

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0548-20

龙门山构造带南段向西南延伸的 遥感影像证据及地震地质意义

马晓雪^{1,2,3,4}, 吴中海^{2,4}, 李家存^{1,3}, 周春景^{2,4},
李 凯^{1,2,3,4}, 王继龙^{2,4,5}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3. 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048;

4. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

5. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 在系统总结活动断裂遥感影像解译标志的基础上, 利用 Landsat ETM、Google Earth 及 ASTER GDEM 等影像资料, 结合前人研究成果, 重点分析了龙门山构造带南段主要活动断裂的空间展布及几何学与运动学特征。研究表明, 龙门山构造带在向南延伸过程中发生了明显的断裂分散现象, 整个断裂带逐渐展宽, 主要包括 5 条断裂带且其中包含多条次级断裂, 至最南端被北西向鲜水河左旋走滑断裂带阻挡。其中活动性较为明显的断裂自西向东主要有 4 条: 泸定断裂、天全断裂、芦山断裂和大邑—名山断裂, 前两者是北川—映秀断裂的南延分支, 而后两者是安县—灌县断裂的南延部分。由于龙门山构造带南段的构造变形被分解至多条次级断裂上, 导致单条断裂错断地表的的活动迹象明显变弱, 因此单条断裂的潜在发震频率和强度也将相应变小, 但潜在震源区会更为分散。结合已有的地震地质资料认为, 未来应注意泸定和雅安 2 个地区的地壳稳定性及未来强震危险性问题。

关键词: 龙门山构造带; 遥感解译; 活动断裂; 潜在震源区; 芦山地震

中图分类号: P627; P315.2

文献标识码: A

龙门山右旋走滑逆冲构造带构成了青藏高原东缘的主要边界, 也是我国南北地震带的重要组成部分。该构造带位于松潘—甘孜造山带与扬子准地台的接合部位, 是中国东西部构造地貌陡变带, 由于其对认识青藏高原东部的动力学及南北地震带的地震活动具有重要意义, 因此一直为中外研究者所关注^[1]。2008 年 5 月 12 日四川汶川 M_s 8.0 级地震和 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M_s 7.0 级地震均发生在龙门山断裂带上^[2~4]。如此短时间内, 沿龙门山断裂带相继发生 2 次强震, 此后该断裂带南段是否还会发生强震成为关注的焦点。由于龙门山断裂带南段处于中高山区, 地形起伏大, 植被发育, 交通不便, 传统的断裂调查方法难度较

收稿日期: 2016-03-25

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120114002101, DD20160268); 国家自然科学基金项目 (41571013, 41171009)

作者简介: 马晓雪 (1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事 3S 技术与地学应用研究。E-mail: mxx120591@sina.com

通讯作者: 吴中海 (1974-), 男, 博士, 研究员, 主要从事新构造和活动构造研究。E-mail: wzhh4488@sina.com

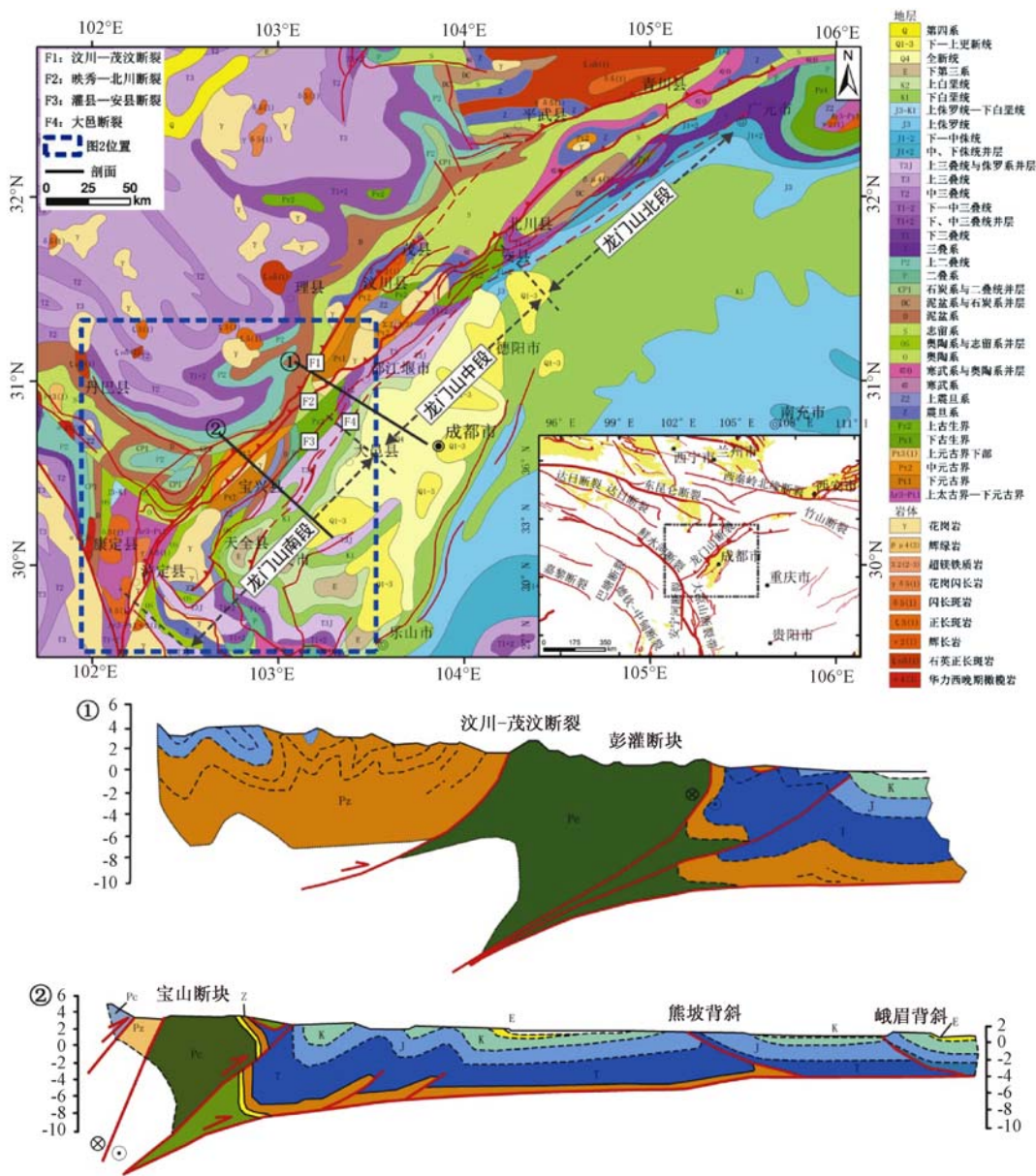
大。前人曾对龙门山断裂带南段的活动性做过一些调查和分析,但是针对该断裂带南段如何进一步向西南延伸还存在较大争议。遥感技术凭借其宏观性、直观性和时效性特点,已成为活动断裂传统调查方法的有益补充。遥感影像可以从宏观尺度上揭示活动断裂的空间展布,为研究断裂活动状态及其与地震活动的相关性、识别发震构造与强震的孕育地段提供丰富信息^[5],前人已成功将遥感影像应用于活动断裂的研究中^[6~9]。本文在总结前人研究成果及活动断裂遥感影像标志的基础上,综合利用 Landsat ETM、Google Earth 及 ASTER GDEM 等多源影像数据,对龙门山构造带南段向西南方向延伸情况进行遥感解译,并结合地震地质资料对该区活动断裂的活动性进行分析和总结,以期能够更深入地认识该区的活动构造,为更好地开展防震减灾工作提供参考依据。

1 区域概况

龙门山是青藏高原东缘的一条边界山脉,同时也是巴颜喀拉块体与华南地块相互碰撞的界线,北东与大巴山相交,南西被鲜水河断裂相截,是我国南北地震带的重要组成部分^[10]。龙门山属于青藏高原东缘的陆内造山带,也是中国西部地质、地貌、气候的陡变带。在地貌上,该区具有青藏高原、龙门山高山、成都盆地和四川盆地东部隆升区4个一级地貌单元,其中龙门山高山与山前地区的高差大于5 km^[11],是青藏高原边缘山脉中陡度变化最大的山脉,目前仍以0.5~0.6 mm/a的速率持续隆升^[12]。在区域地质上,该区自北西向南东由松潘—甘孜造山带-龙门山构造带-前陆盆地-前陆隆起带等4个构造单元构成了一个完整的构造系统^[13]。龙门山地区地层结构复杂,是一个独立的地层复合体,主要发育有志留系—泥盆系浅变质岩、前寒武系杂岩、上古生界—三叠系沉积岩和侏罗系—第三系红层等岩石地层^[14]。

龙门山构造带位于四川盆地西缘,既是青藏高原的东界,又是龙门山前陆盆地的西界,属于松潘—甘孜造山带前缘冲断带,它西南起自泸定、天全一带,向北东延伸经宝兴、都江堰(原称灌县)、茂汶、北川、广元后到达陕西勉县一带,总体呈北东—南西向展布,长约500 km,宽30~40 km^[14]。该构造带由一系列大致平行的叠瓦状冲断带构成,具有典型的逆冲推覆构造特征^[11],由4条主干断裂组成,自西向东分别是龙门山后山断裂(汶川—茂汶断裂)、主中央断裂(映秀—北川断裂)、前山断裂(安县—灌县断裂)和山前隐伏断裂(广元—大邑断裂)^[15~17]。龙门山后山带主要为变质岩系和杂岩体构成的冲断掩覆体,显示为厚皮冲断构造;而龙门山前山带由北东向展布的短轴背斜、向斜和逆冲断层组合而成,显示为叠瓦式推覆体和飞来峰构造^[22]。沿走向上,以北川—安县与卧龙—怀远一线为界可将该构造带分为北、中、南3段,它们在变形样式、演化历史及相关的前陆沉积等方面存在明显差异^[18](见图1)。初步研究表明,晚新生代以来龙门山构造带以北北东向的右行走滑作用为主,并伴随有少量的逆冲分量^[19~24]。地质资料显示,龙门山构造带北段活动性相对较弱,中段和南段活动性相对较强,尤其是与岷山断裂相联系的中段,是地震的多发地带^[25],在不到5 a的时间里,龙门山连续发生了汶川地震和芦山地震,造成重大的人员伤亡和经济损失,也给周边地区带来了重大影响(见图2)。

