目　录

前　言

第一章　遥感地质解译背景……2

一、国内外遥感地质研究及应用现状……2

二、遥感地质发展趋势和存在问题……4

三、遥感图像的国土覆盖率及地质可解程度的概略区划……4

第二章　遥感在成矿预测中地质解译技术的特点、内容和工作程序……8

一、遥感图像特点……8

二、矿物、岩石的波谱特征及地质应用意义……17

三、遥感地质特点……20

四、1:5万区调及中大比例尺成矿预测中遥感解译内容及程序……20

五、解译标志的建立和分类……24

第三章　不同地质（岩区）条件下遥感断裂构造特征判别……26

一、线性因素的涵义……26

二、断裂构造的识别标志……26

三、断裂构造的增强处理……32

四、遥感解译断裂构造可信度分析……34

五、断裂构造的时空特征……38

六、不同岩区断裂构造的特征……41

七、断裂构造的规模分级探讨……44

八、断裂构造与矿产的关系……44

第四章　不同地质（岩区）条件下环形构造特征判别及成因分析……48

一、环形构造的涵义……48

二、环形构造判别标志……48

三、环形构造特征判别及成因分析……49

四、环形构造与矿产的关系……61

第五章　遥感在中大比例尺成矿预测中的作用……66

一、遥感成矿预测的特点……66

二、遥感在成矿预测中的作用……66

三、遥感成矿预测工作准则……68

四、遥感成矿预测方法……70

五、大比例尺成矿预测实例……76

六、遥感找矿实例……82

第六章　1:5万遥感地质解译图的编制……89

一、遥感图像选择……89

二、编图内容及要求……89

结束语……93

参考文献……93

前　言

在大比例尺成矿预测中，主要任务是寻找矿田、矿床。在当前现实情况下，地表矿化露头已越来越少，寻找新的矿产基地的难度越来越大。矿产资源的需求量增大，迫使广大地质工作者将找矿重点转移到不易识别的新类型矿种和深部隐伏矿。多年来的经验告诉我们，要实现这一目标，必须以现代成矿理论为指导，运用遥感、物探、化探等综合手段，加强区域性控矿因素的基础研究。编制小比例尺到大比例尺的成矿预测系列图，是高水平、高质量完成成矿预测工作的唯一途径。

在成矿预测中，国外许多工业发达国家大量采用遥感技术方法，它是查明矿产形成机制最直接有效的方法之一。即通过对各类遥感图像的目视解译和计算机处理、提取与成矿相关信息、并与物化探、地质资料综合分析，圈定成矿远景区，并且实践证明它是成功的方法。

近年来地质矿产部门已把遥感找矿方法应用于大比例尺成矿预测，并已获得很大成功。地矿部把这一方法列为“七五”重点攻关项目来研究，经过五年多在全国不同岩区成矿区带的研究已取得突破性进展。现已找到一种遥感直接找矿田构造的新方法，即使用航天航空遥感技术取得的航卫片图像，直接识别内生金属矿田构造的方法，已获得成功。这种方法来自遥感理论和地质实践，是在对全国十多个成矿带、百余个典型矿田的遥感图像分析对比中总结出来的，经二十多个省区的找矿实践证明是行之有效的。

遥感找矿是以电磁波理论为基础的。任何一个内生金属矿床，都是成矿岩体，成矿热液作用于成矿围岩及在特定的物理、化学因素作用和导矿构造的控制下，成矿物质储集于较为封闭的并在一定的几何空间内形成的。含矿物质、导矿和容矿构造与成矿元素的运移和沉积是成矿的重要条件，由此而形成的地球化学晕和地球物理异常场是成矿过程中的必然产物，具有较强的光谱敏感性，在遥感图像上以色、线、环的组合形式显示出遥感异常来。

遥感找矿就是充分发挥遥感图像宏观真实的特点，在大面积内寻找矿化集中区，将图像上的色、线、环与矿田构造的基本要素（成矿岩体、控矿断裂、围岩蚀变）相结合，建立遥感矿田构造模式。应用这种找矿模式标志，可直接在航卫片上识别矿田构造，预测新的矿产地。

识别矿田构造的基础是详细准确的地质解译，只有了解各类图像的特点、地质规律，掌握了从遥感图像众多信息中提取出地质内容的方法和技术，成矿预测才有可能进行。基于这一目的，作者根据“七五”期间的研究成果结合遥感地质应用现状编写了此书，以期在新一轮的地质矿产普查、中大比例尺成矿预测中起到指导作用。

为了印刷上的方便，将书中的彩色遥感图像，印制成黑白图像，但书中的说明仍按彩色图像说明，请读者在阅读时加以注意。书中插图由褚明芬、楼秀楠同志清绘，在此表示感谢。

由于作者水平和时间所限，文中不妥之处敬请读者指正。

第一章　遥感地质解译背景

一、国内外遥感地质研究及应用现状

（一）国外遥感地质研究及应用现状

1．基础地质方面

前苏联在线性、环形构造地质解译方法研究方面具有世界先进水平。在1981年出版的1:250万全苏航天地质图内容丰富，研究水平较高，对一些地质问题做出了有意义的结论。与此同时，还出版了1:50万线性、环形构造航天地质图，对线性、环形构造的分布、性质、特征及成因进行了研究。在1:5万区调中，前苏联将遥感解译工作做为一个重要的组成部分。美国和一些西欧国家在线性体自动提取及线性体性质分析、图像处理等方面均占领先地位。在岩性识别方面，美国加利福尼亚大学RobertE.Crippen (Crippen,1987)运用TM波段比值的交叉回归方法来调整图像数据结构，较好地提高了图像的岩性识别能力。英国的W.P.Loughlin(Loughlin, 1985)对机载TM数字图像研究认为，机载TM多光谱波段彩色合成图像的不同组合可以有效地识别岩性、地层和蚀变带。西欧一些国家在微波雷达及激光遥感岩性识别方面进行了实验研究，取得了较好的效果。总的来看，遥感数字图像处理在岩性识别和分类方面，已进入可实际应用阶段，对于蚀变岩的识别及提取方法正在进一步的深入研究中。

2．矿产地质方面

目前，美国、法国、原苏联等国在这一领域有较大进展，主要是利用航天遥感资料（MSS.TM等）进行计算机图像处理并结合地球物理及地质资料进行矿产预测。SPOT卫星资料的应用已进入商品化阶段。

美国J.D.Herman(1982)等应用陆地卫星MSS比值图像，在爱达荷州用5/4比值图像圈出了已氧化的热液蚀变带。美国陆地卫星公司埃弗莱特（J. R. Eevertt)❶等人应用MSS图像在田纳西州和肯塔基州铅锌矿区进行的地质工作，解译出了大量线性影像和环形异常，经钻探证实，环形影像与铅锌矿化密切相关，并且发现了四个围绕已知主矿体的卫星矿体和三个独立矿体。在西班牙东南部罗德阿基拉金矿运用TM图像进行的矿产研究工作，识别出了火山杂岩中的热液蚀变区，提出了火山岩区遥感图像的最优处理方案❷。前苏联在贝辰加Cu、Ni矿带应用航空航天像片解译资料结合地球化学资料对构造裂隙进行了分析，认为不同级别断裂的最大密度决定了矿田的位置，无矿区与含矿区的构造格局是不同的，并由此来评定新的地段的找矿远景。南澳奥林匹克坝Cu-Au-U矿床的发现是遥感用于地质找矿的一成功案例，通过对大型线性体分析并结合重磁资料确定出的“特提

---

❶ 赴美遥感技术考察报告，中国遥感代表团，1980．4

❷ 西班牙东南部金矿勘查运用主题填图器填绘热液蚀变带《国外遥感地质通讯》，8702

斯扭曲"(构造扰动带)，经勘探证实为大型Cu矿并伴有U、Au矿❶。

（二）国内遥感地质研究及应用现状

1．基础地质方面

国内遥感地质工作虽然起步较晚，但发展迅速，特别是近十年来遥感在地质中的应用取得了很大进展。地质科学院于1981年出版了1:600万全国陆地线性构造图和说明书，划分出74个巨型和89个大型线性构造带，并判别了断裂的力学性质，同时解译出166个直径约20km以上的环形构造。所提供的资料和见解对全国地质构造提出了重要的补充和修正。青海地矿局于1988年编制了全省1:150万航卫片解译活动构造图，对省内活动构造解译标志、主要活动断裂的影像特征、最新构造运动的表现形式及地震地质特征作了较充分的论述❷。新疆地矿局编制了西准噶尔界山区1:50万线性构造与内生矿产分布图，划分出了2800余条线性构造，解译出26个环形构造，并研究了它们的力学性质及空间展布特征❸。在全国（除西部外）已完成遥感1:50万构造解译。

在1:5万区调中遥感正日益发挥出其优势，甘肃地矿局在红山幅1:5万区调中应用彩色航片，结合常规区调方法，较好地完成了任务。不仅速度快，而且质量高，经济效益显著，较常规投资减少1/2❹。河南地矿厅在鸣皋幅1:5万区调中，采用彩红外航片及卫星图像处理资料，不仅快速完成了任务，而且节省了投资，提高了填图质量和地质、矿产的研究程度。地矿部"七五"科技攻关课题"1:5万区调中遥感方法技术研究"，在总结了大量实际工作的基础上，提出了在1:5万区调中岩性识别、断裂及环形构造解译标志等方法和准则，使遥感地质解译逐步趋向科学化和标准化❺❻。冶金、有色、石油等部门也做了大量的工作。

在计算机遥感图像处理及岩性自动分类，线性体自动提取等方面的研究都已取得了一定的成果，对遥感地质工作将起到推动作用。

2．矿产地质方面

基于找矿目的，有关系统地质（遥感地质）单位在全国不同地区做了大量的应用和研究工作，取得了丰硕成果。王学佑在太行山中段应用MSS和TM图像进行成矿预测工作中发现了30余处含金硅化石英脉或构造破碎，蚀变矿化点、带，提出了岩金（银）成矿的12个特征和9大成矿要素❼，冶金部天津地质研究院在甘肃北山地区用TM图像进行了金矿找矿靶区试验研究，根据遥感图像上的地层，岩体、构造、蚀变等信息结合已知金矿控矿条件及影像特征，圈出36个靶区❽。甘肃省地矿局在红山幅区调中，应用遥感找到了一个中型金银矿和一小型菱镁矿。地矿部遥感中心在对全国主要矿区影像特征研究的基础上，在实际工作中提出了多处找矿远景区，有的已被地质工作所证实，在理论上，提出了应用遥感找矿的十种模式化标志，为遥感找矿提供了新方法。

---

❶ 南澳州罗比当斯地区奥林匹克坝Cu-Au-U矿床发现时线性体构造分析的作用《国外遥感地质通讯》，8701

❷ 青海地矿局遥感站，编制1:150万青海省航卫片解译活动构造图，遥感地质动态 1989，7-18期

❸ 编制新疆西准噶尔界山区1:50万线性构造与内生矿产分布图，出处同上

❹ 甘肃地矿局遥感站，1986，遥感技术在甘肃北山地区1:5万区调中的应用及效果

❺ 楼性满等，1989，不同岩区线性、环形构造影像特征判别及地质解译研究

❻ 薛重生等，1989，1:5万区调中根据遥感图像识别岩性的方法技术研究

❼ 王学佑等，遥感地质在太行山中段金（银）找矿预测中的应用 遥感地质动态，1989，7-18期

❽ 阎积惠等，TM图像用于甘肃北山地质制图和圈定金矿靶区的试验研究成果，出处同上

二、遥感地质发展趋势和存在问题

（一）发展趋势

随着遥感技术的发展和数字图像处理方法及信息提取能力的提高，在地学应用中，必然将多平台、多时相的系列化图像与遥感数据库相结合，使地质解译标志标准化、模式化，使遥感解译达到自动化，由定性到定量，使遥感工作向规范化发展。在1:5万区调及大比例尺矿产预测中遥感将起到越来越重要的作用。

（二）存在问题

1．技术问题

由于没有规范要求，遥感地质解译方法不一致，解译结果也相差较大。在基层地质单位，遥感理论及实际工作经验较少，不能充分发挥遥感的优势。在这种情形下，急需建立遥感工作规范，培训遥感地质人员，提高遥感地质工作者的素质，以适应日新月异的遥感地质学的发展。

2．资料获取问题

目前，在全国都能获取到的遥感资料只有黑白航片和MSS卫星图像，远远不能满足遥感地质工作的需要。TM卫星资料虽然也有一定程度的覆盖，但数据处理、图像合成周期较长，影响到工作使用。因而，需要有关资料部门为用户提供便利条件，使用户及时得到满意的遥感图像。

遥感较高的资料费用也是影响遥感推广普及的一重要因素。

三、遥感图像的国土覆盖率及地质可解程度的概略区划

（一）遥感图像资料的国土覆盖率（表1—1）

1．航天遥感图像资料

·MSS图像：计4个波段，全国覆盖共537幅。

·TM图像：共有7个波段，北京地面接收站可接收我国85%的影像资料（新疆西部地区尚缺）。是当前地学应用的重要航天影像资料。

·SPOT卫星高分辨力可见光图像（尚少）。

·前苏联卫星图像资料：在我国西北部地区有覆盖。解像率较高。

·气象卫星图像资料：我国全部覆盖、但因其地面分辨率太低。对大比例尺成矿预测无价值。

·国土资源卫星图像资料：我国东部地面覆盖率约60%，比例尺1:20万。图像质量有好有坏不稳定。

2．航空遥感像片

·黑白航空像片，全国覆盖。为18×18cm的图幅像片。大部分为50年代到70年代摄制的。

·彩色和彩红外像片：在重点城市重点成矿区带，经济开发区已作过专项飞行共约250×10^4.km。图像为24×24cm宽幅像片，质量较好。

·航空多光谱扫描和热红外扫描图像：只在重点地区作过试验飞行。

·航空侧视雷达图像：在新疆、长江三峡、湖南等地作过试验性飞行。

目前应用以TM图像和航空黑白像片为主，重点区带可作彩色或彩红外像片专门飞行。但要提前提出申请要求。得到批准后，有关部门实施飞行，提供所需照片。

（二）遥感图像地质可解程度的概略区划

图1—1为使用美国陆地卫星MSS图像镶嵌而成的，真实反映了全国自然地理景观，图中土壤、植被、沙漠、河流等一目了然，基岩裸露程度和岩石主要类别清晰可辨，据此再和其它遥感、地质、地理资料可对中国全境遥感地质可解程度做一概略区划。

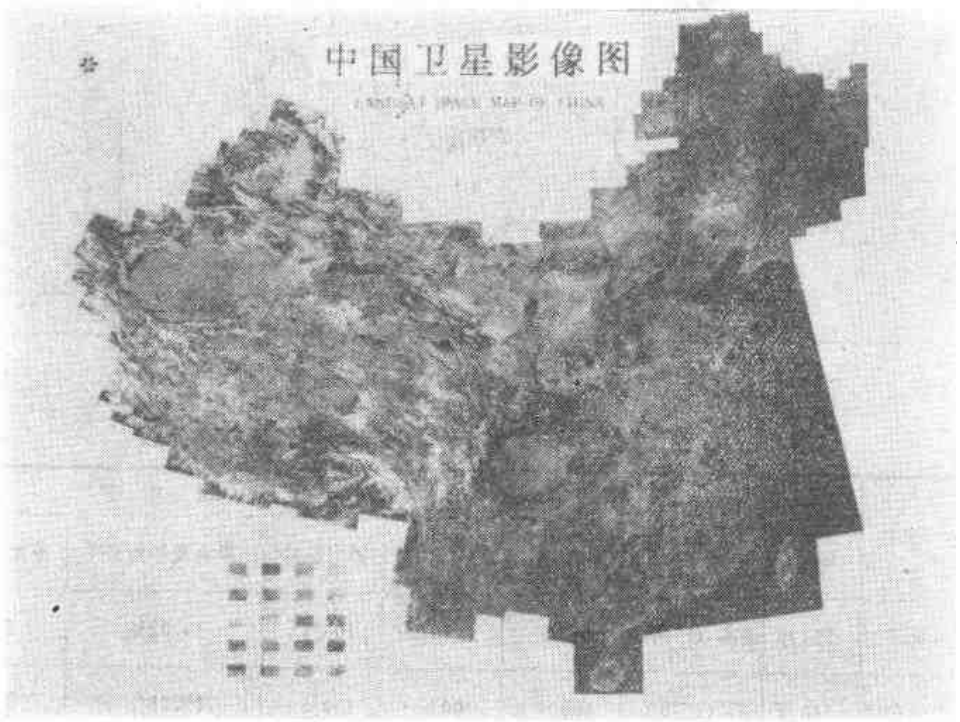


图 1—1　中国卫星影像图（中科院遥感应用研究所编）

本图是采用584幅美国陆地卫星图像镶嵌而成，反映了除南海诸岛以外的我国陆疆全貌，是中华大地自然面貌的真实缩影；本图气势磅礴，宏观展示了中国自然结构和人文环境的丰富信息，清晰地显示了锦绣山河的微细特征

表1—1列出了全国遥感影像地质可解程度的概略分区及各区的航、卫片覆盖。图1—2给出了全国遥感地质可解程度的概略区划、区划基本依据是：

裸露岩石面积及其所占全区面积百分比；植被及土壤覆盖程度；航空像片直接填图找矿能力；卫星图像的区域地质解译程度及其地质制图能力；区域地理景观要素，气候条件要素；工作条件难度等。依上述区划要素，将全国划分成5个一级区划单元的若干个二级单元（图1—2），各区分述如下：

Ⅰ．西北区：为干旱及半干旱气候区，裸露岩区约占70—80%，航卫片地质可解程度达一级，遥感图像直接反映的地质、矿化信息丰富，断裂划分、岩性识别、地层划分基本满足1:5万区调及地质找矿需要。

Ⅱ．华北华东区：为半干旱及温湿带气候区，裸露岩区面积在不同亚区差异较大，一般为30%—70%，其地质可解程度与岩石类型、地层分布、产状形态和地理景观密切相关，以一级和二级居多（见图1—2；2-1、2-2），严重覆盖区降为三—四级（见图1—2；

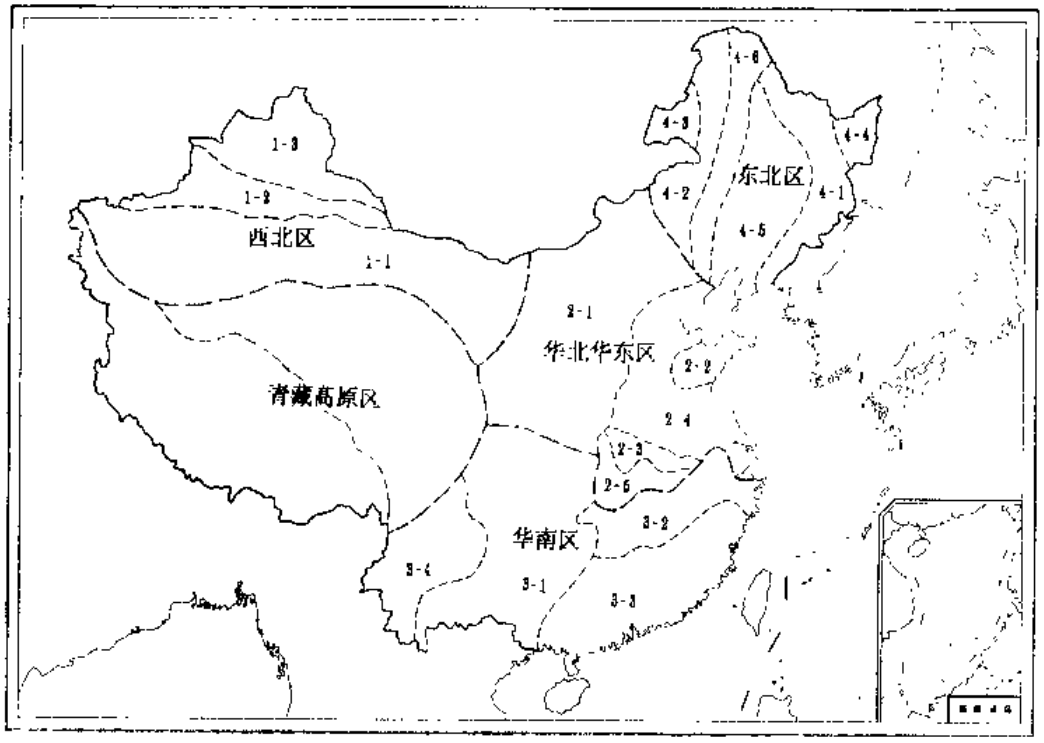


图 1—2　全国航卫片地质解译程度概略区划图

表 1—1　全国航卫片国土覆盖率及地质可解程度概略分区

区划代码	地区名称	面积 (km^2)	地质可解度	影像资料覆盖率				
				MSS	TM	黑白航片	彩色及彩红外②	多光谱及热红外
Ⅰ	西北区	174万	最高（一级）	100%	≈85%①	100%	39.02%	部分地区
Ⅱ	华北华东区	240万	高（二级）	100%	100%	100%	15.77%	部分地区
Ⅲ	华南区	265万	高—中等（一—二级）	100%	100%	100%	11.46%	部分地区
Ⅳ	东北区	90万	中等—较差（三级）	100%	100%	100%	23.37%	部分地区
Ⅴ	青藏区	192万	中等—极差（四—五级）	100%	80%	100%	14.96%	无

① 为我国北京地面所能接收到的

② 据地矿部遥感中心资料统计，资料截止到1991年底

2-3，2-4）。覆盖类型以灌丛林地为主，其次为黄土和残坡积物。在山前及平原区对隐伏构造的解译分析显示出遥感技术的优势。胶东、大别山、北京北部山区—冀东深变质岩发育区可解程度较低。

Ⅲ．华南区：为亚热带—温湿带气候区，植被发育、岩石裸露程度低。长江中下游（见图1—2：3-2）、巴东鄂西、云贵高原碳酸盐岩地区（见图 1—2：3-4）地质可解程度可达一级至二级，南岭侵入岩带一般可达二级（见图 1—2：3-1），东南沿海火山岩带则多属三级（见图1—2：3-3）。

Ⅳ．东北区：为干旱—半干旱气候区。大兴安岭（见图1—2：4-5）及辽东区（见图

1—2：4-1）植被覆盖严重，直接地质信息少，可解程度低，为三级和四级，辽西区（见图1—2：4-2）可达一级到二级，新生代沉积盆地区隐伏构造解译效果好。

Ⅴ．青藏高原区：为高寒地带，寒冻风化强烈，高原边缘基岩裸露率高，地质可解程度达一级至二级，冰雪覆盖区及草甸覆盖区则为三级到四级。

第二章　遥感在成矿预测中地质解译技术的特点、内容和工作程序

一、遥感图像特点

（一）遥感图像基本要素

色、形、坐标是遥感图像三要素，因坐标是固定的，所以色、形是遥感图像最重要的两个因素。

1．色（色调、色别）

不同类型遥感图像上的色调其物理意义是不同的，可见光图像的色调决定于地物反射波谱特征，其深浅与地物亮度值相关。热红外图像的色调是地物温度信息，侧视雷达图像的色调决定于地物对人工发射微波的反射强度值大小，多波段图像则据波段的不同而异。色调是区别不同地物的根本因素，但是影响其因素很多，除地物本身的物质成分、结构构造外，地理环境、地貌形态及感光材料和洗印技术等因素影响也很大。因而色调稳定性差，变化大。地质解译中，主要是研究地质体之间的相对色调差异和相互关系，通过识别色变化，研究色异常与地质信息的相关性以及研究色异常与成矿元素的相关性。

2．形（形态、纹理）

主要是指不同级别的沟谷和不同形态的山体所组成的地貌形态。它决定于地物的平面投影，反映其几何性质，如地物形状、大小及地物之间的平面形态关系。形受成像方式影响较大。

色与形构成图像全貌，两者相辅相成。色是本质属性，形是表像，是通过色显示出来的，没有色就没有形，在图像上色与形两个要素组合出形形色色丰富多彩的信息。色的多层次，形的多方位，充分显示出自然界物质的多样性和地质构造的复杂性。解译者应把图像上色与形显示出的丰富信息准确地加以识别，提取出并转化为地质信息。

（二）遥感图像特征

在1:5万区调及大中比例尺成矿预测中，应用最广的是美国陆地卫星（landsat）多光谱扫描仪（MSS）❶图像和专题制图仪（TM）❷图像以及黑白及彩色（彩红外）航片，少数地区应用侧视雷达（SLAR）❸图像和热红外扫描图像。

1．陆地卫星图像特征

（1）MSS图像特征

① MSS图像特点

---

❶ MSS——Multi Spectral Scanner

❷ TM——Thematic Mapper

❸ SLAR——Side Looking Airborn Radar

A．MSS图像为扫描成像　一幅图像对应地面185km×185km实际面积，由2340条扫描线构成，每条扫描线又由3240个像元构成。每个像元对应79m×79m地面面积。

B．MSS图像是多中心投影成像　由于扫描成像的MSS图像每一次有效扫描都存在一个投影中心，而且投影中心位置随扫描镜的转动而移动，所以MSS图像是多中心投影图像。

C．MSS图像在同一地方相同时间成像　由于陆地卫星与太阳同步，因此MSS图像能在同一地方在基本相同的太阳光照条件下重复成像。

D．中国境内只有粗制的MSS图像　由于目前陆地卫星系统在中国境内无地面控制点，不能测量和校正MSS图像几何畸变引起的误差，所以我国境内的MSS图像都是粗制的，只经过系统误差校正。

② MSS图像的经纬度

MSS图像的经纬度注于图像边框，以度数旁边一段垂直于图像边框的短线近边框一侧为准（图2—1）。在中纬度区半度为一注记，以N、E代表北纬和东经，有时图像一边同时有N和E注记。由于一幅图像面积很大，中、高纬度区的纬线为微微弯曲的弧线。

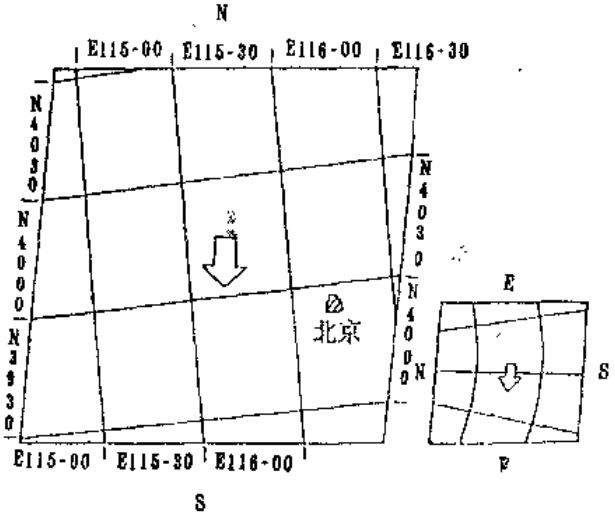


图 2—1　卫星图像的经纬度网格注记

③ MSS图像的重叠率

MSS图像的重叠包括纵向重叠和旁向重叠。

纵向重叠是指同一轨道上，上幅图像的下端和下幅图像的顶端为相同内容，重叠宽度为10%，相当于地面16km。

旁向重叠是由卫星运行轨道决定的，不同纬度地区的重叠率不同（表2—1）。

④ MSS图像注记

MSS图像四周分别有表明图像参数的注记，内容有：

重叠符号：图像四角“+”。

经纬度注记：位于图像四边。

表 2—1　不同纬度区陆地卫星图像旁向重叠率

纬　度	0	10	20	30	40	50	60	70	80
重叠率%	14	15.4	19.1	25.6	34.1	14.8	57.0	70.6	85.0

色标：图像最下侧表示色调分级的长条。

文字注记：位于图像下侧，灰阶之上。以北京幅（图2—2）为例，从左到右依次为：

26OCT76：图像获得日期，即1976年10月26日。

C≒N40-12/E117-06：像主点的地理坐标（经纬度），即北纬40°12′，东经117°06′。

N≒N40-11/E117-10：天底点的地理坐标（经纬度），即北纬40°11′，东经117°10′。

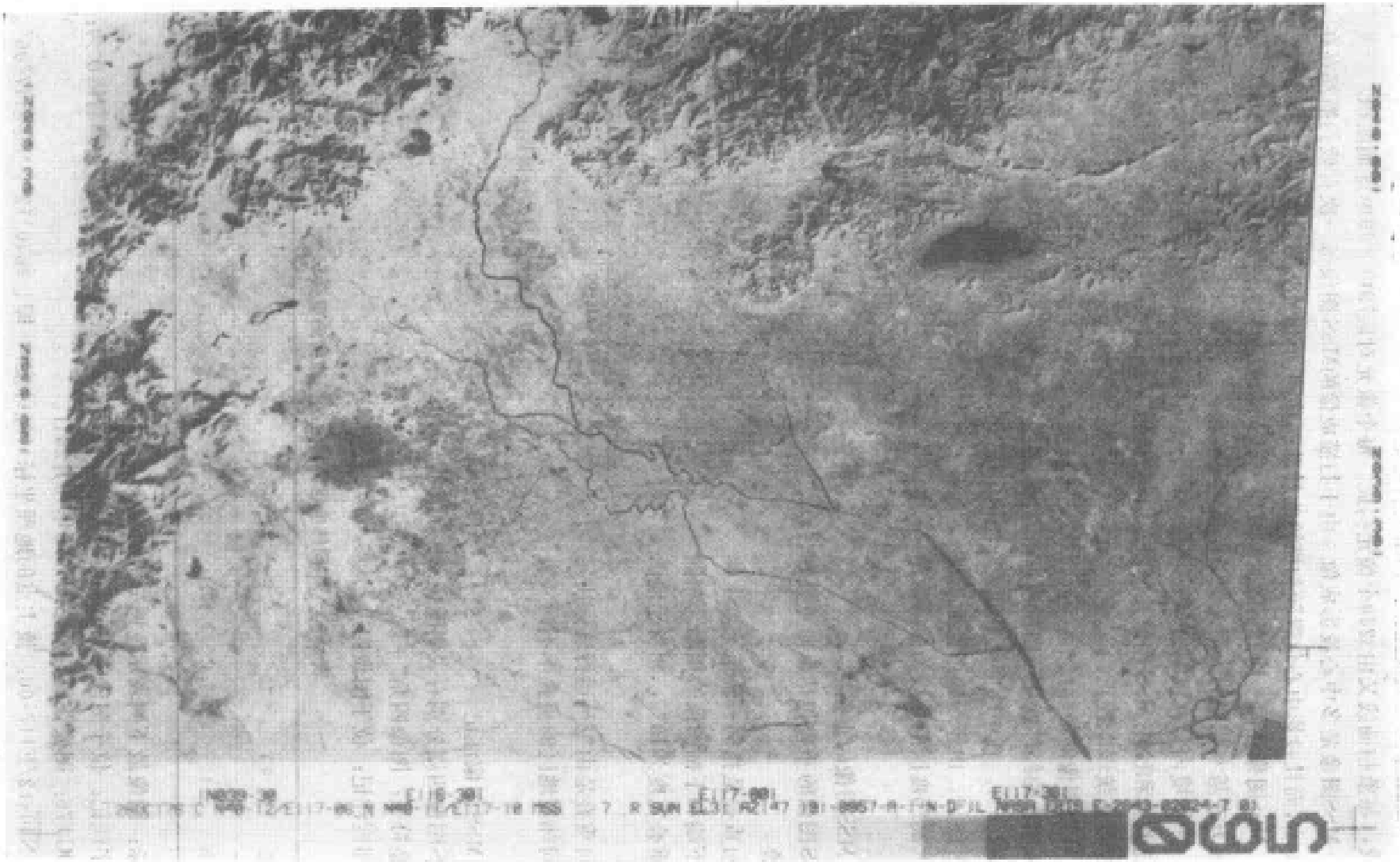


图 2—2　陆地卫星MSS图像注记（北京幅，7波段）

MSS7（或4、5、6）：多光谱扫描图像的波段。

R(D：实时传输图像)：贮存回放图像。

SUNEL31：太阳高度角。

AZ147：太阳方位角。

191-8957-G：

191：航天器的航向（方位角）。

8957：从发射时算起的轨道圈数。

G(A或N)：美国卫星地面接收站，G：加里福尼亚戈尔茨顿，A：阿拉斯加菲尔班克斯，N：马里兰州戈达德空间飞行中心。

1-N-D-1L：

1：图像是满幅的。

N(A)：经正常处理（非正常处理）。

D(P)：图像中心按天体历计算（按轨道星历计算）。

2(1)：卫星资料数据按压缩方式发回（线性方式）。

L(H)：低增益（高增益）。

NASA：美国国家航空和宇宙航行局。

ERTS(LANDSAT)：地球资源技术卫星。

E-2643-02024-7：卫星编号和成像时间。

E-2(或1、3、4、5)：卫星编号。

643：从卫星发射之日起天数。

02：成像时时数（格林尼治平均时）。

02：分。

4：秒（秒的十位数）。

7(或4、5、6)：MSS通道数。

01：再次使用视频的次数。

⑤ MSS图像灰阶

MSS图像下方，有一条表示不同级别色调的长条，即灰阶，分为15级，它是划分地物反射光谱特性的尺度。

灰阶只能反映同一张图像上地物波谱的差异，不同图幅和不同类型图像的灰阶不能相比。

⑥ MSS图像分辨力

是指图像所能分辨的最小地物的大小。Landsat-1、2、3、4 MSS各波段的分辨力为79m×79m。

⑦ 各波段MSS图像的光谱解像力

陆地卫星扫描仪同时对同一地物获取四个波段的扫描图像。在不同波段的图像上，同一地物可以有不同的色调，甚至其影响轮廓特征也不同，这是由于同一地物对不同波段的波谱效应是不同的。不同的波段，在地质应用中所起的作用也是不同的(表2—2)。可用像元亮度值表示。

（2）TM图像特征

表 2—2 各波段MSS图像特点

波　段	波长（μm）	图像特征	地质应用	比例尺
MSS4	0.5—0.6（黄绿光）	各种地物的边缘轮廓模糊	显示植被的分布范围及生长密度，确定水体污染，辨别深色的地层及第四系松散沉积物	1:360万 ↓ 1:20万
MSS5	0.6—0.7（黄红光）	地貌及植被特征明显，水体清晰	辨别水体清晰度，划分岩性，确定第四系边界，解译地质构造	
MSS6	0.7—0.8（红光，近红外）	对水体及湿地反映明显	解译植被掩盖地层、岩性及隐伏地质构造	
MSS7	0.8—1.1（近红外）	立体感强，细节清楚，水体暗，植被亮	解译含水地质体及隐伏构造	

专题制图仪（TM）为 Landsat 4 、5 上新安置的传感器，TM图像特点基本同 MSS 图像（图 2—3），不同的是 TM 图像有七个波段，TM1—4 波段与 MSS 4 个波段相似，但较 MSS谱带窄。TM 5 、7 是为更好识别岩性选用的近红外波段。以上波段地面分辨率为30m。TM 6 为热红外波段，地面分辨率为120m。因此，较MSS 图像 TM图像将为地质应用提供更多的信息（表2—3）。

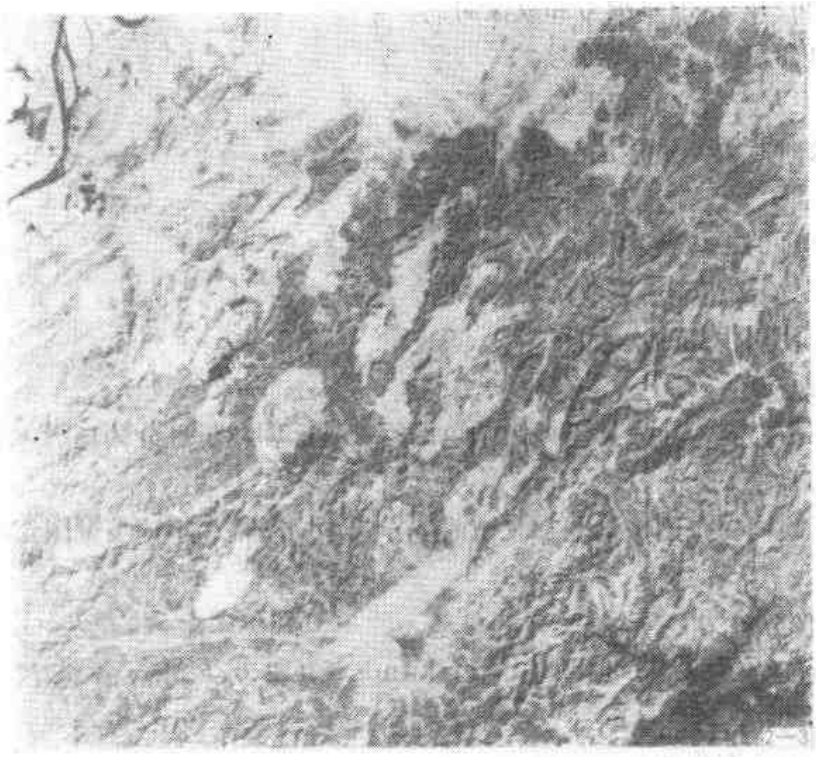


图 2—3 TM卫星图像（屯溪幅，7 波段）

在实际应用中，除采用单波段图像进行解译外，一般采用其中三个波段做彩色合成，经常采用的波段组合有 TM3、2、1（近似天然彩色）、TM5、4、2、TM7、4、1 等，在具体应用中，应视各地区所要重点解决的地质内容根据各波段图像的特点而选用。

由于 MSS 及TM资料为数字记录，所以可以应用计算机对其进行处理，以增强地质体

表 2—3　各波段TM图像特点及用途

波　段	波段范围 (μ_m)	图像特征	主要地质用途	比例尺
TM1	0.45—0.52	基本同MSS4	检测土壤、岩石含氧化铁、锰状况	
TM2	0.52—0.60	基本同MSS5	探测植被，检测岩石含氧化铁、氧化锰状况，识别地质构造	
TM3	0.63—0.69	基本同MSS6	植物分类，生长状况调查，识别地质构造	1:100万 ↓
TM4	0.76—0.90	基本同MSS7	圈绘水体边界，检测岩石所含 Fe^{3+}、Cu^{2+}	1:20万 ↓
TM5	1.55—1.75	水体暗，植被亮，反差大，立体感强，细节清晰	区分云、雪，检测蚀变岩及非蚀变岩，识别地质构造	1:5万
TM6	10.1—12.5	热红外图像，色调反映地物辐射温度大小	检测水温、地热，区分岩石类型，探测隐伏构造	
TM7	2.08—2.35	水体暗，植被亮，立体感强，细节清晰	区分岩石类型，检测热液蚀变带，识别地质构造	

