

三工河小流域泥石流生态—岩土工程调控措施 减缓土壤侵蚀的定量研究

吴铭洋^{1,2}, 陈宁生^{2,3}, 杨溢¹, 侯儒宁^{2,4}, 李志^{2,5}

(1. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 昆明 650093;

2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

3. 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016;

4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 西藏大学 工学院, 拉萨 850013)

[摘要] 为探讨泥石流治理措施对小流域土壤侵蚀的影响, 以天池上游三工河流域为研究对象, 在实地考察的基础上, 通过地形图叠加、遥感解译和 Google Earth Engine(GEE)云计算等手段, 实测计算了该流域 1971~2003 年、2008~2020 年两期土壤侵蚀模数, 定量评估了在该流域开展的泥石流生态—岩土工程调控措施对小流域生态和土壤侵蚀的影响。研究发现: (1) 三工河流域平均植被覆盖度经泥石流综合治理后增加 11.34%, 高植被覆盖度面积增加 16.93%, 泥石流沟道及河谷的植被覆盖度明显提升; (2) 三工河流域 1971~2003 年平均侵蚀模数为 0.34 mm/a, 较北天山山地流域同期平均侵蚀速率高出 131%, 造成该现象的原因是过度放牧、滥砍滥伐等人为因素激发山洪泥石流的爆发导致流域生态环境恶化; (3) 流域经生态—岩土工程调控后(2008~2020 年), 平均侵蚀模数降低至治理前的 15%(0.051 mm/a), 为北天山地区山地流域同期平均侵蚀模数的 34%。

[关键词] 泥石流综合治理工程; 土壤侵蚀; 植被覆盖度; 定量评估

[分类号] P642.22

[文献标志码] A

Quantitative study on the mitigation of soil erosion by comprehensive ecological and geotechnical debris flow treatment measures in small basins: A case study of the Sangong River Basin

WU Mingyang^{1,2}, CHEN Ningsheng^{2,3}, YANG Yi¹, HOU Runing^{2,4}, LI Zhi^{2,5}

[收稿日期] 2023-03-10。

[基金项目] 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0902); 国家自然科学基金联合基金项目(U20A20110); 中国科学院加德满都科教中心资助项目(131C11KYSB20200033)。

[第一作者] 吴铭洋(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 山地灾害评价与预测, E-mail: mingyangwu@stu.kust.edu.cn。

[通信作者] 陈宁生(1965—), 男, 研究员, 研究方向: 山地灾害形成机理与防治, E-mail: chennsh@imde.ac.cn。

[引用格式] 吴铭洋, 陈宁生, 杨溢, 等, 2024. 三工河小流域泥石流生态—岩土工程调控措施减缓土壤侵蚀的定量研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(1): 117-129.

Wu M Y, Chen N S, Yang Y, et al., 2024. Quantitative study on the mitigation of soil erosion by comprehensive ecological and geotechnical debris flow treatment measures in small basins: A case study of the Sangong River Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1): 117-129.

1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China;
3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810016, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
5. College of Engineering, Tibet University, Lhasa 850013, China

Abstract: In order to assess quantitatively the impact of debris flow control projects on soil erosion in small basins, this paper takes the Sangong River Basin in the upper reaches of Tianchi Lake as the research object. Based on field investigation data, a topographic map overlay, and remote sensing interpretation data, we calculate the soil erosion rate of the basin in two periods (1971~2003 and 2008~2020). We also use Google Earth Engine to compute the change of vegetation coverage in this basin over the study years, the impact of comprehensive ecological and geotechnical debris flow treatment measures carried out in this scenic spot on the soil erosion and ecology of the basin are thus uncovered. Our main results were: (1) the average vegetation cover of Sangong River Basin increased by 11.34% after the debris flow treatment, where areas with high vegetation cover increased by 16.93%, and the vegetation cover of the debris flow gullies and river valleys increased significantly. (2) The average erosion rate of Sangong River Basin from 1971 to 2003 was 0.34 mm/a, which was 131% higher than the average erosion rate of the North Tianshan Mountain Basin in the same period. This erosion rate was caused by deterioration of basin ecology due to the outbreak of flash floods and debris flows triggered by human factors such as overgrazing and indiscriminate logging. (3) After the basin was regulated by ecological and geotechnical engineering projects (2008~2020), the average erosion rate reduced to 15% (0.051 mm/a) of that before treatment, which was only 34% of the average erosion rate of the same period in the mountain basin of the North Tianshan region.

Key words: debris flow comprehensive management project; soil erosion; vegetation coverage; quantitative assessment

土壤侵蚀是一种导致土壤退化的自然现象,它不仅受降水、地形、土地利用和植被变化的影响,还会由于自然灾害和人类活动而加剧(Pimentel et al., 1995; 张兴昌等, 2000; 刘宝元等, 2018; El Assad et al., 2021; 刘颢等, 2023)。河流是土壤侵蚀产生的泥沙搬运和输送的主要载体(关雪, 2022), 河流中裹挟的泥沙会在河道内反复经历淤积、冲刷的过程(李华华等, 2023), 当河流汇入湖泊时, 若沉积作用大于构造沉降作用, 这些泥沙则沉降在湖盆内控制着湖泊的演化和消亡(魏学利等, 2018)。世界上有许多湖泊遭受上游河流流域土壤侵蚀的危害, 例如: 18 世纪, 瑞士的图恩湖受到坎德尔河改道工程的影响, 输入湖泊的泥沙量增加了一倍, 导致水下滑坡频繁发生(Wirth et al., 2011); 邛海上游流域由于土地资源的过度开发和森林覆盖率降低, 致使邛海泥沙

淤积现象严重, 导致其预期寿命从 1 200 年缩短到 540 年(Chen et al., 2015); 九寨沟自 20 世纪 80 年代以来受到泥石流等自然灾害的侵袭, 土壤侵蚀现象加剧, 损害了景区内湖泊的美学价值(崔鹏, 1991; Zheng et al., 2022)。

很多研究已经表明, 以生态功能提升为主的植被调控和工程措施是目前土壤侵蚀防治最有效的方式(史志华等, 2018; 史志华等, 2020), 土壤侵蚀量与植被覆盖度呈显著负指数关系(肖继兵等, 2017; 刘靖宇等, 2023), 在黄土高原地区, 通过修建淤地坝和梯田有效治理了流域内的土壤侵蚀(高海东等, 2012)。定量评估流域土壤侵蚀的方法主要有实地测算和土壤侵蚀模型两种(陈思旭等, 2014)。其中土壤侵蚀模型方面, 通用土壤流失方程 USLE(universal soil loss equation)及其修正后的 RUSLE(revised universal soil loss e-

quation)在全球获得了广泛的应用(Prasannakumar et al., 2012; Ganasri et al., 2016; 张超等, 2017),在中国,刘宝元等(Liu et al., 2002)提出的依据 USLE 模型修正的中国土壤流失预报方程(CLSE)应用较多。但由于这类模型使用的是基于经验的建模方法,具有明显的局限性(Alewell et al., 2019; Dinka et al., 2020),需要实测数据进行对照印证。基于实地测量的土壤侵蚀可以为制定治理土壤侵蚀的方针和政策提供合理的、具有实际价值的结果,从而实现更可持续的土地管理(Evans et al., 2010; Evans et al., 2013),但目前通过实地测量得到的泥石流治理措施的水土流失治理定量研究仍较少。

