桂林工学院

硕士学位论文

高分辨率卫星遥感在高龙金矿及其外围找矿中的应用研究

姓名：余勇

申请学位级别：硕士

专业：构造地质学

指导教师：钱建平

20050601

摘 要

广西高龙金矿是桂西北典型的微细浸染型金矿，多年的开采已使矿山的探明资源接近枯竭，及时有效地寻找新的工业矿体是矿山发展和生存迫在眉睫的需要。

卫星遥感分辨率的大幅度提高使遥感地质信息在保持宏观性的同时更具良好的微观性，从而使遥感地质的资源勘查功能得到增强；同时，随着易找矿产资源的不断开采和消耗，未知矿产更具隐蔽性。因此，以遥感地质信息为基础，以多源地质信息综合为原则，探索适用于高龙金矿及其外围的金矿产找矿方法具有现实意义和理论价值。

本文的关键技术和主要成果包括：

1. 采用 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感数据，设计了多重主成分分析—比值假彩色合成图像处理方案，有效提取了高龙金矿及其外围高分辨率卫星遥感影像植被、构造和岩性信息，并间接提取了研究区蚀变信息。

2. 应用分形几何学的原理和方法，对研究区的遥感线性构造进行了定量研究，结果显示，在 1.250～2.000km 标度范围内用盒计维数法求得全区的分维值 D=1.660，回归直线的相关系数 R=0.999。已知的鸡公岩、金龙山和龙爱三个矿段均落在分维高值区。

3、研究区构造系统复杂，就整个研究区而言，NWW 向线性构造的分维值（D=1.316）略大于近 SN 向线性构造的分维值（D=1.217），说明研究区内 NWW 向和近 SN 向线性构造均较发育，但 NWW 向线性构造较近 SN 向线性构造更为发育。

4、研究表明，遥感线性构造分维值与矿区成矿呈正相关关系，且在遥感线性构造子区分维的 5 次和 6 次趋势图上，分维的高值带与该矿区南部 F_{12} 区域性断裂相吻合。因此，可以尝试将高分辨率遥感线性构造作为深部构造解译的重要参数。

5、根据矿区的地质地貌特征、地球化学异常和矿段分布规律可知，高龙穹隆南侧的 F_{12} 断裂为矿区重要的导矿构造。

6、首次以高分辨率卫星遥感地质信息为基础对高龙金矿区的金矿成矿规律

进行了综合分析，圈定了两个成矿预测区，并利用地球化学分析方法进行查证，取得了较好的成矿预测效果。

7、提出了基于 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感的高龙金矿区图像处理模型和综合成矿预测模型。

关键词 QuickBird-2，遥感图像处理，线性构造，分维，成矿预测模型，高龙金矿

Abstract

Gaolong gold deposit is a typical Micrograined impregnation-type gold deposits in Northwestern Guangxi. The source of this deposit is drying up in the past many years of mining. So to discover new orebody is essential for the mine to survive.

Great improvement of remote sensing (RS) resolution makes RS geology information has better macrocosmic characteristics while it has good macroscopic characteristics and makes resource exploring functionality of RS geology enhanced. With the years of mining, the unexposed ore deposit becomes more concealment. So it has economical meaning and academic value to explore new sources in Gaolong gold deposit and its peripheral areas on the base of RS information and with the principle of comprehensive geology information .

The key technology and main results are listed as follow:

1. By use of the data of QuickBird-2 —the high resolution remote sensing (HRRS), a project named multiple principal component analysis(PCA)—Band ratio and false color composite of RS image processing is proposed. The vegetation, geologic formation and lithology information of studying areas have been extracted by using this project. And the rock alteration information has also been extracted in indirect mathod.

2. Based on the theory and methodology of fractal geometry, the RS lineations in studying areas have been quantitatively studied. The results indicate that the fractal dimension(FD) for the RS lineations on the 1.250~2.000km range of scale is 1.660, and the correlation coefficient of the regression line (R) is 0.999, three known ore blockes of Jigongyan, Jinlongshan and Longai are all in the area of high FD.

3. The system of geologic formation in studying area is complex. The FD of the NWW lineations(D=1.316) is slightly bigger than that of the near SN ,this shows that the geologic formations of the NWW and near SN are all developed ,but the lineations of NWW are more deceloped than the near SN.

4. Our study indicates that The FD of lineations have the positive correlation

with the Ore deposit. The high FD zones match the deep fault of F_{12} in southern area on the fifth and sixth step tendency maps of the FD. So,it is considered that the FD for the HRRS lineations can be used as an important element for deep structure interpretation.

5. Based on geology and physiognomy character, geochemical anomalies and distributing regularity of ore blockes,it can be concluded that fault F_{12} in the southern of Gaolong dome structure is the important conducting structure in Gaolong gold deposit.

6. It is the first time to analyse the metallogenic regularity of Gaolong gold deposit by using HRRS. Two ore deposit prediction areas are concluded and checked by the method of geochemistry. The result is good.

7. Based on the QuickBird-2, two models named RS image processing model and ore deposit prediction model in Gaolong gold deposit are designed.

Key words: QuickBird-2, RS image processing, Lineations, FD,

Model of ore deposit prediction, Gaolong Gold Deposit

桂林工学院硕士学位论文

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得桂林工学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签　名：余雪　日　期：2005.6.9

关于论文使用授权的说明

本人完全了解桂林工学院有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密论文在解密后应遵守此规定）

签　名：余雪　导师签名：钱正子　日　期：2005.6.9

前 言

一、论文的内容及意义

高龙金矿是滇黔桂地区典型的微细浸染型金矿之一[1~5]。矿区内现有的三个主要矿段——鸡公岩、龙爱和金龙山矿段探明资源已近乎采完，为了矿山的生存和发展，寻找新的具有工业品位的金矿资源十分必要。

随着时代的发展，特别是计算机技术的飞速进步，近年来，3S技术越来越多地被引入到矿山找矿预测工作中来。在目前的科技背景和自然条件下，如何快速把握指定区域的金矿成矿规律、圈定成矿远景区，以满足金矿产资源的社会需求，遥感（RS，Remote Sensing）技术的应用是首选的技术手段，这是因为：

1. 遥感图像信息量大、对地质构造行迹显示的宏观性、信息的连续性以及对隐伏构造具有“透视”作用的特点。

2. 当前的科学技术不但使遥感图像的地质信息含量大幅度提高，而且面向遥感图像的信息提取技术也有很大发展，遥感技术的地质功能得到明显增强。

3. 随着矿产资源不断的开发利用，一方面未知矿床的赋存更具有隐蔽性，另一方面常规的勘查手段必然会面临着更艰难的自然条件，资源勘查的效率将很难适应经济社会的发展。充分利用遥感数据包含的宏观、微观地质信息，发挥遥感地质的先导功能，会明显提高找矿工作效率。

4. 以遥感地质信息(岩性信息、构造信息)的提取为重点的找矿方案，与区域的实际地质条件是相适应的，应该能发挥很好的效能。

本文结合导师所承担的广西黄金局“广西高龙金矿及其外围构造地球化学找矿研究”（项目编号：桂黄资字（2001-80））项目，在高龙金矿区及其外围首次应用QuickBird-2高分辨率卫星遥感技术，探索适用于QuickBird-2高分辨率卫星遥感数据的处理方法，力图通过对高龙金矿区高分辨率卫星遥感资料进行综合处理、解译，总结出高龙金矿及其外围构造卫星遥感影像特征，并结合地、物、化等各方面信息，确定有利的成矿预测区，通过地球化学取样查证，以检查效果，并探索建立高龙金矿及其外围QuickBird-2高分辨率卫星遥感信息处理模型和综合成矿预测模型，在此基础上指导高龙矿区及其外围找矿工作。

二、本选题有关的研究方向的历史、现状和发展情况

遥感源于航空摄影测量，历史悠久[6]。1839 年摄影像机问世，法国人达格雷(Dagurre)发表了第一张航空像片。1903 年莱特兄弟发明飞机，1914 年，机载摄影机问世。1959 年，前苏联宇宙飞船“月球 3 号”拍摄了第一批月球相片。20 世纪 60 年代初，美国海军研究局的伊·普鲁伊特(Eretyn Pruitt)第一次提出“遥感”这个术语。如今，遥感技术已发展成为多平台、多波段、多分辨率和全天候的一种对地观测技术，未来的热点是高分辨率影像的获取与自动识别。

20 世纪 80 年代以来，遥感技术已经从定性向定量化、动态化、实时化、智能化发展。用遥感技术探测地物，是以各种物体对电磁波的反射、透射、吸收和自身发射为依据的。所有地物在可见光和短波红外波段内都具有与它们组分有关的光谱吸收特征，许多地物的光谱吸收特征具有专一性，据此可以精确地鉴别地物。

当前，遥感在地质领域的应用主要在构造和岩性信息的提取两个方面，研究时通常采用 TM（Thematic Mapper）和 ETM+（Enhance Thematic Mapper）数据。在数据处理方法上也已经有一定的模式[7~10]：提取构造信息通常采用滤波法；对岩性信息特别是蚀变信息的提取多采用主成分分析和比值法。

但不同的蚀变类型处理方法略有不同。王日冬等[11]认为：蚀变矿物中一般富含羟基(OH^-)和碳酸根离子(CO_3^{2-})，它们在 TM7 波段有一个振动吸收带，所以蚀变使 TM7 的亮度下降，而大多数蚀变矿物的 TM5 亮度则明显增高，一般认为 TM5/TM7 图像可以提取蚀变信息。在植被覆盖区，这一比值同时提高了植被因子的亮度。在 TM1～TM3 中，包含了植被的叶绿素吸收特征，且绿色植物在 TM3 到 TM4 波段反射率陡然升高。因此，TM4/TM3 图像增强了植被信息，相反地 TM7/TM4 抑制了植被信息。根据各类地物在不同波段的光谱特征，通过对比试验选用各波段进行比值组合，就可突出某一信息，抑制无关信息。王晓鹏等[12]认为利用 TM3/TM1 可增强铁氧化物类蚀变，TM5/TM4 可增强亚铁氧化物类蚀变，M5/TM7 可增强碳酸盐化及绿泥石类蚀变。对于褐铁矿化类，利用 TM3/TM1、TM5/TM4、Band1345 主成分分析 PC4 向量可合成褐铁矿化增强图像，利用 TM5/TM7、TM3/TM1、Band1457 主成分分析 PC4 向量可合成碳酸盐化及绿泥石类蚀变类增强图像。赵鹏大等[13]认为因 SiO_2 可引起 Band6 的高吸收，根据这一点，直接对 ETM 的 Band6 取阀值即可得到硅化类异常图像。

然而，通过查阅文献和网上资料检索发现，对 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感影像数据的研究远没有 TM 和 ETM+遥感影像数据深入，迄今为止，除了解到

桂林工学院院吴虹在新疆和山东的找矿科研中使用过 QuickBird-2 遥感影像外，尚未发现对 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感影像进行综合地质研究的公开成果。

从前面的简述可知，当前流行的一些遥感处理方法跟波段或波谱范围有很大的关系，但 QuickBird-2 卫星遥感数据却不具备 TM、ETM+等数据具有的 Band5（1.55～1.75μm）、 Band6（10.40～12.50μm）和 Band7(2.08～2.35μm)，显然前文所讲的主成分分析和比值法在 QuickBird-2 数据图像的处理中已经很难直接使用，新的遥感图像处理方法有待发现。因此，本文选题采用选择 QuickBird-2 卫星的高分辨率遥感影像数据进行研究具有一定的现实和创新意义。

三、前人在本研究区的工作成果简述

高龙金矿是滇黔桂“金三角” 地区重要的黄金产地。该金矿自发现以来，受到了国内地质界和黄金生产部门的重视，并积累了大量宝贵的资料。

通过文献检索[1,3,14-21]发现，桂西综合地质大队四分队、广西地质二队一分队、桂林工学院隐伏预测研究所、中国地质科学院地质研究所、沈阳地质矿产研究所、郑州矿产综合研究所、中国地质大学、成都地质学院等科研单位都对该矿区进行过调查研究，但多集中在地质构造、物探、化探等方面，本区与遥感有关的工作仅见有李存有[16]在“高龙金矿地质—地球化学特征及找矿意义”一文中提到“对桂西北进行遥感解译时，发现高龙地区呈同心圆热晕型环形影像”只言片语的简单描述，未见有更多的遥感资料发表。其余文献中均未见提及遥感方面的工作。

对高龙矿区而言，利用 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感影像信息指导矿山综合找矿是一项开创性工作，并且这项技术对桂西北地区找矿研究也属先例。而为配合项目研究的深入进行，本文将从高分辨率卫星遥感的角度，为高龙矿区及其外围找矿工作展开进一步的研究。

四、本次工作情况

鉴于前人工作对本区遥感研究较弱，而矿区构造控矿作用十分明显，故本次工作结合我院科研项目“广西高龙金矿构造地球化学找矿研究”选择“高分辨率遥感在广西高龙金矿及其外围找矿中的应用研究”这一课题。试图从高分辨率卫星遥感的角度，获取矿区植被、构造和岩性信息，通过分形等方法对构造进行深入研究，探索高龙金矿区构造与成矿关系特征，进而为深入探讨本区构造控矿作

用、寻找隐伏矿体提供依据。在综合遥感、地质构造和物化探的资料基础上，提出成矿预测区，并使用构造地球化学方法进行找矿验证。

本次工作自2002年9月开始至2005年3月结束，期间共进行了三次调研，其余时间为室内工作，资料收集、整理以及数据处理。

本次工作量见下表（表0.1）：

表0.1 野外实习工作量表

项 目	数量	单位	项 目	数量	单位
地质路线	18	条	野外照片	46	张
纯野外工作日	35	日	样品采集	352	个
观 察 点	58	个	综合解译图	3	幅
标本采集	25	块	文献摘录	30	篇
外文翻译	5	篇	图像处理	>600	机时

第一章 地质背景概述

第一节 区域地质背景

一、区域地理环境

高龙金矿位于广西西北部高龙乡，隶属于广西百色市田林县管辖，距西林——百色公路20km，距田林县城109km，有公路相通，交通比较方便（图1.1）。研究区地理经纬度坐标为东经105° 35′ 38″ ～105° 43′ 17″，北纬24° 9′ 48″ ～24° 14′ 32″，面积约63km^2。其可见光景观全貌见高龙金矿区高分辨率卫星遥感真彩色合成图（图版1.1）。

田林县[14]位于广西西北部，属云贵高原向东南延伸部分，南与云南省接壤，北与贵州省毗邻，西连西林、隆林两县，东离百色市74km，距南宁市340km，公路交通方便。



图1.1 广西高龙金矿区交通位置图

田林县地处亚热带，北回归线以北，属亚热季风气候，热量较丰富，夏半年温热多雨，干湿季节分明，高寒山区冬天有霜雪。历年平均气温17° C～21° C，其中4～10月均在21～28° C，11～3月为11～19° C，最低气温－3～1° C，最高气温41.3° C。历年平均降雨量为1050-1600mm，但由于季风影响和地势不同，降雨量在时间和空间上分布不均匀，时间雨量多集中在夏半年（4～9月份），占全年总降雨量85%，其中又以6、7、8月份最多。冬半年（11～3月份）雨量少。在空间上地势较高者为多雨区（高龙矿区在内），年降雨量1400～1600mm，由于田林县地域复杂，气候的季节性和地区性都有相当大的差异。

第一章 地质背景概述

第一节 区域地质背景

一、区域地理环境

高龙金矿位于广西西北部高龙乡，隶属于广西百色市田林县管辖，距西林—百色公路 20km，距田林县城 109km，有公路相通，交通比较方便（图 1.1）。研究区地理经纬度坐标为东经 105° 35′ 38″ ～105° 43′ 17″，北纬 24° 9′ 48″～24° 14′ 32″，面积约 63km^2。其可见光景观全貌见高龙金矿区高分辨率卫星遥感真彩色合成图（图版 1.1）。

田林县[14]位于广西西北部，属云贵高原向东南延伸部分，南与云南省接壤，北与贵州省毗邻，西连西林、隆林两县，东离百色市 74km，距南宁市 340km，公路交通方便。



图 1.1 广西高龙金矿区交通位置图

田林县地处亚热带，北回归线以北，属亚热季风气候，热量较丰富，夏半年温热多雨，干湿季节分明，高寒山区冬天有霜雪。历年平均气温 17° C～21° C，其中 4～10 月均在 21～28° C，11～3 月为 11～19° C，最低气温－3～1° C，最高气温 41.3° C。历年平均降雨量为 1050-1600mm，但由于季风影响和地势不同，降雨量在时间和空间上分布不均匀，时间雨量多集中在夏半年（4～9 月份），占全年总降雨量 85%，其中又以 6、7、8 月份最多。冬半年（11～3 月份）雨量少。在空间上地势较高者为多雨区（高龙矿区在内），年降雨量 1400～1600mm，由于田林县地域复杂，气候的季节性和地区性都有相当大的差异。

地区性都有相当大的差异。

矿区地处云贵高原东南侧，海拔标高 730~1340m，相对高差 200~500m。中山地形，谷深坡陡，植被中等发育。亚热带季风气候，年均气温 20℃左右，夏凉冬冷有霜雪。常年降雨量 1100mm左右，5~8.月为雨季。雨水迅速流入驮娘江与西洋江，春季雨水稀少，溪谷断流，人畜饮水亦感困难。而高龙穹隆核部古生界碳酸盐岩分布区岩溶比较发育，部分大气降水潜入溶洞、裂隙之中，枯水期可提供部分饮水之需，也可为矿山的开采提供水源。

矿区附近有林场，松杉杂木成林。已架设了 35 万伏的输电线路。

二、区域地质

高龙矿区的区域构造单元属华南准地台，右江再生地槽桂西凹陷的西林——百色断褶带，地质情况比较复杂[1,14,22]。根据区域地质资料并结合本人的地质调研情况，现将区域地质概况简介如下：

1. 区域地层

区域上出露地层（表 1.1，图 1.2）主要有寒武系（∈）、泥盆系（D）、石炭系(C)、中下三叠统(T_{2-3})及第三系(R)，其中中上寒武统和上古生界仅出露于较大背斜隆起的核部附近，两翼依次渐新。第三系仅见于新生代的断陷盆地之中。在出露面积上以中下三叠统分布最广。与高龙金矿有关是是泥盆系、石炭系、中下三叠统。

2. 区域构造

本区在大地构造单元上位于扬子地台与华南加里东褶皱带交汇处的右江地槽带。早古生代，本区为地槽活动带，广西运动后，在晚古生代是一个相对稳定的发展时期或称地台发展阶段，三叠纪开始又趋于活动并在中三叠世封闭，形成右江褶皱带。右江褶皱带在大地构造上属于华南加里东褶皱系的一部分，并位于其南西端，其北侧以弥勒——师宗断裂与扬子地台为界，西南侧隔哀牢山断裂带与兰坪—思茅印支地台为邻，南东侧为钦州地槽，向东则过渡为同属华南褶皱系的桂中桂东坳陷。右江褶皱带处在几个大的构造单元的交接部位，地质构造复杂，演化历史独特。

表 1.1 区域地层简表

界	系	统	主要岩性特征	厚度(m)	出露层位
新生界	第四系		残坡积物、洪积物未固结成岩	0.1～几十	
	第三系		内陆湖盆沉积砂泥岩、泥岩	几十至数千	
中生界	三叠系	中统	陆源碎屑砂泥岩	267～9190	河口组百逢组等
		下统	海相泥质灰岩	37～2042	逻楼组马脚岭组等
晚古生界	二叠系	上统	灰岩夹炭质页岩及煤层局部硅质岩和碎屑岩	46～368	大隆组龙潭组合山组
		下统	灰岩夹白云质灰岩、白云岩	数十至数百	茅口阶栖霞阶
	石炭系	上统	主要为灰岩，次为白云质灰岩	几十至百	马平群
		中统	白云岩及灰岩	24～1190	黄龙组大埔组
		下统	主要为白云岩次为岩及硅质岩	100～400	大塘组岩关组
	泥盆系	上统	灰岩夹白云岩，白云质灰岩硅质岩	数百至数千	融县组榴江组
		中统	灰岩、生物碎屑灰岩夹白云岩、白云质灰岩	300	东岗岭组北流组罗富组等
		下统	下部主要为泥岩、泥质粉砂岩上部为浅灰—灰黑色中厚层白云岩夹白云质灰岩	300	四排组郁江组益兰组等
早古生界	寒武系	上统	浅灰色—灰黑色中层白云岩夹薄层状泥质条带灰岩	1171	娄山关群三都组
		中统	灰色块状白云岩，泥质条带灰岩及硅质岩	6800	娄山关群

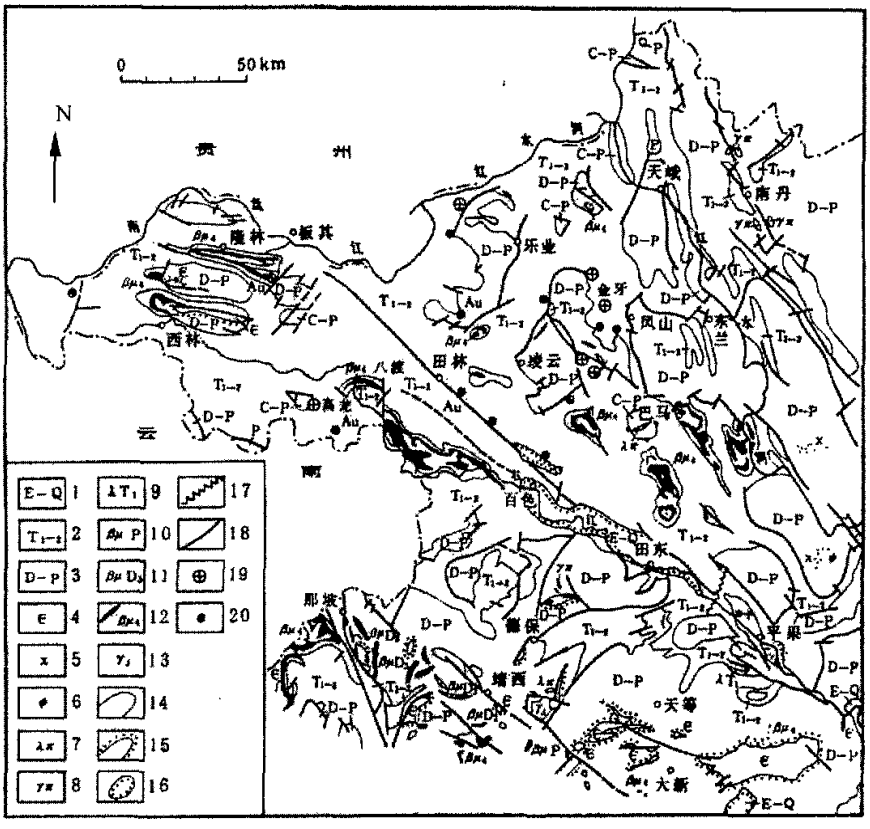


图 1.2 桂西北地区地质略图[77]

