西藏雅鲁藏布江大拐弯地区量化地貌特征及其成因

张沛全1,高明星2, 雷永良3, 刘小汉1

1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 中国石油勘探开发研究院,中国石油天然气股份有限公司盆地构造与油气成藏重点实验室,北京 100083

摘要: 以数字高程分析、实地地貌调查及沉积物年代学为手段, 开展了西藏雅鲁藏布江大拐弯地区地貌特征及其成因研究, 采用SRTM-DEM 数据对地貌进行了量化分析. 区域地貌总体特征为高海拔、高起伏、平山顶(北区). 在 AreGIS 平台中运用条带 法获得该区的最大高程一平均高程一最小高程剖面, 剖面特征显示最大高程控制平均高程; 利用最大和最小高程剖面定量 计 算各地质单元的水系下切深度. 实地调查及年代学研究发现该地区河谷沉积物以晚更新世以来的冰碛物和冰湖相沉积物为 主. 结果表明, 在雅鲁藏布江大拐弯地区地貌演化过程中, 高山冰雪作用是地貌" 削高"、" 去顶" 的重要外动力因素, 也是有助于 "修平"山顶并形成齐一峰顶面的参与因素; 流水" 切割"和" 搬运"作用是形成地表高起伏的重要原因; 外流水系大大削弱了地 貌'填低"作用, 也是导致河谷山谷沉积物年轻化的原因.

关键词: 数字高程剖面; 水系下切; 冰川作用; 地貌; 雅鲁藏布江大拐弯.

中图分类号: P931.2; P343.1 文章编号: 1000-2383(2009)04-0595-09 收稿日期: 2008-07-28

Quantitative Terrain Analysis of the Great Canyon Region of Yalungzangbo River, Tibet and Discussion of Its Origin

ZHANG Pei-quan¹, GAO Ming-xing², LEI Yong-liang³, LIU Xiao-han¹

1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083

3. Key Laboratory of Basin Structure and Petroleum Accumulation, Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Abstract In this paper, we take new SRTM-DEM data for digital elevation analysis, field surveying and chronology of sediments as means to study topographic features and its origin in the great canyon region of Yalung Zangbo River in Tibet. The new SRTM-DEM data are used for quantitative analysis for terrain. The overall geomorphic features are the high-altitude, high-relief and flat peaks (North). ArcGIS software, an analysis platform, is used to obtain statistics for Maximum-Mean-Minimum elevation profiles from a strip area in its SRTM-DEM. These profiles show that the change of Mean elevation is controlled by the change of Maximum elevation. Incision depth of different geological units can be calculated by Max and Min elevation profiles. Sediments in valleys include moraines and icy lake sediments formatted after late Pleistocene which is confirmed by our field investigation and chronological data of sediments. To sum up, glacier, drainage network incision and outflow drainage system control the geomorphology in the great canyon region of Yalungzangbo River during the cause of terrain formation. The Glacier on the high mountain is an important external factor that controls ' unroofing'. Drainage network incision and erosion play an important role of relief terrain. Due to the fact that basin filling is limited by outflow drainage system, not only deposits in moraines but also icy lake sediments in valleys are younger.

Key words: digital elevation model(DEM); drainage incision; glaciation; topography; the great canyon region of Yalungzangbo River.

基金项目:中科院知识创新工程重要方向项目(No.kzcx3-sw-143).

作者简介:张沛全(1978—),男.硕士,构造地质学专业,从事构造地质学和构造地貌学研究.E-mail: zhang peiquan2007@126. com (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

多年来,学者们已经在西藏的腹地(吴珍汉等, 2002a,2002b)、南部(刘德民等,2003)、北部(曹凯 等,2007;王岸等,2007)及东北缘(潘保田等,2004; 李勇等,2006)等开展了不同程度的地貌研究,对高 原地貌演化机制及隆升机制形成了不同的理解.青 藏高原地貌演化问题的研究已经成为窥探其地球动 力学和环境演化的窗口.

位于西藏东南部的雅鲁藏布江大拐弯地区,是 印度板块与欧亚板块碰撞的前缘地区(图1),在地 质科学上具有特殊的地位.多年来,在该地区开展的 地貌研究大致分成两大类:一是强调内动力因素作 用的研究(季建清等,1999;雷永良,2006);二是着重 于外动力因素方面的研究,如水系的作用(杨逸畴, 1982,1984,1985;王二七等,2001,2002).如杨逸畴 (1982,1984,1985)指出,该区的地貌基础受到构造 控制,河谷地貌景观是上新世雅鲁藏布江水系从海 拔5000m的夷平面上开始下切形成的,色季拉附 近齐一山顶面的形成与冰雪作用有关.而王二七等 (2001,2002)认为南迦巴瓦峰在海拔4000~ 4 500 m半山腰部位处存在一个可能为古夷平面的 十分平坦平面.在晚第三纪一早更新世,雅鲁藏布江 就是从该平面开始下切的.这些研究成果为研究该 地区的地貌和环境演化提供了宝贵的第一手材料, 但因其交通条件的限制,该地区地貌研究仍然薄弱. 最近,李勇等(2006)、刘静等(2006)使用 SRTM-DEM 数据在进行定量地貌分析中取得了重大进展, 为艰难地区的地貌研究打开了一个缺口.

