

文章编号: 1001-1986(2007)03-0010-05

高分辨遥感在杭州活断层探测中的应用

张 微¹, 陈汉林¹, 李启敏², 程晓敢¹, 姚 琪¹

(1. 浙江大学地球科学系, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州市地震局, 浙江 杭州 310013)

摘要:详细探查城市及其周边地区的活断层, 对于城市的防震减灾工作具有十分重要的意义。卫星遥感技术可在活断层探测中发挥重要作用。以杭州地区为例, 系统介绍了提取第四纪松散沉积物覆盖区域的隐伏活断层信息流程和方法。结果证明, 在弱活动构造地区, 利用卫星遥感技术进行活断层探测是可行的。

关键词:活断层; 遥感; 第四纪; 弱活动构造

中图分类号: P627; P315.2 **文献标识码:** A

Application of high resolution remote sensing technique to exploration of active fault of Hangzhou and its surroundings

ZHANG Wei¹, CHEN Han-lin¹, LI Qi-min², CHENG Xiao-gan¹, YAO Qi¹

(1. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Seismological Bureau of Hangzhou, Hangzhou 310013, China)

Abstract: It is important to explore the active faults in urban area and its surroundings for the earthquake disaster mitigation. Satellite remote sensing technique can play an important role in active fault exploration. In this paper we take Hangzhou as an example, introduce the treatment of extracting buried active fault information covered by Quaternary unconsolidated sediments. The result shows that it is feasible to explore the active faults in weak active structural area by using satellite remote sensing technique.

Key words: active fault; remote sensing; Quaternary; weak active structure

杭州市地处第四纪松散沉积物覆盖区域, 存在隐伏活断层, 且根据以往地震地质调查和个别地段的浅层人工地震勘探资料分析, 可能存在穿越杭州城区、规模较大的晚更新世断层^[1]。由于人类的频繁活动改变了自然景观, 同时也改变了断层活动的痕迹, 因此常规的野外活断层调查研究方法很难发挥作用。此外, 杭州市及周边地区面积大, 水系发育, 如果整个范围均采用传统的地球物理探测工作不仅花费巨大, 而且周期长。遥感影像能客观、真实、全面地记录地质构造形迹总体和个体的地表几何形态及其物理特征, 信息密度大且连续性好, 具有高度的概括性, 且含有大量的、地下一定深度的隐伏地质构造的信息特征。在遥感影像上不仅能从宏观、动态的角度来研究活断层的发生、发展及时空演化规律, 还可以通过数字图像处理技术实现活断层图像解译与制图的自动化和定量化, 使得以往常规地质方法受限于地形、气候及主观意识等因素的局面得到很大改善, 而且还具有成本小、周期短、无污

染等优点。运用遥感技术研究杭州城市活断层是对常规研究方法的有益补充。

1 区域地质概况

杭州地区位于华南板块与扬子板块结合处, 主体位于扬子板块的范畴。该区经历了从古生代被动大陆边缘到中生代以来活动大陆边缘的活动发展阶段, 以闻家堰为界, 可进一步划分为常山—诸暨隆起带和杭嘉湖断陷带^[2]。区内早期受晋宁构造运动控制, 构造总体呈北东向展布; 在泥盆纪晚期, 萧山—球川断裂与马金—乌镇断裂共同控制着钱塘海盆的沉积; 印支期以来的褶皱和陆缘活动奠定了本区的构造格局, 表层地质构造主要反映了印支运动以来的各种表现形式, 发育了印支期强烈的北东向断裂、褶皱和火山构造, 区内断层在不同的时期均有不同形式地质和地貌的反映, 这些断裂一起控制着杭州地区的沉积作用和岩浆活动, 并决定了其构造格局; 在侏罗纪晚期主要以逆冲推覆运动为主, 表现为较

收稿日期: 2006-12-28

基金项目: 杭州市政府及杭州市地震局“十五”重大项目(HZZFCG-2005-A2)

作者简介: 张 微(1980—), 男, 蒙古族, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士研究生, 从事遥感技术在活动构造方面的研究。

强烈的挤压特点;自早白垩纪以来开始转入拉张期,形成了燕山期断裂和断陷盆地。因此,受不同时期构造运动的影响,杭州地区断层的构造形迹以北东向、北西向和东西向为主体,既具有早期左旋挤压剪切的特点,还具有后期右旋张扭的运动特征。由于区内断层构造具有多期性、继承性等特点,使得地层支离破碎,构造边界趋向复杂化。同时,该地区隐伏断层发育,大部分断层被第四纪松散沉积物所覆盖,这给解译工作带来诸多困难。

