

引用格式: 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. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023123

Citation: 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. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023123

祁连山内部门源盆地地貌特征及构造意义

李红强¹, 袁道阳¹, 苏琦², 文亚猛¹, 苏瑞欢¹, 孙浩¹, 陈艳文¹, 于锦超¹, 张梨君¹

LI Hongqiang¹, YUAN Daoyang¹, SU Qi², WEN Yameng¹, SU Ruihuan¹, SUN Hao¹, CHEN Yanwen¹, YU Jinchao¹, ZHANG Lijun¹

1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730000;
2. 北京师范大学珠海校区文理学院地理系, 广东 珠海 519000
1. School of earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Faculty of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai 519000, Guangdong, China

Geomorphic features of the Menyuan basin in the Qilian Mountains and its tectonic significance

Abstract: The Qilian Mountains are situated on the northeastern margin of the Tibetan Plateau and serve as the leading edge of the plateau's northeastward expansion. The Menyuan Basin, characterized by typical basin landforms, provides valuable insights into the region's neotectonic activity and geomorphic evolution. As a representative mountain basin located in the central part of the Qilian Mountains, the Menyuan Basin's development pattern and geomorphic features are closely linked to tectonic activity. This study aims to investigate the variations in tectonic activity and their underlying causes along the north margin fault and different zones of the Menyuan Basin. To achieve this, 30 m resolution digital elevation model (DEM) data and ArcGIS spatial analysis technology were employed to extract the hypsometric integral (HI) and hypsometric integral curve (HC) of 15 rivers that traverse the northern edge of the basin. Subsequently, kriging interpolation was utilized to obtain the spatial distribution characteristics of HI within the basin. The findings reveal that HI values generally exhibit higher values on the western side and lower values on the eastern side of the Menyuan Basin, with the turning point (Laohugou) of the northern fault at the Menyuan Basin serving as the boundary. By combining the distribution of HI with field investigation results of active structures, it is observed that the eastern fault has extended into the basin's interior, giving rise to a series of active reverse fault–fold zones. This phenomenon may be attributed to changes in fault trends and the presence of northeastward faults. Additionally, a high HI anomaly is detected near Qingshizui Town in the basin's interior. Based on previous electromagnetic detection results, it is inferred that a buried fault exists within the basin. Furthermore, the study demonstrates that most rivers exhibit peak fluctuations in the stream length–gradient index (SL) at a specific position upstream of the main fault, indicating a strong correlation between the location of SL fluctuations and the position of the fault intersecting the river. In other words, tectonic activity can exert a significant influence on SL . Abnormal fluctuations near lithological transitions may suggest that local changes in lithology also impact the stream length–gradient index. The comprehensive analysis underscores the substantial differences in geomorphic development between the eastern and western sections of the northern edge of the Menyuan Basin, primarily controlled and influenced by the active structures in this region. Moreover, the aforementioned geomorphic parameters serve as sensitive indicators

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0901); 国家自然科学基金项目 (42172227)

This research is financially supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (Grant No. 2019QZKK0901) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42172227)

第一作者: 李红强 (1996—), 男, 在读硕士, 主要从事构造地貌方面的研究工作。E-mail: lihq21@lzu.edu.cn

通讯作者: 袁道阳 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事新构造与活动构造方面的研究工作。E-mail: yuandy@lzu.edu.cn

收稿日期: 2023-07-29; 修回日期: 2023-10-08; 责任编辑: 范二平

for evaluating tectonic activity.

Keywords: Menyuan basin; thrust fault; hypsometric Integral; Hack profile; stream length–gradient index; tectonic geomorphology

摘要: 祁连山位于青藏高原东北部边缘,是青藏高原向北东方向挤压扩展的前缘部位,其典型流域地貌特征记录了该地区的新构造活动和地貌发育演化过程。门源盆地是位于祁连山中段内部的一个典型的山间盆地,其发育模式和地貌特征与构造活动有着直接的关系。为探究门源盆地北缘断裂及其不同区段构造活动性的差异及其成因,文中基于30m分辨率数字高程模型(DEM)数据,采用ArcGIS空间分析技术,提取了盆地北缘横穿山体的15条河道的面积-高程积分(HI)和积分曲线(HC),再利用克里金插值法得到HI值在盆地空间上的分布特征。结果表明,以门源盆地北缘断裂走向转折处——老虎沟为界,其西侧河道流域的HI值整体较高,东侧HI值普遍较低;结合野外活动构造调查结果,发现老虎沟东侧断裂已经挤压扩展到盆地内部,并发育一系列的活动逆断层-褶皱带,由此推断断裂走向变化及北东向断裂导致了流域HI值的分布差异。同时,盆地内部青石嘴镇附近出现一处HI高值异常,结合大地电磁探测结果推测盆地内部存在一条隐伏断层。另外,多数河道在主断裂通过上游一定位置时出现了河长坡降指数(SL)峰值波动,说明SL波动位置与断裂通过河道位置具有良好的相关性,即构造活动可以对SL产生显著影响;而处于岩性变化位置附近的波动异常,可能表明局部河段的岩性变化对SL也有一定影响。综合分析表明,门源盆地北缘东、西段的地貌发育具有显著差异,主要受该区域活动构造即门源盆地北缘断裂的控制和影响,上述地貌参数是较为敏感的构造活动性评价指标。

关键词: 门源盆地; 逆冲断裂; 面积-高程积分; Hack剖面; 河长坡降指数; 构造地貌

中图分类号: P931.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2023)06-0824-18

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023123

0 引言

晚新生代以来,印度板块与欧亚板块的挤压碰撞,造成了青藏高原持续的挤压隆升,形成了现今的构造地貌格局,构成世界第三极。青藏高原的形成不仅造就了中国大陆内部强烈的新生代构造变形,同时也对中亚地区的构造格局、地貌演化以及气候环境变化等产生了巨大影响(Molnar and Tapponnier, 1975; An et al., 2001)。祁连山地区位于青藏高原东北部,是青藏高原向北东方向挤压扩展的前缘地区,也是构造变形与地貌演变最为强烈的地区之一,长期以来是人们关注和研究的热点地区之一(Tapponnier et al., 1982; Molnar and England, 1990; Harrison et al., 1992; Molnar et al., 1993; 袁道阳, 2003; 郑文俊, 2009)。祁连山被认为是正在形成的青藏高原的一部分(Tapponnier et al., 2001),其新生代以来的构造变形以分布式的挤压缩短变形为主(Hetzl et al., 2004; Zheng et al., 2017)。整个祁连山5~7 mm/a的总缩短速率被祁连山西段5条北西向的活动断裂(柴达木盆地北缘断裂、祁连-海源断裂、托勒山北缘断裂、肃南-祁连断裂和祁连山北缘断裂)吸收或分解(袁道阳等, 2004; Palumbo et al., 2009;

Champagnac et al., 2010)。Zheng et al.(2013)提出祁连山晚新生代构造变形模式为非对称花状构造,后续也有学者对祁连山南、北侧的变形方式进行了研究,并通过磷灰石裂变径迹(AFT)的手段,厘定了两侧山体开始变形的时间,进一步丰富和完善了祁连山的构造变形模式和地貌发育演化过程(Zheng et al., 2017; Pang et al., 2019)。

已有研究大多侧重于祁连山地区主干活动断裂和南、北两侧的河西走廊、柴达木盆地边缘的构造变形与地貌响应研究(胡小飞, 2010; 张忱, 2012; 姚生海等, 2020; 董金元等, 2021),而对祁连山内部受活动断裂控制的北西西向河谷盆地或山间盆地的关注和研究不够,这制约了对祁连山内部构造-地貌发育及其演化历史的理解。门源盆地位于祁连山中段,属于其内的一个典型的山间断陷盆地,该盆地及其周缘山系的形成-发展-演化过程记录了祁连山内部的盆-山演化过程。相关学者对门源盆地的研究多集中在盆地内大通河的发育演化(Ma et al., 2020; 刘庆宇等, 2022)、河流阶地形成时代(于航等, 2018)及其两侧山地冰川地貌的发育与定年等(康建成等, 1992; 郭红伟等, 1995; 史正涛等, 2000; 赵井东等, 2001; 周尚哲和李吉均, 2003),而对盆地的新构造演化、晚第四纪断裂活动性、盆地构

造变形与祁连山隆升过程的关系等方面的研究却很少涉及(马保起和李德文, 2008)。

构造地貌是构造作用与侵蚀作用相互影响的结果,反映了内、外力地质过程的耦合关系,而构造地貌参数能够有效记录和反映其地貌发育演化的丰富信息,是行之有效的、用来探讨构造活动的方法之一(Burbank, 1999; 王岸和王国灿, 2005; 史兴民和杜忠潮, 2006; 梁明剑等, 2014)。在大量已有研究的基础上,运用 ArcGIS 手段,提取门源盆地横向切穿山前北缘断裂的河流地貌参数,通过对比研究区不同段的地貌参数各项指标的差异性,结合野外活动构造调查资料加以印证,可以深入探究门源盆地北缘断裂及其内部不同区段构造活动性的差异与成因解释。

1 区域地质地貌背景

祁连山是一个记录了从大陆板块分裂到大洋盆地演化、从新元古代到古生代大陆碰撞完整历史的古老缝合带(Song et al., 2013)。自白垩纪以来,祁连山地区一直以北西西—南东东向断裂活动占主导,在其区域内形成了盆—山相间的典型地貌格局(施雅风等, 2006)。关于印度板块与欧亚板块碰撞导致的祁连山地区早期变形已有很多研究(Yin et al., 2002; Yuan et al., 2013),部分学者认为祁连山主要在 20~8 Ma 以来开始形成及发生整体的、强烈的隆升变形(Jolivet et al., 2001; 袁道阳等, 2004; Zheng et al., 2017)。从形成演化时代上看,祁连山地区应该是青藏高原向北东方向挤压扩展的前缘地带之一,其地貌格局记录了高原隆升最新的变形方式。已有学者通过构造地貌和低温热年代学等方法研究发现,祁连山在由南向北挤压扩展的同时,也可能受到阿拉善地块向南俯冲及祁连山北缘断裂向河西走廊内部扩展的作用(苏琦等, 2017; 郑文俊等, 2021)。

门源盆地位于祁连山中段腹地,为大通河上游穿盆而过的山间河谷盆地,也是一个受南、北两侧边界活动断裂控制的压陷型构造盆地。盆地内部整体朝南西倾斜,具有西北高、东南低的地势特征,海拔在 2900 m 以上,东西长约 72 km,南北呈中间宽、两端窄的特征,最宽处约为 15 km,总面积约为 $6.36 \times 10^2 \text{ km}^2$ 。盆地南侧为达板山,最高海拔约为 4100 m,北侧为冷龙岭,峰顶海拔多在 4600 m 以上,

局部地区发育有冰川,例如,冷龙岭宁缠河 1 号冰川、水管河 4 号冰川等;现代冰川的消融退缩增加了流域水量,对区域地貌演化具有一定影响。盆地南、北两侧分别受门源盆地南、北缘逆冲断裂控制,逆冲断裂的存在导致盆岭间高差最大约为 1500 m,新生代以来盆地南、北缘逆冲断裂产生了强烈的垂直差异作用(马保起和李德文, 2008),区域主要断裂展布如图 1、图 2 所示,研究区内断裂活动也导致了门源地区地震频发,仅 40 年来就发生过 3 次 M_s 6.0 以上的地震(图 1)。研究区内基岩山体主要以奥陶系的砂岩和板/页岩为主,其次包括二叠系、三叠系的砂岩夹杂粉砂岩、板岩,内部多覆盖第四系冲洪积的松散砾石、砂泥等碎屑沉积物(图 2a)。大通河自西向东沿盆地南侧山前穿过,南、北两侧山体至盆地内部发育的很多大大小小的冲沟河道汇入其中,如老虎沟、白水河和东沙河等。盆地北缘断裂上盘基岩山体到盆地内部发育大一中型冲沟河道 15 条,流域面积约为 $4.95 \times 10^2 \text{ km}^2$ 。门源盆地北缘断裂在老虎沟处发生明显转折,自西向东走向由北西向转为北西西向,并以老虎沟为界,东、西两侧地形地貌差异较大。老虎沟以西地形落差较大,各支流流域面积小,7 条冲沟河道汇流面积占总汇流面积的 14.3%,老虎沟东侧(含老虎沟)8 条河道,流域面积大,汇流面积占总汇流面积 85.7%。次级集水盆地面积大小是地貌形态差异量化的重要指标。

