

# 微生物固化风沙土的保水性能试验研究

姚姬璇<sup>1</sup>, 吴雨瑶<sup>1</sup>, 陈卓<sup>1</sup>, 段金贵<sup>1</sup>, 赵晓娟<sup>1</sup>, 田堪良<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 研究微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化风沙土的性能,为 MICP 技术在固化风沙土以及恢复生态等方面提供理论依据。[方法] 采用 MICP 技术对风沙土进行不同次数的固化处理,通过扫描电镜和光学显微镜对固化风沙土的微观结构进行分析,并测试分析固化试样的基本物理性质和保水性。[结果] 通过 MICP 处理的风沙土,在风沙土颗粒之间有碳酸钙晶体生成,将沙土颗粒胶结在一起,使松散的风积沙土固化成具有一定强度的整体;随着固化次数的增加,固化风沙土的厚度、干密度、碳酸钙含量逐渐增大,渗透系数逐渐减小,固化厚度由 3.38 mm 增加至 11.28 mm,干密度由原沙的 1.61 g/cm<sup>3</sup> 增加至 2.05 g/cm<sup>3</sup>,碳酸钙含量由 8.99% 增加至 13.08%,渗透系数由原沙的 1.06 × 10<sup>-3</sup> cm/s 减少至 2.35 × 10<sup>-4</sup> cm/s;当固化处理次数不大于 5 次时,保水率随固化处理次数的增加而增大,固化试样的保水性能有所改善,固化处理超过 5 次后,保水性能则有所下降。[结论] 采用 MICP 技术固化的风沙土,可明显改善风沙土的干密度、渗透性能和保水性。综合考虑固化效果、保水性及经济性,建议最佳的固化处理次数为 3 次。这样可有效防治风蚀并保持土壤水分以利于生态修复。

**关键词:** 微生物矿化; 微生物诱导碳酸钙沉淀; 风沙土; 微观结构; 保水性能

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2023)02-0104-09

**中图分类号:** S157.2

**文献参数:** 姚姬璇, 吴雨瑶, 陈卓, 等. 微生物固化风沙土的保水性能试验研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 104-112. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.013; Yao Jixuan, Wu Yuyao, Chen Zhuo, et al. Experimental study on water retention properties of microbially stabilized aeolian sand soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 104-112.

## Experimental Study on Water Retention Properties of Microbially Stabilized Aeolian Sand Soil

Yao Jixuan<sup>1</sup>, Wu Yuyao<sup>1</sup>, Chen Zhuo<sup>1</sup>, Duan Jingui<sup>1</sup>, Zhao Xiaojuan<sup>1</sup>, Tian Kanliang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The performance of microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) to stabilize aeolian sand soil was studied in order to providing a theoretical basis for MICP technology in stabilize aeolian sand soil and restoring ecology. [Methods] The microstructure of aeolian sand soil was analyzed by use of scanning electron microscopy and optical microscopy on an aeolian sand soil stabilized with MICP. The test analyzed the basic physical properties and water retention of stabilized specimens. [Results] The aeolian sand soil treated with MICP had calcium carbonate crystals generated between the aeolian sand particles that cemented the sand particles together and solidified the loose aeolian sand into a whole with a certain strength. As curing time increased, the thickness, dry density, and calcium carbonate content of cured aeolian sand gradually increased, the permeability coefficient gradually decreased, the stabilized thickness increased from 3.38 mm to 11.28 mm, the dry density increased from 1.61 g/cm<sup>3</sup> for the original sand to 2.05 g/cm<sup>3</sup>, the

收稿日期: 2022-07-21

修回日期: 2022-08-31

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄土丘陵沟壑区沟道及坡面治理工程的生态安全保障技术与示范”(2017YFC0504703, 2016YFE0203400)

第一作者: 姚姬璇(1997—), 女(汉族), 河北省张家口市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持工程。Email: yaojx1213@126.com。

