

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, doi: 10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2023. 0033.

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, doi: 10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2023. 0033.

德钦—维西地区地貌特征及其对构造活动的响应*

刘婧楠, 常玉巧[✉], 田鹏, 李圣

(云南省地震局, 云南昆明 650224)

摘要: 基于 ASTER GDEM 30 m 数据, 使用 ArcGIS 空间分析模块提取了德钦—维西地区流域盆地范围, 得到了德钦—维西地区亚流域盆地及主要次级流域盆地面积—高程积分(HI)值, 获得 990 个亚流域盆地 HI 等值分区及 12 个主要次级流域盆地 HI 曲线。结果表明: 阿东河、东水河和三岔河 3 个次级流域盆地 HI 曲线呈微凸型, 处于地貌演化的幼年期, 其它 9 个次级流域盆地 HI 曲线呈 S 型, 处于壮年期。研究区 HI 值表现为北高南低趋势, HI 低值条带的展布方向与研究区活动构造的延伸方向基本一致; HI 高值主要分布于断裂带两侧及构造交会区域。研究区地貌演化的主控因素是构造活动, 岩性和气候影响不明显, 地貌对区内构造活动具有很好的响应关系。

关键词: 德钦—维西地区; 流域盆地; 面积—高程积分; 地貌演化; 构造活动

中图分类号: P315.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2023)03–0315–08

doi: 10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2023. 0033

0 引言

德钦—维西地区位于滇西北川滇菱形块体西南边界附近, 地处三江并流地带, 区内分布着维西—乔后断裂、金沙江断裂及德钦—中甸—大具断裂等多条活动断裂, 这些活动断裂也是川滇菱形块体西部边界的组成部分(常祖峰等, 2016a)。遥感影像上, 区内活动断裂线性特征显著; 野外地质地貌调查揭示, 区域断裂晚第四纪活动强烈, 如德钦—中甸—大具断裂和维西—乔后断裂等均为区域主要发震断裂(安晓文等, 2018)。该区历史上曾发生过 2 次 7 级以上强震, 中强地震时有发生(常祖峰等, 2014)。近年来, 学者们对德钦—维西地区开展了许多研究(王洋等, 2022; 常祖峰等, 2022; 万永魁等, 2021; 常玉巧, 2021; 吴

富峣等, 2019a, b; 刘自凤等, 2019; 倪喆等, 2017; 杨捷等, 2015), 但目前关于该地区流域地貌方面的研究仍然不多。

德钦—维西地区地形复杂、植被茂密, 给区域构造活动性等研究带来了许多困难。在构造活跃区, 河流的发育过程往往受构造活动的影响, 且携带了许多构造活动的信息, 因此, 水系地貌特征对构造活动具有很强的指示意义(卢本添等, 2022; 陈露等, 2020; 李环宇等, 2020; 高效东等, 2019)。区内水系极其发育, 澜沧江和金沙江两大水系贯穿南北, 其支流纵横交错, 水系的演化也记录着区域断裂的活动信息, 为研究区域断裂的构造与地貌的响应关系提供了很好的素材, 是研究地貌对构造活动响应的理想场所。

本文基于 ArcGIS 软件对 ASTER GDEM-V2 数据进行预处理, 提取德钦—维西地区水系网络及

* 收稿日期: 2022–10–08.

基金项目: 云南省地震局科技专项(2019ZX03); 云南省重点研发计划项目(202203AC100003)。

第一作者简介: 刘婧楠(1995–), 助理工程师, 主要从事活动构造、构造地貌及地震次生灾害研究。

E-mail: 1291027734@qq.com.

✉ 通讯作者简介: 常玉巧(1988–), 工程师, 主要从事活动构造、古地震及构造地貌研究。

E-mail: 349797655@qq.com.

亚流域盆地,在此基础上,分别获得了澜沧江和金沙江两大流域4~7级共990个亚流域盆地的面积-高程积分值及12个主要次级流域盆地的面积-高程积分曲线,并探讨了德钦-维西地区水系发育对构造活动的响应。研究成果可为区内德钦、维西、香格里拉、宁蒗、兰坪等县地震灾害风险普查1:5万活动断层分布图及其报告的编写、活动断层数据库的建立等地震灾害风险普查工作提供重要基础资料。

1 区域地震构造背景

德钦-维西地区地处青藏高原东南缘横断山脉中南段,区域构造环境复杂,盆地、山地、湖泊、河流广泛分布,加之强烈的外动力剥蚀作用,该区基岩裸露,构造地貌复杂。沿东西向分布的“盆-岭构造”反映了地貌对该区域构造活动的响应。区内多条断裂带纵横交错,为应力集中区,受川滇菱形块体SE向挤出的影响,德钦-中甸-大具断裂、维西-乔后断裂表现为右旋走滑特征,兼具拉张分量的活动性质(图1)。澜沧江断裂带和金沙江断裂带呈近NS向展布,澜沧江断裂带中段为韧性剪切带,但剪应力较小,断裂带活动性低。GPS速度场显示金沙江断裂带中、南段均表现为右旋走滑,垂向运动不明显(徐晓雪等,2020;王银龙,2019),其南段活动性较低(康四林,2014;常玉巧等,2019;夏金梧,朱萌,2020;常昊等,2021)。德钦-中甸-大具断裂活动性具有明显的分段特征,其中奔子栏以南为全新世以来活动断裂(常祖峰等,2014;吴富晓等,2019b)。2013年以来维西-乔后断裂曾多次发生5.0级以上的地震,受到广泛关注,但前人的研究主要集中在南段巍山盆地一带,北段研究程度较低(汤沛,2013;常祖峰等,2014,2016a,b,2021;贺赤诚等,2015;Chang *et al.*, 2018)。