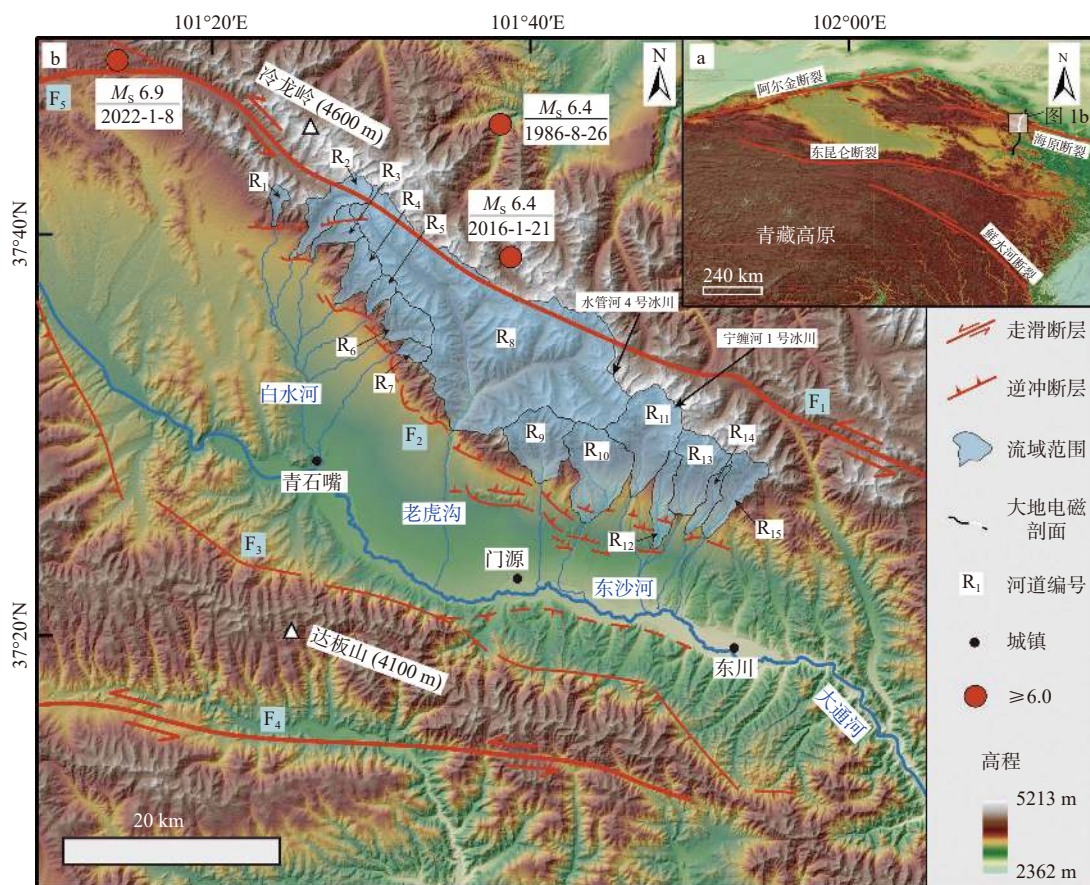
2 数据来源、处理及研究方法

2.1 数据来源

目前研究常用的数字高程模型(DEM)来自于美国的 STRM 雷达数据(分辨率为 30 m、90 m)和日本的 ALOS 观测卫星数据(分辨率为 12.5 m)。文中所选 DEM 数据为 STRM1,分辨率为 30 m,水平基准为 WGS1984,垂直精度为 $\pm 20 \text{ m}$,水平精度为 $\pm 30 \text{ m}$ 。另外,已有研究表明,DEM 分辨率的大小对研究区内的面积-高程积分(Hypsometric Integral, HI)的分析结果并不造成明显影响(张天琪等, 2015),因此 30 m 分辨率能够满足研究所需条件。

2.2 数据处理

利用 ArcGIS10.8 数据管理工具(Date Management Tools)镶嵌栅格,根据 6°分带计算出研究区投影坐标系(UTM)进行投影,将栅格分辨率重采样至 30



F₁—冷龙岭断裂; F₂—门源盆地北缘断裂; F₃—门源盆地南缘断裂; F₄—达板山断裂; F₅—托勒山北缘断裂

图 1 门源盆地构造背景图

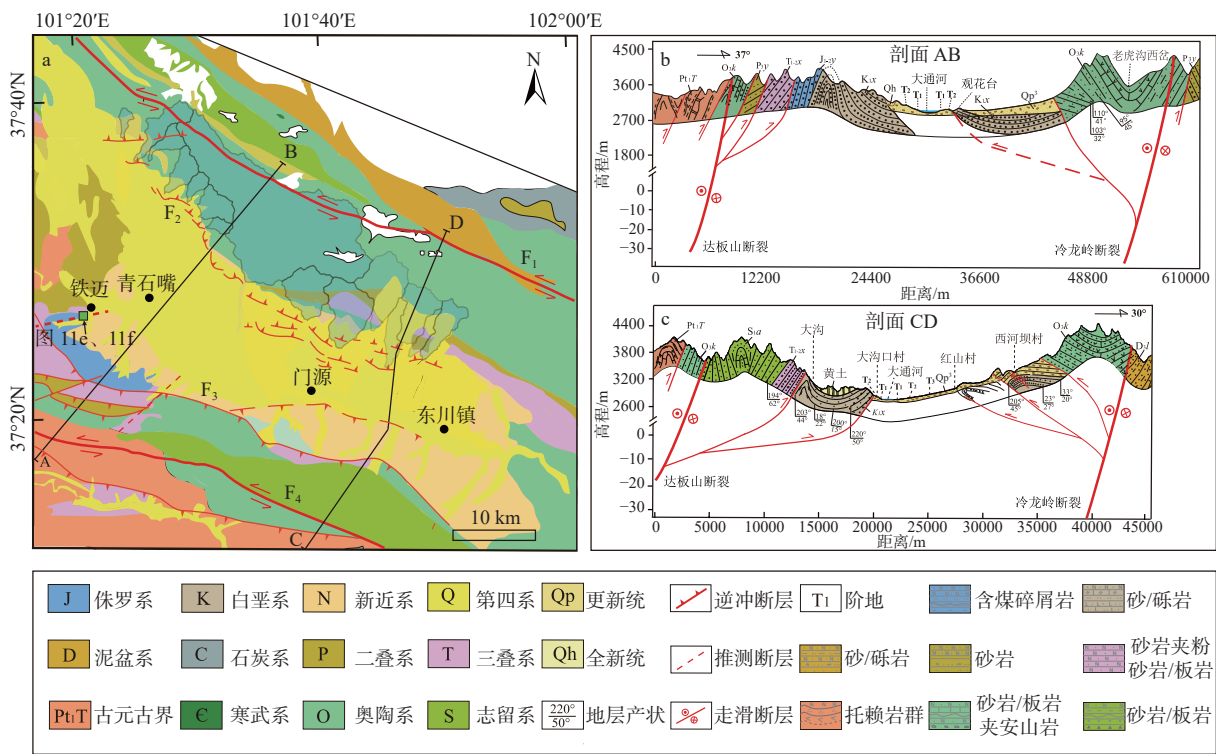
Fig. 1 Geological background map of the Menyuan basin

F₁—Lenglongling fault; F₂—North margin fault of the Menyuan basin; F₃—South margin fault of the Menyuan basin; F₄—Dabanshan fault; F₅—North margin fault of Tuoleshan

m×30 m, 采用空间分析工具 (Spatial Analyst Tools) 对研究区 SRTM1-DEM 进行处理, 提取研究区的河网水系。受 DEM 水平与垂直分辨率、误差和空间均匀性的影响, 生成的流域河网会出现干扰和错误, 与自然水系比较, 描述的是一种概念化现象, 可能存在伪特征 (杨珍, 2014)。郑光佑 (2002) 与赵洪壮等 (2010a) 分别利用 *HI* 值对不同地区进行了构造地貌特征研究, 根据 *HI* 值和次集水盆地面积、高差依赖分析, 认为不同地区满足研究需要的汇流面积阈值存在较大差异。所以, 对于不同的研究区域, 合适的面积阈值并不相同。

文中主要采取了不同汇流面积阈值 (0.9 km²、1.8 km²、2.7 km²、3.6 km²、4.5 km² 和 5.4 km²) 进行对比分析 (表 1), 结果显示, 不同面积阈值、平均面积、平均高差与平均 *HI* 值呈单调递减 (图 3a—3c)。通常, 较大面积阈值下生成的流域个数相对较少, 河网水系相对稀疏, 部分河道河头仅存在于盆地内

部 (例如 4.5 km²、5.4 km² 的面积阈值), 与实际水系分布情况不符, 可能影响最终结果; 较小的面积阈值生成的 *HI* 值可能会因细节被过分强调而影响表达, 所以要根据平均 *HI* 值的变化趋势选择相对合理的面积阈值。不同面积阈值所得到的平均 *HI* 值结果显示, 除阈值为 0.9 km² 外, 其余面积阈值下得到的平均 *HI* 值递减趋势稳定。对结果进行线性拟合发现, 平均 *HI* 值与面积阈值、平均面积在调整后 (排除 0.9 km² 的面积阈值) 的拟合结果更好 (图 3d—3f), 即当面积阈值大于 1.8 km², 平均 *HI* 值基本稳定减小, 因此, 面积阈值选取 1.8 km² 能够准确表示 *HI* 值的空间分布特征、反映流域演化特征。另外, 当面积阈值为 1.8 km² 时, 生成的河网水系与自然水系相比相似性更高, 能更好地反映研究区的水系特征, 对于流域演化特征表达更有益, 这与杨珍 (2014) 提取门源盆地河网水系时取得的结果一致, 综合分析表明研究选取的面积阈值基本合理。



Pt₁T—托赖岩群; O₃k—扣门子组; S₁a—肮脏沟组; D₃l—老君山组; P₃y—窑沟组; T₁₋₂x—西大沟组; J₁₋₂y—窑街组; K₁x—下沟组;
F₁—冷龙岭断裂; F₂—门源盆地北缘断裂; F₃—门源盆地南缘断裂; F₄—达板山断裂
a—研究区地质图(据左群超等, 2018; 青海省 1:250000 门源回族自治县幅建造构造图修改); b—地质剖面图

图 2 门源盆地地质图及穿盆剖面

Fig. 2 Geological map of the Menyuan basin and cross-basin section (Geological map modified from Zuo et al., 2018; 1:250000 Structural Map of Menyuan County, Qinghai Province)

(a) Geological map of the study area; (b) Geologic profile of the study area

Pt₁T—Tuolai Group; O₃k—Koumenzi Formation; S₁a—Angzanggou Formation; D₃l—Laojunshan Formation; P₃y—Yaogou Formation; T₁₋₂x—Xidagou Formation; J₁₋₂y—Yaojie Formation; K₁x—Xiagou Formation

F₁—Lenglongling Fault; F₂—North Margin Fault of Menyuan Basin; F₃—South Margin Fault of Menyuan Basin; F₄—Dabanshan Fault

表 1 面积阈值定义的次级集水流域属性

Table 1 Attributes of the sub-catchment basins defined by area threshold

面积阈值/km ²	次集水盆地个数	平均面积/km ²	平均高差/m	平均HI值
0.9	4818	1.327	375	0.4417
1.8	2333	2.724	474	0.4345
2.7	1640	3.861	530	0.4317
3.6	1187	5.310	574	0.4271
4.5	955	6.590	601	0.4240
5.4	796	7.887	630	0.4216

