

文章编号: 1008-2786-(2020)4-542-10
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000532

涪江上游流域地貌特征及其对断裂活动性的响应

陈浩¹, 董廷旭¹, 李勇², 文星跃³

(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, 成都 610059; 3. 西华师范大学 国土资源学院, 四川 南充 637002)

摘 要: 对涪江上游流域地貌特征及其与断裂活动的相关性进行分析, 有助于深入理解青藏高原东缘晚新生代以来的地貌演化过程, 也可为该区域构造活动和河流发育历史研究提供参考依据。基于经空间叠加处理的海拔高程数据和地势起伏度数据, 在涪江上游流域划分出 15 种地貌形态组合, 在此基础上结合区域断裂活动状况, 从研究区地貌类型、海拔高程、地势起伏度、干流下切深度、河道水平扭错等方面探讨流域地貌特征对断裂活动性的响应, 结果表明: (1) 虎牙断裂和龙门山断裂带逆冲活动驱动区域性间隙抬升使中海拔地貌区成为涪江上游流域地貌类型的主体; (2) 虎牙断裂逆冲作用导致位于上盘的西侧块体具有更高的隆升幅度和海拔高程, 并加剧了外营力侵蚀, 形成了相对较高的地势起伏形态; 龙门山断裂带三条主干断裂的上盘叠瓦式向上推移, 使虎牙断裂东侧区域海拔高程和地势起伏度均自北向南逐级降低; (3) 涪江上游流域一系列逆断层的差异活动导致位于断裂上盘区域的河道下切深度、下切速率总体上大于下盘区域。涪江干流对流经区域地表的切割, 内、外营力的贡献比值大致为 1.95:1; (4) 横跨断裂的涪江河道因断裂平移走滑而沿断裂走向发生同步弯曲, 龙门山断裂带的区域性右旋作用使涪江干流及其支流的流向在龙门山地区发生系统性转变。

关键词: 地貌特征; 断裂活动性; 虎牙断裂; 龙门山断裂带; 涪江

中图分类号: P942

文献标志码: A

断裂活动方式和活动强度在一定程度上控制着流域地貌演化过程, 在断裂广泛发育的造山带内部, 流域系统对断裂作用的响应方式一直是构造地貌学和河流地貌学研究的热点。在断裂展布区域, 先存水系的均衡状态往往因响应断裂活动而改变, 河流流向、水系样式、流域盆地形态等地貌特征传递了断裂垂向逆冲和横向走滑的信息^[1-8]。Davis^[9]自 19 世纪末即提出构造活动是控制河流地貌演化的因素之一, Penck^[10]1923 年指出流域地貌的形成和演化需从动态的构造活动中去分析。20 世纪 50 年代以来, 随着板块构造学说的兴起, 众多学者开始将流域地貌的研究与构造活动结合起来, 研究表明, 断裂等活动构造对水系分支比、亚流域盆地对称性、冲积扇

错断状况、河谷剖面形态、河流阶地发育等具有控制作用^[11-15]。近年来, 地理信息技术的快速发展有效扩展了传统地貌分析的研究尺度, 为流域地貌的可视化、数字化和量化研究提供了技术手段。河流发育对断裂活动的敏感性使流域地貌形态成为记录断裂活动信息的理想载体, 地理信息技术的兴起为地形因子、地貌参数的提取(来源于遥感影像、数字高程模型等)及流域地貌与断裂活动耦合关系的研究提供了客观条件。

青藏高原东移物质对扬子地台的挤压塑造了岷山—龙门山地区复杂的构造地貌。在该区域, 活动断裂表现为逆冲兼左旋(岷山构造体系)及右旋(龙门山构造体系)走滑性质。如前所述, 河流地貌对

收稿日期(Received date): 2020-04-22; 改回日期(Accepted date): 2020-07-25

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41671220); 四川省科技厅科技计划项目(2019YJ0496)。[National Natural Science Foundation of China (41671220); Science and Technology Plan of Science and Technology Department of Sichuan Province (2019YJ0496)]

作者简介(Biography): 陈浩(1977-), 男, 四川三台人, 博士, 教授, 主要研究方向: 构造地貌与第四纪环境。[CHEN Hao (1977-) male, born in Santai, Sichuan province, Ph. D., professor, research on tectonic geomorphology and quaternary environment] E-mail: chen hao11611@163.com

断裂的活动性具有敏感响应,在龙门山—岷山向四川盆地过渡的地形梯度带,主要发育岷江流域和涪江流域两个流域系统,由于岷江是长江一级支流,前人对该区域地貌形态及其形成机制的探讨中,岷江流域特征及其成因的研究相对深入^[16-24],对于涪江流域地貌,前人主要致力于分析涪江上游各亚流域盆地的地表形态^[25],或对虎牙断裂这一单一断裂的地貌反馈作用进行探究^[26],缺少该流域地貌对断裂活动性响应方式的整体认识。由于流域系统传递了构造升降运动的信息,控制了水系下切速率和区域剥蚀速率,塑造了地势起伏结构和地貌高程形态,横跨断裂的水系累积位错量也可作为断裂活动速率的标定依据。因而,本次研究选取地貌类型、海拔高程、地势起伏度、干流下切深度、河道水平扭错等因素探讨流域地貌特征对断裂活动性的响应,从而为研究涪江上游流域构造活动特征和河流演变历史提供参考依据。

1 研究区概况

发源于岷山主峰雪宝顶的涪江是嘉陵江最长支流,江油市龙凤镇以北的涪江上游流域以亚热带季风气候为主,年降水量约为 800 ~ 1200 mm,流域内干、支流水系或由高山峻岭奔流而下,或沿丘间谷地缓缓流淌,河谷相对陡峻,江水迂回跌宕。出龙凤镇,涪江河道展宽,河床比降显著降低,表现出中游河段的形态特征,故以龙凤镇作为涪江上游与中游的分界点。从地貌角度总体看,岷江断裂和虎牙断裂所夹持的岷山隆起区展布于整个涪江上游流域西侧,隶属研究区的成都盆地西缘地带位于龙门山前山断裂(彭县—灌县断裂)东南侧,虎牙断裂东面地区处于龙门山断裂带三条主干断裂逆冲及右旋走滑作用控制之下(图 1)。

