生物炭和聚丙烯酸钾对高寒矿区煤矸石水分特性的影响

马小东，李 川，邹星晨，王作枭，贺康宁
(北京林业大学 水土保持学院，北京 100083)

摘 要：[目的]探究生物炭与聚丙烯酸钾协同改良对高寒矿区煤矸石水分特性的影响机制，旨在提升其持水保墒及抑制水分蒸发的能力。[方法]采用室内土柱模拟试验，设置不同质量分数生物炭(1.1%，4.3%)与聚丙烯酸钾(0.12%，0.22%，0.32%)添加量组合(共6种处理)及对照(CK)。运用一维定水头垂直入渗法、连续称重法及环刀法测定煤矸石基质的入渗特性、蒸发过程及关键持水参数(饱和含水量、毛管持水量、田间持水量)。[结果]各处理饱和含水量较CK提高7.88%～33.35%；聚丙烯酸钾添加量极显著抑制湿润锋运移距离、初始入渗速率、平均入渗速率和累积入渗量($p<0.01$)，生物炭的多级孔隙吸附与聚丙烯酸钾溶胀增阻效应共同形成"缓入渗—强持水"模式，有效抑制水分快速下渗并提升根区水分(如冻融水)捕获储存效率；Kostiakov模型能高精度表征改良基质入渗规律($R^2>0.916$，RMSE<0.159)。高添加量处理(如B_4P_3)抑制蒸发效果显著，累积蒸发损失率较CK最大降低19.88%，并维持更高剩余含水量。在容重1.41 g/cm^{3}条件下，综合持水特性、入渗特性及蒸发抑制性能等指标，煤矸石基质改良的最优配比为B_4P_3处理组，其生物炭质量分数为4.30%，聚丙烯酸钾质量分数为0.32%。[结论]B_4P_3处理显著增强高寒矿区煤矸石持水能力及抑制蒸发能力，Kostiakov模型对各处理组的水分入渗过程展现出最佳拟合效果。

关键词：高寒矿区；煤矸石；生物炭；聚丙烯酸钾；固废资源化利用
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2025)06-0077-10 **中图分类号**：X752，S157

文献参数：马小东，李川，邹星晨，等.生物炭和聚丙烯酸钾对高寒矿区煤矸石水分特性的影响[J].水土保持通报，2025，45(6)：77-86. Ma Xiaodong，Li Chuan，Zou Xingchen，et al. Effects of biochar and potassium polyacrylate on water characteristics of coal gangue in alpine mining area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2025，45(6)：77-86.

DOI：**10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.007** **CSTR**：**32312.14.stbctb.2025.06.007**

Effects of biochar and potassium polyacrylate on water characteristics of coal gangue in alpine mining area

Ma Xiaodong，Li Chuan，Zou Xingchen，Wang Zuoxiao，He Kangning
(*School of Soil and Water Conservation*，*Beijing Forestry University*，*Beijing* 100083，*China*)

Abstract：[Objective] The influencing mechanisms of synergistic improvement by biochar and potassium polyacrylate on the water characteristics of coal gangue in alpine mining areas were investigated，in order to enhance its water-holding and moisture conservation capacity and inhibit water loss via evaporation. [Methods] A laboratory soil column simulation experiment was conducted with different mass fractions of biochar (1.1%，4.3%) and potassium polyacrylate (0.12%，0.22%，0.32%) in combined application (six treatments in total)，along with a control (CK). The one-dimensional constant-head vertical infiltration method，continuous weighing method，and cutting-ring method were employed to determine the infiltration characteristics，evaporation process，and key water-holding parameters (saturated water content，capillary water-holding capacity，and field capacity) of the coal gangue matrix. [Results] The saturated water content of all treatments increased by 7.88% to 33.35%

收稿日期：2025-06-26 **修回日期**：2025-07-21 **采用日期**：2025-07-22
资助项目："十四五"国家重点研发计划项目"高寒矿区水源涵养功能恢复新型材料和冻土剖面近自然重构技术研发与试验示范"(2022YFF1302604)
第一作者：马小东(2000—)，男(汉族)，安徽省利辛县人，硕士研究生，研究方向为矿山生态修复。Email：maxiaodongbjfu@163.com。
通信作者：贺康宁(1962—)，男(汉族)，陕西省蓝田县人，博士，教授，主要从事水土保持与生态修复方面研究。Email：hkn@bjfu.edu.cn。

compared with CK. The addition of potassium polyacrylate significantly inhibited the transport distance of the wetting front, initial infiltration rate, average infiltration rate, and cumulative infiltration volume ($p<0.01$). The multi-level pore adsorption of biochar, combined with the swelling and resistance-enhancing effect of potassium polyacrylate, jointly formed a 'slow infiltration-strong water retention' mode. This mode effectively inhibited rapid water infiltration and enhanced the capture and storage efficiency of water (e.g., freeze-thaw water) in the root zone. The Kostiakov model could accurately characterize the infiltration patterns of the amended matrix ($R^2>0.916$, RMSE<0.159). Treatments with high amendment rates (e.g., B_4P_3) showed significant evaporation inhibition effectiveness, achieving a maximum reduction of 19.88% in cumulative evaporation loss rate compared to CK, while maintaining higher residual water content. Under a bulk density of 1.41 g/cm^3, considering water-holding characteristics, infiltration characteristics, and evaporation inhibition performance, the optimal amendment ratio of the coal gangue matrix was achieved in the B_4P_3 treatment group, with a biochar mass fraction of 4.3% and a potassium polyacrylate mass fraction of 0.32%. [Conclusion] The B_4P_3 treatment significantly enhances the water-holding capacity and evaporation inhibition ability of coal gangue in alpine mining areas. The Kostiakov model demonstrates the best fit for the water infiltration process across all treatment groups.

Keywords: alpine mining area; coal gangue; biochar; potassium polyacrylate; solid waste resource utilization

青藏高原北部分布着以针茅属植物为优势种的典型草原生态系统,其生态功能的维持依赖于地表植被与地下泥炭层的协同作用[1]。高寒地区泥炭层作为关键生态界面层,不仅对多年冻土的热稳定性具有重要调控作用,还通过独特的水文调节功能支撑着高寒植物的生长发育[2]。然而,自2006年以来,木里矿区大规模露天采煤活动引发的复合生态损伤,导致部分区域"植被—泥炭—冻土"三位一体生态结构解体[3]。矿区堆积的煤矸石等固体废弃物通过改变地表反照率、热通量等关键参数[4],显著抑制季节性冻土的形成,进而引发浅层土壤持水容量系统性衰减,导致依赖表层水分的浅根系植物出现持续性水分胁迫并最终死亡,引发一系列严重的生态退化问题。煤矸石作为采煤和洗煤过程中必然产生的固废,具有结构性差,孔隙度高,导热快,保水保肥能力低等特性[5-6],而现有矸土混合修复技术因经济性与次生生态扰动风险的双重制约难以大规模推广。因此,探索基于矿区煤矸石原位重构的生态修复技术,消纳固废存量并激活退化立地的自修复能力,已成为高寒矿区生态恢复的迫切需求。

