



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

濠溪河流域地貌对泸县 $M_s6.0$ 地震发震构造变形的响应及其指示作用

周文英 梁明剑 左洪 廖程 吴微微 王明明 宫悦 魏娅玲

Response of the topography of Laixihe drainage to the structural deformation induced by $M_s6.0$ Luxian earthquake and its indication

Zhou Wenying, Liang Mingjian, Zuo Hong, Liao Cheng, Wu Weiwei, Wang Mingming, Gong Yue, Wei Yaling

引用本文:

周文英, 梁明剑, 左洪, 廖程, 吴微微, 王明明, 宫悦, 魏娅玲. 2022. 濠溪河流域地貌对泸县 $M_s6.0$ 地震发震构造变形的响应及其指示作用. 地震学报[J], 44(2): 250–259. DOI: 10.11939/jass.20210071

Zhou W Y, Liang M J, Zuo H, Liao C, Wu W W, Wang M M, Gong Y, Wei Y L. 2022. Response of the topography of Laixihe drainage to the structural deformation induced by $M_s6.0$ Luxian earthquake and its indication. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(2): 250–259. DOI: 10.11939/jass.20210071

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20210071>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2019年四川长宁 $M_s6.0$ 地震序列重定位和震源特征分析

Relocation and source characteristics of the 2019 Changning $M_s6.0$ earthquake sequence
地震学报. 2020, 42(4): 377–391 <https://doi.org/10.11939/jass.20190170>

永清 $M_s4.3$ 地震和廊坊 $M_s3.0$ 地震的发震构造研究

Seismogenic structure of Yongqing $M_s4.3$ and Langfang $M_s3.0$ earthquakes
地震学报. 2020, 42(4): 392–405 <https://doi.org/10.11939/jass.20200021>

2013年三台 $M_s4.7$ 地震震源机制及发震构造研究

Study on earthquake focal mechanism and seismogenic structure of the Santai $M_s4.7$ earthquake in 2013
地震学报. 2021, 43(6): 716–729 <https://doi.org/10.11939/jass.20200201>

2018年5月28日吉林松原 $M_s5.7$ 地震发震构造分析

Seismogenic structure analysis of the $M_s5.7$ Songyuan, Jilin, earthquake on May 28, 2018
地震学报. 2020, 42(1): 12–23 <https://doi.org/10.11939/jass.20190095>

2017年8月9日精河 $M_s6.6$ 地震余震序列精定位及发震构造分析

Precise location and seismogenic structure analysis of aftershock sequence of Jinghe $M_s6.6$ earthquake on August 9, 2017
地震学报. 2019, 41(3): 314–328 <https://doi.org/10.11939/jass.20180124>

盖州青石岭地震序列发震构造初探

Seismogenic structure of the Qingshiling, Gaizhou, earthquake swarm
地震学报. 2017, 39(6): 848–859 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.003>

周文英, 梁明剑, 左洪, 廖程, 吴微微, 王明明, 官悦, 魏娅玲. 2022. 濛溪河流域地貌对泸县 $M_s6.0$ 地震发震构造变形的响应及其指示作用. 地震学报, 44(2): 250–259. doi: 10.11939/jass.20210071.
Zhou W Y, Liang M J, Zuo H, Liao C, Wu W W, Wang M M, Gong Y, Wei Y L. 2022. Response of the topography of Laixihe drainage to the structural deformation induced by $M_s6.0$ Luxian earthquake and its indication. Acta Seismologica Sinica, 44(2): 250–259. doi: 10.11939/jass.20210071.

濛溪河流域地貌对泸县 $M_s6.0$ 地震发震构造变形的响应及其指示作用*

周文英 梁明剑^{*} 左洪 廖程
吴微微 王明明 官悦 魏娅玲

(中国成都 610041 四川省地震局)

摘要 以 12.5 m 数字高程模型数据为基础, 采用数字地貌分析方法提取了濛溪河流域的高程剖面 and 面积-高程积分(HI)等地貌参数, 分析了 2021 年 9 月 16 日四川盆地东南部泸县 $M_s6.0$ 地震震中附近区域地貌与构造活动的响应关系. 结果显示: 震中西侧的螺观山和梯子崖背斜在震中的南北两端存在明显的缩短量差异; HI 条带状低值区的展布方向与流域内构造的方向一致, HI 高值区位于华蓥山两条断裂夹持的谷地, 但在震中附近存在 WNW 向的 HI 低值带. 综合分析认为, 泸县地震震中附近应存在一走向为 WNW 的隐伏构造, 它不仅调节了螺观山和梯子崖背斜在震中南北两端的缩短量差异, 也使得 HI 值受其影响呈低值特征, 该结果与震源机制解结果、等震线长轴走向以及余震空间展布的优势方向相一致.

