

引用格式:刘青,王伟,高星,兰恒星.大型滑坡坝溃决对下游河谷边坡的影响分析——以白格滑坡下游50 km内的河谷边坡为例[J].山地学报,2021,39(2):226-237.

LIU Qing, WANG Wei, GAO Xing, LAN Hengxing. Analysis of the effects of dammed lake outburst floods on geomorphology of river basin—a case study of the valley slope erosion within 50 km downstream of Baige landslide, Tibet, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(2):226-237.

大型滑坡坝溃决对下游河谷边坡的影响分析 ——以白格滑坡下游50 km内的河谷边坡为例

刘青^{1,2},王伟^{1,2*},高星^{1,2},兰恒星^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:堰塞湖的泄流会对下游河谷边坡造成严重的冲刷,对下游居民的生产生活及基础设施的安全造成威胁。为了研究堰塞湖泄流对下游河谷边坡的影响,选取了具有足够代表性的金沙江白格滑坡下游一定范围(50 km)的河谷边坡为代表区域,将遥感信息提取技术、GIS技术与空间分析等方法相结合,定量地研究了堰塞湖泄流对河谷边坡的影响;并综合考虑了河流形态发育中的重要影响因素,从地形、地貌和地质三个方面分析了不同影响因素对冲刷效果的影响。结果表明:(1)冲刷面积在河流弯曲度较大的地方普遍较大;(2)坡度与冲刷面积呈幂律分布,且在坡度 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内冲刷作用最强;(3)地质岩性对冲刷面积的影响作用显著,受风化作用影响,花岗岩分布的区域相较于大理岩冲刷面积普遍较大;(4)在当前研究的尺度和精度下,地貌要素与冲刷面积具有一定的相关关系。本研究成果可对该区域滑坡灾害的预防以及大型工程选址建设提供参考。

关键词:堰塞湖泄流;河谷边坡;相关性分析;金沙江;白格滑坡

中图分类号: P237; P642.22

文献标志码: C

金沙江白格区域位于我国的西南山区,地震活动频繁,历史上发生了大量大规模的滑坡堵江事件^[1]。在2018年10月白格大型滑坡堵江事件发生之后,巨量的泄流洪水冲毁了下游318国道、金沙江大桥等多座桥梁和大量公路的路基,淹没了多个居民区,灾害损失严重。白格滑坡灾害发生后的堰塞湖泄流问题成为社会关注的焦点,此外正在进行选址勘察的川藏铁路正好从白格滑坡下游跨金沙江通过,因此,开展白格滑坡发生后对下游河谷的影响研究,对该区域沿岸居民地质灾害防范、川藏铁路的选

址以及水电站的规划建设等具有重要指导意义。

在全球范围内,诸多学者针对不同国家和地区发生的大型滑坡事件进行了广泛的研究,在不同区域尺度内评价了滑坡灾害的风险及其对周围生态环境造成的影响,且提供了灾害的防治导向^[2-6]。近年来,国内外学者对滑坡所造成的水文事件的研究日益增多,大多运用遥感技术对堰塞湖泄流过程进行数值模拟和风险性评价,如国内学者利用平面二维水沙数学模型对汶川地震唐家山堰塞湖的泄流进行了动力学过程模拟,以及通过对泄流槽供水过程

收稿日期 (Received date): 2020-03-26; **改回日期** (Accepted date): 2021-03-25

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划项目(2018YFE0100100); 国家自然科学基金(41790443, 41641040) [National Key Research and Development Program of China (2018YFE0100100); National Natural Science Foundation of China (41790443, 41641040)]

作者简介 (Biography): 刘青(1996-),女,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向:山地灾害。[LIU Qing (1996-), female, born in Nanyang, Henan province, M. Sc. candidate, research on mountain disaster] E-mail: liuqing@lreis.ac.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 王伟(1972-),男,河北涿州人,副研究员,主要研究方向:地质灾害与信息技术。[WANG Wei (1972-), male, born in Zhuozhou, Hebei province, Ph. D., associate professor, research on geological disasters and information technology] E-mail: wang_wei@lreis.ac.cn

的分析和计算,预测和模拟泄流过程等^[7-8]。这些学者虽然从不同的方面对堰塞湖泄流的影响进行了评估,但大都忽略了堰塞湖泄流洪水的冲刷作用也会在短时间内改变河流的形态。国内外对于河流形态的研究一般认为是由于环境因素长期作用或人类干预的结果^[9-13],而对以堰塞湖泄流作用为代表的极端水文事件造成的影响较少涉及。因此,研究滑坡堰塞湖泄流造成的水文事件对下游河谷边坡的影响有重要意义。

本研究基于光学遥感影像,结合遥感信息提取技术、GIS 空间分析技术和相关分析方法量化了堰塞湖泄流对下游河谷边坡的冲刷面积,探求了河流下游不同部位冲刷效果存在差异的原因。选取河段位于地震灾害多发区,极易发生滑坡形成堰塞湖,使用的遥感影像数据时间跨度长达 20 年,为提取所选河段常年水体范围提供了充足的样本参考。本研究通过对堰塞湖溃决前后河谷边坡的面积进行量化,进一步探讨了滑坡灾害对河流下游区域造成的影响,对滑坡堰塞湖灾害的研究进行了补充。

1 数据和方法

1.1 研究区与数据来源

白格滑坡位于西藏自治区江达县波罗乡白格村附近的金沙江右岸,其后缘顶点地理坐标为 98°42′17.98″E,31°4′56.41″N^[14]。研究所选取的河段位于白格滑坡下游 50 km 范围内,属于金沙江流域的河谷地带,河流沿岸为典型的构造侵蚀地貌,河流附近岩石类型多为火成岩和沉积岩(图 1)。所选河段河谷谷坡陡直,一般在 40°以上,河谷强烈深切,多呈现“V”型结构。由于短期内白格滑坡两次垮塌并两次形成堰塞湖,泄流后上游水体对下游河段的河谷边坡产生了强烈的冲刷作用(见附录 1),在一定程度上影响了下游河谷边坡的形态,降低了岸坡的稳定性,直接影响到下游人民的生命和财产安全。

本研究采用的数据包括 Sentinel-2 MSI 影像数据、Landsat8 OLI 影像数据、Landsat7 ETM + 影像数据、ZY-3 遥感影像数据、DEM 数据、地貌类型数据和地质岩性数据,其中遥感影像数据详细信息见表 1。Sentinel-2 MSI 数据用于水体信息的提取和人工目视修正;Landsat8 OLI 影像数据和 Landsat7 ETM + 影像数据主要用于水体信息的提取和数据补充;

ZY-3 遥感影像数据用于水域提取精度的验证;DEM 数据、地貌数据和岩性数据用于影响因素的分析。

表 1 遥感影像数据源
Tab. 1 Data source of remote sensing image

数据源	分辨率/m	影像时间	数量/幅	所用波段
Sentinel-2 MSI	10	2015.01—2018.12	19	Green, NIR
Landsat8 OLI	30	2013.01—2018.12	110	Red, SWIR
Landsat7 ETM +	30	1999.01—2013.12	146	Red, SWIR
ZY-3	2.1	2017.12—2018.10	2	全色

