

文章编号: 1000-5641(2023)03-0064-07

## 保水剂和有机肥配施对露天煤矿排土场土壤 持水性的影响

王桂林<sup>1</sup>, 官鹤忆<sup>2</sup>, 商侃侃<sup>2,3,4</sup>, 达良俊<sup>2,4</sup>

(1. 国能准能集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300; 2. 华东师范大学 上海市城市化  
生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 3. 上海辰山植物园, 上海 201602;  
4. 西安建筑科技大学 交叉创新研究院, 西安 710055)

**摘要:** 针对露天矿排土场土壤保水蓄水能力差的特征, 通过测定 3 种保水剂抗蒸发能力和配制土壤的含水量, 开展保水剂与有机肥配施对土壤持水性能的影响研究. 结果表明, 保水剂在凝胶状态下对土壤的抗蒸发效果比干燥状态更好, 以 5‰ 用量的法国爱森保水剂的抗蒸发效果最好. 保水剂和有机肥配合使用能够有效延长土壤的持水时间, 配制土壤持水性随着保水剂用量和有机肥用量增加而增加. 以法国爱森保水剂和有机肥配施效果最佳, 最优配比为法国爱森保水剂 3‰+有机肥 20% 或者法国爱森保水剂 5‰+有机肥 10%, 可使维持该区域约 20% 田间土壤持水量的保水时间延长 1 倍以上. 该配比可为西北地区露天矿排土场土壤修复提供科学参考.

**关键词:** 黑岱沟; 土壤结构; 含水量; 抗蒸发能力; 露天煤矿

**中图分类号:** S156.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2023.03.007

## Effects of combined application of water-retaining agents and organic fertilizer on soil water-holding capacity in waste dumps in open pit coal mines

WANG Guilin<sup>1</sup>, GONG Heyi<sup>2</sup>, SHANG Kankan<sup>2,3,4</sup>, DA Liangjun<sup>2,4</sup>

(1. CHN Energy Zhunneng Group Co. Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China; 2. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201602, China; 4. Institute for Interdisciplinary and Innovate Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** This study investigated the combined application of water-retaining agents and organic fertilizers to enhance the soil water-holding capacity of waste dumps in open pit coal mines by measuring the anti-evaporation capacity and water content of man-made soil. The results showed that the anti-evaporation capacity of water-retaining agents in the gel state was superior to that in the dry state. Among the tested water-retaining agents, we found that France Essen at a concentration of 5‰ was the optimal choice. The soil water-holding time could be prolonged by the combined application of water-retaining agents and organic fertilizers, resulting in improved soil water-holding capacity. The optimum ratio of water-retaining agents to organic fertilizer was 3‰ : 20% or 5‰ : 10%. The water retention time of field capacity in this area would be improved by more than one time. Our findings provide valuable insights

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 上海市绿化和市容管理局科研项目 (G212407); 神华集团科技创新项目 (SHGF-17-35)

第一作者: 王桂林, 男, 高级工程师, 研究方向为矿区生态修复. E-mail: [guilin.wang.f@chnenergy.com.cn](mailto:guilin.wang.f@chnenergy.com.cn)

通信作者: 商侃侃, 男, 研究员, 研究方向为生态修复技术. E-mail: [shankankan@163.com](mailto:shankankan@163.com)

for the scientific community regarding soil remediation in waste dumps within open pit coal mines in Northwest China.

**Keywords:** Heidaigou; soil structure; water content; anti-evaporation capacity; open pit coal mines

0 引 言

露天煤矿多位于西北地区的典型风蚀水蚀地带, 年降水量少且降水集中, 易导致严重的地表径流和水土冲刷<sup>[1]</sup>. 煤矿排土场是一个巨型松散岩土堆积体, 存在层序紊乱、物质松散、地表非均匀沉降和水土流失严重等问题, 改变了土壤的原有结构、自身的营养条件和区域水文条件<sup>[2]</sup>. 排土场的土壤十分贫瘠, 普遍存在质地差、渗透性差、有效水分含量低、有机质含量低等问题, 不利于新构建土体的植被复垦<sup>[3-4]</sup>. 因此, 如何提高排土场的土壤持水性成为当前矿区生态修复中最为紧迫的任务.