表 2—4　航空像片色调色彩与地物对比表

颜色 / 像片 / 地物	彩色像片	黑白像片	彩色红外像片	黑白红外像片
植　被	绿　色	黑　色	红　色	白　色
水　体	蓝　色	灰　白	深　蓝	黑　色
红层（色）	红　色	灰	黄　色	暗　灰
砂卡岩	红　色	暗　灰	黄　色	暗　灰
裸露土壤	灰	暗　灰	蓝　色	灰
沙　漠	白—浅红	浅　灰	白—黄	灰
城　市	灰	灰	蓝　色	灰
云层及雪	白	白	白	白
云　影	暗	浅　灰	深　灰	灰
含泥砂的水	浅　绿		浅　蓝	
湿　地	浅　暗	浅　暗	暗　色	暗　色
阴　影	蓝　色	暗　色	黑　色	暗　色
水的渗透	好	较　好	不　好	差
水陆界线	较清楚	较　差	较清楚	清　楚
线性构造	明　显	较明显	明　显	较明显
环形构造	较　好	较　差	好	较　差
隐伏岩体	较　好	差	好	较　差
花岗岩	浅红色	浅　灰	浅黄色	浅　灰
基性岩	黑　色	黑　灰	暗　色	黑　灰

波谱差异，提高信息识别能力。

2．航空像片特征

航空像片为光学成像，为中心投影。黑白航片以色调的深浅表示地物反射波谱的不同，彩色航片以色彩的差异表示地物反射波谱的不同（表2—4），由于人眼分辨色彩的能力要比分辨色调强得多，且色彩又有色别、亮度和饱和度的区别，因而彩色航片的可识别的信息远高于黑白航片（图2—4）。

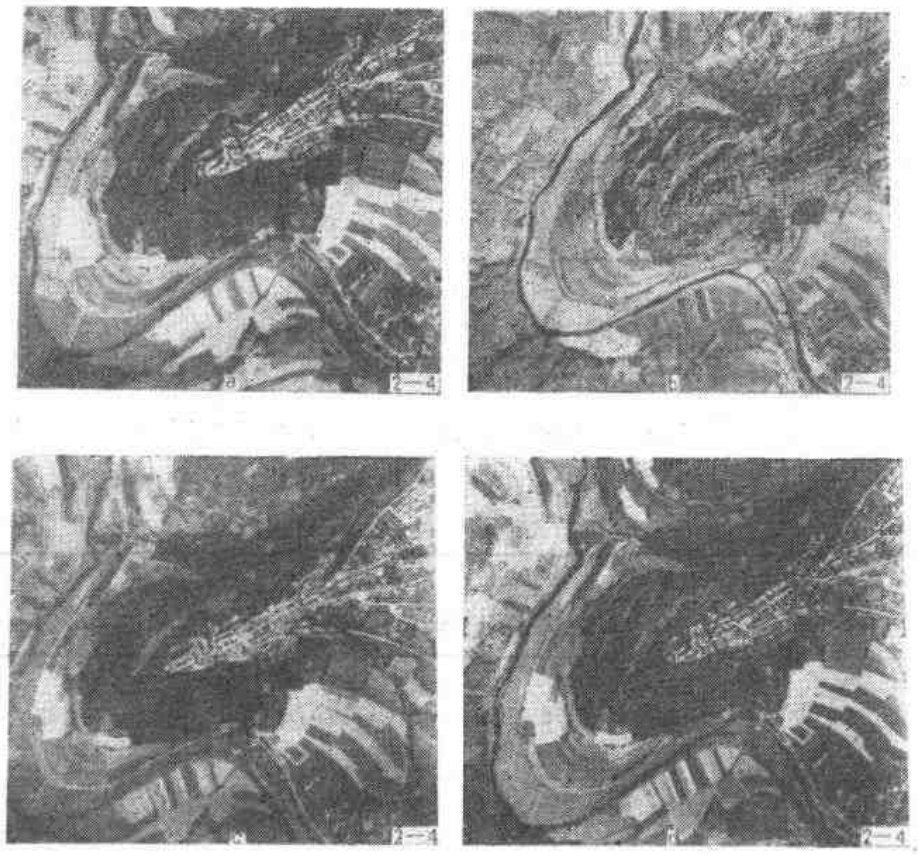


图 2—4　航空照片对比图

a—黑白图像；b—黑白红外图像；c—彩色图像；d—彩色红外图像

由于片种不同，以及比例尺的不同，各种航片的地质解译效果是不同的（表2—5），因而在1:5万区调及成矿预测工作中所起的作用也是不同的（表2—6）。

3．热红外图像特征

热红外图像是用热红外扫描仪扫描成像的，波段范围为3—5.5及8—14μm所获得的遥感信息，主要反映了地物温度和辐射能量的强弱。

红外扫描图像为动态多中心投影成像，每一条扫描线中心比例尺最大，向两侧逐渐变小，因而产生扫描畸变。另外由于飞行姿态、气象因素等影响也可产生特殊的变形现象。

红外图像以色调深浅反映地物在远红外波段上辐射能量大小，色调愈浅，地物温度愈高。在不同时间获得的扫描图像上，同一地物表现出的色调特征不同，如白天获得的图像上水体色调深，而在夜间图像上则呈浅色调（图2—5）。

在地质上，红外图像主要用于辨别辐射强度不同的岩石（岩层），鉴别由热异常反映的蚀变带，识别含水断层及隐伏地质体（图2—6）。

表 2—5　遥感图像地质解译效果对比表

效果 / 图像 / 内容	彩色航空像片 1:5万	彩红外航空像片 1:5万	黑白航空像片 1:5万	多光谱航空像片 1:5万	航空热红外像片 1:5万	黑白红外航空像片 1:5万	假彩色合成卫片 比例尺不定
岩性	好	好	好	好	中等	好	中等
构造	好	较好	好	中等	中等	中等	好
铁帽	好	最好	中等	差	夜间好	中等	中等
地貌	较好	好	中等	中等	中等	好	较好
水系	中等	好	中等	中等	夜间好	好	较好
蚀变带	好	最好	较差	较好	夜间较好	较差	中等

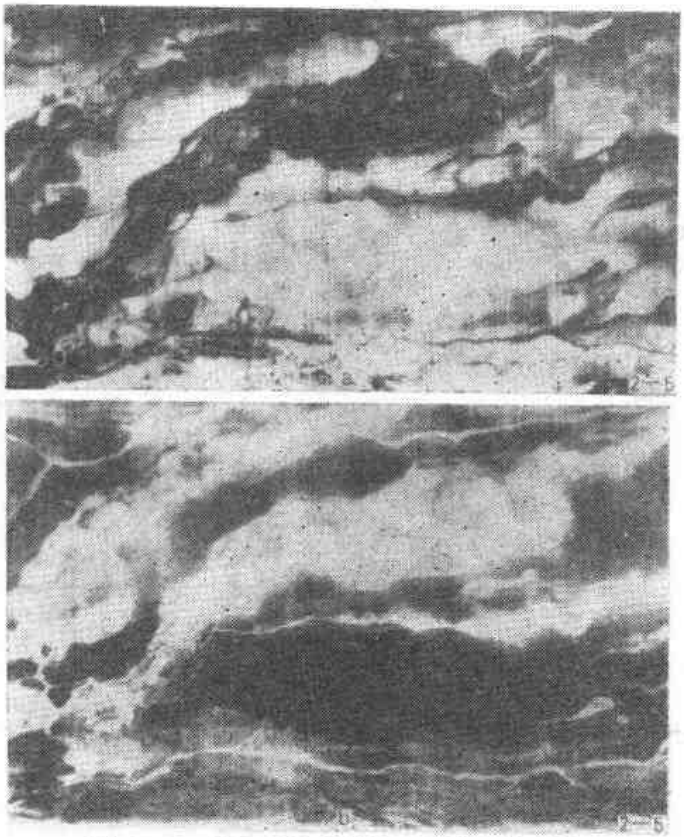


图 2—5　不同时间成像的热红外图像对比

a—白天成像，水体由于比其他地物温度低而呈暗黑色；b—夜间成像，水体由于比其他地物温度高而呈亮白色

（4）侧视雷达图像特征

侧视雷达（SLAR）图像是应用雷达向地物发射微波（1mm—1m）而接收其反射信息形成的图像，是一种主动方式形成的遥感图像。

侧视雷达图像的色调反映了地物反射微波强度的大小，反射强度愈高，色调愈浅。地物的反射率除与雷达本身因素有关外，还与地物表面的粗糙度、物理电学特性照射角和接收方向等有关。

在地形起伏较大的地区，一些高山挡住了斜射的雷达波，从而在其后形成雷达波探测不到的地段，即盲区，由于无回波信号，盲区在图像上呈黑色，与其它地物的浅色调形成

表 2—6　航空像片特征及用途

图　像	波　段 μm	图像特征	比例尺	地质用途
黑白航片	0.4—0.7（可见光）	细节清晰，形态真实，其色调深浅反映了地物对可见光反射率的大小	1:3—6万	反映岩石组合，沉积建造特征，划分主干断裂及褶皱构造
黑白红外片	0.7—0.9	植被白色、水体深色阴影明显	1:1—3万	反映岩石类型及层系特征，划分变质相带，识别断裂、节理及褶皱构造
彩色航片	0.4—0.7（可见光）	航片色彩与地物色彩一致，直观真实，视觉信息较黑白航片丰富	1:3—6万	划分岩层及岩石组合，确定大型隐伏构造，检测蚀变带及蚀变类型，识别大中型断裂及褶皱
彩红外航片	0.7—0.9（近红外）	航片色彩与地物色彩不一致，植被为红色，水体呈蓝色。反差大	1:1—3万	细分岩石类型，圈定隐伏岩体，识别蚀变岩及类型，细分构造类型，进行成矿预测



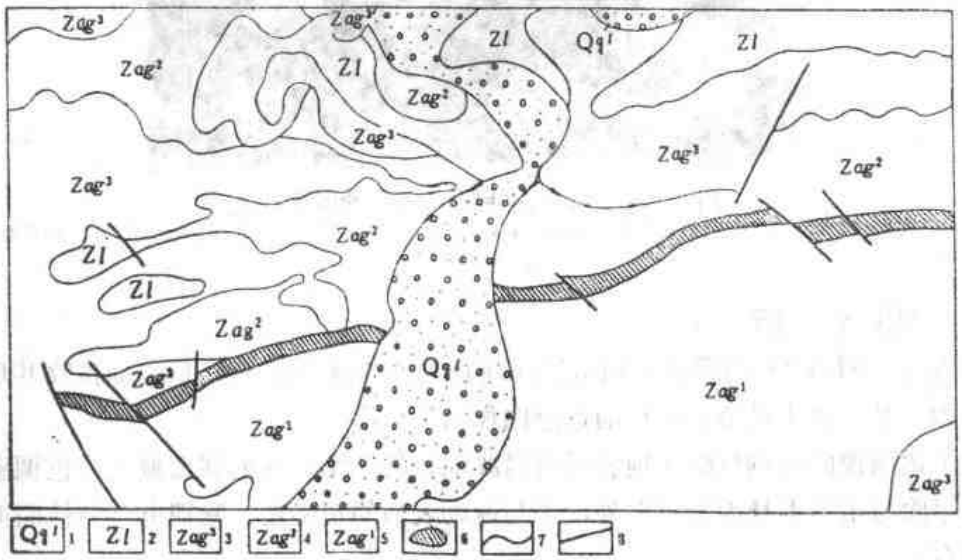


图 2—6　热红外图像的地质应用（据<遥感热红外图像集>）

在震旦纪地层中，沿炭质板岩和含炭质灰岩、白云岩层间发育的多金属铅锌矿脉氧化带（铁帽），出露较好，因其与围岩的岩性差别较大，故在图像中显示为浅色调（箭头所示），局部被断层切割，层位发生错动

强烈的反差，因而整体图像反差强烈，立体感强(图2—7)。

在地质应用中，侧视雷达图像解译岩性的能力比可见光图像差，但对断裂构造的解译效果却很好(图2—8)。由于雷达波对某些地物有一定的穿透能力，因而在干燥地区、松散堆积物覆盖地区，用侧视雷达图像研究地表下面的隐伏地质体、寻找含水体具有一定效果。在沙漠地区穿透力可达几米到十几米，在一般土壤覆盖区穿透力仅几厘米。

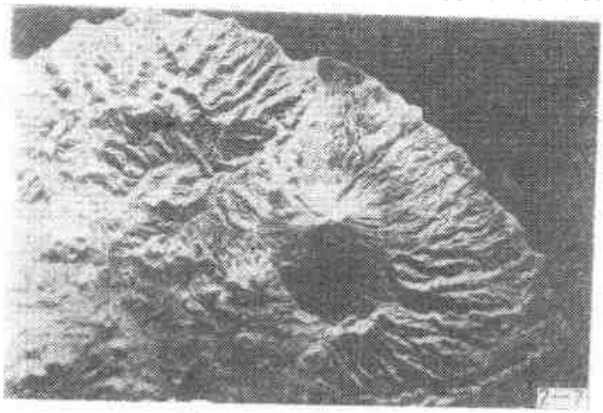
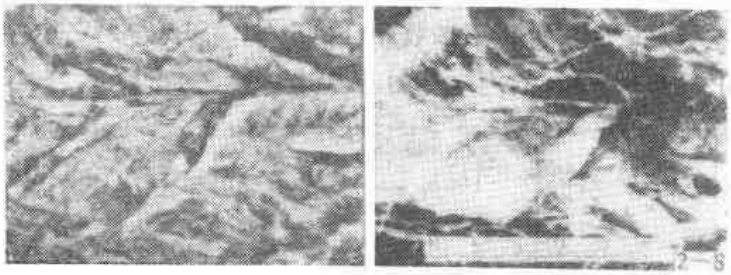


图 2—7　侧视雷达图像（印尼）

印度尼西亚某火山岩地区，用美国古德伊尔电子测绘系统（GEMS）获得，该系统工作于X波段($\lambda = 3$ cm)，合成孔径，地面分辨力达 10m。图像上大小火山口、火山锥以及放射状水系等清晰可见，主体感十分强烈



雷达图像　　卫片图像

图 2—8　新疆某地雷达图像与卫片图像对比

二、矿物、岩石的波谱特征及地质应用意义

地物波谱是地质解译工作的基础，因此遥感成矿预测也必须对矿物岩石和地物波谱特征有所了解。岩石在可见光和近红外波段的波谱决定于矿物组成和结构，不同的矿物成分，形成的波谱不同。矿物结构的粒度，只影响光谱反射率的大小，而不改变反射率曲线的形状。细粒花岗岩和石英的反射率大于粗粒级的反射率。但不同粒级的同种矿物或岩石的反射率曲线形状是一致的。

造岩矿物石英、长石和斜长石在可见光和近红外波段的反射率比较高，并且没有特征谱带。虽然它们是一些岩石的主要成分，但对岩石的波谱特征不起决定性作用，相反岩石中含量不多的磁铁矿、钛铁矿、硬锰矿、黄铁矿、方铅矿、毒砂等矿物，即使其含量只有百分之几，也会降低岩石的反射率（图2—9)。

更有意义的是矿物岩石波谱中的特征谱带、往往是识别某些矿物富集带和划分岩石类型的依据。Fe^{2+}由于能级跃迁而产生的吸收带有两个，较强的一个中心波长在0.5μm左右。如新鲜的角闪石、黑云母、辉石中的Fe^{2+}在0.5μm左右(与TM1波段0.45—0.52μm相当)

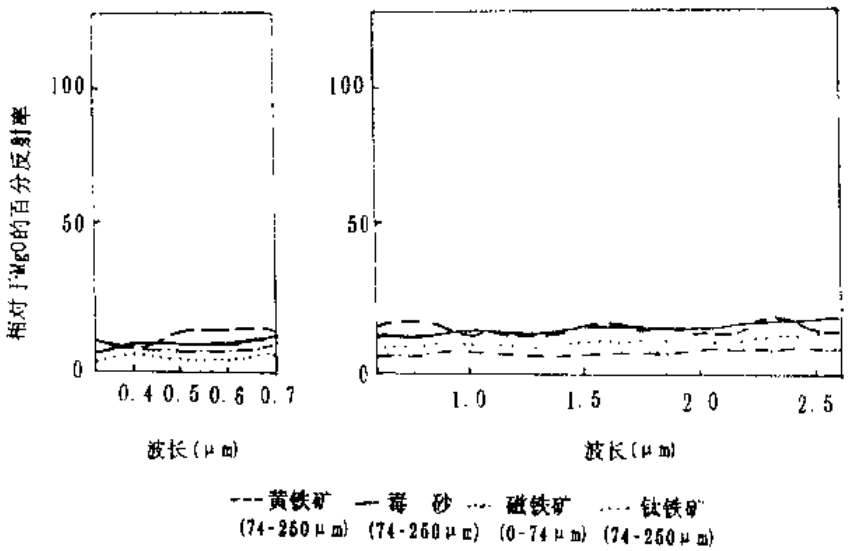


图 2—9 几种不透明金属矿物的反射波谱曲线

的反射率降低吸收带。Fe^{2+}的另一个吸收带在1.0μm附近。

由于氧化作用，地表存在着Fe^{3+}的多种矿物。Fe^{3+}在0.70—0.90μm范围内有强吸收带。赤铁矿、针铁矿、褐铁矿（铁帽）、黄铁钾钒中Fe^{3+}的强吸收带中心波长在0.90μm左右。绿泥石、阳起石等矿物中的Fe^{3+}吸收带在0.8—0.85μm，总之Fe^{3+}的吸收带基本上包括在TM4波段（0.76—0.90μm）内（见图2—10）。

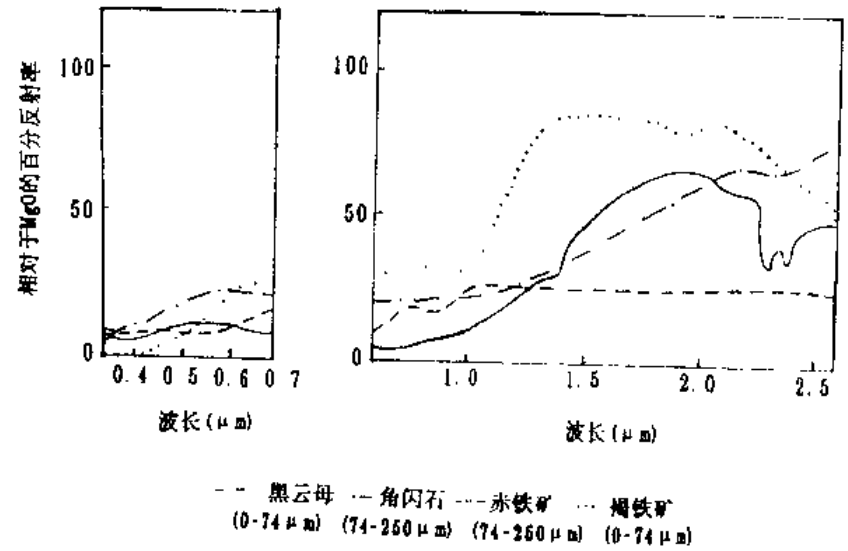


图 2—10 几种含Fe^{3+}矿物的波谱曲线

既含Fe^{2+}又含Fe^{3+}的黑云母、角闪石的波谱曲线，在0.4—1.5μm的宽阔吸收带内（见图2—10）范围相当于TM1—4波段。

热液蚀变产生的绿泥石、次闪石和高岭石、蒙脱石、伊利石等粘土矿物，均含有OH^-，这些矿物中的OH^-在2.2μm—2.35μm之间有较强的吸收带（见图2—11）。

方解石、白云石、菱镁矿等碳酸盐矿物中的CO_3^{2-}、在2.05—2.35μm之间也有明显的吸收带（见图2—11）。OH^-和CO_3^{2-}的上述吸收带，导致含OH^-和CO_3^{2-}的蚀变矿物在TM7（2.08—2.35μm）波段的反射率降低。OH^-和CO_3^{2-}在TM4、TM7波段的吸收带是遥感数

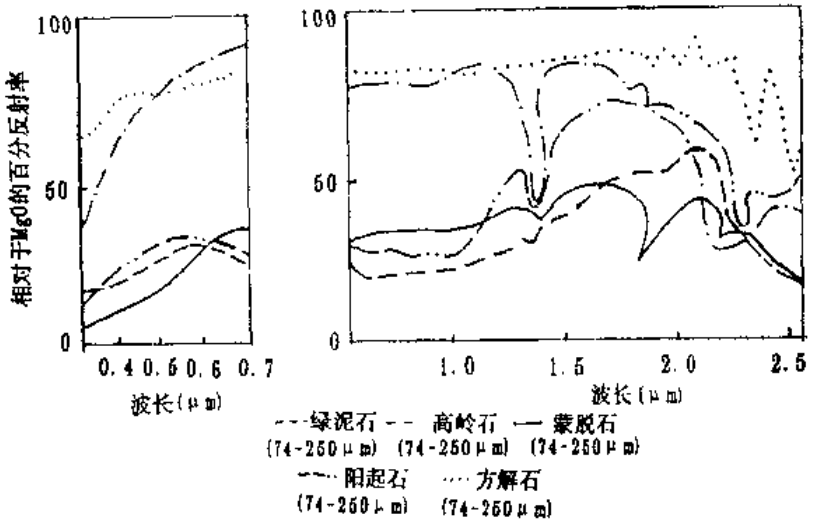


图 2—11　几种含OH、CO_3^{2-}矿物的波谱曲线

字图像提取蚀变带信息的依据。

在TM5（1.55—1.75μm）范围内缺乏长英质矿物的特征谱带。但是绿帘石、黝帘石等矿物在1.65或1.7μm附近有一个反常的羟基弱谱带。

遥感图像应用的波段见表2—7。

表 2—7　大气窗口及遥感图像类型

电磁波性质		大气窗口	应用条件	成像方式	遥感图像类型	
					单波段图像	多波段图像
反射光谱	紫　外	0.32—0.38μm	强光照下白天成像	摄影或扫描	紫外像片	MSS RBV TM HRV AVHRR 航空多波段像片
	可见光	0.4—0.7μm			可见光全波段黑白像片 可见光彩色像片	
	近红外	0.7—1.3μm			黑白红外像片 假彩色红外像片	
		1.3—1.75μm		扫　描	黑白红外像片 彩色红外像片	
		1.8—2.5μm				
反射与发射	中红外（热红外）	3.5—5.5μm	白天和黑夜均可成像	扫描	黑白红外扫描像片 彩色红外扫描像片	
发射光谱	远红外（热红外）	8—14μm	黑夜和白天强光照条件均可成像	扫描	黑白热红外像片 彩色热红外像片	
	微　波	1.4mm 3.1—3.3mm 4mm 8mm 16mm	同　上	扫　描	微波像片	

三、遥感地质特点

遥感图像是地面景观的缩影，具有宏观性特点，它是遥感技术在地质应用中的最大优势。遥感图像中信息丰富，所有的地质信息都包含在其中，既可以从中提取某个地质体的信息，又可以提取多个以至所有地质体的信息。所以说遥感图像中的地质信息是整个遥感图像信息的内涵，遥感地质工作特点是

遥感地质（填图）：面$\xrightarrow{\text{内涵}}$带$\xrightarrow{\text{内涵}}$线$\xrightarrow{\text{内涵}}$点——→地质规律

常规地质工作与其恰好相反，从点到线、带、面。点、线、带、面之间是空白，是由外推得到的结果，其特点是：

常规地质（填图）点$\xrightarrow{\text{外延}}$线$\xrightarrow{\text{外延}}$带$\xrightarrow{\text{外延}}$面——→地质规律

在解决地质问题时，需要把两者密切联系起来，将内涵与外延相结合，互相验证，互为补充，以取得符合客观实际的地质规律。

四、1:5万区调及中大比例尺成矿预测中遥感解译内容及程序

（一）解译内容

1:5万区调主要任务为基础地质调查，成矿预测以地质矿产调查为目的，相应于此，遥感地质解译的主要内容为：

1．基础地质调查

（1）岩性单元划分及对比。

（2）岩体、火山机构的确定及其与围岩的关系，岩体内部岩相、岩脉的详细划分。

（3）变质构造及变质相系的划分。

（4）褶皱构造形态及轴线、转折倾没端的确定，标志层厚度变化及追索。

（5）断裂构造解译，包括错动构造、破碎带、剪切带、节理及断裂形态、力学性质、交切关系、与矿相关性的解译，并对断裂进行级次划分。

（6）深部构造的解译，包括隐伏岩体、隐伏断裂及其它隐伏地质体的解译。

（7）地貌及第四系的解译，包括各种地貌形态如高山、丘陵、平原、阶地、河道、洪积扇，断层崖和冰川地貌及海岸滩途等的解译。

（8）灾害及新构造地质解译，包括滑坡、泥石流、活动火山及与地震有关的活动断裂的解译。

（9）水文工程地质解译，包括地表径流、湖泊、泉水溢出带及岩溶漏斗、暗河、古河道、控水断裂、富水岩层地段的解译。

2．地质矿产调查

在基础地质调查的基础上，所进行的矿产调查主要内容有：

（1）对矿带、矿田、矿床作出评价，对矿化点、古采坑、探槽、废矿堆、金属浸染区进行圈定。

（2）识别蚀变及其类型（硅化、各种金属矿化、绢云母化等）并对含矿层位、含矿

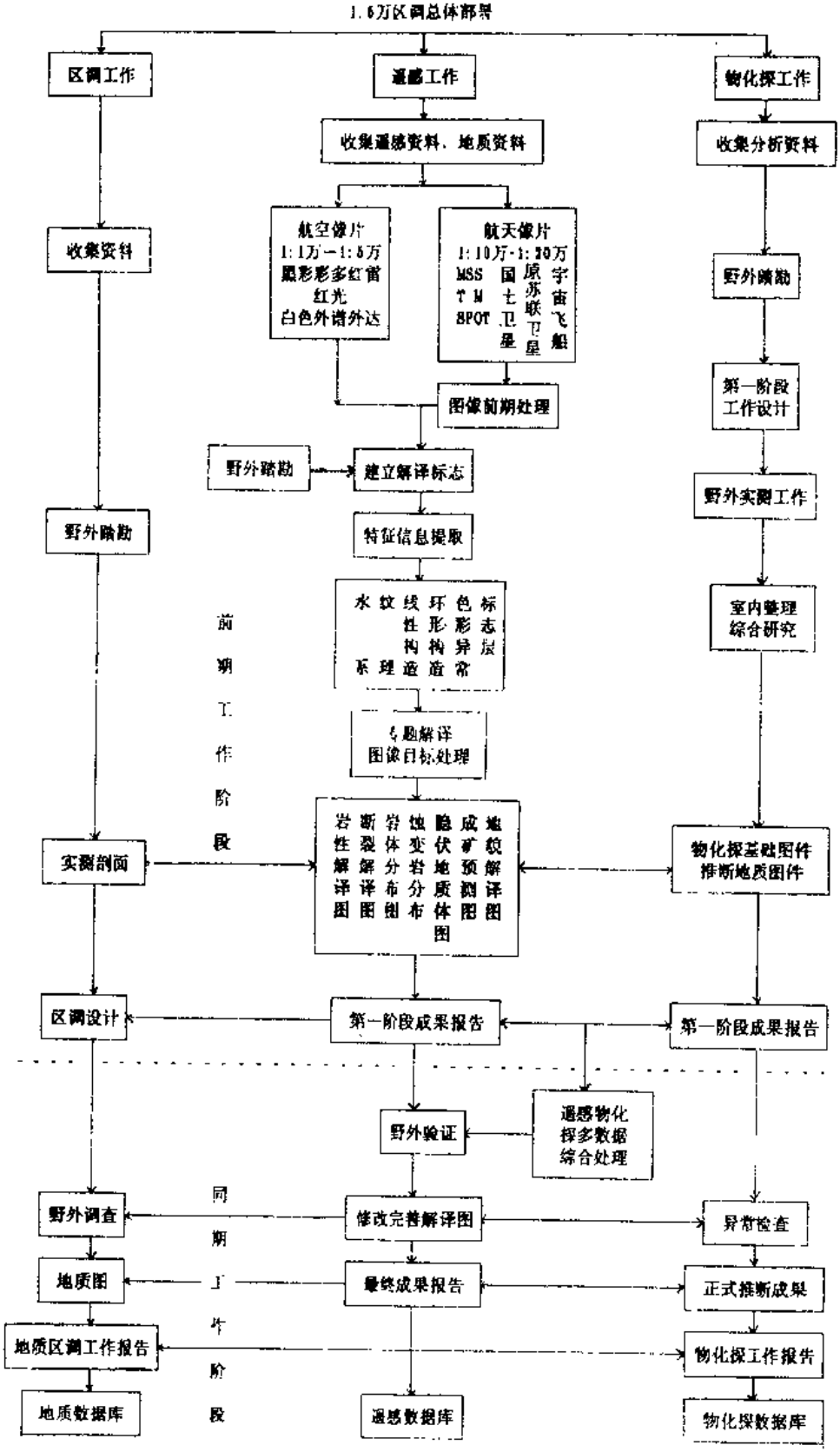


图 2—12　1:5万区调综合工作方法流程

蚀变带追索圈定。

（3）对控矿断裂带、破碎带、剪切带、接触带的追索圈定。

（4）在查明成矿因素和找矿标志掌握成矿规律的基础上评价工作区内找矿远景，指出找矿最有利地段，以查明矿田、矿床为主要对象。

（5）对非金属矿包括花岗岩、碳酸盐岩类、含盐层、泥炭层、煤层、油页岩、粘土层、粉屑层、石英岩层等的追索及形态研究。

（6）对砂矿分布的古河道、古河床阶地的圈定并了解形态变化。

（二）遥感工作程序

1．1:5万区域地质调查工作程序

根据遥感地质的特点及遥感在1:5万区调中的作用，将遥感解译工作分为两个主要阶段，即前期工作阶段和同期工作阶段（图2—12）。

2．中大比例尺成矿预测工作程序

应用遥感手段进行成矿预测，主要是依据各种遥感资料（图像和数据）通过人工解译和计算机处理辅以各种其他资料经综合分析完成的，其工作程序如图2—13。

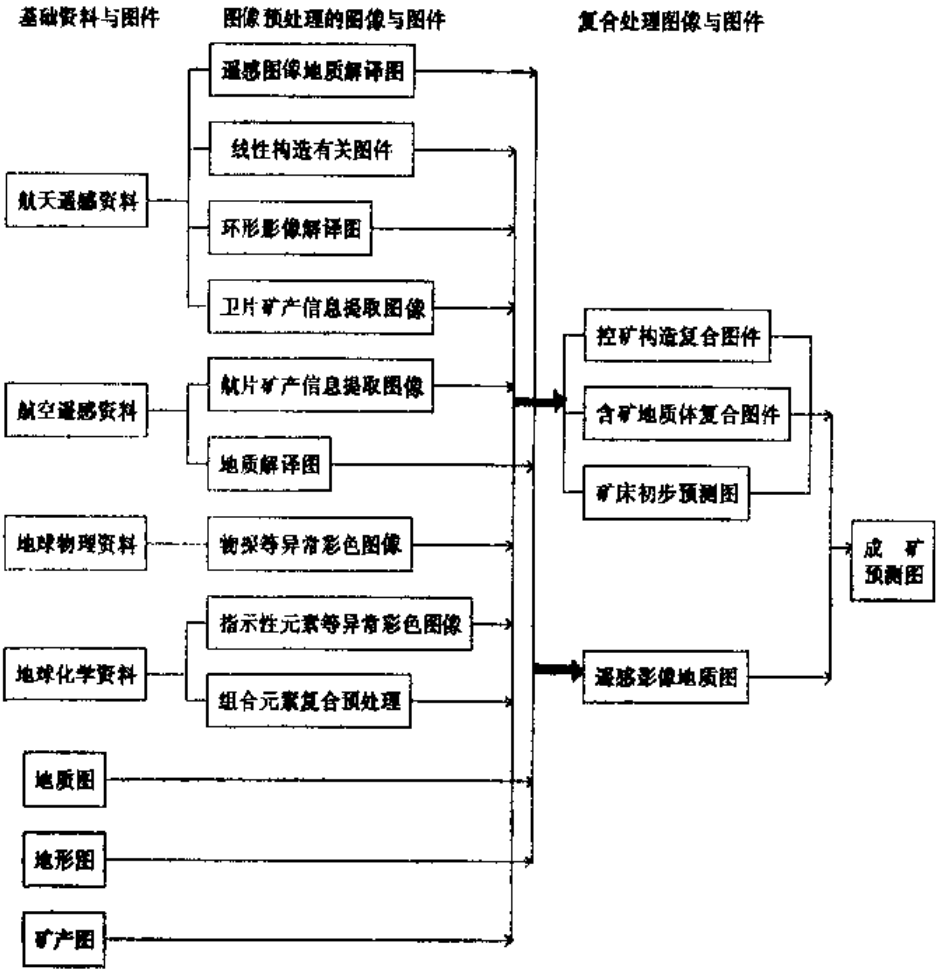


图 2—13 遥感找矿系列图

（刘燕君，1991）

（三）遥感解译方法及原则

1．遥感解译方法

在遥感地质解译工作中，应遵循一定的工作方法，只有方法得当，才能事半功倍。中大比例尺遥感解译中，主要以目视解译为主，主要方法有：

（1）直接解译法

遥感图像上，某些地质现象非常清楚，如出露岩体、断裂、褶皱等，根据地质知识，可以直接将它们的边界、形态及分布准确圈绘出来。如出露岩体及白色大理岩等。

（2）对比分析法

大量的地质内容在图像上无法直接判定，如沉积岩的时代、变质岩的岩性、蚀变岩的类型等，这就需要分析已知地质情况区（解译区内的）各种地质体的影像特征，即建立地质解译标志，根据这些标志对全区进行解译。

图像上经常存在一些零星分布的特殊影像，在已知区或邻区都未曾出现，无法确定其性质。这就要求解译者到实地对照检查，建立特殊地质体的影像解译标志。

（3）推理分析法

某些地质体并不直接显示于图像上，而是通过其他地质体或地物的特征所表现，需要根据地质理论综合分析与之相关的地理地质因素，推断深部地质体的存在及性质。如泉水溢出点呈线状展布，可能反映了断裂的存在，自然植被的疏密可能反映了其覆盖的岩性的差异，环放状断裂或水系的存在可能为隐伏岩体所致。

推理分析在中大比例尺成矿预测中显得更为重要，与成矿有关的矿化信息往往是间接表现出来的，需要通过综合分析图像上的各种信息，根据成矿理论推断控矿地质因素表现出的各种影像特征。

（4）定量分析法

应用图像处理计算机可以对卫星数据磁带或光学成像图像进行处理，识别和提取地质信息。

① 断裂构造自动识别和提取

目前，用计算机识别和提取线性体的方法已经比较成熟，主要为霍夫（Hough）变换法。这种方法可以将图像上具有线性特征的影像体提取出来，根据给定的最小长度，绘出线性体图（图3—16a）。其优点是对于大于最小长度的线性体都不会遗漏，无主观性，结果与目视解译结果总体是一致的（图3—14）。且可以对于检测出的线性体进行密度分析（图3—16b）、长度分析及编制玫瑰图，应该注意的是线性体中除了断裂构造外，还包括了其它非构造因素的线性地物，另一点是计算机提取出的线性体都是断续的，对一些大的断裂和隐伏断裂难以识别，需要人工对其筛选、补充，加以完善。

② 岩性自动识别和提取

各类岩石具有不同的波谱特征，根据各类岩石的波谱曲线和其间的差异，从多波段卫星图像或航空图像上将其识别并提取出来。目前做岩性分类或识别处理的方法主要有非监督分类法、监督分类法和密度分割等，但这些方法尚处于实验阶段，误差较大。

对于蚀变岩的识别及提取亦主要根据其波谱特征进行判别处理，多采用比值及比值合成的方法，国内外在这方面所做的实验研究工作很多，其中有许多成功的例子。这种方法受地植物、土壤覆盖的影响，其结果需要用其它方法加以检验，以避免错误产生。TM彩

色合成图像对蚀变带的识别效果最佳。

2．遥感解译原则

进行遥感地质解译，首先应了解所使用的遥感图像的特点及在地质中所能起到的作用。具体解译时，应遵循：

（1）从已知到未知，先易后难，由简入繁，循序渐进。这是生产实践的总结，是行之有效的。

（2）先整体，后局部。即先解译区域构造格架，确定主干断裂、大型褶皱、划分大的岩性区等，然后进行细节部分解译，补充次级断裂、小褶皱、细分岩性单元。

（3）先构造、后岩性，或构造、岩性结合进行。使解译工作层次分明，有条有理地进行。

（4）先基础地质、后矿产地质，即在完成基础地质解译后，在其基础上分析岩石、地层、构造的成矿性，进行成矿区圈定。

（5）室内解译与野外验证相结合，在解译过程中，会遇到许多难点、疑点和特殊影像点等新问题。需要到实地检查、验证，以补充完善遥感解译之不足。通常解译工作不是一次完成的，需要多次反复，以求达到最佳效果。

五、解译标志的建立和分类

（一）解译标志的建立

据以识别、区分地质体或地质现象，并能说明它们的性质和相互关系的影象特征，称为地质解译标志。

解译标志是遥感地质解译的标准，也是检查遥感解译成果质量的标准。解译标志不是可有可无的，而是地质解译中必须建立的基本要求。它好比一把钥匙，可以打开遥感图像信息的大门，提取遥感信息，并将其转化为地质信息，达到地质解译的目的，因此遥感地质解译标志具有遥感和地质的双重性，是由遥感信息到地质实体的桥梁。

解译标志的建立是一项复杂而细致的工作，贯穿整个解译过程。这就要求遥感工作者有坚实的遥感和地质基础理论知识及丰富的实践经验，同时还必须经过从图像到地质、从感性认识到理性认识反复实践的过程。

当遥感工作者接受任务后，以图像为本，分析图像要素，进行初步解译时，感觉到的是图像表面的色形要素，它是地球表面地物景观的缩影。由于地质专业的需要感兴趣的首先是色调变化，纹理特征、线性体组合、环形影像、地形地貌等信息。经过进一步研究地质、物化探资料，并经野外踏勘，最初的印象开始深化，图像上的线性体与断裂、环形影像与岩体、色调异常与蚀变带、纹理与岩性都密切联系起来，某些遥感信息还显示深部地质构造的信息，这时解译者将遥感信息与地质内容进行了转换，感觉到遥感图像上已经不是单纯的遥感信息了，而是带有地层、岩石、地质构造等确切的含义了。经过这样从实践到理论的多次反复，最后建立起较为客观的解译标志。