1.2 数据处理

研究区地处藏东横断山脉、金沙江流域的河谷地带,遥感影像中存在山体、植被阴影,综合考虑研究区特征和获取的遥感影像光谱特征之后,本研究采用 Mcfeeters^[15]提出的归一化差异水体指数(NDWI)和曹荣龙等^[16]提出的修订型归一化差异指数(RNDWI)分别针对不同的遥感影像进行水域提取:

$$NDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR) \quad (1)$$

$$RNDWI = (SWIR - Rrd)/(SWIR + Red) \quad (2)$$

式中,Green 为绿光波段;NIR 为近红外波段;SWIR 为短波红外 1 波段;Red 为红光波段。RNDWI 方法可以消除混合像元因素的影响,能够更加准确地区分水陆边界,适合提取狭窄条状的水体,并在很大程度上消除了山体和植被阴影的影响。由于 Sentinel-2 MSI 遥感影像数据中短波红外波段和红光波段的分辨率不同,无法计算 RNDWI 值,因此针对该数据采用基本的 NDWI 进行水体的提取。

水体指数图像可以突出水体与陆地其他地物之间的光谱差异,但要准确提取水域边界,还需通过阈值对水体指数图像进行分割。经计算,水体 RNDWI 值的范围主要分布在 -0.42 ~ -0.16 范围内,水体 NDWI 的值主要分布在 0.21 ~ 0.27 范围内。此外,在阈值分割提取水域后,结合同期真彩色遥感影像,对水陆边界以及河宽较小的区域采用人工目视解译的方法进行修正,以便于后续进行精细的量化分析。

1.3 精度评价

由于本研究需要对河谷边坡受泄流水体冲刷后的变化面积进行精细的量化,因此遥感影像信息提取的精度至关重要。本研究以 ZY-3 影像为参考,对水体提取结果进行精度验证。在 ArcGIS 中随机生成

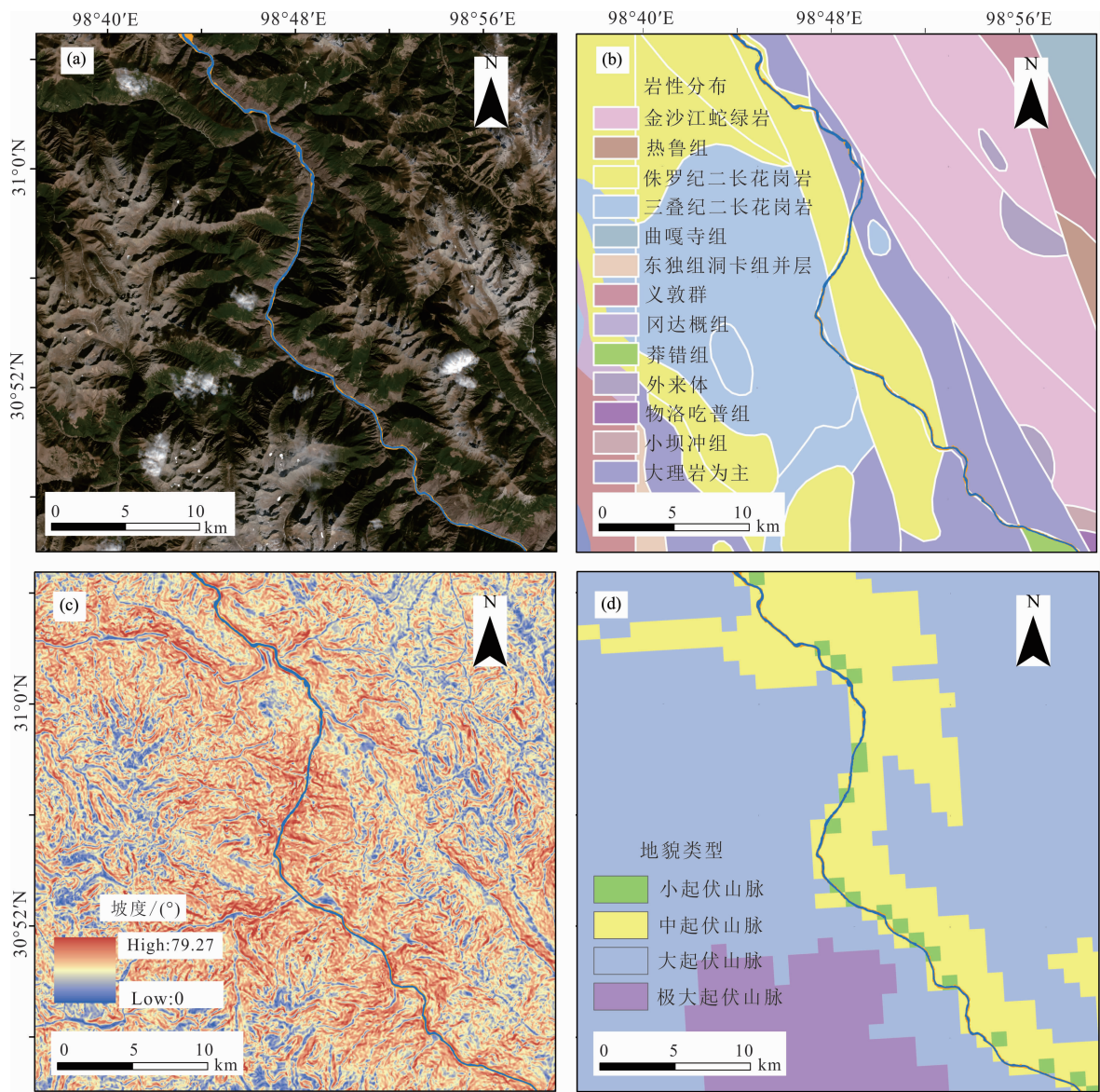


图 1 研究河段区域特征图:(a)位置;(b)岩性;(c)坡度;(d)地貌类型

Fig.1 Regional characteristics map of the river section in the study area: (a) location; (b) lithology; (c) slope; (d) geomorphological types

1000 个采样点,然后与 2.1 m 分辨率的资源三号卫星影像进行对比判别,分别获取人工提取和高分影像对应地物类别,统计正确和错误点位及数量,构建精度检验混淆矩阵,计算总体精度和 Kappa 系数等精度评价指标,结果见表 2。由表 2 可知,利用遥感影像提取的水域总体精度达到了 90% 以上, Kappa 系数为 0.809(95% CI 为 0.340 ~ 0.846), $p < 0.001$,有较好的一致性,能够满足本研究的精度需求。

