

澜沧江中上游流域地貌特征及构造活动性评价方法¹

苟佳¹, 陈文龙², 张凯^{2*}, 周小棚¹, 杜效鹄², 邓建辉¹, 赵思远¹

(1. 四川大学水利水电学院, 成都 610065; 2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 澜沧江中上游流域位于青藏高原东南缘的构造缝合带, 构造运动活跃, 目前对该区域构造活动性的传统研究方法成本高、难度大、周期长。为了实现构造活动性的快速定量化评价, 本文利用 30m 数字高程模型, 计算并分析了面积高程积分 (HI)、归一化河流陡峭指数 (k_{sn})、标准化河长坡降指标 (SLK)、流域盆地不对称度 (AF)、及流域盆地形状因子 (BS) 五个构造地貌参数, 提出基于模糊综合法的构造活动性分级新方法。结果表明, 构造活动性与岩性和降雨相关性差, 对比传统分级方法, 本文方法减少了人为影响和误差, 能更好反映地貌参数与构造强度间的变化规律, 评价结果与已有测量成果基本一致, 具有适用性、便捷性和准确性, 对工程建设及减灾防灾具有重要意义。

关键词: 澜沧江中上游流域; 地貌特征; 相对构造活动性; 青藏高原东南缘

中图分类号: P954

收稿日期: 2026-3-23

Methods for Evaluating the Geomorphological Characteristics and Tectonic Activity of the Middle and Upper Lancang River Basin

GOU Jia¹, CHEN Wen-long², ZHANG Kai², ZHOU Xiao-peng¹, DU Xiao-gu², DENG Jian-hui¹, ZHAO Si-yuan

(1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: The middle and upper reaches of the Lancang River basin are located within the tectonic suture zone along the southeastern margin of China's Qinghai-Tibet Plateau, where tectonic activity is intense. Traditional studies of tectonic activity in this region are currently costly, challenging, and time-consuming. To enable rapid quantitative assessment of tectonic activity, this study utilizes a 30-meter resolution ALOS digital elevation model to calculate and analyze five tectonic-geomorphological parameters: area height integral (HI), normalized river steepness index (k_{sn}), standardized length-to-gradient ratio (SLK), basin asymmetry factor (AF), and basin shape factor (BS). A new method for classifying tectonic activity based on the fuzzy comprehensive evaluation method is proposed. The results indicate that lithology shows a weak correlation with tectonic activity, while precipitation exhibits synchrony with tectonic activity. Compared to traditional classification methods, the new method proposed in this study reduces human bias, minimizes dispersion errors, and better reflects the variation patterns between topographic parameters and tectonic intensity. The evaluation results are generally consistent with active fault zones. This method demonstrates applicability, feasibility, and accuracy, and holds significant implications for engineering construction as well as disaster mitigation and prevention.

Key Words: Middle and Upper Lancang River Basin; Geomorphological Features; Relative Tectonic Activity; Southeastern Margin of the Tibetan Plateau

澜沧江中上游流域位于我国青藏高原东南缘, 是罕见的“三江并流”地貌景观的重要组成部分, 昌都以北为澜沧江的上游, 海拔较高而地形起伏小, 昌都至云龙一带海拔相对较低但地形起伏较大。受

印—欧板块碰撞前缘的构造背景影响, 自新生代以来, 该地区经历了强烈的地壳隆升与河流下切作用, 形成了一系列典型的“V”型峡谷, 较大的河流落差造就了此区域丰富的可利用水利资源。此处有多条

¹ **基金项目:** 西藏自治区科技计划项目 (XZ202402ZD0001); 国家自然科学基金项目 (U22A20601)

作者简介: 苟佳 (2002), 女, 硕士, 从事地质灾害防治和滑坡数值模拟。E-mail: 2036814823@qq.com

***通讯作者:** 张凯, 博士, E-mail: zhangkai@creei.cn

在东南缘构造变形过程中起调节作用的断裂带，是研究西南三江地区构造演化和青藏高原东南缘变形机制的重要窗口，因此澜沧江中上游流域地区的构造活动性评价对于水电工程建设及减灾防灾等方面的研究具有重要的意义，对构造活动性评价方法的研究显得刻不容缓。

近年来大部分研究已基于年代学、河流纵剖面、热年代学及地球物理探测 (Ren et al.,2022) 等方面探讨了澜沧江流域的隆升历史与变形机制从而实现了对构造活动性的评价，但基于以上探测手段的评价方法具有成本高、周期长、难度大等缺陷，如何实现构造活动性的快速评价仍有待解决。构造地貌学是研究构造活动性的基础理论之一，其主要探讨内动力、外营力及气候作用之间的相互关系及其对地形发育与演化过程的影响 (刘静等, 2018)。随着地理信息系统与数字高程模型技术的发展及数据分辨率的提高，地貌研究逐渐由定性描述向定量分析转变 (秦翔等, 2017)。常用的地貌参数有面积高程积分、河流陡峭指数、河长坡降指标、流域不对称度以及流域形状指数 (史小辉, 2018) 等，这些指标被广泛应用于地貌演化阶段的判定与构造活动强度的分析，众多研究表明它们是揭示地貌演化过程及构造活动空间分布特征的重要手段。

介于目前构造活动性的快速评价方法研究不足的现状 (余华玉等, 2025)，本文以澜沧江中上游拉曲-旧州流域为研究对象，基于 ArcGIS 平台和高分辨率 DEM 数据提取并分析面积高程积分、河流陡峭指数等地貌参数，构建多参数综合评价活动性体系，基于模糊综合评价法，探究不同活动性评价方法的适用性，以期揭示澜沧江中上游相对构造活动强度的空间分布规律，从构造地貌学的角度给

青藏高原东南缘的隆升历史及印-欧板块碰撞过程提供新见解，同时也为区域隆升效应、构造活动性分析及地质灾害风险评估提供了新方案。

1 区域地质概况

本研究区位于青藏高原东南缘滇西北地区的侧向挤出构造带，其构造格局受青藏高原整体隆升影响。青藏高原的形成经历了特提斯洋的闭合、多期造山运动，以及约 50-60 Ma 印度板块与欧亚板块的碰撞拼合 (许志琴等, 2011)。根据大陆动力学研究结果，该区属于东构造结范围内的兰坪-保山挤出地体，主要构造单元包括多陆壳地块 (巴颜喀拉-松潘、羌北-昌都-普洱、羌南-唐古拉-保山、冈底斯-念青唐古拉等)、大型板块缝合带 (金沙江、澜沧江、怒江等) 及环青藏高原造山带，其分布如图 1 所示。

澜沧江流域内主要发育八条活动断裂带，其分布如图 2 所示，澜沧江断裂带总体呈 NNW 向，北段具明显全新世活动迹象；怒江断裂邦达段为左旋走滑兼逆冲性质的复合断裂，呈 NW-SE 向；德钦-中甸-大具断裂为右旋走滑断裂，其南段为强震高发；金沙江断裂中段晚第四纪活动显著，以强烈右旋走滑为主；字嘎寺-德钦断裂为金沙江断裂北段分支，NNW 向展布，主要表现为逆冲活动，具 Q3 时期的构造迹象；巴塘断裂 NNE 向展布，右旋走滑显著，晚第四纪活动强烈；甘孜-玉树断裂为 NW-NWW 向左旋走滑断裂；乌兰乌拉湖-玉树断裂为全新世左旋逆冲断裂；各断层滑动速率如表 1 所示。

表 1 研究区断裂水平和垂直滑动速率

Table 1 Horizontal and vertical slip rates in the study area

断裂名称	水平滑动速率 (mm/yr)	垂直滑动速率 (mm/yr)	来源
澜沧江断裂带	1.3~2	2.7~4.6	赵彦博等, 2024
怒江断裂邦达段	>1	>0.15	韩明明, 2022
德钦-中甸-大具断裂	1.7~2.0	0.6~0.7	常祖峰, 2015
金沙江断裂中段	3.5~4.3	0.9~1.1	张献兵等, 2024
字嘎寺-德钦断裂	-	0.016	吴富饶等, 2019
巴塘断裂	5.5~8.5	2~3	项闻, 2022
甘孜-玉树断裂	4.9	-	王艺晨等, 2025
乌兰乌拉湖-玉树断裂	4~6	-	黄学猛等, 2011

澜沧江中上游流域呈狭长形态，岩性组成复杂多样。云龙以北的河段主要发育古生代至新生代的沉积岩层，并伴有三叠系长英质岩与火山岩；云龙地区以兰坪-思茅地块的白垩纪至古近纪沉积岩为主；维西上游以古生代至中生代沉积岩为主要岩性；而德钦至察雅段则以三叠纪至侏罗纪沉积岩为主（王世龙等，2025）。区域内零星分布有中生代-新生代火山岩，澜沧江西部主干区可见韧性剪切带及其伴生变质岩。总体而言，研究区以沉积岩为主，

根据 GB/T 50218—2014《工程岩体分级标准》，结合研究区各类岩石的硬度特征分成了坚硬岩、较硬岩、较软岩、软岩、极软岩、第四系松散沉积六类，分布如图 2 所示。降雨方面，澜沧江流域整体受西南季风系统支配，雨季与旱季分明，湿季通常集中在 5 至 10 月，其中 6 至 8 月的降水量尤为集中，占全年度降水的 85%以上，而旱季则延续至次年 4 月，形成明显的季节性水文循环。

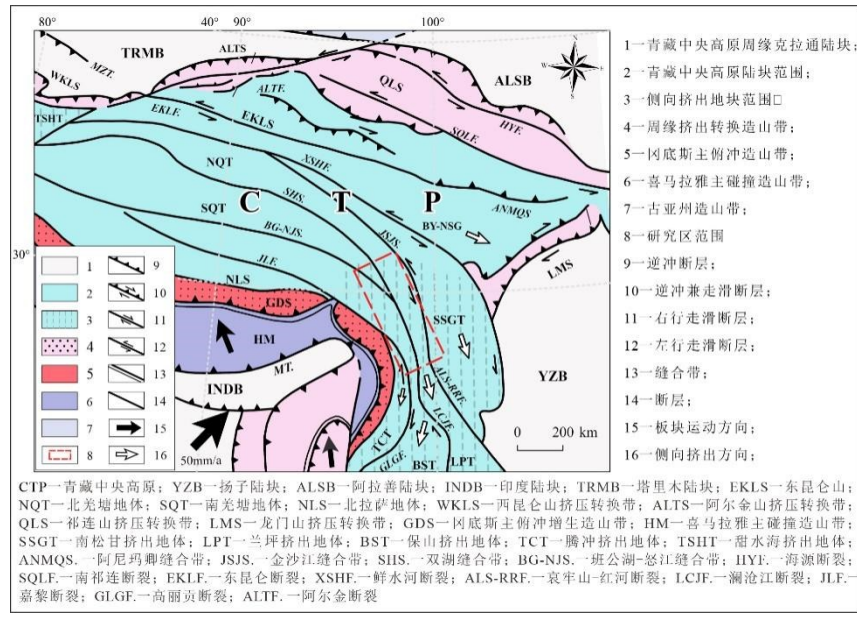


图 1 研究区及周边大地构造单元图（据许志琴等，2011 修改）

Fig. 1 Map of tectonic units in the study area and surrounding regions (modified from Xu Zhiqin et al., 2011)

