

改良红黏土持水性及植物性试验研究

任焱焱, 汪佳欣, 张浩宇, 张海山, 殷瑞遥, 陈冠霖, 杨 凯

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年12月24日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年1月26日

摘 要

本文采用保水剂对红黏土进行改良, 通过掺入不同含量的保水剂材料, 对改良红黏土的持水特性、蒸发特性、植物适用性展开研究。试验结果表明: 在持水蒸发特性方面, 当按0.5%、1%、3%、5%的质量分数掺入改良材料时, 红黏土最大持水量显著提升, 保水剂对持水性改善效果明显; 同时随保水剂含量增加红黏土保水能力提高, 但改良材料超3%后, 其比表面积特征会使土体与空气接触面增大, 导致抗蒸发能力降低, 抵抗蒸发的最佳改良材料配比为3%。在植物适应性研究中, 随保水剂掺量增加植物发芽率逐步上涨, 且保水剂掺量较高组植物株长势良好, 未改良红黏土组及低掺量组存在倒苗现象, 添加保水剂对植物生长的积极作用主要源于其良好的持水保水特性。

关键词

红黏土, 保水剂, 持水特性, 蒸发特性, 植物适应性

Experimental Study on Water Holding and Vegetative Properties of Improved Red Clay Soil

Yaoyao Ren, Jiaxin Wang, Haoyu Zhang, Haishan Zhang, Ruiyao Yin, Guanlin Chen, Kai Yang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 24th, 2024; accepted: Jan. 15th, 2025; published: Jan. 26th, 2025

Abstract

In this paper, red clay was improved with water retaining agent. By adding different contents of water retaining agent, the water retaining property, evaporation property and plant applicability of the improved red clay were studied. The test results show that the maximum water holding

文章引用: 任焱焱, 汪佳欣, 张浩宇, 张海山, 殷瑞遥, 陈冠霖, 杨凯. 改良红黏土持水性及植物性试验研究[J]. 土木工程, 2025, 14(1): 217-225. DOI: 10.12677/hjce.2025.141025

capacity of red clay is significantly increased when the modified material is added with the mass fraction of 0.5%, 1%, 3% and 5%, and the water holding capacity is obviously improved by the water retaining agent. At the same time, with the increase of water retaining agent content, the water retaining ability of red clay is improved, but when the modified material exceeds 3%, its specific surface area characteristics will increase the contact surface between soil and air, resulting in a decrease in evaporation resistance. The optimal ratio of modified material to resist evaporation is 3%. In the study of plant adaptability, the germination rate of plants increased gradually with the increase of water retaining agent content, and the plant growth was good in the higher water retaining agent content group, while the seedling was reversed in the unimproved red clay group and the low water retaining agent group. The positive effect of adding water retaining agent on plant growth was mainly due to its good water retaining characteristics.

Keywords

Red Clay, Water Retaining Agent, Water Holding Property, Evaporation Property, Plant Adaptability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

红黏土是在碳酸盐岩经过红土化作用逐渐形成的高塑性土壤。分布在全球范围内的诸多国家，特别是湿热地区，更是红黏土现身之处，这样的环境为红黏土的形成与存续提供了较为适宜的条件[1][2]。骊山红黏土在外观颜色方面，一般呈现出或深或浅的棕色，辨识度极高。在物理特性上，天然含水率偏高可达到 20%~60%之间。孔隙率一般在 1.4~1.7，最高可达 2.0，较大的孔隙率意味着其内部有着较为疏松的结构[3]。因此，骊山红黏土对外界环境的水分含量具有高敏感性，降雨量高时水分会渗入土体内，填充孔隙，使土体整体膨胀；气候干燥时，水分子蒸发分散到外界环境，周围的土壤颗粒在自身重力以及颗粒间相互作用力影响下，会逐渐向孔隙处靠近、堆积，使得孔隙体积减小，最终导致土体整体收缩。据统计，高速公路建设中，红黏土分布的高速公路里程占比大[4]。红黏土这种吸水膨胀，失水紧缩的性质严重影响了高速公路两侧的边坡稳定[5]。在雨季节时，骊山红黏土遭受降雨的冲刷后，土质结构极为脆弱，无植被生长。严重时会导致山体滑坡，造成大量人员伤亡和进行损失。因此亟需解决骊山红黏土边坡蓄水固土差、植被存活率低的问题。