关键词 泸县 $M_s6.0$ 地震 发震构造 华蓥山断裂带 濛溪河 流域面积-高程积分
doi: 10.11939/jass.20210071 **中图分类号:** P315.2 **文献标识码:** A

Response of the topography of Laixihe drainage to the structural deformation induced by $M_s6.0$ Luxian earthquake and its indication

Zhou Wenying Liang Mingjian^{*} Zuo Hong Liao Cheng
Wu Weiwei Wang Mingming Gong Yue Wei Yaling

(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on 12.5 m DEM data, the elevation profile and hypsometric integral (HI) of Laixihe drainage are extracted by digital geomorphological analysis method, and the response relationship between geomorphology and tectonic activity in the areas near the epicenter of

* 基金项目 中国地震局地震科技星火计划(XH202302)、四川省地震局地震科技专项(LY2216)、国家重点研发计划(2020YFA0710600)、四川省地震局地震科技创新团队专项(201804)和西藏拉萨地球物理国家野外科学观测站研究课题(NORSLS21-04)共同资助.

收稿日期 2021-11-08 收到初稿, 2022-01-10 决定采用修改稿.

作者简介 周文英, 硕士, 工程师, 主要从事构造地貌方面的研究, e-mail: zhouwenying10@163.com; *梁明剑, 博士, 高级工程师, 主要从事活动构造方面的研究, e-mail: 23800794@qq.com



Luxian $M_{\text{s}}6.0$ earthquake is analyzed. The results show that the Luoguanshan and Tiziya anticlines have obvious shortening differences between the north and south ends of the epicenter. The low HI value zone is consistent with the direction of the structure in the basin. The high HI value zone is located between the valleys clamped by the two faults of Huayingshan, but there is a low value zone in WNW direction near the epicenter. The comprehensive analysis shows that there should be a WNW-trending buried structure near the epicenter, which not only regulates the shortening difference between the north and south ends of the epicenter for the Luoguanshan and Tiziya anticlines, but also makes the HI value being a low value characteristic affected by it. The WNW direction of the buried structure is consistent with the results of the focal mechanism solution, major axis strike of isoseismal line, and the dominant predirection of spatial distribution of aftershocks.

Key words: Luxian $M_{\text{s}}6.0$ earthquake; seismogenic structure; Huayingshan fault zone; Laixi river; hypsometric integral (HI)

引言

构造地貌是构造运动、气候条件、侵蚀作用、相关沉积等相互作用的结果(Willett *et al.*, 2006; 刘静等, 2009, 2018). 构造活动对地貌塑造具有重要作用(张世民, 谢富仁, 2001), 流域盆地的发育对构造隆升和气候等控制因素的变化最为敏感, 流域内部不同级别水系的发育与演化记录了该区域不同尺度构造活动、气候侵蚀过程变化的信息, 是研究构造活动与地貌演化之间的理想媒介(Whipple, Tucker, 1999; Clark, Royden, 2000; Liu-Zeng *et al.*, 2008; 刘静等, 2009; 梁明剑等, 2014a; 李伟等, 2021). 目前利用地貌参数对构造活动的响应关系分析构造变形特征已广泛应用于青藏高原边缘地区(张会平等, 2006; Liu-Zeng *et al.*, 2008; 梁明剑等, 2014a; 李奋生等, 2015; 苏琦, 2015; 于洋等, 2018; 王丹等, 2021), 这些地区的隆升和变形强烈, 地貌对构造活动变形具有较强的指示作用, 但是关于四川盆地等弱活动构造区内的构造变形及其地貌响应的研究甚少.

2021年9月16日四川泸县发生 $M_{\text{s}}6.0$ 地震, 微观震中为(29.20°N, 105.34°E), 此次地震的最高烈度为Ⅷ度, 等震线长轴呈 WNW 走向(四川省地震局, 2021). 该地震的震源机制解显示该地震以逆冲破裂为主, 节面 I 为走向 286°, 倾角 45°, 滑动角 103°, 节面 II 为走向 88°, 倾角 46°, 滑动角 77°(易桂喜等, 2021), 发震断层的错动面呈 WNW 走向. 泸县 $M_{\text{s}}6.0$ 地震震中位于华蓥山断裂带东、西两分支断裂之间, 华蓥山断裂带总体呈 NE 走向, 但震源机制解的断层错动面走向与华蓥山断裂带的走向不一致, 而且区域地质图显示地表无断层出露, 这给分析地震的发震构造造成了困难. 泸县地震震中附近区域为四川盆地的川中丘陵与川东平行岭谷的过渡地带, 处在华蓥山脉向西南方向延伸的分支及余脉之间的宽缓山谷中, 水系贯通良好, 这些水系地貌可能记载了该区域构造变形的重要信息, 为研究地貌与构造变形的响应关系提供了基础.

本文拟基于 12.5 m 分辨率的高级陆地观测卫星(advanced land observing satellite, 缩写为 ALOS)数字高程模型(digital elevation model, 缩写为 DEM)数据, 利用数字地貌分析方法提取泸县地震震中所在的濛溪河流域的高程剖面 and 面积-高程积分(hypsometric integral, 缩写为 HI, Langbein, 1947), 并结合区域地质构造特征, 分析水系地貌与震中附近区域构造活动的响应关系, 以期探讨泸县 $M_{\text{s}}6.0$ 地震发震的构造及其变形特征.

