

兰州庄浪河阶地差分 GPS 测量与构造变形分析

刘兴旺^{1, 2, 3}, 袁道阳^{1, 2, 3}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

3. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要:在综合分析兰州庄浪河河流阶地发育和分布特征的基础上,采用高精度差分 GPS 对 I~III 级阶地进行了详细的测量,获得了庄浪河阶地纵横剖面图。结合不同级别阶地年代学资料研究了其构造变形特征,获得了穿越断裂带地区的阶地变形特点、变形带宽度、变形幅度和速率等定量参数。研究表明:兰州庄浪河阶地构造变形主要表现为断裂扩展褶皱模式,阶地变形速率在晚第四纪以来有逐渐加速的特点。

关键词: 河流阶地; 差分 GPS 测量; 构造变形; 断裂扩展褶皱; 庄浪河

中图分类号: P315.211

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2012)04-0393-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2012.04.0393

Analysis of Tectonic Deformation on Zhuanglang River Terraces in Lanzhou Based on the Differential GPS Surveying

LIU Xing-wang^{1, 2, 3}, YUAN Dao-yang^{1, 2, 3}

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

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, CEA, Lanzhou 730000 China;

3. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000 China)

Abstract: Based on the general analyzing the characteristics of distribution and development of the terraces along Zhuanglang river, in Lanzhou, the longitudinal and latitudinal profiles of I ~ III terraces are given by virtual of high-resolution differential GPS carried through detail surveying. According to the dating result of different terraces, their tectonic deformation characters are studied and the quantificational parameters of terrace deformation in fault area such as deformation characters, breadth of deformation zone, extent of deformation and velocity etc are gotten. The result indicates that fault-propagation fold plays most important role in the tectonic deformation of the terraces. The terrace deformation rates have been accelerated since the late Quaternary.

Key words: Fluvial terrace; Differential GPS surveying; Tectonic deformation; Fault-propagation fold; Zhuanglang river

0 引言

庄浪河发育于祁连山地区,其上游称为金强河,进入兰州市永登县境内称为庄浪河,在兰州市河口地区汇入黄河,为黄河的一级支流,全长约 160 km

(图 1)。沿庄浪河两岸发育 I~IV 级河流阶地。由于地处构造活动强烈的青藏块体东北部边缘,紧邻庄浪河断裂,其构造活动引起了阶地的变形^[1]。庄

收稿日期:2011-09-28

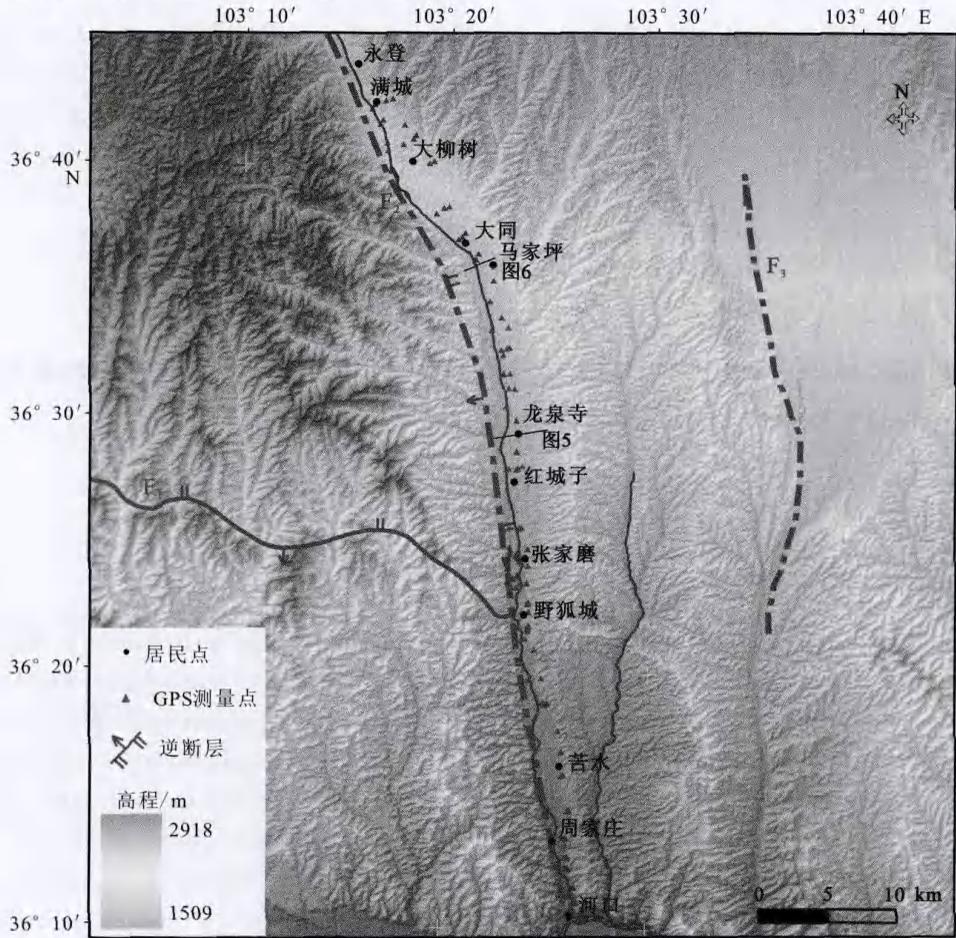
基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2011IESLZ01);中国地震局兰州地震研究所论著号:LC2012025