2 地貌形态类型提取

2.1 地貌形态分级体系

海拔高程和地势起伏度是研究地貌类型和描述地貌形态的两个最重要定量指标^[27];高程反映了不同海拔区域水热条件分布的垂直差异;起伏度揭示了地表切割强度和单位面积内相对高差^[28]。根据中国地貌划分指标^[27,29],利用 DEM (Digital

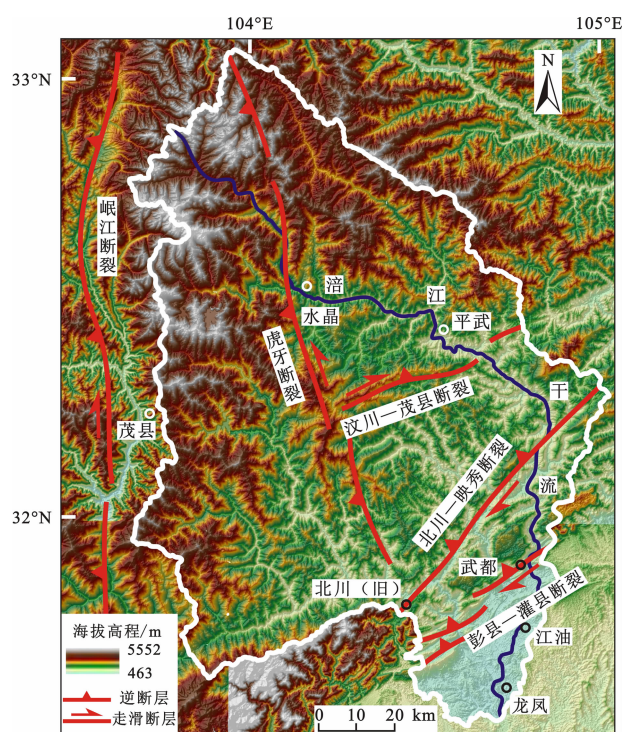


图 1 涪江上游流域区域构造

Fig. 1 Regional tectonics of the upper reaches of the Fujiang river, China

Elevation Model) 数据,对海拔高程(分别以 1000、3500、5000 m 为等级界线,共 4 级)和地势起伏度(分别以 30、50、200、500、1000 m 为等级界线,共 6 级)进行分级,将上述因子不同等级组合状况作为一类地貌形态,从而建立涪江上游流域地貌分级体系。

2.2 地貌形态类型划分

基于分辨率为 30 m 的 DEM 数据,将所提取的地势起伏度和海拔高程进行融合并作空间叠加分析,在涪江上游流域划分出 15 种海拔高程与地势起伏度所组合的地貌形态(表 1,图 2)。在不同海拔高程地貌中,中海拔地形面积达到 9197.12 km²,占研究区域总面积的 77.97%,由表 1 可知,在中海拔地形上,分布有相对高差 30 m 以下的平原~相对高差 1000 m 以上的大起伏山地等所有地势起伏度类型,其中,小起伏中山面积达到 5662.32 km²,中海拔丘陵面积亦为 3459.51 km²,上述两种地貌类型的面积之和达到整个涪江上游流域总面积的 77.34%。从地势起伏度角度分析,在研究区,小起伏山地面积为 6694.46 km²,占研究区域总面积的 56.76%,从表 1 可以看出,小起伏山地展布于低海拔、中海拔、高海拔、极高海拔等各级海拔高程之上,

表 1 涪江上游流域各地貌类型面积

Tab. 1 Area of geomorphologic types in the upper reaches of Fujiang river

地貌类型	面积/km ²				合计
	低海拔 (< 1000 m)	中海拔 (1000 ~ 3500 m)	高海拔 (3500 ~ 5000 m)	极高海拔 (> 5000 m)	
平原 (0 ~ 30 m)	391.70	15.82			407.52
台地 (30 ~ 50 m)	170.74	18.00			188.74
丘陵 (50 ~ 200 m)	657.10	3459.51	334.07		4450.68
小起伏山地 (200 ~ 500 m)	213.03	5662.32	815.98	3.13	6694.46
中起伏山地 (500 ~ 1000 m)		40.78	11.81		52.59
大起伏山地 (1000 ~ 2500 m)		0.69	0.38		1.07
合计	1432.57	9197.12	1162.24	3.13	11795.06

小起伏中山是整个涪江上游流域面积最大的地貌类型。

3 活动断裂的地貌形态响应

3.1 地貌形态成因

参照图 1 和图 2 可以看出,在涪江上游流域,高海拔地貌区(小起伏高山、高海拔丘陵等)主要位于岷江断裂和虎牙断裂所夹持的岷山断块区域,其高海拔地貌主要为岷山断块沿虎牙断裂逆冲滑动所致;低海拔地貌区(低海拔平原、低海拔台地等)集中分布于龙门山断裂带前山断裂(彭县—灌县断裂)东南侧,该地区为龙门山断裂带逆冲作用推挤扬子地台形成的压陷盆地(前陆盆地),另外,在龙门山地区河谷地带,亦有低海拔丘陵和小起伏低山沿河展布;中海拔地貌区是涪江上游流域的主体,虎牙断裂(逆断层)和龙门山断裂带(叠瓦状断层)逆冲活动导致其上盘区域依次向上推移,上盘推移过程驱动区域性间歇抬升,从而使海拔高程 1000 ~ 3500 m 的中海拔地貌成为涪江上游流域主要地貌类型。

3.2 海拔高程与地势起伏度

在涪江上游流域,虎牙断裂东西两侧及龙门山断裂带三条主干断裂展布区域海拔高程和地势起伏度均存在较大差异(图 2)。为了对上述地貌形态变化特征作进一步量化研究,横跨虎牙断裂和龙门山断裂带分别作地形剖面线 A—A'和 B—B',由图 3、图 4 可以直观看,在研究区内,以虎牙断裂为界,其西侧海拔高程均值和地势起伏度均值均大于东侧;在龙门山断裂带分布其中的虎牙断裂东侧地区,

