

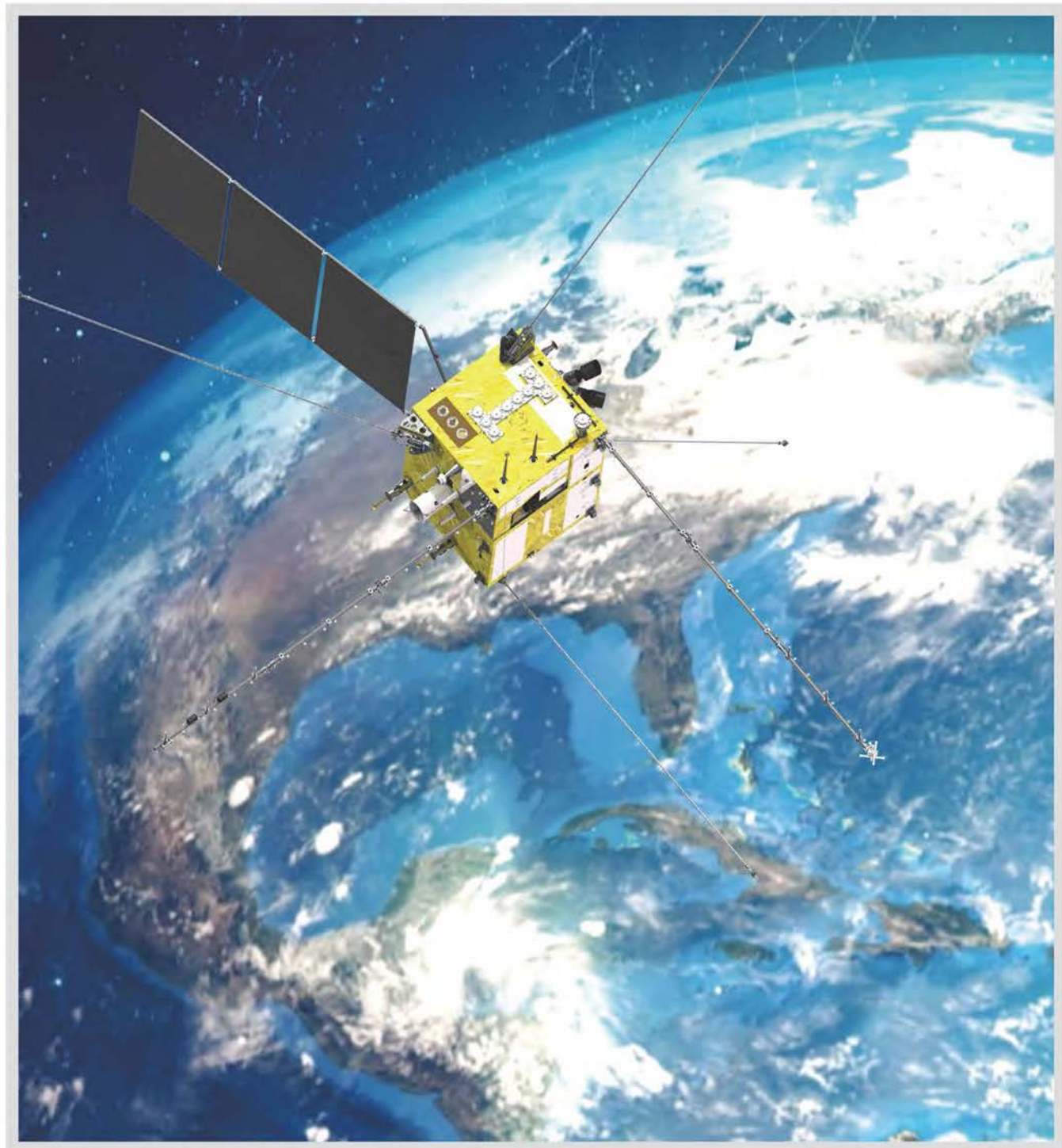
科学出版社
出版
中国地理学会环境遥感分会
中国科学院遥感与数字地球研究所
主办

JOURNAL OF REMOTE SENSING

遥感学报

2018年 Vol.22 第22卷 增刊

ISSN 1007-4619 CN11-3841 / TP CODEN YXAUAB



遥感学报

Yaogan Xuebao

电磁监测试验卫星(张衡一号)地震遥感专刊

第22卷 增刊 2018年

目次

综述

- 中国地震遥感应用研究与地球物理场探测卫星计划 申旭辉, 张学民, 崔静, 周新, 姜文亮, 龚丽霞, 李永生, 刘芹芹 (1)
- 地震地壳形变 InSAR 测量中的关键技术分析 曾琪明, 朱猛, 焦健 (17)

地球物理场探测卫星

- 电磁监测试验卫星(张衡一号)系统设计与关键技术 袁仕耿, 朱兴鸿, 黄建平 (32)
- 电磁监测试验卫星(张衡一号)数据处理方法和流程 王兰炜, 胡哲, 申旭辉, 张兴国, 黄建平, 张宇, 杨艳艳 (39)
- 多地球物理场观测的玉树地震孕育过程分析 张学民, 申旭辉, 刘静, 武艳强, 郑勇 (56)
- 电磁监测试验卫星(张衡一号)高精度磁强计研制与标定 周斌, 程炳钧 (64)
- 星载朗缪尔探针载荷研究与测量 刘超, 关燧炳, 张爱兵, 郑香脂, 孙越强 (74)
- GNSS掩星探测数据的 f_0F_2 和 h_mF_2 全球分布特征 刘祎, 孙睿迪, 周晨, 赵庶凡, 张学民, 申旭辉, 赵正予 (81)
- 激光测距对静态重力场恢复精度的影响分析 朱永超, 万晓云, 于锦海, 梁磊, 张国庆 (93)
- 主喜马拉雅逆冲带的震间与同震重力场变化 周新, 万晓云, 申旭辉 (100)
- 卫星重力加速度计标校方法研究 李瑞锋 (114)

地震 InSAR/SAR 技术

- Sentinel-1 卫星数据提取同震形变场: 最新技术及震例 王腾, 廖明生 (120)
- SAR 图像纹理特征相关变化检测的震害建筑物提取 李强, 张景发, 龚丽霞, 薛腾飞, 蒋洪波 (128)
- 地基 InSAR 评估爆破作业对露天采矿边坡的稳定性影响 刘斌, 葛大庆, 李曼, 张玲, 王艳, 王毅 (139)

综合遥感应用

- 岩石受力红外与微波辐射变化机理及地应力遥感关键问题 吴立新, 毛文飞, 刘善军, 徐忠印, 李志伟, 齐源, 苗则朗 (146)
- 多源遥感图像的 1976 年 Ms7.8 唐山大地震等烈度区判定 张景发, 李强, 张庆云, 田甜, 申文豪, 薛腾飞, 王建飞 (162)
- 昆仑山 Ms8.1 地震前后大气温度垂直分层变化特征研究 马未宇, 康春丽, 刘军, 岳冲, 卢显 (174)
- 2008 年新疆乌恰 M6.7 地震多参量时空变化特征研究 荆凤, 崔月菊, 孙珂, 熊攀 (181)
- 高分辨率遥感技术在活动断层研究中的应用 姜文亮, 张景发, 申旭辉, 焦其松, 田甜, 王鑫 (192)
- 结合纹理特征分析与比辐射率估计的震后滑坡提取 杨明生, 李山山, 冯钟葵 (212)
- 融合航空影像的震后机载 LiDAR 建筑物点云提取 邓飞, 窦爱霞, 王晓青 (224)
- 美国锁眼侦查卫星遥感数据在活动断层研究中的应用——以郯庐断裂带江苏段为例 王鑫, 张景发, 姜文亮, 王德华 (233)

JOURNAL OF REMOTE SENSING

Earthquake remote sensing of geo-electromagnetic satellite (Zhangheng-1) (Vol. 22 Sup 2018)

CONTENTS

Review

- Remote sensing application in earthquake science research and geophysical fields exploration satellite mission in China
..... SHEN Xuhui, ZHANG Xuemin, CUI Jing, ZHOU Xin, JIANG Wenliang, GONG Lixia, LI Yongsheng, LIU Qinqin (16)
- Key technical issues in seismic crustal deformation measurement by InSAR
..... ZENG Qiming, ZHU Meng, JIAO Jian (31)

Geo-Electromagnetic Satellite

- System design and key technology of China Seismo-Electromagnetic satellite
..... YUAN Shigeng, ZHU Xinghong, HUANG Jianping (38)
- Data processing methods and procedures of CSES satellite
..... WANG Lanwei, HU Zhe, SHEN Xuhui, ZHANG Xingguo, HUANG Jianping, ZHANG Yu, YANG Yanyan (55)
- Analysis on the Yushu earthquake preparation process based on multi-geophysical field observations
..... ZHANG Xuemin, SHEN Xuhui, LIU Jing, WU Yanqiang, ZHENG Yong (63)
- Development and calibration of high-precision magnetometer of the China Seismo-Electromagnetic satellite
..... ZHOU Bin, CHENG Bingjun (73)
- Measurement of the spaceborne Langmuir probe
..... LIU Chao, GUAN Yibing, ZHANG Aibing, ZHENG Xiangzhi, SUN Yueqiang (80)
- Global distribution characteristics of f_0F_2 and h_mF_2 based on GNSS occultation data
..... LIU Yi, SUN Ruidi, ZHOU Chen, ZHAO Shufan, ZHANG Xuemin, SHEN Xuhui, ZHAO Zhengyu (92)
- Influence of laser ranging on the accuracy of static gravity field recovery
..... ZHU Yongchao, WAN Xiaoyun, YU Jinhai, LIANG Lei, ZHANG Guoqing (99)
- Coseismic and interseismic gravity field change along the Main Himalaya Thrust
..... ZHOU Xin, WAN Xiaoyun, SHEN Xuhui (113)
- New accelerometer calibration method in satellite gravimetry LI Ruifeng (119)

InSAR/SAR Technology

- Coseismic displacement derived from Sentinel-1 data: Latest techniques and case studies
..... WANG Teng, LIAO Mingsheng (127)
- Extraction of earthquake-collapsed buildings based on correlation change detection of multi-texture features in SAR
images LI Qiang, ZHANG Jingfa, GONG Lixia, XUE Tengfei, JIANG Hongbo (138)
- Using ground-based InSAR to evaluate the stability of an open-pit slope under blasting operation
..... LIU Bin, GE Daqing, LI Man, ZHANG Ling, WANG Yan, WANG Yi (145)

Integrated Remote Sensing Application

- Mechanisms of altering infrared-microwave radiation from stressed rock and key issues on crust stress remote
sensing WU Lixin, MAO Wenfei, LIU Shanjun, XU Zhongyin, LI Zhiwei, QI Yuan, MIAO Zelang (161)
- Intensity zone of the 1976 Ms7.8 Tangshan earthquake based on multi-source remote sensing images
..... ZHANG Jingfa, LI Qiang, ZHANG Qinyun, TIAN Tian, SHEN Wenhao, XUE Tengfei, WANG Jianfei (172)
- Evolution characteristics of multiple stratification air temperature in vertical of Kunlun Mountains Ms8.1 earthquake
..... MA Weiyu, KANG Chunli, LIU Jun, YUE Chong, LU Xian (180)
- Temporal and spatial characteristics of the 2008 Wuqia, Xinjiang M6.7 earthquake multiple parameters
..... JING Feng, CUI Yueju, SUN Ke, XIONG Pan (191)
- Geometric and geomorphic features of active fault structures interpreted from high-resolution remote sensing data
..... JIANG Wenliang, ZHANG Jingfa, SHEN Xuhui, JIAO Qisong, TIAN Tian, WANG Xin (211)
- Post-seismic landslide extraction by combining texture analysis and emissivity estimating
..... YANG Mingsheng, LI Shanshan, FENG Zhongkui (222)
- Fusion of aerial imagery and airborne LiDAR data for post-earthquake building point extraction
..... DENG Fei, DOU Aixia, WANG Xiaoqing (231)
- Application of Keyhole satellite data in active fault study: A case example of Jiangsu segment of Tan-Lu fault zone
..... WANG Xin, ZHANG Jingfa, JIANG Wenliang, WANG Dehua (246)

高分辨率遥感技术在活动断层研究中的应用

姜文亮^{1,2,3}, 张景发^{1,2}, 申旭辉^{1,2}, 焦其松^{1,2}, 田甜^{1,2}, 王鑫^{1,2}

1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085;

2. 中国地震局地壳动力学重点实验室, 北京 100085;

3. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

摘要: 高分辨率遥感技术为活动断层大比例尺调查提供了高效的技术方法, 它可以对活动断层及其控制的构造微地貌进行全面深入的定量研究, 分析断层几何形态、结构特征与构造变形, 进而明确断层运动学特征及力学机制。然而, 遥感技术应用于活动断层与传统遥感地质调查工作区别很大, 前者需要建立不同类型的活动断层遥感解译标志, 目前该方面仍然缺乏系统性的总结与指导, 错误不当的解译标志容易造成对活动断层理解的偏差。为此, 系统地分析了高分辨率遥感在活动断层调查应用中的技术现状, 特别是与传统遥感地质调查之间的区别与联系。在断层形成力学机制分析的基础上, 总结不同断层模式形成的复杂多样的构造微地貌模型及其表现形式, 通过对一些活动断裂带上典型地貌特征遥感影像的分析, 给出了不同活动断层及相关微地貌的高分辨率遥感识别标志及分析方法。通过大量典型的高分辨率遥感影像特征, 建立遥感解译标志、构造微地貌与活动断层之间的关系模型, 并强调利用遥感资料分析活动断层时, 需考虑不同类型断层形成构造地貌的相似性与叠加性, 应根据遥感解译标志对构造地貌模型及其形成的断层力学环境进行综合判定。本文的相关研究可以为中国大陆活动构造探测中遥感技术的应用提供很好的参考。

关键词: 遥感影像, 活动断层, 构造地貌, 解译标志, 定量研究

中图分类号: P65 **文献标志码:** A

引用格式: 姜文亮, 张景发, 申旭辉, 焦其松, 田甜, 王鑫. 2018. 高分辨率遥感技术在活动断层研究中的应用. 遥感学报, 22(增刊): 192-211

Jiang W L, Zhang J F, Shen X H, Jiao Q S, Tian T and Wang X. 2018. Geometric and geomorphic features of active fault structures interpreted from high-resolution remote sensing data. Journal of Remote Sensing, 22(Sup): 192-211 [DOI:10.11834/jrs.20187193]

1 引言

活动构造是指晚更新世以来一直在活动, 未来一定时期内仍会发生活动的各种构造, 如活动断层、活动盆地、活动火山、活动褶皱及被它们围限的地壳块体的变形和运动特征等多种类型的构造活动(邓起东, 1996, 2002; 邓起东等, 2004), 是在地球表面产生变形、对人类社会产生重要影响的构造过程(Keller和Pinter, 2002)。遥感技术的宏观性与直观性等优势, 使得其在活动构造研究中的应用越来越广泛, 为活动构造研究提供