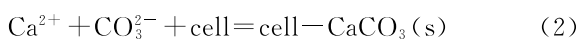
通讯作者: 田堪良(1968—), 男(汉族), 陕西省周至县人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土保持工程相关研究。Email: tiankanliang@163.com。

calcium carbonate content increased from 8.99% to 13.08%, and the permeability coefficient decreased from  $1.06 \times 10^{-3}$  cm/s for the original sand to  $2.35 \times 10^{-4}$  cm/s. When the number of curing treatments was not more than five times, the water retention rate increased with increasing number of curing treatments, and the water retention of the stabilized specimen increased. After more than five curing treatments, water retention decreased. [Conclusion] Aeolian sand soil stabilized by MICP technology can significantly improve the physical and mechanical properties and water retention of aeolian sand soil. Considering this stabilizing effect, water retention, and economics, the best stabilizing treatment time is three times. Thus, we can effectively prevent wind erosion, maintain soil moisture, and facilitate ecological restoration.

**Keywords:** microbial mineralization; MICP; aeolian sand soil; microstructure; water retention performance

风沙土多见于干旱半干旱地区<sup>[1-2]</sup>,由于其本身所含细砂颗粒居多,加之风沙区雨水不足<sup>[2]</sup>,风速较大<sup>[3]</sup>,极易被风吹蚀,发生沙尘暴等<sup>[4]</sup>一系列风沙灾害。不合理的人为扰动是荒漠化的迅速发展的主要原因<sup>[5]</sup>。中国地域辽阔,跨越经度范围大,因而荒漠化成因极为复杂,治理方法难度较高<sup>[6]</sup>。沙漠沿线的公路,铁路施工建设<sup>[7]</sup>都需考虑沙漠风蚀的危害。当前主要采取工程固沙、化学固沙以及生物固沙等措施来防治风蚀<sup>[8]</sup>。其中工程固沙措施只能作为一种临时防护措施,耐久性差<sup>[9]</sup>;化学固沙措施成本较高,对环境扰动大<sup>[10]</sup>;生物措施开展的周期较长,限制条件较多<sup>[11]</sup>。针对传统固沙方式存在的诸多局限性,本文采用了一种适应性强、成本低、高效快速且对环境友好的微生物固沙方法开展固沙试验。并对其固化效果及保水性能进行了探究。

微生物固沙方法基于微生物的矿化原理,向土体中加注巴氏芽孢杆菌菌液和胶结液(CaCl<sub>2</sub>和Urea按照1:1的比例均匀混合),此时细菌能够在碱性条件下,通过自身新陈代谢产生脲酶,从而将尿素分解为铵根离子(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)和碳酸根离子(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)。碳酸根离子(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)与环境存在大量的钙离子(Ca<sup>2+</sup>)结合,围绕细菌表面生成碳酸钙结晶,将松散砂粒固结为一个整体,从而达到防风固沙的目的,且在整个生物矿化的过程中,基本不产生毒性物质和其他副产品。



为了探明微生物诱导碳酸钙沉淀过程中的影响因素,Whiffin等<sup>[12]</sup>人采用注射法和分布灌浆法完成了砂柱的固结试验并测得其具有一定的抗剪强度。彭劼等<sup>[13]</sup>人通过控制反应温度来比较固化后土样中碳酸钙结晶的含量。Ahmad<sup>[14]</sup>提出硝酸钙和氯化钙同样可以作为钙源参与MICP过程。Sivakumar<sup>[15]</sup>将扇贝粉以不同比例添加进MICP试剂中,使得固化后的试样无侧限抗压强度提高了200%。当前关于微生物固化效果的研究主要集中于试样抗剪强度、渗透系数、干密度以及碳酸钙含量等指标,对于固化后试样的保水性能研究较少。而进一步将MICP技术应用于风蚀防治以及植被恢复需要考虑固化试样的保水性能。因此,本研究采用MICP技术对风沙土试样进行不同的次数的固化处理,通过保水性试验探究12d内固化样本的保水性能,结合其固化效果确定最优固化次数,以便为MICP技术在固化风沙土以及恢复生态等方面的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 风沙土材料 试验所用风沙土于2021年6月15日采自宁夏回族自治区中卫市境内沙坡头区的腾格里沙漠地理坐标为37°33'59"N,105°01'52"E,海拔1221.7m。根据GB/T50123-2019土工试验标准<sup>[16]</sup>以及相关试验研究<sup>[17]</sup>,确定风沙土样基本物理化学性质(表1)。

