北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

高吸水树脂改良煤矸石基质水分特性

孙智龙 杨建英 史常青 李成 李睿杰 杨春艳 王小展 邓莫楠

Moisture characteristics of coal gangue matrix modified by super absorbent polymer

Sun Zhilong, Yang Jianying, Shi Changqing, Li Cheng, Li Ruijie, Yang Chunyan, Wang Xiaozhan, Deng Monan

引用本文:
孙智龙, 杨建英, 史常青, 李成, 李睿杰, 杨春艳, 王小展, 邓莫楠. 高吸水树脂改良煤矸石基质水分特性[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2):105–113. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230210
Sun Zhilong, Yang Jianying, Shi Changqing, Li Cheng, Li Ruijie, Yang Chunyan, Wang Xiaozhan, Deng Monan. Moisture characteristics of coal gangue matrix modified by super absorbent polymer[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2):105–113. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230210

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230210

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北地区煤矸石山生态修复草本植物种优选

Selection of herb species for ecological restoration of coal gangue piles in North China

北京林业大学学报, 2021, 43(8): 90–97. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200171

天然沸石对松嫩平原黑钙土理化性质和保水能力的影响

Effects of natural zeolite on physical and chemical properties and water retention capacity of chernozem in Songnen Plain of northeastern China

北京林业大学学报, 2018, 40(2): 51–57. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170218

DSC法研究水分含量对低分子量MUF树脂固化特性的影响

Effects of moisture content on curing characteristics of low molecular mass melamine–urea–formaldehyde (MUF) resin by differential scanning calorimetry (DSC) method

北京林业大学学报, 2021, 43(1): 119–126. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200317

基于液流和叶片水势测定的沙柳水分利用特征分析

Analyses on water use characteristics of *Salix psammophila* based on sap flow and leaf water potential

北京林业大学学报, 2019, 41(11): 87–94. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180241

杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性

Morphology, distribution, dynamic characteristics of poplar roots and its water uptake habits

北京林业大学学报, 2019, 41(12): 37–49. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190400

水蚀风蚀交错区河北杨树干液流密度特征及其对环境因子的响应

Dynamics of sap flow density of *Populus hopeiensis* and its responses to environmental variables in the water–wind erosion crisscross region on the Loess Plateau

北京林业大学学报, 2018, 40(5): 73–81. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180003

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230210

高吸水树脂改良煤矸石基质水分特性

孙智龙[1] 杨建英[1,2,3] 史常青[1,2,3,4] 李 成[1] 李睿杰[1]
杨春艳[1] 王小展[1] 邓莫楠[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心，北京 100083；3. 北京林业大学国家林业和草原局水土保持重点实验室，北京 100083；4. 林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】探究不同质量分数的高吸水树脂（SAP）对矿区煤矸石基质容重、孔隙度、毛管水运移规律和保水性等方面的改善状况，阐明 SAP 最佳使用量下煤矸石基质的水分运移规律，为无土矿区煤矸石基质水分条件改善提供依据，实现矿区煤矸石固废资源化利用，为植被生长提供适宜条件。**【方法】**通过室内土柱试验模拟质量分数 0%、0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4% 的 SAP 对煤矸石基质水分运移规律的影响。**【结果】**（1）SAP 可以改善煤矸石基质物理性质，随 SAP 使用量的增加，煤矸石基质容重呈下降趋势，总孔隙度与毛管孔隙度呈上升趋势；（2）SAP 会极显著抑制煤矸石毛管水上升高度，且质量分数在 0% ~ 0.4% 范围内，随 SAP 使用量的增加抑制效果逐渐增强，但当 SAP 质量分数为 0.4% 时，对煤矸石毛管水抑制程度较 0.3% 差异不显著；（3）最小显著差异法拟合分析得到：煤矸石毛管水上升高度随时间变化呈幂函数增加趋势（$P < 0.01$），上升速率与时间变化呈对数函数下降趋势；（4）在室内通风条件下，72 h 内不同 SAP 质量分数的煤矸石基质含水率持续降低，纯煤矸石（SAP 质量分数 0%）基质含水率下降趋势最大，水分损失率为 15.96%，SAP 质量分数为 0.3% 与 0.4% 下降趋势较小，水分损失率分别为 3.90% 和 3.52%，差异不显著，且作用时间越长，SAP 的保水性能表现越突出。**【结论】**SAP 可以改善煤矸石基质水分条件，且在一定范围内，含量越高改善效果越显著。因此从经济和效果两方面考虑，首选质量分数为 0.3% 的 SAP 应用于无土矿区煤矸石基质中，为植被生长提供适宜的水气条件。

关键词：煤矸石；毛管水运移；高吸水树脂；固废资源化利用；保水性；孔隙度
中图分类号：S728.9；S157 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)02−0105−09
引文格式：孙智龙，杨建英，史常青，等. 高吸水树脂改良煤矸石基质水分特性［J］. 北京林业大学学报，2024，46(2)：105−113. Sun Zhilong, Yang Jianying, Shi Changqing, et al. Moisture characteristics of coal gangue matrix modified by super absorbent polymer［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 105−113.

Moisture characteristics of coal gangue matrix modified by super absorbent polymer

Sun Zhilong[1] Yang Jianying[1,2,3] Shi Changqing[1,2,3,4] Li Cheng[1] Li Ruijie[1] Yang Chunyan[1]
Wang Xiaozhan[1] Deng Monan[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Forestry Ecological Engineering Research Center of Ministry of Education,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
4. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］The improvement of super absorbent polymer (SAP) with various mass fractions on bulk density, porosity, capillary water migration law, and water retention of coal gangue matrix in mines has