了丰富的量化数据(何宏林, 2011), 成为不可缺少的技术方法。由于地震的发生与活动断层密切相关, 因此在活动构造中, 活动断层对人类社会的影响最为重要。对活动断层开展深入的研究, 确定其在地表的出露位置、分布形态与几何结构, 判断其活动习性与变形方式, 对地震研究工作具有重要的意义。

高分辨率遥感技术为活动断层定量研究提供了快速有效的技术手段(Fu等, 2005a, 2005b; 付碧宏等, 2006; Arrowsmith和Zielke, 2009; Klinger等, 2011)。活动断层通常控制了地形地貌

收稿日期: 2017-06-28; 预印本: 2017-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41772219, 41204004); 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项(编号: ZDJ2017-29); “活动断层探测、遥感调查”地震行业标准

第一作者简介: 姜文亮, 1982年生, 男, 副研究员, 研究方向为活动构造学、卫星地震观测应用。E-mail: jiang_wenliang@163.com

的发展,在地表形成非常直观的断层活动证据,通过对断层所控制的晚第四纪地形地貌的研究,可以认识断层活动性(Zielke等,2012)。如沿断裂带通常发育断层陡坎、断塞塘、拉分盆地等(Wesson等,1975; Arrowsmith和Zielke,2009),或错断冲沟、河流阶地、冲洪积扇等地貌单元,这些地貌单元对研究断层活动性具有很好的指示意义。地形不仅可以指示断层的位置,也可以记录断层位移的方向与位移量(江娃利,2008)。

随着高分辨率遥感技术的发展,可以获取到的卫星影像分辨率已经达到亚米级。近年来无人机摄影测量技术的快速发展,使得影像地面分辨率大大提高,通过无人机立体像对可以获得更高精度的地形数据,其水平及垂向分辨率皆可以达到厘米级(Uysal等,2015; Clapuyt等,2016)。此外,激光探测与测量技术LiDAR(Light Detection and Ranging)在活动断层研究中也在快速发展(刘静等,2013; Meigs,2013; Langridge等,2014; Khajavi等,2014; Jiang等,2017a),为活动断层及构造微地貌精细结构定量研究提供有效的手段。构造地貌的几何学精细解析与构造地貌制图是活动断层研究的重要内容之一(陈桂华等,2006),如准确标绘活断层地表迹线对于活断层地震危险性评价和重大工程的建议活断层避让参数的确定至关重要(徐锡伟等,2002)。据此,可以利用高分辨率影像对活动断层与构造微地貌精细结构进行详细解译,获取断层详细几何结构与展布形态特征,在此基础上结合断层力学性质的分析,厘定活动断层变形模式与力学特征。通过对断层错断冲沟水系的分析,将错断地貌恢复重建为地震变形之前的地貌形态,从而界定活动断层的位移量,并进一步区分单次地震事件位移与多次地震累计位移。而结合高分辨率的遥感影像与数字高程模型DEM(Digital Elevation Model),可以制作高分辨率的3维构造地貌可视化图像,再现构造地貌的3维空间特征,从而既在整体上直观、综合地对活动断层及其构造地貌特征进行可视化分析研究(付碧宏等,2008),又可以从精细结构上研究构造地貌的定量形态与变形参数。

近几年,中国地震局开展了“中国地震重点监视防御区活动断层地震危险性评价”和“中国地震活断层探索”(喜马拉雅计划)项目,进行了地震重点防御区与南北地震带1:5万活动断层填图工作。

相关研究人员充分利用了高分辨率遥感影像资料,开展了详细的地层、地貌与构造单元的遥感解译工作,提高了活动断层野外调查效率与精度,相关应用也推动了遥感技术在活动断层调查中的应用水平与能力。

尽管如此,高分辨率遥感在活动断层调查中的应用依然存在很大的提升空间。这主要体现在两个方面:一是高分辨率遥感技术需要与野外活动断层调查更紧密地相结合,二是遥感技术在活动断层及构造微地貌判别中的应用缺乏系统性的总结。具体来说,无论是在理论上还是在野外实践中,对于断层活动造成的地形地貌的变化或是断层派生的次级构造单元,类型多样、形态复杂,但由于这些构造微地貌要素规模有限,在遥感影像中却不能建立有效的判别标志,因此使得遥感解译工作由于缺少先验知识而不能很好地识别相关微地貌现象,进而影响对活动断层的遥感判读。此外,虽然已有相关研究提到了有关活动断层及构造地貌的遥感特征,并推荐了高分辨率遥感技术调查活动断层的工作流程(张景发等,2016),但是目前尚未有学者对活动断层及构造地貌的遥感解译标志进行全面系统的总结描述,也尚未形成以活动断层遥感调查技术及其应用为核心的系统性的指导与参考体系。由于活动断层遥感识别标志有别于传统的遥感地质调查,有必要对活动断层及构造微地貌的遥感识别标志进行系统性的总结与梳理,以更好地辅助活动断层调查工作。

本文将在整理已有活动断层研究成果的基础上,充分利用高分辨率遥感资料,根据活动断层错断地貌,系统性地整理并介绍不同类型活动断层与构造微地貌的遥感判别标志,并从解译标志的精细结构与几何形态角度出发,深入解析断层与微地貌构造变形特征,进而分析断层活动的力学环境,建立不同类型活动断层及其遥感解译标志之间的关系。

2 利用遥感研究活动断层与传统遥感地质调查的区别与联系

传统的遥感地质调查主要侧重在断层宏观形态特征的识别,或是对断层改造的相关地质地貌体宏观变形特征的遥感判别,如遥感影像线性构造的识别(Gupta,2013),这是由于在遥感技术发

展应用的初期, 影像分辨率有限, 无法达到对构造微地貌精细结构的识别。因此, 在以往的构造地质学遥感研究中, 通常是以线性特征、弧形特征、错断山脊、构造盆地等作为宏观的识别标志, 容易产生两个方面认识的偏差。一是所识别的线性构造、弧形构造有可能是图像中地物地貌表现出来的假象而非地质构造单元, 如线性出露的地层边界、侵蚀切割形成的线性沟谷、植被生长差异产生的线性分界等, 这些要素信息容易被误判为线性构造; 二是对活动断层时代的误判, 如通常所提到的错断山脊、地层重复与缺失、断层破碎带、构造强化等, 这些构造现象很可能是新构造运动甚至是更老的构造运动产物, 而并非是晚第四纪以来断层运动产生的构造现象。遥感影像中的线性影像不等于线性构造, 线性构造也不一定是活动断层, 传统的遥感地质学方法已经不能很好地适用于现今活动断层的遥感调查工作。

活动断层是晚第四纪以来有活动的断层, 对第四纪地形地貌有较强的影响改造作用, 活动断层解译的最基本原则是鉴别是否存在被错断的新地貌体(小冲沟或纹沟等)或地貌面(晚第四纪的阶地面或洪积扇面等)(何宏林, 2011), 这种错断地貌的规模表现不一, 位错量也存在很大差别, 位错量与地震震级、地震事件的次数都有关系, 需要借助高分辨率的卫星影像或航片才能将这种错断地貌现象给予很好地解释。在中低分辨率影像中, 只能宏观的识别出断层迹线, 而对于断层迹线两侧的小型冲沟位错等微地貌现象则无能为力。因此, 如果将线性构造作为活动断层解译的第一步骤, 那么鉴别线性构造两侧是否存在被错断的新地貌体(面)就是活动断层解译的关键(何宏林, 2011)。

因此在对活动断层进行遥感调查时, 需要在理念认识上有所转变, 紧密结合活动断层的特点, 根据不同类型活动断层产生的地形地貌特征的多样性, 利用高分辨率影像的优势, 建立起有别于传统遥感地质调查的活动断层遥感解译方法。

3 断层力学环境与构造地貌模型

为了建立不同类型活动断层、构造地貌与遥感影像特征之间的联系, 需首先建立遥感影像解译标志, 并基于遥感影像解译标志对断层运动方

式及力学性质进行解析, 因此, 需同时掌握不同类型、不同力学性质的活动断层所可能造成的构造地貌类型。为此, 本文首先基于构造地质学理论, 对不同性质断层形成的力学机制进行介绍, 进而结合构造地貌学知识, 阐述不同性质的断层所可能形成的构造地貌模型。

由构造作用、静岩压力、浮力或静水压力作用在岩石表面的每个牵引力可以表示为一个矢量, 该矢量代表了施加于任何特定平面的所有应力的总大小与方向(Burbank 等, 2011)。可以把该总应力分解为3个相互正交的分量 σ_{xx} 、 σ_{yy} 与 σ_{zz} , 其中水平应力 σ_{xx} 、 σ_{yy} 代表总应力沿x和y轴方向的应力分量, 二者位于同一水平面, 垂向应力 σ_{zz} 代表总应力沿z轴方向的应力分量。

3.1 走滑断层与构造地貌模型

对于走滑断层, x方向与y方向的偏应力值的符号相反, 如果 σ_{yy} 为拉张应力, 即 $\Delta\sigma_{yy}<0$, 那么 σ_{xx} 为挤压应力, $\Delta\sigma_{xx}>0$, 因此, 对于走滑断层, $\sigma_{xx}>\sigma_{zz}>\sigma_{yy}$ 或者 $\sigma_{xx}<\sigma_{zz}<\sigma_{yy}$ (Fossen, 2010)。当静岩压力等于中间主应力时候, 将会产生两条共轭垂向断层面来调节断层走滑运动, 夹角为 $45^\circ-\theta/2$ 至最大主压应力方向(图1(c)), θ 为错断介质的内摩擦角。

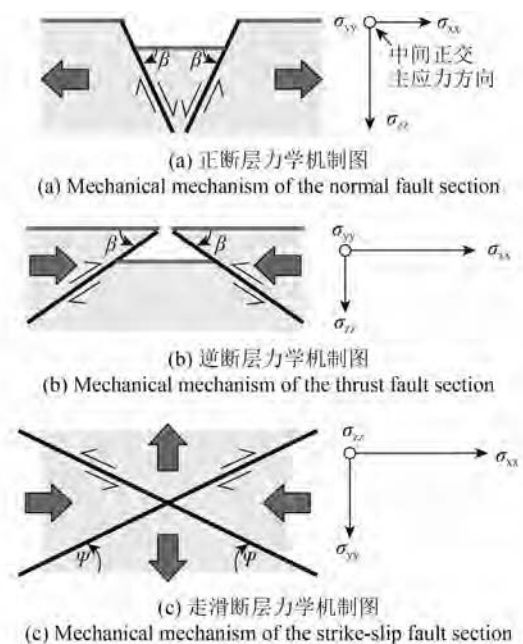


图1 断层与主应力方向示意图(Burbank 等, 2011)
Fig. 1 Fault orientations with respect to principal stress orientations (Burbank et al, 2011)

在实验室与野外皆可以观察到走滑剪切应力场在浅部地壳岩石及冲积层中产生的几何结构(图2)。平行于两个剪切带形成主位移带,垂直于最大伸长率和最大拉张应力方向形成正断层,里德尔剪切面(R)与主断层带的夹角为 $\theta/2$ ($\sim 15^\circ-20^\circ$),剪切面与主位移带的走滑运动方式相似,呈雁行斜列式破裂。随着剪切作用的继续发展,里德尔剪切面的端部逐渐弯曲旋转并与正断层平行,表现为具有少量走滑分量的正断层位移。共轭里德尔剪切面(R')与主断层带夹角 $90^\circ-\theta/2$ ($60^\circ-75^\circ$),与主断层带的走滑运动方式相反。与此同时,在与主压应力垂直的方向会形成褶皱轴或者逆冲断层脊线,褶皱轴最初与主断层带夹角为 45° ,但随着主断层的继续发展,褶皱轴旋转至与逆冲断层面平行的状态。走滑剪切中的这些构造现象代表了不同时期的构造作用,并且会叠加形成非常复杂的宽缓剪切带(Sylvester, 1988)(图2)。

上述结构特征发生在相对平直的走滑断裂带上,通常沿走滑断裂带会产生断层面的弯曲现象,在断层弯曲部位的两个断块之间由于挤压应力或拉张应力形成挤压弯曲或拉张弯曲,挤压弯曲可产生逆冲断层、褶皱(Christie-Blick和Biddle, 1985; Mann, 2007; Burbank等, 2011),并可以发展形成造山带(Biddle和Christie-Blick, 1985)。拉张弯曲则形成伸展构造,产生诸如正断层与拉分盆地的类似构造特征(图3)。

对于走滑断裂产生的地貌特征可以通过单次地震事件或长期的应变积累体现出来。单次地震事件由于位移规模、破裂长度及岩性介质的不同而差异很大。沿主断裂带形成规模仅数米甚至更小的雁行斜列式破裂带、拉张阶步区域的小型断

陷盆地、挤压阶步区域的小型逆冲凸起(Burbank等, 2011)。此外,由于走滑断层通常具有倾滑分量,因此沿断裂带也存在垂向位移,形成断层陡坎。与单次地震事件相比,长时间尺度的走滑断层活动可以形成更加典型的地貌特征。如在断层的任意盘可形成断层陡坎,沿主位移带形成线性沟槽,并在沟槽低洼区域形成断塞塘,断层造成沟谷与山脊错断,使得河流转向,如果错断山脊阻塞了河流则形成闸门脊,并在断层的下坡处形成断头谷,断层运动可以造成河流阶地与冲洪积扇的错断,此外,沿破裂带可存在小型地垒、地堑、拉分盆地、逆冲断裂或者褶皱构造等清晰的地貌现象(图4),通过对这些构造地貌现象的分析并结合剪切应力场,可以对断层的运动方向与力学特征进行解析。

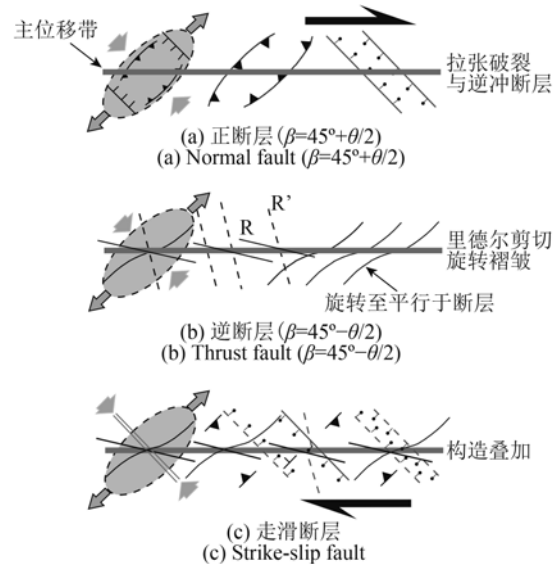


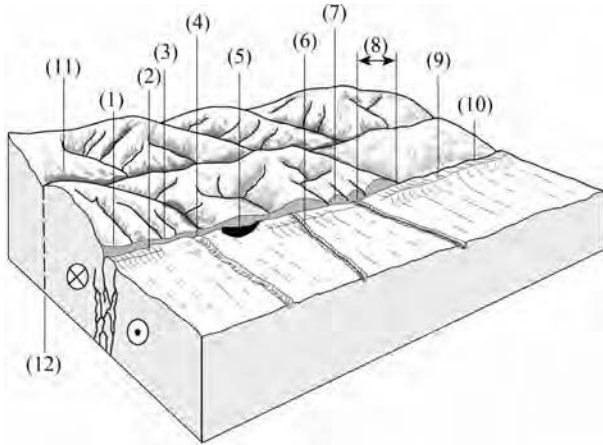
图2 走滑剪切构造特征示意图(Sylvester, 1988)

