论 文

CBERS-02B 数据在霍山山前活动断裂带 1:5 万填图中的应用

徐岳仁^{①②}, 申旭辉^②, 何宏林^①, 陈立泽^{②*}, 孙浩越^①

^① 中国地震局地质研究所国家活断层研究中心, 北京 100029

^② 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

* 通信作者. E-mail: chenlize@hotmail.com

收稿日期: 2011-05-30; 接受日期: 2011-08-12

科技部国际科技合作项目 (批准号: 2010DFB20190) 资助

摘要 利用中巴地球资源卫星 02B 数据, 开展山西霍山山前活动断裂带遥感解译研究, 解译获得该断裂带总延伸长度约 116 km, 整体走向 NE, 按其几何结构可以分为 6 段, 断裂活动在晚更新世以来地层形成的断层陡坎在影像上特征清晰; 结合野外调查, 认为霍山山前断裂带在全新世以来以垂直运动为主. 高分辨率遥感卫星数据可以获取活动构造定量研究中断裂带的长度和分段长度, 通过断层构造地貌的解译, 可以识别出包括断层陡坎、断层槽谷等构造地貌变形信息, 为筛选野外重点工作区域提供帮助. 研究表明, 高分辨率的中巴地球资源卫星可以有效应用于 1:5 万活动断层填图工作及活动构造定量研究中.

关键词 CBERS-02B 卫星 活动断裂 遥感解译 霍山山前活动断裂带

1 引言

活动构造是指晚更新世 10-12 万年以来一直在活动, 现在正在活动、未来一定时期内仍会发生活动的各类构造. 20 世纪 70 年代以来, 随着新技术、新方法的不断引入, 活动构造研究已从早期描述性和定性研究阶段发展到定量研究阶段, 通过获取活动断层的几何学、运动学和地震学等各个方面的定量参数, 以评价断层现在和将来的危险性及可能引发的地震和地质灾害^[1-3]. 活动构造定量化研究除了对具体断裂带的详细研究外, 也包括国家从公共安全出发分批实施的活动构造大比例尺地质填图、重要城市活动断层探测等^[4], 以获取国家战略规划和城市发展必需的地震危险性评价定量数据.

卫星遥感技术为活动构造研究提供了重要的基础数据, 特别是最近 20 年来, 随着高分辨率卫星遥感数据源的逐步丰富, 促进了活动构造定量研究的深入, 取得了一些应用成果^[5-13]. 2007 年以前, 我国科学家在活动构造研究中所使用的高分辨率卫星, 多是国内用户购置的国外遥感数据如 SPOT5, IKONOS, QuickBird 等影像, 数据价格昂贵, 制约着高分辨遥感数据在我国活动构造定量研究中的应用.

中巴地球资源卫星 02B 星 (CBERS-02B 卫星), 2007 年 9 月 19 日发射成功, 是我国第一颗同时具有高、中、低 3 种分辨率的对地观测民用卫星, 数据采用免费分发的方式, 其中 HR 相机可获得

引用格式: 徐岳仁, 申旭辉, 何宏林, 等. CBERS-02B 数据在霍山山前活动断裂带 1:5 万填图中的应用. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(增刊): 202-212

2.36 m 的全色影像, 成像质量较好, 已积累了覆盖我国大部分国土面积的 HR 数据, 已在农业、国土资源调查、城市规划等多个领域取得广泛应用^[5-12]. 但是, 在活动构造定量研究方面的应用还较少. 本文以山西霍山山前活动断裂带 1:5 万活动断层填图为例, 介绍我国国产高分辨率卫星在活动构造填图和定量研究中的应用.