本文主要研究区为龙门山构造带南段,主体由宝兴杂岩体和山前逆冲带组成^[27],第四纪盆地与地层不发育,顺地层发育一系列平行的北东向断层带和弧形冲断层束^[28],向西南延伸被北西向鲜水河断裂所截切。许多学者对该断裂带南段进行了调查和研究,其中:邓起



Pc—前寒武系；Z—新元古系（震旦系）；Pz—古生界；T—三叠系；
 J—侏罗系；K—白垩系；E—始新统；红线为新生代断裂

图1 龙门山断裂带及邻区地质简图和地层剖面^[26]

Fig. 1 Simplified geologic map and stratigraphic profiles of the Longmenshan fault zone and its adjacent region

东^[27]、张岳桥等^[28]认为龙门山断裂带南段主要发育的断裂包括后山的五龙断裂和冷碛断裂、中央的双石—西岭断裂和前山的大邑断裂，与中段发育的主要断裂不完全是一一对应的，两者之间的运动学行为也是不一致的；而陈立春等^[29]则认为龙门山南段断裂延续了中段的4条主干断裂，主要由后山的耿达—陇东断裂、中央的盐井—五龙断裂、前山的大川—双石断裂和山前的大邑断裂组成，周边发育有一系列平行的次级断裂，至宝兴附近，断裂向北西和南东呈帚状发散，宽度不断增大（见图3）。

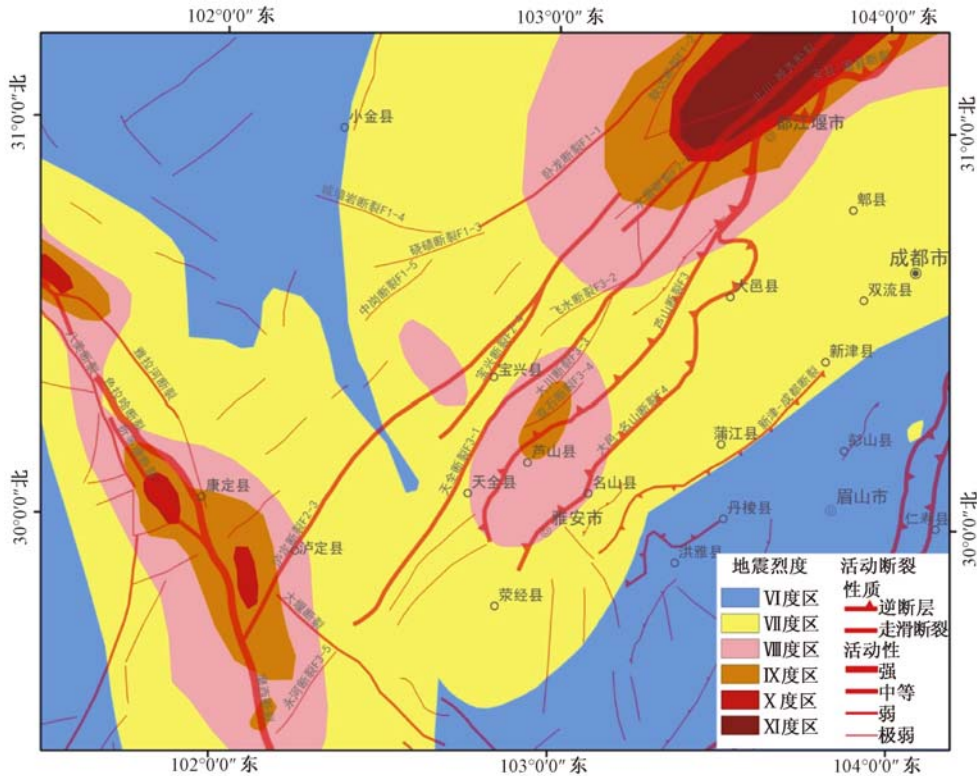


图2 龙门山断裂带南段地震烈度图

(数据来源: 中国地震信息网 <http://www.csi.ac.cn/publish/main/837/1074/index.html>)

Fig. 2 Earthquake intensity map of the southern segment of Longmenshan fault zone

总结以上不同观点, 学者们对龙门山构造带南段的空间展布及向西南方向的延伸情况存在争议, 综合前人研究成果与最新研究进展, 本文通过解译高分辨率遥感影像, 寻找龙门山断裂南段向西南段延伸的证据。

2 遥感影像解译标志

活动断裂是现今地震构造时期能够产生错断现象使地壳发生变形的地质活动^[30], 一条初具规模的活动断裂, 可以错断新近系—第四系, 或者控制第三系—第四系的沉积及相应时代的岩浆喷发, 或者形成各种构造地貌形态和控制两侧的地貌差异。遥感影像不仅可以直观地反映活动断裂的空间展布, 还可以宏观地反映断裂的规模大小、活动强度以及构造地貌特征, 在遥感影像上主要通过形态特征信息和色调信息来判定活动断裂。归纳前人总结的遥感影像标志, 主要包括3类, 即线性标志、垂直错动标志和水平错动标志^[5,8-9,32-34]。

2.1 线性标志

活动断裂在遥感影像上一般以线性展布, 呈现浅色线条或深色线条, 且与两侧色调差异较大, 易于在遥感影像上识别。线性特征越明显、两侧色调反差越大的断裂, 其活动时代越新, 活动强度也越大。活动断裂的线性标志主要表现为以下2点: ①活动特征点的线状展布, 如: 水系同步拐点的连接线, 湖泊与负地形的线状排列, 一系列冲-洪积扇顶点的连接

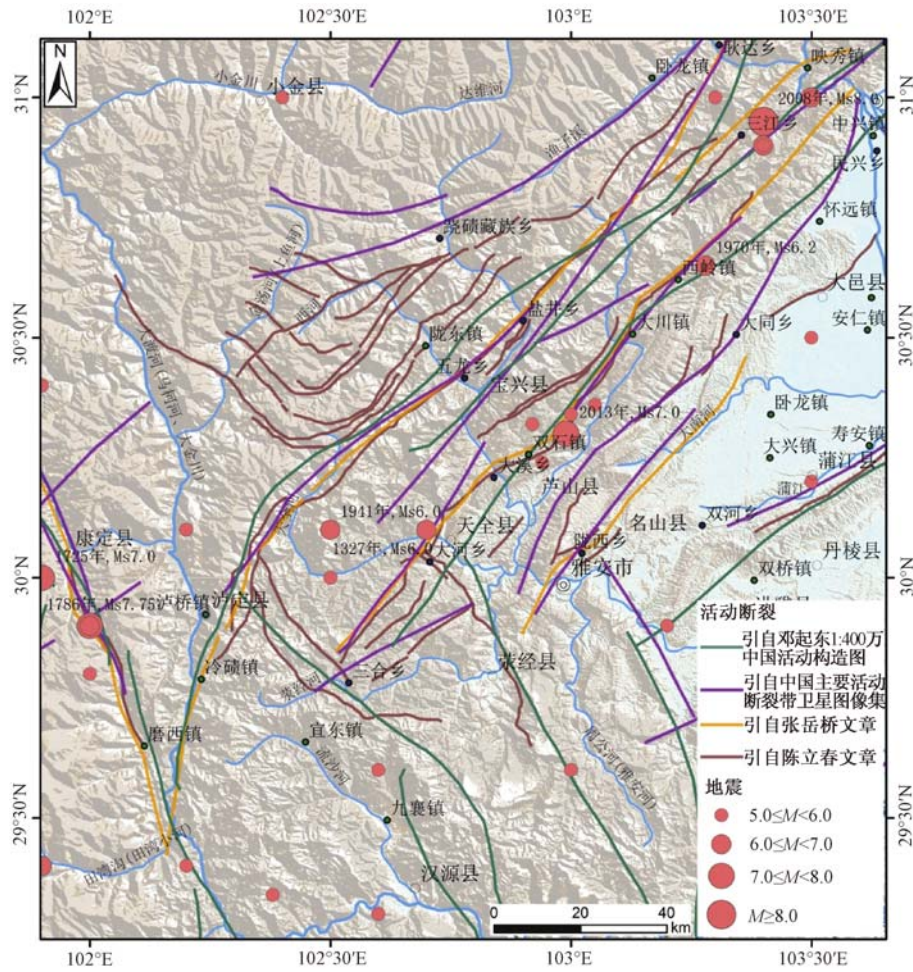


图3 龙门山断裂带南段活动断裂研究现状与地震分布图 (ASTER GDEM) [27~30]

Fig. 3 Active faults and earthquakes in the southern segment of Longmenshan fault zone (ASTER GDEM)

线, 新生代侵入岩体或火山口的线状展布, 温泉与岛屿的线状展布, 地震引起的地裂缝断续线性展布等; ②不同色调与形态的分界线, 如: 隆起区与沉降区的分界线, 第四纪松散沉积物与基岩的分界线, 植被差异分界线, 松散沉积物富水程度差异分界线。

2.2 活动断裂的垂直错动标志

断裂活动可能错断新地层, 也可能控制两盘第四系沉积的差异, 造成两盘发育不同的地貌类型与形态, 甚至引起地貌形态的变形。在遥感影像上可根据影像信息特征、形态特征及光谱特征对其进行分析, 其标志主要有以下几个方面:

①错动地层。在分析断裂新构造时期活动性的时候, 应看其是否切错新近系—第四系, 或者是否控制着新近系—第四系的沉积。

②断层崖与断层三角面。断层崖与断层三角面沿断裂不连续线状展布, 一般而言, 三角面的规模越大, 越高峻陡峭, 断裂的活动也越强烈。

③断陷盆地与湖泊。多个断陷盆地和湖泊沿断裂带串珠状分布。

④水系展布特征变化。垂直差异错动的活动断裂两侧, 水系呈现出不同的形式, 上升盘的水系一般呈深切切割的树枝状或格子状, 而在下降盘水系呈树枝状、平行状、羽状或扇形状。

