

三江源区土壤侵蚀野外调查报告

崔志伟^{1,2}, 李鹏^{1,2}, 马建业^{1,2}, 肖列^{1,2},
李琛阳^{1,2}, 王周³, 杨秀玲⁴, 宁静⁴, 李洁^{1,2}

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2.西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 陕西 西安 710048;

3.国家林业和草原局 西北调查规划院, 西安 710041; 4.青海省林业和草原局, 青海 西宁 810008)

摘要: [目的] 现场调查三江源区土壤侵蚀状况, 旨在为该区域今后水土流失防治提供参考。[方法] 调查组在2023年7月25日至8月20日, 分3组分别前往青海省的果洛州、玉树州、海南州和黄南州, 对上述区域的林地、草地、农田、裸地、道路、河流岸坡、山区沟谷进行了调查和分析。[结果] 草地的土壤侵蚀类型最为复杂, 受到风蚀、水蚀、冻融侵蚀和重力侵蚀等多营力侵蚀的共同作用, 造成了其水土流失严重。此外, 高原鼠害对草地破坏可能是草地侵蚀发生另一重要因素; 乔木林地常在林下出现侵蚀细沟, 但是由于工程护坡的作用下, 发生侵蚀风险整体偏小; 灌木林地所在坡面的坡脚处, 受到水力侵蚀和重力侵蚀的影响较大, 侵蚀风险较大; 农田虽然分布面积较少, 但是在田埂部分发生轻度的水蚀; 对于裸地, 细沟侵蚀较为剧烈, 水土流失严重; 值得注意的是, 在道路两侧, 边坡侵蚀较为严重, 工程开挖导致草皮破坏, 在重力的作用下发生滑塌, 出现较大的裸露面, 为水蚀的发生提供了条件, 导致部分区域已经形成了较大的侵蚀沟网。[结论] 青海省三江源区域土壤侵蚀类型复杂多样, 随着人类活动的加剧, 局部区域水土流失有进一步加剧的风险, 亟需开展新时期的水土保持工作, 需要在该区域加强土壤侵蚀基础研究, 加强水土保持监测站网的布设, 智能化管理等。

关键词: 三江源区域; 土壤侵蚀; 水土保持; 土地利用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0106-12

中图分类号: S157

文献参数: 崔志伟, 李鹏, 马建业, 等. 三江源区土壤侵蚀野外调查报告[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 106-117. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.012; Cui Zhiwei, Li Peng, Ma Jianye, et al. Report on field survey of soil erosion in three-river-source region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 106-117.

Report on Field Survey of Soil Erosion in Three-River-Source Region

Cui Zhiwei^{1,2}, Li Peng^{1,2}, Ma Jianye^{1,2}, Xiao Lie^{1,2},

Li Chenyang^{1,2}, Wang Zhou³, Yang Xiuling⁴, Ning Jing⁴, Li Jie^{1,2}

(1.State Key Laboratory Base of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2.Key laboratory of National

Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3.Northwest Surveying, Planning and

Design Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an, Shaanxi 710041, China;

4.National Forestry and Grassland Administration of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: [Purpose] Field investigations were carried in the three-river-source region, to provide a reference for soil erosion prevention and control in the region. [Methods] The investigation team travelled to Guoluo, Yushu, Hainan, and Huangnan Prefectures in Qinghai Province in three separate groups from July 25 to

收稿日期: 2024-06-03

修回日期: 2024-08-29

资助项目: 国家自然科学基金清华大学联合基金项目“黄河中游水系格局与河流形态变化及水沙效应”(U2243201); 国家林业和草原局西北调查规划院科研项目“三江源地区低盖度灌木林生态服务功能调查及研究项目”(104-441123174)

第一作者: 崔志伟(1998—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 博士研究生, 研究方向为水土保持与土壤侵蚀。Email: cuizhiwei0101@163.com。

通信作者: 李鹏(1974—), 男(汉族), 山东省招远市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区水文过程与生态响应关系方面的研究。Email: lipeng74@163.com。

August 20, 2023. Woodlands, grasslands, farmlands, bare lands, roads, riverbanks, and mountain gullies in these areas were surveyed and analyzed. [Results] Grassland had the most complex type of soil erosion and was subjected to the joint action of multiple camp-force erosions such as wind erosion, water erosion, freezing and thawing erosion, and gravity erosion, resulting in serious soil erosion. In addition, grassland damage by highland rodents may be another important factor in the occurrence of grassland erosion. Forestland had erosion gullies in the standing forest; however, the overall risk of erosion was low due to engineered slope protection. The foot of the slope on which the shrub land is situated was more exposed to hydraulic and gravitational erosion and was at greater risk of erosion. The farmland was spread over a small area, with mild water erosion occurred in the field. For bare ground, fine gully erosion was more intense, and soil erosion was serious. Notably, on both sides of the road, the slopes were more severely eroded, and the excavation of the project has led to the destruction of the turf, sliding under gravity, and the emergence of larger exposed surfaces, which provide conditions for the occurrence of water erosion, leading to a larger network of erosion gullies that have already formed in some areas. [Conclusion] Soil erosion in the three-river-source region of Qinghai Province is complex and varied, with the intensification of human activities and the risk of further exacerbation of soil erosion in localized areas. There is an urgent need to conduct soil and water conservation work in the new era, and there is a need to strengthen basic research on soil erosion in the region, the deployment of the network of soil and water conservation monitoring stations, and intelligent management.