天山天池是中国著名的冰碛堰塞湖之一,它不仅是研究干旱地区高山湖泊形成与演化的重要场所,同时也是联合国教科文组织确立的博格达人与生物圈自然保护区的重要组成部分,具有重要的生态和旅游价值。该区域土壤侵蚀方面的研究主要集中于自然灾害和人类扰动造成的影响(万金泰等, 2008; 刘黎等, 2010; 全婷婷等, 2017)。20 世纪 70 年代起,频繁暴发的泥石流造成的堆积物将天池南岸向湖心推进了 216 m(Wei et al., 2012)。2005 年起,天池景区内针对这一地质灾害与生态灾害综合防治难题采取了一系列生态—岩土工程调控措施,强调了水土流失防治与民生改善、资源开发与生态保护的协调,取得了显著的成效,也为基于生态调控的泥石流治理措施改善流域水土流失的定量化研究提供了一个合适的场所。

本文通过实地测算的天池上游三工河流域侵蚀产沙量,反演该流域 1971~2003 年、2008~2020 年 2 期土壤侵蚀模数,通过时间序列上的前后对比讨论了受工程、生态相结合的泥石流治理措施所控制的侵蚀模数变化。本文的研究成果不仅为天池的自然生态保护和旅游价值提升提供科学参考,还为泥石流生态—岩土调控措施改善小流域土壤侵蚀效益的定量评估提供了见解和案例支撑。

1 研究区背景与数据来源

1.1 研究区概况

天池(43°45′—43°59′ N, 88°00′—88°20′ E)地处新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州阜康市

境内,是天山山脉最大的冰碛堰塞湖。天池地处博格达峰北坡三工河流域内,南北最长处约 3.5 km,东西最宽处约 1.5 km,湖面海拔 1 910 m,最深处达 105 m,水面面积 4.9 km²,蓄水量约为 1.6×10⁸ m³。有多条支沟汇入天池,其中以南岸的三工河上游流域面积最大,约为 104.7 km²,沟道平均纵比降 140.3‰,主沟长 22.8 km,流域最高点的海拔高度为 4 410 m,流域相对高差达到 2 500 m。该流域内孜沿毡和马路沟汇水后称三工河,三工河自南向北分别与哈拉木萨克、大冬沟、小冬沟汇水后注入天池(图 1)。

流域上游冰川地貌发育,由于冰川强烈的侵蚀切割作用,沟壑纵横、群峰林立。孜沿毡和马路沟沟谷形态呈“U”字形,沟床纵比降在 137.9‰~237.2‰之间;两沟汇口处至大冬沟口段地势有所缓和,纵比降为 134.1‰;大冬沟沟口至天池南岸地势逐渐平坦,纵比降为 40.1‰。逐级递减的沟道纵比降促进了沟谷中泥石流的运动和泥沙输移,是导致天池南岸泥沙淤积的潜在因素。

研究区地处中纬度的亚洲中心地带,远离海洋,属温带大陆性干旱气候区内的山地气候区。冬季漫长寒冷,夏季温和短促,降水充沛,气温日变化大。年平均气温 2.55℃;年平均降水量 443.9 mm,多集中在 4~9 月份。三工河年平均径流量为 1.666 m³/s,7 月份平均径流量最大,为 3.803 m³/s,2 月份平均径流量最小,为 0.711 m³/s,年平均蒸发量 1 439 mm。根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)(中华人民共和国水利部, 2008),研究区属于冻融侵蚀类型区中的北方冻融土侵蚀区。

研究区内发育有多条近东西向的断层,位于二叠系及石炭系地层中,岩性以辉长岩、辉绿岩、安山岩为主,并含有少量的玄武岩及硅质岩。第四系沉积物广泛分布于沟谷底部及两岸谷坡,主要的类型有冰碛物、冰水堆积物、坡崩积物和冲洪积物等。这些碎屑物质是由于构造作用和研究区内特定的气候环境造成的强烈冻融风化作用(何杰等, 2010),导致上游各支沟的火成岩节理和裂隙发育,又经物理风化作用形成的,为泥石流爆发和天池南岸淤积灾害提供了大量的物源(表 1)。

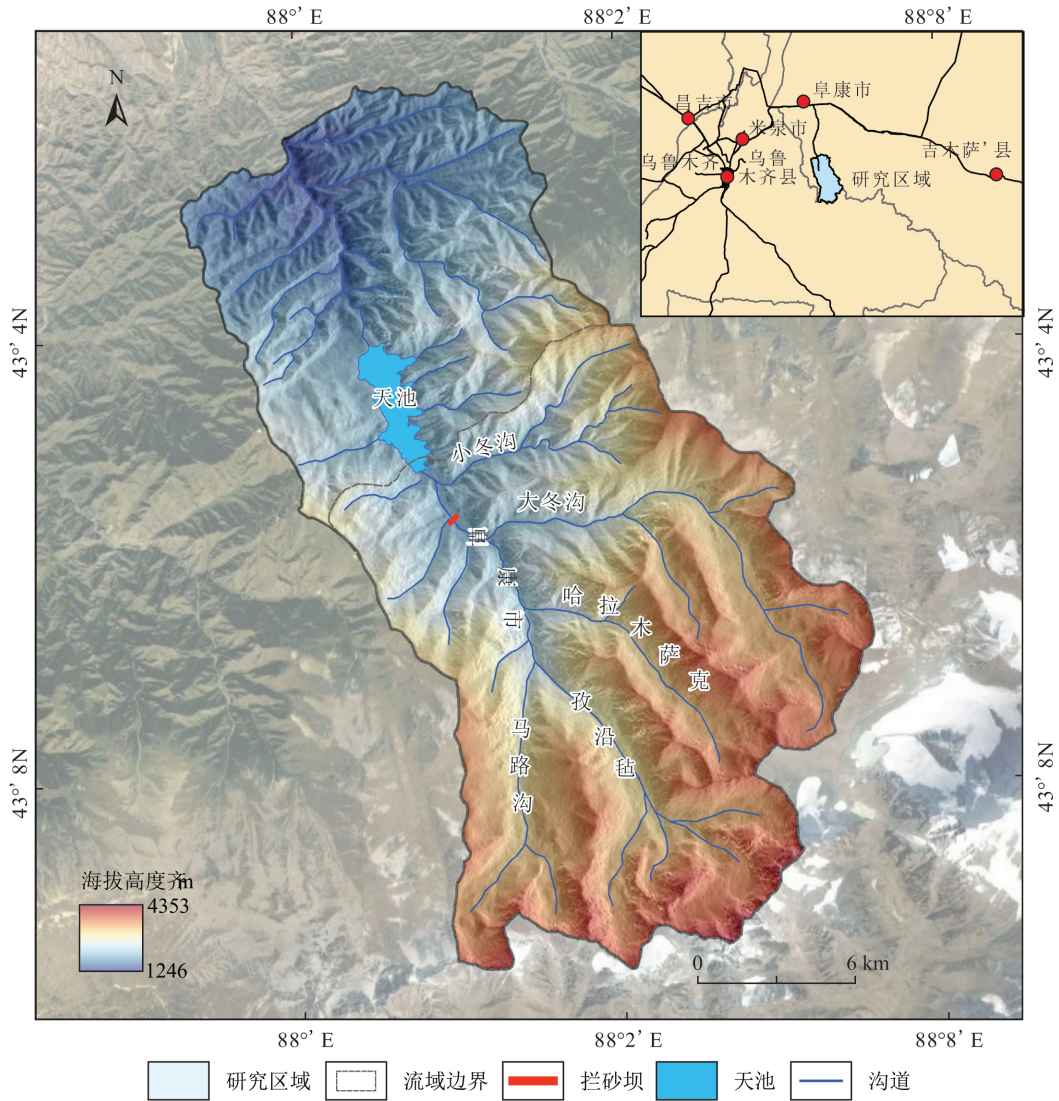


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

表 1 天池上游三工河流域各支沟特征参数

Table 1 Characteristic parameters of each gully in Sangong River Basin in the upper reaches of Tianchi Lake

