引用格式：谭凌，梁明剑，张威，等，2026. 雅砻江上游流域地貌特征及其构造响应分析[J]. 地质力学学报，32（3）：638−655. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026003

Citation: TAN L，LIANG M J，ZHANG W，et al.，2026. Geomorphic features and tectonic responses in the Upper Yalong River basin[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：638−655. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026003

雅砻江上游流域地貌特征及其构造响应分析

谭 凌[1]，梁明剑[1]，张 威[1]，董芸希[1]，刘 韶[1]，李福鹏[1]，谭 鑫[1]，龙建宇[1]，李 圣[2]

TAN Ling[1]，LIANG Mingjian[1]，ZHANG Wei[1]，DONG Yunxi[1]，LIU Shao[1]，LI Fupeng[1]，TAN Xin[1]，LONG Jianyu[1]，LI Sheng[2]

1. 四川省地震局，四川 成都 610041；
2. 云南省地震局，云南 昆明 650051

1. *Sichuan Earthquake Agency*, *Chengdu* 610041, *Sichuan*, *China*;
2. *Yunnan Earthquake Agency*, *Kunming* 650051, *Yunnan*, *China*

Geomorphic features and tectonic responses in the Upper Yalong River basin

Abstract: ［**Objective**］The Upper Yalong River basin, situated on the southeastern margin of the Bayan Har block, is characterized by a well-developed river system. Large-scale NW-trending active faults traverse this drainage basin, where tectonic activity constrains regional fluvial geomorphic development and evolution. Current research has predominantly focused on fault activity, paleoseismic events, and seismic hazard assessment, whereas studies addressing basin-scale geomorphic characteristics and their response to tectonic deformation remain relatively limited. ［**Methods**］Based on a 30-meter-resolution Copernicus Digital Elevation Model (DEM), 98 sub-basins were identified within the Upper Yalong River basin. Five geomorphic indices were calculated for each sub-basin: hypsometric integral (*HI*), basin shape index (*BS*), asymmetry factor (*AF*), elongation ratio (*Re*), and mean normalized stream gradient index (SLK_{avg}). These indices were quantified, classified, and integrated into a composite indicator—the relative strength of tectonic activity (*Iat*). Furthermore, the normalized channel steepness index (k_{sn}) and knickpoints were incorporated to reveal the spatial differentiation of fluvial geomorphic characteristics and to explore the coupling relationship between tectonic activity and landscape evolution. ［**Results**］In the Upper Yalong River basin, *HI* values range from 0.09 to 0.63. Some sub-basins are in an early stage of development and exhibit significant asymmetry. Left-lateral offsets of waterways, gullies, and alluvial fans are observed. SLK_{avg} and k_{sn} indicate strong tectonic uplift in most basins, accompanied by significant longitudinal variations in channel slope. Spatially, the *Iat* displays a pattern of alternating high and low values, with interconnected low-activity zones. Basins with low *Iat* values are distributed in linear belts along fault zones. Along the Wudaoliang–Changshagongma fault, which crosses the upper basin, *Iat* values are lower in the northern and southern Holocene-active segments. In contrast, the middle segment intersecting the Changshagongma Basin shows higher *Iat* values, possibly related to localized variations in tectonic deformation along fault segments. Basins traversed by the Ganzi–Yushu fault also exhibit relatively low *Iat* values, corresponding to strong activity at the block boundary. The geomorphic indices affect *Iat* in the order: $Re > HI > AF > SLK_{avg} > BS$. ［**Conclusions**］The strong consistency among tectonic activity, geomorphic features, and seismic

基金项目：四川省地震局地震科技专项（LY2507）；中国地震局星火计划（XH24036B）

This research was financially supported by the Special Program of Seismic Science and Technology in Sichuan Earthquake Agency (Grant No. LY2507) and Spark Program of the China Earthquake Administration (Grant No. XH24036B).

第一作者：谭凌（1995—），女，硕士，工程师，主要从事断层调查及数据库应用方面的研究。Email：TL1478829150@126.com

通信作者：梁明剑（1979—），男，博士，高级工程师，主要从事活动构造方面的研究。Email：23800794@qq.com

收稿日期：2026−01−08；**修回日期**：2026−05−11；**录用日期**：2026−05−12；**网络出版日期**：2026−05−26；**责任编辑**：范二平

Received：2026−01−08；Revised：2026−05−11；Accepted：2026−05−12；Available Online：2026−05−26；Handling Editor：FAN Erping

activity in the study area directly reflects the role of tectonic processes in shaping the regional landscape pattern. The spatial differentiation of *Iat* and geomorphic indices effectively captures differential tectonic uplift and deformation along fault zones, providing clear geomorphic evidence of ongoing tectonic dynamics on the southeastern margin of the Bayan Har block.

Keywords: Upper Yalong River basin; Bayan Har block; Wudaoliang–Changshagongma fault; geomorphic indices; relative tectonic activity

摘　要：雅砻江上游地处巴颜喀拉块体东南缘，水系发达，区内北西向的大型活动断裂贯穿流域盆地。当前研究多聚焦于其断裂活动性、古地震事件及地震危险性评估，关于流域地貌特征及其构造变形响应方面的研究相对薄弱。文章基于 30 m 分辨率 Copernicus 数字高程模型（DEM）提取了雅砻江上游 98 个子流域，计算各子流域的面积−高程积分（*HI*）、流域形状指数（*BS*）、流域盆地不对称度（*AF*）、流域伸长比（*Re*）及标准化河流梯度指数平均值（SLK_{avg}），通过量化与分级，集成为综合指标——相对构造活动强度（*Iat*），结合归一化河道陡峭指数（k_{sn}）、河流裂点揭示流域地貌特征的空间分异规律，进而探讨构造活动与地貌演化之间的耦合关系。研究结果表明，雅砻江上游流域 *HI* 值介于 0.09～0.63，部分子流域处于发育幼年期，流域几何形态呈现明显不对称，水系、冲沟与冲洪积扇发生左旋位错，SLK_{avg}、k_{sn} 揭示若干子流域抬升强烈，河道纵向坡度变化显著；*Iat* 表明构造活动性在空间上呈现强弱相间、弱域连通的分异格局，低值 *Iat* 子流域沿断裂呈条带状分布；五道梁−长沙贡玛断裂全新世活动段南北端 *Iat* 值较低，中段 *Iat* 值较高，可能与断裂分段局部的构造变形差异有关；甘孜−玉树断裂经过子流域 *Iat* 值也较低，对应块体边界的强活动性；各地貌指数对 *Iat* 影响强度大小依次为 *Re*、*HI*、*AF*、SLK_{avg}、*BS*。构造活动、地貌特征与地震活动在雅砻江上游地区表现出显著的一致性，表明构造动力对流域地貌的发育与演化具有主导控制作用。

关键词：雅砻江上游；巴颜喀拉块体；五道梁−长沙贡玛断裂；地貌指数；相对构造活动性

中图分类号：P931.2; P546　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)03−0638−18

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026003

0　引言

流域内部不同级别水系的发育与演化记录了该区域构造活动、气候侵蚀等信息，是研究构造活动与地貌演化之间的理想媒介。获取相关地貌指数、分析流域地貌发育的阶段及特征，能够揭露和认识构造变形过程及其与地貌耦合关系（曹鹏举等，2021；孟宪萌等，2023）。El Hamdouni et al.（2008）提出一种基于地貌指数评估相对构造活动强度的新方法，该方法以河流坡降（*SL*）、流域盆地不对称度（*AF*）、面积−高程积分（*HI*）、谷底宽高比（*VF*）、流域形状指数（*BS*）和山前曲折度（S_{mf}）为核心指标，构建相对构造活动强度指数（*Iat*）并划分为 4 个等级，成功应用于西班牙南部内华达山脉西南缘的相对构造活动强度评估。Dehbozorgi et al.（2010）采用相同的指数，定量分析了伊朗扎格罗斯山脉中部的相对构造活动强度。Sharma et al.（2018）进一步将该方法应用于印度加尔瓦尔喜马拉雅山脉阿拉克南达河流域，开展构造活动分析。国内诸多学者亦运用 *HI*、*AF*、*SL* 等地貌指数，针对青藏高原东南缘怒江上游、青藏高原东南缘曲江断裂、青藏高原东北缘清水河、北大巴山汉江、滇西澜沧江、北天山、祁连山、太行山等区域的多个流域，解析地貌特征并探讨其构造指示意义（刘樯漪等，2017；关雪等，2021；李红强等，2023；李勇杰等，2024；孙林龙等，2024；王阳等，2024；胡俊宏等，2025；李圣等，2025；谭鑫等，2025）。

青藏高原自晚新生代以来持续隆升、扩展，新构造运动与地震活动强烈，为地貌特征及其构造响应研究提供理想场所（郑文俊等，2025；张明明等，2026）。雅砻江流域位于青藏高原中东部的巴颜喀拉块体东南缘，干流全长 1571 km，流域高差 3870 m，平均比降 2.46‰，流域内高山、峡谷相间发育，支流长度、流域面积、高原面几何形态在空间上呈现较大差异（刘维明等，2021）。五道梁−长沙贡玛断裂为巴颜喀拉块体内部一条大型的左旋走滑断裂，贯穿流域上游，控制着长沙贡玛盆地北边界（梁明剑等，2022）。当前针对该断裂的研究，多聚焦于断裂活动性、古地震事件及地震危险性评估等方向，关于地貌特征及其构造响应的研究尚显不足（母若愚，2022；梁明剑等，2023）。文章以雅砻江上游流域

为研究区，围绕区内的五道梁−长沙贡玛、巴颜喀拉主峰、甘孜−玉树等全新世活动断裂，依托数字高程模型（DEM）提取计算 *HI*、*BS*、*AF*、流域伸长比（*Re*）及标准化河流梯度指数平均值（SLK_{avg}）5 项地貌指数，通过量化与分级，计算 *Iat*，评估区域的构造活动性，并对其空间分布规律展开分析。同时，结合归一化河道陡峭指数（k_{sn}）、河流裂点、区域岩性与构造资料，进一步探讨构造活动性的差异特征、构造活动对地貌演化的驱动作用及地貌特征对构造活动的响应机制，以期为深化青藏高原东部构造−地貌耦合关系研究积累基础数据与典型案例。

