https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.086

藏南仲巴裂谷带地貌和断裂活动特征研究

刘 璐[1],邵延秀[2],王 伟[3*],张金玉[3],刘兴旺[1,4],邹小波[1,4],姚赟胜[1,4]

1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000
2. 天津大学地球系统科学学院,天津 300072
3. 中国地震局地质研究所,地震动力学国家重点实验室,北京 100029
4. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站,甘肃兰州 730000

摘 要: 仲巴裂谷位于藏南裂谷系的西侧,其断层发育、断错地貌清晰.但目前,该断裂活动性研究尚属空白,制约了对整个藏南裂谷系变形机制的探索.基于GIS空间分析技术,利用数字高程模型数据系统提取该区的河流地貌参数,包括地形坡度、地形起伏度、河流陡峭指数和裂点等.对该裂谷两侧36个流域盆地的地形参数结果进行统计和分析后发现:地形坡度与k_{sn}之间具有一致性,仲巴裂谷西侧北、中段坡度陡峭,k_{sn}值较高,南段支流中间部分陡峭,两端较缓,对应k_{sn}值中间高两端低;东侧坡度和k_{sn}分布呈现中段陡峭,两端变缓的特征.河流纵剖面上表现出裂点上下陡峭系数的差异,东西两侧河流均在出水口处河段有最高河道陡峭系数,向上游段减小,总体上西侧河道陡峭系数大于东侧.综合地形坡度、河流纵剖面及裂点分析结果,认为仲巴裂谷西侧断裂的构造活动性可能强于东侧.

关键词: 仲巴裂谷;地貌参数;构造地质.

中图分类号: P931.2;P542 **文章编号:** 1000-2383(2022)08-3029-16 **收稿日期:** 2021-09-21

Study on the Tectonic Geomorphology and Fault Activity Characteristics of the Zhongba Rift, Southern Tibet

Liu Lu[1], Shao Yanxiu[2], Wang Wei[3*], Zhang Jinyu[3], Liu Xingwang[1,4], Zou Xiaobo[1,4], Yao Yunsheng[1,4]

1. *Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou* 730000, *China*
2. *Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*
3. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100029, *China*
4. *Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou* 730000, *China*

Abstract: The Zhongba rift zone located on the west side of the southern Tibet rift system has well-developed faults and clear faulted landforms. However, the study on the activity of the fault is still lacking, which hinders our understanding of the deformation mechanism of the entire southern Tibet rift system. Based on GIS spatial analysis technology, we used the Digital Elevation Model data system to extract geomorphic parameters in this area, including topographic slope, topographic relief, channel steepness index, and knickpoints. We analyzed 36 basins on both sides of the Zhongba rift. The results show that the topographic slope is consistent with k_{sn}. On the west side of the Zhongba rift, tributaries located on the north and middle sections

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(No. 2019QZKK0901);国家自然基金项目(No. 41802228);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(No. IGCEA2112);甘肃省青年科技基金计划(No. 20JR10RA504).

作者简介: 刘璐(1997—),女,硕士研究生,主要从事活动构造与构造地貌研究.ORCID: 0000-0002-5629-2802. E-mail: liulul2021@163.com
*通讯作者:王伟,ORCID: 0000-0003-3227-4885. E-mail: wangwei411@126.com

引用格式: 刘璐,邵延秀,王伟,张金玉,刘兴旺,邹小波,姚赟胜,2022.藏南仲巴裂谷带地貌和断裂活动特征研究.地球科学,47(8):3029-3044.
Citation: Liu Lu, Shao Yanxiu, Wang Wei, Zhang Jinyu, Liu Xingwang, Zou Xiaobo, Yao Yunsheng, 2022. Study on the Tectonic Geomorphology and Fault Activity Characteristics of the Zhongba Rift, Southern Tibet. *Earth Science*, 47(8): 3029-3044.

have steeper slopes and higher k_{sn}; tributaries in the south have steeper middle section with higher k_{sn} value. On the east side, the slope and k_{sn} are steep at the middle part and gentle at both ends. The river profiles display that the channel steepness are different on both sides of the knickpoints. The rivers of the east and west sides have the highest channel steepness near the outlets, and decrease towards the upstream. Generally, the river channels on the west sides are steeper than ones on the east side. Based on the analysis results of the topographical slope, river profiles, and knickpoints, we suspect that the tectonic activity of the faults on the west side of the Zhongba rift may be stronger than that on the east side.

Key words: Zhongba rift zone; geomorphic parameter; tectonics.

0 引言

新生代以来,受印度板块和欧亚板块碰撞,青藏高原发生了强烈的构造变形,造成地壳缩短、岩石圈增厚、高原隆升及喜马拉雅山崛起(Yin and Harrison, 2000). 在南部的喜马拉雅山前逆冲断裂带与北侧斜列分布的喀喇昆仑—嘉黎大型走滑断裂带之间,发育了7条近南北走向的伸展构造,通常称之为"藏南裂谷系",是青藏高原南部最显著的构造特征之一(图1; Molnar *et al.*, 1978; Tapponnier *et al.*, 1981; Yin,2000). 现代GPS观测结果揭示青藏高原中南部地区整体以东西走向伸展运动为主,地质调查显示区域内普遍发育着高角度的正断层以及近南北走向的裂谷地堑构造,高原内部构造活动十分明显(梁诗明,2014). 这些裂谷带的成因机制与青藏高原的隆升以及印度—欧亚板块汇聚变形的调节有着密切的联系,因此一直是青藏高原地球科学研究的热点问题之一(例如, Molnar *et al.*, 1978, 1993; Yin,2000; Tapponnier *et al.*,2001; 张进江等,2007;Li,2015;Shen and Wang,2020).

受高海拔及交通条件限制,前人对藏南裂谷带的定量研究主要集中在东侧,如错那—沃卡裂谷、

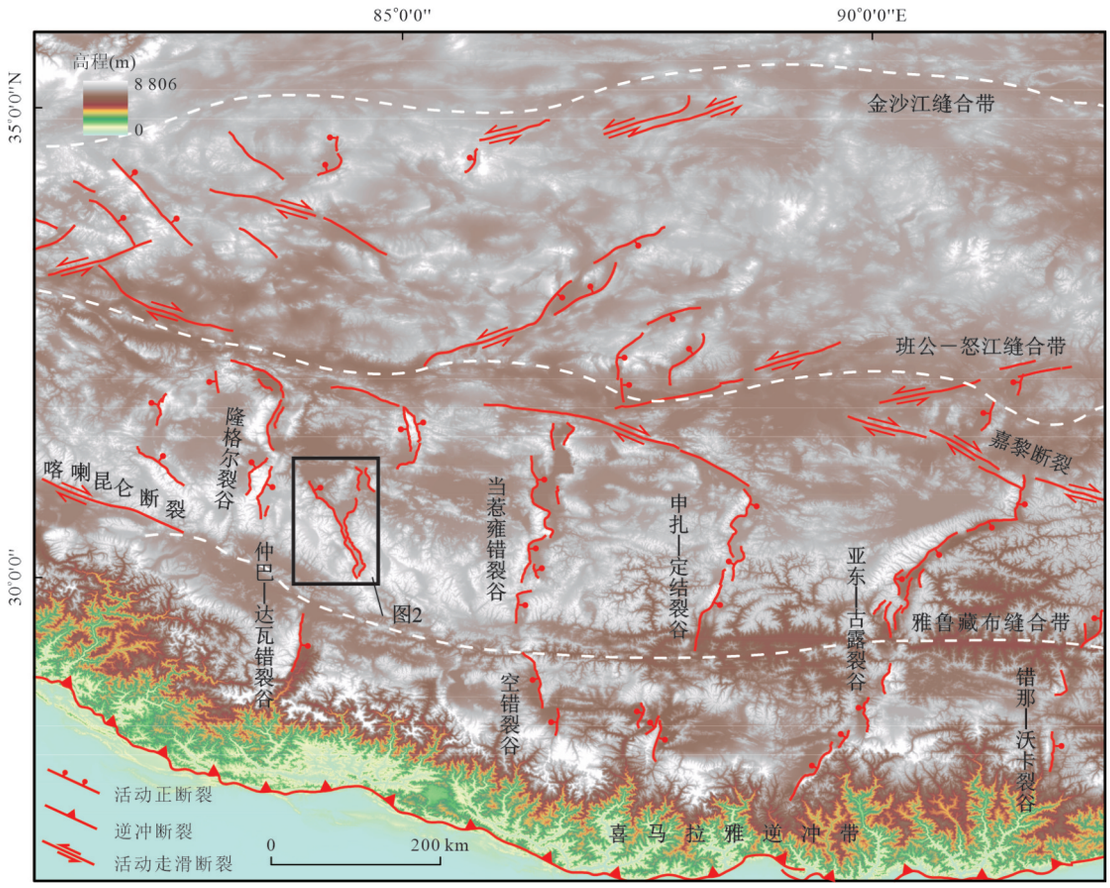

图1 青藏高原内部活动断裂分布图

Fig. 1 Distribution map of active faults in the Tibetan Plateau

据 Taylor and Yin (2009)修改

亚东－谷露裂谷及定结－申扎裂谷，并对这些断裂带的几何学和运动学特征有了一定认识（如 Wu *et al.*, 2004；张进江等，2007；吴中海等，2008；Wang *et al.*, 2019）. 相比而言，西侧 4 条裂谷带在构造活动方面的研究则相对缺乏（Murphy，2010；Sanchez，2013；Styron *et al.*，2013，2015），其中仲巴－达瓦错裂谷带至今没有定量的断裂活动性数据. 该裂谷地貌特征明显，河流水系发育，晚第四纪以来构造活动强烈，历史上发生过多次强震（巴桑次仁等，2009；杜志彪等，2010；邱江涛等，2019）. 当前对该地区的研究主要是通过 GPS 和 InSAR 等大地测量方法来测算其形变场，结果显示该区域有较高的应变率（Murphy，2010；Wang *et al.*, 2019），但是对于断裂精确的几何展布及晚第四纪以来的滑动速率依然没有相关研究报道，缺少定量化的活动性参数.