1-第三系至第四系；2-下中三叠统；3-泥盆系至二叠系；4-寒武系；5-晚泥盆世基性喷发岩；6-晚二叠世基性喷发岩；7-下三叠世酸性喷发岩；8-海西期基性岩；9-海西期花岗岩；10-燕山期花岗岩；11-燕山期石英斑岩；12-燕山期煌斑岩；13-燕山期玻基橄辉岩；14-地质界线；15-不整合界线；16-第三系盆地界线；17-三叠系相变界线；18-断层；19-岩脉、岩墙、岩株。填黑色为基性岩石，空心为酸性岩；20-火山和喷发岩层；21-基性岩墙，层状基性岩；22-金矿床；23-金矿点和矿化点

本区构造主要形成于印支-燕山期。印支早期以张性裂陷为主，形成了北西西向以地堑、地垒为特征的构造格局。印支中晚期又发生了强烈的褶皱，其活动过程中形成的北西向的右江断裂和北西西向的田林——巴马隐伏深断裂影响着本区地质构造的发生发展。区内褶皱形态复杂，断裂发育，主要构造线为北西向，次为北东向和近东西向（图 1.2）。而在燕山期，本区构造运动以断裂为主，形成

一系列以北西向为主要方向的大断裂，表现为右江断裂、田林——巴马隐伏深断裂的复活等。

对于右江地槽的演化历史，燕守勋等[15]也认为由两个阶段组成，以东吴运动为界，海西期是西侧哀牢山古特提斯被动边缘裂谷盆地，印支期是弧后盆地，三叠纪末盆地褶皱造山，终止演化。下面从褶皱和断裂两个方面讨论本区构造特点。

（1）褶皱

本区褶皱形态复杂，以线状分布为主，构成右江复式向斜，其轴部受右江大断裂破坏。在中三叠统碎屑岩区内褶皱一般具尖棱、拱状等特点，地层倾角约 40°～60°，断裂附近达 70°～80°，局部直立或倒转，由地表往深部逐渐开阔，在古生界碳酸盐岩台地则两翼开阔，有箱状、屉状、拱状褶皱及穹隆。总体上，靠近断裂带的褶皱较紧密，呈线状排列，远离断裂带的则逐渐过渡为宽缓的短轴褶皱和穹隆构造，如隆林隆起、凌云隆起，高龙穹隆等。

（2）断裂

本区断裂可分为北西—北西西、北东东、北北西向三组，以前一组为主且与右江断裂、田林——巴马隐伏深断裂基本一致，延伸较远，控制了区域上地层的出露和岩体的分布。正、逆断层均有发育，倾角约 45°～60°，形成始于晚古生代准地台解体与再生地槽形成时，与右江再生地槽的发生、发育有密切的关系。后两者规模不如前者，为后期构造运动的产物，一般切割前者。

3. 区域岩浆岩

区域岩浆岩分布零星，出露面积不大，在那坡、隆林、西林一带分别见有海底中基性火山岩夹于泥盆——三叠系中，岩性为玄武岩、粗面斑岩、安山岩等，为海西—印支期海底火山喷溢作用形成。该期频繁的火山喷溢作用带来的上地幔、下地壳的含金较高的物质，因此与成矿关系较为密切。

在那坡、隆林、百色、田林——巴马一带有大量玄武岩呈层状、似层状产于石炭、二叠系层间，局部侵入下三叠统，与地层同步褶皱。在凌云——巴马一带有燕山期花岗斑岩、石英斑岩侵入于中三叠统碎屑岩中，表现了岩浆活动的多期性的特点。另外，岩体的分布方向与区域总体构造线走向一致，体现了岩浆活动

与区域地质构造演化关系密切。

三、区域物化探信息

本区处在大兴安岭——太行山——武陵山南延而来的重力梯度带上，高龙金矿分布在-110～-120×10^{-5}m/s^2布格重力异常区内。据1989年高精度航磁资料，此类型金矿分布在平静的磁场区内，该区内的重力低异常可能为隐伏花岗岩体引起的。

据第二代1：20万化探资料，桂西24° 11′以北地区发现金化探异常100多处，计达300平方公里。异常群均呈带状分布，异常值在6～20×10^{-9}范围内，相当数量地区有金砷元素异常重叠分布，单个异常长轴一般沿一构造展布。在沿背斜周边碎屑岩分布区的金砷元素异常重合区是金矿床形成的有利部位。

四、区域矿化及矿产

本区矿产较为丰富。1/20万区域地质调查发现本区为Sb、Cu、Pb、Zn高背景区。局部异常展布方向与主要构造线方向一致，第二代1/20万区域化探进一步证实了本区Au、As、Sb、Hg异常点多面广，其中异常上百处，异常面积达300Km^2，最近几年在本区发现了高龙、金牙等几个近大型规模的金矿床。

除Au外，其它矿产也较为丰富，如锡、铂、铍、铜、铅、锌、汞、煤、钛铁矿、锰、芒硝、石膏、粘土、化石、硅石、黄铁矿、水晶、铀等二十余种矿产。已探明的金、锑、水晶等具有大中型规模。

第二节 矿区地质背景

高龙金矿区位于西林——百色断褶带西段西侧的高龙穹隆核部附近，面积49km^2。矿区未见岩浆岩出露，褶皱、断裂发育，构造比较复杂，沿断裂带中低温热液蚀变比较普遍。根据广西地质二队《田林县高龙煤矿区普查勘探地质报告》等前人资料以及本人在矿区调查取得的认识，现将高龙金矿矿区地质特征介绍如下：

一、矿区地层

矿区出露有中上石炭统（C_{2+3}），下二叠统（P_1），上二叠统合山组（P_2h）和长

兴组（P_2c），下三叠统罗楼组（T_1l1），中三叠统百逢组（T_2b）、河口组（T_2h），总厚度>2532m。其中石炭—二叠系产出于穹隆核部（隆起区），三叠系产出于穹隆翼部（坳陷区）。下三叠统罗楼组（T_1l1）砂泥岩为矿区主要的金矿赋存层位。各地层详细特征见矿区地层一览表（表 1.2）。

二、矿区构造

由于受右江大断裂和田林——巴马隐伏深断裂的影响，矿区内褶皱、断裂均较发育，以断裂为主（图 2.1）。

矿区内褶皱以高龙穹隆最为典型。断裂在穹隆周边和核部均较发育，大致可分两组方向：北西西向和近南北向，其中北西西向断裂与区域深大断裂走向大致平行，为矿区主要的导矿构造，而构成高龙窟窿的环状断裂及与其相交的近南北向的次级断裂是矿区内次级的导矿构造和主要的容矿构造。由于本文已在另一章专门讨论矿区构造问题，在此不再赘述。

三、矿床地质特征

矿区内矿床大致可分为微细浸染型和残坡积型两类，以前者规模较大，后者规模较小，多呈漏斗状，主要分布在原生矿附近的灰岩溶沟、溶槽中。下面主要对微细浸染型金矿加以介绍。

1. 矿体特征

微细浸染型矿床主要分布于鸡公岩及其南北矿段、金龙山矿段和龙爱矿段以及部分地段的构造角砾岩中，其下部多为构造石英岩或灰岩，上覆岩层多为砂泥岩和页岩。具体矿段特点[21]如下：

鸡公岩矿段（包括鸡公岩南北矿段）：

该矿段是高龙金矿区矿体产出规模最大的矿段，其位于高龙穹隆东部 F_3 断裂破碎带中，该破碎带宽 60～160m，由构造石英岩、硅化构造角砾岩和硅化砂泥岩组成。矿段由①～⑩号十个矿体组成，各矿体均产于穹隆核部周边环状断裂 F_3 硅化构造破碎带及其旁侧的次级褶皱、断裂破碎带中。矿体的产状、形态受破碎带（层间劈理化带和断层）的产状和形态所制约，形态从较规则的似层状～不规则透镜状、串珠状，沿走向和倾向向北和北东倾斜，倾角 50°～60° 之间，在剖

面上，各矿体略呈反“S”型，大体上呈雁列排布。其中⑥号矿体规模最大，品位高。其他矿体一般长 50～850m，斜深 80～>200m，厚度 3.33～17.60m，分布标高在 1050～1265m 间。

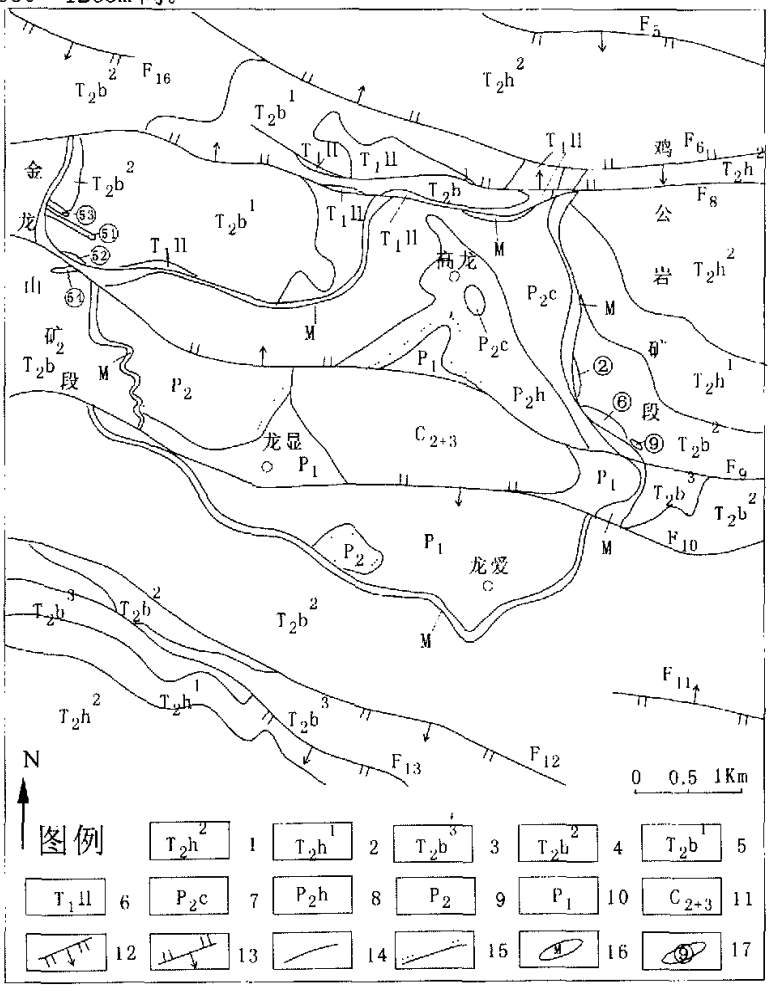


图 2.1 高龙金矿地质图（据国家辉[86]修编）

1—三叠系中统河口组二段；2—三叠系中统河口组一段；3—三叠系中统百逢组三段；4—三叠系中统百逢组二段；5—三叠系中统百逢组一段；6—三叠系下统罗楼群；7—二叠系上统长兴组；8—二叠系上统河山组；9—二叠系上统；10—二叠系下统；11—石炭系中、上统；12—正断层及编号；13—逆断层及编号；14—地层界线；15—平行不整合地层界线；16—硅化带；17—矿体及编号

表 1.2 矿区地层简表

界	系	统	组	主要岩性特征	厚度(m)	出露部位
新生界	第四系			残坡积物、洪积物未固结成岩	0.1～几十	
中生界	三叠系	中统	河口组	泥岩、粉砂岩局部见滑塌岩细砂岩夹灰岩	>313	穹隆翼部
			百逢组	粉砂岩、泥岩	>1084	穹隆翼部(金主要产出层位)
		下统	罗楼组	泥质条带灰岩、生物灰岩	>58	穹隆核部附近
晚古生界	二叠系	上统	合山组	砾岩夹生物碎屑灰岩、炭质泥岩及煤层	>179	穹隆核部附近
			长兴组	微晶生物灰岩，夹煤层。上部见厚层白云岩	>150	穹隆核部附近
		下统		灰岩，上部含硅质和白云质团块	>329	穹隆核部附近
	石炭系	中上统		生物灰岩夹少量白云质灰岩	>240	穹隆核部

矿体的厚度品位及其变化系数有一定的正相关趋势。各矿体厚度在 3.33～17.60m 之间变化，其变化系数在 46～100%，各矿体品位在 1.79～4.04g/t 间变化，其变化系数在 54～100%之间。矿体厚度从地表向深部有变薄趋势，品位则依标高不同而贫富相间出现。

金龙山矿段：该矿段规模较大，各矿体走向以北西向为主，倾向与 F_1 大体一致，倾角较大，与 F_1 为穿层接触关系。各矿体地表形态不规则，以蜂窝状最常见，地貌上产出位置较高，但总体上具雁列特征，雁列角大约 21.5°，雁列间距 14m，

品位达 2g/t 左右。

龙爱矿段：龙爱矿段部分为微细浸染型矿体，部分为残坡积型。残坡积型矿床产状变化与其下伏灰岩和构造角砾岩一致，平均品位 1.0g/t。其它地质特征同上类似。

2. 矿石结构构造

（1）矿石结构

根据肉眼和镜下观察，矿区矿石的结构主要有细粒碎屑结构、挤压破碎结构、粒状结晶结构、包含结构和交代结构。

细粒碎屑结构：赋矿岩石由泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩等组成，具有泥质—粉砂质—细砂质结构，矿物成分主要石英、水云母、少量碳质。

挤压破碎结构：由细碎屑岩形成的角砾被石英细脉或网脉所胶结。胶结角砾的石英脉可再被后期的石英切穿。

粒状结晶结构：黄铁矿以自形结构、半自形结构或他形结构赋存于矿石中而形成的结构。

包含结构：晚期形成的黄铁矿包裹着早期形成的黄铁矿，被包裹的黄铁矿有单晶、碎块，也有多个连生晶体集合体。

（2）矿石构造

矿石构造主要有角砾状构造、浸染状构造、透镜状构造、脉状构造、梳状构造、层状构造和孔隙～蜂窝状构造等。

角砾状构造：赋矿岩石由角砾岩组成。其中角砾可分为石英或砂岩，多为石英细脉或网脉所胶结。

浸染状构造：赋矿岩石中的黄铁矿等矿物以浸染状赋存而形成的构造。

脉状构造：细脉石英穿插于矿石形成的构造。

梳状构造：矿石中的裂隙为后期形成的石英所充填。在薄片中石英结晶颗粒在裂隙中呈梳状排列。

层状构造：赋矿岩石中的片状矿物及碳质等暗色矿物定向排列而形成的构造。

孔隙状～蜂窝状构造：氧化矿石由于氧化作用而使易氧化部分流失，残余下来较稳定的部分形成的孔隙状——蜂窝状构造。

3. *矿石的物质组成及矿石类型*

（1）*矿石物质组成*

矿区矿石以氧化矿石为主，含黄铁矿、褐铁矿等金属矿物，其中褐铁矿占矿石的 7.9%，黄铁矿仅占 0.063%；脉石矿物有石英、粘土矿物等，含量分别为 68%和 23.5%，少量的原生矿物含金属矿物，含量分别为黄铁矿 1.8%，褐铁矿 2.4%，并有少量的毒砂、辉锑矿，脉石矿物以粘土矿物和石英为主，含量分别为 60%和 34%。

（2）*矿石类型*

矿石类型可划分为如下四类：

① 含金构造石英岩矿石，矿石几乎全由热液石英组成，花岗变晶结构，块状构造。

② 含金构造角砾岩矿石，以具有角砾状结构和被热液石英胶结穿插为特征，一般风化较深，褐铁矿常以不规则状充填于矿石裂隙、孔隙之中。

③ 含金硅化砂泥岩矿石：一般出现于硅化构造角砾岩矿石上部，与三叠系砂泥岩石渐变过度关系，有石英脉贯穿于矿石之中，是矿区主要矿石类型之一。

④ 含金砂泥岩矿石：主要为原生矿石，有黄铁矿、毒砂分布于矿石中，仅局部可见。

第二章 遥感技术及其在矿产勘查中的应用现状

第一节 遥感的基本原理

一、物理基础

通过遥感技术获取的常用数据是遥感图像。遥感图像是从中提取遥感信息的最根本的数据源。但遥感数据的获取和信息的提取过程离不开对遥感成像物理基础的正确理解。

遥感探测中，被动遥感的辐射源主要来自与人类最密切相关的两个星球——太阳和地球，其中地球是遥感技术探测的主要对象。

从目前的认识水平看，地球存在两种基本的能量发射现象：电磁波反射和热辐射。这两种能量是遥感技术探测的主要方面。

地球的电磁波反射主要取决于太阳的照射。照射到地表的太阳光分成两部分：被反射、被吸收。这种反射、吸收的特征取决于地物的特性，这是利用遥感技术识别地物的根本依据。其中的反射部分可以根据地物反射波谱测量理论(双向反射比因子、双向反射分布函数)进行测量。

地球的辐射特征可以用“黑体辐射规律”以及“基尔霍夫定律”解释[23]：

$$M(\lambda,T)=\varepsilon(\lambda,T)\cdot M_0(\lambda,T) \qquad (2.1)$$

在公式（2.1）中，M 为黑体辐射出射度，M_0为实际物体辐射出射度，T 为地表温度，λ 为波长，ε 为物体的比辐射率或发射率。

二、地物的反射波谱特征

地物的反射波谱是指地物反射率随波长变化的规律，不同的地物有不同的特色、规律，就形成了所谓的“地物的反射波谱特征”，即，地物具有反射的专属性。地物的反射波谱特征通常用波谱曲线或折线的二维图形表示。例如图 2.1[24]中，高岭石和植被具有不同的光谱曲线(矢量)特征。

图 2.1 曲线的光滑程度，与测试的波段数目有关。测试的波段数目越多，波谱曲线越连续，否则形成折线。

三、遥感技术的分类

从不同的角度，可以将多种遥感技术进行归类。

按照遥感平台划分，有地面遥感、航空遥感、航天遥感和航宇遥感[12]。与本文有关的是航天遥感。

按照传感器的探测波段划分，种类及其特征如下：

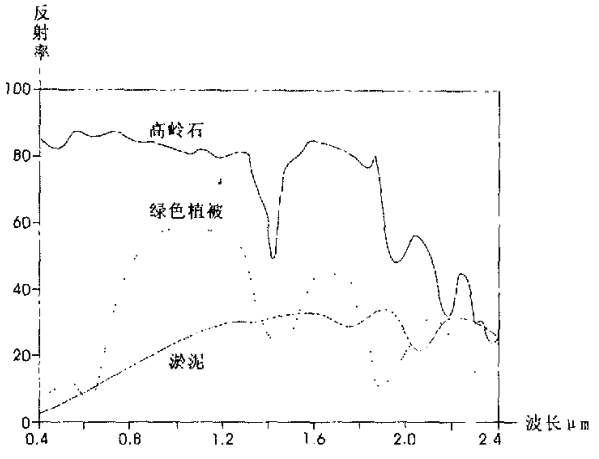


图 2.1 地物的反射波谱特征对比

紫外遥感，探测波段在 0.05μm～0.38μm 之间。

可见光遥感，探测波段在 0.38μm～0.76μm 之间。

红外遥感，探测波段在 0.76μm～1000μm 之间。

微波遥感，探测波段在 1mm～10m 之间。

与本文有关的是可见光遥感和红外遥感。

按照工作方式划分，有主动遥感和被动遥感。主动遥感是由探测器主动发射一定电磁波能量并接受目标的后向散射信号；被动遥感是指，传感器仅被动接受目标物的自身发射和对自然辐射源的反射能量。主动遥感主要指微波遥感，与本文有关的是被动遥感。

当然，还可以从遥感技术的应用领域划分，主要有石油遥感、环境遥感、农业遥感、林业遥感、军事遥感、地质遥感、气象遥感和城谱遥感等。城然谱 城见谱 城植

尽管遥感的种类较多，但遥感数据具有共同的特点：

1. 大面积的同步观测　在进行资源和环境调查时，遥感观测可以提供最佳的信息获取方式，不受地形阻隔的限制，在同一尺度下同时获取大范围的地面数据，信息具有宏观特征。

2. 实效性　是指对于指定的地表区域，遥感数据可以以一定的周期不断重复的获取，从而实现了对地表变化信息的跟踪。

四、遥感图像的分辨率

遥感数据主要以图像的形式进行收集、管理和分析。所以对于光学遥感来说，遥感数据一般被称为遥感影像，基本成为遥感数据的代名词。本文在后续的内容中主要把遥感图像作为研究对象。

遥感图像，尤其是多波段遥感图像，具有丰富的地学信息。遥感图像是遥感技术的首要获取目标，遥感图像的分辨率直接影响图像的信息含量。一般地，遥感图像的信息准确性表现在四个方面[23,25]：

1. 遥感图像的空间分辨率　是指图像中的每个像素所代表的实际的地面范围。例如，MSS(Multispectral Scanner)图像中的每个像元代表地面 $79\times79m^2$ 的面积；TM(ETM)图像中（Band1、2、3、4、5、7 波段）的每个像元代表地面 $30\times30m^2$ 的面积；Ikonos 全波段图像中的每个像元代表地面 $1\times1m^2$ 的面积，QuickBrid-2（Band1、2、3、4 波段）的每个像元代表地面 $2.44\times2.44m^2$ 的面积，其全波段图像中的每个像元代表地面 $0.61\times0.61m^2$ 的面积等等。图像的空间分辨率越高，对地物的几何特征描述的越详细，其中的信息量就越多。表 2.1、2.2、2.3 分别为常见的几种遥感图像的不同波段的空间分辨率说明。图 2.2 为不同的空间分辨率图像描述高龙金矿区的效果比较。