为了深入研究大拐弯地区的地貌演化机制及其 制约因素,近年来笔者对该地区开展了点、面结合的 地貌研究工作,采取了SRTM-DEM 数据分析、多地 点开展地面实地调查及年代学分析等手段,重点讨 论影响该区地貌演化的外动力因素,研究了水系下 切与山脉隆升的关系.

1 区域地质地理概况

雅鲁藏布江大拐弯地区隶属于印度大陆与欧亚 大陆碰撞最前缘的东喜马拉雅构造结地区,是冈底



图 1 研究区位置(a)、数字高程剖面工作区域及地质单元(b)

Fig. 1 Position of study region (a), DEM selected region and geological sketch map (b)

图 a 中的小箭头表示季风方向; 图 b 中字母含义; N. 南坳大断裂; P. 派断裂; M L. 东久一米林断裂; A. 阿尼桥断裂 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net 斯、雅鲁藏布和喜玛拉雅三大地质单元交汇的地区, 各大单元为断层接触关系,如图1所示.区内主要出 露高喜玛拉雅高角闪岩相一麻粒岩相正负片麻岩 (张进江等,2003).

区内岭谷地形突出、高差悬殊,南迦巴瓦峰海拔 高达 7 787 m(杨逸畴, 1999), 雅鲁藏布江的河谷在 鲁霞一带为海拔 2 950 m 左右,巴昔卡海拔只有 155 m(关志华等, 1984).高反差地形导致气候垂直 分带替代了纬度分带,一地并存多种气候,区域上属 于藏东南亚热带山地湿润气候区(林振耀和吴祥定, 1984, 1985).

该区为海洋性冰川的发育中心. 青藏高原最典型的海洋性冰川之一的恰青冰川长度达 35 km. 南 迦巴瓦峰西北坡的则隆弄冰川是我国首次发现的跃 动冰川(张文敬, 1985; 李吉均等, 1986). 则隆弄沟、 倾多沟、古乡等地在晚更新世以来冰川活动性强, 在 沟内留下许多冰碛物(李吉均等, 1986).

雅鲁藏布江作为西藏南部主要的外流水系,自 杰马央宗冰川至本研究区,其走向发生近180°转弯 后从巴昔卡流出国境,在孟加拉国戈阿隆多市附近 与恒河汇合,最后注入印度洋的孟加拉湾.尼洋河、 帕隆藏布、易贡藏布等支流及雅鲁藏布江干流构成 了该区的主要水系(关志华等,1984).

2 地貌的数字高程量化分析和特征

2.1 数据及处理方法

研究地区及数据工作区如图 1、2 所示. 地貌分 析工作在 ArcGIS 平台支持下展开,数据采用新近 的 SRTM-DEM 数据,数据精度为 3arc-seconds,相 当于90m 精度(http://www2.jpl. nasa.gov/srtm/ index.html.).数据处理使用条带法进行处理,具体 步骤见参考文献(汤国安等, 2005). 计算条带为 100 km×50 km 的矩形区域,横跨冈底斯地质单元、 雅鲁藏布地质单元及喜玛拉雅地质单元.

2.2 数据分析结果及其意义

2.2.1 数字高程剖面特征 雅鲁藏布江大拐弯地 区西南部数字高程剖面是对 5000 km² 条带内的高 程进行统计后获得的最大高程、最小高程和平均高 程剖面(图 3).最大高程剖面显示工作区水系下切 留下的最高山顶面高程变化;最小高程剖面显示工 作区水系下切留下的河床高程变化,反映了水系下 切的变化规律;平均高程剖面显示该区平均高程变 化特点.以区域地质背景为参照,把各数字高程剖面 分为冈底斯山区(北区)、雅鲁藏布河流区(中区)和 喜马拉雅山区(南区).其中南区分为南一区(喜马拉 雅山北坡)和南二区(喜马拉雅山南坡).



