

文章编号: 1008-2786-(2020)5-787-11
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000555

喜马拉雅中段吉隆流域构造地貌数字特征

陈露^{1,2*}, 何军³, 冉清红¹

(1. 成都师范学院 西部人文研究所, 成都 611130; 2. 西藏自治区科技信息研究所, 拉萨 850001;
3. 西藏自治区水文水资源勘测局 山南水文水资源分局, 西藏 山南 856000)

摘 要: 在造山带发育的河流记录了山脉隆升历史, 流域地貌蕴含丰富构造信息, 开展造山带流域构造地貌研究对揭示地貌发育的动力机制、尺度效应和响应过程具有重要意义。受制于地形数据的尺度差异, 造山带小尺度流域数字地形特征与构造响应之间的关系常常难以解释。利用 Aster GDEM2, 选取喜马拉雅造山带中段小空间尺度吉隆流域, 计算 14×76 km 条带高程、200 m 等高距地形起伏度和平均坡度三类基本地形指标, 结合区域地质背景和喜马拉雅隆升过程, 分析地形指标数字特征及其与构造、岩性、气候的关系。结果显示: 条带高程的峰顶面曲线周期性变化较好地响应区域构造展布, 表现为逆断层接触面和背斜翼部, 峰顶面抬升; 在藏南拆离构造以北的北倾下滑正断层面上盘和褶皱轴部, 峰顶面降低; 平均高程先增加后稳定的形态指示吉隆流域具有高海拔、低起伏特征, 是隆升沉降—剥蚀沉积过程长期作用的地形证据; 地形起伏度和平均坡度一致变化, 反映了 4000 m 高程应为岩性和气候的垂直分异界线。本文基于普通数字高程模型提取基本地形指标的方法, 适宜地形变化特征显著的小尺度流域构造地貌分析, 为研究造山带地貌发育规律提供了新思路, 验证了 Aster GDEM2 分析与解释地形特征的能力及其存在的典型地貌标志识别缺陷, 可为进一步研究数字地形尺度效应和地貌解释提供借鉴。

关键词: 数字地形特征; 地形解释; 构造地貌; 吉隆流域; 喜马拉雅造山带

中图分类号: P931.2

文献标志码: A

造山带地形特征研究是基于地形现势形态对构造与侵蚀过程的逆向追索, 进而获得造山带地貌成因与发育规律的认识。数字高程模型 (Digital Elevation Models, DEM) 提供了覆盖地表各种尺度的格式统一的高程数据^[1], 数字地形分析方法实现了地形属性定量计算^[2]。DEM 与传统的构造运动、地层岩性、侵蚀过程分析相结合, 成为地貌格局与过程解释的重要手段^[3-6]。坡面折曲点、河道裂点等点状要素能够反映地形对内外营力突变的响

应^[7-8]; 河流网络、河道剖面线等线状要素反映较长时间尺度下地形对侵蚀过程的响应^[9-10], 坡面高程、面积、坡度及起伏度等面状要素能够反映基本地形特征, 而指标的组运算, 如面积—高程积分、山谷宽度—高度比等, 还能定量地刻画较大空间尺度的地形渐变特征^[11-12]。

尽管利用 DEM 及其派生的地形因子开展地形“数字化”解释优势显著, 但仍然存在以下三个方面的问题: 第一, 地形指标对真实地表的数学解析能力

收稿日期 (Received date): 2020-03-24; 改回日期 (Accepted date): 2020-08-26

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (1461029); 成都师范学院引进人才专项 (YJRC2016-6); 西藏自治区自然科学基金项目 (2015ZR-13-66); 四川省教育厅“区域人文资源开发利用研究”创新团队 (14TD0039)。[National Natural Science Foundation of China (1461029); Project of Talent Introduction by Chengdu Normal University (YJRC2016-6); Natural Science Foundation of Tibet Autonomous Region (2015ZR-13-66); Innovation Team of “Research on Development and Utilization of Regional Human Resources” of Sichuan Provincial Department of Education (14TD0039)]

* 作者简介 (Biography): 陈露 (1980-), 女, 四川达州人, 理学博士, 副教授, 主要研究方向: 第四纪地质学与青藏高原景观地学。[CHEN Lu (1980-), female, born in Dazhou, Sichuan province, Ph. D., assistant professor, specialized in quaternary geology and landscape geoscience in the Qinghai-Tibet Plateau.] E-mail: 051052@cdnu.edu.cn

有地域尺度差异^[2];第二,DEM 产品来源与生产过程不同,相同地形指标在不同 DEM 产品中采样的属性值也有偏差^[13-14];第三,从描述、解释数字地形特征进而发现地貌发育机理的研究还不够深入。学者指出 DEM 使得平均高程、平均坡度、地形起伏度等地形指标计算易于实现,但对某些指标的解释却十分复杂^[1,15]。数字地形指标的问题主要源于缺少面向地貌对象及其空间尺度的 DEM 产品匹配分析,致使在山地、丘陵、平原等较大空间尺度地形上尚可使用,而无法深入解释山谷、坡面、河流等较小尺度地形。可见,应用数字地形指标的首要问题是确定地貌对象及其空间尺度,再考虑指标精度是否具有地形解释功能。地貌过程中的频率—量级关系、尺度效应、临界现象与复杂响应过程仍然是地貌学研究的重要理论问题之一^[16]。造山带流域地貌隐含构造、岩性与气候相互作用过程,是数字地形研究的理想对象。本文选择地貌变化明显的喜马拉雅造山带中段典型小空间尺度吉隆流域为研究区,在 Aster GDEM2 空间分辨率约束下提取条带高程、地形起伏度、平均坡度的最优取值,结合区域地质背景和喜马拉雅隆升过程,讨论数字地形指标对构造、岩性、气候的响应规律,验证普通 DEM 产品及其生成的基本地形指标在构造地貌数字特征分析与成因解释方面的能力。

1 研究区概况与地质背景

喜马拉雅造山带中段介于西藏亚东县卓木拉日峰(7320 m)与普兰县纳木那尼峰(7694 m)之间,长约 1207 km,约占喜马拉雅山脉总长度 42.8%,为山脉最高地段。吉隆流域位于中部希夏邦马峰西侧,面积约 2108.59 km²,范围为 85°00′~85°30′E, 28°15′~29°00′N(图 1)。

关于喜马拉雅造山带地质演化已形成基本共识^[17-19],前震旦纪晋宁运动生成高喜马拉雅结晶岩带,震旦纪澄江运动以南北向挤压变形变质作用而叠加改造。至泥盆纪印度板块北缘陆壳裂解,形成北喜马拉雅稳定沉积建造。石炭纪—中三叠世海西运动以绿片岩相变质、退变质作用对高喜马拉雅、北喜马拉雅加以改造,同期开始藏南拆离构造(Southern Tibet Detachment Structures, STDS)。晚三叠世—晚白垩世高喜马拉雅逐步隆升,北喜马拉雅