山西霍山山前活动断裂带发育在临汾盆地东缘北段的霍山西麓, 北延与太原盆地东南缘的太谷断裂相接, 是山西地堑系中部一条重要的边界活动断裂带. 1303 年山西洪洞 8 级地震就发生在该断裂带上. 前人已对该断裂带的构造特征有过多讨论^[13-24], 早期研究认为断裂带全长约 60 km, 位于灵石县仁义镇以南, 总体走向 NE15°-20°, 断面倾向 NW, 倾角 65°-75°, 沿霍山西麓呈锯齿形展布. Xu 等^[14,15] 研究发现了长 45 km 的 1303 年地震地表破裂带, 获得了一批水平位错数据, 确认断裂以右旋走滑为主. Xie 等^[19]、Jiang 等^[20] 通过对绵山西麓断裂和太谷断裂晚第四纪以来活动研究, 认为洪洞 8 级地震的地表破裂带到达太原盆地东南部. 目前对霍山山前断裂带的几何展布和活动方式不同学者还存在着不同认识^[13-15,18,24]. 本文在前人的研究基础上, 通过 CBERS-02B 卫星高分辨率遥感卫星影像的详细解译, 结合野外考察验证, 分析霍山山前断裂带的几何展布特征和活动方式, 讨论 CBERS-02B 数据在提取活动构造定量信息方面的应用.

2 数据源及图像处理

2.1 数据源

CBERS-02B 卫星是我国与巴西合作研制的高分辨率遥感卫星, 采用太阳同步轨道设计, 可以获取 2.36 m 全色 HR 影像和 19.5 m 的 CCD 影像. 本次研究收集成像时间在 2007-2009 年 CBERS-02B 的 HR 和 CCD 数据, 见表 1. 此外, 为了对影像进行对比分析, 收集了成像时间为 2000 年的 ETM+ 影像, 空间分辨率为 30 m; 成像时间为 2008 年 11 月 29 日的 IRS-P5 数据, 空间分辨率为 2.5 m; 收集覆盖研究区的 ASTER-DEM 数据, 分辨率为 30 m; 覆盖研究区的 1:5 万地形图等.

图 1 为两景 CCD 影像及 HR (黑色矩形框) 影像覆盖范围, 可以看出影像成像质量较好, 覆盖整个研究区范围.

2.2 图像处理方法

本文按照 1:5 万活动断层填图技术规程^[4] 的要求, 对获取的遥感影像进行图像增强和配准处理, 便于解译成果统一管理和入库.

利用 ENVI 软件对各期影像进行数据格式转换、影像增强、几何精校正、正射校正等前期处理, 获得 HR 正射影像; 利用正射后的 HR 影像配准 CCD 影像, 选择地貌类型齐全的局部区域为实验数据, 使用多种融合处理算法进行比较, 最后选择 PC spectral sharpening 融合算法作为整个解译区的数据融合算法. 在 ArcGIS 平台下, 采用图层分层管理的方式, 以 1:5 万数字化的地形图为基础地理底图, 导入用于解译的融合影像和其他辅助图层, 所有导入的图层利用配准功能, 实现与地理底图的配准.

3 活动构造遥感解译标志及解译结果

3.1 活动断裂及构造地貌遥感解译标志

解译标志有直接标志和间接标志. 直接解译标志是指地物本身的有关属性在图像上的直接反映,

表 1 研究使用的 CBERS-02B 卫星数据列表

Table 1 Date list of CBERS-02B used in this research

No.	Imaging time	Path-row	Sensor
1	2008-04-28	4-59	CCD
2	2009-04-28	5-59	
3	2008-04-28	4-59-E-5	
4	2008-03-10	5-59-B-2	HR
5		5-59-B-3	
6		5-59-B-4	
7	2008-29-25	5-59-B-3	
8		5-59-B-4	
9		5-59-B-5	
10	299-12-05	5-59-A-2	
11	2007-11-24	5-59-B-4	
12		5-59-B-4	
13	2008-12-18	5-59-C-2	
14		5-59-C-3	
15	2009-01-13	5-59-C-2	

如地物的形状、大小、色调、阴影等;间接解译标志是指与地物的属性有内在联系,通过分析能够推断其性质的影像特征^[4]。活动构造遥感解译标志包括断裂带本身在影像上表现的线性特征,也包括沿断层带受构造活动控制的构造地貌特征。

霍山山前断裂带沿临汾盆地与太原盆地之间的霍山山前展布(见图 1),两侧地貌类型差异显著,整体线性较为显著,结合野外考察和影像特征,断裂带的解译标志有:(1)断层两侧分别是基岩山地和山前洪积扇及黄土丘陵,线性特征明显;(2)断开基岩地层或松散黄土层形成槽谷状地形,表现为线性延伸的山前谷地或槽状地形;(3)沿断裂带有规律分布的山脊垭口,沿断裂带连续分布的断层三角面、断层陡坎等构造微地貌。

