

岷县漳县6.6级地震发震构造与区域地形地貌特征关系讨论

葛伟鹏^{1,2}

(1.中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000;

2.中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,北京 100029)

摘要:为了清晰认识岷县漳县6.6级地震的发震构造环境和区域地貌特征,本文利用DEM(数字高程模型)数据分析了甘东南地区的地形地貌基本特征,结合区域活动断裂分布及其运动学特征讨论了岷县漳县6.6级地震所处的青藏高原东北缘的区域构造环境和地壳运动学特征,研究了甘肃东南部的构造环境、发震断裂的断裂活动性及孕震过程等基本发震条件。主要利用地形剖面方法分析了通过地震震源区的地貌特征,反映出区域地形地貌特征与发震构造的关系,从地貌学角度探讨了区域中上地壳变形特征及孕震过程。最后讨论了区域发震构造、地球动力学背景,通过地形剖面及区域地貌分析了岷县漳县6.6级地震发震构造特点,认为此次地震可能与汶川地震的同震及震后变形过程相关。

关键词: 岷县漳县6.6级地震; 数字高程模型; 地形地貌特征; 发震构造

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)04-840-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.840

Discussion on the Relationship between Regional Landform and Seismogenic Structure of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake

GE Wei-peng^{1,2}

(1.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: To clearly recognize and understand the geomorphologic characteristics and seismogenic structure of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake, we use DEM (Digital Elevation Model) data to analyze the landform characteristics of southeastern Gansu. Regional tectonic environment and crustal kinematic characteristics at northeastern margin of Tibet Plateau are discussed combined with the distribution of regional active faults and their kinematic features around the hypocentral region of Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake. The seismogenic conditions including tectonic environment, activity of seismogenic fault and seismogenic process are also studied. In this paper, we use terrain profile method to analyze the geomorphologic characteristics of source region of this earthquake to reflect the relation between regional geomorphologic characteristic and seismogenic structure. Deforma-

收稿日期:2013-10-22

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项——“柴达木—祁连山地块活动断裂基础数据库建设”;国家自然科学基金资助项目(41304035);中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDB03020201)

作者简介:葛伟鹏(1981-),男,高级工程师,博士研究生,主要从事GPS地壳形变观测与活动构造研究.E-mail:geweipeng@gmail.com

tion characteristic of regional middle and upper crust and seismogenic process are explored from the geomorphologic point of view. At last, regional seismogenic structure and geodynamics background are discussed. We suggest that the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake is related with coseismic and postseismic deformation process of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake.

Key words: the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake; Digital Elevation Model; geomorphologic characteristic; seismogenic structure

0 引言

南北地震带北段是青藏高原东北缘地区地震活动显著、大型地块陆陆碰撞交汇区域^[1-2],主要处于中国大陆内部陕甘宁青四省交界区,发育有地块边界断裂的走滑断裂和局部的逆冲断裂等,如东昆仑断裂东段、海原断裂、西秦岭北缘断裂;逆冲断裂有六盘山断裂、拉脊山逆冲断裂等^[3]。同时,西秦岭北缘断裂与龙门山断裂分别是青藏高原东北缘地区和东缘地区的地貌分界线,上述断裂交汇的甘东南地区也是历史强震丛集区^[4-5]。西秦岭北缘断裂历史上发生多次强震并沿着断裂段多次破裂,但未有发生现代地震。自本世纪以来,围绕巴颜喀拉地块发生了若干强震,如 2001 年东昆仑地震、2008 年汶川地震、

2010 年玉树地震、2013 年庐山地震等。因此,本地区具有历史地震丛集发生、现代强震频发的活动特征,是中国大陆强震研究的热点地区之一。

2013 年 7 月 22 日在甘肃省岷县漳县交界发生 $M_s6.6$ 地震,是在青藏高原东缘继 2008 年汶川地震、2013 庐山地震后在北部发生的一次强震事件,其发震过程及地球动力学机制为研究青藏高原东缘及东北缘变形和构造演化等科学问题提供重要基础数据。那么,此次地震与之前发生的强震是否相关? 汶川地震的发生是否对此次地震有触发作用? 本文试图通过地形地貌特征与发震构造特点回答上述问题。

