

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0659-08

龙门山典型河流形态变化的 潜在地震因素分析

李建锋, 刘 锋, 吴中海

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 以岷江支流白沙河和涪江支流湔江为例, 探讨了 2008 年汶川地震之后龙门山地区河流形态的变化及其可能的长期构造地貌效应。研究表明, 2008 年汶川地震地表破裂带穿越河流形成裂点 (跌水), 地震触发的山体滑坡、泥石流堵塞河道形成堰塞湖, 致使河流形态及河流水动力条件随之发生变化。河流同震裂点在震后迅速消失, 部分河段出现“裁弯取直”的趋势, 这可能与河流中激增的沉积通量有关。随着周期性大地震的复发, 河流的沉积-侵蚀过程会不断改变, 伴随着震间活动断裂持续的构造变形, 龙门山河流形态可能会发生快速变化。

关键词: 裁弯取直; 裂点; 河流形态; 地震; 龙门山

中图分类号: P546; P69

文献标识码: A

河流的“裁弯取直”和裂点后退迁移是河流形态变化的两种表现形式^[1]。通常情况下这两种河流形态变化过程非常缓慢, 以致在短期野外调查的时间尺度内难以直接观察到。由大地震事件引起的同震构造变形可以造成地表物质的快速剥蚀, 向河流输入大量地表物质, 从而使河流形态发生快速变化, 为深入认识河流形态的变化过程提供了直接观察的窗口。2008 年汶川 M_w 7.9 级地震沿地表破裂带和水系触发了大量滑坡、泥石流^[2], 改变了河流的侵蚀-沉积过程^[3]。本文以流经龙门山地区的岷江支流白沙河和涪江支流湔江为例, 探讨龙门山地区河流形态变化中的潜在地震影响因素及其可能的长期构造地貌效应。

1 研究区概况

龙门山逆冲褶皱带夹于青藏高原东缘和四川盆地之间, 中生代以来主要经历了两期重要的地壳缩短过程^[4], 形成了一系列自北西向南东方向逆冲的逆掩推覆构造带, 主要有汶川—茂县逆冲走滑断裂带、映秀—北川逆冲走滑断裂带和灌县 (现都江堰市)—安县逆冲走滑断裂带 3 条主干断裂^[4~5]。2008 年汶川 M_w 7.9 级地震在地表上形成了长度超过 300 km 的