Fig. 2 Orientation of structural features formed in response to strike-slip shear couple (Sylvester, 1988)



图3 走滑断裂挤压弯曲与拉张弯曲结构示意图(Mann, 2007)

Fig. 3 Structural map of releasing bending and restrained bending along strike-slip fault (Mann, 2007)



(1)断层陡坎(2)台地(3)断层湖泊(4)错断冲沟(5)断塞塘(6)断头河
(7)陡坎(8)错断冲沟(9)门脊(10)线性沟槽(11)线性谷
(12)早期断层迹线

(1) Scarp(2) Bench(3) Spring(4) Offset drainage channel(5) Sag pond(6) Beheaded stream(7) Scarp(8) Offset drainage channel(9) Shutter ridge
(10) Linear valley or trough(11) Linear valley(12) Older fault trace

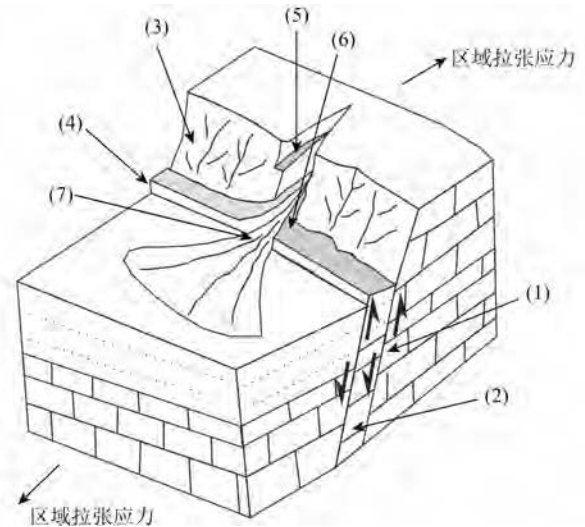
图4 走滑断层构造地貌综合示意图(修改自Burbank和Anderson, 2011)

Fig. 4 Geomorphology of strike-slip fault zones (Modified after Burbank and Anderson, 2011)

3.2 正断层与构造地貌模型

对于正断层而言, 应力垂向分量为静岩压力, 对于即将发生的断层作用, 偏应力 $\Delta\sigma_{xx}$ 必须超过岩石的屈服强度, 同岩石围限值相比, 该偏应力为负值的拉张力($\sigma_{xx}<0$), 因此, 水平应力 σ_{xx} 小于垂向应力 $\Delta\sigma_{zz}$ 。假设y方向不存在应变, 那么y方向的偏应力要么为零要么为拉张力, 与x方向的偏应力成正比关系, $\sigma_{yy}=p\sigma_{xx}$, 其中 $p<1$, 因此y方向的总应力小于z方向的总应力, 得到 $\sigma_{zz}\geq\sigma_{yy}>\sigma_{xx}$ (Burbank和Anderson, 2011)。理论上讲, 断层与主压应力的夹角为 $45^\circ-\theta/2$ (图1(a))。

通常, 正断层与地表呈高角度相交($50^\circ-70^\circ$)。与走滑断层相比, 正断层无论是平面结构特征还是剖面形态结构, 都要简单很多。在横截面中, 正断层上盘的下沉量是下盘上升量的数倍。在正断层作用下, 容易产生地堑/半地堑及地垒构造, 上盘中通常发育同沉积盆地以及同向断层与反向断层, 而下盘作为上升盘更容易遭受侵蚀作用。正断层的这种垂向错断作用, 使得在地表平面上, 表现为断层垂向错断河流阶地与冲洪积扇, 而产生一系列近平行发育的陡坎地貌(图5), 山麓前缘地带则发育充填盆地、地堑、地垒构造地貌。



(1)主断层面(2)次级断层面(3)主断层陡坎(4)次级断层陡坎(5)早期阶地(6)新阶地(7)洪积扇

(1) Main fault plane(2) Secondary fault plane(3) Main fault scarp(4) Secondary fault scarp(5) Older terrace(6) New terrace(7) Pluvial fan

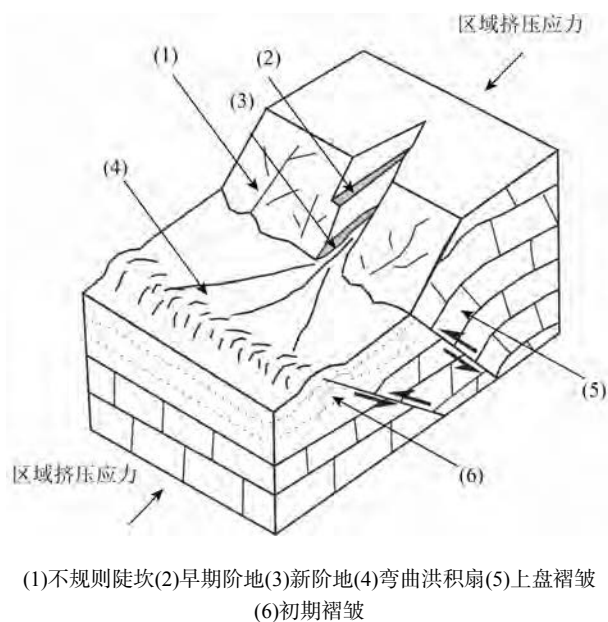
图5 正断层构造地貌示意图

Fig. 5 Tectonic geomorphological model of normal fault

3.3 逆断层与构造地貌模型

对于逆断层, 由于构造作用力的作用, x方向存在挤压偏应力, 因此, $\sigma_{xx}>0$, $\sigma_{xx}>\Delta\sigma_{zz}$ 。由于y方向的偏应力为中间应力, 因此 $\sigma_{xx}>\sigma_{yy}\geq\sigma_{zz}$ 。对于水平方向的最大压应力, 共轭断层面与水平方向及 σ_{xx} 的夹角为 $45^\circ-\theta/2$ (图1(b))(Burbank和Anderson, 2011)。

通常情况下, 逆冲断层与地表呈低角度相交, 但也有呈任意角度的逆冲断层与逆断层错断至地表。由于逆冲断层倾角比较小, 使得逆冲断层地表出露迹线受地形影响很大, 地表出露非常弯曲, 形成的陡坎地貌也多呈不规则形。此外, 由于许多逆冲断层为隐伏断层并未错断至地表, 因此其位移特征比走滑断层与正断层更难详细鉴定, 使得对逆冲断层地表破裂的研究程度较低。逆冲断层的位移量随着靠近逆冲断层的端部而逐渐减小, 因此导致上盘在靠近断层端部时发生褶曲, 随着变形的不断积累将形成上盘背斜(图6)。此外, 在挤压逆冲抬升山地的山前地带, 受山地抬升的侧向力影响, 形成平行于山地延伸的低山丘陵, 通常是由不同类型的背斜构造组成(杨景春和李有利, 2011), 使得山前盆地内的冲洪积扇发生向上弯曲, 形成隆起地貌。



(1)不规则陡坎(2)早期阶地(3)新阶地(4)弯曲洪积扇(5)上盘褶皱
(6)初期褶皱

(1) Unregularly scarp (2) Older terrace (3) New terrace
(4) Bending pluvial fan (5) Hanging fold (6) Original fold

图6 逆冲断层构造地貌示意图

Fig. 6 Tectonic geomorphological model of thrust fault

4 活动断层与构造微地貌遥感特征解析

判断活动断层是否存在可以根据断层错断的地形地貌特征或是对地表地貌的控制改造作用, 错断特征如前面提及的错断冲沟、错断洪积扇等, 对地形地貌的控制如断层控制水体、湖泊或火山口的分布。除对地形地貌的影响作用外, 沿活动断层地表出露迹线还可以形成一系列派生构造要素, 如拉分盆地、断塞塘、雁行斜列式破裂等。可以将断层错断地貌与派生构造要素归为断层直接解译标志, 对于断层间接控制改造的地形地貌现象可以视为间接解译标志。通过直接解译标志, 可以对断层进行精确定位, 较为直观的掌握断层构造变形样式与活动强弱程度, 从而认识断层错断规模。然而对于间接解译标志, 虽然可以用来对断层的分布进行推断, 但由于不能很好地确定断层对第四纪地层的错断情况, 因此对于“活动断层”术语范畴的判定, 需要谨慎对待, 需要寻找更有力断层活动性证据来判定其是否为活动断层。

4.1 活动断层错断地貌特征遥感分析

断层错断第四纪地形地貌是判断其活动性质及强弱的重要依据, 根据断层错断地貌面、错断冲沟等特征, 可以确定断层滑动方向、垂向及水

平方向位移规模。活动断层直接错断地貌的规模与地震强度有关, 通常7级以上的地震产生的地表破裂可以在高分辨率遥感影像上识别, 而7级以下的地震由于造成地表变形较弱, 破裂规模有限, 在卫星遥感影像中难以识别。断层活动强烈地区, 多次强震活动会造成地貌多次错断, 断层累计位移增加。

断层活动使得流经断层的冲沟水系流向发生改变, 对于邻近的同等发育的冲沟水系, 受断层的影响程度相似, 断层长期的蠕动或单次地震时间容易造成冲沟水系的同步弯曲, 而对于强烈活动的断层, 多次地震事件使得冲沟水系多次错断形成叠加累计位移。对于单次地震造成的冲沟水系位错, 可以利用高分辨率遥感影像中的冲沟水系规模与形态特征, 判断断层特征, 并将其恢复到变形前的形态, 从而确定该次地震事件产生的位移量, 如格林错断裂上存在的四条冲沟同步右旋位错, 位移量约14 m(图7)。而对于累计断层位移量, 由于包含数次地震位错信息, 受后期侵蚀堆积作用的影响, 对变形前冲沟状态进行恢复则比较复杂, 如根据富蕴的冲沟变形恢复得到的5次古地震事件(Klinger等, 2011)。而对于经历了不同地震事件的冲沟, 其累计位移会有较大差别。如郟庐断裂带马陵山段, 研究认为全新世以来至少存在4次强震事件(林伟凡和高维明, 1987), 由于郟庐断裂带地处东部平原区, 受城市建设影响地形地貌改变较大, 因此利用历史航片对历史地形地貌进行恢复分析, 可以发现沂沭段王庄附近存在4条冲沟的右旋位错(图8), 累计位错量分别约为45.4 m、44.3 m、42.8 m和46.1 m, 这是由于4条冲沟形成的时代相当, 使得几条冲沟经历的古地震事件次数也相同。康西瓦断裂带遥感影像(图9)上分布的同步左旋弯曲冲沟也反映了断层性质为左旋走滑。

断层错断冲沟的同时, 也造成冲沟及两侧阶地的变形, 如当雄断裂带的1411年8.0级地震, 根据高分辨率遥感影像的分析可以提取断层左行错断冲沟, 并造成阶地左行断错, 最大左行水平位错量约13 m(图10), 与野外调查地震地表破裂位移规模相当(吴章明等, 1990)。冷龙岭断裂带牛头沟段(图11), 3条冲沟存在同步左旋位错, 可以通过LiDAR精确测量3条冲沟的平均累计位移约68 m。断层活动除造成冲沟水系的同步位错, 还容易造成冲沟水系的完全错断, 使得上游冲沟失去下游

或下游冲沟失去上游源头，形成断尾河与断头沟(图12)。除错断冲沟及阶地外，断层错断洪积扇体也是很常见的地貌现象(图13)。当断层错断山脊后，被错断的山脊阻挡了上游冲沟而容易形成闸

门脊现象(图14)。在冰川地貌发育地区，断层活动容易错断侧碛物，形成错断冰川地貌。活动断层长期强烈的正断作用，可以形成清晰的线性断层三角面、断层崖与断层陡坎(图15，图16，图17)。

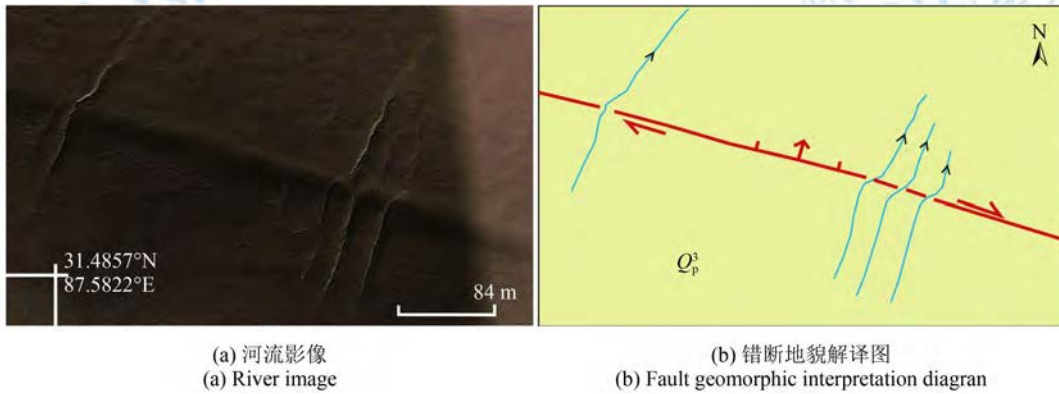


图7 格林错断裂带同步右旋位错河流影像及错断地貌解译图，平均右旋位错量余额约14 m
Fig. 7 Synchronous right lateral offset of the gullies along Gelincuo fault zone, average slip is 14 m