图 2 为苑川一带 CCD 与 HR 融合后影像,白色箭头所指为断层展布位置,表现为连续的线性,沿断层带发育有连续出露的断层三角面、断层槽谷、山脊垭口等构造地貌,穿过断层沿线数条河流出现一定程度的扭曲(图中白色虚线所示),融合后影像结合了 HR 和 CCD 各自优势,断层及沿线构造地貌在影像上纹理和色调较为清晰,容易识别。

图 3 为石门峪局部区域的构造地貌解译图和野外验证确认的断层剖面。图 3(a) 为 HR 影像,箭头所指处为沿山前分布的霍山断层切割的断层陡坎,断层陡坎两侧分布人工改造的梯田及田垄,图 3(b) 为成像时间接近空间分辨率为 2.5 m 的 IRS-P5 全色影像,在地物纹理细节表达上与 HR 影像较为接近,两幅影像都显示了较为清晰的断层陡坎及田垄,利用断裂的解译标志及相关构造地貌单元影像上的纹理特征,获得这一局部区域的构造微地貌解译成果图(图 3(c)),断层错断了跨越断层的冲沟洪积扇砾石层,形成了高差约 10 m 的地貌陡坎(图 3(d)),根据区域地层分析,这套砾石层及表层黄土盖层形成于晚更新世至全新世,反映了霍山断层的最新活动特征,图 3(d)-(f) 为野外考察中确认的山前断层剖面,通过野外验证,确认了应用遥感解译可获得较为准确的断层展布位置及相关地貌信息。

图 1 CBERS-02B 卫星 CCD 及 HR 数据覆盖范围图

Figure 1 Map showing the footprints of CBERS-02B CCD and HR images

图 2 苑川附近霍山断裂带在融合影像上的线性显示

Figure 2 Fusion image showing the linear features of Mt.Huoshan piedmont active fault near Yuanchuan town

图 3 石门峪附近局部解译图及野外断层剖面照片

Figure 3 Interpretation map near Shimenyu village and confirmed fault profiles photos shot during fieldwork

图 4 霍山山前断裂带解译成果图

Figure 4 Interpretation map of the Mt. Huoshan piedmont active fault zones

3.2 活动断裂空间分布特征

利用建立的遥感解译参考标志, 采用目视综合解译的方式, 自南而北获取了霍山山前断裂带的空间展布特征 (图 4). 霍山山前活动断裂带的解译长度约 116 km, 从图 4 可以看出, 山西霍山山前断裂带的空间分布具有分段特征, 依据其几何结构特征, 结合前人研究资料, 自南向北将解译断裂带 (图 4 中红线部分) 分为 6 段, 各段长度及走向见表 2, 下面就各段的解译情况做描述.

表 2 解译断层分段统计表

Table 2 List of the interpreted fault segments

No.	Fault segments	Length (km)	Strike	Fault image features
1	Shucun-Guangshengsi	8.2	NE, NNE	Not clear
2	Guangshengsi-Licao	27.1	NNE	Significant linear feature
3	Licao-Sanjiao	13.6	NEE, NE	Triangles
4	Sanjiao-Renyi	17.1	NNE	Linear feature
5	Renyi-Jingsheng	27.0	NNE, NNW	Fault valley and ridge pass
6	Jingsheng-Longfeng	23.1	NE	Triangles
	In total	116.1

图 5 李曹镇附近断层带 3D 显示效果

Figure 5 Field shots

(a) and 3D visualization of HR image draped on DEM (b) near Licao town

(1) 最南段蜀村至广胜寺段, 解译长度 8.2 km, 该段南端被近东西走向的苏堡断裂所截止, 该段断裂在影像上线性特征不明显, 地貌上位于临汾盆地洪洞凹陷与盆地边缘的丘陵台地的分界断层. 其中, 蜀村至虎头山段为近 SN 向的槽谷地貌, 谷地宽 100 m, 虎头山至广胜寺段为松散层中的地貌坎特征, 为弧形展布特征, 该段是 1303 年洪洞地震震害调查结果较为集中的地段, 表现为砂土液化、地震滑坡等变形^[14], 由于距离地震发生已有数百年, 当时的震害信息在 HR 影像上基本不可识别.