雅持续稳定沉积建造。中新世早中期(10~20 Ma)印欧大陆以大规模逆冲断裂和南北向伸展拆离作用强烈碰撞造山,形成一系列断面北倾的叠瓦构造和广泛的变质、岩浆活动以及褶皱变形。古新世—始新世进入喜马拉雅运动期,至始新世末,造山带地质构造整体格架基本完成^[20]。吉隆流域是中喜马拉雅典型构造山谷。国内学者围绕吉隆盆地上新世河湖相沉积,厚度达 300 m,先后开展了构造地质^[21-22]、孢粉古地理^[23]、生物地层^[24-26]、古地磁年代学等系列研究^[27],取得关于喜马拉雅造山带地质演化、青藏高原隆升、欧亚板块碰撞等重大科学问题的研究论述,为开展数字地形分析提供了丰富的研究基础。

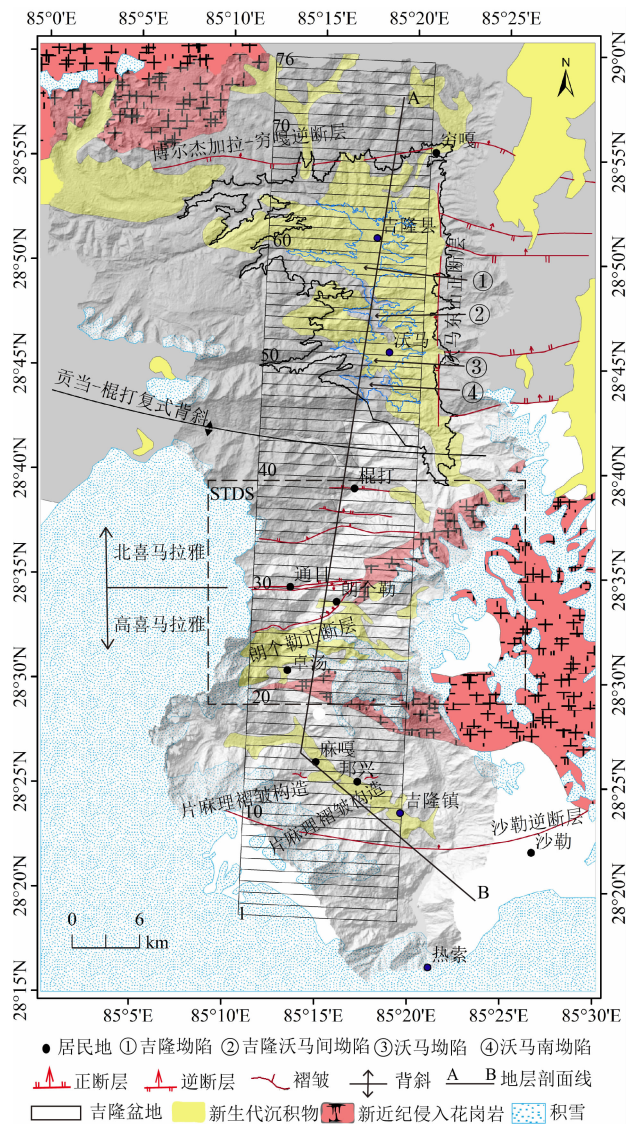


图 1 研究区地质背景

Fig. 1 Study area and geological setting

2 数据和方法

2.1 数据来源与处理

本文采用 Aster GDEM2 (<http://www.gscloud.cn>), 空间分辨率为 1 弧度秒 (约为 30 m)。Aster GDEM2 新增 260 000 景影像, 采用更小空间相关核计算 (5×5 , GDEM1 为 9×9), 解决了 Aster GDEM1 大约 -5 m 总体偏移和水体遮蔽问题。利用多源数据填补了高程空洞, 提高了空间分辨率的准确性。本文共采集 1 个覆盖吉隆流域的 Aster GDEM2 文件, 平面基准为 WGS 1984, 高程基准为 EGM 96, 在 95% 置信度水平上总体精度约 17 m, 水平分辨率约 75 m^[28]。Aster GDEM2 通常采用 UTM 投影, 配准投影栅格分辨率时可能产生影响坡度、坡向、山体阴影、排水网络提取的系统误差^[29], 使像元偏斜倍增或跳过应投影栅格坐标。因此根据研究区地理坐标投影分带, 在 ArcGIS 平台中选择 UTM45°N, 且不执行其他投影变换, 以减小人为操作对栅格平面坐标精度的影响。分析中还用到吉隆县幅 1:25 万地质图, 提取居民地、山峰、垭口等重要地物使用了珠峰自然保护区 1:25 万矢量地理要素数据集, 并设置在 Aster GDEM2 坐标系下。

2.2 方法

2.2.1 条带高程剖面

条带高程剖面是沿山脉主构造线的垂直方向, 绘制一条具有一定水平宽度的带, 再裁剪为若干等间隔长度的带区, 根据研究目标统计和绘制各带区高程值。条带高程剖面分析常用于山脉大尺度地形研究, 有学者研究证实, 条带水平宽度与高程极差为非线性关系, 当水平宽度从 10 km 逐渐增加到 30 km 时, 高程极差将收敛于一个常量^[30]。本文根据吉隆流域面积与形状特点, 设计水平宽度 14 km、长度 76 km 面积约占研究区总面积 50.5% 的条带, 按 1 km 等间隔裁剪为 76 个 $14 \times 1 \text{ km}^2$ 带区。这样既保证所需高程取值的空间随机性, 又满足条带高程统计的面积要求 (图 1)。利用 ArcGIS 分区统计功能, 计算各带区坡面最大高程 (H_{\max})、最小高程 (H_{\min})、平均高程 (\bar{H}) 和高程极差 (R), 利用 MATLAB2016 实现剖面绘制 (图 2)。

2.2.2 地形起伏度

在地形指标定量计算中, 坡度和地形起伏度是

以高程或距离为自变量的函数。地形起伏度计算的关键在于确定适宜地形空间尺度的最佳统计单元^[31]。学者采用面积—高差曲线拐点算法指出大于 1:250 000 地形图适宜采用 2 km^2 统计单元^[32]。30 m 分辨率 Aster GDEM 质量可比 1:50 000 地形图^[33], 因而统计单元可进一步缩小。经计算, 研究区的子流域水平投影面积最小值约为 1 km^2 。为避免统计窗口过小导致过度平滑小规模子流域高差, 本文采用 35×35 栅格 (1.1 km^2) 为最佳统计单元。对比 3×3 ($9 \times 10^{-4} \text{ km}^2$) 栅格, 前者计算效率和效果均较优。

2.2.3 平均坡度

坡度统计单元与地形起伏度一致。首先采用 8 邻域最大高差法^[34], 计算最小单元格网 ($30 \times 30 \text{ m}^2$) 坡度, 再按 35×35 网格分区统计坡度平均值, 即为平均坡度值。

