

大暴雨条件下宁夏生产道路侵蚀特征及影响因素

李嘉敏¹, 张祎², 刘晓君¹, 胡仁正¹, 雷雪怡¹, 陈凯³, 王静³

(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] 调查暴雨条件下宁夏回族自治区生产道路侵蚀状况, 为区域水土流失防治与高质量发展提供科学依据。[方法] 结合遥感影像及气象数据, 确定9县共17个小流域为外业区域, 每流域选取25%土质道路。采用无人机航摄(UAV)、实时动态(RTK)测量等方法, 结合断面法进行道路侵蚀强度判定。[结果] 调查区域以黄土路基道路为主(156条, 抽样调查路段总长度9.01 km), 道路侵蚀沟平均宽度和深度分别为0.20~0.76 m和0.09~0.37 m, 侵蚀宽深比1.40~4.11, 道路坡度分布范围为1.84°~10.11°, 土壤容重为0.94~1.71 kg/m³。调查道路以中度侵蚀为主(44.87%), 固原市原州区和同心县道路侵蚀最严重, 道路侵蚀强度分别以“中度侵蚀”和“中度侵蚀+强烈侵蚀”占据主导地位, 对应的平均侵蚀沟密度分别为19.80和43.37 m/m², 均属于道路侵蚀拓宽速率大于下切速率。对道路侵蚀原因的分析结果表明, 道路路面状况及其两侧土地利用类型是影响道路侵蚀最重要的因素, 其直接贡献率分别为9.39%和9.00%; 此外, 各因子间的交互作用也显著影响道路侵蚀。[结论] 在强降雨事件下, 小流域内现有生产道路的水土保持能力较弱, 易发生侵蚀。亟需推广植被缓冲带与排水设施结合的适地性技术以缓解区域严重的道路侵蚀问题, 进而降低水土流失风险, 保障黄土高原生态安全与区域可持续发展。

关键词: 道路侵蚀; 暴雨调查; 生产道路; 水土流失; 宁夏回族自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0191-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 李嘉敏, 张祎, 刘晓君, 等. 大暴雨条件下宁夏生产道路侵蚀特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 191-201. Li Jiamin, Zhang Yi, Liu Xiaojun, et al. Erosion characteristics and influencing factors of production roads in Ningxia under heavy rainstorm conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 191-201.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.022

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.022

Erosion characteristics and influencing factors of production roads in Ningxia under heavy rainstorm conditions

Li Jiamin¹, Zhang Yi², Liu Xiaojun¹, Hu Renzheng¹, Lei Xueyi¹, Chen Kai³, Wang Jing³

(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 erosion conditions of production roads in Ningxia Hui Autonomous Region under heavy rainstorm conditions were investigated, in order to provide a scientific basis for regional soil erosion control and high-quality development. [Methods] Based on remote sensing images and meteorological data, 17 small watersheds in 9 counties were determined as field survey areas, and 25% of earthen roads were selected in each watershed. Methods such as UAV (unmanned aerial vehicle) aerial photography and RTK (real-time kinematic) measurement were employed, combined with the cross-section method to determine the road erosion intensity. [Results] The surveyed area was dominated by loess roadbeds (156 road sections, with a total length of sampled sections of 9.01 km). The average width and depth of road erosion gullies were 0.20—0.76 m and 0.09—0.37 m,

收稿日期: 2025-07-15 修回日期: 2025-10-16 采用日期: 2025-10-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“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); 宁夏自然科学基金优秀青年项目(2025AAC050024); 宁夏重点研发计划项目(引才专项)(2024BEH04060)

第一作者: 李嘉敏(2000—), 女(汉族), 宁夏回族自治区石嘴山市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与碳循环。Email: 12024131486@stunxu.edu.cn.

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方面的研究。Email: liuxiaojun.lxj@163.com.

respectively, the width-to-depth ratio of erosion was 1.40—4.11, the road slope gradient ranged from 1.84° to 10.11° , and the soil bulk density was $0.94\text{--}1.71\text{ kg/m}^3$. The surveyed roads were dominated by moderate erosion (44.87%). The most severe erosion occurred in Yuanzhou District of Guyuan City and Tongxin County, where the road erosion intensity was predominantly classified as ‘moderate erosion’ and ‘moderate + severe erosion’, respectively. The corresponding average erosion gully densities were 19.80 m/m^2 and 43.37 m/m^2 , both indicating that the widening rate of road erosion was higher than the downcutting rate. Analysis of the causes of road erosion showed that road surface conditions and land use types on both sides were the most important factors affecting road erosion, with direct contribution rates of 9.39% and 9.00%, respectively. In addition, the interaction between factors significantly affected road erosion. [Conclusion] Under intense rainstorm events, existing production roads in small watersheds have weak soil and water conservation capacity and are prone to erosion. It is urgently necessary to promote site-specific technologies combining vegetative buffer strips and drainage facilities to alleviate the severe regional road erosion problems, thereby reducing the risk of soil erosion and ensuring the ecological security and regional sustainable development of the Loess Plateau.

Keywords: road erosion; intense rainstorm investigation; production roads; soil erosion; Ningxia Hui Autonomous Region

近年来,极端暴雨频率增加,叠加黄土高原固有的高强度水土流失,导致该区水土保持工作面临着更为严峻的考验^[1]。黄土高原地区广泛分布依地形而建的生产道路,其结构设计简单,建设成本低廉,是连接区域农业生产和社会经济发展的重要枢纽。然而,诸多生产道路普遍存在排水设施缺失,路面未铺装,维护管理缺位等问题,导致其面临极大的水土流失风险,这种风险在宁夏南部等地区尤为突出。宁夏回族自治区地处黄土高原西北边缘,全年70%以上降雨集中在6—9月,暴雨事件高发。暴雨期间,产流过程迅速且径流高度集中,而道路作为不透水表面,极易汇集地表径流,并使其沿纵坡方向集中下泄,极易造成道路结构性损坏,进而阻碍区域交通正常通行与农业生产^[2]。在气候变暖背景下,宁夏干旱半干旱区极端降雨事件的频率、强度及时空集中性明显增加,国家及省内对水土流失监测和专项调查提出新要求,将暴雨水土保持调查、典型小流域(监测站)观测数据分析纳入常态化工作范畴。因此,及时有效地调查暴雨后宁夏地区土质生产道路的损毁情况,评估损毁程度并分析成因,是当前水土保持工作的重点之一。已有的研究^[3]表明,高强度降雨会通过多重机制导致道路结构破坏。在暴雨来临时,雨滴首先冲击破坏土质路面结构;加之道路的汇流作用,地表径流会沿坡面集中流动,冲刷路基并形成侵蚀沟壑。由于排水措施的缺乏,水流侵蚀作用会进一步加剧,掏空路基支撑层,甚至引发路面塌陷。道路侵蚀过程既可能源于多场次降雨事件在时间分布上诱发的累积性侵蚀效应^[4],也可能由单一极端水文事件产生的非线性冲击效应直接引发^[5]。在实践层面,宁南山区实施高标准梯田工程的前提是建设满