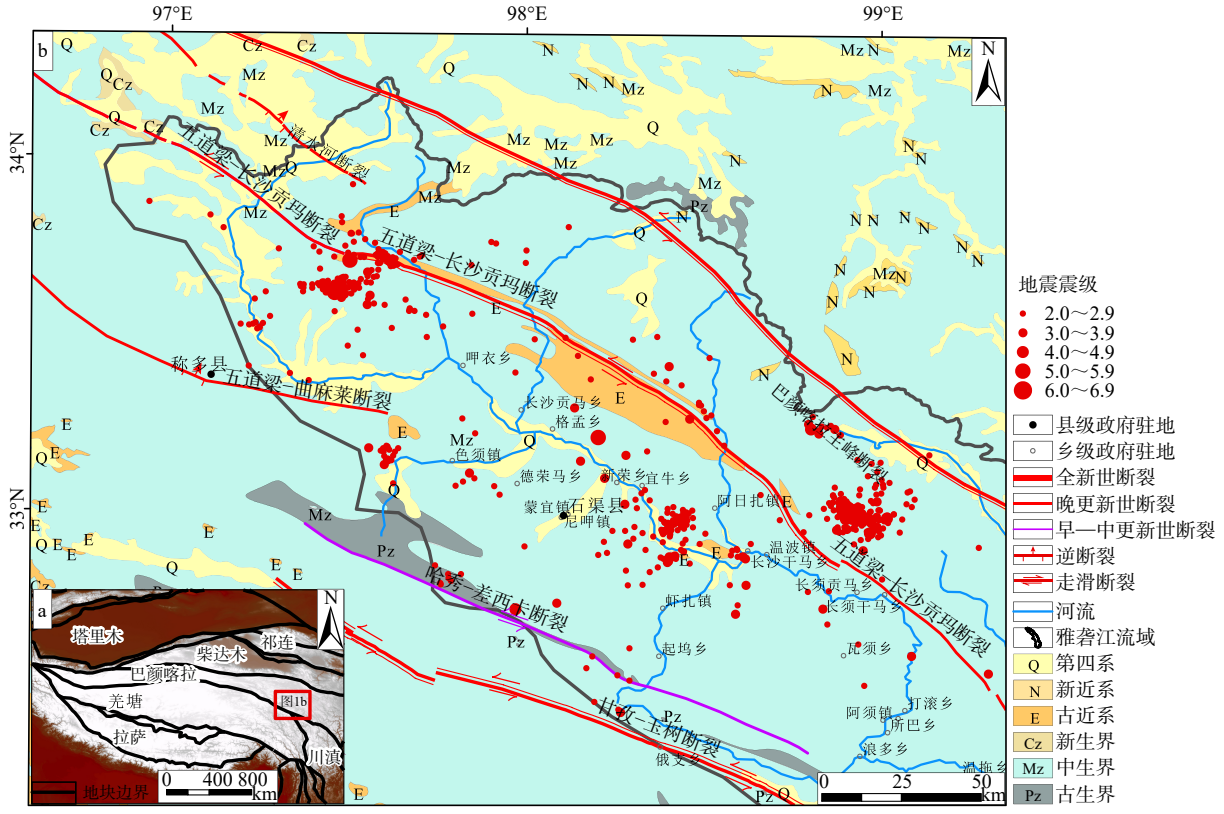
1 区域构造地貌特征

1.1 构造特征

巴颜喀拉块体位于青藏高原中部，整体呈西窄东宽的倒三角形，北接柴达木−西秦岭褶皱带，西南毗邻羌塘块体，东南紧靠四川盆地。其北边界的东昆仑断裂带和南边界的甘孜−玉树断裂带均为大型左旋走滑活动断裂，东缘的龙门山断裂带则以逆冲运动为主，兼具右旋走滑分量（闻学泽等，2011；杨文，2022；李宁等，2024）。五道梁−长沙贡玛断裂是块体内部活动显著的重要断裂，走向北西，西北端起于青海五道梁附近，向东南经石渠县长须贡马乡一带延伸至鲜水河断裂带北西端北侧。该断裂主要表现为左行走滑性质，中南段横穿雅砻江上游流域，为晚更新世—全新世活动断裂，控制沿线的新生代盆地发育与演化，且小震活动频繁（图 1）。2020 年 4 月 1 日四川石渠 5.6 级地震就发生在该断裂中段的南端。巴颜喀拉主峰断裂属于区域性断裂，走向北西，倾向北东，倾角较陡，为全新世左旋走滑断裂。

1.2 地貌特征

雅砻江发源于巴颜喀拉山南麓，干流总体自西北向东南流经青海后进入四川，于石渠县附近始称雅砻江，最终作为金沙江的最大支流汇入其中，干流通常以新龙县乐安乡和无量河口为界，划分为



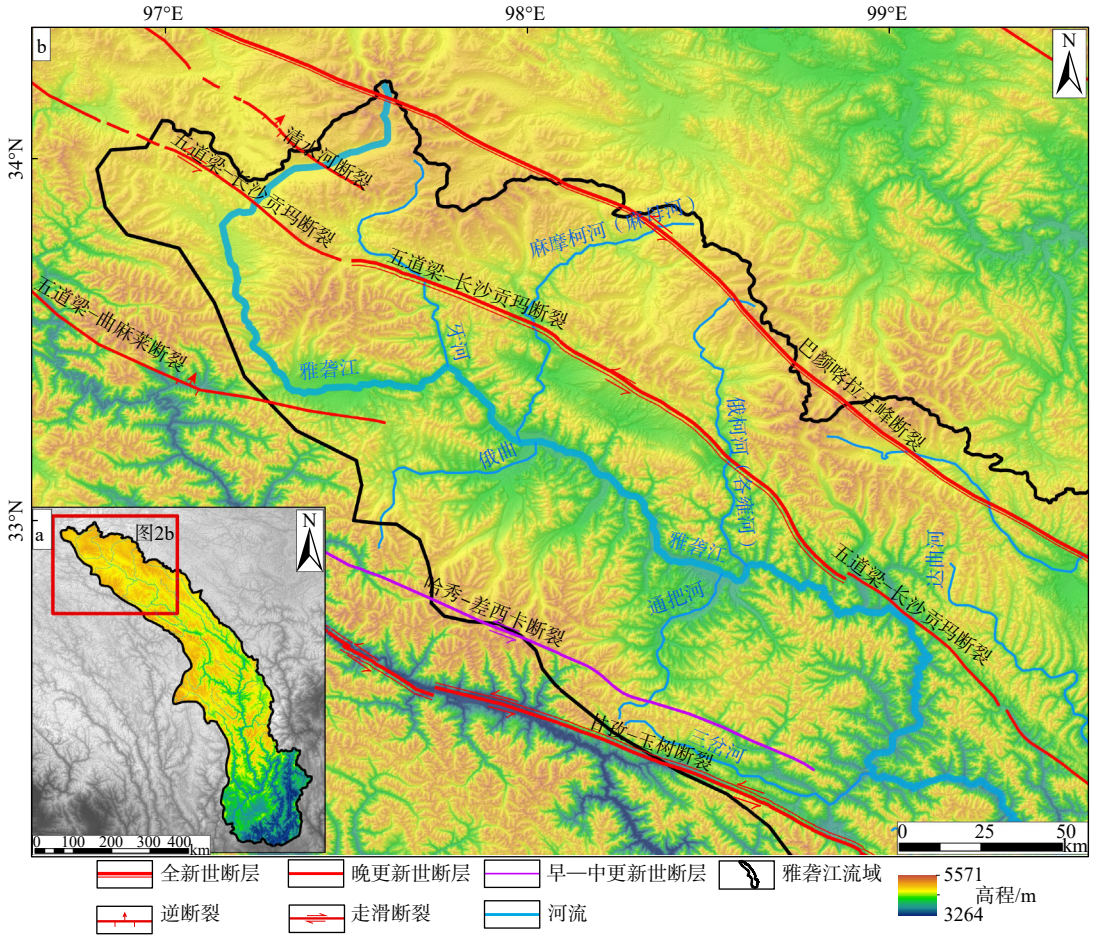
a—雅砻江上游构造背景；b—雅砻江上游构造概况

图 1 雅砻江上游地质构造简图

Fig. 1 Simplified geological structural map of the Upper Yalong River basin

(a) Regional tectonic overview of the Upper Yalong River basin; (b) Stratigraphic distribution and tectonic overview of the Upper Yalong River basin

上、中、下游 3 段(姜胜凡, 2021)。文章选取雅砻江上游流域为研究区，其属于典型的高原山地地貌，整体地势起伏大、地形破碎、沟谷密集，地貌格局深受断裂构造与水系分布的共同控制，构造运动与外力剥蚀作用活跃，山岭与山谷相间分布，高程的剧烈变化反映出地形的阶梯性(姚昆等, 2020; 李阳阳等, 2025)。区域北部坡度缓和，中部盆地、水系宽谷地带地形平缓，南部、东部以及支流沟谷两侧坡度陡峭，整体呈现北缓南陡、谷底平缓、谷坡陡峭的特征。支流广泛发育，短小支沟众多，河网密度高，包括俄曲、麻母河、各雍河等，多呈羽状水系，以锐角从主流两侧汇入(图 2)。



a—雅砻江上游流域地理位置；b—雅砻江上游流域 DEM

图 2　雅砻江上游 DEM 特征

Fig. 2　DEM of the Upper Yalong River basin

(a) Location of the Upper Yalong River basin; (b) Digital elevation model (DEM) of the Upper Yalong River basin

2　研究数据与方法

2.1　数据来源与处理

DEM 数据来源于哥白尼 30 m 数据(Copernicus DEM GLO-30)，是由欧洲航天局主导研发的全球高精度开源地形数据产品，空间分辨率 30 m，融合了 Sentinel-1 雷达、Sentinel-2 光学影像及激光雷达等多源观测数据，数据采集周期集中于 2010—2015 年，具备较高的时空现势性。基于 DEM 数据，借助 GeoScene 软件中水文分析模块与模型构建器，构建流域自动化提取模型，设置汇流累积量区间为 1000～20000，以 500 为步长进行循环试算，多阈值提取河网与流域，将提取结果与实际水系数据进行对比，并结合区域断裂分布特征及研究尺度的实际需求，确定最佳汇流累积量阈值为 10000，最终将研究区划分为 98 个子流域(图 3)。地形地貌分析及数值模拟主要依托 GeoScene 软件平台，使用到的工具及函

数集有：基于 MATLAB 和 TopoToolbox 开发的开源函数集 GeomorphicIndicesExtract（Schwanghart and Kuhn, 2010；Schwanghart and Scherler, 2014；Dai et al., 2024）、Knickpointfinder 工具（Queiroz et al., 2015）。

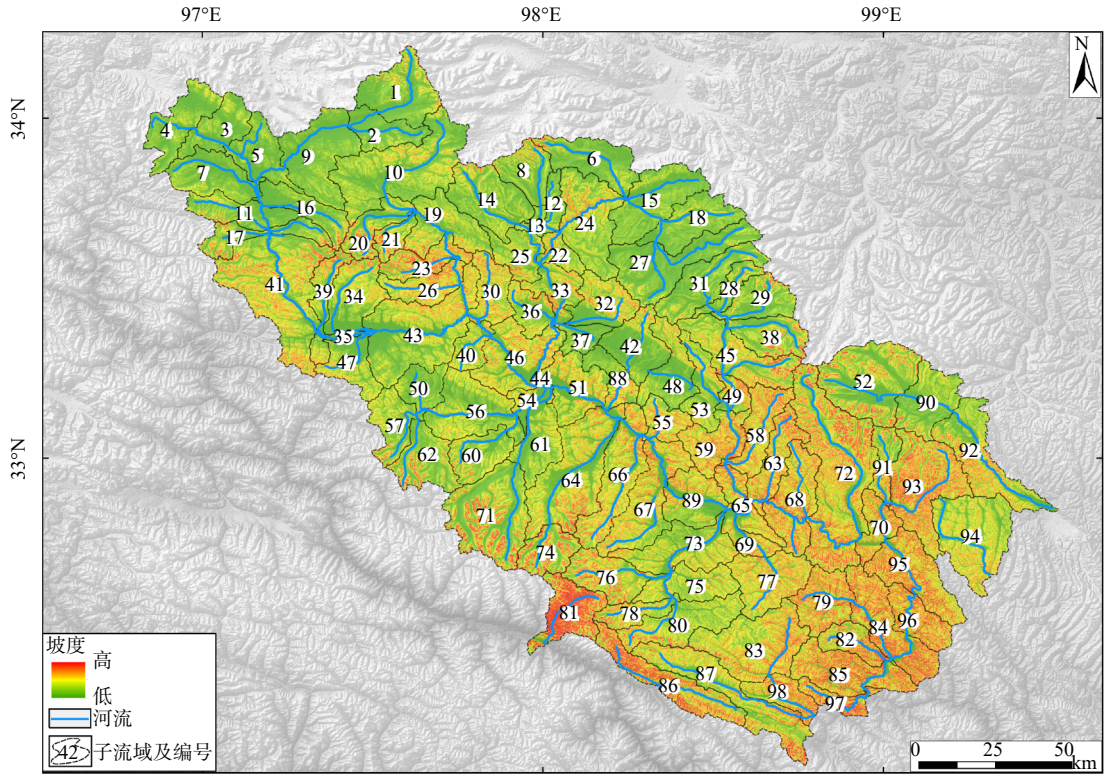


图 3 雅砻江上游子流域分布

Fig. 3 Watershed distribution in the Upper Yalong River basin

2.2 研究方法

不同地貌指数的侧重点各异，*HI* 常用于判别流域构造活动强度与地貌侵蚀演化阶段（张威等，2020；申凯楠和董绍鹏，2023），配合 *BS*、*AF* 可更深入地识别流域地貌演化的主要控制因素，SLK_{avg} 主要用于河流纵剖面受控因素的识别（Scotti et al., 2014）。单一地貌指数在反映区域构造活动时存在局限性，难以对区域整体构造活动程度进行综合评价。通过量化整合 *HI*、*BS*、*AF*、*Re* 等多项地貌指数得到 *Iat*，能够实现对区域构造活动强度的整体判别（孟宪萌等，2023）。地貌指数的分类体系受研究区构造运动特征、地质背景及研究目标的差异影响，研究借鉴已有研究成果（El Hamdouni et al., 2008; Dehbozorgi et al., 2010; 路芳等，2023；孙林龙等，2024；王阳等，2024），结合雅砻江上游实际地质条件，构建适用于研究区的地貌指数等级划分方案（表 1）。其中，*HI*、*BS*、*AF* 及 SLK_{avg} 值与构造活动强度呈正相关，指数值越大，对应等级越高（1 级等级最高，2 级次之，3 级最低），构造活动越强烈；*Re* 值与构造活动强度呈负相关，指数值越小，对应等级越高，构造活动越强烈。综合上述指数计算得到 *Iat* 值，等级越高，构造活动越强。