近年来,生物炭与聚丙烯酸钾被应用于土壤改良中。生物炭由生物质高温热解(>350 ℃)制备,其多级孔隙结构可提升土壤孔隙度,增强持水性能并吸附污染物[7];聚丙烯酸钾可缔合自重数百倍的水分形成凝胶,通过调节土壤孔隙与溶胀压差实现水分缓释供给[8]。尽管二者在环境介质中稳定性良好,但其物理存在可能通过改变微生境(如孔隙堵塞、局部pH波动)间接影响土壤微生物活动,其在高寒区特殊生物群落中的响应需进一步研究验证。作为矿区生态修复的核心调控要素,水分动态平衡对植被重建和生态系统稳定性具有决定性作用[9]。研究表明,二者在盐渍土改良[10]、水土保持等[11]方面中已取得显著成效。例如,Sun Junna等[12]发现生物炭可抑制滨海盐渍土水分下渗并提高保水性;刘世思等[13]证实生物炭通过阻滞红壤湿润锋迁移降低入渗速率;刘慧君等[14]利用聚丙烯酸盐改良剂显著提升燕麦土壤团聚体与养分有效性;Abulaiti等[15]通过生物炭与聚丙烯酰胺协同施用降低水稻土盐分并优化结构。然而,现有研究多聚焦于农田生态系统[16-17],针对高寒矿区煤矸石改良研究极其匮乏。煤矸石与常规土壤的本质差异,使农田改良方案难以直接移植。

本研究聚焦于高寒矿区煤矸石关键水分特征(持水能力、入渗特性、蒸发耗散)对生物炭和聚丙烯酸钾复合改良的响应规律,核心目标在于提升煤矸石持水和保水能力,以期为高寒矿区煤矸石固废资源化与生态修复提供相关理论支撑和实用技术方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2024年7—10月在北京林业大学水土保持学院实验室进行。供试煤矸石于2024年6月下旬取自青海木里煤田聚乎更矿区,依据《矿产地质勘查规范 煤(DZ/T 0215—2020)》,采用50 m×50 m网格法分层采集。样品经避光通风晾干、颚式破碎后过5 mm筛备用;粒径组成以细砾(32.87%)和粗砾(17.84%)为主,其次为细沙(15.05%)和粉黏粒(12.57%),其基本理化性质见表1。

为表征煤矸石的矿物学特征及化学组成(以消除其成分差异对后续入渗研究可能产生的影响),取代表性样品粉碎过75 μm标准筛,研磨均匀后称取适

量粉末，使用洁净载玻片压实制备平整致密的试样表面，用于X射线衍射（XRD）分析；测试条件设定为发散狭缝（DS）与散射狭缝（SS）均为1°，扫描速度8°/min，扫描范围5°～80°（2θ）。XRD图谱（图1）解析结果显示，煤矸石主要矿物组成为石英（62.5%）、斜长石（18.2%）、云母（10.4%）和绿泥石（7.8%）。同步进行的X射线荧光光谱（XRF）分析表明，其主要组成为SiO_2（68.42%），Al_2O_3（15.17%）和Fe_2O_3（4.85%），其余氧化物（CaO，K_2O，TiO_2，MgO，Na_2O和SO_3）总占比11.56%。

表1　煤矸石基本理化性质

Table 1　Basic physicochemical properties of coal gangue

项目	干容重/($g\cdot cm^{-3}$)	自然含水量/%	饱和体积含水量/%	pH值	电导率/($\mu S\cdot cm^{-1}$)	有机质/($g\cdot kg^{-1}$)	速效氮/($mg\cdot kg^{-1}$)	速效磷/($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾/($mg\cdot kg^{-1}$)
数值	1.61	12.69	67.45	7.72	712.64	42.37	33.73	26.45	69.23

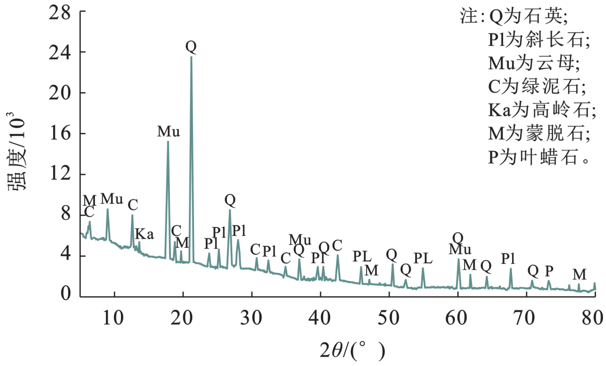


图1　煤矸石XRD图谱

Fig.1　XRD pattern of coal gangue

供试生物炭由植物秸秆于500～600 ℃热解5～6 h制得，呈75 μm粉末状，pH值为9.12，含水量6.51%，灰分含量3.00%，比表面积1 112.26 m^2/g，碘吸附值1 097.75 mg/g。供试聚丙烯酸钾粒径0.25～0.85 mm，具有高凝胶性，可生物降解，降解产物对环境和植物无害，并能有效改良土壤结构，增强保水保肥能力。试验使用过滤水以消除溶质干扰。

1.2　试验设计与试验过程

生物炭与聚丙烯酸钾添加水平依据相关改良文献最优值及预试验验证设置[18-19]。生物炭设置2个水平（质量分数1.1%和4.3%）；聚丙烯酸钾设置3个水平（质量分数0.12%，0.22%和0.32%），二者进行完全交叉组合，形成6种处理。以无添加处理作为对照（CK），共7种处理，每组处理重复3次，总计21个试验单元（表2）。

1.2.1　供试材料吸水倍率测定

基于农林保水剂标准（NY/T 886—2022）及相关文献方法[19-20]，测定生物炭与聚丙烯酸钾的吸水性能。生物炭测定：称取5.00 g（±0.01 g）试样平铺于含双层纱布的托盘（12×8×4 cm），维持0.5 cm水层于20 ℃恒温吸水12 h；沥水30 min后吸干表面水分称重，转入预称重铝盒，105 ℃烘至恒重（12 h）后冷却称量。聚丙烯酸钾测定：取1.00 g（±0.01 g）样品加800 ml溶液溶胀12 h，转移至75 μm筛沥水2 h后称重。

表2　试验设计

Table 2　Experimental design

处理	生物炭质量分数/%	聚丙烯酸钾质量分数/%
B_1P_1	1.1	0.12
B_1P_2	1.1	0.22
B_1P_3	1.1	0.32
B_4P_1	4.3	0.12
B_4P_2	4.3	0.22
B_4P_3	4.3	0.32
CK	0	0

1.2.2　煤矸石基质水分特征值测定

参考相关文献研究方法[19]，将预处理煤矸石按容重1.41，1.51，1.61 g/cm^3装入100 cm^3环刀，压实后置于渗透托盘（环刀轴向间距≥3 cm）。沿托盘壁注水至环刀顶端以下2 mm处，饱和渗透12 h。取出环刀，擦干外壁后立即称重，计算饱和含水量与总孔隙度。随后将饱和后的环刀垂直置于40～60目的石英砂上，分别静置2 h和24 h后称重，依次测定毛管含水量和田间持水量[21-22]，并据此计算毛管孔隙度。试验设3次重复，结果取平均值。