足机械施工要求的标准化生产道路。然而,由于道路硬化(铺装)依赖村民集资且完善周期较长,在硬化完成前的过渡期内,原始土质生产道路系统极易遭受侵蚀,尤其是在遭遇大暴雨时,侵蚀程度将显著加剧^[6]。道路损毁直接影响农业机械通行和农资运输,导致农业生产效率下降,进而制约区域经济发展,最终形成“道路损毁→农业生产受阻→经济收入下降→道路维护资金不足”的恶性循环。为及时掌握宁夏地区大暴雨后土壤侵蚀现状,本研究于2024年9月18日至10月28日对宁夏回族自治区的泾源县、隆德县、彭阳县、西吉县、固原市原州区、海原县、同心县、盐池县及灵武市开展道路侵蚀实地调查。调查沿预先设计路线进行,旨在全面分析暴雨引发的侵蚀特征及主要影响因素,筛查水土保持工作中的薄弱环节,为该区域水土流失治理及新时期水土保持高质量发展提供科学依据和实践基础。

1 材料与方法

1.1 调查区域概况

宁夏回族自治区位于中国西北内陆,地处黄河中上游,地形以黄土丘陵、沟壑为主,海拔 $1\ 200\sim 2\ 955\text{ m}$,土壤以黄绵土和风沙土为主^[7],抗蚀性差。调查区域属温带大陆性干旱气候,年均降水量 $200\sim 400\text{ mm}$,降水时空分布不均,夏季多短时强降雨。调查区域覆盖宁夏中部干旱带及南部黄土丘陵区,包括固原市原州区、西吉县、彭阳县,中卫市海原县,吴忠市同心县等典型区域,调查面积 $1\ 177.52\text{ km}^2$ 。调查区域内生产道路多分布于梯田或林地两侧,道路边坡缺乏防护,地表植被以耐旱草本为主,覆盖率不足40%。入户调查结果表明,暴雨发生前,流域内

生产道路整体状况良好,路面无明显侵蚀迹象,仅少量道路的侧向排水渠存在局部损毁,但未影响其基本的通行与农业生产功能。当道路出现严重损毁时,村委会就会及时组织挖掘机等设备进行应急修复。调查重点聚焦大暴雨后生产道路的侵蚀特征、边坡稳定性及水土保持措施现状,可为生态脆弱区道路防护提供科学依据。2024年7月22日至8月24日,宁夏多地遭遇强降雨^[8]。7月22日,盐池南部、红寺堡中部、同心中部及西部、海原南部及东部、彭阳

东部及南部、隆德南部、西吉西部、泾源西部局地降大雨,彭阳县、泾源县东部降暴雨,最大降雨量为泾源县98 mm。8月8日,全区150站降雨量超50 mm,4站超100 mm,北部灵武市累计降雨量最高,达65.59 mm,防汛抗旱指挥部启动二级应急响应。8月24日,灵武市以北和盐池县西北部降大暴雨,累积雨量高值高达101.25 mm(为3次降雨中最高),6站降雨量超200 mm,33站100~200 mm,56站50~100 mm(图1)。

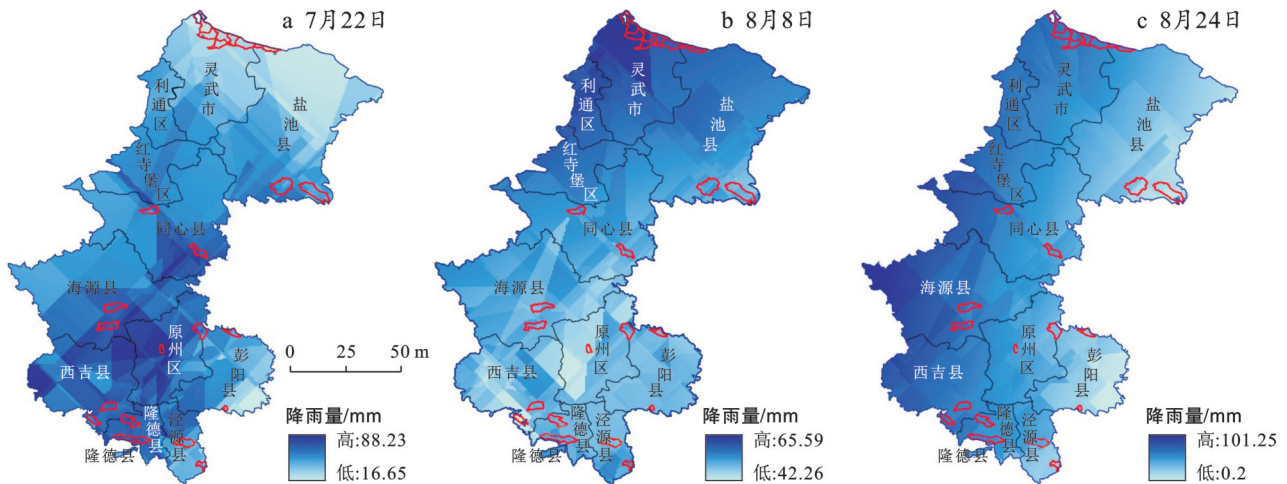


图1 调查小流域分布及3场暴雨累积雨量分布

Fig. 1 Distribution of surveyed small watersheds and cumulative rainstorm of three heavy rainstorm events

1.2 数据来源

本次调查所使用的数据主要包括宁夏地区的土地利用类型、气象条件等数据(2024年)。土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心;归一化植被指数(NDVI)数据源自国家生态科学数据中心所发布的美国国家航空航天局(NASA)MOD13A1产品;数字高程模型(DEM)获取自地理空间数据云平台,坡度数据基于该DEM提取生成;年平均降雨量数据则由国家青藏高原科学数据中心提供。所有数据均统一重采用为30 m×30 m空间分辨率,并采用WGS_1984_UTM_Zone_45N投影坐标系进行配准与后续分析。