收稿日期: 2023−08−25 **修回日期:** 2023−11−08
基金项目: 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: 孙智龙。主要研究方向：矿山生态修复。Email: 1282488069@qq.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 杨建英，博士，教授。主要研究方向：矿山生态修复。Email: jyyang@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

been investigated, and the water migration law of coal gangue matrix under the optimal usage of SAP has been elucidated. It provides a basis for improving the water condition of coal gangue matrix in soilless mining area, which exploits coal gangue solid waste resource utilization in mines, and provides suitable conditions for vegetation growth. [**Method**] The effects of SAP with mass fractions of 0%, 0.1%, 0.2%, 0.3% and 0.4% on the water migration law of coal gangue matrix were simulated by indoor soil column test. [**Result**] (1) There were physical property improvements of coal gangue matrix by containing SAP: the bulk density decreased with higher SAP usage amount, while the total porosity and capillary porosity showed an opposite trend. (2) SAP can significantly inhibit the rising height of coal gangue capillary water, and the mass fraction was in the range of 0%−0.4%. With the increase in SAP dosage, the inhibition effect was gradually enhanced. However, when the mass fraction of SAP was 0.4%, the inhibition degree of coal gangue capillary water was not significantly different from that of 0.3%. (3) It was obtained by (least significant difference, LSD) fitting analysis that the rising height of coal gangue capillary water increased as a power function with the time change ($P < 0.01$), and the rising rate decreased as a logarithmic function with the time change. (4) The coal gangue matrix water content with different SAP mass fractions was dropping continuously within 72 h in indoor ventilation conditions. The moisture content of pure coal gangue matrix (SAP mass fraction 0%) decreased the most with the moisture loss rate of 15.96%. The SAP mass fraction of 0.3% and 0.4% showed smaller downward trends and the water loss rate was 3.90% and 3.52%, respectively, with insignificant difference. And there will be more prominent water retention performance of SAP with a longer operating time. [**Conclusion**] SAP can improve the water condition of coal gangue matrix, and within a certain range, the higher the content, the more significant the improvement effect. Therefore, from the perspective of economy and effect, SAP with a mass fraction of 0.3% is preferred to be applied to the coal gangue matrix in the soilless mining area to provide suitable water and gas conditions for vegetation growth.

Key words: coal gangue; capillary water movement; super absorbent polymer; solid waste resource utilization; water retention; porosity

目前我国大宗固废累计堆存量约 600 亿 t，年新增堆存量近 30 亿 t[1]。2021 年，我国产生大宗固废约 40.38 亿 t，较 2020 年增长 2.51 亿 t，同比增长 6.6%，其中尾矿增幅居前，达到 9.6%，煤矸石、粉煤灰、赤泥和工业副产石膏小幅增长[2]。对于煤矸石固体废弃物大量堆积、水分渗漏严重、水源涵养能力下降等问题，如何在有限的水土资源条件下将煤矸石固体废弃物合理地资源化利用，已经成为我国煤矿区生态修复的紧迫任务。

煤矸石是煤炭开采加工过程中必然产生的固体废物，排放量占煤炭产量的 10%～20%[3]。它是矿区的主要固废，产量庞大，但由于资源化利用率较低，长期堆放不仅占用了大量土地，同时也对环境造成污染[4]。当前对煤矸石山恢复治理的主要方法是在其表面直接覆土进行植被重建[5]，但由于覆土成本过高，同时易对取土区造成二次破坏，因此考虑直接将煤矸石应用于矿区裸露立地的基质填充材料。武琳等[6]认为煤矸石基质中含有供植物生长所需的多种元素，其成分与土壤成分非常相似，但是煤矸石大孔隙多，单独使用作为植生基质会使其结构不良，影响渗透与保水保肥能力等[7]，不能满足植物生长的需求。董颖等[8]研究显示，小粒径煤矸石比表面积优于大粒径，且煤矸石颗粒外部的膜状水多，同时，小粒径煤矸石更有利于养分元素释放，供植物生长，且黏粒含量高，减少水分入渗，保水性能优越[9]，因此需要混合其他物质与煤矸石进行合理利用。当前对煤矸石基质改良研究常用的外源物质有玉米秸秆、土壤、粉煤灰、木炭等[10]，但关于煤矸石基质保水性能研究较少，尤其是在煤矸石基质中使用保水剂用量还有待进一步研究，低量改善效果不明显，过量会影响基质的通透性进而影响植物根系呼吸，因此在煤矸石基质中加入适量的保水剂不仅仅可以改善其水分特性，从经济上也会大大降低成本。

杨永刚等[11]研究表明水分是矿区生态系统恢复重建的关键，高吸水树脂（super absorbent polymer，SAP）是一种广泛应用的保水剂[12]，无毒，具有良好的絮凝性，能够使土壤保持良好的通透性，减少土壤侵蚀，抑制土壤水分蒸发。研究表明，高分子聚合物在有效改善作物根际水环境，为植物提供所需水分，提高作物产量的同时[13−14]，还可以改善土壤物理结

构，促进土壤团聚体形成，增强土壤通气性[15−16]。刘慧军等[17]在土壤中使用聚丙烯酸钾后，土壤不同粒级团聚体、有机质和各速效养分含量较对照均有提高，同时还可改善土壤本身的孔隙分布状况，促使土壤生成疏松多孔的团粒结构，从而提升土壤的透气性和透水性[18]，在此过程中，极大地改善了土壤的最大持水量、密度、水分蒸发速率以及土壤的温差。目前 SAP 的研究主要集中在新材料和新产品的研发[19−20]、理化特性的比较和评价[21]以及对土壤和植物生长的影响[22]、SAP 与结皮种源混合应用于裸沙表层[23]。以往研究只局限于 SAP 改良土壤，防风固沙提高造林成活率[24]的某一个或几个方面，但 SAP 在煤矸石基质中单独使用尚未见报道。

本文以北京市门头沟矿区煤矸石山为研究对象，仅用 SAP 与煤矸石基质混合，从容重、孔隙度、毛管水运移规律和保水性等方面，探究高吸水树脂对煤矸石基质水分影响的变化规律，以期得到改善煤矸石基质水分条件的 SAP 最佳使用量，为无土矿区以及立地条件恶劣的高寒矿区煤矸石基质的资源合理化利用提供支撑，为后期植被重建提供参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料

本试验材料主要是煤矸石和高吸水树脂 SAP。煤矸石取自北京市门头沟区北港沟煤矸石山，将取回后的煤矸石置于阴凉处自然晾干，经粉碎机处理后过 2 mm 筛，然后选取煤矸石样品 300 g 进行基本的颗粒分析试验，将样品过 1、0.5、0.25、0.1 和 0.075 mm 的标准筛进行多组筛分处理，结果如表 1。煤矸石密度测定值为 2.50 g/cm^3。