遥感影像显示,区内主要分布有两大水系:西侧澜沧江水系呈近SN向贯穿研究区;东侧金沙江水系呈NNW-SSE向流经研究区,并被德钦-中甸-大具断裂所截切,断裂以北多条小型河流并列展布,断裂以南多条河流汇为一支,南北两支之间沿断裂出现明显偏转(黄小巾等,2014)。

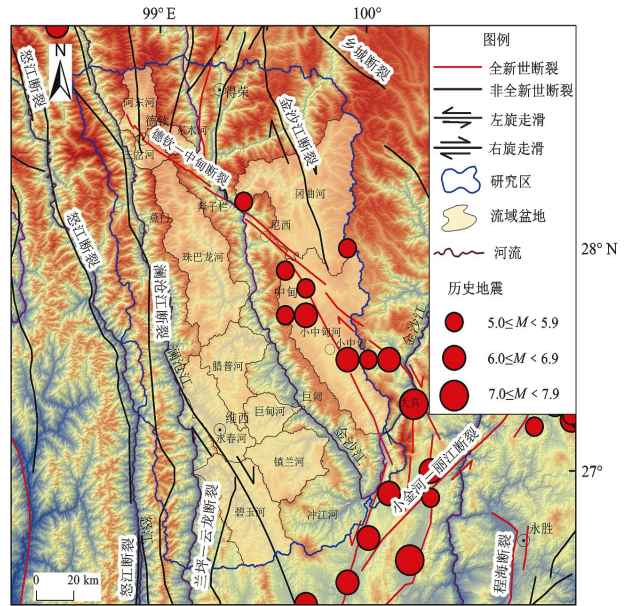


图1 德钦-维西地区构造地貌图

Fig. 1 Tectonic and geomorphological map of Deqin - Weixi area

从水系分布来看,澜沧江流域水系网络较金沙江流域简单,支流流域面积较小;金沙江流域水系网络较为复杂,支流流域面积普遍较大。研究区构造地貌组合主体为山地-盆地-断层,具有张性构造特点。区内受断裂控制的第四纪盆地包括尼西、中甸和小中甸等盆地(夏金梧,朱萌,2020),湖泊、沼泽多沿断裂呈串珠状分布。

2 理论方法与数据处理

2.1 面积-高程积分

Davis (1899) 首先提出了地貌侵蚀循环学说,认为地貌演化是一种构造、应力和时间的函数,并根据这3个变量的组合变化,把地形发育划分为幼年期、壮年期和老年期3个阶段。Strahler (1952) 提出了面积-高程积分(Hypso-metric Integral, 简称HI)的概念,用以描述流域地貌的演化特征,为Davis (1899)的地貌演化阶段模式提供了定量指标(梁欧博等,2018)。面积-高程积分是流域盆地相对面积比与相对高程比定义函数的积分,反映地表被侵蚀后的三维体积残余率和地貌的发育程度,能够定量反映地貌演化与构造抬升之间的关系(梁欧博等,2018;赵国华,2014)。Strahler (1952) 提出的理论中,面积-高

程积分 (HI) 包括 HI 积分曲线和 HI 积分值的计算。

以流域盆地相对面积比 (a/A) 为 X 轴、相对高度比 (h/H) 为 Y 轴, 绘制函数 $y = f(x)$ 曲线, 即为面积-高程积分曲线, 其积分为曲线包围的面积, 即为面积-高程积分值, 计算公式为:

$$HI = \int_0^1 \left(\frac{h}{H} \right) d \left(\frac{a}{A} \right) \quad (1)$$

式中: A 表示流域面积; a 表示该流域内某条等高线以上的面积; h 表示该等高线与流域内最低点的高差; H 表示流域内最大相对高差 (李环宇等, 2020; 王躲, 2018; 章桂芳等, 2018)。

Pike 和 Wilson (1971) 推导估算 HI 值的简易方法, 计算公式为:

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

式中: H_{mean} 、 H_{max} 、 H_{min} 分别表示流域盆地的平均高程、最大高程和最小高程 (李环宇等, 2020; 洪艳等, 2019; 梁欧博等, 2018; 王躲, 2018; 梁明剑等, 2014)。

