引用格式：张梨君，袁道阳，李红强，等，2025. 拉脊山北缘断裂第四纪晚期分段活动的构造地貌证据[J]. 地质力学学报，31（3）：411−426. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024125

Citation: ZHANG L J，YUAN D Y，LI H Q，et al.，2025. Tectonic geomorphological evidence of late Quaternary segmented activity along the northern margin fault of Lajishan[J]. Journal of Geomechanics，31（3）：411−426. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024125

拉脊山北缘断裂第四纪晚期分段活动的构造地貌证据

张梨君[1]，袁道阳[1]，李红强[1]，苏　琦[2]，苏瑞欢[1]，陈艳文[1]，文亚猛[1]

ZHANG Lijun[1]，YUAN Daoyang[1]，LI Hongqiang[1]，SU Qi[2]，SU Ruihuan[1]，CHEN Yanwen[1]，WEN Yameng[1]

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*

Tectonic geomorphological evidence of late Quaternary segmented activity along the northern margin fault of Lajishan

Abstract: ［**Objective**］The Lajishan–Jishishan orogenic belt represents a significant arc-shaped tectonic zone formed by northeastward compressional expansion along the northeastern margin of the Tibetan Plateau, jointly controlled by two compressional thrust fault zones: the North Lajishan Fault and the South Lajishan fault. Since the Late Cenozoic, intense tectonic activities in the Lajishan area have created a prominent basin–range coupled geomorphological pattern, making it an ideal region for investigating the geomorphic evolution and the tectonic dynamics through structural geomorphological approaches. ［**Methods**］Based on a 30-m-resolution digital elevation model (DEM), this study employs the ArcGIS and MatLab platforms with plugin tools and open-source code packages to extract channel steepness indices (K_{sn}) from 105 medium- and small-sized rivers on the hanging wall of the North Lajishan Fault (including the East Jishishan Fault), along with hypsometric integrals (HI) from 54 watersheds along the fault zone. ［**Results**］The K_{sn} distribution reveals an overall west-to-east increasing trend in uplift rates along the North Lajishan fault, with a notable low-value anomaly in its central segment. Statistical analysis of K_{sn} demonstrates clear segmentation characteristics, indicating that the eastern section of northern Lajishan and the Jishishan section exhibit the highest uplift rate and strongest tectonic activity. HI spatial distribution patterns along the North Lajishan fault show multiple high-value zones within piedmont basins. Integrated with geological surveys and petroleum exploration profiles, these findings suggest that during the Late Quaternary, the North Lajishan fault has not only remained active but also propagated northeastward into the Xining–Minhe and Linxia basins, exhibiting thrust fault–fold deformation features. ［**Conclusion**］(1) The tectonic geomorphological evolution of the North Lajishan Fault (including the eastern margin of Jishishan) is obviously different, and it tends to gradually become younger from west to east. The geomorphological evolution of the northern margin of Lajishan has discrete differences, which can be attributed to three sections: a western, a middle, and an eastern section, which includes the northern margin of Jishishan. Among them, the tectonic activity of the latter section is the latest and most intense, consistent with the long-term tectonic evolution. This confirms the rationality of the geomorphological parameter extraction results and is also a geomorphological response to the differential tectonic activity in this area. (2) The tectonic activity characteristics of the northern margin of Lajishan (including the eastern margin of Jishishan) adhere to the geomorphological evolution law and

基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0901）；国家自然科学基金项目（42472267，42172227）

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 Nos. 42472267 and 42172227)

第一作者：张梨君（1994—），女，在读硕士，主要从事活动构造与构造地貌研究。Email：220220903780@lzu.edu.cn

通信作者：袁道阳（1965—），男，教授，博士生导师，主要从事活动构造与新构造研究。Email：yuandy@lzu.edu.cn

收稿日期：2024−11−15；**修回日期**：2025−03−29；**录用日期**：2025−03−31；**网络出版日期**：2025−03−31；**责任编辑**：范二平

also have segmental differences. It is believed that the North Lajishan Fault (including the East Jishishan Fault) has strong tectonic activity from west to east. Specifically, the uplift rate of the western section of the northern margin of Lajishan is stable. The tectonic activity may be superimposed on the strike-slip component of the Riyueshan Fault in addition to the regional extrusion uplift, which was active in the Late Pleistocene and dominated by left-handed strike-slip and thrust. The middle section of the northern margin of Lajishan (NE-trending bulge section) has the lowest tectonic uplift rate, and the fault in this section is dominated by extrusion thrust with a late Pleistocene activity; it is little affected by the Riyueshan fault. The eastern section of the northern margin of the Lajishan-Jishishan section (the fault arc protrudes to the south-east turning section) has strong tectonic activity with Holocene fault activity; its nature is mainly thrust with dextral components. **Significance** In addition to its late Quaternary activity, the North Lajishan Fault (including the East Jishishan Fault) tends to expand and develop into the piedmont basin. Combined with the comprehensive interpretation of field geological surveys and oil exploration sections, it is believed that the fault extends to the interior of the Xining–Minhe Basin to form a reverse fault–fold belt. Its latest tectonic activity may have triggered more than 10 moderate–strong earthquakes. Attention should be paid to this tectonic activity and the related seismicity in those basin.

Keywords: Lajishan; Jishishan; channel steepness index; hypsometric integral; tectonic–geomorphology

摘　要：拉脊山−积石山造山带是青藏高原东北缘向北东方向挤压扩展的重要弧形构造带，由拉脊山南缘断裂和拉脊山北缘断裂2条挤压逆冲断裂带共同控制。晚新生代以来，拉脊山地区构造活动强烈，形成了显著的盆−山耦合构造地貌格局，是利用构造地貌学方法研究其地貌发育演化规律和构造活动的理想地区。文章基于30 m分辨率的数字高程模型（DEM）数据，使用ArcGIS和MatLab平台以及插件工具和开源代码包，提取了拉脊山北缘（包含积石山东缘）断裂上盘105条中、小河道的河流陡峭指数（K_{sn}），同时提取断裂沿线54个流域的面积−高程积分（HI）。从河道的K_{sn}分布结果来看，整个拉脊山北缘断裂隆升速率呈自西向东总体升高的趋势，但在拉脊山北缘断裂中段出现低值，推测与日月山右旋走滑断裂的向东推挤作用在该段减弱有关，这也揭示出该区域构造活动的复杂性、差异性和分段性。通过对K_{sn}统计分析得到明显的分段结果，认为拉脊山北缘东段−积石山段隆升速率最快，构造活动性最强。根据拉脊山北缘流域HI空间分布特征显示，拉脊山北缘断裂山前盆地内部存在多处高值区。结合地质调查和石油勘探剖面综合解释结果，表明拉脊山北缘断裂第四纪晚期除了自身继续活动之外，已向北东延展到西宁−民和盆地和临夏盆地内部，表现为逆断裂−褶皱变形特征，这与西宁−民和盆地内部10余次中—强地震的发生有密切关联，这种构造活动的迁移特征及其地震活动值得关注。

关键词：拉脊山；积石山；河流陡峭指数；面积−高程积分值；构造地貌

中图分类号：P931.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)03−0411−16

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024125

0　引言

2023年12月18日甘肃省临夏州积石山县发生了M_S 6.2地震，造成151人遇难、900余人受伤，大量房屋倒塌，直接经济损失超146亿元(李兆焱等，2024)。震后考察表明，此次地震发生在青藏高原东北缘的拉脊山北缘断裂南东段的积石山东缘断裂上，震区附近构造图像复杂，新活动性强(苏瑞欢等，2024)。因此，拉脊山−积石山地区第四纪晚期的构造活动及其未来的强震危险性备受关注(孙云强等，2024)。

拉脊山−积石山造山带位于祁连山褶皱带南侧，是一个多阶段抬升的构造窗(王二七等，2000)。拉脊山构造带由拉脊山北缘断裂和拉脊山南缘断裂组成，是一组北东向弧形挤压逆冲断裂带。该断裂带西端和东端分别与北北西向的日月山右旋走滑断裂和北西西向的西秦岭北缘左旋走滑断裂连接，这3条断裂带共同构成一个特殊的构造转换区(袁道阳等，2005；史兴民和杜忠潮，2006)。根据初步研究获得的部分证据表明，拉脊山北缘断裂最新活动时代为晚更新世，局部段全新世有活动，控制和影响了拉脊山−积石山北缘地区的构造活动与地貌发育演化过程(袁道阳等，2005)。但到目前为止，该断裂新活动的地质剖面证据并不多，对其确切的活动时代、变形方式及其地震危险性等尚存在较大的不确定性。

构造地貌是受构造内动力作用控制，通过内、外地质动力的相互作用耦合形成的地貌形式，是构造作用导致的地壳隆升和地表侵蚀相互交织的结果，也是现今用来探讨构造活动规律行之有效的方法之一（Burbank and Pinter, 1999; Hsieh and Knuepfer, 2001; 王岸和王国灿, 2005; 史兴民和杜忠潮, 2006）。在构造活动区，地貌发育对构造隆升、气候和岩性等控制因素的变化较为敏感，其内部不同级别水系地貌记录了不同尺度的构造演化信息（Whipple and Tucker, 1999; Kirby and Whipple, 2001; Clark et al., 2004; Wobus et al., 2005; 张会平等, 2006; 刘静等, 2009）。构造地貌的研究方法已较为成熟，除采用常规的、与活动断裂调查相关的分析手段之外，还可以通过地貌发育特征参数加以定量研究（梁明剑等, 2014）。文章在收集已有研究成果的基础上，基于 ArcGIS 和 MatLab 软件，使用辅助插件工具和开源代码包，提取拉脊山北缘地区的河流陡峭指数（K_{sn}）和面积−高程积分（HI）等地貌参数；根据参数结果对拉脊山北缘地区进行地貌演化分段特性及其成因讨论，并结合最新的野外地质地貌调查结果，探究拉脊山北缘断裂及其周缘地区地貌演化规律和构造指示意义，加深对该区域构造活动与地貌响应特征的理解，为断裂活动性鉴定和强震危险区评价等提供构造地貌学依据。

