

露天煤矿排土场不同覆土厚度对土壤侵蚀及养分流失的影响机制*

熊姝臻, 吕刚[†], 张雅楠, 张泰瑜

(辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 覆土厚度是决定露天煤矿排土场生态修复成效的关键因素, 合理的复垦厚度直接影响土壤侵蚀控制、养分保持及植被恢复效果。以抚顺西露天矿排土场为研究对象, 通过室内物理模拟试验, 构建排土场高度 50 cm、平台宽度 40 cm 及坡度 25°的平台-边坡模型, 在 120 mm·h⁻¹的降雨条件下, 探究不同覆土厚度 (10、20 和 30 cm) 对土壤侵蚀特征、产流产沙过程及养分迁移规律的影响。结果表明, 不同覆土厚度条件下, 细沟侵蚀为主导, 过程可分为沟头形成阶段、沟蚀发育演变阶段和稳定阶段, 最大发育速度分别为 0.65~3 cm·min⁻¹、1.5~16.75 cm·min⁻¹ 和 0.38~1.25 cm·min⁻¹。覆土厚度与最大产流产沙速率时间、最大含沙量时间呈线性正相关, $R^2 \geq 0.93$, 即增加覆土厚度可有效延缓侵蚀发生、降低泥沙输出。土壤养分流失比率于 10、20 和 30 cm 覆土条件下分别为 4.34%~55.11%、4.97%~46.78% 和 2.61%~40.93%, 流失程度整体表现为有效磷 > 全氮 > 速效钾 > 有机质。养分流失动态与产流产沙速率呈现协同变化规律, 细沟发育第一、第二和第三阶段累计产流贡献比分别为 2.3%~3.4%、55%~71% 和 31%~43%, 累计产沙贡献比为 0.7%~3%、47%~88% 和 13%~52%, 养分累计流失贡献比分别为 0.61%~4.8%、35.10%~81.48% 和 14.48%~63.98%, 细沟发育第二阶段为主要产流产沙及养分流失阶段, 但流失率峰值随覆土厚度的增加而延迟出现。基于控制土壤侵蚀和养分流失的目标, 建议在同类气候-土壤条件下排土场复垦工程中, 将覆土厚度设置为 30 cm。

关键词: 排土场; 覆土厚度; 细沟侵蚀; 土壤侵蚀; 产流产沙; 养分流失

中图分类号: S157.1 文献标识码: A

The Impact Mechanism of Different Soil Cover Thicknesses on Soil Erosion and Nutrient Loss in Open-pit Coal Mine Dump

XIONG Shuzhen, LÜ Gang[†], ZHANG Yanan, ZHANG Taiyu

(School of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: 【Objective】The thickness of soil cover is a key factor determining the ecological restoration effectiveness of the open-pit coal mine dump. A reasonable reclamation thickness directly affects the effects of soil erosion control, nutrient retention, and vegetation restoration. 【Method】Taking the dump of Fushun West Open-pit Mine as the research object, a platform-slope model with a height of 50 cm, a platform width of 40 cm, and a slope of 25° was constructed. An indoor simulated rainfall test was conducted, and the rainfall duration was 120 min. During the rainfall process, to record the development process of the rill, one section was taken along its longitudinal direction at the top, middle, and bottom, respectively. The width and depth of the trench were measured with a steel ruler, and the length of the trench was recorded simultaneously. The average values were respectively taken as the morphological characteristic parameters of the rill. The measurement time was from the beginning of the self-generated flow. Within the first 20 min, measurements were taken every 2 min, and from 20 to 120 min, measurements were taken every 6 min. Meanwhile, the runoff and sediment yield were collected every two min using the runoff bucket. After 12 h of sedimentation, the supernatant was collected, and the flow rate was measured with a graduated cylinder. The sedimentary soil was dried in an oven at 105°C to a constant weight, and the moisture content was measured. Afterwards, the runoff volume was estimated as the sum of the water volume measured by the graduated cylinder and the soil moisture content, while the sediment yield was considered as the dry weight of silt and sand. After determining the sediment yield, nutrient content analysis was conducted. Soil organic matter was determined by the potassium dichromate external heating method, total nitrogen was determined by the Kjeldahl nitrogen analyzer method, and available phosphorus and available potassium were determined by ICP-MS. By analyzing the obtained data, the influence mechanism of dif-

* 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2007046)和辽宁工程技术大学双一流学科创新团队建设项目(LNTU20TD-24)资助 Supported by the Liaoning Revitalization Talents Program (No.XLYC2007046) and the Discipline Innovation Team of Liaoning Technical University (No.LNTU20TD-24)

[†]通讯作者 Corresponding author, E-mail: lvgang2637@126.com

作者简介: 熊姝臻 (1994-), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。E-mail:xiongshuzhen6@126.com

收稿日期: 2025-07-31; 收到修改稿日期: 2026-03-06; 网络首发日期 (www.cnki.net):

ferent soil cover thicknesses on the sediment yield characteristics and nutrient loss process of the waste dump was revealed. 【Result】 (1) Under different soil cover thicknesses, rill erosion was dominant. The process can be divided into the rill head formation stage, the rill erosion development and evolution stage, and the stable stage. The maximum development rates were 0.65-3.0 cm·min⁻¹, 1.5-16.75 cm·min⁻¹ and 0.38-1.25 cm·min⁻¹, respectively. The soil cover thickness was linearly and positively correlated with the time of the maximum sediment yield rate and the time of the maximum sediment content, with $R^2 \geq 0.93$. That is, increasing the soil cover thickness can effectively delay the occurrence of erosion and reduce the output of sediment. (2) Also, the rate of soil nutrient loss decreased with the increase in soil cover thickness. Under the conditions of 10 cm, 20 cm, and 30 cm soil cover, it was 4.34%-55.11%, 4.97%-46.78%, and 2.61%-40.93%, respectively. The overall degree of nutrient loss followed available phosphorus > total nitrogen > available potassium > organic matter. (3) The dynamics of nutrient loss and the rate of sediment yield and flow showed a synergistic change pattern. The cumulative contribution ratios of sediment yield and flow in the first, second, and third stages of erosion ditch development were 2.3%-3.4%, 55%-71%, and 31%-43%, respectively, and the cumulative contribution ratios of sediment yield were 0.7%-3%, 47%-88%, and 13%-52%, respectively. Additionally, the contribution ratios of cumulative nutrient loss were 0.61%-4.8%, 35.10%-81.48%, and 14.48%-63.98%, respectively. The second stage of furrow development was the main stage of sediment yield and nutrient loss, but the peak loss rate was delayed with the increase of soil cover thickness. 【Conclusion】 Based on the goal of controlling soil erosion and nutrient loss, it is recommended that in the reclamation project of dumps under similar climate-soil conditions, the soil cover thickness be set at 30 cm.

