水保监测与应用技术

塔吉克斯坦典型区土壤侵蚀抽样调查

史海静[1,2], 马 波[1,2], 朱兆龙[1,2], 黄懿梅[3],
温仲明[4], 郭明航[1,2], 张宇飞[1,2], Ing. Oqil Rasulov[5],
Jurakhonzoda Rauf[5], Fayzmamad Davlatbekov[1,2], 刘宝元[6], 安韶山[1,2]

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 5.塔吉克斯坦技术大学 生命安全与生态学系, 杜尚别 734042; 6.北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875)

摘 要: [目的]开展塔吉克斯坦典型区域土壤侵蚀抽样调查与定量评估,揭示不同自然地理单元和土地利用类型下的土壤侵蚀特征、影响因素及水土保持措施现状,为全球土壤侵蚀制图项目试点国家的基础数据积累与方法验证提供支撑。[方法]在塔吉克斯坦中西部和西北部典型山地-山前平原区沿主要河谷和交通干线布设26个调查单元(14个小流域,12个矩形区),通过野外调查、遥感影像解译,获取土地利用、水土保持措施及侵蚀形态信息,并采用中国土壤流失方程(CSLE)定量评估调查区土壤侵蚀速率。[结果]塔吉克斯坦调查区土壤侵蚀空间分异显著,主要强侵蚀区分布于山地峡谷、山前丘陵及河谷过渡带,极强烈和剧烈侵蚀面积占调查总面积的60.2%。不同土地利用类型中,林地侵蚀总体以轻度-中度侵蚀为主,草地多表现为强烈-极强烈侵蚀,建设用地侵蚀等级分异较大,中度和强烈侵蚀较为常见,局部可达极强烈侵蚀,以裸露地表、砾石坡、岩质裸露区及工程扰动裸露面为主的其他土地,多表现为极强烈-剧烈侵蚀,是调查区泥沙输出的重要来源。26个调查单元土壤侵蚀速率均值为11 989.08 t/(km^2·a)。调查区水土保持措施较少,主要为梯田、简易排水沟和局部护坡。[结论]塔吉克斯坦典型单元土壤侵蚀受自然条件与人为扰动共同控制,其中强地形切割,坡面汇流集中,过度放牧,道路工程扰动及治理投入不足是侵蚀增强的重要原因。后续应加强土壤侵蚀基础调查、长期监测与机理研究,分区分类开展综合治理,以提升土壤侵蚀防治的针对性和持续性。

关键词: 土壤侵蚀; 土地利用; 水土保持; 中国土壤流失方程(CSLE); 抽样调查; 塔吉克斯坦

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0089-12 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 史海静, 马波, 朱兆龙, 等.塔吉克斯坦典型区土壤侵蚀抽样调查[J].水土保持通报,2026,46(5):89-100. Shi Haijing, Ma Bo, Zhu Zhaolong, et al. Sampling survey of soil erosion in typical areas of Tajikistan [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):89-100.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.032 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.032**

Sampling survey of soil erosion in typical areas of Tajikistan

Shi Haijing[1,2], Ma Bo[1,2], Zhu Zhaolong[1,2], Huang Yimei[3],
Wen Zhongming[4], Guo Minghang[1,2], Zhang Yufei[1,2], Ing. Oqil Rasulov[5],
Jurakhonzoda Rauf[5], Fayzmamad Davlatbekov[1,2], Liu Baoyuan[6], An Shaoshan[1,2]

(1.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3.*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 4.*College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 5.*Department of Life Safety and Ecology, Tajik Technical*

收稿日期:2026-04-01 **修回日期:**2026-04-29 **采用日期:**2026-04-30

资助项目:陕西省重点研发计划项目"塔吉克斯坦土壤侵蚀定量评价及碳汇型水土流失防控策略"(2025GH-YBXM-060); 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室双一流创新团队项目(Z2010025001-CXTC2515); 国家科技基础条件平台建设项目(2005DKA32300)

第一作者:史海静(1983—),女(汉族),陕西省扶风县人,博士,副研究员,主要从事数字水土保持与大数据分析,生态异质性对生态过程与格局影响等研究。Email:shihaijingcn@nwafu.edu.cn。

通信作者:安韶山(1971—),男(汉族),宁夏平罗县人,博士,研究员,主要从事土壤生态学、水土保持效益评价等研究。Email:shan@ms.iswc.ac.cn。

University, *Dushanbe* 734042, *Tajikistan*; 6.*Faculty of Geographical Science*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*)

Abstract: [Objective] A sampling survey and quantitative assessment of soil erosion in typical regions of Tajikistan were conducted, and soil erosion characteristics, influencing factors, and the status of soil and water conservation measures under different physiographic units and land use types were revealed, in order to provide basic data and methodological validation for pilot countries in the global soil erosion mapping project. [Methods] A total of 26 survey units (14 small watersheds and 12 rectangular plots) were established along major river valleys and transportation corridors in typical mountain-piedmont plain regions of central-western and northwestern Tajikistan. Information on land use, soil and water conservation measures, and erosion morphology was obtained through field investigation and remote sensing image interpretation. The Chinese soil loss equation (CSLE) was then used to quantitatively assess soil erosion rates in the surveyed areas. [Results] Soil erosion in the surveyed areas of Tajikistan showed pronounced spatial differentiation. High-intensity erosion zones were mainly distributed in mountain gorges, piedmont hilly areas, and river-valley transition zones, with very severe and severe erosion levels accounting for 60.2% of the total surveyed area. Among different land use types, forestland was generally dominated by slight to moderate erosion, whereas grassland was mainly characterized by severe to very severe erosion. Construction land showed large differences in erosion intensity levels, with moderate and severe erosion levels being relatively common and localized areas reaching very severe erosion level. Other land, mainly consisting of exposed ground, gravel slopes, rocky outcrops, and engineering-disturbed bare surfaces, was mostly characterized by very severe to extreme erosion level and served as an important source of sediment yield in the surveyed areas. The average soil erosion rate of the 26 survey units was 11 989.08 t/(km^2·a). Soil and water conservation measures were relatively limited in the surveyed areas and mainly included terraces, simple drainage ditches, and localized slope protection. [Conclusion] Soil erosion in typical units of Tajikistan is jointly controlled by natural conditions and human disturbances. Strong topographic dissection, concentrated slope runoff, overgrazing, road engineering disturbance, and insufficient investment in soil erosion control are the major factors intensifying soil erosion. Future efforts should strengthen basic soil erosion surveys, long-term monitoring and mechanistic studies, and implement integrated control measures according to regional conditions and land use types to improve the targeting and sustainability of soil erosion prevention and control.