1　区域地质概况

青藏高原东北缘是由阿尔金断裂、祁连−海原断裂和南侧的东昆仑断裂所围限的一个相对独立的活动地壳块体（图 1a），区内发育了以北西西向和北北西向为主的多条不同方向和不同性质的活动断裂带，新构造活动强烈，地震活动频繁（袁道阳等, 2004）。受上述活动断裂的控制和影响，区内形成了北西西向和北北西向盆−山相间的地貌格局，其内不同级别的河流水系较为发育，主要以黄河及其支流（大通河、湟水、渭河等）为主（袁道阳等, 1999）。其中拉脊山断裂带呈弧形向北东方向挤出，调节着北西西向左旋走滑的西秦岭北缘断裂和北北西向右旋走滑的日月山断裂之间的应力−应变关系，形成一个特殊的挤压构造区和构造转换带（袁道阳等, 2004; 王志才等, 2006; 张波, 2012）。

拉脊山是一条构造活动强烈的晚新生代造山带，也是青藏高原和黄土高原的地貌分界线（李智敏等, 2009），西起日月山垭口、东至民和官亭南，全长超过 200 km，宽为 10～30 km。拉脊山南北两侧被拉脊山北缘断裂和拉脊山南缘断裂所围限（图 1b），中间山体由一套中—上寒武统、奥陶系和早志留世超基性岩、中—基性火山岩（包括枕状熔岩）以及海相沉积岩组成（王二七等, 2000），而南东侧的积石山主要发育早古生代火山岩地层、蛇绿岩套以及晚期侵入的斜长花岗岩、石英闪长岩、花岗闪长岩和各种类型的岩脉（张旺生等, 2003）。其中，拉脊山北缘断裂长约 230 km，控制和影响着拉脊山北缘地区和北部晚新生代山前盆地（西宁−民和盆地、临夏盆地）的演化与构造变形（袁道阳等, 2005）。

2　方法和数据

2.1　方法

2.1.1　河流陡峭指数

河流陡峭指数（K_{sn}）是基于基岩河道水力侵蚀模型得到的、并用以表征河道整体陡峭程度的指标，其值越大，河道整体越陡。K_{sn} 与抬升速率有很好的正相关性，即其值越大，抬升速率越快（Whipple and Tucker, 1999; Snyder et al., 2000; Kirby et al., 2003; Duvall et al., 2004; Hu et al., 2010; 胡小飞等, 2014）。

K_{sn} 计算公式是基于基岩侵蚀速率推导而来的：

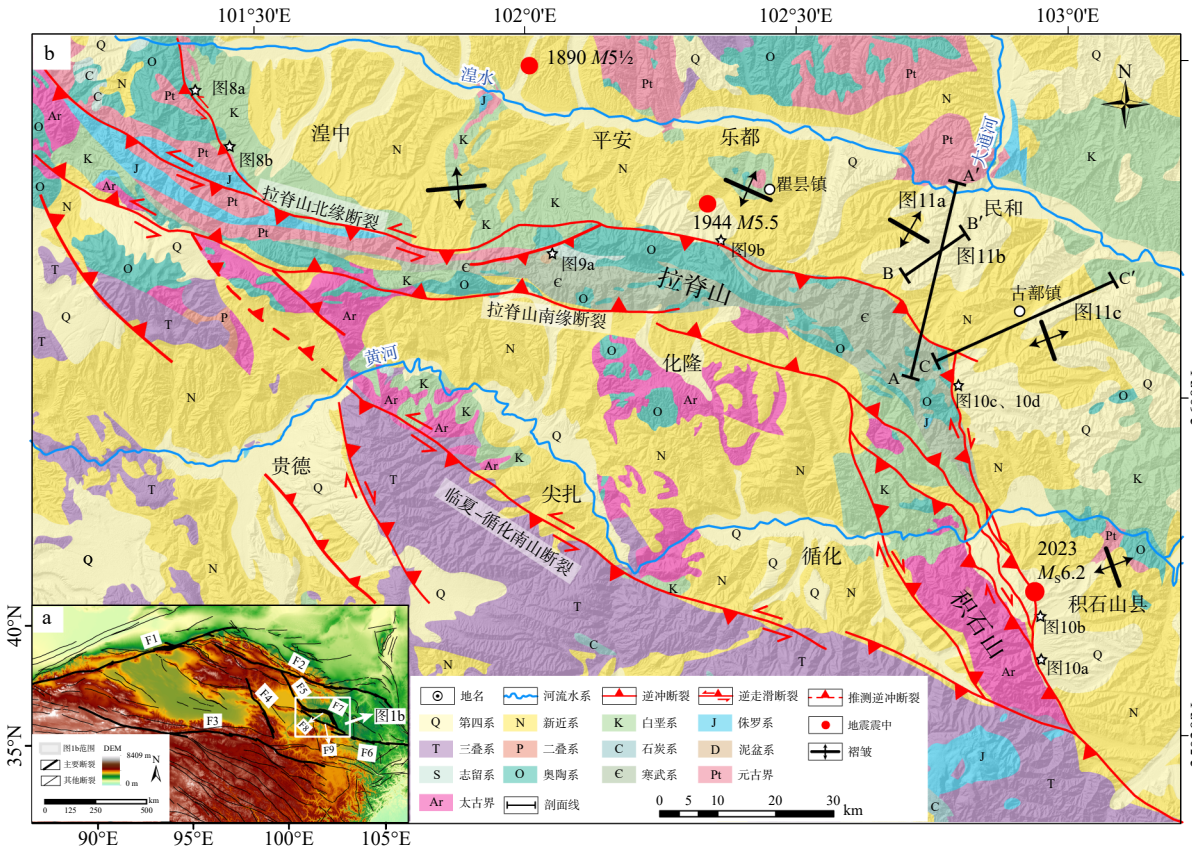
$$K_{sn} = (U/K)^{1/n} \quad (1)$$

式中，K—侵蚀系数，受温度、降水、岩性和构造活动影响；U—基岩抬升速率，n—坡度系数。

2.1.2　面积−高程积分

20 世纪 50 年代，美国理论地貌学家 Strahler（1952）提出侵蚀流域的面积−高程分析方法，由此将戴维斯的地貌发育模型定量化。面积−高程积分（HI）与流域地貌发育有关，在一定程度上能够反映构造活动对区域地貌演化的影响程度。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（李红强等, 2023）。但应用 HI 揭示地貌演化规律时，通常要考虑构造、岩性和气候等因子的综合影响（赵洪壮等, 2010）。

目前常用的 HI 计算方法有起伏比法、体积比法和积分曲线法。通过比较分析发现 3 种方法计算结果大体一致，其中起伏比法相对便捷高效（常直杨等, 2014, 2015）。该方法是 Pike and Wilson（1971）



F1—阿尔金断裂；F2—祁连–海原断裂；F3—东昆仑断裂；F4—鄂拉山断裂；F5—日月山断裂；F6—西秦岭北缘断裂；F7—拉脊山北缘断裂；F8—拉脊山南缘断裂；F9—临夏–循化南山断裂

a—青藏高原东北缘区域构造概况图；b—拉脊山–积石山地区地层分布和构造概况图

图 1 拉脊山–积石山地区活动构造图

Fig. 1 Active tectonics map of the Lajishan–Jishishan area

(a) Regional tectonic overview map of the northeastern margin of the Tibetan Plateau; (b) Stratigraphic distribution and tectonic overview map of the Lajishan–Jishishan region)

F1–Altyn Tagh fault; F2– Qilian–Haiyuan fault; F3–East Kunlun fault; F4–Elashan fault; F5–Riyueshan fault; F6–North margin fault of West Qinling; F7–North margin fault of Lajishan; F8–South margin fault of Lajishan; F9–Linxia–XunhuaNanshan fault

利用数学公式推导得出并用于估算 HI 的，其计算公式如下：

$$\mathrm{HI}=\frac{H_{\mathrm{mean}}-H_{\mathrm{min}}}{H_{\mathrm{max}}-H_{\mathrm{min}}} \tag{2}$$

式中，H_{mean}—流域内的平均高程；H_{max}—流域内的最大高程；H_{min}—流域内的最小高程。

2.2 数据来源

地貌参数基于数字高程模型（DEM）数据提取。研究表明，DEM 分辨率对区域地貌参数分析影响不大（张天琪等，2015；李建柱等，2023）。SRTM1 DEM 是由美国航空航天局（NASA）和国家地理空间情报局（NGA）通过雷达干涉测量技术、采集地表雷达数据生成的近全球陆地高程数据产品，其垂直精度较高，其总体平均误差仅为 0.056m，能够更真实地反映地形起伏和地貌特征。其误差曲面跨度较小，相比其他数据（如全球数字高程模型数据集 ASTER GDEM V3）在地形表达上更具优势，且 SRTM1 DEM 覆盖范围广泛，能够为全球大部分地区提供高程数据（朱一龙等，2024）。基于此，文章选择的 DEM 数据为 SRTM1，包含 3601×3601 个采样点的高程数据，分辨率为 30 m，水平基准为 WGS1984，垂直基准为 EGM96（Earth Gravitational Model 1996），平面精度为±20m，高程精度为±16 m。

气候数据来源于 WorldClim 数据网站（https://worldclim.org）1970—2000 年 30 年间的降雨及气温的栅格数据。首先对原始数据进行 ArcGIS 栅格计算和坐标校准，然后裁剪得到拉脊山–积石山及周边区域的气候栅格数据。地质图矢量数据来源于中

国地质调查局地质云 1∶500000 地质图（https://geocloud.cgs.gov.cn），首先对下载的原始数据的属性表进行处理和校准，然后通过 ArcGIS 软件裁剪出拉脊山–积石山周边的地质地层数据。