在活动构造区，河流地貌记录了新构造运动的重要信息，已有的研究表明可以从河流地貌形态参数中剥离出定量的构造运动信息（Flint, 1974；Kirby and Whipple，2001，2012；Whipple *et al.*, 2001，2004，2013；Gallen and Wegmann, 2017）. 例如，对青藏高原东缘龙门山地区的详细地貌研究发现地形与河道陡峭系数可以用以分析和判定区域断裂的活动性（Kirby and Ouimet, 2011；Wang *et al.*, 2021），并且与汶川地震同震地表抬升量密切相关（Kirby and Ouimet, 2011）. 对喜马拉雅地区的研究同样表明地形是研究地壳变形和抬升空间分布的有效手段（Godard *et al.*, 2014）. 因此，对仲巴－达瓦错裂谷带中段流域进行区域性构造地貌形态量化分析，将有助于更好地认识区域内断裂新生代晚期的构造运动特征，以及对揭示南北向裂谷在西藏高原隆升过程中所起的作用等方面均具有重要意义. 基于此，本文选用 30 m 分辨率 SRTM_GL1 DEM 数据，利用 GIS 空间分析技术系统提取了仲巴裂谷带区域多种河流地貌参数，并结合断裂带活动特征，定量分析研究区河流地貌演化与构造活动之间的响应关系.

1　区域概况

藏南裂谷系地处西藏南部印度板块和亚欧板块碰撞的前缘地带，自东向西有数条南北向裂谷，分布在北部的喀喇昆仑－嘉黎断裂系和南部的喜马拉雅造山带之间（～82°E～92°E），每条裂谷间隔约 150～200 km，指示着青藏高原现今近东西向的伸展，是高原内部重要的活动构造（Molnar *et al.*, 1978，1993；Tapponnier *et al.*, 1981；Yin, 2000）. 前人的研究结果显示，这些裂谷活动时间主要起始于～23～13 Ma（丁林，2006；Sanchez，2013；Sundell *et al.*, 2013；Taylor *et al.*, 2021），并一直持续至今. 来自拉萨地块中部仲巴裂谷东侧的高镁超钾质火山岩 $^{39}Ar/^{40}Ar$ 年龄研究表明，17 Ma 是高镁超钾质火山岩最强烈的喷发时期，可能对应该地区伸展构造强烈活动的时间（丁林，2006）. 此外，部分低温热年代学研究显示隆格尔裂谷最晚形成于＞10 Ma（Sundell *et al.*, 2013），当惹雍错裂谷正断裂初始活动时间为 14.5±1.8 Ma（Wolff *et al.*, 2019）.

仲巴裂谷位于藏南裂谷带西侧，是仲巴－达瓦错裂谷带的中段，南起冈底斯山脉，北至塔若错，西邻隆格尔裂谷，呈 NW-NNW 展布，全长约 150 km（图 2；Murphy，2010；Sanchez，2013；Styron *et al.*, 2013，2015）. 研究区内地层多样，古生界、中生界、新生界均有出露，主要由古近系凝灰岩、中－上更新统砂岩、中生代花岗岩及少量侵入的新生代花岗岩和正长岩（周逍遥等，2021）. 区域断裂主要为 SE 向正断裂，发育规模较大，活动性强烈. 地震记录表明，仲巴地区曾于 2004 年 7 月 12 日、2005 年 4 月 8 日和 2008 年 8 月 25 日分别发生了 M_w6.7、M_w6.5 和 M_w6.8 地震（巴桑次仁等，2009；杜志彪等，2010；邱江涛等，2019）.

2　数据及分析方法

本文采用国际地理空间情报局（NGA）和美国航空航天局（NASA）提供的 30 m 分辨率 SRTM_GL1（Shuttle Radar Topography Mission Global）高程模型数据，使用 ArcGIS 空间分析技术、MATLAB 软件包 TopoToolbox 及 TAK（Topographic Analysis Kit）提取了多种河流地貌参数（Schwanghart and Kuhn, 2010；Schwanghart and Scherler, 2014；Gallen and Wegmann, 2017），包括地形坡度、地形起伏度、河流纵剖面、标准化陡峭指数 k_{sn} 及裂点，综合分析影响这些指标的主要因素，结合区域地质背景及野外地质调查，定量分析仲巴裂谷带河流地貌对构造的指示（Schwanghart and Kuhn, 2010；Schwanghart and Scherler, 2014；Gallen and Wegmann, 2017；Forte and Whipple, 2019）.

2.1　地形分析

地形坡度和地形起伏度是传统地形研究中最

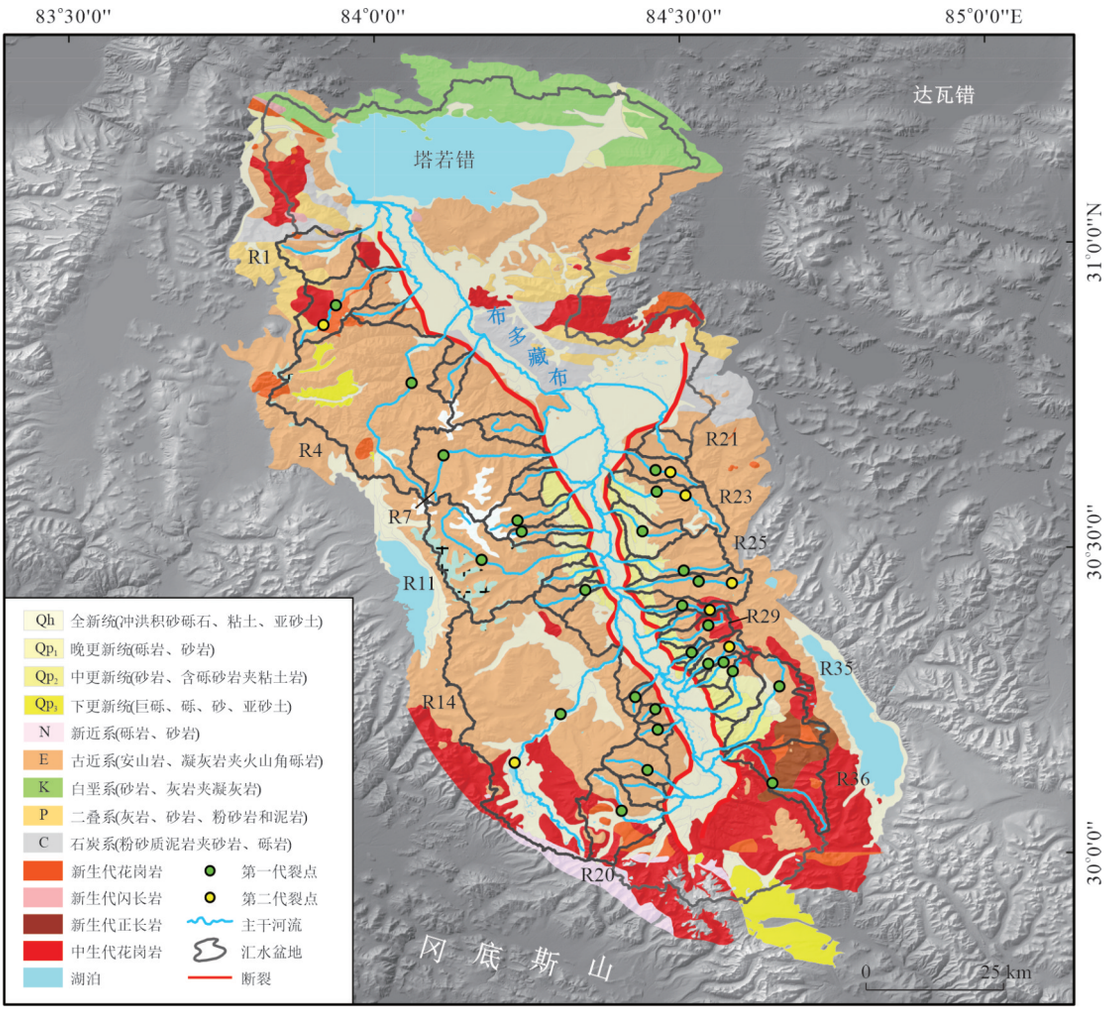

图 2　区域地质背景及水系分布

Fig. 2　Regional geological setting and rivers

常用的定量指标之一(Wang and He, 2020). 地形坡度是坡面相对水平面的度量,地形起伏度指给定区域内最大和最小高度之间的差异,可以反映构造活动的强度,局部地形起伏度值通常用于区域研究. 我们沿仲巴裂谷带东西两条断裂,以主干水系与断裂带的交汇点为出水口位置,提取了 36 个流域盆地,并计算了每个流域的平均坡度,平均起伏度. 西侧水系自北向南标记为 R1~R20,东侧水系为 R21~R36(图 2). 为了揭示仲巴裂谷带左右两侧的地形变化特征,我们自北向南截取了横跨断裂的宽度为 3 km 的 9 条条带状地形剖面,分别为 A-A'、B-B'、…、H-H'、I-I'(图 3). 根据裂谷带走向及几何不连续,将研究区分为 3 段,条带剖面 B-B'及以北为北段,剖面 B-B'至 E-E'之间为中段,E-E'及以南为南段.

