https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.146



# 滇中地块新生代晚期的变形机制:基于构造地貌学分析

王 丹1,董有浦1\*, 焦骞骞1, 张东越1, 段佳鑫2, 余华玉1

1. 昆明理工大学国土资源学院,云南昆明 650093

2. 中国建筑西南勘查设计研究院有限公司,四川成都 610052

摘 要: 滇中地块位于青藏高原东南缘,是研究青藏高原东南缘新生代晚期构造变形机制的理想场所. 滇中地块新生代晚期的变形机制主要有"下地壳流"和"刚性块体挤出"两种模式,前者认为地块构造活动分布较为均匀,后者认为构造活动沿断裂带更为强烈.由于地貌指数对构造活动非常敏感,为厘定研究区新生代晚期的变形机制,基于 30 m 分辨率的 SRTM-3数字高程模型(DEM)提取了滇中地区 319 个(亚)流域盆地,通过分析获得了面积高程积分曲线及面积高程积分(HI)、流域形状指数(BS)、流域盆地不对称度(AF)、标准化河流阶梯指数(SLK)、谷底宽度与谷间高度比(VF)这5种地貌指数,综合这五种指数得出相对活动构造指数(I<sub>a</sub>)并利用构造地貌指数(I<sub>a</sub>)揭示了研究区的相对构造活动分布特征.研究表明丽江一小金河断裂带、则木河一小江断裂带、红河断裂带及金沙江两侧的I<sub>a</sub>值相对较小,其他部位相对较高,这表明滇中地区的构造活动性强的区域主要集中发育在断裂带附近,与"刚性块体挤出"模式相一致.滇中地块中部的金沙江两侧I<sub>a</sub>值相对较低,表明其地貌活动性较强.这是由于新生代晚期青藏高原东南缘的隆升及河流重组,导致的金沙江及其支流切割力增强,从而造成金沙江两侧HI值、BS值、SLK值增高和VF值降低,使得金沙江两侧I<sub>a</sub>值相对较低. **关键词:** 滇中;新生代;构造变形机制;河流地貌;相对构造活动性;构造地质.

**中图分类号:** P546 **文章编号:** 1000-2383(2022)08-3016-13

#### **收稿日期:**2021-06-15

# The Mechanism of Tectonic Deformation of the Central Yunnan Terrane in the Late Cenozoic Based on Tectonic Geomorphology

Wang Dan<sup>1</sup>, Dong Youpu<sup>1\*</sup>, Jiao Qianqian<sup>1</sup>, Zhang Dongyue<sup>1</sup>, Duan Jiaxin<sup>2</sup>, Yu Huayu<sup>1</sup>

Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China
 China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610052, China

**Abstract:** The Central Yunnan Terrane, with internal faults developed, is located in the Southeast of the Tibetan Plateau, which is an ideal place to study the Cenozoic tectonic deformation mechanism of this area. The Cenozoic deformation mechanism of the Central Yunnan Terrane is controversial, and there are two main types of deformation mechanism: "lower crustal flow" and the "rigid block extrusion". The former proposed that the tectonic activity of the block is more uniform, and the latter proposed that the tectonic activity is more intense along the fault. The tectonic activity of different mechanisms has different responses on the surface, and the geomorphic index is extremely sensitive to the tectonic activity response. To determine the tectonic deformation mechanism of the Cenozoic in this study area, 319 basins (sub-basins) were extracted based on the SRTM-3 Digital Elevation

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos. 41802215, 41762017, 41672206).

作者简介:王丹(1993一),女,硕士研究生,从事构造地质学等相关领域的研究.ORICD:0000-0001-6587-847X.E-mail:1239029173@qq.com \* 通讯作者:董有浦,ORICD:0000-0002-2829-7585.E-mail:dongypsd@126.com

**引用格式:**王丹,董有浦,焦骞骞,张东越,段佳鑫,余华玉,2022.滇中地块新生代晚期的变形机制:基于构造地貌学分析.地球科学,47(8): 3016-3028.

**Citation**: Wang Dan, Dong Youpu, Jiao Qianqian, Zhang Dongyue, Duan Jiaxin, Yu Huayu, 2022. The Mechanism of Tectonic Deformation of the Central Yunnan Terrane in the Late Cenozoic Based on Tectonic Geomorphology. *Earth Science*, 47(8): 3016-3028.

Model (DEM) with a resolution of 30 m. Indices used include hypsometric curve and hypsometric integral (HI), drainage basin shape (BS), asymmetric factor (AF), normalized stream-length gradient (SLK), and the ratio of valley floor width to valley height (VF). Results from the analysis are accumulated and expressed as an index of relative active tectonics ( $I_{at}$ ), which we divide into four classes from relatively low to highest tectonic activity. The results are: The Iat values of the Lijiang-Xiaojinhe fault zone, Zemuhe-Xiaojiang fault zone, and Red River fault zone in the Central Yunnan are relatively small, and they gradually increase from north to south, which is consistent with the "rigid block extrusion" mode. At the same time, the Iat value on both sides of the Jinsha River is relatively low it shows that the geomorphic activity is strong, which may be due to the uplift of the Central Yunnan block and river system reconstitution, and the resulting knick points are transmitted upstream. During the migration of the cracks, they are transmitted from the main river channel to the secondary river channel, which affects the increase of the *HI*, *BS* and *SLK* value and the decrease of the *VF* value, making the relative tectonic activity stronger.