Keywords: **soil erosion**; **land use**; **soil and water conservation**; **Chinese soil loss equation (CSLE)**; **sampling survey**; **Tajikistan**

土壤侵蚀是全球性的环境问题,对农业生产、生态安全和社会经济的可持续发展造成了严重威胁。侵蚀过程不仅导致土地退化、土壤肥力下降和生态系统退化,还会引发河流泥沙淤积,水资源污染等次生环境问题[1]。近年来,全球气候变化与人类活动强度叠加,使半干旱半湿润区和山地丘陵区成为土壤侵蚀的高风险区[2]。

塔吉克斯坦地处中亚东南部,国土90%以上为山地,气候干旱少雨且降水分布不均,农业高度依赖冰川融水和灌溉系统[3-4]。长期以来,坡耕地开垦、超载放牧及不合理灌溉等人类活动,加剧了水蚀、风蚀及次生盐渍化的发生。已有研究[5]表明,塔吉克斯坦约97%的耕地存在不同程度的退化,部分地区盐渍化面积超过耕地总量的15%,同时草地生态系统广泛面临超载放牧压力,局部地区牧场退化严重,水土流失已成为制约农业发展和生态安全的重要因素。此外,塔吉克斯坦还是全球土壤侵蚀制图项目(global soil erosion mapping)的重要试点国家之一,具有典型的山地-河谷复合地貌,显著的土地利用差异和多类型侵蚀过程,是开展全球尺度侵蚀制图方法检验、区域参数优化及典型区调查验证的理想研究区。因此,对塔吉克斯坦土壤侵蚀开展系统调查,不仅具有服务本国水土保持规划和生态治理的现实意义,也具有为中亚山地国家及全球侵蚀制图研究提供参考的科学价值。

近年来,已有学者利用遥感、GIS模型及实地监测手段对塔吉克斯坦部分地区的土壤侵蚀进行了研究,但相关成果仍主要集中于坡耕地模拟或灌溉区退化评估,缺乏典型区域的系统调查和综合分析[6-8]。尤其是在地形复杂的山地环境下,不同自然带和土地利用方式下的侵蚀特征、驱动机制及其防治需求仍不够清晰[9]。因此,有必要开展基于实地调查与多源数据融合的系统研究,深入分析塔吉克斯坦的土壤侵蚀现状、空间分异特征及成因机理。这不仅有

助于加深对塔吉克斯坦水土流失空间异质性的认识,也为科学实施水土保持措施和推动区域生态可持续发展提供重要的理论支撑与实践参考。

1　调查区域概况

塔吉克斯坦位于中亚东南部,地理位置为北纬36°40′—41°05′,东经67°31′—75°14′,东邻中国,南接阿富汗,西与乌兹别克斯坦接壤,北与吉尔吉斯斯坦相邻,总面积约1.43×10^5 km^2。全国地势总体呈东高西低,平均海拔超过3 000 m,东部的帕米尔高原被誉为“世界屋脊”的重要组成部分,西部则为锡尔河和阿姆河河谷盆地,是主要农业分布区。全国超过90%的国土为山地和丘陵,地形起伏大,坡度陡峭,极易诱发水土流失[10]。塔吉克斯坦属典型大陆性气候,干旱少雨,年温差大,季节变化显著,降水时空分布极不均匀。西部盆地年降水量不足200 mm,而高山迎风坡可超过1 500 mm,冰川与积雪是重要水源补给,全境冰川面积约占国土面积的5%～6%,对锡尔河和阿姆河流量具有决定性作用[11]。然而,过去几十年中冰川退缩显著,径流量呈下降趋势,对农业生产和水资源安全构成严峻挑战。

塔吉克斯坦土壤类型随海拔表现出明显的垂直分异,低地为灰棕漠土和盐土,高山则主要分布草甸土和冻土。全国可耕地面积约8 600 km^2,占国土总面积的6%左右,其中大部分依赖灌溉,主要种植小麦和棉花;然而,灌溉系统老化、水渠渗漏和管理不足导致水资源利用效率低下,水资源利用率不足50%[12]。草地和牧场覆盖广泛,是畜牧业的重要基础,但长期超载放牧造成严重退化。森林覆盖率不足3%,且分布破碎,过度砍伐进一步加剧了坡面水土流失。不同自然带的侵蚀特征差异明显,低地灌溉区以盐渍化和灌溉侵蚀为主,高山草甸区则普遍存在风蚀和冻融侵蚀,局部地区因强烈侵蚀作用甚至形成典型的沟壑化地貌[13]。2025年,全国人口约1 049万,其中农村人口占多数。农业是国民经济的重要支柱,贡献约1/4的GDP,吸纳近1/2劳动力,但人均耕地不足0.001 km^2,粮食安全高度依赖灌溉农业[3]。脆弱的自然环境与单一的经济结构,使得水土流失对国家粮食生产和生态安全构成双重压力。

2　调查内容与方法

本次调查的主要目的是系统掌握塔吉克斯坦典型农牧交错区和山地农区的土壤侵蚀现状,调查方法包括野外线路调查,抽样单元土壤侵蚀因子遥感解译,土壤侵蚀强度模型计算等。

2.1　调查路线与抽样调查单元设计

本次调查是在前期遥感解译和资料收集的基础上,综合考虑地貌格局、土地利用方式和交通条件,在塔吉克斯坦西部山地-山前平原带布设调查单元,调查单元空间分布如图1所示。重点调查区域以人口和耕地集中的河谷及山前区,沿主要河谷和交通干线自南向北、由西向东依次开展,优先选择坡耕地集中、侵蚀现象典型、对粮食生产和居民聚落安全影响突出的区域,最终划定26个面积在0.69～2.53 km^{2}的抽样调查单元(14个小流域,12个矩形区)进行野外调查,调查单元的基本信息详见表1。为便于识别坡耕地、水土保持措施等地物特征,于农作物生长旺季,即2025年8月17—21日在塔吉克斯坦进行实地调查。