保水剂是一种高分子聚合物材料，也常被称作吸水剂、高吸水性树脂等。通过交联形成三维网状结构能够吸收并储存大量的水分，并且在一定条件下可以缓慢释放所吸收的水分。具有高吸水性、保水性、缓慢释放性，释放水分利用率最高可达 95% [6]。近年来，保水剂凭借保水、保肥等特点，在土壤改良领域展现出了巨大的潜力[7]。张阁艳[8]研究了在荒漠草原条件下，施加保水剂后观察植物生长形势，发现保水剂大大改善草群生物量、种类、高度，对植物生长状况有促进作用。袁惠艳[9]采用不同浓度保水剂对种子影响，在 120 g/m² 溶度浓度时土壤含水率最高，减缓了土壤蒸发率，提高了种子的发芽率，同时对幼苗生长有提升作用。安彦勇[10]探讨新型固化剂有机高分子羟乙基纤维素保水剂对土壤改良的影响，能有效提高固化土的强度满足地基要求，以及增强了土壤的水稳性。王小彬[11]研究保水剂和有机高分子材料聚丙烯酰胺、交联性丙烯酰胺、乳化沥青对土壤的性能的影响；聚丙烯酰胺对土壤水稳性影响最大，可运用在旱地保护上；交联性丙烯酰胺对固结力和水稳性影响不大，可使土壤保水保肥；乳化沥青可增

强土壤固结力，适合抗水固沙。以上可说明，保水剂可改善土壤结构、提高保水性、促进植物生长作用。

现有研究中，将保水剂材料对红黏土改良及植被生长情况的影响研究极少。因此本文采用有机高分子保水剂材料对骊山红黏土改良，在掺入不同含量的保水剂后，探究改良土的持水能力、蒸发性、以及植物适用性效果，该研究可为改良骊山红黏土和植被治理提供科学依据。

2. 试验材料和方法

2.1. 试验材料

本次试验红黏土来自陕西省西安市临潼区骊山浅丘处，选取坡底 1~2 米处位置进行取样。土体颜色呈砖红色，质地均匀。将取样的土碾碎、风干，过 2 mm 筛子，然后进行一系列物理特性试验，根据《公路土工试验规程(JTG 3430-2020)》进行试验，可得到红黏土基本物理指标如表 1 所示。红黏土液限 18.4%，塑限 30.3%，塑性指数 11.9，属低液限粉质粘土。在塑性图中分布如图 1 所示。可以看出，红黏土位于 A 线以上、B 线以左，按照塑性图的分类，属于低液限粘土(CL)。采用筛分法和密度计法得到的红黏土颗粒粒径分析结果见于表 2。粉粒含量(0.005 mm~0.075 mm)占比 70.88%；其次为砂粒，含量(0.075 mm~2 mm)占比 22.52%，且以细砂为主(占总砂粒含量 80.86%)；粘粒含量占比很小，仅有 6.53%。

新型保水剂以生物可降解有机高分子材料为主要成分，经过化学接枝和表面改性形成三维多孔结构，利用多孔结构的中大量孔隙进行保水。高密度微孔成型技术利用成熟的有机化学接枝反应，形成具有一定力学强度的超轻多孔材料，使得孔隙比占总体积 80%以上，孔隙直径在 100 nm 至 100 μm 之间，使得材料本身具有显著的毛细管效应，从而获得优良的保水性能。

本实验选用紫花苜蓿作为盆栽植物。紫花苜蓿属于豆科，根系较为发达，主根尤为粗大，最深可入数米，实验观察较为方便；此外，发达的主根亦能吸收深层的水分，因此比较容易存活。紫花苜蓿被人们称为“牧草之王”，广泛适应各种生存环境，尤其是温暖、半湿润的气候条件；该植株对土壤的适应性较强，可在大多数除重黏土、贫瘠薄土壤及过酸碱土壤上生长，在疏松土壤以及且钙含量较高的壤土中生长最好。

Table 1. Basic physical indicators of red clay
表 1. 红黏土基本物理指标

比重 G_s	天然含水量 $w/\%$	天然干密度 $\rho/(g/cm^3)$	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_L/\%$	塑性指数 I_p
2.73	13.09%	1.325	18.4	30.3	11.9