**Key words:** Central Yunnan Terrane; the Cenozoic; tectonic deformation mechanism; fluvial geomorphology; relative tectonic activity; tectonics.

# 0 引言

目前,关于滇中地块新生代晚期的构造变形机 制主要有两种动力学端元模型,一是"下地壳流"模型(Royden et al., 1997; Royden et al., 2008),另一 种是"刚性块体挤出"模式(Molnar et al., 1975; Tapponnier et al., 1982; Tapponnier, 2001).前者 强调隆升和变形主要由中下地壳粘塑性物质的均 匀增厚和流变所致,否认断裂活动对构造变形和缩 短的主导作用(Royden et al., 1997; Royden et al., 2008; 张培震, 2008),构造活动在整个地块上较为 均匀.后者则认为青藏高原东南缘隆升和变形主要 沿断裂进行(Molnar, 1975; Tapponnier et al., 1982; Tapponnier, 2001; Zeng et al., 2021).

地貌指数对构造活动的响应极为敏感,可以用 来解释流域的相对构造活动性(Strahler, 1952; Hack, 1973).本文基于地理信息系统(GIS)和数字 高程模型(DEM)的地形分析方法获得了滇中地块 的面积高程积分曲线及面积高程积分(HI)、流域形 状指数(BS)、流域盆地不对称度(AF)、标准化河流 阶梯指数(SLK)、谷底宽度与谷间高度比(VF)这5 种用于表征地貌形态的地貌指数(Bull et al., 1977; El Hamdouni et al., 2008; Figueroa and Knott, 2010; Cheng et al., 2018; Shi et al., 2020),以此得 出滇中地区相对构造活动性强度的分布特征,从而 进一步探索滇中地区新生代晚期的变形机制.

## 1 区域地质背景

滇中地块位于扬子地块西缘(图 1a)(Wang et al., 1998),北部边界为北东向丽江一小金河断裂带、东部边界是近南北向的安宁河一则木河一小江

断裂带,南部边界为北西向的红河断裂带(图1b) (阚荣举和林中洋, 1986; Wang et al., 1998; 徐锡 伟等, 2003; 王刚和王二七, 2005; Li et al., 2020). 晚第四纪以来丽江一小金河断裂以左旋走滑为主 兼有倾向运动分量,平均左旋滑动速率为(3.6± 0.2) mm/a左右(徐锡伟等, 2003);安宁河断裂全新 世左旋走滑速率为(5.0±1.2) mm/a,垂直滑动速率 为(0.6±0.1) mm/a(张培震等, 2008).则木河断裂 左旋走滑速率约为(6.4±0.6) mm/a(徐锡伟等, 2003). 小江断裂以左旋走滑为主,兼局部挤压、拉 张,平均走滑速率为8~10 mm/a,且走滑速率由北 向南逐渐减小(Wang, 1998; 徐锡伟等, 2003). 红 河断裂带第四纪以来的右旋走滑速率为3.5 mm/a (徐锡伟等, 2003). 地块内部还发育有多条近南北 向左旋走滑断裂,包括普渡河断裂、易门断裂和绿 汁江断裂,在地块南部发育有与红河断裂近乎平行 的楚雄断裂、建水断裂、曲江断裂等(图1b).新生代 晚期,各断裂强烈走滑,地震频发(张培震,2008). 滇中地块内的断裂被金沙江、珠江、红河三大流域 所覆盖,其主要支流多沿断裂发育.

滇中地块大致以绿汁江断裂为界,分为东西两部分.东部出露中元古界昆阳群复理石、钠质火山岩、碳酸盐岩,震旦系至三叠系的海陆交互相碎屑岩、碳酸盐、基性火山岩,侏罗系、白垩系含煤磨拉石及红色碎屑岩.晚古近纪以来,该地区持续隆升,形成一系列小型山间盆地,为内陆碎屑含煤建造,局部遭受构造变形.西部则以波状起伏的山岭为特征,主要出露三叠纪至古近纪的紫红色陆相碎屑沉积,厚度可达上万米,覆盖在下元古界苴林群变质基底之上(王刚和王二七,2005; 耿元生等,2017).



Fig.1 The structural sketch map of the Central Yunnan terrane and surrounding area a. 青藏高原东缘构造图;b. 研究区

2 研究方法

本文基于地理信息系统(GIS)和 30 m 分辨率 的数字高程模型(DEM)提取了研究区内 319 个 (亚)流域盆地(图 2),获得了 HI、BS、AF、SLK 和 VF 这5个地貌指数(附图 1a~1e).前人研究走滑断 裂构造活动性时,往往求取上述五个地貌指数的分 级的算数平均值来获得构造活动性指数(I<sub>a</sub>)(附录 图 1f),如在美国加利福尼亚州的内华达山脉 (Figueroa and Knott, 2010)、死海南部(Le Béon et al., 2012)、伊朗西南部山区(Faghih et al., 2016)、四川东北部的大巴山等地区(Shi et al., 2020)等. 在前人的研究的基础上,本文结合滇中地区的降雨特征和岩性分布等来分析滇中地块构造活动性分布及其相对强弱关系,从而进一步分析滇中地区新生代构造变形机制.