1.2 地貌特征

四川盆地内部丘陵、平原交错, 地势北高南低, 总体可分为边缘山地和盆地底部两大地形, 其中盆地底部以华蓥山和龙泉山为界分为三部分: 华蓥山以东为大致平行的川东岭谷, 由许多 NE-SW 走向的条状山体组成, 海拔为 700—800 m, 谷地多低丘与平坝, 海拔为 200—500 m; 华蓥山与龙泉山之间为方山丘陵, 区内的紫红色砂页岩倾角平缓, 受切割后形成大片方山式丘陵, 海拔为 350—450 m; 龙泉山以西为平原, 即川西平原或成都平原, 为四川盆地最大的平原, 也是西南地区最大的平原, 海拔约 600 m.

瀾溪河为沱江左岸一级支流, 发源于重庆市大足区中敖镇, 流经重庆市大足区、荣昌区、四川省泸县和龙马潭区, 在四川省泸州市龙马潭区胡市镇注入沱江. 瀾溪河干流全长 238 km, 总体走向 NE, 全流域面积为 3 257 km², 天然落差 223 m, 平均坡降约 1.1‰. 瀾溪河流域地形东北高西南低, 大部分属浅丘地貌(图 1), 坡度介于 0—76.6°之间(图 2). 河源为深丘, 地形变化较大, 流经区域沿河台阶、浅丘宽谷、中丘窄谷、低山深谷等均有分布, 发育有窟窿河、马溪河、新峰河和九曲河等支流, 泸县 $M_S6.0$ 地震震中位于九曲河的宽缓谷地中. 按照自然断点法坡度分级结果(图 2), 瀾溪河上游所在大足区域坡度较大, 但是高坡度成片分布, 主要是受到上

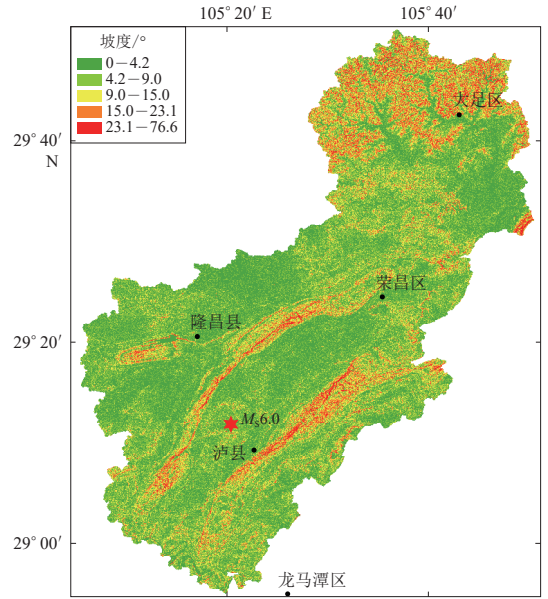


图 2 研究区坡度分布

Fig. 2 The slope map of the study area

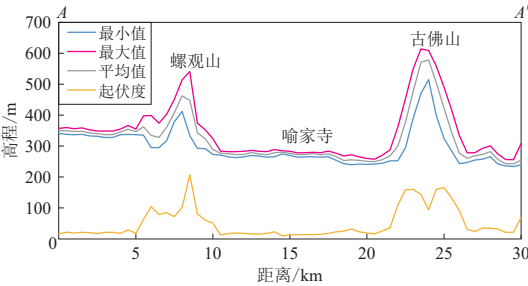


图 3 跨螺观山和古佛山的 AA' 条带地形剖面

Fig. 3 The swath profile AA' across Luoguan Shan and Gufoshan anticline structure

2 流域盆地地质地貌

2.1 流域盆地地质

流域盆地主要发育 NE 向的褶皱构造和华蓥山断裂带, 地层主要为三叠系和侏罗系, 其

游河流侵蚀作用所致; 震中附近的高坡度主要沿褶皱的轴线分布, 明显反映了褶皱构造的形态特征, 说明震中附近的坡度变化主要受构造影响. 跨螺观山和古佛山两个背斜的高程剖面(图 3)显示, 泸县 $M_S6.0$ 地震震中附近区域的地形较平缓, 平均高程和最低、最高高程均相差不大; 在螺观山和古佛山处地形起伏较大, 山地高程主要介于 500—600 m 之间, 古佛山两侧高程的变化较为对称, 而螺观山右侧的高程变化幅值较左侧的大, 两者中间是河谷地貌, 为喻家寺向斜.

