

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, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2025.0041.

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, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2025.0041.

滇中龙川江流域地貌特征及其对构造活动的指示*

李 圣¹, 常玉巧¹, 卿元华^{2♣}, 杨 爽², 刘婧楠¹, 文 雯¹, 罗嘉峰¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 成都师范学院 史地与旅游学院, 四川 成都 611130)

摘要: 基于 30 m 分辨率的 ASTERDEM 数据, 利用 ArcGIS 软件水文分析工具提取龙川江水系和子流域盆地信息, 获得流域高程、条带状剖面、69 个子流域起伏度、面积–高程积分 (*HI*) 和 26 条面积–高程积分曲线 (*HC*), 并综合地层、降雨量、地质构造特征进行分析。结果表明: ①龙川江流域上游、中上游起伏度为中等, 中下游、下游起伏度分别为高、极高, 低起伏度主要分布于河谷区。②条带地形、起伏度剖面自南西向北东具有同步分段性, 地貌可细分为中低山、丘陵、中高山、中高山区。③龙川江流域 *HI* 值为 0.18~0.60, 均值 0.38, 整体处于壮年期。上游、下游 *HC* 曲线主要呈凹型, 中游 *HC* 曲线主要为 S 型。④*HI* 值由大到小对应的岩性抗侵蚀能力排序为: 低–中级变质岩≈沉积岩>第四系沉积物, 岩性、降水对 *HI* 值、起伏度影响较小。⑤构造活动是龙川江流域地貌演化的主控因素, 按照 *HI* 值由大到小的分区排序为: 断裂夹持带>断裂带>非断裂带。⑥*HI* 指数指示: 楚雄盆地、元谋盆地已向侵蚀–沉积阶段演化, 石羊镇–大古岩断裂活动强度有上–下盘效应, 元谋–绿汁江断裂活动强度由北向南增加, 2 条断裂之间的夹持地带隆升强度整体最高。

关键词: 龙川江流域; 面积–高程积分; 条带状剖面; 构造活动; 地貌演化

中图分类号: P315.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2025)03–0391–10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2025.0041

0 引言

新生代以来, 印度洋板块和欧亚板块持续碰撞, 主应力为 NNW–SSE 向, 滇中次级地块形成了一系列 NW 向、SN 向的山系、断裂 (刘昌伟等, 2021), 现今地貌格局、水系样式正是对新构造运动的响应 (李勇等, 2021)。目前, 龙川江流域活动构造研究主要集中于南华–楚雄、元谋–绿汁江断裂局部的滑动速率、活动年代等方面 (卢海峰, 2021), 其地貌方面研究仅限于山地地貌特征

(王学良等, 2011), 涵盖全流域范围的地貌特征研究还缺乏系统性, 针对地貌参数对构造活动的指示意义也鲜有探讨。

基于数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 的地貌参数定量化分析被广泛应用于流域地貌研究, 其中, 地形起伏度、高程条带状剖面、面积–高程积分方法的应用效果较好 (王躲等, 2017)。地形起伏度可以很好地表征构造抬升和地表侵蚀强度, 能间接反映构造活动强弱 (Montgomery, 1994)。与传统线型地形剖面相比, 条带状剖面能够反映面状区域内的地形起伏变化, 为

* 收稿日期: 2024–11–03.

基金项目: 云南省重点研发计划 (202203AC100003); 四川省区域和国别重点研究基地东南亚经济与文化研究中心 2024 年度项目 (DNY2401); 云南省地震科技创新团队项目 (CXTD202408); 四川省科技计划重点研发项目 (2022YFS0488); 四川省自然科学基金项目 (2023NSFC0280)。

第一作者简介: 李 圣 (1988–), 硕士, 工程师, 主要从事构造地貌、地震地质灾害研究。

E-mail: 969667112@qq.com.

♣通信作者简介: 卿元华 (1983–), 博士, 副教授, 主要从事自然地理教学及研究。

E-mail: 051061@cdnu.edu.cn.

定量分析地形信息提供更直观、精确的视角,有助于判断区域内宏观地形地貌的变化趋势 (Grohmann, 2004)。面积-高程积分方法是区分构造活动区和非构造活动区的有力工具,能够定量反映区域构造活动和地表侵蚀作用的相对发育程度,包括面积-高程积分值 (Hypso-Metric Integral, HI) 和面积-高程积分曲线 (Hypso-Metric Integral Curves, HC) 2 种分析方法 (Strahler, 1952)。虽然面积-高程积分计算结果受 DEM 分辨率和空间大小影响,但 30~90 m 分辨率对 HI 值影响极小 (王超, 2019)。在构造活动区排除流域规模、起伏度等流域自身因素及流域所在岩性、气候等其他因素条件下,HC 和 HI 方法能够量化或半量化评价区域构造的差异运动 (郭晓非, 李江海, 2024)。

本文选取龙川江流域为研究对象,提取地形起伏度、面积-高程积分、条带状剖面等地貌参数,以地质构造、地层岩性、气候为约束条件探讨龙川江流域地貌特征及其对构造活动的指示意义,为龙川江流域乃至滇中块体的新构造研究提供参考。

1 研究区概况

龙川江发源于楚雄州南华县,由西向东流经楚雄市区,又折向北进入禄丰市和元谋县 (图 1),最终在元谋北部汇入金沙江,其中,小河口水文站以上河段为龙川江上游,小黄瓜园水文站以下河段为下游 (许志敏, 臧庆春, 2011)。流域内高程为 925~2 884 m,平均高程为 1 992 m,山区和丘陵约占流域面积的 95%,其余为河谷盆地、浅丘。由图 1 可看出,龙川江上游与南华—楚雄断裂平行,中游与石羊镇—大古岩断裂相交,中下游与元谋—绿汁江断裂平行,其中南华—楚雄断裂为右旋走滑断裂,元谋—绿汁江断裂为左旋走滑断裂,石羊镇—大古岩断裂为倾向 NE 的逆断裂。为了获取各断裂对龙川江流域的地貌控制,在研究区内作了 AA' 剖面以便下文分析 (图 1)。流域

