

引用格式: 邓丽, 常宏, 沈俊杰. 塔什库尔干谷地古滑坡堰塞湖事件重建及其地貌响应[J]. 山地学报, 2023, 41(1): 82-92.

DENG Li, CHANG Hong, SHEN Junjie. A Paleolandslide-dammed lake and its impact on geomorphology in Taxkorgan valley, Xinjiang, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(1): 82-92.

# 塔什库尔干谷地古滑坡堰塞湖事件重建及其地貌响应

邓丽<sup>1,2</sup>, 常宏<sup>1,3\*</sup>, 沈俊杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越中心, 西安 710061)

**摘要:** 塔什库尔干谷地构造活动频繁, 滑坡、泥石流等自然灾害频发, 滑坡体堵塞河流形成堰塞湖, 堰塞体溃决后引发特大洪水。开展塔什库尔干谷地古堰塞湖的形成演化研究, 可以提高对堰塞湖灾害的认知, 预防地质灾害发生和降低灾害损失。目前已有对塔什库尔干曲曼村古堰塞湖湖相沉积形成年代和所记录的古环境信息研究, 然而针对该湖泊的形成演化及形成后的地貌响应却鲜有开展。本研究以野外调查为基础, 结合室内分析, 对曲曼古滑坡堰塞湖的区域地貌和残留湖相沉积物特征进行了详细的分析。研究结果表明: (1) 曲曼古滑坡堰塞湖形成可能是由于古地震诱发滑坡导致的, 残留滑坡坝的表面积约为  $4.30 \times 10^5 \text{ m}^2$ , 其体积约为  $2.30 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 所形成的堰塞湖最大湖面积约为  $2.01 \times 10^7 \text{ m}^2$ , 最大库容量约为  $1.12 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 溃决时的洪峰流量约为  $49\,507 \text{ m}^3/\text{s}$ ; (2) 滑坡坝上游陡峭指数大于滑坡坝下游陡峭指数, 说明残留滑坡坝仍对现代河道的地貌形态有一定影响, 下游方向仍在进行较为强烈的地貌调整。本研究深入研究塔什库尔干古堰塞湖, 可以为区域地貌演化及地质灾害发育过程研究提供一定参考。

**关键词:** 帕米尔高原; 古滑坡; 塔什库尔干谷地; 堰塞湖; 河流陡峭指数

**中图分类号:** P531

**文献标志码:** A

堰塞湖是山体滑坡、泥石流或熔岩阻挡河道或洼地积水时形成的湖泊, 通常是灾难性事件的直接结果<sup>[1]</sup>。在轨道时间尺度甚至亚轨道时间尺度上, 地震、滑坡、泥石流等灾害事件影响下所形成的堰塞湖, 会在一定程度上影响河流地貌演变, 甚至超过了构造运动本身和气候的作用<sup>[2-3]</sup>。堰塞湖通过溃坝洪水冲刷下游, 抑制上游河床的下切, 影响整个流域的地貌演化<sup>[4-5]</sup>。重建河流演化过程中所发生的堰塞事件, 分析河流高程变化, 对于正确理解河流系统及区域地貌演化十分必要<sup>[6]</sup>。

塔什库尔干谷地位于帕米尔高原的东部, 是一

个新构造运动活跃、内外地质活动强烈、地震活动频繁的地区<sup>[7-8]</sup>, 沿塔什库尔干河分布着众多大型岩质滑坡<sup>[9]</sup>, 直接威胁水电站及当地居民的生命财产安全。开展对古滑坡及其所形成的滑坡坝、堰塞湖研究, 能够在一定程度上重建区域古地质灾害事件, 同时对现代灾害的时空预测也具有指导意义<sup>[10]</sup>。

已有研究发现, 塔县曲曼村发育一套古堰塞湖湖相沉积物, 可能形成于冰盛期, 由山谷河流出口被堵塞造成<sup>[11]</sup>。放射性碳定年结果表明<sup>[12]</sup>, 其形成时间约为 55 ka BP, 结束时间约为 23 ka BP, 未见明显沉积间断。然而, 目前仍缺乏对该湖泊形成过程、

收稿日期 (Received date): 2022-12-13; 改回日期 (Accepted date): 2023-02-24

基金项目 (Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察项目 (2019QZKK0707); 中国科学院战略先导专项 (XDB40010100)。[The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition Program (2019QZKK0707); The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB40010100)]

作者简介 (Biography): 邓丽 (1998-), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 主要研究方向: 第四纪地质与全球变化。[DENG Li (1998-), female, born in Nanchong, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on quaternary geology and global change] E-mail: dengli2020@ieecas.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 常宏 (1970-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 第四纪地质与全球变化。[CHANG Hong (1970-), male, Ph. D., professor, research on quaternary geology and global change] E-mail: changh@loess.llqg.ac.cn

成因机制以及其对流域地貌的影响的详细研究。

本研究调查收集了野外湖相沉积物范围、高程等数据,结合数字地貌分析手段,重建曲曼典型古滑坡堰塞湖的库容、汇水面积和滑坡坝的体积;基于区域地质及气候信息,分析曲曼古堰塞湖的形成和消亡过程;分析河流堰塞事件过程与流域内河流陡峭指数空间关系,讨论塔什库尔干古堰塞湖的形成对河流地貌演化的影响。本研究将为该地区后续进行科学防治滑坡灾害和理解河流地貌的自然演化过程提供基础资料。

## 1 研究区概况

塔什库尔干谷地位于帕米尔高原和青藏高原的接壤处(图 1a),谷地海拔约 3000 ~ 5000 m。在木吉-塔什库尔干盆地的外围形成了一系列活跃的山

前断层带和地震变形带<sup>[13]</sup>,受谷地南侧塔合曼断裂的影响,整个塔什库尔干盆地又被分割为了塔什库尔干、塔合曼盆地,均处于晚新生代以来强烈隆升的慕士塔格片麻岩穹窿内<sup>[14-15]</sup>。塔什库尔干河发源于喀喇昆仑山,集水面积约为 7984 km<sup>2</sup>,相对高差达 1500 m,地表无植被覆盖,高山冰川融水为流域主要水源。该地主要出露为全新统冲洪积物、上更新统洪积物、太古代—元古代布伦阔勒岩群等(图 1b)。

气候上,该地区主要受中纬度西风带的控制。同时该地区一定程度上还受到来自阿拉伯海的夏季风水汽的影响<sup>[16-17]</sup>。以塔什库尔干站为代表,1960—2020 年,塔什库尔干河流域的平均年降雨量为 87.64 mm,最大年降雨量出现在 2012 年,为 110.45 mm,1963 年降雨量最小,为 20.1 mm。全年 75% 的降水集中在夏季,最高降雨月的累积降水