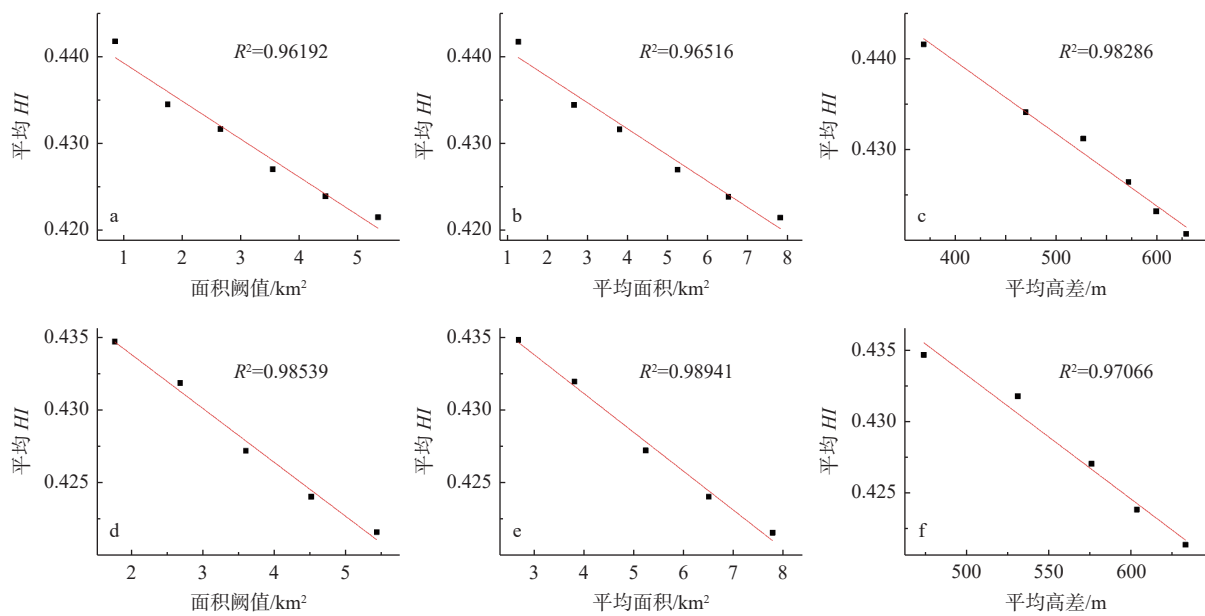
2.3 研究方法

2.3.1 面积-高程积分

Davis(1899)首先提出了地貌侵蚀循环理论。在此基础上, Strahler(1952)通过对比发现地貌侵蚀循环理论和HI值具有一定关联性, 并提出了HI值可以用于探讨流域地貌演化阶段, 其方法主要是通

过计算一定流域内集水盆地的高度比例与面积比例来描述河流目前所处的发育演化阶段。HI值代表了集水流域的原始地貌面在同步的隆升和侵蚀作用下, 流域内残存的地形体积占总体积的比例(图4), 因此同一流域内的HI值分布特征其实是构造抬升与地表侵蚀相互对抗的结果, 且与流域面积大小无关(Strahler, 1952)。目前, 已有许多学者利用HI值开展了构造地貌的相关研究, 揭示了HI值与构造活动之间的响应关系(苏琦等, 2016a; 高泽民等, 2019; 洪艳等, 2019; 关雪等, 2021; 张亚男等, 2022)。

目前HI值的计算方法有很多, 常用的方法有起伏比法、体积比例法和积分曲线法(常直杨等, 2015)。3种方法计算结果相差不大, 但计算效率却有很大差别, 起伏比法是其中效率最高也最为便捷的。Pike and Wilson(1971)利用数学公式推导得出起伏比法, 并用于估算HI值, 计算公式如下:

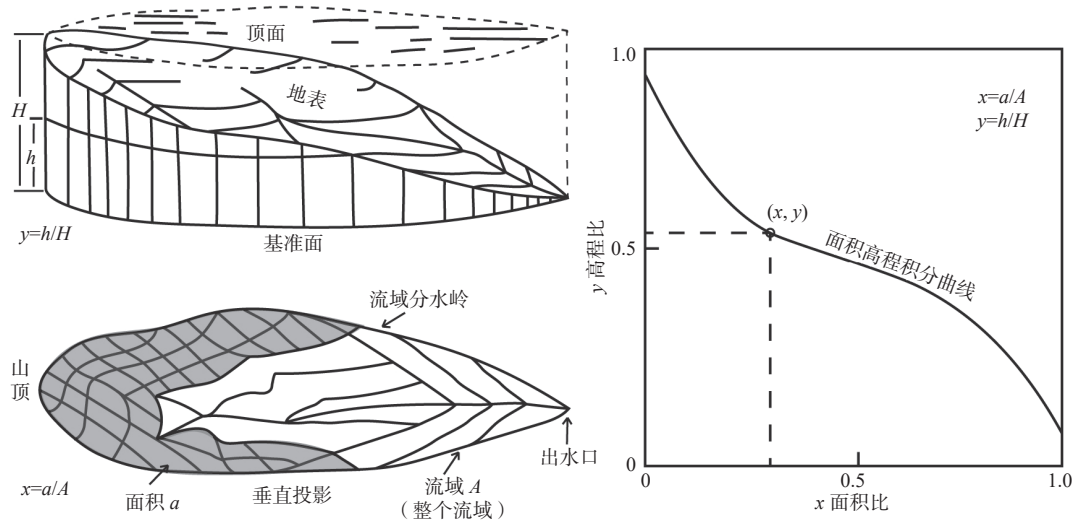


a—平均 HI 值和面积阈值；b—平均 HI 值和平均面积；c—平均 HI 值和平均高差；d—调整后的平均 HI 值和面积阈值；e—调整后的平均值 HI 和平均面积；f—调整后的平均 HI 值和平均高差

图 3 研究区平均 HI 值与面积阈值、平均面积、平均高差的相关关系图

Fig. 3 The correlation graph between the average HI value in the study area and the area threshold, the average area and the average altitude difference

(a) Average HI value and area threshold; (b) Average HI value and average area; (c) Average HI value and average altitude difference; (d) Adjusted average HI value and area threshold; (e) Adjusted average HI value and average area; (f) Adjusted average HI value and average altitude difference



h —流域内选定一点高程与出水口高差； H —河道河头与出水口高差； a —流域内选定一点对应的流域面积； A —整个流域的面积

图 4 面积-高程积分示意图（据 Strahler, 1952 修改）

Fig. 4 Area-elevation integration diagram(Modified from Strahler, 1952)

h —Elevation difference between a selected point within the watershed and the outlet; H —Elevation difference between the riverhead and the outlet; a —Watershed area corresponding to a selected point within the watershed; A — Total area of the entire watershed

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

式中， H_{mean} —流域内平均高程，m； H_{max} —流域内

最大高程，m； H_{min} —流域内最小高程，m。

在地貌演化过程中，地貌形态受到构造、岩性

和气候等因子的综合影响, HI 值则是上述影响因子综合作用的体现(赵洪壮等, 2010a)。 HI 值对于构造活动具有很好的指示作用, 在一定程度上能够反映构造活动对流域盆地的影响程度(张韵娴, 2003; 陈彦杰, 2004; 邵崇建等, 2015)。一般来说, HI 高值代表构造活动强烈地区; 而低值则对应构造活动相对较弱地区。

2.3.2 Hack 剖面与河长坡降指数

Hack(1973)提出河长坡降指数(Stream length-gradient index, SL)与 Hack 剖面。河流纵剖面发生调整通常是构造作用的结果(Burnett and Schumm, 1983; Ouchi, 1985; 赵洪壮等, 2010b)。Hack 剖面与 SL 被用于表征不同尺度的河流地貌特征, 前者常用于反映河流纵剖面的整体变化, 后者则主要突出局部坡度变化(Chen et al., 2003)。河流纵剖面局部河段的坡度变化, 能够反映河床上基岩岩性或构造活动强弱的差异(Hack, 1973)。 SL 将地区河流坡度与该地区河流长度联系起来, 可以为比较不同河流之间受构造活动影响程度提供依据。因此, SL 与 Hack 剖面常被用于评价构造活动、岩性和气候对地

貌形态的影响(吉亚鹏等, 2011; 徐岳仁等, 2013)。

以河段距河流源头的距离取对数作横坐标, 以河段高程作纵坐标, Hack 剖面可表示为:

$$H = c - k \times \ln L \quad (2)$$

式中, H —各河段高程, m; c —任意常数; k —斜率, L —河流源头至河段中点的距离, m(徐岳仁等, 2013; 赵国华等, 2014)。如果图形是一条直线, 则此直线为理想的 Hack 剖面(图 5), 代表目前河流处于“均衡状态”, 即河流下切侵蚀能力与基岩河床抗侵蚀能力达到相对平衡。此时直线的斜率 k 就是 SL 值, 可以用来描述流域盆地内河流不同河段的梯度变化(常直杨等, 2015), 其公式为:

$$SL = \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \times L \quad (3)$$

式中, ΔH —单位河段间的高程差, m; ΔL —单位河段长度, m; L —河段中点到河流源头距离, m(徐岳仁等, 2013; 赵国华等, 2014)。考虑到同一河道不同河段的坡度不断发生变化, 无法直接比较, 且在自然界中河流流经区域的岩石, 其抗侵蚀能力可能

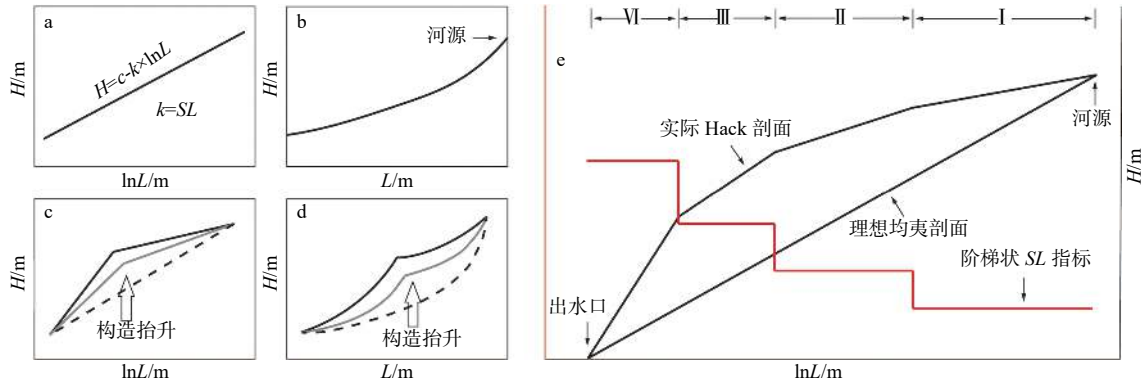


图 c、d 中黑色虚线代表未受构造作用的 Hack 剖面形态与河道剖面形态, 分别对应图 a、b 黑色实线; c、d 中灰色实线与黑色实线代表随着构造作用 Hack 形态与河道剖面形态变化过程; 图 e 中 I、II 对应不同阶段河道受到构造作用后的 SL 曲线形态, 红色阶梯状曲线表示不同阶段的 SL 值

H —河道高程; L —河道距离

a—未受构造扰动的 Hack 剖面; b—未受构造扰动的河流纵剖面; c—受构造抬升的 Hack 剖面; d—受构造抬升的河流纵剖面; e— SL 与 Hack 剖面叠图

图 5 SL 与 Hack 剖面示意图 (据 Hack, 1973 修改)

Fig. 5 SL and Hack profile schematic (Modified from Hack, 1973)

(a) Hack profile without tectonic disturbance; (b) undisturbed river profile; (c) Hack profile uplifted by tectonics; (d) Tectonically uplifted river profile; (e) SL and Hack profile overlay

H —Stream height; L —Stream length

In figures c and d, the black dashed lines represent the unaltered morphology of the Hack profile and river channel profile, corresponding to the black solid lines in figures a and b. The gray solid lines and black solid lines in figures c and d represent the evolution of the Hack morphology and river channel profile with tectonic influences. In figure e, I and II correspond to the SL curve forms of the river channel at different stages after being affected by tectonic forces, where the red stepped curve represents SL values at different stages.

