

第一章 概论

一、航天遥感为地质科学研究开辟了新途径

当代高新科学技术的发展，为现代科学的深化研究，不断开辟出新方法、新途径，其中航天遥感技术的开发与应用，在岩石圈动力学、构造地质学、地震地质学等方面，都取得了卓有成效的成果。卫星遥感图像不仅从宏观上展现了活动构造的影像全貌，而且直观地揭示了断裂活动的影像信息，为分析断裂的活动状态及其与地震活动的相关性，为分析发震构造与强震的孕育地段提供了丰富的信息。

自从 1957 年苏联发射了第一颗人造地球卫星以来，航天遥感技术有了蓬勃发展，至今已形成如下特色^[1,2]：

1. 具有多片种多层次的特点

不同类型的人造卫星所获取的图像，依其目的与应用途径的不同，各自具有不同的功能。各类卫星距离地面的高程分别为几百公里至 36000 公里不等，因此将同一地点、不同高程、不同片种的卫星图像综合在一起，有利于断裂活动信息的对比研究。

2. 应用不同波谱技术获取图像信息

卫星遥感一般采用多波段光谱获取信息，包括可见光波谱、红外光波谱、微波波谱和紫外光波谱等，而且在可见光波谱中还可按红、橙、黄、绿、青、蓝、紫不同波段分别摄取信息。鉴于不同纬度地带、不同空气湿度、不同地质体对光谱的吸收与反射有所差异，因此分波段摄取信息，可以根据各波段摄取信息特点，使地质体的各种相关信息在不同波段中给予充分显示，从而可获得良好解译效果。

3. 可获取不同时相的图像信息

人造卫星在围绕地球运行时不是机械地重复在固定的轨道上，而是呈螺旋式绕道运行，因此同一卫星在同一地点的不同时日可以获得类似的图像。这些不同时相的卫星图像，对于地质构造变动的历史来说，虽是短暂的一瞬间，但是由于不同时相太阳入射角、空间湿度的差异，同一地质体在不同时相的图像中暴露的信息可能有所差异，因此对比研究不同时相的卫星图像，可以更全面地揭示和识别地质体的信息特征。

4. 具有不同的地面分辨率

卫星遥感的地面分辨率，为识别地质体信息特征的重要因子，但不同卫星、不同片种因摄取目的不同，地面分辨率差异甚大。例如气象卫星影像的地面分辨率一般在 1000 米左右，而陆地资源卫星影像的地面分辨率为数十米，其中美国 TM 卫星图像的地面分辨率达 15~30 米，法国 SPOT 卫星图像的地面分辨率达 10~20 米^[1]。后两类在 1:10 万（比例尺还可加大）的卫

星图像中清晰地展现了地质构造、活动断裂的影像信息，从而为研究地质构造、分析断裂在新构造时期的活动特征等，提供了良好的新途径。

二、中国活动断裂的研究状况

1966 年邢台地震以来，我国对活动断裂的研究日益广泛，逐步深入，尤其是地震部门、地质部门和工程建设部门，对活动断裂的研究都提到相当重要的位置。例如国家地震局系统，不仅有一些专业人员多年从事活动断裂研究，而且还专门组织了如下工作：1972~1976 年间，在进行全国第二代地震烈度区划工作的同时，初编了活动断裂简表。②1978 年在黄山召开的全国地震地质学术讨论会上，活动断裂的学术讨论成为会议的重要议程。1980 年在宁夏召开了全国活动断裂专题学术讨论会。④1982 年，出版了《中国活动构造典型卫星影像集》^[3]，着重剖析断裂活动的典型影像信息。⑤1983 年，在武汉召开全国活动断裂科研工作讨论会。⑥1982~1990 年，在开展中国岩石圈动力学研究、编制和出版《中国岩石圈动力学地图集》、《中国岩石圈动力学概论》的同时，各省、区地震局相应地开展了活动断裂的研究，并初编了“中国活动断裂表”。⑦1984~1991 年，许多省、区地震局开展了活动断裂的填图工作，使活动断裂的研究向纵深发展。⑧1987~1991 年，国家地震局组织全国 20 多个有关单位编制《中国活动断裂表》，征集了全国近 800 条长度大于 50 公里的活动断裂，着重剖析这些断裂在第四纪时的活动特征、力学性质、活动方式、活动断距、活动速率、活动分段及其与地震活动的关系，从而使对中国活动断裂的研究形成了一个统一系统。⑨1989~1990 年出版了《中国主要活动断裂带卫星图像集》^[4] 中文版和英文版。1991 年，国家地震局在北京召开了第二次全国活动断裂专题学术讨论会，展现了对活动断裂研究又有新的进展。

综合我国对活动断裂的研究进程，大致可以得出如下几点认识：对活动断裂的研究资料相当丰富，而且逐步深入，并已初步形成了一个统一系统。第四纪时期，全国具有明显活动、长度超过 50 公里的活动断裂大约在 500 条以上，它们展布在全国各地，包括大陆及邻近海域都有活动断裂的踪迹，从而显示了区域分布的广泛性。③各地区断裂的活动状态、活动性质、活动强度、活动方式、活动习性各异，即使同一地区不同断裂的活动特征也存在一定差异，因此应用卫星遥感图像信息从宏观上、整体上对活动断裂进行对比研究，可以更深刻地认识各断裂的活动特点和鉴别它们的差异性。全国 500 条以上的活动断裂，若将其活动性质相同且彼此相邻，又具有成生联系者归并成带，则在全国范围内可划分出近百条活动断裂带，其中 50 条断裂带的遥感信息差异较大，它们在卫星图像中呈现出不同的影像信息特征^[4]。

怎样鉴别第四纪时期的活动断裂呢？综合以前的研究方法，基本上可以归纳为下列四方面：

新构造岩的年代测定

断裂活动新成生的构造岩，一般穿插于老构造岩之中，且多未胶结。对这些新构造岩可进行年代测定，包括热释光法、铀系法、电子自旋共振法、裂变径迹法、石英颗粒形貌法、同位素 C¹⁴测定法等。依据这些方法测定新构造岩的年代，可从中判断断裂的活动时代。

2. 断裂切错的地层

断裂活动错断的地层，以切错上第三系-第四系作为依据，但断裂错断第四系极其罕见，而

往往是造成两盘的第四系厚度差异、沉积相差异、砾态（粒态）砾组差异，因此分析这些差异便成为研究断裂在第四纪时活动的佐证。

3. 层状地貌与构造地貌形态

现代所见到的地貌势态，都是喜马拉雅运动-新构造运动所塑造形成的。据研究^[5,6,7] 地势最高、最早形成的剥蚀夷平面大约形成于早第三纪中期（4000 万年前），依次降低的各种地貌层面也依次递新，因此断裂两侧各级地貌层面的差异、地貌类型的差异、沿断裂所发育的构造地貌形态等，便成为研究断裂活动的重要形迹与依据，而且这些信息都可直观地展现在卫星图像中。

4. 应用仪器进行重复测定

仪器测量方法可分两类：一是沿断裂布设的监测台站，包括定点地形变、重力、地磁、测震、地应力等；二是跨断裂布设的定期复测，也包括地形变、重力、地磁、测震、地应力等。应用仪器研究断裂的活动性在卫星遥感中虽受其精度所限制，但目前的人卫测距（GPS）精度已达到厘米级，因此对一条数百公里至 1000 公里以上的活动断裂，多年、长期进行 GPS 复测，可能对分析该断裂的活动特征有所裨益。