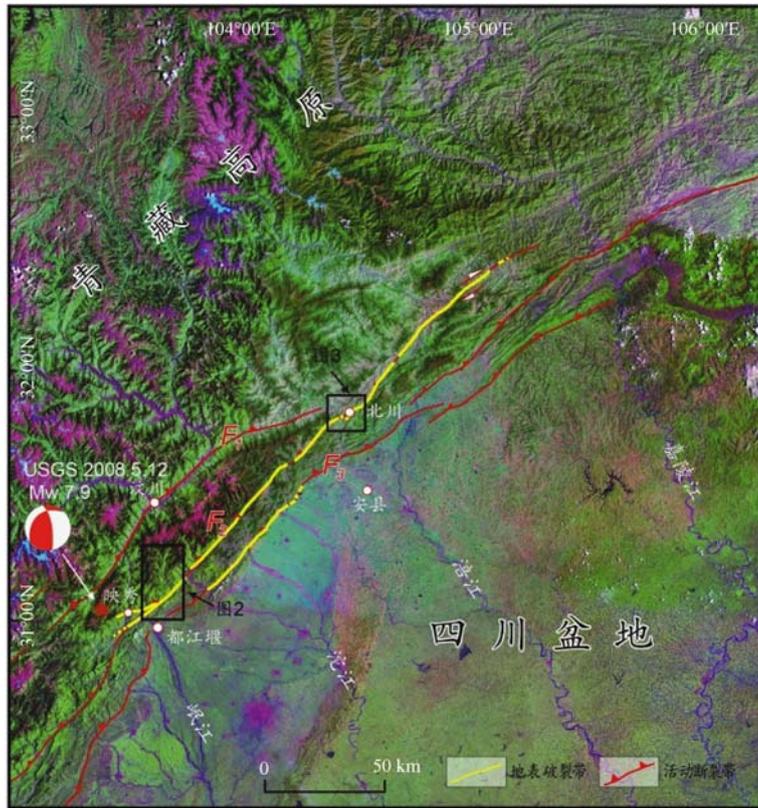
收稿日期: 2016-04-21

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务项目 (DZLXJK201602); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160268); 国家自然科学基金项目 (41672204)

作者简介: 李建锋 (1978-), 男, 博士, 构造地质学专业, 从事造山带与盆地演化及热年代学研究。E-mail: lijianfeng217@sina.com

通讯作者: 刘锋 (1979-), 男, 博士, 构造地质专业, 主要从事构造地貌和地质灾害研究。E-mail: tcytgr2005@outlook.com

地表破裂带^[6-7] (见图 1)。沿地表断裂带和河谷两岸触发了大量的滑坡^[2,8], 引起地表大规模和快速的坡面重力侵蚀^[9]。



F₁—汶川—茂县断裂; F₂—映秀—北川断裂; F₃—灌县—安县断裂

图 1 2008 年汶川地震地表破裂空间分布和龙门山地区主要活动构造图

Fig. 1 Spatial distribution of the surface ruptures of the 2008 Wenchuan earthquake and the active faults in the Longmenshan Mountain

龙门山处于青藏高原与四川盆地之间地形变化的陡变带, 被一系列北西—南东向河流斜向切割, 由北向南依次为嘉陵江、涪江、沱江、岷江和青衣江及其支流 (见图 1), 这些河流在四川盆地内汇入长江。切割龙门山的这些河流均为深切基岩河流^[11], 局部切割深度达 3000 m^[10]。龙门山断裂带南西段水系演化受逆冲褶皱活动控制, 北东段受断裂带右旋走滑作用影响^[12]。

2008 年汶川地震沿涪江北川段两岸产生了大量滑坡, 并堵塞河道形成堰塞湖。2008 年 9 月 24 日北川老县城突降暴雨, 导致区域性泥石流爆发。白沙河是岷江一级支流, 发源于都江堰市虹口乡光光山南麓, 在紫平铺汇入岷江, 流域面积 364 km² (见图 2)。涪江是岷江的一级支流, 由于映秀—北川活动断裂带的影响, 在北川县城附近涪江发生了河流袭夺和水系重组^[12-13], 形成了极其特殊的河流形态 (见图 3)。

