

岷江上游河流阶地对龙门山断裂带逆冲作用的响应

陈浩¹, 李勇²

(1. 绵阳师范学院 资源环境工程学院, 四川 绵阳 621006;

2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 汶川地震导致的岷江阶地面垂直错动量, 记录了在地震这一突变性构造活动作用下水系的瞬时变化情况。震后野外实测数据表明, 切过北川 - 映秀断裂的岷江阶地面, 因断裂北西盘的逆冲作用产生了 2.7 m 的累积垂直位错量。若干次历史地震驱动的逆冲作用使切过龙门山主干断裂的岷江阶地面被大尺度垂直错断, 根据阶面垂直扭错量和相应测年值计算可知, 汶川 - 茂县断裂、北川 - 映秀断裂、彭县 - 灌县断裂晚第四纪以来逆冲速率分别为 0.84 mm/a、0.52 mm/a 和 0.24 mm/a, 计算结果表明, 龙门山各主干断裂逆冲作用有自北西向南东减弱的趋势。龙门山各主干断裂的差异活动不仅使被断裂切过的岷江阶地面产生不同尺度的垂直变形, 而且使汶川 - 茂县断裂和北川 - 映秀断裂所夹持的后龙门山地区的抬升速率和抬升幅度, 大于北川 - 映秀断裂和彭县 - 灌县断裂所夹持的前龙门山地区。

关键词: 岷江上游; 河流阶地; 龙门山断裂带; 逆冲作用

中图分类号: P931.2

文献标志码: A

岷江干流河道发源于岷山构造带西缘的弓嘎岭, 沿川西高原南流, 横切龙门山构造带, 向东进入成都盆地。其中, 弓嘎岭 - 汶川河段主要位于岷山构造带和龙门山构造带西缘的川西高原地貌区, 流向由近南北向北东 - 南西向偏转; 汶川 - 映秀河段流经汶川 - 茂县断裂与北川 - 映秀断裂所夹持的后龙门山地区, 流向近南北; 映秀 - 都江堰河段流经北川 - 映秀断裂与彭县 - 灌县断裂所夹持的前龙门山地区, 该河段流向变化较大, 平面形态呈“S”形。岷江干流进入都江堰灌区后, 都江堰引水枢纽鱼嘴将干流分为内外两江, 西侧外江为岷江正流(图 1)。

造山带内部水系发育模式对构造活动的响应机制一直是构造地貌学研究的热点, 2008 - 05 - 12 T14:28 发生于四川省汶川县境内的 8.0 级特大地震, 是岷江上游流域最新一次区域构造活动, 此次地震的发震构造为龙门山断裂带的主中央断裂。震后应急野外调查表明, 断裂上盘逆冲作用产生的地表破裂带主要沿北川 - 映秀断裂和彭县 - 灌县断裂这

两条叠瓦状逆断层展布, 同时, 切过地表破裂带的岷江阶地面被垂直错断。本次研究着重分析汶川地震对位于震区的岷江阶地的改造作用, 并以此为基础, 探讨岷江上游河流阶地对龙门山断裂带逆冲历史及龙门山推覆体差异隆升的响应机制。

