

龙门山南段青衣江上游流域地貌特征及影响因素研究

胡薇¹⁾, 刘严松^{1, 2)}, 古甜甜¹⁾, 唐方强¹⁾, 郑博睿¹⁾

1) 成都理工大学地球与行星科学学院, 成都, 610059; 2) 四川三合空间科技有限公司, 成都, 610094

内容提要: 龙门山断裂带作为青藏高原与四川盆地的构造边界, 其南段新生代晚期以来的构造隆升与地貌演化是揭示高原东缘扩展机制的关键窗口。笔者等以青衣江上游流域为研究对象, 基于高分辨率的数字高程模型 (DEM) 数据, 利用 ArcGIS 10.8 平台系统提取青衣江上游 4 条支流的河长坡降指数 (SL)、面积—高程积分 (HI)、流域不对称度 (AF)、河谷宽高比 (VF) 及圆度比 (Re) 5 类地貌参数, 结合 Hack 剖面分析, 构建地貌特征综合评价指标, 定量评估龙门山南段构造活动性空间分异特征及地貌演化影响因素。研究表明: ① 高值地貌参数 ($Iat > 2$) 集中分布于耿达—陇东断裂、盐井—五龙断裂及双石—大川断裂带附近, 与断裂走向一致, 表明构造活动是区域内地貌形态的主控因素; ② 4 条支流构造活动性呈显著差异: 天全河与宝兴河流域受多条断裂带控制, 构造活动最强, 玉溪河次之, 荣经河最弱, 区域内断裂带活动性呈现出北强南弱的特征; ③ 区域地貌演化是构造—岩性—气候多尺度耦合作用的结果。研究结果揭示了青藏高原东缘地表过程对构造变形的响应, 为区域构造地貌演化研究提供新证据和参考。

关键词: 龙门山南段; 青衣江上游; 地貌参数; 构造活动; 构造—气候—岩性耦合

龙门山断裂带位于青藏高原东缘, 作为印度板块与欧亚板块碰撞的前缘地带, 是研究陆内造山作用与构造—地貌耦合机制的典型区域 (刘树根等, 1991; Burchfiel, 1995; 李智武等, 2008)。龙门山南段是青藏高原向四川盆地过渡的关键构造单元, 其复杂的地貌特征及地貌格局具有良好的构造响应, 成为揭示高原东向扩展动力学机制的理想区域 (段书苏, 2006; 范增辉等, 2018)。青衣江上游的玉溪河、天全河、宝兴河及荣经河流域, 横跨龙门山南段与四川盆地交界带, 记录了晚新生代以来构造活动与地表过程的多期次响应 (贾营营等, 2010; 王继龙等, 2018; 王林等, 2018)。随着数字高程模型 (DEM)、遥感影像解译及年代学技术的快速发展, 地貌参数的定量提取分析已成为流域地貌研究的主流方法 (汤国安等, 2005; 刘汉永, 2015; 邵崇建, 2016; Luo Lanhua et al., 2020; 曹鹏举等, 2021)。

流域地貌量化研究是解析构造—地表过程—气候演化耦合机制的重要手段 (Kirby and Whipple, 2012; Yang Rong et al., 2015; 陈兴长等, 2023)。在

龙门山地区, 多项研究通过地貌参数分析揭示了构造活动对地貌发育与河流演化的制约作用。张会平等 (2006a) 通过河长坡降指数 (SL) 与分支比 (Rb) 分析, 首次定量揭示岷江水系地貌分异受控于构造带差异性隆升的规律; 张威等 (2018) 基于 DEM 数据, 证实青衣江上游地形坡度突变与双石—大川断裂的构造隆升直接相关, 并建立了地壳隆升速率与河流下切速率之间的正反馈模型; 王继龙等 (2018) 进一步指出晚第四纪河流下切速率的空间差异主要归因于构造抬升与极端降水事件的协同作用。Kirby 和 Whipple (2001) 提出的构造—气候耦合驱动的河流下切普适模型, 为定量刻画区域地貌演化机制提供了理论基础。Gao Mingxing 等 (2016) 结合高程积分 (HI) 与河长坡降指数 (SL), 识别出龙门山断裂系统中相对隆升速率最高的逆冲断层, 并排除岩性与降水影响, 确立构造驱动的主导作用。Wang Wei 等 (2023) 则利用河道纵剖面形态分析揭示龙门山断裂在多时间尺度下的活动性差异, 进一步丰富了区域构造地貌演化的时空认识。然而, 现有研



注: 本文为国家自然科学基金项目 (编号: 41971226); 中国地质调查局地调项目 (编号: DD20221697); 四川省自然资源厅基金项目 (编号: KJ-2016-07); 四川省教育厅基金项目 (编号: 18ZB0065); 甘肃省教育厅高校教师创新基金项目 (编号: 2023A-253) 的成果。

收稿日期: 2025-09-23; 改回日期: 2025-12-19; 网络首发: 2026-02-15; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.071

作者简介: 胡薇, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 地质学专业; Email: huwei1@stu.cdut.edu.cn。通讯作者: 刘严松, 男, 1982 年生, 博士, 副教授, 主要从事地学大数据与资源环境遥感方向研究; Email: liuyansong2012@cdut.edu.cn。

究多集中于单一河流或局部构造单元,对不同流域间的空间分异缺乏系统性对比,导致对龙门山南段整体构造—地貌耦合关系的系统性和差异性认识仍显不足。特别是在青衣江上游地区,4条主要支流在流域面积、岩性组成及构造活动强度等方面存在显著差异,可能导致地貌响应模式的多样性,而这一现象在以往研究中尚未得到系统探讨。

因此,笔者等以青衣江上游4大支流流域为研究对象,系统提取河长坡降指数(SL)、面积—高程积分(HI)、流域不对称度(AF)、河谷宽高比(VF)及圆度比(Rc)等地貌参数,构建相对构造活动性指数(Iat),并结合区域构造格局、岩性分布与气候条

件开展综合分析。研究旨在:①定量刻画各支流流域的地貌特征差异,探究区域地貌响应模式差异;②揭示构造、岩性与气候多因素耦合作用下的地貌演化规律;③探讨青藏高原东缘地表过程对区域构造活动性空间分异的响应。通过系统对比4条特征各异却空间毗邻的支流,弥补了青衣江上游支流缺乏系统性对比的不足,为理解龙门山南段构造—地貌响应机制提供了新的区域视角与实证依据。

1 研究区概况

龙门山南段位于青藏高原东缘与四川盆地过渡带,是巴颜喀拉块体与扬子克拉通碰撞挤压的前缘区域(刘和甫等,1994;滕吉文等,2014)。其构造活动以强烈的逆冲推覆为主,地壳缩短明显,晚第四纪以来构造活动显著,是研究青藏高原东缘隆升机制与构造—地貌响应的关键区域(张培震,2008;王志等,2021)。

龙门山南段具有典型的逆冲推覆构造特征,自北西向南东分布着近似平行的3条主干断裂和1条山前隐伏断裂,依次为耿达—陇东断裂(后山断裂)、盐井—五龙断裂(中央断裂)、双石—大川断裂(前山断裂)以及大邑断裂和洛水—都江堰断裂(山前断裂)(邓起东等,1994;杨晓平等,1999;李勇等,2009;张岳桥等,2010)(图1),且发育有叠瓦状构造和飞来峰构造。其中,耿达—陇东断裂线性特征较差,断错地貌不发育,活动性较弱,为早—中更新世断裂,向南延伸进入金汤弧形断裂带(李大虎等,2015;王明明等,2017);盐井—五龙断裂在晚更新世有活动迹象(刘汉永,2015;姜大伟等,2020),其垂向活动速率为0.20~0.37 mm/a(苏鹏等,2016);双石—大川断裂为一条全新世活动断裂,探槽揭示其断错了晚第四纪地层,表现为清晰的槽谷地貌(梁明剑等,2016),以逆冲运动为主,兼具左旋走滑分量,断裂平均垂向运动速率约为0.6 mm/a(Peng Guo et al., 2024)。整体上,龙门山南段构造活动表现出挤压缩短的特征(李伟等,2017;姜大伟等,2018),最新构造变形已扩展至前陆地区,其活动性明显强于北段(北段兼具走滑分量),反映了青藏高

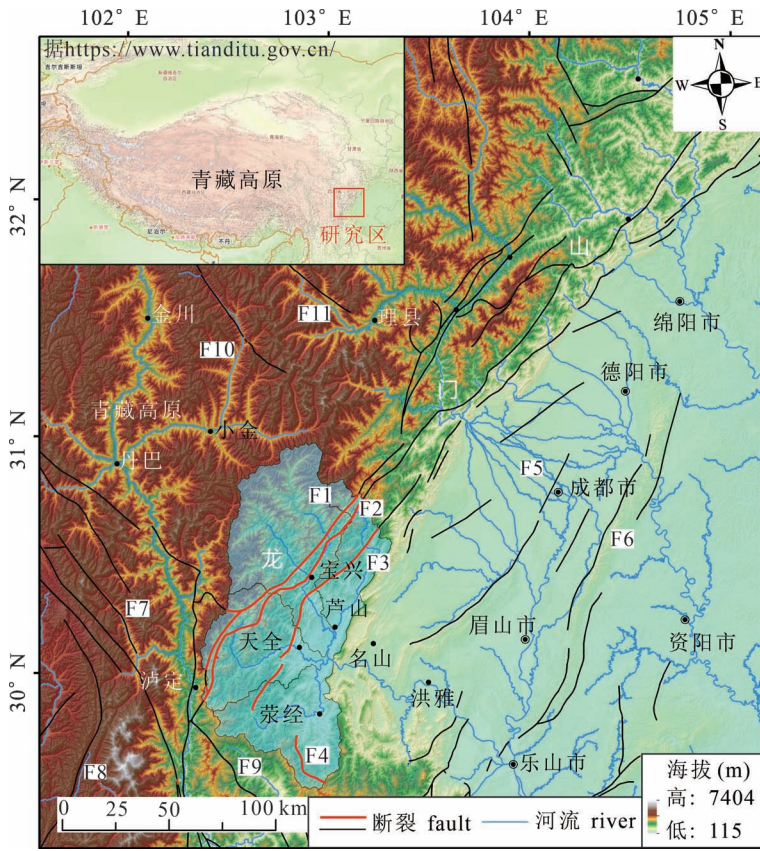


图1 龙门山南段区域地貌和断层分布图

Fig. 1 Regional geomorphology and fault distribution in the southern segment of the Longmenshan Mountains

F1—耿达—陇东断裂; F2—北川—映秀断裂; F3—双石—大川断裂; F4—泸定—峨边断裂; F5—蒲江—新津断裂; F6—龙泉山断裂; F7—鲜水河断裂带; F8—陈支断裂; F9—汉源—甘洛断裂; F10—松岗断裂; F11—阿坝断裂; R1—玉溪河; R2—宝兴河; R3—天全河; R4—荃经河

F1—Gengda—Longdong fault; F2—Beichuan—Yingxiu fault; F3—Shuangshi—Dachuan fault; F4—Luding—Ebian fault; F5—Pujiang—Xinjin fault; F6—Longquanshan fault; F7—Xianshuihe fault Zone; F8—Chenzhi fault; F9—Hanyuan—Ganluo fault; F10—Songgang fault; F11—Aba fault; R1—Yuxi river; R2—Baoping river; R3—Tianquan river; R4—Yingjing river