2 震后河流形态的快速变化

2008 年汶川地震沿白沙河河谷产生约 14 km 的地表破裂带, 形成多处河流裂点^[14]。其

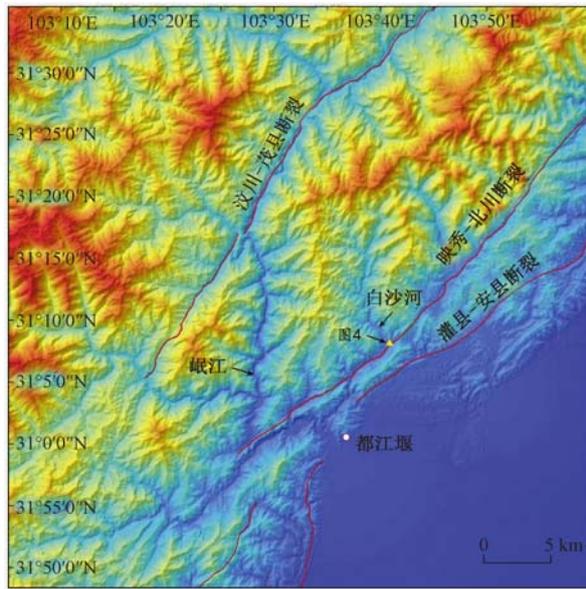


图2 白沙河 DEM 图

Fig. 2 The DEM of the Baisha River

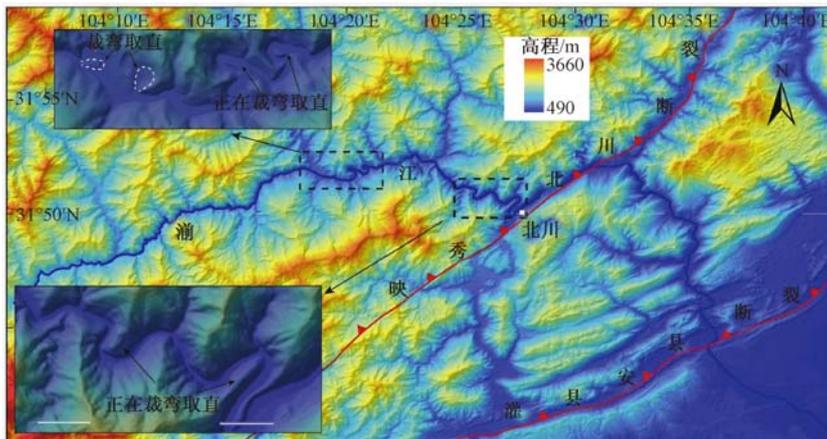


图3 滙江北川段河流形态 (图中显示部分河段已经或正在进行裁弯取直)

Fig. 3 The fluvial morphology of the Beichuan reach of the Jianjiang River

中破裂带东端八角庙附近裂点高差约 $4.5\text{ m}^{[14-15]}$ (见图 4a), 此裂点在震后 3 年内迅速消失 (见图 4b), 推测裂点的消失可能与河流沉积通量的激增有关系。在基岩型河道中, 河流沉积物通过两种方式影响河流的侵蚀过程^[16-17]: ①具有“工具”效应, 特定的物质组成形成“高能”泥流, 加快基岩河道下切; ②在河床上形成巨厚的“抗冲层”阻碍河流的下切侵蚀。河流携带的沉积物以何种方式影响基岩型河道的下切侵蚀取决于河流沉积通量的供给^[18]。

从虹口八角庙地震成因裂点的快速消失来看, 虽然大量地震滑坡物质进入白沙河河道, 但滑坡物质的供给量没有超出白沙河水流的搬运能力, 河床仍然遭受侵蚀, 导致河流裂点被迅速破坏。否则, 大量滑坡物质会沉积在河床。平武县平通镇河床及河漫滩中形成的约 2 m



图4 汶川地震同震裂点位置及其快速消失

Fig. 4 The location of the co-seismic knickpoints of the Wenchuan earthquake and their rapid disappearance

高的同震陡坎和裂点在震后一个月内迅速消失^[19]，也说明短暂堆积的河流沉积物难以在长期内有效减缓河流的下切作用。同震裂点的快速消失，表明同震构造形成的河流坡折点可能不容易保存。

裂点是河流纵剖面从缓坡转换为陡坡的转折点^[1,20]，裂点的形成与构造活动、侵蚀基准变化、岩性差异等因素有关^[21]。河流裂点的存在，意味着河流纵剖面处于非均衡状态，河流需要不断地调整自身形态以达到新的平衡。在此调节过程中，由于侵蚀基准面的下降，引起河流溯源侵蚀，河流裂点不断向上游迁移，河流下切并在裂点下游形成河流阶地（见图5）。

从白沙河河流地貌长期演化的结果（见图6）可以看出，河流在活动断层通过的河段并未形成明显的坡折点。这可能也说明了河流裂点向上游溯源侵蚀距离是有限的，因为有溯源的裂点在纵剖面上应该在原来裂点的上游有较小的坡折，并且在这2个坡折的地方河流纵比降比原来的小^[23]。龙门山水系中同震构造成因裂点的快速消失表明，尽管同震构造变形可以形成河流的坡折点，但同震裂点（跌水）无法长期稳定存在，不可能影响局地侵蚀基准面的持续变化，也就不足以改变河流原有的侵蚀-搬运-堆积状态，因而可能无法控制河流阶地的形成。