1.3 研究方法

在暴雨驱动的道路侵蚀过程中,侵蚀沟是土壤流失的主要形态和主导途径。其形成源于地表径流汇流对路面的集中冲刷,这一水力学过程移走的土壤物质占侵蚀总量的绝对比重。因此,通过精确测量侵蚀沟的形态参数(如深度、宽度、长度),可以直接并准确地计算其导致的土壤流失体积。

生产道路侵蚀调查工作主要分为内业数据处理和外业实地勘测两部分,全面评估道路侵蚀强度及其侵蚀特征。内业工作主要包含3项。首先系统收

集调查小流域及周边降雨前后遥感影像数据并进行解译处理;同步获取调查小流域及周边气象站点本次及次暴雨降雨观测资料和调查小流域关注河流的水文资料;最终根据降雨量大小及受灾严重程度,选取9个县17个典型小流域为外业调查区域。根据前期无人机影像解译结果,运用随机抽样法选取每个流域25%土质生产道路进行调查。将17个小流域按县区进行分类,统计各县区土质生产道路基本特征,为野外核查提供详细数据。外业工作主要采用断面法进行调查和侵蚀强度判定^[9],道路调查及计算方法参考既往大暴雨调查的经验与方法。具体操作为:首先,使用高精度实时动态测量技术测量仪(real-time kinematic, RTK)实地精确测量目标道路子路段并获取高精度坐标。随后,使用100 m卷尺划定调查子路段(50~100 m不等),并采用50 m卷尺详细测量侵蚀沟的宽度与深度。在整个过程中,详细记录并观察道路的基本特征,同时使用环刀法测量土壤容重。

1.3.1 外业调查方法

在暴雨过后及时采用无人机(固定翼飞机)在保证相片原始地面分辨率不低于30 cm的条件下,设计飞行航线对调查小流域进行影像拍摄工作。根据初步确定的调查面积1 177.52 km²,实际航摄面积为

834.66 km²。统一采用 WGS-1984 坐标系, 高斯克列格投影, 中央子午线为 105°E, 进行无人机航摄。用无人机处理软件获取基于无人机的正射影像图 (DOM) 和数字地面模型 (DSM)^[10]。基于“县名_小流域名称\无人机影像”目录下的“DOM.tiff”文件, 在 GIS 软件下调用“县名_小流域名称\6 道路调查\GIS 数据库\GIS.gdb\道路”矢量数据, 提取小流域中所有道路空间分布情况, 进行生产道路线状要素解译, 要求解译的线为生产道路中间位置, 从而得到所有县区内生产道路长度为 4 901.01 km。按照道路两侧土地利用类型、高程和流域内分布情况作为抽样依据, 选取每个流域 25% 土质生产道路进行调查, 在 ArcGIS 10.7 软件上, 将道路按 100 m 为间距划分成

多个子路段 (道路端点处不足 100 m 的也可成为一个子路段), 在 Excel 2021 中建立文件名为“县名_小流域名称_道路抽样统计.xlsx”, 并对所有子路段进行随机抽样, 将抽取的子路段在 GIS 软件中给“是否调查”字段赋值为 1, 其他子路段赋为 0, 并将要调查的子路段从“道路”中导出, 命名为“调查子路段”, 存在“县名_小流域名称\6 道路调查\GIS 数据库\GIS.gdb”中, 将其转为 .kmz/kml 文件, 文件名为“调查子路段.KML”, 并导入手机定位软件 (奥维/GPS 等)。抽样道路子路段总长为 9.01 km。制作“流域生产道路及抽样子路段空间分布图”, 并标注子路段编号, 底图为 DOM/DSM, 加小流域边界与所有道路分布、调查子路段分布 (图 2)。

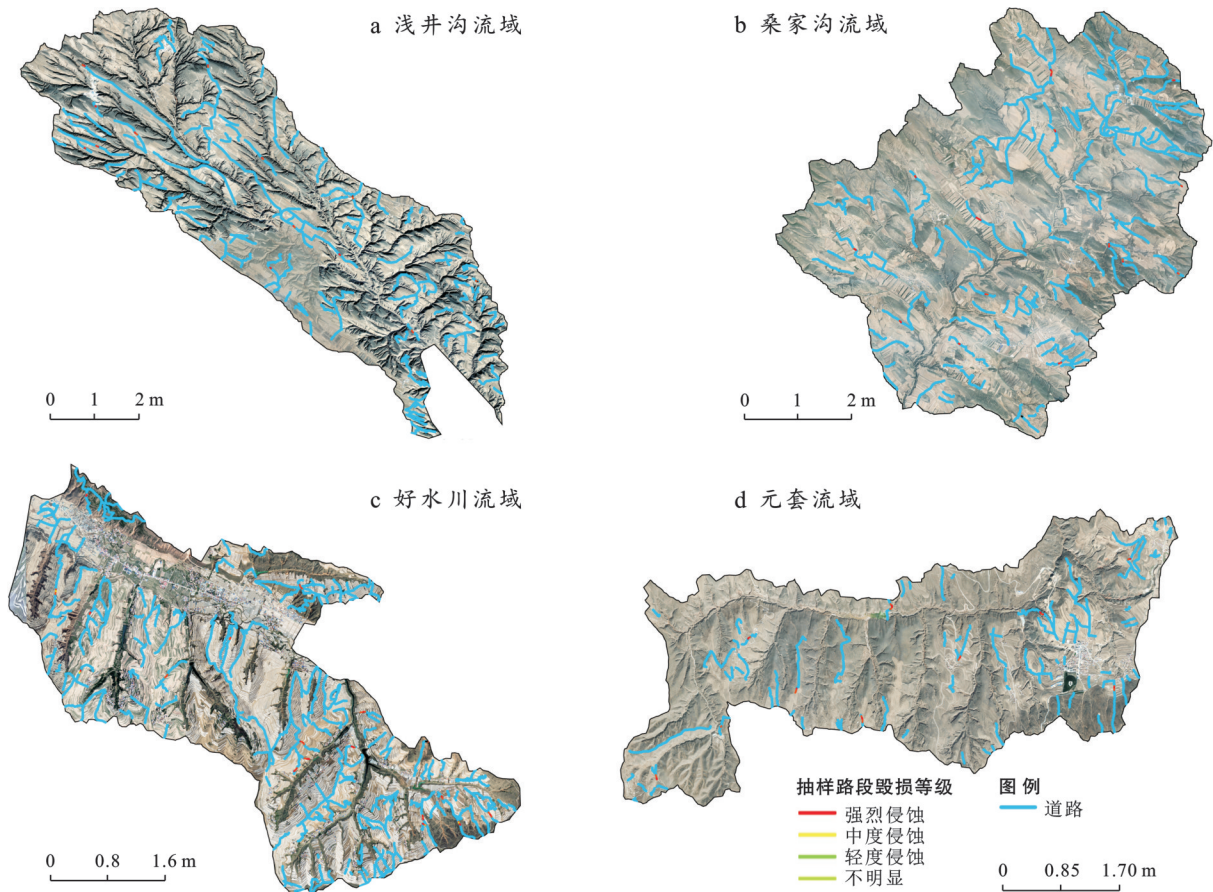


图 2 部分小流域生产道路及抽样子路段空间分布

Fig.2 Spatial distribution of production roads and sampled sub-road sections in some small watersheds

