

# 2024 年宁夏极端暴雨事件引发的梯田侵蚀调查研究

冯瑞<sup>1</sup>, 张祎<sup>2</sup>, 刘晓君<sup>1</sup>, 雷雪怡<sup>1</sup>, 胡仁正<sup>1</sup>, 王静<sup>3</sup>, 陈凯<sup>3</sup>

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021; 2. 西安科技大学

地质与环境学院, 陕西西安 710054; 3. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏银川 750021)

**摘要:** [目的] 探究极端暴雨事件对宁夏回族自治区不同区域梯田侵蚀程度的影响及其发生机制, 为梯田优化设计与水土保持建设提供科学依据。[方法] 基于降水量空间异质性, 沿宁南至宁北暴雨带建立调查样带。以受 2024 年宁夏大范围极端暴雨事件影响的 9 个小流域为对象, 通过遥感解译、实地测量与田间调查, 解析不同梯田侵蚀类型(沟蚀、坎坡崩塌等)的空间分异规律, 定量评估梯田侵蚀量, 探究侵蚀驱动因素(降雨强度、田坎坡度、田埂完好程度、地势因素)。[结果] 调查区域内, 梯田侵蚀类型以冲沟、崩塌、切沟为主。梯田侵蚀集中发生于整座坡面下部 30% 的梯田群; 不同类型梯田因其设计标准、保存质量等不同, 其侵蚀量也存在差异, 老式及坡式梯田侵蚀较为严重。流域梯田侵蚀强度呈现区域分异, 泾源县照明流域(7 080 t/km<sup>2</sup>)侵蚀强度最强, 同心县(41.41 t/km<sup>2</sup>)最弱; 同心县水井沟流域梯田保土量最高(3.48×10<sup>4</sup> t/km<sup>2</sup>)。[结论] 梯田侵蚀受地形、水文、工程协同作用影响, 其侵蚀强度与保土能力的空间分异受自然因子直接驱动与工程建设(田坎坡度、田埂修缮)间接调控。标准化田坎工程结合植被缓冲带可提升梯田抗蚀能力。

**关键词:** 暴雨侵蚀; 梯田侵蚀; 侵蚀特征; 水土保持; 宁夏回族自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0181-10

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 冯瑞, 张祎, 刘晓君, 等. 2024 年宁夏极端暴雨事件引发的梯田侵蚀调查研究[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 181-190. Feng Rui, Zhang Yi, Liu Xiaojun, et al. Investigation and study on terrace erosion caused by 2024 extreme rainstorm event in Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 181-190.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.015

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.015

## Investigation and study on terrace erosion caused by 2024 extreme rainstorm event in Ningxia Hui Autonomous Region

Feng Rui<sup>1</sup>, Zhang Yi<sup>2</sup>, Liu Xiaojun<sup>1</sup>, Lei Xueyi<sup>1</sup>, Hu Renzheng<sup>1</sup>, Wang Jing<sup>3</sup>, Chen Kai<sup>3</sup>

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi

710054, China; 3. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** [Objective] The extent and mechanisms of terrace erosion caused by an extreme rainstorm event across different regions of Ningxia Hui Autonomous Region were analyzed, in order to provide a scientific basis for optimizing terrace design and enhancing soil and water conservation. [Methods] Based on the spatial heterogeneity of precipitation, a survey transect was established along the rainstorm belt from southern to northern Ningxia. Focusing on nine small watersheds affected by the large-scale extreme rainstorm event in Ningxia in 2024, remote sensing interpretation, field measurements, and on-site surveys were used to analyze the spatial distribution patterns of different terrace erosion types (such as gully erosion and embankment collapse). Erosion volume was quantitatively assessed, and driving factors of erosion (rainfall intensity, terrace-ridge gradient, ridge integrity, and topographic factors) were explored. [Results] In the study area, the dominant terrace erosion types were gully

收稿日期: 2025-07-15 修回日期: 2025-09-28 采用日期: 2025-09-30

资助项目: 宁夏重点研发计划项目(引才专项)“黄土高原水沙连通性对生态建设响应及碳输移影响研究: 以西吉县聂家河小流域为例”(2024BEH04060), 泥沙输移沉积过程土壤有机碳源-汇转换机制研究(42473069); 宁夏自然科学基金优秀青年项目(2024AAC05021, 2025AAC050024)

第一作者: 冯瑞(2000—), 女(汉族), 陕西省汉中市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与碳循环。Email: 17391376176@163.com。

通信作者: 刘晓君(1988—), 女(汉族), 山东省泰安市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与养分流失研究。Email: liuxiaojun.lxj@163.com。

erosion, collapse, and rill erosion. Terrace erosion was concentrated within the terrace sequences located on the lower 30% of the entire slopes. Erosion volume varied among terrace types due to differences in design standards and maintenance quality, with older and slope-style terraces experiencing more severe erosion. Terrace erosion intensity showed distinct regional variations across the watersheds, with the Zhaoming watershed in Jingyuan County showing the highest erosion intensity (7 080 t/km<sup>2</sup>) and Tongxin County the lowest (41.41 t/km<sup>2</sup>). The Shuijinggou watershed in Tongxin County had the highest soil conservation capacity (3.48×10<sup>4</sup> t/km<sup>2</sup>). [Conclusion] Terrace erosion is influenced by the combined effects of topography, hydrology, and engineering practices. The spatial variation in erosion intensity and soil conservation capacity is directly driven by natural factors and indirectly modulated by engineering practices (e.g., terrace-ridge gradient, ridge maintenance). Standardized ridge engineering combined with vegetative buffer strips can enhance the erosion resistance of terraces.

**Keywords: rainstorm erosion; terrace erosion; erosion characteristics; soil and water conservation; Ningxia Hui Autonomous Region**

近年来,中国北方极端暴雨频发,引发的水土流失严重,给水土资源的高效利用和农业生产稳定带来极大挑战<sup>[1]</sup>。黄土高原作为北方旱作农业区的重要粮食生产基地,近年来大规模建设高标准梯田,推动机械化生产。新式高标准梯田是在坡耕地上沿等高线修筑的水平条状且顺坡沿等高线呈阶梯式排列的田地,其具备完善的灌排设施和田间道路,系统内部稳定,是黄土高原地区基本农田的重要组成部分<sup>[2]</sup>。高标准梯田通过将天然斜坡转化为平坦的台阶,从而增加降雨入渗和土壤泥沙的沉积,缓解水土流失,稳定山坡,抵御大风、暴雨、洪涝等自然灾害,减少土壤侵蚀现象,提高农业生产力<sup>[3]</sup>。相较于坡耕地,梯田在防控侵蚀,削减洪峰径流,生物量累积,提高土壤养分和生产力方面具有重要作用<sup>[4]</sup>。然而,宁夏地区某些新建高标准梯田存在田坎裸露,缺乏排水设施的问题;加之该区域农业生产地膜覆盖普遍,极端降雨下,新修梯田田面易形成汇流,引发田面湿陷、田坎垮塌,诱发强烈的土壤侵蚀<sup>[1]</sup>,加剧了水土流失,破坏了农业生产稳定性。