# 2.1 面积高程积分及面积高程积分曲线(HI) 面积高程积分(HI)是用来反映流域地貌发育



图 2 滇中地区提取的亚流域盆地 Fig. 2 Shaded relief map with the drainage basins extracted for the Central Yunnan terrane

中隆升与侵蚀之间的关系,计算公式为:

 $HI = (H_{Aver} - H_{Min})/(H_{Max} - H_{Min}),$  (1) 其中: $H_{Aver}$ 为流域平均高程; $H_{Min}$ 为流域最小高程;  $H_{Max}$ 为流域最大高程(表1).处于不同发育期的河 流(青年期、成熟期和老年期)分别对应着不同的面 积高程积分曲线(上凸型、S形和下凹型)(Strahler, 1952; Cheng *et al.*, 2018).因此,高积分值意味着 地形处于幼年期,受构造活动影响强;而低积分值 表示地形演化时间长,地貌处于老年期,很少受近 期变形的影响(图3).根据El Hamdouni et al. (2008)提出的地貌参数构造活动性分级方法,将HI 值分为3个级别:HI>0.5时为第一级,构造活动程度强;0.4 《HI 《0.5时为第二级,构造活动程度中等;HI < 0.4时为第三级,构造活动程度弱.

#### 2.2 流域形状指数(BS)

在强构造活动带中,河流随着山体的地形坡度 或断层的形状而发育,其自身呈线状,但由于河流 的侧向侵蚀或构造活动的减弱,流域形态往往趋于 圆形.流域形状指数(BS)是流域盆地河谷的源头至 出水口的直线距离与垂直于该直线距离的流域盆 地最大宽度的比值,计算公式为:

 $BS = B_1/B_w$ , (2) 其中: $B_1$ 表示源头至出水口的直线距离; $B_w$ 表示垂 直于 $B_1$ 的流域盆地的最大宽度(表1),流域形状指 数可用来描述流域的形状.区域构造活动对流域形 状指数的影响极大,构造活动强烈或处于幼年期的 流域形状为狭长型,随着构造活动逐渐减弱及地形 的不断演化发展,狭长型的流域逐渐变为圆形,BS值越大,表示该地区的构造活动强,BS 值越小,表 示该地区的构造活动越弱.可将其划分为3个等级: 当BS > 2.3时为第1级,构造活动程度相对较强;当  $1.5 \leqslant BS \leqslant 2.3$ 时为第2级,构造活动程度相对较弱 (Figueroa and Knott, 2010; Cheng *et al.*, 2018).

#### 2.3 流域盆地不对称度(AF)

流域盆地不对称度(AF)是判断盆地是否发生 构造倾斜的一个重要指标.流域盆地不同的形状, 可以反映流域受构造活动、岩性差异及不同的侵蚀 过程(Hack, 1973).计算公式为:

 $AF = 100(A_{\rm r}/A_{\rm l}), \qquad (3)$ 

其中: $A_i$ 为流域右侧面积; $A_i$ 为流域总面积(表1). 流域盆地不对称度受构造影响及大,对垂向与干流 走向的掀斜运动非常的敏感,如果流域盆地不对称 度AF值接近于50,即为典型的对称性流域,表示处 于一种稳定的状态,在构造活动稳定区,大多数河 流的流域盆地形状趋于稳定;如果不对称度AF值 远大于50,则说明流域盆地向左倾斜;如果不对称 度AF值远小于50,则说明流域盆地向右倾斜.本 文将流域盆地不对称度AF值其划分为3个等级:当  $|AF-50| \ge 15$ 时为第1级,构造活动程度相对较强; 当 $7 \le |AF-50| < 15$ 时为第2级,构造活动程度相对 中等; $\exists |AF-50| < 7$ 时为第3级,构造活动程度相 对较弱(Figueroa and Knott, 2010; Cheng *et al.*, 2018).

#### 2.4 标准化河流阶梯指数(SLK)

流域盆地地貌特征的形成是由流经不同强度 的岩石或土壤上的河流之间的构造抬升和侵蚀过 程的调整造成的.为定量反映河流纵剖面坡度的变 化,反应河流侵蚀与沉降过程,对河流纵剖面坡度 与环境变化进行定量分析,Hack(1973)定义了一个 名为"坡降指标(SL index)"的参数,用来定量分析 河流坡度变化,它是指单位距离的坡度和与河流源 头的距离的乘积,河流阶梯指数(SL)的公式为:

$$SL = (\Delta H / \Delta L) \times L,$$
 (4)

其中:△H为计算河段的高程差,△L为计算河段的 水平距离,(△H/△L)即为单位距离的河段坡度(表 1).当SL值异常高时,说明该河段岩性抗侵蚀能力 较强或该区域为差异隆升;当SL值异常低时,指示 该河段岩性抗侵蚀能力弱或该河段为沉降区.为对 比不同长度的河道,利用一个均衡的坡降指标 K来 对SL值进行标准化而得到SLK指数,公式为:

$$K = H_{\text{total}} / \ln(L_{\text{total}}), \tag{5}$$

其中:H<sub>total</sub>为河流源头与流域出口的高差;L<sub>total</sub>为河流的总长度(表1).标准化河流阶梯指数(SLK)的 公式为:

$$SLK = SL/K.$$
 (6)

如果排除气候和岩性等因素的影响,较高的SLK通常与较高的隆升和较低的岩石侵蚀率有关.因此,该方法在评价构造隆升中得到了广泛应用.将SLK值划分为3个等级:当SLK≥3.7时为第1级,构造活动程度相对较强;当2.5≤SLK<3.7时为第2级,构造活动程度相对中等;当SLK<2.5时为第3级,构造活动程度相对中等;当SLK<2.5时为第3级,构造活动程度相对较弱(Figueroa and Knott, 2010; Cheng *et al.*, 2018).