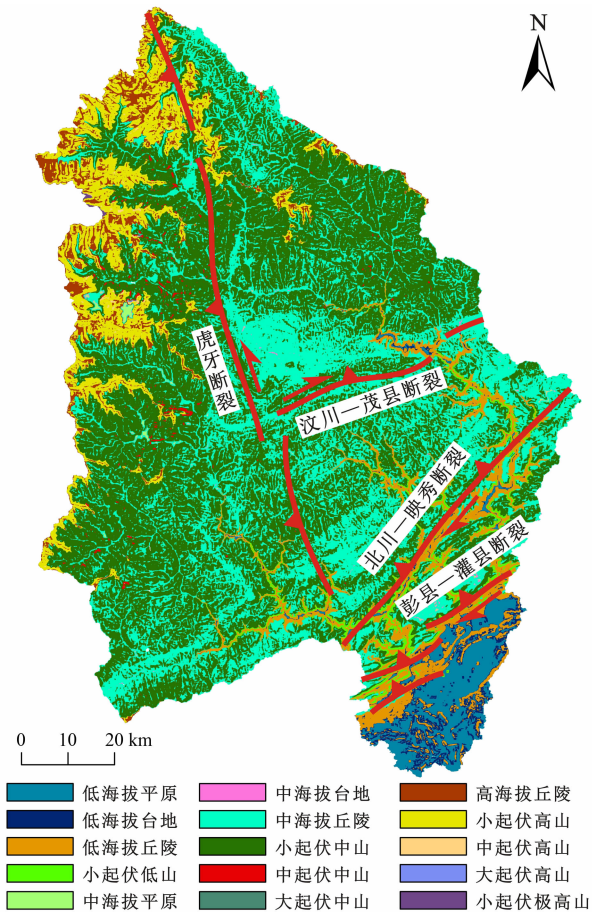


图 2 涪江上游流域地貌形态类型
Fig. 2 Geomorphology classification of the upper reaches of the Fujiang river

分别以汶川—茂县断裂、北川—映秀断裂、彭县—灌县断裂为界,海拔高程均值和地势起伏度均值亦自北向南逐级降低。究其原因,主要是倾向近正西的虎牙断裂(逆断层)几乎贯穿整个涪江上游流域全境,从而将研究区分为东、西两个块体,作为断层上