三、活动断裂的信息提取

航天遥感尽管从宏观上获取了地质构造的各种信息，但是由于区域位置和自然环境的差异，许多断裂或者断裂的某一地段往往被隐蔽，因此需要进行图像处理才可能获得良好的影像信息，即使在断裂的显露地段，进行图像处理也可增强某些影像信息，以提高所需的解译效果。但是，鉴于岩层、第四纪沉积物、地热、地下水、植被、冰雪、空气湿度、云彩等自然因素的影响和干扰，不同的图像处理方法和处理功能，往往获得不同的信息效果^[8]；不同地区、同一波段的图像和不同波段组合的合成图像，其影像信息差异也很大。

1. 不同自然条件下波段的选取

波段的选取，对提取中国活动断裂影像信息，在不同地区呈现出不同的效果。在中国西北地区，任一波段或多波段合成图像，均可获得活动断裂的清晰影像，而且各种活动标志历历在目。南北构造带、华北地区和台湾等地，一般需要加入红、橙光波段进行合成，活动断裂的影像信息才比较明朗，但有些断裂因云彩、冰雪和第四系的覆盖而影响了活动形迹的显露。青藏高原和东北地区，活动断裂常因冰雪的严重覆盖，大大削弱了其影像信息的显露，因此需要选取夏季、初秋的卫星图像，才可获得较好的效果。东南地区因空气湿度较大，青、蓝、紫光波段的图像一般比较混沌，地貌形态比较模糊，断裂的活动标志在图像中常常分辨不清，但红、橙、黄光波段的图像却可显示比较清晰的断裂活动信息。在地下水贫乏和埋藏较深的第四系覆盖区，运用红、橙、黄光波段的图像可以获得断裂两盘差异错动的信息；但在地下水丰富和埋藏较浅的第四系覆盖区，以及在水深几十米以内的浅海地带，只有运用蓝、紫光波段的图像才可能获得断裂两盘差异错动的信息。珠江口外的北东向万山群岛断裂控制着水下沙洲的线状展布，而且其近岸一侧影像色调较深，水深反而加大，显示了断裂两盘的差异活动和水下断层崖或陡坎的发育。

2. 假彩色合成图像

假彩色合成图像上一般可见到比较清晰的地貌形态，但在不同区域和提取信息的目的不同，需采用不同波段进行合成。在西南地区，山间盆地的空气湿度较大，一般采用红、橙、黄、绿光波段进行合成，活动断裂的形迹和构造地貌形态可获得最佳效果，如洱海及其北部的合成图像(图片 1)，不仅醒目地展现了断裂线、断层三角面与断层崖，而且第四纪山间断陷盆地与断陷湖历历在目，与其周围的高山、中山地形对照强烈，反映了该断裂带的强烈活动。在地下水较为富集或埋藏较浅的第四系沉积地区，绿、青、蓝、紫光波段合成图像对于提取隐伏的活动断裂影像，一般都可获得鲜明的线性信息，如在河套断陷盆地中的两条近东西向隐伏活动断裂，即以其两侧的色彩对照差异显著而呈现出色阶分界线，并且跨越断裂的河流呈同步的扭动拐弯，反映了它们在第四纪时的活动兼具左旋平移性质。

3. 光学处理图像

假彩色编码和假彩色密度分割处理图像对于提取线性构造，具有异工同曲的效果，虽然它们的处理方法不同，但都是通过光通量的变化来提取所需要的影像信息，消减非需要的影像信息。这对于活动断裂信息的提取亦然。假彩色编码的图像处理，使郯庐断裂带南段主干断裂两侧呈现出显著的色彩反差，该断裂以深暗的线性越过长江，切穿北东东向构造线，延伸至大德山北坡，终止于江南古陆边缘。在假彩色密度分割图像中，甘肃安西一带虽然为上更新统-全新统所覆盖，但却非常醒目地揭示了近东西向疏勒河隐伏断裂的线性影像，并且展示了北东向三危山断裂被其所限制。

4. 数字化处理图像

运用计算机进行数字化图像处理，在不同的自然环境中选取的处理功能不同，往往获得不同的影像效果，因此在提取活动断裂的信息时，必须注意选择合适的处理功能^[9]。在冰雪覆盖下的库赛湖-玛沁断裂东段，直方图正态化、负片转换及跟踪球线性变换的处理图像，基本消除了冰雪的噪声，使断裂的影像信息充分显露，并显示了冬给错纳湖以东，该地段分为两条近于平行的南东东向断裂。在沙漠覆盖区比值与直方图正态化处理图像，一般可提取出良好的线性信息，如车尔臣河断裂带东北段便呈现出醒目的深色调带，反映了它由两条平行断裂组成，并具有地堑型断陷之特征(图片 2)。在地下水埋藏深且贫乏的黄土覆盖区，比例扩张、局部增强、分段线性密度变换、KIL 变换等处理图像，对断裂线性信息的提取具有较好的效果，如毛毛山-西华山断裂带和六盘山断裂带等的处理图像均有良好线性影像显示。在第四系覆盖的华北平原，地下水比黄土高原丰富且埋藏较浅，选用哈达姆变换、矩阵变换、自乘法运算等处理图像，一般都可获得清晰的断裂线性影像，如河北衡水-南宫一带的哈达姆变换图像中，即可见到北东向和北西向两组断裂的构造影像，它们都表现为两种色彩的分界线。

四、镶嵌图像与断裂带全貌的整体分析

上述讨论的仅是某一断裂、某一地段的图像处理与信息提取，其实卫星遥感还有另一优势，就是从宏观上、整体上来识别断裂带的全貌。但是，一条 200 公里以上的断裂带，往往需要相邻的几幅图像进行镶嵌拼接，长度超过 1500 公里的断裂带(如阿尔金山断裂带)则需要近

30 幅图像进行镶嵌拼接，这样才能更好地研究断裂带的整体特征，对比研究各断裂带的特征，对比分析同一断裂带中不同地段的差异。镶嵌拼接卫星图像有两种方法：一种是光学的、手工镶嵌拼接，这在七、八十年代应用得比较多；另一种是应用计算机进行数字化镶嵌拼接，这在九十年代已得到普遍的推广和进入实用阶段。

对中国主要活动断裂带的卫星图像进行镶嵌拼接的结果，不仅直观地展现了这些断裂带的影像全貌，而且可以从中了解各断裂带的结构和活动的基本状态^[4]。例如：阿尔金山断裂带的镶嵌图像（图片 3），清晰地展示了它主要由三条断裂呈斜接式组成，另有一系列平行分支断裂、入字型分支断裂与其伴生，主干断裂影像非常醒目，线性延续十分完好，但在上更新统-全新统覆盖地段断裂影像比较隐晦。新构造时期主干断裂活动强烈，巍峨壮观的构造地貌形态、断陷盆地、断裂谷与断裂边缘的洪积扇影像历历在目，水系与山体扭动变形的影像清晰可辨。这些错动形迹，反映了主干断裂以左旋走滑为主兼具倾滑错动，并且依据活动特点可分为四个地段，其中断裂带西部分为东、西两个活动地段，断裂带中部和东部分别各属于另两个活动地段。