黑色矩形框为数字高程剖面计算区域

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图 3 最大高程、最小高程和平均高程 Fig. 3 Map of MAX-MEAN-MIN elevation fluctuation 该图为图 2 中黑色矩形框中的计算结果

图 3 中各区的高程变化呈现如下特点:(1) 剖面 的总体特征为最大高程剖面的变化趋势与平均高程 变化趋势较为一致,显示工作区内目前最大高程控 制了平均高程的变化.(2)在0~45km之间的北区, 其最大高程介干 4 600 ~ 5 000 m 之间. 以 4 800 ~ 5000 m为主; 平均高程在 3800~4500 m 左右, 以 4300 m段为优势. 最低高程介干 4 200~3 000 m 之 间,起伏很大,但不影响平均高程的变化趋势.(3)在 45~60km 之间的中区里,最大高程从4700m 左右 下降到 3950 m 左右, 其平均高程从 4000 m 变化到 3200 m 左右, 变化幅度和趋势与最大高程变化相 当,但是,其最小高程基本上没有起伏,在3000~ 2950 m左右.(4)在 60~100 km 之间为南区, 62~ 73 km 为南一区, 73~100 km 为南二区. 南区的最 大高程变化在 5 500~4 200 m 之间, 平均高程在 4200~3000 m 之间变化, 最小高程 3400~1200 m 之间,其中最小高程在90~95 km 处出现突起,其成 因目前仍然无法解释.

特别指出,在南区(喜马拉雅山)65~73 km 处, 有一个很平稳的约4200~4300 m的高程坪值;在 65~73 km 处最小高程同样出现一个3400~ 3500 m的高程坪值,平均高程与最小高程变化呈正 相关关系.然而,在这8 km 范围内的最大高程处出 现了异常.其最大高程值是整条最大高程剖面最突 出的一部分,高程都在5000~5500 m以上.65~ 73 km段最大高程与最小高程成负相关关系,即水 系下切的越深,山顶高度越大.

综上所述, 雅鲁藏布江大拐弯地区西南部的地 形特征为: 高海拔、平山顶(北区), 高起伏. 最大高程 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic F 控制平均高程的变化, 流水作用控制最小高程的变化, 最小高程往南呈变低趋势.

2.2.2 数字高程剖面对水系下切深度的约束 水 系下切深度是代表峰顶面的最大高程和代表水系下 切留下的河床高度的最小高程之间的差值,可使用 Depth= *H*max - *H*min 这个式子进行计算.结果如下:

(1) 北区的下切深度变化较大,约 850~
2 050 m,以1 300~1 800 m 下切深度稍占优势;(2)
中区下切深度变化在 1 850~1 050 m 之间,以1 800 m 的下切深度占优势;(3) 南区下切深度变化在1 500~3 000 m 之间,其中南一区的下切深度在1 500~2 100 m 之间,南二区下切深度在 2 000~
3 000 m之间,南二区的下切深度明显大于南一区的下切深度.

以上3个区域的水系下切深度显示,该区地貌 具有高起伏的地形,地形面貌峥嵘化程度很高.

3 地貌的实地调查

为了研究地貌形成的制约因素及过程,近年来 对该区的多个地点进行了实地考察,并对河谷中的 沉积物开展了年代学研究工作.研究结果表明,河谷 物具有年轻化的特征,其中与冰川相关的沉积物为 末次冰期以来的沉积物.

3.1 冰川地貌

张沛全等(2008b)调查显示,位于岗派公路 83 km宜淀村一格嘎村之间,海拔约3200m的观景 台旁边出露一套高约10~15m冰砾阜.由于开挖公 路,冰砾阜被切出一个陡直的剖面.该剖面大致分为 两段,即A段和B段.A段成层性较好,砾石层与粉砂-细砂层组成互层.A段大致分成11层,其中1、3.5.7.9和11层为粉砂层, 2.4.6.8和10层为砾石层.1层厚0.8~3m, 3.5.7和11层厚约30~50 cm,9层厚约50~60 cm.2.4.8三层砾石颗粒粗大,约10~30 cm大小,层中的砾石杂乱分布,无定向,层厚30~60 cm.6和10两层较薄,厚约10~30 cm,砾石砾径在2~5 cm之间,磨圆度一般;在A段1层和1~2层之间含有黑色的木炭和有机碳.两个¹⁴C的样品分别在第1层第4层两处获得,¹⁴C年龄显示观景台冰砾阜形成于距今23.954±0.097 ka至17.584±0.062 ka的冰进.