受极端降雨影响,各地易发生水土流失现象,但如何及时了解极端天气情况下水土流失状况,科学准确地评估水土流失危害及水土保持效果,为区域水土流失动态监测和常规站点监测提供有效补充,是当前水土保持监测工作亟需解决的问题。目前“‘7·18’子洲县暴雨调查”<sup>[5]</sup>“‘7·26’无定河特大暴雨调查”<sup>[6]</sup>“‘8·10’临朐特大暴雨调查”<sup>[7]</sup>3次暴雨水土保持调查都通过定量分析表明,暴雨会引发严重的水土流失灾害,如梯田损毁、坝体冲毁、道路侵蚀等问题,但每次调查的研究对象数量有限,未能构建暴雨条件下水土保持调查的完整体系,因而难以开展系统性分析。

2024年宁夏回族自治区盐池县南部、红寺堡中

部、同心县中部及西部、海原县南部及东部、彭阳县东部及南部、隆德县南部、西吉县西部、泾源县西部等地发生暴雨,彭阳县冯庄乡、泾源县发生极端暴雨。根据水土保持站降雨监测数据可得,降雨量在50~100 mm共12站,25~50 mm共114站。最大降雨站点为泾源县新民乡新民站,降雨量达98 mm。2024年8月8日8:00—17:00,共有150站降雨量达50 mm以上,4站降雨量达100 mm以上,受该时段连续强降雨影响,宁夏多地梯田系统遭受了不同程度的侵蚀破坏。为科学评估此次极端降雨状况下梯田水土流失的基本状况,了解其侵蚀类型、强度分布、影响因素等关键信息,有效识别出易发生水土流失的重点位置,并对其潜在的危害性做出科学评价,调查团队于2024年9月18日至10月27日对暴雨影响区展开了梯田受损情况专项调查,为后续优化区域高标准梯田建设及地方政府制定防灾减灾应急预案提供有力支持。

## 1 调查区域概况

宁夏回族自治区属典型大陆性气候,降水量自南向北递减。2024年受副热带高压及暖湿气流影响,5—9月降水量较常年偏多。通过当地气象站降雨数据发现,7月22日、8月8日、8月24日,共发生3场典型暴雨。7月22日降雨集中于宁夏南部,降雨量16.65~88.23 mm;8月8日降雨集中于宁夏北部,降雨量42.26~65.59 mm;8月24日降雨集中于宁夏西部,降雨量0.20~101.25 mm。根据此次暴雨过程的累计雨量分布,调查团队选择暴雨中心及附近不同累积雨量梯度所在的9个典型流域进行梯田侵蚀调查。选取的9个小流域,主要分布于贺兰山东麓(水洞沟流域、浅井沟主沟流域、水井沟流域)、宁夏中部干旱带(中坪流域、燕寨科流域、里沟流域)及南

部六盘山(唐家河下游流域、朱庄河流域、照明流域)3大地理单元(表1)。水洞沟流域、中坪流域属于银川平原潜在风蚀重点预防区;浅井沟主沟流域、水井沟流域属于黄土丘陵沟壑水风蚀交错重点治理区;

唐家河下游流域、朱庄河流域属于黄土丘陵沟壑水蚀重点治理区;燕寨科流域、里沟流域属于黄土丘陵沟壑残塬水蚀区;照明流域属于六盘山水蚀重点预防区。

表1 2024年调查区域各流域基本情况

Table 1 Basic information of watersheds at survey area in 2024

流域名称	县区	流域梯田总面积/km <sup>2</sup>	流域新式梯田面积/km <sup>2</sup>	流域年降水量/mm	最大日降水量/mm	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )
水洞沟	灵武市	5.64	3.89	338.60	142.80	1.48
浅井沟主沟	盐池县	36.48	15.45	424.20	60.20	1.31
水井沟	同心县	3.78	0.50	431.40	53.20	1.35
里沟	原州区	8.61	6.59	434.80	34.60	1.53
燕寨科	彭阳县	7.99	2.18	389.90	62.60	1.29
中坪	海原县	27.78	10.97	367.20	31.80	1.32
唐家河下游	西吉县	27.08	16.79	356.20	142.80	1.34
朱庄河	隆德县	39.17	7.40	418.20	82.10	1.37
照明	泾源县	8.02	0.02	511.40	84.20	1.52

注:流域年降水量、最大日降水量为流域内多气象站平均数据。

## 2 调查内容与方法

### 2.1 调查方法

依据宁夏地区暴雨的累积雨量空间分布,确定典型区县。根据累积雨量中心分布区影响的主要河流选择典型河流。针对本次暴雨覆盖范围较广的情况,调查团队按照各县区的年均降水量,自南至北划定调查范围,选取了9个县区内具有代表性的9个小流域,开展此次暴雨调查。使用无人机对整个流域内进行正射拍摄,飞行高度控制在250 m以内<sup>[8]</sup>,将无人机获取的正射影像DOM进行土地利用解译,在GIS软件下制图得到含小流域边界影像图。根据影像初步分析小流域内土壤侵蚀发生的位置和程度。顺流域边界均匀选取典型梯田,将整座坡面的梯田群按层级数量和田层位置以3:4:3的比例分为上中下3部分<sup>[9]</sup>。采用应调尽调的原则进行外业实地测量。在野外调查中,通过奥维软件,确定规划的耕地位置。采用基于全球卫星导航系统的实时动态差分定位技术(real-time kinematic, RTK)、全站仪确定侵蚀点位,采用环刀法采集每块梯田的土样,用于测定土壤容重;用钢尺进行侵蚀体积的尺寸测量,采用断面容积法,通过卷尺测量多个断面的高、深、宽,将数据概化为与侵蚀形状接近的立方体来估算损毁体积<sup>[10]</sup>。并通过记录田面宽、田坎高等尺寸数据,有无田坝及排水设施、田坎与田面坡度等结构状况,土地利用方式、梯田类型等分类信息,将梯田类型分为:新式机修梯田、老式梯田和坡式梯田。新式机修梯