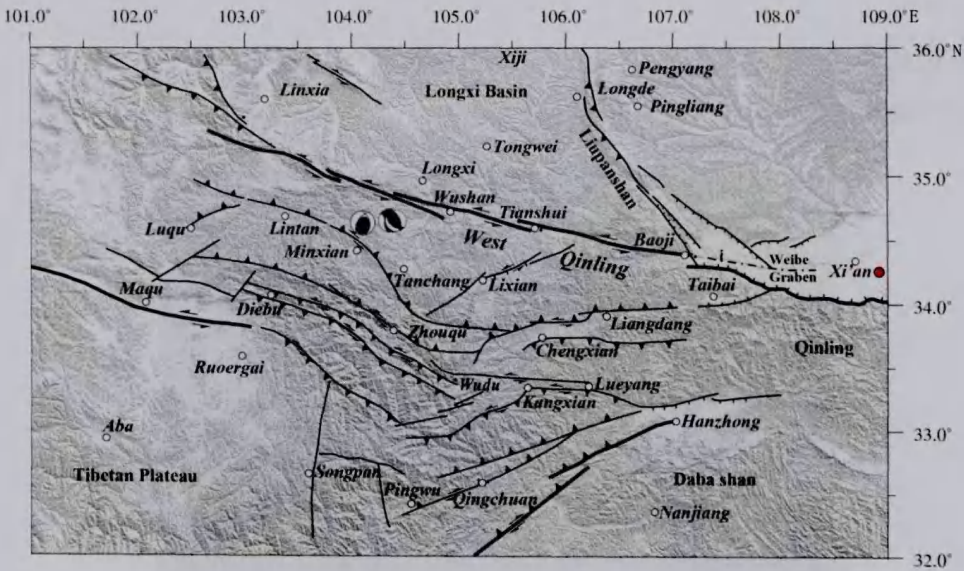


图 1 甘东南地区区域地形地貌与活动构造分布图(据郑文俊等^[11])
Fig.1 Active faults distribution and regional landform map of Southeastern Gansu Province

本文通过讨论临潭—宕昌断裂与西秦岭北缘断裂的几何展布^[6-10],研究了甘东南弧形构造系统和震源构造破裂特征;应用覆盖甘肃东南部地区的数字高程模型数据重点分析了不同海拔高度的山脉分布、走向及与相关活动断裂的展布状态,通过地形剖面方法研究了区域地形特征,结合区域造山过程等,进一步清晰认识 2013 年 7 月 22 日岷县漳县地震的发震构造及孕震环境。

1 区域构造环境

在青藏高原东北缘地区形成新生代造山地貌,主要成因是印度板块北向推挤致使区域内若干大型地块剧烈碰撞。其中巴颜喀拉地块与阿拉善地块所夹持的区域具有地形高差较大的地貌特征,是现今高原强烈隆起变形区。两者之间存在的西秦岭北缘断裂是一条区域地貌形

态的分割线^[3-4](图1)。同时与鄂尔多斯地块交汇碰撞形成六盘山新生代隆起地貌^[11]。区域内分布多条活动断裂,巴颜喀拉地块北侧边界断裂的东昆仑断裂带与阿拉善地块附近的海原断裂带之间发育多个弱走滑断裂和逆冲断裂带,如西秦岭北缘断裂、临潭—宕昌断裂、迭山—光盖山断裂、迭部—白龙江断裂等,同时在临潭—宕昌断裂、西秦岭北缘断裂和礼县—罗家堡断裂之间形成青藏高原NE向推挤变形三角区。作为边界控制断裂的东昆仑断裂和西秦岭北缘断裂的运动性质是该地区构造变形的主控因素。此次岷县漳县6.6级地震正是发生在临潭—宕昌断裂东段与西秦岭北缘断裂之间的三角区西南边界^[9-10,12]。

岷县漳县M_{6.6}地震位于西秦岭北缘断裂和迭部—白龙江断裂之间的临潭—宕昌断裂。临潭—宕昌断裂是本研究区内的规模较大且在晚更新世—全新世有过活动的断裂带,其组成和几何结构复杂,由多条平行和斜接的次级断层所组成,根据活动性和几何结构的差异可分为明显的3段^[6-8],其中段和东端北侧分支存在第四纪晚期新活动迹象^[9-10],该断裂带上现代发生的一些中强地震^[13]的破坏范围也受临潭—宕昌断裂东段的走向所控制,且这些地震的重破坏区正好位于该断裂主支与北侧次级断裂分支间的断层带内^[10]。

2 区域地形地貌特征

2.1 青藏高原东缘及东北缘区域地貌特征及地形

剖面分析

在大尺度范围内的青藏高原东缘,地貌形态上存在以块体东向运动变形为主的巴颜喀拉块体与鄂尔多斯地块碰撞变形的特征。根据区域地貌特征和地形剖面分析(图2),地貌存在以下几个特征:

(1) 沿着南西到北东向上,存在阶梯状的地貌分布特征,在穿过甘孜—玉树—鲜水河断裂到若尔盖盆地南侧的中铁断裂附近,主要海拔高程分布在4 000~4 500 m左右,部分山脉高度约5 000 m;在若尔盖盆地内,平均海拔约3 500 m,具有刚性块体运动变形特征。