中三叠系主要构成背斜构造的核部(四川省地质局, 1980). 区内分布的褶皱构造主要包括螺观山背斜、梯子崖背斜、古佛山背斜、海潮背斜、圣灯山背斜和喻家寺向斜, 主要的断层有: 薄刀岭断层、黄泥垭断层、燕子崖断层、黄草沟断层、双河场断层等, 断层运动性质均以挤压逆冲为主(图 4, 表 1).

螺观山背斜和梯子崖背斜核部地层由上三叠统须家河组砂岩组成, 向西(西翼)依次出现下侏罗统珍珠冲组、中下侏罗统自流井组、中侏罗统新田沟组、下沙溪庙组和上沙溪庙组地层. 在核部或近核部发育有燕子崖断层、黄泥垭断层和天洋坪断层等逆断层. 在黄泥垭断

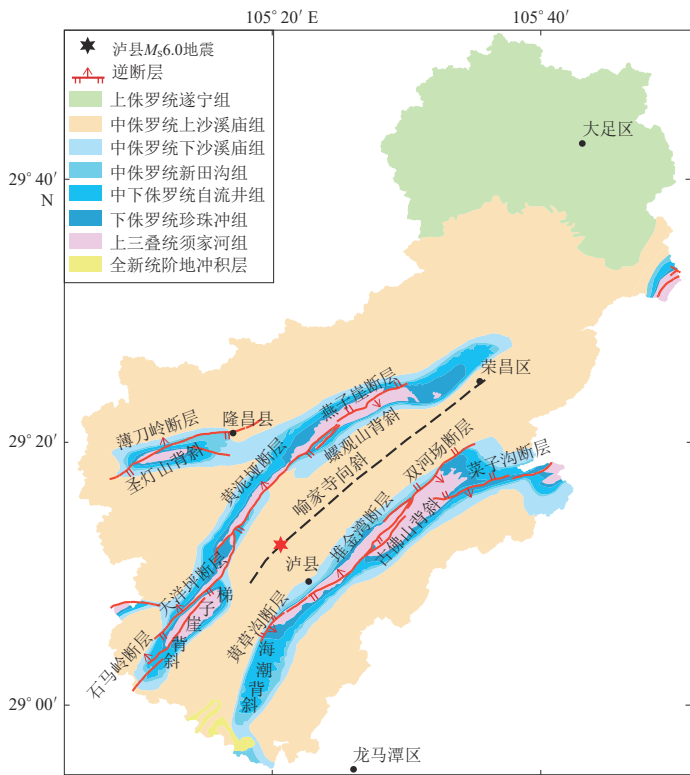


图 4 研究区地层及断层分布
Fig. 4 The geological map of study area

表 1 泸县 M₅6.0 地震震中附近区域断层(引自四川省地质局, 1980)

Table 1 Faults information of Luxian M ₅ 6.0 earthquake area (after Sichuan Geology Bureau, 1980)						
名称	构造部位	走向	倾向	倾角/°	长度/km	性质
薄刀岭断层	圣灯山背斜北翼	N60°E	NW	30—42	18.0	压性逆断层
石马岭断层	梯子崖背斜北西翼	N40°E	SE	28—43	5.6	压性逆断层
天洋坪断层	梯子崖背斜北西翼	N45°E	NW	30—63	18.0	压性逆断层
燕子崖断层	螺观山背斜近核部	N60°E	SE	26—57	10.0	压性逆断层
黄泥垭断层	梯子崖背斜核部北段	N40°E	NW	30—70	25.0	压性逆断层
堆金湾断层	海潮背斜及古佛山背斜近核部	N40°E	NW	50—75	22.4	压性逆断层
黄草沟断层	海潮背斜北西翼	NE	SE	35	4.4	压性逆断层
双河场断层	古佛山背斜北西翼	N40°—50°E	SE	30—40	12.0	压性逆断层
菜子沟断层	古佛山背斜南东翼	N70°E	S	28—37	10.0	压性逆断层

层附近, 由于断层影响造成背斜东翼地层缺失, 仅出现下沙溪庙组地层. 古佛山背斜和海潮背斜核部由上三叠统须家河组砂岩组成, 东、西两翼的地层呈对称分布, 依次为下侏罗统珍珠冲组、中下侏罗统自流井组、中侏罗统新田沟组、下沙溪庙组地层. 在这两个背斜核部和西翼较陡处发育有双河场断层、堆金湾断层、菜子沟断层和黄草沟断层. 圣灯山背斜核部出露地层为上三叠统须家河组, 主要发育薄刀岭断层. 喻家寺向斜的核部由中侏罗统上沙溪庙组紫红色泥岩组成, 两翼为下沙溪庙组地层, 岩层平缓开阔, 总体呈一平缓开阔的向斜地貌(赵正望, 2005).

2.2 流域盆地的高程剖面线

高程剖面分析能够直观地反映地表形态, 它是以 DEM 数据为基础, 根据指定的剖面线输出与之对应的高程值, 或统计垂直于剖面线方向上一定缓冲区(条带)的最大、最小、平均高程和地表起伏度, 即分析高程剖面线和高程条带剖面. 结合构造地质、沉积地质等研究方法, 可以深入讨论构造活动特征、盆山系统的耦合关系等(张会平, 刘少峰, 2004).