Key words: Dump; Soil cover thickness; Rill erosion; Soil erosion; Runoff and sediment yield; Nutrient loss

据统计, 2024 年全国煤炭产量达到 47.6 亿吨, 占能源消费总量比超 50%, 是我国的主体能源^[1]。排土场作为煤矿资源开采的衍生产物, 具有地表物质复杂、结构松散、层组紊乱等特征, 随着极端降雨事件日益增多, 在高强度极端暴雨条件下, 易造成排土场平台-边坡土体水土流失^[2-4]。相关研究表明, 排土场覆土 10~30 cm 的初始入渗速率可达 33.02 mm·min⁻¹, 显著高于覆土 40~50 cm (21.59~24.89 mm·min⁻¹), 然而, 整体较低的入渗能力导致平台-边坡系统在降雨过程中产流产沙量增加, 尽管通过地形重塑、微生物修复与增加植被覆盖度等生物和工程措施可有效减少径流和泥沙总量, 但对于抑制侵蚀沟的发育, 成效仍具有局限性, 侵蚀沟可沿平台至坡脚总体上呈“宽浅-窄深-宽浅”式发展, 宽深比表现为边坡中/下部最大, 是边坡上部的 1.36 倍~1.93 倍, 产流率和产沙率呈波动-稳定变化, 径流量和泥沙量变化范围为 280.27~735.17 L 和 9.36~87.48 kg^[2-3,5-7]。后续研究进一步阐明降雨不仅直接影响产流产沙过程, 还显著调控土壤养分的流失动态^[8]。

降雨驱动的氮、磷等养分流失, 直接关联并决定着土壤肥力水平^[9-10]。现阶段, 水力侵蚀过程对土壤养分迁移规律的研究主要集中在黄土高原区^[11]、丘陵山地^[12]及喀斯特地区^[9]等地貌单元。通过日降雨侵蚀模型发现, 极端降雨通过控制土壤水分含量^[13], 直接影响土壤侵蚀程度^[14], 最终驱动不同土壤养分含量的动态变化。降雨后土壤速效养分含量呈下降趋势, 其中速效氮降低幅度最大, 为 40.84%, 有机质和有效磷分别降低 33.49%和 27.08%。而在径流量显著增加的情况下, 不同形态养分的流失存在明显差异, 铵态氮及可溶性磷的流失强度分别大于 0.37 kg·hm⁻²和 0.20 kg·hm⁻²^[15-17]。有机质、氮和磷等关键成分含量的变化对调控土壤养分平衡具有关键作用, 继而影响植被的生长发育^[18]。目前, 关于矿区排土场水文过程的研究重点在于土壤剥蚀率对降雨强度的水动力响应^[2], 水动力主导的平台-边坡系统沟蚀形态演变^[3], 土体水分入渗动态过程^[5]等, 但针对不同覆土厚度对土壤侵蚀特征及养分流失的影响研究较少。覆土厚度不仅直接影响土壤侵蚀过程及植被根系分布, 还决定了后期复垦植被的养分供应能力, 进而影响植被恢复效果和复垦成本^[19]。因此, 探究降雨作用下覆土厚度-产流产沙-养分流失特征之间的耦合关系, 对同类气候-土壤条件下排土场复垦的生态修复理论具有重要意义。基于此, 本文以抚顺西露天矿排土场土体为研究对象, 开展室内人工降雨试验, 揭示露天煤矿排土场不同覆土厚度对土壤水分入渗、产流产沙和土壤养分流失特征的影响, 以为同类气候-土壤条件下排土场复垦提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤和煤矸石采集于辽宁省抚顺市望花区西南部抚顺西露天矿排土场 (41°50'00"N, 123°51'10"E)。土壤样品为 0~20 cm 表层土, 容重为 1.4 g·cm⁻³, 土壤质地为砂质黏壤土, 土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 56.03%、19.71%和 24.26%, 土壤化学性质见表 1。煤矸石采自矿区未覆土区, 主要由绿页岩和油页岩构成, 此外含有少量煤页岩、表土和凝灰岩等, 容重为 1.6 g·cm⁻³。土壤和煤矸石经风干处理后, 分别过 2 mm 和 5 mm 标准筛, 去除杂质备用。

表 1 土壤化学指标特征

Table 1 Characteristics of soil chemical indicators

土壤类型 Soil type	容重 Bulk den- sity/ (g·cm ⁻³)	全氮 Total nitro- gen/ (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phos- phorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available po- tassium/ (mg·kg ⁻¹)
棕壤 Brown soil	1.4	688.54	40.01	14.39	147.92

1.2 试验设计

为优化排土场植被恢复效果，覆土厚度的确定应综合考虑植被生长需求和水土保持效益。研究表明，当覆土厚度小于或等于 30 cm 时，能有效促进植被种子的萌发和幼苗的建立^[20]。结合现场踏查结果，分别设置阶梯覆土厚度为 10 cm、20 cm 和 30 cm，每个覆土厚度重复 3 次试验。装置为玻璃试验槽（图 1），长 110 cm，宽 50 cm，高 60 cm，玻璃试验槽底部均匀分布 4×4 个直径为 2 cm 的渗水孔，前端设有集流槽，使用径流桶收集径流泥沙。

人工模拟降雨试验强度根据抚顺市暴雨公式确定：

$$q = \frac{1956.829 \times (1 + 0.997 \lg P)}{(t + 10.378)^{0.776}}$$

式中， q 为暴雨强度 (mm·h⁻¹)； P 为设计重现期 (a)； t 为降雨历时 (min)。

根据《水土保持工程设计规范》(GB 51018-2014) 关于弃渣场级别的划分标准，抚顺西露天矿排土场工程等级应确定为 1 级，相应的防洪标准（重现期）为 100 年，因此，极端降雨条件选择 100a，降雨历时 120 min 进行设计，得出暴雨强度为 48 mm·h⁻¹。鉴于实际极端降雨历时对计算结果影响较为显著，最终调整雨强为计算值的 2.5 倍，为 120 mm·h⁻¹。降雨器的供水设备由水箱、流量计和供水管道等构成。降雨设备由 12 个喷头构成，每个喷头的固定位置距离地面垂直高度为 4.0 m。多次率定后降雨均匀度保证在 90% 以上，误差控制在 5% 左右^[2]。

