不同恢复年限矿山排土场边坡细沟侵蚀特征

刘宇辰[1,2,3], 刘艳萍[2,3], 高 永[1]

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;
2.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 3.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要: [目的] 系统阐明生态恢复年限对露天煤矿排土场边坡细沟侵蚀特征及土壤理化性质演变的影响,解析细沟侵蚀特征与土壤理化性质的关联性,为矿区生态修复和水土保持措施优化提供理论参考。[方法] 以典型露天煤矿排土场边坡为对象,选取5个不同恢复年限的边坡样地,采用空间代替时间的方法,探究不同恢复年限排土场边坡的土壤理化指标和细沟密度、宽深比、割裂度及侵蚀量等形态学指标的变化,以及土壤理化性质对细沟的影响。[结果] 侵蚀强度在恢复初期较为剧烈,后期逐渐趋缓。侵蚀模数从恢复1 a的11 597.57 t/(km^2·a)下降至恢复12 a的5 658.24 t/(km^2·a)。随恢复年限增加,细沟密度与割裂度显著上升,说明防控措施虽未完全抑制沟网扩展,但有效降低了侵蚀强度。细沟宽深比在12 a间下降了21.50%,形态由宽浅型转为窄深型;土壤理化性质方面,恢复初期细粒流失,粗粒富集;随恢复时间增加,表层土壤容重下降,孔隙度与饱和持水量显著提高;有机质与速效养分含量在恢复8 a时达到峰值,之后趋于稳定。[结论] 排土场边坡恢复过程中,土壤容重是影响细沟侵蚀模数的关键因子,而土壤结构和养分是提高土壤抗蚀性能的重要保障。

关键词: 露天煤矿; 排土场边坡; 细沟侵蚀; 恢复年限; 土壤理化性质

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0041-12 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 刘宇辰, 刘艳萍, 高永.不同恢复年限矿山排土场边坡细沟侵蚀特征[J].水土保持通报,2026,46(3):41-52. Liu Yuchen, Liu Yanping, Gao Yong. Rill erosion characteristics on mine dump slopes with different restoration durations [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):41-52.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.015 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.015**

Rill erosion characteristics on mine dump slopes with different restoration durations

Liu Yuchen[1,2,3], Liu Yanping[2,3], Gao Yong[1]

(1.*College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2.*Yinshanbeilu Grassland Eco-Hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 3.*Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of ecological restoration durations on rill erosion characteristics and the evolution of soil physicochemical properties on dump slopes of open-pit coal mines were systematically investigated in order to examine the relationships between rill erosion characteristics and soil physicochemical properties and provide theoretical reference for ecological restoration and soil and water conservation in mining areas. [Methods] Typical dump slopes of open-pit coal mines were selected as the research objects, and five slope plots with different restoration durations were selected. A space-for-time substitution approach was adopted to investigate changes in soil physicochemical indicators and morphological indicators of rill erosion, including rill

收稿日期: 2025-11-08 **修回日期:** 2025-12-05 **采用日期:** 2025-12-12

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项课题"山水林田湖草沙多维梯级协同治理与生态功能提升技术"(2024JBGS0023-4); 创建鄂尔多斯国家可持续发展议程创新示范区项目(2022EEDSKJXM005)

第一作者: 刘宇辰(2000—),女(汉族),内蒙古自治区锡林浩特市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 2387913664@qq.com。

通信作者: 高永(1962—),男(汉族),内蒙古自治区包头市人,博士,教授,博士研究生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email: 13948815709@163.com。

density, width-to-depth ratio, dissection degree, erosion amount, and the influence of soil physicochemical properties on rills. [Results] Erosion intensity was most severe in the early stage of restoration and gradually decreased in later stages. The erosion modulus decreased from 11 597.57 t/(km²·a) at 1 year of restoration to 5 658.24 t/(km²·a) at 12 years. With increasing restoration durations, rill density and dissection degree increased significantly, indicating that although control measures did not completely suppress the expansion of the rill network, they effectively reduced the erosion intensity. The rill width-to-depth ratio decreased by 21.50% over 12 years, and the morphology changed from wide-shallow to narrow-deep. In terms of soil properties, the early restoration stage was characterized by fine particle loss and coarse particle enrichment. With increasing restoration duration, surface soil bulk density decreased, while porosity and saturated water-holding capacity significantly increased. Organic matter and available nutrient content reached their peak at 8 years of restoration and then stabilized. [Conclusion] During the restoration process of dump slopes, soil bulk density is a key factor affecting the erosion modulus, while soil structure and nutrients provide important support for erosion resistance.

Keywords: open-pit coal mine; dump slope; rill erosion; restoration duration; soil physicochemical properties

在“双碳”战略与能源安全并重的背景下,煤炭依旧是中国主体能源,并被赋予新的战略定位[1]。内蒙古自治区作为中国最重要的煤炭生产基地,2024年原煤产量达1.30×10^9 t,稳居第一大产煤省区。大规模煤炭资源开采在保障能源供应的同时,也引发了严重的生态环境问题[2-3]。露天煤矿开采形成的大规模排土场边坡,因其松散堆积体结构、贫瘠基质条件及陡峭地形特征,成为矿区生态退化的典型代表[4]。研究[5]表明,这类人工边坡的水土流失强度可达自然地貌的10倍以上。细沟侵蚀作为排土场边坡土壤侵蚀的主要形式,通过切割坡面、搬运土壤颗粒,不仅导致表层肥沃土壤流失,更破坏了植被恢复的立地基础,最终制约生态系统的可持续恢复[6-7]。因此,对矿区排土场边坡进行细沟侵蚀研究,对于改善矿区生态环境、实现矿区的可持续发展具有重要意义。

目前,关于边坡细沟侵蚀的研究主要集中在以下方面:①细沟形态特征的定量描述。随着三维激光扫描与无人机倾斜摄影等技术的普及,毫米级点云数据已成为获取细沟三维形态参数的主流手段。姚怡航等[8]利用无人机贴近摄影测量坡面细沟,多期模型能够清晰刻画细沟发育过程;张攀等[9]利用三维激光扫描仪测量,证实细沟形态参数之间存在明显的相关关系。但受野外复杂地形及仪器布设条件限制,三维激光扫描、无人机摄影测量等高技术手段在矿区边坡的长期、多点监测中仍难以普及,钢尺、卷尺等传统接触式测量因其简便易行、成本低廉而被广泛沿用。崔志强[10]、赵长兴[11]即采用该方法对排土场边坡细沟的沟长、沟宽、沟深等关键形态指标进行了人工量测,刻画了细沟侵蚀的几何特征,为后续高精度研究提供了基础参照;②细沟侵蚀影响因素的探讨。短历时高强度降雨是激发细沟侵蚀的最主要外营力,雨强大于土壤入渗速率后产生地表径流,是细沟形成的开始。李霞等[12]在研究红壤坡面时得到降雨是细沟侵蚀的主要驱动因素,降雨强度、降雨历时与细沟侵蚀量呈正相关;排土场是由采矿废料混合堆积而成的松散体[13],其物理化学性质极差,因此机械组成、土壤结构与稳定性、有机质与养分含量成为影响细沟侵蚀的重要因素;此外,植被是生态修复中控制侵蚀的关键因素,植被通过地上冠层截留降雨、削弱溅蚀,地表枯落物层阻滞径流、增强入渗,以及地下根系固结土壤、提升抗剪强度等方式,显著抑制排土场边坡细沟的发生与发展[14-15]。近年来,随着中国生态文明建设的持续推进,排土场生态修复研究取得了显著进展,但当前针对排土场边坡的研究多集中于单一恢复年限的土壤改良或植被重建,而非对不同恢复年限背景下细沟侵蚀的演变过程,尤其是土壤理化性质如何影响细沟侵蚀的形态发育与侵蚀强度的互馈关系缺乏系统认知。此外,大多数研究未能明确区分不同修复模式的影响,难以将年限效应从措施效应中剥离,从而制约了对特定修复模式长期效果的精准评估。基于此,本研究以满来梁露天煤矿排土场为研究对象,聚焦于“沙柳沙障+混播草籽”这一典型且长期应用的修复模式。采用空间代替时间的方法来研究不同恢复年限排土场边坡细沟特征与土壤理化的变化规律,探究细沟特征与土壤理化性质关键属性之间的关联。研究结果旨在为评估“沙柳沙障+混播草籽”模式的长期效果提供初步数据和理论参考,也可为后续修复工程的监测与评估指标选择提供科学依据。