#### 2.5 谷底宽度与谷间高度比(VF)

*VF*值是谷底的宽度和河谷的高度之间的比值 (Bull, 1977).其公式为:

 $VF = (2V_{fw})/[(E_{Id} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})], (7)$ 其中:  $V_{fw}$ 为谷底宽度;  $E_{Id}$ 和  $E_{rd}$ 分别为河谷左右两侧 分水岭的高程;  $E_{sc}$ 为谷底平均高程(表1). VF 值也 常常被用来反映区域的构造抬升速率, VF 较低则 代表抬升速率较高, 河流深切, 呈峡谷形态, VF 较 高则代表抬升速率较低, 河流以侧向侵蚀为主, 发 育宽谷. VF 值可反映构造活动的程度; VF 值变大, 反映活动构造程度减弱, 抬升速率变小. VF 的值分 为 3 个等级: 当 VF < 0.5 时为第 1级, 构造活动程度 相对较强; 当 0.5 < VF < 1.0 时为第 2级, 构造活动程 度相对中等; 当 VF > 2.5 时为第 3级, 构造活动程 度相对较弱 (Figueroa and Knott, 2010; Cheng *et al.*, 2018).

#### 2.6 构造活动相对强度(I<sub>at</sub>)

El Hamdouni *et al.*(2008)、Figueroa and Knott. (2010)、Faghih *et al.*(2016)和 Shi *et al.*(2020)等在 研究中先后利用 *I*<sub>at</sub>指数来表征走滑断裂的相对构造



表1 构造活动性分析中的地貌指数

修改自 Figueroa and Knott(2010); Cheng et al.(2018).

 类数(表1).根据El Hamdouni et al. (2008)、 Figueroa and Knott (2010)、Faghih et al. (2016)和 Shi et al. (2020)的 I<sub>at</sub>值的分级标准,本研究将滇中 地块的 $I_{at}$ 值分为四级,第1级:1.0 $\ll I_{at} < 1.5$ ,构造活动程度很高;第2级:1.5 $\ll I_{at} < 2.0$ ,构造活动程度较高;第3级:2.0 $\ll I_{at} < 2.5$ ,构造活动程度中等;第4级:2.5 $\ll I_{at} < 3.0$ ,构造活动程度低.

#### 3 结果

#### 3.1 面积高程积分(HI)及面积高程积分曲线

整体来看,HI高值区集中分布在丽江一小金河 断裂带、则木河一小江断裂带、楚雄一曲江断裂及 金沙江两侧,其他部位的HI值则相对较低(附图 1a,附表1).

其中,丽江一小金河断裂两侧 HI值呈现东高西 低的特征;则木河断裂附近的 HI值均较高;安宁河 断裂西侧 HI值高于东侧;小江断裂附近流域 HI值 呈现出北部最高,南部次之,中部稍低;楚雄一曲江 断裂附近的 HI值呈现为北高南低.

另外,普渡河断裂、易门断裂、绿汁江断裂、永 胜断裂附近的流域HI值都呈现了北高南低的特征.

在滇中地块内分别提取了*HI*值高值、中等及低 值区各5条流域的面积高程积分曲线(图3),分别呈 现为上凸型、S型和下凹型.

#### 3.2 流域形状指数(BS)

滇中地块流域形状指数 BS 值整体表现为高值 区集中在丽江一小金河断裂带、小江断裂带、红河 断裂及金沙江两侧(附图 1b,附表1).

其中,丽江一小金河附近流域的BS值东高西低;小江断裂附近的BS值呈现北强,南部次之,中 部最弱;红河断裂两侧BS值也呈现北部最强,南部 次之,中部较弱的特征.

另外,普渡河断裂、绿汁江断裂和易门断裂两侧BS值呈现出由北向南部变弱的特征.

#### 3.3 流域盆地不对称度(AF)

流域盆地不对称度整体表现为:金沙江以南各 走滑断裂附近的|AF-50|值均较高;金沙江以北的 仅在丽江一小金河断裂、安宁河断裂附近的|AF-50|值也较高,其他区域相对较低(附图 1c,附表1). 这表明滇中地块各走滑断裂新生代晚期的构造活 动造成了流域盆地均发生了不同程度的构造倾斜.

#### 3.4 标准化河流阶梯指数(SLK)

标准化河流阶梯指数整体表现为SLK高值区 分布在丽江一小金河断裂带、则木河一小江断裂 带、楚雄一曲江断裂及金沙江两侧(附图 1d, 附表1). 其中,丽江一小金河断裂两侧的SLK值呈现东 高西低的特征,安宁河断裂SLK值为西侧高于东 侧;则木河断裂两侧的SLK值均较高;小江断裂两 侧SLK值为北部最高,南部次之,中部最低;楚雄一 曲江断裂且与小江断裂交汇处的SLK值较高.