依据“调查子路段分布图”, 规划实地调查行进路线, 对抽取子路段逐一调查, 调查时以子路段起点处道路横断面为第一个调查断面, 之后每隔 10 m (布设一个调查断面 (如果形成的侵蚀较为严重, 将另外进行测量重点记录拍照), 舍去道路端点处不足 10 m 部分。

抽样道路子路段总计调查 156 条, 分别在道路起

始断面、结束断面和中间随机断面进行取样 (3 个重复), 取样体积为 100 cm³, 用以测量道路土壤容重。

1.3.2 侵蚀等级判定

在每个横断面按测量时的行进方向从左到右出现的每条侵蚀沟填写“生产道路野外调查表” (表 1)。其中侵蚀沟的宽度和深度每行必填, 其他列 1 个断面只填 1 次即可。

表 1 道路侵蚀等级分类
Table 1 Classification of road erosion levels

道路侵蚀等级	侵蚀现象	侵蚀宽、深/cm	拖拉机通行性
不明显	无明显侵蚀现象	<2	无影响
轻度	出现细沟侵蚀	2—20	基本无影响
中度	浅沟侵蚀为主	20—50	较强颠簸,可通行
强烈	切沟侵蚀为主	≥50	不可通行

1.3.3 内业整理方法

调查结果于调查当天入库,在 ArcGIS 软件下调用矢量数据,将调查点位导入 ArcGIS,按点号和距离将每个子路段分割为 10 m 间隔的断面,据野外填写的“生产道路野外调查表”,为各道路分割后的线段各字段赋值,字段名称与表格一致,定量的数值以上下两个断面平均值为准,其中平均侵蚀深度以道路断面各侵蚀沟宽深乘积之和除以道路宽度计算。外业调查完成后,首先采用环刀法测定典型样点的土壤容重。采用 Excel 2021 和 ArcGIS 协同处理收集的调查区域和周边气象站降雨观测数据以及野外实测数据,构建侵蚀参数数据库。逐步计算出宽深比、侵蚀体积、侵蚀量、侵蚀沟密度,实现道路水土流失特征定量评估。侵蚀沟的宽深比是指侵蚀沟宽度与其对应的深度的比值,无量纲。侵蚀体积为调查子路段长度与平均沟宽、平均沟深 3 者的乘积。侵蚀量为侵蚀体积与土壤容重的乘积。侵蚀沟密度为调查子路段总长度除以调查生产道路子路段总面积^[11]。

$$\text{土壤含水率} = \frac{B - C}{C - A} \times 100\% \quad (1)$$

式中:A 为环刀重(g);B 为环刀加湿土重(g);C 为环刀加烘干土重(g)。

$$\text{土壤容重} = \frac{(G_1 - G_0) \times 100}{V(100 + W)} \quad (2)$$

式中:W 为土壤含水量;G₁ 为环刀及湿土的重量(g);G₀ 为环刀的重量(g);V 为环刀的容积(cm³)。

1.3.4 数据处理

使用 Excel 2021 完成数据整理,利用 R 语言中的 rfPermute 包执行随机森林(random forest)分析,以筛选影响侵蚀量的主要因素;进一步借助 JMP 软件对显著影响因素进行功效分析,量化各因子对侵蚀量的直接与交互贡献度;最终使用 Origin 2025b 完成制图。

2 结果与分析

2.1 道路基本特征

灵武地区道路总长度最高(2 769.80 km),密度达 8.23 km/km²;盐池地区以 858.41 和 4.05 km/km²次之,而西吉县道路密度(1.90 km/km²)最低(表 2)。隆德县道路平均坡度较大,为 10.11°,彭阳县次之(8.81°);海原县(2.05°)和同心县(1.84°)坡度最缓;彭阳县道路土壤容重最大(1.71 kg/m³),海原最低(0.94 kg/m³)。道路两侧土地利用类型主要为耕地(44.44%)和林地(44.44%)。调查县区内道路以黄土路基为主,因缺乏系统排水设施,在强降雨冲刷作用下易产生严重水土流失。整体上,灵武、盐池地区道路网络发达但坡度较缓,而隆德、彭阳县坡度陡、土质密实。

表 2 调查县区生产道路基本特征

Table 2 Basic characteristics of production roads in surveyed counties and districts

县区(流域)	道路总长度/ km	道路密度/ (km·km ⁻²)	坡度/(°)	容重/ (kg·m ⁻³)	道路两侧 土地利用类型	路面状况
彭阳(黑牛沟、燕寨科)	73.69	2.71	8.81	1.71	1	1
隆德(好水川中游、朱庄河)	241.70	2.09	10.11	1.50	1	1
泾源(照明、华兴)	192.31	3.50	7.96	1.40	2	0
西吉(唐家河下游、范沟)	125.30	1.90	6.43	1.42	1	0
原州区(里沟、寨科)	152.92	2.44	4.17	1.39	4	0
海原(中坪、元套)	265.82	2.63	2.05	0.94	1	0
同心(水井沟、红柳沟)	221.07	2.90	1.84	1.09	2	0
盐池(桑家沟上游、浅井沟主沟)	858.41	4.05	3.74	1.14	2	0
灵武(水洞沟)	2 769.80	8.23	4.32	1.41	2	1

注:①道路两侧土地利用类型中,1为耕地;2为林地;3为草地;4为其他。②路面状况中,0为土;1为土、石子混合;3为其他。

2.2 道路侵蚀特征

道路侵蚀沟平均宽度和深度分别为 0.20~0.76 m, 0.09~0.37 m,其中原州区平均沟宽、沟深最大。其中以同心县的侵蚀体积(10.82 m³)和侵蚀量(17.35 t)