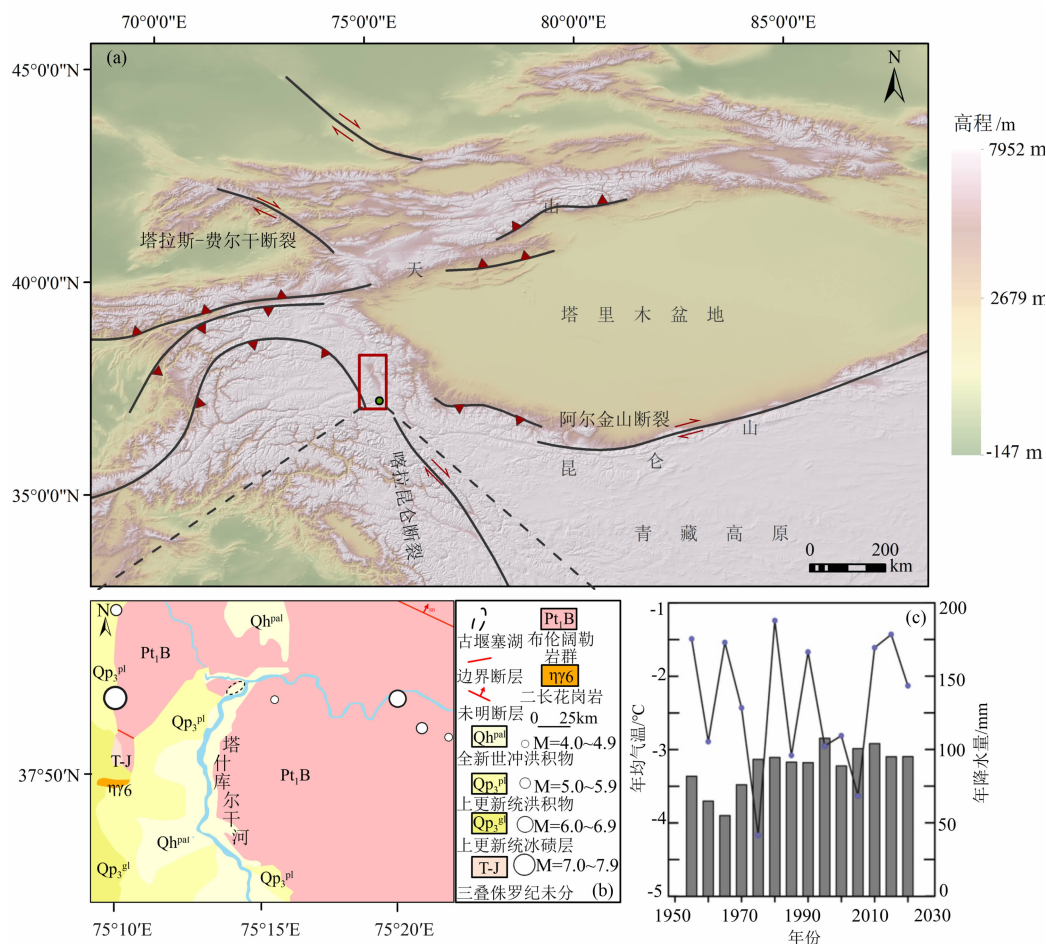


图 1 研究区概况:(a)研究区位置;(b)堰塞湖的位置及出露岩性;

(c)塔什库尔干塔吉克自治县 1960—2020 年均气温和降水(5 年间隔)

Fig. 1 Overview of the study area: (a) location of the study area; (b) location and rock type of dammed lake;

(c) annual average temperature and precipitation at Taxkorgan Tajik Autonomous county from 1960 to 2020 (interval is 5 years)

量为 25.5 mm(图 1c)。此外,该地区气候还受到多尺度地形所引起的小气候变化影响<sup>[18]</sup>。

## 2 样品采集与研究方法

曲曼古堰塞事件的研究技术路线如图 2 所示。首先利用遥感影像对古滑坡堰塞坝进行目视分析,查明古滑坡堰塞坝的地表空间分布形态。滑坡解译主要利用谷歌卫星检索工具获取 Google Earth 高分辨率影像,对滑坡后缘及其残留滑坡坝体在 ENVI5.3 软件中进行目视解译。为了进一步说明曲曼古堰塞事件,利用 DEM 数据在 ArcGis10.7 软件

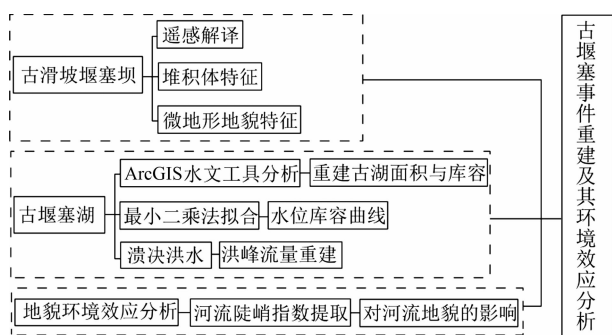


图2 研究技术路线

Fig. 2 Research technique route

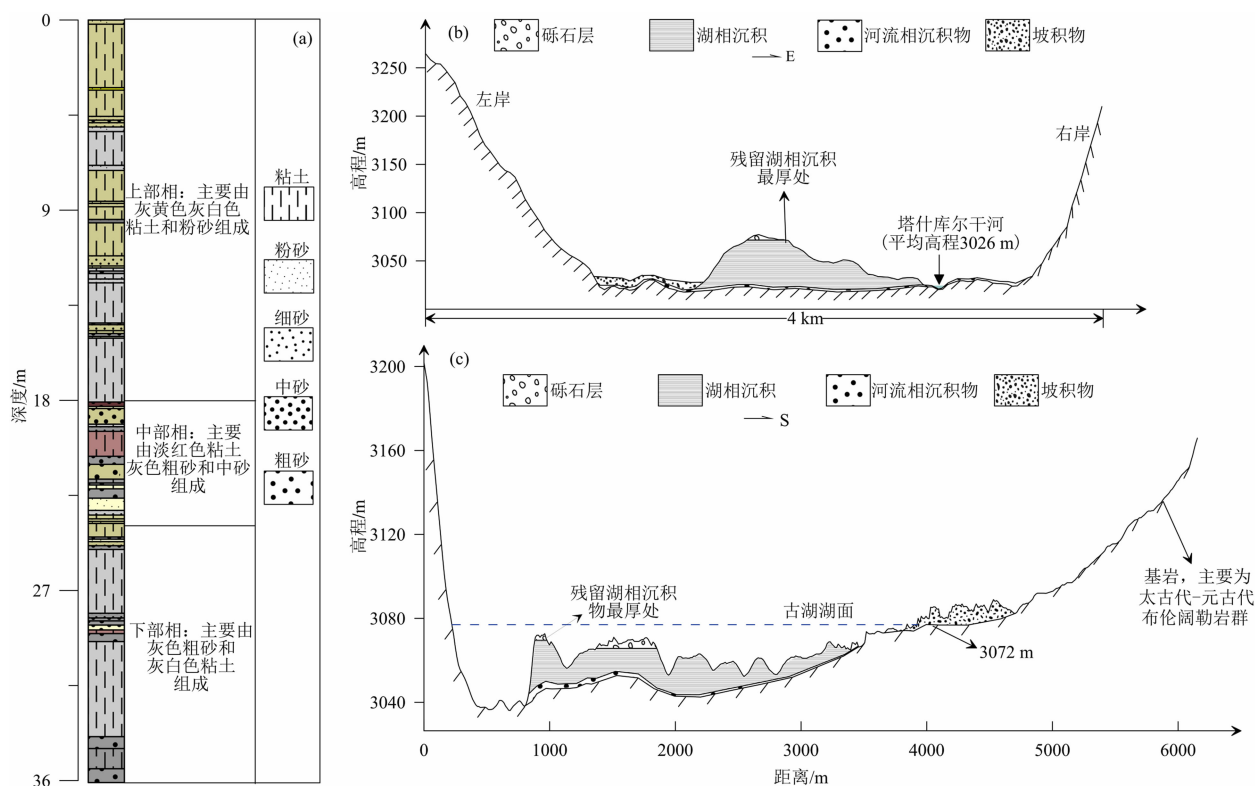


图3 剖面图:(a)湖相沉积岩性柱状图;(b)东西向剖面图;(c)南北向剖面图

Fig. 3 Geologic section: (a) lithological column; (b) E-W; (c) N-S sectional drawing of the residual lacustrine sediments