泸县 $M_s6.0$ 地震震中西侧为螺观山和梯子崖两个背斜构造, 其核部出露的地层均为三叠系砂岩, 核部岩层倾角为 22° — 34° , 两翼地层为侏罗统泥岩, 两翼岩层倾角为 5° — 27° (四川省地质局, 1980). 为了分析泸县 $M_s6.0$ 地震震中南北两端的地形起伏和构造变形的幅度差异, 分别垂直螺观山和梯子崖背斜提取两条高程剖面线 BB' 和 CC' , 剖面分别位于震中的南、北两侧(图 1). 剖面显示, 螺观山和梯子崖的高程均在 420 m 左右, 高点位于背斜核部; 而根据褶皱形态和地质资料, 背斜两翼变形比较强的地层均为自流井组至下沙溪庙组, 倾角为 20° — 27° , 由此测得螺观山背斜的变形宽度约为 3.01 km(图 5a), 梯子崖背斜的变形宽度约为 5.85 km(图 5b), 两者相差 2.84 km, 表明螺观山和梯子崖背斜在震中南北两端的缩短量存在明显的差异.

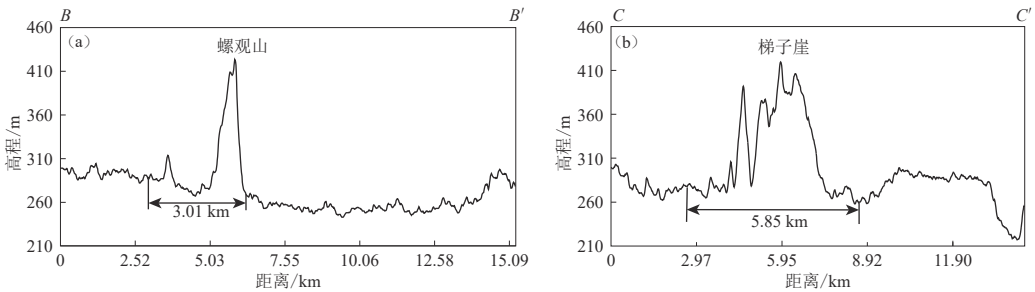


图 5 跨螺观山和梯子崖背斜的高程剖面线 BB' (a) 和 CC' (b)

Fig. 5 Height profiles BB' (a) and CC' (b) across Luoguanshan and Tiziya anticline structures

2.3 流域的面积-高程积分 (HI)

流域盆地的面积-高程积分(HI)能够三维地反映出区域的地表发育程度, 描述流域在给定高度下的面积占整个流域面积的比值, 是分析构造活动十分有效的地貌参数, 对新构造活动、岩性差异和气候变化等因素的反应也较敏感. 由于该地貌参数对单一山前带或者河谷的构造活动程度具有较强的指示作用, 现已在青藏高原边缘地区得到了广泛的应用(梁明剑等, 2014a, b; 于洋等, 2018; 王丹等, 2021), 在分析时需综合考虑地层岩性和气候的影响作用. 本文采用 Pike 和 Wilson (1971) 提出的高程起伏比法计算流域的面积高程积分

$$HI=\frac{h_{\text{mean}}-h_{\text{min}}}{h_{\text{max}}-h_{\text{min}}},\tag{1}$$

式中 HI 为流域面积高程积分， h_{mean} 为流域内高程的平均值， h_{min} 和 h_{max} 分别为流域内高程的最小值和最大值。

由于较小流域盆地的 HI 值更有可能反映局部构造作用、地层岩性和地表过程的差异(梁明剑等, 2014a, b)，甚至可能反映近期活动的褶皱构造(Chen *et al.*, 2003)，为此采用斯特拉勒(Strahler)分级提取研究区内的水系及其亚流域盆地。此处选取 1 061 个亚流域盆地，包括：276 个 2 级亚流域盆地、366 个 3 级亚流域盆地、222 个 4 级亚流域盆地、100 个 5 级亚流域盆地和 97 个 6 级亚流域盆地(图 6)。为更加清晰地反映区域 HI 的变化情况，将各亚流域单元的 HI 赋值到相应亚流域盆地的中心位置，通过反距离加权空间插值生成等值分区图，同时将重定位后的泸县 $M_s6.0$ 地震及其早期余震进行叠加，结果如图 7 所示。