最大,其次为原州区(侵蚀体积及侵蚀量分别为 10.03 m³, 15.09 t)。且同心县的平均侵蚀沟密度也最大 43.37 m/m²(表 3)。由于各县区宽深比均大于 1,可知侵蚀拓宽速率大于下切速率。

表 3 调查县区生产道路损毁特征

Table 3 Damage characteristics of production roads in surveyed counties and districts

县区(流域)	平均沟宽/ m	平均沟深/ m	宽深比	侵蚀 体积/m ³	侵蚀量/t	平均侵蚀沟密度/ (m·m ⁻²)
彭阳(黑牛沟、燕寨科流域)	0.32	0.16	3.54	3.67	6.03	3.31
隆德(好水川中游、朱庄河)	0.50	0.14	3.97	6.25	9.25	3.97
泾源(照明、华兴)	0.31	0.09	3.65	2.04	3.02	4.20
西吉(唐家河下游、范沟)	0.30	0.09	4.11	1.93	3.05	2.59
原州区(里沟、寨科)	0.76	0.37	2.34	10.03	15.09	19.80
海原(中坪、元套)	0.20	0.16	1.49	5.24	8.00	15.70
同心(水井沟、红柳沟)	0.46	0.18	2.58	10.82	17.35	43.37
盐池(桑家沟上游、浅井沟主沟)	0.33	0.24	1.40	9.02	14.30	13.75
灵武(水洞沟)	0.70	0.19	3.37	5.53	9.19	36.76

各子路段存在不同程度的侵蚀沟,侵蚀宽度在 0.20~0.40 m 分布较多;侵蚀宽度大于 2.00 m 的情况极少,仅在原州区发现。统计可得,原州区的道路的侵蚀最深(超过 1.40 m),其次为海原及盐池,侵蚀深

度达到 0.80 m(图 3)。好水川小流域受暴雨侵蚀影响严重,已干扰村民正常出行与秋收,因此在本次暴雨调查开展前,政府已出资完成该流域内大部分土质生产道路的修复工作。

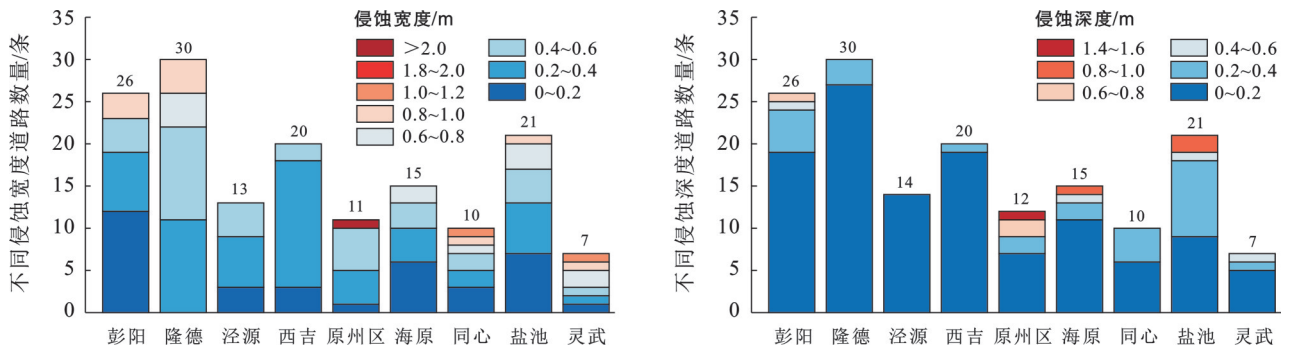


图 3 调查县区生产道路子路段平均侵蚀沟宽及沟深

Fig.3 Average erosion gully width and depth of sub-sections of production roads in surveyed counties and districts

在 9 个县区中,中度侵蚀现象居多。调查子路段中,除彭阳、海原及同心县外,中度侵蚀所占比例最高。除彭阳及泾源外,其他县区均出现强烈侵蚀,且隆德和盐池强烈侵蚀所占比例较高,分别为 29% 和 27%(图 4)。

2.3 道路侵蚀影响因素分析

随机森林数据分析可得(表 4),降雨对侵蚀量的影响最显著,影响度为 21.67%,其次是道路土壤容重,影响度为 18.74%,分别比平均影响度(11.11%)增长 95%,68.64%。

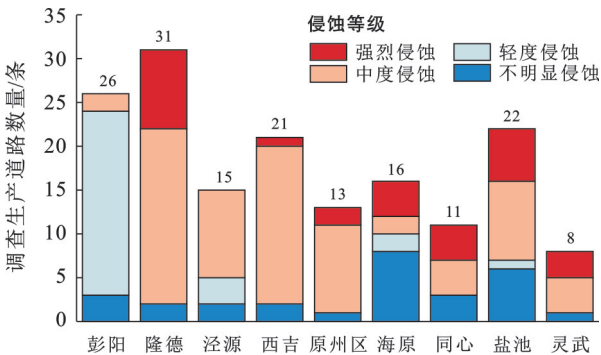


图 4 调查县区生产道路子路段侵蚀强度

Fig.4 Erosion intensity of sub-sections of production roads in surveyed counties and districts

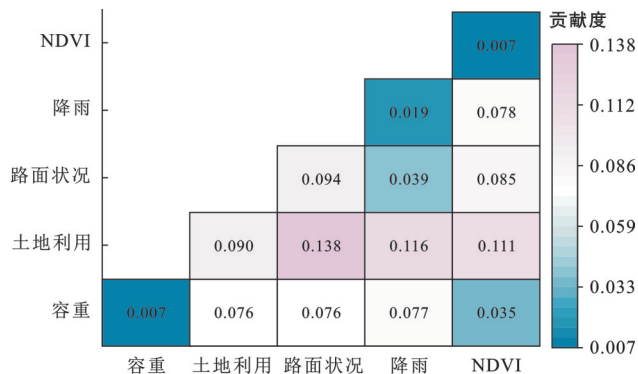
表 4 各相关因素的影响度

Table 4 Influencing degree of related factors

影响因素	影响度/%
降雨**	21.67
土壤容重**	18.74
NDVI**	16.58
路面状况**	11.05
道路两侧土地利用类型**	8.39
高程*	7.44
坡度*	6.78
是否拐弯*	6.27
措施*	3.07