表 1　煤矸石的颗粒组成

Tab. 1　Particle composition of coal gangue

项目 Item	颗粒分级 Particle classification/mm					
	1 ~ 2	0.5 ~ 1	0.25 ~ 0.5	0.1 ~ 0.25	0.075 ~ 0.1	⩽ 0.075
煤矸石百分比 Coal gangue percentage/%	4.69	23.17	27.07	22.65	5.71	16.71

将煤矸石粉末过 200 目筛，磨匀后取适量用玻璃板压实，测试条件为: 光阑系统发散狭缝和散射狭缝均为 1°，扫描速度 8(°)/min，扫描范围 5° ~ 80°，由图 1 能够看出煤矸石的矿物组成主要为铵云母、石英、叶腊石、黄矾、绿泥石等，这 5 种主要矿物分别占 33.7%、18.6%、14.9%、10.9%、6.1%。同时对煤矸石样品进行 X 射线荧光光谱分析，结果表明，煤矸石中 SiO_2 含量占 49.05%，Al_2O_3 与 Fe_2O_3 分别占 32.92% 和 6.39%，同时含有少量的 CaO、K_2O、T_iO_2、Na_2O、MgO、SO_3、P_2O_5，占比分别为 5.01%、1.88%、1.56%、1.40%、0.87%、0.63% 和 0.29%。

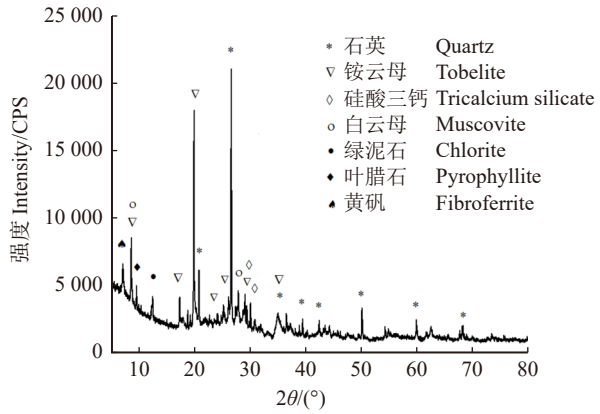


图 1　煤矸石 XRD 分析结果

Fig. 1　XRD analysis results of coal gangue

本试验所用高吸水树脂为 SOCO 保水剂，型号为 SDK324，吸水倍率 ⩾ 350，其性能优于传统的保水材料，单体为聚丙烯酸钾，外观呈白色细砂晶体状，粒径为 0.45 ~ 0.90 mm，凝胶性强，可以增强土壤的透气性，具有三维网状结构，其高分子链上含有大量亲水基团，当水分子与亲水基团接触时，可借助网络结构内外水势梯度不同所形成的水势差而进入到基质内部并储存水分，有极强的吸水性能[25]，可以在吸收水分溶胀的同时又能保持住水分不外流[26]。与传统保水材料相比，SAP 是通过物理和化学两种方式吸水，吸水后即使再挤压也不容易释水，进行“有水吸水，缺水释水”反复循环，并能抑制水分蒸发。它无毒无腐蚀性，可生物降解为二氧化碳和水，对植物和土壤有益无害。

1.2　研究方法

设定 5 个处理，SAP 质量分数分别为 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%，将 SAP 与煤矸石基质按比例混合，分别装填于室内土柱模型中，控制初始土柱容重均为 1.40 g/cm^3，每个处理重复 3 次。土柱模型壁厚 3 mm、直径 15 cm、高 50 cm。

为便于均匀吸收水分，于土柱下方均匀打直径为 5 mm 小孔，同时在土柱的外侧分别于 10、20、30 cm 处钻孔以便插入传感器，土柱外壁贴有刻度条，在吸水过程中便于记录煤矸石基质毛管水上升高度。在装填过程中，每间隔 5 cm 使用赛钢棒进行捣实，直至装填到设计高度 35 cm 处。处理好的土柱经 24 h 室内沉降后，垂直放入水槽中并注水，使

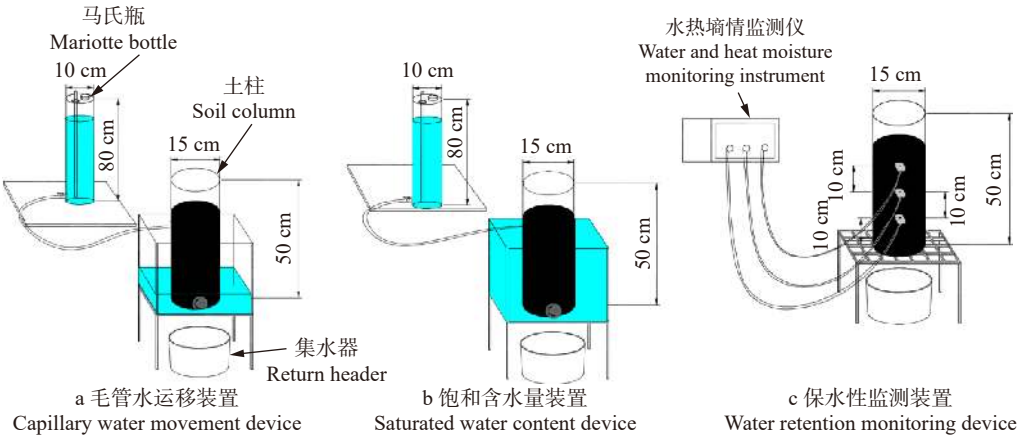


图 2 试验装置简图

Fig. 2 Schematic diagram of the testing device

水槽中的水面刚好接触土柱底部，同时使用马氏瓶供水，保持水槽中水位的高度不变，如图 2a 所示。采用先密后疏的计时方法测定煤矸石基质中毛管水上升高度的变化，0～20 min，每 1 min 记录 1 次毛管水上升高度；20～40 min 每 2 min 记录 1 次；40 min 后每 5 min 测 1 次；140 min 后每 10 min 测一次；340 min 后每 20 min 测一次；700 min 后每 1 h 测一次。当土柱中的毛管水上升到 35 cm 时，将土柱取出称质量观测其质量变化，确定毛管持水量，同时利用土壤墒情监测站来测定不同高度下煤矸石基质的体积含水率。随后增加水槽的水位，直至略低于设计高度 35 cm 处，使土柱完全吸水饱和，观察柱内体积变化，如图 2b 所示，并测定煤矸石的饱和含水量。分析 SAP 对煤矸石基质容重和孔隙度的影响。最后排除水槽中的水，将土柱放置于铁架上于室内通风处，每间隔 24 h 观测土柱质量变化，分析 SAP 对煤矸石基质的保水性能，如图 2c 所示。