⑤冲-洪积扇标志。断裂两侧强烈的垂直差异错动,在断裂两侧形成不同的地貌类型,强烈下降的一盘发育了一系列冲-洪积扇,它们沿断裂并列展布,形成了一排整齐的扇形地。同一条断裂控制的几期冲-洪积扇可在一定程度上反映断裂垂直差异错动的阶段性变化。

2.3 活动断裂的水平错动标志

走滑断裂往往引起地质地貌体的水平错动变形,其产生的走滑位移量,小则几米、几百米,大则几千米、几十千米,甚至几百千米。由于断裂活动具有继承性,其位移量是多期活动的累积结果,因此累积位移量的大小也反映了断裂的活动强度。走滑断裂在遥感影像上线性平直,还可见到地层和地貌形态的扭动,可通过以下标志进行识别:

①地层。断层活动可引起两盘地层的牵引、拖曳、变形、褶曲与错断,主要表现为地层的重复与缺失、岩层产状的突然改变等。

②山脊错断。活动强度较大的断裂可错断新生代发育形成的山脊、山嘴、条带状剥夷面等地貌形态,使其发生扭动变形,在遥感影像上可根据其被错断后凸出的方向判断断裂的运动方向。

③盆地与湖泊的扭动变形。如条带状或菱形状的拉分盆地,“L”形的湖泊等,并可根据其几何形态较可靠地判断断裂的运动方向。

④水系、阶地的同步转折。断裂活动可导致河流在平面上呈现不同的形态,弧形的凸出方向一般指示了所在盘的平移前进方向,“S”形、“L”形及“反Z”形反映了断裂的左旋运动性质,反之则为右旋运动性质。

⑤谷地的同步不对称。跨断裂的河流在断裂平移错动的过程中同时发生旁蚀作用,造成两岸谷坡不对称,而旁蚀形成的侵蚀岸和陡谷坡则反映了该盘的前进方向。

⑥冲-洪积扇形态的变形。当扇形地的形态发生偏移变形,中轴线与断裂斜交时,表明断裂具有水平错动,且偏移摆动方向即为该盘的平移运动方向;同时,不同期的洪积扇如果表现为侧叠式,也可作为断裂平移错动的佐证,堆积物的由老至新则反映了所在盘的平移运动方向。

⑦冲沟错动及断头断尾沟。不同时代发育的冲沟错距有所差异,当一次断层水平错动的幅度超过沟谷宽度时,便会形成断头沟或断尾沟,这些标志在影像上清晰可见。

3 龙门山南段主要断裂的遥感标志

龙门山南段主要以出露五龙、宝兴基底杂岩及其前缘发育飞来峰为典型特征。通过解译断裂,发现龙门山断裂带南段在遥感影像上的线性特征明显,而且发育了一系列反映断裂的微观标志,如:断层崖与断层三角面的线状展布,水系及冲沟的同步转折,冲-洪积扇的形态变化,断层槽谷的发育,河流阶地的同步错动及断头、断尾沟等。本文根据这些遥感影像标志解译了龙门山断裂带南段的主要活动断裂(见图4),对龙门山断裂带南段的卧龙—碛磧断裂带、泸定断裂带、天全断裂带、芦山断裂和大邑—名山断裂的活动标志与特征进行了分析。

3.1 卧龙—碛磧断裂带

遥感解译结果显示,后山的汶川—茂汶断裂向西南延伸为卧龙—碛磧断裂带(F1),该断裂带在延伸过程中发散为多条次级断裂,线性影像不连续,断裂活动性明显减弱,并逐渐被尖灭。卧龙—碛磧断裂带可分为5条分支断裂,包括卧龙断裂(F1-1)、耿达断裂(F1-2)、碛磧断裂(F1-3),城墙岩断裂(F1-4)和中岗断裂(F1-5)(见表1),总体呈爪字型分布(见图5a)。其中,耿达断裂经灯草坪、耿达乡向西南延伸至东经 $103^{\circ}15'$ 后线性影像消失,

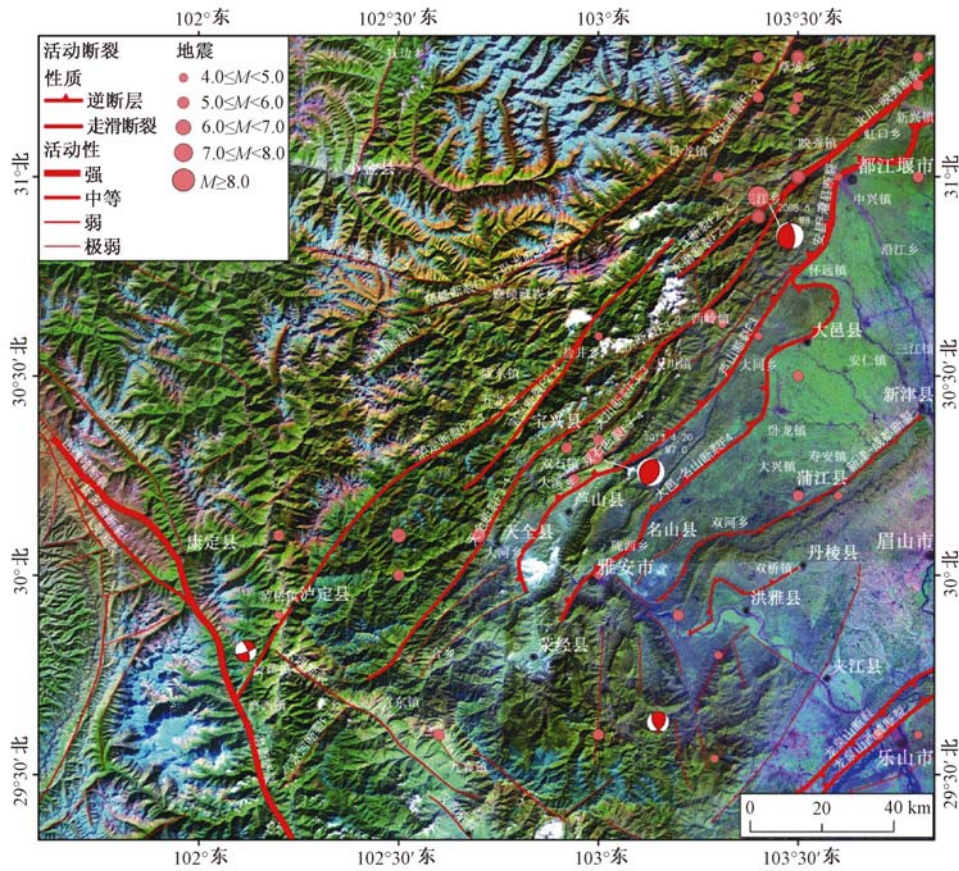


图4 龙门山断裂带南段几何展布及地震分布图 (ETM7)

Fig.4 Geometric distribution of the south segment of Longmenshan fault zone and earthquake distribution (ETM7)

流经耿达乡的二河在穿经断裂时出现向右偏转的现象；另一条卧龙断裂沿耿达断裂北西侧经卧龙镇延伸至宝兴河东侧终止，该断裂中段线性特征显著，断裂平直，控制河谷发育，沿河谷北侧可见一系列线性展布的断层三角面和雁列状冲沟，在遥感影像上其色调与周围对比明显，雁列状冲沟同步向右偏转（见图5b），指示断裂存在垂直和水平两种运动形式。断裂再向西南延伸，发散为3条次级断裂，影像线性特征不明显。城墙岩断裂延伸至铜槽子工棚可见到与卧龙断裂中段类似的影像特征，ETM影像显示断裂两侧色调差异明显，表现为色调异常带（见图5c），断层三角面和冲沟沿断裂整齐排列且冲沟表现向右偏转的迹象（见图5d）。

表1 卧龙-碛碛断裂带主要断裂参数及遥感标志

Table 1 The major activity faults' parameters and remote sensing marks in Wolong-Yaoji fault

断裂带	编号	断裂名称	走向	长度/km	性质	活动性	遥感标志
耿达—陇东断裂带	F1-1	卧龙断裂	NE	78	右旋走滑	弱	断层三角面和雁列状冲沟，冲沟右旋错动
	F1-2	耿达断裂	NNE	26	右旋走滑	极弱	水系向右偏转
	F1-3	碛碛断裂	NEE	35	右旋走滑	极弱	影像特征不明显
	F1-4	城墙岩断裂	E	39	右旋走滑	极弱	断层三角面和雁列状冲沟，冲沟向右偏转
	F1-5	中岗断裂	NE	26	右旋走滑	极弱	影像特征不明显