2 遥感影像处理流程

2.1 遥感数据源的选取

遥感数据源的选取是提取隐伏活断层信息的一个非常重要的环节。遥感数据的光谱分辨率是首要考虑的问题。在具体选取过程中,可根据所研究对象的大小和内容选取合适的遥感资料^[3]。具体应用中,应针对杭州地区城市活断层的特点,既要考虑地形地貌信息、活动构造信息,又要考虑植被、水系等这些隐伏弱信息。本次选用的 Landsat-7 卫星的 ETM+ 传感器有 8 个波段,其中热红外波段分辨率为 60 m,6 个多光谱波段为 30 m,全色波段为 15 m,空间分辨率和波谱分辨率都较为适合。同时 8 个波段可以进行复杂的代数运算,不仅可用于分析活动断裂的几何结构、构造地貌、活动断裂空间展布、断裂带交接关系等宏观特征,还可用于分析与活动断裂运动特性有关的含水异常信息、隐伏信息等弱异常信息。Radarsat-1 雷达卫星采用主动微波遥感方式,具有全天候、全天时的工作能力,能够穿透云、雾、雨、雪等;同时对地物具有一定的穿透能力,获取光学遥感以外的信息,起到验证和补充作用。

2.2 遥感影像处理

在对遥感影像中的活断层信息进行解译和分析之前,需对图像进行针对性的运算和处理,掌握图像的有效特征,获取高质量影像和提取尽可能多的相关信息^[4]。

断层活动本身可以形成明显的地貌现象,如水系断错、断层崖、沟谷等,在遥感影像上一般以线性体的形式出现,可以通过反差增强、空间域滤波等图像增强处理手段来突出相关信息;活断层是构造应力作用的产物,断层运动使得断层两侧出现挤压和拉张现象,挤压区为隆起的较高地形,拉张区为富含水的较低地形,能通过纹理分析突出隐含环状的隆起部分,通过线性拉伸方法使富含水的较低地形突出出来;不同波段反映的地物信息不同,如 TM4 对于鉴别植被含水量和土壤含水性效果明显, TM3 是

地层边界、地质体识别最有利的光谱区,因此通过对两个波段进行代数相减,可以使得岩体的边界信息得到增强;断层活动往往使得地下深处的挥发气体、微量元素离子等在地表的异常聚集,影响植被的生长,从而引起地物波谱的异常反映,这些弱异常信息也可以提取出来;根据地貌、微地貌表现的形态特征反映出基岩地区断裂的形迹,同时在第四纪覆盖的平原区,可以通过松散沉积的岩性、结构、厚度、含水性能差异及像片上表现的色调、色彩明暗特征,反映出隐伏活断层的形迹^[5]。区域水系和线性构造与断层活动密切相关,可以根据水系和线性构造的密度等特征来分析断层的位置。

2.3 隐伏活断层弱异常信息提取

隐伏活断层弱异常信息在遥感影像上多表现为光谱异常信息,它与断层活动密切相关。断层活动可使某些物质在地表异常聚集,影响植被的生长,从而引起地物波谱的异常反映。没有经过人工改造的区域水系,受地层、古构造、现代构造运动影响后,会造成地表水体或含水区域的异常分布,如水系位错、水系分散、水系汇聚等,因而在水系的密度、方位等特征上留下痕迹。另外,地层、岩体、松散沉积物、串珠状水体或盆、洼地呈线性延伸或解除,对判译第四纪隐伏断裂的效果很好。弱异常信息的判断通常需要有较丰富的图像处理和图像解释经验,要利用图像处理方法,尽可能将弱异常信息分离出来,从而便于地震地质人员分析和解释^[6]。