1 研究区概况

满来梁煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗纳林陶亥镇境内,该矿采用露天开采方式,矿

区面积共7.904 4 km^2,核定年生产能力为2.40×10^6 t。研究区地处鄂尔多斯东北部,属于典型的黄土丘陵沟壑区,平均海拔约为1 271 m。当地气候为温带大陆性气候,年均气温为6.2 ℃,年均降雨量为400 mm,降雨年际与月际变异大,且多以短时强降雨形式集中出现在7—8月,这是引发研究区水土流失的主要外营力。年均蒸发量为2 200 mm,蒸发量显著大于降水量。地域性土壤为砂壤土,保水保肥能力弱,易受风蚀、水蚀。研究区周边植被以沙生植被、草甸植被为主,主要包括披碱草(*Elymus dahuricus*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)等。矿区排土场平台及边坡植被以人工种植为主,主要有沙柳(*Salix psammophila*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、草木樨(*Melilotus suaveolens*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)等。

2　材料和方法

2.1　样地选择

基于满来梁煤矿现有生态治理模式,采用空间代替时间的研究方法,在统一的"沙柳沙障+混播草籽"的治理模式下选取5个不同恢复年限的边坡样地作为研究对象,恢复年限分别为1,2,3,8和12 a。其中沙柳沙障为机械沙障,采用1～2 a生的沙柳枝条扦插,混播草籽主要包括紫花苜蓿,草木樨。所有样地的修复工程均严格遵循"分层堆放-机械压实-覆土-生物绿化"修复工艺。在防控措施保持一致的前提下,探讨修复年限单一变量的生态效应。研究区近12 a平均降雨量为431 mm,与区域多年平均降雨量基本一致,研究时段的气候背景具有代表性。

野外调查于2024年8月20日至28日开展。调查期间未发生降水事件,确保了观测条件的一致性。在研究区域内,针对不同恢复年限的边坡,采用随机取样法布设调查样方,样方设计为长方形,宽度统一为3 m,长度依据坡长确定。所选样地均位于内排土场阳坡,试验样地的基本地形特征与植被状况详见表1。

恢复初期的优势物种以人工播种的紫花苜蓿和一年生先锋草本植物为主。随恢复年限的增加,优势物种转变为多年生乡土蒿类植物。样地坡长范围为16～20 m,坡度介于32°～38°,存在微小波动,但其平均坡度为35.2°,且变异系数C_v极低仅为0.06,表明本研究在相对均一的地形条件下展开,有效降低了坡度这一关键地形因子对结果分析的混杂影响。

表1　不同恢复年限边坡情况

Table 1　Slope conditions with different restoration durations

恢复年限/a	海拔高度/m	坡长/m	坡向	坡度/(°)	优势物种	植被覆盖度/%
1	1 272.33	16	阳坡	35	猪毛菜、狗尾草	38.84
2	1 274.66	18	阳坡	36	猪毛菜、紫花苜蓿	50.51
3	1 273.70	18	阳坡	32	紫花苜蓿、冷蒿	47.43
8	1 273.69	20	阳坡	35	猪毛蒿、白沙蒿	42.21
12	1 279.69	20	阳坡	38	猪毛蒿、白沙蒿	42.15

2.2　研究方法

2.2.1　细沟测量

在布设的样方内从排土场边坡的坡顶到坡脚,每2 m设置一个测量段。在每个测量段内,选取测量段中线位置为观察基准线,利用不锈钢直尺,对通过基准线的细沟按从左到右的顺序依次进行测量,具体测量指标包括:细沟的长度、宽度、深度。未与基准线相交的细沟视为非连续性细沟,按无效数据剔除[16]。根据细沟测量指标计算细沟截面几何形态基础指标,具体包括[17]:细沟总长度(L, m)、平均细沟宽度(W, cm)和平均细沟深度(D, cm)。细沟发育衍生指标分别包括:细沟的宽深比(RR)、细沟密度(RD, m·m^{-2})和细沟割裂度(RDD,%),分别反映细沟的形态特点;细沟在坡面的分布情况;坡面的破碎程度,具体计算公式为

$$RR=\frac{W}{D} \tag{1}$$

$$RD=\frac{L}{A} \tag{2}$$

$$RDD=\frac{L\cdot W}{A} \tag{3}$$

式中:RR为细沟的宽深比;RD为细沟密度(m/m^2);RDD为细沟的割裂度(%);W为平均细沟宽度

(cm)；D为平均细沟深度(cm)；L为细沟总长度(m)；A代表样方面积(m^2)。

细沟侵蚀量与侵蚀模数的计算依赖于对细沟横截面积的估算。本研究在野外实测中发现，排土场边坡土质松散，细沟形态不稳定，精确测量沟底宽度极易导致沟壁塌落，操作性不佳。为保证测量的可行性与一致性，本研究借鉴在类似困难立地条件下广泛采用的矩形截面估算法[18]。该方法可能会在一定程度上高估侵蚀量，但其观测值的相对变化趋势足以可靠地揭示侵蚀的发展过程与防控措施的效果。其计算公式为

$$\mathrm{REA}=\frac{L\cdot W\cdot D\cdot \mathrm{BD}}{A} \tag{4}$$

$$\mathrm{REM}=\frac{L\cdot W\cdot D\cdot \mathrm{BD}}{A\cdot t} \tag{5}$$

式中：REA为细沟侵蚀量(t/km^2)；REM为细沟侵蚀模数[$t/(km^2\cdot a)$]；BD为土壤容重(g/cm^3)；t为排土场边坡的恢复时间(a)。

2.2.2 土壤样品采集及测定

在相同恢复年限排土场边坡的坡上、坡中和坡下3个区域进行土壤采集，每个区域内随机选取3个1 m×1 m的样方，共计45个样方。采用随机取样法，垂直向下采集0—30 cm的土层样品，范围为0—10，10—20，20—30 cm。同时使用100 cm^3环刀采集原状土。土样分别装入聚乙烯自封袋与铝盒并进行标注。带回实验室测定土壤物理性质和化学性质。土壤有机质含量测定用重铬酸钾外加热法；碱解氮用碱扩散法测定；速效磷用钼锑抗比色法；速效钾用火焰光度计法测定；土壤粒度组成用激光粒度仪法测定[19]；含水率、饱和含水率用烘干法测定；土壤容重和孔隙度用环刀浸泡法测定。

2.3 数据分析

采用Excel 2021和SPSS 27.0软件进行数据处理和统计分析，用Origin 2025软件进行绘图。采用单因素方差分析对不同恢复年限排土场边坡的土壤理化性质、细沟特征进行显著性检验($p<0.05$)，采用双因素方差分析检验恢复年限和土层深度对土壤理化性质的影响($p<0.05$)，通过相关性分析和主成分分析探究土壤理化性质与细沟侵蚀的关联。