2.2　河流纵剖面分析

基岩河道的陡峭度可用于推断区域地貌的岩石隆起或侵蚀速率(Kirby and Whipple, 2001). 河道陡峭度和侵蚀率之间的函数关系,可用河流水力侵蚀模型来描述,即区域岩石抬升和河流下切对河流纵剖面高程变化的影响(Kirby and Whipple, 2001;Whipple *et al.*, 2004):

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=U-KA^{m}S^{n}, \tag{1}$$

其中:z 为河道高程;t 为时间;U 为岩石隆升速率;K 为河道侵蚀系数;A 为汇水面积;S 为局部河道坡度($S=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x}$,$x$ 为河道溯源距离),m 和 n 为常数. 在稳态条件下,河道下切速率和岩石抬升率相等,即 $\mathrm{d}z/\mathrm{d}t=0$,上式可求解给定排水区域的平衡河道坡度:

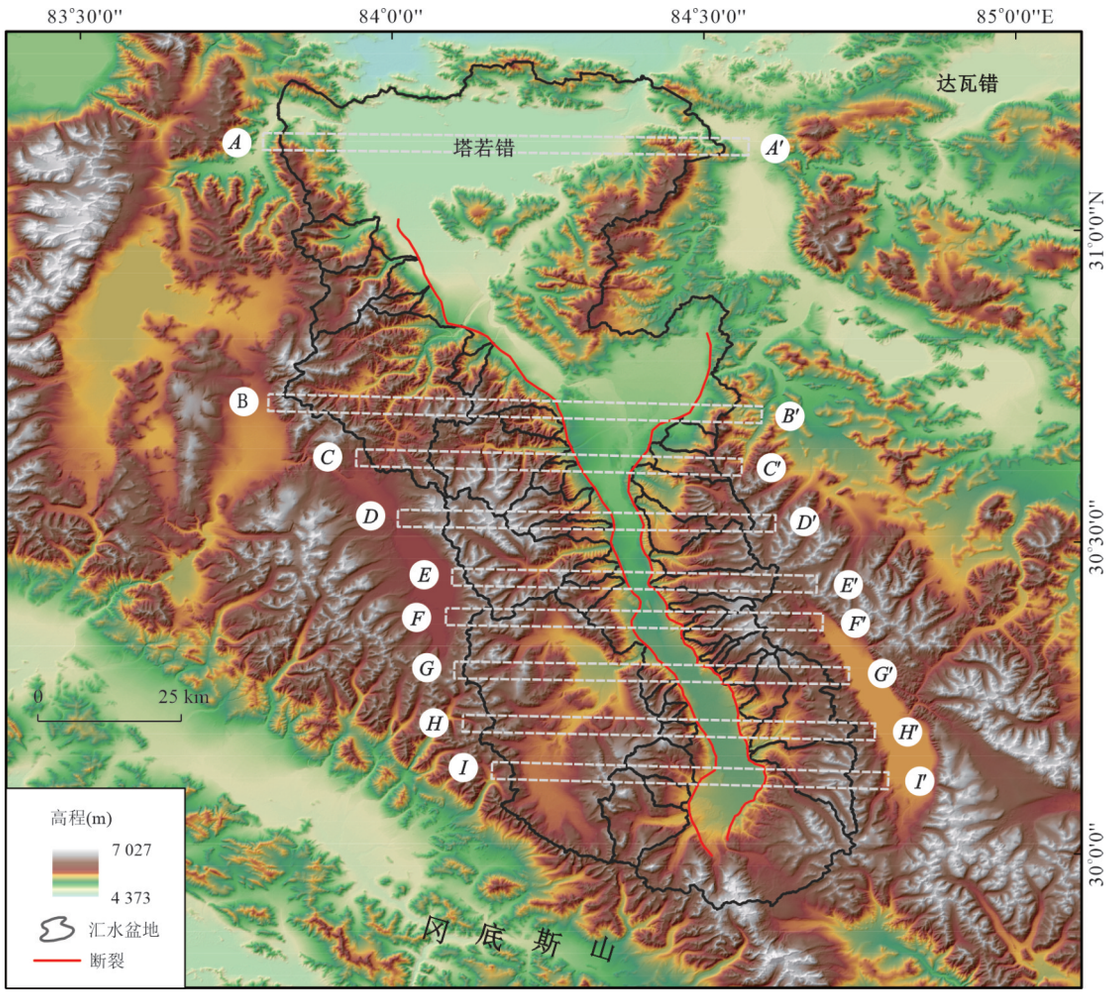

图 3　仲巴流域地貌简图

Fig. 3　The map of topography and major drainage in the study area

根据 30 m 分辨率 SRTM 生成的仲巴裂谷带区域地形,*A*-*A*′、*B*-*B*′、…、*H*-*H*′、*I*-*I*′为横跨裂谷带条带状剖面的位置

$$S=\left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}}A^{-\left(\frac{m}{n}\right)}. \tag{2}$$

前人将稳态河流剖面描述为局部河道坡度和上游排水面积之间的幂律关系,称为弗林特定律(Flint, 1974):

$$S=k_s A^{-\theta}, \tag{3}$$

其中:k_s为河道陡峭系数;θ为凹度,表示局部河道坡度与汇水面积成反比. 结合公式(2)和(3)可得:

$$k_s=\left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}}, \tag{4}$$

$$\theta=\frac{m}{n}. \tag{5}$$

可见,河道陡峭系数 k_s与区域岩石抬升速率正相关,与河道侵蚀系数负相关. 因此,在稳态地区,可以用河道陡峭系数来对比区域上的构造活动强度(Kirby and Whipple,2001, 2012). 此外,m/n比值(河道凹度)也可能受河道侵蚀系数 K 和/或地表抬升速率 U 影响(Kirby and Whipple, 2001; Gallen and Wegmann, 2017),但是相比陡峭系数 k_s的敏感度要小的多(Whipple, 2004; Kirby and Whipple, 2012).

以往通常使用坡度—面积分析法(slope-area analysis)来计算不同河段的河道陡峭系数,但该方法需要对高程数据进行平滑与重采样,高程数据本身的噪点将导致计算结果存在较大的不确定性(Wang *et al.*, 2016). 因此,一些学者提出了积分法(integral approach),即 χ-*z* plot 方法,对公式(2)两边分别积分:

$$z(x)=z(x_b)+\left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}}\int_{x_b}^{x}\left[\frac{1}{A(x)}\right]^{\frac{m}{n}}\mathrm{d}x, \tag{6}$$

式中：$z(x_b)$为河道某点x_b的高程．为了使上式积分项与河道溯源距离有相同的维度，通常需要引入一个参考流域面积A_0．以河道出水口（相对高程为0）作为方程的边界条件，得：

$$z(x)=\left(\frac{U}{KA_0{}^m}\right)^{\frac{1}{n}}\int_0^x\left[\frac{A_0}{A(x)}\right]^{\frac{m}{n}}\mathrm{d}x, \tag{7}$$

$$\chi(x)=\int_0^x\left[\frac{A_0}{A(x)}\right]^{\frac{m}{n}}\mathrm{d}x, \tag{8}$$

则：

$$z(x)=k_sA_0{}^{-\frac{m}{n}}\chi(x). \tag{9}$$

式中：$\chi(x)$为x位置的χ值，以χ值为横坐标，高程z为纵坐标，绘制χ-z plot，图形变为一条过原点的直线．由于变换之后的变量χ只取决于上游流域面积的分布，因此避免了由高程噪声产生的数据偏差．通常设定A_0=1 m^2，这样χ-z plot的斜率就是河道陡峭系数．

此外，χ值的计算与河道凹度有关，难以比较具有不同凹度的流域的河道陡度指数．因此，通常使用参考凹度（reference concavity）θ_{ref}得到标准化陡度指数（normalized channel steepness）k_{sn}来消除凹度对陡度指数的影响（Kirby and Whipple, 2012; Whipple, 2013）．

依照积分法，即χ-z plot方法，我们重点对分布在仲巴裂谷带的36个流域展开研究，利用基岩河道的标准化陡峭系数表征区域构造活动特征．选取500 m河道高程平滑移动窗口消除噪点，计算过程中选用参考面积A_0为1 m^2，参考凹度指数θ_{ref}为0.45，通过‘Topotoolbox’（Schwanghart and Scherler, 2014）和‘ChiProfiler’的matlab脚本程序（Gallen and Wegmann, 2017）提取仲巴裂谷带流域的标准化陡度指数k_{sn}．

2.3　裂点

由于岩性差异、气候变化和构造活动等原因改变了河流侵蚀或者沉积速率，河道打破其原有平衡状态时，将重新调整到新的平衡状态，导致河道出现不连续点，在河流纵剖面上表现为坡度陡然变化的点，称之为裂点（Berlin and Anderson, 2007）．如果裂点下游河道坡度增加，水流功率通常会随之增加，河床的侵蚀能力增强，将导致裂点向上游迁移或扩散（Burbank and Anderson, 2012）．裂点主要分为垂阶型裂点（vertical-step knickpoint）或坡断型裂点（slope-break knickpoint）两种类型（图4；Berlin and Anderson, 2007; Kirby and Whipple, 2012; Whipple *et al.*, 2013）．垂阶型裂点是通常被识别为坡距图或坡面积图中的尖峰，主要为裂点区域高程突变，两侧河道陡峭度无明显变化（图4a，4b）．坡断型裂点则是以不同的河道陡峭度（k_{sn}）值分隔河道河段，并且易于在纵向剖面图和坡面积图上识别，有明显的错位（图4c，4d）．研究表明，垂阶型裂点往往没有直接的构造意义，其绝大多数与河道空间上的非均匀性相关，如滑坡泥石流的扰动（Korup, 2006）、支流交汇处水流量的突然增加（Whipple *et al.*, 2013）；而坡断型裂点则通常受到构造驱动或气候等影响（Whipple *et al.*, 2013），可用来限定岩石隆升或气候的变化（Kirby and Whipple, 2012）．

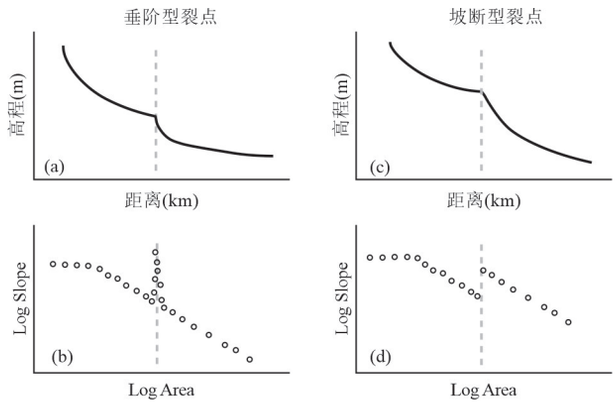

图4　裂点的类型

Fig. 4　Classification of knickpoints

引自Kirby and Whipple（2012）；a. 垂阶型裂点河流纵剖面，上下游河道陡峭度无明显差异；b. 垂阶型裂点log$A$-log$S$散点图表现为高程的突变；c. 坡断型裂点河流纵剖面，上下游河道陡峭度有明显差异；d. 坡断型裂点log$A$-log$S$散点图表现为明显的错位．

考虑到主干河流的代表性以及在对k_{sn}进行统计分析时应将水系源头的非基岩河道（崩积河道）部分排除，本研究只对研究区内36个流域内的主干河流进行了分析．将断层和主干水系交汇点的位置设为出水口的位置，利用‘ChiProfiler’脚本程序提取36个流域主干河流的河流纵剖面及裂点位置．

3　结果分析

3.1　地形

从图5的条带剖面中可以看出，裂谷带两侧的山脉高程主要集中在4 500～6 500 m，且地形起伏较大，反映出局部构造活动和侵蚀程度的差异性．在中段和北段，即剖面B-B'和D-D'，西侧山脉地势要高于东侧，而从E-E'段向南开始，断裂东西两侧地势相差不大，

