

引用格式:王翠芳,杨向阳,熊璨,肖明,黄昊源.构造-地貌耦合视角下川东分水岭迁移动力学机制——以磨刀溪-龙河流域为例[J].山地学报, 2025, 43(1): 13-27.

WANG Cuifang, YANG Xiangyang, XIONG Can, HUANG Haoyuan. Dynamics of watershed migration in Eastern Sichuan from a tectonic-geomorphic coupling perspective: A case study of the Modaoxi-Longhe River Basin, China [J]. Mountain Research, 2025, 43(1): 13-27.

构造-地貌耦合视角下川东分水岭迁移动力学机制 ——以磨刀溪-龙河流域为例

王翠芳¹, 杨向阳^{1*}, 熊璨², 肖明², 黄昊源³

(1. 重庆交通大学 海学院, 重庆 400074; 2. 重庆市地质灾害防治工程勘察设计院, 重庆 400700;

3. 云阳县林业局 云阳县地质公园管理事务中心, 重庆 404500)

摘要: 青藏高原的阶段性隆升及其向东扩展产生的远程构造效应,在川东地区重构独特的河流地貌形态,但区域构造活动特征、河流演化特征及其动力学机制仍不明确。本文以川东地区磨刀溪-龙河流域为研究单元,基于 12.5 m 分辨率的 DEM 数据,利用 ArcGIS 平台,提取研究区内 34 条子流域的地貌参数指标,定量分析研究区河流地貌演化特征,进而探讨区域构造活动程度。结果表明:(1)面积-高程积分值(HI)龙河流域(HI均值为 0.504)大于磨刀溪流域(HI均值为 0.441),揭示区域南北处于差异演化阶段,南侧地貌发育正处于壮年期,以快速侵蚀为主;(2) χ 值南北空间分异($\Delta\chi=5.43\sim12.66$),指示区域受差异构造活动影响,北侧磨刀溪流域受构造抬升作用影响更强(较龙河流域快 $0.037\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$);(3)河流纵剖面分析表明,川东地区地貌演化处于瞬时状态,自新近纪末期(3.0 Ma~3.4 Ma)以来,隆升幅度 1200~1400 m,平均隆升速率为 $(0.43\pm0.03)\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$;(4)建立“构造脉冲-河流响应”动力学模型,证实高原扩展前锋通过应力波传播驱动川东地区幕式隆升(3 期次),导致河流裂点群阶梯状迁移。全新世(0.73 Ma)以来的下切为 400~500 m,平均隆升速率为 $(0.62\pm0.07)\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,川东地区对青藏高原东向隆升扩展响应进一步加强。本研究可以为揭示青藏高原远程隆升扩展机制、厘清构造活动与地貌演化耦合关系提供参考依据。

关键词: 川东褶皱带; 齐岳山背斜; 分水岭迁移; 地貌参数; 青藏高原隆升

中图分类号: P641

文献标志码: A

区域构造活动通过其动力学过程主控河流地貌系统的演化方向与强度,河流地貌的发育特征实时记录地壳隆升与剥蚀作用过程^[1-2]。相对于其他地质证据的滞后性,河流系统的形态参数与演化轨迹能够高分辨率反演区域构造历史,使其成为构造地貌学领域的研究热点^[3-4]。

在构造活跃区,水系发育受到构造活动的干扰,其流向异常、流域形态畸变及侵蚀基准面下降等特征,均蕴含着丰富的区域构造活动信息^[5-7]。河流地貌学早期的研究主要聚焦于河流流动、水系分布、河流演化与地理环境之间的关系。到了 20 世纪初期,自 Davis^[8]提出侵蚀循环理论奠定地貌定量研究

收稿日期(Received date): 2024-11-13; 改回日期(Accepted date): 2025-02-10

基金项目(Foundation item): 川渝共建古生物与古环境协同演化重庆市重点实验室开放课题(CYPL2022KF001); 国家自然科学基金青年基金(42102279); 重庆市规划和自然资源局科技项目(20C00346)。[Open Project of the Chongqing Key Laboratory for Collaborative Evolution of Paleobiology and Paleoenvironment, co-built by Sichuan and Chongqing (CYPL2022KF001); Youth Program of National Natural Science Foundation of China (42102279); Science and Technology Project of Chongqing Municipal Planning and Natural Resources Bureau (20C00346)]

作者简介(Biography): 王翠芳(1999-),女,硕士研究生,四川达州人,主要研究方向:构造地貌与第四纪环境。[WANG Cuifang (1999-), female, born in Dazhou, Sichuan Province, M. Sc. candidate, research on tectonic geomorphology and quaternary environment] E-mail: wangcfqjtu@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 杨向阳(1988-),男,博士,副教授,主要研究方向:构造地质学。[YANG Xiangyang (1988-), male, Ph. D., associate professor, specialized in structural geology] E-mail: yangxy@cqjtu.edu.cn

齐岳山断裂是重要的构造界限,其西侧发育典型的川东“隔挡式”褶皱构造^[24-26],而东侧发育“隔槽式”褶皱构造^[18, 27-29]。

齐岳山背斜位于湘鄂西“隔槽式”褶皱构造西缘前端,受齐岳山基底断裂控制^[20-21, 30-32]。该背斜总体呈 NNE—SSW 走向,核部主要出露三叠系地层,两翼主要分布侏罗系地层,东翼局部可见寒武系地层(图 2a)。齐岳山背斜西侧的隔挡式褶皱主要出露侏罗系、三叠系地层,而东侧的隔槽式褶皱带背斜核部出露南华系-奥陶系地层,向斜核部主要出露二叠系、三叠系地层(图 2b)。

齐岳山断裂是控制齐岳山背斜形成与演化的主干断裂^[32-35](图 1),呈“S”型展布。北段走向 NE,受大巴山推覆及神农架—黄陵隆起的联合影响,褶皱逐渐收敛,在巫山附近走向转为近 NW 向,并最终消失于神农架隆起附近。中段为高陡冲断构造,断层呈 SE 向凸起的弧形展布;南段则发育近 SN 向构造,断层冲出地表。该断裂早期受晚侏罗纪末期古太平洋板块西向俯冲作用影响,发生 NW—SE 向陆内挤压变形^[36]。晚白垩世,川东地区受雪峰山构造带持续 NW 向挤压作用,导致区域快速隆升,齐岳山断裂表现出左行走滑性质^[33-34]。新生代以来,青藏