表 1 风沙土的基本物理化学性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of aeolian sand

天然含水率/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	土粒比重/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%	pH值	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
0.43	1.61	2.63	44	8.36	$1.08 \times 10^{-3}$

### 1.1.2 菌液及胶结液材料

(1) 菌液的制备及相关性质。本试验菌液制备时使用的菌种自美国菌种保藏中心选取巴氏芽孢杆

菌(*Sporosarcina pasteurii*),培养基为CASO AGAR培养基,制作该培养基需将20g尿素,15g酪蛋白胨,5g植物大豆蛋白胨,5gNaCl溶于1L蒸馏水中。

制备菌液时,先按照巴氏芽孢杆菌培养基制备要求,配制液体培养基。将培养基在 121 ℃ 条件下灭菌 20 min,结束后放置于无菌操作台冷却至室温并完成接种工作。将接种完成的液体培养基放入恒温摇床(30 ℃, 200 rpm)振荡培养 48 h。培养结束观察到原本透明澄清的培养基变得浑浊,且无其他杂菌生成,则细菌活化成功。进一步按照此方法完成细菌的扩繁培养,放置于 4 ℃ 冰箱储藏待用。在恒温振荡 48 h 的培养时间内,每间隔两个小时用紫外分光光度计(波长 600 nm)和 pH 计测量菌液的吸光度 OD600 值和 pH 值。由图 1 可知,随着时间的变化,细菌的 OD600 值和 pH 值呈现逐渐上升的趋势。在 2—10 h 内细菌繁殖速度最快,呈现对数增长的趋势。在 10—32 h 内,增长速度放缓。32 h 后逐渐稳定至无明显变化。最终测得菌液 pH 值为 9.18, OD600 值为 2.145。

(2) 胶结液的制备。本次试验选取的胶结液由氯化钙溶液和尿素溶液按照 1:1 摩尔比例混合后制成,其中氯化钙溶液为微生物矿化过程提供了钙源。根据吴雨瑶对风沙土的微生物固化及其抗风蚀试验研究<sup>[18]</sup>可知,胶结液浓度为 0.5 mol/L 时,既能节约成本,又保证了固化效果。故本试验采用的胶结液浓度为 0.5 mol/L。

## 1.2 试验方法

1.2.1 风沙土的固化试验 2021 年 10 月于西北农林科技大学水土保持研究所水土保持生态工程技术

研究中心将采回的风沙土样过筛(1 mm),去除其中的杂质。选取 20 cm(长)×15 cm(宽)×8 cm(高)的塑料容器,底部铺设 1 cm 厚的碎石,上部平铺一层无纺布,计算容器体积和所用风沙土重量,按照风沙土天然密度进行装填,平整表面(图 2)。根据微生物诱导碳酸钙沉淀的基本原理,首先将 50 ml 巴氏芽孢杆菌菌液均匀喷洒于风沙土表面,待 2 h 后菌液完全渗入,再采用相同方式注入等量 0.5 mol/L 的胶结液(CaCl<sub>2</sub> 和 Urea 按照 1:1 的比例均匀混合),菌液和胶结液加注完毕后静置 24 h。此为完整的一次固化过程。本试验共设置 6 组试样,其固化处理次数分别为 0,1,2,3,5,7。每组两个重复。