2. 遥感图像的波段分辨率　是指传感器在接受目标辐射时，在波谱范围中能分辨的最小波段宽度（间隔）。这是衡量传感器所记录数据精度的又一个重要特征。成像的波谱宽度越窄，图像的信息量越大，地物越容易被分辨。

表 2.1 Landsat ETM 主要技术参数（ERDAS Field Guide,1999）

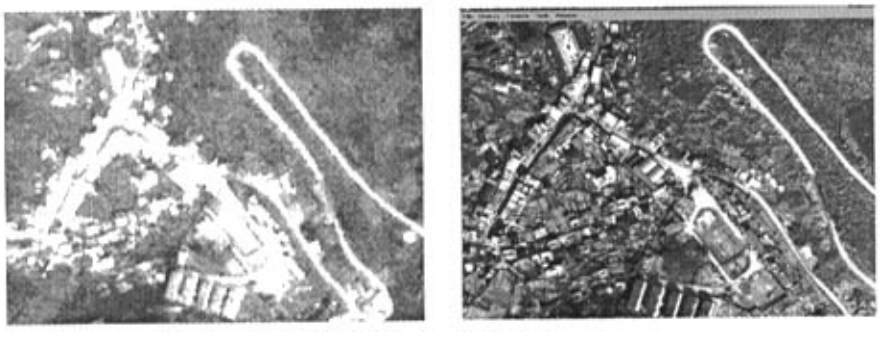
波段序号	波长范围（um）	波段名称	地面分辨率（m）
1	0.45～0.515	蓝色	30
2	0.525～0.605	绿色	30
3	0.63～0.69	红色	30
4	0.75～0.90	近红外	30
5	1.55～1.75	短波红外	30
6	10.4～12.5	热红外	60
7	2.09～2.35	短波红外	30
PAN	0.52～0.9	全色波段	15

表 2.2 IKNONS 主要技术参数（ERDAS Field Guide,1999）

波段序号	波长范围（um）	波段名称	地面分辨率（m）
1	0.45～0.52	蓝色	4
2	0.52～0.60	绿色	4
3	0.63～0.69	红色	4
4	0.76～0.90	近红外	4
PAN	0.45～0.90	全色波段	1

表 2.3 QuickBird-2 主要技术参数（数字地球，2003）

波段序号	波长范围（um）	波段名称	地面分辨率（m）
1	0.45～0.52	蓝色	2.44
2	0.52～0.60	绿色	2.44
3	0.63～0.69	红色	2.44
4	0.76～090	近红外	2.44
PAN	0.45～0.90	全色波段	0.61



A　　B

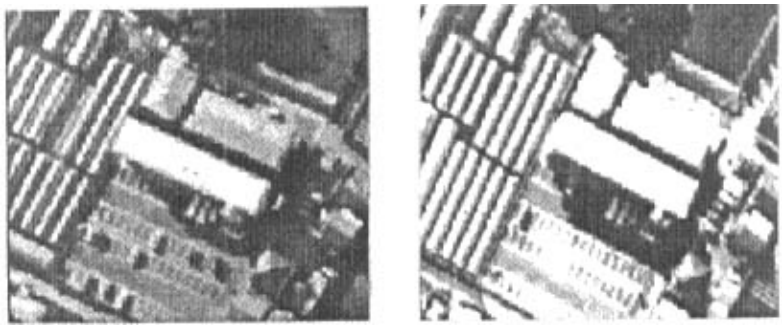
图 2.2 高龙子区不同空间分辨率图像的比较

A 空间分辨率为 2.44m 的快鸟 Band1 图像　　B 空间分辨率 0.61m 快鸟全色波段图像

从图 2.1 看，在 0.4um～2.5um 的电磁波谱范围内，成像的波段越多，被划

分的波谱宽度越窄，特征光曲线越连续。目前波谱分辨率最高的是成像光谱仪形成的高光谱图像，其波谱分辨率已达到纳米级，而一般的多光谱图像的波谱分辨率处于微米级（参见表 2.1、2.2、2.3）。

3. 辐射分辨率　是指传感器接受信号时能分辨的最小辐射度差。它决定了在一幅灰度图像中灰度的取值范围。范围越大，说明传感器对能量的辐射越敏感，对地物的辐射（反射）差别越容易辨认。例如，TM 的辐射分辨率可以用 8bit 充分表达（256 种灰度值），IKNONS 必须用 11bit 才能充分表达，QuickBird-2 也必须用 11bit 才能充分表达。图 2.3 为不同辐射分辨率图像反映同一个景观的效果对比。



A　　B

图 2.3 不同辐射分辨率图像的建筑物景观效果比较

A-辐射分辨率为 11bit 的图像　　B-辐射分辨率为 8bit 的图像

从图 2.3 可以看出，11bit 图像的色调更加丰富。

4. 时间分辨率　是指传感器对同一地点重复成像的周期长短。例如，SPOT 的重访周期为 26 天，Landsat-4,5 为 16 天，QuickBird-2 为 1～6 天（取决于纬度高低），IKNONS 在高纬度区域为 2 天左右。

第二节　遥感技术在找矿工作中的应用

一、遥感找矿简史

遥感信息获取是遥感应用的基础，遥感地质找矿工作随着信息获取手段的更新而不断发展。70 年代以前，遥感局限于“黑白摄影”的概念。这样单调的、非数字化的图像仅能用于目视解译。70 年代以后，随着 Landsat 系列卫星的发射成功，人们可以使用 MSS 遥感数据进行地质研究和植被覆盖的研究。此时 MSS 的空间分辨率为 79×79m，共有 4 个波段。MSS 的前两个波段属于可见光波段，主要用于识别道路的形迹，同时对水体也能进行有效的识别；它的后两个波段属于近红外波段，主要用于识别水、陆地和植物。尽管 MSS 的波谱分辨率和几何分辨率都比较低，但却标志着遥感时代的开始。这期间国外、国内相关的专家学者纷纷对 MSS 数据的使用进行了研究和探索并发表了一些有价值的文献，真正意义的地质遥感也同时起步了。

随着 Landsat4、5 的发射成功，使人们获得了比 MSS 图像质量好的多的 TM(参数见表 2.1)影像，两者的对比见图 2.4。

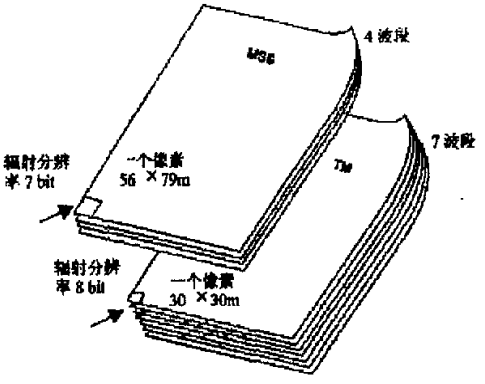


图 2.4 MSS 与 TM 的波谱分辨率、几何分辨率的比较

TM 专门设置了“地质窗口”，并把探测范围扩展到了热红外波段，使 TM 专题绘图仪的 7 个波段同时具有对生物和叶绿素、岩石和矿物、干湿土壤以及水分等自然要素更强的波谱响应。遥感地质的技术方法进一步成熟并变为实用化，在多种领域得到应用。TM 图像信息被普遍用于基础地质工作和矿产勘查工作，基于波谱特征的岩性信息的提取得到深入研究，同时构造信息的提取也受到重视，推动了地质工作在理论和方法上的发展。同时随着计算机的应用技术和相关数学应用技术的发展，遥感图像处理技术进一步提高，“混合像元”的概念受到进一步的重视，并有多篇文献探讨了混合像元的分解方案[26~30]。

从 1986 年开始，法国相继发射了 4 颗 SPOT 卫星。与 TM 图像相比，SPOT 数据主要有两个特点：①波段较少，所以波谱信息不如 TM 丰富。②几何分辨率比 TM 高。

两种图像形成了“优势互补”局面，所以两者之间的融合技术开始成为热点。

进入 90 年代，以成像光谱和成像雷达技术为代表的新一代对地观测系统提供了更强的地质信息获取手段。成像光谱仪由于具有高光谱分辨率[31~32]和宽度很窄的多波段遥感图像的特点可以进行地物波谱特征定量及空间定位分析，从而为岩石类型、矿物成分识别提供全新的技术手段。成像光谱技术以获取岩石物质成分信息见长，特别对含有氢氧根、碳酸根和硫酸根类蚀变矿物最敏感，利用其“诊断性”吸收特征可进行蚀变矿物填图，进而圈定找矿靶区。

成像雷达具有全天候、全天时的探测能力，它主动发射电磁波“照亮”地物，接收地物表面粗糙度和介电特征信息，并随着电磁波波长的增加其穿透覆盖物的能力也增加。成像雷达发射能力脉冲的电场矢量可以在垂直面和水平面内极化，不同地物的不同性质有不同的极化散射性。电磁波发射的方向、入射角不同，对地物表面结构特征有不同的加强或压制效果，基于以上种种优势，成像雷达成为探测地质构造最有效的手段之一[33]。

Landsat7 发射于 1999 年，其影像称为 ETM+（增强型 TM）。ETM+与 TM 的区别是：ETM+具有全色波段，其几何分辨率为 15m；ETM+的第六波段几何分辨率为 60m[34]。

当前，世界航天遥感技术发展迅速，掌握卫星发射技术和具备卫星发射能力的国家越来越多，其中，高分辨率小商业卫星和雷达卫星已经成为重要的遥感信息源；高光谱分辨率遥感将是现在和下个世纪的发展方向。

第三节 我国遥感地质的发展与展望

一、遥感地质工程实践取得的成就

在国内各个领域中，地质矿产勘查是使用遥感技术最早的领域之一。广大的地质工作者在用遥感技术解决实际问题的同时，积累了许多宝贵的遥感地质工作经验，为我国遥感技术的普及与应用奠定了结实的基础。据有关资料[35~41]截止到 2004 年，遥感地质主要取得了如下进展。

1. 在区域地质填图中的应用

区域地质填图是区域地质调查的主要内容，而遥感技术在提高填图质量、实

现计算机成图方面发挥了特殊作用。在小比例尺地质填图中，不但提高了填图质量，而且取得了省时、省力、节省填图经费、提高填图速度的明显效果。

以遥感为主要手段的区域地质填图工作当数在内蒙古、山东、江西、四川等省区开展的 32 个 1: 5 万图幅的地质填图工作。采用大面积多图幅的联测方式工作，不仅提高了工作效率和填图质量，而且节约了填图费用，每幅图的实际费用仅占常规方法所需费用的 2/3。在内蒙苏尼特左旗等进行的 8 幅 1: 5 万区域地质填图中，减少了野外调查路线长度，与区调工作《总则》要求相比节约路线长度约 50%；在山东诸城等 8 幅图的填图过程中，将遥感地质工作程序完全融在“总则”要求的区调程序中，不仅提高了地质研究的深度，也节省了费用，缩短了填图周期。

在辽宁、北京、甘肃、河南等省市开展的遥感技术在 1: 5 万区域地质填图应用研究，也取得了相同的经验。在这些研究中使用了彩色红外航片、黑白航片、TM 卫星资料、侧视雷达图像，结果表明遥感资料在岩性识别、断裂解译、侵入岩体单元超单元划分及新生界成因划分和矿产信息分析等方面均具有优势。

在河北承德地区，用遥感技术进行了 1: 25 万区域地质填图研究。利用航空彩色红外图像、TM 图像等能有效地进行沉积岩、变质岩和岩浆岩的解译，建立的遥感地层单元符合 1:25 万区域地质填图单元技术要求。在地质构造和矿产研究方面则有更多一些的发现。

2. *在地质矿产勘查中的应用*

我国在“七五”、“八五”期间在全国很多地区都曾利用遥感技术进行地质找矿研究，总结了很多普遍适合于地质找矿的遥感地质找矿方法和理论，在发现和扩大特别是地质工作困难地区的找矿潜力方面，充分体现了遥感技术的先导作用。

新疆国家 305 项目办公室与地矿部、中科院自 80 年代中期以来，成功的利用航空彩红外遥感技术、航空多光谱扫描技术和航天遥感技术（TM、 SAR）在东西准噶尔、阿舍勒、多拉纳萨依、东昆仑、西天山等地开展地质找矿研究。编制了不同比例尺的遥感地质解译图及成矿预测和找矿靶区解译图，在综合物探、化探和地质资料的基础上，对控矿构造、成矿规律、成矿条件和矿化蚀变进行了系统的研究，取得了新的认识并建立成矿远景地段及靶区优选的遥感地质找矿模

式，圈定的一批找矿靶区和大～超大型找矿靶区具有很大的找矿前景和社会经济价值。如在东西准噶尔的淖毛湖、沁城和白杨河地区，建立了矿化蚀变影像模式，在成矿规律分析、区域地质构造认识和靶区圈定等方面取得了突破；在白杨河地区以遥感信息分析为主圈定的结勒也门金铜找矿靶区，Au 品位达 5.73g/t，Cu 的含量达 4.15%，显示了很好的金铜找矿前景；在阿舍勒一多拉纳萨依地区揭示了矿化蚀变带，发现了布哈依塔勒德靶区，靶区长 51km，宽 1.5km，靶区内有 4 个矿化体，金最高品位达 154.9g/t 。通过成矿构造分析研究，首次提出区内存在两个期次的推覆构造，建立新的具有大至超大型金矿形成条件的控矿构造规律；通过分析境外前苏联主要矿床如穆龙套金矿、哈雷玛克斑岩型铜矿等的遥感地质特征，在新疆天山地区进行了遥感技术大至超大型矿找矿靶区的圈定。确定的中天山南缘北坡卡林型金矿找矿靶区和南天山哈雷克套山、西天山穆龙套型金矿找矿靶区具有巨大的地质找矿前景。

青海柴达木盆地南北缘地区、甘肃北山地区、西南三江以及秦岭地区都是常规地质工作极困难地区，近年来利用遥感技术作为先导性的基本手段，在这些地区发现了重要的找矿线索。在柴达木盆地的北缘滩见和东昆仑两个地区，结合化探分析，圈定金矿初选靶区 66 处，提供生产单位验证 26 处，发现了工业品位金矿化体；甘肃北山地区第四系覆盖严重，利用微波遥感资料获取了丰富的地质信息，圈出了两条与金、铜矿有关的韧性剪切带，提供生产单位验证，确定了一个平均品位为 7.07g/t 的金矿靶区和一个金铜有利找矿地段(Cu>2%，Au>0.3g/t)；在西南三江地区，圈出 13 个基于遥感信息提取分析的成矿有利地段；在秦岭地区，针对其植被覆盖广泛的特点，开展了以遥感综合技术进行成矿远景定量预测研究，以遥感技术为主导，提取金矿成矿主导成矿因素，建立遥感地质找矿模型并进一步转化为构造、蚀变及生态景观三位一体的影像模式，对以圈定的成矿远景区，经实地检查验证，均发现了金矿化带及具有工业品位的矿化地段。

张玉君[7]等人在北祁连山西段疏勒河以东 9000km^2 区域内通过对 TM 和 ETM+遥感影像的处理和对蚀变岩遥感信息的提取，在 103 处已知矿产地中有 86 处异常与异常图上的蚀变遥感异常相对应，符合率达 83.5%，并根据此异常图，以及该区岩性和构造条件，又预测了找矿靶区 115 处，收到了很好的找矿和成矿预测效果。

3. 在高等级公路工程地质勘查中的应用

近年来，我国高等级公路建设进入了新的增长时期。如何有效快捷地进行高等级公路工程地质勘查则是地质勘查面临的一个新问题。通过石太线太原至旧关段遥感工程地质勘查、川藏公路巴塘至林芝段线路地质灾害遥感调查、乌鲁木齐至奎屯离速公路工程地质遥感调查、连霍公路连云港至徐州段沿线地区断裂构造遥感调查及海南环西线高速公路沿线地区断裂构造遥感研究等表明，遥感技术完全可用于公路工程地质勘查，能取到在有限投资条件下短时间内按质、按量地完成公路工程地质勘查，加速高等级公路建设。

遥感工程地质调查要解决的主要问题有：（1）岩土体特征分析。主要查明岩性成份、结构构造、岩相、厚度及变化规律、岩体工程地质特征和风化特征，并应特别重视对软弱粘性土、胀缩粘土、湿陷性黄土、冻土、易液化饱和土等特殊性质土的调查。（2）灾害地质现象调查，即，对崩塌、滑坡、泥石流、岩溶塌陷、煤田采空区的分布状况及沿路地带稳定性评价进行研究。（3）断层破碎带的分布及活动断层的活动性分析研究也是遥感工程地质勘查的研究内容。

此外，在工程选址，泥石流、滑坡等地质灾害的防治等方面，遥感亦有较广泛的应用。

第三章 高龙金矿区 QuickBird-2 卫星遥感影像的处理

第一节 卫星影像质量及预处理

一、卫星影像数据

本文采用由美国 DigitalGlobeg 公司于 2001 年 10 月 18 日发射成功的 QuickBird-2 卫星遥感数据，其成像时间为 2003 年 1 月 16 日 3 时 29 分 49 秒（美国时间）。从 DigitalGlobeg 公司购买到的数据包包括两种图像数据：一种是多波段影像数据（Multispectral Band），空间分辨率为 2.44m（星下点），另一种是全色（Pan，Panchromatic）波段影像数据，空间分辨率为 0.61m（星下点）。研究区正好位于单幅影像图内，无云雾干扰，影像清晰，质量较好。

二、影像预处理

1. 影像融合

影像融合的目的就是把最佳波段组合的多光谱影像与高分辨率的黑白影像叠加起来，产生兼有高空间分辨率和高光谱分辨率的新影像，提高遥感信息提取精度和综合分析评价能力。

常见的融合方法有 HIS 变换融合、主成分法（PCA 变换融合）、乘积法（Multiplicative）、Brovey 变换融合以及小波变换融合等。其中 HIS 变换是将低分辨率的 RGB 彩色合成图像分解成 H、I、S 分量，然后用高分辨率图像取代 I 分量，最后再转变回 RGB 色彩系统的方法；Brovey 变换融合方法是将遥感所有波段按照公式（3.1）进行计算，获得融合以后的各波段的数值，变换处理完成后，再反变换得到新的图像[42] 。

$$\begin{aligned}&\left[DN_{B1}/(DN_{B1}+DN_{B2}+\cdots+DN_{Bn})\right]\times\left[DN_{highres.image}\right]=DN_{B1-new}\\&\left[DN_{B2}/(DN_{B1}+DN_{B2}+\cdots+DN_{Bn})\right]\times\left[DN_{highres.image}\right]=DN_{B2-new}\\&\cdots\cdots\end{aligned}\qquad(3.1)$$

其中：DNB 代表多光谱影像中的波段数值，DN_{B1_new} 代表融合后的波段数值，$DN_{high\ res.image}$ 代表高分辨率遥感信息。

本文采用 HIS 变换方法（图 3.1）[74]对 QuickBird-2 空间分辨率 2.44m 的多

波段影像数据和空间分辨率为 0.61m 的全色（Pan）波段影像数据进行了融合，处理的结果使得图像不仅保持了全色（Pan）波段影像 0.61m 高空间分辨率的长处，而且又保留了多波段的影像信息。

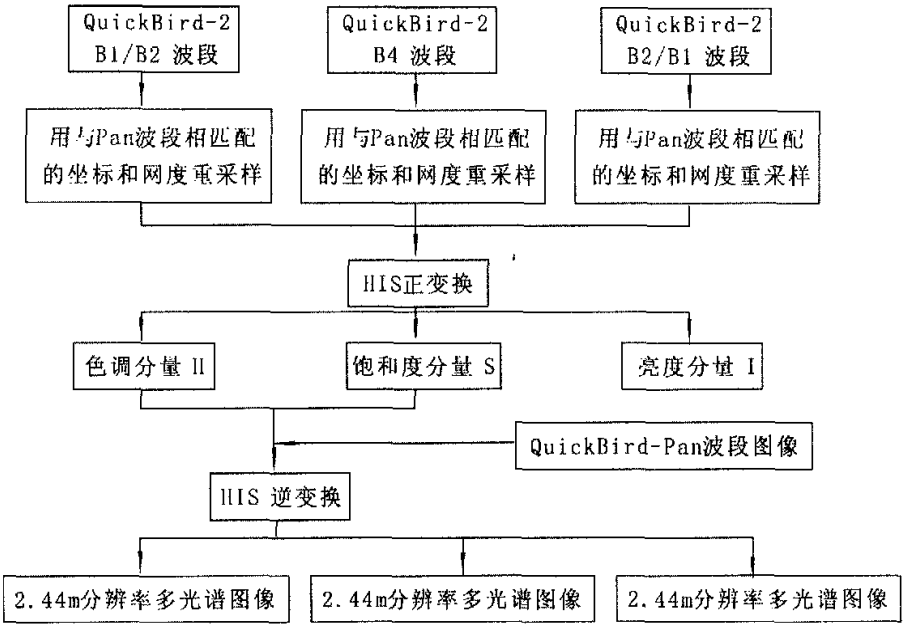


图 3.1 QuickBird-2 Pan 波段与多光谱波段图像 HIS 变换数据融合流程

2. 几何精校正与子区截取

①几何精校正

本次所购的 QuickBird-2 卫星遥感影像已经过辐射量校正（遥感器校正、太阳高度影响、地形校正和大气校正）。因图像在成像时受遥感器、图像投影面的选取及地图投影法的几何学畸变等因素的影响，使得经过辐射量校正后的图像依然存在几何畸形。而数据出售方只对几何畸形进行粗校正。为了定量地确定影像上的像元坐标（图像坐标）与实际目标物的地理坐标（地图坐标等）的对应关系，故在进行图像解译前进行几何精校正。

几何精校正是利用地面控制点(GCP，Ground Control Point)进行的。它通过 GCP 数据对原始卫星图像的几何畸变过程进行数学模拟，建立原始的畸变图像

空间与地理制图用的标准空间(即校正空间)之间的某种对应关系，然后利用这种对应关系把畸变图像空间中的全部元素变换到校正图像空间中去，从而实现几何精校正。校正空间在我国为高斯—克里格投影空间。