运用水文分析工具进行分析重建。本文采用的是从 EARTHDATA 获取的 ALOS 卫星数据,空间分辨率为  $12.5\text{ m} \times 12.5\text{ m}$ ,空间参考为 GCS\_WGS\_1984。后利用经验公式对古堰塞湖溃决时的洪水流量进行重建。利用 ArcGis10.7 软件提取塔什库尔干河流的坡度以及河流陡峭指数。针对曲曼古滑坡堰塞坝的地貌特征和残留湖相沉积的沉积相特征等,进行全方位的野外调查,结合数字地貌结果,分析堰塞事件对于区域地貌演化的影响。

## 3 结果

### 3.1 曲曼古湖地貌和湖积物特征

因为滑坡同时具备了滑坡体、滑动壁和滑动面等部分<sup>[19]</sup>,并具有确定平面作为特定的表面形状,与其他地貌相比,滑坡的遥感图像具有特定的图像属性,因此可用于识别和研究滑坡<sup>[20]</sup>。曲曼古滑坡平面形态呈长舌状,后缘呈圈椅状。利用 Google Earth 提供的空间分辨率为 0.5 m 的遥感影像,可得残留滑坡坝最高点的海拔为 3147 m,最低点的高程为 3030 m,计算出绝对高差约为 117 m。圈出滑坡体的范围(图 3a),结合遥感解译,初步确定残留滑



坡坝的面积约为  $4.30 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。再利用体积与面积的关系式<sup>[21]</sup>:

$$V = \alpha A^\gamma \quad (1)$$

式中,  $V$  为滑坡坝体积( $\text{m}^3$ );  $A$  为滑坡坝面积( $\text{m}^2$ );  $\alpha$  为滑坡指数的标准误差;  $\gamma$  为滑坡指数,  $\gamma$  主要受控于滑坡类型和规模, 其中基岩的  $\gamma$  为  $1.30 \sim 1.60$ 。根据 LARSEN<sup>[17]</sup> 等的研究结果, 取  $\alpha = 0.23$ ,  $\gamma = 1.42$ , 估算滑坡坝的体积约为  $2.30 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

曲曼古湖剖面位于距塔什库尔干自治县城北部 10 km 左右的曲什曼拜火教遗址附近( $37^\circ 52' 47'' \text{N}$ 、 $75^\circ 13' 39'' \text{E}$ )。湖相沉积沿现代河流分布, 高出现代河流, 形成一级较高的台地, 从残留的湖相沉积物来看, 厚度最大的地方海拔约为 3072 m, 拔河 46 m, 剖面总厚度 36 m。堰塞湖的地质证据如下: 沉积物顶部基本在一个水平线上, 层理水平, 间有波状层理及厚度小于 10 cm 的斜层理及交错层理(图 3a), 地层延伸较远, 很少见到河道沉积中常见的透镜体及大型层理(图 3b), 沉积物粒度比现代河流沉积物细。

出露的湖相沉积物厚度从几米到几十米不等, 靠近滑坡后缘方向厚度最大, 远离滑坡后缘厚度递减(图 3c), 沉积物顶部高程相近, 为明显的堰塞湖

沉积特点。曲曼剖面是一套要主要由粘土和粉砂、细砂组成的沉积物, 具有以下特征:

(1) 沉积物颜色变化明显, 形成了厚度一般为 2~5 cm 的韵律层(图 3a), 间有厚度 1 m 左右的厚层, 少量层位厚度可以达到 1.5 m 左右; 在粉细砂层呈现出明显的湖相沉积物的特征即可见波状纹理(图 4b)。

(2) 沉积物由底部的灰色向上逐渐出现淡红色、棕黄色, 最后逐渐变为灰黄色和浅黄色, 大体可分为 0~18 m、19~23 m 和 24~36 m 三套沉积相。上部厚约 18 m, 主要由灰黄色和灰白色的粘土、细砂构成, 色调略有变化, 岩性组成相对稳定, 可见明显的细砂-粉砂-粘土-沉积旋回。中部厚约 5 m, 主要由淡红色粘土、灰色粗砂和中砂组成, 岩性变化频繁, 色调变化明显。下部厚约 13 m, 主要是由灰黄色、红色粘土以及灰色细砂、中砂组成, 可见明显的中砂-细砂-粘土沉积旋回以及清晰的水平或者波状层理。36 m 之下为厚约 2 m 灰色粗砂, 推测为河床砂沉积物(图 4c)。

综合湖相沉积空间分布及其厚度、粒度及岩性的变化等特征, 认为其为湖相沉积。河流形成湖泊

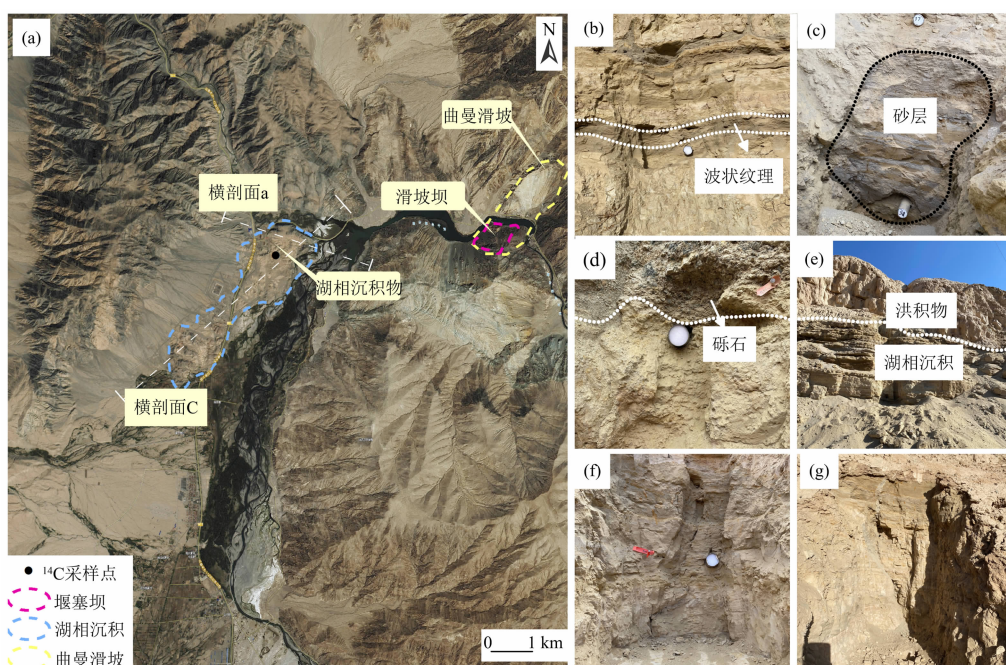


图 4 曲曼湖相沉积物概况: (a) 曲曼古滑坡、湖相沉积物空间分布图; (b) 湖相沉积物中的波状纹理; (c) 湖相沉积物底部的厚砂层; (d) 湖相沉积中的砾石层; (e) 洪积物; (f, g) 湖相沉积物中出现的裂隙

Fig. 4 Overview of Quman lacustrine sediments: (a) spatial distribution map of Quman ancient landslide and lacustrine sediments; (b) wave bedding in the lacustrine sediments; (c) thick sand layer in the lacustrine sediments; (d) gravel layer; (e) diluvium; (f, g) fissure in the lacustrine sediments