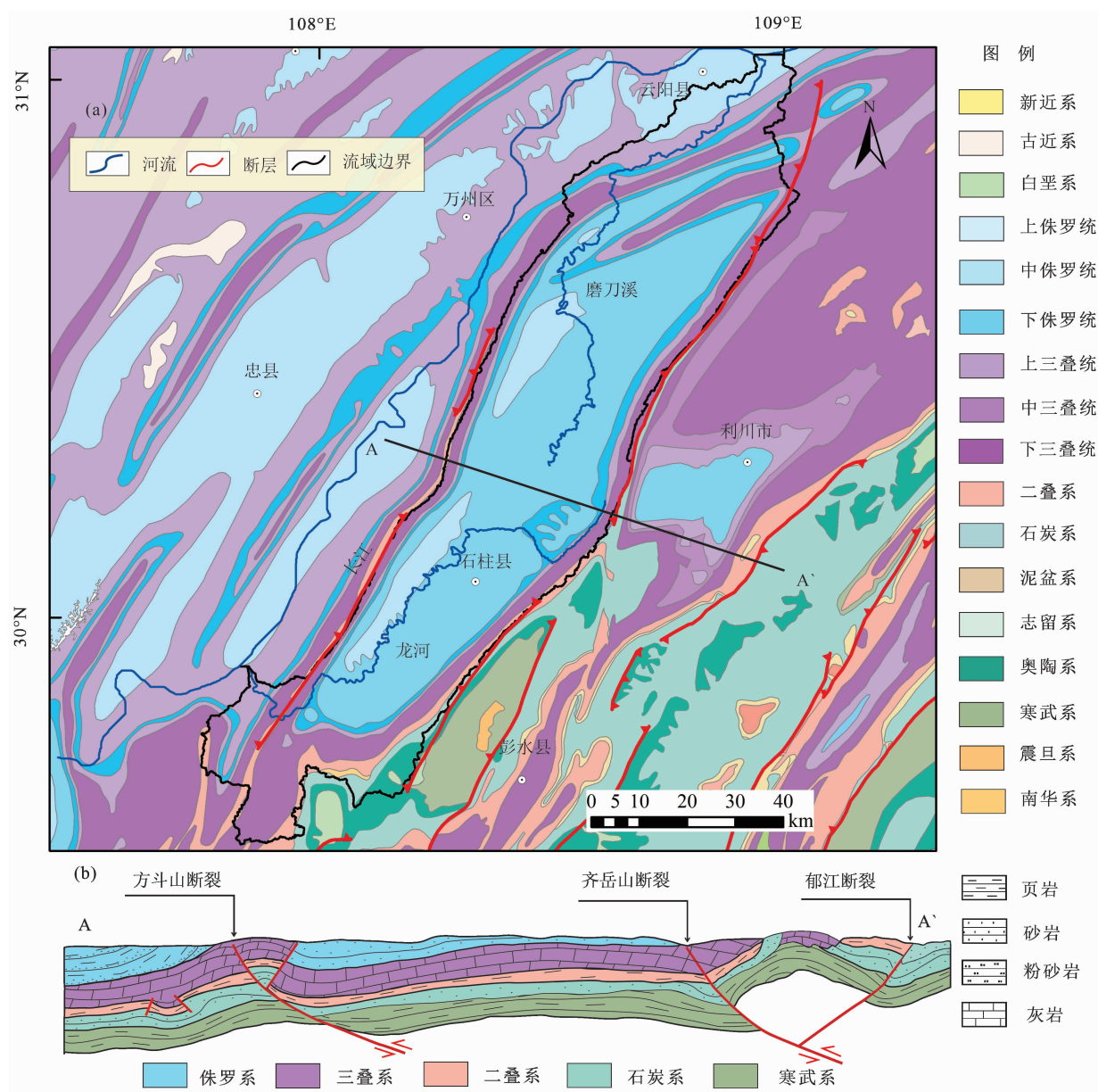


图 2 区域地质简图:(a)齐岳山背斜地质图;(b)A-A'简化横截面图

Fig. 2 Regional geological map: (a) Qiyueshan Anticline geological map; (b) simplified cross-sectional diagram A-A'

高原隆升扩展,远程 NE 向挤压应力作用使得齐岳山断裂转为右行走滑性质^[37-38]。

1.2 案例流域

磨刀溪和龙河位于齐岳山背斜西翼(图 3),是长江右岸的一级支流。磨刀溪全长 170 km,流域面积 3167 km²,发源于石柱县武陵山北麓,流经重庆万州、湖北利川,于重庆云阳县汇入长江右岸,流域地势东南高、西北低。磨刀溪以齐岳山为分水岭与清江相隔,西南以武陵山与龙河相邻,西以方斗山为界与长江相隔。龙河全长约 164 km,流域面积 2810 km²,发源于石柱县齐岳山西北麓,流经武隆县,于丰都县汇入长江上游右岸。流域地势东北高、西南低,南接乌江,西北与长江干流相邻(图 3)。

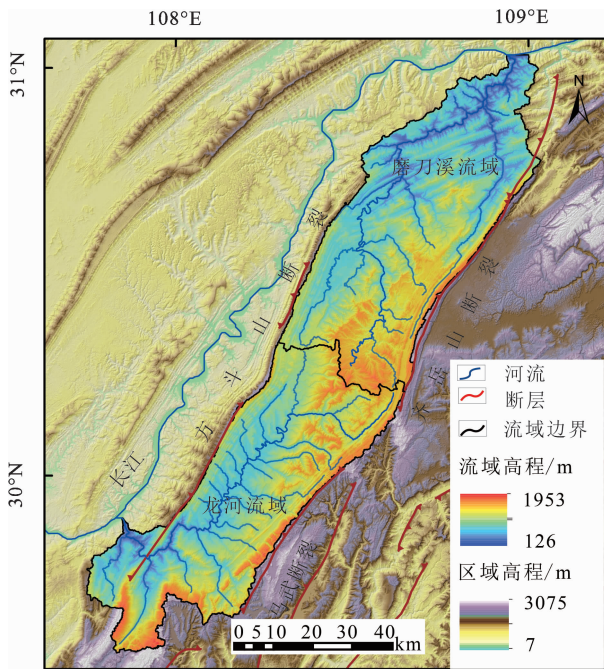


图3 研究区高程图

Fig. 3 Elevation map of the study area

两流域以武陵山为分水岭,广泛出露三叠系地层、局部见侏罗系地层,主要岩性为砂岩、粉砂岩、页岩夹砂岩(图 2b)。区域属亚热带湿润季风气候,年降雨量为 1100 ~ 1400 mm,降雨集中于夏季,季节性变化显著。

2 研究方法

本文基于分辨率为 12.5 m 的 DEM 和 ArcGIS,对基础地貌参数进行定量分析。在 ArcGIS10.8 中

共提取 34 个次级流域,其中龙河流域 19 个、磨刀溪流域 15 个(图 4)。主要分析 χ 值、面积-高程曲线积分(HI)、流域不对称度(AF)及河流纵剖面特征四个地貌参数。

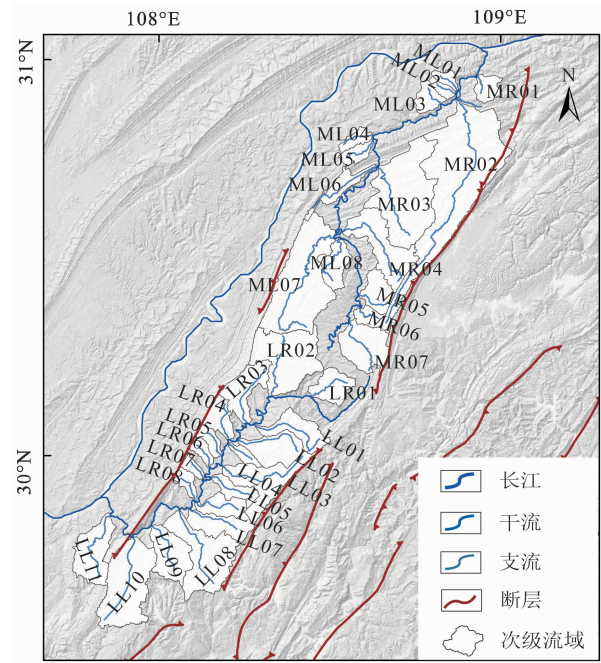


图4 次级流域划分图

Fig. 4 Sub-basin division map

(1) χ 值

Perron^[39]等基于水力侵蚀模型提出,河道高程可由积分式得到,为消除流域面积量纲的影响,引入参考流域面积 $A_0 = 1 \text{ m}^2$ ^[40],河道高程可表示为:

$$Z(x) = Z(b) + \left(\frac{E}{K}\right)^{\frac{1}{n}} A_0^{-\frac{m}{n}} \int_{x_b}^x \left(\frac{A_0}{A(x)}\right)^{\frac{m}{n}} dx \quad (1)$$

上式可简化为:

$$Z(x) = Z(b) + k_{sn} A_0^{-\frac{m}{n}} \chi \quad (2)$$

式中, $Z(b)$ 为河道某点 b 的高程; E 为侵蚀速率; K 为侵蚀系数; m 、 n 分别为流域面积和坡度得指数; m/n 可表示河道的凹度系数; k_{sn} 为标准陡峭指数,受侵蚀速率、侵蚀系数控制; χ 为上游流域面积沿河水平积分距离^[41-42]。

在稳定状态的流域及分水岭,忽略岩性差异及气候等因素的影响,相同基准面高程的点,其 χ 值相同^[43]。上述公式反映出 k_{sn} 与 χ 值呈负相关,即 k_{sn} 越小,其 χ 值越大,分水岭将向 χ 值更高的一侧迁移,直到地貌系统达到新的稳态平衡^[43-44](图 5)。

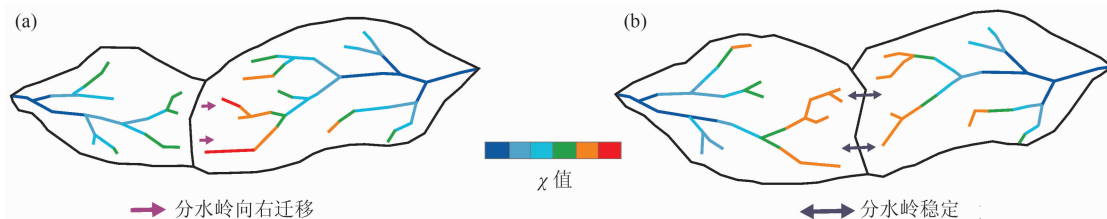


图5 分水岭迁移与 χ 值分布:(a)分水岭不对称演化状态;(b)分水岭稳定状态

Fig. 5 Watershed migration and χ value distribution;

(a) asymmetric evolutionary state of the watershed; (b) stable state of the watershed

(2) 面积-高程曲线积分 (HI)