1 河流阶地对汶川地震驱动的逆冲作用的响应

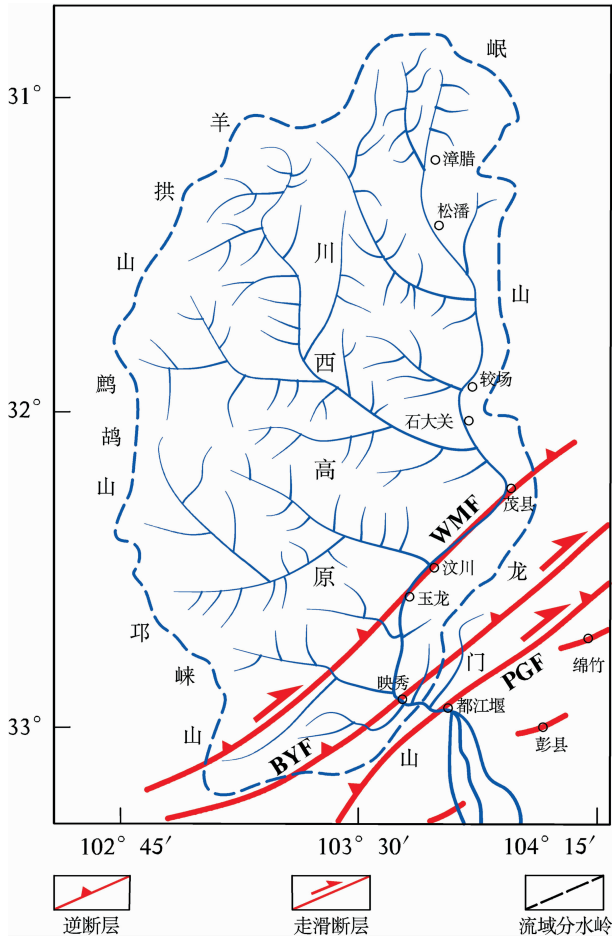
1.1 阶地面的垂直位错

北川 - 映秀断裂切过岷江映秀河段河道, 岷江河床因断裂北西盘逆冲作用而形成一条与河流流向斜交的坡折带, 在岷江河面上, 可见河床抬升导致跌水所形成的浪花。沿河床坡折带的南西方向, 北川 - 映秀断裂切过岷江 IV 级阶地地面上一地貌陡坎的下部。汶川地震发生后, 在该地貌陡坎上形成 3 个新的逆冲型断层陡坎, 从南东到北西, 3 个地震陡坎的垂直位错分别为 1.0 ± 0.1 m、 0.9 ± 0.1 m、 0.8 ± 0.1 m

收稿日期(Received date): 2013 - 10 - 12; 修回日期(Accepted): 2014 - 02 - 12。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(40841010)。[National Sciences Foundation of China(40841010).]

作者简介(Biography): 陈浩(1977 -), 男, 四川三台人, 博士, 讲师, 主要从事构造地貌与第四纪环境研究。[Chen Hao(1977 -), male, Dr. & lecturer, major in study of tectonic geomorphology and quaternary environment.] E-mail: chen hao1611@163.com



(WMF:汶川-茂县断裂;BYF:北川-映秀断裂;PGF:彭县-灌县断裂)

图1 岷江上游流域简图(底图据舒栋才^[1],2005,修改)

Fig. 1 The sketch of the upper Min River basin

(图2),除垂直位错 1.0 ± 0.1 m 的地震陡坎外,另两组地震陡坎水平位错不明显,表明此次断层活动以逆冲作用为主,岷江IV级阶地面上的累积垂直位错量达 2.7 ± 0.1 m。

1.2 岷江上游相邻水系阶地地面的垂直位错

沿产生地表破裂带的北川-映秀断裂和彭县-灌县断裂走向追索,擂鼓镇赵家沟、白鹿镇白鹿河等小溪流的阶地面也因断裂北西盘的逆冲作用而产生垂直变形。

在擂鼓镇坪上村,北川-映秀断裂切过赵家沟,原本平缓的河床上因断裂北西盘的逆冲抬升而形成一巨大坡折,并以此为界导致落差,形成明显的跌水现象。切过赵家沟的北川-映秀断裂向南西方向延伸,在该小河沟I级阶地面上形成一条垂直位错量达 6.2 ± 0.1 m 的断层陡坎(图3)。

在彭州市白鹿镇,彭县-灌县断裂切过位于白鹿河II级阶地面上的白鹿老街,断裂经过处建筑物均被损毁。我们实测了一条被断层错断的石板路面,垂直位错为 2.7 ± 0.2 m(图4),该阶地面的垂直位错量为沿彭县-灌县断裂地表最大垂直位错量。

2 断错阶面对龙门山断裂带逆冲历史的响应

2.1 阶地面垂直变形特征

如前所述,沿岷江映秀河段河床坡折带的南西方向,汶川地震形成的3个逆冲型断层陡坎,均发育于高约 39.6 ± 0.5 m 的地貌陡坎之上(该地貌陡坎高程值系震后全站仪所测)(图2,图5),故怀疑这一地貌陡坎是同一级阶地面因北川-映秀断裂逆冲作用而被垂直错断所致。地貌陡坎两侧阶地顶部砂砾石层样品中砂粒的测年数据(其热释光年龄值分别为 76.36 ± 6.49 ka 和 73.0 ± 6.2 ka^[3],两者年龄接近,为同一阶地面)表明,此地貌陡坎是地质历史