1.2.3　入渗测定

采用一维定水头（5 cm）垂直积水入渗法，试验装置由亚克力柱（内径15 cm，高50 cm）连接马氏瓶构成。为消除侧向流影响，柱内壁涂覆凡士林；为精确监测湿润锋，外壁粘贴刻度尺。根据单层压实厚度（10 cm）和目标容重计算所需煤矸石干重，并分4层等质量装填；每层装填后，使用重力锤（2.5 kg，落距30 cm）沿“回”字形路径自由落体夯击15次；校验合格层间用钢丝刷刮毛糙化消除优先流。装填后柱顶覆滤纸及透水石以缓冲水流冲击，静置

24 h使结构稳定。入渗试验启动前校验系统气密性。试验启动时,快速注入相当于5 cm水头的水量(883.5 ml),并同步开启阀门计时。按时间梯度由密至疏的原则记录湿润锋位置与累积入渗量,试验持续210 min。每个处理重复3次。

1.2.4 蒸发测定

待煤矸石土柱完成入渗试验达完全饱和后,静置至重力水充分排出。使用塑料薄膜密封土柱上表面以隔绝自然蒸发。为模拟自然蒸发环境,于土柱正上方 30 cm处设置250 W红外辐射源,每日08:00—18:00定时辐射,非辐射时段维持密封状态。同步放置同径蒸发皿记录水面蒸发量,作为环境蒸发强度参照基准。分别于试验起始(0),10,20,30 d采用称重法测定土柱质量,计算含水量及累积蒸发量。

蒸发损失率(L)表征水分蒸发抑制效果。L值越低,表明抑制蒸发的效果越显著。L值计算公式为

$$L=\frac{M_1}{M_2}\times 100\% \tag{1}$$

式中:M_1为最终测定的基质水分蒸发量(g);M_2为土柱初始吸收的水分含量(g)。

1.2.5 入渗模型

试验采用统一规格马氏瓶,其水位下降值(cm)直接表征累计入渗量[19]。基于此,应用 Kostiakov与Philip入渗模型[23]拟合煤矸石基质入渗速率随时间变化的动态规律。

Kostiakov模型入渗公式为

$$F(t)=\alpha t^{-\beta} \tag{2}$$

式中:$F(t)$为入渗速率(cm/min);t为入渗历时(min);参数α表征初始入渗能力;参数β反映入渗速率衰减的快慢程度。

Philip模型入渗公式为

$$F(t)=0.5mt^{-0.5}+n \tag{3}$$

式中:$F(t)$为入渗速率(cm/min);t为入渗历时(min);参数m为吸渗系数(cm/min),参数n为稳定入渗率(cm/min)。

1.2.6 评价指标

采用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE, cm)评估入渗模型性能,其中实测值与模拟值的RMSE最优值为0,R^2最优值为1。

决定系数R^2计算公式为

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}(Y_i-X_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(X_i-X_{i,\text{mean}})^2} \tag{4}$$

均方根误差RMSE计算公式为

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(X_i-Y_i\right)^2}{N}} \tag{5}$$

式中:X_i和Y_i分别为第i个读数时实测值和估算值;N为试验过程的读数个数;$X_{i,\text{mean}}$为实测值的平均值。

1.3 数据处理及综合评价

试验数据经Excel 2019预处理后,采用SPSS 27进行单因素方差分析(ANOVA)和LSD检验($p<0.05$),并用Origin 2024绘图。

2 结果与分析

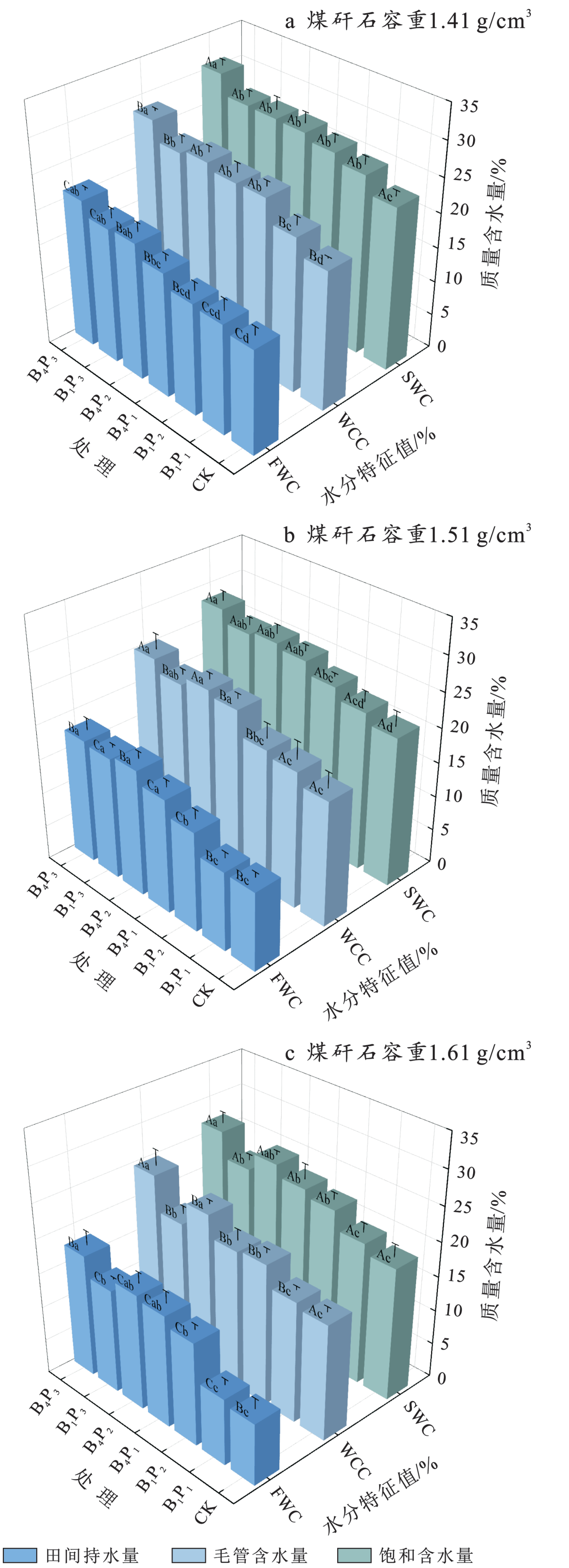
2.1 改良剂对煤矸石持水量特征值的影响

图2和表3表明,煤矸石持水性能受处理方式和容重梯度显著影响。不同处理组饱和含水量均值为21.56%~28.75%,毛管含水量均值为18.39%~26.17%,田间持水量均值为11.91%~19.18%,且生物炭和聚丙烯酸钾添加量与煤矸石含水量呈显著正相关($p<0.05$)。不同处理组间煤矸石的总孔隙度(39.60%~42.40%)与毛管孔隙度(24.96%~30.19%)差异不显著。

研究结果表明,1.41,1.51,1.61 g/cm^3 3种容重的煤矸石持水性能参数差异显著($p<0.05$)。容重从1.41 g/cm^{3}增至1.61 g/cm^{3}时,饱和含水量均值由27.53%降低至23.38%,毛管含水量均值从24.93%降至20.40%,田间持水量由18.15%降至14.24%;同时,总孔隙度由46.09%下降至37.37%,毛管孔隙度由33.45%降至23.04%。单因素方差分析进一步证实,不同容重的煤矸石持水及孔隙度参数均存在极显著差异($p<0.01$)。