不一样, 干扰因素较多, 因此, 可以取单位河段上的 SL 与整条河流的均衡坡降指数 (K) 的比值——标准化河长坡降指数 (SL/K), 消除不同单位河段上 SL 的不确定性及相互之间的不可对比性(苏琦等, 2016b), 在结果中通常也以 SL/K 代替 SL , 表示河道梯度变化特征。Seeber and Gornitz(1983)对喜马拉雅山地区各流域的 SL 形态分析时, 根据 SL/K 对河道形态进行了划分, SL/K 值在 0~2 区间划为缓河段、2~10 划为陡河段、10 以上则划为极陡河段。

一般地, Hack 剖面上凸, 指示河段受到较强的构造扰动; 下凹时, 指示河段受到的构造扰动较弱。当流域内隆升速率与侵蚀速率接近时, Hack 剖面呈直线形态, 此时其斜率就是均衡坡降指数(曹凯等, 2007; 曹鹏举等, 2023)。在岩性均一的基岩区域, 当河道某一阶段 SL/K 发生异常突变, 结合断裂位置、岩性等因素进行分析, 可一定程度上反映出

突变产生的主要原因, 借以探讨构造活动性关系。

3 结果

3.1 流域面积-高程积分特征

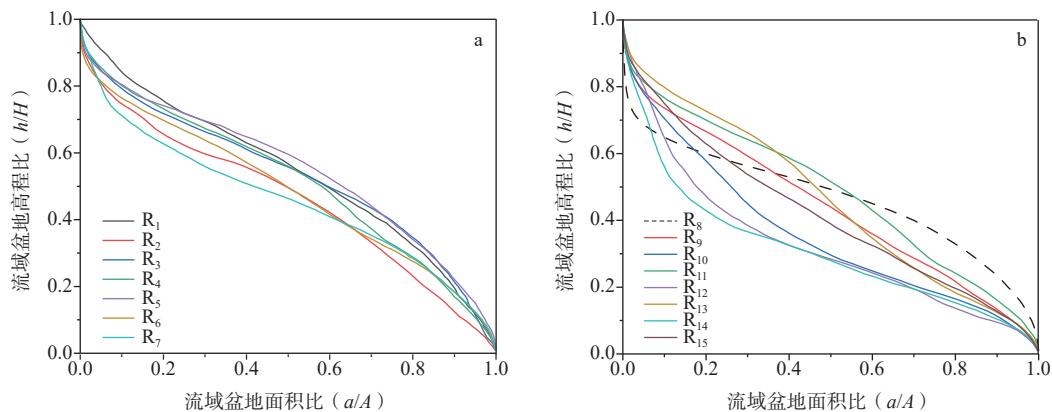
单个流域内高程差异越大则 HI 值越小, 不同的地貌类型具有不同的高程差异, 即 HI 值在空间分布上有一定依赖性(郑光佑, 2002)。因此, 在提取 HI 值时, 在同一类型的集水流域内进行比较得到的结果更为客观, 也可减少高程差异对 HI 值的影响(邵崇建等, 2015)。文中根据合适的汇流阈值提取门源盆地北缘基岩山体的河网水系, 选取了河源可以到达基岩山体的河道, 确定了对应的 15 个流域, 提取其对应的 HI 值(表 2)并绘制面积-高程积分曲线(HC ; 图 6), 用于对比门源盆地北缘断裂走向转折处东、西两侧的 HI 值分布特征。

表 2 门源盆地北侧 15 条河道主要地貌参数

Table 2 Main geomorphic parameters of 15 river channels in the north side of the Menyuan basin

河道编号	河道名称	长度/km	面积/km ²	最大高程/m	最小高程/m	坡度/(°)	HI值
R ₁	无名沟1	2.25	4	3849	3541	7.87	0.54
R ₂	无名沟2	9.21	19	4341	3334	6.28	0.46
R ₃	黑沟	3.01	9	4062	3412	12.47	0.53
R ₄	岗龙沟	5.81	14	4072	3336	7.28	0.52
R ₅	外力沟	3.18	6	4000	3489	9.25	0.55
R ₆	无名沟3	3.94	15	3910	3456	6.62	0.49
R ₇	小萨拉沟	2.46	4	3826	3503	7.54	0.46
R ₈	老虎沟	26.79	250	4396	3200	2.56	0.47
R ₉	北沟	6.16	29	3820	3241	5.39	0.44
R ₁₀	歪里沟	9.71	38	3850	3035	4.81	0.36
R ₁₁	无名沟4	10.54	39	4234	3251	5.35	0.48
R ₁₂	三岔河	7.49	14	3561	2996	4.33	0.33
R ₁₃	无名沟5	7.96	27	4086	3260	5.96	0.46
R ₁₄	卡石头沟	5.32	8	3556	3173	4.13	0.31
R ₁₅	无名沟6	8.12	19	3722	3152	4.03	0.41

注: 长度是基岩河道长度, 面积表示基岩河道所对应的流域面积



a—西侧河道 R₁—R₇ 的 HC 曲线; b—东侧河道 R₁—R₈ 的 HC 曲线

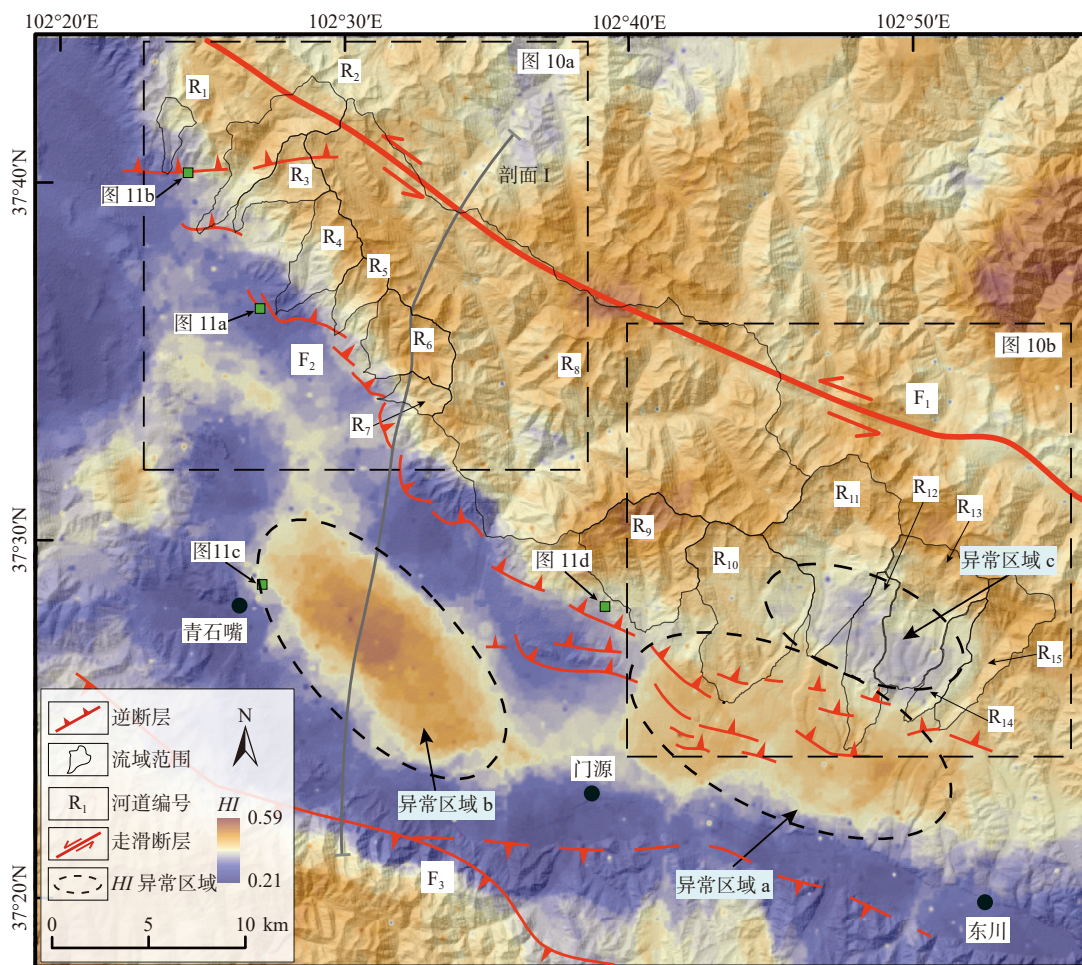
图 6 流域的 HC 曲线特征
Fig. 6 HC curve characteristics of watershed

(a) HC curves of R₁ to R₇; (b) HC curves of R₈ to R₁₅

15条河道的长度、面积与高程差异主要来源于地貌发育演化,是构造活动与地表侵蚀作用等共同作用的结果(表2)。其中,河道 R_8 (老虎沟)的流域面积远大于其他河道。结果表明,在东西向的分布上以断裂走向转折处(老虎沟)为界,西侧 HI 值整体高于东侧;而河道坡度也具有相同的分布趋势。 HC 曲线的弧度特征十分明显,西侧河道 R_1 — R_7 的形态相似,为S型,整体上凸;东侧河道 R_{11} 、 R_{13} 为近直线型,河道 R_{15} 轻微下凹,河道 R_9 、 R_{10} 、 R_{12} 、 R_{14} 则明显下凹。从 HI 值与 HC 分布来看,

西侧河道 R_1 — R_7 整体比东侧河道 R_9 — R_{15} 年轻,发育演化程度更低些。

在参考已有 HI 值分布研究方法的基础上(张天琪等, 2015),将研究范围进行小流域划分,提取2333个子流域的 HI 值,采用克里金插值法,最终得到盆地内不同空间位置流域的 HI 分布特征(图7)。在河道 R_{10} — R_{15} 流域范围内,存在明显低值异常(异常区域c),盆地内部存在2处高值异常(异常区域a、b), HI 值空间分布形态可能对区域断层展布具有一定指示意义。



F₁—冷龙岭断裂; F₂—门源盆地北缘断裂; F₃—门源盆地南缘断裂

图7 面积-高程积分空间分布特征

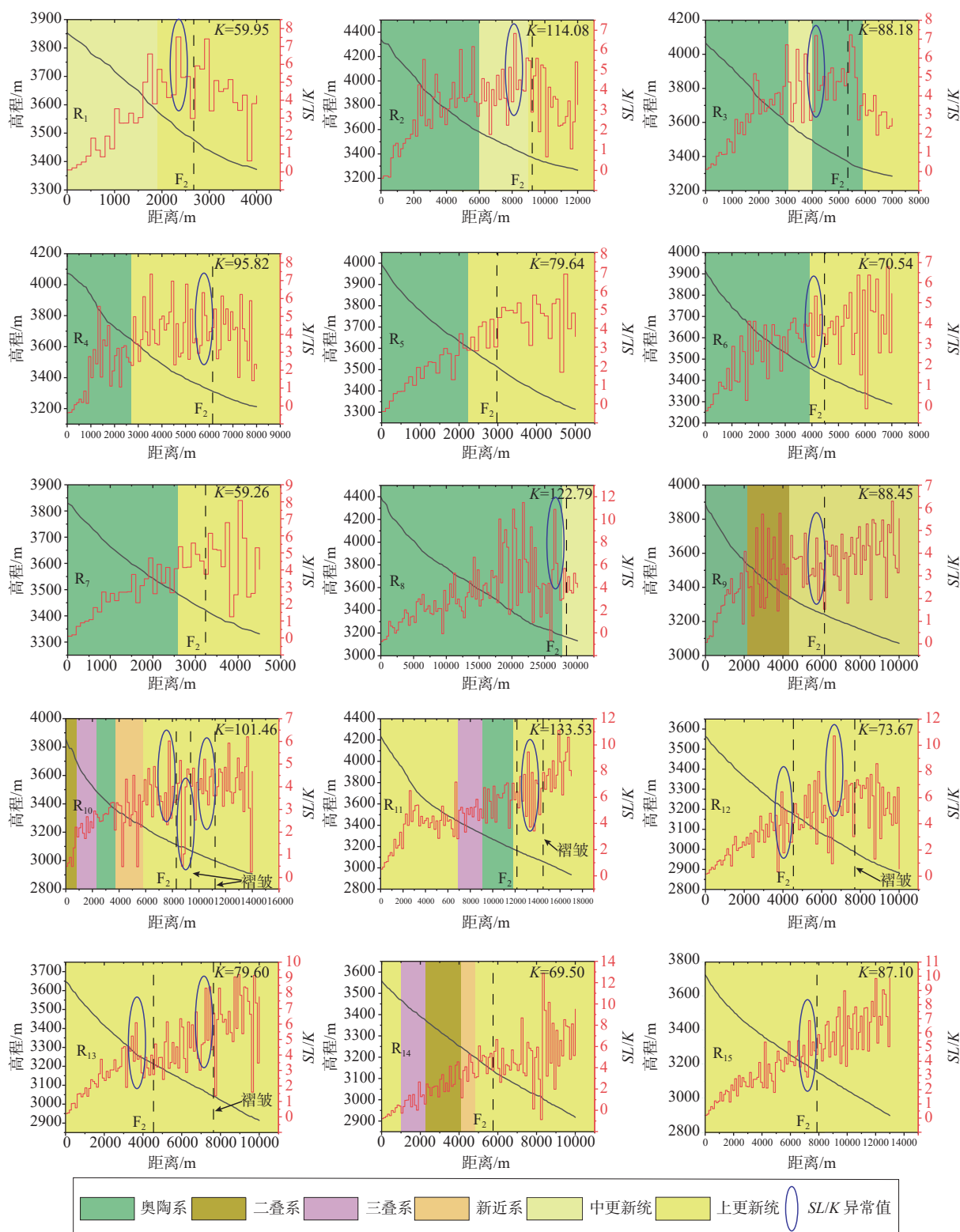
Fig. 7 Spatial distribution characteristics of area-elevation integral