(2) 以东昆仑断裂到西秦岭北缘断裂之间所围限的区域为甘东南地块,海拔高程具有缓慢下降的趋势,为3 800 m到2 200 m的高差。由图1可见,此区域存在临潭—宕昌断裂、迭山—光盖山断裂、迭部—白龙江断裂,均具有微弱走滑兼有逆冲的运动学特征。因此,此地区的地形地貌发育与上述平行断裂带的发育息息相关;国内学者将此地区概括为西秦岭—松潘构造结,形成于印支拼合期并伴随有后期陆内变形构造运动。

(3) 在西秦岭北缘断裂到海原断裂之间,是我国具有显著地貌特征的黄土高原地区,海拔高程主要分布在2 000 m左右,内部发育大量次级活动断裂并且发生大量历史地震,区域内具地壳变形复杂,第四系地层覆盖厚等特点,其中六盘山新生代隆起是此地区较为显著的构造地貌。

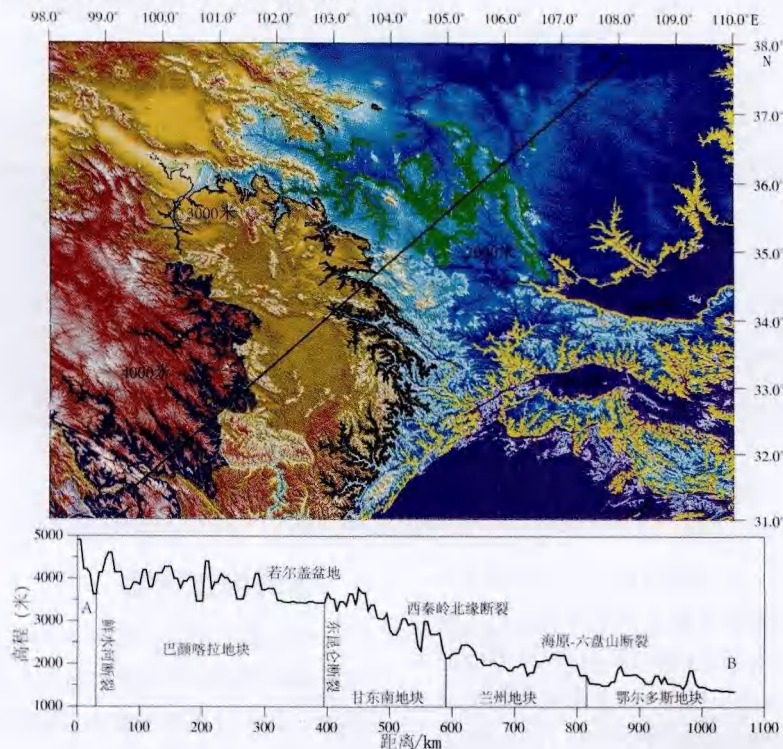


图2 青藏高原东缘及东北缘区域地貌特征、地形剖面分析

Fig.2 Regional Characteristics and topographic profile of eastern and northeastern of Tibetan Plateau

2.2 地形坡度分析解释

本文使用GIS分析工具研究了98°~110°E、31°~38°N范围内的地形坡度变化,此范围包括了鄂尔多斯地块、巴彦喀拉地块及四川盆地等三大块体交汇碰撞变形区域。通过地形坡度分析,在0°~5°的坡度范围主要在渭河盆地、青海湖盆地、共和盆地、若尔盖盆地及四川盆地等陆内盆地;在5°~10°的坡度范围主要分布在鄂尔多斯、陇西及阿拉善等块体区域内,主要是新生代构造变形的前缘扩展部位;在10°~20°的范围主要在若尔盖盆地周缘及北部局部山区内;在20°~30°的坡度范围为在龙门山到甘东南、阿尼玛卿山、祁连山东段等局部地区;而在30°~78°的坡度范围主要在龙门山隆起区、甘东南隆起区与秦岭大巴山区内等具有明显隆起地貌特征的地区,可能的解释是上地壳弹性物质破碎变形、下地壳粘弹性物质汇集区,结果如图3所示。

从数字高程模型所表示的地貌形态看,揭示出在西秦岭北缘断裂南侧的甘东南地区到龙门山地区的弧形隆起区,在上地壳具有强烈挤压破碎的变形特征,并存在明显地壳缩短过程,主要是以多条平行山脉及河谷型地貌为主,密集发育多条弱走滑兼有逆冲的活动断裂,断裂几何展布具有部分弧形的变形形态。此弧形隆起区主要受到巴颜喀拉地块东向地壳物质运动,受到四川盆地等坚硬地块的阻挡在青藏高原东缘地区形成强烈隆起区,同

时在块体内部存在如若尔盖盆地等类似刚性块体,在甘肃东南部的西秦岭—松潘构造结内部也形成如迭山、岷山等隆起山脉,与松潘—虎牙隆起带、龙门山隆起带共同完成弧形构造地貌。