3.2.4 河流网络

利用 ArcGIS 水文分析功能, 提取吉隆流域河网, 统计水流长度, 计算河网密度 (表 1)。

表 1 地表径流垂直分异特征统计

Tab. 1 Characteristic statistics of the surface runoff

vertical differentiation			
海拔区间 /m	面积 /km ²	河网长度 /m	河网密度 /(m/km ²)
≤4000	333.74	395421.63	1184.81
4000~5600	1730.87	1251152.87	722.85
≥5600	153.13	8513.98	55.60

3 结果

3.1 条带高程剖面

图 2 中, 就条带高程属性的物理意义, H_{\max} 和 H_{\min} 反映水平方向上连续规则范围内的地表高度变化, H_{\max} 代表较高坡面或峰顶面高度变化, H_{\min} 则代表谷底或河流高度变化。 R 为 H_{\max} 和 H_{\min} 之差, 代表统计空间内地形高差变化。 \bar{H} 反映隆升沉降—剥蚀沉积作用对坡面高度的均衡影响。四种高程属性具有明显的分段相似性和差异性, 与构造基底形态和构造组合, 具有较好的对应关系。

高喜马拉雅结晶岩带大致由 1~25 km 带区覆

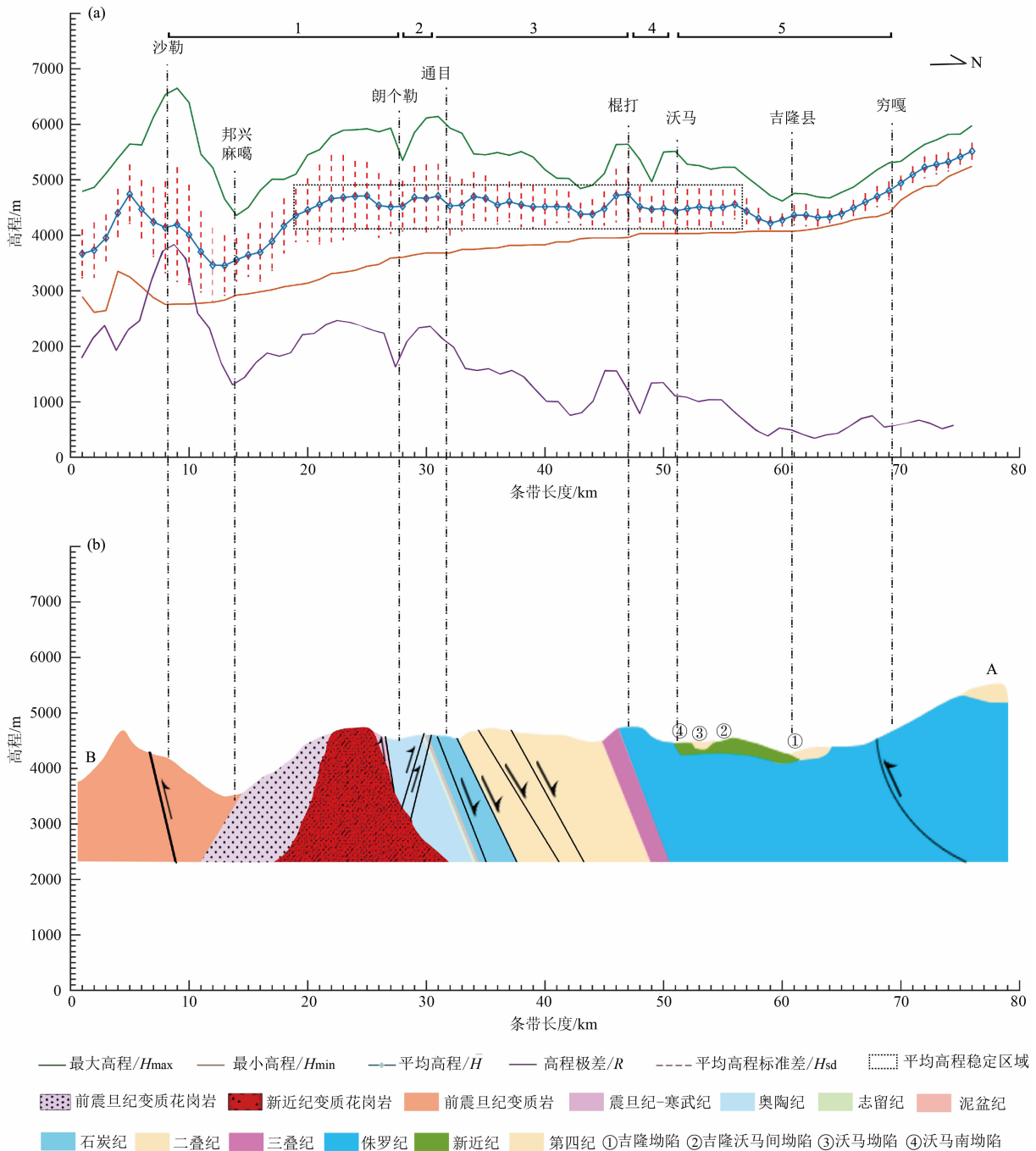


图2 条带高程剖面与地质剖面关系:(a)条带高程剖面;(b)地质剖面

Fig. 2 The relationship between swatch profile of elevation and geological profile: (a) the swatch profile of elevation; (b) the geologic profile

盖(图1,图2b),北喜马拉雅特提斯沉积褶冲带大致被 >25 km带区覆盖,而 $20\sim30$ km带区覆盖藏南拆离构造剪切带^[35-36]。在高喜马拉雅区,以覆盖沙勒逆断层接触面的 $8\sim9$ km带区为界(图1、图2b),将该区分为下、上两盘。下盘峰顶面(图2, H_{max} , $1\sim8$ km)提升迅速并在逆断层接触面达到局部最大值(6651 m),但谷底(图2, H_{min} , $1\sim8$ km)逐

渐降低并在逆断层接触面达到局部最小值(2755 m),成为研究区高程极差最大段落。上盘峰顶面(图2, H_{max} , $9\sim24$ km,第1段)在水平方向上表现为宽波长、深振幅波动形态, $13\sim16$ km带区对应邦兴、麻嘎前震旦纪片麻理褶皱构造(图1),坡面折曲明显。相反,谷底高程(图2, H_{min} , $9\sim24$ km,第1段)以缓慢单调增加为主特征,无起伏波动变形,导