普渡河断裂附近的SLK值为北高南低,而易门断裂、绿汁江断裂及永胜断裂附近流域的SLK值南高北低.

#### 3.5 谷底宽度与谷间高度比(VF)

谷底宽度与谷间高度比的低值区主要集中在 丽江一小金河断裂带、小江断裂带北侧、楚雄一曲 江断裂、绿汁江、普渡河断裂南部及金沙江两侧(附 图 1e,附表1).

其中,丽江一小金河断裂两侧的 VF 值总体呈现北、南强,中部弱的特点;安宁河断裂附近的 VF 值西侧高于东侧;小江断裂附近流域的 VF 值北高 南低;楚雄一曲江断裂北侧的 VF 值较低,南侧较 高.易门断裂、绿汁江断裂、永胜断裂附近流域的 VF 值呈现北部较低,而南部较高.

#### 3.6 构造活动相对强度(I<sub>at</sub>)

根据 I<sub>at</sub>值分级特征,滇中地区有 53.2% 的小流 域为 1级和 2级,相对构造活动强烈;36% 为 3级,相 对构造活动程度中等;10.6% 为 4级,相对构造活动 比较弱(附图 1f). I<sub>at</sub>的低值区集中在丽江一小金河 断裂、楚雄一曲江断裂、则木河一小江断裂带以及 滇中地块中部金沙江两侧(普渡河断裂、易门断裂、 绿汁江断裂、永胜断裂四个断裂的北段)(附图 1f, 附表 1).

#### 4 讨论

流域内地貌指数的变化受到构造和非构造因素 如降水、岩性等的共同影响(Kirby *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2014; 苏琦等, 2016; 王一舟等, 2020).

#### 4.1 降水

降水量的增多往往导致河流流量增加,流量的 增加意味着河道基底侵蚀的增加,会改变河道及流 域形态(Wang, 2014;苏琦等, 2016;王一舟等, 2020),从而使HI、BS、SLK和VF值发生改变,影响 该地区的相对构造活动性.本文基于中国气象数据 网采集的各气象站逐月降水数据(1970~2019年, 数据下载地址:http://data.cma.cn),利用克里金插 值方法得到了滇中地区年平均降水的空间变化,滇 中地区的年平均降水量由北西向南东逐渐增多(图



a. 流域142、161、239、246和273呈上凸型;b. 流域48、94、216、261和302呈S型;c. 流域38、114、130、186和256呈下凹型

4),但滇中地区 I<sub>at</sub>低值区分为4个带:丽江一小金河 断裂带、红河断裂以北的楚雄一曲江断裂带、则木 河一小江断裂带以及滇中地块中部金沙江两侧(普 渡河断裂、易门断裂、绿汁江断裂、永胜断裂北段), 其他区域 I<sub>at</sub>值相对较高.这与由南东向北西降雨逐 渐减少的空间格局并不一致.

同时,本研究还统计了206条支流的流域盆地的降水量和I<sub>at</sub>值之间的关系,发现二者的线性关系 较弱(相关系数R<sup>2</sup>=0.0482)(图5).

因此,本研究认为降水因素不是影响研究区 *I*<sub>at</sub> 值分布的决定性因素.

#### 4.2 岩性

岩性不仅可以控制河道基岩的侵蚀力,还可以 控制流域的剥蚀率与坡度,进而影响地貌响应和河 流剖面形状(张会平等, 2011; 王一舟等, 2017). 本 研究随机提取了研究区内得169条支流的河道纵剖 面.其中24条支流未发育裂点,剩余145条支流发 育有162个裂点,但仅有11个裂点出现在岩性分界 线附近,其余151个裂点均不在岩性分界线附近(附 录表 2), 如流域 35 和 268 所示, 流域 35 以峨眉山玄 武岩为主,局部分布有下二叠统茅口组和栖霞组的 灰岩(云南省地质局第二区域地质测量大队, 1978<sup>®</sup>),裂点也未出现在岩性分界线上(图 6a);流 域268岩性由下侏罗统冯家河组的紫红色的泥岩和 中侏罗统张河组的灰绿、灰紫色石英砂岩为主(云 南省地质局第一区域地质测量大队,1965<sup>2</sup>),裂点 明显未出现在岩性分界线上(图 6b).因此,本研究 认为岩性不是控制本区域构造地貌特征的主要 原因.

#### 4.3 构造变形的影响

丽江一小金河断裂带、则木河一小江断裂带、 红河断裂带作为滇中地块的边界断裂,且丽江一小 金河断裂(徐锡伟等, 2003; Zhang, 2004; 刘晓霞 和邵志刚, 2020)、则木河一小江断裂(Shen et al., 2005)的走滑速率均由北向南逐渐减小.与此相对 应的是丽江一小金河断裂带、则木河一小江断裂 带、楚雄一曲江断裂带及金沙江两侧的HI,BS, SLK和 VF 等地貌参数均表现为较强的构造活动 性,且有自北向南逐渐变弱的趋势. L.低值区即构造 活动性更强的地区也分布在丽江一小金河断裂带、 则木河一小江断裂带、楚雄一曲江断裂带,且自北 向南逐渐变弱(附图 1f).由此可见,滇中地块构造 活动性强的区域主要集中在走滑断裂带上(附图 1f),这说明滇中地块新生代晚期的变形机制与"刚 性块体挤出模式"较为一致(Molnar, 1975; Tapponnier et al., 1982; Tapponnier, 2001; Li et al., 2019a).

