

雅鲁藏布江大拐弯地区河流形态特征及其意义

黄文星^{1,2,3}, 王国灿^{1,2}, 王 岸^{1,2}, 曹树钊^{1,2}, 曹 凯^{1,2}

HUANG Wen-xing^{1,2,3}, WANG Guo-can^{1,2}, WANG An^{1,2}, CAO Shu-zhao^{1,2}, CAO Kai^{1,2}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074;

3. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, Guangdong, China

摘要:为探讨雅鲁藏布江大拐弯地区区域隆升的特点,通过 DEM(数字高程模型)和遥感影像提取雅鲁藏布江干流和帕隆藏布的形态特征,引入 Hack 剖面、SL 参数和 Amos 河宽理论模型进行分析。雅鲁藏布江干流在大渡口以下河段的 Hack 剖面表现为上凸形态,SL 参数升高、河流宽度减小,在藏布巴东瀑布-雅鲁藏布江大拐弯顶端段,SL 参数达到最大值,河流宽度达到最小值;大拐弯顶端以下河段,SL 参数减小,河流渐宽。帕隆藏布江古乡以下河段 SL 参数梯级增高,河流宽度总体收窄,大拐弯顶端附近达到最大值。综合 2 条河流的地貌特征和区域地质与地理背景,认为雅鲁藏布江大拐弯地区的隆升具有不均一性,雅鲁藏布江在大渡口附近开始进入快速隆升区段,隆升最强烈的区段位于藏布巴东瀑布-大拐弯顶端段,大拐弯顶端之后雅鲁藏布江逐渐远离隆升中心区。

关键词:雅鲁藏布江大拐弯;Hack 剖面;SL 参数;河流宽度;隆升

中图分类号:P343.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2013)01-0130-11

Huang W X, Wang G C, Wang A, Cao S Z, Cao K. The morphology of the Yalung Zangbo River in the Great Canyon Region and its implications. *Geological Bulletin of China*, 2013,32(1):130-140

Abstract: In order to probe into the features of uplift in the Great Canyon Region of the Yalung Zangbo River, the authors extracted the morphologies of the Yalung Zangbo River and the Parlung Zangbo River from DEM and remote sensing images, and analyzed them by adopting Hack profile, SL index and the model of Amos river width. The Hack profile of the Yalung Zangbo River which is below Datogka area assumes a convex shape. In this area, the SL index increases and the width of the river decreases. In the Tibet Bubba East Falls, the top of the Great Canyon, the SL index reaches the maximum while the width of the river reaches the minimum. In the river which is below the top of the Great Canyon, the SL index decreases whereas its width becomes wider. In the Parlung Zangbo River which is below Guxiang Village, the SL index increases whereas the width of the river decreases. Combined with the morphology of the two rivers and the regional geological and geographical background, the authors hold that the uplift of the Brahmaputra Great Bend area was heterogeneous, which entered the section with dramatically increasing uplift near Datogka area. The segment which had the strongest uplift is in the possession of Bubba East Falls, the top of the Great Canyon, and after that the Yalung Zangbo River was gradually away from the central area of the uplift.

Key words: Great Canyon Region; Yalung Zangbo River; Hack profile; SL index; river width; uplift

收稿日期:2012-08-13;修订日期:2012-12-15

资助项目:国家自然科学基金项目《中新世以来高喜马拉雅岩石剥露与地表气候-构造响应研究》(批准号:40902060)、中国地质调查局项目《青藏高原新近纪隆升过程与地质事件群研究》(编号:1212011121261)和《青藏高原新生代地质作用过程与第四纪环境演变综合研究》(编号:1212010610103)

作者简介:黄文星(1985-),男,硕士,从事构造地貌研究。E-mail:jackyhwxing@163.com

通讯作者:王国灿(1963-),男,教授,博士生导师,从事区域大地构造、构造年代学和构造地貌学研究。E-mail:wgcanc@cug.edu.cn

构造活动、地表侵蚀和气候变化三者之间相互作用过程的研究是近年来大陆岩石圈动力学和地球表面过程研究的前缘科学领域,也是一个研究难度极大的领域。自从 Molnar 等^[1]提出这个类似“鸡和蛋”的问题后,许多研究者在探讨山地隆升问题时,都非常重视构造活动、地表侵蚀和气候过程之间相互作用的影响^[2]。

雅鲁藏布江大拐弯地区位于东喜马拉雅构造结,是印度洋板块向欧亚板块俯冲、楔入的前缘。该区是现今地球上构造活动最强烈^[3-6]、地貌演化最迅速^[7]的地区之一。此外,本区还发育有世界上切割深度最大的雅鲁藏布江大峡谷,同时冰川集中、降雨丰沛,是研究构造活动、地表侵蚀过程和气候之间相互作用的天然试验场。围绕本区提出的比较具有代表性的理论有“隧道流”模型(Channel flow)^[8]、“南向挤出”模型^[9]、“构造动脉瘤”模型(Tectonic aneurysm model)^[10-11]和

“冰川侵蚀”模型(Glacial buzz-saw model)^[12]。

近年来,在上述模型的基础上,研究人员运用沉积物源分析^[13-14]、低温热年代学^[3,15-17]、河流功计算^[18]和数字地貌分析^[19-21]等方法获得了一系列新的研究成果。例如,Finnegan 等^[18]分析了区域热年代学数据和河流侵蚀能力之间的空间对应关系,认为东喜马拉雅构造结的隆升剥蚀与雅鲁藏布江大拐弯峡谷段强烈的侵蚀切割有关;王猛等^[19]将数字地貌的分析结果与区域降雨量的空间分布进行了对比,发现年降雨量与百万年尺度的剥蚀量在空间分布上具有耦合性;Stewart 等^[13]通过沉积物源分析的方法确定雅鲁藏布江与恒河汇合前,约有 50%的沉积物来自南迦巴瓦及其周边地区。