保水剂是近年来迅速发展起来的一种新型高分子材料, 能吸收相当于自身重量几百倍的水分并可缓慢释放, 具有反复吸收和释放水分的功能, 同时兼具保土、保肥、调节土壤温度以及促进植物生长发育等功能, 在提高土壤保水保肥能力方面发挥重要作用<sup>[5-6]</sup>. 有机肥富含腐殖质及微生物活体, 能够改善土壤理化性质, 可有效减少地表径流, 提高土壤中有效水的含量, 增强降水入渗并减少水分蒸发<sup>[7]</sup>. 由于单一施用有机肥或保水剂改良效果不全面, 近年来有机质和保水剂配合施用引起较多学者关注<sup>[8-10]</sup>. 王荣等<sup>[11]</sup>发现, 使用了保水剂和有机肥的组与使用传统水溶肥的对照组相比, 0 ~ 20 cm 土壤的电导率和养分含量有明显提高, 土壤酸碱度降低. 蒋美佳等<sup>[10]</sup>发现, 单施有机肥和有机肥配施保水剂均降低了水分入渗速率, 可有效减少氮素的淋失. 李想等<sup>[7,9]</sup>在废弃铁尾矿中使用了保水剂和有机肥, 发现也是在 0 ~ 20 cm 层的土壤性质得到了明显改善, 但是有机肥单独使用并不能达到这种效果.

针对露天矿排土场土壤保水蓄水能力差的特征, 开展保水剂与有机肥配施对土壤持水性能的影响研究. 通过测定保水剂的抗蒸发能力和配制土壤的含水量, 确定保水剂及有机肥配合施加对土壤持水能力的改良作用, 筛选保水剂与有机肥最优配比, 为提高排土场土壤修复水平提供参考.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验土壤取自内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗黑岱沟露天煤矿排土场, 该场地是 2020 年新形成的标高为 1 330 m 处的排土场. 土样经自然风干后, 过 1 mm 筛, 采用比重计法测定土壤颗粒组成 (粒径分布). 所取土壤颗粒中黏粒组成占 12.3% ~ 18.3%, 砂粒组成占 34.9% ~ 45.0%, 粉砂砾组成占 42.7% ~ 46.8%, 质地属于土壤类型中的“壤土”. 保水剂选用不同功能成分的旱地宝、聚谷氨酸粉剂 I 型和法国爱森 3 个品牌的保水剂, 其主要成分和来源见表 1. 精制有机肥为上海禾笑有机肥有限公司提供的酒糟、牛粪等原料配制而成, 其总养分 ≥ 5%、有机质含量 ≥ 45% (表 1).

表 1 实验材料主要成分及来源信息  
Tab. 1 Description of experimental materials

材料	品牌/型号	主要成分	来源(成本)
保水剂	旱地宝	接枝共聚腐植酸高吸水膨润土复合材料	华潍新材料科技有限公司(高)
	聚谷氨酸粉剂 I 型	聚谷氨酸	武汉光华时代生物科技有限公司(中)
	法国爱森保水剂	聚丙烯酸盐和聚丙烯酰胺共聚体	北京金元易生态环境产业股份有限公司(低)
有机肥	精制有机肥	酒糟、牛粪等; 总养分 ≥ 5%、有机质含量 ≥ 45%	上海禾笑有机肥有限公司(低)

## 1.2 实验处理

### 1.2.1 保水剂的抗蒸发能力

根据中国天气网的资料显示,鄂尔多斯市准格尔旗平均最热的月份为7月,最高气温能达到30℃左右.实验设置烘箱在45℃的条件下,进行不同状态(干燥、凝胶)和埋深(5 cm、10 cm)保水剂的抗蒸发能力测试(表2).根据田间持水量设定初始土壤含水量为24%,静置使水分完全渗入土壤后再称重,后置于烘箱中恒温烘干,每间隔12 h称重1次并记录,直到重量恒定不变为止.