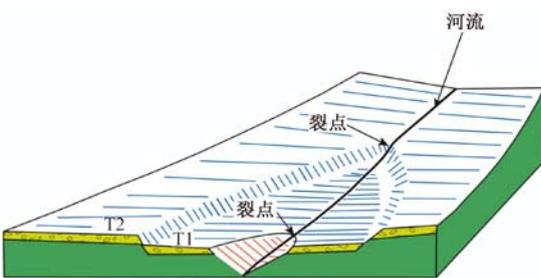


图5 裂点与河流阶地的形成^[22]

Fig. 5 Knickpoint and formation of river terrace

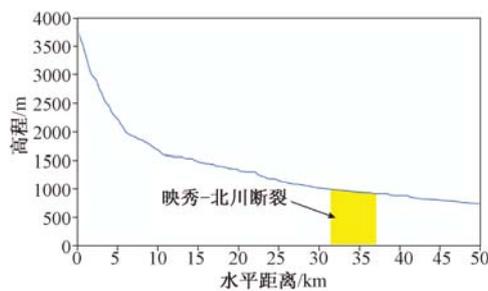


图6 白沙河河流纵剖面

Fig. 6 The longitudinal profile of the Baisha River

从图3看出，北川湔江河流有部分河段已经或正在进行裁弯取直。降水强度（洪水流量大小）、河床岩性抗蚀性强弱、河流输沙率是影响山区基岩型河流曲率的重要因素^[24~26]。北川县城以上湔江部分河段在流经不同岩性的地方河流曲率变化都较为明显（见图7），并

且砂岩、粉砂岩分布的区域也是汶川地震滑坡最为集中的地方^[2], 这些地区软弱的地层可能为河流的侧向摆动提供了空间。受季风性气候影响, 湔江流域降水较为集中, 汶川地震后强降水曾经诱发了大量新的滑坡^[27]。强降水和河流沉积通量的激增可能改变了湔江的河流水力条件。因此, 降水和河水携带的滑坡物质可能影响了湔江河流曲率的变化。