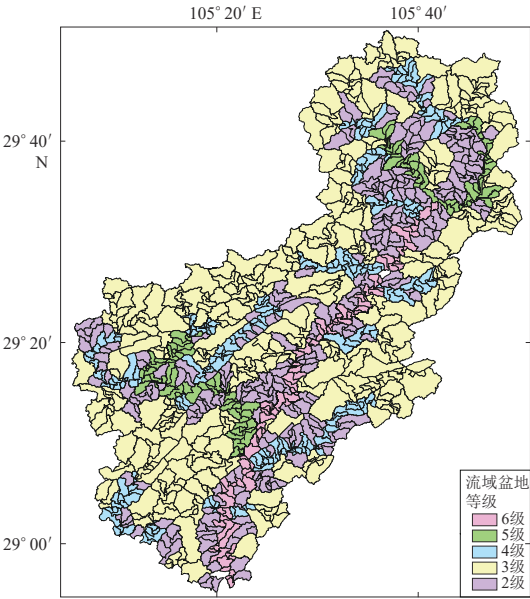


图 6 研究区的亚流域盆地分布图

Fig. 6 The sub-basins distribution of the study area

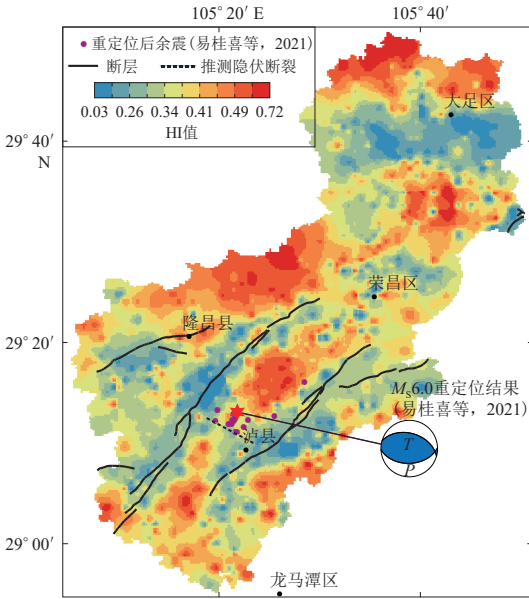


图 7 研究区亚流域盆地的 HI 等值分区图

Fig. 7 The HI values isograms of the study area

从图 7 中可以看出：研究区的 HI 值范围为 0.03—0.72，说明整个区域的侵蚀程度有高低；HI 值分布与该地区构造活动及其导致的隆升、沉降等地表过程密切相关；HI 低值区呈明显的条带状，主要沿区内背斜构造的轴向分布；HI 高值区位于华蓥山两条断裂夹持的谷地之间，但在震中附近存在 WNW 向的低值带，进而将 HI 高值区域分割成明显的两部分。由于华蓥山两条断裂所夹持区域的岩性均为中侏罗统上沙溪庙组，整个流域范围较小，气候的差异性造成的影响作用不明显。这表明泸县 $M_s6.0$ 地震震中附近区域的地貌演化与地层岩性差异关系较小，构造活动是地貌演化的主因，进而说明震中附近可能存在一走向为 WNW 的隐伏构造(图 7)，它不仅调节了螺观山背斜和梯子崖背斜在震中南北两端的缩短量差异，也使得 HI 值受其影响呈低值特征，这也与震源机制解的结果和等震线长轴走向相一致。

3 讨论与结论

本文采用数字地貌分析方法提取了泸县 $M_s6.0$ 地震震中所在流域——濛溪河流域的高程剖面 and 流域盆地的 HI 值, 并结合区域断裂和岩性特征, 对流域地貌与构造活动的响应关系进行了研究, 得出结论如下:

1) 螺观山背斜和梯子崖背斜在震中南北两端存在明显的缩短量差异; 流域盆地的 HI 值在 0.03—0.72 之间, HI 条带状低值区展布方向与流域内构造的方向一致, HI 高值区位于华蓥山两条断裂夹持的谷地之间, 但在震中附近存在 WNW 向的低值带, 将高值区分割成两部分。

2) 螺观山和梯子崖背斜左阶排列的重叠处附近应存在一走向为 WNW 的隐伏断层, 可能为华蓥山主干断裂之间的掀断层, 它不仅调节了螺观山背斜和梯子崖背斜在震中南北两端的缩短量差异, 也使得 HI 值受其影响呈低值特征。地貌所显示的该隐伏断层的行迹与泸县 $M_s6.0$ 地震的震源机制解与余震分布(易桂喜等, 2021), 以及等震线长轴走向(四川省地震局, 2021)相一致, 这表明濛溪河流域地貌对华蓥山断裂带的构造活动存在一定程度的指示作用。

3) 研究区位于四川盆地东南部, 是以褶皱构造为主的弱活动构造区, 流域盆地地貌对区内构造活动存在一定程度的响应, 为研究隐伏构造或弱活动构造区的地震构造提供了一个思路, 同时也反映了华蓥山断裂带泸县段现今仍存在弱活动。但是四川盆地内部现今是否存在构造弱活动, 其构造变形幅度能否引起流域地貌的反馈, 仍有待进一步研究。