2.2.1 面积−高程积分

HI 指数由美国理论地貌学家 Strahler（1952）提出，用于衡量流域地表高程分布与侵蚀阶段的关系，Pike and Wilson（1971）通过起伏比推导其计算公式如下：

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

式中，H_{mean}、H_{min}、H_{max}—流域内高程的平均值、最低值、最高值。*HI* 指数的 1 级指示地貌经历强烈的构造变形，处于发育初始阶段；2 级指示地表形态达到相对均衡，处于地貌壮年期；3 级指示构造变形弱或者未经历构造变形，处于发育晚期。

2.2.2 流域形状指数

流域形状指数通过流域的长宽比确定，计算公式如下（Figueroa and Knott, 2010）：

$$BS = B_l/B_w \quad (2)$$

表 1　地貌指数分级示意表

Table 1　Classification of geomorphic indices

地貌指数分级及构造活动性程度		地貌指数分类方法				最终选取分类
		El Hamdouni et al., 2008	Dehbozorgi et al., 2010	孙林龙等, 2024	王阳等, 2024	
HI	第1级(强)	*HI*>0.5	*HI*≥0.5	*HI*>0.5	*HI*≥0.46	*HI*>0.5
	第2级(中)	0.4≤*HI*≤0.5	0.4≤*HI*<0.5	0.4≤*HI*≤0.5	0.37≤*HI*<0.46	0.4≤*HI*≤0.5
	第3级(弱)	*HI*<0.4	*HI*<0.4	*HI*<0.4	*HI*<0.37	*HI*<0.4
BS	第1级(强)	*BS*≥ 4.0	*BS*≥ 4.0	*BS*>2.3	–	*BS*>2.3
	第2级(中)	3.0<*BS*<4.0	3.0<*BS*<4.0	1.5≤*BS*≤2.3	–	1.5≤*BS*≤2.3
	第3级(弱)	*BS*≤ 3.0	*BS*≤ 3.0	*BS*<1.5	–	*BS*<1.5
AF	第1级(强)	$\lvert AF-50\rvert \geqslant 15$	$\lvert AF-50\rvert \geqslant 15$	$\lvert AF-50\rvert \geqslant 15$	$\lvert AF-50\rvert \geqslant 15$	$\lvert AF—50\rvert \geqslant 15$
	第2级(中)	$7 \leqslant \lvert AF-50\rvert < 15$	$7 \leqslant \lvert AF-50\rvert < 15$	$7 \leqslant \lvert AF-50\rvert < 15$	$7 \leqslant \lvert AF-50\rvert < 15$	$7 \leqslant \lvert AF—50\rvert < 15$
	第3级(弱)	$\lvert AF-50\rvert < 7$	$\lvert AF-50\rvert < 7$	$\lvert AF-50\rvert < 7$	$\lvert AF-50\rvert < 7$	$\lvert AF—50\rvert < 7$
Re	第1级(强)	–	–	–	$Re < 0.5$	$Re < 0.5$
	第2级(中)	–	–	–	$0.5 \leqslant Re < 0.75$	$0.5 \leqslant Re < 0.75$
	第3级(弱)	–	–	–	$0.75 \leqslant Re$	$0.75 \leqslant Re$
SLK_{avg}	第1级(强)	–	–	$SLK_{avg} \geqslant 3.7$	–	$SLK_{avg} \geqslant 3.7$
	第2级(中)	–	–	$2.5 \leqslant SLK_{avg} < 3.7$	–	$2.5 \leqslant SLK_{avg} < 3.7$
	第3级(弱)	–	–	$SLK_{avg} < 2.5$	–	$SLK_{avg} < 2.5$
Iat	第1级(强)	$1.0 < Iat < 1.5$	$1.0 \leqslant Iat < 1.5$	$1.0 \leqslant Iat < 1.5$	$1.0 \leqslant Iat < 1.5$	$1.0 \leqslant Iat < 1.5$
	第2级(较强)	$1.5 < Iat < 2.0$	$1.5 \leqslant Iat < 2.0$	$1.5 \leqslant Iat < 2.0$	$1.5 \leqslant Iat < 2.0$	$1.5 \leqslant Iat < 2.0$
	第3级(中等)	$2.0 < Iat < 2.5$	$2.0 \leqslant Iat < 2.5$	$2.0 \leqslant Iat < 2.5$	$2.0 \leqslant Iat < 2.5$	$2.0 \leqslant Iat < 2.5$
	第4级(弱)	$2.5 < Iat$	$2.5 \leqslant Iat < 3.0$	$2.5 \leqslant Iat < 3.0$	$2.5 \leqslant Iat < 3.0$	$2.5 \leqslant Iat < 3.0$

注: *HI*—面积–高程积分; *BS*—流域形状指数; *AF*—流域盆地不对称度; *Re*—流域伸长比; SLK_{avg}—标准化河流梯度指数平均值; *Iat*—相对构造活动强度

式中，B_l—流域主河道源头到出水口的直线距离；B_w—该流域内垂直于B_l的最大宽度。*BS*指数的1级表示流域形态为狭长形，下切作用强烈，侧向侵蚀较弱；2级表示流域形状介于圆形与狭长流域之间，反映中等侵蚀控制或局部构造影响；3级表示流域逐渐转变趋于圆形，常见于构造稳定、岩性均一地区。

2.2.3　流域盆地不对称度

*AF*是用于量化流域盆地几何形态不对称性的指标(Hack, 1973)：

$$AF = 100(A_r/A_t) \tag{3}$$

式中，A_r—面向下游时干流右侧的流域面积；A_t—流域的总面积。*AF*指数的1级表示流域严重不对称，通常指示强烈的构造控制(如断裂、褶皱倾斜)或外营力(如冰川改造、人为干预)；2级表示流域呈现一定的不对称性，可能反映局部构造影响(如轻微倾斜)或岩性差异，但未完全主导流域演化；3级表示流域两侧面积接近相等，表明流域发育受均一的地质构造或岩性控制。

2.2.4　流域伸长比

*Re*值以“与流域面积相等的理想圆”作为“形态基准”，通过对比该圆的直径与实际流域的最大长度，反映流域形态偏离“理想圆形”的程度，偏离程度越大，意味着构造活动对形态的约束越强，其计算公式如下(Ramírez-Herrera, 1998)：

$$Re = 2\sqrt{A/\pi}/L_b \tag{4}$$

式中，A—流域面积；L_b—源头至河口的流域最大长度。*Re*指数的1级表示流域形态呈细长形，构造活动频繁，河流被迫沿构造应力方向延伸；2级表示流域形态呈椭圆形，构造抬升速率适中，外动力作用仍可部分调整流域边界，但构造定向应力已开始约束河流走向；3级表示流域盆地呈现近圆形形态，处于构造抬升速率极低状态。

2.2.5　标准化河流梯度指数平均值

标准化坡降指数*SL*(Hack, 1973)是反映河流坡度变化与地表侵蚀、沉降过程之间关系的指标，其计算公式如下：

$$SL=(\Delta H/\Delta L)L \tag{5}$$

式中，ΔH—河段的高差；ΔL—河段的长度；L—河段至河源的距离。河道长度会影响水流能量的积累与消耗，引入均衡值K_e对SL进行标准化处理，形成SLK指数准确比较河道活动性，其计算公式如下：

$$K_e=H_{total}/\ln(L_{total}) \tag{6}$$

$$SLK=SL/K_e \tag{7}$$

式中，H_{total}、L_{total}—河流源头与出口的高差和总长度。各河段的SLK的算术平均值SLK_{avg}计算公式如下：

$$SLK_{avg}=\sum_{i=1}^{k}SLK/k \tag{8}$$

式中，$\sum_{i=1}^{k}SLK$—各河段SLK之和；i—河段序号；k—河段数量。SLK值越大，指示区域构造活动越活跃或岩性抗河流侵蚀能力越强；SLK值越小，则意味着区域构造活动较弱或覆盖基岩质地较软、抗侵蚀能力弱。

2.2.6 相对构造活动强度

将多个地貌指数的活动性等级进行算术平均得到相对构造活动强度指数，全面综合评估流域盆地的构造活动性，计算公式为（El Hamdouni et al., 2008）

$$Iat=Sum/5 \tag{9}$$

式中，Sum—参与计算的地貌指数活动性等级之和，研究选取HI、BS、AF、Re及SLK_{avg}共5项地貌指数，故分母为5。

2.2.7 归一化河道陡峭指数

河流纵剖面的高程变化反映了基岩隆升速率与河流侵蚀速率的差值（Flint, 1974）：

$$\mathrm{d}z/\mathrm{d}t=U-KA^m(\mathrm{d}z/\mathrm{d}x)^n \tag{10}$$

式中，U—地壳抬升速率；K—侵蚀系数；A—上游汇水面积；z为河道高程；t—时间；x—河道溯源距离（从出水口到分水岭的方向）；$\mathrm{d}z/\mathrm{d}x$为河道坡度；m、n—汇水面积和坡度的指数。当河道处于稳态时，抬升作用与河流下切达到平衡，即剖面上每一点满足$\mathrm{d}z/\mathrm{d}t=0$，方程可整理为

$$\mathrm{d}z/\mathrm{d}x=(U/K)^{1/n}A^{-m/n} \tag{11}$$

进一步改写为

$$S=k_{sn}A^{-\theta} \tag{12}$$

$$k_{sn}=S/A^{-\theta} \tag{13}$$

式中，S—河道坡度；k_{sn}—归一化河道陡峭指数；θ—河道凹度指数，取值范围通常为0.3～0.8，常用参考值为0.45；其余变量符号含义同上。河道偏离稳态时，会出现裂点，裂点主要分为坡折型裂点与阶步型裂点，坡折型裂点表现为裂点两侧的河流陡峭指数整体差异显著，通常被视为构造活动的直接响应。阶步型裂点表现为裂点附近局部河流陡峭系数的急剧增加，上下游河流陡峭系数总体保持一致，与区域构造活动无直接成因联系（Kirby and Whipple, 2012）。

3 结果与分析

3.1 面积−高程积分

雅砻江上游98个子流域的HI值及其等级分布如图4所示，1级HI>0.5，2级0.4≤HI≤0.5，3级HI<0.4，HI值范围为0.09～0.63，平均值为0.38；高值区沿巴颜喀拉主峰、五道梁−长沙贡玛、哈秀−差西卡、甘孜−玉树断裂呈北西向展布。12号、55号、76号、81号、82号、83号、91号、93号子流域为1级，代表其处于地貌演化阶段的幼年期，构造活动程度强烈，13号、15号、18号等30个子流域为2级，处于壮年期，其余为3级。流域总面积为27224 km^2，1、2、3级占比分别为7.91%、32.25%、59.84%，表明该区域地貌发育阶段呈现显著的不均衡性。

3.2 流域形状指数

研究区内BS值及其等级分布如图5所示，值介于0.31～5.31，1、2、3级子流域的数量分别为19、25、54，多数子流域形状趋于圆形。1级狭长子流域主要分布在巴颜喀拉主峰断裂附近的6号、12号、28号子流域，五道梁−长沙贡玛断裂附近的23号、58号、63号、68号、72号、91号子流域以及哈秀−差西卡断裂附近的78号、97号子流域，甘孜−玉树断裂附近的86号、87号子流域。32号、33号、36号、37号、42号子流域所在的五道梁−长沙贡玛盆地BS值处于3级。

3.3 流域盆地不对称度

AF作为表征流域构造倾斜程度的重要指标，其值与50的偏离程度直接反映了构造活动、岩性差异及侵蚀过程的综合影响（Bhat et al., 2020; Solanki et al., 2021; 刘禄山等, 2024）。AF值及其等级分布如图6所示，最大值为89.2，最小值为15.7。以面积估