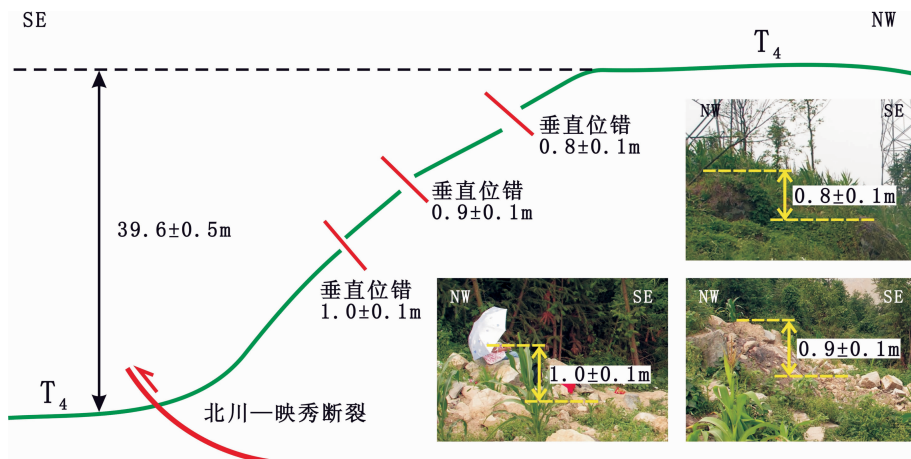


图2 岷江IV级阶地面北川-映秀断裂垂直位错实测剖面图

Fig. 2 The vertical displacement of the fourth terrace of Min River

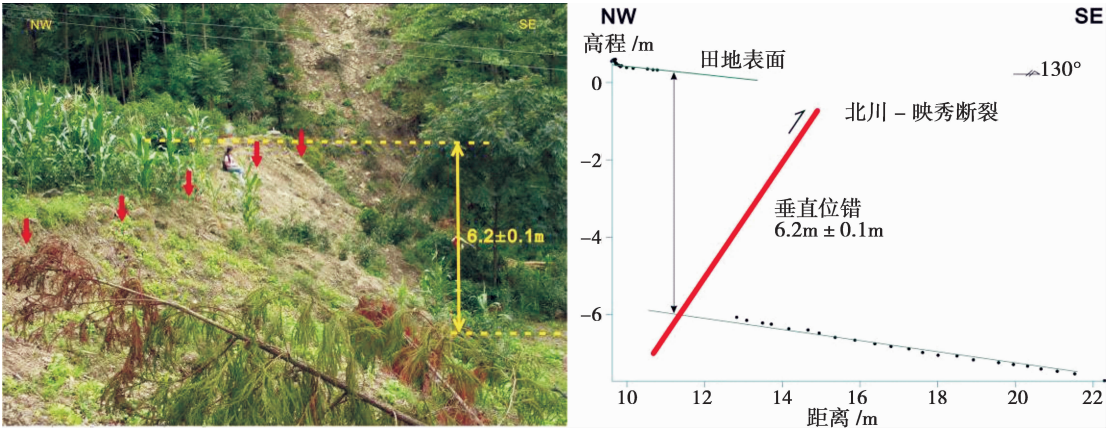


图 3 擂鼓镇坪上村阶地垂直位错实测剖面图

Fig. 3 The vertical displacement of river terrace in Pingshang village of Leigu town

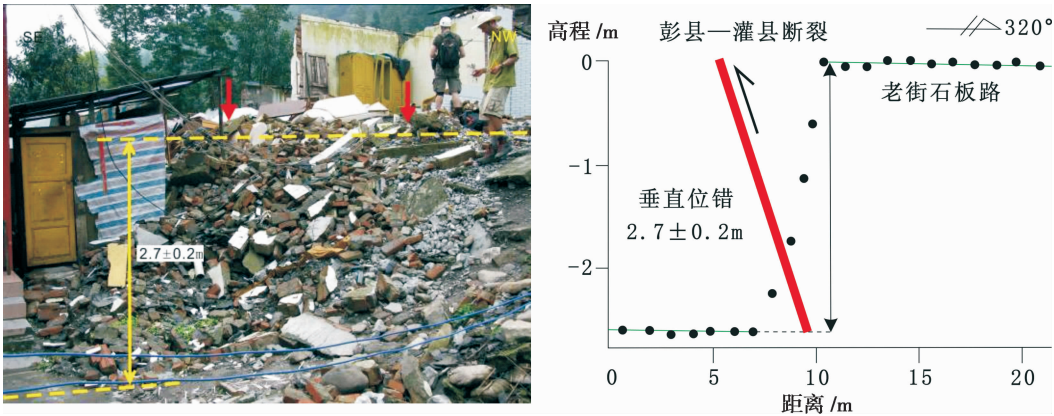


图 4 白鹿镇白鹿老街阶地垂直位错实测剖面图 (据陈浩^[2],2009)