然而,对研究区的河流进行小尺度的形态学研究较少。本文尝试引入 Hack 剖面(河流纵剖面的半对数坐标图)、SL 参数(Hack 剖面的斜率)和 Amos

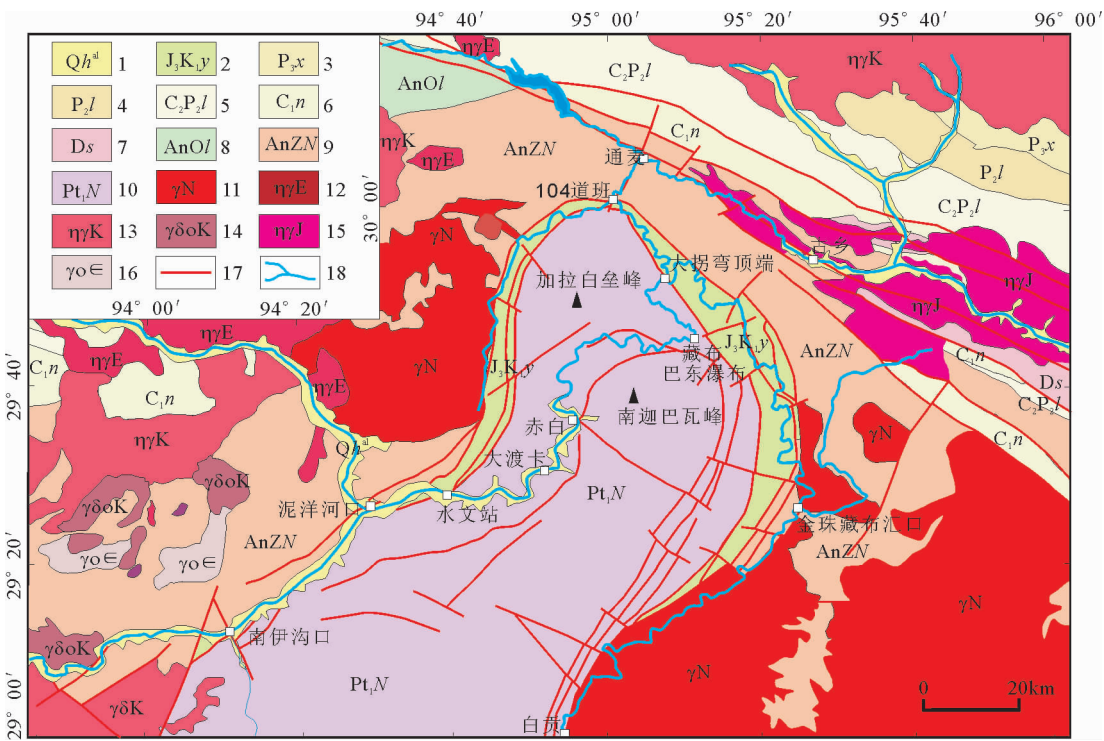


图 1 东喜马拉雅构造结地质构造简图

Fig. 1 Geological and tectonic map of the study area

- 1—第四系松散沉积物;2—上侏罗统—下白垩统雅鲁藏布江蛇绿构造混杂岩;3—上二叠统西马组变细砂岩、板岩夹灰岩;
- 4—中二叠统洛巴堆组:厚层灰岩与板岩/砂质板岩夹砂岩及少量火山岩;5—上石炭统—中二叠统来姑组变安山岩、板岩、含砾板岩;
- 6—下石炭统洛错组灰黑色板岩、千枚岩,接近灰岩变砂岩;7—泥盆系松宗组灰色、灰白色中厚层状灰岩、白云质灰岩;
- 8—前奥陶纪雷龙库岩组灰白色石英岩、石英片岩;9—前震旦纪念青唐古拉山岩群变粒岩、大理岩、斜长片麻岩;
- 10—古元古界南迦巴瓦岩群大理岩、片麻岩、变粒岩;11—中新世花岗岩;12—古近纪二长花岗岩;13—白垩纪二长花岗岩;
- 14—白垩纪英云闪长岩;15—侏罗纪二长花岗岩;16—寒武纪斜长花岗岩;17—断层;18—河流

前普遍应用的SRTM3 数据相比,ASTER GDEM 的水平精度由 90m 提高到 30m(美国本土以外的地区),并且在研究区不存在数据空白。

3 数据分析

3.1 河流分段

在引入 Hack 剖面、SL 参数和 Amos 河宽模型分析前,先根据提取的河流纵剖面 and 河流宽度(图 2),对研究区内的雅鲁藏布江干流和帕隆藏布江进行分段。

对比研究区雅鲁藏布江干流段的河流纵剖面 and 河宽(图 2),发现两者具有较好的耦合性:大渡卡以上河段河流纵坡降小,河宽较大,一般在 1500m 以上;大渡卡附近河流纵坡降增大,河宽也在直白附近由逾 1000m 突然收窄到约 300m,并往赤白方向逐渐减小到 150m;赤白—加拉以下 6.5km 处,河流纵坡降小,河谷逐渐扩宽到 400m 左右;该点往下游到藏布巴东瀑布附近坡度增大,河流平均纵比降达 16‰,河宽收窄到 150m 左右;藏布巴东瀑布—大拐弯顶端附近,纵比降达 27‰,河宽收窄到 60~90m;大拐弯顶端—金珠藏布汇口处坡度较大,纵比降为 9‰,河宽恢复到 150m 左右;金珠藏布汇口以下,河流纵坡降减小,河谷逐渐拓宽。据此,笔者将研究区内的雅鲁藏布江干流划分为 7 个河段(表 1)。

同样,笔者也对研究区内的帕隆藏布江进行河段划分(图 3),总共将其划分为 5 段,各段参数见表 2。

表 1 雅鲁藏布江“南伊沟口—白贡”段河流形态参数
Table 1 River morphology index of the Yalung Zangbo River

河 段	长度 /km	坡降 /‰	河宽 /m
南伊沟口—大渡卡	94.5	0.4	1920
大渡卡—赤白	18.5	8	186
赤白—加拉以下 6.5km	20	1.45	309
加拉以下 6.5km—藏布巴东瀑布	31.5	16	154
藏布巴东瀑布—大拐弯顶端	21	27	82
大拐弯顶端—金珠藏布汇口	92	9	152.5
金珠藏布汇口—白贡	97.5	3.8	293
总 计	375	6.6	654

3.2 河流 Hack 剖面和 SL 参数分析

3.2.1 Hack 剖面和 SL 参数简介

一般情况下,河流坡度的变化是非常敏感的,可以反映构造活动、岩石抗侵蚀能力和地形变化^[31-32]。Hack^[33]在研究河流纵剖面时,提出了 Hack 剖面 and SL 参数。其中 Hack 剖面为河流纵剖面的半对数坐标图,SL 参数则为 Hack 剖面线的斜率。方程如下:
$$H=c-k'\times\ln L$$