（二）解译标志的分类

解译标志有直接标志和间接标志两种。前者是地物本身有关属性在图像上直接表现出来的影像特征，主要有形态和色调（色彩），后者是指与地物属性有内在联系，通过相关分析能够推断其性质的影像特征，主要有水系特征、地貌形态、土壤类型、植被以及人类活

动标志等。

通过各个地区总结出来的识别地质体的解译标志具有一定普遍性，但解译标志也有其局限性和可变性。同一种地质体在不同的地区可以有截然不同的影像特征，因而要视工作区具体情况建立区域性解译标志。在同一地区，同一种地质体由于其产出状态不同，也可能表现出不同的影像特征，所以，在解译时，要注意分析地质体的影像特征，总结变化规律，准确运用解译标志，使解译内容符合地质实际。

在成矿预测中，解译标志的建立和分类要密切结合五级成矿带的划分，按级别根据不同比例尺遥感图像从大到小依次建立各级解译标志。Ⅰ级成矿带的解译标志必须在小比例尺1:400万—1:100万遥感卫片解译中建立，Ⅱ—Ⅲ级成矿带的解译标志，必须在1:100万—1:50万遥感卫片解译中建立，Ⅳ级成矿带的解译标志，必须在1:20万—1:10万遥感卫片解译中建立，而Ⅴ级成矿带的解译标志必须在1:5万或更大比例尺的航空像片解译中建立。各级解译标志都有其独立的内容和涵义，不能互相代替使用。

第三章　不同地质（岩区）条件下遥感断裂构造特征判别

一、线性因素的涵义

在遥感图像上线性因素最醒目、信息量最丰富。其涵义归纳起来有四种类型。

1．人类的活动因素：如交通网，包括公路、铁路、运河等；农林业，包括农田边界线、排灌渠、荒地边界线、农作物边界线、土壤耕作与灌渠差异线、人工造林边界线等；某些工业设施，如高压线、输油管道等称为非地质线性影像。

2．自然地理和地貌因素：如山脊线、山谷线、山坡前缘的堆积物线、雪线、陡崖线、较平直的河流线、盆地边界线、海岸线、冰盖边界线、阶地、湿地、台地及盐碱化界线等。

3．非断裂构造的地质因素：如地层界线，各种不整合接触界线，其中包括沉积接触的层理，侵入接触界线及不同期次侵入岩之间的接触界线、片理化带等。

4．断裂构造因素：主要是指由内应力构造运动，侵入作用所形成的各种线性影像。这是人们较熟悉的断裂构造所形成的线性影像。如断层崖、断裂谷、构造破碎带及其他水文地貌间接标志反映的断裂构造，均可在不同比例尺遥感图像上表现为规模不等的大量线性影像。有些十分明显，有的模糊。这一类是地质工作研究的主要对象。也是本书介绍的重点之一。为了突出其成因并与其他各类相区别，特称其为断裂构造。

二、断裂构造的识别标志

遥感技术要得到广泛应用、提高地质解译水平，关键在于解译标志模式化、标准化。经过多年来对不同岩区断裂构造影像特征的研究，断裂解译标志模式化取得重要进展，以形态为主的断裂实现了模式化标志，在全国不同岩区应用都有普遍意义。

断裂构造的识别标志有（表3—1）：

（一）色调标志

在遥感图像上存在着可识别的色线、色带，也有人称之为色异常带。这种色带光谱特征明显，沿线性体走向各点光谱值稳定，有时延伸很远。人眼利用视觉惯性，对其自动连接，易于识别。横向上光谱值变化较大，色带无明显边缘结构，规模大小不一，形态各异，在不同遥感图像上可识别程度差异很大。比例尺相同情况下，黑白（可见光）像片上模糊不清，彩红外像片或多波段合成彩色图像上则比较清楚。

经在不同岩区验证，这种色异常带表示的主要为地质现象。如第四系覆盖下的隐伏断裂显示出深色带，沿带有水泉和植被分布。与成矿作用有关的蚀变带，愈合断裂带显示出

表 3--1　遥感断裂色形标志简表

分类标志		形态特征	地貌特征	地质意义	实例
色标志	浅深背色景带		窄长条谷地，地堑和地垒相间分布	岩浆活动带，地质构造界线	鄱庐断裂
	深浅背色景带		呈线性槽地展布	压性或张性断裂	东至断裂
	不景同界背线		不同地貌单元呈平直的接触关系	两种地质体呈断裂接触，断裂形成断层崖、构造台阶	大别山东侧断裂
形态标志	平行状		在一定区域内线性谷地或水系平行分布	同级别、同性质的一组平行断裂	黔东南断裂
	格状		两组沟谷或水系垂直相交构成方格状	两组断裂正交构成格状	西秦岭昆仑山
	菱状		两组山脊或水系斜切	两组平行断裂斜交构成菱形格状	鄂东南瑶山
	弧线状		弧线形地貌界线，平面上呈鱼鳞状展布	低角度推覆断裂	塔里木盆地南缘
	放射状		山脊、水系、岩脉等呈放射状展布	放射状断裂	山东铜锡山
	环状		环形山脊和环形水系相间分布	多为隐伏岩体引起的环形张性断裂	铜陵杨家庄
	环放状		环形、放射状或环形山脊、放射状山脊具同一中心	环状和放射状断裂组合	山东牛山顶

深暗色带，沿带常有岩体侵入。这种色带一般规模较大，宏观特征清楚，但地面难以识别，因而不易被地质人员承认。如湖南香花岭南部竹山、龙石岭—大庙背一大岭由东西向色带，长25km，宽 2 km，彩红像片显示极为清楚、宏观地质特征也很明显，在色带两侧地层走向、构造线方向都不一致（图3—1）。应当指出这种色带信息是可靠的，空间上与蚀变带、隐伏断裂带一致，常与重磁异常带、成矿元素异常带相吻合。

遥感图像上显示的可见光以外的信息，在野外眼睛无法识别，但这些信息与物化探信息一样，都是客观存在的，可以用综合方法来验证其存在。

在遥感图像上以色调为主显示的断裂构造有三种情况：

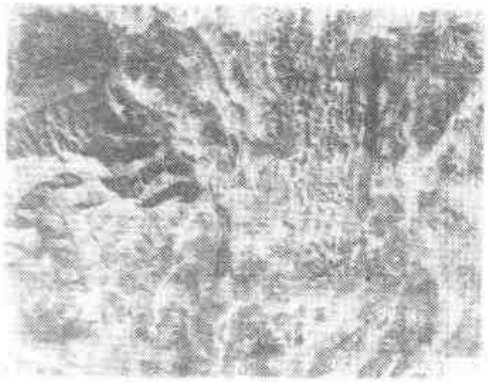


图 3—1—a　由色异常带显示出的断裂影像（湖南，彩红外航片）图像中下部宽大的东西向深色异常带为断裂所致，色带两侧地层形态、构造特征明显不同

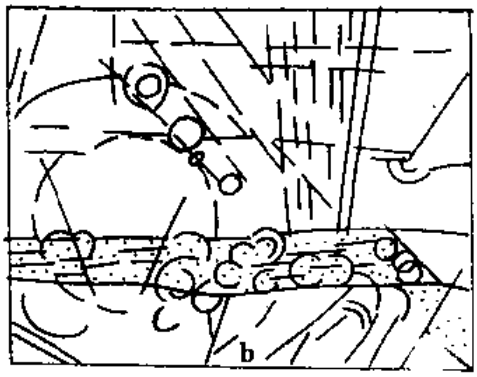


图 3—1—b　湖南香花岭构造解译图

1．浅色背景上的深色线性影像、边界较模糊，地貌上常为窄长线性山谷带、并有岩体、岩脉、水泉、植被等成带分布，如郯庐断裂带（图3—2）。

2．深色背景上的浅色线性影像。主要发育于露头区，地形上表现为线性槽地，多为开口断裂，是较为常见的断裂类型，如安徽东至断裂（图3—3）。



图 3—2—a　由深色调显示出的断裂影像（山东，MSS）深色调的地堑和浅色调的地垒相间排列成巨大的郯庐断裂带

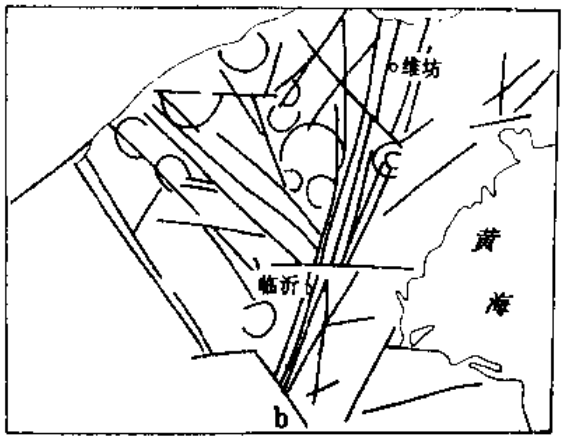


图 3—2—b　山东郯庐断裂解译图

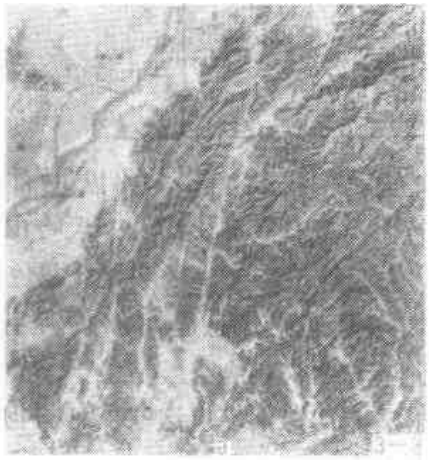


图 3—3—a　由浅色调显示出的断裂影像（安徽，MSS）



图 3—3—b　安徽东至断裂解译图

3．不同色调影像之间的分界线。通常为地貌界线或构造台阶，其两侧地貌景观截然不同，一面为高山、另一面为平原（如图3—4）。

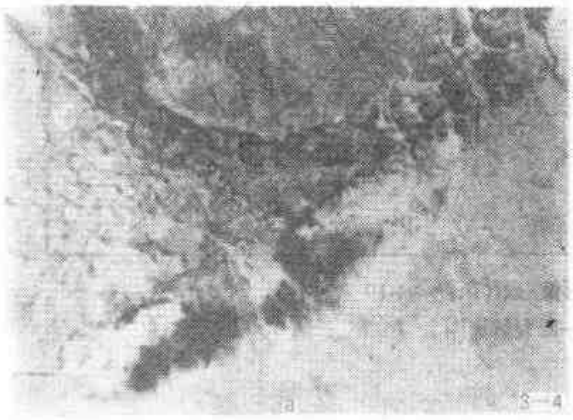


图 3—4—a　由两种不同色彩表现出的隐伏断裂影像（新疆，彩红外航片）断裂两侧为两种不同的地貌单元，表现为不同的色彩

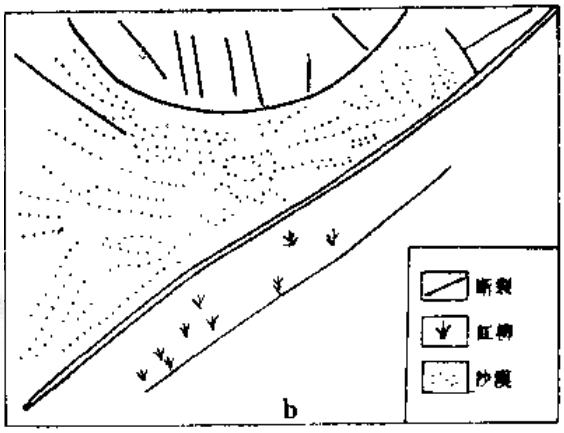


图 3—4—b　隐伏断裂解译图

（二）形态标志

以空间形态特征显示的断裂的模式化标志，是直接识别线性断裂的可靠标志，在各岩区都是适用的，主要类型有：

1．平行式

由一组平行断裂或弧形断裂组成（图3—5）。

2．交叉式

（1）直交式（格状）：两组断裂直交而成（图3—6）。

（2）斜交式（菱状）：两组断裂斜交而成（图3—7）。

3．放射状：以一点为中心断裂呈放射状（图3—8）。

4．环状：以一点为圆心断裂呈同心环状（图3—9），为局部断裂。

5．环放状：由3、4两种断裂组成蛛网状（图3—10）。

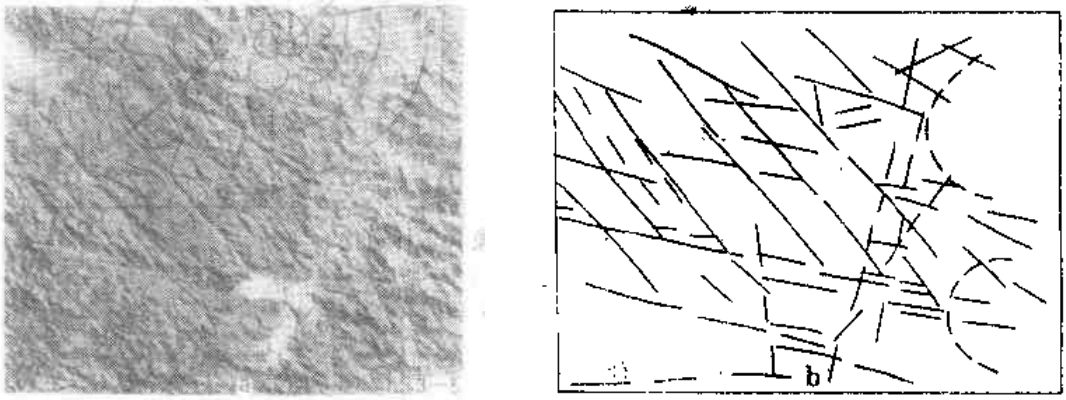


图 3—5　平行断裂影像（贵州榕县）
a—MSS影像；b—断裂解译图

（三）水系标志

水系在覆盖区和半覆盖区是解译断裂构造的重要标志，规模不同的有规律分布的水系反映了规模不同的断裂的存在（图3—11）。

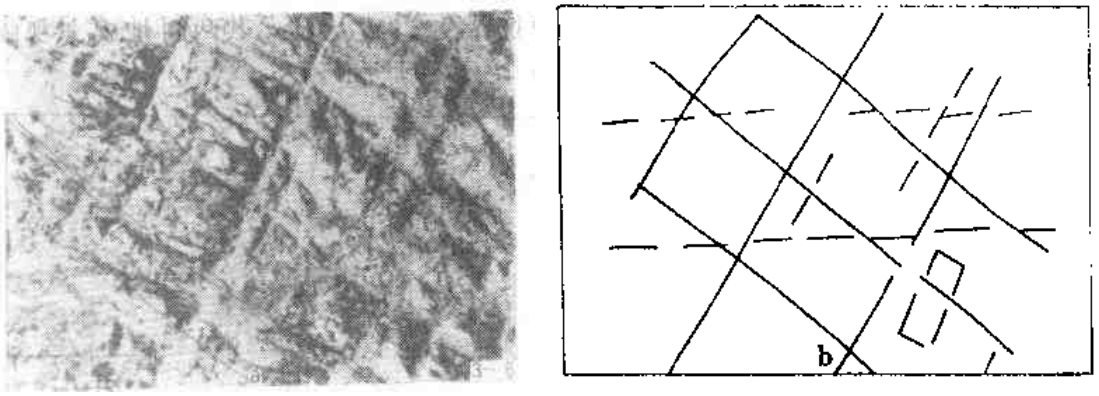


图 3—6　格状断裂影像（山东昆嵛山）
a—彩色航片；b—断裂解译图

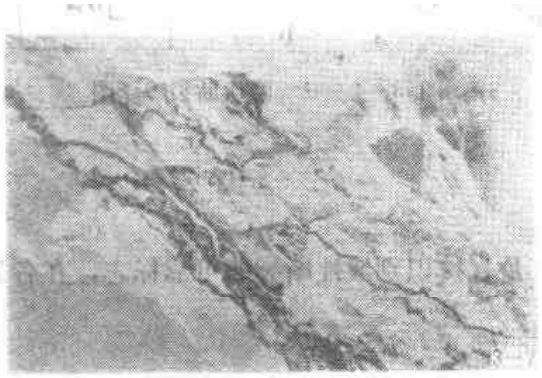


图 3—7　菱形断裂影像（甘肃黑白航片）
隐伏断裂由于含水而呈暗色调，北西和东西两组断裂构成菱形格状



图 3—8　放射状断裂影像（山东昆嵛山彩色航片）

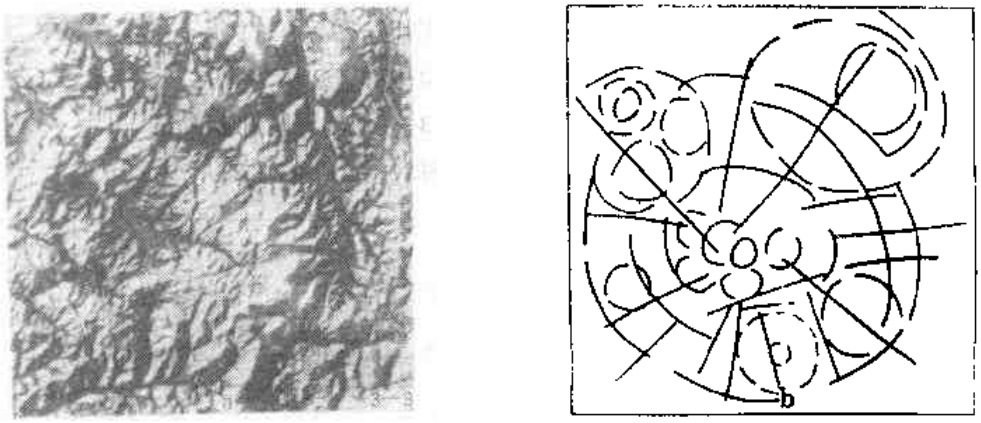


图 3—9　环形断裂影像（吉林通化）
a—TM影像（据赵长英）；b—断裂解译图
中心部位为出露岩体，四周发育多层环状断裂

1．格状水系是两组直交断裂存在的标志。

2．菱状水系是两组斜交断裂存在的标志。

3．平行状水系可能反映了走向断裂的存在，但应注意与层理区分。

1．环状及放射状水系是环放状断裂存在的标志。

（四）综合解译标志

遥感图像　断裂构造可由某种主要标志表现出，也可能是多种因素的综合反映，在解

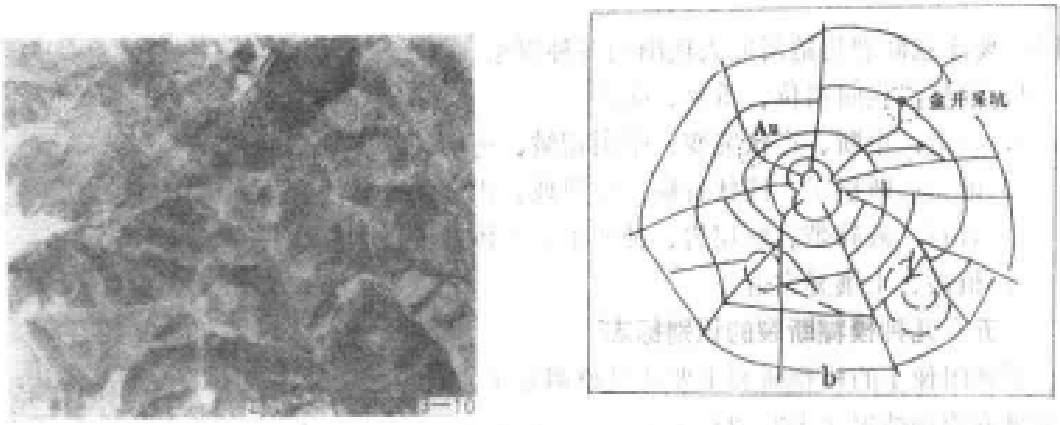


图 3—10 环放状断裂影像（山东牟平）

a—彩色航片；b—断裂解译图

以最高点为中心，环状和放射状断裂构成嵌网状，断裂交点有较好的控矿性

水系类型	水 系 形 态
a 格 状	
b 菱 状	
c 平行状	
d 环 状 放射状	

图 3—11 与断裂有关的常见水系类型

译时，要注意断裂构造所能表现出的各种现象。

1．地层：横向错位、重复、缺失。

2．构造：中断、产状突变、牵引褶皱、剪切等。

3．地貌：断层崖、线状谷地、窄凹地、山脊错位、线性排列火山口等。

4．岩石：破碎带、断层岩、蚀变带、岩体线性排列等。

5．植被、土壤异常带。

（五）几种模糊断裂的识别标志

遥感图像上的模糊断裂主要是以色调显示的断裂，一般边界不清，不易辨认，在各岩区常见有四种情况（表3—2）。

表 3—2 遥感图像上几种模糊断裂简表

类 别	区域背景	断 裂 特 征	特殊解译标志	边界确定
1	成矿时断裂	以色带为主，形态模糊不清，常横切地层，锯齿状延展	沿断裂有岩体侵入热液蚀变，矿化发育，愈合特征明显	按色带中心或宽度确定位置
2	第四系覆盖断裂带	微弱的模糊信息（透露）常有水和植物的带状分布	深色或浅色带	按色带中心确定断裂位置
3	走向断层（层间断层）	与层理一致，易于混淆	断裂延伸到地层转折处，可与层理区分开，航片可见断层三角面	按地形坐标确定
4	巨大型断裂带	长度、宽度很大，航片上模糊不清，不易辨认	1/50万卫星图像上清晰可见	按地形水系确定边界

1．成矿时断裂：形态特征模糊，色调特征明显，由于热液蚀变而使断裂愈合，地貌上表现为坚硬的山脊、突起的条带。

2．隐伏断裂：主要以色调特征显示出来，多为暗色条带，宏观特征明显，一般规模较大。其形态模糊，边界不清，多出现于平原及河谷地区。

3．层间断裂：发育于沉积岩层理间，易与层理混淆，但断裂可穿过岩层转折端，可与层理区别。在断裂带上有时可见断层三角面、岩石破碎或岩石蚀变。

4．大型断裂：这种断裂在航片上表现为巨大的破碎带，多形成宽大的河谷或山谷，形态特征不清。而在小比例尺卫星图像上其形态特征表现得比较清楚，易于识别。因而在解译时，应与各种遥感图像结合使用。

三、断裂构造的增强处理

为了补充遥感图像目视解译的不足，充分而有效地提取卫星图像中的模糊信息，通常需要对遥感图像及数据进行光学和数字增强处理。

（一）处理目的

模糊断裂构造（隐伏断裂）、模糊环形构造（隐伏岩体）及蚀变带等通过多种光学和数字化处理后，信息可得到增强，从而提高它们显示的清晰度和解译的可靠程度。但图像

处理只能增强某种信息，不能产生出原始数据中没有的新信息。

然而，并不是所有的图像处理方法都能达到预期目的，其关键在于解译人员必须具有遥感、地质和计算机专业知识，对研究地区的地质特点、地物波谱特征有足够的了解，并能正确选择和实施图像处理方案。只有这样才能取得预期效果，否则将浪费人力、物力，达不到预期目的。

（二）处理方法

1．光学处理方法

（1）假彩色合成和密度分割：用于增强岩性和线性构造，是图像光学处理的基本方法。其优点是方便、经济、效果好。如新疆卡布拉克铁矿，处理前的黑白像片（图3—12a），经彩色合成和密度分割后，铁矿体和构造背景都有明显增强（图3—12b、c）



图 3—12　新疆卡布拉克铁矿航空像片及光学处理图像

a—黑白航片；b—假彩色密度分割片；c—彩色合成片

（2）激光或白光源相干光处理：这种方法快速方便，效果明显，与原图像相比提高了图像的对比度和清晰度，边缘得到增强，立体感增加，微细结构比较清楚。由于线性体得到明显增强，对识别区域性模糊断裂效果尤为明显，如对屯溪幅的处理（图3—13），其结果见表3—3。

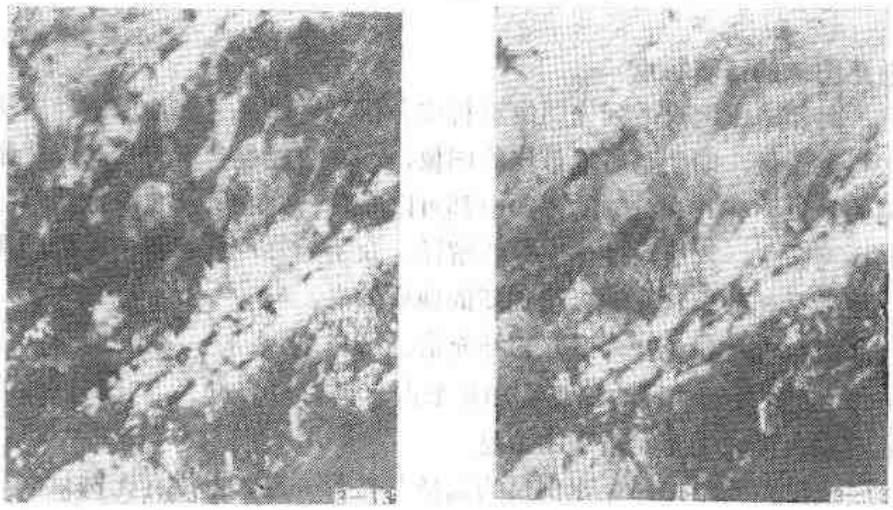


图 3—13　彩色合成图像与白光处理合成图像对比（安徽屯溪幅）

a—彩色合成图像（MSS）；b—白光处理合成图像

2．计算机数字处理方法

表 3—3 原片合成图像与经激光处理后合成图像特征比较表

片种 内容	原片	激光处理片
图像清晰度	一般	较明亮
线性断裂	明显	更明显，且立体感强
环形地质体	不明显	明显
隐伏岩体	边界不清	边界线增强
微地貌	一般	较清晰
已知岩体	清楚	边界增强，有立体感
水系	微小水系不清	微小水系较清楚
云影	明显	减轻

主要利用图像处理计算机对卫星图像磁带数据进行处理。通过处理，使遥感图像上的模糊线性体得到增强，易于识别。目前I²S 101图像处理系统增强线性体的方法有梯度法、微分法和滤波法等，其中滤波法较为常用。

（1）高通滤波：目的是抑制图像上的低频成分，使细微构造和边界突出。

（2）低通滤波：目的是抑制图像上的高频成分，增强主干构造。

（3）定向滤波：主要用来增强指定方向上的线性体，采用不同模板可以使不同方向上的线性体得到增强。

上述方法对于增强基岩区的线性体是较为有效的，而对于覆盖区线性体采用直方图均衡、哈达姆变换等方法较为有效。一般这些方法往往叠加使用，根据不同岩区图像特点及处理目的选择不同的方法。

四、遥感解译断裂构造可信度分析

（一）遥感图像的信息特点

不同片种、时相、比例尺系列化图像资料综合信息提取在遥感地质解译中是最理想的。任何一张遥感图像，即使是质量最佳的图像，都不可能包含所有信息。一张图像只能记录某一时刻的景象，在其它时刻的图像中都可以发现一些它所没有的地质信息。只有利用不同时相的遥感图像，才能保证作充分的解译。众所周知，夏、冬两季的图像，地质信息大不一样，如果互相补充利用就会增加新的地质信息。

不同波段的图像也是如此，可以互相补充信息，一般来说，0.4—0.7μm（可见光）和0.8—1.1μm（近红外）波段的信息量加起来占总量的50～80%。任何波段的图像都会有自己特有的在别的图像上不可重现的信息。

在大比例尺成矿预测中，图像比例尺的选择存在着一定的矛盾，比例尺大，宏观信息难于识别、微观信息突出、适合岩性、蚀变带的解译，不适合构造的解译。为了保证构造解译必须选择中、小比例尺图像，突出宏观信息。

因此，地质解译只有使用不同时相、不同片种、不同比例尺的系列图像，才能充分提

取矿化信息，满足大比例尺成矿预测的需要。

（二）断裂构造目视解译结果与计算机提取结果对比分析

以安徽铜陵幅为例，作一对比，目视解译是使用 1:1.8 万彩红外航空像片，提取长度大于250m的断裂，经过适当分类而成的（图3—14）使用了 150 张像片、解译时间一个多月。计算机提取断裂是使用TM磁带在 I²S101 机上用霍夫变换方法，控制窗口的大小，提取长度在 100m 以上的断裂。同时绘出断裂构造图（图 3—16 a）和断裂等值线图（图 3—16b）。时间只须几小时，十分方便。

对比两张解译图可以看出：断裂的密度、方位、分布规律和构造格局都基本一致。尤其是中小断裂全都吻合，只有大的主干断裂计算机没有识别出来，需要目视解译来补充。由此可见，在大比例尺成矿预测中断裂构造的解译，可采用 TM 图像使用计算机提取、再经过目视解译补充完善，这样可以做到省时、省力、又节省资金，提高工作效率。

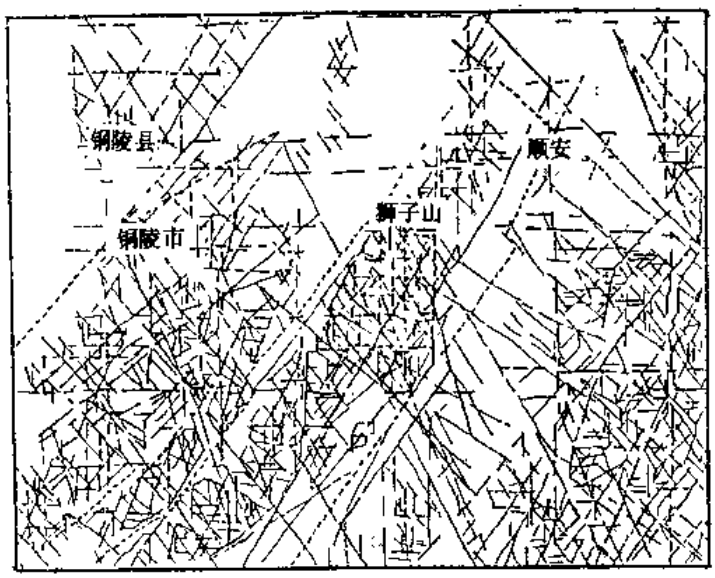
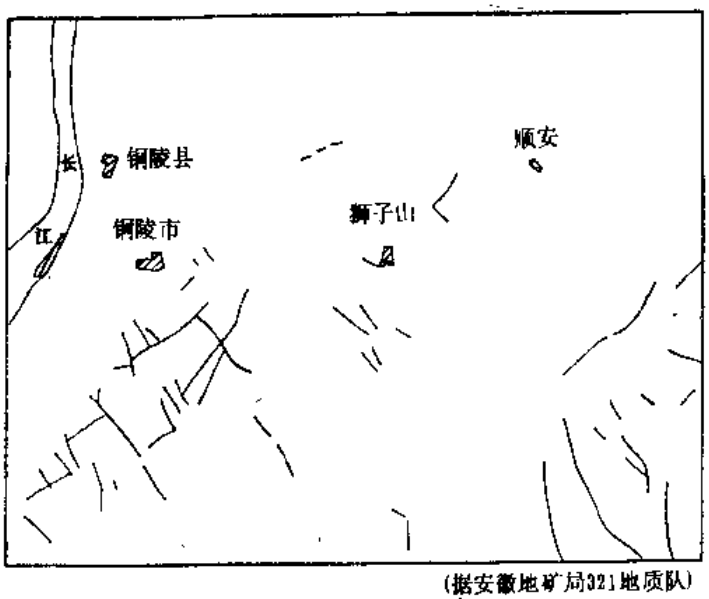


图 3—14　安徽铜陵幅遥感目视解译断裂图



（据安徽地矿局321地质队）

图 3—15　安徽铜陵幅地质填绘断裂图

（三）断裂构造目视解译结果与常规地质填图结果对比

铜陵幅1:5万地质图是1969年正式出版的。图上断裂都是按规范要求填制的（图3—15），与遥感断裂解译图（图3—14）对比可以看出，常规地质图上断裂数量少、规模小、方位只有NE和NW两个，没有EW和SN向，且断裂分布集中在露头上，覆盖区没有显示。而遥感解译图就不一样，无论在断裂数量、方位、还是在规模、分布等方面，都显示出面目一新之感，其信息量大大增加。

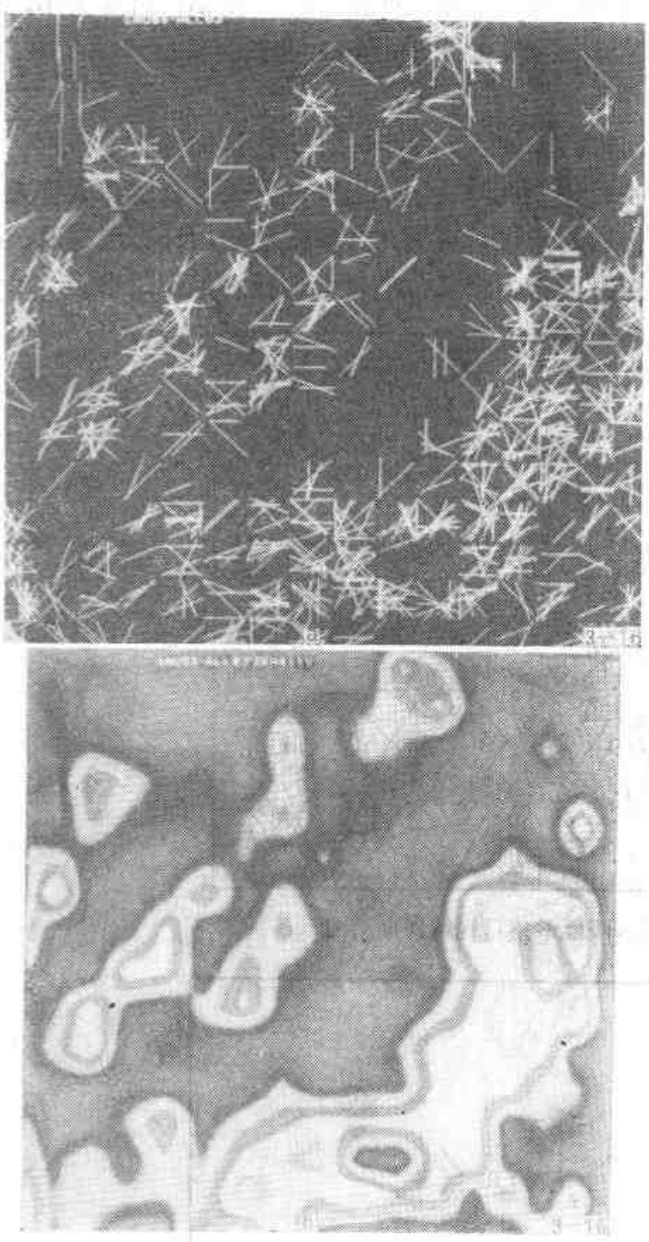


图 3—16 安徽铜陵幅计算机提取断裂图（a）和断裂密度图（b）

遥感解译断裂与常规地质填出的断裂数量上和规模上差别如此之大的原因在于常规地质着眼于点，很难确立规模较大的断裂，尤其难以识别隐伏断裂以及由色彩差异表现出的断裂。而遥感解译是从面上着眼，从宏观的角度取得丰富的信息，对大断裂易于识别，特别是识别隐伏断裂及由色调不同显现的断裂，更是遥感的优势之处。着眼点不同，得到的结果肯定会有所差异。因而在工作中应把两者密切结合起来。互相补充、验证，得到较为客观的结果。

在成矿预测中，可对遥感解译的断裂进行筛选取舍，选用规模较大的与区内基础地质和矿产信息有关的断裂。如山东水道幅区调中从2000余条遥感解译断裂中只选用了200余条，即已满足填图要求。

（四）遥感断裂密度图与航磁等值线图对比分析

1．铜陵幅遥感密度图（图3—17）区域分布，梯度带形态特征与航磁等值线图（图3—18）形态基本一致。如狮子山矿区西北部的北东向梯度带、东部的南北向梯度带、南部的北西向梯度带，两图的形态、范围完全一致。这不是偶然的巧合，而恰好说明狮子山矿区有磁性的花岗闪长岩体的侵入，是受多组断裂构造控制的。

2．水道幅遥感断裂解译图与航磁图对比也具有一致性。金牛山NNE向破碎带是区内重要的蚀变带。遥感解译的断裂与航磁负磁场带一致，没有位移，说明断裂近于直立。玉林店以东的东西向断裂带，遥感与航磁分布形态一致，但有位移、航磁场偏南800m，说