Keywords: the three-river-source region; soil erosion; soil and water conservation; land use

三江源地区位于青藏高原腹地,是澜沧江、长江和黄河的发源地,是中国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地和高寒生物种质资源宝库,也是中国乃至全球维持气候稳定的“生态源”和“气候源”^[1-3]。该区域气候寒冷,海拔高,生态环境脆弱,也是中国环境与气候变化的功能脆弱区^[4]。在气候变化和人类活动的共同影响下,该区域的生态状况持续退化,水土流失面积也明显增加,这可能对中国的生态安全、粮食安全产生一定的威胁^[5-6]。因此,为全面了解该地区的土壤侵蚀现状,开展了对三江源地区的土壤侵蚀现场调查,探寻该区域的典型土壤侵蚀特征及其问题,为当地的水土保持工作提供理论指导,同时也为生态文明建设提供决策依据。

三江源地区是中国生态系统的重要屏障,被誉为“中华水塔”^[7]。该地区总面积为 $3.57 \times 10^5 \text{ km}^2$,其下辖的长江源、黄河源和澜沧江源三个子源区的面积分别为 15.41×10^4 , 9.83×10^4 和 $3.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[8]。三江源地势呈西北高、东南低的特征,海拔高度介于 2 222—6 779 m,平均海拔高度达到 4 580 m^[9]。其独特的地形地貌特征使得该区域分布着众多的河流、湖泊、冰川、沼泽及雪山,成为中国重要的生态保护区与水源涵养地^[10]。该区域由于纬度跨度较大,区域的气候差异也较大,土壤侵蚀类型复杂多样^[11]。由于区域面积较大,加之高寒环境的局限性,对该区域的土壤侵蚀的研究主要以遥感技术和模型模拟为

主^[12-14],张卫^[15]通过使用遥感与地理信息系统技术相结合的方式,动态地分析了三江源区 2000—2004 年间的土壤侵蚀变化情况;吴万贞等^[16]根据三江源地区 1995,2000,2005 年的遥感数据进行各类型侵蚀面积的动态变化分析;曹巍等^[17]采用修正通用土壤流失方程,对三江源区 1997—2012 年的土壤侵蚀模数和土壤侵蚀量进行定量模拟;黄婷婷等^[18]利用中国土壤流失方程(CSLE)、风力侵蚀模型和冻融侵蚀强度评价模型,采用叠加分析的方法,分析了三江源国家公园土壤侵蚀状况;于文竹等^[19]通过模型模拟及核素示踪的方法,定量分析了三江源区三大侵蚀空间分布特征。从目前对三江源区的土壤侵蚀研究方法来看,针对实际情况开展实地考察和调研的研究工作较少。近年来,在全球气候变暖和越发频繁的人类活动的影响下,三江源区域土壤侵蚀和水土流失情况也有了新的变化。为了了解三江源区的土壤侵蚀现场状况,本课题组在 2023 年 7 月 25 日至 2023 年 8 月 20 日分 3 个工作小组赴青海省的玉树市、果洛州、海南州和黄南州区域,沿着前期设计的路线开展土壤侵蚀实地调查,以期摸清三江源区域侵蚀特征并发现存在的问题,为今后该区的水土流失治理及新阶段水土保持高质量发展提供实践基础。

1 调查区域概况

三江源位于中国青海省南部,位于北纬 $31^{\circ}33'$ —

36°17′, 东经 89°24′—102°15′ 之间, 是世界屋脊—青藏高原的腹地。调查区域范围包括玉树州的玉树市、杂多县、称多县、治多县、囊谦县、曲麻莱县; 果洛州玛沁县、班玛县、甘德县、达日县、久治县、玛多县; 海南州的兴海县、同德县、贵南县、共和县; 黄南州的泽库县、河南县(表 1)。调查组行车路线共约 18 500 km; 调查三江源区域面积约 $1.87 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)。

三江源境内共有大小河流 180 余条, 河流面积约 1 600 km^2 , 区内沼泽和湖泊众多, 冰川和雪山广布, 是全球海拔最高、面积最大、湿地类型最丰富的地区。该区域气候特征属于典型的高原大陆性气候, 冷热季交替, 干湿季分明、暖季水热资源丰富、降水充沛, 年均降水量 262.2~772.8 mm, 自西北向东南依次递

增。三江源地区是青藏高原的腹地和主体, 地形地貌主要以山原和高山峡谷为主, 山脉绵延、地势高耸、地形复杂, 山地区域占总面积的 70% 以上。

三江源地区植被类型有针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌丛、草甸、草原、沼泽及水生植被、垫状植被和稀疏植被 9 个植被型, 可分为 14 个群系纲级, 50 个群系。灌丛植被主要种类有山生柳 (*Salix oritrepha* Schneid.)、金露梅 (*Potentilla fruticose*)、锦鸡儿 (*Caragana sinica*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 等。草原、草甸等植被类型主要植物种类为矮生嵩草 (*Kobresia humilis*)、针茅 (*Stipa capillata*) 以及藻类、苔藓等。该区域人口稀少, 土地利用单一, 主要以高寒草甸为主, 草地面积占该区域总面积的 80% 以上。

表 1 三江源地区的基本信息

Table 1 Basic information of three-river-source region

自治州	县城	调查时间	海拔高度/m	年降雨量/mm	主要土地利用	植被类型
	玛沁县	20230727	3 200~4 200	528	草地、林地	青海云杉、祁连圆柏
	班玛县	20230808	3 900~4 200	638	草地、耕地	高山柳、金露梅、小蒿草
果洛藏族自治州	达日县	20230810	4 000~4 500	540	草地、耕地	绒毛蒿草、紫花针茅、锦鸡儿
	甘德县	20230813	3 600~5 200	550	草地、耕地	小蒿草、线叶蒿草、圆穗蓼
	久治县	20230816	3 500~5 400	764	草地、耕地	高山蒿草、矮蒿草、线叶蒿草
	玛多县	20230811	4 200~5 000	304	草地、林地	紫花针茅、矮蒿草、线叶蒿草
	共和县	20230726	2 400~5 300	364	草地、耕地	固沙草、爬松
	兴海县	20230804	2 600~5 300	353	草地、耕地	高山蒿草、芨芨草、紫花针茅
	贵南县	20230809	2 200~4 500	404	草地、耕地	青海云杉、金露梅、针茅
海南、黄南	同德县	20230812	2 700~4 600	371	草地、林地	针茅、高山蒿草、苔草
藏族自治州	泽库县	20230815	2 800~5 000	547	草地、耕地	针茅、高山柳
	河南县	20230817	3 200~4 500	600	草地、林地	黄芪、早熟禾、披碱草沙棘
	囊谦县	20230727	4 000~5 000	527	草地、耕地	高山蒿草、金露梅、川西云杉
	杂多县	20230729	4 200~5 500	524	草地、耕地	大果圆柏、高山柳、金露梅
玉树藏族自治州	玉树市	20230801	3 200~5 800	487	草地、耕地	青海蒿草、紫花针茅、糙叶苔草
	称多县	20230810	3 600~5 500	500	草地、耕地	青海蒿草、青海云杉、针茅
	曲麻莱县	20230811	4 200~5 000	385	草地、林地	铁线莲属、锦鸡儿属、金露梅属
	治多县	20230815	4 100~4 800	397	草地、林地	小蒿草、矮蒿草、绒叶蒿草

