

谭锡斌,徐锡伟,李元希等. 2015. 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. 地球物理学报, 58(1):143-152, doi:10. 6038/cjg20150112.

Tan X B, Xu X W, Lee Y H, et al. 2015. Differential Late-Cenozoic vertical motions of the Beichuan-Yingxiu Fault and the Jiangyou-Guanxian Fault in the central Longmenshan range and their tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(1):143-152, doi:10. 6038/cjg20150112.

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

谭锡斌¹, 徐锡伟^{1*}, 李元希², 袁仁茂¹, 于贵华¹, 许冲¹

1 中国地震局地质研究所 活动构造与火山重点实验室, 北京 100029

2 台湾中正大学地球与环境科学学院, 台湾嘉义 62102

摘要 2008 汶川地震之后, 多个研究组对龙门山的新生代剥蚀历史进行了研究, 但是在龙门山推覆构造带中段, 剥蚀历史研究主要集中在彭灌杂岩, 而彭灌杂岩东侧(即中央断裂下盘)的热年代学资料相对缺乏, 其剥蚀历史还比较模糊. 对于彭灌杂岩东侧岩体的新生代剥蚀历史研究, 不仅可以了解龙门山推覆构造带的新生代断层活动历史, 而且对于青藏高原东缘的新生代隆升机制具有重要约束作用.

在前人热年代学研究基础上, 在龙门山推覆构造带中段中央断裂和前山断裂附近补充了一些裂变径迹样品. 采用外探测器法(external detector method)对样品进行裂变径迹分析, 实验测试在台湾中正大学裂变径迹实验室完成.

实验获得了 6 个锆石裂变径迹和 6 个磷灰石裂变径迹年龄. 前山断裂上盘, AFT(磷灰石裂变径迹)年龄以小鱼洞断裂为界存在明显的差异, 其中小鱼洞断裂以南的样品 AFT 年龄为 39 Ma, 小鱼洞断裂以北的 4 个 AFT 年龄介于 6—8 Ma 之间.

研究揭示出中央断裂和前山断裂的新生代活动性以 NW 向小鱼洞断裂为界存在较大差异: 距今 8 Ma 以来, 小鱼洞断裂以北, 中央断裂和前山断裂的平均垂向滑动速率分别为约 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和约 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 小鱼洞断裂以南, 平均垂向滑动速率则分别为约 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和约 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. 低温热年代学方法获得的断层新生代垂向滑动速率与汶川地震断层垂向同震位移分布基本一致. 前山断裂(小鱼洞断裂以北)距今 8 Ma 以来北西—南东向水平缩短量达到 8~12 km, 表明地壳缩短是造成龙门山抬升和剥蚀的重要因素之一. 本研究结论不支持下地壳增厚模型对于龙门山隆升的解释.

关键词 青藏高原; 龙门山; 汶川地震; 裂变径迹; 滑动速率

doi:10. 6038/cjg20150112

中图分类号 P546

收稿日期 2012-08-19, 2014-06-09 收修定稿

Differential Late-Cenozoic vertical motions of the Beichuan-Yingxiu Fault and the Jiangyou-Guanxian Fault in the central Longmenshan range and their tectonic implications

TAN Xi-Bin¹, XU Xi-Wei^{1*}, LEE Yuan-Hsi², YUAN Ren-Mao¹, YU Gui-Hua¹, XU Chong¹

1 Key Laboratory of Active Fault and Volcano Institute of Geology, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 Department of Earth and Environmental Sciences, National Chung-Cheng University, Taiwan Chia-i Hsien 62102, China

Abstract After the 2008 Wenchuan earthquake, several groups did some researches on the

基金项目 国家自然科学基金项目(41302159 和 40821160550)资助.

作者简介 谭锡斌,男,1985 年生,博士,主要从事活动构造和热年代学研究. E-mail: tanxibin@sina.com

* **通讯作者** 徐锡伟,男,1962 年生,研究员,主要从事活动构造学研究及其在减轻地震灾害中的应用. E-mail: xiweixu@vip.sina.com

Cenozoic exhumation history of the Longmenshan range. However, to the east of the Pengguan massif, the thermochronology data are still scarce and the exhumation history is unknown, as the previous researches mainly focus on the Pengguan massif. The research on the exhumation history of the rocks to the east of the Pengguan massif can not only help to understand the Cenozoic faulting histories of the faults at the Longmenshan Thrust Belt, but also make significant constraints on the uplift mechanism of the eastern margin of the Tibetan plateau.

We add some fission track samples along the Beichuan-Yingxiu fault and the Jiangyou-Guanxian fault, on the basis of previous studies. The samples are dated at the Fission Track Lab of the National Chung Cheng University, with the external detector method.

We get 6 Zircon Fission Track (ZFT) data and 6 Apatite Fission Track (AFT) data. At the hanging wall of the Jiangyou-Guanxian fault, the AFT data show significant difference divided by the Xiaoyudong fault. To the south of the Xiaoyudong fault, the AFT age is 39 Ma, while the ages are between 6—8 Ma to the north.

The research reveals that the vertical activities of the Beichuan-Yingxiu fault and the Jiangyou-Guanxian fault since 8 Ma are much different separated by the Xiaoyudong fault: north to the Xiaoyudong fault, the average vertical slip rate along the Beichuan-Yingxiu fault and the Jiangyou-Guanxian fault is about $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ and about $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively; south to the Xiaoyudong fault, the average vertical slip rate along the Beichuan-Yingxiu fault and Jiangyou-Guanxian fault is about $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ and about $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The late-Cenozoic vertical slip rate of the faults revealed by the thermochronology data is coincided with the co-seismic vertical displacement of the Wenchuan earthquake. The horizontal shortening across the Jiangyou-Guanxian fault (north to the Xiaoyudong fault) reaches 8~12 km since 8 Ma, which indicates that the crustal shortening performing as the thrust movement along the main faults is the one of the main causes for the uplift and exhumation of the Longmenshan range. Our results don't support the lower crust thickening model for the uplift of the Longmenshan range.