台湾岛的镶嵌图像表明，岛上主要为三条断裂带所盘据，即阿里山断裂带、玉山断裂带和台东纵谷断裂带，它们的主干断裂均呈现出醒目的线性影像，控制着山脉的走向或河谷的发育，塑造了巍峨壮观的构造地貌，兼具左旋平移错动的活动形迹；东、西两条断裂带活动强烈，中间的玉山断裂带的活动相形见绌。东断裂带由南澳-大武断裂和花莲-台东断裂组成，卫星图像上，两断裂之间为一浅色调带，这是第四纪时呈不对称断陷的裂谷带。花莲-台东断裂呈斜列式展布，断层崖陡峻挺拔，该断裂错断上第三系，控制晚第三纪中性、超基性岩浆的侵入。1900 年以来，台东纵谷断裂带及其边缘共发生 9 次 $M \geq 7$ 级强震。西断裂带在卫星图像上可见到几条断裂呈近于平行或斜接式展布，它们与第三纪褶皱轴平行或斜交，控制着阿里山山脉的褶皱断隆，造成阿里山山脉西坡的叠瓦式断陷。该断裂带北段控制着延绵近 100 公里断层崖的发育和安山岩岩浆的喷发；中段横跨断裂的河流扭动变形显著，并显示了断裂兼具左旋平移错动；南段强烈的垂直差异错动控制着全新统的堆积和两盘强烈的地貌反差。1900 年以来，该断裂带共发生十多次 $M \geq 6$ 级强震。玉山断裂带以宜兰断裂为主干，控制着宜兰浊水溪河谷的发育和玉山山脉的断块隆起，断裂谷两侧的羽状水系和支脉的影像典型，并显示了主干断裂兼具左旋平移错动性质，在雾社以南，中亚带分为两支，并与西亚带相互交切。

总之，卫星镶嵌图像对于鸟瞰断裂带的全貌，分析和对比它们的总体活动特征与差异性，具有很显著的优越性。

第二章 活动断裂的线性影像及其制约因素

活动断裂一般都具有特殊的电磁效应，呈线性延伸，并与其两侧的地质体、地貌体的电磁场表现出一定差异，因此当其电磁辐射录入于卫星遥感时，在图像中，往往以独特的线性影像展现出来，成为地质工作者认识和分析活动断裂的依据。

一、活动断裂的线性影像特征

断裂是一种线形地质体，其所反射的电磁信息明显地呈现线性特征，因此录入于遥感图像中的断裂一般都可辩认出线性影像，而且断裂的线性影像愈明显，断裂的活动也愈显著，因为断裂的强烈活动——特别是第四纪时的强烈活动，常常造成断裂的电磁辐射与其两侧地质体电磁辐射的显著差异^[8]。活动断裂的线性影像大致可从线性的纹理、色调特征和线形的几何形态特征等方面给予识别，但不同区域、不同背景、不同断裂往往具有较大的差异。综观中国境内的断裂影像信息，可以初步将其分为下列四种线性形式：

1. 纹线

线体细小，刻纹不明显，线性影像色调与两侧差异不大，线形多数较平直，延伸较短，普遍在 10~30 公里之内。刻纹较深者，常伴有弱阴影而使纹线显得较为清晰，且延伸比较长。在中国境内，遥感图像上所见到的纹线，一般都出现在新生代时期地壳相对稳定的地区。在湘、闽、浙、赣相邻区域内和东北的长白山地区，北东向、北西向的纹线屡见不鲜，其中北西向纹线比较隐晦，北东向纹线比较清晰且较长。福建永泰地区的北东向纹线密集展布，刻蚀深，阴影明显，似乎将岩体切割得支离破碎，而北西向纹线较稀疏，刻蚀浅，犹如刻痕一般横切于北东向纹线，并将北东向纹线错断。在湘、黔、桂的边境地域，纹线的分布相当广泛，并像刀砍状一样切割地表，而且常有两组不同方向的纹线相互穿插，形成网络状。总的来说，纹线所表征的断裂在第四纪时的活动并不明显，虽然有的沿线阴影明显，但可能这是流水沿断裂破碎带侵蚀所致，因为断裂两侧的构造地貌差异并不大，尚不足以说明断裂的显著活动。

2. 色线

线体较粗，线性影像明显，色调与两侧差异较大，常呈一明亮的、白色的或阴暗的、深色的色调线，延伸比较长远，线性长可达百公里以上。在隆起区色线一般呈深切割影像，阴影明显，沿线构造地貌形态清晰可见。西藏东部的嘉黎-康萨断裂线性影像瞩目，长达 450 公里，控制着易贡藏布和帕隆藏布河谷的发育，断裂谷深切达 2000 米左右，断层三角面排列整齐且陡峭，以致形成了一条阴影显著的深色线。云南的红河断裂以醒目的色线斜穿于该省南部，长约 500 公里，并继续延伸进入越南境内，该色线比较明亮，色调较浅，有些地段（戛洒-元阳）呈浅灰色、灰白色，有些地段（南涧-戛洒）沿线发育了良好的断层三角面，但仍呈现出明亮的色线，从而与嘉黎-康萨断裂的色线形成了鲜明的对照。

在沉降区和大型的断陷盆地中，色线比较少见，即使有所见，一般只出现在两种色调灰阶

之间，且色线的深浅各地表现不一。位于华北平原南部的北西向永城-宿县断裂，西北地区的近东西向疏勒河断裂、渭河断裂等，它们都隐伏于第四系之下，长 100~600 公里不等，在卫星图像上均呈浅色线，并成为两侧不同色调、灰阶的分界线。新疆罗布泊东部有两条北东向断裂，即科什兰孜断裂和库木库都克断裂，它们均掩没于沙漠之下，但卫星图像上则展现出瞩目的深色线，并呈斜列式展布。新疆哈密盆地中，隐伏于第四系洪积物之下的近东西向柳树泉断裂，卫星图像上虽呈浅色线，但线性不连续，而是时隐时现断续延伸 100 多公里，从而成为另一种色线表现形式。

在隆起区与沉降区或者隆起区与断陷盆地的转折边界，往往有活动断裂控制着两者的分野，因此卫星图像上常常呈现出瞩目的色线，一般为浅色线或深色线，而色线的粗细与瞩目程度，似乎与断裂活动所引起的两盘反差强度，以及沿断裂破裂带的含水量有一定联系。在山西断陷带中，有一系列斜式展布的断裂，分别控制着大同、太原、临汾等断陷盆地的发育，其中位于盆地西缘的断裂在卫星图像中多呈浅色线，并鲜明地成为断陷盆地与断隆山地的分界线。内蒙古大青山南麓断裂在卫星图像上为一瞩目的浅色线，该色线自土默特左旗往西逐渐变细，明朗程度也逐渐降低，色线北侧强烈断隆形成海拔 2000 米以上的中山地形，南侧强烈断陷并堆积着 250~1000 米的第四系，色线边缘全新世洪积扇形态影像鲜明。甘肃敦煌-安西断裂在卫星图像上以瞩目的深色线呈北东向展布，色线边缘还有较浅的晕染色调带，显示了沿带的地下水比较富集且埋藏较浅。

总之，色线一般反映断裂具有较明显的活动，而且色线愈瞩目，电磁效应愈强，其所反映的断裂活动也愈显著，尤其在断隆区与断陷区或断陷盆地之间的色线，往往表明断裂具有较强烈的活动。