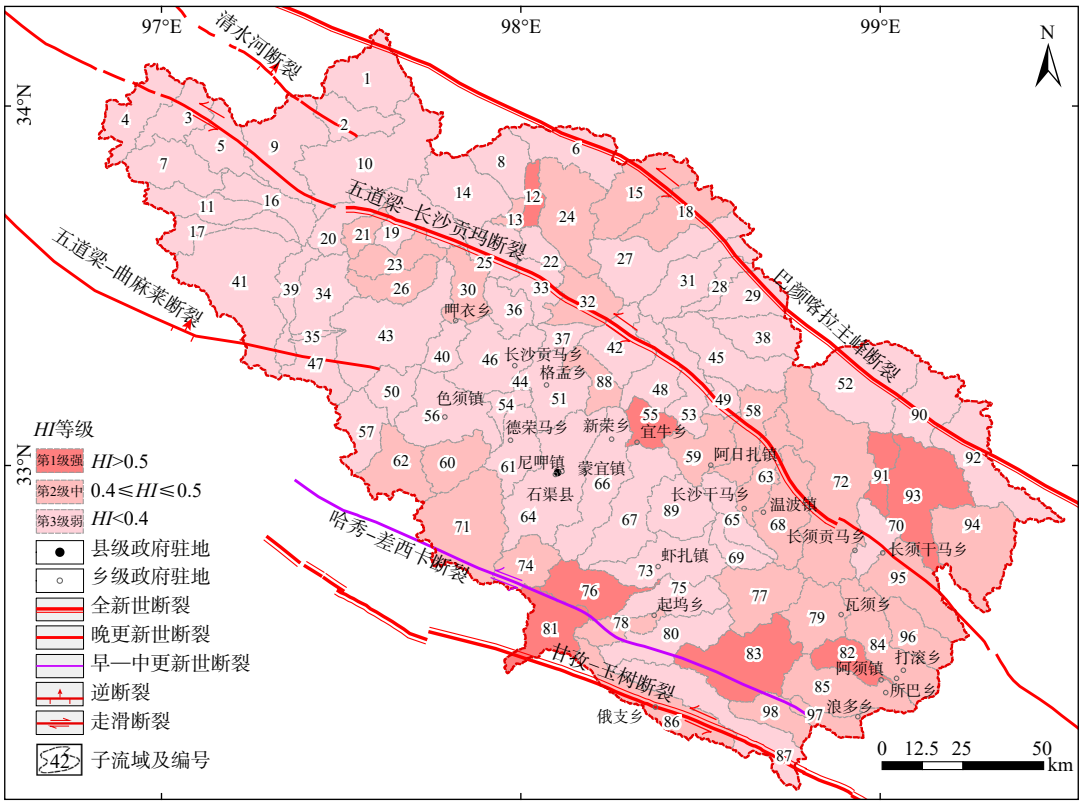


图 4　面积–高程积分（*HI*）分布图

Fig. 4　Distribution of the hypsometric integral (*HI*)

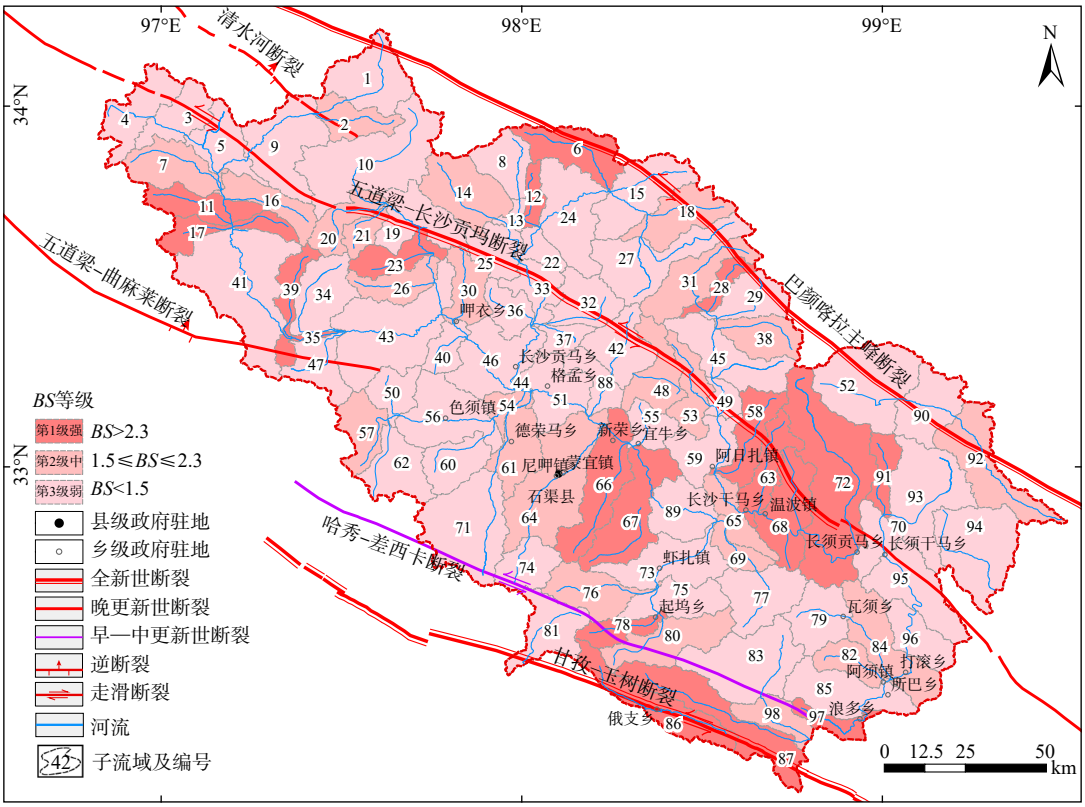


图 5　流域形状指数（*BS*）分布图

Fig. 5　Distribution of the drainage basin shape (*BS*)

算，约 50% 子流域严重不对称，剩余 50% 子流域中低等不对称。1 级子流域倾斜程度较大，但倾斜方向不集中，没有明显规律。断裂穿过的 3 号、5 号、7 号等多个子流域显著掀斜，30 号、33 号、37 号、53 号等子流域为中等不对称，1 号、2 号、4 号、6 号等子流域 *AF* 值接近 50，形态相对对称。

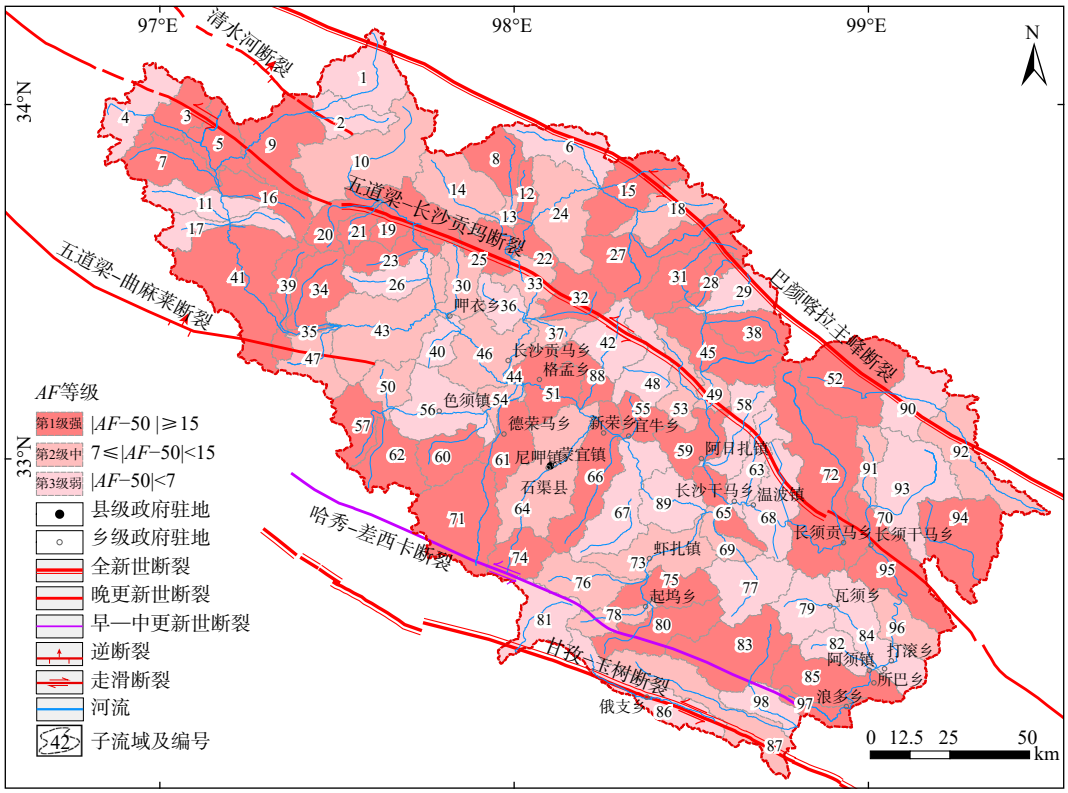


图 6 流域盆地不对称度（*AF*）分布图

Fig. 6 Distribution of the asymmetry factor (*AF*)

3.4 流域伸长比

Re 值及其等级分布如图 7 所示，区内各子流域伸长比表现出较小差异性。23 号、24 号、75 号、85 号等 65 个子流域 $Re \geq 0.75$，$Re < 0.5$ 只存在子流域 17 号、35 号，是尚未充分演化的流域。直接位于断裂带上的 20 号、21 号、53 号、58 号、63 号、72 号子流域及其邻近的 7 号、11 号、16 号子流域普遍表现为明显的拉长形态。石渠县城所在的 64 号、66 号、67 号子流域受翁曲河、翁琼河与虾曲河北东向切割，并垂直注入雅砻江干流，*Re* 值处于 2 级。

3.5 标准化河流梯度指数平均值

SLK 指数表征河流侵蚀与构造活动的动态平衡，常用于评估构造活动、气候及岩性对地形地貌的影响。雅砻江上游 SLK_{avg} 值及其等级分布如图 8 所示，1、2、3 等级面积占比分别为 29.13%、58.35%、12.52%，多数流域 SLK_{avg} 值中等偏高，河道活动性较高，纵向坡度变化较大，存在区域差异隆升。区域地势北、西、东三面偏高，整体向南倾斜，出水口海拔较高的子流域，河长坡降大，43 号、46 号、51 号等子流域位于雅砻江主干流经过的宽缓河谷地带，河床地势趋于平缓，河道坡降相应减小。

3.6 相对构造活动强度

综合分析多个地貌指数，可以参考判断流域的构造活动强度。*Iat* 值及其等级分布如图 9 所示。雅砻江上游相对构造活动强弱分布与 3 级以上地震震中分布显著一致。活动性强、较强的区域呈条带状、斑块状沿断裂离散分布，中等、弱的区域在主要断裂夹持区形成连片格局，整体呈强弱相间、弱域连通的态势。12 号、35 号、72 号及 91 号子流域为相对构造活动性最强的单元，流域形态狭长、高差显著、河流偏斜，*HI*、*BS*、*AF*、*Re* 及 SLK_{avg} 均达到 1、2 级。巴颜喀拉主峰断裂穿过的 6 号、31 号、28 号、38 号子流域，甘孜–玉树断裂穿过的 86、87 号子流域 *Iat* 值均为 2 级，指示构造活动性较强。五道梁–长沙贡玛断裂以 30 号、58 号子流域为界可划分为 3 段，北段 20 号、21 号、23 号、26 号、30 号子流域

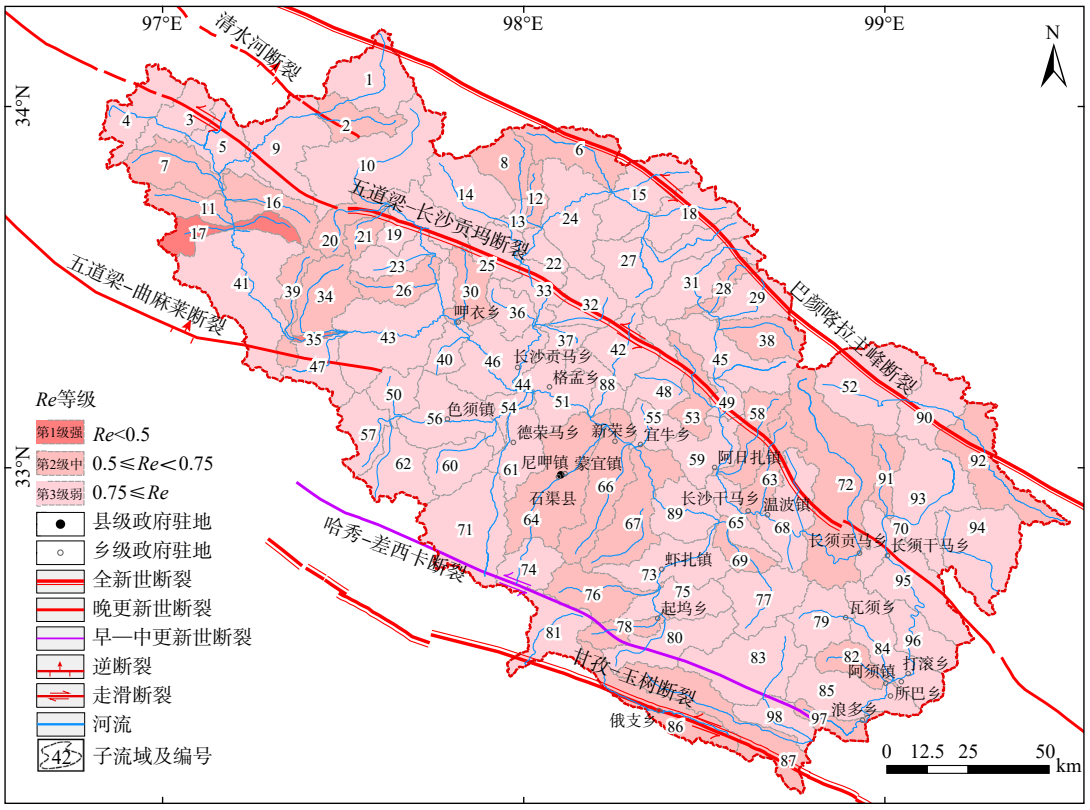


图 7　流域伸长比（*Re*）分布图

Fig. 7　Distribution of the elongation ratio (*Re*)