基于现场踏勘及相似原理确定排土场几何尺寸。排土场单个台阶高度为 (25±0.58) m，平台宽度为 (20±1.15) m，倾角 (28±3)°，基于相似原理，本研究相似系数为 50，确定室内模拟排土场参数分别为高度 50 cm，平台宽度 40 cm，模型坡度为 25°。为还原排土场实际结构，模型采用上层覆土、下层煤矸石的分层填筑方式。既有研究表明，细颗粒覆盖在粗颗粒上层组成分层土壤时，入渗速率主要受上层土壤影响^[21]。同时，在试验玻璃槽底部设置 4×4 个直径为 2 cm 的渗水孔，以确保水分在到达煤矸石层后能够快速排出，避免积水影响。因此，为保持模型坡度一致，煤矸石层与覆土层的总垂直高度在试验过程中保持恒定（图 1）。

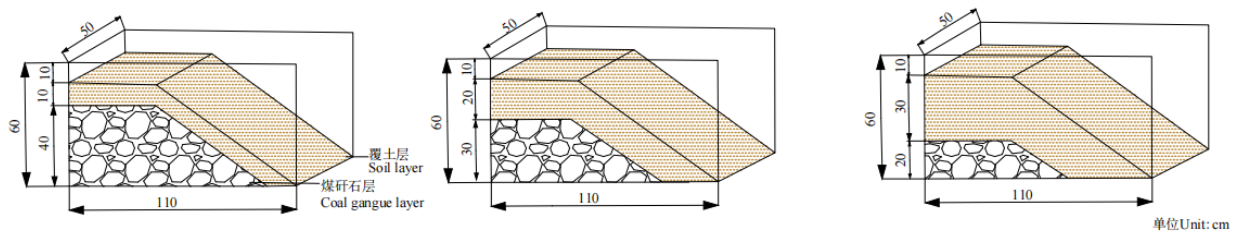


图 1 排土场模型图

Fig. 1 Model diagram of the dump

1.3 试验过程

将煤矸石和覆土按 5 cm 为一层分层填入玻璃试验槽，控制容重接近设计容重，静置 24 小时，使土体在自然状态下沉降与固结。

降雨历时为 120 min，产流开始时，每 2 min 使用径流桶收集一次径流泥沙。待沉淀 12 h，取上清液，用量筒测量径流流量，沉积泥土在 105℃ 烘箱中烘干至恒重，产流量为量筒测水量和泥土含水量之和，产沙量为泥沙干重。在测定产沙量后，进行养分含量分析。土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定，全氮采用凯氏定氮仪法测定，有效磷和速效钾采用 ICP-MS 测定。为记录细沟的发育过程，沿其纵向在上、中、下各取一个断面，使用钢尺测量沟宽与沟深，同时记录沟长，分别取平均值，作为该细沟的形态特征参数。测量时间为自产流开始，前 20 min 内，每隔 2 min 测量一次，20~120 min 每隔 6 min 测量一次。

1.4 数据分析及处理

(1) 产沙率为接样时间 t 内径流所能剥蚀的土壤质量，计算公式为：

$$Sr = \frac{Ms}{t} \quad (1)$$

式中， Sr 为产沙率， $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ ； Ms 为接样时间 t 内收集到的全部泥沙质量，其数值是将径流泥沙样品烘干后称重获得， g 。

(2) 含沙量为接样时间 t 内收集的泥沙和水的混合物中所含的泥沙质量，计算公式为：

$$Ps = \frac{Ms}{Vm} \quad (2)$$

式中， Ps 为含沙量， $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ； Ms 为接样时间 t 内收集到的全部泥沙质量， g ； Vm 为接样时间 t 内收集到的泥沙和水的混合体总体积， L 。

(3) 细沟宽深比为细沟宽度与对应深度的比值，用于表征细沟发育过程中的形态变化，计算公式为：

$$Rwd = \frac{Wi}{Di} \quad (3)$$

式中， Rwd 为细沟宽深比； Wi 与 Di 分别为第 i 个采样点的细沟平均宽度与深度， cm 。

采用 SPSS27.0、origin 2024 进行数据分析及图表制作。

2 结果

2.1 细沟发育特征

120 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度条件下，不同覆土厚度条件下以细沟发育为主，长度、宽度和深度变化范围分别为 3~120 cm 、1~50 cm 和 0.5~28 cm ，呈阶段性变化趋势（图 2）。

根据细沟长度、宽度和深度的变化过程，可将其发育划分为三个阶段：第一阶段（0~18 min ）为沟头形成阶段，细沟长度、深度与宽度发育较为缓慢，随着坡上与坡下交界处持续下切，沟头逐渐成型，最大发育速度为 0.65~3 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，沟长、沟宽与沟深范围分别为 1~15 cm 、1~4 cm 与 0.5~3.5 cm ，宽深比均大于 0.7，其中 10 cm 覆土厚度下细沟整体发育速度最快；第二阶段（18~88 min ）为沟蚀发育演变阶段，坡上与坡下细沟向坡中汇集，1#与 2#细沟贯通形成 3#细沟，表现为沟长纵向延伸、沟宽横向扩张与沟深垂向下切，并逐渐发育至土槽边缘，最大发育速度达 1.5~16.75 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，伴随沟壁滑塌现象，沟长、沟宽与沟深范围分别为 2~119 cm 、2~49 cm 与 1~25 cm ，宽深比均大于 1，20 cm 覆土厚度时细沟整体发育速度最快；第三阶段（88~120 min ）为稳定阶段，细沟最大发育速度降至 0.38~1.25 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，沟长、沟宽与沟深不再发生明显变化，30 cm 覆土厚度下整体发育速度最快。随覆土厚度增加，细沟出现时间延后但贯通时间提前（图 2），且在短时间内细沟沟长、沟宽与沟深发育较快。