3 结果与分析

3.1 不同恢复年限排土场边坡细沟特征分析

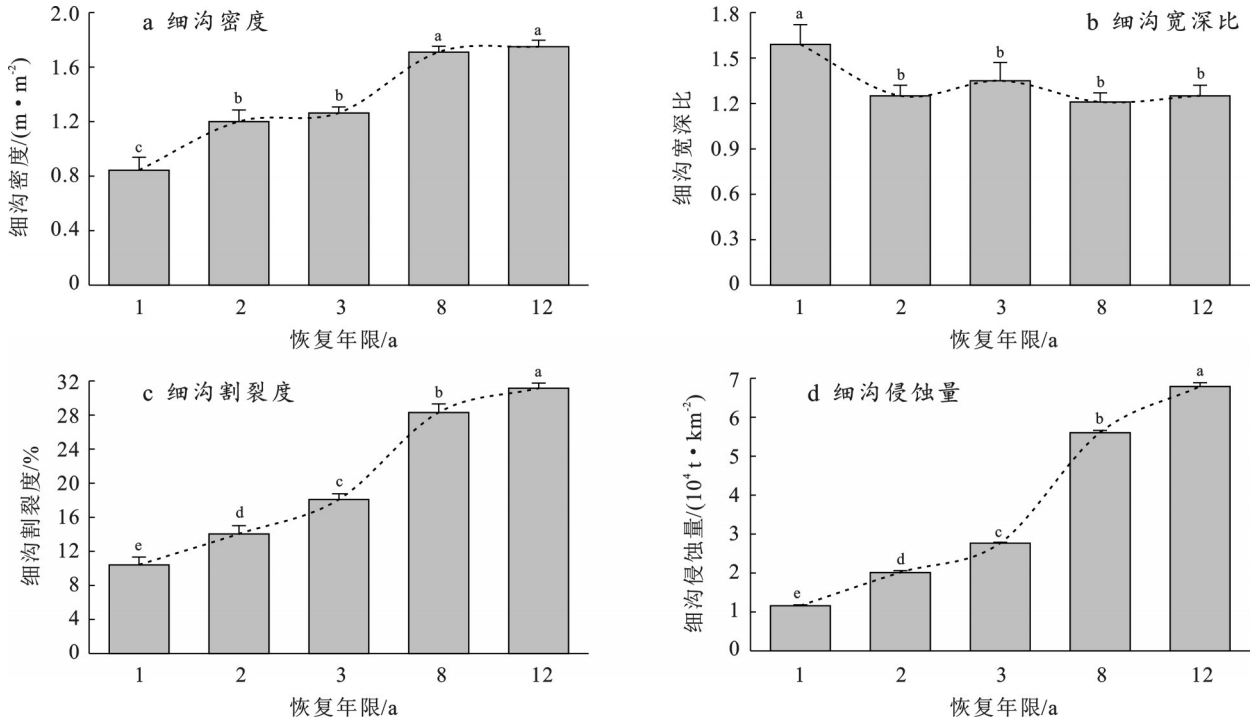
不同恢复年限排土场边坡的细沟发育特征如图1所示。随恢复年限的增加，细沟密度呈现增大的趋势，由1 a的0.53 m/m^2增加到12 a的1.75 m/m^2，增幅为108.33%。其中1～2 a的细沟密度增长最为迅速，增幅为42.86%；3～8 a的增长次之，增幅为35.71%；8 a与12 a的细沟密度无显著差异，在恢复后期细沟密度增长减缓。相较于1 a时宽深比为1.59的宽浅型细沟，其他恢复年限边坡的细沟宽深比显著降低($p<0.05$)，降幅最高达到23.90%，其他恢复年限之间并没有显著差异，细沟形态均转为窄深型。随恢复年限延长，细沟割裂度显著增加，由最初的10.41%增长至31.16%，导致排土场边坡破碎化加剧。随恢复时间的推移，排土场边坡不仅会出现新的细沟，原有细沟的深度、宽度、长度还会在原有基础上进一步增加，所以细沟侵蚀量会呈现出累积增长的趋势。在8 a时侵蚀量突破5.60×10^4 t/km^2，12 a的细沟侵蚀量达到6.79×10^4 t/km^2，为1 a的5.9倍；虽然细沟侵蚀量一直呈增加的趋势，但在8 a后细沟侵蚀量的增加趋势逐渐趋缓。

图2为不同恢复年限排土场边坡的细沟侵蚀模数，随恢复年限的增加细沟侵蚀模数呈现逐渐减小的趋势。1 a时细沟侵蚀模数高达11 597.57 $t/(km^2\cdot a)$，2 a时降至10 059.19 $t/(km^2\cdot a)$，12 a时进一步降至5 658.24 $t/(km^2\cdot a)$。反映侵蚀强度在恢复初期较为剧烈，后期逐渐趋缓。

为揭示细沟发育的差异，进一步分析了不同坡位的细沟形态特征和侵蚀模数。结果如图3所示，细沟形态与侵蚀模数在坡面上存在显著且规律的空间分异。随恢复年限增加，各坡位宽深比总体呈下降趋势。在同一恢复年限内，宽深比总体上表现为：上坡位＞中坡位＞下坡位。细沟密度与割裂度二者呈现出高度一致的空间分布模式。它们均随恢复年限增加而增大，且在同一恢复年限内，均表现为：下坡位＞中坡位＞上坡位。坡面下部的细沟网络更为密集、复杂，破碎化程度最高。细沟侵蚀模数代表侵蚀的强度，在坡面上的分异最为直观。各恢复年限均一致地表现为：下坡位＞中坡位＞上坡位。在恢复1 a时，下坡位的侵蚀模数是上坡位的2.33倍。尽管随恢复年限增加，各坡位侵蚀模数均显著下降，但坡下部侵蚀最强的空间格局始终存在。

为了进一步揭示细沟形态特征对坡面土壤流失量的影响，本研究对各形态指标与累积侵蚀量进行相关性分析，结果如图4所示。割裂度是影响侵蚀量的最核心形态指标，与累积侵蚀量呈现极显著正相关($r=0.991$，$p<0.01$)。细沟网络的破碎化程度越高，地表物质迁移通道越发达，直接导致侵蚀量激增。细沟密度对侵蚀量具有高度显著的正向作用

(r=0.954, p<0.01),表明单位面积内细沟数量增加会显著强化侵蚀强度。细沟平均深度与侵蚀量呈显著正相关(r=0.885, p<0.01),沟道下切深度增大反映侵蚀动能的累积效应。平均宽度与侵蚀量显著正相关(r=0.852, p<0.01),体现径流横向扩展对侵蚀的贡献。细沟平均深度与平均宽度呈正相关(r=0.864, p<0.01),说明细沟发育过程中深度与宽度具有同步增长特征。宽深比与累计侵蚀量呈负相关(r=−0.608, p<0.05),该指标降低往往伴随侵蚀量增加。



注:不同小写字母表示不同恢复年限间差异显著(p<0.05)。下同。

图 1　不同恢复年限的细沟侵蚀特征

Fig.1　Rill erosion characteristics with different restoration durations

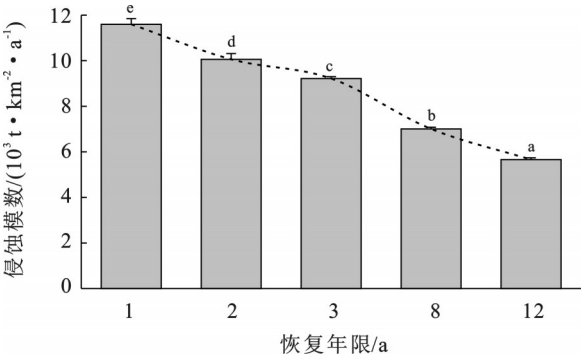


图 2　不同恢复年限的细沟侵蚀模数

Fig.2　Rill erosion modulus with different restoration durations

3.2　不同恢复年限排土场边坡土壤物理性质分析

不同恢复年限下不同土层深度的土壤粒度组成如表 2 所示。排土场边坡的粒径组成以粉粒、细砂、中砂为主。从土层深度来看,与恢复 1 a 相比,恢复 2 a 的粉粒含量在 0—10 cm, 10—20 cm 处显著减少(p<0.05),20—30 cm 处差异不显著,说明水蚀首先搬运表层的粉粒。从恢复年限来看,在恢复初期阶段 1～3 a,细颗粒严重流失。2 a 的表层粉粒含量降至最低值 7.17%,黏粒仅为 1.02%,较 1 a 分别下降 61.47% 与 24.44%。而粗颗粒相对富集,表层细砂、中砂比例达到峰值,分别为 60.56% 和 27.97%,说明细沟水流优先迁移粉粒与黏粒。相较于 2 a 时,3 a 时表层土壤的黏粒含量与粉粒含量比例增加,分别为 1.55% 和 12.36%,但仍显著低于 1 a。在恢复后期阶段(8～12 a),随植被盖度提升,粉粒流失速率减缓,8 a 与 12 a 表层粉粒含量分别为 47.42% 和 41.39%。在 12 a 时细砂、中砂减少至 35.22% 和 8.87%,这一现象是植被减缓细颗粒流失与初始土壤异质性共同作用的结果。