Keywords Tibetan Plateau; Longmenshan Range; Wenchuan earthquake; Fission track; Slip rate

1 引言

大约在距今 50 Ma 前印度板块开始与欧亚板块碰撞造成其北侧软弱块体的隆升,形成了广阔的高海拔-低坡度的青藏高原(Yin and Harrison, 2000; Tapponnier et al., 2001; Hubbard and Shaw, 2009). 在青藏高原东边界,高原块体向东运移的过程中,遇到了相对较强硬的华南块体的阻挡,形成了高出四川盆地 4000 m 的龙门山(图 1),沿着龙门山发育了多条 NE 走向的逆断层,统称为龙门山推覆构造带. 2008 年汶川 M_w 7.9 地震证实了龙门山推覆构造带具有巨大的活动性,并且使龙门山地区成为地球科学研究的焦点之一(Hubbard and Shaw, 2009; Xu et al., 2009). 针对汶川地震断裂活动特征以及龙门山造山机制的研究,研究者重新开始对龙门山的隆升机制进行争论,观点主要分为两种:(1)

地壳缩短造成龙门山的隆升(Hubbard and Shaw, 2009; Xu et al., 2009; Hubbard et al., 2010; Shi et al., 2012); (2) 下地壳增厚造成龙门山的隆升(Burchfiel et al., 2008; Royden et al., 2008).

低温热年代学方法是揭示龙门山新生代造山过程以及新生代断层垂向活动性的重要方法,多位学者在龙门山及其邻近地区获得了大量的热年代学数据(Arne et al., 1997; Xu and Kamp, 2000; Kirby et al., 2002),尤其是在汶川地震之后. Godard 等(2009)对龙门山中段的彭灌杂岩及其附近地区的样品进行了详细的锆石和磷灰石(U-Th)/He 测年获得龙门山中段中央断裂和后山断裂的新生代断层活动性,但是目前中央断裂下盘的低温热年代学数据较少,导致对于前山断裂的新生代断层活动性认识还比较模糊. 汶川地震中,前山断裂在小鱼洞阶区和高川阶区之间产生了约 70 km 长的地表破裂(Tan et al., 2012),最大抬升量达 3 m(Yu et al.,

2010),前山断裂的晚新生代活动性对于龙门山新生代以来的造山过程的认识和造山机制的研究具有重要意义.本文在前人研究的基础上,在前山断裂两侧补充采集并测试了裂变径迹样品,获得了龙门山中段以小鱼洞阶区为界南北两个段落的中央断裂和前山断裂的晚新生代活动性质,并在此基础上对青藏高原东缘的隆升机制进行了讨论.

2 构造背景

龙门山推覆构造带位于青藏高原东缘与四川盆地交接地带,同时也是松潘甘孜地块与华南地块相互碰撞作用的界线,为南北地震带的重要组成部分,在中国区域构造体系中具有极其重要的地质意义(图 1).从四川盆地向西穿过龙门山进入青藏高原,在不到 50 km 的距离内,海拔从 500 m 迅速上升到 5000 m 以上,形成了青藏高原周缘乃至世界上最陡的地形梯度(Clark and Royden, 2000; Kirby et al., 2002)(图 2).根据 GPS 数据推测,龙门山现今缩短速率小于 $3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (King et al., 1997; Chen et al., 2000; Gan et al., 2007).龙门山推覆构造带整体呈北东走向,全长约 500 km,宽 30~60 km,主要由多条平行逆冲断裂组成,分别为后山断裂(汶川—茂县断裂、青川断裂)、中央断裂(北川—映秀断裂)、前山断裂(江油—灌县断裂)、山前隐伏断裂等,主要断裂均倾向北西,具有前展式构造特征.部分学者认为后山断裂附近存在正断层,以调整青藏高原和龙门山的剥蚀差异(Burchfiel, 2004; Meng et al., 2006).

在深部构造上,龙门山断裂带西北侧为青藏高原厚壳厚幔区,东南侧为四川盆地薄壳薄幔区(李勇等, 2009).地壳厚度从四川盆地向青藏高原急剧增厚,形成一个莫霍面向西倾斜的陡变带,该线的中心线是龙门山断裂带的深部位置,其与地表位置相比不同程度地向西偏移,表明龙门山断裂带向西倾斜,并缺乏山根,显示龙门山为陆内山链,是一个独立的构造负载系统(李勇等, 2009).

在区域地质上,研究区自 NW 向 SE 由松潘—甘孜造山带—龙门山断裂带—前陆盆地—前陆隆起带四个单元构成了一个完整的构造系统(图 3).松潘甘孜造山带构成青藏高原东缘的大部分,它是中生代以来长期演化的陆内造山带,主体由三叠系西康群的半深海复理石、斜坡相复理石类型的碎屑物质组成.龙门山断裂带核心部位出现了前寒武系的杂岩,杂岩两侧分布着古生代和中生代的沉积岩.前

陆盆地和前陆隆起带位于龙门山断裂带下盘的四川盆地内,分别表现为沉积平原和褶皱.新生代以来,由于印度板块的楔入作用,青藏高原东缘发生大规模的侧向挤出,龙门山断裂带“复活”,断裂上盘发生了强烈的隆升,2008 汶川地震也是这种强烈隆升作用的表现.同时,新生褶皱变形继续向四川盆地内部扩展,主要表现为山前隐伏断裂以及褶皱的发育,尤以龙门山断裂带中南段最为发育(Hubbard and Shaw, 2009).

前人通过低温热年代学方法对龙门山的隆升历史进行了较多的研究. Xu 和 Kamp(2000)通过裂变径迹研究认为青藏高原东缘(包括龙门山)新近纪以来经历了三期快速隆升,时间分别为 22 Ma、7 Ma 和 2 Ma,龙门山南段在此期间总剥蚀量约 7~10 km. Kirby 等(2002)认为龙门山中段在 150—11 Ma 缓慢降温,约 $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 11 Ma 以来的冷却速率达到 $15\sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$;同样位于青藏高原东缘的岷山(位于龙门山北部)则从 5 Ma 开始快速降温,速率达 $20\sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$,之前的降温速率仅约 $1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$. Godard 等(2009)的(U-Th)/He 研究结果同样揭示出龙门山中段 8—11 Ma 开始快速剥蚀,彭灌杂岩 8—11 Ma 以来的平均剥蚀速率约 $0.65 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. Li 等(2012)给出龙门山地区大量的 ZFT 和 AFT 数据,认为新生代以来龙门山有三次冷却事件,分别为 60—40 Ma, 20—25 Ma, 9—14 Ma.