(2) 广胜寺至李曹镇段, 该段解译主断裂长度 27.1 km, 走向近 NNE, 局部有转折, 该段断裂的线性特征最为清晰, 特别是自洪洞县明姜镇的兴旺峪村至霍州市陶唐峪一带的山前, 断裂在影像上横切了所有的地貌单元, 表现为断层三角面连续展布、槽谷地貌、断层陡坎等特征, 野外验证确认了解译成果 (见图 3). 将影像与 DEM 数据进行叠加, 进行三维显示, 有助于对植被覆盖或野外难以到达区域的断层及构造地貌信息提取, 此外在苑川一带, 发育有一条次级断裂, 延伸长度约 10 km, 为次生黄土与基岩山地的分界线, 在沙窝一带交汇于主断裂.

(3) 李曹镇至三教段, 该段主断裂延伸 13.6 km, 主要分布于李曹镇东南的山前, 影像上表现为清晰的线性特征, 断层三角面发育 (见图 5). 多处沟谷在断层通过处表现为悬谷特征, 断层上盘为山前冲

积、洪积砾石层,局部为厚层黄土丘陵,断层倾向 NNW,此外在李曹镇附近的松散层中发育数条次级断裂,断续延伸,这些解译断层的位置在野外得到确认。

(4) 三教至仁义段,该段解译长度 17.1 km,主要沿三教一带的山前分布,线性特征清晰,影像上三教乡的杀羊坪、梨湾一带线性特征明显。断裂带沿山前分布,在山前松散沉积物中发育有断层陡坎,反映了断裂的最新活动特征,该段在北部表现为山前垭口地貌,与仁义至静升段存在部分段落重叠。

(5) 仁义至静升镇段,该段解译长度 27.0 km,影像和 DEM 上均表现为山前显著的线性特征。仁义河左岸(南侧)表现为向东倾的系列断层三角面特征,仁义河以北表现山前槽谷地形及垭口地貌特征,至静升镇一端出现多条次级断层同时存在的特征,受断层活动影响,穿过断层的多条河流出现扭曲变形。

(6) 静升镇至龙凤镇段,该段山前出露的长度约 23 km,走向 NE,该段以北与太谷断裂带相接,影像上表现为清晰的线性特征, NW 倾,两侧地貌差异显著,下盘为抬升的绵山山脉,上盘为下降后的盆地。此外在静升盆地西缘该段内在静升镇周边,还存在着两条错断黄土丘陵的次级断裂带,地貌上显示较为清晰。

本次解译并结合野外系统验证,共获得整个霍山山前断裂带的长度约 116 km,包括了前人研究较为详细的断裂带南段,将前人称为绵山西麓断裂归入霍山山前断裂带^[19,20],断裂带的北端与太谷断裂带通过阶区相接,走向上由 NE 转为 NEE,而南端被东西走向的苏堡断裂截切。早期主要依据野外调查集中在霍山断裂带南段的霍州和洪洞山前一带,认为该断裂带全长约 60 km^[13],断裂带北段的绵山西麓断裂开展工作较少^[19],本次研究结合 1:5 万填图项目,利用 CBERS-02B 高分辨率遥感解译,系统研究了霍山山前断裂带的整体延伸情况,比较全面地获得了霍山山前断裂带的详细空间结构和相关构造地貌信息,为进一步分析断裂带的活动历史及评价地震危险性提供基础资料。