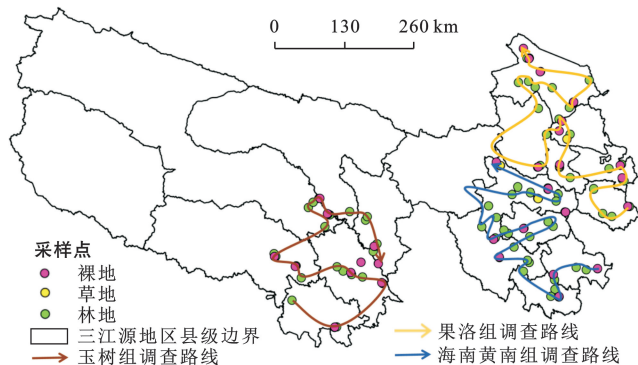


图 1 三江源地区土壤侵蚀野外调查路线

Fig.1 Route of field investigation on soil erosion in three-rivers-source region

2 调查内容与方法

2.1 调查内容和方法

(1) 土地利用调查: 对三江源区域不同土地利用进行调查(图 2), 主要根据青海三江源地区 2020 年“森林资源管理一张图”的小班数据, 在灌木林地周围设置草地和裸地的采样点, 乔木林地点位主要设置在玛沁县内, 农田的调查主要是在路途中遇到的为主。在每种土地利用类型中都设置若干采样点, 结合现有交通线路与可达性, 使采样点分布尽量均匀分布在研究区中。

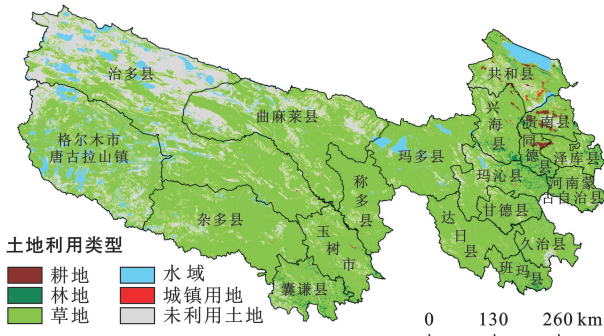


图 2 三江源区域土地利用类型

Fig.2 Land use types in three-rivers-source region

(2) 植被和土壤调查:首先使用 GIS 技术对研究区域进行空间分析,依据坡度、海拔高度、土壤类型、土地利用和交通可达性等综合因素进行样点布设,主要以县城为单位进行实地调研,植被和土壤的采样点均设置在县城区外的典型区域内,设置的采样点尽可能覆盖更广泛的地理区域和不同类型的土地利用。我们对调查区域内的主要植被类型、覆盖度、土层厚度、是否有枯枝落叶层、土壤侵蚀状况等信息进行调查,还在调查区域内的不同地类中选取了采样点。每

一个采样点随机设置 3 个灌木样方,样方的间距至少 100 m。灌木样方大小设置为 5 m×5 m(图 3),灌木样地的整体覆盖度达 55%以上,平均高度达 75 cm 左右。另外,在每个灌木样方的右上角,分别设置一个 1 m×1 m 的草本样方(图 4),草地的整体覆盖度达 90%以上,平均高度达 4 cm 左右。拍摄采样点植被景观照片,明确调查点所处地点、经度、纬度、海拔、坡度、坡向、植被类型、群落高度、郁闭度等信息,再明确调查采样点存在的主要人类活动等,调查灌木样方中植物种类,测定灌木的盖度、株(丛)数、冠幅、高度、基径等,并填写记录表。调查草本样方中植物种类,测定草本植物的盖度、株(丛)数、平均高度等。测定草本样方中地表凋落物的厚度,并收集样方中的全部地表凋落物样品,称重后取 500 g 左右代表性样品放入纸袋中带回实验室。土壤容重是用环刀进行采样,现场称重后,将样品带回,同时在每个样点内使用内径 5 cm 的土钻随机钻取 3 钻土,分别按 0—20,20—40 cm 采集土壤样品,每层混合成一个混合样。将采集的土壤样品放入塑封袋中带回实验室,测定土壤含水量,待将土壤晾干后,备后续的理化性质等相关指标的测定。