5·12 汶川 $M_w 7.9$ 地震沿着中央断裂产生了约 240 km 的地表破裂,另外在前山断裂产生约 70 km 地表破裂和北西走向的小鱼洞断裂产生约 7 km 的地表破裂(Xu et al., 2009)(图 2),最大垂直位移达约 7 m(Yu et al., 2010; 徐锡伟等, 2010).古地震初步研究结果认为,上一次地震破裂事件发生在距今 3300 年前至 1100 年前之间(冉勇康等, 2010).

3 样品采集、测年、结果及解释

样品位于龙门山推覆构造带中段,主要分布在靠近前山断裂的上盘和下盘地区(图 3).样品 WCH-6 位于中央断裂的两个分支断裂的中间.由于前人在中央断裂与前山断裂之间的热年代学数据较少,我们在此区域做了一些补充,其中两个样品(WCH-7, WCH-8)位于小鱼洞断裂以南,四个样品位于小鱼洞断裂以北(JH-3, JH-4, JH-5, LK-4).另外还有两个样品(JH-1, JH-2)位于前山断裂下盘的四川盆地内.样品经、纬度和高程信息由手持便携式

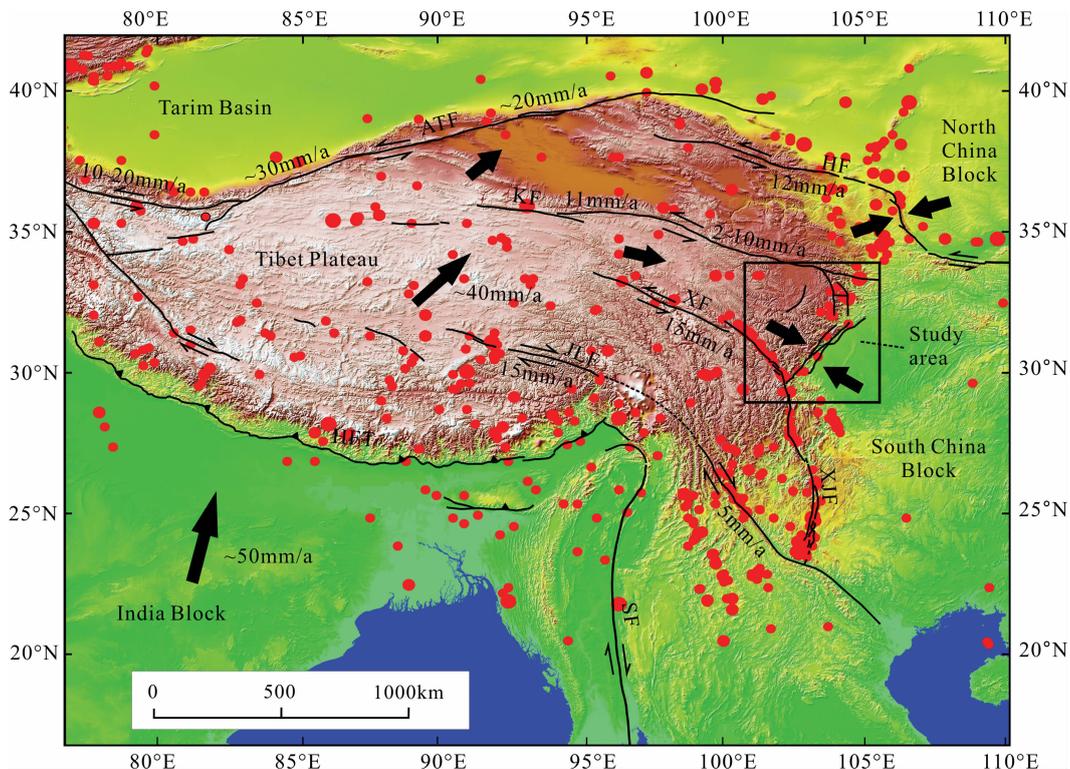


图 1 青藏高原地形图及主要断裂分布(修改自 Tapponnier et al., 2001)

黑色箭头代表地块运动方向, 数字代表运动速率; 黑色线条代表主要断裂, 数字代表晚更新世以来断层活动速率; 黑框为研究区; ATF: 阿尔金断裂带; HF: 海原断裂带; KF: 昆仑山断裂带; XF: 鲜水河断裂带; XJF: 小江断裂带; JLF: 嘉黎断裂带; HFT: 喜马拉雅前冲断裂带; SF: 实皆断裂。昆仑断裂东段速率引自(Harkins et al., 2010)。

Fig. 1 Map showing topography and major active faults in the Tibetan plateau (modified from Tapponnier et al., 2001) Black lines are active faults. Black arrows show motion directions of blocks. Numbers indicate rates known. ATF: Altyn Tagh Fault; HF: Haiyuan Fault; KF: Kunlun Fault; XF: Xianshuihe Fault; XJF: Xiao Jiang Fault; JLF: Jia Li Fault; HFT: Himalayan Frontal Thrust; SF: Sagaing Fault. The rate on the eastern KF is from (Harkins et al., 2010).

