中国科学院“数字地球基础理论研究”资助项目(编号：KZCX0055)

遥感数据模型与处理方法

马建文 赵忠明 布和敖斯尔 编著



中国科学技术出版社

责任编辑：高纺云
封面设计：张圣凯　李本洋
责任校对：马　静
责任制印：张建农

Remote Sensing Data Model and Processing Method

Ma Jianwen　Zhao Zhongming　Buheaosier

作者简介



马建文 男，1953年5月出生，博士学位，博士生导师，研究员，1998－2001年中国科学院"百人计划"入选者，现任中科院遥感所资源环境遥感应用中心主任，中国地理学会遥感学会第五届理事，中国图像图形学会第三届理事，主要从事遥感数据模型与处理方法研究。

近年来，他先后主持完成：中国科学院1998年"百人计划"项目(KJ990003)，中国科学院重点领域项目数字地球－3(KZCX0055)，973课题（7－010008），科技部中荷合作优先项目(A类)等5余项，获得王宽诚国际会议基金一次，撰写出版专著2部，发表论文40余篇，其中SCI收录2篇，EI收录6篇，CSCD收录20余篇。

ISBN 7-5046-3160-4

ISBN 7-5046-3160-4 / V · 18
定价：40.00元

中国科学院“数字地球基础理论研究”资助项目（编号：KZCX0055）

遥感数据模型与处理方法

马建文　赵忠明　布和敖斯尔　编著

中国科学技术出版社

·北　京·

图书在版编目（CIP）数据

遥感数据模型与处理方法 / 马建文，赵忠明，布和敖斯尔编著 .
－北京：中国科学技术出版社，2001.9
ISBN 7-5046-3160-4

Ⅰ.遥… Ⅱ.①马…②赵…③布… Ⅲ.①遥感图像－数据模型
②遥感图像－图像处理 Ⅳ.TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 062112 号

中国科学技术出版社出版
北京海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码：100081
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京地质印刷厂印刷
*
开本：787 毫米×1092 毫米 1/16 印张：12.625 插页：8 字数：300 千字
2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷
印数：1－1500 册 定价：40.00 元

内容简介

人类在通过不断探索挖掘电磁波资源研制新型传感器的同时，还在积极探索实现遥感数据资源中有效信息挖掘的方法。本书通过图像处理过程的模型化，将地物光学反射辐射模型、传感器模型、数据模型与信息提取有机地结合起来，前端是遥感信息产生过程，后端是各种应用。书中还通过大量的应用实例说明图像处理算法的研发与应用之间存在巨大的扩展空间和开发潜力。

本书可供从事遥感应用、图像处理和数据挖掘等领域的科学和管理工作者参考，也可作为学校有关专业师生的参考用书。

序

遥感数据获取能力的进步，日新月异。航天、航空与网络，使遥感信息源极大丰富：光谱分辨率达到纳米级，空间分辨率也超过了米级。成像雷达已实现多波段、多极化。三维遥感更集成定位、定量、定性功能于一体，凝聚多源数据采集于一体。各种对地观测卫星密布太空，组成监测星座，夜以继日，向地面接收台站网发送遥感数据，并以宽带网向用户传输数据，从而形成了海量数据仓库群和巨大的遥感信息流，为人类创造了丰富的社会和经济财富，加深了人类对自己居住的星球的再认识，进入比较自觉地协调人与自然资源、生态环境的持续发展的新世纪。毫无疑问，这是20世纪后半叶空间科学与信息技术交叉融合的伟大贡献；也为21世纪人类进入全球化、网络化和智能化的信息时代，铺垫了良好的创新环境，这是人类文明的新的骄傲。

然而，无可讳言，作为遥感数据获取与应用系统工程的中间关键环节—遥感数据的分析模型与图像处理方法，至今仍然是遥感信息流程中的技术瓶颈，制约着整个规模生产的速度、广度和深度，使效率难以提高。例如大多数的遥感图像处理系统，基本上沿袭数十年一贯制的传统方法，离不开概率统计，甚至重复着排列组合的形式逻辑或相关分析。深入剖析地物光谱特征和相干雷达变形分析等创新的亮点，大部分还停留在实验室成果和论文阶段，还没有转化成为生产能力，加入到规模生产的流程中去。

遥感数据模型与处理方法正在向规模生产的纵深发展。世纪之交，已崭露头角：其一是“速度”，数据处理愈来愈接近实时或准实时处理水平。美国入侵越南战争中，遥感数据采集、处理到反馈的全过程需要8天；在海湾战争中缩短到4.5小时；美国偷袭利比亚仅用17分钟；轰炸科索沃，不超过1分钟。其二是“广度”，覆盖全球范围的高分辨率制图能力明显提高。美国航天飞船奋进号（SRTM）测图计划，222小时获取全球（中低纬地区）海陆面积范围80%的遥感数据，制图计划预期在2年内完成。其

工作量超过了20世纪全球航测制图的总和。其三是“深度”，遥感数据的数据挖掘（Data Mining）与知识发现，由于深入渗透到许多相关学科中去，吸收它们最新的理论成果和方法而大放异彩。例如，生物地球景观化学背景值与遥感光谱特征数据处理嫁接为碳循环、碳水化合物光合作用与生命营养元素的研究，有可能开拓崭新的领域。分形分维、小波分析等方法的引进，为地学信息图谱的研究，为生态系统与社会可持续发展等复杂性问题的探索，有可能打开崭新的局面。总之，遥感数据量大、面大，周而复始，时间序列愈来愈长，多源融合，空间分辨率愈来愈高。只要我们继续努力，坚持科学创新与技术攻关，努力解决数据模型与处理方法中的速度、广度与深度问题，必将为科技创新提供巨大的知识财富和技术经济效益，在21世纪的信息社会中，为人类及时提供更有应用价值的信息服务。

在中国科学院遥感应用研究所工作的马建文、赵忠明、布和敖斯尔三位遥感专家，联合编著《遥感数据模型与处理方法》，归纳了他们近年取得的科学实验与创新成果，来自实践而高于实践。提炼出一条从光学反射辐射模型—传感器模型—数据模型—信息提取的主线，突破了微弱信息分离与提取的难点，着重介绍了“临边效应”掩膜快速提取方法和多波段遥感数据场的角度变换，探索了在全球变化、生态脆弱带、净初级生产力估算等当前科学热点问题。阅后更令人耳目一新、美不胜收！如前所述，正是我们为解决当前瓶颈问题所期盼的一部佳作；也是促进遥感科技交流很有理论和实用价值的参考书。有幸先睹为快，谨此致贺！

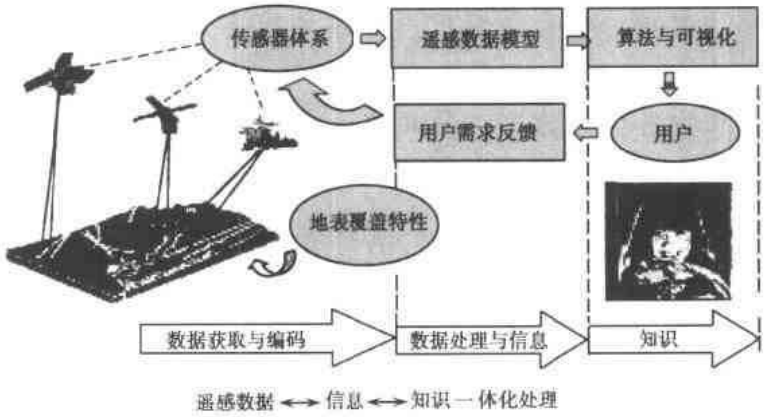
陈述彭

2001年3月3日

前　言

遥感技术已经成为人类了解地球表面变迁和大气变化的基本手段。传感器获取的数据记录了电磁波辐射与地表物质相互作用特征；从不同时空尺度上客观地反映了地球表面系统与大气系统的活动和规律；电磁波在传输路径上受到不同介质及其表面形状的影响，人类在通过传感器的研制不断探索挖掘电磁波资源的同时，还在积极探索实现遥感数据资源中有效信息的挖掘。本书从遥感数据模型这一新视角，在图像处理中更自觉地运用遥感信息机理与模型，使图像处理产生更好的应用效果。

我们在遥感图像处理的实践中反复证明，机械地使用图像处理系统或新算法是难以将复杂的地球覆盖和表面过程具有指示意义的信息分离出来的。在各种成功的遥感应用和有效的图像处理经历背后，都在自觉不自觉地应用着遥感数据形成的某些原理，存在一条独立的主线。在经历了大量的阅读、讨论和思考之后，越来越明朗，这是一条将光学反射辐射模型、传感器模型、数据模型，基于数据模型的信息提取有机地结合起来的主线，如题图所示。



本书汇集了中国科学院遥感所马建文博士（1997 年中国科学院“百人计划”）、赵忠明博士后和布和敖斯尔博士后近年来的主要研究成果，展示了提取遥感数据中弱信息的潜在能力，建立了空间角度模型，开发了逐步正交变换、投影变换两项技术，形成了自主产权的创新思想和技术方法体系。着重介绍了“临边效应”掩膜快速提取方法和多波段遥感数据的角度变换；探索了在全球变化、生态脆弱带、净初级生产力估算；深入研究了遥感数据与其他地学数据的交叉与融合等当前科学热点问题中的应用理论和技术方法。这些研究代表了遥

感图像处理的发展方向。

全书共八章。第一章介绍了遥感科学与技术的发展现状，描述了主要光学遥感传感器类型及其工作原理和建立光学遥感基本参数；第二章用数学的方法描述了遥感技术中最重要的光学反射辐射过程和模型；第三章解释了传感器模型及其空间响应原理；第四章通过遥感数据模型表达出遥感系统中传感器特点与遥感数据，实现了前几章遥感物理模型与图像处理之间的联接。

对遥感数据中的“微弱”信息的分离与提取始终是遥感应用的追求目标之一，故在第五章介绍了基于“临边效应”的掩膜、主成分变换、色点调整为核心技术的MPH目标信息快速提取方法及应用实例；第六章介绍了将可视化理论运用在图像处理中，提出了基于遥感数据场的角度分析模型与方法探索，通过多波段遥感数据场的角度变换，提取角度空间层信息；随着对不同时空尺度像元遥感信息提取方法的研究、数字地球在资源环境数据管理中的应用，数据融合理论与技术成为图像处理的发展热点，代表了重要的发展方向。

西部大开发、生态环境治理和可持续发展研究是新世纪的国家经济建设的主题，通过地面参数与遥感数据相结合揭示中国资源环境脆弱带的研究以及随着全球环境变化遥感研究的不断深入，净初级生产率NPP估算成为研究碳循环研究的基础，为此，第七章论述了该方面的问题，介绍了NPP计算方法和遥感估算方法和图像等成果。

遥感应用方法是将遥感数据与其他数据相结合解决实际问题的。数据融合模型与方法研究已经成为当代遥感应用探索的重要方向，第八章主要介绍了数据融合模型与方法。

本书一至六章主要由马建文、马超飞、韩秀珍完成；第七章由布和敖斯尔和马建文完成；第八章由赵忠明、马建文、闫春燕、王成完成。本书承王长耀先生审阅，并对部分章节作了修改；郭华东、朱重光、田国良先生对本书总体结构提出了良好建议和意见，在此一并致以衷心的感谢。

受水平所限，对于书中表述不当之处，盼读者指正。

作者

2001年5月30日

目　录

第一章　绪论 …… (1)
§1.1　概述 …… (1)
§1.2　卫星遥感应用和国际卫星遥感计划 …… (1)
§1.3　我国卫星发展计划的比较优势 …… (9)
§1.4　遥感数据的信息载荷 …… (13)
§1.5　光谱特征与定量分析 …… (14)
§1.6　遥感系统 …… (17)
§1.7　图像显示系统 …… (21)
参考文献 …… (24)
第二章　太阳辐射与地球系统 …… (25)
§2.1　概述 …… (25)
§2.2　太阳辐射和电磁光谱 …… (25)
§2.3　黑体中波－热红外波谱域 …… (33)
参考文献 …… (39)
第三章　传感器模型 …… (40)
§3.1　概述 …… (40)
§3.2　光学传感器模型 …… (40)
§3.3　光谱响应 …… (44)
§3.4　空间响应 …… (46)
§3.5　遥感信号放大 …… (51)
§3.6　遥感信号的采样与量化 …… (51)
§3.7　简化的传感器模型 …… (52)
§3.8　几何畸变 …… (52)
参考文献 …… (61)
第四章　数据模型 …… (62)
§4.1　概述 …… (62)
§4.2　数据模型的概念 …… (62)
§4.3　图像单变量统计 …… (63)
§4.4　多波段图像的统计与计算 …… (65)
§4.5　噪声模型 …… (68)
§4.6　方差分析 …… (70)
§4.7　地形条件与传感器效应 …… (77)
参考文献 …… (84)

第五章　遥感数据的临边效应与 MPH 技术 …… (85)
§5.1　概述 …… (85)
§5.2　像元光谱分解与单元光谱提取 …… (86)
§5.3　MPH 技术应用实例 …… (90)
参考文献 …… (111)
第六章　多维空间遥感数据的角度分析与弱信息挖掘 …… (113)
§6.1　概述 …… (113)
§6.2　入射、反射能量角度关系 …… (114)
§6.3　三角函数矩阵 …… (117)
§6.4　掩膜和多因子逐步正交变换相结合区分岩性信息 …… (121)
§6.5　利用 Gram－Schmidt 投影方法提取 TM 数据中含矿蚀变带信息 …… (124)
参考文献 …… (130)
第七章　陆地生态系统脆弱带遥感模型与全球生物量估算 …… (131)
§7.1　中国陆地生态系统脆弱带遥感模型 …… (131)
§7.2　像元 NDVI 主成分分析与 NDVI 综合特征值的求出 …… (131)
§7.3　典型样区植被指数（NDVI）的比较 …… (133)
§7.4　土地覆盖时空变化规律 …… (134)
§7.5　土地覆盖变化的区域环境影响分析 …… (136)
§7.6　中国陆地生态系统时空脆弱性研究 …… (139)
§7.7　全球生物量估算 …… (144)
参考文献 …… (147)
第八章　遥感数据融合 …… (149)
§8.1　概述 …… (149)
§8.2　数据融合定义与一般推理模型 …… (150)
§8.3　遥感数据融合的一般方法 …… (155)
§8.4　遥感数据融合的空间域和尺度空间数学模型 …… (161)
§8.5　多光谱遥感数据像元级融合 …… (163)
§8.6　多传感器遥感数据特征级融合 …… (168)
§8.7　多时相决策级遥感数据融合 …… (183)
参考文献 …… (191)
附录：彩色图版

第一章 绪 论

§1.1 概 述

1972 年美国发射的陆地卫星 1 号（Landsat-1），首次采用了数字扫描方式记录和传输探测信息，数字记录和传输不仅可以延长了卫星服务时间、减轻了有效载荷重量，而且还克服了感光底片保存和复制技术缺陷，是卫星对地观测技术发展的标志性阶段。当今，运行的卫星系统与 1972 年第一颗陆地卫星系统发射时相比较，展示了全面发展的特点。几何分辨率从 5m 到 4000m，覆盖了大气窗口的光谱域，大气窗口以外的光谱域也被航空遥感以 10nm 光谱分辨率所覆盖（Clark 1990）。1999 年和 2000 年美国 1m 分辨率卫星 IKONOS 商业化运行和雷达 30m 三维测地卫星 SRTM 发射成功，将人类经历上百年完成的地球表面 1:25 万测绘，缩短到两年。由于卫星对地观测技术的发展推动着人类对地球系统整体行为的观测与研究，促进了从自然现象的定性描述向定量化方向的发展。本章主要描述了电子－光学遥感仪器成像原理和图像特征，同时建立数字图像与地表之间的关联。

§1.2 卫星遥感应用和国际卫星遥感计划

1.2.1 卫星遥感应用

遥感是不直接接触物体而利用传感器探测地表物体的电磁波谱特性，了解物体的自然状态、特征或演化的过程。多种探测使命的卫星遥感计划利用数字化测量地球表面的陆地、森林、海洋和围绕地球表面的大气，观测大气中的化学光谱。通过探测不仅提供地表扫描形成的二维网格数据，同时还能持续地提供不同时间分辨率的数字图像，其最显著应用价值就是可以监测陆地第一净生产力、C 循环、全球变化和人类活动对全球变化的影响规律。随着传感器技术的发展，遥感的应用领域也在不断地扩大，其当前主要应用领域有以下几个方面（Campbell 1996）：

（1）环境评估与监测：城市发展、灾害、废物排放。
（2）全球变化探测与监测：大气臭氧消耗、森林减少、全球变暖。
（3）农业：农作物长势、产量估算、土壤侵蚀。
（4）可再生资源：湿地、土壤、森林、海洋。
（5）不可再生资源勘查：矿产、石油、天然气。
（6）气象：气象预报、天气预报、大气动力学研究。
（7）测绘：地形图、土地利用图、民用工程。
（8）军事监视与勘查：隐蔽目标识别、战略决策、战术估计、数字战场。
（9）网络与新闻媒体：背景说明、场景分析。

第一章 绪 论

§1.1 概 述

1972 年美国发射的陆地卫星 1 号（Landsat-1），首次采用了数字扫描方式记录和传输探测信息，数字记录和传输不仅可以延长了卫星服务时间、减轻了有效载荷重量，而且还克服了感光底片保存和复制技术缺陷，是卫星对地观测技术发展的标志性阶段。当今，运行的卫星系统与 1972 年第一颗陆地卫星系统发射时相比较，展示了全面发展的特点。几何分辨率从 5m 到 4000m，覆盖了大气窗口的光谱域，大气窗口以外的光谱域也被航空遥感以 10nm 光谱分辨率所覆盖（Clark 1990）。1999 年和 2000 年美国 1m 分辨率卫星 IKONOS 商业化运行和雷达 30m 三维测地卫星 SRTM 发射成功，将人类经历上百年完成的地球表面 1:25 万测绘，缩短到两年。由于卫星对地观测技术的发展推动着人类对地球系统整体行为的观测与研究，促进了从自然现象的定性描述向定量化方向的发展。本章主要描述了电子－光学遥感仪器成像原理和图像特征，同时建立数字图像与地表之间的关联。

§1.2 卫星遥感应用和国际卫星遥感计划

1.2.1 卫星遥感应用

遥感是不直接接触物体而利用传感器探测地表物体的电磁波谱特性，了解物体的自然状态、特征或演化的过程。多种探测使命的卫星遥感计划利用数字化测量地球表面的陆地、森林、海洋和围绕地球表面的大气，观测大气中的化学光谱。通过探测不仅提供地表扫描形成的二维网格数据，同时还能持续地提供不同时间分辨率的数字图像，其最显著应用价值就是可以监测陆地第一净生产力、C 循环、全球变化和人类活动对全球变化的影响规律。随着传感器技术的发展，遥感的应用领域也在不断地扩大，其当前主要应用领域有以下几个方面（Campbell 1996）：

（1）环境评估与监测：城市发展、灾害、废物排放。
（2）全球变化探测与监测：大气臭氧消耗、森林减少、全球变暖。
（3）农业：农作物长势、产量估算、土壤侵蚀。
（4）可再生资源：湿地、土壤、森林、海洋。
（5）不可再生资源勘查：矿产、石油、天然气。
（6）气象：气象预报、天气预报、大气动力学研究。
（7）测绘：地形图、土地利用图、民用工程。
（8）军事监视与勘查：隐蔽目标识别、战略决策、战术估计、数字战场。
（9）网络与新闻媒体：背景说明、场景分析。

(10) 数字城市与数字地球：三维数字城市和地球。

为了满足不同用户对参数和数据的需求，许多遥感系统原始数据提供了大量空间、光谱和辐射参数；数据类型有低空间分辨率、高空间分辨率和高重复覆盖数据。通过应用模型，遥感数据用来模拟与预测地球环境变化模型（GCM），估算和监测净第一性生产力（NPP），碳循环及其变迁，特别是遥感的动态复轨数据对研究地表生态过程是非常珍贵的。不同尺度的数据可以揭示不同尺度的自然过程和变化规律，应针对不同问题选择合适的分辨率数据。所以，对全球尺度研究高分辨率数据并不是理想数据；而提取含矿蚀变带和植物地球化学信息需要使用高分辨率数据，因为地质现象的变化比较缓慢，一般不要求时间分辨率；在使用不同传感器数据时要考虑时间和空间精确的一致性。根据不同的应用目标，可以选择不同光谱波段、分辨率和灰度级的数据。遥感数据的这些信息也可以用于不同时相的自然变化关系分析和不同时间的投入－产出经济活动监测分析（Asrar and Greenstone 1995）。

光谱资源的挖掘与融合、数据的尺度研究、复轨遥感数据对地表动态过程和规律的研究、多光谱波段能量信息深度分解与弱信息提取，提高遥感数据有效利用率等，已成为新世纪的研究热点。遥感数据中的信息一般可以从两个方面理解和提取：第一是以图像为中心的方法，这种方法的基础是显示地物之间的关系，它延续了最早航空像片制图的方法。这种方法依赖利用人的经验，例如河流、地质构造、植被、飞机场、军事目标的解译。第二是以数据为中心的方法，以数据为中心的方法更注重数据的维数而不是地物之间的关系，如利用特殊的算法提取高光谱和多光谱数据中的特征信息；利用不同端元组分分解方法对像元组分的分解；通过剖面恢复算法提取大气和海洋参数。对电磁强度的精确计算是本方法的侧重点，即使以数据为中心的方法最终还是要以图像方式表达处理的结果（图 1－1）。

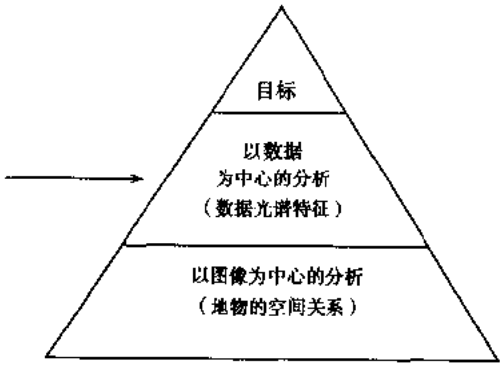


图 1－1 遥感数据中的信息可以从两个方面理解和提取

多光谱数据处理的基本方法在 20 世纪 70 年代初就由一些科研机构和公司相继开发出来，如美国宇航局（NASA）、美国喷气实验室（JPL）、美国地质调查所（USGS）、美国 RSI 公司的 ENVI、ERDAS 图像与可视化系统，以及加拿大的 PCI 和 Moridian 图像处理系统等都是当今有一定市场占有率的图像处理和分析软件系统（Richards 1993）。与此同时，我国有代表性的商业化软件有中国科学院遥感应用研究所的 ISRA 图像处理软件、北京大学的 Spaceman、石油部遥感应用研究所和地矿部遥感中心开发的图像处理软件。进入 20 世纪 90 年代，随着图像信息与空间信息相结合的发展趋势，图像处理软件也逐渐加入了地理信息系统功能和实现了图像处理软件与地理信息系统的一体化（Schowengerd 1997）。由于网

络技术的迅速发展，基于Java的网络遥感数据挖掘和网络地理信息系统将成为21世纪的发展方向。

1.2.2 主要国际卫星遥感计划

各国制定的卫星观测系统计划首先是为本国利益服务的，要求其提供可靠的全球性、局域性观测数据。下面简要地介绍一下主要卫星大国近期的卫星计划，同时也分析一下我国对地观测体系的发展。

美国继1972年第一颗陆地卫星之后，分别于1975年、1978年发射了陆地卫星2号、3号。1982年发射的陆地卫星4号载荷了新的传感器系统，6个波段30m空间分辨率的专题制图（TM）系统和一个120m的热红外波段。1984年发射了5号陆地卫星，6号陆地卫星由于搭载火箭没有进入轨道而告失败。陆地卫星7号于1999年4月发射成功，系统共设8个波段，与前6颗TM卫星相比较，红外波段分辨率从129m提高到60m，增加了全色波段0.52~0.90μm，空间分辨率为15m。陆地卫星系列的系统性和连续性为全球土地资源调查、地质矿产勘查和地球表面过程变化提供了可持续利用的数据源。

在卫星大家族中还有低几何分辨率的AVHRR和地球观测系统（EOS）计划的系列卫星数据（Michael，2000，http：//edc.usgs.gov/）。无论过去和现在的遥感传感器都可以用两个参量来表达，①光谱波段数 nB；②像元几何分辨率，并且定义为瞬间视场地面投影（GIFOV）。

美国地球观测系统计划（EOS）是美国宇航局（NASA）制订的一个循序渐进探测地球系统的观测和数据管理战略，EOS计划用了近20年时间的准备。它的基本设计要求是提供足够长时间和序列的数据记录。计划采取了系列传感器性能交叉互补，完成单一传感器无法完成的探测任务，同时协调与陆地卫星系列等其他计划的促进，共同帮助人类分析地球系统的自然过程，区分人类活动和自然力对地球系统的各种影响。

（1）地球观测系统的上午系列（EOS－AM系列）

EOS－AM系列卫星经过赤道的时间均在上午10：30左右，每天此时全球陆地云覆盖量最小，因而最有利于对陆地进行卫星观测。该卫星系列于1998年开始实施，计划的主要目标是为了取得每日有关云、气溶胶和辐射平衡及陆地生态系统特性，土地利用、土壤、陆地能量、水分和对流层化学成分，火山喷发对气候的影响等观测值。传感器有效载荷由美国NASA/JPL、加拿大、日本、欧洲等国家共同提供。云的物理和辐射特性由高级空间热辐射热反射辐射计（ASTER）、云和地球辐射能量系统（CERES）、多角度成像光谱辐射计（MISR）和中等分辨率成像光谱仪（MODIS）观测，大气－陆地、大气－海洋的能量、碳水交换由ASTER、MISR和MODIS观测；甲烷总量由对流层污染测量仪（MOPITT）测定；火山在气候变化中的作用亦由ASTER、MISR和MODIS观测（Salomonson，Barker 1998）。

（2）地球观测系统的色彩卫星（EOS－COLOR）

该卫星主要目标是收集有关海洋初级生产率的数据。EOS－COLOR将观测海洋叶绿素、

浮游植物等海洋水色和生产率，通过观测求得对海洋在全球碳循环中作用的理解。EOS－COLOR 是继海洋卫星（Seastar）计划后的海洋宽视场探测器。在 MODIS 能在 EOS － AM 和 PM 上工作之前，该计划提供连续观测数据。

（3）地球观测系统的测高计划（EOS－ALT 卫星系列）

EOS 测高计划的目标是要获取海洋循环、冰盖重力平衡及相对海平面变化的高精度测量数据，卫星携带的主要传感器系统有地面激光高度计系统（GLAS）、TOPEX 微波辐射计（TMR）、卫星集成的多谱段轨道成像及无线电定位仪（DORIS）和固态高度计（SSALT）。SSALT 用来测量海洋表面形态，据此可推断海洋洋流循环；亦可用来测量风速和波高。GLAS 用来收集格陵兰和南极冰盖剖面数据。DORIS 为空间飞行器精确定位，而 TMR 则为校正高度计的数据而设计。计划要求将光学和雷达传感器分别载于不同的卫星系统，以满足不同的轨道高度和倾斜要求。

（4）地球观测系统的化学计划（EOS－CHEM 系列）

EOS 化学计划系列卫星将于 2003 年开始发射，其目的是研究大气化学和动力学、大气化学与气候交互作用，测量大气化学成分及大气和海洋间化学变换与能量交换等参量。EOS 化学计划中主动型谐振辐射计辐照度监视仪（ACRIM）用于测量太阳能量流；太阳天体辐射度比较实验体（SOLSTICE 11）用于测定太阳紫外辐射；高分辨率临界动态探测仪（HIRDLS）、微波临界探测仪（MLS）和 SAGE 探测大气温度、气溶胶和温室气体数据。EOS 化学计划将与 EOS 上午系列和 EOS 气溶胶计划一起提供对流层、低层平流层动态和化学成分变化及对流层—平流层化学交换的探测数据。EOS 化学计划将结合多种仪器测得的相关数据，以提供多种仪器产生的数据产品和综合数据产品。通过 EOS/MODIS 系列探测计划实现时空探测数据系列化和有效数据积累（表 1－1）。

表 1－1　　EOS／MODIS 卫星系列波段设定目标

探测目标	波段	光谱覆盖（nm）	地表视场 GIFOV（m）
植被叶绿素，云	1	620～670	250
	2	841～876	
土壤与植被的区分	3	459～479	500
绿色植被	4	545～564	
树叶与树冠特性	5	1230～1250	
雪与云的特性	6	1628～1652	
陆地与云的特性	7	2105～2155	
海洋叶绿素	8	405～420	
海洋叶绿素	9	438～448	
海洋叶绿素	10	483～493	
海洋叶绿素	11	526～536	
海洋沉积物	12	546～556	
海洋沉积物与大气	13	662～672	
海洋叶绿素荧光	14	673～683	
气溶胶特性	15	743～753	
气溶胶与大气特性	16	862～877	

续表

探测目标	波段	光谱覆盖（nm）	地表视场 GIFOV（m）
云与大气特性	17	890～920	
云与大气特性	18	931～941	
云与大气特性	19	915～965	
热红外 μm			
海面温度	20	3.66～3.84	
森林火灾与火山	21	3.929～3.989	
云与大气温度	22	3.929～3.989	
云与大气温度	23	4.02～4.08	
对流层温度与碎云	24	4.433～4.498	
对流层温度与碎云	25	4.482～4.549	
大气与云			
旋卷云	26	1.36～1.39	1000
热红外 μm			
中对流层水气	27	6.535～6.895	
上对流层水气	28	7.175～7.475	
表层温度	29	8.4～8.7	
臭氧层	30	9.5～9.88	
云与表层温度	31	10.78～11.28	
云与表层温度	32	11.77～12.27	
云高和碎云	33	13.185～13.485	
云高和碎云	34	13.485～13.785	
云高和碎云	35	13.785～14.085	
云高和碎云	36	14.085～14.385	

传感器的不断发展对储存和处理“海量”数据提出了新的挑战。如要处理所有 EOS 系统接收的一天的数据就必须具备 10^{15} 个字节的处理能力。在快速发展的航天对地观测背景下，传统的摄影航空遥感也在发挥着重要的作用。它主要体现在两个方面：第一是高空间分辨率遥感；第二是满足特殊的需求。

美国海洋卫星 SEASTAR 是美国为数不多的海洋卫星，搭载的传感器为 SeaWiFS，服务年限 1997～1999 年，主要探测海洋水色、海洋浮游生物和海洋生态。SeaWiFS－2 纳入 EOS－海洋水色计划，探测海洋浮游生物、叶绿素、生物量和海洋初级生产率（见 EOS－COLOR）。

雷达三维测图卫星（SRTM）美国航天飞机于 2000 年 1 月 11 日发射携带 X－band 型微波传感器，飞行 11 天 5 小时接收到地表 80％和 95％有人口陆地三维数据，2001 年 3 月将完成数据处理，形成 DEM 数据和图像。该传感器的发射成功将人类经过 200 年完成的地表绘制，缩短到 1～2 年的时间，而且是 DEM、一维图像和干涉图像三种形式产品。无疑 SRTM 的成功将为地形测绘、制图带来一场技术革命（http：//www.dfd.dlr.de/srtm）。

美国 1m 分辨率陆地卫星（IKONOS）是商业卫星系统（表 1－2），于 1999 年 9 月发射成功，主要用于城市规划；农业灾害、估产；保险损失评价等（http：//www.ersi.bc.ca）。

表 1-2　　美国 1m 分辨率陆地卫星技术参数

产品名称	空间分辨率	光谱波段（μm）
IKONOS	4m	波段 1：0.45~0.53（蓝） 波段 2：0.52~0.61（绿） 波段 3：0.64~0.72（红） 波段 4：0.77~0.88（近红外）
	1m	全色波段：0.45~0.90

欧洲空间局（ESA）遥感卫星 1 号（ERS1）作为 20 世纪 90 年代新一代空间计划的先驱，在 1991 年发射升空。ERSI 工作到 1995 年由它的继承者 ERS2（1995 年 8 月发射成功）接替。ERS1 和 ERS2 使用能全天候测量和成像的微波技术，提供全球重复性的观测数据。ERS 是与太阳同步的极地轨道卫星系统，能覆盖目前其他卫星系列还未有或不足的地区观测领域，包括海况、洋面风、海洋循环及海洋/冰层等。ERS 观测数据可以改善我们对海洋—大气间相互作用的理解；海洋循环及能量传输方面知识的更新；南北极冰盖质量平衡的估计；海岸动态过程和污染的监测，以及改善土地利用变化的探测和管理。ERS 携带的传感器主要有主动式微波仪（AMI），具有图像、波和风三种工作方式，雷达高度计（RA）、纵向扫描辐射仪（ATSR）、精密测距和测速率设备（PRARE）及激光反向反射器。ERS2 上还多了一个全球臭氧监测实验仪（GOME），主要用于观测在对流层和平流层中的微量气体种类（http：//earth.esa.int）。

ESA 的环境卫星（Envisat）计划 1998 年 9 月升空。它带有双重任务：一是继续 ERSI 和 ERSZ 对地观测，即全球海洋循环和陆地生态系统类型、范围和物候现象制图；二是对环境的研究，即获取陆地表面性质、大气化学、气溶胶分布和海洋生物学等方面的观测值。它的传感器系统除 ERS 携带的一些外，还新加了中等分辨率成像光谱仪（MERIS）、全球臭氧监测仪（GOMOS）、辐射收支扫描仪（SCARAB）和微波辐射仪（MWR）等主要用于测量大气化学和辐射收支方面数据的仪器。

ESA 还在 2000 年发射另一个卫星—— 极轨气象卫星（METOP），用于气象和气候监测。卫星核心部分载有 9 种仪器，其中 5 种用于气候方面的监测。

日本的国家空间发展局（NASDA）和日本国际工贸部（MITI）于 1992 年联合发射了日本地球资源卫星 1 号（JERSI）。该卫星所携带的 SAR 和光学传感器（OPS）能用于冰川现象研究、土地利用（农林业）调查、沿海地区观测、土质制图及环境和灾害监测。先进的地球观测卫星（ADEOS）计划将继续收集陆地、大气和海洋的遥感数据（http：//eorc.nasda.go.jp）。这些数据最初是由日本海洋观测卫星（MOS，1987）和 JERS－1（1992）开始记录。ADEOS 卫星包括两台由日本 NASDA 研制的核心仪器外加 6 台由其他国际伙伴提供的传感器。日本 NASDA 研制的核心传感器为海洋色温扫描仪（OCTS）和先进的可见光/近红外辐射仪（AVNIR）。法国空间局（CNES）提供被动式光学成像辐射仪（POLDER），而 NASA 提供散射计（NSCAT）和成图光谱仪（TOMS）。日本分别在 1994 年和 2000 年实施 ADEOS 和高分辨率观测卫星（HIROS）。ADEOSll 将执行全球监测，并强调水循环；而 HIROS 则获取高分辨率可见光和微波观测数据。

热带降雨测量计划（TRMM）是 NASA 与 NASDA 的联合项目，它的主要目的是测量热带降水，并由此衍生出全球水文循环和大气动态模型。TRMM 将测量热带地区气温/降雨的每日变化和传导过程。

法国 SPOT 卫星系列地球观测计划始于 1977 年。SPOT－1 于 1986 年发射成功，所携带的传感器为高分辨率可见光传感器（HRV），可以获得 10m（全色）和 20m（多光谱）高空间分辨率观测图像，主要用于土地利用、农林业、地质、制图及区域规划等。SPOT－3（1993 年 9 月发射）携带极地臭氧和气溶胶测量仪，用于臭氧等大气化学成分的测量。SPOT－4 卫星搭载了多种仪器，它们是改进型轨道定位系统；测量发射和在轨时的热特性、辐射特性和微震动环境的仪器；法国海军和法属圭亚那地面标准场雷达发射机；测量地球两极上空的臭氧和气溶胶水平的美国仪器；欧洲空间局的 S 频段试验终端和欧洲空间局的 Silex 试验终端，为未来的 Artemis 通信试验卫星试验低轨道和地球同步轨道间的光通信。SPOT－4 数据用户市场百分比为：绘制地图占 41%，农业 22%，环境 12%，城市规划和通信 10%，地质 8%，其他 7%。按地区分：亚洲占 37%，欧洲 25%，美国 21%，中东 6%，南美 6%，非洲 5%。

加拿大的雷达卫星（Radarsat）于 1995 年 11 月发射成功。携带的合成孔径雷达（SAR）微波仪器，使用 8 种工作方式。雷达卫星获取的数据主要应用于资源管理，冰、海洋和环境监测及北极和近海勘测，也可用来支持渔业、航海业、海洋研究等。

俄罗斯的地球观测系列卫星（ALMAZ－1B）工作期间为 1996～1998 年，携带有 9 种传感器，主要用来收集有关制图、陆地表面观测、地质、海洋、渔业及灾害等突发事件的监测。几乎同期工作的俄罗斯空间站研究模型（PRIRODA－1）和俄罗斯资源监测卫星系列（RESURS－0）主要用于地球生态、海洋循环、地质、大气、农作物状态、森林火灾、污染监测等。

印度国家空间部（DOS）的 Bhaskara－1 和 2、IRS－1A/1B、IRS－P3 和 IRS－1C 构成了印度卫星遥感计划家族。1996 年 12 月发射的 IRS－1C 系统携带具有三个传感器的，三轴稳定极轨太阳同步卫星，轨道高度 817km，重访能力 5 天，设计寿命为 3 年。三个传感器分别为（用户简讯 1999）：

a. 全色（PAN），光谱覆盖范围为 0.50～0.75μm；

b. 多光谱（LISS－III），四个波段的光谱覆盖范围分别为：

波段 2　0.52～0.59μm　　波段 3　0.62～0.68μm

波段 4　0.77～0.86μm　　波段 5　1.55～1.70μm

c. 广域（WIFS），二个波段的光谱覆盖范围分别为：

波段 3　0.62～0.68μm　　波段 4　0.77～0.86μm

空间分辨率/幅宽为：

全色（PAN）5.8m/70km；

多光谱（LISS－III）2、3、4 波段为 23.5m/141km，第 5 波段为 70.5m/148km；

广域（WIFS）188.3m/810km.

由于 IRS－1C 遥感卫星数据的高空间分辨率、多光谱和重访时间等特点，被广泛地应用在农作物长势与估产、旱情监测与评估、洪涝损失制图、荒地范围绘图、海洋资源调查、

城市规划、矿产、森林和国土资源调查等。

近年来，商用小卫星发展迅速。小卫星与大卫星在光谱、空间、时间分辨率方面互补，是大学、公司为了满足市场需求和商业化服务发展起来的。为了提供最大限度的全球陆地覆盖观测资料，商用小卫星一般为小型、重量不超过500kg。小卫星一般使用与太阳同步，圆形、低高度极地轨道，具有灵活的指向能力、高几何精度及快速传递图像资料等特点。为了提高商用图像的竞争能力，各个卫星公司均在提取图像的最佳太阳角、同地区重复覆盖率、立体成像和实时监测事件能力等方面下功夫。商用小卫星计划与传统地球观测系统不同之处在于高空间分辨率及高时相分辨率。商用小卫星系统的图像产品以不同要求的制图为导向。从1997年起美国的一些商用小卫星公司开始发射首批高分辨率地球观测卫星系统，开创了商业性地球观测卫星的新时代，并引起卫星设计、发射和管理的一场革命。我国清华1号50kg小卫星于2000年6月发射成功，并传回了清晰的照片。21世纪初仅陆地卫星系列，各国拟计划发射31颗对地观测卫星（表1-3）。

表1-3　　21世纪初各国计划发射的31颗陆地卫星

13颗美国陆地卫星系列	12颗高分辨率卫星
美国2颗（1颗与日本合作）	8颗多光谱
法国1颗	4颗全色
印度4颗	（美国和以色列2颗，印度1颗，俄罗斯1颗）
中国和巴西2颗	
美国商业卫星4颗	
4颗高光谱卫星	**2颗雷达卫星**
美国3颗	欧盟1颗
欧盟1颗	加拿大1颗

综上所述，国际卫星计划有以下趋势：①大卫星、小卫星结合，光谱、空间和时间分辨率重复交叉、微波与光学结合、宽视场与窄视场兼有的航天对地观测、航空和地面系统化、立体化探测体系，已经不是一种发展趋势而是一种国际联合和全局优化发展的新阶段（Filiberti，Marsh 1994）；各种平台时间、几何、光谱分辨率和不同尺度互补，应用目标和科学探测相结合，揭示地球各圈层和圈层相互作用，理解全球变化的物理化学机理和规律，探求人类与自然和谐可持续发展之路（图1-2）；②小卫星探测目标单一，灵活的小卫星具有“快、好、省”的商业化发展前景；③由于各种遥感卫星计划改变了我们看地球的方式，人类迎来了数字地球和通过数字地球准确、清晰、及时地探测地表变化获得决策依据（Fritz 1996）。

我国卫星遥感计划在国际大家庭中还处于较弱的地位，采用系统化的原则对我国卫星遥感计划进行全局优化，实现立体探测，在解决发生在我国陆地、海洋和气象问题的同时参与国际合作，使我国的遥感卫星计划不断完善、走向成熟，是我们的任务。

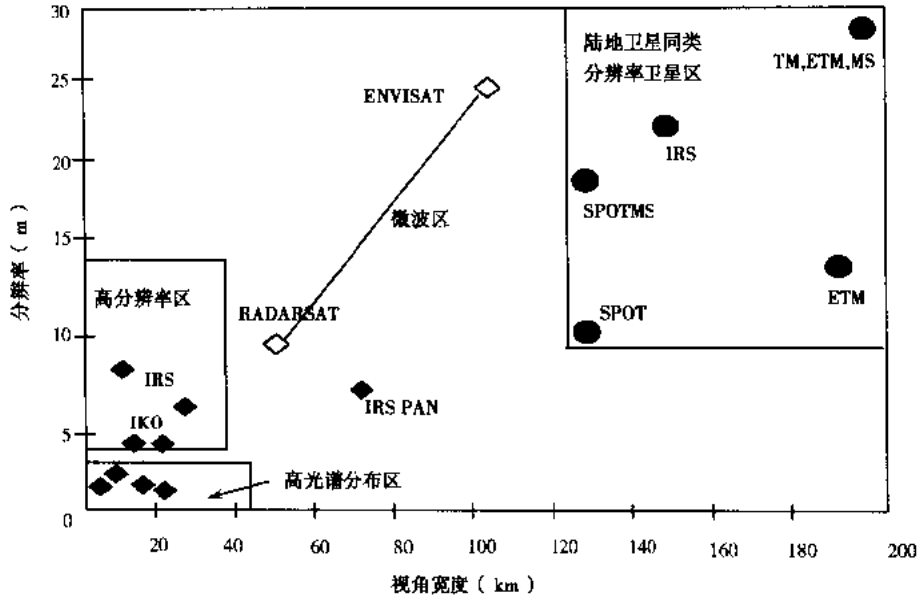


图 1－2　国际卫星计划体系的相互关系

§1.3　我国卫星发展计划的比较优势

按有关的卫星资料，从应用角度选择波段光谱覆盖范围和波段数，分别取对数 x 坐标和 y 坐标制作卫星发展趋势图（图 1－3），从中可以看到我国卫星未来发展的国际定位（中国国务院新闻办公室，论证报告　2000）。

（1）气象遥感卫星（FY－3）

第二代风云极轨气象卫星（FY－3）的目的是发展全球、全天候、多光谱和三维定量气象遥感，预计于 2003 年发射。FY－3 有效载荷为：可见光、红外扫描辐射计（见表 1－4）；红外分光计（见表 1－5）；微波辐射计；中分辨率成像光谱仪；紫外臭氧探测器；地球辐射收支探测器；空间环境检测器；微波成像仪（见表 1－6）。空间分辨率为 1.1km；极轨。气象卫星传感器的设定考虑了其在资源和减灾领域中的应用（国家气象局　2000）。

表 1－4　　气象遥感卫星可见光、红外扫描辐射计主要探测目标与光谱性能要求

通道	1	2	3	4	5
光谱范围（μm）	0.58～0.68	0.84～0.89	0.915～0.965	0.931～0.941	1.325～1.395
主要设计探测目的	白天云图、地表图像、泥沙、植被	白天云图、地表图像、水陆边界、冰雪、植被	对流层底层水汽	对流层底层水汽	区分冰云和水云、云的相态、监测卷云
通道	6	7	8	9	10
光谱范围（μm）	1.55～1.64	3.55～3.93	8.4～8.9	10.3～11.3	11.5～12.5
主要设计探测目的	土壤水分、作物状态、区分云雪	表面温度、森林火灾	云识别、地表、洋面、云顶温度	昼夜云图、地表、洋面、云顶温度	昼夜云图、地表、洋面、云顶温度

表 1－5　　气象遥感红外分光计主要探测目标与光谱性能要求

通道	1～7	9	10	8	12	13	14～17	19～20
中心波数 cm^{-1}	669～749	900	1030	802	1365	1533	2188～2245	2515～2660
中心波长 μm	14.95～13.35	11.11	9.71	12.4	7.33	6.52	4.57～4.45	4.00～3.76
主要设计探测目的	大气温度，1通道对冷区大气敏感，5～7通道用来计算云参数；7通道对水汽反应敏感，用于反演底层水汽	表面温度和云检测	臭氧总量	地表温度，云检测水汽廓线，对 CO_2 和窗区通道提供水汽订正；通道13可用于卷云探测			大气温度，17通道对相对暖区大气敏感，短波辐射值对云比1通道差	地表温度，对云和水汽不敏感；对部分有云视场，与9通道一起用于检测云并由此推算表面，两个通道联用可以从测值中消除反射太阳光的影响

通道	22	18	23～27	21	11
中心波数 cm^{-1}	14500	2382	15175～16098	3015	1345
中心波长 μm	0.69	4.20	0.659～1.64	3.30	7.43
主要设计探测目的	云检测与19和9通道联用确定晴空视场	CO_2 增温效应	陆地覆盖，气溶胶，大气光学厚度，云性质，可降水总量叶盖性质，区分云和雪	痕量气体	

表 1－6　　气象遥感卫星微波成像仪

频率（GHz）	10.65	18.7	23.8	36.5	89	150
极化	VH	VH	VH	VH	VH	VH
带宽（MHz）	180	200	400	900	4600	4000
地面分辨率（km×km）	51×85	30×50	27×45	18×30	9×12	7.5×12

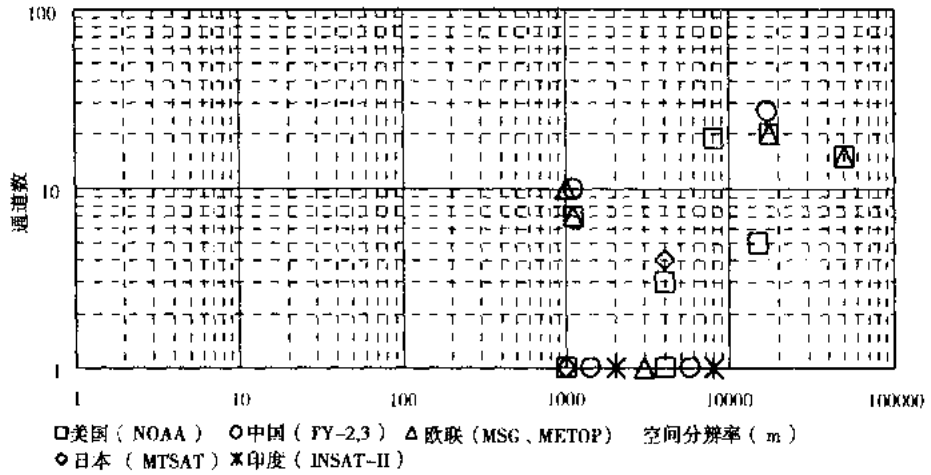


图 1－3　世界主要卫星国家气象卫星比较

（该图采用对数坐标2维体系，横坐标表示空间分辨率，纵坐标表示波段数）

（2）资源遥感卫星系列（CBERS－3）

由我国与巴西合作研制的资源1号（CBERS－1）卫星于1999年10月发射成功，设计服务期两年。国家还在北京、广州和乌鲁木齐分别建站接收国境内和邻国的遥感数据（中国资源卫星应用中心2000）。资源2号（CBERS－2）卫星的主要传感器的参数选择前充分征求了农业、林业、地矿、水利等部门用户的意见和对比国外ADEOS－2、IRS、SPOT－4和Landsat－7传感器，具有很强的实用性。CBERS－3需要在CBERS－1基础上：①完善CCD相机、IRMSS扫描仪、红外波段和WFI宽角相机等波段的定标和稳定性；②增加卫星定位系统和合成孔径雷达成像仪；③重复观测时间从26天提高到16天；④资源卫星传感器的设定考虑了灾害监测的应用；当前对航天成像光谱仪的需求可以通过航空像光谱仪实现（表1－7）。

表1－7　　资源1号卫星（CBERS－3）改进的传感器

传感器	通道	光谱范围 μm	分辨率 m	扫描带宽 km	主要设计探测目的
CCD相机	1	0.45～0.52	15	120	土地利用现状调查；林业资源调查；1:20万和1:5万区域地质调查；1:10万和1:5万水土流失调查
	2	0.52～0.59			
	3	0.63～0.69			
	4	0.77～0.89			
WFI宽视场成像仪	10	0.52～0.59	250	890	利用重复观测次数
	11	0.63～0.69			
	12	0.77～0.89			
IRMSS红外多光谱扫描仪	6	0.50～0.90	40	119.5	地震前兆、森林火灾；城市热环境监测
	7	1.55～1.75	40		
	8	2.08～2.35	40		
	9	10.4～12.5	80		
全色CCD相机	5	0.51～0.73	5	60	与其他波段匹配使用

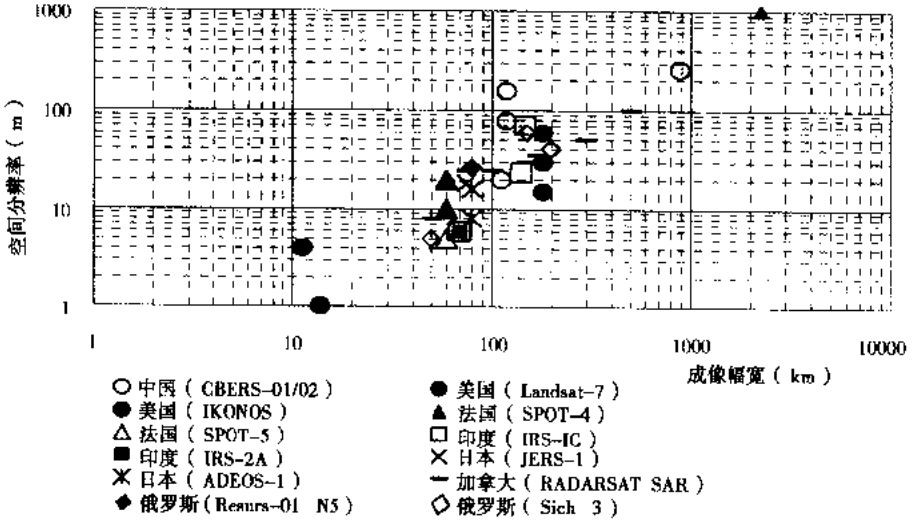


图1－4　世界主要卫星国家资源卫星比较

（该图采用对数坐标2维体系。横坐标表空间分辨率，纵坐标表示波段数）

(3) 海洋遥感卫星（HY－1）

海洋卫星系统对加强我国 300 万 km^2 海洋环境监测，提高海洋灾害预警、预报的准确性和时效性，维护我国海洋权益和研究我国海、陆和大气相互作用与演变规律等科学问题都将发挥不可替代的作用（国家海洋局 2000）。我国海洋卫星（HY－1）将与 2001 年搭载风云（FY－1D）发射，目前我国海洋遥感卫星落后国际先进水平约 15～20 年。海洋卫星计划中将海洋卫星应用划分为三类：海洋水色环境、海洋动力环境、海洋灾害。海洋遥感卫星设计主要特点见表 1－8，表 1－9。

表 1－8　　海洋遥感卫星（HY－1）为海洋水色环境遥感卫星

通道	8	2
中心波数（cm^{-1}）	402～885	
波长（μm）		10.03～12.5
空间分辨率（m）	1100	
重复周期	2～3 天，卫星降交点地方时要求上午 10:30～12:00	
主要设计探测目的	水色要素：叶绿素、悬浮泥沙、可溶性黄色物质、水温	

表 1－9　　海洋遥感卫星（HY－2）为海洋动力环境遥感卫星

通道	4	无
中心波数（cm^{-1}）	420～890	
空间分辨率（m）	250	
重复周期	2～3 天，卫星降交点地方时要求上午 10:30～12:00	
主要设计探测目的	海洋动力环境要素：海面风场、海面高度、海浪场、流场及温度	

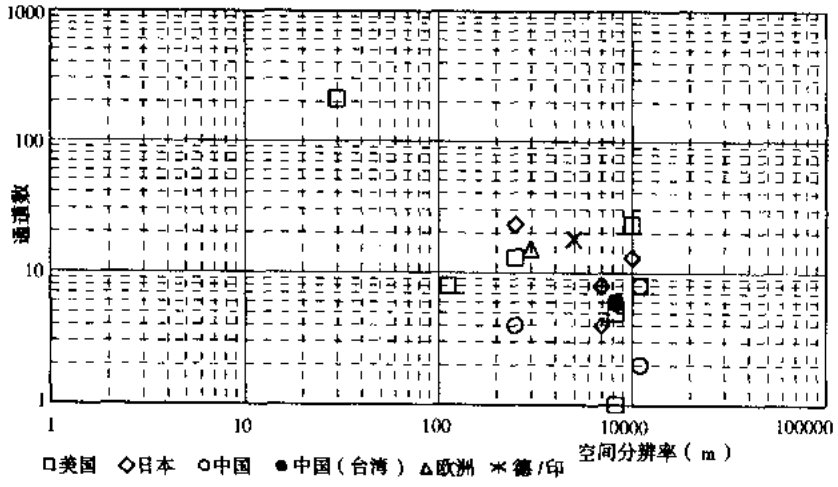


图 1－5　选择了美国、日本、欧盟、印度以及中国台湾的海洋遥感卫星与我国即将发射的同类卫星相比较

（该图采用对数坐标 2 维体系。横坐标表示空间分辨率，纵坐标表示波段数）

我国“清华1号”小卫星2000年6月发射成功，重量只有50kg。小卫星在国际上率先实现了发射入轨在轨软件的调控功能，这意味着这颗卫星上天后可以根据需要改变功能，和在轨电磁波段修复。“清华1号”具有遥感拍摄功能，可以对森林火灾、水灾等自然灾害进行监测。此外，它还可以做一些空间无线电磁波的接受分析试验，以及大学教学活动。

§1.4 遥感数据的信息载荷

地球表面覆盖物质的性质和状态信息通过光谱传输被传感器接收，转换成数字图像。不同光谱域、视场角和复轨时间的传感器接收的数据从不同侧面反映了自然界的变化规律，如1km尺度像元的遥感数据与30m尺度像元的遥感数据反映和揭示自然规律尺度是不同的。这就是遥感信息的“尺度效应”。为了帮助大家根据不同的应用目的选择合适的传感器数据，根据我们多年的工作经验编制了三角简图。图1-6展示了不同应用和选择不同传感器的关系，三角形内部传感器类型能观测三角形外部的特征，如不同传感器的每一个像元含有空间和灰度信息。

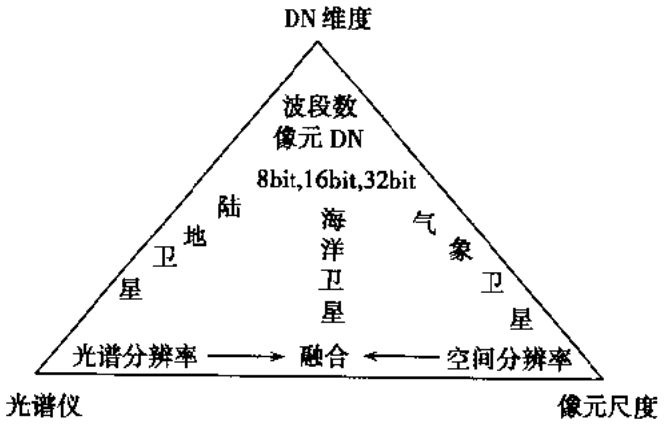


图1-6 遥感数据深度与传感器类型图

表1-10 各种传感器使用的光谱域

光谱域	光谱覆盖	辐射源	地表特性
可见光（V）	0.4~0.7μm	太阳能	反射
近红外（NIR）	0.7~1.1μm	太阳能	反射
短波红外（SWIR）	1.1~.35μm 1.4~1.8μm 2~2.5μm	太阳能	反射
中红外（MWIR）	3~4μm 4~5.5μm	太阳能 热辐射	反射 温度
热红外（TIR）	8~9.5μm 10~14μm	热辐射	温度
微波、雷达	1mm~1m	辐射(被动)主动	温度(被动)地表粗糙度(主动)

选择这些光谱域是由于地表反射、辐射能量可以通过这些窗口被卫星传感器响应。在大气窗口之间的大气中含有吸收辐射能量的成分。如在 2.5～3μm 主要成分是水汽、一氧化碳。微波与雷达传感器具有穿透云、雾、雨和全天时接受地表信息的能力。

主动遥感技术携带主动发射天线接收的是大气和地表散射信号和介电常数。如激光天线可以接收到臭氧层中的分子成分。在微波光谱段，合成孔径雷达传感器（SAR）是一种常规的主动传感器，用来探测从地表反射回来的天线发射的雷达波。微波雷达图像的分辨率取决于雷达天线。

表 1－11　　遥感中常用的微波波长和频率

波段	频率（GHz）	波长（cm）	传感器实例
Ka	26.5～40	0.8～1.1	SSM／I (37.0)
K	18～26.5	1.1～1.7	SSM／I (19.35, 22.235)
Ku	12.5～18	1.7～2.4	Cassini (13.8)
X	8～12.5	2.4～3.8	X－SAR (9.6)
C	4～8	3.8～7.5	SIR－C (5.3), ERS－1 (5.25), Radarsat (5.3)
S	2～4	7.5～15	Magellan (2.385)
L	1～2	15～30	Seasat (1.275), SIR－A (1.278), SIR－C (1.25), JERS－1 (1.275)
P	0.3～1	30～100	NASA／JPL DC－8 (0.44)

综上所述，多数的光学遥感系统的有效载荷采取了多光谱传感器与全色传感器相结合的形式。多光谱波段提供了地物的多种光谱性质数据，全色波段提供了更高几何分辨率数据，经过数据融合处理可以综合光谱和几何分辨率。SIR 系列微波传感器一般携带单频率极化装置，而 SAR 系列微波传感器发射水平（H）和垂直（V）两种极化波，响应回波时或出现在同一极化平面(HH,VV)或出现在正交平面（HV，VH）(Curlander, McDonoug 1991）随着多光谱传感器、多极化传感器和多空间尺度遥感数据的增多，也促进了不同传感器数据之间的融合处理技术的发展。

§1.5　光谱特征与定量分析

地球表面覆盖主要由土壤、岩石、植被和水体构成。美国科学家 Hunt，Salisbury 领导的试验室，从 20 世纪 60 年代开始对岩浆岩、沉积岩和变质岩三大岩类中不同矿物组合波谱特征系统的测试和研究（Avery，Berlin 1996，Swain，Davis 1978，Rubin 1993）；80 年代李小文博士建立了几何－光学模型反演遥感二向反射，探索光学遥感信息机理（李小文

1989)。这些代表性研究为航天、航空遥感器的波段选择和设置，为遥感数据的系统校正提供了可靠的科学依据。中国科学家童庆禧等人，经过多年的积累在1990年出版了《中国典型地物波谱及其特征分析》，书中第一次系统地展示了中国遥感地物波谱基础研究成果；由国家自然基金委支持的“八五”重大基金《遥感信息机理研究》等项目和成果，则为中国遥感基础研究奠定了基础。总结国内外典型岩石波谱曲线，可以将三大岩类的波谱概括为以下四个基本点：①岩石的反射波谱特征曲线产生于矿物晶体中电子跃迁和分子振动；岩浆岩波谱与Fe离子、OH^{-1}羟基和H_2O关系密切；沉积岩除上述因素外，还与CO_3^{-2}碳酸根等阴离子团有关；变质岩的波谱除上述因素外，还与Fe、Al、Mo等金属离子含量有关；②岩浆岩的反射率随SiO_2的含量减少而降低；沉积岩以碳酸岩反射强度最大，碎屑岩次之，蚀变岩、黏土岩类尤其是含铁离子及有机物质的黏土岩反射强度最低，区域变质岩类的反射规律不明显；③生物地球化学遥感主要是植物叶绿素，叶和茎中可变金属元素的响应；④影响岩石反射率变化强度的因素，除物质组成外，还有岩石的结构、构造以及产出地域的环境因素。图1－7为三种地表主要覆盖的光谱曲线。

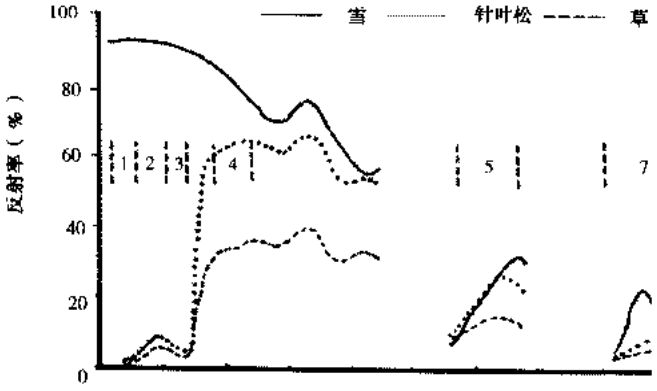


图1－7　三种代表性地物的光谱曲线

归一化植被指数（NDVI）是由近红外波段－红波段与近红外波段＋红波段比值运算的结果，在NDVI图像中红色为植被。NDVI已经成为生物圈与地圈计划（IGBP）估算植物净初级生产力（NPP）、农作物长势与估产研究中遥感信息定量化的基本参数（Townshend，Justice　1991）。NDVI的动态变化可以通过两个不同时相的NDVI图像比值运算求得。

我国南方是植被覆盖密度大的地区，利用光学遥感研究植被覆盖条件下的土壤和岩石成分一直是该领域的热点问题。植被光谱和生物地球化学紧密结合是该领域的突破口。虽然陆地卫星空间分辨率为30m，但是光谱分辨率为50～100nm。从理论上讲，只要生物地球化学的光谱效应能够产生50～100nm的特征差异，就有识别和区分的可能。我们在湘西“扶贫”找矿中，采用了TM遥感数据、地面高光谱测试和地球化学、植物地球化学相结合的方法，揭示了微量元素组合的光谱特征响应，有针对性地选择TM波段，合理地解释了TM图像中的色调异常，为寻找金矿提供了矿化异常信息，增加了野外工作的目的性和效率。

首先，为了找出叶片光谱与微量元素之间的关系，我们选择了生物地球化学活跃的“夏季窗口”，购置了6月份的图像，安排6月份野外采样和野外测光谱，将植被叶片中测得的Fe、Mn、Cu、Zn、Co、Cr、Mo、B等8种微量元素与原叶片光谱分析和一阶导数光谱分析（图1－8）。在微量元素与原始光谱的相关性分析中发现，Co元素于560nm波段附近相关性

2021044

较高，R^2（相关系数取正数）达到0.623。560nm正好位于植物光谱的绿区，见图1－8中高峰值，因此，叶绿素是导致光谱特征差异的主要内在因素。

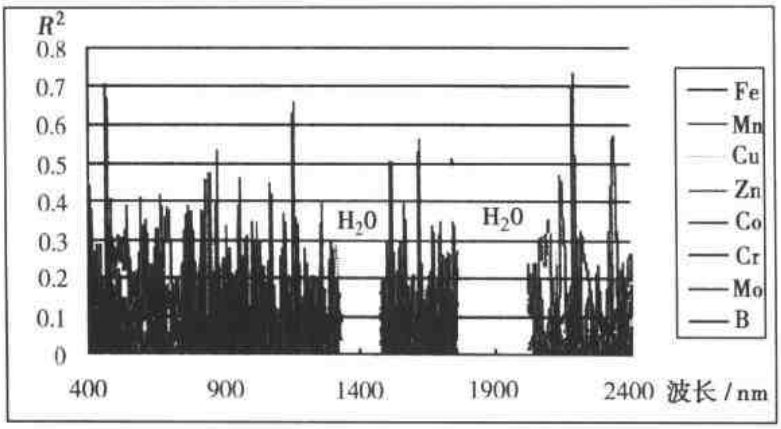


图1－8　微量元素与植物一阶导数光谱相关性

其次，在元素胁迫条件下也会造成特征光谱响应。前人研究结果表明，不同营养N、P、K、Ca、Mg、S胁迫下产生不同叶位叶片的光谱特征，在全营养元素的胁迫下叶片的叶绿素含量都会降低，这与本地区Co的光谱响应是一致的。其他几种微量元素在此区间并没有这种响应，其原因是它们含量还没有达到胁迫的程度。

图1－8所示的一阶光谱导数与微量元素的相关系数平方在波段上的分布图。从图1－8中可以看出Mn、B、Mo和Zn分别与中心波长为402.87 nm、1161.88nm；470.28 nm、878 nm、2191.02 nm、2338.93 nm；1623.06 nm和2338.93 nm的光谱反射峰位置有较好的相关性（$R^2>0.5$）。波段范围从可见光一直到中波红外，既包括色素区间，也包括细胞结构区间以及水分控制区间，可以说微量元素的生理作用涉及植物的各个方面。另外，这四个微量元素与其方差分析结果有很好的一致性。表1－12归纳了上述相关性并在前人工作的基础上总结了这四种元素的植物生理功能，及其各个吸收特征波段所对应的生物化学成分。从表1－12中比较清楚地反映微量元素生理功能不同所造成的主量生化成分的差异，进而间接影响植物的光谱响应，如B元素能促进植物蛋白质代谢及增强植物输导系统，与特征吸收波长2.19和2.34μm所对应的生化成分有很好的一致性。

表1－12　　微量元系特征吸收波段分析

元素	对应TM波长（μm）	相关系数R^2	生化成分	元素生理功能
Mn	0.40	0.58	?	增强光合作用，增加蛋白质积累，参与维生素C和核黄酸的合成
	1.16	0.66	本质素	
B	0.47	0.70	叶绿素b	促进糖类和蛋白质代谢，增强植物输导系统，促进糖分对植物对各部分的供应
	0.88	0.53	?	
	2.19	0.73	蛋白质，N	
	2.34	0.57	纤维素	
Mo	1.62	0.56	?	固氮作用及促进蛋白质的合成
Zn	2.34	0.54	纤维素	促进光合作用，参与生长素的合成

注：? 代表未知项。

研究中我们还认识到，虽然单棵树的生物地球化学效应光谱响应比较弱，但是如果这种较弱光谱响应成为连续的植被冠层光谱，空间上形成一定的面积就会使得弱响应能量线性累加。因此，利用卫星遥感技术能够有效识别生物地球化学光谱效应信息，也得到了合理的解释。

§1.6 遥感系统

遥感系统是遥感数据从光信号转变为电信号和数据编码的关键环节。卫星遥感传感有效载荷取决于探测目的、光谱探测波段的物理局限和大气窗口的限制。光学传感器与微波传感器工作原理不同，本书主要介绍光学传感器的工作原理，进而理解遥感数据生成和系统校正去糙声的原因，在涉及微波时仅作一般介绍。

1.6.1 光学传感器

图像中每个像元表达了地物的空间、光谱和时间三维向量的平均值。同一图像中相邻像元的时间维度平均变化是很小的，但在空间和光谱维的变化是显著的。遥感像元的空间和光谱差异是区分同一时相不同地表覆盖物质的基础。如果将图像像元定义为三维空间的连续参数 (x, y, λ)。x，y 表示空间坐标，λ 表示波长。遥感图像则是由离散像元集合表达的连续地面，图 1－9 是取自内蒙古的 TM 数据 1，4，7 波段合成的 400×300 个像元子区的图像。图中暗色区为岩石裸露区，明亮区为沙漠。图 1－10 是图 1－9 波段 1 的 DN 值灰度图像，灰度图像的 z 轴代表了 0～255 灰度变化的 DN 值（近似的表达 λ），在图 1－9 中的沙漠分布区为高灰度值分布区；岩石的 DN 值变化与沙漠分布区相反，其中一些变化也清楚地显示出来（见图中圈出部位）。

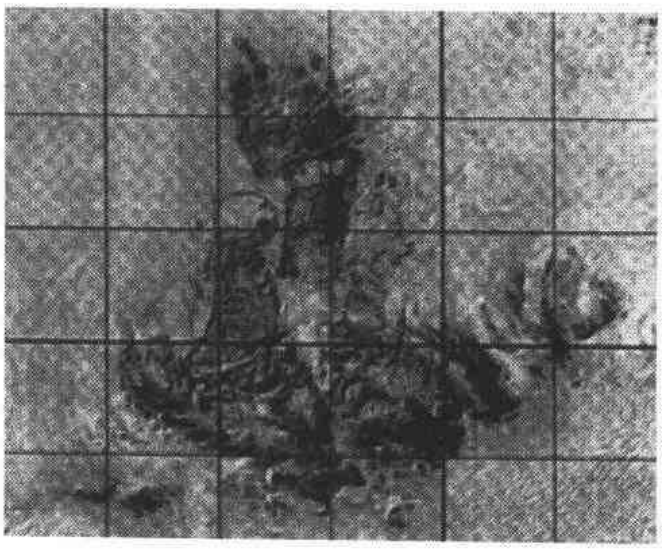


图 1－9 TM 波段 1，4，7 合成图像
（暗色区为岩石裸露区，明亮区为沙漠）

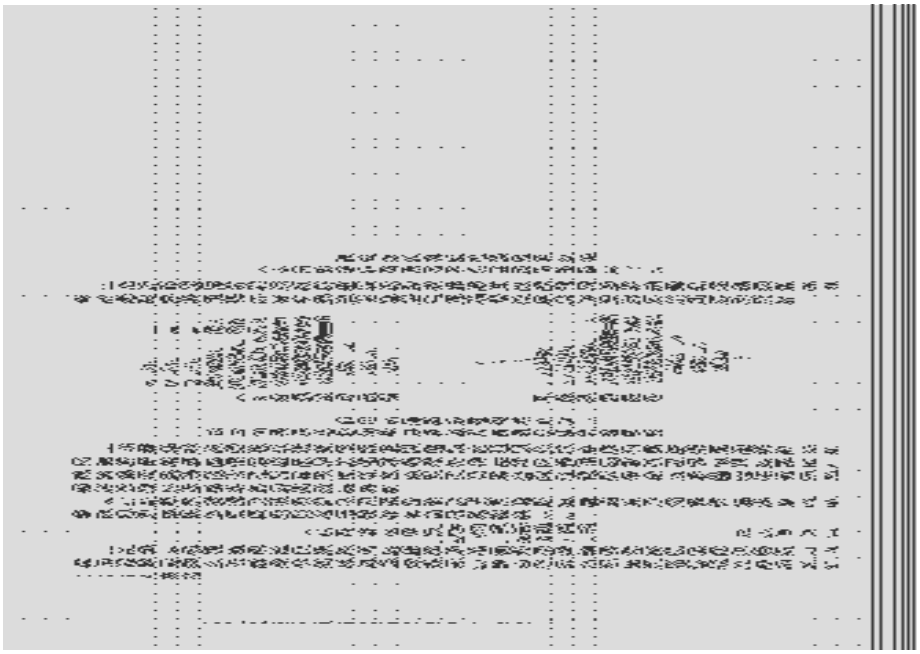


图 1－10　TM 波段 1 的灰度图像

（每一个点代表一个像元，高度是灰度值，近似地表达了 λ）

光学传感器对地扫描一般采取横扫和推扫两种扫描方式，横扫描又分为单行单向扫描和多行双向扫描两种（图 1－11）。陆地卫星采取多行双向横扫描，SPOT 卫星则采取推扫描方式。

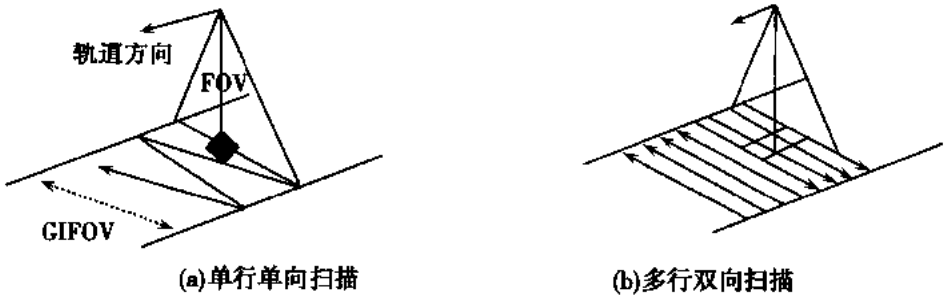


图 1－11　线扫描的两种方式

（图中 FOV 表示传感器视场，GIFOV 表示地表视场或地表扫描宽度）

传感器的地表采样间隔（GSI）是指相邻两个像元中心点之间的距离。顺轨方向采样为顺轨采样与轨道垂直方向的像元采样的垂轨采样。顺轨地表采样速度取决于卫星飞行速度，垂轨向采样速度取决于扫描速度。一般这两个方向的扫描速度是相同时 GSI 与地表瞬间投影观测面（GIFOV）相同（图 1－12）。

GSI 也取决于传感器系统的高度（H），传感器的聚焦镜（f）和空间采样速度。如果空间采样速度与像元/内部测定空间相同，GSI 可以表达为

$$\text{GSI} = \text{内测空间} \times \frac{H}{f} = \frac{\text{内测空间}}{m} \tag{1-1}$$

式中 H/f 是几何放大比例式，m 从地表到光学透镜的距离。内部探测空间一般情况下与探测器的宽度（w）相同，GIFOV 同样取决于 H、f 和 w。在卫星遥感系统设计中，定

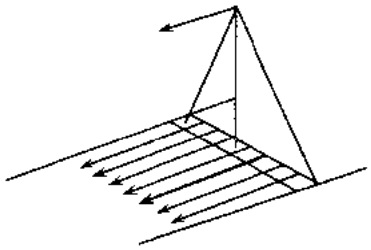


图 1－12　推扫描方式

义GIFOV为扫描边弦线夹角，见图1－13：

$$\mathrm{IFOV}-2\tan\left(\frac{w}{2f}\right)\cong\frac{w}{f} \tag{1-2}$$

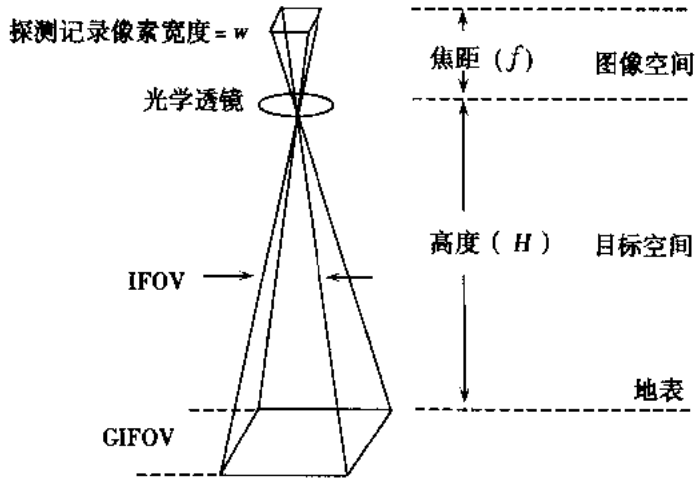


图 1－13　光学传感器与一个被探测像元的几何关系

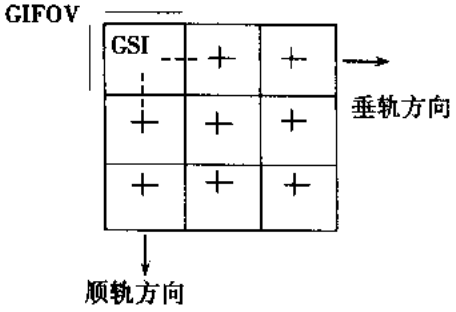


图 1－14　典型传感器

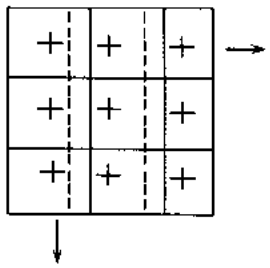


图 1－15　MSS传感器

GIFOV 计算公式为

$$\mathrm{GIFOV}=2H\tan\left(\frac{\mathrm{IFOV}}{2}\right)\approx w\times\frac{\mathrm{H}}{f}=\frac{w}{m} \tag{1-3}$$

GSI 和 GIFOV 是由内探测空间宽度（w）与地面宽度（m）按比例构成。卫星遥感用户在分析中习惯用 GIFOV。

每个像元记录的辐射能量是整幅能量的一小部分，GIFOV 的平方代表像元的近似面积，

实际面积要大一些。传感器接受到的是光信号，将光信号转变成电信号记录下来，然后将电信号量化成离散数码（DN 值）。所有的数据按 2 进制“比特”编码，

$$N_{DN}=2^{Q} \tag{1-4}$$

DN 排列通式，

$$DN_{排列}=[0\ ,\ 2^{Q}-1] \tag{1-5}$$

式中，Q 值越大，数据越接近地表连续变化和光谱的分辨率就越高。TM 和 SPOT 数据每个像元是 8bit，AVHRR 数据是 10bit 数据，Radarsat 一般模式为 16bit 的数据。为了获得更高的电磁精度，EOS MODIS 设计为 1bit 数据。总而言之，一个像元具有三个特征量：GSI、GIFOV 和 Q。

产生多光谱通道的原理是通过光学传感器将光束分到多个通道，在通道中设置不同的光谱滤波器。高光谱传感器，如 HYDICE 在聚焦面上设定了 2 维阵列探测仪，对于 HYDICE 探测器在垂轨方向设有 320 像元，在顺轨方向设 210 个像元，采用了推扫方式。当飞机顺轨方向飞行时，垂轨方向接收到所有 210 个光谱波段的数据。