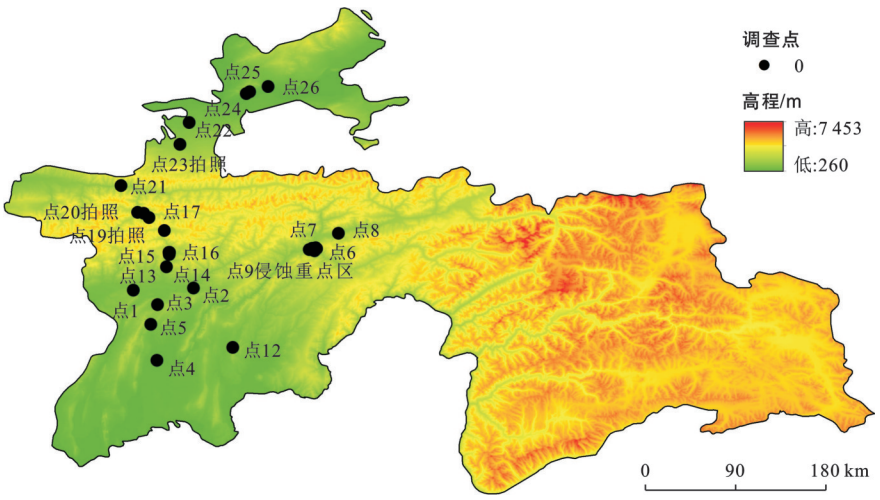


图1　塔吉克斯坦地形和调查单元分布位置

Fig.1　Topography of Tajikistan and distribution of survey units

2.2　野外调查与遥感解译

根据第一次中国水利普查水土保持普查中的土地利用分类标准,结合已有遥感解译成果,首先利用中高分辨率遥感影像对研究区土地利用类型和水土

保持措施进行预判与划分,形成解译初稿。随后,参照既定调查路线,对26个调查单元内土地利用、水土保持措施和侵蚀形态进行逐图斑核实。野外工作中,借助奥维互动地图APP进行定位、照相和轨迹记录,对各调查单元内每一个图斑的地类类型、种植制度和水土保持措施现状进行逐一核实和补充,对明显误判的图斑边界和类型现场标注修订意见。调查结束后,将外业记录与照片信息导入ArcGIS,对土地利用和水土保持措施图进行统一修编和整理,形成与模型因子栅格相匹配的调查成果图。

2.3 CSLE因子确定与土壤侵蚀速率计算

在影像解译和野外验证的基础上,本研究采用中国土壤流失方程(CSLE)对塔吉克斯坦调查区的土壤侵蚀速率进行定量评估。CSLE是在美国通用土壤流失方程(USLE)基础上发展而来的经验模型,通过将USLE中的覆盖与管理因子C和水土保持措施因子P细化为植被覆盖与生物措施因子B、工程措施因子E和耕作措施因子T这3个因子,更适用于反映不同类型水土保持措施的减蚀效应。已有研究表明,CSLE不仅已用于黄土高原[14]、云南高山峡谷区[15]和福建典型区域等[16]中国不同地貌单元的土壤侵蚀评价,也已扩展应用于泰国北部山区[17]以及巴基斯坦等[18]国外抽样单元的侵蚀速率计算,表现出较好的适用性。

表1 塔吉克斯坦土壤侵蚀调查单元基本信息

Table 1 Basic information of soil erosion survey units in Tajikistan

调查单元编号	调查日期	海拔高度/m	地貌特征	土地利用类型
1	20250817	784～813	山前河谷阶地,地势平坦	耕地、园地、建设用地
2	20250817	887～1 003	山地丘陵区,坡陡沟深,沟蚀发育	草地、建设用地
3	20250821	931～1 022	山地丘陵区,起伏缓坡为主	草地、建设用地
4	20250821	406～425	山前冲积平原区,地势平坦	耕地、建设用地
5	20250821	781～1 131	山地峡谷区,坡陡沟深	草地、其他土地
6	20250818	1 286～1 616	山地丘陵区,坡度较大	草地
7	20250818	1 312～1 650	山地丘陵区,坡度较大	草地、林地
8	20250818	1 546～2 056	山地峡谷区,坡陡沟深,切割强烈	草地、建设用地
9	20250818	1 402～1 886	山地峡谷区,坡陡沟深,下切侵蚀强烈	林地、其他土地
10	20250818	1 619～2 229	山地峡谷区,坡陡沟深,切割强烈	草地、其他土地
11	20250818	1 328～1 786	山地区,谷地狭长,坡陡沟深	草地、林地、建设用地
12	20250821	820～1 489	山地区,坡陡沟深,多级沟谷切割明显	其他土地
13	20250819	992～1 672	山地丘陵区,坡陡起伏大,沟谷密集切割	林地、其他土地
14	20250819	1 228～1 806	山地区,坡陡沟深,扇状沟蚀带发育	林地、其他土地
15	20250819	1 212～1 565	山地河谷阶地,坡度中等,浅沟发育	林地、建设用地、其他土地
16	20250819	1 283～1 773	山地区,坡陡谷深,单沟小流域切割明显	林地、草地
17	20250819	1 983～2 728	山地峡谷区,坡陡沟深,下切侵蚀强烈	林地、草地
18	20250820	2 346～3 229	山地峡谷区,坡陡沟深,下切侵蚀强烈	其他土地
19	20250819	1 745～2 312	山地沟谷区,坡陡起伏大,下切沟蚀强烈	其他土地
20	20250819	1 662～2 689	山地峡谷区,坡陡条带状沟谷密集	其他土地
21	20250819	1 262～1 649	河谷冲积阶地,地势较平缓,局部浅沟切割	林地、耕地、建设用地
22	20250819	758～783	冲积平原区,地势平坦,沟蚀不明显	耕地、园地
23	20250820	1 246～1 271	山地丘陵区,坡度中等,条带状坡耕地与浅沟发育	耕地、园地
24	20250820	346～415	山前冲洪积扇边缘区,地势平坦	耕地、园地、建设用地
25	20250820	411～474	山前冲洪积扇边缘区,地势平坦	耕地、园地、建设用地
26	20250820	387～418	冲积平原灌溉农田区,地势平坦,侵蚀沟发育不明显	耕地、园地、建设用地

在此模型框架下,本研究结合已有研究成果、相关技术规定及调查区实际资料,分别确定R,K,LS,B,E和T因子。降雨侵蚀力因子R采用Google Earth Engine(GEE)平台提供的CHIRPS Daily日尺度降水数据集,并参考中国水力侵蚀抽样调查[19]的方法进行计算。土壤可蚀性因子K采用已有的全球土壤可蚀性因子栅格数据。坡度坡长因子LS采用30 m分辨率SRTM数字高程数据,利用LS_Tool计算得到。植被覆盖与生物措施因子B以GlobeLand 30土地利用数据、树冠盖度等植被覆盖数据为基础,并结合修编后的土地利用图斑和现场核查结果进行确定;其计算与赋值参考Borrelli关于全球作物覆盖因子的研究思路[20],以及已有巴基斯坦土壤侵蚀评价研究中对B因子的处理方法[21],具体赋值结果详见