(1)
 H 为海拔高度, c 为常数, k' 为 SL 参数, L 为河流从源区到流域分界点的长度。Hack 剖面反映河流纵剖面的整体变化,对指示较大时空尺度的构造运动非常有用^[34]。Keller 等^[35]指出,当河流流经构造稳定区时,Hack 剖面呈“凹”形,而当河流流经快速隆升区时,Hack 剖面呈“凸”形^[36-39]。

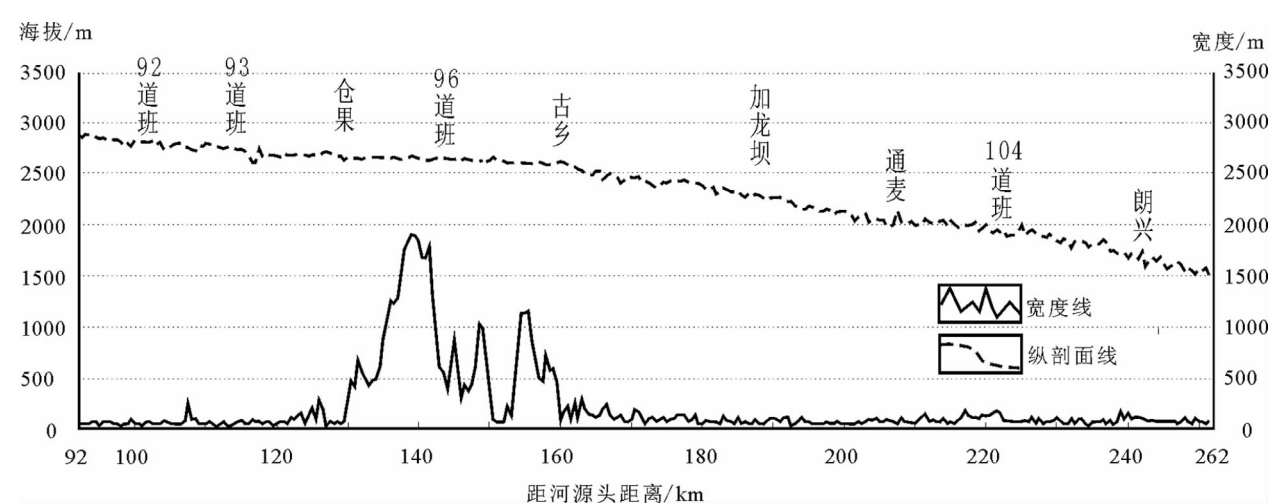


图 3 帕隆藏布江“91 道班—大拐弯顶端”段河流纵剖面 and 河流宽度
Fig. 3 River elevation and channel width along the Parlung Zangbo River

SL 参数对河流坡度的变化非常敏感^[40],其变化主要受构造活动和岩石抗侵蚀能力的影响^[31,34,41]。构造活动造成的河流坡度局部变化会使 SL 参数增高。另外,河流流经的岩石抗侵蚀能力强,与邻区经过长期的差异侵蚀,使得河流坡度变陡,也会造成 SL 参数的增加^[34]。

本研究中,笔者在分别获取了雅鲁藏布江干流段和帕隆藏布江 Hack 剖面的基础上,相应地截取“南伊沟口—白贡”河段和“91 道班—大拐弯顶端”河段进行局部放大研究,SL 参数按照前述的分段方案分段拟合。

3.2.2 研究区雅鲁藏布江干流段的 Hack 剖面 and SL 参数分析

研究区雅鲁藏布江干流段的 Hack 剖面线(图4)总体上可以划分为 2 段,大渡口以上的平直段和大渡口以下的曲线段。平直段预示该段构造活动较弱或处于构造相对沉降区。曲线段总体呈“凸”形,内部又可以划分出 3 个规模不一的上凸段:“大渡口—赤白”微凸段、“加拉—大拐弯顶端”强烈上凸段和“大拐弯顶端—金珠藏布汇口”微凸段。Hack 剖面线的曲折变化暗示沿雅鲁藏布江的构造隆升幅度是不均一的。

SL 参数呈“凸”形,前段低平,大渡口附近开始呈阶梯状上升,在“藏布巴东瀑布—大拐弯顶端”段达到最大值,之后逐级降低。

大渡口以上河段 SL 参数较小,河流纵坡降小,水流平缓,边滩心滩发育,属于冲积型河道,其形成

表 2 帕隆藏布江“91 道班—大拐弯顶端”段河流形态参数
Table 2 River morphology index of the Parlung Zangbo River

河段	长度 /km	坡降 ‰	河宽 /m
91道班—古乡	65	4.25	401.8
古乡—加龙坝	31.5	12.06	125.4
加龙坝—通麦	18.5	12	85.5
通麦—104道班	12	9.75	125
104道班—大拐弯顶端	28	13.82	94.1

主要受控于区域构造格局。该河段位于东久—米林断裂北西侧,东久—米林断裂是一条总体呈北东向展布的正断层,其下降盘为北西盘^[23],故该河段主要以构造沉降为主。

“大渡口—大拐弯顶端”河段 SL 参数除了在加拉村附近出现突然降低外,总体呈上升趋势。该河段流经南迦巴瓦岩群内部,岩性基本一致,SL 参数的升高可能意味着大渡口往下到大拐弯顶端附近,隆升速率逐渐增大。加拉村附近出现 SL 参数突然降低的异常现象,遥感解译证实是由加拉村以下 6km 处的冰川融水型泥石流堵江造成的(图 5)。

大拐弯顶端附近 SL 参数急剧下降,可能与如下 4 种情况有关:①大拐弯顶端以下河段构造隆升减弱;②雅鲁藏布江在大拐弯顶端附近重新进入雅鲁藏布江带(图 1),带内硬脆的岩石(石英云母片岩、绿片岩等)受密集发育的断裂节理破坏,岩体的