1.6.2 卫星遥感重复观测

卫星遥感技术最大应用价值之一，是具有用同一标准积累动态数据的能力，可以重复观测地球表面发生的变化。选取重复观测数据的时间段，取决于被观测目标的时间尺度变化规律。如气象预报要求表示以小时为时间单位的气候变化；农业估产以旬和天为时间单位；地质年代变化则以百万年对卫星数据的时间分辨率要求不严格，而更多考虑的是环境的干扰因素。静止卫星运行方向与地球自转方向相同，卫星绕地球一周的时间与地球自转一周的时间正好相等，即 23 小时 56 分钟；同步卫星绕地球运行的周期与地球自转周期相同，如陆地卫星、SPOT 卫星和我国资源卫星 CBERS。卫星对地重复观测周期取决于传感器设计的星下点的观测方向。为了实现高重复观测率，在卫星系统中设计两颗卫星同轨飞行，当卫星按一定距离同轨飞行就实现了重复观测率。SPOT 卫星在轨飞行时观测角度在垂轨方向改变 ±26°的角度，实现跨轨重复观测。一些在轨和计划发射卫星重复观测时间，见表 1－13。

表 1－13　　在轨和计划发射卫星重复观测时间

卫星系统	重复观测时间（天）	观测时间
Landsat 1，2，3	18	上午 9:30～10:00
Landsat 4，5	16	上午 9:45
NOAA/AVHRR	1	上午 7:30
	7 小时（2 个系统）	下午 2:30
SPOT	26	上午 10:30
IRS－1A，B	22	上午 10:30
CBERS	26	上午 10:30
EOS/MODIS	2	上午 10:30 或下午 1:30

利用重复观测数据，可以进行土壤侵蚀和农作物长势监测，干旱、洪水和沙尘暴等自然灾害的监测，全球气候变化和人类活动对生态环境施加的影响等。

§1.7 图像显示系统

卫星遥感数字图像通常采取两种保存格式，波段顺行记录格式（BSQ）（见图 1－16）和波段逐行交替记录格式（BIL）（见图 1－17）。数据格式的不同取决于数据的三维顺序，BSQ 格式为使用单波段数据的用户提供了方便；BIL 为使用多波段数据的用户提供了方便，BIL 格式也常用于数据压缩。

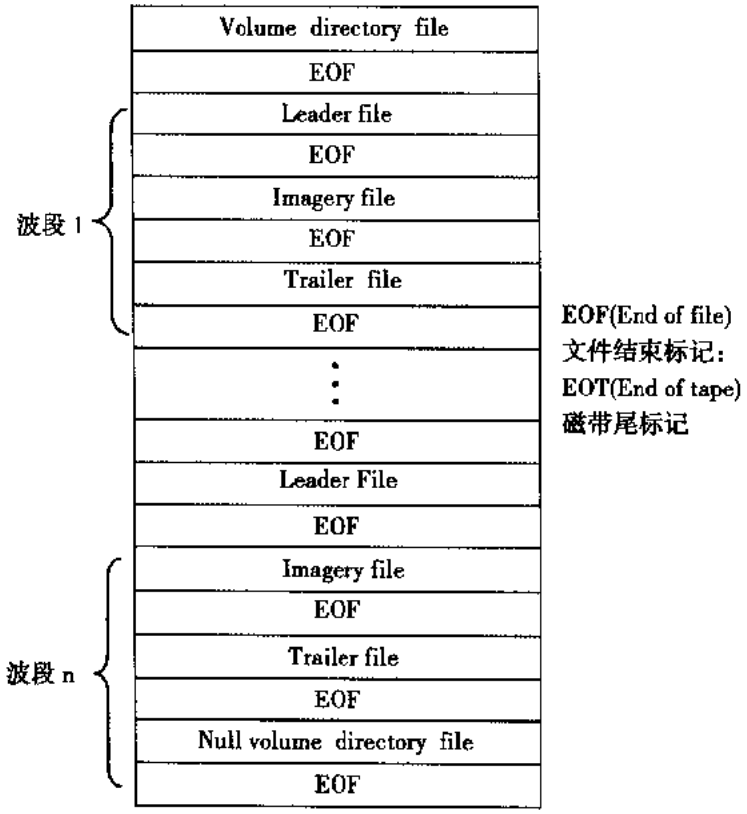


图 1－16 BSQ 记录方式

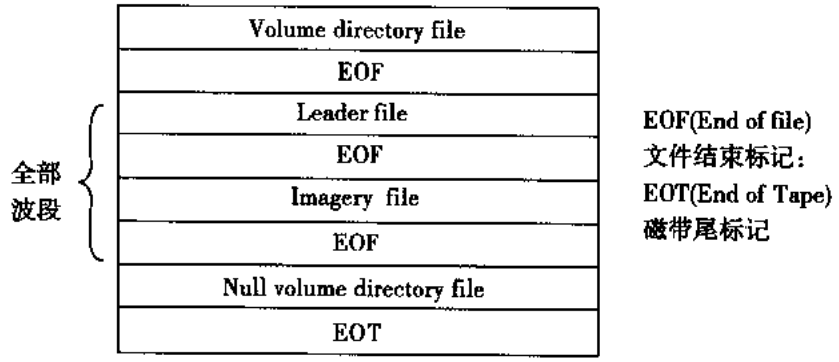


图 1－17 BIL 记录方式

遥感数据通过计算机显示，将数字图像按红、绿、蓝通道合成为地表彩色图像是将3个波段的图像数据经过计算机显示器调色板（LUTs）将灰度值（GLs）赋予R、G、B三种不同的颜色。

$$GLs = LUT_{DN} \tag{1-6}$$

DN值在调色板中是整数编码，GL在显示器内存中也是整数编码（图1-18）。

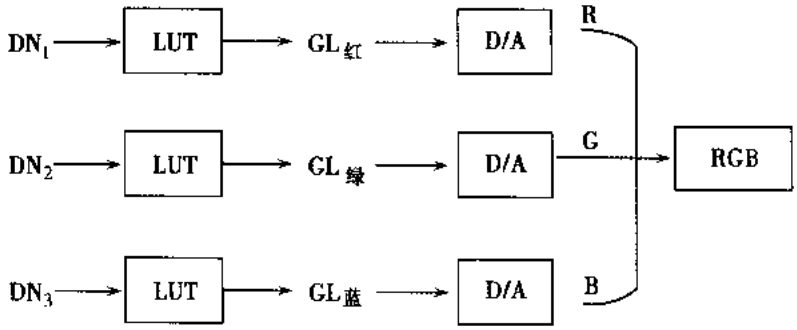


图1-18 DN在调色板中的整数编码

DN值以$DN_{排列}=[0, 2^Q-1]$方式排列，GL是以$GL_{排列}=[0, 255]$。硬件系统的调色板显示输出LUT限定在$GL_{排列}=[0, 255]$范围，LUT可以对图像DN作拉伸变换提高图像显示质量。如果DN排列值大于DL排列值，LUT还可以实现DN值压缩显示。

由此可知，彩色图像是由任意3个多光谱波段通过GL实现的。用24比特显示器显示时，3个波段分配了3个8比特整数显示色彩，分别为红（R），绿（G）和蓝（B）。为此，每一个波段有256个GL，每一个被显示的像元有一个颜色相对应，这个颜色由三个一组GLs定义。所以也可以理解为彩色（RGB）三维体矢量。

$$RGB=[GL_R, GL_B, GL_B]^T \tag{1-7}$$

式中T表示彩色显示维度，按排列组合理论，在彩色（RGB）三维体矢量中存在256^3RGB显示的可能性，由于受当前显示器硬件能力的限制，实际显示彩色要小于256^3RGB。

图1-19彩色显示器GL空间示意图。计算机显示器产生色彩采取添加法，一个像元与相等的GL_S红、绿、蓝，在屏幕上显示为灰度。如果一个像元有相等的红、绿而没有蓝，显示色彩为黄色。在遥感信息应用中，不同的色彩显示是非常重要的。

因为不同传感器对可见光谱域的设定是不一样的，因此选择波段和用哪种色调显示目标是可以选择的。但从摄影学角度讲，“标准”真彩色和显示植被一般采取表1-14和表1-15中的方案。

表1-14　　标准波段的彩色显示方案

显示彩色	传感器波段		
	真彩色（TC）	植被	假彩色（FC）
红（R）	R	NIR	任意波段
绿（G）	G	R	任意波段
蓝（B）	B	G	任意波段

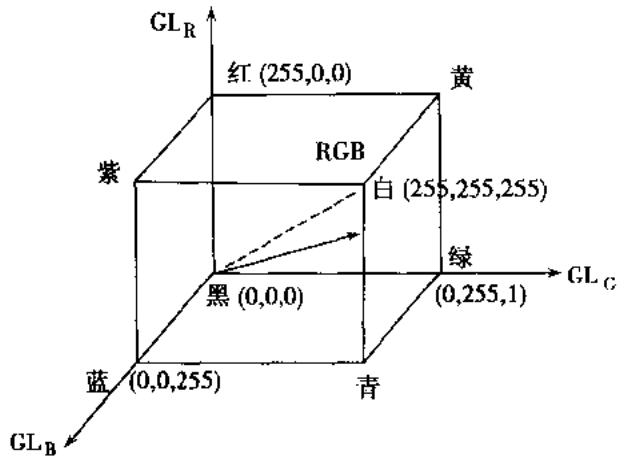


图 1－19　彩色显示器 GL 空间示意图

表 1－15　　**特殊波段的彩色显示方案**

合成图像	放入 RGB 的波段			
	MSS	TM	SPOT	AVIRIS
真彩色		3，2，1		27，17，7
模拟真彩色		5，4，3		
植被	4，2，1	4，3，2	3，2，1	51，27，17

单波段数据彩色显示可以通过调色板按灰度值赋予不同的颜色，通过单波段灰度分割和色彩显示可以分辨 DN 值之间细微的差别。

遥感数据预处理的目的是通过计算图像电磁特性，校正几何畸变，去除传感器噪声和产生标准数据格式，实现数据不断更新，保证数据库的通用性。特殊预处理方法取决于传感器的特殊性，需要什么样的预处理精度取决于不同的应用目的。一般预处理可以概括为以下几点：

- 格式化原始数据；
- 传感器造成的误差校正（几何校正、电磁校正）；
- 像元校正数据（几何校正）；
- 地球物理数据融合。

总之，按图 1－1 标准，在上述各种处理中，下层处理比上层处理需要更多的辅助数据和多次复杂处理过程。在一般情况下，数据处理仅作上层处理，下层处理费时、费钱。对于特征信息的提取，需要数据使用者自己来完成。

参考文献

Schowengerd, R.A.1997.Remote sensing models and methods for image processing, Chapter one, ACADEMIC press

Asrar, G., R.Greenstone.1995.MTPE/EOS Reference Handbook.Greenbelt.MD, NASA/Goddard Space Flight Center, No.NP－215

Avery, T.E., G.L.Berlin.1992. Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation.5th Ed.New York, NY: Macmillan Publishing Company, 472p

Campbell, J.B.1996. Introduction to Remote Sensing.Second Ed.New York, NY: The Guilford Press.622p

Clark, B.P., 1990. Landsat Thematic Mapper data production: a history of bulk image processing.photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56 (4): 447～451

Curlander, J.C., R.N.McDonough.1991. Synthetic Aperture Radar－Systems and Signal Processing.New York, NY: John Wiley & Sons, 647p

Filiberti, D., S.marsh , R. Schowengerdt.1994 Synthesis of high spatial and spectral resolution imagery from multiple image sources.Optical Engineering 33(8): 2520～2528

Fritz L.W.1996. The era of commercial earth observation satellites.Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 62(1):39～45

Richards, J.A.1993. Remote Sensing Digital Image Analysis － An Introduction.Second Ed.Berlin: Springer－Verlag, 334p

Rubin, T.D.1993. Spectral mapping with imaging spectrometers.Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 59(2):215～220

Salomonson, V.V., J.Barker, E.Knight.1995 et al. Spectral characteristics of the Earth Observing System (EOS) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (ODIS) .In Imaging Spectrometry, Orlando, FL, SPIE, vol.2480: 142～152

Swain, P.H., S.M.Davis .1978 .Remote Sensing: The Quantitative Approach.New York, NY: McGraw－Hill, 396p

Townshend, J., C.Justice, W.Li, C.Gurney, J.Mcmanus.1991. Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. Remote Sensing of Environment 35: 243－255

李小文 .1989. 地物二向性反射和方向谱特征 . 环境遥感, 4(1): 67～72

第二章　太阳辐射与地球系统

§2.1　概　　述

太阳辐射到达地球表面的能量驱动着地球系统各圈层的能量交换和生物循环，支撑着生命的轮回。在整个被开发的光谱资源中，我们重点介绍可见光到热红外谱段光谱特征。自然界中大多数物质都有其独特的反射、辐射特性和光谱标记，遥感技术系统的能力是通过测定光谱特定谱段，选择合适的传感器，探测大气成分，如云、气溶胶、水蒸气、臭氧；地表特征，如植被、水体、雪盖与冰盖、土壤和岩石、水体的重要特征；地球系统的重要特征，如地表温度、海流、能量收支平衡等。自然界中电磁波谱覆盖范围，从短波高能的γ射线到长波的无线电。目前遥感对地观测主要利用的光谱范围为可见光、近红外、热红外和微波。遥感器接收到的是太阳辐射能量到达地表的反射、散射和传输路径过程中的大气散射能量的线性叠加。热红外谱段接收的能量来自地表物体热能辐射和大气热能辐射，见图 2－1。本章将重点放在光学反射的基本模型和在建模过程中运用到的电磁学原理。

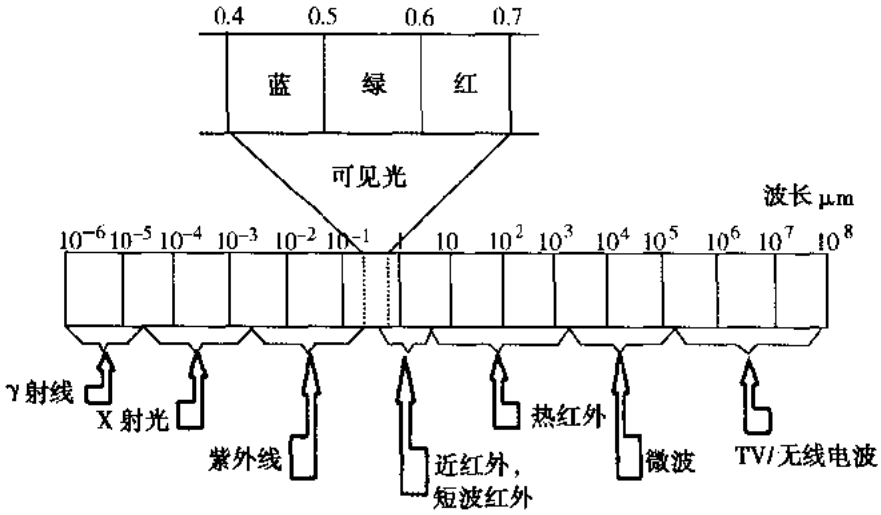


图 2－1　自然界中电磁波资源（从短波高能的γ射线到无线电长波）

§2.2　太阳辐射和电磁光谱

太阳辐射（Irradiance）是指太阳单位时间、单位表面积发射的电磁能量。太阳常数（Solar Constant）是指地球大气层表面接收到的总辐射能量。卫星测量的年平均太阳常数为 1368 W/m^2。反照度（Albedo）是地球表面反射、辐射、散射能量的总和，是地球能量支出的重要指标。太阳辐射、太阳常数是地球能量收支平衡和气候模型的基本参数。人们试图建立大气顶部和地球表面的相关计算难度比较大，因为，几乎 70％的太阳辐射量被大气和云

所阻挡，为了建立全球能量支出平衡模型，科学家正在努力寻找估算到达地球表面的实际辐射能量模型（李小文等 1994）。由于地球自转，地球轨道造成的年季节变化，地表高度不等形成不同的地球光照面，造成地球表面 24 小时辐射能量分布的变化。上述因素也改变了一天中地表接收太阳辐射的能量，角度问题又直接影响了卫星图像亮度。21 世纪遥感技术发展也将集中在解决这些问题。

地球能量收支平衡探测器（CERES）卫星于 2000 年 1 月 26 日接收到的第一幅地球大气表层下午太阳辐射图像，CERES 数据向世界首次展示了完整 24 小时覆盖全球太阳辐射能量。太阳能反射（图像亮度）可以定量地描述光能的分布、聚集和运动规律。太阳辐射能图在没有云出现的地球海洋部分就比较暗，能图展示了发生在赤道附近，美国西海岸和地球南半球海洋的风暴。位于非洲和澳大利亚之间还出现了热带涡流（ITCZ），在大气旋流影响区没有云聚集。陆地反射的能量比海洋要强，位于能图的中部撒哈拉大沙漠是反射能量集中、面积最大的地球表面，地球的其他地区相对比较暗。南美和非洲的热带雨林的亮度与海洋相差不多，雨林上空较亮区域反映的是云，该图像很好地保留了当天地球表层与太阳辐射之间的能量交换关系，见彩图 2－1。

彩图 2－2 是 1995 年 1 月份 NOAA/AVHRR－1km 分辨率的全球平均反照度（Albedo）图像，图中黄色为高反照度分布区。

2.2.1 电磁波传输

太阳辐射能在空间传播形成电磁波，电磁波以光速在空中传播（周克定等 2000）。在真空条件下，光速为 $v=300\ 000$ km/s，光速在大气和透明玻璃中传输速度要稍慢。电磁波在空中传输时，电场和磁场相互垂直，同时还与传输方向垂直，见图 2－2。

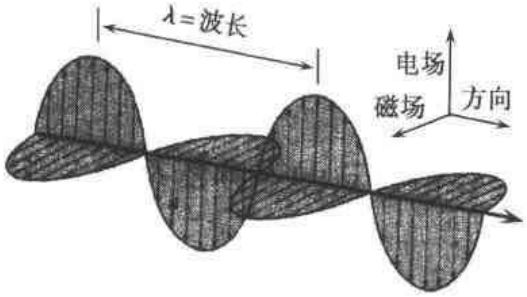


图 2－2 电场、磁场相互垂直与传输方向垂直

热红外探测的是地球表层的热特性，根据黑体辐射能量理论，太阳可以看做完全的能量辐射体，太阳辐射出最大热能用普朗克公式来描述①，

$$M_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5\left[e^{c_2/(\lambda T)}-1\right]} \tag{2-1}$$

式中：T 是黑体温度（绝对温度，计量单位 K），$C_1=3.74151\times10^8\mathrm{W-m^{-2}-\mu m^4}$，$C_2=1.43879\times10^4\mu\mathrm{m-K}$。使用这些参量和选定波谱 λ 就可以计算黑体温度。黑体温度的单位与

① 普朗克公式描述绝对黑体的光谱出射度与温度、波长关系的定理。

光谱辐射单位相同为 $W-m^{-2}-\mu m^{-1}$，太阳表面光谱能量可以用单位面积长度来表述。

维恩定理表明，黑体发射最大能量值相对应的波长与温度成反比，

$$\lambda_{max}=2898/T \tag{2-2}$$

公式（2-2）描述了黑体温度和辐射波长极值的关系。定律反映出随着黑体温度升高或降低，波长极值点向短波或长波方向位移。在实际应用中，我们关心的是到达地球表面的辐射能量。为了实现计算到达地球表面的辐射能量，首先要到达平流层的定光谱辐射能 E_λ^0，E_λ^0 状态可以由公式（2-3）表达，

$$\text{平流层：}\quad E_\lambda^0=\frac{M_\lambda}{\pi}\times\frac{\text{太阳能量发射面}}{(\text{太阳到地球表面的距离})^2} \tag{2-3}$$

光谱辐射单位是 $W-m^{-2}-\mu m^{-1}$。

地球表面的平均温度为 300K，其 $\lambda_{max}=9.6\mu m$；太阳的平均温度为 5900K，则其 $\lambda_{max}=0.48\mu m$。根据定律计算出热红外传感器的探测通道为 3～5μm 适用于探测森林火灾、火山活动，8～14μm 适合于探测地表一般物体的热辐射特性，见图 2-3。

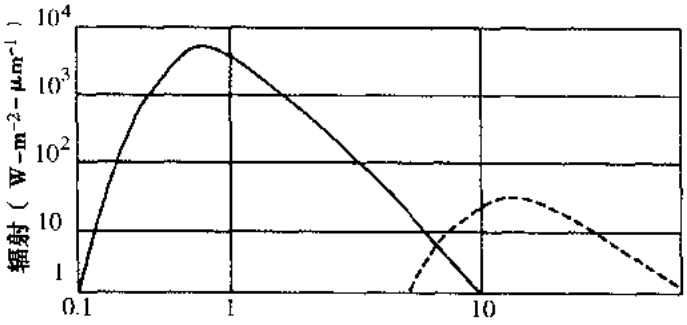


图 2-3 可见光—热红外谱段二种辐射源在大气顶端的光谱贡献

2.2.2 传感器响应的反射组分

三种到达传感器的反射组分，见图 2-4，

- 无散射地表反射组分（L_λ^{su}）；
- 来自散射光的地表反射组分（L_λ^{sd}）；
- 反射路径上天光散射加入的组分（L_λ^{sp}）。

根据图 2-4，我们可以写出向上到达传感器高度的总辐射为，

$$L_\lambda^{s}=L_\lambda^{su}+L_\lambda^{sd}+L_\lambda^{sp} \tag{2-4}$$

下面建立每一种组分的模型。

（1）无散射地表反射组分（L_λ^{su}）

太阳辐射到达地表路径上和由地表反射到达传感器路径上的散射、吸收作用是光学遥感不可回避的影响因素。到达地表的太阳辐射称做光照路径传输，τ_s（λ）取值范围 0～1，为无量纲。用大气模型说明的典型太阳辐射传输曲线，见图 2-5。

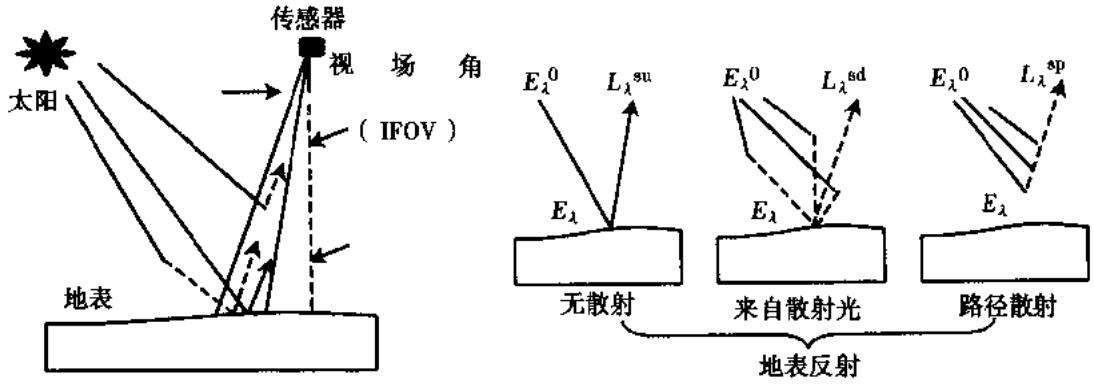


图 2－4　太阳能与传感器接收到信号辐射组分示意图

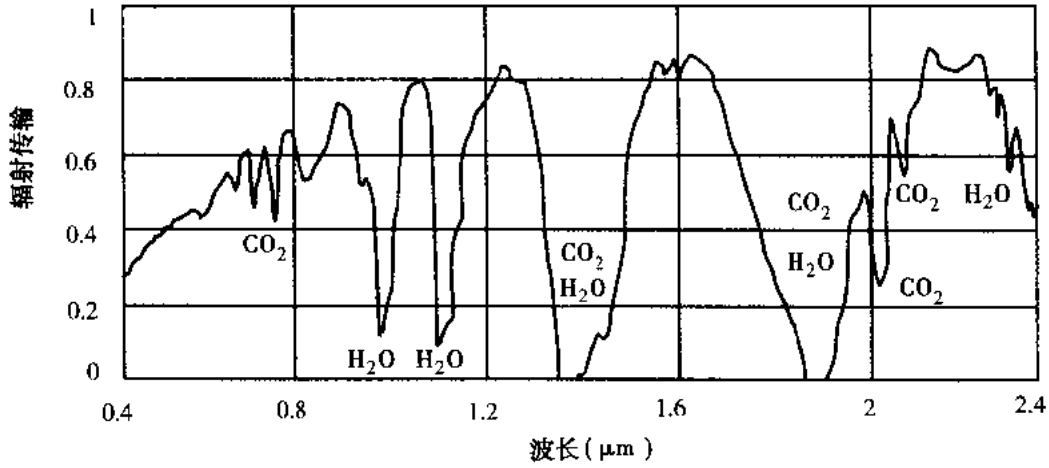


图 2－5　Thome 计算大气辐射传输

图 2－5 中显示，水和二氧化碳共同吸收分别出现在 1.4μm 和 1.9μm 谱段造成很深的吸收峰。所以在选择对地观测卫星光学传感器光谱波段时，一般要避开这个光谱区域。相反，对云、水汽的探测应当利用这个光谱区域。在中心光谱为 1.4μm 区域地表反射光谱被水汽吸收，太阳辐射被水汽反射。在 0.9μm 和 1.1μm 水吸收很窄，当传感器为宽波段时会影响其信号接收量，如 TM4 波段。

在光谱的绿波段辐射反射信号迅速地减弱，这是由于太阳辐射能量沿辐射路径被直径小于 λ/π 大气分子散射。最大散射接近 Rayleigh[①] 散射，波长为 λ^{-4}。与红光相比蓝光被散射，这也解释了为什么天空呈现蓝色。当太阳升起和日落时太阳辐射传输路径变长，这时的天空呈现红色。当大气中含有气溶胶（各种污染粒子、灰尘、雾、冰晶）大气粒子，而且粒子的直径小于 $2\lambda/\pi$ 时，符合 Mie[②] 散射依波长变化定律；当粒子的直径大于 $2\lambda/\pi$ 时的 Mie 散射不依波长变化，处于无选择性散射状态，如厚云层呈现白色，这是由于小水滴产生的米氏散射。对于粒子直径在 λ/π 和 $2\lambda/\pi$ 之间造成的散射也符合依赖于波长变化定律，但

① 引起散射粒子直径远小于入射电子波长的称 Rayleigh 散射，其散射强度与波长的 4 次方成正比。

② 粒子的直径与入射波长相近称 Mie 米氏散射。

不完全符合 Rayleigh 散射。对于自然状态下的大气，包括气溶胶和各种直径的粒子展现出的散射现象更多的是 Rayleigh 散射和 Mie 散射的综合现象，见图 2－6。

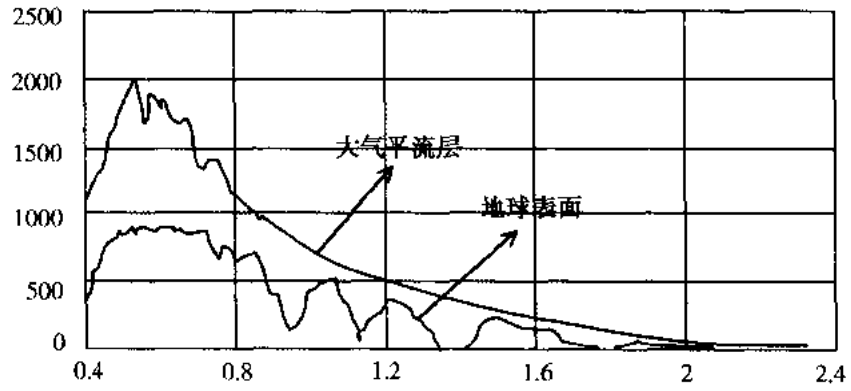


图 2－6　太阳辐射能量在平流层和地球表面分布

图 2－7 展示了太阳辐射在大气介质中传输的光谱效果。电磁辐射经过大气到达地表之前发生了明显的变化。垂直于太阳光的地球表面辐射能量 E_λ 为，

地球表面：

$$E_\lambda = \tau_s\ (\lambda)\ E_\lambda^0 \tag{2-5}$$

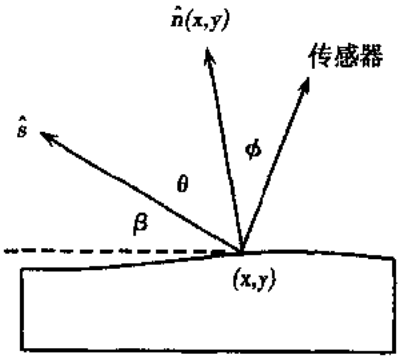


图 2－7　太阳辐射到达地表的几何模型

式 2－5 中 τ_s 是太阳辐射路径上的大气传输参数，E_λ 小于或等于 E_λ^0。地表辐射取决于瞬间视场角，瞬间视场角度的最大值是垂直于地面 90°角。当角度减少时符合余弦角度关系，可以通过两个矢量点来表达见图 2－8。瞬间辐射能量 E_λ 与地表形态有关，

地球表面：

$$\begin{aligned} E_\lambda(x,y) &= \tau_s(\lambda)E_\lambda^0\hat{n}(x,y)\times\hat{s} \\ &= \tau_s(\lambda)E_\lambda^0\cos[\theta(x,y)] \end{aligned} \tag{2-6}$$

到达地表的太阳能量一部分转变为地表反射和散射，一部分被吸收转变为物质体的热辐射能（Teillet，Fedoscjevs　1995）。为了研究方便，假定地球表面为 Lambertian[①] 面，反射太阳辐射能量的几何模型主要参数为 π 因子和光谱的漫反射 ρ，

① Lambertian 面理想的漫反射面，即在入射辐照度不变的条件下漫反射面的反射强度与观测角度无关。

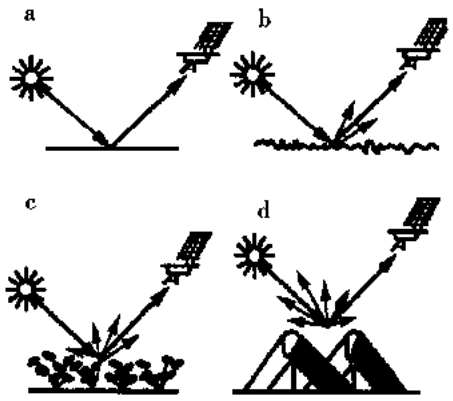


图 2－8　二向性反射示意图。a 表示镜面反射；b 粗糙表面的海洋；c 与叶面有关的二向性体散射；d 与阴影和结构有关的二向性反射，如树冠层

地球表面：

$$L_\lambda(x,y) = \rho(x,y,\lambda)\frac{E_\lambda(x,y)}{\pi}$$

$$= \rho(x,y,\lambda)\frac{\tau_s(\lambda)E_\lambda^0}{\pi}\cos[\theta(x,y)] \qquad (2-7)$$

与多数情况不具备 Lambertian 面假设，再加上传感太阳辐射传输一样，光谱反射传输也是比率，无量纲，取值范围 0～1 之间。地球表面物质的光谱特征随着波长和空间位置的不同表现也不尽相同。但是地球自然表面，多数情况不具备 Lambertian 面假设，再加上传感器观测角度因素，就造成反射光谱模型的复杂程度。为了描述这种复杂性，在遥感信息机理研究中产生了各种模型。其中有代表性的模型为二向性反射模型（BRDF），几何－光学模型，几何－物理模型和多角度模型等（陈述彭等　1998，李小文等　1995，李小文　1989）。在理想条件下，二向性反射可以通过测定物质的入射光谱和反射光谱得到。BRDF 表达式可以通过 BRDF 替代式 2－7 中的 $\rho(x, y, \lambda)/\pi$ 得到。二向性反射 BRDF，描述了地表目标的太阳照射和观测之间的基本几何关系，见图 2－8。BRDF 值取决于辐射波长和地形、光学特性，表现为阴影、多角度散射、互影、反射、吸收和地表发射、反射面朝向和反射面密度等参数。BRDF 在遥感中主要用来修正太阳照射亮度和观测方向的角度效应，用于图像的标准化、镶嵌以及计算反照度、土地分类、云层测量、大气校正、全球能量收支平衡计算等，见图 2－9。

从地表反射的能量只有穿过大气层才能到达传感器。星下点和星下点夹角 40°时通过大气的反射能量，见图 2－10。图 2－10 中的曲线与图 2－6 中曲线的主要区别是路径的差别。例如陆地卫星 TM 传感器的观测角 FOV 比较小，在地表变化不大的情况下，同一景数据各像元之间的大气条件变化比较小。但在高山区，由于像元与像元之间的高度不一样，造成像元间大气影响的差别。通过比较图 2－10 与图 2－5 可以看出，两图曲线在短波段的差别比较大，说明可见光和短波红外图像由于观测角的变化会造成较大变化。

现在我们需要根据观测路径传输 $\tau_v(\lambda)$ 来定义式 2－7 方程中描述的传感器对反射能量响应的表达公式，

在传感器端：

$$L_\lambda^{su} = \tau_v(\lambda)L_\lambda$$

$$= \rho(x,y,\lambda)\frac{\tau_v(\lambda)\tau_s(\lambda)E_\lambda^0}{\pi}\cos[\theta(x,y)] \qquad (2-8)$$

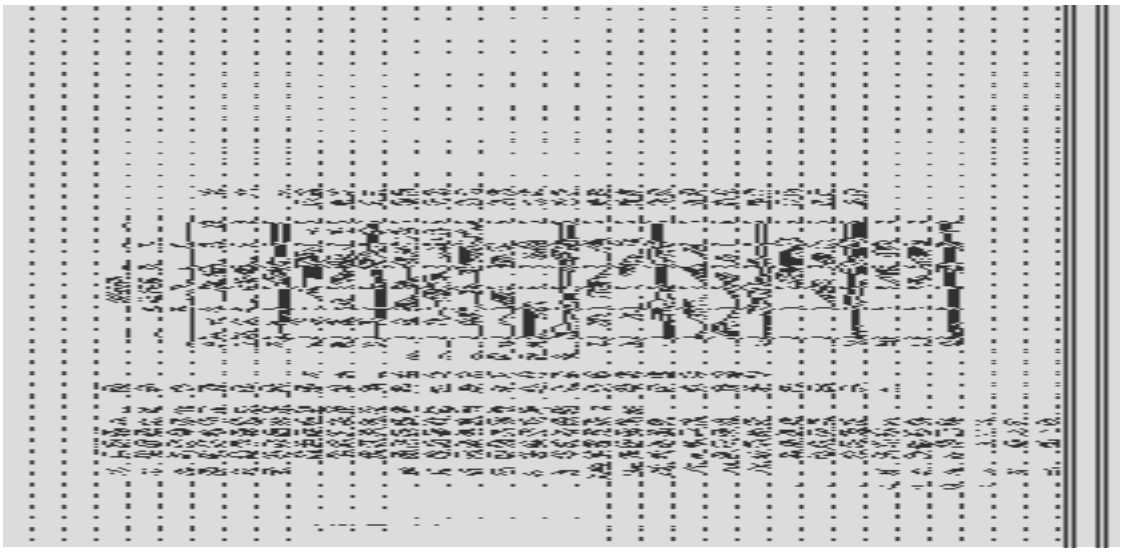


图 2　9　左图表示太阳辐射从射像者的背后照射树林，看不到树的阴影，右图相反方向摄像，反射方向为暗光（根据 Don Deering 照片改编）

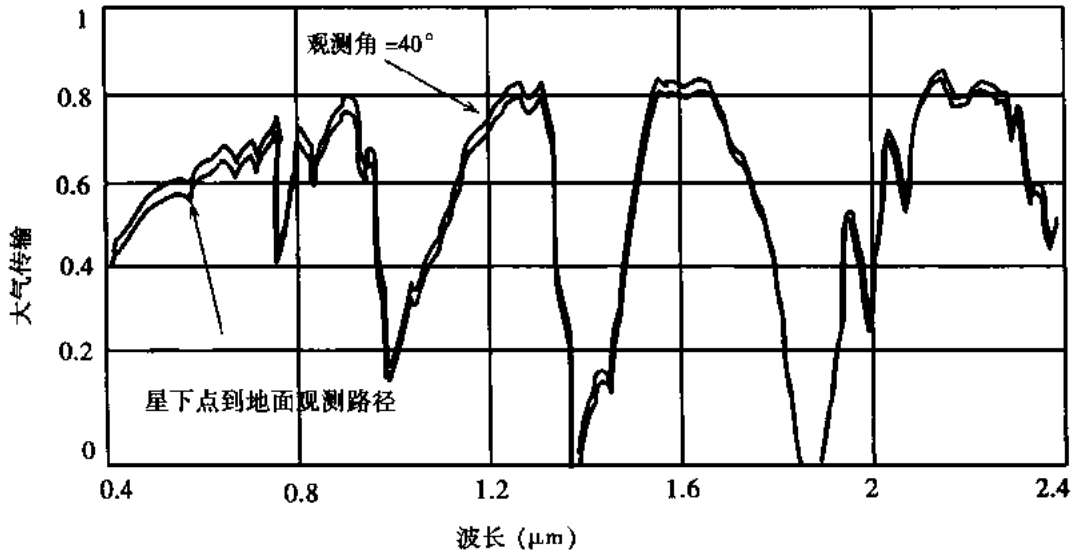


图 2－10　经过大气传输到达传感器的反射能量

公式中描述的组分 L_λ^{su} 携带着由 ρ（x，y，λ）函数表述的空间－光谱反射信号。

（2）地表－反射光谱和大气－散射组分（L_λ^{sd}）

传感器接收的另一个能量组分是通过大气层散射到达地表后产生的散射光 L_λ^{sd}（x，y）。检查各种散射光简便和有效的方法是读取近红外图像中山区深部阴影的像元，如果出现亮度值，这个亮度值就可以看做是散射作用的结果。天光反射能量 E_λ^{d} 是地表反射组分中的一部分 ρ。这些参量也可以通过地表定标仪器测定。地形影响在散射能量公式中用 F（x，y）表示，于是有，

在传感器端：
$$L_\lambda^{sd} = F(x,y)\rho(x,y)\frac{\tau_v(\lambda)E_\lambda^{d}}{\pi} \tag{2-9}$$

(3) 路径－散射组分（L_λ^{sp}）

太阳能量的路径辐射是指两种散射的综合效应：一种是由不同分子组成的依赖于波长变化的 Rayleigh 散射；一种是气溶胶和粒子产生的散射效应，不依赖随波长变化的 Mie 散射。在大气晴朗洁净条件下，两种散射的综合效应位于 $\lambda^{-2}\sim\lambda^{-0.7}$之间。

路径辐射在一景图像中可以是不相同的，如城市和乡村、大气中的烟雾、空气污染和晴朗天空；卫星观测角度也可以导致路径散射发生变化，如宽视场角 AVHRR 图像和可变视场卫星传感器系统，如 SPOT 可变 FOV；当地形平缓视场角小时，在星下点没有变化的情况下，路径辐射在图像中是不变的，如 TM 图像，这时公式可以简化成 L_λ^{sp}。

(4) 传感器响应的全部太阳辐射（L_λ^s）

传感器响应的全部太阳辐射能量是上述三种组分的线性叠加，式 2－10 表达了传感器接收到的总光谱辐射能量。

在传感器：

$$\begin{aligned} L_\lambda^s(x,y) &= L_\lambda^{su}(x,y) + L_\lambda^{sd}(x,y) + L_\lambda^{sp} \\ &= \rho(x,y,\lambda)\frac{\tau_v(\lambda)\tau_s(\lambda)E_\lambda^0}{\pi}\cos[\theta(x,y)] + F(x,y)\rho(x,y,\lambda)\frac{\tau_v(\lambda)E_\lambda^d}{\pi} + L_\lambda^{sd} \\ &= \rho(x,y,\lambda)\frac{\tau_v(\lambda)}{\pi}\{\tau_s(\lambda)E_\lambda^0\cos[\theta(x,y)] + F(x,y)E_\lambda^d\} + L_\lambda^{sd} \end{aligned} \qquad (2-10)$$

我们选择晴朗天空条件下，内蒙古戈壁不同波段 TM 图像和 DN 值趋势面（能量场）图形，图 2－12，图 2－11 为原始数据 TM7，5，1 合成图像，图像中暗色部分为裸露岩石小山，地形起伏有阴影反射率相对较低；较亮部分为戈壁沙漠，地形平坦反射率相对较高，近似满足 2－10 公式描述的三条件。新图像突出了原始图像中较暗部分，而使原始图像中较亮部分变暗，图 2－14。再将图像转变成 DN 值灰度图像，图 2－15。通过数据格式和变换处理可以可视化的对图像与灰度（能量）之间有感性的认识。

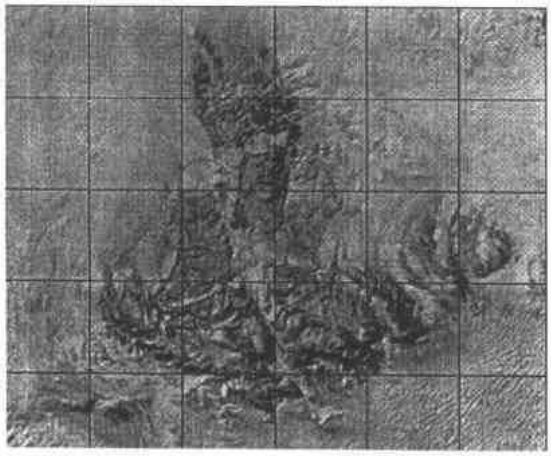


图 2－11　IM147 波段原始波段合成图像

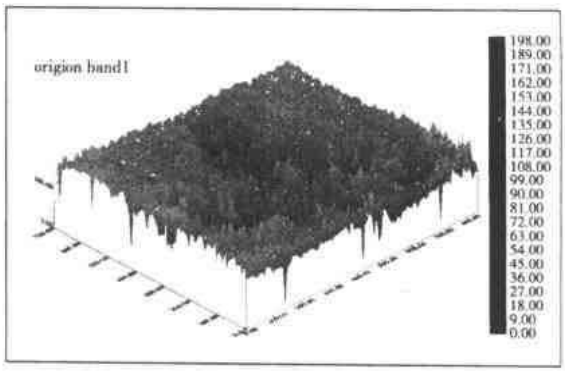


图 2－12　TM1 波段数据能量场趋势面

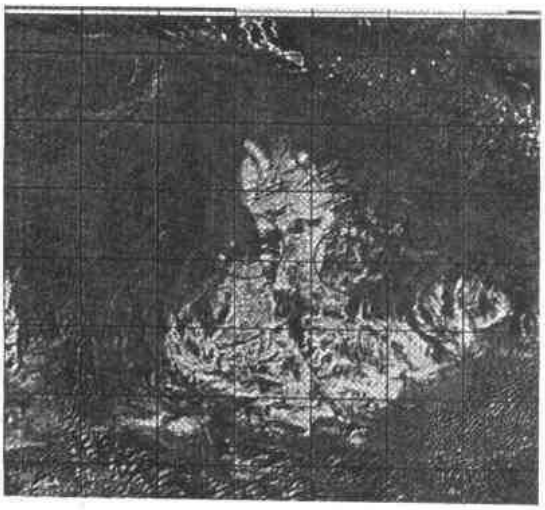


图 2－13　TM147 波段分别求反后的合成图像

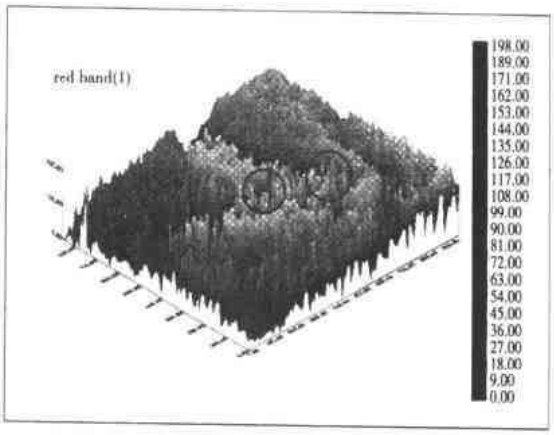


图 2－14　TM1 波段数据能量场趋势面图

§2.3　黑体中波－热红外波谱域

在短波红外－中红外长波谱段，太阳辐射的作用逐渐减弱，而地表物体吸收太阳热能产生的热辐射能量效应逐渐增强，地形影响也随之减弱。在这种条件下，地表物体可以看成是 Lambertian 体。在更长的热红外光谱域，太阳的辐射能量已经不在是重要的因素，而经过太阳辐射的地表物体发出的热能便成为主要热辐射能。这里提到的地表物体热辐射能不包括由其他原因造成的热辐射，如森林火灾、火山爆发等。

2.3.1　热红外辐射

根据分子动力学原理，任何超过绝对零度的物体都会产生热辐射，遵照 Planck 辐射方程。在自然条件下，多数物体是灰体，其光谱辐射可能不表现为黑体，这是因为灰体辐射是波长的函数。

2.3.2　热红外辐射组分

散射组分，见图 2－15。

辐射组分，见图 2－16。

传感器响应的热辐射总量，

$$L_\lambda^e = L_\lambda^{eu} + L_\lambda^{ed} + L_\lambda^{ep} \tag{2-11}$$

传感器中红外谱段响应的总辐射能量为，

在传感器（MWIR）：

$$L_\lambda^{mwir} - L_\lambda^s + L_\lambda^e \tag{2-12}$$

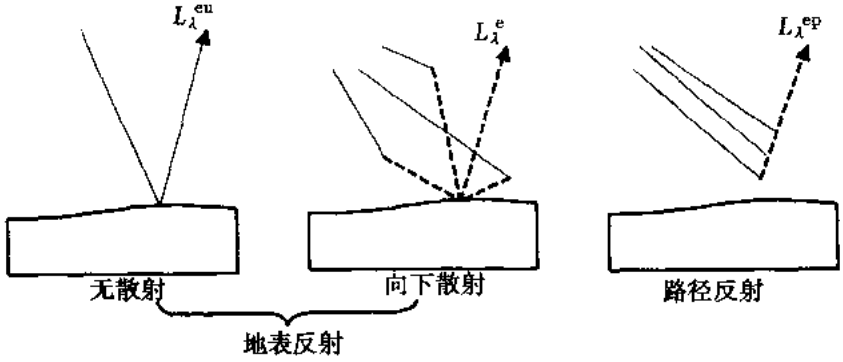


图 2－15　传感器接收到的散射组分

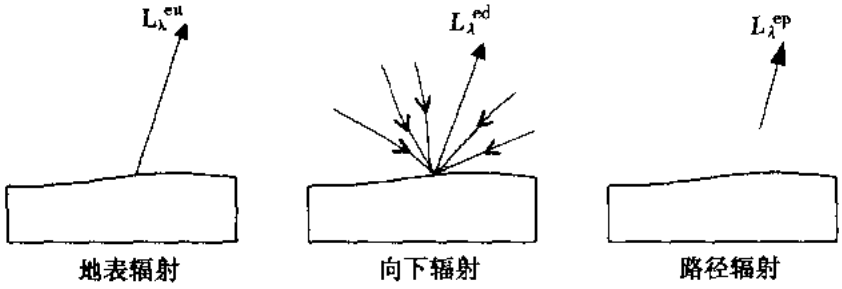


图 2－16　传感器接收到的辐射组分

式中 L_λ^s表达的物理量与公式 2－10 中的物理量相同，在 8～15μm 谱段，当来自太阳的辐射能量与地表物体发射的热辐射能量相比，可以忽略不计时，上式可以改写为，

在传感器(TIR)：　　$L_\lambda^{tir} = L_\lambda^s$　　(2－13)

(1) 地表发射组分 (L_λ^{eu})

热红外遥感将地球作为基本热辐射体，地球平均辐射能量为 300K。地球在吸收太阳辐射能量后，表层上不同地物均具有不同程度的辐射热能，即便是两种相同温度的地物也可能发出不同的热辐射能量。自然界中多数物体不是绝对黑体也不具备黑体 100% 的辐射热能的效率。比发射率 ε (emissivity) 是衡量物体辐射热红外的作用的重要指标，是灰体辐射量与同温黑体的辐射量的比值（陈述彭等　1998）。黑体的 ε 值恒等于 1，灰体的 ε 分布在 0 与 1 之间。地球辐射热能用下面公式表达，

地球表面：　　$L_\lambda \approx \varepsilon(x,y,\lambda)\dfrac{M_\lambda[T(x,y)+b_\lambda]}{\pi}$　　(2－14)

公式中，地表不同物质存在具有不同的温度，具有不同的光谱辐射能量。为了区分比发射率与温度关系，一般假设地物在空间上是变化连续、平缓。例如在利用热红外传感器测定城市建筑辐射热量，一般假定建筑屋顶的材料是相同的，这样才能估算出建筑的热量流失；在地质探测应用中则相反，一般假定地质体温度是确定的来估算地质体的比发射率。实际上这两个参数对热辐射能量均起到作用，因此，在确定单一影响因素时，应当设法减少一个参数的影响（Schowengerd　1997）。

2－14 式表达热量辐射和温源的关系不明晰，为了加深对两个参量的理解，编制了热量

辐射和温源关系图，图 2－17 表明了在发射率为常数的条件下，辐射造成的温度在 TIR 谱段光谱存在三个特征位置，地球表面的白天与黑夜温度变化范围在 250～320K 之间，可以看出在这个变化范围光谱辐射与温度呈线性关系。根据这一关系可以将公式 2－14 改写为，

地球表面：
$$L_\lambda \approx \varepsilon(x,y,\lambda)\frac{a_\lambda[T(x,y)+b_\lambda]}{\pi} \tag{2-15}$$

公式中，a_λ 和 b_λ 在波长中的作用相对较弱。实际应用中，各遥感各波段探测的是各种参量的平均值。公式 2－15 将温度线性化表达辐射与温度之间的关系。

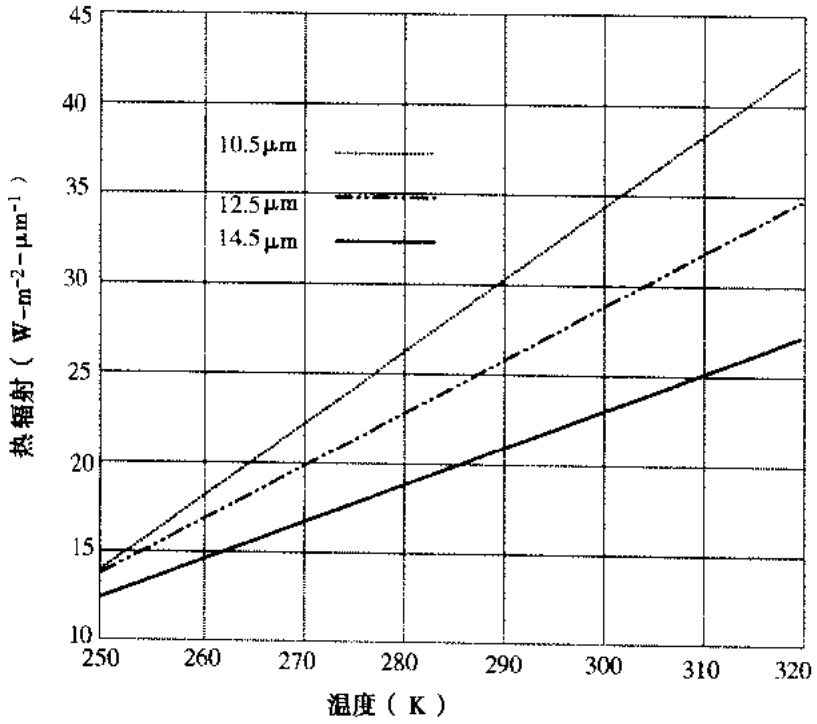


图 2－17　地球表面光谱辐射与温度的关系图

从地球表面辐射发射的能量沿着卫星观测路径通过大气到达传感器，达到传感器端的能量可以表达为，

在传感器端：
$$\begin{aligned} L_\lambda^{su}(x,y) &= \tau_w(\lambda)L_\lambda(x,y) \\ &= \varepsilon(x,y,\lambda)\frac{\tau_\lambda[a_\lambda T(x,y)+b_\lambda]}{\pi} \end{aligned} \tag{2-16}$$

图 2－18 表示了 2.5～14.5μm 的大气传输，图中展示了 4 个可被用于卫星遥感探测的窗口。图 2－19 太阳能量曲线在 2.5μm 迅速下降就说明了太阳辐射在该谱段变化不大。

（2）地表－大气辐射组分（L_λ^{ed}）

大气中滞留了一部分的太阳辐射能量，这部分能量向地表传输，然后返回到传感器，这部分辐射能量也是地表辐射能量的一部分。大气辐射组分也是散射天光的一部分，表示为，

在传感器端：
$$L_\lambda^{ed} = F(x,y,\lambda)\rho(x,y,\lambda)\frac{\tau_\lambda(\lambda)M_\lambda^a}{\pi} \tag{2-17}$$

式中 M_λ^a 是指大气的辐射能，参量 F 是从地面（x，y）到天空半球 π 的分数，与公式 2－9

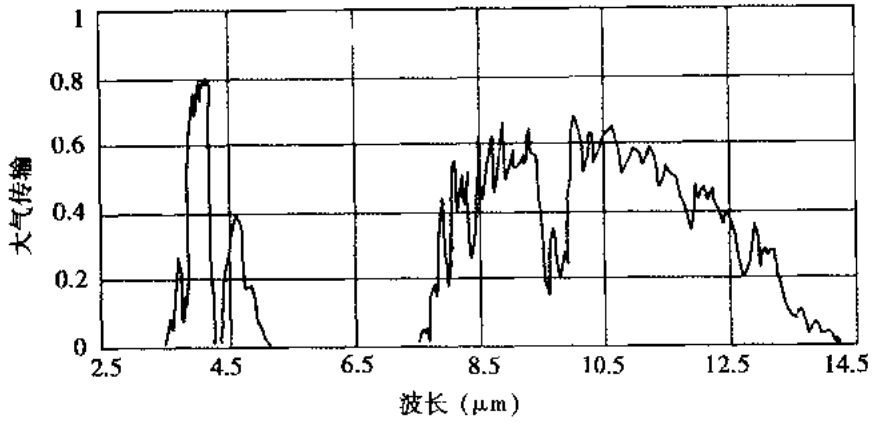


图 2－18　太阳角 45°时大气传输曲线图

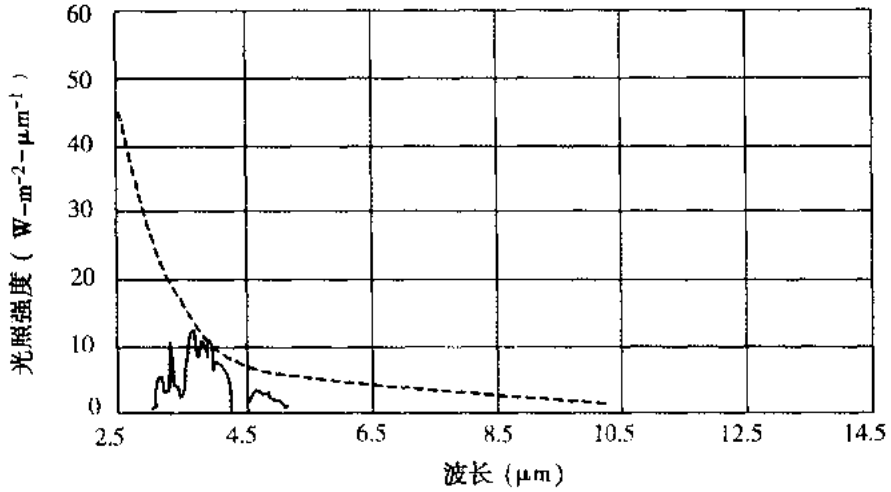


图 2－19　太阳角 45°太阳辐射能量曲线

中反射天光的参量作用相同。

Kirchhoff's定理解释了在没有地表透射条件下，地表辐射能量与比辐射率之间关系，

$$\rho(x,y,\lambda) = 1 - \varepsilon(x,y,\lambda) \qquad (2-18)$$

公式 2－18 适用于任何光谱域。该公式中（$\varepsilon \cong 1$），这也说明任何物体当它是很好的反射体，就不可能是很好的辐射体，相反也成立。在理想条件下，该公式可以代替公式 2－17。

（3）路径－辐射组分（$L_\lambda^\uparrow$）

大气层存在温度垂直分带现象，同时大气不仅向地面发出辐射能量，而且还向太空发出辐射能量。大气层的这些特点也反映了传感器接收到的辐射信号随观测轨道高度不同有不同的情况出现。遥感轨道高度不同大气层的温度和各种辐射能量的累加量不同；观测角度不同也造成传输路径的增加，当观测角度大于或等于 20°时，路径－发射组分将会增加。另外，地表发生森林大火时也会较大地改变地面上大气的温度。

(4) 传感器响应的地表和大气辐射能（L_λ^e）

传感器响应的总热辐射能量信号是前面介绍的三种组分的线性叠加。

在传感器端：
$$L_\lambda^e = L_\lambda^{em} + L_\lambda^{ed} + L_\lambda^{ep}$$
$$= \varepsilon(x,y,\lambda)\frac{\tau_v(\lambda)}{\pi} + [\alpha_\lambda T(x,y) + b_\lambda]$$
$$+ F(x,y,\lambda)\rho(x,y,\lambda)\frac{\tau_v(\lambda)M_\lambda^e}{\pi} + L_\lambda^{ep} \quad (2-19)$$

2.3.3 传感器接收的反射、辐射总能量

太阳总热辐射 L_λ^s 与地球表面辐射 L_λ^e 的总能量公式，

在传感器端：
$$L_\lambda(x,y) = L_\lambda^s(x,y) + L_\lambda^e(x,y) \quad (2-20)$$

公式中，L_λ^s 和 L_λ^e 的组成和物理意义与公式 2－10 和 2－9 相同，公式中的 L_λ^s 在热红外中可以忽略，L_λ^e 在可见光和近红外也可以忽略；在短波红外和中红外二个参数均非常重要，取值范围决定于地球表面反射和辐射等因素。

传输路径的物理和化学条件随高度变化，当大气温度随高度增长变低时，路径反射、辐射组分具有向长波方向漂移的特点。但在传感器端接收到的信号是全路径的混合信号。因此，传感器全路径反射、辐射能量对地表温度信号也不会出现纯黑体的特征曲线。

2.3.4 热红外波段卫星遥感图像

地球表面平均辐射温度为 300K，当辐射能量传输路径的高度增加时，温度环境也急速下降，即便是在白天，云层的温度要比地面冷得多。图 2－20 是我国湖南省某地的陆地卫星 5 的热红外图像，热红外波段 TM6 的地面分辨率为 120m，图像中的云为黑色是因为热红外波段的辐射能量被水汽吸收。图 2－21 是同景数据近波红外图像，红波段 TM3 的地面分辨率为 30m，图像中的云为白色是因为红波段的反射云信息。热红外波段 TM6 展现的是亮温信息也可以反映“城市热岛”效应，图 2－22 中黑色为北京城区和郊区，图 2－23 中白色为北京城区和城区四个角线性延伸区域，两图黑和白区域相比黑色区域面积要略小，这表明热效应从城中向城郊逐步扩散，城市热效应图像可以为合理城市布局提供科学决策依据。

在夜间最能发挥热红外的图像信息效果，所以，我国环保部门利用夜间热红外图像来监测长江沿岸的生活和工业排污；城市规划部门利用这一时间段的热信息图像监测城市热岛和建筑的热能渗漏问题。

热红外卫星（ASTER）是全球变化系列探测器（TERRA）中，地球表面热红外辐射能量探测传感器，于 1999 年 12 月发射成功。ASTER 与 CERES、地球生物圈与陆地、海洋相互作用探测器（MOPITT）、36 个波段的 MODIS 探测器以及多角度（9 个角度）探测器（MISR）构成了对地球探测体系（EOS）。EOS 的目的是探测全球变化和导致全球变化的原因，为人类了解地球生命支撑系统各圈层相互作用、变化规律提供空间科学探测数据。彩图 2－3 是夏威夷 ASTER 热红外图像，图像中不同时代形成的熔岩表现出不同的颜色，这个信息可以帮助了解熔岩喷发的历史和如何避免未来发生喷发可能造成的危害。



图 2－20　TM6－120m 分辨率热红外图像中云为黑色



图 2－21　TM5－30m 分辨率图像中云为白色

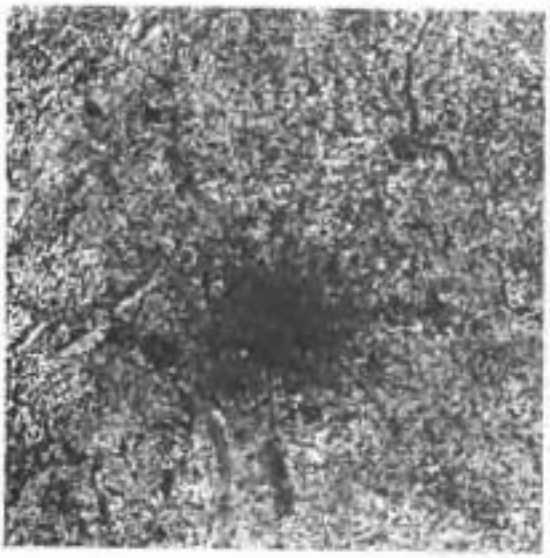


图 2－22　北京 1987 年 7 月的 TM6 热红外热岛图像

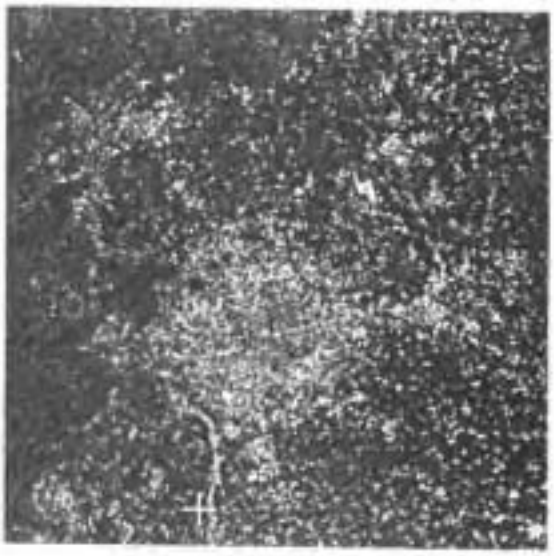


图 2－23　同景 TM4 近红外光谱发射图像

参 考 文 献

Teillet, P.M., G. Fedosejevs.1995. On the dark target approach to atmospheric correction of remotely sensed data.Canadian Journal of Remote Sensing 21 (4): 374－387

Schowengerd, R.A., 1997. Remote sensing models and methods for image processing, Chapter one, ACADEMIC press

陈述彭，等 .1998. 遥感大词典 . 北京：科学出版社

陈述彭，童庆喜，郭华东主编 .1998. 遥感信息机理研究 . 北京：科学出版社

李小文 .1989. 地物的二向性反射和方向谱特征 . 环境遥感 . 4(1):67～72

李小文，王锦地 .1995. 植被光学遥感模型与植被结构参数化 . 北京：科学出版社

李小文，王锦地，Strahler, A.H.1994. 不连续植被及其下地面对光谱辐射的吸收与反照率模型 . 中国科学，24 (8)：828－836

周克定，张萧文等译 .2000. 电磁场与电磁波 . 北京：机械工业出版社

第三章　传感器模型

§3.1　概　述

根据不同的应用目的，来配置卫星传感器的有效载荷。目前气象卫星、国土资源卫星和海洋卫星已经成为世界卫星大国的三大持续发展的系统。这三大卫星系统的传感器有效载荷各不相同，又有各自的特点，构成了对地球表层，包括陆地、海洋和大气层辐射、反射、散射的能量的探测。传感器响应的信号仅是地球表面辐射、反射信号总能量的一部分，是原始信号沿路径选择性的传输和接收。理解这种选择性传输和接收有助于正确选择波段、图像处理方法、解释数字图像处理结果以及指导图像处理算法的开发。本章内容包括遥感传感器波段探测的反射、辐射电磁波信号特点以及数字图像几何校正等。

§3.2　光学传感器模型

传感器的应用目的，模拟/数字转换器（A/D）等决定了传感器中各波段记录的地球表面反射、辐射能量载荷、信号的表达形式和特征。在这个过程中，首先，将空间分布的光信号转变成连续时间域的电信号，然后将电信号再经过模拟/数字转换器（A/D）转换成标准化的离散数据（DN值），最终使用DN_{ij}值矩阵来表达数字图像。这个遥感信号形成过程可以概括为光学传感器模型，见图3-1。

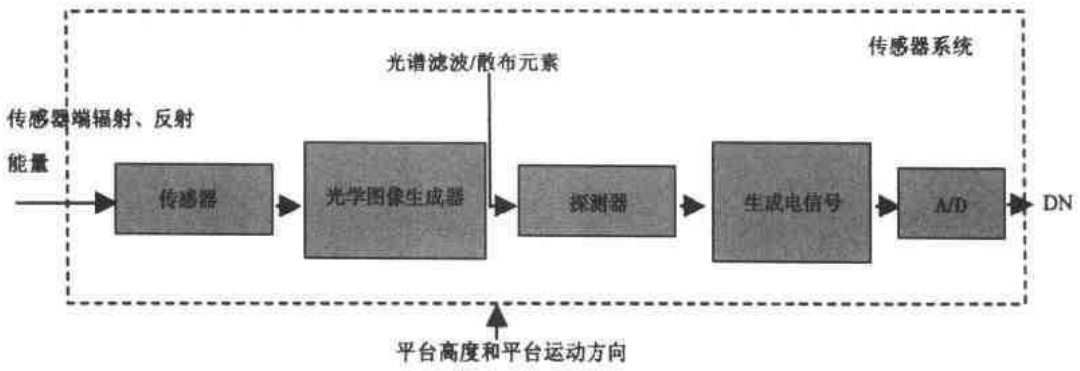


图3-1　一般光学传感器探测的模型

3.2.1　分辨率与仪器的响应

在遥感科学领域中，分辨率被误用和错用率是最多的。分辨率传达了很强的直觉含义，很容易错用和混用。从一般意义上讲，包括遥感探测器在内的所有仪器，不可能精确无误地测定物理信号。如果信号随光谱变化，仪器需要在一个非零光谱宽度上均化；如果信号在随

时间变化的条件，探测器需要在一个非零响应时间上均化；如果信号随空间变化，仪器需要在一个非零空间上均化。公式 3－1 表达了多种类型仪器输出端的状态，

$$0(Z_0) = \int_W i(\alpha) r(Z_0 - \alpha) d\alpha \qquad (3-1)$$

式中，i（α）为输入信号，r（$z_0 - \alpha$）仪器响应，由参数 Z_0 决定该项的变化，0（Z_0）是在 $Z = Z_0$ 位置的输出值，W 为仪器响应强烈的取值范围。3－1 式解释了仪器权重输入 0（Z_0）与邻近（W）信号的状态。假设赋予 Z_0 连续变化值，上述关系就变成卷积，表达为，

$$0\ (Z_0) = i\ (\alpha) \times r\ (\alpha) \qquad (3-2)$$

式中输出信号、输入信号与卷积相同，（3－2）数学式可以作为描述探测仪器的通用表达式，在遥感技术系统中常称为空间和光谱响应表达式。

3.2.2 空间分辨率

传感器的空间分辨率（像元尺度），一般被看做是 GIFOV。像元光谱是像元中不同种类地物反射光谱的线性叠加，分解出的像元光谱定义为端元组分光谱。遥感探测器对端元组分的识别取决于构成端元组分物质的形状、性质、颜色等特性、特征以及地形等外部条件，所以，像元光谱是一个相对值。一般来说，当遥感探测目标的反射光谱与背景的反射光谱能量有一定反差时或目标小于 GIFOV 时就可以被记录下来。这就是为什么 TM 图像中的道路、河流上的桥梁、铁轨等目标远小于像元 30m 的尺度，都可以显示出来的直观因素。也有的情况是，理论上目标应当能被探测记录，但是实际上分辨不出来或分辨不清楚，这说明遥感像元空间分辨率是相对概念。

图 3－2 是 1996 年 7 月接收的浙江省沿海海水养殖池 TM5 波段图像，图（a）像元为 30m×30m 图像，图（a）中显示的最细池边宽度为 1m 左右（仅为像元边长的 1/30），也可以清晰可见。图（b）为放大 4 倍的图像，图（c）为放大 8 倍的图像。随着图像像元放大、图像清晰度减弱。这个放大过程说明，为了保持目标在图像中的清晰度，需要选择合理的像元空间分辨率和最终成图的像元尺度。

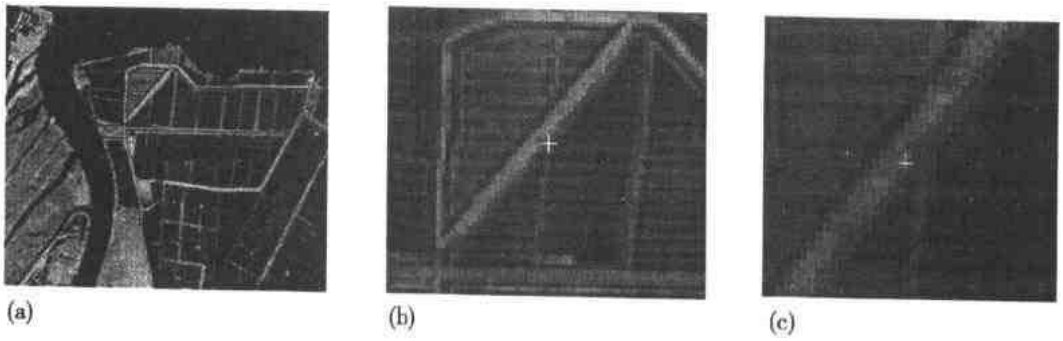


图 3－2 浙江沿海盐海水养殖池场 TM5 图像像元放大倍数与目标清晰度

为了进一步理解遥感分辨率的相对性，假设有这样一个传感器直接接收的是地面反射信号，地物面积大于 GIFOV 覆盖面积，这个地物没有反射信号，因此 DN 值为零，同时也有

这样一种地物反射率为255。如果这两种地物同时出现在一个GIFOV中，这两种反射率代表两种地物。在传感器端响应的信号包括目标和背景反射和散射（两种混合）的光谱。不同反射率地物在GIFOV中的相对面积也会影响像元的DN值。如果一种物体在GIFOV中所占面积的相对比例为50%，DN值应当为128；如果更明亮的物体占GIFOV面积的10%，这时DN值应当为26。既然传感器可以以一个像元单位识别两个不同DN值的物体。经过实验，在没有噪声干扰和黑色背景条件下最小识别为像元面积的4%的明亮物体(Schowengerd 1997)，见图3－3。

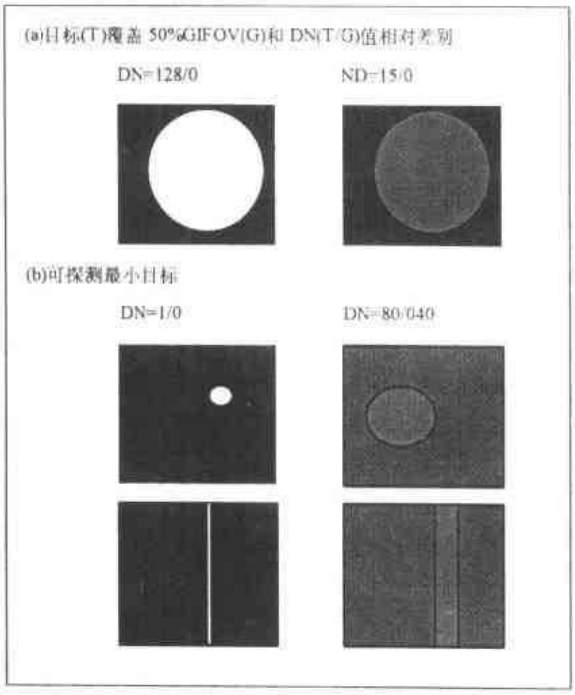


图3 3 理想条件下，传感器对目标与背景探测能力示意图

下面用更贴近自然的状态来描述地表物体反射与像元之间的关系。假设相对较黑的背景的反射率为4%，目标反射率为8%，产生的对灰度的比度为2:1。如果目标占GIFOV的50%，背景的DN值为10，像元的DN值为15时，还存在5个灰度级的不同，二者可以被区分，上述情况下，如果目标占GIFOV的10%就难以探测到了。

通过以上分析得知，背景和目标电磁反射能量的对比度、传感器的GIFOV和目标在GIFOV中所占的比例是决定图像识别能力的主要因素。如果传感器模型系统中掺入噪声(机械噪声)，那么目标与背景的区分域值则变高，区分能力降低。因此，背景与目标在像元中的对比度，应当是图像分辨率的重要影响因素。

在过去的文献中，讲到图像分辨率时，经常被忽略的是目标与背景在像元中的相对位置关系。这里提到的位置是指目标与背景在图像像元中的空间关系和占有的面积。实际上目标在图像中所占面积是一个最不确定的因素。不同空间尺度像元的集合与目标空间面积、形态均不同。按遥感识别能力分析结果，实际上对自然界中的同一种目标地物只需要识别其边缘即可，一般情况下，边界识别概率为±1/2个像元之间。图3－4中介绍了无数种位置关系中的两种，表示理想条件下像元集合目标与背景空间相位效应。图中四个GIFOV（像元）

和一个目标（圆形）之间的关系，目标面积是一个 GIFOV 面积的 50%。左图中目标被分成四等份，每份只占一个 GIFOV 的 12.5%。右图中目标与四个 GIFOV 的关系分别为 30%、13%、5%和 2%。如果目标占 GIFOV 的 50%将有 ±1/2 的显示概率。当边界切过多个像元的线性目标，即便是一个像元的一小部分也会得到很好的显示（Ma Jianwen at el 1991）。

目标与背景分析对于遥感数据分析和复杂目标的提取是十分重要的。假设目标是由一系列空间等宽亮条带构成，背景是黑色的，当传感器 GIFOV 的宽度与亮条带的宽度相同时，相位效应产生的效果是出现高亮度带，高对比度或出现全暗色带，没有对比度；如果 GIFOV 的宽度是亮条带的宽度 2 倍时将出现无对比度的现象。

相位效应还表现在同一景数据中的像元由于 GIFOV 角度的不同造成的目标体位移。

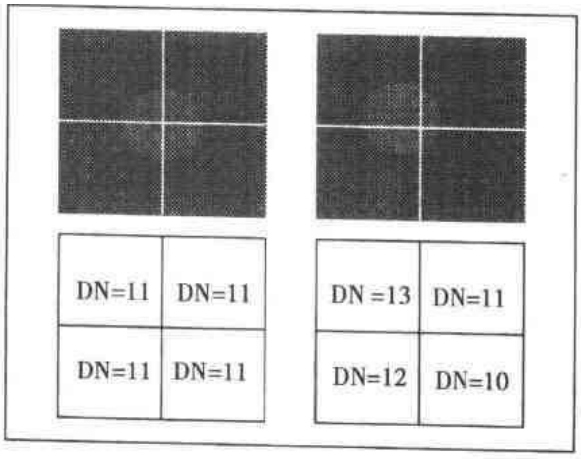


图 3-4 理想条件下不同像元之间目标与背景空间位置效应

图 3-4 沿着 GIFOV 边界扫描角度为非 90°时也产生相位效应，使得在不同一剖面线不同 GIFOV 角度的观测的像大小发生一些变化。此外，叠加上地形的影响情况就更为复杂，所以有人认为对目标的反演是一种“病态反演”。

3.2.3 传感器响应与临边效应

每一个传感器波段探测的总能量是卫星遥感过顶飞行是接收到图像反射、辐射的总权重（公式 3-5），这个权重决定了传感器识别光谱细节的能力。为了解释上述结论以矿物光谱为例（第一章），明矾石的 OH 的两个吸收峰出现在 1350～1550nm 之间，用多光谱传感器数据来模拟。1/2 的双峰仅有 10～20nm 宽，这两个吸收峰之间的间隔有 50nm。如果允许 10nm 宽，间隔 10nm 的多波段（峰响应仅有 50%）测量，每一个权重将有足够的反射率信息，见图 3-5。如果使用 50nm 宽的光谱波段测量这两个吸收峰将被均化掉；如果光谱波段没有重叠，见图 3-5 中的 TM 波段 3、4、5 和 7，即便识别更为粗特征物体也造成阻碍。当然提高光谱分辨率，将增加数据量。

图 3-6 表示传感器接收的辐射权重值。通过波谱积分便可以得到每个波段的有效辐射量。图中的实线表示反射光谱曲线；虚线表示 TM 波段对权重光谱的贡献；黑点为总权重光谱贡献中的有效辐射能量，包括来自相邻波段的光谱的贡献。我们将波段之间的重叠光谱贡献定义为遥感数据的光谱“临边效应”。

宽光谱波段对自然界中物质响应曲线是比较平滑的，没有细微的变化，如植被和土壤的反射率曲线。为了更好地了解小尺度物质光谱吸收特性、生物化学的相互作用和植被中的纤维素、木质素和蛋白质等，应当使用分辨率更高的传感器。对不同目标探测和表达分辨率能力时光谱波段位置与波段宽窄同样重要，在可选波谱波段方面，高光谱提供了相对连续和更多波段的选择。

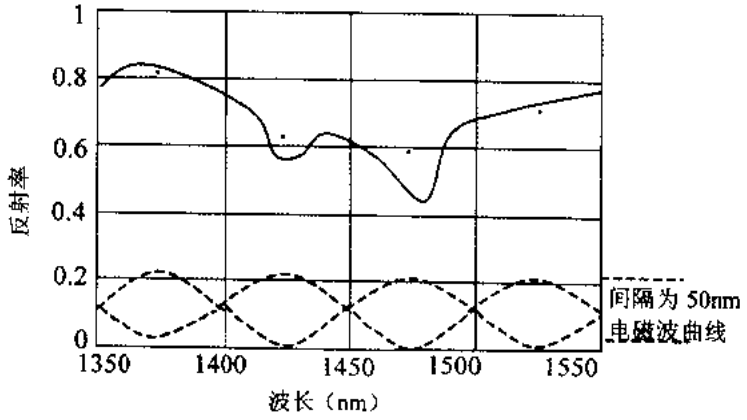


图 3－5　多光谱传感器探测明矾石有效辐射光谱

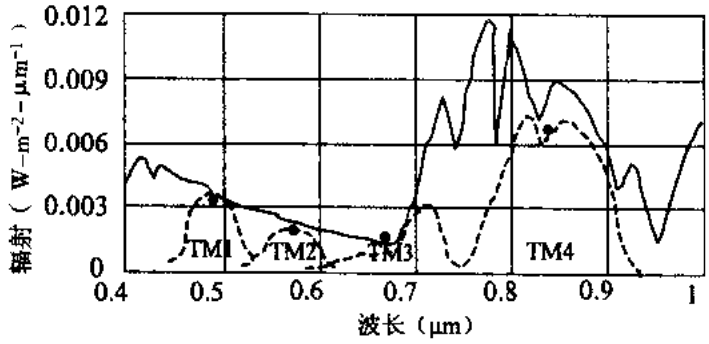


图 3－6　到达传感器端的辐射能量

§3.3　光谱响应

第二章中大量的公式和插图描述了到达传感器端的辐射能量和通过光/电信号转换器转换成图像数字信号的过程。探测器端反射辐射信号与照相机镜头辐射 L_λ 相关，可表示为，

$$\text{在镜头端：}\ E_\lambda\ (x,\ y) = \frac{\pi\tau_0\ (\lambda)}{4N^2} L_\lambda\ (x,\ y) \qquad (\mathrm{W-m^{-2}-\mu m^{-1}}) \tag{3-3}$$