表2 保水剂抗蒸发能力实验设计

Tab. 2 Experimental design for measuring anti-evaporation capacity of water-retaining agents

空白对照组	旱地宝		聚谷氨酸粉剂 I 型		法国爱森保水剂		埋深/cm
	干燥	凝胶	干燥	凝胶	干燥	凝胶	
CK5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>j</sub> 5	J <sub>z</sub> 5	J <sub>j</sub> 5	S <sub>z</sub> 5	S <sub>j</sub> 5	5
CK10	H <sub>z</sub> 10	H <sub>j</sub> 10	J <sub>z</sub> 10	J <sub>j</sub> 10	S <sub>z</sub> 10	S <sub>j</sub> 10	10

### 1.2.2 配制土壤的持水能力

在控制土壤容重为1.27 g/cm<sup>3</sup>的条件下装入相同的圆柱形聚丙烯管,每盆装干土0.565 kg.3种保水剂均设置了占土壤干质量的0、1%、3%和5%共4个使用量梯度,有机肥设置了占土壤干质量的0、10%、20%和30%共4个使用量梯度,均匀混入土中备用.实验一共有40组处理,每组3个重复.

环刀法(100 cm<sup>3</sup>)测定土壤最大持水量和毛管持水量.过筛后的土壤以1.27 g/cm<sup>3</sup>的干密度装入环刀,放在水中浸泡(粗滤纸和有孔底盖朝下,水面与刀口齐平),水分饱和恒重(约24 h)后去掉滤纸和底盖并吸干多余水分称量,然后放入(105 ± 2)℃的恒温干燥箱中烘干、称重,计算土壤最大持水量.土壤前处理同最大持水量,将浸泡容器换成只盛有2 ~ 3 mm水层的托盘(粗滤纸和有孔底盖朝下),让土壤毛管吸水.恒重后(4 ~ 6 h)取出,烘干并称重,计算公式均与最大持水量相同.

称量法测定土壤持水性.以每次100 mL、共500 mL的水浇入土盆中,最后一次浇水24 h时的含水量作为初始含水量.用1/100的电子天平每隔48 h称量1次,计算土壤含水量.

### 1.2.3 数据统计分析

所有数据的统计分析采用Excel 2007软件进行,拟合相关曲线方程.利用SPSS 17.0软件进行方差分析和多重比较,采用LSD (least significant difference)法检验相同有机肥用量下不同保水剂处理间和相同保水剂处理下不同有机肥用量间的差异显著性( $p < 0.05$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤保水剂的抗蒸发能力比较

不同埋深和不同状态的3种保水剂含水量随时间推移呈指数或者对数下降,相同时间段凝胶状态含水量明显高于干燥状态,但均高于对照处理(图1).在埋深5 cm情况下,36 h和72 h时除了S<sub>j</sub>5处理的含水量分别保持在78.91%和57.68%,其他6组处理的含水量分别降低至19.03% ~ 35.35%和4.47% ~ 12.78%,以H<sub>j</sub>5、S<sub>z</sub>5和J<sub>j</sub>5处理的含水量相对较高;S<sub>j</sub>5处理的含水量至192 h和216 h才分别降低至22.64%和12.12%.在埋深10 cm情况下,36 h和72 h时除了S<sub>j</sub>5处理的含水量分别保持在103.52%和37.29%,其他6组处理的含水量分别降低至22.71% ~ 60.77%和7.91% ~ 16.07%,以H<sub>j</sub>10、S<sub>z</sub>10和J<sub>j</sub>10处理的含水量相对较高;S<sub>j</sub>10处理的含水量至84 h和144 h才分别降低至22.29%和10.60%.结果说明了3种保水剂材料在凝胶状态下抗蒸发效果好,其中法国爱森保水剂 >

旱地宝 > 聚谷氨酸粉剂 I 型; 添加法国爱森保水剂的土壤抗蒸发能力以埋深 5 cm 效果最佳, 凝胶状态的处理效果可以持续 8 d 以上, 而埋深 10 cm 效果仅维持 3 ~ 5 d.