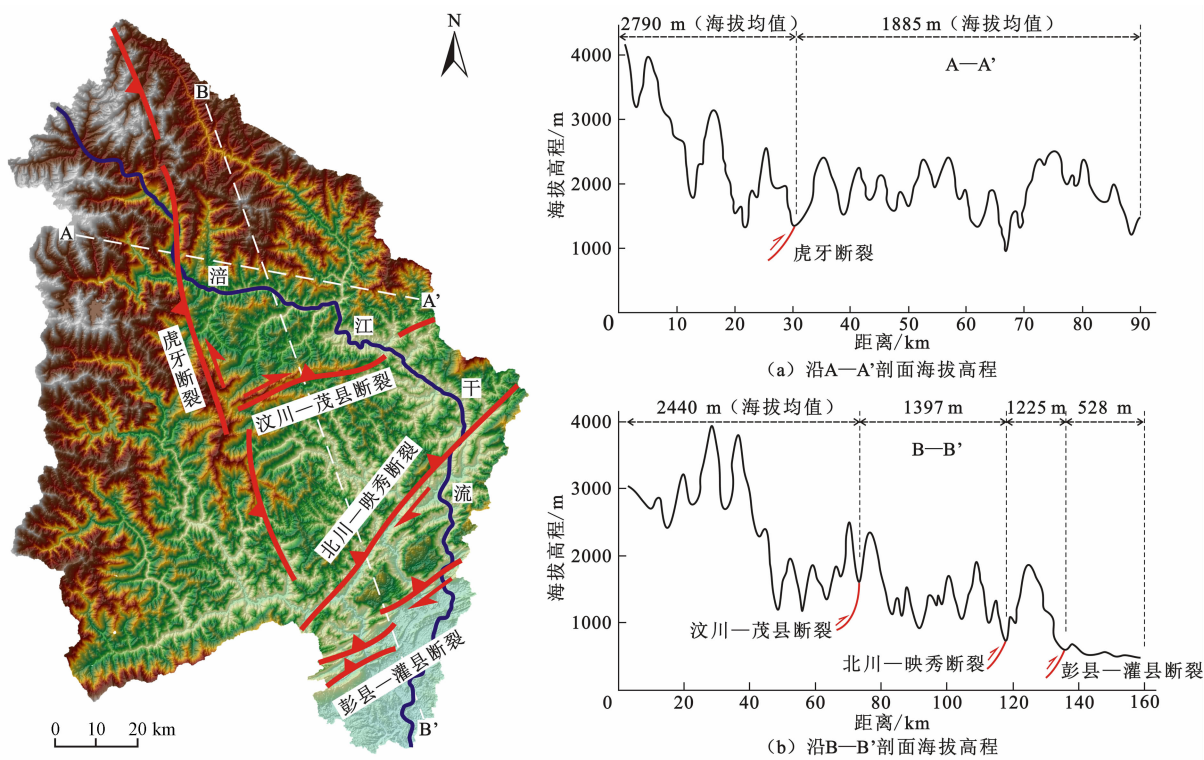


图3 涪江上游流域海拔高程剖面

Fig. 3 Topographical section of the upper reaches of the Fujiang river

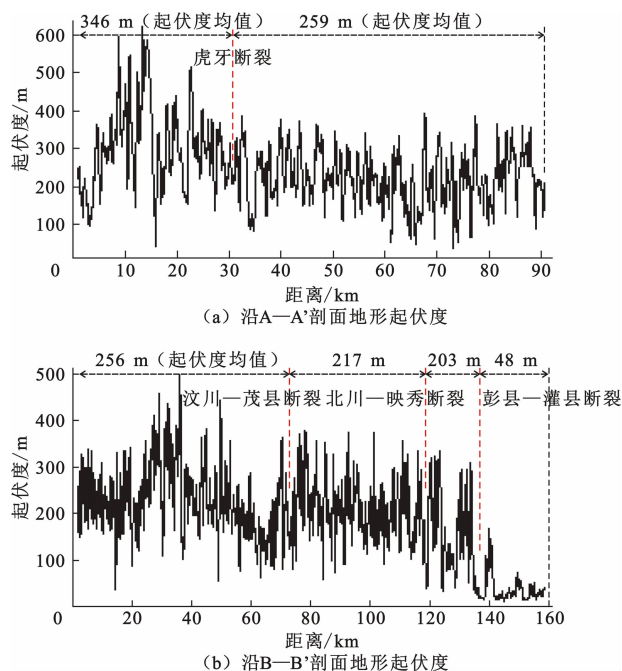


图4 涪江上游流域地势起伏度剖面

Fig. 4 Relief amplitude section of the upper reaches of the Fujiang river

盘的西侧块体沿断层面逆冲活动,导致了更高的隆升幅度和海拔高程;同时,地壳抬升加剧了外营力的

侵蚀作用,从而形成了相对较高的地势起伏形态。同理,位于虎牙断裂东侧的龙门山断裂带为三条产状大致相同的断裂组成的叠瓦状断层,断裂倾向均为北西向,从剖面上看,三条断裂呈盖瓦式叠覆,被各断裂分割的块体自南向北沿断裂面依次抬升,如前所述,断块相对抬升导致更大的隆升幅度和更强烈的外营力侵蚀,从而使虎牙断裂东侧区域海拔高程和地势起伏度均自北向南依次降低。

3.3 干流河道下切

沿涪江干流延伸方向,提取一条宽度为 10 km 的条带区域(距干流中心线两侧各 5 km),并把这一条带区域划分为 100 个段落,统计每一个段落中最高海拔点高程和涪江河床最低海拔点高程。其中,最高海拔高程值指示被河流下蚀后残留的最高山顶面高程值,其与每一段落内河床最低海拔高程值之差指示该段落河道的下切深度(图 5 中的灰色区域)。

3.3.1 下切深度对比

在涪江上游流域,以虎牙断裂、龙门山断裂带三条主干断裂为界,涪江干流河道分别流经岷山构造带(“河源”至“虎牙断裂”)、摩天岭地块(“虎牙断

裂”至“汶川—茂县断裂”)、龙门山构造带(“汶川—茂县断裂”至“彭县—灌县断裂”,“北川—映秀断裂”将该区域进一步分隔为“前龙门山构造带”和“后龙门山构造带”)、川西前陆拗陷带(“彭县—灌县断裂”以远区域)等构造单元。在不同构造单元,流域地貌特征及河流下切深度差异显著。从图 5 可以看出,河源至虎牙断裂区域是一个陡峻坡度带,沿干流河道大致 50 km 距离内山顶面海拔高程的差值达到 1700 m 以上,河道坡降指数(单位距离内的河道高程差)亦高达 3.20;虎牙断裂至汶川—茂县断裂河段位于摩天岭山地南缘,与涪江岷山河段相比,其山顶面海拔高程降速减缓,河道坡降指数也下降为 0.62;汶川—茂县断裂和彭县—灌县断裂所夹持的龙门山地区山顶面最高点高度相对一致,海拔高程约 1500~2300 m,经计算,流经龙门山的涪江河段坡降指数为 0.31;涪江干流切过彭县—灌县断裂之后,进入前陆拗陷带中的盆缘低丘平坝区,山顶面高程值显著下降(500~700 m),其对应的河道坡降指数仅为 0.18。残留山顶面高程与河床面高程之差记录了河道的下切深度,各断裂所夹持区域的河道切割深度差异显著(图 5、表 2),但其总体变化特征与区域海拔高程、地势起伏度变化特征一致。涪江上游流域虎牙断裂驱动的逆冲作用使位于断裂上盘的干流河道下切深度高于下盘区域,在虎牙断裂下盘地区,龙门山断裂带三条主干断裂叠瓦式逆冲活动使涪江干流切割深度在该区域自北向南逐级降低。总体来看,在涪江上游流域,各断裂差异活动驱动的隆升作用和外营力切割作用使海拔高程越高、地势起伏度越大的区域,相应河段下蚀愈深。

3.3.2 下切速率对比

根据涪江上游干流河道切割深度和初始下切时间,可分别计算研究区不同地貌单元的河流下切速

率。贾营营^[2]等通过对涪江山前冲积扇中砾石层胶结程度和沉积特征的分析,推断涪江形成于上新世末期或早更新世初期,根据砾岩沉积年龄测定结果,将涪江上游河道形成年代厘定为 3 Ma。以此为基础,计算出活动断裂所夹持各地貌区涪江干流河道的下切速率,从表 2 可以看出,不同地貌单元河流切割速率与该地貌单元表面隆升幅度呈正相关关系,虎牙断裂、龙门山断裂带逆冲活动导致位于断层上盘块体的干流河道下切速率总体高于下盘块体河道,沿涪江干流,其河道下切速率自河源向出山口方向逐级降低。文力^[30]、梁欧博^[26]等利用穿过青藏高原东缘地区河流的输沙量数据,估算出涪江上游流域的侵蚀速率(图 6),其研究结果与根据涪江河道下切深度所推定涪江上游各河段下切速率基本一致。

3.3.3 下切过程的控制因素

地表隆升、气候变化、侵蚀基准面下降等因素导致河流下切侵蚀。其中,引起地表(河床纵剖面位置)相对抬高的断裂活动、岩石褶皱变形属内营力作用范畴,驱动气候变化、侵蚀基准面下降的大气圈