a 布设灌木样方



b 灌木样方

图 3 灌木样地布设

Fig.3 Layout of shrub sample plots



a 布设草本样方



b 草本样方

图 4 草地样地布设

Fig.4 Layout of grassland sample plots

2.2 土壤侵蚀调查

土壤侵蚀调查通常涉及对土壤侵蚀情况的系统性评估,以了解其类型、程度和影响^[20]。目前常见的一些调查方法:一是现场调查,通过观察土壤表面,记录侵蚀迹象,在不同的侵蚀区采集土壤样本,进行实验室分析以评估土壤质地、含水量和有机质等。二是通过遥感技术,利用卫星图像或航空照片进行大范围的土壤侵蚀监测,通过图像处理技术分析侵蚀情况;三是通过使用土壤侵蚀模型(如 USLE, RUSLE 等)进行模拟计算,根据模型预测侵蚀的强度和分布^[21-23]。对于了解不同的土壤侵蚀类型,我们需要了解调查区域内的土地利用类型,植被类型、植被盖度、坡度、土壤类型、土壤厚度、边坡水流痕迹和沟网、还需在研究区内采集不同土地利用的土壤样本,分析其物理和化学性质等,由于本次调查在三江源区域内,冻融侵蚀区域较大,我们现场观测了典型草地冻融区,并拍照记录点位;鼠害导致的侵蚀较为明显,我们也记录了草地鼠洞数量和直径等。本次土壤侵蚀调查主要采用现场调查的方式,调查组沿着调查路线,对途经区域的侵蚀类型和特征进行初步判定,记录产生较大面积的侵蚀区域的经纬度、海拔高度、侵蚀类型等基本信息,并通过奥维地图打点、拍照记录,以便后续工作需要。沿着调查路线对不同土地利用类型、河谷坡面、路基边坡、河岸、冰川消融等造成的侵蚀危害也进行了调查。地面调查判断的土壤侵蚀强度整体与土壤侵蚀模数图相吻合,土壤侵蚀模数图显示玉树市、囊谦县、班玛县、久治县及周边区域土壤侵蚀模数较大(图 5),水土流失较为强烈,在实际调查中也发现,土壤侵蚀模数较大的区域人口较为密集,这些区域处于高海拔,气候环境恶劣,加之当地居民草场过度放牧,大量挖掘药材,大型建设工程也相对较多,造成了这些区域的水土流失较为严重;而人类活动干扰弱的一些区域,土壤侵蚀

程度较低。例如核心保护区、野生动物主要栖息地都设有围栏。这些措施对恢复草原植被发挥了积极的作用,区域内植被覆盖度较高,水土流失程度较低。

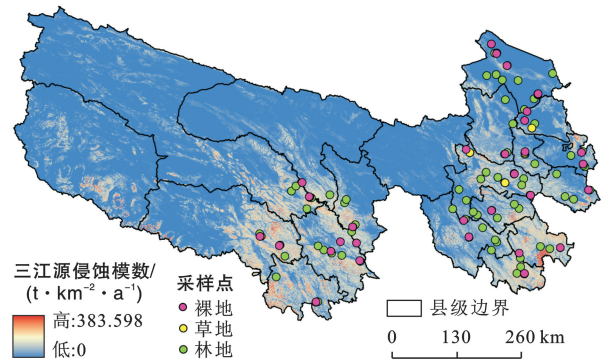


图 5 三江源区域土壤侵蚀模数分布

Fig.5 Distribution of soil erosion modulus three-river-source in region

3 土壤侵蚀特征

3.1 不同土地利用类型的土壤侵蚀特征

3.1.1 草地土壤侵蚀特征 三江源地区分布最为广泛的土地利用类型为草地,约占三江源地区总面积的 65%左右^[24]。草地植被类型主要为嵩草、针茅草、风毛菊、鹅观草、早熟禾、披碱草、芨芨草以及藻类、苔藓等。草地生态系统作为该地区的主体系统,对该区域的生态系统服务功能的支撑起到关键性的作用,因此准确了解该区域草地的土壤侵蚀特征是很重要的。在沿途海拔 2 600—4 800 m 的高山草甸,均观测到了不同程度的草地退化现象,由于当地降雨频率较高,草地区域主要是以水力侵蚀为主,在海拔约 4 500 m 以上的区域,由于温差较大,冻融侵蚀广泛分布,在三江源地区常见的冻融侵蚀 4 种形态有:寒冻风化剥蚀、热融滑塌、冻融泥流、风沙溶蚀坍塌^[25],调研组在草地的调研过程中,尤以热融滑塌最为常见(图 6)。



a 草地滑塌



b 坡脚塌陷

图 6 玉树州治多县山地坡脚草地坍塌损坏状况(马建业摄于 20230814)

Fig.6 Collapsed and damaged grassland at foot of a mountain slope at Zhiduo County, Yushu Prefecture (Photos taken by Ma Jianye on 20230814)

此外,草地区域发生的土壤侵蚀部位主要在坡脚处,在冻融侵蚀和重力侵蚀等多营力作用下,造成了大面积的滑塌,出现大面积的裸露坡面,不仅造成了严重的水土流失,也不利于当地畜牧业的发展。三江源地区地质发育时间较短,高寒气候条件下形成的土壤,更显珍贵与脆弱。该地区脱离第四纪冰期冰川作用的时间不长,区域内还分布有较多现代冰川,加之地质成土过程年轻,造成了该区域土壤的土层薄、质地粗、保水性能差,容易受侵蚀而造成水土流失^[26]。在调查点挖掘的土壤剖面发现,该区域的土层有着明显的分层现象,在距地表约 0—30 cm 的土层是高山草甸土,在地面 30 cm 以下的土层主要以碎石和砾石为主,所以该区域的表层土壤是非常宝贵的资源。但是,在水力—风力—冻融等多向复合侵蚀的作用下,草地退化速度加剧,加之人类活动的干扰,当地主要是过度放牧和采挖药材,整体对草地生态环境的破坏还是较大的。

3.1.2 林地土壤侵蚀特征 在调查路线中,乔木林地的树种主要以祁连圆柏、青海云杉和紫果云杉为主,在调查过程中发现乔木林地整体覆盖度较高,由于调查区的林地是自然混交林,地上部分有着多层次的冠层结构,地表有杂草和枯落物覆盖,地下有大量的根系固结土壤,所有乔木林地区域整体侵蚀较弱。但是在高强度、高频率的降雨条件下,在乔木林区域内,依然会形成较大的侵蚀沟(图 7),大部分林地由于处于海拔较低的区域,该区域主要以水力侵蚀为主。此外,在该区域的道路两侧,由于坡面没有很好的保护措施,水力侵蚀和重力侵蚀较为严重,发生垮塌和滑坡的地区较多,导致道路两侧的乔木倒伏很多,部分树木根系明显外露(图 7)。而林地的这些主要的侵蚀过程由于林地冠层的覆盖遮挡,很难在林地以外观察到,具有一定的隐蔽性,从而对当地土壤侵蚀程度的评估造成一定的影响。



a 林区侵蚀沟



b 林区边坡坍塌

图 7 海南州同德县乔木林地侵蚀情况(崔志伟摄于 20230819)