沟名	马路沟	孜沿毡	哈拉木萨克 gully	大冬沟	小冬沟
流域面积/km ²	18.6	27.7	12.2	34.8	15.1
主沟长度/km	9.31	9.88	7.23	12.91	7.25
比降/‰	186.6	193.3	215.8	137.9	237.2
冰碛物体积/10 ⁴ m ³	1584.8	932.4	151.8	771.7	291.2
坡积物体积/10 ⁴ m ³			1073.3	1942.8	
物源合计体积/10 ⁴ m ³	1584.8	932.4	1225.1	2714.5	291.2

1.2 数据来源

本研究数据包括:研究区 1987~2021 年 6~9 月份植被主要生长期内的 Landsat 系列遥感影像图,来自 2021 年发布的 Landsat Collection2

Level 2 数据集,该数据集进行了更精确的正射校正,其中包含使用生态系统干扰自适应处理系统(Landsat ecosystem disturbance adaptive processing system, LEDAPS)算法生产的 Landsat

4、Landsat 5、Landsat 7 地表反射率产品(surface reflectance,SR),和使用陆地表面反射率代码(land surface reflectance code,LaSRC)生产的 Landsat 8 地表反射率产品,用于 GEE(Google Earth Engine)平台调用计算;1971 年天池南岸 1:100 000 地形图;2003 年 8 月测定的天池南岸 1:1 000 地形图;泥石流生态—岩土工程调控措施相关数据来自中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 2003 年 12 月编制的《新疆天山南部淤积天池的山洪泥石流调查研究与防治方案》和 2008 年 3 月编制的《新疆天山天池旅游景区地质灾害防治工程可行性研究报告》;2008~

2020 年天池南岸沉沙池淤积量数据为 2020 年 9 月、2022 年 7 月作者实地测量所得。

2 植被覆盖度(FVC)对泥石流生态—岩土工程调控措施的响应

2005 年起,为保护天池上游流域生态环境,治理天池泥沙淤积灾害,有关部门采取了一系列生态治理措施(表 2),如封山育林育草、人工还林还草、古榆树保护、生态围栏以及开发人工饲草料基地等生态建设,使天池上游流域 60 km² 的谷地森林得到了保护,生态移民人数达 15 000 余人,解决了过度放牧对天池南岸草场的破坏。

表 2 水土保持综合治理工程方案表
Table 2 Comprehensive water and soil conservation control project plan

项目	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	共计	
生态治理措施	退牧还林	1.0 km ²	1.0 km ²	1.0 km ²	1.0 km ²	1.4 km ²	5.4 km ²
	退牧还草	0.8 km ²	0.8 km ²	0.8 km ²	0.5 km ²	0.3 km ²	3.2 km ²
	防护林	1.0 km ²	1.0 m ²	1.0 km ²	1.0 km ²	0.6 km ²	4.6 km ²
	经济林	0.8 km ²	0.6 km ²	0.6 km ²	0.6 km ²	0.5 km ²	3.1 km ²
	封禁治理	0.6 km ²					0.6 km ²
	荒山荒坡造林	1.2 km ²					1.2 km ²
						18.1 km ²	
岩土工程措施	拦砂坝						1 座
	旧堤维护	470 m					470 m
	旧堤延长	100 m					100 m
生态移民	迁移牧民	15 000 余人					15 000 余人

本文使用 Google Earth Engine 对三工河流域 1987~2021 年中 33 期的植被覆盖度(FVC)进行了计算与对比。其中算法部分参考李红梅等(2022)的研究。植被覆盖度分级参考水利部发布的《区域水土流失动态监测技术规定(试行)》(水利部水土保持监测中心,2018)中的植被覆盖度分类分级标准,将植被覆盖度分为 5 个等级:小于 30%为低覆盖,[30%,45%)为中低覆盖,[45%,60%)为中覆盖,[60%,75%)为中高覆盖,大于等于 75%为高覆盖。

天池上游三工河流域在 2005 年采取泥石流生态—岩土工程调控措施前,山洪泥石流的暴发(表 3)导致河道内的植被覆盖度明显下降(图 2),沟道及河谷森林的植被覆盖度自 1990 年的 68.84%下降至 2005 年的 54.98%。与此同时,流域的平均植被覆盖度也呈波动减少趋势(图 3),在统计时间段内,流域平均植被覆盖度(图 4)从 1992 年的 50.94%下降至 2005 年的 39.80%。其中,中高及以上植被覆盖面积下降了 13.40%,中低及以下植被覆盖面积增加了 7.73%。

表 3 1971~2003 年规模较大洪水泥石流统计表
Table 3 Statistics of the large-scale flood and debris flow from 1971 to 2003

时间	1985 年 7 月	1987 年 7 月	1992 年	1996 年 7 月
清水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	170	166	150	226
泥石流洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	193	189	160	298
泥石流总量/10 ⁴ m ³	139	136	118	199
泥沙总量/10 ⁴ m ³	16.8	16.5	7.2	48.3

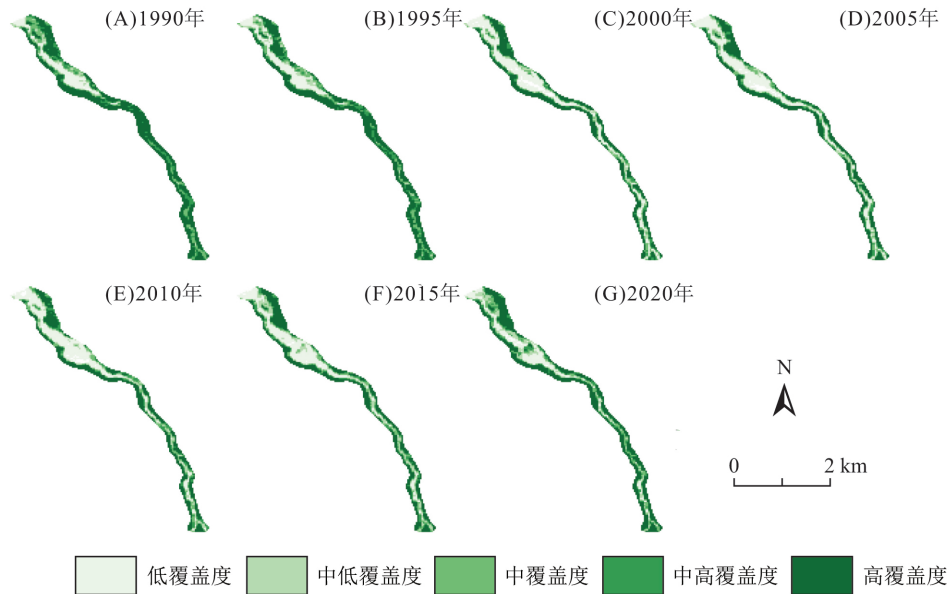


图 2 天池上游三工河流域河谷沟道植被覆盖变化图

Fig. 2 Change of forest vegetation cover in the valley of the upper reaches of Tianchi Lake