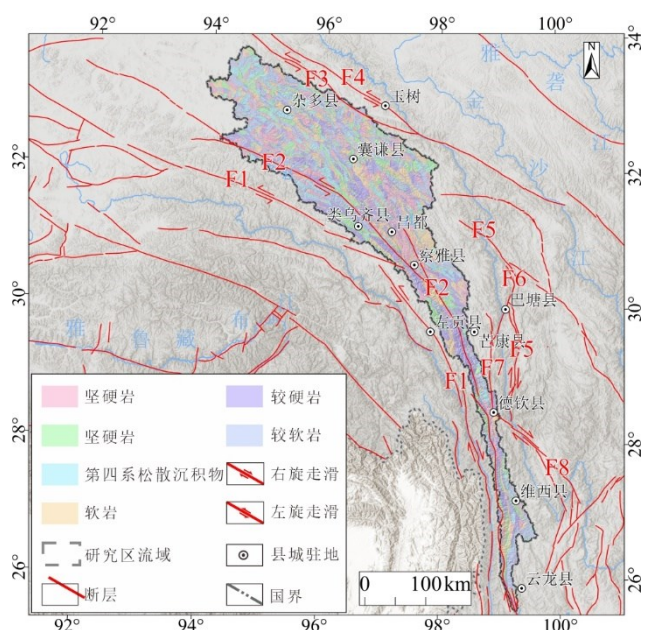


图 2 研究区断层分布图与岩性分布图

Fig. 2 Fault distribution map and lithological distribution map of the study area

2 数据来源及方法流程

本文数字高程模型数据选自地理空间数据云²的 ALOS30m 分辨率数据, 该数据已在大尺度区域的地貌与构造研究中得到广泛应用, 具有较高的精度与可靠性。岩性数据来自国家地质资料数据中心³, 断层数据来自地震活动断层探索数据中心中全新世以来的断层⁴, 降水数据来自欧洲中期天气预报中心⁵ (ECMWF) 发布的 ERA5-Land 全球陆地气候再分析数据集。本文利用 ArcGIS 水文分析模块对 DEM 进行预处理, 包括填洼、流向与流量计算以及汇流阈值分析, 然后基于 ArcGIS 和 Excel 工具 (褚永彬等, 2021) 结合 Jupyter Notebook 编程, 计算并提取研究区的面积高程积分 (HI)、归一化河流陡峭指数 (k_{sn})、标准化河长坡降指标 (SLK)、盆地不对称度 (AF)、形状因子 (BS) 等地貌参数, 各个参数的含义、计算原理及方法步骤如下。

2.1 面积-高程积分 (HI) 及流域汇流阈值

面积高程积分 (HI) 是反映流域在构造作用、气候条件与岩性差异共同影响下地貌发育特征的重要指标, 可以用来判断流域的地貌演化阶段。面积高程积分的计算方法有曲线法、积分法与体积比法。起伏比法计算简便、效率较高, 尤其在子流域数量较多的情况下得到广泛应用, 相关研究表明, 起伏比法与积分曲线法及体积比法所得结果差异极小, 误差通常小于 0.01, 可忽略不计 (常直杨, 2014)。因此本文采用起伏比法来进行计算, 公式如下:

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

式中, H_{mean} 为集水盆地平均高程, H_{max} 为最大高程, H_{min} 为集水盆地的最小高程。综合考虑气候、岩性等因素, HI 值可用于定量评价流域构造活动的强弱 (Luo et al., 2023)。

2.2 归一化河流陡峭指数 (k_{sn})

河流陡峭指数 (k_{sn}) 能够有效反映区域的构造抬升速率, 当 k_{sn} 值较高时, 说明研究区存在较强的

构造抬升作用; k_{sn} 值较低则说明构造活动较弱 (王乃瑞等, 2015)。河流剖面中, 任意位置的高程可以看作岩石隆升与侵蚀共同作用的结果:

$$\frac{dz}{dt} = U - E \quad (2)$$

$$E = KA^m S^n \quad (3)$$

式中, U 为岩石隆升速率, E 为侵蚀速率, A 为流域面积, S 为河道坡度, K 表示侵蚀系数, 受气候与岩性等因素共同控制 (Willett et al., 1999), m 与 n 为正指数参数, 用来表示河道侵蚀速率与流域面积、坡度之间的定量关系 (Whipple et al., 1999)。当河流剖面进入稳定状态, 即岩石的隆升速率与侵蚀速率达到动态平衡时, 坡度可以表示为:

$$S = \left(\frac{U}{K} \right)^{\frac{1}{n}} A^{-\frac{m}{n}} \quad (4)$$

在岩性、气候与构造隆升速率均较均一的情况下, 稳态基岩河流的坡度 (S) 与流域面积 (A) 呈幂律关系:

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (5)$$

其中, θ 为凹度指数, k_s 为河流陡峭指数, 当河流处于侵蚀与隆升平衡状态时, θ 通常介于 0.3~0.6 之间, 不随隆升速率发生变化, $\theta=45^\circ$, 得到归一化河流陡峭指数 k_{sn} , 即消除凹度差异的影响, 进而比较不同流域的侵蚀速率。

2.3 标准化河长坡降指标 (SLK)

Hack (Hack et al., 1973) 提出用“坡降指数 (SL)”来定量描述河流纵剖面坡度变化, 用以揭示河道纵剖面特征与地表侵蚀及地壳沉降过程之间的关系, 其计算公式为:

$$SL = \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \times L \quad (6)$$

其中, ΔL 为该河段的水平距离, ΔH 表示河流源头与出口间的高程差, L 代表从河流起点至终点的总长度, $(\Delta H/\Delta L)$ 反映了单位水平距离上的坡度变化, 为消除不同河段长度差异对结果的影响, 引入均衡系数 (K) 对 SL 进行标准化处理, 得到 SLK 指数, 其计算公式如下:

$$K = H/\ln(L) \quad (7)$$

² <https://www.gscloud.cn/#page4>

³ <http://dc.ngac.org.cn/infoProduct>

⁴ <https://www.activefault-datacenter.cn/>

⁵ <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview>

$$SLK = SL/K \quad (8)$$

$$SLK_{\text{平均值}} = \frac{\sum_{i=1}^n SLK_i}{n} \quad (9)$$

式中, H 表示河流源头至出口的高程差, n 代表河流数量, $SLK_{\text{平均值}}$ 可用于划分不同等级的构造活动强 (徐岳仁等, 2013)。

2.4 流域盆地不对称度 (AF)

流域盆地不对称度 (AF) 可以衡量流域在一定空间尺度上的构造倾斜程度, 反映了流域形态受构造运动控制的常被用于中-大尺度区域的地貌构造分析, 其公式为:

$$AF = \left(\frac{Ar}{At} \right) \times 100 \quad (10)$$

式中, At 为整个流域的总面积, Ar 表示主干河流下游右岸的汇水面积, 当 $AF > 50$ 时, 表明流域整体向左倾斜; 当 $AF < 50$ 时, 则指示流域向右倾斜; 而当接近 50 时, 流域基本对称, 垂直于主干河道方向的构造倾斜较弱或几乎不存在。通过计算 AF 与 50 的绝对值 (Amine et al., 2020), 可以判断流域倾斜程度大小:

$$AF_{\text{relative}} = |50 - 100 \times (Ar/At)| \quad (11)$$

后文中所示 AF 皆为 AF_{relative} 。

2.5 形状指数 (BS)

形状指数 (BS) 受构造活动影响显著, 在构造强烈抬升区域, 河流以下切作用为主, 盆地形态多呈狭长状或处于地貌发育的早期阶段, 而在构造活动较弱的地区, 侧向侵蚀作用占优势, 流域形态逐渐趋于圆形, 盆地宽度明显增大, 表明地貌演化已进入相对成熟阶段, 流域形状指计算公式如下:

$$BS = \frac{B_l}{B_w} \quad (12)$$

式中, B_w 是流域盆地的最大宽度, B_l 表示流域盆地从主河道源头到汇水口的长度。

2.6 基于模糊综合评价法的相对构造活动性分级

模糊综合评价法是综合考虑与被评价事物相关的各个要素, 应用模糊变换原理和最大隶属度原则的一类综合评价方法, 区别于传统线性方法, 采

用隶属度函数能更好模拟参数的过渡状态, 减少人为的主观硬性划分影响, 减少误差, 通过矩阵运算更能客观反映各个参数对最终结果的贡献 (王哲等, 2012)。建立过程如下:

首先确定此体系的影响因素集 U 和评语级 V , 其中 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 代表影响结果的 n 个具体指标, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 代表评价结果的分级, 然后确定各指标的权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 满足各项之和为 1。

针对每个指标 u_i , 根据其特征建立线性隶属度函数, 计算其评语等级 v_j 的隶属度 r_{ij} , 所有指标的隶属度可以组成模糊关系矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots \\ r_{21} & r_{22} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots \end{bmatrix} \quad (13)$$

将权重矩阵 W 与模糊矩阵 R 进行合成运算, 得到综合向量 B :

$$B = W \cdot R = (b_1, b_2, \dots) \quad (14)$$

根据最大隶属度原则对 B 进行处理, 确定最终的评价等级。

根据模糊集理论, 本文中的影响因素集为 $U = \{HI, k_{sn}, SLK, AF, BS\}$, 对应的评语集为 $V = \{\text{高}, \text{中}, \text{低}\}$, 而本研究选取的五个指标均为描述流域构造活动性的重要参数, 具有相对均衡的重要性和明确的物理意义, 且各指标之间不存在显著的从属关系和主次差异, 因此为避免主观经验对评价结果的过多干扰, 本文采用等权重法将各指标权重向量设置为 $W = \{0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2\}$ 。由于五个指标均为连续变化的定量指标, 基于研究区地貌参数特点及分布特征, 本文参照已有相关隶属度函数构造经验构建了降半梯形、岭形、升半梯形的隶属度函数, 分别对应地貌活动性的低、中、高三个活动性等级。