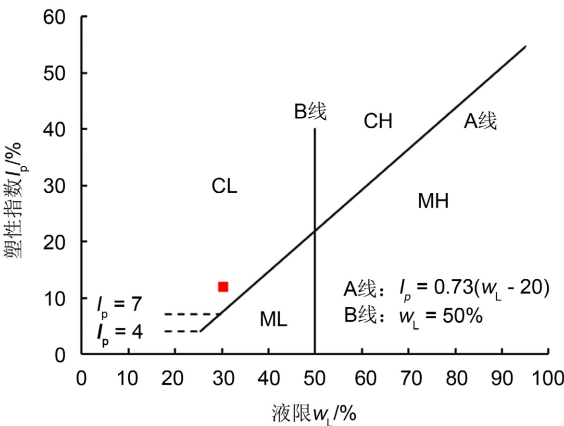


Figure 1. Plasticity chart
图 1. 塑性图

Table 2. Results of red clay particle analysis
表 2. 红黏土颗粒分析结果

粒组统称	粒组名称	粒径(d)/mm	含量/%	合计/%	备注
粗粒	砾粒	d > 2	0.08	0.08	湿筛法
	粗砂	2 ≥ d > 0.5	2.67	22.52	
	中砂	0.5 ≥ d > 0.25	1.64		
	细砂	0.25 ≥ d > 0.075	18.21		
细粒	粉粒	0.075 ≥ d > 0.045	22.61	70.88	激光粒度仪
		0.045 ≥ d > 0.020	29.58		
		0.020 ≥ d > 0.010	12.42		
		0.010 ≥ d > 0.005	6.27		
	粘粒	0.005 ≥ d > 0.002	4.51	6.53	
		0.002 ≥ d > 0.0001	1.42		
		0.001 ≥ d > 0.0005	0.58		
		d ≤ 0.0005	0.02		

2.2. 试样制备与测试方法

2.2.1. 持水特性试验

试验采用土柱模型进行模拟土壤持水特性，模型主体结构采用内径 $d = 100 \text{ mm}$ 、高 $h = 120 \text{ mm}$ 的亚克力材质无底筒体，置于金属托盘中，盘中铺设厚度为 30 mm 的砂土渗透层，用于模型内土柱排气排水。筒底与砂土接触面放置一层滤纸，而后松散堆积 60 mm 后土体材料，整平后再铺设一层滤纸，其上部再铺设厚度 30 mm 的砂土渗透层，装置示意图与实物图如图 2 所示。试验步骤具体如下：

- 1) 将试验前准备好的亚克力材质无底筒体放置在铺设 20 mm 厚度砂土透水层的金属托盘上，管柱底部铺设滤纸以观察底部水量渗流情况，并分别称重各组试验器材的质量；
- 2) 向对应标签的管柱内添加对应试验前配制好的土壤试样，统一添加高度为 600 mm 的土柱，并分别记录对应添加试样的干质量；
- 3) 在土柱上添加厚度为 300 mm 的砂土防渗层，接触面铺设滤纸，防止注水压力和上部水量游走对土柱造成的扰动，并记录对应添加试样的干质量；
- 4) 依次向各组试样管柱中缓慢注入蒸馏水，当达到土柱顶部 30 mm 时停止注水，静待水量自然下降，下降一定程度后继续加水，等上部加水量与底部出水量一致后，认为土柱不再吸水，达到最大持水量；
- 5) 称量试样总质量，依次计算出稳定的最大持水量：首先将散状黄土风干过筛(0.5 mm)处理，随后根据配合比称取一定质量的粉煤灰、PP 纤维和蒸馏水(误差不大于 0.01 g)，与之混合均匀。粉煤灰含量、PP 纤维含量分别固定至 20% 和 0.5% ，含水率设置 13% 、 16% 、 19% 、 22% 、 25% 五档。在金属环刀模具底部放上滤纸，然后将制备好的混合物依据最大干密度 1.64 g/cm^3 到标准模具中(直径 61.8 mm ，高 20 mm)。最后将成型的试样密封并静置在室内 7 d ，温度恒定为 $20.0^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 。而后，将土样放置在冻融试验箱中进行冻融循环，首先在 -20°C 条件下冻结 12 h ，而后在 20°C 的环境中融化 12 h ，并将此过程重复 0 、 1 、 2 、 3 、 5 、 7 和 10 次。直剪试验用仪器为 ZJ 型应变控制式直剪仪，应变速率控制在 0.8 mm/min 。以试样产生 6 mm 剪切位移作为破坏标准。