2 结果与分析

2.1 SAP 对煤矸石基质容重和孔隙度影响

土柱饱和过程中发现纯煤矸石基质柱内高度没有明显变化，而加入了 SAP 的煤矸石基质，水分饱和后柱内高度明显增加。SAP 质量分数为 0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4% 的土柱高度较纯煤矸石依次增加了 0.5、1.3、1.8 和 2.7 cm，可见煤矸石基质的物理性状随 SAP 质量分数的增加发生了不同程度的变化（表 2）。煤矸石基质装填容重为 1.40 g/cm^3，总孔隙度为 44.00%，毛管孔隙度为 17.89%，较土壤相比，容重偏大，总孔隙度偏小，导致其水气条件不利于植物根系水分运移。而加入不同质量分数 SAP 后，随 SAP 使用量增加，容重依次比纯煤矸石减小 1.43%、3.57%、5.00% 和 7.14%；总孔隙度依次增加 1.82%、4.55%、6.36% 和 9.09%；毛管孔隙度依次增加 9.95%、11.46%、13.03% 和 15.26%。最小显著差异法（least significant difference，LSD）进行多重比较表明，使用不同质量分数的 SAP，煤矸石基质容重、总孔隙度、毛管孔隙度等均比纯煤矸石基质有显著改善（$P < 0.05$），说明 SAP 可以在一定程度上改善煤矸石基质物理性状，其水气条件能够更好地满足植物生长需求。

2.2 SAP 对煤矸石基质毛管水运移特征影响

5 种不同 SAP 质量分数下煤矸石基质体积含水率随毛管水上升高度的变化如图 3 所示。毛管水上升高度于 10 cm 处，加入 SAP 的煤矸石基质体积含水率均明显高于纯煤矸石，但 SAP 质量分数在 0.1%～0.4%，煤矸石的体积含水率差别较小，变化范围为

表 2 5 种 SAP 质量分数下煤矸石基质容重和孔隙度变化情况

Tab. 2 Changes of bulk density and porosity of coal gangue matrix under 5 kinds of SAP mass fraction

SAP质量分数 SAP mass fraction/%	容重 Bulk density/（g·cm^{-3}）	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	毛管持水量 Capillary water capacity/%
0	1.40a	44.00e	17.89d	12.78e
0.1	1.38b	44.80d	19.67c	14.25d
0.2	1.35c	46.00c	19.94c	14.77c
0.3	1.33d	46.80b	20.27b	15.24b
0.4	1.30e	48.00a	20.62a	15.86a

注：同列中不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）。Note: different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

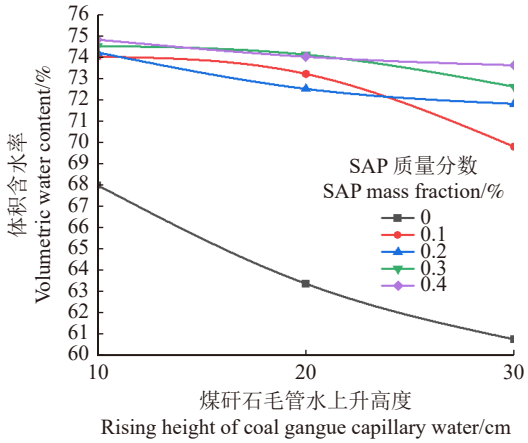


图 3　不同质量分数 SAP 煤矸石基质体积含水率随毛管水上升高度变化

Fig. 3　Volumetric water content of coal gangue matrix with different mass fractions of SAP changes with the rising height of capillary water

74.0% ~ 74.8%，变异系数为 0.82%；在 30 cm 高度时，5 种 SAP 煤矸石基质的体积含水率却出现了差异性的变化，SAP 质量分数与煤矸石基质的体积含水率呈正相关，其变化范围是 60.8% ~ 73.6%。随毛管水上升高度增加，体积含水率均呈下降趋势，下降趋势与 SAP 质量分数呈负相关。0%、0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4% 5 种质量分数的 SAP 在不同高度其平均体积含水率分别为 64.07%、72.33%、72.83%、73.73% 和 74.13%，变异系数分别为 8.05%、4.36%、2.40%、1.92%、和 1.17%。根据试验结果，可以观察到随 SAP 使用量的增加，不同高度的平均体积含水率随之增加，但变异系数随之减小，结合表 2 中毛管孔隙度的变化，可以得出 SAP 能够增加煤矸石基质中毛管水上升运移和持水能力。

2.3　SAP 对煤矸石基质毛管水上升高度及上升速率的影响

5 种 SAP 质量分数下煤矸石基质毛管水上升高度随时间的变化情况如图 4 所示。为清楚观察毛管水上升初始阶段 SAP 的影响，将 0 ~ 30 min 内的变化情况提取出进一步分析。

质量分数为 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4% SAP 的煤矸石基质在 600 min 内毛管水上升高度分别为 23.3、19.6、15.4、10.5 和 11.5 cm，差异极显著（$P < 0.01$），但在毛管水上升过程中，不同使用量的 SAP 对煤矸石基质毛管水运移速率抑制程度均不同。因此，将上升过程分成 3 个阶段，其中 0 ~ 30 min 为第 1 阶段，不同质量分数的 SAP 对毛管水上升高度影响均较小，作用程度较为相似；30 ~ 600 min 为第 2 阶段，可以观察到 SAP 质量分数为 0%、0.1% 和 0.2% 煤矸石基质毛管水的上升高度开始有明显差异，且随着时间的推移差异逐渐扩大，方差分析差异显著。而质量分数为 0.3% 和 0.4% 的 SAP，其基质毛管水的上升高度差异不显著，并且在多个时间点上升高度保持一致；600 min 至到达设计高度为第 3 阶段，上升速率趋于稳定阶段。纯煤矸石在 1 480 min 达到设计高度，同时在整个上升过程中，纯煤矸石的毛管水上升速度都要远远快于其他质量分数。0.3% 与 0.4%SAP 下基质毛管水上升高度基本一致，上升速度最为缓慢，毛管水上升高度从快到慢为 0%、0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4%，充分说明 SAP 在 0% ~ 0.4% 范围内，使用量越高，抑制毛管水的运移速率越强。但 0.3% 与 0.4% 几乎同时达到设计高度处，且 0.4% 的使用量较 0.3% 相比，未呈现出显著变化，两者对毛管水上升高度差异不显著。