田工程质量好,标准高,地块宽大,田面平整略有向内反坡,埂坎坚实,能有效控制水土流失<sup>[11]</sup>。其中调查区域内主要存在复式埂坎式、削坡复式两类新式梯田(图1);老式梯田田面窄短陡洼,形态完全根据山体的坡度,田坎就地取材,地块狭小分散,无法进行大规模机械化作业<sup>[12]</sup>;坡式梯田田面不平,田坎通常较低矮,多用泥土或草皮简单垒砌,结构相对简单,分布于坡度较陡、地形破碎的地区<sup>[13]</sup>。受损类型和损毁长度等关键损毁指标,通过实地勘测明确侵蚀类型(侵蚀类型分类标准参考水土保持学概论<sup>[14]</sup>)及发生原因,以评估各类梯田的侵蚀情况。根据流域面积在流域内均匀选取10~20处坡耕地进行细沟侵蚀调查,从“qsdk.shp”数据中筛选面积较大的坡耕地(前75%),随机选取3~5块作为样本。在每个样本中划出10 m宽的样带(有浅沟时按实际宽度),沿坡面设置5~7条测量断面。野外测量时用3把卷尺定位,记录每条细沟的长、宽、深。遇到坡度变化处单独设置测量样带。并计算细沟侵蚀量,用于流域梯田保土量计算。

### 2.2 计算方法

本调查采用多源数据融合技术体系量化土壤侵蚀与梯田损毁程度。

土壤侵蚀量采用体积量测法计算<sup>[15]</sup>:

$$M = V \cdot \gamma \quad (1)$$

式中: $M$ 代表土壤侵蚀量(t); $V$ 代表侵蚀土方量(m<sup>3</sup>),通过实地测量获取; $\gamma$ 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>),采用环刀法采集原状土样实验室测定。

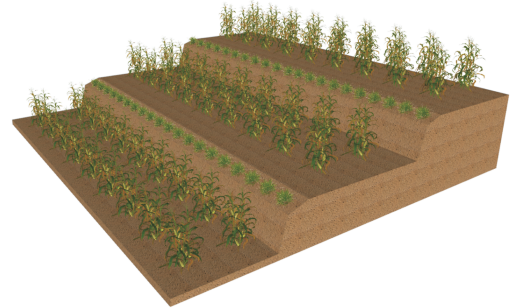
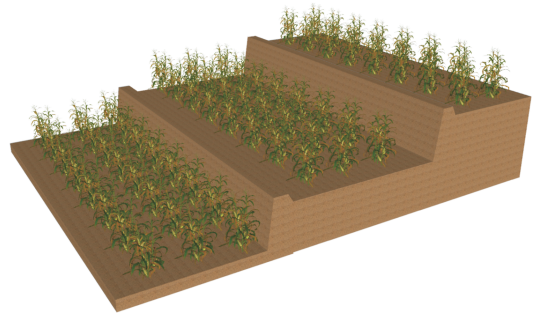
a<sub>1</sub> 复式埂坎梯田(实景图)b<sub>1</sub> 削坡复式梯田(实景图)a<sub>2</sub> 复式埂坎梯田(模型图)b<sub>2</sub> 削坡复式梯田(模型图)

图 1 调查区域新式梯田实景与模型图

Fig.1 Field photos and model diagrams of new terraces in survey area

单位面积侵蚀量  $M_d$  采用容积法进行测量:

$$M_d = \frac{M}{S} \quad (2)$$

式中:  $M_d$  代表单位面积侵蚀量 ( $t/km^2$ );  $M$  代表土壤侵蚀量 ( $t$ );  $S$  代表实际调查梯田面积 ( $km^2$ ), 通过 GIS 解译获得。

保土效益通过情景分析方法进行评价(一般细沟侵蚀量占坡耕地侵蚀量的 70%)<sup>[16]</sup> 梯田总保土量:

$$T = A - M_T \quad (3)$$

式中:  $T$  代表流域梯田总保土量 ( $t$ );  $A$  代表坡耕地侵蚀量 ( $t$ );  $M_T$  代表流域梯田侵蚀量 ( $t$ )。

梯田单位面积保土量:

$$T_d = \frac{T}{S_z} \quad (4)$$

式中:  $T_d$  代表单位面积保土量 ( $t/km^2$ );  $S_z$  代表流域梯田总面积 ( $km^2$ )。

以上数据源采用 ArcGIS 空间叠加分析确保计算单元一致性。平行实验测土壤容重 ( $RSD < 5\%$ ) 确保数据可靠性, 坐标系 (CGCS2000\_3\_Degree\_GK\_CM\_105E) 统一化确保侵蚀位点精确性, 对梯田的工程措施、侵蚀过程和空间位置 3 个方面及其相互关系进行量化系统评估。

按照中华人民共和国水利部批准《土壤侵蚀分类分级标准 (SL 190—2007)》为参考, 对本次调查涉及的流域进行土壤侵蚀分级<sup>[17]</sup>, 具体分级标准详见表 2。

表 2 土壤侵蚀分类分级标准  
Table 2 Classification and grading standards for soil erosion

侵蚀等级	单位面积侵蚀量 / ( $t \cdot km^{-2}$ )	赋分
微度	1 000	10
轻度	1 000~2 500	8
中度	2 500~5 000	6
强烈	5 000~8 000	4
极强烈	8 000~15 000	2
剧烈	>15 000	0

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤侵蚀类型特征

调查共发现崩塌、冲沟、切沟、陷穴、滑坡、泻溜及落水洞 7 种土壤侵蚀类型, 且存在同一片梯田中出现多种侵蚀类型的现象。调查发现, 梯田侵蚀以冲沟、崩塌、切沟为主(表 3), 所占比例分别为 57.2% ( $5.53 \times 10^4 t$ ), 21.7% ( $1.09 \times 10^4 t$ ), 10.8% (743.85 t)。通过对流域内农户的走访调查, 发现暴雨发生前, 农田中无明显侵蚀状况或仅存在微量细沟侵蚀, 但暴雨发生后, 各流域农田中均出现不同程度的细沟侵蚀, 严重的已发展成冲沟、崩塌侵蚀。其中冲沟侵蚀主要分布于燕寨科、照明及里沟流域; 崩塌侵蚀主要发生于朱庄河、照明流域; 切沟侵蚀主要发生在燕寨科、朱庄河、水井沟流域。

表 3 调查区域内不同类型侵蚀情况

Table 3 Different types of erosion in survey area

侵蚀类型	侵蚀数量比例/%	侵蚀量/t	侵蚀特征及其原因
冲沟	57.20	5 531.12	地表水流集中冲刷形成的较深且宽的沟壑;多生于田坎边缘地区
崩塌	21.70	1 090.96	土体未夯实,在雨水渗透和重力作用下脱离母体;高发区集中于田坎土体结构松散的机修梯田带和道路旁的梯田切面上
切沟	10.80	82.78	细小水流在坡面形成密集的水流网络,进行持续冲刷、渗透;多发生于田面内,梯田与生产道路路口接壤处
落水洞	5.40	743.85	地表水流通过垂直裂缝直接渗入地下形成垂向通道;主要分布于田坎剖面上
滑坡	3.00	235.50	降雨渗透增加土体重力,土体沿滑动面整体或分块向下滑动;多发于生产道路边坡
陷穴	1.20	390.00	雨水沿裂缝下渗,掏空松散土体所致;常见于田坎过渡带
泻溜	0.60	0.32	土体未夯实,在雨水入渗和土体重力作用下,沿着坡面下泻;集中于新建高标准梯田田坎