注:*,**分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关。

JMP 功效分析得出(图 5),路面状况是影响土壤侵蚀量最关键的因素,贡献度为 9.39%,其次为道路两侧土地利用类型(9.00%),两者占单因素贡献度的 84.67%;容重对侵蚀量的直接贡献最小(0.71%)。整体上,道路两侧土地利用类型与其他 3 个因素的双因素交互均大于道路两侧土地利用类型的直接作用对侵蚀量的影响;其中道路两侧土地利用类型与路面状况的双因素交互作用最大,为 13.81%。



注:图中单因子贡献度指单一因子对研究中侵蚀量的贡献程度;双因子交互贡献度指两因子间结合,对侵蚀量的贡献程度。

图 5 各主要影响因素对侵蚀量的贡献度
Fig.5 Contribution of main influencing factors to erosion amount

3 讨论与建议

3.1 道路侵蚀特征及影响因素

研究^[12]表明,强降雨条件下土质道路极易发生沟蚀,且侵蚀量随降雨强度增加而升高。降雨通过引发地表径流造成水土流失,是加剧道路侵蚀的关键环境影响因素之一^[13]。极端暴雨时,短时强降雨使雨水难以及时下渗,形成地表径流^[12],易形成侵蚀沟。从暴雨骤降、地表径流快速形成到侵蚀沟出现的过程,构成道路侵蚀发生的前置条件^[14]。阎思宇等研究中提出的“流向—地貌耦合增强侵蚀”观点^[8]与本调查结果一致,生产道路转弯路段侵蚀程度普遍高于平直路段,侵蚀沟多沿车辙轨迹发育(图 6),这一现象在同心县尤为明显,该地区转弯处侵蚀沟的平均宽深比高达 2.58(较最小值 1.14 高 55.81%)。这是由于径流沿平直路面自然下泄,道路转向时水流惯性作用使径流集中,形成局部冲刷强化区,增强对路面的剪切力,加速侵蚀沟的发生(图 7)。根据实地调查可知,坡度较大的生产道路侵蚀较为严重(图 8)。较大的坡度使水流汇聚更为迅速,在极端降雨情况下,更容易形成较大的径流流量,侵蚀强度随之增大。坡度较小区域,水流相对平缓,侵蚀作用较弱^[15](图 8)。

泾源县和西吉县的道路侵蚀相对较轻,侵蚀体积分别为 2.04 和 1.93 m³(侵蚀量分别为 3.02 和 3.05 t)。本次调查结果与既有研究结论一致^[16],植被对道路侵蚀的抑制作用源于对水文过程和土壤稳定性的调节。植被覆盖度较高的路段(如朱庄河道路,图 9)侵蚀程度较轻甚至无侵蚀。植被冠层可通过拦截降雨、降低雨滴击溅作用有效减少地表扰动;枯落物与根系层能延缓径流形成、降低流速,并通过根—土互作增强土壤结构性与抗冲性,降低径流侵蚀力^[17]。但植被防护效果依赖空间配置与覆盖水平:覆盖度低或分布不连续的路段仍易发生侵蚀^[18],只有当植被达到一定盖度且连续分布时,才能充分发挥其减蚀效益;此外,西吉县道路密度较低(1.90 km/km²),人类活动干扰相对较弱^[19]。且该区域在暴雨前实施了更多维护措施,从而减轻了侵蚀程度,这与阎思宇等^[8]在西吉县五十岔小流域的观测结果一致。



图 6 调查县区内因车辙形成的道路侵蚀
Fig.6 Road erosion caused by ruts in surveyed counties and districts

调查县区内侵蚀多发生于未硬化土质道路(尤以黄土路最严重),此类道路土壤松散、黏性低、抗冲刷能力弱^[16];侵蚀路段两侧土地类型以梯田为主、林地为辅,梯田独特的地形使径流汇集并流向道路,增加了路面径流量和径流剪切力。以西吉县为例,其道路两侧以耕地为主,侵蚀沟宽深比达 4.11(较最小值 1.14 高出 72.26%),横向侵蚀更严重^[20]。生产道路通常承载较多农业机械与车辆通行,荷载车辆反复碾压导致土壤容重增大,地表紧实度提高,减少了径流入渗,增加地表径流量,最终加剧侵蚀沟的形成^[21]。

相关研究^[16]表明,多因子交互是驱动侵蚀过程的关键机制,且因子间的交互作用对侵蚀的贡献远大于单一因子的独立作用。研究^[22]发现,道路两侧土地利用类型与路面状况的交互作用贡献度最高(13.81%),远高于二者直接贡献之和,说明当不良路面状况与易加剧侵蚀土地利用类型(如耕地)叠加

时,易加剧侵蚀^[22]。道路两侧土地利用类型与降雨的交互贡献率达11.61%,表明在强降雨背景下,道路两侧土地利用类型对侵蚀的响应差异会进一步放大^[23]。NDVI与降雨的交互作用(7.74%)及与路面状况的交互(8.54%)也较为明显,表明植被覆盖在调

控降雨和路面径流侵蚀能力中具有重要的缓冲作用^[24]。当路段存在植被覆盖且路面为石子路时,道路几乎无侵蚀发生,植被根系能够有效固定土壤,而石子路面可以减缓径流流速,进一步降低了侵蚀风险^[25](图10)。



a 严重侵蚀



b 道路湿陷

图7 浅井沟小流域道路拐弯处侵蚀情况

Fig.7 Erosion conditions at road corners in Qianjinggou small watershed



a 坡度为15°道路



b 坡度为3°道路

图8 小流域不同坡度道路处侵蚀情况

Fig.8 Erosion conditions of roads with different slope gradients in small watersheds



a 植被覆盖(朱庄河小流域)



b 植被覆盖且为石子路(中坪小流域)

图9 调查县区道路覆被情况

Fig.9 Road coverage conditions in surveyed counties and districts

3.2 生产道路侵蚀防治建议

生产道路是连接田间与村镇的“生命线”,其侵蚀损坏不仅直接导致农业生产链条断裂,造成经济

损失,还会加剧区域生态失衡^[26]。宁夏南部山区属于黄土高原生态脆弱区,道路侵蚀问题尤其突出,极易打破生态系统平衡,并诱发次生生态问题。江西

等地曾通过“草灌结合”模式构建生物拦截带,有效减少了泥沙流失^[27],但本次调查发现,宁夏部分植被覆盖的道路仍存在侵蚀现象。这是因为该区域蒸发量大,气候干旱,制约了生产道路沿线植被的正常存活与生长,导致此类生物防护措施在当地的适用性受限。