作者简介:刘兴旺(1980-),男(汉族),山东东营人,助理研究员,主要从事活动构造与地貌年代学研究工作。

浪河断裂是本区的一条重要断裂,历史上曾发生过1440年永登6¼级地震和苦水5½级地震^[2]。1995年7月22日庄浪河西侧又发生了永登5.8级地震^[3-4]。由于庄浪河断裂地表出露不清楚,所获得的断裂新活动性证据不充分,认识上也不统一,是长期以来想解决而又没很好解决的重要断裂。

阶地是记录构造变形的良好地貌证据,利用阶地变形研究新构造运动也是一种重要的手段^[5-7]。袁道阳等^[1]曾用气压计研究本区阶地变形,根据阶

地变形特征,认为该区的庄浪河断裂为一逆断裂一褶皱带,属断裂扩展褶皱模式。然而气压计易受到环境的影响,误差较大,存在较大的不确定性。本文在详细划分阶地的基础上,利用差分GPS实测庄浪河不同级别阶地面和砾石层高度,做阶地纵、横剖面图,进而探讨庄浪河断裂的新活动性及其构造变形特征,获得该区构造活动的地貌学证据,以期对庄浪河阶地发育和断裂变形特征给出更明确的认识。



F₁:疙瘩沟断裂; F₂:庄浪河断裂; F₃:秦王川盆地西缘断裂

图1 庄浪河地区 DEM 图像

Fig. 1 DEM image of the Zhuanglang river region.

1 兰州庄浪河阶地发育分布特征及年代序列

沿庄浪河两岸共发育了四级阶地,其中东岸阶地连续性好,发育较全,西岸零星发育。以张家磨为界,以北地区以堆积阶地为主,沉积了厚层的风成黄土,以南地区均为基座阶地,河谷狭窄。

I级阶地连续性好,发育普遍,以堆积阶地为主,局部地方为基座阶地,基座为白垩系砖红色砂砾岩。阶地面总体走向 NNW,西岸狭窄,东岸宽阔。堆积阶地上部为薄层土状堆积物,下部为砂砾石层,砾石磨圆度中等,分选性一般。阶地面拔河高度 5~15 m。在本次的研究中,我们选择阶地发育典型的沙沟附近(36°23'13.2", 103°23'41.4")对 I级阶

地采集了光释光年代样品。剖面如图 2 所示,顶部 0.7 m 为富含植物根系的灰黑土层,中间为黄土层,在距离地表 2.8 m 的 I 级阶地砾石层上部,上覆黄土层的底部,采了光释光样品,年龄为 (4.9 ± 0.5) ka B. P.。

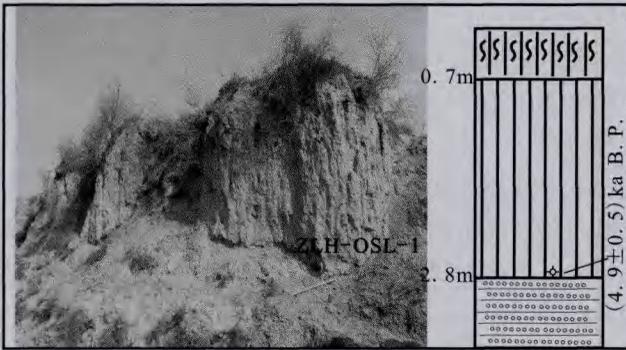


图 2 庄浪河 I 级阶地样品采集剖面(镜像 E)
Fig. 2 Sample collection section at T_1 of Zhuanglang river.