注:表中侵蚀数量比例表示 9 个流域各类型侵蚀数量占 9 个流域所有侵蚀数量的百分比;总侵蚀量表示各类型侵蚀在 9 个流域的总侵蚀量。

调查显示(图 2),冲沟侵蚀在多数流域中(如唐家河下游流域:侵蚀量比例为 80.55%,数量比例为 71.68%;里沟流域的侵蚀量比例为 66.67%,数量比例为 52.78%)侵蚀量比例高于数量比例。但水井沟流域冲沟数量比例达 95.68%,侵蚀量比例仅 50.00%,说明该流域单个冲沟侵蚀强度较其他流域偏低。相比之下,崩塌侵蚀对朱庄河流域梯田侵蚀量的贡献占据主导地位,其侵蚀量比例(64.29%)与

数量比例(74.82%)均远高于其他侵蚀类型。燕寨科流域的落水洞侵蚀(数量比例为 39.3%,侵蚀量比例仅为 14.29%),照明流域的陷穴侵蚀(数量比例为 42.69%,侵蚀量比例仅为 2.78%)和里沟流域的滑坡侵蚀(数量比例为 39.65%,侵蚀量比例仅为 11.11%),均表现出“高发生频率,低侵蚀量”的特征。中坪流域的泻溜侵蚀,其侵蚀量比例(2.5%)远超其侵蚀数量比例(0.06%)。

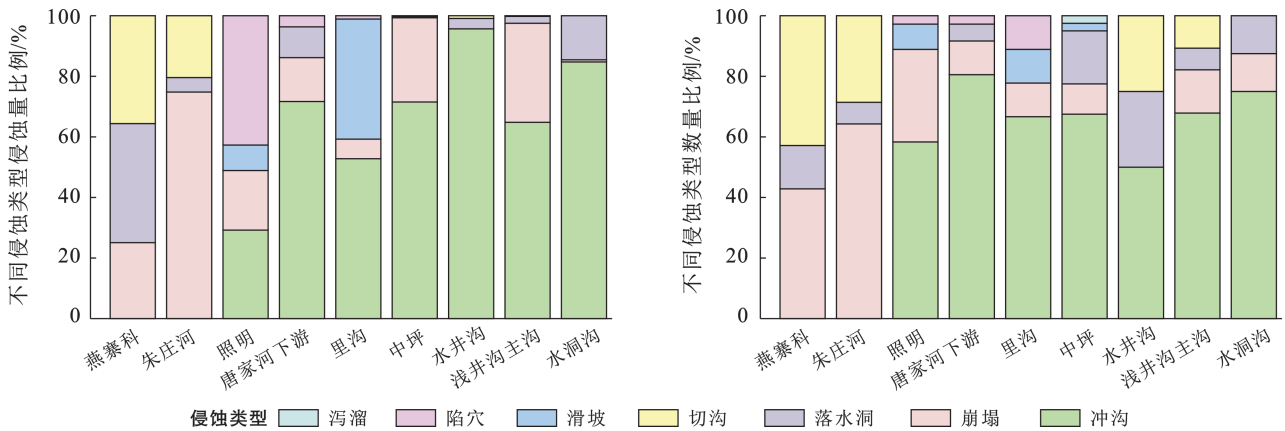


图 2 调查区域内各流域不同侵蚀类型数量及侵蚀量比例

Fig.2 Number and proportion of different erosion types at each watershed of survey area

### 3.2 土壤侵蚀位置特征

基于实地调查与 RTK 空间定位影像,标记每个侵蚀所在位点,并对梯田各部分侵蚀数量进行统计(图 3)。唐家河下游流域发生的侵蚀数量最多(72 处),水井沟流域发生的侵蚀数量最少(4 处)。各流域梯田侵蚀主要集中在整座坡面的下部梯田群,侵蚀量呈:下部梯田群>上部梯田群>中部梯田群的分布趋势。实地调研发现,梯田上部梯田群以切沟溯源侵蚀伴随基部掏蚀为主(即冲沟、落水洞侵蚀),下部梯田群则表现为渗透软化和表层剥蚀为主(即冲沟、崩塌、滑坡侵蚀)。此外,唐家河下游流域

28 号耕地的中下部梯田条带间出现了连级侵蚀现象。上层梯田水流突破田埂后,地表水流逐级递增,致使下游梯田侵蚀量增加,发生连续冲沟侵蚀,最终形成贯穿坡面的连续侵蚀沟。

### 3.3 不同类型梯田侵蚀特征

本次共调查梯田 1 485 块(老式梯田 975 块,新式梯田 475 块,坡式 35 块)其中发生侵蚀梯田 224 块(老式梯田 145 块,新式梯田 76 块,坡式 3 块),侵蚀总量为 8 074.02 t。表 4—5 显示,老式梯田侵蚀最为严重,单位面积侵蚀量达 5 347.79 t/km<sup>2</sup>,总侵蚀量达 5 865.93 t,其中发生于土质田坎的侵蚀量占老式梯

田总侵蚀量的 99%。老式梯田结构老化,排水系统缺失。土质田坎透水性差,易发生崩塌侵蚀,造成田坎垮塌。新式梯田总侵蚀量为  $1.99 \times 10^3$  t,单位面积侵蚀量仍达  $3.84 \times 10^3$  t/km<sup>2</sup>。调查中发现的新式梯田有复式埂坎式和削坡式两类,其中发生在复式埂坎式梯田的侵蚀量占新式梯田侵蚀总量的 94%。复式埂坎式梯田侵蚀主要发生于埂坎交界处,侵蚀类型以冲沟、崩塌侵蚀为主。削坡式梯田侵蚀主要发生于田坎下部,侵蚀类型以切沟、落水洞为主。坡式梯田呈现“总量低,强度高”的现象,其总侵蚀量仅 222.09 t,单位面积侵蚀量却高达  $4.65 \times 10^3$  t/km<sup>2</sup>(接近老式梯田),反映陡坡区(>25°)开发的水土失控隐患。

### 3.4 不同流域侵蚀特征

调查发现(表 6),水井沟( $3.49 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>)、水洞沟( $1.11 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>)流域坡耕地侵蚀较严重,其侵蚀类型以细沟侵蚀为主。不同区县单位面积侵蚀量为 41.41~7 080 t/km<sup>2</sup>。同心、彭阳、隆德等 7 个区县属微度侵蚀水平(<1 000 t/km<sup>2</sup>),侵蚀程度较弱。泾源县(照明流域)侵蚀程度最强,单位面积侵蚀量 7 080 t/km<sup>2</sup>,属强烈侵蚀,水洞沟流域单位面积侵蚀量达 3 150 t/km<sup>2</sup>,属中度侵蚀。不同县区梯田保土效