原推挤与川滇块体向东挤压的共同作用(姜大伟等,2020)。该段构造主体由五龙杂岩、宝兴杂岩体和山前逆冲带构成,杂岩体位于后山和中央断裂之间,而在中央和前山断裂之间分布有多个飞来峰(张岳桥等,2010)。中新世以来龙门山南段经历多期隆升,形成了世界上最陡峻的地形梯度带,从四川盆地西边界到青藏高原仅 50 km 范围内高差达 4.5 km(姜大伟,2017;郑勇等,2018)。

青衣江发源于龙门山西南段,穿过龙门山断裂带后山断裂、中央断裂、前山断裂及褶皱,受到龙门山断裂带西南段多期构造活动的控制形成格网状水系,流向与断裂方向吻合度较高,主要为北东—南西和北西—南东向(贾营营等,2010;刘汉永,2015)。作为发育于断裂控制区域的河流,青衣江流域的地貌特征记录了龙门山南段构造活动的空间差异性,系统对比分析其地貌参数有助于揭示断裂活动性与构造隆升的时空分异规律。结合区域断裂分布、褶皱变形及河流地貌记录,量化构造—岩性—气候耦合作用对地貌演化的影响。

2 数据与方法

2.1 数据

笔者等使用的高分辨率数字高程模型(DEM)数据来源于日本的 ALOS(Advanced Land Observing Satellite)卫星(ALOS@EORC Homepage);降雨数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的国家环境信息中心(NCEI)(<https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/>);地质数据来自四川省地震局(<https://data.earthquake.cn/>);2000~2025年地震数据来源于国家地震科学数据中心(<https://data.earthquake.cn/index.html>);遥感影像数据来源于欧洲航天局数据中心的哨兵2号卫星多光谱数据(<https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-2>)。

2.2 方法

笔者等基于高精度 DEM 数据,运用 GIS 水文分析工具,按分水岭自然边界设定汇流累积量阈值,自动提取河网与汇流点,进而划分出子流域盆地。通过调整阈值及倾泻点位置,结合流域面积、河网密度等实际条件,将龙门山南段青衣江上游的玉溪河、宝兴河、天全河与荃经河 4 条支流进一步划分为 26、54、25 和 23 个子流域盆地(图 2)。利用 ArcGIS 10.8 计算各个子流域的地貌参数,包括:河长坡降指标(SL)、Hack 剖面、面积—高程积分(HI)、流域

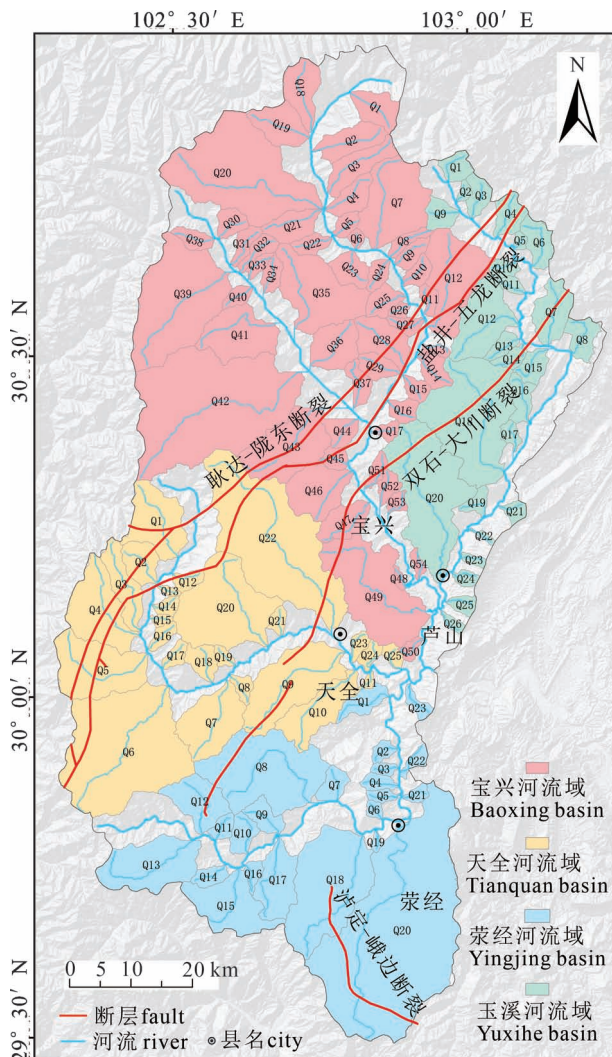


图 2 龙门山南段青衣江上游流域盆地分布图

Fig. 2 Distribution of sub-watershed basins in the upper reaches of the Qingyi River, southern Longmenshan Mountains

不对称度(AF)、河谷宽高比(VF)以及圆度比(Rc)共 6 项指标,通过参数分级标准化处理与算术平均运算,构建表征区域构造活动性的相对指数(Iat)。据此系统揭示研究区流域构造活动性的空间分异特征,并从构造运动、岩性组合与气候过程的耦合机制出发,探讨地貌发育的影响因素及其相互作用关系。

2.2.1 面积高程积分(HI)

面积高程积分(HI)是定量评估构造演化的有效指标之一。根据 Davis 地貌旋回理论,Strahler(1952)提出通过计算侵蚀残留体积与原始地貌总体积之比,系统揭示流域地貌的发育阶段。流域地貌演化具有明显的阶段性与旋回性,不同演化阶段对应特定的 HI 值区间与面积—高程曲线形态,为定

量判别地貌发育进程提供了依据。目前 HI 的计算方法主要包括积分曲线法 (Strahler, 1952)、体积比法 (Lifton and Chase, 1992) 和起伏比法 (Pike and Wilson, 1971)。基于 GIS 平台的起伏比法则是最高效、准确的方法 (常直杨等, 2015)。笔者等采用起伏比法计算流域的面积—高程积分值。计算公式如下:

$$HI = (H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}) / (H_{\text{max}} - H_{\text{min}}) \quad (1)$$

式中: H_{mean} 为流域盆地内平均高程; H_{min} 为流域盆地内最小高程; H_{max} 为流域盆地内最大高程。

2.2.2 河长坡降指数 (SL) 与 Hack 剖面

河长坡降指数 (SL) 是表征河流纵剖面坡度突变特征的重要地貌参数。Hack (1973) 通过量化单位距离坡度与河道源头距离的乘积, 有效揭示构造活动与岩性差异对河流侵蚀过程的影响机制。在构造稳定条件下, 河流侵蚀与堆积作用趋于平衡, 纵剖面形态通常呈圆滑下凹型; 而当剖面出现明显坡度突变时, 则可能反映岩性变化、支流汇入或构造活动的存在与强度差异 (Pike and Wilson, 1971)。此差异会直观体现在 SL 值的大小上, SL 值越大, 表明该区域构造活跃或该区的岩性抗河流侵蚀能力较强, 构造抬升速率大于侵蚀速率; SL 值越小, 表明该区域构造活动较弱或所覆盖的基岩较软, 抗侵蚀能力弱, 侵蚀速率大于构造抬升速率 (彭志忠等, 2024; 王阳等, 2024)。计算公式如下:

$$SL = \Delta H / \Delta L \cdot L \quad (2)$$

式中: 其中 $\Delta H / \Delta L$ 为单位河段的坡度 S , L 为河流源头至河段中点的距离。其中 $\Delta L, \Delta H$ 为单位河段的长度和最大高程差, L 为河流分水岭至河段中点的距离。

Hack 剖面主要研究河流纵剖面形态与构造侵蚀过程之间的动态响应关系。Hack (1973) 提出用对数方程来描述全河段抗蚀能力相似河流的纵剖面。河流处于不同的发育时段, 相应的纵剖面形态将呈现出不同的特征 (李奋生等, 2015)。为使不同河段及河流具有对比性, 前人提出了河流均衡坡降指标 K , 即连接 Hack 剖面起点与终点所构成直线的斜率 (刘非非和杜国云, 2016; 彭志忠等, 2024)。该指标可用于对河流纵剖面进行标准化处理, 其曲线形态直观反映整体坡降变化趋势。由于岩性、构造和气候条件在空间上的差异, 多数河流的抗侵蚀能力沿程发生变化, 导致 Hack 剖面常偏离直线形态, 呈现上凸或下凹等非线性特征 (苏琦等, 2016)。计算公式如下:

$$H = C - K \cdot \lg L \quad (3)$$

式中: H 是河流纵剖面上某点的高程, 是该点到河源的距离; C 是常数; K 值表示斜率, 同时也代表均衡坡降指标。

2.2.3 流域不对称指数 (AF)

流域不对称指数 (AF) 对于垂向掀斜运动非常敏感。Garrote 等 (2006) 通过测量干流与流域边界到理论中线的距离比来判定河流迁移方向。在无构造扰动的均衡状态下, 流域两侧集水面积近似相等, AF 值趋近于 50; 而在构造活动区域, 掀斜作用导致河流一侧侵蚀加剧、另一侧堆积, 致使河道偏离中线, AF 值显著偏离 50, 其偏离程度可反映构造活动的强度。计算公式如下:

$$AF = A_r / A_t \cdot 100 \quad (4)$$

式中: A_r 为河流右侧集水区的面积; A_t 为整个集水区的总面积。

2.2.4 河流宽谷比 (VF)

河流宽谷比 (VF) 是反映区域抬升速率与侵蚀速率之间关系的指标。Bull 和 Mcfadden (1977) 提出用谷底宽度与谷肩高度之比来构建河谷的几何形态, 从而反映区域的构造活动。VF 指数越小, 表明河谷形态越趋近于“V”型谷, 反映下蚀作用占主导, 构造抬升速率较高; VF 指数越大, 河谷越宽阔, 河流以侧蚀作用为主, 区域构造活动相对稳定。在岩性均一的区域, VF 能有效反映构造活动的强弱 (马少谦等, 2020; 陈旭等, 2023)。计算公式如下:

$$VF = \frac{2Vf_w}{[(E_{ld} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})]} \quad (5)$$

式中, Vf_w 为河谷谷底的宽度, E_{sc} 为河谷谷底的平均高程, E_{ld} 为河谷左侧谷肩的高程值, E_{rd} 为河谷右侧谷肩的高程值。

2.2.5 圆度比 (Rc)

圆度比 (Rc) 是描述流域盆地形状的指数。Bull 和 Mcfadden (1977) 将其定义为流域面积与等周长圆面积之比。该参数反映流域形状在水平投影面上接近圆形的程度 (刘樯漪等, 2017)。流域盆地形状越趋近于狭长形, 通常认为流域构造活动强度较强; 流域盆地形状趋近于圆形, 则认为流域构造活动强度较弱。计算公式如下:

$$Rc = 4\pi A / P^2 \quad (6)$$

式中: A 为流域面积; P 为流域周长。

2.2.6 相对构造活动性程度 (Iat)