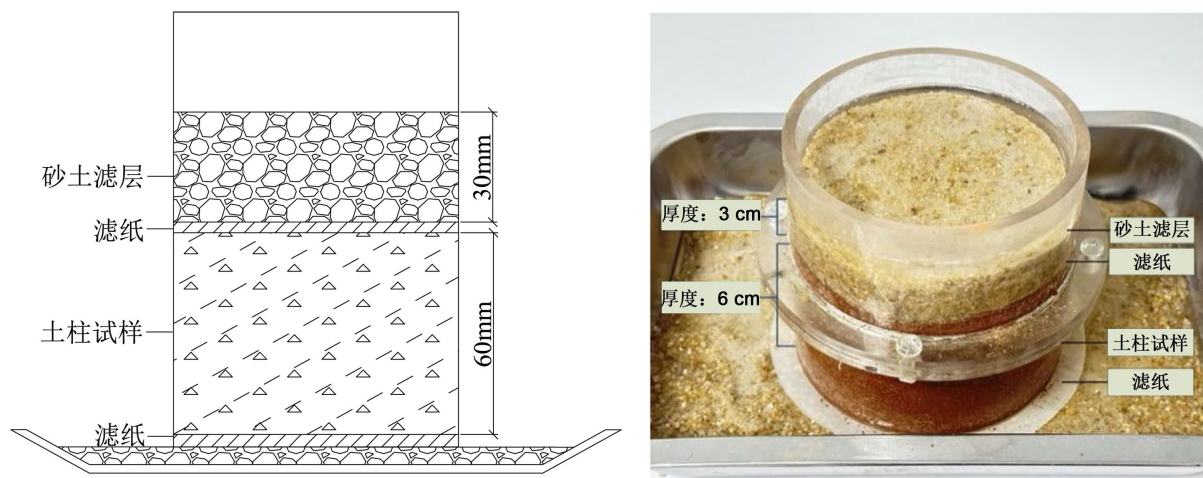


Figure 2. Schematic diagram and physical diagram of modified red clay water capacity test device
图 2. 改良红黏土持水量试验装置示意图与实物图

2.2.2. 蒸发特性试验

为了研究保水剂在提高红黏土保水能力方面的作用，采用室内蒸发试验，研究 5 种干密度(1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45 g/cm³)和 5 种改良剂使用量(0%, 0.5%, 1%, 3%, 5%)对最大持水量的影响。本次试验在温室中进行，室内温度控制于 26℃，同时保持阳光充足，各组试样自然蒸发，每隔 6 h 称量记录试样质量变化情况，直至质量不再发生变化及蒸发结束截止试验。干密度组：将红黏土按干密度为 1.25、1.30、1.35、1.40、1.45 g/cm³ 分为五组，并制备含水率为 26%的试样分别加入对应编号的器皿中，称取各组试样质量；改良剂组：将改良剂掺量按质量分数为 0%、0.5%、1%、3%、5%制备试样，并控制含水率至 26%，干密度为 1.35 g/cm³ 分别加入对应编号的器皿中，称取各组试样质量。

2.2.3. 植物适用性试验

为了研究土壤改良材料是否会对植物生长产生影响，设计并进行了室内盆栽试验。根据花盆体积计算所需改良材料和土壤质量，设定混合材料质量 500 g，随后将改良材料按 0%、0.5%、1%、3%、5%的质量分数与土样充分混合，并控制含水率一定的条件下进行填充入相应花盆内，编号记录；为能够对不同改良剂材料掺量下红黏土种植物出苗率、生长状况等指标进行准确观测和统计，本试验采用紫花苜蓿单一植物作为试种对象，周期 28 d，并控制每个试样的播种量为 1.0 g/m²，约 30 粒种子，晚间播种，盆栽试验设计参数如表 3。播种后，按照一定时间间隔，对不同改良剂掺量下紫花苜蓿的出苗率、生长状况和根系发展情况进行连续观测并记录。

Table 3. Design parameters of pot experiment
表 3. 盆栽试验设计参数

试样	土质	种子数(粒)	改良材料掺量(%)
A	红黏土	30	0
B	红黏土	30	0.5
C	红黏土	30	1
D	红黏土	30	3
E	红黏土	30	5

3. 结果与讨论

3.1. 改良红黏土持水特性试验

由图 3 可以看出,在红黏土中掺入改良剂可以有效提高土壤的持水性能,并随着改良剂含量的增加,土壤的持水量呈现增长趋势,因为新型土壤改良剂作为具有一定力学强度的超轻多孔材料,孔隙比占总体积 80%以上,空隙直径在 100 nm 至 100 μm 之间,使得材料本身具有显著的毛细管效应,具有获得优良的保水性能。在灌水或降雨后,有效提高土壤基质的整体保水能力。