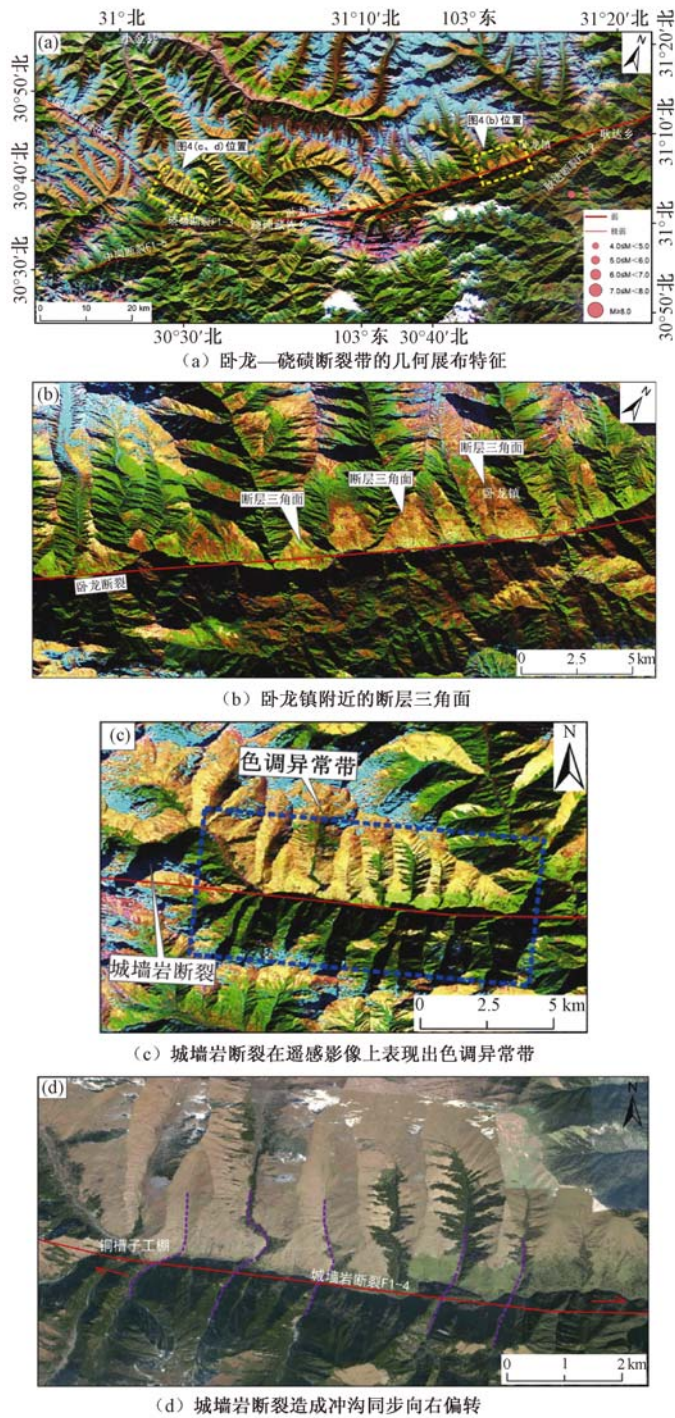


图5 卧龙—晓碛断裂带几何展布及错断地貌特征

Fig. 5 Geometric distribution of Wolong-Yaoji fault zone and and features of displacing landforms

对遥感影像解译结果及耿达—陇东断裂带中各断裂影像特征进行分析后发现, 耿达—陇东断裂带的连续性较差, 断裂向四处分散, 只有卧龙断裂的影像特征较明显; 而且该断裂带周围的地震分布极少, 仅在耿达断裂南侧有一个 $M5.0$ 级中等地震, 因此笔者认为耿达—陇

东断裂带的活动性较弱。

3.2 泸定断裂带

泸定断裂带北段又称盐井—五龙断裂带，是由中段的中央北川—映秀断裂向西南延伸而来。北川—映秀断裂在向西南延伸的过程中，在水磨镇东北侧 7 km 处分为 2 条支断裂，其中北侧的断裂向西南延伸成为泸定断裂带（F2），南侧断裂延伸成为大川—双石断裂带。泸定断裂带主要包括 4 条断裂：水磨断裂（F2-1）、三江断裂（F2-2）、泸定断裂（F2-3）和宝兴断裂（F2-4）（见表 2）。水磨断裂、三江断裂与泸定断裂呈左阶雁列展布（见图 6a），水磨断裂在水磨镇附近影像特征明显，沿线性沟谷延伸，断裂两侧发育与断裂延伸方向一致的断层陡坎。三江断裂在邓家村一带，断裂影像色调与两侧形成鲜明对比，沿断裂两侧发育一系列断层崖和断层三角面。泸定断裂向南经盐井—五龙—明礼—泸定向西南呈弧状延伸，最终被北向西向鲜水河断裂带的磨西断裂所截。遥感影像显示，断裂在宝兴县东升村附近切错一系列断层崖，形成断层三角面，并沿断裂整齐排列（见图 6b）；断裂向南延伸在穿经的黑悬沟及其两侧的冲沟表现出同步向右偏转迹象，错动距离分别为 720 ± 20 m， 430 ± 15 m， 1680 ± 25 m（见图 6c）；断裂在泸定县附近线性特征清晰且平直，穿经泸定县的大渡河在该处发生明显的右旋错动，错动位移量高达 4.7 ± 0.5 km（见图 6d）。宝兴断裂沿泸定断裂南侧延伸至东经 $102^{\circ}37'$ 左右，其北段线性影像特征显著，断裂控制河流发育，河流整体走向平直，下切形成深切峡谷，在穿过宝兴县的西河时，西河沿断裂发生明显的右旋错动，错动位移量为 6.4 ± 0.5 km（见图 6e），与泸定断裂错断大渡河的位移量相当，如果以距今约 5.0 Ma（上新世以来）作为泸定断裂带开始活动的时间，则该断裂带的右旋走滑速率为 $0.84 \sim 1.38$ mm/a，属于中等活动性断裂。

表 2 泸定断裂带主要断裂参数及遥感标志

Table 2 The major fault parameters and remote sensing marks in Luding fault zone

编号	断裂名称	走向	长度/km	性质	活动性	遥感标志
F2-1	水磨断裂	NE	35	右旋走滑	中等	断裂沿沟谷延伸，断层陡坎发育
F2-2	三江断裂	NE	24	右旋走滑	极弱	发育一系列断层崖和断层三角面
F2-3	泸定断裂	NE—NNE	168	右旋走滑	中等	大渡河发生明显偏移，偏移量高达 4.7 ± 0.5 km，山脊错动
F2-4	宝兴断裂	NE—NEE	49	右旋走滑	中等	西河发生明显偏移，偏移量高达 6.4 ± 0.5 km

泸定断裂带中各断裂的遥感影像标志显示，该断裂带主要表现为走滑错动，局部兼有逆冲现象。其中，泸定断裂的线性影像特征明显，断裂连续性较好，通过该断裂的大渡河发生了显著偏移；同样，穿过宝兴断裂的西河也发生了明显错动，两处水系错动距离相当。因此笔者认为泸定断裂带比耿达—陇东断裂带活动性略强，属于中等活动性断裂。

3.3 天全断裂带

中段的北川—映秀断裂的另一条分支向西南延伸为天全断裂带（F3），该断裂带的北段与前人所述的大川—双石断裂北段重合；再向南，主干断裂主要沿大川、双石的西侧延伸，与前人所述的大川—双石断裂已经不是同一条断裂。天全断裂带主要由天全断裂（F3-1）、飞水断裂（F3-2）、大川断裂（F3-3）、双石断裂（F3-4）和永河断裂（F3-5）等 5 条断裂组成（见表 3）。其中天全断裂经鸡冠山乡—西岭镇—灵关镇—天全西延伸（见图 7a），断裂北段线性特征清晰，主要沿线性沟谷展布，断裂两侧发育一系列断裂谷，断裂在大邑双河一带控制口江支流，并切割河流谷坡，形成断层崖、断层沟槽及垭口。在油茶树一带，沿断裂一侧分布一系列断层崖，在断层沟槽中控制着第四纪地层的分布。在西岭镇，见一块长椭圆形岩块位于断裂谷中，该岩块是一个巨型滑坡体，且可以看到该滑坡体受到断裂右旋走滑

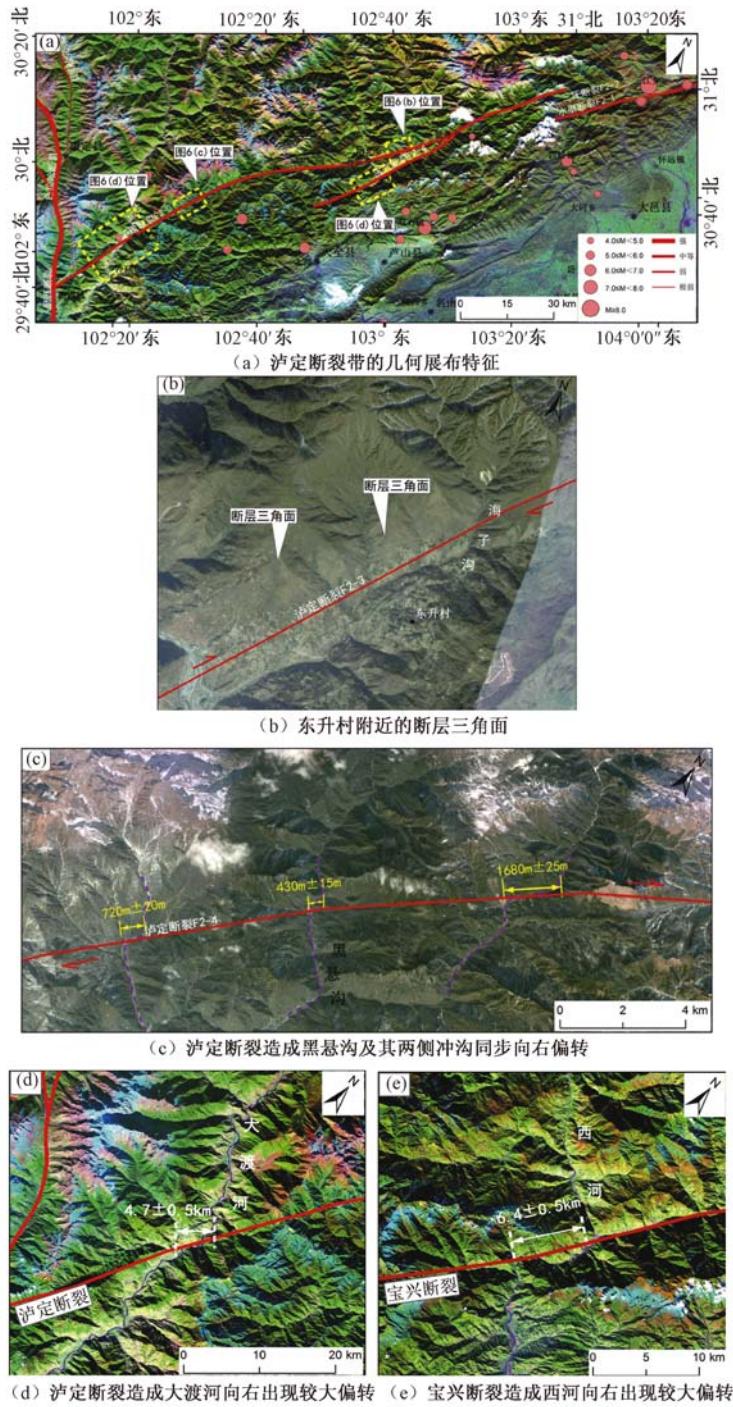


图6 泸定断裂带的几何展布及错断地貌特征

Fig. 6 Geometric distribution of Luding fault zone and features of dislocation landforms