相对构造活动性指数 (Iat) 是基于多个地貌参数构造活动等级的算术平均值构建的综合评价指

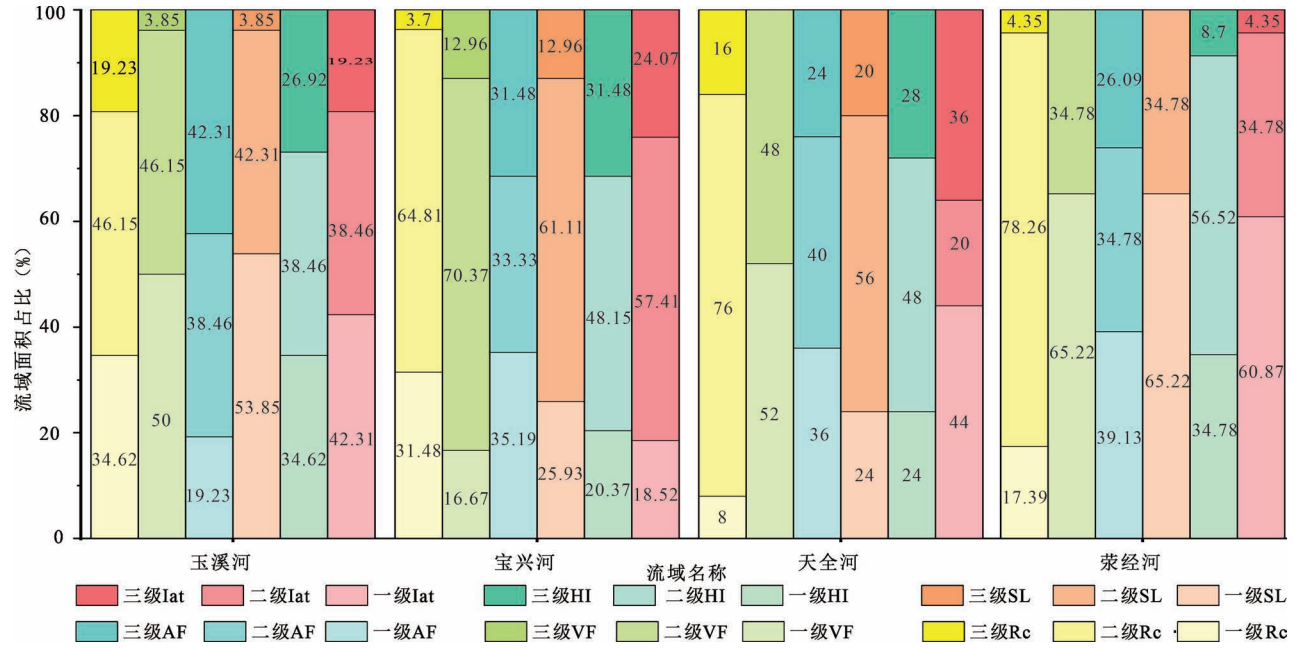


图3 各流域地貌参数等级比例图

Fig. 3 Grade scale map of geomorphological parameters in each river basin

标。上述各地貌参数分别从地貌发育阶段、形态特征及流域平面轮廓等不同角度反映构造活动强度,但在单一参数评价时可能产生判别差异。为更全面、一致地评估区域构造活跃程度,将多参数综合为单一指标,有助于消除此类偏差(王阳等,2024)。其计算公式如下:

$$I_{at} = (I_{HI} + I_{SL} + I_{AF} + I_{VF} + I_{Rc}) / 5 \quad (7)$$

式中: I 代表的是各流域地貌参数的活动性等级。

3 结果分析

3.1 面积—高程积分 (HI)

青衣江上游的流域盆地的 HI 值介于 0.194 ~ 0.595,反映出各支流流域地貌发育程度存在显著差异。从图 3 可见,宝兴河的 HI 值处于 3 级 ($HI > 0.5$) 的流域盆地面积占比最大,其次是天全河流域和玉溪河流域,荣经河流域占比最低。进一步从 3

级 HI 的子流域盆地分布来看(图 4a),主要存在 3 个集中区域:宝兴河北侧支流两岸呈北西—南东向分布的条带区域、玉溪河东侧的狭长条带状区域,以及天全河“U”型河湾北侧的弧形条带区。宝兴河北侧支流的高 HI 值区海拔较高,处于耿达—陇东逆断层的上盘,并向南东延伸,穿越耿达—陇东断裂和盐井—五龙断裂,构造活动强烈,地表处于抬升状态,侵蚀作用尚未充分切割地形,导致流域整体处于地貌发育的幼年期 ($HI > 0.5$)。玉溪河东侧呈南北向分布的高 HI 值区受控于龙门山南北向断裂带,该断裂带作为印度板块与亚欧板块碰撞挤压所产生的侧向挤出与韧性走滑的构造转换带,兼具高地形与强构造活动性特征,强烈的地壳隆升是该区 HI 值偏高的主要原因。天全河“U”型河湾处位于双石—大川断裂带和盐井—五龙断裂带之间,是构造抬升占主导、河流侵蚀相对滞后的综合体现,属于活动逆断层带地貌响应的标志之一。

3.2 河长坡降指数 (SL) 与 Hack 剖面

研究区内多数子流域盆地的 SL 值大于 200,且 Hack 剖面普遍呈现上凸形态,表明整个流域受构造活动影响显著,整体处于构造抬升状态。由图 3 可知,天全河流域中 SL 值处于三级的流域盆地面积占比最多,其次是宝兴河、玉溪河,而荣经河子流域盆地的 SL 值均小于 400。结合空间分布特征(图 4b),高 SL 值子流域的展布方向与区内 3 条主干断

表 1 各参数分级标准

Table 1 Classification Criteria for Each Parameter

地貌参数	弱	中	强
HI	$HI \leq 0.4$	$0.4 < HI < 0.5$	$HI \geq 0.5$
SL	$SL \leq 200$	$200 < SL < 400$	$SL \geq 400$
AF	$ AF \leq 7$	$7 < AF < 15$	$ AF \geq 15$
VF	$VF \geq 0.5$	$0.15 < VF < 0.5$	$VF \geq 0.15$
Rc	$Rc \geq 0.6$	$0.4 < Rc < 0.6$	$Rc \leq 0.4$
Iat	$Iat < 1.8$	$1.8 \leq Iat \leq 2$	$Iat > 2$

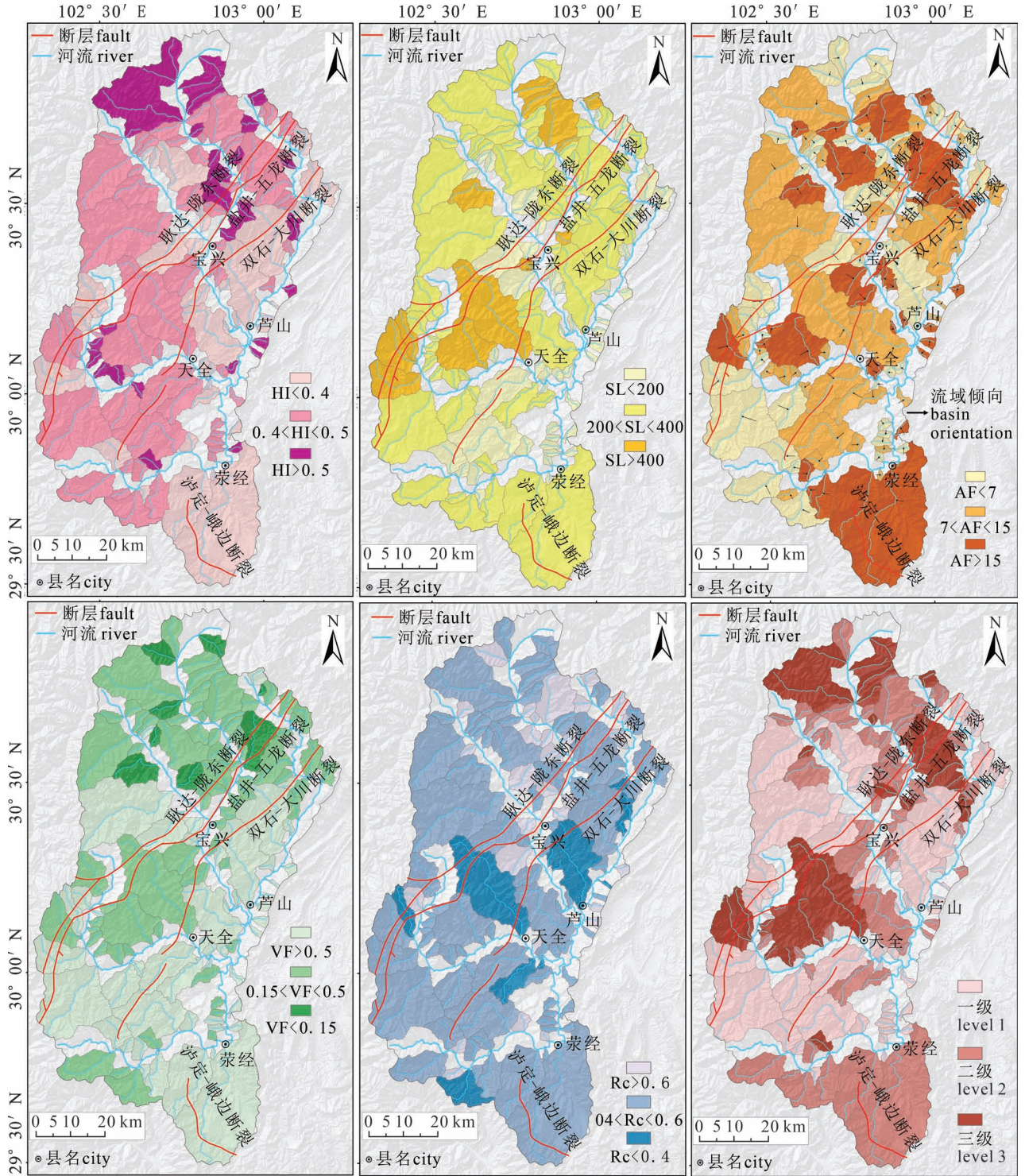


图4 各流域指数等级分布图:(a)—(d)依次为 HI、SL、AF、VF、Rc、Iat 指数

Fig. 4 Distribution map of index grades in each river basin:(a)—(d) correspond to the HI, SL, AF, VF, Rc, and Iat indices, respectively

裂带走向高度吻合,低 SL 值区域则多集中于面积较小的流域。由于 SL 值在大流域中主要响应构造抬升而非流域规模(李贝贝等,2018),上述分布格局进一步证实断裂带对该区河流地貌发育具有长期控