内主要出露侏罗系、白垩系、古近系砂泥岩,局部见第四系砂、砾、黏土沉积物。区内属低纬度高原季风气候,温差小,每年多雨期为 5~10 月,少雨期为 11 月至次年 4 月,降雨量以元谋县最低。

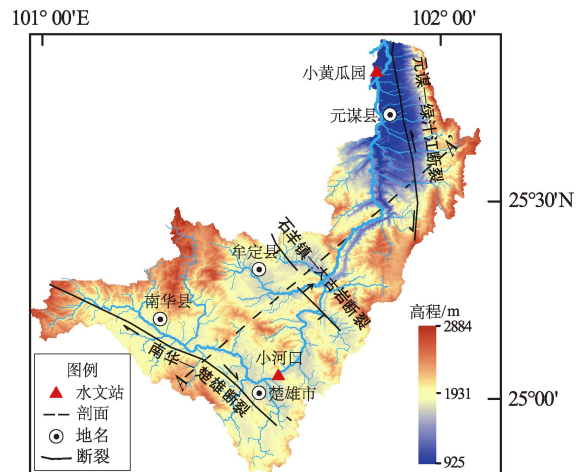


图 1 龙川江流域水系、剖面、发震构造及地形地貌
Fig. 1 The water system, the profile, seismic tectonics and the topography in the Longchuan River Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源

ASTERDEM 数据从地理空间数据云网站^①获得,分辨率为 30 m。降雨量数据来自中国气象数据网^②。地层资料由云南省 1:25 万地质图矢量化所得。活动断裂由云南第四纪活动断裂分布图 (安晓文等, 2018) 矢量化得到,比例尺为 1:100 万。

2.2 研究方法

本文研究方法的流程如图 2 所示,先根据谷歌地球图像校正河道的空间位置,然后利用 ArcGIS 10.2 软件水文分析工具,依次完成 DEM 数据填洼、流向、流量等步骤,提取龙川江水系、流域边界,将研究区划分为 69 个子流域来计算面积-高程积分和起伏度。基于 SwathProfiler 插件提取高程条带状剖面数据,并利用 Matlab 软件绘制 AA' 剖面,以分析高程、面积-高程积分在断裂处的变化。为了探究流域不同段落的演化阶段,采用褚

① <http://www.gscloud.cn/>.

② <http://data.cma.cn/site/index.html>.

永彬等(2021)的计算方法分别在上、中、下游随机选择26个子流域作HC曲线。

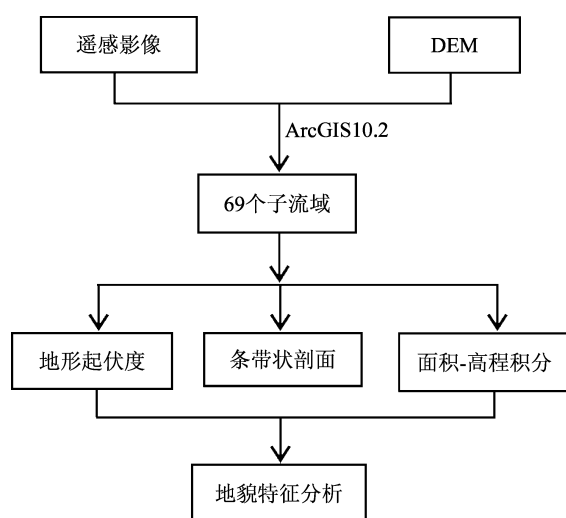


图2 本文研究方法主要流程

Fig. 2 The main research procedures in this paper

2.2.1 高程剖面与起伏度

本文选取一条垂直于龙川江、南华—楚雄断裂、石羊镇—大古岩断裂、元谋—绿汁江断裂的水平宽度为5 km、长度为90 km的条带状剖面(图1)。该剖面自紫溪山开始,经龙川江上游、猪头梁子等地,止于乌蒙山,绘制 H_{\max} 、 H_{\min} 、 H_{mean} 共3条高程曲线和地形起伏度 R 曲线(图3a)。其中, H_{\max} 曲线代表坡面或峰顶面高度变化; H_{\min} 曲线代表谷底或河流高度变化; H_{mean} 曲线反映隆升沉降—剥蚀沉积作用对坡面高度的均衡影响。

地形起伏度 R 是用最高点海拔与最低点海拔差值来量化地形变化的宏观地形因子。一般而言,构造隆升会造成断层带两侧高差急剧增加,因此 R 可以表征构造活动性(刘楠漪等,2017),其计算公式为:

$$R = h_{\max} - h_{\min} \quad (1)$$

式中: h_{\max} 为最大高程; h_{\min} 为最小高程。

2.2.2 面积—高程积分

面积—高程积分表示地貌在侵蚀作用下残留的物质占比,是定量描述高程分布的参数指标,其计算方法有积分曲线法、体积比法和起伏比法。其中起伏比法最为便捷(常直杨等,2015),计算