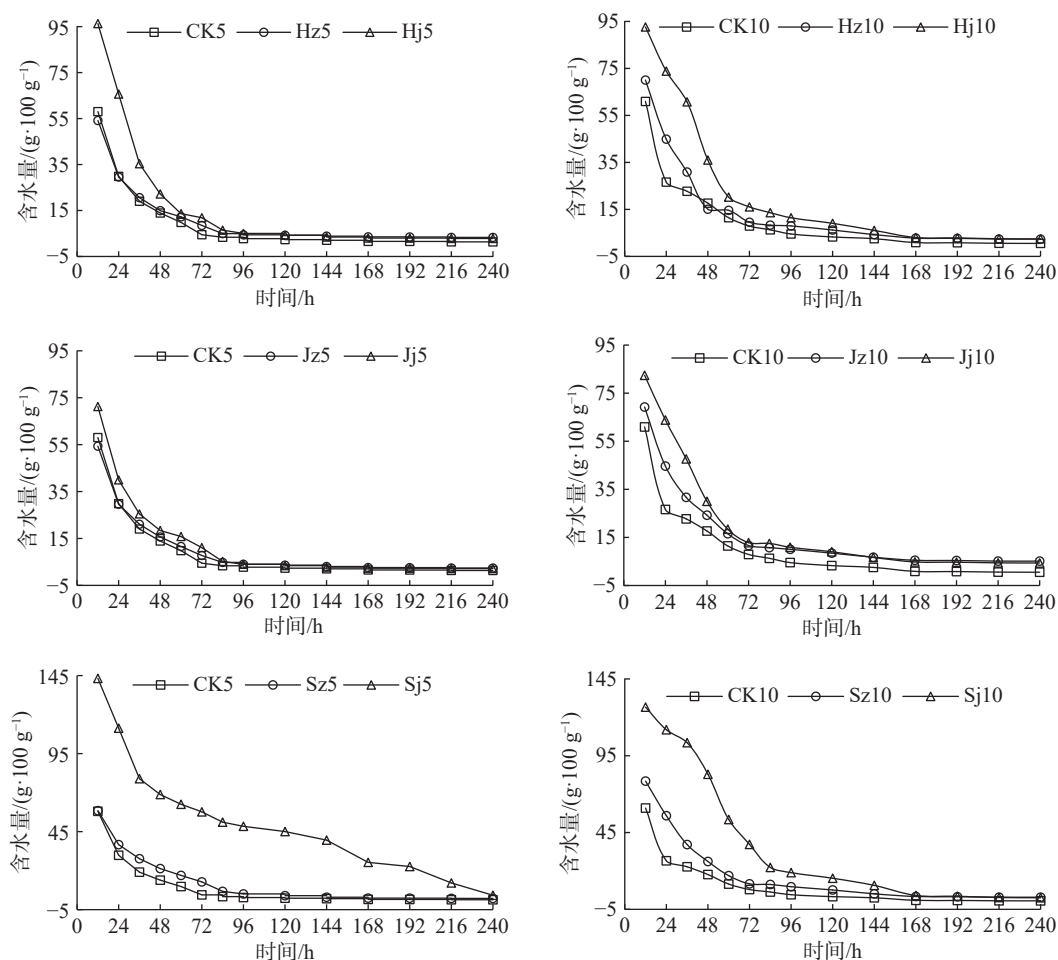


图 1 不同状态与不同埋深条件下保水剂的抗蒸发效果

Fig. 1 The anti-evaporation effect of water-retaining agents at different depths and conditions