II 级阶地在张家磨以南为基座阶地,阶地面发育不完整,经后期的侵蚀,地貌上表现为不连续的小山包,顺河谷两岸山前呈细条状零星分布。阶地面拔河 50~60 m,砾石层拔河 30~40 m。基座为白垩系砖红色砂砾岩,上覆 2~3 m 厚的冲积砾石层,之上为 2 m 左右的浅桔红色层状水成黄土,上覆 5~10 m 厚的风成黄土。张家磨以北为堆积阶地,阶地面拔河 20~30 m,上部为厚层风成黄土,未见基底出露。在沙沟附近 ($36^{\circ}23'20.8''$, $103^{\circ}24'03.3''$) 我们对 II 级阶地也采集了年代样品,剖面如图 3 所示。顶部 0.5 m 为含植物的根系的灰黑土层,中间为黄土层,样品点距地表 8 m,阶地砾石层之上,年龄为 (52.6 ± 4.7) ka B. P.。

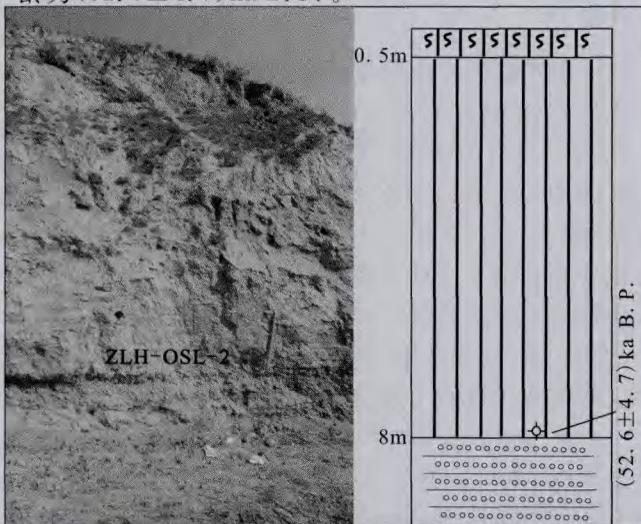


图 3 庄浪河 II 级阶地样品采集剖面(镜像 E)
Fig. 3 Sample collection section at T_2 of Zhuanglang river.

III 级阶地在张家磨以南为基座阶地,阶地面拔河 70~100 m,基座拔河 45~55 m,基座之上 2~3 m 为冲积砾石层,砾石磨圆度一般,分选性较好,之上为厚层风成黄土。张家磨以北为堆积阶地,阶地面拔河 40~60 m,阶地面宽阔平坦,后期侵蚀成丘陵状。剖面中显示厚层风成黄土,未见基座出露。考虑到 III 级阶地的年代可能大于 100 ka,光释光测年误差较大,因此 III 级阶地的年代主要由区域河流阶地年代对比获得。

VI 级阶地由于后期侵蚀切割,阶地面残缺不全,只有零星分布,以堆积阶地为主,上部为厚层风成黄土,底部为冲积砂砾石层。由于其分布的不完整和不连续,因此在本次的研究中未做工作。

对黄河及其与庄浪河紧邻的一级支流湟水河的年代序列,前人曾做过大量的研究^[8-16]。最新的研究结果表明,黄河 $T_1 \sim T_3$ 年代分别为 10 ka, 50 ka 和 130 ka^[8],湟水河 $T_1 \sim T_3$ 的年代分别为 10 ka, 50~70 ka 和 120~150 ka^[12-16]。由二者年代序列与庄浪河年代对比,庄浪河 T_1 阶地年代为 (4.9 ± 0.5) ka B. P.,考虑到庄浪河作为黄河的支流,发育晚于黄河,因此该年代值较为可信。庄浪河 T_2 阶地年龄 (52.6 ± 4.7) ka B. P.,该年龄值与黄河及湟水对比,基本与二者相当。虽然在本次的研究中,没有采集庄浪河 T_3 的年代样品,但与黄河及湟水河对比可知,庄浪河 T_3 的年代应该介于 120~150 ka 之间。