要准确地识别这些解译标志,还需要对遥感影像弱异常信息进行提取和增强处理,主要方法如下:

a. 光谱信息增强 如彩色合成、线性拉伸、遥感信息融合、主成份分析等。通常,地物都具有较为稳定的色彩,但断层及附近区域往往会出现淡色调,可通过分段线性拉伸,调整、放大目标地物的波谱区间,突出地物细微的波谱差异;

b. 空间域处理 如边缘增强、霍夫曼变换和滤波等。边缘增强可以突出地物的边缘信息,包括地物的边界、地质线性构造和环状构造。高通滤波能突出地表局部的细微信息。低通滤波能突出较大区域的综合信息;

c. 分形几何学处理 如基于分形几何的影像纹理分析、多重分形分析等^[4];

d. 比值处理 不同波段既有相关的地物特性,又有不相关的地物特性,通过比值方法可以突出那些不相关的地物,从而达到弱异常信息提取的目的;

e. 小波变换 它在图像处理中用处很大,既

可以分析宏观图像特征,又可分析图像细节,在隐伏断层异常信息提取中可发挥重要作用^[7]。

2.4 断裂解译标志

杭州市及周边地区活动断裂,主要属于第四纪晚更新世以来复活的继承性活动断裂,可进一步分为两种类型:山地裸露区活动断层和第四纪覆盖区隐伏活动断层^[8]。杭州地区活动断裂卫星遥感影像具有如下特征:

- a. 清晰连续的线状遥感影像;
- b. 山脊线的错动或位移;
- c. 截然不同的地貌、地层分界线,或具有一定规模的线性色调异常带;
- d. 错断的河流或冲积扇的定向排列;
- e. 特殊水系类型,如河道受断裂控制呈直线、折线急湾,水系拐点连线呈线性排列,以及局部明显的蛇曲段,通常,这种现象为新构造隆起的一种典型标志;
- f. 分布在新生代盆地内的断裂,主要表现为:
 - (a)断裂两侧的地貌、地层截然不同;
 - (b)水系河流具有明显的线性图形;
 - (c)通过色调和几何特征反映出的异常色调、色线;
- g. 断续切穿不同地貌,规模较小的线性影像。

3 断裂构造遥感综合解译示例

通过系统的遥感信息提取和野外查证,确定杭州地区主要发育有北东向的萧山—球川断裂(F_1)和马金—乌镇断裂(F_2)、NW 向的孝丰—三门湾断裂(F_3)和前村—瓜沥断裂(F_5)和近 EW 向的昌化—普陀断裂(F_4)3 组。

萧山—球川断裂(F_1)由一组宽约 5~7 km 平行的北东向断裂组成,在杭州地区长约 42 km,且大部分隐伏于杭嘉湖平原之下。在卫星遥感影像上可以看出清晰的宽谷和陡崖(图 1a),以及断裂带两侧明显不同的色调和影纹特征,表明断裂未受到较长时间的侵蚀切割,同时断裂除了发生垂直升降运动外还存在强烈的侧向挤压作用,使得钱塘江水系发生明显的弯曲,在富春江水水库附近该处断裂控制了第四纪洪积扇群的发育(图 1b),并于扇后缘发育断层崖和断裂三角面,说明断裂可能在第四纪以来曾有过一定的活动。此外,在萧山钱江农场的浅层人工地震勘探剖面中可以发现该断裂倾角陡竖,具有典型的断裂破碎带特征,使得下白垩统凝灰岩(K_1)和上白垩统含砾砂岩(K_2)断层接触。钻孔资料显示断裂断错了埋深 75~80 m 的基岩面和上覆的中更新

世(Q_2)地层,直至地表下 45 m 左右的晚更新世上部(Q_3^{2-3})地层^[9]。



(a)



(b)

图 1 萧山—球川断裂遥感影像特征

Fig. 1 Remote sensing images of Xiaoshan—Qiuchuan fault

马金—乌镇断裂(F_2)在杭州地区的西北部穿过,大部分被厚度约 60 m 的第四系松散沉积物所覆盖,仅在麻车头地区有零星露头。该断裂发育在全新统灰色淤泥质粉土质亚粘土、粘土组成的海相地层覆盖的盆地内^[10],在遥感影像上呈现比较清晰连续的线性体,并使得附近的水系发生比较明显的错动和偏转(图 2a),推测可能在第四纪早、中期有一定活动;孝丰—三门湾(F_3)断裂自北西向南东斜贯杭州地区,由一组宽约 3~7 km 的断裂组成。通过遥感影像可以看到断续的陡崖等线性影像,表明断裂受到了较长时间的侵蚀和切割,地表构造形迹明显,多右形扭动。同时断裂使得钱塘江主干河道发生了直角转折,形成反“之”字形,并控制了支流浦阳江河道分布(图 2b),推测断裂最新活动年代为第四纪早、中期。