## 2.2 不同配比土壤的含水量比较

不同土壤保水剂和有机肥用量组合对土壤毛管持水量和最大持水量的影响存在显著差异 ( $p < 0.05$ , 表 3 和表 4). 在未添加保水剂土壤中, 随着有机肥用量增加, 土壤毛管持水量和最大持水量均显著增加. 在同一保水剂用量处理下, 除 3‰旱地宝和 5‰法国爱森保水剂用量与 10% 有机肥用量、3‰法国爱森保水剂用量和 20% 有机肥用量处理下土壤含水率最高外, 其他各处处理的土壤毛管持水量和最大持水量随着有机肥用量增加而增加. 在相同的有机肥用量下, 法国爱森保水剂处理下土壤毛管持水量和最大持水量显著高于旱地宝保水剂和聚谷氨酸粉剂 I 型保水剂处理; 土壤毛管持水量和最大持水量随着法国爱森保水剂和旱地宝保水剂添加量增加而增加, 以 5‰用量效果最佳, 聚谷氨酸粉剂 I 型保水剂 3‰添加量的毛管持水量最佳.

土壤最大持水量和毛管持水量达到最大的均是法国爱森保水剂 5‰用量与有机肥 10% 用量的组合. 按土壤毛管持水量和最大持水量排名前五名均是法国爱森保水剂 5‰+有机肥 10% > 法国爱森保水剂 5‰ > 法国爱森保水剂 5‰+有机肥 20% > 法国爱森保水剂 3‰+有机肥 20% > 法国爱森保水剂 5‰+有机肥 30%, 说明法国爱森保水剂能够最大限度地提升土壤的毛管持水量和最大持水量,

且用量越高效果越显著;当使用剂量达到 5‰时,添加 10% 有机肥能最显著提升土壤最大持水量,但是 20% 和 30% 的添加量均显著降低土壤最大持水量.

表 3 不同配比土壤的毛管持水量比较

Tab. 3 Soil capillary water capacity for different combinations of water-retaining agents and organic fertilizers

保水剂用量/‰	保水剂种类	土壤毛管持水量/%			
		无有机肥	有机肥10%	有机肥20%	有机肥30%
0	—	33.63±0.65ghB	37.74±2.58cdeA	37.96±0.80cA	38.87±0.40cdA
1	旱地宝	35.55±0.82efgA	35.25±1.12eA	36.69±1.01cdA	36.25±0.15eA
	聚谷氨酸粉剂 I 型	32.29±1.08hC	35.72±0.83eB	36.06±1.00dAB	37.65±0.76deA
	法国爱森保水剂	40.07±1.41dA	39.53±1.32cdA	40.34±0.87bA	40.79±1.68bcA
3	旱地宝	37.18±1.01eB	40.23±1.27bcA	37.75±0.88cdB	38.14±0.15deB
	聚谷氨酸粉剂 I 型	35.78±1.42efB	36.75±1.71deAB	37.39±1.52cdAB	38.74±1.29cdA
	法国爱森保水剂	43.58±1.36cBC	42.83±2.98bC	48.18±0.40aA	46.55±1.29aAB
5	旱地宝	45.71±1.16bA	36.60±1.32eC	41.08±1.55bB	42.23±1.32bB
	聚谷氨酸粉剂 I 型	34.63±1.84fgB	35.41±1.20eB	36.67±1.15cdAB	37.93±0.06deA
	法国爱森保水剂	53.87±1.10aB	63.64±1.34aA	49.47±1.30aC	45.47±2.68aD

注: 数据后同列小写字母表示不同保水剂处理间差异显著( $p<0.05$ ), 数据后同行大写字母表示不同有机肥用量处理间差异显著( $p<0.05$ ), 下同.