4 讨论

4.1 霍山山前断裂带的活动历史和活动方式

山西霍山山前活动断裂带形成于上新世初的强烈地壳运动,沿着霍山不对称背斜西翼形成,在上新世末、更新世都有活动,进入全新世以来仍有活动^[13]。Xu 等^[14]通过对断裂带南段的研究,认为晚更新世至全新世的断裂活动主要反映在现代地貌上,表现为冲沟发生变位、沉积地层被断层切割和沿断裂带出现黄土坎等;Xie 等^[19]对断裂带北段绵山西麓断裂的研究,发现多处断裂错断了晚更新世地层,表明其全新世有活动,结合太谷断裂西南段全新世古地震研究,认为霍山断裂北段全新世以来有活动;Jiang 等^[20]进一步认为 1303 年洪洞地震的地表破裂带长达 163 km,活动方式包括太谷断裂的大部分。断裂的活动方式方面,鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组^[13]研究认为,从区域构造分析霍山断裂的活动方式似应以右旋张扭活动,但地质证据只反映了强烈的垂直差异活动,尚未取得比较可靠的水平运动证据。Xu 等^[14]通过跨断裂水系错动和断层面擦痕特征,认为该断裂带以右旋走滑为主兼有一定倾滑分量的长期活动的断裂。

通过本次遥感解译和野外实地调查,我们认为,霍山山前断裂带是连接临汾盆地和太原盆地的一条重要边界断裂,断裂带的南段和北段具有共同的活动历史。该断裂的最新一次活动表现为 1303 年洪洞 8 级大地震的应力释放。上述文献中推测的 1303 年破裂带长度超过 160 km,包括了太谷断裂的大部分,从两条断裂在影像上切割两侧地层的清晰程度分析,太谷断裂的活动性较弱,历史记载太谷断裂没有发生 7 级以上地震,因此认为断裂带的活动可能到图 4 所示的龙凤镇一带。支持断裂带全新

图 6 经野外验证的两处断层陡坎地貌及对应影像

Figure 6 Two fault scarps interpreted from CBER-02B HR images and their field shots (a), (b) are the HR images showing the fault scarps; (c), (d) are their field shots

图 7 (a) 断层带擦痕产状分布及 (b)–(d) 野外擦痕照片

Figure 7 (a) Statistics of the fault scratches; (b)–(d) some field shots

世活动的证据是, 根据解译结果, 选择了几个重点部位开展了探槽开挖和剖面清理 (图 6), 通过对错断地层的测年数据分析, 确认断层错断了中晚全新世的地层。

结合野外古地震研究和最新断层面擦痕证据, 擦痕侧伏角近直立, 反映了断层以垂直运动为主兼有少量的右旋分量 (图 7). 野外测量了 18 组最新断层擦痕产状, 其主要集中在 70° – 90° (图 7(a)), 反映了以垂直运动为主, 兼有少量的水平位移量. 至于沿断裂带冲沟发生变位错动, 如前所述, 野外调查从断层擦痕、断裂带节理产状等分析, 水平运动有左旋也有右旋情况, 在苑川一带, 冲沟的右旋位错也仅出现在几个局部位置, 其他地方跨断层冲沟的水平变动并不明显 (图 2). 可能的解释是该断裂带全新世以来以垂直运动为主, 全新世以前不排除有以走滑分量为主的活动时期.

4.2 CBERS-02B 卫星数据在活动构造定量研究中的应用

活动断层定量研究的主要参数包括断裂长度和分段长度、累计位移量和同震位移、滑动速率、古地震、离逝时间及复发周期等^[2], 其中前两项与断层的几何学特征有关, 后边参数性的获得也一定程度依赖几何定量信息的获取.

活动断层的空间展布长度可通过高分辨率遥感卫星数据的遥感解译获得, 获取的断层分布位置还需要野外验证确认. 以走滑断层为主的断层活动的同震位移和累计位移量可通过震前震后的影像对比分析, 利用高分辨率卫星结合必要的野外工作, 可以系统获取^[25], 对以垂直运动为主的活动断层, 位移量的量值无法通过影像直接量取, 但是利用影像对断层沿线地貌单元的变形进行分析, 提取反映断层活动引起的地貌变形如断层陡坎、断层槽地等微地貌信息, 对筛选野外工作重点区域具有极大的帮助. 本次研究的断层以垂直运动为主, 利用影像特征先后在洪洞县东北山前发现多处断层陡坎, 与周边的田垄和人工陡坎进行区别, 通过这些洪积扇体变形数据的野外测量及相关年代学数据, 可以获得断裂带的滑动速率.