2.3 地貌高程差异分析

本地区是青藏高原北部及东缘向周缘扩展变形的重要区域,是巴彦喀拉块体与鄂尔多斯块体、阿拉善块体等碰撞的剧烈变形区。由于青藏高原边界隆升过程中导致造山过程及形态具有流变学特征,从而在较大的空间尺度上具有弧形构造变形特征,如甘东南弧形构造区、拉脊山弧形构造区、青海南山弧形构造区及六盘山弧形构造区;仅仅在较小空间尺度内,地壳运动表现出块体运动特征,如若尔盖块体、鄂尔多斯块体等。本文应用数字高程模型进行了等高线分析,研究了地貌形态与活动构造的关系。

巴颜喀拉地块北边界的东昆仑断裂,如图2所示,蓝色为4 000 m等高线,黑色为3 000 m等高线,绿色为2 000 m等高线,黄色为1 000 m等高线。我们发现鄂尔多斯块体与周围的阿拉善块体、陇西块体在地貌上差异较小,处于1 500~2 000 m左右的高程范围内,此地区也是黄土高原覆盖区及黄河流域内,具有干旱-半干旱的气候地理特征。

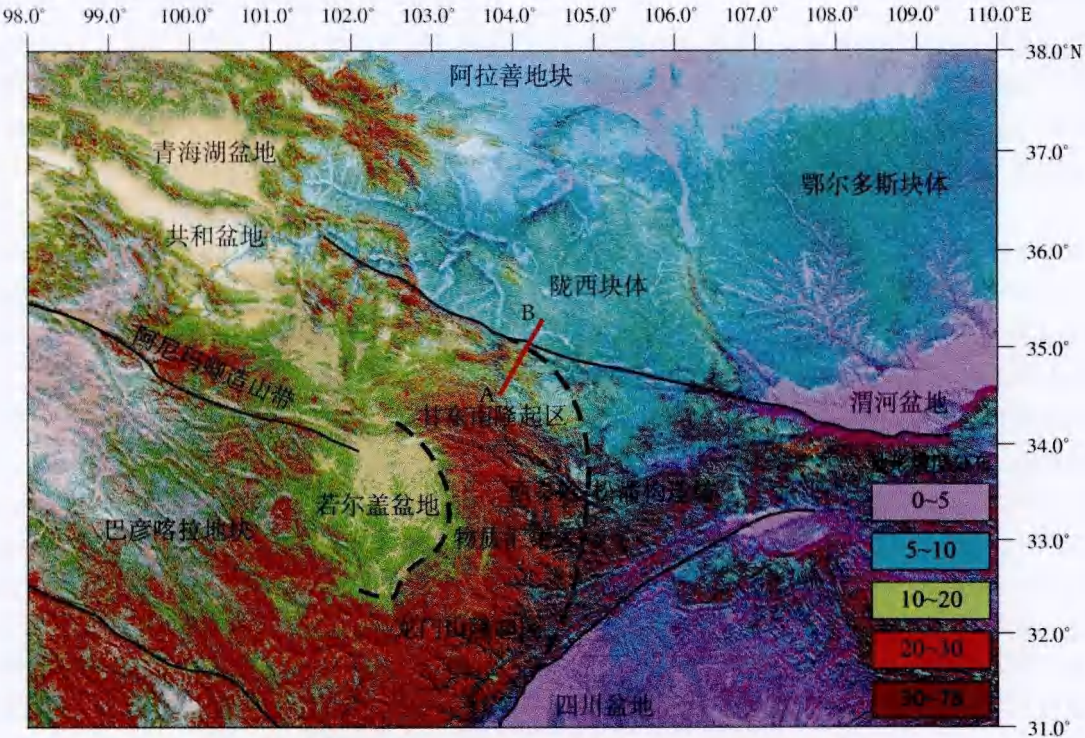


图3 青藏高原东缘及东北缘区域地形坡度分析及解释
Fig.3 Interpretation and analysis on slope of topography in eastern and northeastern Tibetan Plateau

提取青藏高原东缘及东北缘以1 000 m为间距的等高线,其中3 000 m等高线可以清晰地显示出高原变形的主体轮廓,与Royden等^[17]给出的青藏高原东缘轮廓线是一致的。以祁连山北缘一带到古浪并向南跨过西宁盆地到拉脊山,并最终跨过西秦岭北缘断裂延伸至甘东南地区,上述3 000 m等高线特征可以说明受到印度板块北向推挤,在青藏高原北部及东缘地区形成现今仍然处于强烈抬升的构造系统。张会平等^[18]也从河流演化及区域地貌研究讨论了岷山、岷江断裂的地貌演化,认为晚新生代以来岷山构造带存在快速隆起过程以及龙门山构造带内部差异活动。葛伟鹏等^[19]认为以鄂拉山到祁连山东段一线的逆冲挤压变形在此地貌线也有较好的反映。