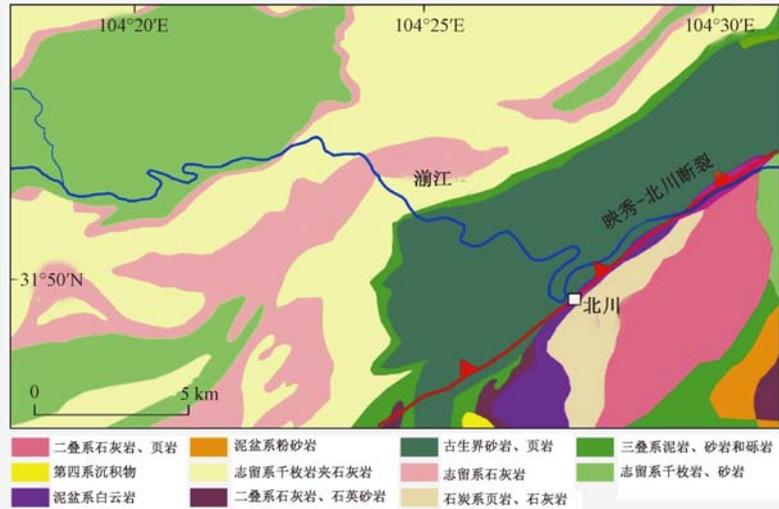


图7 湔江河流形态与岩性

Fig. 7 The fluvial morphology of the Jianjiang River and the lithology

3 地震与龙门山河流长期形态变化

晚新生代以来龙门山地区水系的发育和演化受活动断裂带的影响^[11~12], 例如: 岷江部分河段沿汶川—茂县活动断裂带发育, 北川县附近湔江发生了河流袭夺和水系重组^[12~13]。强烈的河流下切侵蚀作用塑造了龙门山地区典型的高山峡谷地貌, 高陡地形的放大效应使得汶川地震沿水系两侧诱发大量滑坡^[27]。发育在河道曲率较大部位的地震滑坡, 将被季节性强降水不断带入河道, 可能引起河流侧向侵蚀的增强, 使得河道内侧坡面失稳, 造成河岸坍塌。因此, 从河流形态的长期演化看, 随着类似汶川地震的大地震周期性复发, 除了受活动断裂的影响外, 河流携带的地震滑坡物质可能也是影响龙门山地区水系形态变化的重要因素。

坡面过程与河流作用的耦合是塑造活动造山带河流地貌的主要地表营力^[18,29~30]。其中, 坡面过程主要以滑坡、泥石流等重力侵蚀方式进行, 而河流不仅对河谷下切侵蚀, 同时还会将滑坡、泥石流侵蚀物质搬运出造山带。河流下切使得河谷边坡超过坡面失稳临界坡度, 从而发生大规模的崩塌滑坡, 导致河流沉积通量的增加。

龙门山河流地貌演化过程中可能包含着“地震滑坡—增强侵蚀下切—形成深切河谷—河流恢复侵蚀平衡”这一系列河流动力学过程。河流下切侵蚀导致边坡失稳, 地形的放大效应使得崩塌滑坡在强震作用下沿河流大规模发生^[28], 滑坡物质进入河道, 河流对滑坡物质快速搬运卸载 (见图8); 随着滑坡物质逐渐被卸载, 河流水动力将逐步达到新的平衡。但是由于龙门山河流能耗 (物质搬运能力) 的空间差异, 不同的河段可能对此反馈机制的

响应会有差异。例如,震后部分较大粒径的滑坡物质滞留在河道,延缓了河道的进一步下切,直到大洪水或者经长时期河水持续冲刷,河床才开始继续下切。随着强震的再次复发,龙门山河流地貌演化开始新一轮“坡面—地震滑坡—河流系统”的河流过程。在坡面—河流系统中,地震滑坡沿河分布的位置、距离河流远近以及滑坡的规模,会产生不同的地貌效应(见图9)。具体可能有如下表现形式:沿河分布的规模较大的滑坡侧向挤压河道,使河道变窄或者侧移,甚至会阻塞河道,形成堰塞湖;如果堰塞湖可以长期稳定存在,可能成为控制河流下切侵蚀基准面,堰塞湖以上和以下河道的演化将发生变化;如果滑坡距离河流较远,在雨季时为泥石流的爆发提供丰富的物源,泥石流在输入物质进入河道的过程中,会形成新的冲沟,加快坡面溯源侵蚀;最终坡面物质会进入河道,改变河流的水动力条件,影响河流的侵蚀搬运。



图8 河流的快速搬运

Fig. 8 The rapid transport capacity of the Baisha River

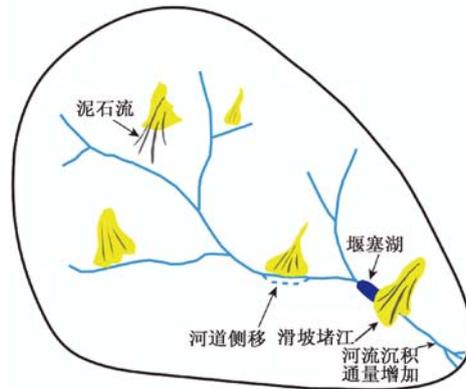


图9 地震滑坡地貌效应示意图

Fig. 9 Schematic representation of the geomorphological effect of the seismic landslide