表 4 不同配比土壤的最大持水量比较

Tab. 4 Maximum soil water capacity in different combinations

保水剂用量/‰	保水剂种类	土壤最大持水量/%			
		无有机肥	有机肥10%	有机肥20%	有机肥30%
0	—	33.84±0.66eC	38.57±0.61dB	40.61±0.65cA	41.18±0.68deA
1	旱地宝	37.45±0.91dA	35.81±1.47eAB	37.66±0.67deAB	37.38±0.10gB
	聚谷氨酸粉剂 I 型	33.53±0.48eC	36.66±1.47deB	36.38±0.93eB	38.72±1.01fgA
	法国爱森保水剂	41.23±1.10cB	41.47±0.55cAB	42.73±1.06bAB	43.63±1.71cA
3	旱地宝	37.77±0.73dB	42.48±1.43cA	38.81±0.78cdB	38.92±0.26fgB
	聚谷氨酸粉剂 I 型	36.33±1.38dB	36.98±1.61deB	37.74±1.57deAB	40.07±1.04efA
	法国爱森保水剂	46.30±0.78bC	45.54±1.54bC	50.87±0.38aA	48.76±1.10bB
5	旱地宝	48.00±1.35bA	37.74±0.71deC	42.70±1.52bB	42.80±1.35cdB
	聚谷氨酸粉剂 I 型	36.26±1.42dC	37.37±1.05deBC	38.64±1.24dAB	39.82±0.14efA
	法国爱森保水剂	55.40±1.11aB	66.70±1.29aA	52.52±1.30aC	50.98±0.85aC

### 2.3 不同配比土壤的保水时间比较

法国爱森保水剂和有机肥配制土壤含水量随着持续时间呈二项式相关关系, 呈现先快速降低后变缓慢的趋势, 法国爱森保水剂 5‰+有机肥 10% 处理保水效果最好 (图 2 和表 5). 分析持续 40 d 时间内土壤含水量的变化, 发现, 对照组处理在 14 d 和 22 d 时分别降至 20.68% 和 10.94%, 至 40 d 时仅



为 2.48%; 而 14 d 时其他处理土壤含水量大小顺序为法国爱森保水剂 5‰+有机肥 10% (40.13%) > 法国爱森保水剂 3‰+有机肥 20% (36.81%) > 法国爱森保水剂 5‰+有机肥 20% (36.78%) > 法国爱森保水剂 5‰+有机肥 30% (36.01%) > 法国爱森保水剂 3‰+有机肥 10% (31.65%) > 法国爱森保水剂 1‰+有机肥 30% (28.05%) > 法国爱森保水剂 1‰+有机肥 20% (25.24%) > 法国爱森保水剂 1‰+有机肥 10% (24.23%)。至第 40 d 时, 其他处理土壤含水量仍高于 10% 的处理有法国爱森保水剂 3‰+有机肥 20% (13.65%) > 法国爱森保水剂 5‰+有机肥 10% (12.67%) > 法国爱森保水剂 5‰+有机肥 20% (11.31%) > 法国爱森保水剂 5‰+有机肥 30% (10.99%)。说明法国爱森保水剂的添加量越多, 土壤含水量持续时间越长, 以法国爱森保水剂 3‰+有机肥 20% 或者法国爱森保水剂 5‰+有机肥 10% 持续效果最佳, 两者分别在 28 d 和 32 d 时土壤含水量降至约 20%。

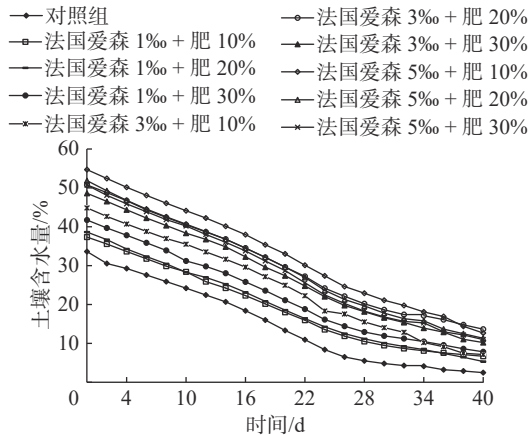


图 2 爱森保水剂与有机肥组合的配方土壤含水量变化

Fig. 2 Water content variation in different combinations of water-retaining agents and organic fertilizers