表 2。工程措施因子 E 根据修编后的图斑属性和现场核查结果识别各图斑的工程措施类型,并参照全国水土保持普查相关技术规定及工程措施因子赋值表确定。对于识别到明确工程措施的图斑,依据其工程措施类型查表赋值;对于未识别出工程措施或工程措施减蚀作用不明确的图斑,按无工程措施处理。E 因子赋值详见表 3。耕作措施因子 T 主要针对耕地图斑确定。本研究依据修编后的土地利用图斑、遥感影像判读结果和现场调查记录,结合调查区耕地利用方式、作物种植状况、地形地貌条件和当地熟制特征,对耕地图斑进行类型判定,并参照全国水土保持普查中耕作措施因子的赋值方式进行类比赋值。非耕地图斑统一按 T=1 处理。最后将上述因子图层统一到相同空间分辨率和坐标系统后,利用 CSLE 对调查区各栅格单元进行计算,得到土壤侵蚀速率栅格,并进一步按图斑和调查单元统计平均土壤侵蚀速率,用于后续土壤侵蚀特征分析。

表 2　生物措施因子(B)赋值

Table 2　Assignment of biological measure factor (B)

GlobeLand30 土地利用类型	取值范围	GlobeLand30 土地利用类型	取值范围
耕 地	1	水 体	0.000 1
林 地	0.000 1～0.003 0	人造地表	0.010 0
草 地	0.010 0～0.150 0	裸 地	0.100 0～0.500 0
灌木地	0.010 0～0.150 0	冰川和永久积雪	0.000 1
湿 地	0.000 1		

表 3　水土保持工程措施因子(E)赋值

Table 3　Assignment of soil and water conservation engineering measure factor (E)

工程措施类型	具体工程措施	因子值
梯 田	土坎水平梯田	0.084
	石坎水平梯田	0.121
	坡式梯田	0.414
	隔坡梯田	0.347
地 埂		0.347
水平阶(反坡梯田)		0.151
水平沟		0.335
鱼鳞坑		0.249
大型果树坑		0.160

3　塔吉克斯坦典型区土壤侵蚀特征

3.1　土壤侵蚀总体特征

基于 CSLE 模型计算结果(表 4),26 个调查单元平均土壤侵蚀速率表现出明显差异和右偏分布特征,均值和中值分别为 11 989.08 和 11 755.71 t/(km²·a),四分位区间为 2 365.42～17 755.45 t/(km²·a),P_5—P_{95} 分位数范围为 123.04～33 325.53 t/(km²·a),表明多数调查单元处于中低至较高侵蚀水平,少数单元受陡坡地形、裸露地表、沟谷发育及工程扰动影响而表现出极高侵蚀速率。总体上看,本研究得到的平均土壤侵蚀速率明显高于丛铭泽等[22]利用 RUSLE 模型给出的 1901—2023 年塔吉克斯坦黄土堆积区整体平均侵蚀速率 1 690.99 t/(km²·a),但与 Buhlmann 等[6]在塔吉克斯坦 Faizabad 农田区基于 RUSLE 的研究结果在量级上基本一致,该区农田多数为低侵蚀,即≤1 000 t/(km²·a),河谷平缓耕地多≤3 000 t/(km²·a),而山麓坡耕地往往＞3 000 t/(km²·a)。综合上述对比,本次调查单元主要分布在黄土层较厚、坡度较大且人类耕作、放牧活动较集中的山地-河谷地带,整体上代表了塔吉克斯坦典型的高侵蚀敏感区。

依据水利部《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》,将调查单元的土壤侵蚀强度划分为微度侵蚀〔＜500 t/(km²·a)〕、轻度侵蚀〔500～2 500 t/(km²·a)〕、中度侵蚀〔2 500～5 000 t/(km²·a)〕、强烈侵蚀〔5 000～8 000 t/(km²·a)〕、极强烈侵蚀〔8 000～15 000 t/(km²·a)〕和剧烈侵蚀〔＞15 000 t/(km²·a)〕。结果表明,微度和轻度侵蚀面积合计约 9.04 km²,占调查总面积的 26.8%;中度和强烈侵蚀面积约 4.41 km²,占调查总面积 13.0%;而极强烈和剧烈侵蚀面积则达到 20.34 km²,占调查总面积 60.2%,是调查单元中的主要侵蚀等级。需要说明的是,该比例主要反映本次调查所覆盖的山地峡谷、山前丘陵及裸露坡面等高敏感单元的侵蚀特征。从空间分布来看,微度侵蚀主要分布在位于山前冲积平原和冲洪积扇边缘的调查单元(如 4,22,24—26 号等),地势平坦、沟蚀不明显,以灌溉农田、园地及居民点为主,耕作措施较完善,坡度和坡长因子较小,因而综合侵蚀强度维持在较低水平。相比之下,大部分山地峡谷和山地沟谷单元(如 5,7—10,12—20 号等)位于海拔 1 300～3 200 m 的高差较大区域,坡陡沟深,切割强烈,多以草地、林地和其他未利用地为主,坡长坡度因子显著增加,同时叠加局部存在放牧过度,坡面裸露等人类干扰因素,导致平均侵蚀模数普遍达到极强烈乃至剧烈侵蚀等级,是调查区水土流失最为集中的区域。为进一步解释剧烈侵蚀单元的形成原因,本研究选取平均土壤侵蚀速率大于 15 000 t/(km²·a)的调查单元,对其主要 CSLE 因子均值及百分位进行统计诊断(表 5)。结果表明,剧烈侵蚀单元的 K 因子均值为 0.026 7～0.032 8,K 百分位为 8.00%～73.00%,均未进入前 25%,未表现出异常偏高特征,说明高侵蚀速率并非