Fig.7 Erosion of arboreal woodland at Tongde County, Hainan Prefecture (Photos taken by Cui Zhiwei on 20230819)

灌木林主要以柳灌、金露梅、鬼箭锦鸡儿、杜鹃、红柳,沙棘为主,由于水汽较为充足,灌木区域覆盖度较好(图 8),水土流失程度整体较小。但是在降雨、

冻融和重力侵蚀的综合影响下,局部地区在缺乏防护的坡脚处,依然会出现坡面崩塌,形成面积较大的滑动面。



a 灌木区域景观



b 灌木区坡脚侵蚀

图 8 果洛州玛沁县灌木林地侵蚀情况(肖列摄于 20230811)

Fig.8 Shrubland erosion at Maqin County, Guoluo Prefecture (Photos taken by Xiao Lie on 20230811)

3.1.3 裸地土壤侵蚀特征 调研途中,裸地分布区域并不多。造成该地区土地裸露的一部分原因是工程施工过程中,人为对地表的扰动后,造成的土地裸露。另一部分原因是山体滑塌、河道两侧和草地退化等也形成了一定面积的裸地(图 9)。沙地只存在于某些特定的宽大河谷区,这些河谷区受到风力侵蚀的影响较大,地表沙化严重。由于调查时间是在汛期,

调查组发现澜沧江段和通天河段的水流含沙量较高,分布的裸地和沙地受到水力侵蚀的影响较大,并且在地表径流的作用下,向河道输送着沙物质,裸地和沙地可能是潜在的沙物质源。裸地、沙地在水力侵蚀、风力侵蚀和鼠虫的综合影响下,侵蚀状况较为严重,造成较为严重的水土流失,应是今后恢复治理的重点区域。



a 裸地土壤侵蚀状况



b 河谷区裸地

图 9 海南州贵南县裸地状况(李洁摄于 20230806)

Fig.9 Condition of bare ground at Guinan County, Hainan Prefecture (Photos taken by Li Jie on 20230806)

3.1.4 农田土壤侵蚀状况 在调查路线中,调查的农田区域较少,沿途常见的农作物主要有青稞、土豆、油菜花等。农田的地形起伏较缓,该区域的侵蚀较弱,

但也可观测到农田的田埂部分和田面分布有着轻度侵蚀(如图 10 所示)。整体而言,农田的土壤侵蚀状况较弱。



a 农田田坎侵蚀状况



b 农田景观

图 10 果洛州玛沁县农田地埂侵蚀状况(崔志伟摄于 20230810)

Fig.10 Erosion of farmland stalks at Maqin County, Guoluo Prefecture (Photos taken by Cui Zhiwei on 20230810)

3.2 不同地类的土壤侵蚀特征

3.2.1 鼠虫害侵蚀特征 草地上鼠虫害对草地的破坏,远比我们想象中严重。其中,在玉树州称多县内的一处半山坡上,有着极其密集的鼠洞(图 11),通过在该区域打了两个 25 m^2 的样方,发现样方内平均有 20 个鼠洞,最大鼠洞直径高达 40 cm,可见鼠虫害也是造成该区域草地面积退化的重要因素。鼠类会啃食植物的根、茎,其强大的食草和掘土造丘行为,一年

四季都对草场有危害,会形成大面积的“黑土滩”,给当地畜牧业的发展造成极大的威胁^[27]。另外,鼠洞口堆积的松散土壤,抗侵蚀性也非常差,这些裸土不仅加速了草地退化,还会改变地表能量和水量分配,进而影响冻土的水热特征。在冻融—水蚀、鼠虫害、放牧、开荒等作用下,致使当地草场出现了大面积的裸地,不仅造成了严重的水土流失,更不利于畜牧业的可持续发展。



a 鼠虫害造成的侵蚀



b 鼠洞集中区布设样方

图 11 玉树州称多县鼠虫害破坏草地状况(崔志伟摄于 20230810)

Fig.11 Condition of grassland damaged by rodent infestation at Jindu County, Yushu Prefecture (Photos taken by Cui Zhiwei on 20230810)

3.2.2 道路边坡侵蚀特征 在调研途中,道路边坡的侵蚀面积十分广泛。由于在修建道路过程中缺乏有效的防护措施,且设计类型较为单一,大多数道路两侧边坡都发生了较为剧烈的侵蚀状况。尤其在水蚀、冻融侵蚀、风力侵蚀和重力侵蚀等多营力作用下,路基边坡两侧会发生垮塌,并且随着水流作用向上发

展。主要原因是道路的修建过程中,道路边坡原始地貌的破坏和扰动很大,在之后的恢复过程中也较为困难和缓慢,发生降水过后,路基两侧的坡地上会形成许多沟网,再次遇到降水时,又会形成跌坎,逐渐发育成沟头(图 12),随着溯源侵蚀发生并逐渐形成更大的侵蚀沟。



a 道路边坡侵蚀状况



b 道路边坡滑塌

图 12 玉树州杂多县道路两侧边坡的侵蚀状况(肖列摄于 20230730)

Fig.12 Erosion of slopes on both sides of road at Zado County, Yushu Prefecture (Photos taken by Xiao Lie on 20230730)