1.4 相关性分析

1.4.1 方差分析

方差分析 (Analysis of variance, ANOVA) 是通过检验各总体的均值是否相等来判断分类型自变量

表 2 精度评价结果

Tab.2 Results of accuracy evaluation

提取 次数	水体采样 点个数	非水体采 样点个数	总体 精度	Kappa 系数
第一次	62	938	93.8%	0.809
第二次	55	945		

对数值型因变量是否有显著影响的一种相关分析方法^[17]。单因素方差分析采用 F 统计量进行检验,总的变差平方和记为 Q_T ,分解为组间变差平方和 Q_G 以及组内变差平方和 Q_E ,即 $Q_T = Q_G + Q_E$ 。其中:

$$Q_G = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 \quad (3)$$

$$Q_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 \quad (4)$$

式中, k 为水平数; n_i 为第 i 个水平下所进行的试验次数, 即样本容量; \bar{X}_i 为因素在不同水平下的均值; \bar{X} 为指标均值; \bar{X}_{ij} 为第 i 个水平下第 j 个指标。

进行方差分析需要满足各总体的方差相等、各总体服从正态分布以及各观测值互相独立三个基本假设。本研究中采用单因素方差分析方法分别对影响冲刷面积的地质岩性和地貌类型进行相关性分析。

1.4.2 滤波分析

数字滤波技术是通过原始数据进行数学分析, 并保留有效信息的一种技术手段^[18]。滤波的作用就是消除或压制干扰噪声, 而保留对科学研究有价值的信号成分。其中, 中值滤波在数字处理方面应用广泛, 也是时间序列分析中常用的一种方法。中值滤波技术可以归结为一类非线性的平滑技术, 是以数学中的排序理论为基础, 用一个设定好的区域对一系列数据不断地做平滑, 然后对此区域中的数据排序并找出中间值输出^[19]。

为了更加清晰直观地反映堰塞湖泄流之后冲刷面积沿河流流向的分布与河流形态的相关关系, 本研究对河流中心线两侧划分统计单元后的一系列冲刷面积值进行中值滤波分析, 压制了高频噪声, 获得了河流中心线两侧冲刷面积随河流流向的分布及变化过程。

2 结果与分析

2.1 冲刷面积变化特征分析

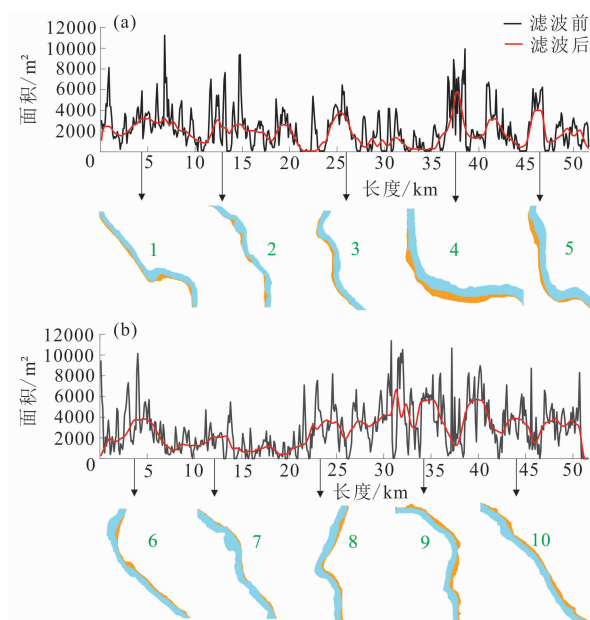
为了分析所选河段河谷边坡冲刷面积 (见附录 2) 与河流形态和走势之间的关系, 以及冲刷面积沿河流流向的分布特征, 本研究采用划分统计单元的方式对冲刷面积进行统计分析。综合考虑研究区的地形地貌特征, 使得统计数据在尽可能多的情况下可以覆盖至少一个地形地貌单元, 以 100 m 为间隔划分统计区间。首先对生成的河流中心线按照每 100 m 为一段进行分割; 再以间断点为垂点, 生成垂直于间断点的切割线, 得到按照河流流向的一系列分割单元数据。在 MATLAB 中通过中值滤波对河流中心线两侧的冲刷面积数据分别进行滤波分析,

结果见图 2。

通过滤波分析去除了噪声, 可以更加清晰直观地看出沿河流流向冲刷面积的变化。选取滤波结果中几个较为典型的波峰进行标记 (1~10), 通过与遥感影像解译的结果进行对比可以看出, 冲刷面积的变化与河流的形态变化和走势有着很大的相关关系。具体表现为冲刷面积较大的区域大多分布在河流弯曲段, 如图 2a 中的 1~5 和图 2b 中的 6~9, 而河流直线段河谷边坡的冲刷面积则相对较小。由于河流弯曲段受到浅滩的影响, 水流的主流向发生变化, 不再按照原来的直路方向前进, 同时在水动力和势能的影响下, 在河流弯曲处产生环流作用, 造成该河段处的凸岸淤积, 在衔接处发生凹岸冲刷现象。在图 2b 中 6 号河段的后半段以及 10 号河段的后半段中可以看到, 虽然这两段都处于河流的直线段, 但冲刷面积也处于波峰的位置。因此, 河谷边坡的冲刷面积除了与河流的形态相关外, 还要考虑河段所在区域的地形地质等其他因素的影响。

2.2 地形要素影响分析

坡度对河流的发育有重要的影响作用^[20], 在一定程度上决定了泄流水体对下游河谷边坡冲刷的程



注: 绿色标记的数字 1~10 为选取的典型波峰所对应的河段; 蓝色区域为对应河段的河流面域, 橙色区域为冲刷面积。

图 2 河流两岸冲刷面积变化分布:

(a) 河流左岸; (b) 河流右岸

Fig. 2 Distribution of scouring area on both sides of river centerline:

(a) left bank of the river; (b) right bank of the river

度。本研究所用 DEM 数据分辨率为 30 m。利用 ArcGIS 对 DEM 数据进行坡度的计算,再通过区域分析等工具,提取每个面积分析单元所对应的坡度均值,得到用于进行坡度与冲刷面积相关性分析的数据。

由图 3 可知,坡度和面积两个变量不具备线性相关关系,但是数据在坡度 20°~40°的范围内有明显的聚集,在这个范围内面积集中分布在 5000 m² 以下;而在坡度 0°~20°和大于 40°的范围内,数据分布相对分散。

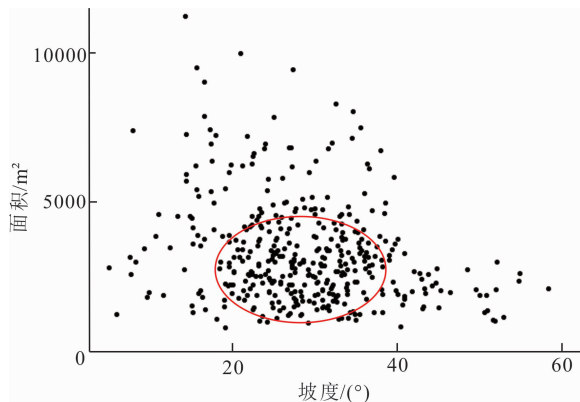


图 3 统计单元坡度散点图
Fig.3 Scatter plot of slope of statistical units

初步分析发现冲刷面积与坡度的关系在一定程度上符合幂律分布 (Power-law Distributions) 的特征^[21],因此利用 R 语言进行幂律分布的验证。利用一元线性回归模型和最小二乘法,可得 $\ln y$ 对 $\ln x$ 的经验回归直线方程,从而得到 y 与 x 之间的幂律关系式。