2.3　数据预处理

根据研究区所处经纬度，对获取的 DEM 数据，选择合适的 6°带分带投影；其中 K_{sn} 和 HI 的提取要求 DEM 栅格是整数，所以对数据进行 30 m×30 m 重采样计算。

ArcGIS 软件是成熟且广泛应用的水文分析工具，通过模型建构器可以将这一系列流程建模，完成河网和流域面提取。另外，受 DEM 数据质量的影响，计算生成的流域河网与自然水系相比存在伪特征，即存在与自然水系不符之处；且汇水流量阈值的设置也对河网提取有不同程度的干扰，需要经过对比研究，得到符合研究区地形地貌的合适阈值（郑光佑，2002；杨珍，2014；李红强等，2023）。通过比较不同阈值下提取到的河网特征和真实河网展布情况，认为拉脊山北缘区域汇水流量阈值采用 10000 个像元当为最佳。

3　参数提取和结果

3.1　河流陡峭指数

基于 DEM 数据，提取拉脊山北缘（包括积石山东缘，下同）断裂上盘基岩山区长度介于 1～10 km、规模大体相当的中、小河道 105 条，从西到东编号依次为 N1—N105。基于参考凹度 θ_{ref}= 0.45（Stock and Montgomery，1999）获取拉脊山北缘各河道的标准化陡峭指数（K_{sn}）的空间分布特征（图 2）。结果显示，沿拉脊山北缘至积石山东缘其 K_{sn} 的分布呈现自西向东总体升高的趋势。具体来说，拉脊山北缘西段呈近东西走向，K_{sn} 较平稳；随后至拉脊山北缘中间部位开始向北东凸出段（拉脊山北缘中段），其 K_{sn} 出现低值；而自亲仁乡以东弧形挤出直到转为北北西向（拉脊山北缘东段—积石山段），其 K_{sn} 均值达到最大。

对拉脊山北缘 K_{sn} 做进一步统计分析，得到其平均值为 96.9，但是全段具有明显的分段差异性。从西到东，大致可分为 3 段，即拉脊山北缘西段、拉

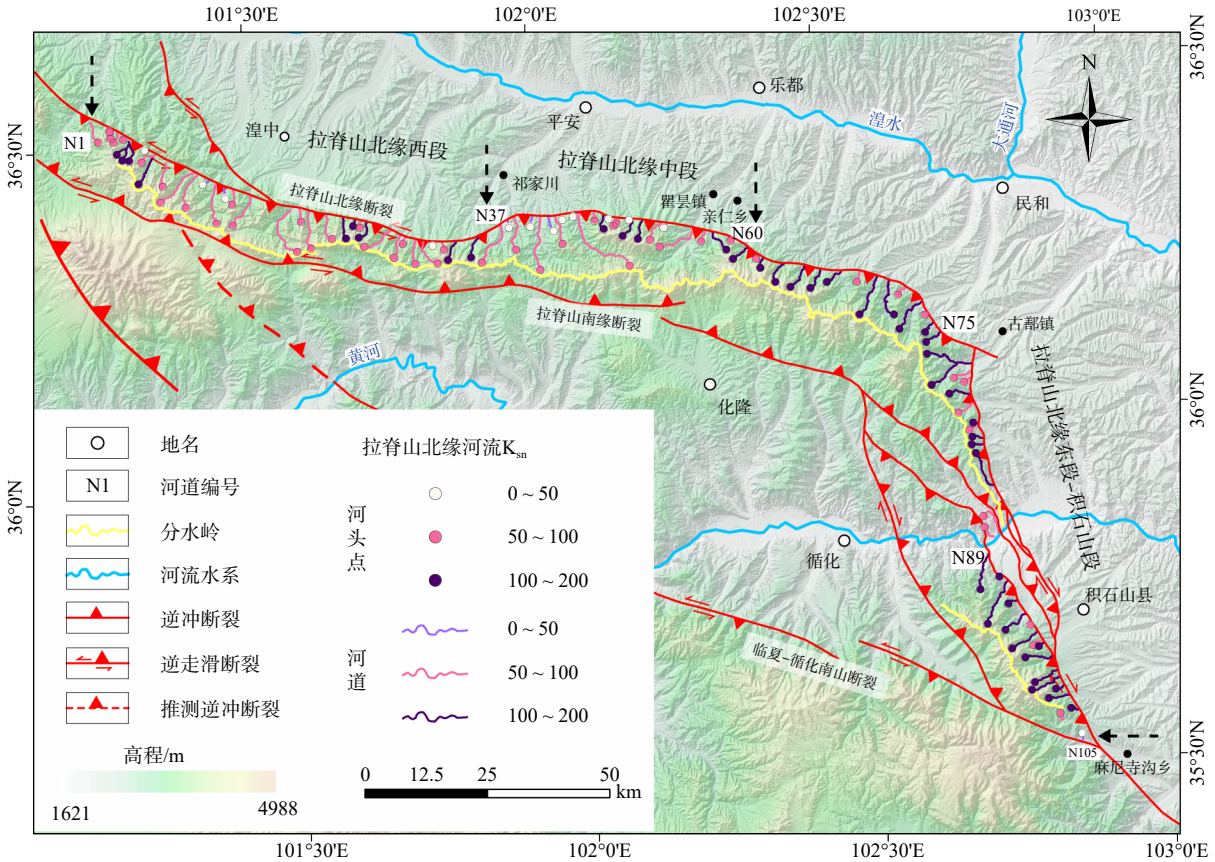


图 2　拉脊山北缘区域 K_{sn} 空间分布图

Fig. 2　Spatial distribution of K_{sn} values for the northern margin of the Lajishan region

脊山北缘中段和拉脊山北缘东段−积石山段(图 3)。3 个区段 K_{sn} 均值分别为 84.6、72.6 和 119.5,其中拉脊山东段−积石山段 K_{sn} 明显高于其他两段。从 K_{sn} 揭示的隆升速率情况来看,拉脊山北缘西段较中段偏高,推测该段除受到区域北东向挤压作用之外,还受到日月山断裂向东的推挤作用;中段隆升速率最低,表明该段受日月山断裂的作用很小;至拉脊山北缘东段−积石山段,隆升速率又大幅度增长,该段断裂性质逐渐转换为强烈挤压逆冲为主。

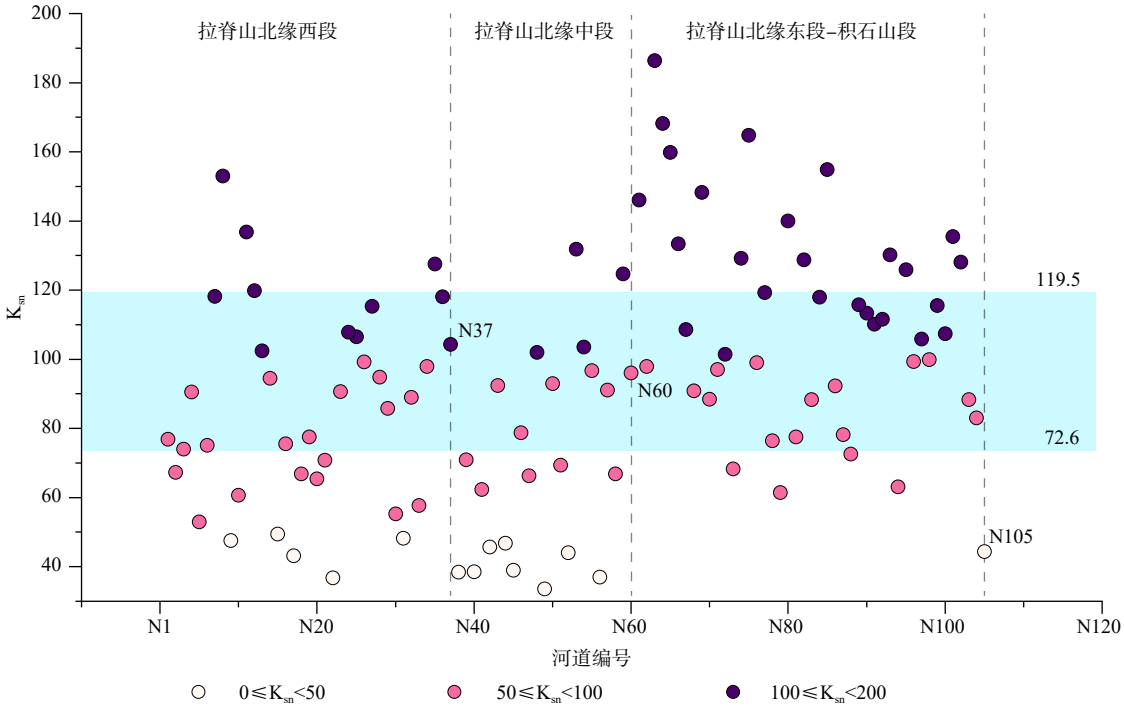


图 3 拉脊山北缘 K_{sn} 分布散点图

Fig. 3 Scatter plot of the K_{sn} value distribution for the northern margin of Lajishan

3.2 面积−高程积分

根据恰当的汇流阈值提取了拉脊山北缘区域的河网水系和对应流域,然后通过起伏比法计算了各个流域的 HI,最后通过对 HI 进行克里金插值得到拉脊山北缘区域 HI 的空间分布特征(图 4)。拉脊山北缘山前区域(如西宁−民和盆地、临夏盆地)有多个比较集中的高值区,尤其集中在拉脊山北东向弧形挤出部位前缘的盆地内部。

筛选拉脊山北缘基岩山体的河道水系,选取了 54 条河流源头到达基岩山体、规模大体相当的中、小河道,通过 ArcGIS 工具提取对应的 54 个流域,并使用 Hypsometry 工具计算对应的 HI 结果(表 1)。