制作用,反映构造在塑造区域地貌形态方面起关键作用。

笔者等选取了 23 个发育断裂且河流横跨断裂带的子流域盆地(图 2),绘制其 Hack 剖面。所选样

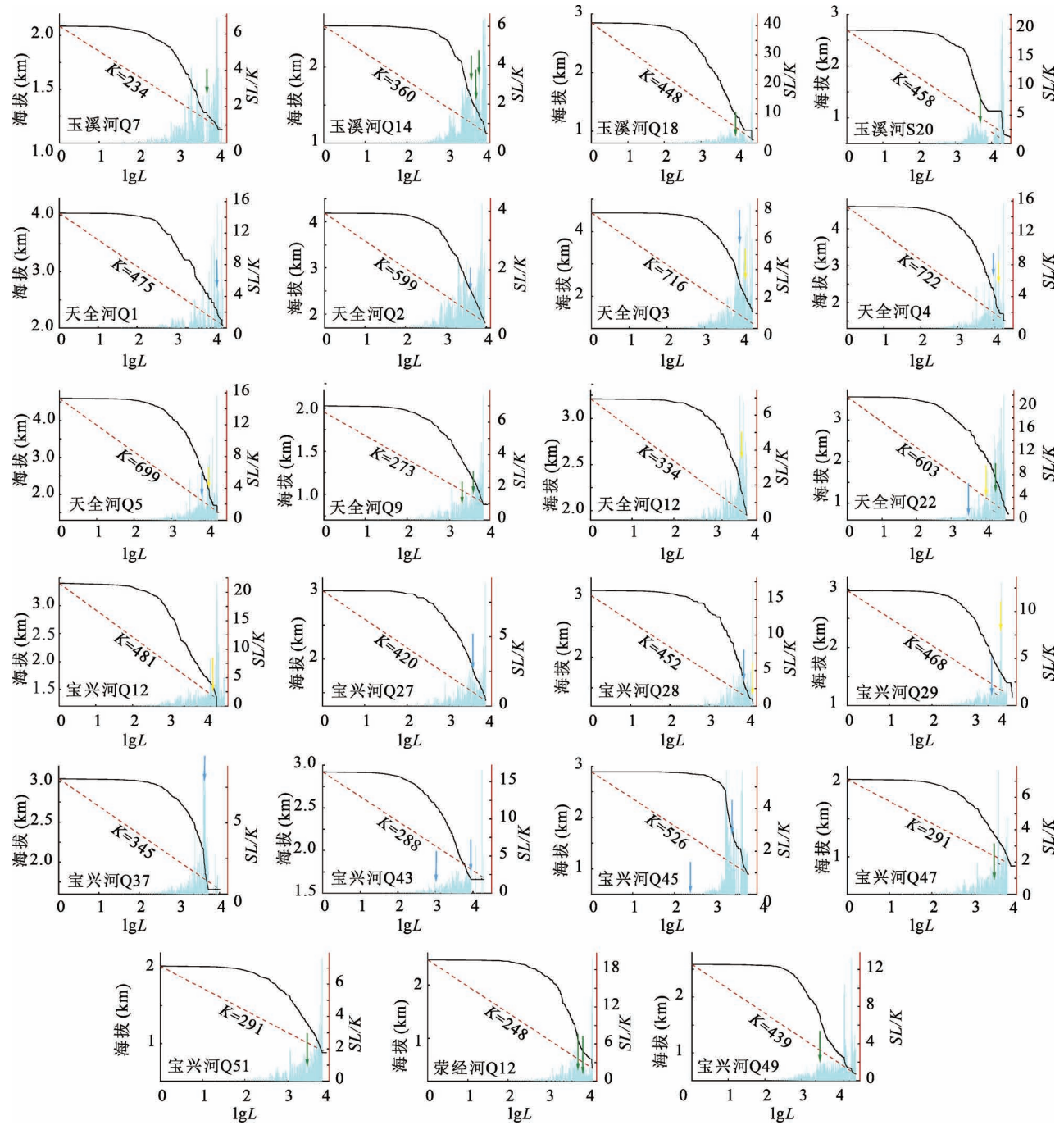


图5 典型子流域盆地 Hack 剖面图(黄色箭头代表盐井—五龙断裂带,绿色箭头代表双石—大川断裂带,蓝色箭头代表耿达—陇东断裂带)

Fig. 5 Hack profile of a typical sub-basin(Arrows mark the locations of major fault zones: yellow for Yanjing—Wulong, green for Shuangshi—Dachuan, and blue for Gengda—Longdong)

本覆盖研究区内断裂的不同段落,具有良好的代表性及可比性。如图5所示,所有流域的Hack剖面均呈现明显“上凸”形态。尽管岩性差异也可能引起剖面凸起(武登云等,2018),但凸起部位与断裂带的空间位置高度吻合,进一步证明其形成主要受控于构造抬升。

3.3 流域不对称指数(AF)

青衣江上游的 $|50-AF|$ 值变化范围介于0.3893至30.6907之间,反映研究区普遍存在掀斜构造活动,但强度存在明显差异。从图3可见,3条支流均发育有掀斜程度较高的子流域,玉溪河流域3级 $|50-AF|$ 值的面积占比最大,其余流域也普遍

较高,进一步说明掀斜构造在区域内广泛发育且强度不均。研究区西北侧出露中厚层块状结晶白云岩,夹有相对软弱的灰岩与云灰岩。在断裂活动影响下,这些软弱岩层易形成裂隙与破碎带,为水流汇集与下切侵蚀提供了优势通道,从而加剧局部侵蚀差异,促使流域形态改变,不对称度升高。此外,研究区西侧子流域多呈现向东倾斜的趋势(图4c),与青藏高原东缘巴颜喀拉块体向东推挤的区域构造应力方向一致(李海兵等,2021),局部断裂活动亦可能强化此类地貌格局。因此,该倾向可视为区域构造应力与局部构造活动共同作用下的综合地貌响应。

3.4 河流宽谷比(VF)

研究区河谷形态整体较为平缓,VF值介于0.0687~2.5668。图3显示,仅宝兴河和玉溪河流域存在少量VF值为3级(VF<0.15)的子流域。从空间分布来看(图4d),深切河谷主要集中于研究区北部,且其分布与SL、HI高值区较为一致,进一步印证该区域构造活动更为强烈。该区以高海拔山地为主,地势起伏显著,河床落差显著,在巴颜喀拉块体持续挤压作用下,西侧山体持续隆升,重力驱动增强河流下切,形成谷肩高、谷底窄的典型“V”型河谷。与之相对的是研究区东部块体运动产生的应力减弱,地势趋于平缓,河流下蚀动力不足,侧向侵蚀作用更为突出,谷肩较低,多发育“U”型宽谷。

3.5 圆度比(Rc)

流域整体的圆度比介于0.2531~0.8180,证明各子流域盆地的形态差异显著。由图3可知,玉溪河流域中狭长型盆地占比最高,其次是天全河与荣经河流域,而宝兴河流域各盆地形态接近圆形。空间上(图4e),在3条断裂带共同控制下,高Rc值子流域的分布与断裂走向基本一致,仅少数面积较小的流域形态趋于圆形。

3.6 相对构造活动性程度(Iat)

基于Iat值将研究区构造活动性划分为3个等级(表1)。由图3可知,天全河流域的强构造活动区面积占比最高(36%),宝兴河与玉溪河次之,荣经河流域占比最小。空间上(图4f),高Iat值子流域主要沿区内3条主干断裂带集中分布,具体位于北部宝兴河北侧支流沿岸、中部天全河“U”型弯道两侧及南部荣经河南岸,另有少数高值区分布于研究区西北侧。整体上,西北部因软弱岩层发育、地形高差大,强烈下切侵蚀增强了构造活动性表征;中部受3条断裂共同控制,断层活动主导了该地区的地貌格局形成;南部荣经河则受高降水量与软弱岩层

影响,叠加泸定—峨边断裂活动,亦表现出较强的构造活动性。

4 讨论

各地貌参数的高值区与断裂带展布具有高度的空间一致性。为深入揭示研究区地貌发育的控制机制及其空间分异特征,在前述地貌参数定量分析的基础上,从构造—岩性—气候耦合的角度综合解析各地貌演化影响因素,并结合子流域活动性差异,探讨不同流域地貌发育的响应特征,以揭示构造活动的空间分异特征。

4.1 地貌参数影响因素分析

现今地貌是地球内、外动力长期综合作用的结果,区域构造活动、气候变化与岩性差异共同控制着地貌的形成演化(杨波等,2025; Mauricio and Lindsay,2025)。地貌参数定量分析表明,研究区内子流域三级相对构造活动性区域的面积达2084.92 km²,其中位于3条断裂带之间的区域面积达1342.28 km²,占总面积的64.38%。高值地貌参数集中分布于断裂带穿越的子流域,其空间展布与断裂走向高度一致,表明构造活动对地貌发育具有显著控制作用。

具体而言,耿达—陇东逆冲断裂带发育强烈下蚀形成的深切河谷,导致高VF值广泛分布;早期北西—南东向挤压引发上盘抬升,后期叠加南北向应力场,促使逆冲推覆构造最终定型(陶晓凤,1999; 陈应涛等,2019),从而显著增强流域不对称性;双石—大川断裂带的断层破碎作用促进河流下切,形成陡峭河谷。各断裂带内构造岩的风化剥蚀为水系发育提供物源,而差异抬升则直接控制河谷形态的发育特征。

岩性差异通过调节抗侵蚀能力在一定程度上影响流域地貌发育(常直杨等,2014;路芳等,2023),研究区内不同构造单元的地层与岩性具有明显分异(图6a):耿达—陇东逆冲断裂沿中高山地貌单元展布,两侧广泛发育风化程度高的断层碎裂岩(李大虎等,2015;李伟等,2017);与盐井—五龙断裂间主要出露志留系茂县群千枚岩,岩性较坚硬,抗侵蚀能力较强;双石—大川断裂东侧广泛分布的侏罗系、白垩系、古近系和新近系“红层”,固结状态较差,易受水流侵蚀;盐井—五龙断裂与大川—双石断裂之间发育元古界花岗岩、角闪岩及变粒岩等深成岩类,抗风化能力强,三叠系地层主要出露于研究区北缘及双石—大川断裂东侧,与侏罗—白垩系呈交互产出,

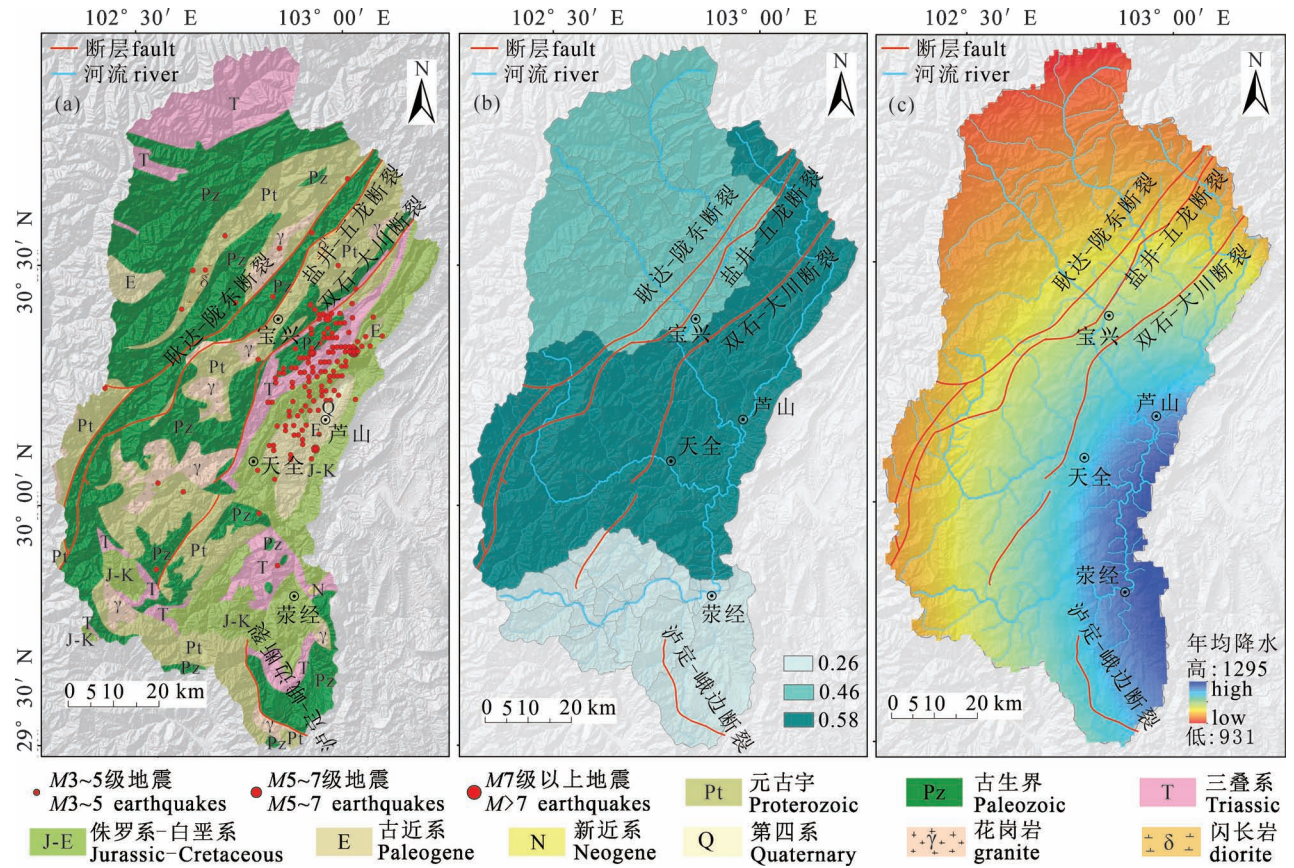


图 6 地貌参数影响因素分布图:(a)地层图;(b)侵蚀速率图(据文力等,2012 修改);(c)降水图

Fig. 6 Distribution Map of Factors Influencing Geomorphic Parameters: (a) stratigraphic distribution; (b) modern erosion rates (modified from Wen Li et al. , 2012&); (c) precipitation distribution