3. 色带

卫星图像上常可见到一种带状展布的色调带或灰阶带，与其两侧的色彩、灰阶呈现一定的差异，带宽宽达数公里至 20 公里，长数十至数百公里。色带两侧边缘一般为活动断裂的展布位置，但也有少数色带只在其一侧展布着活动断裂。从构造型式来看，色带一般反映了地堑型、半地堑型断陷，少数反映了地垒型断隆。西藏当雄地堑在卫星图像上呈一浅色带，宽 10 公里左右，长 150 公里，边缘断裂的强烈活动造成当雄地堑盆地与两侧高山的反差超过 2000 米。新疆塔什库尔干盆地呈半地堑型断陷，卫星图像上也呈浅色带，宽 6~24 公里，长 160 公里，第四纪时西侧断裂的垂直错距超过 1000 米，成为帕米尔高原中一条醒目的影像带^[4]。发育于塔里盆地中的车尔臣河断裂带，第四纪时呈地堑型断陷，卫星图像上呈一深色调带，宽 20~30 公里，断续延伸长达 800 公里，成为浩瀚沙漠中的相对富水带（图片 2）。山东境内的沂沭断裂带，为五条大致平行的北北东向断裂组成，其中西部两条断裂之间和东部三条断裂之间都断陷成为地堑，而两堑之间则断隆成为地垒，它们在卫星图像上两地堑呈深色带，地垒呈浅色带，从而构成两深夹一浅的构造影像色带图式（图片 4）。

色带是应用遥感信息研究活动断裂的重要特征之一。色带因其呈现宽阔的带状展布，不仅易于识别，而且其所判读、分析的色带边缘活动断裂的可信度也较高。另一方面，色带与两侧的色彩、灰阶的反差愈大，它与两侧地质体电磁效应的差异也愈大，其所反映的断裂活动也愈显著。

4. 色界线

卫星图像上，两种色彩、两种灰阶级别差异较大的接触面，有时并不存在着色线，而是表现为色彩、灰阶的分界线。这种接触线的影像，常常是隐伏活动断裂的信息显示。色界线的延伸一般为数十公里，长者达一百多公里，主要出现在第四纪沉积区和沉积盆地中，在隆起区也有所表现。河北宁晋-隆尧一带和江苏阜宁一带，广泛为全新统所覆盖，它们在假彩色合成图像、黑白图像和处理图像中，都有清晰的色界线呈现出来，宁晋-隆尧一带可见到北东向和北西向两种色界线，阜宁一带仅见北西向的色界线。内蒙古阿拉善左旗西部为全新统沙漠所覆盖，但图像上仍可见到一条呈北西向展布的色界线，两侧色调或灰阶差异明显，东北侧色彩较深，湖泊、水系较发育，地下水位较浅；西南侧色彩较浅，新月形沙丘发育，地下水位较深，两者的界面恰好与北西向断裂的展布位置相吻合。

在黄土高原，活动断裂两侧除了呈现一定的地貌反差之外，色界面往往成为识别断裂存在与否的另一项重要影像标志，如毛毛山-西华山断裂带、六盘山断裂带等，在卫星图像上都展现出醒目的色界面，两侧的色彩、灰阶差异悬殊，从而增加了活动断裂存在的可信度。在隆起区与相对断陷区之间，如郯庐断裂南段的桐城-黄梅一带、东秦岭（河南境内）的朱阳关-夏馆断裂等，两侧色彩、灰阶的反差及其色界面，与色线一样可作为断裂活动的信息效应。

在上新世-第四纪玄武岩覆盖区，色界面往往也是活动断裂的影像信息。内蒙古阿巴嘎旗和巴音郭勒等地分布着大面积的上新世-早更新世玄武岩，在卫星图像上可见到北东向和北西向两组色界面，有的还控制着火山锥、火山口的定向排列，显示了这两地存在着北东向和北西向两组活动断裂，并控制着岩浆喷发，但色界面两侧的地貌形态差异比较小。海南岛北部广泛覆盖的玄武岩可分为上新世-早更新世、晚更新世和全新世三期，各期在卫星图像上的色彩、灰度差异较大，两期之间的色界面清晰可辨，但多呈不规则形状，其间只有与活动断裂展布位置吻合者，才呈现较为平直的色界线。事实上，海南岛北部有一系列北东向、北西向断裂，它们在卫星图像上表现为弱色界面，并穿插于不同时期的玄武岩之中，但两侧的色彩、灰阶和地貌形态都差异较小。

在近岸浅海区域内，色界线则是判读、分析活动断裂的重要标志。在南黄海，卫星图像上有一系列北东向的色界线，与物探推测的北东向断裂位置基本吻合。珠江口的北东向万山群岛断裂，控制着水下沙洲的线状展布，卫星图像上，水下沙洲呈浅色调，沙洲内侧（靠近海岸一侧）水深反而加大，呈深色调，两者之间为一明显、平直的色界线，似乎反映了断裂活动所塑造的断层陡坎。在琼州海峡中也有明显的北东向、北西向的色界线展布，但靠近岸边一侧色调较浅，而呈深色调的深水槽位于海峡之中部。

总体来说，色界面的梯度愈大，两侧色彩、灰阶的反差强烈愈大，其所显示的断裂活动也愈激烈。

二、制约活动断裂线性影像的因素

活动断裂的线性影像及其清晰程度，除了取决于自身的属性之外，还受区域地质、自然环境的影响与制约，包括岩石强度与应力作用、地质历史与构造变动、第四系沉积物、地热、地下水、地表水、植被、冰雪、空气湿度、云层等因素。

1. 岩石强度与应力作用

火成岩、变质岩与沉积岩等三大类岩石的矿物成分、结构、组分和物理、化学性质不同，其所形成的电、磁、热效应的差异也很大；各类岩石的强度、应力作用方式与环境不同，破裂状况的差异也很大。岩石的强度分为抗压强度、抗拉强度和抗剪强度。表 2—1 列举了一些岩石的强度数据^[10]，这是岩石抵抗应力作用而不破裂的极限强度，超过这些数据岩石便会破裂。从表中可以看出，不同岩石的轴向抗压强度最大差距达 20 倍，轴向抗拉强度最大差距 7.5 倍，抗剪强度最大差距超过 8 倍，显然在同一区域的统一应力场作用下，不同岩石同一方向的破裂状况往往有较大的差异，因此，录入于遥感图像中并展现出来的线性构造的密集程度和规模也有很大的差异。表 2—1 还说明，同一岩石的抗压强度远比抗拉强度、抗剪强度高，其数量级之比普遍在 5~10 倍以上，即是说在同一应力环境作用下，岩石的拉张破裂与剪切破裂较为普遍，挤压破裂较为少见，从而显示出岩石强度对线性构造发育的影响。

表 2—1 一些岩石的破裂强度对比表（据谷德振，1979）

岩石名称	轴向抗压强度 (千克/厘米 ²)	轴向抗拉强度 (千克/厘米 ²)	抗 剪 强 度	
			(千克/厘米 ²)	内摩擦角度
花岗岩	1000~2500	70~250	140~500	45°~60°
长英岩	2000~3500	150~350	250~600	55°~60°
玄武岩	1500~3000	100~300	200~600	50°~55°
砂岩	200~1700	40~250	80~400	35°~50°
页岩	100~1000	20~100	30~300	15°~30°
石灰岩	300~2500	150~250	100~500	35°~50°
石英岩	1500~3000	100~300	200~600	50°~60°
大理岩	1000~2500	70~200	150~300	35°~50°