将 54 个流域从西到东依次编号为 1—54,通过对这 54 个流域的 HI 进行数据统计,发现拉脊山北缘区域内流域 HI 最小值为 0.21,最大值为 0.55,平均值为 0.36。将 54 个流域的 HI 生成散点图并做回归曲线(图 5)发现,沿拉脊山北缘从西向东,HI 同样呈递增趋势。整个拉脊山北缘区域的 HI 均值为 0.35,其中拉脊山北缘西段的 HI 均值为 0.35、最高值 0.46,中段 HI 均值为 0.35、最高值 0.44,两者大体相当;而拉脊山北缘东段−积石山段(自拉脊山弧形挤出部位至积石山)的 HI 均值为 0.4、最高值达到 0.55。跟 K_{sn} 类似,HI 同样也具有分段差异性。

4 控制因素分析

利用 K_{sn} 和 HI 进行区域构造特征分析时往往受多种因素控制。其中,K_{sn} 主要受地形坡度、河道长度、岩性和构造活动等因素影响;而 HI 主要受控于构造活动、气候变化和岩石抗侵蚀差异等因素(Lifton and Chase, 1992; Masek et al., 1994; 胡小飞等, 2014)。下面分别从岩性、气候、地形和构造活动等方面来分析 K_{sn} 和 HI 变化的主要控制因素。

4.1 气候

青藏高原东北缘环境演化受东亚季风和西风环流的共同影响,自晚更新世以来经历了温暖湿

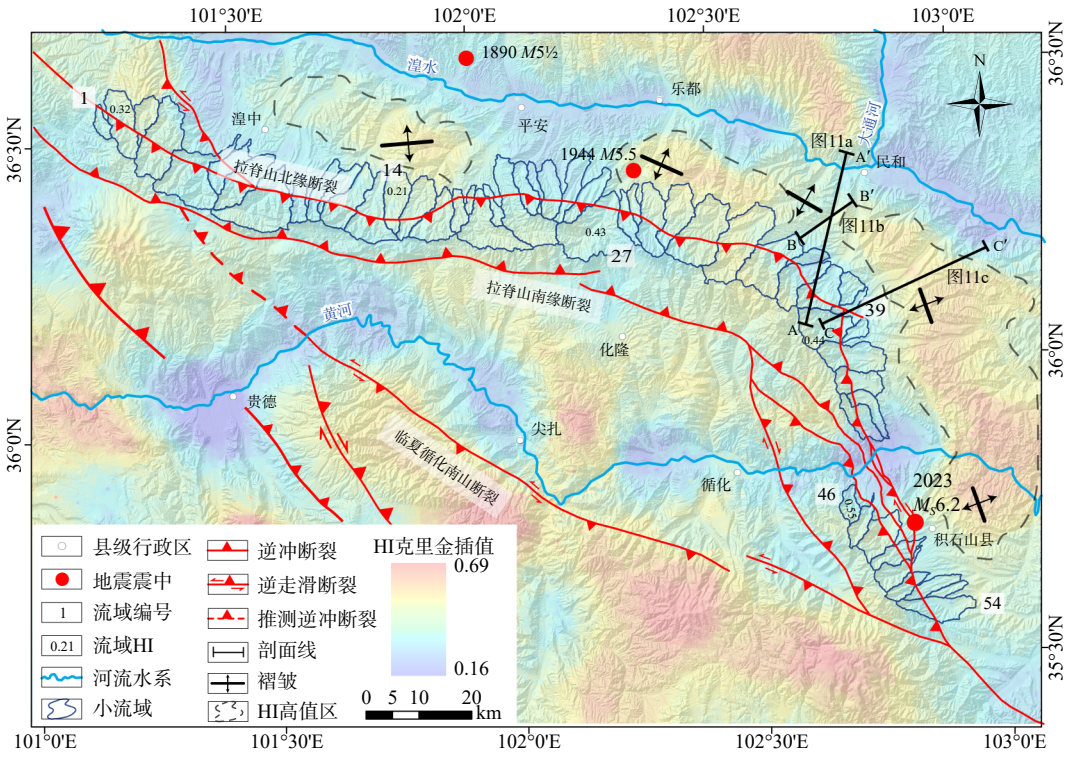


图 4　拉脊山北缘 HI 空间分布特征

Fig. 4　Results of the HI value Kriging interpolation of the LajishanKriging interpolationJishishan area

表 1　拉脊山北缘中、小流域 HI 计算结果

Table 1　Results of HI calculation of the small and middle watershed on the northern margin of Lajishan

流域编号	流域面积/km²	HI	流域编号	流域面积/km²	HI	流域编号	流域面积/km²	HI
1	12.57	0.39	19	68.42	0.43	37	49.07	0.29
2	55.52	0.32	20	12.59	0.38	38	20.21	0.47
3	25.87	0.45	21	86.79	0.43	39	10.52	0.28
4	87.83	0.34	22	27.40	0.29	40	56.54	0.44
5	94.08	0.41	23	11.58	0.27	41	11.88	0.44
6	31.98	0.25	24	36.07	0.31	42	58.05	0.28
7	55.46	0.37	25	35.08	0.29	43	35.90	0.35
8	99.22	0.46	26	32.61	0.32	44	23.60	0.32
9	23.00	0.36	27	113.03	0.43	45	32.28	0.38
10	26.02	0.33	28	21.16	0.38	46	18.32	0.55
11	24.88	0.22	29	11.84	0.33	47	20.48	0.51
12	53.99	0.33	30	52.60	0.37	48	44.19	0.37
13	64.66	0.34	31	49.46	0.26	49	27.49	0.35
14	43.72	0.21	32	93.74	0.35	50	27.51	0.52
15	46.15	0.25	33	98.44	0.33	51	20.09	0.46
16	48.24	0.39	34	78.43	0.40	52	22.57	0.26
17	18.32	0.35	35	14.51	0.27	53	10.21	0.45
18	6.98	0.44	36	47.76	0.37	54	45.76	0.28

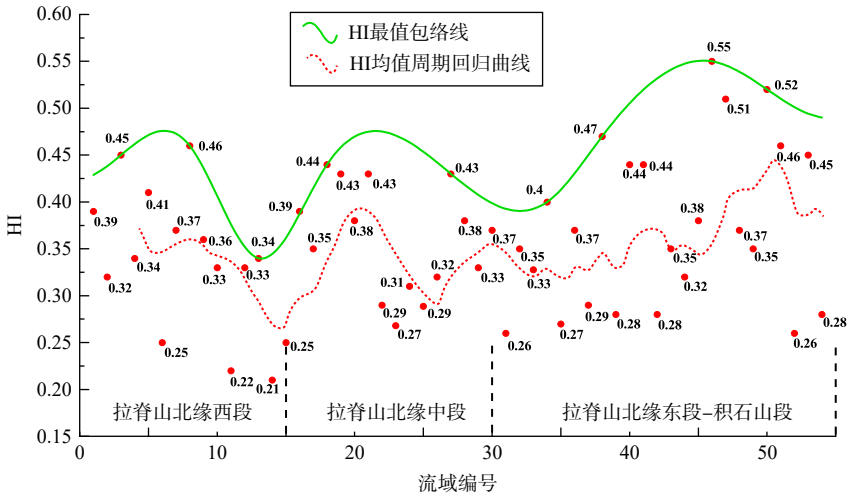


图 5 拉脊山北缘流域 HI 分布规律图

Fig. 5 The distribution of HI values for the watershed along the northern margin of Lajishan

润、寒冷干燥、温暖偏湿、偏冷干燥转温凉偏湿和相对温湿转相对冷干 5 个发展阶段(柯思茵等, 2021)。拉脊山地区基岩裸露较多, 区域内年均最高温约 7 ℃, 年均最低温为−4 ℃, 年均温均值约为 1 ℃, 区域内全年温差较小。

沿拉脊山北缘断裂−积石山东缘断裂两侧提取 20 km 范围的 K_{sn}、HI 和年均降雨量条带剖面(图 6a—6c)。结果显示, 整个拉脊山−积石山北缘区域年均最大降雨量约为 610 mm, 最小降雨量约为 510 mm, 年均降雨量均值约为 514 mm; 局部区域 K_{sn} 分布曲线与年均降雨量曲线趋势相对一致, 而 HI 分布曲线与年均降雨量曲线趋势明显不一致。因此, 推测在拉脊山北缘−积石山区域, 降雨不是该区域 HI 变化的主要控制因素, 局部地区的 K_{sn} 则可受到降雨的影响。