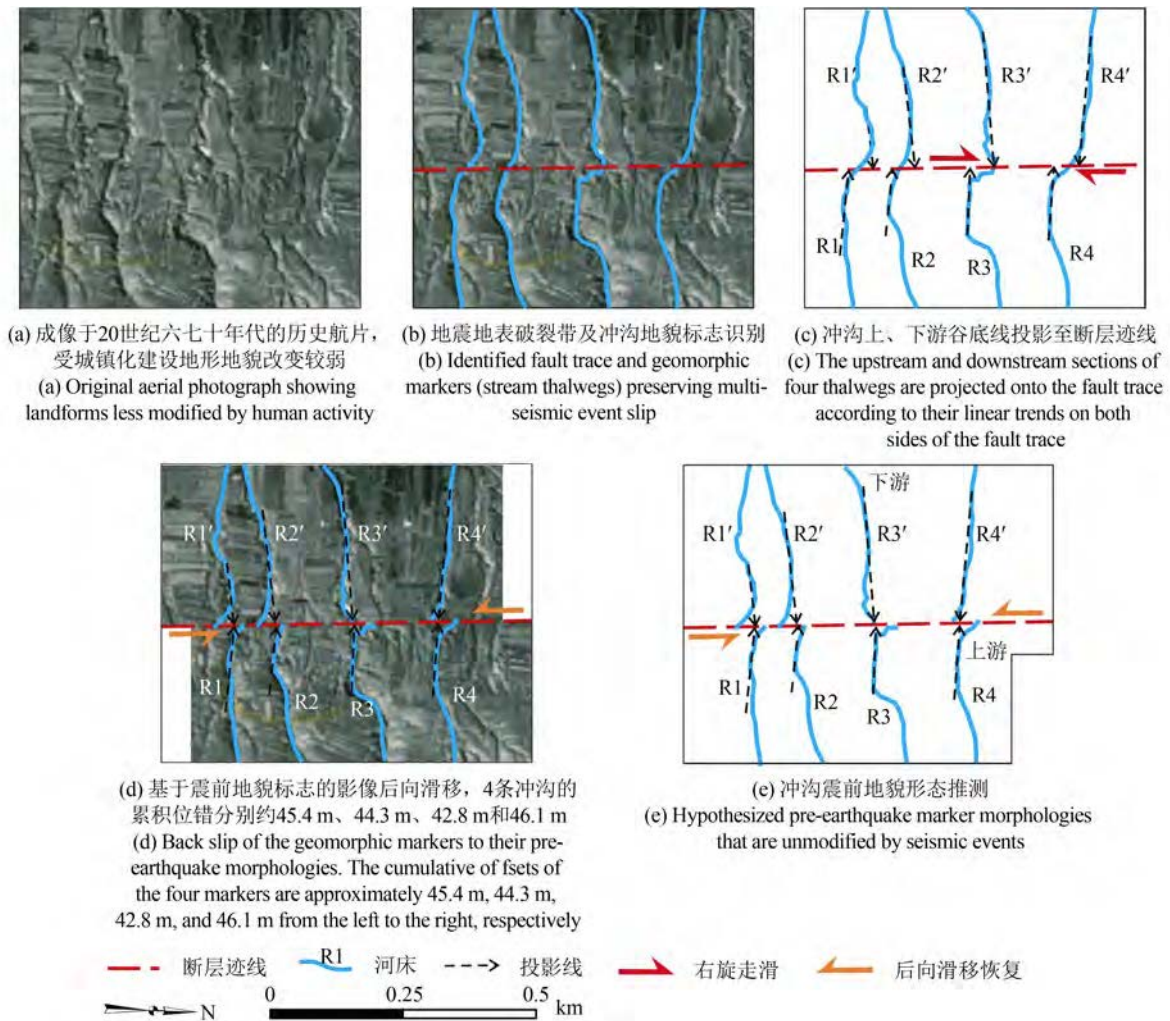


图8 郟庐断裂带王庄段水系同步右旋位错历史航片(Jiang, 2017b)
Fig. 8 Synchronous right lateral offset of the gullies of aerial photograph along Tan-Lu fault zone (Jiang, 2017b)

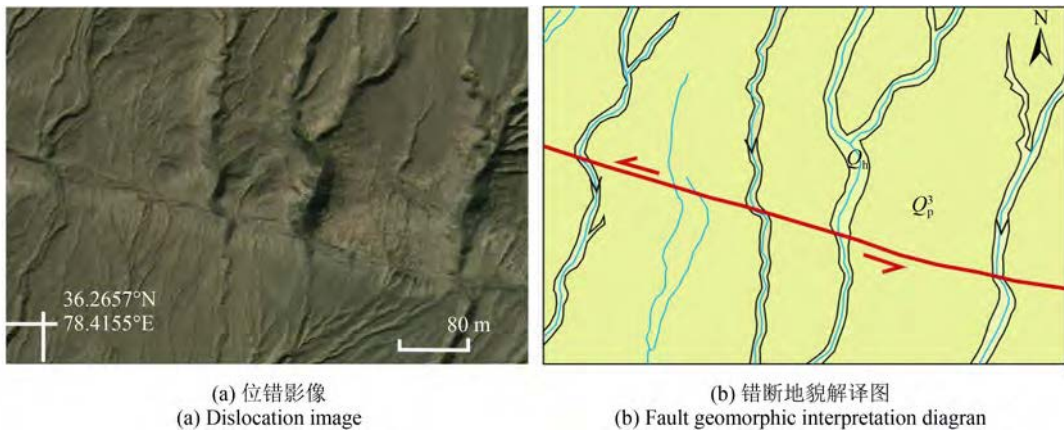


图 9 康西瓦断裂带冲沟同步左旋位错影像及错断地貌解译图
Fig. 9 Synchronous left lateral offset of the gullies along Altyn Tagh fault zone

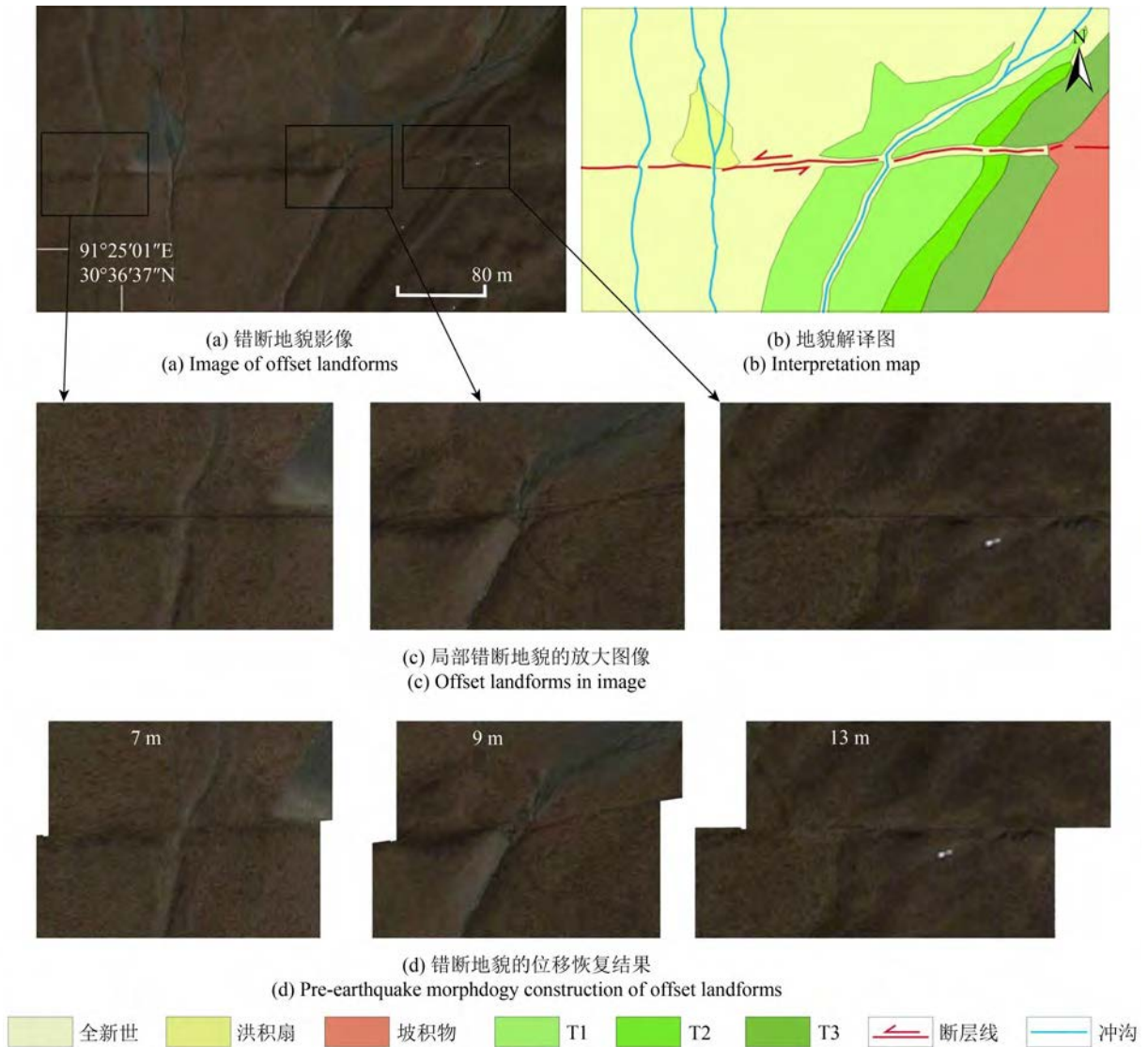


图 10 当雄断裂带左旋剪切错断冲沟及阶地影像，地貌解译图及地震位移恢复图(Jiang 等, 2016)
Fig. 10 Left offset of the terraces and gullies, interpretation map of offset landforms and back slip recovery maps of pre-earthquake morphologies along the Damxung fault (Jiang et al, 2016)

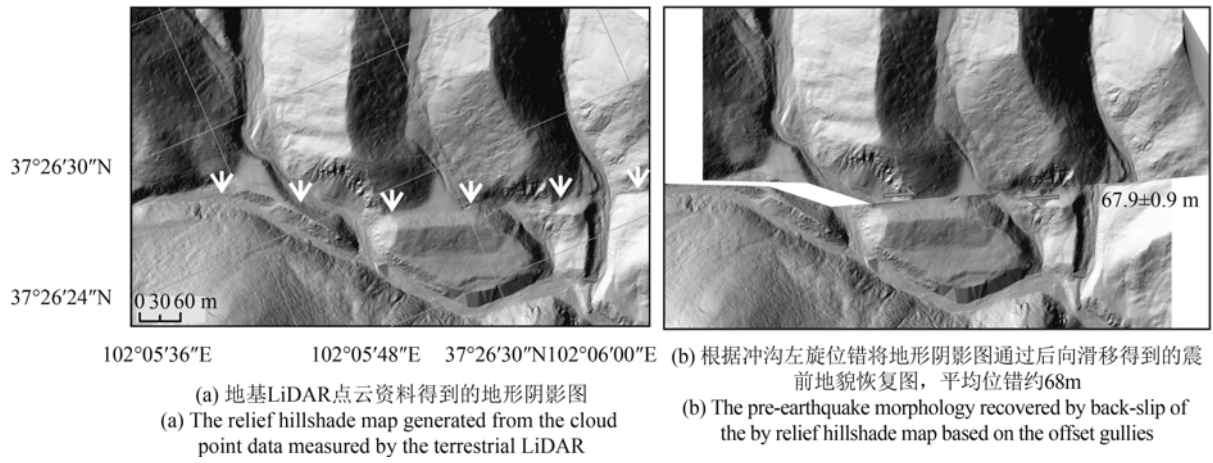


图 11 冷龙岭断裂带地基LiDAR测量冲沟同步左旋位错(Jiang 等, 2017a)

Fig. 11 Synchronous left lateral offset of the gullies along Lenglongling fault zone by LiDAR (Jiang et al, 2017a)