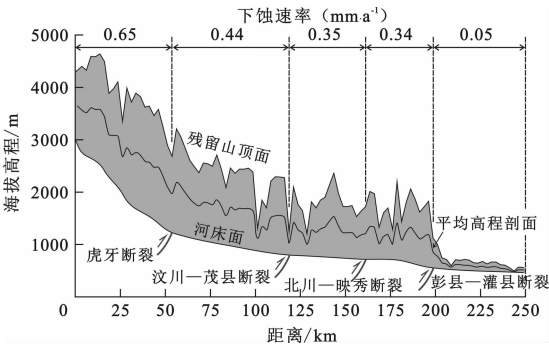


图 5 涪江上游流域数字高程剖面
Fig. 5 Profiles of digital elevation model in the upper reaches of the Fujiang river

表 2 外营力对涪江下切过程的约束系数
Tab. 2 Restrain coefficients of external agency in the process of erosion

河道流经区域	河道下切深度/m	河道下切速率/(mm·a ⁻¹)	地表隆升速率/(mm·a ⁻¹)	约束系数
“河源”至“虎牙断裂”	1959	0.65	0.40	1.63
“虎牙断裂”至“汶川—茂县断裂”	1320	0.44	0.30	1.47
“汶川—茂县断裂”至“北川—映秀断裂”	1036	0.35	0.24	1.46
“北川—映秀断裂”至“彭县—灌县断裂”	1015	0.34	0.24	1.42
“彭县—灌县断裂”至“盆缘低丘平坝区”	163	0.05	0.03	1.67

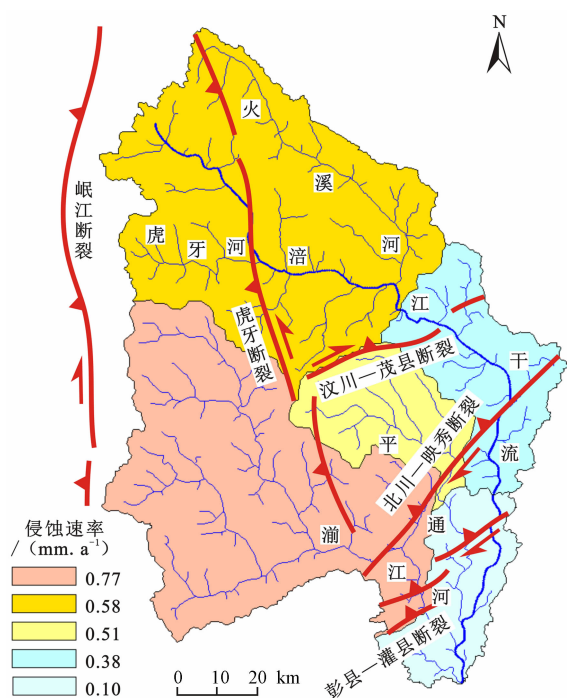


图6 涪江上游流域侵蚀速率

(侵蚀速率数据来源于文力^[30]、梁欧博^[26])

Fig.6 Erosion rates in the upper reaches of the Fujiang river

(Data source: WEN Li^[30], LIANG Oubo^[26])

层活动属外营力作用范畴。涪江上游流域整体位于秦岭以南的亚热带季风气候区;加之作为局部侵蚀基准面的长江江面升降对整个涪江上游流域的下蚀过程具有同步控制作用。因而,涪江水系发育对于气候变化和侵蚀基准面下降的响应基本是一致的,可据此建立研究区河流下切速率与表面隆升速率之间的定量关系式:

$$V_e = V_u \times C \quad (1)$$

其中, V_e 、 V_u 分别表示涪江干流河道流经不同构造单元的下切速率、各构造单元的表面隆升速率; C 表示气候变化、侵蚀基准面下降等外营力因素对河道下切过程的约束系数。

参考前人^[31-34]对青藏高原东缘不同构造地貌区表面隆升速率的反演结果,结合涪江上游干流河道下切速率值,计算出 C 值(外营力约束系数)介于 1.42 ~ 1.67 之间(表2)。计算结果表明,涪江虽流经不同构造地貌单元,但由于整个流域具有共同的局部侵蚀基准面并处于同一气候区,气候条件及侵蚀基准面变化对研究区河流下蚀作用的影响具有一致性,因而,上述外营力对涪江下切过程的约束系数数值较为接近。根据“各构造单元地表隆

升速率均值”在“流经其上的干流河道下切速率均值”中所占比重,并结合外营力约束系数分析可知,涪江上游河道对流域地表的切割,内、外营力的贡献比值大致为 1.95:1(即驱动河道下切过程的因素中,66%为地表抬升所贡献,34%为外营力作用所贡献)。

3.4 河道水平扭错

穿过断裂的河流通常因断裂走滑作用而沿断裂平移方向转向,河道在断裂处的弯曲距离标识了自河流形成以来断层水平错动幅度。由图1、图6可以看出,涪江干流河道穿过虎牙断裂、北川—映秀断裂、彭县—灌县断裂时均发生了较为明显的同步弯曲,水系所记录的位移量分别为 4365、3786、3541 m(图7),根据涪江干流沿断裂横移方向的位移距离和涪江上游河道形成年龄,计算出上述三条活动断裂的走滑速率分别为 1.46、1.26、1.18 mm·a⁻¹。因在涪江干流流经区域汶川—茂县断裂被局部错列,故而干流河道未沿该断裂发生水平扭错,参考李勇^[35]等在高坎附近对山脊错断变形现象的研究,可知汶川—茂县断裂右旋走滑速率为 1.30 mm·a⁻¹。上述分析表明,龙门山各主干断裂右旋走滑作用有自北西向南东减弱的趋势,结合笔者^[24]对岷江上游河流阶地错断变形特征的研究结果可以看出,龙门山三条主干断裂逆冲作用亦自北西向南东逐级减缓。

另外,由图1、图6可知,沿西北—东南方向发育的涪江干流河道的流向在龙门山地区发生了明显偏转,干流流经汶川—茂县断裂东南侧之后,转变为近正南流向。涪江右岸平通河、湍江等支流水系的发育方向在这一区域也发生了同步偏移。究其原因,主要是龙门山三条主干断裂具右旋走滑性质,断裂活动使该地区物质长期处于右旋剪切力作用控制之下,从而导致涪江河道的流向相对于原流向发生了系统性右向偏转。