式中 N 是光学聚焦 f 长度值，由光学聚焦长度与孔径直径端点的比取得。可以简单的理解为地球表面和遥感成像面的几何距离。

$$m = f/H \tag{3-4}$$

在同一坐标体系中采用（x，y）表示镜头和图像；多数传感器系统中，光学转换

τ_0（λ）一般较大于90%或更高，光谱曲线比较平缓。采取了多光谱滤波或波谱分光的方法，将接收到的能量分解成不同的波段。如TM光删滤波器将接收到的总能量经过多条路径分配到6个不同的光谱波段。这个分解过程称做光谱响应度R_b（λ）。信号s_b被b波段响应的表达式为，

$$S_b(x,y)=\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R_b(\lambda)F_\lambda^i(x,y)d\lambda \quad (w-m^2) \tag{3-5}$$

式中λ_{max}和λ_{min}决定光谱波段的灵敏度。

公式3-5定义了接收到的综合光谱和光学/电转换器转换的电流。R表示安培数$-W^{-1}$或瓦数$-W^{-1}$。图3-7中展示了不同遥感传感器的光谱响应。

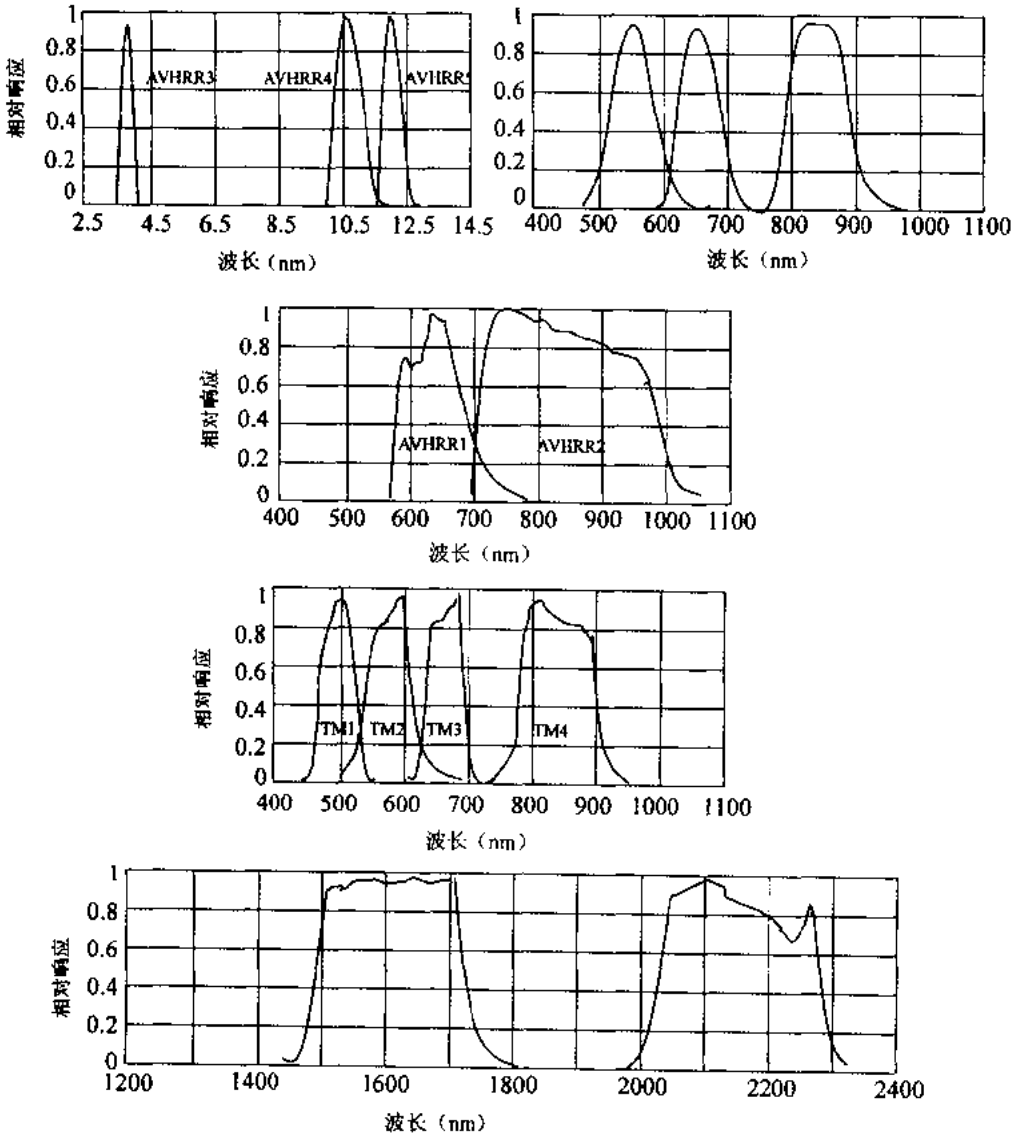


图3-7 AVHRR、SPOTT和TM传感器归一化的光谱响应

§3.4 空间响应

空间特征变化可以归结为：光学透镜、探测器和电子学原因造成的图像模糊；几何畸变。本节主要集中讨论空间模糊问题。

传感器接收到的数字图像并不能100%地反映地表的空间状态。与场景中分布较大面积的和反射率高的地物相比分布面积小、反射率低的地物中的细节被抑制和模糊了。这种模糊效应是由于传感器点扩展函数（PSF_{net}）造成的。PSF_{net}表达了传感器的空间响应是空间卷积的权重函数（公式3-1），空间卷积信号是探测器获得的电磁信号e_b，

$$e_b(x,y) = \int_{\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} \int_{\beta_{min}}^{\beta_{max}} S_b(\alpha,\beta) PSF_{net}(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta \tag{3-6}$$

公式表达的空间重叠与公式3-5描述的光谱重叠有些相似。这两种情况均表达了传感器响应的物理信号取权重函数的理由，其测量值也是综合值，具有权重特点的物理信号。点扩展函数同时也表达了空间“临边效应”。在当前情况下，积分限定义为PSF在坐标（x，y）的空间扩展，公式左项仍然是坐标（x，y）的函数。在权重物理信号被重采样之前，形不成按坐标表达的离散像元。

PSF由以下几种成分构成：①光学PSF产生的模糊；②图像位移PSF，在透镜形成图像的过程中，对像元复合中产生的位移；③由探测器增加的模糊成分；④被探测的电磁信号再一次被弱化，图3-1中表示了这个过程。下面就以TM数据为例来说明传感器模型中的参数，虽然这些参数在发射卫星之前已经在实验室中反复测试过，但是卫星运行过程中也免不了对设计参数的调整。

一个重要的假设是，净2-D传感器，跨轨和顺轨方向产生2个1-D PSF，

$$PSF_{net}(x,y) = PSF_c(x) PSF_i(y) \tag{3-7}$$

从这个意义上讲，净PSF是可分的。实际应用中有效的可分性取决于传感器种类和目标的种类，同时也要满足简单1-D矩形函数关系和2-D矩形、高斯函数关系。

简单1-D矩形函数关系（图3-8表示）为，

$$\text{Rect}\ (t/W) = \begin{cases} 0 & |x/W| > 1/2 \\ 1/2 & |x/W| = 1/2 \\ 1 & |x/W| < 1/2 \end{cases} \tag{3-8}$$

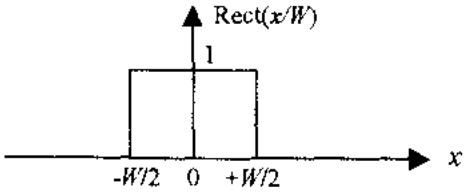


图3-8 说明公式3-8的几何关系

公式中的W是宽度，边缘函数值取值并不严格。

当可分函数出一个二维向量定义时就产生了二个结果。一维垂直函数，

$$f(x,y)=f_1(x)f_2(y) \tag{3-9}$$

那么，二维矩形函数表示为，

$$\mathrm{Rect}(x/A,y/B)=\mathrm{Rect}(x/A)\mathrm{Rect}(y/B) \tag{3-10}$$

见矩形体，(图 3-9) 为，

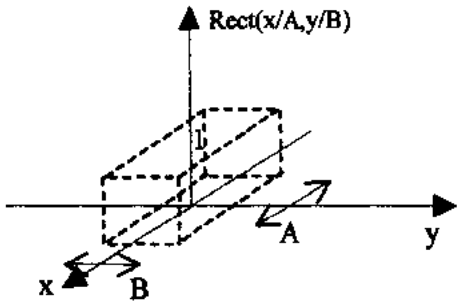


图 3-9 公式 3-10 的几何关系

一般认为二维矩形函数模型描述单波段探测元素是比较合理的，其合理性体现在，二维矩形函数排除了探测器之间灵敏度的非一致性或元素之间的交叉探测。

高斯方程也经常用来描述 PSF 的可分性，

$$\mathrm{gaus}\ (x/w)\ =\mathrm{e}^{-x^2/2W^2} \tag{3-11}$$

二维可分公式，

$$\mathrm{gaus}(x/A,y/B)=\mathrm{e}^{-x^2/2A^2}\mathrm{e}^{-x^2/2B^2} \tag{3-12}$$

这个公式不仅表达了可分性，在几何上当 $A=B$ 时的可旋转性。Gauss 数学模型常被用来表示传感器光学空间响应模型。

3.4.1 光学 $\mathrm{PSF_{opt}}$

光学 PSF 是空间能量分布形成的点源图像，如天空中的星星或暗室中的针眼透出的点光。由点光源形成的光学图像系统不会是完美的系统，因为能量发源于一个很小的聚焦平面然后扩散开来，扩散面取决于多种因素，包括光学衍射、光行差和机械组合质量等。

通用 PSF 光学模型一般采用高斯二维数学模型表达，

$$\mathrm{PSF_{opt}}(x,y)=\frac{1}{2\pi ab}\mathrm{e}^{-x^2/2a^2}\mathrm{e}^{-x^2/2b^2} \tag{3-13}$$

式中的参数 a 和 b 决定了 PSF 透镜分别代表垂轨和顺轨的宽度。

3.4.2 图像位移 $\mathrm{PSF_{IM}}$

如果图像动态通过探头，在每一个像元位置上叠合信号将产生图像模糊。对于横向扫描传感器 (Whiskroom)，图像沿垂轨移动其模型是矩形 PSF。

横向扫描传感器端：　　$\mathrm{PSF_{IM}}\ (x,\ y)\ =\mathrm{Rect}\ (x/S)$　　(3-14)

公式中 S 为，

$$S = \text{扫描速度 } v \times \text{叠合时间 } T \tag{3-15}$$

实际上如同 AVHRR 和 TM 横向扫描传感器的扫描速度是非常快的，以至于像元重合时间可以忽略不计。一般情况下由于 S 造成的像元重合模糊误差为 1/10 个像元。

推扫传感器，如 SPOT，重合时间造成的顺轨模糊，

推扫传感器端：
$$FSV_{IM}(x, y) = \text{Rect}(y/S) \tag{3-16}$$

式中 S 等于，

$$S = \text{飞行器速度 } v \times \text{叠合时间 } T \tag{3-17}$$

对 SPOT，等同于重合时间过程中位移一个 GIFOV，这也是该传感器最具特色的设计之一。

3.4.3 探测 PSF_{det}

传感器中每个探头的非零空间域造成的空间模糊。一般探头在对地扫描过程中不可避免地出现一些微小的偏移，对偏移的估计，

$$PSF_{det}(x, y) = \text{Rect}(x/\text{GIFOV})\text{Rect}(y/\text{GIFOV}) \tag{3-18}$$

式 3－18 表达了可分的函数，如果 GIFOV 在两个方向有差别，公式 3－18 将相应地进行修改。

3.4.4 电子学 PSF_{el}

探头得到的信号必须经过电子滤波减少噪声后的信号。由电子因素产生在扫描和读出信号时间维变化，这种对时间的依赖性可以转变成一个等同的对空间依赖的变量，

横扫传感器端：
$$x = \text{扫描速度 } v \times \text{采样时间间隔 } \Delta T \tag{3-19}$$

或

推扫传感器端：
$$x = \text{飞行器速度 } v \times \text{采样时间间隔 } \Delta T \tag{3-20}$$

用于 TM 的滤波为低通滤波，Butterworth 型滤波主要用于垂轨方向的扫描信号，通过滤波可以平滑垂轨扫描得到的信号。如 SPOT 传感器没有顺轨滤波，但是采用了数据每 10m 间隔顺轨叠合一次，其效果等同于滤波。

3.4.5 净 PSF_{net}

根据采样理论，净 PSF 是 PSF_s 的组分的卷积，

$$PSF_{net}(x, y) = PSF_{opt} \times PSF_{IM} \times PSF_{det} \times PSF_{el} \tag{3-21}$$

PSF_{net} 的宽度是 PSF 各组分 PSF_s 的宽度之和。

3.4.6 不同传感器 PSF_s 的比较

图 3－10 展示了三种传感器的总 PSF 图，其中 AVHRR 显示了传感器模糊作用在垂轨要比顺轨大两倍；所有 3 个传感器系统垂轨响应的宽度要比顺轨宽的。这一点结果是非常重要的，解释了从遥感图像中提取的像元光谱特征信息和目标信息。就是因为这种模糊作用，

遥感系统的GIFOV作用远大于几何意义上的GIFOV，如TM GIFOV是45m，而不是30m。这也是造成遥感像元之间“临边效应”的原因之一。

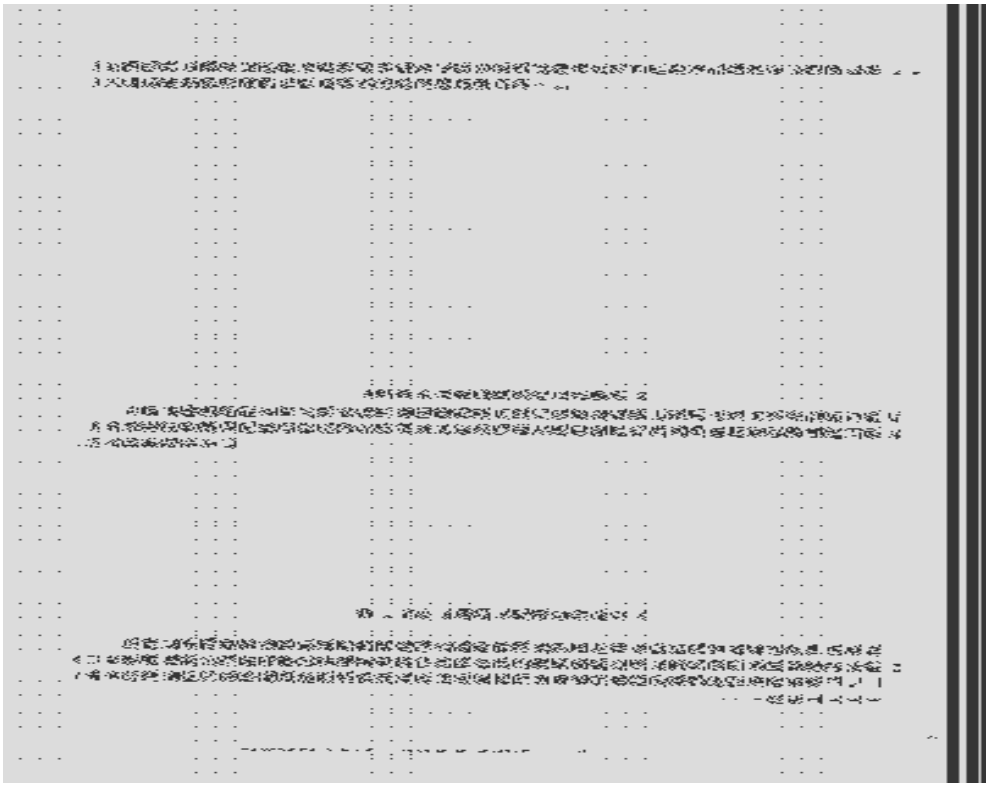
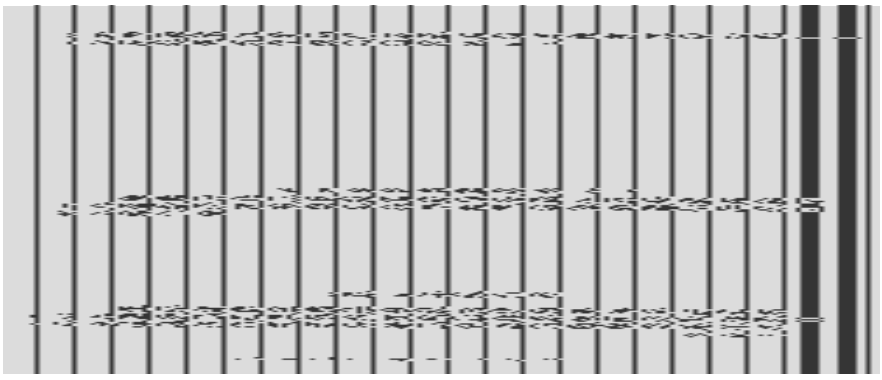


图3-10　三种传感器系统PSF图示

TM传感器的PSF。在TM遥感图像形成过程中，PSFs组分见图3-11所示。高灰度比例值说明高响应，黑色表明零响应。三张图分别表示透镜、探头和电子。其中探头宽度为30mGIFOV。



3.4.7　成像系统的模拟

成像系统的模拟主要目的是检验传感器参数设置的效果。一张航空照片有较小的GSI，GSI放大后建筑物和道路就难以辨认，这是由于初始图像就不具有细节，图像就不会有放大率，这种现象在显微镜下称做“空放大率”。同样，GIFOV也影响图像表达的细节水平。

为了解释传感器组分下降效果，用航空模拟的 TM 图像来说明 GSI 和 GIFOV 之间的关系。首先，经过几何校正，使图像与 TM 轨道相一致，这时图像可以表示空间分布的辐射能量。图 3－12 中的第一张模拟图像描绘了光学 PSF，图像表示在传感器端反射辐射能量的分布状态；经过扫描探测器 IFOV 图像被模糊了一些，如果再加上噪声模拟图像将变得更加模糊；最后电子滤波用来滤掉垂轨噪声；原始 2m 的 GSI 一直保持到最后，图 3－12 最后一张图像，TM 图像 GSI 就成为 30m。



光学透镜造成的模糊



光学透镜与探测器造成的模糊



光学透镜、探测器与电子造成的模糊

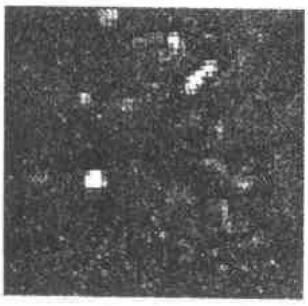


经过亚采样的 2 m、30 m GSI

图 3－12　系列模拟 TM 生成过程的航空图像，每一步都造成图像清晰度的降低



航空模拟 TM 数据



真实 TM



经过对比度调整的 TM

图 3－13　由图 3－12 中模拟图像放大的图像与真实的 TM 图像比

图 3－13 将放大的模拟 TM 图像与 4 个月后接收到的真实卫星 TM 波段 3 图像进行比较。航空模拟图像与 TM 图像作成相同空间分辨率，再经过调整就成为相似的两张图像。这里没有考虑电磁模拟，诸如太阳角度、阴影、大气条件和光谱响应等。

§3.5 遥感信号放大

波段 b 中的电信号 e_b 是经过电子 PSF_d 放大和过滤形成的。信号放大阶段使电信号足够大，送入 A/D 转换器对信号进行转换和定量化处理。确定电信号的增益与偏移通过 A/D 转换器后生成全覆盖范围的DN值，见图3－14。也有一些特殊的情况，如需要沙漠地区高反射辐射得到的增益值增加整幅图像的清晰度和分辨率。传感器分辨率的高低一部分原因就是增益值控制的。通过 A/D 放大的信号表示为 a_b 公式，

$$a_b = gain_b \times e_b(x, y) + offset_b \tag{3-22}$$

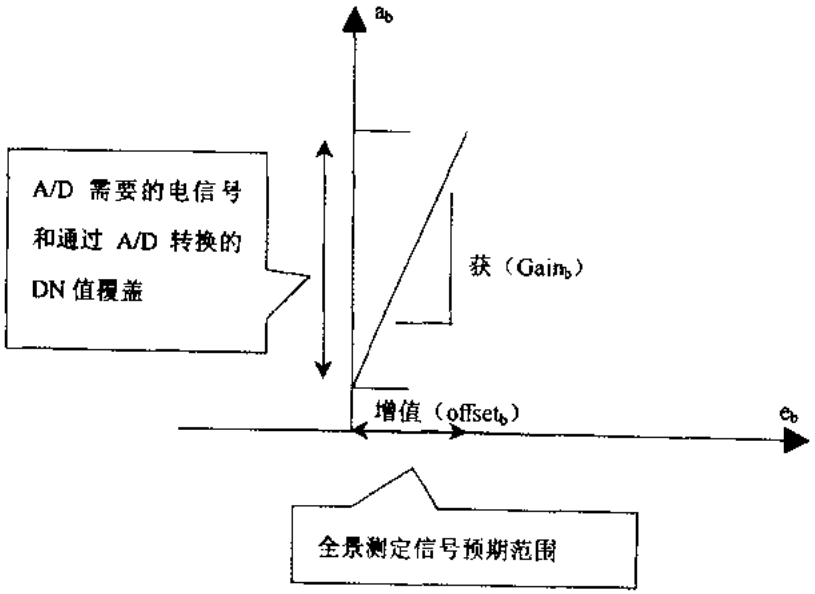


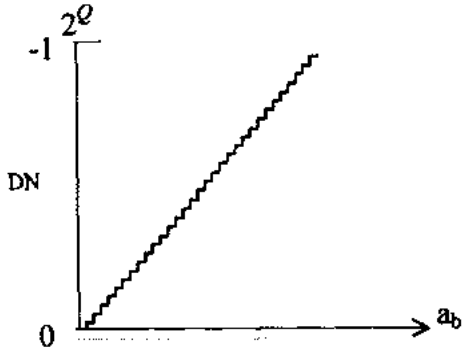
图 3－14 原始电信号 e_b 与放大信号 a_b 之间的关系

§3.6 遥感信号的采样与量化

通过 A/D 转换器，被放大和滤波的信号再次被采样和量化成 DN 值。一般采用线性量化器，见图 3－15。量化过程被称做取整 int [ ]操作器，操作器将输出的放大信号转变成最相近正整数。波段 b 像元最后的 DN 值为，

$$DNpb = int[\,] - int[gain_b \times e_b(x, y) + offset_b] \tag{3-23}$$

时空采样已经包含在 A/D 转变方程中，表现为在空间坐标中从连续到离散的转变过程。



输入到 A/D 转换器的信号

图 3－15　在 A/D 转换器 ab 和 DN 的信号比较

虽然在 DN 与 a_b 转变过程实际上是非线性的，但是这种非线性在中到高的信号范围是可以被忽略不计的，因为由非线性引起的变化占的百分比很小。但是定量化测量是非常重要的，详细研究时还需要考虑。DN 的数量由 bit/pixel$Q$ 决定，也决定了遥感系统的空间分辨率。通常由 2^{-Q}次方来定义电磁分辨率的反射辐射动力范围。

§3.7　简化的传感器模型

虽然公式 3－18 看起来比较简单，公式中包含了三重积分，一个积分表示在 3－5 公式中的系统光谱响应；另外两个积分表示系统空间响应，x，y 公式 3－6。一个简化的公式 3－23经常被使用的公式。传感器的光谱响应 R_b（λ）是一种光谱波段对比度的平均效果。同理，传感器空间响应 PSF（x，y)是 GIFOV 的平均效果。两种因子可以从积分项中去除掉。于是，

$$DN_{pb} = int[k_b \iiint L_\lambda(x,y)\,d\lambda\,dx\,dy + offset_b \qquad (3-24)$$

公式中，探测器响应函数和其他一些影响因素一同被表达为 K_b。积分公式 3－24 概括了有效的光谱波段和有效的 GIFOV。这个结果展示了 DN 之间在传感器端的线性关系，如果用 L_{pb}代替中间项，空间位置特定一个像元时，公式可以进一步地简化为，

$$DN_{pb} = K_b L_{pb} + offset_b \qquad (3-25)$$

公式简练地说明了图像中 DNs 与传感器端的反射辐射能量和在 GIFOV、有效光谱波段的积分。公式的反求就可以通过已知图像 DN 求得传感器的值。当然精确的传感器的值还应当考虑到大气影响、地表变化等因素。

§3.8　几何畸变

前面介绍的是关于传感器特征与电磁波的关系对遥感图像质量的影响问题，回答图像中

包含的是什么，为什么。另外，需要回答的问题是图像中展示的内容在哪里，回答空间位置的准确性问题。这个问题是图像几何问题，主要内容包括卫星轨道、平台高度、传感器质量、地球自转和形状等。

在理想条件下，静止测图框架和静态地物，按一定网格照相测定地物也是平坦的，这时得到的照片几乎是没有畸变。如果现在的传感器按推扫方式通过地表，姿态速度平稳、高度不变，结果图像对应于设计的几何行和列，遥感原始图像的行和列与地理坐标的经纬度是不同的，在我国 TM 图像与经纬度的夹角不同一般在 9°～10°。

3.8.1 卫星轨道模型

一般地讲，对地观测卫星的轨道设计近似为圆形，这样可以保证遥感图像保持同样的比例尺。如果精确地计算，卫星轨道是椭圆形的。卫星的飞行速度是保持不变的，陆地卫星的速度是 1.0253×10^{-3}rad/s。当卫星在地球上空极轨和近极轨飞行时，地球自转使卫星轨道向西偏移，几天后便可以覆盖整个地球表面（图 3－16）。不同卫星平台的飞行姿态、高度和速度均是不可以忽略的影响因素。这些难以克服掉的因素可以通过对接收后的数字图像处理来解决。



图 3－16 NASN 设计的地球观测卫星轨道图

3.8.2 遥感平台姿态

平台姿态的稳定与精确直接影响到遥感数据产品的后期使用。根据角度几何学原理，卫星传感器对地角度的微小变化就会在地球表面导致极大偏差。为了说明这一点，例举两颗卫星图像像元之间的 GSI 计算结果，表 3－1 说明在卫星上的微小变化就会导致地面上一个像元的误差。

表 3－1　　传感器 2 个相邻像元点角度

卫星系统	高度（km）	顺轨 GSI（m）	传感器点角度（mrad）
AVHRR	850	800	0.941
TM	705	30	0.0425
SPOT	832	10	0.0123
SPOT－XS	832	20	0.024

为了实现特殊任务要求，一些新卫星传感器技术实现了改变轨道高度和改变视场角度，实现了用一颗卫星获取局部更高分辨率图像和多角度卫星图像，但是对卫星系统处理提出了更高的要求。

卫星姿态模型可用三个方向的角度变化控制图 3－17。使用三轴稳定技术将卫星平台姿态的变化控制在一定精度范围。实际操作过程中，滚（roll）、偏荡（yaw）和倾斜（pitch）变化被记录在数字图像中。这些数据一般是不提供给最终用户，是系统处理的基本参数。数据产品可以选择不同的格式，选择合适的数据格式对于更精确的几何校正和图像恢复是非常重要的。

航空传感器平台受气候因素的影响很大，所以航空遥感必须选择良好的天气和适合的高度以避免飞行姿态的强烈变化。

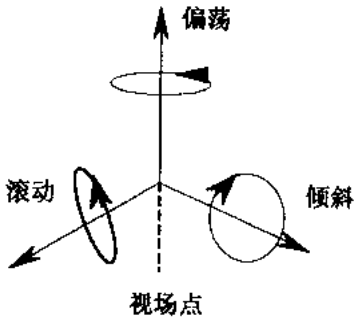


图 3－17　通常传感器使用的三轴稳定模型

3.8.3　传感器模型

由传感器造成的畸变是系统时间的函数。这种影响一般表现为沿扫描线正弦曲线状的像元位移，位移以传感器中心点向两边摆动，差最大约为 ±400m。畸变一般是系统性的，所以纠正起来也比较简单。

由于横向扫描传感器系统比推扫传感器系统的动态部件多，所以导致传感器畸变的可能性要大。在垂轨方向上像元的位置是由扫描镜运动方式决定的，垂轨扫描的同时随着卫星顺轨飞行完成顺轨扫描。无论是线性还是阵列推扫传感器系统，由于没有垂轨扫描，不会产生垂轨系统要求与顺轨保持一致性问题，但是也存在系统的一定的畸变。传感器造成的畸变一般可以在航空模拟飞行中发现，进行模型的校正见表 3－2。

表 3－2　　**TM，SPOT 传感器系统**

传感器系统	畸变源	图像反应	最大误差	资料来源
TM	聚焦面位移	可见光、近红外与短波红外配准问题	－1.25 个像元	Desachy *et al*., 1985
SPOT	探测器元素错位	顺轨和垂轨像元配准问题	＋0.2 个像元	Westin, 1992

3.8.4 地球模型

虽然地球的几何模型与卫星轨道模型是相互独立的，但是卫星运行轨道与地球自转轨道形成一种互动的关系。这种互动关系体现在以下两个方面。

首先，地球的形状不是圆的，赤道直径要大于两极直径。许多卫星遥感模型用来计算卫星观测矢量与地球表面之间的关系。因此，需要精确地模拟地球形状。地球椭圆体的描述公式，见图 3－18，

$$\frac{p_x^2 + p_y^2}{r_{eq}^2} + \frac{p_z^2}{r_p^2} = 1 \tag{3-26}$$

式中，p_x，p_y，p_z 是地球表面任意点的中心坐标图 3－21；Req 是赤道半径；rp 是极半径；φ 是地球的经度；λ 是地球的纬度。如同公式 3－27 中显示，φ 和 λ 与 p 的关系为，

$$\varphi = \alpha\sin\frac{p_z}{r} \tag{3-27}$$

和

$$\lambda = \alpha\tan\frac{p_y}{p_x} \tag{3-28}$$

式中，r 是点 p 的地球半径。地球椭圆体偏心率来定量计算地图投影，

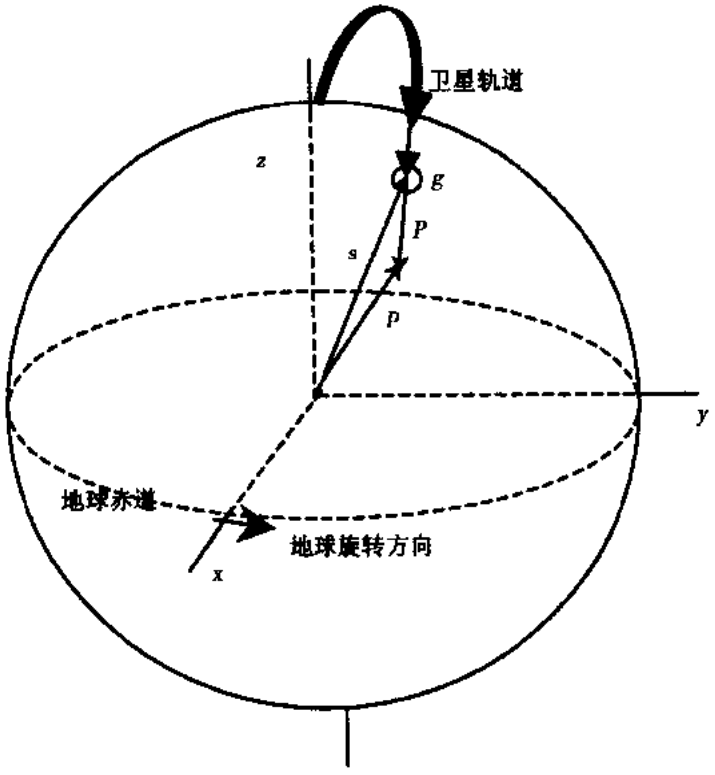


图 3－18　近极轨地球卫星测图几何模型关键参数

$$\varepsilon = \frac{r_{eq}^2 - r_p^2}{r_{eq}^2} \tag{3-29}$$

圆形的偏心率为零。

地球模型的几何特征列表 3－3，不同的国家使用不同参数系统，建立地图投影体系。

表 3－3　　有用地球参数

地球参数	参数值
赤道半径	6378.137km
极半径	6356.752km
赤道周长	40075.02km
极周长	39940.65km
偏心率	0.00669
角速度	7.2722052×10^{-5}rad/s

第二个因子是地球以一定的角速度 ω 自转的同时卫星围绕地球轨道旋转，并且以垂直角度对地观测扫描。地球在卫星轨道下面从西到东运行，地球表面的速度为，

$$v_0 = \omega_e r_e \cos\varphi \tag{3-30}$$

式中，r_e 地球的半径；φ 地球经度。由于 TM 和 SPOT 卫星轨道与地球的极有倾斜角 i，一般是 9.1°。地球的旋转与卫星垂轨扫描不平行，所以在卫星扫描方向的地球旋转速度减缓为，

$$v_0 = v_0\cos(i) = 0.98769\,v_0 \tag{3-31}$$

最重要的对地球轨道模型三个矢量参数 s，g 和 p 的选择，这三个参数构成了对地观测基础三角形。由这三个参数建立矢量方程，

$$p = s + g \tag{3-32}$$

对卫星轨道模型和图像几何畸变产生原因及其校正的研究经历了很长时间，积累了大量的资料，见表 3－4 和表 3－5。

表 3－4　　卫星轨道校正文献

传感器类型	参考文献
AVHRR	Emery and Lkeda，1984 Brush，1985 Ho and Asem，1986 Brush，1989 Emery et al.1989 Bachmann and Bendix，1992 Moreno and Melia，1993 Krasnopolsky and Breaker，1994
TM	Seto，1991
SPOT	Kratky，1989 Westin，1990

表 3-5　　关于图像几何校正文献

传感器类型	误差（像元）	参考文献
TM	±1.5（L 4），±0.4（L-5）	Borgeson *et al*., 1985
	±1.1（L-4）	Walker *et al*., 1984
	±1（L-4）	Welch and Usery, 1984
	±1（L-5）	Bryant *et al*., 1985
	±0.7	Fusco *et al*., 1985
	±0.6（L-4），±0.3（L-5）	Welch *et al*., 1985
	±1.5（地球轨道模型）	Wrigley *et al*., 1985
SPOT	±0.3（P 数据，地球轨道模型）	Westin, 1990

由于 AVHRR 数据接收站点覆盖全球范围，AVHRR 图像几何校正方面的文献很多，本章就不专门介绍。由于 AVHRR 数据有较大的 FOV 和低空间分辨率，AVHRR 导航模型需要介绍一下，按相对精度为 1～1.5 像元，传感器、地球形状模型及其天体位置推算表各值（表 3-6）；对于更为复杂亚像元计算模型需要考虑 AVHRR 地面站接收到的 TBUS 天体位置表 3-7，使用 GCPs 数据各种参数可以取得更高的精度。TM 数据采用双向横扫描模式精度可以小于 0.5 个像元。一般是在地形起伏不大的地形条件下可以取得高精度校正图像，在地形变化较大的山区由于地球表面曲度很难取得高精度的校正图像。

表 3-6　　用传感器、地球形状模型对 AVHRR 数据的校正

模型与数据	位置精度（像元）	参考文献
圆形轨道与地球	2～3	Legeckis and Pritchard, 1976
椭圆轨道和地球＋天体位置推算表	1～2	Emery and Ikeda, 1984
椭圆轨道和地球＋TBUS	＜1	Moreno and melia, 1993

3.8.5　横向扫描几何

横向扫描传感器在轨像元采样是利用定时增益线，该传感器的速度是确定不变的与地球自转造成确定的增益角 $\Delta\theta$，θ 是由天底角得到的扫描角。对于线状横轨扫描每一个 GSI 都有所不同，其增加也增加了扫描角度，

地球表面是平坦时：
$$\frac{\mathrm{GSI_f}\ (\theta)}{\mathrm{GSI}\ (\theta)}=\left[\frac{1}{\cos\ (\theta)^2}\right] \tag{3-33}$$

当扫描角度较大时，如 AVRHH 图 3-22，必须要考虑地表面的变化，这时的公式可以修正为，

圆形地球表面：
$$\frac{\mathrm{GSI_e}}{\mathrm{GSI}}=\frac{[H+r_e(1-\cos\varphi)]}{H\cos(\theta)\cos(\theta+\varphi)} \tag{3-34}$$

式中，对应于地表扫描角 θ 的地心角 ϕ，

$$\phi=a\sin\left\{\left[\left(\frac{re+H}{r}\right)\sin(\theta)\right]\right\}-\theta \tag{3-35}$$

横轨 GIFOV 以相同方式变化，产生了地表投影“蝴蝶结”形的扫描图。因为地球表面到天

底角与 ϕ 角是成比例的，所以像元编录从天底角到扫描角 θ 成比例，公式 3－36 也描述了从天底角到每一条像元扫描线的距离，见图 3－19，图 3－20。

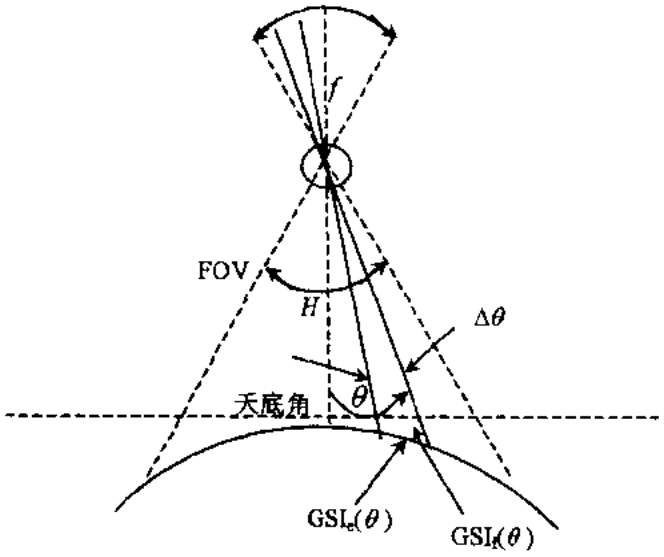


图 3－19　天底角到每一条像元扫描线的距离

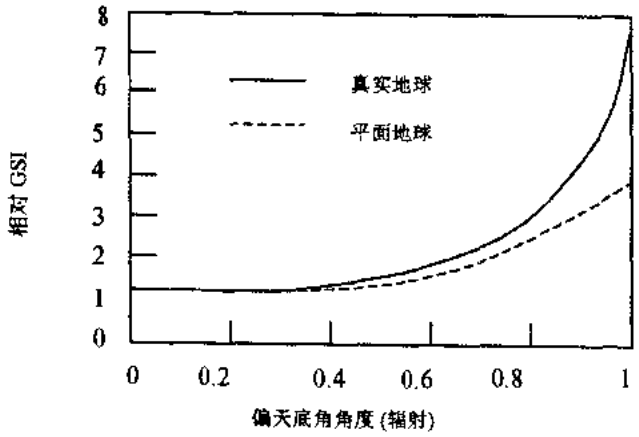


图 3－20　横扫描相对 GSI 与天底角的关系

3.8.6　推扫几何

推扫系统的传感器工作方式与横轨扫描方式有所不同，推扫有两种，一种是线状推扫；一种是面阵推扫。无论是哪种推扫方式其横轨方向没有变化，探测元素按 w 等距离分布，遍布整个面阵。但是由于横轨扫描方式的方向角度是变化的，所以横轨的 IFOV 各像元是不一样的。如果地球是平面的，这种变化是固定的，

平面地球表面：

$$GS1_f = w \cdot \frac{H}{f} \tag{3-36}$$

横轨方向改变 IFOV 时，

$$\frac{\mathrm{IFOV}(\theta)}{\mathrm{IFOV}(0)} = [\cos(\theta)]^2 \tag{3-37}$$

公式 3－37 和 3－38 描述了真实表面的横轨方向 GSI 随观测角度变化的情况，

弧形地球表面：

$$\frac{\mathrm{GSI}_e(\theta)}{\mathrm{GSI}(0)} = \frac{[H + r_e(1-\cos\phi)\cos(\theta)]}{H\cos(\theta+\phi)} \tag{3-38}$$

式中 ϕ 与 3－36 中公式相同。这个公式表达的各种参数关系可以通过图 3－21、图 3－22 来表述。

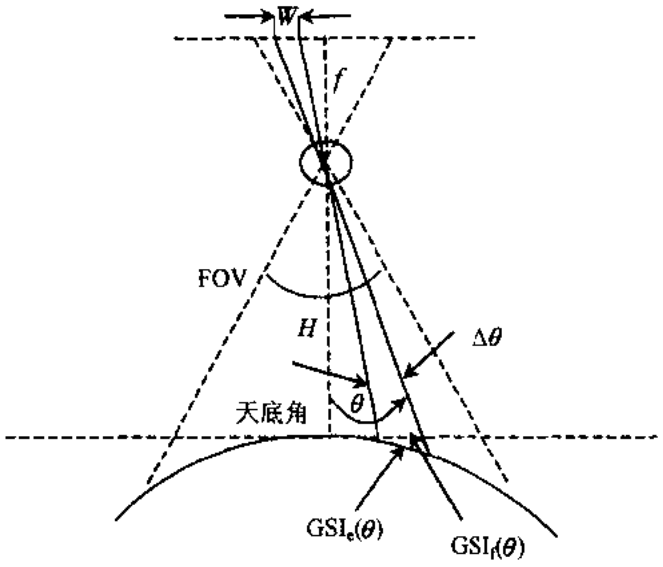


图 3－21　推扫描几何模型

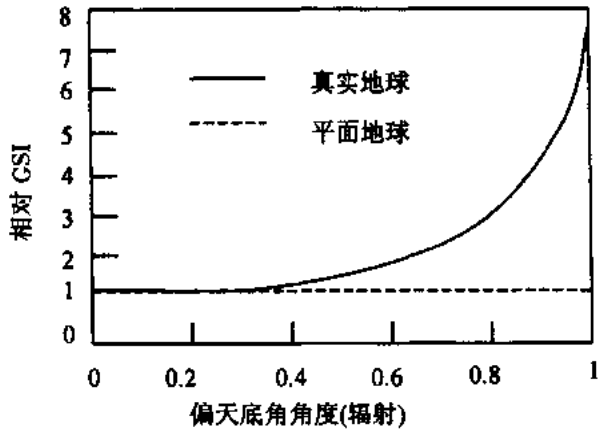


图 3－22　推扫描相对 GSI 与天底角的关系

3.8.7　地形造成的畸变

前面介绍了造成图像畸变的最主要的原因，当对图像进行精校正时就需要校正图像的地形因素。地表任何高度都会影响图像中地物的实际位置，最简单的实例如图 3－23 显示。从

图中显示的几何关系我们可以得知，图像中，一点从正射投影位置的偏移，取决于地物从天底点角的偏移和地物相对于参考平面的高度。

选择任何图像，很难看出像元之间的高度的差别。但是如果有两幅图像构成了像对，就可以发现同一点的高度，图 3－24。显示地表同一点的立体像对 A 和 B，

$$p_a = a_1 - a_2 = \frac{fH}{H - Z_A} \tag{3-39}$$

式中，H 和 Z 是从相对于基准面和图像坐标测得。a_1、a_2 和 c_1 是从两幅图像的光学中心点测得，合并上述两式可得，

$$p_c = c_1 - c_2 = \frac{fB}{H - Z_c} \tag{3-40}$$

式中，Δ_p 是 $p_a - p_c$ 相对差。这个公式在高度大的卫星遥感和起伏不大的地表时（$H >> Z_c$）可以简化为，

$$\Delta Z = Z_A - Z_C = \frac{\Delta_P (H - Z_C)}{P_a} \tag{3-41}$$

式中的 B 是基础，两幅图像中心点的地面距离；B/H 是基础对高度的比值。对于给定传感器的聚焦长度和高度，基础决定了从两幅像对测量高度的灵敏度；$\Delta p/m$ 是由图像放大对应于地面点之间像对差；从对图像分析的角度看，公式 3－41 两地面点高度的不同与两幅图像相同点成正比。应用这一简单关系就可以从一幅立体像对中获取数字高程信息。

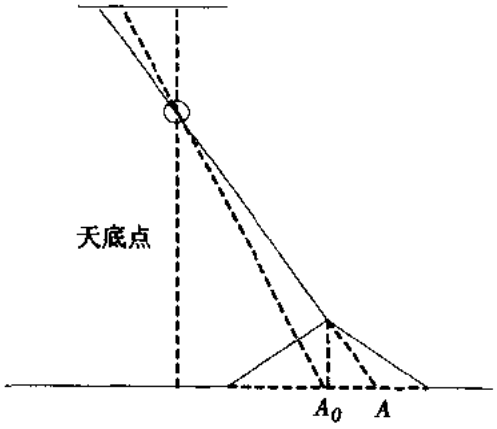


图 3－23　推扫系统横轨方向的地形影响

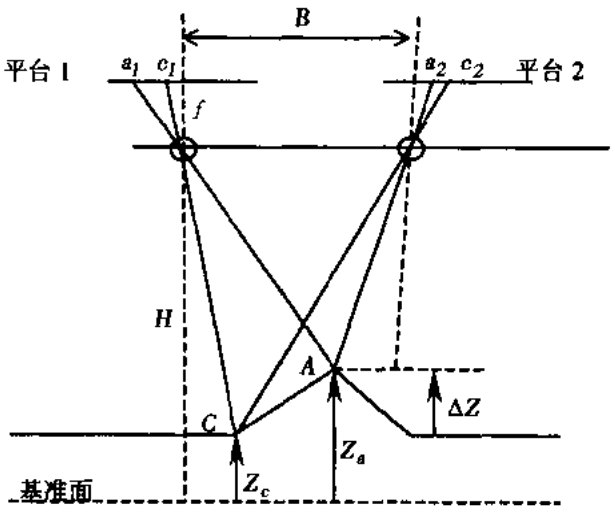


图 3－24　立体图像几何关系

参考文献

Schowengerd, R.A.1997.Remote sensing models and methods for image processing, Chapter three, ACADEMIC press

Bachmann, M., J.1992.Bendix.An improved algorithm for NOAA－AVHRR image referencing International Journal of Remote Sensing 13(16):3205～3215

Chen, L.C., L.H.Lee.1993.Rigorous generation of digital orthophotos from SPOT images.Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 59(5):655～661

Dereniak, E.L., G.D. Boreman.1996.Infrared Detectors and Systems.New York, NY, Wiley－ Interscience, 560 p

Krasnopolsky, V.M., L.C.Breader.1994.The problem of AVHRR image navigation revisited.International Journal of Remote Sensing 15(5):979～1008

Maling, D.H.1992. Coordinate Systems and Map Projections.Ed.Oxford, England: Pergamon Press, 476p

Moreno, J.F., S.Gandia,, J.Melia.1992.Geometric integration of NOAA AVHRR and SPOT data: low resolution effective parameters from high resolution data.IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 30(5):1006～1014

Moreno, J.F., J. Melia.1993.A method for accurate geometric correction of NOAA AVHRR HRPT data.IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 31(1):204～226

Richards, J.A.1993. Remote Sensing Digital Image Analysis－An Introduction Second Ed . Berlin: Springer－Verlag , 334p

Seto, Y.1991.Geometric correction algorithms for satellite imagery using a bi－directional scanning sensor.IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.292～299

Vedebout, J., S.Jacquemoud, G. Schmuck.1994.Optical properties of leaves: modelling and experimental studies.Imaging Spectrometry－A Tool for Environmental Observations. 4: 335p

Westin, T.1990. Precision rectification of SPOT imagery.photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56(2):247～253

Westin, T.1992. Inflight calibration of SPOTCCD detecctor geometry.Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 58(9):1313～1319

Ma Jianwen, V.R. Slany, J.Harris, S.B.Balentyne.1991.the use of Landsat data for the mapping of limonite and altered rocks in the Sulphurete area, Central British Columbia, Proceedings of the 14th Canadian Symposium on Remote Sensing, Calgary, Alberta, pp.419～422

第四章　数据模型

§4.1　概　述

遥感图像处理的初期，一般将数字图像看做单纯的数据，关心的是像元之间的空间关系，忽略了遥感数字图像产生的物理过程和多波段向量灰度信息之间的关系。随着遥感技术应用的不断深入和需求，图像处理技术也得到了很大的发展。为了将遥感信息转化为可以指导决策和工作的知识，满足国家和领域的需求，与地物特性模型、遥感信息机理模型、传感器模型相对应，建立数据模型。通过数据模型可以有效地提取和挖掘各种专题特征信息，充分开发遥感数据资源。前面几章介绍了辐射模型、传感器模型，这些模型近似地描述了自然条件下，电磁波的作用机理、传递方式和载荷的信息最终都被记录在遥感数据中，实现了由电磁波作为信息载体到数据作为信息载体的转变。遥感数据模型的任务就是将记录在数据中的有效信息分离和提取出来。所以遥感数据模型是遥感信息的物理过程与图像处理算法相联接的中间环节，见图 4－1。

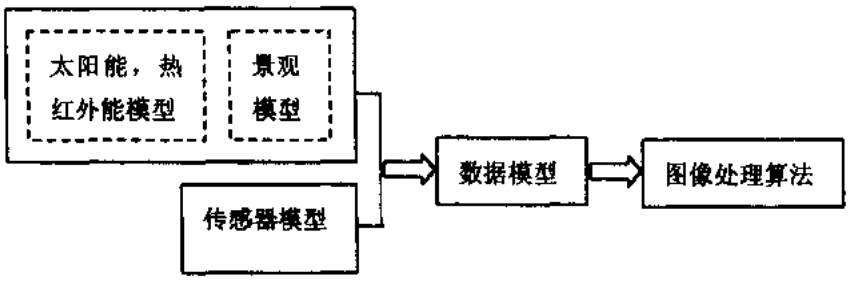


图 4－1　数据模型是遥感物理过程与图像处理算法的中间环节

§4.2　数据模型的概念

采用数据方式记录传感器响应的电磁信号是成像遥感技术发展历史中的一次革命。与胶片记录方式相比较，数据记录方式，不仅减少了传感器的有效载荷，延长了卫星的使用寿命，而且可以与计算机处理技术和数据库管理技术紧密结合，通过分离和提取技术处理多波段光谱信息，通过数据融合技术提高几何分辨率，通过数据积累展示时空变化过程等，工程师习惯于用数学符号表达数据与物质世界之间的函数关系；在遥感应用中地表覆盖的空间、时间、大气和光谱维度变化是连续的，表达这种变化关系的函数应当是连续的，而传感器通过信号转换器 A/D 将原始信号重采样、量化，用 DN 灰度值描述像元和像元集合。遥感使用的是离散函数关系近似地表达复杂、连续变化的地表函数关系。根据这一数据原理在处理图像数据时应当采用离散数学的理论、方法和表达式，同时还要考虑到多光谱波段数据结构形成的维数。图像中的像元是用 i 和 j 下脚标定义的，整幅图像构成了一个数码阵列。一个像元的 DN 值可以编为在 i 行，j 列表达为 DN_{ij} 或简单地表达为 DN_P。DN_P 的表达方法在

前面已经用过了。数字图像的行与列是经过从左上角（1，1）到右下脚（N，M）的连续编码构成（Gonzalez，1993）。如图 4－2，

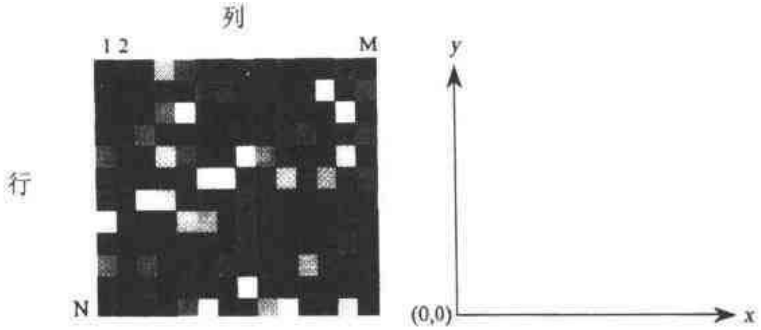


图 4－2　经过增强处理的 TM 图像的像元阵列

§4.3　图像单变量统计

数字图像统计一般划分为单变量（单波段）统计和多变量统计（多波段）两种。

4.3.1　直方图

图像直方图展示了单波段像元 DN 值二维空间分布，

直方图：
$$DN=\frac{\text{计算 DN}}{N} \tag{4-1}$$

直方图与概率密度公式（PDF）有，

直方图：
$$DN=PDF\ (DN) \tag{4-2}$$

遥感数据是离散型数据，图像像元是相互独立的 DN 值，所以用直方图容易表达遥感数据的统计规律。二维直方图是在不同 DN 值（x 坐标）条件下，相同 DN 值像元个数（y 坐标）的统计图。遥感数字图像的单峰直方图，直方图沿 y 坐标向高值方向扩展时留有扩展尾。直方图不能表达具有相同 DN 值的不同地物像元之间的空间关系，多峰直方图曲线通常表达了图像中地物的主要类型，如土壤和水体。

直方图扩展是调整整幅图像对比度的有效工具。图像处理软件中包含了直方图调整的算法，如将直方图两端拉开对整幅图像调整；将直方图分段调整分段拉开对图像中不同地物调整；还可以对直方图进行域值处理形成二值图像，完成对图像中不同地物掩膜的特殊处理。直方图调整结果改变了图像中不同 DN 值的百分比例，因此，在需要对原始图像实施特殊处理前最好不要进行直方图扩展处理。

为了能用数学方法分析和解释遥感数据特征，可以将遥感数据作为独立分布的离散过程样本，采取高斯归一化数据分析方法。

$$N\ (f\mu,\ \sigma)\ =\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\left[\frac{(f-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \tag{4-3}$$

公式 4－3 描述了图 4－3DN 值的分布状况，直方图中心点位于 μ，其宽度按比例扩展

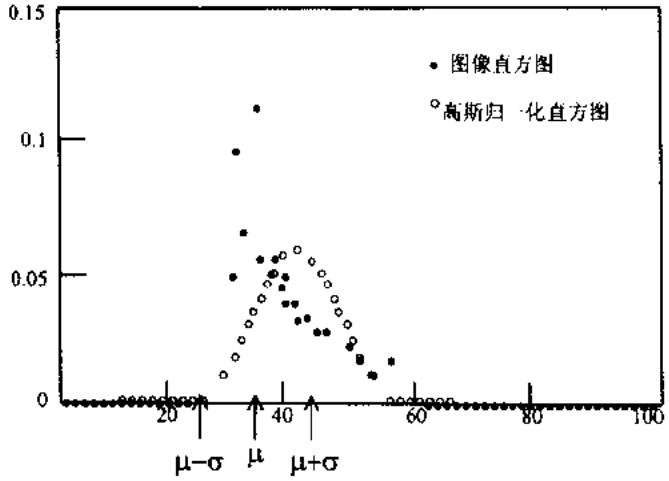


图 4－3　DN 值归一化分布处理

到 σ。输入不同的光谱波段，归一化处理结果图像是不一样的，如归一化植被指数 NDVI，主要突出的是红波段与近红外波段对叶绿素的敏感响应信息，可以根据（Adams et al.，1993）。

4.3.2　累积直方图

图像处理中将直方图均衡，直方图匹配称为累积直方图，公式表达为，

$$累计直方面_{DN} = \sum_{DN-DN_{min}}^{DN} 直方图_{DN} \qquad (4-4)$$

累积直方图是 DN 值单变量公式，其变化特点是从最小 DN 值按每一个直方图单位，向最高 DN 值变化，对称累积直方图变化最大值为 1，见图 4－4。

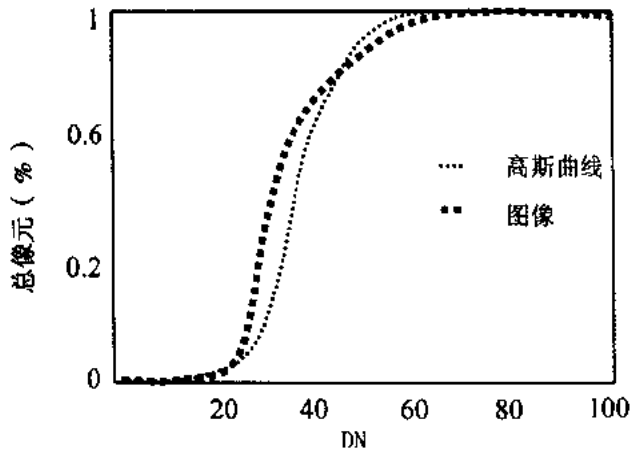


图 4－4　对称直方图

归一化直方图也称为累积方程（CDF）。归一化直方图公式 4－2 同样也是近似表达式。

4.3.3 统计参数

图像的 DN 均值可以由两种方法求得，

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{p=1}^{N} DN_p = \sum_{DN=DN_{min}}^{DN_{max}} DN \times 直方图_{DN} \tag{4-5}$$

第一种方法将图像所有 DN 值加和，再除以所有 DN 值的均值；

第二种方法将图像直方图相对应的 DN 像元权重值和，除以全体像元权重。

DN 值也可以表达为，

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{p=1}^{N}(DN_p - \mu)^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{DN=DN_{min}}^{DN_{max}}(DN-\mu)^2 \times 直方图_{DN} \tag{4-6}$$

式中 N－1 是从数据中计算的均值和直方图的最佳分布，DN 值的标准差 σ 是平方根的变量。

根据统计学原理，被统计图像直方图为单峰对称条件才适合于高斯分布模型。实际图像的直方图曲线一般不是对称单峰，而是多峰的直方图曲线，经常采取 DN 均值方法将直方图归一化处理，取得图像比较好的整体效果。在定量描述直方图时，一般采用标准差、顶点、中值、均值、对称度和锐度等参数。通过计算图像标准差检验和测定图像的对比度，标准差是直方图的宽度，描述了图像 DN 值散布状况。在统计参数中还经常用到直方图顶点值，顶点值描述了相同 DN 像元的最大分布，中值将直方图分为相同的两个部分。直方图的对称度可由下列公式表达，

$$直方图对称度 = \frac{1}{N}\sum_{p=1}^{N}\left(\frac{DN_p - \mu}{\sigma}\right)^3 = \sum_{DN=DN_{min}}^{DN_{max}}(DN-\mu)^3 \times 直方图_{DN} \tag{4-7}$$

直方图的锐度由下列公式表达，

$$直方图锐度 = \left[\frac{1}{N}\sum_{p=1}^{N}\left(\frac{DN_p - \mu}{\sigma}\right)^4\right] - 3 = \left[\sum_{DN=DN_{min}}^{DN_{max}}(DN-\mu)^4 \times 直方图_{DN}\right] - 3 \tag{4-8}$$

直方图为对称曲线时不对称度值为零。典型的遥感图像直方图表现为带长尾的正对称直方图；当直方图归一化后其锐度为零。对称度，锐度与均值，方差，无量纲，图 4－3 有，

$$\mu = 34.1$$

$$\sigma = 9.12$$

$$对称度 = 1.78$$

$$锐度 = 4.32$$

说明直方图曲线峰的不对称和锐度，不对称与锐度说明了远离主体像元分布的状况。

§4.4 多波段图像的统计与计算

前面介绍了遥感单波段一维（单波段）数据结构和统计方法，下面过渡到多维数据（多

波段）数据结构和统计方法，多维 DN 值量度，DN 的 K 维向量空间，见图 4－5。

$$DN_{ij}^{[k]} = [DN_{ij_1} DN_{ij_2} \cdots DN_{ijk}]^T = \begin{bmatrix} DN_{p_1} \\ DN_{p_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ DN_{pk} \end{bmatrix} \tag{4-9}$$

用 K 维向量空间表达 DN 值的 p 有，

$$DN_p = [DN_{p_1} DN_{p_2} \cdots DN_{pk}]^T = \begin{bmatrix} DN_{p_1} \\ DN_{p_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ DN_{pk} \end{bmatrix} \tag{4-10}$$

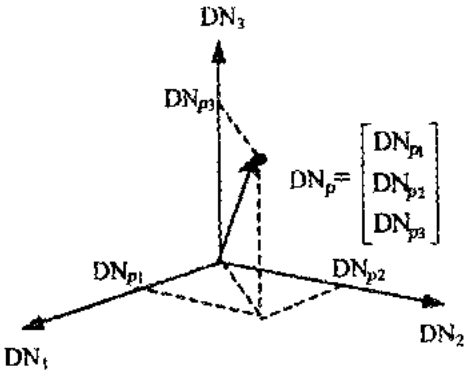


图 4－5　像元 DN_p 在三维直角坐标系中的表示

二维、三维散点图是遥感数据多维向量（多波段）可视化表达的一种方法。图 4－6 表示 TM 波段 1，4，7 三维散点图就是一个实例，散点图中每一个点在二维图像中是一个像元，三维散点图表达了三个光谱波段的像元 DN 向量值。三维散点图表达的另一个好处就是通过散点图的旋转，从不同的角度展示数据的结构特征，不同性质的地物就会形成密度相对集中的像元群。

二维散点图可以投影到一维坐标形成一维散点图。在 K 维向量空间直方图可以表达为，

$$直方图_{DN} = \frac{计算\ (DN)}{N} \tag{4-11}$$

公式为 K－D 向量公式。在一维空间，归一化分布公式 4－3 仅需要数据均值和变量 2 个参数，可以全面表达函数关系。同理，表达一个 K 维归一化分布的是均值向量，表达 DN 值则是，

$$\mu = [\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_k]^T = <DN^T> \tag{4-12}$$

4－12 公式在波段 K 中的均值为，

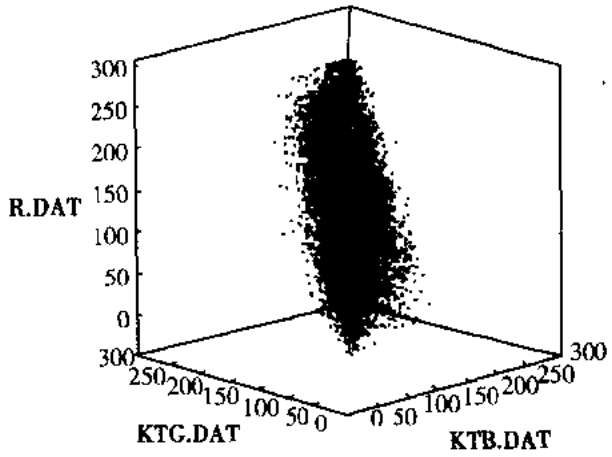


图 4－6　TM 波段 1，4，7 的三维散点图

$$\mu_k = < \mathrm{DN}_K > = \frac{1}{N}\sum_{p=1}^{N}\mathrm{DN}_{pk} \tag{4-13}$$

相关变量矩阵为，

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1k} \\ \cdot & \cdots & \cdot \\ C_{k1} & \cdots & C_{kk} \end{bmatrix} = <(\mathrm{DN}-\mu)(\mathrm{DN}-\mu)^T> \tag{4-14}$$

式中波段 m 和 n 的协方差变量为，

$$C_{mn} = \frac{1}{N-1}\sum_{p=1}^{N}(\mathrm{DN}_{pm}-\mu_m)(\mathrm{DN}_{pn}-\mu_n) \tag{4-15}$$

协方差矩阵是对称的，所以 C_{mn} 与 C_{nm} 相等；由于对角元素 C_{kk} 反映了沿每个方向变化的分布情况，一般为正数；在对角线以外的元素可以取正也可以取负。也就是说多光谱遥感数据二个波段会出现负协方差。用相关矩阵定义非对角线元素的协方差矩阵为，

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \rho_{1k} \\ \cdot & \cdots & \cdot \\ \rho_{k1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} -1 \leqslant \rho_{mn} \leqslant 1 \text{ 或 } |\rho_{mn}| \leqslant 1 \tag{4-16}$$

二个波段 m 和 n 相关系数定义为，

$$\rho_{mn} = \frac{C_{mn}}{(C_{mn} \times C_{nn})^{\frac{1}{2}}} \tag{4-17}$$

公式 4－17 是二个波段的协方差与二个波段的标准差相除。ρ_{mn} 取值范围为 ±1 之间。不同的相关系数二个波段归一化分布可以用理想化图形表示，(1) 高相关；(2) 中等相关和 (3) 不高相关表示，见图 4－7。图 4－7 中 ρ_{mn} 取接近 ±1 值时表达了二个波段很强的线性相关；如果 ρ_{mn} 取零时表达了二个波段不相关。

离散数据的 K 维向量归一化分布函数可以近似地定义为连续，归一化分布函数关系，如下，

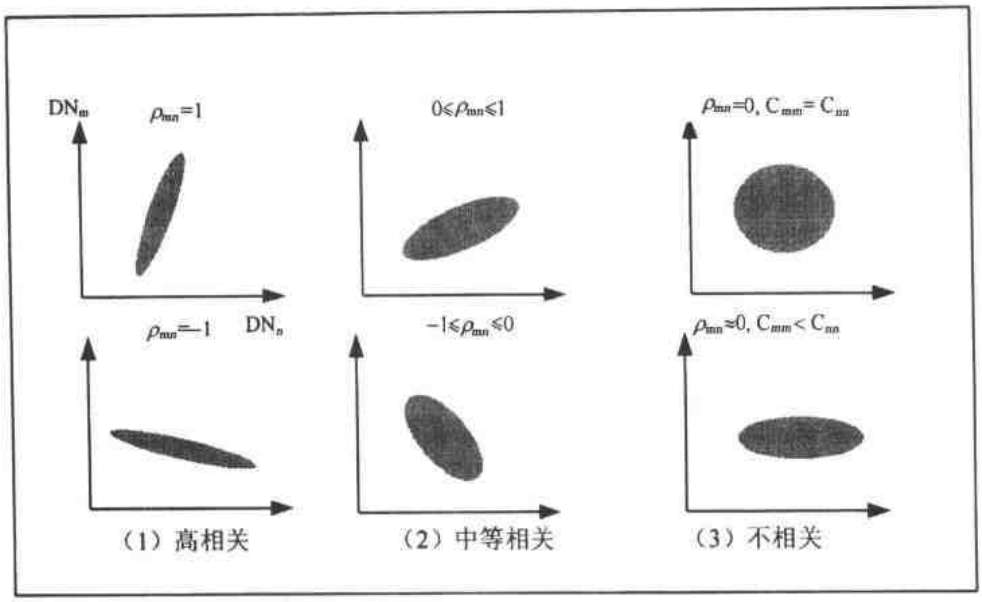


图 4－7　多光谱 2 个波段散点图形状表达了不同的相关系数

$$N(\mathrm{DN};\mu,C)=\frac{1}{|C|^{\frac{1}{2}}(2\pi)^{\frac{k}{2}}}e^{\frac{-(\mathrm{DN}-\mu)^{T}C^{-1}(\mathrm{DN}-\mu)}{2}} \tag{4-18}$$

公式 4－18 中，表达的是多波段遥感数据 DN 值 K 向量的数量函数关系，图 4－8 展示了遥感图像二维归一化分布与密度概率等值线叠合结构关系。

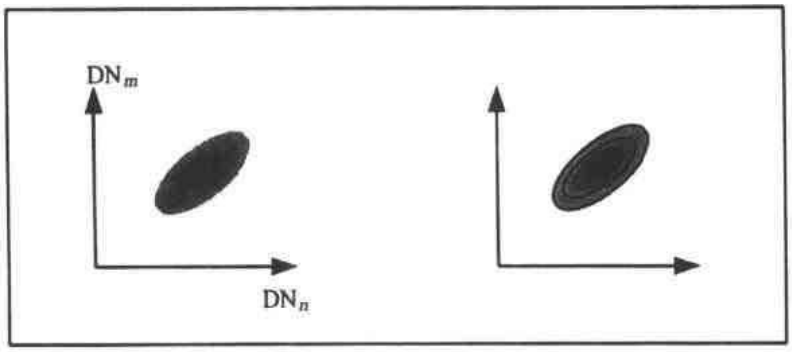


图 4－8　灰度图像二维归一化分布与密度概率等值线图

图 4－8 密度结构说明了归一化函数的一个重要性质，无论 DN 值离均值有多大，概率都不会等于零，在实际工作中，选择图像分类方法时要考虑这个性质。

§4.5　噪声模型

噪声一般是由传感器系统造成，噪声直接影响图像的质量，其出现在图像中的形式是多种多样的，所以噪声很难构造出统一的模型。因此去除噪声的方法也是多种多样的。尽管如此，从不同的噪声中提炼出有代表性的类型有助于快速判断噪声类型去除不同的噪声。现将

文献中发表的方法归纳如下。

4.5.1 加性噪声模型

最简单噪声模型为加性噪声，信号独立组分 P 表达式为，

$$DN_p = int[a_p + n_p] \tag{4-19}$$

公式中的三个参数为多光谱空间中的向量。噪声也可以在数字图像产生的各个环节加入到像元中。当知道何时加入的噪声点时，噪声的模型就好建立了。公式中 a_p 是探测器放大的噪声；n_p 是不确定时间出现的噪声总和。更多的情况下，相对于一大幅图像中的少量噪声显得没有实际意义，只是表现为无噪声信号的正负波动，非独立信号加性像元，

$$DN_p = int[a_p + n_p(a_p)] \tag{4-20}$$

传统的胶片曝光方法，噪声在氯化银粒曝光是随机的。现代光－电信号传感器系统中这种情况几乎不会出现，因为量化间隔是传感器噪声标准差的两倍，常产生的是周期性扫描产生的噪声。SPOT 推扫图像有时会出现顺轨条带；TM 横轨扫描也会出现间隔性条带。

传感器扫描产生的噪声可以用公式 4－19 和 4－20 描述。对于 TM 数据我们对每个波段的 16 个探测器中的每一个探测器的增益和偏移值建立模型为，

$$DN_{ij}^{det} = int[gain^{det} \times e_{ij}^{det} + offset^{det}] \tag{4-21}$$

公式中的上标 det 代表了探测器表 1，2，3…16；公式 4－22 直接采用了遥感中的表达方法，所以 DN 在这里代表向量，ij 定义向量的位置；如果只定义顺轨噪声，公式中的探测器表示为，

$$i = （传感器 - 1）\times 16 + det，\qquad 传感器 = 1，2，3\cdots \tag{4-22}$$

4.5.2 图像质量统计测量

数字图像质量的影响因素是多种多样的，用一种数字尺度是难以测量的。在本章我们只介绍常用的评价数字图像的尺度（Atkinson，1995）。

（1）图像对比度的数字衡量一般有，

$$C_{ratio} = \frac{DN_{max}}{DN_{min}} \tag{4-23}$$

$$C_{range} = DN_{max} - DN_{min} \tag{4-24}$$

或者，

$$C_{std} = \sigma_{DN} \tag{4-25}$$

式中 DN_{max} 和 DN_{min} 是图像中最大和最小 DN 值；σ_{DN} 是 DN 值的标准差。上面的三种表达方法用于不同的图像，如 C_{ratio} 和 C_{range} 一般不用于多噪声图像，因为一个或几个坏像元会形成高对比度值；这种情况用 C_{std} 就不会出现高对比度现象；在三种方法中只有 C_{ratio} 不受单元像元的影响。

图像的主观评价是图像质量的标准之一，视觉还与观察者的心理因素有关。

（2）和差比是另一个描述图像质量的指标。和差比 M 定义为，

$$M=\frac{DN_{max}-DN_{min}}{DN_{max}+DN_{min}} \tag{4-26}$$

由于 DN 永远取正数，所以和差比可以取值 0～1 之间，而且是无量纲。和差比最适合空间上周期变化的信号与光谱上指示性的地物信息提取，如植被指数 NDVI，公式 4－28 表达空间上周期变化的信号，

$$f(x)=\text{均值}+\text{幅度}_{DN}\times\sin\left(2\pi\frac{x}{\text{时域}}-\text{相}\right) \tag{4-27}$$

空间频域变化与时域有关，

$$\text{空间频域}=\frac{1}{\text{时域}} \tag{4-28}$$

于是有，

$$M=\frac{\frac{(DN_{max}-DN_{min})}{2}}{\frac{(DN_{max}+DN_{min})}{2}}=\frac{\text{幅度}_{DN}}{\text{均值}_{DN}} \tag{4-29}$$

公式表达了作为比值数据均值的变化范围。对于多数遥感数字图像公式 4－29 还是有意义的，但是在解释时需要谨慎。

§4.6 方差分析

方差是描述随机变量对其数学期望离散度的数学特征。协方差是描述多维随机变量中各分量相关密切程度的数学特征，协方差分析是多波段遥感数据分析常用的分析方法。

4.6.1 协方差的可视化

在多波段向量空间中选择两个不同 DN 值量的像元，做概率统计后可以取得接近的直方图，

$$\text{直方图}_h=\text{计算}\frac{(DN_1,\ DN_2)}{N_h} \tag{4-30}$$

该公式是 4－11 表达式的特例。N_h 表示给定 h 情况下参与计算的像元对；在分别有两对像元轴的散点图中，h 像元代表选定方向。在二维散点图中可以看到散点图的一个坐标由像元的一组 DN 值构成，另一个坐标是由 h 像元的 DN 值组成。如图 4－9 显示，h 取值低时分离效果差表现出相关性强，与相临散点图形状基本相同。随着 h 值增高，相关性降低，最终变的各个方向同性，像元对得到分解。这个现象将也表现在多维空间向量相关矩阵中(Castleman 1996)。

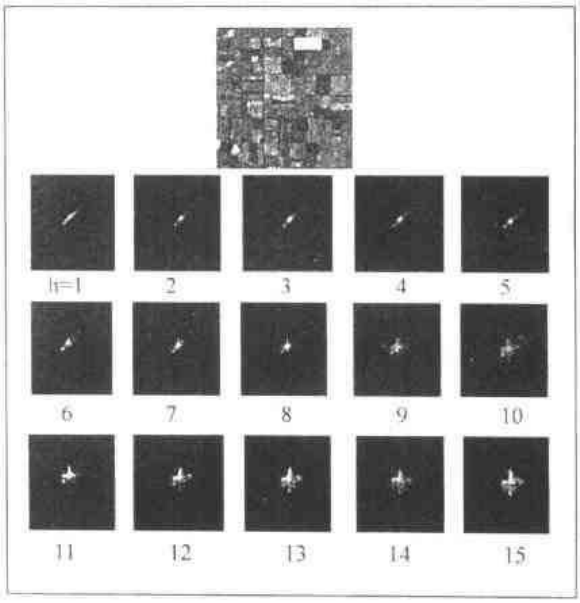


图 4－9　在二维散点图中可以看到散点图的一个坐标由像元的一组 DN 值构成，另一个坐标是由 h 像元的 DN 值组成，随着 h 值增高，相关性降低，最终变的各个方向同性，像元对的分解

4.6.2　协方差和半方差

克里金统计学中，一维数据集的协方差函数为，

$$C(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{(i,j)lh_{ij}=h} \mathrm{DN}_i \mathrm{DN}_j - \mu_{-h}\mu_{+h} \tag{4-31}$$

公式中的参数 h_{ij} 是下标为 i，j 像对数据点之间的距离。μ_{-h} 和 μ_{+h} 是位于 $-\mu$ 和 $+\mu$ 之间所有数据点 DN 的均值，这两个值很少出现相等的情况；N（h）是由 h 区分的数据点（Kulkarni　1998，Chiles　1976，Rossi　1994）。

克里金半方差公式为，

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)lh_{ij}=h} (\mathrm{DN}_i - \mathrm{DN}_j)^2 \tag{4-32}$$

或，

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N} (\mathrm{DN}_i - \mathrm{DN}_j)^2 \tag{4-33}$$

公式 4－33 表示散点图测量内部角为 45°线时状态的函数关系。同时表达了散点图分布和不同像元间的相关程度。

协方差方程与半方差方程的关系为，

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \tag{4-34}$$

如果使用足够多的数据样本 C（0），协方差函数和半方差函数所表达的内容应当是相同的。

表 4－1 中搜集总结了协方差公式和半方差公式，其中指数协方差模型被普遍地应用在图像处理中。

表 4－1　　几种协方差公式和半方差公式

空间统计	模型	方程
协方差	指数	$C(h)=C(0)e^{-ah}$
半方差	高斯	$\gamma(h)=1-e^{-3(h/a)^2}$ 稳定 $a=\gamma(0.95)$
	球面	$\gamma(h)=\begin{cases}1.5h/a-0.5(h/a)^3, \\ h\leqslant a; \\ 1, h>a\end{cases}$ 稳定 $a=\gamma$

当地球物理数据网格化后才适用于使用半方差公式。连续变化的数据也要插值后方能使用半方差公式，前人成功地利用半方差处理遥感数据实例，见表 4－2。

表 4－2　　利用半方差处理遥感数据实例

应用领域	数据源	参考
耕地	TM	(Woodcock *et al*. 1988b)
林地	航空照片	
地表覆盖类型	航空多光谱	(Curran, 1988)
评价 SNR	AVIRS	(Curran and Dungan, 1989)
海洋表面温度	AVHRR	(WALD, 1989)
评价杂乱像元噪声	CZCS, AVHRR	
测定图像之间错位	模拟 MODIS	(Townshend *et al*., 1992)
地表覆盖	野外光谱测试仪	(Lacaze *et al*., 1994)
	HCMM 热红外	
	SPOT	
	TM	
估计阴影中地表覆盖类型	TM	(Rossi *et al*., 1994)
克里金立体像对	SPOT	(Djamdji and Bijaoui, 1995)

上面介绍了如何实现在多维空间中对一维数据分析，下面采用两种途径将一维模型分析扩展到二维分析。

一种方法是用 2－D 中的半径 r 代替 1－D 中的 h，将指数协方差模型转变成各向同性的公式，

$$C(r)=C(0)e^{-ar} \tag{4-35}$$

式中，

$$r=(h_x^2+h_y^2)^{\frac{1}{2}} \tag{4-36}$$

各向同性公式表达了像元特征在方向上具有相同性质。一般地讲，遥感图像不是各向同性的，图像的空间数据统计也不是各向同性的，这种情况应当用各向异性公式表达。

另一种选择是可以将两个 1－D 公式通过乘法运算建立一个分离模型，实现 2－D 的正交公式，

$$C(x,y)=C(0)e^{-\alpha|x|}e^{-\beta|y|}=C(0)e^{(-\alpha|x|+\beta|y|)} \tag{4-37}$$