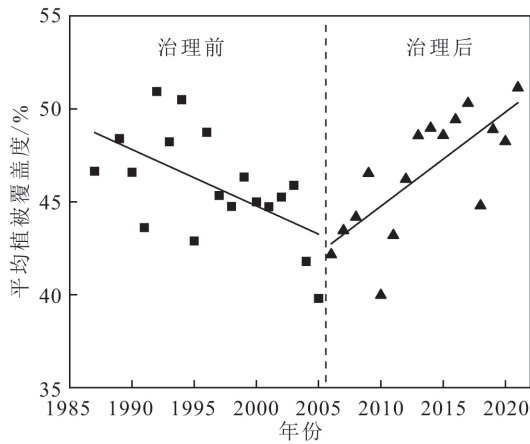


图 3 天池上游三工河流域 1987~2021 年植被覆盖度统计图

Fig. 3 Statistics of vegetation coverage in the upper reaches of Tianchi Lake from 1987 to 2021

经治理后,天池上游三工河流域生态环境整体呈向好趋势(图 3)。与 2005 年相比,2020 年沟道及河谷森林的植被覆盖度回升至 66.02%(图 2)。2021 年平均植被覆盖面积提升至 51.14%,较治理前增加了 11.34%,高植被覆盖度面积占比从 17.12%增加到 34.05%,中高以上植被覆盖度面积增加 13.19%,中低以下植被覆盖面积减少 7.57%。尤其是小冬沟和主沟(三工河)拦沙坝附近区域植被治理效果明显(图 4),河谷森林植被覆盖度已逐渐恢复到生态环境恶化前的水平。

3 流域侵蚀模数实测对比

河流出口口的泥沙沉积物记录了上游流域的侵蚀产沙特征,使用侵蚀产沙量反演上游流域现代尺度的侵蚀模数是一种被广为使用的方法(Romero-Díaz et al., 2007; Koi et al., 2008; Chen et al., 2018; 史学建等, 2019)。本文中的流域年平均侵蚀模数 $R(\text{mm/a})$ 采用下式计算:

$$R = S/A \cdot a \quad (1)$$

其中, S 表示流域总输沙量(m^3); A 表示上游集水面积(km^2); a 表示数据年限跨度。

3.1 1971~2003 年土壤侵蚀模数计算

自 20 世纪 70 年代起,天池南岸向湖心推进了 216 m,造成该现象的堆积物主要有 2 个方面的来源。一是源于山洪泥石流的侵蚀作用以及流域的自然侵蚀,1970 年以来,天池上游流域发生过多次不同程度的山洪泥石流(闫亮等, 2011),据调查走访,以 1996 年 7 月暴发的百年一遇的泥石流规模最大,其最大流量 $290 \text{ m}^3/\text{s}$,冲出固体物质达 $48.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。二是天池南岸泥石流堆积区受泥石流冲刷遭受的侵蚀,该堆积区由长年以来上游暴发的洪水泥石流冲出的固体物质堆积而成(图 5),堆积区长 2 528 m,面积 0.749 km^2 。

堆积区侵蚀总量通过地形叠加法得到的平均侵蚀厚度和面积进行计算。将 1971 年测定的天池南岸 1 : 100 000 地形图与 2003 年 8 月所测得

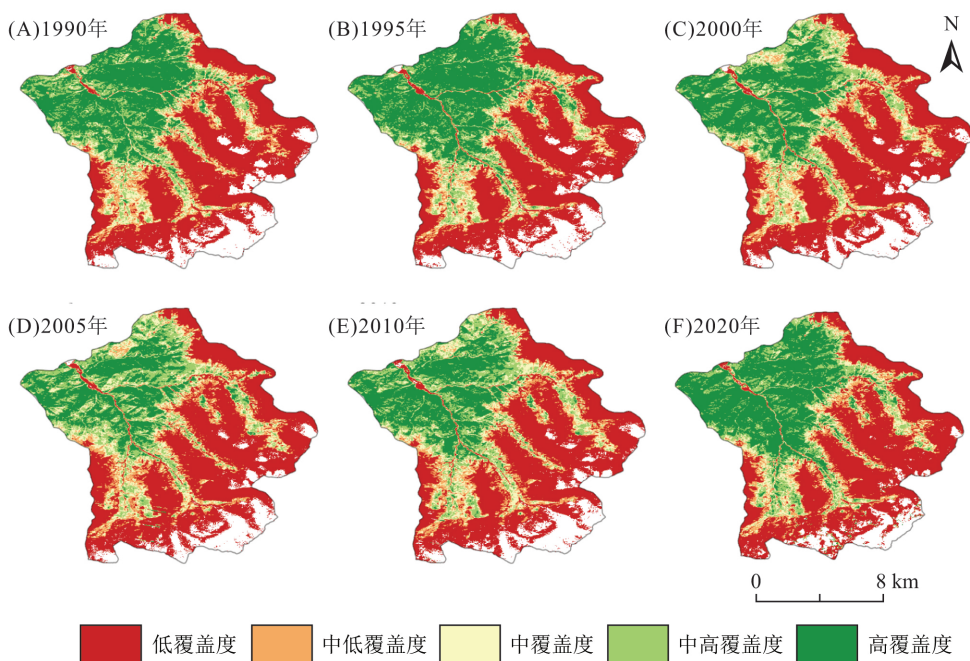


图 4 天池上游三工河流域 1990~2020 年植被覆盖度对比图

Fig. 4 Comparison of vegetation coverage in the upper reaches of Tianchi Lake from 1990 to 2020

的该地区 1 : 1 000 地形图叠加,选取 6 个海拔基准点,进一步计算 1971~2003 年各基准点的海拔高度变化,结合堆积区河道纵比降,将堆积区按地形变化划分为 4 个部分 (B_1, B_2, B_3, B_4)

(图 5),通过测量堆积区 4 个部分的平均侵蚀厚度及侵蚀面积,分别计算每部分的土壤侵蚀量(表 5)。结果表明 32 年间堆积区的土壤侵蚀总量为 $97.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