F₁—Lenglongling fault; F₂—North margin fault of the Menyuan basin; F₃—South margin fault of the Menyuan basin

3.2 Hack剖面与河长坡降指数

根据公式(2),以河段与河流源头距离的对数值作Hack剖面横坐标,会导致中、下游河段的坡度变化放大而被强调,而上游河段的坡度变化则会因为被压缩而失去解析度(Hack, 1973; 赵洪壮等,

2010b),所以直接采用Hack剖面与 SL 的关系会难以显示真正的河道坡度变化信息,应该利用 SL 与河流纵剖面结合,再叠加断裂位置以及河床岩层信息进行综合分析,尽可能全面地展现出河流纵剖面上的坡度变化与各种影响因素间的相互关系(图8)。



黑色曲线为河流纵剖面; 红色阶梯状曲线表示 SL/K 变化趋势; 黑色虚线 F_2 表示门源盆地北缘断裂主断裂位置

图 8 河流纵剖面与河长坡降指数及盆地北缘断裂、河床地层岩性叠加图

Fig. 8 Overlay diagrams of river longitudinal profile and stream length–gradient index, north margin fault and riverbed lithology

The black curve represents the longitudinal profile of the river, the red stepped curve indicates the trend of SL/K variations, and the black dashed line F_3 denotes the main fault location of the north margin fault of the Menyuan basin.

由于不同河道长度差别较大,所以应根据河道长度采用不同的水平间距来保证结果中 SL 信息密度,得到更直观的结果。

结果显示,15条河道的 Hack 剖面整体形态强烈上凸(图9),指示河道受构造作用扰动强烈,所有河道的 K 值大小与流域面积也呈较好的相关性;除河道 R_5 、 R_7 、 R_{14} 外,其他河道在断裂经过河道位置的上游一定距离处都出现了 SL 峰值波动;另外,河道 R_1 — R_7 的 SL/K 值处于 $0\sim 10$ 之间,河道 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{14} 和 R_{15} 中出现大于 10 的 SL 峰值,指示河道 R_8 西侧未出现极陡河段,主要为缓河段与陡河段,东侧部分河道局部出现了极陡河段。

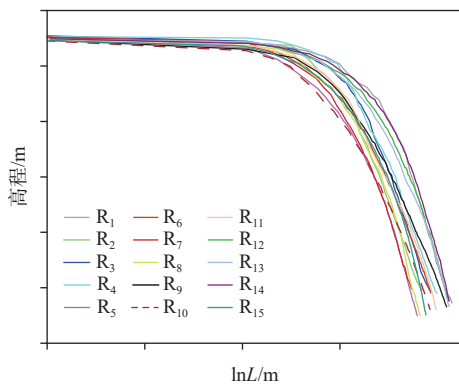


图9 15条河道 Hack 剖面形态示意图

Fig. 9 Hack profile morphology of 15 river channels

4 结果分析及讨论

4.1 HI 值的影响因素分析

构造活动、气候变化和岩石抗侵蚀差异是 HI 值的主要影响因素 (Lifton and Chase, 1992; Masek et al., 1994)。研究区内水流补给主要源于气候性降水和冰雪融水,且河道 R_1 — R_{15} 中存在流经不同地层的河道,若要更精细地体现 HI 值的构造指示意义,还必须单独讨论岩性、气候(主要是降雨)及现代冰川等因素的影响。

4.1.1 岩性因素

一般情况下,河道基岩硬度的差异及周缘裂隙分布情况会导致河床的抗侵蚀能力发生改变,进而影响到河流地貌发育速率,最终对整个区域的地貌形态产生影响;但野外实际的岩石抗侵蚀能力数据难以获得,所以研究中通常利用不同年代地层以及岩石类型来讨论其对现今地貌形态的影响(胡小飞等, 2010)。

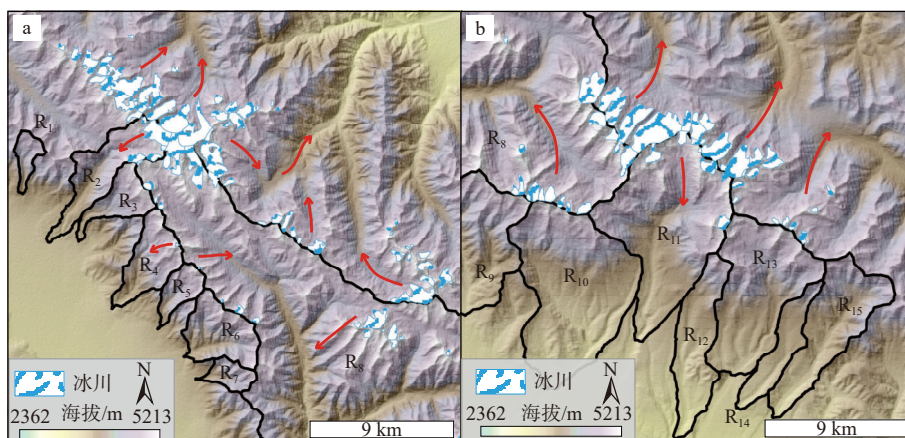
根据研究区的区域地质特征(图2a),主要流域所在区域的岩性以奥陶系的砂岩、页/板岩为主,夹有部分石灰岩;河道 R_{10} — R_{15} 还流经二叠系和三叠系的砂岩夹粉砂岩、板岩,其岩性与奥陶系相近;而河道 R_1 — R_4 、 R_{11} — R_{15} 流域还覆盖有第四系砂砾石、细砂、粉砂、砂土层及冲洪积物质。奥陶系与二叠系、三叠系的抗侵蚀能力相差不大,第四系冲洪积松散物质及局部半胶结的碎屑沉积物抗侵蚀能力最弱。假设岩性是影响河道 HI 值大小的主要因素,那么河道 R_1 对应的流域 HI 值应该较低,与河道 R_{12} 、 R_{13} 、 R_{15} 接近,但实际河道 R_1 流域的 HI 值却明显较高,因此,研究区的岩性差异并不是 HI 值差异的主要影响因素。

4.1.2 水系流量因素

通常,流水对地貌形态的塑造具有至关重要的作用。流域水量的改变以及物源变化会调整水系侵蚀能力,进而影响地貌形态。水系流量大小在很大程度上取决于区域降水量的多少,其次就是冰川融水作用。研究区属于高原亚寒带气候,降雨较集中,平均年降雨量约为 530 mm(杨珍, 2014),且分布较均匀,因此流域水量变化受降雨影响十分有限。除此之外,流域上方冷龙岭有现代冰川覆盖(图10),冰川融水可使流域内水量急剧增加,加快流域内的侵蚀速率。对现代冰川的覆盖位置分析发现,山体阳坡处冰川较少,主要覆盖范围位于阴坡(冷龙岭山脊北侧);根据融水后水流方向,河道 R_2 、 R_8 、 R_{11} 在研究区 15 个流域中受冰川影响相对较大,且河道 R_2 对应流域的 HI 值在河道 R_1 — R_7 中偏低,推测是此前冰川季节性融水加快了该流域的侵蚀速率;河道 R_{11} 所在流域受到冰川影响较大,其 HI 值在河道 R_9 — R_{15} 中最大,说明冰川融水并未对该流域造成太大影响;河道 R_4 流域范围仅有一处小规模冰川覆盖(图10a), HI 值与相邻河道流域接近,受冰川影响较小;其余冰川分布于山体阴坡,冰川融水后不汇入河道 R_1 — R_{15} 所在流域,所以现代冰川分布可能对个别流域演化具有影响,但对 15 条河道及其对应流域的整体影响有限。除此之外,因第四纪晚期以来的古冰川具体位置和规模以及退缩速率等数据难以获得,古冰川是否对地貌演化产生影响,不在此具体讨论。

4.1.3 坡度因素

根据基岩河道水力侵蚀模型,基岩河道的侵蚀速率与河道坡度呈正相关性(王一舟等, 2016)。研



红色箭头指示冰川融化后汇入方向

a—河道 R_8 西侧现代冰川覆盖情况; b—河道 R_8 东侧现代冰川覆盖情况

图 10 研究区现代冰川分布特征 (具体位置见图 7; 数据来自国家青藏高原科学数据中心 <https://data.tpdc.ac.cn/home>)

Fig. 10 Distribution characteristics of modern glacier cover in the study area (The position is shown in Figure 7; Data sources: national science data center of the qinghai-tibet plateau at <https://data.tpdc.ac.cn/home>)

(a) Modern glacier cover on the west side of R_8 ; Modern glacier cover on the east side of R_8

The red arrows indicate the direction of glacier meltwater runoff.