另外, 在打林村的调查显示(张沛全等, 2008b), 打林村冰碛阶地(冰川堰塞坝)位于直白村 的对岸, 对应着则隆弄冰川的西北出口, 明显可见4 级, 最高阶地比河床高约350 m, 阶地表面由冰碛物 组成.此地的雅鲁藏布江河床海拔约2800 m, 四级 阶地中T1海拔为2888 m, T2海拔约为2920 m, T3海拔约为2980 m, T4海拔约为3150 m. T4近 EW 走向, T1、T2和T3为NE-SW向. 雅鲁藏布江 绕着冰碛坝先往NE流, 然后折向NW向, 再折成 近 EW 向. 根据T4阶地砾石宇宙成因核素¹⁰Be的 年龄显示, 打林村T4阶地形成于距今8.7~9.0 ka 之间.

3.2 洪积地貌

鲁霞、丹娘及德阳三地分别是 3 条从喜马拉雅 山北坡流向雅鲁藏布江支流的出口.据研究(张沛全 和刘小汉,2008),以上 3 个居民点都座落于 3 条支 流的现代巨大洪积扇上,其中鲁霞洪积扇宽约 3600~3700 m,丹娘洪积扇宽约 1970~2000 m, 德阳洪积扇宽约 2400~2500 m.三地的洪积扇总 体积大于 4×10⁸ m³,其中德阳的洪积扇顶部厚约 150~200 m,中部厚约 30~50 m,局部达 50~60 m. 2~4 m 宽的小溪流密布洪积扇上,个别大溪流 (100~200 m 宽)切入洪积扇约 20~50 m.这些大小 不一的溪流是排泄上游冰川融水和雨水的主要通 道.靠近沟口位置上盖有一层直径 5~10 cm 的鹅卵 石,磨圆度一般,河漫滩附近为细砂.

3.3 河谷与山谷中的沉积地貌

近几年来的调查显示该地区的河谷与山谷难以 严格区分,最典型的是鲁霞至龙白一线既是喜马拉 雅山脉与冈底斯山脉的山谷,又是雅鲁藏布江的河 谷.区内河谷两侧谷坡陡峻,一般在50°~60°之间, 2004; 刘宇平等, 2006) 和冰碛物(彭补拙和杨逸畴, 1996).

据张沛全等(2008b)调查,从宜淀村村口沿小路往雅鲁藏布江方向,在电信通讯铁塔附近,出露一套厚约100m的湖相沉积物,其顶面海拔约3010~3100m.沿小路往NW方向走,湖相沉积物的层理和颜色逐渐变化.这套沉积物大致分为3段,从下到上分别为:中段为褐红色与灰白色相间层理,有波状起伏但幅度不大的沉积层.上段的下部为层理平行且倾斜的灰蓝一灰白色相间的沉积层,层理中有冰川坠石.因此,上段的下部沉积段为冰筏沉积段;上段为灰蓝一灰白色相间的层理水平的沉积层.郑来林等(2004)曾经在该套沉积物的中部获取到了一个¹⁴C年龄数据为(19.61 \pm 2.26) \times 10³ a,亦即该套沉积物为末次盛冰期时期的产物;同时也意味着冰筏沉积事件发生的时代在距今约19 ka.

在林芝县比日神山附近海拔约 3 200 m 的山谷 中调查发现,沿着 318 国道分布有浅褐黄色—褐黄 色湖相沉积物,局部地区沉积物有灰色夹层,沉积物 厚度约 30~50 m 左右.其形成年代有待进一步 考证.

4 地貌演化的制约因素

据以上的数字地貌分析显示,本区地貌的特征 是高海拔、高起伏,在海拔4800~5000m处存在整 齐的峰顶面.这些地形特点明显区别于高原内部的 高海拔、低起伏的平坦地形(刘静等,2006).笔者认 为,高海拔的成因与构造作用奠定的地形格局有关, 值得讨论的是高起伏、整齐峰顶面及各调查点出现 的各类年轻沉积物.

4.1 冰雪作用与齐一峰顶面

藏东南整齐的峰顶面曾引起过学者们的注意, 杨逸畴(1982,1984,1985)认为,整齐统一的山顶可 能是冰雪作用引起的.王志超(1984)认为,色季拉山 顶以东前方的一排山地,山顶夷平面海拔约 4600m,往下200m有并列古冰斗,再往下是典型 的并列古槽谷,古槽谷是白玉冰期时发育的平顶冰 川.根据河谷地貌的实地调查显示,河谷中的沉积物 以冰碛物及湖相沉积物为主.之前,有学者(Mongomery *et al.*,2004;刘宇平等,2006;张沛全等, 2008a;张沛全和刘小汉,2008)研究发现,晚更新世 以来,该区多次发生冰进事件并且堵塞了雅鲁藏布