假设变量 x 服从参数为 α 的幂律分布,则其概率密度函数可以表示为:

$$f(x) = c s^{-\alpha-1}, x \rightarrow \infty \tag{5}$$

其互补累积分布函数可以表示为:

$$P(X \geq x) = c x^{-\alpha}, x \rightarrow \infty \tag{6}$$

从表 3 的参数估计中可以看出, $a = 7669.231$, $b = 0.275$,标准误差为 0.019,说明在 95% 的置信区间下,此估计值拟合程度较高。

为了研究不同范围的坡度对冲刷面积影响程度的差异,我们把研究区的坡度范围按照每 5°为一个区间进行划分,统计每个坡度区间内的坡度栅格数量及其所覆盖的面积,并分别计算每个区间内坡度单元数量和面积分别占总坡度栅格数量和总面积的比值,再对两者求比值,得到坡度与冲刷面积的相关性指数,见图 4。比值越大,表示该坡度区间内冲刷面积越大,即正相关性越强。

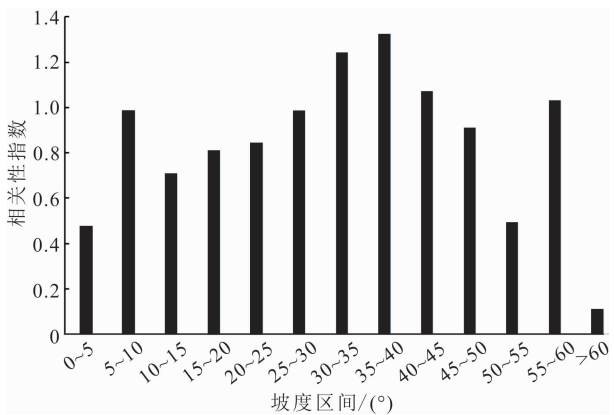


图 4 坡度与冲刷面积的相关性指数
Fig.4 Correlation index of slope and scouring area

图 4 显示,坡度与面积的相关性指数在整体上呈正态分布的趋势。在坡度值为 35°之前,冲刷面积与坡度呈正相关;在坡度值大于 40°时呈负相关。在坡度为 35°~40°的区域内,冲刷面积最大。已有研究表明,在坡度 30°~40°范围内,自然条件下滑坡所处的坡体临空面的黏性力很小,斜坡受重力影

表 3 幂律分布参数估计表

Tab.3 Parameter estimation of Power Law Distribution

方法	参数	估计	标准误差	95% 置信区间		95% 修正范围	
				下限	上限	下限	上限
渐进	a	7669.231	1736.305	4255.729	11 082.733		
	b	0.275	0.070	0.138	0.412		
重复取样	a	7669.231	2065.643	3444.516	11 893.946	5076.956	15 042.995
	b	0.275	0.072	0.129	0.421	0.156	0.485

响较大,滑坡发生的可能性最大,这个范围内的坡度被称为滑坡易发坡度^[22]。因此,在工程建设中应尽量避免这个坡度的区域,避免堰塞湖泄流灾害导致河流两岸滑坡潜在发生区域内二次灾害的发生。

图 4 中 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 和 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 区间内冲刷面积出现了与规律相反的结果,经过对此坡度区域河流河段所在位置的地貌和岩性等比较后发现,此坡度区域的河流大多分布在河流转弯处的外侧,受到堰塞湖泄流水的冲刷力度较大,且该区域的岩石类型多为侏罗纪二长花岗岩,风化时间长,表层土质较为松软。因此,在这个区域出现异常值是多种环境因素共同作用的结果。

2.3 地质岩性的影响分析

河流流经区域不同的岩性特征也会对冲刷作用表现出不同的响应特征。本研究用地质岩性数据精度为 1:50 万。在此精度下,研究区共覆盖三种类型的岩石,分别为大理岩、侏罗纪二长花岗岩和三叠纪二长花岗岩(研究区部分河段地质岩性实地调查结果见附录 3)。针对上述数据,在 R 语言中以冲刷面积为响应变量,地质岩性类型为预测变量,利用 ANOVA 函数进行单因素方差分析。

根据图 5 和图 6 的结果以及表 4 中的数据可以看出,地质岩性对冲刷面积有一定的影响,但冲刷面积的差异在统计上并不显著。地质岩性作为河流发育过程中的一个重要影响因素,对河流形态的变化

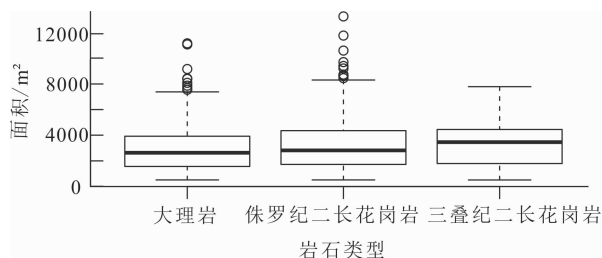


图 5 岩性与冲刷面积相关性箱图

Fig. 5 Box plot of correlation between scouring area and lithology

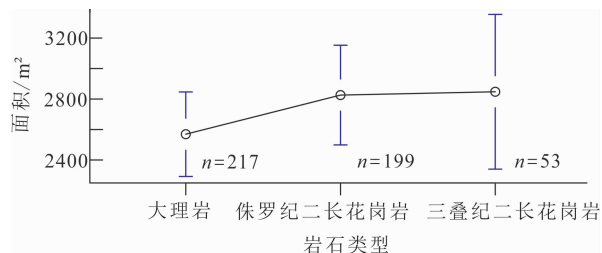


图 6 95% CI 的均值图

Fig. 6 Mean plot with 95% CI

起着至关重要的作用。因此,在堰塞湖泄流对下游河谷边坡产生冲刷作用的过程中,岩性因素也对冲刷效果造成了不同程度的制约。

表 4 单因素方差分析结果

Tab. 4 One-way ANOVA results

	平方和	df	平均值平方	F	显著性
群组之间	7975620.646	2	3987810.323	0.849	0.428
群组内	2187920877.291	466	4695109.179		
总计	2195896497.937	468			

从图 7 可以看出,两种花岗岩影响下的冲刷面积显著高于大理岩影响下的冲刷面积,这说明从总体上来看,花岗岩相比于大理岩更容易受到冲刷作用的影响,也从另一方面说明研究区大理岩所分布的区域较两种花岗岩分布区域更为坚固和稳定。就两种类型的花岗岩冲刷面积均值比较来看,三叠纪二长花岗岩略高于侏罗纪二长花岗岩。因此,在工程建设的选址和选线中,对于滑坡灾害发生较为频繁的区域而言,重要设施的布点和建设应该尽量避免此种岩性分布广泛的区域,从而可以在一定程度上避免由于突发大型水文事件造成的负面影响。