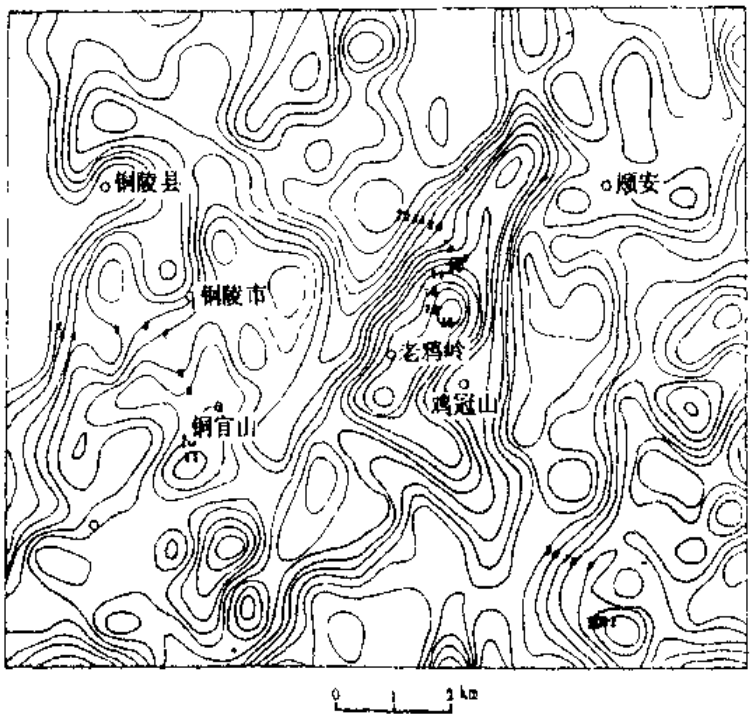


图 3—17 铜陵幅断裂密度等值线图

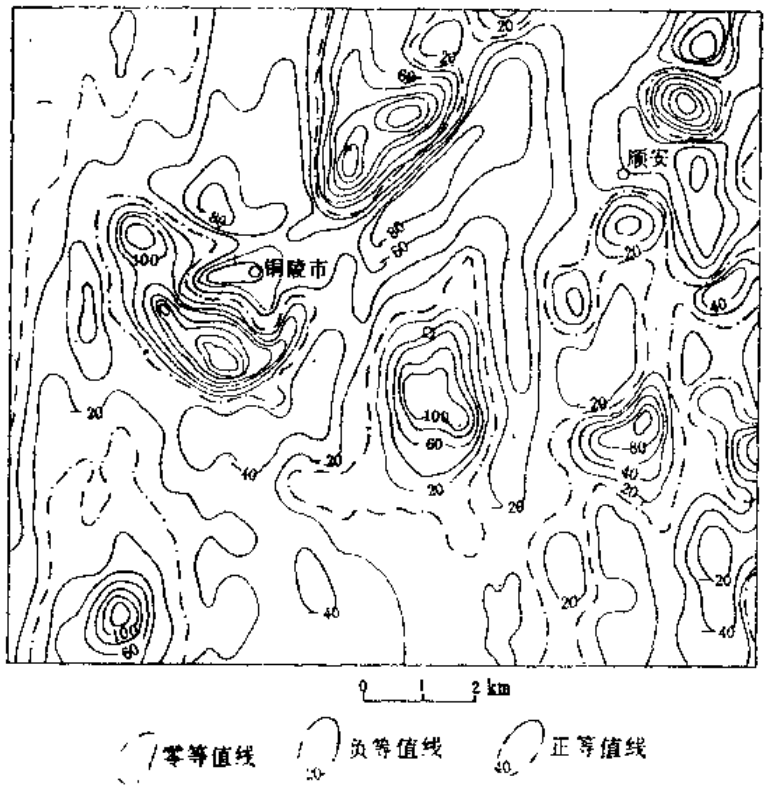


图 3—18 铜陵幅航磁ΔT磁场等值线图

明断裂南倾。

（五）遥感解译断裂的地面查证

遥感解译断裂是否可靠，在地面能否找到，是否具有实际意义呢？以铜陵幅遥感解译断裂实地查证为例，对其可信度作出评价。

查证主要在基岩区进行，采取按方位查证的方法。每一方位抽查3—5条。选取二组断裂交汇或有落差存在等断裂特征明显的地方，将其位置预先标定在航片上，然后进行野外查证，对检查结果进行记录，并对特征现象进行照像和素描。

通过野外查证和取样镜下观察，证实解译出的 EW、SN、NE、NW 各向断裂都是存在的，遥感解译断裂是可信的。对一些大的断裂和原地质图上没有的断裂（如 EW 向）进行反复检查，确认解译和验证结果可靠无误。

五、断裂构造的时空特征

断裂的时空特征是一个较为复杂的地质问题，在遥感解译及研究中发现，不同岩区的断裂时空特征有很大的相似性。

断裂在时间上有长期性，多期次性，复杂叠加性；在空间上有多方位性，等距性；在规模上有多层次性（多级别性），以大控小性等，这些特性不论在什么岩区都有一致性，主要特征介绍如下：

（一）断裂的空间分布规律

遥感图像上显示的线性断裂纵横交错，甚至密如蛛网。显然它们是在不同应力场条件下形成的，而且断裂的密度、性质还与破裂岩石及其边界条件有关，一般刚性岩块交接处应力集中，断裂发育；而在刚性岩块内部易发育两组平行的共轭剪切断裂，在刚性岩块间的柔性岩石分布区易形成压扭性断裂，且多与地层走向平行，经分析研究，它们不外乎呈等距平行分布和围绕一个中心呈环状或放射状分布两种规律。

1．等间距平行分布规律

断裂的平行分布是地壳中断裂分布的一种普遍现象，岩性条件相同地区断裂不仅具平行分布特征，而且有等距分布的规律，如铜陵沉积岩区，据遥感图像解译，其中一组南北向断裂由长江边至南陵县共有 4 条规模较大的，间距约16km，每两条大断裂之间尚有同方向，间距分别为4km和1km的次级断裂存在。其它岩区及矿区断裂都有这种分布规律(表3—4)。

表 3—4　不同岩区断裂等间距分布表　　(km)

岩区 / 方位		沉积岩区 铜陵	变质岩区 牟平—乳山	火山岩区 朱溪—汛桥	岩浆岩区 香花岭
东西		5,1	5	0.5—1	5
南北		16,4.1	5		
北东	北北东		4		
	北东	5	6	26,3.5	8.5
北西	北北西		5		
	北西	5	4	4	6.5

这种分布规律有区域性特点，与水平地应力作用有关。断裂间距与其规模成正比，规模越大，断裂间间距愈大，且大断裂控制小断裂的等级性极为明显。在一定范围内，应用等距平行分布规律可预测未知断裂的存在位置，还可以作为断裂规模大小分类的依据，具有实用意义。

由于一个地区的断裂是长期和多次形成的，而每一次构造活动，应力场都有所变化，这样，各期次形成的断裂方位也不断变化，如铜陵地区的断裂分布就有10个方位（图3—19），造成了断裂错综复杂的空间分布特征，但只要掌握了断裂等距平行分布规律是不难将其查清的。

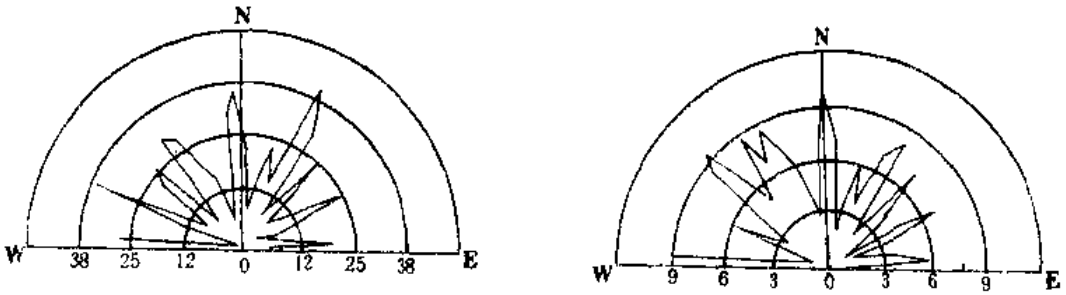


图 3—19　铜陵地区断裂走向玫瑰花图

a—长度；b—频率

2．环状和放射状分布规律

据遥感图像解译，断裂空间分布还有一种环状、放射状形式。这种断裂主要分布在岩浆岩区的岩体顶部及火山口和热液通道口附近，常被后期岩脉充填，热液蚀变强烈，愈合作用明显。图像上以色调和形态反映出来，是主要的控矿容矿标志。沉积岩区油气富集地段也有这种断裂分布。环、放状断裂的分布是局部的，与区域性的平行断裂的分布是不同的。

由上两种形式的断裂，虽然是在不同形式地应力作用下形成的产物，但在成矿有利地带或矿区内，由于构造应力的多次作用，这两种断裂常常互相叠加在一起，造成成矿区断裂分布很复杂，既有区域性应力作用下产生的等距性平行分布的断裂，也有局部岩浆侵入作用产生的环状和放射状断裂，形成高密度破碎带。但只要掌握断裂的分布规律，就不难区分不同级别、不同性质，成矿前，成矿期和成矿后断裂了。

（二）断裂的形态特征与力学性质关系

岩体、矿体的赋存位置常与张性、张扭性断裂（裂隙）有关，如胶东石英脉型金矿多产于陡倾角的张扭性断裂，而在压扭性断裂中很少赋存大的矿床。由此可见，确定断裂性质，对于查明容矿构造，预测成矿远景区很有意义。

遥感图像上断裂构造形态特征是研究断裂形成时力学性质的重要依据。图像上一些大大小小的线性体，由于受到不同地应力作用，表现出形形色色千姿百态的形态。这些线性体有粗有细、有长有短、有宽有窄，有平直有曲折，色调呈现出深浅不同变化，在地貌上出现升降、张口、闭合、推扭和错位等现象，根据这些形态特征可以判别出断裂的力学性质（表3—5）。

1．张性断裂

线性体短粗或细密成带，或呈曲折锯齿状、宽带状分布。总的走向呈直线，倾角陡，

表 3—5 断裂影像特征与力学关系表

类 型	形态特征	影 像 特 征	力学性质	规 模
直线状		浅色调，平直线性体，延伸长，连续性好，多为走向断层	压扭	区域性
断线状		色调深或浅，短粗线性体，总体延伸长	压张复合	区域性
缓波状		舒缓波状，延伸长	压扭	区域性
锯齿状		曲折线性体，呈锯齿状，连续性好，一般规模小	张	区域性
密带状		密集平行细线，呈带状，总体延伸长	张、扭	区域性
宽带状		深或浅色调，宽带状，有较好连续性，延伸长	张	区域性
弧线状		单条时呈弧状，面上呈鱼鳞状分部	压(推覆)	区域性
环 状		同心环状，范围小	张扭	局 部
放射状		放射状，范围小	张	局 部
环放状		环状、放射状水系或山脊共同一中心点，组合成环放状	张、张扭	局 部

产状变化大，连续性差，常为开口断裂。多呈阶梯状、地堑形式出现，常与地层走向垂直。有岩体侵入时呈明显的色带，形态较模糊。

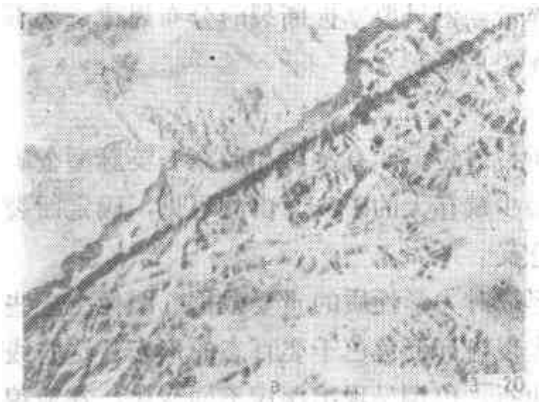


图 3—20 压扭性断裂影像（新疆达布尔特，黑白航片）
断裂平直，连续性好，形成构造台阶，为山区和丘陵区界线

2．压扭性断裂

线性体多平直细长，略有波状或弧形，中夹透镜状岩块，延伸远。常见多条断裂平行分布或雁行状排列，有时构成地貌界线，形成构造台阶(图3—20)。在沉积岩发育区，这种断裂常与地层走向一致，与地层界线易于混淆。有岩体侵入或热液作用时，常形成蚀变或矿化带，图像上有明显的色带显示。

3．扭性断裂

多呈直线状延伸的细色线，连续性好，两侧地形、地质特征错动明显。

4．推覆断裂

常出现在盆地边缘或大构造单元接触部位，单条断裂呈弧线形，面上呈鱼鳞状分布，

断裂角度极为平缓，如塔里木盆地边缘（图3—21）、太行山南缘、克拉玛依油田北部推覆断裂。

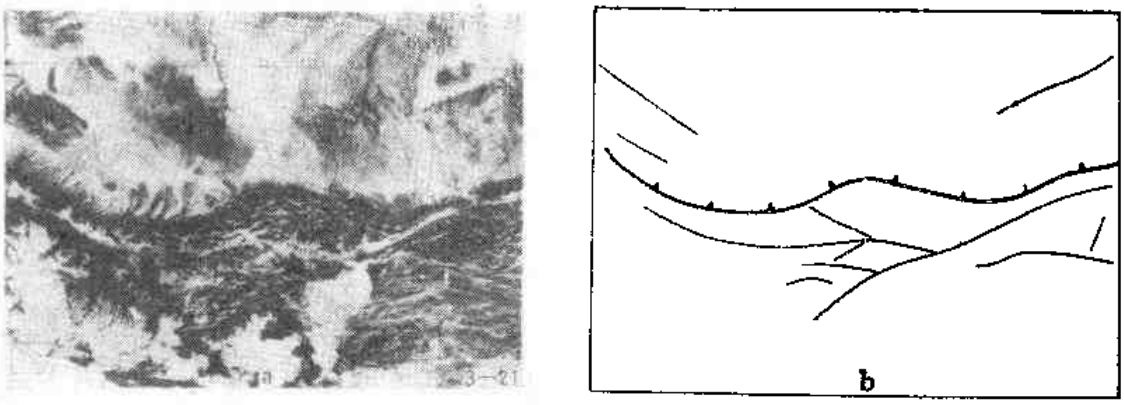


图 3—21　压性断裂影像特征（新疆塔里木盆地南边）
a—MSS影像；b—构造解译图

断裂性质，特别是规模巨大的断裂的性质在空间上是变化的。在一个地点见到的断裂产状可能只代表其局部意义。在评价断裂的性质时，不能以地表某点的特征来概括全貌，可表陡深缓，亦可表缓深陡。应用遥感图像从宏观特点来判别断裂的性质可能较为客观。

六、不同岩区断裂构造的特征

断裂的形成及其特征与岩性是有密切联系的，除上述讨论的各岩区断裂相同的规律外，各种不同岩性区断裂还有其独特的特征。

（一）沉积岩区断裂特征

沉积岩的层理特性是沉积岩区的最大特点，其层理中的一些软弱岩层如页岩、粉砂岩等是断裂最易成生的部位。这种断裂多为层间滑动断层，在遥感图像上其判读标志是：为顺层的层间沟谷，两侧地层岩性差异较大，在地层弯曲或间断时，线性体仍能向外延伸，不受地层范围限制，切错地层或显示为色异常带（图3—22）。其次，沉积岩区的断裂常造成正常层序的重复或缺失，根据这一特点亦可判定断层的存在。如江西九瑞地区，泥盆系

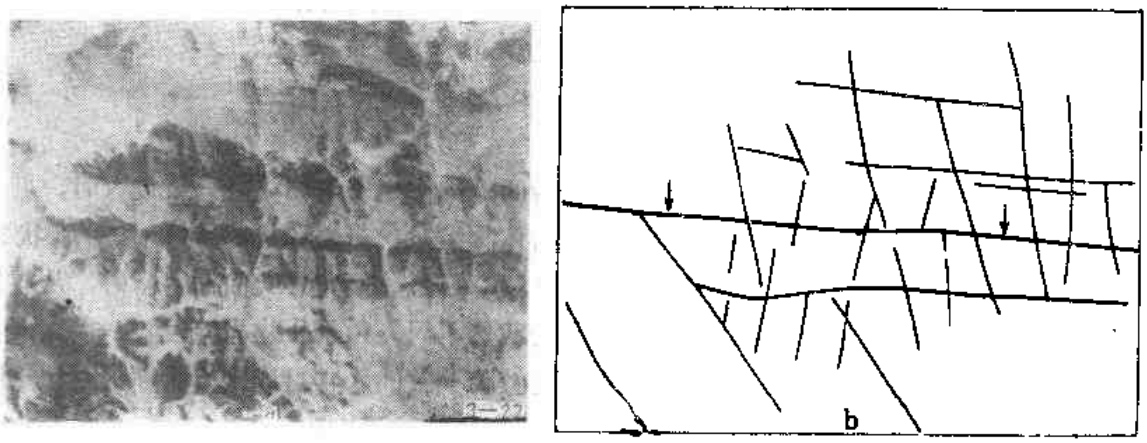


图 3—22　层间断裂影像（江西九瑞地区）
a—彩红外航片；b—断裂解译图

与二叠系之间缺失石炭系，即为断裂所致（图3—23）。

与岩层垂直的横向断裂也是十分发育的，一般伴随褶皱生成，为张性断裂。其特征极为明显：切断地层，常形成折曲沟谷（水系），具等距平行排列的规律（图3—24）。

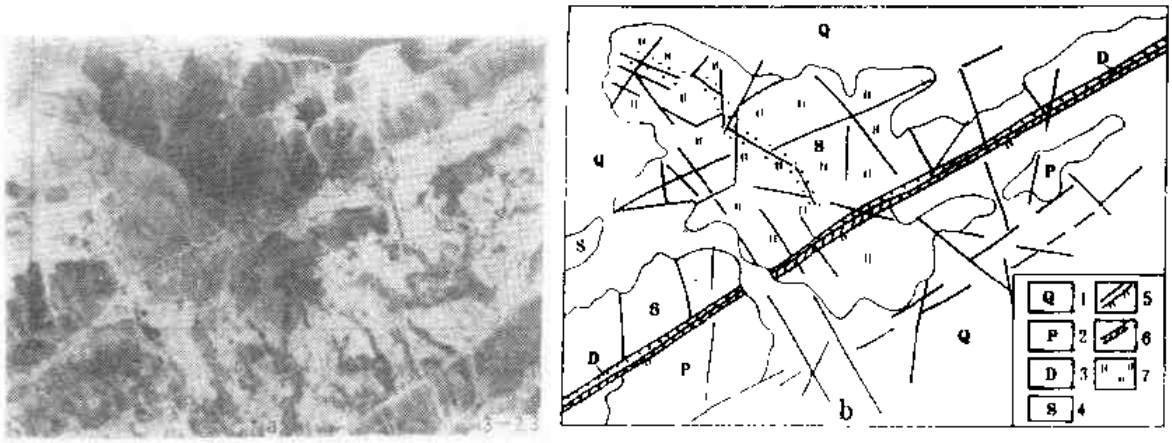


图 3—23　由于断裂作用造成的地层缺失（江西九瑞地区）

a—彩红外航片；b—地质解译略图

1—第四系；2—二叠系；3—泥盆系；4—志留系；5—断裂；6—含铜黄铁矿；7—硅化

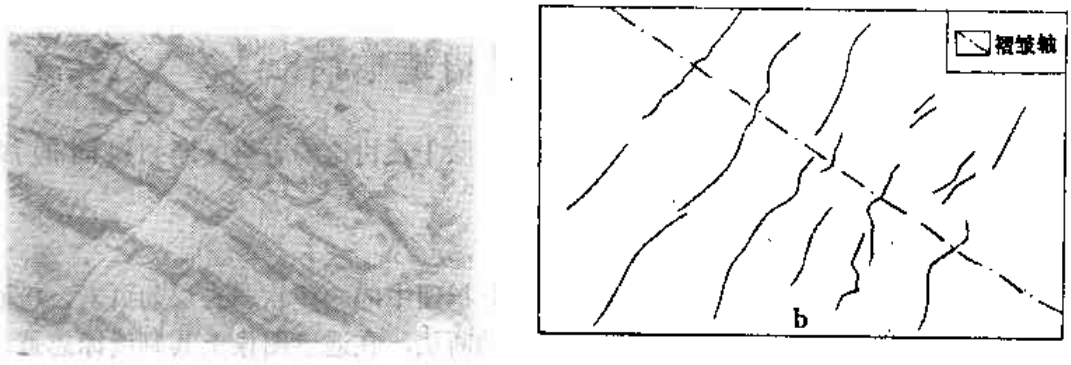


图 3—24　垂直于褶皱轴的横向断层（青海北部地区）

a—黑白航片；b—断裂解译图

与岩层斜交的断裂一般为剪切断裂。在铜陵地区，北东向顺层断层和北西向张性断层构成菱形构造，南北向和东西向剪切断裂恰好构成菱形块体的对角线。

沉积岩与第四系的接触边界，常为断裂构造。

（二）岩浆岩区断裂的特征

1．侵入岩区断裂的特征

侵入岩区的断裂与岩浆侵入时及岩体形成后的冷缩作用密切相关。岩浆侵入时，其上侵应力使围岩发生张裂，形成放射状断裂，当岩体冷缩时，产生环状陷落，形成环状断裂，这种特征也是判别隐伏岩体的最可靠标志（图3—11）。侵入岩大面积出露时，从航片上可见其节理是非常密集的，其发育特点与围岩截然不同。由于岩体岩性较均一，因而在同一应力下，形成断裂的性质、级别、间距都是较为一致的，常组成网格状断裂系统（图3—25）。

2．火山岩区断裂的特征

火山岩区断裂最主要特征与火山作用有关，在火山口及附近形成放射状及环状断裂。

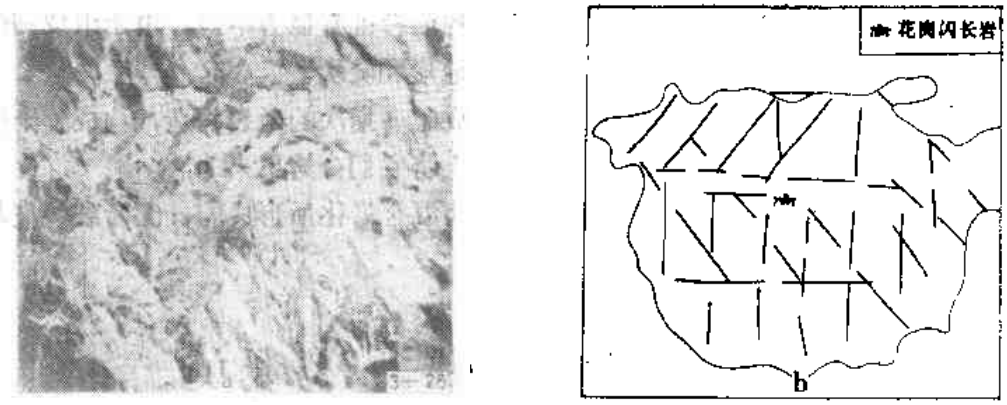


图 3—25　花岗岩区断裂影像特征（安徽凤凰山岩体）
a—彩红外航片；b—构造解译图

放射状断裂在平面上向火山口中心汇聚，同侵入岩区放射状断裂一样，都是张应力作用的结果。环状断裂为环绕火山口分布的弧形断裂（图3—26）。层理发育的火山岩区的断裂构造与沉积岩区的特征大致相同。

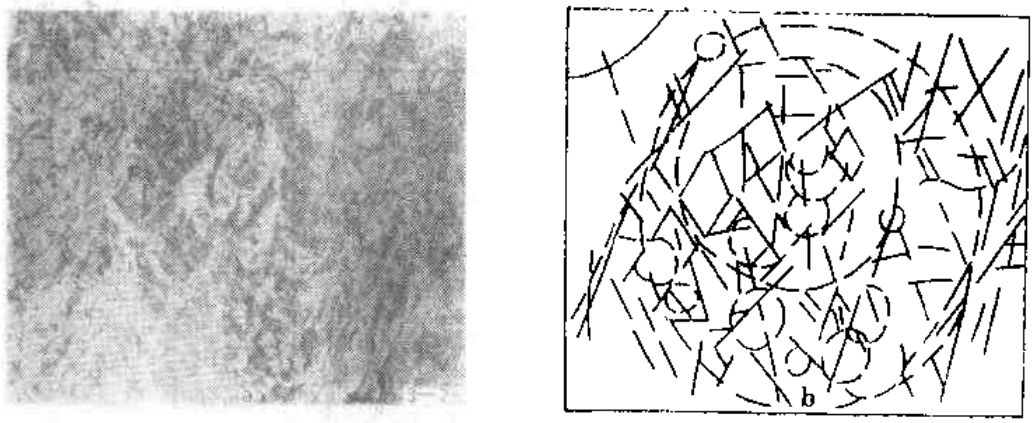


图 3—26　火山岩区断裂构造（浙江括苍山火山口）
a—MSS 影像；b—构造解译图

在岩浆岩区，岩浆的隐爆作用可形成不同形式的断裂系统，浅层隐爆作用常形成同心状及放射状断裂，中深层隐爆作用形成的断裂构成多边形地块，在块体内断裂密集，岩石破碎[1]。

岩浆岩区，大量发育的岩脉是断裂存在的间接标志，根据岩脉的分布特征可以解译出断裂及其性质，并可追索岩浆中心。

3．变质岩区断裂的特征

变质岩区断裂比非变质岩区要复杂得多，根据断裂形成时间与变质作用发生时的先后关系，可将其分为前变质作用断裂、同变质作用断裂和后变质作用断裂。

前变质作用断裂因后来的变质变形作用而愈合、泯灭，其特征很少保留且难以识别，同变质作用断裂主要为韧性剪切带，在遥感图像上其主要特征为：

带状展布的狭长色带，带内没有明显的破裂面及脆性变形痕迹（后期叠加者除外），

[1] 高荫岐，遥感地质，1987.3

带内发育的线理构造及糜棱岩带方向与两侧的构造特征有显著不同。由于组成韧性剪切带的糜棱岩较围岩抗风化能力强，易形成条状正地形和陡坎。

变质作用后，经历了漫长的地质时期，形成了多期次的断裂构造，构成复杂的断裂网络，但从断裂的基本特征分析还是能够从影像上将它们分辨出来的。

在强烈混合岩化地区，发育的断裂基本上为混合岩化后形成的，其断裂特征与花岗岩区的基本一致。

七、断裂构造的规模分级探讨

根据不同比例尺遥感图像显示出来的线性体规模，不难看出，断裂是多层次分等级的，有全球性的，也有区域性和局部性的。这些不同规模的断裂构成全球性的断裂网络，大断裂控制小断裂，逐级递推，规律极为明显（表3—6）。

表 3—6　线性体规模与断裂等级及图像比例尺关系表

线性体级别	线性体名称	线性体规模(km)	断裂类型	断裂级别	编图比例尺	图像比例尺
六级	微型线性体	＜1	节理，大节理等间距密集分布，多受岩性控制	最小一级地应力作用产物	1:1万	航空像片
五级	小型线性体	1—10	地表盖层断裂，等间距密集分布，受区域性构造控制	地应力作用产物，是前一级节理的集中带	1:5万	1:0.5万 1:1万
四级	大型线性体	10—100	地表中型断裂呈密集网络分布有等距性特点	地应力作用产物，是前两级断裂的集中带	1:5万 1:20万	1:5万 1:10万
三级	区域线性体	100—500	区域性基底断裂切割不同构造，呈色带，清晰程度不一	地应力直接作用产物，是前三级的集中带	1:50万	1:20万 1:50万
二级	大陆线性带	500—1000	裂谷带或穿透带巨型地壳断裂带穿切不同构造	大陆板块内部应力集中带	1:100万	1:100万 1:200万
一级	全球线性带	＞1000	大陆板块边缘结合带	板块边界缝合线	1:200万	＜1:200万 卫星像片

八、断裂构造与矿产的关系

（一）断裂构造对矿产的控制作用

应用遥感图像的宏观优势，研究区域性断裂构造，对了解区域构造发展史，查明控矿因素，进行成矿预测有着重要意义。就内生金属矿床而言，成矿区极大多数是处在特定断裂构造位置上，区内的矿床分布均受断裂构造控制，因而只有在查明断裂构造体系的基础

上对内生金属矿床进行预测才有意义。

控制矿产形成的断裂有的简单，有的复杂。简单的单条断裂就能控制矿床及矿体，如山东金清顶金矿，即是产于NNE向的将军石断裂带中。多数矿床是受多条（组）断裂的复合控制的，如吉林东部铜矿位于两条以上断裂交叉处占39.7%❶，我国四十个主要斑岩铜钼矿中57.5%受到多组断裂交叉复合的控制（芮宗瑶，1984），德兴斑岩铜钼矿区的朱砂红、铜厂、富家坞三个矿区的成矿岩体都位于北东、北西和东西向三组构造的交叉点上（图3—27），含矿体则充填于更次级的断裂中。由多条断裂构成的不同几何形态的块体对成矿的控制作用也是显著的。黄敏俭等通过对江西境内遥感图像、地球物理场和地球化学场分析研究后认为区内的找矿方向应着重放在德兴、上清、上饶三角形的边角部位❷。新疆宝贝金矿、甘肃柳园金矿都受到菱形构造的控制，香花岭矿区内所有的化探异常和成矿岩体都局限于菱块构造之内。滇中易门地区多边形地块控制了铁、铜矿床的分布❸。日本九州南部从MSS影像上反映出的数个五角形、六角形线性体组合除与火山口形成有关外，还与热液型金矿有着密切的联系（图3—28）❹。

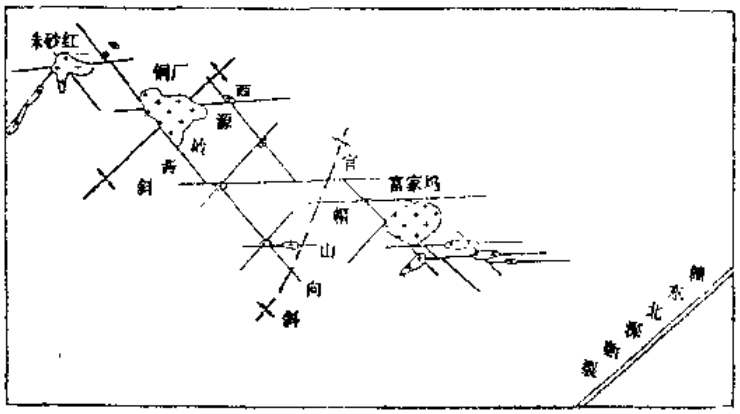
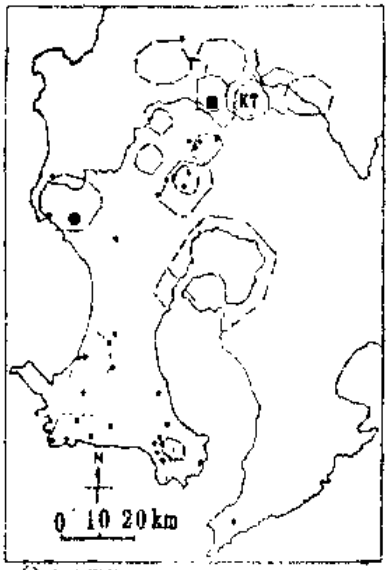


图 3—27 德兴斑岩铜（钼）矿田地质构造略图
（据胡魁等原图简化）



○多边形构造 KT 破火山口 ●金矿床

图 3—28 日本九州多边形构造与金矿分布图

韧性剪切带作为控矿构造的一种重要形式越来越受到重视。丹东五龙金矿、河北金厂峪金矿现都被认为与韧性剪切带有关❺❻。所谓的“含金石英脉”亦被认为是含金剪切带的一种重要形式❼。但是，并不是所有的韧性剪切带都能控制成矿，只有那些蚀变发育的交织型剪切带才有可能成矿，图3—29详细列出了这种剪切带的特征及其对金矿田、矿床的控制作用。通常大型断裂带与成矿元素的地球化学晕之间的关系，可指示出含矿带的空

❶ 刘福权，遥感地质，1985.1
❷ 黄敏俭，遥感与地质，1983.3
❸ 高荫歧，遥感地质，1987.3
❹ 国外遥感地质通讯，8701
❺ 李志中等，遥感与地质，1991.2
❻ 许云程等，地质与勘探，1991.8
❼ M.博纳梅宗，“含金石英脉是含金剪切带的一种特殊情况”《含金剪切带型金矿床》，地矿部情报所，1989

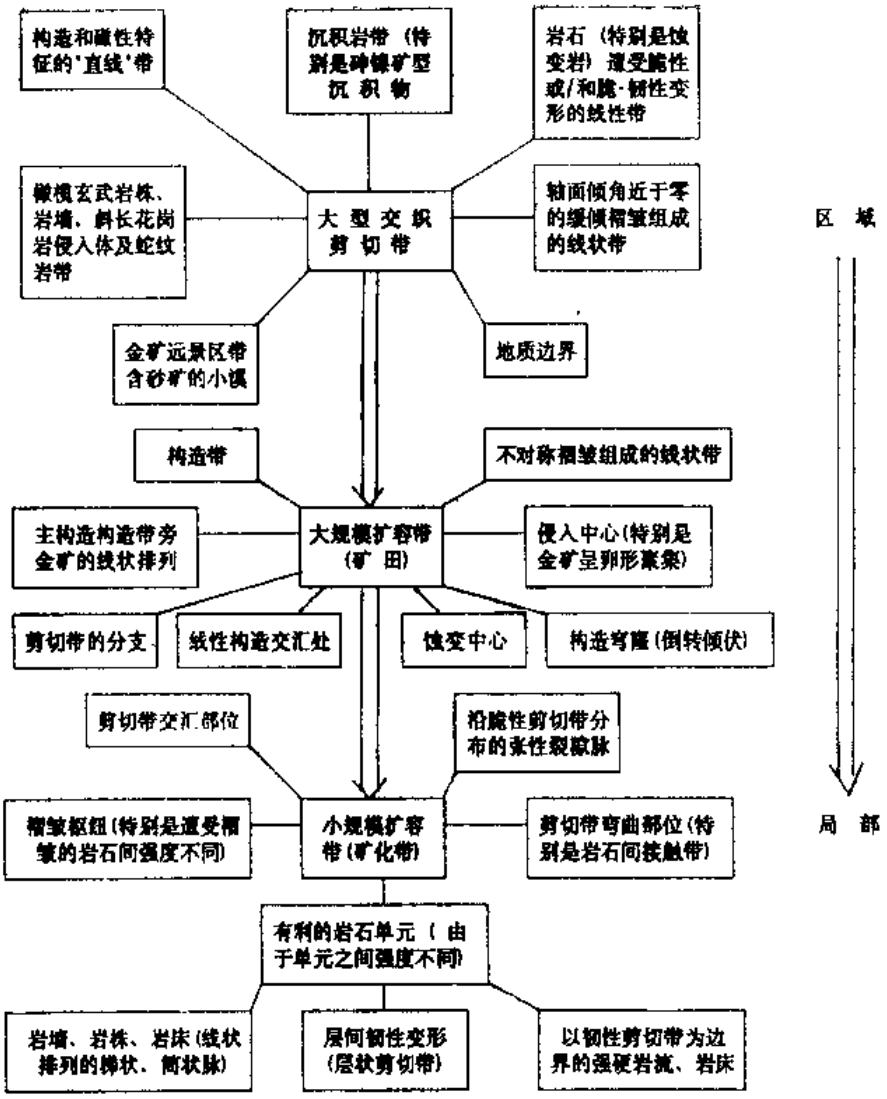


图 3—29 与交织剪切系统有关的金矿床的勘查准则（据地矿部情报所）

间分布和成矿构造分布的规律性，并可划分出成矿组分高富集的聚矿带，在聚矿构造带上与其它不同方向构造带的立体交织点、圈出矿田构造预测区。在岩浆岩区，断裂常被含矿岩脉充填，呈脉状和网脉状的矿化现象是成矿预测极为重要的构造—岩浆标志，是直接找矿信息。

（二）控矿断裂的识别

识别控矿断裂以大比例航空像片尤其是彩色、彩红外航片为佳。

控制脉型矿产断裂的影像有两种，一为控制不易风化脉（矿）体的断裂，由于脉(矿)体坚硬，不易风化，在图像上呈现出长条垄岗状地形，因其含有各种成矿组分及热液蚀变矿物，而在彩色航片上呈现特殊的色彩，如山东的含金石英脉表现为褐红色，不含矿者为浅白色（图3—30）。另一种为含易风化脉（矿）体断裂，呈现低凹的长条状地形，也表现出与围岩不同的特殊色彩，如江西一些多金属矿床的含锌、铅碳酸盐岩脉。

控制破碎带蚀变岩型矿产的断裂影像特征为：断裂发育，岩石破碎，地形平缓，色彩异常。山东西直格庄控矿断裂在实地不易发现，但在彩色航片上却呈现出一褐红色带状

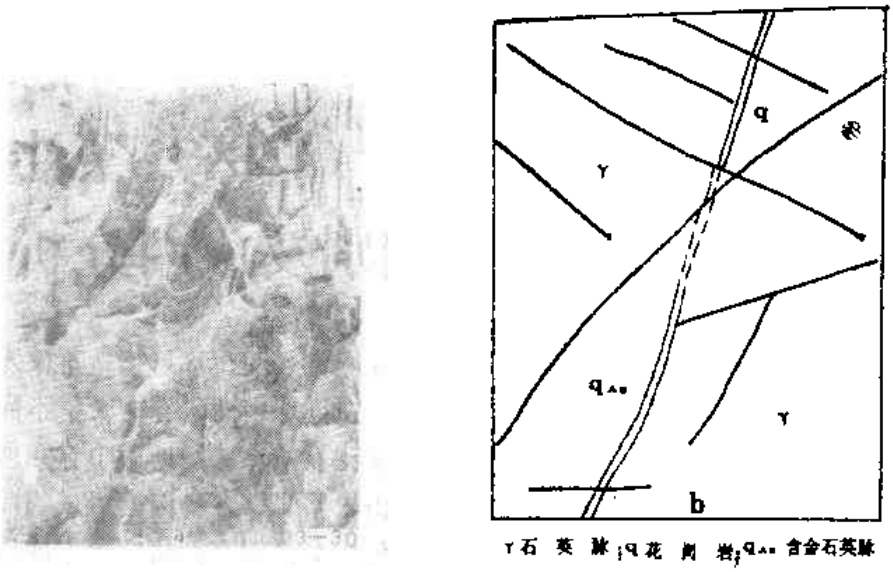


图 3—30 控矿断裂影像（山东牟平）

a—彩色航片；b—地质解译略图

体，局部有民采痕迹。甘肃金场沟控制金银矿的断裂在彩色航片上呈浅色线性特征，安徽铜陵地区的控矿断裂在彩红外航片上多呈浅黄色。

位于断裂上的采矿遗迹也是确定断裂控矿性的标志之一。在大比例尺航片上，矿坑、探槽、废矿堆等采矿痕迹清晰可见，在解译时应充分注意这些现象。

第四章　不同地质（岩区）条件下环形构造特征判别及成因分析

随着航天技术的发展，不断获得的大量星际图像表明，环形构造不仅发育于太阳系及其他行星表面，而且广泛分布于地球岩石圈中，在地球表面，存在大量不同大小和成因的环形构造，它们是大陆地壳中稳定而重要的特征。在前寒武纪地质中存在地球最古老的环形构造——陆核，在年青地块中也广泛存在着由岩浆岩等各种因素形成的环形构造，所以说地壳上的环形构造具有地质客观性，这是任何一个渴望全面研究探索地球构造的科学家所不能忽视的主要因素。

一、环形构造的涵义

同研究断裂构造一样，首先必须明确与环形构造有关的遥感术语的确切涵义。

（一）环形影像

指在遥感图像上呈圆形、椭圆形或不规则封闭曲线等形状的影像，直径由数公里到数百公里，其色调特征、地貌形态与周围地区有较明显的差异，常伴有环形水系和放射状（或向心状）水系。