2.2 不同处理煤矸石湿润锋运移特征

湿润锋是土壤水分入渗过程中由重力与基质吸力共同驱动的干湿界面动态边界[24]。图3表明,湿润锋运移呈三阶段特征:0—20 min快速迁移,20—90 min逐渐减缓,90 min后趋于稳定。所有改良剂处理的湿润锋最终运移距离均显著低于CK组($p<0.05$)。210 min时,运移距离排序为CK> B_1P_1> B_1P_2> B_4P_1> B_4P_2> B_1P_3> B_4P_3,表明在固定生物炭比例下,聚丙烯酸钾剂量增加($P_1<P_2<P_3$),可显著缩短运移距离;同等聚丙烯酸钾水平下,高生物炭比例处理运移距离更低,其中B_4P_3协同抑制效果最强。表明生物炭与聚丙烯酸钾通过优化孔隙结构、增强持水能力,有效延缓了煤矸石水分入渗进程。



注:SWC 为饱和含水量;WCC 为毛管含水量;FWC 为田间持水量。图柱上标不同大写字母表示同一处理下不同水分特征值间差异显著($p<0.05$);图柱上标不同小写字母表示不同处理同一水分特征值间差异显著($p<0.05$)。各处理方案见表1。下同。

图 2　不同处理下煤矸石水分特征值变化

Fig.2　Changes in water characteristic values of coal gangue under different treatments

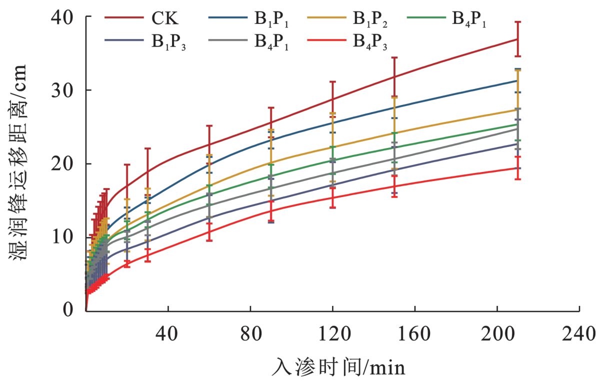


图 3　不同处理下湿润锋运移距离变化

Fig.3　Changes in wetting front transport distance under different treatments

为定量表征改良剂对煤矸石湿润锋运移动力学的影响,采用幂函数模型[$D(t)=ut^k$]拟合运移距离(D)与时间(t)的关系(表4)。所有处理拟合效果均达极显著水平,其中 B_1P_1,B_1P_2 和 B_4P_1 处理的 R^2($\geqslant$0.998)与 RMSE($\leqslant$0.303)表现最优,表明该模型可精确描述湿润锋运移规律。参数分析表明,在固定生物炭比例下,聚丙烯酸钾剂量增加时,系数 u 显著降低,指数 k 显著增大,说明聚丙烯酸钾增强了运移速率的衰减效应。双因素方差分析表明,聚丙烯酸钾对运移距离的影响极显著($p<0.01$)(表5),生物炭影响显著($p<0.05$),二者交互作用未达显著水平($p>0.05$)。

2.3　不同处理煤矸石累积入渗量

累积入渗量表征单位土表在特定时段的下渗水分总量[25],是评估土壤入渗能力的关键指标。图4表明,入渗 210 min 时,所有改良剂处理的累积入渗量均显著低于 CK 组($p<0.05$)。各处理累积入渗量排序为:CK>B_1P_1>B_1P_2>B_4P_1>B_4P_2>B_1P_3>B_4P_3,较 CK 降幅为 21.07%~62.93%,其中 B_4P_3 降幅最大(62.93%)。双因素方差分析表明(表5),聚丙烯酸钾对累积入渗量有极显著抑制作用($p<0.01$),为主要控制因子;生物炭及其交互作用影响均未达显著水平($p>0.05$)。

2.4　不同处理煤矸石入渗速率及模型拟合

入渗速率是表征土壤水分入渗动态的关键指标[26]。图5表明,所有改良剂处理的初始、稳定及平均入渗速率均显著低于 CK 组($p<0.05$)。初始入渗速率排序为:CK>B_1P_1>B_1P_2>B_4P_1>B_4P_2>B_1P_3>B_4P_3,其中 B_4P_3 较 CK 降低了 66.27%;稳定入渗速率排序为:CK>B_1P_1>B_4P_2>B_1P_3>B_1P_2>B_4P_1>B_4P_3,其中 B_4P_3 较 CK 降低了 47.52%;平均入渗速率表现为:CK>B_1P_1>B_1P_2>B_4P_1>B_4P_2>B_1P_3>B_4P_3,其中 B_4P_3 较 CK 降低了 64.75%。双因素方差分析表明(表5),聚丙烯酸钾对初始入渗速率和平均入渗速率

有极显著抑制作用($p<0.01$),但对稳定入渗速率无显著影响($p>0.05$);生物炭及其与聚丙烯酸钾的交互作用对初始入渗速率、平均入渗速率和稳定入渗速率均无显著影响($p>0.05$)。表明聚丙烯酸钾主要抑制入渗前期水分运移,而生物炭通过物理持水机制间接调控入渗过程。

表 3　不同处理及容重梯度下煤矸石水分特征参数

Table 3　Water characteristic parameters of coal gangue under different treatments and bulk density gradients

因 素	处理	饱和含水量/%	毛管含水量/%	田间持水量/%	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%
处 理	B_1P_1	23.26±2.63^{bc}	19.95±2.57^{bc}	12.42±3.02^{b}	41.13±4.30^{a}	25.15±5.69^{a}
	B_1P_2	25.00±1.91^{abc}	22.23±2.82^{abc}	15.26±1.31^{ab}	41.73±4.30^{a}	27.64±3.84^{a}
	B_1P_3	25.99±2.32^{ab}	23.02±2.74^{ab}	17.50±2.15^{a}	42.40±4.61^{a}	30.19±4.74^{a}
	B_4P_1	26.19±2.17^{ab}	23.21±2.65^{ab}	17.00±1.41^{a}	41.47±4.20^{a}	28.09±3.45^{a}
	B_4P_2	26.98±1.53^{ab}	24.76±1.55^{a}	18.35±1.80^{a}	42.00±4.00^{a}	29.46±4.89^{a}
	B_4P_3	28.75±2.17^{a}	26.17±2.37^{a}	19.18±2.29^{a}	43.47±4.81^{a}	29.95±4.74^{a}
	CK	21.56±2.41^{c}	18.39±1.90^{c}	11.91±2.91^{b}	39.60±4.00^{a}	24.96±5.79^{a}
容重/(g·cm^{-3})	1.41	27.53±2.38^{a}	24.93±2.71^{a}	18.15±2.49^{a}	46.09±1.50^{a}	33.45±2.44^{a}
	1.51	25.27±2.47^{ab}	22.26±2.99^{ab}	15.45±2.96^{ab}	41.60±1.08^{b}	27.26±2.48^{b}
	1.61	23.38±2.82^{b}	20.40±2.89^{b}	14.24±3.51^{b}	37.37±1.03^{c}	23.04±3.03^{c}