图 5 为不同恢复年限不同土层深度土壤的物理性质。不同恢复年限排土场边坡的土壤容重都较高,介于 1.48～1.72 g/cm³。从垂直变化方向看,在 1～2 a 时容重随土层深度增加呈现递减趋势,表现为:0—10 cm＞10—20 cm＞20—30 cm,在 8～12 a 时 10—20 cm 处的容重显著高于其他两层(p<0.05)。

从恢复年限来看,表层土壤容重随时间增加而递减,从1 a的1.64 g/cm³降至12 a的1.48 g/cm³,降幅达到9.76%;而深层的容重降幅较小,仅从1 a的1.51 g/cm³变为12 a的1.53 g/cm³。含水率在各恢复年限随土层深度递增,均表现为:0—10 cm<10—20 cm<20—30 cm。0—10 cm,10—20 cm处的含水率都随恢复年限增加呈先增加后减小的趋势,20—30 cm处呈先增加后减少再增加的趋势,在12 a时各层土壤含水率均显著高于1 a($p<0.05$)。土壤饱和含水量与总孔隙度基本呈现一致的变化趋势。表层饱和含水量随着恢复时间的增加总体呈现显著增长趋势($p<0.05$),12 a时达到27.94%,较1 a的22.76%相对提升22.76%;中层和深层的饱和含水量、总孔隙度变化一致,分别表现为先增加后减少再增加;先减小后增加。在1~3 a的恢复初期饱和含水量、总孔隙度在垂直分布上总体呈现中间高两头低的特征。细沟侵蚀较为严重的3 a表层饱和含水量降至22.48%,总孔隙度同步衰减至36.54%,显著低于深层($p<0.05$)。在8~12 a的恢复后期表层饱和含水量、总孔隙度显著高于其他两层($p<0.05$)。

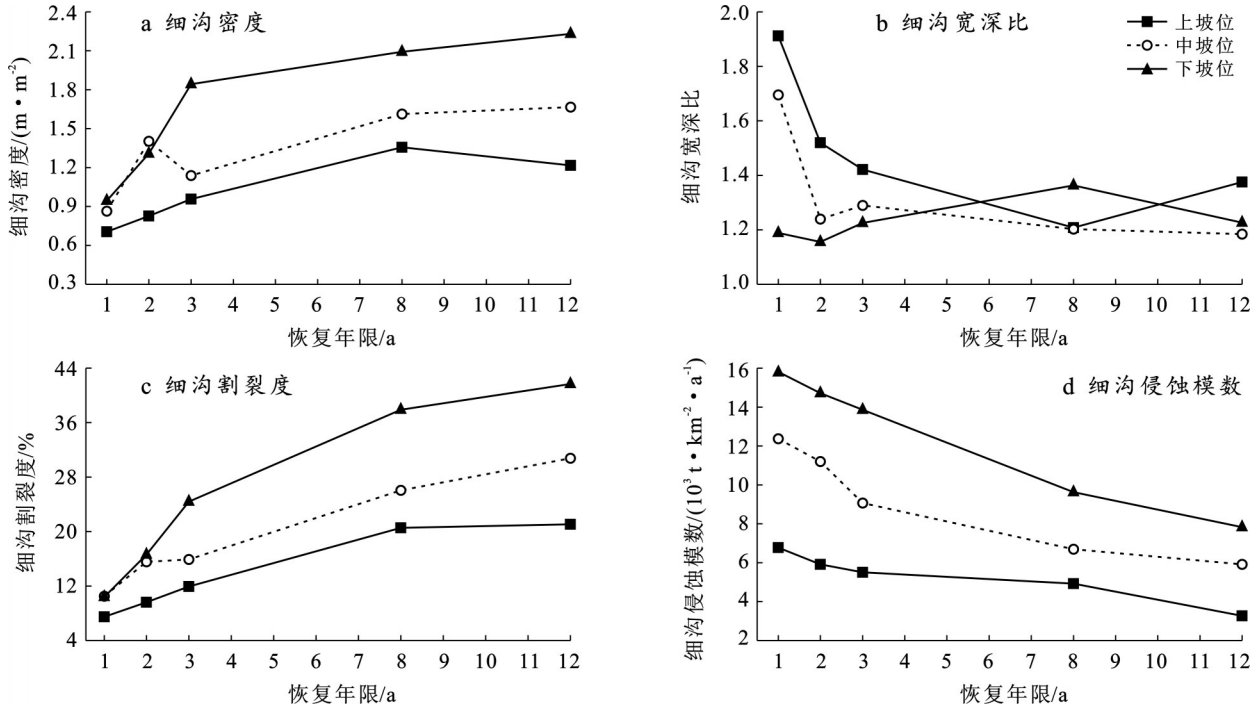
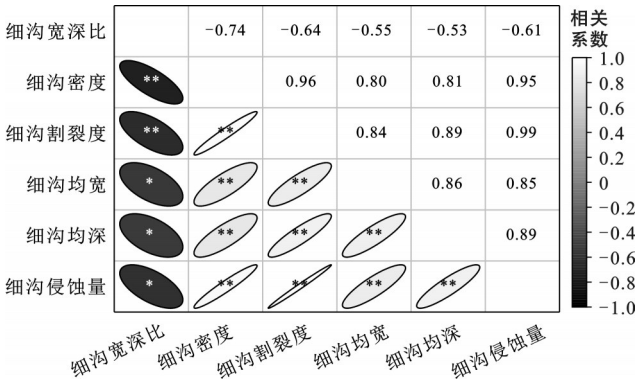


图3 不同恢复年限下不同坡位的细沟侵蚀特征

Fig.3 Rill erosion characteristics at different slope positions with different restoration durations



注:*表示显著相关($p<0.05$),**表示极显著相关($p<0.01$)。下同。

图4 细沟侵蚀量与细沟形态的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between rill erosion amount and rill morphology

3.3 不同恢复年限排土场边坡土壤化学性质分析

在恢复过程中土壤有机质与速效养分逐渐积累并趋于稳定。图6为不同恢复年限排土场边坡土壤化学性质。从恢复年限看,有机质、碱解氮、速效磷、速效钾都随恢复年限增加呈现先增加后减少的趋势。0—10 cm土层的有机质、碱解氮含量均在8 a时达到峰值,分别为8.90 g/kg和2.95 mg/kg,较1 a分别提高了46.62%和90.32%($p<0.05$),在12 a时略有下降,分别降至6.78 g/kg和2.06 mg/kg。各土层速效磷含量均在3 a时达到峰值,表层速效磷含量为4.11 mg/kg,是1 a的1.99倍,在8 a时回落至3.4 mg/kg,之后趋于稳定。各土层的速效钾含量均表现为8 a时显著高于其他恢复年限($p<0.05$)。从垂直方向看,有机质含量呈现明显的表层聚集现象,不同年限均表现为:0—10 cm>10—20 cm>20—30 cm;碱解氮在1 a,2 a时呈现表层匮乏,含量低于其他两层,但随恢复年限的增加在8~12 a时表层碱解氮含