致高程极差(R)明显地随峰顶面而变化(图2a)。

北喜马拉雅区以博尔杰加拉—穷嘎逆断层为界(图1、图2b),分为南、北两带,南带的构造体自南向北为STDS、贡当—棍打复式背斜、东部褶皱区和吉隆盆地;北带最重要的构造体是马拉山穹隆。条带67~69 km位于逆断层接触面上(图1、图2b),峰顶面和谷底高程变化也以之为界,呈现南北迥异的两段空间特征。南段(图2, 25~67 km)在大约43 km水平方向上,峰顶面(H_{\max})表现为“窄—宽”波长相间、“浅—深”振幅相间的4段波动形态(图2,第2~5段),且第2、3段与第4、5段似乎具有空间周期性特征;而谷底(H_{\min})持续缓慢升高895 m,平均升高率21 m/km。相比北段(图2, 69~76 km),峰顶面和谷底几乎一致升高。 H_{\max} 和 H_{\min} 的空间差异也影响了高程极差(R)变化。在南段25~69 km, R 形态与 H_{\max} 一致,可能谷底地形升高趋势缓慢以致无法显著影响其取值改变;而在北段>69 km时, R 曲线在约151 m高差内小起伏波动,形态不受 H_{\max} 和 H_{\min} 影响,可能该区域峰顶面已不再高耸陡峭,而谷底地势达到足够高度,地表变化的空间范围已十分局促。

3.2 地形起伏度

地形起伏度被认为能够反映地表隆升与侵蚀相互作用程度^[37]。为观察和对比山地垂直方向上地形特征,参照学者等在Swiss Alps东西走向褶皱冲断带的计算方法^[15],以200 m等高距提取平均坡度和地形起伏度,绘制出与高程的定量关系(图3、图4)。

研究区高程为1809~7356 m,地形起伏度明显分为三个变化区:(1) ≤ 4000 m时,坡面起伏程度在490 m以上。其中,<3000 m坡面以波动为主,>3000 m坡面起伏逐渐增大,起伏程度从490.40 m升至695.90 m,增大206 m。(2)4000~5800 m,地形起伏度保持在424~502 m小幅度(仅78 m)波动。(3)在6000~7356 m,地形强烈隆起升高,起伏程度达到334 m。另外,地形起伏度标准差显示,在海拔6800~7200 m坡面起伏变化最小81~97 m,其次为 ≤ 2600 m和3400~4000 m坡面起伏变化为150~200 m,其他海拔区间变化为200~320 m。

3.3 平均坡度

研究区平均坡度与地形起伏度曲线形态基本一致,仅在最低高程区间1809~2000 m,坡面起伏度升高(100 m)而平均坡度降低(6.5°)。2000 m以上也可辨识出三段坡度变化区:(1)在 ≤ 4000 m平均坡度在24°~35°间波动显著。(2)在4000~5600 m,平均坡度在22°~24°之间小幅度变化,表明该区域地形比其他高程区域平坦。(3)在5800~7356 m,地形强烈变陡,坡度自27°增大至40°,并在7000 m以上的流域分水岭附近,保持36°以上高平均坡度值。平均坡度标准差的高程分区特征与地形起伏度标准差也基本一致。

4 讨论

4.1 数字高程特征及对构造基底的响应解释

对比图1和图2发现,条带最大高程所代表的

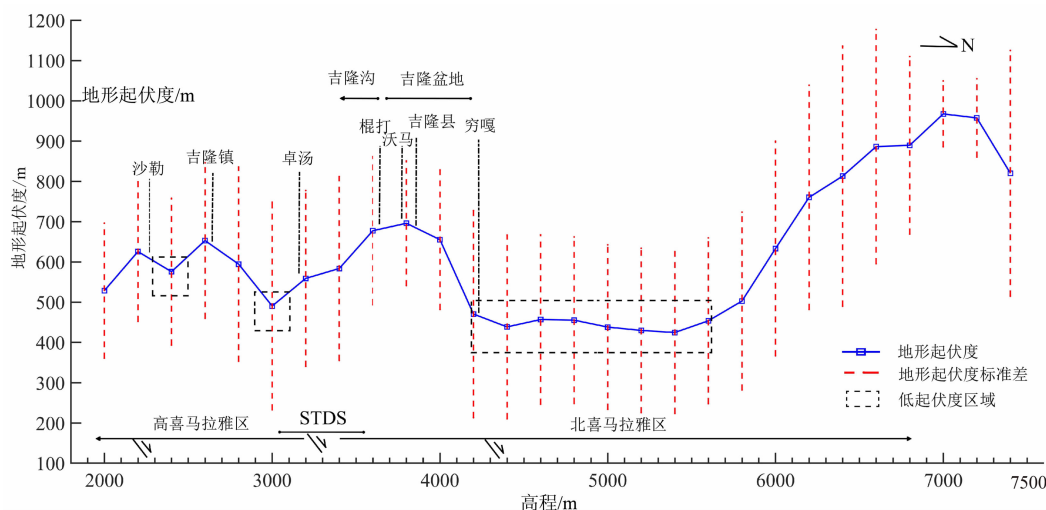


图3 200 m等高距地形起伏度剖面

Fig. 3 Profile of relief amplitude on 200 m elevation interval

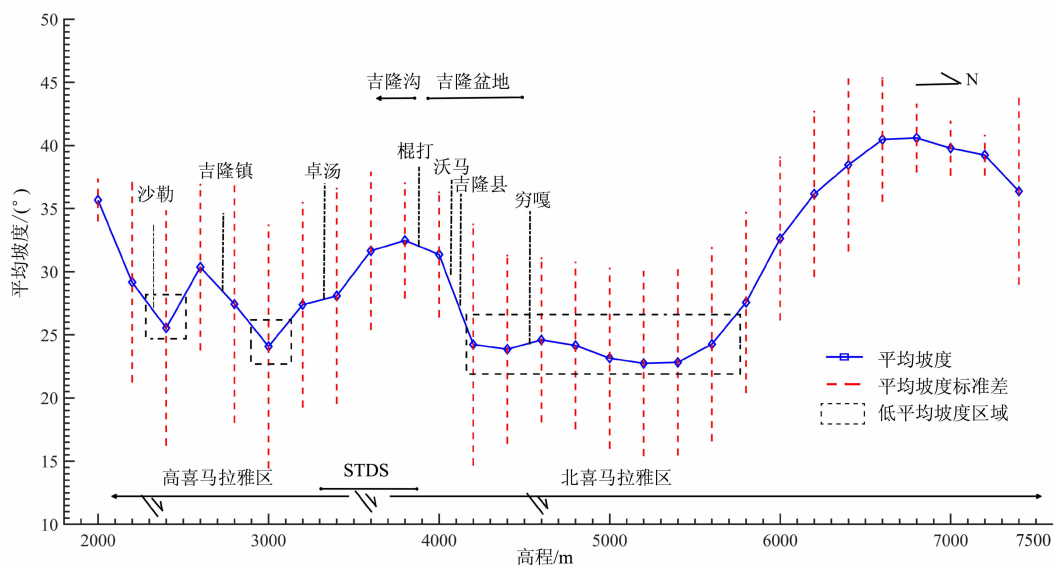


图4 200 m 等高距平均坡度剖面

Fig. 4 Profile of mean slope on 200 m elevation interval

峰顶面高程对断层和褶皱展布具有较好的响应规律。在第8 km 沙勒逆断层、第30 km 通目村两套逆断层、第46 km 贡当—棍打复式背斜北翼的隐伏逆断层、第67~69 km 博尔杰加拉—穷嘎逆断层上,峰顶面在以上逆断层接触面和背斜翼部呈现抬升特征。尤其在逆断层下盘逐渐接近接触面区域时,峰顶面抬升迅速且形态陡峭;当越过接触面进入逆断层上盘时,峰顶面随即下降,曲线形态相对舒缓;在STDS以北,第14 km 前震旦纪片麻理褶皱区、第28 km 朗个勒正断层、第32~43 km 贡当—棍打复式背斜南翼4套次级正断层上,峰顶面覆盖这些北向下滑正断层上盘和北倾褶皱轴部,呈现降低特征。