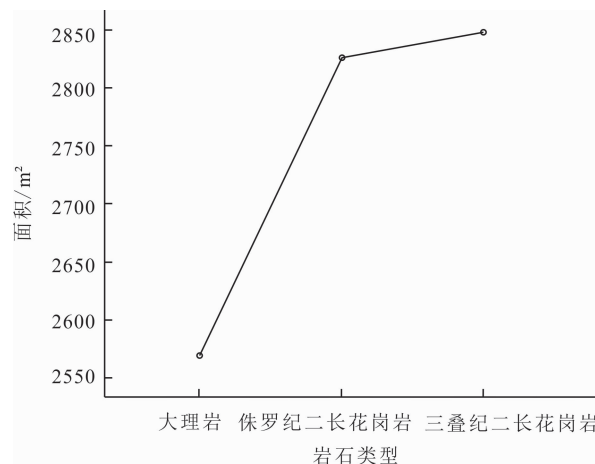


图 7 不同岩性影响下的平均冲刷面积

Fig. 7 Average scouring area under the influence of different types of lithology

2.4 地貌要素影响分析

地形地貌是河流发育的场所,对河流形态的变化有着重要影响。本研究用地貌数据为 1:100 万地貌类型空间分布栅格数据,此数据将地貌类型分

为四个大类,分别是小起伏山脉、中起伏山脉、大起伏山脉和极大起伏山脉,不同起伏度下还有更为精细的10个类别的划分。本研究所选河段共跨越3种起伏度下共20个小类的地貌单元类型。针对上述数据,在R语言中以冲刷面积为响应变量,地貌类型为预测变量,进行单因素方差分析,结果如图8所示。

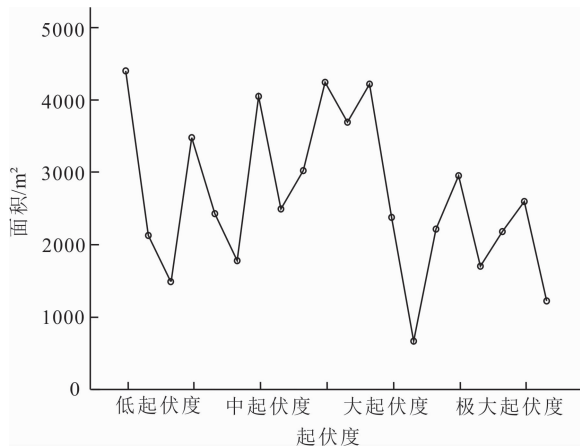


图8 不同地貌类型影响下的平均冲刷面积
Fig.8 Average scouring area affected by different landform types

从图8中可以看出,随着地貌起伏度的增加,冲刷面积在整体上呈现下降的趋势,并且在同一起伏度下,随着山脉高度的增加,冲刷面积也大体上呈现下降的趋势。整体上数据波动剧烈,组间差异显著,但趋势性效果并不明显,因此对于地貌类型与冲刷面积的关系还需要进行数据的验证,如表5所示。

表5 单因素方差分析结果

Tab.5 One-way ANOVA results					
	平方和	df	平均值平方	F	显著性
群组之间	470 236 902.588	19	24 749 310.663	6.366	0.000
群组内	1 994 271 461.211	513	3 887 468.735		
总计	2 464 508 363.798	532			

表5表明不同的地貌类型对冲刷面积有一定的影响,即:在当前试验条件下,低起伏山脉、中起伏山

脉、大起伏山脉与极大起伏山脉对河谷边坡冲刷的面积影响作用有一定的差异。但由于数据的局限性,在目前试验条件下,研究本身引起的误差与不同地貌作用条件下冲刷面积的影响相当,因此从统计分析角度来看,目前所用数据条件下不能有效识别不同地貌类型对于冲刷面积的影响。

3 讨论

3.1 不同岩性的影响效果存在差异的内在原因分析

从2.3中可知,在花岗岩分布广泛的区域,河谷边坡受到上游堰塞湖泄流带来的冲刷作用要明显大于大理岩分布的区域,并且三叠纪二长花岗岩对于冲刷面积的影响高于侏罗纪二长花岗岩。为了探究不同岩性对冲刷效果的影响存在差异的原因,通过查阅资料^[23],对三种岩石的矿物成分、化学成分和物理性质等方面进行了分析比较,结果见表6。

由表6可知,大理岩与花岗岩相比,硬度、抗压强度较低。出露地表岩石的稳定性除了与岩石本身的物理化学性质有关外,环境因素也对岩石的稳定性有着极其重要的影响。自然状态下,岩石受环境作用最明显的表现就是风化^[24]。按照两种花岗岩的成岩年代来看,两种花岗岩分别成岩于距今约1亿5000万年和2亿年的侏罗纪与三叠纪,暴露在地表中经过长时间的日光照射、雨水降雪的渗透、以及风力、生物活动等的影响,逐渐在风化作用下生成了次生粘土矿物,稳定性大大下降。此外,由于三叠纪二长花岗岩暴露地表的时间比侏罗纪二长花岗岩长约5000万年,其风化后形成的次生粘土矿物质地会更加松软,因此在泄流水体的冲刷下,其所影响的河谷边坡被冲刷的面积大于侏罗纪二长花岗岩分布的区域。

因此,虽然从两种岩石的矿物成分和化学成分上来看,花岗岩都要比大理岩坚固和稳定很多,但是由于两种花岗岩暴露地表的时间长,经过上亿年漫长的风化作用,岩石内部产生了很大的物理和化学

表6 三种岩石性质比较

岩石名称	类型	主要成分	莫氏硬度	抗压强度	易风化性
大理岩	变质岩	CaCO ₃ >50%	3~5	49.0~117.7 MPa	易风化
侏罗纪二长花岗岩	火成岩	65% < SiO ₂ < 75%	6~7	100~300 MPa	不易风化
三叠纪二长花岗岩	火成岩	65% < SiO ₂ < 75%	6~7	100~300 MPa	不易风化

变化,从而在原地形成了松散的堆积物。因此,在工程建设的勘测和选址中,应对河谷边坡两岸地质岩性做深度的考察,除了岩石本身的物理和化学特性外,更要考虑环境影响下的风化程度对岩石稳定性的影响,从而避免在大型水文事件发生后可能带来的安全隐患。

3.2 统计方式和数据精度对结果的影响

3.2.1 河谷边坡冲刷面积统计方式

选择合适的统计方式对结果的分析有着重要的影响。在本研究中,综合考虑研究区的地形地貌特征,使得统计数据在尽可能多的情况下可以覆盖至少一个地形地貌单元,通过河流中心线,将整个研究区的河段按照 100 m 等间隔分段,河流中心线左右两侧分别划分为 517 个统计单元,然后分别计算每个统计单元内的冲刷面积、坡度、地貌类型和地质岩性等进行相关性分析。结果表明,按照 100 m 为间隔划分统计单元,所得到的数据样本具有一定的连续性和代表性,在冲刷面积与地形、地貌和地质因素的相关性分析中起到了重要作用,不仅简化了分析过程,也可以反映出冲刷面积随着河流流向的变化规律,使得结论具有较高的可信度和说服力。