为有效缓解宁夏生产道路的侵蚀问题,提出以下针对性建议:①在侵蚀严重路段布设简易排水沟、沉沙池或地下输水管,防止径流集中冲刷路面。东北黑土区在道路单侧或两侧建设侧向排水槽结果表明可降低径流含沙量^[28],且在宁夏全区(尤其南部山区与中部干旱带)具有适用性^[29],但在高陡边坡旁的生产道路需要配合生态袋护坡,避免槽体坍塌。在道路两侧建设植被缓冲带,选择本地耐旱深根植物固土护坡^[16],可参考Cao等^[18]提出的“草-沟-管”一体化技

术,实现生态与工程措施协同防护。②优化道路设计与维护机制。依据区域地形差异与土壤质地,因地制宜制定防护方案。彭阳县梯田道路采用“拱形+砾石”铺面,中间高两侧低的曲面设计(拱高0.1~0.2 m),分散径流避免集中冲刷,路面产沙量比平直路减少62%^[11]。建议在土质路面掺入适量砾石或固化剂,提高抗蚀性及承压能力,尤其在车辆频繁通行的路段^[30]。建立暴雨前后道路巡查与快速修复机制,对已形成侵蚀沟的路段及时填埋压实,防止侵蚀沟进一步下切扩张;此外,应避免在道路边坡范围内埋设管道,防止人为破坏路基稳定性。③在道路规划阶段应优先避让陡坡、汇水线等高侵蚀风险区域,若无法避让,则需配套采取强化防护措施。同时,调整道路两侧土地利用类型,避免双侧均为耕地或林地,适当保留草本植被带,以截流泥沙,减缓径流^[21]。



a 石子路面侵蚀



b 黄土路面侵蚀

图10 红柳沟小流域道路路面状况

Fig.10 Road surface conditions in Hongliugou small watershed

4 结论

通过对宁夏黄土高原9县17个小流域的实地调查,明确暴雨条件下生产道路侵蚀的严重性及主要影响因素。结果表明,调查区道路以中度侵蚀为主,侵蚀沟平均宽度0.20~0.76 m,深度0.09~0.37 m,宽深比1.40~4.11;固原市原州区和同心县侵蚀最为严重,平均侵蚀沟密度分别为19.80和43.37 m/m²。降雨、容重、NDVI值、路面状况和道路两侧土地利用类型为影响道路侵蚀的5个关键因素;路面状况直接贡献度最高(9.39%),道路两侧土地利用类型次之(9.00%),且因子间交互作用对侵蚀的贡献远大于单一因子,尤以道路两侧土地利用类型与路面状况的交互效应最强(13.81%)。这表明不良路面与道路两侧易侵蚀土地利用类型的组合会加剧侵蚀。综上所述,道路侵蚀防治需综合考虑自然与人为因素的交互作用,推广植被缓冲带与排水设施结合的技术模式,并

优化路面材料与道路两侧土地利用类型布局,以提升道路抗蚀能力,保障区域生态与农业可持续发展。

参考文献(References)

- [1] 郑美君,查元源,杜帅.黄土高原农业区蒸散发时空演变与环境因子贡献研究[J].农业机械学报,2025,56(8):52-61.
Zheng Meijun, Zha Yuanyuan, Du Shuai. Spatiotemporal evolution of evapotranspiration and contribution of environmental factors in Loess Plateau agricultural region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(8):52-61.
- [2] 温艳茹,余强毅,杨扬,等.黑土小流域沟道分布遥感监测及主控因素研究[J].农业资源与环境学报,2021,38(6):1074-1083.
Wen Yanru, Yu Qiangyi, Yang Yang, et al. Gully distribution monitoring based remote sensing and key driving factors in the catchment scale of Mollisol region [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,

- 2021,38(6):1074-1083.
- [3] 杨波,焦菊英,马晓武,等.2022年黄土高原典型暴雨侵蚀及洪水灾害调查分析[J].水土保持通报,2022,42(6):1-13.
Yang Bo, Jiao Juying, Ma Xiaowu, et al. Investigation and analysis of typical rainstorm erosion and flood disaster on Loess Plateau in 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):1-13.
- [4] Zhang Yan, Zhao Yiyang, Liu Baoyuan, et al. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 284: 106580.
- [5] 赵龙山,樊春华,李开凤.乡村聚落土壤侵蚀环境与水土流失研究综述[J].中国水土保持科学,2019,17(6):140-147.
Zhao Longshan, Fan Chunhua, Li Kaifeng. A review of soil erosion environment and soil and water loss for rural settlement [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(6):140-147.
- [6] 周立梅,纪丽娟.强降雨山洪灾害防范应对能力提升浅析:宁夏回族自治区8月24—25日强降雨防范应对情况分析[J].中国减灾,2024(23):28-31.
Zhou Limei, Ji Lijuan. Analysis on improving the ability to prevent and respond to torrential rainfall: Analysis on the prevention and response to heavy rainfall in Ningxia Hui autonomous region on August 24—25 [J]. Disaster Reduction in China, 2024(23):28-31.
- [7] 李百云,许泽华,郭鑫年,等.宁夏不同生态类型区土壤养分状况比较分析[J].寒旱农业科学,2024(5):434-440.
Li Baiyun, Xu Zehua, Guo Xinnian, et al. Comparative analysis of soil nutrient status across different ecological zones in Ningxia [J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2024(5):434-440.
- [8] 阎思宇,李斌斌,于坤霞,等.2022年“7·13”暴雨下生产道路侵蚀强度调查:以宁夏回族自治区西吉县五十岔小流域为例[J].水土保持通报,2022,42(6):14-22.
Yan Siyu, Li Binbin, Yu Kunxia, et al. Investigation on erosion intensity of production roads under “7·13” rainstorm in 2020: Taking Wushicha small watershed at Xiji County, Ningxia Hui Autonomous Region as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6):14-22.
- [9] 陈竹安,施陈敬,冯祥瑞,等.低空多旋翼无人机航测在秀美乡村规划建设中的应用[J].测绘通报,2019(8):144-148.
Chen Zhu'an, Shi Chenjing, Feng Xiangrui, et al. Application of aerial survey of low-altitude multi-rotor UAV in beautiful rural planning and construction [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(8):144-148.
- [10] 王生菊,刘文昊,靳瑰丽,等.新疆草地上生物量时空变化及对气候因子的响应[J].草地学报,2025,33(7):2320-2332.
Wang Shengju, Liu Wenhao, Jin Guili, et al. Temporal and spatial changes of grassland aboveground biomass and its response to climate factors in Xinjiang [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(7):2320-2332.
- [11] 刘焕永,杜鹏飞,赵莹,等.暴雨条件下黄土高原荞麦地的沟蚀特征:以陕西省定边县为例[J].水土保持研究,2024,31(5):1-8.
Liu Huanyong, Du Pengfei, Zhao Ying, et al. Characteristics of gully erosion on buckwheat field in the Loess Plateau under heavy rainfall conditions: A case study in Dingbian County, Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(5):1-8.
- [12] 李朋飞,李伟光,翁学先,等.基于LiDAR的黄土丘陵沟壑区道路侵蚀及其影响因素[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(2):83-92.
Li Pengfei, Li Weiguang, Weng Xuexian, et al. Unpaved road erosion in the hilly-gully region of Loess Plateau and its impacting factors based on LiDAR [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(2):83-92.
- [13] 孜来布·阿布来提.新疆近10年降雨量与地表径流时空变化研究[J].水利科技与经济,2025,31(2):134-138.
Zilaibu·Abulaiti. Temporal and spatial changes of rainfall and surface runoff in Xinjiang in recent 10 years [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2025,31(2):134-138.
- [14] 赵新凯.毛管末端冲洗阀水力性能测试及其在含沙水滴灌系统中应用研究[D].河北保定:河北农业大学,2021.
Zhao Xinkai. Research on hydraulic performance test of flushing valve at end of capillary and its application in sandy drip irrigation system [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2021.
- [15] 黄建.黄土沟壑区高速公路总体设计及关键技术问题分析[J].公路,2024,69(5):123-127.
Huang Jian. Overall design and key technical issues analysis of highways in loess gully region [J]. Highway, 2024,69(5):123-127.
- [16] Liu Yaojun, Hu Jianmin, Wang Tianwei, et al. Effects of vegetation cover and road-concentrated flow on hill-slope erosion in rainfall and scouring simulation tests in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2016,136:108-117.
- [17] 胡保安,李祖政,吴会峰.黄土高原生态系统服务权衡对人为和自然因素的空间非平稳响应[J/OL].环境科学,2025:1-15.(2025-08-21). <https://link.cnki.net/>