基于 Davis 地貌旋回理论^[8], Strahler^[45] 提出了面积-高程曲线积分法 (Hypsometric integral, HI), 将 Davis 的定性描述转化为定量表达。以高程比为纵轴, 流域面积比为横轴, 绘制面积-高程曲线 (HC 曲线), 其围成的面积即积分值 (HI 值), HC 曲线不同形态反映了流域内未被侵蚀的体积与总体积的比值, 即地貌残存体积, 是衡量流域侵蚀程度的重要指标 (图 6)。

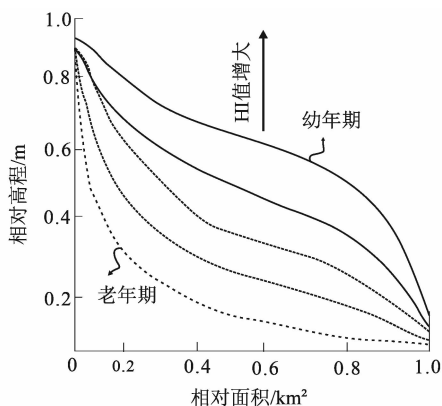


图6 面积-高程积分示意图

Fig. 6 Hypsometric integral diagram

1971 年, Pike 和 Wilson^[46] 提出了用起伏比法简化 HI 值的计算:

$$HI = \frac{H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \quad (3)$$

其中, H_{mean} 、 H_{max} 、 H_{min} 分别为流域内平均、最大、最小高程。

根据 HI 值的范围, 可将流域演化阶段划分为: 幼年期 (HI 值 > 0.6), 流域内侵蚀程度低, 此时 HC 曲线呈上凸形, 反映受近期构造活动影响显著; 壮年期 ($0.35 < \text{HI 值} < 0.6$), 此时 HC 曲线呈 S 形, 流域处于侵蚀与抬升相平衡的状态; 老年期 (HI 值 $<$

0.35), 此时流域内被侵蚀程度高, HC 曲线呈下凹形, 构造活动趋于稳定。

(3) 流域不对称度 (AF)

流域不对称度 (Asymmetry factor, AF) 是评估流域构造掀斜程度的指标, 定义为流域干流右岸面积占流域总面积的百分比, 计算如下:

$$AF = \left(\frac{A_r}{A_t} \right) \times 100 \quad (4)$$

式中, A_r 为顺着干流流向右侧的面积; A_t 为流域总面积。

通过将 AF 值与 50 进行比较, 可揭示流域的不对称掀斜特征: 若 AF 值与 50 大小相当, 说明此流域中在垂直于干流方向的不对称掀斜程度小; 若 AF 值 > 50 或 < 50 , 则指示区域内存在显著的不对称掀斜作用, 可能受差异化构造活动或侵蚀能力的影响 (图 7)。

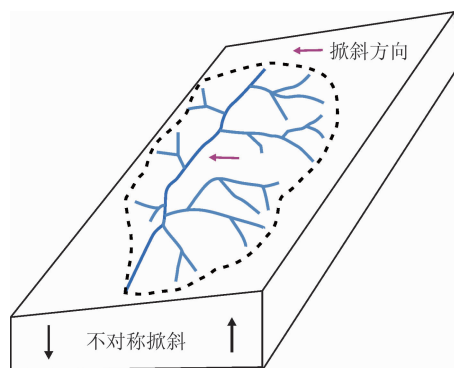


图7 流域不对称掀斜示意图

Fig. 7 Schematic diagram of basin asymmetric tilting

3 河流地貌发育特征

本文通过计算 34 条次级支流的 HI 值和 AF 值, 并结合 χ 值和河流纵剖面分析, 揭示了区域地貌特征和构造活动差异性。计算结果详见表 1。

表 1 磨刀溪-龙河流域主要地貌参数表

Tab. 1 Main geomorphological parameters of the Modaoxi-Longhe River Basin, China

编号	面积/km ²	河流长度/km	HI 值	AF 值	编号	面积/km ²	河流长度/km	HI 值	AF 值
MR01	46.86	6.59	0.48	84.92	LL03	26.17	8.97	0.56	44.73
MR02	669.66	85.73	0.44	47.20	LL04	173.38	31.59	0.51	35.11
MR03	385.71	26.99	0.49	73.51	LL05	54.29	15.53	0.49	52.11
MR04	196.19	33.49	0.56	64.30	LL06	66.83	15.94	0.51	48.54
MR05	78.47	11.60	0.58	79.01	LL07	104.16	16.66	0.50	36.38
MR06	37.73	9.46	0.51	39.83	LL08	243.91	27.15	0.52	54.83
MR07	151.88	20.59	0.47	56.28	LL09	132.98	17.55	0.55	57.79
ML01	24.73	7.22	0.58	42.36	LL10	280.88	29.08	0.57	59.23
ML02	22.73	7.03	0.54	68.70	LL11	148.16	26.92	0.40	40.22
ML03	48.71	7.65	0.54	73.23	LR01	84.67	14.96	0.41	49.91
ML04	32.38	10.58	0.46	79.25	LR02	261.66	24.52	0.42	33.87
ML05	37.89	11.75	0.43	47.40	LR03	120.51	20.93	0.38	72.06
ML06	63.41	24.85	0.37	44.34	LR04	65.16	13.89	0.36	65.42
ML07	412.11	57.15	0.34	45.79	LR05	34.10	9.48	0.37	64.03
ML08	80.43	20.49	0.32	57.35	LR06	29.23	9.42	0.39	44.78
LL01	105.89	29.42	0.68	57.26	LR07	22.20	7.20	0.40	67.19
LL02	120.89	22.98	0.59	22.13	LR08	32.24	9.53	0.38	37.82

3.1 χ 值分布特征

在研究分水岭的动态演化时,重点选取分水岭两侧接近河源的上游河段,以排除岩性、降雨等外部因素的干扰。 χ 值空间分布图显示,磨刀溪、龙河流域间分水岭两侧呈明显的 χ 值异常,分水岭以北的

χ 值明显大于南侧(图 8)。在分水岭两端,磨刀溪 χ 值为 23.44 ~ 36.09,而龙河 χ 值为 13.55 ~ 23.43,这一结果表明,分水岭处于不稳定状态,可能正向北迁移。低 χ 值(绿色、蓝色)主要分布于河流下游及主干流附近,表明这些区域侵蚀活跃,或受强烈水动力作用影响。高 χ 值(红色、橙色)主要集中在流域上游及分水岭区域,表明这些区域可能受到构造抬升影响,水系仍处于调整过程中。此外,磨刀溪流域与其东侧清江流域之间的分水岭也存在 χ 值异常,但本次研究暂未深入探讨。

3.2 HI 值分布特征

研究区 HI 值为 0.317 ~ 0.679。其中,龙河左岸 HI 值为 0.40 ~ 0.68,磨刀溪流域右岸为 0.44 ~ 0.58,龙河右岸为 0.36 ~ 0.42,磨刀溪左岸为 0.32 ~ 0.58(表 1)。空间分布显示,龙河左岸和磨刀溪右岸支流的 HI 值普遍偏高(图 9),研究区 HI 值在东西方向上呈现明显的规律,东高西低,且龙河流域整体 HI 值高于磨刀溪流域。流域次级河道的 HC 曲线显示,龙河和磨刀溪流域均以“S”形曲线形态为主,但龙河流域曲线形态更为上凸,而磨刀溪流域则兼具“S”和“下凹”形的曲线形态(图 10)。

3.3 AF 值分布特征

基于前人研究^[47],流域不对称度以 $|AF - 50|$

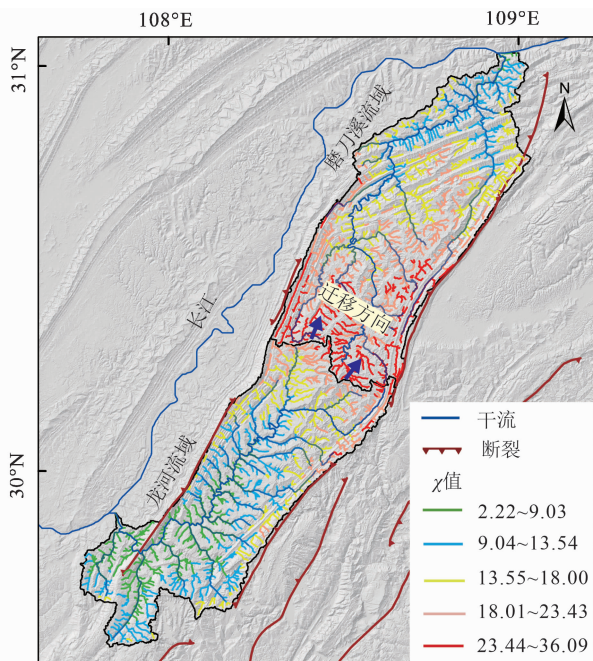


图 8 χ 值空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution map of χ values