昌化—普陀断裂横跨杭州市中、南部地区,由多

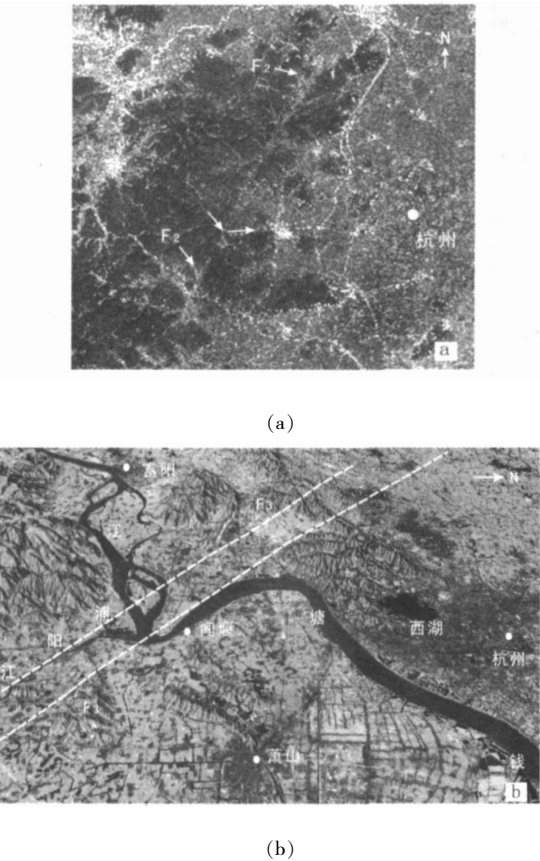


图 2 马金—乌镇断裂和孝丰—三门湾断裂遥感影像特征
Fig. 2 Remote sensing images of Majin—Wuzhen fault and Xiaofeng—Sanmenwan fault

条宽约 20~30 km 的平行断裂组成,地貌上表现为浙北沉降区与浙南山区分界线(图 3)。遥感影像上表现为一组断续的线性体向东延伸。断续的沟谷、陡崖和断层三角面表明,断裂经受了较长时间的切割和剥蚀。断裂使得山体、山谷发生一定程度的错动和扭动,产生较大的位移。断裂运动使得地层发生了抬升,主要表现为地层的重复与缺失、地质体的错开、形成破碎带等。这些特征在遥感影像上主要表现为色调和灰度的差异。据此推测,第四纪早、中期可能有一定活动。

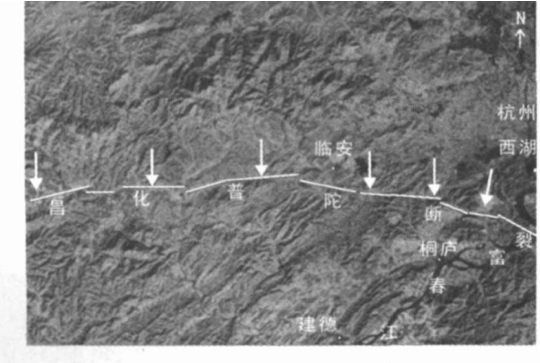


图 3 昌化—普陀断裂空间展布图
Fig. 3 The extension of Changhua—Putuo fault

前村—瓜沥断裂发育于杭州半山前村、萧山赭山和龛山一线,长约 35 km。该断裂大部分被深约 80~120 m 的第四纪沉积物所覆盖,仅在半山和龛山有较清晰的出露(图 4)。通过遥感影像可以看出,断裂使得钱塘江河道发生比较明显的偏转。据此推测,前村—瓜沥断裂可能与孝丰—三门湾断裂一起控制了钱塘江河道的分布与变迁,说明断裂可能在第四纪以来有过活动。经野外实地调查发现,该断裂发育在泥盆纪(D)砂岩中;断裂性质为正断层并具走滑特征;同时,前人研究认为该断裂活动年代可能为晚更新世早期^[11]。