学者进行构造展布序列分析时,将吉隆盆地细分为马拉山穹隆、吉隆盆地(拗陷)、吉隆沃马间盆地(拗陷)、沃马盆地(拗陷)、沃马南小盆地(拗陷)(图1),指出基底构造性质为铲式正断层造成的掀斜断块^[38]。本文基于峰顶面形态的比较分析推测,可能为正、逆断层组合构造基底。图1、图2中,第2、3段峰顶面对应朗格勒正断层—通目逆断层—棍打正断层,第4、5段峰顶面依次覆盖沃马南拗陷、沃马拗陷、吉隆沃马间拗陷、吉隆拗陷,其先窄后宽的形态与第2、3段峰顶面在长度和宽度上极为一致。据此可推测吉隆盆地基底也存在一套对应的正、逆断层构造。另一个间接的证据是吉隆盆地东界沃马东山正断层东侧,与沃马南拗陷南北界大致相当的纬度位置(图1第47 km、51 km 带区),各发育一套

东西向平行的高角度正断层;与吉隆县城和县城西北杠嘎村大致相当的维度位置(图1第60 km、64 km 带区),也各发育了一套东西向平行的高角度逆断层。沃马东山正断层形成于晚中新世青藏高原东西向伸展构造^[39],切断了原本沿东西向构造线连续展布的三叠纪、侏罗纪地层,形成吉隆盆地东界。进入第四纪,断层开始恢复活动并可能一直持续到现代,地震证据也表明沃马东山正断层可能一直影响到吉隆沟一带^[40],是一条活跃的纵贯造山带山脊的构造线。那么,可能引起先前隐伏的断层发生掀斜、变形,形成正、逆断层组合基底。

4.2 平均高程变化对喜马拉雅隆升—侵蚀过程的指示意义

平均高程(图2, \bar{H})特征比较独特,在高喜马拉雅区(图2,约1~20 km)其形态与峰顶面、高程极差曲线形态基本一致,而在STDS和北喜马拉雅的大部分区域(图2,约20~56 km) \bar{H} 一直保持在4560 m(图2a)。20~56 km 带区内,高程标准差变化(H_{sd})与同区间峰顶面变化一致,即 H_{max} 增加则 H_{sd} 取值增大, H_{max} 降低则 H_{sd} 取值缩小(图2a),保证了 \bar{H} 稳定性。观察图1和图2,此段条带覆盖STDS、贡当—棍打复式背斜东部褶皱两翼、沃马南拗陷、沃马拗陷、吉隆沃马间拗陷三套南北展布的组合构造。岩性已从高喜马拉雅结晶岩过渡到北喜马拉雅沉积岩,但是平均高程并未因构造、岩性的改变而显著变化,具有高海拔、低起伏特征。Adams等使用30 km

水平宽度条带在不丹的东喜马拉雅腹地($N27^{\circ}15' \sim 27^{\circ}50'$, $E89^{\circ}10' \sim 91^{\circ}30'$)计算地形指标,指出在平均高程 3000 ~ 3500 m 区域,存在四组平行的低起伏(<200 m)小地貌单元^[41],是发育在喜马拉雅冰川河流之下的高海拔冲积盆地,与喜马拉雅隆升沉降—剥蚀沉积过程的长期作用有重要关系。本文条带布设位置位于 Adams 等人的研究区以西,纬度基本相同,发育在吉隆藏布上游冲积盆地底部。高海拔、低起伏特征可以解释最近地质历史时期的地貌演化过程。

吉隆流域地表平均高程的稳定状态是隆升沉降—剥蚀沉积过程的长期作用的结果。在喜马拉雅山脉构造抬升的同时,吉隆流域河流、冰川侵蚀和风化剥蚀过程相继加入地貌塑造过程。已有研究表明,中新世晚期—上新世吉隆盆地沉积了总厚约 300 m 河湖相地层,1.7 Ma 吉隆盆地被南部水系袭夺,封闭湖盆转为外流河道,河流侵蚀强烈。喜马拉雅山脉在中更新世 0.8 Ma 达到 4000 ~ 4500 m^[42],冰川作用加入地貌塑造。中更新世末冰川作用减弱并退缩。进入全新世(0.13 Ma),吉隆流域现代水系格局才完全形成,冰川冻融、河流侵蚀、风化剥蚀成为地表过程主要形式,但侵蚀能力已大为削弱。可见,吉隆流域快速抬升达到现代高度与大规模侵蚀沉积作用应大致在更新世期间完成,历时约 1.5 Ma。在这个极短的地质历史期间,不可能完成喜马拉雅山脉“削高填洼”过程,但可能形成局部堆积或冲积地貌。因此,平均高程先增加后稳定的形态特征及其展布格局,指示了山脉构造抬升和侵蚀堆积过程在吉隆流域形成过程。

4.3 地形起伏度和平均坡度空间变化及与稳定坡面的关系

地形起伏度和平均坡度曲线在高程上具有垂直分异性。表现为:(1)2000 ~ 4000 m 坡面起伏变化和平均坡度均较剧烈,但 2200 ~ 2400 m、2800 ~ 3000 m 坡面起伏度和平均坡度较小(图 3、图 4);2000 ~ 4000 m 等高线形态显示(图 5),坡面宽度沿吉隆藏布主流向北逐渐变窄。(2)4000 ~ 5600 m,高差 1600 m 内的坡面面积约 1730.87 km²,占总面积约 82.08%(表 1),广阔的坡面起伏变化和平均坡度均最小(图 3、图 4)。(3)海拔 >5600 m 坡面已接近冰缘,面积仅 153.13 km²(表 1、图 5),但是剧烈增加的起伏度和坡度表明地形形态已迥异于其他

海拔区间。按照两个指标的垂直分异性,分高程区间统计地表径流长度和密度(表 1),海拔 4000 ~ 5600 m 的河网长度比海拔 ≤ 4000 m 长度多 2 倍以上,但河网密度仅有其 61%。现代气象观测数据显示,降水量在喜马拉雅南北坡差异很大,棍打以南的吉隆沟一带是亚热带山地季风气候区,年降水量约 1000 mm,北面吉隆盆地属藏南寒温带半干旱高原河谷季风气候区,年降水量约 300 ~ 600 mm^[43]。降水量的巨大差异是河网长度和密度分布的直接原因。结合前述造山带现代水系格局可能成型于全新世,可以认为全新世也是吉隆流域气候空间分布格局形成时间,并加剧了地表侵蚀作用的空间分异性,大致 4000 m 为气候分异高程界线。