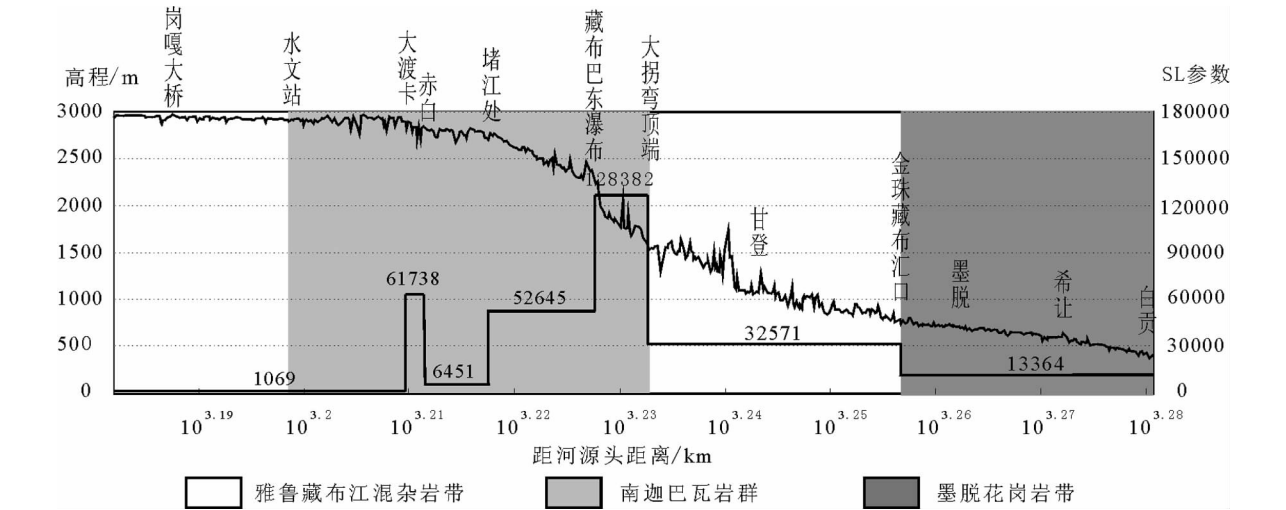


图 4 雅鲁藏布江“南伊沟—白贡”段 SL 参数、Hack 剖面 and 岩性分布
Fig. 4 Hack profile and SL index along the Yalung Zangbo River

稳定性减弱,抗侵蚀能力急剧下降;③大拐弯顶端以下河段发育密集的崩塌滑坡(图 6)造成淤塞;④大拐弯顶端附近,雅鲁藏布江的最大支流——帕隆藏布江(径流量约占雅鲁藏布江干流的 1/4)的汇入。究竟哪种因素占主导,下文将与帕隆藏布江进行对比研究。

SL 参数在大拐弯顶端附近急剧下降,在金珠藏布汇口再次下降,暗示雅鲁藏布江干流在大拐弯顶端附近开始逐渐远离隆升核心区,而金珠藏布汇口以下河段的 SL 参数仍然保持较高的值,则可能与岩性有关:金珠藏布汇口处附近,雅鲁藏布江干流两侧岩性由雅鲁藏布江缝合带内部的偏松散硬脆的石英岩、石英片岩,进入到墨脱花岗岩带,带内岩性为细粒角闪闪长岩、细粒英云闪长岩、中粒黑云母石英闪长岩、中粒黑云花岗岩闪长岩和二长花岗岩,岩体整体性较好,抗侵蚀能力较强。另外,金珠藏布汇口以下河段,降雨丰沛,强降雨带来的强剥蚀作用可能引发较为显著的均衡隆升效应。

3.2.3 研究区帕隆藏布江的 Hack 剖面 和 SL 参数 分析

帕隆藏布江 Hack 剖面(图 7)在古乡以下总体表现为“凸”形,SL 参数依次递增,暗示顺江往下越来越接近隆升核心区。具体地,Hack 剖面 和 SL 参数发生明显变化的位置主要有:古乡、通麦和 104 道班。古乡附近 Hack 剖面陡变,SL 参数剧增,与古乡泥石流堵江有关。堵江泥石流造成帕隆藏布江淤塞并形成古乡湖,引起明显的上下游河流纵坡



图 5 加拉附近的泥石流堵江(图片来自 Google Earth)
Fig. 5 Glacier debris flows that dammed the Yarlung Zangbo River near Jala Village

降差异。古乡以下,河流的纵坡降逐渐增大,至通麦附近,河流纵坡降和 SL 参数减小,这可能与下

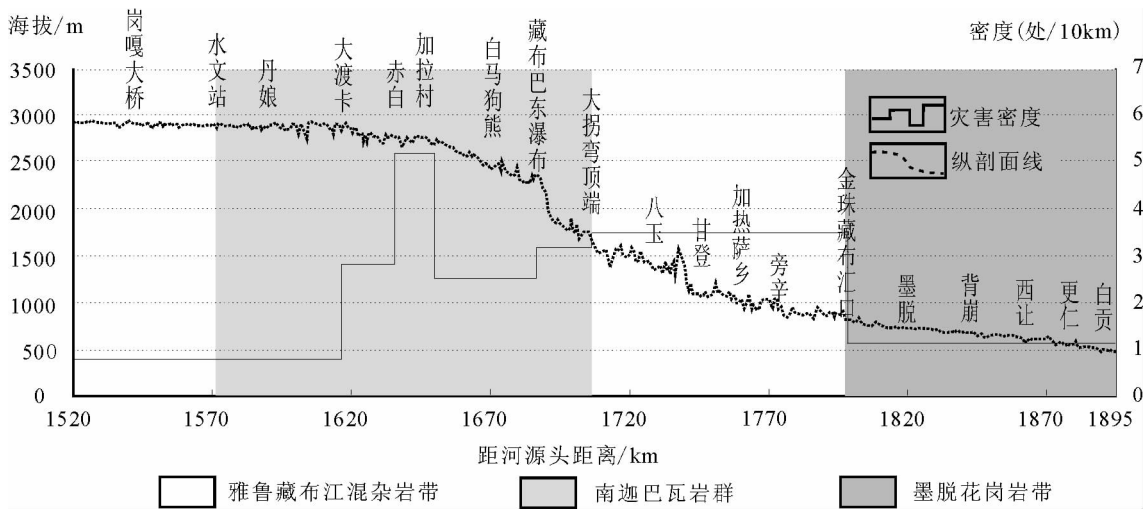


图 6 研究区雅鲁藏布江干流纵剖面与崩塌、滑坡的发育密度分布
Fig. 6 Distribution of landslide along the Yarlung Zangbo River