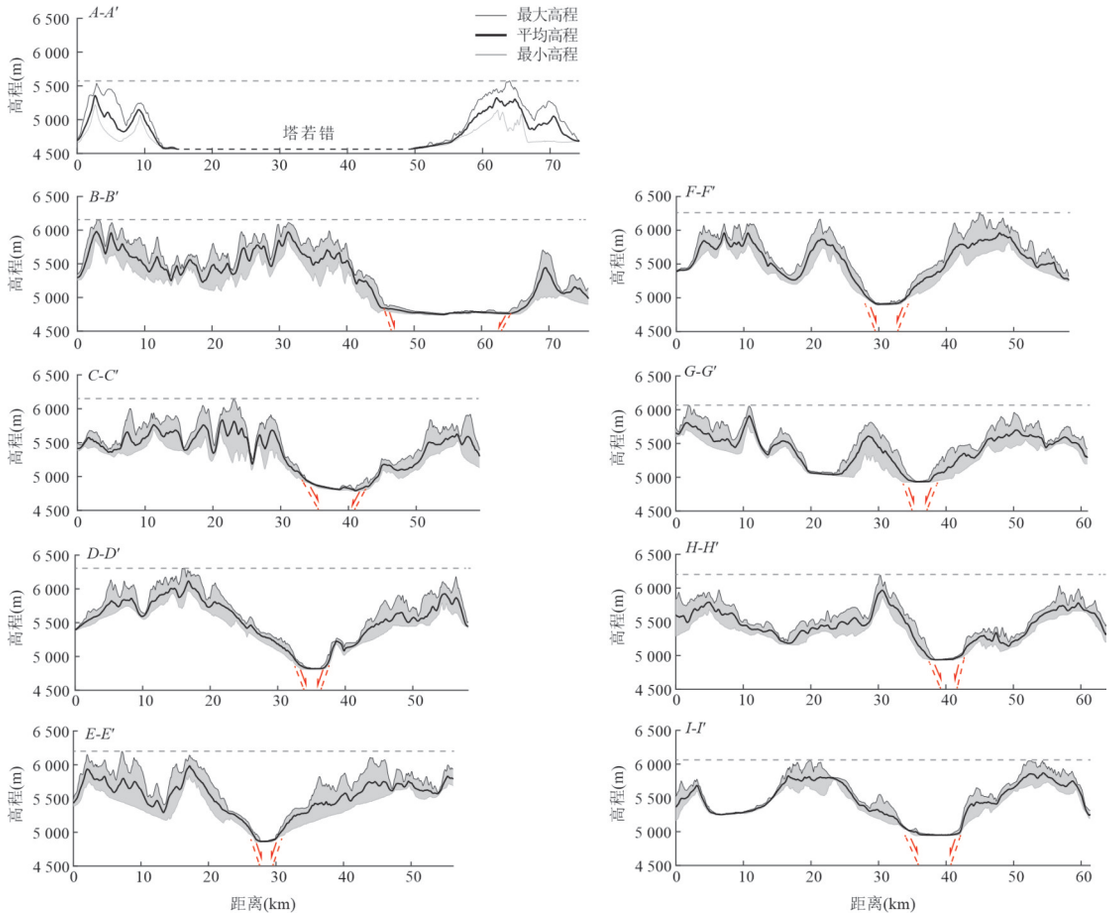

图 5　横跨仲巴裂谷带条带状剖面

Fig. 5　The swath profiles across the Zhongba rift

剖面位置见图 3,虚线为裂谷带左右山脉最高位置,红色实线箭头为断裂位置

局部下凹位于研究区最大流域盆地. 图 5 同时显示出了两条断裂带之间的间距变化,由南向北,从河流的上游开始,间距由起初的~10 km 逐渐缩小至 3 km,在 *C*-*C*′段处逐渐扩大至~20 km.

区域坡度图(图 6)显示仲巴裂谷带东西两侧坡度差异较大,西侧的中、北段流域内地形较为陡峭,坡度整体大于 30°;而南段流域除部分小流域具有较高坡度外,整体地形较为平缓,平均坡度小于 20°. 东侧流域内坡度相对西侧而言较为平缓,大于 30°的坡度主要集中在中段流域距离出水口 10 km 以上的位置;南段平均坡度小于 20°,靠近冈底斯山脉的流域即 S36 上游端处坡度较大.

3.2　河道陡峭系数

为从空间整体上来观察河道陡峭指数的变化,将全流域内河道陡峭指数 k_{sn} 进行插值,获得了陡峭指数空间分布图(图 7). 区域 k_{sn} 值分布变化情况明显,其空间分布特征与地形坡度具有近似一致性,此外,发现裂谷带断裂两侧的 k_{sn} 值差异较为显著. 西侧中、北段裂谷带的陡峭指数沿其走向近连续,k_{sn} 值的变化整体较为均一,在南段最大流域 S14 处有明显的减小趋势,随后依旧有较高陡峭值,在流域 S18、S19、S20 处又减小,即南段流域内 k_{sn} 值呈现中间高两端低的特征;而东侧裂谷带的陡峭指数差异明显,整体而言呈现中间高两端低的趋势.

3.3　河流纵剖面及裂点

图 8 显示西侧 20 条水系中,无裂点发育的 7 条(1、3、5、6、8、12、19),发育一个裂点的 11 条(4、7、9、10、11、13、15、16、17、18、20),发育两个裂点的 2 条(2,14);东侧 16 条水系中,无裂点发育的 3 条(21、28、31),发育一个裂点的 8 条(24、25、29、30、33、34、35、36),发育两个裂点的 5 条(22、23、26、27、32). 依据仲巴流域 36 条主干河流的河道纵剖面特征,发现裂点前后,陡峭系数差异明显,裂点类型均为坡断型裂点(图 9). 西侧中、北段裂点的分布较为分散,而南段自流域 15 至 20,均只有一个裂点;东侧裂点分布则较为集中.

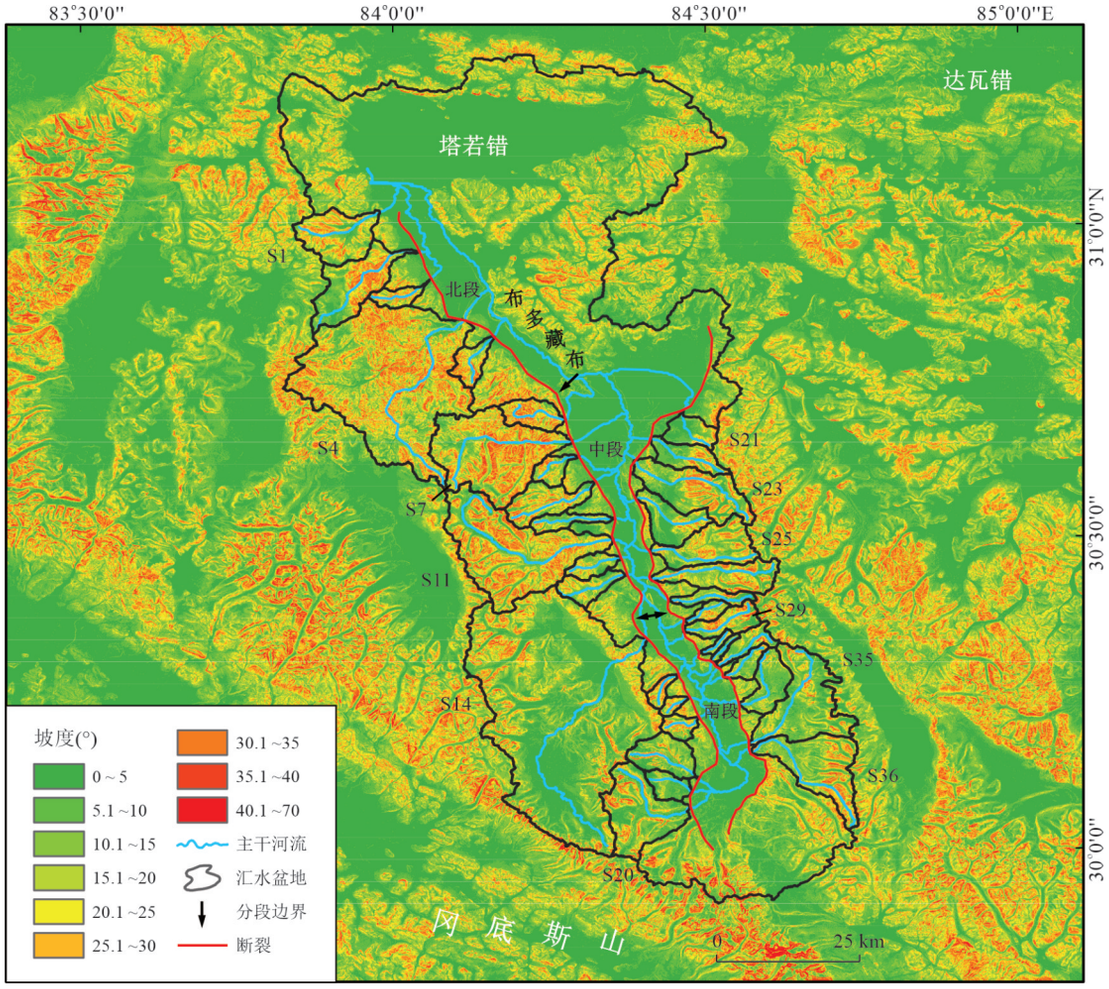

图 6　仲巴裂谷带坡度分布

Fig. 6　Slope map of the Zhongba rift

根据裂谷带走向及几何不连续，将裂谷带由北向南分为 3 段，记为北段、中段和南段

根据研究区地形特征以及裂点上下河段的相对变化，将裂点自下而上分为第一代、第二代（图 8）. 统计分段第一代裂点海拔的均值，西侧北、中、南 3 段分别约为 5 118.1 m、5 424.7 m 和 5 330.0 m；东侧中、南两段分别约为 5 270.7 m 和 5 476.0 m，中段裂点高程均值西侧高于东侧，南段为东侧高于西侧. 且从河流纵剖面上的裂点分布来看，西侧第一代裂点在中段 9、10 号水系处海拔较高，两侧较低；东侧第一代裂点高程较为一致，大多分布在均值约 5 381.2 m 左右，且南段更集中（图 9a、9h）. 裂谷带两侧裂点高程比较，西侧中段裂点高程较高，而东侧整体要高于西侧，其均值约为 5 381.2 m. 第二代裂点的数量要少于第一代裂点，西侧仅出现在 2、14 号流域，裂点海拔分别为 5 369.3 m 和 5 254.0 m；东侧第二代裂点数多于西侧，但也只有 5 个，海拔最高为 27 号水系的 5 870.3 m，最低为 22 号水系的 5 306.4 m.