（二）环形构造

指在遥感图像上反映地质内容的环形影像，包括基底穹窿及各时代沉积岩系的圆形、椭圆形构造（陆核、古潜山、油气构造及盐丘等），隐伏的隆起、坳陷，穹窿构造及向斜构造，以及火山机构、环形侵入体、爆破岩筒、各种蚀变晕圈、环形断裂和热液通道等。

二、环形构造判别标志

（一）色调标志

遥感图像上显示出的与背景不同的环状色调，亦称之为遥感色异常。这种色调异常在黑白图像上不易发现，难于辨认，而在彩色或彩红外图像上则清楚易见，呈深色、浅色或各种色彩的环形影像，与背景色调有明显差异。近年来，随着遥感技术及地质应用的发展，这种模糊环形色异常越来越多地被发现，且日益引起地质界极大的关注。现已证明，这种环形色异常不是偶然出现的，而是与蚀变岩石有密切成因联系，且与成矿区的分布相一致，并与重磁异常、γ能谱异常、化探异常相吻合。

众所周知，在矿田上有各种地球物理场的异常存在。磁性体有磁异常显示，地质体密度差异有重力异常显示，放射性元素有γ能谱异常显示，硫化物矿床有电性异常显示等。由于色异常是一种特殊的光谱异常，也是地球物理场的表现形式之一，因而在矿田上也存在遥感色异常。这种色异常与地面岩石波谱相关，常与蚀变岩石范围相吻合，在遥感图像

上表现为不同的色调差异。色异常并与成矿元素富集密切相关。

在区调及找矿工作中，可利用这种遥感色异常作为成矿预测的标志，圈定找矿靶区，尤其是在没有开展物化探工作的地区，更有必要这样做。

（二）形态标志

环形构造有多种成因，不同成因的环形构造可表现为不同的形态。

1．地貌标志：圆形隆起或环状山脊，或隆起、洼陷相间呈环状分布。

2．水系标志：环状水系、放射状水系或向心状水系。

3．同心环状断裂、放射状断裂以及环放状断裂呈蛛网状出现。

以上标志可在一个环形构造中同时出现，也可单独出现，在解译时应具体分析。

三、环形构造特征判别及成因分析

对于环形构造成因，许多学者对其进行了研究，前苏联的Б. А. 布什等根据环形构造的大小级别作了成因分类，共分为六类（表4—1）。高荫歧分析了卫星图像上环形构造特

表 4—1 环形影像成因类型

环形分级 (km)	成因类型													
	多成因的			单成因的										
				变质成因	岩浆成因				构造成因				外成的	后成的
					地壳的		壳下的							
巨型 1000以上	陆核	地幔—震源	岛弧（?）						负的：陆向斜 向斜					
大型 200—1000				片麻岩褶皱椭圆	碱性基性辉长斜长岩和碱性—超基性侵入体深成的	火山岩暗色区	火山深成的			正的：穹隆长垣、短背斜				
中型 50—200				花岗-片麻岩隆起			深成的：花岗岩类侵入体	大陆和边缘带火山的			底辟体、盐丘的和粘土的	旋转的		
小型 10—50														
微型 10以下					利岩 碳酸岩金伯								矽卡岩漏斗 沉陷漏斗	冲击的

（据Б. А. 布什）

征，认为环形构造主要由火山构造、岩浆侵入构造、地震、地下爆炸、构造旋扭及构造穹窿和陨石冲击形成❶；赵树明总结了圆形影像对应的地物类型，从外动力及内动力两方面

❶ 高荫歧，卫星像片上环形构造成因及地质特征，遥感地质，总9期，1983，12

探讨了其成因❶；陈荫祥认为岩浆热动力是环形构造的主要成因；高林波研究了环形构造与铀矿化的联系后认为，环形构造至少形成于热动力集中区、地应力场转化过程中的引张区和基底构造活动区❷。

表 4—2　不同岩区环形构造特征与地质成因对照表

岩区		影像特征 / 成因		形态特征	遥感解译标志	地质背景	实例
岩浆岩区	侵入岩体	单岩体	出露		浅色，环形边界极清晰，盆状环内地貌平缓，光滑	岩性单一	巴伦台东花岗岩体
			半隐伏		环形清晰，环心浅色，环边深色，盆状，环形山脊向心水系	断裂交汇处	托里宝贝金矿
					环状、放射状山脊、水系，外圈为色彩异常	岩浆上涌形成的张性断裂	通化岩体
			浅隐伏		浅－深色色环，较清楚，边界为环形山脊	断裂交汇处，蚀变强烈	北峪岩体
			深隐伏		深色，色环模糊，呈云雾状晕，边界不清	构造－岩浆带，蚀变强烈	铜陵岩体
			隐爆岩体		色浅，环内断裂发育，呈网脉状，环内地形破碎	岩浆、断裂发育区	罗茨岩体
		群体	串珠状		串珠状隆起，深暗色色环	沿断裂带发育，蚀变强烈	寺门口
			蘑菇群式		色杂，小环成群，环形山，环状水系发育	多组断裂交汇岩浆活动蚀变强烈	碰海
			母子式		色杂，大环套小环，环形地貌发育	多组断裂交汇岩浆活动蚀变强烈	冬瓜山
			宝塔式		色杂，大中小环叠加，小环清晰，大环模糊	多组断裂交汇岩浆活动蚀变强烈	狮子山
	火山岩区	单体	现代火山口		深色，环形清晰，正地形，环形山	中心式火山机构	腾冲
			古火山口		环形地貌，柱状突起，放射状断裂，边界有时模糊	火山岩发育区	括苍山
		群体	串珠状火山口		深色，环形火山口呈带状分布	线状排列的火山机构	五大莲池
			莲花状火山机构		色深而杂，围绕一个中心环形构造叠加分布，圆形隆起	复杂火山机构，断裂发育	临海

❶ 赵树明，遥感图像中圆形影像对应的地物成因类型探讨，遥感地质，1988，3 期

❷ 高林波，环形构造与热液型铀矿化的可能联系，遥感地质，总 7 期，1983，6

续表

岩区	影像特征 / 成因		形态特征	遥感解译标志	地质背景	实例
岩浆岩区	蚀变作用	黄铁矿化铁帽		深色晕圈，彩红外航片呈深黄色，环状、放射状水系	断裂交汇处，热液通道口	店门口金矿
		矽卡岩化		暗色晕圈，彩红外航片呈黄色，环状山脊，中心凹陷	岩体接触带	冬瓜山金矿
		硅化		暗色环，边界不清	破碎带，蚀变强烈	溪上金矿
		高岭土化		浅色环，边界较清楚	断裂交汇处，热液通道口	三合圩多金属矿
	构造作用	帚状构造		山脊水系围绕圆形地块呈撒开状	位于大断裂附近中心为岩体	
		旋卷状构造		以一点为中心，水系、山脊地层呈旋卷状	构造发育区	
变质岩区	变质作用			色深，片理呈环带状，边界不清	变质强烈，构造发育	冀东
	混合岩化作用			色浅，规模较大，边界不清	混合岩化中心	胶东
	蚀变作用	石英脉型		沿垄岗状石英脉上分布有褐色晕圈，边界不清	构造破碎带，充石英脉蚀变强烈	金牛山
		蚀变破碎带		褐色晕圈，环形隆起，环状放射状水系发育	断裂交汇、蚀变强烈	牛山顶
沉积岩区	构造作用	油气构造		多层色晕圈，环状、放射状水系发育	构造发育区	胜利油田
		煤田构造		菱（格）状地块内低洼的环状地貌，色浅	构造发育区	贵阳煤田
		穹隆构造		地形呈圆形或椭圆形隆起，地层呈环状分布	等轴或短轴背斜	湖南涟源

根据近年来在不同岩区对环形构造的研究，作者认为在1:5万区调及中大比例尺成矿预测中所遇到的环形构造主要成因有：岩浆侵入作用，火山作用，变质作用（混合岩化作用），热液蚀变、地球化学作用和构造作用等。不同岩区环形构造影像特征不同，成因也不一样，有的环形构造只在特定的岩区才形成。下面分别对各岩区环形构造特征和成因做进一步探讨。

（一）侵入岩区环形构造特征及成因

在侵入岩发育区，环形构造主要为不同深度就位的侵入岩体和侵入过程中的热液蚀变作用以及爆破作用、构造作用的产物，主要类型有（表4—2）：

1．不同深度就位的简单岩体形成的环形构造，按侵入深度和剥蚀程度不同有四种类型。

（1）出露岩体形成的环形构造

边界极清楚，图像上一目了然。在新疆、甘肃、湖南等地基岩裸露区，出露的中酸性岩体为浅色的圆形或椭圆形，圆内色调均一，与围岩界线清晰可分（图4—1）。

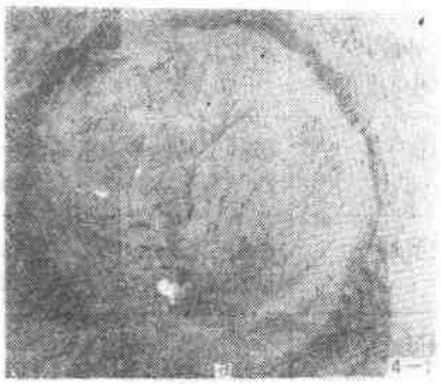


图 4—1—a 出露岩体影像（新疆布尔根河南岸）环圈内亮色部分为花岗岩体，周边暗色部分为接触角岩

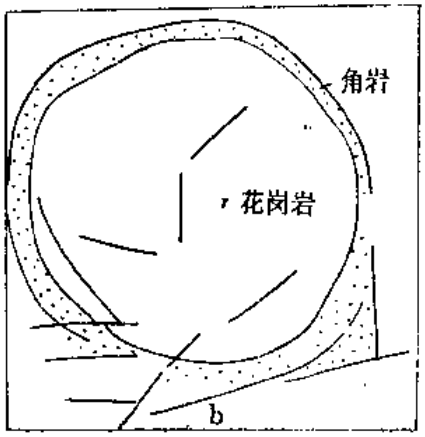


图 4—1—b 出露岩体（图4—1—a）解译图

（2）半出露（隐伏）岩体形成的环形构造

① 色调（彩）特征：出露部位多呈较背景浅的圆形影像，隐伏部位为环形蚀变所表现，多呈较鲜明的彩色或呈暗色调。

② 构造特征：在隐伏部位发育环状断裂或放射状断裂以及充填于断裂中的环状、放射状岩脉，并伴有围岩蚀变。如图3—9所示，岩体外侧环放状断裂极为发育，最外一圈环状断裂即为隐伏岩体的边界。

③ 地貌特征：出露部位多为盆状地形，隐伏部位形成环状山脊。如北京房山半隐伏岩体，中心部位为较低平的亮白色圆形地貌，边部为因蚀变而形成的暗红色的环状山脊（图4—2）。



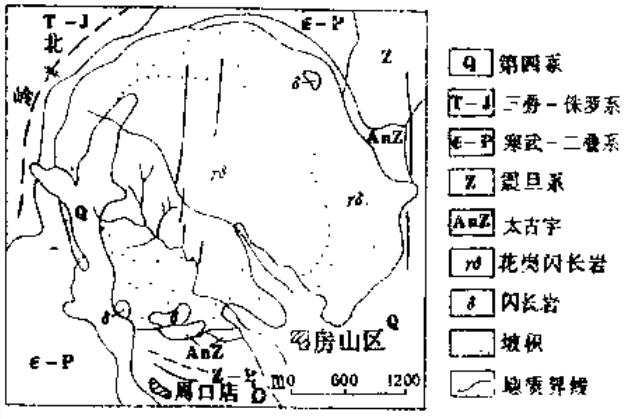


图 4—2 半出露岩体影像（北京燕山）

a—TM影像；b—地质解译图

（3）浅隐伏岩体形成的环形构造

① 色彩（调）特征：中心部位多因强烈蚀变而呈现出不同于背景的色彩（调）。如北京西山北峪浅隐伏岩体中心为圆大理岩化呈现出的亮白色影像，向外逐渐向正常色调过渡

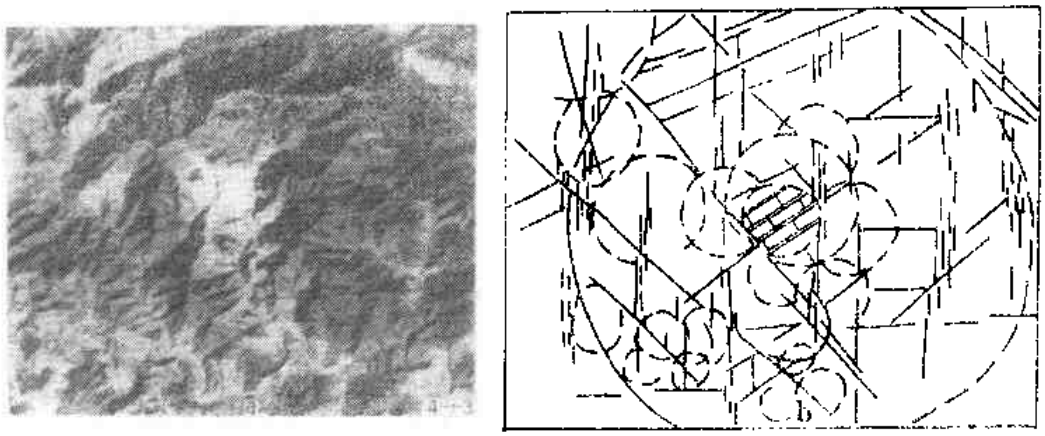


图 4—3 浅隐伏岩体影像（北京西山大台）

a—TM影像；b—构造解译图

（图4—3），正常与异常色调的边界即为隐伏岩体的边界。

② 构造特征：在隐伏岩体顶部通常由侵入活动形成辐射状断裂，而侵入体因结晶作用，体积缩小而引起岩体顶部岩层的坍塌作用产生环状断裂。通常伴有热液蚀变晕以及多金属矿脉。

③ 地貌特征：

A．圆形隆起与环状洼地、环形山脊相间排列，为长江中下游浅隐伏岩体较为普遍的一种形式，中心部位为一小鼓丘，隐伏部位为环状低洼地带，隐伏边界呈突起的环状山脊。

B．盆状低地、环状山脊、中心部位由于风化发育而呈盆地，周边围岩由于岩浆作用变形变质，形成环形坚硬山脊，如江西东雷湾岩体（图4—4）。

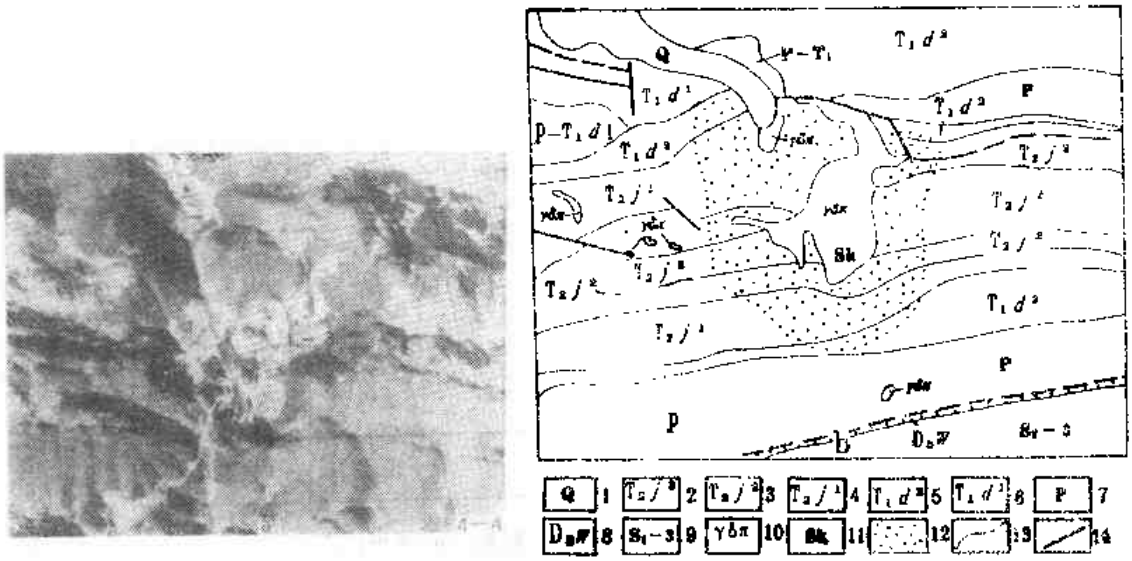


图 4—4 浅山露-浅隐伏岩体盆状影像特征

a—彩红外航片（江西，东雷湾）；b—地质略图（据赣西北地质队1:5万地质图简化）

1—第四系；2—4—三叠系上统；5—6—三叠系下统；7—二叠系；8—泥盆系中统；9—志留系中上统；10—花岗闪长斑岩；11—矽卡岩；12—大理岩化；13—地质界线；14—断裂

（4）深隐伏岩体形成的环形构造

这类岩体由于埋藏较深且规模较大，多为大的岩基，需要应用卫星图像及配合物化探资料进行分析，其主要影像特征为：

在较大范围内，地形呈隆起状，地层或山脊多呈弧形或环形围绕隆起中心展布，隆起之上出露有小的岩株、岩脉和小的隐伏岩体，且蚀变大量发育，整个隐伏岩体区在色彩上与区域特征有一定差异。如安徽铜陵隐伏岩体除影像特征清晰外，能谱也有较好的异常显示（图4—5）。

根据岩体在不同深度形成环形构造特征，总结出理想的环形构造模式(图4—6)。

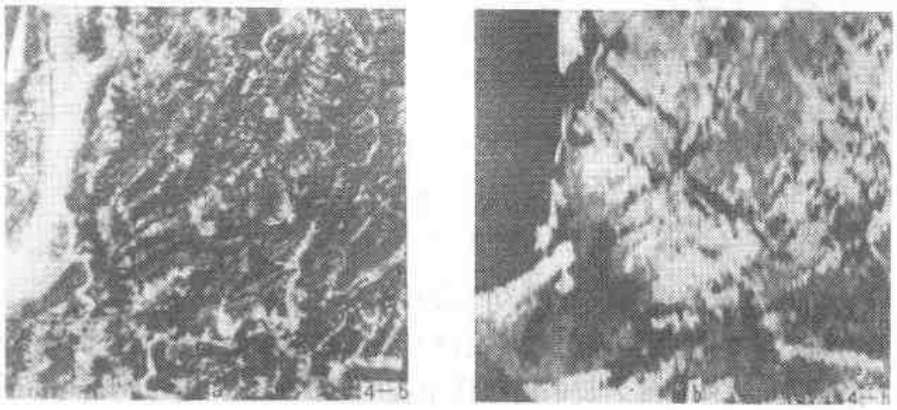


图 4—5　深隐伏岩体特征（安徽铜陵）

a—TM影像；b—能谱图像

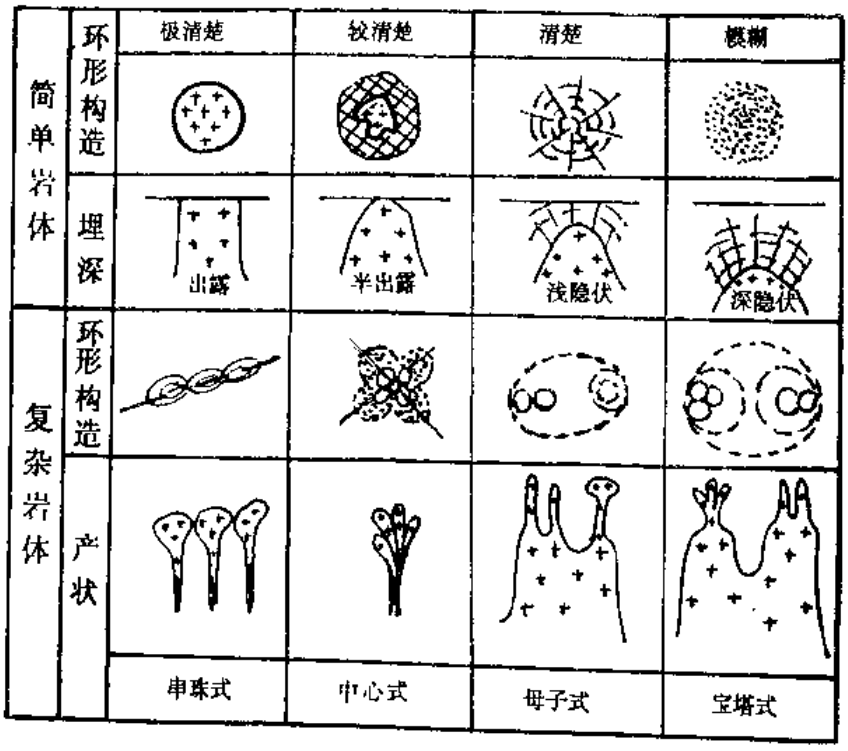


图 4—6　岩浆岩体形成环形构造的理想模式

2．大型复杂岩群形成的环形构造

一般，岩体的出现不是单独的，而是由多期次的岩浆活动形成的，其组合形式也是比较复杂的。从影像看，复杂岩群多形成大小环嵌套式影像，大环宏观特征清楚，规模大小不一，内部形态极为复杂，小环成群成带分布，常见大环套小环，环与环互相穿插、切割，从组合形式看有蘑菇群式、母子式、宝塔式等（表4—2）。

大环形构造区常为相对隆起区，环内色调深浅不一，为复杂的岩浆活动中心，其边界

受大断裂控制，代表了岩浆活动区的范围；是深部岩基的显示（图4—7）。中、小型环形构造则是中浅部的中小岩体的反映，有时清晰有时模糊，这决定于剥蚀程度和蚀变岩石与围岩的光谱差异。

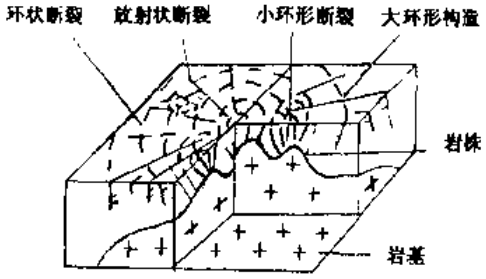


图 4—7 岩浆岩侵入形态与环形构造关系示意图

分析对比铜陵幅侵入岩体的分布(图4—8）与环形构造的分布（图4—9）可以看出，两者分布上大的格局是一致的，不同的是出露岩体面积小，呈点块状，环形构造为几个大环之内嵌套多个中小环。中小环的范围与出露岩体相对应，大环为出露岩体集中分布区的边界，即小岩体下的大岩基的边界。只有环形构造分布而无出露岩体则可能反映了深部岩体之间的关系。位于同一大环之内的出露岩体多属于同一来源、同一岩基，从而为岩浆岩区单元—超单元方法填图，划分岩体单元组合提供可靠依据。

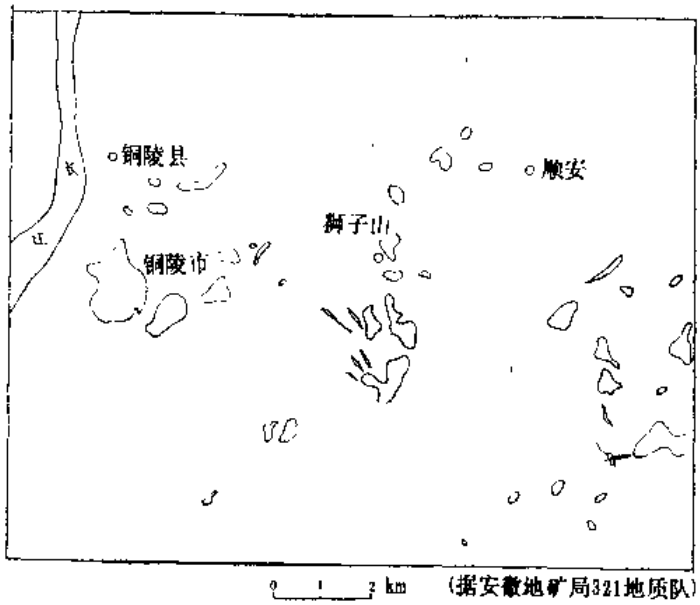


图 4—8 铜陵幅侵入岩体分布图

3．岩浆热液蚀变作用形成的环形构造

岩浆热液蚀变作用使岩石发生物理化学变化，形成与原岩物质成分及结构构造上的差异，在图像上表现为色调的不同及地貌的差异。

热液蚀变主要形成于热源（岩浆岩）和热液通道（断裂）周围。由此特点，从遥感图像上可以有针对性地识别热液蚀变环形构造，其影像特征为：

（1）色调特征

圆形或环形色彩异常，分布于隐伏岩体顶部或出露岩体边部，各类蚀变在图像上表现出的色彩类型见表4—3。

上表热液变质晕圈的范围，一般可达接触带以外几km，最大达10km。

（2）形态特征

A．圆形隆起，位于热源的顶部或附近。

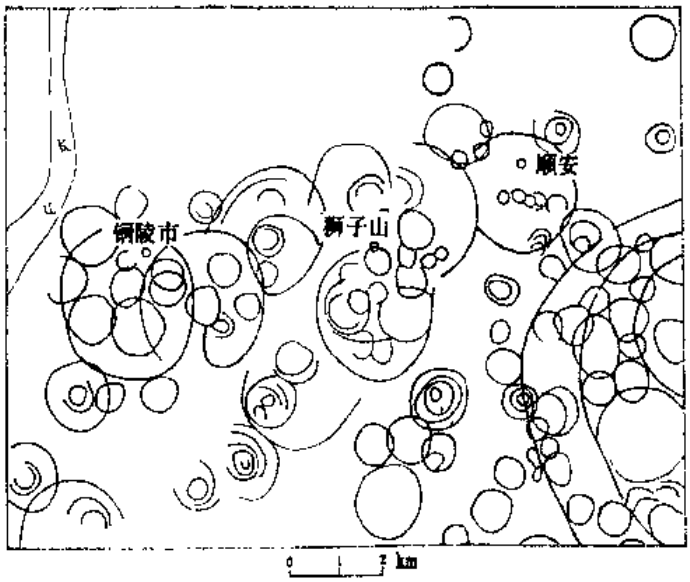


图 4—9 铜陵幅遥感环形构造解译图

表 4—3 常见蚀变岩石与遥感图像色彩对照表

蚀变 / 片种	硅化	黄铁矿化	矽卡岩化	铁帽①	高岭土化	角岩化	大理岩化
彩红片	暗紫色	暗紫黄色	金黄色	深黄色	浅灰色	深灰色	灰白色
彩色片	暗绿色	深暗色	红 色	紫红色	灰白色	暗黑色	灰白色

① 为后生氧化作用所致。

B．环状洼地或山脊，位于岩体与围岩接触部位，为接触蚀变岩带，易风化者形成环状洼地，抗风化者形成环状山脊。

4．构造作用形成的环形构造

由于旋扭构造运动，围绕刚性岩块常形成一系列弧线形构造，称为旋扭构造，其刚性地块常由岩浆岩体或隐伏岩体充当。

旋扭构造有多种型式，但其基本特征却是相同的，即都是由环核和环圈组成。按表现形式可分为帚状构造、环状构造和涡轮状构造。

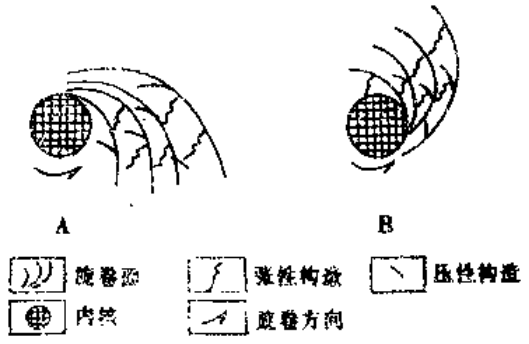


图 4—10 压扭性旋卷构造（A）和张扭性旋卷构造（B）示意图

（1）帚状构造

由一系列大致向一端收敛，向另一端撒开，形如扫帚状的弧形断裂或褶皱群组成，内核位于弧形构造内。根据弧形结构面力学性质，可分为压扭性和张扭性帚状构造（图4—10）。

帚状构造多形成于大断裂的旁侧，为大构造系中的次级构造。如安徽洪镇帚状构造，位于郯城—庐江大断裂与长江破碎带之间，环核为花岗岩，旋圈由断裂和褶皱组成，位于环核的东北侧，由北向南收敛，由旋圈中的压扭性断层、逆掩断层可以判定此帚状构造为压扭性。

（2）环状构造

旋圈围绕环核呈参差不齐的大致为同心环或弧环状分布，常把所在地块切成环形地带或环列的弧形地貌。这种环状构造的形成也是由于其旁侧的大型断裂平移错动而致。

旋扭作用形成的环状构造与岩浆作用形成的环形构造是不同的，前者范围较大，环状构造成分为环、弧形断裂和褶皱，连续性差，多为偏心状，无同期的放射状断裂，后者范围小，环状构造成分为环状断裂，连续性好，为同心状，并伴有放射状断裂。

（3）涡轮状构造

为一系列弧形褶皱或断裂围绕核心向四周撒开呈放射涡轮状展布，且弧形构造有规律地向一方弯曲。

除断裂错动产生的旋扭应力形成旋扭构造外，岩浆螺旋式上升也可使围岩发生旋扭，形成旋卷构造。

旋扭构造不仅可以单独出现，而且可以组合出现，组成并列式、同心式、包含式等形态。

（二）火山岩区环形构造特征及成因

1．近代火山活动形成的环形构造

从分布来看有中心式喷发和带状、串珠状裂隙式喷发两种形式。如黑龙江五大连池（图4—11）、吉林长白山、云南腾冲等，火山口形态极为显目，边界清晰，岩性以基性熔岩为主。



图 4—11　现代火山口影像（黑龙江五大连池彩色航片）

2．古火山机构形成的环形构造

呈圆形隆起地貌，包括环状水系和山脊，伴有放射状断裂，由于植被密度不同色调或深或浅。如铜陵蝌蚪山古火山机构（图4—12），呈突起圆柱状，边界陡立，环内地形较平坦，发育有多组断裂，以浅色调为主，暗色处为植被覆盖区。

时代较老的古火山机构，形态极为复杂，因后期岩浆侵入作用和热液作用使其又叠加上新的蚀变晕圈，影像特征不清，边界模糊，较难分辨（图3—26）。通常这些环形构造分布区有重磁异常和化探异常反映。



图 4—12—a　铜陵蝌蚪山火山口影像

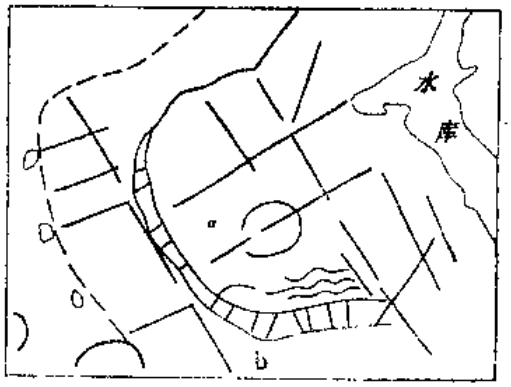


图 4—12—b　蝌蚪山构造解译图

（三）爆裂作用形成的环形构造特征

由深部岩浆爆裂形成的岩筒、岩管、岩体等在图像上多呈破碎的环形体，地形多低洼、平缓，岩石破碎，构造发育，构成蛛网状或不规则条块状，色调较围岩差别较大。不同深度岩浆爆裂作用形成的影像有所差异，由浅到深形态特征逐渐模糊，剥蚀程度不同影像清晰程度也不同。

（四）沉积岩区环形构造特征及成因

沉积岩因其本身的特性可形成各种环形影像，如水平层理的岩层风化剥蚀后呈现云朵状圆形地貌，碳酸盐岩溶风化发育区溶蚀残丘亦形成圆形地貌，一些现成及第四纪地貌也可形成环形影像（图4—13），但这两种类型环形影像与成矿无相关关系。另一类为由构造作用形成的穹窿和凹陷，在图像上呈现出大小不等的环状影像。构造穹窿由底辟构造或由两组不同方向的褶皱叠加形成，如湖南涟源—邵阳一带的东西向排列的一系列穹窿即为北东向和东西向褶皱构造叠加而成（图4—14）。凹陷盆地为油气、煤田等主要产区，其内分布有大小不等的环形构造（图4—15），形态特征各异，有的呈同心多圈色环构造，有的呈色调深浅不均的云雾状色异常。大庆、大港、胜利等油田，无例外地均在色环异常中，

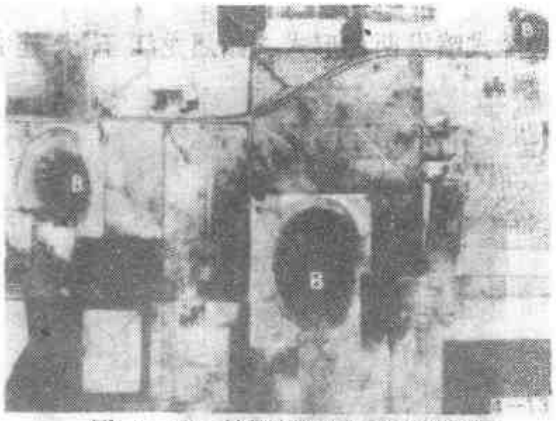


图 4—13　第四纪平原区环形影像
B中黑色为水体，边界为水体退缩后，形成环状淤积（黑白航片）



图 4—14　由两期不同方向褶皱构造及岩体侵入叠加形成的环形构造
（湖南龙山MSS）

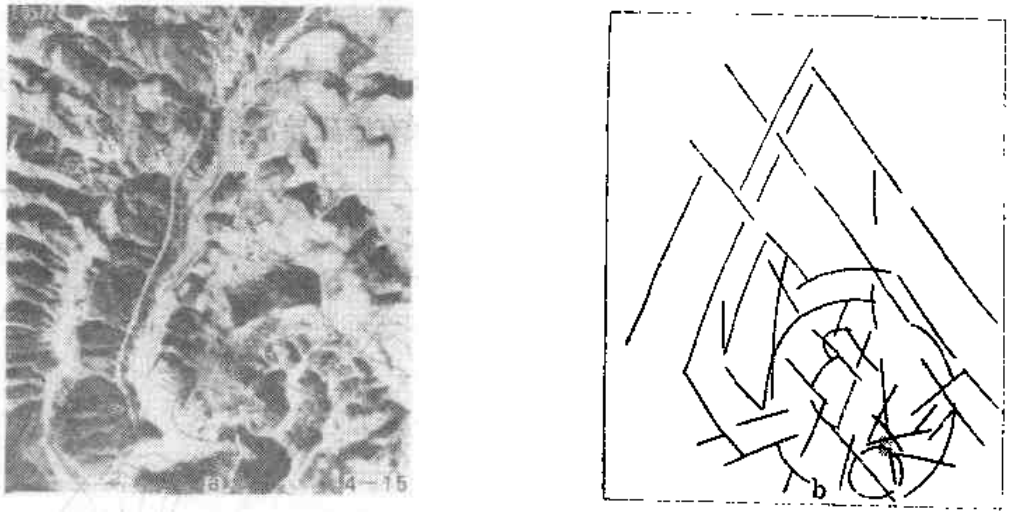


图 4—15　贵州贵阳成煤盆地中环形影像
a—黑白航片；b—构造解译图
成煤区为环形构造所限，四周为菱状断裂

这种色异常与烃类聚集扩散有关，高精度磁测亦有微弱异常显示。因此，盆地中的色环晕圈是找油气的重要标志；在云南、贵州、四川碳酸盐岩、碎屑岩地区的油气构造，不但有色环晕圈显示，而且发育环形和放射状断裂，集色、线、环于一体，与隐伏岩体特征极相似。

由岩浆及其蚀变作用形成的环形构造特征前已述及。

（五）变质岩区环形构造特征及成因

变质岩区环形构造特征和成因较为复杂，总的来看，主要与构造-变质作用和混合岩化作用有关。

1．构造-变质作用形成的环形构造

由于变形变质作用在前寒武纪变质岩区常形成一些大的弧形、环形构造，这些环形构造多与底辟花岗岩作用有关，常围绕底辟花岗岩形成环、弧形线理、褶皱带，其范围可大可小，由1公里到几十公里（图4—16）。

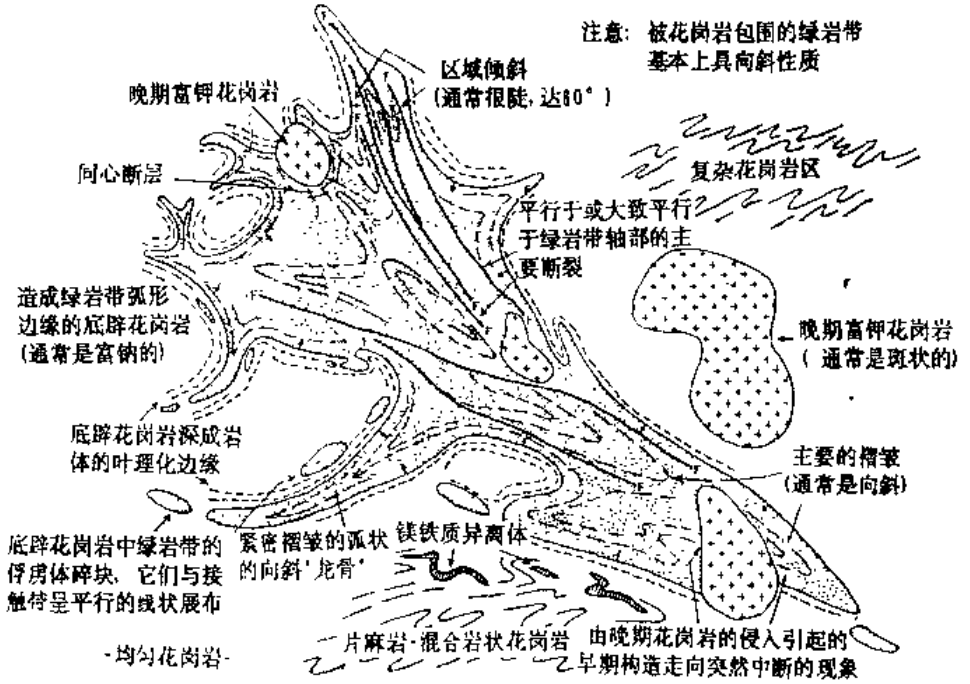


图 4—16 表明克拉通陆核内部的早前寒武纪绿岩带及伴生的花岗岩的各种显著特征的假想示意图❶

由构造作用形成的断隆（穹窿）也显示为环状特征，如迁安地区存在一环形构造，受到断裂控制，为一断块环。环内形态复杂，为多期变质作用和构造作用叠加而成。其环心为一暗色环核，由内向外又可分为三个环带，控制着区内的变质铁矿（刘允良，1990）。前苏联科拉半岛阿拉列钦地区为由变质岩构成的原生火山穹窿区，通过遥感解译出的角闪岩岩脉及变质岩分布界线构成多个椭圆形穹状构造，其核心由花岗片麻岩或花岗闪长岩构成，在核心的周围为角闪岩岩脉（图4—17），航磁图（图4—18）中亦有良好反映，说明了这类构造存在的可靠性❶。