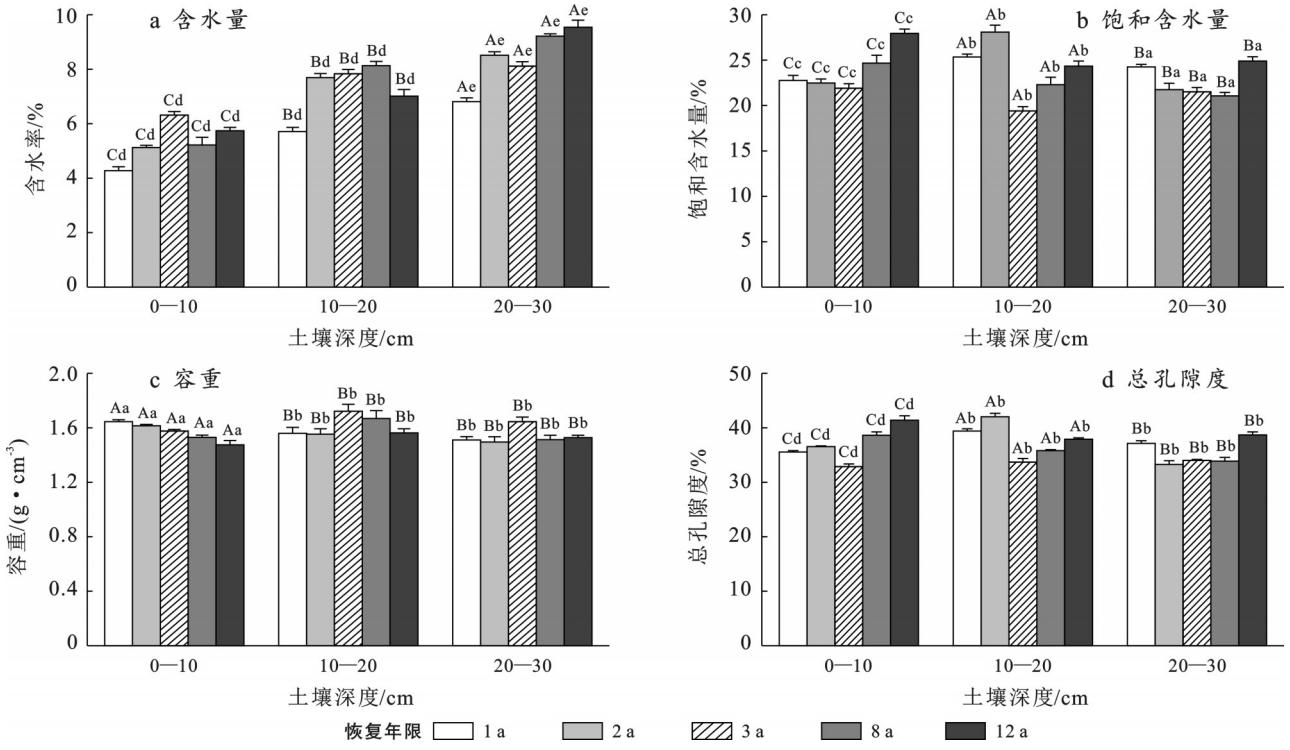
量富集,高于其他两层;速效磷含量均表现为中层富集,10—20 cm>0—10 cm>20—30 cm;速效钾含量随土层深度增加而增加,表现为:20—30 cm>10—20 cm>0—10 cm。

表 2　不同恢复年限不同土层深度的土壤粒度组成

Table 2　Soil particle size composition at different soil depths with different restoration durations　　单位:%

恢复年限/a	土层深度/cm	黏粒含量	粉粒含量	极细砂含量	细砂含量	中砂含量	粗砂含量
1	0—10	1.35±0.12^{Bc}	18.61±1.06^{Bc}	9.06±0.18^{Ab}	45.53±0.48^{Cc}	25.26±1.05^{Ab}	0.19±0.01^{Ac}
	10—20	1.36±0.08^{Bc}	18.27±0.36^{Bd}	9.11±0.04^{Ab}	46.96±0.07^{Bb}	24.13±0.33^{Ab}	0.15±0.01^{Bd}
	20—30	1.72±0.17^{Aab}	27.09±0.59^{Ac}	8.49±0.05^{Ba}	48.42±0.36^{Ab}	14.17±0.42^{Bd}	0.12±0.02^{Cd}
2	0—10	1.02±0.11^{Bd}	7.17±0.55^{Ce}	2.8±0.04^{Cd}	60.56±0.28^{Aa}	27.97±0.40^{Ca}	0.47±0.03^{Cb}
	10—20	2.43±0.07^{Aa}	9.72±0.26^{Be}	3.22±0.17^{Be}	41.58±0.39^{Cd}	29.94±0.44^{Ba}	1.33±0.08^{Ba}
	20—30	1.07±0.04^{Bd}	21.51±0.09^{Ac}	3.49±0.05^{Ac}	45.38±0.70^{Bc}	37.07±0.53^{Aa}	3.27±0.18^{Aa}
3	0—10	1.55±0.10^{Bbc}	12.36±0.25^{Bd}	5.87±0.33^{Ac}	51.45±0.22^{Bb}	24.58±0.41^{Bb}	0.67±0.03^{Ba}
	10—20	1.84±0.09^{Ab}	15.87±0.07^{Ad}	5.88±0.08^{Ad}	54.68±0.35^{Aa}	20.96±0.79^{Cc}	0.38±0.03^{Cc}
	20—30	1.41±0.07^{Bc}	16.28±0.45^{Ae}	3.39±0.10^{Bc}	51.74±0.14^{Ba}	29.83±0.24^{Ab}	1.27±0.01^{Ab}
8	0—10	1.75±0.23^{Ab}	47.42±0.72^{Aa}	9.20±0.15^{Ab}	32.18±0.26^{Ce}	9.34±0.51^{Cc}	0.05±0.01^{Cd}
	10—20	1.07±0.15^{Bd}	23.88±0.30^{Cb}	6.40±0.22^{Cc}	44.58±0.38^{Ac}	23.47±0.18^{Ab}	0.59±0.03^{Ab}
	20—30	1.55±0.16^{Abc}	35.00±0.70^{Ba}	7.42±0.16^{Bb}	38.64±0.12^{Be}	16.95±0.73^{Bc}	0.44±0.03^{Bc}
12	0—10	2.12±0.21^{Aa}	41.39±0.69^{Ab}	12.34±0.21^{Aa}	35.22±0.39^{Bd}	8.87±0.36^{Bc}	0.03±0.01^{Bd}
	10—20	1.91±0.26^{Ab}	41.62±0.99^{Aa}	11.62±0.33^{Ba}	35.78±0.69^{Be}	9.04±0.32^{Bd}	0.03±0.01^{Be}
	20—30	1.84±0.14^{Aa}	33.20±1.03^{Bb}	7.34±0.41^{Cb}	40.01±0.35^{Ad}	17.36±0.44^{Ac}	0.25±0.05^{Ad}

注:数值平均值±标准误;不同大写字母表示相同恢复年限不同土层间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示相同土层不同恢复年限间差异显著($p<0.05$)。



注:不同大写字母表示相同恢复年限不同土层间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示相同土层不同恢复年限间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 5　不同恢复年限不同土层深度的物理性质

Fig.5　Physical properties at different soil depths with different restoration durations