校正公式[43]（3.2）如下：

$$\left.\begin{aligned} x &= a_{10} + a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}X^2 + a_{14}XY + a_{15}Y^2 + \cdots\cdots' \\ y &= a_{20} + a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}X^2 + a_{24}XY + a_{25}Y^2 + \cdots\cdots' \end{aligned}\right\} \qquad (3.2)$$

式中：X，Y为源图像像元坐标，x，y为校正后对应像元坐标

a_{ij}（i=1，2，3，……；j=0，1，2，3，……）为多项式系数，在控制点给定的情况下，通过线性最小二乘法可以得出。

本次几何校正的地面控制点是从“广西田林县高龙金矿区矿段地形地质图”[44][79~80]上读取的。因QuickBird-2遥感影像的空间分辨率非常高，所以典型地物选取的准确性较高，一般选取河流的转弯、道路的分叉或易确定的山顶等。经读取地质图和遥感影像上对应的典型地物的坐标，本次几何校正共获得15个对应的坐标值。依图3.2，将数据输入ENVI软件后，结果的误差在允许的范围内（表3.1）。

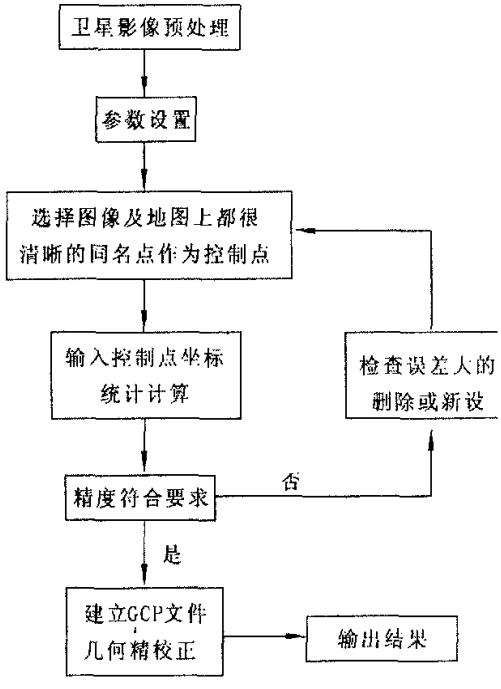


图 3.2 几何精校正流程

② 子区截取

为了更集中地我们的研究范围开展工作，本文对经过几何校正的影像进行了子区截取。

截取子区坐标为:105° 36′ 59″ ～105° 42′ 15″，24° 13′ 59″ N～24° 10′ 11″ N，面积S≈62.76km^2。（图3.3）

表 3.1 几何校正数据及结果误差数据

	MapX	MapY	ImageX	ImageY	PredictX	PredictY	ErrorX	ErroY	RMS
#1+	18569371.00	2679645.00	2842.00	733 00	2841.1254	733.5287	-0.8755	0.5287	1.0227
#2+	18569218.00	2674287.00	2765.00	2926.00	2765.0782	2926.0229	0.0782	0.0229	0.0815
#3+	18564445 00	2677132.00	791.00	1777.00	792.1311	1776.4916	1.1311	-0.5084	1.2401
#4+	18563744.00	2676976.00	502.00	1842.00	501.6936	1841.9006	-0.3064	-0.0994	0.3221
#5+	18563674.00	2679469.00	463.00	796.00	462.8617	797.0981	-0.1383	0.0981	0.1696
#6+	18567631.00	2678180.00	2118.00	1341.00	2114.9342	1340.4776	-3 0658	-0.5224	1.1100
#7+	18565845.00	2676535.00	1375.00	2025.00	1374.5521	2025.4907	-0.4479	0.4907	0.6644
#8+	18567109.00	2675401.00	2824.00	2494.00	2825.0052	2493.5091	1.0052	-0 4909	1.1187
#9+	18567109.00	2680559.00	1895.00	352.00	1896 1691	351.3887	1.1691	-0.6113	1.1393
#10+	18564270.00	2674480.00	724.00	2875.00	723.9094	2875.2263	-0 0906	0.2263	0.2437
#11+	18564905.00	2675759 00	977.00	2349.00	978.8213	2349.1814	0.8213	0 4214	0.8365
#12+	18568281.00	2676820.00	2375.00	1901.00	2376.1329	1901.3195	0.7329	0.8195	0 7408
#13+	18568281.00	2677688.00	536.00	1529.00	536.7011	1528.8910	0.5001	-0.2315	0.1546
#14+	18568281.00	2675330.00	876 00	2524.00	875.3399	2523.1200	-0.7845	-0.8800	1 0211
#15+	18568281.00	2681157.00	987.00	101.00	988.4322	100.5232	1.1021	-0.4124	1.0235

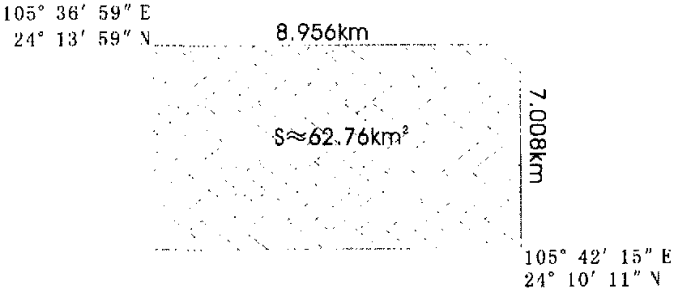


图 3.3 研究区 QuickBird-2 卫星遥感影像范围示意图

第二节 图像处理方法

因QuickBird-2卫星遥感只有Band1(B)、Band2(G)、Band3(R)、Band4(NR)四个波段的彩色影像数据和一个全色(Pan波段)影像数据，在进行影像处理时，相对于人们熟知的TM或ETM+等遥感数据来说，波段的选择有很大的局限性。为了能在有限的波段（波长）范围内更多更好地挖掘影像数据所包含的各种有用信息，同时剔除一些干扰信息，使遥感影像能满足我所需，为我所用，本文对QuickBird-2卫星遥感影像数据的处理方法进行了积极探索，在主成分分析和波段比值法的基础上提出了多重主成分分析—比值假彩色合成法。

主成分分析(PCA，Principal Component Analysis)在数学上称为KL（Karhunen-Losve）变换，是一种基于数据统计特征的多维正交线形变换，也是数字图像处理中常用的一种图像变换方法[45]。主成分变换原理由公式（3.3）表达，其中A矩阵为X变换协方差矩阵$\sum_x$的本征向量所组成。

$$\underset{n'\times 1}{Y'} = \underset{(n'\times n)}{AT} \bullet \underset{n\times 1}{X} \qquad (3.3)$$

主成分分析着眼于变量之间的相互关系，是尽可能不丢失信息地用几个综合性指标汇集多个变量的测量值进行描述的方法（图3.4）[43]，其特点是数据压缩与去相关。在把P个变量（P维）的测量值汇集于m个（m维）主成分的过程中，也可以说是使维数减少的方法。在多光谱图像中，由于各波段的数据间存在相关的情况很多，通过采用主成分分析就可以把图像中所含的大部分信息用假想的少数波段表示出来。这意味着信息几乎不丢失但数据量可以减少。

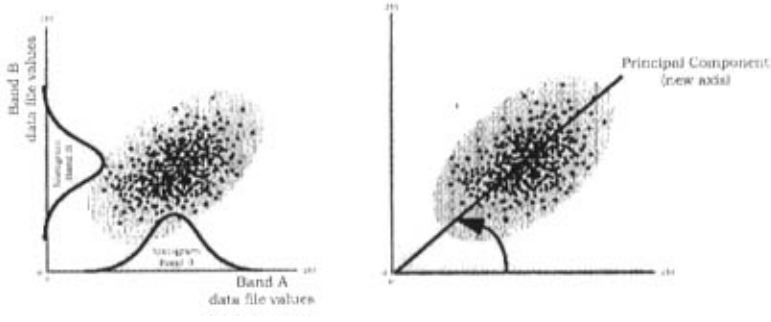


图 3.4 主成分分析原理

波段比值法在多光谱域中图像变换的一般形式可表达为：

$$Y_R = \frac{a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_n x_n}{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots b_n x_n} = \frac{Y_1}{Y_2} \qquad (3.4)\ [46]$$

其中：a_i，b_i——权系数；

x_i——第i波段图像亮度值；

Y_1，Y_2——相应于比式分子和分母的某种线性变换。

比值图像Y_R是原始图像x_i的非线性变换，它可以看成是原始图像线性变换结果Y_1和Y_2之间的简单比值。权系数a_i和b_i可以根据需要来定义和选取。

本文在实现对图像有用信息和干扰信息的初步分离提取后，对有用信息采用主成分分析—比值法近一步进行增强。一方面该方法通过主成分分析和波段比值图像的处理得到了二次分析图像，在一定程度上丰富了处理图像的选择范围；另一方面实现了对有用信息和干扰信息的分离，并对有用信息进行了增强，实现了对图像信息的积极挖掘。

本文利用多重主成分分析—比值假彩色合成法，成功地提取了矿区的植被信息（图版 3.1）、构造信息（图版 3.2），并通过增强处理，间接获得了矿区的蚀变信息。

第三节 植被信息处理

植被覆盖率是指在单位地表面积内，绿色植物所占用的面积比例。“中等植被覆盖”[47~48]是对研究区域植被覆盖程度和长势的一种定性描述，一般指植被覆盖率在 30%左右。植被覆盖率与其它植被指数(例如，叶面积指数等)存在着复杂的关系[49~51]。

在此对中等植被覆盖的含义进行简单说明主要意图是:高龙金矿区及其外围是本文的研究区域，该区域的植被覆盖程度可以被描述为“中等植被覆盖”，据初步估计，覆盖率在 30%左右。考虑到本文收集到的 QuickBird-2 图像的成像日期为 2003 年 1 月 16 日，笔者在 2004 年 3 月 19 日对研究区域的植被覆盖程度进行了初步的野外实地调查，发现研究区植被以草和常绿杉树林为主（图版 3.3、3.4，为研究区植被覆盖典型代表区），但其分布具有一定分带性，即穹隆的核部（石炭—二叠系灰岩区）植被较少，多以草为主（图版 3.5），而穹隆的坳陷区（三

叠系砂泥岩）植被较多，多为大片常绿杉树林（图版 3.6），在两者的过渡部位即环状断裂附近则为草、灌木和衫树混杂。从图板 3.3、3.4、3.5 和 3.6 中可见，将研究区域描述为中等植被覆盖是比较适当的。据有关资料，若植被覆盖率在 60%以上，用遥感数据直接提取地表的岩性信息是不可能的。可见，在研究区域提取岩性和本来微弱的蚀变信息具有一定的挑战性。

光学域的遥感其可见光部分的灰度值直接代表了不同地物的亮度。而其热红外和中红外波段代表了地物的温度。由于植被在近红外波段上的高反射性，由红外和红波段可以组合多种模式代表植被的“绿度”。

人们对遥感影像的植被问题的分析，大多采用获取归一化植被指数（NDVI，Normalized Difference Vegetation Index）图像。归一化植被指数是一个普遍应用的植被指数，将多波谱数据变换成唯一的图像波段显示植被分布。归一化植被指数指示着像元中绿色植被的数量，较高的值预示着较多的绿色植被。归一化植被指数（NDVI）的表达如下：

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \qquad (3.5)$$

对于 QucikBird-2 数据来说，ρ_{nir} 和 ρ_{red} 分别代表 Band4 和 Band3。通过 ENVI 软件处理后，获得的图像（图 3.5）并不能很直观地表现研究区的植被情况。

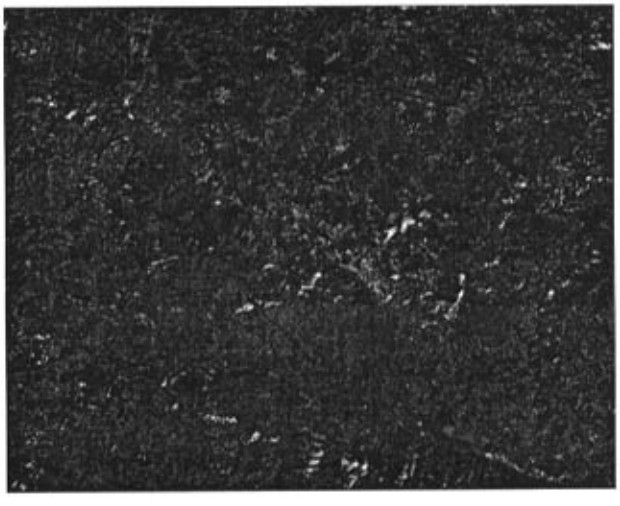


图 3.5 高龙金矿区及其外围 NDVI 图像

作者在对 Band1、2、3、4 四个波段进行主成分分析后发现其 PC2 主要包含的是植被信息，加之因绿色植被反射光谱在 0.65

-0.70μm处存在叶绿素强吸收带,而在0.70-0.75μm处植被反射光谱曲线呈陡直上升形态，在遥感影像信息提取处理中，人们通常采用Band4/Band3来获得植被图像。作者曾尝试将Band1、2、3、4四个波段进行主成分分析的PC2作为R,将Band4/Band3作为G，将Band1作为B进行假彩色合成，结果得到了一个色彩不佳的植被图像，但可基本显示植被信息。受此启发，为了更好地显示植被信息，作者想到了多重主成分分析—比值假彩色合成法，即将Band1、2、3、4和Band4/Band3组合起来进行主成分分析，获得的PC2图像依然具有丰富的植被信息，为了实现信息叠加以增强显示的目的，本文最终采用Band1、2、3、4和Band4/Band3主成分分析的PC2作为R，将Band1、2、3、4四个波段进行主成分分析的PC2作为G，将B1作为B进行假彩色合成，结果显示，获得的图像（图版3.1）较好地获得了植被信息。在该图像上常绿杉树林呈绿色（其中阳坡呈鲜绿色、背阴坡呈深绿色），草（冬季已枯黄）呈黄或浅黄色调。

从提取的植被信息来看，将研究区定义为中等植被区是合适的。

植被信息对遥感图像的构造信息和岩性信息来说，是一种严重的干扰信息，实现了对植被信息的提取，为在以后的处理中将其剔除做好了准备。

第四节 地质构造信息的提取

构造信息是进行成矿规律分析和成矿预测的主要地质信息之一，也是多源地质信息综合的主要分析对象之一。提取遥感图像中地质构造的信息具有重大的地质意义，原因有以下3个方面:

1. 线性构造和环形构造 特别是它们的交汇处是有利的控矿、容矿构造。对于高龙金矿区来说，线、环信息对研究区域内的成矿规律和成矿预测都有较大意义。

2. 线、环构造具有地理属性 借助于GIS等工具，将提取的线、环信息与其它地学数据进行综合分析有利于探讨更广泛的地质意义。

3. 本文研究区域的植被覆盖比较普遍，从遥感图像中提取地质构造信息，在方法上有较高的研究价值。

本节的主要成果是，通过图像处理技术获取研究区域的遥感构造解译图，为多源信息综合分析提供基础图件。

一、线性体、环形体的地质意义

地貌地形景观是互相联系的多种地质因素和组份构成的统一的地质地理系统(王润生，杨文立，1992)。地质构造活动和成岩成矿作用等热动力作用通过热力场、矿物场、地球物理化学场、构造应力场和成矿地质场的作用传输到地表，并留下它们的标志和形迹，经表生作用的改造和叠加，形成与地质环境和内外地质作用相对应的自然景观特征。线环特征正是这种自然景观在遥感图像上的一种表现，它通过色调反差、地形地貌和水系等特征表现出来，因此它是一种地质标志场。既然地质活动、地貌景观和遥感图像存在这样的对应关系，所以研究遥感图像中的线环体，实际上是对地质活动的反演，对于把握区域成矿规律和矿产预测有很重要意义。

虽然线性体并不都反映了地质构造、断裂,具有广义与狭义之分,但有时却直接代表了地质构造，本文在前期提取中是广义上的线性体，在最后成图时的线性体为参照矿区地质图及实地检测的综合结果，仅包括狭义部分。

二、线性信息的提取

图版 1.1 是研究区域的遥感图像可见光波段的真彩色合成图像，它接近于摄像机拍摄的彩色照片，基本表示出了研究区域的可见光自然景观。从图版 1.1 中可以看出，线性地物较多，主要表现为山脊、第四系的边界、沟谷等。相比之下，环形体不很明显。但存在于多波段遥感图像中的线环体信息，并不是可以由 Band3、Band2 和 Band1 可见光波段完整表达的，而是由更多的波段图像共同表达的。

对遥感构造信息的提取，常用的方法是滤波和分类法（图 3.6）。

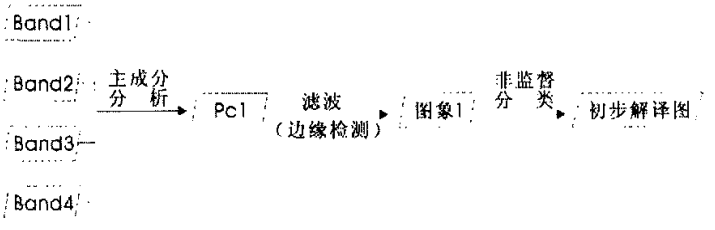


图 3.6 常见遥感线环构造解译流程示意图

但此方法对于 QuickBird-2 卫星遥感图像来说，效果却不好，因为

QuickBird-2 卫星遥感数据的空间分辨率很高，图像本身所含的构造信息已较清晰，处理不好会事得其反。当滤波处理时的背景成分（image add back）低（如10%）时（图3.7），图像信息除道路外，构造信息其它损失殆尽，而当背景成分高（如80%）时滤波的用处又被削弱殆尽，取中间值时，图像变的模糊而达不到效果。因此，依靠常规的处理方法来增强获得QuickBird-2卫星影像的构造信息是不够的。

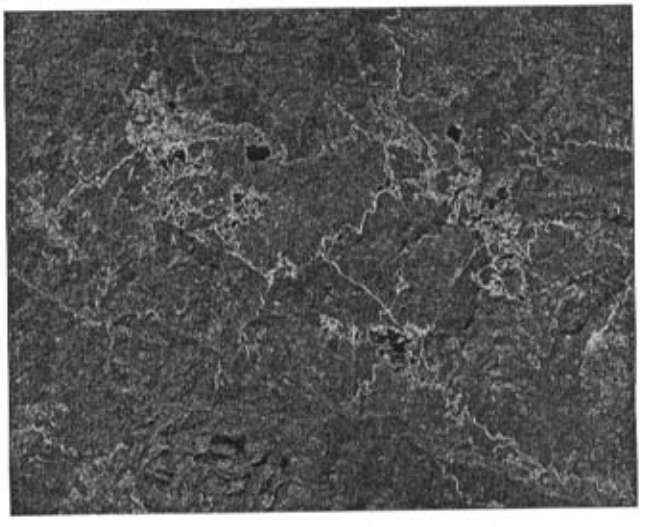


图 3.7 QuickBird-2 数据 Band1 滤波（10%）后图像

在多波段图像数字处理中，主成份分析是对数据进行压缩的主要方法之一[52]。多波段图像在经过主成份变换以后，绝大部分信息会集中在第一主成份(PC1)中。本文在处理植被信息时，进行了到Band1、2、3、4和Band4/Band3的主成分分析，其PC1图像（图3.8）不仅含有较大的综合信息，同时还具有其它处理难以直接得到的一定的地貌信息（山和谷在没有做DEM的情况下已经“立体”显现），这些地貌信息对于构造信息来说无疑是很重要的。其PC2图像因含有大量的植被



图 3.8 Band1.2.3.4 与 Band4/Band3 的 PC1 图像

信息已在处理植被信息时使用，此时避之不用。其PC3分量含有大量的岩性信息，因为高龙穹隆的核部和翼部地层在地表是以断裂分界的，因此岩性信息的出现对线性的提取是有利的。

另外，考虑到要分离和压制植被信息，本文对Band1、2、3、4和NDVI进行了主成分分析，结果（表3.2）显示：其PC1获得了70.51%的信息，而PC2和PC3所获的信息含量相差不大，分别为14.63%和12.11%，经过图像分析可知PC3主要表现为岩性信息。

表3.2 各主成分图像的信息含量

主成分分量	特征值	分量信息量	累积信息量
PC1	10213.7753	70.51%	70.51%
PC2	2117.9604	14.63%	85.14%
PC3	1755.0231	12.11%	97.25%
PC4	348.9608	2.41%	99.66%
PC5	49.0342	0.34%	100.00%

基于原始图像滤波方法效果不佳，而主成分分析—比值图像又各有所长，本文特汇取其长，将Band1、2、3、4和Band4/Band3的主成分分析的PC1、PC3与Band1、2、3、4和NDVI进行了主成分分析的PC1、PC3进行再次主成分分析，结果（表3.3）显示，其PC1和PC2获得了96.69%的信息，且PC1与PC2的信息含量相差不大。

综合以上分析，本文最后采用将再次主成分分析的PC1和PC2分别作为红(R)和绿（G）波段，将Band1作为蓝（B）进行假彩色合成，结果成功的实现了对线环信息的增强（图版3.2）。

以F_9为例，F_9主体发育于灰岩区，北西西向从高龙穹隆中部贯穿而过，在滤波和其他主成分或比值处理图像上不易识别，但在图版3.2可以看出，F_9断裂以不连续的红色区域贯穿穹隆中部而显示了它的存在。

当然，要获得研究区的构造信息，还需要参照高龙金矿区其它的一些地质资料。本文在对高分辨率卫星遥感影像的线环信息进行增强处理后，结合其它资料及图像具体特征，去除了道路、矿坝、阴影及人为工程等干扰而编制了高龙金矿

QuickBird-2 遥感影像综合构造解译图（图 3.9），其间参考了高龙金矿区地形地质图[53]和野外踏勘资料，因此可以认为是断裂，且绝大多数经过了实地检查和证实。基于此，本文以后的文字叙述中提到的线性构造大体上等同于断裂或大型节理，文中不再赘述和区分。

表 3.3 各主成分图像的信息含量

主成分分量	特征值	分量信息量	累积信息量
PC 1	7116.2110	51.14%	51.14%
2	6338.4638	45.55%	96.69%
3	458.8821	3.30%	99.99%
4	1.8061	0.01%	100.00%