地貌指标值越大属于低活动性的概率越小, 指标值越小属于高活动性的概率越小, 当指标介于低阈值和高阈值之间则属于中活动性的概率更大, 当指标等于二者的中值时, 代表该指标为研究区最典型的中间发育状态, 隶属度为 1, 同样, 当指标极小和极大时, 代表最不活跃和最活跃确定状态, 隶属度也为 1, 考虑到地貌响应的滞后性以及连续性, 指标在低阈值以下、高阈值以上也应该有属于中活动性的概率, 所以将低阈值的一半作为其隶属度函数的起点, 并向高值区延伸一个等跨度区间

（即高、低阈值之差）。高活动性、中活动性和低活动性隶属度函数如下所示：

设定 T_L 为低阈值， T_H 为高阈值，令跨度 $S=T_H-T_L$ ：

(1) 低活动性隶属度函数

$$\mu_{Low}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq \frac{1}{2}T_L \\ 1 - \frac{0.5\left(x - \frac{1}{2}T_L\right)}{T_L - \frac{1}{2}T_L}, & \frac{1}{2}T_L < x \leq \frac{T_L + T_H}{2} \\ 0.5\left(\frac{T_L + T_H}{2} - x\right) / \frac{T_L + T_H}{2} - T_L, & T_L < x \leq \frac{T_L + T_H}{2} \\ 0, & x > \frac{T_L + T_H}{2} \end{cases} \quad (15)$$

(2) 中活动性隶属度函数

$$\mu_{Mid}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \frac{1}{2}T_L \\ 0.5\left(x - \frac{1}{2}T_L\right) / \frac{1}{2}T_L, & \frac{1}{2}T_L < x \leq \frac{T_L + T_H}{2} \\ 1 - \frac{0.5\left(\frac{T_L + T_H}{2} - x\right)}{\frac{T_L + T_H}{2} - T_L}, & T_L < x \leq \frac{T_L + T_H}{2} \\ 0.5\left(x - \frac{T_L + T_H}{2}\right) / \frac{T_H - \frac{T_L + T_H}{2}}{2}, & \frac{T_L + T_H}{2} < x \leq T_H \\ 0.5 - \frac{0.5(x - T_H)}{S}, & T_H < x \leq T_H + S \\ 0, & x > T_H + S \end{cases} \quad (16)$$

(3) 高活动性隶属度函数

$$\mu_{High}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \frac{T_L + T_H}{2} \\ 0.5\left(x - \frac{T_L + T_H}{2}\right) / \frac{T_H - \frac{T_L + T_H}{2}}{2}, & \frac{T_L + T_H}{2} < x \leq T_H \\ 0.5 + \frac{0.5(x - T_H)}{S}, & T_H < x \leq T_H + S \\ 1, & x > T_H + S \end{cases} \quad (17)$$

根据以上预设的隶属度函数（低：降半梯形，中：岭形，高：升半梯形），可以得到单指标隶属度向量：

$$R_i = (\mu_{Low}, \mu_{Mid}, \mu_{High}) \quad (18)$$

将 5 个指标的隶属度向量组合，构建模糊评价矩阵，其中每一行表示单一指标对不同活动性等级的隶属程度：

$$R = \begin{bmatrix} \mu_{Low}(HI) & \mu_{Mid}(HI) & \mu_{High}(HI) \\ \mu_{Low}(k_{sn}) & \mu_{Mid}(k_{sn}) & \mu_{High}(k_{sn}) \\ \mu_{Low}(SLK) & \mu_{Mid}(SLK) & \mu_{High}(SLK) \\ \mu_{Low}(AF) & \mu_{Mid}(AF) & \mu_{High}(AF) \\ \mu_{Low}(BS) & \mu_{Mid}(BS) & \mu_{High}(BS) \end{bmatrix} \quad (19)$$

采用加权进行综合评价：

$$B = W \cdot R \quad (20)$$

最后得到综合评价向量，：

$$B = (b_{Low}, b_{Mid}, b_{High}) \quad (21)$$

根据最大隶属度原则确定流域活动性等级即 I

$RAT = \max(b_{Low}, b_{Mid}, b_{High})$ 。

基于前文地貌参数可以建立流域的相对构造活动程度评价体系，具体流程如图 3 所示。

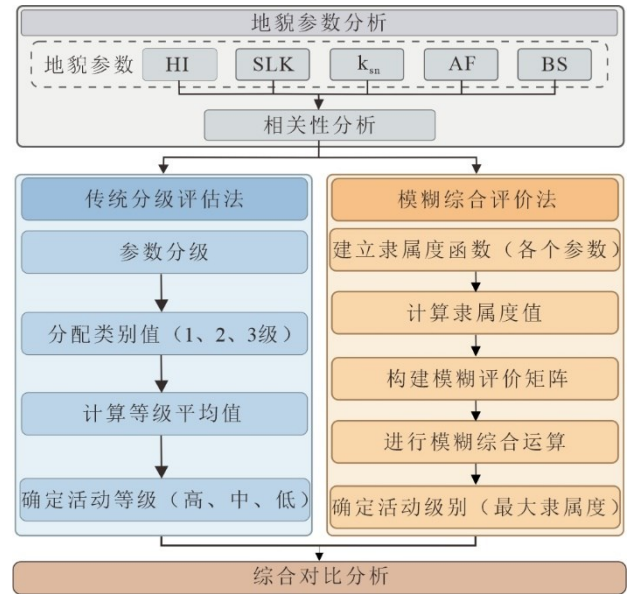


图 3 构造活动性评估体系流程图

Fig. 3 Flowchart for an activity assessment system

3 研究区地貌分布特征结果分析

3.1 面积高程积分 (HI) 及最佳汇流阈值确定

面积高程积分受流域面积影响显著，不同面积范围内的流域可能呈现不同的 HI 分布特征（马腾霄等，2022），因此在分析澜沧江中上游的地貌演化特征前，必须确定最佳流量阈值，才能让构造地貌参数准确反映区域构造活动特征。

根据前人研究表明,各子流域的面积高程积分的最大值、平均值、最小值会随流量阈值的变化而变化,最后趋近于稳定,因此本文为了确定最优汇流阈值,在 4.5km^2 - 450km^2 范围内设置 21 个不同阈值提取水系,分别计算其对应的 HI 及相关参数 ($\text{HI}_{\max}$ 、 $\text{HI}_{\min}$ 、 HI_{mean}),依据参数变化趋势选出最佳流量阈值,并进一步分析该阈值下 HI 与流域面积及高差之间的相关关系,然后在此基础上计算其他地貌参数。

研究以 4.5km^2 、 9km^2 、 13.5km^2 、 18km^2 、 22.5

km^2 、 27km^2 、 36km^2 、 45km^2 、 54km^2 、 63km^2 、 72km^2 、 81km^2 、 90km^2 、 135km^2 、 180km^2 、 225km^2 、 270km^2 、 315km^2 、 360km^2 、 405km^2 、 450km^2 作为汇流阈值提取次集水盆地,得到不同汇流阈值条件下澜沧中上游流域的面积高程积分,部分结果如图 4 所示,当汇流阈值分别为 4.5km^2 、 22.5km^2 、 90km^2 、 225km^2 、 360km^2 、 450km^2 ,研究区流域的上部处于河流演化阶段的侵蚀能力很弱的老年期、中下部处于侵蚀能力强的青、壮年期。

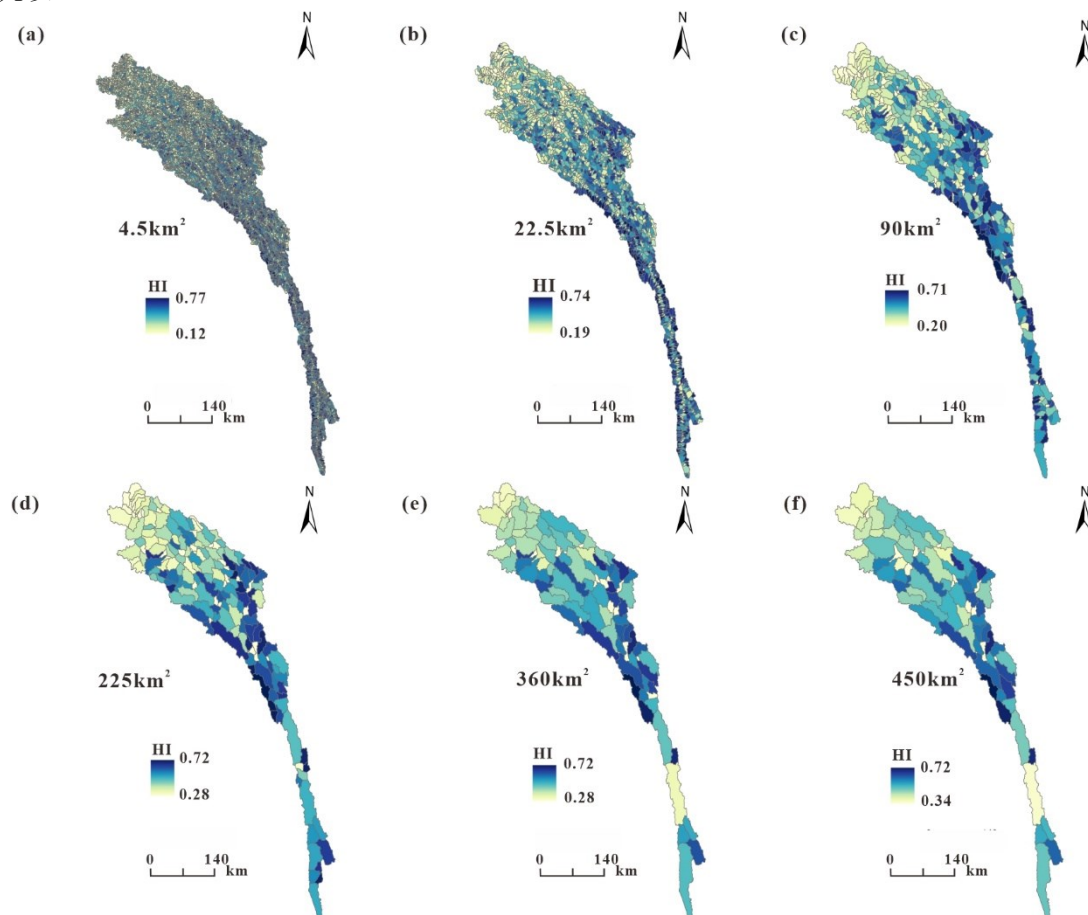


图 4 部分汇流阈值下研究区面积高程积分分布图

Fig. 4 Distribution map of elevation integrals for study area at selected convergence thresholds