3.2.3 河流岸坡侵蚀特征 河流岸坡侵蚀是河道演变的主要方式之一,存在着破坏沿岸土地、威胁沿河道路、人民生命财产安全等问题^[28]。在调查期间,降雨多发频发,正是该区域河流的汛期,在途经的通天河段、澜沧江段均发现有着较高的含沙量(图 13),这几条河流中的沙物质的源头是哪里?在经过调查后发现,这些河流堤岸基本没有防护措施,河流岸坡的侵蚀极为严重(图 13),易受到水力侵蚀和重力侵蚀影响较大,岸坡塌陷严重,形成沙物质源。其次岸坡侵蚀沟网交错纵横,在发生降水后,碎屑物质随着径

流进入河道,造成了河流有较大的泥沙含量。大量的泥沙进入江河后,可进一步造成的水质变差、抬高河床、拥堵水库大坝、破坏水生物生存环境等问题。

3.2.4 山区沟谷复合侵蚀 三江源区以山地地貌为主,山脉绵延、地势高耸、地形复杂,平均海拔 4 400 m 左右,海拔 4 000~5 800 m 的高山是保护区地貌的主要骨架^[29]。部分海拔较高的山顶,基本没有植被覆盖,半山腰处是稀疏的草地。大多数山体整体由草地和灌木覆盖,但是在水力、风力和冻融交替的作用下,在坡面经常出现较大的侵蚀沟。三江源区域由于土

层较薄,岩石层分布广泛,雨水入渗困难,降雨极易形成径流并冲刷土层,在坡面形成细沟网,细沟汇聚形

成侵蚀沟(图 14),发生多次降雨后,坡面径流极易携带大量泥沙汇入河道,造成河流含沙量增高。



a 河道两侧的碎屑物



b 河岸滑塌

图 13 玉树州曲麻莱县通天河岸两侧侵蚀状况(崔志伟摄于 20230812)

Fig.13 Erosion on both sides of banks of Tongtian River at Qumalai County, Yushu Prefecture (Photos taken by Cui Zhiwei on 20230812)



a 山坡集水区侵蚀沟



b 山坡集水区复合侵蚀

图 14 果洛州同德县山区坡面侵蚀状况(马建业摄于 20230815)

Fig.14 Erosion of mountain slopes at Tongde County, Guoluo Prefecture (Photos taken by Ma Jianye on 20230815)

3.3 土壤侵蚀治理措施状况

本次调查过程中发现三江源区域土壤侵蚀类型多样,加之其特殊的地理和气候条件,这一地区面临着严重的水土流失问题。随着国家对三江源区域保护力度的提升,该区域也实施了土壤侵蚀治理措施,常见的是植树造林、人工草地的建设、通过封禁保护现有植被;也实施了一些水土保持工程措施,如在陡坡修建梯田、沟渠建设谷坊等;此外,国家和地方政府也制定并执行相关的水土保持法规和政策,建立了生态补偿机制,鼓励保护生态环境的行为,对该区域的水土流失治理工作起到重要的作用^[30]。

在调查过程中发现,三江源区域通车里程较长,但只有部分路段的坡面两侧布设了浆砌石护坡、挡墙、边坡防护网等一些基本的工程措施(图 15),而大部分路段两侧均没有保护措施,导致了路基边坡两侧的土壤侵蚀较为严重;虽然该区域实施了一些水土保

持治理措施,但该区域面积大,土壤侵蚀类型复杂,大部分区域仍然面临着较大的水土流失风险;大部分河道的两侧均没有防护工程,在雨季降雨频发,径流沿着坡面将碎屑物质带入河流中,导致汛期河流内含沙量较高,这可能会造成下游水库淤堵、水质下降等危害;三江源核心保护区面积 $1.06 \times 10^5 \text{ km}^2$,占国家公园总面积的 55%,保护区内部由于没有人类活动的干扰,整体土壤侵蚀状况较好;而在一般控制区,由于过度放牧、滥挖滥采等人类活动的强烈干扰,造成了控制区严重的草地退化现象。

整体而言,在全球气候变化和人类不合理活动的双重影响下,该区域生态状况持续退化,土壤侵蚀发生的面积也在增大,而在三江源区域内土壤侵蚀治理措施较少,之后应在水土流失严重的区域增加相关治理措施,在生态脆弱区减少人为活动的影响,以封育治理为主,采取面上封育、点上治理的策略。

4 讨论和建议

4.1 加强水土保持研究

近年来,随着气候变化和人为活动的影响,加剧了三江源地区的土壤侵蚀,这将严重影响到该地的生态系统的平衡,也威胁着中国的水安全,生态安全。随着中国生态文明建设进程加快,当地居民对美好的生态环境需求不断增强,政府和社会公众对水土流失的危害也有了全面认识,该区域的水土流失状况也受到了更加广泛深入的关注。开展了一系列水土保持工作,在生态脆弱区采取封禁措施、限制毁林、植树造林、在部分道路两侧进行水土保持工程措施(挡墙、浆

砌石护坡、边坡防护网)等相关措施,减少了水土流失,提高地表植被覆盖率。但是,由于当地侵蚀类型多样,环境变化复杂,目前该区域基础研究相对较为薄弱,在土壤侵蚀环境演变、流域规划与管理、水土保持措施设计等方面存在不足。

因此,在现有的研究基础上,要加强水土保持理论的研究,开展水土流失区域调查,水土保持措施的综合配置,流域水土保持规划等方面的基础研究。尤其是在风—水—冻融等多向复合侵蚀强度较大的区域进行基础理论的研究,加强滑坡塌方,泥石流等重大灾害的防治措施的研究,进一步完善水土保持的系统治理技术体系。



a 金属网护坡



b 锚固护坡

图 15 果洛州玛沁县水土保持治理措施(崔志伟摄于 20230812)

Fig.15 Soil and water conservation management measures at Maqin County, Guoluo Prefecture (Photos taken by Cui Zhiwei on 20230812)