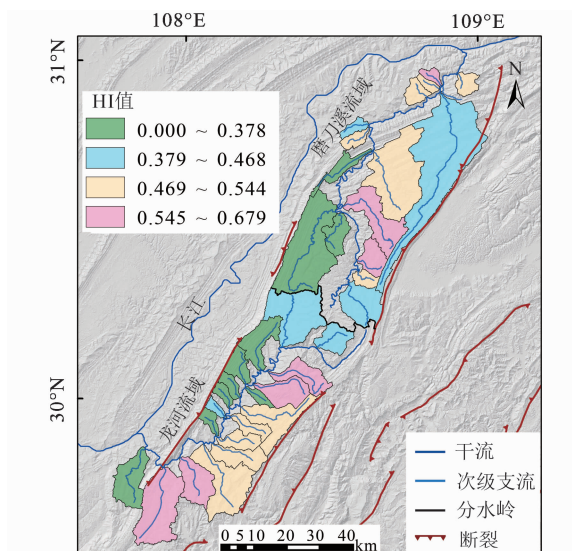


图9 HI值空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution map of HI values

为划分依据,可分为3个等级:极不对称, $|AF - 50| \geq 15$, 反映强烈的地层掀斜作用; 不对称, $7 \leq |AF - 50| < 15$, 指示中等掀斜程度; 对称, $|AF - 50| < 7$, 表明掀斜作用弱。

研究区 $|AF - 50|$ 为 0.93 ~ 34.92, 龙河流域整体高于磨刀溪流域。龙河流域次级支流的 $|AF - 50|$ 由流域河口位置向河源位置逐渐增大, 在近分水岭处达到峰值; 磨刀溪流域则在河口处出现最大值 (34.92)。不对称掀斜方向显示, 研究区内以 EW 和 EN—WS 向掀斜为主, 且干流东侧不对称度普遍高于西侧, 龙河流域不对称度显著大于磨刀溪流域 (图 11)。

3.4 河流纵剖面特征

河床纵剖面分析显示, 研究区干流存在明显的裂点分布, 两条干流河道上分别发育两期裂点 (图 12)。结合地质简图, 裂点分布与岩性变化无显著

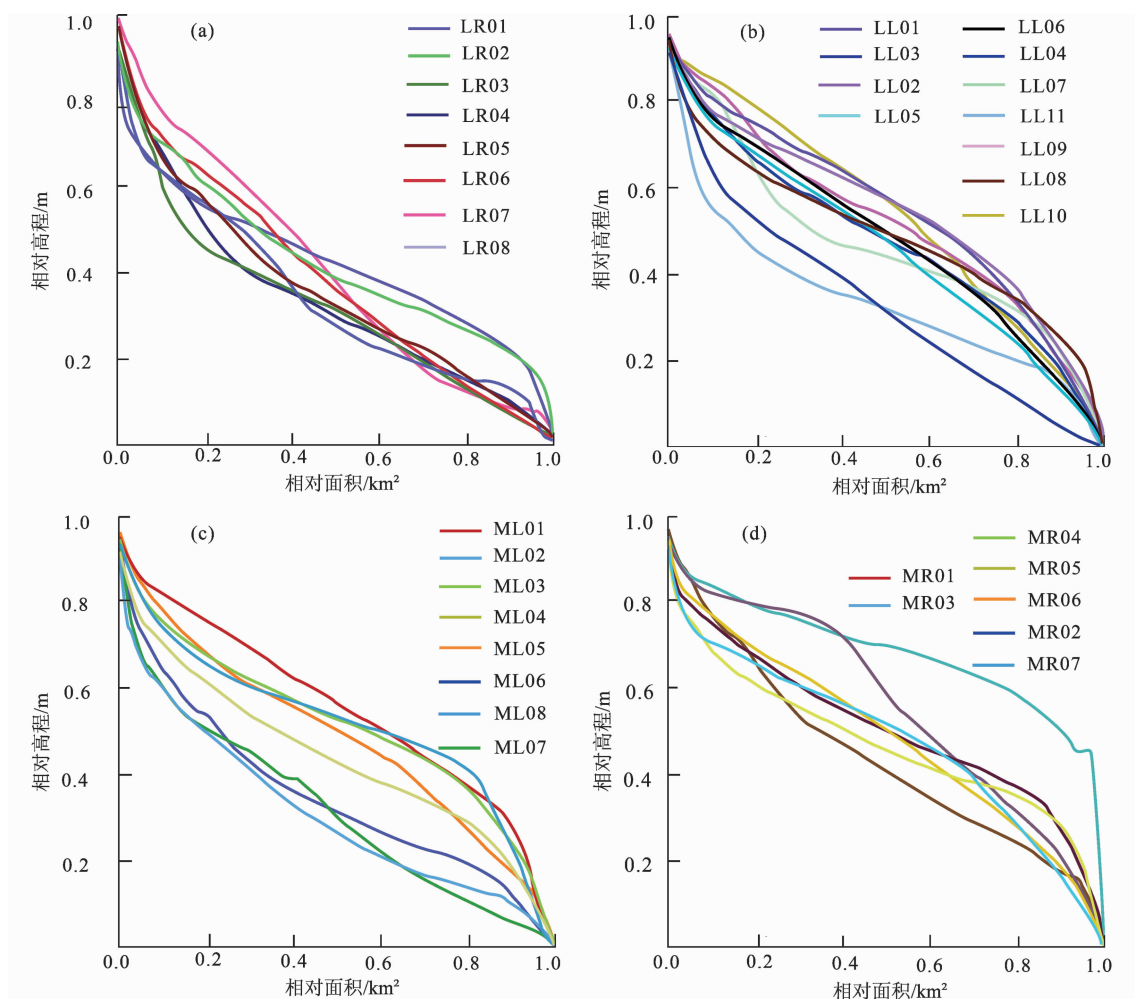


图10 次级流域积分曲线图:(a)龙河右岸;(b)龙河左岸;(c)磨刀溪左岸;(d)磨刀溪右岸

Fig. 10 Hypsometric curve of sub-basins: (a) the right bank of the Longhe; (b) the left bank of the Longhe; (c) the left bank of the Modaoxi; (d) the right bank of the Modaoxi

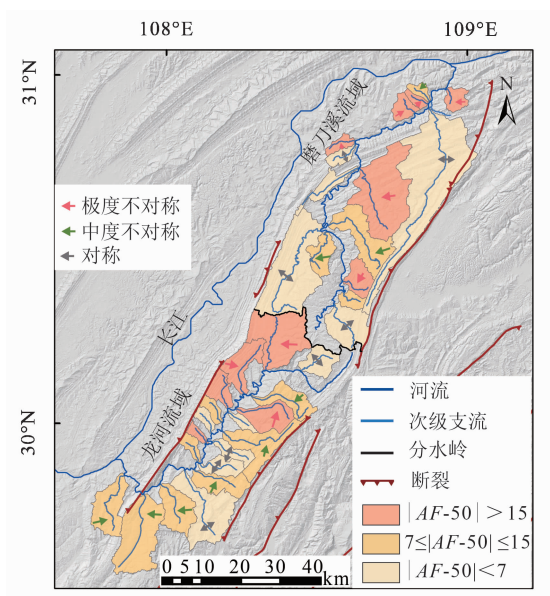


图 11 AF 值空间分布图

Fig. 11 Spatial distribution map of AF values

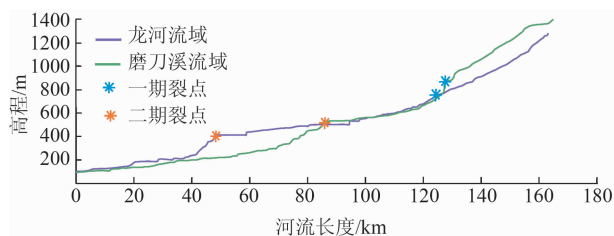


图 12 干流裂点分布图

Fig. 12 Distribution of knicpoint in the mainstream

相关性,表明岩性对裂点分布的影响可忽略。裂点将河道划分为两段:裂点上游为残存地貌,裂点以下则是自裂点启动后的调整地貌,两段具有不同的侵蚀率。河流纵剖面最新一期裂点显示磨刀溪一侧裂

点迁移距离更远,高程更高。河源高程为 1200 ~ 1400 m,根据支流纵剖面重建显示,最新一期明显裂点下切深度为 400 ~ 500 m。

4 讨论

为检验流域面积对各地貌参数计算值的影响,分析了 34 个小流域盆地的面积与 HI、AF 的相关性。结构显示,HI 值与流域面积的相关系数为 0.0522、AF 值与流域面积的相关系数为 0.0415,均呈弱相关性(图 13)。这表明流域面积并非导致各地貌参数值差异的主要原因。