2 庄浪河阶地差分 GPS 测量及构造变形分析

本次研究选择了庄浪河东岸发育连续且完整的 I~III 级阶地进行了构造变形的定量研究。野外测量采用瑞士莱卡 1200 系列差分 GPS 仪,共实测了 300 多个阶地面高度值(图 1),做出了河流阶地纵剖面图;同时利用 DEM 数据的地表高度,结合前人研究资料,做出河流阶地横剖面图。

2.1 庄浪河阶地纵剖面变形特征

图 4 是根据实测的庄浪河东岸 I~III 级阶地纵剖面图。其中张家磨以北为沉降区,属堆积阶地;张家磨以南为隆起区,属基座阶地。阶地变形最常见的有两种类型,即穿过构造抬升区引起的拱曲和横切活动断裂引起的断错^[17]。从庄浪河阶地纵剖面图可以看出,张家磨以南阶地明显隆起,发生了同步褶皱变形,变形主要以拱曲为主而不是直接断错,形成较宽的构造变形带,宽约 1~2 km,说明其构造活

动以褶皱隆起为主,没有直接断错特征。变形部位核部比较平坦,南翼缓倾,北翼陡倾,其几何形态与断裂扩展褶皱模型的图像十分类似^[5,18]。其中Ⅲ级阶地面抬升幅度为 28 m 左右,Ⅱ级阶地面抬升幅度为 19 m 左右,Ⅰ级阶地抬升幅度仅 5 m,显示该逆断裂—褶皱带自晚新生代形成以来到晚更新世甚至全新世仍在活动。可见,庄浪河断裂带晚第四纪以来仍是以断裂扩展机制变形的,本区发生的多次中强地震可能也与此有关^[1]。根据相应的年代资料,则可得出 T_3 的变形速率为 0.19~0.23 mm/a, T_2 的变形速率为 0.36 mm/a, T_1 的变形速率为 1 mm/a。

所得阶地变形速率的可靠性如何呢? 本次研究中所用差分 GPS 精度较高,误差为厘米级,因此仪器误差可以不计;根据所测阶地年代及与区域河流的对比,庄浪河阶地的年代可信度也较高,误差也不会很大。若速率存在误差,很有可能来源于阶地本身的测量,如不同地段黄土沉积厚度的不同、测量点位于阶地前缘还是后缘等。但该速率与黄河阶地变形速率相当^[19],与 GPS 观测的断层滑动速率也高度吻合^[20],因此我们认为该速率还是较为可靠的。由阶地变形速率的值可以看出,阶地变形速率在晚第四纪有逐渐增快的趋势,表明庄浪河断裂活动晚更新世至全新世活动有所增强。