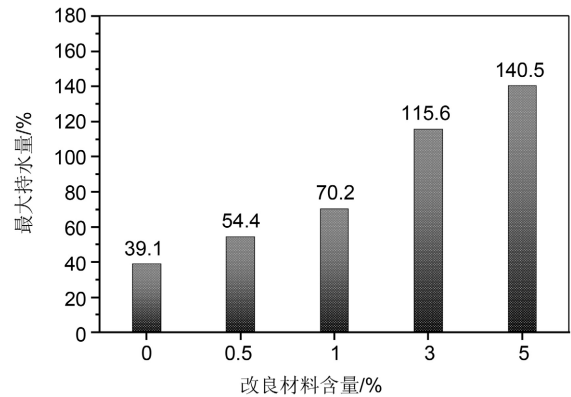


Figure 3. Effect of the content of the same modifier on the maximum water holding capacity of red clay
图 3. 不同改良剂含量对红黏土最大持水量的影响

由试验结果可以看出,在按照 0.5%、1%、3%、5%质量分数掺入改良材料时,红黏土最大持水量由改良前 39.1%增至 54.4%、70.2%、115.6%、140.5%,增幅分别为 39.1%、79.5%、195.7%、259.3%,说明改良剂对红黏土持水性的改善效果十分明显。

3.2. 改良红黏土蒸发特性试验

由图 4 得出土壤的压实效果影响红黏土的蒸发量,并随着密度的增加,土壤的蒸发量呈缓慢降低趋势,因为压实过程中红粘性土的孔隙结构变密实,孔隙中的弱游离水不易蒸发,但随着压实密度的增加,土壤的渗透性也将随之降低,同时对土壤植被生态存在一定的影响。

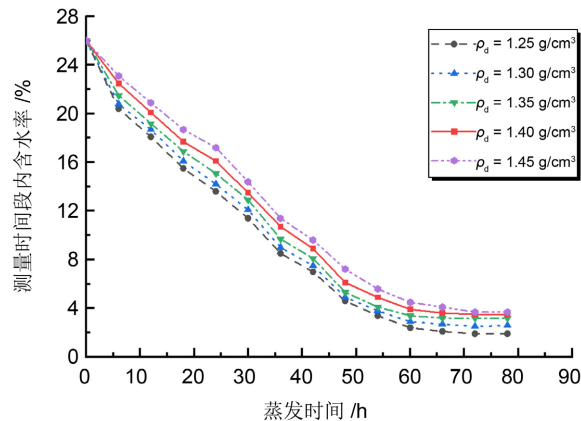


Figure 4. Effect of dry density on evaporation of red clay
图 4. 干密度对红黏土蒸发的影响

由图 5 可以看出,对比添加改良材料的红黏土,在干密度一定条件下,随改良材料的增加,其蒸发量逐渐降低,且最终试样的含水率均高于无改良材料红黏土,改良材料一定程度上提高了土壤的保水能力,抑制了蒸发效应,对于提高植被水分的利用效率具有积极意义。另外,也可观察到,改良材料的质量分数在 3% 时对土壤的蒸发影响最大,在 5% 的高掺量下,改良材料的高比表面积特征使土体与空气接触面增大,从而降低了改良土的抗蒸发能力。