Strahler (1952) 通过 HI 值将 Davis 地貌侵蚀循环发育模式量化分为 3 个阶段: 当 $HI > 0.60$ 时, 面积-高程积分曲线呈凸型, 地貌演化阶段处于幼年期, 侵蚀程度低, 构造作用为主时表现

为强烈隆升阶段; 当 $0.4 < HI < 0.60$ 时, 面积-高程积分曲线呈 S 型, 地貌演化阶段处于壮年期, 构造作用为主时表现为缓慢隆升阶段; 当 $HI < 0.4$ 时, 面积-高程积分曲线呈凹型, 地貌演化阶段进入老年期, 侵蚀程度高, 构造作用为主时表现为隆升停滞阶段, 此时流域趋于稳定 (张威等, 2020; 洪艳等, 2019; 章桂芳等, 2018)。

2.2 数据处理

本文使用 ArcGIS 软件对 ASTER GDEM 30 m 数据进行处理, 处理流程如下: ①使用数据管理工具, 对研究区 DEM 数据进行栅格镶嵌、投影和空间分析工具之掩膜提取等处理, 对 ASTER GDEM 数据进行拼接、投影变换和裁剪, 获取研究区空间分辨率为 1 s (约 30 m) 的 DEM 数据。②使用水文分析模块, 对预处理得到的 DEM 数据依次进行填洼-流向计算-流量计算-河网提取-水系分级处理, 最终得到研究区水系网络。其中, 水系分级采用 Strahler (1952) 分级方法, 无支流流入的河流为一级河流, 同级别的两条河流交汇形成的河流为二级河流, 以此类推, 不同级别的河流交汇形成的河流级别为交汇河流较高者的等级。③利用盆地工具, 基于研究区水系网络提取相应的亚流域盆地。德钦—维西地区提取出 4~7 级亚流域盆地共计 990 个 (图 2a)。④基于亚流域盆地和研究区 DEM 数据, 利用 ArcGIS 的空间分析统计

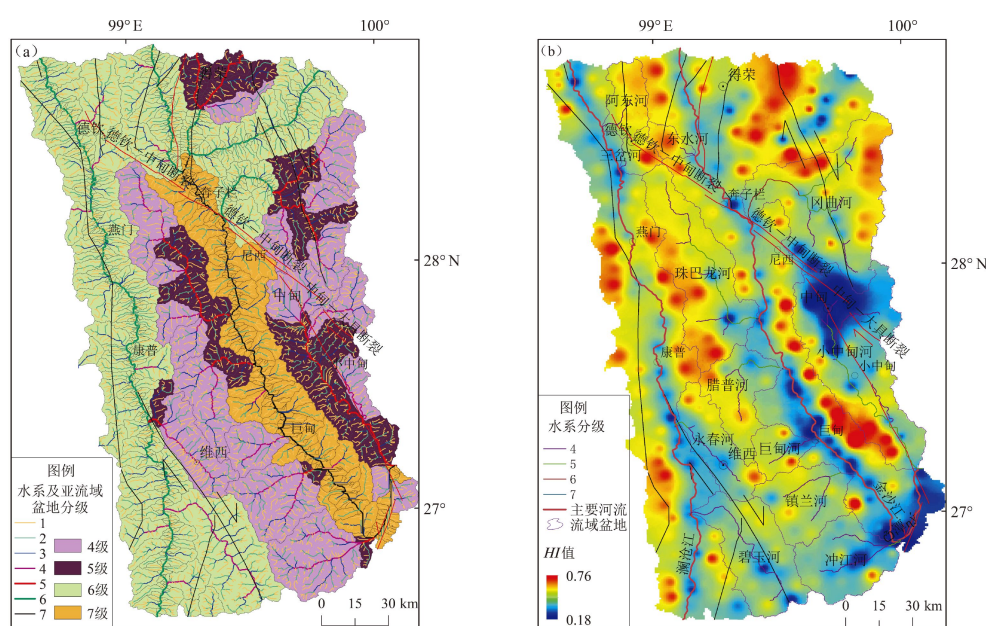


图2 研究区亚流域盆地分布 (a) 及 HI 等值分区 (b)

Fig. 2 Distribution of sub-drainage areas (a) and hypsometric integrals (b) in the study area

工具 zonal 统计分析亚流域盆地的平均高程 H_{mean} 、最大高程 H_{max} 和最小高程 H_{min} ，然后根据式 (2)，分别计算亚流域的面积-高程积分值 (HI 值)，并对亚流域盆地 HI 值进行空间插值，得到 HI 等值分区图 (图 2b)。⑤根据 Strahler (1952) 的理论方法，分别获取研究区 12 个主要河流的次级流域盆地，在 ArcGIS 工具中加载由旧金山州立大学 Jerry Davis 制作的 Hypsometry Tool^①，提取次级流域盆地的面积比和高程比 2 个参数，然后利用 Excel 分别绘制次级流域盆地 HI 曲线。