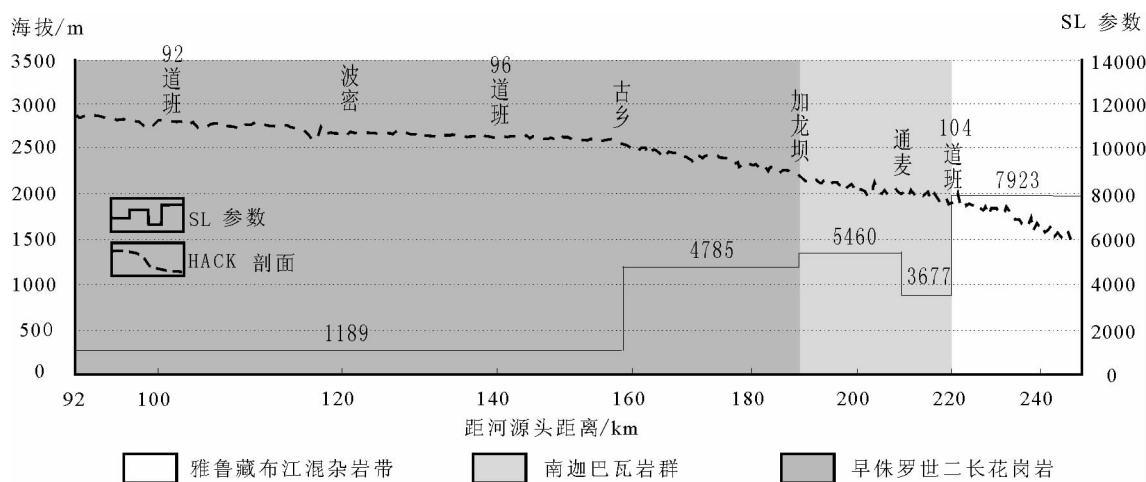


图 7 帕隆藏布江 SL 参数、Hack 剖面 and 岩性分布
Fig. 7 Hack profile and SL index along the Parlung Zangbo River

游排龙附近的“Z”字型河流急拐弯造成的局部涌水有关，而更重要的影响可能来自排龙沟大规模泥石流堵江(图 8)。排龙沟全长约 10km, 汇水区面积约 65km², 是易贡堵江泥石流汇水区面积的 2 倍多, 内部发育大量冰川, 排龙村对岸仍可见泥石流堵江大坝的残积体。

104 道班附近, 东久河汇入, 帕隆藏布江由念青

唐古拉岩群进入雅鲁藏布江缝合带, 且下游发育密集的崩塌滑坡(图 9), 这与雅鲁藏布江干流大拐弯顶端附近的情况类似。然而, 相比雅鲁藏布江干流在大拐弯顶端附近的 SL 参数降低, 帕隆藏布江在 104 道班附近却出现了 SL 参数的增加, 暗示雅鲁藏布江干流在大拐弯顶端附近开始逐渐远离隆升核心区, 而帕隆藏布江在 104 道班附近逐渐靠近隆升核

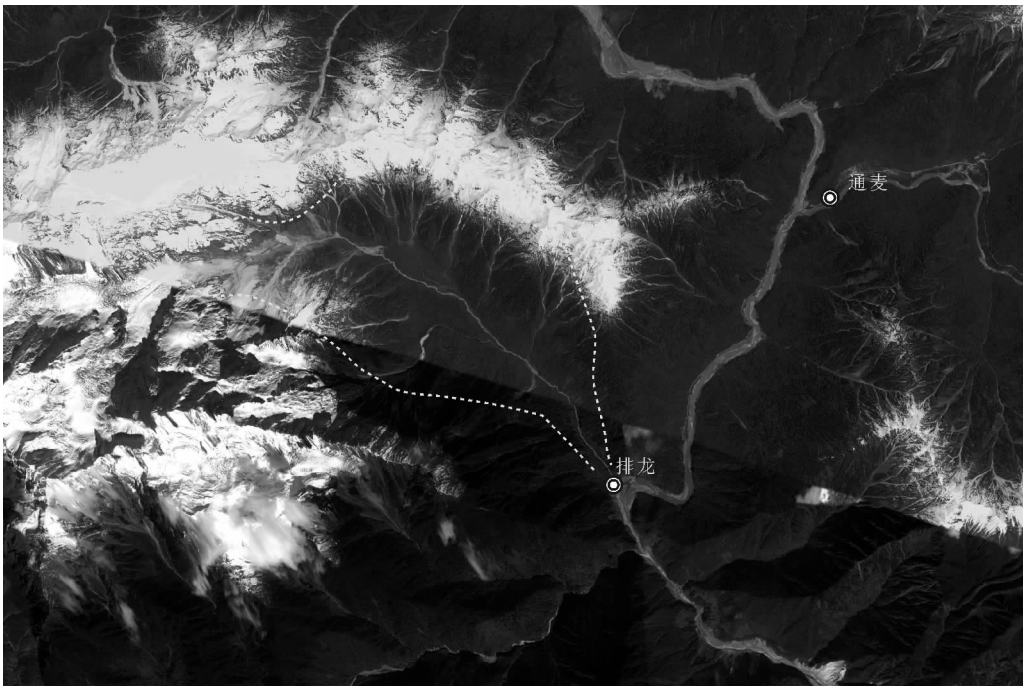


图 8 帕隆藏布江排龙附近的“Z”型河弯和冰川融水型泥石流(图片来自 Google Earth)
Fig. 8 Glacier debris flows that dammed the Parlung Zangbo River near Pailong Village

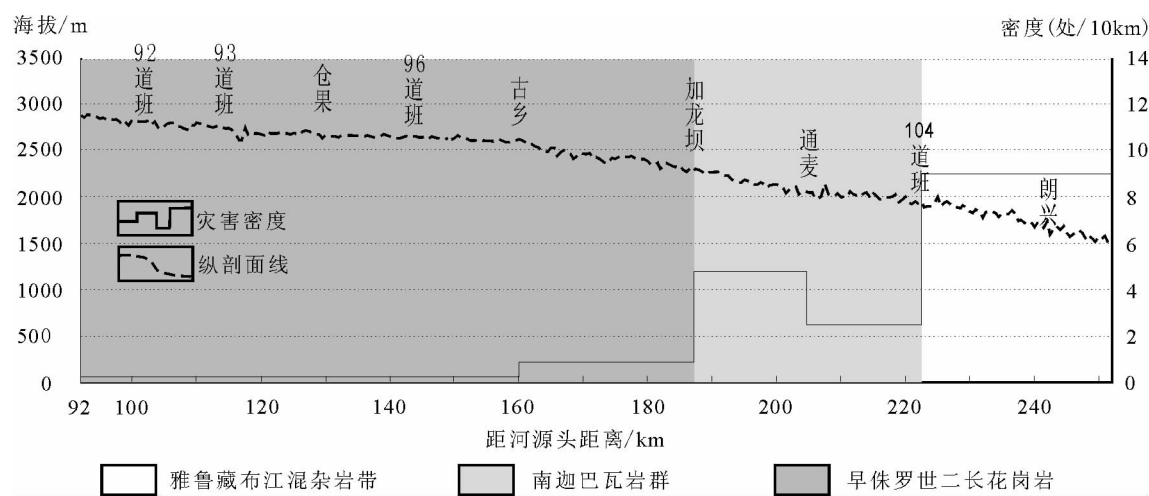


图 9 研究区帕隆藏布江河流纵剖面与崩塌滑坡的发育密度
Fig. 9 Distribution of landslide along the Parlung Zangbo River