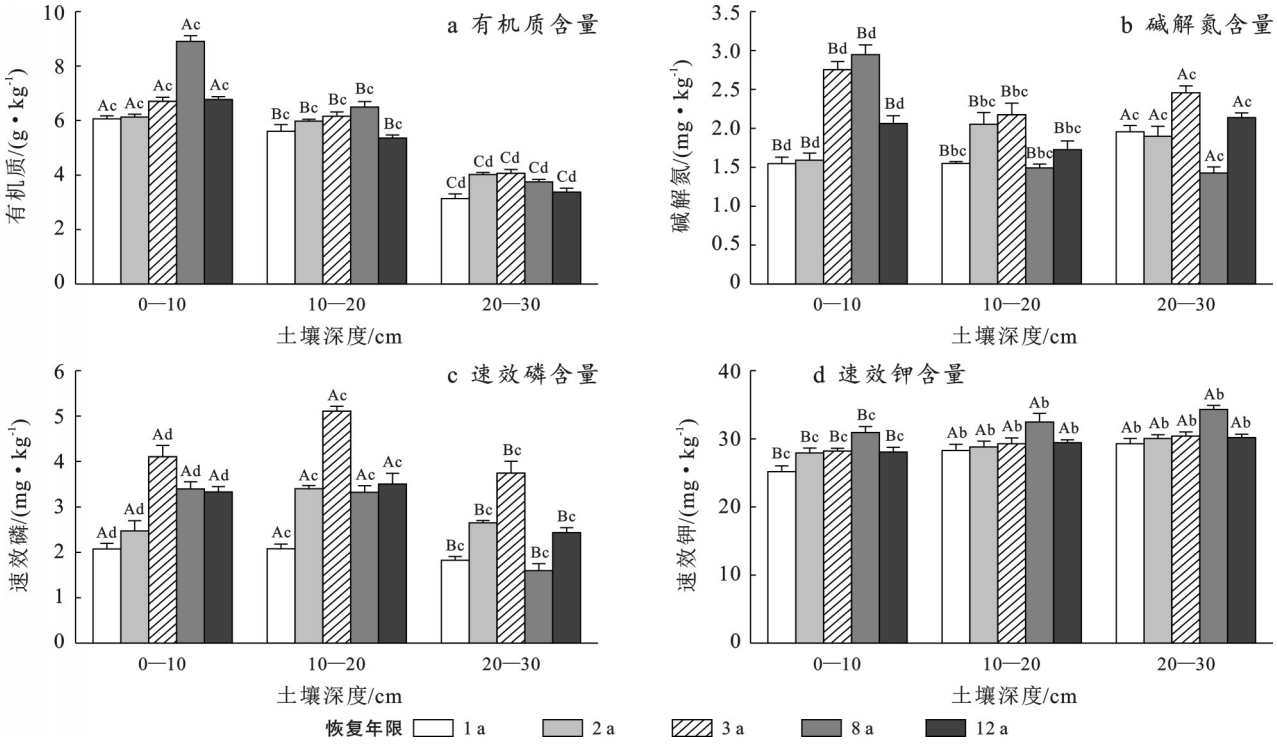


图 6 不同恢复年限不同土层深度的化学性质

Fig.6 Chemical properties at different soil depths with different restoration durations

3.4 细沟侵蚀特征与土壤理化性质的相关性分析

为进一步探究排土场边坡土壤理化性质对细沟侵蚀强度的综合影响,对细沟侵蚀模数与土壤理化性质指标进行相关性分析,结果如图 7 所示。分析表明,土壤容重与侵蚀模数呈现极显著的正相关关系(r=0.956, p<0.01),是影响侵蚀模数的最主要的因子。容重增大意味着土壤紧实度增加,通常导致入渗能力下降、地表径流增强,从而加剧土壤侵蚀。这与饱和持水量(r=−0.823,p<0.01)和总孔隙度(r=−0.745,p<0.01)与侵蚀模数呈显著的负相关性的结果相互印证。饱和持水量和总孔隙度高通常反映土壤结构疏松、通透性好、持水能力强,有利于水分入渗和保持,降低了土壤可蚀性。土壤抗蚀性主要依赖于其物理结构与物质组成。除物理结构外,土壤养分指标也与侵蚀模数呈显著负相关,其中,速效钾的负相关性最强(r=−0.669,p<0.01),其次为有机质(r=−0.591,p<0.05)、速效磷(r=−0.570,p<0.05)和碱解氮(r=−0.524,p<0.05)。有机质作为形成团聚体的核心物质,其本身直接贡献于抗蚀性;而速效养分作为植物生长的必需元素,主要通过促进植被生长,间接增加有机质输入并改善了土壤结构,从而增强系统的整体抗蚀能力。同时,土壤养分指标之间存在显著正相关,反映了土壤养分之间的协同性,如有机质与碱解氮(r=0.793),有机质与速效钾(r=0.814),碱解氮与速效磷(r=0.829)。

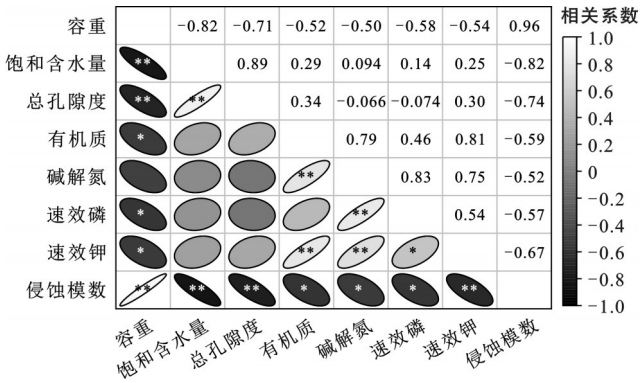


图 7 细沟侵蚀模数与土壤理化性质的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between rill erosion modulus and soil physicochemical properties

对不同恢复年限排土场边坡的指标进行主成分分析,以揭示土壤理化性质与细沟侵蚀之间的内在联系,结果如图 8 所示。PCA_1 轴与 PCA_2 轴共同解释了所有指标的 84.9%,贡献率分别为 68.8% 和 16.1%。主成分空间中的向量分布清晰地揭示了各指标间的内在关联,且与上述相关性分析结果相互印证。具体而言,细沟侵蚀模数、宽深比、割裂度、密度、平均宽度和平均深度等侵蚀特征指标与土壤容重的向量方向极为接近,夹角为锐角,表明它们之间存在显著的正相关关系。反之,这些细沟侵蚀指标与饱和持水量、总孔隙度、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾等表征土壤结构和肥力的指标则分布在相反

的象限,向量夹角为钝角,证实了它们之间存在显著的负相关关系。

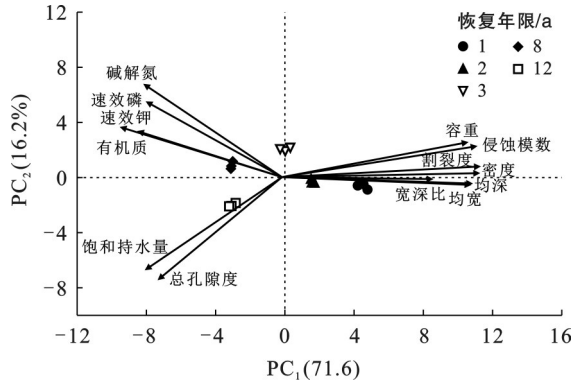


图 8　细沟特征与土壤理化性质的主成分分析

Fig.8　Principal component analysis of rill characteristics and soil physicochemical properties