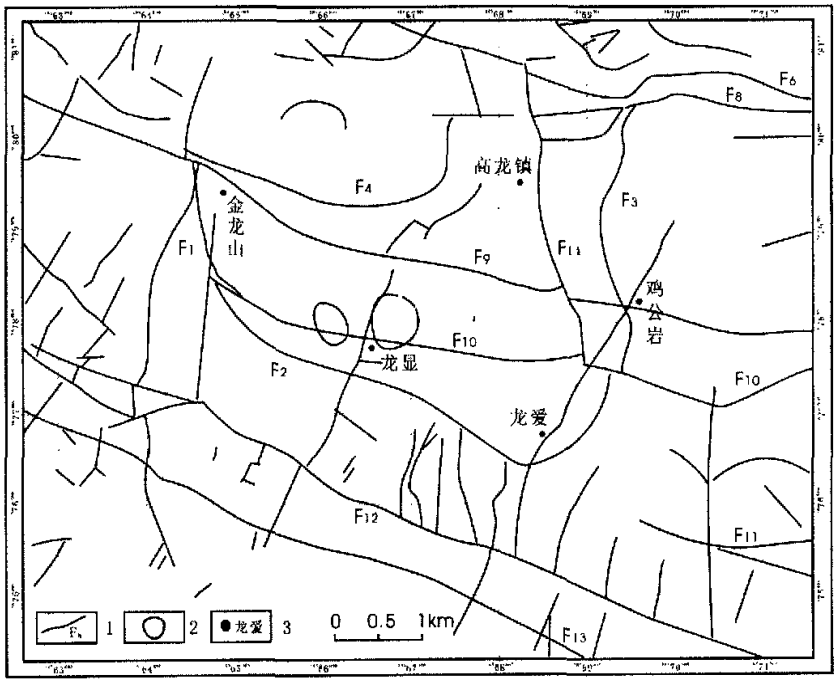


图 3.9 高龙金矿 QuickBird-2 遥感影像综合构造解译图

1-断裂及编号 2-环形构造 3-地名

第五节 岩性和蚀变信息的提取

研究区地层主要为沉积岩。沉积岩在地球表面分布最广，物质组成也比较复杂，影响岩石光谱的因素也多。当沉积岩中含有较多的暗色矿物、有机质时，如三价铁、锰的氧化物，岩石光谱受到压抑，色调往往较暗；当岩石富含空隙和裂隙且填充较多水分时，反射率就会降低，影像色调加深，反之，则呈浅色调。

高龙穹隆核部（隆起区）的地层为上古生界碳酸盐岩（图版 3.7）富含有机质，局部夹劣质煤层，故在遥感影像上的色调应呈暗色调。

而穹隆的翼部（或坳陷区）为局部含有黄铁矿和毒砂的三叠系砂泥岩和泥灰岩[54]（图版 3.8），砂泥岩的孔隙度一般较大，且因本文采用的遥感影像数据采集于 2003 年 1 月 16 日，为当地枯水季节，根据其光谱特性，砂泥岩区应该呈浅色调。

基于此，经过对比优选，本文认为在高龙金矿区使用 Band4/Band2 的比值图像，能较好地区分研究区的岩性（图版 3.9）。在该图上，暗颜色的石炭系（C）～二叠系（P）灰岩位于穹隆的核部，较浅颜色的三叠系（T）砂泥岩位于核部周围。

已有成果表明，硅化是区域内与金矿化有紧密联系的主要蚀变类型。所以，硅化蚀变对金矿化有明显的指示作用，提取研究区域内的硅化蚀变信息具有重要意义。

根据已有的研究成果[41,55~58]，在中等植被覆盖区提取蚀变信息的技术方案主要是主成分分析法和比值法，而其他方法很少见。本文曾尝试利用主成分分析法、比值法及多重主成分分析—比值假彩色合成法对研究区的蚀变信息进行提取，均未取得预期效果。经过作者野外实地考察后，分析出出现上述情况的主要原因是研究区的硅化蚀变带除植被覆盖影响外，最主要的是受第四系覆盖的影响。根据在研究区野外实地踏勘研究发现，研究区硅化带除鸡公岩、金龙山等已知矿段的老采坑内可见硅化蚀变带呈“孤峰”状在“孤峰”壁上出露外（图版 3.10、3.11），其余地段均被厚约 30cm 的第四系覆盖（图版 3.12、图版 3.13），第四系的干扰大大削弱了蚀变弱信息的提取。

分析高龙金矿区已有的地质资料可知，研究区的蚀变带是依附于构成高龙穹隆的环状断裂——F_1、F_2、F_3、F_4 四条断裂发育的，故本文结合本章上节提取的环状断裂构造信息，综合高龙金矿区综合地质地形图，圈出了研究区蚀变带的范

围而最终获得了研究区遥感地质综合解译图。（图 3.10）

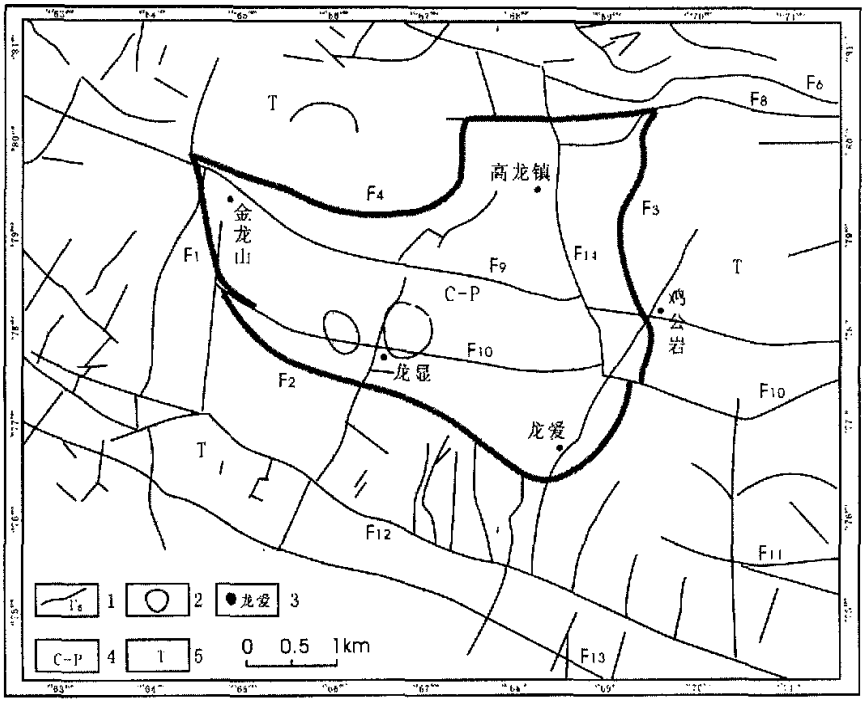


图 3.10 高龙金矿区 QuickBird-2 遥感地质综合解译图

1-断裂及编号 2-硅化带 3-地名 4-石炭-二叠系 5-三叠系

第四章 研究区地质构造遥感影像特征及定量分析

第一节 环形构造特征

在研究区高分辨率卫星遥感影像上，经过岩性分析处理后，环形构造——高龙穹隆非常清楚（图 4.1）。

该环形构造位于本幅遥感影像的中偏北东部，近乎椭圆形（略呈“鞋”状），长轴北西西向，长约 5km，较短轴近南北向，长约 3.5km，面积约 20km^2。边界清晰、连续且较规则，顺时针方向经鸡公岩——清风岭——龙爱——龙显——金龙山等地形成一个不规则环形，突显了高龙穹隆的轮廓。

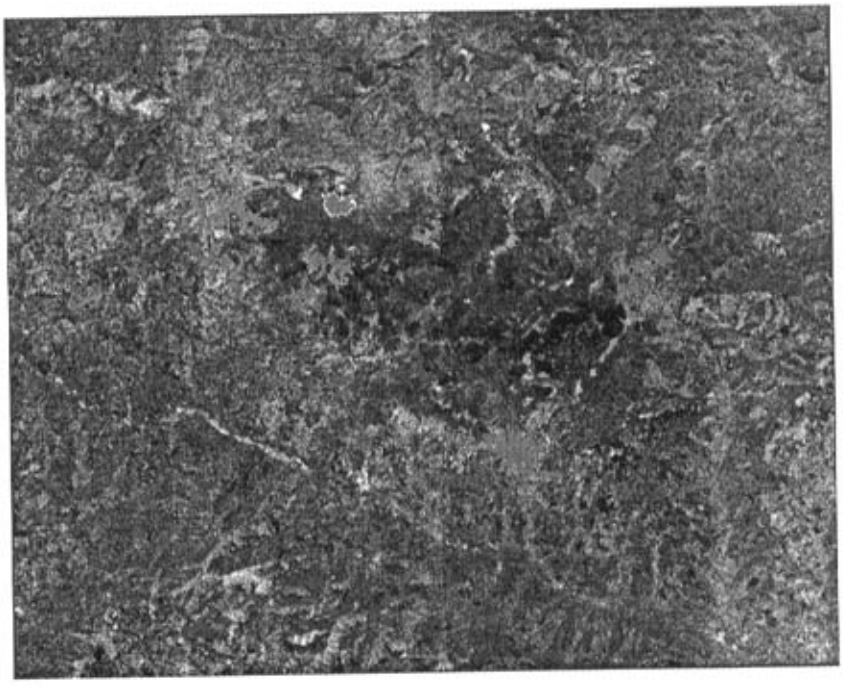


图 4.1 高龙穹隆遥感影像图

该环形构造是一个色调明显异常的色环构成色调明显异常的主要原因是地层岩性的差别。由第四章第五节叙述可知，高龙穹隆（图 4.2）核部（隆起区）地层由中上石炭统、下二叠统碳酸盐岩及上二叠统含煤碳酸盐岩组成，在图 4.1

上为暗黑色区域；而翼部（坳陷区）则为中三叠统百逢组碎屑岩，在图 4.1 上为灰色区域。

该环形构造同时还是一个构造环。由前文叙述可知，该环形构造——高龙穹隆（图 4.2）的周边发育由 F_1、F_2、F_3、F_4 四条线性断裂从西向北逆时针首尾相接构成的环状断裂。该环状断裂破碎带普遍硅化，部分地段岩性分带明显，可分为硅化构造角砾岩和构造石英岩带，角砾岩或交代残余的角砾岩均为大小混杂的灰岩张性角砾。F_1、F_2、F_3、F_4 四条断裂的具体特征将在下节详细介绍。

目前所发现的金矿体均位于该环形构造——穹隆周边的破碎带或破碎带附近的次一级断裂和层间破碎带中。

第二节　线性构造特征

一、线性构造基本特征

从综合解译图上（图 3-7）可以看出，研究区内线性构造信息十分丰富（由前文叙述可知，图 3-7 上的线性构造大体上等同于断裂或大型节理），其中，矿区南部北西西向的 F_{12} 断裂最为明显，该断裂地貌上为一北西西向的山沟，遥感影像上表现为一条北西西向的色调异常带，是研究区除环形构造——高龙穹隆外最突出最易识别的构造。因其延伸方向与区域上的深大断裂方向近乎平行，为一区域性断裂。

从综合解译图上（图 3-10）可以看出研究区的线性构造主要可分为两组方向：北西西向和近南北向。本文除将构成高龙穹隆周围环状断裂的 F_1 和 F_3（近南北向）、F_2 和 F_4（近南北向）专门讨论外，其余将分组表述。（简明特征见表 4-1）

1. 构成环状断裂的 F_1、F_2、F_3 和 F_4 断裂特征

F_1、F_2、F_3、F_4 有的文献[16][84-85]直接将其称为环状断裂，本文认为，它们本身为线性构造，只是组合起来构成不规则的环形，故将其放置在线性构造中讨论。

F_1、F_2、F_3、F_4 从西向东逆时针方向呈环形组成了高龙穹隆隆起区的边界，是矿区主要的导矿和储矿构造，矿区内已知的金龙山、龙爱和鸡公岩矿段分别位于 F_1、F_2 和 F_3 周围。

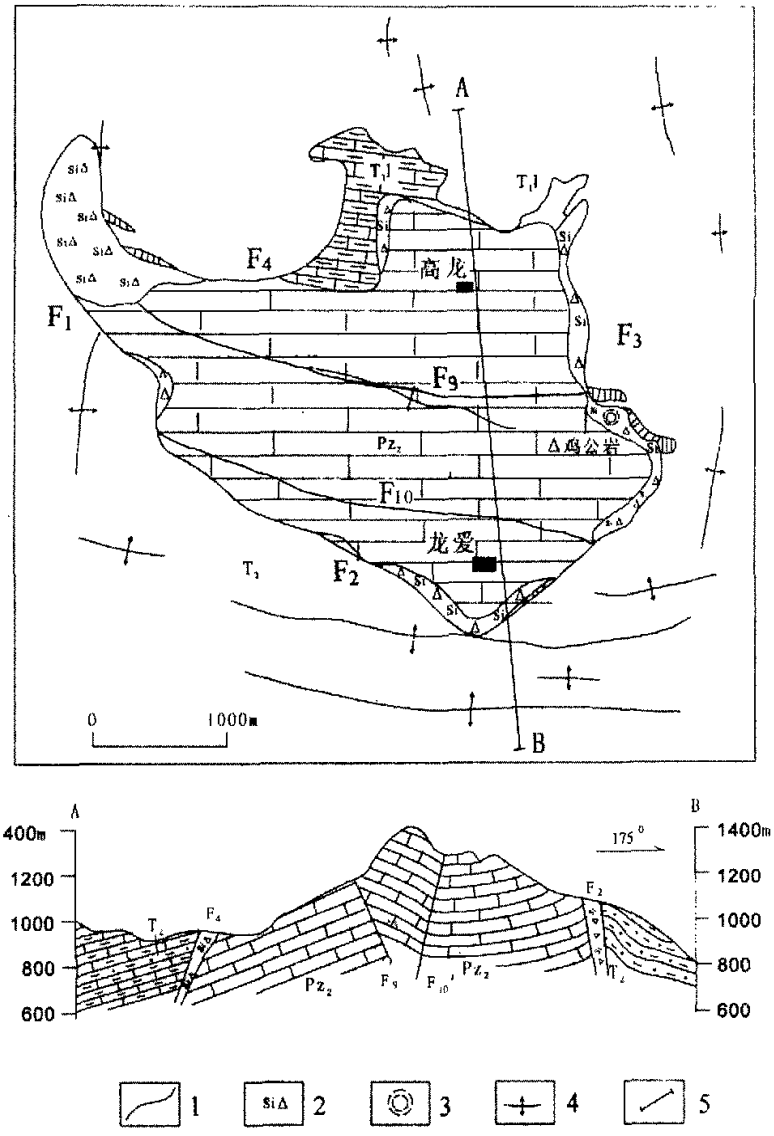


图 4.2 矿区穹隆构造及岩性剖面略图（据王国田资料修编）

1—地质界线；2—硅化构造角砾岩；3—硅化锥；4—背斜轴；5—剖面线

T_2—中三叠统钙质泥岩、粉砂岩夹细砂岩；T_2l—下三叠统泥质条带灰岩夹泥岩；Pz_2—上古生界灰岩、生物碎屑灰岩

F_1：位于矿区西部，长约 2.78km，走向近北西向，向南西倾，倾角 45°～70°，硅化破碎带宽 20～100m，大部分地带分带明显，可划分为构造石英岩带和硅化构造角砾岩带，是金龙山矿段的主要含矿断层。

F_2：位于矿区南部，长 5.33km，向南倾斜，倾角一般较陡，硅化破碎带宽 2～10m，大部分分带不明显，以构造石英岩为主。

F_3：位于矿区东部，长 3.05km，地貌上表现为一南北向山脊，向东倾斜。在鸡公岩南段转南东走向，向北倾斜，倾角一般 50° 左右。硅化破碎带宽 10～130m。亦可划分为构造石英岩带和硅化构造角砾岩带，其特点为：

（1）构造石英岩带

主要由构造石英岩组成，楔形，白色，粒状变晶结构，块状结构，成分几乎全为石英。其中可见有脉石英角砾，说明该断层具有多期活动性。

（2）硅化构造角砾岩带

带宽 1～80 米，主要由构造角砾岩（图版 4.1）组成，深部变窄，次棱角状，大小混杂，角砾成分为砂岩、泥岩，被热液石英不均匀交代，与构造石英岩界线不明显，角砾之间一般为石英胶结接触面（上覆硅化砂泥岩），其附近是矿体产出的主要位置。

F_4：位于矿区北部，中部走向为南北向，西端为北西西向，破碎带宽 2～150m，带中可见构造角砾岩化，分带不明显，金矿化较弱。

2. 北西西向断裂组

本组断裂在研究区内最为发育，通常规模较大，延伸较远，在 QUickBird-2 遥感影像上以 F_9 和 F_{12} 最为突出。

F_8：位于穹隆以北，倾向北，倾角 50°～75°，为正断层。破碎带宽 1～10m。下断面较清楚平直，断层带内角砾呈棱角状，也可见构造透镜体，表现为压、张复合性质断层。

F_9：位于矿区中部，大致沿穹隆长轴展布，两端延出矿区。断层北盘下降，南盘上升。总体向北倾斜，倾角 65°～80°。部分地貌上呈墙状凸起（图版 4.2）。断层带内灰岩中石英脉呈网状发育，风化呈蜂窝状，显示该断层在形成期间，热

液活动强烈。

F_{10}：位于矿区西部，破碎带宽约 6～25 米，向南倾斜，倾角大约 50°～80°，断层角砾大小混杂，具棱角状、次棱角状，局部具构造透镜体和角砾磨光现象，且发育硅化、绿泥石化。在灰岩区角砾成分为灰岩，胶结物为方解石脉。碎屑岩区角砾成分为砂泥岩，胶结物为网状石英脉。

F_{12}：位于矿区外围，高龙穹隆南侧，破碎带宽约 15～150 米，带内偶见构造角砾岩，地貌上表现为一北西西向的大山沟，沟坡和沟底为高龙镇永久农田保护区。

3. 近南北向断裂组

除环状断裂中发育的 F_1 和 F_3 外，还有规模较大的 F_{14} 和规模较小的 F_{18} 断裂存在。F_{14} 位于矿区的中部偏东，在地貌上表现为一大沟谷，断层性质不很明显，东盘下降，西盘上升。在灰岩区中表现为热液石英转变呈线状分布，具辉锑矿化。在碎屑岩区，未观察到破碎带，该断裂穿切环状硅化带和北西西向断裂。

线状断裂分析[21]表明本区曾至少先后经过北东向和东西向两次挤压作用，其中北东向挤压作用较早，形成穹隆的主要构造线——北西西向断裂组，该组断裂无论从规模上还是数量上都比其他方向的断裂更为明显，其中 F_8、F_9 和 F_{10} 贯穿整个穹隆构造，而且都表现出压性和张性复合的性质，说明在该组断裂形成以后或者形成过程中曾经受到多次构造活动影响；近南北向断裂组以 F_{14} 为主，该断层仍然表现出压、张复合性质，表明该组断裂也是多期活动形成的结果。另外，根据 F_{14} 断层穿切环状硅化带和北西西向断裂这一现象，表明该组断裂的形成比整个环状断裂稍晚，至少表明是环状断裂形成过程中的后期产物，由此可以说明，在整个穹隆构造形成过程中曾经经历过多期次的构造活动。

研究区主要断裂构造遥感影像特征见一览表（表 4.1）。

二、线性构造分形特征

近年来，以找矿预测和成矿作用为目的的线性构造解译和研究已成为人们研究构造、遥感和成矿作用共同关注的热点。线性构造对金属矿床空间分布的控制及其找矿意义的研究是矿床地质学家关心的课题。特别是一些世界级的超大型矿床，如澳大利亚奥林匹克坝（Olympic Dam）Cu-Au-U 矿床就是在线性构造解译的

表 4.1 研究区内主要断裂构造遥感影像特征一览表

编号	遥感影像特征			
	位置	延伸方向	图上延伸长度（km）	识别标志
F_1	高龙穹隆西边界	NNW	2.78	略呈线形影像，断裂两侧色调有较明显差异，局部被露天采矿区掩盖。
F_2	高龙穹隆南边界	NW 转 NE	5.33	略呈线形影像，断裂两侧色调差异明显。
F_3	高龙穹隆东边界	近 SN	3.05	显示有一条清晰的线性影像，断裂北部为一负地形，南部两侧色调有差异，局部被采矿区掩盖。
F_4	高龙穹隆北边界	NNE 转 NEE 转 NWW	3.81	总体线性影像不太明显，表现杂乱，但中部较明显，两侧色调明显不同。
F_6	高龙穹隆东北侧	近 EW	4.99	线性影像特征明显，被 F_{14} 错断
F_8	高龙穹隆东北侧	近 EW	2.17	线性影像较明显，被 F_4 截断
F_9	高龙穹隆中部偏北	NWW	9.37	线性影像较明显，NWW 向贯穿穹隆，与 F3 相交，被 F_{14} 错断
F_{10}	高龙穹隆中部偏南	NWW	7.17	线性影像较明显，与 F_3 相交，在穹隆西侧与 F_1、F_2 相交而尖灭。
F_{12}	高龙穹隆南侧	NWW	9.12	断裂规模大，线性特征非常明显，断层带和断层两侧的色调明显不同。
F_{14}	高龙穹隆中部偏东	近 SN	3.44	线性影像较明显，与 F_3 相交，在穹隆中部偏东侧与 F_9、F_{10} 相交。延伸至穹隆北侧被 F6 终截。

基础上进行了成功的靶区预测而发现的[63]。自法裔美籍科学家曼德布罗特（Mandelbrot，B.B.）于本世纪 70 年代中期创立分形理论以来[64]，分形几何学已作为一门研究自然界不规则物理现象及其内在规律的学科在地球科学领域得到广泛应用，更为我们研究遥感线性构造提供了科学而实用的新方法。

1. 分形维数的求解原理

众所周知，断裂构造的空间展布是一系列无规则的线状或面状集合体，这是传统的欧氏空间几何学无法精确描述的。但越来越多的研究表明，断裂破碎具有随机相似性，断裂的分布和几何形态具有明显的分形结构特征[60]。