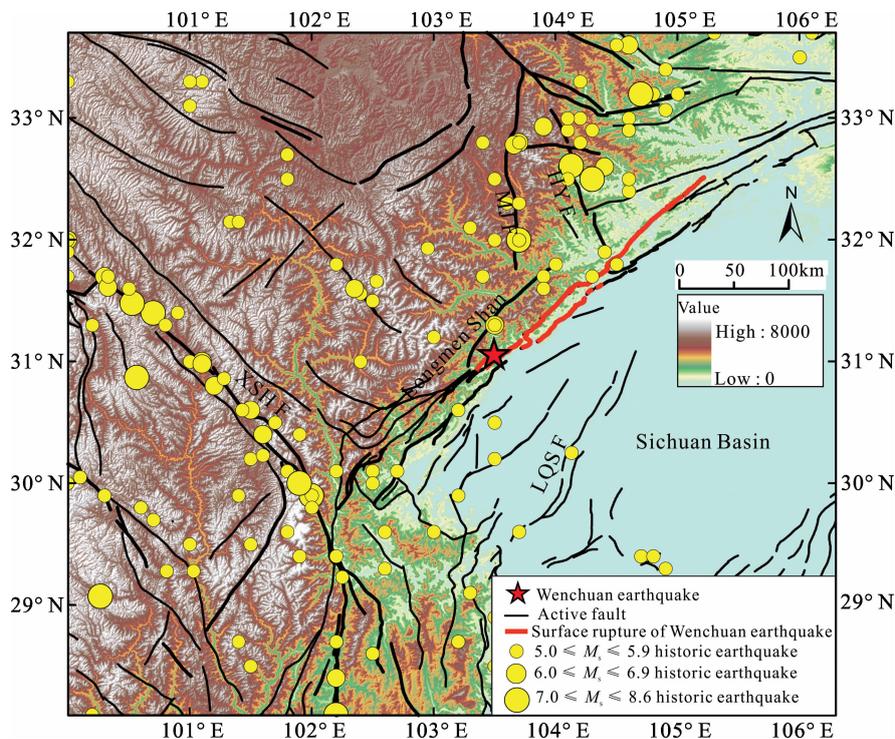


图 2 研究区新构造背景及近期地震分布图(修改自 Yu et al., 2010)

Fig. 2 Neotectonic setting and distribution of recent major earthquakes in and around Longmen Shan Mountains (modified from Yu et al., 2010)

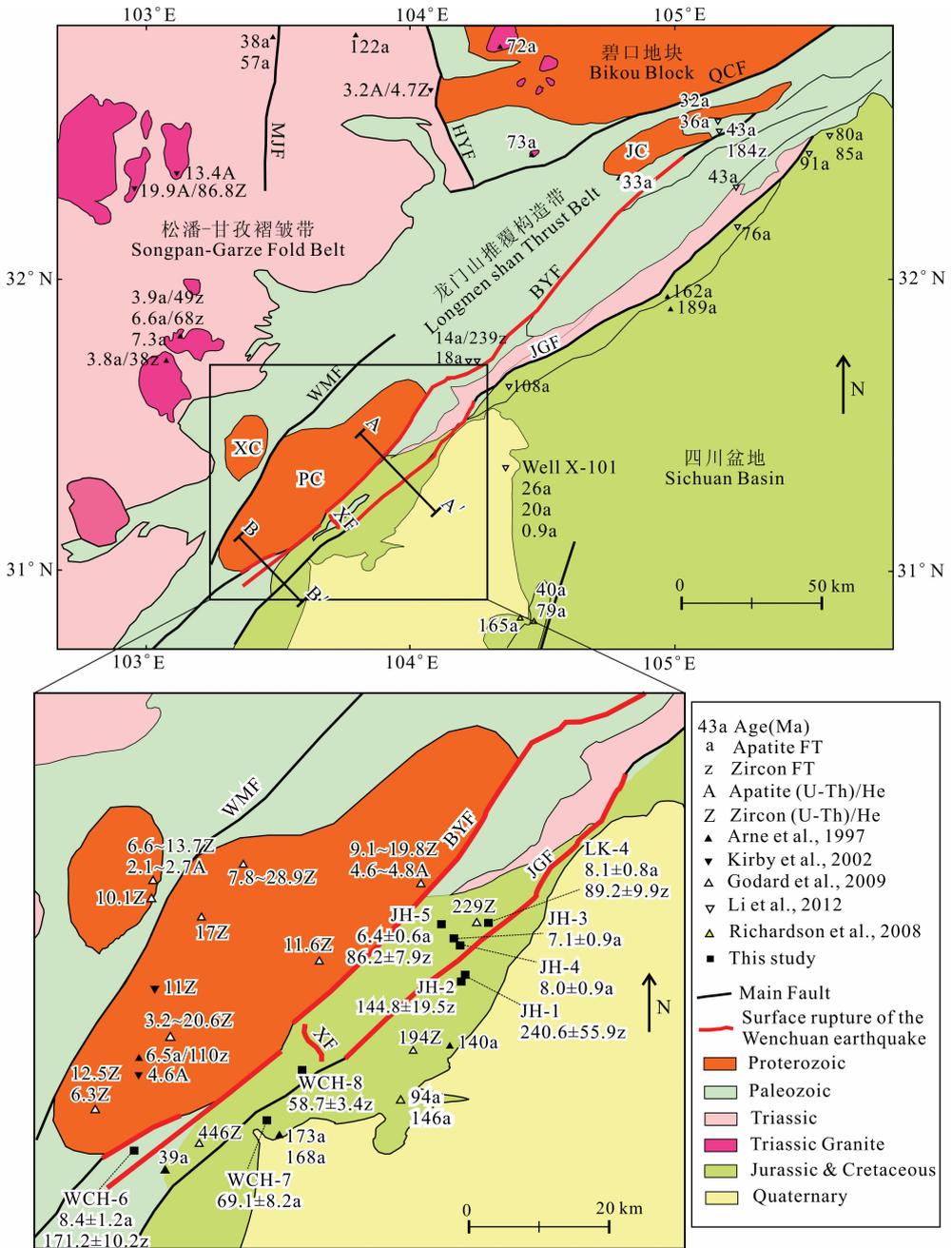


图 3 龙门山推覆构造带地质简图及热年代学数据分布(Richardson et al., 2010)

WMF: 汶川-茂县断裂; BYF: 北川-映秀断裂; JGF: 江油-灌县断裂; XF: 小鱼洞断裂; QCF: 青川断裂; HYF: 虎牙断裂; MJF: 岷江断裂; XC: 雪隆包杂岩; PC: 彭灌杂岩; JC: 轿子顶杂岩.