克里金统计数据和图像数据的各向异性模型表达为，

$$C(h_x, h_y) = C(0)e^{-\sqrt{\alpha h_x^2 + \beta h_y^2}} \tag{4-38}$$

公式 4－37 与 4－38 表达了 2－D 指数协方差函数模型的各向同性和各向异性。这两个公式哪个更贴近实际情况，取决于图像的具体情况。当图像统计数据在各个方向相同时可以使用各向同性的模型，各向异性模型一般用于特殊图像处理。

4.6.3 光照能谱密度

协方差函数的傅立叶变换被称为光谱密度（Power Spectral Density，PSD）或光照能谱。如果多光谱波段遥感数据之间的相关性小，协方差函数变化范围就窄，光照能谱强；相反如果多光谱波段遥感数据之间的相关性大，协方差函数变化范围就宽，光照能谱弱。图 4－10 展示了光谱强度的宽度与协方差宽度成反比。图 4－11 展示了一些子区图像和子区图像光谱强度密度，图像被分割成 128×128 子区图像。用傅立叶放大器计算每一个子区强光谱，图像中光谱强度边缘和线条表现出线性的方向性特征，光谱强度组分最高点与各方向垂直。由表 4－1 中的指数协方差模型产生的光谱强度模型（Djamdji 1990，Conesc 1993，Gohin 1993），表达为，

$$\mathrm{PSD}(\mu) = \frac{2\alpha}{\alpha^2 + (2\pi\mu)^2} \tag{4-39}$$

公式中的 μ 是空间频域，利用这个模型表示三种植被密度类型，见图 4－10，4－11。如同指数模型与协方差函数一样，光谱强度数学模型 4－39 与 PSD 模型也可以取得比较好的效果。

前面描述了图像协方差函数和光谱强度函数的关系，该函数关系并不是对任何时间的图像都适用。但将模型理解为平均模型时，平均模型就可以适用于图像分析。

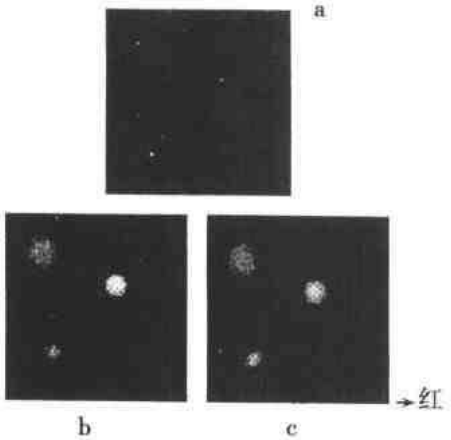


图 4－10 光谱强度数学模型
a 无结构信息；b 未经几何校正的结构信息；c 经几何校正的结构信息

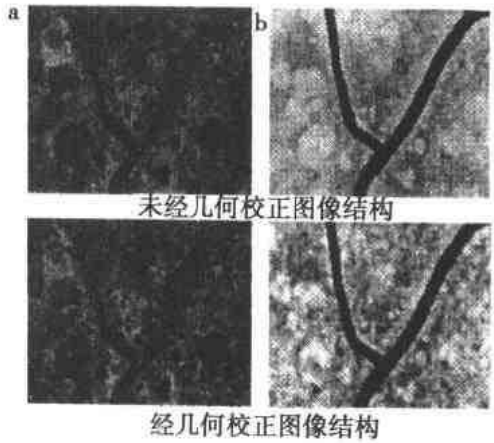


图 4－11 三种植被密度类型图像
a 红光谱波段；b 近红外光谱波段

4.6.4 共现矩阵

像元对的共同概率 P（DN_1，DN_2）组成的二维矩阵，在给定空间方向上可以用距离 h 区分，这个像元对的联合概率矩阵称为共现矩阵（CM）。4 · 10 散点图就是实例。CM 包含了图像中大量局部空间信息，问题是如何将这些信息提取出来。有人用 CM 成功地提取图像的空间结构信息如表 4－4。用这些公式可以测量图像不同的 CM 特征，这些特征之间具有一定的相关性。对给定的 h 和方向，CM 是 $2^Q \times 2^Q$，这里的 Q 代表了比特/像元数量，用 8 比特/像元时的 CM 为 $2^Q \times 2^Q$。描述整幅图像应当计算水平、垂直和对角线方向所有的 h。为了减少计算量，通过均化临边像元减少 DN 的数量和均化各空间方向的 CM 减少 CM 的空间方向的向量。

为了解释从 CM 中计算出的结构特征，一般要使用有较大空间变化的三幅图像，见图 4－9。一幅是农业用地，对原始 DN 值的熵和对比度的特征计算，重新量化后整幅图像的 DN 值从最小到最大分为 32 个水平。从第一个到第 15 个像元空间参数在水平方向上是不同的，图 4－9 中表现了随 h 变化的 CM 对比度和熵特征，但是图像的 DN 值直方图特征是不同的，这使比较结果变得有些混乱。为了使混乱的结果归一化，采用了直方图均衡变换的方法。结果图像见图 4－9，新的对比度和熵特征。在 h 取大值的位置，这些曲线具有相同的比例尺。

4.6.5 分形几何

分形几何是描述地表结构的一种几何方法。在传统的欧氏几何中：点为 0 维，直线为一维，二维为平面，三维为立体面。一个物体称为分形物体是指物体数学描述的分数维数，如 1.6 为不规则直线，2.4 为图像表面。一般讲，维数越高图像的几何结构就越复杂，分形物体无论观测尺度的变化情况如何，都遵从统计意义上的自相似原则，这表明物体是统计意义上相似，最经典的分形实例就是 Mandelbrot 对英国海岸线长度的测量。如果海岸线测量使用的是不同刻度的尺子，可以测到不同的长度值。尺子的刻度小，海岸线的测量值就大，反之值就小。对数测量参数遵从对数坐标的线性关系。自然界中大多数物体和物体表面具有分形特征（Mandelbrot 1982，Peli 1990，）。

当前有几种方法来测定图像的分形维度（D）值。方法之一是使用一维数据横断面，图像的分形维度与横断面的强光谱相关。对横断面光谱，使用对数坐标系作图，展现出线性相关函数特征，在对数坐标系中分形维 D 与曲线形态基本一致。平均方位角可以产生具有一定直径的光谱强度，分形维表现为一维特点，有人将这项技术应用在图像处理中，用来提取图像中的结构信息。

分形盖毯模型是应用的经典实例。分形的一个重要性质就是自相似，取任意两个不同的尺度作的测量，其分形计算都会出现相同的分形维度。由此可以认为，地表的分形变化具有独立于尺度变化的特征。如果将遥感图像的灰度解释为分形空间深度，图像表示的地表形态则表现为纹理表面。盖毯模型计算了不同像元尺度表层上面纹理和下面底层纹理的图像信息。也可以将盖毯理解成放在图像上（下）的子图层，盖毯形象地表达了 DN 上下表层面。随着分辨率的降低，两个盖毯变得平滑。这时两个原始毯面之间的体积比例变化，将变化幅

度绘制出来，再与对数坐标曲线相比较，通过对比曲线坡度可以测定分形维数。计算中使用了图像的灰度体积信息，计算的基础是各向同性的。

下面简要介绍以下盖毯方法的具体步骤。

若以图像表面的任一点为中心，在与点中心距离不超过 ε 像元点的集合可作为两个为 ε 的毯覆盖。盖毯表面的面积可用双毯覆盖的体积除以 2ε 得到。盖毯的上表面 $U(i, j, \varepsilon)$ 和下表面 $L(i, j, \varepsilon)$ 的定义为，

$$U(i, j, 0) = L(i, j, 0) = \text{灰度}(i, j)$$

$$U'(i,j,\varepsilon)=\max\left\{U(i,j,0)=\text{灰度}(i,j)+1,\max_{(k,m)\in\eta}[U(k,m,\varepsilon-1)]\right\}\quad \varepsilon=1,2,\cdots,\varepsilon_{\max} \tag{4-40}$$

$$L(i,j,\varepsilon)=\min\left\{L(i,j,\varepsilon-1)-1,\min_{(k,m)\in\eta}[L(k,m,\varepsilon-1)]\right\}\ \varepsilon=1,2,\cdots,\varepsilon_{\max} \tag{4-41}$$

式中 (i, j) 表示像元在左上角为 $(0, 0)$ 图像灰度矩阵的第 i 行，第 j 列位置，$\eta = \{(k, m) \mid \text{距离}[(k, m), (i, j)] \leqslant 1\}$，$\varepsilon$ 是计算分形参数时所取得最大尺度，$\varepsilon \in N$，且 $\varepsilon \geqslant 2$。

盖毯两个表面中间的体积为，

$$V(i,j,\varepsilon)=\sum_{k=i-\varepsilon}^{i+1}\sum_{m=j-\varepsilon}^{j+1}[U(k,m,\varepsilon)-L(k,m,\varepsilon)] \tag{4-42}$$

盖毯的表面积为，

$$A(i,j,\varepsilon)=\frac{\sum_{k=i-\varepsilon}^{i+1}\sum_{m=j-\varepsilon}^{j+1}[U(k,m,\varepsilon)-L(k,m,\varepsilon)]}{2\varepsilon}=\frac{V(i,j,\varepsilon)}{2\varepsilon} \tag{4-43}$$

将上式归一化处理，

$$AI(i,j,\varepsilon)=\frac{A(i,j,\varepsilon)}{(2\varepsilon+1)^2} \tag{4-44}$$

度量特性满足，

$$M(\varepsilon)=K\varepsilon^{D_T-D}\ (D_T \text{ 为拓扑维数}) \tag{4-45}$$

由公式可以计算出图像中每一个像元在不同尺度 ε 上的维数 D 和分形常数 K，计算步骤方法如下，在尺度 $\varepsilon = 1,2,\cdots,\varepsilon_{\max}$，上，分别计算各个尺度的上表面 $U(i, j, \varepsilon)$ 和下表面 $L(i, j, \varepsilon)$。当尺度为 ε 时，周围像元 (i, j) 设置一个 $(2\varepsilon + 1) \times (2\varepsilon + 1)$ 的求和窗口，在像元 (i, j) 周围 $(2\varepsilon + 1) \times (2\varepsilon + 1)$ 的求和窗口中分别计算各个尺度上的 $V(i, j, \varepsilon)$ 和 $A(i, j, \varepsilon)$。计算归一化面积 $A_1(i, j, \varepsilon)$ 和改变 ε 的大小，分别计算各个对数 $\log\varepsilon$ 和 $\log A_1(i, j, \varepsilon)$ 的值，然后利用最小二乘法求出 D 和分形常数 K 的值，分形维数为 $D_T - D$，见表 4 - 3。

表 4-3　　用对数 - 对数坐标的直线匹配 s 表示估算的图像分形维数

测量方法	分形维度	参考资料
半变量	2 - S/2	(Carr, 1995)
光谱强度	2.5 - S/2	(Carr, 1995) (Pentland, 1984)
盖毯体积模型	2 + S	(Peleg *et al*., 1984)

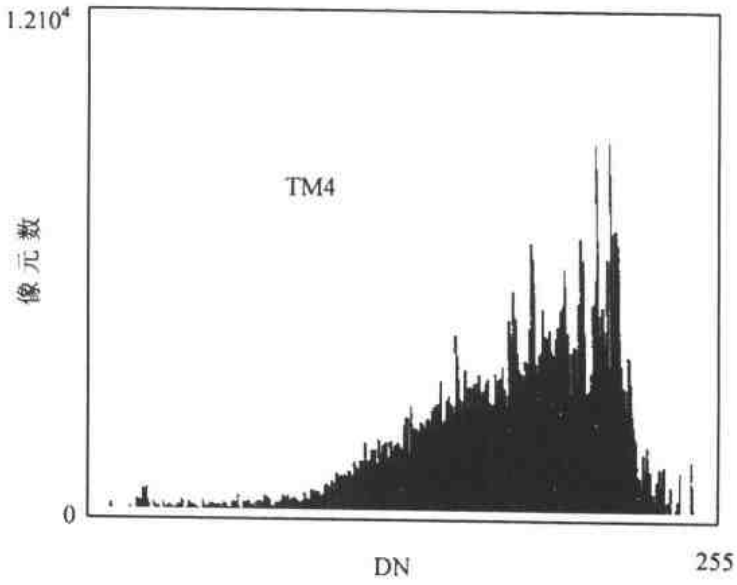
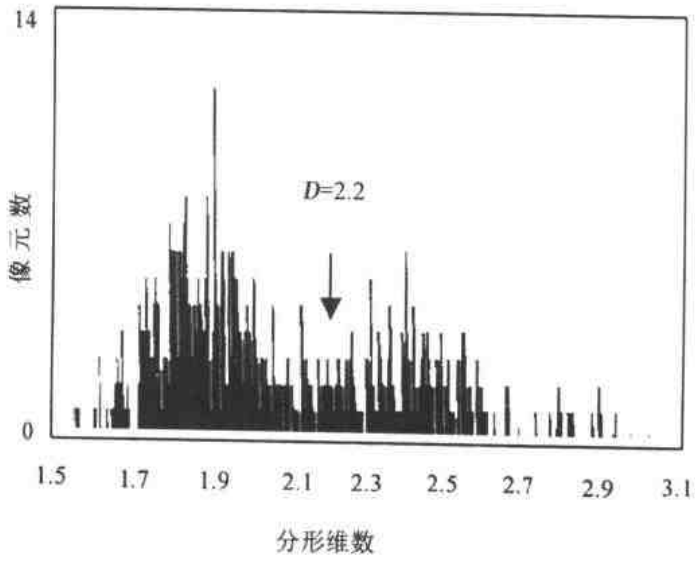


图 4－12　TM4 直方图域值取 DN＝170 与维数取 D＝2.2 的图像



§4.7 地形条件与传感器效应

用遥感数据反演地面参数时，必须考虑地形影响和遥感平台状态的影响。在第三章中介绍了地形、传感器光谱和空间分辨率是怎样影响遥感图像质量。本节主要通过模拟地形变化及其光谱特征，可视化地表达了地形条件对图像质量的影响（Fukumaga 1990, Gaddis 1996）。

4.7.1 地形与光谱散点图

假定地表为朗伯反射体，其辐射强度与太阳辐射方向夹角的余弦成正比。假定有一幅图像，图像中主要包含土壤和植被两种地物，每种地物的特性明显，光谱之间的相关性很小，存在两种可分变量。用简单的灰度扩展处理就可以将两种地物从三个波段合成图像中区分出来。在处理中使用了 DEM 数据，同时希望在处理图像的横剖面上出现土壤和植被两种地物，而且每种地物覆盖都为 50%。为了使空间特征更接近实际，建立了土壤和植被掩膜，每一种掩膜中的像元与地形图像相乘，公式 2－7。最后两种数据合成一幅两波段模拟图像。

模拟图像的近红外散点图，从图中可以看到原始不相关分布的 DN 值现在呈现出很强的相关性，出现这种现象是因为瞬间辐射的作用被余弦因子减弱，掩膜［0，1］在零值位置被负值充填。这个地形模型已经被认为是影响遥感数据光谱特征的因素。虽然多数的工作集中在减少地形的影响方面，见表 4－4，地形影响可以通过模型从多光谱遥感数据中提取，但是地形的物理模型可以用来分解图像光谱仪数据转变成光谱成分。

表 4－4　　关于前人遥感图像地形影响的测量研究

数　据	参　考
野外测量	(Hoben and Justice, 1980)
MSS	(Hoben and Justice, 1981)
	(Eliason et al., 1981)
	(Justice et al., 1981)
	(Teillet et al., 1981)
	(Kawata et al., 1988)
TM	(Civco, 1989)
	(Conese et al., 1993)
	(Itten and Meyer, 1993)

4.7.2 传感器 GIFOV 对图像质量的影响

探测器在对地推扫或摆扫获得地表光谱信号的同时，由于传感器系统本身的技术指标与性能等问题也会产生噪声，并且加入到系统信号中，噪声的加入造成信号的钝化，影响了图

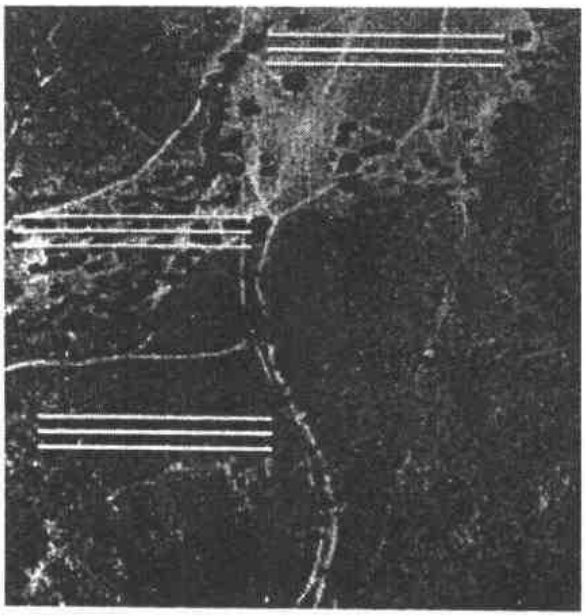


图 4－14 扫描数字化的航空照片

像的质量。本节主要介绍两种对图像质量造成的影响因素。图 4－14 是一幅航空模拟图像，当 DN 标准差取 20 时，确定了图像中每一个像元归一化分布状态和噪声的分布。图中的噪声很高，当 h 取 0 值时出现不相关噪声点，每一个噪声点高出原始的协方差 400 个单位，这个量可以作为噪声加入量。在 h 非 0 区，表现出了不相关的像元噪声。图 4－15 的半方差处理结果就包含了不同类型的信息。在 h 取 0 时两条曲线之间相差 400DN，在 0 是相同。通过最低值外推到零时，其值表现为“块金值”即突变值，模拟图像中的突变值为 400。半方差分析图形中展示的突变值可视为图像中的噪声。

使用图 4－14 模拟图像，不加入噪声，通过卷积形成 5×5 GIFOV 形成像元矩阵。图像的细节被钝化，全图协方差值变化很大。通过比较 $h=0$ 和归一化曲线，更容易观察到协方差矩阵函数的变化，见图4－15。当传感器用GIFOV观测地表时已经参入了相邻像元的信息。协方差函数计算的是不同传感器通道相关性的均值，当 GIFOV 在 h 低值域改变了协方差函数曲线的形态，当 $h=0$ 时，曲线形态变化平缓，这个结果与增加协方差宽度相对应，半方差表现出随 h 增加而增加的平缓趋势，见图 4－16，4－17。

通过对航空图像模拟实验表说明了半方差函数对 GIFOV 几何结构的依赖性，在同一地区的航空图像中表现出两种不同的特点。

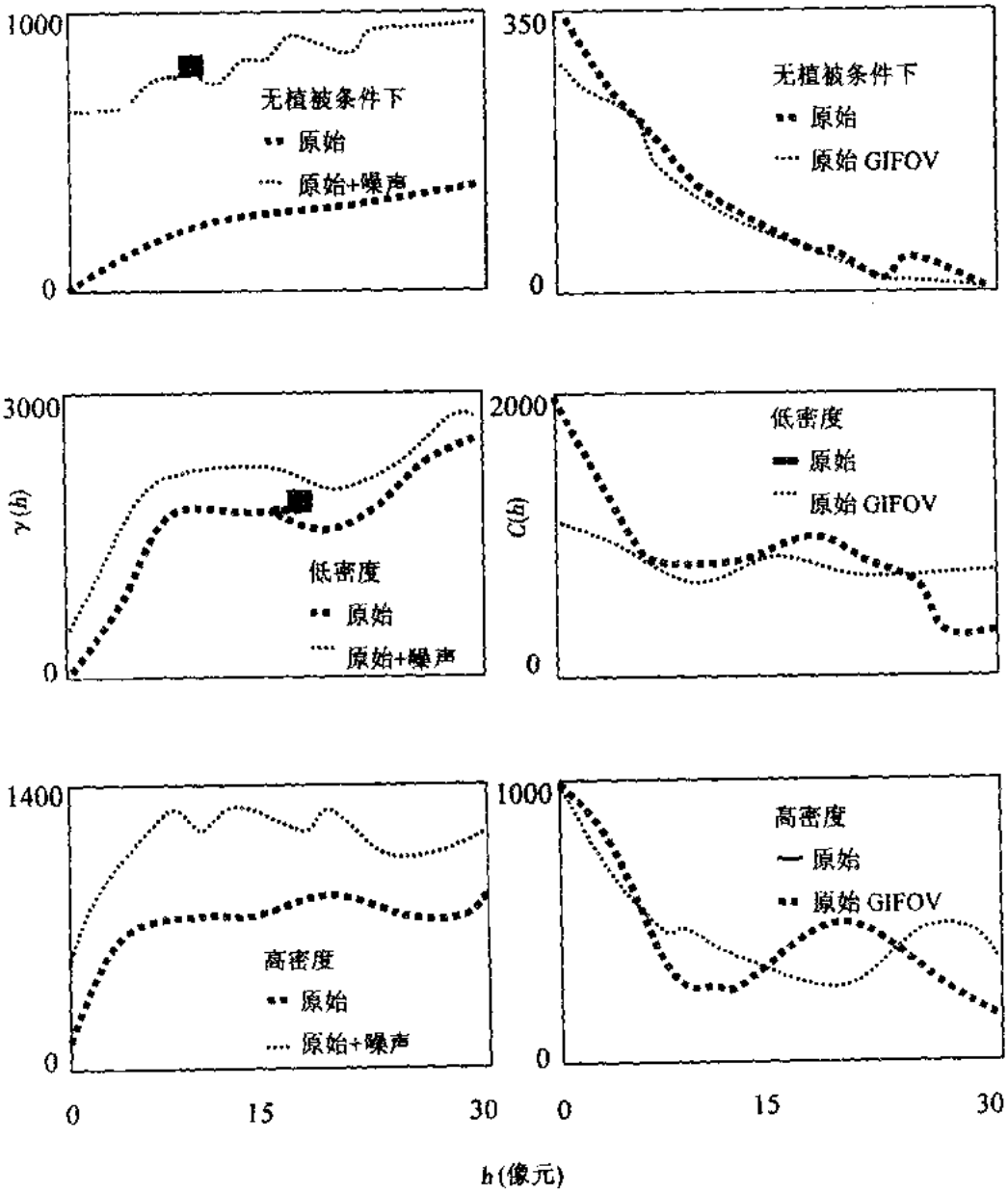


图 4－15　左边为原始图像中加入噪声的半方差函数曲线，
右边 GIFOV 为 5×5 像元原始图像曲线

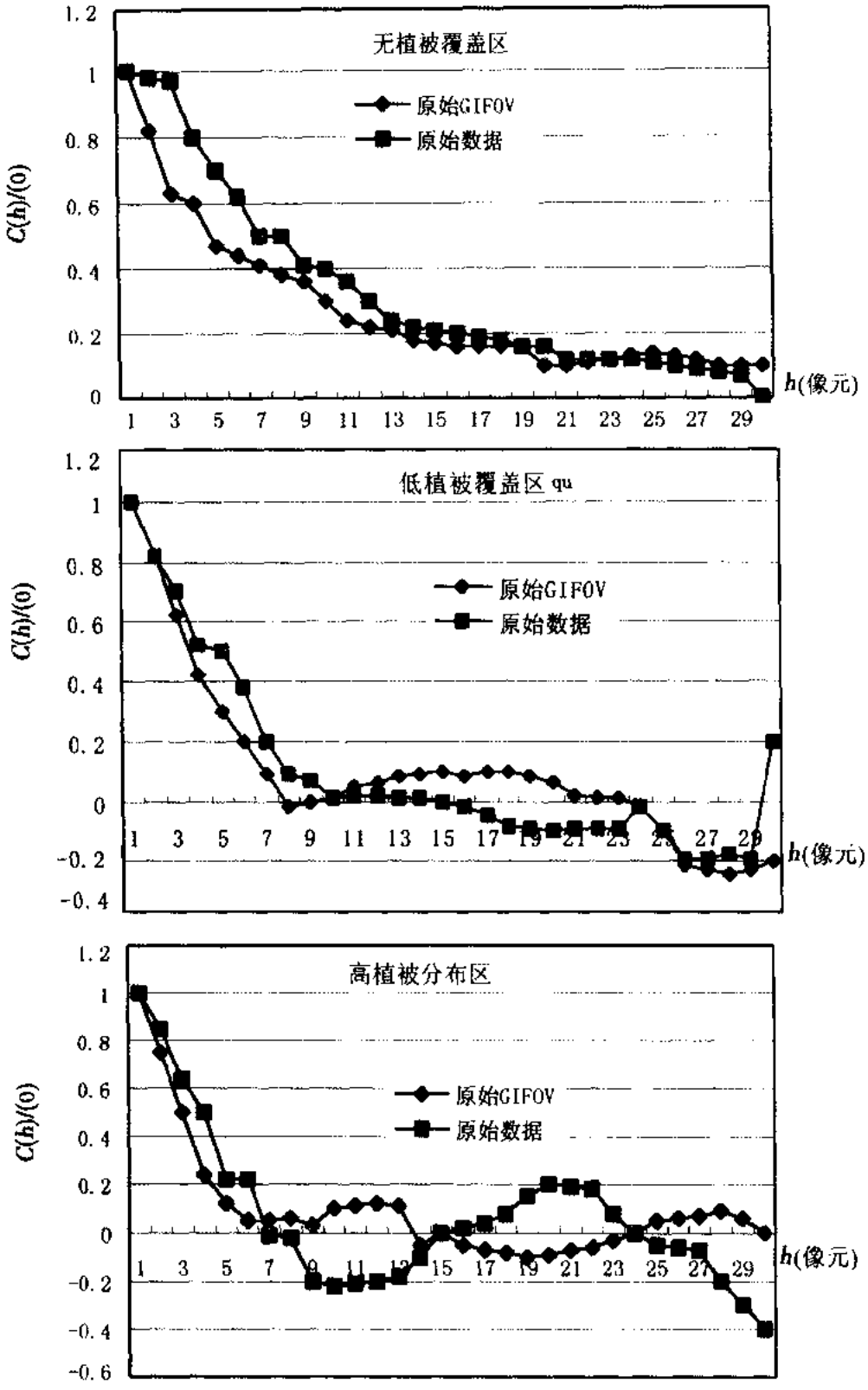


图 4－16　GIFOV 为 5×5 像元归一化原始图像的协方差函数曲线

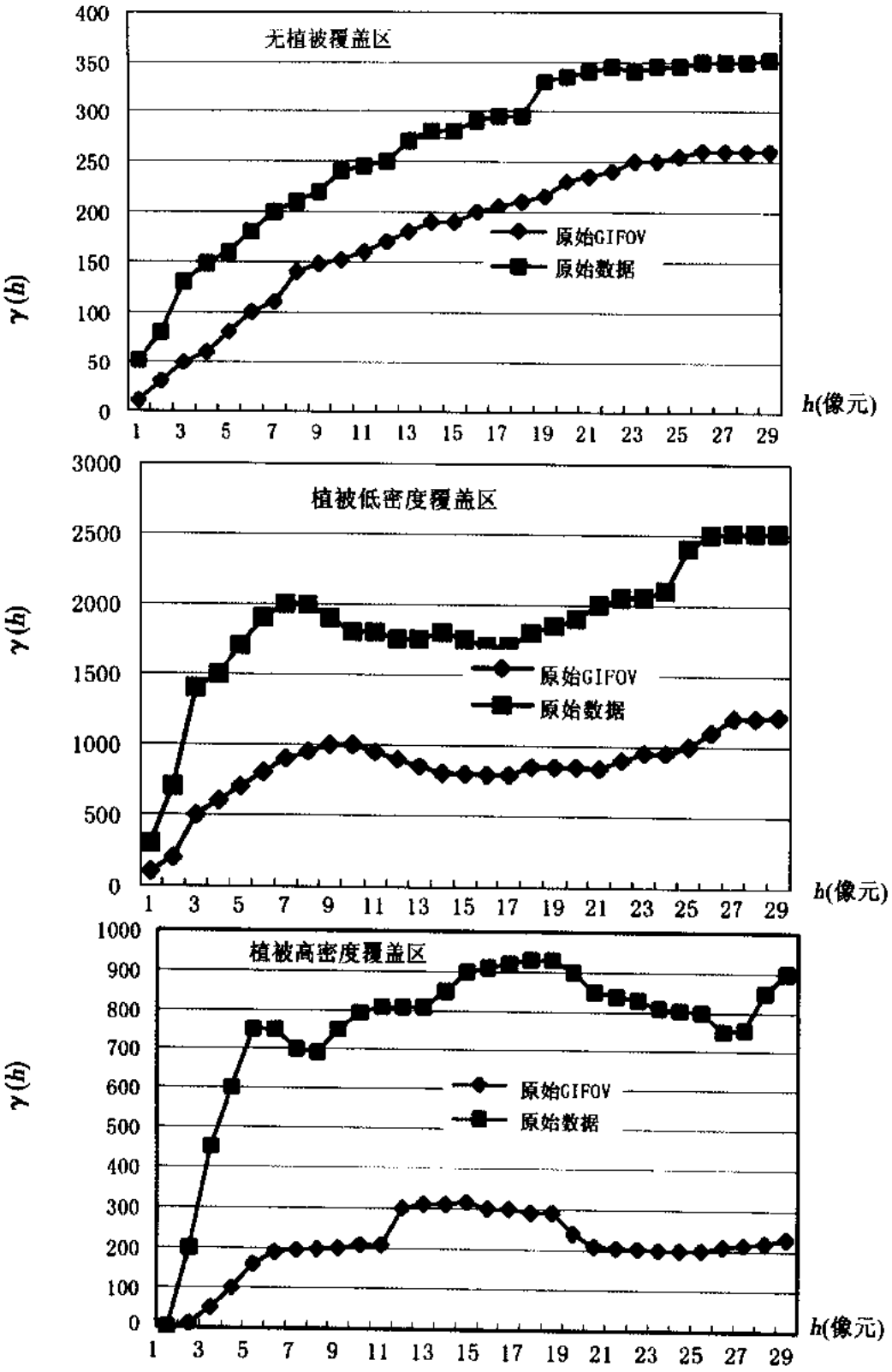


图 4－17　GIFOV 为 5×5 像元原始图像的半方差函数曲线

4.7.3 传感器特征与光谱散点图

前面分析了图像对传感器 GIFOV 几何结构的依赖性特点，本节主要介绍传感器对光谱信息的影响。为了说明这一点，建立一个二个波段包含三种地物类型的图像，图像中的地物有柏油路、土壤和植被，植被又分为草、灌木和树三种。三种地物的模拟值与红波段和近红外波段相同，见图 4－18 无结构信息。往图像中加入结构信息，第一步，加入与空间至光谱不相关的随机变量信息，这时每个波段中的柏油路与土壤标准差为 5，见图 4－19，图 4－20；第二步，加入植被类信息，见图 4－21；第三步，在每一种类型中加入空间信息，见图 4－22 空间相关结构。图 4－23 是这种条件下的散点图，图主要表现了不同地物之间的空间相关性。传感器空间响应和光谱响应说明以下几点。

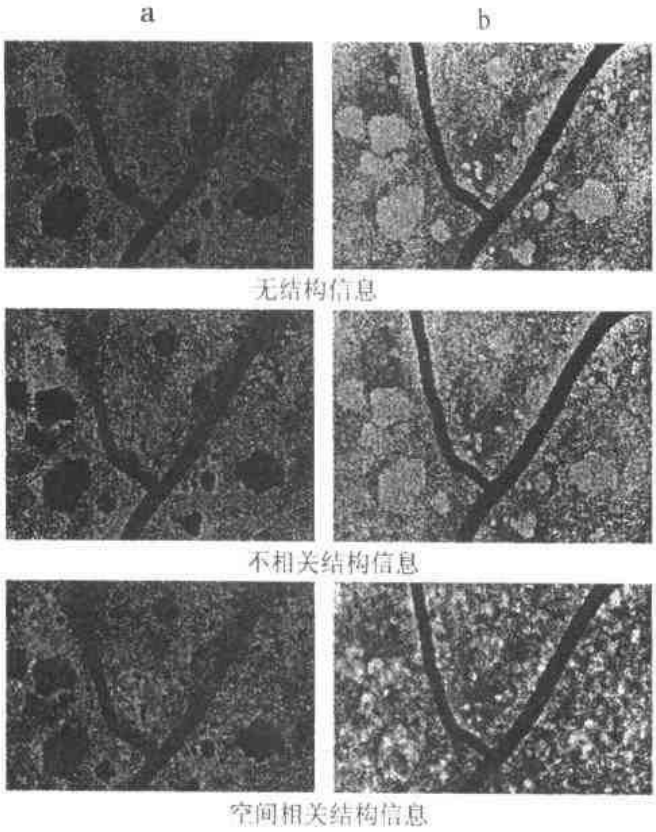


图 4－18　二波段模拟图像，图像中包括三种地物
a 红波段；b 近红外波段

（1）传感器的光谱响应在地物之间空间相关性弱的情况下，彼此都是相对独立的子区，容易表现出结构的变化，在地物空间相关性强的情况下，空间分类变量表现的不明显。

（2）对于两种不同地物造成的光谱响应，传感器 GIFOV 几何结构造成传感器在响应地表反射光谱是已经将两种相邻地物的光谱特性混合，所以散点图经常表现混合的特征。模拟实验中，还没有加入阴影等信息。

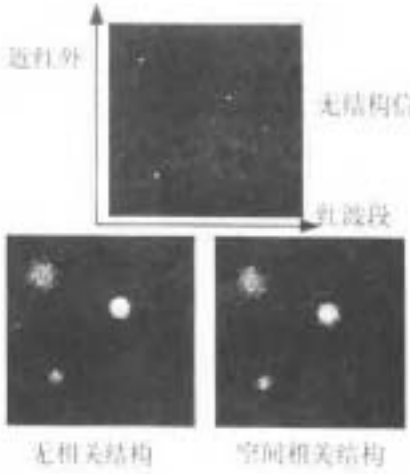


图 4－19　原始图像近红外与红波段的散点图

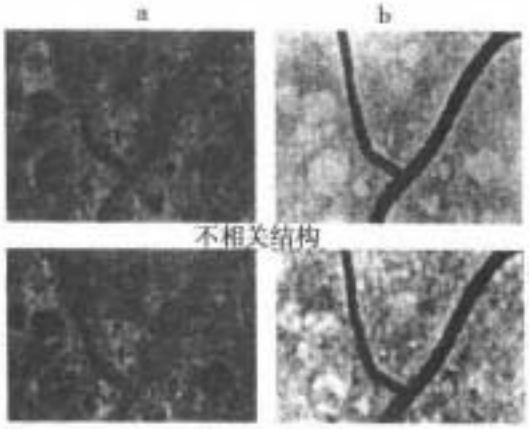


图 4－20、图4－21 的 2 种结构情况下空间均值模拟图像
a 红波段；b 近红外波段

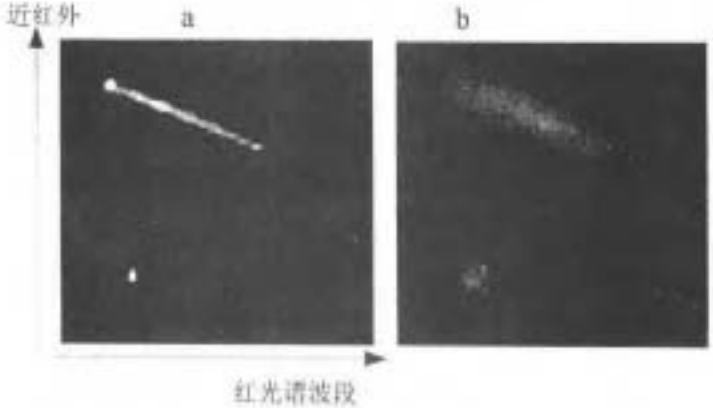


图 4－22、图 4－23 的散点图，说明传感器空间叠合效果
a 无相关性结构信息；b 空间具有相关性的结构信息

参考文献

Adams, J.B., M.O.Smith, A.R.Gillespie.1993.Imaging Spectral scopy: Interpretation Based on Spectral Mixture Analysis. Remote Geochemical Andysis: Elemental and Mineralogica Composition Cambridge. Cambridge University Press: 145～166

Atkinson, P.M.1993.The effect of spatial resolution on the exepermental variogram of airborne Mss imagery. International Journal of Remote Sensing. 14(5):105～1011

Carr, J.R.1995.Numerical Analysis for the Geological Science.Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, pp592

Castleman, K, R.1996.Digital Image Processing.Englewood Cliffs. NJ: Prentice Hall, pp667

Kulkarni R.1984.Bayeian Kriging in geostatistics Problems, In ibid. Part2. pp.261270

Chile, J.P.1976.How to adapt Kriging to non－classical problems: three vase studies, In advanced geostatistics in the mining industry. Dordrecht, pp80～89

Rossi, R.E., J.L.Dungan, L.R.Beck.1994.Kriging in shadows: geostatistical interppolation for remote sensing.Remote Sensing of Environment.48: 1～25

Conese, C., M.A.Gilabert, F.Maselli, L.Bottai.1993.Topographic normalization of Tm-scenes through the use of and atmospheric correction method and digital rerrain Models. Photo－grammetric Engineering and Remote Sensing. 59(12):1745～1753

Djamdji, J., A.Bijaoui.1995.Disparity analysis: A wavelet transform approach.IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 33(1):67～76

Fukunaga, K.1990.Introduction to Statistical Pattern Recognition. Second Ed .SanDiego: Academic Press, pp591

Gaddis, L.R., L.A.Soderblom, H.H.Kieffer.*et al*.1996.Decomposition of AVIRIS Spectra : Extraction of surface－reflectance, atmospheric and instrumental Components.IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 34(1):163～178

Gohin, F., G.Langlois.1993.Using geostatistics to merge in situ measurements and Remotely sensed observations of sea surface temperature.International Journal of Remote Sensing. 14 (1):9～19

Gonzalez, R.C., R.E.Woods.1992.Digital image processing. MA: Addison－Wesley, pp703

Itlen, K.I, P.Meyer.1993.Geometric and radiometric correction of TM data of mountainous Forestry area. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 31(4):764～770

Mandelbrot B.B.1982.the Fractral geometry of nature, W.H.Freeman and Co. New York

Peli, T.1990.Multiscale fractal theory and object characterization. Journal of the Optical Society of America. 7(6):1101～1112

第五章　遥感数据的临边效应与 MPH 技术

前几章介绍了传感器对地面反射光谱的响应，说明了地形表面的复杂性和散射光谱作用。由于传感器光谱波段之间相关性和中心像元与相邻像元空间位置（点扩展函数）产生的临边效应在各波段表现不同，而且各波段的临边效应存在系数 2.3～2.7 关系，因此研究了剔除临边效应的 MPH 方法。

§5.1 概　　述

经过近 30 年的系列运行，资源卫星数据以其多光谱波段、30～20m、全色 5～10m、幅宽 180～60km、重复观测时间 26～40 天技术指标和系统的持续运行、廉价等特点，已经成为应用率最高的数据源。在这个尺度上较多的应用集中在资源与环境，背景数据库和时空信息的分离和提取。对多光谱数据中 50～100nm 光谱分辨率的性质与多波段光谱维度信息分解、弱信息提取的研究报道的不多，导致数据的光谱信息有效利用率不到 10%（陈述彭等 1998）。为此，国内外专家孜孜不倦地研究新的光学模型，探求新的处理方法。如波士顿大学 Li 和 Strahler 教授从事的 BRDF/albedo 二向性反射几何－光学模型研究（Li Xiaowen 1995，Christopher 1998），几何－光学模型已经被用于 MODIS 光学传感器接收和数据地面参数系统订正。在卫星数据应用中，图像处理往往是以提取和分离出需要的目标，特别是弱目标为最终评价标准，因此，关于数据模型的研究仍然是摆在国际遥感界的主题。

由于不断变化、复杂的大气和照度条件，建立统一的光学遥感数据模型和统一的算法是不客观的。设想将更多有用的光谱信息从多波段遥感数据载体中分离出来，应当包括若干个步骤，基本原则是要从数据中剔除地形造成散射光谱造成的“临边效应”的影响，还要在各种方法运用中体现出，对要识别的目标相一致累加增强效果。在经过近 20 年的连续不断的探索，逐渐归纳了有效弱信息提取技术的理论和技术体系，这个方法体系包括 MPH 技术和角度空间变换技术，见图 5－1。下一章介绍角度空间分解技术。

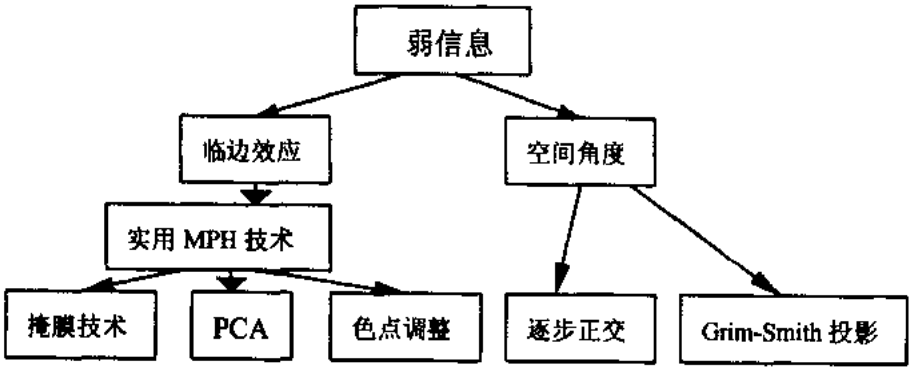


图 5－1　遥感数据中有效弱信息分离的理论和技术体系

在展开介绍遥感数据中有效弱信息分离的理论和技术体系之前，有必要定义理论和技术体系中使用到有关名词的含义。

遥感信息 —— 以电磁波作为载体，经过在大气中传输由各种航天器收集到的，能够反映地球表面物质特性的信息；

遥感数据 —— 记录、处理、储存、可视化表达、传输电磁信息的方式；

有效弱信息 —— 在不同的应用中，弱信息的内涵有所不同，但是指示信息，重要信息。目标信息相对与背景信息较弱，在资源卫星数据中，目标与背景灰度级相差较大；

像元深度 —— 2^8，$2^{16}\cdots 2^n$ DN 表达的光谱细节，可分解成不同的灰度等级；

数据场 —— 可视化理论中对物体特性矢量、张量、标量表达；

矢量 —— 地物特性构成数据的矢量状态，资源卫星数据有 n 个波段，每一个像元有 n 个亮度值，构成 n 维空间的矢量$(x_1, x_2\cdots x_n)$；

向量 —— 线性计算空间基和矩阵运算，若 n 维空间 L 任意元素 α 都可以表现为一组与线性无关的向量 $a_1a_2\cdots a_n$ 使得 $\mathrm{a} = a_1a_1a_2a_2\cdots a_na_n$ 则称为 $a_1a_2\cdots a_n$ 是 L 的基底；

角度空间基和角度变换 —— 三角函数构成的矩阵运算基；

地物单元 —— 相同属性像元集合；

弱信息单元效应 —— 较弱的光谱特征信息，当具有一定面积分布时，就构成可探测信息；

BRDF —— 二向性反射，表征物体反射特性空间分布的基本参数；

Albedo —— 从反射体表面，向各个方向反射的全部光通量占入射总光通量的百分比，地球表面的反照率是 34%；

临边效应 —— 一个像元包含了相邻 8 个像元的光谱贡献的信息，单元数据中包含的来自相邻单元的反射光谱信息。我们统计 ETM 数据结果表示，各波段临边效应不同，临边效应系数为 2.3～2.7 之间，相邻像元的光谱对目标像元的贡献率为 25%～30%；

MPH 技术是 Masking，Principal component transformation and Hue adjust 这三种算法的组合。

§5.2 像元光谱分解与单元光谱提取

如果说 BRDF/albedo 模型是用来对光学遥感数据中地形造成的散射作系统校正的，那么，我们的研究重点放在如何从经过 BRDF 校正的数据中，再度排除来自相邻像元或单元反射光谱的影响，进而从多波段遥感数据载荷的光谱信息中发现和提取有效弱信息，提高数据的利用率。

5.2.1 单波段像元光谱模型

像元表达的是地表平均辐射、反射率，是指像元端元组分的总反射率，总反射率是由出现在像元中的地表覆盖类型所占的比例决定的。

在给定日期、光谱波段和 P 种类型地物出现时，平均反射率，

$$Rvsi = \sum_{j}^{p} P_{ij}\,\overline{R_j} + bE_i \qquad (5-1)$$

$Rvsi$ —— 图像中像元 i 的平均反射率；

$\overline{R_j}$ —— 一种地物类型 j 的平均反射率；

P_{ij}—— 地物类型 j 在像元 i 中所占的百分比；

E_i —— 误差；

b —— 邻边像元的贡献光谱。

5.2.2 多波段像元光谱模型

地物光谱是连续的曲线。资源卫星传感器多光谱波段是在大气窗口约束下设计的，探测地物的某些特性，所以，在设计处理算法模型时，全波段更能真实地模拟表物体的曲线特性，见图 5-2。

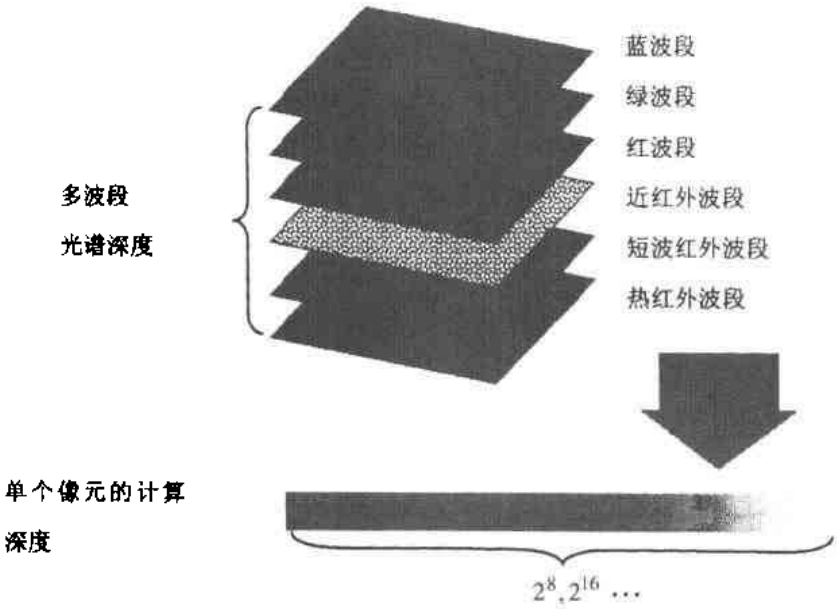


图 5-2 单个像元和多波段像元光谱可计算深度

多光谱单波段数学表达模型如下，

$$x_i = \sum^{n} f_j M_{ij} + bE_i \qquad (5-2)$$

x —— 在 i 波段的像元反射率；

n —— 波段数；

M —— 波段 i 中端元光谱 j 的反射率；

f —— 第 j 端元组分在像元中占的百分比；

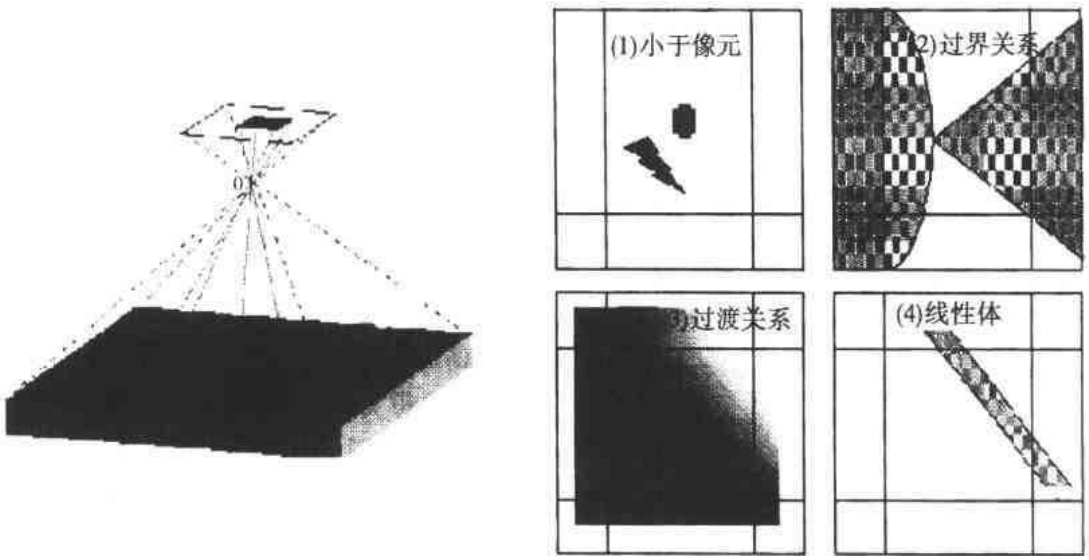
E —— 误差；

b —— 邻边像元的贡献光谱。

公式 5.2 数学模型表达了多波段光谱反射率可计算光谱深度。

5.2.3 地物光谱与临边效应

我们在构建像元光谱模型时，已经考虑到像元平均光谱是端元组分的混合光谱。在实际应用中我们关心的是目标，图像中的目标则是由相同属性的像元集合构成，并且具有不规则的自然边界。将像元的概念扩大到像元之外，可以用分析像元光谱的集合关系来构建图像中不同地物单元和单元光谱。单波段整景图像或子区图像是由若干个像元组成，构成了像元阵列 n_{ij}，不同像元的 DN 值表示了不同地物类型。由于地形条件、反照度和传感器的视场等原因，像元光谱并不是纯光谱也包含了相邻像元的光谱公式 5－1 和公式 5－2 中的误差系数 b，背景地物不同时 b 可近似取平均值，学术界称为“临边效应”。同理，如果将观察对象放大成由若干个相同属性像元的集合，构成了单元光谱。根据香农信息传递原理，无论像元到端元光谱还是单元到背景光谱其载荷的总光谱能量变化是遵循线性规律，见公式 5－2 和图 5－3。



(a)瞬间视场下的像元光谱　　(b)抽象出来的像元与地物之间的几何关系

图 5－3　一组关于像元光谱与单元光谱的抽象表达

传感器响应的是太阳辐射能量与地表反射能量之差，是目标地物单元与相邻背景信号的混合信号，可以表示为（Christopher，et al.，1998），

$$\rho_{TOA}(\mu_s,\mu_v\Phi_s-\Phi_v)=\rho_{R+A}+e^{-\tau/\mu}\rho_s(\mu_s,\mu_v\Phi_s,-\Phi_v)+e^{-\tau/\mu}t_d(\mu_s)\bar{p}+e^{-\tau/\mu}t_d(\mu_v)\bar{\rho}+t_d(\mu_s)\bar{v}+\frac{T_R+A(\mu_s)T_R+A(\mu_v)S(\bar{\rho})^2}{1-S\bar{p}} \quad (5-3)$$

5－3 公式中，ρ_{TOA} 通过大气传输到传感器的总响应信号，ρ_{A+R} 是大气本身的反射能量，τ 是大气光学厚度（瑞利反射和气溶胶），μ_s 是太阳辐射角的余弦，μ_v 传感器观测角的余弦，ρ_s 地表二向性反射因子，$\Phi_s \sim \Phi_v$ 太阳入射角与观测角的差，$t_d(\mu_s)$ 太阳通过大气向地表的散射，$t_d(\mu_s)$ 太阳通过大气向太空的散射，$T_{R+A}(\mu_s)$ 总通过大气到达地表的辐射量，$T_{R+A}(\mu_v)$ 总通过大气向太空的辐射量，ρ 是通过大气到达地表和通过大气扩散到外空的能量。

通过我们统计山区26°向阳面与阴面像元，ETM数据相同与不同波段的向阳面与阴面像元DN值的比值存在一个系数，系数变化范围为2.3～2.7。

5.2.4 用于排除“临边效应”的MPH技术

对像元分辨率小于250m的多光谱数据弱信息提取时，一般要考虑“临边效应”的影响，美国陆地卫星系列数据经历了近年的运行，提供了廉价的80m分辨率的MSS、30m分辨率的TM和ETM多光谱数据，成为资源环境应用稳定的数据源。本章定位在30m尺度像元系列多光谱卫星数据的“临边效应”处理和提取有效弱信息。

MPH技术是总结了原有图像处理方法，针对在排除临边效应和提取矿化弱信息的基础上，提出的一种技术。该技术经历了10余年国内外多种不同地理环境条件的应用，实验证明是有实际效果的技术，应用中有效率达到98%以上。

基于先验知识的掩膜技术（masking），结合专题分析和研究的需要，从图像中确定了目标区后，选择对要掩膜背景地物响应强的光谱波段选取阈值，并将阈值区赋零值，作成膜。用膜与其他波段相乘，使其在后续处理过程中的方差为零，由此提高后续算法对掩膜后剩余区信息的分解效率。

主成分变换（PCA），MPH技术中主要借用了主成分变换的两个算法功能。①主成分变换对输入波段全部像元值的统计功能；②对全部像元灰度值的压缩和分解功能。由于多波段像元灰度值相关性强的信息多为地形信息和反照度信息，遥感应用中称为共同信息（丰茂森，1992），主成分算法又将具有共同特征的灰度值（>90%）压缩到第一主成分中，第二主分量后续的压缩分量被认为是去掉了地形和反照度信息后的较“纯”的地物信息。

一景遥感数字图像总能量经过优选择掩膜和主成分压缩，两次光谱剥离计算后，剩余数据更能表达资源卫星50～100nm识别能力。如在内蒙西鄂尔多斯濒危珍稀植物保护区种群时空分布规律信息时，采用ETM的1，2，3，4，5，7六个光谱波段的数据分别作了原始数据的方差统计，原始数据的主成分变换方差统计和掩膜了代表水体和部分干涸河道光谱的像元的主成分变换的方差统计和比较（表5－1，图5－4）。原始数据的均值和方差表现的是各个波段DN值的分布特征，主成分变化方差是协方差，是对各波段整体像元相关性和特征的量度，方差越大越能表现共同特征，方差越小则越能体现局部特征。未经掩膜的主成分变换特征值和方差反映了六个波段整体像元的DN值特征。主成分变换的第一主成分累积了主要的地表反照度信息，表现为地形信息，是各波段的共同信息。掩膜后一部分像元为零值，在主成分变换统计中，这部分零值像元被填入近似于变换前原始各波段数据统计的均值。其结果，通过处理方法排除了叠加在“目标”单元的干扰信息，提高了对剩余像元的分解效果。表5－1，图5－4从上述三种统计结果的方差对比分析，掩膜后的主成分方差范围扩大，包含了更多波段的共同信息，后续各分量与未经掩膜的主成分相同分量相比变化不大，体现了掩膜方法、主成分变换对减少临边效应的累加效果，以及剩余分量对微弱信息的分解效力。

表 5－1　　原始数据 ETM 六个光谱通道数据的均值和方差（a）、未掩膜主成分变换（b）、掩膜后主成分变换（c）的特征值和方差比较

(a) 原始数据通道	均值	方差	(b) 原始数据主成分 PC	特征值	方差	(c) 掩膜主成分 PC	特征值	方差
1	99.04	46.62	1	4454.94	66.74	1	19012.55	137.88
2	100.66	48.18	2	300.96	17.34	2	221.28	14.86
3	128.73	63.13	3	113.72	10.66	3	70.56	8.40
4	104.23	49.90	4	38.20	6.18	4	20.71	4.55
5	136.31	67.72	5	7.83	2.79	5	6.78	2.60
7	120.00	61.43	7	2.09	2.09	7	1.56	1.25

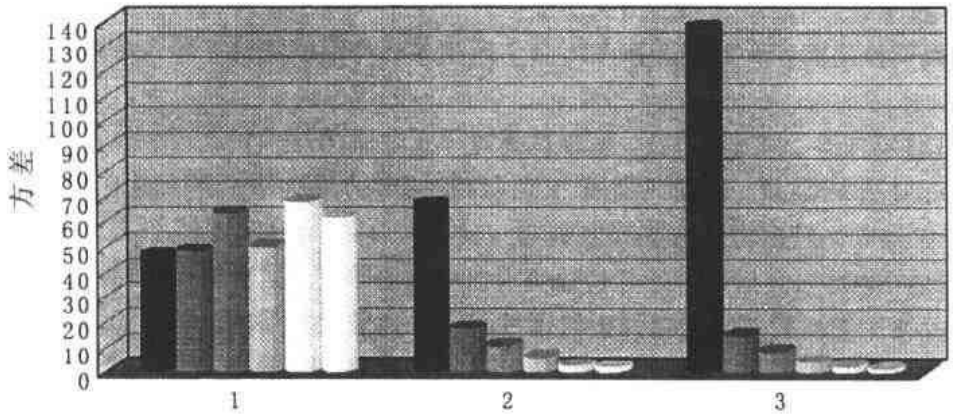


图 5－4　1－原始数据 ETM 六个光谱通道数据的方差；2－未掩膜主成分变换方差和 3－掩膜后主成分变换方差比较

§5.3　MPH 技术应用实例

近年来，为了验证 MPH 技术的实用效果，我们在完成国家任务中有意选择不同地理环境条件下的方法实验。半干旱地区，河北东坪研究区从钾长石花岗岩背景中提取金矿含金钾化蚀变带信息；新疆昆仑山高山积雪环境下，提取含多金属矿化、硅化、绢云岩化热液蚀变岩信息；结合国家计委湘西山区“扶贫”找矿，为了排除稠密植被覆盖干扰，开展的黔阳地区树冠层地球化学效应信息提取；为了反映生态环境变化和植物的多样性，利用 TM－ETM 数据提取内蒙西鄂尔多斯珍稀濒危植物动态变化与种群信息。上述成果均在国内外刊物和论文集中发表。

5.3.1　中国西部喀喇昆仑明铁盖多金属矿化带信息的提取

卫星遥感对地观测技术具有宏观定量、经济快速获取地表信息的优势。卫星勘查技术是实施西部资源战略的重要手段，特别是在常规技术方法难以开展工作的高寒山区，遥感技术更是发挥着不可替代的作用。面对高寒山区自然环境的特殊性和复杂性，总结 10 余年来在新疆高寒山区遥感矿产勘查研究与实践，得出成矿环境分析和成矿标志遥感探测相结合的方法。在昆仑山区新一轮遥感矿产勘查中，建立成矿环境与遥感信息之间的关联，探测新的成

矿环境以发现新的成矿类型。运用该方法在喀喇昆仑明铁盖地区发现了多金属矿化区－罗布盖子沟铅锌矿化区就是其中一例。

(1) 成矿地质背景、环境与标志分析

明铁盖地区位于喀喇昆仑西北部，地处中国、阿富汗、巴基斯坦三国交界，中－巴红旗拉甫口岸西南。地理坐标：北纬 74°～75°，东经 37°～37°15′，是海拔 4200～5520m 的高寒山区。前人根据不同大地构造观对该区隶属的地质构造单元进行了划分，阐述了区域构造及其发展演化历史。目前，用增生弧模式来解释西昆仑大地构造格架与演化，将西昆仑划分为陆－增生弧型碰撞造山带。明铁盖地区隶属于该增生弧型碰撞造山带之喀喇昆仑前陆冲褶带。喀喇昆仑前陆冲褶带局部出露古元古代深变质基底岩石和志留系弧后盆地板岩。晚古生代－三叠纪弧后盆地沉积和侏罗－白垩纪前陆盆地沉积广布。构造样式铸定于三叠世末－白垩纪北部羌塘陆块与南部晚古生代－早中生代昆仑岛弧的碰撞和褶皱冲断，形成了极性向南的逆冲推覆构造系。随着白垩纪褶皱冲断的结束，巨大的兴都库什－喀喇昆仑花岗岩带形成，明铁盖地区的花岗岩类属于该花岗岩带。

前人将明铁盖地区划分为喀喇昆仑成矿区林济塘金、石膏成矿带。研究区比较完整的资料是 1∶100 万区域地质调查矿点资料和新疆地质矿产局第二地质大队编制的 1∶50 万地质矿产图（新疆地质矿产局第二地质大队　1985）。以往区域遥感地质研究（李永安等　1995）已将本区划为二级找矿预测区，并指出围绕岩体接触带及附近寻找热液型铜、金矿床。在本研究中运用卫星遥感构造和矿化信息在花岗闪长岩外接触带找到了罗布盖子多金属矿化区。

根据上述资料，我们对该区成矿环境进一步分析，认识到了该区优势的成矿地质条件。

明铁盖地区的成矿地质环境是：广泛出露的下二叠统加温达坂组弧后盆地含炭岩系和燕山期成矿花岗岩、花岗闪长岩及北西－东西向剪切带构造；研究区内已知有两个热液铜矿化点，一处热液型含钨金矿点，见图 5－5。

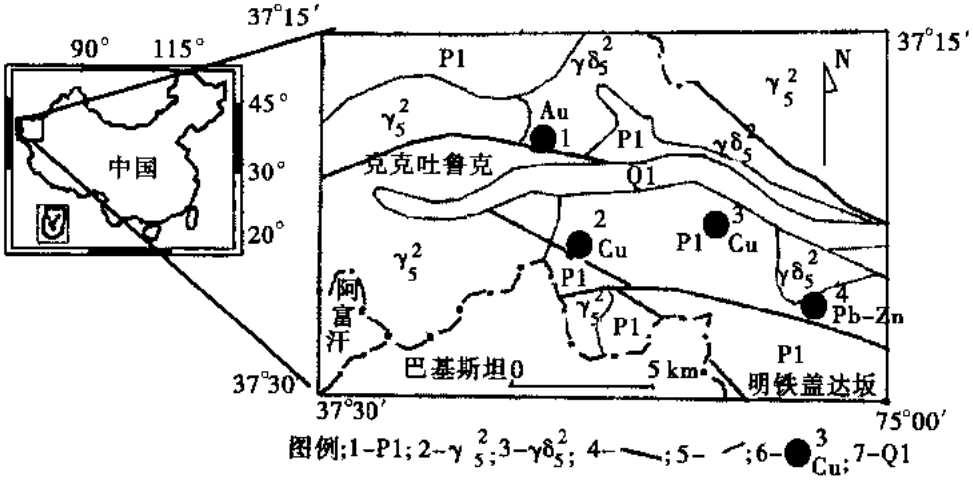


图 5－5　明铁盖地区位置和矿产地质略图

1－下二叠统加温达坂组；2－燕山期花岗岩；3－燕山期花岗闪长岩；4－断层；5－地质界线；6－矿化点及其编号（1. 卡拉其古八大山含钨金矿点；2. 谢并卡拉基尔干铜矿点；3. 明铁克铜矿点；4. 遥感新发现的罗布盖子沟多金属矿化区；7－第四系）

下二叠统加温达坂组在明铁盖达坂－罗布盖子沟－卡满素河剖面下部为灰色、灰黑色炭质粉砂岩、变质的绢云母石英砂岩和褐灰色钙质绢云母板岩；中部为灰黑色含深水黄铁矿还原斑和锰结核的泥质板岩，灰黑色硅质板岩、泥质放射虫硅质岩、薄层深水硅质灰岩加中厚层泥晶灰岩及安山凝灰岩、含砾板岩；上部为褐灰色钙质长石英细砂岩与厚层灰岩互层。视厚度达2900m。在达布达－明铁盖剖面夹多层拉斑玄武岩276.3±18Ma，（丁道桂等1996）。其总体是一套夹基性火山岩的黑色含炭岩系，是有利的成矿岩石。

明铁盖地区广泛出露燕山期花岗岩、花岗闪长岩，约占岩石出露面积的50%。形成于白垩纪，K－Ar年龄为70.9 ～ 110.9Ma。SiO_2为60% ～ 65%；Al_2O_3为15% ～ 16%；Na_2O为2.9% ～ 3.0%；K_2O为2.8% ～ 3.6%。属钙碱系列I型（同熔型）花岗岩，是地幔衍生物并有较多陆壳成分混杂（李继亮 1999）。

明铁盖地区发育北西向和近东西向剪切带，控制外围侏罗－白垩系沉积和区内花岗岩的分布。

前期1:100万区域地质调查在区内发现了谢并喀拉基尔干铜矿点和明铁克铜矿点；现有民采卡拉其古八大山含钨金矿点。铜矿点均为产于花岗岩外接触带的石英脉型，受北西向剪切带控制，以下二叠统含炭岩系为含矿围岩。石英脉长达30m，宽10 ～ 30cm，黄铜矿以浸染状分布在石英脉中。卡拉其古八大山含钨金矿点也是石英脉型，位于东西向卡拉其古断裂北侧，花岗闪长岩体内断裂破碎带中发育多条石英脉，脉长10～30m，宽1～1.5m，走向75°，脉内见黑钨矿、黄铁矿、黄铜矿、孔雀石，围岩蚀变为云英岩化、硅化、绢云母化、绿泥石化。

根据上述矿点的区域构造背景，成矿地质环境，概括出明铁盖地区遥感找矿目标为：花岗岩内、外接触带受断裂控制的热液矿床，矿化蚀变岩是直接成矿标志。

（2）TM图像处理及地质解译

明铁盖地区可购得卫星TM数据轨道号为P149，R34，接收时间为1986年6月。区内65%的地表面积被冰雪覆盖。这主要因为冰雪在可见光波段反射光谱强，在红外波段吸收光谱强。裸露岩石含水性增加，自身反射光谱减弱，加之冰雪光谱的干扰，岩性信息被抑制。因此，原始数据比值和主成分变换处理均未取得满意的效果。根据图像中冰雪覆盖一般出现在山顶部，山坡和沟谷基岩裸露的实际情况。采用了MPH技术。图像经掩膜冰雪后6个TM波段数据（TM1，2，3，4，5和7波段的数据）进行主成分变换，选择MPH3，5，6合成假彩色图像。彩图5－1中呈现出反S形构造地貌影像。该反S型构造北半部为由燕山期花岗闪长岩体形成的环形影像，其具有放射状分布的沟谷，见彩图5－1a，b和c区位，该反S形构造南半部为半环形山体，发育有卡满素河、卡前乃河等沟谷。最为引人注目的影像是反S型构造地貌中部、花岗闪长岩环形影像南缘有两条近东西向展布的弧形线性构造，南北两条分别向南、北突出，形成一构造透镜体，（见彩图5－1b中的3）。该构造透镜体中部分布有大、小两个色调环，由黄色、绿色和白色调斑点构成。大环（彩图5－1b中的1）北半部已在透镜体之外，小环（彩图5－1b中的2）在透镜体之内。该透镜体东部也有黄色、绿色色调异常。由于该影像主要色调为粉红色，是掩膜冰雪后的充填色调，蓝色调为基岩，白色调为沟谷冲积物。根据野外观察这些绿、黄色调是褐铁矿化与硅化。根据野外和图像构造分析，比较成分测试Kriging Pb－Zn，Cu，Ag空间变化趋势图高值显示，这些色调

环是构造透镜体南、北两侧断裂为含矿热液为上升通道的、花岗闪长岩体南缘的热液矿化蚀变晕，当是矿床直接定位的标志。野外验证在花岗闪长岩环形影像南缘两个蚀变环两侧发现了4个铅锌矿化带，3个在透镜状影像构造体内，1个在透镜状影像构造体边部。

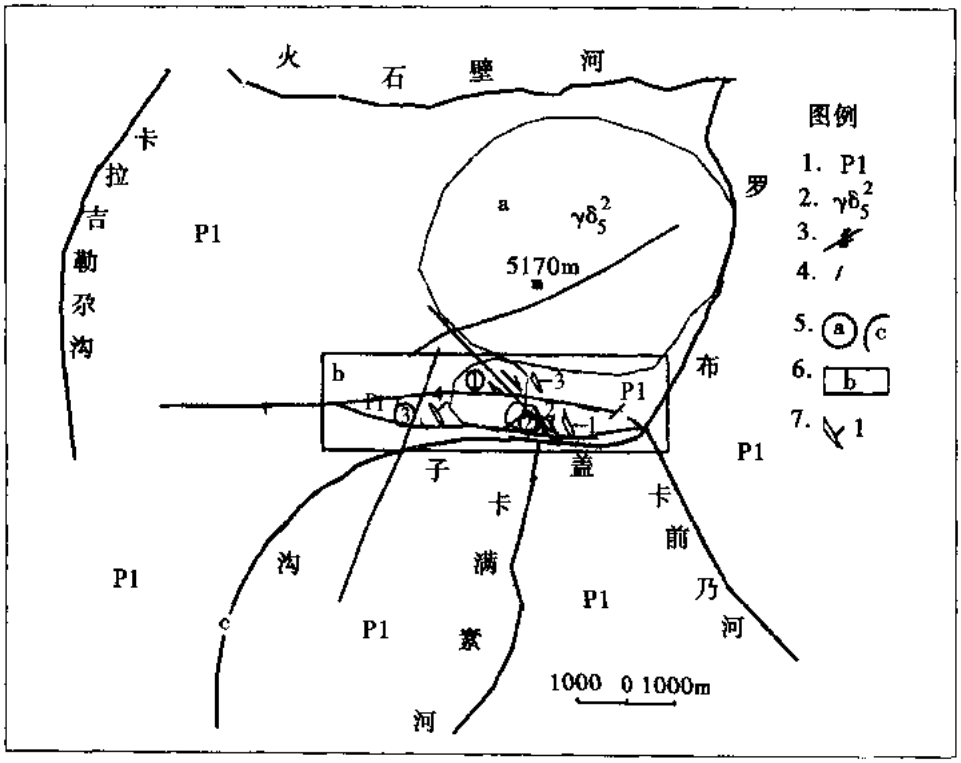


图5－6　明铁盖地区TM图像地质解译图

图例1－下二叠统加温达坂组，2－燕山期花岗闪长岩，3－剪切带及其剪切方向，4－断层，5－环形影像（a）及弧形影像（c），6－还形影像（b）中①②和透镜体影像③分布区，7－铅锌多金属矿化带及其编号，图中1，2，3，4为矿化带，矿化带位置据野外填图定位在TM影像图上圈定，直接从TM影像图上不能解译出矿带

（3）明铁盖多金属矿化区的地质特征与遥感地质成矿模式

1998年8月野外验证工作时，对明铁盖花岗闪长岩环形影像南缘矿化蚀变异常影像做了剖面观察和系统采样。剖面观察过程中发现了4条铅锌矿化带，见图5－8。对矿化带1和2进行了重点观测与采样。矿化带以下二叠统加温达坂组中部灰黑色含深水黄铁矿还原斑和锰结核的泥质板岩，灰黑色硅质板岩、薄层深水硅质灰岩加中厚层泥晶灰岩为含矿围岩。第1矿化带处在硅质灰岩与炭质板岩交接带，第2，3，4矿化带均以炭质板岩为含矿围岩。矿化带均受倾向为200°～250°，倾角为50°～85°的顺层剪切带控制，剪切带由高应变带和低应变带相间组成，单条宽达100m。密集分布剪切扁豆体，见图5－7。野外据水平擦痕方向、拖褶皱轴与断面锐夹角及剪切透镜体两组剪裂面夹角判断向110°～150°方向右行剪切。

第1矿带长达140m，宽达20m；第2矿带长达150m，宽达50m。每个矿带发育3～5条矿脉。矿脉由强硅化带及与硅化伴生的方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿等金属硫化物组

成。硫化物以细脉状、块状、密集浸染状、稀疏浸染状分布在石英扁豆体中及其两侧的围岩中和围岩中的剪裂面中，是典型的蚀变岩型矿化。

室内磨制了14块矿石光、薄片。显微镜下观察，主要金属硫化物为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿，次为黄铜矿；脉石矿物为石英、方解石、长石、黑云母、绿泥石等。矿石呈半自形——它形粒状、交代残余、乳滴状（黄铜矿在闪锌矿中）结构。细脉状、块状、密集浸染状、稀疏浸染状构造。

围岩蚀变主要为硅化、碳酸盐岩化、绿泥石化，以硅化为主。硅化表现为断续分布的宽达50cm、长达数米的石英扁豆体及石英细脉，矿化都与硅化相伴，图5－7中的矿化带都在硅化带中。

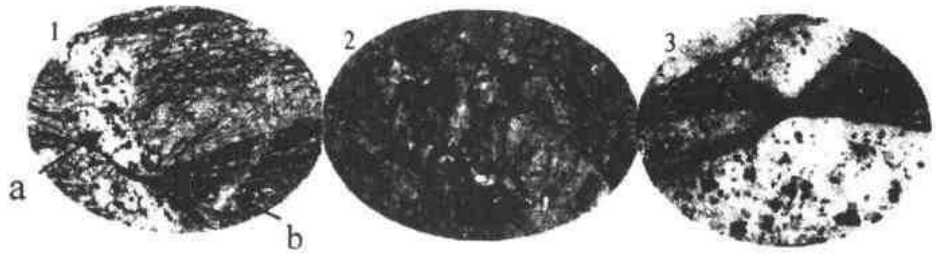


图5－7　明铁盖铅锌矿化区剪切带和硅化特征显微照片

1－第2矿带炭质板岩中的剪切带切过粗石英脉（a）又被细石英脉（b）切过，证明剪切过程与硅化过程同期，正交偏光；2－碳酸盐岩中的硅化（白色）和硫化物（黑色）相伴，正交偏光；3－第1矿带碳酸盐岩中的剪切带，其中的黑色斑点为硫化物，单偏光

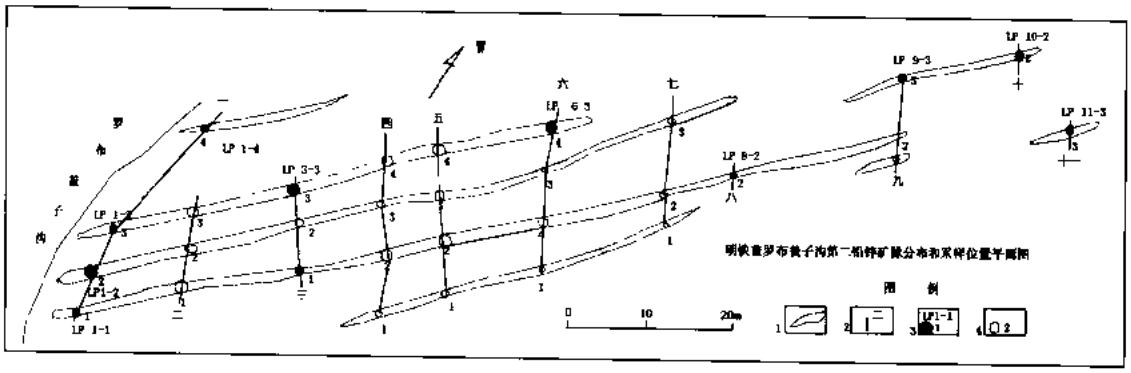


图5－8　明铁盖罗布盖子沟第二铅锌矿化带矿脉与观测位置平面

1－矿脉；2－观测剖面及其编号；3－采样点号及标本号；4－观测点号

矿化带次生蚀变发育，尤其在碳酸盐岩中，红色褐铁矿发育，这是造成TM影像黄色色调异常的原因。

矿石化学成分分析结果，见表5－2标明，地表成分变化较大，Au含量为$1\sim50\times10^{-9}$，平均为10.58×10^{-9}；Ag含量为$50\sim5000\times10^{-9}$，平均1478.7×10^{-9}；Cu含量为$15\sim90\times10^{-6}$，平均为35.08×10^{-6}；Pb含量为$16\sim26000\times10^{-6}$，平均为$4531.17\times$

10^{-6}；Zn 含量为 47 ～24600×10^{-6}，平均为 8145.03×10^{-6}。根据第 2 矿带采样位置平面图和样品化学分析结果，运用 Kriging 插值计算了 Pb，Zn，Cu，Ag，Au 共 5 个元素的趋势面，见彩图 5－2。该图表明，Pb、Zn、Cu、Ag 具有相同的品位变化趋势，在两端高，以靠近花岗闪长岩一端最高；Au 与 Pb、Zn、Cu、Ag 呈为消长关系，在 Pb、Zn、Cu、Ag 高的两端低，在 Pb、Zn、Cu、Ag 低的中部高，呈马鞍形。

表 5－2　　明铁盖罗布盖子沟铅锌矿化区矿石样品化学分析结果

标本号	Au 1×10^{-9}	Cu 1×10^{-6}	Pb 1×10^{-6}	Ag 1×10^{-9}	Zn 1×10^{-6}	备　注
LP1－1	17	15	16	81	47	第 2 矿带第一剖面第 1 点
LP1－2	1.6	16	2900	1050	400	第 2 矿带第一剖面第 2 点
LP1－3－1	18	40	13000	4300	8500	第 2 矿带第一剖面第 3 点
2	1	20	400	1050	72	第 2 矿带第一剖面第 3 点
3	7.7	50	46	170	53	第 2 矿带第一剖面第 3 点
LP1－3avg	8.9	36.67	4482	1840	8500	第 2 矿带第一剖面第 3 点平均值
LP1－4	3.8	20	400	850	88	第 2 矿带第一剖面第 4 点
LP3－3	9	25	300	1000	70	第 2 矿带第三剖面第 3 点
LP6－3－1	75	23	6000	3200	56	第 2 矿带第六剖面第 3 点
2	46	18	4300	2100	56	第 2 矿带第六剖面第 3 点
LP6 3avg	60.5	20.5	5150	2650	56	第 2 矿带第六剖面第 3 点平均值
LP8－2－1	16	25	8000	2300	15100	第 2 矿带第八剖面第 2 点
2	20	15	11900	2100	15500	第 2 矿带第八剖面第 2 点
LP8－2avg	18	20	9950	2200	15300	第 2 矿带第八剖面第 2 点平均值
LP9－3	13	30	21900	5000	14300	第 2 矿带第九剖面第 3 点
LP10－2	5.3	45	26000	5000	24600	第 2 矿带第十剖面第 2 点
LP11－3	5.1	40	110	3000	450	第 2 矿带第十一剖面第 3 点
MF1－1	4.8	20	60	120	500	第 1 矿带第 1 点
2	9.7	45	70	129	21600	第 1 矿带第 1 点
MF1－1avg	7.25	32.5	65	124.5	21600	第 1 矿带第 1 点平均值
MF2－1	5.8	60	500	240	21800	第 1 矿带第 2 点
2	7.6	80	500	245	14700	第 1 矿带第 2 点
3	5.7	60	500	240	500	第 1 矿带第 2 点
4	5.7	70	30	140	76	第 1 矿带第 2 点
5	7.9	80	500	590	23000	第 1 矿带第 2 点
6	8.7	70	500	300	20700	第 1 矿带第 2 点
7	2	23	25	75	85	第 1 矿带第 2 点
MF2avg	5.35	46.5	262.5	187.5	20700	第 1 矿带第 2 点平均值
MF3－1	4.2	50	1000	365	10200	第 1 矿带第 3 点
2	2.4	25	500	240	1000	第 1 矿带第 3 点
3	5	35	50	100	1000	第 1 矿带第 2 点
4	2	90	25	95	250	第 1 矿带第 3 点
MF3avg	3.4	50	393.75	200	3175	第 1 矿带第 3 点平均值
MF4－1	2.9	20	16	60	56	第 1 矿带第 4 点
2	1.3	15	18	60	49	第 1 矿带第 4 点
3	2.4	15	15	50	49	第 1 矿带第 4 点
4	1.5	20	13	51	85	第 1 矿带第 4 点
MF4－1avg	2.025	17.5	15.5	55.25	59.75	第 1 矿带第 4 点平均值
总平均数	10.58	35.08	4531.17	1478.70	8145.03	