注:以上数据为均值±标准差,$n=3$;不同小写字母代表不同处理间显著差异($p<0.05$)。

表 4　不同处理湿润锋运移距离与时间拟合情况

Table 4　Fitting of wetting front transport distance and time under different treatments

处理	u	k	幂函数模型表达式	R^2	RMSE
CK	6.200	0.327	$D(t)=6.200\,t^{0.327}$	0.991	0.907
B_1P_1	4.984	0.341	$D(t)=4.984\,t^{0.341}$	0.999	0.303
B_1P_2	4.282	0.344	$D(t)=4.282\,t^{0.344}$	0.999	0.278
B_4P_1	4.173	0.333	$D(t)=4.173\,t^{0.333}$	0.998	0.277
B_1P_3	2.805	0.382	$D(t)=2.805\,t^{0.382}$	0.994	0.455
B_4P_2	3.862	0.336	$D(t)=3.862\,t^{0.336}$	0.992	0.571
B_4P_3	1.695	0.458	$D(t)=1.695\,t^{0.458}$	0.997	0.321

采用Kostiakov与Philip入渗模型对煤矸石水分入渗过程进行模拟(表6)。B_4P_3处理组表现出最小的α值(1.808)和最大的β值(2.909),表明高比例生物炭与聚丙烯酸钾协同作用下,煤矸石初始入渗能力最弱且入渗速率衰减最快,对水分入渗的抑制效果最为显著。该模型拟合精度较高(R^2范围为0.916~0.970,平均0.954;RMSE范围为0.101~0.159,平均0.129)。在Philip模型中,所有改良处理的吸渗系数(m)均显著低于CK组;而参数n在B_4P_3处理组达最小值。该模型拟合效果(R^2范围0.530~0.903,平均0.711;RMSE范围0.223~0.397,平均0.309)整体弱于Kostiakov模型。综合对比评价指标,Kostiakov模型对改良煤矸石入渗过程的拟合度显著优于Philip模型。

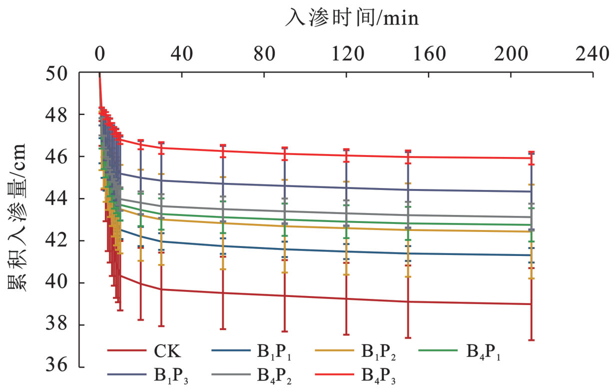


图 4　不同处理下煤矸石累积入渗量变化

Fig.4　Changes in cumulative infiltration volume under different treatments

表 5　不同处理下煤矸石入渗参数的双因素方差分析

Table 5　Two-way ANOVA of infiltration parameters of coal gangue under different treatments

因 素	初始入渗速率/(cm·min^{-1})		稳定入渗速率/(cm·min^{-1})		平均入渗速率/(cm·min^{-1})		累积入渗量/cm		湿润锋运移距离/cm	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
BC	3.41	0.09	3.93	0.07	3.62	0.08	3.91	0.07	7.90	<0.05
PKA	8.49	<0.01	1.72	0.22	8.68	<0.01	8.86	<0.01	9.32	<0.01
BC*PKA	0.26	0.77	3.40	0.06	0.24	0.79	0.20	0.82	0.53	0.60

注:BC为生物炭;PKA为聚丙烯酸钾;F统计量;p为显著性概率值。

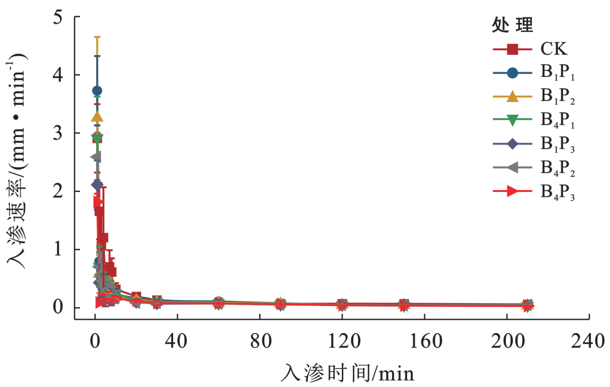


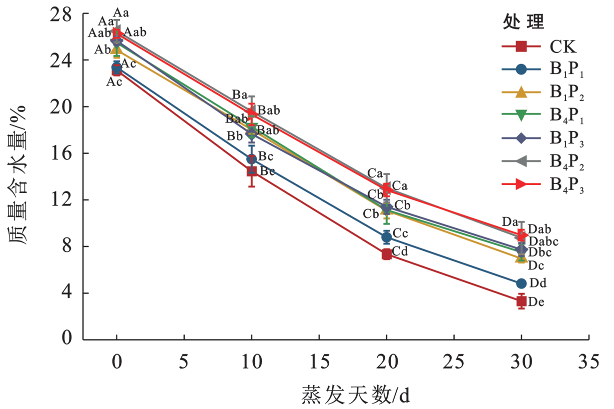
图 5　不同处理下煤矸石入渗速率变化

Fig.5　Changes in infiltration rate of coal gangue under different treatments

2.5　不同处理下水分蒸发特性

2.5.1　煤矸石蒸发

土壤蒸发是环境因子(太阳辐射、温度、湿度及风力)驱动下土壤水分汽化散失的关键过程[27]。研究结果(图 6)表明,煤矸石含水量随蒸发时间延长而降低。蒸发初期(0—10 d),各处理组含水量差异较小;至蒸发中期(10—30 d),差异显著增大。蒸发 30 d 后,各处理含水量表现为 B_4P_3(8.98%)>B_4P_2(8.75%)>B_1P_3(7.74%)>B_4P_1(7.52%)>B_1P_1(6.96%)>B_1P_2(4.82%)>CK(3.31%),所有改良剂处理的含水量均显著高于CK(p<0.05)。进一步分析表明,高比例生物炭(B_4)与聚丙烯酸钾(P_2/P_3)表现出最强的持水能力,其中 B_4P_3 含水量为 CK 的 2.71 倍,持水能力最强。依据含水量变化速率,蒸发过程可分为 2 个阶段:快速期(0—20 d),日均降幅 0.67%~0.79%;缓速期(20—30 d),日均降幅 0.36%~0.41%,且复合改良剂处理降幅多低于 CK。表明生物炭与聚丙烯酸钾协同作用有效延缓了煤矸石水分蒸发,高剂量组合(B_4P_3,B_4P_2)效果最显著。



注:误差线上不同大写字母表示同一处理下不同时间显著差异(p<0.05);误差线上不同小写字母表示不同处理同一时间含水量显著差异(p<0.05)。

图 6　不同处理下煤矸石连续 30 d 蒸发含水量变化

Fig.6　Changes in water content during 30 consecutive days evaporation of coal gangue under different treatments