在变质岩区，还存在着一系列年轻的环形花岗质侵入体，在图像上反映清晰，造成早

❶ 地矿部情报所，苏联大比例尺地质填图中的遥感地质工作，1988.1

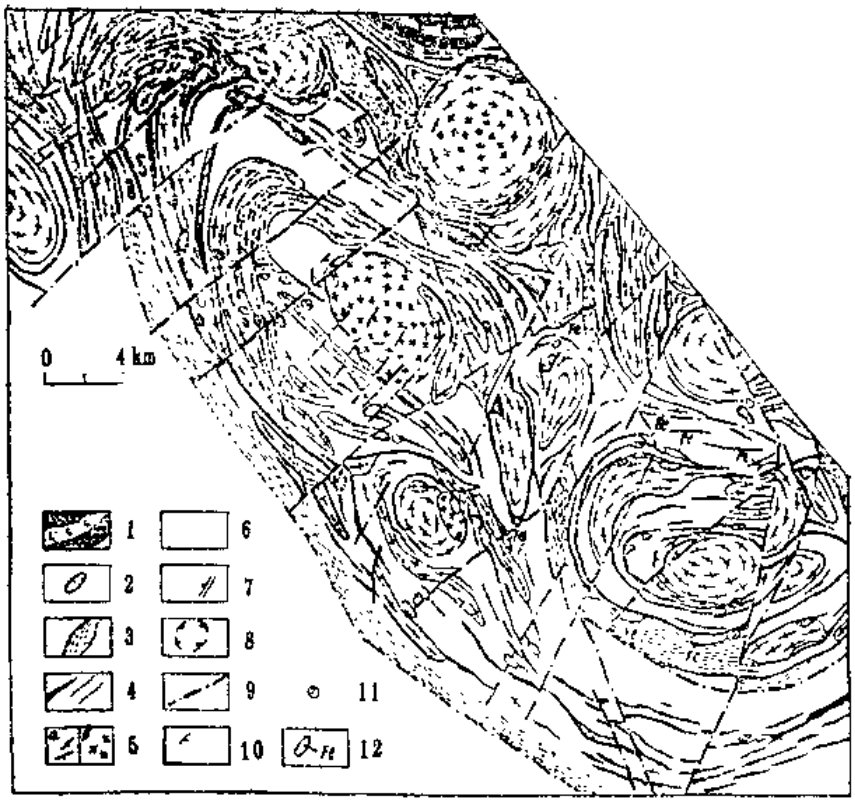


图 4—17 阿拉列钦地区的地质解译草图●

1—火山-沉积岩层组合；2—超基性岩；3—变余橄榄岩；4—角闪岩；5—花岗片麻岩（a）花岗闪长片麻岩、花岗闪长岩（δ）；6—角闪石-黑云母片麻岩、黑云母片麻岩（混合岩）；7—火山-沉积岩层组合的南部构造边界；8—推断的环形断裂；9—断裂；10—产状要素；11—铜镍成矿现象；12—含铁石英岩

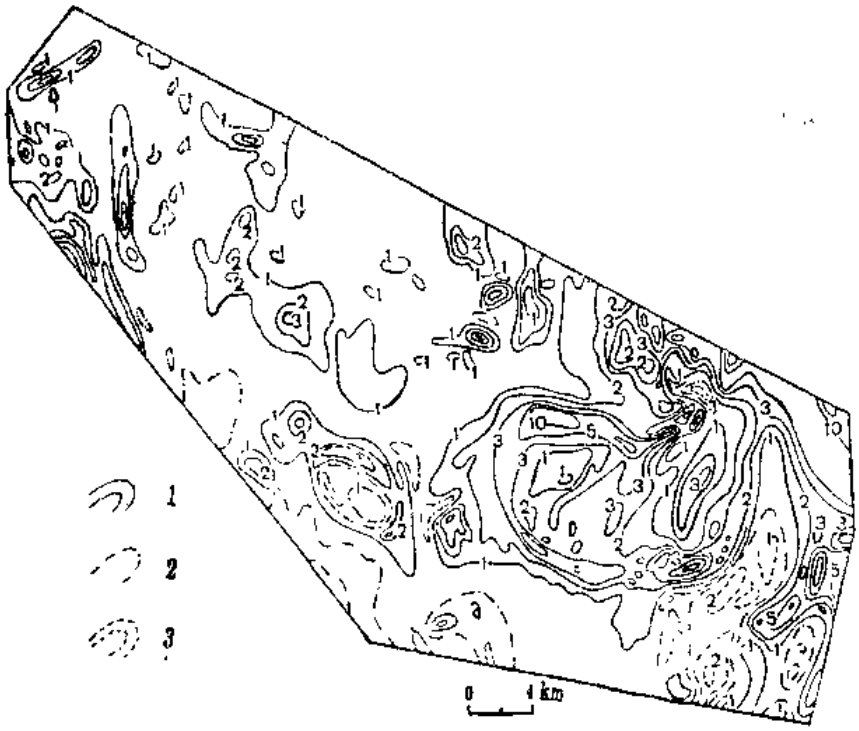


图 4—18 阿拉列钦地区磁场ΔTa图●

磁场等值线：1—正值；2—零；3—负值

● 地矿部情报研究所，1988.4

期形成的构造突然截断，地层错位或被切割（图4—17），这类岩体与变质岩区金属矿产的形成有着密切的联系。

2．混合岩化作用形成的环形构造

一般规模较大，环中心色调浅，类似花岗岩体，但边界不清楚，有时环边变质带呈同心环状。这类环形构造在卫星图像上较为清晰。

另一类是混合岩化作用过程中的残留体，经蚀变、风化，构成色调较深的环形构造，地形常为突起的圆形山包，边界清晰。

四、环形构造与矿产的关系

（一）环形构造对成矿的控制作用

大量事实表明，研究环形构造具有实用意义，据统计地球上四分之三的金属矿床受环形构造控制。巨型、大型和部分中型环形构造控制着成矿区的分布，在区域成矿预测中起制约作用。微型、小型和部分中型环形构造直接控制成矿过程中强度最大的矿节和矿带，即起控矿作用，在局部预测中起指示作用❶。

1．大中型环形构造的控矿作用

大中型环形构造往往控制着一个成矿区域，在此区内，分布着有一定成因联系的多种金属矿床。

如甘肃岷县、宕昌环形构造即为大中型区域控矿构造，在卫片上呈一圆形突起，由五个大的中酸性岩体组成，直径约70km。内核分布有一些小的环块和环洼及放射状断裂，外环为弧形断裂带和直线形断裂，在此环块内分布有60余处金属矿床、矿点，且矿产的分布有一定的规律性，即从环心到环边由伟晶岩型的稀有金属、高温热液的钨锡矿→中温热液的铀、铜、铅、锌多金属矿→低温的汞、锑矿床呈环状分布（图4—19）❷，矿床、矿点主要分布于断裂构造与环形断裂的交汇部位。

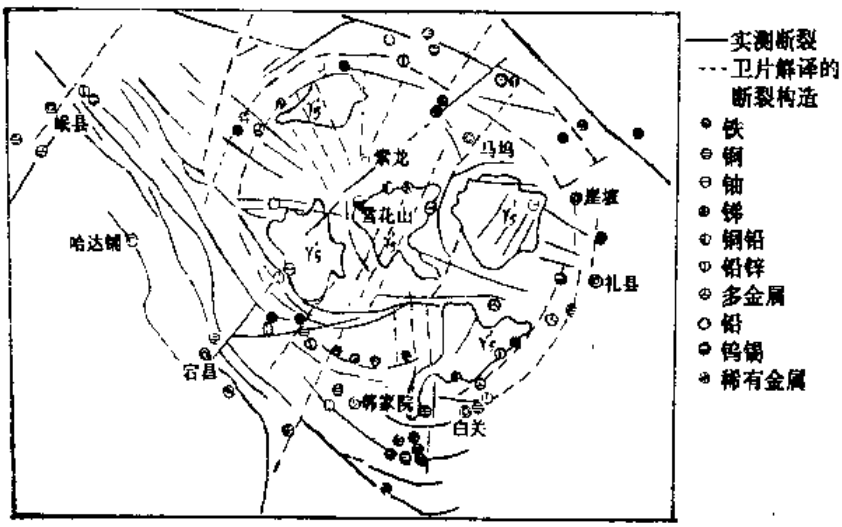


图 4—19　岷宕环块构造及矿床分布图

❶ Ю. А. 布什等，1986，全球环形构造：理论和实践意义，今后的研究问题，陆波译

❷ 边戈果，环形影像及其在找矿中的意义，遥感地质，1986.9

2．小型环形构造的控矿作用

在成矿有利区带上的小型环形构造往往是矿床和矿体的直接控制者，如山东铜锡山环形构造（图4—20）。从彩色航片上可见其被北东和北西向两条断裂所限，呈一圆形隆起，

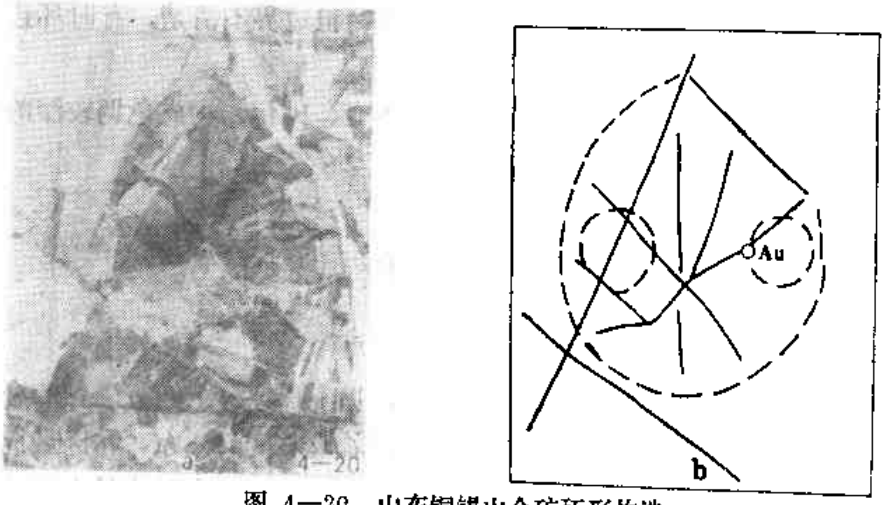


图 4—20　山东铜锡山金矿环形构造

a—彩色航片；b—构造解译图

面积约 0.2 km²，环内发育放射状断裂，环边为由褐铁矿化引起的褐红色异常。环东部为一含金黄铁矿化石英脉，构成小型矿体。从整体看，含金矿体亦受南北向断裂控制。

（二）环形构造控矿性判别

遥感图像上存在众多的环形构造，但并不是每个都控矿，而是那些存在于一定构造背景中的特殊环与成矿有着密切联系。

1．环形构造控矿实例

山东水道—冯家地区共解译出 81 个环形构造（图4—21），根据航磁、重力、化探及地质资料，应用成矿信息量法对其含矿性进行了评价，结果如表4—4。

表 4—4　环形构造含矿性评价表

级　别	信息量	数　量	百分比%	成矿元素异常	影像及地质特征
A	5.199—1.593	6	7.4	Au、Ag、As、Sb	蚀变强烈，构造发育，具含金石英脉
B	1.002—2.066	25	30.9	Ag、Au、As	具蚀变，构造发育，多含石英脉
C	2.062—0.650	36	44.4	Au、Ag	多为地形环，构造环，弱蚀变，少量含石英脉
D	0.366—0	14	17.3	Zn或无	

应用综合方法确定的37个预测靶区中，包含了 31 个A、B级环形构造的23个，即位于靶区内的环形构造占A、B级的 74.2%，所以说，此区内A、B级环形构造与成矿关系极为密切。这类环形构造的主要特征为：断裂发育，蚀变强烈，含有矿化石英脉，包含已知矿，主要分布于①控矿断裂带和构造破碎强烈地带，②变质岩扭曲带及变质岩与混合花岗岩接触带。而基本与矿无关的C、D级环形构造在图像上多表现为地形、地貌环，构造不发育，少量含有石英脉，主要分布于混合花岗岩体内部。

安徽铜陵、江西九瑞地区控矿环形构造的影像特征为：断裂发育，蚀变强烈，多为隆起环。主要分布于①控矿断裂带及构造破碎地带，②控矿地层与岩体接触部位。

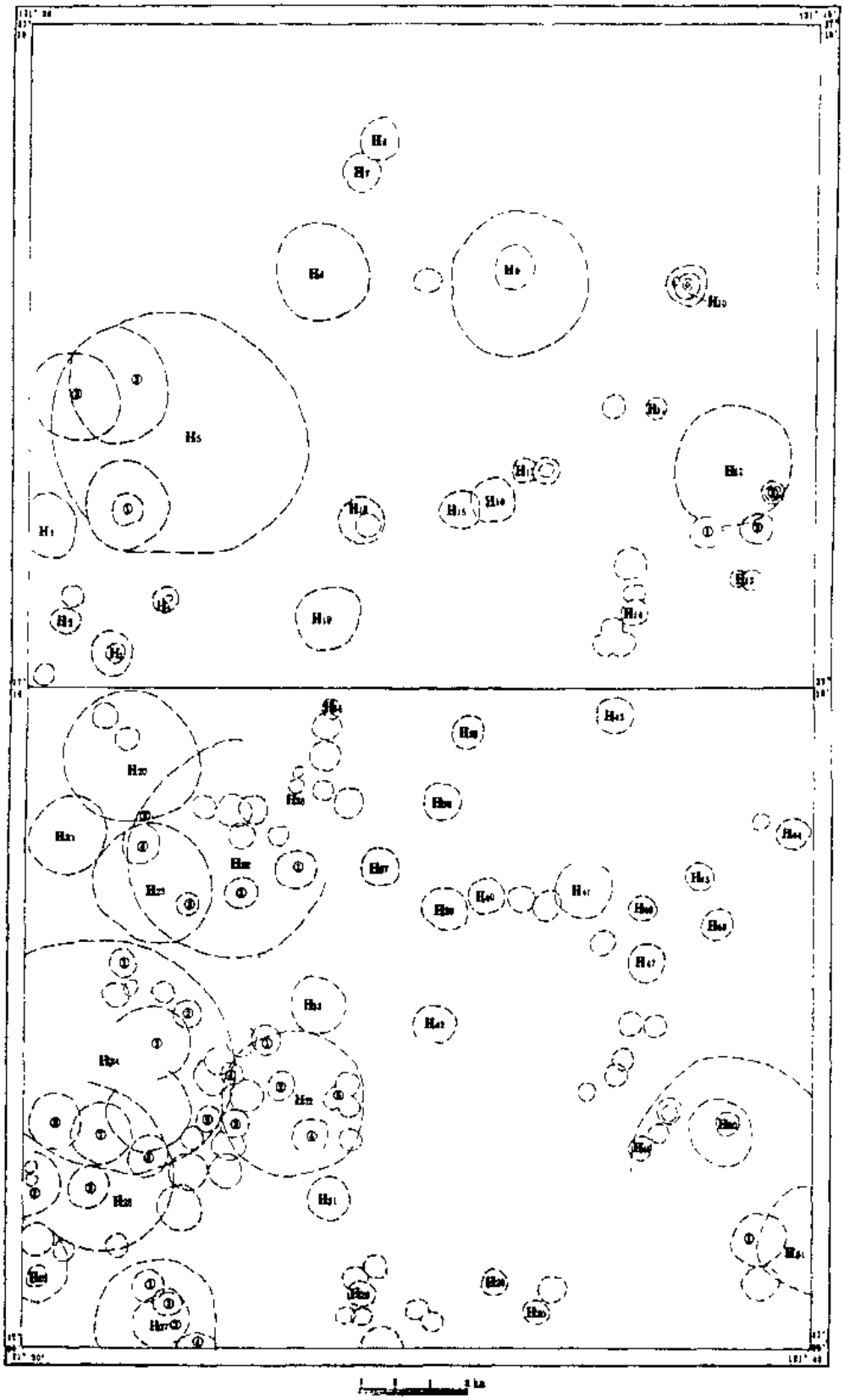


图 4—21　山东水道—冯家幅环形构造解译图

对比分析各个地区与矿有关的环形构造影像特征可知：虽然各个地区成矿背景，成矿类型不同，控矿环形构造各有特点，但也存在共同的特征：

① 位于特殊地质单元，即成矿带或成矿区背景上。

② 位于断裂构造发育区，即大断裂旁侧或断裂密集区。交汇中心及附近结点。

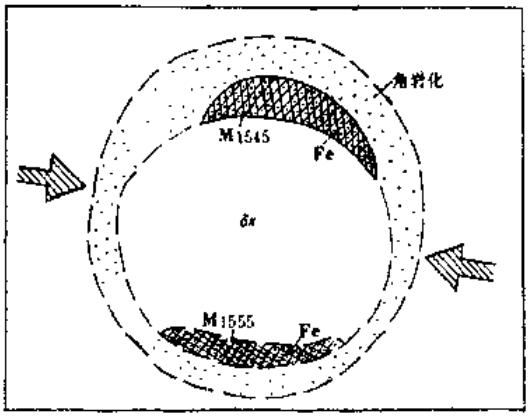


图 4—22 磁海铁矿环形构造铁矿富集部位东西向挤压产生拉张边构造，在南北两侧富集铁矿

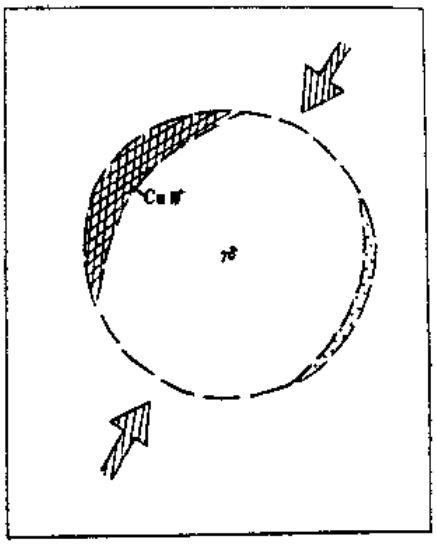


图 4—23 江西永平铜矿环形构造，近南北向挤压产生拉张边构造，铜矿在西部空间富集

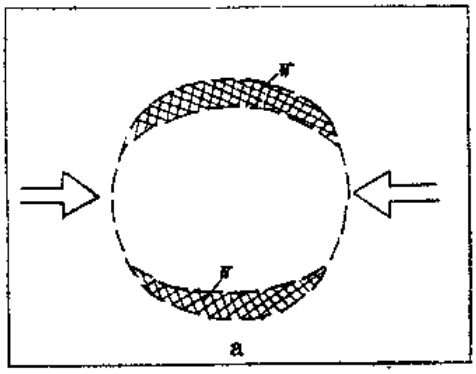


图 4—24—a 侏罗纪东西向挤压产生拉张边构造在南北两侧空间富集成矿

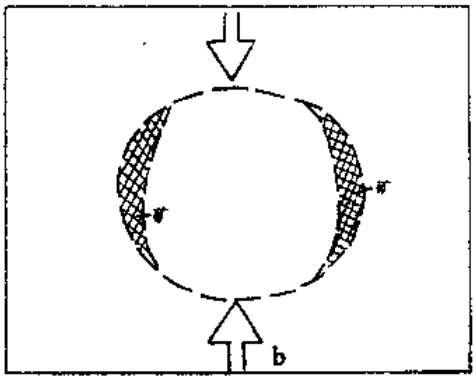


图 4—24—b 白垩纪南北向挤压产生拉张边构造，在东西两侧空间富集成矿

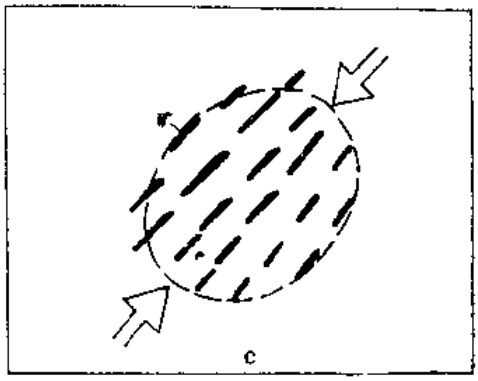


图 4—24—c 热液成矿期北东～南西向挤压产生张裂带，在北东向裂隙中富集成矿

③ 位于隆起区，多为复式环，具多层环圈和次级小环。大环一般为背景信息，是深部岩基的显示，小环是浅部岩株的反映，是成矿预测的重要信息。

④ 与隐伏或出露岩体有关，环内放射状、环状断裂发育，有利于矿产富集。

⑤ 蚀变发育，在环边或环内蚀变普遍存在。常见蚀变有矽卡岩化、硅化、黄铁矿化、角岩化、大理岩化、铁帽等。

2．环形构造矿产富集部位及实例

① 环形构造矿产富集实例。

② 环形构造矿产富集部位理想模式（图4—24 a、b、c）

第五章　遥感在中大比例尺成矿预测中的作用

一、遥感成矿预测的特点

应用遥感方法找矿，其优势在于遥感图像视域广，反映地物形态真实，地质信息量丰富。任何找矿方法，都包括成矿预测和地质验证两部分，其中成矿预测是关键，对找矿起决定性作用，而成矿预测靠的是矿化信息，因此可靠的矿化信息是找矿的突破口，也是决定成矿预测成功与否的关键。

利用遥感图像可以在大区域成矿环境中查明色线环异常显示的控矿信息，进而直接或间接圈定成矿有利地段和找矿靶区，这比常规地质及物化探找矿方法投资少，见效快，因而在地质找矿中，遥感是不可缺少的新方法。直接找矿就是从遥感图像上识别出色线环影像异常区，直接确定矿田构造，间接找矿则是通过对比遥感图像上影像正常区和异常区，研究与成矿有关的构造环境，以及通过数据处理方法确定成矿有利地段，进而缩小找矿地区，明确找矿目标。

在成矿带确定后，矿化带、矿化点作为总的成矿背景，在此背景上确定成矿构造远景区或矿田构造。这对常规地质来说是一项很花钱又十分困难的事，而对遥感来说就变得较为容易。把最大型的构造（长期活动的断裂、纵向的和边界的断裂、环形构造的顶部和边缘部位断裂等）这些因素起着控矿导矿作用，斜交的和横向的断层、环、放状断裂等因素有集矿（容矿）作用。预测矿田、矿床、作为主要目标，这些目标均可在遥感图像上得到确定。尤其是成矿元素富集的蚀变带在遥感图像上呈现出深色异常带（或浅色异常带），这是遥感找矿的重要标志。它的基本原理是因为成矿元素虽然含量很小，但波谱效应明显，在波谱曲线上能产生异常。而非成矿的长英物质虽然含量很大，在波谱曲线上不会产生异常，只能构成背景场。因此在卫星图像上都能显示出成矿元素富集的蚀变带产生波谱效应。在彩色和彩红外航片上还能区分不同蚀变类型，如硅化、黄铁矿化、角岩化、泥化、大理岩化等（表4—3）。

二、遥感在成矿预测中的作用

要知道遥感技术在成矿预测中的作用，必须首先了解成矿作用是怎么一回事。通俗地说成矿作用是在地球长期演化过程中，使分散在地壳和上地幔中的化学元素和有用物质在一定的地质环境中，相对集中形成矿床的作用。它可分为内生成矿作用，外生成矿作用和变质成矿作用三大类。

就内生金属成矿作用来说，它是指来自上地幔熔融岩浆上升冷凝过程中所发生的成矿

作用。同时还包括溶解地壳上部沉积盖层中分散的有用元素，在有利地质环境中发生的成矿作用以及变质作用过程中的某些变质热液成矿作用。岩浆上升侵入过程中，从下部逐渐到达地表不同环境中分别形成：岩浆矿床、伟晶岩矿床、接触交代矿床、热液矿床等四种矿床。

任何一个内生金属矿床，都是有成矿岩体、成矿热液作用于成矿围岩，在特定的物理、化学因素作用和导矿断裂的控制下，成矿物质储集于较为封闭的空间内形成的。因此所有内生金属矿床的形成，都有它的三大因素构成的，即成矿岩体、成矿断裂、围岩蚀变。这三大因素可以作为找金属矿用的三大特征标志。遥感在成矿预测中应用的基本原理，就是把遥感图像上的色、线、环要素与成矿岩体、成矿断裂、围岩蚀变三个特征标志结合起来，建立遥感找矿模型，实现直接和间接找矿目的。

本书重点介绍遥感技术在成矿预测中的作用，要弄明白这个问题，须先了解常规地质找矿是怎样进行的，通过对比遥感的作用就显而易见了。

常规地质找矿，它的基本手段是地质人员加三大法宝（罗盘、铁锤、放大镜）进行野外调查，以野外逐点观察为基础，然后用某种理论作推断，将观察点连成线和面。编制成地质图，圈出找矿有利地区。这种找矿过程，所依靠的点和理论都有局限性。首先是点的问题，地球如此之大，地表被水、土壤、植被覆盖率很高。观察点代表性有限、许多重要地质现象被遗漏或未识别出来，地质人员深感有三不见之苦，即在野外大的成矿带看不见，小的成矿元素看不见，地下的盲矿也看不见，这就是常规地质的短处。遥感方法恰好能弥补常规地质的不足。

自从现代化的遥感技术出现后，人们才有可能离开地球，从宇宙空间观察地球表面陆地海洋全貌，还可以观察地球任何一部分的成矿带展布，以及地块之间互相碰撞挤压的动态关系。遥感技术使人们大开眼界，真正实现了放眼世界。地质工作者可以从全球构造的整体出发，即可作全球性的成矿分析，又可作局部性成矿研究，使地质找矿工作大到全球性成矿带研究，小到矿田、矿床圈定，变得直观准确。这是遥感技术在成矿预测中的优势。

通过上述对比可知遥感技术在成矿预测中可以发挥重要作用。主要有二个方面：即在小比例尺成矿预测中的作用和大比例尺成矿预测中的作用。

（一）在小比例尺成矿远景区带划分中的作用

首先是应用遥感图像资料的宏观性，可以进行全球性成矿带划分。如在太平洋成矿带的划分，对比、追索中起到很大作用。使确定超大型破碎带、碰撞带、板块边界等等变得容易得多。

其次是遥感图像摄取于航天航空空间，俗语说得好，站得高，看得远，看得多。可以从全区的角度揭示成矿地质背景和相应的影像异常及其分布规律。对地质工作者来说地面不易发现的地质矿化信息，在遥感图像上可以得到，如大的断裂带、隐伏岩体、蚀变带信息等，大大丰富了地质内容。并可在合理布置工作量方面起重要作用，使工作有目的、有重点，增强预见性，实现四省一高，即节省人力、物力、财力和时间，提高成矿预测质量。

（二）在大比例尺成矿预测中的作用

遥感图像是地球表面综合景观的缩影。内含极其丰富的地质构造、矿产信息。所有成矿带、矿田、矿床、断裂、岩性等在遥感图像上都有显示。在大比例尺成矿预测中，应用遥感技术可以增加大量新的地质矿产信息，特别是深部成矿构造的信息。这些信息恰好是

常规地质方法难以得到的。因而可以大大提高地质找矿效果，具体作用有以下五方面。

1．通过断裂构造的解译，确定较大的断裂、剪切带、破碎带、并作分级处理，对其性质、时代和成矿关系进行分析。重点是对控矿断裂的识别，区分成矿前和成矿后的断裂，确立含矿构造带。

2．通过对影像的分析，从大到小划分出岩带（和）单元，对地层分布、褶皱形态、含矿层追索等可以在图像上直接观察进行。地层的挤压变形、错位及位移量、矿化蚀变带分布，甚至更详细的岩脉、节理、蚀变类型等都可解译出来，从而为成矿预测提供基础地质资料。

3．圈定成矿岩体：通过对环形构造的解译分析，可以识别出露岩体、半出露的、浅隐伏和深隐伏岩体的分布。并研究侵入体的内部结构、节理系统、含矿岩脉、矿化蚀变晕圈等，分析岩浆活动期次，岩体穿插关系及复杂程度。根据遥感模型进一步推断岩体侵位深度和产状特征，最终查明成矿岩体分布和成矿有利部位。

4．对火山岩的分析、岩相带划分有明显作用，可以确定火山口的位置，研究火山机构的成因、喷发类型、及其含矿性等，如浙江括苍山火山机构，其形态特征、岩性变化、断裂系统含矿性及蚀变晕等在图像上都有显示。

5．在图像上直接提取矿产信息

利用遥感找矿模型，在现代找矿理论指导下，可在图像上直接识别矿田构造。这是根据遥感色调异常、线性特征、环形构造特征三者结合成一体来确定的，通过先进的成矿理论和实践经验指导找矿工作。结合物化探资料可以对预测区定性，通过地面采样分析验证进一步定性更加准确。

三、遥感成矿预测工作准则

遥感技术是成矿预测的重要手段之一，它是区域矿产资源分析和找矿靶区预测必不可少的有效技术和方法。遥感技术应用于找矿是一项综合性应用技术，即包含遥感信息处理技术与分析方法，又包含区域地质成矿理论的应用和成矿预测的多源统计分析方法。在矿产资源预测中，遥感技术必须与物化探技术相结合，以提高成矿预测的成功率。为此，拟定其工作准则是十分必要的。

遥感技术找矿从工作内容上讲，属于成矿区带或成矿远景区的异常评价范畴。遥感工作可与五级成矿带划分相配合，除Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级成矿预测属于小比例尺外，Ⅳ、Ⅴ二级属于大比例尺成矿预测，并且是本书重点介绍的内容。现按不同阶段介绍如下：

（一）遥感区域成矿带预测工作准则

在区域成矿预测阶段，遥感找矿的基本任务是通过编制1:50万和1:20万成矿预测图，进行区域地质成矿环境分析和找矿方向预测。

1．编制中小比例尺遥感成矿预测系列图：遥感成矿预测系列图是由1:50万～1:20万的遥感影像图、遥感线性、环形构造图、遥感深部构造地质综合解译推断图、区域成矿地质背景图或区域控矿构造图等系列图件构成的一套区域找矿方向预测图。遥感系列图的编制要充分运用现代区域地质成矿理论，对TM、MSS、热红外、彩色红外、雷达图像进行控矿构造、深部地质、色调异常信息的增强处理和矿化信息的提取，以便获得与区域成

矿地质条件有关的找矿信息。

2．区域地质成矿背景分析：首先将区内的已知矿田、矿床、矿点及矿化信息投影到相应的遥感成矿系列图上，分析已知矿田、成矿带与区域构造和岩石单元之间的相关性。然后运用现代成矿地质理论作指导，分析区域成矿规律，用类比法预测找矿远景区带。或者利用区域成矿预测数理统计方法，对遥感、物探、化探及地质资料进行数字化，作区域中小比例尺矿产资源总量预测。

3．区域成矿远景区带预测：在上述研究的基础上，建立遥感构造区域概念模型，确定区域构造格架及其控岩、控矿的关系，建立区域性穿透性断裂、复式热源环形构造，线环构造空间关系及构造交叉结的控矿模式，结合物化探异常评价和筛选，初步拟定在研究区域中具有成矿远景的含矿构造带，圈出进一步工作的远景区，提供1:5万普查找矿应用。

（二）成矿远景区带遥感成矿预测工作准则

1:5万区域矿产解译分析是成矿远景区带异常评价的一种快速而有效的方法。该阶段的工作目的是确定矿田的勘查靶区。遥感工作的准则或程序如下。

1．编制大比例尺的遥感矿产解译图：以TM合成放大图像、大比例尺的彩红外像片、航空多光谱、黑白航片或其他种类航空遥感影像资料为基础，在第一阶段工作基础上，进行详细矿产地质解译、编制成1:5万比例尺的成矿预测图件。尤其注意对色、线、环组合异常标志构成的矿田模式进行详细研究。

2．矿田构造确定后开展地面检查和波谱测试，以获取蚀变岩、含矿岩系和与成矿有关的地表异常（如土壤异常、植被异常等）的光谱资料，建立遥感找矿光谱数据库。选择遥感最佳波段和波段组合，并进行图像处理，直接提取成矿异常地面信息，建立遥感找矿模型。

3．遥感、物化探异常综合分析：运用地学多源数据复合图像处理方法，提取综合找矿预测信息，消除单纯遥感异常信息中的干扰因素，并建立综合信息成矿预测模型，圈出找矿靶区。

4．遥感、地质、物化探综合方法的异常检查：这是对预测靶区进行的第一阶段综合

表 5—1　山东牟乳金矿区遥感找矿预测程序

目标等级	图像种类	比例尺	建模标志	成矿背景	实　例
面	TM、MSS	1:100万	区域级环块构造	褶皱隆起区	胶北金矿区
矿　带	TM、MSS	1:50万	板块、地块线性构造带	一级控矿构造	招远金矿带 牟乳金矿带
矿　致	TM	1:20万	断块构造、线性构造结线环构造关系	导矿—配矿构造、构造热事件	金牛山矿段
矿　田	彩色片	1:5万	菱环构造、局部线环构造结	配矿—容矿构造、物化探异常	金牛山矿田
矿　床	彩色片	1:1万	色、线、环异常带、线、晕	矿床、矿体赋存特征	金牛山矿床

评价工作，其工作程序是：遥感空间定位找区选点、物化探异常定性、地质勘查定量。这种矿点异常评价和初步勘查模式有效性高、经济快速、找矿效果好，是值得推广的综合找矿方法。

（三）矿田内外遥感找矿工作准则

在已知矿田、矿床的内部和外围，遥感找矿的优势是可从空间上运用类比法寻找同类矿田及矿床、矿体。遥感矿产地质解译要以大比例尺航空像片为基础，并配合TM图像的增强处理方法，研究已知矿田、矿床的控矿地质因素及遥感影像的地面模式。此外，还要注意植被及土壤异常、地理综合景观等。通过控矿地质因素、影像地面模式的研究，建立成矿模型，同时对矿田外围进行找矿靶区预测。运用遥感技术在矿田内外进行"就矿找矿"的靶区优选过程中，必须编制大比例尺1:1万的综合成矿预测图，以便较准确地进行空间定位。

表5—1所示为应用遥感方法在山东牟乳地区进行金矿成矿预测程序。

四、遥感成矿预测方法

（一）利用遥感图像应用成矿理论识别找矿目标

内生金属矿床的形成，受到岩体、围岩和构造的控制。这些因素中，断裂构造是至关重要的。应用遥感图像，可以分析断裂构造分布特征及控矿特点，圈定隐伏构造，并据之进行不同级别的成矿预测，主要方法有：

1．分析区域成矿规律，查明控矿断裂、隐体岩体，进而缩小找矿地区，提供找矿远景区。

在江西九江—瑞昌地区进行的1:5万成矿预测工作，应用遥感方法取得了较好的效果，其主要内容有：

（1）分析解译出的断裂构造，确定成矿前和成矿时的控矿、容矿断裂。

（2）分析环形构造特征，确定与成矿岩体有关的环形构造，包括出露、半出露、浅隐伏和深隐伏侵入体。

（3）分析影像色异常，确定不同类型的岩石蚀变，如硅化、黄铁矿化、矽卡岩化、大理岩化等。

（4）分析已知矿床、矿点、蚀变等成矿信息，总结控矿因素及成矿规律。

（5）综合分析上述因素，结合已知矿床影像特征，圈定找矿远景区。

全区共圈定金铜成矿远景区14个（图5—1）。经地面验证，除与已知矿一致的外，其余都与地面破碎带、隐伏岩体及蚀变带有关，化探Cu、Au、Pb、Zn等成矿元素都集中分布于远景区之内，异常范围与远景区十分吻合。

经综合分析其它资料，结合地面工程，已在其中三处见到矿体、矿化，证明预测效果较好。

对于遥感选定的远景区，应结合物化探资料进行评价、筛选，几者都有较好异常显示的再进行地面取样，择优进行钻孔验证。

2．查明容矿断裂，缩小成矿范围

几乎所有内生金属矿床都受到不同级别的断裂和破碎中心的控制。因此，在成矿预测

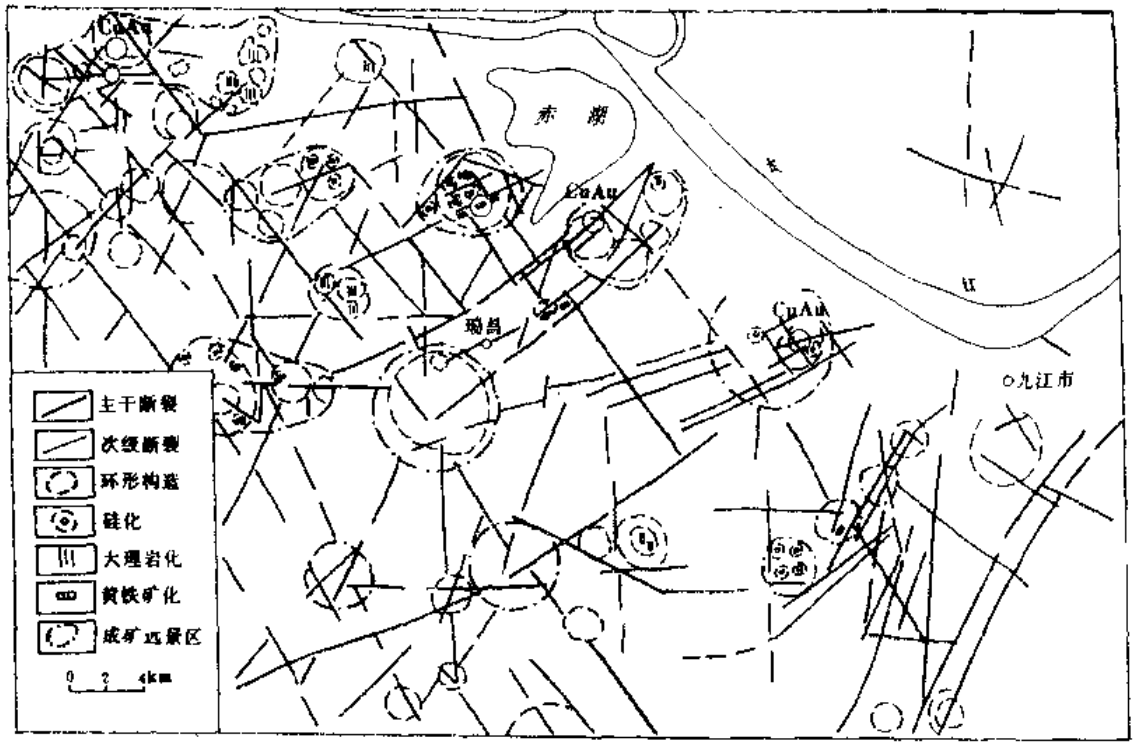


图 5—1　九江—瑞昌地区遥感成矿预测图

中，查明控矿断裂的分布是首要问题。应用遥感解译的断裂分布图或应用计算机成图的断裂密度图，可以大大缩小找矿靶区，提供有远景的矿产地。以冯家幅为例，全幅面积 420 km^2，经遥感方法圈定对找矿有利的破碎带、破碎中心 20 km^2，面积缩小约 20 倍。