绘制不同汇流阈下面积高程积分相关参数散点图并拟合,如图 5 所示,HI 值分布于 0.18-0.77 之间,当阈值接近 90km^2 时,相关参数拟合曲线出现明显拐点,决定系数 R^2 分别为 0.8161、0.8330 2 和 0.91121,表明拟合效果良好,说明在该阈值附近流域水系结构发生显著调整。将 HI 与流域面积、地势起伏度进行线性拟合(图 6),结果表明二者相关性较弱,说明在 90km^2 阈值下,面积高程积分与高程差、流域面积之间无显著线性关系。

综合以上考虑,确定 90km^2 作为最能反映澜沧江中上游流域构造特征的最佳汇流阈值,可以用于

流域地貌参数提取和构造分析。当汇流阈值设为 90km^2 时,共划分 517 个子流域,子流域面积范围 $5.81.88$ - $1.26 \times 10^9 \text{km}^2$ (图 7)。

Strahler et al.(1952)在 W. Davies 的地貌发育模式基础上对 HI 进行了分级:当 $\text{HI} > 0.6$ 时,流域处于青年期,构造抬升占主导,地形起伏较大、地貌粗糙、沉积物堆积较少;当 $0.4 \leq \text{HI} \leq 0.6$ 时,流域进入壮年期,侵蚀作用显著、地形高差大,滑坡与细沟侵蚀等坡面过程活跃;当 $\text{HI} < 0.4$ 时,则为老年期阶段,构造抬升作用减弱,地形趋于平缓,堆积及冲积过程增强,表现为地貌平整化趋势。结

合澜沧江的流域特点对该分级进行了修改, HI>0.5 时, 流域处于青年期, 当 $0.3 \leq HI \leq 0.5$ 时, 流域处于壮年期, HI<0.3 时流域则属于老年期。结果显示, 上游处于地貌演化老年期, 中下游则处于青、壮年期, 与前文一致。HI 值范围为 0-0.7126, 均值为 0.

4527, 其中老年期子流域 140 个 (8.72%, 7677.65 km²), 壮年期 250 个 (63.74%, 56140.30km²), 幼年期 127 个 (27.54%, 24258.61km²)。整体 HI 偏低, 表明研究区主体处于壮年期。

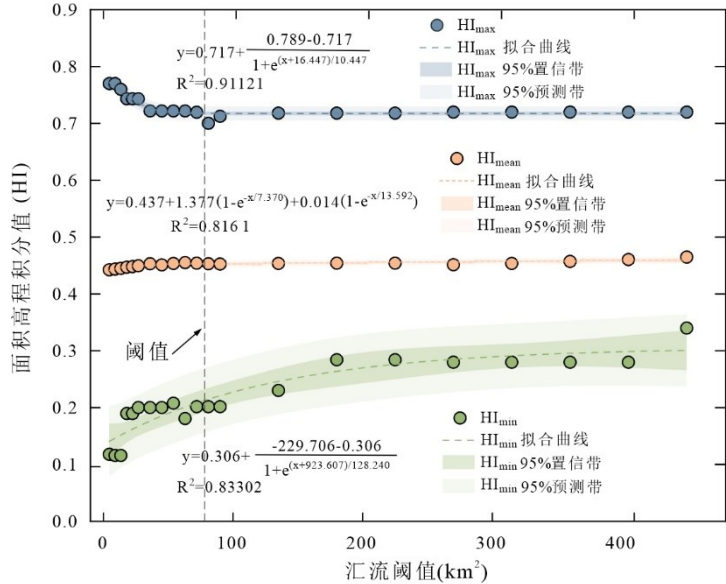


图 5 基于不同汇流阈值的 HI 值相关参数变化趋势图

Fig. 5 Trend chart of HI-related parameters based on different convergence thresholds

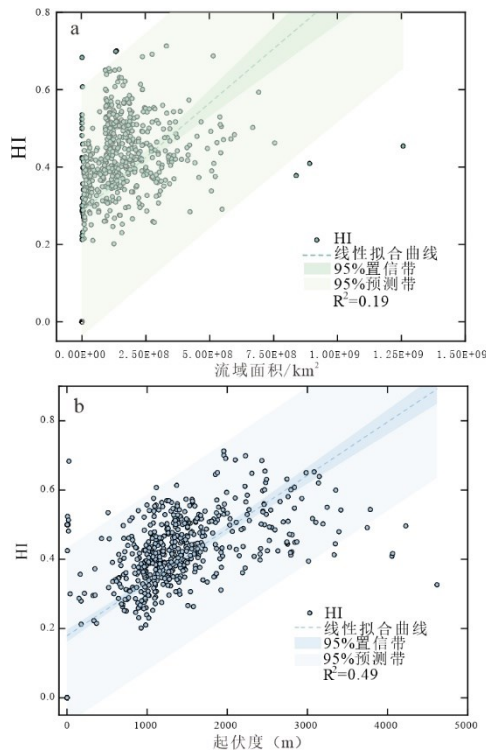


图 6 (a) HI 值与流域面积关系, (b) HI 与地势起伏度关系

Fig. 6 (a) Relationship between HI and watershed area, (b) relationship between HI and terrain undulation.

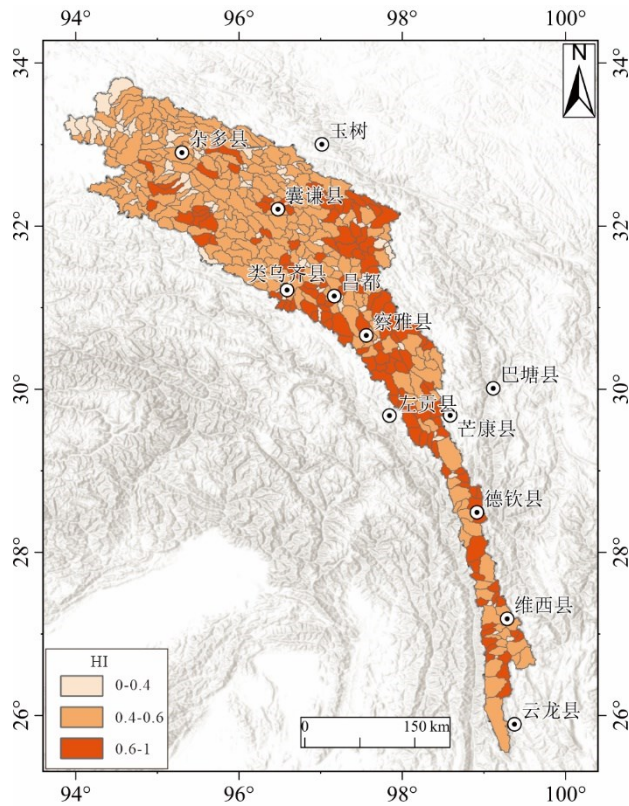


图 7 研究区 HI 值空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution map of HI values in the study area

3.2 归一化河流陡峭指数 (k_{sn})

以 200m 为固定间距计算归一化河流陡峭指数 (k_{sn})，结果显示其范围为 0-822.95，参考自然断点法的分级结果，进行适当调整得到， $k_{sn}>2$ 时活动性强， $2>k_{sn}>1$ 时活动性中等， $k_{sn}<1$ 时活动性较弱， k_{sn} 总体呈南高北低分布，高值区主要集中在察雅-德钦沿线，与 HI 高值区一致，位于怒江与澜沧江断裂之间（图 8），其余区域 k_{sn} 整体偏低，但局部仍出现高值。

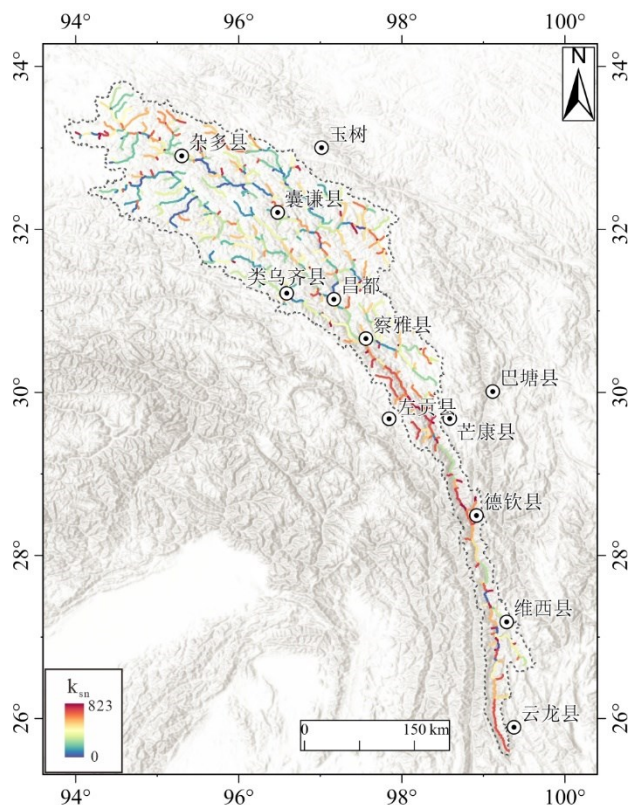


图 8 研究区 k_{sn} 值分布图

Fig. 8 Distribution map of k_{sn} values in the study area

3.3 标准化河长坡降指标 (SLK)

参考 Seeber et al. (1983) 对 SLK 值等级划分并进行适当调整， $SLK>7$ 的河段为极陡河段； $4<SLK\leq 7$ 的河段为陡河段； $SLK\leq 4$ 的河段为平缓河段，本文以 5000m 为间隔计算 517 条支流的标准化河长坡降指标 (SLK)，并取各支流平均值作为代表。结果显示，SLK 范围为 1.39-78.80，均值 6.78，如图 9 所示。其中， $SLK\leq 4$ 的支流 83 条，面积占比为 9.67%；SLK 为 4-7 的较陡河段 348 条，占 74.12%； $SLK>7$ 的极陡河段 86 条，占 16.21%。