究区内 15 条河道坡度自西向东逐渐减小 (表 2), 对比东、西两侧河道坡度及 HI 值变化, 如果坡度是主要影响因素, 河道 R_1 与 R_{12} 基岩河床都是第四纪冲洪积物质, 不考虑其他因素影响, 河道 R_1 坡度远大于河道 R_{12} , 此时河道 R_1 的 HI 值应低于河道 R_{12} , 但结果恰好相反。由此可见, 坡度也不是造成河道 HI 值差异的主控因素, 对流域演化影响有限。从流域演化过程来看, 河道坡度差异本身也是地貌演化所带来的。

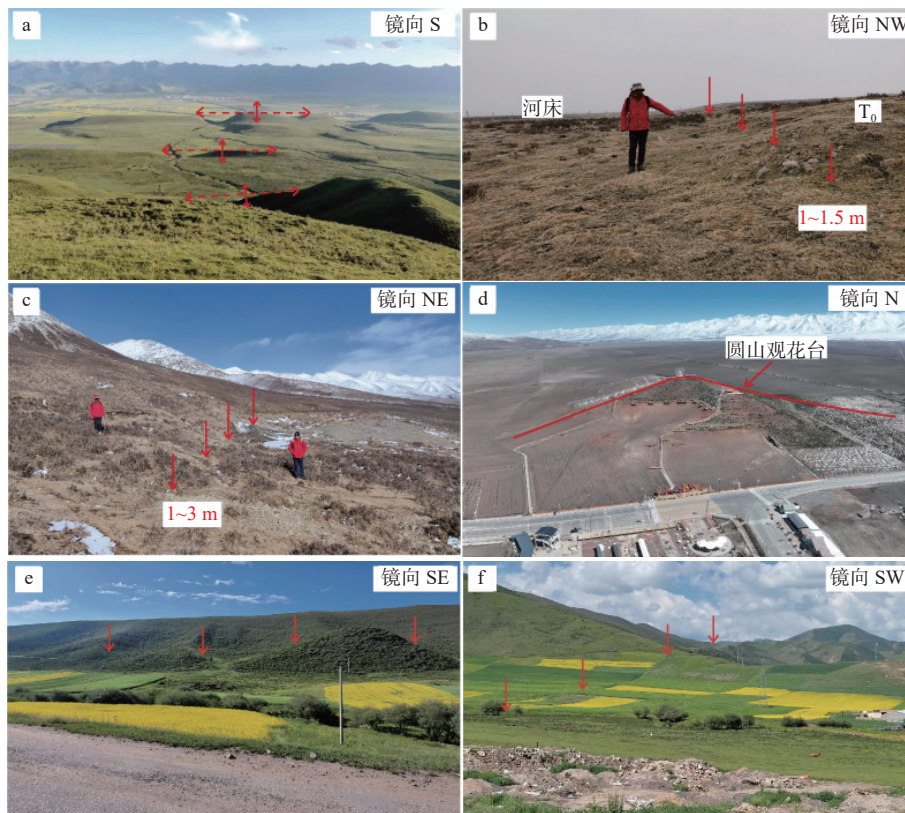
综合以上分析可知, 研究区的地质岩性、气候 (降雨)、冰川覆盖及河道坡度对河道流域演化过程具有一定影响, 但这些影响只针对个别河道流域, 无法对整体结果造成大的改变。因此, 除侵蚀方面的影响外, 推测地貌演化过程中可能主要由另一种驱动力 (构造活动) 控制, 形成了现今的地貌格局。

4.2 HI 值指示的地表活动构造变形特征

根据 15 个河道的 HI 值和 HC 曲线特征并结合其影响因素分析表明, HI 值的空间分布特征指示着研究区构造活动的强弱分布特征及断层展布形式。门源盆地北缘断裂的走向自河道 R_8 处发生转折, 转折处东、西两侧表现出不一样的地貌演化特征, 实际指示了山前断裂活动性分布特征具有西段和东段明显的差异。门源盆地为典型的山间断陷盆地, 盆地两侧的逆冲断层双向对冲使得盆地下

陷。相似地如中国台湾的中央山脉地区, 郑光佑 (2002) 对其两侧断层活动进行研究时发现, 河道的 HI 高值通常会分布在逆断层上盘附近, 而低值则会分布在断层下盘。根据文中 HI 分布特征 (图 7), 河道 R_{10} — R_{15} 的流域内存在明显低值异常 (图 7 异常区域 c), 谷地内部存在 2 处高值异常 (图 7 异常区域 a、b), 结合野外地质考察, 可推断东侧山根前主断裂已挤压扩展入盆地内部, 导致山体后缘产生了一定亏损并发育张性正断层, 而在盆地内部则发育了成排的逆断层-褶皱带 (图 11a), 这也就解释了 HI 低值异常 (图 7 异常区域 c) 及山前出现高值异常 (图 7 异常区域 a) 的原因。在河道 R_8 西侧山根前发现了一系列全新世活动的逆断层陡坎 (图 11b、11c), 与 HI 分布特征基本吻合, 并未在河道 R_8 东侧发现类似的逆断层-褶皱带。

除此之外, 在盆地内部青石嘴镇及河道 R_8 东侧分布有大面积的 HI 高值异常区 (图 7 异常区域 b), 但在野外并未在地表发现连续的断层地貌等异常特征。文中利用地貌剖面结果, 并结合赵凌强等 (2022) 测得的深部大地电磁数据进行分析 (图 12), 结果显示, 高程曲线与 HI 值曲线的起伏关系整体具有较好的一致性, 大地电磁剖面解译出的不同区段断裂深部延展特征, 很好地对应了盆地内部的 HI 高值异常, 由此推测门源盆地内部可能存在一条隐伏



a—门源盆地北缘断裂东段多排逆断层-褶皱带；b—门源盆地北缘断裂西段岗什卡滩高漫滩逆断层陡坎；c—门源盆地北缘断裂西段狼洞沟逆断层陡坎；d—门源盆地内部青石嘴镇处推测逆断层；e—铁迈附近断层槽谷及山脊位错；f—铁迈附近断层垭口及小的断层陡坎

图 11 门源盆地中发育的断层及其变形表现（具体位置见图 7）

Fig. 11 The field photos of the Menyuan basin (The position is shown in Fig. 7)

(a) Multi-row reverse fault-fold belt in the east section of the north margin fault of the Menyuan basin; (b) Gangshikatan high overplain reverse fault in the west section of the north margin fault of the Menyuan basin; (c) Langdonggou reverse fault in the west section of the north margin fault of the Menyuan basin; (d) The reverse fault presumed in Qingshizui town, Menyuan basin; (e) Fault troughs and ridges dislocations near Tiemai; (f) Fault pass and small fault steepes near Tiemai

断裂(F_6 ; 图 12)。同时,野外地质考察在青石嘴镇地区发现一处地形隆起(图 11d),推测可能是隐伏断裂在地表的部分地貌表现。

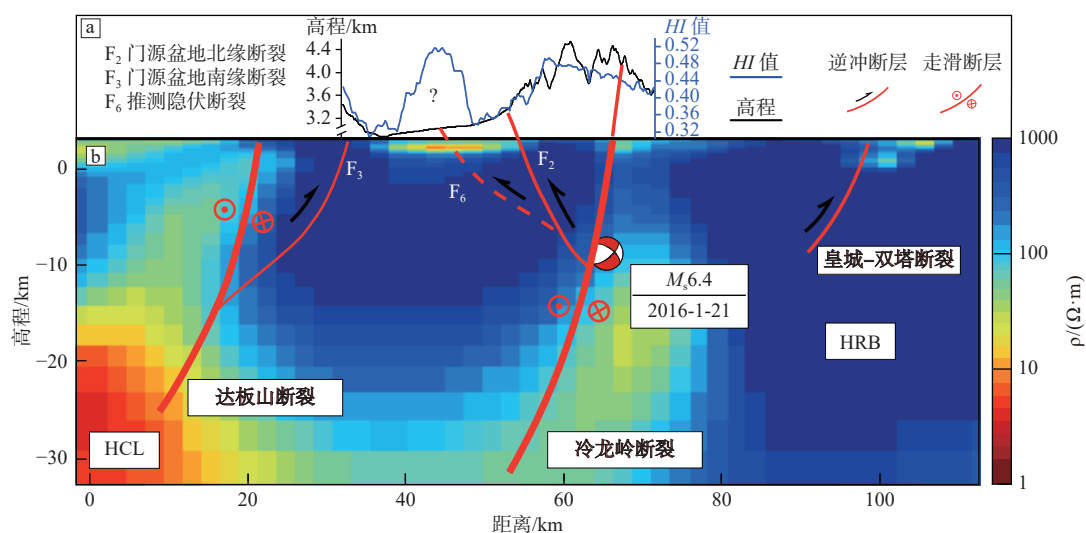
门源地区曾多次发生过较大规模的地震,最近发生的 2 次地震相隔时间较短,其中,2016 年 1 月 21 日发生在冷龙岭北侧断裂的门源 $M_s6.4$ 地震,震源机制为逆冲型(胡朝忠等, 2016); 2022 年 1 月 8 日发生的 $M_s6.9$ 地震(韩帅等, 2022; 袁道阳等, 2023),震中位于冷龙岭断裂西段与托莱山断裂东段的交汇地区,发震构造以冷龙岭断裂西段为主,托勒山断裂东段参与,为二者共同作用产生双向破裂的结果。初步地表调查发现,门源 $M_s6.9$ 地震形成了一系列复杂的同震地表破裂带,影响了包括兰新铁路、扁门高速公路等国家重要工程(盖海龙等, 2022; 袁道阳等, 2023)。根据 HI 值分布的高值异常

位置,隐伏断裂位于门源盆地内部以青石嘴镇为主的人类居住密集区,结合近些年来门源地区地震频发,该隐伏断裂应引起一定重视。

4.3 河长坡降指数所指示的活动构造意义

当 SL 在局部河段发生明显突起,代表该河段的坡度发生了快速变化,可能是断裂、褶皱或岩性改变所致,也可能是人类活动造成,如建造水坝、拦沙坝等。因此要结合河道实际情况,综合分析影响 SL 突变的因素以及断裂活动性的差异(赵洪壮等, 2010b)。河道不同位置出现 SL 峰值波动的原因也有差别,上游的 SL 出现波动首先要考虑断裂活动及岩性变化,中、下游则应首要考虑人类活动产生的影响。

河道 R_1-R_{15} 中部分河道所流经的地层岩性发生变化(一般由坚硬岩性向软弱岩性过渡时)可能



HCL—地壳中的低阻结构; HRB—地壳中的高阻结构

a—地貌剖面(具体位置见图7); b—大地电磁剖面

图12 横穿研究区的地貌剖面 and 二维大地电磁结构模型(大地电磁剖面位置见图1a; 据赵凌强等, 2022 修改)

Fig. 12 Geomorphic profile and two-dimensional magnetotelluric structural model obtained across the study area(The position of the geomorphic profile is shown in Fig. 7; The position of magnetotelluric profile is shown in Fig. 1a; Modified from Zhao et al., 2022)

HCL—Low-resistivity structures in the crust; HRB—High-resistivity structures in the crust; a—Geomorphic profile; b—Magnetotelluric profile

会出现 SL 峰值波动, 形成固定的 Vertical-step 裂点(王一舟等, 2016)。在均一岩性的基岩河道出现 SL 峰值变化, 则可能是由于断裂、褶皱变形或人类活动所致。门源盆地北缘断裂主断裂分布在冷龙岭北缘山前, 人类活动导致 SL 产生峰值的可能性较小, 断裂位置的上游河道出现 SL 峰值波动可能由断裂活动所致。分析表明, 除河道 R₅、R₇ 和 R₁₄, 其他河道都在断裂穿过河道位置前一定距离出现明显的 SL 峰值(图8)。其中, 河道 R₁、R₂、R₄、R₉、R₁₁ 和 R₁₅ 的 SL 峰值出现在同一时代地层中, 且未在该位置发现有明显人类活动痕迹, 因此认为 SL 峰值的产生应该是由断裂构造活动; 河道 R₃ 的 SL 峰值虽然位于不同时代地层变化区域内, 但其岩性转化是由第四系的松散冲洪积物质变为奥陶系砂岩、页/板岩, 因此判断是由断裂活动引起; 河道 R₆ 的 SL 峰值位置处于岩性变化界线附近且位于断裂前缘位置, 难以直接判定究竟是哪种因素引起的 SL 峰值突变; 河道 R₁₀、R₁₂ 和 R₁₃ 的 SL 峰值不止一处, 位置均不在岩性界线附近, 主断裂前的峰值可能是由该断裂活动造成的, 其他峰值波动则可能由中、下游的逆断层-褶皱活动引起。河道 R₅、R₇ 和 R₁₄ 在断裂前缘没有发现 SL 异常峰值, 但在中、下游存在明显峰值波动, 由于峰值所处位置距离人类活动聚集

区域较近, 推测其可能是由人类活动所造成的。此外, 河道 R₈ 西侧 R₁—R₇ 所有河道的 SL/K 值小于 10, 以陡河段为主; 东侧河道 R₁₁、R₁₂、R₁₄ 和 R₁₅ 的局部 SL/K 波动峰值大于 10, 表明东侧河道的局部河段出现了极陡河段, 尤其是河道 R₁₂ 的 SL/K 峰值位置指示其可能是由逆断层-褶皱带活动引起的; R₁₁、R₁₃ 和 R₁₅ 河道 SL/K 值大于 10 的波动主要位于中、下游区域, 可能是由人类活动引起的局部河段坡度增加。由此可见, 构造活动可以对 SL 产生显著影响。