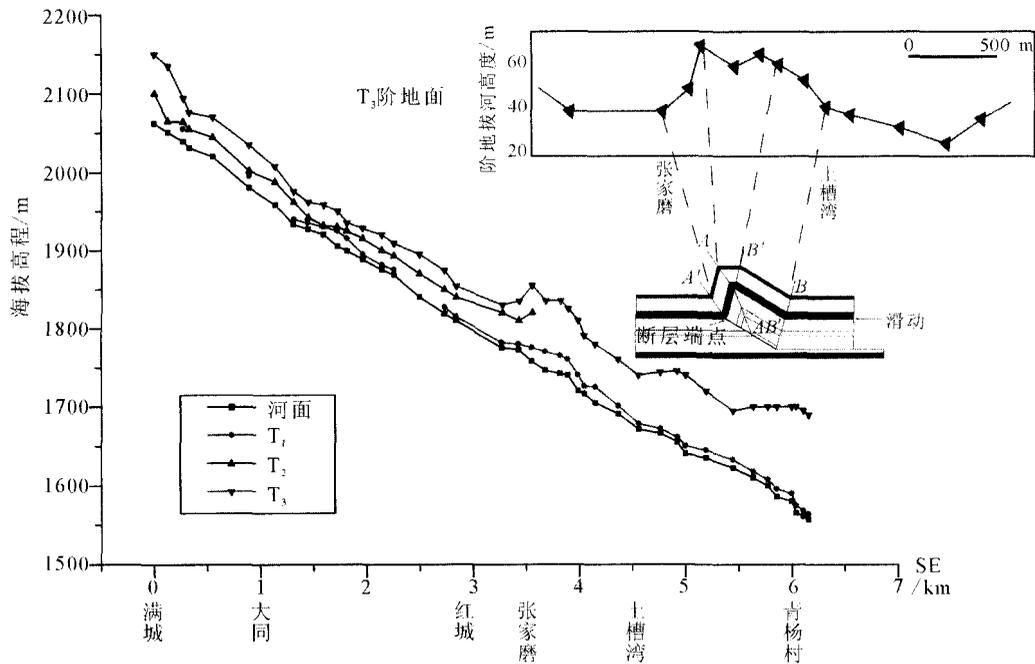


图 4 兰州庄浪河阶地纵剖面图

Fig. 4 Longitudinal profiles of Zhuanglang river terraces in Lanzhou.

利用阶地拔河高度,可以得出阶地下切速率分别为 T_3 0.47~0.83 mm/a, T_2 0.87~1.25 mm/a, T_1 1~3 mm/a。庄浪河地区地处青藏高原东北缘地区,其阶地的形成与青藏高原的隆升有着密切的联系。根据前人的研究,0.15 Ma 以来青藏高原起码经历了三次脉动式的上升^[8],黄河及其支流湟水河等均形成了三级阶地,年代与庄浪河各阶地相当^[9-10,12]。同样,根据河流的下切速率可以看出,0.15 Ma 以来青藏高原的隆升明显有后期加速的趋势。

2.2 庄浪河阶地横剖面变形特征

在构造作用长期持续的地区,其活动变形作用应产生一种叠加在长期构造效应之上的河流响应,

其中引用最为广泛的变形证据是河谷内阶地的挠曲或发育在断裂或河谷两侧的同级阶地高度的变化^[21]。已有的研究表明:发生在青藏高原隆升区内的大多数阶地的形成和变形过程常与新构造运动相关^[22-25]。其中利用阶地资料分析构造运动的认识主要有以下几种类型:河流发育的阶地级数常与构造运动期次相对应;阶地面的变形、断错与断裂活动相联系;河流两岸同级阶地高差及阶地类型的较大幅度变化可能与断裂的活动方式相联系。

在本次研究中,庄浪河阶地横剖面的获得主要是通过 DEM 图形数据及前人研究资料获得^①。庄

① 甘肃省地震局,中国地震局兰州地震研究所,兰州地区地震地质环境研究,2001。

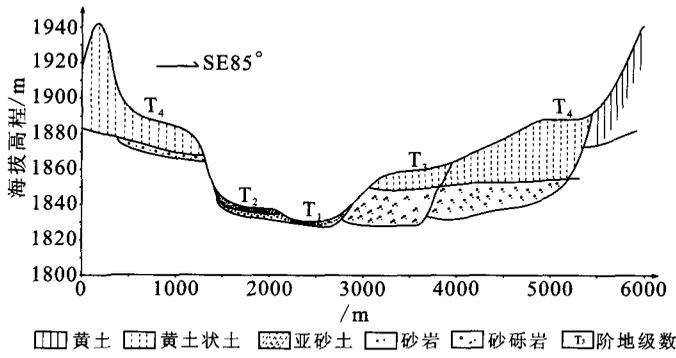


图 5 龙泉寺阶地横剖面图

Fig. 5 Vertical profiles of terraces at Longquansi.

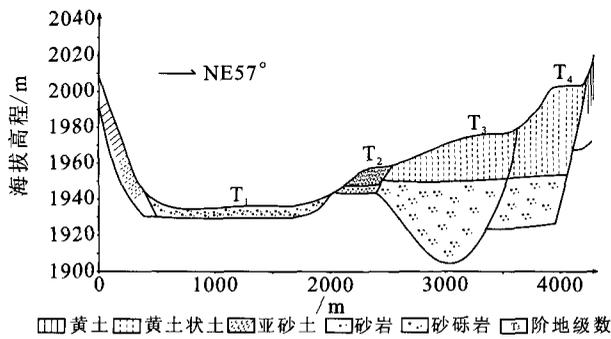


图 6 马家坪阶地横剖面图

Fig. 6 Vertical profiles of terraces at Majiaping.