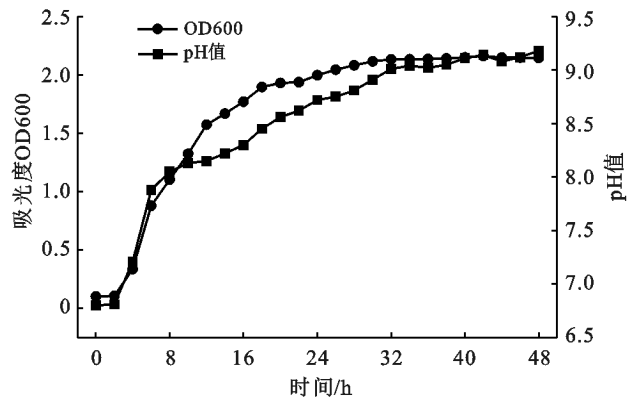


图 1 48 h 内菌液吸光度 OD600 和 pH 值的变化  
Fig.1 Changes of OD600 and pH value of bacterial solution within 48 h



固化试样称量



固化层厚度测量

图 2 风沙土固化试样

Fig.2 Solidified sample of aeolian sand

1.2.2 固化试样干密度及渗透系数的测定 采用蜡封法<sup>[19]</sup>测定不同固化次数处理后的试样块干密度。首先将固化后的风沙土切割成相近大小的试样块,在纯水中浸泡后放入烘箱,在 105 ℃ 下烘干 24 h。将烘干后的试样块称重,记为  $m_1$ 。用细线绑好试样将其没入蜡液中,保证其被包裹完全且表面没有气泡,称

重蜡封好的试样块重量,记为  $m_2$ 。再测定蜡封好的试样浸入纯水时的重量,记为  $m_3$ 。按照干密度测定公式计算固化试样干密度( $\rho$ )。

$$\rho = \frac{m_1}{\frac{(m_2 - m_3)}{\rho_1} - (m_2 - m_1)} \rho_2$$

式中:  $\rho_1$  为纯水的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_2$  为蜡的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

使用体积为  $100 \text{ cm}^3$  的环刀切取固化处理后的试样,并放入渗透仪中,将适量凡士林涂抹于渗透仪内壁中,保证圆柱状的试样与渗透仪紧密贴合且不透水。采用常水头试验方法<sup>[17]</sup>,使水流自上而下浸润试样,水头由低到高逐级增加,记录渗透量、经过时间等相关数据,按照渗透系数( $K$ )计算公式测定不同固化试样的渗透系数。

$$K = \frac{QL}{Aht}$$

式中: $Q$  为渗透水量( $\text{cm}^3$ );  $L$  为渗径( $\text{cm}$ );  $A$  为试样横截面积( $\text{cm}^2$ );  $h$  为常水头( $\text{cm}$ );  $t$  为经过时间( $\text{s}$ )。

1.2.3 固化试样的保水率测定 为了探究不同固化次数下,风沙土试样的保水性能,采用称重法对原沙及各个样本进行测定。取固化样本,将其烘干至水分不再变化时测重,计为  $m_1$ ;向固化试样面喷水,使其达到饱和状态时再次测重,计为  $m_2$ 。置于室内  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  恒温条件下,每  $24 \text{ h}$  进行一次称重测定。根据下式<sup>[20]</sup>测定其保水率。共测定 12 次。

$$R = \frac{m_1 - m}{m_2 - m} \times 100\%$$

式中: $m_1$  为风沙土总重( $\text{g}$ );  $m$  为风沙土干重( $\text{g}$ );  $m_2$  为风沙土达饱和含水量后风沙土总重。