注：1998 年 9 月新疆有色地质中心实验分析。

总结明铁盖罗布盖子沟多金属矿化遥感与测试资料，其成矿地质特征可以概括为以下几

个方面：

a. 产于燕山期花岗闪长岩外接触带；

b. 以下二叠统加温达坂组炭质岩系为含矿围岩；

c. 受北西向剪切带控制。成矿机制是与幔源并不同程度混入地壳成分的花岗闪长岩有关的富硅热液沿断裂上升，发生充填、交代作用形成蚀变岩型脉状矿化。推断罗布盖子沟多金属矿化是以花岗闪长岩环形影像南缘构造透镜体状影像构造的东西向弧形断裂为导矿通道，含矿热液上升充填到北西向剪切带中成矿。由遥感构造、色调异常、化学分析、野外调查等综合分析，形成罗布盖子沟多金属矿化成矿模式，见图 5－9。该模式在喀喇昆仑地区利用遥感技术寻找相同成矿环境的矿床起到了指导作用。

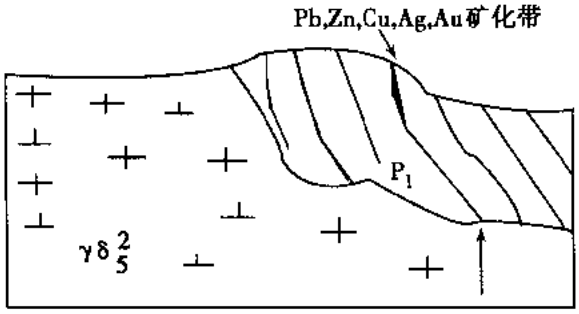


图 5－9　明铁盖地区 Pb－Zn、Cu、Au 成矿模式

P_1－下二叠统加温达坂组；γ^3－燕山期花岗闪长岩；↑－含矿热运液移方向

中国西部高山冰雪覆盖区，成矿环境的地质分析与遥感成矿标志信息是遥感矿产勘查的关键。根据相同的成矿环境产出相同的成矿类型进行“相似类比”，运用成矿信息遥感从大面积地区迅速、准确地集中和缩小勘查区域，可大量节省人力与财力。

喀喇昆仑明铁盖罗布盖子沟铅锌多金属矿化区的发现是上述遥感矿产勘察方法运用的成功典例。成矿环境和标志分析明确了该区的具体遥感目标是花岗岩、花岗闪长岩内、外接触带的受断裂控制的热液脉型矿床。经掩膜冰雪后主成分分析的 TM 影像揭示了成矿环境与标志的组合影像：花岗闪长岩环形影像南缘构造透镜体及其相关的蚀变色调环，实现遥感进一步地表验证：

野外验证，系统采样测试和 Pb，Zn，Cu，Ag，Au 趋势面分析图揭示了矿化强度双峰（Pb，Zn，Cu，Ag 元素）和单峰（Au 元素）空间变化规律（刘德权等　1996）。

由遥感矿化定位信息，元素趋势面图分析和矿化特征综合分析建立了明铁盖罗布盖子沟多金属矿化区的成矿模式：其是产于燕山期花岗闪长岩外接触带、受剪切带控制的、以黑色含炭岩系为含矿围岩的蚀变岩型矿化。该模式对在喀喇昆仑山区勘查相同环境的矿产起到了指导作用。

5.3.2　提取植被冠层生物地球化学效应光谱信息

常规地质填图往往需要大量的人力和物力，特别是贫困高山密林覆盖地区人迹罕至，更

是给地质填图带来困难。利用先进遥感手段进行地质填图一般不存在这些障碍，其能经济快速地划分不同的岩性单元。利用廉价 TM 数据和 MPH 技术，提取植被冠层有效弱信息的关键在于选择合适的光谱响应波段。本研究从植被微量元素与其反射光谱和一阶导数光谱响应微观规律入手，开展野外调查、采样以及室内测试和分析。

植物中微量元素的生理功能与光合作用、蛋白质合成、生长刺激素合成等有关，同时在调节植物中的氧化－还原过程也起重要作用，而且能决定植物体内新陈代谢的一般特征，因此植物体内若缺乏某些微量元素将阻碍其正常的生长发育，甚至产生生理病症，例如，植物 Fe、S、Mg、Mn 的缺乏能降低叶绿素含量，从而降低叶片对太阳辐射能的吸收，（Masoni 1996，李小文等 1995），首先，提出锌是生长素合成所必需的微量元素。植物营养元素状况变化将直接导致光谱特征的变化。

本研究在分析研究区区域岩石地球化学背景数据的基础上，发现了不同岩性地层，如元古界，寒武纪及加里东二期岩体，存在不同的特征微量元素组合，进而影响生长在其上的植被叶片微量元素成分和冠层的光谱，不同基岩岩性上生长的植被冠层光谱临边效应，导致区域植被微弱光谱差异。利用 TM 数据提取植被冠层的光谱差异，能有效地区分不同的岩性单元和矿化异常带。

（1）研究区概况

选择湘西黔阳贫困山区作为研究区，区内主要生长树种有马尾松、杉木，伴生乔木有青冈栎、木荷等常绿阔叶树，灌木有毛冬青、油茶、毛竹等组成常绿阔叶灌木层片，草本层以常绿铁芒为主要特点，马尾松更能在土壤贫瘠的山区生长，见彩图 5－3（a），红色代表较高植被覆盖区。该地区位于湘西雪峰山西段白马山复式岩体为中心的 W－Sn－Th－Nb－Ta 高温成矿带的西缘，岩体外接触带的矽卡岩型和热液裂隙充填交代型的高中温 W－Cu－Pb－Zn－As矿点分布区。出露地层主要有元古代板溪群拉揽组砂岩、硅质板岩，加榜组千枚状板岩（原生金矿围岩）；震旦系，寒武系含铁矿页岩硅质岩、灰岩、板岩；地层以前寒武系为主，其中以上元古界板溪群和震旦系下统江口组最广，约占区域面积四分之三以上。由于本区处于近南北向的岩浆－构造强烈活动带中，以加里东至印支、燕山期均有岩浆侵入，既有中酸性花岗岩体产出，又有基性、碱性岩脉群分布。由于多种地质构造和多期岩浆热液活动，区内矿化点发育，矿产开采已成为当地脱贫致富之路。

（2）区域岩石地球化学背景数据

区域元古宇冷家溪群、板溪群的马底驿组、五强溪组的微量元素特征及与上部大陆地壳的平均值比值分析，见彩图 5－3（c），说明本研究区元古界中微量元素 Cr，Cn 的平均含量明显高于上部大陆地壳的平均值，Zn，V 次之，可以认为本区元古界微量元素组合为 Cr－Cn－Zn－V。

寒武系下统（寒武纪木昌期）黑色岩系在本研究区内属远硅质建造带。元素组合复杂，有基性超基性岩微量元素，如 Ni，Fe，V 等，又有酸性岩的特征元素，如稀土等。这种多源共生关系表明元素在海盆中的分散富集与沉积环境有着密切的关系。总的说，本区寒武系下统多元素富集层可分为 Ni－Mo－PGE（铂族元素）序列和 V－Cn－U 序列。

(3) 野外成像光谱数据和植被成分数据分析与处理

微量元素与植物光谱特征的研究是光学遥感定量化研究的重要内容之一。本研究利用高光谱地面光谱仪（GER）在湖南黔阳地区不同地质地球化学背景下的同一垂直剖面上分别测量了岩石、土壤植物（林灌草）的反射光谱曲线和植物叶片的 8 种微量元素含量。通过研究微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn、Co、Cr、Mo、B 与植物（包括林灌草）反射光谱间的相关性研究发现 Co 的含量与植物光谱绿区（0.56μm 附近）反射率存在强的负相关，Mn、B、Mo 和 Zn 分别在可见光、近红外、短波红外存在较好的相关性和光谱响应，图 5－10。

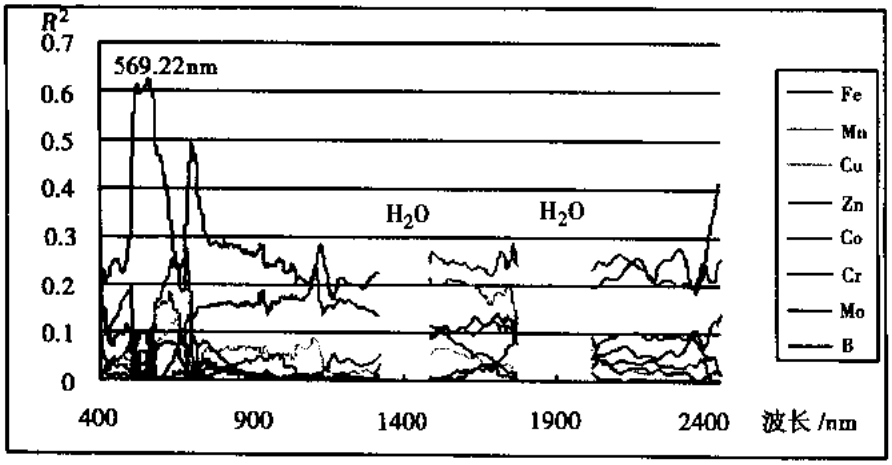


图 5－10　微量元素与植物原始光谱相关性

为了找出叶片光谱与微量元素之间的关联，采取单相关分别分析两种光谱变量（包括原始光谱和一阶微分光谱）和 8 种微量元素之间进行。原始光谱及一阶微分光谱与 8 种微量元素之间计算单相关系数及相关系数的平方见彩图 5－4 所示。在微量元素与原始光谱的相关性分析中，Co 元素于 569.22nm 波段附近相关性较高，R^2 达到 0.623，相关系数为 －0.77。从光谱波形分析知道，该波段正好位于植物光谱的绿区。一般认为叶绿素是导致光谱特征差异的主要内在因素。Al-Abbas（1974）研究了不同营养（N、P、K、Ca、Mg、S）胁迫下不同叶位叶片的光谱特征，认为在所有营养胁迫下叶片的叶绿素含量都会降低，这与本文中 Co 的光谱响应是一致的。

Johnson 在研究氮素含量时发现叶片反射率的一阶导数与叶片全氮量间的相关性在整个光谱区间最好，Yoder 也认为以反射率的一阶导数与叶片建模精度最高。为了反应光谱反射峰位置是否因微量元素的含量不同而发生偏移，采用彩图 5－4 所示的一阶光谱导数与微量元素的相关系数平方在不同波段上的分布图。图上显示了 Mn、B、Mo 和 Zn 分别与中心波长为（402.87，1161.88）、（470.28，878，2191.02，2338.93）、（1623.06）和（2338.93）nm 的光谱反射峰位置有较好的相关性（$R^2 > 0.5$）。波段范围从可见光一直到中波红外，既包括色素区间，也包括细胞结构区间以及水分控制区间，可以说微量元素的生理作用涉及植物的各个方面。

综上所述，研究区微量元素含量与植被光谱强相关性组合见表 5－3。

表 5－3　　研究区微量元素与 TM 波段对应表

元素	元素	对应 TM 波段
Co	569.22	TM2
Mn	402.87	
	1161.8	
B	470.28	TM1
	878	TM4
	2191.02	TM7
	2338.93	TM7
Mo	1623.06	TM5
Zn	2338.93	TM7

根据表 5－3 以及区域岩石地球化学背景数据分析所得出的三种不同的微量元素组合可归纳出三种地层所对应的 TM 数据特征响应波段分别为：元古界→TM7；寒武系→TM5；加里东中酸性岩体→TM1，TM4，TM7。

（4）TM 数据的岩性与矿化弱信息提取

TM 波段选择原则参考前人对（1）植物地球化学元素可变含量的研究结果，植物地球化学元素丰度不同主要取决于两种因素。

a 种属不同，由此取得的地球化学含量称为种属含量；b 随植物生长土壤中地球化学元素不同、含量变化引起其成分、含量变化称为植物的可变含量，据此可以预测研究区中不同时代形成的岩石建造和改造的环境、强度差异。在区域岩石地球化学背景数据分析中可以发现三种不同地层拥有不同的微量元素组合，这对植物地球化学元素含量和种类产生一定的影响。

表 5－3 说明研究区内微量元素对 TM 数据的响应波段，表 5－4 则提供了不同植物所含微量元素含量与 TM 波段间的响应关系。

表 5－4　　不同植物所含微量元素与 TM 波段响应关系

植被种类	微量元素	TM 波　段 (μm)						资料来源
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	
		0.4～0.5	0.6	0.7	0.8～0.9	1.6～1.8	2.1～2.4	
栎属	Cu	⇓	⇓	⇓		⇓	⇓	Yost (1975), Barber (1979)
	Pb			⇑				Press (1974)
	Zn			⇑				Press (1974)
	As			⇑				Barber (1979)
冷杉	Cu	⇓	⇓	⇓	⇓			
	Mo	⇓	⇓	⇓	⇓			
针叶松	Cu			⇓	⇓			Collims (1977)
	Pb			⇓	⇓			Press (1974)
	Zn			⇓	⇓			Press (1974)

(5) 卫星多光谱数据弱信息的提取与效果分析

TM 图像波段光谱较宽，它很难对单个矿物进行识别，但是它却足以识别感兴趣的矿物组合以及填制勘探工作前期所必须的比较大的岩性带。

长期以来，我们开展卫星多光谱数据模型与弱信息提取方法的研究，总结概括出基于临边效应的 MPH 技术，其主要组合了三种传统的图像处理方法：掩膜、主成分变换以及弱信息色点调整。

在主成分变换前，先对影像做掩膜处理能有效地突出未掩膜地物的差异。主成分分析，是将波段空间中数字图像信息映射到所选取的主成分空间中，来分析识别特征信息的一种处理方法。对主成分分析机理的探讨表明，主成分由各个波段的线性组合构成，每个主成分都含有各波段的信息。在各个主成分上都存在着信息增强与归并，但增强与归并的幅度在各个主成分上并不相同，不同主成分的信息增强与归并的信息类型也不相同。主成分分析将反映在各波段的特征信息重新组合，表现出“综合”增强的效果。因此，主成分分析不仅能起到降低植被影响的作用，而且主成分假彩色合成图像大大提高了信息识别的能力。根据表 5－3，表 5－4 结果，微量元素对植物反射波谱的响应涉及 TM 各个波段，本研究因而对影像数据进行全波段主成分分析。

根据主成分变换的协方差特征向量矩阵，选取对应 TM4、TM5、TM7 的主成分 PC2、FPC3（PC3 求反）、FPC4（PC4 求反）进行彩色合成。合成方案为 FPC4（红）、FPC3（绿）、PC2（蓝），合成后的图像再经 Hue 调整增强色差，见彩图 5－4。

图像处理最后选择 1024×1256 的 TM 子区，见彩图 5－4a，b，以便进一步对该研究区进行岩性识别和填制 1:20 万地质图。

(6) 结果与讨论

本节根据研究区区域岩石地球化学背景数据、成像光谱数据、植被微量元素成分数据及 TM 数据综合分析的基础上利用 MPH 技术提取高植被覆盖区冠层面状地层岩性光谱信息。在有效实施植被地球化学光谱弱信息提取的过程中，①利用背景数据、成像光谱数据和植物微量元素含量的相关性分析确定 TM 数据处理需突出的波段；②采用了有效的 MPH 弱信息提取技术；③ 对区域 1:20 万地质矿产图中的构造和岩性界线进行了修正；④在区分不同岩性地层的基础上，同时突出了 Au、As、W、Th 矿化异常带位置和走向，有关该矿化带成因机理需进一步研究；⑤ 本研究利用先进遥感技术和方法提取矿化信息和岩性差异为中科院地质力学研究所扶贫找矿项目“黔阳地区金锑矿控矿条件及靶区优选”提供了依据，也对高山密林地区经济快速地质填图提供有力的技术支持。

5.3.3 利用 TM－ETM 多时相数据对西鄂尔多斯珍稀濒危植物动态变化与种群信息的提取

分布在内蒙古西鄂尔多斯的四合木（Tetraena mongolica）、半日花（Helianthemum soongolicum）、长叶红砂（Reaumunia trigyna）、绵刺（Potaninia mongolica）、沙冬青（Ammopiptanthus mongolicus）等灌群是亚洲东部荒漠特有的种群，已被列为国家级珍稀濒危植物，该

地区也于1994年被列为国家自然保护区，范围东经106°40′～107°44′，北纬39°13′～40°11′，南北长约105km，东西宽约86km，海拔高度从黄河的1080 m到桌子山主峰的2149.4m。开展四合木、半日花、长叶红砂、绵刺、沙冬青等灌群的研究，对世界植物地理、植被分区、荒漠干旱植物区系演化历史、灌群受损的荒漠生态环境演变与人为因素研究、灌群生态功能与全球变化研究都具有重要的科学价值（彩图5－5）。

根据世界和亚洲植物地理分区理论，西鄂尔多斯珍稀植物分布特点体现了中心和边界交替过渡的特点，这些灌群是优良的防风固沙植物，构成了维护荒漠生态环境系统的核心。人们对这些荒漠植物的功能、作用与价值的认知经历了漫长的过程。从19世纪末，该地区就吸引着中外学者。1883年法国David和Franchet合作发表了“鄂尔多斯植物”，此后，俄国、美国、日本学者相继到过该地区考察、研究发表了一些论文和报道（赵一之等 1986，李博 1990，李博 1960，李博 1962，孔令昭 1964，陈昌笃 1964）。新中国成立以后，开展了包括地质、地理、生态环境多学科研究、工程勘察和联合科学考察、科技攻关，为生物的多样性保护和生态环境变化撰写了一系列的学术和工程性成果。

但是，利用传统的研究和样方统计方法不仅费时、费工，而且进展缓慢，很难实现对保护区大面积相同生长期不同年份和同一年份同一旬的动态监测。利用TM和ETM系列卫星提供的数据选择具有相同光谱波段选择和相同的处理结果提高不同年代和时相信息的可比性。结合野外实地样方统计、地貌、土壤条件分析和社会经济因素分析，三维立体景观分析实现了对建立国家自然保护区珍稀植物种群的有效监测。为进一步研究这些灌丛的分布特点、荒漠生态系统中的多样性、功能、合理利用植被资源，对受损荒漠生态系统的恢复提供依据。

(1) 濒危珍稀植物群落与生境

由于西鄂尔多斯珍稀植物从第三纪以来一直保持至今，对于研究环境演化、生物多样性、全球变化等具有重大的学术价值和诊断意义，受到国内外生物学、生态学、地理学等学科研究者的极大关注。然而利用遥感高新技术对荒漠珍稀濒危植物进行研究的甚少，亟待开展研究。珍稀濒危植物包括珍贵、稀有、濒危植物。珍贵植物一般是指在经济或科学上有重要意义；稀有植物是在某区域分布、个体数量很少；濒危指自然和人为因素使植物严重受损或分布范围明显减少处于渐危或濒危状况的植物。研究区珍稀濒危植物从东到西：藏锦鸡儿复合群落逐渐被四合木、半日花、绵刺、沙冬青等复合群落所代替，具有对地貌和土壤依存的空间分布特点（史念海 1980，昭和斯图 1985）。内蒙古鄂尔多斯高原西部为荒漠化草原向草原化荒漠的过渡区，年均温度7.8～8.1℃，历史上最暖月均温24.7℃，最冷月均温－10 ℃；年均降水量162.4～271.6mm；年蒸发量为2471～3481mm，湿润度0.0983～0.2469。研究区的岗德格尔山和桌子山近南北展布，黄河从西坡流向北，水汽比东坡大，导致建群植被类型略有差别，见表5－5。

四合木是亚洲中部荒漠区东阿拉善荒漠特有的单种属植物，为内蒙古仅有的一个特有属，也是蒙古高原、亚洲中部的特征属之一。四合木群落生长在地形较高的砾质和沙砾质高平原上，地表多砾石，也出现在覆沙地和丘间壤质土壤上，常与绵刺、沙冬青和狭叶锦鸡儿复合灌群出现，在四合木的建群作用下，群落中伴生灌木种较多，如霸王、沙冬青、绵刺、珍珠、猫头刺和狭叶锦鸡儿等，草本层植物也较发达，以禾本科和菊科植物为主。

表 5－5　　野外样方与主要珍稀濒危植物生境综合统计表

样方（原始样方编录）	植物名称	平均高度	盖度	密度	多度	优势度	生　境
1（1）	四合木	9.42	2326.61	0.54	0.21	21.93	黄河高位滩、岗德格尔山砾石质山前倾斜平原砾石质土或沙砾质土
	半日花	0	0	0	0	0	
	长叶红砂	0	0	0	0	0	
	红砂	11.89	6561.87	1.38	0.55	49.9	
	霸王	2.25	85.87	0.33	0.11	7.55	
	珍珠柴	13.44	2007.74	0.27	0.13	19.11	
2（4）	四合木	15.42	3146.3	0.29	0.47	38.06	黄河高位滩与岗德格尔山交接处
	半日花	0	0	0	0	0	
	长叶红砂	5.33	104.72	0.02	0.03	4.2	
	红砂	13.33	1812.96	0.04	0.05	13.39	
	霸王	11.58	5427.1	0.21	0.26	32.81	
	珍珠柴	0	0	0	0	0	
3（7）	四合木	21.89	7415.21	0.23	0.1	23.45	岗德格尔山北麓石质土丘陵坡地地貌
	半日花	4.83	3012.44	1.5	0.46	29.94	
	长叶红砂	13.33	85.08	0.04	0.01	4.79	
	红砂	13.55	1174.17	0.31	0.11	11.38	
	霸王	4	104.46	0.48	0.13	8.43	
	珍珠柴	16.58	3010.69	0.27	0.11	15.03	
4（22）	四合木	20.86	8899.61	0.23	0.2	35.61	岗德格尔山东北坡宽谷地砾质或沙砾质土
	半日花	5.69	224.62	0.21	0.21	12.61	
	长叶红砂	8.17	70.69	0.06	0.05	6.38	
	红砂	5.67	897.45	0.06	0.05	6.75	
	霸王	0	0	0	0	0	
	珍珠柴	12.55	3701.32	0.58	0.47	36.78	
5（24）	四合木	16.53	3924.37	0.29	0.24	30.25	岗德格尔山东北麓砾石质土
	半日花	0	0	0	0	0	
	长叶红砂	3	15.97	0.04	0.04	3.45	
	红砂	8.52	1259.26	0.19	0.19	16.16	
	霸王	0	0	0	0	0	
	珍珠柴	12.98	4536.72	0.71	0.47	43.87	
6（25）	四合木	30.17	9335.5	0.15	0.32	37.44	岗德格尔山与桌子山间台地沙砾石质
	半日花	0	0	0	0	0	
	长叶红砂	0	0	0	0	0	
	红砂	17.53	4766.06	0.33	0.44	35.55	
	霸王	0	0	0	0	0	
	珍珠柴	29.92	2902.57	0.13	0.24	25	

注：优势度 =（相对高度 + 相对盖度 + 相对密度 + 相对多度）/4×100%，原始样方 25 个。

由于四合木易燃，近年在桌子山地区大力兴办国家厂矿、集体企业，四合木成为当地居民的主要燃料，对四合木的生长破坏较严重，使本种处于濒危之中。

半日花是亚洲中部荒漠的特有种，它在我国新疆的准噶尔和内蒙古桌子山南部阿拉巴素的山麓及其邻近地区，呈岛状残遗分布。半日花分布在地形为起伏高差 10～ 50m 的山麓石质残丘，地表具大量的石块，覆盖率达 70% 以上，形成强烈干燥剥蚀的石质丘坡地。半日花荒漠和石质－砂质化半日花荒漠群落中除半日花占优势外，木旋花为主要的伴生种，此外，还有松叶猪毛菜、长叶红砂、狭叶锦鸡儿、四合木、猫头刺和霸王。草本层植物为石生植物和旱生丛生禾草为主。

绵刺为古老的单种属植物，也为蒙古高原或亚洲中部所特有。绵刺群落的主要生境土壤和地貌类型是薄层覆沙的沙砾质戈壁，其分布对土壤水分的多寡有明显的反映，属沙砾质荒漠植被，绵刺建群种有四合木、沙冬青、霸王、长叶红砂等。

沙冬青是东阿拉善荒漠特有的古老残遗植物，也为蒙古高原和亚洲中部所特有。沙冬青

是阿拉善荒漠地区惟一的常绿灌木。它的存在，无疑地也使亚洲中部荒漠植物区系多元发生观点与热带起源一说联系起来，并为之提供了又一有力的证据。

1987年9月和1999年8月两次野外调查，发现生长在西桌子山水泥厂附近沙砾质荒漠上的霸王群落受破坏比较严重，枯死的植株较多，有可能沦为新的濒危植物。

(2) 遥感数据处理与相关分析模型

以NDVI为基础揭示全球变化、生物多样性、NPP、地表能量转换等宏观规律已经成为国际遥感常规方法。探索提取不同植物信息，研究植被种群和多样性则是当前的热点。为了动态对比保护区内植被12年变化，选取了30m分辨率的1987年9月TM和1999年8月ETM卫星的多光谱6个波段数据，数据的轨道号为129－32；图像子区选择在保护区的西部，桌子山西坡平行于荒漠灌群具有多样性特点，像元数为837列×1360行，子区面积1000多平方公里；DEM数据为1:25万数字高程数据，覆盖面积500多平方千米。为了提高图像信息的可比性和可信性，处理过程中注意选择具有相同光谱波段和相同的处理方法。通过对比数字化保护区植被分布图，野外样方统计数据建立以地貌、土壤为主要因子的多元相关分析模型。为了动态对比保护区内植被12年变化，选取了30m分辨率的1987年9月TM和1999年8月ETM卫星的多光谱6个波段数据，经过两个时期NDVI运算得到植被变化分布图像，图像中客观地反映了植被的减少与城市扩张和经济发展的时空间相关性。

(3) 遥感数据中植被种群信息分离

利用30m多光谱卫星数据分离不同灌木种群的珍稀植物是弱信息处理问题。本研究采用弱信息处理技术（MPH技术）中的两个步骤。第一步利用掩膜技术剔除了图像范围内代表水体和部分干涸河道光谱的像元；第二步在掩膜了的基础上，采用ETM的1，2，3，4，5，7等六个光谱通道的数据主成分变换。由于掩膜了代表水体和部分干涸河道光谱的像元，提高了主成分算法分解六个光谱通道的灰度信息的能力。原始数据ETM六个光谱通道数据的均值和方差、未掩膜主成分变换、掩膜后主成分变换的特征值和方差比较。原始数据的均值和方差表现的是各个波段DN值的分布特征；主成分变化方差是协方差，是对各波段整体像元相关性和特征的量度，方差越大越能表现共同特征，方差小则越能体现局部特征。未经掩膜的主成分变换特征值和方差反映了6个波段整体像元的DN值特征；主成分变换的第一主成分累积了主要的地表反照度信息，表现为地形信息，是各波段的共同信息；掩膜后一部分像元为零值，在主成分变换统计中这部分零值像元被填入近似于变换前原始数据统计各波段均值的平均值，人为弱化了特征，提高了对剩余像元的分解效果。图5-11从上述三种统计结果的方差对比分析，掩膜后的主成分方差范围扩大，包含了更多波段的共同信息，后续各分量与未经掩膜的主成分相同分量相比变化不大，体现了剩余像元特征对更微弱信息的分解效力。选择PC2，PC3和PC5合成假彩色图像比较好地区分出灌群。

(4) 样方统计与三维景观物群分带模型

野外样方剖面选择在岗格尔山与桌子山，横穿两山边坡和山间谷地。样方4m×4m，通过25个实测样方对主要植物进行了平均高度、盖度、密度、多度等四个因子及其相对参数和优势度等的统计分析，同时参考了李新荣10m×10m的样方统计结果。结合遥感数据

30m×30m分辨率像元尺度，按地貌和土壤类型将样方归类建立遥感分析模型，

$$LSG_{color} = L_i + S_i + G_i \qquad (5-4)$$

式中 LSG_{color} 表示和地貌、土壤建群植物相关的图像色彩；L_i 表示地貌特征因子；S_i 表示土壤因子；G_i 建群植物组合。

利用 PCI 图像处理软件在实现 MPH 技术图像几何校正和 1:25 万地形图的栅格化处理的基础上制作成三维立体图像，见彩图 5-6，更好地表达虚拟三维实地景观。从景观图像中可以直观地看到灌群的分带性特点。这于表 5-5 中描述的不同种的珍稀植物的建群功能基本一致。

1~6 系列标记表示野外样方剖面，解释如下：图 5-11 建群植物分类图中（研究区）1~2在本图中为合并项，为红砂-四合木；在彩图5-6遥感图像中为 2 项（1 为红砂，2 为四合木）；3 为半日花；4~6 为四合木、珍珠柴；5 为四合木、松叶猪毛菜。

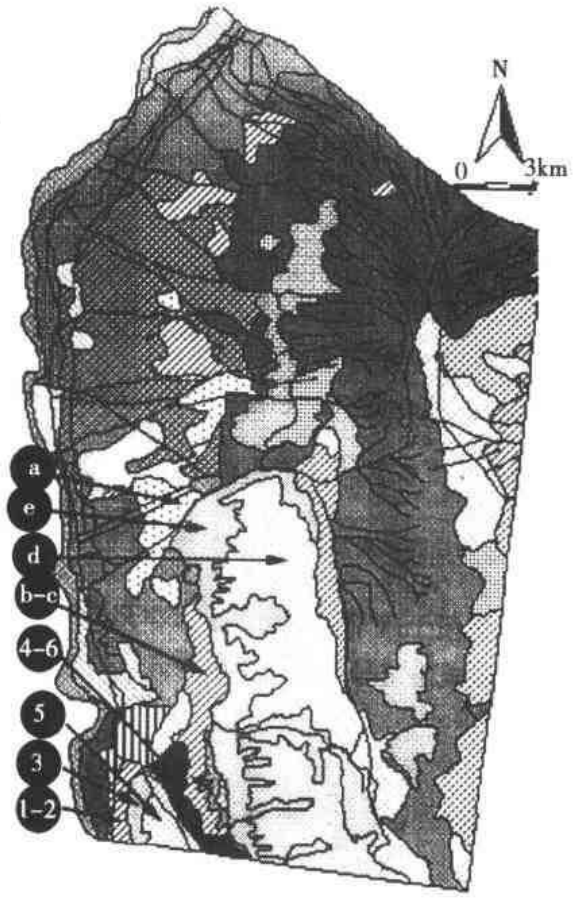


图 5-11　西鄂尔多斯植物分类图（根据内蒙古环境监测中心 1994 年 1:10 万图数字化改编）

a~e 系列标记表示与植被分布图比较，解释如下：图 5-11 与彩图 5-6 对比，a 霸王和油蒿、b ~c 红砂和小禾草、d 戈壁针茅和松叶猪毛菜、e 针茅和半日花。

图5-12统计直方图清晰地解释了彩图 5-7 中的色彩分带垂直和水平分带规律，图

5－12中的建群植物、物群组合水平分带特点为，从岗德格尔山西坡，半日花从西坡开始逐渐增多，从山顶到东坡减少；长叶红砂群落主要发育在西坡；红砂主要分布在西坡。该地区是四合木的核心生长区，加之单株较大，样方统计特点分带特点不明显。

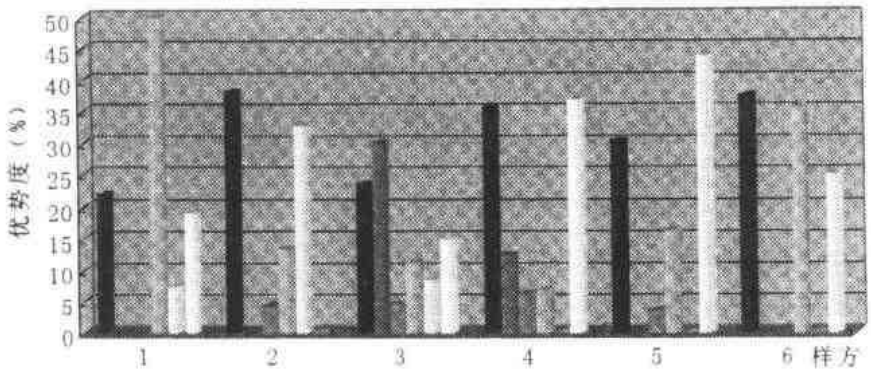


图 5－12　岗德格尔山不同生境植物类型统计分析图

干旱、半干旱荒漠、半荒漠地区土壤分带性依赖于地形地貌景观类型，所以群落的垂直分带性也表现得比较明显。土质为砾石主要有建群植被为四合木，沙砾质为霸王群落，石质残丘上主要有半日花群落。

(5) 植被指数动态分析

植物光谱在 0.63～1.1μm 出现一个反射肩，根据植物光谱的这个特征，利用陆地卫星 TM 和 ETM 的蓝通道 CH3 光谱覆盖范围是 CH0.63～ 0.69μm 与近红外通道 CH4 0.775～0.90μm 对植物叶子及其生长状况有很强的指示作用。归一化植被指数 NDVI（绿度）是经可见光波段与近红外波段减—加—比而成的固定数值，它对植物的生长面积、健康状况及光合作用的强弱反应灵敏，NDVI 已经是利用遥感技术研究植被覆盖面积、生物量和 NPP 的基本参数。本研究利用植被指数揭示植被覆盖面积的变化，分析研究区生态环境的变化趋势。

归一化植被指数，

$$NDVI=\frac{CH4-CH3}{CH4+CH3} \tag{5-5}$$

其中 CH3、CH4 分别表示 TM 的第三和第四通道的反射率。为了查出 1988 年 9 月和 1999 年 9 月 11 年植被覆盖的动态变化。首先，利用公式 5－5 分别提取两个不同年份 TM 数据的 NDVI。彩图 5－7 中（a）（b）分别为 1999 年和 1988 年相同月份的 NDVI－（红）与其相应的原始 TM 数据 CH4－（绿）、3－（蓝）的合成图像，植被在图中表现为红色，1999 年图像中的黄色是植被覆盖面积明显减少的地区。

为了提取变化面积采用了以下计算公式，

$$S_{变化面积}=\frac{NDVI_{99}}{NDVI_{88}} \tag{5-6}$$

经过公式 5－6 处理的图像可以将两个时期 NDVI 的不同部分增强，提取出来。将结果图像

与原始通道 4，3 合成，产生图像（c）。在将图像（c）中 NDVI 变化部分分离出来形成图像(d)，统计变化的像元数就可以定量化的解释 12 年，沿黄河人工林、河滩植被面积减少了 10.7%，主要集中在新磴口附近，分布在乌海市桌子山一带植被的面积减少了 0.12%，客观地揭示了与 20 世纪 90 年代城市扩张、经济发展的相关性。

(6) 结论与讨论

利用卫星家族中 30m 分辨率的廉价卫星数据，研究提取数据中有效弱信息方法不仅提高了数据本身的利用率，而且揭示了本应反映出的科学规律。本文研究采用了 MPH 技术提取和区分珍惜建群植物和组合特征，并且制作虚拟现实的三维景观图展示植物的空间分布规律；结合野外样方和前人的工作成果证实了从岗德格尔山、桌子山西坡到东坡珍稀建群植物和植物组合水平与垂直分带的结构特点，遥感图像上显示的桌子山西坡植物类别比 1994 年 1:10 万植被分布图多 1 类。

利用 30m 分辨率的 TM 和 ETM 系列数据可以揭示珍稀植物分布区盖度的时空变化；从时空间关系上分析，11 年中接近新磴口和乌海工业区的绿度覆盖减少的比其他地区快，但是缺少地面调查验证资料，具有另设课题研究的价值；荒漠地区的其他植物，如霸王在 1999 年 9 月野外调查时选择性枯死沦为新的濒危植物，霸王与其他种群的关系以及霸王枯死原因还有待结合生态学、分类系学、遗传学等和区域生境变化与全球变化之间的关系等深入研究。

总之，本研究显示了遥感在研究荒漠地区珍稀濒危植物的潜力，使用廉价的 30m 分辨率多光谱 ETM 数据可以形成遥感运行系统对保护区实施动态诊断和监测。

5.3.4 加拿大北部地区应用遥感多光谱数据提取含金热液蚀变带信息指导找矿

Sulphurets 地区位于加拿大北部“金、银成矿三角”地区。该地区金矿是由加拿大三家采矿公司联合勘探，1989 年在 Sulphurets 找到了一个储量约 7t 的金矿，Au 平均品位为 2.75×10^{-6}。为了进一步扩大外围勘探，金矿公司委托加拿大地调所和加拿大遥感中心在该地区做遥感工作。马建文博士正在加拿大遥感中心做访问学者研究，承担和完成了这个项目。

Sulphurets 位于美国的阿拉斯加西南是典型的高纬度山区，气候寒冷，相对高差大，野外工作时间短，交通靠直升飞机，给地质找矿和蚀变填图带来了极大困难。因此，在高纬度山区、冰川和积雪环境，利用陆地卫星 TM 数字图像处理、识别、提取热液蚀变带信息，具有找矿的现实意义。本次研究选择的遥感数据的接收时间为 1985 年 9 月 7 日，这个时相的图像冰川覆盖面积最小，岩石裸露面积最大。子区图像是 TM 50555－191758 幅的四分之一景。

(1) 区域地质背景

研究区位于加拿大西海岸造山带，区内发育中侏罗世的火山岩、沉积岩，这些岩石和地层在白垩纪时经历了强烈的构造和变质作用，属于典型的岛弧背景岩系组合。从侏罗纪到第三纪主要有三期岩浆活动形成大量的中性火山碎屑岩，如安山质火山灰、火山砾岩、斜长角

闪岩、二长岩、正长岩、花岗岩。大面积出露的蚀变岩以泥质、硅质、黄铁矿化、绢云母化为主，石英－黄铁矿－绢云母化蚀变带的表面常常伴随有褐铁矿化的铁染现象，金矿就赋存于蚀变岩带中。因此，利用 TM 数字图像处理提取和识别石英－黄铁矿－绢云母化热液蚀变带信息是该区找金的关键。

(2) 地物波谱特征

Hunt 等人的研究表明，含 Fe^{+3}和 OH 的矿物在 0.55μm，0.99μm，1.4μm 以及 1.9μm 出现较强的吸收谱带。研究区大面积出露的蚀变岩是以泥质、硅质、黄铁矿化、绢云母化为主，地表伴随有褐铁矿化的铁染现象。由于 TM 波段较宽，对蚀变岩的反射光谱的响应包含了 Fe^{+3}和 OH^-型光谱特征。因而在 TM1 和 TM2 波段出现 Fe^{+3}吸收峰而在 TM3，TM5 出现 Fe^{+3}反射峰，并且还在 TM7 波段出现强 OH^-吸收峰。研究区蚀变岩的反射光谱曲线表现为一种混合特征曲线，这主要是由于褐铁矿化只出现在石英—黄铁矿—绢云母化蚀变带的表层，而且 TM 数据接收季节正值冰、雪融化季节，地表潮湿，这对蚀变矿物的反射光谱特征也会产生一定的影响，与试验室测定的曲线相比较，蚀变带子图像的像元亮度值的统计均值、标准差的最大值向 TM3 或 TM7 波段偏移。

由于研究区相对高差大，植被种类，密度也相差较大，针叶林生长在河谷的两侧，雪线附近主要生长雪线草类。植被的反射曲线相似。TM1、TM2 波段反射率低，TM4、TM5 波段反射率较高，而在 TM7 波段反射率迅速降低，但反射曲线出现的反射百分率相差很大。

冰雪的反射波谱测试与 TM 数据接收为相同季节。冰雪在可见光范围反射峰，在 TM 二波段反射率最高，近红外和远红外波长范围内反射度低，这是由于冰川边缘携带碎石和风化土造成的，但是，曲线的总趋势高于植被的光谱曲线。

(3) 遥感数据处理

数字图像处理的训练区为 814×1004 像元，图像处理使用的是加拿大遥感中心 PCI 微机图像处理软件和工作站 Dipix 图像处理软件和数字化 SPANS 软件结合，功能互补。图像处理的步骤为：首先，根据 TM7 个波段原始数据的统计结果，选择相关性最小的 3 个波段，合成一幅彩色图像。然后，对这幅彩色用图像掩膜技术将代表冰川与积雪、针叶林、雪线草以及裸露岩石的像元分离出来，形成四个独立的子图像。用这种方法减少整幅图像中不同地物 DN 值的相关性。在此基础上，试验不同的图像处理算法处理只代表裸露岩石的像元数据，以提取蚀变带的信息。

多波段彩色合成 TM7 个波段数据的相关矩阵数字统计结果表明：TM543 波段合成(RGB)，对合成图像直方图的 0～70 线性拉伸处理，压抑了冰川和积雪的亮度范围，提高了图像其他地物之间的亮度值差别，使图像清晰地呈现出各种地物（彩图 5－8）。

图像掩膜处理：热液蚀变带信息，在各种三波段色合成图像上都没有得到很好显示。采用比值法和主成分等图像处理方法，对未经掩膜的原始图像的处理也没有取得理想的效果，原因是：①包括蚀变带在内的裸露岩石只占图像面积的 15%，而其他地物占了图像面积的 80%以上；②不同地物之间反射光谱相互叠置，图像数据相关性大，大大降低了识别和提取蚀变信息的可能。图像掩膜技术主要是结合野外调查和地质资料，把 TM 多波段彩色合成或单波段图像按不同地物种类分割成四幅子图像，进而达到消除或减少整幅图像叠置现象对

蚀变带信息提取的影响。

TM5 波段的直方图展示了四组不同亮度的像元频数集中区。把这四组不同像元频数区分别赋 1 值，其他部分赋 0 值，结果就形成 4 个分离的图像合膜。用这个图像再分别乘以选择的 TM1、2、3、4、5、7 六个波段，形成代表不同地物的子图像。这些子图像是：冰川和积雪，裸露岩石，雪线草，针叶林。掩膜结果与 TM5 的关系用 BOX 图表示，见图 5－13。图中每个矩形的中线代表了某种地物像元数的中值，矩形的其他部位和黑体线部分表示标准差。BOX 图展示了不同子图像之间像元 DN 值数理统计的相关性，并用来表达原始图像中不同地物之间地物的可分性。如 TM5 波段的 BOX 图中，岩石和雪线草的矩形和中值线相互叠置，相关性大，很难区分；冰川、积雪与针叶林之间相关性小，容易区分。

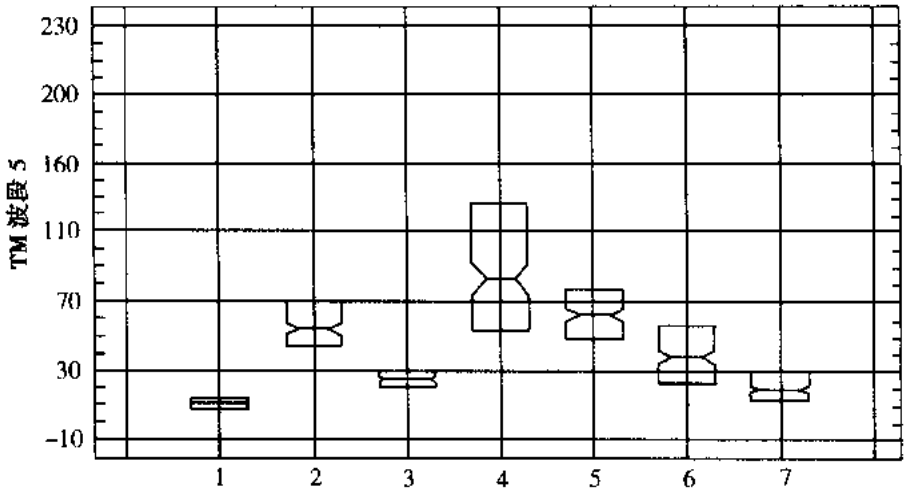


图 5－13　掩膜结果与 TM5 的关系用 BOX 图表示

1－冰水堆积物；2－针叶林；3－灌木；4－蚀变岩石；5－二长岩；6－未蚀变带围岩；7－冰

在图像掩膜的基础上，选择代表裸露岩石和雪线草的子图像数据，采用不同的增强处理方法，实现对含蚀变矿物 Fe^{+3}和 OH^- 的蚀变信息的提取与识别。

主成分变换：TM 比值增强处理是基于像元点的处理其效果与掩膜前比较对于增强蚀变信息效果不大。由于主成分变换是基于域相关（对全部波段的 DN 值统计）的处理，具有压缩数据和降维去相关的能力。在掩膜去掉了可能造成统计相关的地物像元的基础上，再运用主成分变换处理岩性子图像其运算效力得到充分的发挥。对不同岩性具有较好的区分效果。

主成分变换结果统计数据表中的运算前输入 TM 各波段与变换后的 PC 正、负权重值的对应关系，说明了经主成分变换后因子图像信息的波谱含意。选择代表裸露岩石和雪线草的 TM1、2、3、4、5、7 波段的子图像进行主成分变换，变换后的 PC 数据统计特征矩阵作为筛选和解释正、负权重值的实际波谱和地质意义（表 5－6）。从表中可以知道：PC4 对应 TM3 波段是正权重值（0.72%），主要反映 Fe^{+3}的信息；PC5 对应 TM5 波段也是正权重值，反映了 Fe^{+3}和 OH^- 的综合信息；PC3 对应 TM4 波段是负权重值（－0.90%），反映的是二长花岗岩的信息正权重值图像亮度值高，负权重值图像亮度值低。选择 PC543（RGB）彩色合成，图像上蚀变带表现为黄色，二长岩表现为蓝色，并发现二个新区，见彩图 5－9 中的黄色 C、D 区。为了使掩膜＋主成分变换的图像恢复其整体性，再将被掩膜掉的子图像

用逻辑运算方法合并到 PC543 图像上，使其成为一幅完整的图像，见彩图 5－10。

表 5－6　　裸露岩石和雪线草 TM 6 个波段子图像的主成分分析特征矩阵

特征值		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
		2044.346	1051.221	62.784	20.794	7.161	1.972
TM 波段		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
特征向量组分	PC1	0.6183	0.6183	0.4770	0.2778	0.3858	0.2189
	PC2	－0.4751	－0.1540	－0.1275	0.1124	0.7657	0.3678
	PC3	0.1757	0.0127	0.0573	－0.9034	0.0711	0.3802
	PC4	－0.5841	0.2798	0.7202	－0.0415	－0.2259	0.0955
	PC5	－0.0355	0.0648	0.1798	0.3014	0.4564	－0.8143
	PC6	－0.1367	－0.8817	0.4494	0.0395	0.0395	－0.0036

（4）环形构造与矿化弱信息的关系

TM543 波段彩色合成图像的构造解译结果与蚀变带信息复合表明，研究区是一个由许多线性构造组成的环形构造，该环形构造的直径约 20km。野外实地调查结果表明：构成该环形构造的线性构造主要是断裂构造和侵入体与围岩的接触带。从蚀变带信息和环形构造的复合图可以清楚地看到，蚀变带主要分布于环形构造东部，这正好是环形构造与 NE 向线性构造的交汇处，西区蚀变带也分布在环形构造与 NE 向线性构造的交汇部位，见图 5－14。

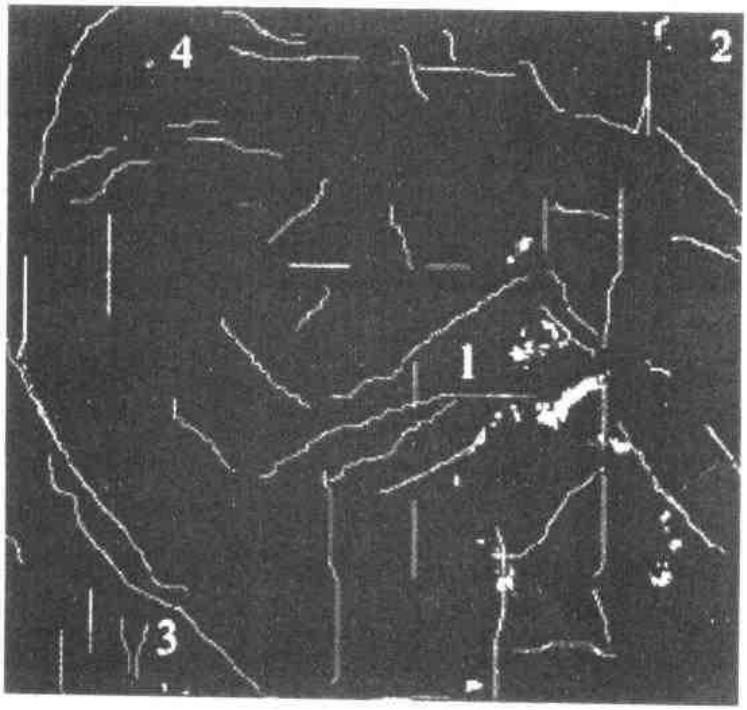


图 5－14　蚀变信息与环形影像融合图像

（5）结论

1）研究中采用的数据和技术路线见图 5－15，本章没有包括分类图像。

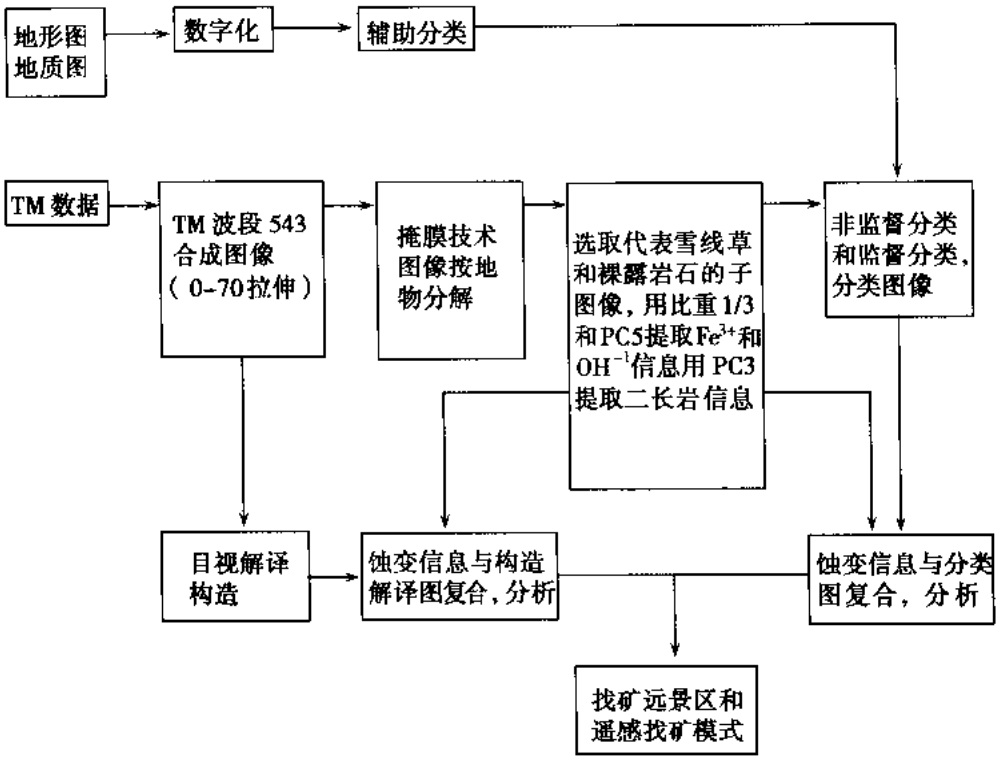


图 5－15　Sulphurets 地区的遥感地质研究组合和技术流程图

2）含金的石英－黄铁矿—绢云母蚀变带受北东向（NE）线性构造和环形构造交汇部位的控制。

3）成矿具有多期性特点，但最后一次成矿作用与二长岩侵入关系密切，其侵入时代为白垩纪。

4）通过提取 Fe^{+3}和 OH^{-}蚀变信息填制了已知的含金带，同时发现两处新区，并经过野外验证。

参 考 文 献

陈述彭，童庆禧，郭华东 .1998. 遥感信息机理研究 . 北京：科学出版社

李小文，王锦地 .1995. 植被光谱遥感模型与植被结构参数化 . 北京：科学出版社，pp64～74

Christopher O.Justics, *et al*.1998. The Moderate Resolution Imaging Spectradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research.IEEE. Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 36, No.4. July.

Gore, Al.1998.The Digital Earth: Understanding Our Planet in The 21th Century.Givwn At the California Science Centre, Los Angeles, California, on January 31

Jianwen Ma, V. R. Slaney, J.Harris *et al*.1991.Use of landsat TM data for mapping of limonitic and altered rocks in sulphurets area, central british Columbia, Proceedings of the 14th cannadian syposium on remote sensing calgary, alberta, cancada, McAra, pp 419～422

Jianwen Ma, Ballantyne, S. B.1992. LandSat Thematic Used to Mapper with ground truth element distribution: an example from British Colunbia Golden Triangle DNriet. Program with Abstracts, GSC Forum 1992, Canada, 17～18, January, pp.14.

马建文 .1995. 利用 TM 数据提取含金蚀变带的方法研究 . "八五" 地质科技重要成果学术成果交流会论文集 . 中国地质学会 .

马建文 .1998,（3）. 数据快速提取含矿蚀变带方法研究遥感学报

Jianwen Ma.1993.gold in the Hills of British Colunmbia. Landsat data users notes, spring

Jianwen Ma, Souxun Yan, Changlin Wang.2000. Exploration of polymetallic mineralization zone using Landsat data and Geochemical data in Min－tic－gai area of Western Kaci－Kunlun Mountains, China, INT.J Remote Sensing.

丰茂森 .1992. 遥感图像数字处理 . 北京：地质出版社

李继亮，孙枢，郝杰等 .1999,（2）. 论碰撞造山带的分类 . 地质科学

李永安，李向东，孙东江等 .1995. 中国新疆西南部喀喇昆仑羌塘地块及康西瓦构造带构造演化 . 乌鲁木齐：新疆科技卫生出版社

毕华，王中刚，王元龙等 .1999,（5）. 西昆仑造山带构造－岩浆演化史 . 中国科学

丁道桂，王道宣，刘伟新等 .1996. 西昆仑造山带与盆地 . 北京，地质出版社

刘德权，唐延龄，周汝洪 .1996. 中国新疆矿床成矿系列 . 北京，地质出版社

汪玉珍，方锡廉 .1987,（1）. 西昆仑山、喀喇昆仑山花岗岩时空分布规律的初步探讨 . 新疆地质

Masoni A, Ercoli L, Mariotti M.1996. Spectral properties of leaves deficient in iron, sulfur, magnesium, and manganese. Agron. J. 88:: 937～943.

李小文，王锦地 .1995. 植被光学遥感模型与植被结构参数化，北京：科学出版社

Al－abbas A H, Barr R, Hall S D, *et al*. 1974. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves. Agron. J., 66: 16～20

赵一之，雍世鹏 .1986. 内蒙古珍稀濒危植物及其保护对策的初步探讨 . 草原环境保护学术讨论会论文集 .
李博 .1990. 内蒙古鄂尔多斯高原自然资源与环境研究 . 北京：科学出版社
李博 .1960,（2）. 内蒙古荒漠区植被考察初报 . 内蒙古大学学报
李博 .1962,（2）. 内蒙古地带性植被的基本类型及其生态地理规律 . 内蒙古大学学报
孔令昭 .1964,（1）. 内蒙古鄂尔多斯东南部沙区各种生态类型植被的化学成分特点 . 植物生态学与地植物学丛刊
陈昌笃 .1964,（1）. 我国典型草原亚地带和荒漠草原亚地带中段（鄂尔多斯地区）的分界线在哪里？. 植物生态学与地植物学丛刊
史念海 .1980,（6）. 两千三百年来鄂尔多斯高原和河套平原农林牧地区的分布及其变迁 . 北京师范大学学报
昭和斯图 .1985,（2）. 鄂尔多斯高原天然草场暖季冷季产草量的调查研究 . 中国草原

第六章　多维空间遥感数据的角度分析与弱信息挖掘

§6.1　概　　述

本章主要介绍了多维空间遥感数据的角度分析理论、模型和技术方法。技术方法重点介绍逐步正交变换和正交投影变换。

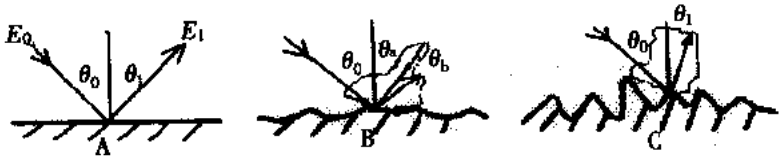
在长期的图像处理实验中，我们发现一些与背景成分差别不大的微弱信息，对多光谱TM数据实施了掩膜和主成分变换后难以显示出来。如发育在钾长石斑晶花岗岩中的含金钾化蚀变带，在采用了MPH技术处理后，选择两个主分量作散点图分类时发现，钾化蚀变信息并没有出现在散点图的重心位置，而是出现在散点图的边缘。通过这个实验，我们证明了一个长期以来被遥感图像处理工作忽略的问题，即目前使用的商业化图像处理软件中收录的算法，在一般统计意义上是最佳的，但在提取遥感数据中弱信息时，不一定会取得最佳效果。这一认识的突破，是导致我们多维空间遥感数据的角度分析理论、模型和技术方法。

科学计算的可视化是空间数据场的可视化。标量、矢量、张量是线性电磁系统中定义多维数据场的基本参数。从瞬变电磁系统的因果律出发，可以将遥感传感器对电磁波的响应看做是地表电磁场量的映像，像元是电磁场量的载荷。由于电磁场量的线性关联多波段遥感数字图像可以表示为多维空间数据场量。在多维向量空间中可以对数据场量进行度量、分解和构造向量角度函数。遥感多维空间数据场有效弱信息提取方法则是基于多维空间数据场角度分析展开的。

实验室地物光谱分析证明：自然界中没有两种地物具有完全相同的光谱曲线。根据这一实验结果有人提出了地球表面物质存在“DNA”的设想，但是用遥感数据反演地物时所遇到的问题并没有那样简单。主要因为传感器响应到的能量信号与地球表面反射、辐射能量不相等，在传输过程中被干扰弱化影响了探测度（马建文　1999，马建文　2001）。地物光谱是在可见光—短波红外域是连续变化的，卫星遥感探测器仅选取了数个有效窗口，因此多个波段域信息能近似模拟连续变化的地物光谱特征。地球表面不同地物反射、辐射强度不同，相对较弱的信息有时是解释宏观规律的指示信息，重要的信息，但在反射、辐射背景场中被强信息抑制。同理，当相对较弱的电磁能量构成一定的面积场强分布可以形成单元光谱，电磁系统中的这种现象被称之为临地效应或单元效应。鉴于上述认识，遥感界从不同的方面探索表达地表能量场与遥感多维空间数据场之间的关联模式，如植被指数（NDVI）和植被、水综合指数（NDWI）（田庆九　1998），二向性反射模型（BRDF）（Li X　1986），反射率、反照度综合模型（TOA），初级净生产力（NPP）等的研究。这些研究都是以数据反演为目的在地面能量模型、几何模型的基础上进行的。本章介绍了我们如何将空间角度理论引入图像处理及其算法，还选择了典型应用来说明算法的有效性，这些示例已经在国内外刊物上发表。

§6.2 入射、反射能量角度关系

我们利用概念模型来帮助构造遥感数据计算矩阵的角度基。几种地表散射模型的入射、反射角度与粗糙地表的散射光谱关系。



(1) $\theta_0 = \theta_1$　　(2) $\theta_0 = \theta_1 + \theta_2$　　(3) $\theta_0 \geqslant \theta$

图 6-1　几种地表散射模型的入射、反射角度关系

不同粗糙度地表散射影响的过渡关系，

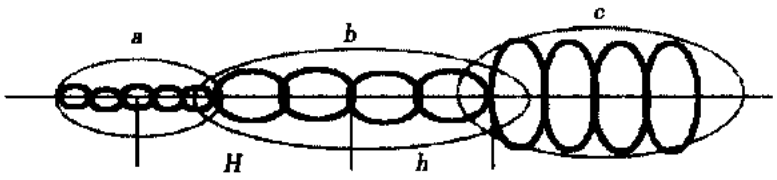


图 6-2　不同粗糙度地表散射影响的过渡关系

6.2.1　太阳光到达地表的辐射被称之为直接辐射（E_D）

$$\left.\begin{aligned} E_D &= sE_{on}\cos(\theta_i)\exp\left(-\frac{\delta}{\cos(\theta_z)}\right) \\ E_{on} &= \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 E_{sc} \end{aligned}\right\} \qquad (6-1)$$

其中：s —— 遮蔽因子，$s = 1$ 时，太阳照射面，$s = 0$，被遮蔽，为阴影区；

E_{on}—— 大气上界垂直太阳光线平面的太阳辐射；

E_{sc}—— 太阳常数(1367 ~ 1395$WO\mathrm{m}^{-2}$)；

θ_i—— 坡面法向矢量和太阳光的夹角，即入射角；

δ —— 大气光学厚度；

θ_z—— 太阳天顶角和太阳仰角构成一对互余角；

R_0—— 日地平均距离，R 实际日地距离。

入射角的计算利用下面的公式，

$$\cos(\theta_i) = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta\cos(A_s - A_r) \qquad (6-2)$$

其中：α——太阳高度角 $\alpha + \theta_z = 90°$；

β——坡度角；

A_s——太阳方位角；

A_r——坡向方位角。

6.2.2 大气因子产生的临边效应

太阳光在到达地表的目标物之前会由于大气中物质的吸收、散射而衰减。同样，目标反射在到达传感器之前也会被大气吸收和散射。地表接受到的能量除了太阳直射分量外，也包括大气的散射，而大气强烈地改变着到达传感器上的地物光谱特征。不同的区域，采用不同的模型处理大气影响，很难找到独立于图像之外的大气纠正参数（Li Shuqing 1998，Proy 1989）。

$$\left.\begin{aligned} E_d &= E_{dh}(1+\cos\beta)/2 \\ E_{dh} &= E_{on}\cos(\theta_z)[0.271-0.2939(b_0+b_1\mathrm{e}^{-km})] \end{aligned}\right\} \tag{6-3}$$

其中：E_{dh}—— 是在水平面上的散射强度；

β—— 是坡度；

b_0、b_1、k ——和大气可见度有关，在可见度为 21km 时，

$$\left.\begin{aligned} b_0 &= 0.4237-0.00821(6-H)^2 \\ b_1 &= 0.5055+0.00595(6.5-H)^2 \\ k &= 0.2711+0.01858(2.5-H)^2 \end{aligned}\right\} \tag{6-4}$$

其中 H 为传感器高度，以上式子为经验公式。

利用图像的灰度数据研究地表目标的信息，首先要确定地表辐射能量和图像 DN 值之间的关系。第一步将 DN 值变换为传感器的辐射能量；第二步将传感器辐射能量变换为地表的辐射能量。对于 Landsat－4 和 Landsat－5 TM 系统，第一步校正的系数如下仪器校正参数如表 6－1 所示（EOSAT 1994）。

表 6－1　　EOSAT 公布的 TM 校正参数－增益和偏移系数

Band	Landsat－4		Landsat－5	
	Cal－gain	Cal－offset	Cal－gain	Cal－offset
1	0.672	－3.361	0.642	－2.568
2	1.217	－6.085	1.274	－5.098
3	0.819	－4.917	0.979	－3.914
4	0.994	－9.936	0.925	－4.629
5	0.120	－0.7208	0.127	－0.763
6	0.0568	+1.252	0.0552	+1.238
7	0.0734	－0.367	0.0677	－0.0338

利用表中的系数，可以计算出传感器接收到的辐射能量，

$$L_b^\lambda = cal-gain_b \times DN_b \times cal-offset_b \tag{6-5}$$

为了获得地表辐射能量的大小，将上式写成，

$$L_b^s = L_b^{su}(x,y) + L_b^{sp} \tag{6-6}$$

其中 L_b^{su} (x, y) 是地表向上辐射的能量，L_b^{sp} 是大气程辐射。为了得到地表的辐射能量，改写上式如下，

$$L_b^s = \tau_b L_b(x,y) + L_b^{sp} \tag{6-7}$$

地表辐射能量为，

$$L_b(x,y) = \frac{L_b^s(x,y) - L_b^{sp}}{\tau_{sb}} \tag{6-8}$$

目前常用的大气校正方法有下面两种方法：

a. 利用辐射传输方程的方法，利用数值解法近似求解辐射传输方程，大气的影响主要由气溶胶散射和水蒸气吸收引起。为了求解方程的解，需要预先知道可见光和近红外气溶胶的密度和热红外区的水蒸气的浓度。然而这些参数很难测量，所以辐射传输方程截法只能得到大气影响的近似解，见表 6－2。

表 6－2　　大气条件的离散特征

大气条件	相对散射模型
很晴朗	$\lambda^{-4.0}$
晴朗	$\lambda^{-2.0}$
中等	$\lambda^{-1.0}$
不晴朗	$\lambda^{-0.7}$
非常不晴朗	$\lambda^{-0.5}$

b. 利用地面实况数据的方法在采集图像数据时，设置反射率已知的目标物，将实况数和图像上的数据进行比较，从而消除大气的影响。但是在人迹罕至的高山地区，很难获得地面实况数据，这种方法受到一定的限制。

从以上分析看到，利用正演计算和地面定标的方法本身都有局限性，所以目前图像处理的方法一般采用的都是图像本身读取参数相对方法。在可见光区域中，最简单有效的方法是假设在某个波段上大气的影响整景相同，在可见光和近红外范围内大气影响以程辐射为主。实现方法是在图像范围内寻找亮度最暗的像元 DOS (dark object in scene)，在最暗像元内部由于接收不到太阳直射辐射，所以可以认为最暗像元接受到的是大气散射的辐射能量或是利用白云顶端 DN 值减去沙漠 DN 值的方法获得。

下面表格是在不同波段大气散射的估计计算方法。

6.2.3　地表散射与临边效应分析模型

由于地形的影响，遥感多波段图像上深度很大的阴坡可以有 DN 值；较亮地物的 DN 值会影响到相邻像元的 DN 值。从数学上讲，地形的影响相当于一个乘性因子，对每一个波段都基本相同，因此两个波段的比值可以压制地形所造成的亮度差异，从而突出了地物反射的变化特征。

$$E_A = \sum_{B=1}^{B=i} \rho_B E_B \cos(T_A)\cos(T_B)\mathrm{d}S_B/\pi r_{Ab}^2 \tag{6-9}$$

式中，T_AT_B—— 地表的法向方向和 AB 连线的夹角；

ρ_B、E_B—— 像元 B 点的反射率和接收到的照度；

γ_{AB}^2——AB 间距离的平方。

综合以上三部分照度，假定地表为朗伯反射，地表的入射强度和反射强度为，

$$\left.\begin{aligned} L_i &= E_D + E_d + E_A \\ L_b &= \rho \frac{E_D + E_d + E_A}{\pi} \end{aligned}\right\} \tag{6-10}$$

其中，ρ 是地表反射因子。ρ/π 是对于朗伯面的双向反射分布函数，当不考虑吸收时，$\rho = 1$。对任意的波段 b，利用上式和大气影响导出地表目标的反射率值，

$$P(b) = \frac{\pi(L_s(b) - L_p(b))}{(E_D + E_d + E_A)\tau_{vb}} \tag{6-11}$$

其中，$\tau = \exp(-k/\cos(\theta_z))$，$L_s$ 可以从图像的 DN 值得到，对于 TM 图像，利用校正因子 a_0(偏移) 和 a_1(增益) 求出。

$$\left.\begin{aligned} L_b^s &= a_0 + a_1 \times \mathrm{DN} \\ E_d &= L_b^p \times \frac{\pi}{\rho} \end{aligned}\right\} \tag{6-12}$$

对于 L_b^p 的计算，利用阴影区的 DN 值可以算出散射量。

§6.3 三角函数矩阵

以上讲述了关于临边效应的各种概念和数学模型，这些模型对于定量和相对准确理解数据中临边效应是非常有帮助的。但是将这些模型用到图像处理中必须构造三角函数矩阵基(孙伯鲁，1996)。

多维正交变换利用了矩阵对角化分解性质，对多波段遥感数据方差协方差矩阵 A 进行逐步旋转，每一步旋转特征轴表示的角度都不同，就可以实现对多波段遥感数据逐步正交分解。遥感数字图像是由离散像元集合组成，每个像元有 2 个属性：位置和灰度。在每个像元位置，电磁能量被采样和量化，从而得到图像对应点上表示其明暗程度的一个整数值，一幅图像就被表示成一个矩阵。遥感数据的两个空间维和一个光谱维构成的描述了地表能量变化的三维数字阵列场。

6.3.1 洛伦兹协变定理

科学计算的可视化是空间数据场的可视化。标量、矢量、张量是线性电磁系统中定义多维数据场的基本参数（唐泽圣，1999)。在多维向量空间中可以对多波段遥感数据场量进行度量、分解分析和构造向量角度函数。在多维向量空间中改变向量的一个角度会不会使原来坐标系定义的物理量发生异变？对这个问题的解释需要引入洛伦兹协变定理（郑庆璋，1998)。

a. 坐标中矢量各分量的变换规律同坐标的变换规律一定是密切相关的。

b. 同一点上的两个矢量其分量的具体数值可以各不相同，但都遵循相同的规律进行变换。

c. 在坐标变换过程中标量、矢量和张量等物理量具有协变的性质。

6.3.2 逐步正交变换技术

逐步正交算法开发的思想产生于作者在完成人事部归国留学基金项目，运用遥感技术在钾长石斑晶花岗岩中提取钾化含金蚀变带，由于这两种岩石成分上都含有钾，实验室光谱差别不大。使用了掩膜技术和主成分变换后还没有达到目的，最后采取了两个主分量散点图分类方法取得了较好的效果。在散点图中选择的训练区并不是在散点图的重心位置，是在散点图的边缘。这一实验结果表明，遥感数据中的一些弱信息可能出现在非正交角度变换结果，也可以把正交变换是非正交变换的一个特例，于是我们就展开了关于多波段遥感数据的非正交变换探索。

数学上，主成分变换是多维向量空间中的一种线性变换，即 $Y = CX$，其中 X 为原始数据，C 为变换矩阵，Y 为变换后的数据。多维向量空间线性变换相应于空间域坐标轴的旋转，主成分在原始数据上的载荷因子就是变换后的坐标轴。多波段遥感 TM 数据主成分分析，通过建立酉矩阵和利用酉矩阵的性质(罗家洪，1992)。根据波段数据的方差、协方差来计算特征值和特征向量。将特征向量作为主因子轴，变换后的主因子轴间彼此独立，互不相关。多因子逐步正交变换是利用矩阵对角化分解的思想，根据多波段遥感数据方差、协方差建立酉矩阵 A，对 A 进行逐步旋转，每一步旋转特征轴表示的角度不同，以达到分离目标信息的效果。

$$C = P_1 P_2 P_3 \cdots P_n \tag{6-13}$$

C 是正交矩阵，$C^T = C^{-1}$。上式表示 C 可分解为一系列简单正交矩阵的乘积，

其中：

$$P_i = U_{pq} \tag{6-14}$$

U_{pq} 是单位向量的 $(p,q),(q,p),(p,p),(q,q)$ 位置上替换为正交分量，如下列矩阵所示，

$$\begin{array}{c} \quad\quad\quad\quad\quad p \quad\quad q \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & 1 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cos\theta & \cdots & \sin\theta & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1 & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & -\sin\theta & \cdots & \cos\theta & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \tag{6-15}$$

上面矩阵中对角线上省略元素为 1，非对角线上省略元素为 0。

得到，

$$\left.\begin{aligned}
b_{pp} &= a_{pp}\cos^2\theta - 2a_{pq}\sin\theta\cos\theta + a_{qq}\sin^2\theta \\
b_{qq} &= a_{pp}\sin^2\theta + 2a_{pq}\sin\theta\cos\theta + a_{qq}\cos^2\theta \\
b_{pq} &= b_{qp} = (a_{pp} - a_{qq})\sin\theta\cos\theta + a_{pq}(\cos^2\theta - \sin^2\theta) \\
b_{pj} &= a_{pj}\cos\theta - a_{qj}\sin\theta \qquad j \neq q \\
b_{qj} &= a_{pj}\sin\theta + a_{qj}\sin\theta \qquad j \neq p \\
b_{ij} &= a_{ij} \qquad i,j \neq p,q
\end{aligned}\right\} \tag{6-16}$$

为了使得非对角元素为零，即，

$$\left.\begin{aligned}
u_{pp} &= u_{qq} = \cos\theta \\
u_{pq} &= -u_{qp} = \sin\theta \\
u_{ii} &= 1 \\
u_{ij} &= 0 \qquad i \neq j, \\
B &= u_{pq}^{T} A u_{pq}
\end{aligned}\right\} \tag{6-17}$$

$$\left.\begin{aligned}
&b_{pq} = b_{qp} = 0 \\
&(a_{pp} - a_{qq})\sin\theta\cos\theta + a_{pq}(\cos^2\theta - \sin^2\theta) = 0 \\
&\cot(2\theta) = \frac{a_{pp} - a_{qq}}{2a_{pq}}
\end{aligned}\right\} \tag{6-18}$$

U_{pq} 矩阵的作用就是将主对角线上的元素不断增加，非对角线上的元素的值不断降低，每一次旋转，就得到 p 和 q 两个因子方差最大的正交轴，也就是使得 p 和 q 两个新向量之间互相独立，协方差为零。通过两两建立相互正交轴，反复迭代，最终能够获得全部的方差最大的正交轴，当方差协方差矩阵旋转成对角矩阵时，得到的特征值和特征向量为主成分分析的结果。通过对旋转过程中变量载荷因子的分析，得到不同旋转位置在原始数据的载荷分配，从而达到突出和提取有用的岩性信息的目的。

迭代变换的另一个重要作用在于它提供了一种能够从角度来分析主成分变换结果的可能性。最终迭代结果如下面矩阵。

其中每个元素 A_{ij} 为两两坐标轴间旋转的角度，根据旋转角度所在的空间位置，可以分析主成分因子所表示的结果，从而也就解决了主成分分析结果难以解释的困难；也为选择面向目标的旋转角度提供了依据。

$$\begin{bmatrix}
0 & A_{1,2} & A_{1,3} & \cdots & A_{1,n} \\
A_{2,1} & 0 & A_{2,3} & \cdots & \vdots \\
A_{3,1} & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & A_{n-1,n} \\
A_{n,1} & A_{n,2} & \cdots & A_{n,n-1} & 0
\end{bmatrix} \tag{16-19}$$

6.3.3 遥感数据正交投影变换

均方差估计是遥感数据正交投影变换的基础。设 M 是一标准正交系。给定 n 个数据 $\eta_1 \sim \eta_n$，希望找出 n 个常数 $a_1, \cdots, a_n$，

使得线性组合 $\hat{\xi} = \sum_{i=1}^{n} a_i \eta_i$ 拟合未知的随机变量 ξ 时，拟合(或估计)误差，

$$\epsilon = \xi - \hat{\xi} = \xi - \sum_{i=1}^{n} a_i \eta_i \tag{6-20}$$

的均方值，

$$P = E\left\{\left|\xi - \sum_{i=1}^{n} a_i \eta_i\right|^2\right\} \tag{6-21}$$

为最小，确保 ξ 在 L_2 空间上的投影 ξ 正交，见图 6-3。在实际应用中原始数据一般不是正交数据，因此我们需要先将原始数据归一化转换成标准正交数据（张贤达，1997)。

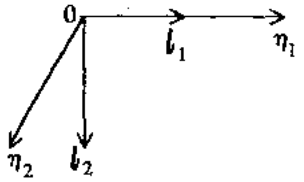


图 6-3　任意数据构造 Gtram-Schmidt 正交关系的三维坐标空间位

任意数据标准正交化 Gtram-Schmidt 正交方法直接提供了对任意原始数据进行标准正交化的方法。

如果 η_1，…，η_n是任意数据，根据 Gtram-Schmidt 正交构造法，可以用，

$$\left.\begin{aligned} l_1 &= \gamma_1^{(1)} \eta_1 \\ l_1 &= \gamma_1^{(2)} \eta_1 + \gamma_2^{(2)} \eta_2 \\ i_k &= \sum_{l=1}^{k} \gamma^{l(k)} \eta l, \qquad k = 2, \cdots, n \end{aligned}\right\} \tag{6-22}$$

构造 n 个标准正交随机变量，归结为确定式(6-7) 中的系数 $\gamma l^{(k)}, l = 1, \cdots k$；$k = 2, \cdots, n$。令：$Rij = E\{\eta_i \eta_j\}$ 由标准正交化条件 $E\{i_1^2\} = (\gamma I^{(1)})^2 R_{11} = 1$ 可以求出 $\gamma I^{(k)}$，在构造 l_k 时利用了条件 $l_k \perp l_j (j < k)$ 得到 $k-1$ 个方程，

$$E\{l_k l_j\} = \gamma_1^{(k)} R_{1j} + \cdots + \gamma_k^{(k)} R_{kj} = 0, \; j = 1, \cdots, k-1 \tag{6-23}$$

从标准化条件又可以得到第 k 个方程，

$$E\{l_k^2\} = \gamma_1^{(k)} R_{1k} + \cdots + \gamma_k^{(k)} R_{kk} = 1 \tag{6-24}$$

因此，k 个系数 $\gamma_1^{(k)}, \cdots, \gamma_k^{(k)}$ 由方程(6-23)(6-24) 的解确定。在实际运算中采用三角矩阵方法，

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1^{(1)} & \gamma_1^{(2)} & \cdots & \gamma_1^{(n)} \\ & \gamma_2^{(2)} & \cdots & \gamma_2^{(n)} \\ & & \ddots & \vdots \\ 0 & & & \gamma_n^{(n)} \end{bmatrix} \tag{6-25}$$

$$L = \Gamma^{-1} = \begin{bmatrix} l_1^{(1)} & l_1^{(2)} & \cdots & l_1^{(n)} \\ & l_2^{(2)} & \cdots & l_2^{(n)} \\ & & \ddots & \vdots \\ 0 & & & l_n^{(n)} \end{bmatrix} \tag{6-26}$$