果不同,隆德县朱庄河流域保土效果较差,仅为 861.46 t/km<sup>2</sup>,同心县水井沟流域的保土效果最好  $3.48 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>,是照明流域的 27.6 倍。

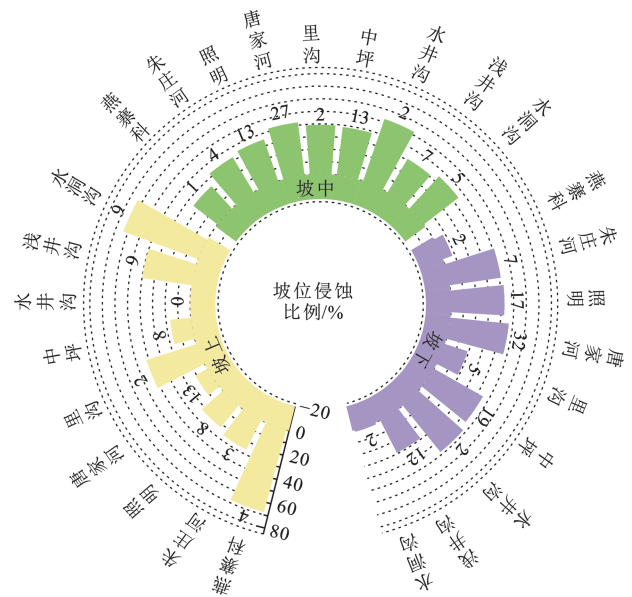


图 3 调查区域内梯田上、中、下各部分侵蚀数量及侵蚀量比例

Fig.3 Number of erosion occurrences and proportions of erosion volume in upper, middle and lower parts of terraces in survey area

表 4 调查区域各梯田类型侵蚀情况

Table 4 Erosion conditions of different terrace types in survey area

单位:t

流域	新式梯田侵蚀量		老式梯田侵蚀量		坡式梯田
	复式埂坎式	削坡式	石质田坎	土质田坎	
燕寨科	113.86	—	6.94	14.30	110.50
朱庄河	22.21	—	17.50	44.78	—
照明	1 198.83	—	—	1 193.44	—
唐家河下游	158.79	40.06	—	477.85	—
里沟	40.24	—	—	43.22	—
中坪	146.58	65.57	—	310.71	—
水井沟	0.45	—	—	326.41	—
浅井沟主沟	180.04	19.44	—	9.85	—
水洞沟	—	—	—	3 420.93	111.59
总计	1 861.00	125.07	24.44	5 841.49	222.09
	1 986.06		5 865.93		

表 5 调查区域内不同梯田类型侵蚀量及单位面积侵蚀量

Table 5 Erosion amount and erosion per unit area of different terrace types in survey area

梯田类型	侵蚀量/t	调查面积/km <sup>2</sup>	单位面积侵蚀量/(t·km <sup>-2</sup> )
新式梯田	1 986.06	0.57	3 837.98
老式梯田	5 865.93	1.17	5 347.79
坡式梯田	222.09	0.05	4 645.98

## 4 讨论

梯田建设是减少流域土壤侵蚀量的有效措施,梯田侵蚀的影响因素有多个方面。有研究<sup>[3]</sup>表明,梯田控制水土流失的有效性与梯田结构(梯田田埂质量、田坎高度及坡度)、土地利用类型、土壤质地和地形梯度、降雨强度、植被种类和覆盖度等诸多因素密切相关。

表 6 调查流域坡耕地单位面积侵蚀量、梯田单位面积侵蚀量及保土量对比  
Table 6 Comparison of erosion per unit area of slope farmland, erosion per unit area of terraces and soil conservation amount at survey watersheds 单位:t/km<sup>2</sup>

流域	坡耕地单位面积侵蚀量	梯田单位面积侵蚀量	梯田保土量
浅井沟主沟	7 270	629.51	6 640
水井沟	3.49×10 <sup>4</sup>	41.41	3.48×10 <sup>4</sup>
唐家河下游	3 820	703.71	3 110
中坪	3 280	370.00	2 910
水洞沟	1.11×10 <sup>4</sup>	3 150	7 960
朱庄河	1 050	188.21	861.46
燕寨科	4 850	157.41	4 690
里沟	1 270	203.95	1 070
照明	8 330	7 080	1 260

#### 4.1 降雨因素对梯田侵蚀的影响

降雨作为影响梯田蓄水保土效益的关键自然因素,尤其以暴雨和大暴雨对梯田结构的破坏作用最为显著<sup>[18]</sup>。从降雨分布与侵蚀状况来看,照明流域所在的泾源县年降水量为 511.4 mm,属调查区内年降雨量最高的区域,持续性强降雨易诱发壤中流,造成表土松散,从而加剧土坎梯田的侵蚀程度。结合短时强降雨事件分析,灵武市水洞沟流域曾在 4 小时内降雨 209.4 mm(据任家庄气象站,8 月 24 日 22:00 至 8 月 25 日 2:00),为监测中短时雨量最大的流域,其单位面积侵蚀量高达 3.15×10<sup>3</sup> t/km<sup>2</sup>。盐池浅井沟主沟流域于 8 月 8 日发生雨强达 66.8 mm/h 的短时暴雨,成为单小时降雨强度最大的区域,其单位面积侵蚀量也达 629.51 t/km<sup>2</sup>。已有研究<sup>[19]</sup>表明,暴雨强度与梯田侵蚀量之间存在显著正相关关系,短时强降雨尤其容易引发田埂冲决和表土剥蚀。旷兰等<sup>[20]</sup>提出的短时雨强>0.5 mm/min(30 min 雨量大于 15 mm)是梯田冲决的临界气象指标的观点,进一步支持了二者的关联性。

调查显示,冲沟侵蚀在 7 类侵蚀中发生频率与侵蚀量均居首位。强降雨作用下,细沟侵蚀不断演进,部分沟壁发生局部滑塌与崩解,推动细沟规模扩大并逐步发育为冲沟,从而导致冲沟侵蚀频发。随着雨滴击溅作用增强,径流在沟道内汇集,沟床加深、加宽,致使侵蚀量显著增大。相比之下,陷穴侵蚀虽发生频率较低,但单次侵蚀量高,呈现“低频高量”特征。陷穴侵蚀是黄土地区特有的一种侵蚀现象,其形成机制与黄土结构的不均匀性密切相关:地表水沿裂隙或孔隙下渗,对下层土体进行潜蚀掏空,最终