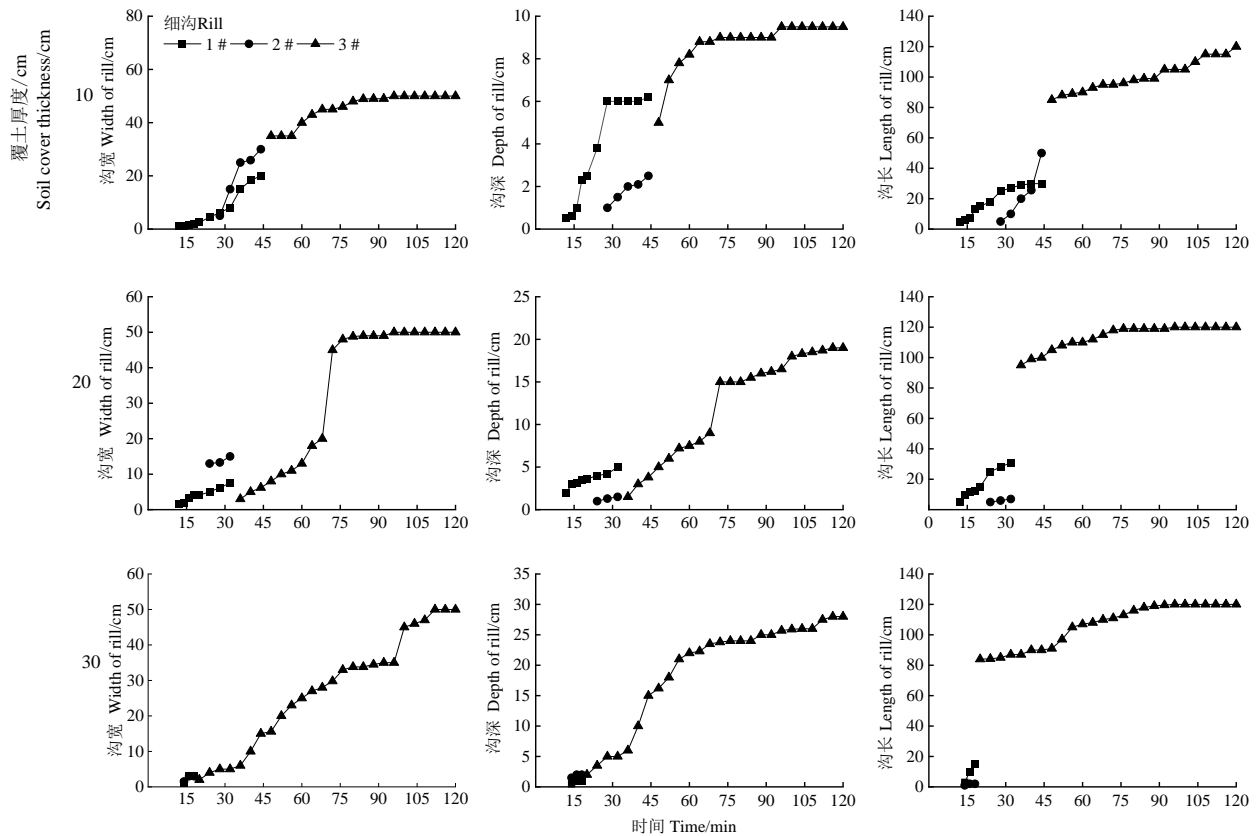


图 2 不同覆土厚度下细沟形态变化

Fig. 2 Morphological changes of rill under different soil cover thicknesses

2.2 坡面侵蚀过程

不同覆土厚度条件下，细沟发育第一阶段产沙速率、含沙量和累计产沙量整体呈上升变化趋势，累计产沙贡献比为 0.7%~3%，10 cm 覆土厚度累计产沙量显著大于 20 和 30 cm ($P < 0.05$) (图 3)。第二阶段沟蚀发育演变阶段是主要的侵蚀产沙阶段，即累计产沙量持续增加，产沙率和含沙量均呈现上升-下降-上升-下降的波动性变化，累计产沙贡献比为 47%~88%，20 cm 覆土累计产沙量显著大于覆土 10 和 30 cm ($P < 0.05$)。此阶段，10 cm 覆土厚度侵蚀响应最为迅速，降雨 36 min 内的侵蚀总量显著高于覆土 20 cm 和 30 cm，这种快速响应主要源于其较低的入渗能力。降雨 48 min 时同步出现产沙速率和含沙量的第一个峰值，后随着表层土壤的快速流失，产沙速率及含沙量降低。在 20 cm 覆土条件下，降雨 72 min 同步达到产沙速率和含沙量峰值，随降雨历时的增加，产沙速率及含沙量逐渐降低，在降雨 36~102 min 时侵蚀总量最大。当覆土厚度增至 30 cm 时，产沙速率及含沙量的变化则表现为延迟响应，降雨 72 min 和 108 min 出现两个产沙峰值，同时，降雨 108 min 时含沙量也达峰值。因此，细沟形成的第三阶段，10 cm 和 20 cm 覆土厚度产沙速率和含沙量主要表现为持续降低的变化趋势，而 30 cm 则表现为先增加后降低，最终趋于稳定。第三阶段的累积产沙贡献比为 13%~52%，30 cm 覆土累计产沙量显著大于覆土 10 和 20 cm ($P < 0.05$)。较大的产沙速率双峰值特征使 30 cm 覆土侵蚀总量大于覆土 20 cm 和 10 cm，表明较厚的覆土可延迟侵蚀高峰，且能提供更多的侵蚀物质来源，而薄覆土则因快速流失导致后期侵蚀量减少。