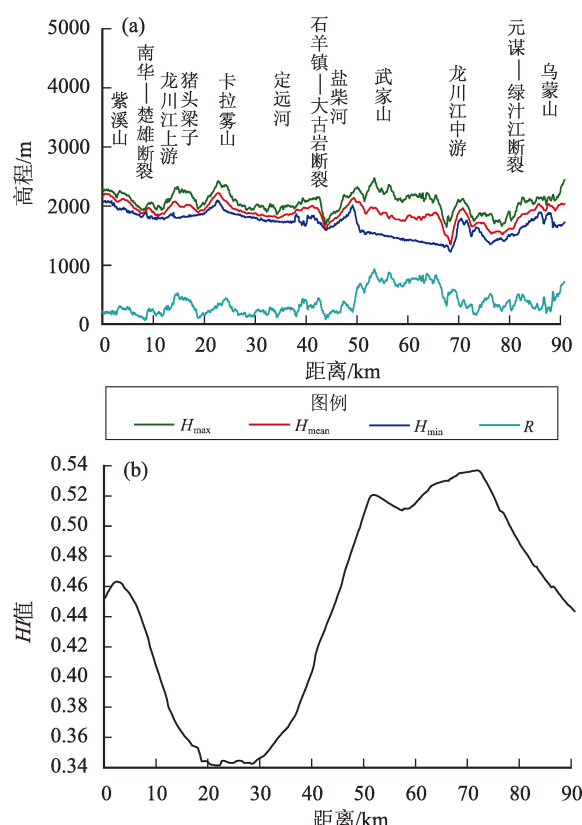


图3 A—A' 高程剖面 (a) 和 HI 值剖面 (b)

Fig. 3 Elevation profile (a) and HI value profile in A—A' direction (b)

公式为(Pike, Wilson, 1971):

$$HI = \frac{h_{\text{mean}} - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \quad (2)$$

式中: h_{\max} 为最大高程; h_{\min} 为最小高程; h_{mean} 为平均高程。

本文基于 ArcGIS 10.2 软件分别统计出 69 个子流域的 h_{\min} 、 h_{\max} 、 h_{mean} ,依据公式(2)计算出各流域的HI值,并绘制剖面(图3b)。

3 结果分析

3.1 高程及地形起伏度

研究区高程整体表现为中间低、四周高的地貌特征(图1),低值分布与河流走向基本吻合,高值主要分布于南华—楚雄断裂两侧、元谋—绿汁江断裂东侧以及元谋—绿汁江断裂与石羊镇—大古岩断裂的夹持带,反映了河流、断裂构造对

高程具有重要影响。

基于式 (1) 计算了 69 个子流域的起伏度, 为 277~1 800 m (图 4)。低起伏度 (小于 500 m) 主要沿着河谷分布, 中起伏度 (500~1 000 m) 大多分布于中上游子流域, 高起伏度 (1 000~1 500 m)、极高起伏度 (大于 1 500 m) 主要分布于中下游子流域, 越靠近元谋—绿汁江断裂, 起伏度越高。

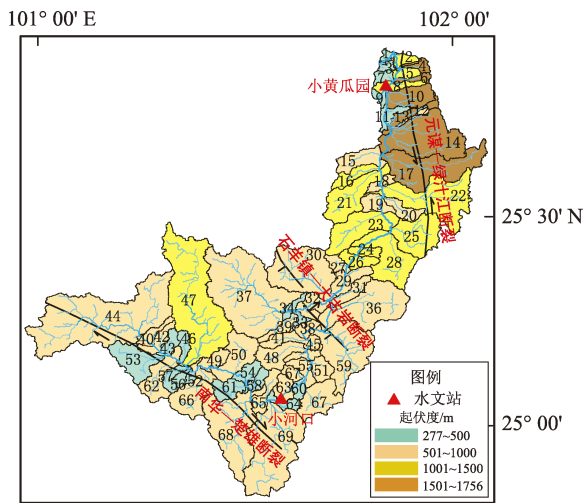


图 4 龙川江 69 个子流域及地形起伏度

Fig. 4 Sixty-nine sub-basins of the Longchuan River Basin and their topographic relief

3.2 条带状剖面

由图 3a 可见, H_{\max} 、 H_{\min} 、 H_{mean} 、起伏度 R 4 条曲线具有明显的同步分段特征。区内南华—楚雄断裂、石羊镇—大古岩断裂、元谋—绿汁江断裂将剖面分为 4 个区, 自南西向北东依次分为西南中低山、中部丘陵、中部中高山、东北中高山区。其中, 西南中低山区, 4 条曲线呈现同步变化, 在南华—楚雄断裂带出现陡降。中部丘陵区, 河谷地区和平原区起伏度小, 山地起伏度高。中部中高山区, H_{\max} 曲线呈锯齿状, H_{\min} 曲线呈连续性下降, 是剖面起伏度最高区域, 在石羊镇—大古岩断裂附近出现升降变化。东北中高山区, 其南西侧为元谋盆地, 北东侧为乌蒙山区, 在元谋—绿汁江断裂附近各曲线出现陡升、陡降。曲线在断裂处的升降变化, 指示研究区地貌的形成与构造活动的差异升降有关。

3.3 面积—高程积分

为便于后文分析, 笔者将龙川江流域划分为断裂带、断裂夹持带、非断裂带区, 并对各区的子流域和 HI 值进行整理 (表 1)。其中, 断裂带区为断裂经过的子流域, 断裂夹持带为南华—楚雄断裂、石羊镇—大古岩断裂、元谋—绿汁江断裂会交区域的子流域, 其他子流域归为非断裂带区。为了判断流域面积是否对 HI 值有影响, 本文对 69 个子流域的面积和 HI 值做了相关性分析。从图 5 可见, 龙川江 69 个子流域 HI 值与面积相关性系数低, 说明面积对 HI 值的影响较小, 这与张威等 (2020) 在玉曲流域的研究结论一致。

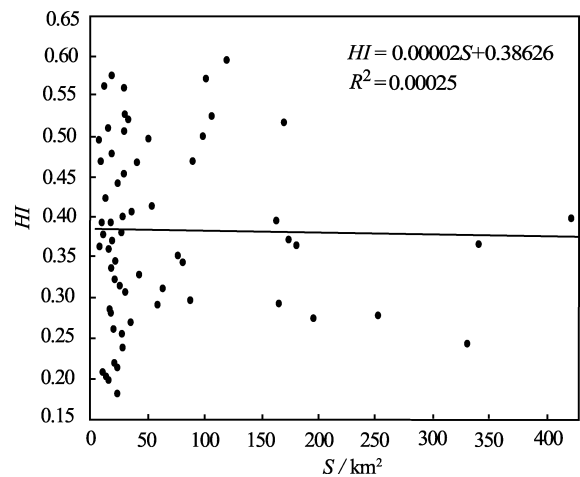


图 5 龙川江 69 个子流域面积与 HI 值的相关性

Fig. 5 Correlation between the areas of 69 sub-basins of the Longchuan River Basin and HI values