心区, 隆升核心区位于大拐弯顶端附近。

3.3 河流宽度分析

研究河流宽度对构造隆升的响应尚处于起步阶段^[42]。近年来, 许多学者^[43-51]对流经构造隆升区的河流宽度变化进行了研究, 并且越来越多的学者^[51-54]开始认识到河宽先于河流坡度对构造、气候和岩性条件的变化作出反应。

Amos 等^[54]在研究横穿南新西兰 Ostler 断裂带多条古河流的宽度和坡度变化的基础上, 提出了河

流宽度对区域快速隆升和慢速隆升的响应模式 (图 10): (A) 当隆升幅度很小, 河流只需要通过宽度变窄就可以维持原来的路径流动; (B) 当隆升幅度过大, 河宽达到极限的最小值, 仍然不能提供足够的切割侵蚀能力, 更多的侵蚀将依赖于坡度的增加和裂点的发育。雅鲁藏布江大拐弯地区发育多个河流裂点^[2], 指示隆升的幅度远远超过了河宽调节能力, 属于 B 模式。

研究区内雅鲁藏布江干流的实测河宽 (图 2) 显

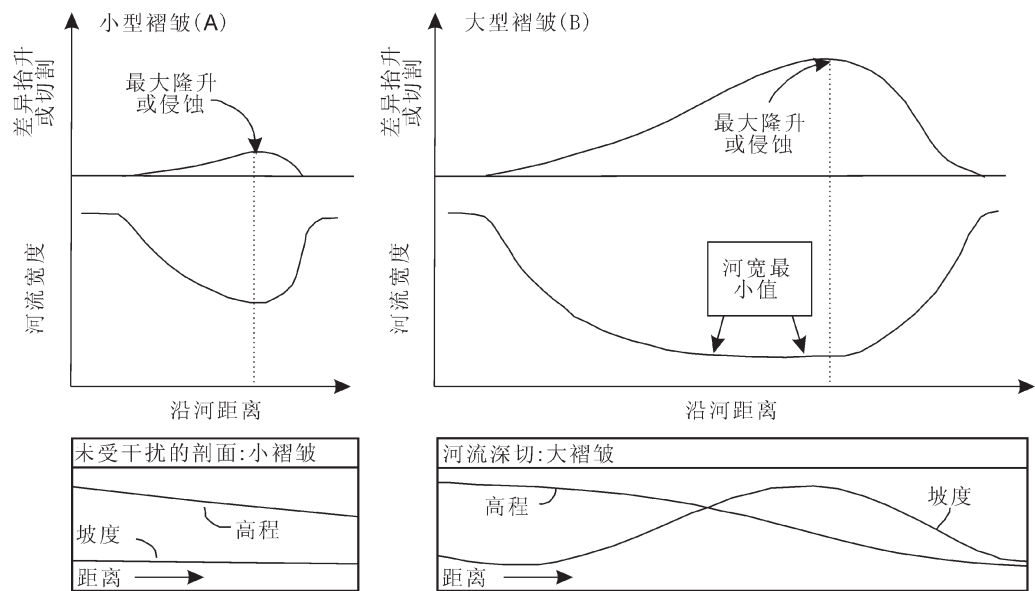


图 10 河流宽度对活动褶皱的响应 (据参考文献[54]修改)
Fig. 10 Conceptual illustration of channel width response to active folding

示,雅鲁藏布江在大渡口以上为宽谷段;大渡口以下急剧收窄,在“藏布巴东瀑布—大拐弯顶端”河段达到最小值;之后有所扩宽;金珠藏布汇口以下重新进入宽谷段,局部发育边滩心滩。依照前述河宽模型的B模式,雅鲁藏布江干流流经区域的强烈隆升区域位于大拐弯顶端附近,然而,该模式是建立在岩石抗侵蚀能力均一、没有支流汇入等其他影响的前提下的,事实上,雅鲁藏布江干流在大拐弯顶端附近,有占总流量近1/4的帕隆藏布江汇入,且岩石抗侵蚀能力降低(由南迦巴瓦群进入雅鲁藏布江缝合带),这些在一定程度上都可能促使河流宽度的增加,基于现有的资料笔者尚无法对这些因素造成的影响进行评估。仅就“大渡口—大拐弯顶端”段而言,岩性均一、无大型支流汇入,河宽逐渐收窄,暗示在该河段中,顺流往下,逐渐靠近隆升核心区。

帕隆藏布江在仓果以上河段为峡谷段;“仓果—古乡”段为宽谷段,主要受古乡泥石流堵江影响;古乡以下逐渐收窄为峡谷;通麦附近河谷有所扩宽,可能与易贡藏布江的汇入有关;104道班附近,东久河汇入,岩性从抗侵蚀能力较强的念青唐古拉山岩群进入到抗侵蚀能力相对较弱的雅鲁藏布江缝合带内部,情况与雅鲁藏布江干流在大拐弯顶端附近类似(都有大型支流汇入,河谷两侧基岩的抗侵蚀能力都由强变弱),而雅鲁藏布江干流河宽增加,帕隆藏布江却继续收窄,暗示大拐弯顶端附近为隆升最为强烈的区域。