4.2 加强水土保持监测与治理

三江源地区总面积为 $3.57 \times 10^5 \text{ km}^2$,在调查过程中发现相关监测设施较少。目前主要的水文站点侧重于水位、气象要素等日常观测,无法支撑区域土壤侵蚀评价、流域水沙情势、水土保持规划等方面的研究。就不同土地利用类型状况来看,在调查中发现,草地的土壤侵蚀状况较差,可能一方面是草原植被的草群成分简单,生态系统的稳定性及抗干扰能力相对林地生态系统较为差,另一方面,在冻融侵蚀、水力侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀及其两相、三相或者四相的组合侵蚀作用下,加之过度放牧,鼠虫害,滥挖滥采等造成大片草地退化、沙化甚至消失。在实际调查过程中发现该区域调查数据较为缺乏,且土壤侵蚀监测方法较为单一。因此,首先需要综合运用无人机、卫星遥感、实地监测等手段对生态脆弱区、生产建设项目区等重点区域实现精准自动化监测,以满足科学研究及水土保持监管的需求。其次创新复合侵蚀监测技术,满足三江源地区侵蚀类型多样,侵蚀过程耦合机制复杂以及协同治理的需要。最后应建立覆盖重点区域的

水土流失自动化监测网络,构建水土流失数据库管理系统,增强“天地一体化”监管能力,推进水土保持管理信息化,提高水土保持部门的水保持监管能力。

4.3 增加水土流失治理投入

在调查中发现,随着气候变化的加剧和人为活动的干扰,致使当地的水土流失状况呈加剧趋势,但是在调查过程中发现实施的水土保持措施较少。经当地水土保持局相关工作人员介绍,目前三江源地区水土保持工作面临经费投入不足,经费来源渠道单一,运行管护困难,专业人才缺乏等诸多问题。此外,在调查中还发现三江源地区正经历经济高速发展的阶段,诸多大型项目在此开展,大规模的建设必然会对脆弱的生态环境带来越来越严重的影响。如何在生产建设项目实施过程中有效开展扰动区水土流失防治,提升水土保持的监管能力,保护生态环境,是当前水土保持相关部门必须面对和亟需解决的问题。

参考文献(References)

[1] 陈琼,吴万贞,周强,等.基于 GIS 的三江源地区土壤侵

- 蚀综合分析[J].安徽农业科学,2010,38(27):14989-14991,15039.
- Chen Qiong, Wu Wanzhen, Zhou Qiang, et al. Comprehensive analysis of soil erosion in the three rivers source area based on GIS [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010,38(27):14989-14991,15039.
- [2] 李红梅,颜亮东,温婷婷,等.三江源地区气候变化特征及其影响评估[J].高原气象,2022,41(2):306-316.
- Li Hongmei, Yan Liangdong, Wen Tingting, et al. Characteristics of climate change and its impact assessment in the three-river regions [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(2):306-316.
- [3] Chen Dongdong, Li Qi, Huo Lili, et al. Soil nutrients directly drive soil microbial biomass and carbon metabolism in the Sanjiangyuan alpine grassland [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023,23(3):3548-3560.
- [4] 陈同德,焦菊英,王颖霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.
- Chen Tongde, Jiao Juying, Wang Haolin, et al. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(3):547-564.
- [5] 吴万贞,刘峰贵,陈琼,等.三江源地区土壤侵蚀类型研究[J].地球科学与环境学报,2009,31(4):423-426.
- Wu Wanzhen, Liu Fenggui, Chen Qiong, et al. Study on soil erosion types in three-river headstream region [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(4):423-426.
- [6] 吴万贞,周强,于斌,等.三江源地区土壤侵蚀特点[J].山地学报,2009,27(6):683-687.
- Wu Wanzhen, Zhou Qiang, Yu Bin, et al. Characteristics of soil erosion in three rivers' sources natural reserve [J]. Journal of Mountain Science, 2009,27(6):683-687.
- [7] 肖海龙,周会程,姚玉娇,等.三江源地区不同退化程度高寒草原植被与土壤特征分析[J].草原与草坪,2023,43(2):85-91.
- Xiao Hailong, Zhou Huicheng, Yao Yujiao, et al. Analysis on vegetation and soil characteristics of alpine grassland with different degradation degrees in three rivers region [J]. Grassland and Turf, 2023,43(2):85-91.
- [8] 毛爱涵,李发祥,杨思源,等.三江源地区环境足迹及居民福祉的动态变化特征评价[J].生态学报,2023,43(18):7637-7650.
- Mao Aihan, Li Faxiang, Yang Siyuan, et al. Evaluation on the dynamic features of environmental footprint and human well-being in the three-river headwaters region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(18):7637-7650.
- [9] 王腾,孙博,王会军,等.三江源地区冬季降水年代际变化特征及相关物理机制[J].大气科学,2023,47(6):1863-1875.
- Wang Teng, Sun Bo, Wang Huijun, et al. Interdecadal variations of winter precipitation over the three river source region in China and associated physical mechanisms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023,47(6):1863-1875.
- [10] 杜娟,于晓晶,黎小东,等.近 60 年三江源地区降水集中度和季节性降水特征变化分析[J].高原气象,2024,43(4):826-840.
- Du Juan, Yu Xiaojing, Li Xiaodong, et al. Analysis of changes in precipitation concentration and seasonal precipitation characteristics in the three river headwaters region over the past 60 years [J]. Plateau Meteorology, 2024,43(4):826-840.
- [11] 史展,陶和平,刘淑珍,等.基于 GIS 的三江源区冻融侵蚀评价与分析[J].农业工程学报,2012,28(19):214-221,300.
- Shi Zhan, Tao Heping, Liu Shuzhen, et al. Research of freeze-thaw erosion in the three-river-source area based on GIS [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(19):214-221,300.
- [12] 李付杰,孙倩莹,王世曦等.2000—2015 年三江源区生态系统服务评估[J].环境工程技术学报,2020,10(5):786-797.
- Li Fujie, Sun Qianying, Wang Shixi et al. Valuation of ecosystem services in three-river headwaters region from 2000 to 2015 [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020,10(5):786-797.
- [13] 周琼.三江源区山坡退化草地生态恢复技术应用效果及区域适应性评价[D].兰州:兰州大学,2020.
- Evaluation of application's effect and regional adaptability of ecological restoration technology in Hillside's degraded grassland in three river source region on the Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [14] 祁永刚,张卫,张小珠.三江源区水土保持生态监测实践与探索[J].中国水土保持,2007(11):23-25.
- Qi Yonggang, Zhang Wei, Zhang Xiaozhu. Practice and exploration on soil and water conservation ecologic monitoring of three-river water source region [J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(11):23-25.
- [15] 张卫.三江源地区土壤侵蚀遥感动态监测研究[J].中国水土保持,2008(10):35-36.
- Zhang Wei. Remote sensing dynamic monitoring of soil erosion of three-river-source area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(10):35-36.
- [16] 吴万贞.三江源地区土壤侵蚀类型及其强度分析[D].西宁:青海师范大学,2010.
- Wu Wanzhen. Soil erosion types and intensity analysis on the three-river headstream region [D]. Xining, Qinghai Normal University, 2010.