表 6　煤矸石水分入渗过程模型拟合参数和评价参数

Table 6　Model fitting and evaluation parameters of infiltration process of coal gangue

处理	Kostiakov 入渗模型				Philip 入渗模型			
	α	β	R^2	RMSE	m	n	R^2	RMSE
CK	2.935	0.874	0.966	0.134	5.696	−0.381	0.903	0.223
B_1P_1	3.644	1.629	0.965	0.157	5.665	−0.508	0.679	0.397
B_1P_2	3.180	1.678	0.953	0.159	4.887	−0.435	0.665	0.368
B_4P_1	2.825	1.450	0.965	0.122	4.554	−0.392	0.720	0.347
B_1P_3	2.029	1.345	0.940	0.116	3.306	−0.266	0.721	0.251
B_4P_2	2.508	1.304	0.970	0.101	4.194	−0.349	0.761	0.294
B_4P_3	1.808	2.909	0.916	0.117	2.418	−0.206	0.530	0.280

注:α 为初始入渗率;β 为入渗率随时间下降的速度;R^2 为决定系数;RMSE 为均方根误差;m 为吸渗系数;n 为稳定入渗率。

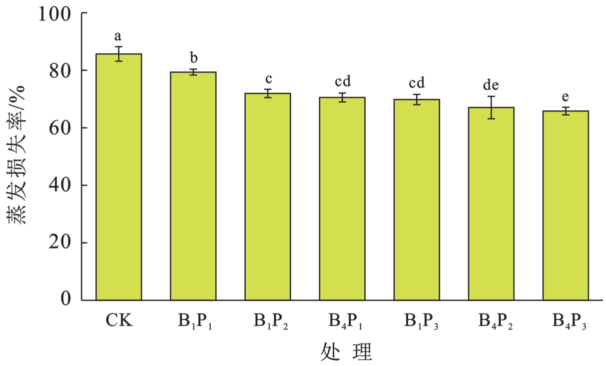
2.5.2　蒸发损失率

累计蒸发损失率进一步证实生物炭与聚丙烯酸钾的协同抑蒸效应(图 7),所有复合改良剂处理的 30 d 累计蒸发损失率均显著低于 CK 组(p<0.05)。各处理蒸发损失率表现为:B_4P_3(65.81%)<B_4P_2(67.04%)<B_1P_3(69.83%)<B_4P_1(70.54%)<B_1P_2(71.96%)<B_1P_1(79.36%)<CK(85.69%)。其中,B_4P_3 和 B P_2 抑制蒸发效果最优,损失率较 CK 分别降低 23.2% 和 21.8%。

3　讨 论

水分作为高寒干旱半干旱地区生态修复的关键限制性因子,其动态受蒸发潜势和季节性冻融作用共同影响,导致土壤保水能力低下,严重制约高寒矿区植被重建。煤矸石作为矿区主要固体废弃物,其结构松散、持水能力弱及水分渗透性强的固有特性,进一步加剧了区域的水分胁迫效应。本研究结果表明,生物炭与聚丙烯酸钾的协同作用可有效提升煤

矸石基质的持水性能。其核心机制在于改良剂增加了基质总孔隙度,优化了关键持水参数。



注:图柱上不同小写字母表示不同处理间显著差异($p<0.05$)。

图 7 不同处理下煤矸石的蒸发损失率

Fig.7 Evaporative loss rate of coal gangue under different treatments

针对煤矸石基质水分渗透性强、易流失的特点,生物炭与聚丙烯酸钾的协同作用显著优化了水分入渗过程,形成了关键的“缓入渗”物理屏障效应。虽初期高基质势下各处理均呈现高入渗率,但随入渗时间延长,改良组入渗速率显著低于 CK($p<0.01$)。这种“缓入渗”效应可归因于二者协同构建的物理屏障(图 8),生物炭丰富的微孔和介孔提供了巨大的比表面积和毛细管力,对水分产生物理吸附与持留作用,延缓了其在孔隙网络中的运移速率[28];而聚丙烯酸钾吸水后发生剧烈溶胀(吸水倍率达 413.42±40.85 g/g)(表 7),其膨胀的凝胶有效填充和阻塞了煤矸石基质中的大孔隙通道,显著降低了大孔隙的连通性,阻碍了水分的快速通过。二者的协同作用并非简单阻滞水分,而是通过生物炭孔隙的“缓释”与聚丙烯酸钾溶胀体的“物理阻隔”相结合,共同优化了水分的空间分布,从而显著提高了高寒矿区稀缺水分资源(如冻融水)在根区的捕获与储存效率。

尽管 Philip 模型具有明确的物理基础,但其对入渗初期数据波动敏感,且在煤矸石—改良剂界面水分运移复杂性的影响下,参数拟合效果较差。相比之下,Kostiakov 模型凭借其幂函数形式的灵活性,能更准确地描述煤矸石高初始入渗率及快速衰减的特征(参数 α 值为 1.808~3.644)。α 值范围表明改良剂通过填充大孔隙有效降低了水分入渗速率的衰减速率,这与孔隙结构分析揭示的物理机制一致。

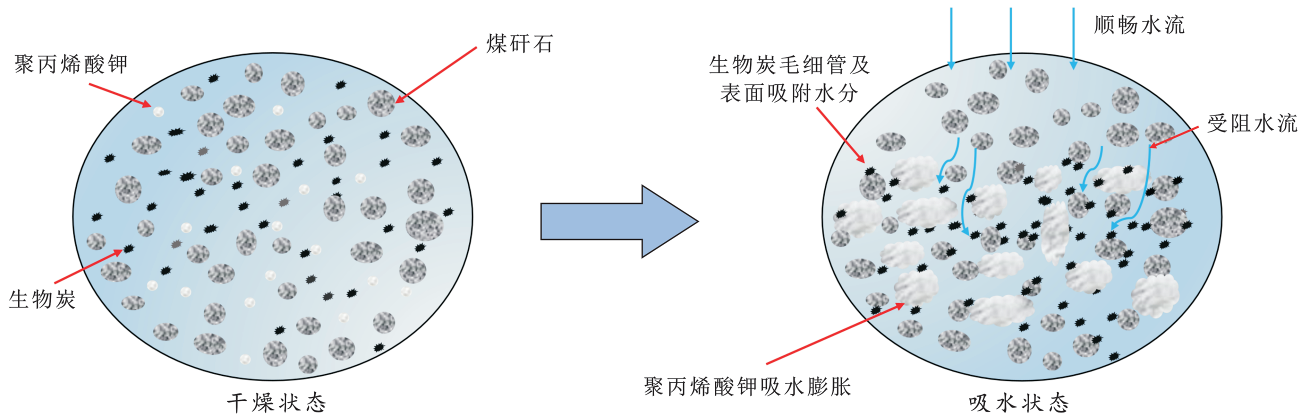


图 8 生物炭与聚丙烯酸钾协同作用示意图

Fig.8 Schematic diagram of synergistic effect of biochar and potassium polyacrylate

表 7 供试材料吸水倍率

Table 7 Water absorption rate of test materials

供试材料	自来水	去离子水	0.1% 盐溶液	0.5% 盐溶液	0.9% 盐溶液
生物炭/($g \cdot g^{-1}$)	—	7.15±0.62	—	—	—
聚丙烯酸钾/($g \cdot g^{-1}$)	277.06±23.43	413.42±40.85	179.26±28.43	123.43±27.16	72.12±18.76