两位审稿专家为本文提出了建设性意见, 作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- 邓宾. 2013. 四川盆地中-新生代盆-山结构与油气分布[D]. 成都: 成都理工大学: 17–18.
- Deng B. 2013. *Meso-Cenozoic Architecture of Basin-Mountain System in the Sichuan Basin and Its Gas Distribution*[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 17–18 (in Chinese).
- 贺鸿冰. 2012. 华蓥山构造带的构造几何学与运动学及其对川东与川中地块作用关系的启示[D]. 北京: 中国地质大学: 1–2.
- He H B. 2012. *Geometry and Kinematics Structures of the Huayingshan Mountains: Implications to Relationship Between Central Sichuan and East Sichuan Block*[D]. Beijing: China University of Geosciences: 1–2 (in Chinese).
- 李奋生, 赵国华, 李勇, 颜照坤, 梁明剑, 闫亮, 李敬波, 邵崇建, 郑立龙. 2015. 龙门山地区水系发育特征及其对青藏高原东缘隆升的指示[J]. 地质论评, 61(2): 345–355.
- Li F S, Zhao G H, Li Y, Yan Z K, Liang M J, Yan L, Li J B, Shao C J, Zheng L L. 2015. The characteristics of drainage development in Longmen mountains area and its indication to the uplift of the eastern margin of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. *Geological Review*, 61(2): 345–355 (in Chinese).
- 李伟, 谢超, 程宏宾, 冯兵. 2021. 利用水系方位角和 GPS 数据研究龙门山后山断裂运动模式[J]. 四川地震, (2): 7–10.
- Li W, Xie C, Cheng H B, Feng B. 2021. Study on the fault movement model of the backmountain of Longmen mountain based on the azimuth angle and GPS data[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, (2): 7–10 (in Chinese).
- 梁明剑, 李大虎, 郭红梅, 王世元. 2014a. 成都盆地南缘第四纪构造变形及地貌响应特征[J]. 地震工程学报, 36(1): 98–106.
- Liang M J, Li D H, Guo H M, Wang S Y. 2014a. Quaternary tectonic deformation and geomorphologic response characteristics in the southern margin of Chengdu basin[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 36(1): 98–106 (in Chinese).

- 梁明剑, 周荣军, 闫亮, 赵国华, 郭红梅. 2014b. 青海达日断裂中段构造活动与地貌发育的响应关系探讨[J]. 地震地质, **36**(1): 28–38.
- Liang M J, Zhou R J, Yan L, Zhao G H, Guo H M. 2014b. The relationships between neotectonic activity of the middle segment of Dari fault and its geomorphological response, Qinghai Province, China[J]. *Seismology and Geology*, **36**(1): 28–38 (in Chinese).
- 刘静, 曾令森, 丁林, Tapponnier P, Gaudemer Y, 文力, 谢克家. 2009. 青藏高原东南缘构造地貌、活动构造和下地壳流动假说[J]. 地质科学, **44**(4): 1227–1255.
- Liu J, Zeng L S, Ding L, Tapponnier P, Gaudemer Y, Wen L, Xie K J. 2009. Tectonic geomorphology, active tectonics and lower crustal channel flow hypothesis of the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geology*, **44**(4): 1227–1255 (in Chinese).
- 刘静, 张金玉, 葛玉魁, 王伟, 曾令森, 李根, 林旭. 2018. 构造地貌学: 构造–气候–地表过程相互作用的交叉研究[J]. 科学通报, **63**(30): 3070–3088.
- Liu J, Zhang J Y, Ge Y K, Wang W, Zeng L S, Li G, Lin X. 2018. Tectonic geomorphology: An interdisciplinary study of the interaction among tectonic climatic and surface processes[J]. *Chinese Science Bulletin*, **63**(30): 3070–3088 (in Chinese).
- 四川省地质局. 1980. 中华人民共和国区域地质调查报告(遂宁幅、自贡幅、内江幅、宜宾幅、泸州幅)[M]. 成都: 四川省地质局: 153.
- Sichuan Geology Bureau. 1980. *Regional Geological Survey Report of People's Republic of China (Suining, Zigong, Neijiang, Yibin and Luzhou Geological Map Sheet)* [M]. Chengdu: Sichuan Geology Bureau: 153 (in Chinese).
- 四川省地震局. 2021. 四川泸县 6.0 级地震烈度图发布[EB/OL]. [2021-12-24]. http://www.scdzj.gov.cn/xwzx/fzjzyw/202109/t20210920_50114.html.
- Sichuan Earthquake Agency. 2021. Intensity map of the M_s 6.0 Sichuan Luxian earthquake on September 16, 2021[EB/OL]. [2021-12-24]. http://www.scdzj.gov.cn/xwzx/fzjzyw/202109/t20210920_50114.html (in Chinese).
- 苏琦. 2015. 青藏高原东北缘典型流域地貌参数分析与构造变形探讨[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所: 69–70.
- Su Q. 2015. *Study on Typical Drainage Basins Along Northeastern Tibetan Plateau and Its Tectonic Deformation*[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration: 69–70 (in Chinese).
- 王丹, 董有浦, 焦骞骞, 张东越, 段佳鑫, 余华玉. 2021. 滇中地块新生代晚期的变形机制: 基于构造地貌学分析[J/OL]. [2021-12-24]. 地球科学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211118.1549.004.html>.
- Wang D, Dong Y P, Jiao Q Q, Zhang D Y, Duan J X, Yu H Y. 2021. The mechanism of tectonic deformation of the central Yunnan terrane in the Late Cenozoic based on tectonic geomorphology[J/OL]. [2021-12-24]. *Earth Science*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211118.1549.004.html> (in Chinese).
- 易桂喜, 赵敏, 龙锋, 梁明剑, 王明明, 周荣军, 王思维. 2021. 2021 年 9 月 16 日四川泸县 M_s 6.0 地震序列特征及孕震构造环境[J]. 地球物理学报, **64**(12): 4449–4461.
- Yi G X, Zhao M, Long F, Liang M J, Wang M M, Zhou R J, Wang S W. 2021. Characteristics of the seismic sequence and seismogenic environment of the M_s 6.0 Sichuan Luxian earthquake on September 16, 2021[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(12): 4449–4461 (in Chinese).
- 于洋, 王先彦, 李一泉, 戴岩, 鹿化煜. 2018. 长江源地区通天河段水系格局演化与构造活动的关系[J]. 地理学报, **73**(7): 1338–1351.
- Yu Y, Wang X Y, Li Y Q, Dai Y, Lu H Y. 2018. The evolution of drainage pattern and its relation to tectonic movement in the upstream Yangtze catchment[J]. *Acta Geographica Sinica*, **73**(7): 1338–1351 (in Chinese).
- 张会平, 刘少峰. 2004. 利用 DEM 进行地形高程剖面分析的新方法[J]. 地学前缘, **11**(3): 226.
- Zhang H P, Liu S F. 2004. A new method for elevation profile analysis using DEM[J]. *Earth Science Frontiers*, **11**(3): 226 (in Chinese).
- 张会平, 杨农, 刘少峰, 张岳桥. 2006. 数字高程模型(DEM)在构造地貌研究中的应用新进展[J]. 地质通报, **25**(6): 660–669.
- Zhang H P, Yang N, Liu S F, Zhang Y Q. 2006. Recent progress in the DEM-based tectonogeomorphic study[J]. *Geological Bulletin of China*, **25**(6): 660–669 (in Chinese).