江干流,在干流河谷中形成堰塞湖.堰塞湖回水甚至 到达八一神山及上游的加查地区 (Mongomerv etal., 2004: 刘宇平等, 2006). 因此, 湖相沉积物的形 成与该区冰川活动有密切关系,该区是藏东南海洋 性冰川的发育中心,区内高山山顶普遍发育现代冰 川、以上的实地调查及年代学工作显示山谷中的沉 积物,特别是与冰川相关的沉积物(如冰碛物阶地和 冰川活动形成的湖相沉积物),其年代集中在晚更新 世以来的末次冰期.据研究(张沛全等,2008a),南区 的水系格局形成于60Ma左右,有理由推断(杨逸 畴,私人交流),水系格局形成之后,当高原抬升到一 定高度时,阻挡了来自印度洋的季风,冰雪覆盖在高 山地区.覆盖在高山地区的冰雪在雪线以上通过冰 川作用改造山顶地形,而在雪线附近通过冰缘作用 改造地形 冰川或冰川融水则沿着冰川谷道把高山 地区的物质带向低处,因而,冰雪作用成为本区地貌 "削高"、"去顶"、"削平"的重要外动力因素.

4.2 水系下切与高起伏地貌、外流水系及河谷中的 年轻沉积物

数字高程剖面揭示了该区现代地形的最大高 程、最小高程变化及水系的下切深度变化、三者的变 化特征及差异说明该地区的地形起伏很大.60 Ma 左右形成的水系格局受到区域后期强烈的挤压、同 心圆状构造抬升等地质作用影响,水系下切加剧,冰 雪作用以下地带以暴雨泥石流、坡面洪水等形式运 移物质(张进江等,2003;张沛全和刘小汉,2008).山 谷河谷等凹地形是接受被运移物质的场所, 如鲁霞 一带的洪积扇.外流的雅鲁藏布江水系把山谷与河 谷中所接收的物质通过流水带走,导致山谷中河流 沉积稀少,古老的沉积物尤其难以保存,只留零星分 布的少量年代较新的冰川搬运沉积物及相关的湖相 沉积物.据曾庆利等(2007)、周尚哲等(2007)研究, 隶属于大拐弯地区的其他地点如松宗、古乡、白玉、 林芝等地的冰碛物形成年代都不超过晚更新世.因 此,外流水系是大大削弱本区地表"填低"作用并形 成高起伏地形的重要外部条件.

4.3 水汽通道作用

杨逸畴(私人交流)强调,雅鲁藏布江作为藏东 南的"水汽通道"对该地区地貌演化的贡献是重要 的.水汽通道促进了海洋性冰川向内陆发育,加强了 山体顶部的冰雪作用,是齐一峰顶面形成的重要外 力作用.水汽通道顺应地质构造发育,强化了流水的 地形切割作用,增加了雅鲁藏布江的落差.

综上所述,造就雅鲁藏布江大拐弯入口地区山 顶平坦化、地形峥嵘化的外力因素从上至下为冰雪 作用一水汽通道作用一流水作用.

5 剥蚀作用在南区地貌演化中的作 用──刍议地貌演化机制

近些年来,造山带中水系发育造成的剥蚀作用 及其与山脉隆升之间的关系是构造地貌学界的热点 问题(Molnar and England, 1990; Burbank and Anderson, 2002).李勇等(2006)研究指出,川西地区 边缘山脉平均高程与高原腹地平均高程相当,是边 缘山脉曾经与高原内部作为整体抬升的结果.最大 高程高于腹地高程的原因在于边缘山脉后期的隆升 过程中受到剥蚀作用的影响,导致边缘山脉产生均 衡隆升.就本文研究地区而言,数字高程剖面中南一 区的平均高程与北区平均高程相当,但最大高程却 比北区高出 400 m 左右. 如果简单地以降水量作为 侵蚀作用的强弱指标解释南一区最大高程大干北区 的最大高程,其原因是由于地表受到侵蚀作用而造 成均衡抬升,这样的解释似乎过于简单,根据林振耀 和吴祥定(1984) 收集的南迦巴瓦峰地区气象资料 (表1),对照各地貌单元水系下切深度与降水量的 关系可以发现,水系下切的深度与降水量的大小并 未完全成正比.剥蚀作用在南二区的最大高程变化 中有多大程度的贡献?这个问题仍然有待于深入 研究.

表1 各地海拔、年平均温度和年降水量情况

Table 1	Elevation,	annual mean	temperature a	nd annual	precipitation	n in different	geomorphic units
			1		1 1		

地貌单元	下切深度(m)	海拔(m) *	年均气温(℃)*	年降水量数据(mm) *	采集地点 *
北区	1 300 ~ 1 800	3 000	8.5	654.2	林芝
南一区	1 500 ~ 2 100	2 950	7.8	379.8	丹娘
南二区	2 000 ~ 3 000	~ 2 000	14.0	> 2 200	汗(汉)密

注:*数据来自林振耀和吴祥定(1985).