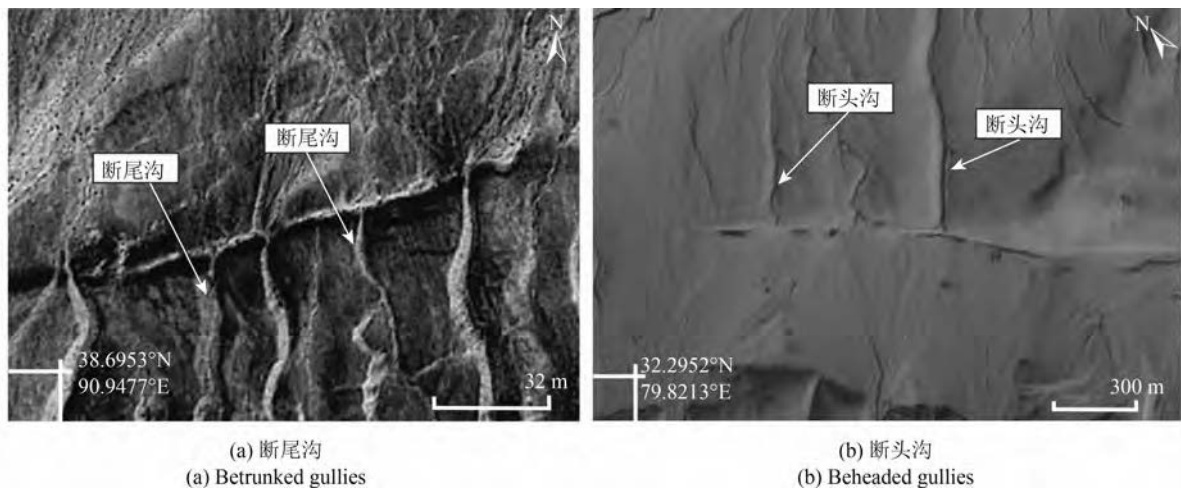


图 12 断层错断形成的断尾沟及断头沟

Fig. 12 Betrunken gullies along and beheaded gullies along active fault zone

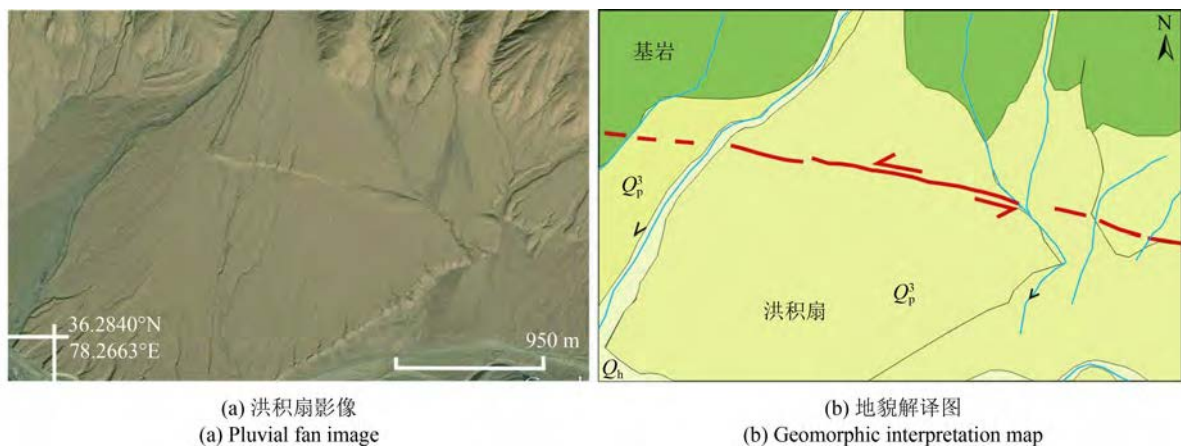


图 13 康西瓦断裂带左行错断洪积扇影像及错断地貌解译图

Fig. 13 Left offset of pluvial fan along Kangxiwar fault zone

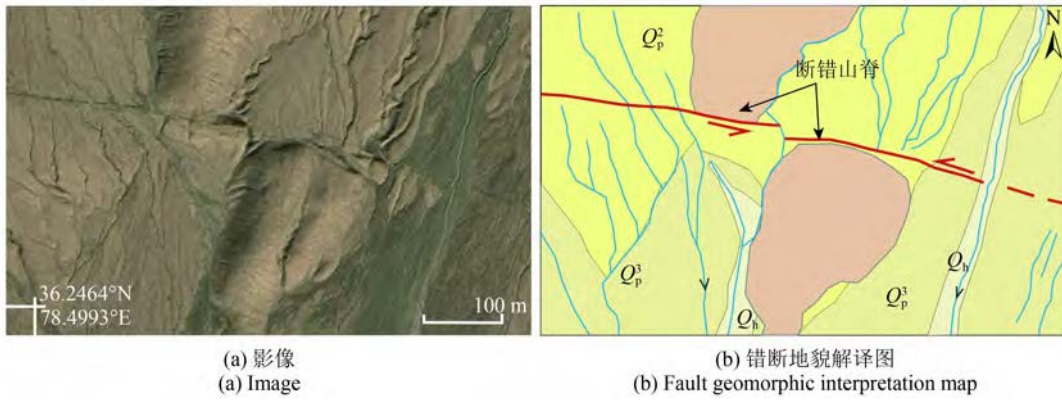


图 14 康西瓦断裂带左旋剪切错断山脊形成闸门脊影像及错断地貌解译图

Fig. 14 Left offset ridge along Kangxiwar fault zone

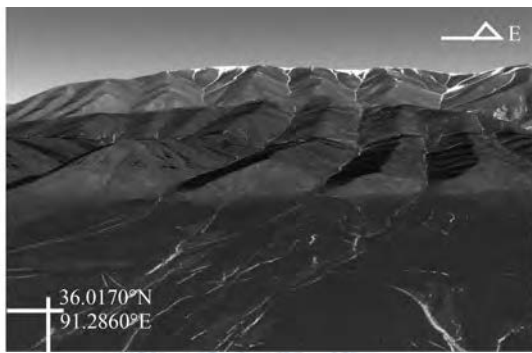


图 15 东昆仑断裂带断层三角面

Fig. 15 Fault triangular facet along East Kunlun fault zone

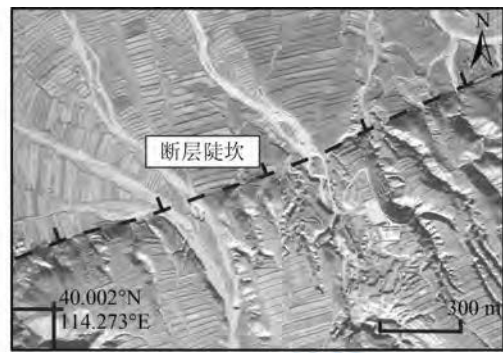


图 16 阳原盆地南缘断层陡坎地貌高分2号卫星影像

Fig. 16 Gaofen-2 image of the cliff along the Yangyuan basin fault

(a) 遥感影像
(a) Remote sensing image(b) 野外照片, 照片镜向南
(b) Field photograph towards south

图 17 郯庐断裂带麦坡段断层陡坎两侧岩性差异

Fig. 17 Lithology differences along Tan-Lu fault zone

4.2 活动断层派生构造地貌特征遥感分析

活动断层除直接错断第四纪地形地貌外, 还

由于地表的变形或破裂而在地表形成一些新生的构造地貌类型, 如拉分盆地、地震鼓包、断塞塘、

河流裂点等, 在本文中将这些构造地貌类型称为断层派生构造地貌。对于正断层与逆断层, 断层的垂向活动可以在断层的上盘形成河流裂点(图18), 可以通过数字高程模型对河流裂点进行识别研究断层活动的期次(He和Ma, 2015)。而对于3种断层类型, 又可以分别形成不同类型的派生构造单元。

在走滑断层的弯曲部位受剪切作用的影响, 构造类型比较复杂。在挤压弯曲即剪切挤压部位发生地层弯曲形成褶皱, 地形上表现为地震鼓包(图19)或挤压脊(图20), 在拉张弯曲即剪切拉张部位, 形成斜列式剪切破裂(图21)或拉分盆地(图22)。在遥感影像中, 可以根据拉分盆地的形态或斜列式地表破裂的展布样式在综合分析走滑断裂破裂模式基础上来判断断层的运动方向及力学性质。如东昆仑断裂带上于2003年8.3级地震造成的菱形地表破裂(图23), 以及康西瓦断裂带上的小型拉分

盆地(图22), 可以判断两条断裂带具有左旋剪切走滑运动特征, 而根据崩错断裂带上的崩错湖拉分盆地(图24)以及右行右阶斜列式地表破裂(图21)可以推断出该断裂带具有右旋剪切运动性质。此外, 东昆仑断裂带上与主破裂面呈大角度相交的共轭里德尔剪切破裂张裂隙(T)也反映出了断裂带的左旋剪切走滑运动(图25), 根据断层地震地表裂隙长短轴的方位也可以判断出断层运动性质(图26)。

在拉张作用下, 正断层派生的构造单元表现为断层陡坎及断层槽沟等。如具有正断层性质的格林错断裂带形成的断层陡坎(图7)与当雄断裂带上所形成的断层槽沟(图27)。而区域正断层的长期活动可以形成大型构造盆地, 如山西地堑系(图28)与当雄—羊八井半地堑系, 由此形成的构造盆地可演化为大型裂谷, 如东非大裂谷。顺坡发育的断层, 当断层面倾向与山坡倾向相反时, 容易形成反向陡坎(图29)。

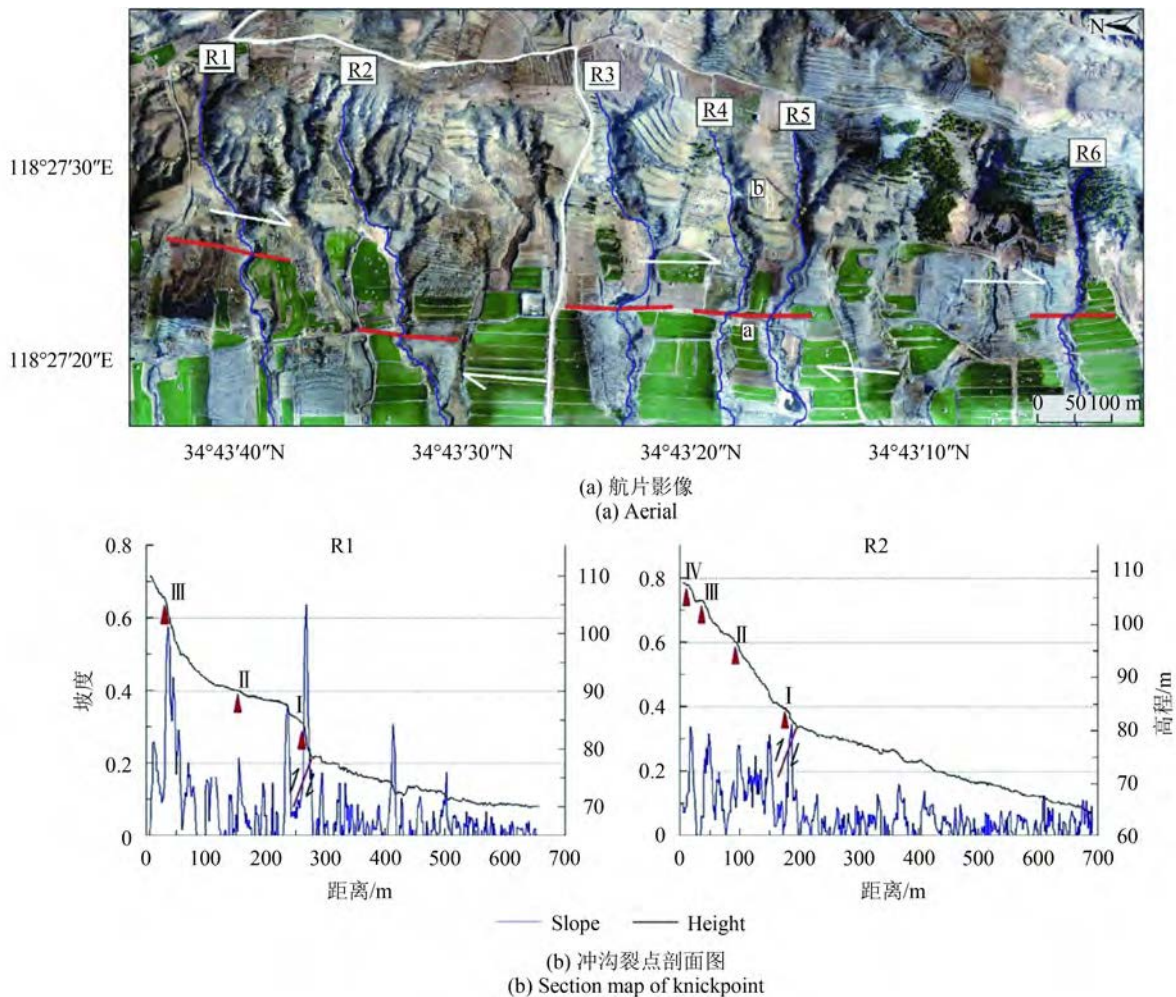


图 18 郯庐断裂带航片影像及基于立体相对识别的冲沟裂点剖面图(Jiao 等, 2016)

Fig. 18 Aerial photo in the Tan-Lu fault zone and the knickpoint identified from the DEM (Jiao et al, 2016)

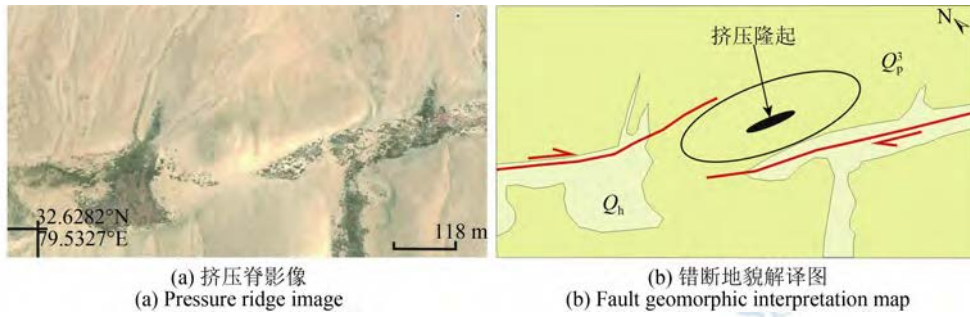


图 19 喀喇昆仑断裂带右行剪切挤压隆起—挤压脊影像及错断地貌解译图

Fig. 19 Pressure ridge resulted from restrained bending by dextral movement along Karakorum fault zone

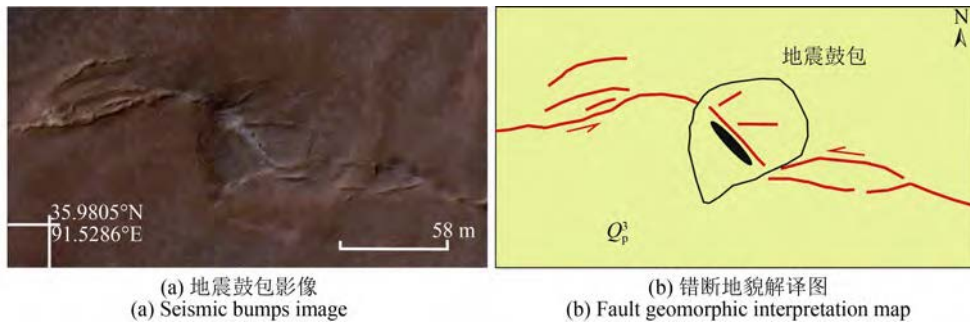


图 20 东昆仑左旋走滑断裂带挤压弯曲部位形成地震鼓包影像及错断地貌解译图

Fig. 20 Seismic bumps resulted from restrained bending by sinistral movement along east Kunlun fault zone

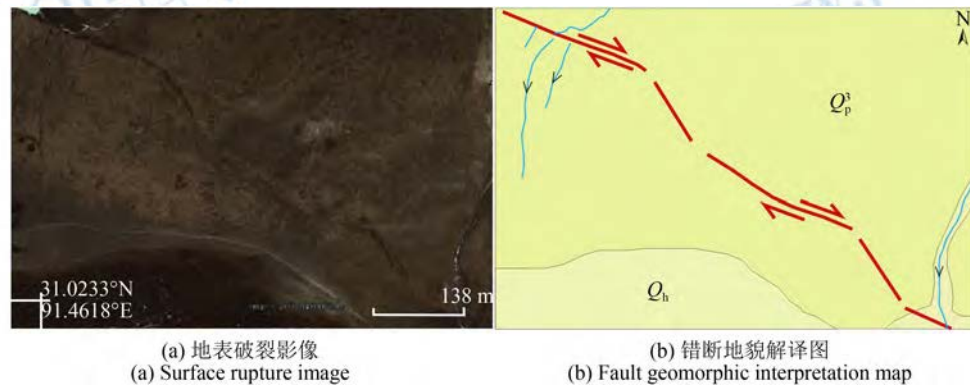


图 21 崩错断裂右行右阶雁行斜列式地表破裂影像及错断地貌解译图

Fig. 21 Dextral right-step en echelon ruptures along Bengcuo fault

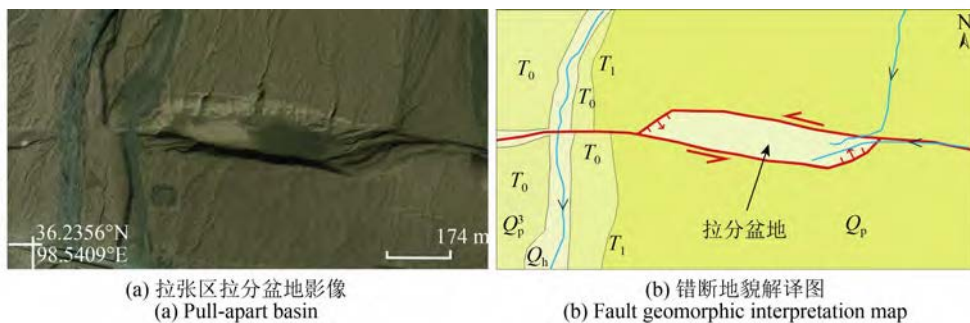


图 22 康西瓦左旋走滑断裂带拉张区拉分盆地影像及错断地貌解译图

Fig. 22 Pull-apart basin by left lateral strike-slip Kangxiwar fault zone

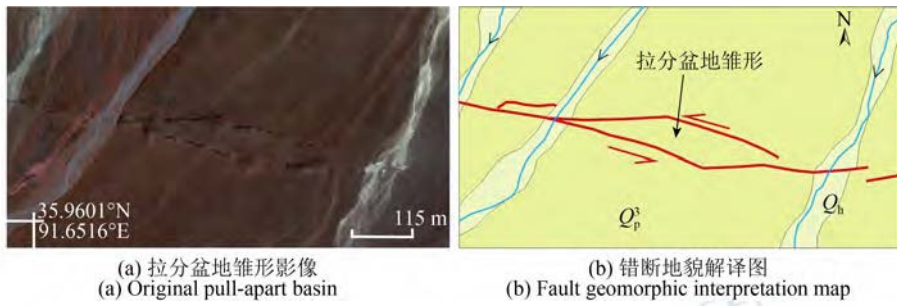


图 23 东昆仑左旋走滑断裂带形成拉分盆地锥形影像及错断地貌解译图
 Fig. 23 Original pull-apart basin by left lateral strike-slip east Kunlun fault zone