滇中地块中部金沙江两侧的 *I*<sub>at</sub>值也相对较低, 本文认为这可以通过两种机制来解释(附图 1f).机 制一:地壳均衡反弹作用(王二七等,2006;石许华 等,2008;王岩和刘少峰,2013),金沙江的强烈侵 蚀导致的金沙江两侧掀斜抬升.前人在滇西哀牢山 (王二七等,2006)、玉龙雪山的虎跳峡(石许华等, 2008)、龙门山(王岩和刘少峰,2013)等多个地区发 现了地壳均衡反弹作用对山体的隆升的影响,但其 影响的空间范围不大.金沙江南北两侧低 Iat 范围 约为 100~150 km,地壳均衡反弹作用能否影响如 此大的范围还存在较大疑问.机制二:滇中地区隆

①云南省地质局第二区域地质测量大队,1978,G-48-XX(1:200 000曲靖幅)区域地质调查报告.

②云南省地质局第一区域地质测量大队,1965,G-47-XXX(1:200 000楚雄幅)地质报告书(上册).









升信号的传递及新生代晚期的河流重组.前人研究

表明新生代以来滇中地块发生了隆升(王刚和王二 七,2005;张岳桥和李海龙,2016;Wu et al., 2020),差异隆升导致金沙江河道中产生裂点.裂点 形成后,沿着河流纵剖面的不断向上游迁移,且从 主干河道传向次一级河道(张会平等,2011;Cook et al.,2013).在滇中地块中部的金沙江两侧,本研 究提取了的7个主支流的纵剖面,并绘制了其中3 条的纵剖面,发现均有明显的裂点发育(图7),且控 制了 I<sub>a</sub>低值区的空间分布(附图 1f).由于裂点以上 河道受到隆升作用的影响较小,则可以保留构造隆 升之前的地貌形态;而裂点以下河道发生强烈侵蚀 (王一舟等,2017;Li et al.,2019b),则可以造成金 沙江流域两侧河流下蚀能力增强,继而造成金沙江





![](_page_9_Figure_5.jpeg)

两侧 HI值、BS值、SLK值增高和 VF值降低;同时, 由于新生代青藏高原东南缘持续地构造变形,导致 了河流不断发生重组,如长江不断袭夺古红河水系 (Clark et al., 2004; Yang et al., 2020),形成了现今 的长江水系.在河流重组过程中,河流侵蚀能力不 断增强(Yang et al., 2020),这也将造成金沙江两侧 HI值、BS值、SLK值增高和 VF值降低(附图1),从 而使得其两侧 I<sub>at</sub>值较低.

结合 I<sub>at</sub>低值区空间分布特征,本研究认为第二 种机制是造成金沙江两侧的 I<sub>at</sub>值相对较低的主要 原因.

## 5 结论

本文利用地貌指数对地貌过程和构造变形进行了定量分析,得出了滇中地块的相对构造活动性,同时对滇中地区新生代隆升模式及其动力学机制进行了探索,主要形成以下几点认识:

(1) 滇中地区的丽江一小金河断裂带、则木 河一小江断裂带、红河断裂带 I<sub>at</sub>值相对较小,其由北 向南逐渐增大.同时金沙江两侧 I<sub>at</sub>值相对较低,其 他部位相对较高.

(2)降水和岩性对滇中地区 *I*<sub>at</sub>值的空间分布无整体性影响.

(3)构造活动影响了对滇中地区 I<sub>at</sub>值的空间分 布,滇中地区的构造活动性强的区域主要集中发育 在断裂带附近,且呈北强南弱趋势,这与"刚性块体 挤出模式"相一致. 滇中地块中部的金沙江两侧 I<sub>at</sub> 值相对较低,这是由于新生代晚期青藏高原东南缘 的隆升及河流重组,导致了金沙江及其支流切割力 的增强,造成了金沙江两侧 HI 值、BS 值、SLK 值增 高和 VF 值降低,使得金沙江两侧 I<sub>at</sub>值相对较低.

致谢:衷心感谢两位审稿专家对本文提出的宝 贵意见!

附件见本刊官网(www.earth-science.net).