4.4 门源盆地东、西侧活动样式差异及其可能成因分析

门源盆地构造变形样式主要为: 盆地北缘断裂走向发生转折处(老虎沟)以西(图2b), 北侧山体主要由门源盆地北缘断裂控制, 山根前发育全新世活动的低矮断层陡坎; 断裂走向转折处(老虎沟)以东, 剖面形态发生明显改变, 北侧山体逆冲至盆地内部, 山前发育了多排晚第四纪活动的逆断层-褶皱带(图2c); 南侧山体由门源盆地南缘断裂控制, 目前考察发现其最新活动时代为晚更新世, 暂未发现全新世活动的证据。门源盆地南、北缘断裂分别为达板山与冷龙岭2条大型走滑兼逆冲断裂带的分支断裂, 与发育的其他多条小型分支断裂, 共同控制形成了门源盆地现有的地貌格局。

门源盆地北缘断裂自北西西向转为北西向,从而导致盆地东、西侧构造变形样式、地貌形态及其地貌参数产生显著差异,但其驱动原因目前尚不明晰,还需要进一步讨论。野外地质考察发现,在铁迈乡发育有北东东向的第四纪晚期活动断裂(图 11e、11f)以及正对着老虎沟的北东向的断裂(位置见图 2a),所以,初步认为北东向断裂的存在以及冷龙岭主走滑断裂走向发生北西西—北西向的偏转可能是导致门源盆地北缘断裂走向发生转折的原因,也可能是造成盆地东、西两侧活动样式与地貌形态存在差异的原因。

5 结论

文中利用 ArcGIS 平台与数字高程模型数据 (DEM) 提取了门源盆地北缘山体 15 条河道对应流域的 HI 值并绘制了 HC 曲线,结合河道 Hack 剖面 and SL 峰值变化,探讨了该区域地貌发育演化特征、断裂展布形式以及地貌发育与断裂构造活动的关系等,得到以下结论。

(1) 15 条河道对应流域的 HI 值在门源盆地北缘断裂走向转折位置(老虎沟)发生变化, HC 曲线特征表现为老虎沟西侧整体上凸,东侧呈直线或下凹,说明山前主断裂的活动性在西侧与东侧存在明显差异,西侧逆断层仅发育于山根前有限的范围内;而东侧断裂则以活动逆断层—褶皱带的形式扩展到盆地内部;这也表明在排除其他干扰因素后, HI 值能够从地貌角度较好地反映其构造活动的差异性,是一个较为敏感的参数指标。

(2) 门源盆地内部以老虎沟为界,东、西两侧地貌发育演化差异较大,西侧以山前陡坎为主、地形陡峭,东侧断裂已逆冲至盆地内部、为大型逆断层—褶皱带。盆地内部的青石嘴镇及老虎沟东侧存在 HI 高值异常区,结合大地电磁探测结果,推测地下可能存在隐伏活动断裂。结合门源地区近年来地震频发的情况,门源盆地边缘及其内部褶皱、隐伏断裂等地应引起重视,建议开展活动断裂定量研究与潜在地震危险性评价工作。

(3) 15 条河道 Hack 剖面均表现为上凸形态,表明门源盆地北侧基岩山体整体受到较强的构造作用。在活动断裂通过的上游地区,多数河道的 SL 出现异常峰值波动,波峰位置与主断裂位置距离相近,说明构造活动可以对 SL 产生显著影响;个别河道还在岩性界线附近出现异常峰值,表明局部河段

的岩性变化可能对 SL 也有一定影响。

致谢: 感谢中国地震局地质研究所詹艳研究员的帮助和审稿专家有益的建议。

References

- AN Z S, KUTZBACH J E, PRELL W L, et al., 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya–Tibetan plateau since Late Miocene times[J]. *Nature*, 411(6833): 62–66.
- BURBANK P, 1999. Landscape evolution: the interactions of tectonics and surface processes[J]. *Basin Research*, 11(1): 1–6.
- BURNETT A W, SCHUMM S A, 1983. Alluvial-river response to neotectonic deformation in Louisiana and Mississippi[J]. *Science*, 222(4619): 49–50.
- CAO K, WANG G C, WANG A, 2007. The analysis of the tectonics and the behavior of the longitudinal section of Kunlun River in East Kunlun[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 713–721. (in Chinese with English abstract)
- CAO P J, LIU X B, CHENG S Y, et al., 2023. Geomorphic feature of the Zhuanglang River Basin in the eastern margin of Qilian Mountains and its tectonic implications[J]. *Geographical Research*, 42(1): 262–279. (in Chinese with English abstract)
- CHAMPAGNAC J D, YUAN D Y, GE W P, et al., 2010. Slip rate at the north-eastern front of the Qilian Shan, China[J]. *Terra Nova*, 22(3): 180–187.
- 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 with English abstract)
- CHEN Y C, SUNG Q, CHENG K Y, 2003. Along-strike variations of morphotectonic features in the western foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis[J]. *Geomorphology*, 56(1–2): 109–137.
- CHEN Y J, 2008. Morphotectonic features of Taiwan mountain belt based on hypsometric integral, topographic fractals and SL index[D]. Tainan: National Cheng Kung University: 1–84. (in Chinese with English abstract)
- DAVIS W M, 1899. The geographical cycle[J]. *The Geographical Journal*, 14(5): 481–504.
- DONG J Y, LI C Y, ZHENG W J, et al., 2021. Tectonic geomorphic features and geological significance of the Shidiqian anticline in the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Seismology and Geology*, 43(3): 521–539. (in Chinese with English abstract)
- GAI H L, LI Z M, YAO S H, et al., 2022. Preliminary investigation and research on surface rupture characteristics of the 2022 Qinghai Menyuan $M_{6.9}$ earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 44(1): 238–255. (in Chinese with English abstract)
- GAO Z M, LIU X W, SHAO Y X, et al., 2019. Geomorphological characteristics of Daqingshan drainage area in the northern margin of Hetao basin[J]. *Seismology and Geology*, 41(06): 1317–1332. (in Chinese with English abstract)
- 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 H W, CHEN Y, LI J J, 1995. A preliminary study on the sequences of glaciers, loess records and terraces of the southern foothills of Lenlong Ling in Qilian Mountains[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 31(1): 102-110. (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.
- HAN S, WU Z H, GAO Y, et al., 2022. Surface rupture investigation of the 2022 Menyuan $M_{\text{s}}6.9$ Earthquake, Qinghai, China: implications for the fault behavior of the Lenglongling fault and regional intense earthquake risk[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 155-168. (in Chinese with English abstract)
- HARRISON T M, COPELAND P, KIDD W S F, et al., 1992. Raising Tibet[J]. *Science*, 255(5052): 1663-1670.
- HETZEL R, TAO M X, STOKES S, et al., 2004. Late Pleistocene/Holocene slip rate of the Zhangye thrust (Qilian Shan, China) and implications for the active growth of the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 23(6): TC6006.
- HONG Y, ZHAO Y B, WANG Y S, et al., 2019. Study on the geomorphic uplift characteristics of the Longmenshan fault zone using hypsometric integral method[J]. *Science Technology and Engineering*, 19(30): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- HU C Z, YANG P X, LI Z M, et al., 2016. Seismogenic mechanism of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai $M_{\text{s}}6.4$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(5): 1637-1646. (in Chinese with English abstract)
- HU X F, 2010. The researches on temporal and spatial distributions of erosion rates and tectonic deformation in the Northern Oilian Shan[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1-143. (in Chinese with English abstract)
- HU X F, PAN B T, KIRBY E, et al., 2010. Spatial differences in rock uplift rates inferred from channel steepness indices along the northern flank of the Qilian Mountain, northeast Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(27): 3205-3214.
- JI Y P, GAO H S, PAN B T, et al., 2011. Implication of active structure in the upper reaches of Weihe river basin from stream length-gradient index (SL index) and Hack profile[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 47(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- JOLIVET M, BRUNEL M, SEWARD D, et al., 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan Plateau: fission-track constraints[J]. *Tectonophysics*, 343(1-2): 111-134.
- KANG J C, ZHU J J, CHEN H K, 1992. Late quaternary glacial sequence on the south Slope of the Lenglongling, Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 14(4): 352-359. (in Chinese with English abstract)
- LIANG M J, ZHOU R J, YAN L, et al., 2014. The relationships between neotectonic activity of the middle segment of Dari fault and its geomorphological response, Qinghai Province, China[J]. *Seismology and Geology*, 36(1): 28-38. (in Chinese with English abstract)
- LIFTON N A, CHASE C G, 1992. Tectonic, climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry: implications for landscape evolution in the San Gabriel Mountains, California[J]. *Geomorphology*, 5(1-2): 77-114.
- LIU Q Y, MA Y, CHENG L, 2022. Geochemical Evaluation of Soil Quality in Menyuan County of Qinghai Province[J]. *Geology and Exploration*, 58(3): 609-619.
- MA B Q, LI D W, 2008. Stages of the neotectonic movement of the Menyuan basin in the middle segment of the Qilian mountains[J]. *Journal of Geomechanics*, 14(3): 201-211. (in Chinese with English abstract)
- MA Z H, FENG Z T, PENG T J, et al., 2020. Quaternary drainage evolution of the Datong River, Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 353: 107021.
- MASEK J G, ISACKS B L, GUBBELS T L, et al., 1994. Erosion and tectonics at the margins of continental plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B7): 13941-13956.
- 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[J]. *Science*, 189(4201): 419-426.
- MOLNAR P, ENGLAND P, 1990. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or eggs?[J]. *Nature*, 346(6279): 29-34.
- MOLNAR P, ENGLAND P, MARTINOD J, 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon[J]. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357-396.
- OUCHI S, 1985. Response of alluvial rivers to slow active tectonic movement[J]. *GSA Bulletin*, 96(4): 504-515.
- PALUMBO L, HETZEL R, TAO M X, et al., 2009. Deciphering the rate of mountain growth during topographic presteady state: an example from the NE margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 28(4): TC4017.
- PANG J Z, YU J X, ZHENG D W, et al., 2019. Neogene expansion of the Qilian Shan, North Tibet: implications for the dynamic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 38(3): 1018-1032.
- PIKE R J, WILSON S E, 1971. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis[J]. *GSA Bulletin*, 82(4): 1079-1084.
- SEEBER L, GORNITZ V, 1983. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics[J]. *Tectonophysics*, 92(4): 335-367.
- SHAO C J, LI Y, ZHAO G H, et al., 2015. Tectonic geomorphology analysis of piedmont rivers in the southern section of Longmenshan Based on hypsometric integral[J]. *Geoscience*, 29(4): 727-737. (in Chinese with English abstract)
- SHI X M, DU Z C, 2006. Review and prospect of tectonic geomorphology in China[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 28(3): 280-284. (in Chinese with English abstract)
- SHI Y F, CUI J Z, SU Z, 2006. Glaciations and Environmental variations in China[M]. Hebei: Hebei Science and Technology Publishing House.
- SHI Z T, ZHANG S Q, ZHOU S Z, et al., 2000. Study of ESR dating of quaternary moraine, Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2(4): 353-357. (in Chinese with English abstract)
- SONG S G, NIU Y L, SU L, et al., 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1378-1401.
- STRAHLER A N, 1952. Dynamic basis of geomorphology[J]. *GSA Bulletin*, 63(9): 923-938.
- SU Q, YUAN D Y, XIE H, et al., 2016a. Geomorphic features of the Shule river drainage basin in Qilianshan and its insight into tectonic implications[J]. *Seismology and Geology*, 38(2): 240-258. (in Chinese with English abstract)
- SU Q, YUAN D Y, XIE H, 2016b. Geomorphic features of the Heihe river drainage basin in western Qilian Shan-Hexi corridor and its tectonic implications[J]. *Seismology and Geology*, 38(3): 560-581. (in Chinese