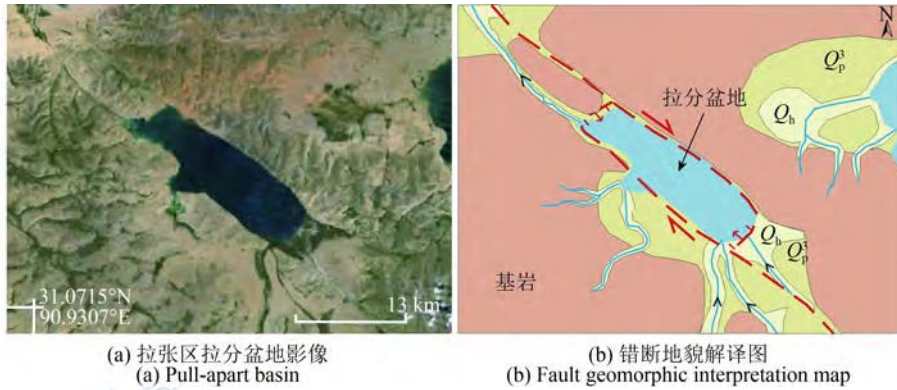


图 24 崩错右行走滑断裂拉张区拉分盆地影像及错断地貌解译图
 Fig. 24 Pull-apart basin by right lateral strike-slip Bengcuo fault zone

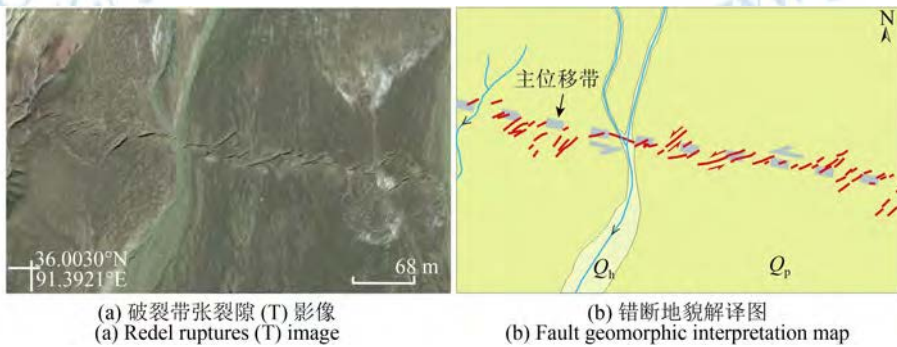


图 25 走滑断裂带沿主位移带分布的里德尔破裂带张裂隙(T)影像及错断地貌解译图
 Fig. 25 Redel ruptures along the principle deformation zone of the left lateral strike-slip east Kunlun fault

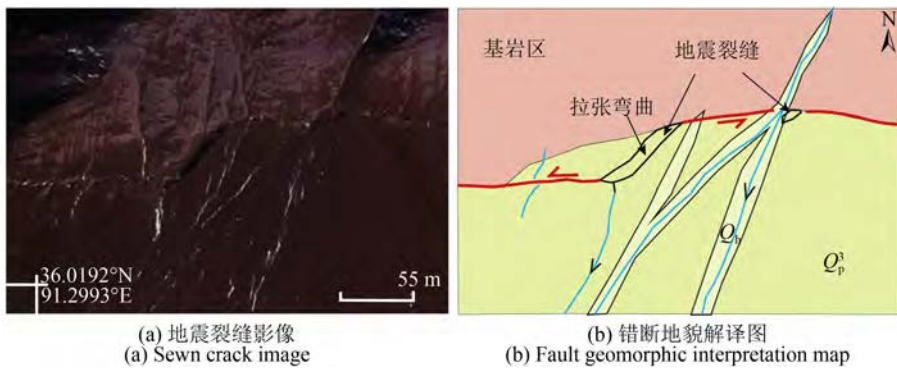


图 26 东昆仑左旋走滑断层拉张弯曲部位形成地震裂缝影像及错断地貌解译图
 Fig. 26 Seismic surface fissure due to releasing bending along the left lateral strike-slip east Kunlun fault zone

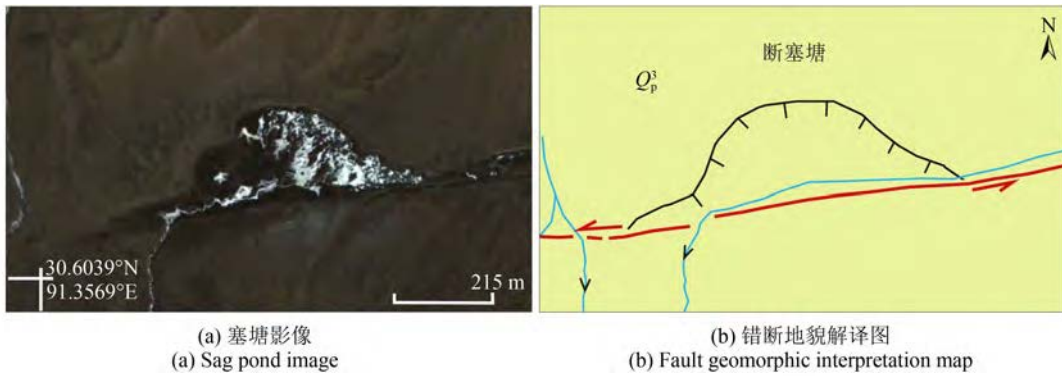


图 27 当雄断裂带断塞塘影像及错断地貌解译图

Fig. 27 Sag pond along the Damxung fault zone



图 28 山西地堑系拉张断陷盆地

Fig. 28 Extensional rift basin of Shanxi graben system

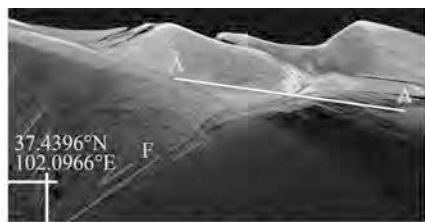
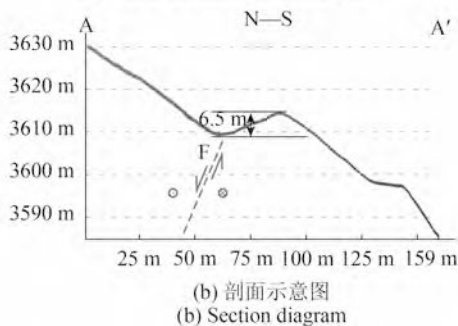
(a) 三维景观图
(a) Three dimensional landscape(b) 剖面示意图
(b) Section diagram

图 29 冷龙岭断裂带地面LiDAR测量反向陡坎三维景观图及剖面示意图，红线为推测断层发育位置

Fig. 29 Opposite orientated fault cliff along Lenglongling fault by LiDAR and the cross-section

在挤压作用下，沿逆断层形成的派生构造单元包括断层陡坎与褶皱隆起等。根据图6逆冲断层构造模式图可知，在挤压力的作用下逆断层造成的隆起构造即可形成于上盘前缘地带，也可以形成于下盘边缘地带，如四川盆地西部的龙泉山实则为来自于巴彦喀拉块体的挤压作用力传导至盆地内部致使地层褶皱弯曲形成隆起地貌(图30)，南天山山前褶皱—冲断带则为上盘挤压弯曲形成的上盘断弯褶皱(陈杰等，2001)，形成于逆冲断层上盘的褶皱隆起多易形成规模较大的造山带。

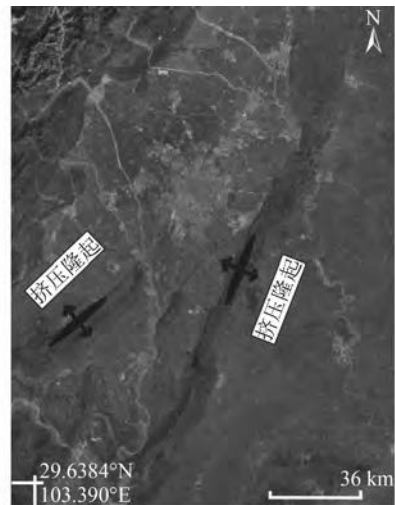


图 30 龙泉山褶皱隆起地貌

Fig. 30 Upfolding geomorphology of Longquan Mountain

4.3 活动断层间接解译特征遥感分析

严格来说，活动断层间接解译标志是依据遥感影像中与活动断层有关联的地物特征推断活动断层现象，如地貌形态、植被分布、水系格局、土地利用与人类活动等影像特征间接表示出来的

活动断层体, 需要进行人为推理才能判断。然而利用间接解译标志对构造进行解译判断时, 有时仅仅能确定断层的分布位置, 而不能判定构造体的活动性。在这种情况下, 可以通过利用被解译地段构造体所处的整条构造带的活动性来推断, 如果有关整条构造带的活动性也未知时, 可以作为疑似活动断层来对待, 结合高分辨率影像、野外调查工作中或其他方法寻找更有说服力的活动性证据。如图31中, 郟庐断裂带控制了湖泊的边界, 通过断裂带的延伸, 可以确定断层的准确位置; 图32中, 断裂带造成植被差异, 在多光谱图像中形成色调差异; 此外, 断裂带所控制的活火山口(图33)及水体湖泊的分布(图34), 也可以作为间接解译标志。



图31 断层控制湖泊线性边界(郟庐断裂带)

Fig. 31 Linear boundary of lake restrained by Tan-Lu fault zone

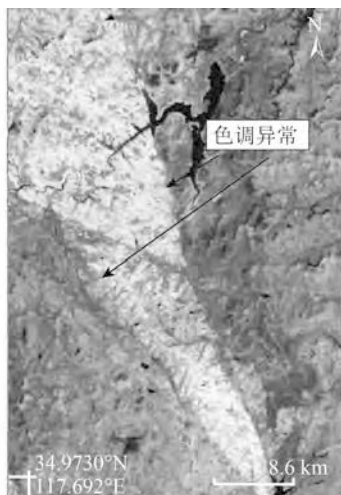


图32 断层控地物产生色调的线性差异

Fig. 32 Linear differences of pseudo-color influenced by fault zone

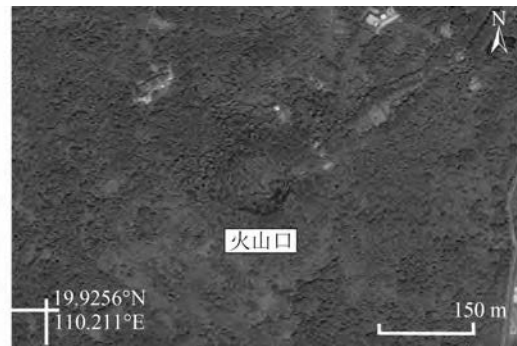


图33 海南石山断裂控制的火山口

Fig. 33 Volcanic dictated by Shishan fault



图34 格林错断裂带控制的串珠湖泊影像

Fig. 34 Linear distribution of lakes dictated by Gelincuo fault

4.4 非活动断层特征遥感分析

在遥感影像中, 存在许多构造、地貌或其他要素表现出与活动断层比较相似的影像特征, 然而实际上这类要素对第四纪地形地貌并未造成任何改造与影响作用, 在此把这类要素视为非活动断层影像特征。非活动断层与活动断层在中低分辨率遥感影像中比较容易被混淆, 如线性出露的基岩整合地层表现为明显的线性影像特征(图35), 容易与断层陡坎现象混淆; 河流强烈下切侵蚀形成的狭长沟谷与断层破碎沟谷表现比较相似(图36); 沿冲沟水系出现的河流弯曲现象容易被理解为受构造控制的假象; 断层错断基岩在遥感影像中形成的清晰可见的线性错断特征; 褶皱活动在地表形成清晰可见的构造形迹等(图37)。以上构造与地貌现象对于活动断层遥感特征的识别会产生一定影响, 需要在高分辨率影像中结合第四纪地形地貌的分析加以区分。

根据遥感影像中实际地物的属性与地貌类别, 可以将非活动断层现象划分为3类。一是地层、地貌等非构造类要素信息, 如线性出露的地层(图35)、冲沟裂谷(图36)、线性水体、岩性色调差异等, 这类要素在遥感影像中多表现为清晰的线性特征, 容易与断层陡坎、断层沟谷等构造信

息相混淆；二是形成于第四纪之前现今不再活动的构造体，如形成时代较早的伸展构造(图38)、逆冲推覆构造、不整合面、褶皱(图37)、死火山等，这类构造要素对第四纪地形地貌没有任何的改造作用，容易被误判为活动断层；三是现代人类活动形成的线性影像特征(图39)，如农田植被异常、道路、运河、人工堤等现象，在中低分辨率影像上容易被认为是断层痕迹而造成理解的偏差，不过随着遥感影像分辨率的大幅提高，人为改造现象很容易被辨别而排除。