由土壤可蚀性因子异常放大所致。相比之下，*LS*因子在多数剧烈侵蚀单元中明显偏高，19，20，14，12，17，18号单元的*LS*均值均超过40，且*LS*百分位均高于80%，表明坡陡沟深、坡长较大和沟谷切割强烈是调查区剧烈侵蚀形成的重要地形控制因素。其中，19号单元平均侵蚀速率最高，达到43 182.21 t/(km²·a)，但其*K*因子均值仅为0.026 7，*K*百分位为8.00%，并未表现出偏高特征；相反，该单元*LS*均值达到66.96，*LS*百分位为100.00%，说明其剧烈侵蚀主要受强地形切割、陡坡长坡条件、沟谷汇流集中以及裸露碎屑坡面发育等因素控制。13号和14号单元的*R*百分位均达到94.00%，说明较高降雨侵蚀力会进一步增强山地坡面的侵蚀风险。7号单元*LS*因子并非最高，但*B*因子百分位较高，反映出林草覆盖不连续、放牧踩踏和坡面汇流集中对侵蚀增强具有重要影响；9号单元则受较高*LS*因子、较差地表覆盖状况以及其他土地和裸露坡面分布影响，沟谷下切和坡面汇流作用较强，导致侵蚀速率显著升高。总体来看，剧烈侵蚀单元是地形因子、降雨侵蚀力、地表覆盖状况、土地利用类型和人为扰动共同作用的结果。

表4 各抽样调查单元不同土地利用类型平均土壤侵蚀速率

Table 4 Average soil erosion rates of different land use types in each sampling survey unit

调查单元编号	调查单元面积/km²	主要土地利用的平均土壤侵蚀速率/(t·km⁻²·a⁻¹)						平均侵蚀速率/(t·km⁻²·a⁻¹)
		耕地	园地	林地	草地	建设用地	其他土地	
1	1.28	502.86	3217.5	1 590.07		924.76		2 271.08
2	1.19	723.49			2 671.38	8 252.99	13 749.22	2 841.23
3	0.92		73.14		2 851.76	3 452.95	2 231.52	2 648.45
4	1.29	44.17	259.42		189.65	200.38	242.27	97.72
5	1.64				9 180.05		4 895.94	8 577.08
6	0.98				6540.2			6 540.2
7	1.21			33 559.79	26 754.12			29 710.48
8	1.17				14 445.47	1 549.88		14 158.46
9	0.69			5 202.19			36180	34 530.54
10	1.41				12 962.98		15 483.34	14 094.24
11	1.32			617.71	5 035.63	895.24	14 705.36	5 182.08
12	1.51						18 504.43	18 504.43
13	1.32			6 035.83		333.96	35 023.65	17 619.32
14	1.32			9 603.28		5 857.33	23 600.94	20 261.39
15	1.28		865.96	5 446.13		5 540.11	18 235.96	12 684.34
16	1.09			9914.6	12 592.63		12 129.26	10 827.07
17	1.09			20 222.82	18 020.63		1 6751.9	18 201.09
18	1.97						15 691.99	15 691.99
19	0.81						43 182.21	43 182.21
20	2.53						17 800.83	17 800.83
21	1.32	1 721.2	13 683.99	16 395.12		9 638.01	22 412.16	14 861.99
22	1.32	175.93	644.25					199
23	1.28	355.15	617.12			698.83	946.84	393.54
24	1.32	276.91	92.61			1 215.25	979.51	422.64
25	1.35	170.67	55.01			476.05	599.07	330.3
26	1.22	83.93	26.48			211.39	329.94	84.29

3.2 不同土地利用类型的土壤侵蚀特征

3.2.1 林地土壤侵蚀特征

调查区林地面积总体较小，空间分布破碎，主要集中在中高山峡谷两侧及山地丘陵区的阴坡与局地小流域上部坡段，典型如9，13—17，21号等单元，多处于海拔1 200 m以上、坡度较大的地带。林地以天然乔灌混交林和灌木林为主，局部树种以杜松、圆柏、刺柏类灌木或小乔木为主，林冠呈斑块状镶嵌分布，林下多为砾石、块石或薄层黄土。野外调查表明，林冠相对连续的坡段林下可见一定枯枝落叶覆盖，土壤侵蚀相对较轻；但在坡陡沟深、基岩出露和放牧扰动较强的疏林坡面，林下枯落物层较薄且分布不连续，地表多为砾石、块石或薄层黄土，局部还发育牲畜路径和裸露带，林地减蚀作用明显减

弱。CSLE计算结果表明,林地土壤侵蚀速率均值为 10 858.75 t/(km²·a),不同调查单元间差异较大。该均值受7号等局部高值单元影响明显,高值主要出现在林草覆盖不连续、坡面汇流明显和放牧踩踏较强的局部单元,反映了调查区退化疏林和林草混生陡坡的高侵蚀敏感性。

表5　剧烈侵蚀调查单元主要CSLE因子均值及其百分位

Table 5　Average values and percentiles of major CSLE factors in severe-erosion-level survey units

调查单元编号	平均侵蚀速率	*R*均值	*R*百分位/%	*K*均值	*K*百分位/%	*LS*均值	*LS*百分位/%	*B*均值	*B*百分位/%
7	29 710.48	707.95	69	0.030 1	42	18.63	38	0.683 6	69
9	34 530.54	707.95	69	0.031 1	58	37.39	69	0.379 4	62
12	18 504.43	446.44	35	0.032 8	73	42.11	88	0.268 3	54
13	17 619.32	1 093.43	94	0.028 2	23	35.69	65	0.152 9	15
14	20 261.39	1 093.43	94	0.026 9	15	42.28	92	0.157 6	19
17	18 201.09	536.35	44	0.031 3	62	41.55	85	0.255 0	50
18	15 691.99	536.35	44	0.031 8	65	41.40	81	0.227 0	46
19	43 182.21	536.35	44	0.026 7	8	66.96	100	0.452 1	65
20	17 800.83	536.35	44	0.028 3	27	46.56	96	0.274 7	58

注:①平均侵蚀速率单位为t/(km²·a);②*R*为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm²·h·a)];③百分位表示该因子均值在26个调查单元中的相对排序,数值越高表示该因子在调查单元中相对越高。