图3所示的坡度图说明在挤压变形强烈区,其坡向变化值较大(红色值),可以看出在祁连山北缘一带存在细长的坡度值较大区域,与此区域构造变形过程有密切关系。巴彦喀拉块体在东侧龙门山断裂以西、龙日坝断裂以东地区在晚新生代以来形成上地壳物质集聚变形区,也是强震多发区,是现今岩石圈变形最强烈地区之一,并且图3所给出的地貌形态表明巴颜喀拉地块在东北部的块体边界已趋于模糊,主要变形以挤压隆起为主,仅在局部表现有弱走滑性质,如塔藏断裂、白龙江断裂等。

3 甘肃岷县漳县6.6级地震发震构造与区域地貌形态的关系

区域构造地貌与发震断层发育是具有相关性的,我们从地貌特征和地形坡度上讨论地壳深部的断裂发震状态。据图3所示的剖面线AB的位置是跨此次地震的地形剖面位置示意图,图4给出了相关深度地震剖面数据和推测模型。

近年来多个研究学者对这一区域开展了大量详实的研究工作,王志才等^[16]从新生构造变形特征研究了西秦岭北缘断裂的断裂展布,认为西秦岭北缘断裂在地表具有花状构造展布特征;Shen等^[20]通过接受函数研究了跨西秦岭北缘断裂深部地壳速度结构与地形的关系,认为此地区地壳深浅构造关系在形态上具有相似性。此次地震发生后,在较短时间内地震学相关研究结果已发表,张元生等^[14]、冯红武等^[21]对余震序列重定位及波速等资料给出了此次地震的发震构造模式,陈继锋等^[22]从二维平面角度讨论此次地震发震构造,未给出沿深度剖面的发震与断裂构造的关系。由于该地区构造复杂,对于此次地震的发震构造解释也不尽相同。张元生等^[14]给出了深部P波、S波速度结构及P波Q值结果,认为此构造倾向为NE向,与刘旭宙等给出的区域应力场结果为NE向结论一致;但郑

文俊等^[11-12]等讨论东昆仑断裂与西秦岭北缘断裂之间的断裂分布和变形模式等,通过地表发震构造、滑坡分布等,认为此发震断裂倾向为SW,与上述结果存在差异。张国伟等^[9]给出了西秦岭-松潘构造结平武-礼县-甘谷构造剖面图,与郑文俊等的结果在北侧具有一致性,但在南侧却具有相反的展布状态。可见,现今研究结果仍存在较大的不确定性,推测一个合理的构造变形模型仍具有相当程度的难度。因此,我们在后续研究工作中仍需通过各种资料深入研究此地震的构造模型。

Royden等^[17]、Clark等^[23]提出青藏高原东北缘及东缘“下地壳流动”概念,为研究青藏高原东边界的地形地貌形成演化提供了有力的定量研究手段,将下地壳流动的黏滞系数与地表地貌形态进行了有机结合。那么,分析图4(b),(c)可以发现此次岷县漳县地震孕震环境正处于由热、软物性参数的物质与较硬、较冷的物质转换的过渡边界带上,说明此地区是有存在“下地壳流动”变形的可能性。而且从地震学角度上,可以清晰勾画出了区域造山运动在岩石圈变形层面上的解释依据。

4 地球动力学背景讨论与结论

(1) 坡度分析与等高线分析揭示出的地貌特征

从区域地貌角度分析,发现岷山、迭山等山脉与邻近活动断裂的走向具有一致性,说明地质学时间尺度的造山过程与断裂的长期活动过程相关,也与瞬间断裂破裂过程具有相似性,并且现今地震对造山过程具有继承性。因此,也说明来自印度板块与欧亚板块碰地的北向巨大推挤力量对青藏高原东北缘及甘肃东南部现今地貌的形成。那么,阶梯状的地貌差异的成因是印度板块北向推挤在青藏高原东北缘流变学变形特征的体现,而且以3 000 m左右的等高线所围限的范围正是青藏高原东缘现今强震孕育的边界带,是地壳强烈挤压变形带。

(2) 甘肃东南地区的应变能累积状态与周边强震孕育的关系

在汶川8.0级地震发生后,地处青藏高原东北缘的甘东南地区的地壳应变能累积状态是什么情况?万勇革等^[24]分析了汶川地震后区域地壳的库伦应力变化状态,认为甘青川、甘东南等地区的库伦应力变化具有正变化趋势;王双绪等^[25]通过汶川地震震前及震后地壳形变数据研究西秦岭北缘断裂附近的地壳形变特征,认为区域西秦岭北缘断裂及周缘断裂不具有快速滑动特征,断裂可能出于闭锁状态;因此,我们认为岷县漳县6.6级地震可能受到汶川地震同震及震后变形的影响,并且此次地震可能不足以完全释放该区域所积累的应变能。