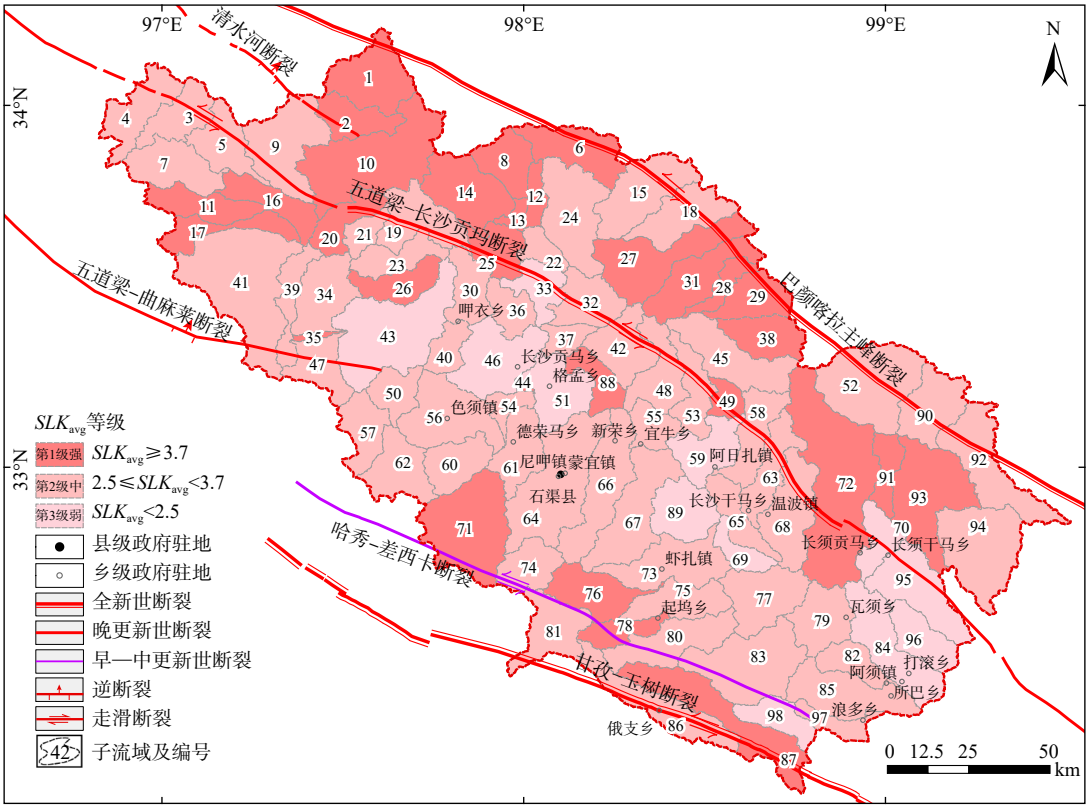


图 8　标准化河流梯度指数平均值（SLK_{avg}）分布图

Fig. 8　Distribution of the mean normalized stream length gradient (SLK_{avg})

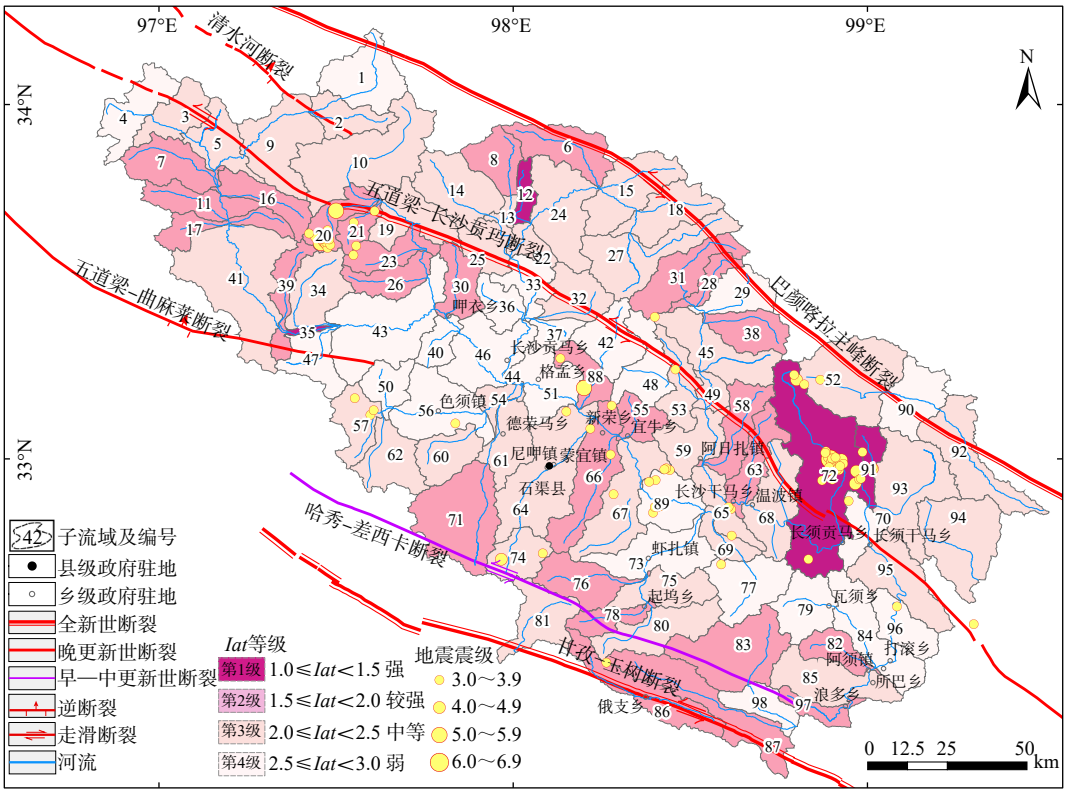


图 9 相对构造活动强度（*Iat*）分布图

Fig. 9 Distribution of relative tectonic activity classes (*Iat*)

Iat 值为 2 级；中段 32 号、33 号、42 号、48 号、53 号、59 号子流域 *Iat* 值为 3、4 级；南段 58 号、63 号、72 号子流域 *Iat* 值为 1、2 级，活动强度呈现明显分段差异。

3.7 归一化河道陡峭指数

k_{sn} 区间为 0.04～48.00，如图 10 所示。低值区主要分布在 1 号—10 号子流域和 35 号、43 号、44 号、51 号子流域，分别是五道梁−长沙贡玛断裂北西晚更新世活动段、雅砻江主干流经的宽缓河谷地区。61 号、64 号、66 号、70 号、72 号、91 号子流域高值集中，基岩隆升速率大于河流侵蚀速率。使用 Knickpointfinder 工具识别提取流域内裂点 151 个，综合岩性与 k_{sn} 值判断，其中阶步型裂点 33 个，坡折型裂点 118 个。阶步型裂点主要分布在岩性交界部分，受岩性影响较大（见图 11）。坡折型裂点主要沿断裂带及其所贯穿的流域分布。其中，巴颜喀拉主峰断裂沿线的 6 号、15 号、18 号子流域裂点分布较为稀疏，沿线裂点密度仅为 0.06 个/km；五道梁−长沙贡玛断裂沿线裂点密度为 0.14 个/km；而甘孜−玉树断裂沿线的 86 号子流域裂点发育密集，密度可达 0.89 个/km，对应区域 k_{sn} 值也呈现剧烈且频繁的波动变化。

4 讨论

地貌演化过程中，流域对构造活动、气候变化敏感，流域的平面形态与剖面结构的发育均受控于岩性特征、气候条件、构造运动等（孟宪萌等，2023；郭晓非等，2024）。结合地层岩性和地质构造背景，分析其对流域地貌特征的影响。

4.1 岩性对流域地貌的影响

雅砻江上游以浅变质的三叠系沉积岩为基底，少量花岗闪长岩、二长花岗岩等中酸性侵入岩局部发育，部分被新生代松散沉积物覆盖，变质砂岩、板岩等变质岩广泛分布，岩性相对一致。其中，全新统冲洪积、沼泽堆积，几乎无抗侵蚀能力；泥岩和粉砂岩强度极低，遇水易软化、泥化；花岗闪长岩、二长花岗岩、石英闪长岩等抗侵蚀能力强的岩体分布零散且面积极小，流域整体抗侵蚀能力较弱，流域形态易受影响改变。分析雅砻江上游岩性与 *HI*、*BS*、*AF*、*Re*、SLK_{avg}、*Iat*、k_{sn} 的空间分布特征发现：区内广泛分布第四系河流冲积、洪积物，以泥、砂、砾石为主，常夹泥炭层，抗侵蚀能力极弱，k_{sn} 值整体偏低，仅在岩性交界地带零星发育裂点，*HI*、*BS*、*AF*、

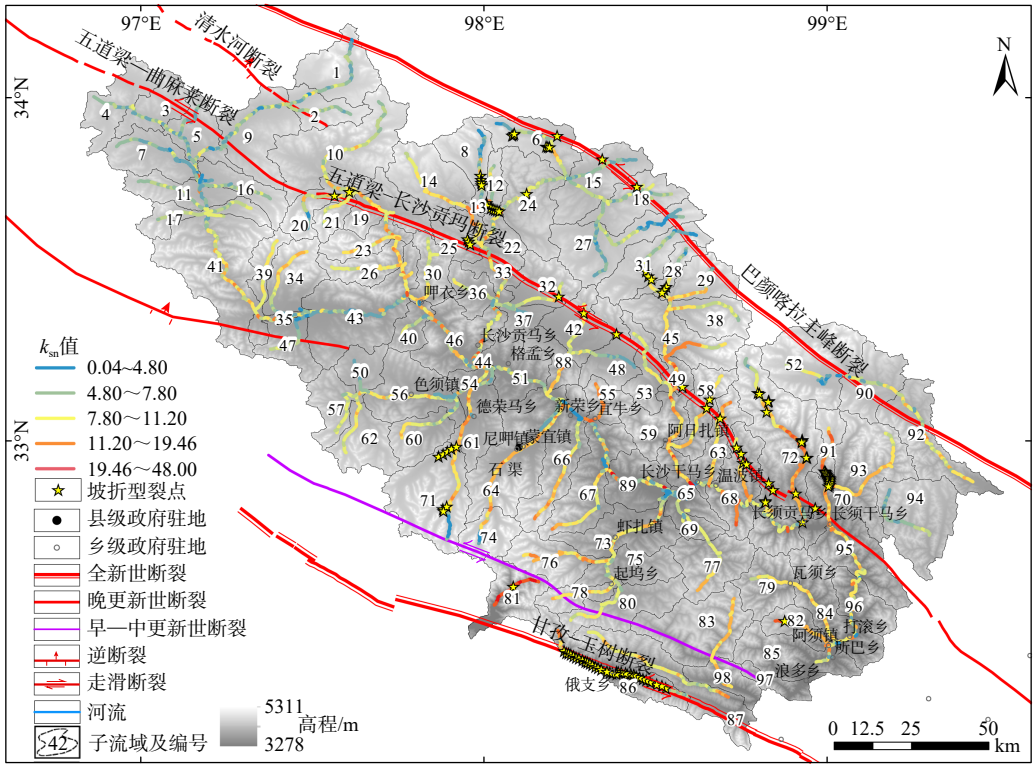


图 10　归一化河道陡峭指数（k_{sn}）分布图

Fig. 10　Distribution of the normalized channel steepness index(k_{sn})