HI 指数反映了流域的侵蚀程度和地貌发展阶段。 $HI > 0.6$ 、 $0.35 < HI < 0.60$ 、 $HI < 0.35$ 分别指示地貌发育的幼年期、壮年期、老年期 (Strahler, 1952)。龙川江流域 HI 值为 0.18~0.60 (表 1), 均值为 0.38, 表明整体处于壮年期。26 个子流域的 HC 曲线与 HI 值对应良好, 凹型子流域 HI 值几乎都小于 0.35, S 型和凸型子流域 HI 值都大于 0.35 (图 6、表 1)。从图 6 可以看出, 龙川江中上游、下游子流域的 HC 曲线主要为凹型, 中下游主要为 S 型。依据 HC 曲线形态和河流演化的对应关系 (Strahler, 1952) 可知, 中上游、下游河流演化较为成熟, 已经进入老年期 (图 6a), 中下游和

表1 龙川江69个子流域所处位置及对应的HI值

Tab. 1 Location of the 69 sub-basins of the Longchuan River Basin and their corresponding HI values

子流域编号	HI 值	所处位置	子流域编号	HI 值	所处位置	子流域编号	HI 值	所处位置
1	0.395 0	非断裂带	24	0.480 8	断裂夹持带	47	0.371 7	非断裂带
2	0.285 8	断裂带	25	0.573 2	断裂夹持带	48	0.417 0	断裂夹持带
3	0.380 7	非断裂带	26	0.508 4	断裂夹持带	49	0.383 8	断裂夹持带
4	0.512 6	断裂带	27	0.578 0	断裂夹持带	50	0.347 2	断裂夹持带
5	0.282 6	断裂带	28	0.596 6	断裂夹持带	51	0.403 3	断裂夹持带
6	0.426 0	断裂带	29	0.470 8	断裂夹持带	52	0.497 8	断裂带
7	0.202 1	非断裂带	30	0.373 1	断裂夹持带	53	0.354 4	断裂带
8	0.184 3	断裂带	31	0.527 4	断裂夹持带	54	0.317 6	断裂夹持带
9	0.208 7	非断裂带	32	0.444 8	断裂夹持带	55	0.260 1	断裂夹持带
10	0.293 7	断裂带	33	0.362 5	断裂夹持带	56	0.563 5	断裂带
11	0.217 4	非断裂带	34	0.362 0	断裂带	57	0.441 9	断裂带
12	0.365 7	断裂带	35	0.471 7	断裂夹持带	58	0.265 0	断裂夹持带
13	0.256 3	断裂带	36	0.520 9	断裂夹持带	59	0.294 9	断裂夹持带
14	0.367 2	断裂带	37	0.244 1	非断裂带	60	0.287 9	非断裂带
15	0.499 1	断裂夹持带	38	0.338 0	断裂带	61	0.408 8	断裂带
16	0.524 4	断裂夹持带	39	0.347 6	断裂夹持带	62	0.312 5	断裂带
17	0.398 1	断裂夹持带	40	0.219 8	非断裂带	63	0.310 9	断裂夹持带
18	0.480 7	断裂夹持带	41	0.331 7	断裂夹持带	64	0.373 2	断裂夹持带
19	0.456 6	断裂夹持带	42	0.239 2	非断裂带	65	0.270 6	断裂夹持带
20	0.561 4	断裂夹持带	43	0.323 9	非断裂带	66	0.472 1	断裂带
21	0.502 5	断裂夹持带	44	0.398 4	断裂带	67	0.299 1	非断裂带
22	0.520 0	断裂夹持带	45	0.393 6	断裂夹持带	68	0.276 6	断裂带
23	0.526 4	断裂夹持带	46	0.395 2	断裂夹持带	69	0.279 8	断裂带

上游河流的演化还处于壮年期（图 6b、c）。少数 HC 曲线反映的流域演化阶段与 HI 值反映的不一致，如 22、29、56 子流域 HI 值显示流域处于壮年期（表 1），但 HC 曲线为凸型表明其处于幼年期（图 6c），33 子流域 HI 值（0.363 5）显示流域为壮年期，但 HC 曲线为凹型显示为老年期，这些子流域靠近断裂带，HI 值与 HC 曲线不一致的情况可能指示了构造隆升与侵蚀作用的相对平衡关系（丁智强等，2021）。

4 讨论

现今地貌是地球内、外动力长期综合作用的结果，区域构造活动、气候变化、岩性差异控制

着地貌的演化（李勇等，2021），故需分析地貌的影响因素，进而探讨构造地貌是否可以反映区域新构造活动的信息。

4.1 岩性对流域地貌的影响

一般情况下，抗侵蚀能力强的岩石区，因风化弱，输送到流域的物质较少，其地貌趋于幼年期，HI 值较高，地形起伏度高，反之则趋于老年期（李正晨等，2021）。为了客观评价岩性与地貌参数的关系，剔除构造影响，本文选取断裂夹持带、非断裂带区的 48 个子流域（表 1）进行分析。

由图 7 可见，黄瓜园镇、元马镇之间的 7、9、11 子流域远离断裂，发育第四系砂、砾沉积物，坚固系数小于 1（陈庭根，管志川，2000），HI 均值为 0.21，起伏度平均为 405 m。1、3 子流域，