岩性以抗侵蚀较强的砂岩为主。区内现代侵蚀速率空间分布图显示(图 6b),东北部地形陡峭区域河流下切强烈,西南部地势平坦处侵蚀速率较低,侵蚀格局与地貌参数值基本吻合。研究区东侧岩性软弱的区多发育“U”形谷,而在岩性坚硬区则多为“V”形谷,并普遍对应较高的SL与HI值,如盐井—五龙断裂与大川—双石断裂之间花岗岩、角闪岩区域。然

而相同岩性背景下仍存在地貌参数差异,如东侧玉溪河流经的侏罗—白垩系区域同时存在高、低HI值子流域盆地,北侧较硬的古生界石灰岩和砂岩也存在SL和HI低值。此外,同为红层分布的流域在断裂带附近下切更为显著。这表明岩性虽能影响侵蚀强度与局部河谷形态,对地貌发育具有一定调控作用(秦川等,2023),但对地貌参数空间分异的控制

表 2 青衣江上游各流域特征对比表

Table 2 Comparison of Watershed Attributes in the Upper Qingyi River Basin

流域名称	主要构造控制	岩性特征	地貌参数特征	地貌演化阶段	主要地貌形态
玉溪河	河流贯穿三条断裂,在双石—大川断裂处发生近直角转向	上游岩性坚硬,转向后进入软弱岩层区	AF、Rc 较高,SL 较低	壮年期	海拔落差小,流域形态狭长,河谷平坦
宝兴河	河流贯穿三条断裂,在盐井—五龙断裂处发生近直角转向	上游支流区岩性坚硬,汇合后进入软弱岩层区	AF、HI 较高	幼年期	落差大,深切峡谷广泛发育,河道断裂错断明显
天全河	贯穿三条断裂,河流由东转南再转北;耿达—陇东与盐井—五龙断裂控制东—南转向,双石—大川控制东—北转向	北岸岩浆岩坚硬,南岸岩石软弱,抗侵蚀差异显著	SL 值高,VF 值差异显著	壮年期	海拔落差较大,流域形态狭长,北岸深切谷,南岸河谷平坦
荣经河	受双石—大川和峨边—泸定断裂控制	整体岩性软弱,易侵蚀	地貌参数整体偏低	成熟期	地形开阔平缓,海拔落差较小

作用有限,难以独立解释全区地貌发育差异。

气候作为影响地貌发育的重要外营力,主要通过降水调节河流流量,从而影响侵蚀、搬运和堆积过程,参与地貌演化(Hartshorn et al., 2002; Kirby et al., 2012)。研究区年均降水量介于 930 ~ 1295 mm,整体呈现西北低、东南高的格局,最大差值可达 360 mm(图 6c)。尽管降水量分布存在一定的规律,但其与各地貌参数未呈现显著系统性关联,证明了降水并非控制研究区地貌参数空间分异的主导因素,仅对地貌格局形成起到辅助作用。

综上,研究区地貌格局是构造—岩性—气候多尺度耦合作用的结果,其中构造活动居于主导地位。气候通过降水影响侵蚀过程,但其空间分布与地貌参数缺乏系统性关联,表明其对地貌分异影响有限;岩性差异虽局部调节抗侵蚀性并影响河谷形态,但相同岩性区内参数变异及相似岩性区的地貌差异揭示了其控制的局限性。定量分析表明,高值地貌参数集中分布于断裂带沿线,且与构造活动强度空间耦合良好,证实构造运动通过控制隆升幅度、破裂程度及应力体制,直接主导了河流下切强度、流域不对称性及地势格局的形成。

4.2 子流域活动性差异分析

青衣江上游的玉溪河、宝兴河、天全河及荣经河流域在地貌参数(HI、SL、AF、VF、Rc、Iat)上表现出显著差异,反映构造活动、岩性差异及气候—侵蚀耦合作用的空间分异特征。以下从构造控制、岩性响应及地貌演化阶段 3 个方面进行对比分析。

玉溪河贯穿 3 条断裂,受到活动性强烈的双石—大川断裂带影响,河道被断层错动,发生明显位移并出现直角转向,后此河流走向与断裂带保持高度平行(图 7a)。流域上游地处逆冲断裂上盘(邵崇建,2019),且岩性坚硬,转向后流经岩性相对软弱区。研究区上游受构造控制,表现为较高的流域不对称度(AF)和圆度比(Rc),高值区与断层相关地貌的空间分布高度吻合。河长坡降指数(SL)较低,反映出构造隆升与河流侵蚀作用的相对平衡。整体来看,玉溪河处于壮年期,流域海拔落差较小,呈狭长型轮廓,河谷相对平坦,断裂的构造应力与岩性差异共同塑造其地貌格局。

宝兴河流域对构造活动响应显著。作为一个面积广阔、具双分支水系的流域,其河道全程贯穿主要断裂带,强烈的构造作用使河道在宝兴县城附近发生错断,直观反映构造运动对水系格局的改造影响(图 7c)。北侧支流位于耿达—陇东断裂带上盘,岩

性坚硬,地貌参数(如 HI 和 SL)普遍较高,指示强烈隆升与快速下蚀的地貌响应。流域整体表现为高 AF 与 HI 值,反映出构造隆升造成的地势不均衡与侵蚀差异。上游属高海拔山区河流类型(邓荣贵和张倬元,1995),强烈的水动力作用与断裂带中风化破碎的岩体相互作用,促使河流下切显著,谷肩与谷底高差显著,深切峡谷地貌广泛发育,证明该流域正处于以快速下切为主要特征的幼年期演化阶段。

天全河河道走向多变,构造地貌格局受多条断裂带协同控制(图 7c)。在逆冲—走滑复合构造应力作用下,地表呈现出快速隆升的特征,为地貌演化提供持续动力基础。流域东侧断裂沿线发育有线性槽谷、水系偏转等构造地貌。其中构造活动最为强烈的子流域盆地集中分布于“U”型河湾处。该河湾地处耿达—陇东断裂与盐井—五龙断裂的夹持地带,是构造应力集中释放的关键部位(Yue Caiya et al., 2018)。流域南北两侧岩性差异显著影响侵蚀过程与河谷形态,北岸岩浆岩抗侵蚀能力强,在构造抬升与河流下切共同作用下形成陡峻的“V”型峡谷;南岸相对软弱的岩石在长期的侵蚀作用中,逐渐发育成开阔平缓的“U”型河谷,形成河流两岸差异明显的地貌格局。

荣经河流域的地貌演化受构造活动与外营力的协同作用(图 7d)。尽管区域构造活动相对微弱,但双石—大川断裂和峨边—泸定断裂仍主导着流域的构造格局,并孕育了线性地貌、水系错断等典型构造地貌特征。流域岩性以软弱岩层为主,易于受构造与外力作用发生侵蚀改造。由于各地貌参数整体较低,指示河流已进入成熟期,整体高差较小,河谷宽缓,呈现以稳定侵蚀和缓慢演化为特征的地貌格局。

DEM 分辨率是影响河网与流域特征提取精度的关键因素(Piotr and Marek, 2016)。笔者等选取 12.5 m 分辨率的 DEM 以期获得更加准确的河网数据和流域特征(张会平等,2006b),但不同地貌参数对分辨率的响应存在差异,如 AF 受其影响较小(王雪等,2019),而 SL 等参数则对分辨率变化较为敏感(何成邦等,2023)。考虑到研究区地形高差显著,即使在较高分辨率 DEM 支持下,参数提取结果仍存在一定的不确定性。其次,在评价区域相对构造活动性(Iat)时,笔者等采用等权重叠加分析方法。该方法虽便于区域对比且应用广泛,但可能忽略不同参数在指示构造活动性方面的贡献差异,从而引入结果偏差。