容矿断裂主要指规模较小的次级断裂，为含矿脉岩充填的断裂（节理、裂隙），一般在比例尺较大的航空像片上容易判别。这些含矿岩脉有的由于岩性较围岩坚硬、耐风化，常形成正地形。如胶东金牛山地区的含金石英脉，有的含多金属矿碳酸盐岩脉，由于岩性较软，又易风化、常形成负地形。如湖南、江西一些含铅、锌多金属矿的碳酸盐岩脉。但判别岩脉是否含矿，常需借助围岩蚀变标志。一般含矿岩脉多伴有强烈的热液蚀变。如新疆一些地区的含金石英脉，硅化、黄铁矿化很发育，常形成色异常现象。在图像上常形成深色晕带，因黄铁矿氧化地表岩石多呈赭色，在彩色图像上有鲜明的色彩晕显示。根据色异常的存在，可以直接指示出这些岩脉含矿性，可以进一步缩小找矿范围。

当然对规模太小的矿化脉体，在图像上还是不易判别的，但它们常常形成网脉带或网脉体并伴有强烈的热液蚀变，因此在图像上也有各种色调的蚀变晕圈显示。

3．直接圈定找矿靶区

根据已知矿区的遥感影像特征，结合分析区域成矿规律，在具特殊的遥感色线环组合处直接圈定找矿靶区（下文（三）中详述）。

（二）应用定量分析方法，进行成矿预测

1．定量分析断裂构造，确定找矿靶区

应用数理统计方法研究线性断裂可以充分发挥计算机优势，深化断裂构造研究，快速有效地揭示断裂构造分布规律，是成矿预测中值得推广的一种方法。这种方法有助于查明区域构造格架和局部构造异常及其相互关系，同时有利于消除目视解译中主观性带来的影

响，而且便于与物化探资料对比和多数据拟合处理。

目前，对线性断裂进行定量分析的方法主要有直方图分析、密度分析、构造方位异常度分析和断裂优益度分析等，本文着重讨论密度分析法。

线性断裂的密度分析方法：

① 成图方法

线性断裂统计分析使用的资料是遥感影像线性断裂解译图(目视解译或计算机提取)，分析所用数据是线性断裂的长度、条数、交点及方位等。线性断裂密度图的作法是用一定的采样网格对断裂解译图采样，量出每一网孔内各条线性断裂的长度(或交点、条数)和，将该数据置于网孔中心，输入计算机制成密度图。

对线性断裂解译图数字化时，采样网孔的大小、孔形等，直接影响原始数据的统计分析和成果图件的信息含量。在大中比例尺成矿预测时，可采用500m×500m 或 1km×1km 的格网，孔径越大区域背景特征越明显，但细节丧失也多，反之孔径越小细节越突出，区域背景模糊。最佳孔径由工作目标物而定，一般孔径大小与目标物大小相当为好。

② 线性断裂密度图的分析

线性断裂密度图反映了断裂空间分布的结构特征，显示出深部构造信息和找矿线索。如从铜陵地区线性断裂密度图（图5—2）中可以清楚看出断裂在空间分布上有两种规律：一种为区域性等距分布，有明显的周期性特点，推断其与地应力的波动性有关；另一种为成环形分布的局部构造异常，与矿化带、隐伏岩体、古火山机构有关，也可能是断裂、隐伏穹窿和褶皱隆起的发育部位，高密度异常区的边界可以据全区密度值计算得出或据具体情况而定，这种高密度异常区往往就是找矿远景区，对比图5—2与控矿信息图（图5—3）

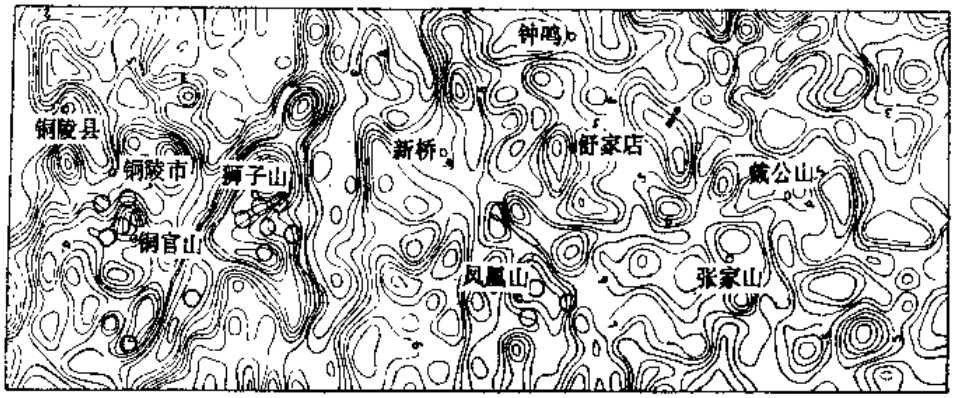


图 5—2 铜陵地区线性断裂密度图

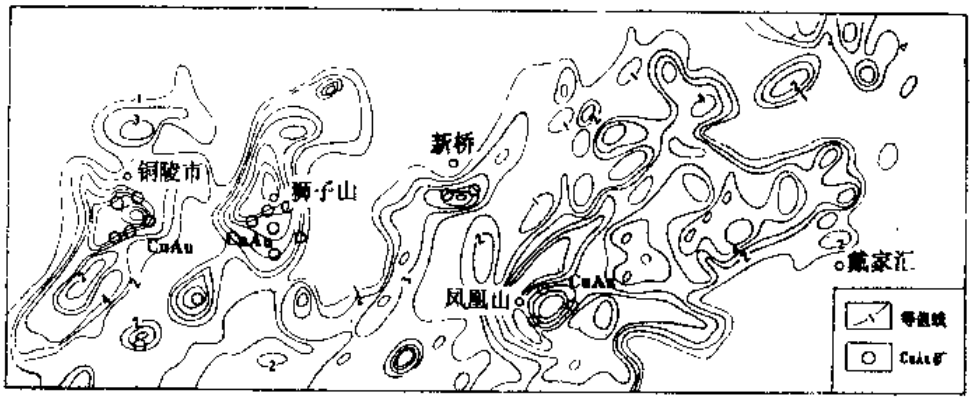


图 5—3 铜陵地区地表控矿信息平面图（据丁腾飞）

可知，断裂密度异常区与控矿信息高值区基本一致。更高一级的密度异常区则为重点找矿靶区。

2．多源信息遥感图像成矿预测法

这是一种现代化综合成矿预测方法，它是把遥感、地质、物化探、地理景观多种信息通过属性分离、归纳、选择、图像正规化、网格化、数字化、几何配准后、转换成标准化图象和数据文件。有条件的地方可利用计算机处理，实现专家成矿预测系统，形成综合地质图像集。

综合地质图像包含了遥感、地质、物化探、地理景观等方面的多源地学信息。其空间模式是对这些信息结构特征的描述、表示或几何模型的概括。模式识别是图像分析中的演绎推理过程。反映专家系统的区域地质经验、概念和推理认识。因此建立综合地质图像的空间模式是进行图像、区域地质分析和遥感地质找矿的重要手段之一，也是智能图像处理中建立推理网络的基本方法。

地质图像集中的原始图像数据经过滤波处理、变换，特征提取、空间匹配和位累加等计算法，便可产生与区域成矿预测相关专题图像或特征值图像，在此基础上建立区域找矿和知识模型与推理网络，筛选成矿有利单元（图5—4）。

找矿知识模型是在区域成矿理论和已知矿田的地质背景上建立的初始模型，然后由地质图像集产生“知识模型参数”用专家推理网络进行筛选。

定量解译法在成矿预测中的应用，可以贯穿整个工作程序的全过程，非常灵活方便。工作开始时可作单方法数理统计做数字化图件，如断裂等密度图、玫瑰花图等，随着工作进展可以不断扩充成多方法、多源信息，建立数据库，最终并完成综合地质图像集，实现专家成矿预测系统。

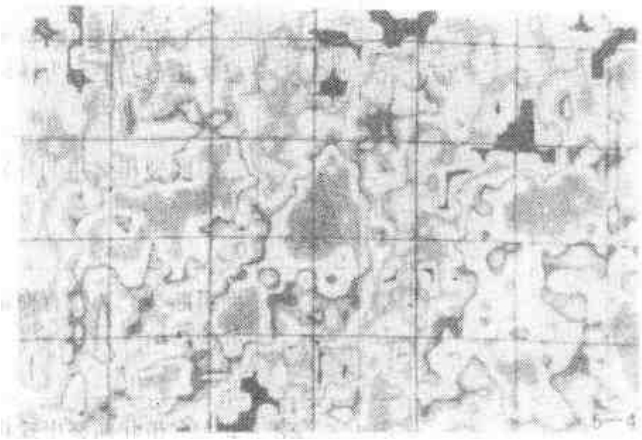


图 5—4　铜陵地区多元信息成矿预测图

参与成矿预测的变量有遥感：线性、环形构造、纹理等；地质：地层（各种岩性）、岩浆岩、构造等；物探：航磁、重力等；化探：Cu、Au、Ag、Pb、Zn等几十种

（三）建立遥感矿田构造模型，直接圈定矿田构造

从已知到未知，是地质找矿行之有效的方法，认真研究已知矿田上遥感色、线、环影像异常特征，总结出有规律性的成矿模式，指导成矿预测，是遥感找矿获得成功的一条重要途径。

早在70年代新疆遥感试验中发现新疆托里宝贝金矿区中心有一个环形岩体，外围是菱形构造蚀变带，组成明显的菱环构造（图 5—9）。后来在安徽铜陵地区的铜官山、狮子山矿田、湖南香花岭矿田（图 5—10）均发现具极典型的菱环构造，而且化探、航磁、重力都有异常显示。这一矿田构造模式在1987年地矿部举办的烟台金矿学习班上介绍后，贵州遥感站于1988年提出梵净山多金属矿田和万山汞矿田呈菱环构造模式（图5—5），云南遥感站提出红河断裂南侧金矿带呈菱环构造模式，尤其是福建遥感站于上杭县紫金山变质岩区的菱环构造锐角处发现了规模大、品位高的金铜矿（图5—15），这些事实足以说明遥感菱

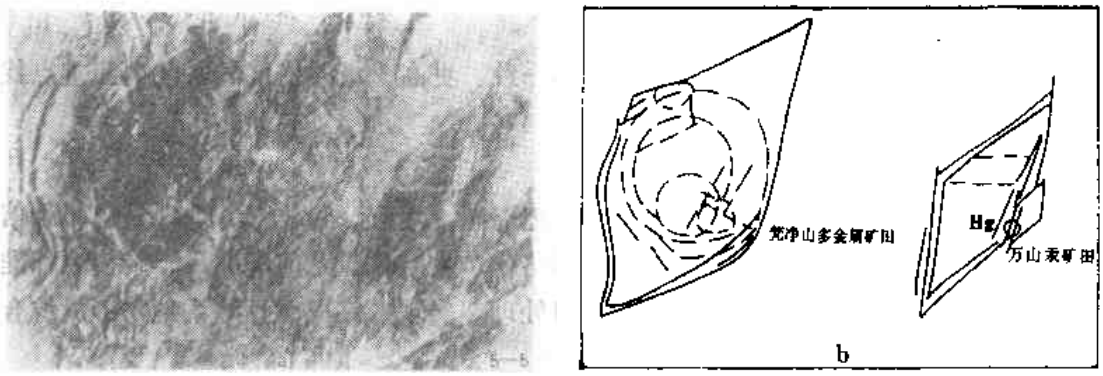


图 5—5　贵州梵净山菱环构造

a—TM影像；b—线环构造解译图

表 5—2　内生金属矿田遥感构造模式分类表

编号	形式	色线环图形	色线环组合标志	地质背景	矿田实例
一	菱环式		两组斜交断裂构成菱块构造，中心为环形构造，色形边界清楚	上升菱形断块构造中心有岩体侵入，围岩蚀变强烈	湖南香花岭矿田
二	方格式		东西与南北两组断裂构成格状构造，中心为环形构造，色异常明显	上升格状断块，中心有岩体侵入，并蚀变强烈	个旧锡矿田
三	三角式		三组断裂相交并上升为三角状	三组断裂相交，中心有岩体侵入，并蚀变强烈	阿舍勒东矿田
四	中心式		两组断裂交叉处有梅花状环形构造	北东北西向断裂交叉处侵入岩体蚀变强烈黄铁矿化发育	牛山矿田
五	串珠状		北东向带状断裂串珠状环形构造	北东向破碎带上有岩体侵入呈串珠状分布，蚀变强烈	寺门口矿田
六	环式		大环浅色，小环深色构成大环套小环	不同蚀变岩石引起的圆形山包，深部有隐伏岩体	三合圩矿田
七	条带式		色调深，平行分布的条带山脊	含金石英脉呈平行分布	邓格庄矿田
八	挠曲式		变质岩带扭曲，明显错位被北西向线性断裂切割	变质岩带挤压、破碎强烈，蚀变明显	潘家庄异常区
九	环放式		环形和放射水系或山脊，色异常明显	环放状断裂，黄铁矿化强烈，有老采金坑	牛山顶异常区
十	帚状式		扭曲线性断裂构成帚状	扭曲断裂组成帚状构造	庆阳金矿

环构造矿田模式对成矿预测有明显的指导意义。

几年来的研究发现，遥感图像上由色、线、环影像异常显示出的矿田构造模式是多种多样的，表5—2中列举了10种常见的矿田构造模式特征。实际上，矿田控矿构造类型远不只这些，还有待于今后工作进一步总结。

下面以菱环构造为例，对矿田控矿构造模式做进一步探讨，从中可以看出其为矿田形成的控制作用。

在成矿有利地带遥感图像上显示的菱环构造是内生金属矿床成矿过程的综合反映。菱环构造形态逼真，反映了矿田构造的全貌，它包括围岩构造、岩浆岩构造和岩石蚀变三部分。

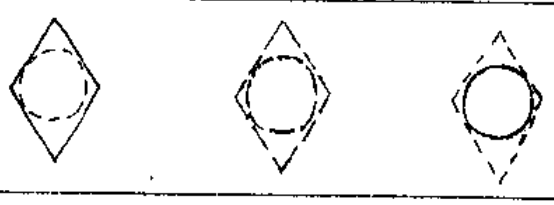
1．菱块构造代表成矿前的围岩（盖层）构造。狮子山、香花岭矿田围岩都是古生代地层，处于构造上升部位，受北东和北西向两组断裂控制，构成菱形块体，边界十分清楚。菱块体长轴方向为南北向，锐角为60°，其几何形态极为规则，内部断裂发育。狮子山矿田内，东西向张断裂有五条，以1 km间距分布，南北向具三条密集断裂形成的剪切带，亦间隔，1km分布，上述断裂与四条北东向断裂、五条北西向断裂构成密集的断裂网络，构成极为有利的成矿空间。

2．环形构造代表成矿时的侵入岩体构造。如香花岭矿田，大环、小环叠加在一起，与航磁背景场和局部异常相吻合，显示出成矿母岩分为上下两层，为母子式岩体。下部岩基在图像上显示为大的环形构造，上部围岩中的岩株群和蚀变圈显示为大环中的多个小环。因而，从大小环叠加现象可以解译出成矿母岩的范围、活动期次、蚀变带等。

3．岩石蚀变。菱环构造内色彩异常与岩石蚀变具有相关性，不同的色彩异常反映了不同类型的岩石蚀变（表4—3）。

4．菱与环的关系。菱与环的相互关系，显示了内生金属矿田的动态特征（表5—3）：

表 5—3　菱环构造关系表

盖层厚度	厚	——→	薄(无)
岩体深度	深	——→	浅
矿床类型	低温(Hg, Au, As)	——→	高温(W, Mo, Fe)
菱形构造	清楚	——→	模糊
环形构造	模糊	——→	清楚
菱环构造几何形态			

（1）菱形清楚、环形模糊时，说明盖层构造保存完好，侵入岩体埋深较大，地表有低温矿床形成，如万山汞矿。

（2）菱、环都清楚时说明盖层薄，岩体隐伏不深，对多金属矿形成有利，如香花岭多金属矿。

（3）环形构造清楚、菱形不明显时，表明侵入岩体已出露地表，盖层已被剥蚀掉，在岩体周围找铁及高温矿床有利，如磁海铁矿田。根据这些特点，总结出理想的菱环构造模型（图5—6）。

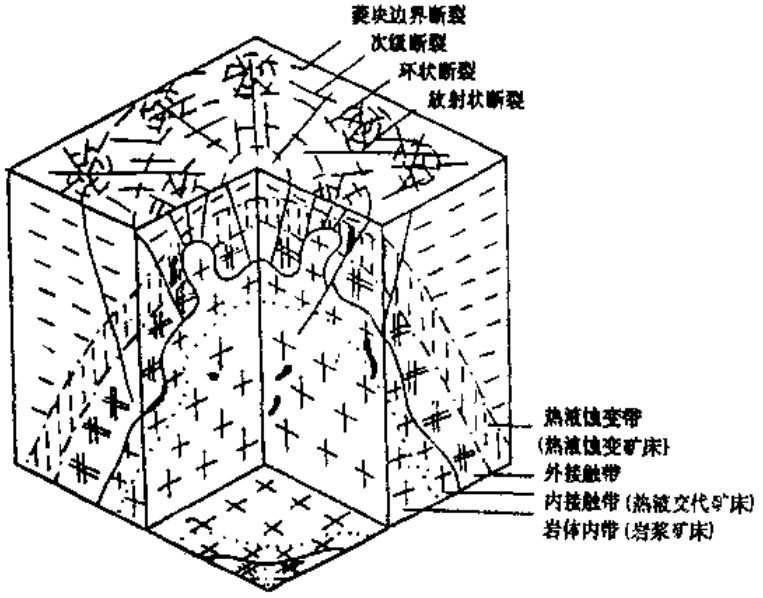


图 5—6　遥感菱环构造成矿模型

五、大比例尺成矿预测实例

以安徽铜陵铜官山矿区为例，说明在成矿区进行遥感成矿预测的主要步骤及内容。

（一）主要步骤

1．收集矿区遥感图像，制做航片镶嵌图，本区使用的为1:5000的彩红外放大片（图5—7）。

2．进行控矿地质信息解译，重点为控矿断裂、环形构造、蚀变岩类型及范围，编制遥感解译图（图5—8a），并将解译内容登记入表（表5—4）。

3．结合矿区地质资料（5—8b）、物化探资料分析断裂的控矿性、环形构造的成因及与矿产的关系，提出矿区内及矿区外围找矿最有利地区。

4．编写成矿预测报告，说明解译内容，预测靶区依据。

（二）矿区遥感地质解译内容及预测结果

1．控矿断裂特征

矿区位于铜官山背斜倾没端、断裂发育，以铜官山为中心北东向、北西向、东西向、南北向四组断裂都很发育（表5—4—1）。

（1）北东向断裂：北东向断裂有六条，与成矿有关的主要有三条。①铜官山矿区断裂（F_4），是泥盆系与石炭系层间滑脱破碎带，该断裂影像线性清晰，两侧差异大，沿断裂有铁帽分布，是区内重要的控矿断裂带。②铜官山东侧断裂，20°—30°方向线性明显、切割山脊，蚀变发育、推断为区内重要控矿断裂（F_5）。③笔山西—白鹤断裂（F_3）。线性影像清晰，在铜官山岩体和金口岭岩体之间通过，是区内重要的控矿断裂之一。

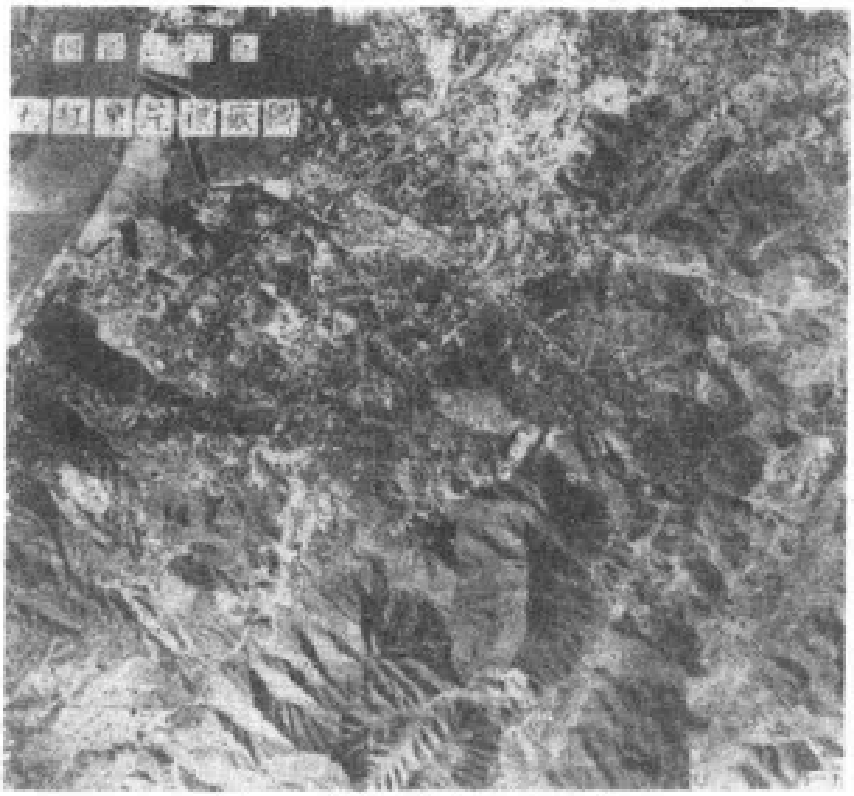


图 5—7　铜官山矿区彩红外航片镶嵌图

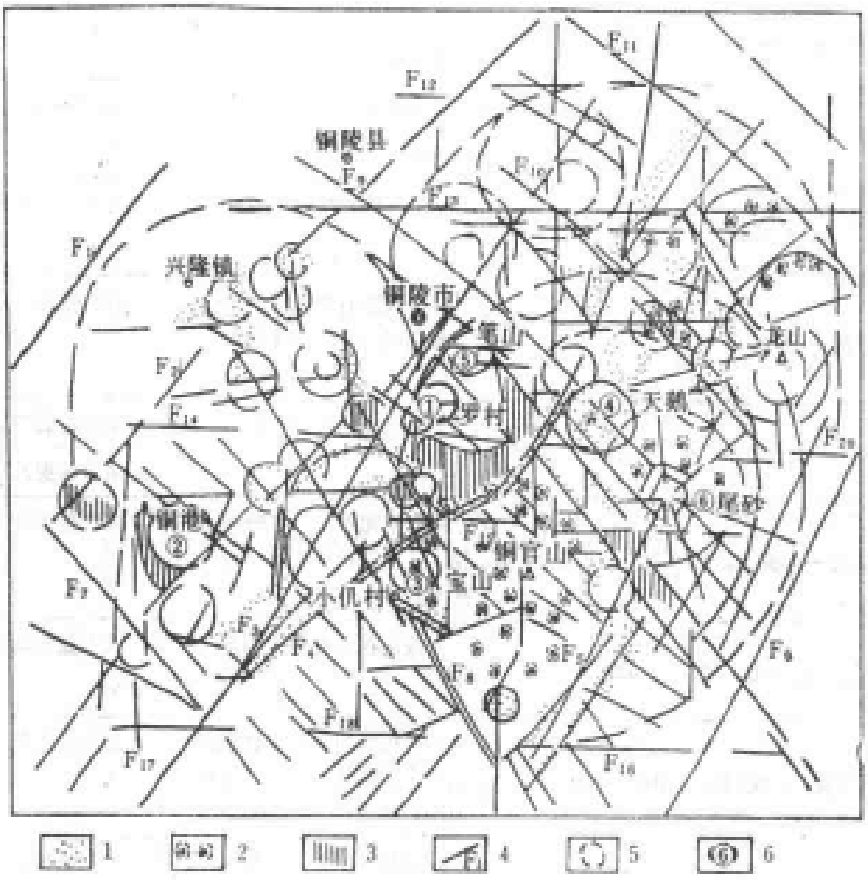


图 5—8—a　铜官山矿区及外围遥感成矿预测图

1—砂卡岩化；2—硅化；3—大理岩化；4—断裂及编号；5—环形构造；6—预测区及编号

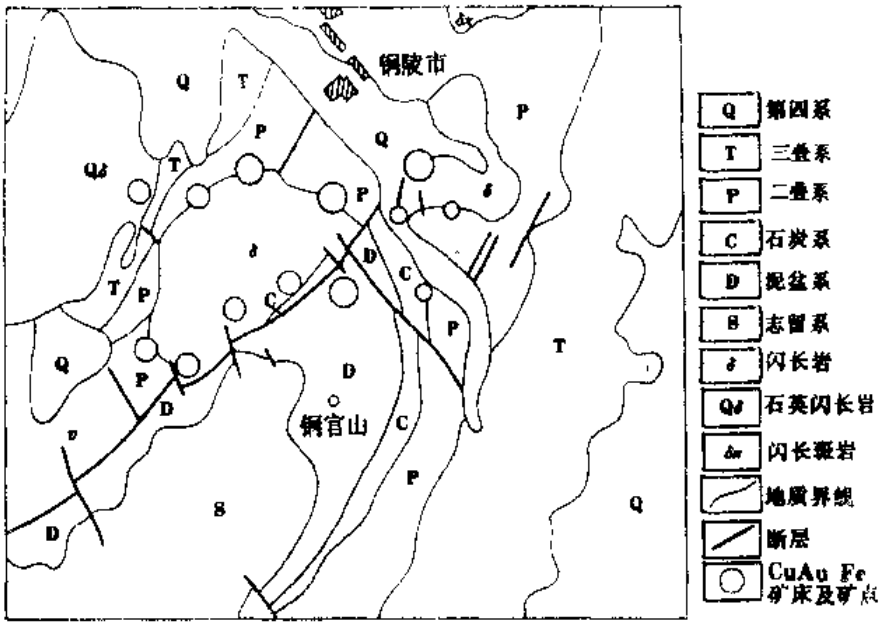


图 5—8— b　铜官山矿区地质图

表 5—4—1　线性断裂表

编　号	名　　称	方　向	长度 (km)	影像特征	地质依据	备注
1	扫把沟—江边	30°	3	卫片线性明显湖泊串珠状呈线性分布	长江破碎带	
2	兴隆镇—西湖西界	30°	5	线性浅色带宽度较大，延伸长规模大	北西盘下降有岩体侵入	
3	笔山西—白鹤	30°	7	影像线性断续分布	北西盘下降笔山西有断裂带	
4	白鹤—铜官山矿	50°	8	影像线性清晰，泥盆与石炭二叠之间的纵向沟谷有人工控矿坑	有角砾岩片理化	已知
5	铜官山东	20°	6	直线沟谷山脊被切割	地面断裂明显，沿断裂带蚀变发育	
6	山底板—东风水泥厂	30°—50°	3	第四系河谷呈直线分布，规模大，由多条线性体组成。包括分水岭一线	北西盘上升	
7	五七干校—大山冲	320°	8	直线沟谷山脊错位明显	北东盘向北西错位500m	
8	铜港—大倪村	310°—320°	5	线性体西侧影像明显不同，铜官山浑圆状，水系不发育，西南侧棱角状，水系发育	北东盘上升	
9	铜陵市区	325°—335°	7	线性影像明显，切割地层错位，多条线性体组成，规模较大	地层破碎，有岩体侵入	

续表

编号	名称	方向	长度(km)	影像特征	地质依据	备注
10	铜陵站—独山	310°	5	线性体呈直线，延伸长	三叠系地层错位北东盘向南东位移	
11	谢家冲—龙山东	310°	3	线性体细而长，连续性好	切割老鸦岭矿区，地层岩脉错位	
12	铜陵县—西湖镇	东西	5	断崖，鞍部，沟谷水系构成一条直线带断续延伸	有岩体侵入，北侧下降	
13	兴隆镇—龙山北	同上	5	地貌形态西侧明显不同，北侧下降，湖泊水系发育，影像宽带状	有断层广泛分布，岩浆活动强烈，航磁有明显反映	
14	笔山南—铜官山北端	同上	5	东西向山脊沟谷断续分布	笔山南见东西向破碎带	
15	宝山—独山	同上	6	东西向山脊沟谷断续分布	宝山有东西向断裂带	
16	白鹤—铜官山南端	同上	6	影像粗短断续延伸，多条线性体平行分布宽度大	切割北东向地层有明显位移	
17	兴隆—白鹤	南北	5	南北向水系冲沟极发育，曲折延伸	与长江断裂平行	
18	笔山西—宝山	同上	4	影像线性断续分布，笔山西清晰	宝山东有南北向破碎带	
19	笔山东—铜官山	同上	5	南北向山脊沟谷直线延伸清晰	切割北东向地层笔山东有破碎带	
20	西湖镇—大尖山	同上	5	线性沟谷，湖边，南北线性体显示清晰	切割背山背斜，独山附近地层破碎	

（2）北西向断裂：北西向断裂有四条，与成矿关系密切的有二条。一是铜陵市区断裂带（F_9）。该断裂与铜官山矿区断裂相交于笔山东侧。并切割铜官山北端，影像清晰，是矿区内最大的北西断裂带。航磁重力场都有明显的梯度带。是一条控岩控矿断裂带。另一组在铜港—大倪村一带有一条较大的断裂带（F_8）。310°—320°两个方向由两条断裂组成，切割铜官山矿区南部，在宝山西侧与北东向铜官山矿区断裂相交，是区内重要控矿断裂之一。

上述五条北东向和北西向断裂除笔山西一条北东向断裂外，其余四条直接切割铜官山四边，使铜官山构成菱形块体，长轴指向南北。

（3）东西向断裂带：东西向断裂带有五条，其中兴隆镇—龙山北、铜官山北端、宝山—独山三条比较重要，这三条断裂是铜陵—新桥东西向断裂的一部分，影像显示为短粗断续的线性体。大区域看极清楚，在矿区内较模糊不清，这三条断裂向下可能为一岩浆破

碎带，已被岩体充填，故面目不清了，宽度3—4 km。

（4）南北向断裂带：南北向断裂带有四条，其中铜官山主峰断裂和笔山西—宝山断裂二条比较重要。从卫片和航片镶嵌图看，通过铜官山南北向主山脊是一条较大的南北向断裂，南北两头延伸长，影像线性呈锯齿状分布，是矿区内最大的一条南北向断裂。笔山西还有规模较小的南北向断裂分布。

以上北东向、北西向、东西向、南北向四组断裂集中相交于铜官山为中心的矿区地带，构成一个岩浆活动极为有利的空间。

2．环形构造及隐伏岩体特征（表5—4—2）

表 5—4—2 环形构造表

编号	名称	分类	面积 km	影像特征	地质依据	备注
1	金口岭环形构造	深成	20	环边在狼尾湖、周冲、铜官山，东部较清楚，南部是弧形山脊，北边人为破坏不清，铜官山、笔山部分重叠。周边高，中心低，环内有五个小环形构造	金口岭岩体及蚀变带有关	
	①罗村	浅成	0.3	色环明显，蚀变发育		
	②铜港	同上	1.5	色调浅，色环明显	金口岭岩体出露	
	③组织厂	同上	0.4	色环明显	岩体	
	④倪家村	同上	2	环形山脊，色环明显	接触带	
	⑤宝山	同上	2.3	色环明显	接触带	
2	铜官山环形构造	深成	17	笔山，虎山—龙山，环形山脊极清晰，与环形蚀变带一致，环内有六个小环形构造	天鹅抱蛋、虎山、龙山岩体及蚀变带有关	
	①笔山	浅成		色环明显	已知矿区	
	②天鹅抱蛋	同上	1.5	色环明显	闪长岩出露	
	③虎山	同上	1.5	环形山脊，色环明显	虎山岩体出露	
	④水泥厂	同上	2	色环明显	蚀变发育	
	⑤尾矿砂东	同上	2	三个小环重叠分布	蚀变发育	
	⑥独山徐	同上	0.7	环形山	蚀变发育	
3	龙山环形构造	深成	12	中心在龙山附近，直径4km虎山一带与铜官山环重叠，北界到西湖镇，环内有三个小构造	龙山岩体及蚀变带有关	
	①西冲	浅成	1.5	环形蚀变山	蚀变发育	
	②龙山	同上	1.5	环形蚀变明显	闪长岩体	
	③小冲	同上				

（1）环形构造的分布特征：区内环形构造整个铜陵幅有一个大环形构造，卫片显示

清晰，在铜官山矿区航片反映有三个次级环形构造，集中分布在铜官山背斜倾没端。它们是金口岭环形构造、铜官山环形构造、龙山环形构造。在这三个环形构造内还有多个小环形构造存在。在平面分布上构成大环套小环、互相迭合的特点。

（2）隐伏岩体的特征：环形构造的分布特征与重、磁场图对比发现：大环形构造与区域高背景场吻合、次级环与次级高背景场吻合。小环形构造与局部异常一致。这种遥感环形构造和物探异常一致的现象不是偶然的巧合。而是遥感和物探在发现隐伏岩体方面都有自己的独特功能和表现形式。根据遥感和物探反映的一致性，推断区内深部岩体明显地可分为上、中、下，三层结构。3 km 以下整个铜陵地区是一个大岩基，岩基的走向近东西。1.2km以下有多个中型岩基。铜官山矿区就是一个椭圆形岩基，走向近东西，稍偏北西，中心在宝山西附近。近地表由磨菇群式小岩体、岩株、岩脉组成，地表小岩体的分布方向明显受北东向北西向断裂控制。

这种宝塔式多层结构岩浆岩体，从岩浆房上侵地表时，受到多层构造面的阻挡，有充分时间的分离作用，对成矿极为有利。

金口岭环形构造与铜官山环形构造互相重叠部位的宝山笔山环形构造是矿区岩浆活动中心所在，也是铜官山矿区的成矿中心。

3．蚀变岩特征

区内蚀变广泛发育，主要类型有硅化、矽卡岩化和铁帽后生氧化作用所致。

硅化：航片上表现为暗紫红色色彩，地貌呈突起尖棱状，岩石坚硬。主要分布于铜官山菱形区域内，东北部形成几处环状山脊。

矽卡岩化：航片上表现为亮黄色色彩，地形无较大变化，主要分布于区内大的控矿断裂带上和环形构造边缘。

铁帽：航片上表现为暗黄色色彩，团块状覆盖基岩，地势平缓，主要分布于铜官山已知矿区和铜陵市断裂上，其它地区有小面积的零星存在。

从全区来看，蚀变岩的存在受到岩浆岩和断裂的综合控制，在岩体边缘存在构造尤其是大断裂时蚀变尤为发育，在未见岩体出露而存在蚀变型环形构造的地区则反映了其下隐伏岩体的存在。

4．找矿靶区

（1）笔山一宝山一带是矿区岩浆活动通道，也是铜官山矿区的成矿中心。目前开采的铜官山主矿带倾向北西，根据遥感物探资料分析，这个主矿带下部折向南东倾斜。铜官山主峰下存在岩体，而不是地层，铜官山目前所见之龟背状山脊，实际上是一个不太厚的顶盖，深部为中酸性岩体。如果这一推断得到证实，将对矿区找矿方向发生重大转变。

（2）目前铜官山主矿带的下界面接触带上岩石钾化蚀变强烈。岩体含铜偏高，是找斑岩铜矿的重要线索。如果证实接触面倾向转向南东，找斑岩铜矿的希望更大。

（3）二条北西向控岩容矿破碎带，切割铜官山南北两端。目前笔山附近的北西向矿带有可能向南东延伸，为北西向成矿带，这样铜官山的“Y”成矿带将成为“X”网络成矿带。

（4）重视三条北东向成矿带的找矿工作。已知的铜官山主矿带中要注意垂直矿带的北西向横节理充填矿床。笔山西一白鹤断裂和铜官山东侧断裂要注意找金矿。

（5）注意铜官山菱块四边四角的找矿工作，如果把笔山加上，铜官山菱块北西边扩

大到铜港，同时要注意大菱块的四边（实为五边）六角的找矿工作（六角为六个断裂交汇处）。

（6）重视六个环形构造的找矿工作（罗村、铜港、宝山、天鹅抱蛋、笔山北、尾矿沙，即图5—8—a中编号者）。

地面验证情况：1号罗村环形构造经取样化验，含金品位较高，经勘探为一大型金矿床，可延长铜官山金矿开采年限20年。

对铜官山矿区大比例尺遥感图像解译说明：遥感技术在大比例尺成矿预测及为老矿区提供新的矿产基地中引起重要作用，对查明控矿断裂、隐伏岩体、蚀变带、预测靶区等大有作为。

六、遥感找矿实例

（一）已知矿田遥感影像特征

1．新疆宝贝金矿影像特征

整个矿区在航片上显示为菱环构造特征(图5—9)中心部位为一浅色等轴状环形构造，为华力西期斑状钾质花岗岩，侵入到石炭系中，出露面积4.5km²。环内平坦、光滑，向外为由北东和北西两组断裂控制的深色菱形块体，地形突起，为接触交代硅化、角岩化火山岩，菱形体长轴东西向，锐角为60°，菱与环构成统一的菱环构造，总体面积约20km²。