本文遥感解译图主要图例如图40所示。

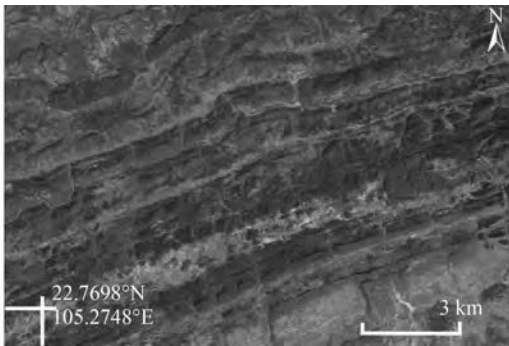


图 35 线性平行出露的岩体
Fig. 35 Linear outcropped stratum

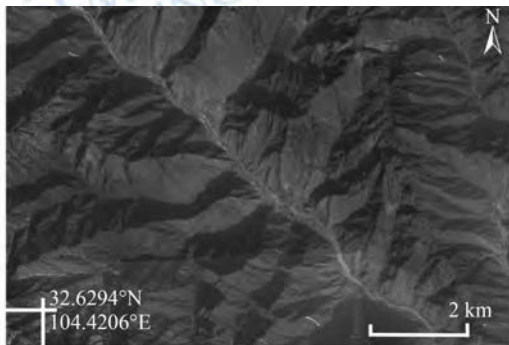


图 36 水系深切形成的NW向线性峡谷
Fig. 36 Linear valley incised by stream

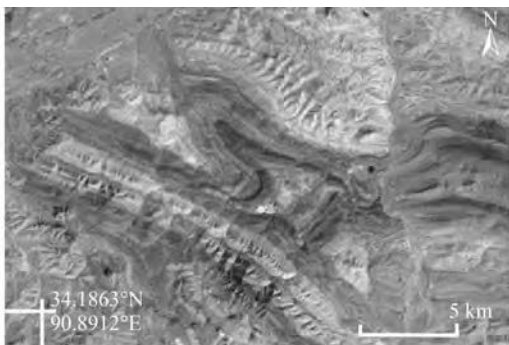


图 37 褶皱构造(非活动构造)遥感影像
Fig. 37 Folding structure, non-active tectonics

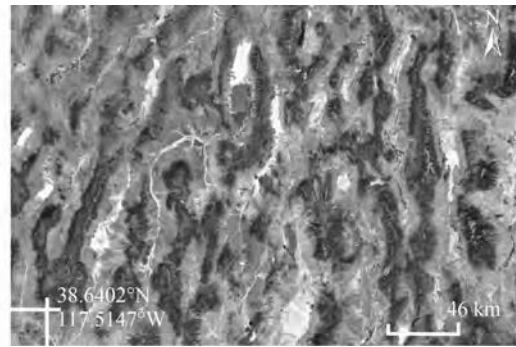


图 38 北美西部盆岭构造(伸展构造)遥感影像
Fig. 38 Basin and Range tectonics in the North America

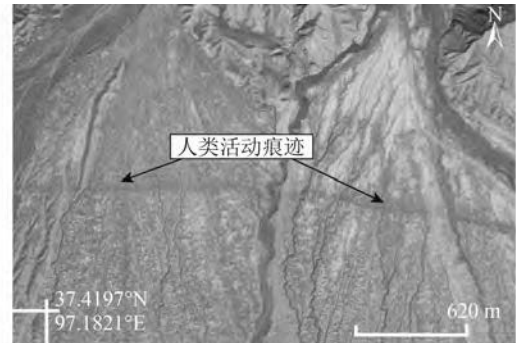


图 39 宗务隆山山前人类活动形成的线性痕迹
Fig. 39 Linear trace of human beings in front of Zongwulongshan

	解译活动断层		断层陡坎		全新世
	推测断层		地震地表破裂带		晚更新世
	正断层		挤压脊		河流阶地
	逆断层		断塞塘		冲沟水系
	走滑断层		地质界线		背斜轴

图 40 本文遥感解译图主要图例，图例参考(中国地震局，2014)

Fig. 40 Legend of the most of the images of the paper, referenced from (China Earthquake Administration, 2014)

5 讨论

在断层类型的描述中，如果断层上盘作垂向运动，即断层上盘沿断层面垂直向上或向下运动，这类断层为倾滑断层，如果断层沿断层面作水平运动，即为走滑断层。然而在自然界中，很少有纯粹的倾滑断层或走滑断层，大多数断层既有水平运动分量又有垂向运动分量。因此由不同类型的断层运动所形成的构造地貌也通常具有很大的相似性，在遥感影像中的表现特征也更加相

似, 在利用遥感资料分析构造微地貌调查活动断层时, 需要考虑构造地貌的叠加性与相似性, 以根据遥感影像解译标志对构造地貌模型及其形成的断层力学环境进行综合判定。

沿走滑断层的弯曲部位, 于右行右阶与左行左阶剪切构造模式下, 会由于断层两盘的拉张弯曲形成小型拉分盆地等构造地貌, 如沿崩错断裂形成的崩错湖即是一个典型的拉分盆地(图24), 随着盆地规模的不断扩大而形成类似于断陷盆地的形态。在正断层构造变形模式下, 由于断层两盘的相对升降运动, 断层上盘由于重力作用, 会形成反牵引构造, 形成同沉积构造, 在地形地貌上形成盆地, 在正断层形成的地堑与半地堑构造体系中, 也形成盆地构造, 如当雄—羊八井活动断裂带形成的半地堑系盆地。在逆断层构造变形模式情况下, 逆冲推覆断层的上盘强烈挤压下盘, 导致上盘变形强烈形成褶皱—冲断带, 而在造山带, 逆冲推覆构造的下盘则强烈挠曲沉降变形而形成前陆盆地, 如四川盆地。据此可以发现, 无论是正断层、逆断层或是剪切环境下的走滑断层产生的构造变形, 皆可以形成盆地构造, 然而各自所形成盆地在地形地貌的规模及形态特征方面还是存在着很大差异的。相比较而言, 正断层与逆断层形成的构造盆地通常要比走滑断层形成的拉分盆地规模要大很多。

在剪切构造环境下, 如若断层形成左行右阶或右行左阶排列的构造变形方式, 在联接主破裂的阶区部位, 由于断层面弯曲受断层两盘的挤压作用, 容易造成地层的弯曲形成褶皱隆起, 在地貌上表现为鼓包、挤压脊等构造地貌特征, 在高分辨率遥感图像中可以清晰地识别这类地貌特征(图19, 图20)。对于逆断层构造变形模式, 沿破裂面的上盘地带一方面可以形成规模较小的褶皱变形, 另一方面, 对于大型逆冲推覆构造, 则在断裂带的上盘由于强烈的挤压构造变形, 容易形成大型褶皱而表现为造山带, 如龙门山活动断裂带则是由于巴彦喀拉块体与克拉通块体的强烈碰撞而在上盘形成褶皱—冲断带, 而在盆地内部, 由于地层的挤压作用, 也容易形成小规模的地层弯曲, 形成褶皱, 如逆冲断层构造示意图中的盆地内部褶皱(图6)。逆断层所形成的这类褶皱构造变形规模较大, 在遥感影像中总体表现为宏观的造山带地貌, 不容易根据构造微地貌单体形态的判别而建立解译标志。

对于正断层与逆断层运动而形成的垂向地貌错断特征, 在利用遥感影像判断层活动性质时, 需要综合分析错断地貌特征。通常正断层可以形成较为清晰、完整且呈线性展布的断层三角面与断层崖, 如具有正断层性质的东昆仑断裂带与山西地堑系, 保存有完整线性的断层三角面与断层崖构造地貌形态(图15, 图16)。而对于纯粹的逆断层, 由于上盘强烈挤压形成褶皱, 不容易形成完整的断层三角面与断层崖, 所形成的断层陡坎也呈曲折状很少具有连续的线性特征, 而具有走滑断层性质的逆断层, 则可以形成比较清晰的线性地表破裂及断层陡坎, 如左旋兼逆冲的郯庐断裂带(图17)与右旋走滑逆断层的龙门山断裂带在剪切作用下形成的构造地貌线性现象比较显著。

与正断层及逆断层构造变形相比, 走滑断层造成的地表变形特征最为典型, 产生的构造地貌类型也最为丰富, 在遥感影像平面上的错断特征非常显著, 因此走滑断层所产生的水平错断最容易建立遥感解译标志。通过利用高分辨率遥感影像对走滑断层造成的错断冲沟、错断阶地等地貌特征的鉴别, 可以恢复地震变形前的地貌形态, 进而识别不同期次的地震事件并明确断层位移量。对于正断层与逆断层, 由于其构造变形表现为垂向错断, 因此在平面的遥感影像上不容易进行定量分析, 需要借助高精度的DEM数据, 制作3维精细构造地貌模型。随着卫星影像分辨率的逐步提高, 以及无人机遥感技术(Uysal 等, 2015; Clapuyt 等, 2016)与LiDAR测量技术的快速发展(刘静 等, 2013; Meigs, 2013; Langridge 等, 2014; Khajavi 等, 2014; Jiang 等, 2017a), 可获取更高精度的DEM资料, 可以据此进行构造地貌3维精细结构的定量分析。

由于对活动断层的时间界定一般为晚更新世以来, 利用遥感影像判定断层是否为活动断层最重要的是找到断层活动性证据。对于造成强烈构造变形的强震, 可以在地表形成直观的地震地表破裂带、断层槽地、地震鼓包等, 形成错断河流冲沟、错断阶地等错断地貌, 在遥感影像中形成直观的断层活动痕迹, 因此可以判定断层为活动断层, 如前文提到的一系列判别标志。而对于在地表未能形成直观的地表破裂的断层, 需要分析断层活动对微地貌的改造特征, 如断层对河流冲沟、河流阶地等地貌的影响, 如果存在同步位错现象, 则有可能是活动断层。而对于遥感影像中

宏观特征非常明显的断层三角面、断层崖等现象, 以及一些线性构造特征, 尽管与断层活动相关, 但可能与断层第四纪长期的活动相关, 而非是断层最新活动的证据, 因此不能用来定义为活动断层, 需要在遥感判读的基础上, 结合野外调查工作来鉴别其活动情况。

6 结 论

总结分析了高分辨率遥感技术应用于活动断层调查研究中存在的问题, 论述了活动断层与传统地质调查中遥感技术应用的区别与联系。通过分析断层力学性质, 系统性地归纳了不同运动模式活动断层所产生的构造地貌类型, 如活动断层错断地貌与断层派生构造微地貌。通过利用丰富的高分辨率影像, 建立了不同类型活动断层及构造微地貌的直接与间接解译标志及其识别方法, 系统分析了如何应用遥感影像地形地貌特征来判别活动断层, 强调了非活动断层因素对活动断层遥感判别存在的影响, 建立了遥感影像、构造微地貌与活动断层之间的判别关系。

国家地震科技创新工程于2017年最新提出了“透明地壳”研究计划, 其中中国大陆活动构造探察为重要研究任务之一。中国活动断层调查具有量大、面广、任务大的特点, 亟需借助卫星遥感技术的独特优势。随着国产高分辨率卫星遥感、高精度地形地貌测量技术以及大数据处理技术的快速发展, 必将为活动断层大比例尺、大范围、高效率研究提供更多的数据支撑, 为构造地貌精细结构、活动断层构造变形模式、强震复发特征研究提供重要依据。本文相关研究工作将为今后利用高分辨率遥感开展活动断层大比例尺定量调查也提供重要技术思路, 具有一定的参考意义。

志 谢 感谢中国科学院遥感与数字地球研究所付碧宏研究员; 中国地震局地质研究所韩竹军研究员、何宏林研究员; 中国地震局地壳应力研究所李德文研究员及何仲太博士为本文提出的宝贵修改建议。感谢期刊主编与编辑为本文所做的修改工作。本文所使用的影像来源于国产高分2号卫星数据及Google Earth。

参考文献(References)

Arrowsmith J R and Zielke O. 2009. Tectonic geomorphology of the

San Andreas Fault zone from high resolution topography: an example from the Cholame segment. *Geomorphology*, 113(1/2): 70–81 [DOI: [10.1016/j.geomorph.2009.01.002](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.002)]

Biddle K T and Christie-Blick N. 1985. Strike-slip deformation, Basin Formation, and sedimentation. SEPM Special Publication No. 37. Tulsa, OK: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists: 1–34

Burbank D W and Anderson R S. 2011. *Tectonic Geomorphology*. 2nd ed. Chichester: Wiley-Blackwell: 1–454

Chen G H, Xu X W, Wen X Z, Wang Y L and Zheng R Z. 2006. Application of digital aerophotogrammetry in active tectonics. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 405–410 (陈桂华, 徐锡伟, 闻学泽, 王亚丽, 郑荣章. 2006. 数字航空摄影测量学方法在活动构造中的应用. *地球科学-中国地质大学学报*, 31(3): 405–410) [DOI: [10.3321/j.issn:1000-2383.2006.03.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.2006.03.020)]

Chen J, Ding G Y, Burbank D W, Scharer K, Rubin C, Sobel E, Qu G S, Shen Jun, Yin J H and Zhao R B. 2001. Late Cenozoic tectonics and seismicity in the Southwestern Tianshan, China. *Earthquake Research in China*, 17(2): 134–155 (陈杰, 丁国瑜, Burbank D W, Scharer K, Rubin C, Sobel E, 曲国胜, 沈军, 尹金辉, 赵瑞斌. 2001. 中国西南天山山前的晚新生代构造与地震活动. *中国地震*, 17(2): 134–155) [DOI: [10.3969/j.issn.1001-4683.2001.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4683.2001.02.005)]

China Earthquake Administration. 2014. DB/T 53-2013 Mapping of Active Fault in 1:50000. Beijing: Seismological Press: 1–14 (中国地震局. 2014. DB/T 53-2013 1:50000活动断层填图. 北京: 地震出版社: 1–14)

Christie-Blick N and Biddle K T. 1985. Deformation and basin formation along strike-slip faults // Christie-Blick N and Biddle K T, eds. *Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation*. SEPM Special Publications No. 37. Tulsa, OK: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists [DOI: [10.2110/pec.85.37.0001](https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0001)]

Clapuyt F, Vanacker V and Van Oost K. 2016. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology*, 260: 4–15 [DOI: [10.1016/j.geomorph.2015.05.011](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.011)]

Deng Q D. 1996. Active tectonics in China. *Geological Review*, 42(4): 295–299 (邓起东. 1996. 中国活动构造研究. *地质论评*, 42(4): 295–299) [DOI: [10.16509/j.georeview.1996.04.003](https://doi.org/10.16509/j.georeview.1996.04.003)]

Deng Q D. 2002. Advances and overview on researches of active tectonics in China. *Geological Review*, 48(2): 168–177 (邓起东. 2002. 中国活动构造研究的进展与展望. *地质论评*, 48(2): 168–177) [DOI: [10.3321/j.issn:0371-5736.2002.02.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:0371-5736.2002.02.007)]

Deng Q D, Chen L C and Ran Y K. 2004. Quantitative studies and applications of active tectonics. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 383–392 (邓起东, 陈立春, 冉勇康. 2004. 活动构造定量研究与应用. *地学前缘*, 11(4): 383–392) [DOI: [10.3321/j.issn:1005-2321.2004.04.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-2321.2004.04.005)]

Fossen H. 2010. *Structural Geology*. Cambridge: Cambridge University Press: 1–463 [DOI: [10.1017/CBO9780511777806](https://doi.org/10.1017/CBO9780511777806)]