活动的影响, 发生了明显的右旋错动 (见图 7b), 该处还可见到明显的水系扭错现象, 被断裂扭错的小河子呈“Z”形展布, 最大扭错量可达 5 km 左右 (见图 7c), 可见滑坡体与水系扭错是同步的, 皆呈右旋错动。在宝兴县朱沙溪附近, 沿断裂能够清楚地看到由断裂活动

表3 天全断裂带主要断裂参数及遥感标志

Table 3 The major fault parameters and remote sensing marks in Tianguan fault zone

编号	断裂名称	走向	长度/km	性质	活动性	遥感标志
F3-1	天全断裂	NE—NNE	172	右旋走滑	中等	断裂沿线性沟谷展布, 断裂谷发育, 断裂切割河流谷坡形成断层崖、断层沟槽及垭口
F3-2	飞水断裂	NE	30	右旋走滑	极弱	无明显错断现象, 断裂行迹不清晰
F3-3	大川断裂	NNE	30	右旋走滑	极弱	沿断裂发育一排整齐的断裂谷, 断裂两侧地貌差异明显
F3-4	双石断裂	NE	21	右旋走滑	极弱	断层崖发育, 水系右旋错动
F3-5	永河断裂	NE	28	右旋走滑	极弱	断裂沿线性沟谷发育

造成的槽谷地貌, 影像显示沿断裂发育了一系列小型槽谷, 连续性虽差, 但整体仍表现出线性地貌特征, 到山坪村后断裂线性特征明显, 主要沿沟谷延伸 (见图 7d)。天全断裂在西岭镇和横山村分别分出 2 条分支断裂, 即飞水断裂和大川断裂, 其中飞水断裂沿天全断裂北侧延伸, 该断裂的末端影像形迹较明显, 断裂沿沟谷发育, 两侧色调差异较大。遥感影像上, 大川断裂和双石断裂的特征并不是特别明显, 活动性相对较弱, 大川断裂南侧发育有一排整齐的断层崖 (见图 7e); 双石断裂北段影像较平直, 沿线性沟谷展布, 延伸到围塔村附近, 断裂南北两侧出现色调差异, 断裂南侧断层崖发育 (见图 7f)。

从天全断裂带两侧的地震分布情况 (见图 3) 来看, 该断裂周围地震较集中。自 1787 年灌县 $M4.75$ 级地震以来, 共发生过 5 次中强地震。其中最大的就是 2013 年芦山 $M7.0$ 级地震, 震中位于双石断裂附近, 但是此次地震并没有产生明显的地震地表破裂带, 因此认为芦山地震的发震断层不是出露于地表的天全断裂带, 而应该是一条尚未出露地表的盲逆断层^[3,35~37], 震中附近可见到背斜状隆起山地, 这次地震是该断裂的最新活动结果。

3.4 芦山断裂和大邑一名山断裂

龙门山断裂带中段的前山安县—灌县断裂向南主要延伸为 2 条断裂, 即西侧的芦山断裂 (F4) 和东侧的大邑一名山断裂 (F5) (见表 4)。芦山断裂北起怀远, 经大同乡—龙门乡向西北方向凸出, 继续延伸至芦山盆地地下部 (见图 8a)。该断裂北段的行迹较清楚, 断裂沿地形分界线延伸, 地形西侧高东侧低。断裂延伸到中段, 在状元村与靖口村间的线性影像非常清晰, 沿线性沟谷延伸, 断裂通过处与周围色调形成明显反差, 其北侧发育一系列雁列状冲沟, 并沿断裂整齐排列 (见图 8b)。断裂延伸至龙门乡附近, 影像特征不明显, 断裂地表踪迹消失, 可能隐伏于芦山盆地之下。在芦山县附近, 由于断裂活动导致两侧高差显著, 断裂上盘上升形成深切峡谷, 下盘形成宽谷, 断裂沿两者的分界线穿过 (见图 8d)。大邑一名山断裂经大邑县—平乐镇一直延伸至雅安西南, 遥感影像上可以清楚地看到断裂沿丘陵和盆地的分界线展布 (见图 8a)。在大邑县附近, 断裂北侧发育一系列线性排列的断层三角面 (见图 8c), 同时沿断裂还可见到呈雁列状展布的小鼓丘, 根据鼓丘的空间展布, 认为它们是由该断裂最新活动造成的褶皱隆起带^[38]。断裂延伸至邛崃县附近, 其在地表的行迹逐渐不清晰, 地表主要表现出褶皱地貌。在雅安市附近存在与芦山县类似的地貌特征, 河流下切形成深切峡谷, 推测此处有断坡构造 (见图 8e)。

表4 芦山断裂和大邑-名山断裂的参数及遥感标志

Table 4 The major fault parameters and remote sensing marks in Lushan fault and Dayi-Mingshan fault

编号	断裂名称	走向	长度/km	性质	活动性	遥感标志
F4	芦山断裂	NNE—NE	115	逆冲	中等	断裂两侧地形差异较大, 发育雁列状冲沟
F5	大邑一名山断裂	E—N	133	逆冲	中等	断裂沿盆地边界展布, 断裂西侧发育一系列断层三角面和小鼓丘

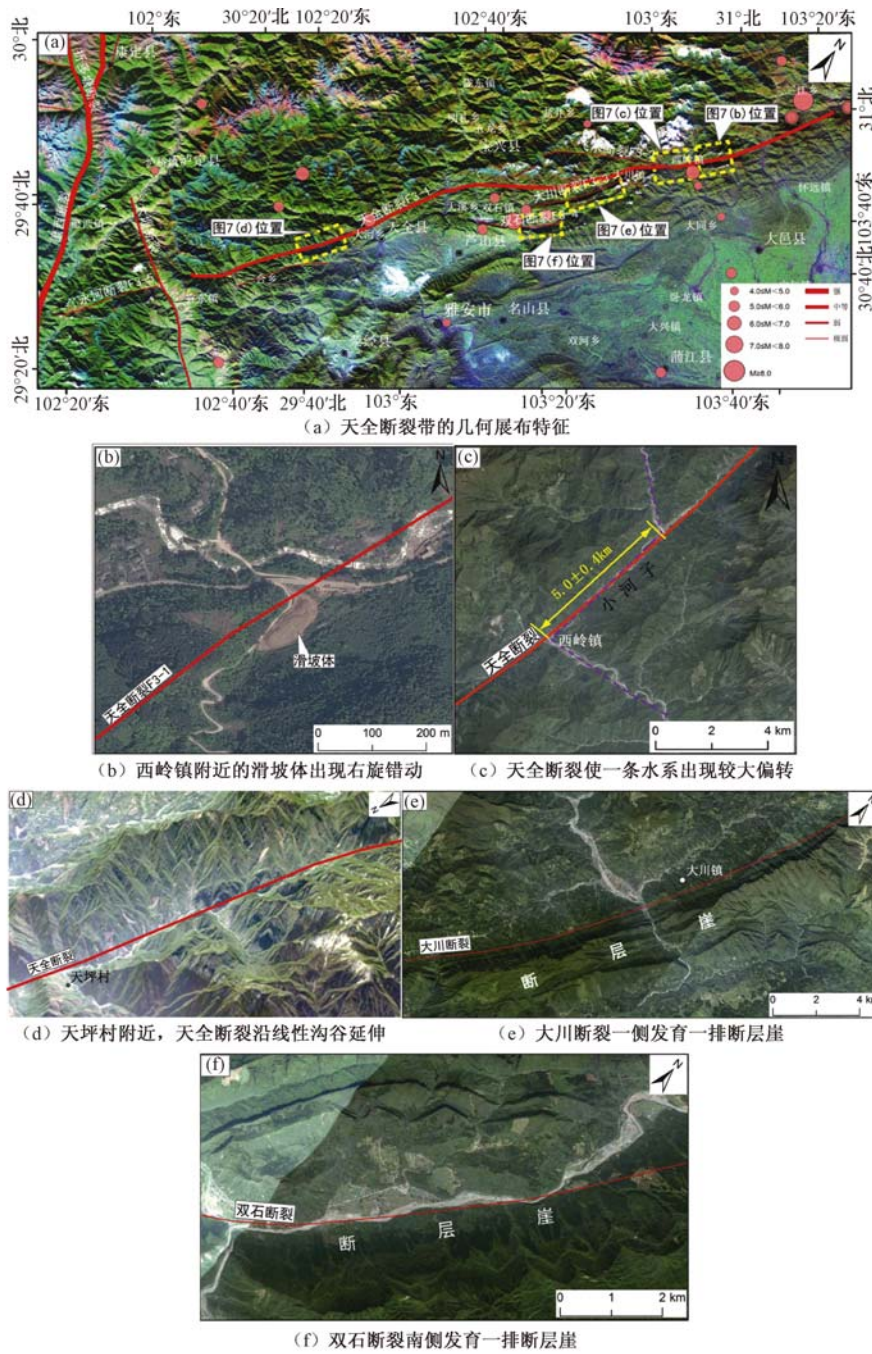


图7 天全断裂带的几何展布及地貌特征

Fig. 7 Geometric distribution of Tianguan fault zone and its landform features

芦山断裂和大邑一名山断裂发育于龙门山前缘扩展变形带, 控制着成都平原的北西界。该区褶皱构造发育, 自西向东依次发育芦山向斜、石仙山背斜、下里向斜、蒙顶山背斜和名山向斜等, 并呈左阶雁列展布^[36]。该区总体地势西北高、东南低, 这是由于断裂主要以逆冲-滑脱作用为主, 断裂活动使西北盘抬升, 东南盘下降, 地表表现为2排逆冲断层-滑脱褶皱带。两条断裂北段影像特征清楚, 越往南延伸断裂影像逐渐不清晰, 断层隐伏于地下, 也