4　讨　论

4.1　不同恢复年限排土场边坡细沟特征的变化

细沟密度和割裂度随恢复年限延长显著增加,尤其在恢复初期增速最快,可能与植被初步建立时地表仍较为脆弱、径流冲刷形成新沟道有关。但随着恢复时间延长,植被盖度增加,冠层和枯落物有效拦截降雨,减弱雨滴溅蚀和径流冲刷能力[20],减少了对土壤的剥离,从而使侵蚀模数显著下降。植被虽未完全抑制细沟扩展,但显著降低了单位时间的侵蚀强度,本研究结果与闫聪等[21]的研究结果一致。随恢复年限增加,细沟宽深比显著下降,这一结果与崔志强等[22]发现的规律一致。可能是径流动力与植被抗蚀作用协同演替的结果。在恢复后期,植被盖度与地表粗糙度增加,促使径流路径趋于集中化,增强了水流对沟床的下切能力;同时植物根系网络抑制了沟道的横向扩展。在这种下切作用相对增强,而侧蚀作用受到强力抑制的协同作用下,细沟形态逐渐向窄深型发展。通过对不同坡位的分析进一步揭示,细沟发育在坡面上分布不均,呈现显著的空间异质性。细沟密度、割裂度及侵蚀模数均表现出:坡下部>坡中部>坡上部的规律。这主要归因于径流的汇集与能量累积效应。地表径流自上而下流动,并在坡下部汇集,导致流速和冲刷能力增强,从而更易于形成密集的细沟网络并产生更强的侵蚀。同时,宽深比自上而下减小的趋势,反映了坡下部径流动力更集中,下切作用更为强烈,促使沟道形态向窄深型发展,这与裴冠博等[23]通过模拟放水试验得出的边坡细沟宽深比会随坡长增大而减小的结果基本一致。细沟形态指标与累计侵蚀量的相关性分析表明,细沟的形态特征对侵蚀过程具有关键控制作用。割裂度与累计侵蚀量呈极显著正相关,高割裂度意味着更发达的径流网络和更强烈的物质迁移通道。这一发现与刘庆等[24]在黄土坡面的研究结论一致,他们发现割裂度是表征侵蚀强弱的敏感指标。细沟密度对侵蚀量的高度显著正相关进一步证实了单位面积内沟道数量对侵蚀强度的重要影响[25]。平均深度和平均宽度与侵蚀量呈强正相关,且两者具有正相关关系,说明细沟发育过程中深度与宽度具有协同增长特征,这与前人研究结论一致[26]。

4.2　不同恢复年限排土场边坡土壤理化性质的变化

土壤粒度组成在恢复过程中发生显著分异。在1~3 a的恢复初期,水力分选作用导致悬移的粉粒、黏粒及极细砂易优先迁移,难移动的粗颗粒残留[27];随着恢复年限的增加,表层细颗粒流失速率减缓,这与王东丽等[28]在半干旱区排土场的研究结果相吻合,但采用时间代替空间方法,可能无法完全排除初始土壤质地的空间异质性。研究观测到的颗粒组成变化,是初始异质性与侵蚀恢复过程共同作用的结果。随着恢复年限的增加,排土场边坡土壤理化性质显著改善,表层土壤容重下降,孔隙度和饱和持水量提高,反映出土壤结构的改善和持水能力的增强,这有利于水分入渗,减少地表径流[29]。垂直方向上,表层土壤物理性质改善最为明显,说明植被作用主要集中在根系分布层。土壤养分含量在恢复过程中呈先升后降趋势,有机质与速效钾在8 a时达到峰值,之后略有回落。可能与植被演替阶段的养分需求变化有关。恢复初期植被快速生长大量消耗养分,随后通过枯落物归还和根系分泌物输入逐渐实现养分平衡[30]。养分在剖面上的分异特征明显,有机质表现为表聚现象,速效磷中层富集,速效钾则随深度递增,反映出不同养分元素在迁移与固定过程中的差异。

4.3　不同恢复年限下细沟侵蚀特征与土壤理化性质间的相关性

降雨径流是细沟侵蚀发生的原始驱动力,而土壤理化性质通过改变土壤的抗蚀、抗冲能力,对细沟侵蚀起到至关重要的调控作用。本研究结果表明,土壤容重与侵蚀模数呈显著的正相关关系,是影响侵蚀的最主要因子。土壤容重增加会导致孔隙连通性降低,进而减少水分入渗,促进地表径流形成,最终加剧土壤侵蚀[31]。与此相对应,饱和持水量和总孔隙度与侵蚀模数呈显著负相关,这与王凯等[32]关于土壤团聚体稳定性的研究结论相印证,他们发现高孔隙度土壤能够提供更好的水分入渗通道,有效

降低地表径流侵蚀力。在土壤养分方面,各指标均与侵蚀模数呈负相关关系,它们通过支持植物生长这一间接途径来强化抗蚀性。其中速效钾的负相关性最强,其次为有机质。尽管土壤抗蚀性主要由机械组成主导,但速效钾能通过促进土壤团聚体的形成和增强植物根系发育,从而间接提升土壤的抗冲性与结构稳定性[33]。土壤有机质作为形成团聚体的关键胶结物质,其含量的增加能有效改善土壤结构,增强团聚体稳定性,进而提高整体抗蚀能力,这与刘鸿涛等[34]的结论一致。

本研究揭示了不同恢复年限下土壤理化性质与细沟侵蚀的关联。但土壤侵蚀是一个受降雨、植被、地形和土壤性质等多因子协同调控的复杂过程。尽管本研究通过样地选择在一定程度上控制了地形变异,但双变量相关性分析难以完全剥离各因子间的交互作用,精确量化其独立贡献。为更深入、定量地揭示矿区排土场边坡的侵蚀驱动机制,未来的研究亟需建立长期定位观测网络,进行连续、多时间节点的同步监测,并构建包含降雨特征、植被参数、地形指标和土壤性质在内的综合概念框架,采用结构方程模型等多元统计方法进行路径分析,以量化各因子的直接与间接效应,从而深化对矿区生态水文过程的理解。

5 结 论

(1)排土场边坡细沟发育呈现出显著的时空分异特征。随着恢复年限的增加,细沟密度与割裂度均表现为先迅速上升而后逐渐趋缓的变化趋势,侵蚀模数则显著降低,细沟形态由恢复初期的宽浅型逐步向窄深型转变。在空间分布上,细沟发育表现出明显的坡面异质性,细沟密度、割裂度及侵蚀模数均呈现:坡下部>坡中部>坡上部的规律。相关性分析进一步表明,细沟密度、割裂度、平均深度与平均宽度均与累积侵蚀量呈显著正相关关系,可作为评估边坡侵蚀程度的关键形态指标。基于上述规律,建议在矿区边坡治理与生态恢复过程中,将坡中、下部作为重点防护与监测区域,以更精准地控制土壤侵蚀,提升治理成效。

(2)土壤物理结构与养分含量在恢复过程中协同演变,并在8 a左右达到关键拐点。防控措施显著改善土壤物理结构,表现为表层容重下降,孔隙度和饱和持水能力提升,粉粒流失速率减缓。土壤有机质和速效养分含量在恢复8 a时达到峰值,该拐点为确定矿区生态修复的关键管护窗口期提供了重要依据。

(3)排土场边坡细沟侵蚀特征受土壤物理结构与养分因子的协同调控,容重是影响侵蚀模数的关键因子,而以有机质和机械组成为核心的土壤结构是抗蚀的直接物质基础,速效养分则通过维持植被生产力,间接保障和巩固这一抗蚀性基础。本研究结果可为煤矿排土场边坡恢复过程中的治理措施布设提供科学依据和理论支撑。

(4)本研究通过空间代替时间的方法,初步揭示了在“沙柳沙障+混播草籽”修复模式下,排土场边坡细沟侵蚀特征与土壤理化性质随恢复年限变化的趋势,并探讨其内在关联。为更精确地揭示降水、植被演替与侵蚀过程的多尺度耦合机制,未来需建立长期定位观测站,开展连续、多时间节点动态监测,并采用结构方程模型等工具深入解析各影响因子的作用路径。

参考文献(References)

[1] 王佟,刘峰,赵欣,等.“双碳”背景下我国煤炭资源保障能力与勘查方向的思考[J].煤炭科学技术,2023,51(12):1-8.
Wang Tong, Liu Feng, Zhao Xin, et al. Reflection on China's coal resource guarantee capacity and exploration work under the background of “double carbon” [J]. Coal Science and Technology, 2023,51(12):1-8.

[2] 邹兰兰,冯启言,郝明,等.灵泉露天矿生态修复效果及驱动因素分析[J].中国矿业,2024,33(3):43-50.
Zou Lanlan, Feng Qiyan, Hao Ming, et al. Ecological restoration effect and driving factors analysis of Lingquan open-pit mine [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(3):43-50.

[3] Feng Yu, Wang Jinman, Bai Zhongke, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 191: 12-25.