Fig. 4 The vertical displacement of river terrace in the old street of Bailu town

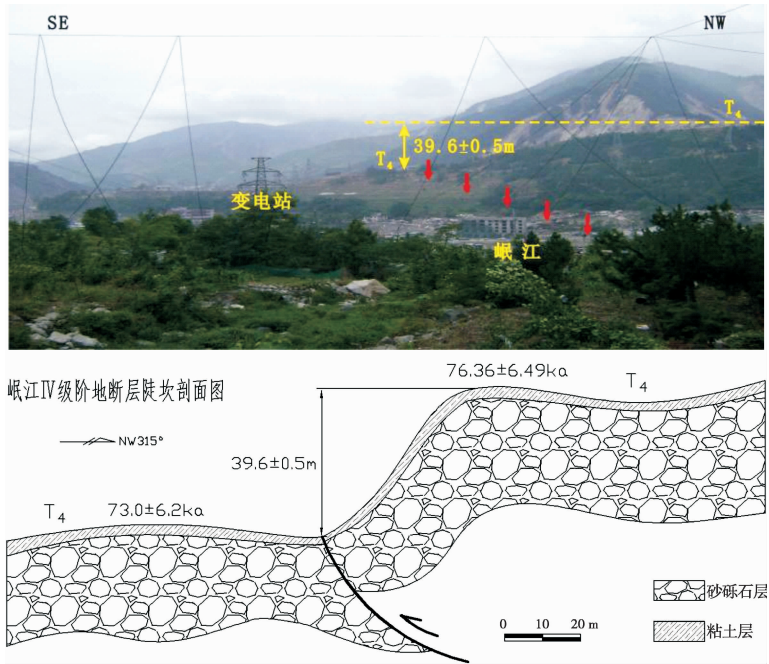


图 5 映秀变电站旁岷江Ⅳ级河流阶地断层陡坎 (镜向 SW)

Fig. 5 The fault scarp on the fourth terrace of Min River beside the substation

时期北川-映秀断裂若干次逆冲活动的结果。根据此处岷江Ⅳ级阶地面垂直错断量和地貌陡坎两侧阶地面年龄值估算,北川-映秀断裂的平均逆冲速率为0.52~0.54 mm/a。

在茂县县城北,汶川-茂县断裂错断岷江Ⅲ级河流阶地面,断裂东侧的基岩破碎带直接逆冲在Ⅲ级河流阶地的砂砾石层之上,逆冲高程约为20 m。逆冲而上的基岩与阶地砂砾石层之间发生了轻微的揉皱现象,沿断裂面形成一条砾石定向带,定向带内砾石长轴指示北西盘向南东运动^[4]。在阶地的中部取黄色亚粘土,经热释光测定砂砾石层的年龄值为 23.7 ± 1.9 ka^[3]。据此估算汶川-茂县断裂的平均逆冲速率为0.84 mm/a。

在都江堰二王庙附近,彭县-灌县断裂与岷江斜交,切过断裂的岷江Ⅲ级阶地面被错断,形成一条明显的断层陡坎,陡坎两侧Ⅲ级阶地面的拔河高程分别为82 m和70 m,阶地面的变形量为12 m,取阶地砂砾石层上部漫滩相细砂物质测年,其年龄值为50 ka^[5]。自晚更新世以来,彭县-灌县断裂的平均逆冲速率为0.24 mm/a。

2.2 龙门山主干断裂逆冲速率对比

从岷江上游阶地面垂直变形量及根据阶面变形量计算所得的各主干断裂逆冲速率可以看出(表1),不同断裂切过岷江阶地面时,阶面产生了不同尺度的垂直位错。根据阶面垂直位错量和相应测年值计算可知,在龙门山构造带中,各主干断裂逆冲分量的滑动速率有自北西向南东逐渐减小的趋势,即从龙门山后山带至前山带主干断裂的逆冲作用越来越弱。