有了矩阵(6－25)(6－26)后,式(6－24)可以简写为,

$$l = h\Gamma \tag{6-27}$$

式中 $l = [l_1, \cdots\cdots, l_n]$, $h = [\eta_1, \cdots, \eta_n]$,经过转换后,原始数据向量 h 可以表示为,

$$h = l\Gamma^{-1} = lL \tag{6-28}$$

式(6－28)中的 Γ 相当一个白化滤波器,任意原始数据通过该滤波器后即可转换成为标准正交的数据 $l_1, \cdots, l_n$。由式(6－22)可知 $l_1, \cdots, l_n$ 具有与 $\eta_1, \cdots, \eta_n$ 相同的信息(子空间),因为前者是后者线性变换的结果。因此经标准正交化的 $l_1, \cdots, l_n$ 也称做原始数据 $\eta_1, \cdots, \eta_n$ 的信息。式(6－28)则表明,矩阵 L 相当于一个新息滤波器,用新息 $l_1, \cdots, l_n$ 作新息滤波器的输入,滤波器的输出即是原始数据。

利用白化滤波器的上述性质,我们便可以对多波段遥感数据进行正交分解(均方差最小判断)。同理,还可以相似性叠加(均方差最大判断)和不同数据间的融合(新息滤波器)。目前遥感数据的正交分解实验已经取得了较好的示范应用,数据融合还在实验中。

§6.4 掩膜和多因子逐步正交变换相结合区分岩性信息

近年来,华北地台北缘是我国寻找大型、超大型金矿的热点地区。峪耳崖金矿位于华北地台北缘冀东隆起北部元古宙界坳陷带内,属同溶花岗岩杂岩体中金矿。该区岩浆按岩性和形成时序划分为两个序列:早期为超基性－基性－二长岩系列,晚期是闪长岩－花岗闪长岩－花岗岩系列。峪耳崖基性－二长花岗岩侵位于元古界长城系高于庄组碳酸岩中,金矿化带主要分布在内接触带附近。选择峪耳崖金矿带采用多光谱遥感数据快速分离和提取该带中不同岩性,显示和分析与金矿分布的空间位置,对在整个地台寻找同类型金矿具有重要的意义。

多光谱 TM 数据中包含了丰富的地表信息,其中岩性信息的分离是本研究所关心的问题。马建文采取掩膜技术排除图像中的冰雪、植被、阴影和干河道信息作为主成分变换的预处理,提高了主成分变换的数学效力。为了解释主成分变换结果,(Crosta 1989)发展了面向特征的主成分分析方法。(Loughlin 1991)对该方法进行了重大改进,通过对目标反射光谱曲线进行定量化分析,选择目标特征信息含量较多的几个波段参加主成分分析。(Chavez 等 1989)提出了 2 个波段参加主成分变换的选择主成分分析,将目标反射曲线中最低和最高的 2 个波段参加主成分分析,使目标的特征信息主要集中在第 2 个分量中。尽管人们采取了各种方法利用主成分变换,但是它只表示了特征空间变换的一种结果,为了分析和评价多因子在载荷变化空间中出现的特征信息,挑选所需要信息的因子,开发了多因子逐步正交变换算法软件充分挖掘 TM 数据中有关岩性信息。本文选择华北地台北缘峪耳崖金矿带 TM 数据作为方法实验数据,展示处理效果。

主成分变换对于区分多光谱遥感数据中岩性信息有一定效果。利用主成分变换的 2 个因子散点图分类提取多光谱遥感数据中较弱岩性信息时,发现这些弱信息并不是出现在散点图重合部分的重心位置,说明多光谱原始遥感数据之间除了存在着起支配作用的主特征值外,还存在反应较弱信息的特征因子。而主成分变换只表示了特征空间系列变换的一种结果,为了提取和显示多因子变化空间中出现的较弱特征信息,开发了多因子逐步正交变换算法软

件，在峪耳崖金矿带应用时取得了较好的效果。研究中还采取了掩膜技术排除水体和河道的干扰信息。该方法已用在华北地台北缘其他地区的找矿。

(1) 方法实验

以华北地台北缘峪耳崖金矿带为例：TM 数据有 7 个波段，其中波段 6 属热红外波段，不参与旋转分析。首先对原始数据进行统计分析，计算 6 个波段的方差协方差矩阵，子区大小为 236km^2，统计结果见表 6－3。

表 6－3　　原始波段间方差协方差矩

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	53.967155	33.535265	69.660571	－15.800603	117.254421	103.295697
TM2	33.535265	23.264519	45.931809	0.750338	84.171626	69.506811
TM3	69.660571	45.931809	99.826045	－22.889488	171.121876	151.388773
TM4	－15.800603	0.750338	－22.889488	140.418399	43.231309	－25.636412
TM5	117.254421	84.171626	171.121876	43.231309	397.804041	293.817705
TM7	103.295697	69.506811	151.388773	－25.636412	293.817705	255.082687

根据逐步旋转计算原理计算因子矩阵。在旋转矩阵的作用下，每次旋转对应一个载荷因子矩阵，即因子轴在原始数据上的权重。旋转过程中，坐标轴两两旋转，即 $U_{1,2}$、$U_{1,3}$、$U_{1,4}$、$U_{1,5}$、$U_{1,6}$、$U_{2,3}$、$U_{2,4}$、$U_{2,5}$、$U_{2,6}$、…$U_{5,6}$共 15 次为一个周期，反复迭代，最后得到方差协方差矩阵的对角线元素为特征值，非对角线上元素为 0 的矩阵，各次旋转矩阵的乘积为主成分的载荷矩阵。数据迭代 3 周期 45 次之后，停止迭代，得到的旋转特征值，表 6－4 对角线元素和特征向量的近似值，见表 6－5。

表 6－4　　原始方差协方差矩阵逐步旋转结果

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	2.48054	－0.05615	－0.09361	－0.04251	0.00056	－0.00124
TM2	－0.05615	0.65072	－0.03876	0.00268	－0.12310	0.00010
TM3	－0.09361	－0.03876	165.98595	0.00641	0.00001	0.00008
TM4	－0.04251	0.00268	0.00641	18.97274	0.00003	0.00000
TM5	0.00056	－0.12310	0.00001	0.00003	775.23418	－0.00329
TM7	－0.00124	0.00009	0.00008	0.00000	0.07493	7.03870

表 6－5　　逐步旋转矩阵乘积得到特征向量的近似结果

	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 7
TM1	0.62667	－0.26724	0.13091	0.60439	0.23414	－0.31406
TM2	－0.03573	0.91651	0.01341	0.36302	0.16146	－0.02660
TM3	－0.73550	－0.28107	0.18056	0.48219	0.33796	0.02671
TM4	0.01180	－0.09252	－0.91278	0.28556	0.00712	0.27665
TM5	－0.04715	0.02779	－0.28101	－0.41289	0.69985	－0.50771
TM7	0.25037	－0.01641	0.19478	－0.13567	0.56130	0.75210

为了更好地分离获得岩性信息，在旋转过程中分析各因子在波段 7 上的载荷大小，选择载荷最大的位置进行分析。通过对载荷因子比较，波段 7 载荷最大的位置在第 21 次旋转。根据

对21次旋转因子图像进行非监督分类，岩性分类效果显著。第21次旋转后载荷矩阵，用于岩性分类，见表6－6。

表6－6　　用于分离岩性信息的载荷因子

	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	因子7
TM1	0.76518	－0.26947	0.44516	0.21929	0.24187	－0.19271
TM2	0.04517	0.92675	0.24831	0.18882	0.15871	－0.12885
TM3	－0.63978	－0.25182	0.55850	0.21172	0.35341	－0.21360
TM4	－0.04527	－0.07153	－0.42722	0.86910	－0.10513	－0.20959
TM5	0.02412	0.00045	－0.48672	－0.26451	0.69453	－0.45846
TM7	0.02262	－0.00136	－0.09403	0.21478	0.54588	0.80407

通过以上分析可以看出：不同角度的因子轴在原始数据上的载荷不同，因而整个旋转过程构成了一个向量载荷空间。为了直观地显示多因子逐步变换对区分岩性信息的效果，在因子轴当中选择主要包含岩性信息的TM5、7波段（5，6因子轴）的因子作为主因子轴做载荷空间曲面。选择TM3－X，TM5－Y，TM7－Z三维坐标，曲面为第5个因子轴在3个波段上的载荷分布。其中最高值分布区为寻找的载荷位置，在该区域相关性最小，这时在TM5上的载荷为中等Y＝0.70。岩性信息主要分布在TM5贡献较大的区域，Y＝0.85。选择TM1－X，TM7－Y，TM5－Z三维坐标，曲面为第6个因子轴在3个波段上的载荷分布。其中最低值分布区为主成分载荷，在该区域相关性最小岩性信息主要分布在TM7上的载荷为Y＝0.81，TM5贡献较大的区域，Y＝－0.38，见图6－4，6－5。

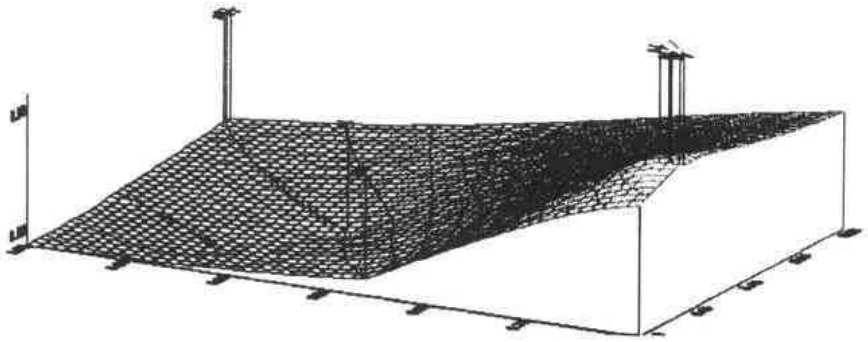


图6－4　因子轴5在原始波段TM5（Y），3（X），7（Z）上的载荷空间曲面图

（2）图像效果

根据上述分析，选择因子526合成因子图像掩膜去掉干河道影响后，见彩图6　1，与原始数据主成分变换PC345结果相比较，彩图6－2，太古界黑云角闪片麻岩（2浅蓝色）与玄武岩－二长岩系（5深蓝色）得到较好的区分；元古界长城系高于庄组碳酸岩（3深红色）与主成分变换PC345结果图像中的深红色－灰白色相比红色调更稳定；花岗闪长岩－花岗岩株呈黄绿色分布在太古界和元古界地层的NW和SE部分（3、6），主成分未能区分；长城系常州村组石英岩呈（1紫色），主成分变换区分不明显（1）。上述图像效果与该地区地质矿产图比较，除了填出了基本岩性单元外，还显示了与成矿有关的环形构造体，浅灰色环形体，为分析该地区成矿地质条件提供了空间组合信息，见彩图6－1，6－2。

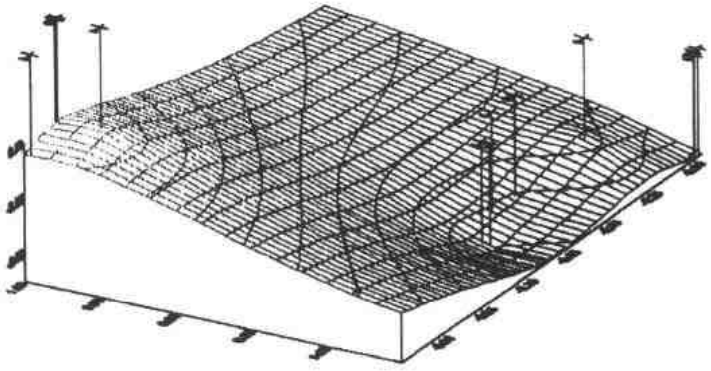


图 6－5　因子轴 7 在原始波段 TM7 (Y),1(X),5(Z) 上的载荷空间曲面图

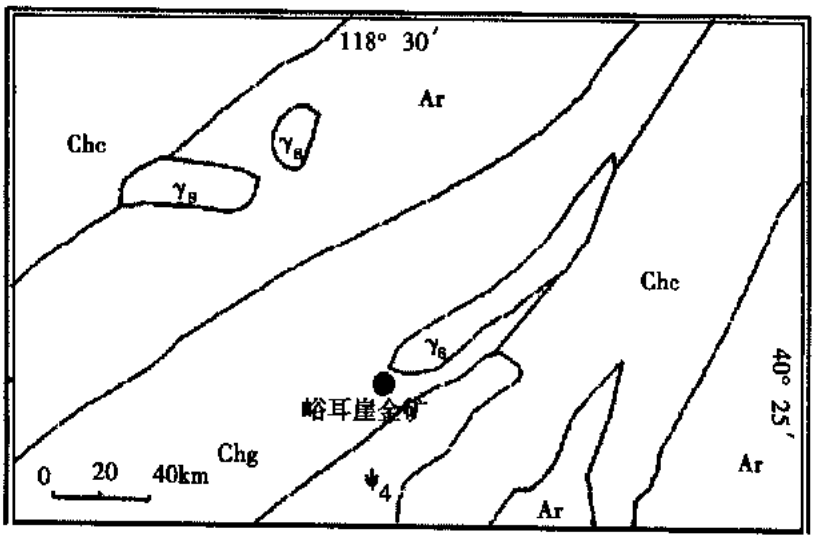


图 6－6　1:20 万地质矿产图 Chc 长城系常州村组石英岩，Chg 长城系高于庄组灰岩，Ar 太古界黑云母片麻岩，γ_5 花岗闪长岩－花岗岩，φ_4 基性岩

综上所述，为了充分地挖掘遥感数据中具有找矿意义的岩性信息，开发了多因子逐步正交变换算法软件在提取峪耳崖金矿带中岩性信息取得了较好的效果。该方法已推广到华北地台北缘其他地区。

§6.5　利用 Gram－Schmidt 投影方法提取 TM 数据中含矿蚀变带信息

近年来，航天遥感技术在东西昆仑高寒山区的应用，加快了该地区地质找矿工作的进展。针对高寒山区的找矿目标、背景和环境特点，实验、开发了从多光谱遥感数据中分离和

矿有关的地层、岩体信息，热液蚀变带信息的方法。这些方法的研制基于对120余块室内光谱曲线处理分析结果和野外观察：①自然界中没有两种岩石的光谱曲线完全相同，多波段数据同时使用更能表达地物光谱曲线的全貌和岩石的属性；②不同岩石光谱曲线Z轴（光谱深度）存在信息差，利用角度分解的方法可以从多维向量空间中能分离出更多的信息，可以将较弱蚀变带信息显示出来，角度分解过程相当于数学“聚焦”过程；③由目标、背景和环境组成了不规则边界的遥感信息单元，不同尺度范围遥感数据的处理方法组合有所不同。掩膜与Gram－Schmidt投影相结合提取含矿蚀变带方法是其中之一。采用掩膜与Gram－Schmidt正交投影图像处理方法处理新疆康西瓦TM数据，有效地分离出了含矿热液蚀变带信息，1998年野外验证和样品矿化品位测试取得较好的结果，见图6－7。

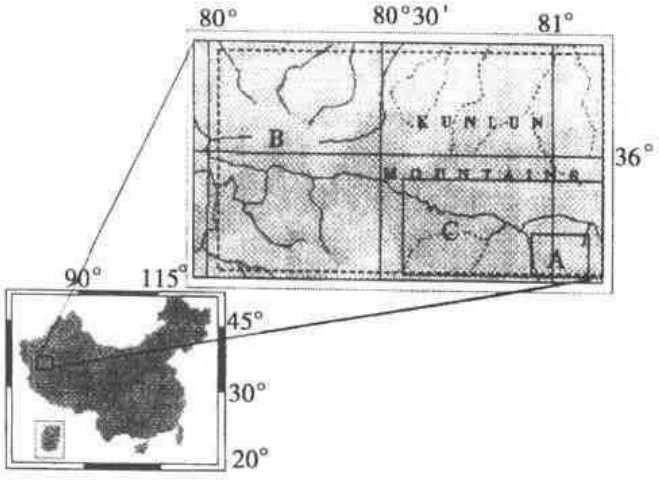


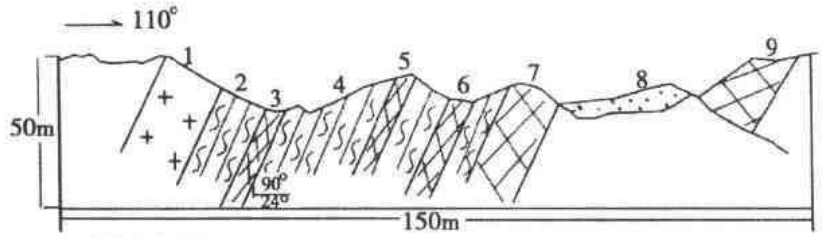
图6－7　研究区位置图

利用波段比值、主成分变换，从多光谱TM数据中成功地提取与矿床有成因联系的热液蚀变信息的文章比较多，但是在冰雪覆盖的高山区成功的却比较少。在这种环境条件下，蚀变岩光谱信息被高山上的冰雪和河谷中砂石等强反射率信息所抑制，利用比值和主成分变换方法提取较弱的蚀变岩信息时难以奏效。本文中介绍了利用冰雪、干河道掩膜和Gram－Schmidt投影相结合的方法提取含热液蚀变带信息。1998年野外采样和实验室测试结果，证实该带为脉状热液Pb、Zn、Cu、Au、Ag矿化带。

根据1998年野外采样观察和实验室测试结果表明：康西瓦矿化异常区位于西昆仑麻扎－康西瓦断裂带的南缘，主要地层是三叠系片岩、板岩，夹有顺层侵入的花岗岩脉，厚度20cm至1m。矿化发生在花岗岩脉的内外接触带中，地表为黏土化的退色带和褐铁矿化团块。氧化带埋深3～4m，矿石为Pb、Zn结晶体，伴有孔雀石化和金、银矿化。矿化带宽度为3～15m，从矿脉到围岩矿化特征为矿化网脉脉宽一般20～50cm，见图6－8。

沿着野外地质剖面，按矿石、近矿体硅化蚀变围岩、未蚀变围岩采5件岩石样品作光谱测试和矿化品位测试。

首先，与整个工作区样品一同进行了聚类分析，康西瓦样品分别落在了G5、G11和G10类中，取三条曲线数据代表，①围岩；②硅化围岩和③矿石光谱数据作岩石光谱曲线毯图，表达实验室光谱数据在Z轴深度方向上光谱差异的存在，见图6－9。作TM波段中心值的重采样数据绘制的曲线，表明在Z轴深度方向上TM数据对不同地物响应的差异，见图6－10。



图例 1 紫色花岗岩脉；
2，4，黑云母片岩，硅化黑云母片岩；
3，5，6，7，9矿化热液蚀变带，黄铁矿化、孔雀石化、Pb、Zn、Au矿化；
8黄土

图 6－8　新疆康西瓦野外剖面图和地质图

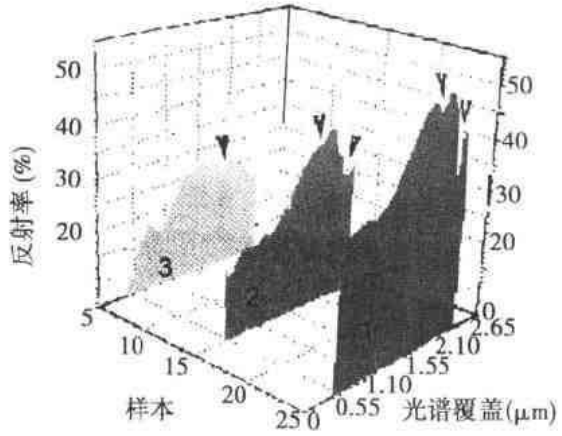


图 6－9　岩石光谱曲线毯图

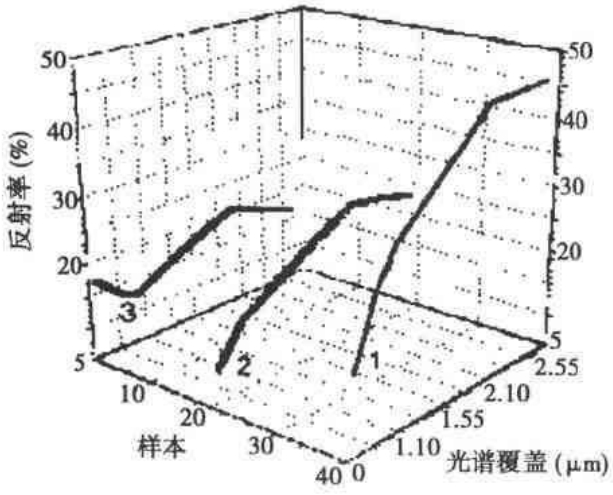


图 6－10　TM 波段中心值的重采样数据曲线

图 6－10 中 1，2 曲线主要差别是硅化曲线反射率高于未蚀变曲线；在 2～2.5μm 出现两个吸收峰；在 2μm 曲线 1，3 都出现吸收峰；图 6－9 中 1，2 曲线主要差别是硅化曲线反射率高于未蚀变曲线；在 2～2.5μm 曲线 2 出现明显的收峰特征；曲线 3 在可见光和短波红

外都出现了明显的吸收特征。TM 波段中心重采样光谱曲线与原始光谱曲线相比较，不同岩石光谱细节特征被平滑，但是趋势性差别还是存在的，表现的比较弱。为了将 1，3 蚀变信息从 2 围岩信息中分离出来，我们根据多光谱遥感数据特点对信号处理线性代数中的 Gram－Schmidt 正交投影方法加以改进，取得了较好的效果。

将遥感数据的一个 $M \times N$ 大小的图像当成一个 $M \times N$ 维向量，所有波段的遥感数据组成一组线性独立的向量。利用 Gram－Schmidt 投影方法构造多波段遥感数据的正交向量。

遥感影像表示传感器所接收到的地面电磁反射和辐射的有限能量，所以可以把原始 TM 影像 TM1,2,3,4,5,6,7 看做 L_2 空间线性独立的随机变量序列。从前面的公式可以看出，第一个初始向量的选择被设定为基向量，其他向量顺序的在前面向量所组成的空间内投影，并且从本身中减去在前面向量空间的估计，剩下不相关的分量。

TM 数据像元数为 $P500 \times L520$。

对于从多光谱遥感数据分离蚀变带相对较弱的信息，我们采用了正交分解逆运算的方法，逆运算的方法可以产生相似性叠加的效果。考虑到该地区为高寒山区，山上是冰雪，山沟是卵石滩高反射率、温差大的环境条件，选择了 TM6 反应地物亮温状态信息波段为基向量正交分解其他 6 个波段的数据。在生成上述图像过程中，需要计算两个图像向量的内积，内积的大小反映两个波段间的相关性，可以作为两幅图像具有相同性质部分的信息量的一种度量。正交分解分量百分比统计数据和直方图表明，采用 Gram－Schmidt 正交投影方法分解处理多光谱 TM 数据信息时，可以定量化地评价多波段信息相似性程度，同时可以定量化评价多波段信息对处理结果的贡献，见表 6－7。挑选相似性最小的变化结果向量图像、相似性最大的变化结果向量图像和相似性中等的变化结果向量图像，合成彩色图像中的红色条带为含矿热液蚀变带。图像中圈定的区域是野外重点工作区，现场和矿石标本的野外照片，用线段连接了采样图像位置，分别见彩图 6－3 及图 6－11，6－12，6－13，6－14，6－15，6－16。



图 6－11　TM 波段 2 数据为第 2 向量

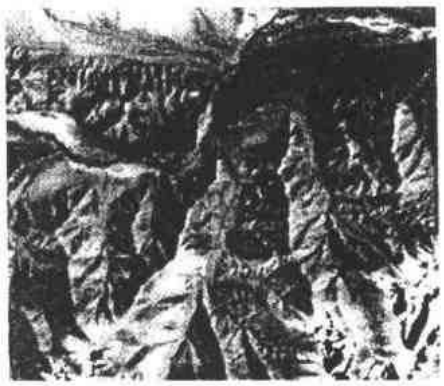


图 6－12　TM 波段 3 数据为第 3 向量

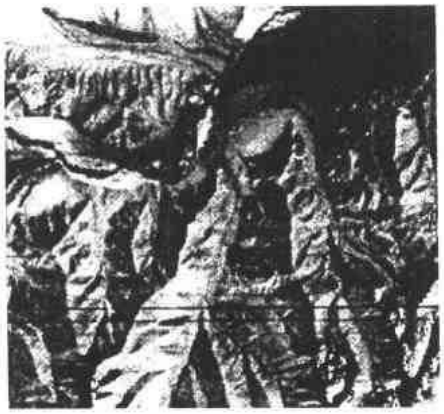


图 6－13　TM 波段 4 数据为第 4 向量



图 6－14　TM 波段 5 数据为第 5 向量



图 6－15　TM 波段 1 数据为第 6 向量

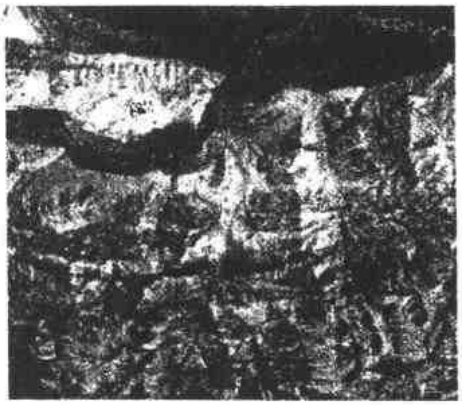


图 6－16　TM 波段 7 数据为第 7 向量，暗色带是热液蚀变矿化岩

正交投影分解剩余分量为多波段的波段特征，表明投影过程是一个波段一个波段顺序分解过程，见表 6－7。

表 6－7　　正交分解剩余值统计

TM 波段	向量	向量剩余值
6	1	1
2	0.328914	0.687553
3	0.970879	0.045198
4	0.074019	0.927009
5	0.509693	0.527315
1	0.030562	0.970575
7	0.012398	0.987743

主成分变换分解剩余分量百分比统计数据，表明是对多波段整体 DN 值的统计和压缩分解，区别于投影变换的分解过程，见表 6－8。

表 6－8　　主成分变换分解剩余分量百分比统计

PCA	本征值	协方差（%）
1	3099.6082	97.13
2	65.2091	2.04
3	18.1106	0.57
4	5.3888	0.17
5	2.3319	0.07
6	0.6701	0.02

野外热液蚀变带标本化学分析数据元素组合为 Pb－Cu－Au－Ag，为热液型多金属矿化带，见表 6－9。矿化带宽 100m，呈平缓弧状近东西展布约 1000m。矿化带地表宽 30～50m，根据探矿槽、浅硐揭露的矿化带埋深 4～10m，并且呈平缓弧状、近东西展布约 1000m。彩图 6－5 与主成分变换 3，4，5 合成图像（见彩图 6－7）相比，图中的冰雪湿地和河滩湿地的颜色与蚀变带颜色相同。

表 6－9　　矿化岩石化学分析数据表

样品号	$\omega()/10^{-9}$Au	$\omega()/10^{-6}$Cu	$\omega()/10^{-6}$Pb	$\omega()/10^{-9}$Ag
Ksw2	480	>1000	>1000	>5000
Ksw3	5.2	50	>1000	1700
Ksw1	320	20	>1000	>5000

多光谱 TM 数据提供了 60～270nm 光谱分辨率的 6 个波段，2100nm 光谱分辨率热红外波段数据，热液蚀变作用是对地下热液活动交代围岩形成的矿物组合的描述，含矿热液蚀变带是热液成矿作用保留的晕带，是遥感地质找矿的直接标志。遥感地质科学家和实践者孜孜以求地探索如何从多光谱遥感数据中反演和分离含矿热液蚀变带，为此做了大量系统的室内和野外光谱测试和图像处理方法实验。本课题在总结前人工作的基础上产生了角度投影的方法分离多光谱波段之间深层微弱信息的分离思想，通过改进了 Gram－Schmidt 正交投影信号处理方法分离多光谱 TM 数据中的矿化蚀变弱信息，取得了其他方法难以实现的效果。该方法在新疆东昆仑阿尔金高山区红柳沟 $100\times50km^2$ 大范围岩性填图也取得了好的效果。

参 考 文 献

唐泽圣 .1999. 可视化及虚拟现实技术的新发展 . 计算机世界

马建文 .1999. 基于遥感信息场的多波段遥感数据弱信息分离 - 概念、方法和应用 . 遥感知识创新文集 . 北京：中国科学技术出版社

马建文 .2001，(1) . 遥感多维空间数据场特征的角度分析与应用 . 遥感学报

田庆九 .1998，(4) . 植被指数研究进展 . 地球科学进展

Li Shuqing.1981 ~ 1985. 1998.Electronmagnetic Scattering from Two Adjacent Cylinders].IEEE Transactions On Geosciences and Remote Sensing, 36(6)

Li X., A.Strahler.1986.Geometric - Optical Bidirectional Reflectance Modeling of a Conniferous Forest Canopy, J, IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, GE - 24, 281 ~ 293

罗家洪 .1992. 矩阵分析引理论 . 广州：华南理工大学出版社

郑庆璋 .1998. 相对论与时空 . 太原：山西科学技术出版社

孙伯鲁 .1996. 空间角度自动计算 . 北京：国防工业出版社

PROY, C., Tanre and P.Y.Deschamps.1989. Evaluation of Topographic Effects in Remotely Sensing Data, Remote Sensing Environment.Vol.30, pp21 ~ 32

EOSAT note.1994. Gold in Hills in British Columbia, Canada. Spring

刘勇卫，贺雪鸿 .1993. 遥感精解 . 北京：测绘出版社

Chavez, P.S., et al.1989. Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55 (3), pp339 ~ 348

张贤达 .1997. 信号处理中的线性代数 . 北京：科学出版社

马建文 .1997，(3) . 利用 TM 数据快速提取含矿蚀变带方法研究 . 遥感学报

Crosta, A.P. , McM Moore.1989.Enhancement of Landsat Thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW minas Gerais state, Brazil. A prospecting case history in greenstone belt terrain.The Seventh Thematic conference on remote sensing for exploration geology, Calgary Alberta, Canada, 2 - 6 October, 1173 ~ 1187

Loughlin, W..P..1991.Principal Component Analysis for Alteration mapping. The Eighth thematic conference on Geology Remote Sensing. Denver Colorado, USA., pp293 - 306 .April 29 - May 2

第七章　陆地生态系统脆弱带遥感模型与全球生物量估算

§7.1　中国陆地生态系统脆弱带遥感模型

本研究通过对我国陆地生态系统8个典型样区的植被指数取样实验和图像计算结果发现，这8个样区植被指数随着水、热因子的季节变化，在时间和空间上具有一定的“绿波推移”和“景观更替”规律。在中国东部湿润的季风区（样区1～3），随着纬度的增高，其月平均植被指数与月平均气温有较大的相关（陈述彭　1992）。发现降水相对丰沛的地带，热量和光照条件的变化成为植被生长和变化的自然限制因子；而在中国北方森林－森林草原－典型草原－荒漠草原－荒漠地带上，随着从东部（湿润地区）到西部（干旱地区）干湿条件的更替，月平均植被指数与降水多寡有较大的正相关关系。在8个样区上都呈现出共同的规律，即定向风的分布与植被指数的分布在时间和空间上具有相逆分布的“套合关系”。尤其在时间上有相逆套合关系，这正是中国北方沙尘暴和沙漠化加剧的自然原因。本研究定量地给出了我国陆地不同经纬度带生态系统脆弱季节和累积时间的分布。

根据水分和热量条件的差异性原则，我们选择了8个典型实验样区分别为：华南江汉平原水田区、华北平原冬小麦耕作区、东北平原旱作农业区、大兴安岭山区（森林区）、呼伦贝尔草原（森林草原区）、锡林郭勒草原（典型干草原）、阿拉善荒漠草原区和新疆塔干沙漠区。

应用实验样区（1～8）每周的NOAA原始图像，经过纠正后，用其AVHRR的1波段数据（可见光）和2波段数据（近红外），计算了正规化植被指数（NDVI）。在同一样区每月叠加按周计算的4景植被指数图像，并除云处理后比较各像元的NDVI值，选择其最大一次的NDVI值作为代表这个月的平均植被指数（NDVI）值。NOAA原始图像是1993年4月到1995年3月，共96周的NOAA图像。月平均值是对两年月平均值进行按月平均后得到的。在选择典型地物时，我们对由原始像元值构成NDVI的矩阵进行主成分分析，得到所有地物NDVI季相、月际变化规律，结合区域植被分类图件等，选择了典型地物覆盖类型，并对典型地物类型的月变化进行单独分析和研究（刘纪远　1996，Liu Jiyuan　1996）。

§7.2　像元NDVI主成分分析与NDVI综合特征值的求出

主成分分析方法有相关(关系)矩阵的计算方法和离散、共离散矩阵的计算方法等两种。这里应用的是关系矩阵的演算方法。根据各主成分固有向量(vector)值的月变化特性，可以提炼出所有9个主成分代表全部(100%)的成分和其平均值，以横坐标作为月份，纵坐标作为各向量月平均NDVI值，绘制出各主成分NDVI月相变化曲线。

假设有P个特征值X_1，X_2，$\cdots X_P$，其所载信息，可概括为满足下列两个条件的m个综合特征值Z_1，Z_2，$\cdots Z_m$这时把（Z_1，Z_2，$\cdots Z_m$的值称第一，第二，…，第m主成

分），此时构成，

$$\left.\begin{aligned} Z_1 &= A_{11}X_1 + a_{12}X_2 + ,\cdots A_{1P}X_P \\ Z_2 &= A_{21}X_1 + a_{22}X_2 + ,\cdots A_{2P}X_P \\ &\cdots \\ Z_m &= A_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + ,\cdots A_{mP}X_P \end{aligned}\right\} \qquad (7-1)$$

这时，系数 *Aki* 满足，

$$\sum_{i-1}^{P} A_{ki}^2 = 1 \qquad (k = 1,2,\cdots,m) \qquad (7-2)$$

这里，两个条件为，

a. 条件一：Z_j 和 Z_k（$j \neq k$；j，$k = 1$，2，…，m）的相关全为零，即不相关。

b. 条件二：Z_1 的离散度在（X_1，$X_2 \cdots X_P$）的所有一次方程式的离散度中最大；而 Z_2 的离散度在所有与 Z_1 不相关的一次方程式中属于最大。同样，以此类推 Z_m 的离散程度在所有与 Z_1，Z_2，$\cdots Z_{m-1}$ 不相关的一次方程式中属于最大。那么，我们称系数 *Aki* 所构成的向量叫特征向量（eigen－vector）。我们用这个方法计算了各类地物 12 个月的每月特征向量（Aase 1986 Yates 1986，布和敖斯尔 1999）。主成分 1 和主成分 2 的累积贡献率就占全体的 90%；为了分析细小地物，共取前 9 个特征向量，绘制了其 NDVI 月变曲线。第一主成分（PC1）一年中变化不大，应该代表植被指数年平均值或代表植被指数各月平均累积量；第二主成分（PC2）其向量系数值一年中有明显的一次增加和一次减少，即从春季开始增大；从秋季开始减少，并且最大值出现在 7 月或 8 月份，因此，应该代表有明显季相变化特征的植被，华北和东北是落叶阔叶林植被有类似特征；第三主成分（PC3）也是有明显的冬、夏季变化，但其变化比第二主成分（PC2）要早一个月，代表植被指数春秋差异，又绘制了代表各月 NDVI 变化的综合特性曲线。主成分七、八和九（PC7、PC8 和 PC9）分别代表水田和旱田植被指数；而主成分四、五和六（PC4、PC5 和 PC6）代表草地类型的植被指数。经过特征向量的计算和分析，能够解释出华北平原和东北平原植被指数月相变化的某些不同。例如，华北平原总的植被指数（NDVI）的特性曲线受冬小麦的影响，从 3 月份开始 NDVI 增大；4 月份继续增大；5 月份达到高值；6 月份随着冬小麦收割，达到这个时段的最低值。由于对农作物进行着间作，因此植被指数在 8 月份出现最大值，而 11 月份出现最低值。11～3 月为冬季，即华北平原休耕期；3 月份开始冬小麦发绿；3～6 月间生长和收割为一个作业季节；而 6～10 月或 11 月为另一种农作物作业季节，即春小麦或其他旱作农业生长和收割的季节，显示出两年三作的农田作业规律和土地覆盖（植被指数）的变化规律（绿波双峰双谷规律）。东北平原，4 月份（有些年份 3 月中旬或 4 月上旬）开始，植被指数（NDVI）发生变化，绿波推移开始；7 或 8 月份达到最大值（绿波峰值）；4 月或 3 月份达到最小值（绿波谷），显示出农作物一年一作的作业规律（绿波单峰单谷规律）。总之，主成分分析中我们可以得到的地表植被变化的规律是，华北平原的植被指数（NDVI）主成分分析中明显看出冬小麦（5 月份）和秋作物（8 月份）两个植被指数高峰值；而东北平原的植被指数月变主成分分析中看出东北平原地表植被（农作物区）一年中只有一次高峰值，它们分别出现在 7 月份或 8 月份，见图 7－1 和图 7－2。

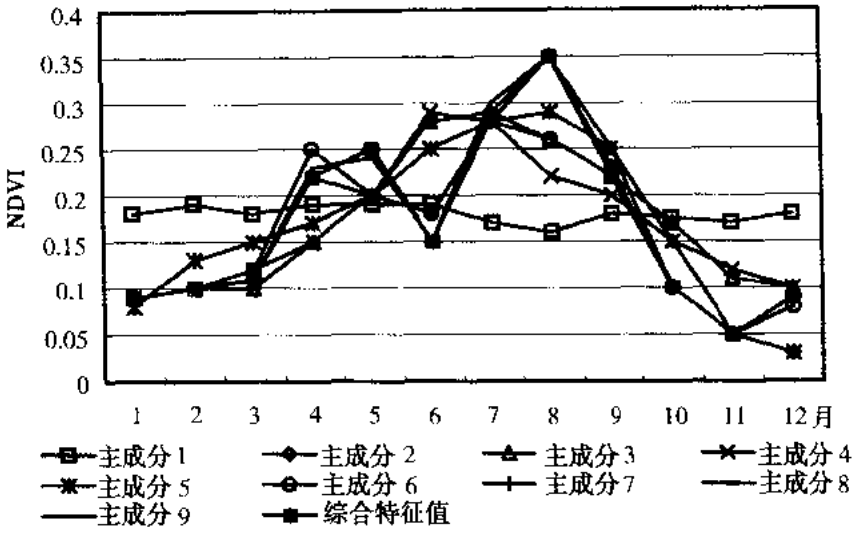


图 7－1　华北平原样区（冬小麦）各类地物主成分及综合特征曲线

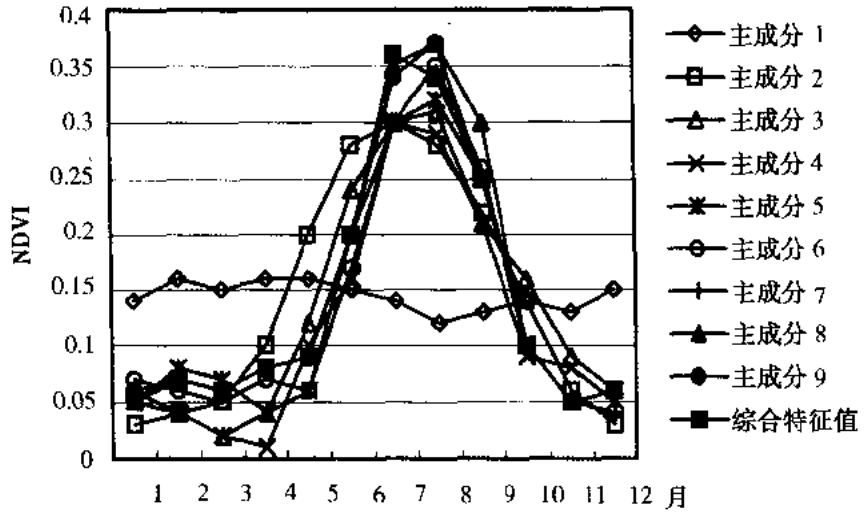


图 7－2　东北平原样区（旱地）各类地物主成分及综合特征曲线

§7.3　典型样区植被指数（NDVI）的比较

我们计算了由南至北沿经线方向（基本是同一经度带上），选择了样区 1～3 的农田区域植被指数的月平均值，并以此反映农作物植被指数的绿波推移（NDVI 值月相变化）规律；样区 4～8 分别为东部湿润区到西部干旱地区的湿润度跨度上，从东北至西北，沿纬线方向（基本上处在同一纬度地带上）的森林→森林草原→典型草原→荒漠草原→荒漠的月平均植被指数，以此反映不同植被类型（景观推移）月相 NDVI 变化规律。植被指数（NDVI）的计算基于 NOAA AVHRR 的波段（CH_1）和 2 波段（CH_2）数据（NDVI = （$CH_2 - CH_1$）/

($CH_2 + RCH_1$)。计算出的 NDVI 值是指原始 NDVI 月最大值的两年平均值（综合特征值），代表了这个区域月平均最大 NDVI 值。

§7.4 土地覆盖时空变化规律

以植被指数的变化代替土地覆盖变化时，其时间和空间的变化具有一定的规律（Sellers 1992，Sellers 1995，Rossow 1994）。这种规律性的变化，主要受大区域水、热、土壤类型等环境与生态条件的区域之间的差异所控制。沿经线和纬线，从热带到寒带；从沿海到内

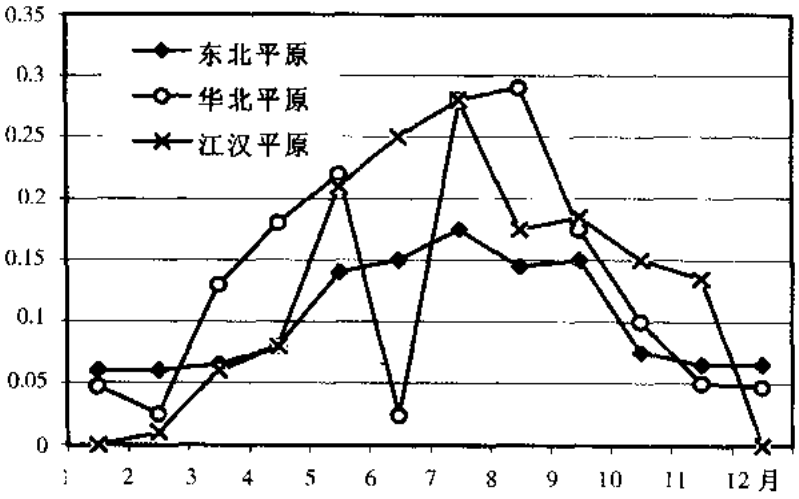


图 7－3 典型区月平均 NDVI 变化曲线（NDVI 纬向变化）

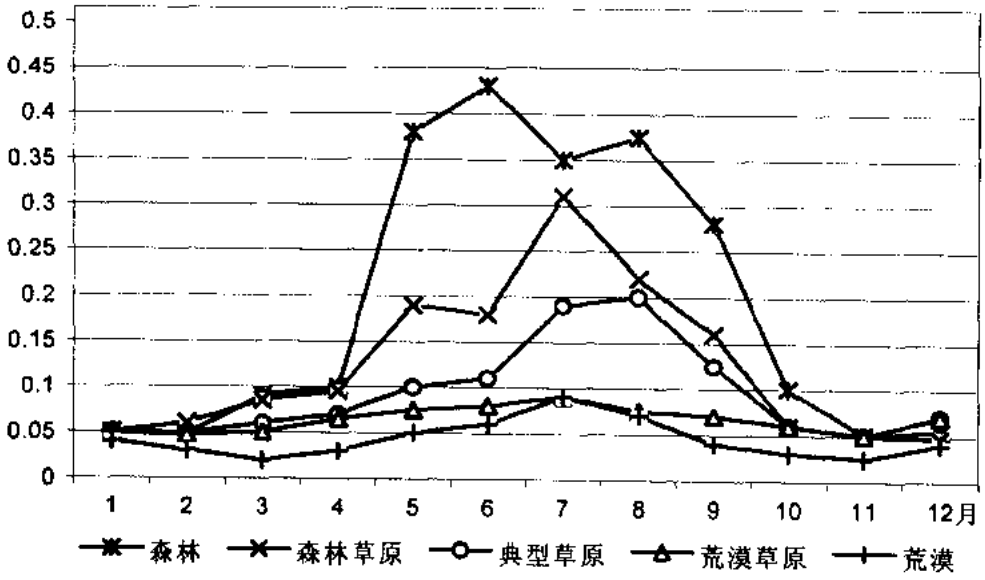


图 7－4 典型区月平均 NDVI 变化曲线（NDVI 纬向变化）

陆有规律地演替或更替，见图 7－3 和图 7－4 所示。对图 7－3 的分析中得到这样的一个规

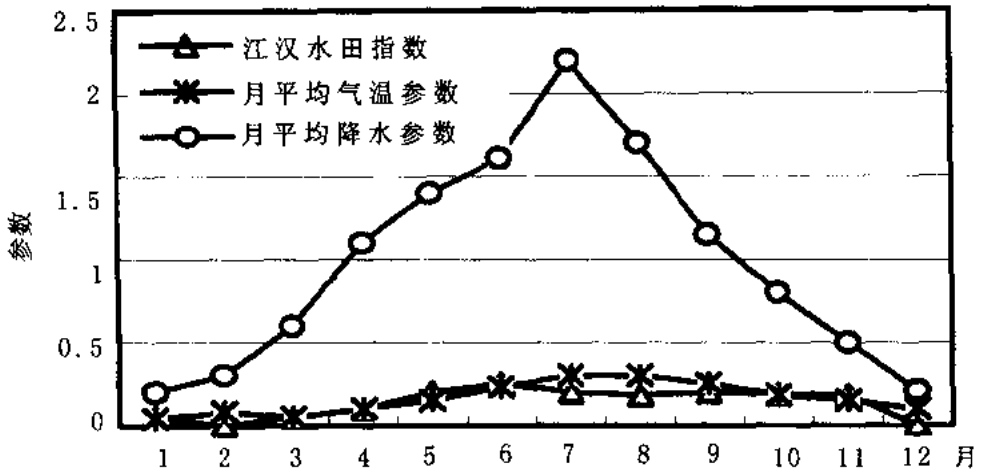


图 7－5　江汉水田指数与水热参数关系曲线

律;从华南到华北和东北，农作物指数（A－NDVI）的月相变化，其差异实质上不是月平均植被指数（NDVI）大小（数量）的差异，而是这三个样地 NDVI 最大值、最小值出现的时间上的差异，即所谓的绿波推移。例如，华北水旱田指数，一年中有两个高峰值，分别出现在 5 月份和 8 月份；而东北旱田指数，一年中只有一次高峰值，出现以 7 月份；而江汉水田指数最大值出现在 6 月份，9 月份也有一个高峰值，但有所不同的是从南到北，植被指数峰值的出现有明显的延迟反应，即绿波推移规律明显，南到北差异（延迟）一个月左右。除此之外，NDVI 绝对值大小也有变化，平均差异出现在随着纬度的增高，月平均 NDVI 值在减少。从图 7－4 的分析中得到与图 7－3 有所不同的比较明显的规律就是：从最东部的东北大兴安岭山区森林到最西北的荒漠，月平均植被指数（NDVI）最大值和最小值的出现，几乎是同步的（即绿波推移是同步），而其差异主要出现在每月平均 NDVI 值大小（数量）的差异上。不同样地之间同一月份 NDVI 值大小的差异，夏季最明显，即从 4 月份开始，森林、森林草原、典型草原、荒漠草原和荒漠月平均 NDVI 大小差异突然拉大，但其月间波动几乎都是同步，其差异实质上是干物质生产量 NPP（或叫绿波峰值）的差异。是什么原因导致图 7－3 和图 7－4 的不同变化和规律呢？我们从以下几方面去解释这一现象和规律。

a. 江汉平原水田区→华北冬小麦区→东北平原旱作区，农作物指数的差异出现在其峰值出现的早与迟上，这是地表绿波推移的时间延迟问题。典型样地 1、2、3 同处在中国东部沿海湿润平原（中国地形的“一级阶地”）上，统属东亚季风区，它们间虽然存在年平均降水量大小差异，但这三个区域的主要的、根本的差别是热量（温度）条件的差异，也就是导致绿波从南到北推移的根本原因不是降水，而是月平均气温条件。

b. 森林→森林草原→典型草原→荒漠草原→荒漠，地表植被指数的差异出现在月平均植被指数大小的差异，即干物质量（NPP，即干物质生产量）的差异上。样地 4，5，6，7，8，从东部季风区（湿润区）过渡到西北非季风的干旱区，其区域条件的根本差异不是热量，而是水分，即水分条件导致样地 4，5，6，7，8 间植被指数（NDVI）大小值的差异，由于它们都处在同一纬度带上，热量条件几乎相同，因此，其绿波推移几乎是同步的（月平均 NDVI 的月相变化波动规律是相同的）。

c. 热量（或气温）对地表植被指数的影响。从宏观上看，主要表现在植被生长的季节性节律上，即绿波的南北推移上（绿波峰值出现的早与迟上）；水分对地表植被指数的影响，从宏观上看，主要表现在干物质生产量（NPP 大小）上，即绿波峰值大与小的区域差异上。具体到植被类型时，在南北不同热量条件下，生长发育着不同温度喜性的植被类型，植被水平结构和镶嵌发生了本质变化；在东西不同水分条件下，地表植物光合生产能力发生着本质变化，即植被高度和垂直结构发生了本质变化。

§7.5 土地覆盖变化的区域环境影响分析

以植被指数(NDVI)的变化来表示土地覆盖变化时，水、热等区域性参数的变化对土地覆盖变化的影响是非常大的。那么，在不同热量带和不同湿润地带上，水和热对土地覆盖变化的影响是否有差异？有哪些差异呢？为了回答这些问题，我们输入了各样地月平均气温和月平均降水参数（所谓参数是指为了把气温和降水量月平均观测值（与 NDVI 同期）表示在样地植被指数月相变化曲线坐标里（同一坐标里），我们对多年月平均气温、降水参数进行了同化处理），比较研究水分和热量条件的变化对各样地植被指数变化的不同影响，图 7－5 至图 7－7 表示了各样地中的典型地物植被指数与环境参数关系曲线。

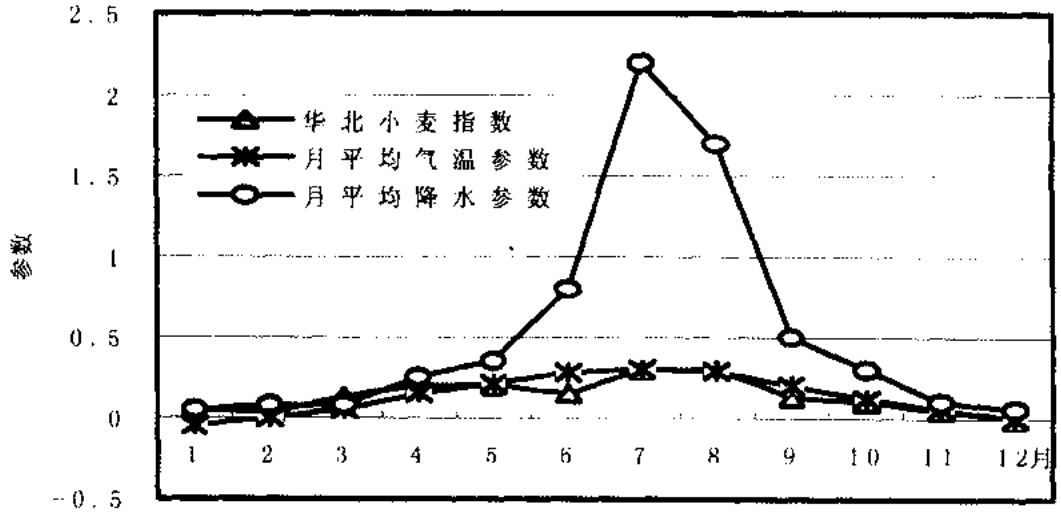


图 7－6 华北平原小麦指数与水热参数关系曲线

从图 7－5 至图 7－8 的曲线中可以看出这样的一个现象，即样地 1—江汉水田如图 7－5 植被指数的月相变化，在一定程度上与月平均气温参数有比较紧密的关系。与月平均降水参数相比，月平均气温参数与 NDVI 的关系比较紧密。月平均 NDVI，与月平均气温的相关系数 $R_{NDVI-T}=0.917$，而与月平均降水的相关系数 $R_{NDVI-p}=0.843$；在华北平原如图 7－6 也显示出同样的规律，月平均气温参数与月平均 NDVI 有比较紧密的相关关系。这里的月平均 NDVI，与月平均气温的相关系数（$R_{NDVI-T}=0.872$），而与月平均降水也有较大相关，相关系数 $R_{NDVI-p}=0.802$，样地 3—东北平原的月平均 NDVI，见图 7－7 与月平均气温关系又很密切，即月平均气温对月平均 NDVI 的影响更直接，两条曲线十分吻合，说明与降

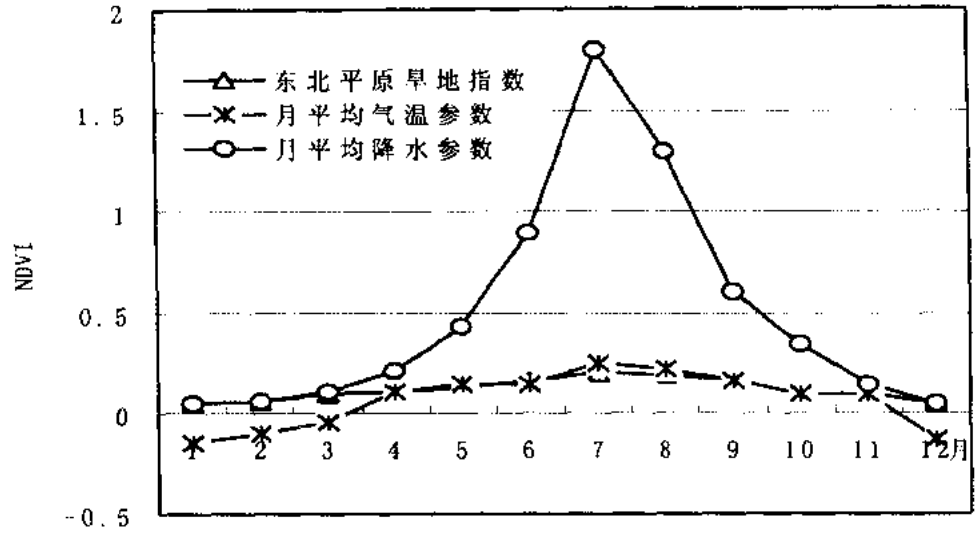


图 7－7　东北平原旱地指数与水热参数关系曲线

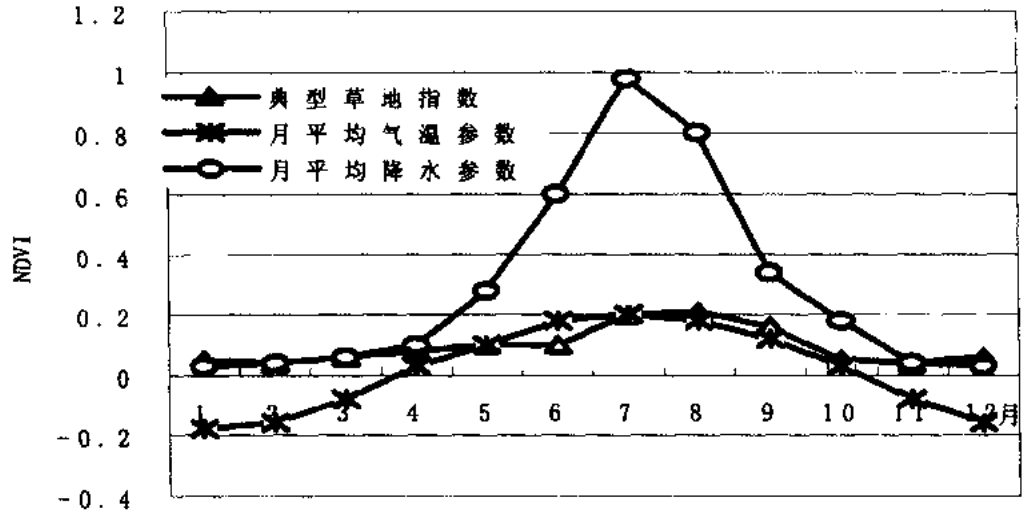


图 7－8（a）　典型草原草地指数与水热参数关系曲线

水量相比，气温条件对地表植被变化的影响更大、更直接；大兴安岭山地森林地区（样地4）NDVI（森林指数）的变化与降水和温度条件的变化也都显示比较好的正相关，相关系数分别为 $R_{NDVI-T}=0.898$；$R_{NDVI-p}=0.825$；气温的相关程度稍高于降水量；森林草原地区样地 5 为过渡地带，降水和气温条件成为森林草原生长和演替的限制因子，与气温相比，降水和气温条件成为森林草原生长和变化的限制因子，与气温相比，降水的变化更能影响本区 NDVI 的变化（Seze 1991，Legates 1990，Deering 1992，Sellers 1994）；典型草原地区（样地 6），见图 7－8（a 和 b），气温、降水和 NDVI 的波动既同步又同幅。但与气温相比，月平均降水对 NDVI 的影响更直接和更紧密，相关程度高，其相关系数分别为 $R_{NDVI-T}=0.834$；$R_{NDVI\ p}=0.945$；在荒漠草原地区（样地 7），地表 NDVI 的变化很小，但这种微小的变化也是夏季（6 月至 8 月间）仅有的一、两场降雨带来的。因此，降水的变化对 NDVI

的影响更直接，NDVI 对降水的相应程度很高，我们用非线性方程计算了 NDVI 对水分和热量的响应逻辑曲线。如图 7－9 所示，很显然 NDVI 与降水的关系为上凸曲线，而 NDVI 与气温的关系为下凸曲线，说明 NDVI 与 P 之间的响应比 NDVI 与 T 之间的响应高，在干旱地区水、热条件中，水分更能影响植被覆盖度；在荒漠地区（样地 8），降水的每一次微小的变化都会引起地表 NDVI 的变化，相关系数 $R_{NDVI-P}=0.89$；$R_{NDVI-T}=0.727$。因为干旱地区的植被能够充分利用一年中仅有的几场降雨，可以完成其生命的全部过程。在所有 8 个样地中，典型草原的降水的变化对 NDVI 的影响是最大、最直接和同步的。

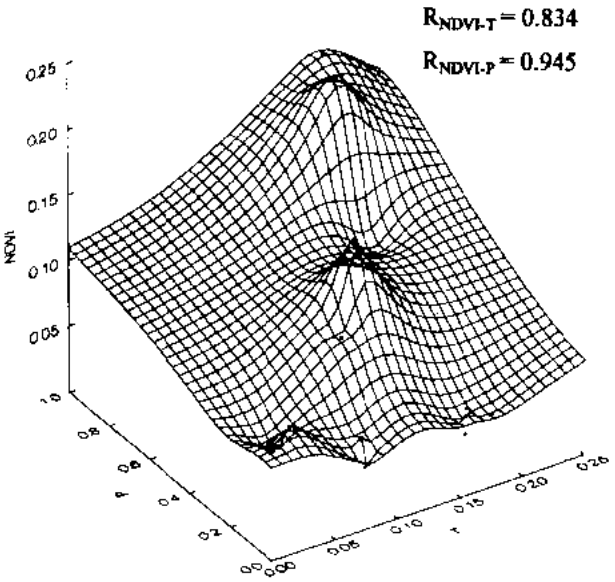


图 7－8（b）　典型草原草地指数与水热参数关系 3D 曲线

总之，月平均 NDVI、月平均气温和月平均降水的相关分析中可以看出，在缺水的干旱地区，水分条件成为其地表覆盖物月相变化的限制因子；在湿润地区，温度条件却成为其地表覆盖变化的主要限制因子；而过渡地带，水热条件共同限制其地表覆盖的变化。我们清楚地看到，在地处同经度地带上的样 1，2，3，4（同位于东部季风区），随着纬度的增高，NDVI 的季相变化在增大，因此 NDVI 与月平均气温有较大相关，而同一纬度地带上的样地 5，6，7，8（同属北方干旱、半干旱地区），随着离海岸线距离的增大，月平均 NDVI 总量在锐减。因此 NDVI 与月平均降水有较大相关，干旱程度越高，NDVI 值越少，见表 7－1。

表 7－1　　典型区月平均 NDVI 与月平均气温/降水相关程度

	NDVI 与气温的相关系数（R_{NDVI-T}）	NDVI 与降水的相关系数（R_{NDVI-P}）
样地 1	0.971	0.834
样地 2	0.872	0.802
样地 3	0.914	0.918
样地 4	0.898	0.825
样地 5	0.857	0.943
样地 6	0.834	0.945
样地 7	0.893	0.869
样地 8	0.727	0.890

§7.6 中国陆地生态系统时空脆弱性研究

一个区域土地覆盖变化在很大程度上代表了地表土壤—植被—大气联合体（即近地面生态系统）相互作用及其变化趋势，直接或间接反映了自然环境变化和人类活动影响的累积变化（Long，1989，Long，1992，见图 7－9）。引起土地覆盖变化的影响因子很多，诸如水、热等区域性条件变化；土地利用变化、全球变化等都可能引起土地覆盖的变化。那么，土地覆盖变化类型究竟有哪些呢？因为土地覆盖层的基础层面是地表岩石层或土壤—岩石层面，而土地覆盖层面包括了土壤和岩石层之上的（当然包括土壤和岩石层）森林、草地、农田、水域、荒漠、冰川雪域、裸岩裸土、人工地面（包括人造覆盖层）等，其变化类型可概括为：

a. 土地覆盖物的质量变化（包括土地退化、水域污染、草场退化、耕地退化等）；

b. 土地覆盖类型面积变化，包括水域萎缩、耕地林地减少、沙漠化扩大、湿地变化等；

c. 土地覆盖类型变化，包括土壤盐碱化和沙化、草场开垦、水域变干、森林开垦、城市扩展、湿地开发、热带雨林开发等；

d. 潜在变化，包括各种土地覆盖物内在的数量上的变化以及将来可能发生的突变等。

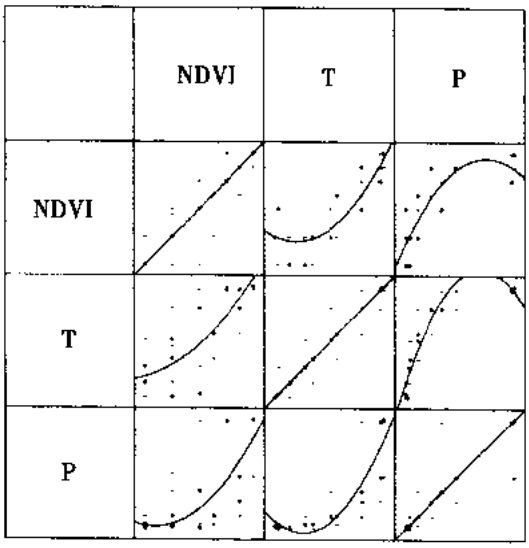


图 7－9 荒漠草原区植被指数的水热响应的 LOG 模型（T＝气温；P＝降水）

7.6.1 土地覆盖变化与危险区搜索

土地覆盖变化首先发生在各种作用力相互接触，相互作用的区域或层面上。在水平空间上，土地覆盖变化发生在生态环境脆弱地带，即两种或两种以上生态系统的过渡带，例如海岸带、城乡交界带、分水岭地带、农牧交错地带、沙漠与绿洲边缘地带等；在垂直空间上，

土地覆盖变化发生在两种或两种以上作用力的接触面上，即在土地覆盖的“界面”上。

假设 M_{ij} 是个属性变量值，表示的是 j 区域（土地覆盖类型区域）上发生土覆盖变化可能发生在 i 个栅格上的属性值，如图 7－10 所示。M_{ij} 的确认值称 X_{ij} 那么 X_{ij} 发生的先验概率计算为，

$$W = XCX_{11} \cdot P_{11}^{X_{11}} \cdot X - X_{11}CX_{12} \cdot P_{12}^{X_{12}} = \cdots (X!/\prod_i \prod_j X_{ij}!) \prod_i \prod_j P_{ij}^{X_{ij}} \quad (7-3)$$

而确认概率（搜索到的危险区出现的实际概率）计算为，

$$P_{ij} = M_{ij} / \sum_i \sum_j M_{ij} \quad (7-4)$$

那么（$i=1, 2, \cdots, ij=1, 2, \cdots, j$），这里，

$$X = \sum_i \sum_j X_{ij} \quad (7-5)$$

图斑各属性合计值（$Rj, j=1, 2, \cdots, j$）的约束方程为，

$$Rj = \sum_i X_{ij} \quad (7-6)$$

而此时小栅格（危险区域基本单元栅格）面积的约束方程为，

$$A = \sum_i a_{ij} X_{ij} \quad (7-7)$$

这里，a_{ij} 为 j 区域 i 栅格的面积换算系数，在多边形为同一属性时，$a_{ij} = 1$，否则，$a_{ij} = p \times b_{ij}$。其中 b_{ij} 为预先知道的相对变量；p 为参数。

如果我们在确认的危险区域检索中，小栅格出现的概率方程的两侧取对数的话，

$$\log W = \log X! \sum_i \sum_j X_{ij} \log X_{ij} + \sum_i \sum_j X_{ij} \log P_{ij} \quad (7-8)$$

当 X_{ij} 十分大时，$\log X_{ij}! = X_{ij} \log X_{ij}$，

$$\log W = X \log X \sum_i \sum_j X_{ij} \log X_{ij} + \sum_i \sum_j X_{ij} \log P_{ij} \quad (7-9)$$

输入拉格朗日参数 λj 和 μ_j 时就得到解析解为，

$$X_{ij} = M_{ij} \exp(\lambda_i b_{ij} + \mu_j) \quad (7-10)$$

用近似解代替上述复杂非线形连续方程时，

$$\alpha_i \beta_j = \exp(\lambda_i b_{ij} + \mu_j) \quad (7-11)$$

$X_{ij} = \alpha_i \beta_j M_{ij}$ 那么约束议程变为，

$$\begin{aligned} \alpha_i &= A / \sum_j p b_{ij} M \\ \beta_j &= Rj / \sum \alpha_1 M_{ij} \end{aligned} \quad (7-12)$$

总面积的计算成为，

$$IA = P \sum_i \sum_j b_{ij} X_{ij} \quad (7-13)$$

那么，IA 就是搜索到的土地覆盖变化的面积，如图 7－10 所示。

7.6.2 土地覆盖变化季相脆弱性研究

除了裸岩、裸土等极少数土地覆盖物以外，绝大多数土地覆盖物都随着自然环境的季节性变化而发生着季节性变化，其中最为明显的就是植被的季节性变化，随着纬度的增高，植

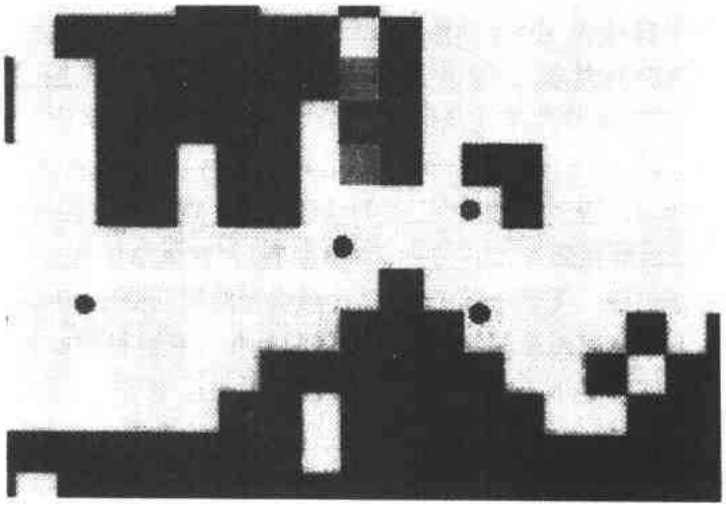


图 7－10　土地覆盖变化危险区域检索

被的季相特性更加明显。植被是自然界联结大气、土壤和水文的纽带，植被的变化反应其周围区域生态与自然环境条件的变化。当植被处于季节性枯萎时，地表基本处于低覆盖度状态，此时土地覆盖处于最为脆弱时期，一旦遭受来自自然或人文的“打击”时，就会出现土地退化或土地沙漠化。那么，当土地覆盖度处于较低状态时，自然环境条件究竟又处在什么状态呢？众所周知，风是最主要的外力之一，无论对于土地沙漠化，还是对于土地退化，风力是其最主要的表面驱动力之一，在风的搬运和悬浮作用下，表土（养分）出现风蚀、迁移或扩散。中国北方土地退化和沙漠化一般都出现在秋、冬、春季节或其过渡时期，为了证明这种自然现象，我们把月平均风力参数与月平均植被指数绘制在统一坐标系中，如图 7－11 至图 7－13 所示。

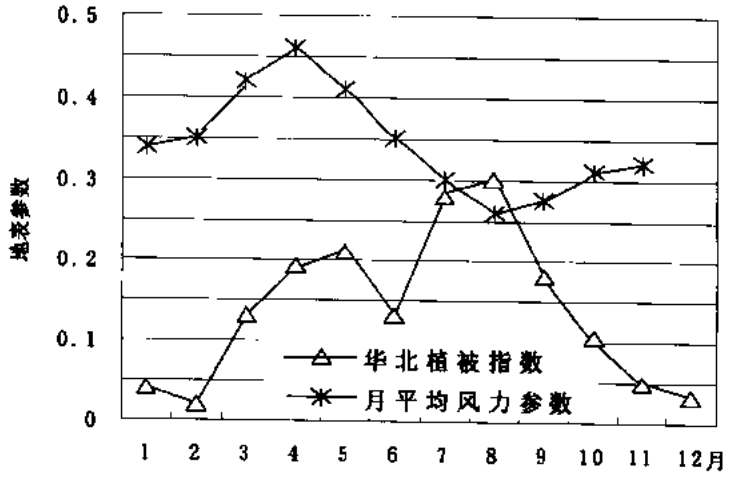


图 7－11　华北平原地表指数与平均风速时间套合关系

从图 7－11 至 7－13 中显示出一个非常明显的普遍的现象，那就是当地表处于裸露或半裸露（NDVI 值最低）时候，正是近地面月平均风力最大的时候，即月平均风力最大时，地表覆盖正处在一年中最低覆盖状态。因此，在风的吹拂、搬运作用下，表土养分和表层土壤

容易流失，其结果可能会出现沙漠化蔓延、土地退化或沙漠化；草场和耕地退化等生态与环境的问题。

从图 7－11 至图 7－13 的曲线中可看出，月平均风力参数曲线和月平均 NDVI 正好相反，即大多数样地月平均 NDVI 和月平均风力在一年中各月的变化规律正好相逆或接近相逆。在月平均 NDVI 和月平均风力之间应该是没有因果关系的，即它们是不相关的。例如

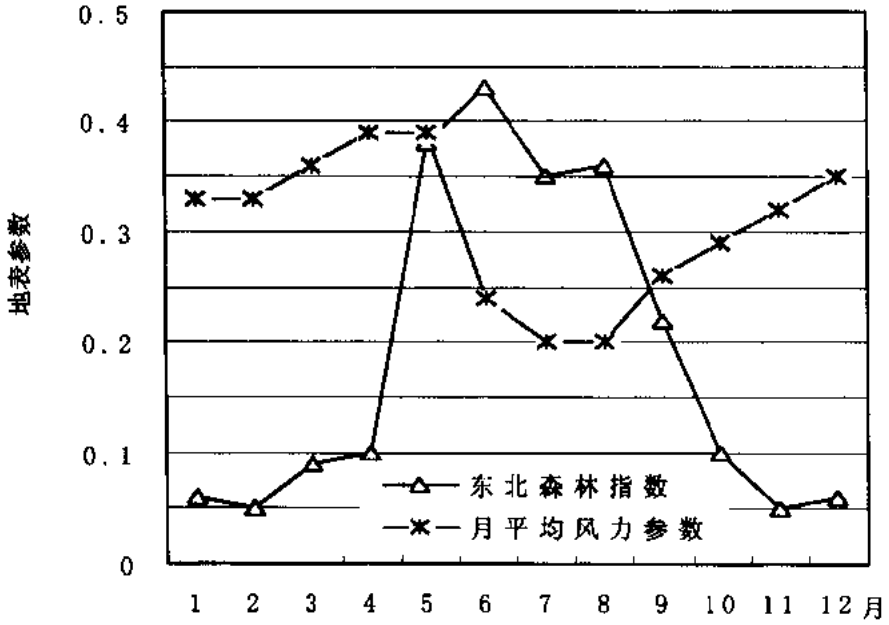


图 7－12　东北平原地表指数与平均风速时间套合关系

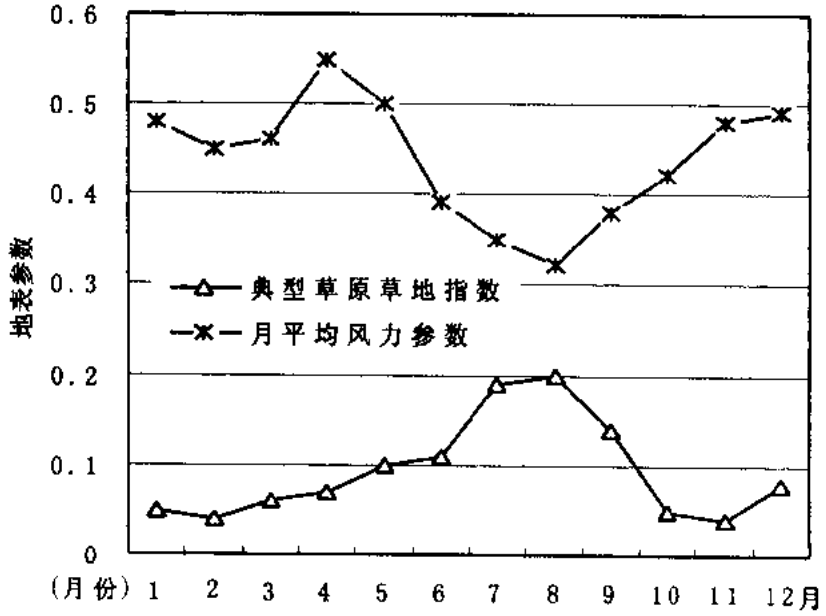


图 7－13　典型草地地表指数与平均风速时间套合关系

样地 1（江汉水旧）月平均风力与月相关系数 $R_{WN}=0.234$；样地 2（华北冬小麦）$R_{WN}=0.111$；大兴安岭林区（样地 4）的 $R_{WN}=-0.574$；典型草原地区（样地 6）$R_{WN}=-0.755$。在森林草原地区（样地 5）$R_{WN}=0.142$；荒漠区（样地 8）$R_{WN}=-0.046$，因此认为风力与 NDVI 间不相关，即没有因果关系，但其数值的按月分布正好相反或接近相反，并且随着纬度增高和随着远离海岸线距离的增大，这种相逆关系越加明显。我们把一年中月平均风力大且月平均 NDVI 小的时期定义为土地覆盖变化的脆弱季节。在华北地区（如图 7-11 所示），其土地覆盖变化的脆弱季节为 11 月至次年的 2 月间，共 3 个月左右；在东北为 10 月份至次年的 3 月份间，共 5 个月左右；大兴安岭林区如图 7-12 所示，为 10 月至次年 4 月间，共 6 个月，因此，可以推断如果大兴安岭林地的森林生态系统一旦被遭到破坏，其后果更加严重，因为本区一年中半年为生态脆弱季节，本区土地退化和沙漠进程将会非常迅速的；在森林草原地区，3 月至 5 月份和 10 月至 12 月份，共 4 个月左右的（春、秋）脆弱季节；在典型草原地区如图 7-13 所示，10 月至次年 6 月份为其土地覆盖变化的脆弱季节，持续时间约 6 个月左右；荒漠和荒漠草原地区，常年都处在风沙危害之中，除了 6 月份至 9 月份（3 个月）地表暂时处于稳定外，一年中 9 个月都处在地表覆盖的不稳定或风沙运动状态。随着远离海岸线距离的增大和纬度的增高，随着温度和湿度差异的增大，地表覆盖的稳定程度将会下降，土地覆盖变化脆弱季节变得越来越长。彩图 7-1 显示了根据 1999 年 NOAA 数据计算得到的中国陆地生态系统中脆弱地带的分布遥感调查图。脆弱性指标除了植被指数外还考虑了上述水、热参数和同期风力时间套合关系。

通过对中国陆地生态系统 8 个典型样地的取样实验结果得到（见表 7-2），8 个样地植被指数随着水、热因子的季节变化，植被指数在时间和空间上具有一定的“绿波推移”和“景观更替”规律。

a. 以联结土壤-大气-水分系统，并起着“纽带”作用的地带性植被（以植被指数作为其量化指标）作为“指示器”，研究土地覆盖变化时，发现在时间上它具有一定的季节性和季节脆弱性规律；在空间上具有一定的地带性和地带脆弱性规律。

b. 在中国东部湿润的季风区（样地 1-3），随着纬度的增高，其月平均植被指数与月平均气温有较大的相关。发现降水相对丰沛的地带，热量和光照条件的变化成为植被生长和变化的自然限制因子；而在中国北方森林-森林草原-典型草原-荒漠草原-荒漠地带上，随着从东部（湿润地区）到西部（干旱地区）干湿条件的更替，月平均植被指数与降水多寡有较大的正相关关系，说明在干旱地区水分条件成为植被生长的主要限制性因子。

c. 在 8 个样地上都呈现出共同的规律，即定向风的分布与植被指数的分布在时间和空间上具有相逆分布的“套合关系”。尤其在时间上有相逆套合关系。这说明，中国北方地表植被裸露和枯萎时期正好与盛行风力最大的时期是同期分布。这正是中国北方沙尘暴和沙漠化加剧的自然原因。本章给出了定量的脆弱季节和时间分布。

d. 本研究对于土地覆盖变化的时空特征研究，区域分异规律研究，地带性规律研究，土地利用规划，防沙治沙研究具有一定的参考价值。

表 7-2　　各样地生态脆弱性比较

	风速与 NDVI 关系系数	生态脆弱性月份分布（月份）	各样地生态脆弱性时间段（天）
样地 1	0.234	0	0
样地 2	0.111	11, 12, 1, 2	120
样地 3	−0.492	11, 12, 1, 2, 3	150
样地 4	−0.574	11, 12, 1, 2, 3, 4	180
样地 5	0.142	10, 11, 12, 1, 2, 3, 4	210
样地 6	0.755	10, 11, 12, 1, 2, 3, 4	210
样地 7	0.167	10, 11, 12, 1, 2, 3, 4, 5	240
样地 8	−0.046	10, 11, 12, 1, 2, 3, 4, 5	240