地形起伏度、平均坡度能够描述垂直方向上坡面变化特征,但对特征加以解释,则需要考虑剥蚀沉积的动力学机制。构造隆升与剥蚀沉积的综合作用是地表垂直高度不断变化的基本动力。国外学者采用最大稳定坡面模型计算北美洲喀斯卡特山脉和圣

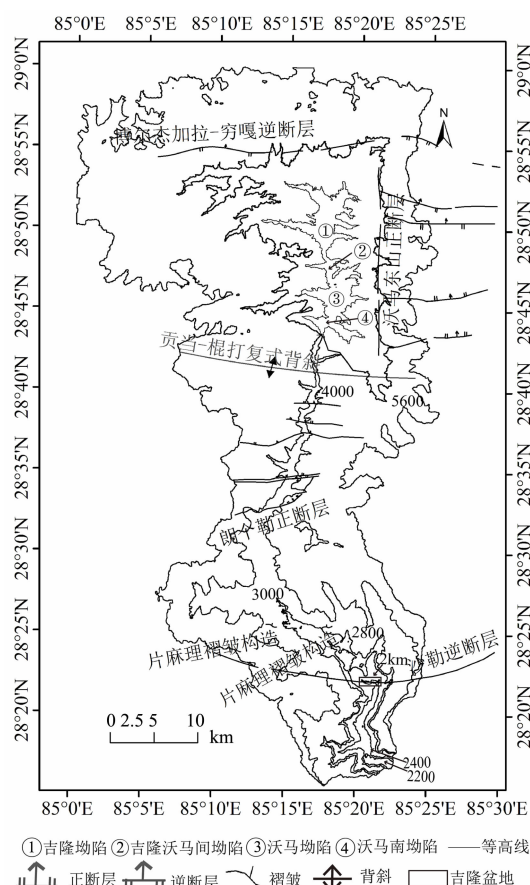


图5 地形起伏度、平均坡度空间分布与地质结构关系

Fig. 5 Relationship between spatial distribution of topographic relief, mean slope and geological setting of the research area

克鲁斯山脉深成基岩滑坡体坡面物质内聚力和摩擦角,证实地形尺度、物质强度、构造、气候将影响山脉起伏极限^[26]。Swiss Alps 侏罗山脉褶皱冲断带剖面的平均坡度角阈值为 25°,这是由于侵蚀作用通过逐渐消减坡度使坡面最终达到这一稳定角度^[15]。图 4 中,临近该阈值的吉隆流域坡面有三处,由下至上为:(1)2200 ~ 2400 m,平均坡度 24.07°、起伏度 575.60 m,地体为前寒武纪变质岩,坡面位于沙勒逆断层下盘,坡面北端沿断层接触面东西延伸约 2 km (图 5);(2)2800 ~ 3000 m,平均坡度 24.07°、起伏度 490.40 m,沿吉隆藏布主流麻嘎一邦兴一吉隆镇一带分布,这一区域冰蚀地貌特征显著^[44],区域地质调查显示该区域出露早、晚更新世冰蚀作用形成的古冰川冰坎,吉隆藏布干流西岸山前堆积大量全新世冲洪积物;(3)4000 ~ 5600 m,平均坡度 22.73° ~ 24.59°,地形起伏度也较平稳(图 3),而且该垂直高程区间与条带 20 ~ 56 km 水平坡面基本重叠(图 2)。与上述山脉比较,吉隆流域仅为小地形尺度,且平均高程比之高出 2000 ~ 3000 m,但仍能形成接近稳定状态的坡面。就吉隆流域尺度而言,稳定坡面可以存在于 2000 m、3000 m、4000 m 不同高程。可见,尽管不同造山带具有不同气候、地貌、构造、地层岩性条件,侵蚀作用还是能在不同尺度地形上塑造稳定坡面。

研究过程中仍然发现 Aster GDEM2 在展现吉隆流域山顶剥蚀面、夷平面、河流阶地这三类典型地貌标志方面存在不足。已有研究表明,吉隆盆地周围存在一级海拔 5400 ~ 5000 m 剥夷面,且向低海拔方向倾斜,形成时间应在早更新世之前。马拉山口(约 5300 m)一带保存完整。条带高程指标能够代表全区域基本地形特征,但未见指示剥夷面地貌特征,面向某高程段的地形解释能力尚待探索。这进一步说明基于 DEM 的数字地形分析需要充分考虑 DEM 产品适宜的空间尺度和分析对象。在现代水系形成过程中,吉隆盆地内的吉隆河沿岸形成 8 级基座和堆积阶地。地形起伏度和平均坡度是以 200 m 等高距提取,在地形指标曲线上无法表现高程跨度大但分布面积小的阶地地貌特征。

5 结论

研究显示,在充分考虑 DEM 产品的应用对象及

其空间尺度基础上,由 Aster GDEM2 提取的基本地形指标适宜小尺度流域数字地形特征分析,且具有较好的构造成因解释能力,能够反映岩性、气候的时空变化。本研究主要结论如下:

(1)吉隆流域条带高程曲线保留了主要构造信息,峰顶面周期性变化对构造展布有较好响应规律,平均高程指示高海拔、低起伏空间特征,为解释喜马拉雅区域构造抬升和侵蚀堆积过程提供了数字地形证据。

(2)地形起伏度和平均坡度在高程上的垂直分异性与岩性、气候的空间分布格局一致,同时验证了吉隆流域构造地貌的垂直分异界线。

(3)条带高程指标不能识别吉隆盆地周边及马拉山口一带 5400 ~ 5000 m 剥夷面,缺乏面向特定高程地貌的解释能力。

(4)200 m 等高距提取地形起伏度和平均坡度,不能表现吉隆藏布沿岸、高程跨度大但面积小的 8 级基座和堆积阶地地貌。若提升等高距取样密度,又将过度平滑小规模子流域高差,造成地形指标失真。所以,适宜的分析方法也是数字地貌研究面临的难点之一。

致谢:本文数据来自地理空间数据云,得到成都理工大学阚琰珂博士指导,多名匿名审稿专家提出宝贵的修改意见,对各位专家的指导和帮助一并感谢。

参考文献 (References)

- [1] BURBANK W D. Characteristic size of relief [J]. *Nature*, 1992, **359**: 483 - 484.
- [2] 李志林,朱庆,谢潇. 数字高程模型[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2017: 12 - 15. [LI Zhilin, ZHU Qing, XIE Xiao. Digital elevation models(the third edition) [M]. Beijing: Science Press, 2017: 12 - 15]
- [3] XIONG Liyang, TANG Guoan, YUAN Baoyin, et al. Geomorphological inheritance for loess landform evolution in a severe soil erosion region of Loess Plateau of China based on digital elevation models [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, (8): 1944 - 1952.
- [4] WANG Xinyuan, LUO Lei, GUO Huadong, et al. Cratering process and morphological features of the Xiuyan impact crater in Northeast China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, **56**(10): 1629 - 1638.
- [5] HILLEY E G, ARROWSMITH R J. Geomorphic response to uplift along the Dragon's Back pressure ridge, Carrizo Plain, California