4 结论

汶川地震发生后,河流携带沉积物的侵蚀效应导致同震裂点(跌水)无法长期稳定地存在;降水及河水携带的滑坡物质可能影响了龙门山河流曲率的变化。

随着类似汶川地震的大地震的周期性复发,除了受活动断裂的影响,河流携带的地震滑坡物质可能也是影响龙门山地区水系形态变化的重要因素。

致谢 中国科学院遥感与数字地球研究所付碧宏研究员对本文给予了悉心指导和大力支持,马元旭博士对文章提出了建设性的意见,在此一并感谢。

参 考 文 献

- [1] Schumm S A. The fluvial system [M]. Wiley-Interscience, 1977.
- [2] Dai F C, Xu C, Yao X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 M_s 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40 (4): 883 ~ 895.
- [3] Wang E C, Meng Q R. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Longmenshan fault belt [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52 (5): 579 ~ 592.

- [4] Burchfiel B C, Chen Z L, Liu Y P, et al. Tectonics of the Longmenshan and adjacent region, central China [J]. *International Geology Review*, 1995, 37 (8): 661 ~ 735.
- [5] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 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, 16 (4): 389 ~ 403.
- DENG Qi-dong, CHEN She-fa, ZHAO Xiao-lin. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan Mountain and its adjacent regions [J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16 (4): 389 ~ 403.
- [6] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China [J]. *Geology*, 2009, 37 (6): 515 ~ 518.
- [7] Fu B H, Shi P L, Guo H D, et al. Surface deformation related to the 2008 Wenchuan earthquake, and mountain building of the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40 (4): 805 ~ 824.
- [8] Qi S W, Xu Q, Lan H X, et al. Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008 5. 12 Wenchuan Earthquake, China [J]. *Engineering Geology*, 2010, 116 (1/2): 95 ~ 108.
- [9] Parker R N, Densmore A L, Rosser N J, et al. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth [J]. *Nature Geoscience*, 2011, (4): 449 ~ 452.
- [10] 李智武, 陈洪德, 刘树根, 等. 龙门山冲断隆升及其走向差异的裂变径迹证据 [J]. *地质科学*, 2010, 45 (4): 944 ~ 968.
- LI Zhi-wu, CHEN Hong-de, LIU Shu-gen, et al. Differential uplift driven by thrusting and its lateral variation along the Longmenshan belt, western Sichuan, China: Evidence from fission track thermochronology [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2010, 45 (4): 944 ~ 968.
- [11] Kirby E, Whipple K X, Tang W Q, et al. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (B4): 2217.
- [12] 贾营营, 付碧宏, 王岩, 等. 青藏高原东缘龙门山断裂带晚新生代构造地貌生长及水系响应 [J]. *第四纪研究*, 2010, 30 (4): 825 ~ 836.
- JIA Ying-ying, FU Bi-hong, WANG Yan, et al. Late Cenozoic tectono-geomorphic growth and drainage response in the Longmen Shan fault zone, east margin of Tibet [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30 (4): 825 ~ 836.
- [13] 周荣军, 李勇, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘活动构造 [J]. *矿物岩石*, 2006, 26 (2): 40 ~ 51.
- ZHOU Rong-jun, LI Yong, Densmore A L, et al. Active tectonics of the eastern margin of the Tibet Plateau [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26 (2): 40 ~ 51.
- [14] 何宏林, 孙昭民, 魏占玉, 等. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带白沙河段破裂及其位移特征 [J]. *地震地质*, 2008, 30 (3): 658 ~ 672.
- HE Hong-lin, SUN Zhao-min, WEI Zhan-yu, et al. Rupture of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake along Baishahe River [J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30 (3): 658 ~ 672.
- [15] 付碧宏, 王萍, 孔屏, 等. 中国汶川“5.12”8.0级大地震: 地震地质灾害图集 [M]. 北京: 地震出版社, 2009.
- FU Bi-hong, WANG Ping, KONG Ping, et al. The atlas of seismic geohazards of Chinese Wenchuan 5.12 M_s 8.0 earthquake [M]. Beijing: Seismological Press, 2009.
- [16] Sklar L S, Dietrich W E. Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock [J]. *Geology*, 2001, 29 (12): 1087 ~ 1090.
- [17] Lamb M P, Dietrich W E, Sklar L S. A model for fluvial bedrock incision by impacting suspended and bed load sediment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (F3): F03025.
- [18] Burbank D W. Rates of erosion and their implications for exhumation [J]. *Mineralogical Magazine*, 2002, 66 (1): 25 ~ 52.
- [19] 何仲太, 马保起, 田勤俭, 等. 汶川8.0地震地表破裂带平通镇段的变形特征 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28 (5): 789 ~ 795.
- HE Zhong-tai, MA Bao-qi, TIAN Qin-jian, et al. Deformation features of surface rupture of the Wenchuan earthquake (M_s 8.0) at the Pingtong Town [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28 (5): 789 ~ 795.
- [20] Howard A D. A detachment-limited model of drainage basin evolution [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30 (7): 2261 ~ 2286.