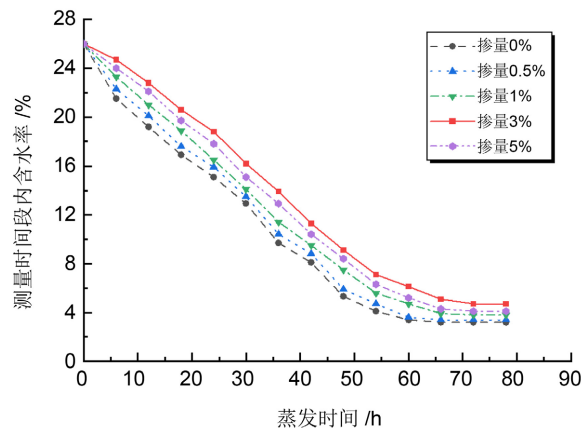


Figure 5. Effect of modifier content on evaporation of red clay

图 5. 改良剂掺量对红黏土蒸发的影响

3.3. 改良红黏土植物适用性试验

研究五种不同改良剂掺量下红黏土对植物出苗率的影响,不同掺量下 7 d、14 d 出苗率柱状图如图 6 所示。可见,在一定条件下,改良材料的掺量会影响紫花苜蓿种子的出苗率。主要表现为种子出苗率随着改良材料掺量的增加呈线性增长趋势,在 5% 情况下,种子的发芽率最高为 70%,而相对于未添加改良材料的试验,种子的出苗率却只有 16.7%。对比 7 d 与 14 d 的出苗率可以得出,在未添加改良材料的试样中,植物出苗率出现负增长,而添加改良材料的试样中,植物出苗率出现增长。说明保水剂的添加有效提高出苗率,对紫花苜蓿生长有促进作用。其结果与文献[12]研究结果一致,即保水剂的添加对植物在苗期的含水率有促进作用。

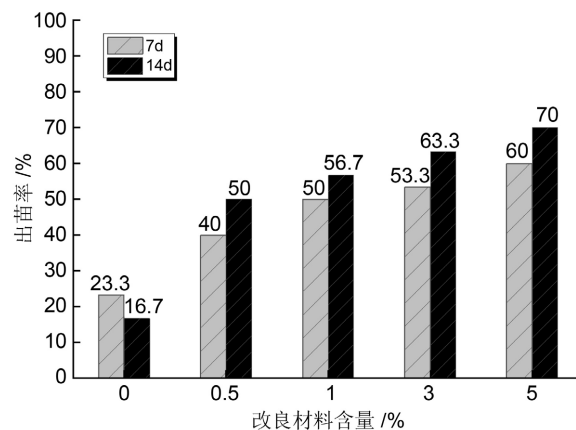


Figure 6. Effect of improved material content on plant emergence rate

图 6. 改良材料掺量对植物出苗率的影响

五种不同改良剂掺量下红黏土对植物生长状况的影响如图 7 所示。可见, 植物生长 14 d 后, 基本呈现出随改良材料掺量的增加, 紫花苜蓿叶片大小以及株高都会增加的趋势, 当掺量达到 1% 时, 植物生长的最好; 在对比 7 d 与 14 d 的植物生长状况后可以得出, 在第 7 d, A 组盆栽中紫花苜蓿明显出现倒苗现象, 14 d 时仅少数幼苗存活, 随后其他掺量下的试验组也陆续出现该现象, 此外通过对比盆栽表面裂纹可以发现, 随着干湿循环的进行, 土壤表面裂纹随改良材料掺量的增加, 逐渐减少, 由此可见改良材料具有一定的保水能力, 对土壤的蒸发渗透有一定的抑制作用, 对自然恶劣环境具有一定的适应性。

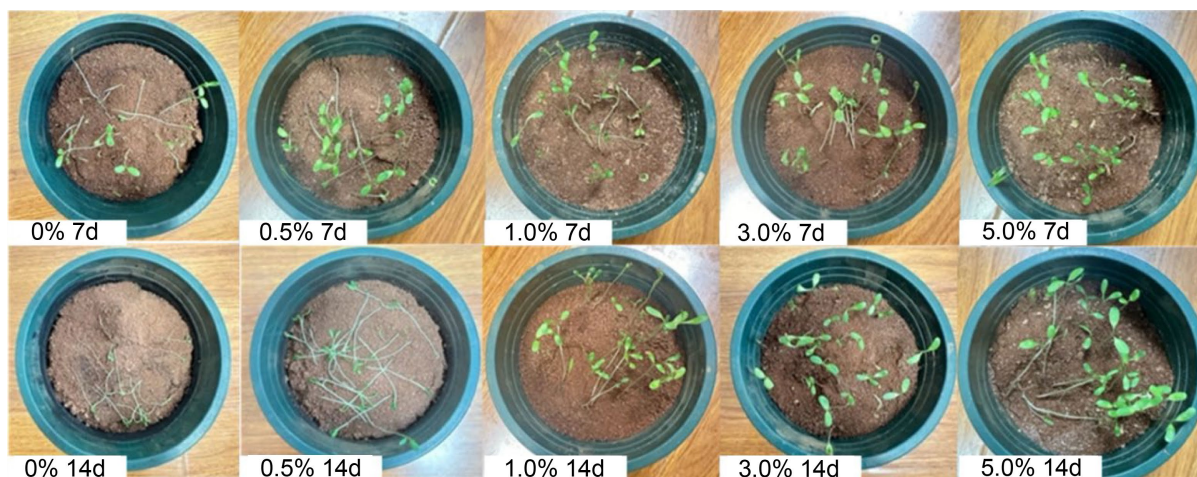


Figure 7. The growth of plants on 7 d and 14 d was improved with different dosage