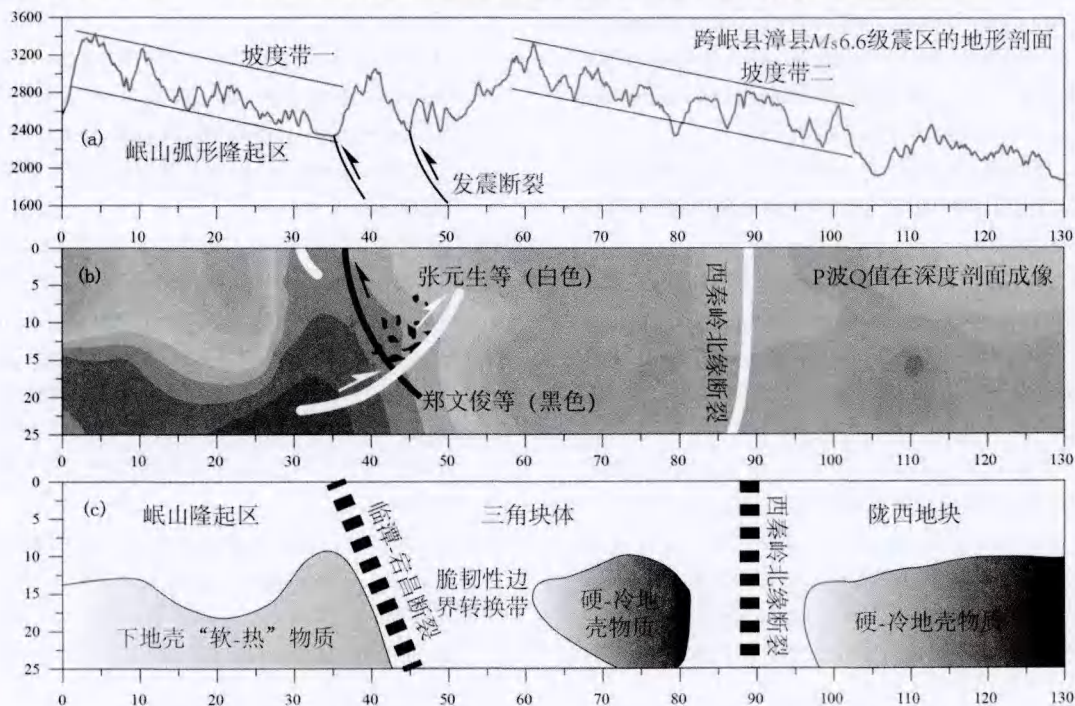


图4 跨震源区地形剖面(a)、P波Q值深度剖面(b)耦合关系及震源区地壳模型解释(c)

(根据郑文俊等^[11]、张元生等^[14]分别依据地质学和地震学两种方法推测的断层展布)

Fig.4 Topographic profile across seismogenic region (a), Q value profile based on P wave velocity (b) and upper crust model of seismogenic region (c) (fault surface distribution based on the geology by Zheng Wen-jun^[11] and seismology by Zhang Yuan-sheng, respectively)

(3) 岷县漳县6.6级地震发震构造模型

岷县漳县6.6级地震震源机制解显示以逆冲为主,震源深度约20 km,发生在以临潭-宕昌断裂、西秦岭北缘断裂、礼县-罗家堡断裂所围限的三角变形区域的西南边界上(图4(c))。所反映的发震破裂过程可能是深度处于15~20 km的弹性-粘弹性转换层附近的一次破裂事件,沿剖面水平方向可能存在脆韧性边界转换带。由于此次地震震源深度较深,且释放能量较小,逆冲发震构造可能造成沿着断裂破裂面迅速衰减,因此未在地表形成有效破裂带,仅以滑坡集中分布的形式表现出震害特征。本区的走滑断裂均以NNW向为主,但刘旭宙等^[26]认为甘东南区域应力场方向为NEE向,这一现象与此次地震的发生断裂部位有关,断裂可能处于走滑到逆冲的转换部位^[11-12]。因此,从地形地貌上显示,以造山隆升变形为主,图4(a)所示在震源区两侧分别存在两个坡度带,且具有一致的坡度,说明此造山带仍处于强烈运动期,平均海拔高程仍未达到处于稳态的地貌高度。