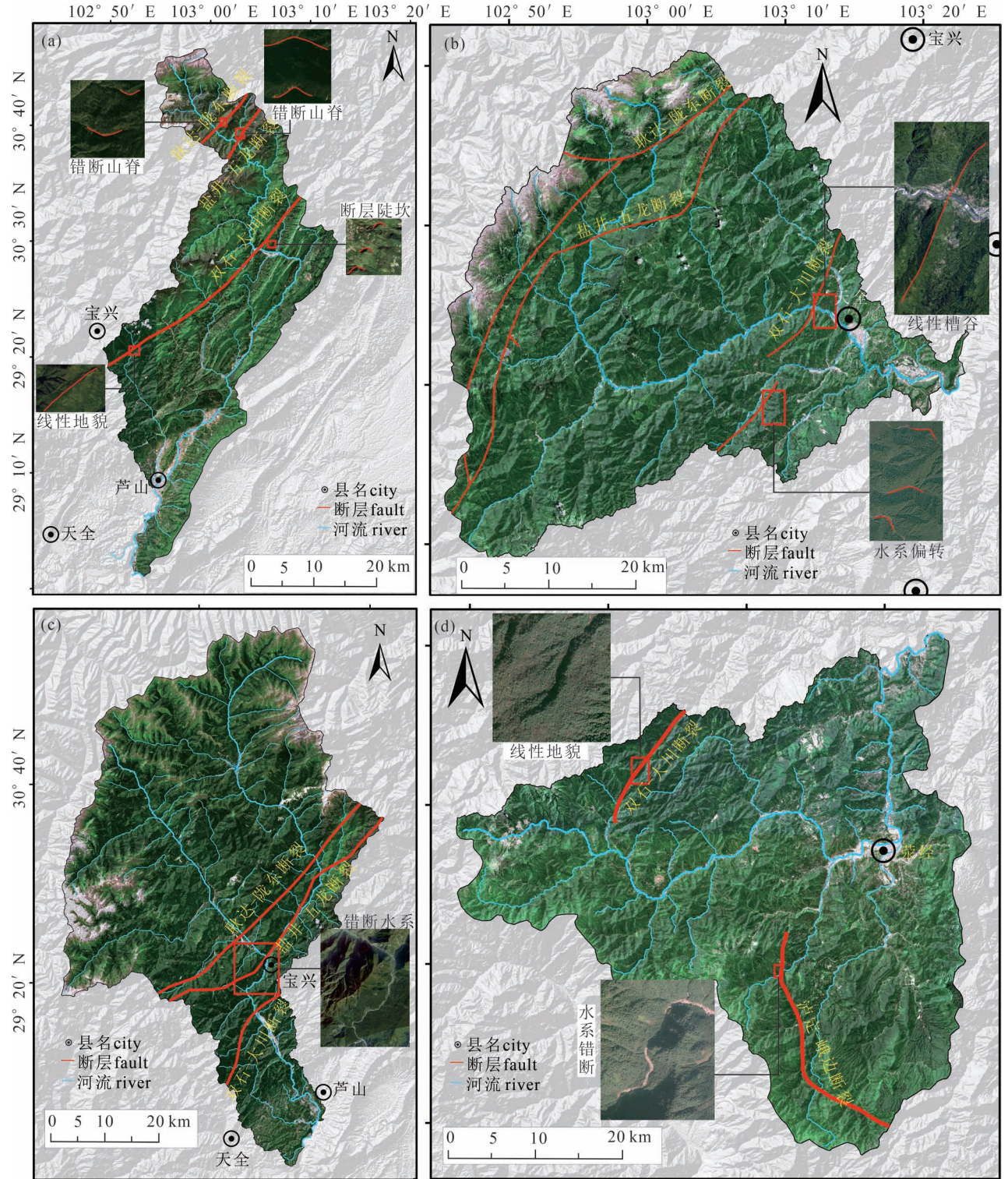


图 7 各流域遥感影像图:(a)玉溪县;(b)天全河;(c)宝兴河;(d)荣经河

Fig. 7 Remote sensing image map of eachriverbasin:(a) Yuxi river;(b) Tianquan river;(c) Baoxing river

5 结论

笔者等以青衣江上游 4 条支流为研究对象,基于高分辨率 DEM 数据与地貌参数定量分析,提取流

域地貌形态参数,评估区域相对构造活动性,并结合地质资料系统探讨了新生代以来河流发育与构造变形特征,获得如下认识:

(1) 构造活动是控制区域地貌演化的主导因

素。构造活动性最强的子流域盆地展布与断裂带走向高度一致,高值地貌参数($HI>0.5, SL>400$)与构造活动性强($Iat>2$)的区域集中分布于主要断裂带沿线及断裂交汇区(如天全河“U”型弯道),揭示断裂控制下的差异隆升对流域地貌演化的直接塑造作用。

(2)4条支流的地貌演化特征存在显著差异。天全河流域与宝兴河流域的构造活动性最强,玉溪河次之,荣经河最弱。区内断裂构造亦表现出明显的空间分异特征,多个地貌参数的高值区主要分布在研究区北侧,揭示出3条主要断裂带的构造活动性整体呈现自北向南递减的规律。

(3)区域地貌演化是构造—岩性—气候多尺度耦合作用的结果。在青藏高原东缘持续向东挤压的构造背景下,岩性差异与降水对局部侵蚀过程具有一定调节作用,但构造活动通过控制隆升幅度与断裂格局,主导了流域地貌发育的阶段性与空间分异,为理解造山带边缘河流系统演化提供了典型案例。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

毕丽思. 2011. 基于DEM的活动构造地貌参数研究. 导师:何宏林. 北京:中国地震局地质研究所硕士学位论文:1~142.

曹鹏举,程三友,林海星,王曦,李曼琪,陈静. 2021. DEM在构造地貌定量分析中的应用与展望. 地质力学学报, 27(6): 949~962.

常直杨,王建,白世彪,张志刚. 2014. 基于DEM的白龙江流域构造活动定量分析. 第四纪研究, 34(2): 292~301.

常直杨,王建,白世彪,张志刚. 2015. 面积高程积分值计算方法的比较. 干旱区资源与环境, 29(3): 171~175.

陈兴长,郭晓军,陈慧. 2023. 金沙江上游德格—白玉段流域地貌特征及影响因素分析. 第四纪研究, 43(5): 1269~1281.

陈旭,赵德军,冉波,向文川. 2023. 涪江支流潼江流域地貌参数对广元—江油断裂活动的指示意义. 矿物岩石, 43(2): 132~145.

陈应涛,张国伟,鲁魁魁,郭安林,谢晋强,朱伟. 2019. 龙门山南段盐井—五龙断裂组构造特征及其对几何学、运动学的制约. 大地构造与成矿学, 43(2): 199~212.

邓起东,陈社发,赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. 地震地质, 16(4): 389~403.

邓荣贵,张俤元. 1995. 宝兴河流域地质灾害特征浅析. 成都理工大学学报, 22(2): 57~63.

段书苏. 2016. 基于构造地貌学的山区孕灾环境分析及线路工程减灾策略. 导师:. 成都:西南交通大学博士学位论文:1~135.

范增辉,刘树根,范存辉,胡林辉,李文佳,米鸿,韩翀,韩小俊. 2018. 龙门山褶皱冲断带典型地震剖面平衡剖面恢复及构造演化分析. 地质论评, 64(2): 347~360.

何成邦,胡春生,赵婷婷,李伯祥. 2023. DEM分辨率对山地河流形态提取的影响. 安徽师范大学学报(自然科学版), 46(6): 555~563.

贾营营,付碧宏,王岩,时丕龙,刘锋. 2010. 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. 第四纪研究, 30

(4): 825~836.

姜大伟,张世民,李明. 2020. 龙门山南段活动构造分布特征. 地质科学, 55(2): 537~557.

姜大伟,张世民,李伟,丁锐. 2018. 龙门山南段前陆区晚第四纪构造变形样式. 地球物理学报, 61(5): 1949~1969.

姜大伟. 2017. 龙门山南段及其前陆区晚第四纪构造变形的河流地貌研究. 导师:张世民. 北京:中国地震局地质研究所博士学位论文:1~183.

李贝贝,李志威,胡旭跃,余国安. 2018. 长江源区河网纵剖面分析. 山地学报, 36(3): 470~481.

李大虎,邵昌盛,刘远志,邹俊. 2015. 龙门山断裂带南段耿达—陇东断裂的浅层地震反射波法探测. 成都理工大学学报(自然科学版), 42(4): 500~508.

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. 地质论评, 61(2): 345~355.

李海兵,潘家伟,孙知明,司家亮,裴军令,刘栋梁,Marie-Luce CHEVALIER,王焕,卢海建,郑勇,李春锐. 2021. 大陆构造变形与地震活动——以青藏高原为例. 地质学报, 2021, 95(01): 194~213.

李环宇,丁锐,张世民. 2020. 丽江—小金河断裂南、中段地貌特征及构造指示意义. 震灾防御技术, 15(2): 380~391.

李伟,张世民,姜大伟,郗宇. 2017. 龙门山南段晚第四纪逆冲活动的河流地貌研究. 地震地质, 39(6): 1213~1236.

李勇,黄润秋,周荣军, Alexander L D S, Michael A E, 闫亮,董顺利, Nicholas R, 张毅,何玉林,陈浩,乔宝成,马博琳. 2009. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂. 工程地质学报, 17(1): 3~18.

李勇杰,周小虎,尤继元,胡金鑫,黄琪. 2024. 北大巴山汉江流域地貌特征及其构造意义. 地质科学, 59(4): 1132~1150.

李智武,刘树根,陈洪德,刘顺,郭兵,田小彬. 2008. 龙门山冲断带分段—分带性构造格局及其差异变形特征. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 440~454.

梁明剑,陈立春,冉勇康,王虎,李东雨. 2016. 龙门山断裂南段天全段的新活动特征与1327年天全地震的关系. 地震地质, 38(3): 546~559.

刘非非,杜国云. 2016. 沂沭断裂带活动构造的流域地貌分析. 第四纪研究, 36(2): 453~463.

刘汉永. 2015. 龙门山构造带南段构造地貌研究. 导师:张世民. 北京:中国地震局地壳应力研究所硕士学位论文:1~69.

刘和甫,梁慧社,蔡立国,沈飞. 1994. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化. 地质学报, 68(2): 101~118.

刘楠漪,程维明,郭良,孙东亚. 2017. 北天山流域地貌特征及其构造活动分析. 地理与地理信息科学, 33(4): 79~85.

刘树根,罗志立,曹树恒. 1991. 一种新的陆内俯冲类型——龙门山型俯冲成因机制研究. 石油实验地质, 13(4): 314~324.

路芳,高明星,周书贤,王顺. 2023. 阿尔金东段断裂带流域地貌特征及其构造活动. 现代地质, 37(5): 1100~1109.

马少谦,李家存,王俊,刘晓东. 2020. 地貌指数在当雄县宁中盆地及邻域构造活动性评价中的应用. 首都师范大学学报(自然科学版), 41(5): 53~61.

彭志忠,袁飞云,何朝阳,李东来,解明礼,饶泽迅. 2024. 地质灾害多源基础数据结构体系及应用. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(4): 630~640+653.

秦川,李敬波,郑立龙,白赞. 2023. 云南莲峰、昭通—鲁甸断裂带面积—高程积分的构造地貌研究. 地质论评, 69(5): 1649~1660.

邵崇建. 2016. 青藏高原东缘龙门山南段山前流域构造地貌研究. 导师:李勇. 成都:成都理工大学硕士学位论文:1~80.