4.1 地貌演化与构造活动耦合关系

(1) HI 值揭示了流域地貌演化差异特征。龙河流域的 HI 值为 0.36 ~ 0.68,磨刀溪流域为 0.32 ~ 0.58(表 1)。龙河流域的 HC 曲线形态更为上凸(图 10),表明其地貌残存量较多,地貌演化多处于青、幼年期;而磨刀溪流域地形较老,地貌演化趋于老、青年期,指示现阶段龙河流域构造活动更活跃。东西方向上,东侧子流域 HI 值明显高于西侧,主要是因为东侧受到齐岳山断裂右行走滑活动的影响,断裂下盘构造异常活跃导致东西向地貌差异演化。

(2) AF 值揭示了区域构造活动差异特征。龙河流域和磨刀溪流域的 AF 值分布显示,龙河流域一、二、三级不对称度的占比分别是 26.3%、42.1%、31.6%,磨刀溪流域为 40.0%、26.7%、33.3%。一、二级 AF 值指示较强的流域不对称特征,图 11 显示龙河多数子流域处于不对称演化状态。空间分布上,磨刀溪的不对称子流域多集中在河口处,而龙河

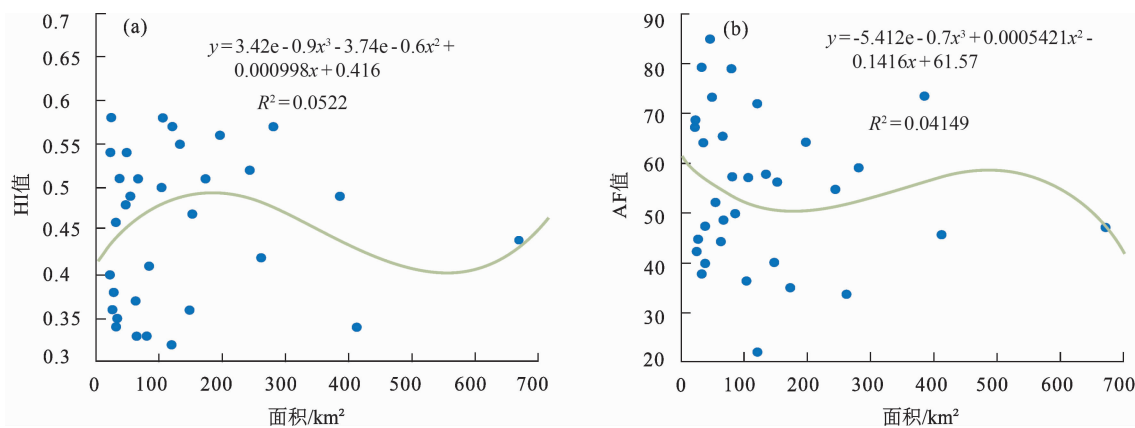


图 13 流域面积拟合函数:(a) HI 值与流域面积拟合函数;(b) AF 值与流域面积拟合函数

Fig. 13 Drainage area fitting function: (a) the fitting functions of HI with area; (b) the fitting functions of AF with area

流域多分布在河源处。分水岭两侧的不对称性差异进一步表明,龙河流域受构造活动更为显著。

(3)河床纵剖面显示明显的裂点迁移特征。研究区内阶地发育,表明地区存在持续的地表隆升过程^[48-49]。受新构造运动间歇性影响,长江沿岸发育5级阶地,T1、T2残缺不全,T3阶地形成于更新世晚期,表明地表隆升对研究区产生影响。磨刀溪流域裂点分布更高且迁移更远,指示该侧地表隆升更强烈,可能导致分水岭向北迁移以达到新的平衡状态。河源高程为1200~1400 m,河道最新一期裂点高程为500~600 m,裂点阶梯状分布表明地貌处于间歇性瞬态演化。

综合HI值、AF值及裂点迁移等地貌指标,研究区流域分水岭处于不平衡状态,且均指示分水岭向北迁移的特征,与 χ 值分析结果一致。

4.2 影响因素分析

河流地貌的发育演化受地质构造、岩性、气候等多种因素的综合影响^[50-51]。在较短时间尺度上,气候的影响主要表现为区域降雨量的空间分布差异,但研究区范围较小,降雨量大致均匀分布,其对地貌的影响有限。岩性是影响流域形态和演化过程的重要因素,软硬岩石的分布影响流域的侵蚀能力,进而塑造流域的剖面和平面的形态。研究区广泛分布侏罗纪和三叠纪的紫红色泥岩、砂岩、粉砂岩,磨刀溪下游河段夹有少量灰岩(图3b)。地貌参数差异性与岩性分布并不完全一致,且分水岭处未见岩性差异,表明岩性并非造成流域形态差异、地貌参数差异和分水岭迁移的主要原因。

分水岭两侧河道侵蚀基准面高程差异会引起不平衡的溯源侵蚀,从而导致分水岭的迁移、河流袭夺及流域形态变化^[51-52]。较低的河床海拔通常伴随较大的垂向比降,增强河流下蚀能力,促使河道源头向水流反方向延伸。研究区两侧流域干流河口侵蚀基准面均为126 m,表明两侧地貌演化趋势相似。从河口至河源,磨刀溪一侧在较长河道段内保持了较大的河床高程变化,反映其溯源侵蚀能力较强。然而,河床高程变化与 χ 值分布结果不一致, χ 值指示分水岭整体向北迁移,而河床高程变化则显示磨刀溪一侧溯源侵蚀能力更强,理论上分水岭应向南迁移。因此,河道侵蚀基准面并非分水岭迁移的主要因素。

排除气候、岩性等非构造因素之后,区域构造活

动被认为是流域差异演化的主控因素,前文地貌参数分析结果也支持这一观点。研究区东侧支流与干流多呈近90°交汇,而非自然的锐角顺插形态,表明其主要受到东西向的构造应力控制。此外,两流域干流在分水岭处均向东侧偏移,进一步指示区域近期受到西向构造作用力的影响。

4.3 流域演化与青藏高原隆升的潜在关系

分水岭向北迁移指示区域经历了不对称抬升。梅廉夫^[53]、邓宾^[54]等通过磷灰石裂变径迹(Apatite fission track, AFT)和低温热年代学证据,揭示四川盆地地表隆升和剥蚀过程具有明显的时空分区性,隆升速率由北向南递减。具体而言,川东高陡褶皱区北部自12 Ma以来隆升剥蚀速率约为 $144.9 \text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$,南部自19 Ma以来约为 $107.8 \text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$,北侧较南侧快 $0.037 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。区域内隆升速率的差异影响了河流的演化过程,导致分水岭处于瞬时状态,并呈现出北移的特征。四川盆地AFT年龄频度数自晚白垩至新近纪呈现递增趋势^[53],这一现象可能表明,在青藏高原东向隆升扩展的影响下,区域的构造抬升逐渐加强。

青藏高原的隆升由中部向四周扩展,形成高程由中心向外逐渐递减的分布特征。流域的两期裂点呈现北东高、西南低的趋势,与青藏高原隆升扩展规律一致。河道高程为1200~1400 m,与新近纪末期(3.0 Ma~3.4 Ma)喜马拉雅Ⅱ幕构造活动形成的夷平面(山原期夷平面)高程相似(1200~1500 m),因此当前河道高海拔代表了川东地区自新近纪末期以来的隆升幅度,其平均隆升速率为 $(0.43 \pm 0.03) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。最新裂点分布集中在500~600 m处,与更新世(0.73 Ma)喜马拉雅Ⅲ幕构造活动形成的剥夷面(云梦期夷平面)高程相似(500~600 m),这表明裂点自更新世启动以来达到了400~500 m的下切深度,平均侵蚀速率为 $(0.62 \pm 0.07) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。河流下切速率可代表地表隆升速率,这表明川东地区自新近纪到更新世,受构造隆起作用控制效应愈发强烈^[55-57]。约0.12 Ma,末次间冰期气候变化和青藏高原隆升共同作用,推动新一轮地貌演化,由于该阶段隆升时间较短,河流尚未达到均衡状态,仅表现为流域貌指标差异化,裂点迁移特征尚不明显。