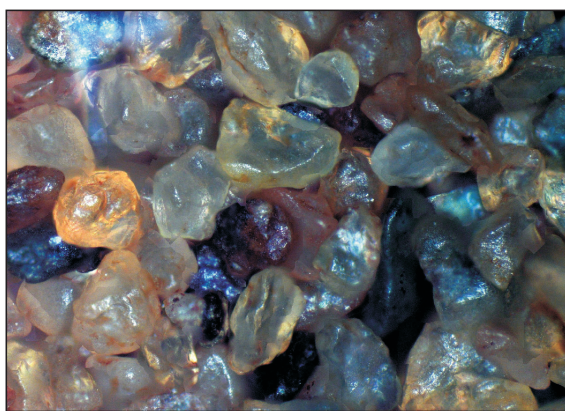
1.2.3 数据处理 采用 Excel 2016 办公软件对试验数据进行初步整理,使用 SPSS 数据分析软件对整理

好的数据进行差异性分析。并在 Origin 2018 软件中完成相关图片的绘制。

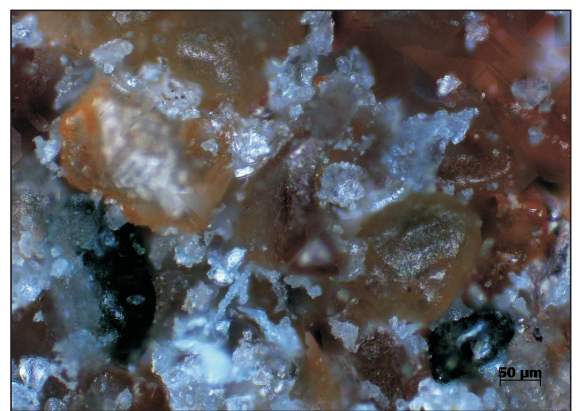
## 2 结果与分析

### 2.1 固化风沙土的微观结构分析

选取小块固化风沙土试样的自然破坏面,在光学显微镜(Axio scope A1)下放大 200 倍进行观察分析;再将小块试样进行喷金处理后,放入扫描电子显微镜(S-4800)内放大 500,5 000 倍,对固化试样的微观结构进行分析。图 3a 为风沙土试样固化前的光学显微镜图像<sup>[18]</sup>,可以看到风沙土颗粒与颗粒间孔隙较大,颗粒表面光滑且无明显的附着物。图 3b 为固化后试样放大 200 倍的图像,可在风沙土颗粒间明显观测到白色碳酸钙结晶生成,填补了原沙的孔隙,使得松散沙粒胶结在一起。图 4a 为固化后试样切块放大 500 倍的扫描电镜图像,可以观察到有大量细小颗粒生成,紧紧包裹在风沙土颗粒表面,起到连接沙颗粒的作用。图 4b 为固化后试样切块放大 5 000 倍的扫描电镜图像,可以更加直观地看出生成的细小颗粒为方解石晶体,且在晶体表面存在长条状的孔洞,这是由于在 MICP 过程中,生成的碳酸钙结晶越来越多,阻挡甚至切断了巴氏芽孢杆菌吸收生存物质的通道,导致细菌在一段时间后死亡,留下了大小不一的孔洞,一定程度上验证了微生物在 MICP 过程中充当了晶核的作用。



固化前



固化后

图 3 风沙土试样固化前后光学显微镜图像

Fig.3 Optical microscope images of aeolian sand samples before and after curing

### 2.2 固化风沙土的物理化学特性

2.2.1 风沙土的固化层厚度及碳酸钙含量 为了探究不同处理次数对固化效果的影响,将固化好的样本进行烘干处理,分别从中间切断,取切面,将下部松散砂粒掏空,取固化表层测量其厚度及重量。采用酸

洗法向各试样中加入过量的盐酸,使用滤纸过滤,用超纯水淋洗加酸后的固化风沙土试样,去除多余盐酸,将处理好的试样放入烘箱烘干,再次称重,前后两次试样质量的差值,即为碳酸钙含量(表 2)。由表 2 可知,随着固化次数的增加,菌液及胶结液入渗