邵崇建. 2019. 龙门山构造地貌特征与应变差异传递机制研究. 导

- 师:李勇. 成都:成都理工大学博士学位论文; 1~162.
- 苏鹏, 田勤俭, 梁朋, 李文巧, 王林. 2016. 基于青衣江变形河流阶地研究龙门山断裂带南段的构造活动性. 地震地质, 38(3): 523~545.
- 苏琦, 袁道阳, 谢虹, 邵延秀, 梁明剑. 2016. 祁连山西段疏勒河流域地貌特征及其构造意义. 地震地质, 38(2): 240~258.
- 汤国安, 刘学军, 闫国年. 2005. 数字高程模型及地学分析的原理与方法. 北京: 科学出版社, 1~411.
- 陶晓风. 1999. 龙门山南段推覆构造与前陆盆地演化. 成都理工学院学报, 26(1): 73~77.
- 滕吉文, 皮娇龙, 杨辉, 闫雅芬, 张永谦, 阮小敏, 胡国泽. 2014. 汶川—映秀 $M_s 8.0$ 地震的发震断裂带和形成的深层动力学响应. 地球物理学报, 57(2): 392~403.
- 王继龙, 吴中海, 张克旗, 孙玉军, 周游. 2018. 四川龙门山南段青衣江河流阶地形成时代及其构造地貌意义. 地质通报, 37(6): 996~1005.
- 王林, 李文巧, 苏鹏, 梁朋. 2018. 芦山盆地水系与层状地貌面的构造响应及其指示意义. 第四纪研究, 38(1): 165~182.
- 王明明, 马超, 李大虎, 汤才成, 黄成程. 2017. 耿达——陇东断裂地质地貌调查及活动性探讨. 四川地震(1): 1~5.
- 王雪, 李精忠, 余斌. 2019. 基于 DEM 提取流域特征影响因素的分析. 测绘与空间地理信息, 42(6): 38~42.
- 王阳, 周小虎, 史小辉, 黄琪, 刘禄山. 2024. 青藏高原东北缘清水河流域地貌特征及其构造意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(4): 579~595.
- 王志, 王剑, 付修根. 2021. 青藏高原东缘—扬子特提斯构造域深部结构与地壳形变研究. 地质论评, 67(1): 1~13.
- 魏智明. 2023. 龙门山南段活动断裂与地震活动性分析. 导师: 李勇. 成都: 成都理工大学硕士学位论文; 1~83.
- 文力, 刘静, M. Oskin, 曾令森, 王伟. 2012. 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. 第四纪研究, 32(5): 968~985.
- 武登云, 张天琪, 程璐, 王振, 吕红华, 郑祥民. 2018. 地貌形态指标揭示的北天山乌鲁木齐河流域新构造活动特征. 第四纪研究, 38(1): 193~203.
- 杨波, 吴磊, 管涛, 闫兵, 苏楠, 杨树锋, 陈汉林. 2025. 构造地貌物理模拟实验方法研究进展. 地质论评: 1~19. (2025-09-17). <https://link.cnki.net/doi/10.16509/j.georeview.2025.08.032>.
- 杨晓平, 蒋溥, 宋方敏, 梁小华, 陈献程, 邓忠文. 1999. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据. 地震地质, 21(4): 341~345.
- 张会平, 刘少峰, 孙亚平, 陈永生. 2006b. 基于 SRTM-DEM 区域地形起伏的获取及应用. 国土资源遥感, 18(1): 31~35+94.
- 张会平, 杨农, 张岳桥, 孟晖. 2006a. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义. 第四纪研究, 26(1): 126~135.
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. 中国科学(D辑: 地球科学), 38(9): 1041~1056.
- 张威, 马超, 王世元, 何玉林, 刘玉法, 颜照坤. 2018. 青衣江流域地貌特征及构造指示意义. 四川师范大学学报(自然科学版), 41(3): 410~418.
- 张岳桥, 李海龙, 李建华. 2010. 青藏高原东缘中更新世伸展作用及其新构造意义. 地质论评, 56(6): 781~791.
- 郑勇, 李海兵, 王焕, 张蕾, 李成龙. 2018. 印支期龙门山断裂带的逆冲——推覆构造和沉积响应. 地质论评, 64(1): 45~61.
- 周启鸣, 刘学军. 2001. 数字地形分析. 北京: 科学出版社.
- Bi Lisi. 2011. A study on the geomorphologic indexes in active tectonics based on DEM data. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration Master Thesis; 1~142.
- Bull W B, Mcfadden L D. 1977. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. Doehring D O. Geomorphology in arid regions; a proceedings volume of the eighth annual geomorphology symposium. Binghamton: State University of New York; 115~138.
- Burchfiel B C, Chen Zhiliang, Yupinc L, Royden L H. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, Central China. International Geology Review, 37(8): 661~735.
- Cao Pengju, Cheng Sanyou, Lin Haixing, Wang Xi, Li Manqi, Chen Jing. 2021. DEM in quantitative analysis of structural geomorphology: Application and prospect. Journal of Geomechanics, 27(6): 949~962.
- Chang Zhiyang, Wang Jian, Bai Shibiao, Zhang Zhigang. 2014. Appraisal of active tectonic in Bailongjiang basin based on DEM data. Quaternary Sciences, 34(2): 292~301.
- Chang Zhiyang, Wang Jian, Bai Shibiao, Zhang Zhigang. 2015. Comparison of hypsometric integral methods. Journal of Arid Land Resources and Environment, 29(3): 171~175.
- Chen Xingzhang, Guo Xiaojun, Chen Hui. 2023. Analysis on geomorphological characteristics of catchments and its influencing factors in Dege—Baiyu section of the upper Jinsha river. Quaternary Sciences, 43(5): 1269~1281.
- Chen Xu, Zhao Dejun, Ran Bo, Xiang Wenchuan. 2023. The significance of geomorphic parameters of Tongjiang river basin in Fujiang tributary to the activity of Guangyuan—Jiangyou fault. Mineralogy and Petrology, 43(2): 132~145.
- Chen Yingtao, Zhang Guowei, Lu Rukui, Guo Anlin, Xie Jinqiang, Zhu Wei. 2019. Kinematics and geometry of the Yanjing—Wulong fault in the southern section of Longmenshan tectonic belt: Constraints from magnetic fabrics. Geotectonica et Metallogenia, 43(2): 199~212.
- Deng Qidong, Chen Shefa, Zhao Xiaolin. 1994. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmen Shan mountains and its adjacent regions. Seismology and Geology, 16(4): 389~403.
- Deng Ronggui, Zhang Zhuoyuan. 1995. Distribution and feature of the geological disasters in the Baoxinghe River drainage, Sichuan. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 22(2): 57~63.
- Duan Shusu. 2016. Analysis of disaster-pregnant environment in mountain areas and disaster reduction strategies for line engineering based on tectonic geomorphology. Chengdu: Southwest Jiaotong University Doctoral Dissertation; 1~135.
- Fan Zenghui, Liu Shugen, Fan Cunhui, Hu Linhui, Li Wenjia, Mi Hong, Han Chong, Han Xiaojun. 2018. Analysis of typical seismic profile and balanced cross-section recovery and tectonic evolution in the Longmenshan fold—Thrust belt. Geological Review, 64(2): 347~360.
- Gao Mingxing, Zeilinger G, Xu Xiwei, Tan Xibin, Wang Qingliang, Hao Ming. 2016. Active tectonics evaluation from geomorphic indices for the central and the southern Longmenshan range on the Eastern Tibetan Plateau, China. Tectonics, 35(8): 1812~1826.
- Garrote J, Cox R T, Swann C T, Ellis M A. 2006. Tectonic geomorphology of the southeastern Mississippi Embayment in northern Mississippi, USA. Geological Society of America Bulletin, 118: 1160~1170.
- Guo Peng, Han Zhujun, Zhan Yan, Wang Jiawei, Niu Pengfei, Sun Xiangyu. 2024. Structural geometry and active faulting along the

- southern segment of the Longmenshan thrust belt; Insights into the seismotectonics of the 1327 Tianquan and 2013 Lushan earthquakes (eastern Tibetan Plateau, China). *Tectonophysics*, 871: 230179.
- Haag M B, Schoenbohm L M. 2025. Thor: A rock strength database for investigating lithologic controls in landscape evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 660: 119364.
- Hack J T, 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the US Geological Survey*, 1(4): 421~429.
- Hartshorn K, Hovius N, Dade W B, Slingerland R L. 2002. Climate-driven bedrock incision in an active mountain belt. *Science*, 297(5589): 2036~2038.
- He Chengbang, Hu Chunsheng, Zhao Tingting, Li Boxiang. 2023&. Effect of DEM resolution on morphology extraction of mountain rivers. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 46(6): 555~563.
- Jia Yingying, Fu Bihong, Wang Yan, Shi Pilong, Liu Feng. 2010&. Late Cenozoic tectono-geomorphic growth and drainage response in the Longmen Shan fault zone, east margin of Tibet. *Quaternary Sciences*, 30(4): 825~836.
- Jiang Dawei, Zhang Shimin, Li Ming. 2020&. Active tectonic pattern of the southern Longmen Shan. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 55(2): 537~557.
- Jiang Dawei, Zhang Shimin, Li Wei, Ding Rui. 2018&. Foreland deformation pattern of the southern Longmen Shan in Late Quaternary. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(5): 1949~1969.
- Jiang Dawei. 2017&. A fluvial geomorphology research about the late quaternary deformation of the southern Longmen Shan and its foreland basin. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration Doctoral Dissertation; 1~183.
- Kirby E, Whipple K X. 2012. Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44: 54~75.
- Kirby E, Whipple K. 2001. Quantifying differential rock-uplift rates *via* stream profile analysis. *Geology*, 29(5): 415.
- Li Beibei, Li Zhiwei, Hu Xuyue, Yu Guoan. 2018&. Longitudinal profile of river networks in the Yangtze River source region. *Mountain Research*, 36(3): 470~481.
- Li Dahu, Shao Changsheng, Liu Yuanzhi, Zou Jun. 2015&. Exploration of Gengda—Longdong fault in southern segment of Longmenshan fault zone by using shallow seismic reflection. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 42(4): 500~508.
- Li Fusheng, Zhao Guohua, Li Yong, Yan Zhaokun, Liang Mingjian, Yan Liang, Li Jingbo, Shao Chongjian, Zheng Lilong. 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. *Geological Review*, 61(2): 345~355.
- Li Haibing, Pan Jiawei, Sun Zhiming, Si Jialiang, Pei Junling, Liu Dongliang, Marie-Luce Chevalier, Wang Huan, Lu Haijian, Zheng Yong, Li Chunrui. 2021&. Continental tectonic deformation and seismic activity: a case study from the Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 194~213.
- Li Huanyu, Ding Rui, Zhang Shimin. 2020&. Geomorphological features of the south and middle sections of Lijiang—xiaojinhe fault and their tectonic significance. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 15(2): 380~391.
- Li Wei, Zhang Shimin, Jiang Dawei, Gao Yu. 2017&. Thrust of the southern Longmenshan fault in the late quaternary revealed by river landforms. *Seismology and Geology*, 39(6): 1213~1236.
- Li Yong, Huang Runqiu, Zhou Rongjun, Densmore A L, Ellis M A, Yan Liang, Dong Shunli, Richardson N, Zhang Yi, He Yulin, Chen Hao, Qiao Baocheng, Ma Bolin, 2009&. Geological background of Longmen Shan seismic belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 17(1): 3~18.
- Li Yongjie, Zhou Xiaohu, You Jiyan, Hu Jinxin, Huang Qi. 2024&. Geomorphic feature and tectonic implications of the Hanjiang River basin in the northern Dabashan. *Chinese Journal of Geology*, 59(4): 1132~1150.
- Li Zhiwu, Liu Shugen, Chen Hongde, Liu Shun, Guo Bing, Tian Xiaobin. 2008&. Structural segmentation and zonation and differential deformation across and along the Longmen thrust belt, West Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 35(4): 440~454.
- Liang Mingjian, Chen Lichun, Ran Yongkang, Wang Hu, Li Dongyu. 2016&. The discussion for the new activity of the Tianquan segment of Longmenshan fault zone and its relationship to the 1327 Tianquan earthquake, Sichuan. *Seismology and Geology*, 38(3): 546~559.
- Lifton N A, Chase C G. 1992. Tectonic, climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry: implications for landscape evolution. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B13): 1995~2004.
- Liu Feifei, Du Guoyun. 2016&. Catchment geomorphic properties of active tectonics in yishu fault zone. *Quaternary Sciences*, 36(2): 453~463.
- Liu Hanyong. 2015&. Study on tectonic geomorphology of the southern segment of Longmen Shan tectonic zone. Beijing: Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration for Master Thesis; 1~69.
- Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Ligu, Shen Fei. 1994. Structural styles of the Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 68(2): 101~118.
- Liu Qiangyi, Cheng Weiming, Guo Liang, Sun Dongya. 2017&. Geomorphology of northern Tianshan and its structural analysis. *Geography and Geo-Information Science*, 33(4): 79~85.
- Liu Shugen, Luo Zhili, Cao Shuheng. 1991&. On the mechanism of a new type of intracontinental subduction—the Longmenshan subduction. *Petroleum Geology & Experiment*, 13(4): 314~324.
- Lu Fang, Gao Mingxing, Zhou Shuxian, Wang Shun. 2023&. Fluvial geomorphology of the eastern Altyn tagh and its tectonic activity implications. *Geoscience*, 37(5): 1100~1109.
- Luo Lanhua, Li Fayuan, Dai Ziyang, Yang Xue, Liu Wei, Fang Xuan. 2020. Terrace extraction based on remote sensing images and digital elevation model in the Loess Plateau, China. *Earth Science Informatics*, 13(2): 433~446.
- Ma Shaoqian, Li Jiacun, Wang Jun, Liu Xiaodong. 2020&. Application of geomorphic index in evaluating tectonic activity in ningzhong basin and its adjacent areas of Dangxiang country. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 41(5): 53~61.
- Migoń P, Kasprzak M. 2016. Pathways of geomorphic evolution of sandstone escarpments in the Góry Stołowe tableland (SW Poland)—Insights from LiDAR-based high-resolution DEM. *Geomorphology*, 260: 51~63.
- Peng Zhizhong, Yuan Feiyun, He Chaoyang, Li Donglai, Xie Mingli, Rao Zexun. 2024&. System to integrate and manage multi-source data on geological hazards and its application. *Journal of Chengdu*