分形的特征之一是分形图形或集合符合幂指数特征，幂指数的指数就是分形的维数(Fractal dimension,缩写为 D，简称分维)，可以表示为：

$$N(r) \propto r^{-D} \qquad (4.1)$$

其中 r 为测量标尺，$N(r)$ 是利用标尺测得大于 r 的频数，D 为分维值，也可定义为：

$$D = -\lim_{r \to 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r} \qquad (4.2)$$

把 $N(r)$ 和 r 的数值分别投在双对数坐标上，并用最小二乘法拟合，直线的斜率即为 D 值。

但在实际的处理过程中，通常利用粗视化程度 r 和在此时被观测的个数 N(r)，通过公式（4.3）求得 D 值。

$$D = -\frac{\lg[N(r)]}{\lg r} \qquad (4.3)$$

2. 线性构造分维的研究方法和结果

本文所利用的遥感线性构造以高龙金矿 QuickBird-2 遥感影像地质综合解译图（图 3.10）为基础。

目前，研究线性构造分维的方法有很多，常用的有长度-频度统计法、圆覆盖法及盒计维数法（Box-Counting Dimension method，Mandelbrot，1985）等。本文采用第三种方法，即盒计维数法。具体做法为[59]：

①选用边长为 L 的正方形初始网格覆盖在遥感资料解译图上，在此基础上，

分别选取 r=L/2、L/4、L/8、L/16、L/32 的网格分别求出相应标度下含有线性构造的网格数 N(r)；

②在 lg（r）—lgN（r）坐标系中作图，用计算机回归求解技术求得最后回归直线斜率的绝对值即为分维值 D[60]，同时可求得相关系数 R。

本文对研究区遥感线性构造进行分形统计所采用的标度为 2.000～0.125km。经过统计计算（表 4.2），最后求得研究区的分维值 D=1.660，相关系数 R=0.999。相关系数 R=0.999 说明 lgN（r）与 lg（r）具有极好的相关性，表明研究区线性构造具有分形特征，其分形结构具有很好的统计自相似性。

表 4.2 分形统计结果

标度（km）	格子数(个)
2.000	16
1.000	54
0.500	185
0.250	509
0.125	1624

3. 线性构造的分形特征

将研究区的分维值与其它地区进行对比（表 4.3），可知：①高龙金矿区的分维值高于华南地区线性构造、川滇西北断裂构造、柴达木盆地北缘断裂的分维值，而与广西区断裂、日本岛弧断裂、德兴斑岩铜矿区断裂分维值相近。表明研究区的断裂分形结构偏于复杂，活动性偏强；②从整个矿区看，NWW 向线性构造的分维值大于近SN向线性构造的分维值，说明研究区内 NWW 向的线性构造比近SN向线

表 4.3 研究区及其它地区线性构造分形特征

区域	分维值	资料来源
研究区线性构造	1.660	本次研究
研究区 NWW 向线性构造	1.316	
研究区近SN向线性构造	1.217	
华南地区线性构造	1.35	孔凡巨等[65]
日本岛弧线性构造	<1.6	Hireta[65]
川滇西北断裂构造	<1.5	皇甫岗等[67]
德兴斑岩铜矿田断裂	1.596	金章东等[68]
广西区断裂	1.62	郭纯清等[69]
柴达木盆地北缘断裂	1.23	曾联波等[70]

性构造更为发育，其连通性和发育强度前者大于后者。

为了进一步探讨高龙金矿区遥感线性构造分维与构造环境的关系，利用各子区分维值做等值线图（图 4.3）。结果显示，线性构造分维的高值区（D≥1.10）主要出现在高龙穹隆的周边，特别是硅化蚀变带及其附近。而低值区（D≤0.90）主要出现在高龙穹隆的外围及穹隆近核部位置。这种结果表明不同的构造环境下线性构造的发育程度存在明显的不同。在各子区分维做等值线图上，将各子区等值线图与矿区已知矿段点进行对比，可见高龙金矿区三个大的已知矿段——鸡公岩矿段、金龙山矿段和龙爱矿段均位于线性构造分维的高值区中，由此可推知，线性构造分维值高的区域更有利于成矿。

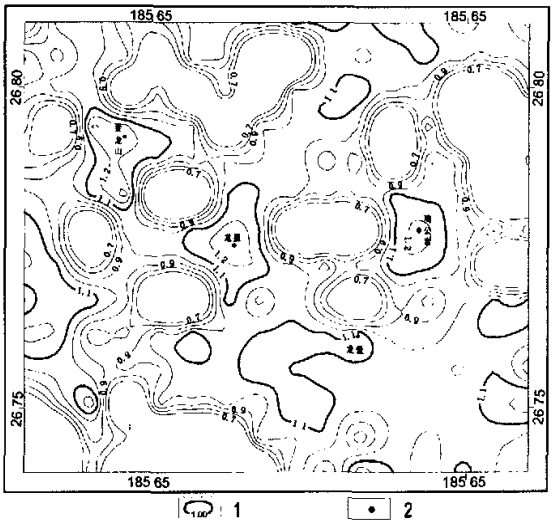


图 4.3 研究区遥感线性构造分维等值线图

1-线性构造分维等值线及值 2-矿段

三、线性构造分维趋势特征

虽然线性构造直接反映的是地表线状信息，但由于一部分线性构造的发育和展布受到深部构造的影响和控制，因而它们能够间接地反映来自地壳深部的构造信息(王四龙等,1995)[61]。为了揭示线性构造所蕴含的深部构造信息，对各子区分维进行趋势分析。结果显示，较高次趋势分析的结果与深部构造关系密切。可以看出：

1. 子区分维趋势的高值区大致呈近东西向和近南北向两个条带状展布（图 4.4），但近东西向趋势更强，尤其在 6 次趋势图（图 4.5）上表现的更直观，几乎没有了近南北向趋势，这就近一步表明了研究区内近 EW 向的线性构造比近 SN 向线性构造更为发育，其结构的复杂性和强度均为前者大于后者。

2. 将子区分维 6 次趋势图（图 4.5）与研究区 QuickBird-2 遥感影像图（图 4.6）进行对照分析可知，6 次趋势的高值区与研究区南部的深大断裂（F_{12}）的位

置十分吻合。因此，可以尝试将高分辨率遥感线性构造作为深部构造解译的重要参数。

四、对 F_{12} 的新认识

燕守勋[17] 等认为高龙断块穹窿及其周边的北西向断层和南北向走向调整断层，是高龙金矿床的控矿构造系统。李存有[16~18]认为矿区内的环状断裂控制着热液的活动，是高龙金矿的主要导矿和容矿构造。国家辉[19]则强调隆起边缘的基底断裂活动带。可见以往的研究者对高龙金矿区的控控系统认识只局限于矿区内的环状断裂及环状断裂近旁的次级断裂，而很少甚至没有考虑紧临高龙穹隆南侧的 F_{12} 断裂。

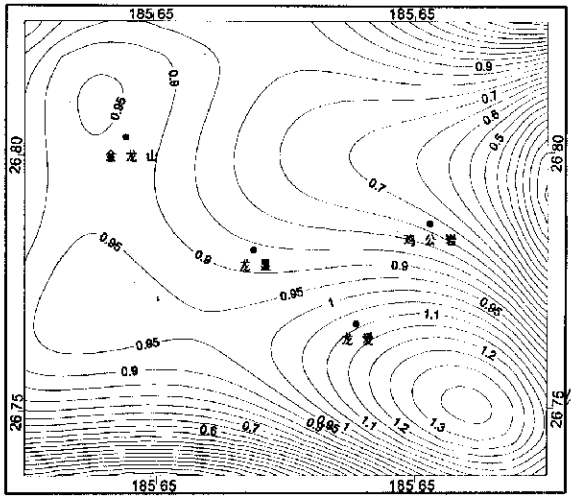


图 4.4 研究区遥感线性构造分维 5 次趋势图

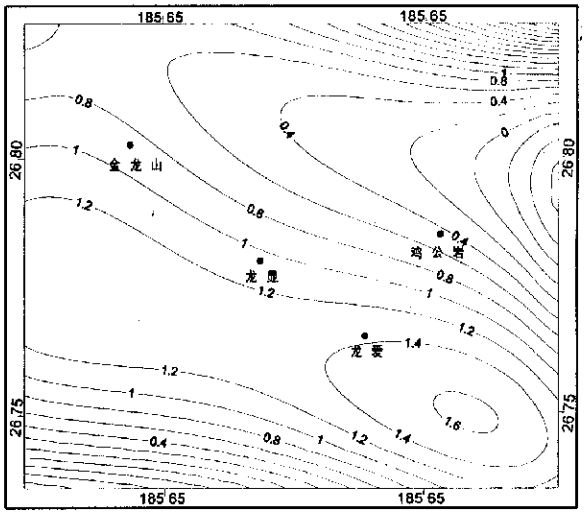


图 4.5 研究区遥感线性构造分维 6 次趋势图

F_{12} 断裂在 QuickBord-2 卫星遥感遥感影像上的特征十分显眼，除具有特殊的纹理特征外，其南北两侧的次级构造线方向亦不一，北侧近南北向，而南侧则为北东东向。在研究区的 ETM+遥感影像图（图版 4.3）上可见，F_{12} 断裂为一北西西向延伸的区域性断裂，且与区域上的西林—百色断褶带的延伸方向大致平行。

已有的研究表明[16][20]，高龙金矿体的物质来源主要为穹隆坳陷区的三叠纪地层。从 QuickBord-2 卫星遥感遥感影像图（图 4.6）上可见，高龙穹隆的东、南、西三侧均有已知的矿段分布，即鸡公岩矿段、龙爱矿段和金龙山矿段分别。我们

曾在高龙穹隆北面的硅化带进行地球化学取样，研究发现其金矿化明显低于穹隆的其它三边且达不到工业开采品位要求。由此便产生了一个疑问：因何同处于穹隆边界上，构造和成矿物质条件几乎相同的北面却没有形成具有工业价值的矿体呢？

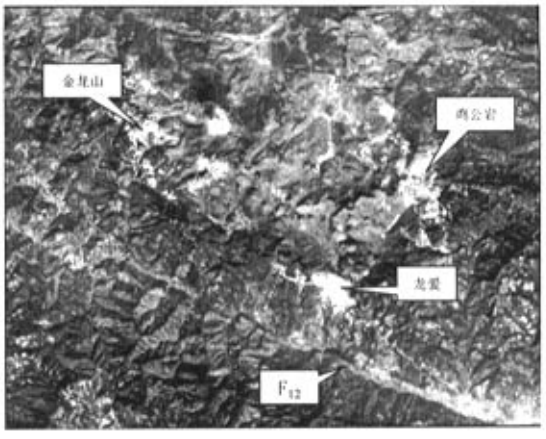


图 4.6 研究区 QuickBird-2 Band1 遥感影像

从高龙金矿区 QuickBird-2 遥感地质综合解译图（图 3.7）可以看出，矿区内已知的三个矿段除了位于高龙穹隆周边环状断裂上外，还有一个共同的特征就是：东南西三个矿段均有一条近南北向的断裂（图版 4.4）与 F_{12} 断裂（图版 4.5）交汇！而穹隆北面却不具备这一条件。

由广西田林县高龙金矿区金、砷元素异常图（图 4.7）可知，连接并贯通三个已知矿段与 F_{12} 的断裂均位于近南北向的金异常带上。说明这几条断裂与已知矿段矿体的形成有一定的联系。

综上所述，本文认为，高龙穹隆南侧的 F_{12} 断裂及连接并贯穿 F_{12} 与环状断裂的次级南北向断裂与高龙金矿床的形成有非常密切的成因关系，是矿区导矿构造中不可忽略的重要部分，也是今后找矿不可或缺的考虑条件。

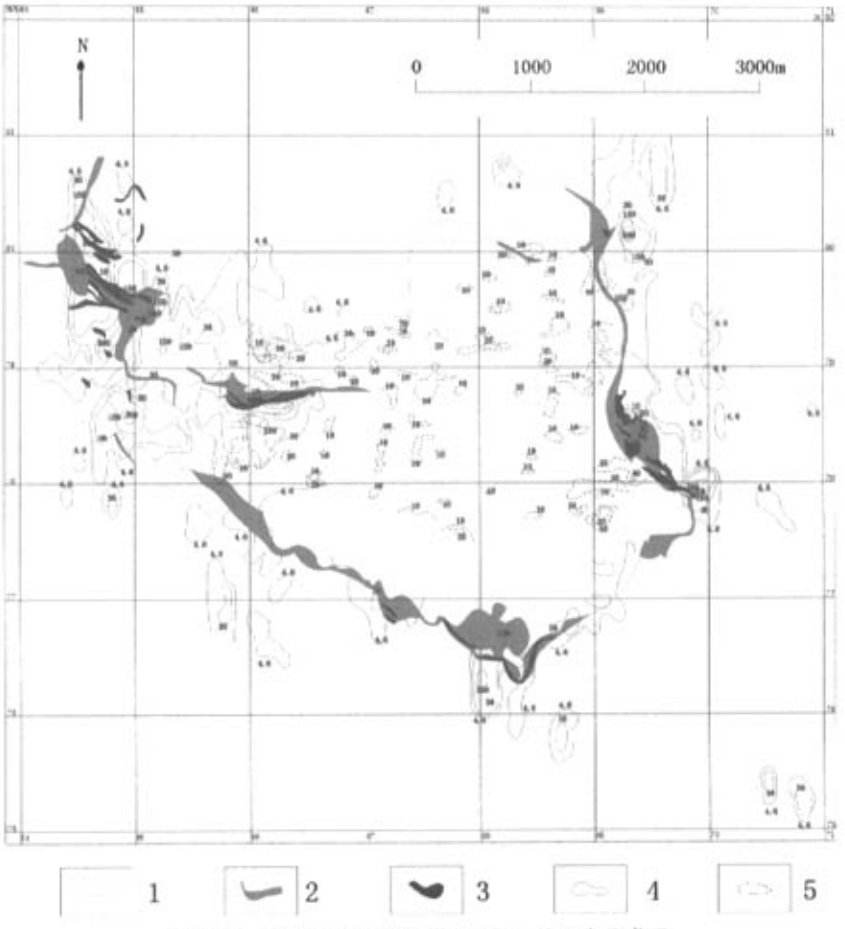


图 4.7 广西田林县高龙金矿区金、砷元素异常图

1-地质界线 2-硅化带 3-金矿体 4-金异常 5-砷异常

第五章 成矿预测与有利成矿区验证

第一节 成矿预测区的确定

高龙金矿已探明为一中型金矿床，矿体大多产于晚古生代碳酸盐岩与三叠系砂质泥岩之间的硅化蚀变带内。

1. 矿床产出规律

矿床以环状展布于穹窿周边，自东边开始顺时针方向依次主要为鸡公岩矿段、龙爱矿段和金龙山矿段，严格受环状断裂带控制。穹隆周边、次级南北向断裂与构成高龙穹隆的环形断裂的交汇部位的硅化带附近是成矿的最佳部位。

2. 矿段产出规律

尽管矿床呈环带分布于穹窿周边，但其内各矿段并不相连。由矿区金砷异常图可以看出，矿段的产出明显受南北向断裂控制。各矿段和相关异常带均为南北走向，并且在东西方向上以一定的间隔平行排布。

3. 据第二代1：20万化探资料，桂西24° 11′ 以北地区发现金化探异常100多处，计达300平方公里。异常群均呈带状分布，异常值在6～20×10^{-9}范围内，相当数量地区有金砷元素异常重叠分布，单个异常长轴一般沿一构造展布。在沿背斜周边碎屑岩分布区的金砷元素异常重合区是金矿床形成的有利部位。在高龙金矿区金砷异常均以南北向延伸切穿高龙穹隆周边的蚀变岩带（图4.7）。

4. 在航磁ΔT图上，金矿区处于一近东西向的低缓弱值异常区（桂C-92-95）边缘。异常强度1-8nT，沿走向15km，宽1～2km，最宽处7km，极大值8nT与矿区西部南北向的金龙山矿段相对应（图5.1）[62]，其余矿段皆处异常边缘负磁场中。

综合研究区已知的鸡公岩、龙爱和金龙山矿段的地物化遥等特征，结合本次研究发现的已知矿段均产在线性构造分维高值区的特点，以研究区QuickBird-2卫星遥感影像地质综合解译图（图3.7）、遥感线性构造分维等值线图（图4.3）为基础，我们得出了高龙金矿区综合成矿预测图（图5.2）。在该图上我们提出两个成矿预测区：其中Ⅰ区位于龙显村周围，东经105° 39′ 7″～105° 39′ 29″；北纬24° 11′ 28″～24° 12′ 16″，面积约0.81km^2；Ⅱ区位于龙爱村东侧，东经105° 40′ 25″～105° 40′ 38″；北纬24° 10′ 54″～24° 11′ 40″，面积约

$0.25km^2$。

此两个成矿预测区均具有如下特征：

1、均位于高龙穹隆周边的环状断裂上或其附近；

2、均处于近南北向次级断裂与环形断裂的交汇部位；

3、均位于硅化蚀变带或位于其附近；

4、均处在遥感线性构造分维等值线的高值区内；

5、均有次级近南北向的断裂与 F_{12} 贯通。

综合前文的研究可以发现，两个成矿预测区所具有的这五个特点也是高龙金矿区已知鸡公岩、龙爱和金龙山矿段所共有的特点。本文认为这五个特点是高龙金矿区成矿预测的必要条件，也是指导找矿的规律所在。

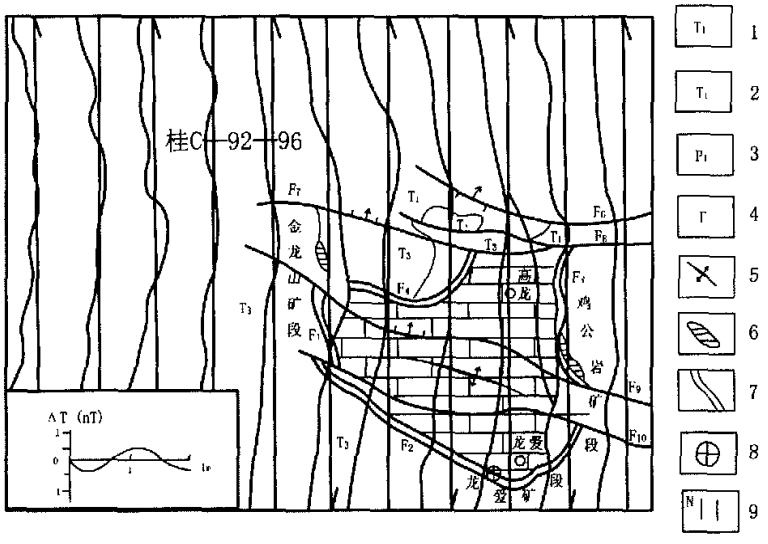


图 5.1 高龙金矿区及其外围航磁特征

1-百逢组 2-罗楼群 3-上古生界 4-断裂 5-背斜 6-金矿体

7-断裂蚀变带 8-金矿点 9-航磁测线方向

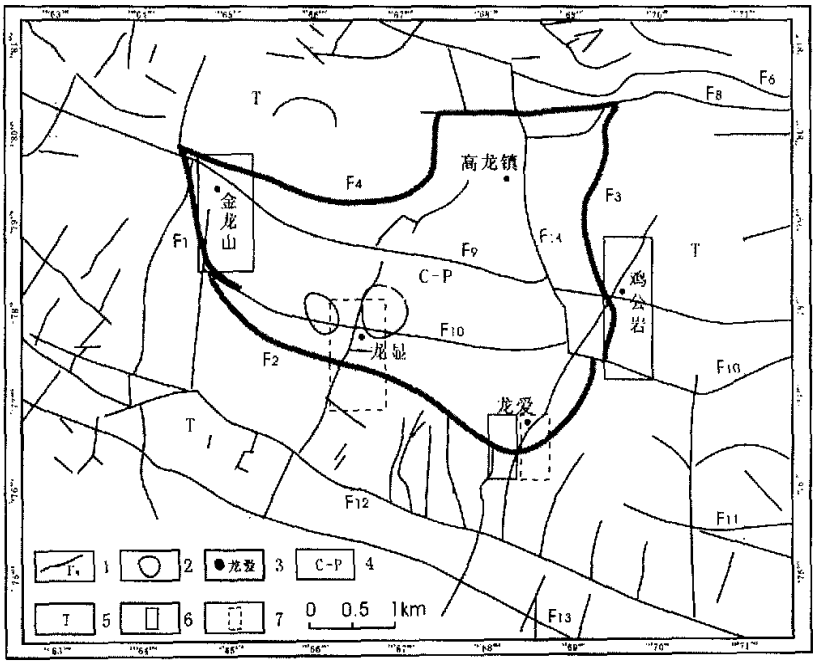


图 5.2 高龙金矿区综合成矿预测图

1-断裂及编号 2-硅化带 3-地名 4-石炭-二叠系 5-三叠系

6-已知成矿区 7-成矿预测区

第二节 有利成矿预测区的地球化学查证

一 验证方法——构造地化找矿法

本次成矿区找矿验证采用构造地球化学研究方法。采样线方位大致与高龙穹隆南缘硅化带走向垂直。根据已知矿体的规模、形态、产出位置和蚀变特征，确定采样网格为 100m×50m（线距×点距），但不拘泥于标准的网格，有时在设计采样点的附近适当偏离，主要针对断裂破碎带、裂隙充填物、矿化蚀变带和石英脉发育处取样，必要时针对不同对象分别取样或加密取样；在无构造发育地带按相应距离采取新鲜岩石作为控制样，在无原生露头时采集土壤样控制，采样深度约为 1.2m，取样对象只要为角砾粘土层，样品重约为 500g/个。取样时，在取样点附近采取多点组合成样，以便保证样品的代表性。为了准确定位和成图，全部采

样均为 GPS 定点。

二 工作设计及实施

本次工作以 1：10000 高龙金矿区地形地质图作为工作底图，采用 100m×50m 采样网格，工作范围覆盖穹隆南缘的硅化带，西起金龙山矿区南面（1088.3 山头附近），东至清刚岭北端，东西长约 6100m，南北平均宽约 275m，面积约为 1.7Km^2。工作剖面约有 65 条，样品总数 352 个（图 5.3）。采用化学光谱分析法对金元素进行室内分析，其灵敏度为 0.1×10^{-9}。