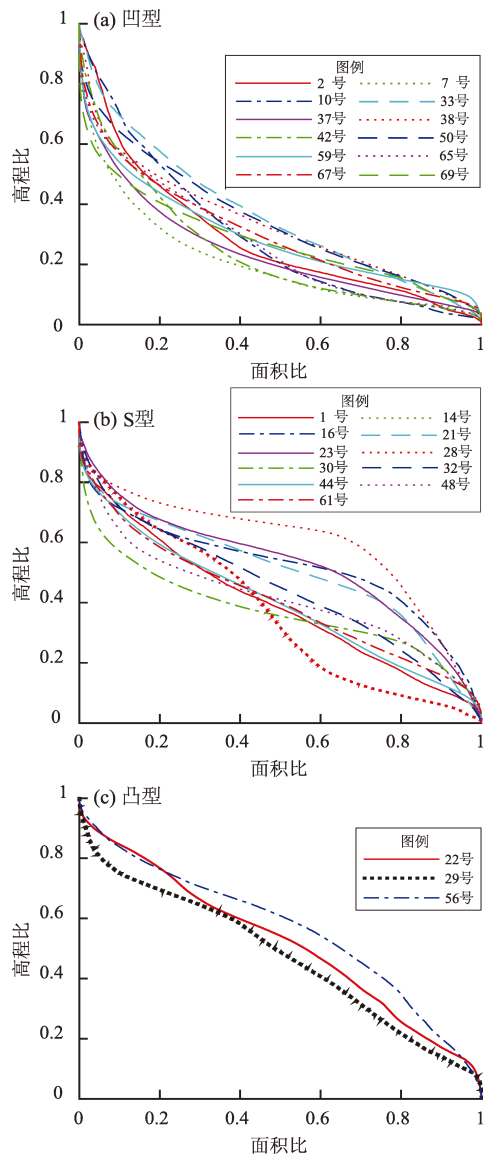


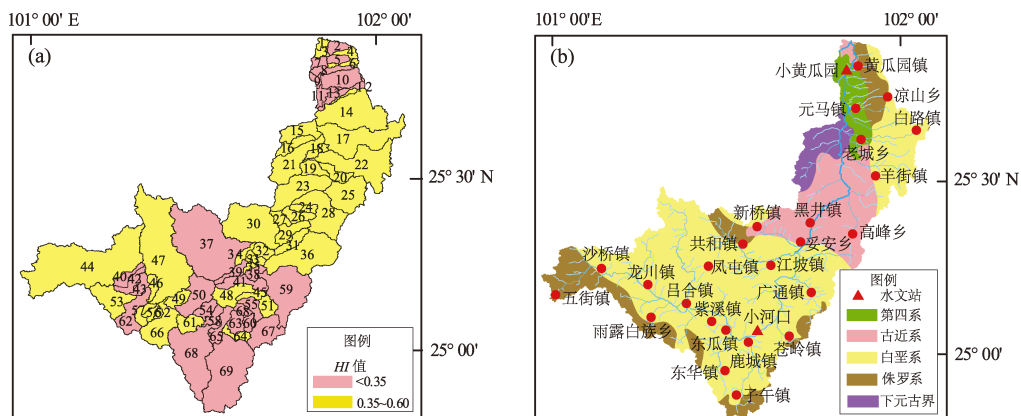
图6 龙川江26个子流域HC曲线

Fig. 6 HC curves of 26 sub-basins of the Longchuan River Basin

主要发育古近系砂、泥岩, 坚固系数多大于4 (陈庭根, 管志川, 2000), HI 均值为0.39, 起伏度平均为416 m。7、9、11与1、3子流域地形起伏度、构造位置相当, 但因岩性差异较大, 沉积岩区的 HI 值明显大于沉积物区 HI 值。老城乡西侧15、16、18、21子流域远离断裂带, 主要发育下元古界荇林群, 岩性主要为片岩、千枚岩等低-中级变质岩, 坚固系数大于4 (陈庭根, 管志川, 2000), HI 均值0.50, 地形起伏度为669~1411 m。羊街镇以西的23、24、26、27、28、29子流域, 主要发育古近系砂泥岩, HI 均值为0.53, 地形起伏度为874~1349 m (图4)。两者起伏度、构造位置相当, 岩性差异较大, 但 HI 值相近。可见, HI 值由大到小对应的岩性抗侵蚀能力排序为: 低-中级变质岩 \approx 沉积岩>第四系沉积物。虽然岩性对 HI 值有控制作用, 但研究区第四系沉积物仅分布下游局部地区 (图7b), 整体以砂、泥岩为主, 岩性抗侵蚀能力差异不大。故岩性对地貌发育的控制只是次要因素。

4.2 降水量对流域地貌的影响

降雨量高的地区, 降雨的侵蚀作用强, 河谷下切深度大, HI 值偏低, 起伏度增加, 反之也成立 (李勇等, 2021)。区内降水量由南西向北东向递减 (图8a), 在不考虑岩性、构造的背景上, 降雨对地貌的侵蚀作用向北东向递减, 其 HI 值自南西向北东向递增, 地形起伏度则向北东向递减。分段来看, 龙川江中上游, 楚雄市附近的63、64、65、68、69子流域, 降水量最高, 均值为654 mm, HI 均值为0.30, 起伏度均值为555 m。中下游

图7 龙川江子流域 HI 值(a)和岩层分布(b)Fig. 7 Distribution of HI values (a) and rock strata (b) in the Longchuan River

的8、9、10、11、12子流域,降雨量低,均值仅为293 mm, HI 均值为0.25,起伏度均值为1 000 m。中上游降水量高,其 HI 值应该比中下游低,起伏度应比中下游高,但结果恰好相反,与理论不符。位于元谋—绿汁江断裂与石羊镇—大古岩断裂的夹持带且远离断裂、岩性相当的26、27、29、31子流域与15、16、18、19、20、21、23、28子流域,年降水量均值分别为487 mm、363 mm,差异较大,但 HI 均值相近,分别为0.53、0.52,起伏度均值相近,分别为901 m、1 085 m,与理论推断不符。因此,降水量不是地貌发育的主要因素。