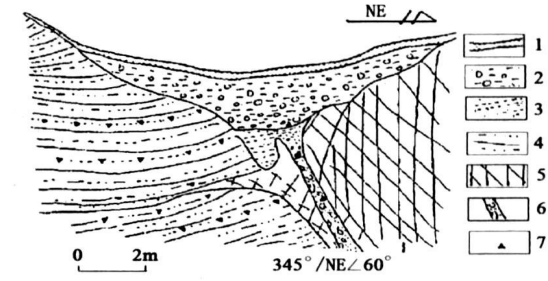


图 4 前村—瓜沥断裂杭州半山采石场剖面
Fig. 4 The profile of Qiancun—Guali fault in Banshan quarry
1—Q₄ 耕植土;2—Q₃ 残坡积层;3—Q₂ 粉砂质粘土;4—D 砂岩;
5—D 挤压破碎带;6—断层破碎带;7—TL 采样点

此外,为了更好地提取和分析活动构造信息,突出地表不同的地物特征以提高地质解译程度,本文将不同分辨率的 ETM+和 Radarsat 遥感影像进行融合(图 5)。这样既发挥了 ETM+多光谱、色彩信息丰富的优点,又吸收了 Radarsat 雷达影像高几何分辨率的优势,以及全天候、全天时、具有一定的穿透能力的特点。同时,为了提高对断裂的解译能力,将卫星遥感影像与数字高程模型(DEM)进行融合,创建三维动态模拟影像(图 6)。这样,可从不同角度、不同视点对所研究的断裂进行观测,使图像更加清晰和逼真,提高了断裂解译的精度和视觉效果,从而提高了对图像的分析能力。在以上工作的基础上,分别对各主要断裂信息进行了分析和提取,编制了杭州及周边地区断裂构造解译图(图 7)。

4 结语

利用遥感技术探测活断层,特别是第四纪松软沉积覆盖的隐伏活断层,可以充分发挥遥感技术数据量大、范围广且可宏观动态监测地表活动信息的优点,有效地弥补了传统活断层探测的技术手段。但遥感技术在活断层探测中的应用也非常局限,只能作为传统探测手段和物化探手段的有效补充。



图 5 遥感影像融合处理

Fig.5 Fusion process of remote sensing images

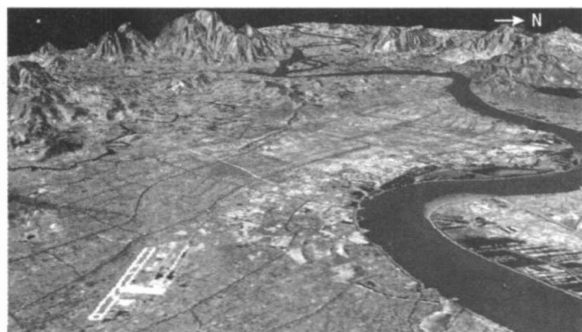


图 6 遥感影像与数字高程模型叠加分析

Fig.6 Superposition analysis of RS images and DEM



图 7 杭州及周边地区断裂构造解译图

Fig.7 Structural interpretation results of Hangzhou and its surroundings

相信随着卫星传感器分辨率的不断提高, 遥感影像处理技术的不断改进, 遥感解译标志的不断丰富, 遥感技术将在城市活断层探测中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 叶建青. 城市活断层研究与浙江省的城市化建设[J]. 上海地质, 2001(4): 31—33.
- [2] 丁伯阳, 叶建青, 孟凡丽, 等. 杭州市周边构造和断层及其对建、构筑物的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2003, 31(3): 319—323.
- [3] 马建文, 赵忠明, 布和敖斯尔. 遥感数据模型与处理方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [4] 章孝灿, 黄智才, 赵元洪. 遥感数字图像处理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [5] 张景发, 陶夏新, 田云锋, 等. 城市周边活断层探测中遥感技术的应用[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 137—145.
- [6] 隋志龙, 李德威, 黄春霞. 断裂构造的遥感研究方法综述[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(3): 34—37.
- [7] 邹谨敞, 邵顺妹. 活动断裂的遥感影像研究[J]. 环境遥感, 1995, 10(3): 182—187.
- [8] 李长江, 王永江, 沈晓华, 等. 浙江省国土资源遥感调查与综合研究[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [9] 赵冬, 叶建青, 马志江, 等. 萧山—球川断裂(富阳—盐官段)活动性研究[M]. 杭州: 浙江省工程地震研究所, 2004.
- [10] 陈修民, 叶建青. 浙北地区地震危险性预测研究[M]. 杭州: 浙江省工程地震研究所, 2000.
- [11] 赵冬, 叶建青, 马志江, 等. 杭州市地铁一号线工程场地地震安全性评价[M]. 杭州: 浙江省工程地震研究所, 2003.