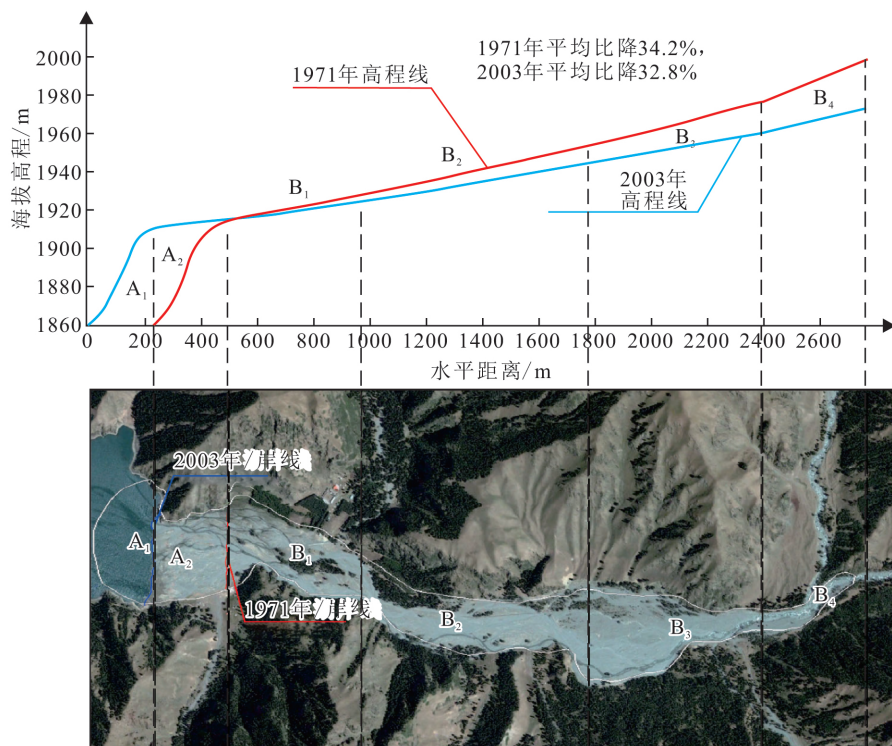


图 5 1971~2003 年天池南岸堆积区侵蚀与湖内淤积地形剖面示意图

Fig. 5 Topographic profile of erosion and siltation on the south bank of Tianchi Lake from 1971 to 2003

上游流域侵蚀总量通过计算淤积总量和堆积区侵蚀总量之差获得。通过遥感影像对比, 2003 年天池南湖岸线较 1971 年向湖心推进了 216 m。以这 2 个时间点的湖岸线为分界线, 将原 1971 年湖岸线以北的泥沙淤积区域分为 2 个部分(A₁, A₂)(图 5), 通过选择代表性的 3 个点测量 2003 年的池岸地形, 其深度及各点相应池底高程如表 4 所示, 得出湖底的地形线(图 5)。假设

表 4 2003 年天池南岸池底地形测量数据表
Table 4 Topographic survey data of the south bank of Tianchi Lake in 2003

点号	1	2	3
距池岸距离/m	93.13	200.00	232.00
深度/m	4.29	37.56	46.87
湖底高程/m	1906.21	1872.94	1863.63

1971 年天池南岸池底地形与 2003 年的地形相似, 结合 2003 年池岸地形纵比降, 推算 2 个部分的泥沙平均淤积厚度和面积, 进而分别计算每部分的泥沙淤积量(表 4)。结果表明 1971 年和 2003 年的天池南池岸线之间的泥沙淤积总量为 $184.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 2003 年池岸线以北的湖底泥沙淤积总量为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$, 即淤积总量为 $234.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 则上游流域侵蚀总量为 $136.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据 Liu et al. (2011) 在同地区乌鲁木齐河的相关研究, 该地区河流的泥沙输移主要以推移质为主, 悬移质占比很少, 所以将该值视为 32 年内天池上游流域的输沙总量, 取流域面积为 127.4 km^2 , 由式(1)计算得 1971~2003 年天池上游流域平均侵蚀模数为 0.34 mm/a , 较北天山山地流域平均侵蚀速率(Guan et al., 2022)高出 131%。

表 5 1971~2003 年天池南岸泥沙侵蚀与淤积体积计算表

Table 5 Calculation of sediment erosion and siltation volume on the south bank of Tianchi Lake from 1971 to 2003

	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
面积/m ²	69,900	55,700	85,300	201,800	96,800	44,900
平均厚度/m	7.15	33.07	0.55	1.93	3.65	4.10
体积/m ³	499,785	1,841,999	46,888	389,766	353,476	184,170

3.2 2008~2020 年土壤侵蚀模数计算

2008 年, 为治理天池泥沙淤积灾害, 天池管委会于大冬沟与三工河汇口下游约 800 m 处修建

了一座带有沉沙池的拦沙坝(图 6-A), 可以在泥石流暴发时拦蓄颗粒较大的固体物质。坝址海拔 1 954 m, 坝高 10 m, 坝顶宽 2 m, 坝轴线长 220 m,

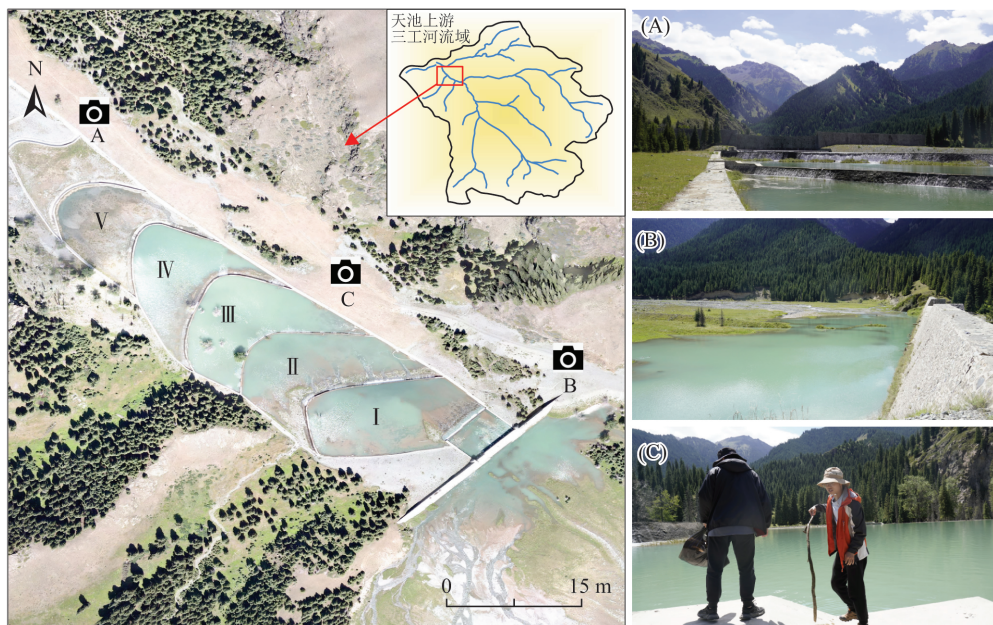


图 6 天池南岸拦沙坝与沉沙池俯视图

Fig. 6 Top view of the check dam and sedimentation basin on the south bank of Tianchi Lake

排水孔截面大小为 0.5 m×0.5 m。沉沙池为六级“梯田式”沉沙池,总长 462 m,每级落差 1~4.4 m,最大淤积量约为 104×10³ m³。同时,通过导流固岸工程使堆积区不再受到山洪冲刷侵蚀。由于三工河小流域是天池南岸最大的集水区,携带该流域内侵蚀产生的固体物质的地表径流几乎都要流经拦沙坝和沉沙池后注入天池,因此将沉沙池中淤积的泥沙体积视作研究时间段内的侵蚀总量。

通过 2020 年 9 月、2022 年 7 月实地测量(图 6-C),拦沙坝前并无明显淤积(图 6-B),六级沉沙池中的 5 级有泥沙淤积,将其按照高度从 I~V 进行编号(图 6),得到 2008~2020 年沉沙池中淤