- doi/10.13227/j.hjxx.202505059.
- Hu Baoan, Li Zuzheng, Wu Huifeng. Spatially non-stationary responses of ecosystem service trade-offs to anthropogenic and natural drivers on the Loess Plateau [J/OL]. *Environmental Science*, 2025; 1-15. (2025-08-21). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjxx.202505059>.
- [18] Cao C S, Li Chen, Gao Wangsheng, et al. Impact of planting grass on terrene roads to avoid soil erosion [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 78(3):205-216.
- [19] 徐倩, 焦菊英, 严晰芹, 等. 道路侵蚀研究的进展与展望 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4):357-367.
- Xu Qian, Jiao Juying, Yan Xiqin, et al. Progress and prospect of research on road erosion [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4):357-367.
- [20] 吴可, 李镇, 齐志国, 等. 冀西北间山盆地切沟断面特征分析 [J]. *河北地质大学学报*, 2022, 45(2):39-45.
- Wu Ke, Li Zhen, Qi Zhiguo, et al. Analysis on the characteristics of gully cross section in the basin of north-west Hebei mountains [J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2022, 45(2):39-45.
- [21] 刘娜, 王志洋. 路域边坡六棱砖不同铺设方式下的生态修复效果研究 [J]. *黑龙江环境通报*, 2022, 35(4):116-120.
- Liu Na, Wang Zhiyang. Study on ecological restoration effects of different laying methods of hexagonal bricks on roadside slopes [J]. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2022, 35(4):116-120.
- [22] Cimusa Kulimushi L, Bigabwa Bashagaluke J, Prasad P, et al. Soil erosion susceptibility mapping using ensemble machine learning models: A case study of upper Congo river sub-basin [J]. *Catena*, 2023, 222:106858.
- [23] 王梦竹, 许珊珊, 黎树式, 等. 人类活动和气候变化影响下钦江近60年悬浮泥沙浓度变化 [J/OL]. *热带海洋学报*, 2025; 1-13. (2025-08-25). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=RDHY20250825001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- Wang Mengzhu, Xu Shanshan, Li Shushi, et al. Variations of suspended sediment concentration in the Qinjiang River in recent 60 years based on human activities and climate change [J/OL]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2025; 1-13. (2025-08-25). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=RDHY20250825001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [24] 田风霞, 刘刚, 郑世清, 等. 草本植物对土质路面径流水动力学特征及水沙过程的影响 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10):25-29.
- Tian Fengxia, Liu Gang, Zheng Shiqing, et al. Influence of herbaceous plants on runoff hydraulic characteristics and sediment generation on terrene roads [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(10):25-29.
- [25] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5):1-13.
- Zhang Guanghui. Advances and prospects for gully erosion researches [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5):1-13.
- [26] 张强, 郑世清, 田风霞, 等. 黄土区土质道路人工降雨及放水试验条件下产流产沙特征 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5):83-87.
- Zhang Qiang, Zheng Shiqing, Tian Fengxia, et al. Runoff and sediment yield characteristics of earth road under artificial rainfall and simulated overland flow tests conditions in Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(5):83-87.
- [27] 唐丽, 谢勇, 杨威, 等. 稻草覆盖和厢边种植大豆对玉米产量、养分利用及径流损失的影响 [J]. *南方农业学报*, 2019, 50(6):1204-1210.
- Tang Li, Xie Yong, Yang Wei, et al. Effects of rice-straw mulching and soybean planting around the maize block on maize yield, nutrient utilization and runoff loss [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(6):1204-1210.
- [28] 吴旭, 陈强, 郭明明, 等. 东北黑土区可耕作地埂技术的应用效果 [J]. *水土保持通报*, 2025, 45(2):181-189.
- Wu Xu, Chen Qiang, Guo Mingming, et al. Application effects of tillable earth bund technology in black soil region of Northeast China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(2):181-189.
- [29] 杨进生, 李巨芬, 王宇, 等. 大同盆地高钾、高氟水形成环境遥感影像分析 [J]. *遥感信息*, 2008, 23(3):87-91.
- Yang Jinsheng, Li Jufen, Wang Yu, et al. Remote sensing image analysis of the endemia formed environment in Datong Basin [J]. *Remote Sensing Information*, 2008, 23(3):87-91.
- [30] Potter K N, Carter F S, Doll E C. Physical properties of constructed and undisturbed soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(5):1435-1438.