一般有两种形式,包括由河流截弯取直形成牛轭湖和河道堵塞形成堰塞湖,但河流的截弯取直一般都发生在河流曲率较大的泛滥平原。因此,在河流坡度较陡、构造运动活跃的区域,河道堵塞是形成堰塞湖是形成湖相堆积最为可能的方式。在湖相沉积物下游位置可见明显的滑动面,其岩性与周界岩性显著不同,形态上呈现出典型的圈椅状,可以推断该处发生了一次滑坡事件。由此推测该套湖相沉积为一套由滑坡所导致的堰塞湖沉。

### 3.2 曲曼古湖的形成、消亡及演化机制探讨

由自然河流过程产生的堰塞湖一般是通过溃决而消亡,其消亡既可以通过一次溃决完成<sup>[22]</sup>,也可以通过多次小规模溃决完成,部分堰塞湖则长期存在未发生溃决<sup>[23]</sup>。

据现场调查塔什库尔干流域属于叶尔羌河的一级支流,集水区面积为 18 475 km<sup>2</sup>,残留的湖相沉积主要分布在塔什库尔干河的右岸,其最高处的高程约为 3072 m,顶部形态较为平坦,在残留湖相沉积顶部发现了由砾石组成的冲洪积物,因此推测

3072 m 应是堰塞湖存在期间湖面位置的最高点。基于以上调查结果,利用 ArcGis10.7 软件对 12.5 m 分辨率的数字高程模型进行分析重建曲曼古湖的湖面积和库容(图 5)。重建结果表明,根据 DEM 数据提取的等高线可以看出从塔什库尔干河流域的上游到下游,海拔逐渐下降,曲曼古湖最大湖面面积约为  $2.01 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,最大库容量约为  $1.12 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。选取参数幂函数

$$Z = aV^b + c \quad (2)$$

式中, $Z$ 、 $V$  分别为水位和库容, $a$ 、 $b$ 、 $c$  为可变量,以水位差值的平方和最小为目标。

运用最小二乘法,在 excel 中利用规划求解工具所得拟合函数为  $Z = 0.000039V^{0.70} + 2982.10$ ,据此得出曲曼堰塞湖的水位库容曲线(图 6)。曲曼古堰塞湖的溃决洪峰流量可以根据经验回归方程<sup>[24]</sup>进行估算:

$$Q_p = 3.4V^{0.46} \quad (3)$$

式中, $Q_p$  为洪峰流量时的蓄水量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $V$  为堰塞湖溃决时的蓄水量( $\text{m}^3$ )。

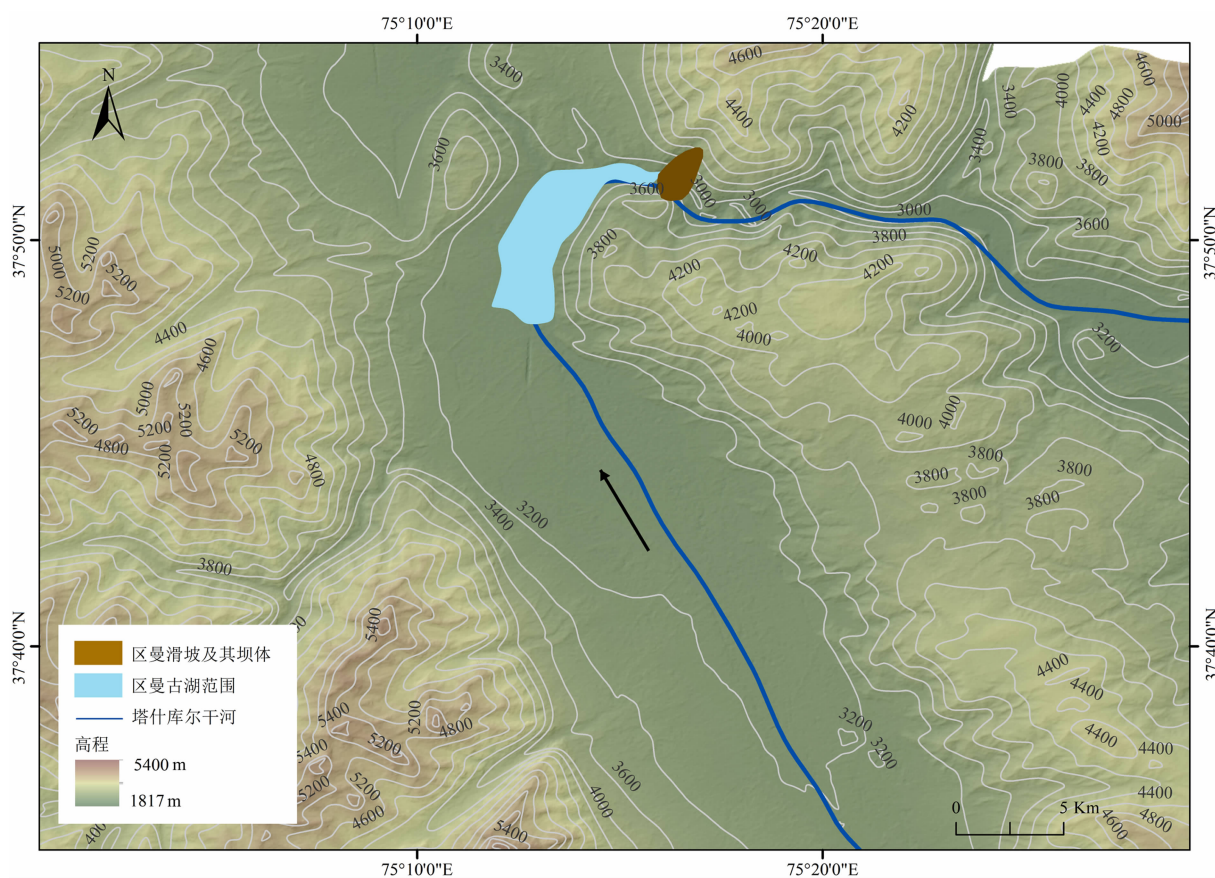


图 5 曲曼古堰塞湖重建示意图

Fig. 5 Reconstruction of paleo-landslide blocked lake in Quman



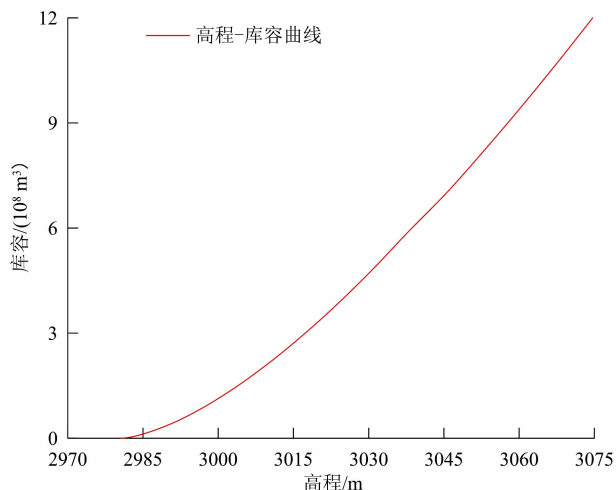


图6 曲曼古堰塞湖库容曲线  
Fig. 6 Storage capacity curve of paleo-landslide blocked lake in Quman

此处  $V$  取湖泊最大库容量  $1.12 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 根据式 (3) 计算得出曲曼古湖溃决洪流量约为  $49\,507 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