积的泥沙总量约为 61 017.9 m³(表 6)。结合沉沙池设计资料与小冬沟口堆积物颗粒级配,沉沙池蓄满水后可沉降粒径在 0.05 mm 以上的泥沙,其质量约占泥沙总量的 92.6%,其余 7.4%粒径较小的悬移质会随水流进入下游,从而估算得该时间段内天池上游三工河流域的输沙总量约为 65 894.1 m³。取流域面积为坝控面积 107 km²,由式(1)计算得 2008~2020 年天池上游流域平均侵蚀模数为 0.051 mm/a,是北天山山地流域平均侵蚀速率的 0.34 倍。该值与前人在天池流域通过野外实验获得的 2007 年、2008 年平均侵蚀模数 0.069 mm/a 相近(王大庆等,2009),从年际变化来看具有较好的衔接性。

表 6 沉沙池淤积量
Table 6 Amount of sedimentation in the basin

沉沙池编号	面积/m ²	设计深度/m	淤积深度/m	泥沙淤积量/m ³
I	12,378	1.9	1.63	20,176.14
II	8,883	1.8	1.26	11,192.58
III	9,688	2.8	2.26	21,894.88
IV	9,958	2.1	0.50	4,979.00
V	9,251	1.9	0.30	2,775.30

4 讨论

天池上游三工河小流域 1971~2003 年平均土壤侵蚀模数较高的根本原因是 20 世纪谷地森林的滥砍滥伐、过度放牧导致的草场退化以及山洪泥石流(陈宁生等,2015)。研究区在 1972~1977 年间有过森林的滥砍滥伐,虽然在 1978 年采取了封山育林的政策后停止,但导致流域下垫面对径流洪水的调节能力减弱,之后的十余年间,由于洪水泥石流等地质灾害的作用,天池上游三工河流域 100~200 m 宽的谷地森林死亡了 60%。在天池流域,植被覆盖情况对产沙量造成的差距达到了 10 倍以上(周宏飞等,2009;王大庆等,2009),植被覆盖度的下降显著地影响着流域的土壤侵蚀模数(孙雪娇等,2021)。同时,牲畜数量的增加也导致了侵蚀和产沙量的增加(Foster et al.,1994),在 2003 年 8 月进行的统计调查中发现,当时天池景区的牲畜量已经严重超过该区域天然牧场的承载能力,其中夏牧场超载率为 47.4%,冬牧场超载率达 230%,过度放牧问题导致草场退化严重。除此之外,由于全球气候的变暖,导致上游博格达峰地区冰川的退缩(周远刚

等,2019),因此而出露的冰碛物增加了流域内的松散物源,极端天气带来的径流量增加则补充了流域的水源,使该流域更易发生规模较大的洪水泥石流灾害。

研究区 2008~2020 年侵蚀模数约为 1971~2003 年的 15%,在干旱—半干旱地区降水总体呈增多趋势(Xu et al.,2021),地形、岩性等不会在短时间内有较大改变的背景下,该侵蚀模数的降低主要归因于自 2005 年起在景区内开展的一系列地质灾害岩土工程、生态建设与生态移民措施带来的生态环境恢复。其中,拦砂坝、沉沙池和导流固岸等泥石流治理工程措施的作用是拦蓄泥沙、保护河道,为河谷森林提供稳定的生长环境,是河谷森林恢复、生态环境改善的基础之一。通过人工种植防护林、经济林不仅提高了植被覆盖度,还为后续的植被恢复提供基础(Wang et al.,2021),坝址附近区域的植被恢复成效更能说明生态修复结合工程治理措施的作用。山地森林面积的扩大可以增强流域涵养水源的能力(高新和等,2000),随着植被恢复,临界侵蚀剪应力增大,侵蚀能显著降低,侵蚀面积随植被恢复的程度呈指数递减(Shen et al.,2017)。总的来说,在泥石流生

态—岩土综合治理措施的作用下,研究区域的水土流失现象得到有效治理,伴随的泥石流灾害及天池淤埋现象也到了缓解。

5 结论

泥石流综合治理措施可以有效缓解小流域的水土流失现象已经得到广泛承认,但目前通过实地测量的方式对泥石流治理措施的水土流失治理效益定量分析和案例支持仍较少。本文以天池景区为例,基于天池上游三工河小流域的侵蚀产沙量反演该流域 1971~2003 年、2008~2020 年 2 期土壤侵蚀模数,结合研究区域的植被覆盖变化探讨泥石流生态—岩土调控措施对流域土壤侵蚀的影响。得到以下结论:

a. 天池上游三工河流域生态环境由于山洪泥石流的爆发自 20 世纪 80 年代起逐年恶化,年平均植被覆盖度从 50.94% 下降至 2005 年的 39.80%,经生态—岩土工程治理后,至 2021 年流域平均植被覆盖度增加 11.34%,高植被覆盖度面积增加 16.93%,泥石流沟道的植被覆盖度明显提升,区域生态整体向好发展。

b. 三工河流域由于河谷森林的滥砍滥伐、草场过度放牧等人为因素激发山洪泥石流爆发导致流域生态环境恶化,该流域 1971~2003 年平均侵蚀模数为 0.34 mm/a,较同地区山地流域平均侵蚀速率高出 131%。

c. 通过泥石流生态—岩土工程调控措施结合生态移民的方式对泥石流进行综合治理后(2008~2020 年),三工河流域平均侵蚀模数降低至治理前的 15%(0.051 mm/a),为同地区山地流域平均侵蚀模数的 34%。

[参 考 文 献]

陈宁生,胡桂胜,2015. 天山天池景区地质灾害防治与生态环境保护关键技术研究及应用[J]. 科技促进发展, 11(3):380—384.

Chen N S, Hu G S, 2015. Research and application on Tianshan Tianchi scenic geological disaster prevention and environment protection key technology[J]. Science & Technology for Development, 11(3):380—384. (in Chinese)

陈思旭,杨小唤,肖树林,等,2014. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. 资源科学,36(6):1288—1297.

Chen S X, Yang X H, Xiao L L, *et al.*, 2014. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE Model[J]. Resources Science, 36(6):1288—1297. (in Chinese)

崔鹏,1991. 九寨沟泥石流预测[J]. 山地研究,9(2):88—92.

Cui P, 1991. Calculation of debris flow in Jiuzhai gully[J]. Mountain Research, 9(2):88—92. (in Chinese)

高海东,李占斌,李鹏,等,2012. 梯田建设和淤地坝淤积对土壤侵蚀影响的定量分析[J]. 地理学报,67(5):599—608.

Gao H D, Li Z B, Li P, *et al.*, 2012. Influences of terrace construction and check dam silting-up on soil erosion [J]. Acta Geographica Sinica, 67(5):599—608. (in Chinese)

高新和,姜志林,张金池,等,2000. 天山山地森林调节河川径流作用的探讨[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),24(4):49—54.

Gao X H, Jiang Z L, Zhang J C, *et al.*, 2000. A study on regulating function of forest on fluvial annual runoff discharge on Tianshan Mountains[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 24(4):49—54. (in Chinese)

关雪,2022. 北天山山地流域侵蚀速率时空特征与机制研究[D]. 上海:华东师范大学档案馆.