高度逐渐增加,伴随着越来越多碳酸钙结晶的生成,固结深度随之增加,固化层厚度从 3.38 mm 增加到 11.28 mm。其中,固化 1 次和固化 2 次的厚度差别不大,固化 3~5 次的厚度增加幅度较大。固化处理

增加伴随着固化层厚度增加的同时,碳酸钙含量呈现相同的上升趋势,更进一步表明,微生物诱导碳酸钙沉淀的过程中,生成的碳酸钙越多,固结的沙颗粒越多。

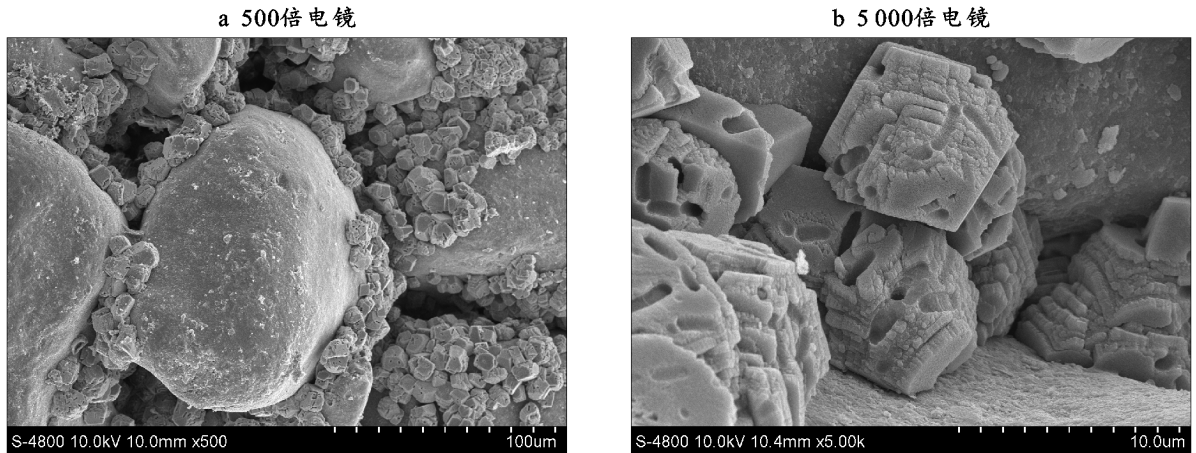


图 4 固化试样的电镜图片

Fig.4 Electron microscope image of solidified sample

表 2 固化试样的碳酸钙含量

Table 2 Calcium carbonate content of solidified samples

固化次数	固化层厚度/mm	固化层重量/g	酸溶解后沙重/g	碳酸钙重量/g	碳酸钙含量/%
1	3.37	3.56	3.24	0.32	8.99
2	3.42	3.72	3.36	0.36	9.68
3	4.88	5.67	5.11	0.56	9.87
5	8.94	10.84	9.71	1.13	10.42
7	11.28	14.45	12.56	1.89	13.08

2.2.2 固化风沙土的干密度及渗透系数 由图 5 可知,将原沙作为对照组进行比较,固化处理后的风沙土试样密度与固化处理次数之间呈现正相关。原沙的干密度为  $1.61 \text{ g/cm}^3$ ,固化试样的干密度随着处理次数的增加逐渐增大。最大干密度为  $2.05 \text{ g/cm}^3$ 。这表明经过 MICP 固化处理后的沙样,其干密度与原沙相比明显增大,这是由于随着固化次数的增加,菌液入渗深度增加,沙粒间形成了越来越多的碳酸钙结晶,松散的原沙变成了致密的整体。同时随着试样干密度的不断增大,大量的碳酸钙结晶不仅填充了固化试样表层的孔隙,其内部的沙颗粒也被牢牢胶结在一起,使得试样孔隙度不断减小,进一步导致固化试样的渗透系数逐渐减小。