3 研究结果

3.1 亚流域盆地 HI 值

由图 2b 可见，德钦—维西地区 HI 值为 0.18 ~ 0.76，变化范围较大，说明其地貌演化具有一定的复杂性。

整体来看， HI 值与海拔大体呈正相关关系，其分布与地形起伏基本一致。研究区地形起伏北高南低， HI 值也表现为北高南低的趋势。 HI 低值主要沿河谷和盆地呈带状分布，如中甸盆地整体表现为大范围的 HI 低值；金沙江、澜沧江、珠巴龙河、冈曲河和腊普河河谷地带 HI 值亦较低。 HI 高值主要分布在海拔相对较高且地形起伏较大的区域，多沿分水岭呈条带状分布，如研究区北部金沙江两侧的雪山山脉沿线，包括研究区北部德钦以北察里雪山—甲午雪山—压赛雪山—人之雪山一线、得荣以东县城东侧至巴拉格宗雪山一带、维西—康普—燕门一线东侧金沙江与澜沧江的分水岭白马雪山—白芒雪山一带 HI 高值条带及中甸盆地以西的 HI 高值条带。

从 HI 值分布与活动断裂的位置关系来看， HI 低值条带的展布方向与研究区活动构造的延伸方向基本一致，如德钦—中甸—大具断裂奔子栏以南、金沙江断裂得荣—奔子栏段、维西—乔后断裂沿线。 HI 高值主要分布于断裂带两侧及构造交汇区域，如金沙江断裂与德钦—中甸—大具断裂、兰坪—云龙断裂与维西—乔后断裂交汇区域。

3.2 次级流域盆地 HI 曲线

本文提取德钦—维西地区 12 个主要次级流域盆地的 HI 曲线 (图 3、4)，包括澜沧江流域 4

个支流次级流域盆地 (阿东河、三岔河、碧玉河和永春河流域盆地) 及金沙江流域 8 个支流次级流域盆地 (东水河、珠巴龙河、腊普河、巨甸河、镇兰河、冲江河、冈曲河和小中甸河流域盆地)。

从 12 个次级流域盆地的 HI 曲线 (图 4) 形态来看，大致可以分为微凸型和 S 型。其中阿东河、东水河和三岔河次级流域盆地 HI 曲线呈微凸型， $HI > 0.6$ ，盆地发育处于幼年期 (图 4b)，其它流域盆地为 S 型。根据 HI 曲线的局部变化，S 型又可细分为以下 3 个亚类 (图 3)：①亚 S1 型：碧玉河、冈曲河和小中甸河次级流域盆地 HI 曲线呈现上凹下凸形态 (图 4c)，但与标准的 S 型相比，形态上中间部位过渡不够平滑，所以称之为亚 S1 型；②标准 S 型：巨甸河、腊普河和珠巴龙河次级流域盆地 HI 曲线形态为标准的 S 型曲线 (图 4c)；③亚 S2 型：冲江河、永春河和镇兰河次级流域盆地 HI 曲线形态上类似 S 型，但局部又存在较大的差别，这 3 个次级流域盆地 HI 曲线中间部分有向下凹的趋势 (图 4c)，所以称之为亚 S2 型。

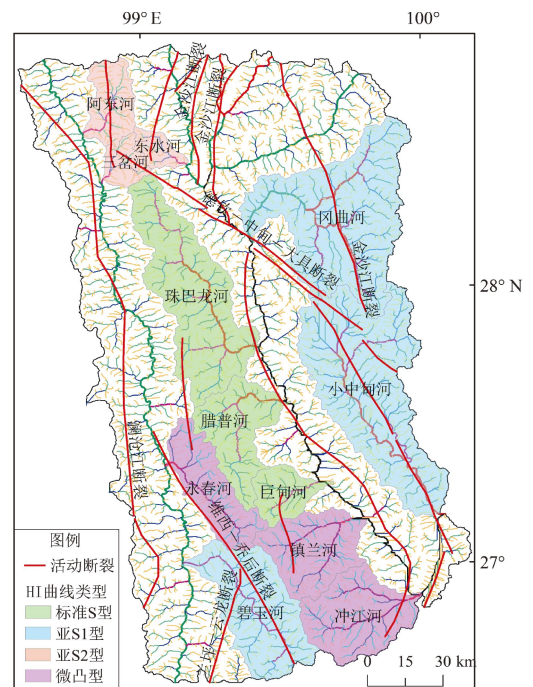


图 3 次级流域盆地 HI 曲线分类与分布

Fig. 3 Types and distribution of the hypsometric integral curves of the secondary drainage areas

① <https://gis.sfsu.edu/tools>.