如上所述, 高分辨率遥感数据在活动构造研究中的应用主要集中在获取活动断层的长度和分段长度方面; 位移量方面, 对走滑断裂而言, 可以直接量取累计位移量数据 (水平运动量), 利用震前震后的影像对比, 还可以获得同震位移量, 对正断层而言, 可以帮助选择可进行野外测量的重点区域如断层陡坎位置等. 除了可以获取如上所述的几何信息外, 高分辨率遥感卫星也用来研究活动断裂带沿线的构造地貌、次生地质灾害等方面.

5 结论

(1) 应用 CBERS-02B HR 数据开展山西霍山山前断裂带 1:5 万遥感解译, 获得完整的断裂带的空间展布特征, 主断裂解译长度约 116 km, 走向 NE, NNE, 依据几何结构及影像特征可分为 6 段, 结合野外最新擦痕证据, 霍山山前断裂带南段和北段在全新世以来以垂直运动为主, 跨断层的水系受断层活动影响发生一定的变形, 沿断裂带南段部分水系同步错动可能反映了全新世之前断层的活动状态有较大的走滑分量.

(2) 高分辨率遥感卫星在活动构造定量研究中主要用于获取断裂带的长度和分段长度, 获取走滑断裂的水平同震位移和累计位移量, 对垂直运动为主的断裂, 可通过获取反映断层多次活动的断层陡坎、断层槽谷等信息来确定进一步野外工作重点区. 结合本次研究, 认为 CBERS-02B 星数据可以用于我国 1:5 万活动构造填图研究中.

致谢 CBERS 数据下载自 <http://www.cresda.com/com/n16/index.html>, ASTER-DEM 数据来自 <https://www.lpdac.usgs.gov>, 特向以上单位表示诚挚的谢意.