### 2.3 固化风沙土的保水性能

#### 2.3.1 风沙土试样保水率随固化次数的变化规律

图 6 为固化风沙土试样在恒温条件下,保水率随着固化次数的变化曲线。由图 6 可知,固化处理试样的保水率从第 2 d 开始出现变化,第 3~9 d 变化较为

显著且固化处理 3 次与 5 次的样本保水率差异并不明显,而固化处理 7 次的样本保水率最低。第 11 和 12 d 固化 2 次后的试样保水率变化明显,处于较低水平。

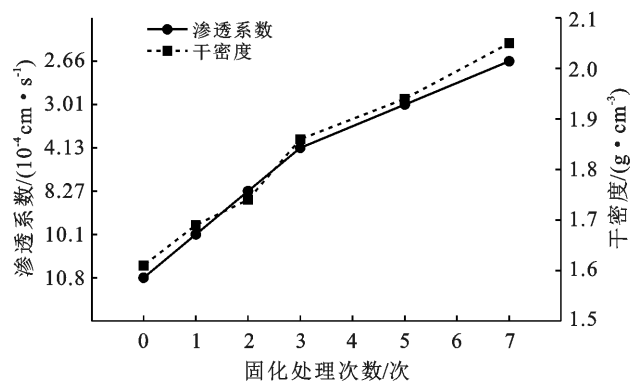


图 5 随着固化次数的增加固化试样渗透系数和干密度的变化趋势

Fig.5 Variation trend of permeability coefficient and dry density of solidified samples with increasing curing times

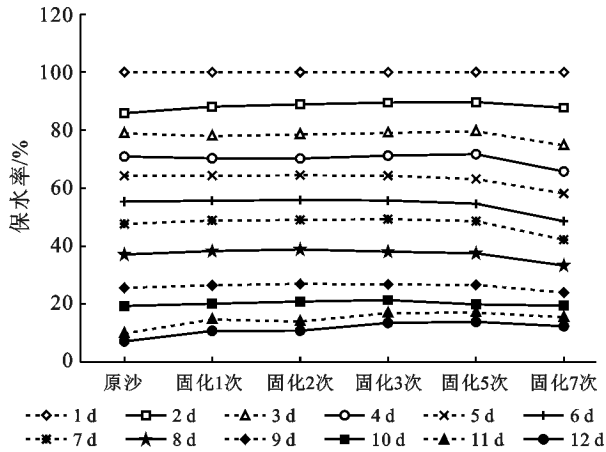


图 6 12 d 内固化试样保水率随固化次数的变化  
Fig.6 Variation of water retention of cured samples with curing times

图 7 为经过不同固化次数处理的风沙土试样在恒温条件下, 12 d 内的平均保水率对比曲线。由图 7 可知随着固化处理次数的增加, 固化层保水率逐渐增加且高于原沙的平均保水率。但固化 7 次的风沙土试样平均保水率显著低于原沙。

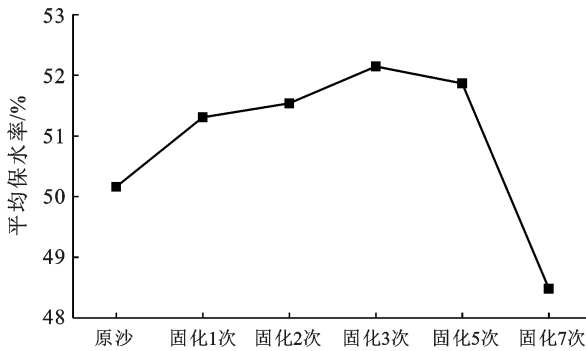


图 7 各风沙土试样固化 12 d 的平均保水率  
Fig.7 Average water retention rate of each aeolian sand sample for 12-day solidified