Fig. 3 Geology map of the Longmen Shan thrust belt and thermochronology data(Richardson et al., 2010)

WMF: Wenchuan-Maoxian fault; BYF: Beichuan-Yingxiu fault; JGF: Jiangyou-Guanxian fault; XF: Xiaoyudong fault; QCF: Qingchuan fault; HYF: Huya fault; MJF: Minjiang fault; XC: Xulongbao complex; PC: Pengguan complex; JC: Jiaoziding complex.

GPS 测定.

经过对样品的锆石和磷灰石单矿物分选之后, 采用外探测器法(external detector method)对样品进行裂变径迹分析, 实验测试在台湾中正大学裂变径迹实验室完成. 实验步骤和实验条件如下: (1) 将富集后的锆石和磷灰石矿物颗粒分别制成薄片, 然

后抛光, 蚀刻. 锆石的蚀刻条件为: 11.2g KOH 和 8g NaOH, 240~260 °C. 磷灰石的蚀刻条件为: 常温, 5M 硝酸, 约 20 s. (2) 将蚀刻的薄片加盖后送台湾“清华大学”反应炉 VT-4 位置照射. 外探测器(白云母片)蚀刻条件为: 48% HF, 室温, 25 min. 锆石部分采用 NBS-610 标准玻璃, 磷灰石则用 CN-5,

Zeta(ζ)值分别为: $\zeta(\text{NBS-610}) = 29 \pm 1$, $\zeta(\text{CN-5}) = 360 \pm 10$. (3)最后采用颗粒对应法(Grain-by-Grain methods)进行裂变径迹统计,并代入公式获得样品年龄,公式为

$$T = \left(\frac{1}{\lambda_d}\right) \times \ln \left[1 + \left(\frac{\rho_s}{\rho_i}\right) \lambda_d \rho_m \zeta \right],$$

其中, ρ_m 为白云母片所记录的标准诱发裂变径迹密度(径迹数/厘米²), λ_d 为 U^{238} 之总蜕变常数 1.551×10^{-10} , ρ_s 为样本内部自发径迹密度(径迹数/厘米²), ρ_i 为样本内部诱发径迹密度(径迹数/厘米²).

本研究获得了6个锆石裂变径迹(ZFT)年龄和6个磷灰石裂变径迹(AFT)年龄,样品坐标、岩性以

及裂变径迹年龄信息见表1、表2和图3.位于中央断裂两条分支断层之间的样品WCH-6的ZFT和AFT年龄分别为 171.2 ± 10.2 Ma和 8.4 ± 1.2 Ma.中央断裂下盘、前山断裂上盘,获得了3个ZFT年龄和5个AFT年龄.ZFT年龄介于59—89 Ma之间;AFT年龄以小鱼洞断裂为界存在明显的差异,其中小鱼洞断裂以南的样品WCH-7的AFT年龄为 69.1 ± 8.2 Ma,小鱼洞断裂以北的4个AFT年龄介于6—8 Ma之间,表明其6—8 Ma以来的快速剥蚀(平均剥蚀速率达到约 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$).位于前山断裂下盘的两个ZFT年龄较老,分别为 240.6 ± 55.9 Ma和 144.8 ± 19.5 Ma,表明其新生代以来剥蚀量较小.

表1 龙门山推覆构造带中段锆石裂变径迹测年结果

Table 1 ZFT data on the central segment of the Longmen Shan thrust belt

样品编号	纬度(°N)	经度(°E)	海拔(m)	岩性	Crystal	RhoS	Ns	RhoI	Ni	RhoD	Nd	Pooled Age (Ma)
WCH-8	31.117	103.750	822	砂岩	33	62.397	3330	12.498	667	8.43	4798	58.7 ± 3.4
LK-4	31.470	104.154	659	砂岩	5	120.331	806	15.377	103	8.2	4798	89.2 ± 9.9
JH-5	31.410	104.022	1090	砂岩	7	95.708	1224	12.667	162	8.2	4798	86.2 ± 7.9
WCH-6	31.052	103.480	884	砂岩	13	327.881	5118	34.403	537	13	4798	171.2 ± 10.2
JH-1	31.310	104.058	672	砾岩	2	194.5	412	9.443	20	8.5	2000	240.6 ± 55.9
JH-2	31.287	104.032	725	砾岩	7	91.63	800	7.445	65	8.5	2000	144.8 ± 19.5

表2 龙门山推覆构造带中段磷灰石裂变径迹测年结果

Table 2 AFT data on the central segment of the Longmen Shan thrust belt

样品编号	纬度(°N)	经度(°E)	海拔(m)	岩性	Crystal	RhoS	Ns	RhoI	Ni	RhoD	Nd	Pooled Age (Ma)
WCH-6	31.052	103.480	884	砂岩	14	0.583	115	4.443	876	3.96	4798	8.4 ± 1.2
WCH-7	31.061	103.693	726	砂岩	12	4.671	411	4.307	379	3.96	4798	69.1 ± 8.2
JH-3	31.360	104.022	888	砂岩	26	1.29	77	12.016	717	3.9	4798	7.1 ± 0.9
JH-4	31.356	104.021	874	砂岩	37	0.687	133	4.943	957	3.3	4798	8.0 ± 0.9
JH-5	31.410	104.022	1090	砂岩	39	1.078	113	11.247	1179	3.9	4798	6.4 ± 0.6
LK-4	31.470	104.154	659	砂岩	40	1.056	187	7.506	1329	3.3	4798	8.1 ± 0.8

4 断层晚新生代垂向活动性

龙门山中段中央断裂和前山断裂两侧的热年代学数据存在明显的差异(图3),这种差异能够揭示出断层新生代垂向活动性.Godard等(2009)最先通过此方法来定量研究汶川—茂县断裂和中央断裂的新生代垂向活动性,他们通过热年代学研究认为中中新世(距今约10 Ma)以来中央断裂两侧的差异剥蚀量4~6.5 km,汶川—茂县断裂两侧的剥蚀量很小,但是Godard等(2009)获得的中央断裂的新生代垂向活动性仅代表小鱼洞以南的段落,而小鱼洞

以北的断裂活动性可能存在较大差异,这在汶川地震的地表破裂分布上有所体现(Xu et al., 2009; Yu et al., 2010)(图2).本文根据断层两侧的热年代学数据首先给出断层两侧块体晚新生代以来的平均剥蚀速率,在此基础上进一步给出了龙门山中段中央断裂和前山断裂不同段落(以小鱼洞断裂为界)的差异剥蚀速率(图4).