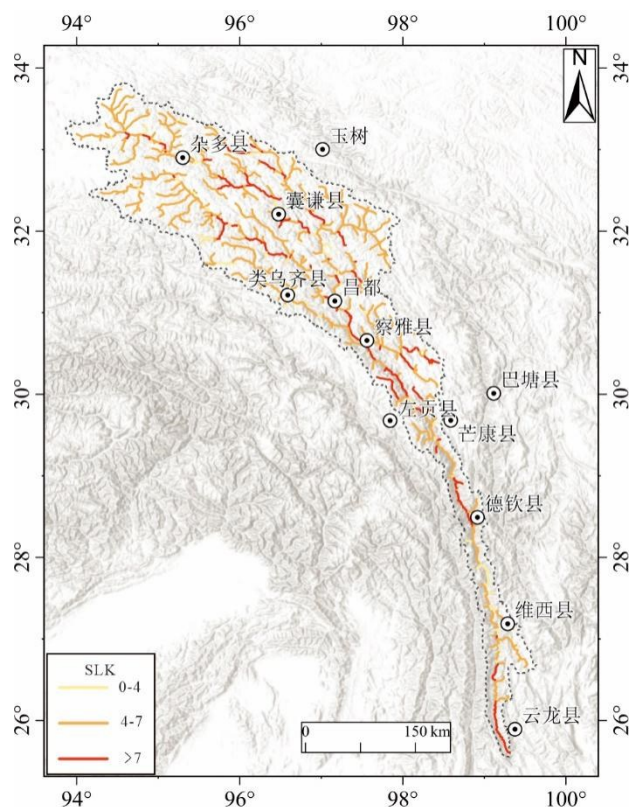


图 9 研究区 SLK 值分布图

Fig. 9 SLK value distribution map of the study area

3.4 流域盆地不对称度 (AF)

通过计算研究区 517 个流域盆地的不对称度范围为 0.08-49.24，借鉴前人对 AF 的分级并做适当调整（徐岳仁等，2013），当 $AF>14$ 时，表示盆地倾斜程度大且强烈不对称， $AF=6\sim 14$ 时，表示盆地倾斜程度中等且对称程度中等， $AF<6$ 时，表示盆地倾斜程度较小且比较对称。通过对河流在空间上的汇水面积偏移方向和幅度进行分析，可以反推研究区内构造单元的倾斜趋势，一般情况下流域不对称度能够反映构造抬升速率在空间上的差异，当不同区域的抬升速率差异较大时，河流会向左或向右掀斜，从而指示构造掀斜方向。

研究区内对称盆地 131 个 (29.56%, 26036.11 km^2)；中等不对称 173 个 (35.58%, 31336.75 km^2)；强烈不对称 213 个 (34.86%, 30703.70 km^2) 分布如图 10 所示。

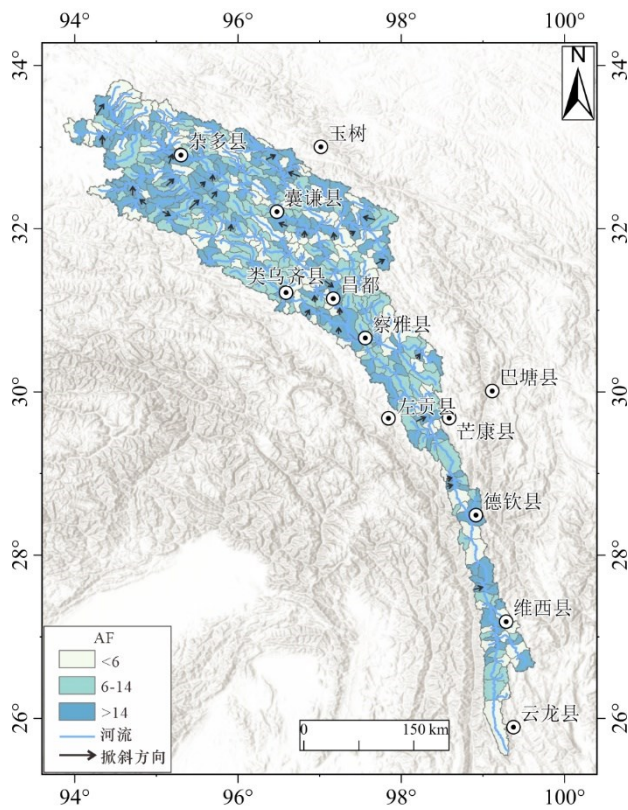


图 10 研究区 AF 值空间分布及子流域掀斜方向

Fig. 10 Spatial distribution of AF values in the study area and dip direction of sub-basins

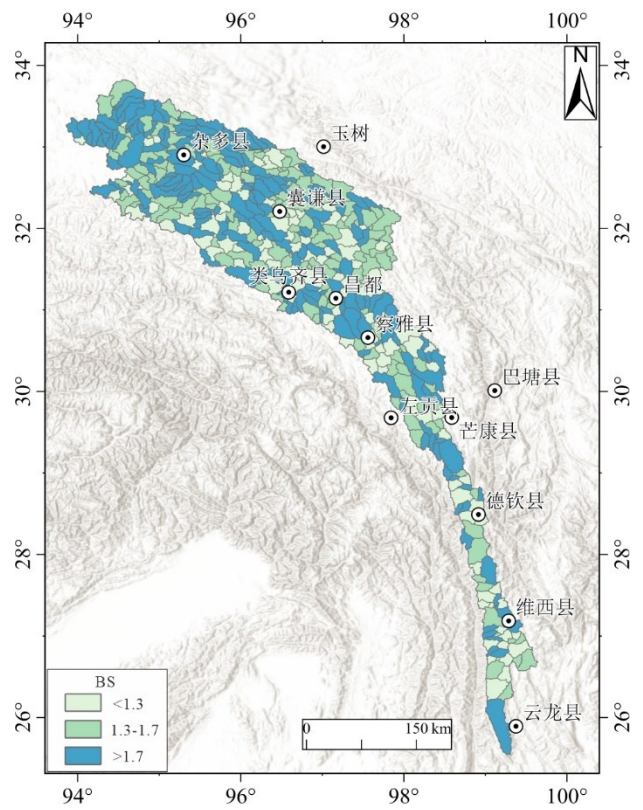


图 11 研究区 BS 值分布图

Fig. 11 BS value distribution map of the study area

3.5 流域盆地形状指数 (BS)

研究区 517 个流域的形状指数范围为 1-5.94 (图 11)。参考前人对 BS 划分的三个等级 (王乃瑞等, 2015), 规定 $BS > 1.7$, 盆地形态非常狭长; $1.3 < BS \leq 1.7$, 盆地形态中等狭长; $BS < 1.3$, 盆地形态接近圆形。结果显示研究区内, 狭长流域 209 个, 总面积 39043.88km^2 , 占 44.33%; 中等狭长流域 189 个, 总面积 28703.78km^2 , 占 32.59%; 近圆形流域 119 个, 总面积 20328.89km^2 , 占 23.08%。

4 相对构造活动性评价结果分析

本文采用面积高程积分值 (HI)、流域盆地不对称度 (AF)、标准化河长坡降指标 (SLK)、归一化河流陡峭指数 (k_{sn}) 和形状指数 (BS) 5 种地貌指数对研究区的地貌演化阶段和相对构造活动性进行研究。

面积高程积分可以判断地貌发育阶段和构造活动特征 (Giano et al., 2018)。研究区大部分流域 HI 值低于 0.6, 整体处于地貌演化的壮年期, 上游部分流域则更接近老年期, 显示外营力作用以堆积和平整为主, 地貌起伏度较小, 可能受青藏高原夷平面残留形态的制约。局部高 HI 值主要分布在昌都—芒康沿线 (图 7), 该区邻近怒江断裂与澜沧江断裂, 两者为左旋走滑断裂, 其平行或斜列分布易造成局部压应力集中, 形成“推挤型”构造, 进而诱发地块隆升, 导致区域 HI 值升高。

河流陡峭指数的大小与基岩的差异性隆升速率呈正相关。由图 8 可得, 研究区整体表现为北部隆升速率较低、向南逐渐增高, 其中察雅—德钦段 k_{sn} 值显著偏高, 表明该区域自新生代以来经历了较强的构造隆升作用。

标准化河长坡降指数的异常高值通常反映断裂活动、褶皱变形或岩性差异所致的侵蚀阻力变化（赵洪壮等，2010）。研究区 SLK 平均值较低，但在澜沧江断裂及怒江断裂附近呈显著高值，北、南两侧也分布有局部异常区，显示断裂构造对河道纵剖面突变具有明显控制作用。

流域盆地不对称度可反映构造倾斜程度。研究区大多数子流域呈不对称分布，其中强烈不对称盆地主要集中于上游，反映断裂活动强烈及差异性抬升作用显著，下游不对称程度相对较弱，流域的整体倾斜方向以近东西向为主，表明其受控于东西向的构造应力场，这一特征与青藏高原新生代以来的整体向东挤出与扩张动力背景相吻合。

流域形状指数整体偏低，流域主要呈狭长及中等狭长形态。北部局部盆地呈中等狭长特征，对应怒江断裂、杂多断裂带等主要构造带，河流沿断裂发育并受强烈下切作用控制（图 2），导致盆地相对狭窄。

因此每一个地貌参数是从不同的角度对构造活动性的强弱进行了评价，本文借鉴 EI Hamdouni et al.（2008）的评价方法利用各地貌参数对研究区相对构造活动强度进行分析，以 517 个流域为对象，构建多维度参数体系。其中，一维参数包括 k_{sn} 、SLK，二维参数包括 AF、BS，三维参数为 HI。为避免信息冗余，对地貌参数进行皮尔逊相关性分析，结果如图 12 所示，发现五个参数相关性极差，具有较高独立性，可以联合用于构造活动性分析。

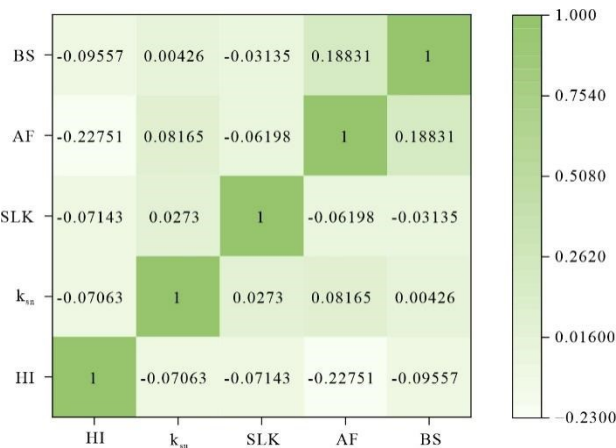


图 12 地貌指数皮尔逊相关系数图

Fig. 12 Map of pearson correlation coefficients for landform Indices

为了构建出研究区相对构造活动强度评价体系，本文分别计算了传统活动性分级评估（IAT）、

模糊综合评价活动性分级（IRAT）。如图 13 所示，

4.1 传统活动性分级评估（IAT）

传统活动性分级是将各参数（HI、 k_{sn} 、SLK、AF、BS）分级归类后再计算平均值得到相对构造活动指数 IAT：

$$IAT = (HI_f + k_{snf} + SLK_f + AF_f + BS_f) / 5 \quad (22)$$

式中，分别表示 HI、SLK、AF、BS、 k_{sn} 对应的级数，各地貌参数分级如表 2 所示。

表 2 区域地貌参数分级

Table 2 Classification of regional geomorphological parameters

分级	HI	k_{sn}	SLK	AF	BS
1	HI>0.5	$k_{sn}>2$	SLK>7	14≤AF	BS>1.7
2	0.3<HI≤0.5	1< k_{sn} ≤2	4<SLK≤7	6≤AF<14	1.3<BS≤1.7
3	HI≤0.3	$k_{sn}≤1$	SLK≤4	AF<6	BS<1.3