§7.7　全球生物量估算

通过全球生态项目 NASA 于 1999 年在 ORNL.DAAC 数据中心建立起来的全球 NPP 数据库，数据中心存放了全球各站点的实测 NPP 数据集与相关的论文。NPP 数据库包括了来自全球 450 多个站点近 30 年的观测数据（Milner 1968, Singh 1979, Singh 1975, Weigert 1964, 刘世荣 1996, 侯光良 1990, 刘世荣 1998, 陈镜明 1999），其中有生物量动力数据、气象数据、站点地理特征等数据。做成这样的数据库目标是实现按统一标准持续的记录和野外计算 NPP，为研究全球变化服务，促进全球数据共享。

7.7.1　全球 NPP 数据库与估算方法

计算 NPP 通常是按年成长过程作为计算单位。由于南北半球季节不一样，选取起止月份。根据计算模型要求，在地面上部和地面下部按一定规则选取生长着的生物量和死去的植物物质测量参数。地上植物的干重分类应在随机样方取一个月平均数。在采样时要注意剔除已经死去的植被样本。通过去掉样方中的土壤保留植物根系的方法获取地下植物物质，深度一般采样要求为植物根系长度的 80% 或 15～30cm。土壤的样品干燥后要通过 2 mm 筛子筛过，选出土壤颗粒和生物颗粒。地面下样本的采取过程比较耗时，通常不是质量保证不了就是缺样。最后统计计算样方面积和采样结果的就可以完成计算 NPP 值，见彩图 7-2。下面列出了 ORNL.DAAC 数据中心 NPP 估算方法。

① 1a. 生物量峰值法 A

$$ANPP = \max\{AG\ 生物量\} \tag{7-14}$$

适用条件：任何前一年标准死去的物质，排除当年死的植物；活体植物应为当年生长的植物。地下生物产品可以忽略或仅作为地表植物产品的分子，如天然植物的根/芽比。这种方法更适用于在生长期大量死去的植物计算 NPP。

② 1b. 生物量峰值法 B

$$ANPP = \max\{AG\ Tot\ clip\} \tag{7-15}$$

适用条件：任何当年标准死去的物质，排除前一年死的植物；地下生物产品可以忽略或仅作为地表植物产品的分子，如天然植物的根/芽比。

③ 1c. 最大－最小方法

$$NPP = \max\{AG\text{生物量}\} - \min\{AG\text{生物量}\} \tag{7-16}$$

适用条件：与（1a）相同，但必须排除任何由去年生长的生物量。

④ 2a. IBP 标准方法

$$NPP = \text{总量}\{\text{正增长 AG 生物量}\} \tag{7-17}$$

适用条件：样本任何成长出现采样间隔，在采样过程中不能出现死亡或生长量；NPP 不能出现负数。

⑤ 2b. 限制条件 IBP 标准方法

$$NPP = \text{sum}\{\text{生长增加}\} \tag{7-18}$$

式中生长增加 = AG 生物量的正增加

适用条件：与上式相同

⑥ “UNEP 项目”方法

$$NPP = \text{sum}\{AG\text{生物量改变量} + AGT\text{死生物物质改变量} + (AGr \cdot AGT\text{死生物物质改变量})\} \tag{7-19}$$

注：AGr＝地表植物腐烂物质。

适用条件：由于放牧丢失 AG 生物量和 AGT 死物质量，根系分泌等可以忽略。

通过上面的公式可以估算生物量动力，但是无现存关于分解或丢失死了的植物物质的数据可以用到其他地区的样方统计。

7.7.2 中国草地 NPP

中国 690 个研究站点观测 NPP 数据通过网络与该数据库连接。ORNL.DAAC 草原数据库中可以查到内蒙古锡林郭勒每月测量的生物量动力数据和利用遥感数据模型估算的 NPP 图像，见彩图 7－2。彩图中不同颜色表现了 32 种不同的植被种类，图像大小为 L180×P360 个像素。

中国内蒙古，经纬度为 43.7 N 116.6 E，实测数据时间范围 1980～1989。锡林郭勒平均年降水 360 mm，海拔高度为 1200 m。主要植被种类为草，覆盖度为 6.3%，长期为轻度放牧草原。土壤类型主要为黑色栗土粗颗粒结构，砂/细砂/黏土比为 0.60/0.19/0.21，土壤碳含量 5405 g/m^2，深度 0～20 cm；相同深度的氮含量为 414 g/m^2 见图 7～14。NPP 最大值分别出现在 1981，1982，1987，1988 年；最低值出现在 1980，1983 年。

NPP 是指生长植物吸收的净二氧化碳量为植物光合作用与呼吸作用，释放吸收的二氧化碳量之差。所以 NPP 可以反映事物的生长状况和计算碳循环的重要参量。

a. 卫星图像可为 NPP 估算提供地物覆盖类型和植被结构参数信息以及通过辐射传输模型确定卫星资料与植物树冠结构参数的关系。

b. 基于中国水热条件 NPP 模型 12 个月图像展示了中国 NPP 年变化趋势。

c. 对比中国草原 NPP 曲线峰值出现在 6，7，8 月，不像一般 NPP 出现在 8 月，但是低

峰值年出现的月份都为9月。

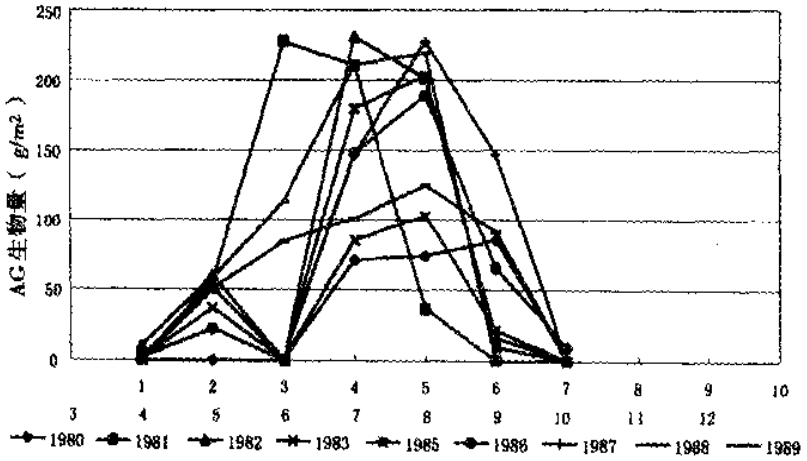


图7－14　中国内蒙古锡林郭勒草原观测站观测的AG生物量（单位 g/m^2）。

参 考 文 献

陈述彭著 .1992. 地学探索（第三册）遥感应用 . 北京：科学出版社

刘纪远主编 .1996. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究，北京：中国科学技术出版社

刘纪远，布和敖斯尔 .1996. 应用遥感和 GIS 技术开展中国土地利用变化研究 .《遥感新进展与发展战略》. 北京：中国科学技术出版社

布和敖斯尔，刘纪远，吴祖南 .1999. 基于季相及经度特征的中国土地覆盖变化遥感研究 . 地理学报

Liu Jiyuan, Buheaosier.1996.The Longitude Change Model for Chinese Land Use/Cover Based on Landsat TM Data.Start Regional Centre for Temperate East Asia Press. P.29～30

布和敖斯尔，励惠国 .1994. 亚洲季风区全球变化区域模式研究与遥感应用时空域 . 国土资源遥感，Vol.22，No.4

Aase J.K., Millard J.P., Brown B.S.1986. Spectral radiance estimates of Leaf area and leaf phytomass of small grains and native vegetation. IEEE Trans. Geosci.Remote Sensing, GE－24：685－692

Yates H.W., Strong A., McGinnis D., Tarpley, D.1986. Terrestrial observation from NOAA operational satellites. Science 231：463～470

Holben B. N., Y. Kaufmann, J. Kendall.1990. NOAA－11 AVHRR Visible and near－IR in－flight calibration. International Journal of Remote Sensing, 11：1511～1519

Sellers, P.J., J.A. Berry, G.J. Collatz, C.B. Fields, F.G Hall.1992. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. Ⅲ. analysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. Remote Sensing of Environment, 42：187～216

Sellers, P.J., S.O. Los, C.J. Tucker, C.O. Justice, D.A. Dazlich, G.J. Collatz,, D.A. Randall. 1995.A revised land surface parameterizationfor atmospheric GCMs. Part 2：The generation of global fields of terrestrial.biophysical parameters from satellite data. Submitted to Journal of Climate

Rossow, W.B., L. Garder.1984. Selection of Map Grid for Data Analysis and Archival. J. Climate Appl. Meteor.23：1253～1257

Seze, G., W.B. Rossow. 1991. Effects of Satellite Data Resolution on Measuring the Space/Time Variations of Surfaces and Clouds.INT. J. Remote Sensing, 12：921～952

Legates, D.R., C.J. Willmott.1990. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected global precipitation. INT. J. Climate.9：111～127

Deering, D.W., E.M. Middleton, J.R. Irons.1992. BanerjeeDifferent instruments at the FIFE site measure prairie grassland bi－directional reflectance. Journal of Geophysical Research.9：18 887～18 903

Sellers, P.J., S.O. Los., C.J. Tucker. 1994. A global 1*1 degree NDVI data set for climate

studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. International Journal of Remote Sensing.15 (17): 3519～3545

Long, S.P., E. Garcia Moya , S.K. Imbamba. 1989. Primary productivity of natural grass ecosystems of the tropics: a reappraisal. Plant and Soil. 115, pp 155～166

Long, S.P., M.B. Jones, M.J. Roberts.1992. Primary Productivity of Grass Ecosystems of the Tropics and Sub－tropics. Chapman and Hall, London.267 pp.123～130

Milner, C., R.E. Hughes.1968. Methods for the Measurement of the Primary Production of Grassland. IBP Handbook No.6. Blackwell. Oxford

Singh, J.S., M.C. Joshi. 1979. Tropical grasslands primary production. IN: Grassland Ecosystems of the World (R.T. Coupland, ed.) Cambridge University Press. pp.197～218

Singh, J.S., W.K. Lauenroth , R.K. Sernhorst. 1975. Review and assessment of various techniques for estimating net aerial primary production in grasslands from harvest data. Botanical Review 41.181～232

Weigert, R.G., F.C. Evans. 1994. Primary production and the disappearance of dead vegetation on an old field in south－eastern Michigan. Ecology.45: 49～63

刘世荣，郭泉水，王兵. 1996.（增刊）. 大气二氧化碳浓度增加对生物组织结构与功能的可能影响（I）－模拟 CO_2 实验技术及细胞．片和个体生长对 CO_2 的反应．地理学报，129～140

侯光良，游松才 .1990. 用筑后模型估算我国植物气候生产力．自然资源学报，3 (1): 60～65

刘世荣，郭泉水，王兵 .1998. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究．生态学报，Vol.18，No.5: 70～76

第八章　遥感数据融合

§8.1　概 述

随着数据库技术的成熟和数据应用的普及，人类积累的数据量正在以指数速度增长。信息化、数字化、网络化以及数字城市实施、数字地球发展战略的提出，世界似乎进入了一个混沌信息空间。据统计资料，1993 年全球数据存贮容量约为 2000TB，到 2000 年会增加到 3 000 000TB。数据是信息的载体，它只是描述发生了什么事情，对数据进行分析，赋予数据意义就产生了信息。对信息进行再加工，找出逻辑联系、建立模式模型获得知识对未来进行科学预测。正如纳斯博特指出的“我们被淹没在信息里，但感受到知识的饥饿。显然，利用当前技术处理这个水平的信息是不够的，没有能力控制和组构的信息在信息领域已经不在被认为是资源，相反这种信息已经成为垃圾。”人们越来越渴望利用更多的信息做出正确的决策，人类面临着“数据与知识”的巨大挑战（Gore　1998）。于是数据融合与数据挖掘模型和技术便应运而生，并且得以迅速发展。数据融合与数据挖掘在遥感界也得到积极的响应，通过不同空间、时间序列和不同探测机理的遥感数据融合，增强遥感图像的几何、时间和光谱分辨率，提高对目标的识别能力已经成为遥感技术领域数据融合与信息挖掘探索的热点问题。美国航天航空局 NASA 发起成立了国际信息融合协会，建立了相关的网站，从 1998 年开始涉及卫星传感器探测数据的国际组织，如 IEEE 信号处理协会联合 IEEE 国际信息融合学会等每年联合或独自组织召开一次数据融合与数据挖掘国际会议（Special ISSUE on data fusion，1999，FUSION '98 ，1998，1999 NASA Workshop on Data Fusion，1999，FUSION '99，1999，NSSDF '99，1999，EuroFusion '99，1999，FUSION 2000 3rd，2000，FUSION 2000 4th，2000）。美国国防部成立了融合信息分析中心 FUSIAC，在多传感器的数据融合理论基础研究方面取得了系列的成果，C^3I 系统已经实用化应用与海湾和科索沃局部战争。数据融合技术应用领域广泛，展示了巨大的发展前景，见表 8－1。

以美国 NETobjects 公司开发的 Netobjects Fusion5.0 版为代表的网上信息融合与挖掘软件代表了基于网络的数据融合服务器开发与应用重要的发展趋势。

表 8－1　　数据融合应用

数据类型	数据融合应用	使用单位
遥感数据	增进图像精度、增进几何分辨率使图像得到明显锐化、修补图像中丢失或损坏的数据、增进几何校正精度、提高了图像识别地物的能力；三维地形可视化；外空探测可视化探测	遥感应用，商业，军方
制图	GIS 及产生的数据；地球环境系统	国土资源调查，军方
军事目标自动识别	战场指挥和战地服务	军方
工业机器人	3－D 多传感器观察；无损探测	工业，军方，科研
医学图像	人体检查，病情诊断	医院，研究

近年来，我国也开展了数据融合与数据挖掘方面的研究，相继建立了相关的网站，如KDD之家，数据挖掘网上学术研究等。发表了一些论文、专刊和专著。但是有关遥感数据融合与系统应用的报道不多。

20世纪遥感技术经历了从光子实验到实用科学工具的过程，21世纪面临着“数据与知识”的挑战。随着以全球变化，资源环境、海洋的光学、雷达等系列遥感探测器的发射新数据、获取和不同类型的遥感数据商业化。仅美国航空航天局的数据库DAACs每天从卫星下载的数据量就达5TB，并且要求将这些数据保存7年之久。我国已经运行和将要发射的气象、海洋、减灾和资源系列对地观测卫星每天数据获取能力也接近3个TB。数字地球原数据为合理管理空间数据提供了多层结构和空间框架，在地球表面同一经纬度范围的位置上存放多来源、多时相和多分辨率的遥感数据、空间数据和社会经济数据。根据使用目的综合使用这些数据可以提高对目标的分类精度、增进识别能力和模拟预测提高决策的正确性。但是，当前的计算机软硬件条件要想同时处理多源、多时相和多分辨率的遥感数据，从中发现需要的信息不是一件容易的事。于是人们探索通过一个设计合理的处理流程来解决这个问题，这个过程就是数据融合过程，这种处理过程的方法被称为数据融合。由此可以将遥感数据融合的主要任务概括为两个方面，通过多种传感器数据处理过程增进对目标的解读；通过相同传感器系列数据处理克服单一波段对目标识别的不确定性。根据当前国内外遥感领域的数据融合发展情况，IEEE国际遥感数据融合技术委员会将遥感数据融合分为数据、特征和决策等三级和增进图像精度、增进几何分辨率使图像得到明显锐化、修补图像中丢失或损坏的数据、增进几何校正精度、提高了图像识别地物的能力等五个方面的内容和标志性评价标准。

§8.2 数据融合定义与一般推理模型

8.2.1 数据融合与数据挖掘的异同

数据融合与数据挖掘提出时间都是在20世纪80～90年代，其目标都是从巨量的数据中寻找与发现需要的信息和知识。二者之间存在严格的区别（刘同明，1998，图像图形学报专刊，1999，康耀红，1997）。

（1）数据融合

目前数据融合概念大多数是对数据融合功能的描述，有代表性的如美国NASA定义，认为数据融合是通过综合多传感器和多源信息处理过程实现增进估计实体特征的能力。美国国防部信息中心从信息战场角度将数据融合定为一种处理过程，在过程中将来自许多传感器和信息源的数据和信息加以联合、相关和组合，以获得精确的位置估计和身份估计，以及对战场情况和威逼及其重要程度进行适时的完整评价（Lucien，1999）。（Wald，1998）在文献中对上述定义进行了补充和修改，用状态估计代替位置估计，并加上检测功能，从而给出了以下定义：数据融合是一种多层次、多方面的处理过程，这个过程是对多源数据进行检测、相关、估计和组合以达到精确的状态估计和身份估计，以及完整、及时的态势评估和威胁评

估。将数据融合定义为，一种规范化的工作框架在这个框架中表达真实含义，又可以表达为能够将不同数据源数据重新组织起来的一种工具。数据融合的目标是取得更高质量的信息，更高质量的精确定义取决于应用对精度的要求。这个定义强调融合处理框架、遥感数据基础和质量，而不是强调工具和功能。

(2) 数据挖掘

1989年8月在美国底特律召开的第11届国际人工智能联合会议的专题讨论会上首次出现知识发现KDD这个术语。大多数文献认为知识发现=数据预处理+数据挖掘+解释评价。用数据库管理系统来存储数据，用机器学习的方法来分析数据，挖掘大量数据背后的知识，这两者的结合促成了数据库中的知识发现的产生。数据库中的知识发现是一门交叉性学科，涉及到机器学习、模式识别、统计学、智能数据库、知识获取、数据可视化、高性能计算、专家系统等多个领域。从数据库中发现出来的知识可以用在信息管理、过程控制、科学研究、决策支持等许多方面。KDD国际会议发展成为年会。1998年在美国纽约举行的第4届知识发现与数据挖掘国际学术会议不仅进行了学术讨论，并且有30多家软件公司展示了他们的数据挖掘软件产品，不少软件已在北美、欧洲等国得到应用。在我国，许多单位也已开始进行数据挖掘技术的研究，但目前数据挖掘技术在我国还处于初步研究阶段。

(3) 数据组合、数据叠合、数据复合

数据组合（combination），数据合并（merge）是图像处理中经常用到的词汇，涵盖范围要比数据融合（data fusion）广泛，数据组合比数据合并的涵盖范围还要广。这两个词汇的含义指任何处理过程中一种数学算法用于处理至少两种以上的数据或信息。数据复合（integration）与数据组合与数据叠合相似，倾向于表达遥感数据向量的增加，没有表达从遥感数据中提取特征信息。数据融合定义即包含了数据复合（像元级）、数据中特征信息提取（特征级），又包含了决策级（像元、特征和时间序列）等复杂的数据分析过程。

8.2.2 数据融合的一般推理模型

数据挖掘主要任务是通过归纳推理方法发现和建立模型，预测未来，数据融合主要任务是通过演绎推理的方法应用模型准确地发现目标，见表8-2，图8-1。

表8-2　　数据融合一般推理模型

处理流程	一般特征	工具
归纳	利用特定数据集，建立模型假设和解释数据集 扩展模型假设，建立解释和验证	数据挖掘目标是发现、建立模型
演绎	应用模型创建假设，测量和解释目标	数据融合的目标是使用模型探测目标

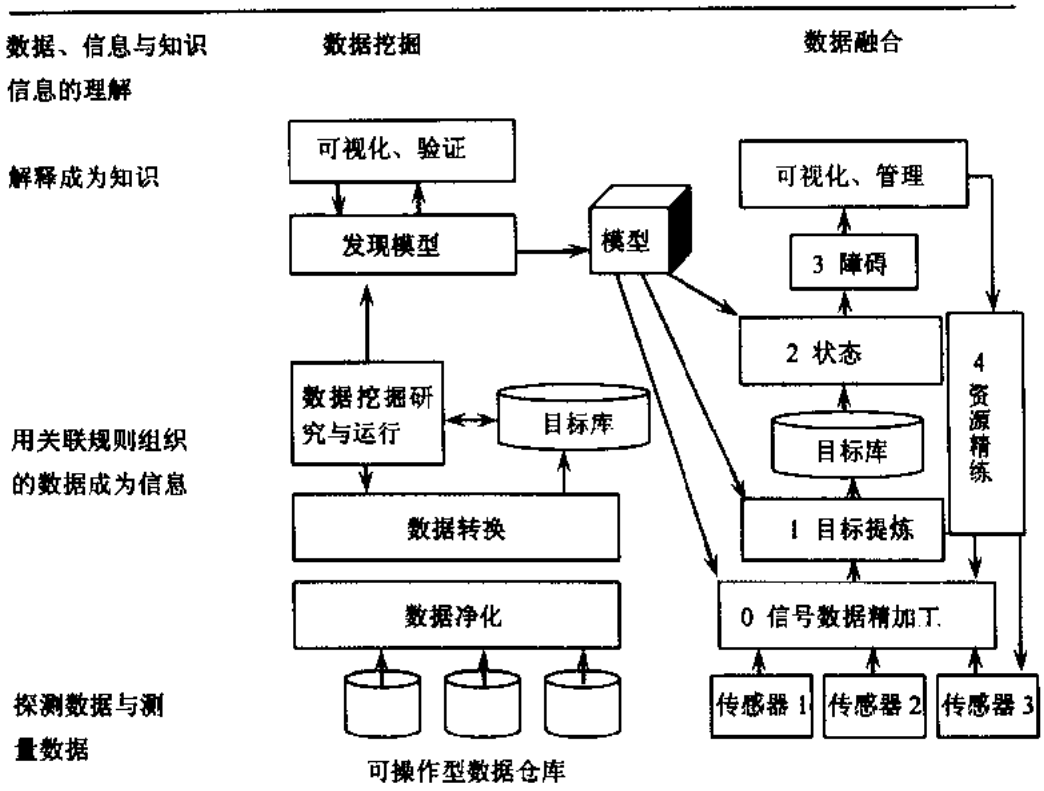


图 8－1　基于归纳、演绎推理模型的数据融合与数据挖掘流程

8.2.3　数据融合的分级

IEEE 国际遥感数据融合技术委员会将遥感数据融合分为数据、特征和决策等三级融合以及增进图像精度、增进几何分辨率使图像得到明显锐化、修补图像中丢失或损坏的数据、增进几何校正精度、提高图像识别地物的能力等五个方面的标志性评价内容。一些学者从目标时空序列变化的角度提出了基于目标时间域与空间域序列变化过程的数据融合，见三种数据融合数据流，见图 8－2。

(1) 像元级融合

像元级融合是直接在采集到的原始数据层上进行的融合，各种传感器的原始测报未经预处理之前就进行数据的综合和分析。这是最低层次的融合，如成像传感器中通过对包含若干像元的模糊图像进行图像处理和模式识别来确认目标属性的过程就属于像元级融合。这种融合的主要优点是能保持尽可能多的现场数据，提供其他融合层次所不能提供的细微信息。其局限性表现为：它所要处理的传感器数量太大，故处理代价高，处理时间长，实时性差；这种融合是在信息的最低层进行的，传感器原始信息的不确定性、不完全性和不稳定性要求在融合时有较高的纠错处理能力；要求各个传感器信息之间具有精确到一个像元的校准精度，故要求各传感器信息来自同质传感器；数据通信量较大，抗干扰能力较差（Zhukov 1999）。

像元级融合通常用于：多源图像复合、图像分析和理解；同类（同质）雷达波形的直接合成；多传感器数据融合的卡尔曼滤波等。20 世纪 90 年代初美国海军在 SSN－691 潜艇上安装了第一套数据融合样机，它可使操作员在最佳位置上直接观测到各传感器输出的全部图像、图表和数据，同时又可提高整个系统的战术性能。

（2）特征级融合

特征级融合属于中间层次，它对来自传感器的原始信息进行特征提取（特征可以是目标的边缘、方向、速度等），然后对特征信息进行综合分析和处理。一般来说，提取的特征信息就是像元信息的充分表示量或充分统计量，然后按特征信息对多传感器数据进行分类、汇集和综合。特征级融合的优点在于实现了可观的信息压缩，有利于实时处理，并且由于所提取的特征直接与决策分析有关，因而融合结果能最大限度地给出决策分析所需要的特征信息。目前军方使用的 C^3I（command，control，communication and intelligent）系统的数据融合研究都是在该层次上展开的。特征级融合可划分为两大类：目标状态数据融合和目标特性融合。

特征级目标状态数据融合主要用于多传感器目标跟踪领域。融合系统对传感器数据进行预处理以完成数据校准，然后主要实现参数相关和状态向量估计。特征级目标特性数据融合就是特征层联合识别，具体的融合方法仍是模式识别的相应技术，只是在融合前必须先对特征进行相关处理，把特征向量分类成有意义的组合。

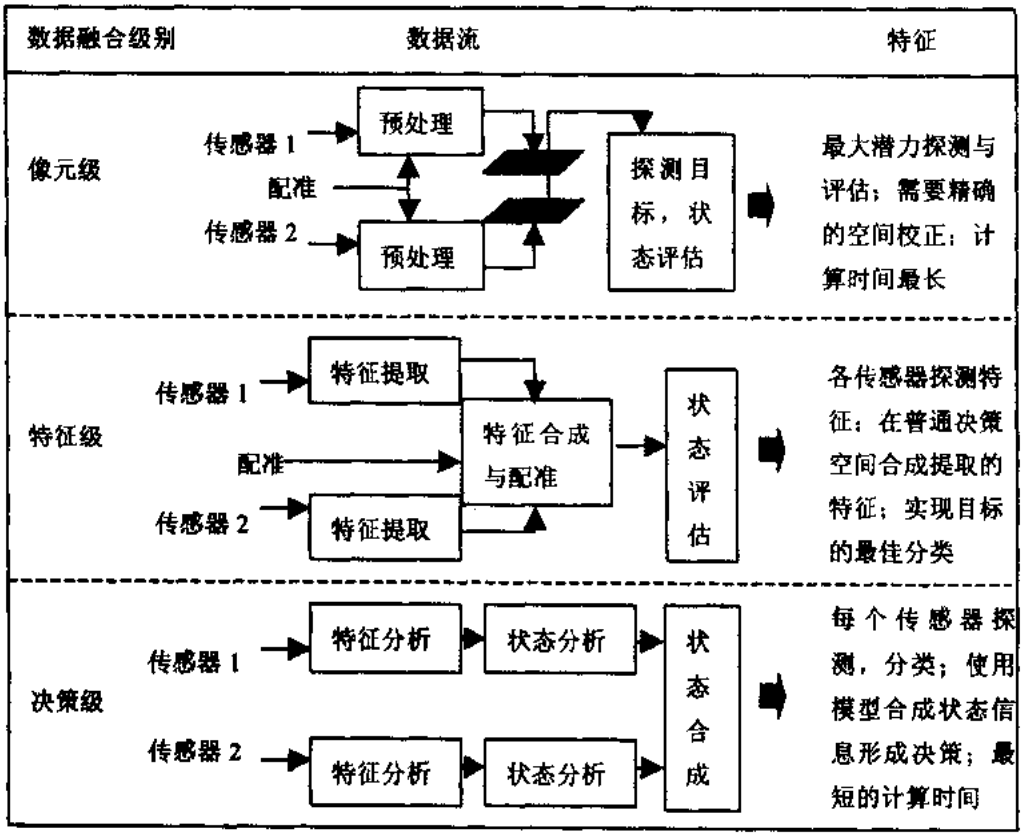


图 8 2 三种级别数据融合数据流

(3) 决策级融合

决策级融合是一种高层次融合，其结果为指挥控制决策提供依据，因此，决策级融合必须从具体决策问题的需求出发，充分利用特征级融合所提取的测量对象的各类特征信息，采用适当的融合技术来实现。决策级融合是三级融合的最终结果，是直接针对具体决策目标的，融合结果直接影响决策水平。决策级融合的主要优点有：具有很高的灵活性；系统对信息传输带宽要求较低；能有效地反映环境或目标各个侧面的不同类型信息；当一个或几个传感器出现错误时，通过适当的融合，系统还能获得正确的结果，所以具有容错性；通信量小，抗干扰能力强；对传感器的依赖性小，传感器可以是同质的，也可以是异质的；融合中心处理代价低。但是，决策级融合首先要对原传感器信息进行预处理以获得各自的判定结果，所以预处理代价高。

(4) 时空序列过程融合

当使用多种卫星系列数据分析地球演化和变迁时，当使用多个分布在不同位置上的传感器对动态目标进行观测时，传感器系统在不同时间对相同空间的观测值将不同，从而形成一个观测值集合。如有 s 个传感器在 n 个时刻观测同一个目标可以有 $s \times n$ 个观测值，用集合 Z 表示为，

$$\left.\begin{aligned} Z &= \{Z_j\} \qquad (j = 1,2,\cdots,s) \\ Z_j &= \{Z_j(k)\} \quad (k = 1,2,\cdots,s) \end{aligned}\right\} \tag{8-1}$$

其中 Z_j 代表第 j 号传感器的观测值的集合，$Z_j(k)$ 表示第 j 号传感器在 k 时刻的观测值。将这些观测值在时间排列如表 8-3 所示。

表 8-3　　多传感器单一目标的观测数据集

	1	…	n
1	$Z_1(1)$	…	$Z_1(n)$
2	$Z_2(1)$	…	$Z_1(n)$
⋮	⋮		⋮
s	$Z_s(1)$	…	$Z_s(n)$

为了得出对随时间变化目标状态的综合信息，又分为在时间融合和空间融合问题。

时间融合：按时间先后对相同目标在不同时间的观测值进行融合，主要用于一种或多种传感器系统的数据融合。

空间融合：对同一时刻的不同位置传感器对相同目标的观测值进行融合，适用于多传感器系统信息的一次融合处理。

时间－空间融合：先对每个传感器系统的观测值集进行的时间融合，得出每个传感器对目标状态信息与估计，然后将各个传感器的信息进行空间融合，从而得到目标状态的最终评价。

空间－时间融合：先在同一时间对各传感器的观测值进行融合，得出各个不同时间的目

标位置信息和估计，然后进行时间融合，得出最终状态评价。

时间空间融合：时间融合和空间融合同时进行，信息损失少，是一种理想的数据融合和分析方法，用于解决地球系统演化与人类作用关系分析和军事伪装运动目标的准确识别问题。但在用于大型非线性系统、复杂系统的数据融合系统分析时难度较大。

§8.3 遥感数据融合的一般方法

以20世纪70年代发射的陆地资源卫星（Landsat）卫星和产生的数据产品（MSS）为标志，对地观测开创了数字卫星遥感新时代。以陆地资源卫星Landsat，SPOT卫星，高分辨率IRS等光学卫星系列，RADARSAT卫星等雷达卫星系列，NOVAA气象卫星系列为代表，每个系列按连续的物理参数探测地球表面、大气的物理特性和变迁。采用统一的系统处理数学算法，保留了这些卫星数据空间尺度和时间序列的连续性和可比性。90年代末期的EOS/MODIS系列卫星和多角度卫星系列是对上述卫星系列在空间、时间和光谱尺度的补充与发展。

8.3.1 不同遥感数据配准

由于各种传感器系列工作方式和传感器设计的几何、光谱、分辨率等有所不同，为了将多传感器信息有效融合，提取不同侧面信息，对目标特性作出正确估计，必须对多源影像数据进行有效的配准，例如10m分辨率的SPOT影像与30m分辨率的TM影像之间的融合。由于两种传感器工作原理不同，两种数据融合一般要进行正射图像处理过程。

遥感数据配准可以被定义为这样一种过程：从不同探测器、不同时相、不同角度所获得的两幅或多幅影像的最佳匹配。其中一幅是参考影像数据，其他图像作为输入影像与参考影像进行相关匹配。根据Brown的总结，图像配准可以被看做下面几种要素的结合。

特征空间：定义特征集用于实现匹配，特征集是从参考影像和输入影像中提取出来的。

搜索空间：可以在输入特征与参考特征之间建立对应关系的可能的变换的集合。

搜索策略：用于选择变换模型以使匹配在处理过程中逐步达到精度要求。

相似性度量标准：用于评估对从搜索空间中获得的一个给定的变换所定义的输入数据与参考数据之间的匹配。

图像配准算法分成两大类：基于灰度的影像匹配和基于特征的影像匹配。在基于灰度的算法中，首先从参考图像中选取控制点；然后用该点在待配准图像中滑动，通过相似性度量来寻找最佳匹配点。这类影像可以用一维窗口，二维窗口在空域或频率域进行处理。各种算法的主要差异在于相似性度量标准的选择不同。对于非特征像元点利用插值等方法处理推算出对应匹配关系，从而实现两幅图像之间逐像元的配准。一般来说，由于基于灰度特征匹配算法把匹配点周围区域的点的灰度都考虑进来进行计算，故匹配时，计算量大、速度较慢。而基于特征的算法由于提取了图像特征，大大压缩图像信息的数据量，同时保持了图像的位移、旋转、比例方面的特性。故在匹配时计算量小、速度较快。

基于特征的影像匹配算法是以从图像灰度中提取出来的某些特征作为匹配基元，用于匹

配的特征通常为点、线、区域。算法的过程通常分为两步：特征提取和匹配。在匹配前，首先要从两幅图像中提取出的点、线、区域等特征形成特征集。然后在两幅图像对应的特征集中利用特征匹配算法尽可能地将存在匹配关系的特征对选择出来。

8.3.2 HIS 变换原理与 Smith 's 融合模型

HIS 变换法在多传感器像元融合方面应用较广，最早由 Haydan 等人（1982）提出，现在已经成为将可见光波段数据与亮温数据融合提高对地物的识别能力；高分辨率数据 ETM－PAN与低分辨率数据融合提高几何分辨率常规方法。PCI 商业化图像处理软件中的 HIS 变换就具备了数据融合功能。一幅低分辨率三波段图像与一幅高分辨率单波段图像进行融合处理。这种方法将三个波段的低分辨率的数据通过 IHS 变换到 IHS 空间。同时将单波段高分辨率图像进行对比度拉伸以使其灰度的均值与方差和 HIS 空间中亮度分量图像一致。然后将拉伸过的高分辨率图像作为新的亮度分量代入 HIS 反变换还原到原始空间中。这样获得的高分辨率采色图像既具有较高空间分辨率，同时又具有与该原影像相同的色度与饱和度，有利于目视判读和计算机自动化处理。由于提高了空间分辨率，从而也可以提高地物分类的精度。然而，要注意的一点是，将高分辨率图像替换变度分量的依据是高分辨率图像与亮度分景在光谱分布上大体相同。

HIS 融合方法是基于把 RGB 多光谱通道变换成 HIS 成分的。I 是指总体彩色亮度，H 是指构成某种颜色的主要波长或平均波长，S 是指相对于灰度的彩色纯度。标准融合方法的一般步骤如下：

①把低分辨率多光谱图像配准成同高分辨率全色图像具有相同的大小，以便添加。通常情况下，用控制点和双三次多项式拟合法对卫星 TM 图像进行配准，其误差在 0.25 像元范围内；

②把多光谱图像的 R、G、B 通道变换成 HIS 成分；

③修正高分辨率全色图像，以考虑同多光谱图像的光谱差别以及不同的大气和照明条件。全色图像和 HIS 表示法中的强度成分进行直方图匹配可以达到上述效果。特别地、全色图像和多光谱图像强度成分的直方图计算完成后，多光谱图像的强度直方图往往被用做参考，用以匹配全色图像的直方图；

④用全色图像替代多光谱图像的强度成分，然后，进行反变换以获得融合了全色信息的 RGB 图像。

假定，所有的 R、G 和 B 通道取值范围为 0－255。

标准数据融合方法的融合结果依赖于所采用的 IHS 系统。目前有许多种 IHS 变换算法可以转换 RGB 值。算法模型不同时，能够产生相似的 H 值和 S 值。然而，计算强度成分的方法却是不同的，最常用的强度定义如下，

$$\left.\begin{aligned} I &= \max(R,G,B) \\ L &= \frac{R+G+B}{3} \\ L &= \frac{\max(R,G,B)+\min(R,G,B)}{2} \end{aligned}\right\} \tag{8-2}$$

我们把基于上述定义的 IHS 方法分别为 IHS、LHS、L'HS 彩色系统。基于 I 的第一个系统，称做 Smith's 六边圆模型（Chavez 1991）；在忽略其他两个成分去计算强度值 I，对纯彩色（255，0，0）和（255，255，255）将得到相同的强度值；像元强度值为 255 时生成白色像元，对一纯彩色像元仅产生 85 强度值。构成基于 L 的第二个系统，也称做 Smith 's 三角模型；基于L'的第三种系统，同样白色像元为 255 的强度值，但纯彩色像元仅产生 125 的强度值。

然而，在某些情况下基于 L' 定义的变换算法会产生一些异常的现象。例如，把 RGB 值（100，150，200）把它们变换到L'HS，然后把L'加 10，在反变换回 RGB 表示法，得到的值为（115，160，205），即，具有最低值的彩色通道 R 获得了最大增量，而具有最大值的 B 通道获得了最小增量。另外，如果把相同的 RGB 值（100，150，200）变换到 LHS 系统，再次对 L 通道加 10 后，反变换，得到 RGB 值为（107，160，213）。此时，针对于强度通道 L 的增量 10，被按照同 R、G、B 值成正比的原则分布到各通道上。

8.3.3 主成分变换与滤波法实现数据融合

主成分变换与 IHS 变换法类似，它将低分辨率的图像（三个波段或更多）作为输入分量进行主成分分析，主成分变换将输入图像在特征空间中。故第一主成分中通常含有变换前各波段的相同信息，而各波段中惟一对应各波段的部分，则被分配到变换后的其他波段。与 HIS 法类似，将高分辨率影像拉伸使其有和主成分第一分量相同的均值和方差。其依据为拉伸的高分辨率图像与第一分量图像近似相同，这样才能不至于损失第一分量的信息。通过高空间分辨率数据与高光谱分辨率数据的融合得到新的数据集包括了二幅原图像的高空间分辨率与高光谱分辨率特征，保留了原图像的高频信息。从视觉效果分析，得到的融合图像目视判读效果有很大的改善，这是由于分辨率提高，融合图像上目标细部特征更加清晰，光谱信息更加丰富，灰度范围增加，即信息量有所提高。

该方法同样也存在几种局限，第一，在操作过程中第一步的空间位置配准极为关键，空间配准的误差大小将影响融合的结果，如果配准精度能提高到子像元精度，则融合效果将会更佳。第二，图像在作主成分分析时，第一分量的信息表达的是原各波段中信息的共同变化成分。其变化与高分辨率图像中细节变化含义略有不同。虽然可使高分辨率图像通过适当的拉伸与第一分量产生高相似性。但融合后的图像在空间分辨率与光谱分辨率上会有所变化。第三，由于光谱信息的变化，使结果图像不能用于地物识别与反演工作。但它依然可以改进目视判读效果，同时提高分类制图的精度。

高通滤波法将高分辨率图像中的边缘信息提取出来加入低分辨率高光谱图像中。首先，通过高通滤波器提取高分辨图像中对应空间信息的高频分量。这种空域滤波器去除了大部分光谱信息。然后，将高通滤波结果加入空间分辨率低、但光谱分辨率高的图像，形成高频特征信息突出的融合影像。这种方法将高空间分辨率图像中的空间信息与高光谱分辨率图像中的光谱信息有效地结合起来。

8.3.4 基于小波变换的数据融合

采用离散二进小波变换的塔式算法，可将两幅待融合的图像分解成多级小波系数图像。融合在每一级小波系数图像上进行，最后通过小波逆变换出每一级的融合图像生成最终的融合结果。一般准则有基于像元的与基于特征的。基于像元的准则是取对应点灰度绝对值的最大值。因为小波基具有紧支性、正交性和提供方向信息的能力，所以从小波系数图像上提取特征是很有效的。一种特征提取策略是基于局部方差的。这种融合规则是：如果 A 图像小波系数图像中某一点周围窗口内的方差大于等于 B 图像小波系数图像中对应点周围窗口内的方差，则该级融合的小波系数图像在该点值为图像 A 的小波系数，反之为图像 B 的小皮系数。以上 2 种准则都可称为最大准则。最大准则的一种修正是：如果图像 A、B 的特征之差的绝对值大于某一阈值，采用最大准则，反之采用加权平均准则。对以上方法的一个有价值的补充是引入了一致性检验：如果在各级融合图像中某点周围的像元中来自图像 A 或 B 的像元占优势，则不论该点来自图像 A 或 B，均将此点替换为来自图像 A 或 B 的数值，反之该点值保持不变。

Yocky，Li 等人（1995）提出了一种离散小波框架（DWF）变换，与标准小波变换相似，但不需进行倍数为 2 的向下重采样。这样对以后的融合会有很多方便之处，例如这种变换得到的各级图像大小与原图像相同，而不像一般小波变换中那样逐级缩小。将这种 DWF 变换与 PCA 变换（主成分变换）相结合，提出了一种通过融合来提取灰度图像纹理特征的有效方法。

小波遥感数据分解与融合方法

小波遥感数据分解　小波分解方法是指把图像按照局部频率成分分解成多个通道。小波变换提供了基本框架，用于把图像分解为一系列新图像，其中每一个新图像具有不同的分辨率。傅立叶变换给出图像的频率域概况，而小波表示则是位于傅立叶表示和空间域表示之间的一种中间表示，并且在频率域和空间域内它都能提供较好的定位。分布式小波变换 $f(t)$ 表示如下，

$$W(f)(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}}\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{8-3}$$

式中：a 和 b 代表缩放和转换参数，$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为函数基。

每一个基函数基本都是母函数 ψ 经过缩放和变换后的版本。这些基函数满足，

$$\int \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = 0 \tag{8-4}$$

小波变换的离散实现有几种不同的算法。然而，并不是所有的算法都很好地适用于所有问题。广受欢迎的 Mallat 's 算法使用正交基，但是，这种变换不具备移不变性，这使其不适用于信号分析、模式识别、数据融合等领域。为了获得具有移不变性的图像离散小波变换，使用“分叉”离散小波变换算法把图像分解成一系列小波面。给定图像 p，我们构建相似序列，

$$F_1(p) = p_1, \qquad F_2(p_1) = p_2, \cdots\cdots \tag{8-5}$$

为了构建上述图像序列，“分叉”算法利用从缩放辅助函数求得的滤波器相继进行卷积操作。我们使用具有 B3 三次比样条形状的缩放函数。使用 B3 三次比样条，我们得到 5×5 的卷积核如下，

$$\frac{1}{256}\begin{Bmatrix}1 & 4 & 6 & 4 & 1\\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4\\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6\\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4\\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1\end{Bmatrix} \tag{8-6}$$

计算所得的 Wavelet plan 作为两相继连续的相似图像 p_{l-1} 和 p_l 之间的差值。令：$w_l = p_{l-1} - p_l$（$l = 1, \cdots, n$），式中 $P_0 = P$ 于是，重构公式如下，

$$P = \sum_{l=1}^{n} w_l + P_r \tag{8-7}$$

上式中，图像 $P_l =$（0，…，n）是原始图像 p 进行缩放（减小分辨率）操作所得到的不同版本，$w_l =$（$l = 1$，…，n）代表多分辨率小波面，p_r 代表图像的剩余部分。本文中，我们使用二元分解方法。因此，原始图像 p_0 的分辨率是图像 p_1 分辨率的 2 倍，p_1 是 p_2 的 2 倍，依此类推。例如，如果图像 p_0 的分辨率是 $10m$，那么 p_1 的分辨率就是 $20m$，p_2 的分辨率是 $40m$。然而，大家要注意，无论是后续图像 p_l 还是小波面，在处理过程中，保持相同数量的像元个数。这是采用“分叉”算法的必然结果，因为“分叉”是一种非正交且过采样的算法。这成为“分叉”算法不适用于图像压缩的一个主要限制原因。

小波数据融合　小波数据融合方法基于如下算法过程，小波分解中图像 $p_l =$（0，…，n）是原始图像经过二进变换后所得到的连续不同分辨率的小波面。因此，高分辨率全色图像的第一个小波面就具有多光谱图像所不具备的空间信息。基于小波的数据融合有以下两种实现途径：

a. 替代法　小波替代法中，多光谱图像的一部分小波面被高分辨率全色图像相应的小波面所替代，过程如下：

把低分辨率多光谱图像配准成和高分辨率全色图像具有相同的大小，以便添加；进行全色图像和彩色图像的强度成分的直方图匹配。定义 PAN 代表全色图像，R、G 和 B 是多光谱图像的三个通道；分别把多光谱图像的 R、G 和 B 通道分解成 n 个分辨率水平小波面，通常 $n = 2$ 或 3，

$$R = \sum_{l=1}^{n} W_{Rl} + R_r \qquad G = \sum_{l=1}^{n} W_{Gl} + G_r \qquad B = \sum_{l=1}^{n} W_{Bl} + B_r \tag{8-8}$$

相应的分解全色高分辨率图像，如下，

$$\mathrm{PAN} = \sum_{l=1}^{n} W_{Pl} + \mathrm{PAN}_r \tag{8-9}$$

替代 R、G 和 B 通道分解式的第一个小波面为全色图像分解式的相应小波面；进行小波反变换如下：

$$R_{\mathrm{new}} = \sum_{l=1}^{n} W_{Pl} + R_r \qquad G_{\mathrm{new}} = \sum_{l=1}^{n} W_{Pl} + G_r \qquad B_{\mathrm{new}} = \sum_{l=1}^{n} W_{Pl} + B_r \tag{8-10}$$

b. 添加法　把高分辨率图像的小波面直接加到多光谱图像上。添加法步骤为，添加到

RGB通道上。第一种可能性是把高分辨率信息直接加到RGB通道上，操作如下：配准低分辨率图像，进行全色图像和彩色图像强度成分之间的直方图匹配，如前所述。令PAN代表全色图像，R、G和B代表多光谱图像的三个通道；只把全色高分辨率图像分解到 n 个小波面，通常 $n=2$ 或3；把全色图像分解式中的小波面加到多光谱图像的RGB三个通道上，

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{PAN} &= \sum_{l=1}^{n} W_{Pl} + \mathrm{PAN}_r \qquad R = \sum_{l=1}^{n} W_{Pl} + R \\ G &= \sum_{l=1}^{n} W_{Gl} + G \\ B &= \sum_{l=1}^{n} W_{Bl} + B \end{aligned}\right\} \tag{8-11}$$

c. 添加到强度（I）组分　把高分辨率信息和多光谱图像的强度成分直接合并，我们对此方法进行了初步研究，操作步骤如下：

把全色高分辨率的图像分解到 n 个小波面，通常 $n=2$ 或3两个过程加到RGB通道后得到，

$$\mathrm{PAN} = \sum_{l=1}^{n} W_{Pl} + \mathrm{PAN}_r \tag{8-12}$$

将多光谱图像的RGB成分变换成IHS表示法，使I，H，S成为多光谱图像的三个成分；把全色图像分解式中的小波面加到 I 成分上．如下，

$$I_{new} = \sum_{i=1}^{n} W_{Pi} + I \tag{8-13}$$

将新值反变换回RGB表示。

上面提到过，我们可以分别用 I，L 和L'作为强度成分的表示，因此，随着强度成分的定义不同，我们分别得到 AWI，AWL 和AWL'三种融合方法。我们倾向于使用公式 $L=\dfrac{R+G+B}{3}$（AWL 方法）定义强度（I）成分。

在替代法中，多光谱图像的相应小波面被丢弃，并且被全色图像的相应小波面替代。然而，在添加法中，多光谱图像的所有空间信息都被保留下来。添加法的主要优点就是，用到了来源于传感器的细节信息。而把全色图像的小波面添加到RGB通道和添加到强度成分主要差别则在于：前者，全色图像的信息按照相同的大小分别添加到RGB三个通道上，偏离了相对于灰度值的像元颜色值；而后者，高分辨率信息仅修正强度成分，更好地保留了多光谱信息。因此，从理论上讲，添加到强度成分比分别添加到RGB三个通道上效果要好。

如上所述，用 L 成分代表强度而不用I或者 L' 的原因在于：I 忽略了RGB三个通道中的两个通道值（仅取最大值），而 L' 使得强度的增量值不是按比例被分布到RGB三个通道上的。

d. 小波遥感数据融合方法的优点　很大程度上保留了彩色图像的光谱特征；融合结果中用到了全色图像的分辨率，但没有忽略多光谱图像的分辨率，因此来源于两种图像的细节信息都被采纳了；小波面除剩余图像外都具有0均值，因此保持了多光谱图像的总的光流量；添加小波面到强度成分上的方法，在强度成分没有被全色图像替代这一意义上，可以说是传统的IHS/LHS方法的改进和完善，但通过把全色图像的第一个小波面添加到强度成分上的手段，使得融合结果具有了多光谱图像所不具备的高分辨率特征。

小波是一种特殊的子带变换，采用其他滤波器可以得到各种子带分解。最近，有人提出基于 Mellin 变换的子带分解技术可提取纹理结构的平移方向，尺度不变的各种特征。

8.3.5 基于金字塔的多分辨率数据融合

常用的金字塔有金字塔、基于样条函数的金字塔等。这方面的两种各有代表性的方法是最大对比度方法和匹配与重要性度量方法。最大对比度方法比较简单，它采用最大对比度信息作为选择融合特征的准则；匹配与重要性度量方法较前者为复杂，它采用一种称为匹配与重要性度量的特征选择规则。从融合的效果看，最大对比度方法优于匹配与重要性度量方法（Iverson，1994，Alparone，1997，Zhukov，1996，Jeon，1999）。基于对比敏感度的特征选择准则的融合方法也取得了较好的效果。

§8.4 遥感数据融合的空间域和尺度空间数学模型

有效的多传感器数据融合也需要两幅图像具有辐射相关性，例如，需要一些合理的相似度。我们可以从较低的光谱相关的融合图像中进行人造物的提取。举一个大家都熟悉的例子，假设我们有一部 VNIR 多光谱传感器（例如 TM，ETM，IRS）和一部高分辨率全色波段传感器（例如 SPOT，ETM），由于全色波段传感器的灵敏度还没有达到近 IR 的水平，因此一幅可见波段和全色波段的植被图像会显示出很好的相关性，而近 IR 波段和全色波段的相关性则很差。这样，融合图像中错误的彩色和 IR 合成物往往会被认为有人造物出现，尤其是在植被和土壤的交界处，因为在这里，可见光和近 IR 的原图像反差很大。融合技术还可以应用于不同传感器图像，例如 RADARSAT 不同模式的雷达数据和热红外数据。在实现不同传感器数据融合时要注意辐射相关性。

现在人们已经验证了很多不同的融合算法，这些算法通常可以分为两类：空间域和尺度空间技术，下面我们来解释这两类算法。

8.4.1 空间域融合

这一观点就是如何将高分辨率图像的高频成分移植到低分辨率图像上去，该方法有一个传统的例子，将 Landsat MSS 上的 1 和 4 波段用空间平衡退化为 240m 和 400m，并且和原来的 2 波段进行下面的点一点操作进行重组，

$$R_{ijk} = M_{ijk} + HPH_{ij} \qquad (8-14)$$

这里，R_{ijk}是波段 k 的融合图像，M_{ijk}是波段 k 的低分辨率多光谱图像，HPH_{ij}是高分辨率图像 H_{ij}的高通滤波结果。注意，在公式（8－14）中，初始图像 M_{ijk}和 HPH_{ij}的高通成分来自于两幅不同的图像。可以推出，公式（8－14）的重组其成功在于依赖于两幅图像高频成分的辐射相关性。尽管 R_{ij1}、R_{ij4}和 M_{ij2}的彩色融合图像和退化的 1、4 波段和原 2 波段的组合图像比起来从视觉效果上要显得变化明显，但是无论那些 2 波段图像和这些波段不相关，就会出现人造物，尤其是植被和土壤的交界处。受此启发，乘以一个权值 K_{ijk}来改善这

些区域的融合效果。

$$R_{ijk} = M_{ijk} + K_{ijk}HPH_{ij} \tag{8-15}$$

(1) 空间高频调制

在空间高频调制算法（HFM）中，高分辨率全色图像 H 乘以多光谱图像的各个波段，而低分辨率图像 M 则通过一个 H 的低通滤波结果 LPH 规则化，来估计波段 k 的增强多光谱图像，

$$R_{ijk} = \frac{M_{ijk}H_{ij}}{LPH_{ij}} \tag{8-16}$$

这样，算法假定在各个点上波段 k 增强（锐化）后的多光谱图像和相应高分辨率图像成简单的正比关系，比例系数为空间变化增益因子 K_{ijk}，

$$K_{ijk} = \frac{M_{ijk}}{LPH_{ij}} \tag{8-17}$$

可得出公式 8-18 为，

$$R_{ijk} = K_{ijk}H_{ij} \tag{8-18}$$

使用二元空间频率图像模型，

$$H_{ij} = LPH_{ij} + HPH_{ij} \tag{8-19}$$

可以将公式（8-18）改写为，

$$\begin{aligned} R_{ijk} &= \frac{M_{ijk}\ (LPH_{ij} + HPH_{ij})}{LPH_{ij}} \\ &= M_{ijk}\ (\frac{1 + HP_{ij}}{LPH_{ij}}) \\ &= M_{ijk} + K_{ijk}HPH_{ij} \end{aligned} \tag{8-20}$$

这一公式和公式（8-18）具有相同的形式，代入（8-17）式给定的空间权值函数 K_{ijk}，这样，高频调制技术就相当于 M 的高通滤波器，其中的高频成分来自于高分辨率图像 H 并且在其上乘以权重 K。

(2) 滤波器设计

在进行空间域的融合时必须对高分辨率图像引入低通滤波器和高通滤波器，这些滤波器不能任意给定，因为它们定义了两幅图像的辐射标准化，例如，在公式（8-20）中，根据高分辨率全色图像我们似乎可以合理地将 LPF 匹配为多光谱图像的 PSF，这一直观的关系可以从数学推导得出，但是已经超出我们目前的研究范围。

8.4.2 尺度空间融合

现在似乎可以这么认为，尺度空间概念可以很自然的应用于多分辨率图像的融合，尤其是小波变换，现在已经应用于 SPOT 多光谱和 SPOT 全色图像的融合，以及 Landsat 的 TM 和 SPOT 全色图像的融合。在结合 SPOT 多光谱和全色图像时，高分辨率图像首先拉伸 3 次，每一次匹配一幅多光谱直方图，修改一次图像，都计算一次 1 级小波变化，使用各自的

初始多光谱图像（20m）和相应于修改后的面板图像的三种高频成分（L_xH_y，H_xL_y，H_xH_y；）来合成的1级多光谱小波分，由于小波变化是向下采样的，因此这些成分也是20m。然后进行小波反变换，得出三种10m的重建多光谱图像。还有一种类似的方法来融合SPOT全色图像和TM多光谱图像，不同的只是构造一种五级递增小波应用于两种图像，并且所有最高级的SPOT数据都被相同级的TM数据所取代。这两种小波基技术都和高频调制HFM相似，它们采用小波算法来进行必要的重采样。

某些情况下，一幅图像应该同时具有高的空间分辨率和高的光谱分辨率。这一要求对遥感领域尤其重要。其他领域，如天文学，它需要具有高空间分辨率和高信噪比的图像。但是，大多数情况下，或是由于设计原因，或是由于观测方面的限制，传感器不能提供上述数据。例如，在遥感领域，SPOT PAN卫星提供10m分辨率全色数据，而Landsat卫星TM和ETM提供30m分辨率多光谱图像数据和ETM PAN 15m分辨率全色数据。在天文学领域，空间望远镜能够提供高分辨率图像，然而，收集光子是很昂贵的，所以通常不进行长时间外露式的多光谱观测。相反，在地面上，分辨率比较差，但光子收集成本却很低，并且信噪比可以提高。此外，从地面上获得长期外露式（但是分辨率比较低）的多光谱数据也比较容易。

一种可能的解决方法来源于数据融合领域。人们提出了很多种方法进行全色数据和多光谱数据的融合。最普遍使用的是HIS和LIS方法。然而，不幸的是，HIS和LIS方法会产生光谱特征损耗。在遥感领域，当两幅图像不在同一时间获取，那么它们进行融合时所造成的光谱损耗便是严重且具有决定性的。过去的几年，多光谱分析已发展成遥感图像分析的最有前途的方法。近来，有关作者提出了一种基于离散二维小波变换的多分辨率分析方法进行数据融合。同样，我们在小波基方法和图像重建的结合方面，进行了一些初步研究。在保持多光谱图像的光谱特征方面，小波基方法要好于HIS和LHS等标准方法。

基于小波的数据融合过程，可以采用以下两种方法实现：

（a）光谱图像的小波系数用高分辨率图像相应的小波系数来替代；

（b）把高分辨率图像的小波系数直接加到高光谱图像上。在此，我们特别研究了后者。为了把数据分解成小波系数，我们使用了离散小波变换算法。这种方法适用于SPOT卫星图像和LANDSAT TM卫星图像。

§8.5 多光谱遥感数据像元级融合

从1985年以来，SPOT（20m/10m），ETM（30m/15m）和IRS（4m/3m）卫星传感器系列为用户提供了多个波段的多光谱多分辨率数据和一个较高全色波段数据。这些数据可以用来产生类似真彩色的航空照片影像。通过不同算法融合充分利用高空间分辨率几何信息与较低分辨率多光谱信息。一个普遍的方法是前面已经介绍的强度—色调—饱和度（IHS）转换方法，它将低分辨率的三个波段（红，绿和蓝）转化为强度，色调和饱和度，然后以高分辨率影像替代强度。最后再将结果转换为名义上的红—绿—蓝。这种方法主要用来增强和锐化影像。在此基础上，还发展了一种赖于高低分辨率影像辐射值统计关系的方法。这种方法要求高分辨率结果影像的辐射值与原始低分辨率影像一致，所以增强效果满足较高空间分辨率

限度。该方法是否有效可以通过将高低分辨率数据都平均到临近粗分辨率水平，然后应用该方法与已知值比较得到的误差统计值来检验。因此，对于20m/10m数据的准确性可以通过将它们都平均后产生的40m/20m数据来估计。将该方法应用到40m/20m数据，产生40m结果数据，将其与原始20m多光谱数据比较。用这种方法，需对整幅影像进行统计，当不同的光谱信号都从一个高分辨率光谱值推出时这将导致模棱两可的结果。本节除了统计值是从局部得到也即对低分辨率影像中心3×3阵列元素进行分析以外，其他采用相同的方法。这加强了高低分辨率数据的联系。另一种是依赖于端点分析和分类的方法。这种方法，与前种方法一样，都依赖于影像的特性而且必须处理好如何确定影像中合适的端点的复杂问题。我们提出并阐述了局部化机制。

8.5.1 局部化处理

令 Y_{ij}为低分辨率数据的像元（i，j）的值，X_{kl}为高分辨率数据像元（k，l）的值，M为各自像元边长的比。每个低分辨率像元对应平方米个高分辨率像元。大写字母值指的是低分辨率数据，小写字母指高分辨率数据（小像元）。假设高分辨率数据只有一个波段。如果这两类数据具有共同的起始点或左上角，那么 $k=M\times(i-1)+1$，$1=M\times(j-1)+1$。对于Landsat TM，1～5和7波段（0.45～0.52μm，0.53～0.61μm，0.63～0.69μm，0.78～0.90μm，1.55～1.75μm和2.09～2.35μm）空间分辨率将为30m，而TM全色波μm段（0.52～0.90μm）（将称做第8波段）分辨率将为15m。在这里，$M=2$。对于分辨率为60m的TM第6波段（10.4～12.5μm），它对波段1～5和7的比例同样也为2。增加 m 引起的影响将在后面讨论。令 X_{ij}为对应于低分辨率数据（i，j）位置的高分辨率数据的 $M\times M$ 平均，

$$X_{ij}=\sum_{k=k_1}^{k_1+m-1}\sum_{l=l_1}^{l_1+m-1}x_{kl} \tag{8-21}$$

其中 k_1 和 l_1 为当两种分辨率数据的起始坐标一致时高分辨率数据在低分辨率像元 Y_{ij} 内的起始像元和起始行。我们定义 y_{kl}和x_{kl}的关系如下，

$$y_{kl}=a_{ij}\times x_{kl}+b \tag{8-22}$$

其中 a_{ij}将通过以 X_{ij}为中心的9个低分辨率像元的 Y 和 X 之间的关系来确定。我们要求低分辨率辐射测定值不受影响，因此这种关系可以写成，

$$y_{kl}-Y_{ij}=a_{ij}(x_{kl}-X_{ij}) \tag{8-23}$$

上式右面在 X_{ij}内的 M^2 个像元内平均为0。这保证了在一个大像元内对 y_{kl}平均可以产生 Y_{ij}。每个 a_{ij}的值从低分辨率像元中心3×3阵列的低分辨率数据值之间的统计关系得到。将大像元（X_{pq}，Y_{pq}）乘以（$X_{pq}-X_{ij}$）然后带入（8－23）并在以 ij 为中心的九个像元内平均，我们得到，

$$aij=\frac{\sum_{p=i-1}^{i+1}\sum_{p=j-1}^{j+1}(X_{pq}-X_{ij})(Y_{pq}-Y_{ij})}{\sum_{p=i-1}^{i-1}\sum_{p=j-1}^{j+1}(X_{pq}-X_{ij})} \tag{8-24}$$

如果3×3的区域非常均一则（8－24）的分母可能会小，有时会出现0。因此，如果分

母小于9，则令 a_{ij} 为0，如果分母接近于0，则低分辨率数据本来就已均一，没有必要再进行增强。首先，对每个大像元都得到一个 a_{ij}，然后从（8－23）可以计算得到高分辨率值 y_{kl}，最后将 ij 沿整个图像移动。对每个低分辨率光谱波段重复该步骤。如果需要，对边缘像元利用2×3阵列确定 a_{ij} 或对影像角像元利用2×2阵列确定。

8.5.2 AVIRIS与TM遥感数据融合处理

AVIRIS提供224个光谱波段，波谱范围0.4～2.5μm，光谱分辨率约为10nm。该数据不含有相应于TM波段6的热红外数据，因此无法模拟TM波段6的低分辨率数据。每景AVIRIS影像覆盖10×12km，空间分辨率20m。将AVIRIS光谱利用TM传感器函数卷积产生光谱上等同的TM波段1～5，7和8数据，空间分辨率都为20m，结果近ETM全色波段（0.52～0.90μm）的15m分辨率和反射波段的30m分辨率。如果只有全色波段分辨率为20m而其他波段为40m则该精度可以通过全色40m和低分辨率数据的80m的计算来估计。给定AVIRIS数据，则所有7个波段都为高空间分辨率。每个波段都可以作为得到其他波段高分辨率数据的替代数据单独进行检验，$M=2$。图像价值表 f，将低分辨率复制数据视为最差结果。因此复制数据带来的误差为，

$$\text{误差(复制)} = \frac{1}{N}(\sum[y_{kl}(\text{复制}) - y_{kl}(\text{原始数据})]^2 \tag{8-25}$$

而对分析数据，

$$\text{误差(分析)} = \frac{1}{N}(\sum[y_{kl}(\text{分析}) - y_{kl}(\text{原始数据})]^2 \tag{8-26}$$

其中N为影像中的小像元数。因此价值表定义为，

$$f = 1 - (\frac{\text{误差(分析)}}{\text{误差(复制)}}) \tag{8-27}$$

如果结果产生的是精度同原始数据，则 f 应为1，如果一点改进都没有则 f 为0。对所有45个景区的数据都进行了分析。将7个波段中的每个波段视为高分辨率波段，结果如表8－4。

表8－4　　将七个波段中的每个波段视为高分辨率波段

高分辨率波段	低分辨率TM数据特征							
	1	2	3	4	5	7	8（PAN）	均值
1	.988	.914	.856	.398	.507	.613	.619	.615
2	.917	.989	.939	.497	.624	.687	.747	.735
3	.858	.935	.991	.517	.688	.758	.733	.748
4	.459	.519	.531	.991	.477	.399	.825	.535
5	.539	.632	.712	.507	.992	.885	.661	.656
7	.608	.677	.762	.431	.879	.993	.579	.656
8	.638	.729	.708	.790	.601	.514	.990	.663

表8－4中7×7矩阵的对角线元素不为1，不能产生对称矩阵。这是在保持8比特精度的条件下，由于将高分辨数据平均处理成低分辨率数据过程中产生的误差。我们将不同光谱波段（8－4中非对角线元素）平均的相关系数作为选择高分辨率光谱波段的质量参数，最好的

通道为3，其次是2通道。这个结果也可以通过TM不同波段的相关矩阵（表8－5）说明。

表8－5　　TM各波段的相关系数矩阵

TM波段	1	2	3	4	5	7
1	1	.915	.884	.122	.537	.749
2		1	.896	.261	.620	.786
3			1	－.038	.556	.850
4				1	.433	.045
5					1	.782
7						1

当两个波段高度相关时，满足方程（8－26），但存在误差。TM波段4相对于其他波段弱相关，导致表8－4 f 的低值。Landsat ETM的全色波段增宽到0.52－0.90μm从而为探测器提供了更多的能量，可以维持较好的信噪比。从表8－4和表8－5可以看出信噪比向短波波段扩展比向长波波段扩展更好。

8.5.3　融合处理效果验证

将上述方法得到的影像与原始数据做比较，发现几乎所有45个影像中都表现出一致性特点。在多数情况下，利用单波段高分辨率数据融合低分辨率数据是一种获得高空间分辨率和多光谱数据的有效而经济的方法。在一定放大倍数下和对比度相应增强的条件下，在相对均一的地区，低分辨率影像也存在不和谐的块状或格状图案。这种影响可以通过上节介绍的方法减少，当通过影像放大来提高显示地物时一些图像结构不再出现。这是由于每个低分辨率像元与公式（8－24）中变换变量 a_{ij} 中的每个相邻像元共享六个像元。这也保证了一些像元到像元的连续性。

融合造成高分辨率数据与低分辨率数据平均，所以融合结果难以展示高分辨率图像对低分辨率图像局部的增强效果。图8－3显示了TM数据PAN数据与多光谱分辨率图像的融合效果。图8－3（a）为40m分辨率波段合成的图像，(c)20m分辨率波段合成的图像，(b)是40m和20m分辨率图像融合的结果图像，(b)与(c)差别不大。

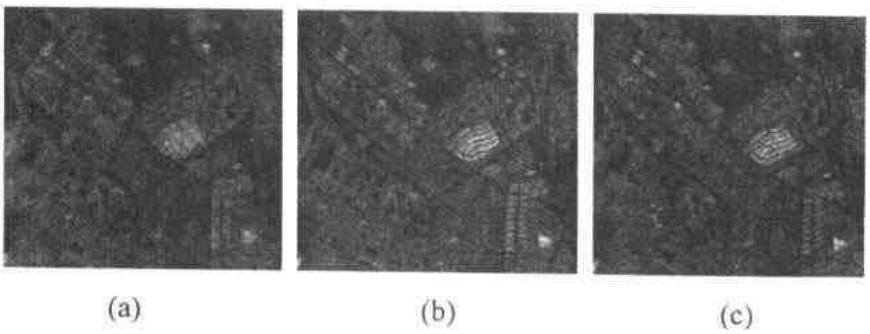
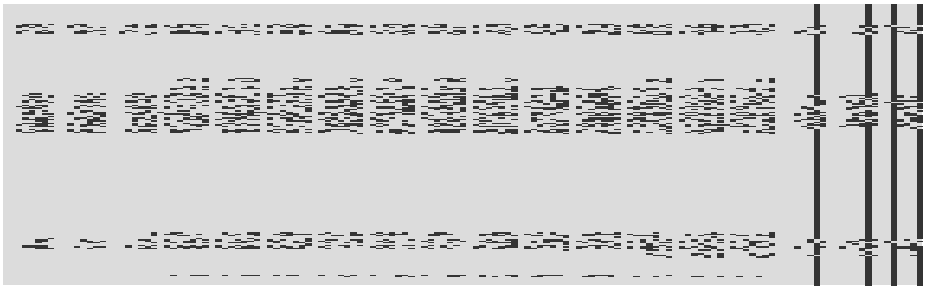


图8－3　(a)和(c)将40m分辨率的图像（a）融合成20m分辨率的(b)

对影像进行对比度拉伸后图像高对比度区差异增加和夸大，特别是在不同地表类型的边界，如表8－4。为了对比，从45景影像中找出图像效果最差的三个波段合成图像，将TM波段8当做高分辨率波段。图8－4显示植被覆盖区暗色调与裸土明亮区形成对比。在40m

分辨率图像中（a）边界比较模糊，图（b）20m 分辨率图像中边界分辨效果略好，图（c）是比度拉伸后图像的 20m 分辨率图像，进一步检查可以发现图像夸大了植被和土壤的边界。



(a)　　(b)　　(c)

图 8－4　40m 分辨率的图像（a）、20m 分辨率图像（b）和人工边界图像（c）

数据加权平均融合提高图像分辨率。图 8－5 中 20m 分辨率图像（c）不如 40m 分辨率的（a）。解释为什么图 8－5（c）增强到 20m 图像效果不如 40m 分辨率（a）的原因。波段 3 图 8－6（a）可见光和图（b）波段 4 近红外显示了林地与背景地物的差异。20m 分辨率波段 8 图像中林地和开阔地之间无明显的对比度差异，代表了波段 3 和波段 4 的加权平均。因此，对这景影像，高分辨率波段 8 没有提供额外的信息。这是由于波段 8 数据在植被和裸土之间表现的反差最小，虽然分母很小，但不为 0。这导致了图 8－5（c）中植被和土壤边界对比度的夸大。这可以通过改变使 a_{ij} 为 0 的分母的限制值来减小和去除。

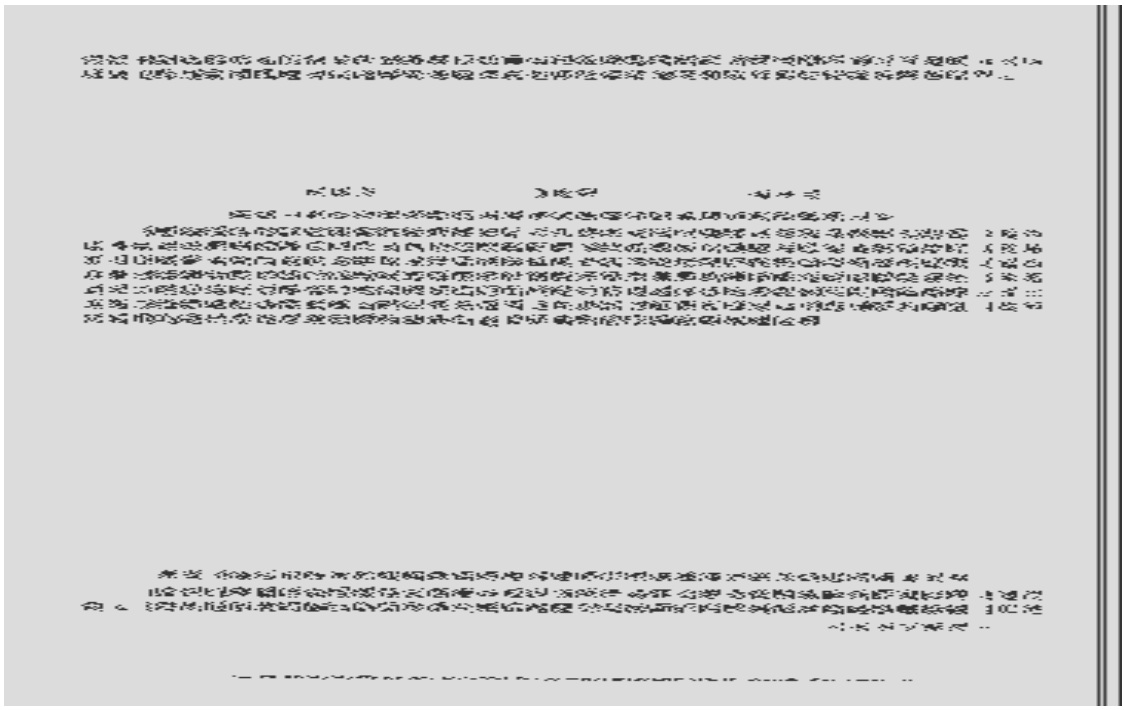


图 8－6　波段（a）图中亮处为砍伐区，（b）图中暗处为砍伐区，在（c）中难以分辨出来

由于随波长反射率的变化，图 8－6 中波段 1（b）和 2（c）图像几乎被云覆盖，而波段 8（a）则表现为无云图像效果。这种效果是将通过 HIS 变换用波段 8 的地表结构信息抑制其

他波段出现的云信息产生的。

8.5.4 改变复制因子

上面的讨论和计算都是对长度比为2时的情况而言。对比例因子为4和8时的ETM等同数据也做了分析。结果在表5中，它表明当比例因子增加时该方法的能力下降。这是可以预料到的，因为当低分辨率像元包含了更宽广的地表类型时越来越多的细节被均化了。

本节定义了一种复合不同空间分辨率光谱数据的方法，同时定义了一种价值指数用来优选未来遥感传感器上的通道。经过数据分析，当全色波段用来进行空间锐化时，该方法明显改进了有效空间分辨率。该方法依赖于局部相关，因此与那些需要产生影像直方图和分析影像端点的方法相反，它是个单通算法。除了影像质量的整体改进，这个方法依赖于波段间的相关。因此，当相关接近于0时，这个方法可能不灵。对特定实例的分析表明物理理解力对应用影像锐化方法很重要。

§8.6 多传感器遥感数据特征级融合

当我们选定应用目标，如植被和水体的化学组成，土壤和岩石的矿物学组成，表面温度，植被和土壤含水量等，就需要选择合适的传感器系列及其传感器系列之间的融合。一种多传感器数据使用方法是利用高分辨率数据融合，分析低分辨率数据的混合像元特征组成从而分解混合像元，提高识别目标的能力。

多传感器影像数据的融合使得我们能够对来自于具有不同的波段范围，从可见光到微波和不同的波段数，波段位置和波宽的传感器的互补信息协同解译。多传感器数据集的一个独特的特征体现在不同的传感器空间分辨率存在差异。这一方面是由于对高分辨率数据多重应用目的的需要；另一方面是受限于物理和技术水平，目前还不能获得不同波长及不同波宽的同分辨率影像。具体的针对陆地应用的需要从几米到几十米分辨率。否则，大量的像元可能均是不同目标的混合体。这些混合像元是卫星影像解译误差的主要来源之一。然而，所需的高空间分辨率只能由全色和反射光谱范围的多光谱扫描仪（如，HRV/SPOT，航天飞机D-2和MIR工作站PRIRODA指令舱上的MOMS-02，LANDSAT TM和ASTER/EOS-AM1的反射通道）以及合成孔径雷达（SAR）（如，ERS1，ALMAZ和RADARSAT）提供。其他类型的卫星传感器如成像光谱仪（MERIS/ENVISAT）微波辐射仪（DMSP上的SSM/I）能够提供其他有用的信息，如植被和水体的化学组成，土壤和岩石的矿物学组成，表面温度，植被和土壤含水量等。然而，它们的分辨率从热红外扫描仪的100m到微波辐射仪的数十公里，导致了大量的混合像元的产生，从而阻止了它们在许多土地应用方面的有效使用。

本节的目的旨在介绍多种传感器多分辨率技术（MMT），MMT是一种多种传感器数据使用方法，利用高分辨率数据融合，分析低分辨率数据的混合像元特征组成，从而分解混合像元，提高识别能力。

8.6.1 研究背景

多分辨率影像融合技术将高分辨率影像的空间信息和低分辨率影像的辐射信息融合在一起。该过程也可认为是低分辨率影像的锐化。这里的“高分辨率”和“低分辨率”是相对于所使用的两种影像而言的。许多影像锐化方法是适应于当高分辨率影像只有一个光谱波段时的具体实例而发展起来的，如融合全色和多光谱影像，像 HRV/SPOT。我们将处理的是当高分辨率影像可能是多光谱时的普遍情况。

锐化影像波段分辨率低而像元尺寸分辨率高，对其进行光谱意义上准确的重建时可用的约束条件为“能量平衡”需求，①如果锐化后的影像退化到最初的低分辨率，它应该能与原始的低分辨率影像符合；②如果高分辨率影像的光谱波段能够用低分辨率影像的光谱波段拟合的话，还要求相应的锐化影像的光谱退化能再现原高波段分辨率影像。显然这些约束条件不足以得到一个确定的锐化影像。有人建议沿投影梯度上的第一局部最小作为锐化低分辨率影像无穷可能解中的惟一解。然而，几乎不存在任何实际的理由解释某些方法更优于另一些方法。一些比较的研究表明那些辐射意义上最准确锐化的方法往往不能产生合成影像视觉上最好的效果。后者甚至是通过牺牲辐射精度而增强高分辨率影像纹理特征而得到的。本文中，我们以辐射精度作为分析影像融合方法的主要准则。

影像锐化方法通常分为光谱分量替代法和空域法。光谱分量替代法主要是融合全色和多光谱影像时发展起来的。它们是以辐射调整后全色影像替代低分辨率多光谱影像的一个光谱分量为基础的。常用的光谱分量替代法如下：

a. 强度—色调—饱和度融合，替代影像强度分量。

b. 主成分融合，替代第一主分量。

c. 回归变量替代（RVS）法，替代高低分辨率影像统计拟合得到的回归变量。

d. 辐射方法，替代高低波段分辨率影像光谱拟合得到的分量。

RVS 方法和辐射方法提供了替代分量的最好的辐射调整。然而，光谱分量替代法的一个普遍弊病是除了替代分量外的其他光谱分量依旧保持原始的低分辨率。空域方法利用多种确定性的和统计的预测因子将高分辨率影像的信息转移到全部的低分辨率影像的光谱波段中。为了保留低分辨率影像可用的辐射信息，只有那些额外的高空间频率分量才被转移到低分辨率光谱波段中。这可以通过影像域的高通滤波或不同的多分辨率表达法。小波分解，Laplacian 金字塔或傅立叶分解实现。

一个正确的预测因子的选择是锐化影像辐射准确性的关键。确定性预测因子较简单但准确性较自适应统计预测因子差。线性统计预测因子提供了较好的辐射精度，前题是高低分辨率影像的配准精度高。否则，它们可能导致锐化影像的严重辐射扭曲。如，在融合全色和近红外或反射和热红外影像时可能出现这种情况。非线性预测因子假设从高分辨率波段信号可以预测低分辨率波段的信号，而不是认为两者间存在着线性关系，在解决上述问题时，可以得到较好的结果。非线性预测因子的实例有，增强表中值和滤波器。然而，如果高低分辨率波段信号间如果是非线性的话，就又产生了一个问题，那就是自适应预测因子的训练。这时候，利用低分辨率影像训练预测因子然后将其应用到高分辨率影像像元大小的过程可能就不正确了。如果低分辨率影像存在大量的混合像元，自适应统计预测因子就可能不能得到辐射