致谢:感谢与张元生研究员在震源发震模型方面的讨论;本文使用SRTM与ASTER等的DEM数据,使用GMT程序及Perl语言制图,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 张国伟,孟庆任,赖绍聪.秦岭造山带的结构构造[J].中国科学:D辑,1995,25(9):994-1003.
ZHANG Guo-wei, MENG Qing-ren, LAI Shao-cong. Structure of the Qinlingorogen[J]. Science in China: Series D, 1995, 25(9): 994-1003. (in Chinese)
- [2] 张国伟,郭安林,刘福田,等. 秦岭造山带三维结构及其动力学分析[J].中国科学:D辑,1996,26(增刊):1-6.
ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, LIU Fu-tian, et al. Analysis on Dynamics and 3D Structure of the Qinlingorogen[J]. Science in China: Series D, 1996, 26(S): 1-6. (in Chinese)
- [3] 张国伟,郭安林,姚安平.中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结[J].地学前缘,2004,11(3):23-32.
ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, YAO An-ping. Western Qinling-Songpan Continental Tectonic Node in China's Continental Tectonics[J]. Earth Science Frontier, 2004, 11(3): 23-32. (in Chinese)
- [4] ZHANG Pei-zhen. A Review on Active Tectonics and Deep Crustal Processes of the Western Sichuan Region, Eastern Margin of the Tibetan Plateau, Tectonophysics (2012), doi:10.1016/j.tecto.2012.02.021.
- [5] 袁道阳.青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化[D].北京:中国地震局地质研究所,2003:137-145.

- YUAN Dao-yang. Tectonic Deformation Features and Space-time Evolution in Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau since the Late Cenozoic Time[D]. Beijing: Institute of geology, CEA, 2003:6-145. (in Chinese)
- [6] 袁道阳, 张培震, 刘百箴, 等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 2004, 8(2):270-278.
- YUAN Dao-yang, ZHANG Pei-zheng, LIU Bai-chi, et al. Geometrical Imagery and Transformation of Late Quaternary Active Tectonics in Northeastern Margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 8(2):270-278. (in Chinese)
- [7] 袁道阳, 雷中生, 何文贵, 等. 公元前186年甘肃武都地震考证与发震构造探讨[J]. 地震学报, 2007, 9(6):654-663.
- YUAN Dao-yang, LEI Zhong-sheng, HE Wen-gui, et al. Textual Research of Wudu Earthquake in 186 B.C. in Gansu Province, China and Discussion on its Causative Structure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(6):654-663. (in Chinese)
- [8] 郑文俊, 刘小凤, 赵广坤, 等. 2003年11月13日甘肃岷县 $M_{5.2}$ 地震基本特征[J]. 西北地震学报, 2005, 27(1):61-65.
- ZHENG Wen-jun, LIU Xiao-feng, ZHAO Guang-kun, et al. Principal Features of Minxian $M_{5.2}$ Earthquake in Gansu Province, on Nov.13, 2003[J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(1):61-65. (in Chinese)
- [9] 郑文俊, 雷中生, 袁道阳, 等. 1573年甘肃岷县地震史料考证与发震构造探讨[J]. 中国地震, 2007, 23(1):73-83.
- ZHENG Wen-jun, LEI Zhong-sheng, YUAN Dao-yang, et al. Textual Research on the Historical Data of the 1573 AD Minxian Earthquake in Gansu Province and Discussion on Its Seismogenic Structure[J]. Earthquake Research China, 2007, 23(1):73-83. (in Chinese)
- [10] 郑文俊, 雷中生, 袁道阳, 等. 1837年甘肃岷县北6级地震考证与发震构造分析[J]. 地震, 2007, 27(1):120-130.
- ZHENG Wen-jun, LEI Zhong-sheng, YUAN Dao-yang, et al. Structural Research on the 1837 Northern Minxian M_6 Earthquake in Gansu Province and its Causative Structure[J]. Earthquake, 2007, 27(1):120-130. (in Chinese)
- [11] 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等. 甘东南地区构造活动特征: 兼论岷县漳县 $M_{6.6}$ 地震孕震机制[J]. 地球物理学报, 2013, 56(12):4058-4071.
- ZHENG Wen-Jun, YUAN Dao-Yang, HE Wen-Gui, et al. Geometric Pattern and Active Tectonics in Southeastern Gansu Province: Discussion on Seismogenic Mechanism of the Minxian-Zhangxian $M_{6.6}$ Earthquake on July 22, 2013[J]. Chinese Journal Geophysics, 2013, 56(12):4058-4071. (in Chinese)
- [12] 郑文俊, 闵伟, 何文贵, 等. 2013年甘肃岷县漳县6.6级地震震害分布特征及发震构造分析[J]. 地震地质, 2013, 35(3):604-615.
- ZHENG Wen-jun, MIN Wei, HE Wen-gui, et al. Distribution of the Related Disaster and the Causative Tectonic of the Minxian-Zhangxian $M_{6.6}$ Earthquake on July 22, 2013, Gansu, China[J]. Seismology and Geology, 2013, 35(3):604-615. (in Chinese)
- [13] ZHENG De-wen, ZHANG Pei-zhen, WAN Jin-lin, et al. Rapid Exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan Thrust Fault from Apatite Fission-track Thermochronology: Implications for Growth of the Northeastern Tibetan Plateau Margin[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 248:183-193.
- [14] 张元生, 冯红武, 陈继锋, 等. 基于地震学资料探讨2013年岷县漳县6.6级地震发震构造[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3):419-423.
- ZHANG Yuan-sheng, FENG Hong-wu, CHEN Ji-feng, et al. Study on Seismogenic Structure of 2013 Minxian-Zhangxian $M_{6.6}$ Earthquake with Seismological Data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3):419-423. (in Chinese)
- [15] 何文贵, 周志宇, 马尔曼, 等. 2004年9月7日岷县-卓尼5.0级地震的基本特征和地质背景研究[J]. 地震研究, 2006, 29(3):57-62.
- HE Wen-gui, ZHOU Zhi-yu, MA Er-man, et al. The Research on Principal Feature and Geologic Background of Minxian-Zhuoni $M_{5.0}$ Earthquake, on Sep.9, 2004[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(3):57-62. (in Chinese)
- [16] 王志才, 张培震, 张广良, 等. 西秦岭北缘构造带的新生代构造活动——兼论对青藏高原东北缘形成过程的指示意义[J]. 地学前缘, 2006, 13(4):119-135.
- WANG Zhi-cai, ZHANG Pei-zheng, ZHANG Guang-liang, et al. Tertiary Tectonic Activities of North Frontal Fault Zone of the West Qinling Mountains: Implications for the Growth of the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(4):119-135. (in Chinese)
- [17] Royden L H, et al. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet[J]. Science, 1997, 276(5313):788-790.
- [18] 张会平, 杨农, 张岳桥, 等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1):126-135.
- ZHANG Hui-ping, YANG Nong, ZHANG Yue-qiao, et al. Geomorphology of the Minjiang Drainage System (Sichuan, China) and its Structural Implication[J]. 2006, 26(1):126-135. (in Chinese)
- [19] 葛伟鹏, 王敏, 沈正康, 等. 柴达木-祁连山地块内部震间上地壳块体运动特征与变形模式研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9):2994-3010.
- GE Wei-peng, WANG Min, SHEN Zheng-kang, et al. Intersiesmic Kinematics and Deformation Patterns on the Upper Crust of Qaidam-Qilianshan block[J]. Chinese Journal