4 讨论和结论

研究区雅鲁藏布江和帕隆藏布江的形态(宽度和坡降)测量结果显示,在雅鲁藏布江大拐弯顶端附近,河流的纵坡降最大、宽度最窄,指示现今雅鲁藏布江大拐弯顶端附近区域为研究区河流侵蚀切割最强烈的区段。Stewart等^[13]发表的低温热年代学数据(锆石(U-Th)/He、黑云母 $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{40}$ 等)显示,雅鲁藏布江大拐弯顶端附近的基岩隆升剥露速率最快,其中锆石(U-Th)/He年龄多集中在0.3~1Ma。这意味着1Ma以来,雅鲁藏布江大拐弯顶端附近一直是研究区的强侵蚀切割区,它作为雅鲁藏布江的裂点并没有发生明显的溯源迁移^[18]。对此,目前主要存在2种解释。

(1) 区域隆升和河流侵蚀之间的相对平衡

Finnegan等^[18]对比了雅鲁藏布江大拐弯流域不

同区段的河流侵蚀能力、地貌起伏度和基岩冷却年龄,发现三者空间上具有耦合性,认为这是区域隆升和河流侵蚀之间相对平衡的结果。

笔者引入Hack剖面、SL参数和Amos河宽理论模型进行研究,结果显示雅鲁藏布江大拐弯顶端附近具有强烈的隆升作用;根据前人^[7,55]的研究成果,造山带河流地貌对构造气候的响应时间域为几十万年到几百万年,意味着雅鲁藏布江河流形态反映的区域隆升,是百万年尺度的综合反映,与Stewart等^[13]在本区获取的低温热年代学年龄,尤其是锆石(U-Th)/He年龄,具有同等的量级,可以进行对比。对比河流形态反映的隆升核心区和Stewart等^[13]依据低温热年代学数据圈定的快速剥露区,发现两者在空间上同样具有很好的耦合性,都位于大拐弯顶端附近,是区域隆升和河流侵蚀之间相对平衡的又一佐证。

(2) 其它机制(崩塌堆积、冰川堵江)抑制河流溯源侵蚀

Ouimet等^[56]研究了青藏高原东部的大渡河和雅砻江的崩塌滑坡灾害,认为大规模的崩塌滑坡形成堵江大坝,会使上游出现长期的、大规模的淤积,阻止侵蚀切割作用,并抑制河流对区域构造、气候和岩性等作出调整。

Korup等^[57]通过遥感和实地调查,在雅鲁藏布江大拐弯地区识别出了260多个冰碛大坝,同时结合残留在河流上游的湖相沉积层,认为第四纪以来,本区发生过多多次大规模的冰川堵江事件,强调冰川堵江事件对河流裂点迁移的控制作用。

本文对研究区雅鲁藏布江和帕隆藏布江干流的崩塌滑坡灾害进行了统计(图6、图9),发现灾害体多集中在雅鲁藏布江大拐弯顶端附近,受构造、岩性和地貌控制明显。构造上,大拐弯顶端为隆升的核心区,隆升造成了新的不稳定和不平衡,是灾害发育的主控因素;岩性方面,缝合带内的岩性相对硬脆,受构造剪切破碎,稳定性较差,容易发生崩塌滑坡;地貌上,灾害多集中在深切峡谷段,峡谷深切,容易侧蚀形成凌空面,造成重力失稳,诱发崩滑。

研究区的崩塌滑坡点多面广,是区域表层剥露的主要动力之一,表层的快速剥露同样可以带来强烈的重力均衡隆升,但这对区域隆升的贡献量有多大,在一定时间尺度内是否足以维持侵蚀平衡,仍有待于进一步研究。

另外,笔者也发现,个别大型的、长期活动的灾

害体确实对河流地貌形态,尤其是裂点的分布具有很强的控制作用。如雅鲁藏布江加拉附近的堵江泥石流、帕隆藏布江的古乡泥石流和排龙泥石流,这些堵江泥石流都在一段时间内抑制了河流裂点的溯源迁移,但是对整个青藏高原东南边界保存的贡献量有多大,还有待于进一步的探讨。