参考文献（Ngapna et al., 2020）相对构造活动性分类，利用自然断点法，得到适合研究区的 IAT 分级，当 $IAT \leq 1.6$ 时，构造活动性强；当 $1.6 < IAT < 2$ 时，构造活动性中等；当 $2 \leq IAT$ 时，构造活动性弱。计算结果显示，517 个流域中，构造活动性强的流域 118 个，总面积 23062.35718km²，占 26.18%；中等活动性流域 238 个，总面积 44210.7059 km²，占 50.20%；弱活动性流域 161 个，总面积 20803.49465km²，占 23.62%，总体上研究区构造活动性以中等为主。

4.2 模糊综合评价活动性分级（IRAT）

前文活动性评价方法基于参数的强制等级分割，受人为主观性强，但是由于地貌过程的复杂性，指标阈值的划分应该存在一个不确定过渡带，而基于隶属度函数的模糊综合评价法能反映出“低活动性”到“高活动性”状态的连续平滑演变，更能反映地貌发育阶段的渐进性特征，因此基于模糊综合理论，对研究区的各流域活动性进行了评价。

计算结果显示（图 13（a）），517 个流域中，构造活动性强的流域 142 个，总面积 9986.316819k

m²，占 11.34%；中等活动性流域 262 个，总面积 5 6320.2482km²，占 63.94%；弱活动性流域 113 个，总面积 21769.98964km²，占 24.72%。总体上，研究区构造活动性仍以中等为主。

如图 13 所示，基于传统活动性分级法和模糊综合评价法得出的活动性分布情况相近，总体上活动性较强的流域主要分布在昌都-左贡、德钦、云龙一带，昌都以北也存在活动性较强的小流域，但分布杂乱，总体显现出靠东北区域的弧形分布。其中，德钦县和左贡县附近高活动性流域最密集，所以构造活动最为活跃。按强、中、弱三个等级对应 1、

2、3 级，如图 13 (c) 展示了模糊综合评价法和传统活动性分级法的差值分布 (IRAT-IAT)，其中大部分流域活动性等级相同，占比 60.07%，相比于传统分析法，模糊综合评价法有 12.77% 的流域活动性等级要低于传统法，有 26.99% 的流域活动性要高于传统法，说明传统方法趋向于低估构造活动性强度，从分布上看高估区和低估区在研究区内交错分布，但在局部区域出现一定的聚集特征，模糊综合评价法得到的强活动性区域在东北方向更能体现出弧形线聚类特征。

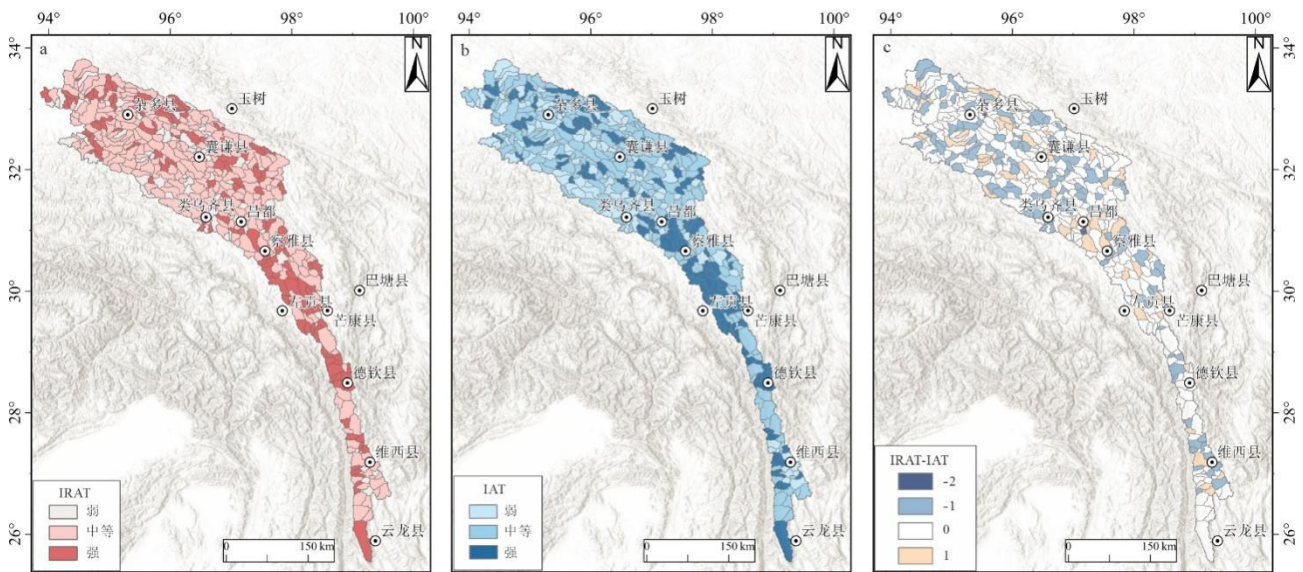


图 13 (a) 模糊综合评价活动性分级空间分布、(b) 传统活动性分级评估空间分布、(c) 两种评价方法等级相减对比图
Fig. 13 (a) Spatial distribution of fuzzy comprehensive evaluation of activity grading, (b) spatial distribution of traditional activity grading assessment, and (c) a comparison of the difference in grades between the two evaluation methods

5 讨论

5.1 方法准确性验证及方法对比

许多研究对构造活动性的评价是通过测量板块 GPS 位移速率、断层两侧相对滑动速率以及地表侵蚀速率的来判定，其中侵蚀速率与构造抬升速率之间存在高度相关性，构造活动性越强的区域，地表侵蚀速率越高 (文力等, 2012)，因此为验证本文评价方法的准确性，本文结合 Wang (2020) 研究中的 GPS 水平位移速率，参考前人对澜沧江地区断层的滑动速率研究成果，然后基于桑云云 (2023) 收集到的侵蚀速率点，利用反距离加权法对已有数据进行插值，从水平与垂直两个维度，综合 GPS、断层相对位移、侵蚀速率三个视角对本文构造活动

性评价结果进行验证 (图 14)。

从空间分布上，GPS 运动速率测量成果显示，澜沧江流域水平运动速率整体呈现由北向南递减的趋势，说明从水平运动角度而言，研究区北部区域活动性较强，与本文得到的流域北部活动性等级也较高基本一致；区域构造活动主要通过断裂发育及其演化过程表现出来，是控制地貌形态的重要因素 (邱燕等, 2024)，位于喜马拉雅东部构造结弧顶端的澜沧江中上游，其东侧的横断山地区是印度板块向北俯冲推挤、高原物质向东挤出并伴随顺时针旋转的关键地带，形成了一系列以 NNW—NNE 及 NW—SE 走向为主的多条断裂，这些断裂带在晚第四纪至全新世均表现出不同程度的活动性，滑动速率普遍达到毫米/年量级，个别断裂如金沙江断裂中段、巴塘断裂及甘孜—玉树断裂，水平走滑速率可超过 5 mm/a，构造变形能力较强。研究区地貌指

数的空间分布格局与断裂分布及其滑动速率表现出良好的对应关系，通过分析流域中心距断层的平均距离与活动性的关系（图 15），两种活动性分级方法计算出的结果均显示断层距离与流域活动性高度相关，流域中心距断层越近，则活动性越高，而距断裂较远的区域活动性相对较低。其中左贡区域夹于澜沧江断裂与怒江断裂之间，同时澜沧江与怒江断裂均表现出较高的断层位移速率，因此该区域的构造活动性也较强，与本文评价结果基本一致；区内德钦县附近侵蚀速率最高，该区域处于川滇菱形板块边界，断层密度大且抬升速率较高（常祖峰，2015），因而构造抬升活动强烈、侵蚀作用显著，表明德钦县附近构造活动性较强，与本文模糊综合评价结果同样基本一致。因此，结合研究区 GPS 位移速率、断层活动性情况、侵蚀速率三个方面证实，本文提出的构造活动性评价方法是综合的构造活动性强弱的体现。

需要指出的是，基于 GPS 位移速率、断层活动性、侵蚀速率来判断活动性强弱的方法具有较大的局限性和片面性，GPS 位移和断层活动性观测需长期连续监测，才能获得稳定速率场，设备建设与维护成本较高；而侵蚀速率测试过程复杂、费用昂贵且样点有限，难以实现高密度空间覆盖。采用模糊综合评价方法可在较低成本和较短周期内实现对构造活动性的有效评估，具有良好的实际应用价值。

总体而言，构造活动通过控制沉积过程与地表形态演化，对区域地貌格局产生重要影响（谭毅滢等，2024），研究区地貌演化主要受区域构造作用影响，澜沧江中上游流域的地貌发育在一定程度上反映了青藏高原东向挤出与扩张作用的构造响应特征，与本文结论一致，说明了本文评价方法的准确性、适用性和合理性。

尽管传统评价方法与本文提出的新方法在空间趋势上表现出较高的一致性，但模糊综合评价在微观细节上具有显著优势。传统分级计算方法具有人为主观硬性划分，参数分级多由经验硬性决定，所以可能存在一定的误差，模糊综合评价法更能反映地貌发育的连续性，考虑到两种活动性等级同时存在（地貌演化交替过程）的可能性，有效降低了“确定边界”带来的分类偏差。同时基于模糊综合评价法在选取指标时进行了相关性分析，选取的地貌指标具有一定的独立性、代表性，相较于传统方法指标选取的随机性，得到的活动性分级结果跟准确。