在图 10 中，我们绘制了裂谷带从北向南的主干河流自出水口至上游不同河段的 k_{sn} 值图. 图 10a 为各流域第一代裂点下游河流段 k_{sn} 值，西侧较为分散，北段的 2 号水系、中段的 9、13 号水系以及南段的 16、17 号水系大于 150 $m^{0.9}$，总体上在中段和南段整体呈中间高、两边低，而在北段有向北侧增加的趋势；东侧较为集中在 100 $m^{0.9}$ 上下，仅在中间部分的 27、29、32 号水系存在高 k_{sn} 值，呈现中间高、两边低的趋势；其东西两侧均值分别约为 104.9±0.9 $m^{0.9}$、134.3±1.4 $m^{0.9}$（1σ），西侧整体要大于东侧. 图 10b 中的菱形点为只有一个裂点的上游河段 k_{sn} 值，方形点为含有两个裂点流域的第一代裂点与第二代裂点之间的河流段 k_{sn} 值，除东侧 22、23 号水系两个裂点之间的 k_{sn} 值较大外，其余河流段 k_{sn} 值集中在 50 $m^{0.9}$ 上下，在西侧南段仍有小幅度的中间高、两边

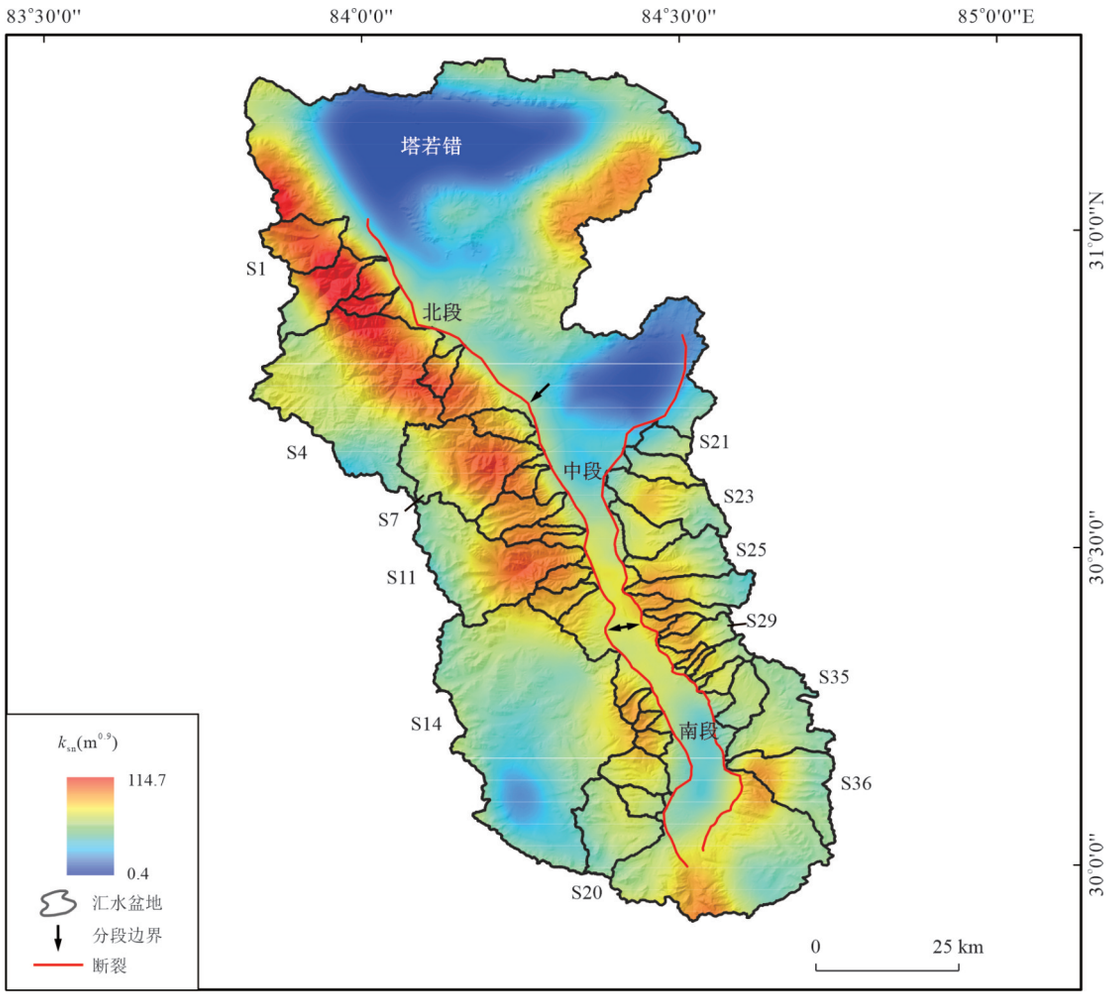

图 7　河道陡峭系数空间分布

Fig. 7　Spatial distribution map of river channel steepness

低的趋势,其东西两侧的均值分别为 67.1±1.6 m$^{0.9}$、63.6±0.78 m$^{0.9}$. 图 10c 中的菱形点同图 10b 中的菱形一样,圆形点为含有两个裂点流域的第二代裂点上游河流段 k_{sn} 值,西侧变化与图 10b 中差别不大,东侧与图 10b 中的 k_{sn} 值大于 50 m$^{0.9}$ 的值相比,均减小至 50 以下,其东西两侧的均值分别为 39.8±1.2 m$^{0.9}$、58.6±0.82 m$^{0.9}$.

自出水口至上游河段,k_{sn} 值整体减小(图 10a～10c),同时,西侧 k_{sn} 值整体高于东侧,东侧的变化趋势则更为明显,由中间向两侧减小. 从塔若错湖口开始,西侧最北边出水口段 k_{sn} 值较高,逐渐降低至中段约 100 km 处,后增加至南段约 170 km 处,在靠近冈底斯山脉附近降低;东侧从中段约 100 km 处的 22 号河流开始有最小 k_{sn} 值,同西侧中段一样,逐渐增加至南段约 170 km 处,随后大幅降低(图 10a). 东西侧在中段增加区域,距湖口相似距离处的河流段,西侧 k_{sn} 值大于东侧.

对比仲巴裂谷东西两侧流域平均 k_{sn} 值(图 11a),发现在西侧中段中间 9、10 流域和南段中间 15、16、17 流域处有较大平均 k_{sn} 值,其值大于 200 m$^{0.9}$,而在整个西侧两端,北段有增加的趋势,南段则逐渐减小;对于东侧而言,中间高、两端低的趋势则更为明显,且整体平均流域 k_{sn} 值小于西侧. 图 11b 表明流域平均坡度值在东西两侧均表现为中间高、两端低,整体呈现出西侧的流域平均坡度值高于东侧.

计算得到的第一代裂点的相对高程(相对于河流出水口,即第一代裂点与断层的高差)(图 11c)发现:裂谷带西侧第一代裂点相对高程的最大值位于中段 10 号水系,约 852.0 m,最小值位于南段 18 号水系,约 185.3 m,且南段高差低于中、北段;东侧裂点最大值出现在南段 34 号水系,约 615.5 m,最小值出现在中段 22 号水系,约 213.8 m,中间部分相对高程较高,两端较低,且中段高差低于南段. 在 10 号水

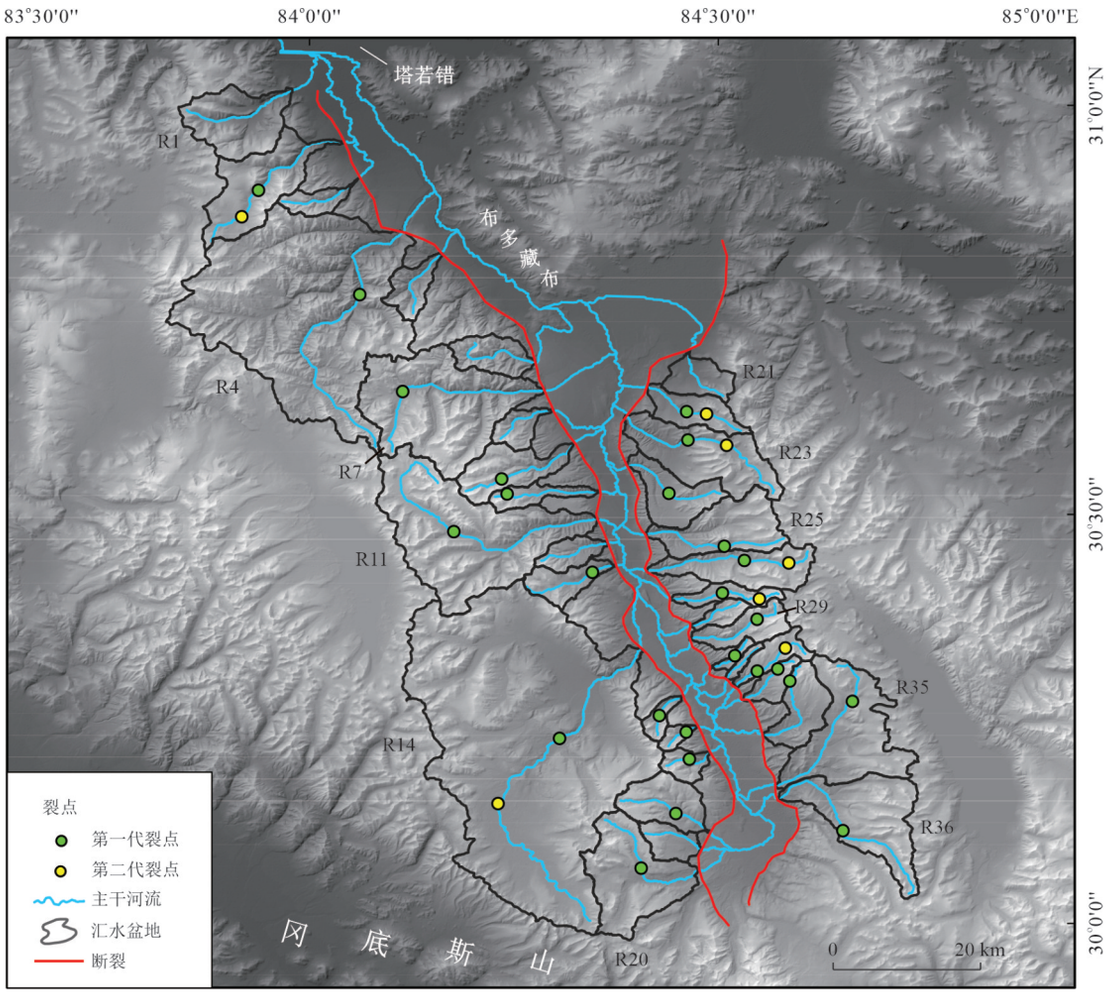

图 8　主干水系裂点分布

Fig. 8　Distribution of knickpoints in the trunk river channels

系以北，西侧相对高程均大于东侧，而在 10 号水系以南，东侧相对高程要大于西侧.