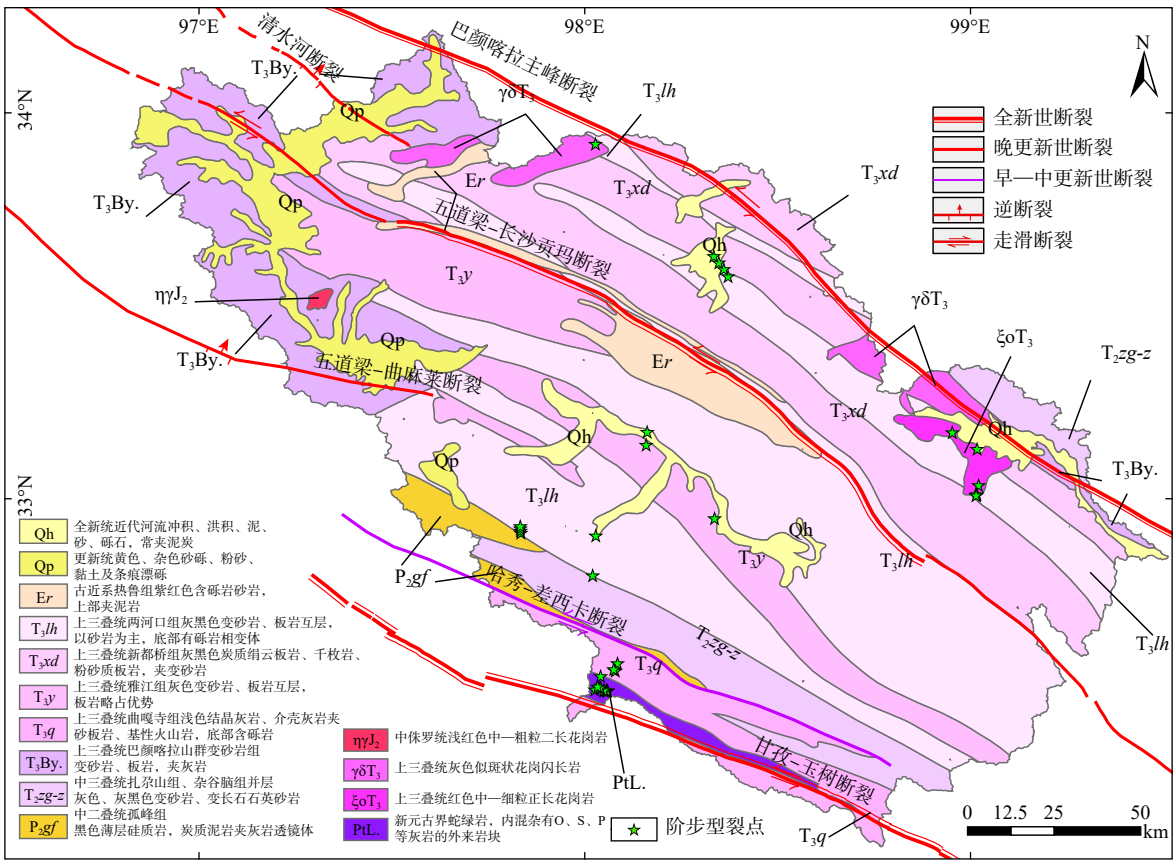


图 11　雅砻江上游岩层分布图

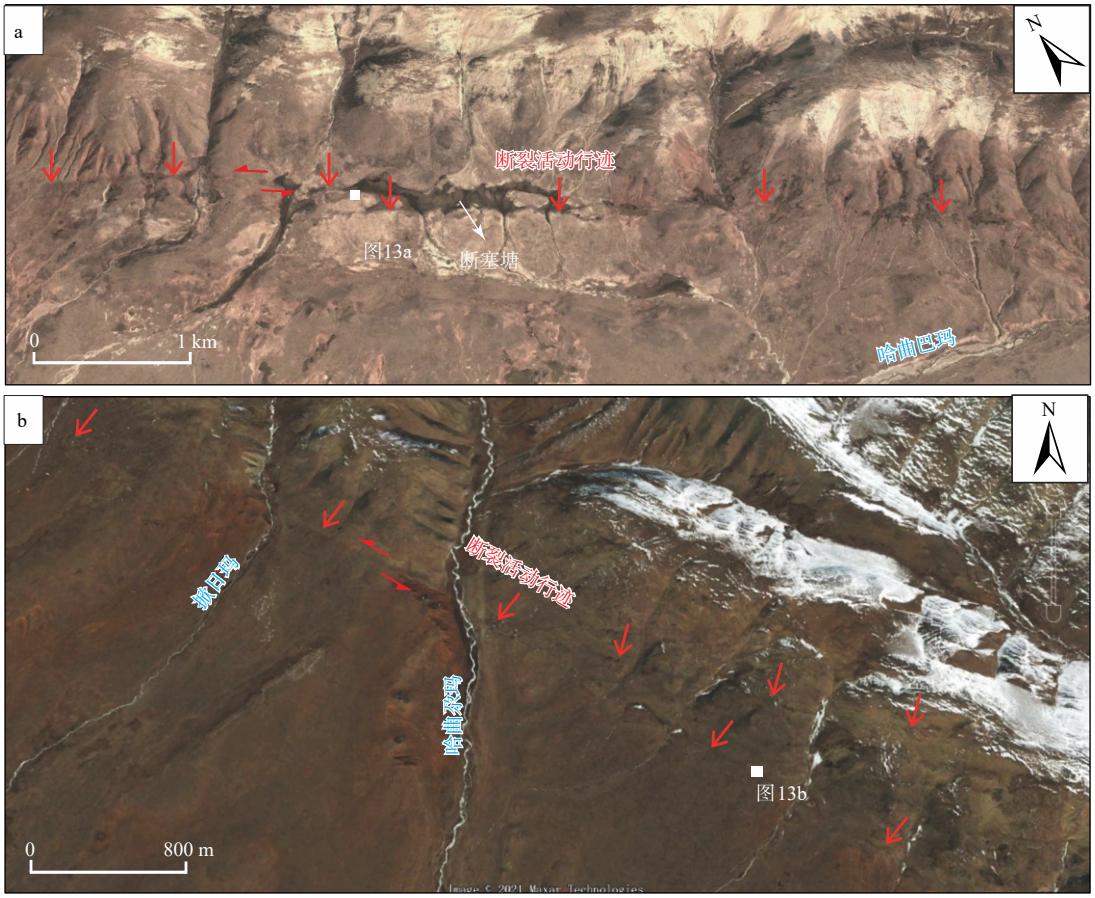
Fig. 11　Distribution of rock strata

Re、SLK_{avg}与岩性无显著相关性，表明岩性对雅砻江上游地貌指数的影响较为有限。

4.2 构造对流域地貌的影响

雅砻江上游位于巴颜喀拉块体内部，该块体是承接青藏高原东南缘“侧向挤出”与东北缘“挤压隆升”的关键构造枢纽带，其构造运动（区域性隆起、塌陷、局部断层活动、褶曲变形）直接影响流域地貌特征与构造活动强度（闻学泽等，2011；张培震等，2022）。其中，五道梁−长沙贡玛断裂切过山前洪积扇，断错一系列水系与冲洪积扇，形成线性断层陡坎、挤压脊、断塞塘、断层泉等微地貌，如图 12 所示。在 32 号子流域中哈曲巴玛沟口西山前洪积扇（图 13a）形成挤压脊地貌，向东则为连续性良好的断层反向陡坎，形成断塞塘地貌。42 号子流域中，哈曲尕玛沟口东山前洪积扇（图 13b）经五道梁−长沙贡玛断裂切过，发育良好的线性陡坎，坎下常见断层泉发育，断裂使冲洪积扇左旋错断约 29.1±2.4 m（图 13c），根据 TC1 探槽揭露的地层及^{14}C测年结果，该冲积扇的年龄为距今 15052～14782 a，由此估算该处的断裂水平滑动速率为 2.0 mm/a（梁明剑等，2022）。甘孜−玉树断裂 86 号子流域所在的洛须段平均滑动速率为 7.2±1.2 mm/a，处于高度的应变积累状态。在俄支乡，一系列南流的冲沟在山前形成洪积扇裙并被断裂左旋错断，俄支小学的洪积扇上发育有一系列断层陡坎，坡向南西的陡坎高 2.5～3.5 m，坡向北东陡坎高 0.5～2.3 m（周荣军等，1996）。巴颜喀拉主峰断裂，倾角较陡，具有左旋走滑的特征，使一系列地质体反扭错。上述研究成果在亚米级空间尺度上，可反映构造对地貌的控制。

研究基于 30 m 分辨率 DEM 提取地貌指数，以子流域为划分单位，从宏观整体视角分析构造运动如何塑造地貌格局。雅砻江上游西北部高原面经长期剥蚀作用趋于平缓，受近期活动构造影响较弱，HI 为 3 级；东南部地形高差与坡度较大，2 级

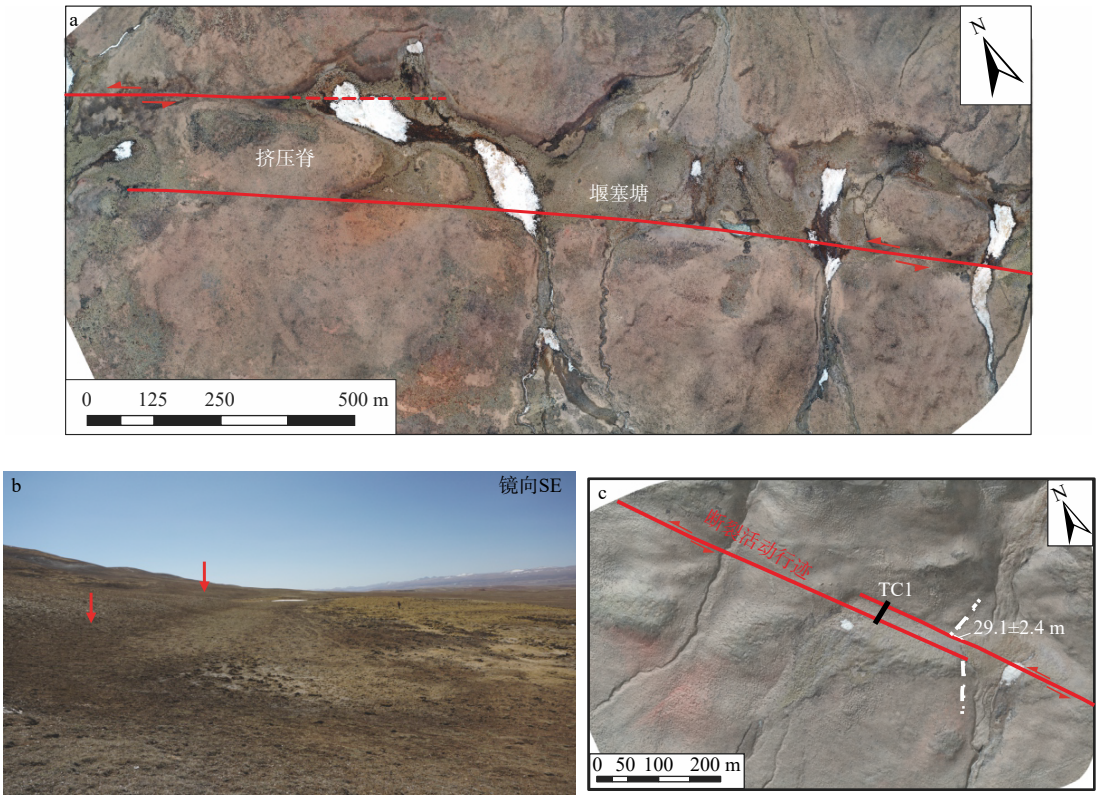


a—32 号子流域断裂构造地貌；b—42 号子流域断裂构造地貌

图 12 五道梁−长沙贡玛断裂活动行迹（据梁明剑等，2022 修改）

Fig. 12 Active traces of the Wudaoliang–Changshagongma fault (modified after Liang et al., 2022)