2. 地质历史与构造变动

一般来说，地质历史比较古老、经历多期构造变动作用的岩层，断裂、裂隙都比较发育；地质历史比较短、遭受构造变动比较弱的岩层，断裂、裂隙却比较少见。大别山地区主要为下元古界变质岩系组成，卫星图像上可见到许多断裂线性影像，它们纵横交错，密集成群，两条平行断裂的间距往往只有数公里至十几公里。在湘、鄂、川、黔交界地区，地表广泛出露古生界-中生界的沉积岩系，主要遭受印支运动和燕山运动的作用，岩层塑性变形比较显著，因此卫星图像上只见到褶皱密集，断裂比较稀少，且多属于与褶皱伴生的走向断裂，其它方向的断裂极其少见。但是，也有个别地区例外，例如台湾虽然主要出露下第三系，但在强烈构造运动作用下，下第三系发生变质，北北东向断裂极其发育，并有一系列近东西向断裂与其交切，以致形成了羽状构造形式，它们均醒目地反映在卫星图像中。

3. 第四纪沉积物

第四纪沉积物对活动断裂的影像信息影响最为显著。中国第四系的覆盖极其普遍，沉降区与盆地广泛堆积了数十米至数百米厚，山地丘陵地区也常堆积了数米至数十米厚，而黄土高原覆盖的第四系厚度普遍超过 100 米^[11]。如此厚度和广泛覆盖的第四系，常常影响了断裂影像信息的显露，因为电磁波传播至地表时，其穿透深度与媒质的吸收性质和波长有关，波长愈长，吸收系数愈小，穿透深度就愈大。但是可见光和红外光对地物的穿透深度却很小，而微波对干沙的穿透深度则可达几十米^[1]。显然，以电磁波感应成像的遥感图片，对于掩埋在第四纪松散沉积物之下的隐伏断裂，其影像信息一般都比较隐晦，甚至见不到任何形迹，因此在第四系覆盖区域难以见到断裂的线性影像。虽然有些隐伏断裂显露出较明显的线性影像，这是因为它们埋藏较浅（即第四系覆盖较薄），或因断裂活动造成两侧第四系厚度差异较大，或通过图像处理、信息提取而获得。

4. 地热

断裂往往是地热逸出的通道，特别是那些切割较深的张性、张扭性活动断裂，地热的逸出几乎是常年不断。地热通过断裂逸出地表主要有三种形式：①以气体方式通过裂隙孔道漫逸或喷出地表；②以热液水——温泉的方式沿断裂裂隙自流或喷溢出地表；③以热传导的方式沿断裂构造岩传递、散射至地表。不管哪一种方式，地热沿着断裂带的逸出现象在遥感图像中，特别在远红外图像中都是增强断裂影像信息的重要因素，因为远红外图像对直接出露地表的地热体一般都反映得很清楚。据研究^[1] 地热流大于 $83.7 \text{ 焦耳} \cdot \text{米}^{-2}$ 时，不论白天或夜间的远红外图像上都有显示；地热流为 $10 \sim 83.7 \text{ 焦耳} \cdot \text{米}^{-2}$ 时，可在夜间的远红外图像上发现。在热红外遥感图像中，地热异常区的影像特征与其周围地区的差异显著；在可见光遥感图像中，水温 $20^\circ \sim 40^\circ$ 以上的温泉影像特征，一般比其周围的背景色调深一些。西藏当雄-羊八井断裂和云南盈江-腾冲断裂的边缘，温泉水温普遍在 60°C 以上，高者达 100 左右，为我国境内最高的温热带区之一，它们在遥感图像中呈现较深的色调，并显著增强了断裂的影像信息。

5. 地下水

存在于地表土层和岩石空隙中的地下水，如果其埋藏深度较浅，在遥感图像中通常都有较明显的信息显示。展布于基岩裸露区域的断裂，如果其破裂带为一地下水富水带，往往加深了断裂影像色调，使断裂的线性更为醒目。云南的普洱-思茅一带，有一组发育于古生界-中生界的北北西向断裂，尽管它们时而切割山嘴，时而错断山脊，但在遥感图像中仍然以醒目线性影像展现出来，这除了其自身具有较强的活动性之外，似乎还与该组断裂的构造岩富含裂隙水相关。

断裂两侧第四系中潜水层的差异，对断裂线性影像的显露程度影响最为显著，而承压水由于埋藏较深，在遥感图像上往往难以见到明显的信息。一般而言，潜水富集和埋藏浅的地区，影像色调、灰阶较深，反之则较浅。隐伏于第四系之下的活动断裂，第四纪时期的活动一般都没有切错第四系，但可造成断裂两侧第四系厚度、沉积相、砾态砾组（粒态粒组）和地下水的差异，而断裂两侧潜水的富集程度和埋藏深浅的差异，在遥感图像中则反映为色调、灰阶深浅的差异，因此可以通过这些现象辨认断裂的影像信息。在干旱的沙漠地区和黄土高原，地下水贫乏且埋藏较深，一般难以根据地下潜水层的变异来分辨隐伏断裂的影像信息；在中国东部的平原区域

和盆地中，断裂两侧地下潜水层的变异，往往在遥感图像中呈现出其影像信息，因此可作为确认隐伏断裂的重要依据之一。

6. 地表水

这里统称的地表水，包括河流、湖泊、海洋等水体。地表水的覆盖对断裂影像信息具有重要的影响，虽然电磁波对水体具有一定穿透能力，但不同波段穿透能力有所不同，并反映出不同深度层次的水体特性。据研究^[1]，在清澈透明的水体中，0.4~0.5微米波段（紫、蓝光波段）被水的吸收系数最小，穿透深度最大，通常可穿透到水面下20米，而0.7~0.8微米波段（红光、近红外波段）对水体的穿透深度则小于1米。但是，在天然水体中一般都含有较多溶解物、悬浮物（主要是泥沙）、浮游生物和污染物，它们对电磁波产生较强的反射、散射和吸收作用，因此常常削弱了电磁波对水体的穿透深度。事物的另一方面，科学家们通过图像处理、信息提取和激光探测，目前已可获得水深50米内的影像信息。在中国陆地上，地表水体（河流、湖泊）大多比较浑浊，除个别地点外，一般难以从遥感图像上辨别水下的断裂影像，但在近岸海域中，包括渤海、黄海、东海、台湾海峡和南海北部，一般在紫蓝光波段的遥感图像中可见到水深20米内的活动断裂影像，而经过技术处理，则可提取水深小于50米的活动断裂影像信息。显然，遥感技术已为研究中国近岸浅海区的活动构造开辟了新的途径，并呈现出广阔的前景。

7. 植被

植被对电磁波有其特殊的反射波谱，它与岩石、土壤、水体等的反射波谱不同。在近红外波段，植被的平均光谱反射率显著高于土壤或水体；在可见光波段，植被的平均光谱反射率通常比风干土低，但略高于水体或与其相近^[1]。即是说，近红外波段对植被具有较强的穿透能力，因此对于显露地表而掩覆于植被之下的断裂形迹，在近红外遥感图像中仍然可能获得较好的影像信息，但在可见光波段植被的覆盖对断裂信息的获取却影响很大。在中国东部（包括南北构造带）的山地、丘陵地区，植被覆盖一般比较好，在可见光波段的遥感图像中，断裂的线性影像往往显得比较隐晦，有时还难以辨认；但在中国的西北地区，基岩裸露的山地植被覆盖率相形见绌，因此在可见光波段的遥感图像中，断裂一般都具有较明显的线性影像信息。