表1 龙门山各主干断裂逆冲速率
Table 1 The thrust rate of of Longmenshan main faults

断裂名称	汶川-茂县断裂	北川-映秀断裂	彭县-灌县断裂
阶地级数	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ
阶面垂直变形量/m	20	39.6	12
断裂逆冲速率/(mm/a)	0.84	0.52	0.24

3 阶地高程对龙门山推覆体差异升降的响应

龙门山各主干断裂的差异活动不仅使被断裂切过的岷江阶地面产生不同尺度的垂直变形,位于断

裂所夹持区域的各级阶地拔河高程也因此存在明显差异。从理论上分析,在同一时期内,某一区域构造抬升速率越快,抬升幅度越大,位于该区域的河流阶地拔河高程值也越大。马保起^[5]、李勇^[6]等实测了岷江高坎-紫坪铺河段各级阶地拔河高程和阶地堆积物的年龄(表2,图6),各级阶地年龄值具有一致性,岷江干流河道Ⅰ级阶地的年龄为8.86~13.19 ka,Ⅱ级阶地的年龄为20.36~29.81 ka,Ⅲ级阶地的年龄为51.33~52.42 ka。笔者据此计算了岷江不同河段的下蚀速率(豆芽坪Ⅲ级阶地年龄取自所测岷江干流河道Ⅲ级阶地年龄平均值)。其中,高坎-豆芽坪河段位于汶川-茂县断裂和北川-映秀断裂所夹持的后龙门山地区,其平均下切速率为1.76

表2 岷江不同河段下蚀速率及阶地高程

Table 2 The terrace elevation and the incision rate of different reaches of the Min River

剖面位置	阶地高程/m			下蚀速率/(mm/a)
	T1	T2	T3	
高坎	17	未测	未测	1.92
东界老	10	31	74	1.52
豆芽坪	11	38	96	1.85
映秀	8	缺失	64	1.25
庙子坪	11	31	74	0.83
青云坪	11	30	76	1.01
紫坪铺	10	30	46	1.81

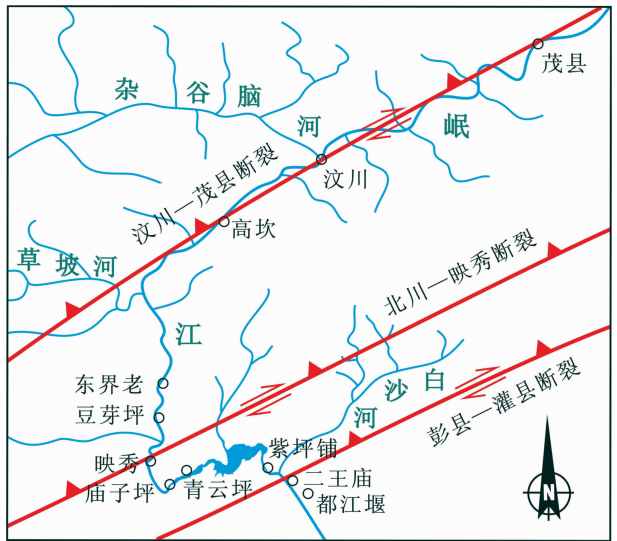


图6 岷江上游河流阶地调查点及测年点位置

Fig. 6 Sites of the investigation points and dating points of river terraces along the upper Min River

mm/a,各级阶地拔河高程平均值分别为 $T_1:12.7$ m、 $T_2:34.5$ m、 $T_3:85.0$ m;映秀-紫坪铺河段位于北川-映秀断裂和彭县-灌县断裂所夹持的前龙门山地区,平均下切速率为 1.23 mm/a,各级阶地拔河高程平均值分别为 $T_1:10.0$ m、 $T_2:30.3$ m、 $T_3:65.0$ m,岷江后龙门山河段下蚀速率和各级阶地高程明显大于前龙门山河段,表明后龙门山地区的抬升速率和抬升幅度大于前龙门山地区(前后龙门山共处一个气候区,其局部侵蚀基准面同为成都盆地)。究其原因,主要是后龙门山推覆体的主滑面为北川-映秀断裂(晚第四纪以来逆冲速率为 0.52 mm/a),前龙门山推覆体的主滑面为彭县-灌县断裂(晚第四纪以来逆冲速率为 0.24 mm/a),北川-映秀断裂的逆冲速率明显大于彭县-灌县断裂的逆冲速率,再加上对后龙门山推覆体有控制作用的汶川-茂县断裂逆冲速率也比较大,因而,相对于前龙门山地区,后龙门山地区抬升速率更快,地形隆起更为显著,位于该区域的河流阶地拔河高程也更大(图7)。