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

6 结论

本文运用数字高程模型及沉积物年代学两种数 据对雅鲁藏布江大拐弯地区地貌进行了定量化分 析,取得了如下认识:(1) ArcGIS 工具分析 SRTM-DEM 数据揭示了雅鲁藏布江大拐弯地区的高海拔、 高起伏,北区的冈底斯地貌区具有齐一的峰顶面的 宏观地貌景观特征.(2)年代学的工作显示所有调查 地点的沉积物都属于末次冰期以来的沉积物.(3)根 据实地调查与上述两种数据的定量化分析认为,冰 雪作用是本区高海拔地貌"削高"作用的重要外动力 因素,至于齐一峰顶面的成因,还需要进一步研究; 水系的下切作用是地貌峥嵘化及高起伏地形的主要 外动力,外流型水系通过流水把河谷与山谷中接受 的沉积物排出高原,不但严重阻碍了"填平"作用的 进行,而且导致河谷山谷中沉积物年轻化.因此,现 今的高起伏地貌景观是水系下切作用与外流水系的 共同作用结果.

简而言之,冰川作用、流水下切以及外流型水系 是制约雅鲁藏布江大拐弯地区地貌发育的外动力因 素和外在条件.

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所杨逸 畴研究员对本文进行了认真的审阅并提出了有益的 改进意见,成文过程中与中国地震局地质研究所地 震动力学国家重点实验室张会平助理研究员进行了 有益的讨论,野外工作得到了中国科学院地质与地 球物理研究所孔屏研究员、中国科学院青藏高原研 究所黄费新助理研究员、韦利杰和李广伟博士生的 帮助;匿名审稿人给予了有益的建议,在此一并表示 感谢.

References

- Burbank, D. W., Anderson, R. S., 2002. Tectonic geomorphology. Blackwell Science, Massachusetts, 1-274.
- 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. *Earth Science-Journal* of China University of Geosciences, 32(5): 713-721 (in Chinese with English abstract).
- Guan, Z. H., Chen, C. Y., Ou, Y. X., et al., 1984. Rivers and lakes in Tibet. Sciences Press, Beijing (in Chinese).
- Ji, J. Q., Zhong, D. L., Ding, L., et al., 1999. Genesis and scientific significance of the Yarlung-Zangbo canyon. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 231-235 (in Chinese

with English abstract).

- Lei, Y. L., 2006. Geochronologic studies on tectono-geomorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis since Late Miocene time: (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing, China (in Chinese with English abstract).
- Li, J. J. , Zheng, B. X. , Yang, X. J. , et al. , 1986. The glaciers in Tibet. Sciences Press, Beijing, 1-328 (in Chinese).
- Li, Y., Densmore, A. L., Zhou, Y. J., et al., 2006. Profiles of digital elevation models (DEM) crossing the eastern margin of the Tibetan plateau and their constraints on dissection depths and incision rates of late Cenozoic rivers. Quaternary Sciences, 26(2): 236-243.
- Liu, D. M., Li, D. W., Xie, D. F., et al., 2003. Primary study on tectonic landforms in northern part of Middle Himalayan orogen. *Earth Science-Journal of China Uni*versity of Geosciences, 28(6): 639-644 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Ding, L., Zeng, L.S., et al., 2006. Large-scale terrain analysis of selected regions of the Tibetan plateau: Discussion on the origin of plateau planation surface. *Earth Science Frontiers*, 13(5): 285-299 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. P., Mongomery, D. R., Hallet, B., et al., 2006. Quaternary glacier blocking events at the entrance of Yarlung Zangbo great canyon, Southeast Tibet. *Quaternary Sciences*, 26(1): 52-62 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Z. Y., Wu, X. D., 1984. Vertical zone of climate and climatic type in the MT, Namjagbarwa region. *Mountain Research*, 2(3): 165-173 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Z. Y., Wu, X. D., 1985. A preliminary analysis of the climate in the Mt. Namjagbarwa region. *Mountain Research*, 3(4): 250-257 (in Chinese with English abstract).
- Molnar, P., England, P., 1990. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: Chicken or egg? *Nature*, 346(29-34): 29-34.
- Mongomery, D. R., Hallet, B., Liu, Y. P., et al., 2004. Evidence for Holocene megafloods down the Tsangpo River gorge, southeastern Tibet. *Quaternary Research*, 62: 201-207.
- Pan, B. T., Gao, H. S., Li, B. Y., et al., 2004. Step-like landforms and uplift of the Qinghai-Xizang plateau. *Quaternary Sciences*, 24(1): 50–57 (in Chinese with English abstract).