8. 冰雪

冰与雪是地面上反射率最大的物体。新积雪在可见光波段的反射率可达95%，它们在遥感图像上常呈白色、灰白色或亮色调，因此掩埋于冰雪下的断裂，除少数沿线有一系列温泉出露之外，一般在可见光波段的遥感图像上难以发现断裂的形迹。我国的冰雪覆盖面积很广，尤其在隆冬季节，冰雪的覆盖常常严重地影响了断裂形迹的显露。据报导^[1]，我国现代冰川占据的总面积约5.7万平方公里，主要分布在喜马拉雅山北坡、昆仑山、天山中西部、念青唐古拉山、喀喇昆仑山、唐古拉山以及祁连山和横断山脉的一些高峰区，在这些区域内顺冰川流向往往难以见到断裂的影像信息，横冰川流向断裂的线性影像则常表现为时断时续。在我国的东北地区，尤其是大兴安岭、长白山等地，冬季积雪覆盖厚度普遍达数十厘米，遥感图像中往往呈现漠蒙一片，地质构造成像质量较差，即使进行图像处理，也难以提取良好的断裂影像信息，但在夏季冰雪融化之时，地面的反射率较低，地物成像质量较好，断裂的影像信息一般都显得比较清晰。

9. 空气湿度

空气中的水汽对电磁波具有一定的干扰，包括对一部分电磁波的吸收和反射，因此空气湿度的差异，可导致不同波段遥感成像的差异。空气中的湿度随时间、空间的变化而剧烈变化，通常对流层下部的湿度最大，平流层的湿度极其微小；从纬度地带的差异来看，热带的湿度最大，极地的湿度最小，两地的水汽含量差距可达 30 倍以上^[12]。我国的空气湿度除了纬度地带的差异之外，还与经度、大陆度和区域自然地理条件的变化密切相关。绝对湿度以南海诸岛最大，西沙群岛的年平均值达 28.4 毫巴；沙漠干旱地区最小，柴达木盆地茫崖的绝对湿度年平均值只有 2.2 毫巴。相对湿度以横断山脉及其以东的山地和台湾山脉最大，大娄山脉主峰金佛山的年平均值达 90%；西北沙漠地区的相对湿度最小，青海冷湖镇的年平均值只有 30%^[12]。区域性的湿度差异导致如下的成像效果：在中国的西南和东南地区，因空气湿度比较大，青、蓝、紫波段的遥感图像显得比较混沌，地貌形态比较模糊，断裂形迹常常分辨不清，只有在红、橙、黄波段的遥感图像中，各种地貌类型才清晰展现在目，断裂影像也获得较好的效果；在中国西北干旱地区，各波段的可见光遥感图像，一般都可获得清晰的断裂影像信息。

10. 云层

云层既具有吸收、发射或反射电磁辐射的特性，又具有分布范围广、面积大的特点。有的云层宽度和长度达数百和一千多公里（如高层云），覆盖面积达数十万平方公里。云层一般覆盖在地表之上近千米至 10 公里的空间，因此常常遮蔽或者削弱地面的影像信息，致使在云层覆盖区几乎见不到断裂的影像信息。但是，云层是一种动态的影响因素，在同一区域不同时间段的云层变化很大，而且在短期内云层即可消失或移动到他方，因此利用不多时相的卫星图像进行叠加，即可消除云层覆盖的影响，判读出地表的构造形迹。

第三章 活动断裂的影像标志

一条初具规模的活动断裂，可以切错上第三系-第四系，或者控制晚第三纪-第四纪的沉积及其相应时代的岩浆喷发，或者沿断裂形成各种构造地貌形态和控制着两侧的地貌差异、扭动变形与水系的同步转折，因此，它们的活动状态，在卫星图像上可以通过形态特征信息和色调信息进行判定^[8]。

一、活动断裂的垂直错动标志

活动断裂的垂直差异错动，在卫星图像中可以根据影像信息特征、形态特征进行对比分析，其标志主要如下：

1. 地层标志

断裂所切错的地层不一定都反映断裂的新活动。一般来说，分析断裂在新构造运动时期的活动，应看其是否切错上第三系-第四系。在沉降地区，包括巨型沉积盆地，由于第四系特别是全新统的广泛覆盖，断裂普遍隐伏在沉积物之下，地表难以找到断裂的踪迹，但是在卫星图像上往往可以鉴别断裂两侧的色彩、灰阶是否有所差异，从而进一步分析断裂两盘的垂直差异错动状况。北西向的河南永城-安徽宿县断裂在第五波段的陆地卫星图像上，两盘的色调灰阶差异较大，东北盘的灰阶级别低、色调浅，第四系厚度较小，地下水贫乏或者埋藏较深；西南盘的灰阶级别高、色调深，第四系厚度较大，地下水富集或者埋藏较浅。该断裂两盘对比表明，在第四纪时它呈现明显的垂直差异错动，其中西南盘的下降幅度比较大。江苏盐城的北西向隐伏活动断裂，虽然它的垂直差异错动在卫星图像上也表现为两盘的色调差异，但它却控制着两种不同沉积相。该断裂东北侧为全新统海相沉积物，主要成分为粉砂、细砂土，含盐分较高，色调较浅；断裂西南侧为全新统河湖相沉积物，主要成分为泥质软土，色调较深。内蒙古的北西向托克托断裂，虽然两侧均为全新统河流相与牛轭湖相沉积，但两盘的影像特征对比表明，东北盘下降较强烈，卫星图像呈灰黑色夹灰白色斑块状，牛轭湖呈黑色条纹穿插其间，地下水埋藏浅，地表普遍沼泽化；西南盘下降较弱，卫星图像呈灰色花斑，牛轭湖多被淤积而呈灰白色条纹穿插其间（个别牛轭湖仍呈黑色条纹），地下水埋藏较深。

断裂的垂直差异错动如果表现为一盘上升，一盘下降，则上升盘基岩裸露，下降盘控制上第三系-第四系沉积，从而反映了断裂在晚第三纪-第四纪的新活动。陕西华山北麓断裂的垂直差异错动强烈，北盘断陷显著，堆积了数百米厚的第四系冲-洪积物，南盘大幅度隆起成为中山，断裂则成为第四系与基岩的重要分界线，两侧对照鲜明，影像色调反差很大（图片 5）。山西中条山北麓断裂的强烈垂直差异错动，不仅控制着西北盘数百米厚的第四系堆积，而且沿断裂边缘发育了一些湖泊和形成了一条沼泽化带。断裂垂直差异错动控制着下降盘的上第三系-第四系沉积，是活动断裂的一种普遍现象，在全国许多地方均可见到，且在卫星图像上也比较容易判读。

2. 地貌类型的对比

各种地貌类型都是新生代以来内、外营力联合作用的结果^[13]，因此利用地貌类型对比法，往往可以在卫星图像上分析断裂垂直差异错动的状况。例如，在隆起地区，断裂的垂直差异错动造成了一盘上升幅度比较大，另一盘上升幅度比较小，从而导致了断裂两侧发育成为两种不同的地貌类型。湖北公路断裂在新构造运动时期具有明显的垂直差异错动，断裂北侧分别发育着剥蚀丘陵或低山，谷地宽阔，卫星图像呈条纹斑状；南侧上升比较强，以致隆起成为侵蚀构造中山，山脊线明显，河流切割较深，山坡与谷坡陡峻，卫星图像上阴影明显。湖南长平断裂的垂直差异错动，不仅造成两侧的不同地层发育了两种不同地貌类型，而且在其西北盘的长寿街附近，虽与东南盘一样均出露着元古界，但西北盘上升较弱形成了剥蚀丘陵，东南盘上升较强形成了侵蚀构造中山。