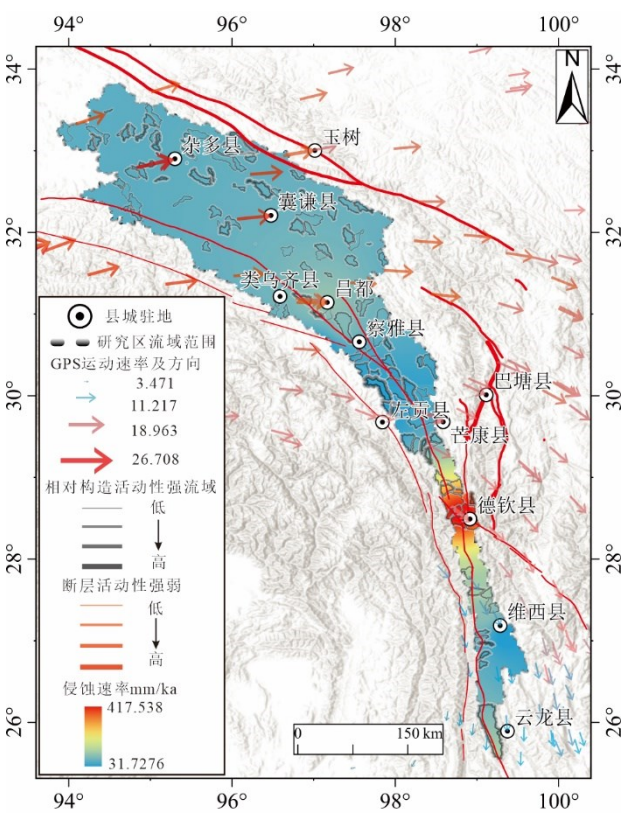


图 14 研究区高活动性流域、GPS 运动矢量、断层分布与流域侵蚀速率特征图

Fig. 14 Characteristic maps of highly active watersheds, GPS movement vectors, fault distributions, and watershed erosion rates in the study area

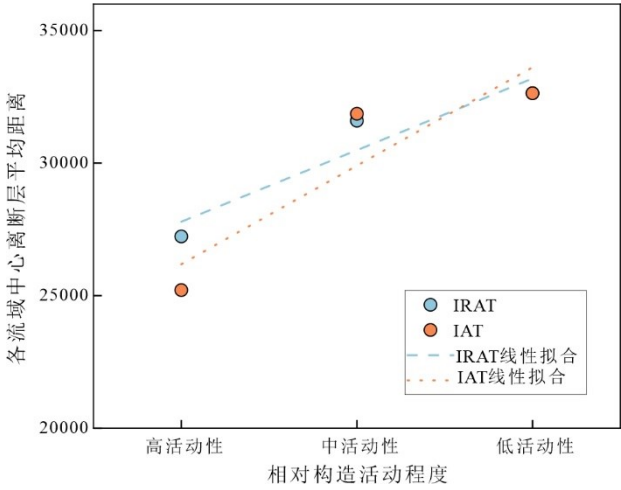


图 15 流域中心距断层距离与相对构造活动等级关系

Fig. 15 The relationship between the distance of a watershed center from a fault and the level of relative tectonic activity

5.2 地貌指数影响因素分析

单一地貌指数的变化不仅受构造活动控制，还受到气候条件、岩性差异等多种因素的共同影响（K

eller et al., 1995)。因此为探究降雨及岩性条件对构造活动性评价结果的影响, 本文基于目前已有数据对构造活动性评价结果进行进一步分析。

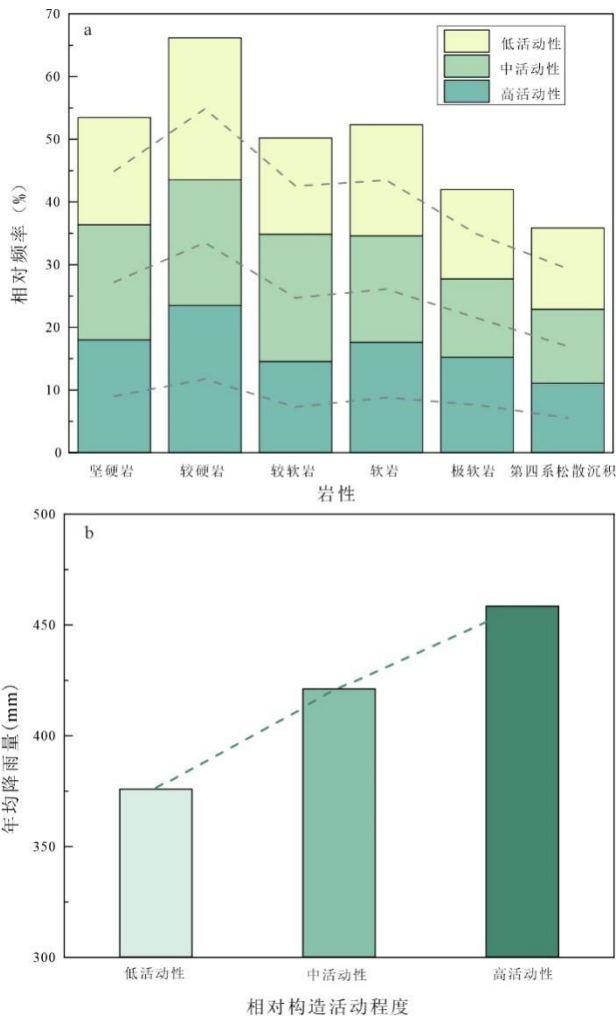


图 16 (a) 相对构造活动程度与岩性、(b) 平均降雨量关系

Fig. 16 (a) Relationship between relative tectonic activity and lithology and (b) average annual precipitation.

基于前文分成的六类岩性进行分析, 统计每类岩性中各个构造活动性所占比率, 如图 16 (a) 所示, 随着岩性硬度的降低, 三种活动性等级的相对占比均呈现下降趋势, 高活动性的流域以坚硬岩和较硬岩为主, 说明构造较活跃的流域更集中分布在物理性质较稳定的坚硬岩石区。从空间分布上, 研究区各类岩组呈带状分布, 其抗蚀性差异有限, 对地貌格局影响相对较小, 结合构造地貌指数和活动性程度的空间分布, 并无随岩性变化而变化的情况, 因此岩性与构造活动性的评价结果相关性较低, 岩性并不会对构造活动性造成太大影响。

根据研究区近七十年年均降雨量数据, 其呈现出南高北低的分布特征 (图 17), 从图 16 (b)

可知, 虽然统计数据上, 随着相对构造活动性等级的增加, 年均降雨量也呈现明显的阶梯式上升趋势, 但空间分布上地貌指数高值主要集中于断裂带附近, 且北部活动性强区域降雨量依旧很少, 说明了澜沧江地区降雨量与构造活动性的并无直接联系, 研究区上游降水梯度较小的察雅-左贡段而言, 该区域内降雨量较为接近, 但是构造活动等级高值点仍高度向区域断裂带集中, 总体而言, 降雨对构造活动性影响较小。

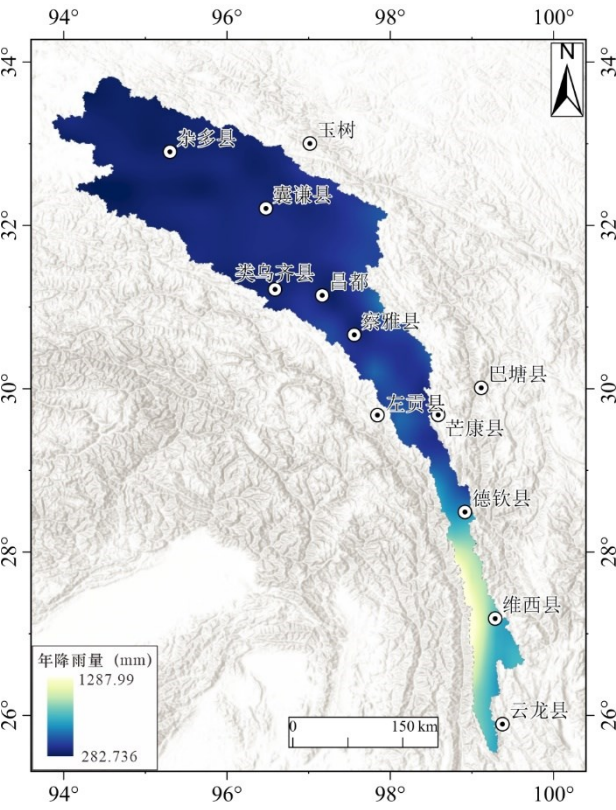


图 17 研究区年均降雨量分布图

Fig. 17 Map of annual average precipitation in the study area

6 结论

研究基于 30 m 分辨率的 ALOS 数字高程模型数据, 提取了澜沧江中上游流域的多种地貌指数, 对区域地貌特征进行了定量分析, 主要结论如下:

- (1) 通过面积高程积分分析, 研究区流域盆地普遍位于 0.5 以下, 流域主体处于地貌演化的壮年期, 提取流域水系的最佳汇流阈值为 90 km²。
- (2) 综合面积-高程积分、标准化河流陡峭指数、标准化河长坡降指标、流域盆地不对称度、流域盆地形状指数五种指数分析, 分别构建传统活动

性分级体系、模糊综合评价分级体系来分析流域活动性,发现昌都-左贡、德钦、云龙一带流域活动性较强。从影响因素来看,岩性和降雨对构造活动性影响较小,活动断层位置是主导因素。

(3) 相较与传统活动性分级方法,利用模糊综合评价法来进行相对构造活动性分级更能体现地貌指标的连续性,减少了人为硬性划分的误差。

(4) 构造活动性评价结果和目前构造活动性的测量评价结果较为一致,说明本文方法对应快速评价构造活动性具有一定的适用性。尽管区内多为走滑断裂,但不同区段活动性差异显著,表明青藏高原东南缘物质东向逃逸过程中,能量的传递与释放受到多条断裂带规模、活动性质及空间展布差异的共同制约,从而形成了区域内复杂多样的构造地貌格局。

References

Amine A, El Ouardi H, Zebari M, et al. 2020. Active tectonics in the Moulay Idriss Massif (South Rifian Ridges, NW Morocco): New insights from geomorphic indices and drainage pattern analysis. *Journal of African Earth Sciences*, 167: 103833.

El Hamdouni R, Irigaray C, Fernandez T, et al. 2008. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2): 150-173.

Giano S I, Pescatore E, Agosta F, et al. 2018. Geomorphic evidence of Quaternary tectonics within an underlap fault zone of southern Apennines, Italy. *Geomorphology*, 303: 172-190.

Hack J T 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *US Geological Survey Journal of Research*, 1(4): 421-429.

Keller E A, Pinter N 1995. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Luo Q, Li J, Wang S, et al. 2023. Morphometric analysis of the North Liuleng Shan Fault in the northern Shanxi Graben system, China: Insights into active deformation pattern and fault evolution. *Geomorphology*, 440: 108862.

Ngapna M N, Owona S, Owono F M, et al. 2020. Assessment of relative active tectonics in Edea-Eseka region (SW Cameroon, Central Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 164: 103798.

Ren J J, Chen J, Li Y, et al. 2022. Late Quaternary slip rate of the northern Lancangjiang fault zone in eastern Tibet: Seismic hazards for the Sichuan-Tibet Railway and regional tectonic implications. *Engineering Geology*, 306: 106748.