除了本研究中的等间距统计单元划分方法外,还可以按照河流的走势、形态、弯曲度等多种方式进行统计单元的划分。根据研究的侧重点不同,后续可以进行多种统计单元划分方式的对比,来满足不同的研究需要。

3.2.2 相关分析数据精度

研究用地貌数据为全国 1:100 万地貌类型空间分布栅格数据,主要以形态特征作为划分标准,将全国划分为平原、台地、丘陵、小起伏山脉、中起伏山脉、大起伏山脉和极大起伏山脉共 7 大类,再结合海拔高度将每个大类划分为 3~4 个不同等级的小类。因此,本研所得到的关于地貌类型与冲刷面积的关系主要是与地形起伏和高程为侧重点。研究已经表明地貌类型对于冲刷面积有一定的影响,但由于本研所用数据精度的限制,暂无法给出两者之间更加精确的相关关系。此外,地貌类型的划分有很多其他方式,后续可以从提高数据精度和转换数据类型两方面进行更深入的研究。

本研究中所用的地质岩性数据为 1:50 万的全国地质岩性空间分布数据,共包括 8000 多个地质岩性单元,全国范围内共分为 41 个类别的岩石类型。

研究河段共覆盖三种岩性,分别是大理岩、侏罗纪二长花岗岩和三叠纪二长花岗岩。由于所用岩性数据精度的限制,无法冲刷面积与岩石类型之间更为精细的相关关系,在后续的研究中可以通过提高数据的精度进行更加深入的研究。

4 结论

本文通过对研究河段 20 年遥感影像数据的解译和处理,量化了堰塞湖泄流后上游水体对下游河谷边坡的冲刷作用,在综合考虑河谷边坡形态发育影响因素的基础上,从地形、地貌和地质三个方面分析了造成冲刷面积有差异的影响因素,得到如下结论:

(1)突发的大型水文事件对河谷边坡造成的影响巨大,且河谷边坡受泄流水体冲刷后的冲刷面积与河流形态和走势具有相关性,冲刷面积的峰值大都分布在河流的转弯处。

(2)地形对冲刷面积的影响作用显著。整体上坡度与冲刷面积呈幂律分布的关系,冲刷面积较大的区域坡度大部分分布在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间;在坡度值为 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间,两者的相关性最强。在坡度值小于 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 时,坡度与冲刷面积呈正相关关系;在坡度大于 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 时,两者呈负相关。在灾害防护和工程建设中应着重考虑此坡度的区域,避免造成不必要的经济损失。

(3)地质岩性对河谷边坡的稳定性有着重要的影响,其影响的强弱不仅与岩石类型本身矿物成分、化学成分和结构构造等方面有关,与岩石成岩年代和环境因素影响下的风化程度密不可分。该区域花岗岩风化时间长,其表层稳定性弱于大理岩,表现为在研究区两种花岗岩广泛分布的区域,河谷边坡受到上游水体冲刷后的冲刷面积更大。因此,在大型工程设施的选址勘测中,地质岩性是重要的参考因素。

(4)地形要素对于冲刷面积有一定的影响,但受本研究中数据类型和精度的限制,对地形的影响程度尚无法得到更加精确的结论,在后续研究中可以通过多种地貌数据类型的对比和提高数据的精度等方式来进行更深入的探讨。

致谢:本文附录中的照片来自兰恒星老师课题组成员野外考察的现场拍摄结果,在此表示由衷的感谢。

参考文献 (References)

- [1] 王治华. 金沙江下游的滑坡和泥石流[J]. 地理学报, 1999, **54**(2): 142 – 149. [WANG Zhihua. Landslides and debris flows in the lower reach of the Jinsha River, China [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, **54**(2): 142 – 149] DOI: 10.11821/xb199902006
- [2] 付建康, 罗刚, 胡卸文. 滑坡堰塞坝越顶溢流破坏的物理模型实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, **48**(1): 203 – 212. [FU Jiankang, LUO Gang, HU Xiewen. Physical model experiment on overtopping overflow failure of landslide dam [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, **48**(1): 203 – 212] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20170151
- [3] HU Kaiheng, ZHANG Xiaopeng, YOU Yong, et al. Landslides and dammed lakes triggered by the 2017 Ms6.9 Milin earthquake in the Tsangpo gorge [J]. Landslides, 2019, **16**(5): 993 – 1001. DOI: 10.1007/s10346-019-01168-w
- [4] CIAMPALINI A, RASPINI F, FRODELLA W, et al. The effectiveness of high-resolution LiDAR data combined with PSInSAR data in landslide study [J]. Landslides, 2016, **13**(2): 399 – 410. DOI: 10.1007/s10346-015-0663-5
- [5] PHAM B T, BUI D T, PRAKASH I, et al. Hybrid integration of multilayer perceptron neural networks and machine learning ensembles for landslide susceptibility assessment at Himalayan area (India) using GIS [J]. Catena, 2017, **149**(9): 52 – 63. DOI: 10.1016/j.catena.2016.09.007
- [6] 伍保祥, 沈军辉, 刘维国, 等. 金沙江上游藏曲口滑坡成因机制及稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, **19**(1): 12 – 15. [WU Baoxiang, SHEN Junhui, LIU Weiguo, et al. Analysis of origin and the stability evaluation of the Zangqokou landslide of Jinshajiang [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2008, **19**(1): 12 – 15] DOI: 10.3969/j.issn.1006-4362.2008.01.003
- [7] 王光谦, 王永强, 刘磊, 等. 堰塞坝及其溃决模拟研究评述[J]. 人民黄河, 2015, **37**(9): 1 – 7. [WANG Guangqian, WANG Yongqiang, LIU Lei, et al. Reviewed on barrier dam and simulation on dam breach [J]. Yellow River, 2015, **37**(9): 1 – 7] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2015.09.001
- [8] 周兴波, 杜效鹤, 姚虞. 金沙江白格堰塞湖溃坝洪水分析[J]. 水力发电, 2019, **45**(3): 8 – 12 + 32. [ZHOU Xingbo, DU Xiaohu, YAO Yu. Research and analysis on Baige landslide dam break flood in Jinsha River [J]. Water Power, 2019, **45**(3): 8 – 12 + 32] DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2019.03.003
- [9] WOOLDERINK H A G, KASSE C, GROOTEMAN L P A, et al. Interplay between climatic, tectonic and anthropogenic forcing in the lower Rhine Graben, the Roer River [J]. Geomorphology, 2019, **344**(1): 25 – 45. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.07.009
- [10] SHUAI Pin, CHEN Xingyuan, SONG Xuehang, et al. Dam operations and subsurface hydrogeology control dynamics of hydrologic exchange flows in a regulated river reach [J]. Water Resources Research, 2019, **55**(4): 2593 – 2612. DOI: 10.1029/2018WR024193
- [11] 陈昆仑, 王旭, 李丹, 等. 1990 ~ 2010 年广州城市河流水体形态演化研究[J]. 地理科学, 2013, **33**(2): 223 – 230. [CHEN Kunlun, WANG Xu, LI Dan, et al. The morphological evolution of river and water body in urban area of Guangzhou city in 1990 – 2010 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, **33**(2): 223 – 230] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2013.02.001
- [12] 刘飞, 张小峰, 邓安军, 等. 入湖河流三角洲形成发展规律[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, **24**(5): 943 – 954. [LIU Fei, ZHANG Xiaofeng, DENG Anjun, et al. Formation and development law of rivers into the lake delta [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, **24**(5): 943 – 954] DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2016.05.008
- [13] 张康, 王兆印, 韩鲁杰, 等. 来沙条件对河床结构及推移质运动的影响过程[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, **52**(6): 725 – 729. [ZHANG Kang, WANG Zhaoyin, HAN Lujie, et al. Influence of supply sediment to streambed structures and bed load motion [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2012, **52**(6): 725 – 729] DOI: 10.16511/j.cnki.qhdx.2012.06.007
- [14] 邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. 工程科学与技术, 2019, **51**(1): 9 – 16. [DENG Jianhui, GAO Yunjian, YU Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China [J]. Advanced Engineering Science, 2019, **51**(1): 9 – 16] DOI: 10.15961/j.jsuese.201801438
- [15] MCFEETERS S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, **17**(7): 1425 – 1432. DOI: 10.1080/01431169608948714
- [16] 曹荣龙, 李存军, 刘良云, 等. 基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测[J]. 测绘科学, 2008, **33**(2): 158 – 160. [CAO Ronglong, LI Cunjun, LIU Liangyun, et al. Extracting Miyun reservoir's water area and monitoring its change based on a revised normalized different water index [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, **33**(2): 158 – 160] DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2008.02.054
- [17] 戴金辉. 单因素方差分析中异方差的检验与修正[J]. 统计与决策, 2017(8): 23 – 26. [DAI Jinhui. Test and correction of heteroscedasticity in the single-factor variance analysis [J]. Statistics & Decision, 2017(8): 23 – 26] DOI: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2017.08.005
- [18] 殷传印, 朱斌, 司雯雯. 赵各庄矿地下水位时间序列数字滤波分析[J]. 山东国土资源, 2016, **32**(2): 60 – 64. [YIN Chuanyin, ZHU Bin, SI Wenwen. Digital filter analysis of time series of groundwater level in Zhaogezhuang coalmine [J]. Shandong Land and Resources, 2016, **32**(2): 60 – 64] DOI: 10.3969/j.issn.1672-6979.2016.02.012
- [19] 王旭, 赵冲. 井中地震数据中值滤波方法研究[J]. 云南化工, 2019, **46**(9): 77 – 79. [WANG Xu, ZHAO Chong. Research on