(a) Fault-controlled tectonic geomorphology of No. 32 sub-basin; (b) Fault-controlled tectonic geomorphology of No. 42 sub-basin



a—哈曲巴玛沟口西山前洪积扇的挤压脊与堰塞塘；b—哈曲尕玛沟口东山前洪积扇断层陡坎与槽谷；c—哈曲尕玛沟口东山前洪积扇左旋错断约 29.1±2.4 m

图 13　典型构造地貌特征（具体位置见图 12；据梁明剑等，2022 修改）

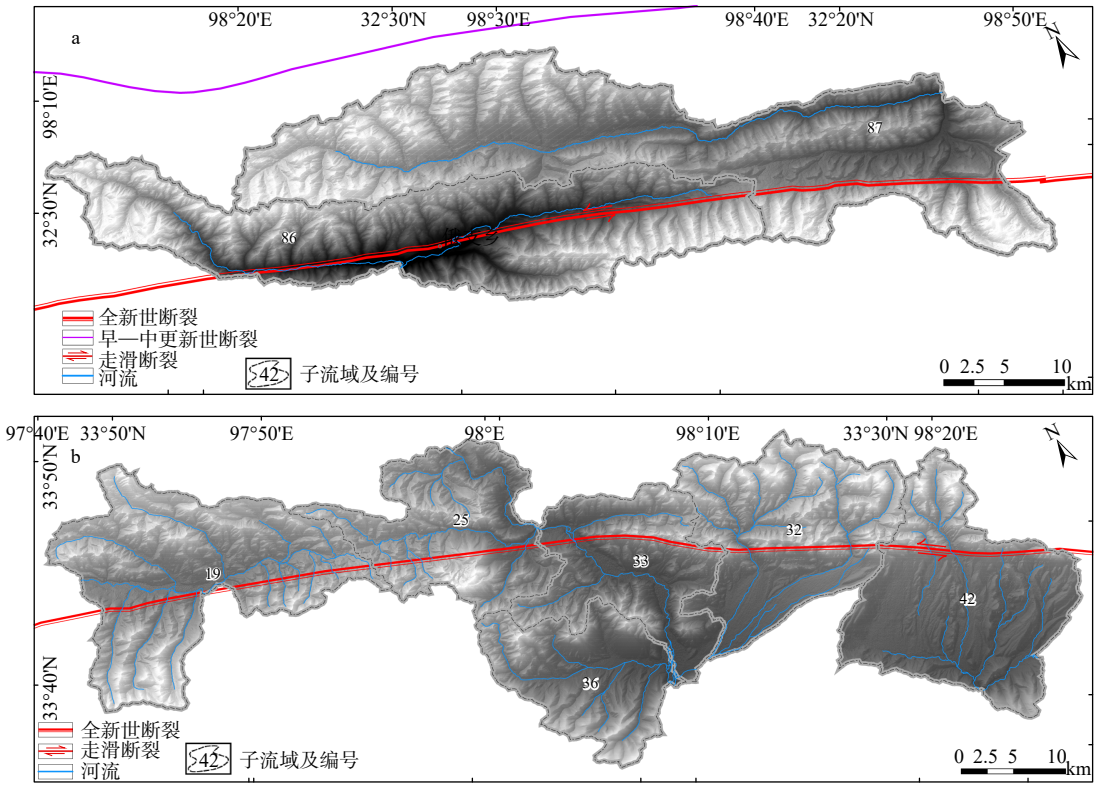
Fig. 13　Typical tectonic geomorphic features (see Fig. 12 for locations; modified after Liang et al., 2022)

(a) Compressional ridge and sag pond developed on the alluvial fan near the mouth of the Haqubama river; (b) Fault scarp and trough on the eastern piedmont alluvial fan at the mouth of the Haqugama gully; (c) The piedmont alluvial fan east of the mouth of the Haqugama river has been left-laterally offset by approximately 29.1±2.4 m

HI 值沿五道梁−长沙贡玛、甘孜−玉树断裂分布，对应高起伏地貌。*BS*、*Re* 可反映断裂性质对水系结构的直接影响，通过控制流域延伸长度、约束流域展布宽度，使水系整体呈线状或近线状发育，86 号、87 号子流域即为典型实例（图 14a）。在五道梁−长沙贡玛断裂中段流经的 25 号、36 号、33 号、32 号、42 号子流域 *BS* 值相对较低，这些流域形态趋近于“十”字形，其北东向主干河流与近垂直的支流组合，导致子流域长度与最大宽度的比值偏小，形成流域形状趋于圆形的表观特征，推测断裂水平剪切运动引导河流沿断层带发育，相关子流域呈现沿北西走向延伸突出的趋势（图 14b）。*AF* 值整体偏高，严重不对称的子流域沿断裂带集中分布，揭示区域可能存在掀斜断块活动与褶皱运动。SLK_{avg} 值 1、2 级广泛分布，表明在区域岩性抗侵蚀能力普遍较弱的背景下，河流下切尚不足以均衡强烈的构造抬升。

Iat 的空间分布受区域主干断裂的显著控制，1、2 级沿巴颜喀拉山主峰断裂、五道梁−长沙贡玛断裂、哈秀−差西卡断裂及甘孜−玉树断裂两侧呈条带状展布，反映了构造活动的优先响应带。五道梁−长沙贡玛断裂为晚更新世—全新世活动断裂，其分段活动性差异显著——断裂南北两段为全新世与晚更新世活动段的交汇部位，推测构造应力易于集中，应变易发生积累，*Iat* 等级整体偏高，同时也是地震活动的高发区。北段 20 号子流域记录了 15 次 3 级以上地震，其中 2 次震级超过 5 级；南段 72 号子流域记录了 12 次 3 级以上地震，包括 2020 年 4 月 1 日四川石渠 5.6 级地震，相邻 91 号子流域也有 4 次地震记录。地震活动与 *Iat* 等级 1、2 级分布高度耦合，表明构造活动强区也是应力释放的主要场所。相比之下，断裂中段长沙贡玛盆地受地貌改造较弱，构造活动的地貌响应不显著，*Iat* 等级整体偏低，与南北两段形成对比。

部分远离主干断裂的子流域，如 55 号、66 号、



a—甘孜–玉树断裂影响水系结构; b—五道梁–长沙贡玛断裂影响水系结构

图 14 断裂性质影响水系结构

Fig. 14 Influence of fault properties on drainage structure

(a) Drainage structure controlled by the Ganzi–Yushu fault; (b) Drainage structure controlled by the Wudaoliang–Changshagongma fault

88 号, *Iat* 处于 2 级临界状态, 但 k_{sn} 整体偏高, 流域形态呈现严重不对称性, 主干流左右岸面积失衡, 且区域内偶发中强地震, 如 88 号子流域 1992 年 11 月 30 日发生的 5.1 级地震。此外, 河流裂点数量与 *Iat* 等级呈显著正相关, 71 号、86 号、72 号、91 号等构造活动性强、较强的子流域, 分别发育 34、16、16、12 个裂点(图 9, 图 10), 进一步佐证了 *Iat* 等级越高, 构造活动性越强。

为探讨 *HI*、*BS*、*AF*、*Re*、SLK_{avg} 对 *Iat* 的影响, 采用普通最小二乘(OLS)回归模型, 分析不同地貌指数对构造活动的响应敏感性, 结果显示, 模型决定系数 R^2=0.8976, 调整后决定系数 R_A^2=0.8920, 表明模型可解释因变量 *Iat* 约 89% 的变异, 拟合效果优良, 模型整体检验 P<0.001, 回归方程高度显著, 各地貌指数作为自变量整体对 *Iat* 具有显著影响。回归方程如下:

$$Iat = -2.02132 + 0.43791 \times HI + 0.35010 \times BS + 0.41957 \times AF + 0.55500 \times Re + 0.41026 \times SLK_{avg} \quad (14)$$

Re 系数相关性最强。对比图 7 与图 9 可见, *Re* 与 *Iat* 的强弱空间分布呈现高度一致。*Re* 可直接表征流域受抬升、挤压等构造运动控制的拉伸变形程度, 构造活动越强烈, 流域与水系形态越易被拉伸改造, 响应区内各断裂走滑性质。*HI* 的响应敏感性次之, 在 21 号、23 号、26 号、55 号、76 号、83 号等子流域内, *HI* 与 *Iat* 等级整体偏高, 反映该区域构造抬升速率显著大于地表剥蚀速率。*AF* 敏感性第三, 26 号、33 号、36 号、40 号、42 号、43 号等构造不对称程度中等偏弱的子流域, 对应区域构造活动性最弱。SLK_{avg} 用于反映河流纵剖面阶梯状发育特征, 敏感程度中等。*BS* 的响应敏感性相对最弱, 但相关性仍显著, 推测是因为 *Re* 与 *BS* 的 3 级分区范围基本重合, 仅在少数子流域的 1、2 级等级划分上存在细微差异, 2 项指标存在一定共线性。

5 结论

(1)雅砻江上游流域地貌格局特征清晰。*HI* 值北低南高, 局部流域处于发育幼年期, *BS*、*Re* 高值流域明显受断裂控制, 呈狭长线状形态, 存在断裂

沿线子流域的水系、冲沟与冲洪积扇发生左旋位错现象，*AF* 表明流域整体严重不对称，SLK_{avg}、k_{sn} 揭示部分子流域构造抬升明显，河道纵向坡度变化大。

（2）构造活动性空间分异显著。*Iat* 高等级区沿主干断裂呈条带状、斑块状展布，低等级区在断裂夹持带中连片分布。五道梁−长沙贡玛断裂，南北两段为晚更新世—全新世活动断裂交汇带，推测应力集中，应变累积，*Iat* 以强、较强等级为主，地震活动频发，中段地貌演化成熟，构造活动性偏弱，*Iat* 处于中、弱等级。

（3）采用 OLS 回归分析 *HI*、*BS*、*AF*、*Re*、SLK_{avg} 对 *Iat* 的影响，影响强度表现为 $Re>HI>AF>SLK_{avg}>BS$。其中，*Re* 对构造活动响应最直接明显，*HI* 能有效反映区域抬升与剥蚀差异，*AF* 指示流域构造不对称特征，SLK_{avg} 体现河流阶梯发育程度，*BS* 敏感性相对较弱，可能与 *Re* 存在共线性有关。

（4）构造−地貌−地震活动具有良好一致性，构造活动性高的流域与 3 级以上地震、坡折型裂点分布吻合，表明区域地貌特征与地震活动受断裂的空间展布、活动性质、滑动速率、分段性差异控制，是新构造运动在青藏高原东北缘地壳变形枢纽带的直接体现。

（5）研究实践综合定量评价方法，弥补单一指数评价的局限性与定性描述的不足，通过将多个独立的地貌指数系统性地整合为一个综合指数，构建了适用于巴颜喀拉块体东南缘的流域相对构造活动强度分级方案，揭示了五道梁−长沙贡玛断裂分段性构造活动的地貌响应特征，为深入探究构造运动对流域地貌的塑造机制提供了有效途径，为青藏高原内部地貌指数分析与构造变形研究积累成果。

作者贡献声明： 谭凌、梁明剑负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；张威、董芸希、刘韶参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；李福鹏、谭鑫、龙建宇、李圣参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: TAN Ling and LIANG Mingjian conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; ZHANG Wei, DONG Yunxi and LIU Shao participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; LI Fupeng, TAN Xin, LONG Jianyu and LI Sheng were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明： 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

BHAT M A, DAR T, BALI B S, 2020. Morphotectonic analysis of Aripal Basin in the north-western Himalayas (India): an evaluation of tectonics derived from geomorphic indices[J]. Quaternary International, 568: 103-115.

CAO P J, CHENG S Y, LIN H X, et al., 2021. DEM in quantitative analysis of structural geomorphology: application and prospect[J]. Journal of Geomechanics, 27(6): 949-962. (in Chinese with English abstract)

DAI Z L, SHEN Y G, LI A B, 2024. Automatic extraction of the geomorphic indices[DB/OL]. Zenodo [2026-09-16]

DEHBOZORGI M, POURKERMANI M, ARIAN M, et al., 2010. Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran[J]. Geomorphology, 121(3-4): 329-341.

EL HAMDOUNI R, IRIGARAY C, FERNÁNDEZ T, et al., 2008. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain)[J]. Geomorphology, 96(1-2): 150-173.

FIGUEROA A M, KNOTT J R, 2010. Tectonic geomorphology of the southern Sierra Nevada Mountains (California): evidence for uplift and basin formation[J]. Geomorphology, 123(1-2): 34-45.

FLINT J J, 1974. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge[J]. Water Resources Research, 10(5): 969-973.

GUAN X, PANG L C, JIANG Y T, et al., 2021. Spatial characteristics of quantitative geomorphic indices in the Taihang Mountains, North China: implications for tectonic geomorphology[J]. Journal of Geomechanics, 27(2): 280-293. (in Chinese with English abstract)

GUO X F, LI J H, 2024. Fluvial geomorphic characteristics of Taiwan Island, China and its tectonic implications[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 60(3): 464-474. (in Chinese with English abstract)

HACK J T, 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index[J]. Journal of Research of the U. S. Geological Survey, 1(4): 421-429.