4 结论

基于 SRTM 30 m 精度数字高程模型,将海拔高程数据与地势起伏度数据融合并进行空间叠加分析,在涪江上游流域划分出 15 种地貌形态组合。在此基础上结合断裂活动特征,从地貌类型、海拔高程、地势起伏度、河道下切深度、河道水平扭错等方

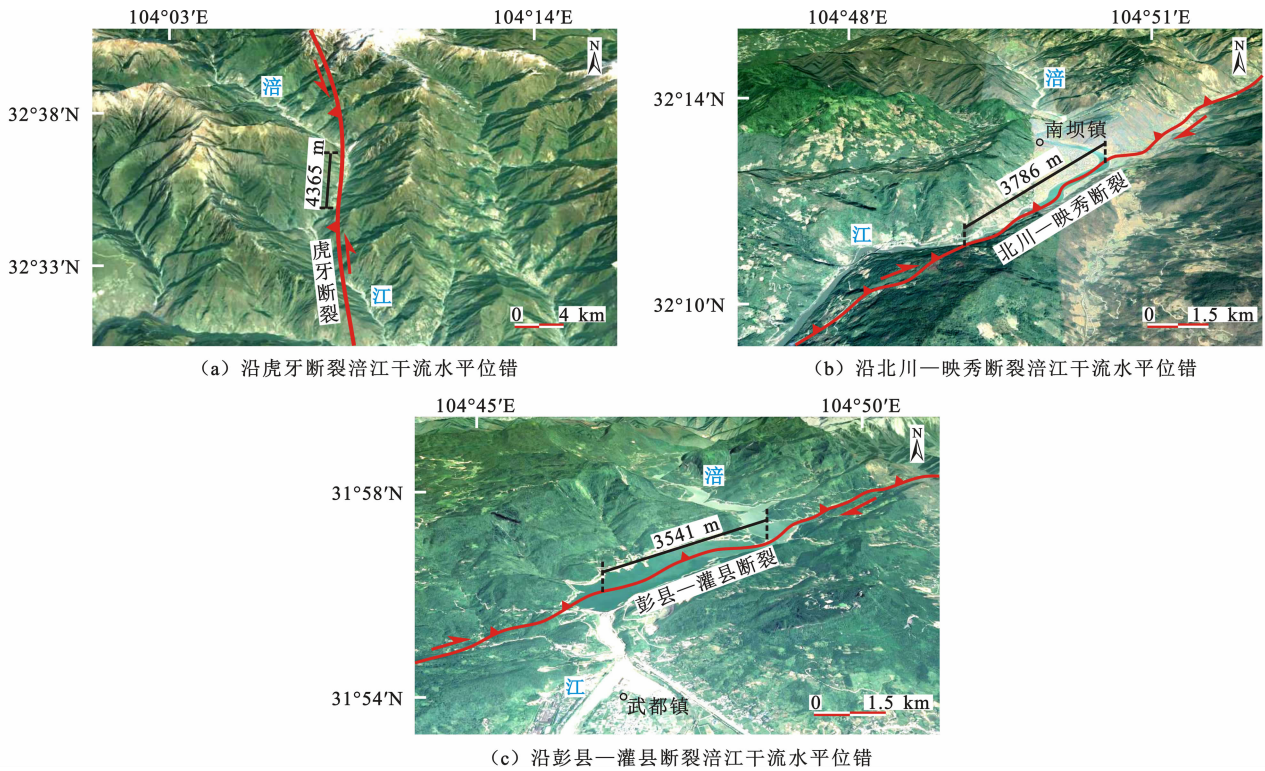


图 7 沿活动断裂涪江干流位移距离

Fig. 7 Displacement distance of the Fujiang river along fault strike

面开展了涪江上游流域地貌形态与断裂活动性关系的研究,探讨了断裂差异活动所导致的流域地貌形态差异,得到如下结论:

(1) 虎牙断裂和龙门山断裂带逆冲活动驱动区域性间歇抬升使中海拔地貌区成为涪江上游流域的主体,其中,小起伏中山、中海拔丘陵两类中海拔地貌类型面积之和达到涪江上游流域总面积的 77.34%。此外,在研究区,高海拔地貌类型(小起伏高山、高海拔丘陵等)主要分布于岷江断裂和虎牙断裂所夹持的沿虎牙断裂逆冲滑动的上盘区域;龙门山断裂带驱动的逆冲作用推挤扬子地台形成压陷盆地,低海拔地貌区(低海拔平原、低海拔台地、低海拔丘陵等)集中分布于彭县—灌县断裂东南侧这一压陷区域。

(2) 几乎贯穿整个涪江上游流域全境、倾向近正西的虎牙断裂(逆断层)将研究区分为东、西两个块体,作为断层上盘的西侧块体逆冲活动导致了更高的隆升幅度和海拔高程,并加剧了外营力的侵蚀,形成了相对较高的地势起伏形态;虎牙断裂东侧,龙门山断裂带三条主干断裂的上盘依次叠瓦状向上推移,使该区域海拔高程和地势起伏度均自北向南逐

级降低。

(3) 龙门山断裂带和虎牙断裂的差异活动使位于断层上盘区域的河道下切深度、下切速率总体上大于下盘区域。基于研究区表面隆升速率,建立局部侵蚀基准面和气候变化对河流下切控制作用的约束系数(1.42 ~ 1.67),结果表明,涪江上游干流河道对流经区域地表的切割,内、外营力的贡献比值大致为 1.95:1。

(4) 根据涪江干流河道横切虎牙断裂和龙门山断裂带时的水平位错量计算可知,龙门山三条主干断裂右旋走滑速率自北西南东降低,其逆冲速率亦具这一变化趋势。同时,在区域性右旋作用控制下,涪江干流及其支流的流向在龙门山地区发生了整体性向右偏转。