浪河河谷较为狭窄,最宽的地方约 10 km,最窄不足 1 km。从横剖面图 5、6 可以看出西岸阶地与东岸阶地相比,发育既不完整也不连续;同级阶地西岸大多高于东岸。野外调查表明,西岸主要为基座阶地和侵蚀阶地,东岸除发育基座阶地外还有堆积阶地。另外,阶地砾石层厚度差异较大,西岸一般均小于 2 m,东岸砾石层厚度可达 5~8 m,说明东岸的堆积作用强于西岸。这些资料反映了庄浪河两岸阶地的抬升方式和幅度是不一致的。

3 结论

通过对庄浪河阶地的差分 GPS 测量,结合 DEM 图像数据,获得黄河北两岸阶地纵横剖面图,参考该区断裂的活动特征,综合研究得到如下认识:

(1) 庄浪河阶地的变形地区之中在张家磨至土槽湾地区,变形范围约 1~2 km,变形方式表现为断裂扩展褶皱模式。Ⅲ级阶地地面抬升幅度为 28 m 左右,Ⅱ级阶地地面抬升幅度为 19 m 左右,而Ⅰ级阶地抬升幅度为 5 m 左右。

(2) 结合阶地年代学资料,获得Ⅲ~Ⅰ级阶地的变形速率分别为 0.19~0.23、0.36、1 mm/a,阶

地变形速率在晚第四纪有逐渐增快的趋势,表明庄浪河断裂活动晚更新世至全新世活动是逐渐增强的。

(3) 利用阶地拔河高度,获得Ⅲ~Ⅰ级阶地下切速率分别为 0.47~0.83 mm/a, 0.87~1.25 mm/a, 1~3 mm/a,表明青藏高原在晚更新世以来的隆升有加速的趋势。

(4) 综合阶地横剖面特征和野外调查结果,庄浪河东西两岸的阶地抬升方式和幅度是不一致的。

【参考文献】

[1] 袁道阳,刘百箴,张培震,等. 兰州庄浪河断裂带的新构造变形与地震活动[J]. 地震学报, 2002, 24(4): 441-444.

[2] 国家地震局兰州地震研究所,甘肃省计划委员会. 甘肃省地震危险性区划研究[M]. 兰州:兰州大学出版社, 1993: 88-91.

[3] 邢成起,荣代路,姚同福,等. 1995年7月22日永登5.8级地震发震构造与发震机制分析[J]. 西北地震学报, 1996, 18(3): 1-9.

[4] 周俊喜. 1995年7月22日永登5.8级地震发震构造初步分析[J]. 西北地震学报, 1997, 19(增刊): 139-141.

[5] 杨晓平,邓起东,张培震,等. 利用阶地变形资料研究北天山吐鲁谷逆断裂—背斜带晚更新世以来的褶皱变形特征[A]//《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究 2[G]. 北京:地震出版社, 1994, 44-62.

[6] 程绍平,邓起东,闵伟,等. 黄河晋陕河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动[J]. 第四纪研究, 1998, 8(3): 238-248.

[7] 王峰,徐锡伟,郑荣章. 用阶地测量方法探讨阿尔金中段全新世滑动速率[J]. 地震地质, 2004, 26(1): 61-70.

[8] 潘保田,李吉均,朱俊杰,等. 兰州地区黄河阶地发育与地貌演化[A]//中国第四纪冰川与环境研究中心、中国第四纪研究会编. 中国西部第四纪冰川与环境[G]. 北京:科学出版社, 1991, 271-277.

[9] 潘保田,苏怀,胡春生,等. 兰州地区 1.0 Ma 黄河阶地的发现和 0.8 Ma 阶地形成时代的重新厘定[J]. 自然科学进展, 2006, 16(11): 1411-1418.

[10] 潘保田,苏怀,刘小丰,等. 兰州东盆地最近 1.2 Ma 的黄河阶地序列与形成原因[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 172-180.

[11] 朱俊杰,曹继秀,钟巍,等. 兰州地区黄河最高级阶地与最老黄土沉积的发现及其古地磁年代学的研究[A]//青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究[G]. 北京:科学出版社, 1994, 77-90.

[12] 曾永年,马海州,李珍,等. 西宁地区湟水阶地的形成与发育研究[J]. 地理科学, 1995, 15(3): 253-258.