4　讨论

裂谷带区域主要由古近系凝灰岩、中－上更新统砂岩、中生代花岗岩及少量侵入的新生代花岗岩和正长岩组成，且花岗岩主要分布于南端的冈底斯山脉周围. 对比 k_{sn} 值和区域岩性(图 2、7)分布，发现流域大部分区域为相同类型的岩石，仅有少量沉积岩和花岗岩侵入，河道陡峭系数在岩性一致的区域也有差异. 比较河道纵剖面中裂点与岩性分布的关系，发现大多数裂点位于古近系凝灰岩区域，从河流纵剖面(图 9)中可以看出，裂点上下，陡峭系数差异明显，均为坡断型裂点. 这些证据表明裂谷带流域的河道陡峭系数的分布与岩性无明显相关性. 此外，由于仲巴裂谷区研究范围较小，其降水量的空间差异也较小，可近似认为区内降水均匀分布，气候变化对河道陡峭系数的影响忽略不计.

标准化陡峭系数 k_{sn} 常用来分析抬升速率的分布规律，k_{sn} 值高的地区构造抬升速率也高，相反，k_{sn} 值低的地区其构造抬升速率也低(Kirby and Whipple, 2012). 不论是流域平均 k_{sn}(图 7、11a)还是对应最新构造活动性的裂点下游 k_{sn}(图 10a)都表明：西侧河道坡度整体上要略大于东侧，表明西侧可能具有相对较高的抬升速率；仲巴裂谷带西侧中、北段的陡峭指数比南段高，表明该区西侧中、北段山体抬升速率较高，构造活动性较强；东侧为中间高两端低，对应山体抬升速率有从中间向两侧减小的趋势，说明中间部位的构造活动性要强于南北两侧. 而东侧流域 S36 的 k_{sn} 值与其附近其他流域相比，略高一些，这可能受到了更南边冈底斯山脉的影响. 流域平均坡度分布与 k_{sn} 分布基本一致(图 6，7、11a，b)，同样表明裂谷两侧以及沿断裂具有不同的侵蚀

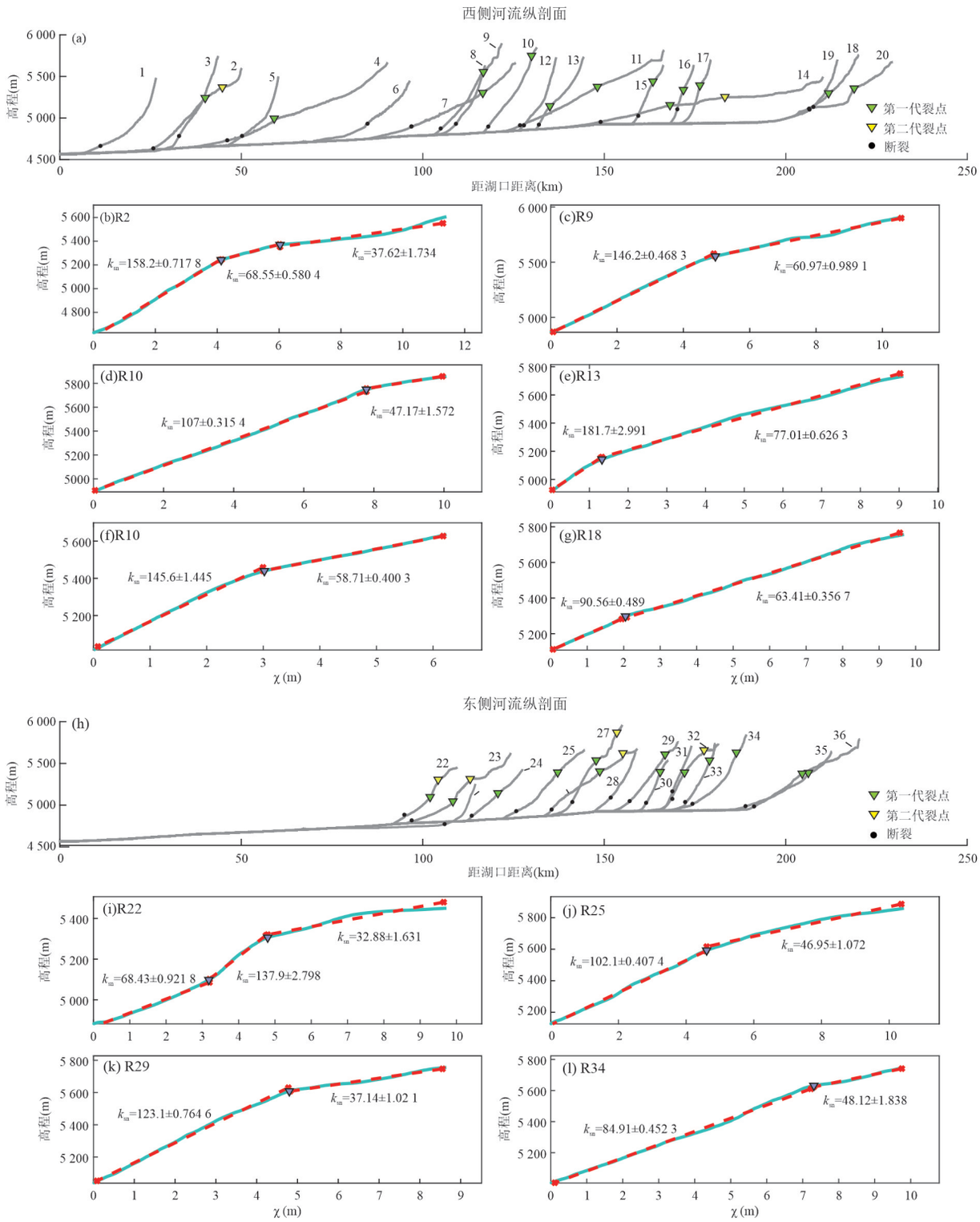

图 9　河流纵剖面分析结果

Fig. 9　Analysis results of trunk channel river profiles

a. 仲巴裂谷西侧 1-20 号流域距塔若错出口距离的主干道河流剖面图河流纵剖面及裂点:显示了每条河流在本次研究中确定的主要河流裂点及出水口位置,即断层. b～g. 图为西侧河流 χ 与海拔图的典型示例(蓝色粗线). 蓝色线表示原始的 χ-z 分布,红色虚线表示回归的 χ-z 分布;坡度的突变被归类为裂点,用蓝色三角形标记. h. 仲巴裂谷东侧 21～36 号流域距塔若错出口距离的主干道河流剖面图河流纵剖面及裂点;i～l. 图为东侧河流 χ 与海拔图的典型示例

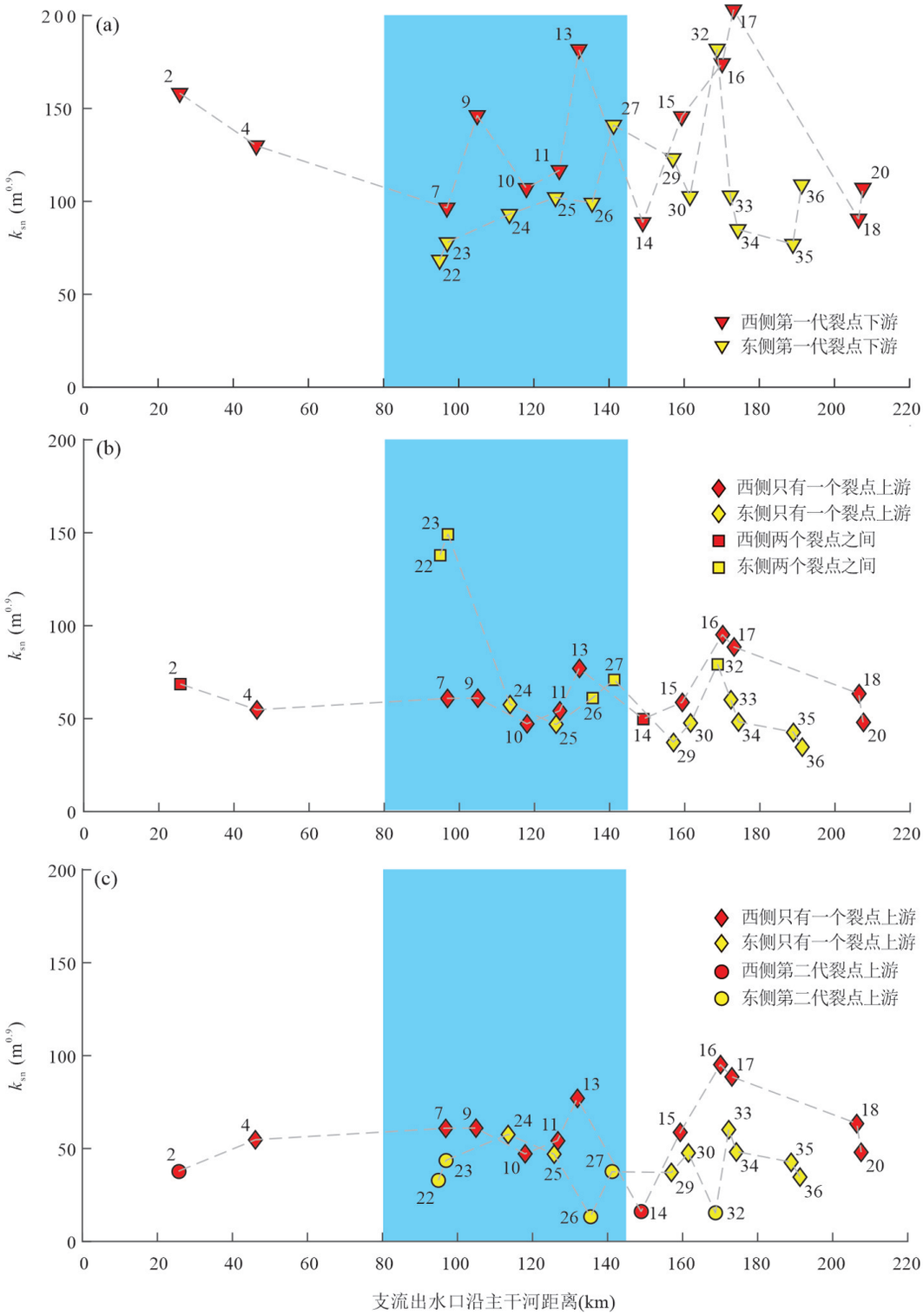

图 10　沿裂谷带不同河段的标准化陡峭指数

Fig. 10　Normalized steepness index for different channel segments along the rift zone