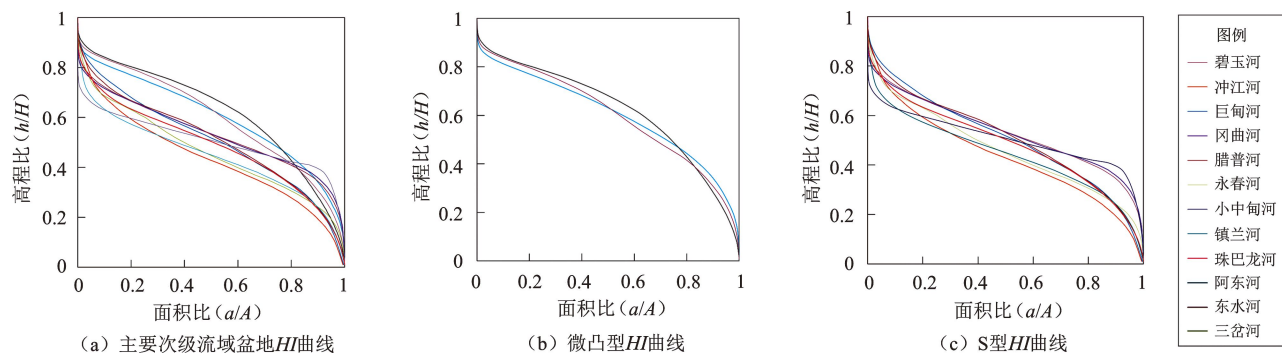


图4 12个次级流域盆地HI曲线

Fig. 4 The hypsometric integral curves of each river in the secondary watershed

从图3可看出,微凸型的阿东河、东水河和三岔河3个次级流域盆地均为流域面积较小的流域盆地,均位于德钦—中甸断裂与金沙江断裂交汇处,即德钦县附近;亚S1型的碧玉河、冈曲河和小中甸河次级流域盆地分别被维西—乔后断裂、金沙江断裂和中甸—龙蟠—乔后断裂近平行于河谷穿切;标准S型的巨甸河、腊普河和珠巴龙河次级流域盆地均未被区域断裂所截切;亚S2型的冲江河、永春河和镇兰河次级流域盆地局部被区域断裂所截切。

4 讨论

构造地貌是构造作用导致的地壳隆升和地表过程

相互竞争的结果。地貌形态可能记录了不同尺度构造、气候和侵蚀过程变化的信息(张洁等,2016)。流域盆地的HI值对构造活动、岩性差异和气候变化等因素的反应比较敏感(邵崇建等,2015)。

4.1 降雨量

东英吉利大学气候研究单位(CRU)基于英国国家大气科学中心(NVAS)资助的合作中心NERC提供的高分辨率网格($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$),制作了高分辨率气候逐月变化网格数据。本文选用分辨率为 0.5° 的CRU TS 4.05版降雨量数据,对研究区长达120年(1901—2020年)的降雨量数据进行空间插值,生成月均降雨量等值分布图(图5a)。

从图5a可以看出,研究区月均降雨量总体表

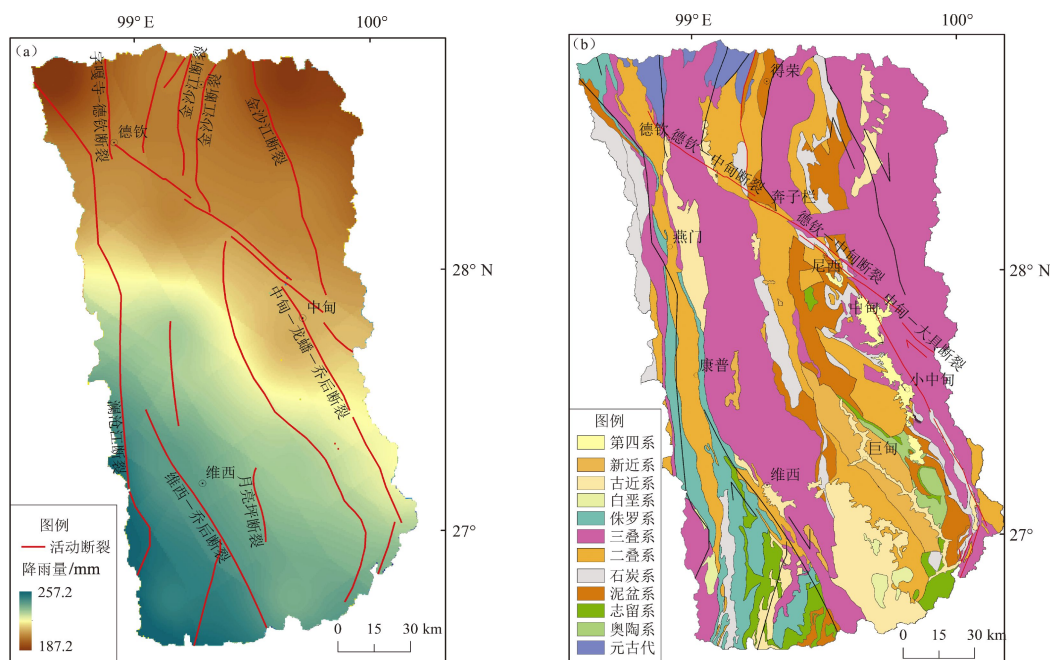


图5 研究区年降雨量等值(a)及地层(b)分布图

Fig. 5 Annual precipitation distribution (a) and stratigraphic distribution (b) in the study area