小鱼洞断裂以北,中央断裂上盘的锆石和磷灰石(U-Th)/He年龄分别为4.6—4.8 Ma和9.1—19.8 Ma,与彭灌杂岩其他样品的年龄较一致,其距今约10 Ma以来的平均剥蚀速率约 $0.65 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (Godard et al., 2009);中央断裂下盘、前山断裂上

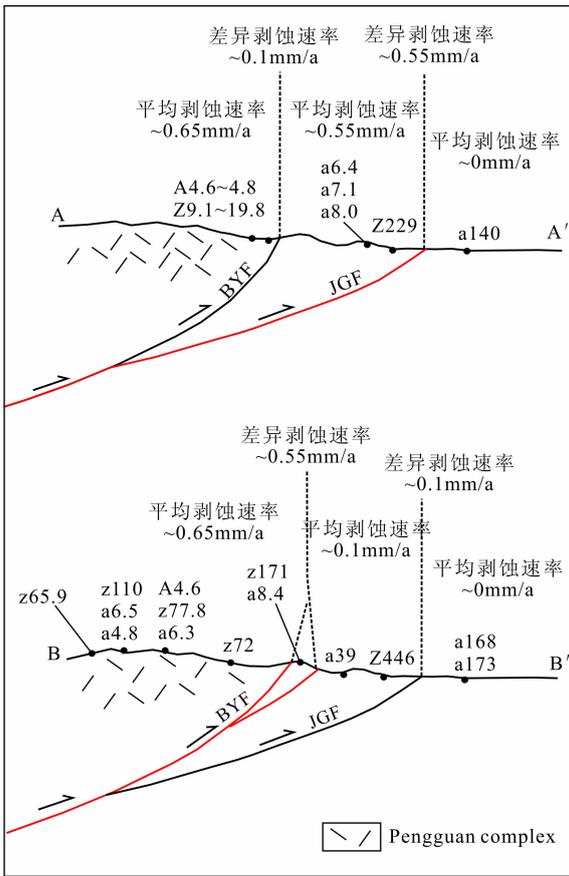


图 4 龙门山推覆构造带中段不同剖面北川—映秀断裂和江油—灌县断裂两侧的差异剥蚀速率对比

剖面位置见图 3, 红色线条代表吸收龙门山北西—南东向缩短的主断裂, BYF 代表北川—映秀断裂, JGF 代表江油—灌县断裂, a 代表磷灰石裂变迹年龄, z 代表锆石裂变迹年龄, Z 代表锆石(U-Th)/He 年龄, A 代表磷灰石(U-Th)/He 年龄, 单位均为 Ma。

Fig. 4 Comparison of differential exhumation rates on both sides of the Beichuan-Yingxiu fault and Jiangyou-Guanxian fault at different segment of the central Longmen Shan

The profile locations are shown in Fig. 3. Red lines are the main faults absorbing the NW-SE shortening. BYF: Beichuan-Yingxiu fault; JGF: Jiangyou-Guanxian fault. "a" indicates apatite fission track, and "z" indicates zircon fission track. "Z" indicates zircon (U-Th)/He, and "A" indicates apatite (U-Th)/He, in Ma.

盘的 3 个 AFT 年龄介于 6—8 Ma 之间, 表明其距今 8 Ma 以来的平均剥蚀速率约 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 前山断裂下盘的 AFT 年龄为 140 Ma, 表明其晚新生代以来的剥蚀量基本可忽略。根据三个区域的不同的剥蚀速率, 我们获得了断裂两侧晚新生代以来的差异剥蚀速率, 中央断裂两侧块体的距今 8 Ma 以来的平均差异剥蚀速率为约 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 前山断裂两侧块体的距今 8 Ma 以来的平均差异剥蚀速率为约 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。小鱼洞断裂以南, 中央断裂和

前山断裂之间的 AFT 年龄为 39 Ma, 其 39 Ma 以来的平均剥蚀速率约 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 前山断裂下盘的 AFT 年龄约为 170 Ma, 表明其晚新生代以来的剥蚀量基本可忽略。根据同样的方法, 获得了小鱼洞断裂以南中央断裂和前山断裂两侧的差异剥蚀速率, 分别为约 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和约 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。以上剥蚀厚度和剥蚀速率等定量的结论均在 AFT 退火温度为 $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 地表温度为 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、地温梯度为 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的假设下获得(为了便于对比, 与 Godard 等(2009)的一致), 实际情况可能会略有差异。

由于断层上下盘样品的高程差较小(表 1 和表 2), 断裂两侧的差异剥蚀速率差异与断裂的垂向滑移速率基本一致, 即小鱼洞断裂以北, 中央断裂和前山断裂距今 8 Ma 以来的平均垂向滑动速率分别为约 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和约 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 小鱼洞断裂以南, 中央断裂和前山断裂距今 8 Ma 以来的平均垂向滑动速率分别为约 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和约 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

5 构造意义讨论

热年代学数据显示龙门山中段的中央断裂和前山断裂的垂向活动性以小鱼洞断裂为界存在明显的差异: 小鱼洞断裂以北, 垂向滑移主要集中于前山断裂, 而小鱼洞以南, 垂向滑移主要集中于中央断裂(图 4), 这一现象与汶川地震地表破裂的分布及同震位移数据基本一致。Tan 等(2012)通过对小鱼洞地区的地表破裂调查和测量, 提出挤压阶区模型解释北西向小鱼洞断裂的成因以及前山断裂在小鱼洞断裂以北产生地表破裂的力学机制(图 5)。Tan 等(2012)认为小鱼洞地区存在 3.5 km 宽的挤压阶区, 产生了以逆冲为主且走向变化较大的小鱼洞断裂, 另外 3.5 km 宽的挤压阶区造成了小鱼洞断裂以北的中央断裂断层面明显陡于小鱼洞断裂以南, 因此中央断裂上盘对下盘的推挤作用在小鱼洞断裂以北更加强烈, 从而造成了前山断裂在小鱼洞断裂以北的活动(图 5b)。本研究揭示出的断层长期垂向活动性与汶川地震的断层活动特征基本一致, 表明这种由于中央断裂产状变化造成的前山断裂的垂向活动性差异距今 8 Ma 以来一直存在。另外前山断裂的晚新生代垂向活动性以小鱼洞断裂为界表现出的南北差异, 暗示着上地壳的横向推挤作用是造成晚新生代以来龙门山造山作用和剥蚀作用的重要因素之一。