4 结论

在汶川地震中,切过北川-映秀断裂的岷江阶地面因断裂北西盘的逆冲作用而产生了 2.7 m 的累积垂直位错量,若干次历史地震驱动的逆冲作用使切过龙门山主干断裂的岷江阶地面被大尺度垂直错动,根据阶面垂直扭错量和相应测年值计算可知,在龙门山构造带中,各主干断裂逆冲作用有自北西向东南减弱的趋势。龙门山各主干断裂的差异活动导致后龙门山地区的抬升速率和抬升幅度大于前龙门山地区,岷江后龙门山河段下蚀速率和各级阶地拔

河高程也明显大于前龙门山河段。

一些学者^[7-12]根据河谷地貌形态、水系展布格局等探讨了岷江水系特征的构造指示意义,河谷形态和水系格局是在构造活动作用下经历漫长地质历史时期渐变的结果,本次研究对汶川地震导致的岷江阶地面垂直错动量进行了实地测量,所测数据记录了在地震这一突变性构造活动作用下水系的瞬时变化情况,为该区域活动构造的水系响应研究提供了最直接的量化资料。汶川地震形成的阶面错动点也可作为标定活动断层和古地震事件的指示器。同时,岷江上游河流阶地对龙门山断裂带逆冲作用响应机制的探讨有助于进一步认识水系剖面样式与断裂活动的耦合关系,进而为深入分析龙门山阶段性隆升历史提供地形地貌证据。

致谢:董顺利、闫亮、马博琳、乔宝成、张毅也参加了本次研究的野外调查工作,震区现场图片为本项目组成员野外调查的共同成果,在此深表谢意。

参考文献 (Reference)

- [1] Shu Dongcai. Study of mountainous forest watershed distributed hydrological model based on DEM [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. [舒栋才. 基于 DEM 的山地森林流域分布式水文模型研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.]
- [2] Chen Hao, Li Yong, Dong Shunli, et al. Deformation features of surface rupture of the Wenchuan Earthquake (M8.0) at the Bailu Town [J]. Chinese Journal of Nature, 2009, 31(5): 268-271 [陈浩, 李勇, 董顺利, 等. 汶川 8.0 级地震地表破裂白鹿镇段的变形特征[J]. 自然杂志, 2009, 31(5): 268-271]
- [3] Zhou Rongjun, Li Yong, Densmore A L. Active tectonics of the eastern margin of the Tibet plateau [J]. Mineralogy and Petrology, 2006, 26(2): 40-51 [周荣军, 李勇, Densmore A L. 青藏高原东缘活动构造[J]. 矿物岩石, 2006, 26(2): 40-51]
- [4] Tang Fangtuo, Deng Zhihui, Liang Xiaohua, et al. Late quaternary ki-

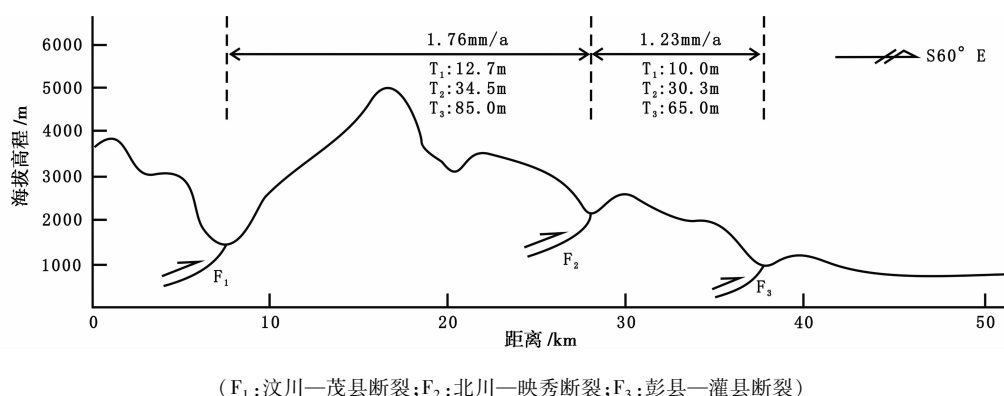


图7 岷江前、后龙门山河段下蚀速率及阶地高程对比(底图据李勇^[6], 2006, 修改)