#### References

- Bull, W. B., McFadden, L. D., 1977. Tectonic Geomorphology North and South of the Garlock Fault, California. Synthetic Metals, 115-138. https://doi.org/10.1016/S0379-6779 (00)01411-9
- Cheng, Y. L., He, C. Q., Rao, G., et al., 2018. Geomorphological and Structural Characterization of the Southern Weihe Graben, Central China: Implications for Fault Segmentation. *Tectonophysics*, 722: 11-24. https://doi. org/10.1016/j.tecto.2017.10.024
- Clark, M., Schoenbohm, L., Royden, L., 2004. Surface Uplift, Tectonics, and Erosion of Eastern Tibet from Large -Scale Drainage Patterns. *Tectonics*, 23(1): TC1006. https: //doi.org/10.1029/2002TC001402
- Cook, K. L., Turowski, J. M., Hovius, N., 2013. A Demonstration of the Importance of Bedload Transport for Fluvial Bedrock Erosion and Knickpoint Propagation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(7): 683-695. https: //doi.org/10.1002/esp.3313
- Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., et al., 2008. Assessment of Relative Active Tectonics, Southwest Border of the Sierra Nevada (Southern Spain). *Geomorphology*, 96(1/2): 150-173. https://doi.org/10.1016/j. geomorph.2007.08.004
- Faghih, A., Nezamzadeh, I., Kusky, T. M., 2016. Geomorphometric Evidence of an Active Pop-Up Structure along the Sabzpushan Fault Zone, Zagros Mountains, SW Iran. *Journal of Earth Science*, 27(6): 945-954. https://doi.org/ 10.1007/s12583-016-0663-y
- Figueroa, A. M., Knott, J. R., 2010. Tectonic Geomorphology of the Southern Sierra Nevada Mountains (California): Evidence for Uplift and Basin Formation. *Geomorphology*, 123(1/2): 34-45. https://doi.org/10.1016/j. geomorph.2010.06.009
- Geng, Y., Kuang, H., Liu, Y., et al., 2017. Subdivision and Correlation of the Mesoproterozoic Stratigraphy in the Western and Northern Margins of Y angtze Block. Acta Geologica Sinica, 91(10): 2151-2174(in Chinese with

English abstract).

- Hack, J., 1973. Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index. Journal of Research of the Us Geological Survey, 1(4): 421-429.
- Kan, R., Lin, Z., 1986. A Preliminary Study on Crustal and Upper Mantle Steucture in Yunnan. Earthquake Research in China, 2(4): 1001-4683 (in Chinese with English abstract).
- Kirby, E., Whipple, K. X., 2012. Expression of Active Tectonics in Erosional Landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44: 54-75. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.009
- Béon, M. L., Klinger, Y., Mériaux, A. S., et al., 2012. Quaternary Morphotectonic Mapping of the Wadi Araba and Implications for the Tectonic Activity of the Southern Dead Sea Fault. *Tectonics*, 31(5): TC5003. https://doi. org/10.1029/2012TC003112
- Li, H. N., Dai, J. G., Xu, S. Y., et al., 2019a. The Formation and Expansion of the Eastern Proto-Tibetan Plateau: Insights from Low-Temperature Thermochronology. *Journal* of Asian Earth Sciences, 183: 103975. https://doi.org/ 10.1016/j.jseaes.2019.103975
- Li, Q., Pan, B. T., Gao, H. S., et al., 2019b. Differential Rock Uplift along the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau Inferred from Bedrock Channel Longitudinal Profiles. *Journal of Asian Earth Sciences*, 169: 182–198. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.08.005
- Li, S. H., Su, T., Spicer, R., et al., 2020. Oligocene Deformation of the Chuandian Terrane in the SE Margin of the Tibetan Plateau Related to the Extrusion of Indochina. *Tectonics*, 39(7): 1-15. https://doi.org/10.1029/ 2019TC005974
- Liu, X., Shao, Z., 2020. Current Fault Movement Characteristics in the Lijiang - Xiaojinhe Fault Zone. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(3): 1117-1126(in Chinese with English abstract).
- Molnar, P., Tapponnier, P., 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of Recent Continental Tectonics in Asia can be Interpreted as Results of the India-Eurasia Collision. *Science*, 189(4201): 419– 426. https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419
- Royden, L. H., Burchfiel, B. C., King, R. W., et al., 1997. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet. Science, 276(5313): 788-790. https://doi.org/ 10.1126/science.276.5313.788
- Royden, L. H., Burchfiel, B. C., van der Hilst, R. D., 2008. The Geological Evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321(5892): 1054-1058. https://doi. org/10.1126/science.1155371

- Shen, Z., Lü, J., Wang, M., 2005. Contemporary Crustal Deformation around the Southeast Borderland of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 110: B11409.
- Shi, X.H., Wang, E.Q., Wang, G., et al., 2008. Late Cenozoic Uplift of the Yulong Snow Mountain(5 596 m) Se Tibetan Plateau, Caused by Erosion and Tectonic Forcing. *Quaternary Sciences*, 28(2): 222-231 (in Chinese with English abstract).
- Shi, X. H., Yang, Z., Dong, Y. P., et al., 2020. Geomorphic Indices and Longitudinal Profile of the Daba Shan, Northeastern Sichuan Basin: Evidence for the Late Cenozoic Eastward Growth of the Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 353: 107031. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107031
- Strahler, A. N., 1952. Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. Bulletin of the Geological Society of America, 63(11): 1117-1142.
- Su, Q., Yuan, D., Xie, H., et al., 2016. Geomorphic Features of the Shule River Drainage Basin in Qilianshan and its Insight into Tectonic Implications. *Seismology and Geol*ogy, 38(2): 240-258 (in Chinese with English abstract).
- Tapponnier, P., Zhiqin, X., Roger, F., et al., 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau. Science, 294(5547): 1671-1677. https://doi.org/10.1126/science.105978
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., et al., 1982. Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine. *Geology*, 10(12): 611-616.
- Wang, E., Burchfiel, B. C., Royden, L. H., et al., 1998. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang Red River, and Dali Fault Systems of South-Western Sichuan and Central Yunnan, China. Special Paper of the Geological Society of America, 327: 1-108.
- Wang, E., Fan, C., Wang, G., et al., 2006. Deformational and Geomorphic Processes in the Formation of the Ailao Shan -Diancang Range West Yunnan. *Quaternary Sciences*, 26 (2): 220-227 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G., Wang, E., 2005. Extensional Structures Whthin The Compressional orogenic Belt And Its Mechanism : A Case Study for the Late Cenozoic Deformation in Central Yunnan. Seismology and Geology, 27(2):188-199 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Liu, S., 2013. Quantitative Research on Longmen Shan Uplift Caused by Late Cenozoic Isostatic Rebound. *Geoscience*, 27(2): 239-247 (in Chinese with English abstract).