流域不对称性和构造掀斜方向分析显示,倾斜方向以东西向为主(图11),反映齐岳山背斜沟经历

东西向的掀斜变形。主要河流流向几乎与主应力方向垂直,指示主要应力来自西方,进一步暗示青藏高原隆升对川东地区的潜在影响。南北流域演化差异则揭示了秦岭—大巴山复合作用对四川盆地新近纪隆升过程的重要影响。大巴山隆升速率由西向东递减,城口-房县断层的走滑运动加速了大巴山的抬升^[58-59]。晚新生代以来,大巴山构造变形受到青藏高原向东扩展的影响,构造应力在黄陵刚性块体处引发垂直隆升,塑造了大巴山现代地貌格局。齐岳山北段受到大巴山构造带和黄陵隆起的限制^[60-63],中段构造作用最为强烈,北段垂直隆升加剧了磨刀溪一侧的隆升速率,形成阶地、平地 and 喀斯特台地,推动分水岭向北迁移。相较之下,龙河流域构造活动更为活跃的,呈现侵蚀强烈、年轻化的地貌特征。

本研究证实了地形地貌指数在区域构造活动评估和流域演化阶段解析中的有效性,为理解青藏高原远程效应影响川东地区的构造演化历史提供了新的视角。然而,由于川东地区地质条件复杂,构造活动的细节仍需进一步深入探讨。未来研究可以进一步结合高分辨率的地形数据、更广泛的地质调查以及多学科交叉的综合分析,以更全面地揭示区域构造活动特征及其对地形演化的影响。

5 结论

(1) 龙河流域和磨刀溪流域的 HI 值存在显著差异,龙河流域 HI 值为 0.36 ~ 0.68, 平均值 0.441, 而磨刀溪流域 HI 值为 0.32 ~ 0.58, 平均值 0.504, 显示龙河流域的地层未被广泛侵蚀,地貌呈现出较为年轻的特征。相对而言,磨刀溪流域的地貌受到强烈侵蚀而进入更老的演化阶段。揭示区域南北处于差异演化阶段,南侧地貌发育正处于壮年期,以快速侵蚀为主。

(2) 流域内 χ 值为 2.22 ~ 36.09, 在河流上下游 χ 值存在明显区别,上游河源处 χ 值更大,而下游河口处 χ 值更小。在分水岭处,南北流域 χ 值差别明显 ($\Delta\chi = 5.43 \sim 12.66$), 指示区域受差异构造活动影响,北侧磨刀溪流域受构造抬升作用影响更强 (较龙河流域快 $0.037 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)。

(3) 河流纵剖面分析表明,川东地区地貌演化处于瞬时状态。河道高程为 1200 ~ 1400 m, 与新近纪末期 (3.0 Ma ~ 3.4 Ma) 喜马拉雅 II 幕构造活动形成的夷

平面 (山原期夷平面) 高程相似 (1200 ~ 1500 m), 表明自新近纪末期以来,区域隆升幅度 1200 ~ 1400 m, 平均隆升速率为 $(0.43 \pm 0.03) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(4) 建立“构造脉冲-河流响应”动力学模型,证实高原扩展前锋通过应力波传播驱动川东地区幕式隆升 (3 期次), 导致河流裂点群阶梯状迁移。全新世 (0.73 Ma) 以来区域隆升 400 ~ 500 m, 平均隆升速率为 $(0.62 \pm 0.07) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 表明川东地区对青藏高原东向隆升扩展响应进一步加强。其东向扩展导致川东地区受到不对称掀斜作用, 表现为 χ 值南北空间分异、流域演化阶段东西分异 (西侧 HI 平均值为 0.42, 东侧 HI 平均值为 0.53), 体现了河流的不对称演化和地貌侵蚀差异。

参考文献 (References)

- [1] ANTÓN L, DE VICENTE G, MUÑOZ-MARTÍN A, et al. Using river long profiles and geomorphic indices to evaluate the geomorphological signature of continental scale drainage capture, Duero basin (NW Iberia) [J]. *Geomorphology*, 2014, **206**: 250 - 261. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.09.028
- [2] 张天琪, 王振, 张晓明, 等. 北天山乌鲁木齐河流域面积-高程积分及其地貌意义 [J]. *第四纪研究*, 2015, **35** (1): 60 - 70. [ZHANG Tianqi, WANG Zhen, ZHANG Xiaoming, et al. Hypsometric integral analysis of the Ürümqi River drainage basin and its implications for topographic evolution [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, **35** (1): 60 - 70] DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2015.01.06
- [3] 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 Taohe River drainage system and its structural implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, **17** (4): 43 - 49]
- [4] 陈浩, 董廷旭, 李勇, 等. 涪江上游流域地貌特征及其对断裂活动性的响应 [J]. *山地学报*, 2020, **38** (4): 542 - 551. [CHEN Hao, DONG Tingxu, LI Yong, et al. Geomorphological characteristics and its response to fault activity in the upper reaches of the Fujiang drainage basin, China [J]. *Mountain Research*, 2020, **38** (4): 542 - 551] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000532
- [5] 谢小平, 白毛伟, 陈芝聪, 等. 龙门山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] DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2018.01.20

- [6] 王一舟, 张会平, 郑德文, 等. 基岩河道河流水力侵蚀模型及其应用: 兼论青藏高原基岩河道研究的迫切性[J]. 第四纪研究, 2016, **36**(4): 884–897. [WANG Yizhou, ZHANG Huiping, ZHENG Dewen, et al. Stream-power incision model and its implications: Discussion on the urgency of studying bedrock channel across the Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2016, **36**(4): 884–897] DOI: 10.11928/j.issn.1001–7410.2016.04.09
- [7] 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. DOI: 10.1007/s1442–017–1438–9
- [8] DAVIS W M. The geographical cycle [J]. The Geographical Journal, 1899, **14**(5): 481–504. DOI: 10.2307/1774538
- [9] 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. DOI: 10.1016/j.jseas.2010.05.015
- [10] 吴雯雯, 张文翔, 明庆忠, 等. 基于 DEM 的长江第一弯地区地貌因子特征[J]. 山地学报, 2014, **32**(2): 219–225. [WU Wenwen, ZHANG Wenxiang, MING Qingzhong, et al. The physiognomy morphological characters and the origin of the area in the first turn of Yangtze River based on DEM [J]. Mountain Research, 2014, **32**(2): 219–225] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2014.02.003
- [11] YIN An, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2003, **28**: 211–280. DOI: 10.1146/annurev.earth.28.1.211
- [12] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度—亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报, 2011, **85**(1): 1–33. [XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. On the tectonics of the India-Asia collision [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, **85**(1): 1–33] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2011.01.001
- [13] 张培震, 王伟涛, 甘卫军, 等. 青藏高原的现今构造变形与地球动力过程[J]. 地质学报, 2022, **96**(10): 3297–3313. [ZHANG Peizhen, WANG Weitao, GAN Weijun, et al. Present-day deformation and geodynamic processes of the Tibetan Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, **96**(10): 3297–3313] DOI: 10.3969/j.issn.0001–5717.2022.10.003
- [14] 张信宝, 刘维明, 陈宁生, 等. 青藏高原面地貌稳定态与高原隆升时间[J]. 山地学报, 2023, **41**(4): 459–468. [ZHANG Xinbao, LIU Weiming, CHEN Ningsheng, et al. Geomorphological steady state of the Tibet Plateau and its uplift time [J]. Mountain Research, 2023, **41**(4): 459–468] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000762
- [15] 张信宝, 刘彧, 胡凯衡, 等. 金沙江折向东流的地质背景、古堰塞湖沉积、第四纪河流演化[J]. 山地学报, 2020, **38**(6): 805–815. [ZHANG Xinbao, LIU Yu, HU Kaiheng, et al. Geological implication of the Jinsha River flowing eastward, ancient dammed lake deposition, and Quaternary river evolution in China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(6): 805–815] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000557
- [16] ENGLAND P, MOLNAR P. Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks [J]. Geology, 1990, **18**(12): 1173–1177. DOI: 10.1130/0091–7613(1990)018<1173:SUUORA>2.3.CO;2
- [17] WANG E, KIRBY E, FURLONG K P, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic [J]. Nature Geoscience, 2013, **5**(9): 640–645. DOI: 10.1038/ngeo1538
- [18] 徐汀滢, 季建清, 涂继耀, 等. 川东褶皱带构造发育深度层次与变形样式[J]. 地质科学, 2012, **47**(3): 788–807. [XU Tingying, JI Jianqing, TU Jiyao, et al. Tectonic levels and deformation patterns of the eastern Sichuan fold belt [J]. Chinese Journal of Geology, 2012, **47**(3): 788–807] DOI: 10.3969/j.issn.0563–5020.2012.03.016
- [19] 唐永, 梅廉夫, 肖安成, 等. 川东北宣汉—达县地区晚中生代—新生代构造应力场转化及其油气意义[J]. 石油学报, 2013, **34**(1): 59–70. [TANG Yong, MEI Lianfu, XIAO Ancheng, et al. Transition of tectonic stress field and hydrocarbon significance of the Late Mesozoic-Cenozoic in Xuanhan-Daxian region, northeastern Sichuan Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2013, **34**(1): 59–70] DOI: 10.7623/syxb201301007
- [20] 颜丹平, 汪新文, 刘友元. 川鄂湘边区褶皱构造样式及其成因机制分析[J]. 现代地质, 2000, **14**(1): 37–43. [YAN Danping, WANG Xinwen, LIU Youyuan. Analysis of fold style and its formation mechanism in the area of boundary among Sichuan, Hubei and Hunan [J]. Geoscience, 2000, **14**(1): 37–43] DOI: 10.1007/s11769–000–0051–4
- [21] 魏峰, 陈孔全, 庾秀松. 川东齐岳山断层北部差异构造变形特征[J]. 石油实验地质, 2019, **41**(3): 348–354+362. [WEI Feng, CHEN Kongquan, TUO Xiusong. Differential tectonic deformation in the northern Qiyueshan Fault, eastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, **41**(3): 348–354+362] DOI: 10.11781/sydz201903348
- [22] ZHAO Yang, RATSCHBACHER L, JONCKHEERE R, et al. Late-stage foreland growth of China's largest orogens (Qinling, Tibet): Evidence from the Hannan-Micang crystalline massifs and the northern Sichuan Basin, central China [J]. Lithosphere, 2013, **5**(4): 420–437. DOI: 10.1130/L260.1
- [23] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, **43**(10): 1553–1582. [ZHANG Guowei, GUO Anlin, WANG Yuejun, et al. Tectonics of south China continent and its implications [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, **56**: 1804–1828] DOI: 10.1007/s11430–013–4679–1