图 7. 不同掺量改良材料植物 7 d、14 d 生长状况

4. 结论

1) 改良红黏土持水蒸发特性研究: 最大持水性试验表明, 按照 0.5%、1%、3%、5% 质量分数掺入改良材料时, 红黏土最大持水量由改良前 39.1% 增至 54.4%、70.2%、115.6%、140.5%, 增幅分别为 39.1%、79.5%、195.7%、259.3%, 改良剂对红黏土持水性的改善效果十分明显。

2) 改良红黏土持水蒸发特性研究: 自然蒸发试验表明, 随改良材料的增加, 红黏土的保水能力得到了提高, 但当改良材料超过 3% 后, 改良材料的高比表面积特征使土体与空气接触面增大, 从而降低了改良土的抗蒸发能力, 因此, 在抵抗蒸发方面, 改良材料的最后配比为 3%。

3) 改良红黏土植物适应性研究: 在干旱环境下, 红黏土在使用改良材料后, 植物发芽率与生长状况均要好于纯黄土。随着改良剂掺量由 0.5% 增至 5%, 植物发芽率由改良前 23.3% 增至 40%、50%、53.3%、60%。在植物生长状况方面, 改良剂掺量较高的组植物株长势较高, 未改良的红黏土组在 7 d 时即出现苗株缺水倒苗现象, 0.5% 掺量组在 14 d 时也出现倒苗现象, 其他组苗株长势良好。添加改良剂对植物生长的作用主要体现在改良剂较好的持水保水特性。

基金项目

骊山浅丘区水土流失生态治理与成效评价技术研究(S202412715054)。

参考文献

- [1] Venkatesh, C., Chand, M. and Nerella, R. (2019) A State of the Art on Red Mud as a Substitutional Cementitious Material. *Annales de Chimie-Science des Matériaux*, **43**, 99-103. <https://doi.org/10.18280/acsm.430206>
- [2] Zhu, F., Chen, L., Yao, Y., Zhao, Q. and Li, J. (2020) Experimental Study on Direct Shear Mechanical Characteristics

- of Warm Frozen Silty Clay. *Annales de Chimie—Science des Matériaux*, **44**, 53-58.
<https://doi.org/10.18280/acsm.440107>
- [3] Ghobadi, M.H., Abdilor, Y. and Babazadeh, R. (2013) Stabilization of Clay Soils Using Lime and Effect of Ph Variations on Shear Strength Parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **73**, 611-619.
<https://doi.org/10.1007/s10064-013-0563-7>
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报[R]. 2021.
- [5] 赵亚文. 不同含水率下红黏土抗剪强度特性的方法探讨[J]. 南方农机, 2018, 49(5): 174-179.
- [6] Yang, L., Yang, Y., Chen, Z., Guo, C. and Li, S. (2014) Influence of Super Absorbent Polymer on Soil Water Retention, Seed Germination and Plant Survivals for Rocky Slopes Eco-Engineering. *Ecological Engineering*, **62**, 27-32.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.019>
- [7] 胡甫嵩, 王琮棋, 夏德强, 等. 保水剂的发展现状及应用研究[J]. 云南化工, 2024, 51(9): 20-23.
- [8] 张阁艳, 哈斯毕力格, 于海龙. 荒漠草原天然草地施加保水剂对植被生长的影响研究[J]. 农村牧区机械化, 2015(1): 42-43.
- [9] 袁惠燕, 梅晓东, 胡磊, 等. 干旱胁迫下保水剂对高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2014(1): 72-74.
- [10] 安彦勇, 张洪江, 辛志杰. HEC 土体固结剂在闵行铁路货场工程中的应用[J]. 施工技术, 2009, 38(9): 103-104.
- [11] 王小彬, 蔡典雄, 张锐. 几种高分子材料固土性能比较与评价研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1608-1615.
- [12] 佟长福, 侯洪飞, 李瑞平, 等. 保水剂和蒸腾抑制剂对玉米生长和水肥耦合的影响[J]. 节水灌溉, 2024(6): 63-68, 76.