Seeber L, Gornitz V 1983. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*, 92(4): 335-367.

Strahler A N 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *GSA Bulletin*, 63(11): 1117-1142.

Whipple K X, Tucker G E 1999. Dynamics of the stream-power river incision

model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B8): 17661-17674.

Willett S D 1999. Orogeny and orography: The effects of erosion on the structure of mountain belts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B12): 28957-28981.

Wang, Min, and Zheng-Kang Shen. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125.2 (2020): e2019JB018774.

附中文参考文献

常直杨. 2014. 青藏高原东缘白龙江流域地貌定量参数体系研究[D]. 南京师范大学. DOI:10.7666/d.Y2625265. (CHANG Zhiyang. 2014. A Study on the Quantitative Parameter System of Landforms in the Bailong River Basin on the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Nanjing Normal University) (in Chinese with English abstract)

常祖峰 2015. 2013 年云南奔子栏 M5.9 地震发生的地震地质背景. *地震地质*, 37(1): 192-207. (CHANG Zufeng 2015. Seismotectonic background of the 2013 M5.9 Benzilan earthquake in Yunnan. *Seismology and Geology*, 37(1): 192-207.) (in Chinese with English abstract)

褚永彬, 朱利东, 杨文光, 等 2021. 利用 ArcGIS 和 Excel 提取面积高程积分曲线的方法. *科学技术与工程*, 21(36): 15372-15377. (CHU Yongbin, ZHU Lidong, YANG Wenguang, et al. 2021. Method for extracting hypsometric integral curves using ArcGIS and Excel. *Science Technology and Engineering*, 21(36): 15372-15377.) (in Chinese with English abstract)

韩明明 2022. 怒江断裂带邦达段晚第四纪活动性研究. 北京: 中国地震局地质研究所. (HAN Mingming 2022. Study on Late Quaternary activity of the Bangda segment of the Nu River fault zone. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration.) (in Chinese with English abstract)

黄学猛, 杜义, 何仲太, 等. 2011. 乌兰乌拉湖-玉树断裂东段晚第四纪滑动速率[J]. *地震地质*. DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2011.04.013. (HUANG Xuemeng, Du Yi, He Zhongtai, et al. Late Quaternary Slip Rates on the Eastern Segment of the Wulanwula Lake-Yushu Fault [J]. *Seismology and Geology*, 2011(4)) (in Chinese with English abstract)

刘静, 张金玉, 葛玉魁, 等. 2018. 构造地貌学: 构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究[J]. *科学通报*, 63(30): 3070-3088. (LIU Jing, Zhang Jinyu, Ge Yukui, et al. 2018. Tectonomorphology: An Interdisciplinary Study of the Interactions Among Tectonics, Climate, and Surface Processes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 63(30): 3070-3088.) (in Chinese with English abstract)

马腾霄, 杨文光, 朱利东, 等 2022. 雅鲁藏布江中游地貌参数特征及其构造地貌意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 49(4): 502-512. (MA Tengxiao, YANG Wenguang, ZHU Lidong, et al. 2022. Geomorphic parameters and tectonic geomorphology significance of the middle reaches of Yarlung Zangbo River. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 49(4): 502-512.) (in Chinese with English abstract)

秦翔, 施炜, 李恒强, 等 2017. 基于 DEM 地形特征因子的青藏高原东北缘宁南弧

- 形断裂带活动性分析. 第四纪研究, 37(2): 213-223. (QIN Xiang, SHI Wei, LI Hengqiang, et al. 2017. Activity analysis of the Ningnan arcuate fault zone on the northeastern margin of the Tibetan Plateau based on DEM terrain factor. Quaternary Sciences, 37(2): 213-223.) (in Chinese with English abstract)
- 邱燕, 聂鑫, 阎贫, 等. 2024. 南海陆缘中南-礼乐断裂带的发育与构造活动. 地球科学, 49(10): 3471-3487. (QIU Yan, NIE Xin, YAN Pin, et al. 2024. Development and tectonic activity of the Zhongnan-Liyue fault zone in the northern margin of the South China Sea. Earth Science, 49(10): 3471-3487.) (in Chinese with English abstract)
- 桑云云. 2023. 横断山区堰塞坝分布规律及侵蚀速率研究. 南充: 西华师范大学. (SANG Yunyun 2023. Research on distribution rules of landslide dams and erosion rates in the Hengduan Mountains. Nanchong: West China Normal University.) (in Chinese with English abstract)
- 史小辉. 2018. 秦岭一大巴山构造地貌特征及动力学意义. 西安: 西北大学. (SHI Xiaohui 2018. Tectonic geomorphological characteristics and geodynamic significance of Qinling-Daba Mountains. Xi'an: Northwest University.) (in Chinese with English abstract)
- 谭毅滢, 肖文交, 宋东方. 2024. 弧前盆地的沉积和构造特征. 地球科学, 49(7): 2539-2551. (Tan Yiyang, Xiao Wenjiao, Song Dongfang. 2024. Sedimentary and Structural Characteristics of Forearc Basins. Earth Science, 49(7): 2539-2551.) (in Chinese with English abstract)
- 王乃瑞, 韩志勇, 李徐生, 等. 2015. 河流纵剖面陡峭指数对庐山构造抬升的指示[J]. 地理学报, 70(9):10.D0I:10.11821/dlxb201509013. (WANG Nairui, Han Zhiyong, Li Xusheng, et al. 2015. Indications of the tectonic uplift of Mount Lu from river longitudinal profile steepness indices [J]. Acta Geographica Sinica, 70(9):10.) (in Chinese with English abstract)
- 王世龙, 刘静, 李金阳, 等. 2025. 澜沧江裂点带支河谷纵剖面和下切量空间分布特征. 地质通报, 1-19. (WANG Shilong, LI Jinyang, LIU Jing, YANG Chaoyun, XING Yukun, SHAO Yanxiu. Longitudinal profile, spatial distribution characteristics and evolutionary trend of tributaries in the knick-zone of the Lancang River[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(8): 1535-1549. DOI: 10.12097/gbc.2022.03.011) (in Chinese with English abstract)
- 王艺晨, 郝明, 余中元, 等. 2025. GNSS 约束下的甘孜—玉树—鲜水河断裂带滑动速率研究. 地震研究, 48(3): 382-390. (WANG Yichen, HAO Ming, YU Zhongyuan, et al. 2025. Slip rate of the Ganzi - Yushu - Xianshuihe fault zone constrained by GNSS. Journal of Seismological Research, 48(3): 382-390.) (in Chinese with English abstract)
- 王哲, 易发成, 陈廷方. 2012. 基于模糊综合评判的绵阳市地质灾害易发性评价. 科技导报, 30(31): 53-60. (WANG Zhe, YI Facheng, CHEN Tingfang 2012. Vulnerability assessment of geological hazards in Mianyang City based on fuzzy comprehensive evaluation. Science & Technology Review, 30(31): 53-60.) (in Chinese with English abstract)
- 吴富晓, 蒋良文, 张广泽, 等. 2019. 川藏铁路金沙江断裂带北段第四纪活动特征探讨[J]. 高速铁路技术, 10(4): 23-28. (WU Fuyao, Jiang Liangwen, Zhang Guangze, et al. 2019. A Study on Quaternary Activity Characteristics of the Northern Section of the Jinsha River Fault Zone along the Sichuan-Tibet Railway [J]. High-Speed Railway Technology, 10(4): 23-28.) (in Chinese with English abstract)
- 文力, 刘静, M.Oskin, 等. 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(05): 968-985. (WEN Li, LIU Jing, OSKIN M, et al. 2012. Control of active tectonics on the spatial distribution of erosion rates at the plateau margin: A case study of the Longmenshan area. Quaternary Sciences, 32(05): 968-985.) (in Chinese with English abstract)
- 项闻. 2022. 巴塘断裂晚第四纪活动特征及地震危险性评价. 西安: 长安大学. (XIANG Wen 2022. Late Quaternary activity characteristics and seismic hazard assessment of the Batang fault. Xi'an: Chang'an University.) (in Chinese with English abstract)
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85(1): 1-33. (XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. 2011. Tectonics of the India - Asia collision. Acta Geologica Sinica, 85(1): 1-33.) (in Chinese with English abstract)
- 徐岳仁, 何宏林, 邓起东, 等. 2013. 山西霍山山脉河流地貌定量参数及其构造意义. 第四纪研究, 33(4): 746-759. (XU Yueren, HE Honglin, DENG Qidong, et al. 2013. Quantitative fluvial geomorphological parameters and their tectonic significance in the Huoshan Mountains, Shanxi Province. Quaternary Sciences, 33(4): 746-759.) (in Chinese with English abstract)
- 余华玉, 董有浦, 于良, 等. 2025. 滇中普渡河断裂相对构造活动性特征. 地球科学, 50(01): 336-348. (YU Huayu, DONG Youpu, YU Liang, et al. 2025. Characteristics of relative tectonic activity of the Pudu River fault in central Yunnan. Earth Science, 50(01): 336-348.) (in Chinese with English abstract)
- 张献兵, 于皓, 余潇, 等. 2024. 滇藏铁路沿线重要活动断裂带晚第四纪活动性初步研究. 地震科学进展, 54(1): 94-109. (ZHANG Xianbing, YU Hao, YU Xia, et al. 2024. Preliminary study on Late Quaternary activity of important active faults along the Sichuan-Tibet Railway. Progress in Earthquake Sciences, 54(1): 94-109.) (in Chinese with English abstract)
- 赵洪壮, 李有利, 杨景春. 2010. 北天山流域河长坡降指标与 Hack 剖面的新构造意义. 北京大学学报 (自然科学版), 46(2): 237-244. (Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun 2010. Neotectonic significance of river length - slope index and Hack profile in the northern Tianshan River Basin. Journal of Peking University (Natural Sciences), 46(2): 237-244.) (in Chinese with English abstract)
- 赵彦博, 李振江, 李高保, 等. 2024. 怒江、澜沧江、金沙江断裂带北段第四纪活动特征. 地球科学前沿, 14(12): 1570-1577. (ZHAO Yanbo, LI Zhenjiang, LI Gaobao, et al. 2024. Quaternary activity characteristics of the northern section of the Nu River, Lancang River, and Jinsha River fault zones. Earth Science Frontiers, 14(12): 1570-1577.) (in Chinese with English abstract)
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 2014. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社.(Ministry of Housing and Urban-Rural Construction, State Quality Supervision and Inspection and Quarantine General Administration. 2014. Engineering rock mass classification standard: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press.)

ng and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2014. Standard for Engineering Classification of Rock Mass: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press.) (in Chinese with English abstract)