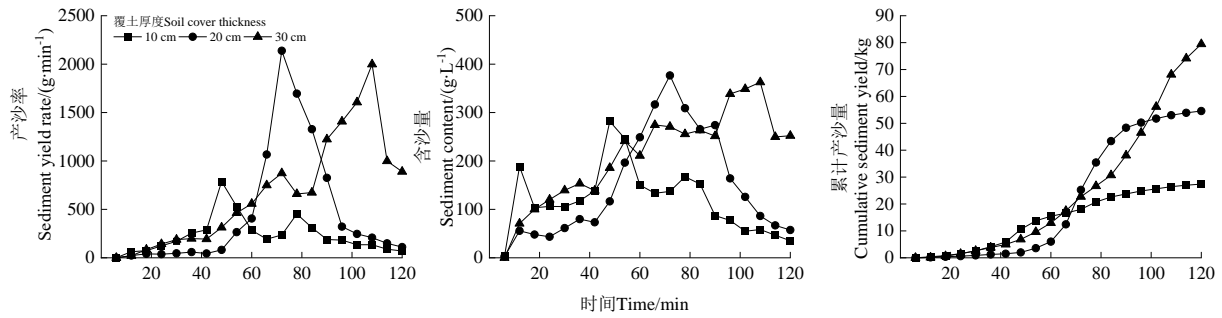


图3 侵蚀速率随降雨历时的变化
Fig. 3 Variation of erosion rate with rainfall duration

2.3 坡面产流特征

120 mm·h⁻¹的极端降雨条件下,覆土厚度与初始产流时间呈显著的负相关关系,不同覆土厚度初始产流时间具有显著性差异 ($P < 0.05$) (图4)。30 cm覆土厚度的初始产流时间最长,10 cm最短,仅为30 cm的27.88%,表明覆土厚度的增加能有效延缓地表径流的形成。10 cm覆土厚度初始产流率最大,呈现三峰值衰减特征,即48、78和102 min均出现产流率峰值,范围为44.70~50.78 mm·h⁻¹。20 cm覆土厚度前48 min产流率较小,72 min出现单峰,96 min后产流率趋于稳定。覆土30 cm时,峰值出现时间最晚且呈现三峰值递增变化趋势,即72、90和108 min均出现峰值,变化范围为58.68~100.17 mm·h⁻¹。降雨历时前18 min,3种覆土厚度的累计产流量有差异,但不显著;降雨历时18~88 min,累计产流量表现为20 cm覆土厚度显著大于覆土10 cm和30 cm ($P < 0.05$);而88~120 min,表现为30 cm覆土厚度显著大于覆土10 cm和20 cm ($P < 0.05$) (图4),表明覆土厚度增加会延迟产流峰值的出现时间,改变峰值数量,对水文过程具有调控作用。对比整个产流动态过程,细沟发育第一、二和三阶段累计产流贡献比分别为2.3%~3.4%、55%~71%和31%~43%,细沟发育第二阶段为主要产流阶段。

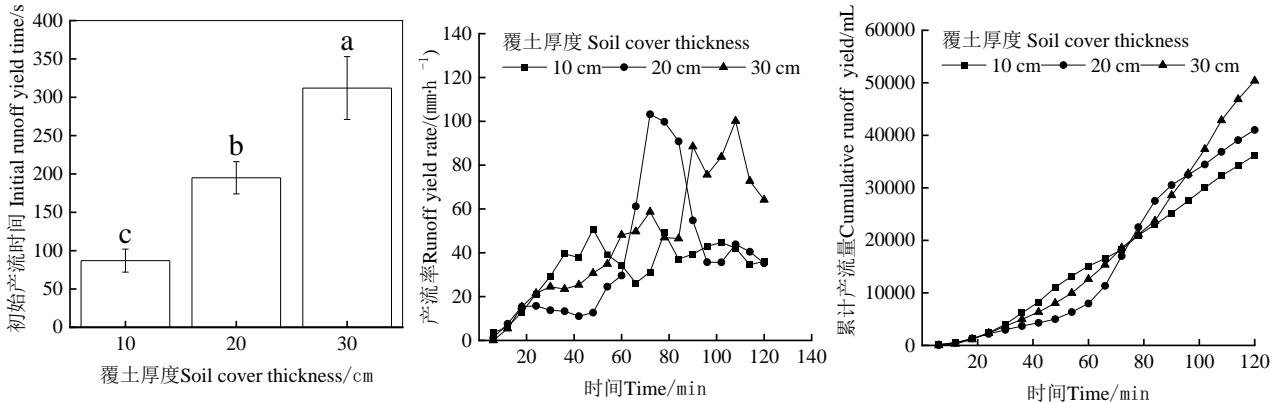


图4 不同覆土厚度下产流特征
Fig. 4 Runoff generation characteristics under different soil cover thicknesses

2.4 坡面养分流失特征

土壤养分含量均随降雨历时的增加呈现波动性变化趋势,10 cm、20 cm和30 cm覆土条件下,土壤养分流失比率分别为4.34%~55.11%、4.97%~46.78%和2.61%~40.93%,整体表现为有效磷>全氮>速效钾>有机质(图5)。10 cm覆土厚度土壤养分随降雨历时的增加,波动变化范围较小,土壤有机质和全氮流失速率呈现双峰值衰减流失特征,峰值分别出现在降雨48~78 min,后随降雨历时的增加持续衰减至稳定,速效钾和有效磷流失率在降雨48 min出现单峰,速率为0.34~556.58 g·min⁻¹。而20 cm和30 cm覆土厚度不同土壤养分呈现稳定增加-突变波动增加-降低-趋于稳定的变化趋势。20 cm覆土厚度在降雨66~78 min期间,不同土壤养分流失速率均呈现单峰特征,变化范围为1.98~1137.75 mg·min⁻¹。30 cm覆土厚度下不同养分的流失速率峰值于降雨72~108 min出现,速率为1.48~1231.16 g·min⁻¹,表明增加覆土厚度可延迟养分流失速率峰值的出现。

细沟发育第一、二和三阶段四种养分平均流失速率分别为 $0.016\sim 33.9\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.22\sim 1087.25\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.09\sim 879.04\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ，养分累计流失贡献比分别为 $0.61\%\sim 4.8\%$ 、 $35.10\%\sim 81.48\%$ 和 $14.48\%\sim 63.98\%$ 。因此，细沟发育第二阶段为主要养分流失阶段。细沟发育三个阶段的土壤养分累计流失量与累计产流产沙量在不同覆土厚度下表现出较为一致的显著性差异，表明覆土厚度的增加会减缓土壤养分的流失。

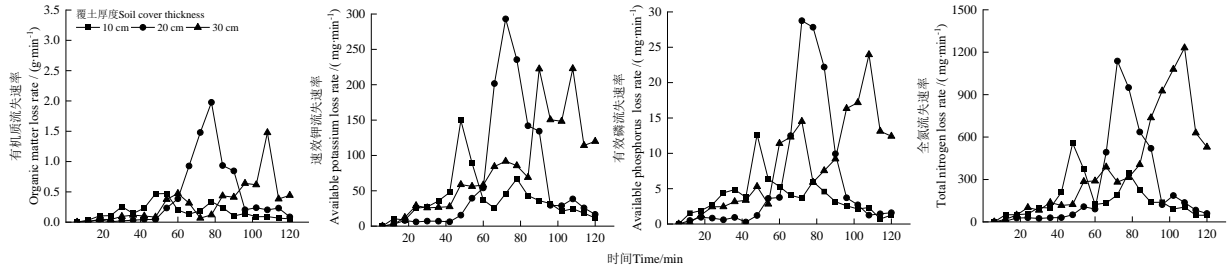


图 5 不同覆土厚度下养分流失特征

Fig. 5 Characteristics of nutrient loss under different soil cover thicknesses

3 讨论

3.1 覆土厚度对产流产沙量的影响

降雨是影响坡面径流、泥沙产生以及细沟发育的关键因素^[6,9,22-24]。平台-坡面细沟发育阶段分为沟头形成阶段、沟蚀发育演变阶段和稳定阶段。降雨前期（沟头形成阶段），由于土壤对降水的持续吸收显著降低了地表径流量，导致径流动力减弱，细沟发育受限，产沙量较少^[23]。