3. 冲-洪积扇的线状排列

强烈的垂直差异错动，往往造成断裂两盘形成了两种对照鲜明、地形反差大的地貌类型，其中激烈抬升的一盘隆起成为山地，激烈下降的一盘发育了一系列冲-洪积扇，它们沿断裂呈整齐的线状排列。内蒙古大青山南麓断裂南、北两盘垂直差异错动显著，北盘断隆形成中山，南盘断陷堆积着较厚的第四系，并在山前发育了一系列冲-洪积扇，彼此并列展布，形成了一排整齐的扇形地，它们的顶端明显受活动断裂所控制。在卫星照片上，大青山山前的扇形影像清晰（图片 6），形态完整，地势低平，富含地下水，以致各个扇形形态呈深色调。

一般来说，洪积扇或者冲-洪积扇的顶部为粗大砾石夹碎屑物所组成，地下水位低，地表比较干燥，卫星影像呈浅色调，而扇形地的前缘则为细小的碎屑物所组成，地下水位高，土质湿度大，卫星影像呈深色调。但是不同时代的洪积扇或冲-洪积扇，除了地下水等因素影响它们在卫星图像上的色调差异之外，还因它们的地貌部位、组成岩性等不同而呈现不同的色调灰阶，因此在卫星图像上可以粗略地判读出不同时期的洪积扇，而山前地带活动断裂所控制的几期洪积扇，则间接地反映了断裂的垂直差异错动具有时强时弱的变化过程。阿尔金山断裂带某些地段（如阿卡腾能山北麓）的垂直差异错动，便控制着晚更新世与全新世两期洪积扇的发育，前者的影像色调较浅，后者的影像色调较深，并且超覆在晚更新世洪积扇的前缘，反映了断裂在晚更新世时经历了一次强烈的垂直差异错动，而后处于相对稳定，全新世时再次发生激烈的错动和发育了新的洪积扇。早更新世时新疆博罗霍坦山南麓断裂的激烈错动控制着山前洪积物的堆积，中更新世时断裂垂直差异错动不明显，两盘均表现为上升，下更新统洪积物遭受剥蚀，但晚更新世-全新世时该断裂再次发生明显的垂直差异错动，发育了新的洪积扇，并与下更新统洪积物呈内叠接触。总之，同一条活动断裂所控制发育的几期洪积扇或冲-洪积扇，可以作为断裂垂直差异错动经历了几次激烈错动和相对稳定的变化过程。

4. 断层崖和断层三角面

断裂的垂直差异错动若有一盘表现为强烈上升，则沿断裂往往形成了陡峭挺拔的断层崖，或者发育了一系列整齐排列的断层三角面，因此断层崖与断层三角面的出现便成为断裂垂直差异错动的重要标志^[3]。在卫星图像上，断层崖与断层三角面的形态典型，影像特征易于鉴别。

倘若活动断裂垂直差异错动的幅度较大，则断裂两侧的地形反差强度大，地貌差异显著，断层崖发育良好。沿断裂的断层崖影像色调深暗，阴影明显，并呈一定的线形延伸，长达数公里

至数十公里。有些断裂的断层崖断续展布，延伸达 100 公里以上。一般来说，在坚硬岩层地区，断层崖发育良好，而软弱岩层地区则发育较差或者不发育。陕西钟家沟-堰口断裂的断层崖，有明显的阶梯状现象，在卫星图像上可以将其分为四级，每级断层崖反映了断裂的一次激烈垂直差异错动，而断层崖下的倾斜台阶则反映了断裂处于相对稳定阶段，因此阶梯状断层崖的出现便反映了断裂的多次活动。

断层三角面的发育比断层崖更为普遍，无论是活动强烈或者活动较弱的断裂，无论是断裂切错坚硬岩层或者软弱岩层，均可见到断层三角面的发育。断层三角面的形态一般呈三角形，个别呈梯形，它们沿断裂呈线状排列。三角面的规模大小、高度和坡度，在不同断裂往往具有很大的差异，对我国数十条活动断裂进行对比结果可以看出，这三者除了受岩性、地层产状、流水侵蚀与剥蚀等因素的影响之外，还与断裂的垂直差异错动的速度与强度密切相关。一般而言，三角面的规模大且高峻陡峭者，反映了断层的活动比较强烈，反之则比较微弱。有的活动断裂控制着山脉的走向，并将其羽状支脉的山嘴切错，形成了整齐排列的三角面。有些规模较大的断层三角面，往往套着一些小三角面，并依其高度可以分为若干层，每一层三角面的发育反映了断裂的急速错动过程，而三角面的顶端连接面则表明断裂处于相对稳定阶段，因此几层高度不同的断层三角面的出现，反映了断裂的垂直差异错动具有强弱的变化过程。

5. 断陷盆地与湖泊

断陷盆地与断陷湖泊的发育，都是断裂活动的佐证。一般而言，当活动断裂控制着盆地与湖泊的边缘，并在另一侧呈现隆起时，则反映了断裂的垂直差异错动。我国许多巨型盆地边缘的活动断裂，均属于此种类型。在四川、云南境内的南北向构造带中，一些断裂的强烈垂直差异错动，常常造成一盘强烈隆起形成高山、中山，另一盘相对断陷形成盆地或湖泊，但它们的规模都比较小，而且常沿着断裂呈串珠状展布。在我国东南地区，许多白垩-第三纪盆地在新构造时期表现为回升，并在盆地中形成了剥蚀地形，但断裂两侧的地貌形态和卫星影像对比表明，断裂仍具一定的垂直差异错动，并常造成其所控制的断陷盆地发生掀斜。陕西汉中盆地北缘断裂的垂直差异错动，造成了盆地向南掀斜，东西流向横穿盆地的汉水向南岸摆动，掀斜量向盆地南缘增强。四川盐源盆地的掀斜情况却与此不同，掀斜量向断裂边缘增强，断陷中心位于断裂边缘，它与汉中盆地对比，反映了其边缘断裂的垂直差异错动幅度比汉中盆地北缘断裂大一些。这两种情况，在卫星图像上均有良好的影像信息，可以进行鉴别和对比。

6. 谷地形态与水系形式

活动断裂两侧的垂直差异错动，可造成谷地形态与水系形式的变化，但在沉降地区，由于断裂两侧都表现为下降，它的垂直差异错动一般没有引起谷地形态与水系形式的显著变化。在隆起与沉降的转折地带和在隆起区内，断裂两侧的垂直差异错动则常造成谷地形态与水系形式发生变化，它们在卫星图像上标志明显，易于鉴别^[3]。

在垂直差异错动幅度比较大的断块隆起区边缘，当河流穿过活动断裂时，纵剖面比降大，并常形成多级裂点，裂点上游，河谷随着上升盘的隆起，成为高悬在断块山上之悬谷。倘若河流穿过活动断裂时裂点不发育，则可形成深切的“V”形谷或槽形谷。倘若活动断裂的另一盘表现为急剧沉降，则河床到了下降盘时便突然展宽，甚至成为游荡河。陕西韩城断裂强烈的垂直差异错动，造成黄河河床从上升盘的 500 米宽，至下降盘（距断裂 1 公里处）突然展宽到 4 公里，为上升盘河床宽度的 8 倍，两者影像对照鲜明。