汶川地震之后, 对于同震地壳缩短量的研究成

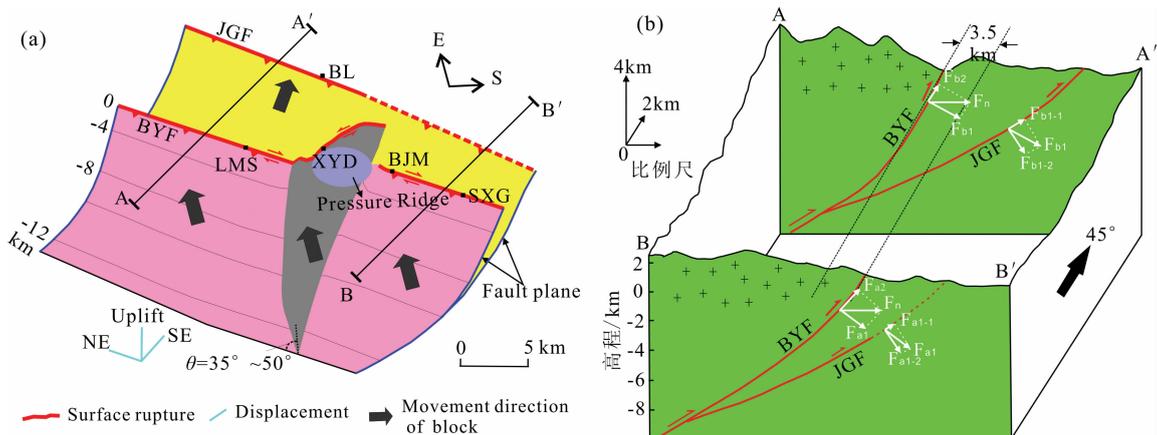


图5 (a) 小鱼洞阶区三维模型图; (b) 两条平行断裂同时破裂的应力机制分析

由于中央断裂在小鱼洞南北的产状变化,造成 $F_{b1-1} > F_{a1-1}$, 从而导致小鱼洞以北的前山断裂在汶川地震中发生错动(修改自 Tan et al., 2012). BJM: 八角庙村; BL: 白鹿镇; BYF: 北川-映秀断裂; JGF: 江油-灌县断裂; LMS: 龙门山镇; SXG: 深溪沟村; XYD: 小鱼洞镇.

Fig. 5 (a) 3D model for the Xiaoyudong restraining step-over; (b) Model explanation for two parallel faults ruptured simultaneously

The change of the Beichuan-Yingxiu fault's attitude make $F_{b1-1} > F_{a1-1}$, which caused the Jianguyou-Guanxian fault slip to the north of the Xiaoyudong area (modified from Tan et al., 2012). BJM: Bajiaomiao village; BL: Bailu town; BYF: Beichuan-Yingxiu fault; JGF: Jianguyou-Guanxian fault; LMS: Longmen Shan town; SXG: Shenxigou village; XYD: Xiaoyudong town.

为验证地壳缩短模型(Hubbard and Shaw, 2009; Xu et al., 2009; Hubbard et al., 2010; Shi et al., 2012)和地下壳增厚模型(Burchfiel et al., 2008; Royden et al., 2008)的重要手段. Xu 等(2009)在汶川地震详细地表破裂和同震位移以及地震反射剖面的基础上,获得的汶川地震造成的地壳缩短量达 8.5 m,认为地壳缩短是造成青藏高原东缘抬升的主要因素之一. Li 等(2010)在汶川地震地表破裂带北段的调查认为其同震缩短量很小,约 0.2~1.0 m. Wang 等(2010)通过探槽的方法获得的最大同震缩短量约为 5.3 m. Shi 等(2012)通过震前震后的卫星影像对比获得的中央断裂白沙河段(小鱼洞断裂以南)距离地表破裂约 1 km 以内的地壳平均缩短量达 7 m,认为地壳缩短是造成龙门山隆升的主要因素. 本研究在获得垂直抬升速率的基础上,根据断层的产状,可以进一步获得晚新生代以来断层的平均倾滑速率及缩短速率等信息. 鲁人齐(2011)通过石油地震剖面解译认为龙门山中段的前山断裂的倾角介于 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间,则小鱼洞断裂以北的前山断裂距今 8 Ma 以来的倾滑速率达 $1.1 \sim 1.6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、缩短速率约 $1.0 \sim 1.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,表明前山断裂是吸收龙门山推覆构造带北西-南东向缩短的主要断裂之一. 前山断裂(小鱼洞断裂以北)距今 8 Ma 以来的倾滑量达到 9~13 km,其北西-南东向水平缩短量达到 8~12 km,表明逆冲断层活动引起的地壳缩短是龙门山造山作用和剥蚀作用的重要驱动力之一.

6 结论

本文对龙门山推覆构造带中段前山断裂附近补充了一些裂变径迹样品,获得了 6 个 ZFT 年龄和 6 个 AFT 年龄. 结合前人对龙门山的热年代学研究,获得了以下主要结论:

(1) 龙门山推覆构造带中段中中新世以来,中央断裂和前山断裂的垂向活动性以小鱼洞断裂为界存在较大差异:小鱼洞断裂以北,中央断裂和前山断裂的平均垂向滑动速率分别为约 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和约 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;小鱼洞断裂以南,中央断裂和前山断裂的平均垂向滑动速率分别为约 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和约 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. 前山断裂晚新生代活动性与汶川地震中前山断裂的垂向同震位移较一致.