4.2 岩性

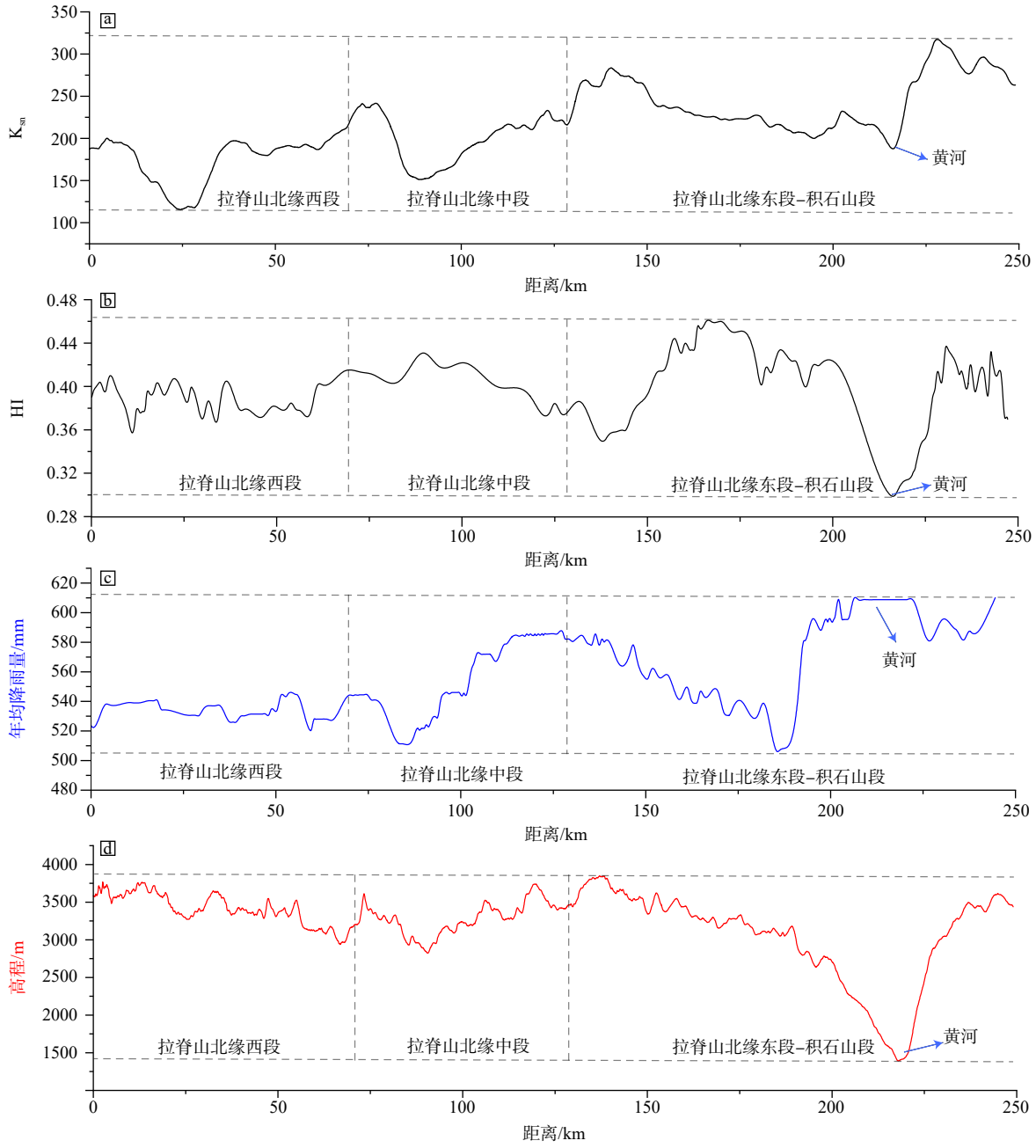
河道基岩硬度的差异会导致河床的抗侵蚀能力发生改变, 进而影响河流地貌发育速率, 最终对整个区域的地貌形态产生影响(胡小飞等, 2010)。岩石的抗侵蚀能力与岩石硬度成正比, 工程研究中用岩石的磨蚀性表征硬度, 研究发现闪长岩、花岗岩、片麻岩、石英岩和角闪岩的 CAI(Cerchar Abrasivity Index)值较大, 即其磨蚀性较高(龚秋明等, 2021)。

将拉脊山北缘(包括积石山东缘)区域抗侵蚀能力较强的岩性进行划分(图 7), 同时将其与拉脊山北缘中、小流域 HI 和 K_{sn} 分布特征进行对比发现, 整个拉脊山北缘(包括积石山东缘)范围内河流的流域 HI 受岩性影响较小, 仅 40—42 流域周边有少量花岗闪长岩分布, 与流域 HI 高值有对应; 拉脊山北缘的 K_{sn} 受岩性影响也较小, 仅个别河道的 K_{sn} 可能受岩性影响较大, 如 N78—N80 河道下发育有花岗闪长岩, 由此可见拉脊山区域内岩石岩性对 HI 和 K_{sn} 的分布影响不大。而积石山区域广泛分布石英闪长岩和二长花岗岩, 抗侵蚀能力较强, 同时该区域内的 HI 和 K_{sn} 均为相对高值, 与上述岩性对应, 表明积石山区域的 K_{sn} 会受到一定的岩性影响。

4.3 构造活动

拉脊山为位于南北两侧的循化−化隆与西宁−民和新生代盆地的界山, 山体由西向东蜿蜒分布, 拉脊山北坡险峻, 南坡相对平缓。最大高程约为 3800 m, 最小高程约为 1400 m, 地形起伏较大。区域内河道 K_{sn} 曲线、河道流域 HI 曲线和高程曲线(图 6d)对比显示, 三者的变化规律并不完全吻合。其中, 拉脊山北缘西段近东西走向, 海拔较高, 河道 K_{sn} 却表现为相对低值, 而流域 HI 与地形起伏规律一致; 拉脊山北缘中段和拉脊山北缘东段−积石山段, 河道 K_{sn}、流域 HI 均与高程起伏大、地形下蚀作用强较一致。这表明区域地貌参数变化的规律性差异可能与拉脊山北缘断裂不同段构造活动强度的时空差异性关系更密切。

具体来说, 拉脊山是在晚新生代以来的较强挤压应力与较弱剥蚀作用下逐渐隆起的较老山体, 而积石山形成时间明显较拉脊山晚(Lease et al., 2011), 相应地其水系发育与地貌接受侵蚀经历的时间要短, 但是强度更大, 加之黄河穿过积石峡, 使得其侵蚀作用更强。低温热年代学研究结果表明, 拉脊山自 22 Ma 就开始隆升, 而积石山弧形构造段强烈隆升的起始时间为约 8 Ma, 随后大约在 5 Ma 前, 抗剥



a—拉脊山北缘河道 K_{sn} 分布曲线图；b—拉脊山北缘流域 HI 分布曲线图；c—拉脊山北缘断裂沿线年均降雨量曲线图；d—拉脊山北缘断裂沿线高程曲线图

图 6　K_{sn}、HI 与年均降雨量和高程起伏曲线对比图

Fig. 6　Comparison chart of K_{sn} values, HI values, average annual rainfall and elevation

(a) K_{sn} distribution curve of drainage channels along the northern margin of Lajishan; (b) HI distribution curve of drainage basins along the northern margin of Lajishan; (c) Annual mean rainfall curve along the fault on the northern margin of Lajishan; (d) Elevation profile curve along the fault on the northern margin of Lajishan

蚀性较强的古生代花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩被剥露到地表，地面开始加速隆升，并且随着花岗岩类出露面积的增大，地面隆升的速率也加快(郑德文等，2006)，所以，文章认为位于拉脊山北缘东段–积石山段的河道 K_{sn} 和流域 HI 均处于高值、且与地形起伏较大的特征较一致，是构造活动叠加岩性影响的结果。

综上分析认为，气候、地形和岩性因素对拉脊山–积石山区域地貌参数的影响是小范围的、局部的，而控制该区域整体地貌演化的主要驱动力是构

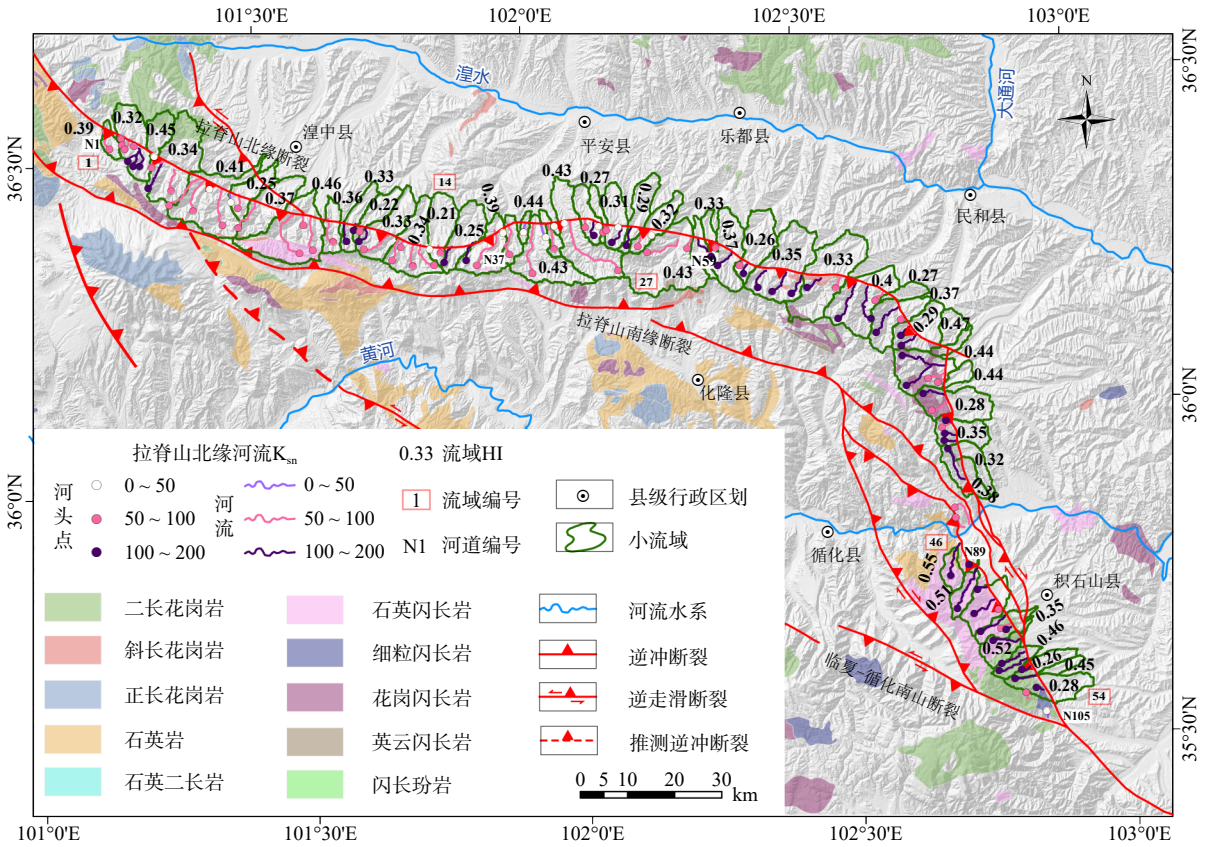


图 7 拉脊山–积石山 K_{sn}、HI 和岩性分布图

Fig. 7 K_{sn} values, HI values, and lithological distribution map of Lajishan–Jishishan