HU J H, ZHAO X Y, LONG R X, et al., 2025. Geomorphic features of the upper Nujiang River basin and their tectonic significance in the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geology, 60(5): 1281-1297. (in Chinese with English abstract)

JIANG S F, 2021. Geomorphic response of dam events in the Yalong River[D]. Xining: Qinghai Normal University. (in Chinese with English abstract)

KIRBY E, WHIPPLE K X, 2012. Expression of active tectonics in erosional landscapes[J]. Journal of Structural Geology, 44: 54-75.

LI H Q, YUAN D Y, SU Q, et al., 2023. Geomorphic features of the Menyuan basin in the Qilian Mountains and its tectonic significance[J]. Journal of Geomechanics, 29(6): 824-841. (in Chinese with English abstract)

LI N, JI L Y, JIANG F Y, et al., 2024. Analysis of future strong earthquake activity at the boundary faults of the Bayan Har block based on GPS data[J]. Journal of Seismological Research, 47(3): 405-418. (in Chinese with English abstract)

LI S, CHANG Y Q, QING Y H, et al., 2025. Geomorphologic features of the Longchuan River Basin in central Yunnan and their indication of tectonic activity[J]. Journal of Seismological Research, 48(3): 391-400. (in Chinese with English abstract)

LI Y J, ZHOU X H, YOU J Y, et al., 2024. Geomorphic feature and tectonic implications of the Hanjiang River basin in the northern Dabashan[J]. Chinese Journal of Geology, 59(4): 1132-1150. (in Chinese with English abstract)

LI Y Y, YANG R, XU C C, 2025. Analysis of morphological variability on the southeastern Tibetan Plateau and its causes: a case study of the Yajiang area[J]. Quaternary Sciences, 45(1): 117-131. (in Chinese with English abstract)

LIANG M J, HUANG F P, SUN K, et al., 2022. The Holocene activity and its evidence from paleoearthquake of the middle segment of Wudaoliang-Changshagongma Fault inside the Bayan Har Block[J]. Earth Science, 47(3): 766-778. (in Chinese with English abstract)

LIANG M J, ZHOU W Y, DONG Y, et al. , 2023. New progress of research on NW-trending active faults within the Bayan Har Block[J]. Earthquake Research in Sichuan(1): 12-17. (in Chinese with English abstract)

LIU L S, ZHOU X H, WANG Y, et al., 2024. The activity analysis of the middle segment of the Haiyuan fault zone based on DEM terrain feature factor[J]. Scientia Geologica Sinica, 59(4): 1111-1131. (in Chinese with English abstract)

LIU Q Y, CHENG W M, GUO L, et al., 2017. Geomorphology of Northern Tianshan and Its Structural Analysis[J]. Geography and Geo-Information Science, 33(4): 79-85. (in Chinese with English abstract)

LIU W M, ZHOU L Q, CHEN X Q, et al., 2021. Influence of natural dams on the river profile of the Yalong River Basin[J]. Earth Science Frontiers, 28(2): 58-70. (in Chinese with English abstract)

LU F, GAO M X, ZHOU S X, et al, 2023. Fluvial geomorphology of the eastern Altyn Tagh and its tectonic activity implications[J]. Geoscience, 37(5): 1100-1109.

MENG X M, HUANG M, HUANG J, et al., 2023. Recent advances in influencing mechanisms and evolution models of watershed geomorphology and river network structure[J]. Advances in Earth Science, 38(8): 780-789. (in Chinese with English abstract)

MU R Y, 2022. A comparative study on the characteristics of seismic faults in the interior and boundary of Bayanhar block: take the 2021 M_S7.4 Madoi earthquake and the Zoige Paleoearthquake as examples[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

PIKE R J, WILSON S E, 1971. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis[J]. GSA Bulletin, 82(4): 1079-1083.

QUEIROZ G L, SALAMUNI E, NASCIMENTO E R, 2015. Knickpoint finder: a software tool that improves neotectonic analysis[J]. Computers & Geosciences, 76: 80-87.

RAMÍREZ-HERRERA M T, 1998. Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 23(4): 317-332.

SCHWANGHART W, KUHN N J, 2010. TopoToolbox: a set of Matlab functions for topographic analysis[J]. Environmental Modelling & Software, 25(6): 770-781.

SCHWANGHART W, SCHERLER D, 2014. TopoToolbox 2-MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences[J]. Earth Surface Dynamics, 2(1): 1-7.

SCOTTI V N, MOLIN P, FACCENNA C, et al., 2014. The influence of surface and tectonic processes on landscape evolution of the Iberian Chain (Spain): quantitative geomorphological analysis and geochronology[J]. Geomorphology, 206: 37-57.

SHARMA G, CHAMPATI RAY P K, MOHANTY S, 2018. Morphotectonic analysis and GNSS observations for assessment of relative tectonic activity in Alaknanda basin of Garhwal Himalaya, India[J]. Geomorphology, 301: 108-120.

SHEN K N, DONG S P, 2023. Spatial Characters of Geomorphic Indices in the Eastern Piedmont of the Helan Shan and Its Neotectonic Implications[J]. Quaternary Sciences, 43(5): 1282-1297.

SOLANKI T, SOLANKI P M, MAKWANA N, et al. , 2021. Geomorphic response to neotectonic instability in the Deccan volcanic province, Shetrunji River, western India: insights from quantitative geomorphology[J]. Quaternary International, 575-576: 96-110.

STRAHLER A N, 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. GSA Bulletin, 63(11): 1117-1142.

SUN L L, DONG Y P, WU Z H, et al., 2024. Study on tectonic activity of the southern Lancang River fault based on the stream geomorphic index[J]. Chinese Journal of Geology, 59(6): 1543-1561. (in Chinese with English abstract)

TAN X, LIANG K, MA B Q, 2025. Response of the stream geomorphic index to fault activity in the Qujiang fault on the southeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Progress in Earthquake Sciences, 55(10): 571-586. (in Chinese with English abstract)

WANG Y, ZHOU X H, SHI X H, et al., 2024. Geomorphic features of the Qingshui River Basin and their significance for the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 579-595. (in Chinese with English abstract)

WEN X Z, DU F, ZHANG P Z, et al., 2011. Correlation of major earthquake sequences on the northern and eastern boundaries of the Bayan Har block, and its relation to the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(3): 706-716. (in Chinese with English abstract)

YANG W, 2022. Velocity structure and seismic hazard in the northeastern margin of Bayan Har block[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

YAO K, ZHANG C J, HE L, et al., 2020. Dynamic evaluation and prediction of ecological environment vulnerability in the middle-upper reaches of the Yalong River[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 32(4): 199-208. (in Chinese with English abstract)

ZHANG M M, ZHOU X S, LI X H, et al., 2026. Present-Day Tectonic Stress Field Inversion of the Qinghai-Xizang Plateau Based on Seismic Focal Mechanisms[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 46(5): 522-529.(in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, WANG W T, GAN W J, et al., 2022. Present-day deformation and geodynamic processes of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 96(10): 3297-3313. (in Chinese with English abstract)

ZHANG W, TANG Q Y, LIU L, et al., 2020. Geomorphologic analysis of the Yuqu River drainage basin in Tenasserim Chain based on hypsometric integral value[J]. Scientia Geographica Sinica, 40(8): 1394-1402. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, SUN X, YUAN D Y, et al., 2025. Active faults, seismic activity, and seismotectonic environments in the Tibetan Plateau and its adjacent regions[J]. Journal of Geomechanics, 31(5): 1006-1029. (in Chinese with English abstract)

ZHOU R J, MA S H, CAI C X, 1996. Late quaternary active features of the Ganzi-Yushu fault zone[J]. Earthquake Research in China, 12(3): 250-260. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹鹏举，程三友，林海星，等，2021. DEM 在构造地貌定量分析中的应用与展望[J]. 地质力学学报，27(6)：949-962.

关雪，逄立臣，姜雨彤，等，2021. 太行山地貌计量指标空间特征及其构造地貌意义[J]. 地质力学学报，27(2)：280-293.

郭晓非，李江海，2024. 中国台湾岛流域地貌对构造活动的响应[J]. 北京大学学报(自然科学版)，60(3)：464-474.

胡俊宏，赵晓彦，龙睿馨，等，2025. 青藏高原东南缘怒江上游流域地貌特征及其构造意义[J]. 地质科学，60(5)：1281-1297.

姜胜凡，2021. 雅砻江堰塞事件的地貌响应[D]. 西宁：青海师范大学.

李红强，袁道阳，苏琦，等，2023. 祁连山内部门源盆地地貌特征及构造意义[J]. 地质力学学报，29(6)：824-841.

李宁，季灵运，蒋锋云，等，2024. 基于 GPS 数据分析巴颜喀拉块体边界强震活动特征[J]. 地震研究，47(3)：405-418.

李圣，常玉巧，卿元华，等，2025. 滇中龙川江流域地貌特征及其对构造活动的指示[J]. 地震研究，48(3)：391-400.

李阳阳，杨蓉，徐陈超，2025. 青藏高原东南缘地貌差异性成因分析：以雅江地区为例[J]. 第四纪研究，45(1)：117-131.

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

梁明剑，黄飞鹏，孙凯，等，2022. 巴颜喀拉块体内部五道梁-长沙贡玛断裂中段全新世活动及最新古地震证据[J]. 地球科学，47(3)：766-778.

梁明剑，周文英，董云，等，2023. 巴颜喀拉块体内部 NW 向主要断裂研究新进展[J]. 四川地震(1)：12-17.

刘禄山，周小虎，王阳，等，2024. 基于 DEM 地形特征因子的海原断裂带中东段构造活动性分析[J]. 中国地质，59(4)：1111-1131.

刘樯漪，程维明，郭良，等，2017. 北天山流域地貌特征及其构造活动分析[J]. 地理与地理信息科学，33(4)：79-85.

刘维明，周丽琴，陈晓清，等，2021. 雅砻江流域河道高程剖面上的堰塞坝印记[J]. 地学前缘，28(2)：58-70.

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

孟宪萌，黄檬，黄杰，等，2023. 流域地貌与河网结构影响机制及其演化模型的研究进展[J]. 地球科学进展，38(8)：780-789.

母若愚，2022. 巴颜喀拉地块内部与边界地震断裂特征对比研究：以 2021 年 M_S7.4 玛多地震和若尔盖古地震为例[D]. 北京：中国地震局地震预测研究所.

申凯楠，董绍鹏，2023. 贺兰山东麓地貌形态指数的空间特征及其新构造意义[J]. 第四纪研究，43(5)：1282-1297.

孙林龙，董有浦，吴中海，等，2024. 基于河流地貌指数的澜沧江断裂南段构造活动性研究[J]. 地质科学，59(6)：1543-1561.

谭鑫，梁宽，马保起，2025. 青藏高原东南缘曲江断裂河流地貌指数对断裂活动的响应[J]. 地震科学进展，55(10)：571-586.

王阳，周小虎，史小辉，等，2024. 青藏高原东北缘清水河流域地貌特征及其构造意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，51(4)：579-595.

闻学泽，杜方，张培震，等，2011. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与 2008 年汶川地震[J]. 地球物理学报，54(3)：706-716.

杨文，2022. 巴颜喀拉块体东北缘速度结构及地震危险性[D]. 北京：中国地震局地球物理研究所.

姚昆，张存杰，何磊，等，2020. 雅砻江中上游流域生态环境脆弱性动态评价及预测[J]. 国土资源遥感，32(4)：199-208.

张明明，周新锁，李晓晖，等，2026. 基于地震震源机制的青藏高原现今构造应力场反演[J]. 大地测量与地球动力学，46(5)：522-529.

张培震，王伟涛，甘卫军，等，2022. 青藏高原的现今构造变形与地球动力过程[J]. 地质学报，96(10)：3297-3313.

张威，唐倩玉，刘亮，等，2020. 基于面积—高程积分的他念他翁山玉曲流域地貌学分析[J]. 地理科学，40(8)：1394-1402.

郑文俊，孙鑫，袁道阳，等，2025. 青藏高原及邻区活动断裂、地震活动及地震构造环境[J]. 地质力学学报，31(5)：1006-1029.

周荣军，马声浩，蔡长星，1996. 甘孜-玉树断裂带的晚第四纪活动特征[J]. 中国地震，12(3)：250-260.