(5) 总体来看,在逆冲兼走滑断裂带展布区,断裂逆冲作用使断层上盘块体隆升幅度和海拔高程高于下盘块体,地表隆升驱动更强烈的外营力切割,通常导致流经上盘区域的河段下蚀更深,地势起伏度更大。同时,断裂走滑作用使切过断裂的河道沿断裂滑动方向同步弯曲,河道弯曲距离标识了自河道形成以来断裂的累积走滑距离。

参考文献 (References)

- [1] 谢小平, 白毛伟, 陈芝聪, 等. 龙门山北东段山前断裂第四纪构造活动性与构造地貌特征[J]. 第四纪研究, 2018, **38**(1): 247 – 260. [XIE Xiaoping, BAI Maowei, CHEN Zhicong, et al. Quaternary tectonic activity and tectono-geomorphic in the northeastern Longmen mountains foreland faults zone [J]. Quaternary Sciences, 2018, **38**(1): 247 – 260]
- [2] 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 Yingying, FU Bihong, WANG Yan, et al. Late cenozoic tectono-geomorphic growth and drainage response in the Longmenshan fault zone, east margin of Tibet [J]. Quaternary Sciences, 2010, **30**(4): 825 – 836]
- [3] WANG Xianyan, VANDENBERGHE J, LU Huayu, et al. Climatic and tectonic controls on the fluvial morphology of the northeastern Tibetan plateau (China) [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, **27**: 1325 – 1340.
- [4] ZHANG Huiping, ZHANG Peizhen, KIRBY E, et al. Along-strike topographic variation of the Longmen shan and its significance for landscape evolution along the eastern Tibetan plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, **40**: 855 – 864.
- [5] RAMSEY L A, WALKER R T, JACKSON J. Fold evolution and drainage development in the Zagros mountains of Fars province, SE Iran [J]. Basin Research, 2008, **20**: 23 – 48.
- [6] KIRBY E, WHIPPLE K X. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis [J]. Geology, 2001, **29**: 415 – 418.
- [7] 闫亮, 李勇, 赵国华, 等. 青藏高原东缘龙门山构造带晚第四纪构造隆升作用的河流地貌响应[J]. 第四纪研究, 2018, **38**(1): 232 – 246. [YAN Liang, LI Yong, ZHAO Gouhua, et al. The uplift process and the geomorphological features of the rivers system in the Longmenshan since late Quaternary [J]. Quaternary Sciences, 2018, **38**(1): 232 – 246]
- [8] 常直杨, 王建, 白世彪, 等. 基于 DEM 的岷江上游流域构造活动强度分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, **16**(6): 568 – 574. [CHANG Zhiyang, WANG Jian, BAI Shibiao, et al. Quantitative analysis of the tectonic activity in Minjiang drainage basin based on DEM [J]. Journal of Geo-information Science, 2014, **16**(6): 568 – 574]
- [9] DAVIS W M. The geographical cycle [J]. The Geographical Journal, 1899, **14**: 481 – 501.
- [10] PENCK W. Morphological analysis of landforms [M]. London: Macmillan Press, 1953: 1 – 18.
- [11] SUMMERFIELD M A. Geomorphology and global tectonics [M]. London: John Wiley and Sons Company Limited Press, 2000: 1 – 20.
- [12] BURBANK D W, ANDERSON R S. Tectonic geomorphology [M]. Massachusetts: Blackwell Science, 2001: 1 – 11.
- [13] 赵洪壮, 李有利, 杨景春. 北天山流域河长坡降指标与 Hack 剖面的新构造意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, **46**(2): 237 – 244. [ZHAO Hongzhuang, LI Youli, YANG Jingchun. Implication of active structure along the northern Tianshan by stream length-gradient index and Hack profile [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, **46**(2): 237 – 244]
- [14] 闵石头, 王随继. 滇西纵向岭谷区河谷形态特征、发育规律及成因[J]. 山地学报, 2007, **25**(5): 524 – 533. [MIN Shitou, WANG Suji. Valley morphological characteristics, development law and their cause in the longitudinal rang-gorge region [J]. Mountain Research, 2007, **25**(5): 524 – 533]
- [15] 王岩, 刘少峰, 高明星, 等. 洮河水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 地学前缘, 2010, **17**(4): 43 – 49. [WANG Yan, LIU Shaofeng, GAO Mingxing, et al. Geomorphology of the Taohu river drainage system and its structural implications [J]. Earth Science Frontiers, 2010, **17**(4): 43 – 49]
- [16] 高玄戎, 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. [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]
- [17] 何玉林, 胡先明. 岷江—沱江水系及新构造应力场[J]. 四川地震, 1992(3): 30 – 34. [HE Yulin, HU Xianming. Drainage system of Minjiang and Tojiang rivers and neotectonic stress field [J]. Earthquake Research in Sichuan, 1992(3): 30 – 34]
- [18] 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. [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]
- [19] 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. [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]
- [20] 杨农, 张岳桥, 孟辉, 等. 川西高原岷江上游河流阶地初步研究[J]. 地质力学学报, 2003, **9**(4): 363 – 370. [YANG Nong, ZHANG Yueqiao, MENG Hui, et al. Study of the Minjiang river terraces in the western Sichuan plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2003, **9**(4): 363 – 370]
- [21] 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. [ZHANG Huiping, YANG Nong, ZHANG Yueqiao, et al. Geomorphology of the Minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications [J]. Quaternary Sciences, 2006, **26**(1): 126 – 135]
- [22] 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. [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 (Science & Technology Edition), 2005, **32**(4): 331–339]
- [23] 陈浩, 李勇. 岷江上游水系对龙门山断裂带右旋走滑作用的响应[J]. 山地学报, 2013, **31**(2): 211–217. [CHEN Hao, LI Yong. Water system responding to the dextral strike-slipping of the Longmenshan fault zone in the upper Min river basin [J]. Mountain Research, 2013, **31**(2): 211–217]
- [24] 陈浩, 李勇. 岷江上游河流阶地对龙门山断裂带逆冲作用的响应[J]. 山地学报, 2014, **32**(5): 535–540. [CHEN Hao, LI Yong. River terrace responding to the obduction of the Longmenshan fault zone in the upper Min river basin [J]. Mountain Research, 2014, **32**(5): 535–540]
- [25] 陈浩, 杜华明, 董廷旭, 等. 涪江上游流域盆地地貌特征及构造指示意义[J]. 第四纪研究, 2020, **40**(1): 148–156. [CHEN Hao, DU Huaming, DONG Tingxu, et al. Geomorphologic characteristics of the upper reaches of Fujiang drainage basin and its structural implications [J]. Quaternary Sciences, 2020, **40**(1): 148–156]
- [26] 梁欧博, 任俊杰, 吕延武. 涪江流域河流地貌特征对虎牙断裂带活动性的响应[J]. 地震地质, 2018, **40**(1): 42–56. [LIANG Oubo, REN Junjie, LU Yanwu. The response of fluvial geomorphologic characteristics of the Fujiang drainage basin to activity of the Huya fault zone [J]. Seismology and Geology, 2018, **40**(1): 42–56]
- [27] 莫申国. 基于 DEM 的秦岭数字地貌格局研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2008, (2): 8–14. [MO Shenguo. Study on digital landform patterns based on DEM in Qinling Mts [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2008, (2): 8–14]
- [28] 曹伟超, 陶和平, 孔博, 等. 基于 DEM 数据分割的西南地区地貌形态自动识别研究[J]. 中国水土保持, 2011, **32**(3): 38–41. [CAO Weichao, TAO Heping, KONG Bo, et al. Automatic recognition of landform in southwest China based on DEM data segmentation [J]. Soil and Water Conservation in China, 2011, **32**(3): 38–41]
- [29] 中国科学院地理研究所. 中国 1:100 万地貌图制图规范[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [Institute of Geography in Chinese Academy of Sciences. Standards for 1:1 million geomorphologic map in China [M]. Beijing: Science Press, 1987]
- [30] 文力, 刘静, M. Oskin, 等. 活动构造对高原边界侵蚀速率空间分布的控制作用—以龙门山地区为例[J]. 第四纪研究, 2012, **32**(5): 968–985. [WEN Li, LIU Jing, M. Oskin, et al. Pattern of modern denudation in the Longmenshan, eastern Tibetan plateau: tectonic controls on focused erosion along the plateau margin [J]. Quaternary Sciences, 2012, **32**(5): 968–985]
- [31] 谭锡斌. 龙门山推覆构造带新生代热演化历史研究及其对青藏高原东缘隆升机制的约束[J]. 国际地震动态, 2013, **43**(10): 44–46. [TAN Xibin. Study on Cenozoic thermal evolution history of Longmenshan nappe tectonic belt and its restriction on uplift mechanism of eastern margin of Qinghai-Tibet plateau [J]. Recent Developments in World Seismology, 2013, **43**(10): 44–46]
- [32] 邓宾, 刘树根, 李智武, 等. 青藏高原东缘及四川盆地晚中生代以来隆升作用对比研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, **35**(4): 477–486. [DENG Bin, LIU Shugen, LI Zhiwu, et al. A comparative study of the late Mesozoic uplifting in the eastern margin of Qinghai-Tibet plateau and Sichuan basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2008, **35**(4): 477–486]
- [33] 嵇少丞. 龙门山断裂带与强震[EB/OL]. (2013–04–28) [2020–03–16]. <http://wenku.baidu.com>. [JI Shaocheng. Longmenshan fault zone and massive earthquake [EB/OL]. (2013–04–28) [2020–03–16]. <http://wenku.baidu.com>]
- [34] 李勇, DENSMORE A L, 周荣军, 等. 青藏高原东缘数字高程剖面及其对晚新生代河流下切深度和下切速率的约束[J]. 第四纪研究, 2006, **26**(2): 236–243. [LI Yong, DENSMORE A L, ZHOU Rongjun, et al. Profiles of digital elevation models (DEM) crossing the eastern margin of the Tibetan plateau and their constraints on dissection depths and incision rates of late cenozoic rivers [J]. Quaternary Sciences, 2006, **26**(2): 236–243]
- [35] 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: 44–48. [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: 44–48]