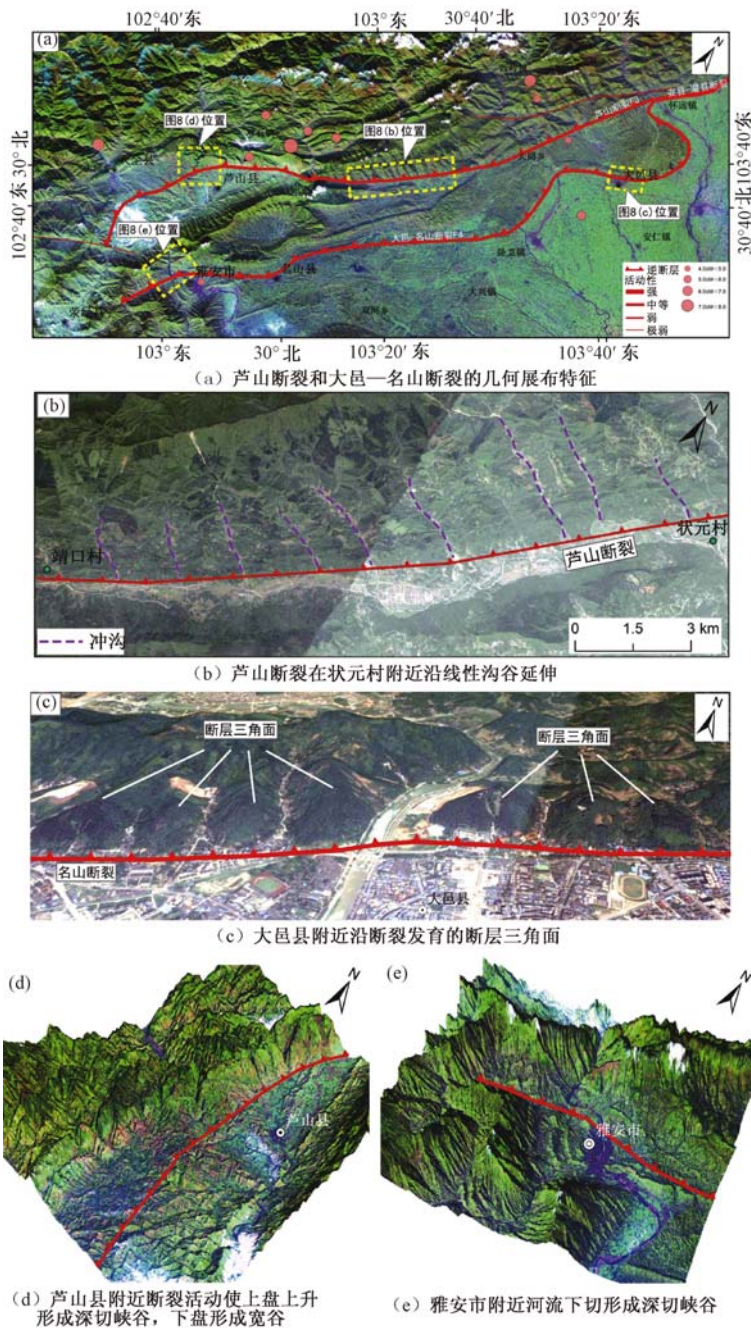


图 8 芦山断裂和大邑-名山断裂的几何展布及错断地貌特征

Fig. 8 Geometric distribution of Lushan and Dayi-Mingshan faults and their dislocation landform features

可能是盲断层, 这需要进一步调查研究。

4 讨论

遥感解译结果显示, 龙门山断裂带南段与断裂带中、北段相比结构复杂, 中段 3 条清楚

的主干断裂向西南延伸为若干条北东向断裂,构成了一个相对复杂的构造系统,总体分为5条断裂带,即卧龙—碛碛断裂带、泸定断裂带、天全断裂带、芦山断裂和大邑—名山断裂(见图9)。龙门山南段西侧断裂包括卧龙—碛碛断裂带、泸定断裂带、天全断裂带,以右旋走滑作用为主,东侧的芦山断裂和大邑—名山断裂主要表现为强烈的逆冲作用,其中泸定断裂、天全断裂、芦山断裂和名山断裂这4条断裂的活动较明显,属于中等活动性断裂,其他断裂的活动性均较弱。

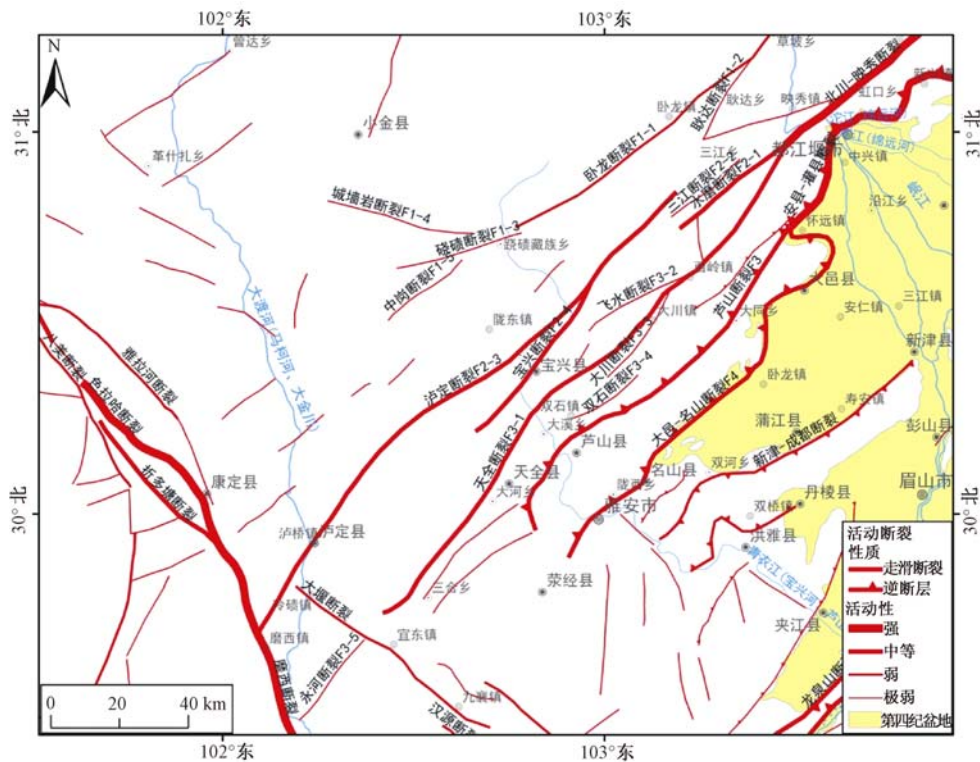


图9 龙门山断裂带南段主要活动断裂的延伸

Fig. 9 Extension of the major active faults in the south segment of Longmenshan fault zone

与龙门山断裂带中、北段相比,南段的活动断裂条数增多,变形活动更为复杂,其活动更多地受到西南侧鲜水河断裂带左旋走滑作用的影响,且变形时期比中、北段更晚一些,变形活动在喜马拉雅期基本定型,现今仍在发育^[18]。张岳桥等^[28]和杨晓平等^[39]通过野外调查和样品测年获得了龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据,其活动时代较新,现今活动性相对较强,因此该段的现代地震活动,特别是中强地震活动频繁。该段断裂的最新活动即为2013年M7.0级芦山地震,此次地震的震中位于双石断裂附近,但并未在地表形成明显的地震地表破裂带,因此多数地质学者认为此次地震的发震断层为一条隐伏于地下的盲逆断层^[3,36-37]。他们分别对芦山地震的发震构造进行了分析,总结如下:在天全断裂带以西的宝兴杂岩之下存在一个北西倾向的滑脱带,该滑脱带上对应着龙门山断裂带南段的一系列新生代褶皱变形——芦山向斜、蒙顶山背斜、名山向斜等及东部边缘的逆冲断层,这些逆冲断层均呈铲状向下延伸汇交于该滑脱带上,因此该滑脱的运动会影响或带动其上断裂的活动(见图10)。此次芦山地震就是位于地下的滑脱带逆冲错动,导致其上部断裂的逆冲错

动，但这些断错均未明显到达地表，这也是芦山地震没有形成明显地震地表破裂带的原因。由于未形成地表破裂，该断裂的应变能未能完全释放，因此应进一步关注该段未来发生地震的可能性。

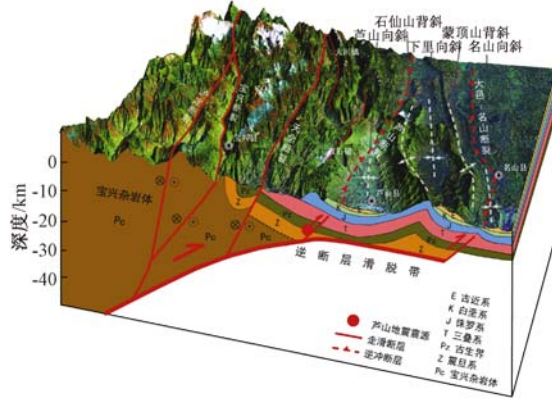


图 10 龙门山断裂带南段的三维结构与芦山 7.0 地震发震构造示意图

Fig. 10 A model map showing the three-dimensional structure of the southern section of Longmen Shan fault zone and seismogenic structures associated with the $M_s7.0$ Lushan earthquake