注:以上数据为均值±标准差,$n=3$。

在蒸发调控方面,改良剂协同应用显著增强了煤矸石基质的持水性并抑制了蒸发。随着改良剂用量增加,其协同作用增大了土壤比表面积并构建多级孔隙结构,有效阻断了毛细管输水路径[29]。在蒸发初期,改良处理的蒸发速率显著低于 CK,主要由于大孔隙被生物炭及聚丙烯酸钾形成的絮状物填充,导致其导水能力下降。当蒸发进入扩散主导阶段,水分损失主要通过蒸汽扩散进行[30],而施用改良剂的煤矸石在蒸发结束后的剩余含水量更高。这可能是因为残余水分主要储存在改良剂和煤矸石团聚

体孔隙中,其赋存状态更难通过蒸发散失。因此,在相同蒸发条件下,添加改良剂不仅降低了蒸发损失率,更显著提升了基质的水分保持能力和有效水储量,使其能更持久地供给植被。

生物炭与聚丙烯酸钾的协同应用有效优化了高寒矿区煤矸石基质的持水-供水能力,实现了入渗过程的调控,并提升了基质自身的抗蒸发能力,为提高矿区水分资源利用效率提供了有效途径。鉴于高寒矿区煤矸石基质理化性质及环境条件存在显著的空间异质性,后续研究需聚焦煤矸石理化性质、改良剂对微生物群落功能的影响机制,适生草本植被筛选配置及优先流调控,以构建更高效的矿区生态修复技术体系。

4 结 论

(1) 生物炭的多级孔隙吸附与聚丙烯酸钾吸水溶胀协同作用有效延缓了水分运移(尤其是后期速率),显著抑制水分快速下渗流失,提升根区对冻融水等稀缺水分的捕获与储存效率。

(2) 煤矸石基质中添加质量分数4.3%生物炭和质量分数0.32%聚丙烯酸钾(B_4P_3处理),可显著提高其饱和含水量、毛管持水量及田间持水量,达到最佳持水效果。

(3) 高添加量处理(如B_4P_3)显著降低了累积蒸发损失率,并在蒸发后期维持更高剩余含水量,有效增强了基质的长期持水能力。

参考文献(References)

[1] 王鹏森,刘刚,李旭旭,等.未来气候情景下垂穗披碱草在中国的潜在分布[J].生态学杂志,2025,44(2):590-599.
Wang Pengsen, Liu Gang, Li Xuxu, et al. Potential distribution of *Elymus nutans* in China under future climate scenarios [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025,44(2):590-599.

[2] 陈哲,徐巍,门双,等.祁连山岛状冻土活动层土壤氮库对模拟冻融响应[J].草地学报,2023,31(1):19-28.
Chen Zhe, Xu Wei, Men Shuang, et al. Response of soil nitrogen pools to a simulated freeze-thaw test in the active layer of segregated permafrost on the Qilian Mountains [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023,31(1):19-28.

[3] 陈峰,杨利亚,冯海波,等.祁连山南麓露天矿区高寒草地植被生态系统稳定性研究:以青海木里-聚乎更矿区为例[J].安全与环境工程,2024,31(1):291-300.
Chen Feng, Yang Liya, Feng Haibo, et al. Stability of the alpine grassland vegetation ecosystem in open-pit mining area at the southern Qilian Mountains: A case study in Muli-Juhugeng mining area, Qinghai Province [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(1):291-300.

[4] 周雪雨,郭亮亮,张永波.煤矸石人工热储的建造及自燃热能潜力分析[J].矿业安全与环保,2023,50(3):129-135.
Zhou Xueyu, Guo Liangliang, Zhang Yongbo. Constraction of coal gangue artificial thermal storage and analysis of spontaneous combustion thermal energy potential [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(3):129-135.

[5] Guo Shijie, Zhang Jixiong, Li Meng, et al. A preliminary study of solid-waste coal gangue based biomineralization as eco-friendly underground backfill material: Material preparation and macro-micro analyses [J]. Science of the Total Environment, 2021,770:145241.

[6] Wang Jinman, Li Xinfeng, Bai Zhongke, et al. The effects of coal gangue and fly ash on the hydraulic properties and water content distribution in reconstructed soil profiles of coal-mined land with a high groundwater table [J]. Hydrological Processes, 2017,31(3):687-697.

[7] 宋凯,高宇,左雨田,等.生物炭改良模式下农田土壤总有机碳的Meta分析[J].中国农学通报,2025,41(9):125-131.
Song Kai, Gao Yu, Zuo Yutian, et al. Meta-analysis of total organic carbon in agricultural soils under biochar amendment model [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025,41(9):125-131.

[8] Yang Lixia, Yang Yang, Chen Zhang, et al. Influence of super absorbent polymer on soil water retention, seed germination and plant survivals for rocky slopes eco-engineering [J]. Ecological Engineering, 2014,62:27-32.

[9] 杨永刚,苏帅,焦文涛.煤矿复垦区土壤水动力学特性对下渗过程的影响[J].生态学报,2018,38(16):5876-5882.
Yang Yonggang, Su Shuai, Jiao Wentao. The influence of hydrodynamic characteristics on the infiltration process of soil water in a coal mine reclamation area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(16):5876-5882.

[10] 魏盈,焦乐,张鹏,等.生物炭改良盐碱地研究与应用进展[J].环境科学,2024,45(2):940-951.
Wei Ying, Jiao Le, Zhang Peng, et al. Research and application progress of biochar in amelioration of saline-alkali soil [J]. Environmental Science, 2024, 45(2):940-951.

[11] 陈诗婷,查瑞波,毛兰花,等.施用保水剂对花岗岩红壤坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):44-49.
Chen Shiting, Zha Ruibo, Mao Lanhua, et al. Effects of SAP application on slope erosion process of granite red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):44-49.

[12] Sun Junna, Yang Runya, Li Wenxue, et al. Effect of

biochar amendment on water infiltration in a coastal saline soil [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(11):3271-3279.

[13] 刘世思,裴青宝,宋奕欣,等.生物炭添加量对红壤水分运移的影响[J].水资源与水工程学报,2024,35(5):217-224.
Liu Shisi, Pei Qingbao, Song Yixin, et al. Effect of biochar addition on water transport in red soils [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(5):217-224.

[14] 刘慧军,刘景辉,于健,等.聚丙烯酸盐类土壤改良剂对燕麦土壤微生物量氮及酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2013(1):25-31.
Liu Huijun, Liu Jinghui, Yu Jian, et al. Effect of soil amendment of polyacrylate on soil microbial biomass nitrogen and soil enzyme activity [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(1):25-31.

[15] Abulaiti A, She Dongli, Liu Zhipeng, et al. Application of biochar and polyacrylamide to revitalize coastal saline soil quality to improve rice growth [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(7):18731-18747.

[16] 赵西宁,刘帅,高晓东,等.不同改良剂对黄土高原丘陵区山地果园土壤质量的影响[J].生态学报,2022,42(17):7080-7091.
Zhao Xining, Liu Shuai, Gao Xiaodong, et al. Effect evaluation of soil amendments on soil quantity of mountain apple orchards in the hilly region of Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(17):7080-7091.