### 3.3 地貌效应分析

构造隆起和河流下切会导致河流坡度更陡、起伏更大,当坡度达到重力不平衡的阈值时,就会发生各种规模的滑坡,从而导致坡面侵蚀,进一步限制了集水区的蜿蜒度<sup>[25-27]</sup>。研究表明,滑坡对集水区有一定的反馈作用,因滑坡通过向河流提供泥沙来控制高地侵蚀的速度,从而调节河流的下切速度<sup>[28-29]</sup>,另一方面滑坡还会引起分水岭迁移和河流袭夺等,从而影响着流域的地貌演化<sup>[30-31]</sup>。下切速

率主要受构造活动的控制,所以河流纵向剖面的形态变化是指示构造活动一个很好的指标<sup>[32-33]</sup>。WHIPPLE 和 AMBILI 等人基于 ArcGIS 等软件,利用高分辨的 DEM 数据提取了河流地貌形态参数,为河流地貌的数学建模提供了条件和基础<sup>[33-34]</sup>。研究表明,通过使用凹曲度指数  $\theta_{ref}$  来处理公式 (4),可以得到一个标准化陡峭指数  $K_{sn}$  值,因此  $K_{sn}$  可以反映构造抬升速率的相对大小<sup>[35]</sup>。

$$S = K_{sn} A^{-\theta} \quad (4)$$

式中,  $A$  为上游流域面积 ( $\text{m}^2$ );  $K_{sn}$  为陡峭指数 ( $\text{m}^{0.9}$ );  $S$  为河道坡度 ( $^\circ$ );  $\theta$  为凹度指数,由上游流域面积和河道坡度进行线性拟合取其斜率所得,此处为 0.45,陡峭指数每 1000 m 计算一次。

为分析曲曼古滑坡对于塔什库尔干河流地貌的影响,本文利用 12.5 m ALOS 数字高程模型 (DEM) 提取了塔什库尔干河流纵剖面 and 河流陡峭指数  $K_{sn}$ 。陡峭指数的高值主要集中在海拔相对低的下游,低值主要集中在海拔相对高的上游。结果表明,塔什库尔干河的下游下切速率更高。此外,陡峭指数还可以用于定量检测决口河段与相邻河段相比是否异常陡峭<sup>[36-38]</sup>。通过对河道纵剖面、陡峭指数和古滑坡位置的叠加对比 (图 7),发现曲曼古滑坡所在的位置与河流陡峭指数的高值有着较好的对应关系。决口河段的异常陡峭现象,主要归因为滑坡坝结构相对稳定,堰塞事件发生后堵塞河道的时间较长,上游构造抬升潜力没有来得及彻底调整,而当堰塞湖

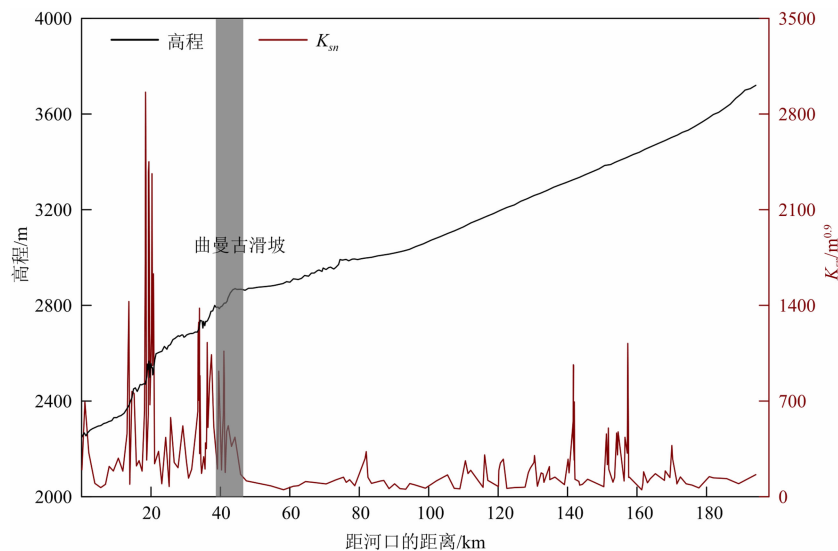


图7 塔什库尔干河道纵剖面和陡峭指数

Fig. 7 Longitudinal profiles and steepness index ( $K_{sn}$ ) for Taxkorgan river

溃决后,下游地貌改造强烈使得陡峭指数明显提高。

## 4 讨论

### 4.1 滑坡溃决原因

降水、冻融、地震和人类活动均可能导致滑坡的形成,其形成机制可以概括为牵引错动、剪切滑动、蠕滑平移以及崩滑液化<sup>[39]</sup>。

根据现有历史资料记录,塔什库尔干谷地自 1895 年以来曾多次发生强震活动(表 1),说明塔什库尔干谷地是一个强烈地震活动带,主要受到喀拉昆仑断裂、塔什库尔干断裂、慕士塔格断裂以及塔合曼断裂的控制。慕士塔格断裂北段各断层全新世以来活动强烈,其东西拉张速率达到了  $5.50 \text{ mm/a}$ <sup>[40]</sup>。通过对土库曼苏沟口南岸的冰碛面研究发现,慕士塔格断裂中段在晚第四纪水平滑动速率为  $2.20 \text{ mm/a}$ ,累积错断量可达  $100 \text{ m}$ <sup>[41]</sup>。前人研究认为塔什库尔干断裂是区域地震构造中的一条重要地震带<sup>[42-43]</sup>。此外,李海兵等利用锆石年龄得出喀喇昆仑断裂自形成以来累积走滑位移量至少在  $280 \text{ km}$  以上,长期的平均滑移速率为  $11 \text{ mm/a}$ <sup>[44]</sup>。因此塔什库尔干谷地具有发生强震的地质条件。

其次,该地区位于亚欧大陆内部,气候寒冷而干燥<sup>[45-46]</sup>。LIU 等利用碳氧同位素指标研究指出中-晚更新世塔里木盆地干旱化趋势显著加剧<sup>[47-49]</sup>,现代意义的塔克拉玛干沙漠最终形成,这表明帕米尔高原在中晚更新世达到了现在的高度,从而阻止了西风环流所携带水汽的直接进入,西北内陆现代意义上的干旱化格局也由此产生<sup>[50-51]</sup>。自 MIS5 以来该地区气候较为干冷,焦克勤<sup>[52]</sup>等认为西昆山冰川在  $2.3 \text{ ka BP}$  发生了大范围扩张,当时气温比现代低约  $9^\circ\text{C}$ ,降水量不足  $200 \text{ mm}$ ,其中全新世 S0 ( $8500 \sim 3100 \text{ a B. P}$ ) 最为干冷<sup>[53]</sup>,仅在  $6700 \sim 6500 \text{ a B. P}$  出现了一个显著湿润期<sup>[54]</sup>。该区域晚更新世以来由于降水诱发大型岩质滑坡形成堰塞湖的可能性很小。

根据上述讨论,该区地质条件以及构造运动满足发生地震的自然条件,因此本文推测曲曼古滑坡堰塞湖可能是由古地震引起的。柴贺军<sup>[55]</sup>等统计了我国近十年有记录的堰塞湖共超过 100 个,其中地震触发的占  $66.7\%$ ,极端降水触发的占  $26.9\%$ 。