- Geophysics, 2013, 56(9): 2994–3010. (in Chinese)
- [20] Shen X, et al. Receiver Function Structures beneath the Deep Large Faults in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 2013, 10: 011. (in Chinese)
- [21] 冯红武, 张元生, 刘旭宙, 等. 2013 年甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震及余震序列重定位[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 443–447.
- FENG Hong-wu, ZHANG yuan-sheng, LIU Xu-zhou, et al. Relocation of Mainshock and Aftershocks of the 2013 Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake in Gansu[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 443–447. (in Chinese)
- [22] 陈继锋, 林向东, 何新社. 2013 年甘肃岷县 $M_s6.6$ 地震矩张量反演及发震构造初探[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 425–431.
- CHEN Ji-feng, LIN Xiang-dong, HE Xin-she. Moment Tensor Inversion and Seismogenic Tectonics for the 2013 Minxian $M_s6.6$ Earthquake in Gansu[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 425–431. (in Chinese)
- [23] Clark M K, L H Royden. Topographic Ooze: Building the Eastern Margin of Tibet by Lower Crustal Flow[J]. Geology, 2000, 28(8): 703–706.
- [24] 万永革, 沈正康, 盛书中, 等. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, 2009, 31(2): 128–139.
- WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, SHENG Shu-zhong, et al. The Influence of 2008 Wenchuan Earthquake on Surrounding Faults[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(2): 128–139. (in Chinese)
- [25] 王双绪, 蒋锋云, 李宁, 等. 岷县漳县 6.6 级地震前区域地壳运动变形背景与断层形变异常特征[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 503–512.
- WANG Shuang-xu, JIANG Feng-yun, LI Ning, et al. Regional Crustal Movement Background and Cross-fault Deformation Anomaly Characteristics Prior to the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 503–512. (in Chinese)
- [26] 刘旭宙, 张元生, 秦满忠, 2013, 岷县 $M_s6.6$ 地震震源机制及构造应力研究[J]. 地震工程学报, 35(3): 432–437.
- LIU Xu-zhou, ZHANG Yuan-sheng, QIN Man-zhong, et al. Analysis of the Focal Mechanism and Tectonic Stress of Minxian $M_s6.6$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 432–437. (in Chinese)