引发表层塌陷形成陷穴。随降雨强度增加,潜蚀作用增强,陷穴规模与深度进一步扩展,侵蚀愈发严重<sup>[21]</sup>。

#### 4.2 人为因素对梯田侵蚀的影响

在黄土高原陡坡地带修筑宽幅梯田,需配套更宽道路与更高田坎,这降低了边坡稳定性与阶梯结构抗蚀能力,也提高了崩塌灾害的风险<sup>[22]</sup>。不合理的田坎设计在暴雨中易引发连续边坡侵蚀与田坎侵蚀,且梯田近路侧常见局部洼陷,导致径流异常汇集,加剧边坡冲刷与田坎崩塌。降雨还可能诱发边坡垮塌,改变汇流路径,使水流导向路面。道路作为输沙通道,将上方梯田的径流和泥沙输送至下方,促成连续边坡侵蚀<sup>[23]</sup>。唐家河下游流域出现田坎连续侵蚀现象。观察其径流痕迹发现,径流溢至田坎时,发生强烈冲刷,田坎出现贯通上下田面的侵蚀沟<sup>[24]</sup>。在两种新式高标准梯田中,复式埂坎式梯田(由缓坡与垂直坡复合构成田坎)发生侵蚀较多,其径流于缓坡坎汇集并冲刷坎体,尤其在缓坡与垂直坎交界处受集中水流冲击,易引发冲沟和崩塌侵蚀。而削坡式梯田(采用田埂叠加垂直田坎结构)则在田面径流冲毁田埂后,在田坎下部汇流,进而形成落水洞等侵蚀。实地调查表明,照明流域存在大量不合理滴灌铺设(图 4),导致该区域侵蚀严重,在暴雨条件下加剧侵蚀发生。同时该区种植盆栽崧蓝会降低土壤蓄水能力,暴雨冲刷致使滴灌带暴露损坏,加重侵蚀。此外,尽管玉米地覆膜具有抗侵蚀性,但阻止了径流下渗<sup>[25]</sup>,在强降雨条件下,膜面汇流增加地表径流,造成梯田侵蚀加剧。

#### 4.3 其他因素对梯田侵蚀的影响

地势条件是影响梯田侵蚀发生位置的关键因素。坡度增大直接强化了径流剪切力,导致侵蚀量显著增加<sup>[26]</sup>。在不同类型梯田中,侵蚀分布存在差异。调查发现,水洞沟与燕寨科流域的坡式梯田以上部梯田群侵蚀量比例明显高于下部梯田群(图 3)。研究<sup>[27]</sup>表明,顺坡方向上总侵蚀速率总体呈波动下降趋势。新修机修梯田(如浅井沟主沟和里沟流域)因田埂结构松散,易在雨水汇集处发生局部侵蚀,整体风险较高<sup>[10]</sup>。其上部梯田群更易发生冲沟侵蚀,细颗粒在持续降雨中向下迁移,导致底部梯田群流失量常低于顶部<sup>[28]</sup>。但也有研究指出,因下部汇水累积效应更强,整座梯田自上至下的侵蚀量可能呈递增趋势<sup>[29]</sup>,朱庄河、中坪和照明流域即符合该规律(图 3)。而唐家河下游与水井沟流域中下部梯田群侵蚀更严重(图 3),可能与整座梯田上部和下部的相对高差和汇水面积有关<sup>[30]</sup>。暴雨条件下,上部梯田

群因汇水面积较小,难以形成集中股流;而中下部梯田易发育细沟,这些细沟沿坡面延长,并通过合并与分叉作用不断拓宽和向深层发育,因此侵蚀主要集中于中下部梯田群<sup>[31]</sup>。土壤质地是影响梯田抗侵蚀能力的另一重要因子。老式梯田长期耕作导致有机碳减少、团聚体稳定性降低、容重上升<sup>[32]</sup>,抗蚀性下降,下渗减少、径流和剪切力增大,从而更易发生冲

沟侵蚀<sup>[10]</sup>。新修梯田则因机械翻动导致土体疏松、容重低、压实差,强降雨时易发生内部侵蚀(如落水洞和陷穴)或地表冲刷。土壤含水率也是重要因子之一。较高含水率有利于干湿交替后结构快速恢复,缩短侵蚀响应时间。水洞沟流域平均含水率仅 4.64%,为调查区最低,土壤团聚体易遭破坏且恢复缓慢,导致干湿交替过程中发生侵蚀<sup>[9]</sup>。



a 道路汇水造成的侵蚀



b 边坡侵蚀



c 不合理灌溉造成的侵蚀



图 4 调查区域内人为因素造成的侵蚀

Fig.4 Erosion caused by human activities in survey area

#### 4.4 梯田侵蚀的防控

调查发现,缓坡石坎抗蚀性优于陡坡土坎。因此,梯田建设中应依据坡度合理选择田坎类型,陡坡区宜采用石砌或混凝土等坚固结构,并配合回填土夯实与坡面植草,以兼顾经济性与抗蚀能力。针对田埂基部易被冲刷的问题,建议加宽加高埂体、加强夯实,关键部位以石料镶边,埂顶设计为向内微反坡,并全面植草固土。同时应强化排水沟衔接处,及时修补裂缝,确保水流畅通,反坡田面或内倾排水沟均匀分散,避免集中冲刷。综合分析表明,整座坡面的下部梯田群侵蚀较为严重,主要是整座梯田缺乏有效的水沙调控措施,导致径流向下汇集能量增强。故应以综合治理为原则,在整座坡面上部修建截水沟(缓冲径流的作用)<sup>[10]</sup>中部设置反坡田面(内倾 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 可减少 71% 的径流<sup>[9]</sup>)下部建设分级排水与导流槽系统,实现径流逐级消能,从而减轻下部侵蚀<sup>[33]</sup>。同时,滴灌技术具备节水减蚀能力,但不合理铺设会加

剧局部侵蚀。建议将滴灌管理设至 25 cm 深度并进行锚固,以防暴雨冲刷导致裸露<sup>[34]</sup>。

## 5 结论

宁夏典型暴雨调查流域中,照明流域梯田侵蚀最为严重( $7\ 080\ \text{t}/\text{km}^2$ ),其次为水洞沟流域( $3\ 150\ \text{t}/\text{km}^2$ ),水井沟流域侵蚀最轻。老式农耕梯田侵蚀量较高( $5.35\times 10^4\ \text{t}/\text{km}^2$ );而新式梯田侵蚀相对较轻( $3.84\times 10^4\ \text{t}/\text{km}^2$ ),新式梯田中,复式埂坎式梯田因结构缺陷抗蚀能力相对较差。在 7 种侵蚀类型中,冲沟侵蚀量最大( $5.55\times 10^4\ \text{t}$ ),为崩塌侵蚀的 5.09 倍。在空间分布上,下部梯田群侵蚀频率最高,且多发于田坎、坎边坡及田埂等关键部位。