- [J]. *Geology*, 2008, **36**(5): 367–370.
- [6] STOLAR B D, WILLETT D S, MONTGOMERY R D. Characterization of topographic steady state in Taiwan [J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 2007, **261**: 421–431.
- [7] ZHANG Huiping, ZHANG Peizhen, FAN Qicheng. Initiation and recession of the fluvial knickpoints: a case study from the Yalu River-Wang tian'e volcanic region, northeastern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, **54**(11): 1746–1753.
- [8] HAVIV I, ENZEL Y, WHIPPLE X K, et al. Evolution of vertical knickpoints (waterfalls) with resistant cap rock: insights from numerical modeling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: 1–22.
- [9] DONG Shaopeng, ZHANG Peizhen, ZHANG Huiping, et al. Drainage responses to the activity of the Langshan Range – Front fault and tectonic implication [J]. *Journal of Earth Science*, 2018, **29**(1): 193–209.
- [10] 张会平, 张培震, 吴庆龙, 等. 循化—贵德地区黄河水系河流纵剖面形态特征及其构造意义[J]. *第四纪研究*, 2008, **28**(2): 299–309. [ZHANG Huiping, ZHANG Peizhen, WU Qinglong, et al. Morphological characteristics and structural significance of longitudinal section of the Yellow River system in xunhua – guide area [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(2): 299–309]
- [11] 戴岩, 王先彦, 王胜利, 等. 地貌形态指数反映的青藏高原东北部宛川河流域新构造活动[J]. *地理学报*, 2016, **71**(3): 412–421. [DAI Yan, WANG Xianyan, WANG Shengli, et al. The neotectonic activity of Wanchuan catchment reflected by geomorphic indices [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(3): 412–421]
- [12] VIJITH H, PRASANNAKUMAR V, SHARATH MOHAN A M, et al. River and basin morphometric indexes to detect tectonic activity: a case study of selected river basins in the South Indian Granulite Terrain (SIGT) [J]. *Physical Geography*, 2017, **38**(4): 360–378.
- [13] 赵国松, 杜耘, 凌峰, 等. ASTER GDEM 与 SRTM3 高程差异影响因素分析[J]. *测绘科学*, 2012, **37**(4): 167–170. [ZHAO Guosong, DU Yun, LING Feng, et al. Analysis of influencing factors on height differences between ASTER GDEM and SRTM3 [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2012, **37**(4): 167–170]
- [14] GONGA – SAHOLIARILIVA N, GUNNELL Y, PETIT C, et al. Techniques for quantifying the accuracy of gridded elevation models and for mapping uncertainty in digital terrain analysis [J]. *Progress in Physical Geography*, 2013, **35**(6): 739–764.
- [15] KUHN A, PFIFFNER, A O. The relief of the Swiss Alps and adjacent areas and its relation to lithology and structure: topographic analysis from a 250m DEM [J]. *Geomorphology*, 2001, **41**: 285–307.
- [16] 许炯心, 李炳元, 杨小平, 等. 中国地貌与第四纪研究的近今进展与未来展望[J]. *地理学报*, 2009, **64**(11): 1375–1393.
- [XU Jiongxin, LI Bingyuan, YANG Xiaoping, et al. Recent progress in geomorphology and quaternary geology in China and some perspectives [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(11): 1375–1393]
- [17] MOLNAR P, TAPPONNIER P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision [J]. *Science*, 1975, **189**(4201): 419–426.
- [18] 尹安. 喜马拉雅造山带新生代构造演化: 沿走向变化的构造几何形态、剥露历史和前陆沉积的约束[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(5): 416–515. [YIN An. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan Orogen as constrained by along – strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, **13**(5): 416–515]
- [19] VALDIYA S K. Evolution of the Himalaya [J]. *Tectonophysics*, 1984, **105**: 229–248.
- [20] 潘裕生, 汪一鹏, 常承法. 喜马拉雅板块活动证据兼论青藏高原形成模式[J]. *地震地质*, 1980, **2**(2): 1–12. [PAN Yusheng, WANG Yipeng, CHANG Chengfa. Evidence of plate activity in Himalayas and a model for formation of Qinghai – Xizang Plateau [J]. *Seismology and Geology*, 1980, **2**(2): 1–12]
- [21] 王德朝, 张进江, 杨雄英, 等. 吉隆盆地构造、环境演化与青藏高原隆升[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, **45**(1): 79–89. [WANG Dechao, ZHANG Jinjiang, YANG Xiongying, et al. Tectonic and environmental evolution of Gyirong Basin, and its relationship to the uplift of Tibetan plateau [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, **45**(1): 79–89]
- [22] 王富葆, 李升峰, 张捷, 等. 吉隆盆地的形成演化、环境变迁与喜马拉雅山隆起[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, **26**(4): 329–335. [WANG Fubao, LI Shengfeng, ZHANG Jie, et al. The formation and evolution, environmental transition of Gyirong Basin and uplift of Himalaya [J]. *Science China Series D – Earth Science*, 1996, **26**(4): 329–335]
- [23] 孙黎明, 阎同生, 唐桂英, 等. 西藏吉隆盆地新近纪孢粉组合及古地理研究[J]. *中国地质*, 2007, **34**(1): 49–54. [SUN Liming, YAN Tongsheng, TANG Guiying, et al. Neogene sporopollen assemblages and paleogeography in the Gyirong Basin, Tibet [J]. *Geology in China*, 2007, **34**(1): 49–54]
- [24] 陈万勇. 喜马拉雅山中段上新世三趾马动物群生活环境的探讨[J]. *古脊椎动物与古人类*, 1982, **20**(1): 45–53. [CHEN Wangyong. Pliocene environment of Hipparion fauna of middle Himalaya range [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1982, **20**(1): 45–53]
- [25] 孙立新, 李金和, 张振利. 西藏吉隆地区白垩纪复理石相遗迹化石及其地质意义[J]. *地质通报*, 2002, **21**(11): 745–748. [SUN Lixin, LI Jinhe, ZHANG Zhenli. Trace fossils of cretaceous flysch facies in the Gyirong area, Tibet, and their geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, **21**(11):