塔什库尔干河流域降水量未达到触发滑坡的临界值—— $860 \text{ mm}$ ,同时日降水需要达到  $11 \text{ mm}$ <sup>[56]</sup>。塔什库尔干河流域年平均降水量仅为  $68 \text{ mm}$ ,最高降水月的累积降水量只有  $25.5 \text{ mm}$ 。此外,冻融也会引起滑坡,但主要发生在丘陵、山岳地区有较多的地下水分布且岩性相对松散的地区。塔什库尔干谷地山体岩性主要为太古代—元古代布伦阔勒岩群,其主体为一套角闪岩相-麻粒岩相的岩石组合,山体表面松散沉积物较少。大地震会导致粗碎屑沉积物大量出现在湖相沉积物的底部<sup>[57-59]</sup>。野外调查显示在曲曼湖相沉积物底部存在粗碎屑沉积物,湖相沉积中的不同位置出现了走向相似的裂隙,通过对地层组成、堰塞湖发生规律和区域古气候特征综合分析,初步推断曲曼滑坡古堰塞湖可能是地震触发的。

表 1 塔什库尔干县近现代地震记录

Tab. 1 Record of modern earthquake in Taxkorgan county

地震时间	震中位置	地域	震级	震源深度/km
1895-07-05	37.70°N, 75.10°E	塔什库尔干	7.00	20
1896-03-04	38.00°N, 76.00°E	塔什库尔干	7.10	40
1972-01-13	37.70°N, 75.00°E	塔什库尔干	5.40	84
2017-05-11	37.58°N, 75.25°E	塔什库尔干	5.50	8
2017-05-11	37.62°N, 75.27°E	塔什库尔干	4.50	5

### 4.2 流域地貌效应

大型滑坡通过改变分水岭、阻断上游水源、袭夺河流、形成堰塞湖以及调节河谷山坡坡度与曲率等过程控制着流域地貌的演化<sup>[60-61]</sup>。曲曼古滑坡堵塞塔什库尔干河形成古堰塞湖的长期维持,对湖相沉积物的沉积、粒度特征等都产生了影响,由交错层理变为水平层理,粒度变化表现为由粗砂、中砂、粉砂逐渐向粘土、粉质粘土转变,表明上游河流进入古湖后水动力条件得到了极大地减缓,流速和侵蚀能力的降低导致随河流搬运而来的物质在古湖内大量沉积。同时,溃坝所产生的洪水会对下游地区产生灾难性的破坏,河流陡峭指数提取结果指出决口河段存在异常的陡峭现象。一方面是因为滑坡坝结构相对稳定,堰塞事件发生后堵塞河道的时间较长,上游构造抬升潜力没有来得及彻底调整,而当堰塞湖溃决后,产生洪水规模较大,对下游河道的侵蚀也更为剧烈。另一方面是因为古滑坡长期为下游河道沉

积物提供物源,物源碎屑物质的运输也在一定程度上增加了河流的侵蚀潜力,引起了河流陡峭指数值的上升并加剧了河流下切侵蚀山体两岸斜坡。综上所述,曲曼古滑坡堰塞事件对于现代河道的地貌形态仍然存在一定影响,改变山区河流的沉积与搬运模式。

## 5 结论

通过详细分析湖相沉积物、滑坡坝和滑坡体的特征,研究了帕米尔高原地区古堰塞湖的形成和演变。主要结论如下:

(1) 遥感目视解译及野外调查显示,塔什库尔干河中下游存在一次明显的堰塞事件,指示此处曾经存在一个大型的滑坡堰塞湖。估算出滑坡坝面积约为  $4.30 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,体积约为  $2.30 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。曲曼古湖最大湖面面积约为  $2.01 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,最大库容量约为  $1.12 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

(2) 野外地质地貌调查及区域资料分析显示,区域古地震诱发大型滑坡堵塞塔什库尔干河,形成了曲曼古堰塞湖。目前该区域仍存在该类滑坡事件的风险。

(3) 曲曼古滑坡堰塞事件过程对于现代河道的地貌形态仍存在一定影响,其具体表现为在滑坡坝下游形成了坡度较大、陡峭指数( $K_{sn}$ )较高的河道。

## 参考文献 (References)

- [1] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, **100**(7): 1054 – 1068. DOI: 10.1130/0016 – 7606 (1988) 100 < 1054: TFAFON > 2.3. CO;2
- [2] KORUP O, MONTGOMERY D R, HEWITT K. Glacier and landslide feedbacks to topographic relief in the Himalayan syntaxes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, **107**(12): 5317 – 5322. DOI: 10.1073/pnas.0907531107
- [3] KORUP O, STROM A L, WEIDINGER J T. Fluvial response to large rock-slope failures: Examples from the Himalayas, the Tien Shan, and the Southern Alps in New Zealand [J]. Geomorphology, 2006, **78**(1/2): 3 – 21. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.01.020
- [4] COOK K L, ANDERMANN C, GIMBERT F, et al. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya [J]. Science, 2018, **362**(6410): 53 – 57. DOI: 10.1126/science.aat4981
- [5] OUMET 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. DOI: 10.1130/B26136.1
- [6] 程雪峰, 范念念, 刘维明, 等. 两万年来岷江汶川古堰塞湖事件研究 [J]. 山地学报, 2020, **38**(4): 561 – 570. [CHENG Xuefeng, FAN Niannian, LIU Weiming, et al. A paleo-lake in the Minjiang River since 20,000 years before present in Wenchuan, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(4): 561 – 570] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000534
- [7] 刘栋梁, 李海兵, 潘家伟, 等. 帕米尔东北缘-西昆仑的构造地貌及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2011, **27**(11): 3499 – 3512. [LIU Dongliang, LI Haibing, PAN Jiawei, et al. Morphotectonic study from the northeastern margin of the Pamir to the West Kunlun range and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, **27**(11): 3499 – 3512]
- [8] YUAN Z, CHEN J, OWEN L A, et al. Nature and timing of large landslides within an active orogen, eastern Pamir, China [J]. Geomorphology, 2013, **182**: 49 – 65. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.10.028
- [9] 陈钱, 吴和秋, 张明, 等. 新疆塔县地震触发顺向坡失稳破坏机理研究 [J]. 安全与环境工程, 2021, **28**(5): 88 – 95. [CHEN Qian, WU Heqiu, ZHANG Ming, et al. Research on the mechanism of earthquake-triggered failure of bedding slope in Taxian of Xinjiang [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, **28**(5): 88 – 95] DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671 – 1556.20201041
- [10] 陈剑, 崔之久, 陈瑞琛, 等. 金沙江上游特米古滑坡堰塞湖成因与演化 [J]. 地学前缘, 2021, **28**(2): 85 – 93. [CHEN Jian, CUI Zhijiu, CHEN Ruichen, et al. The origin and evolution of the Temi paleolandslide-dammed lake in the upper Jinsha River [J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(2): 85 – 93] DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.9.9
- [11] 李文巧, 陈杰, 袁兆德, 等. 帕米尔高原 1895 年塔什库尔干地震地表多段同震破裂与发震构造 [J]. 地震地质, 2011, **33**(2): 260 – 276. [LI Wenqiao, CHEN Jie, YUAN Zhaode, et al. Coseismic surface ruptures of multi segments and sismogenic fault of the Tashkorgan earthquake in Pamir, 1895 [J]. Seismology and Geology, 2011, **33**(2): 260 – 276] DOI: 10.3969/j.issn.0253 – 4967.2011.02.002
- [12] 刘健, 史杰, 姚鑫, 等. 帕米尔高原东北缘活动构造对塔什库尔干盆地地热控制作用 [J]. 中国地质, 2018, **45**(4): 681 – 692. [LIU Jian, SHI Jie, YAO Xin, et al. The control of neotectonic activity over geothermal resource in the Taxkorgan Basin on the northeastern margin of the Pamir [J]. Geology of China, 2018, **45**(4): 681 – 692] DOI: 10.12029/gc20180403
- [13] CAROSI R. Extension in a multilayer sequence along the Karakoram fault [J]. Journal of Structural Geology, 2010, **33**(6):