- with English abstract)
- SU Q, YUAN D Y, XIE H, 2017. Geomorphic features of the Shiyang River drainage basin and adjacent area in Eastern Qilian Mountains and its insight into tectonic implications[J]. *Geological Review*, 63(1): 7-20. (in Chinese with English abstract)
- TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 10(12): 611-616.
- TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- WANG A, WANG G C, 2005. Review on morphotectonic and its analytical methods[J]. *Geological Science and Technology Information*, 24(4): 7-12, 20. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y Z, ZHANG H P, ZHENG D W, et al., 2016. Stream-power incision model and its implications: discussion on the urgency of studying bed-rock channel across the Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 36(4): 884-897. (in Chinese with English abstract)
- XU Y R, HE H L, DENG Q D, et al., 2013. Quantitative river geomorphic parameters surrounding MTS. Huoshan, Shanxi province and their tectonic implications[J]. *Quaternary Sciences*, 33(4): 746-759. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z, 2014. The hydrological characteristics and rainfall landslides stability analysis of Menyuan basin, Qinghai Province[D]. Xi'an: Chang'an University: 1-81. (in Chinese with English abstract)
- YAO S H, GAI H L, YIN X, et al., 2020. Tectonic geomorphology and quaternary slip rate of the Xitieshan section of the Northern Margin Fault of Qaidam Basin[J]. *Seismology and Geology*, 42(6): 1385-1400. (in Chinese with English abstract)
- YIN A, RUMELHART P E, BUTLER R, et al., 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114(10): 1257-1295.
- YU H, BU F, HU D G, et al., 2018. Ages and geological significance of the river terrace of Datong River in Qilian Mountains[J]. *Geological Survey of China*, 5(3): 43-48. (in Chinese with English abstract)
- YUAN D Y, 2003. Tectonic deformation features and space-time evolution in Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau since the Late Cenozoic Time[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator: 1-173. (in Chinese with English abstract)
- YUAN D Y, ZHANG P Z, LIU B C, et al., 2004. Geometrical imagery and tectonic transformation of late quaternary active tectonics in Northeastern Margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 270-278. (in Chinese with English abstract)
- YUAN D Y, GE W P, CHEN Z W, et al., 2013. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large-scale continental geodynamics: a review of recent studies[J]. *Tectonics*, 32(5): 1358-1370.
- YUAN D Y, XIE H, SU R H, et al., 2023. Characteristics of co-seismic surface rupture zone of Menyuan $M_s6.9$ earthquake in Qinghai Province on January 8, 2022 and seismogenic mechanism[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(1): 229-244. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C, 2012. Geomorphic index analysis along the Yumu Shan and its implications for tectonic activities[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1-54. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG T Q, WANG Z, ZHANG X M, et al., 2015. Hypsometric integral analysis of the Ürümqi river drainage basin and its implications for topographic evolution[J]. *Quaternary Sciences*, 35(1): 60-70. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y N, HU X F, PAN Y F, 2022. Comparison of geomorphic characteristics between the northern Qilian Shan and eastern Kunlun shan and its indications for tectonic uplift[J]. *Quaternary Sciences*, 42(3): 809-822. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO G H, LI Y, YAN Z K, et al., 2014. Tectonic geomorphology analysis of piedmont rivers of the middle MT. Longmenshan based on Hack profile and hypsometric integral[J]. *Quaternary Sciences*, 34(2): 302-311. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H Z, LI Y L, YANG J C, et al., 2010a. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications[J]. *Geographical Research*, 29(2): 271-282. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H Z, LI Y L, YANG J C, 2010b. Implication of active structure along the Northern Tianshan by stream length-gradient index and hack profile[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46(2): 237-244. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO J D, ZHOU S Z, SHI Z T, et al., 2001. ESR dating of glacial tills of Baishuihe River on the southern slope of Lenglongling in the Eastern Part of Qilian Mountains[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 37(4): 110-116. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO L Q, SUN X Y, ZHAN Y, et al., 2022. The seismogenic model of the Menyuan $M_s6.9$ earthquake on January 8, 2022, Qinghai Province and segmented extensional characteristics of the Lenglongling fault[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(4): 1536-1546. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG D W, WANG W T, WAN J L, et al., 2017. Progressive northward growth of the northern Qilian Shan-Hexi Corridor (northeastern Tibet) during the Cenozoic[J]. *Lithosphere*, 9(3): 408-416.
- ZHENG G Y, 2022. The implications of hypsometric integral for river basins in the mountain front of western Taiwan[D]. Gaoxiong, China: National Kaohsiung Normal University: 33-37. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG W J, 2009. Geometric pattern and active tectonics of the Hexi Corridor and its adjacent regions[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator: 1-220. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG W J, ZHANG P Z, GE W P, et al., 2013. Late Quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi Corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 32(2): 271-293.
- ZHENG W J, ZHANG B X, YUAN D Y, et al., 2021. Tectonic activity in the Southern Alashan block and the latest boundary of outward expansion on the northeastern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(2): 224-236. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU S Z, LI J J, 2003. New dating results of quaternary glaciations in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(6): 660-666. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y X, 2003. The hypsometric analysis of Taiwan and its tectonic implication[D]. National Kaohsiung Normal University, Kaohsiung: 1-110. (in Chinese with English abstract)
- ZUO Q CH, YE T ZH, FENG Y F et al., 2018. Spatial database of 1: 250, 000 construction and structure maps of China[J]. *Geology in China*, 45(S1): 1-26.

附中文参考文献

- 曹凯,王国灿,王岸,2007.东昆仑山昆仑河纵剖面地貌分析及构造涵义[J].地球科学-中国地质大学学报,32(5):713-721.
- 曹鹏举,刘晓波,程三友,等,2023.祁连山东段庄浪河流域地貌特征及其构造指示意义[J].地理研究,42(1):262-279.
- 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.
- 陈彦杰,2004.台湾山脉的构造地形指标特性:以面积高度积分、地形碎形参数与河流坡降指标为依据[D].台南:国立成功大学:1-84.
- 董金元,李传友,郑文俊,等,2021.柴达木盆地北缘石底泉背斜构造地貌特征及地质意义[J].地震地质,43(3):521-539.
- 盖海龙,李智敏,姚生海,等,2022.2022年青海门源 $M_s6.9$ 地震地表破裂特征的初步调查研究[J].地震地质,44(1):238-255.
- 高泽民,刘兴旺,邵延秀,等,2019.河套盆地北缘大青山地区构造地貌特征[J].地震地质,41(6):1317-1332.
- 关雪,逢立臣,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.
- 郭红伟,陈晔,李吉均,1995.祁连山冷龙岭南麓的冰川序列、黄土记录 and 阶地系列的初步研究[J].兰州大学学报(自然科学版),31(1):102-110.
- 韩帅,吴中海,高扬,等,2022.2022年1月8日青海门源 $M_s6.9$ 地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示[J].地质力学学报,28(2):155-168.
- 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.
- 胡朝忠,杨攀新,李智敏,等,2016.2016年1月21日青海门源6.4级地震的发震机制探讨[J].地球物理学报,59(5):1637-1646.
- 胡小飞,2010.祁连山北部侵蚀速率的时空分布与构造抬升变形研究[D].兰州:兰州大学:1-143.
- 胡小飞,潘保田,KIRBY E,等,2010.河道陡峭指数所反映的祁连山北翼抬升速率的东西差异[J].科学通报,55(23):2329-2338.
- 吉亚鹏,高红山,潘保田,等,2011.渭河上游流域河长坡降指标SL参数与Hack剖面的新构造意义[J].兰州大学学报(自然科学版),47(4):1-6.
- 康建成,朱俊杰,陈宏凯,1992.祁连山冷龙岭南坡晚第四纪冰川演化序列[J].冰川冻土,14(4):352-359.
- 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.
- 刘庆宇,马瑛,程莉,2022.青海门源县土壤质量地球化学评价[J].地质与勘探,58(3):609-619.
- 马保起,李德文,2008.祁连山中段门源盆地新构造运动的阶段划分[J].地质力学学报,14(3):201-211.
- 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.
- 史兴民,杜忠潮,2006.中国构造地貌学的回顾与展望[J].西北地质学报,28(3):280-284.
- 施雅风,崔之久,苏珍,2006.中国第四纪冰川与环境变化[M].河北:河北科学技术出版社.
- 史正涛,张世强,周尚哲,等,2000.祁连山第四纪冰碛物的ESR测年研究[J].冰川冻土,22(4):353-357.
- 苏琦,袁道阳,谢虹,等,2016a.祁连山西段疏勒河流域地貌特征及其构造意义[J].地震地质,38(2):240-258.
- 苏琦,袁道阳,谢虹,2016b.祁连山一河西走廊黑河流域地貌特征及其构造意义[J].地震地质,38(3):560-581.
- 苏琦,袁道阳,谢虹,2017.祁连山东段石羊河流域及邻区地貌特征及其构造意义[J].地质论评,63(1):7-20.
- 王岸,王国灿,2005.构造地貌及其分析方法述评[J].地质科技情报,24(4):7-12,20.
- 王一舟,张会平,郑德文,等,2016.基岩河道河流水力侵蚀模型及其应用:兼论青藏高原基岩河道研究的迫切性[J].第四纪研究,36(4):884-897.
- 徐岳仁,何宏林,邓起东,等,2013.山西霍山山脉河流地貌定量参数及其构造意义[J].第四纪研究,33(4):746-759.
- 杨珍,2014.青海省门源盆地水文特征与降雨型滑坡稳定性分析[D].西安:长安大学:1-81.
- 姚生海,盖海龙,殷翔,等,2020.柴达木盆地北缘断裂(锡铁山段)的构造地貌特征与晚第四纪活动速率[J].地震地质,42(6):1385-1400.
- 于航,步凡,胡道功,等,2018.祁连山大通河河流阶地形成时代及地质意义[J].中国地质调查,5(3):43-48.
- 袁道阳,2003.青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化[D].北京:中国地震局地质研究所:1-173.
- 袁道阳,张培震,刘百麓,等,2004.青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J].地质学报,78(2):270-278.
- 袁道阳,谢虹,苏瑞欢,等,2023.2022年1月8日青海门源 $M_s6.9$ 地震地表破裂带特征与发震机制[J].地球物理学报,66(1):229-244.
- 张忱,2012.祁连山中段榆木山地区地貌指数分析及其活动构造意义[D].兰州:兰州大学:1-54.
- 张天琪,王振,张晓明,等,2015.北天山乌鲁木齐河流域面积-高程积分及其地貌意义[J].第四纪研究,35(1):60-70.
- 张亚男,胡小飞,潘彦菲,2022.北祁连山和东昆仑山的地貌特征对比及其对构造抬升的指示意义[J].第四纪研究,42(3):809-822.
- 张韵娴,2003.台湾地区流域面积高程积分值之研究[D].高雄:国立高雄师范大学:1-110.
- 赵国华,李勇,颜照坤,等,2014.龙门山中段山前河流Hack剖面 and 面积-高程积分的构造地貌研究[J].第四纪研究,34(2):302-311.
- 赵洪壮,李有利,杨景春,等,2010a.面积高度积分的面积依赖与空间分布特征[J].地理研究,29(2):271-282.
- 赵洪壮,李有利,杨景春,2010b.北天山流域河长坡降指标与Hack剖面的新构造意义[J].北京大学学报(自然科学版),46(2):237-244.
- 赵井东,周尚哲,史正涛,等,2001.祁连山东段冷龙岭南麓白水河冰碛物ESR测年研究[J].兰州大学学报,37(4):110-116.
- 赵凌强,孙翔宇,詹艳,等,2022.2022年1月8日青海门源 $M_s6.9$ 地震孕震环境和冷龙岭断裂分段延展特征[J].地球物理学报,65(4):1536-1546.
- 郑光佑,2002.台湾西部麓山带前缘流域面积高度积分之构造意义研究[D].高雄:国立高雄师范大学:33-37.
- 郑文俊,2009.河西走廊及其邻区活动构造图像及构造变形模式[D].北京:中国地震局地质研究所:1-220.
- 郑文俊,张博譔,袁道阳,等,2021.阿拉善地块南缘构造活动特征与青藏高原东北缘向外扩展的最新边界[J].地球科学与环境学报,43(2):224-236.
- 周尚哲,李吉均,2003.第四纪冰川测年研究新进展[J].冰川冻土,25(6):660-666.
- 左群超,叶天竺,冯艳芳,等,2018.中国陆域1:25万分幅建造构造图空间数据库[J].中国地质,45(S1):1-26.