- 张世民, 谢富仁. 2001. 鲜水河—小江断裂带 7 级以上强震构造区的划分及其构造地貌特征[J]. *地震学报*, **23**(1): 36–44.
- Zhang S M, Xie F R. 2001. Seismo-tectonic divisions of strong earthquakes ($M \geq 7.0$) and their tectonic geomorphology along Xianshuihe-Xiaojiang fault zone[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **23**(1): 36–44 (in Chinese).
- 赵正望. 2005. 川东南地区构造特征及其对油气成藏的控制作用[D]. 北京: 中国地质大学: 33.
- Zhao Z W. 2005. *The Regional Tectonic Characteristic of Southeast Sichuan Basin and Its Control to Oil and Gas Reservoir*[D]. Beijing: China University of Geosciences: 33 (in Chinese).
- 周荣军, 唐荣昌, 钱洪, 文德华, 马声浩, 何玉林, 蒲晓虹. 1997. 地震构造类比法的应用: 以川东地区华蓥山断裂带为例[J]. *地震研究*, **20**(3): 316–322.
- Zhou R J, Tang R C, Qian H, Wen D H, Ma S H, He Y L, Pu X H. 1997. An application of seismotectonic analogy to the Huayingshan fault zone in east Sichuan[J]. *Journal of Seismological Research*, **20**(3): 316–322 (in Chinese).
- Chen Y C, Sung Q, Cheng K Y. 2003. Along-strike variations of morphotectonic features in the western foothills of Taiwan: Tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis[J]. *Geomorphology*, **56**(1/2): 109–137.
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. *Geology*, **28**(8): 703–706.
- Langbein W B. 1947. *Topographic Characteristics of Drainage Basins*[R/OL]. [2021–11–04]. <https://pubs.usgs.gov/wsp/0968c/report.pdf>.
- Liu-Zeng J, Tapponnier P, Gaudemer Y, Ding L. 2008. Quantifying landscape differences across the Tibetan Plateau: Implications for topographic relief evolution[J]. *J Geophys Res*, **113**(F4): F04018.
- Pike R J, Wilson S E. 1971. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis[J]. *GSA Bull*, **82**(4): 1079–1084.
- Whipple K X, Tucker G E. 1999. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **104**(B8): 17661–17674.
- Willett S D, Hovius N, Brandon M T, Fisher D M. 2006. *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution*[M/OL]. [2021–11–04]. https://www.researchgate.net/profile/Sean-Willett/publication/235431560_Tectonics_Climate_and_Landscape_Evolution/links/00b4951932ecc71355000000/Tectonics-Climate-and-Landscape-Evolution.pdf.