造活动，局部段岩性和气候有一定的影响作用。

5 分析和讨论

5.1 河道 K_{sn} 指示的拉脊山北缘断裂构造活动的分段特征

拉脊山北缘断裂的构造活动具有明显的分段性，大致可分为拉脊山北缘西段（对应河道编号 N1—N37）、拉脊山北缘中段（对应河道编号 N38—N60）和拉脊山北缘东段–积石山段（对应河道编号 N61—N105）。这 3 段河道的 K_{sn} 均值总体逐渐升高，表明自西向东断裂活动性逐渐增强。其中拉脊山北缘中段河道的 K_{sn} 均值略低于西段，推测日月山断裂右旋走滑对拉脊山向东推挤作用已逐渐减弱。同时，沿拉脊山北麓的 54 条中、小流域的 HI 也具有相似的规律，即自西向东流域的 HI 也是逐渐升高的。

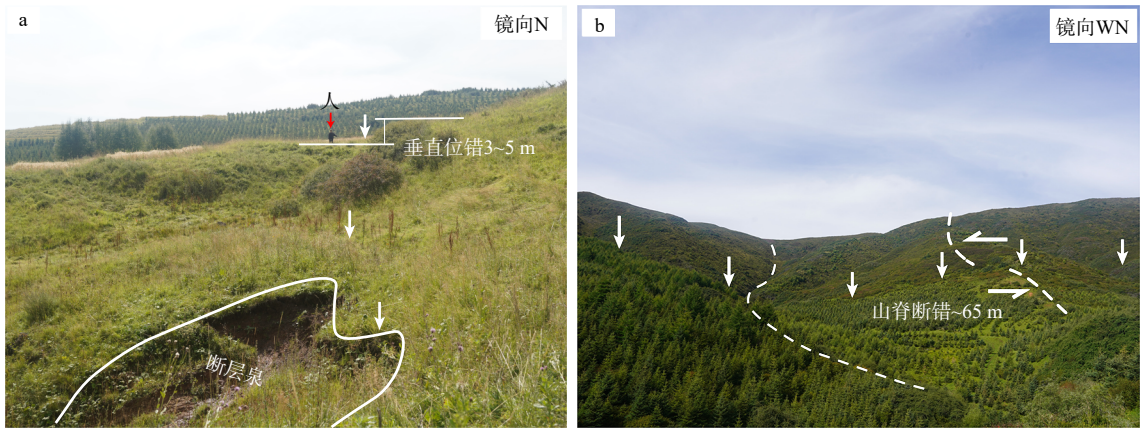
Zhuang et al.（2023）根据近年来的全球卫星导航系统（GNSS）观测数据计算出拉脊山北缘断裂和积石山东缘断裂现今的挤压隆升速率分别为 0.1±0.2 mm/a 和 1.2±0.2 mm/a，这表明拉脊山北缘断裂现今构造活动较弱，而近北西向的积石山东缘断裂更活跃，这与前地貌参数指示的地貌演化规律相吻合。同时，文章通过开展沿断裂不同段的地质地貌调查工作来进一步分析和验证拉脊山北缘断裂第四纪晚期以来的构造活动。

5.1.1 拉脊山北缘西段

拉脊山北缘西段大致从日月山垭口东的山根村向东至祁家川，断裂呈近东西向延展。沿线考察发现，该段断裂在青石坡以西主要为左旋走滑兼具逆冲性质。在湟中县南的大天桥（图 8a）和疙瘩湾（图 8b）附近发现断裂最新活动的地貌特征主要表现为较大的逆冲断层陡坎（高度为 3～5 m）和山脊冲沟左旋（约为 65 m），未发现最新地貌面断错的断层陡坎或冲沟、阶地位错，由此判断该段断裂最新活动时代为晚更新世。

5.1.2 拉脊山北缘中段

拉脊山北缘中段大致从祁家川到乐都亲仁乡一带，该段断裂走向略微向北东凸出，断裂性质以逆冲为主。野外考察发现，在六台村水库（图 9a）和峰堆乡（图 9b）附近断裂活动形成了明显的断层陡崖、断层沟槽和垭口等新活动地貌现象，断裂穿过

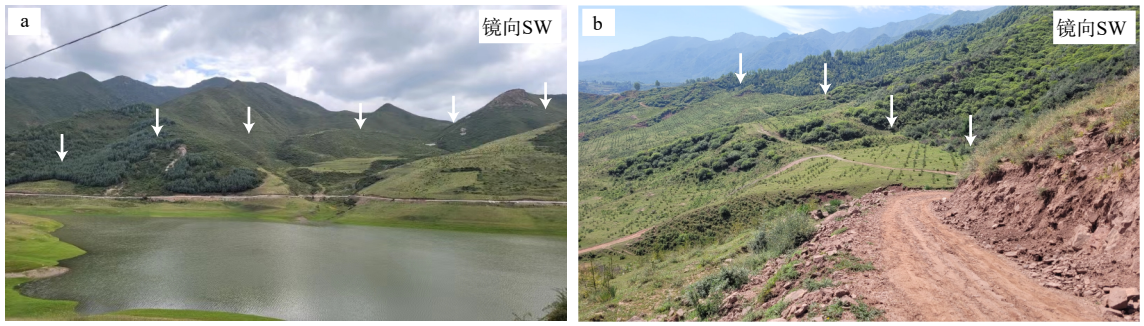


a—大天桥以北断层陡坎及断层泉；b—疙瘩湾以西山脊水系左旋及断层陡坎

图 8　拉脊山北缘断裂西段构造活动的地貌学证据（位置见图 1）

Fig. 8　Geomorphological evidence of tectonic activity along the western section of the North Lajishan Fault (The location is shown in Fig.1.)

(a) Fault scarp and fault-related spring north of Datianqiao; (b) Left-lateral deflection of ridge drainage coupled with fault scarp west of Gedawan



a—六台村水库附近半山坡断错台地及陡崖；b—峰堆乡附近高大断层陡坎

图 9　拉脊山北缘断裂中段构造活动的地貌证据（位置见图 1）

Fig. 9　Geomorphological evidence of tectonic activity along the middle section of the North Lajishan Fault (The location is shown in Fig.1.)

(a) Faulted terrace and colluvial scarp at mid-slope near Liutai Village; (b) Fault scarp near the Fengdui Township

的半山坡上的断错台地和断层陡崖高达数米。上述现象表明，拉脊山北缘断裂中段（断裂转向处）晚更新世具有新活动的地貌表现。

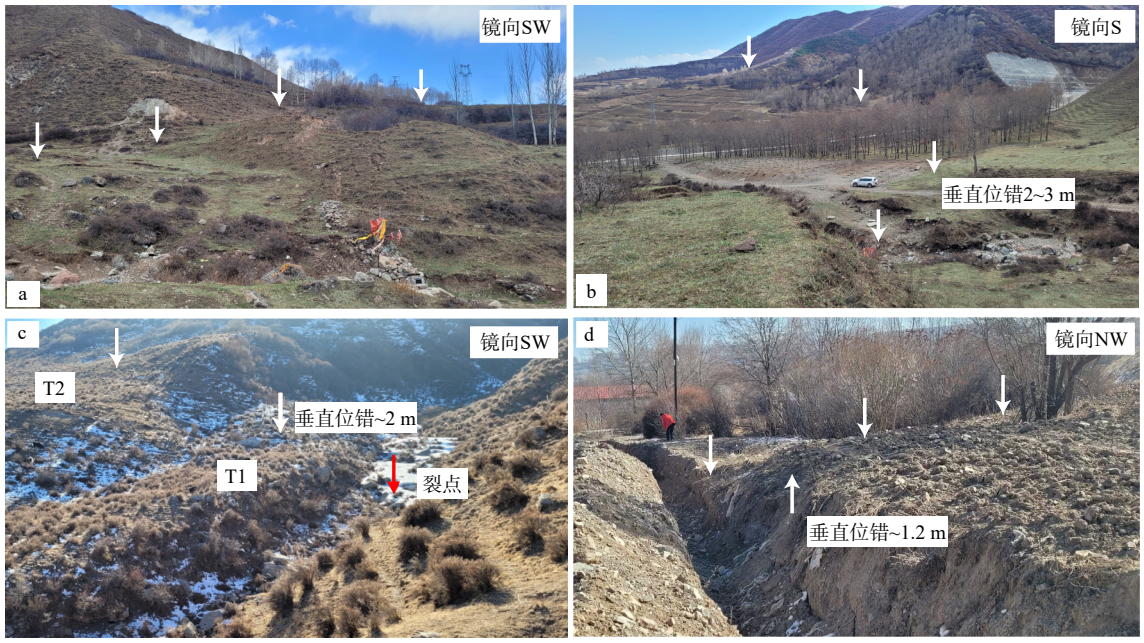
5.1.3　拉脊山北缘东段–积石山段

该段断裂从亲仁乡东直到积石山县麻尼寺沟乡，呈北东向弧形挤出，随后转南东向延展（此段为积石山东缘断裂）。这一区域以往研究程度较低，袁道阳等（2005）曾在北东向区段的峡门（图 10a、10b）附近考察时发现断裂在地貌上较清晰，形成小的断层垭口，断裂穿过该沟口南侧 T2 级阶地时形成高为 2～3 m 的陡坎。最新野外考察中发现，在居集镇北东方向的沟道处，积石山东缘断裂错断了 T1、T2 级阶地，其中 T1 级阶地垂直位错达 2 m，并有清晰的河流裂点（图 10c）。在尕护林附近可以看到明显的断裂线性地貌特征，断裂最新活动断错了 T1 级阶地（垂直位错约为 1.2 m；图 10d）。上述证据表明，拉脊山北缘东段–积石山段（尤其积石山东缘断裂）全新世晚期均有较强的活动。