总的来说，龙门山断裂带在向西南延伸的过程中，宽度逐渐变宽，断裂条数增加，单条断裂错断地貌的现象减弱，且通过遥感影像解译发现，越向西南，断裂影像特征越不明显。这是因为龙门山断裂带在向西南延伸的过程中受到北西向鲜水河断裂带制约，减弱了其活动性^[40~45]，越向西南，断裂活动性越弱。从遥感解译图上可以发现，鲜水河断裂带的西侧还发育一系列长度较短、规模较小的北东向断裂，这些断裂是否为龙门山南段继续向西南延伸的小断裂需要进一步研究与讨论。

研究龙门山南段活动断裂的几何学及运动学特征对认识该地区现今的地壳变形过程及如何调节青藏高原物质向东挤出具有重要意义，同时也能够为该区未来地震危险性评价提供参考依据。解译结果显示，泸定断裂、天全断裂、芦山断裂和名山断裂的活动性相对较强，因此在以后的研究中应注意这些断裂活动所带来的滑坡、泥石流、地震等自然灾害。从图 10 可以看出，泸定和雅安两个地区地下断裂结构与芦山地震的发震结构类似，因此，应特别注意这两个地区的地壳稳定性及未来发震可能性，尽可能减少断裂活动带来的人员伤亡和经济损失。对已经发震的芦山地区要注意防止发震断裂应变能未完全释放带来的地震灾害影响。

5 结论

龙门山断裂带南段共包括 5 条断裂带，自西向东依次为卧龙—硃碛断裂带、泸定断裂带、天全断裂带、芦山断裂和大邑—名山断裂。其中卧龙—硃碛断裂带为后山的汶川—茂汶断裂向西南延伸而形成，并发散为多条次级断裂，呈爪字型展布；中央的北川—映秀断裂向西南延伸为 2 条分支断裂，西侧为泸定断裂带，南侧为天全断裂带；前山的安县—灌县断裂向西南延伸为芦山断裂和大邑—名山断裂。龙门山断裂带南段与其中、北段相比，断裂带宽度变宽，次级断裂增加，构造更为复杂。

龙门山南段的 5 条断裂带中，西侧的卧龙—硃碛断裂带、泸定断裂带、天全断裂带主要

以右旋走滑方式活动,而东侧的芦山断裂和大邑—名山断裂为一系列隐伏和盲逆断层,以逆冲推覆和滑脱作用为主。本文解译的天全断裂,其北段与前述的大川—双石断裂基本重合,再向西南主要沿双石、天全的西侧延伸,与前述的大川—双石断裂已经不是一条断裂,且本文解译的大川断裂和双石断裂在遥感影像上的标志并不十分明显,活动性相对较弱。

根据本文解译结果,泸定断裂、天全断裂、芦山断裂和名山断裂在遥感影像上标志较明显,活动性相对较强,属于中等活动性断裂,今后的研究中应注意这些断裂活动所带来的滑坡、泥石流等灾害影响。经分析发现泸定和雅安地区的地下断层构造与芦山地震发震构造类似,因此,尤其应注意这2个地区的地壳稳定性及未来地震发生的可能性,加强该区域的地震监测及发震危险性研究等工作。

参 考 文 献

- [1] 邓起东,陈社发. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学 [J]. 地震地质, 1994 (4): 389~403.
DENG Qi-dong, CHEN She-fa. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan Mountains and its adjacent regions [J]. Seismology and geology, 1994 (4): 389~403.
- [2] 闻学泽,张培震,杜方,等. 2008年汶川8.0级地震发生的历史与现今地震活动背景 [J]. 地球物理学报, 2009, 52 (2): 444~454.
WEN Xue-ze, ZHANG Pei-zhen, DU Fang, et al. The background of historical and modern seismic activities of the occurrence of the 2008 Ms8.0 Wenchuan, Sichuan, earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (2): 444~454.
- [3] 徐锡伟,闻学泽,韩竹军,等. 四川芦山7.0级强震:一次典型的盲逆断层型地震 [J]. 科学通报, 2013, 58 (20): 1887~1893.
XU Xi-wei, WEN Xue-ze, HAN Zhu-jun, et al. Lushan Ms7.0 earthquake: A blind reverse-fault earthquake [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58, (20): 1887~1893.
- [4] 徐锡伟,陈桂华,于贵华,等. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论 [J]. 地学前缘, 2013, 20 (3): 11~20.
XU Xi-wei, CHEN Gui-hua, YU Gui-hua, et al. Seismogenic structure of Lushan earthquake and its relationship with Wenchuan earthquake [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20 (3): 11~20.
- [5] 郑文俊,郭华,袁道阳,等. 遥感影像信息在活动断裂研究中的应用 [J]. 高原地震, 2002, 14 (2): 15~21.
ZHENG Wen-jun, GUO Hua, YUAN Dao-yang, et al. Application of remote sensing image information in the research of active faults [J]. Earthquake Research in Plateau, 2002, 14 (2): 15~21.
- [6] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision; Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision [J]. British Journal of Nutrition, 1975, 189 (4201): 419~426.
- [7] S. Kaya. Tracing the geometry of an active fault using remote sensing and digital elevation model: Ganos segment, North Anatolian Fault zone, Turkey [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25 (19): 3843~3855.
- [8] 李家存,吴中海,张铎,等. 青海玉树地区主要活动断裂的遥感影像解译及构造活动性 [J]. 地质通报, 2014, 33 (4): 535~550.
LI Jia-cun, WU Zhong-hai, ZHANG Duo, et al. Remote sensing image interpretation and tectonic activity study of the main active faults in Yushu area, Qinghai Province [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33 (4): 535~550.

- [9] 马丹, 吴中海, 李家存, 等. 川西理塘断裂带的空间展布与第四纪左旋走滑活动的遥感影像标志 [J]. 地质学报, 2014, 88 (8): 1417 ~ 1435.
MA Dan, WU Zhong-hai, LI Jia-cun, et al. Geometric distribution and the quaternary activity of Litang Active Fault zone based on remote sensing [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (8): 1417 ~ 1435.
- [10] 谭锡斌, 徐锡伟, 李元希, 等. 龙门山中段中央断裂和前山断裂的晚新生代垂向活动性差异及其构造意义 [J]. 地球物理学报, 2015, 58 (1): 143 ~ 152.
TAN Xi-bin, XU Xi-wei, LI Yuan-xi, et al. Differential Late-Cenozoic vertical motions of the Beichuan-Yingxiu Fault and Jiangyou-Guanxian Fault in the central Longmenshan range and their tectonic implications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58 (1): 143 ~ 152.
- [11] 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (1): 40 ~ 51.
LI Yong, ZHOU Rong-jun, Desmore A L, et al. Geomorphic evidence for the Late Cenozoic strike-slipping and thrusting in Longmen Mountain at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26 (1): 40 ~ 51.
- [12] 刘树根, 罗志立, 戴苏兰, 等. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降 [J]. 地质学报, 1995, 69 (3): 204 ~ 214.
LIU Shu-gen, LUO Zhi-li, DAI Su-lan, et al. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of the western Sichuan foreland basin [J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 69 (3): 204 ~ 214.
- [13] 李勇, 黄润秋, 周荣军, 等. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (1): 3 ~ 18.
LI Yong, HUANG Run-qiu, ZHOU Rong-jun, et al. Geological background of Longmenshan seismic belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (1): 3 ~ 18.
- [14] 李勇, 孙爱珍. 龙门山造山带构造地层学研究 [J]. 地层学杂志, 2000, 24 (3): 201 ~ 206.
LI Yong, SUN Ai-zhen. Tectostratigraphy of Longmenshan Orogen [J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24 (3): 201 ~ 206.
- [15] 唐荣昌, 立德华. 松潘-龙门山地区主要活动断裂带第四纪活动特征 [J]. 中国地震, 1991, (3): 64 ~ 71.
TANG Rong-chang, LI De-hua. The quaternary activity characteristics of several major active faults in the Songpan-Longmenshan region [J]. Earthquake Research in China, 1991, (3): 64 ~ 71.
- [16] 刘健, 熊探宇, 赵越, 等. 龙门山活动断裂带运动学特征及其构造意义 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42 (S2): 320 ~ 330.
LIU Jian, XIONG Tan-yu, ZHAO Yue, et al. Kinematic characteristics Longmenshan active fault zone and its tectonic implication [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42 (S2): 320 ~ 330.
- [17] 陈国光, 计凤桔, 周荣军, 等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究 [J]. 地震地质, 2007, 29 (3): 657 ~ 673.
CHEN Guo-guang, JI Feng-ju, ZHOU Rong-jun, et al. Primary research of activity segmentation of Longmenshan Fault zone since Late-Quaternary [J]. Seismology and Geology, 2007, 29 (3): 657 ~ 673.
- [18] 李智武, 刘树根, 陈洪德, 等. 龙门山冲断带分段-分带性构造格局及其差异变形特征 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35 (4): 440 ~ 454.
LI Zhi-wu, LIU Shu-gen, CHEN Hong-de, et al. Structural segmentation and zonation and differential deformation across and along the Longmen thrust belt, West Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35 (4): 440 ~ 454.
- [19] England P, Molnar P. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet [J].