致谢:感谢评审专家提出的宝贵意见。另外,本文的观点曾在多个会议场合进行过宣讲,参会专家提出了宝贵的指导意见,在此一并致以衷心感谢。

参考文献

- [1] Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg? [J]. *Nature*, 1990, 346(6279): 29–34.
- [2] 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [3] 雷永良, 钟大赉, 季建清, 等. 东喜马拉雅构造结更新世两期抬升–剥露事件的裂变径迹证据[J]. 第四纪研究, 2008, 28(04): 584–590.
- [4] 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据[J]. 科学通报, 1995, 40(16): 1497–1500.
- [5] 刘焰, 钟大赉. 东喜马拉雅地区高压麻粒岩岩石学研究及构造意义[J]. 地质科学, 1998, 33(3): 267–281.
- [6] 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 等. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 744–751.
- [7] 陈建军, 季建清, 余绍立. 雅鲁藏布江大峡谷地貌响应时间域的量计算[J]. 第四纪研究, 2008, 28(02): 264–272.
- [8] Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, et al. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low–viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation[J]. *Nature*, 2001, 414(6865): 738–742.
- [9] Hodges K V. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(3): 324–350.
- [10] Zeitler P K, Meltzer A, Koons P, et al. Erosion, Himalayan Geodynamics and the Geomorphology of Metamorphism[J]. *GSA Today*, 2001, 11(1): 4–9.
- [11] Koons P O, Zeitler P K, Chamberlain C P, et al. Mechanical links between erosion and metamorphism in Nanga Parbat, Pakistan Himalaya[J]. *American Journal of Science*, 2002, 302(9): 749–773.
- [12] Brozovic N, Burbank D W, Meigs A J. Climatic Limits on Landscape Development in the Northwestern Himalaya[J]. *Science*, 1997, 276(5312): 571–574.
- [13] Stewart R J, Hallet B, Zeitler P K, et al. Brahmaputra sediment flux dominated by highly localized rapid erosion from the easternmost Himalaya[J]. *Geology*, 2008, 36(9): 711–714.
- [14] Singh S, France–Lanord C. Tracing the distribution of erosion in the Brahmaputra watershed from isotopic compositions of stream sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 202(3/4): 645–662.
- [15] Zeitler P K, Malloy M A, Kutney M P, et al. Geochronological Evidence for the Tectonic and Topographic Evolution of SE Tibet [N]. *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*, 2006, 87, Abstract T23B–0480.
- [16] 龚俊峰, 季建清, 陈建军, 等. 东喜马拉雅构造结岩体冷却的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2255–2272.
- [17] 刘焰, Wolfgang S, 王猛. 东喜马拉雅构造结陆内变形过程的研究[J]. 地质学报, 2006, 80(09): 1274–1285.
- [18] Finnegan N J, Hallet B, Montgomery D R, et al. Coupling of rock uplift and river incision in the Namche Barwa–Gyala Peri massif, Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120(1/2): 142–155.
- [19] 王猛, 刘焰, 何延波, 等. 喜马拉雅山脉的地质地貌特征: 来自 SRTM 数字高程模型和降水量数据的约束[J]. 地质科学, 2008, 43(3): 603–622.
- [20] 刘静, 曾令森, 丁林, 等. 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, 2009, 44(4): 1227–1255.
- [21] 张沛全, 高明星, 雷永良, 等. 西藏雅鲁藏布江大拐弯地区量化地貌特征及其成因[J]. 地球科学, 2009, 34(04): 595–603.
- [22] 杨逸畴, 李炳元, 尹泽生, 等. 西藏地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [23] 张进江, 季建清, 钟大赉, 等. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(04): 373–383.
- [24] 陈建军, 季建清, 龚俊峰, 等. 雅鲁藏布江大峡谷的形成[J]. 地质通报, 2008, 27(04): 491–499.
- [25] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 289–295.
- [26] 季建清, 钟大赉, 张连生. 青藏高原东南部新生代挤出板块西边界[J]. 科学通报, 2000, 45(2): 128–133.
- [27] 张进江. 青藏高原东南部新生代构造年代学框架[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 303–304.
- [28] Burg J P, Dacy P, Nievergelt P, et al. Exhumation during crustal folding in the Namche–Barwa syntaxis[J]. *Terra Nova*, 1997, 9: 53–56.
- [29] Burg J P, Nievergelt P, Oberli F, et al. The Namche–Barwa syntaxis: Evidence for exhumation related to compressional crustal folding[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1998, 16(2/3): 239–252.
- [30] 龚俊峰, 季建清, 周晶, 等. 东喜马拉雅构造结气候构造作用下热史演化的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学记录[J]. 岩石学报, 2009, 25(3): 621–635.
- [31] Merritts D J, Vincent K R, Wohl E E. Long river profiles tectonism and eustasy: A guide to interpreting fluvial Terraces[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(B7): 14031–14050.
- [32] 曹凯, 王国灿, 王岸. 东昆仑山昆仑河纵剖面地貌分析及构造涵义[J]. 地球科学, 2007, 32(05): 713–721.
- [33] Hack J T. Stream–profile analysis and stream–gradient index[J]. *U. S. Geol. Surv. J. Res.*, 1973, 1: 421–429.
- [34] 赵洪壮, 李有利, 杨景春. 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), 2009, (02): 60–67.

- [35]Keller E A, Pinter N. Active tectonic: earthquakes, uplift, and landscape[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [36]Brookfield M E. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: Rivers draining southwards[J]. *Geomorphology*, 1998, 2: 285-312.
- [37]Marple R T, Talwani P. Evidence of possible tectonic upwarping along the South Carolina coastal plain from an examination of river morphology and elevation data[J]. *Geology*, 1993, 21(7): 651-654.
- [38]Rhea S. Evidence of uplift near Charleston, South Carolina[J]. *Geology*, 1989, 17(4): 311-315.
- [39]Merritts D J, Vincent K R. Geomorphic response of coastal streams to low, intermediate, and high rates of uplift, Mendocino Triple Junction region, Northern California[J]. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1989, 110: 1373-1388.
- [40]Burbank D W, Anderson R S. *Tectonic Geomorphology* [M]. Oxford: Blackwell Science, 2001.
- [41]Chen Y C, Sung Q C, Cheng K Y. Along strike variations of morphotectonic features in the western Foothills of Taiwan: Tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis[J]. *Geomorphology*, 2003, 56: 109-137.
- [42]Turowski J M, Lague D, Hovius N. Response of bedrock channel width to tectonic forcing: Insights from a numerical model, theoretical considerations, and comparison with field data[J]. *Geophys Res*, 2009, 114(F3): F3016.
- [43]Harbor D J. Dynamic Equilibrium between an Active Uplift and the Sevier River, Utah[J]. *The Journal of Geology*, 1998, 106(2): 181-194.
- [44]Snyder N P, Whipple K X, Tucker G E, et al. 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*, 2000, 112(8): 1250-1263.
- [45]Lav J, Avouac J P. Fluvial incision and tectonic uplift across the Himalayas of central Nepal[J]. *Geophys. Res.* 2001, 106(B11): 26561-26591.
- [46]Snyder N P, Whipple K X, Tucker G E, et al. Channel response to tectonic forcing: field analysis of stream morphology and hydrology in the Mendocino triple junction region, northern California[J]. *Geomorphology*, 2003, 53(1/2): 97-127.
- [47]Duvall A, Kirby E, Burbank D. Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California[J]. *Geophys. Res.*, 2004, 109(F3): F3002.
- [48]Montgomery D R. Observations on the role of lithology in strath terrace formation and bedrock channel width[J]. *American Journal of Science*, 2004, 304(5): 454-476.
- [49]Pearce S A, Pazzaglia F J, Eppes M C. Ephemeral stream response to growing folds[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(9/10): 1223-1239.
- [50]Turowski J M, Lague D, Crave A, et al. Experimental channel response to tectonic uplift[J]. *Geophys Res*, 2006, 111(F3): F3008.
- [51]Wobus C W, Tucker G E, Anderson R S. Self-formed bedrock channels[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33(18): L18408.
- [52]Whipple K X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens[J]. *Earth Planet.* 2004, 32(1): 151-185.
- [53]Stark C P. A self-regulating model of bedrock river channel geometry[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33(4): L4402.
- [54]Amos C B, Burbank D W. Channel width response to differential uplift[J]. *Geophys. Res.*, 2007, 112(F2): F2010.
- [55]Whipple K X. Fluvial Landscape Response Time: How Plausible Is Steady-State Denudation? [J]. *American Journal of Science*, 2001, 301(4/5): 313-325.
- [56]Ouimet W B, Whipple K X, Royden L H, et al. The influence of large landslides on river incision in a transient landscape: Eastern margin of the Tibetan Plateau (Sichuan, China)[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119(11/12): 1462-1476.
- [57]Korup O, Montgomery D R. Tibetan plateau river incision inhibited by glacial stabilization of the Tsangpo gorge[J]. *Nature*, 2008, 455(7214): 786-789.