Guan X, 2022. Spatiotemporal Characteristics of Basin-Wide Erosion Rates in the Northern Chinese Tianshan and Its Controlling Factors[D]. Shanghai: The Archive of East China Normal University. (in Chinese)

何杰,杨薇,闫亮,等,2010. 结合新疆天池泥石流防治模式的风景区生态景观修复对策研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),37(2):181—187.

He J, Yang W, Yan L, *et al.*, 2010. Study on the ecological landscape restoration for the Tianchi Lake nature reserve in Xinjiang, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 37(2):181—187. (in Chinese)

李红梅,巴贺贾依娜尔·铁木尔别克,常顺利,等,2022. 天山北坡植被覆盖近 30 年时空变化及预测分析[J]. 生态学杂志,41(12):2414—2423.

Li H M, Bahejiayinaer T, Chang S L, *et al.*, 2022. Spatial-temporal variations in the past 30 years and prediction analysis of vegetation coverage in the northern slope of Tianshan Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 41(12):2414—2423. (in Chinese)

李华华,张茂省,冯立,等,2023. 砭砂岩区水土流失机制及防治措施研究现状与展望[J]. 西北地质,56(3):109—120.

Li H H, Zhang M S, Feng L, *et al.*, 2023. Research status

- and prospect of soil and water loss mechanism and prevention measures in Pisha sandstone area [J]. *Northwestern Geology*, 56(3): 109—120. (in Chinese)
- 刘宝元, 杨扬, 陆绍娟, 2018. 几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J]. *中国水土保持科学*, 16(1): 9—16.
- Liu B Y, Yang Y, Lu S J, 2018. Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 16(1): 9—16. (in Chinese)
- 刘颢, 张茂省, 冯立, 等, 2023. 榆林黄河中游粗泥沙区生态问题与生态格局构建[J]. *西北地质*, 56(3): 58—69.
- Liu H, Zhang M S, Feng L, *et al.*, 2023. Ecological problems, systematically protection and restoration strategies of Yulin coarse sand area in the middle Yellow River[J]. *Northwestern Geology*, 56(3): 58—69. (in Chinese)
- 刘靖宇, 蒋磊, 尹立河, 等, 2023. 塔里木盆地东北缘绿洲区土壤养分特征及主控因素分析[J]. *西北地质*, 56(3): 141—152.
- Liu J Y, Jiang L, Yin L H, *et al.*, 2023. Soil nutrient characteristics and main controlling factors in the oasis zone of the northeastern margin of Tarim Basin[J]. *Northwestern Geology*, 56(3): 141—152. (in Chinese)
- 刘黎, 陈宁生, 田连权, 2010. 近 37a 新疆天山天池气候变化及其对生态环境的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 24(10): 87—91.
- Liu L, Chen N S, Tian L Q, 2010. The climate change and its influences on ecosystem environment for the last 37 years in Heavenly Pond in Tianshan of Xinjiang [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 24(10): 87—91. (in Chinese)
- 全婷婷, 陈学刚, 魏疆, 2017. 新疆天山天池景区土壤磁学特征及其环境意义[J]. *干旱区研究*, 34(6): 1286—1293.
- Quan T T, Chen X G, Wei J, 2017. Magnetic properties of topsoil and its environmental implications in the Tianshan Heaven Lake scenic spot, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 34(6): 1286—1293. (in Chinese)
- 史学建, 王玲玲, 杨吉山, 等, 2019. 基于淤地坝沉积信息的流域土壤侵蚀模数估算[J]. *人民黄河*, 41(2): 103—106.
- Shi X J, Wang L L, Yang J S, *et al.*, 2019. Calculation of soil erosion modulus based on sedimentation investigation of check dam[J]. *Yellow River*, 41(2): 103—106. (in Chinese)
- 史志华, 刘前进, 张含玉, 等, 2020. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 57(5): 1117—1127.
- Shi Z H, Liu Q J, Zhang H Y, *et al.*, 2020. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 57(5): 1117—1127. (in Chinese)
- 史志华, 王玲, 刘前进, 等, 2018. 土壤侵蚀: 从综合治理到生态调控[J]. *中国科学院院刊*, 33(2): 198—205.
- Shi Z H, Wang L, Liu Q J, *et al.*, 2018. Soil erosion: From comprehensive control to ecological regulation[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33(2): 198—205. (in Chinese)
- 水利部水土保持监测中心, 2018. 区域水土流失动态监测技术规范(试行)[S]. 北京: 水利部水土保持监测中心.
- Soil and Water Conservation Monitoring Center of Ministry of Water Resources, 2018. Technical Provisions on Dynamic Monitoring of Regional Soil and Water Erosion (Trial)[S]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. (in Chinese)
- 孙雪娇, 李吉玫, 张毓涛, 等, 2021. 天山北坡山地森林林地产流产沙特征及其影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 30(9): 1821—1830.
- Sun X J, Li J M, Zhang Y T, *et al.*, 2021. Characteristics and influence of runoff and sediment yield in mountain forest on the north slope of Tianshan Mountains [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 30(9): 1821—1830. (in Chinese)
- 万金泰, 张建国, 2008. 天山北坡三工河流域暴雨洪水及其对自然环境的影响[J]. *冰川冻土*, 30(4): 599—604.
- Wan J T, Zhang J G, 2008. Storm floods and their impacts on nature environments in Sangong River Basin on the northern slope of the Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(4): 599—604. (in Chinese)
- 王大庆, 2009. 新疆天池自然保护区产流产沙试验研究[D]. 石河子: 石河子大学档案馆.
- Wang D Q, 2009. Research on Runoff Formation and Sediment Yield in the Natural Conservation Area of Tianchi Lake in Xinjiang[D]. Shihezi: The Archive of Shihezi University. (in Chinese)
- 王大庆, 周宏飞, 马健, 等, 2009. 新疆天池自然保护区草地坡地土壤侵蚀规律研究[J]. *水土保持通报*, 29(3): 127—129.
- Wang D Q, Zhou H F, Ma J, *et al.*, 2009. Soil erosion processes on sloping grassland in Heaven Lake nature reserve of Xinjiang Wei autonomous region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 29(3): 127—