降雨至 18~88 min，细沟发育至第二阶段，即沟蚀发育演变阶段。细沟发育加快，表现为纵向持续延伸，横向不断扩展，沟深逐步下切。侵蚀过程中的关键节点参数有所不同^[3]。10 cm 和 20 cm 覆土厚度出现最大产流产沙速率时间、最大含沙量时间较早，而 30 cm 覆土厚度对降雨具有更强的缓冲与调蓄作用，较厚的土层能吸收更多水分^[23]，导致土壤水分入渗量增大，地表产流速率增加较缓慢，从而延迟了径流与产沙峰值出现时间，使最大产沙速率延后出现，继而不同覆土厚度的最大产流产沙速率时间、最大含沙量时间、累计产沙量及细沟贯通时间具有显著性差异 ($P < 0.05$)（表 2）。将覆土厚度与最大产流产沙速率时间、最大含沙量时间和累计产沙量拟合，均呈线性正相关， R^2 为 $0.93\sim 0.99$ ，原因在于分层土壤结构中，上覆的细颗粒土壤是水分入渗过程的主要制约层^[21]，覆土越厚水分吸收越多，产流产沙越慢。但覆土厚度与细沟贯通时间拟合，呈线性负相关， R^2 为 0.94 ，相关研究表明地表土壤的侵蚀性与土壤含水率有关，覆土越厚，水分吸收越多，含水率的增加导致土壤抗剪强度降低^[25]，促进细沟快速发育贯通。此阶段，覆土厚度 30 cm 的细沟逐渐下切（沟深 $> 20\text{ cm}$ ^[3]），细沟宽深比与前人针对矿区排土场沟蚀的研究结果不同^[7,26]，原因主要在于坡面条件的差异。前人研究基于有植被恢复的排土场，根系的固土作用抑制了下切侵蚀，促使细沟以水平发育为主，而本研究的排土场为裸坡，径流下切阻力小，因而形成了相对窄深的沟道形态。随着降雨历时的增加，沟蚀发育至第三阶段（88~120 min），产流产沙量逐渐趋于稳定。降雨全过程，沟蚀的发育主要表现为细沟侵蚀，该结果与速坎等^[3]在陕北露天矿排土场中的研究发现相似。

表 2 侵蚀过程中关键节点参数

Table 2 Parameters of key nodes during the erosion process

覆土厚度 Soil cover thickness/cm	细沟贯通时间 Rill confluence time	最大产流速率时间 Maximum runoff yield rate time/min	最大产沙速率时间 Maximum sediment yield rate time/min	最大含沙量时间 Maximum sediment content time/min	累计产沙量 Cumulative sediment yield/g
10	48±1a	48±1.16c	48±0.57c	48±0.29c	27407.17±7.17c
20	36±1.53b	72±0.76b	72±1b	72±0.5b	54574.82±0.82b
30	20±0.58c	108±0.5a	108±1.73a	108±0.5a	79468.38±0.5a

注：不同小写字母表示组间在 0.05 水平差异显著。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between groups at the 0.05 level.

地表径流的产生主要受降雨驱动，径流可携带泥沙运移，产流量的变化显著影响产沙量^[27-28]。产流初

期(0~18 min)，10 cm 覆土厚度的产流产沙量分别为 30 cm 的 1.1 倍和 1.3 倍，主要是由于薄覆土层在降雨初期更容易产生地表径流和土壤流失。当降雨持续至 18~88 min 时，不同覆土厚度的径流泥沙量逐渐增加。其中，20 cm 覆土厚度条件下，降雨进行至 68~84 min 时，表层土壤含水率的上升削弱了土粒间的黏结力，致使土壤结构稳定性降低，同时，径流剪切力随径流量的增加而增大，在不稳定土体结构与较强径流冲刷的协同作用下^[2,6]，引发了该阶段的产沙高峰。相比之下，10 cm 覆土厚度因土层较薄，其可侵蚀物质在降雨前期已大量流失，导致此时侵蚀物质供给受限；而 30 cm 覆土厚度则因水分入渗量更大，径流发育相对迟缓，故均未在此阶段形成同等的产沙强度。然而，当降雨历时延长至 88~120 min 时，30 cm 覆土厚度的产流产沙量急剧增加，增加量达 10 cm 覆土厚度的数倍。这种动态变化主要源于两方面机制：一方面，厚覆土层因其较强的初始入渗能力，在降雨前期能有效减少地表径流和侵蚀；另一方面，随着降雨持续，排土场较为松散的土壤结构随水分含量的增加，其稳定性显著降低^[2]，而此时薄覆土层的可侵蚀物质已基本流失。相比之下，厚覆土层可提供更丰富的可蚀物质，最终导致产沙量增加。在两个因素的共同作用下，覆土厚度与产沙量最终呈正相关关系，这与已有研究结果不同^[23]。已有研究表明，随坡度增加，产沙量也相应增加，产生差异的原因在于本研究构建的排土场模型坡度始终保持一致，而覆土厚度作为侵蚀的泥沙来源，随覆土厚度的增加，产沙量增加。将产流量与产沙量进行拟合发现(图 6)，20 cm 和 30 cm 覆土厚度产流量与产沙量呈线性函数变化。10 cm 覆土厚度由于覆土较薄，产沙量受土方量限制，导致即使产流量相同时产沙量差异也较大。因此，10 cm 覆土厚度产流量与产沙量呈幂函数变化，与淡彩虹等^[22]的研究结果相似。