[17] 夏茂林,刘云飞,张承吉,等.新型复合保水剂对半干旱区烤烟生长和生理特性的影响[J].中国烟草科学,2023,44(1):32-37.
Xia Maolin, Liu Yunfei, Zhang Chengji, et al. Effects of new composite water retention agents on growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco in semi-arid areas [J]. Chinese Tobacco Science, 2023,44(1):32-37.

[18] 刘欢平,郑彩霞,石琪仙,等.聚丙烯酰胺与腐植酸混施对紫色土水分入渗特性的影响[J].水土保持通报,2023,43(4):121-127.
Liu Huanping, Zheng Caixia, Shi Qixian, et al. Effect of mixed application of polyacrylamide and humic acid on water infiltration characteristics of purple soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4):121-127.

[19] 孙智龙,杨建英,史常青,等.SOCO-SAP对高寒矿区不同级配煤矸石水分与披碱草生长的影响[J].煤炭学报,2024,49(12):4915-4927.
Sun Zhilong, Yang Jianying, Shi Changqing, et al. Effect of SOCO-SAP on moisture of different graded coal gangue and *Elymus dahuricus* growth in alpine mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12):4915-4927.

[20] 王小展,杨春艳,史常青,等.不同温度和冷冻/冻融循环对保水剂吸持水性能的影响[J].农业工程学报,2025,41(4):59-69.
Wang Xiaozhan, Yang Chunyan, Shi Changqing, et al. Effects of different temperatures and freezing/freezing-thawing cycles on the water absorption and holding properties of superabsorbent polymers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(4):59-69.

[21] 杨卓,盛世博,辛建宝,等.露天煤矿剥离物不同配比表土替代材料的物理性质[J].水土保持通报,2021,41(2):201-207.
Yang Zhuo, Sheng Shibo, Xin Jianbao, et al. Physical properties of topsoil substitute materials formed by overburden materials in open-pit coal mine with different ratios [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(2):201-207.

[22] 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.

[23] Su Lijun, Wang Quanjiu, Shan Yuyang, et al. Estimating soil saturated hydraulic conductivity using the Kostiakov and Philip infiltration equations [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016,80(6):1463-1475.

[24] 陈浩,刘冬冬,冯娜,等.上覆碳酸盐岩红土层对磷石膏水分运移的影响及Green-Ampt模型模拟[J].水土保持通报,2025,45(1):225-234.
Chen Hao, Liu Dongdong, Feng Na, et al. Effect and simulation of overlying carbonate red soil layers on water migration in phosphogypsum [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):225-234.

[25] 陆丽霞,陈浩,王儒章,等.微塑料种类和尺寸对碳酸盐岩红土入渗过程及水力参数的影响[J].水土保持通报,2025,45(1):215-224.
Lu Lixia, Chen Hao, Wang Ruzhang, et al. Influence of microplastic species and size on infiltration process and hydraulic parameters of carbonate lateritic soils [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1):215-224.

[26] 王志超,张博文,倪嘉轩,等.微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响[J].环境科学,2022,43(8):4394-4401.
Wang Zhichao, Zhang Bowen, Ni Jiaxuan, et al. Effect of microplastics on soil water infiltration and evaporation [J]. Environmental Science, 2022,43(8):4394-4401.

(下转第97页)

reduction for network anomaly detection [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(2):137-142.

[21] 王如岩,赵龙,宋庆健,等.大汶河上游小流域降雨类型及其对产流产沙的影响[J].水土保持通报,2024,44(6):194-199.
Wang Ruyan, Zhao Long, Song Qingjian, et al. Rainfall regimes and their influence on runoff and sediment yield at small watershed in upper reaches of Dawen River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(6):194-199.

[22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[23] 欧会迪,张锦豪,李建菲,等.太行山南麓鱼鳞坑坡面产流特征及其影响因素[J].水土保持通报,2024,44(2):110-118.
Ou Huidi, Zhang Jinhao, Li Jianfei, et al. Characteristics of runoff and its influencing factors on fish-scale pit slopes in southern foothills of Taihang Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(2):110-118.

[24] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
Xie Yun, Liu Baoyuan, Zhang Wenbo. Study on standard of erosive rainfall [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(4):6-11.

[25] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):35-41.
Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. Resources Science, 2003,25(1):35-41.

[26] 张哲,方政,董智,等.鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(1):69-76.
Zhang Zhe, Fang Zheng, Dong Zhi, et al. Effects of erosive rainfall and typical crops on slope runoff and sediment yield in mountainous area of central-south of Shandong Province [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2024,46(1):69-76.

[27] 王赫,杨舜成,岳晓峰,等.红壤区裸露坡地不同类型次降雨的产流产沙规律[J].水土保持学报,2023,37(4):61-68.
Wang He, Yang Shuncheng, Yue Xiaofeng, et al. Runoff and sediment of different rainfall types on bare slope in the red soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(4):61-68.

[28] 张春霞,董智,高波,等.侵蚀性雨型分类及不同植被类型对棕壤坡面土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2023,30(2):36-41.
Zhang Chunxia, Dong Zhi, Gao Bo, et al. Effects of erosive rainfall patterns and different vegetation types on soil erosion in slope with brown soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):36-41.

[29] 顾朝军,朱永清,黄立文,等.不同土地利用对江西红壤坡地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):10-18.
Gu Chaojun, Zhu Yongqing, Huang Liwen, et al. Effects of different land uses on the runoff and sediment yield in red soil slope, Jiangxi [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(4):10-18.

[30] 刘亦涵,王浩天,甄志磊,等.基于RUSLE模型的黄河流域山西段土壤侵蚀变化与驱动因子[J].土壤,2025,57(2):452-460.
Liu Yihan, Wang Haotian, Zhen Zhilei, et al. Changes of soil erosion based on RUSLE model and driving factors in Shanxi section of Yellow River basin [J]. Soils, 2025,57(2):452-460.

(上接第 86 页)

[27] 马靖涵,穆艳.城市绿化树种银杏的蒸散特征和土壤水分状况[J].水土保持通报,2023,43(2):69-76.
Ma Jinghan, Mu Yan. Evapotranspiration characteristics and soil moisture conditions of *Ginkgo biloba* in urban gardens [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):69-76.

[28] 吴志娟,毕二平.生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用[J].环境科学,2017,38(5):2154-2160.
Wu Zhijuan, Bi Erping. Enhanced sorption of cetirizine to loessial soil amended with biochar [J]. Environmental Science, 2017,38(5):2154-2160.

[29] Ali Akbar Nakhli S, Imhoff P T. Models for predicting water retention in pyrogenic carbon (biochar) and biochar-amended soil at low water contents [J]. Water Resources Research, 2020,56(11):e2020WR027726.

[30] 杨春艳,王小展,史常青,等.不同材料覆盖对高寒矿区扰动界面土壤蒸发特性的影响[J].水土保持研究,2025,32(2):198-206.
Yang Chunyan, Wang Xiaozhan, Shi Changqing, et al. Effect of different mulching materials on soil evaporation characteristics of disturbed interface in alpine mining area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(2):198-206.