- Nature, 1990 (6262): 140.
- [20] Jean-Philippe A, Paul T. Kinematic Model of Active Deformation in Central-Asia [J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20 (10): 895 ~ 898.
- [21] Burchfiel B C, Chen Zhiliang, Liu Yupinc, et al. Tectonics of the Longmenshan and adjacent regions, Central China [J]. International Geology Review, 1995, 37 (8): 661 ~ 735.
- [22] Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2000, 105 (7): 16215 ~ 16227.
- [23] LI Yong, Densmore A L, Allen P A, et al. Sedimentary responses to thrusting and strike-slipping of Longmen Shan along eastern margin of Tibetan Plateau and their implication of Cimmerian continents and India/Eurasia collision [J]. ScientiaGeologicaSinica, 2001, 10 (4): 223 ~ 243.
- [24] 李勇, 周荣军, Densmore, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑挤压作用的沉积响应 [J]. 沉积学报, 2006, 24 (2): 153 ~ 164.
- LI Yong, ZHOU Rong-jun, Densmore, et al. Sedimentary responses to Late Cenozoic thrusting and strike slipping of Longmenshan along Eastern margin of Tibetan Plateau [J]. ActaSedimentologicaSinica, 2006, 24 (2): 153 ~ 164.
- [25] 唐文清, 刘宇平, 陈智梁, 等. 基于 GPS 技术的活动断裂监测——以鲜水河、龙门山断裂为例 [J]. 山地学报, 2007, 25 (1): 103 ~ 107.
- TANG Wen-qing, LIU Yu-ping, CHEN Zhi-liang, et al. Monitoring of faults activity based on GPS [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25 (1): 103 ~ 107.
- [26] Burchfiel B C, Royden L H, Hilst R D V D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China [J]. Gsa Today, 2008, 18 (18): 4 ~ 11.
- [27] 邓起东. 中国活动构造图 (1:400 万) [M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- DENG Qi-dong. Chinese active tectonic map (1:4000000) [M]. Beijing: Seismological Press, 2007.
- [28] 张岳桥, 李海龙. 龙门山断裂带西南段晚第四纪活动性调查与分析 [J]. 第四纪研究, 2010, 30 (4): 699 ~ 710.
- ZHANG Yue-qiao, LI Hai-long. Late quaternary active along the SW segment of the Longmenshan fault zone [J]. Quaternary Sciences, 2010, 30 (4): 699 ~ 710.
- [29] 陈立春, 冉勇康, 王虎, 等. 芦山地震与龙门山断裂带南段活动性 [J]. 科学通报, 2013 (20): 1925 ~ 1932.
- CHEN Li-chun, RAN Yong-kang, WANG Hu, et al. The Lushan Ms 7.0 earthquake and activity of the southern segment of the Longmenshan fault zone [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, (20): 1925 ~ 1932.
- [30] 国家地震局地震研究所. 中国主要活动断裂带卫星图像集 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 65 ~ 67.
- The Seismological Institute of China Earthquake Administration. A satellite image set China's major active faults [M]. Beijing: Science Press, 1989: 65 ~ 67.
- [31] 吴中海, 张岳桥, 胡道功. 新构造、活动构造与地震地质 [J]. 地质通报, 2014, 33 (4): 391 ~ 402.
- WU Zhong-hai, ZHANG Yue-qiao, HU Dao-gong. Neotectonics, active tectonics and earthquake geology [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33 (4): 391 ~ 402.
- [32] 谢广林, 蒋茜珍, 朱源明, 等. 活动断裂的影象标志 [J]. 地震, 1982, (3): 23 ~ 26.
- XIE Guang-lin, JIANG Lin-zhen, ZHU Yuan-ming, et al. The image mark of active faults [J]. Earthquake, 1982, (3): 23 ~ 26.
- [33] 蒋茜珍. 活动断裂垂直错动的影象标志 [J]. 华南地震, 1985, (4): 12 ~ 19.
- JIANG Lin-zhen. The image mark of the vertical dislocation of active fault [J]. South China Journal of Seismology, 1985,

- (4): 12 ~ 19.
- [34] 丁国瑜. 活动走滑断裂带的断错水系与地震 [J]. 地震, 1982, (1): 3 ~ 8.
DING Guo-yu. Faulted river system and earthquake of active strike slip fault zone [J]. Earthquake, 1982, (1): 3 ~ 8.
- [35] 张岳桥, 董树文, 侯春堂, 等. 四川芦山 2013 年 Ms7.0 地震发震构造初步研究 [J]. 地质学报, 2013, 87 (6): 747 ~ 758.
ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, HOU Chun-tang, et al. Preliminary study on the seismotectonics of the 2013 Lushan Ms7.0 earthquake, West Sichuan [J]. ActaGeologicaSinica, 2013, 87 (6): 747 ~ 758.
- [36] 李传友, 徐锡伟, 甘卫军, 等. 四川省芦山 7.0 地震发震构造分析 [J]. 地震地质, 2013, 35 (3): 671 ~ 683.
LI Chuan-you, XU Xi-wei, GAN Wei-jun, et al. Seismogenic structures associated with the 20 April 2013 Ms 7.0 Lushan earthquake, Sichuan province [J]. Seismology and Geology, 2013, 35 (3): 671 ~ 683.
- [37] 李勇, 周荣军, 赵国华, 等. 龙门山前缘的芦山地震与逆冲-滑脱褶皱作用 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40 (4): 353 ~ 363.
LI Yong, ZHOU Rong-jun, ZHAO Guo-hua, et al. Thrusting and detachment folding of Lushan earthquake in front of Longmenshan mountains [J]. Journal of Chengdu University of technology, 2013, 40 (4): 353 ~ 363.
- [38] 董绍鹏, 韩竹军, 尹金辉, 等. 龙门山山前大邑断裂活动时代与最新构造变形样式初步研究 [J]. 地震地质, 2008, 30 (4): 996 ~ 1003.
DONG Shao-peng, HAN Zhu-jun, YIN Jin-hui, et al. A preliminary research on the latest tectonic deformation style and the activity age of the Dayi fault in the piedmont of the Longmen mountains.
- [39] 杨晓平, 邓忠文. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据 [J]. 地震地质, 1999, 21 (4): 341 ~ 345.
YANG Xiao-ping, DENG Zhong-wen, et al. The evidence of the south Longmenshan fault zones cutting Late Quaternary stratum [J]. Seismology and Geology, 1999, 21 (4): 341 ~ 345.
- [40] 唐文清, 陈智梁, 刘宇平, 等. 青藏高原东缘鲜水河断裂与龙门山断裂交会区现今的构造活动 [J]. 地质通报, 2005, 24 (12): 1169 ~ 1172.
TANG Wen-qing, CHEN Zhi-liang, LIU Yu-ping, et al. Present-day tectonics activity in the intersection area of the Xianshuihe fault and Longmenshan fault on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24 (12): 1169 ~ 1172.
- [41] 刘峡, 孙东颖, 马瑾, 等. GPS 结果揭示的龙门山断裂带现今形变与受力——与川滇地区其他断裂带的对比研究 [J]. 地球物理学报, 2014 (4): 1091 ~ 1100.
LIU Xia, SUN Dong-ying, MA Jin, et al. Present-day deformation and stress state of Longmenshan fault from GPS results-comparative research on active faults in Sichuan-Yunnan region [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014 (4): 1091 ~ 1100.
- [42] 赵炜喆, 吴忠良, 蒋长胜, 等. 用地震资料估计的龙门山断裂深部形变及其对于汶川地震成因的意义 [J]. 地质学报, 2008, 82 (12): 1778 ~ 1787.
ZHAO Yi-zhe, WU Zhong-liang, JIANG Chang-sheng, et al. Present deep deformation along the Longmenshan fault by seismic data and implications for the tectonic context of the Wenchuan earthquake [J]. ActaGeologicaSinica, 2008, 82 (12): 1778 ~ 1787.
- [43] 石绍先, 曹刻, 和宏伟, 等. 川滇地区成组强震活动的基本特征 [J]. 地震研究, 2003, 26 (增刊): 55 ~ 61.
SHI Shao-xian, CAO Ke, HE Hong-wei, et al. The basic features of seismicity of grouped strong earthquakes in Sichuan-Yunnan region [J]. Journal of Seismological Research, 2003, 26 (Sup.): 55 ~ 61.
- [44] 孟文, 陈群策, 吴满路, 等. 龙门山断裂带现今构造应力场特征及分段性研究 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28

(3): 1150 ~ 1160.

MENG Wen, CHEN Qun-ce, WU Man-lu, et al. Research on segmentation and characteristic of tectonic stress field of Longmenshan fault zone [J]. *Progress in Geophys*, 2013, 28 (3): 1150 ~ 1160.

[45] 安其美, 丁立丰, 王海忠, 等. 龙门山断裂带的性质与活动性研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2004, 24 (2): 115 ~ 119.

AN Qi-mei, DING Li-feng, WANG Hai-zhong, et al. Research of property and activity of Longmen Mountain fault zone [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24 (2): 115 ~ 119.

REMOTE SENSING EVIDENCE OF THE SOUTH SEGMENT OF LONGMENSHAN FAULT ZONE EXTENDING TO SOUTHWEST AND ITS SEISMIC GEOLOGICAL SIGNIFICANCE

MA Xiao-xue^{1,2,3,4}, WU Zhong-hai^{2,4}, LI Jia-cun^{1,3}, ZHOU Chun-jing^{2,4},
LI Kai^{1,2,3,4}, WANG Ji-long^{2,4,5}

(1. *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;*

2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

3. *Beijing Key Laboratory of Resource Environment and Geographic Information System, Beijing 100048, China;*

4. *Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;*

5. *College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)*

Abstract: Combining remote sensing imagery interpretation of active faults with Landsat ETM, Google Earth and ASTER GDEM image data, this paper analysed the spatial distribution and geometry and motion characteristics of the south section of Longmenshan tectonic belt. The results showed that Longmenshan tectonic belt occurred obvious fracture dispersion in the process of extending to the south. The tectonic zone gradually widened, developing 5 faults and many secondary faults. The southernmost of Longmenshan tectonic zone was stopped by Xianshuihe sinistral strike-slip fault. Activities of Luding fault, Tianquan fault, Lushan fault and Dayi-Mingshan fault are more obvious. The former two are south-extending branches of Beichuan-Yingxiu fault, the latter two are south-extending branches of Anxian-Guanxian fault. The tectonic deformation of south Longmenshan tectonic belt was dispersed to a plurality of secondary faults, resulting in surface activity signs of single fault weaken significantly. So the potential earthquake frequency and intensity of single fault will also be correspondingly smaller, but potential seismic source region will be more dispersed. According to the existing seismic geological data, we should pay attention to the crustal stability and strong earthquake risk in Ya'an and Luding areas in the future.

Key words: Longmenshan tectonic belt; remote sensing interpretation; active fault; potential seismic source region; Lushan earthquake