综合上述这些新活动现象表明，整条拉脊山北缘弧形断裂带自西向东其挤压逆冲作用和最新活动性逐渐增强，与上文提取的地貌参数指标所反映的分段性和变化趋势相吻合。

5.2　流域 HI 指示的拉脊山北缘断裂向盆地内部的挤压扩展作用

流域 HI 的空间分布特征（图 4）表明，在拉脊山北侧的西宁–民和盆地和积石山北东侧的临夏盆地内部出现多个比较集中的高值区，尤其集中在拉脊山北东向弧形挤出的前缘部位，可能是该断裂挤压逆冲活动已经延伸到了盆地内部造成的地貌响应。



a—峡门附近断层垭口；b—峡门南侧断层陡坎；c—积石山东缘居集附近冲沟两级阶地断错（T1 断错约为 2 m）；d—尕护林附近 T1 阶地断错约为 1.2 m

图 10 拉脊山北缘东段−积石山段构造活动的地貌证据

Fig. 10 Geomorphological evidence of tectonic activity along the east section of North Lajishan Fault and the Jishi section

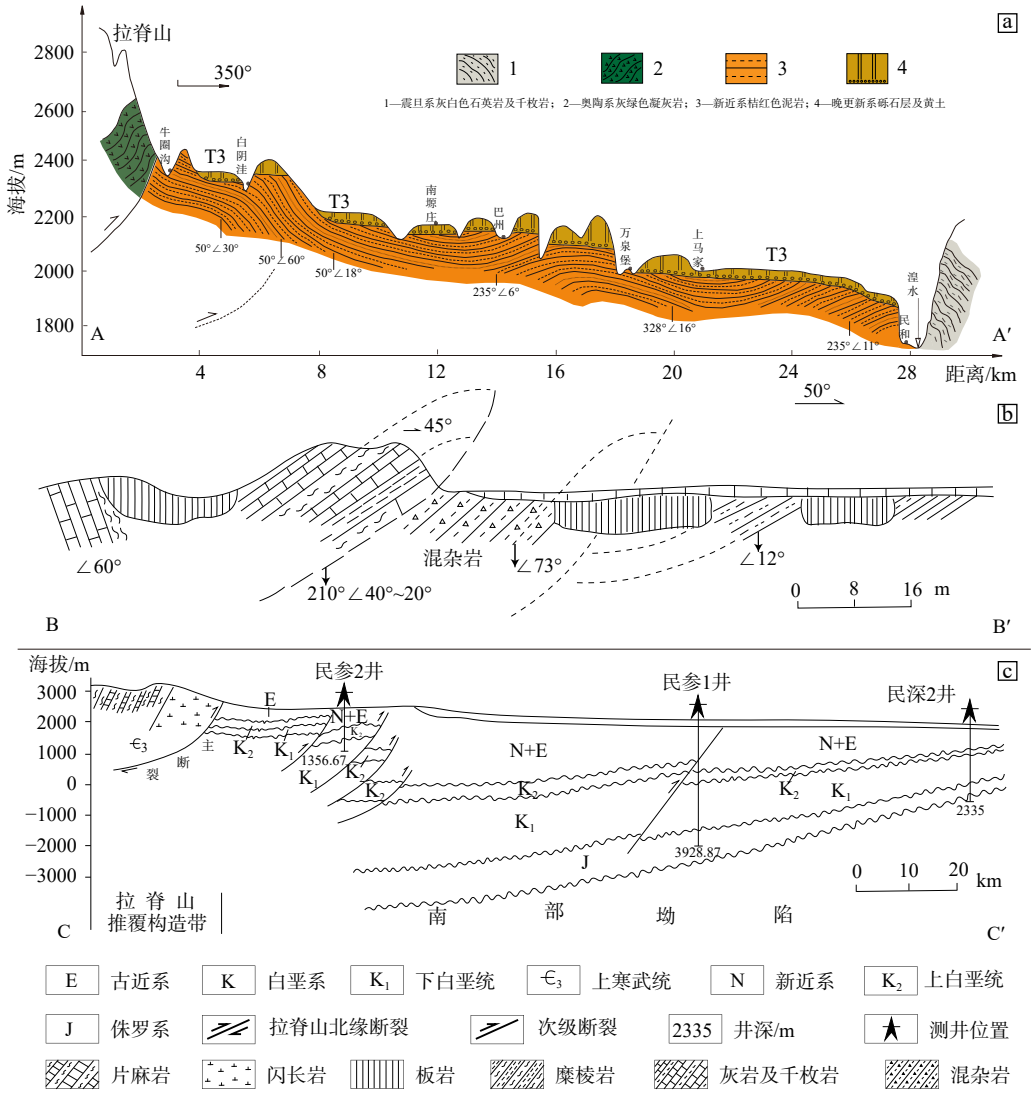
(a) Fault saddle near Xiamen; (b) Fault scarp south of Xiamen; (c) Two-level terrace offsets near Juji along the eastern margin of Jishishan (T1 offset is about 2 m); (d) ~1.2 m offset of T1 terrace near Gahulin

参考米拉沟、古鄯乡和积石山前的银川沟等处的石油地质勘探综合地质解释剖面或地质调查剖面图（图 11）可见，晚新生代以来，拉脊山北缘除主断裂持续活动外，其挤压逆冲活动已经逐渐沿北东方向向西宁−民和盆地和临夏盆地内部扩展，形成断续分布的前展式逆冲断裂和活动褶皱带（袁道阳，2003）。拉脊山北缘断裂活动导致盆地内部的西宁、乐都一带在历史上发生了 10 余次 5 级左右中、强地震，其中仅 1890 年 2 月 17 日在西宁东发生的 5½级地震给出了震中位置（N36.5°、E102.0°；图 1；袁道阳等，2005）。其最新构造活动为发生在西宁−民和盆地内部的 1944 年青海瞿昙寺 5.5 级地震，该地震造成了瞿昙寺的破坏（谢虹等，2014），这很可能与盆地内部的逆断裂−褶皱作用相关。这些地震年代较早、位置不确切且呈弥散状分布，可能与该区特殊的构造活动有关。该区域作为甘肃−青海两省交界处城镇和人口较为密集的地区，在开展拉脊山断裂（包括积石山断裂）最新构造活动的调查过程中，还应关注山前西宁−民和盆地和临夏盆地内部逆断裂−褶皱型构造活动新的活动方式、地震活动及其灾害特征。

6 结论

（1）拉脊山北缘（包括积石山东缘）构造地貌演化呈现明显差异，具有自西向东逐渐年轻的趋势。根据 K_{sn} 和 HI 分布规律，拉脊山北缘（包括积石山东缘）的地貌演化规律具有分段差异性，具体可分为拉脊山北缘西段、拉脊山北缘中段和拉脊山北缘东段−积石山段 3 段。其中，拉脊山北缘东段−积石山段构造活动最新、最强烈，这与长期构造演化是一致的，印证了地貌参数提取结果的合理性，也是该区差异构造活动的地貌响应。

（2）拉脊山北缘（包括积石山东缘）构造活动特征响应着地貌演化规律，也具有分段差异性。根据地貌参数（K_{sn} 和 HI）结果，结合野外地质考察，认为拉脊山北缘断裂（包括积石山东缘断裂）自西向东构造活动强烈，具体来说，拉脊山北缘西段隆升速率稳定，构造活动除了区域挤压隆升作用外，可能还叠加了日月山断裂的走滑分量，该段断裂在晚更新世活动，性质以左旋兼逆冲为主；拉脊山北缘中段（北东向凸出段），构造隆升速率最低，此段断裂以挤压逆冲为主，为晚更新世活动，受日月山断裂



a—拉脊山北缘古鄯乡隆治沟实测地质剖面(据袁道阳，2003 修改)；b—拉脊山北缘米拉沟野外露头剖面素描图(据杨中轩，1993 修改)；c—拉脊山推覆构造带地质综合剖面图(据杨中轩，1993 修改)

图 11　拉脊山北缘典型地质剖面图

Fig. 11　Geological section of the northern margin of Lajishan

(a) Measured geological section of Longzhigou in Gushan Township, northern margin of Lajishan (adapted from Yuan, 2003); (b) Sketch of the outcrop of Milagou along the northern margin of Lajishan (adapted from Yang, 1993); (c) Comprehensive geological section of the thrust tectonic zone of Lajishan (adapted from Yang, 1993)

影响很小；拉脊山北缘东段−积石山段(断裂弧形突出到南东转向段)构造活动强烈，断裂全新世活动，性质主要以逆冲为主兼具右旋分量。

(3)拉脊山北缘断裂(包括积石山东缘断裂)除自身第四纪晚期活动之外，还具有向山前盆地扩展发育的趋势。拉脊山北缘的西宁−民和盆地和积石山东缘的临夏盆地内部出现多处 HI 高值区，结合野外地质调查和石油勘探剖面综合解释，认为拉脊山北缘断裂向盆地内部挤压扩展，形成逆断裂−褶皱带，其最新构造活动可能引发了历史上 10 余次中—强地震活动。盆地内部这种构造活动方式及其地震活动性应当引起重视。

References

BURBANK, PINTER, 1999. Landscape evolution: the interactions of tectonics and surface processes[J]. Basin Research, 11(1): 1-6.

CHANG Z Y, WANG J, BAI S B, et al. , 2014. Research on landform classification based on DEM data: taking West Qinling as an example[J]. Soil and Water Conservation in China(4): 56-59. (in Chinese)

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)

CLARK M K, SCHOENBOHM L M, ROYDEN L H, et al., 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns[J]. Tectonics, 23(1): TC1006.

DUVALL A, KIRBY E, BURBANK D, 2004. Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 109(F3): F03002.

GONG Q M, XU H Y, LI L M, 2021. Discussions on the rock abrasivity index classification[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 17(3): 748-758 . (in Chinese with English abstract)

HSIEH M L, KNUEPFER P L K, 2001. Middle-late Holocene river terraces in the Erhjen River Basin, southwestern Taiwan: implications of river response to climate change and active tectonic uplift[J]. Geomorphology, 38(3-4): 337-372.

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(27-28): 3205-3214.