4.3 构造活动对流域地貌的影响

研究区断裂夹持带子流域共36个, HI 值介于0.26~0.60,均值为0.43;断裂带子流域共有21个(表1), HI 值为0.18~0.56,均值为0.37;非断裂带子流域共12个, HI 值为0.202~0.40,均值为0.28。其原因为:断裂带强烈破碎,抗风化能力差,但由于隆升较为明显(图3a),河流势能较强,侵蚀作用较为强烈,地貌特征接近老年期, HI 值较低(图3b);断裂夹持带受南华—楚雄断裂、元谋—绿汁江断裂、石羊镇—大古岩断裂控制,岩石破碎程度虽然低于断裂带,但因为隆升最明显(图3a),河流势能最大,侵蚀作用最强, HI 值最高(图3b),地貌演化趋于壮年期;在非断裂带,岩石较完整,隆升不明显,河流势能最低,侵蚀作用最弱,地貌倾向老年期特征, HI 值

最低(李正晨等,2021)。

南华—楚雄断裂、石羊镇—大古岩断裂、元谋—绿汁江断裂附近的干流走向与断裂大致平行,说明河流受断裂控制。南华—楚雄断裂、元谋—绿汁江断裂的走滑作用造成支流河道发生水平位错,如南华—楚雄断裂经过的44、53、62子流域、元谋—绿汁江断裂带经过的14、17、25子流域的河流河道发生同步弯曲(图4)。前人科考工作也验证了这一点,常祖峰等(2015)发现南华—楚雄断裂导致龙川江一级支流右旋错位近400~600 m;卢海峰等(2008)发现元谋—绿汁江断裂导致龙川江支流左旋错位近350~550 m。表明龙川江干流的流向、支流的水平位错是对断裂走滑作用的响应。

由图3a可以看出,剖面的4条曲线分段性特征变化一致,说明地貌与构造基底具有很好的对应关系。剖面中断裂带的高程和起伏度曲线均出现升降变化,而位于石羊镇—大古岩断裂和元谋—绿汁江断裂夹持的武家山地区,岩性为砂泥岩,抗侵蚀能力中等,降雨量适中,但其高程、起伏度、 HI 值则是剖面的最高区域。前述研究表明,降水、岩性对区内的地貌影响有限,因此,龙川江流域地貌主要受控于构造活动。

4.4 流域地貌的构造指示意义

滇中地区是中生代时期形成的大型拗陷盆地,且自燕山运动末期以来一直处于隆升状态(常祖峰等,2015;刘婧楠等,2023)。洪艳等(2019)

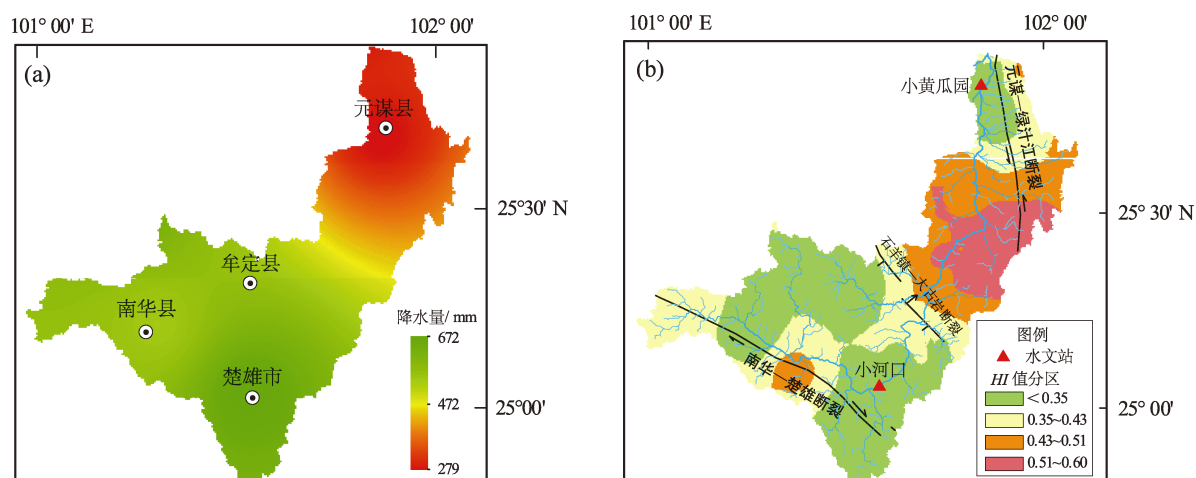


图8 龙川江流域降水量(a)和 HI 值(b)分布

Fig. 8 The precipitation (a) and HI -value (b) distribution in the Longchuan River Basin

依据隆升和侵蚀的相对强度进行 HI 划分: ① $HI > 0.43$ 、 $HI < 0.43$ 分别指示隆升、侵蚀阶段; ② $HI > 0.60$ 为隆升强烈期 (幼年期), 将壮年期细分为隆升缓慢期 ($0.51 < HI < 0.60$)、隆升衰减期 ($0.43 < HI < 0.51$) 和隆升停滞期 ($0.35 < HI < 0.43$), $HI < 0.35$ 为侵蚀下切期 (晚年期)。

从图 8b 可知, $HI < 0.43$ 区域主要分布在龙川江中上游和下游, 其中楚雄盆地、元谋盆地、南华县与牟定县之间的山间盆地的子流域 HI 值最低, 表明该区构造隆升已停止并向侵蚀—沉积阶段演化。 $HI > 0.43$ 区域主要位于断裂夹持带及南华—楚雄断裂中段两侧, 指示这 2 个区域还处于隆升阶段。其中, 夹持带 HI 值最高, 表明夹持带地质应力相对集中, 构造活动最强。夹持带西侧的石羊镇—大古岩断裂为倾向北东的逆断层, 上盘 HI 值 > 0.43 , 处于隆升阶段, 下盘 $HI < 0.43$, 处于侵蚀阶段, 说明两侧活动强度不同, 而夹持带东侧的元谋—绿汁江断裂带的 HI 值 (图 8b) 和滑动速率由南向北减弱 (卢海峰等, 2008, 2021), 指示断裂活动强度具有分段性。综上可知, 在滇中隆起的构造背景下研究区构造隆升具有不均匀性, 其中上游、下游主体处于隆升停止阶段, 而中游受石羊镇—大古岩断裂和元谋—绿汁江断裂控制, 隆升还在继续, 且隆升强度为流域内最高。