(2) 前山断裂(小鱼洞断裂以北,包括多条分支)距今 8 Ma 以来的倾滑速率为 $1.1 \sim 1.6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,缩短速率约 $1.0 \sim 1.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,表明前山断裂是吸收龙门山推覆构造带北西-南东向缩短的主要断裂之一. 距今 8 Ma 以来的倾滑量达到 9~13 km,北西-南东向水平缩短量达到 8~12 km,表明地壳缩短是造成龙门山抬升和剥蚀的重要因素之一.

致谢 感谢邓起东院士对论文写作过程中给予的启发和建议,感谢中国地震局地质研究所郑德文研究员和杨晓平研究员在论文写作过程中提出的宝贵意见和建议.

References

- Arne D, Worley B, Wilson C, et al. 1997. Differential exhumation in response to episodic thrusting along the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 280(3-4): 239-256.
- Burchfiel B C. 2004. 2003 presidential address: New technology, new geological challenges. *GSA Today*, 14(2): 4-9.
- Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, et al. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 18(7): 4-11.
- Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al. 2000. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *J. Geophys. Res.*, 105(B7): 16215-16227, doi: 10.1029/2000JB900092.
- Clark M, Royden L H. 2000. Topographic ooze: building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28(8): 703-706.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, 112, B08416. doi: 10.1029/2005JB004120.
- Godard V, Pik R, Lavé J, et al. 2009. Late Cenozoic evolution of the central Longmen Shan, eastern Tibet: Insight from (U-Th)/He thermochronometry. *Tectonics*, 28, doi 10.1029/2008TC002407.
- Harkins N, Kirby E, Shi X, et al. 2010. Millennial slip rates along the eastern Kunlun fault: Implications for the dynamics of intracontinental deformation in Asia. *Lithosphere*, 2(4): 247-266, doi: 10.1130/L85.1.
- Hubbard J, Shaw J H. 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan (M_w 7.9) earthquake. *Nature*, 458(7235): 194-197.
- Hubbard J, Shaw J H, Klinger Y. 2010. Structural setting of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan, China, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B): 2713-2735.
- Li C Y, Wei Z Y, Ye J Q, et al. 2010. Amounts and styles of coseismic deformation along the northern segment of surface rupture, of the 2008 Wenchuan M_w 7.9 earthquake, China. *Tectonophysics*, 491(1-4): 35-58.
- Li Y, Huang R Q, Zhou R J, et al. 2009. Geological background of Longmen Shan Seismic Belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 17(1): 1-10.
- Li Z, Liu S, Chen H, et al. 2012. Spatial variation in Meso-Cenozoic exhumation history of the Longmen Shan thrust belt (eastern Tibetan Plateau) and the adjacent western Sichuan basin: Constraints from fission track thermochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 185-203.
- Lu R Q. 2011. The geometry and kinematics of the Central Segment of the Longmenshan Mountains: Implications for the uplifting mechanism in the Southeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau [Ph.D. thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences.
- King R W, Shen F, Burchfiel B C, et al. 1997. Geodetic measurements of crustal motion in southwest China. *Geology*, 25(2): 179-182, doi: 10.1130/0091-7613.
- Kirby E, Reiners P W, Krol M A, et al. 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 21(1): 1-1-1-20.
- Meng Q R, Hu J M, Wang E, et al. 2006. Late Cenozoic denudation by large-magnitude landslides in the eastern edge of Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(1-2): 252-267.
- Ran Y, Xu X, Chen W, et al. 2010. Paleo earthquake and large earthquakes recurrence interval along Yingxiu-Beichuan fault of the Longmenshan fault zone, Sichuan, China. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), (6): 28-29.
- Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. 2008. Extraordinary denudation in the Sichuan Basin: Insights from low-temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 113, B04409, doi: 10.1029/2006JB004739.
- Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321(5892): 1054-1058.
- Shi F, He H L, Wei Z Y. 2012. Coseismic horizontal shortening associated with the 2008 Wenchuan Earthquake along the Bashahe segment from high resolution satellite images. *Journal of Asian Earth Sciences*, 50: 164-170, doi: 10.1016/j.jseaes.2012.01.001
- Tan X B, Yuan R M, Xu X W, et al. 2012. Complex surface rupturing and related formation mechanisms in the Xiaoyudong area for the 2008 M_w 7.9 Wenchuan Earthquake, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 58: 132-142, doi: 10.1016/j.jseaes.2012.06.005.
- Tapponnier P, Xu Z, Roger E, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- Wang H, Ran Y K, Chen L C, et al. 2010. Determination of horizontal shortening and amount of reverse-faulting from trenching across the surface rupture of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics*, 491(1): 10-20.
- Xu G Q, Kamp P J J. 2000. Tectonics and denudation adjacent to the Xianshuihe Fault, eastern Tibetan Plateau: Constrains from fission track thermochronology. *J. Geophys. Res.*, 105(B8): 19231-19251.
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 37(6): 515-518.
- Xu X W, Chen G H, Yu G H, et al. 2010. Reevaluation of surface rupture parameters of the 5 • 12 Wenchuan earthquake and its tectonic implication for Tibetan uplift. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(10): 2321-2336, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.006.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-

Tibetan orogen. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 28: 211-280.

Yu G, Xu X, Klinger Y, et al. 2010. Fault-Scarp features and Cascading-Rupture model for the Wenchuan earthquake (M_w 7.9), Eastern Tibetan Plateau, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B): 2590-2614. doi: 10.1785/0120090255.

附中文参考文献

李勇, 黄润秋, 周荣军等. 2009. 龙门山地震带的地质背景与汶川

地震的地表破裂. *工程地质学报*, 17(1): 1-10.

鲁人齐. 2011. 龙门山中段构造几何学、运动学及其对青藏高原东南缘隆升机制的约束[博士学位论文]. 北京: 中国地质大学.

冉永康, 徐锡伟, 陈文山等. 2010. 龙门山断裂带映秀—北川断裂的古地震及其复发间隔初步研究. *国际地震动态*, (6): 28-29.

徐锡伟, 陈桂华, 于贵华等. 2010. 5·12汶川地震地表破裂基本参数的再论证及其构造内涵分析. *地球物理学报*, 53(10): 2321-2336, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.006.

(本文编辑 张正峰)