现为由 SW 向 NE 递减的规律,降雨量等值分布图呈 NW 向近似条带状分布。但降水量的分布与 HI 值的分区并没有明显的相关关系。由此可见,气候不是研究区地貌的主控因素。

4.2 岩性

岩性也会通过剥蚀速率和河流侵蚀影响流域地貌演化(卢本添等,2022;李环宇等,2020;梁欧博等,2018)。抗侵蚀强的岩石可以阻止分水岭的迁移,而抗侵蚀弱的岩石则容易被河流下切和侧向侵蚀,形成准平原面(于洋等,2022)。研究区位于德钦—维西地层分区,各时代地层分布较齐全,自元古界至第四系均有出露(图 5b),但广泛出露的为中生代陆相湖泊和河流相泥岩、泥质砂岩地层,部分地区有板岩、片岩、千枚岩等变质岩,局部见有煤系地层、石膏和灰岩(宋章等,2019)。

研究区北部,即德钦—中甸—大具断裂以北及其附近区域,大部分出露三叠系岩层,岩性以较坚硬的中厚层石英砂岩夹板岩、厚层碳酸岩或碳酸盐岩夹板岩组为主;西北部零星分布有三叠纪和第三纪的火山岩;研究区中部及以南地区,大范围分布有坚硬的中厚层—厚层砂岩或砂岩夹泥岩岩组,东南部夹有近南北呈条状分布的第四系黏土岩层和狭长分布的砂岩、泥岩夹灰岩岩组,少量零星分布有炭质页岩(王银龙,2019)。

总体来说,德钦—维西地区岩层质地较硬,整体的岩石抗侵蚀能力差别不大。因此,研究区的岩性并不是影响地貌演化的主控因素。

4.3 区域构造

前述讨论表明,降水和岩性均不是德钦—维西地区地貌演化的主控因素。因此,笔者认为研究区地貌演化主要受区域断裂差异抬升运动的控制,即德钦—维西地区流域盆地 HI 值与该区构造活动及其导致的隆升、沉降等地表过程密切相关。

新生代以来,受板块碰撞引起的隆升作用影响,滇西北地区发生了差异性构造隆升,在整体隆升的同时,北部较南部隆升更剧烈,幅度也更大(李峰,薛传东,1999)。研究区内整体 HI 值表现为北高南低,北部德钦以北、得荣以东、维西—康普—燕门一线东侧为 HI 高值条带,这可能就是这种大尺度抬升作用的直接表现。阿东河、三岔河、东水河的流域盆地曲线的上凸形态,可能也是对区域抬升作用的响应。

河流的冲刷下切作用形成了沿河流展布的 HI 低值区,并在河流的交汇口出现 HI 低值,如阿东河、三岔河与澜沧江的交汇处,北部金沙江支流与干流的交汇处,珠巴龙河、腊普河、镇兰河与金沙江的交汇处等。河流的交汇分布形成了山脊—河谷交错排列的地形结构。南部水系丰富,河流流域盆地的 HI 曲线图表现为 S 型,说明这些区域的地貌正处于侵蚀演化阶段。

德钦—中甸断裂以奔子栏为界分为两段(吴富饶等,2019b),北西段德钦—奔子栏段为 HI 高值区,南东段奔子栏—中甸段沿线 HI 值较低,说明德钦—中甸断裂以奔子栏为界,北西段与南东段的活动性存在差异,这与吴富饶等(2019b)的研究结果一致。

阿东河、东水河和三岔河 3 个处于幼年期的次级流域盆地均位于金沙江断裂与德钦—中甸断裂的交汇区域,说明该区地貌演化正处于构造隆升期,构造活动较强烈;其南侧为珠巴龙河流域,断裂带附近的 HI 高值较南侧偏低,这与整体北高南低的地势不符,可能也是区域构造活动的结果。

小中甸以南、中甸—龙蟠—乔后断裂带与金沙江断裂夹持的区域存在一个突出的 HI 高值异常,而此处地势较研究区北部偏低。该异常揭示,受中甸—龙蟠—乔后断裂带与金沙江断裂活动的共同影响,该区构造活动强烈,地形地貌处于持续抬升状态,抬升速率大于剥蚀速率。同理,研究区南部的兰坪—云龙断裂与维西—乔后断裂北段交汇处具有较周围更高的 HI 值,这也是兰坪—云龙断裂与维西—乔后断裂北段活动的直接表现。

主要次级流域盆地中亚 S1 型和亚 S2 型 HI 曲线均属于被区域断裂截切的流域盆地的曲线,这也是研究区地貌演化受区域构造控制的直接证据。维西—乔后断裂、金沙江断裂和中甸—龙蟠—乔后断裂分别近平行穿切碧玉河、冈曲河和小中甸河 3 个次级流域盆地河谷地带,断裂带的活动直接影响了盆地的发育与演化,断裂带两侧河道差异抬升与沉降造成流域演化分异,相对抬升一侧处于幼年期, HI 曲线凸起;相对下降一侧处于老年期, HI 曲线下凹,导致次级流域盆地 HI 曲线均表现为上凹下凸形态。亚 S2 型的冲江河、永春河和镇兰河次级流域盆地局部被区域断裂所截切,效果与亚 S1 型一致。