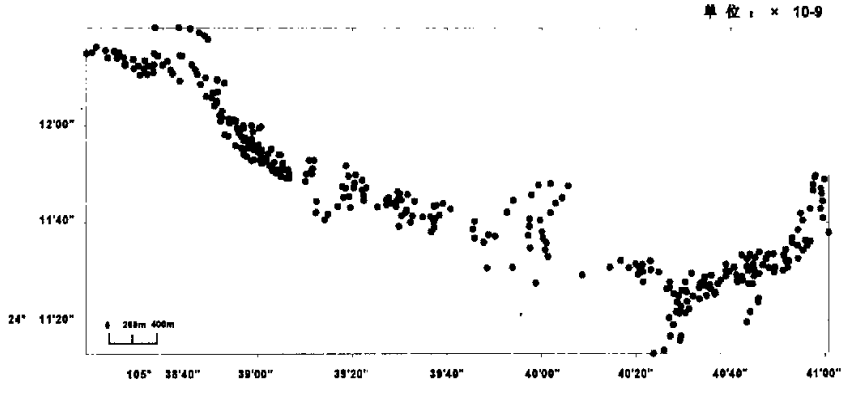


图 5.3 高龙矿区穹隆南缘金元素采样位置图

三 地球化学资料整理及图件编制

对于 Au 元素测试数据利用 SUFER 软件进行计算机处理圈定等值线图，初步所得结果（图 5.4）：

从图中我们得出①、②、③、④四处高值区，其中①区在龙显村南西面，呈近似等轴状，最高等值线值为 400×10^{-9}；②区位于龙显村南面，近似等轴状，最高等值线值为 500×10^{-9}；③区位于龙爱村南西面，呈双峰状，最高等值线值为 500×10^{-9}；④区位于龙爱村的东面，呈不规则状，最高等值线值为 2238.7×10^{-9}；其中③号高值区位于已知矿点上；①、②、④三个高值区是未知区域。

由于样品分布不均匀，很有可能导致计算机成图产生畸形现象。为了确定高值区的真伪，故将采样位置投在等值线图上（图 5.5）：

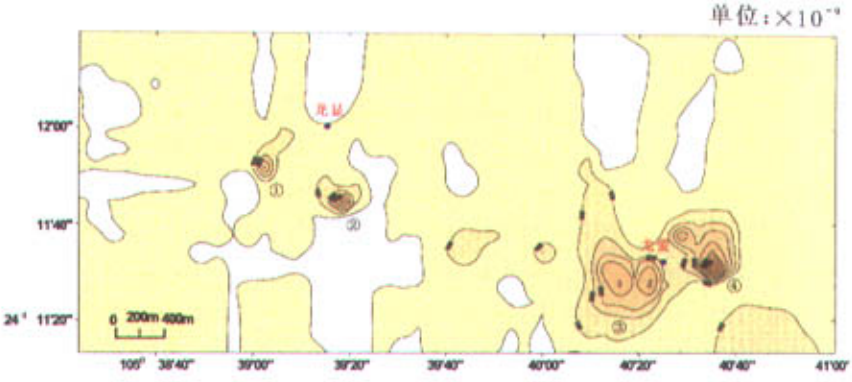


图 5.4 高龙穹隆南缘金元素初步地球化学异常图

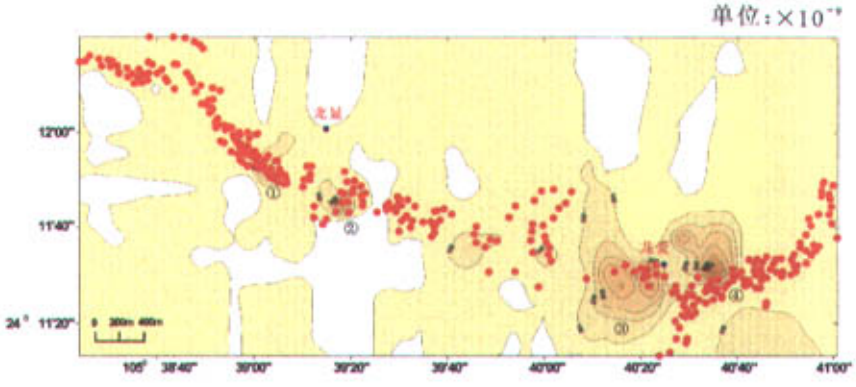


图 5.5 高龙穹隆南缘金元素地球化学异常与采样位置图

从图 5.5 中可以知道，①、②、④这三个区都有样品分布，属于真高值区。

针对①、②、④三个未知高值区，本文对其用室内化学光谱分析法对 Au 元素进行分析所得数据进行了异常特征参数计算。

异常特征参数计算的原理如下：

1 异常下限

通过下列公式计算而得：

$$C_b = 1/N\sum_{i=1}^{N} C_i \qquad (5.1)$$

$$S_b=\sqrt{1/(N-1)\sum_{i=1}^{N}(C_i-C_b)^2}\quad (i=1,2,3\cdots N)\qquad T=C_b+RS_b$$

式中：（5.2）

C_b……背景平均值

S_b……标准离差

N……参与统计计算的数据个数

C_i……第 i 个样品的含量

T……异常下限

R……可靠性系数

2 平均异常强度

采用异常范围内样品含量总值与样品个数之比，即：

$$C_a=\sum_{i=1}^{N}C_i/N \qquad (5.3)$$

3 异常衬度

采用平均异常强度与异常下限之比，即：

$$K=C_a/T \qquad (5.4)$$

C_a……异常含量平均值

K……异常衬度

4 异常面积

通过异常下限圈定的异常范围，为异常面积，其确定采用厘米纸法，即厘米格数乘以 2500m^2。

5 异常规模及形态

是综合异常强度和异常面积而提出的参数，本次异常规模采用面金属量来衡量。

面金属量值的计算应用如下公式：

$$Ps=(C_a-C_b)\times S \qquad (5.5)$$

式中：

Ps……异常面金属量（$m^2 \cdot 10^{-9}$或$m^2 \cdot 10^{-6}$）

C_a……异常平均强度

C_b……异常背景平均值

S……异常面积（m^2）

考虑到本区成矿元素含量不高，取 R=1，计算出 Au 元素的异常特征参数（表 5.1）：

表 5.1 Au 元素异常特征参数表

异常特征参数 / 元素	C_b	S_b	T
Au	53.24	142.19	195.43

注：Au 为 1×10^{-9}

四 初步工作成果

通过本次地球化学采样分析，成图后工有四个明显的构造地球化学异常区（图 5.6），其中 II 和IV号异常区分别落在前文提出的 I 和 II 成矿预测区内。经过进一步的 Au 异常特征参数计算，得出各异常区金元素的异常特征见表 5.2。

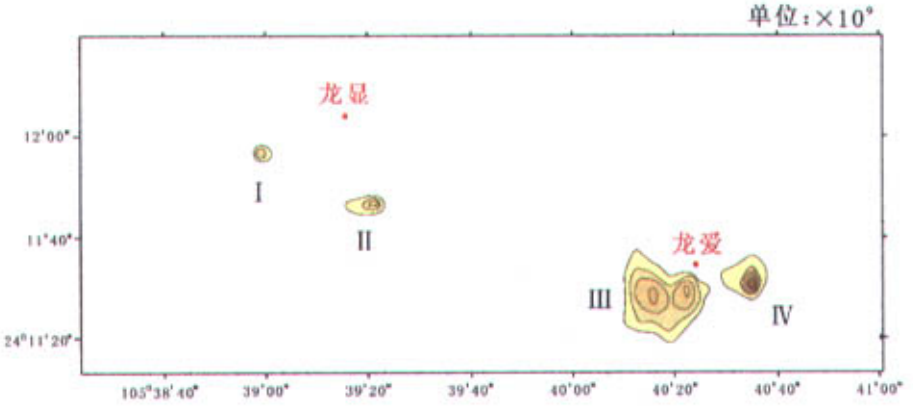


图 5.6 高龙穹窿南缘金元素地球化学异常图

表 5.2 各异常区金元素异常特征表

编号	形态	面积（Km^2）	规模（$\times10^{-9}$. Km^2）	异常强度（$\times10^{-9}$）	衬度
I	近圆形	0.02	0.76	157.46	0.81
II	近椭圆形	0.04	2.15	249.20	1.28
III	双峰状	0.28	36.78	326.77	1.67
IV	近三角形	0.08	19.85	443.54	2.27

I 号金异常区:

位于龙显村南西面约 700m ，东经 105° 38′ 57″ ～105° 39′ 01″ ；北纬 24° 11′ 54″ ～ 24° 11′ 59″ 。产于硅化带中，东西宽约 150m，南北宽约 163m，近圆形，面积约为 0.02Km^2。Au 一般为 10～350$\times10^{-9}$，最高为 1196.19$\times10^{-9}$，其异常强度为 157.46$\times10^{-9}$，异常衬度为 0.81。该异常为矿致异常，地表上可见较为破碎的岩石以及硅化程度不高的硅化角砾，蚀变强烈，局部有黄铁矿化、褐铁矿化。

II 号金异常区（位于本文 II 号预测区内（图 5.2））:

位于龙显村南约 663m 处，东经 105° 39′ 15″ ～105° 39′ 23″ ；北纬 24° 11′ 44″ ～24° 11′ 49″ 。产于硅化带中，东西宽约 280m，南北宽约 175m，呈近椭圆形，面积约 0.04Km^2。Au 一般 18～680$\times10^{-9}$，最高为 760.66$\times10^{-9}$。该区的异常强度为 249.20$\times10^{-9}$，异常衬值为 1.28。该异常为矿致异常，地表可见硅化角砾，岩石破碎，蚀变强烈，具有硅化、黄铁矿化特征。现已有公路开通至山顶。

III 号金异常区:

该区为预测结果内检区，位于已知的龙爱矿段区内，已被高龙黄金有限公司大规模露采。位于龙爱村南西侧，东经 105° 40′ 09″ ～105° 40′ 27″ ；北纬 24° 11′ 19″ ～24° 11′ 38″ 。产于硅化带中，东西宽约 650m，南北宽约 665m，呈双峰状，面积约为 0.28Km^2。Au 一般为 110～660$\times10^{-9}$，最高为 681.08$\times10^{-9}$。该区异常强度为 326.77$\times10^{-9}$，异常衬值为 1.67。该异常为矿致异常，地表上可见硅化角砾，岩石破碎，蚀变强烈，具有硅化、黄铁矿化、毒砂化。

IV号金异常（位于本文 II 号预测区（图 5.2））:

位于龙爱村东面约 400m 处，东经 105° 40′ 28″ ～105° 40′ 38″；北纬 24° 11′ 27″ ～24° 11′ 35″。产于硅化带中，东西宽约 350m，南北宽约 280m，呈近三角形，面积约为 0.08Km^2。Au 一般为 40～260×10^{-9}，最高为 2238.7×10^{-9}。该区异常强度为 443.54×10^{-9}，异常衬值为 2.27。异常衬值为 2.27。地表局部露头上见硅化角砾，岩石破碎（图版 4.11、4.12 的照片即摄于此区东南面山脚下公路边）。

由地球化学取样验证结果可见，以高分辨率卫星遥感资料为基础，结合其它地质资料进行综合成矿预测是可行的。

第六章 基于高分辨率卫星遥感的高龙金矿找矿模型

一、建模的意义及内容

将源于实践的知识和累积的经验上升为理论，以便于回过头来指导实践，使今后类似的工作有一定的依据可循。

在总结本次研究工作的基础上，本文给出了QuickBird-2 遥感影像信息处理模型和高龙金矿区高分辨率遥感地质综合成矿预测模型。

二、QuickBird-2 遥感影像信息处理模型

如前文所述，QuickBird-2 卫星遥感影像数据因其具有很高的空间分辨率，且只有红（Band3）、绿（Band2）、蓝（Band1）和近红外（Band4）四个多光谱波段和一个全色(Pan)波段，相对于惯用的 TM 和 ETM+等遥感影像数据来说，在图像处理时，任何处理方法都将面临波段选择的局限性难题。为了更好地挖掘 QuickBird-2 卫星遥感数据的地学信息，使遥感在危机矿山找矿应用中突现其宏观和微观两方面的长处，本文对高龙金矿区 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感影像处理方法进行了探索，提出了多重主成分—比值假彩色合成法。该方法已经在第四章详细介绍，其优点不仅增加了图像处理时波段选择的范围，同时在增强植被和构造信息方面有显著的效果。本文已利用此方法较好地从 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感影像数据中提取了研究区植被覆盖信息、构造及岩性信息。

以多重主成分—比值假彩色合成法为灵魂，本文提出了 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感数据处理模型(图 6.1)，该模型虽然主要针对于矿山找矿研究方面，但多重主成分—比值假彩色合成法就 QuickBird-2 遥感数据而言，因其对植被信息的处理有直观和悦目的长处，在环境遥感等与植被有关的研究中同样具有推广价值。

三、综合成矿预测模型

处理卫星遥感数据的目的就是能获取有用信息用于实现预期的目标。为了更好地达到找矿目的，在支持本文的项目中，我采用了以高分辨率卫星遥感为基础，综合地、物、化信息，沿着遥感和综合信息为前导、构造分析论证、物化探验证的思路，顺利开展了工作，并探索完成了高龙金矿区及其外围 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感地质综合成矿预测模型（图 6.2）。

该模型从高分辨率遥感信息解译出发，结合矿区构造控矿的特征，对研究区

的线性构造进行了综合解译成图，同时引入分形几何学了理论和方法对研究区的构造进行了进一步研究，得出了研究区内已知矿段与分维高值区间相吻合的结论和认识，进而将研究区的分维等值线图作为成矿预测的一个参考，在综合研究区其它地质资料进行思考后，提出了有利成矿预测区。为了讨论成矿预测的可靠度，最后进行了地球化学取样查证，结果显示，成矿预测效果较好。

该模型中，有利成矿预测区的选定是很重要的部分，它是对本次研究的所得和前人研究结果的综合，是建立在对前人工作的充分认识、理解和本次踏实研究基础之上的，也是研究的目的所在。

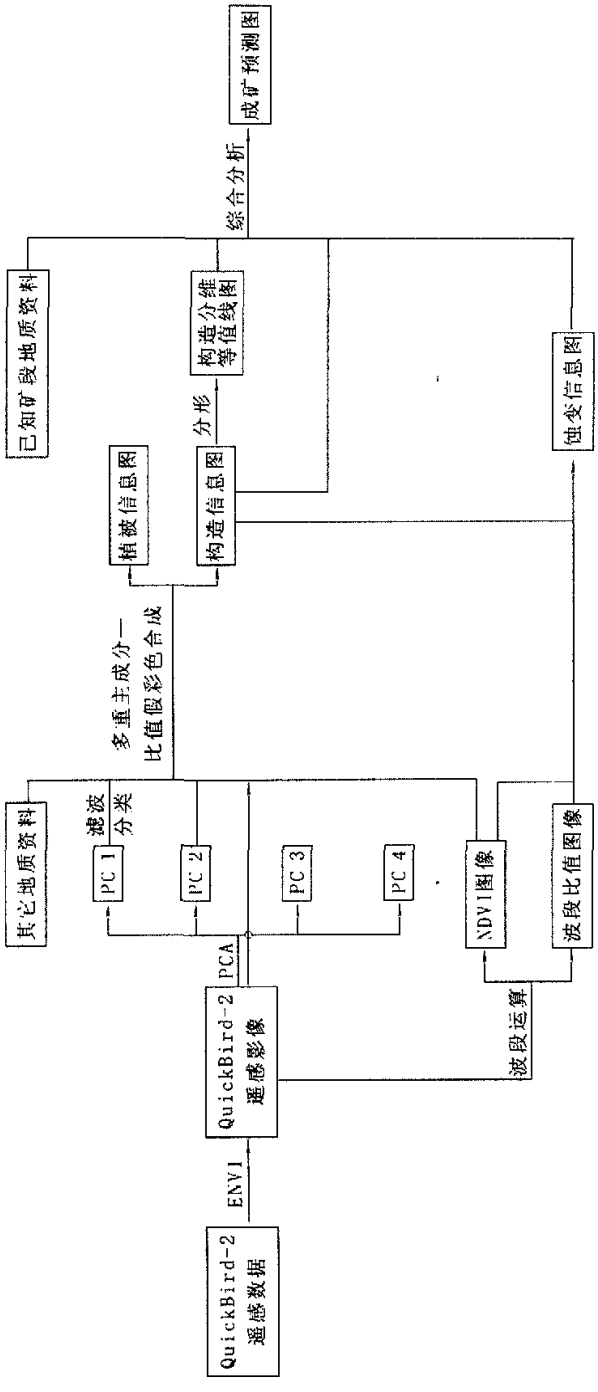


图 6.1 高龙金矿区及其外围 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感影像处理模型

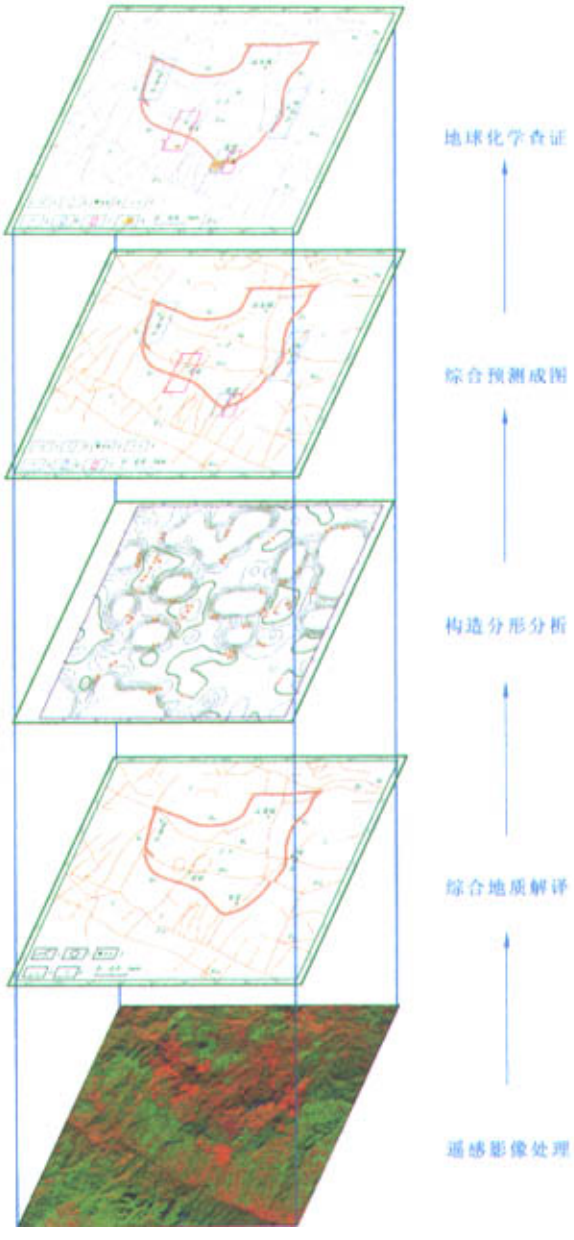


图 6.2 高龙矿区及其外围基于 QuickBird-2 遥感地质综合成矿预测模型

第七章 结论

通过对高龙金矿区的处理，并采用遥感和综合信息为前导、构造分析论证、物化探验证的研究思路，本文的研究取得一下主要成果或认识：

1、QuickBird-2 高分辨率卫星遥感影像数据的处理方法进行了探索，提出并采用多重主成分—比值假彩色合成法，通过图像处理，在中等植被覆盖的高龙金矿区及其外围有效地增强并提取植被、构造信息和岩性信息，并通过间接方法到了研究区蚀变信息，完成了研究区植被信息图（图版 3.1）和研究区地质综合解译图（图 3.7）

2、研究区的遥感线性构造应用盒计维数法（分形处理），在 20.000~0.125km 的标度范围内，经过统计计算求得高龙金矿及其外围的分维值 D=1.660，相关系数 R=0.999，表明研究区线性构造具有分形特征，其分形结构具有很好的统计自相似性。

3、通过分析高龙金矿区遥感线性构造分维等值线图可知，研究区内已知的三个矿段均处于分维高值区内，说明遥感线性构造的分维值越高，成矿的可能性越大。

4、就整个矿区而言，NWW 向线性构造的分维值大于近 SN 向线性构造的分维值，说明研究区内 NWW 向的线性构造较近 SN 向线性构造更为发育。

5、以 QuickBird-2 高分辨率卫星遥感解译资料为主，结合矿区其它基础地质资料，得出两个成矿预测区，经地球化学采样验证，均见有明显的金异常。据此表明高分辨率卫星遥感解译资料——特别是遥感线性构造的分维资料可作为矿床区成矿预测的重要指标。

6、遥感线性构造的分维能够反映地壳深部的构造信息，而深部构造又是矿区成矿的重要因素，因此可以尝试将高分辨率遥感线性构造作为成矿区预测和深部构造解译的重要参数。

7、高龙穹隆南侧的 F_{12} 断裂为矿区重要的导矿构造，及其连接并贯穿 F_{12} 与环状断裂的次级南北向断裂与高龙金矿床的形成有非常密切的成因关系，是矿区导矿构造中不可忽略的重要部分。

因时间有限，本文未完成研究区的 DEM，所以研究区的三维立体显示无法进

行，今后在遥感线性构造自动提取方面、QuickBird-2 与 ETM+遥感信息融合处理方面仍有探索的必要。限于笔者的水平，加之经费有限，本次工作在对于遥感地质的某些概念的理解、对遥感图像的处理方法和信息挖掘、分形方法的引用及构造地球化学验证工作中一定存在着其它的不当之处，甚至是错误，敬请有关专家、学者和同行批评指正，使本人的理论和实践水平能得到进一步提高，为遥感综合找矿技术的进一步应用和发展贡献一点微薄之力。

致谢

本论文自始至终是在钱建平教授和吴虹研究员的悉心指导和关怀下完成的。钱老师广博的学识使我受益匪浅，吴老师严谨的治学态度和坦荡豁达的胸怀及真诚的帮助将使我铭记在心，不敢忘记。在此谨向我的导师钱建平教授和吴虹研究员表示深深的谢意和由衷的敬意。

在课题的研究过程中，欧阳成甫教授、喻亨祥研究员和张明华博士给于了重要的指点。生活和学习上，承蒙冯佐海教授、罗先熔教授、庞保成博士、胡云沪副教授、伍开明老师及研究生处各位老师的帮助。三年里，师母张力高级实验师给了我家人般的关心。师弟吴高海曾两次陪同我到高龙进行野外考察，山高路远，烈日炎炎，吃了很多苦头，师弟陈建强在室内遥感数据处理中给于了很大的帮助，师妹李梅在论文答辩前帮我做了很多准备工作，师弟叶军、何胜飞和等及韦访和周辉等同学在室内用机方面给于了充分的理解和支持。在野外考察期间，得到了广西高龙金矿责任有限公司的大力支持，在此向各位老师、同学和高龙金矿有限责任公司表示深深的感谢。

最后，再一次向我的导师钱建平教授和吴虹研究员致以诚挚的谢意，向师弟吴高海表示深深的感谢！

主要参考文献

[1] 王国田. 广西田林县高龙金矿成因探讨. 矿产与勘查，1991，8（4）：136~141

[2] 夏邦栋，刘洪磊，吴运高. 滇黔桂裂谷. 石油实验地质，1992，14（1）：20～30.