从侵蚀形态看,在坡度中等、林冠相对连续的山地缓坡,林地坡面土壤层相对完整,侵蚀形态以面蚀为主,局部顺坡汇流带可见细沟侵蚀和坡面沟蚀发育;而在坡度陡峭、基岩出露度高的山地峡谷区,林地常沿沟谷两侧和岩壁平台呈带状或点状分布,土层薄而不连续,径流易沿岩面和松散堆积物集中,形成局部沟蚀下切,并伴随泻溜、滚石等重力侵蚀过程。如图2所示,部分疏林和林草混生坡面可见沿坡向发育的径流冲刷带、沟蚀裸露带和砾石堆积带,表明在强降雨条件下,坡面径流易沿裸露带和松散堆积物集中,导致局部沟蚀发育明显。公路切坡、林区简易道路和零星采伐活动进一步削弱了边坡稳定性,在道路上方和下方坡面形成裸露带和小型滑塌体,导致局部林地单元的土壤侵蚀速率显著高于区域平均水平,个别区域甚至达到极强烈乃至剧烈侵蚀等级。



a 林地坡面沟蚀　　b 林地陡坡泻溜及水蚀

图2　林地土壤侵蚀(马波摄于20250818)

Fig.2　Soil erosion in forestland (photographed by Ma Bo on August 18, 2025)

从人类活动影响上看,部分疏林地、林草混生坡面及林缘地带存在明显的放牧踩踏现象。天然林以杜松、圆柏、刺柏类灌木或小乔木为主,林分相对疏散,林下草本覆盖不连续,牲畜长期通行和采食使坡面形成明显羊道(兽径)和阶状微地形,局部出现地表裸露和踩踏压实,属典型踩踏侵蚀。羊道的发育增强了坡面径流汇集条件,可能进一步诱发细沟侵蚀并加剧坡面剥蚀,说明放牧活动对部分林地土壤侵蚀过程影响较大(图3)。

3.2.2　草地土壤侵蚀特征

草地(含放牧地)是本次调查区最广泛,最具代表性的土地利用类型之一,主要分布于山地—丘陵

坡面及沟谷两侧的中高坡位地带，典型单元如7，8，10号等。受坡度较大、土层松散、植被盖度偏低及长期放牧扰动等因素的共同影响，草地往往具有较高的侵蚀敏感性。CSLE计算结果表明，草地土壤侵蚀速率均值为10 113.14 t/(km^2·a)，不同调查单元间差异显著，并在部分山地调查单元中达到强烈至剧烈侵蚀水平。总体上，山地峡谷区及山前丘陵高坡位草地的侵蚀强度明显高于河谷平缓带和局部灌溉绿洲边缘，如7，8，16，17号等山地单元草地侵蚀速率明显高于4号平缓单元，反映出地形切割、坡面汇流与放牧踩踏叠加对草地侵蚀具有显著放大作用。从野外调查结果看，羊道侵蚀在草地坡面上分布较为普遍，是本次调查中识别到的典型侵蚀类型之一。长期放牧和牲畜反复踩踏使坡面形成密集兽径或羊道，局部形成阶状微地形、坡面裸化和侵蚀墩等现象，表现为表土疏松剥蚀、裸露斑块增多，并在局部出现微地形刻蚀，形成约20～30 cm高的侵蚀墩。这表明羊道侵蚀不仅是草地退化的重要外在表现，也是侵蚀过程持续增强的重要信号。从侵蚀形态上看，草地侵蚀主要表现为坡面面蚀、细沟侵蚀、切沟侵蚀以及放牧踩踏形成的羊道侵蚀。典型沟谷型草地中可见切沟明显发育(图4a)，沟壁较陡、沟底裸露，局部伴随沟头后退和沟岸坍塌，表明在强降雨条件下坡面径流在沟谷内高度汇集，导致沟道下切与侧蚀并存，侵蚀强度显著增强。与此同时，部分草地坡面可见沟头溯源侵蚀(图4b)，表明局部坡面汇流已发生明显集中，坡面侵蚀过程具有由面蚀向线状冲刷演化的趋势。



a 稀疏林地羊道(兽径)侵蚀　　b 自然圆柏林

图3　林地羊道(兽径)侵蚀(史海静摄于20250820)

Fig.3　Erosion of sheep trails (livestock track) in forestland (photographed by Shi Haijing on August 20, 2025)



a 切沟侵蚀　　b 沟头溯源侵蚀

图4　草地坡面典型沟蚀类型(朱兆龙摄于20250818)

Fig.4　Typical gully erosion types on grassland slopes (photographed by Zhu Zhaolong on August 18, 2025)

草地坡面上普遍存在由于放牧踩踏造成的羊道侵蚀(图5)。在多数坡面草地中，羊道沿等高线或顺坡方向密集分布，形成一系列连续的裸露带。羊道具有明显的“压实-减渗-汇流”效应：一方面，牲畜踩踏压实破坏表土结构，降低入渗能力；另一方面，羊道本身成为微地形凹槽，暴雨时易迅速集流并形成细沟，进而向切沟发展。因此，羊道不仅是草地退化的直接表征，也是草地侵蚀由面蚀向沟蚀转化的重要通道。

3.2.3　建设用地土壤侵蚀特征

调查区建设用地主要包括居民点及其周边场

地、道路(含干线公路与简易道路)以及各类工程扰动裸露地,空间上多沿河谷平缓地带和交通干线呈带状分布,面积比例相对较小,但土壤侵蚀表现出明显的局部高强度特征(图 6)。CSLE 计算结果显示,建设用地土壤侵蚀速率均值为 2 803.37 t/(km²·a),不同调查单元间差异较大。总体上,山地峡谷区或山前丘陵区的建设用地侵蚀强度显著高于冲积平原与灌溉绿洲区:例如部分山地单元建设用地侵蚀速率可达 5 540～9 640 t/(km²·a)(如 15,21 号等),而平缓区单元多低于 300 t/(km²·a)(如 4,26 号等),反映出地形与人为扰动叠加对建设用地侵蚀的放大效应。

3.2.4　其他土地利用类型土壤侵蚀特征

本次调查中,其他土地利用类型主要包括裸地、砾石坡、岩质裸露地及沟谷两侧的强扰动裸露面等类型,主要分布于中高山峡谷区陡坡、沟谷汇流带及崩塌堆积体上,植被覆盖稀少、土体或风化碎屑结构松散,是调查区典型的高敏感侵蚀地类(图 7—8)。CSLE 计算结果显示,其他土地土壤侵蚀速率均值为 14 936.97 t/(km²·a),整体高于林地、草地和建设用地,接近剧烈侵蚀等级阈值,且不同调查单元间差异明显。在部分山地单元中,其他土地侵蚀速率可达 30 000～43 000 t/(km²·a)(如 9,13,19 号等单元)。结合表 5 的因子诊断结果看,这类高值主要与坡度坡长因子较高、沟谷切割强烈、坡面汇流集中以及裸露碎屑物质发育有关。尤其是 19 号单元,平均侵蚀速率最高,其 LS 因子百分位达到 100.00%,表明强地形切割和裸露坡面条件是该类土地高侵蚀速率的主要控制因素。相反,在地形较缓、汇流条件较弱的单元中,其他土地侵蚀速率明显较低(如 4,23—26 号等单元)。因此,其他土地的高侵蚀速率主要反映了本次调查中山地峡谷裸露坡面和强扰动裸露地的局部高敏感性。



a 羊道侵蚀形成20～30cm高的侵蚀墩　　b 羊道侵蚀形成阶状微地形

图 5　羊道侵蚀形成的草地裸坡化(史海静摄于 20250819)