- median filter in borehole seismic data processing [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, **46**(9): 77–79] DOI: 10.3969/j.issn.1004–275X.2019.09.030
- [20] 张会平, 张培震, 吴庆龙, 等. 循化—贵德地区黄河水系河流纵剖面形态特征及其构造意义[J]. 第四纪研究, 2008, **28**(2): 299–309. [ZHANG Huiping, ZHANG Peizhen, WU Qinglong, et al. Characteristics of the Huanghe River longitudinal profiles around Xunhua-Guide area (NE Tibet) and their tectonic significance [J]. Quaternary Sciences, 2008, **28**(2): 299–309] DOI: 10.3321/j.issn:1001–7410.2008.02.012
- [21] GOURIET K, CORDIER P, GAREL F, et al. Dislocation dynamics modelling of the power-law breakdown in olivine single crystals: Toward a unified creep law for the upper mantle [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, **15**(506): 282–291. DOI: 10.1016/j.epsl.2018.10.049
- [22] 侯德波, 宁飞, 尹飞, 等. 坡度与滑坡发育规模、广度及深度相关性探讨[J]. 云南地质, 2013, **32**(2): 238–240. [HOU Debo, NING Fei, YIN Fei, et al. A probe into the correlation between slope gradient and slide scale, width, depth [J]. Yunnan Geology, 2013, **32**(2): 238–240] DOI: 10.3969/j.issn.1004–1885.2013.02.032
- [23] KUSHNIR A R L, HEAP M J, BAUD P, et al. Characterizing the physical properties of rocks from the Paleozoic to Permo-Triassic transition in the Upper Rhine Graben [J]. Geothermal Energy, 2018, **6**: 16. DOI: 10.1186/s40517–018–0103–6
- [24] 秦建华, 杜谷, 冉敬. 青藏高原东部金沙江流域盆地陆地风化特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, **30**(3): 18–23. [QIN Jianhua, DU Gu, RAN Jing. Continental weathering features in the Jinsha River drainage basin in the eastern part of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, **30**(3): 18–23] DOI: 10.3969/j.issn.1009–3850.2010.03.003

Analysis of the Effects of Dammed Lake Outburst Floods on Geomorphology of River Basin: A Case Study of the Valley Slope Erosion within 50 km Downstream of the Baige Landslide, Tibet, China

LIU Qing^{1,2}, WANG Wei^{1,2*}, GAO Xing^{1,2}, LAN Hengxing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Dammed lake outburst floods cause serious erosion to riverbanks downstream, posing great threats to the safety of local communities and infrastructure in the lower reaches. In order to evaluate the effects of dammed lake outburst floods on geomorphology of river basin, a representative segment of river valley in the upper reaches of the Jinsha River was targeted in this study within a range of 50 km downstream of Baige landslide, Jiangda county, Tibetan Autonomous Region, China, which occurred on October and November of 2018 with serious economic losses. It quantitatively examined the scouring actions to basin shapes incurred by lake water gushing from the breached dam based on extraction technology of remote sensing information, GIS technology and spatial analysis method. The influence of different geo-environmental factors on the scouring effects for Baige landslide was comprehensively analyzed from the three aspects of topography, geomorphology and geology, as well as it considering the evolving history of fluvial landform. The results show that: (1) Fluvial erosion quite occurred at places with large curved reaches. (2) The distribution of slope areas and fluvial areas obeyed power-law distribution, and in a slope range of $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ the scouring action of a flash flood was the strongest. (3) Geological lithology had a significant impact on scouring area. Due to weathering effect, scouring took place at places with granite riverbed in river channel generally larger than that with marble riverbed. (4) Limited to the scale and accuracy of current research, only geomorphic elements appeared to have a certain correlation with fluvial area as results of dammed lake outburst floods, which is worthy of further study. The results of this study provide reference for the prevention of landslide disasters and the site selection and construction of large-scale projects in this area.