表 5 爱森保水剂和有机肥组合的配方土壤含水量与保水时间的关系

Tab. 5 Relationship between soil water content and holding time for different combinations of water-retaining agents and organic fertilizers

处理	含水量 (y) 与时间 (x) 拟合曲线	$R^2$
对照组	$y = 0.0115x^2 - 1.3017x + 34.742$	0.985 4
法国爱森1‰ + 肥10%	$y = 0.0107x^2 - 1.2588x + 38.688$	0.992 6
法国爱森1‰ + 肥20%	$y = 0.0089x^2 - 1.2213x + 39.375$	0.996 0
法国爱森1‰ + 肥30%	$y = 0.0100x^2 - 1.3021x + 42.964$	0.993 6
法国爱森3‰ + 肥10%	$y = 0.0028x^2 - 1.1113x + 45.515$	0.994 7
法国爱森3‰ + 肥20%	$y = 0.0075x^2 - 1.2849x + 51.907$	0.993 3
法国爱森3‰ + 肥30%	$y = 0.0055x^2 - 1.2311x + 49.517$	0.995 5
法国爱森5‰ + 肥10%	$y = 0.0028x^2 - 1.1923x + 55.260$	0.996 8
法国爱森5‰ + 肥20%	$y = 0.0056x^2 - 1.2803x + 52.355$	0.995 3
法国爱森5‰ + 肥30%	$y = 0.0064x^2 - 1.3042x + 51.560$	0.993 0

### 3 讨论与结论

保水剂具有保水保肥、改善土壤团粒结构、增加土壤通透性及持水性等作用<sup>[12-14]</sup>。本研究中, 旱地宝、聚谷氨酸粉剂 I 型和法国爱森 3 种保水剂在不同土壤埋深表现出抗蒸发能力存在显著差别, 以埋深 5 cm 的法国爱森效果最佳, 凝胶状态的抗蒸发效果可以持续 8 d 以上, 而埋深 10 cm 效果仅维持

3 ~ 5 d, 这与保水剂类型及其与土壤间吸水速率快慢差异有关<sup>[15-17]</sup>. 在与土壤混合并灌水后, 法国爱森保水剂可以快速获取水分并利用亲水性基团保持住水分<sup>[18]</sup>, 凝胶状态下的吸水速度慢于干燥土壤.

施用有机肥可有效减少地表径流, 提高土壤中有效水的含量, 协调土壤供水与作物蓄水之间的矛盾<sup>[7,10]</sup>, 但单一施用有机肥或保水剂改良效果不全面, 甚至会造成不同程度的负面影响<sup>[19-20]</sup>. 蒋美佳等<sup>[10]</sup>研究发现有机肥和保水剂配施的保水效果优于单施有机肥; 而李想等<sup>[7]</sup>则发现单施有机肥较单施保水剂更利于尾矿表层理化性质的改良, 有机肥与保水剂配施效果更好. 在本实验发现配制土壤的保水能力随着保水剂用量或有机肥用量增加而提高, 但当添加 5‰ 法国爱森保水剂时, 10% 有机肥用量能够提高土壤的最大持水能力, 20% 和 30% 的用量却会减弱保水剂的持水能力, 这与有机物对保水剂的影响机理不同有关<sup>[10,21]</sup>. 施用有机肥的土壤具有高孔隙度和低容重的特性, 主要成分腐殖质是能有效吸附水分的高分子聚合物, 可作为土壤的良好胶结剂, 导水性和缓冲性较好<sup>[21]</sup>; 保水剂可吸收自身重量上百倍的水分, 在土壤中通过吸水形成凝胶状态, 堵塞土壤大孔隙, 减少水分淋溶损失, 增强土壤的保水性<sup>[10]</sup>. 调查表明, 黑岱沟自然恢复下的排土场土壤饱和含水量、毛管持水量和田间持水量分别为 23.88%、21.61% 和 20.58%<sup>[22]</sup>. 本研究发现 14 d 内对照样地的土壤含水量降低至 20.68%, 而保水剂和有机肥配施可以有效延长保水持水能力, 当土壤含水量降至约 20%, 爱森保水剂和有机肥配施的保水时间可延长 1 倍以上.