Fig.5　Bare slope degradation in grassland caused by livestock track erosion (photographed by Shi Haijing on August 19, 2025)



a 道路边坡缺少防护措施　　b 地形与人为扰动叠加作用下的建设用地侵蚀

图 6　建设用地典型侵蚀类型(马波摄于 20250820)

Fig.6　Typical erosion types in construction land (photographed by Ma Bo on August 20, 2025)

4　水土保持措施

调查表明,塔吉克斯坦调查区水土保持措施总体偏少、措施体系相对单一,以坡面修筑梯田为主(图 9),辅以少量沟渠排水、田坎整治与局部护坡等小型措施。

梯田多分布于山地、丘陵坡面及河谷两侧缓坡地带,常与居民点、果木(灌木)种植带一起出现,形成居住、生产与防护相结合的复合景观。典型坡面上可见多级等高线方向的阶梯状田面与田坎连续展开。梯田通过削减坡度与坡长,分段拦截汇流,提高地表粗糙度与入渗能力,有效削弱雨滴溅蚀与坡面径流冲刷,抑制细沟发育,并在一定程度上拦蓄泥沙,减缓其向沟谷的输移。部分梯田地块周边种植果木或灌丛带,通过根系固土和枯落物覆盖,有助于稳定田坎、减少坡面裸露。除梯田外,调查区在局部

地段可见以排水、导流和护坡为核心的小型配套措施。例如沿道路或田块边缘设置简易排水沟、截水沟，将上坡汇水导排至稳定汇流通道，减少径流在田面或坡脚的漫流；居民点与道路边坡多采取就地取材的块石堆砌、简单挡护或草被覆盖来减缓冲刷。总体来看，这些措施规模普遍较小，离散分布，更多体现为对生产生活需求的被动防护，其减蚀效果在很大程度上依赖于排水组织是否合理，田坎与沟渠是否持续维护。在强降雨条件下，若梯田田坎低矮或破损，排水沟衔接不畅，径流仍可能沿地形或道路形成集中汇流，诱发田坎冲毁，沟蚀加深及局部塌陷。因此，在现有措施基础上，应优先提升梯田的配套排水与稳坎能力（如完善排水沟，设置消能与护脚，及时修复破损田坎），并在高风险汇流带与道路切坡段加强简易工程防护与植被恢复，将有助于提高梯田减蚀效应的稳定性与持续性。



a 裸地崩塌侵蚀　　b 裸露坡面细沟侵蚀

图 7　裸露坡面侵蚀（史海静摄于 20250820）

Fig.7　Erosion on exposed slopes (photographed by Shi Haijing on August 20, 2025)



a 高山区沟蚀　　b 高山区溜砂坡

图 8　裸露坡面侵蚀（马波摄于 20250819）

Fig.8　Erosion on exposed slopes (photographed by Ma Bo on August 19, 2025)

5　土壤侵蚀影响因素分析

塔吉克斯坦土壤侵蚀的影响因素主要分为自然因素与人为因素两大方面。自然条件方面，塔吉克斯坦以山地地形为主，地势起伏大，坡陡沟深，地形切割强，河谷-山前过渡带广泛分布，降雨过程中的径流易沿坡面微地形汇集并迅速形成集中径流，从而推动侵蚀由面蚀向细沟乃至沟道下切演化；同时，部分地区松散堆积物与风化碎屑覆盖较多，土层浅薄、结构疏松，抗冲性弱，在短历时强降雨或融雪补给条件下更易发生强烈冲刷，并可能与崩塌、滑塌、滚石等重力过程叠加，形成水蚀-重力侵蚀的复合效应，导致侵蚀强度高且空间差异显著。地表覆盖差异进一步塑造了侵蚀敏感性：天然林与灌丛在局部山地可通过冠层截留，枯落物覆盖和根系固结削弱雨滴溅蚀与坡面径流，而大面积草地以及放牧地在干旱半干旱背景下盖度偏低，地表裸露斑块多，更容易在汇流条件叠加时出现沟蚀与沟岸塌陷。

人为因素方面，塔吉克斯坦经济基础相对薄弱，山区人口对土地与自然资源依赖度高，过度放牧、坡

面开垦等生计活动在一定程度上削弱植被恢复能力并破坏表土结构,促使产流增加,侵蚀阈值降低;与此同时,道路交通与工程建设多沿河谷与山前地带展开,切坡开挖、弃渣堆置以及排水系统不完善,易形成点状或带状的强侵蚀区,对地形敏感区产生明显放大效应。受贫困与治理投入不足等国情约束,当地水土保持措施仍然以梯田、简易排水沟等为主,且多零散分布,标准不一,管护能力偏弱,难以系统性削减坡面与沟道侵蚀过程的风险,因而侵蚀更易在地形敏感区与扰动集中区呈现集聚加剧的格局。



a 水平梯田　　b 缓坡梯田

图 9　典型水土保持措施(史海静摄于 20250821)

Fig.9　Typical soil and water conservation measures (photographed by Shi Haijing on August 21, 2025)

本研究属于基于典型调查单元的抽样调查与模型评价。调查单元主要设在塔吉克斯坦中西部和西北部地区,空间上集中于河谷、交通干线及侵蚀现象较典型区域,覆盖了低海拔绿洲边缘、山前丘陵和中山地貌区,能够较好地反映塔吉克斯坦中西部和西北部高敏感区的侵蚀特征。需要说明的是,本次调查未覆盖东部帕米尔高原地区,因此调查结果主要适用于解释中西部和西北部典型区域的侵蚀特征,但尚不能完全代表全国尺度土壤侵蚀的总体水平,尤其对高寒高海拔、干旱寒漠及冰雪冻融作用显著的帕米尔高原地区适用性有限。同时,CSLE模型计算依赖降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、植被覆盖及水土保持措施等因子的空间表达,部分因子参数仍存在一定不确定性,尤其是复杂山地条件下沟蚀、泻溜、滚石等复合侵蚀过程难以通过经验模型完全刻画。后续研究仍需结合更大范围的样点调查,长期监测和实测泥沙资料,对模型参数和不同侵蚀过程进行进一步校验与优化。