- 745 – 748]
- [26] 朱才伐, 田立富, 孙黎明, 等. 藏南吉隆地区二叠纪生物地层[J]. 地层学杂志, 2008, **32**(3): 333 – 339. [ZHU Caifa, TIAN Lifu, SUN Liming, et al. Permian biostratigraphy from the Jilong area, southern Xizang [J]. Journal of Stratigraphy, 2008, **32**(3): 333 – 339]
- [27] 岳乐平, 邓涛, 张睿, 等. 西藏吉隆—沃马盆地龙骨沟剖面古地磁年代学及喜马拉雅山抬升记录[J]. 地球物理学报, 2004, **47**(6): 1009 – 1016. [YUE Leping, DENG Tao, ZHANG Rui, et al. Paleomagnetic chronology and records of Himalayan uplift on the longgugou section of Gyirong – Oma basin the Xizang (Tibet) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, **47**(6): 1009 – 1016]
- [28] USGS. ASTER GDEM 2 readme [EB/OL]. (2011 – 10) [2020 – 11 – 04]. <https://lpdaac.usgs.gov>.
- [29] HARBOR D, GUNNELL Y. Along – strike escarpment heterogeneity of the western Ghats: a synthesis of drainage and topography using digital morphometric tools [J]. Journal Geological Society of India, 2007, **70**: 411 – 426.
- [30] AHNERT F. Local relief and the height limits of mountain ranges [J]. American Journal of Science, 1984, **284**: 1035 – 1055.
- [31] 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 112. [ZHOU Qiming, LIU Xuejun. Data terrain analysis [M]. Beijing: Science Press, 2006: 112]
- [32] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证[J]. 湖北大学学报 (自然科学版), 1990, **12**(3): 266 – 271. [TU Hanming, LIU Zhendong. Demonstrating on optimum statistic unit of relief amplitude in China [J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 1990, **12**(3): 266 – 271]
- [33] 张朝忙, 刘庆生, 刘高焕, 等. SRTM3 与 ASTERGDEM 数据处理及应用进展[J]. 地理与地理信息科学, 2012, **28**(5): 29 – 34. [ZHANG Zhaomang, LIU Qingsheng, LIU Gaohuan, et al. Data processing and application progress of SRTM3 and ASTER GDEM [J]. Geography and Geo – Information Science, 2012, **28**(5): 29 – 34]
- [34] O'CALLAGHAN F J, MARK M D. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, **28**: 323 – 344.
- [35] 杨雄英, 张进江, 戚国伟, 等. 吉隆盆地周缘构造变形特征及藏南拆离系启动年龄[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, **39**(8): 1128 – 1139. [YANG Xiongying, ZHANG Jinjiang, QI Guowei, et al. Structure and deformation around the Gyirong basin, northern Himalaya, and onset of the south Tibetan detachment system [J]. Science China Series D – Earth Science, 2009, **39**(8): 1046 – 1058]
- [36] 张振利, 孙肖, 李广栋, 等. 西藏普兰、吉隆沟一带藏南拆离构造新认识[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, **26**(2): 1 – 6. [ZHANG Zhenli, SUN Xiao, LI Guangdong, et al. New explanation of detachment structures in the Burang and Gyironggou regions, southern Xizang [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2006, **26**(2): 1 – 6]
- [37] SCHMIDT M K, MONTGOMERY R D. Limits to relief [J]. Science, 1995, **270**(5236): 617 – 620.
- [38] 王德朝. 吉隆盆地构造、环境演化与青藏高原隆升[D]. 北京: 北京大学, 2008: 11. [WANG Dechao. Tectonic and environmental evolution of the Gyirong basin, and its relationship to the uplift of Tibetan plateau [D]. Beijing: Peking University, 2008: 11]
- [39] 张进江. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述[J]. 地质通报, 2007, **26**(6): 639 – 649. [ZHANG Jinjiang. A review on the extensional structures in the northern Himalaya and southern Tibet [J]. Geological Bulletin of China, 2007, **26**(6): 639 – 649]
- [40] HURTADO J M, HODGES K V, WHIPPLE K X. Neotectonics of the Thakkhola graben and Implications for Recent activity on the South Tibetan Fault System in the Central Nepal Himalaya [J]. Geological Society of America Bulletin, 2001, **113**(2): 222 – 240.
- [41] ADAMS A B, WHIPPLE X K, HODGES V K, et al. In situ development of high-elevation, low-relief landscapes via duplex deformation in the Eastern Himalayan hinterland, Bhutan [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, **121**: 294 – 319.
- [42] 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. 科学通报, 1998, **43**(15): 1569 – 1574. [LI Jijun, FANG Xiaomin. Study on uplift and environmental change of Qinghai – Tibet Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, **43**(15): 1569 – 1574]
- [43] 杨人凡. 西藏吉隆盆地冲锥堆积体的成因研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 11. [YANG Renfan. Research of chongzhui accumulation body's cause of formation in basin JiLong Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 11]
- [44] 朱诚. 西藏吉隆盆地的新构造运动及第四纪冰川[J]. 山地学报, 1995, **13**(4): 219 – 225. [ZHU Cheng. Neotectonism and quaternary glaciation of Gyirong Basin, Xizang [J]. Mountain Research, 1995, **13**(4): 219 – 225]

Digital Features of Tectonic Landform of the Gyirong Watershed in the Middle Himalayas, China

CHEN Lu^{1,2*}, HE Jun³, RAN Qinghong¹

(1. *Institute of Humanity Resources in Western China, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China;*

2. *Institute of Science & Technology Information of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850001, China;*

3. *Shannan Branch of Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Tibet Autonomous Region, Shannan 856000, Tibet, China)*

Abstract: Rivers developed in orogen record the history of mountain uplift, and the watersheds contains rich tectonic information. To research the tectonic geomorphology in the orogenic watersheds is of great significance to reveal the dynamic mechanism, scale effect and response process of geomorphology development. The discussion on the relationship between topographic features of small-scale watershed and tectonic response is often difficult to explain due to scale differences in topographic data. In this paper, 14 km in width \times 76 km in length swath elevations, 200 m contour interval topographic relief, and average slope angle of a small-spatial-scale Gyirong Watershed in the middle Himalayan orogen were calculated using Aster GDEM2 data with 30 m spatial resolution. Based on the regional geological background and Himalayan uplift process, the digital topographic characteristics of Gyirong Watershed and their relationships with structure, lithology, and climate were analyzed. The results showed that the periodic spatial change at the summit level on swath elevation curves had a clear relationship with the regional tectonic distribution. This regularity was manifested by summit level, namely the maximum elevation curve, uplift in the contact surface of reverse faults and anticlinal wing; in the north of Southern Tibet Detachment Structures, summit level declined with the north-dipping normal faults and folds axis. Average elevation increased at first and then stabilized, indicating that the Gyirong Watershed is characterized by high-elevation and low-relief, which provided topographic evidence for the long-term action of tectonic uplift and erosional accumulation process. The topographic relief and average slope changed consistently, which reflected that 4000 m elevation is the vertical differentiation boundary for the lithology and climate. The method of extracting basic topographic indexes from common digital elevation model products is suitable for the analysis of the structural geomorphology of small-scale watershed with significant terrain change characteristics. It also provides an easy access to studying geomorphic development laws. This study verifies the ability of Aster GDEM2 data to analyze and interpret digital topographic features, as well as some defects in identification of typical geomorphic signs. Therefore, this study can serve as an informative reference for further studies on digital topographic scale effects and topographic interpretation.

Key words: digital topographic feature; topographic interpretation; tectonic landform; Gyirong watershed; Himalaya orogen