含金矿脉体产于菱块北部边界的北东向断裂及菱与环的接触部位。

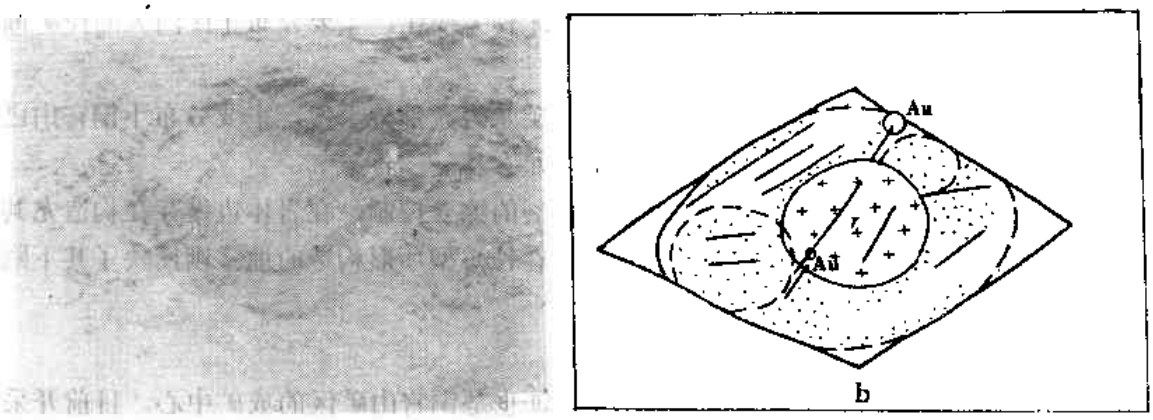


图 5—9　新疆西准噶尔宝贝金矿菱环构造

a—黑白航片；b—地质解译略图

2．香花岭矿田影像特征

香花岭为一多金属矿田，图像上显示为菱环构造特征（图5—10）。菱块构造为北东、北西向两组断裂交叉构成，面积约400km²，南部由于后期东西向断裂作用而特征不清。长轴大致为南北向，锐角为60°。菱块内次级断裂及蚀变发育。环形构造内切于菱块四边，具多层环圈，反映了其下存在隐伏岩体，其上分布有多个小环，为出露岩株、浅隐伏岩体和蚀变作用所致。从环形构造分布特点分析岩体是呈母子式产出的。

区内的各种成矿元素异常均圈限于菱形区域内，航磁异常特征亦与遥感特征相吻合（图5—10c），航磁异常区形态为菱形，内部分布有多处小异常，与小隐伏岩体相对应。

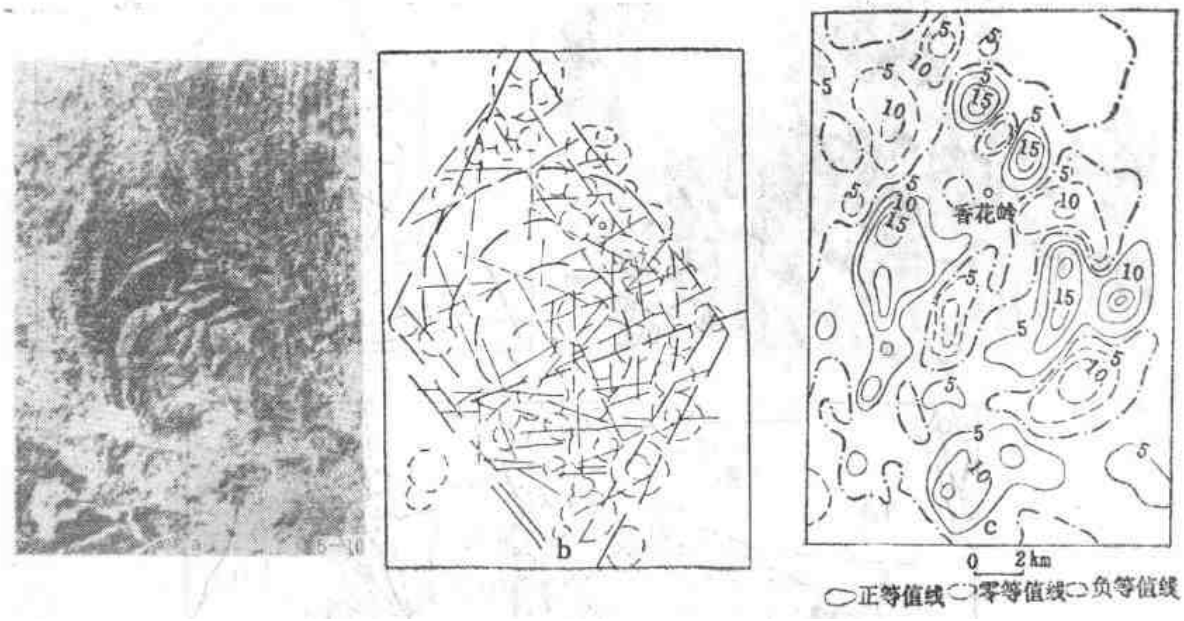


图 5—10 湖南香花岭菱环构造

a—MSS影象；b—构造解译图；c—航磁ΔT等值线图

经上延处理后，异常区为一整体环状，与深部岩基相对应。

矿体主要分布于小环形构造上，而小环形构造又发育于菱块构造的边角部位。

3．云南个旧锡矿影像特征

卫星图像上显示为一环块构造，矿区位于红河裂谷北侧，东西，北北东和北北西向三条断裂及红河断裂共同构成一近方形隆起断块，其内发育一大型环形构造，为多层同心环（图5—11），核部位于块体中心，为向心谷地，向外展现为由脊、谷构成的两个外弧层圈，大环之内又包含有多个小环。大环内层圈为出露岩体（龙岔河岩体）范围，外层圈为隐伏岩体范围，小环则对应出露小岩株和隐伏小岩体。在此大环的东部又交切一中型色环，环心低洼，亮白色，环内断裂发育，为另一期岩浆活动所致。

矿田限于隆起块体之内，矿体产于：①大岩体外围的小岩体（袁见齐，1979），即小环构造上；②岩体与围岩接触带且构造碎破区，即外层环圈，而又以东部环形构造叠加区和断裂发育区为佳（图5—11—c）。

4．新疆磁海铁矿影像特征

彩色航片上呈明显的等轴状环形构造，具两层环圈，中心为呈浅色调的花岗岩、花岗闪长岩、辉长辉绿岩等，均已强烈蚀变，面积约4 km^2，周边为接触变质带，呈暗色（图5—12）。

磁铁矿分布在环形构造南北两侧及周边接触带上，航磁有10处异常显示，其中M1545、M1555两个异常为大矿（图5—11—c），矿体产在基性杂岩体与石炭纪变质地层接触带上，色彩呈深暗色（图5—12）。

5．江西德兴富家坞铜矿影像特征

遥感图像上显示为典型的环形构造，色形特征明显，环状、放射状断裂发育。环中心色调浅，出露花岗闪长斑岩，外围为深色角岩化蚀变岩，由内向外色调由浅变深，呈多环圈构造（图5—13—a），这与矿田的地质结构即岩体、接触带、蚀变带的环状分布是一致的（图

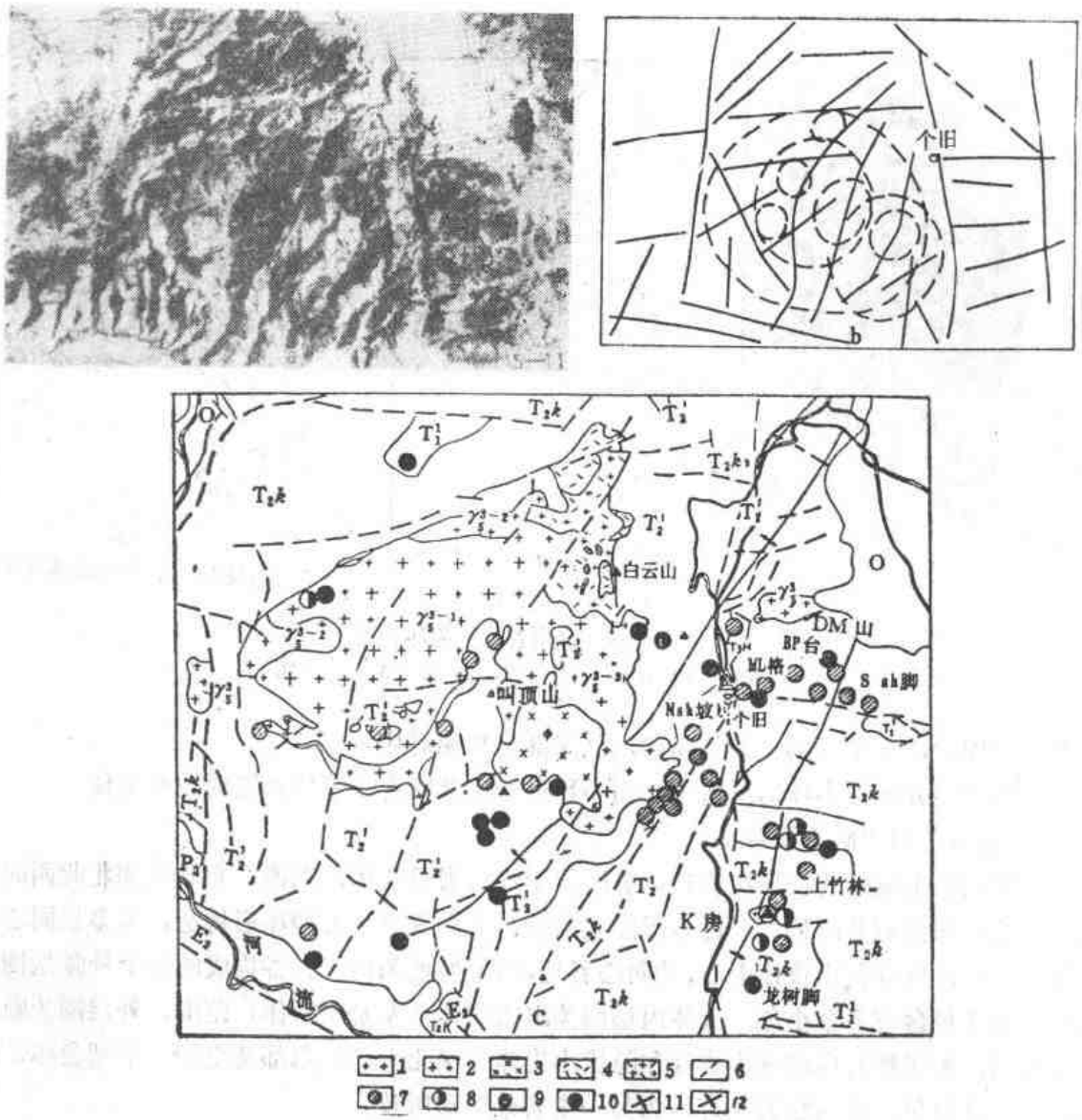


图 5—11 云南个旧锡矿区环块构造

a—TM影像；b—线、环构造解译图；c—矿区地质图

（据《矿床地质学》）

1—斑状黑云母花岗岩（T_3^{3-1}，T_3^{3-2}）；2—黑云母花岗岩（T_3^{3-3}）；3—辉长二长岩；4—霞石正长岩（ε）；5—富钾花岗岩（ξ）；6—断层；7—锡矿；8—铜矿；9—钨矿；10—铅矿；11—背斜轴；12—向斜轴

5—13—b）。矿体产于斑岩体外接触带上即内环层圈上，应注意在外圈蚀变带中即外环层圈寻找中低温矿床，尤其是微粒金矿。

6．邓格庄金矿区影像特征

邓格庄金矿区位于胶东东部金成矿带上，为一大中型金矿。在彩色航片上其影像特征为：矿田位于混合花岗岩与胶东群变质岩接触带混合花岗岩一侧，为丘陵地貌，金牛山断裂为主要控矿断裂，呈舒缓波状，沿断裂充填有连续性较好的石英脉，地形呈长条垄岗状，在矿区内呈褐红色。矿区南北两端，由北东和北西两组断裂交叉控制，主断裂两侧平行排布多条含金矿脉，构成矿田主脉体（图5—14）。与矿田两端简单分布的石英脉相比，矿田内为膨胀性扩容构造控制的石英脉群，从蚀变程度看，矿田外石英脉基本无蚀变或弱蚀变，矿田内石英脉为强蚀变，主要类型为黄铁矿化及硅化。

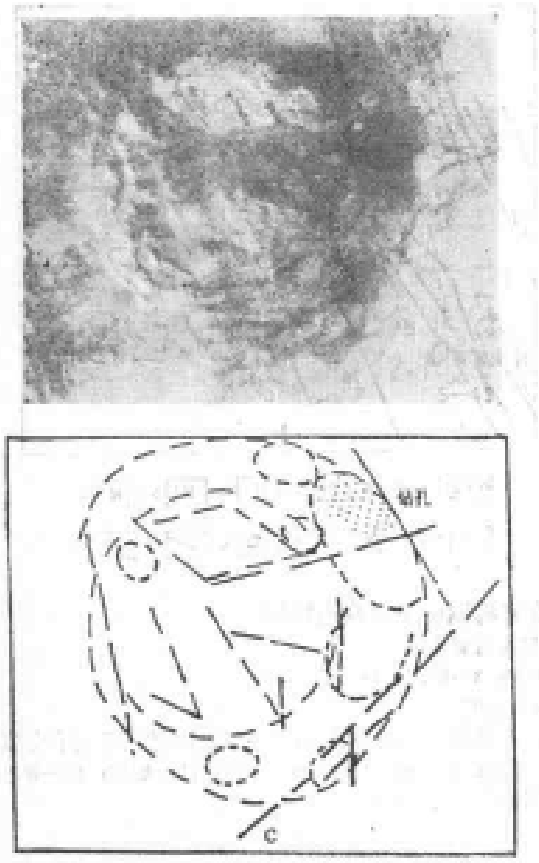




图 5—12 新疆磁海铁矿环形构造特征

a—彩色航片；b—构造解译图；c—地质略图

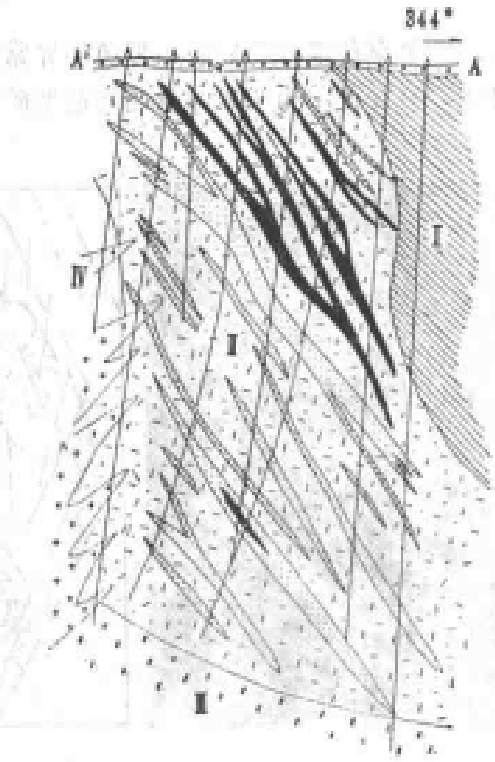




图 5—12—d 新疆磁海Ⅴ勘探线剖面图

1—变质岩；2—辉石石榴石岩；3—碱性长石岩；4—富矿；5—贫矿；6—花岗岩；7—第四系；8—蚀变带序号

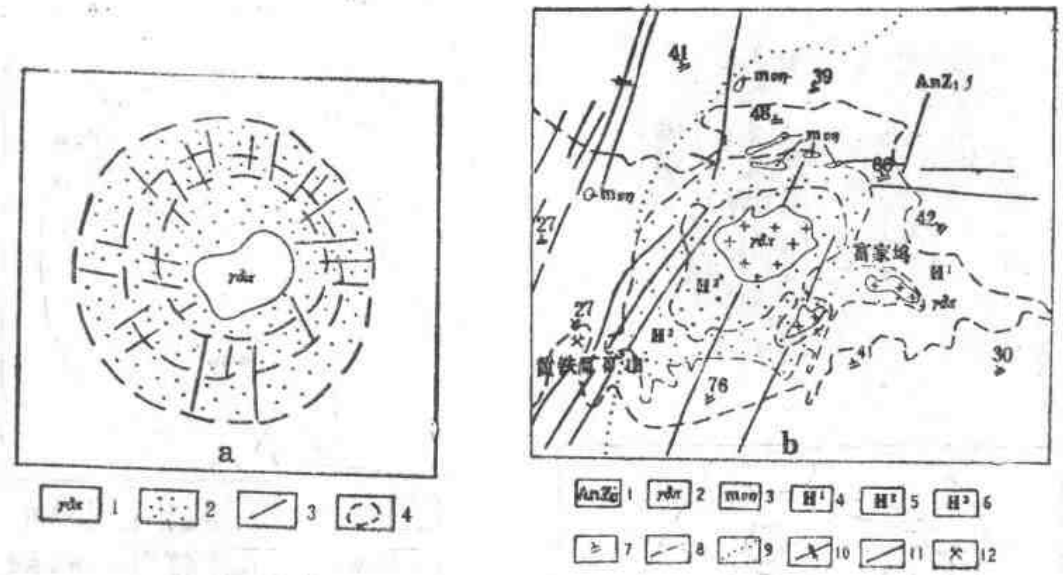


图 5—13　江西德兴富家坞铜矿环形构造特征

a—线、环构造解译图

1—花岗闪长斑岩；2—蚀变；3—断裂；4—环形构造

b—地质图

1—前震旦系；2—花岗闪长斑岩；3—变质辉绿岩；4—绿泥石-水云母千枚岩；5—绿泥石-水云母化千枚岩；6—石英-水云母化千枚岩；7—片理产状；8—蚀变带界线；9—地质界线；10—向斜；11—断层；12—矿山

（据《中国斑岩铜（钼）矿床》）

（二）遥感预测成矿远景区

1．紫金山成矿远景区

图像显示为清楚的菱形构造，四个交角都有明显的小型色环异常，尤其南部锐角处色环明显，南北向剪切带和东西向断裂极发育，为明显的菱环构造型矿田构造（图5—15）。

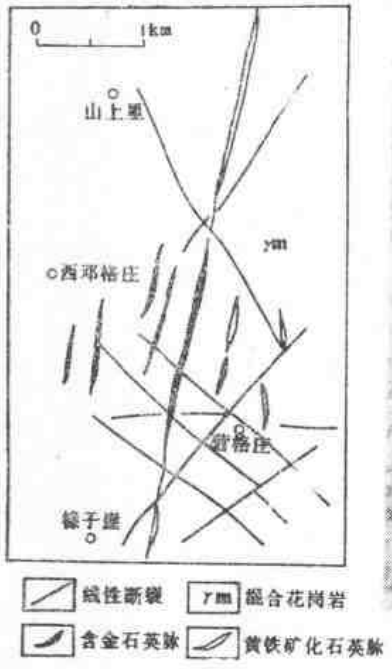


图 5—14　山东牟平西邓格庄金矿区遥感地质解译图

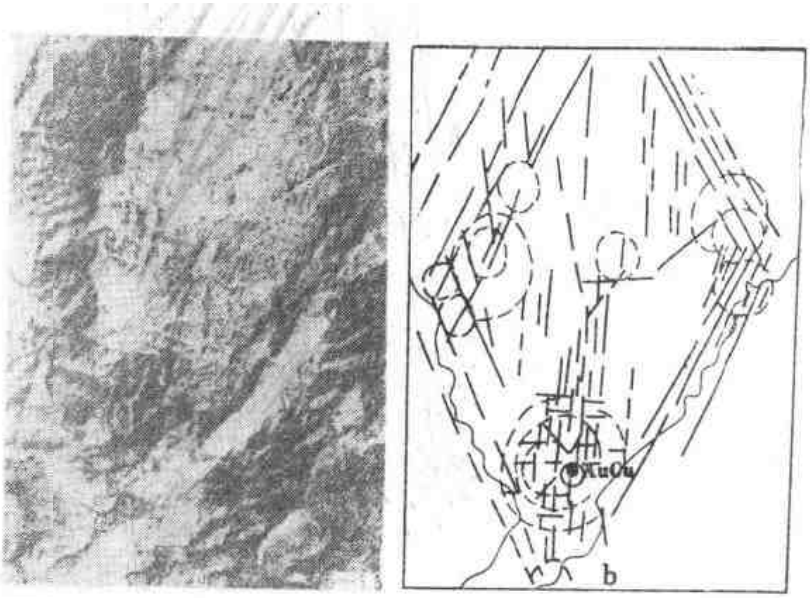


图 5—15　福建上杭紫金山菱环构造特征

a—TM彩色影像；b—线、环构造解译图

地面出露建欧群，菱形内断裂发育，尤其是菱的四边破碎带蚀变强烈，南部锐角处紫

金山区已发现含金、铜黄铁矿，规模大、品位高。现正进一步勘探验证，是很有远景的铜、金矿远景区。

2．寺门口金矿远景区

彩红外航空像片上有三个环形构造，呈北东向串珠状分布，串珠之间为北西向横向断层。环形构造除显示为暗紫色外，地貌特征也很明显，呈多层圈隆起（图5—16）。

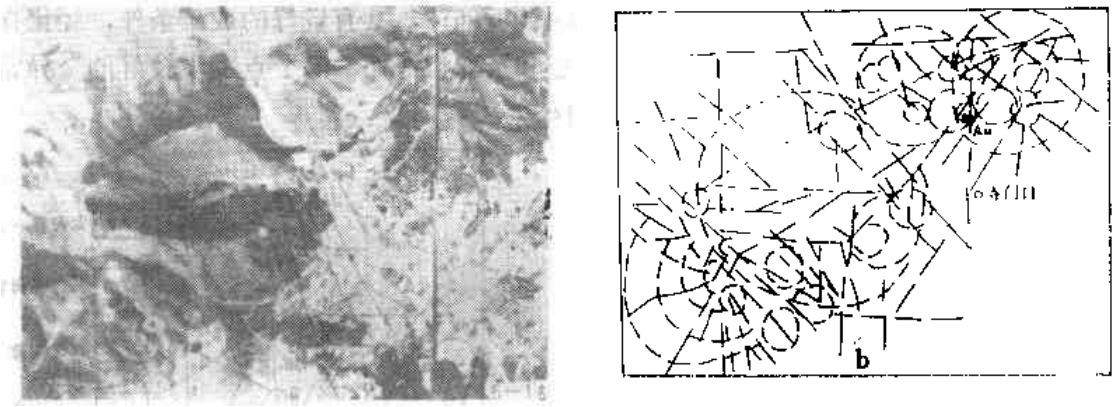


图 5—16　安徽铜陵木镇寺门口成矿远景区影像特征

a—彩红外航片；b—构造解译图

地面出露志留纪砂岩，铁帽发育，铁帽中金品位很高，最东边的寺门口环已打孔控制含矿层300多米，未见底和岩体。航磁异常亦为北东向串珠状，与遥感相对应，由此推断，寺门口西南的里山冲、棕子店环形构造是很有远景的成矿区。经化探、浅钻验证，为大型破碎蚀变带，已列为重点普查远景区。

3．荒草沟成矿远景区

TM彩色合成图像上显示出一串亮白色环形构造，分布于北东向断裂带上。以中部环发育完整，边界清晰，环内弧形断裂发育，蚀变发育强烈，主要为矽卡岩化，这些特征反映了隐伏岩体的存在（图5—17）。

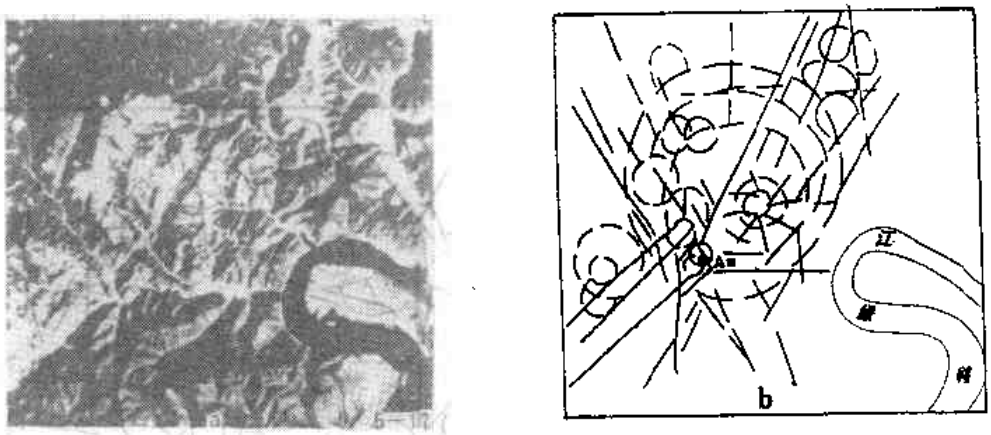


图 5—17　吉林荒草沟成矿远景区影像特征

a—TM彩色影像；b—线环构造解译图

环形构造形成于主要含金铜矿岩层元古代珍珠门组中，从岩浆岩、构造、围岩和蚀变特点看，这一串环形构造有较好的成矿远景，已知的几个大中型铜、金矿都位于此带的环形构造上。

4．潘家庄成矿远景区

卫星图像上显示出清晰的“S”型构造（图5—18），远景区内太古界—元古界变质岩呈北北东向带状展布，边界受北北东向断裂控制，两侧为混合花岗岩。变质岩带中部，受到北西和东西两组断裂的作用，其延展方向发生变化，出现连续的“S”形弯折。整个变质岩带在影像上表现为暗色的山脊带，其两侧的混合花岗岩呈浅色的平坦光滑的丘陵地貌。

与国外资料对比，这种“S”形弯折的转折部位，具有较好的成矿条件，经化探分析和工程地质工作，已在西部弯曲处“A”点和东部弯曲处“B”点发现较好的金异常和数条含金石英脉，确定此区为较好的找矿地区。

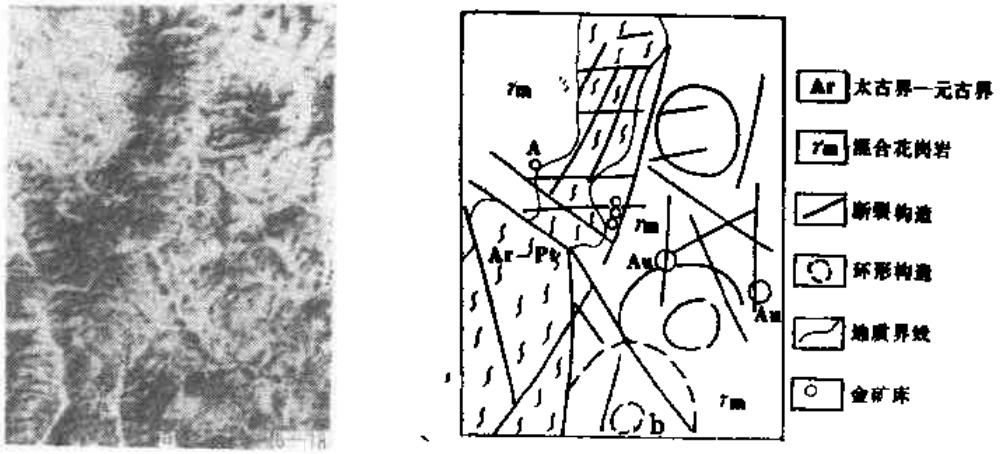


图 5—18　山东牟平潘家庄成矿远景区特征

a—MSS彩色影像；b—地质解译略图

5．三合圩成矿远景区

彩红外航片上为一显著的浅色环形构造，环内平坦光滑，零星分布有暗色小突起，边部为一暗色环边，北东、北西和东西向三条断裂围成“△”（图 5—19）。环内浅色物质系由热液蚀变形成的钾长石化、绢云母化等组成，暗色环边为角岩化引起。这种影像特征反映了隐伏岩体的存在，具有良好成矿条件。经验证，已在不同深度见到了 Pb、Zn、Cu、W、Mo矿和底部隐伏的黑云母花岗岩。

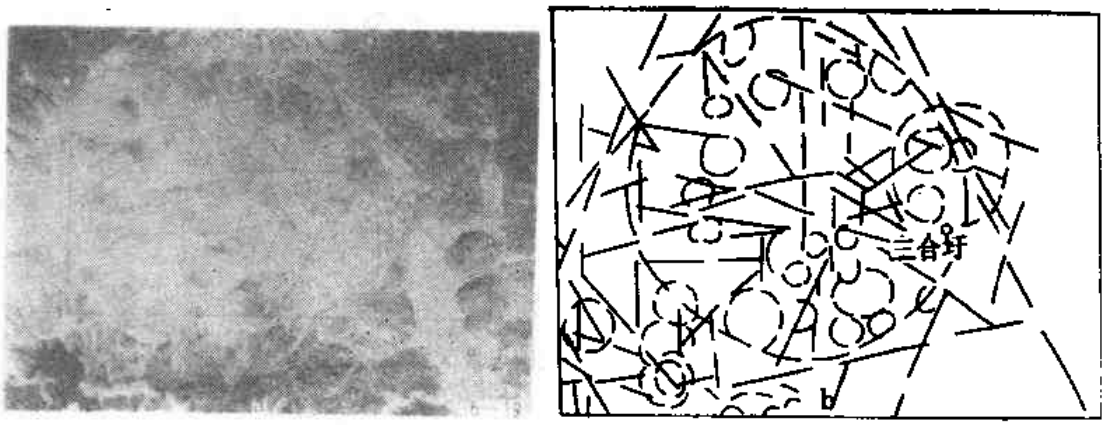


图 5—19　湖南香花岭三合圩环形构造特征

a—彩红外航片；b—线环构造解译图

第六章　1:5万遥感地质解译图的编制

一、遥感图像选择

遥感图像种类很多，不同图像在区调中的作用是不同的（表2—2，3，4，5，6），只有了解了各类图像的特征，才能选择出合适的图像，才能在充分发挥遥感特点的情况下，降低成本，提高效益。

根据目前我国区调的实际情况下列方案是比较适宜的。

（一）一般区

应用TM图像或MSS图像（1:10万—1:20万）进行宏观控制，应用黑白航片（1:1万—1:3万）进行地质解译。这种卫片加黑白航片组合形式适合我国国情，其特点是图像获取方便，成本低，每幅图只需几千元，可以普遍推广。

（二）重点成矿带、重点项目、重点城市

应用TM图像（1:10万—1:20万）进行宏观控制，应用彩红外航片或彩色航片（1:1万—1:5万）进行专业解译，其特点是需要专门航摄，每幅图需增加经费3—4万元。如已有1:5万彩色片，可放大成1:1万—1:2万使用，可降低成本，每幅图只需几千元。

使用彩色航片所增加的费用，对重点项目是必要的，而且在地形复杂、交通困难的地区，地质效果和经济效益尤为显著。除供地质填图、矿产调查外，彩色航片还可供城市调查、工程设计等多方面使用，达到一片多用，增加经济效益。

二、编图内容及要求

遥感编图在1:5万区调中作为前期工作，必须在地质、物化探工作开展之前完成，以指导地质、物化探工作部署。

（一）编图内容

1．航空像片镶嵌略图；

2．遥感线性断裂解译图；

3．遥感环形构造及岩体蚀变带解译图；

4．遥感岩性解译图；

5．遥感成矿预测图。

（二）编图要求

1．航空像片镶嵌略图的制作及要求

镶嵌略图是进行地质解译的基础，因而在地质解译之前、首先需要制作镶嵌略图，其主要步骤为：

收集一套1:2万—1:5万航空像片，检查航片质量，要求质量合格，编号齐全。抽出单

号或双号，按航带或从中间向四周拼接，使相邻航片上线性地物如水系、道路、山脊线等相接如一，并用透明胶纸固定。然后检查方位差，把地形图四个角点的坐标转绘到拼合好的图上，检查南北图边是否平行，东西图边是否相等，最终使图像方位与地形图一致，这是保证镶嵌图质量的关键。

最后用刀切去重叠部分，刀与像片要垂直，不要离接边太远，边切边固定。切完后，再检查方位差，防止扭动，裱到图板上后，经图面整饰即成一张镶嵌略图。如用透明薄膜覆盖好则能保存较长时间。

2．线性断裂解译图编制要点及精度要求

（1）编图要点

地形图、镶嵌图准备好后，以解译标志为依据，按先粗后细、先长后短、先明显后模糊的原则，按方位对断裂一组一组解译。通常北东和北西向两组断裂斜交构成菱格状，比较明显，可以先解译，东西和南北向断裂正交构成格状，规模较大，比较模糊，可后解。较大断裂有等间距平行分布特点，找到一条后在其两侧很容易发现其他同级断裂。线性断裂与视线方向一致时较清楚，垂直时易漏掉。断裂确定后随即转绘到地形图上。要注意断裂性质、形态特征、规模、切割关系等，随时记录。并根据延伸、宽度和位移等特点确定断裂等级，列表填写断裂编号、名称、方位、长度、解译标志等（表6—1）。在解译时要注意航卫片结合使用，互相参考、互为补充，最后清绘成图、编写解译说明。

表 6—1　遥感线性断裂解译表

编　　号	名　称	方　向	长度(km)	影像特征	地质依据	备　注

（2）精度要求

① 解译断裂要保持其在图像上的原始形态，不要任意延长或加宽、简化等。

② 航空像片上长度大于150m或宽度大于50m的断裂应解出，TM图像计算机提取大于100m。

③ 转绘误差不大于1mm。

④ 稳定性检查，二次重复解译大断裂重合率大于60—80%，否则须重新解译。

3．环形构造解译图编制要点及精度要求

（1）编图要点

环形构造解译对图像质量要求高，比例尺也要适中，1:5万左右的彩红外航片或彩色航片，是最理想的。彩红片较彩色片效果好，而黑白航片效果不佳。

识别环形构造、解译标志是关键。从彩色或彩红外像片上识别环形构造主要靠色彩构成的环形色异常、云雾状晕圈，从黑白航片上主要靠环形断裂、放射状或向心状水系和环形地貌等标志来识别。一般航卫片结合解译，先识别大的环形构造，后在大环中找小环。

简单清晰的先转绘，复杂模糊的后转绘，并注意重叠、交切的环形构造。将环形构造编号、名称、规模，形态特征填入表内（表6—2），最后清绘成图。

表 6—2 遥感环形构造解译表

编　　号	名　称	分　类	面积(km^2)	影像特征	地质依据	备　注

（2）精度要求

① 统一解译标志，保持环的原始形态不改变，尽量客观转绘。

② 环的最小直径大于200m。

③ 环的中心位置误差：边界清楚的不大于100m，边界模糊的云雾状晕圈不大于250m。

④ 稳定性检查：二次重复解译重合率大于60—80%，否则须重解。

4、岩性解译图编制要点及精度要求

（1）岩性解译时，先在卫星图像上划分出明显的影像大类区，如沉积岩类、变质岩类、岩浆岩类、火山岩类等，然后应用1:1万—1:3万航片在各岩类中进一步细分，根据色调、纹理、形态结构、水系、地貌等微小特征划分出最小岩性影像单元。在沉积岩区可划分出碎屑岩类、碳酸盐岩类、第四系等，根据纹理、最小水系的差异，再细分出最小岩性影像单元。如碎屑岩类可细分为砂岩、砂砾岩、页岩、红层等，碳酸盐岩类可分成厚层、薄层、互层等。初解完成后必须经过野外验证，对每层岩石按顺序进行定名、编号、并列表说明其分布、解译标志、主要岩性等（表6—3）。岩性解译图只反映不同岩石类型，不说明其新老关系。

表 6—3 遥感岩性解译表

岩类	岩性单元	地质单元	解译标志 / 岩性	色彩	影纹	地貌	水系	植被	其他

（2）精度要求

① 闭合地质体直径大于100m。

② 线状地质体宽度大于50m，长度大于250m。

③ 矿化蚀变带，找矿标志层等有重要地质意义的而小于上述要求的可适当放大表示。

④ 岩性界线位移不大于50m，转绘误差不大于1 mm。

⑤ 稳定性检查：二次解译重合率大于70%，否则须重解。

5．成矿预测图的编制要求

编制成矿预测图，首先要求遥感解译信息要可靠，否则，会使预测不准确，造成不应有的损失，成矿预测图必须为找矿工作提出最佳方案。

遥感成矿预测图以岩性解译图做底图，将与成矿有关的控矿断裂、成矿时和成矿前断裂以及与隐伏岩体、蚀变带、矿化等相关的环形构造转绘上，并与地质、物化探资料结合对比分析。一般，多信息相关的信息是可靠的，离散度大的信息要检查其原因。最后提出最佳找矿方案，对找矿靶区划分等级，编号并绘制成图，说明信息来源和可靠程度。

结 束 语

自从遥感地质工作方法在全国地矿系统推广应用以来，广大地质工作者已能应用遥感配合地质工作，特别是能够以遥感图像上根据矿田构造模型识别出各种矿田构造，进行矿产预测。

但是，矿产的形成是长期的、多源的、全球性的，成矿条件是极其复杂的，千差万别的。成矿预测的关键是总结成矿规律，查明矿田构造的形成机制，这项工作必须有千千万万地质工作者的共同努力才能取得圆满的、合理的答案。

笔者认为，应用地球动力学理论来指导成矿预测是探索成矿规律的有效途径。

地球动力学观点认为矿田构造的形成与地壳断块之间的相对运动有着密切的联系。断块之间的相对运动对上覆岩层的建造发育及构造变形有着直接的控制作用，尤其是基底断块和边缘断裂的活动方式和强度不仅直接控制着沉积盆地范围、地层岩相带的分布，而且影响和制约着盖层褶皱、断裂及岩浆作用、变质作用和成矿特点。断块活动的不均一性，是矿产分段富集的重要原因，往往强烈活动的次级断块边界是成矿的有利场所。断块之间接触碰撞带的性质和活动方式控制了成矿作用的强弱和成矿元素的分带。断块的边缘断裂和内部的次级断裂是直接控矿和容矿的场所。

在不久的将来，应用遥感方法在新一轮的地质普查、成矿预测工作中将会取得丰硕的成果。作者盼望通过矿田构造这个成矿窗口的研究，深入地研究成矿机理的发生、发展及形成，以求真正打开成矿规律的大门。

参 考 文 献

[1] 地矿部情报所，1981，国外前寒武纪地质构造研究，地质出版社

[2] J.D.Herman，1986，用陆地卫星资料勘查爱达荷州中部东区的贵金属和钼矿床，《遥感专辑》(3)，地质出版社

[3] 刘焕若，1991，遥感找矿的原理和方法，冶金出版社

[4] 刘允良，1990，遥感图像在变质岩地区构造特征研究和找铁矿中的应用，《国土资源遥感》1期

[5] 芮宗瑶，1981，中国斑岩铜（钼）矿床，地质出版社

[6] 阎积惠，1989，TM合成图像的波段组合模式与解译，《遥感信息》1期