- [24] YAN Danping, ZHANG Bing, ZHOU Meifu, et al. Constraints on the depth, geometry and kinematics of blind detachment faults provided by fault-propagation folds: An example from the Mesozoic fold belt of south China [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009, **31**(2): 150–162. DOI: 10.1016/j.jsg.2008.11.005
- [25] SHU Liangshu, FAURE M, WANG Bo, et al. Late Palaeozoic–Early Mesozoic geological features of south China: Response to the Indosinian collision events in southeast Asia [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, **340**(2–3): 151–165. DOI: 10.1016/j.crte.2007.10.010
- [26] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. *中国地质*, 2009, **26**(3): 573–593. [XU Xianbing, ZHANG Yueqiao, JIA Dong, et al. Early Mesozoic geotectonic processes in south China [J]. *Geology in China*, 2009, **26**(3): 573–593] DOI: 10.3969/j.issn.1000–3657.2009.03.007
- [27] MENG Qingren, WANG Erchie, HU Jianmin. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin: Implication for continued clockwise rotation of the south China block [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, **117**(3–4): 396–410. DOI: 10.1130/B25407.1
- [28] 舒良树. 陆内造山带特征及其动力学讨论[J]. *地质学报*, 2021, **95**(1): 98–106. [SHU Liangshu. Principal features of intracontinental orogenic belt and discussions on its dynamics [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, **95**(1): 98–106] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020287
- [29] 李建华, 董树文, 赵国春, 等. 华南晚中生代大陆变形、深部过程及动力学[J]. *地质学报*, 2024, **98**(3): 829–861. [LI Jianhua, DONG Shuwen, ZHAO Guochun, et al. Late Mesozoic continental deformation, deep processes, and geodynamic evolution of south China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, **98**(3): 829–861] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024005
- [30] 许效松, 刘宝珺, 赵玉光. 上扬子台地西缘二叠系—三叠系层序界面成因分析与盆地转换[J]. *特提斯地质*, 1996, **20**: 1–30. [XU Xiaosong, LIU Baojun, ZHAO Yuguang. Sequence boundary genesis and basin-mountain transformation on the western margin of the upper Yangtze platform during the Permian to Triassic [J]. *Tethyan Geology*, 1996, **20**: 1–30]
- [31] WANG Yuejun, ZHANG Yuzhi, FAN Weiming, et al. Early Neoproterozoic accretionary assemblage in the Cathaysia Block: Geochronological, Lu–Hf isotopic and geochemical evidence from granitoid gneisses [J]. *Precambrian Research*, 2014, **249**: 144–161. DOI: 10.1016/j.precamres.2014.05.003
- [32] YU Jinhai, WANG Lijuan, O'REILLY S Y, et al. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China [J]. *Precambrian Research*, 2009, **174**(3–4): 347–363. DOI: 10.1016/j.precamres.2009.08.009
- [33] 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造[J]. *中国地质*, 2011, **38**(2): 233–250. [ZHANG Yueqiao, DONG Shuwen, LI Jianhua, et al. Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan basin [J]. *Geology China*, 2011, **38**(2): 233–250] DOI: 10.3969/j.issn.1000–3657.2011.02.001
- [34] MAO Jingwen, CHENG Yanbo, CHEN Maohong, et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in south China and their geodynamic settings [J]. *Miner Deposita*, 2013, **48**(3): 267–294. DOI: 10.1007/s00126–012–0446–z
- [35] 邓宾, 刘树根, 王国芝, 等. 四川盆地南部地区新生代隆升剥露研究—低温热年代学证据[J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(6): 1958–1973. [DENG Bing, LIU Shugen, WANG Guozhi, et al. Cenozoic uplift and exhumation in southern Sichuan Basin: Evidence from low-temperature thermochronology [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(6): 1958–1973] DOI: 10.6038/cjg20130618
- [36] 邹玉涛, 段金宝, 赵艳军, 等. 川东高陡断褶带构造特征及其演化[J]. *地质学报*, 2015, **89**(11): 2046–2052. [ZOU Yutao, DUAN Jinbao, ZHAO Yanjun, et al. Tectonic characteristics and evolution of the high and steep fault folding belt in east Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, **89**(11): 2046–2052] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2015.11.015.
- [37] 张旭亮. 鄂西—渝东地区构造演化及成因机制[D]. 北京: 中国地质大学, 2019: 1–173. [ZHANG Xuliang. Tectonic evolution and genetic mechanism of western Hubei and eastern Chongqing area [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019: 1–173]
- [38] 王二七, 尹纪云. 川西南新生代构造作用以及四川原型盆地的破坏[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2009, **39**(3): 359–367. [WANG Erqi, YIN Jiyun. Cenozoic multi-stage deformation occurred in southwest Sichuan: Cause for the dismemberment of the proto-Sichuan Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2009, **39**(3): 359–367] DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2009.03.018
- [39] PERRON J T, ROYDEN L. An integral approach to bedrock river profile analysis [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, **38**(6): 570–576. DOI: 10.1002/esp.3302
- [40] 王一舟, 郑德文, 张会平. 河流高程剖面分析的方法与程序实现—基于 Matlab 平台编写的开源函数集 RiverProAnalysis [J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, **52**(10): 2039–2060. [WANG Yizhou, ZHENG Dewen, ZHANG Huiping. The methods and program implementation for river longitudinal profile analysis—RiverProAnalysis, a set of open-source functions based on the Matlab platform [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(9): 1788–1809] DOI: 10.1007/s11430–021–9938–x
- [41] FORTE A M, WHIPPLE K X. Criteria and tools for determining drainage divide stability [J]. *Earth and Planetary Science Letters*,