1045. DOI: 10.1016/j.jsg.2010.04.010
- [14] SOBEL E R, SCHOENBOHM L M, CHEN J, et al. Late Miocene-Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: Implications for Pamir orogenesis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, **304**(3-4): 369-378. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.02.012
- [15] ROBINSON A C, YIN A, MANNING C E, et al. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: Implications for strain-accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, **119**(7-8): 882-896. DOI: 10.1130/B25981.1
- [16] AIZEN E M, AIZEN V B, MELACK J M, et al. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, **21**(5): 535-556. DOI: 10.1002/joc.626
- [17] WAKE C P. Glaciochemical investigations as a tool for determining the spatial and seasonal variation of snow accumulation in the central Karakoram, northern Pakistan [J]. *Annals of Glaciology*, 1989, **13**: 279-284.
- [18] OWEN L A, FINKEL R C, BARNARD P L, et al. Climatic and topographic controls on the style and timing of Late Quaternary glaciation throughout Tibet and the Himalaya defined by  $^{10}\text{Be}$  cosmogenic radionuclide surface exposure dating [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, **24**(12-13): 1391-1411. DOI: 10.1016/j.quascirev.2004.10.014
- [19] 王帅, 王深法, 俞建强. 构造活动与地质灾害的相关性——浙西南山地滑坡、崩塌、泥石流分布规律[J]. *山地学报*, 2002, **20**(1): 47-52. [WANG Shuai, WANG Shenfa, YU Jianqiang. A study on the relationships between neotectonism and geological hazards [J]. *Mountain Research*, 2002, **20**(1): 47-52] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2002.01.008
- [20] 侯伟. 基于遥感与DEM的面向对象滑坡识别研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. [HOU Wei. Object-oriented identifying landslides using remote sensing and DEM data [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014]
- [21] LARSEN I J, MONTGOMERY D R, KORUP O. Landslide erosion controlled by hillslope material [J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3**(4): 247-251. DOI: 10.1038/NGEO776
- [22] 聂高众, 高建国, 邓砚. 地震诱发的堰塞湖初步研究[J]. *第四纪研究*, 2004, **24**(3): 293-301. [NIE Gaozhong, GAO Jianguo, DENG Yan. Preliminary study on earthquake-induced dammed lake [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(3): 293-301] DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.2004.03.008
- [23] 王兰生, 杨立铮, 王小群, 等. 岷江叠溪古堰塞湖的发现[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005, **32**(1): 1-11. [WANG Lansheng, YANG Lizheng, WANG Xiaoqun, et al. Discovery of huge ancient dammed lake on upstream of Minjiang River in Sichuan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 2005, **32**(1): 1-11]
- [24] CENDERELLI D A. Floods from natural and artificial dam failures [G]// WOHL E E. *Inland Flood Hazards*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 73-103.
- [25] LARSEN I J, MONTGOMERY D R. Landslide erosion coupled to tectonics and river incision [J]. *Nature Geoscience*, 2012, **5**(7): 468-473. DOI: 10.1038/NGEO1479
- [26] MONTGOMERY D R, BRANDON M T. Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **201**(3-4): 481-489. DOI: 10.1016/S0012-821X(02)00725-2
- [27] BURBANK D W, LELAND J, FIELDING E, et al. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas [J]. *Nature*, 1996, **379**(6565): 505-510. DOI: 10.1038/379505a0
- [28] EGHOLM D L, KNUDSEN M F, SANDIFORD M. Lifespan of mountain ranges scaled by feedbacks between landsliding and erosion by rivers [J]. *Nature*, 2013, **498**(7455): 475-478. DOI: 10.1038/nature12218
- [29] YANITES B J, TUCKER G E, MUELLER K J, et al. How rivers react to large earthquakes: Evidence from central Taiwan [J]. *Geology*, 2010, **38**(7): 639-642. DOI: 10.1130/G30883.1
- [30] WHIPPLE K X, FORTE A M, DIBIASE R A, et al. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: Implications for the role of divide mobility in landscape evolution [J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2017, **122**(1): 248-273. DOI: 10.1002/2016JF003973
- [31] DAHLQUIST M P, WEST A J, LI G. Landslide-driven drainage divide migration [J]. *Geology*, 2018, **46**(5): 403-406. DOI: 10.1130/G39916.1
- [32] KIRBY E, WHIPPLE K. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis [J]. *Geology*, 2001, **29**(5): 415-418. DOI: 10.1130/0091-7613(2001)029<0415:Qdrurv>2.0.Co;2
- [33] WHIPPLE K X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, **32**: 151-185. DOI: 10.1146/annurev.earth.32.101802.120356
- [34] AMBILI V, NARAYANA A C. Tectonic effects on the longitudinal profiles of the Chaliyar River and its tributaries, southwest India [J]. *Geomorphology*, 2014, **217**: 37-47. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.04.013
- [35] TRAUERSTEIN M, NORTON K P, PREUSSER F, et al. Climatic imprint on landscape morphology in the western escarpment of the Andes [J]. *Geomorphology*, 2013, **194**: 76-83. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.04.015
- [36] KORUP O. Rock-slope failure and the river long profile [J]. *Geology*, 2006, **34**(1): 45-48. DOI: 10.1130/G21959.1
- [37] TAKAHASHI N, SHYU J B H, CHEN C Y, et al. Long-term