准确的融合效果。

多光谱和高光谱影像的混合像元可以利用光谱“端元组分”分解方法分解。这些方法利用纯光谱类别端元组分的参考光谱得到混合像元中每种纯类别所占的比例，而不是重建低分辨率波段的高分辨率影像。恰当的端元组分和它们光谱的确定是获得合理结果必需的。对于一个波段低分辨率影像 Landsat TM 热红外影像上述方法的效果较差。低空间分辨率影像的分解和低分辨率波段影像重建到高分辨率影像的过程都可以通过 MMT 方法实现。它可以用在大多数甚至全部低分辨率影像的像元都是混合像元的情况下。与端元组分分解方法相比，它不需要纯类别光谱来分解混合像元，而是在过程中提取。MMT 基于①对高分辨率传感器影像分类；②提取出高分辨率数据上识别出的类别在低分辨率传感器影像上的信号。从这点看，高分辨率传感器通常被称为分类，而低分辨率传感器被称为实测。作为选择，高分辨率 TM 影像可以当做分类来分解实测影像。

基于类别的分解方法的主要局限在于影像中实测信号是每一类别的平均结果。通过一个滑动窗口处理方法对选定窗口的平均来减小空间尺度。利用一个低通校正过程代替或补充滑动窗口处理方法，它可以在分解影像上仅产生额外的空间频率信息而保留低分辨率可用的信息。低通校正方法的一个缺陷是对于明显的地物边界可能会产生波状物。

本书介绍影像融合的约束 MMT 分解算法，为合并与分解可用的实测信息提供了新工具。

8.6.2 多传感器多分辨率技术（MMT）的算法

MMT 算法适应于多通道数据中特征空间信息仅存在于高分辨率分类影像的情况。该信息用来分析低分辨率实测像元的特征组成及对特征的分解和识别。对测量像元分解过程是在滑动窗口方式下连续进行的，为了分解窗口中心的测量像元，用到了周边测量像元的关联信息（图 8－7）。假设高分辨率分类影像上可以识别的特征在窗口中心测量像元和周围测量像元具有同样的实测信号。

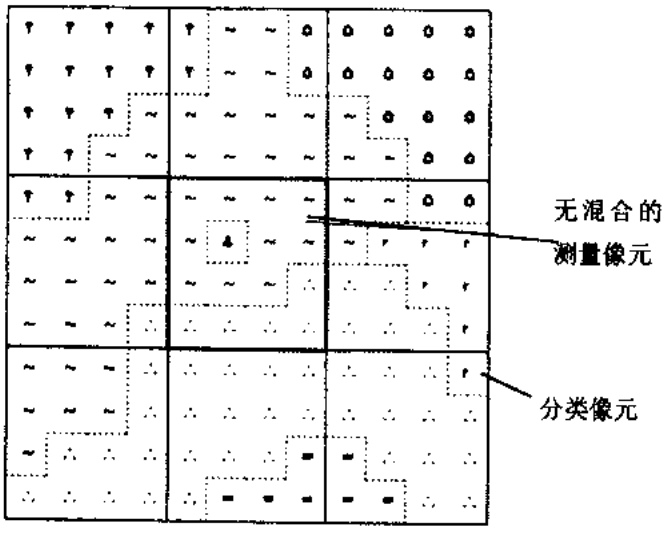


图 8－7 多传感器多分辨率技术（MMT）分解方法的滑动窗口，中心实测像元利用高分辨率分类影像提供的它的组成和窗口中

图 8-7 多传感器多分辨率技术（MMT）分解方法的滑动窗口，中心实测像元利用高分辨率分类影像提供的它的组成和窗口中其他实测像元的组成信息来分解该算法包括以下操作步骤：

a. 分类影像的分类。

b. 类别对实测像元信号贡献的确定。

c. 基于窗口的实测像元分解。

d. 分解（锐化）影像的重建。

算法的第一步是高分辨率分类影像的分类。不同的非监督和监督分类算法可用来执行分类影像的光谱或纹理分类。分类算法的选择应该取决于特定的应用目的。本文中我们将用到非监督分类。对于提取影像上的辐射变化量和从物理参数通过模型倒置的角度解释它们，这是一种合适的方法。尽管可以对每个窗口分别分类，还是最好对整个影像统一分类，它可以避免在不同的窗口中相同的光谱类别间建立联系。

分类结果是一幅高分辨率影像类别图 $k(m,n)$，对每个影像像元（m，n）指定了一个相应的类别代码 k。这些类别可能代表了具有不同物理参数的不同目标或亚目标区域。类别对实测像元信号贡献的确定是通过利用分类图 $k(m,n)$确定实测像元中每类所占的面积比和实测通道的点扩散函数（PSF）来实现的，

$$c_i(l,s;k_0)=\sum_{k(m,n)\subset k_0}\rho_i(l,s;m,n) \tag{8-28}$$

式中（l，s；k_0）是类别 k_0 对实测波段 l，像元（l，s）的贡献，ρ_i（l，s；m，n）是传感器 PSF 的离散近似。

离散 PSF 给出了高分辨率像元（m，n）对实测影像波段 i 像元（l，s）信号的贡献。它在（m，n）的总和假设已归一化。PSF 解释了与传感器有关的影响和重采样带来的影响，如果实测影像经过了重采样与分类影像配准。只有当分类影像中的大气模糊在分类前经过了纠正，或基于地面基础的 TM 而不是分类数据用来分解混合像元的情况下，大气成分才应该包括在 PSF 中。在这种情况下，大气模糊将会在分解过程中去除。

实测像元的分解在以步长为 1 个实测像元的滑动窗口中连续进行。在每个窗口中，中心实测像元的分解通过一个线性混合方程反推，

$$S_i(l,s)=\sum_{k=1}^{k}C_i(l,s;k)\overline{S}_i(k)+\varepsilon_i(l,s) \tag{8-29}$$

式中 S_i（l，s）是窗口中实测像元（l，s）的信号，$\overline{S}_i$（k）是窗口中 k 类实测信号的平均值，ε_i（l，s）是模型误差。模型误差来源于传感器误差（辐射噪声，配准误差，PSF 校正误差）以及类别异质性，它可能引起不同实测像元中平均信号 $\overline{S}_i$（k）的类别差异。

方程 8-29 的回归通过最小二乘法对每个实测波段单独进行。如果窗口影像中心像元的方程 2 作为最小二乘法回归过程中的一个线性约束条件，它将使得中心像元“能量平衡”的要求得到满足保留了原始实测像元的全部信号。这种分解方法称做约束分解。另外，如果窗口中所有像元在最小二乘法回归过程中权重相同，则分解过程称做无约束分解。无约束分解仅对窗口中单独类别满足“能量平衡”要求，而非对独个实测像元。

回归方程 8-30 出现的问题以及其他分辨率增强的问题是病态条件，导致了结果的噪声放大。为了稳定解，最小二乘法回归可以通过损耗函数最小化进行，

$$F - \sum_{(l,s)\neq(l_0,s_0)} (S_i(l,s) - \sum_{K=1}^{K} C_i(l,s;K)\overline{S}_i(K))^2 + a\frac{N_{MI}-1}{K}\sum_{K=1}^{K}(\overline{S}_i(K) - \overline{S}_i(K))^2 \tag{8-30}$$

其中 K 和 N_{MI} 为窗口中类别数和实测像元数。方程中第一求和项是对窗口中所有像元进行，在约束分解中除去中心像元（l_0，s_0）。第二项带有调整参数 α 的求和项加入解中用来调整解。它避免了实测类别信号 $\overline{S}_i$（k）偏离预设类别信号 S_i（k）太远。因子（N_{MI} 1）/K 的引入使得 α 与第一和第二项求和项中的项数差无关从而更好地表现了预设类别信号权重在分解中的作用，在非约束分解中该因子为 N_{MI}/K。

调整过程可以使得对小类别可能偏大的反演误差减小。预设实测类别信号的一种选择是采用实测影像利用中值锐化方法得到的窗口中每类区域中像元的中值。调整参数 a 的选择是调整技术中的一个普遍问题：太大的 a 将会导致分解后影像的模糊，而太小的 a 又不能有效的抑制对小类别来说太大的反演误差。一些学者提出了一些调整参数的最优选择算法，如矛盾原则，广义交叉校正法和 L 曲线法。也可采用简单的分解影像的目视检查：减小 a 值，直到分解影像开始出现胡椒粉状噪声，对应于小类别大的反演误差。

分解后实测影像的恢复通过对高分辨率分类图中像元分配相应的估计平均类别信号值进行，

$$H_i^*(m,n) = \overline{S}_i^*(K(m,n)),(m,n)\in(l_0,s_0) \tag{8-31}$$

该分配过程仅对中心实测像元（l_0，s_0）（如果采用约束分解方法满足“能量平衡”）区域内的每个窗口进行。当窗口以一个像元步长沿图像移动时，整幅分解后的影像就一个像元一个像元地重建了。

8.6.3 多传感器多分辨率技术（MMT）应用与局限

(1) 类别数和它们的可分性

方程 8-29 的最小二乘解存在的普遍条件是，

$$\det(A_i(k,k')) \neq 0 \tag{8-32}$$

$$Ai(k,k') - \sum_{l,s} ci(l,s;k)ci(l,s;k') \tag{8-33}$$

条件取决于实测波段 I，因为不同的实测通道可能具有不同的 PSF。

特别的条件限定了窗口中的类别数 K：非约束分解不应超过窗口中实测像元数 N_{MI}，而约束分解应该小于 N_{MI}。此外，建议将此最大类别数再减小 2 个左右以确保回归结果的稳定性。然而，这仍然不能保证解存在。这种情况的一个典型例子是当两个或更多类的小目标仅出现在一个实测像元中时，而其他地方都没有很明显，这种情况下无法分解实测信号。

在我们的算法中，当方程至少在一个波段的某个窗口无解时，则窗口中最小的类别就与光谱最接近的类别归并直到条件满足。

(2) 分解能力

MMT 分解方法仅对在高分辨率分类影像上可以识别的那些类型适用。如果某类别在分类光谱波段中同性而在实测波段中异性，可采用将窗口（约束算法中代表所有可用的低分辨率信息）中该类别的实测特征进行平均。如果不同实测特征的类别区域位于不同的窗口中，则将它们单独处理，不采用实测特征平均。因此，MMT 分解方法对某种具体的应用目的是有效的，条件是对该应用目的关键的类别在分类数据中光谱可分或空间可分。

让我们考虑一下分解后影像重建高分辨率影像的重建误差，

$$\begin{aligned}\Delta_i^{分解}(m,n) &= H_i^*(m,n) - H_i(m,n)\\ &= (\overrightarrow{S_i}(k) - \overline{S_i}(k)) + S_i(k) - \overline{H_i}(m,n)\\ &= \Delta_i^{分类}(k) + \Delta^{类内}(m,n)\end{aligned} \tag{8-34}$$

这里 H_i（m，n）是假设从实测光谱波段重建的理想高分辨率影像像元。重建误差(8-34)有两个分量：①分类过程中像元（m，n）被指定的类别 k 的平均实测信号的重建误差 Δ_i^{class}（k）②由于窗口中类别异质性而导致的实际实测像元平均类别偏差 $\Delta_i^{in-class}(m,n)$。

类别信号重建误差：①的标准偏差可以通过线性混合模型 ②的残差估计。当窗口中该类别的面积下降时该项趋于增长。让我们以一个简单的影像为例，该影像由分布在同质背景（类 2）中的亚像元目标（类 1）组成。以 c（1）和（1－c（1））分别代表目标存在的实测像元信号中目标和背景的贡献。其他的像元假设为仅含有背景。因此，目标反演信号的标准偏差可以从方程 8－29 得到，

$$\sigma^{class}(1) = \frac{\sqrt{\sigma_0^2 + (1-c(1))\overline{\sigma^{class^2}(2)}}}{c(1)} \approx \frac{\sigma_0}{c(1)} \tag{8-35}$$

其中 σ_0 是模型误差的标准偏差。在此注意到背景信号反演误差的标准偏差为 $\sigma^{class} \approx \sigma_0/\sqrt{N_{MI}-1}$相对于 σ_0 可以忽略。因此，尽管对于每类的最小面积大小没有主要的限制(条件 5 要满足)，仍可以预见对于小类别会出现大的反演误差，它们的标准偏差与面积成反比。

相反，类别异质误差分量 $\sigma^{in\ class}$（m，n）应该随着分类的越详细而减小到分类识别能力的上限。这个误差不能仅从现有的数据估计。减小该误差的一条途径是不要在分类/实测融合影像的高分辨率像元水平上而是在影像上可以识别的扩展特征水平上进行解译。这些特征的边界主要由高分辨率分类图的类别边界确定，如果需要，采用保留在分解后的实测影像中的低分辨率实测信息做适当修改。同类别的像元值的平均可以减小平均实测信号与平均类别实测信号的偏差。

(3) 窗口大小

窗口大小的选择由两个因素决定：①窗口的大小应该尽可能的小以减小实测类别特征的空间平均的尺度；②窗口应包括足够的像元数以便得到稳定的回归解。我们的实验表明 3×3 的窗口只能用在相当粗糙的分类图中，因为它明显地限制了允许的类别数。此外，3×3 的窗口证明比大窗口对传感器误差和调整参数的变化更敏感。

5×5 的窗口证明可以很好地协调可接受的空间平均的尺度，允许的类别数和回归解的稳定性之间的矛盾。如果没有用到调整步骤，或许采用更大的窗口才能稳定解。

8.6.4 多传感器多分辨率（MMT）分解应用

我们将以多分辨率可见光，近红外（VNIR），短波红外（SWIR）和热红外（TIR）影像的分解和融合为例来说明 MMT 的应用。为此，采用了一个模拟的和实际的 Landsat TM 影像以及模拟的 ASTER/EOS－AM1（Advanced Spaceborn Thermal Emission and Radiation Radiometer）影像。模拟影像可以检验分解的精度和分析方法对传感器误差的敏感性。Do－228 载有的数字成像光谱仪 DAIS7915 所成的高空间高光谱影像用来进行此模拟过程。LANDSAT TM，ASTER/EOS－AM1 和 DAIS7915 的波段和像元大小（采样步骤）列于表 8－6。

(1) LANDSAT TM 影像

LANDSAT TM 扫描仪有 6 个近红外 NIR 和短波红外 SWIR 波段，像元大小 30m，一个热红外 TIR 波段，像元大小 120m，见表 8－6。热红外波段的分解及其与反射波段的融合可以应用在如农业和微气象上。MMT 分解技术用于农田的 LANDSAT TM－5 影像，成像于 1996 年 5 月。该影像包括 512×384 个像元，像元大小 30m。

相同区域的 DAIS7915 影像有两条航带，成像于 Landsat 5 过境后 50 分钟内。两条航带包括 512×1910 和 512×191 个高光谱像元，像元大小约 6m。

表 8－6　　LANDSAT TM，ASTER/EOS－AM1 和 DAIS－7915 的光谱波段和像元大小

传感器	光谱覆盖	波段（μm）	像元大小（m）
TM Landsat	VNIR	0.45～0.52，0.52～0.60，0.63～0.69， 0.76～0.90	30
	SWIR	1.55～1.75，2.08～2.35	30
	TIR	10.4～12.5	120
ASTER EOS－AM	VNIR	0.52～0.60，0.63～0.69，0.76～0.86，	15
	SWIR	1.6～1.7，2.14～2.18，2.18～2.22，	30
	TIR	2.23～2.28，2.29～2.36，2.36～2.43， 8.12～8.47，8.47～8.82，8.92～9.27， 10.25～10.95，10.95～11.65	90
DAIS 7915	VNIR	由波段宽为 0.02～0.03 的 32 个波段构成， 光谱覆盖范围 0.47～1.09。	6
	SWIR	由波段宽为 0.03～0.06 的 40 个波段构成光	6
	MIR	谱覆盖范围 1.48～2.50，3～5	
	TIR	8.2～9.1，9.1～9.8，9.8～0.6， 10.4～11.4，11.0～12.2，11.9～13.5	6 6

以下的处理步骤是用 DAIS－7915 影像来模拟重叠区内 TM 的影像。

a. TM 和 DAIS－7915 影像的几何配准，配准误差不超过 1 个 TM 反射波段像元（0.25 个热红外像元）；

b. 利用它们的光谱响应函数将 DAIS 7915 的波段拟合到 TM 波段；

c. 通过 DAIS－7915 影像与一个高斯 PSF 的卷积将其空间分辨率降低；

d. DAIS－7915 和 TM 热红外影像的相互辐射校正以及利用地面实测资料进行绝对校正。

高斯 PSF 在反射波段的 2σ 宽度等于采样步长 30m。在热红外波段的宽度通过拟合模拟的和实际的 TM 热红外影像确定，确定为 160m。这个值在分解实际 TM 影像的过程中还要用到。

模拟和实际的热红外 TM 影像的残余标准差为 $2.1K$。这可以解释为以下几点：

a. TM/DAIS－7915 影像的几何配准误差；

b. TM 影像相对强的条带噪声达到 $0.8K$；

c. 观测时间的不同导致模拟和实际影像的某些区域明显的对比度差异；

d. 部分高度半透明的朦胧状在实际 TM 影像上表现为低信号值，但是在模拟影像上无此现象。

此外，利用从 DAIS－7915 生成的热红外影像作为验证 MMT 分解结果的参考影像。参考影像与 TM 热红外影像光谱上匹配，但是分辨率为 30m。模拟的 TM 热红外影像的残差 2.1K 可以假设为参考影像残差的下限，后者随着配准精度的增加会更高。为了找出实际热红外影像的分解误差，在两幅影像的重叠区内确定分解和参考影像的标准差。为了将分解误差的影响从参考影像残差的影响中分离出来。它可以视为由于可能低估了参考影像的残余误差而导致的分解误差的上限。模拟 TM 热红外影像的分解误差直接定义为参考影像标准差。

采用固定光谱类别的叠代 ISODATA 聚类算法对 6 个反射波段实际和模拟的 TM 影像进行分类。聚类时采用 $K_0 = 4 \sim 64$ 类以研究类别数对分解精度的影响。如果某次叠代结束后，一些类为空，则重新确定类别，将最密集的类别分为两类。当仅有小于 0.1% 的像元改变类别时，叠代过程结束。最后，采用一个 3×3 的自适应中值滤波器对分类图滤波，滤除孤立点。

实际和模拟 TM 热红外影像的分解采用 5×5 的窗口，为了调整，利用经中值－预测因子算法锐化的影像。图 8－8 显示了调整参数 α 对约束和无约束分解算法精度的影响。在理想情况下模拟影像没有传感器误差，当 $\alpha = 0.3 \sim 0.5$ 约束算法得到的最小分解误差约为 $1.6K$。总的说来，约束分解算法比无约束分解算法需要调整的多，因为约束算法还会使解不稳定。

除了当 $\alpha < 0.01$，模拟影像的无约束分解算法的误差明显要高。当 $\alpha > 1$，中值锐化调整影像占主要地位，理想模拟影像的无约束算法的误差甚至比实际 TM 影像还大。相反，无约束算法对于实际带噪 TM 影像提供了比约束算法更好的精度，当 $\alpha = 0.5$ 时，分解误差为 $2.0K$。对于约束算法，在此噪声水平下，反演误差超过空间锐化效果。结果，分解误差随 α 的降低单调增加。值得注意是，如果算法（约束和无约束）选得合适，与 α 的最优选择比较而言，调整参数 α 相对大的变动 0.1～1 不会明显地导致分解精度降低。

类别数对分解误差的影响如图 8－9 所示。在模拟影像的约束和无约束分解及实际 TM 影像的无约束分解过程中，当 $K_0 = 10 \sim 20$ 类时，分解误差达到最小。它对应于 5×5 滑动窗口中心热红外像元 K 平均为 8～12 类和 5～8 类。类别增大时，类别信号反演误差的增加

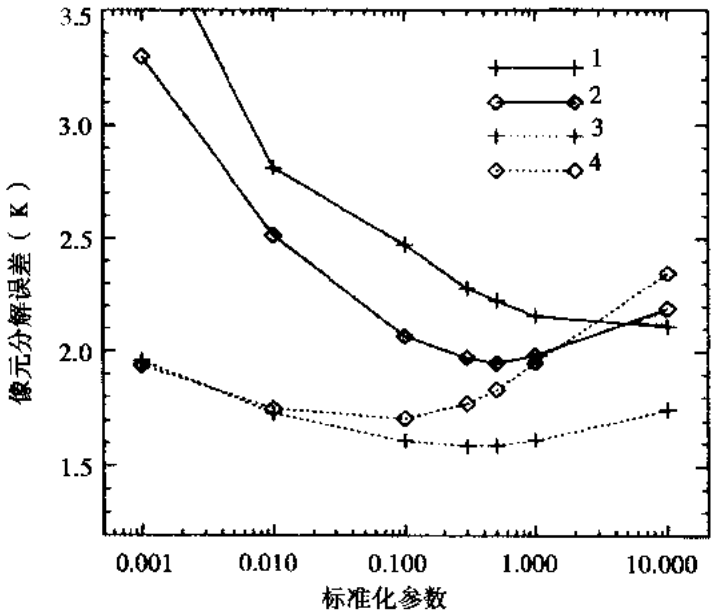


图 8　8　TM 热红外影像作为调整参数的函数的分解误差，
1—实际 TM 影像的约束分解；2—实际 TM 影像的无约束分解；
3—模拟 TM 影像的约束分解；4—模拟 TM 影像的无约束分解

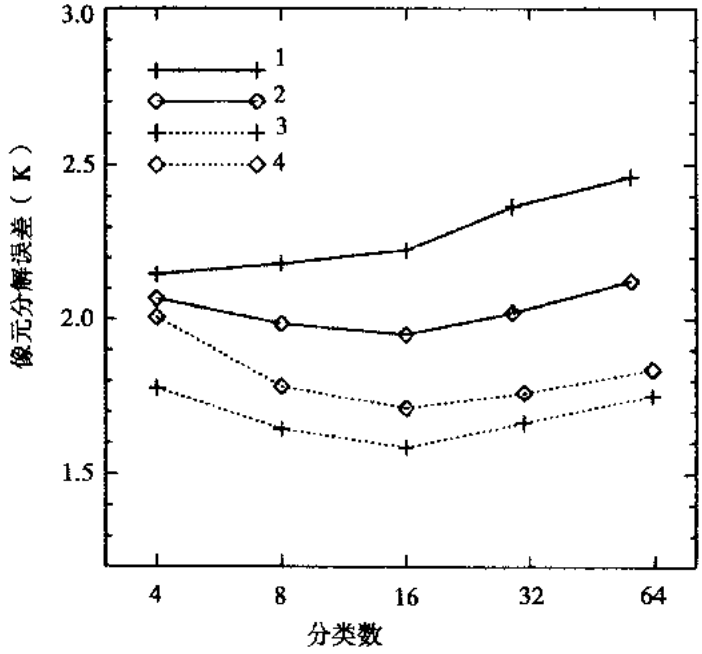


图 8－9　TM 热红外影像作为分类图中类别数函数的分解误差
1—实际 TM 影像的约束分解；2—实际 TM 影像的无约束分解；
3—模拟 TM 影像的约束分解；4—模拟 TM 影像的无约束分解

开始在总的分解误差 7 中占主导地位。而类别减小，分解误差也会增加，因为缺乏足够的类

别信息导致类别异质性增加。

当噪声水平较高的实际 TM 影像采用约束算法时，类别信号反演误差常常占主导作用，从而导致分解误差随着类别数的增加而单调增加。为了详细研究传感器误差对 MMT 分解算法精度的影响，将以下两点误差引入到模拟的 TM 影像中。

a. 不相关高斯噪声，噪声系数定义为噪声和信号的标准差的比。

b. 各波段影像在行和列方向的相对移动，模拟通道间配准误差。

图 8－10 表明了热红外影像对分解精度的影响。类似的在高分辨率反射波段的误差在热红外波段要小得多。在低传感器误差水平下的约束算法的分解误差明显比无约束算法小。然而，它对于传感器误差更敏感，所以在传感器误差高的情况下，无约束算法更合适。信号变化 0.1 个单位以内的实际的合理噪声不会明显增加反演误差。当 PSF 宽度误差在其真值的 0.1 到 0.2 单位时情况也如此。最大的影响是波段间的相互配准。分类和实测影像的相互配准误差不应超过 0.1～0.2 个实测像元，以免引起分解误差的明显增加。

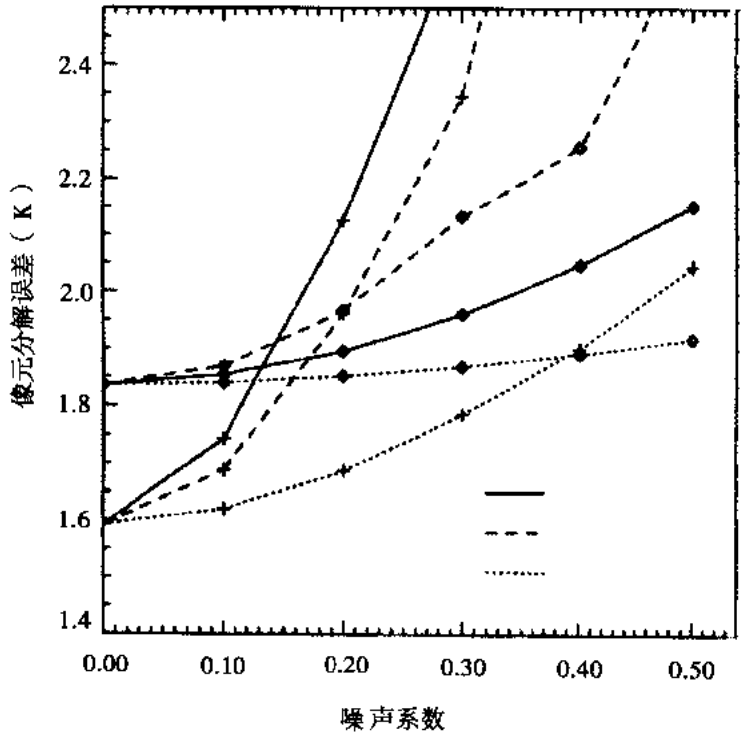


图 8－10　噪声，相对位移和相对 PSF—误差对模拟 TM 热红外影像的分解误差的影响

十字—约束分解；方块—无约束分解

TM 热红外影像的条带噪声对应的噪声系数约为 0.1。这个噪声与可能的相对配准和 0.1～0.2 个 PSF－校正误差可以解释模拟和实际 TM 影响分解误差（图 8－10 和图 8－11）的不同。

TM 热红外影像的分解如图 8－11，（a）波段 3（0.63～0.69μm）的高分辨率影像；(b) 16 类分类图；（c）原始低分辨率热红外影像；（d）无约束分解后的热红外影像；（e）约束分解后的热红外影像；（f）模拟自 DAIS－7915 数据的参考高分辨率热红外影像。下部

－（c）～（f）正方形方框中所示部分的放大影像。$\alpha=0.5$，$K_0=16$。表中显示了一幅高分辨率影像（a）用来得到高分辨率分类图（b）。分类图用来分解原始 TM 热红外影像（c），采用无约束算法（d）和约束算法（e）。结果可与从 DAIS－7915 数据模拟的参考影像（f）比较。

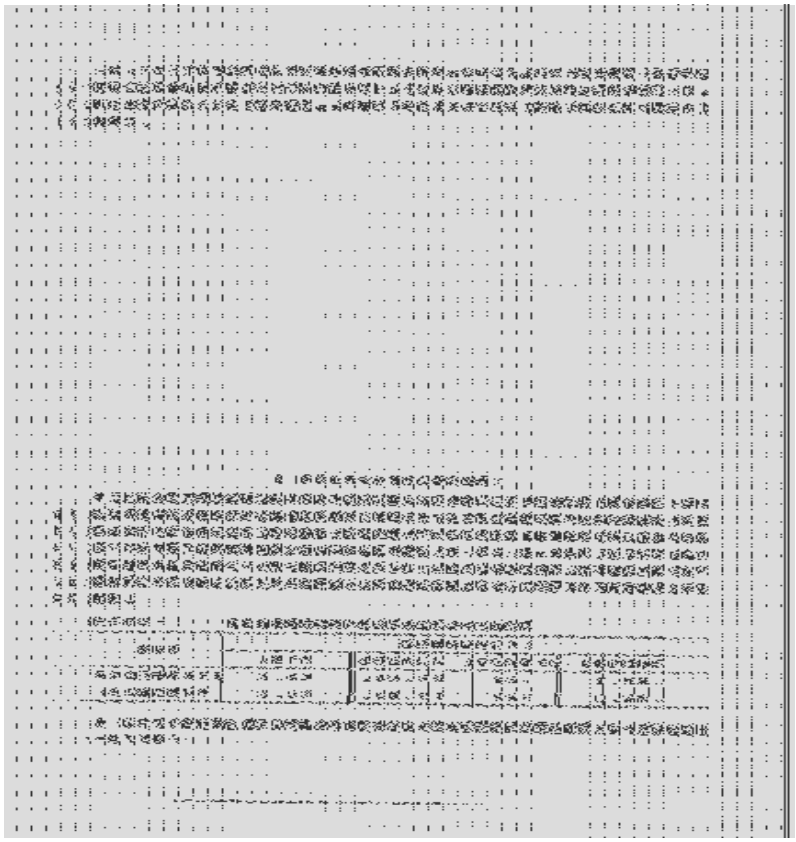


图 8－11　TM 热红外分解图像

无论是约束还是无约束算法都可以锐化原始 TM 影像。无约束分解算法由于它在窗口内的平均作用还可以移去原始影像的条带噪声。由于它只在类别内部平均，因此它保留了类别边界的清晰度。相反，约束算法保留了原始热红外像元尺度上的所有影像特征，包括噪声。有时候它可以更准确地重建小的特征。举例来说，图 8－11（c～f）显示了几个放大的影像片段，绿地中有一小片才耕过的土壤。这小片土地在原始影像上几乎不可能确定。尽管无约束算法也可以确定，但是它的对比度比参考影像低得多。而约束算法可以较好地重建对比度。

表 8－7　　模拟和实际 TM 热红外影像的 MMT－分解精度

图像	遥感波段的标准差			
	原始	中值锐化	无条件分解	有条件分解
无噪声模拟图	2.65	2.48	1.84	1.59
像真实图像	2.53	2.30	1.95	1.22

表 8－7 给出了分解误差及原始 TM 热红外影像和中值锐化影像的准确度。为了说明传

感器误差的影像，无噪模拟影像的分解误差也列于表中。无噪影像约束算法的分解误差为1.59K，比无约束算法（1.84K）低。两种算法都能有效的改善原始影像（2.65K）。由于大量的混合像元此例中值锐化影像效果不明显。

在分解实际带噪 TM 影像时，无约束算法比其他算法提供了更高的总体精度（1.95K）。它明显地改善了原始影像的精度（2.53K）。约束分解算法受噪声影响更大，提供的精度低得多（2.22K）。然而，它仍然比中值锐化（2.30K）效果好。

分解的 TM 热红外波段可以与 VNIR 和 SWIR 波段影像融合进行联合解译。如图 8－12（a）给出了无约束分解后的实际 TM 影像的田间 NDVI 植被指数和平均温度的关系。为了比较，（b）给出了参考影像相同田区的这种关系。分解和实际影像田间平均温度的标准差等于2.1K，与实际和模拟 TM 热红外影像的残差一致。因此，将分解影像田区进行平均可以把分解误差减小到在给定参考影像精度下不能定量的水平。

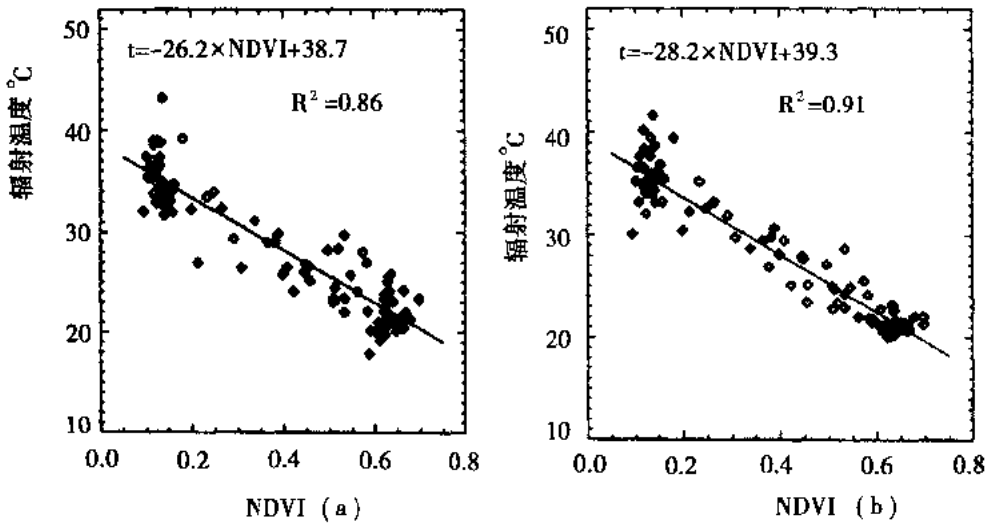


图 8－12　（a）实际融合的 TM 和（b）参与影像中农田的 NDVI 和辐射温度的关系

两种情况下的回归曲线都非常接近。回归线周围点群的分布（达到了 Kelvin）实际上表明了从 NDVI 不能得到的热红外波段信息。它说明了作物种类、表面颜色和水分的影响。

（2）模拟 ASTER 影像

未来搭载在 EOS－AM1 上的 ASTER 传感器将会有 3 个 VNIR 波段，像元大小 15m，6 个 SWIR 通道，像元大小 30m，5 个 TIR 波段，像元大小 90m，见表 8－8。它将具备改进的光谱识别能力，尤其对于矿物勘探，分解 ASTER 数据识别矿物的应用是 MMT 的关键。ASTER SWIR 波段包含特别的带有 OH－，H_2O，CO_3－和 SO_4－离子矿物的吸收特征，这些特征在高分辨率 VNIR 波段没有，而 TIR 波段又包含 VNIR 和 SWIR 波段所不具有的硅酸盐吸收特征。因此，在这种 MMT 应用中，高分辨率波段的分类对分解低分辨率波段可能不够。既然这样，我们将以分解模拟的德国中部褐煤矿 ASTER 影像为例说明 MMT 的潜力和局限。今天，这种矿物的再利用成为一个主要的任务，它需要详细掌握堆积沉积物的矿物学和地球化学组成。

同样，我们可以利用 1996 年 5 月 30 日的 DAIS－7915 机载高光谱影像模拟 ASTER 影

像。ASTER VNIR 和 SWIR 波段可以通过 DAIS－7915 很精确地拟合。然而，ASTER TIR 波段无法拟合，因为相应的 DAIS－7915 波段太宽。这正是为什么用原始的 DAIS－7915 波段 8.2～9.1μm，9.1～9.8μm，9.8～10.6μm，10.4～11.4μm 和 11.0～12.2μm 用来近似代替 ASTER TIR10－14 波段，而没有考虑它们的波谱位置和波宽明显不同。波段光谱拟合后，将 DAIS－7915 影像的几何分辨率降到指定的 ASTER 通道分辨率，假设高斯 PSF 的 2σ 宽度等于相应通道的采样步长。

以下根据 ASTER 传感器参数将传感器误差加入到模拟影像中。

a. VNIR 和 SWIR 波段的信噪比为 50（相对于平均波段信号而定义）的高斯噪声，TIR 波段噪声等价温度 0.2K；

b. 通过引入通道间在行和列方向的位移模拟相互配准误差：0－对于 1，4，7，12 通道；－0.1 个采样步长对于 2，5，8，10，13 通道；0.1 个采样步长对于 3，6，9，11，14 通道。

为了模拟 ASTER 传感器 PSF，分解时采用比假设的模拟影像宽 10% 的 PSF。

同样模拟分辨率为 15m 的 ASTER SWIR 和 TIR 波段的参考影像以检验分解误差。

既然 ASTER 传感器有三个分辨率水平，分解过程也分两步：①利用较高分辨率 VNIR 影像分解 SWIR 影像；②利用融合的较高分辨率 VNIR/SWIR 影像分解 TIR 影像。同样发现当 K_0 = 10～20 时，分解误差最小且对分类图的总类别数稀为敏感。它相当于在 5×5 SWIR 影像窗口平均 K =5～8，5×5 影像窗口 K = 8～14，对应中心实测像元平均类别数为 3～5 和 6～10。调整参数 α 的最优值在 0.3～0.5。

当 K_0=16 和 α= 0.5 时的分解结果示于图 8－13 模拟 ASTER 影像的分解。(a) 可见和近红外波段 2（0.63～0.69μm）影像，像元大小 15m；(b) 原始短波红外（2.185～2.225μm）波段 6 影像，像元大小 30m；(c) 波段 6 约束分解后的影像；(d) 波段 6 参考影像，像元大小 15m；(e) 原始热红外波段 14（11.0～12.2μm）影像，像元大小 90m；(f) 无约束分解后的 14 波段影像；(g) 约束分解后的 14 波段影像；(h) 波段 14 的参考影像，像元大小 15m；(I) 热红外波段 10（8.2～9.1μm）的发射率影像，像元大小 90m；(j) 无约束分解后的 10 波段影像；(k) 约束分解后的 10 波段影像；(l) 波段 10 参考发射率影像，像元大小 15m。模拟 ASTER 影像的 MMT 分解误差列在表 8－8。

表 8－8　　模拟 ASTER 影像的 MMT 分解精度

参数	遥感波段的标准差			
	原始	中值锐化	无条件分解	有条件分解
反射（SWIR 波段 4～8 均值）	0.0179	0.0228	0.0207	0.0168
辐射温度 K（TIR 波段 14）	1.47	1.49	1.34	1.23
发射（TIR 波段 10）	0.0098	0.0091	0.0079	0.0081

第一步，对三波段 VNIR 影像，像元大小 15m，其中一张如图 8－13 (a) 进行分类并用来分解 6 波段 SWIR 影像，像元大小 30m。分解结果如图 8－13，(b) ～ (d) 是 ASTER 第 6 波段（2.185～2.225μm）及分解结果，该波段包括带 OH 离子矿的吸收特征。虽然原始影像，(c) 看起来有点模糊，约束分解能够部分重建它的清晰度，与参考影像 (d) 相比。约束算法分解的误差（0.0168）个地面反射单位比原始影像（0.0179）要低。然而，无约束

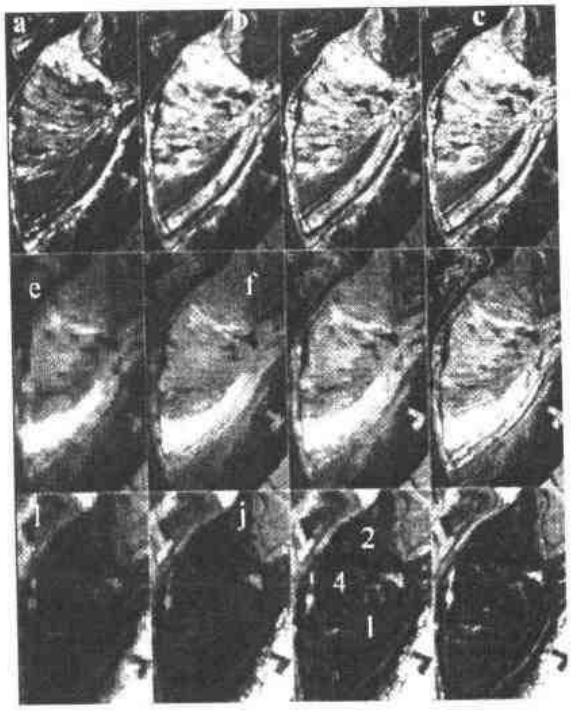


图 8－13　当 $K_0=16$ 和 $\alpha=0.5$ 时的分解结果示于图 7 模拟 ASTER 影像的分解

算法却导致了比原始影像大的误差（0.0207），这是因为在两幅影像分辨率比基础上的锐化效果不能抵消窗口内部的平均效果和反演误差。中值锐化的精度甚至更低（0.0228）。

利用约束算法分解的 SWIR 影像以 15m 像元大小与 VNIR 影像进行融合。对此 9 波段融合影像进行分类并用来分解 5 波段 TIR 影像，像元大小为 90m。图 8－13（e）～（h）为 14 波段，模拟的 11.0～12.2μm 的分解结果。该波段由于很少受发射率变化的影响，所以代表了表面温度的变化。尽管原始影像非常模糊（f），许多大的温度变化都可以通过约束和无约束算法重建（f），（g）。小的特征，尤其是在堆积处南部的波纹状不能在给定实测/分类分辨率比为 6 与参考影像相比的基础上重建。

无约束分解算法（f）抑制了传感器噪声，在约束分解结果（g）的某些部分表现为块状结构。然而，它是以另外的空间平均为代价的，导致了与约束分解算法相比小尺度温度变化对比度的降低。结果，无约束算法的分解误差（1.34K）比约束算法（1.23K）的大。中值锐化的误差（1.49K）还是比原始影像（1.47K）大，这是由于大量混合像元的存在。

对于许多矿物上的应用，主要的兴趣在发射率变化而不是温度。我们利用波段 10（模拟的 8.2～9.1μm）（该波段包括了所谓的石英的波段）来研究分解对发射率的影响。波段 10 的发射率通过 10/14 波段辐射率比并假设波段 14 的发射率为常数 $\varepsilon=0.985$，如应用于矿物勘探方面的参考通道方法得到。图 8－13（I）～（l）给出了通道 10 的“发射率影像”，从原始影像（I），分解影像（j）和参考影像（l）得到。我们将只分析矿区，因为对于影像中的其他目标物（农田，房屋），前面假设的 14 通道的发射率值可能不正确。尽管影像增加了噪声，该噪声在约束算法分解影像上表现为块状结构，但我们应该注意到影像的清晰度有了明显提高，较大的发射率变化与参考影像符合一致。对应于高的石英含量的大片较暗的特

征在影像矿物堆积区的北部和南部可以明显地看到。中部可以看到较小的暗特征。发射率影像上的亮点和反射波段影像的暗点相应，对应于潮湿土壤。细的波纹状特征，不能从分解的温度影像上产生，同样也不能在发射率影像上产生。

无约束分解算法图 8－13（j）还导致了相对于约束算法（k）细小特征对比度的减小。然而，由于它对于噪声的增加敏感性较小，总的精度甚至比约束算法稍高（0.0079 对 0.0081）。中值锐化（0.0091）的误差比 MMT 分解法要高，而比原始影像要低。

对约束分解的 SWIR 和 TIR 影像与 VNIR 影像在 15m 像元尺度上进行融合并且结合起来分析整个 ASTER 覆盖波谱范围内矿区某些特征的光谱。这些特征的位置如图 8－13（k）所示，它们在分解和参考影像上的光谱的对比如图 8－14。TIR 反射值是由 1 减去发射率所得（Kirchhoff 定律）。

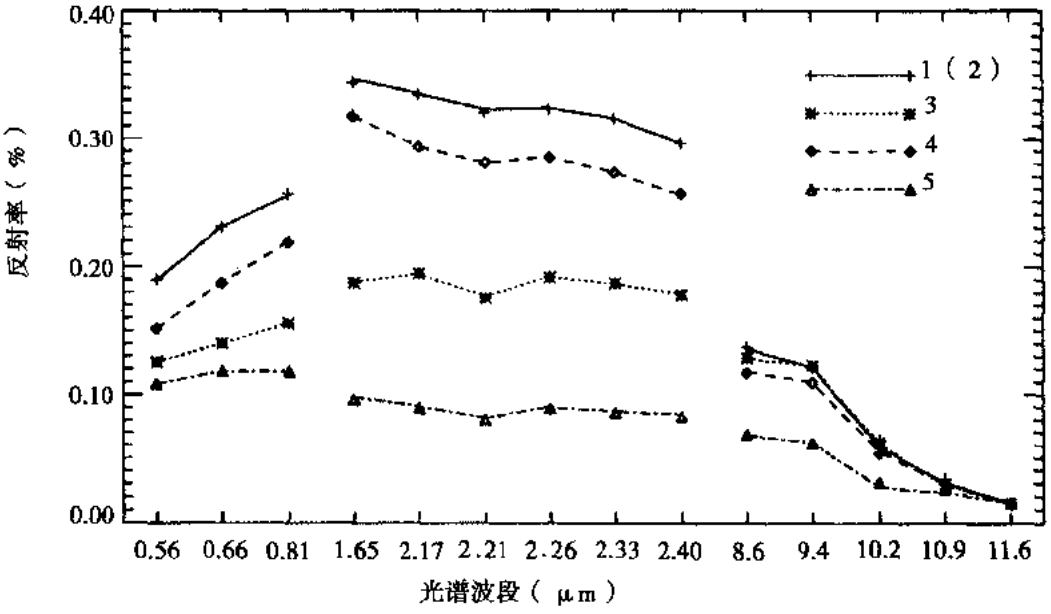


图 8－14　图 8－13（K）中所未堆积处的反射光谱，线—参考影像的光谱；
符号—融合 VNIR/SWIR/TIR 影像的光谱

特征区域的平均作用明显地除去了像元水平的误差。即使发射率影像中心细小的暗特征 1 在分解和参考影像上也没有表现出明显的偏差。它的光谱与堆积区北部大区域 2 的光谱相一致。这两个区域表现出最大的石英含量。堆积区南部的区域 3 在 VNIR 和 SWIR 具有很低的反射率，石英含量比区域 1 和区域 2 略低。黏土矿在 2.2μm 的典型的吸收特征，在这个区域可以最好地表现。堆积区中心部位（区域 4）表现出的石英含量最低。然而，它在 VNIR 和 SWIR 波段的反射率界于区域 1（2）和 3 之间。它附带说明了线性统计预测因子可以反演石英含量对比度。

潮湿区域 5 的光谱由含水量决定，因此没有进行矿物学解释。某些发射率变化与石英含量的重建可以通过局部统计预测能力来解释。石英在 VNIR 和 SWIR 不含有吸收特征，而分类是用的这两个波谱范围。然而，地层学和岩石学上不同的沉积物的混合可能同时导致了石英含量和矿物内容的局部变化，这些变化在 VNIR/SWIR 和/或表面结构上可以识别出来。结果，在较高分辨率的 VNIR/SWIR 影像上可以识别的特征证明在 TIR 波段有不同的

光谱特征。根据石英含量解译它们的 TIR 光谱特征有助于表征它们的 VNIR/SWIR 特征。

①将 MMT 分解算法应用到实际的 TM 和模拟 ASTER 影像，与原始影像相比明显地改善了清晰度和辐射准确度。当影像主要由混合像元组成时，MMT 分解算法明显优于中值锐化方法。

②约束 MMT 分解算法保留了低分辨率实测影像所有可用的辐射信息，而且当噪声和目标物较小时表现最好。另一方面，无约束 MMT 分解算法在噪声较大时表现最好，而且可以抑制原始图像的噪声。无约束 MMT 算法相对于其他噪声滤波器的优点在于它仅在窗口内进行类间的平均因此保留了分类图的清晰度。

③MMT 分解算法只能相对于在高分辨率分类影像上可以识别的类别进行。如果某一类在高分辨率分类波段相似而在实测波段异性，则对窗口内某类的实测信号进行平均（约束算法中说明了所有可以利用的低分辨率实测信息）。如果某类区域实测信号不同，且在不同的窗口内，则对它们分别处理而不是进行实测信号的平均。因此，MMT 分解可以对某个特定的应用目的有效，如果对于该应用关键的类别在分类数据光谱可分和/或空间可分。

④在分析 MMT 分解算法对某一具体应用的有效性时，需考虑在分类和实测光谱波段可以识别的现象间可能存在局部相关。局部相关的重要性我们已经以利用 VNIR/SWIR 分类图分解与石英相联系的发射率变化影像为例进行了说明。

⑤分解影像的边界特征主要是由高分辨率分类影像图确定，同时也可能利用低分辨率实测波段的信号变化进行修改。实测/分类数据的融合相对于分类波段可用的信息可能可以提高识别能力。本节用两种融合方法说明，①农田的 NDVI 和温度；②与褐煤矿中石英相联系的 VNIR/SWIR 光谱变化和发射率变。

⑥TM 和 ASTER 影像的 MMT 分解证明在高分辨率像元水平上可以提供 1.0 到 2.0K 的辐射精度，取决于现场景像和传感器误差。发射率的分解精度在石英吸收波段约为 0.008，使得区分不同石英含量等级成为可能。如果分解影像在能够识别的特征水平上进行解译的话，还可以提高反演精度。

⑦通过对 MMT 对传感器误差的敏感性分析表明数据几何配准的准确性是最强烈的要求，配准误差不应超过 0.1～0.2 个低分辨率影像像元。相对于现代配准方法，这是个既强烈又不现实的要求。

⑧模拟 ASTER 数据融合显示了 MMT 分解算法在融合不远的将来新卫星传感器的多光谱多分辨率 VNIR/SWIR/TIR 数据的应用潜力。

§8.7 多时相决策级遥感数据融合

本节提出了两种不同的基于决策融合的多时相分类。联合似然度决策融合方法与数据融合的分类相比，可以提高 5%的总体分类精度和约 2%的类平均精度。虽然，数据融合方法效果与加权多数决策融合方法效果相当，但这种情况下，使用先验知识比加权多数决策融合方法与双，方法也较为简单。

8.7.1 决策因子

假设有同一地区的 P 幅相互配准的多时相遥感数据。多时相分类设计的目标是确定对一个不同时期观测的数据 $|x_1, x_2\cdots, x_P|$（X_K 是 K 时相观测的数据）全局类别决策的最优决策准则。决策因子 u_0 在 M_0 个用户定义的信息类别中确定，$\Omega_0 = |\omega_1, \cdots \omega M_0|$。某个信息类别是指根据数据分析的特定目的直接对用户有用的类别。由于信息类别在特征空间不一定可分，所以数据通常在训练阶段进行分析，比如，通过聚类找到相异和无遗漏的亚类别或光谱类别的集合从而对每个可以通过一个适当的概率密度函数模拟。由于计算的复杂性和实际训练样本需求的限制，数据集总体假设为类别彼此条件独立，而且每组数据在训练阶段分别分析。因此不同时间的数据通常具有截然不同的光谱类别。我们以 Ω_k 表示 K 时间数据的 M_k 光谱类别的集合，$k=1, \cdots p$。K 时相数据的局部类别决策表示为从 Ω_k 中选取出 u_k。

如果将每个时相数据看做一个独立的信息源，多时相分类可以认为是多源数据分类的例子，多源数据分类从概念上分有两种不同的方法。一种是数据融合方法，在此方法中，将数据源的特征矢量赋予中央决策程序，它从 Ω_0 中做最后决策 u_0。注意在这种方法中，最优贝叶斯多时相决策准则选择使 $P\{u_0 = \omega_j | x_1, \cdots, x_p\}$ 最大的 $\omega_j \in \Omega_0$ 采用堆叠向量 $\{x_1, \cdots, x_p\}$ 作为最大似然法（ML）分类的扩展的特征。然而，特征向量维数的增加需要比通常 p 按像元分类所需样本总合还多的训练样本。*Swain* 简化了该方法得出了一个层叠分类，他假设不同数据的特征向量类别条件独立，从而得到了找出某类 ω_j 使 $P(\omega_j)\ P(x_1|\omega_j) \cdots P(x_p|\omega_j)$ 最大的决策准则。注意在此方法中，每套数据对于最终决策 $u_0 = \omega_j$ 的影响相同。多时相分类，该方法假设类别随着时间不变，在此假设下可以利用像元时间上的相关信息。因为他们假设每个时相数据有相同的（光谱）类别，所有的多时相数据在训练阶段应该一起进行处理来确定光谱类别，从而增加了所需光谱类别的总数，这是由于类别随时间不变的假设条件引起的。在多源数据分类的背景下，Lee（1987）发展了统计多源分类，后来又被进行了扩充，将数据与可靠性因子相联系。函数对 $\omega_j \in \Omega_0$，$j=1, \cdots, M_0$ 定义如下，

$$F_j(x_1, \cdots, x_p) = P(\omega_j) \sum_{k=1}^{P} \left[\frac{P(\omega_j | x_k)}{P(\omega_j)} \right]^{a_k} \tag{8-36}$$

通过选择具有最大成员函数值的类别 $u_0 = \omega_j$ 做决策。方程 8-36 说明了个体加权后验概率如何影响全局成员函数，其中 a_k 是与 k 时相数据相联系的可靠性因子，$k=1, \cdots p$。注意如果所有数据的可靠性因子都置于 1，层叠分类与公式 8-36 等价。证据推理方法结合数据可靠度用来进行多源分类。然而，没有一种方法用到了类可靠度。

第二种方法，是一种决策融合方法，通过综合每个时相数据的类决策因子作出最终的分类决策。这种方法的关键有两点：一是局部分类的设计；二是局部类决策因子的最佳融合方法。该问题与 M-ary 分布假设检验非常类似，后者近来在诸如雷达和军事监察系统等领域引起了相当多的研究兴趣。Tubbs 和 Allty（1995）考虑到将多传感器分类结果结合起来，提出了一种基于类决策因子大小排列的决策方法。Tenny 和 Sandell（1986）提出了一个两种传感器数据的分布检测算法。Chair 和 Varshney（1986）将二元局部决策因子加入到多传感器检测问题中得到了一个最优融合准则。后来，Reibman 和 Nol（1987）提出了一种系统

宽度最优方法，解决了当假设局部检测的统计值和门槛值相同时受限制的问题。Tang 提出了一个解决多传感器分布检测的更普遍问题的方法。

8.7.2 多时相分类的决策融合

(1) 联合似然度决策融合准则

假设用一个通常的按像元的分类诸如 ML 分别对每个时相的数据独立地作出局部类别决策。下面关于决策融合多时相分类的问题就是给定局部决策 $\{u_1, \cdots, u_p\}$ 如何确定 Ω_0 中最优的全局决策 u_0。为了找出最小期望消耗意义上的最优决策融合方法，我们定义 $J = (u_0; u_1 \cdots, u_p, \omega_j)$ 为当真实类别为 ω_j 时给定 $\{u_1, \cdots, u_p\}$ 确定 u_0 需要的消耗。期望消耗表示为，

$$E\{J(u_0;u_1,\cdots,u_p,\omega_j)\} = \sum_{\omega_j \in \Omega_0} J(u_0;u_1,\cdots,u_p,\omega_j)P\{u_1,\cdots,u_p,\omega_j\} \quad (8-37)$$

Tang 等 (1998) 定义了一个消耗函数 $J = (u_0; u_1 \cdots, u_p, \omega_j) = J(u_0; \omega_j) \equiv [1 - \delta(u_0, \omega_j)]$，其中 $\delta(u_0, \omega_j) = 1$ 仅当 $u_0 = \omega_j$，否则 $\delta(u_0, \omega_j) = 0$；(2) 中使用同样的消耗函数就可以得到选出 $u_0 \in \Omega_0$ 使 $P(u_1 \cdots, u_p, u_0)$ 最大的决策融合准则。这表示找到某类与局部决策 $\{u_1 \cdots, u_p\}$ 联合出现的可能性最大。注意对于 $P(u_1 \cdots, u_p, u_0)$ 总共有 $M_0 \times M_1 \times \cdots M_p$ 种不同的类别组合。本文中，我们假设给定 u_0 时 u_k's 条件独立，即，

$$P\{u_k \mid u_{k-1},\cdots,u_1,u_0\} = P\{u_k \mid u_0\} \quad (8-38)$$

尽管 u_k's 是否真的条件独立应该在给定的环境中仔细审查，但是我们在此做这个假设只是为了使分类尽可能的简单。在公式 8-38 的假设下，简化的贝叶斯最小消耗意义上的最优决策融合准则是选择使 $H_{TP\ \ LIK}(u_0)$ 最大的 $u_0 \in \Omega_0$，$H_{TP-LIK}(u_0)$ 定义为，

$$H_{TP-LIK}(u_0) \equiv P\{u_0\}\prod_{k=1}^{p} P\{u_k \mid u_0\} \quad (8-39)$$

我们称此为联合概率决策融合多时相分类。由于局部类别决策 u_k，$k = 1, \cdots, p$ 在 Ω_k 中可能有任何的 M_k 种光谱类别，需要估计的条件概率 $P(u_k \mid u_0)$ 总数目为 $M_0 \times (M_1 + \cdots + M_p)$ 个。对于大量的光谱类别，这个估计任务就不再是件容易的事，总的来说，找出训练区所有的类别组合几乎是不可能的。一种实际的解决办法可以假设一定的类别转换模型，最好借助与某些特定的数据知识如某种农作物的发育时期等。比如，通过分析训练样本，我们可能预计到某种信息类别的样本最可能归属于哪个光谱类别子集。从这种先验知识，我们可以得到概率 $P\{u_k \mid u_0\}$ 的实际合理的模型。在本节的实验中，采用一种简单的模型运用到决策融合模型。

(2) 加权多数决策融合准则

在局部决策 $\{u_1, \cdots, u_p\}$ 中，某些决策从可靠性上讲比其他决策更可信。在这种情况下，我们希望最终决策 u_0 尽可能的与那些可信度高的局部决策相一致。然而，分类不能提供不同程度的可靠度，因为消耗函数 $J(u_0; \omega_j)$ 仅检查 u_0 和 ω_j 的匹配情况。

为了提高 $\{u_1, \cdots, u_p\}$ 中可靠的局部决策的作用，我们对消耗函数做轻微的修改。特别的，考察满足以下关系的消耗函数，

$$J(u_0; u_1, \cdots, u_p, \omega_j) = \sum_{k=1}^{p} J(u_0; u_k, \omega_j) \tag{8-40}$$

$J(u_0; u_k, \omega_j)$ 是一个与 K 时相数据相联系的局部消耗函数，它确定了在局部决策 u_k 基础上选择 u_0 所需的消耗。所有局部消耗的总和即是在 $\{u_1, \cdots, u_p\}$ 基础上选择 u_0 的实际消耗。我们选择一个消耗函数 $J(u_0; u_k, \omega_j)$ 满足，

$$J(u_0; u_k, \omega_j) = J(u_0; u_k,) \doteq 1 - A(u_k)\delta(u_0, u_k) \tag{8-41}$$

其中 $0 \leqslant A_k \leqslant 1$。如果光谱类别 u_k 属于 u_0 所指示的信息类别，我们定义 $\delta(u_0, u_k) = 1$，否则 $\delta(u_0, u_k) = 0$。$A_k(u_k)$ 是个与局部类别决策 u_k 有关的数。它可以控制 u_0 和局部决策 u_k 之间一致性的相对重要性，因为选择全局决策 u_0 与局部决策 u_k 匹配的消耗是 $1 - A_k(u_k)$ 而其他情况下是 1。根据数据和类可靠度，我们这样选择合适的 $A_k(u_k)$ 值，可靠性较小的局部决策对于融合准则确定的最终决策 u_0 影响有限。预计消耗如下，

$$E\{J(u_0; u_1, \cdots, u_p, \omega_j)\} = P(u_1, \cdots, u_p)\{p - \sum_{k=1}^{p} A_k(u)\delta(u_0, u_k)\} \tag{8-42}$$

如果圆括号中第二项就决策 u_0 而言最大，该式最小。我们确定一个多时相融合分类即选择使 $H_{TP\ WHTM}(u_0)$ 最大时的类别 $u_0 \in \Omega_0$，$H_{TP-WHTM}(u_0)$ 定义如下，

$$H_{TP-WHTM}(u_0) \equiv \sum_{k=1}^{p} A_k(u_k)\delta(u_0, u_k) \tag{8-43}$$

为了更好地理解 $A_k(u_k)$'S 的作用，假设它们都为 1。然后，分类将会选择一个类别 u_0，它是一个 u_k'S，$K = 1, \cdots, p$ 所指示的多数类别。因此，这是个多数准则。有了不同的 $A_k(u_k)$'S，每个局部决策 u_k 的作用大小可以根据 $A_k(u_k)$ 进行加权。因此这种决策融合方法被称为“加权多数决策融合准则”。

(3) 数据和类可靠度

由于对每个时相的数据所做的决策具有不同的潜在可靠度，我们定义类可靠度，$rel(k, u_k)$ $u_k \in \Omega_k$，$k = 1, \cdots, p$ 为利用 k 时相数据决策 u_k 的可靠度。同样，数据可靠度，$rel(k)$，$k = 1, \cdots, p$，表示 k 时相数据总的可靠度。当融合准则不能得出大可靠度的局部决策时，合乎逻辑的做法是指定一个大消耗值。

三种不同的数据可靠度的度量方法，分别利用类可分离性、疑义度和联系性。尽管类间统计分离性是估计数据可靠度的好方法，但是如果数据不符和多元正态分布的假设，则估计可分离度时需用的计算量大得惊人。采用疑义度，数据的可靠度与数据（或光谱）类别指示某一特定信息类别的程度相联系。由于本文决策融合的目的是分类，分类精度高的数据假设可靠度比其他数据大。注意分类精度可以不用考虑假设潜在的概率密度函数轻易得到。在本节的实验中，我们没有试图估计数据可靠度的最优值，只是实验了几种不同的可靠度值来考察它们对分类的影响。

对于类可靠度，我们可以人为指定大的可靠度值给可信的局部决策，这样全局决策就会尽可能地偏向可靠的局部决策。尽管没有一个确定的方法度量某个具体局部决策的可靠度有多大，我们还是可以考虑两种方法：一种基于检测概率；另一种基于正确分类的类概率。当

$u_k \in \Omega_k$，$\omega_j \in \Omega_0$，$k=1$，…，p，$j=1$，…，M_0，第一种定义如下，

$$rel(k, u_k \in \omega_j) \equiv P(k, u_k \in \omega_j) \quad x_k \in \omega_j \tag{8-44}$$

类别 ω_j 的检测概率即为将样本 x_k 正确分到类 ω_j 的概率。它的原理是任何具有高检测概率的类别应该是可靠的。顺便提一下，在下面的假设实例中利用这种方法产生了一些问题。假设某个设计较差的局部分类，它对于某种数据的特征矢量性质较差，所以将所有样本都分到某个特别的类别中。在这种情况下，(8－44) 的方法会将最高可信度 1 分配到那一特别的类中，尽管这个类别决策毫无意义。相反，第二种方法，如下定义，

$$rel(k, u_k \in \omega_j) \equiv P(k, u_k \in \omega_j) \quad u_k \in \omega_j \tag{8-45}$$

就没有这种问题。当局部决策 u_k 为 ω_j 时，它是样本 x_k 真正来自 ω_j 时的概率，也即它是局部决策真确的概率。在我们的实验中，我们检测了这两种类可靠度的度量方法，发现 (8－45) 方法更有效。我们期望 (8－45) 的高值从统计上意味着该局部决策真确的可能性最大，因此，u_k 应是个较好的局部决策，它强烈影响 x_k 的全局类别决策。

将数据和类可靠度与实际的权值 A_k (u_k)'S 联系起来时还有一个问题。既然选择最优似乎看起来很难，现在至少可以利用一个看似简单的方法，如下，

$$A_k(u_k) = rel(k) \times rel(k, u_k) \tag{8-46}$$

以从代表性训练样本的分类结果估计得到。

8.7.3 实验与讨论

(1) 多时相数据和训练

为了检测本文提出的两种多时相分类决策融合方法，我们利用相同农田的三个时相 (1986 年 4 月，7 月和 9 月) TM 数据做了实验，7 月收集了相关的地面资料。所有 7 个波段都参与了分类。利用地面实际资料，对 7 月和 9 月数据定义了四种信息类别 Ω_0 = {玉米，大豆，小麦，紫花苜蓿/燕麦}。对于每组数据每个 Ω_0 中的信息类别提出了几个亚类别，这是为了满足亚类别多元正态分布的假设。由于小麦是 4 月数据中惟一的绿色植被类型，而且植被相对于土壤具有明显不同的光谱反射特征，因此它可以以相对高的精度识别出来。因此，对 4 月的数据仅定义了两种信息类别——小麦和非小麦。大约每组数据选择 15000 个样本来做实验，随机选择约 10% 的样本作为训练区。

表 8－9　　在不同类别转换概率下，利用 9 月数据对 7 月数据分类结果

P	玉米	大豆	小麦	紫花苜蓿/燕麦	CAG	OVA
0.80	91.02	59.42	66.34	78.55	73.83	75.20
0.99	92.03	60.28	64.12	78.92	73.84	75.78
1.00	89.84	60.03	61.40	79.43	72.68	74.55
最好	91.80	63.08	69.88	73.35	74.53	76.67

利用按像元的 ML 分类对每个时相数据单独进行分类，总分类精度 (OVA) 和平均分类精度 (CAG) 作为评价该文提出的多时相分类运行状况的参考。利用所有多时相数据在

Ω0 中作出最终（全局）决策。注意联合似然度决策融合准则需要类别转化概率 $P(u_k|u_0)$。由于 u_k 表示光谱类别 Ω_k 中的一类而全局决策 u_0 是在信息类别 Ω_0 中作出的，因此会出现多于一种的类别 u_k 与同一种信息类别 u_0 对应的情况。在本文的实验中，我们用一种试探性的方法确定概率 $P(u_k|u_0)$，即与全局决策 u_0 同属于一种信息类别的局部决策 u_k 的概率 $P(u_k|u_0)$ 比其他情况的概率高：假设局部决策 u_k 对应于某种信息类别 $u_0=\omega_j$，Ω_k 中共有 n 种亚类别（光谱类别）对应于信息类别 ω_j；于是，$\omega_j\in\Omega_0$，$k=1,\cdots,p$，定义，

$$P\{u_k \mid u_0=\omega_j\}=\frac{P_0}{n} \tag{8-47}$$

当局部决策 u_k 不属于 u_0 所指示的信息类别时有，

$$P\{u_k \mid u_0=\omega_j\}=\frac{(1-P_0)}{(M_k-n)} \tag{8-48}$$

其中 P_0 是用户定义的值，界于 0 和 1 之间：P_0 为 1 意味着不允许某类转换到一个不同的信息类。如果 P_0 为 0 则只允许某类转换到一个不同的信息类。检验了几个不同的 P_0 值，表 8－9 列出了部分结果。获得最好效果的 P_0 值用来与其他分类进行比较。在用 4 月数据分 7 月数据的时候，P_0 置为 1。

（2）数据融合多时相融合分类

为了比较，采用 4 月和 9 月数据利用基于公式 8－45 数据融合的常规多时相分类对 7 月的数据进行了分类，结果列于表 8－10。由于地面实况资料收集于 7 月而且与 7 月数据匹配得最好，所以所有的比较都是关于 7 月数据的。检测了几种不同的数据可靠因子（对每组数据以 0.1 为步长从 0.6 到 1.0）看看它们对分类结果的影响。然而，发现总的分类精度差别不大；由于不同数据可靠度引起的最大偏差不到 2%（表 8－10 中结果采用 *rel*（4 月）= *rel*（7 月）= *rel*（9 月）= 0.6）。基于公式 8－45 的多时相分类获得的结果优于任何单独按像元 ML 分类结果；当 9 月和 4 月的数据与 7 月数据一起使用时按像元 ML 分类结果的总体精度增加了约 6%。加入 4 月数据明显提高了小麦和紫花苜蓿/燕麦分类精度。9 月数据的引入提高了大豆的分类精度，但稍微降低了紫花苜蓿/燕麦的分类精度，见 7 月 + 9 月。由于引入 9 月数据导致 4 月数据分类精度的提高可以看做是数据融合方法的边缘。注意 9 月数据的分类精度除了谷物外都很低，见表 8－10。表 8－10 表达了公式 ①仅用 7 月数据采用按像元 ML 分类，OVA 的提高；②采用按像元 ML 分类对 4 月数据分类时，只有两种信息类别｛小麦，其他｝，其他分类精度在谷类下；③相同数据可靠度，*rel*（4 月）= *rel*（7 月）= *rel*（9 月）=1.0；④方程 8－10 用在类可靠度。

表 8－10　　多时相分类器的分类精度

不同时相数据集	分类精度（%）						
	玉米	大豆	小麦	紫花苜蓿/燕麦	CAG	OVA	增加 OVA
每种时相数据最大相似分类器结果							
4 月	58.59		90.29		89.94	89.65	
9 月	82.59	55.06	51.19	47.04	59.00	65.28	
7 月	90.18	57.72	68.72	77.89	73.63	74.37	

续表

不同时相数据集	分类精度（%）						
	玉米	大豆	小麦	紫花苜蓿/燕麦	CAG	OVA	增加 OVA
融合公式 8－36 计算结果							
7月＋4月	90.29	56.42	86.50	83.16	79.09	76.16	1.79
7月＋9月	92.30	64.63	69.22	67.72	73.47	76.80	2.43
7月＋4月＋9月	92.52	65.56	88.07	79.50	81.41	80.23	5.86
融合公式 8－39 处理结果							
7月＋4月	90.18	57.72	89.96	80.82	79.67	79.67	2.30
7月＋9月	94.19	57.63	68.72	73.79	78.08	82.24	7.87
7月＋4月＋9月	95.97	77.08	88.89	71.52	83.32	85.10	10.73
融合公式 8－44 处理结果							
7月＋4月	92.61	57.72	84.53	73.50	77.09	76.43	2.06
7月＋9月	96.83	76.08	64.44	51.46	72.41	81.08	6.71
7月＋4月＋9月	97.18	76.77	75.23	64.86	78.51	83.60	9.23

（3）结合似然度决策融合多时相分类

表 8－10 还给出了利用本文提出的两种多时相分类－联合似然度分类和加权多数分类的分类结果。在决策融合方法中，相对于结合先验概率的数据融合方法，它是结合了有限的局部类别决策信息。然而，可以看到联合似然度融合准则比基于公式 8－45 的数据融合方法效果要好得多。因此，可以看到联合似然度决策融合准则所需联合概率 P（$u_1\cdots$，u_p，u_0）的先验信息对信息结合来分类有效。在条件独立的假设下，足够估计 M_k 次 K 时相数据 $P\{u_k|u_0\}$ 的 M_0 条件概率，其中 M_k 是 K 时相数据的类别数，M_0 是 Ω_0 中的类别数。

利用 9 月和 4 月数据对 7 月数据分类时，联合似然度决策融合法比最好的数据融合多时相分类精度提高约 5%。大豆的分类精度明显的提高（约 11%）；然而，紫花苜蓿/燕麦精度反倒下降了约 8%，因此，类平均精度提高了约 2%。与按像元 ML 对 7 月数据的分类结果相比，联合似然度决策融合总体分类精度提高了 10.73%。

（4）加权多数决策融合多时相分类

加权多数决策融合的分类结果也列在表 8－10，表 8－10 中的结果采用相同的数据可靠度，这与简单的多数准则相符。注意加权多数融合方法进一步减少了所需的先验信息；只需要 K 时相数据 M_k 不同的类可靠度 rel（k，u_k）就足够了。在我们的实验中，不是估计数据可靠度，而是给每组数据分配了几个不同的值（0 ～ 1.0）结果发现总体精度变化不大（小于 1.3%）。然而，从表 8－11 可以看到类平均精度在某种程度上对数据可靠度敏感（见小麦和紫花苜蓿/燕麦）。在数据融合分类中，对于不同的数据可靠度分类精度（类平均精度和总体精度）最大差异不超过 2%。然而，数据可靠度确定了 A_k（u_k），而且，除了类可靠度外，再没有其他依赖于数据的量，因此，分类精度似乎在加权多数分类中更对数据可靠度敏感。这表明在应用加权多数决策融合方法时，估计最优的数据可靠度是个重要问题。

表 8－11　　不同数据可靠度的加权决策融合

数据可靠度			分类精度（%）					
4月	7月	9月	玉米	大豆	小麦	紫花苜蓿/燕麦	CAG	OVA
1.0	0.6	0.6	92.50	78.11	74.49	72.04	79.28	82.77
1.0	0.7	0.7	96.85	77.23	74.07	72.04	80.05	84.27
0.6	1.0	0.6	96.55	76.24	87.49	62.45	80.68	84.03
0.7	1.0	0.7	96.87	76.24	78.11	64.86	79.02	83.54
0.6	0.6	1.0	92.50	78.11	74.49	72.04	79.28	82.77
0.7	0.7	1.0	96.85	77.23	74.07	72.04	80.05	84.27
1.0	1.0	1.0	97.18	76.77	75.23	64.86	78.51	83.60

对于类可靠度，方法公式 8－44 和方法公式 8－45 表现明显不同：公式 8－45 的类可靠度明显地产生了比公式 8－44 好的效果（OVA 提高了 6%～8%；CAG 提高了 3%～4%）。这很容易理解，因为公式 8－45 中类可靠度直接明了某个局部决策为真的概率。表 8－11 的结果是采用公式 8－45 得到的。注意尽管加权多数决策融合比联合似然度决策融合需要的先验知识少得多，简单得多；但是至少从总体精度上说它可以与另两种方法相当，证明是一种有用的简化多时相分类。然而，实验结果也表明还需要做进一步的研究以确定最优的数据可靠度从而提高类平均分类精度。

尽管还需要进一步的研究选择最优数据和类可靠度，本文提出的基于决策融合的多时相分类证明比无上下文信息的 ML 分类或特征层融合的多时相分类效果好。注意数据融合的多时相分类将每组数据的先验知识结合起来，因此所有的数据必须用统计概率来描述。如果数据统计特性非常不同，先验概率的结合可能就不能产生预料的结果，因为如果某组数据具有变化范围较大的概率值，它可能会对全局决策过程起主导作用。相反，决策融合方法不存在这个问题。有了数据和类可靠度或条件概率的信息，它就能直接控制某组特定数据或最终全局决策的特定类决策的相对重要性。注意决策融合方法从计算上讲非常简单，只要每个时相数据的类决策可以得到，它就可以应用来分类多时相数据。

本节提出了两种不同的基于决策融合的多时相分类。第一，联合似然度决策融合方法与数据融合的分类相比，可以提高约 5% 的总体分类精度和约 2% 的类平均精度；第二，加权多数决策融合方法表明总体分类精度与数据融合方法效果相当，即使对它提供的先验知识比联合似然度决策融合方法少得多，它也能产生与后者相当的结果，而且它比数据融合方法简单得多。实验结果表明在如何确定最优的数据可靠度，提高类平均分类精度还需要进一步深入的研究。

参考文献

Gore.Al, 1998. the digital earth: Understanding our planet in the 21st century, giwen at the California Science Center, Los Angeles, California, on January 31

Special ISSUE on data fusion, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1999. May Vol.37, No.3, pp1187

FUSION'98 —First International Conference on Multisource－Multisensor Information Fusion, July 6－9, 1998, Monte Carlo Resort & Casino, Las Vegas, Nevada, USA

1999 NASA Workshop on Data Fusion and Data Mining July 9－10, 1999, NASA－Ames, Moffet Field, Mountain View, CA, USA

FUSION'99 —The 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION FUSION, July 6 － 8, 1999, Sunnyvale Hilton Inn, 1250 Lakeside Drive, Sunnyvale, California 94086 USA, The Silicon Valley－San Francisco Bay Area;

NSSDF'99 －, DoD－IRIS National Symposium on sensor & Data Fusion, May 24－28, 1999, Johns－Hopkins University, Applied Physics Laboratory, Laurel, MD

EuroFusion'99 —International Conference on Data Fusion October 5－7, 1999, Stratford－upon－Avon, Warwickshire, UK

FUSION 2000 3rd international conference on information fusion, July 10th－13th, Paris, France FUSION 2000 4th international conference on information fusion, July 10th－13th, August 7－10, Montreal, Canada.2001

康耀红 .1997. 数据融合理论与应用 . 西安：西安电子科技大学出版社

刘同明，夏祖勋等 .1998. 数据融合技术及其应用 . 北京：国防工业大学出版社

马建文主编 .1999. 数据挖掘，知识发现和数字地球专刊 . 图像图形学报，vol.4 (A)

Lucien Wald, May 1999. Some terms of reference in data fusion, IEEEtransactions on geoscience and remote sensing, Vol.37, No.3, pp1190～1193

Wald L.1998.A European proposal for terms of reference in data fusion. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII, Part 7, 651～654

Zhukov. B., D. Oertel. May, 1999.Unmixing-Based multisensor multiresolution image fusion. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, Vol.37, no.3, pp1221～1225

he processing of multisensor data and image enhancement, in Proc. Int.Symp, Remote Sensing of Arid and Semi－Arid lands, Cairo, Egypt, pp599～616

Chavez. P.S., S.C.Sides, Mar.1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data Landsat and Spot Pan, Photogramm.Eng.Remote Sensing, Vol.57, no. 3, pp295～303

Ranchin.T., L.Wald, 1993.Efficient data fusion using wavelet transformation: the case of SPOT satellite image, Proc. SPIE, Vol.2034, pp171～178

Li .H., B.S.Ma, Junath May, 1995. Multisensor image fusion using the wavelet transformation, Opt. Models image processing, Vol.12, no.9, pp235～245

Yocky.D.A.Setp.1995.Image Merging and fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet Transformation, J.Opt.Soc.Amer., Vol.12, No. 9, pp1834～1841

Iverson.A.E., J.K.Lersck. 1994.Adaptive image sharpening using multiresolution representations, Proc.SPIE.Vol.2231, pp72～83

Alparone.L., V, Cappelini. 1997.A Pyramid－based approach to multisensor image data fusion with preservation of spectral signatures, in Future tends in Remote sensing, Proc. 17th EARSel Symposium, Lyngby, Denmark, June 17～19

Zhukov.B., D.Oertel.1996.Fusion of airborn hyperspectral and multispectral images. Proc.SPIE, Apr.Vol.2758, pp.148～159

Jeon.B., D.A.Landgrebe, May, 1999. Decision fusion approach for multitemporal classification, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, Vol.37, no.3, pp.1227～1233

Lee.T., J.A.Richhardew, May 1987.Prohabilistic and evidential sensing, IEEE Tran. Syst, Vol.GE－25, pp, 283～293

Tubbs.J.D., W.O.Alltop, Aug.1995. Measures of confidence associated with combining lclassification Result, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.25, pp, 1257～1265

Tenny.R.R., N.R.Sandell, July 1986.Detection with distribution sensor, Aerosp., Electron. syst., Vol . AES～17, pp, 501～510

Chair. Z., P.K.Varshney, 1986.Optimum data fusion in multiple sensor detection system, IEEE Tran., Aerosp., Electron.syst., Vol.AES～22, PP..98～101

Reibman.A.R., L.W.Nolte, 1987.Optimal detection and performance of distributed sensor systems, IEEE Tran., Aerosp., Electron.syst., Vol.AES～23, PP..24～30

Tang.Z., K.R.Pattipati, D.L.Kleinman, Dec.1998.A distributed M－ary hypoesis testing problem with correlated observations, in Proc.20th IEEE Conf.Decision Conral, Tampa, FL, pp, 962～968