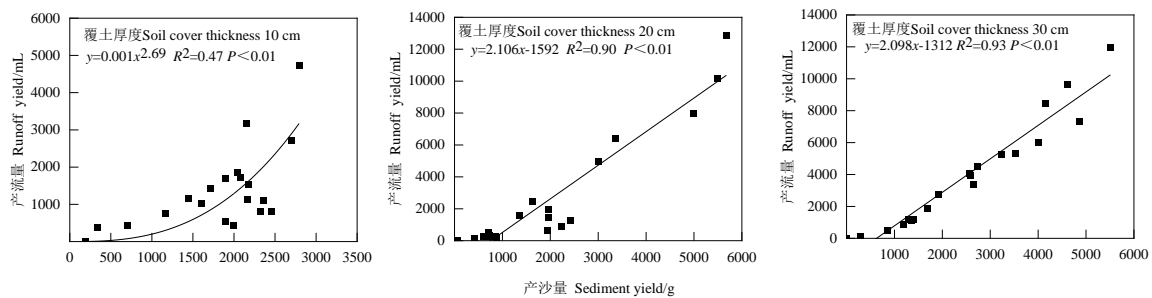


图 6 产流产沙关系

Fig. 6 Relationship of runoff and sediment yield

3.2 不同覆土厚度条件下产流产沙与养分流失的关系

土壤氮、磷等元素是土壤养分的重要组成部分，也是植被生长发育必需的营养元素，其含量变化会影响土壤养分的积累和供应^[4,10,18]。降雨不仅会导致水土流失，还会加剧养分流失，造成土壤肥力下降^[3,10,19,24,28-29]。土壤养分在降雨驱动下，主要通过地表径流和侵蚀的泥沙发生迁移^[3,9]。降雨进行至 18 min，水分润湿土壤表面后开始入渗，当土壤入渗能力及表土持水能力小于降雨强度时，坡面开始产流^[3]，细沟逐渐发育，10 cm 覆土厚度产流产沙量及土壤养分流失量最多。降雨历时增加至 18~88 min 时，侵蚀过程进入沟蚀发育演变阶段，是沟蚀的主要阶段，最大发育速度可达 $1.5\sim 16.75\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，累计产流产沙贡献比均大于 47%，而全氮、速效钾、有效磷及有机质累计流失贡献比为 35.10%~83.34%，养分流失量和土壤流失量呈正相关关系，与陆淑宁等^[8]的研究结果相似。不同覆土厚度累计产流产沙量及养分流失量表现为覆土 20 cm 大于 10 和 30 cm。当降雨历时 88~120 min 时，养分流失量随产流产沙量的减少而降低，30 cm 覆土厚度累计流失量最大。对比土壤侵蚀动态发现，较厚覆土层具有延缓侵蚀响应的作用。在不同覆土厚度条件下，土壤养分均随降雨历时的增加呈降低趋势，与已有研究结果相似^[8,16]。尽管前人研究^[3,7,26]已确认了细沟侵蚀在排土场的重要性，但在细沟发育阶段与产流产沙-养分流失的耦合关系中缺乏阐释，本研究将矿区土壤侵蚀水沙过程深化至水-沙-养分协同流失，通过量化细沟发育阶段与养分流失量的响应关系，证明了细沟不仅是产沙的主导过程，更是养分迁移的关键路径。

结合侵蚀动态特征发现，30 cm 覆土在降雨作用下表现出显著优势，在降雨前中期产流产沙量和养分流失贡献均低于 10 cm 及 20 cm 覆土，且能延迟侵蚀高峰出现时间，其作用与水土保持防护措施相似^[8,30]。然而，本研究的结论是基于室内模拟试验得出的，存在一定的固有局限性，如分层填筑结构未能充分模拟天然环境中土石混合的复杂剖面结构及其所主导的非均匀水文过程，未来的研究可通过现场试验或与其他

水文模型结合的方式进一步完善。

4 结论

120 mm·h⁻¹降雨条件下, 细沟发育分为沟头形成阶段、沟蚀发育演变阶段和稳定阶段, 其中沟蚀发育演变阶段为主要侵蚀阶段, 细沟最大发育速度达 1.5~16.75 cm·min⁻¹, 是产流、产沙与养分流失的关键时期, 累计贡献比分别为 55%~71%、47%~88%和 35.10%~81.48%, 土壤养分流失比率随覆土厚度增加而降低, 流失程度依次为有效磷>全氮>速效钾>有机质。覆土厚度与最大产流产沙速率时间、最大含沙量时间呈线性正相关, $R^2 \geq 0.93$, 即增加覆土厚度可有效抑制侵蚀进程。抚顺市属于北方温带大陆性季风气候区, 极端降雨事件较多, 区域内棕壤入渗能力偏低, 在长期露天采矿与工业化建设的叠加影响下, 该地区表土资源趋于枯竭, 排土场随服务年限的增加更易出现土壤侵蚀问题, 因此, 覆土厚度的增加对棕壤地区的水土保持具有积极调控作用。基于上述, 为提升棕壤重构区域的水土保持成效, 建议在同类气候-土壤条件下的排土场复垦工程中, 将覆土厚度设置为 30 cm, 作为控制土壤侵蚀与养分流失的有效工程措施。

参考文献(References)

- [1] Liu X G, Zhang Z, Liu Q J, et al. Pressure law and roof control of near shallow buried super large mining height working face[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(12): 1-14. [刘晓刚, 张震, 刘前进, 等. 近浅埋超大采高工作面来压规律及顶板控制[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(12): 1-14.]
- [2] Xiong S Z, Lü G, Li Y X, et al. Response of soil denudation process to vegetation coverage of dumping site under extreme rain-storm conditions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(5): 1271-1281. [熊姝臻, 吕刚, 李叶鑫, 等. 极端暴雨作用下排土场边坡土壤剥蚀率对植被覆盖度的响应[J]. 土壤学报, 2025, 62(5): 1271-1281.]
- [3] Su H, Wang W L, Kang H L, et al. Erosion morphology and the characteristics of runoff and sediment yielding in platform-slope system of opencast coal mine[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 3194-3206. [速欢, 王文龙, 康宏亮, 等. 露天矿排土场平台-边坡系统侵蚀形态及径流产沙特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3194-3206.]
- [4] Fang H Y. Impacts of soil conservation measures on runoff and soil loss in a hilly region, Northern China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 247: 106740.
- [5] Zhang Y N, Lü G. Effect of soil cover thickness on soil water infiltration and plant water utilization in the dump of open pit coal mine[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 345-351, 362. [张雅楠, 吕刚. 露天煤矿排土场覆土厚度对土壤水分入渗及植物水分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 345-351, 362.]
- [6] Niu Y B, Wu X, Gao Z L, et al. Characteristics of soil erosion on engineering accumulation slope under the rainfall and inflow conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 69-77. [牛耀彬, 吴旭, 高照良, 等. 降雨和上方来水条件下工程堆积体坡面土壤侵蚀特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 69-77.]
- [7] Xu W X, Kang H L, Wang W L, et al. Vegetation mitigates rill initiation and network evolution on dump slopes in coalfields: Evidence from an *in situ* simulated rainfall experiment[J]. Land Degradation & Development, 2025, 36(16): 5817-5836.
- [8] Lu S N, Li R R, Yao C, et al. Study on the effects of counter tillage on runoff and sediment yield and process of nitrogen and phosphorus nutrient loss on sloping farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(5): 1271-1283. [陆淑宁, 李荣融, 姚冲, 等. 横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1271-1283.]
- [9] Gan X M, Yan Y J, Dai Q H, et al. Impact of rainfall intensity and slope gradient on runoff and nitrogen and phosphorus loss fluxes of sloping farmland in a karst area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(4): 116-123. [甘贤民, 严友进, 戴全厚, 等. 降雨强度和坡度对喀斯特坡耕地产流和氮磷流失的影响[J]. 环境科学学报, 2024, 44(4): 116-123.]
- [10] Chen Y Q, Xu L Y, Wang Z W, et al. Stoichiometric characteristics of nutrient-microbial biomass-extracellular enzyme activity in different salt-affected soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(3): 811-824. [陈玉琪, 徐灵颖, 王志旺, 等. 不同盐渍化土壤养分-微生物生物量-胞外酶活的化学计量特征[J]. 土壤学报, 2025, 62(3): 811-824.]