参考文献

- 1 Deng Q D, You H C. Characteristics of active graben system around the Ordos Plateau and their mechanism (in Chinese). Research on Modern Tectonics. Beijing: Seismological Press, 1985. 58–78
- 2 Deng Q D, Chen L C, Ran Y K. Quantitative studies and applications of active tectonics (in Chinese). Earth Sci Front, 2004, 11: 383–392
- 3 Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. Basic characteristics of active tectonics of China. Sci China Ser D- Earth Sci, 2003, 46: 356–372
- 4 China Earthquake Administration. Stipulation on Technical System for China Earthquake Active Fault Surveying (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2005. 8–11
- 5 Jing F, Shen X H, Fang C, et al. The application of CBERS-02B CCD data in earthquake active fault studying (in Chinese). In: Disquisition Collection on the Application and Research of CBERS-02B Data. Beijing: China Aerospace Press, 2008. 198–207
- 6 Yang W N, Liao C G, Pu G L, et al. A new method for digital regional geological survey: 3D visualization of geological interpretation of remote sensing images and image dynamical analysis (in Chinese). Geol Bull China, 2003, 22: 60–64
- 7 Dou A X, Wang X Q, Wang D L, et al. Remote sensing image processing technique in active faults survey based on multi-source data (in Chinese). Earthq, 2010, 30: 123–128
- 8 Xu Y R, Shen X H, Hong S Y, et al. The research on Shenzhen active faults using multi-style remote sensing data (in Chinese). Earthq, 2009, 29(Supp): 154–163
- 9 Jiang D W, Li D M, Jiang F, et al. A tentative analysis of remote sensing interpretational key for the neotectonics in Yangtze river basin (in Chinese). Rem Sens Land Resour, 2010, 86: 113–117
- 10 Ren Z K, Tian Q J, Chen L Z. Seismotectonic interpretation along central section of Chinese north-south belt from ETM image (in Chinese). Earthq, 2005, 25: 127–132
- 11 Chen L C, Chen G H, Chen L Z, et al. ETM image characteristics and interpretation of active tectonics of the area the Kalpintag thrust system (in Chinese). Seism Geol, 2006, 28: 289–298
- 12 Li D R, Wang M, Hu F. Utilizing Chinese high-resolution satellite images for inspection of unauthorized constructions in Beijing. Chin Sci Bull, 2009, 54: 2524–2534
- 13 Working group on active fault system around the Ordos Plateau of State Seismological Bureau. Active fault system around the Ordos (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1988. 1–328
- 14 Xu X W, Deng Q D. The features of late quaternary activity of the piedmont fault of Mt. Huoshan, Shanxi Province and 1303 Hongdong Earthquake ($M_s=8$) (in Chinese). Seism Geol, 1990, 12: 21–30
- 15 Xu X W, Deng Q D, Han Z J. Research on late quaternary activity and paleoseismic of the piedmont fault of Mt. Huoshan (in Chinese). In: Ma Z J, ed. Research on Earthquake and Disaster Mitigation System in Linfen City, Shanxi Province. Beijing: Seismological Press, 1993. 136–158
- 16 Seismological Geological team of State Seismological Bureau, Department of Geological and Geography of Peking University. Characteristics of active tectonic system in Linfen basin and adjacent region. 1975. 1–45
- 17 Deng Q D, Wang K L, Wang Y P, et al. On the tendency of seismicity and their geological set-up of seismic belt of the Shanxi graben (in Chinese). Chinese J Geol, 1973, 2: 37–47
- 18 Wang N L, Yang J C, Xia Z K, et al. Cenozoic sedimentation and tectonic geomorphology of the Shanxi grabens (in Chinese). Beijing: Science Press, 1996. 1–392
- 19 Xie X S, Jiang W L, Wang H Z, et al. Holocene activities of the Taigu fault zone, Shanxi Province, in relation to the 1303 Hongdong $M=8$ Earthquake (in Chinese). Acta Seism Sinica, 2004, 26: 281–293
- 20 Jiang W L, Deng Q D, Xu X W, et al. Surface rupture zone of the 1303 Hongdong $M=8$ earthquake, Shanxi Province (in Chinese). Acta Seism Sinica, 2004, 26: 355–362
- 21 Cheng S P, Deng Q D, Min W, et al. Yellow river and Quaternary tectonic movements of the Ordos Plateau (in Chinese). Quaternary Sci, 1998, 3: 238–248
- 22 Ma B Q, Xu G L, Sheng X Q, et al. A study on the tectonogeomorphology along the Jiaocheng Fault, Shanxi Province (in Chinese). In: Tectonic and Crustal Stress Collection 12. Beijing: Seismological Press, 1999. 7–15
- 23 Yang J C, Li Y L. Principles of Geomorphology. Revision edition. Beijing: Peking University Press, 2005. 188–210

- 24 Zhang Y Q, Mercier J L, Vergély P. Extension in the graben systems around the Ordos (China), and its contribution to the extrusion tectonics of south China with respect to Gobi-Mongolia. *Tectonophysics*, 1998, 285: 41–75
- 25 Fu B H, Shi P L, Jia Y Y. Late Cenozoic tectonogeomorphic growth and drainage response along the large scale strike slip fault system in Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin J Geol*, 2009, 44: 1342–1363

Application of CBERS-02B satellite images to Mt. Huoshan piedmont active fault mapping (1:50000 scale)

XU YueRen^{1,2}, SHEN XuHui², HE HongLin¹, CHEN LiZe^{2*} & SUN HaoYue¹

1 *National Active Fault Research Center, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;*

2 *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

*E-mail: yuefei189@gmail.com

Abstract This paper assesses the application of remote sensing interpretations based on China-Brazil Earth Resource Satellite (CBERS)-02B CCD and HR images in active fault quantitative research, using a case study of the Mt. Huoshan piedmont active fault zones, Shanxi Province. We show that the active fault has a northeast-trending length of more than 116km and can be divided into six segments based on the structure of its geometry, and that vertical movement has occurred during the Holocene along all segments. We discuss the uses of CBERS-02B images for quantitatively establishing fault and segment length and locations, for collecting information on tectonic geomorphology such as fault scarps and faulting valleys along the fault zone and for selecting sites for detailed fieldwork. We conclude that CBERS-02B images and follow-up serial ones can be effectively used in active faults mapping (1:50000 scale) and related quantitative research.

Keywords CBERS-02B satellite, active faults, remote sensing interpretation, Mt. Huoshan piedmont active fault zones