- 2018, **493**: 102 – 117. DOI: 10.1016/j.epsl.2018.04.026
- [42] WILLETT S D, MCCOY S W, PERRON J T, et al. Dynamic reorganization of river basins [J]. *Science*, 2014, **343** (6175): 1248765. DOI: 10.1126/science.1248765
- [43] WHIPPLE K X, FORTE A M, DIBIASE R A, et al. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture; Implications for the role of divide mobility in landscape evolution [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, **122** (1): 248 – 273. DOI: 10.1002/2016JF003973
- [44] FAN Niannian, KONG Ping, ROBL J C, et al. Timing of river capture in major Yangtze River tributaries: Insights from sediment provenance and morphometric indices [J]. *Geomorphology*, 2021, **392**: 107915. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107915
- [45] STRAHLER A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1952, **63** (11): 1117 – 1141. DOI: 10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2
- [46] PIKE R J, WILSON S E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1971, **82** (4): 1079 – 1083. DOI: 10.1130/0016-7606(1971)82[1079:erhiag]2.0.co;2
- [47] MUSSELMAN Z A, AGULAR A. Investigation of drainage basin geometry near an anomalously straight reach of the Big Black River, Mississippi, USA [J]. *Physical Geography*, 2016, **37** (2): 169 – 187. DOI: 10.1080/02723646.2016.1163482
- [48] 何成邦, 胡春生, 田景梅, 等. 大别山东南缘河流裂点成因及其地貌演化意义[J]. *山地学报*, 2023, **41** (3): 322 – 334. [HE Chengbang, HU Chunsheng, TIAN Jingmei, et al. Origin and geomorphological evolution of river knickpoints in the southeast edge of the Dabie Mountains, China [J]. *Mountain Research*, 2023, **41** (3): 322 – 334] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000751
- [49] 张东越, 董有浦, 焦骞骞, 等. 青藏高原东南缘新生代的三期构造隆升——来自河流纵剖面分析的证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2023, **47** (2): 308 – 326. [ZHANG Dongyue, DONG Youpu, JIAO Qianqian, et al. Three periods of Cenozoic tectonic uplift in the southeastern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from fluvial longitudinal profile analysis [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2023, **47** (2): 308 – 326] DOI: 10.16539/j.ddzyckx.2023.02.006
- [50] WILLETT S D. Orogeny and orography: The effects of erosion on the structure of mountain belts [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1999, **104** (B12): 28957 – 28981. DOI: 10.1029/1999jb900248
- [51] ZENG Xun, TAN Xibin. Drainage divide migration in response to strike-slip faulting: An example from northern Longmen Shan, eastern Tibet [J]. *Tectonophysics*, 2023, **848**: 229720. DOI: 10.1016/j.tecto.2023.229720
- [52] KIRBY E, WHIPPLE K X, TANG Wenqing, 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 Solid Earth*, 2003, **108** (B4): 148 – 227. DOI: 10.1029/2001jb000861
- [53] 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等. 湘鄂西-川东中生代陆内递进扩展变形: 来自裂变径迹和平衡剖面的证据[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2010, **35** (2): 161 – 174. [MEI Lianfu, LIU Zhaoqian, TANG Jiguang, et al. Mesozoic Intra-continental progressive deformation in western Hunan-Hubei-eastern Sichuan provinces of China: Evidence from apatite fission track and balanced cross-section [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2010, **35** (2): 161 – 174] DOI: 10.3799/dqkx.2010.017
- [54] 邓宾, 刘树根, 刘顺, 等. 四川盆地地表剥蚀量恢复及其意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, **36** (6): 675 – 686. [DENG Bin, LIU Shugen, LIU Shun, et al. Restoration of exhumation thickness and its significance in Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2009, **36** (6): 675 – 686] DOI: 10.3969/j.issn.1671-9727.2009.06.013
- [55] LI Jijun, XIE Shiyu, KUANG Mingsheng. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation [J]. *Geomorphology*, 2001, **41** (2-3): 125 – 135. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00110-6
- [56] YANG Chaoqun, JIAO Ruohong, ZATTIN M, et al. Late Oligocene-Early Miocene incision of the Three Gorges and the initial establishment of an east-flowing Yangtze River [J]. *Geomorphology*, 2023, **441**: 108897. DOI: 10.1016/j.geomorph.2023.108897
- [57] 张信宝, 胡凯衡, 刘戡, 等. 古老的长江, 年轻的三峡[J]. *山地学报*, 2021, **39** (5): 611 – 620. [ZHANG Xinbao, HU Kaiheng, LIU Yu, et al. The ancient Yangtze River versus the young Three Gorges [J]. *Mountain Research*, 2021, **39** (5): 611 – 620] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000624
- [58] SHI Xiaohui, YANG Zhao, DONG Yunpeng, et al. Geomorphic indices and longitudinal profile of the Daba Shan, northeastern Sichuan Basin: Evidence for the late Cenozoic eastward growth of the Tibetan Plateau [J]. *Geomorphology*, 2020, **353**: 107031. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107031
- [59] 陶帅, 王彬, 李玮, 等. 西秦岭东段对青藏高原东向扩展过程构造响应的古地磁制约[J]. *地球物理学报*, 2020, **65** (9): 3502 – 3520. [TAO Shuai, WANG Bin, LI Wei, et al. Paleomagnetic constraints on the tectonic response of the eastern part of the west Qinling to the eastward spreading process of the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, **65** (9): 3502 – 3520] DOI: 10.6038/cjg2022P0225
- [60] 刘树根, 孙玮, 李智武, 等. 四川盆地晚白垩世以来的构造隆

- 升作用与天然气成藏[J]. 天然气地球科学, 2008, **19**(3): 293–300. [LIU Shugen, SUN Wei, LI Zhiwu, et al. Tectonic uplifting and gas pool formation since Late Cretaceous epoch Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, **19**(3): 293–300] DOI: 10.11764/j.issn.1672–1926.200803.293
- [61] 叶飞, 舒多友, 潘文, 等. 扬子地台东南缘武陵凹陷区新生代以来的隆升剥蚀过程—来自碎屑岩磷灰石裂变径迹的证据[J]. 地质通报, 2022, **41**(12): 2158–2166. [YE Fei, SHU Duoyou, PAN Wen, et al. Uplifting and erosion process of Wuling Concave Field, southeast margin Yangtze Platform since Cenozoic—evidence of fission track of clastic apatite [J]. Geological Bulletin of China, 2022, **41**(12): 2158–2166] DOI: 10.12097/j.issn.1671–2552.2022.12.008
- [62] 虞秀松, 陈孔全, 罗顺社, 等. 四川盆地东南缘齐岳山断裂构造特征与页岩气保存条件[J]. 石油与天然气地质, 2020, **41**(5): 1017–1027. [TUO Xiusong, CHEN Kongquan, LUO Shunshu, et al. Structural characteristics of Qiyueshan Fault and shale gas preservation at the southeastern margin of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, **41**(5): 1017–1027] DOI: 10.11743/ogg20200512
- [63] WANG Yadong, YUAN Sihua, SONG Chunhui, et al. Jianchuan Basin Uplift and Paleo-upper Yangtze River diversion during the latest Eocene: Evidence from synsedimentary structure and apatite fission track thermochronology [J]. Geomorphology, 2024, **463**: 109375. DOI: 10.1016/j.geomorph.2024.109375

Dynamics of Watershed Migration in Eastern Sichuan from a Tectonic-Geomorphic Coupling Perspective: A Case Study of the Modaoxi-Longhe River Basin, China

WANG Cuifang¹, YANG Xiangyang^{1*}, XIONG Can², XIAO Ming², HUANG Haoyuan³

(1. Hehai College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 40074, China;

2. Chongqing Geological Disaster Prevention Engineering Exploration and Design Institute, Chongqing 400700, China;

3. Yunyang Geopark Management Affairs Center, Yunyang County Forestry Bureau, Chongqing 404512, China)

Abstract: The phased uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau and its eastward expansion exert significant far-field tectonic effects, reshaping unique fluvial landforms in eastern Sichuan, but the characteristics of tectonic activity, river evolution, and underlying dynamic mechanisms in the area remain poorly constrained.

In this study, it took the Modaoxi-Longhe River basin in eastern Sichuan as a representative research case. It used 12.5 m resolution DEM data and the ArcGIS platform to extract geomorphic parameters for 34 sub-basins within the study area. These data were analyzed quantitatively to investigate the evolution of fluvial landforms in the study area and assess the intensity of regional tectonic activity.

(1) By hypsometric integral (HI) values calculation, it suggested that the Longhe River basin had a higher HI value (mean HI = 0.504) than that of the Modaoxi basin (mean HI = 0.441), which indicates differential evolution phase between the northern and southern region of the study areas, with the southern area in a mature stage dominated by rapid erosion.

(2) It suggested by spatial χ -value disparities ($\Delta\chi = 5.43 - 12.66$) there were differential tectonic activities, with stronger uplift in the northern Modaoxi basin ($0.037 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ faster than in the Longhe Basin).

(3) By longitudinal river profile analysis, it revealed eastern Sichuan was in a phase of transient geomorphic evolution, with a total uplift of 1200–1400 m since the late Neogene (3.0–3.4 Ma) at an average rate of $(0.43 \pm 0.03) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$.

(4) Our proposed a “tectonic pulse-fluvial response” dynamic model, which confirmed that stress wave

propagation from the plateau's expanding front drove episodic uplift (three phases) in eastern Sichuan, triggering stepped migration of knickpoint clusters. Post-Holocene (0.73 Ma) incision reached 400 – 500 m, with an average uplift rate of $(0.62 \pm 0.07) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, indicating enhanced regional response to the Qinghai-Tibetan Plateau's eastward expansion.

This study provides insights into the mechanisms of far-field plateau uplift and the coupling between tectonic activity and landscape evolution.

Key words: eastern Sichuan folding belt; Qiyueshan Anticline; watershed migration; geomorphological parameter; uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau

(责任编辑 钟雨倩)