5 结论

本文通过对龙川江流域地形起伏度、条带状剖面、 HI 值与 HC 曲线进行分析, 主要得到以下结论:

(1) 低起伏度分布于河谷区, 中起伏度分布于上游、中上游, 高、极高起伏度主要分布于中下游、下游断裂带周围。条带状剖面的高程曲线具有同步性, 地貌自南西向北东细分为中低山、丘陵、中高山、中高山。

(2) 子流域 HI 值为 $0.18 \sim 0.60$, 均值为 0.38 , 整体进入壮年期, 流域上游、下游 HC 曲线主要呈凹型, 中游 HC 曲线主要为 S 型。在抗侵蚀能力变化的区域岩性对地貌有影响, HI 值由大到小对应的抗侵蚀能力排序为: 低—中级变质岩 \approx 沉积岩 $>$ 第四系沉积物。

(3) 岩性、降水对 HI 值、地形起伏度的影响有限, 构造活动才是地貌演化的主控因素, 且 HI 值由大到小的分区排序为: 断裂夹持带 $>$ 断裂带 $>$ 非断裂带。

(4) HI 指数指示: 楚雄盆地、元谋盆地构造隆升停止向侵蚀—沉积阶段演化, 石羊镇—大古岩断裂活动强度具有上—下盘效应, 元谋—绿汁江断裂活动强度由北向南逐渐增加, 而在 2 条断裂之间的夹持地带, 隆升强度整体最高。

参考文献:

- 安晓文, 常祖峰, 陈宇军, 等. 2018. 云南第四纪活动断裂暨云南第四纪活动断裂分布图 [M]. 北京: 地震出版社.
- An X W, Chang Z F, Chen Y J, et al. 2018. Quaternary active fractures in Yunnan and distribution map of quaternary active fractures in Yunnan [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese).
- 常直杨, 王建, 白世彪, 等. 2015. 面积高程积分值计算方法的比较 [J]. 干旱区资源与环境, 29(3): 171–175.
- Chang Z Y, Wang J, Bai S B, et al. 2015. Comparison of hypsometric integral methods [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 29(3): 171–175. (in Chinese)
- 常祖峰, 常昊, 李鉴林, 等. 2015. 楚雄—南华断裂晚第四纪活动与 1680 年楚雄 6 $\frac{3}{4}$ 级地震 [J]. 中国地震, 31(3): 492–500.
- Chang Z F, Chang H, Li J L, et al. 2015. Late Quaternary activity of the Chuxiong—Nanhua fault and the 1680 Chuxiong M $6\frac{3}{4}$ earthquake [J]. Earthquake Research in China, 31(3): 492–500. (in Chinese)
- 陈庭根, 管志川. 2000. 钻井工程理论与技术 [M]. 东营: 石油大学出版社.
- Chen T G, Guan Z C. 2000. Theory and technology of drilling engineering [M]. Dongying: Petroleum University Press. (in Chinese)
- 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 [J]. 科学技术与工程, 21(36): 15372–15377.
- Chu Y B, Zhu L D, Yang W G, et al. 2021. Method of extracting hypsometric curve by ArcGIS and Excel [J]. Science Technology and Engineering, 21(36): 15372–15377. (in Chinese)
- 丁智强, 王平, 李玉辉. 2021. 基于面积—高程积分值的喀斯特地貌演化动力机制研究 [J]. 第四纪研究, 41(6): 1546–1557.
- Ding Z Q, Wang P, Li Y H. 2021. Dynamic mechanism of Karst geomorphology evolution based on hypsometric index [J]. Quaternary Sciences, 41(6): 1546–1557. (in Chinese)
- 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.
- 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)
- 洪艳, 赵银兵, 王运生, 等. 2019. 利用面积高程积分方法研究龙门山断裂带地貌隆升特征 [J]. 科学技术与工程, 19(30): 43–51.