LSD 多重比较拟合分析（表 3）可知，煤矸石毛管水上升高度随时间变化呈幂函数增加趋势（$P < 0.01$）；对毛管水上升速率与时间进行回归拟合分析，得出 5 种处理煤矸石毛管水的上升速率随时间增加呈对数函数降低趋势。0%~0.4%SAP 煤矸石基质的毛管水上升速率范围为 0.002 ~ 0.700 cm/min，通过单因素方差分析，发现不同质量分数之间的上

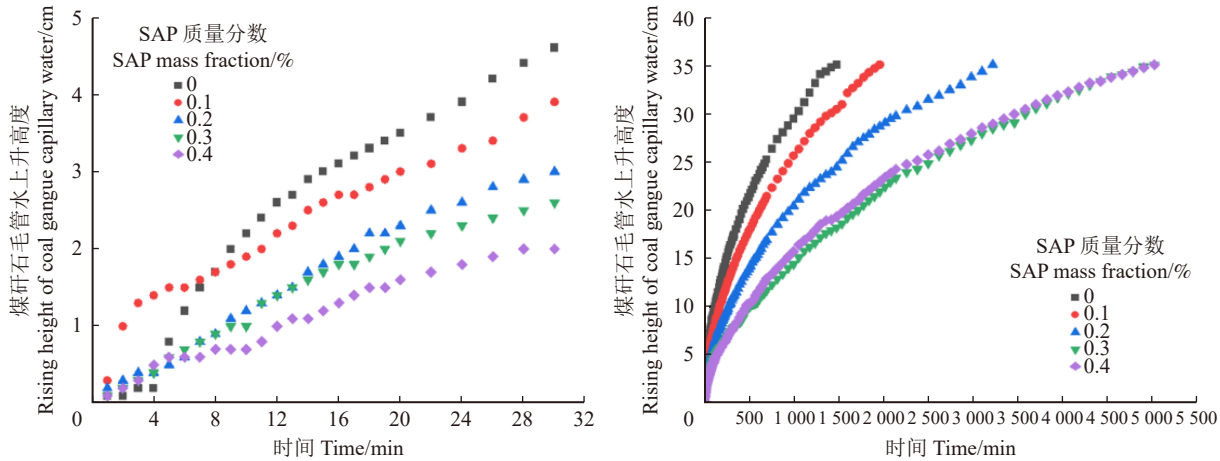


图 4　煤矸石基质毛管水上升高度随 SAP 质量分数变化

Fig. 4　Rising height of capillary water in coal gangue matrix varies with the mass fraction of SAP

表 3 SAP 不同质量分数下煤矸石基质毛管水上升高度、上升速率与时间的最佳拟合方程

Tab. 3 Best fitting equation of rising height, rising rate and time of capillary water in coal gangue matrix under different mass fractions of SAP

项目 Item	SAP质量分数 SAP mass fraction/%	拟合方程 Fitting equation	R^2	P
上升高度 Rising height (y)	0	$y = 0.343\ 3t^{0.677\ 3}$	0.919 0	< 0.01
	0.1	$y = 0.570\ 1t^{0.551\ 8}$	0.994 5	< 0.01
	0.2	$y = 0.317\ 3t^{0.605\ 9}$	0.982 7	< 0.01
	0.3	$y = 0.291\ 2t^{0.570\ 9}$	0.980 8	< 0.01
	0.4	$y = 0.221\ 7t^{0.612\ 9}$	0.990 7	< 0.01
上升速率 Rising rate (v)	0	$v = -0.032\ln t + 0.219\ 7$		
	0.1	$v = -0.030\ln t + 0.199\ 0$		
	0.2	$v = -0.019\ln t + 0.134\ 8$		
	0.3	$v = -0.014\ln t + 0.106\ 4$		
	0.4	$v = -0.011\ln t + 0.088\ 1$		

注：t为毛管水上升时间，min。Notes: t is capillary water rising time, min.

升速率差异显著（$P < 0.05$）。

2.4 SAP 对煤矸石基质保水性的影响

煤矸石自身孔隙大、保水性差，水分散失相比其他基质快。在毛管水上升试验结束后，待土柱充分吸水饱和后自然通风，每间隔 24 h，称其土柱质量变化，测定 SAP 对煤矸石基质的保水性能的影响。

5 种处理的煤矸石基质随时间延长，其不同高度含水率均呈现减少趋势，但减少程度不同（图 5）。其中纯煤矸石水分散失的最快，保水能力最差，10、20、30 cm 处饱和后体积含水率分别为 69.3%、65.2%、63.7%，在 72 h 后分别降为 67.0%、63.5%、61.0%。而添加了 SAP 的煤矸石基质保水性能均好于纯煤矸石，不同高度的体积含水率变化与 SAP 的质量分数呈正相关，保水效果最好的 SAP 质量分数为 0.4%，其变化范围从饱和状态的 76.6% ~ 77.5%，在 72 h 后下降为 75.8% ~ 76.3%，体积含水率变化范围最小。

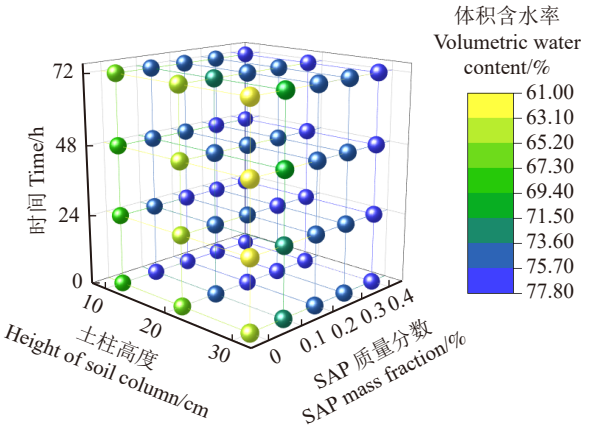


图 5 5 种 SAP 质量分数随时间变化各高度煤矸石基质体积含水率变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of volumetric water content of coal gangue matrix at different heights with time of five kinds of SAP mass fraction