梯田侵蚀主要受降雨、人为及其他 3 类因素影响。高雨量与短时强降雨易诱发沟蚀;不合理的田坎设计在暴雨下常引发连续边坡及田坎侵蚀;覆膜玉米地因径流汇集加剧田面冲刷。地势条件直接影

响侵蚀集中发生的区位,土壤容重过高会增强径流,引发冲沟与崩塌;新修梯田因回填土容重低,未经压实,易同时发生冲沟侵蚀和陷穴、落水洞等内部侵蚀。梯田侵蚀防控需统筹结构设计、植被保护、排水系统与长效管护措施,系统提升整体抗蚀能力。

### 参考文献(References)

- [1] 党维勤,党恬敏,张泉,等.“7·26”暴雨调查对黄土高原水土保持工作的启示[J].中国水土保持,2021(3):24-27.  
Dang Weiqin, Dang Tianmin, Zhang Quan, et al. Enlightenment of “7·26” rainstorm survey on soil and water conservation in the Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(3): 24-27.
- [2] 王彦武,牛莉婷,张峰,等.黄土区高标准梯田生态服务功能及其价值[J].水土保持学报,2019,33(6):190-196.  
Wang Yanwu, Niu Liting, Zhang Feng, et al. Ecological service function and its value of high-standard terrace in loess region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(6):190-196.
- [3] Duan Jian, Liu Yaojun, Tang Chongjun, et al. Efficacy of orchard terrace measures to minimize water erosion caused by extreme rainfall in the hilly region of China: Long-term continuous in situ observations [J]. Journal of Environmental Management, 2021,278:111537.
- [4] Wei Wei, Chen Die, Wang Lixin, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 388-403.
- [5] 李学斌.陕西省2015年暴雨洪水防御工作回顾[J].中国防汛抗旱,2015,25(6):21-22.  
Li Xuebin. A review of flood and storm defence in Shaanxi Province in 2015 [J]. China Flood & Drought Management, 2015,25(6):21-22.
- [6] 余欣,侯素珍,李勇,等.黄河无定河流域“2017.7.26”洪水泥沙来源辨析[J].水利水运工程学报,2019(6):31-37.  
Yu Xin, Hou Suzhen, Li Yong, et al. Identifying sediment sources in Wudinghe River during “7·26” flood in 2017 [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019 (6) : 31-37.
- [7] 林祚顶,刘宝元,丛佩娟,等.山东临朐2019年“8·10”特大暴雨水土保持调查[J].水土保持学报,2021,35(1):149-153.  
Lin Zuoding, Liu Baoyuan, Cong Peijuan, et al. Soil and water conservation survey after a heavy storm on 10-th August, 2019 in Linqu, Shandong Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):149-153.
- [8] 王嘉龄,韩剑桥,张亮,等.2023年极端暴雨下中国北方土石山区-黄土区土壤侵蚀的过渡特征[J].中国水土保持科学,2025,23(2):66-76.  
Wang Jialing, Han Jianqiao, Zhang Liang, et al. The transitional characteristics of soil erosion in the earth-rocky mountain area-loess area of northern China under extreme rainstorm in 2023 [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(2):66-76.
- [9] 石学瑾.黄土丘陵区小流域梯田侵蚀空间异质性及极端降雨下侵蚀模拟[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2025.  
Shi Xuejin. Spatial heterogeneity of soil erosion on terraced fields in a small watershed of the loess hilly region and simulation under extreme rainfall events [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2025.
- [10] 刘焕永,杜鹏飞,屈丽琴,等.极端暴雨下水平梯田边坡损毁形状概化及侵蚀特征[J].中国水土保持科学,2025,23(4):75-86.  
Liu Huanyong, Du Pengfei, Qu Liqin, et al. Generalization of damaged shapes and erosion characteristics of horizontal terraced field slopes under extreme rainstorms [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23 (4):75-86.
- [11] 李晓明.浅谈机修梯田[J].中国农业信息,2014(3):166.  
Li Xiaoming. Discussion on machine repair terraced fields [J]. China Agriculture Information, 2014(3):166.
- [12] 毛泽秦,柳喜仓.对庄浪县梯田建设问题的思考与建议[J].水利发展研究,2010,10(6):65-67.  
Mao Zeqin, Liu Xicang. Thoughts and suggestions on the construction of terraces in Zhuanglang County [J]. Water Resources Development Research, 2010,10(6): 65-67.
- [13] 刘雪宁.基于情景分析的云南省高原山地坡式梯田空间优化的研究[D].云南昆明:云南大学,2023.  
Liu Xuening. Research on space optimization of slope terraced fields in plateau mountains of Yunnan Province based on scenario analysis [D]. Kunming, Yunan: Yunnan University, 2023.
- [14] 吴发启,朱首军.水土保持学概论[M].2版.北京:中国农业出版社,2016:43.  
Wu Faqi, Zhu Shoujun. Water and Soil Conservation [M]. 2nd. ed. Beijing: China Agriculture Press, 2016:43.
- [15] 王颢霖,焦菊英,唐柄哲,等.陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(11):122-130.  
Wang Haolin, Jiao Juying, Tang Bingzhe, et al. Characteristics of rill erosion and its influencing factors in slope farmland after “7·26” rainstorm in Zizhou County, Shaanxi Province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(11): 122-130.