- Hong Y, Zhao Y B, Wang Y S, *et al.* 2019. Study on the geomorphic uplift characteristics of the Longmenshan fault zone using hypso - metric integral method[J]. Science Technology and Engineering, 19(30): 43 - 51. (in Chinese)
- 李勇, 周荣军, 闫亮, 等. 2021. 龙门山构造地貌与表面过程[M]. 北京: 科学出版社.
- Li Y, Zhou R J, Yan L, *et al.* 2021. Tectonic geomorphology and surface processes in Longmen Mountains[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 李正晨, 王先彦, 于洋, 等. 2021. 岩性和侵蚀基准面对构造活跃区河流地貌演化的影响——以青藏高原东北缘老虎山和哈思山地区为例[J]. 中国科学: 地球科学, 51(6): 994 - 1008.
- Li Z C, Wang X Y, Yu Y, *et al.* 2021. The impacts of base level and lithology on fluvial geomorphic evolution at the tectonically active Lahu and Hasi Mountains, northeastern Tibetan Plateau[J]. Scientia Sinica Terrae, 51(6): 994 - 1008. (in Chinese)
- 刘昌伟, 常祖峰, 庄儒新, 等. 2021. 滇中汤郎—易门断裂构造活动的地貌特征[J]. 震灾防御技术, 16(4): 641 - 650.
- Liu C W, Chang Z F, Zhuang R X, *et al.* 2021. Geomorphic characteristics of tectonic activity of Tanglang - Yimen fault in Central Yunnan[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 16(4): 641 - 650. (in Chinese)
- 刘婧楠, 常玉巧, 田鹏, 等. 2023. 德钦—维西地区地貌特征及其对构造活动的响应[J]. 地震研究, 46(3): 315 - 322.
- Liu J N, Chang Y Q, Tian P, *et al.* 2023. Geomorphic characteristics of drainage basins in deqin - weixi area and their response to tectonic activities[J]. Journal of Seismological Research, 46(3): 315 - 322. (in Chinese)
- 刘楠漪, 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.
- 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)
- 卢海峰, 何仲太, 赵俊香, 等. 2008. 元谋断裂晚第四纪活动性定量分析[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 33(6): 852 - 860.
- Lu H F, He Z T, Zhao J X, *et al.* 2008. Quantitative analysis on activity of the Yuanmou Fault in Late Quaternary[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 33(6): 852 - 860. (in Chinese)
- 卢海峰. 2021. 元谋断裂带晚第四纪活动性与地震地质灾害的关系[J]. 大地构造与成矿学, 45(3): 478 - 491.
- Lu H F. 2021. Relationship between activity of the Yuanmou fault and earthquake-induced geological disaster during the Late Quaternary[J]. Geotectonica et Metallogenia, 45(3): 478 - 491. (in Chinese)
- 王超. 2019. 浙东四明山甬江流域地貌计量指标与构造地貌研究[D]. 上海: 华东师范大学.
- Wang C. 2019. Quantitative geomorphic indices characteristics and tectonics of the Yong River basin in Siming Mountain, Eastern Zhejiang[D]. Shanghai: East China Normal University. (in Chinese)
- 王躲, 尹功明, 韩非, 等. 2017. 格仁错断裂带流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 地震地质, 39(2): 304 - 322.
- Wang D, Yin G M, Han F, *et al.* 2017. Geomorphology of the Gyaring Co fault zonal drainage system and its structural implications[J]. Seismology and Geology, 39(2): 304 - 322. (in Chinese)
- 王学良, 席武俊, 盖艾鸿. 2011. 基于 DEM 的云南楚雄高原地貌特征研究[J]. 甘肃农业大学学报, 46(6): 109 - 114.
- Wang X L, Xi W J, Gai A H. 2011. Study on topographic features of Chuxiong plateau based on DEM[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 46(6): 109 - 114. (in Chinese)
- 许志敏, 臧庆春. 2011. 龙川江流域年径流特性的地区综合法分析[J]. 人民长江, 42(10): 73 - 76.
- Xu Z M, Zang Q C. 2011. Analysis of annual run off characteristics of Longchuan river shedding using regional synthesis[J]. Yangtze River, 42(10): 73 - 76. (in Chinese)
- 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.
- Zhang W, Tang Q Y, Liu L, *et al.* 2020. Geomorphologic analysis of the Yuqu River drainage basin in Tenasserim based on hypsometric integral value[J]. Scientia Geographica Sinica, 40(8): 1394 - 1402. (in Chinese)
- Grohmann C H. 2004. Morphometric analysis in geographic information systems: Applications of free software GRASS and R[J]. Computers & Geosciences, 30(9): 1055 - 1067.
- Montgomery D R. 1994. Valley incision and the uplift of mountain peaks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99(B7): 13913.
- Pike R J, Wilson S E. 1971. Elevation - relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area - altitude analysis[J]. Geological Society of America Bulletin, 82(4): 1079 - 1084.
- Strahler A H. 1952. Hypsometric (area - altitude) analysis of erosional topography[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 63(11): 1117 - 1142.

Geomorphologic Features of the Longchuan River Basin in Central Yunnan and Their Indication of Tectonic Activity

LI Sheng¹, CHANG Yuqiao¹, QING Yuanhua², YANG Shuang², LIU Jingnan¹, WEN Wen¹, LUO Jiazheng¹

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. History & Geography and Tourism College, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract

Based on the 30-meter resolution ASTERDEM data, the hydrological analysis tool of ArcGIS software was used to extract the water system and sub-basins of the Longchuan River Basin, to obtain the basin elevations, strip profiles, 69 sub-basin undulations, hypso-metric integral values (HI), and 26 hypso-metric integral curves (HC), and to synthesize the stratigraphy, rainfall, and geologic structure. The results show that: ①The upper and middle reaches of the Longchuan River Basin have medium level of undulation; the lower reaches have high and very high level of undulation; the river valley is characterized by low level of undulation. ②In the Longchuan River Basin, the strip topography and the undulation profile has synchronous segmentation from southwest to northeast, the Basin can be subdivided into hills, middle – low mountains, middle – high mountains, and high mountains. ③ HI values in the Longchuan River Basin range between 0.18 and 0.60, with a mean of 0.38, and the whole Basin is in geologically its mature stage. The HC curve in the upper reaches is mainly concave, so as in the lower reaches; the HC curve in the middle reaches is mainly S – shaped. ④According to HI values from the largest to the smallest in the River Basin, low – intermediate metamorphic rock's resistance to erosion is approximately equal to sedimentary rock's resistance to erosion, and stronger than the Quaternary sediments' resistance to erosion. Lithology and precipitation have less influence on HI values and the undulation degree in the Basin. ⑤Tectonic activity is the main controlling factor of geomorphic evolution in the Longchuan River Basin. HI values in the fracture-clamping zone is larger than HI values in the fracture zone, and HI values in the fracture zone is larger than the ones in the non – fracture zone. ⑥The HI index indicates that the Chuxiong Basin and the Yuanmou Basin have evolved to the erosion – sedimentation stage. The intensity of the Shiyangzhen – Daguyan Fault activity has different effect on the hanging wall and the footwall. The Yuanmou – Luzhijiang Fault acted intensively from north to south, and the uplift in the clamped zone is the highest in overall.

Keywords: the Longchuan River Basin; hypso – metric integral; strip profile; tectonic activity; geomorphological evolution