由此可见，随时间的增加，SAP 质量分数越高的煤矸石基质水分散失越缓慢。

5 种处理煤矸石基质水分饱和后，在自然通风状态下连续测定 72 h（图 6），可以发现不同 SAP 质量分数煤矸石基质的质量含水率均持续降低，但是降幅不同。纯煤矸石从 15.23% 减少到 12.80%，SAP 质量分数为 0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4% 时，质量含水率分别从 15.52% 减少到 13.66%、16.44% 减少到 15.49%、16.94% 减少到 16.28%、17.62% 减少到 17.00%。纯煤矸石基质质量含水率下降趋势最大，水分损失率最大为 15.96%。SAP 质量分数为 0.3% 与 0.4% 质量含水率下降趋势较小，水分损失率分别为 3.90% 和 3.52%，差异不显著，说明在相同的外界条件下，0.4% 质量分数的 SAP 具有较强的保水性能，能够有效抑制水分的散失。从图 6 可以看出，在 72 h 内，质量分数为 0.4% 的煤矸石基质质量含水率最高，这进一步证明了 SAP 的保水性能。因此，随着 SAP 质量分数的增加与时间的延长，煤矸石基质的保水性能逐渐增强。如果保住的这部分水分是植物能够利用的有效水分，那么在煤矸石基质中加入 SAP 将会是解决无土矿区植被缺水的有效方法。

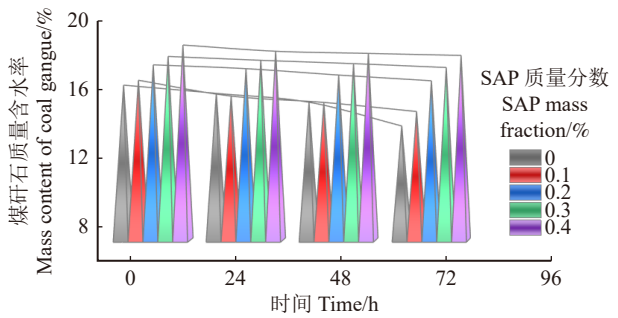


图 6 5 种 SAP 质量分数下煤矸石质量含水率随时间变化

Fig. 6 Changes in the mass moisture content of coal gangue over time under five SAP mass fractions

3 讨　　论

3.1 改善煤矸石基质容重和孔隙度的 SAP 适用量

保水剂对土壤水分变化规律的影响不仅取决于保水剂类型，同时使用量也是十分重要的影响因素[27−28]。研究表明在干旱荒漠地区使用适量的 SAP 能够显著影响沙土的有效水、容重和孔隙度，可以有效促进植物根系水分运移[29]。李杨等[30]研究鄂尔多斯沙质土壤的物理性质对玉米生长影响，得到 SAP 极大程度提升沙土的保水能力，降低沙土容重，增大沙土孔隙度，当 SAP 使用量在 0.5% ~ 1.0% 时效果最佳。赵雪晴等[31]研究加入砂土中的保水剂用量越多，干湿交替对保水剂提高毛管孔隙度、抑制水分蒸发能力以及保水性能的效果削弱程度越明显，其主要原因在于 SAP 改善了煤矸石的孔隙组成，增加了毛管孔隙，同时 SAP 自身的三维网状结构，其高分子链上的大量亲水基团使其吸住的水分不外流，抑制水分蒸发。但当 SAP 使用过量时，对土壤容重和孔隙度的改善效果并不明显[32]。SAP 对煤矸石基质的水分变化规律有一定的改善作用，本研究中发现，SAP 质量分数在 0% ~ 0.4% 范围内，煤矸石基质的容重与 SAP 呈负相关，总孔隙度、毛管孔隙度与 SAP 呈正相关，且使用 0.3% 和 0.4% 的 SAP 对于容重和孔隙度改善效果较好，表明 SAP 用于煤矸石基质的使用量与添加在不同类型的土壤基质中相似，均在一定质量分数下，改善效果最好，但是煤矸石基质中使用 SAP 质量分数的最大限值，还需要进一步的试验验证。

3.2 SAP 与煤矸石基质水分接触时间对毛管水上升高度的影响

本试验中使用的 SAP 呈白色细砂晶体状，遇水膨胀后变为絮凝状。不同质量分数 SAP 对煤矸石毛管水上升高度的抑制程度不同，这与张超英等[33]在煤矸石基质中添加丙烯酰胺和丙烯酸钾共聚物和生物炭的研究现象相似。SAP 吸水主要依靠氢键，借助网络结构内外水势梯度不同，所形成的水势差作用时间的快慢，有效地将水分子封闭在网络中，从而实现对水分子的活动限制[34]。在 SAP 与水分接触的过程中，其 SAP 的使用量不同，导致膨胀的程度不同，进而与煤矸石基质所形成的空间结构必然也会有所差异。吕春娟等[35]研究表明在复垦铁尾矿砂中使用聚丙烯酰胺类保水剂对基质毛管水上升高度由大到小为 0%、0.2%、0.05%、0.1%，这一现象与本文 SAP 对煤矸石毛管水上升高度的抑制作用并非使用量越高效果越好相一致。本文研究表明添加质量分数 0.3% 和 0.4% 的 SAP 对煤矸石毛管水抑制程度较好且差异不显著，多个时间段毛管水上升速率保持一致，其次是 0.2%、0.1%、0%。主要原因是 SAP 高分子链上亲水基团与水分子接触时，自身结构的改变可能都会改变煤矸石基质的孔隙组成，进而影响煤矸石水分运移速率，这需要使用扫描电镜对 SAP 结构特征进行微观监测。