- [16] 王婷婷,沈海鸥,梁羽石,等.不同坡度条件下连续降雨及汇流对黑土坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):12-20.  
Wang Tingting, Shen Haiou, Liang Yushi, et al. Effects of continuous rainfall and runoff under different slope conditions on hillslope soil erosion in the black soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(2):12-20.
- [17] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL 190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [18] 李慧娟,高建恩,张元星,等.延安极端降雨特性分析及对梯田侵蚀灾害影响[J].水土保持学报,2016,30(6):79-84.  
Li Huijuan, Gao Jian'en, Zhang Yuanxing, et al. Analysis of Yan'an extreme rainfall characteristics and impacts of erosion disasters on terraces [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(6):79-84.
- [19] Kang Hongliang, Wang Wenlong, Li Liangna, et al. Soil erosion characteristics of the agricultural terrace induced by heavy rainfalls on Chinese Loess Plateau: A case study [J]. Agronomy, 2024,14(8):1840.
- [20] 旷兰,田茂举,李强,等.基于不同地形因子的重庆市短时强降水时空变化特征分析[J].水电能源科学,2023,41(4):1-4.  
Kuang Lan, Tian Maoju, Li Qiang, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of short-term heavy precipitation in Chongqing based on different landforms [J]. Water Resources and Power, 2023,41(4):1-4.
- [21] 刘健斌,郭强,李赞勇,等.黄土地区高速公路设计与建设的绿色创新策略[J].公路,2025,70(1):25-36.  
Liu Jianbin, Guo Qiang, Li Zanyong, et al. Green innovation strategy of highway design and construction in loess area [J]. Highway, 2025,70(1):25-36.
- [22] 张玥,郭学锋,韩剑桥,等.黄土高原近40年梯田建设的土壤固碳效益初步估算[J].水土保持学报,2024,38(4):190-197.  
Zhang Yue, Guo Xuefeng, Han Jianqiao, et al. Preliminary estimation of soil carbon sequestration benefits of terrace construction on the Loess Plateau in the past nearly 40 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):190-197.
- [23] 喻涵,周子渊,王一,等.极端暴雨下典型小流域重力侵蚀的分布及影响因素[J].水土保持学报,2023,37(4):69-74.  
Yu Han, Zhou Ziyuan, Wang Yi, et al. Distribution and influencing factors of gravitational erosion in typical small watershed under extreme rainstorm [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(4):69-74.
- [24] Masselink R, Temme A J A M, Giménez R, et al. Assessing hillslope-channel connectivity in an agricultural catchment using rare-earth oxide tracers and random forests models [J]. Cuadernos de Investigación Geográfica, 2017,43(1):17-39.
- [25] 李佳良,杜强,刘旭梅,等.钙源及处理轮次对砂黄土MICP覆膜效果的影响[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),2025:1-11.(2025-01-06).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=JIAN20250104001>.  
Li Jialiang, Du Qiang, Liu Xumei, et al. Influence of calcium source and treatment cycles on MICP coating effect of sandy loess [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025:1-11.(2025-01-06).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=JIAN20250104001>.
- [26] 陈乐,卫伟.黄土丘陵沟壑区不同生态恢复模式下生态系统服务及其驱动因素[J].生态学报,2025,45(15):7373-7385.  
Chen Le, Wei Wei. Ecosystem services and driving factors under different ecological restoration models in the loess hilly and gully region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(15):7373-7385.
- [27] 周铃,苏正安,杨静,等.祁连山农牧交错带典型草地和梯田土壤侵蚀对团聚体有机碳的影响[J].水土保持学报,2025,39(4):198-207.  
Zhou Ling, Su Zheng'an, Yang Jing, et al. Effects of soil erosion on aggregate-associated organic carbon in typical grassland and terraced fields of the agro-pastoral ecotone of Qilian Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(4):198-207.
- [28] 黄博.降雨条件下修复加固田埂梯田减蚀效益研究[D].云南昆明:昆明理工大学,2024.  
Huang Bo. Study on the erosion reduction effect of repairing and reinforcing ridge terraces under rainfall conditions [D]. Kunming, Yunan: Kunming University of Science and Technology, 2024.
- [29] 白先发,高建恩,张元星,等.具有水窖设施的梯田苹果地抗暴雨侵蚀研究[J].水土保持研究,2015,22(4):247-252.  
Bai Xianfa, Gao Jian'en, Zhang Yuanxing, et al. Study on anti-erosion in apple orchard terrace with water cellar [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(4):247-252.

- 报, 2020, 36(7): 854-861.
- Li Jinpu, Xia Shaoxia, Yu Xiubo, et al. Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem in Hebei Province based on InVEST model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(7): 854-861.
- [22] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. *中国科学数据*, 2019, 4(1): 90-96.
- Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 90-96.
- [23] 谢耕, 吴莉萍, 陈敏. 基于土地利用变化的成都市碳储量时空格局演变特征分析[J]. *环境影响评价*, 2023, 45(6): 104-112.
- Xie Geng, Wu Liping, Chen Min. Characterization of the evolution of spatial and temporal patterns of carbon storage in Chengdu based on land use change [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2023, 45(6): 104-112.
- [24] 伍丹, 朱康文, 张晟, 等. 基于PLUS模型和InVEST模型的成渝经济区碳储量演化分析[J]. *三峡生态环境监测*, 2022, 7(2): 85-96.
- Wu Dan, Zhu Kangwen, Zhang Sheng, et al. Evolution analysis of carbon stock in Chengdu-Chongqing economic zone based on PLUS model and InVEST model [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2022, 7(2): 85-96.
- [25] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000, 404(6780): 858-861.
- [26] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 89: 67-76.
- [27] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [28] 魏熙乐, 李倩, 邓爱平, 等. 基于土地利用变化的四川省碳储量时空演变与预测及驱动因素分析[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3): 373-383.
- Wei Xile, Li Qian, Deng Aiping, et al. Spatiotemporal evolution, forecast, and driving factor analysis of carbon storage in Sichuan Province based on land use change [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3): 373-383.
- [29] 赵桐, 蒙吉军. 基于土地利用变化的成都平原经济区碳储量时空演变与情景模拟[J]. *山地学报*, 2023, 41(5): 648-661.
- Zhao Tong, Meng Jijun. Spatio-temporal evolution of land use and resulting change in carbon stock in Chengdu Plain economic zone (CPEZ), China [J]. *Mountain Research*, 2023, 41(5): 648-661.
- [30] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 等. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4307-4316.
- Wang Feicui, Wang Dongchuan, Zhang Lihui, et al. Spatiotemporal analysis of the dynamic changes in land use ecological risks in the urban agglomeration of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4307-4316.
- (上接第190页)
- [30] 练晶香, 黎焯, 丁佳艺, 等. 坡耕地黑土有机碳含量和活性组分的坡面分异规律与影响因素[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 2025: 1-13. (2025-05-19). <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2025.0096>.
- Lian Jingxiang, Li Ye, Ding Jiayi, et al. Spatial variations and determining factors of the quantity and quality of soil organic carbon along the slope of Mollisols in northeast China [J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025: 1-13. (2025-05-19). <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2025.0096>.
- [31] 刘庆, 沈东辉, 和继军, 等. 黄土坡面细沟侵蚀形态特征及横断面分异性[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 30-39.
- Liu Qing, Shen Donghui, He Jijun, et al. Morphological characteristics and cross-sectional heterogeneity of rill erosion on loess slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 30-39.
- [32] 吴瑜健, 马海林, 孙姗姗, 等. 巨大芽孢杆菌F<sub>1</sub>配施有机物料对土壤理化性质的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2025, 56(2): 353-361.
- Wu Yujian, Ma Hailin, Sun Shanshan, et al. *Bacillus megaterium* F<sub>1</sub> combined with organic materials on soil physical and chemical properties [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2025, 56(2): 353-361.
- [33] 夏文. 窄路面加宽改造项目土石方平衡与生态弃土方案优化[J]. *交通科技与管理*, 2025(16): 122-124.
- Xia Wen. Optimization of earthwork balance and ecological spoilage scheme for narrow pavement widening reconstruction project [J]. *Transportation technology and management*, 2025(16): 122-124.
- [34] Zhang Haohui, Hui Xin, Wang Wentao, et al. A multi-objective approach for optimizing mobile drip irrigation systems: Experimental verifications in northern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 659: 133334.