5 结论

本文通过提取德钦—维西地区亚流域盆地面积—高程积分 HI 值和主要次级流域盆地 HI 曲线, 探讨了该区地貌对区内构造活动的响应, 主要得到以下结论:

(1) 研究区 HI 值整体呈北高南低趋势, 与海拔大体呈正相关关系。 HI 低值主要沿河谷、盆地和活动构造的延伸方向呈带状分布, HI 高值主要沿分水岭和断裂带交汇区域分布。

(2) 气候和岩性均不是控制研究区地貌演化的主要因素, 区域构造的活动才是研究区地貌演化的主控因素。

(3) 研究区 12 个次级流域盆地的 HI 曲线大致可以分出微凸型和 S 型两大类型。阿东河、东水河和三岔河盆地的 HI 曲线呈微凸型, 盆地发育处于幼年期。S 型可细分为 3 个亚类亚: 碧玉河、冈曲河和小中甸河盆地的 HI 曲线呈现上凹下凸形态亚 S1 型; 巨甸河、腊普河和珠巴龙河盆地的 HI 曲线为标准的 S 型曲线, 冲江河、永春河和镇兰河盆地的 HI 曲线为亚 S2 型。

(4) 亚流域盆地 HI 等值分区和次级流域盆地 HI 曲线形态均明显受区域断裂的影响和控制, 研究区地貌演化很好地响应了区域构造的活动。

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.
- 常昊, 常祖峰, 刘昌伟. 2021. 金沙江断裂带活动与大型滑坡群的关系研究: 以金沙江拿荣—绒学段为例[J]. 地震地质, 43(6): 1435–1458.
- 常玉巧, 陈立春, 张琦. 2019. 金沙江断裂带构造地貌与断裂活动特征研究[J]. 国际地震动态, (8): 2.
- 常玉巧. 2021. 德钦—维西地区流域盆地面积—高程积分特征及其构造意义[J]. 地震地磁观测与研究, 257(S1): 142–144.
- 常祖峰, 常昊, 李鉴林, 等. 2016b. 维西—乔后断裂南段正断层活动特征[J]. 地震研究, 39(4): 579–586.
- 常祖峰, 常昊, 李鉴林, 等. 2021. 维西—乔后断裂全新世活动与古地震[J]. 地震地质, 43(4): 881–898.
- 常祖峰, 常昊, 臧阳, 等. 2016a. 维西—乔后断裂新活动特征及其与红河断裂的关系[J]. 地质力学学报, 22(3): 517–530.
- 常祖峰, 李鉴林, 常昊, 等. 2022. 维西—乔后断裂通甸—马登盆地晚第四纪活动特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 313(5): 875–887.
- 常祖峰, 张艳凤, 周青云, 等. 2014. 2013 年洱源 $M_{\text{s}}5.5$ 地震烈度分布及震区活动构造背景研究[J]. 中国地震, 30(4): 560–570.
- 陈露, 何军, 冉清红. 2020. 喜马拉雅中段吉隆流域构造地貌数字特征[J]. 山地学报, 38(5): 787–797.
- 高效东, 谢虹, 袁道阳, 等. 2019. 祁连山东段石羊河流域河流纵剖面及其构造意义[J]. 地震地质, 41(2): 320–340.
- 贺赤诚, 李献瑞, 王杰, 等. 2015. 云南迪庆 5.9 级地震构造背景、深部流变结构与发震机制[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 40(10): 1653–1666.
- 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.
- 黄小巾, 吴中海, 李家存, 等. 2014. 滇西北裂陷带的构造地貌特征与第四纪构造活动性[J]. 地质通报, 33(4): 578–593.
- 康四林. 2014. 红河断裂与金沙江断裂的 GPS 监测研究[J]. 山西科技, 29(4): 56–59.
- 李峰, 薛传东. 1999. 滇西北新生代以来地球动力学背景及其环境影响[J]. 大地构造与成矿学, 23(2): 16–23.
- 李环宇, 丁锐, 张世民. 2020. 丽江—小金河断裂南、中段地貌特征及构造指示意义[J]. 震灾防御技术, 15(2): 380–391.
- 梁明剑, 周荣军, 闫亮, 等. 2014. 青海达日断裂中段构造活动与地貌发育的响应关系探讨[J]. 地震地质, 36(1): 28–38.
- 梁欧博, 任俊杰, 吕延武. 2018. 涪江流域河流地貌特征对虎牙断裂带活动性的响应[J]. 地震地质, 40(1): 42–56.
- 刘自凤, 龙锋, 彭关灵, 等. 2019. 滇西北地区强震危险性分析[J]. 地震研究, 42(3): 330–337.
- 卢本添, 李志刚, 梁浩, 等. 2022. 中条山北麓河流地貌特征及其对断裂构造演化的响应[J]. 地震地质, 44(4): 961–975.
- 倪喆, 陈斌, 崔兴平, 等. 2017. 地震孕育过程中地下磁化率结构的变化分析[J]. 地震研究, 40(3): 382–387.
- 邵崇建, 李勇, 赵国华, 等. 2015. 基于面积—高程积分对龙门山南段山前河流的构造地貌研究[J]. 现代地质, 29(4): 727–737.
- 宋章, 朱颖, 魏永幸, 等. 2019. 滇藏铁路三江并流区工程地质减灾选线研究[J]. 铁道工程学报, 36(2): 1–6.
- 汤沛. 2013. 维西—乔后断裂巍山盆地活动性研究[D]. 昆明: 云南大学.
- 万永魁, 沈小七, 刘瑞丰, 等. 2021. 川滇地区活动块体边界断裂现今运动和应力分布[J]. 地震地质, 43(6): 1614–1637.
- 王躲. 2018. 青藏高原中部格仁错断裂带构造地貌研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 王洋, 王岳军, 张培震, 等. 2022. 青藏高原东南缘断裂体系新生代构造演化[J]. 中国科学: 地球科学, 52(5): 777–802.
- 王银龙. 2019. 滇西北德钦—中甸断裂带活动特征及断错效应研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- 吴富晓, 蒋良文, 张广泽, 等. 2019a. 德钦—中甸断裂奔子栏段精定位及铁路构造工程效应[J]. 高速铁路技术, 10(3): 41–45.
- 吴富晓, 蒋良文, 张广泽, 等. 2019b. 青藏高原东南缘德钦—中甸断裂中北段活动性及地震危险性评估[J]. 地质学报, 93(10): 2656–2665.
- 夏金梧, 朱萌. 2020. 金沙江主断裂带中段构造特征与活动性研究[J]. 人民长江, 51(5): 131–137.
- 徐晓雪, 季灵运, 蒋锋云, 等. 2020. 基于 GPS 和小震研究金沙江断裂带现今活动特征[J]. 大地测量与地球动力学, 40(10): 1062–1069.