[4] 王党朝,申莹莹,杨震.胜利一号露天煤矿开发建设对生态环境的影响评价[J].中国煤炭,2020,46(1):58-66.
Wang Dangchao, Shen Yingying, Yang Zhen. Evaluation of the impact of development and construction of Shengli No.1 open-pit coal mine [J]. China Coal, 2020, 46(1):58-66.

[5] 李叶鑫,吕刚,刘国阳,等.煤矿区水土流失特征及防控措施效应研究进展[J].土壤通报,2025,56(1):291-300.
Li Yexin, lü Gang, Liu Guoyang, et al. A review on soil erosion characteristics and control practice effect in coal mining areas [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(1):291-300.

[6] Zhang Ling, Wang Jinman, Bai Zhongke, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land

in an opencast coal-mine dump in a loess area [J]. Catena, 2015,128:44-53.

[7] Niu Yaobin, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: A field runoff plot experiment[J]. Soil and Tillage Research, 2020,202:104655.

[8] 姚怡航,张展,李永红,等.基于无人机贴近摄影测量的坡面细沟侵蚀及形态演化研究[J].水土保持通报,2023,43(6):142-147.
Yao Yihang, Zhang Zhan, Li Yonghong, et al. Slope rill erosion and morphological evolution based on UAV nap-of-the-object photogrammetry [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(6):142-147.

[9] 张攀,姚文艺,唐洪武,等.黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):114-119.
Zhang Pan, Yao Wenyi, Tang Hongwu, et al. Rill morphology change and its effect on erosion and sediment yield on loess slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(5):114-119.

[10] 崔志强.不同植被配置对排土场边坡细沟发育过程的影响机制研究[D].陕西 杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2022.
Cui Zhiqiang. Study on the influence mechanism of different vegetation configurations on the development process of rills on spoil dump slopes [D]. Yangling, Shaanxi: Research Center for Eco-Environmental Sciences,Chinese Academy of Sciences, 2022.

[11] 赵长兴.高寒矿区不同植被恢复方式下细沟侵蚀及土壤质量特征研究[D].甘肃 兰州:兰州大学,2024.
Zhao Changxing. Study on the rill erosion and soil quality characteristics under different vegetation restoration modes in alpine mines [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2024.

[12] 李霞,金鑫,谢斯琴,等.间歇降雨对红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):96-102.
Li Xia, Jin Xin, Xie Siqin, et al. Slope erosion and its changes in red soil under intermittent rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):96-102.

[13] 周忠良,连民杰,孙世国.不同降雨工况对排土场安全性影响规律研究[J].金属矿山,2023(8):278-282.
Zhou Zhongliang, Lian Minjie, Sun Shiguo. Study on the influence of different rainfall conditions on the safety of waste dump [J]. Metal Mine, 2023(8):278-282.

[14] 李瑞栋.植物根系对矿区排土场边坡细沟发育过程的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
Li Ruidong. Study on the influence of plant roots on the development process of rills on dump slope in mining area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.

[15] 李建明,张长伟,王志刚,等.不同植被类型对堆积体坡面径流特性的影响[J].长江科学院院报,2021,38(10):60-68.
Li Jianming, Zhang Changwei, Wang Zhigang, et al. Impact of different vegetation types on runoff characteristics of spoil heaps [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2021,38(10):60-68.

[16] 史倩华,王文龙,刘瑞顺,等.植被恢复措施对不同排土年限煤矿排土场边坡细沟侵蚀的影响[J].农业工程学报,2016,32(17):226-232.
Shi Qianhua, Wang Wenlong, Liu Ruishun, et al. Effect of vegetation recovery measures on rill erosion of dump side slope in coal mine with different casting time [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(17):226-232.

[17] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊.细沟发育与形态特征研究进展[J].生态学报,2018,38(19):6818-6825.
Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei. A research review of rill development and morphological characteristics [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(19):6818-6825.

[18] 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.

[19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[20] 王晶,赵文武,刘月,等.植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J].生态学报,2019,39(9):3355-3364.
Wang Jing, Zhao Wenwu, Liu Yue, et al. Effects of plant functional traits on soil conservation: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(9):3355-3364.

[21] 闫聪,胡夏嵩,李希来,等.高寒矿区排土场植被恢复对边坡土体物理力学性质影响研究[J].工程地质学报,2022,30(2):383-393.
Yan Cong, Hu Xiasong, Li Xilai, et al. Experimental study on effects of vegetation restoration on physical and mechanical properties of dump slope soil in alpine coal mine areas [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2):383-393.

[22] 崔志强,王文龙,郭明明,等.不同植被措施下排土场边坡细沟发育时空特征[J].土壤学报,2020,57(5):1155-1165.
Cui Zhiqiang, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al.

Spatial and temporal characteristics of rill development on slopes of waste dump of mining as affected by revegetation measures [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1155-1165.

[23] 裴冠博,龚冬琴,付兴涛.晋西黄绵土坡面细沟形态及其对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):79-84.
Pei Guanbo, Gong Dongqin, Fu Xingtao. Rill morphology and its effect on runoff and sediment yield on loessal soil slope in western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(6):79-84.

[24] 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.

[25] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7):162-170.
Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):162-170.

[26] 龙琪,韩剑桥,何育聪,等.黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征[J].水土保持学报,2022,36(1):1-7.
Long Qi, Han Jianqiao, He Yucong, et al.Spatial distribution of rill erosion intensity on loess slope and its morphology differentiation characteristics [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):1-7.

[27] 汤珊珊,高海东,李占斌,等.坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性[J].农业工程学报,2017,33(2):125-130.
Tang Shanshan, Gao Haidong, Li Zhanbin, et al. Characteristics of particle separation of erosion sediment in slop surface covered with sand [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2):125-130.

[28] 王东丽,刘阳,郭莹莹,等.半干旱矿区排土场苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形的演变特征[J].生态学报,2020,40(13):4585-4593.
Wang Dongli, Liu Yang, Guo Yingying, et al. The fractal characteristics of soil particles during the restoration of *Medicago sativa* in a semi-arid mining dump [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(13):4585-4593.

[29] Li Suqing, Liber K. Influence of different revegetation choices on plant community and soil development nine years after initial planting on a reclaimed coal gob pile in the Shanxi mining area, China [J]. Science of the Total Environment, 2018,618:1314-1323.

[30] 王东丽,于百和,赵晓亮,等.风沙黄土区排土场不同植被类型下土壤生态化学计量特征[J].水土保持研究,2024,31(1):61-69.
Wang Dongli, Yu Baihe, Zhao Xiaoliang, et al. Soil ecological stoichiometric characteristics under different vegetation types of open-pit dump in sandy loess region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):61-69.

[31] 李叶鑫,吕刚,王道涵,等.排土场土体裂缝特征对土壤物理性质的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(4):214-222.
Li Yexin, Lv Gang, Wang Daohan, et al. Effects of ground fissure characteristics on soil physical properties in the dump [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022,40(4):214-222.

[32] 王凯,那恩航,张亮,等.阜新露天煤矿排土场边坡土壤团聚体稳定性及分形特征[J].干旱区研究,2021,38(2):402-410.
Wang Kai, Na Enhang, Zhang Liang, et al. Soil aggregates stability and fractal features on dump slopes of opencast coal mine in Funxin, China [J]. Arid Zone Research, 2021,38(2):402-410.

[33] Xu Qiwen, Fu Hao, Zhu Bo, et al. Potassium improves drought stress tolerance in plants by affecting root morphology, root exudates, and microbial diversity [J]. Metabolites, 2021,11(3):131.

[34] 刘鸿涛,郑纪勇,李高亮,等.晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征[J].农业环境科学学报,2021,40(1):137-143.
Liu Hongtao, Zheng Jiyong, Li Gaoliang, et al. Characteristics of soil aggregates in the Shanxi-Shaanxi-Inner Monglia opencast coal dump, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021,40(1):137-143.