3.3 SAP 改善煤矸石基质保水性的其他影响因素

SAP 在实际应用中，通过吸水和溶胀的保水方式将水分贮存起来，SAP 的使用方法会对其保水效果产生影响。目前对于保水剂的使用方法主要采用溶于灌溉水[36]或者撒施[37]于土壤表面，本试验考虑没有灌溉条件且节约成本的目的，采用混施的方式进行室内土柱模拟试验，便于实施观测水分运移变化。SAP 的粒径会直接影响其吸水倍率从而影响煤矸石基质的保水效果，因此选择适宜粒径大小的 SAP 非常重要，在使用的过程中尽量混合均匀。对于不同地区确定最佳的 SAP 使用方式和使用量可以有效提高基质的保水性能。极端干旱荒漠区使用保水剂可提高土壤含水量和改善幼苗体内水分状况[38]。李海燕等[39]研究表明一定范围内使用 SAP 会增加煤矸石基质的保水量，用量过高，煤矸石基质虽然含水率有所增加，而吸水效率会降低，还会出现胶结状，使基质液相部分增加，气相部分被迫减少，影响其通透性，对植物根系水分运移不利。这与荒漠区的沙土研究有所差别，沙漠土壤和煤矸石基质的特性不同，沙漠土壤通常是贫瘠且干燥，而煤矸石基质则含有较高的颗粒物和矿物质，基质质量稍好于沙漠土壤，同时沙漠土壤主要分布于干旱荒漠区，对保水剂的使用量更多，在保持水分的同时还需考虑防风固沙，因此需要考虑 SAP 的类型与粒径。不论是在沙漠土壤还是煤矸石基质中应用保水剂，都旨在改善基质的保水能力以促进植物生长，但在选择和使用方式上可能存在一些差异。此外 SAP 在基质应用中，其吸保水能力还与外界因素有关，诸如植物类型、土壤质地、环境温度、光照、水溶液离子浓度和离子类型等[40]。

为了更好地改善矿区生态环境，后续研究将会引入草本和灌木，拉长时间尺度，综合考虑不同植被间相互作用机制对无土矿区生态恢复效果的影响，高吸水树脂 SAP 将会在矿区煤矸石基质生态修复与荒漠化防治领域呈现出良好的应用价值。

4 结　　论

(1)SAP 吸水后可以改善煤矸石基质的物理性状，在 SAP 质量分数 0% ~ 0.4% 范围内，随质量分数增加，容重持续减小，毛管孔隙度和总孔隙度逐渐

增大，SAP 最佳使用量为 0.4%。

（2）SAP 极显著抑制煤矸石毛管水上升高度，且质量分数在 0%～0.4% 范围内，随 SAP 使用量的增加抑制效果逐渐增强，但当 SAP 质量分数为 0.4% 时，对煤矸石毛管水抑制程度较 0.3% 差异不显著，但整体均好于 0%～0.2%。

（3）SAP 质量分数为 0.4% 时，抑制煤矸石水分散失的能力和保水效果最强，与纯煤矸石基质相比，两者水分损失率相差 12.44%，且作用时间越长，SAP 的保水性能越强。

从经济上考虑，建议首选质量分数为 0.3% 的 SAP 应用于煤矸石基质中，促进矿区生态恢复，为后期植被恢复提供有利条件。

参 考 文 献

[1] 国家发展改革委.《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(2): 286.
National Development and Reform Commission. Guiding Opinions on the Comprehensive Utilization of Bulk Solid Waste during the 14th Five Year Plan[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(2): 286.

[2] 王玉涛. 煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用现状与展望 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 54−56.
Wang Y T. Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 54−56.

[3] 胡振琪, 肖武, 赵艳玲. 再论煤矿区生态环境“边采边复”[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 351−359.
Hu Z Q, Xiao W, Zhao Y L. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 351−359.

[4] Shi J G, Ji X Z, Meng L, 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/OL]. Science of the Total Environment, 2021, 770 [2021−01−20]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145241.

[5] 杜韬, 王冬梅, 张泽洲, 等. 煤矸石植生基质保水性能对黑麦草生长的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 75−84.
Du T, Wang D M, Zhang Z Z, et al. Effect of the water-retaining property of coal gangue planting substrate on the growth of *Lolium perenne*[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 75−84.

[6] 武琳, 郑永红, 张治国, 等. 粉煤灰用作土壤改良剂的养分和污染风险评价 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43(9): 219−227.
Wu L, Zheng Y H, Zhang Z G, et al. Assessment of nutrient and pollution risk of fly ash as a soil amendment[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(9): 219−227.

[7] 范秋运, 张超英, 耿玉清, 等. 添加粉煤灰对煤矸石基质性质和植物生长的影响 [J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2022, 20(5): 85−92.
Fan Q Y, Zhang C Y, Geng Y Q, et al. Effects of fly ash application on the properties of coal gangue matrix and plant growth[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(5): 85−92.

[8] 董颖, 李娜, 耿玉清, 等. 添加保水剂对煤矸石基质保水性能的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(3): 114−123.
Dong Y, Li N, Geng Y Q, et al. Effect of addition of water-retaining agent on the water-retaining properties of coal gangue matrix[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(3): 114−123.

[9] Han X N, Dong Y, Geng Y, et al. Influence of coal gangue mulching with various thicknesses and particle sizes on soil water characteristics[J/OL]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 15368 [2022−02−21]. https://doi.org/10.1038/s41598-021-94806-0.

[10] 赵陟峰, 王冬梅, 赵廷宁. 保水剂对煤矸石基质上高羊茅生长及营养吸收的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5101−5108.
Zhao Z F, Wang D M, Zhao T N. The effect of super absorbent polymer on the growth and nutrition absorption of *Festuca arundinacea* L. on an improved gangue matrix[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 5101−5108.

[11] 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 Y G, Su S, Jiao W T. 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.

[12] Islam M R, Hu Y G, Mao S S, et al. Effects of water-saving super absorbent polymer on anti-oxidant enzyme activities and lipid peroxidation in corn (*Zea mays* L.) under drought stress[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(5): 813−819.

[13] Huang W, Liu Z, Zhou C, et al. Enhancement of soil ecological self-repair using a polymer composite material[J/OL]. Catena, 2020, 188: 104443−104443[2020−01−08]. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104443.

[14] Yang L, Yang Y, Chen Z, 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.

[15] Sepaskhah A R, Shahabizad V. Effects of water quality and PAM application rate on the control of soil erosion, water infiltration and runoff for different soil textures measured in a rainfall simulator[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 513−520.

[16] Han Y G, Yang P L, Luo Y P, et al. Porosity change model for watered super absorbent polymer-treated soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61: 1197−1205.