[3] 谢卓熙. 广西田林高龙金矿地质特征及成因. 黄金科学技术，2000，8（5）：28～36.

[4] 涂光炽. 超大型矿床的探寻与研究的若干进展. 地学前缘，1994，1（3）：45～53.

[5] 罗镇宽，关康，等. 中国金矿床概论. 天津：天津科学技术出版社，1993，85～87.

[6] 毛政元，李霖. "3S"集成及其应用. 华中师范大学学报（自然科学版），2002,36（3）：385~388

[7] 张玉君，杨建民，陈薇. ETM+ (TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——地质依据和波谱前提. 国土资源与遥感，2002, (4): 30～36

[8] 张玉君，杨建民. 基岩裸露区蚀变遥感信息的提取方法. 国土资源遥感，1998，(2):46～53

[9] 张玉君，曾朝铭，陈薇. ETM+ (TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程. 国土资源遥感，2003，(2):44～49

[10] 刘吉平，赵鹏大，胡光道. 遥感影像地质异常分析及其应用. 地质科技情报，1997，6（增刊）:111～116

[11] 王日冬，邢立新. 矿床蚀变信息的遥感提取方法[J]. 世界地质，2000，19（4）：397-401

[12] 王晓鹏，谢志清，伍跃中. ETM 图像数据中矿化蚀变信息的提取——以西昆仑塔什库尔干地区为例. 地质与资源，2002，11（2）：119 ～122

[13] 赵鹏大，陈永清，刘吉平，等. 地质异常成矿预测理论与实践[M]. 武汉：中国地质大学出版社，1999

[14] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志. 北京：地质出版社，1985

[15] 燕守勋. 桂西北高龙金矿床的控矿构造. 地质力学学报，1996，第 2 期，31～35

[16] 李存有. 高龙金矿地质—地球化学特征及找矿意义. 贵金属地质，1994，3（4）：278~287

[17] 燕守勋，孟宪刚. 桂西北高龙金矿床的控矿构造. 地质力学学报，1996，2（4）：31~35

[18] 李存有. 高龙金矿同位素地球化学特征及其地质意义. 贵金属地质，1994，3(2)：123~130

[19] 国家辉. 桂西北超微粒浸染型金矿成矿地质条件及找矿模式. 广西地质，1994，7（2）：37~50

[20] 胡明安. 广西田林高龙卡林型金矿床成矿物质来源的稀土元素示踪. 地质科技情报，2003，22（3）：45~48

[21] 王灿章. 桂西北高龙金矿穹隆构造形成机制和控矿作用分析[硕士学位论文]. 桂林工学院，2003

[22] 孙忠. 桂西印支地槽褶皱系地质构造基本特征. 第二届全国构造会议论文选集. 北京：地质出版社，1979，第一卷：107~118

[23] 梅安新等. 遥感导论[M]. 北京：高等教育出版社，2001

[24] 马建文，赵忠明，布和敖斯尔. 遥感数据模型与处理方法[M]. 北京：中国科技出版社，2001.9

[25] 周成虎，等. 遥感影像地学理解与分析[M]. 北京：科学出版社，1999

[26] 李剑萍. 气象卫星混合像元分解研究综述明. 气象科技，1999, 2: 7-9

[27] 朱述龙. 基于混合像元的遥感图像分类技术[J]. 解放军测绘学院学报，1995, 12 (4):276-278

[28] J.J.SETTLE and N.A.DRAKE, Linear mixing and the estimation of ground cover proportions[J], INT.J.REMOTE SENSING; 1993, 14(6): 1159-1177

[29] Maarten Tromp & GerritEEpema, Spectral mixture analysis for mapping land degradation in semi-arid crew[J], Geologie en Mijnbouw, 1999,77:153-160

[30] Ph.PUYOU-LASCASSIES, A.PODAIRE & M.GAY, Extracting crop radiometric responses from simulated low and high spatial resolution data using a linear mixing model[J], INT. J.REMOTE SENSING,1994, 15(18):3767-3784

[31] 浦瑞良，宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社，2000

[32] 王晋年，等. 以地物识别和分类为目标的高光谱数据挖掘[J]. 中国图象图形学报，1999,4 (4): 957-961

[33] 谭衡霖，等. 试论遥感地质找矿的进展[J]. 地质找矿论丛，1999, 14 (4): 29-34

[34] 厉银喜，等. 美国陆地卫星 7 号的数据产品分类和格式[J]. 遥感信息，2000, 3: 37-40

[35] 张雍，等. 遥感技术在地质勘查研究中的应用(论文集). 北京:测绘出版社，遥感在中国，1996: 68-71

[36] 刘刚，于学政. 浅谈遥感技术在 1:5 万区调中的应用[J]. 国土资源遥感，1997, 1: 14-19

[37] 奚小环，张连. 地质矿产部“八五”期间物探、化探、遥感勘查若干新进展[J]. 物探与化探，1997, 21 (1): 2-5

[38] 余华琪，齐小平. 石油遥感二十年[J]. 国土资源遥感，1999, 3: 16-22

[39] 沙志刚. 数字遥感技术在土地利用动态监测中的应用概述[J]. 国土资源遥感，1999,

2:7-11

[40] 陈荫祥. 展十年辉煌功业望遥感宏伟前程[J]. 国土资源遥感，1999, 3: 3-8

[41] 刘成. 中等植被覆盖区遥感地质信息的提取及多源信息综合成矿预测方法研究——以辽南卧龙泉地区为例. 博士学位论文. 东北大学，2002

[42] 韦金丽. 多源遥感影像融合技术在土地利用动态检测方面的应用研究. 广西遥感学会第四次代表大会暨2004年学术交流会论文集.2004，97~102

[43] 张连蓬，陶华学，刘国林，等. 遥感图像几何校正的非线性有理逼近模型. 煤炭学报，2003，28（2）：140~144

[44] 广西壮族自治区第二地质队五分队. 广西田林县高龙金矿区鸡公岩矿段地形地质图，1：2000，1990

[45] Rong Guanao. Processing of Computer Image[M]. Beojing:Tsinghua University Press，1996

[46] 孙家柄，舒宁，关泽群. 遥感原理、方法和应用[M]. 北京：测绘出版社，1997

[47] 陈光火. 中等程度植被覆盖区岩石蚀变信息提取技术及其应用[J]. 国土资源遥感，1992,3: 55-60

[48] 张满郎. 中等植被覆盖区金矿蚀变TM及JERS-1 OPS遥感信息增强技术[J]. 国土资源遥感，1996, 4: 51-56

[49] 田庆久. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展，1998, 13 (4): 327-332

[50] N.A.QUARMBY, M.MILNES, TL.HINDLE and N.SILLEOS. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation prediction[J]，INTJ.REMOTE SENSINq1993,14(2):199-210

[51] S.M.E.GROTEN, NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso[J],INTIREMOTE SENSINq1993,14(8):1495-1513

[52] 邓兆伦. 遥感与地学数据综合分析技术在长白地区寻找隐伏矿的应用研究[J]. 国土资源遥感，1994, 1: 7-14

[53] 广西壮族自治区第二地质队. 广西田林县高龙金矿区地形地质图，1：10000，1990

[54] 任纪舜. 论中国南部的大地构造. 地质学报，1990，64（3）：225～238.

[55] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社，2001

[56] Dinesh.M.S, K.Chidananda Gowda and P,Nagabhushan, Unsupervised Classification for Remotely Sensed Data using Fussy Set Theory, GRASS'1997, 1997, 521-523

[57] 赵不亿，秦小光. 遥感构造的定量分析方法. 地质科技情报，1988,7(1):127～136

[58] 陈昌彦，黄克兴，王贵荣. 构造地质学中的分形几何学. 黑龙江矿业学院学报，1995,5(2):7～12

[59] 冯佐海，梁金城，等. 平桂地区遥感线性构造的分形特征及其地质意义. 地球学报，2002，23（6）：563~566

[60] 韩喜彬. 云开隆起西、北缘断裂构造与金矿关系分析研究[硕士学位论文]. 桂林工学院，2003

[61] 冯佐海，梁金城，等. 广西平桂地区构造线定量分析. 广西科学，2002，9（2）：115~118

[62] 梁德超，郑广如，侯连第. 高精度航磁资料在桂滇黔地区金矿普查中的应用效果. 物探与化探，1995，19（2）：128~134

[63]肖龙，王方正，等. 新疆伊犁吐拉苏地区的线性构造及控矿特征. 地球科学——中国地质大学学报，2003，28（2）：191~195

[64] Mandelbrot，B.B. Fractal:Forms.Chance,and Dimension[M]. WHFreeman，NewYork，1977

[65] 孔凡臣,丁国瑜，等. 线性构造分维值的含义. 地震，1991，5：33～37

[66] Hirata T. Fractal dimension of fault systems in Japan: Fractal structure in rock fracturegeometry at various scales.Pure and Appl.Geophys.1989,131:157～170

[67] 夏玉成，樊怀仁，胡明星，等. 霍州矿区断层构造的分形特征. 西安矿业学院学报，1997，17（1）：22～24，43

[68] 金章东,卢新卫,张传林. 江西德兴斑岩铜矿田断裂分形研究.地质评论，1998,44(11):57~61

[69] 郭纯青，李文兴，等. 岩溶含水介质与地下水系统理论研究. 桂林：广西师范大学出版社，1996.57～60

[70] 曾联波，金之均，李京昌，等. 柴达木盆地北缘断裂构造分形特征与油气分布关系研究. 地质科学，2001,66(2):241～247

[71] GG Wilkinson, A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data[J]，Int.J.Geographical Information Systems, 1996, 10(1):85-101

[72] H.Murai and S.Omatu, Remote Sensing image analysis using a neural network and knowledge-based processing[J], INT.J.REMOTE SENSING, 1997, 18(4):811-828

[73] B.Klinkenberg. 阴影区和太阳照射区的分形分析[J]. 世界地质，1995, 14 (1): 82-87

[74] B.Mannan, J.Roy and A.K.Ray. Fussy Artmap supervised classification of multi-spectral remotely-sensed images[J], INT.J.REMOTE SENSING 1998,19(4):767-774

[75] Yang Bailin et al. (1985)，Spectral study of rocks and some iron deposits from Easterm China.

Proceedings of the 3rd international Collopuium Signatures of Objects in Remote Sensing, Les Arca France, 399～402

[74] 吴虹，杨永德，王松庆. QuickBird-2&SPOT-1 矿山生态环境遥感调查试验研究.国土资源遥感，2004，(4)：46~49

[75] 刘燕君. 遥感找矿的原理和方法[M]. 北京：冶金工业出版社，1991

[76] 薛重生，王霞. 基于分形几何的遥感图像纹理分析方法及应用[J]. 地质科技情报，1997,2（增刊）:99-104

[77] 广西地质二队. 桂西北地区地质略图. 1989

[78] 夏玉成，樊怀仁，胡明星，等. 霍州矿区断层构造的分形特征. 西安矿业学院学报，1997,17(1):22～24

[79] 广西壮族自治区第二地质队五分队. 广西田林县高龙金矿区龙爱矿段地形地质图，1：2000，1990

[80] 广西壮族自治区第二地质队五分队. 广西田林县高龙金矿区金龙山矿段地形地质图，1：2000，1990

[81] 麻志勇，成荣树. 用灰色系统对赣西金矿床地质异常进行评价和预测[J]. 有色金属矿产与勘查，1994, 3 (5): 312-316

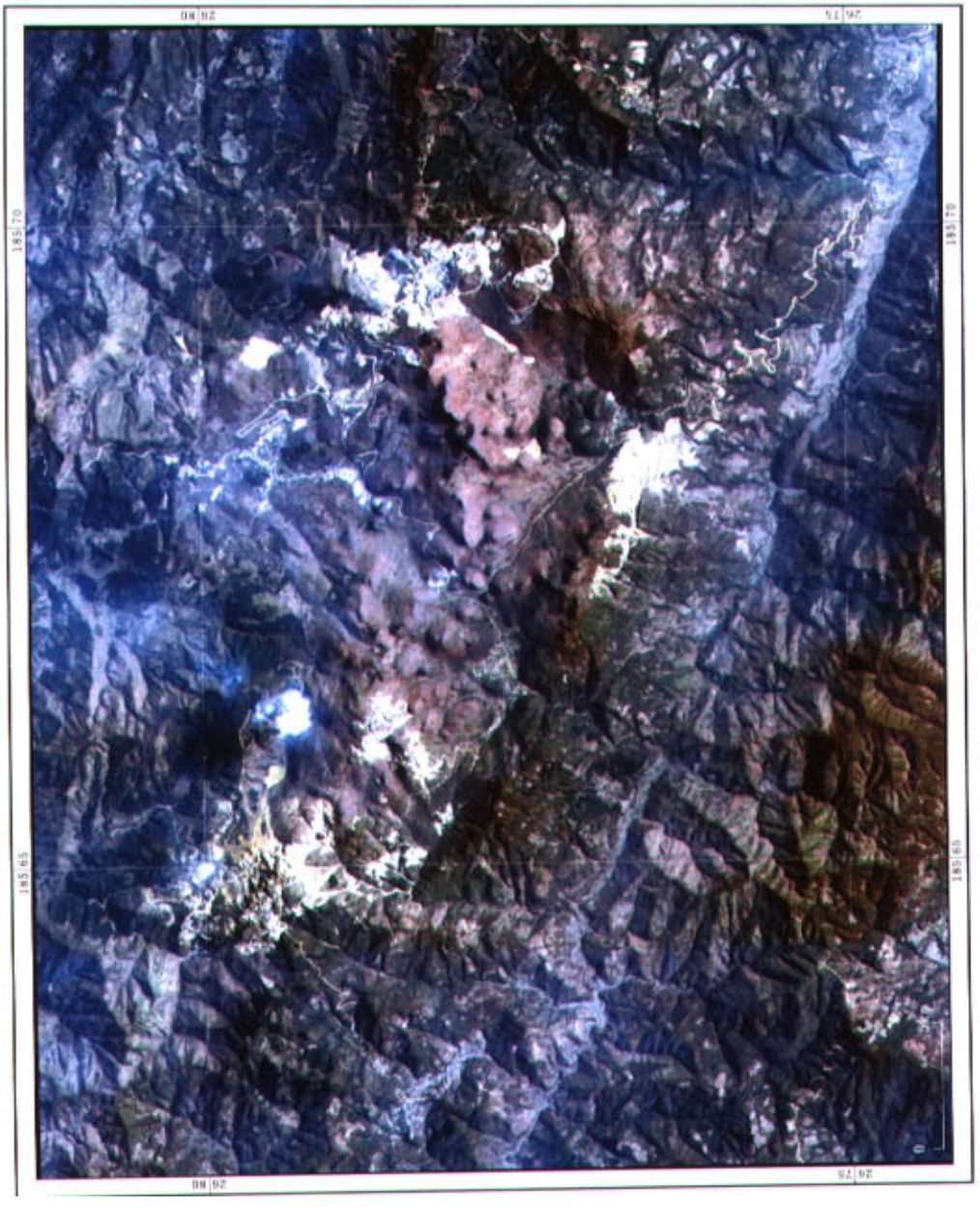
[82] 丁家瑞. 关于遥感技术在地质中应用的一些问题思考. 国土资源遥感，1996, 2: 1-9

[83] 桂预风，等. 基于灰神经网络理论的混合像元分解方法研究[J]. 遥感信息，2000, 4: 27-28

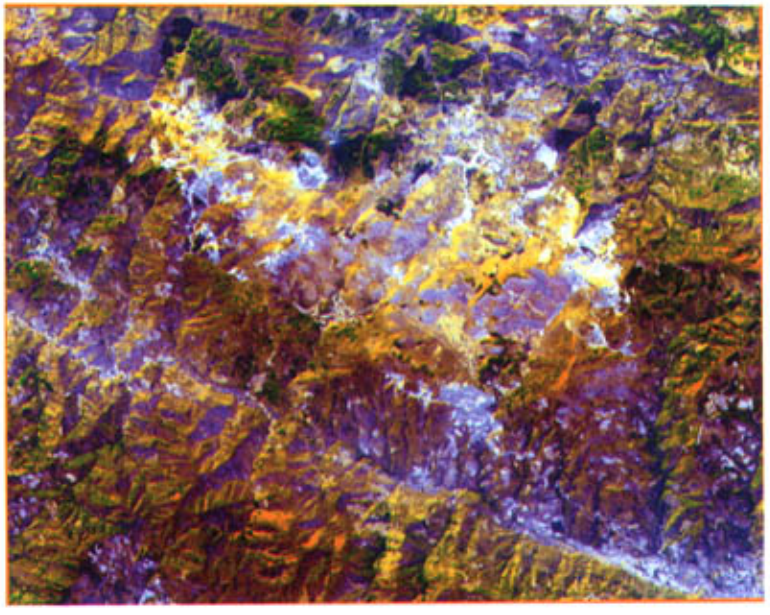
[84] 莫荣志. 高龙金矿区鸡公岩矿段成矿条件分析与成矿预测. 广西地质，1998，11（2）：13~16

[85] 杜建波，罗先熔，王 钟，等. 广西高龙金矿地电化学深部找矿研究. 黄金地质，2001，7（3）：69~73

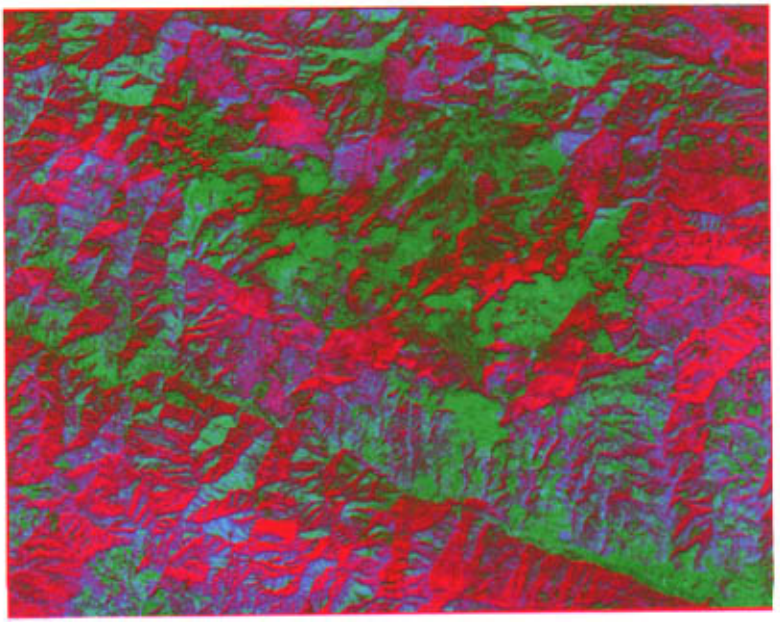
[86] 国家辉. 桂西北超微粒浸染型金矿成矿地质条件及找矿模式. 广西地质，1994，7（2）：37~50



图版1.1 高龙金矿及其外围QuickBird-2遥感影像真彩色合成图



图版3.1 高龙金矿及其外围植被发育情况假彩色合成图
（杉树呈绿色，草呈黄色）



图版3.2 高龙金矿及其外围构造信息假彩色合成图



图版3.3 研究区植被覆盖情况(典型代表区)
拍摄位置：18569073,2678976 拍摄方位：355°



图版3.4 上图兰色框范围放大
拍摄位置：18569160,2679510 拍摄方位：180°



图版3.5 研究区灰岩区植被覆盖情况
拍摄位置：18567481,2677551 拍摄方位：78°



图版3.6 研究区砂泥岩区植被覆盖情况
拍摄位置：18566566,2679246 拍摄方位：310°



图版3.7 高龙穹隆核部石炭—二叠系灰岩
拍摄位置：18567744,2679597 拍摄方位：240°



图版3.8 高龙穹隆翼部三叠系砂泥岩
拍摄位置：18569132,2679640 拍摄方位：355°



图版3.9 高龙穹隆岩性信息图
（中间较暗色调区为石炭-二叠系灰岩，周边较浅色调区为三叠系砂泥岩）



图版3.10 鸡公岩北矿段老采坑内
“孤峰状”硅化蚀变区
拍摄位置：18567744,2679597 拍摄方位：240°



图版3.10 金龙山矿段采坑内
“孤峰状”硅化蚀变区
拍摄位置：18569132,2679640 拍摄方位：355°



图版3.12 被第四系和植被覆盖的蚀变带（局部）
拍摄位置：18568536,2676397 拍摄方位：50°



图版3.13 被第四系和植被覆盖的蚀变带（全景）
拍摄位置：18568536,2676397 拍摄方位：50°



图版4.1 构造角砾岩
拍摄位置：18565062,2679588 拍摄方位：200°



图版4.2 发育于高龙穹隆中部的F_9断裂
拍摄位置：18568890,2678690 拍摄方位：38°



图版4.3 高龙金矿区及其外围ETM+遥感影像真彩色合成图



图版4.4 贯穿金龙山矿段与F_{12}断裂的地貌表现
（近南北向山沟）
拍摄位置：18564570,2679443 拍摄方位：175°

图版4.5 F_{12}断裂的地貌表现
（为北西西向大山沟（西段局部））
拍摄位置：18565765,2676393 拍摄方位：300°