- [21] Miller J R. The influence of bedrock geology on knickpoint development and channel-bed degradation along downcutting streams in south-central Indiana [J]. *The Journal of Geology*, 1991, 99 (4): 591 ~ 605.
- [22] 杨景春, 李有利. 地貌学原理 (修订版) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
YANG Jing-chun, LI You-li. Principles of geomorphology [M]. Beijing: Peking University Press, 2005.
- [23] 单菊萍. 基于 DEM 的雅鲁藏布江河流地貌特征的研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
SHAN Ju-ping. Research on the morphological features of Yarlung Zangbo river based on DEM [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [24] Hartshorn K, Hovius N, Dade W B, et al. Climate-driven bedrock incision in an active mountain belt [J]. *Science*, 2002, 297 (5589): 2036 ~ 2038.
- [25] Barbour J R. The origin and significance of sinuosity along incising bedrock rivers [D]. New York: Columbia University, 2008.
- [26] Stark C P, Barbour J R, Hayakawa Y S, et al. The climatic signature of incised river meanders [J]. *Science*, 2010, 327 (5972): 1497 ~ 1501.
- [27] Tang C, Zhu J, Qi X, et al. Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China [J]. *Engineering Geology*, 2011, 122 (1/2): 22 ~ 33.
- [28] Huang R Q, Li W L. Development and distribution of geohazards triggered by the 5.12 Wenchuan Earthquake in China [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52 (4): 810 ~ 819.
- [29] Tucker G E, Bras R L. Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34 (10): 2751 ~ 2764.
- [30] Korup O, Schlunegger F. Bedrock landsliding, river incision, and transience of geomorphic hillslope-channel coupling: Evidence from inner gorges in the Swiss Alps [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112 (F3): F03027.

POSSIBLE SEISMIC CONTROL ON RIVER CHANNEL CHANGE IN THE LONGMENSHAN MOUNTAIN

LI Jian-feng, LIU Feng, WU Zhong-hai

(*Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: The 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake induced a large quantity of landslides whose materials entered the river channels. In some channel reach the seismic surface ruptures caused the co-seismic knick points across the channel of the Longmenshan Mountain. The river morphology and hydrodynamic condition may be changed. The field investigations show that co-seismic knick points disappeared rapidly, and meander cut-off would potentially occur in the near future. This suggests that the temporal increase in sediment input will not reduce the long-term fluvial transport capacity. A few years later, the rivers will reach a new state of erosion-transport-deposition. It is concluded that the seismic erosion events (landslide) and local hydrometeorological conditions (heavy rainfall and flash flood) exert significant controls on the river channel change in the Longmenshan Mountain.

Key words: meander cutoff; knick point; river channel change; large earthquake; Longmenshan Mountain