- 杨捷,曾佐勋,李茂华,等. 2015. 2013 年云南香格里拉、德钦—四川得荣交界 5.9 级地震灾害及发震构造[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(10):1701–1709.
- 于洋,王先彦,李正晨,等. 2022. 晚第四纪长江源区水系演化对断裂活动和气候变化的响应[J]. 第四纪研究, 42(3):881–899.
- 张洁,王少军,梁明剑. 2016. 福建沿海地区流域盆地的面积—高程积分特征及其新构造指示意义[J]. 地震工程学报, 38(4):638–646.
- 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.
- 章桂芳,陈凯伦,张浩然,等. 2018. 基于 DEM 的丹霞地貌演化阶段划分[J]. 中山大学学报(自然科学版), 256(2):12–21.
- 赵国华. 2014. 川滇块体内理塘断裂活动性及其构造地貌研究[D]. 成都:成都理工大学.
- Chang Z F, Zang Y, Chang H. 2018. New discovery of Holocene activity along the Weixi-Qiaohou Fault in Southeastern margin of the Tibetan Plateau and its neotectonic significance[J]. ACTA GEOLOGICA SINICA(English Edition), 92(6):2464–2465.
- Davis W M. 1899. The geographical cycle[J]. The Geographical Journal, 14(5):481–504.
- 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 N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 63(11):1117–1142.

Geomorphic Characteristics of Drainage Basins in Deqin-Weixi Area and Their Response to Tectonic Activities

LIU Jingnan, CHANG Yuqiao, TIAN Peng, LI Sheng
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Deqin-Weixi area, located in the middle south section of the Hengduan Mountains on the southeast margin of the Tibet Plateau, and near the Southwest boundary of the Sichuan-Yunnan rhombic block, is a typical active tectonic area, where plenty of late Quaternary active faults extend. With complex topography and developed water system, this area is an ideal place for researchers to study the response of landform to tectonic activities. Based on the spatial analysis mode of ArcGIS, the hypsometric integral (HI) values of the sub-drainage areas and main secondary drainage areas in Deqin-Weixi area were extracted by using ASTER GDEM 30 m data, and the HI equivalent zoning of 990 sub-drainage areas and HI curves of 12 main secondary drainage areas were obtained. The results show that the HI curves in the Adong River secondary basin, the Dongshui River secondary basin, and the Sanchahe River secondary basin are slightly convex, indicating that the geomorphic evolution of these 3 basins are in the “young” stage. The HI curves in other basins are S-shaped, indicating the geomorphic evolution of these basins are in the “mature” stage. The HI values are high in the north and low in the south of the study area, and the low HI value are roughly distributed along with the extension of active structures, while high HI values are mainly distributed on both sides of the fault zone and in the tectonic intersection area. The tectonic activity is the main controlling factor of the geomorphic evolution in the study area; the geomorphology responds well to the tectonic activity in the study area. Lithology and climate scarcely influence the geomorphology in the study area.

Keywords: Deqin-Weixi area; drainage basin; the hypsometric integral; geomorphic evolution; tectonic activity