129. (in Chinese)
- 魏学利,陈宁生,2018. 官坝河泥石流发育特征及对四川邛海的泥沙淤积效应[J]. 地理学报,73(1):81-91.
- Wei X L, Chen N S, 2018. Development of debris flows in Guanba River and its effect on sediment deposition in Qionghai Lake of Sichuan[J]. Acta Geographica Sinica, 73(1):81-91. (in Chinese)
- 肖继兵,孙占祥,刘志,等,2017. 降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报,33(22):159-166.
- Xiao J B, Sun Z X, Liu Z, *et al.*, 2017. Effects of rainfall erosion factor, vegetation type and coverage on soil erosion of sloping farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 33(22): 159-166. (in Chinese)
- 闫亮,李勇,何杰,等,2011. 生态修复对策在新疆天池泥石流地质灾害防治中的应用[J]. 自然杂志,33(2):106-111.
- Yan L, Li Y, He J, *et al.*, 2011. Application of ecological restoration strategy for controlling debris flow hazards in Tianchi Lake in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Nature, 33(2):106-111. (in Chinese)
- 张超,陈国建,李春娟,等,2017. 基于 USLE 模型的重庆生态涵养发展区土壤侵蚀量估算[J]. 水土保持研究,24(3):33-38.
- Zhang C, Chen G J, Li C J, *et al.*, 2017. Estimate of soil erosion amount of the ecological conservation development area in Chongqing based on the USLE Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 24(3): 33-38. (in Chinese)
- 张兴昌,邵明安,黄占斌,等,2000. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J]. 生态学报,20(6):1038-1044.
- Zhang X C, Shao M A, Huang Z B, *et al.*, 2000. An experimental research on soil erosion and nitrogen loss under different vegetation cover[J]. Acta Ecologica Sinica, 20(6):1038-1044. (in Chinese)
- 中华人民共和国水利部,2008. 土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)[S]. 北京:中国水利水电出版社.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2008. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion (SL190-2007)[S]. Beijing: China Water & Power Press. (in Chinese)
- 周宏飞,王大庆,马健,等,2009. 天山山区草地覆被和雨强对产流和产沙的影响研究——以天山天池自然保护区为例[J]. 水土保持通报,29(5):26-29.
- Zhou H F, Wang D Q, Ma J, *et al.*, 2009. Impacts of grass coverage and rainfall intensity on runoff and sediment yield in Tianshan Mountains of China—A case study of the Tianchi natural lake reserve area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 29(5):26-29. (in Chinese)
- 周远刚,赵锐锋,张丽华,等,2019. 博格达峰地区冰川和积雪变化遥感监测及影响因素分析[J]. 干旱区地理,42(6):1395-1403.
- Zhou Y G, Zhao R F, Zhang L H, *et al.*, 2019. Remote sensing monitoring of the change of glacier and snow cover and its influencing factors in Mount Bogda[J]. Arid Land Geography, 42(6):1395-1403. (in Chinese)
- Alewell C, Borrelli P, Meusburger K, *et al.*, 2019. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling[J]. International Soil and Water Conservation Research, 7(3):203-225.
- Chen N S, Chen M L, Li J, *et al.*, 2015. Effects of human activity on erosion, sedimentation and debris flow activity—A case study of the Qionghai Lake watershed, southeastern Tibetan Plateau, China[J]. Holocene, 25(6):973-988.
- Chen N S, Li J, Liu L H, *et al.*, 2018. Post-earthquake denudation and its impacts on ancient civilizations in the Chengdu Longmenshan region, China[J]. Geomorphology, 309:51-59.
- Dinka M O, 2020. Quantification of soil erosion and sediment yield for ungauged catchment using the RUSLE model: Case study for Lake Basaka catchment in Ethiopia[J]. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 25(2):183-195.
- El Assad H, Kissi B, Hassan R, *et al.*, 2021. Numerical modeling of soil erosion with three wall laws at the soil-water interface[J]. Civil Engineering Journal, 7(9):1546-1556.
- Evans R, 2010. Runoff and soil erosion in arable Britain: Changes in perception and policy since 1945[J]. Environmental Science & Policy, 13(2):141-149.
- Evans R, 2013. Assessment and monitoring of accelerated water erosion of cultivated land—when will reality be acknowledged? [J]. Soil Use and Management, 29(1):105-118.
- Foster I, Walling D, 1994. Using reservoir deposits to reconstruct changing sediment yields and sources in the catchment of the Old Mill Reservoir, South Devon, UK, over the past 50 years[J]. Hydrological Sciences Journal, 39(4):347-368.
- Ganasri B P, Ramesh H, 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS—A case study of Nethravathi Basin[J]. Geoscience Frontiers, 7(6):953-961.
- Guan X, Ma Y, Lu H, *et al.*, 2022. Topographic and climatic controls on decadal-scale catchment-basin ero-

- sion rates in the northern Chinese Tian Shan[J]. *Catena*, 210.
- Koi T, Hotta N, Ishigaki I, *et al.*, 2008. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: The Tanzawa region, Japan [J]. *Geomorphology*, 101(4): 692–702.
- Liu B Y, Zang K L, Xie Y, 2002. An empirical soil loss equation[C]// Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China.
- Liu Y, Metivier F, Gaillardet J, *et al.*, 2011. Erosion rates deduced from seasonal mass balance along the upper Urumqi River in Tianshan[J]. *Solid Earth*, 2(2): 283–301.
- Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, *et al.*, 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits [J]. *Science*, 267(5201): 1117–1123.
- Prasannakumar V, Vijith H, Abinod S, *et al.*, 2012. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using revised universal soil loss equation (RUSLE) and geo-information technology[J]. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 209–215.
- Romero-Díaz A, Alonso-Sarriá F, Martínez-Lloris M, 2007. Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison [J]. *Catena*, 71(1): 172–178.
- Shen P, Zhang L M, Chen H X, *et al.*, 2017. Role of vegetation restoration in mitigating hillslope erosion and debris flows [J]. *Engineering Geology*, 216: 122–133.
- Wang Z, Chen Z, Yu S, *et al.*, 2021. Erosion-control mechanism of sediment check dams on the Loess Plateau [J]. *International Journal of Sediment Research*, 36(5): 668–677.
- Wei X L, Xiao F P, Chen N S, *et al.*, 2012. The preliminary study on the effect of debris flow on the Tianchi Lake [J]. *Advanced Materials Research*, 599: 757–761.
- Wirth S B, Giraidelos S, Rellstab C, *et al.*, 2011. The sedimentary response to a pioneer geo-engineering project: Tracking the Kander River deviation in the sediments of Lake Thun (Switzerland) [J]. *Sedimentology*, 58(7): 1737–1761.
- Xu L, Zheng C, Ma Y, 2021. Variations in precipitation extremes in the arid and semi-arid regions of China [J]. *International Journal of Climatology*, 41(3): 1542–1554.
- Zheng X, Tang Y, Du J, *et al.*, 2022. Enhanced soil erosion threatens fluvial tufa landscapes after an Ms 7.0 earthquake in the Jiuzhaigou world heritage site, southwestern China [J]. *Science of The Total Environment*, 848: 157632.

(责任编辑:魏 巍)

(上接第 116 页)

- 朱筱敏,刘媛,方庆,等,2012.大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式:以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J].*地学前缘*,19(1):89–99.
- Zhu X M, Liu Y, Fang Q, *et al.*, 2012. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: Example from Cretaceous Quantou formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 89–99. (in Chinese)
- 朱筱敏,潘荣,赵东娜,等,2013.湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*,37(5):7–14.
- Zhu X M, Pan R, Zhao D N, *et al.*, 2013. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 37(5): 7–14. (in Chinese)
- 朱筱敏,2008.沉积岩石学(第四版) [M].北京:石油工业出版社.
- Zhu X M, 2008. *Sedimentary Petrology (Forth Edition)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 朱兆群,林承焰,张宪国,等,2017.断陷湖盆早期浅水三角洲沉积——以高邮凹陷永安地区戴一段为例[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,47(3):659–673.
- Zhu Z Q, Lin C Y, Zhang X G, *et al.*, 2017. Shallow-water delta deposits in a rifting lacustrine basin during early stage: A case study of the first member of Dainan Formation at Yong'an area, Gaoyou sag [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(3): 659–673. (in Chinese)
- Fish H N, Kolb C R, McFarlan E J, *et al.*, 1954. Sedimentary framework of the modern Mississippi delta [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 24(2): 76–99.
- Postma G, 1990. An analysis of the variation in delta architecture [J]. *Terra Nova*, 2(2): 124–130.

(责任编辑:黄维婷)