断裂的垂直差异错动，还常造成断裂谷的发育。台湾台东纵谷断裂带强烈垂直差异错动所形成的断裂谷，堆积着近千米厚的上第三系-第四系，而且断裂谷两坡不对称，东陡西缓。青海库赛湖-玛沁断裂所发育的断裂谷，形态清晰，影像典型，在高山地形中形成了一个相对深陷的谷地，谷地中堆积着较厚的第四系。发育于活动断裂两侧的顺向谷，如果谷坡不对称，也可分析其垂直差异错动状况，例如四川茶坪山的北东向龙门山断裂带，顺向谷明显向东南岸摆动，显示了西北侧断隆幅度大于东南侧。

垂直差异错动显著的活动断裂两侧，常常呈现不同的水系形式，而且活动断裂即为两种水系形式的转折点。在上升盘，水系形式一般呈深切的树枝状水系或格子状水系；在相对下降盘，一般形成了浅切割的树枝状水系、平行状水系、羽状水系或扇形状水系。相对下降盘，如果具有掀斜运动性质，一般形成平行状水系；如果属于槽形断陷盆地，则多形成羽状水系。青海库赛湖-玛沁断裂形成的断裂谷，由于谷地南侧上升幅度较大，河流向北奔流汇入断裂谷，然后汇集分成几束，再穿过断裂北盘继续向北奔流，形成了帚状水系（图 3—1）。阿尔金山断裂东端，强烈上升盘所发育的树枝状水系，穿过活动断裂后突然撒开呈扇形状水系。活动断裂两侧的水系在卫星图像上，影像清晰，形式典型，易于判读，因此它们成为研究断裂垂直差异错动的重要标志。

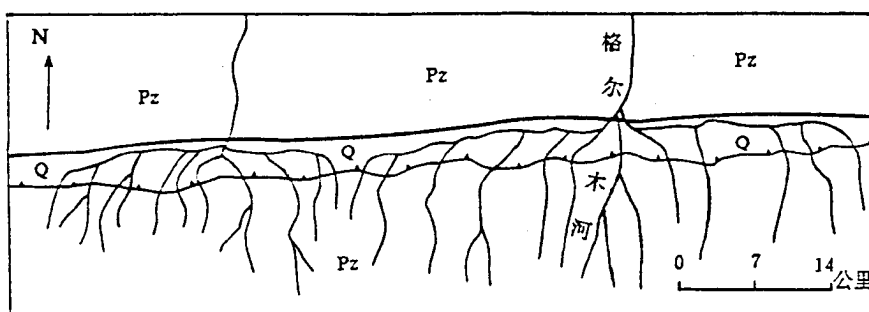


图 3—1 青海库赛湖-玛沁断裂谷与帚状水系

二、活动断裂的水平错动标志

水平错动显著的活动断裂，不仅线形平直，而且图像上可见到地层和地貌形态的扭动。

1. 新地层的牵引变形或位错

断裂活动可以引起两盘新地层的牵引、拖曳、变形、褶皱与错断。我国西北地区有不少断裂错断上第三系-下更新统，有的甚至错断中更新统，并且引起地层的牵引变形或位错，它们在卫星图像上线性醒目，两盘平移的对应点标志清晰，易于判读。新疆北北西向的普昌断裂，不仅错断一系列晚第三纪-早第四纪褶皱，而且引起两盘地层的牵引弯曲与拖曳现象，反映了断裂呈左旋扭动（图片 7）。

2. 山脊等的扭动变形

现代地貌形态一般都是新生代发育成形的，因此当活动断裂具有较大的水平错距时，往往将山脊、山嘴、条带状剥夷面等错开，并发生扭动变形。内蒙古雅布赖山被一条北东东向断裂错成两截，南北两截山体发生显著的右旋位错。广西北西向湖润-太平断裂的左旋平移错动，则将山脊线扭动呈平缓的“S”形。在祁连山脉中段，北西向的走廊南山断裂切错了一系列羽状支脉，并明显地呈左旋平移、错开（图片 8）。

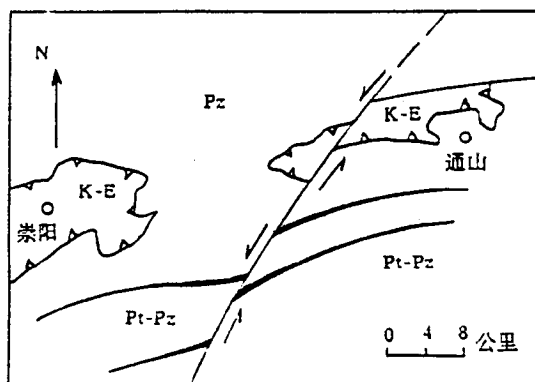


图 3—2 湖北塘口断裂的左旋平错与白垩-早第三纪盆地的位错

3. 盆地与湖泊的扭动变形

受活动断裂控制的盆地与湖泊，当断裂两盘发生显著的平移错动时，它们的形态往往发生扭动变形。北东向达拉布特断裂（新疆）和北北东向塘口断裂（湖北）的左旋扭动，使其所控制的盆地呈现平行四边形，盆地与断裂交汇的锐角指示另一盘的平移运动方向（图 3—2）^[14]。西藏北北西向达果断裂的左旋错动，把当惹雍错湖拦腰截断，湖岸被错开呈“L”形。

4. 河流的同步转折

穿过活动断裂的河流，当它们发生同步转折时，一般可反映断裂两盘的水平错动^[15]。活动断裂水平错距的大小，左旋与右旋的不同，可以导致河流在平面上呈不同的图形，如弧形、“S”形与反“S”形、“L”形与反“L”形、“Z”字形与反“Z”字形等。弧形的凸出方向一般表征所在盘的平移前进方向。“S”形、反“L”形、反“Z”字形反映断裂的左旋平移性质；反之，则为右旋平移性质。四川龙门山断裂带显著的右旋平移错动，造成许多河流穿过断裂时，都呈同步的“L”形或“Z”字形大转折（图 3—3）。此外，在卫星影像上还可寻找河流变形的对应点和进一步判读断裂活动的平移错距。

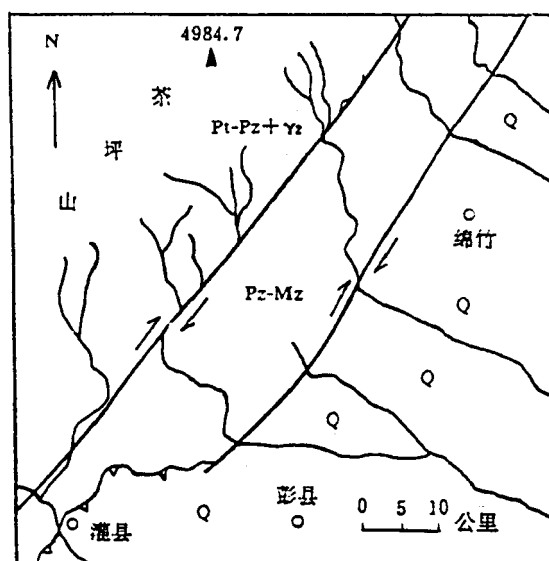


图 3—3 四川龙门山断裂带的右旋平错与水系的扭动