Peng, B.Z., Yang, Y. C., 1996. Geography and resources in (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net Namche Barwa region. Sciences Press, Beijing (in Chinese).

- Tang, G. A., Liu, X. J., Yan, G. N., 2005. Digital elevation model and its theory and method at earth science analysis. Sciences Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, A., Wang, G. C., Xie, D. F., et al., 2007. Fission track geochronology of Xiaonanchuan pluton and the morphotectonic evolution of eastern Kunlun since Late Miocene. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 32(1):51—58 (in Chinese with English abstract).
- Wang, E. Q., Chen, L. Z., Chen, Z. L., 2002. Tectonic and climatic element-controlled evolution of the Yalung-Zangbu River in southern Tibet. *Quaternary Sciences*, 22(4): 365-373 (in Chinese with English abstract).
- Wang, E. Q., Zhou, Y., Chen, Z. L., et al., 2001. Geologic and geomorphic origins of the east Himalayan gap. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 122-128 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., 1984. A Preliminary research on ancient glacial relics in the Mt. Namjagbarwa region. *Mountain Re*search, 2(3): 216-220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Hu, D. G., Liu, Q. S., et al., 2002a. The formation and evolution of tectonic landform of Damxung area in central Tibetan plateau. Acta Geoscientia Sinica, 23 (5):423-428 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Jiang, W., Wu, Z. H., et al., 2002b. Dating of typical basin and range tectonics in central Tibetan plateau. Acta Geoscientia Sinica, 23(4): 289-294 (in Chinese with English abstract). http://www2. jpl. nasa. gov/srtm/index.html.
- Yang, Y. C., 1982. The topographic features and the origin of the great bend valley at the Yarlung-Zangbo River in Tibet. *Geographic Research*, 1(1): 40-48 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. C., 1984. The geomorphologic characters and the origin in the Mt. Namjagbarwa region. *Mountain Re*search, 2(3): 134-141 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. C., 1985. The second report on the geomorphology in the Mt. Namjagbarwa region. *Mountain Research*, 3 (4): 227-233 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. C., 1999. New exploring results of the greatest canyon in the world. *Mountain Research*, 17(3): 200-206 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Q. L., Yang, Z. F., Yuan, G. X., et al., 2007. Songzong Lake: An ice-dammed lake of last glacial maximum in (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic P

Purlung Tsangpo River, Southeast Tibet. *Quaternary Sciences*, 27(1): 85-92 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, J. J., Ji, J. Q., Zhong, D. L., et al., 2003. Discussion about the tectonic frame of Namche Barwa region at eastern Himalayan syntaxis and its forming process. *Science in China (Series D)*, 33(4): 373-383 (in Chinese).
- Zhang, P. Q., Gao, M. X., Liu, X. H., 2008a. Fluvial morphological features of the entrance region of Yalung-Zangbo River great gorge and its response to tectonic movement, south-eastern Tibet. *Geography and Geo information Science*, 24(3): 45-48 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Q., Liu, X. H., Kong, P., 2008b. Evidences of glacial movement since Last Glacial Period at the ectrance of Yarlung zangbo great canyon and its structural-environmental implication, north-eastern Tibet. *Chinese Journal of Geology*, 43(3):588-602 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Q., Liu, X. H., 2008. Debris flow distribution and preventions at the great turning in the gorge of Yaluzangbo River, southeastern Tibet. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1 (19): 12-17 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. J., 1985. Some features of the surge glacier in the Mt. Namjagbarw a. *Mountain Research*, 3(4): 234-238 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. L., Liao, G. Y., Geng, Q. R., et al., 2004. New results and major progress in regional geological survey of the Medog County sheet. *Geological Bulletin of China*, 23(5-6): 458-462 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S. Z., Xu, L. B., Patrick, M. C., et al., 2007. Cosmogenic nuclide ¹⁰ Be dating of Guxiang and Baiyu ice age. *Chinese Science Bulletins*, 52(8): 945-950 (in Chinese).

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形貌分析 及构造涵义.地球科学——中国地质大学学报,32(5): 713—721.
- 关志华,陈传友,区裕雄,等,1984. 西藏河流与湖泊. 北京:科 学出版社.
- 季建清, 钟大赉, 丁林, 等, 1999. 雅鲁 藏布 大峡 谷地质 成因. 地学前缘, 6(4): 231-235.
- 雷永良,2006. 东喜马拉雅构造结地区晚中新世以来的构造- 地貌年代学研究(博士论文). 中国科学院地质与

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地球物理研究所,1-79.