- Wang, Y., Zhang, H., Zhang, P., 2017. A Brief Introduction to the New Method for Riverprofile Analaysis: Integral Approach. Seismology and Geology, 39(6): 1111-1126 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Z., Zhang, H. P., Zheng, D. W., et al., 2014. Controls on Decadal Erosion Rates in Qilian Shan: Re-Evaluation and New Insights into Landscape Evolution in North-East Tibet. *Geomorphology*, 223: 117-128. https: //doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.002.
- Wang, Y., Zheng, D., Zhang, H., et al., 2020. Activity Characteristics of the Huashan Piedmont Normal Fault: Insights from Fluvial Geomorphic Parameters. *Seismology* and Geology, 42(2): 382-398 (in Chinese with English abstract).
- Wu, K., Dong, Y. P., Duan, J. X., et al., 2020. Cenozoic Uplift of the Central Yunnan Fragment, Southwestern China, Revealed by Apatite (U-Th)/He Dating. *Journal of Earth Science*, 31(4): 735-742. https://doi.org/10.1007/ s12583-020-1328-4
- Xu, X., Wen, X., Zheng, R., et al., 2003. Pattern of Latest Tectonic Motion and Its Dynamics for Active Blocks in Sichuan-Yunnan Region, China. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(S2): 210-226 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R., Suhail, H. A., Gourbet, L., et al., 2020. Early Pleistocene Drainage Pattern Changes in Eastern Tibet: Constraints from Provenance Analysis, Thermochronometry, and Numerical Modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 115955. https://doi.org/10.1016/j. epsl.2019.115955
- Zhang, H., Zhang, P., Fan, Q., 2011. Initiation and Recession of the Fluvial Knickpoints: A Case Study from the Yalu River-Wangtian Evolcanic Region, Northeastern China. *Sci. China Earth Sci.*, 41(11): 1627-1635 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Shen, Z., Wang, M., et al., 2004. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data. *Geology*, 9(32): 809-812. https://doi.org/ 10.1130/G20554.1
- Zhang, P., 2008. A Study on The Present Tectonic Deformation, Strain Partitioning and Deep Dynamic Process of West Sichuan Region on Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau. Science in China (Series D), 38(9): 1041-1056 (in Chinese).
- Zhang, Y., Li, H., 2016. Late Cenozoic Tectonic Events in East Tibetan Plateau and Extrusion - Related Orogenic System. Geology in China, 43(6): 1829-1852(in Chinese with English abstract).

Zeng, W.P., Purnell, M.A., Jiang, H.S., et al., 2021. Late Triassic (Norian) Conodont Apparatuses Revealed by Conodont Clusters from Yunnan Province, Southwestern China. *Journal of Earth Science*, 32(3): 709-724. https:// doi.org/10.1007/s12583-021-1459-2

#### 附中文参考文献

- 耿元生, 旷红伟, 柳永清, 等, 2017. 扬子地块西、北缘中元古代 地层的划分与对比. 地质学报, 91(10):2151-2174.
- 阚荣举,林中洋,1986.云南地壳上地幔构造的初步研究.中国 地震,(4):1001-4683.
- 刘晓霞,邵志刚,2020.丽江一小金河断裂带现今断层运动特征.地球物理学报,63(3):1117-1126.
- 石许华,王二七,王刚,等,2008. 青藏高原东南缘玉龙雪山(5 596 m)晚新生代隆升的侵蚀与构造控制作用. 第四纪研 究,(2):222-231.
- 苏琦,袁道阳,谢虹,等,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.
- 王二七,樊春,王刚,等,2006. 滇西哀牢山一点苍山形成的构造 和地貌过程. 第四纪研究, 26(2):220-227.

- 王刚,王二七,2005.挤压造山带中的伸展构造及其成因—— 以滇中地区晚新生代构造为例.地震地质,27(2):188-199.
- 王岩,刘少峰,2013.龙门山晚新生代均衡反弹隆升的定量研 究.现代地质,27(2):239-247.
- 王一舟,张会平,郑德文,2017. 稳态河道高程剖面分析的新方
  法——积分法. 地震地质,39(6):1111-1126.
- 王一舟,郑德文,张会平,等,2020. 华山山前正断层的分段活 动特征——来自河流地貌参数的约束. 地震地质,42(2): 382-398.
- 徐锡伟,闻学泽,郑荣章,等,2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学 D 辑,33(z1): 151-162.
- 张会平,张培震,樊祺诚,2011.河流裂点的发育及其溯源迁移: 以鸭绿江-望天鹅火山区为例.中国科学:地球科学,41 (11):1627-1635.
- 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),(9): 1041-1056.
- 张岳桥,李海龙,2016. 青藏高原东部晚新生代重大构造事件 与挤出造山构造体系. 中国地质,43(6):1829-1852.