因此, 从保水剂种类选择及其与有机肥配施保水效果来看, 选择主要成分为聚丙烯酸盐和聚丙烯酰胺共聚体的法国爱森保水剂为保水材料, 最优配方为法国爱森保水剂 3‰ + 有机肥 20% 或者法国爱森保水剂 5‰ + 有机肥 10%, 可以增强土壤持水性能, 但其对植物生长作用效果有待验证.

## [参 考 文 献]

- [1] 冯超, 甘雨晨, 贺晓, 等. 草原矿区苔藓植物多样性及其与土壤理化性质的关系 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2022(1): 76-84.
- [2] 李海宽, 张雅楠. 内蒙古黑岱沟矿区排土场土壤质量评价 [J]. 中国水土保持, 2014(10): 63-66.
- [3] 马佳慧, 张兴昌, 邱莉萍. 黑岱沟矿区排土场不同复垦方式下土壤性质的研究 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 93-96.
- [4] 李鹏飞, 张兴昌, 朱首军, 等. 植被恢复对黑岱沟矿区排土场土壤性质的影响 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 64-70.
- [5] 陈宝玉, 王洪君, 滕轶, 等. 保水剂对土壤温度和水分动态的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 32-36.
- [6] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 19-26.
- [7] 李想, 张宝娟, 李继泉, 等. 保水剂与有机肥配施对铁尾矿理化性质的改良作用 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 554-562.
- [8] 冯瑞云, 王慧杰, 郭峰, 等. 秸秆型土壤改良剂对土壤结构和水分特征的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 44-48.
- [9] 李想, 张宝娟, 李继泉, 等. 保水剂与有机肥配合施加对铁尾矿基质下植物生长的影响 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 44-50.
- [10] 蒋美佳, 刘晓林, 冯钰梅, 等. 有机肥配施保水剂对紫色土水分入渗及氮素淋溶的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 99-104.
- [11] 王荣, 刘吉青, 周海霞, 等. 生物有机肥与保水剂对设施连作黄瓜生长和土壤肥力的影响 [J]. 河南农业科学, 2018, 47(8): 45-53.
- [12] 陈显双, 韦丽君, 付海天, 等. 不同剂型保水剂对木薯植株性状及产量的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(S2): 76-79.
- [13] 荣俊冬, 凡莉莉, 陈礼光, 等. 不同用量保水剂对沿海沙地麻竹生理特征的影响 [J]. 南方农业学报, 2019, 50(2): 323-329.
- [14] 肖红玉. 保水剂对土壤持水特性的影响研究 [J]. 广东水利水电, 2020(5): 28-32.
- [15] 何宇, 吕卫光, 张娟琴, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(18): 18-22.
- [16] 张婧, 侯党社, 辛莹娟, 等. 天然高分子改性保水剂的研究进展 [J]. 陕西农业科学, 2020, 66(10): 76-80.
- [17] 徐婉婷, 韩舒, 师庆东, 等. 不同保水剂在干旱环境下的基本性能对比研究 [J]. 节水灌溉, 2015(8): 38-41.
- [18] 王志玉, 刘作新. 高吸水树脂的性能及其在农业上的应用 [J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 352-356.
- [19] 郭世文, 李品芳, 芦谅, 等. 不同土壤水分条件下施用黄腐酸与保水剂对玉米生长、耗水及水分利用效率的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 1-11.
- [20] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(12): 2336-2347.
- [21] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 352-360.
- [22] 张雅楠. 黑岱沟排土场复垦地植被类型及土壤理化性质的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.

(责任编辑: 李万会)