[17] 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, 243(1): 25−31.
Liu H J, Liu J H, Yu J, et al. Effect of soil amendment of polyacrylate on soil microbial biomass nitrogen and soil enzyme activity[J]. Soil and Fertilizers in China, 2013, 243(1): 25−31.

[18] Thombare N, Mishra S, Siddiqui M Z, et al. Design and development of guar gum based novel, superabsorbent and moisture retaining hydrogels for agricultural applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 185: 169−178.

[19] Andry H, Yamamoto T, Irie T, et al. Water retention, hydraulic conductivity of hydrophilic polymers in sandy soil as affected by temperature and water quality[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(1−2): 177−183.

[20] Ma Z, Li Q, Yue Q, et al. Synthesis and characterization of a

novel super-absorbent based on wheat straw[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2853−2858.

[21] Devine D M, Higginbotham C L. Synthesis and characterisation of chemically crosslinked N-vinyl pyrrolidinone (NVP) based hydrogels[J]. European Polymer Journal, 2005, 41(6): 1272−1279.

[22] Li X, He J Z, Liu Y R, et al. Effects of super absorbent polymers on soil microbial properties and Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) growth[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13: 711−719.

[23] 刘军, 张宇清, 冯薇, 等. 几种外源添加物对生物土壤结皮培育的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(5): 100−107.
Liu J, Zhang Y Q, Feng W, et al. Influences of exogenous additives on culture of biological soil crusts[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(5): 100−107.

[24] 郭东权, 饶良懿. 保水剂的发展现状及在农林和荒漠化修复中的应用研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(6): 1372−1385.
Guo D Q, Rao L Y. Development situation of superabsorbent polymer and its application in agroforestry and desertification restoration[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(6): 1372−1385.

[25] Karimi A, Noshadi M, Ahmadzadeh M. Effects of super absorbent polymer (igeta) on crop, soil water and irrigation interval[J]. JWSS-Isfahan University of Technology, 2009, 12(46): 403−414.

[26] Yubang T, Lijun Y U, Lei X U, et al. Effects of combined application of water retaining agents and organic materials on water holding characteristics of yellow brown soils in hilly areas[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(9): 1985−1988.

[27] 冉艳玲, 王益权, 张润霞, 等. 保水剂对土壤持水特性的作用机理研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 101−107.
Ran Y L, Wang Y Q, Zhang R X, et al. Research on the mechanism of super absorbent polymer to soil water-holding characteristic[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(5): 101−107.

[28] 闫永利, 魏占民, 任秀苹, 等. 保水剂对土壤持水性影响及在不同土壤中效果比较 [J]. 节水灌溉, 2016(1): 34−38.
Yan Y L, Wei Z M, Ren X P, et al. Influence of water retaining agent on soil water holding capacity and its effect comparison in different soils[J]. Water Saving Irrigation, 2016(1): 34−38.

[29] Yousefian M, Jafari M, Tavili A, et al. The effects of superabsorbent polymer on *Atriplex lentiformis* growth and soil characteristics under drought stress (case study: Desert Research Station, Semnan, Iran)[J]. Journal of Rangeland Science, 2018, 8(1): 65−76.

[30] 李杨, 王百田. 高吸水性树脂对沙质土壤物理性质和玉米生长的影响 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 76−82.
Li Y, Wang B T. Influence of superabsorbent polymers on sandy soil physical properties and corn growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 76−82.

[31] 赵雪晴, 王冬梅, 张泽洲, 等. 干湿交替对添加保水剂的砂土持水性能的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 90−99.
Zhao X Q, Wang D M, Zhang Z Z, et al. Effects of drying-rewetting alternation on water-holding capacity of sandy soil added with super absorbent polymer[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1): 90−99.

[32] Li R, Hou X, Li P, et al. Multifunctional superabsorbent polymer under residue incorporation increased maize productivity through improving sandy soil properties[J/OL]. Advances in Polymer Technology, 2022, 6554918[2022−12−13]. https://doi.org/10.1155/2022/6554918.

[33] 张超英, 陈艳鑫, 耿玉清, 等. 生物炭和保水剂对煤矸石基质水分物理特征的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(9): 122−128.
Zhang C Y, Chen Y X, Geng Y Q, et al. Effect of biochar and super water absorbents on water physical characteristics of coal gangue matrix[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(9): 122−128.

[34] Narayanan A, Kartik R, Sangeetha E, et al. Super water absorbing polymeric gel from chitosan, citric acid and urea: synthesis and mechanism of water absorption[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 191: 152−160.

[35] 吕春娟, 毕如田, 陈卫国, 等. 土壤结构调理剂 PAM 对复垦铁尾矿砂物理性状的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 240−245.
Lü C J, Bi R T, Chen W G, et al. Effect of soil structure conditioner PAM on physical properties of iron tailings in reclaiming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 240−245.

[36] 袁普金, 黄兴发, 雷廷武, 等. 波涌灌溉和 PAM 作用下内蒙古河套灌区水蚀的试验研究 [J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(2): 36−40.
Yuan P J, Huang X F, Lei T W, et al. Experimental study on soil water erosion under surge irrigation and use of PAM in Hetao irrigation region, Inner Mongolia[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(2): 36−40.

[37] 韩凤朋, 郑纪勇, 李占斌, 等. PAM 对土壤物理性状以及水分分布的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 70−74.
Han F P, Zheng J Y, Li Z B, et al. Effect of PAM on soil physical properties and water distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 70−74.

[38] 刘辰宇, 马蕊, 罗文静, 等. 保水剂用量对胡杨幼苗生长、光合特性和抗逆生理的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 36−44.
Liu C Y, Ma R, Luo W J, et al. Effects of super absorbent polymer dosage on growth, photosynthetic characteristics and stress-resistance physiology of *Populus euphratica* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 36−44.

[39] 李海燕, 张芮, 王福霞. 保水剂对注水播种玉米土壤水分运移及水分生产效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 37−42.
Li H Y, Zhang R, Wang F X. Effects of water-retaining agent on soil water moverment and water use efficiency of maize sowed with absolved water-storing irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 37−42.

[40] 黄占斌, 孙朋成, 钟建, 等. 高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 125−131.
Huang Z B, Sun P C, Zhong J, et al. Application of super absorbent polymer in water and fertilizer conversation of soil and pollution management[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 125−131.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　杨晓晖）