- [11] Zhu P Z, Zhang G H, Wang H X, et al. Effectiveness of typical plant communities in controlling runoff and soil erosion on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126714.
- [12] Bettoni M, Maerker M, Bosino A, et al. Land use effects on surface runoff and soil erosion in a southern Alpine valley[J]. *Geoderma*, 2023, 435: 116505.
- [13] Shi D M, Jiang G Y, Peng X D, et al. Relationship between the periodicity of soil and water loss and erosion-sensitive periods based on temporal distributions of rainfall erosivity in the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. *Catena*, 2021, 202: 105268.
- [14] He J J, Sun L Y, Duan G Y, et al. Slope gradient impacts on rill morphological characteristics: Using indoor simulation experiment on loamy clay under certain rainfall intensity[J]. *Catena*, 2023, 222: 106895.
- [15] Zhang Y L, Lu Y X, Yin B F, et al. Effects of simulated rainfall on soil nutrient contents and enzyme activities in the Gurbantunggut Desert, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5): 1739-1749. [张玉林, 陆永兴, 尹本丰, 等. 模拟降雨变化对古尔班通古特沙漠土壤养分及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1739-1749.]
- [16] Yang Y, Meng Z J, Chen X Y. Process of runoff and sediment yield and nutrient transport characteristics in desert steppe[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 45-54. [杨毅, 蒙仲举, 陈晓燕. 荒漠草原产流产沙过程及养分运移特征[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 45-54.]
- [17] Zhu X Y, Li Z H, Lin Q M, et al. Turnover of soil microbial biomass phosphorus in typical steppe under different simulated rainfalls during spring[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2655-2661. [朱晓亚, 李子豪, 林启美, 等. 模拟不同春季降雨量下典型草原土壤微生物磷周转特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(8): 2655-2661.]
- [18] Xu H W, Qu Q, Li P, et al. Stocks and stoichiometry of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus after vegetation restoration in the Loess Hilly Region, China[J]. *Forests*, 2019, 10(1): 27.
- [19] Guo L N, Ji P, Sun H Y, et al. On the influence of soil thickness on the growth of urban garden plants[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2022, 38(3): 112-117. [郭利娜, 姬鹏, 孙宏彦, 等. 覆土厚度对城市园林植物生长的影响分析[J]. *中国园林*, 2022, 38(3): 112-117.]
- [20] Yuan Y, Zhao Z Q, Niu S Y, et al. The reclaimed coal mine ecosystem diverges from the surrounding ecosystem and reaches a new self-sustaining state after 20-23 years of succession in the Loess Plateau area, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 727: 138739.
- [21] Zheng L P, Gan Y D, Jia Y W, et al. Experiment on water and soil regulation method based on layered soil[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 708-730. [郑丽萍, 甘永德, 贾仰文, 等. 基于分层土壤的水土调控方法试验[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 708-730.]
- [22] Dan C H, Xu H H, Wang B, et al. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment yield on loess slope under simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 31-36. [淡彩虹, 许欢欢, 王兵, 等. 模拟降雨下前期含水量对黄绵土坡面产流产沙过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 31-36.]
- [23] Wu G Q, Dai Q H, Wang Y, et al. Response of runoff and sediment yield from maize slope farmland in karst areas to slope gradient[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6): 13-22. [吴光琴, 戴全厚, 王勇, 等. 喀斯特玉米坡耕地产流产沙对坡度的响应[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(6): 13-22.]
- [24] Zeng X, Peng X D, Liu T T, et al. Runoff generation and erosion processes at the rock-soil interface of outcrops with a concave surface in a rocky desertification area[J]. *Catena*, 2024, 239: 107920.
- [25] Zhao S, Xu Y G, Guo W Z, et al. Response of soil shear strength to heavy rainfall under different land use types on Loess Tableland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(4): 108-115. [赵珊, 许阳光, 郭文召, 等. 黄土塬区不同土地利用类型下土壤抗剪强度对强降雨的响应[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(4): 108-115.]
- [26] Cui Z Q, Wang W L, Guo M M, 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. [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.]
- [27] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow[J]. *Catena*, 2019, 173: 494-504.

- [28] Liu J B, Liang Y, Gao G Y, et al. Quantifying the effects of rainfall intensity fluctuation on runoff and soil loss: From indicators to models[J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127494.
- [29] Zhu X A, Liu W J, Chen J, et al. Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: A review of evidence and processes[J]. Plant and Soil, 2020, 453(1): 45-86.
- [30] Pu J Z, Lü X Z, Zhang Q F, et al. Characteristics and Influencing Factors of Runoff and Sediment Yield of Typical Grassland in Loess Hilly and Gully Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2):1-6.[普隽泽, 吕锡芝, 张秋芬, 等. 黄土丘陵沟壑区典型草被产流产沙特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2):1-6.]
- [30] Pu J Z, Lü X Z, Zhang Q F, et al. Characteristics and influencing factors of runoff and sediment yield of typical grassland in loess hilly and Gully Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 1-6. [普隽泽, 吕锡芝, 张秋芬, 等. 黄土丘陵沟壑区典型草被产流产沙特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 1-6.]

(责任编辑: 檀满枝)