[13] 侯元才,许伟林,俞建,等. 青藏高原东北缘 112 Ma B. P. 以来各阶段古气候演变[J]. 青海地质, 2001, (增刊): 10-16.

[14] 张智勇,于庆文,张克信,等. 黄河上游第四纪河流地貌演化——兼论青藏高原 1:25 万新生代地质填图地貌演化调查[J]. 地球科学, 2003, 28(6): 621-626.

(下转 404 页)

- 形成机理[J]. 地震学报, 2008, 2(30): 152-164.
- [13] 师亚芹, 冯希杰, 戴王强, 等. 临潼—长安断裂带所在陡坎的成因分析[J]. 第四纪研究, 2008, 4(28): 721-732.
- [14] 戴王强, 韩恒悦, 冯希杰, 等. 临潼—长安断裂带晚第四纪以来的活动性[J]. 地震地质, 2007, 2(29): 330-335.
- [15] 戴王强, 韩恒悦, 李晓妮, 等. 临潼—长安断裂带晚第四纪以来的活动性[J]. 地震, 2007, 4(27): 129-136.
- [16] 方盛明, 张先康, 刘保金, 等. 探测大城市活断层的地球物理方法[J]. 地震地质, 2002, 24(4): 606-6131.
- [17] 潘纪顺, 刘保金, 朱金芳, 等. 城市活断层的抗干扰高分辨率浅层地震勘探研究[J]. 中国地震, 2003, 19(2): 148-1571.
- [18] 刘育侠, 王振明, 王兰民, 等. 兰州盆地活断层的高分辨率浅层地震勘探技术[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 344-353.
- [19] 连玉平, 张锦福, 林松建, 等. 高分辨率浅层人工地震勘探探测
 隐伏断裂实例[J]. 西北地震学报, 2007, 3(29): 260-263.
- [20] 徐锡伟, 计凤桔, 于贵华, 等. 用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列: 河北夏垫断裂古地震研究[J]. 地震地质, 2000, 22(1): 9-19.
- [21] 徐锡伟, 吴卫民, 张先康. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [22] 杨晓平, 袁洪克, 宋新初, 等. 浙江宁波育王山山前隐伏断层勘探和新活动时代[J]. 地球科学—中国地质大学, 2011, 36(6): 967-976.
- [23] 何仲太, 马保起, 卢海峰, 等. 北京东北旺—小汤山断裂存在的证据[J]. 地震地质, 2009, 31(2): 233-246.
- [24] 何文贵, 袁道阳, 葛伟鹏, 等. 对兰州市刘家堡断层的新认识[J]. 西北地震学报, 2009, 31(1): 40-45.

(上接 397 页)

- [15] 鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 等. 最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(9): 855-864.
- [16] 何生胤. 西宁盆地湟水河流阶地与高原演化特征分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(3): 81-85.
- [17] C R 艾伦, 等著, 四川省地震局译. 活动构造学[M]. 四川: 科学技术出版社, 1989.
- [18] Suppe J, Medwedeff D. A. Geometry and kinematics of fault-propagation folding[J]. Ecologue Geol. Helv., 1990, 83(3): 409-454.
- [19] 刘兴旺, 袁道阳, 葛伟鹏. 兰州黄河阶地高精度差分 GPS 测量与构造变形分析[J]. 西北地震学报, 2007, 29(4): 341-346.
- [20] 周德敏, 甘卫军, 任金卫, 等. 基于 GPS 观测资料反演庄浪河
 断裂带、马衔山北缘断裂带的滑动速率[J]. 地震地质, 2005, 27(4): 706-714.
- [21] 侯康明, 袁道阳, 李绍业. 武威—天祝—庄浪河 NNW 向断裂分段及变形特征[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19(3): 55-63.
- [22] 杨景春, 谭利华, 李有利, 等. 祁连山北麓河流阶地与新构造演化[J]. 第四纪研究, 1998, 3: 229-237.
- [23] 陈杰, 卢演涛, 丁国瑜. 祁连山西段及酒西盆地第四纪构造运动的阶段划分[J]. 第四纪研究, 1996, 3: 263-271.
- [24] 李有利, 杨景春. 河西走廊平原地全新世河流阶地对气候变化的响应[J]. 地理科学, 1997, (13)3: 248-252.
- [25] 李吉均, 方小敏, 马海州, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学(D辑), 1996, (26)4: 316-322.