Fu B H, Awata Y, Du J G and He W G. 2005a. Late Quaternary sys-

- tematic stream offsets caused by repeated large seismic events along the Kunlun fault, northern Tibet. *Geomorphology*, 71(3/4): 278–292 [DOI: [10.1016/j.geomorph.2005.03.001](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.03.001)]
- Fu B H, Awata Y, Du J G, Ninomiya Y and He W G. 2005b. Complex geometry and segmentation of the surface rupture associated with the 14 November 2001 great Kunlun earthquake, northern Tibet, China. *Tectonophysics*, 407(1/2): 43–63 [DOI: [10.1016/j.tecto.2005.07.002](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.07.002)]
- Fu B H, Yoshiki N, Dong Y F, Shi P L and Zhang Z W. 2008. Generation of 3-dimensional perspective satellite imagery and its application on Quaternary geomorphological analysis. *Quaternary Sciences*, 28(2): 189–196 (付碧宏, 二宫芳树, 董彦芳, 时丕龙, 张之武. 2008. 三维卫星遥感图像生成技术及其在第四纪构造地貌研究中的应用. *第四纪研究*, 28(2): 189–196) [DOI: [10.3321/j.issn:1001-7410.2008.02.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-7410.2008.02.001)]
- Fu B H, Zhang S L, Xie X P, Shi X H and Wang S F. 2006. Late Quaternary tectono-geomorphic features along the Kangxiwar fault, Altyn Tagh fault system, Northern Tibet. *Quaternary Sciences*, 26(2): 228–235 (付碧宏, 张松林, 谢小平, 石许华, 王世锋. 2006. 阿尔金断裂系西段——康西瓦断裂的晚第四纪构造地貌特征研究. *第四纪研究*, 26(2): 228–235) [DOI: [10.3321/j.issn:1001-7410.2006.02.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-7410.2006.02.010)]
- Gupta R P. 2003. *Remote Sensing Geology*. Berlin Heidelberg: Springer: 1–655
- He H L. 2011. Some problems of aerial photo interpretation in active fault mapping. *Seismology and Geology*, 33(4): 938–950 (何宏林. 2011. 活动断层填图中的航片解译问题. *地震地质*, 33(4): 938–950) [DOI: [10.3969/j.issn.0253-4967.2011.04.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4967.2011.04.017)]
- He Z T and Ma B Q. 2015. Holocene paleoearthquakes of the Daqing-shan fault detected from knickpoint identification and alluvial soil profile. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 261–271 [DOI: [10.1016/j.jseas.2014.11.025](https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.11.025)]
- Jiang W L. 2008. Discussion on seismological principle of geologist. *Seismology and Geology*, 30(1): 305–323 (江娃利. 2008. 试论地质学者的地震理念. *地震地质*, 30(1): 305–323) [DOI: [10.3969/j.issn.0253-4967.2008.01.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4967.2008.01.023)]
- Jiang W L, Han Z J, Guo P, Zhang J F, Jiao Q S, Kang S and Tian Y F. 2017a. Slip rate and recurrence interval of the east Lenglongling fault constrained by morphotectonics: tectonic implications for the northeastern Tibetan Plateau. *Lithosphere*, 9(3): 417–430 [DOI: [10.1130/L597.1](https://doi.org/10.1130/L597.1)]
- Jiang W L, Han Z J, Zhang J F and Jiao Q S. 2016. Stream profile analysis, tectonic geomorphology and neotectonic activity of the Damxung-Yangbajain rift in the south Tibetan Plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(10): 1312–1326 [DOI: [10.1002/esp.3899](https://doi.org/10.1002/esp.3899)]
- Jiang W L, Zhang J F, Han Z J, Tian T, Jiao Q S, Wang X and Jiang H B. 2017b. Characteristic slip of strong earthquakes along the Yishu fault zone in east China evidenced by offset landforms. *Tectonics*, 36(10): 1947–1965 [DOI: [10.102/2016TC004363](https://doi.org/10.102/2016TC004363)]
- Jiao Q S, Jiang W L, Zhang J F, Jiang H B, Luo Y and Wang X. 2016. Identification of paleoearthquakes based on geomorphological evidence and their tectonic implications for the southern part of the active Anqiu–Juxian fault, eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 132: 1–8 [DOI: [10.1016/j.jseas.2016.10.012](https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.10.012)]
- Keller E A and Pinter N. 2002. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall: 1–362
- Khajavi N, Quigley M and Langridge R M. 2014. Influence of topography and basement depth on surface rupture morphology revealed from LiDAR and field mapping, Hope Fault, New Zealand. *Tectonophysics*, 630: 265–284 [DOI: [10.1016/j.tecto.2014.05.032](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.032)]
- Klinger Y, Etchebes M, Taponnier P and Narteau C. 2011. Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun fault in China. *Nature Geoscience*, 4(6): 389–392 [DOI: [10.1038/ngeo1158](https://doi.org/10.1038/ngeo1158)]
- Langridge R M, Ries W F, Farrier T, Barth N C, Khajavi N and De Pascale G P. 2014. Developing sub 5-m LiDAR DEMs for forested sections of the Alpine and Hope faults, South Island, New Zealand: implications for structural interpretations. *Journal of Structural Geology*, 64: 53–66 [DOI: [10.1016/j.jsg.2013.11.007](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.11.007)]
- Lin W F and Gao W M. 1987. The recurrence intervals of large earthquake in the Yishu fault zone. *Earthquake Research in China*, 3(3): 36–42 (林伟凡, 高维明. 1987. 沂沭断裂带大地震复发周期. *中国地震*, 3(3): 36–42)
- Liu J, Chen T, Zhang P Z, Zhang H P, Zheng W J, Ren Z K, Liang S M, Sheng C Z and Gan W J. 2013. Illuminating the active Haiyuan fault, China by Airborne Light Detection and Ranging. *Chinese Science Bulletin (Chinese Version)*, 58(1): 41–45 (刘静, 陈涛, 张培震, 张会平, 郑文俊, 任治坤, 梁诗明, 盛传贞, 甘卫军. 2013. 机载激光雷达扫描揭示海原断裂带微地貌的精细结构. *科学通报*, 58(1): 41–45) [DOI: [10.1360/972012-1526](https://doi.org/10.1360/972012-1526)]
- Mann P. 2007. Global catalogue, classification and tectonic origins of restraining- and releasing bends on active and ancient strike-slip fault systems// Cunningham W D and Mann P, eds. *Tectonics of Strike-slip Restraining and Releasing Bends*. Geological Society, London, Special Publications, 290(1): 13–142 [DOI: [10.1144/SP290.2](https://doi.org/10.1144/SP290.2)]
- Meigs A. 2013. Active tectonics and the LiDAR revolution. *Lithosphere*, 5(2): 226–229 [DOI: [10.1130/RF.L004.1](https://doi.org/10.1130/RF.L004.1)]
- Sylvester A G. 1988. Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 100(11): 1666–1703 [DOI: [10.1130/0016-7606\(1988\)100<1666:SSF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1666:SSF>2.3.CO;2)]
- Uysal M, Toprak A S and Polat N. 2015. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*, 73: 539–543 [DOI: [10.1016/j.measurement.2015.06.010](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010)]
- Wesson R L, Helley E J, Lajoie K R and Wentworth C M. 1975. Faults and future earthquakes. In Borchardt, R.D.(ed.). *Studies for Seismic Zonation of the San Francisco Bay Region*. Professional Paper 941A, pp. 5-30. United States Geological Survey, Washington, DC
- Wu Z M, Shentu J M, Cao Z Q and Deng Q D. 1990. The surface ruptures of Danxung (Tibet) earthquake (M=8) in 1411. *Seismology and Geology*, 12(2): 98–108 (吴章明, 申屠炯明, 曹忠权, 邓起东. 1990. 1411年西藏当雄南8级地震地表破裂. *地震地质*, 12(2): 98–108)
- Xu X W, Yu G H, Ma W T, Ran Y K, Chen G H, Han Z J, Zhang L F and You H C. 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault. *Seismology and Geology*, 24(4): 470–483 (徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 冉永康, 陈桂华, 韩竹军, 张兰凤, 尤惠川. 2002.

- 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法. 地震地质, 24(4): 470–483 [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2002.04.001]
- Yang J C and Li Y L. 2011. Active Tectonics and Geomorphology. Beijing: Peking University Press: 1–206 (杨景春, 李有利. 2011. 活动构造地貌学. 北京: 北京大学出版社: 1–206)
- Zhang J F, Jiang W L, Tian T and Wang X. 2016. High resolution remote sensing application research in active fault surveying. Acta Seismologica Sinica, 38(3): 386–398 (张景发, 姜文亮, 田甜, 王鑫. 2016. 活动断裂调查中的高分辨率遥感技术应用方法研究. 地震学报, 38(3): 386–398 [DOI: 10.11939/jass.2016.03.006])
- Zielke O, Arrowsmith J R, Ludwig L G and Akciz S O. 2012. High-resolution topography-derived offsets along the 1857 fort Tejon earthquake rupture trace, San Andreas Fault. Bulletin of the Seismological Society of America, 102(3): 1135–1154 [DOI: 10.1785/0120110230]

Geometric and geomorphic features of active fault structures interpreted from high-resolution remote sensing data

JIANG Wenliang^{1,2,3}, ZHANG Jingfa^{1,2}, SHEN Xuhui^{1,2}, JIAO Qisong^{1,2}, TIAN Tian^{1,2}, WANG Xin^{1,2}

1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

2. Key Laboratory of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

3. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: Seismic hazard is closely related to Holocene active tectonics. A quantitative study of parameters, such as seismic slips, slip rate, and recurrence intervals of the active fault, is significant for scientific earthquake research. High-resolution Remote Sensing (RS) is effective for a large-scale quantitative study of active tectonics. However, many differences exist between active tectonics study and traditional geologic study with the use of RS. We should first establish a series of geomorphic markers to interpret many different active tectonics, which still lack effective guidance and a systematic conclusion.

To direct the effective application of RS in quantitative research of active faults, we conducted several investigations based on RS images. First, the differences and correlations between active tectonic survey and traditional geologic survey, which mostly relies on the interpretation of macrogeomorphology or linear structural features, are discussed based on research developments through high-resolution RS. Second, the mechanisms of different fault models, including strike-slip, normal, and thrust faults, are introduced according to their stress-strain relations among maximum principal stress ($\Delta\sigma_{xx}$), intermediate principal stress ($\Delta\sigma_{yy}$), and minimum principal stress ($\Delta\sigma_{zz}$). The different relationships among the three vectors generate different structural environments and mechanical behavior. Three tectonic geomorphologic models are illustrated and delineated in the paper according to dynamic mechanics with field phenomena. A series of micro-tectonic geomorphological features is generated by the three fault models.

A series of interpretive markers of different tectonic geomorphologic indices related to the active tectonics is presented based on RS images. We divide the interpretive markers into three groups, namely, geomorphologic markers directly offset by a fault, tectonic geomorphologic markers derived from a fault, and indirect interpretive markers from an image. The first group can be identified directly from offset evidence conserved on the earth surface; it can also be used to determine the fault type and evaluate the offset amount of the fault. The second group can be used to determine the geometrical and kinetic features of the active fault, such as the pressure ridge, seismic bumps, pull-apart basin, and Redel ruptures. The third group is an indirect interpretive marker for the active fault. However, not all phenomena similar to the third group are related to the active fault. Image features of a non-active fault that may be related to human activity, natural erosion, or previous geological evolution are also analyzed in this study. These features may lead to the misinterpretation of active tectonics. Numerous examples of different markers, which are interpreted from important active faults of China, are presented in this study to guide the investigation of active faults. Different correlations among active faults, tectonic micro-geomorphology, interpretive markers, and image features are analyzed according to different cases.

Each of the three fault models can generate many different interpretive markers. However, the three-fault model could also generate similar interpretive markers. In practice, no fault with one pure fault model exists in the field, and the fault usually behaves in superimposed mechanical mechanisms. In addition, the fault may also behave in different fault models in different segments along the fault zone. Therefore, studying an active fault by using interpretive markers is complicated. Field identification of active faults by verifying interpretive markers is necessary to supplement the evidence.

The interpretive markers of different active faults are summarized by high-resolution RS images in this paper. The relational schemas supplied among different active faults, tectonic micro-geomorphology, interpretive markers, and image features are important for a qualitative and quantitative study of active faults. Our study provides beneficial guidelines for research of active faults on the basis of high-resolution RS images.

Key words: remote sensing image, active fault, tectonic micro-geomorphology, interpretive marker, quantitative research

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41772219, 41204004); Special Item for Public Welfare of Scientific Research Project from Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration (No. ZDJ2017-29); Standard for Seismic Industrial “Remote Sensing Investigation Technique of Active Fault Exploration”



封面说明

About the Cover

电磁监测试验卫星(张衡一号)

The geo-electromagnetic satellite of Zhangheng-1

电磁监测试验卫星(张衡一号)是中国地球物理场探测卫星计划首发星,也是中国地震立体观测体系第一个天基平台,于2018年2月2日在酒泉顺利发射入轨。该卫星采用高度507 km、倾角97.4°的太阳同步圆轨道,回归周期为5 d。星上搭载高精度磁强计、感应式磁力仪、电场仪、等离子体分析仪、朗缪尔探针、GNSS掩星接收机、三频信标发射机和高能粒子探测器。目前卫星在轨运行状态良好,首次获取了完全自主知识产权的全球地磁场和电离层状态,并清晰记录到强磁暴以及地面人工和天然源引起的电离层扰动。卫星将为地震监测、空间天气预警、电波环境管理以及地球科学和空间科学研究提供全新的数据支持。

The geo-electromagnetic satellite named Zhangheng-1, successfully launched on February 2, 2018, in Jiuquan, China, is the first satellite in China's geophysical field detecting satellite mission and the first space-based platform of China earthquake stereoscopic observation system. Zhangheng-1 travels in a near circular, sun-synchronous orbit with an altitude of 507 km, an inclination of 97.4°, and a repeat cycle of five days. The payload assemblies of Zhangheng-1 include high-performance magnetometer, search-coil magnetometer, electrical field detector, plasma analyzer, Langmuir probe, GNSS occultation receiver, tri-frequency transmitter, and highly energetic particle detector. Until now, the "Zhangheng-1" onboard operation is excellent. It has provided the first set of results for global geomagnetic field and ionosphere status with completely independent intellectual property rights and has recorded a geomagnetic storm and ionosphere disturbance caused by artificial and natural sources. The "Zhangheng-1" will provide data services for earthquake monitoring, space weather warning, radio environment management, and geophysics and space physics research.

遥感学报

JOURNAL OF REMOTE SENSING

YAOGAN XUEBAO (双月刊 1997年创刊)

第22卷 增刊 2018年12月25日

(Bimonthly, Started in 1997)

Vol.22 Sup. December 25, 2018

主管	中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主办	中国科学院遥感与数字地球研究所 中国地理学会环境遥感分会	Sponsored by	Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS The Associate on Environment Remote Sensing of China
主编	顾行发	Editor-in-Chief	GU Xing-fa
编辑	《遥感学报》编委会 北京市朝阳区大屯路中国科学院遥感与数字地球研究所 邮编:100101 电话:86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail: jrs@radi.ac.cn	Edited by	Editorial Board of Journal of Remote Sensing Add: P.O.Box 9718, Beijing 100101, China Tel: 86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail: jrs@radi.ac.cn
出版	科学出版社	Published by	Science Press
印刷装订	北京科信印刷有限公司	Printed by	Beijing Kexin Printing Co. Ltd.
总发行	科学出版社 北京东黄城根北街16号 国内邮发代号: 82-324 邮政编码: 100717 电话: 86-10-64017032 E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: 86-10-64017032 E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com
国外发行	中国国际图书贸易总公司 北京 399 信箱 邮政编码: 100044 国外发行代号: BM 1002	Overseas distributed by	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399, Beijing 100044, China

中国标准连续出版物号: ISSN 1007-4619

CN 11-3841/TP

CODEN YXAUAB

定价: 70.00元



官网



微站

ISSN 1007-4619



9 771007 461187

9 8 >