Key words: Dammed lake outburst flood; valley slope; correlation analysis; Jinsha River; Baige landslide

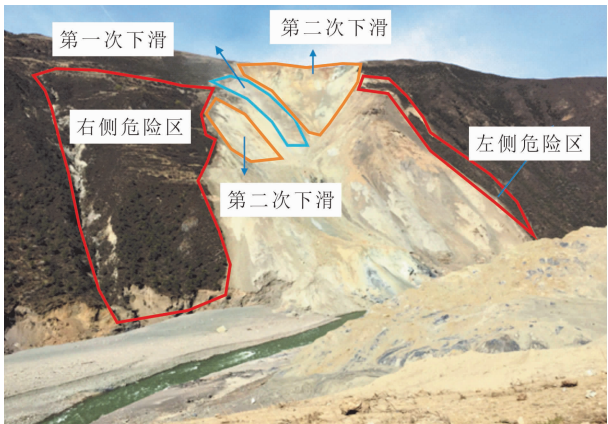
附 录

附录 1 实地考察照片



图片说明:2019 年 4 月 7 日拍摄于金沙江白格滑坡堰塞湖处。白格滑坡共发生两次,2018 年 10 月 10 日发生第一次滑动,堵塞了金沙江而形成了堰塞湖;10 月 13 日滑坡坝被冲开,堰塞湖水位持续下降,溃坝隐患解除。然而,在 11 月 3 日,滑坡后缘再次发生滑动,新的滑坡体堵塞原来的堰塞坝泄水通道。照片所示为尚未完全泄流的堰塞湖。

附图 1 部分泄流的堰塞湖
Appendix-fig. 1 Partial discharge dammed lake



图片说明:2019 年 4 月 7 日拍摄于白格滑坡坡体位置处。照片所示为白格两次滑坡中滑坡体的位置。滑坡后缘发育两组断裂,构成楔形滑坡失稳。部分滑坡物质下滑过程中偏离主滑坡路径,崩飞后越过山脊飞入滑坡左侧,增加了影响区域。

附图 2 白格两次滑坡的位置
Appendix-fig. 2 Location of Baige landslide



图片说明:2019 年 4 月 7 日拍摄于白格滑坡下游两岸。泄流水体的冲刷作用先将水流冲刷到金沙江左岸,然后冲刷到左岸上的水流回江面,使得左岸该处植被向金沙江方向倾覆。

附图 3 岸坡植被向金沙江方向倾覆
Appendix-fig. 3 Vegetation on the bank overturns towards the Jinsha River

附录 2 对冲刷面积的解释

本文所量化的冲刷面积指的是堰塞湖泄流之后,泄流水体在短时间内对下游河谷边坡产生的冲刷作用最大的面积,如附图 4 所示。



附图 4 河流沿岸的冲刷面积
Appendix-fig. 4 Fluvial area along the river
(2019 年 4 月 7 日拍摄于白格滑坡下游河段河流沿岸)

堰塞湖泄洪后,下游坡体受到洪水的冲刷,在有些坡度较大的区域或不稳定的区域会形成小范围内的滑坡,如附图 5 所示(位于白格滑坡下游 1 km 左右)。



附图 5 堰塞湖下游区域受洪水冲刷后形成滑坡
Appendix-fig. 5 A landslide after being scoured by the flood
(2019 年 4 月 7 日拍摄于白格堰塞湖下游约 1 km 处)

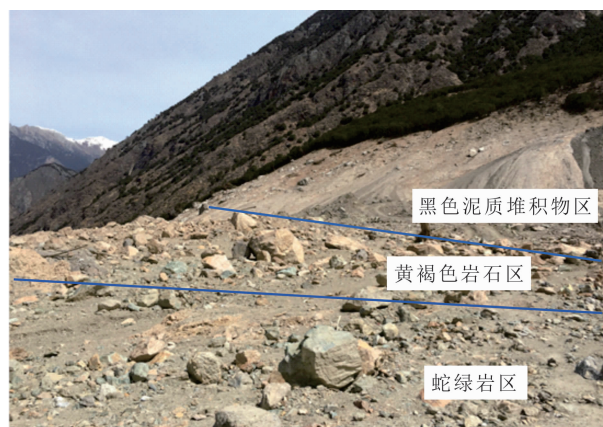
由于上游堰塞水体的冲刷会在较短的时间内对下游河谷两岸的区域产生严重的影响,因此本文通过光学遥感影像的解译所量化的正是在这个泄流过程中洪水对两岸冲刷所能达到的最大范围,以此来对堰塞湖灾害的预防提供参考。

而坡体形变指的是在一个时间范围内滑坡对下游河谷两岸的坡体产生的垂直或水平方向的位移,大多通过时间序列 InSAR 分析来得到在滑坡事件发生前后坡体的形变量和形变速率。在探究堰塞湖泄流对下游河谷边坡的影响时,除了利用光学遥感影像从短时间范围内的冲刷面积来考虑外,也可以利用雷达遥感影像对坡体形变进行量化。如利用 Sentinel-1A 雷达影像通过 SBAS-InSAR 时序分析方法进行白格滑坡发生前后一定时间内下游河谷两岸坡体的形变量的研究。

附录 3 白格滑坡区域地质岩性概况

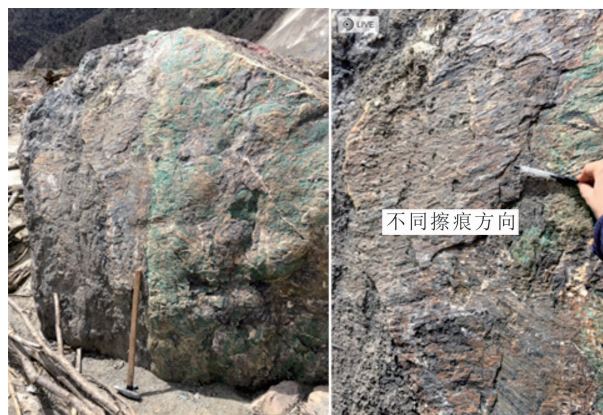
白格滑坡堰塞堆积体上的物质可大致分为四个区域,由滑坡体近侧向河流对岸的远侧大致可分为黑色岩石区、蛇绿岩区、黄褐色岩石区、黑色泥质堆

积物区(附图 6)。



附图 6 堰塞湖下游两岸部分岩石类型
Appendix-fig. 6 Rock types on both sides of the dammed lake
(2019 年 4 月 7 日拍摄于白格堰塞湖下游约 2 km 处河段沿岸)

黑色泥质堆积物区的成因可能有两种,一种是该物质最初分布在滑坡顶部,风化严重,滑坡发生后冲到对岸顶部;第二种是该物质滑坡前分布在坡体底部,滑坡发生后被滑坡物质推到河流对岸最远端。黄褐色岩石区是由一种变质岩构成,岩性未知。蛇绿岩区的蛇绿岩大小不一,擦痕非常明显,表面反光发亮。黑色岩石区疑似由片岩构成,夹石英岩,表面发现多组擦痕方向,滑坡堆积后其上覆细小物质,如附图 7 所示。初次滑动之后,堰塞坝堆积上还发现绿色变质岩。滑坡体下侧可见黄褐色与黑色边界,可能是两次下滑的分界线,该处堆积体呈现一定序列,可能与顶部岩层序列一致。



附录 - 照片 7 不同岩石及擦痕方向
Appendix-fig. 7 Different rock and scratch directions
(2019 年 4 月 7 日拍摄于白格滑坡坝堆积体中)