Geomorphological Characteristics and Its Response to Fault Activity in the Upper Reaches of the Fujiang Drainge Basin, China

CHEN Hao¹, DONG Tingxu¹, LI Yong², WEN Xingyue³

(1. College of Resources and environmental engineering, Mian Yang Teachers' College, Mianyang 621000, Sichuan, China;

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

3. College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan, China)

Abstract: Analysis of geomorphic characteristics and its correlation with fault activity is helpful to understand the geomorphic evolution process of the eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau since late Cenozoic in the upper reaches of the Fujiang river. It can also provide reference material for tectonic activity and river evolution history in this area. In this study, the upper reaches of the Fujiang river basin were divided into 15 geomorphic types based on elevation data and relief data, geomorphological characteristics and its response to fault activity were discussed combined with regional fracture activity from the aspects of geomorphologic type, elevation, relief amplitude, incision depth, river channel horizontal dislocation and so on. The results showed that thrust activity of the Huya fault and the Longmenshan fault zone drived regional uplift for a long time, so that middle-elevation landform area became the main landform type in the upper reaches of the Fujiang river. As a result of the thrusting effect of Huya fault, higher uplift amplitude and elevation were generated on the western block of hanging wall, the exogenous erosion was aggravated, and relatively higher topographic relief was formed. The imbricated thrusting of the hanging wall of the Longmenshan fault zone led to the decrease of elevation and relief from north to south in the region. As a result of differential activities of thrust faults, the depth and rate of river incision in the hanging wall were generally greater than that in the footwall. The effect proportion of endogenous forces and exogenous forces to erosion process was about 1.95:1. Due to the translational strike-slip of the fault, the Fujiang river course was curved synchronously along the faults. The regional dextral action of the Longmenshan fault zone made the flow direction of the main stream of the Fujiang river and its tributaries change systematically in the Longmenshan area.

Key words: geomorphological characteristics; fault activity; Huya fault; Longmenshan fault zone; Fujiang