- 李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等, 1986. 西藏冰川. 北京: 科学出 版社.
- 李勇, Densmore, A.L., 周荣军, 等, 2006. 青藏高原东缘数字 高程剖面及其对晚新生代河流下切深度和下切速率的 约束. 第四纪研究, 26(2): 236-243.
- 林振耀,吴祥定,1984.南迦巴瓦峰地区垂直气候带及气候类型.山地研究,2(3):165-173.
- 林振耀,吴祥定,1985.南迦巴瓦峰地区气候基本特征.山地 研究,3(4):250-257.
- 刘德民,李德威,谢德凡,等,2003. 喜马拉雅造山带中段北坡 构造地貌初步研究.地球科学——中国地质大学学报, 28(6):639-644.
- 刘静, 丁林, 曾令森, 等, 2006. 青藏高原典型地区的地貌量化 分析——兼对高原"夷平面"的讨论. 地学前缘, 13(5): 285-299.
- 刘宇平, Mongomery, D. R., Hallet, B., 等, 2006. 西藏东南雅 鲁藏布大峡谷入口处第四纪多次冰川阻江事件. 第四 纪研究, 26(1): 52-62.
- 潘保田,高红山,李炳元,等,2004. 青藏高原层状地貌与高原 隆升.第四纪研究,24(1):50-57.
- 彭补拙,杨逸畴, 1996. 南迦巴瓦发地区自然地理与自然资 源.北京:科学出版社.
- 汤国安,刘学军, 阎国年, 2005. 数字高程模型及地学分析的 原理与方法.北京: 科学出版社.
- 王岸,王国灿,谢德凡,等,2007.东昆仑山小南川岩体裂变径 迹年代与中新世晚期以来的构造地貌演化.地球科 学——中国地质大学学报,32(1):51-58.
- 王二七, 陈良忠, 陈智樑, 2002. 在构造和气候因素制约下的 雅鲁藏布江的演化. 第四纪研究, 22(4): 365-373.
- 王二七,周勇,陈智樑,等,2001.东喜马拉雅缺口的地质与地 貌成因.地质科学,36(1):122-128.
- 王志超, 1984. 南迦巴瓦峰地区古冰川遗迹概述. 山地研究, 2 (3): 216-220.

- 吴珍汉, 胡道功, 刘崎胜, 等, 2002a. 西藏当雄地区构造地貌 及形成演化过程. 地球学报, 23(5): 423-428.
- 吴珍汉, 江万, 吴中海, 等, 2002b. 青藏高原腹地典型盆一山 构造形成时代. 地球学报, 23(4): 289-294.
- 杨逸畴, 1982. 雅鲁藏布江大拐弯峡谷的地貌特征和成因. 地 理研究, 1(1): 40-48.
- 杨逸畴, 1984. 南迦巴瓦峰地区地貌的基本特征和成因. 山地 研究, 2(3): 134-141.
- 杨逸畴,1985. 再论南迦巴瓦峰地区的地貌. 山地研究, 3(4): 227-233.
- 杨逸畴, 1999. 徒步穿越考察世界第一大峡谷最新成果. 山地 学报, 17(3): 200-206.
- 曾庆利,杨志法,袁广祥,等,2007.松宗古湖——藏东南帕隆 藏布江末次盛冰期发育的一个冰川堰塞湖.第四纪研 究,27(1):85-92.
- 张进江,季建清,钟大赉,等,2003.东喜玛拉雅南迦巴瓦构造 结的构造格局及形成过程探讨.中国科学(D辑),33 (4):373-383.
- 张沛全,高明星,刘小汉,2008a. 西藏雅鲁藏布 江大拐弯入口 流水地貌特征及其对构造运动的响应. 地理与地理信 息科学,24(3):45-48.
- 张沛全, 刘小汉, 孔屏, 2008b. 雅鲁藏布江大拐弯地区末次冰期以来的冰川活动证据及其构造一环境意义. 地质科学, 43(3):588-602.
- 张沛全, 刘小汉, 2008. 雅鲁藏布江大拐弯入口段泥石流特征 及应对措施. 中国地质灾害与防治学报, 1 (19): 12-17.
- 张文敬,1985. 南迦巴瓦峰跃动冰川的某些特征. 山地研究,3 (4): 234-238.
- 郑来林, 廖光宇, 耿全如, 等, 2004. 墨脱县幅地质调查新成果 及主要进展. 地质通报, 23(5-6): 458-462.
- 周尚哲, 许刘兵, Patrick, M.C., 等, 2007. 古乡冰期和白玉冰 期的宇宙成因核素¹⁰ Be 定年. 科学通报, 52(8): 945-950.