HU X F, PAN B T, LI Q, 2014. Principles of the stream power erosion model and its latest progress in research[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 50(6): 824-831. (in Chinese with English abstract)

KE S Y, ZHANG D L, WANG W T, et al., 2021. Progress of environmental change in the northeastern Tibetan Plateau since late Pleistocene[J]. Advances in Earth Science, 36(7): 727-739. (in Chinese with English abstract)

KIRBY E, WHIPPLE K, 2001. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis[J]. Geology, 29(5): 415-418.

KIRBY E, WHIPPLE K X, TANG W Q, et al., 2003. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: inferences from bedrock channel longitudinal profiles[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B4): 2217.

LEASE, RICHARD O, BURBANK, et al., 2011. Middle Miocene reorganization of deformation along the northeastern Tibetan Plateau[J]. Geology, 39(4): 359-362.

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. (in Chinese with English abstract)

LI J Z, LI L J, ZHANG T, et al., 2023. Effect of DEM data sources and resolutions on watershed flood simulations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 42(3): 26-40. (in Chinese with English abstract)

LI Z M, TIAN Q J, TU H W, 2009. Remote sensing characteristics of Lajishan fault[J]. Plateau Earthquake Research, 21(1): 26-31. (in Chinese with English abstract)

LI Z Y, ZHANG S, YUAN X M, et al., 2024. Characteristics of disasters caused by the Jishishan M_S6.2 earthquake in Gansu Province in 2023[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 26(2): 43-52. (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 J, ZENG L S, DING L, et al., 2009. Tectonic geomorphology, active tectonics and lower crustal channel flow hypothesis of the southeastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geology, 44(4): 1227-1255. (in Chinese with English abstract)

MASEK J G, ISACKS B L, GUBBELS T L, et al., 1994. Erosion and tectonics at the margins of continental plateaus[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99(B7): 13941-13956.

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.

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)

SNYDER N P, WHIPPLE K X, TUCKER G E, et al., 2000. Landscape response to tectonic forcing: digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California[J]. Geological Society of America Bulletin, 112(8): 1250-1263.

STOCK J D, MONTGOMERY D R, 1999. Geologic constraints on bedrock river incision using the stream power law[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 104(B3): 4983-4993.

STRAHLER A N, 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. GSA Bulletin, 63(11): 1117-1142.

SU R H, YUAN D Y, ZHENG W J, et al., 2024. Surface rupture and damage characteristics of the 2023 M_S6.2 Jishishan earthquake, Gansu[J]. Chinese Journal of Geophysics, 67(9): 3454-3471. (in Chinese with English abstract)

SUN Y Q, QIU X P, CHEN C Y, et al., 2024. GNSS and InSAR derived coseismic slip distribution of the 2023 Jishishan M_S6.2 earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 46(4): 867-879. (in Chinese with English abstract)

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 E Q, ZHANG Q, BURCHFIEL C B, 2000. The Lajishan fault belt in Qinghai Province: a multi-staged uplifting structural window[J]. Scientia Geologica Sinica, 35(4): 493-500. (in Chinese with English abstract)

WANG Z C, ZHANG P Z, ZHANG G L, et al., 2006. Tertiary tectonic activities of the north frontal fault zone of the west Qinling mountains: implications for the growth of the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 13(4): 119-135. (in Chinese with English abstract)

WHIPPLE K, TUCKER G E, 1999. Dynamics of the stream-power river incision model: implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs[J]. Journal of Geophysic-

al Research: Solid Earth, 104(B8): 17661-17674.

WOBUS C, HEIMSATH A, WHIPPLE K, et al., 2005. Active out-of-sequence thrust faulting in the central Nepalese Himalaya[J]. Nature, 434(7036): 1008-1011.

XIE H, LEI Z S, YUAN D Y, et al., 2014. Research on historical data of Qutan Temple earthquake in 1944 in Qinghai Province[J]. Inland Earthquake, 28(4): 305-311. (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. (in Chinese with English abstract)

YANG Z X, 1993. On the overthrust zone in the north margin of the Lajishan, the southern Qilian Mountains[J]. Experimental Petroleum Geology, 15(2): 138-145. (in Chinese with English abstract)

YUAN D Y, SHI Y C, LIU B C, 1999. Study on the time scale of late quaternary hydrogenic sediments along the northeastern margin of Qinghai Xizang Plateau[J]. Seismology and Geology, 21(1): 1-8. (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. (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. ZHANG P Z, LEI Z S, et al., 2005. A preliminary study on the new activity features of the Lajishan Mountain fault zone in Qinghai Province[J]. Earthquake Research in China, 21(1): 93-102. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B, 2012. The study of new activities on western segment of northern margin of western Qinling fault and Laji Shan fault[D]. Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology. (in Chinese with English abstract)

ZHANG H P, YANG N, ZHANG Y Q, et al., 2006. Geomorphology of the Minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications[J]. Quaternary Sciences, 26(1): 126-135. (in Chinese with English abstract)

ZHANG T Q, WANG Z, ZHANG X M, et al., 2015. Hypsometric integral analysis of the Urumqi river drainage basin and its implications for topographic evolution[J]. Quaternary Sciences, 35(1): 60-70. (in Chinese with English abstract)

ZHANG W S, FENG G S, GAO S, et al., 2003. Metamorphic core complex structure and uplifting mechanism in Lajishan-Hualong area[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 28(4): 407-413. (in Chinese with English abstract)

ZHAO H Z, LI Y L, YANG J C, et al., 2010. 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)

ZHENG D W, ZHANG P Z, WAN J L, et al., 2006. Tectonic events, climate and conglomerate: example from Jishishan Mountain and Linxia Basin[J]. Quaternary Sciences, 26(1): 63-69. (in Chinese with English abstract)

ZHENG G Y, 2002. Study on the Tectonic Significance of Hypsometric Integral in the Frontal Basins of the Western Foothills Belt, Taiwan [D]. Kaohsiung: National Kaohsiung Normal University: 37. (in Chinese with English abstract)

ZHU Y L, BAI D, ZHANG C, et al., 2024. Comparative analysis study of SRTM and ASTER GDEM data in Shaanxi Province based on ICESat-2[J]. Mineral Exploration, 15(5): 845-852. (in Chinese with English abstract)

ZHUANG W Q, CUI D X, HAO M, et al., 2023. Geodetic constraints on contemporary three-dimensional crustal deformation in the Laji Shan–Jishi Shan tectonic belt[J]. Geodesy and Geodynamics, 14(6): 589-596.

附中文参考文献

常直杨，王建，白世彪，等，2014. 基于 DEM 数据的地貌分类研究：以西秦岭为例[J]. 中国水土保持(4)：56-59.

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.

龚秋明，许弘毅，李立民，2021. 岩石磨蚀性指数分级讨论[J]. 地下空间与工程学报，17(3)：748-758.

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.

胡小飞，潘保田，李琼，2014. 基岩河道水力侵蚀模型原理及其最新研究进展[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，50(6)：824-831.

柯思茵，张冬丽，王伟涛，等，2021. 青藏高原东北缘晚更新世以来环境变化研究进展[J]. 地球科学进展，36(7)：727-739.

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.

李建柱，李磊菁，张婷，等，2023. DEM 数据源及分辨率对流域洪水模拟影响研究[J]. 水力发电学报，42(3)：26-40.

李兆焱，张升，袁晓铭，等，2024. 2023 年甘肃积石山 6.2 级地震灾害特征[J]. 防灾科技学院学报，26(2)：43-52.

李智敏，田勤俭，屠泓为，2009. 拉脊山断裂带遥感特征研究[J]. 高原地震，21(1)：26-31.

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.

刘静，曾令森，丁林，等，2009. 青藏高原东南缘构造地貌、活动构造和下地壳流动假说[J]. 地质科学，44(4)：1227-1255.

史兴民，杜忠潮，2006. 中国构造地貌学的回顾与展望[J]. 西北地震学报，28(3)：280-284.

苏瑞欢，袁道阳，郑文俊，等，2024. 2023 年甘肃积石山 M_S6.2 地震地表破裂及震害特征分析[J]. 地球物理学报，67(9)：3454-3471.

孙云强，邱鑫鹏，陈常勇，等，2024. GNSS 和 InSAR 约束的 2023 积石山 M_S6.2 地震同震滑动分布[J]. 地震工程学报，46(4)：867-879.

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.

王二七，张旗，BURCHFIEL C B, 2000. 青海拉鸡山：一个多阶段抬升

的构造窗[J]. 地质科学, 35(4): 493-500.

王志才, 张培震, 张广良, 等, 2006. 西秦岭北缘构造带的新生代构造活动: 兼论对青藏高原东北缘形成过程的指示意义[J]. 地学前缘, 13(4): 119-135.

谢虹, 雷中生, 袁道阳, 等, 2014. 1944年青海乐都瞿昙寺地震考证[J]. 内陆地震, 28(4): 305-311.

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.

杨中轩, 1993. 南祁连拉脊山北缘逆冲推覆构造带[J]. 石油实验地质, 15(2): 138-145.

袁道阳, 石玉成, 刘百篪, 1999. 青藏高原东北缘地区晚第四纪水系沉积物年代标尺的初步研究[J]. 地震地质, 21(1): 1-8.

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.

袁道阳, 张培震, 刘百篪, 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, 张培震, 雷中生, 等, 2005. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究[J]. 中国地震, 21(1): 93-102.

张波, 2012. 西秦岭北缘断裂西段与拉脊山断裂新活动特征研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.

张会平, 杨农, 张岳桥, 等, 2006. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 第四纪研究, 26(1): 126-135.

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.

张旺生, 冯光胜, 高山, 等, 2003. 拉脊山-化隆变质核杂岩构造及其隆升机制探讨[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 28(4): 407-413.

赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等, 2010. 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.

郑德文, 张培震, 万景林, 等, 2006. 构造、气候与砾岩: 以积石山和临夏盆地为例[J]. 第四纪研究, 26(1): 63-69.

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.

朱一龙, 白栋, 张春, 等, 2024. 基于ICESat-2的陕西省SRTM和ASTER GDEM数据对比分析研究[J]. 矿产勘查, (5): 845-852.