- uplift pattern recorded by rivers across contrasting lithology: Insights into earthquake recurrence in the epicentral area of the 2016 Kumamoto earthquake, Japan [J]. *Geomorphology*, 2022, **419**: 108492. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108492
- [38] WANG Yizhou, ZHENG Dewen, ZHANG Huiping. The methods and program implementation for river longitudinal profile analysis: RiverProAnalysis, a set of open-source functions based on the Matlab platform [J]. *Science China-Earth Sciences*, 2022, **65** (9): 1788 – 1809. DOI: 10.1007/s11430-021-9938-x
- [39] 李滨, 殷跃平, 吴树仁, 等. 多级旋转黄土滑坡基本类型及特征分析[J]. *工程地质学报*, 2011, **19**(5): 703 – 711. [LI Bin, YIN Yueping, WU Shuren, et al. Basic types and characteristics of multiple rotational landslides in loess [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, **19**(5): 703 – 711] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2011.05.010
- [40] CHEVALIER M L, LI H B, PAN J W, et al. Fast slip-rate along the northern end of the Karakorum fault system, western Tibet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38** (22): 122309. DOI: 10.1029/2011GL049921
- [41] 李文巧. 帕米尔高原东北部塔什库尔干谷地的活动构造与强震[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2013. [LI Wenqiao. Active tectonics and strong earthquakes in the Tarshkurgan valley, northeastern Pamir Plateau [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2013]
- [42] 沈军, 柏美祥, 石广岭. 新疆及邻区地震构造图简介[J]. *内陆地震*, 2011, **25**(2): 97 – 108. [SHEN Jun, BAI Meixiang, SHI Guangling. Brief introduction on the seismotectonic map of Xinjiang and its neighborhood [J]. *Inland Earthquake*, 2011, **25** (2): 97 – 108] DOI: 10.3969/j.issn.1001-8956.2011.02.001
- [43] 尹光华. 塔什库尔县发现三期地震遗迹[J]. *内陆地震*, 1990 (1): 26. [YIN Guanghua. Three phase earthquake remains found in Tashkur county [J]. *Inland Earthquake*, 1990(1): 26]
- [44] 李海兵, VALLI F, 许志琴, 等. 喀喇昆仑断裂的变形特征及构造演化[J]. *中国地质*, 2006, **33** (2): 239 – 255. [LI Haibing, VALLI F, XU Zhiqin, et al. Deformation and tectonic evolution of the Karakorum fault, western Tibet [J]. *Geology in China*, 2006, **33**(2): 239 – 255]
- [45] 戴新刚, 任宜勇, 陈洪武. 近 50 年新疆温度降水配置演变及其尺度特征[J]. *气象学报*, 2007, **65**(6): 1003 – 1010. [DAI Xingang, REN Yiyong, CHEN Hongwu. Multi-scale feature of climate and climate shifts in Xinjiang over the past 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, **65** (6): 1003 – 1010] DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2007.06.018
- [46] 杨舵, 史玉光. 新疆春季降水与北大西洋海温关系的事实分析[J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(4): 478 – 484. [YANG Duo, SHI Yuguang. A preliminary research on relationship between precipitation in spring in xinjiang and ssta in northern atlantic [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, **13**(4): 478 – 484] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2002.04.011
- [47] HAO Q Z, WANG L, OLDFIELD F, et al. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400, 000-year minima in insolation variability [J]. *Nature*, 2012, **490** (7420): 393 – 396. DOI: 10.1038/nature11493
- [48] LIU Jian, WANG Rujian, ZHAO Yue, et al. A 40, 000-year record of aridity and dust activity at Lop Nur, Tarim Basin, northwestern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, **211**: 208 – 221. DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.03.023
- [49] LIU Weiguo, LIU Zhonghui, SUN Jimin, et al. Onset of permanent Taklimakan Desert linked to the mid-Pleistocene transition [J]. *Geology*, 2020, **48** (8): 782 – 786. DOI: 10.1130/G47406.1
- [50] 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. *科学通报*, 1998, **43**(15): 1569 – 1574. [LI Jijun, FANG Xiaoming. Study on the uplift of Qinghai-Tibet plateau and environmental change [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, **43** (15): 1569 – 1574]
- [51] SUN Jimin, LIU Weiguo, LIU Zhonghui, et al. Extreme aridification since the beginning of the Pliocene in the Tarim Basin, western China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, **485**: 189 – 200. DOI: 10.1016/j.palaeo.2017.06.012
- [52] 焦克勤, 姚檀栋, 李世杰. 西昆仑山 32ka 来的冰川与环境演变[J]. *冰川冻土*, 2000, **22** (3): 250 – 256. [JIAO Keqin, YAO Tandong, LI Shijie. Evolution of glaciers and environment in the west Kunlun Mountains during the past 32 ka [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **22** (3): 250 – 256]
- [53] 何毅. 俄罗斯亚速海地区与中国帕米尔地区 MIS5 以来黄土磁性特征及环境演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [HE Yi. The loess research on magnetic characteristics and environmental evolution in Azov region of Russia and Pamir region of China since MIS5 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016]
- [54] 钟巍, 王立国, 熊黑钢, 等. 塔里木盆地南缘和田绿洲中全新世以来气候环境变化与人类活动[J]. *中国沙漠*, 2007, **27** (2): 171 – 176. [ZHONG Wei, WANG Liguang, XIONG Heigang, et al. Climate-environment changes and possible human activity effect since Mid-Holocene in Hetian Oasis, southern margin of Tarim Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, **27** (2): 171 – 176] DOI: 10.3321/j.issn:1000-694X.2007.02.001
- [55] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 中国塔里木盆地发育分布特征[J]. *山地学报*, 2000, **18** (S1): 51 – 54. [CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan. The temporal-spatial distribution of damming landslides in China [J]. *Mountain Research*, 2000, **18** (S1): 51 – 54] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2000.s1.011
- [56] GABET E J, BURBANK D W, PUTKONEN J K, et al. Rainfall thresholds for landsliding in the Himalayas of Nepal [J]. *Geomorphology*, 2004, **63**(3-4): 131 – 143. DOI: 10.1016/j.

- geomorph. 2004. 03. 011
- [57] LIU Weiming, HU Kaiheng, CARLING P A, et al. The establishment and influence of Baimakou paleo-dam in an upstream reach of the Yangtze River, southeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Geomorphology*, 2018, **321**(15): 167 – 173. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.08.028
- [58] PARKER R N, DENSMORE A L, ROSSER N J, et al. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth [J]. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(7): 449 – 452. DOI: 10.1038/NCEO1154
- [59] CRUDEN D M. Some forms of mountain peaks in the Canadian Rockies controlled by their rock structure [J]. *Quaternary International*, 2000, **68 – 71**: 59 – 65. DOI: 10.1016/S1040 – 6182(00)00032 – X
- [60] LIANG Lianji, ZHANG Zhouhui, DAI Fuchu. A Late Pleistocene landslide damming event and its implications for the evolution of river valley landforms in the upper Jinsha River, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary International*, 2022, **622**: 97 – 109. DOI: 10.1016/j.quaint.2022.01.006
- [61] WANG Hao, CUI Peng, ZHOU Liqin, et al. Spatial and temporal distribution of landslide-dammed lakes in Purlung Tsangpo [J]. *Engineering Geology*, 2022, **308**: 106802. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106802

## A Paleolandslide-Dammed Lake and Its Impact on Geomorphology in Taxkorgan Valley, Xinjiang, China

DENG Li<sup>1,2</sup>, CHANG Hong<sup>1,3\*</sup>, SHEN Junjie<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China)*

**Key words:** The Taxkorgan valley is a typical area of frequent tectonic activities and geological hazards. Ancient landslides and debris flows dominated in this valley, quite often followed by sliding geo-bodies blocking rivers in the downstream and formed lots of barrier lakes. Past research concerns were mostly made to the formation age and paleoenvironmental profile of these paleolandslide-dammed lakes, but little to the formation and evolution of the lakes and resulting geomorphic responses to this process. It is imperative to exemplify the formation and evolution of the paleolandslide-dammed lakes by a case study for better control of barrier-lake-break-flood and prevention. In this study, a plot of paleolandslide-dammed lake sediments of the Taxkorgan valley at the Quman village, Xinjiang, China was targeted for investigation of the geomorphology and characteristics of sediments. It was done by field survey, analysis of a digital elevation model (DEM) and remote sensing images. Following results were obtained: (1) This lake was possibly formed by a paleoearthquake-triggered landslide, with a residual dam surface area of around  $4.30 \times 10^5 \text{ m}^2$  and a volume of about  $2.30 \times 10^7 \text{ m}^3$ . Approximately, the lake's maximum surface area was  $2.01 \times 10^7 \text{ m}^2$  with water volume  $1.12 \times 10^9 \text{ m}^3$ , and its maximum flow during an event of barrier-lake-break-flood was approximately  $49\,507 \text{ m}^3/\text{s}$ . (2) The steepness index ( $K_{sn}$ ) for the upstream of the landslide dam was greater than the  $K_{sn}$  for the downstream of the landslide dam, representing a response to a relatively strong geomorphic reshape process. This result was ascribed to the lasting impact of the landslide dam on the Taxkorgan river. Our findings provide references to future studies on regional geomorphic evolution and the emergence of geological hazards in the Taxkorgan valley.

**Key word:** the Pamirs; paleolandslide; the Taxkorgan valley; dammed lake; the steepness index ( $K_{sn}$ )

(责任编辑 李嵘)