仲巴裂谷东西两侧流域距塔若错出口距离的主干道河流裂点 k_{sn} 值，蓝色区域为裂谷中段，其左右部分分别对应北段和南段；a. 各流域第一代裂点下游河流段 k_{sn} 值；b. 菱形为只有一个裂点流域的裂点上游河流段 k_{sn} 值（如图 10c～10g、10j～10l）；方形为含有两个裂点流域的第一代裂点与第二代裂点之间的河流段 k_{sn} 值（如图 10b、10i）；c. 菱形为只有一个裂点流域的裂点上游河流段 k_{sn} 值（同图 b 中的菱形）；圆形为含有两个裂点流域的第二代裂点上游河流段 k_{sn} 值

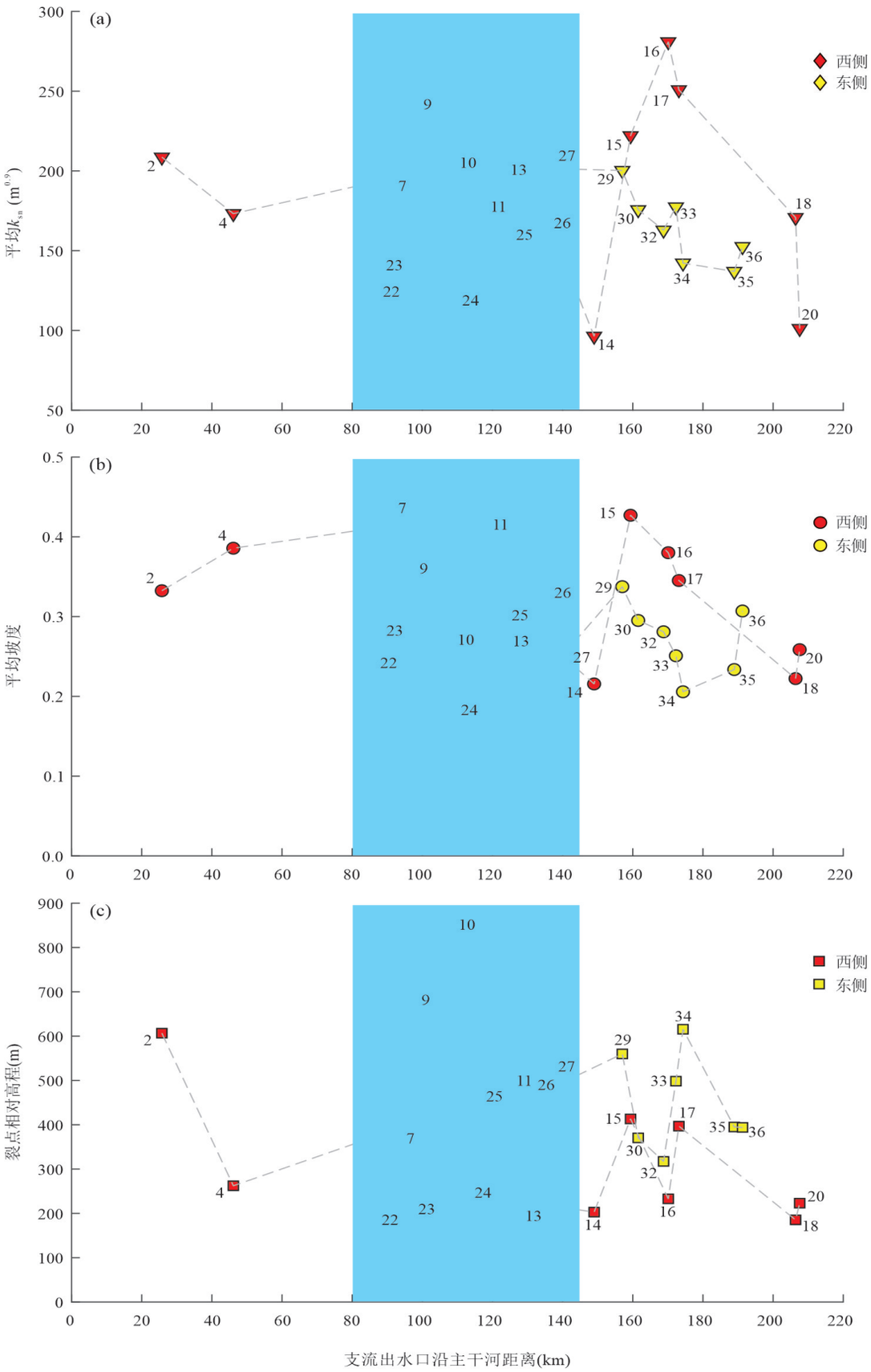

图 11　(a)流域平均 k_{sn} 值分布图;(b) 流域平均坡度值分布图;(c)第一代裂点的相对高程

Fig. 11　(a) The mean k_{sn} value of the drainage basins;(b) The mean gradient value of the drainage basins; (c) Relative elevation of the first knickpoint

速率和构造活动性.在菲亚米尼亚诺正断层开展的河流纵剖面研究表明河流裂点高度可以用来指示断层的垂向速率(Whittaker *et al.*, 2012).仲巴裂谷中—北段西侧的裂点高度高于东侧,但中—南段西侧的裂点高度要明显低于东侧(图11c),如果这些裂点高度代表的是最新的构造活动,那么表明裂谷两侧以及沿断裂走向上具有不同的滑动速率.另外,裂点高度与河道k_{sn}空间展布样式不同(图11a, 11c),表明短期和长期上断层滑动速率的空间分布可能并非完全一致,在不同时期存在滑坡速率走向上的变化.

在构造地貌方面,仲巴裂谷东西两侧在Google Earth遥感图像上均可见明显的断层迹线.西侧活动正断裂起始于北部的塔若错,靠近隆格尔南北裂谷交界处,走向为NNW,东侧则从研究区中段开始,靠近达瓦错段裂谷,走向为NNE.在中段23流域出水口附近,两侧断层以南逐渐转变为近SN、NNW,其后又在南段36流域出水口附近,转变为近NNE,最后被冈底斯山脉阻挡,结合河流地貌参数所反映出的南段构造活动性减弱来看,该处断层应该终止活动,并没有扩展穿过印度—亚洲缝合带(Yin, 2000).而西侧北段处的地貌参数指示断层活动性并未有减弱的趋势,且越靠近塔若错,活动性越强,表明该处断层可能仍在向北部扩展,与北侧的右旋走滑断裂相连;东侧北部断层活动性则逐渐减弱,表明该处断层可能停止活动,然而还需要更多的野外证据.

5 结论

本研究基于GIS空间分析技术,提取分析了仲巴裂谷带区域36条水系网络和流域盆地的地形数据,结合区域地形坡度、地形起伏度、河流纵剖面、标准化陡峭指数k_{sn}及裂点等多种地貌参数,综合分析这些参数对裂谷带构造活动的启示.研究结果表明,地形坡度、地形起伏度在西侧的中、北段处更为陡峭,对应区域的k_{sn}值分布空间上也大于东侧,同时从主干河流裂点上下的k_{sn}值变化规律来看,西侧整体k_{sn}值大于东侧,反映了西侧中、北段山体抬升速率较高,构造活动性较强,大于东侧;而东侧均呈现中间高、两端低的趋势,反映东侧山体抬升速率有从中间向两侧减小的趋势,中间部位的构造活动性要强于两侧.河道纵剖面显示存在多个裂点,表明河道仍处于非均衡状态.结合区域地质背景分析,发现岩性因素对该区地貌因子的影响不大.综合分析,地貌参数表征了仲巴裂谷带山体隆升及地貌演化信息,可指示仲巴流域西侧构造活动强度大于东侧.

References

Basangciren, Guo, C. M., Deng, G. Y., et al., 2009. Analysis on Seismic Disaster Characteristics of Dangxiong Ms6.6 and Zhongba Ms6.8 Earthquakes in Xizang. *Plateau Earthquake Research*, 21(3): 64—69 (in Chinese with English abstract).

Berlin, M. M., Anderson, R. S., 2007. Modeling of Knickpoint Retreat on the Roan Plateau, Western Colorado. *Journal of Geophysical Research*, 112(F3): S06. https://doi.org/10.1029/2006jf000553

Burbank, D. W., Anderson, R. S., 2012. Tectonic Geomorphology, Second Edition. *Environmental & Engineering Geoscience*, 19(2): 198—200. https://doi.org/10.2113/gseegeosci.19.2.198

Ding, L., Yue, Y. H., Cai, F. L., et al., 2006. $^{40}Ar/^{39}Ar$ Geochronology, Geochemical and Sr-Nd-O Isotopic Characteristics of the High-Mg Ultrapotassic Rocks in Lhasa Block of Tibet: Implicationsin the Onset Time and Depth of NS-Striking Rift System. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1252—1261(in Chinese with English abstract).

Du, Z. B., Shen, Q., He, C. J., et al., 2010. Analysis of Deformation of Zhongba, Tibet 2004 MS6.7 and 2005 *MS*6.5 Earthquakes as Constrained by InSAR Measurement. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(4): 12—18 (in Chinese with English abstract).