Fig. 7 Comparison on the terrace elevation and the incision rate of the Min River in fore Longmenshan area and back Longmenshan area

- nematic characteristic of the back range faults at the middle Longmenshan fault zone[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, **23**(3):710–716 [唐方头, 邓志辉, 梁小华, 等. 龙门山中段后山断裂带晚第四纪运动特征[J]. *地球物理学进展*, 2008, **23**(3):710–716]
- [5] Ma Baoqi, Su Gang, Hou Zhihua, et al. Late quaternary slip rate in the central part of the Longmenshan fault zone from terrace deformation along the Minjiang river[J]. *Seismology and Geology*, 2005, **27**(2):234–242 [马保起, 苏刚, 侯治华, 等. 利用岷江阶地的变形估算龙门山断裂带中段晚第四纪滑动速率[J]. *地震地质*, 2005, **27**(2):234–242]
- [6] Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al. Continental dynamics and geological responses of the eastern margin of Qinghai–Tibet plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006. [李勇, 周荣军, Densmore A L 等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 北京: 地质出版社, 2006.]
- [7] Zhang Yueqiao, Yang Nong, Meng Hui. Deep–incised valleys along the Minjiang river upstream and their responses to the uplift of the west sichuan plateau, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2005, **32**(4):331–339 [张岳桥, 杨农, 孟晖. 岷江上游深切河谷及其对川西高原隆升的响应[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2005, **32**(4):331–339]
- [8] Li Yong, Cao Shuyou, Zhou Rongjun, et al. Late cenozoic Minjiang incision rate and its constraint on the uplift of the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, **79**(1):28–37 [李勇, 曹叔尤, 周荣军, 等. 晚新生代岷江下蚀速率及其对青藏高原东缘山脉隆升机制和形成时限的定量约束[J]. *地质学报*, 2005, **79**(1):28–37]
- [9] Gao Xuanyu, Li Yong. Comparison on the incision rate in the upper and middle reaches of Minjiang river[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, **15**(4):517–521 [高玄域, 李勇. 岷江上游和中游几个河段的下蚀率对比研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(4):517–521]
- [10] Zhang Huiping, Yang Nong, Zhang Yueqiao. Geomorphology of the Minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications[J]. *Quaternary Science*, 2006, **26**(1):126–135 [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]
- [11] Tang Rongchang, Wen Dehua, Huang Zuzhi, et al. The quaternary activity characteristics of several major active faults in the Songpan–Longmenshan region[J]. *China Earthquake*, 1991, **7**(3):64–71 [唐荣昌, 文德华, 黄祖智, 等. 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, **7**(3):64–71]
- [12] Ma Bolin, Li Yong, Dong Shunli, et al. Characteristics of the surface rupture of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake on the epicenter, Yingxiu area [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2009, **31**(4):339–343 [马博琳, 李勇, 董顺利, 等. 汶川地震震中映秀地区地表破裂特征[J]. *西北地震学报*, 2009, **31**(4):339–343]

River Terrace Responding to the Obduction of the Longmenshan Fault Zone in the Upper Min River Basin

CHEN Hao¹, LI Yong²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Mian Yang Normal University, Mianyang 621006, China;

2. National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The instantaneous variations of water system was recorded by the vertical displacement of terraces surface caused by the Wenchuan earthquake, the field investigation data showed that the vertical slip amount of terraces surface of Min river reaches 2.7 m because of the thrust motion of Beichuan–Yingxiu fault. Terraces surface of Min river was vertically dislocated by Longmenshan main faults because of several times obduction. The thrust rate of faults was calculated according to the vertical slip amount of terraces surface and the corresponding age. The thrust rate of Wenchuan–Maoxian fault is 0.84 mm/a, the thrust rate of Beichuan–Yingxiu fault is 0.52 mm/a, the thrust rate of Pengxian–Guanxian fault is 0.24 mm/a. The intensity of obduction of main faults in the Longmen Mountain were decreased from northwest to southeast. The uplift rate of back Longmenshan sandwiched between Wenchuan–Maoxian fault and Beichuan–Yingxiu fault are faster than the uplift rate of fore Longmenshan sandwiched between Beichuan–Yingxiu fault and Pengxian–Guanxian fault because of the differential activity of Longmenshan main faults.

Key words: the upper Min River basin; river terrace; Longmenshan fault zone; obduction