6　结 论

(1) 塔吉克斯坦调查区土壤侵蚀空间分异显著,强侵蚀区主要集中于山地峡谷、山前丘陵及河谷过渡带,表现出明显的地貌控制特征。26个调查单元土壤侵蚀速率均值为11 989.08 t/(km^2·a),不同单元间侵蚀强度差异明显。在本次典型调查单元范围内,极强烈和剧烈侵蚀面积占调查总面积的60.2%,主要反映山地峡谷、山前丘陵及裸露坡面等高敏感单元的侵蚀特征。

(2) 不同土地利用类型的侵蚀强度差异明显。林地总体侵蚀较轻,但在道路切坡、林缘裸露带及基岩出露区侵蚀增强,部分疏林地和林草混生坡面存在放牧踩踏形成的羊道侵蚀;草地受长期放牧和羊道化影响,侵蚀整体偏强,是重要坡面产沙源区;建设用地面积虽小,但受道路开挖、边坡裸露及排水不完善影响,表现出局部高强度侵蚀特征;其他土地因覆盖度低、地表物质松散且多位于汇流集中带,侵蚀最为剧烈,是高强度泥沙输出的重要来源。

(3) 调查区土壤侵蚀是自然因素与人为扰动共同作用的结果。强地形切割、坡面汇流集中和松散地表物质是侵蚀发生的自然基础,过度放牧,道路工程扰动及水土保持措施不足则进一步加剧了侵蚀风险。

(4) 本研究基于典型调查单元的抽样调查,主要反映塔吉克斯坦中西部和西北部高敏感区的侵蚀特征,不能完全代表全国尺度土壤侵蚀总体水平。研究结果可为塔吉克斯坦水土保持治理提供基础依据,同时也可为全球土壤侵蚀制图项目在中亚山地国家的典型区验证与方法应用提供参考。

参考文献(References)

[1] Montgomery D R. Soil erosion and agricultural sustainability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(33):

13268-13272.

[2] Li Zhiying, Fang Haiyan. Impacts of climate change on water erosion: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2016,163:94-117.

[3] Sodikov K A, Arabov F P, Bobohonzoda K R, et al. Sustainable development of ecological and economic use of agricultural land and water resources of the Republic of Tajikistan [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022,981(2):022028.

[4] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers [J]. Science, 2010,328(5984):1382-1385.

[5] Umuhoza J, Jiapaer G, Yin Hanmin, et al. The analysis of grassland carrying capacity and its impact factors in typical mountain areas in central Asia: A case of Kyrgyzstan and Tajikistan [J]. Ecological Indicators, 2021,131: 108129.

[6] Bühlmann E, Wolfgramm B, Maselli D, et al. Geographic information system: Based decision support for soil conservation planning in Tajikistan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,65(3):151-159.

[7] Sidle R C, Caiserman A, Jarihani B, et al. Sediment sources, erosion processes, and interactions with climate dynamics in the Vakhsh River basin, Tajikistan [J]. Water, 2024,16(1):122.

[8] Golosov V N, Sosin P M, Belyaev V R, et al. Effect of irrigation-induced erosion on the degradation of soils in river valleys of the alpine Pamir [J]. Eurasian Soil Science, 2015,48(3):325-335.

[9] Rahmonov O, Szypuła B, Sobala M, et al. Environmental and land-use changes as a consequence of land reform in the Urej River catchment (western Tajikistan) [J]. Resources, 2024,13(4):59.

[10] Dear C, Shigaeva J, Wolfgramm B. Assessing the state of sustainable land management research in Kyrgyzstan and Tajikistan [J]. Mountain Research and Development, 2013,33(4):443-452.

[11] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (central Asia) [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(10): 725-731.

[12] Xenarios S, Laldjebaev M, Shenhav R. Agricultural water and energy management in Tajikistan: A new opportunity [J]. International Journal of Water Resources Development, 2021,37(1):118-136.

[13] Akhmodov H. Cartographic monitoring of a soil erosion of the mountain territory of Tajikistan [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008,37(2):883-6.

[14] Shi Wenhai, Huang Mingbin, Barbour S L. Storm-based CSLE that incorporates the estimated runoff for soil loss prediction on the Chinese Loess Plateau [J]. Soil and Tillage Research, 2018,180:137-147.

[15] Chen Guokun, Zhang Zengxiang, Guo Qiankun, et al. Quantitative assessment of soil erosion based on CSLE and the 2010 national soil erosion survey at regional scale in Yunnan Province of China [J]. Sustainability, 2019,11(12):3252.

[16] 蒲坚,李建明,王文龙,等.基于CSLE模型的2024年福建省典型区域水土流失特征及其差异评估[J].水土保持通报,2026,46(1):153-165.
Pu Jian, Li Jianming, Wang Wenlong, et al. Soil erosion characteristics and assessment of their differences in typical regions of Fujian Province in 2024 based on CSLE model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(1):153-165.

[17] 张加琼,马波,税军峰,等.泰国北部山区土壤侵蚀调查报告[J].水土保持通报,2019,39(1):1-8.
Zhang Jiaqiong, Ma Bo, Shui Junfeng, et al. Investigation report on soil erosion in northern mountain area of Thailand [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(1):1-8.

[18] 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.
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.

[19] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013(10):26-34.
Liu Baoyuan, Guo Suoyan, Li Zhiguang, et al. Sampling survey of hydraulic erosion in China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10):26-34.

[20] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications, 2017,8:2013.

[21] 朱浩楠.基于GIS和CSLE模型的巴基斯坦土壤侵蚀评价[D].西安:西北大学,2021.
Zhu Haonan. Assessment of soil erosion in Pakistan based on GIS technology and CSLE model [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.

[22] 丛铭泽,鹿化煜,王晓勇,等.塔吉克斯坦黄土分布区地表侵蚀速率评估[J].地理学报,2025,80(9):2398-2415.
Cong Mingze, Lu Huayu, Wang Xiaoyong, et al. Quantitative assessment of surface erosion in loess region of Tajikistan [J]. Acta Geographica Sinica, 2025,80(9): 2398-2415.