Flint, J. J., 1974. Stream Gradient as a Function of Order, Magnitude, and Discharge. *Water Resources Research*, 10(5): 969—973. https://doi.org/10.1029/wr010i005p00969

Forte, A. M., Whipple, K. X., 2019. Short Communication: The Topographic Analysis Kit (TAK) for Topo Toolbox. *Earth Surface Dynamics*, 7(1): 87—95. https://doi.org/10.5194/esurf-7-87-2019

Gallen, S. F., Wegmann, K. W., 2017. River Profile Response to Normal Fault Growth and Linkage: An Example from the Hellenic Forearc of South-Central Crete, Greece. *Earth Surface Dynamics*, 5(1): 161—186. https://doi.org/10.5194/esurf-5-161-2017

Godard, V., Bourlès, D. L., Spinabella, F., et al., 2014. Dominance of Tectonics over Climate in Himalayan Denudation. *Geology*, 42(3): 243—246. https://doi.org/10.1130/G35342.1

Kirby, E., Whipple, K., 2001. Quantifying Differential Rock-

Uplift Rates Via Stream Profile Analysis. *Geology*, 29(5): 415. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0415:qdrurv>2.0.co;2

Kirby, E., Ouimet, W., 2011. Tectonic Geomorphology along the Eastern Margin of Tibet: Insights into the Pattern and Processes of Active Deformation Adjacent to the Sichuan Basin. *Geological Society, London, Special Publications*, 353(1): 165－188. https://doi.org/10.1144/sp353.9

Kirby, E., Whipple, K. X., 2012. Expression of Active Tectonics in Erosional Landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44: 54－75. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.009

Korup, O., 2006. Rock-Slope Failure and the River Long Profile. *Geology*, 34(1): 45. https://doi. org/10.1130/g21959.1

Li, Y. L., Wang, C. S., Dai, J. G., et al., 2015. Propagation of the Deformation and Growth of the Tibetan-Himalayan Orogen: A Review. *Earth-Science Reviews*, 143(3－4): 36－61. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.01.001

Liang, S. M., 2014.Three-Dimensional Velocity Field of Present-Day Crustal Motion of the Tibetan Plateau Inferred from GPS Measurements (Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing (in Chinese with English abstract).

Molnar, P., Tapponnier, P., 1978. Active Tectonics of Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 83(B11): 5361. https://doi.org/10.1029/jb083ib11p05361

Molnar, P., England, P., Martinod, J., 1993. Mantle Dynamics, Uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357－396. https://doi.org/10.1029/93RG02030

Murphy, M. A., Sanchez, V., Taylor, M. H., 2010. Syncollisional Extension along the India-Asia Suture Zone, South-Central Tibet: Implications for Crustal Deformation of Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(3/4): 233－243. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.11.046

Qiu, J. T., Liu, L., Liu, C. J., et al., 2019. The Deformation of the 2008 Zhongba Earthquakes and the Tectonic Movement Revealed. *Seismology and Geology*, 41(2): 481－498 (in Chinese with English abstract).

Sanchez, V. I., Murphy, M. A., Robinson, A. C., et al., 2013. Tectonic Evolution of the India-Asia Suture Zone since Middle Eocene Time, Lopukangri Area, South-Central Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62(20): 205－220. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.09.004

Schwanghart, W., Kuhn, N. J., 2010. TopoToolbox: A Set of Matlab Functions for Topographic Analysis. *Environmental Modelling & Software*, 25(6): 770－781. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.12.002

Schwanghart, W., Scherler, D., 2014. Short Communication: TopoToolbox 2-MATLAB-Based Software for Topographic Analysis and Modeling in Earth Surface Sciences. *Earth Surface Dynamics*, 2(1): 1－7. https://doi. org/10.5194/esurf-2-1-2014

Shen, T.Y., Wang, G.C., , 2020. Detrital Zircon Fission-Track Thermochronology of the Present-Day River Drainage System in the Mt. Kailas Area, Western Tibet: Implications for Multiple Cooling Stages of the Gangdese Magmatic Arc. *Journal of Earth Science*, 31(5): 896－904. https://doi.org/ 10.1007/s12583-020-1285-y

Styron, R. H., Taylor, M. H., Sundell, K. E., et al., 2013. Miocene Initiation and Acceleration of Extension in the South Lunggar Rift, Western Tibet: Evolution of an Active Detachment System from Structural Mapping and (U-Th)/He Thermochronology. *Tectonics*, 32(4): 880－907. https://doi.org/10.1002/tect.20053

Styron, R., Taylor, M., Sundell, K., 2015. Accelerated Extension of Tibet Linked to the Northward Underthrusting of Indian Crust. *Nature Geoscience*, 8(2): 131－134. https://doi.org/10.1038/NGEO2336

Sundell, K. E., Taylor, M. H., Styron, R. H., et al., 2013. Evidence for Constriction and Pliocene Acceleration of East-West Extension in the North Lunggar Rift Region of West Central Tibet. *Tectonics*, 32(5): 1454－1479. https://doi.org/10.1002/tect.20086

Tapponnier, P., Mercier, J. L., Armijo, R., et al., 1981. Field Evidence for Active Normal Faulting in Tibet. *Nature*, 294(5840): 410－414. https://doi.org/10.1038/294410a0

Tapponnier, P., Xu, Z. Q., Roger, F., et al., 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671－1677. https://doi. org/10.1126/science.105978

Taylor, M., Forte, A., Laskowski, A., et al., 2021. Active Uplift of Southern Tibet Revealed. *GSA Today*, 31(8): 4－10. https://doi.org/10.1130/gsatg487a.1

Taylor, M., Yin, A., 2009. Active Structures of the Himalayan-Tibetan Orogen and their Relationships to Earthquake Distribution, Contemporary Strain Field, and Cenozoic Volcanism. *Geosphere*, 5(3): 199－214. https://doi.org/10.1130/ges00217.1

Wang, H., Wright, T. J., Liu, L., et al., 2019. Strain Rate Distribution in South-Central Tibet from Two Decades of InSAR and GPS. *Geophysical Research Letters*, 46: 1－10. https://doi.org/10.1029/2019GL081916

Wang, J. Y., He, Z. T., 2020. Responses of Stream Geomorphic Indices to Piedmont Fault Activity in the Daqingshan Area of China. *Journal of Earth Science*, 31(5):

978－987. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1321-y

Wang, W., Godard, V., Liu, Z. J., et al., 2021. Tectonic Controls on Surface Erosion Rates in the Longmen Shan, Eastern Tibet. *Tectonics*, 40(3): e2020TC006445. https://doi.org/10.1029/2020tc006445

Wang, Y. Z., Zhang, H. P., Zheng, D. W., et al., 2016. Coupling Slope-Area Analysis, Integral Approach and Statistic Tests to Steady-State Bedrock River Profile Analysis. *Earth Surface Dynamics*, 5(1): 145－160. https://doi.org/10.5194/esurf-5-145-2017

Whipple, K. X., 2001. Fluvial Landscape Response Time: How Plausible is Steady-State Denudation? *American Journal of Science*, 301(4/5): 313－325. https://doi.org/10.2475/ajs.301.4-5.313

Whipple, K. X., 2004. Bedrock Rivers and The Geomorphology of Active Orogens. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32(1): 151－185. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120356

Whipple, K. X., DiBiase, R. A., Crosby, B. T., 2013. Bedrock Rivers. *Treatise on Geomorphology*, 9: 550－573. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00254-2

Whittaker, A. C., 2012. How do Landscapes Record Tectonics and Climate?. *Lithosphere*, 4(2): 160－164. https://doi.org/10.1130/rf.l003.1

Wolff, R., Hetzel, R., Dunkl, I., et al., 2019. High-Angle Normal Faulting at the Tangra Yumco Graben (Southern Tibet) since ～15 Ma. *The Journal of Geology*, 127(1): 15－36. https://doi.org/10.1086/700406

Wu, Z. H., Zhao, X. T., Wu, Z. H., et al., 2004. Quaternary Geology and Faulting in the Damxung-Yangbajain Basin. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 78(1): 273－282. https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2004.tb00700.x

Wu, Z. H., Zhang, Y. S., Hu, D. G., et al., 2008. The Quaternary Normal Faulting of the Cona-Oiga Rift. *Seismology and Geology*, 30(1): 144－160 (in Chinese with English abstract).

Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211－280. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211

Yin, A., 2000. Mode of Cenozoic East-West Extension in Tibet Suggesting a Common Origin of Rifts in Asia during the Indo-Asian Collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B9): 21745－21759. https://doi.org/10.1029/2000jb900168

Zhang, J. J., 2007. A Review on the Extensional Structures in the Northern Himalaya and Southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 26(6):639－649 (in Chinese with English abstract).

Zhou, X. Y., Zhang, Y. X., Zhang, J. H., et al., 2021. Petrogenesis of Early Paleocene Dengtong Volcanic-Plutonic Complex in Central Lhasa Terrane and Evolution of Crustal High-Silica Magma. *Journal of Earth Science*, 46(2): 474－488 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

巴桑次仁,郭春明,邓桂英,等,2009. 西藏当雄6.6级地震与仲巴6.8级地震震害特征分析. 高原地震,21(3):64－69.

丁林,岳雅慧,蔡福龙,等,2006. 西藏拉萨地块高镁超钾质火山岩及对南北向裂谷形成时间和切割深度的制约. 地质学报,80(9):1252－1261.

杜志彪,沈强,何婵军,等,2010. 仲巴2004年*MS*6.7和2005年*MS*6.5地震的InSAR观测及形变分析. 大地测量与地球动力学,30(4):12－18.

梁诗明,2014. 基于GPS观测的青藏高原现今三维地壳运动研究(博士学位论文). 北京:中国地震局地质研究所.

邱江涛,刘雷,刘传金,等,2019. 2008年仲巴地震形变及其揭示的构造运动. 地震地质,41(2):481－498.

吴中海,张永双,胡道功,等,2008. 藏南错那－沃卡裂谷的第四纪正断层作用及其特征. 地震地质,30(1):144－160.

张进江,2007. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述. 地质通报,26(6):639－649.

周逍遥,张玉修,张吉衡,等,2021. 拉萨地体中部古新世早期灯垌火山－侵入杂岩成因及地壳硅质岩浆演化. 地球科学,46(2):474－488.