- [17] 曹巍,刘璐璐,吴丹.三江源区土壤侵蚀变化及驱动因素分析[J].草业学报,2018,27(6):10-22.
Cao Wei, Liu Lulu, Wu Dan. Soil erosion changes and driving factors in the three-river headwaters region [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018,27(6):10-22.
- [18] 黄婷婷,赵辉,赵院,等.三江源国家公园土壤侵蚀及其分布特征[J].水土保持通报,2023,43(5):95-103,110.
Huang Tingting, Zhao Hui, Zhao Yuan, et al. Soil erosion and its spatial distribution characteristics in Three-River-Source National Park [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(5):95-103,110.
- [19] 于文竹.基于模型模拟及核素示踪的三江源土壤侵蚀研究[D].甘肃兰州:兰州大学,2021.
Study on soil erosion of three river source region based on erosion model and nuclide tracer technique [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2021.
- [20] 张怡捷,康宾,张秀梅,等.内蒙古十大孔兑西柳沟流域土壤侵蚀及水土保持措施调查[J].水土保持通报,2023,43(6):391-401.
Zhang Yijie, Kang Bin, Zhang Xiumei, et al. Soil erosion and soil and water conservation measures at Xiliugou Watershed in ten tributaries area in Inner Mongolia [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(6):391-401.
- [21] 刘沛好.郑州“7·20”特大暴雨大坡小流域水土流失灾害调查与评价[D].泰安:山东农业大学,2023.
Liu Peiyu. Investigation and evaluation of soil erosion in Dapo Small Watershed by the “7·20” extraordinary rainstorm disaster in Zhengzhou [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [22] 王颖霖,焦菊英,安韶山,等.新疆天山东段南北坡土壤侵蚀调查[J].水土保持通报,2019,39(4):306-313.
Wang Haolin, Jiao Juying, An Shaoshan, et al. Investigation on soil erosion in north and south slopes of Eastern Tianshan Mountain in Xinjiang Wei Autonomous Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019,39(4):306-313.
- [23] 刘淑珍,刘斌涛,苏正安,等.对我国水土流失调查评价方法若干问题的思考[J].山地学报,2014,32(2):150-153.
Liu Shuzhen, Liu Bintao, Su Zheng'an, et al. Thoughts on the methods of soil and water loss survey and evaluation in China [J]. *Mountain Research*, 2014,32(2):150-153.
- [24] 刘佩霞,王军邦,孙晓芳,等.三江源区高寒草地植被生长的气候适宜性研究[J].草地学报,2023,31(10):3145-3156.
Liu Peixia, Wang Junbang, Sun Xiaofang, et al. Climatic suitability of vegetation growth over alpine grassland in the three-river headwaters [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023,31(10):3145-3156.
- [25] 肖海龙,周会程,姚玉娇,等.三江源地区不同退化程度高寒草原植被与土壤特征分析[J].草原与草坪,2023,43(2):85-91.
Xiao Hailong, Zhou Huicheng, Yao Yujiao, et al. Analysis on vegetation and soil characteristics of alpine grassland with different degradation degrees in three rivers region [J]. *Grassland and Turf*, 2023,43(2):85-91.
- [26] 马波,张加琼,税军锋,等.西藏中东部地区土壤侵蚀野外调查报告[J].水土保持通报,2018,38(5):1-8,361.
Ma Bo, Zhang Jiaqiong, Shui Junfeng, et al. Report on field survey of soil erosion in Central and Eastern Tibet [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018,38(5):1-8,361.
- [27] 王德利,李心诚,潘多峰,等.青藏高原草地鼠害的生态释义及控制[J].西南民族大学学报(自然科学版),2016,42(3):237-245.
Wang Deli, Li Xincheng, Pan Duofeng, et al. The ecological significance and controlling of rodent outbreaks in the Qinghai-Tibetan grasslands [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2016,42(3):237-245.
- [28] 陈同德,朱梦阳,焦菊英,等.巴基斯坦波特瓦尔高原土壤侵蚀调查报告[J].水土保持通报,2019,39(3):297-306,316-317.
Chen Tongde, Zhu Mengyang, Jiao Juying, et al. Investigation on soil erosion in Pothohar Plateau area of Pakistan [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019,39(3):297-306,316-317.
- [29] 张晓莹,何毅,赵蕾.2000—2020年我国五大国家公园植被覆盖时空变化特征[J].自然保护地,2023,3(3):11-27.
Zhang Xiaoying, He Yi, Zhao Lei. The spatial-temporal variation characteristics of vegetation coverage in five national parks from 2000 to 2020 [J]. *Natural Protected Areas*, 2023,3(3):11-27.
- [30] 王清韵,周丁扬,安萍莉,等.自然保护地政策对区域生态环境质量的影响:以三江源地区为例[J].应用生态学报,2023,34(5):1349-1359.
Wang Qingyun, Zhou Dingyang, An Pingli, et al. Impacts of nature reserve policy on regional ecological environment quality: A case study of Sanjiangyuan region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023,34(5):1349-1359.