- University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 630~640+653.
- Pike R J, Wilson S E. 1971. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4): 1079.
- Qin Chuan, Li Jingbo, Zheng Lilong, Bai Yun. 2023&. Study on tectonic geomorphology of area—elevation integral in Lianfeng and Zhaotong—Ludian fault zone. *Geological Review*, 69(5): 1649~1660.
- Shao Chongjian. 2016&. Tectonic geomorphology analysis of piedmont rivers in the southern segment of the Longmen shanat the eastern margin of the Tibetan Plateau. Chengdu: Chengdu University of Technology Master Thesis: 1~80.
- Shao Chongjian. 2019&. Study on the tectonic geomorphology feature and the strain differential transfer mechanism of the Longmenshan. Chengdu: Chengdu University of Technology Doctoral Dissertation: 1~162.
- Strahler A N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11): 1117.
- Su Peng, Tian Qinjian, Liang Peng, Li Wenqiao, Wang Lin. 2016. Using deformed fluvial terraces of the qingyijiang river to study the tectonic activity of the southern segment of Longmenshan fault zone. *Seismology and Geology*, 38(3): 523~545.
- Su Qi, Yuan Daoyang, Xie Hong, Shao Yanxiu, Liang Mingjian. 2016&. Geomorphic features of the Shule river drainage basin in Qilianshan and its insight into tectonic implications. *Seismology and Geology*, 38(2): 240~258.
- Tang Guoan, Liu Xuejun, Lü Guonian. 2005&. Principles and methods of digital elevation model and geoscience analysis. Beijing: Science Press, 1~411.
- Tao Xiaofeng. 1999&. Evolution of nappe tectonic and foreland basin in the southern section of Longmen mountains. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 26(1): 73~77.
- Teng Jiwen, Pi Jiaolong, Yang Hui, Yan Yafen, Zhang Yongqian, Ruan Xiaomin, Hu Guoze. 2014. Wenchuan—Yingxiu M₈. 0 earthquake seismogenic faults and deep dynamic response. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(2): 392~403.
- Wang Hu, Chen Lichun, Ran Yongkang, Lei Shengxue, Li Xi. 2015. Paleoseismic investigation of the seismic gap between the seismogenic structures of the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan earthquakes along the Longmen Shan fault zone at the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Lithosphere*, 7(1): 14~20.
- Wang Jilong, Wu Zhonghai, Zhang Keqi, Sun Yujun, Zhou You. 2018&. Formation age and its tectonic geomorphological significance of Qingyijiang River terraces in the southern of Longmenshan, Sichuan. *Geological Bulletin of China*, 37(6): 996~1005.
- Wang Lin, Li Wenqiao, Su Peng, Liang Peng. 2018&. Tectonic response of the river and layered landform surface in the Lushan basin and its implication. *Quaternary Sciences*, 38(1): 165~182.
- Wang Mingming, Ma Chao, Li Dahu, Tang Caicheng, Huang Chengcheng. 2017&. Geological and geomorphic investigation and activity discussion on the gengda—Longdong fault. *Earthquake Research in Sichuan*, (1): 1~5.
- Wang Wei, Shao Yanxiu, Zhang Jinyu, Wang Wenxin, Lu Renqi. 2023. Channel profiles reveal fault activity along the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 15(19): 4721.
- Wang Xue, Li Jingzhong, Yu Bin. 2019&. Analysis of influence factors for extraction of hydrological basin features from DEM. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 42(6): 38~42.
- Wang Yang, Zhou Xiaohu, Shi Xiaohui, Huang Qi, Liu Lushan. 2024&. Geomorphic features of the Qingshui River Basin and their significance for the northeastern margin of the Qinghai—Tibet Plateau. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(4): 579~595.
- Wang Zhi, Wang Jian, Fu Xiugen. 2021&. Deep structure and crustal deformation in the Tethys tectonic domain of the eastern Xizang (Tibetan) margin—Yangtze Platform. *Geological Review*, 67(1): 1~13.
- Wei Zhiming. 2023&. Analysis of active faults and seismic activity in the southern segment of Longmen Shan. Chengdu: Chengdu University of Technology Master Thesis: 1~83.
- Wen Li, Liu Jing, Oskin M, Zeng Lingsen, Wang Wei. 2012&. Pattern of modern denudation in the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau; Tectonic controls on focused erosion along the plateau margin. *Quaternary Sciences*, 32(5): 968~985.
- Wu Dengyun, Zhang Tianqi, Cheng Lu, Wang Zhen, Lü Honghua, Zheng Xiangmin. 2018&. Neotectonic activation of the Ürümqi river basin revealed by geomorphic indices. *Quaternary Sciences*, 38(1): 193~203.
- Yang Bo, Wu Lei, Guan Tao, Yan Bing, Su Nan, Yang Shufeng, Chen Hanlin. 2025&. Advances in experimental methods for physical simulation of tectonic—geomorphic processes [J/OL]. *Geological Review*: 1~19. (2025-09-17). <https://link.cnki.net/doi/10.16509/j.georeview.2025.08.032>.
- Yang Rong, Willett S D, Goren L. 2015. In situ low-relief landscape formation as a result of river network disruption. *Nature*, 520(7548): 526~529.
- Yang Xiaoping, Jiang Pu, Song Fengmin, Liang Xiaohua, Chen Xiancheng, Deng Zhongwen. 1999&. The evidence of the south Longmenshan fault zones cutting late quaternary stratum. *Seismology and Geology*, 21(4): 341~345.
- Yue Caiya, Dang Yamin, Dai Huayang, Yang Qiang, Wang Xiankai. 2018. Crustal deformation characteristics of Sichuan—Yunnan region in China on the constraint of multi-periods of GPS velocity fields. *Advances in Space Research*, 61(8): 2180~2189.
- Zhang Huiping, Liu Shaofeng, Sun Yaping, Chen Yongsheng. 2006b&. The acquisition of local topographic relief and its application; An srtm-Dem analysis. *Remote Sensing for Land & Resources*, 18(1): 31~35+94.
- Zhang Huiping, Yang Nong, Zhang Yueqiao, Meng Hui. 2006a. Geomorphology of the Minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications. *Quaternary Sciences*, 26(1): 126~135.
- Zhang Peizhen. 2008&. Present-day tectonic deformation, strain partitioning, and deep dynamic processes in western Sichuan, eastern margin of the Qinghai—Tibet Plateau. *Science in China (Series D (Earth Sciences))*, 38(9): 1041~1056.
- Zhang Wei, Ma Chao, Wang Shiyuan, He Yulin, Liu Yufa, Yan Zhaokun. 2018&. Geomorphology of the qingyi river and their tectonic significance. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)*, 41(3): 410~418.
- Zhang Yueqiao, Li Hailong, Li Jianhua. 2010&. Middle Pleistocene extension along the eastern margin of Xizang (Tibetan) plateau and its neotectonic significance. *Geological Review*, 56(6): 781~791.

Zheng Yong, Li Haibing, Wang Huan, Zhang Lei, Li Chenglong.
2018&. Indosinian thrust—Nappe structure and its sedimentary
response in the Longmen mts. thrust belt. *Geological Review*, 64

(1): 45~61.

Zhou Qiming, Liu Xuejun. 2001&. Digital terrain analysis. Beijing:
Science Press.

Analysis of the geomorphological characteristics and influencing factors of the upstream basin of the Qingyijiang River in the southern section of Longmenshan

HU Wei¹⁾, LIU Yansong^{1, 2)}, GU Tiantian¹⁾, TANG Fangqiang¹⁾, ZHENG Boqian¹⁾

1) *College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;*

2) *Sichuan Sanhe Space Technology Co., LTD., Chengdu, 610094*

Objective: The Longmenshan fault zone represents the tectonic boundary between the Tibetan Plateau and the Sichuan Basin. The rapid uplift and geomorphic evolution of its southern segment since the Late Cenozoic are of critical significance for revealing the expansion mechanism of the eastern margin of the plateau. This study aims to quantitatively assess the spatial differentiation of tectonic activity in the southern segment of the Longmenshan fault zone and to explore its controlling effects on the geomorphic development of the upper Qingyijiang River basin.

Methods: Based on high-resolution DEM data, four tributaries in the upper Qingyijiang River basin were selected as study objects. Using the ArcGIS 10.8 platform, five geomorphic parameters were extracted, including the stream length-gradient index (SL), hypsometric integral (HI), the asymmetry factor (AF), valley floor width-height ratio (VF), and circularity ratio (Rc). Combined with Hack profile analysis, a comprehensive geomorphic index was constructed to quantitatively compare tectonic activity.

Results: The results indicate that: ① high-value geomorphic parameters ($I_{at} > 2$) are mainly distributed near the Gengda—Longdong, Yanjing—Wulong, and Shuangshi—Dachuan fault zones, consistent with the fault trends, reflecting that tectonic activity is the dominant factor controlling regional geomorphic variation; ② The four tributaries exhibit significant variations in tectonic activity: the Tianquan River and Baoxing River basins, controlled by multiple fault zones, demonstrate the highest level of tectonic activity, followed by the Yuxi River, while the Yingjing River shows the weakest activity. Overall, fault zone activity in the region displays a pattern of stronger intensity in the north and weaker in the south; ③ Regional geomorphic evolution results from the multiscale coupling of tectonics, lithology, and climate.

Conclusion: These findings revealed how surface processes respond to tectonic deformation on the eastern margin of the Tibetan Plateau, providing new evidence and insights for studying regional tectonic geomorphology evolution.

Keywords: southern Longmenshan; upper Qingyijiang river; geomorphic parameters; tectonic activity; tectonic—climate—lithology coupling

Acknowledgements: This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41971226), the project of China Geological Survey (No. DD20221697), the Project Supported by Scientific Reserch Fund of Sichuan Provincial Education Department (No. 18ZB0065), Gansu Provincial Higher Education Institutions Teacher Innovation Fund Project (No. 2023A-253)

First author: HU Wei, female, born in 2000, master student; Email: huwei1@stu.cdut.edu.cn

Corresponding author: LIU Yansong, male, born in 1982, associate professor, is mainly working on geospatial big data and remote sensing for resources and environment; Email: liuyansong2012@cdut.edu.cn

Manuscript received on: 2025-09-23; Accepted on: 2025-12-19; Published online on: 2026-02-15

Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.071

Edited by: LIU Zhiqiang