2.3.2 不同固化处理试样保水率随时间的变化规律  
图 8 为固化风沙土试样在恒温条件下, 12 d 内保水

率随时间的变化曲线。由图 8 可知随着蒸发时长的增加, 试样中的风沙土含水量均逐渐减少。处理 1~5 次的试样与原沙相比保水性能均有所增加, 其中, 处理 3 次与 5 次的固化试样在 12 d 内, 保水性能呈现出较好的效果。处理 1~2 次的固化试样在试验前期保水性较好, 后期较差。而处理 7 次的保水性最差, 甚至在 2~9 d 这一时间段保水率低于原沙试样。

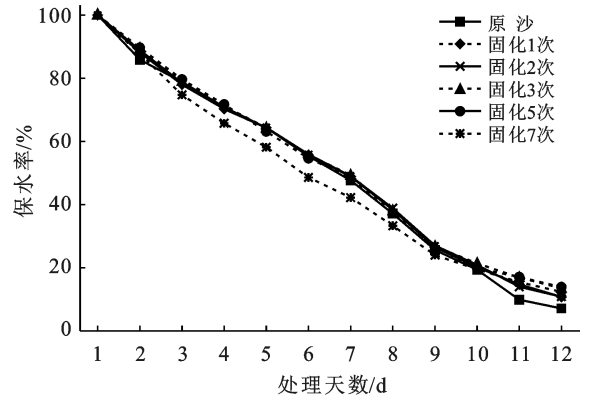
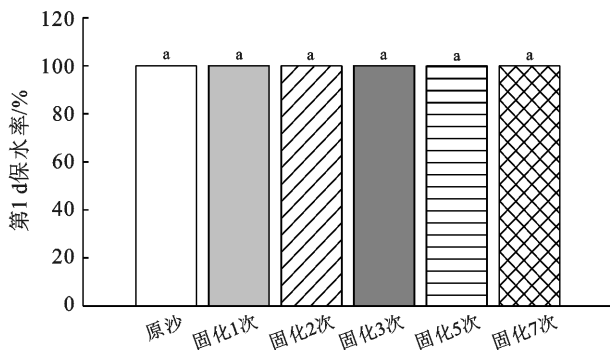


图 8 不同固化处理试样保水率随时间的变化曲线  
Fig.8 Variation curve of water retention rate of different curing treatment samples with time

2.3.3 不同固化处理试样保水率的时间分布特征  
由图 9 可知, 在保水性试验的第 2 d, 各试样保水率均有一定程度的下降。经过固化处理的风沙土试样保水率均高于原沙试样。其中固化处理 1 次和 7 次的试样保水率与原沙试样保水率无显著性差异。而固化处理 2, 3, 5 次的试样保水率与原沙呈现显著性差异。

由图 10 可知, 从保水试验第 3—8 d, 各风沙土试样保水率不断下降, 固化 7 次处理后的风沙土试样保水率均为最低, 其次是固化处理 2 次的试样。其中第 3—7 d, 固化处理 1, 2, 3, 5 次试样及原沙试样均与固化处理 7 次试样呈现出差异性, 第 8 d, 固化 2 次的风沙土试样保水率下降幅度较大, 与固化 7 次的试样保水率已无显著差异。



注: 不同小写字母表示不同固化处理试样保水率之间差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 9 第 1—2 d 不同固化处理试样保水率之间的差异

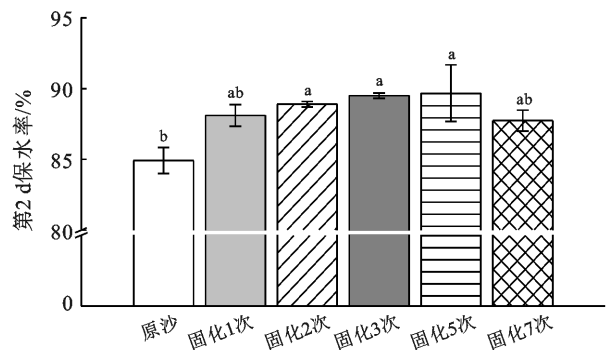


Fig.9 Differences in water retention rates of samples treated with different curing treatments during the 1st to 2nd days

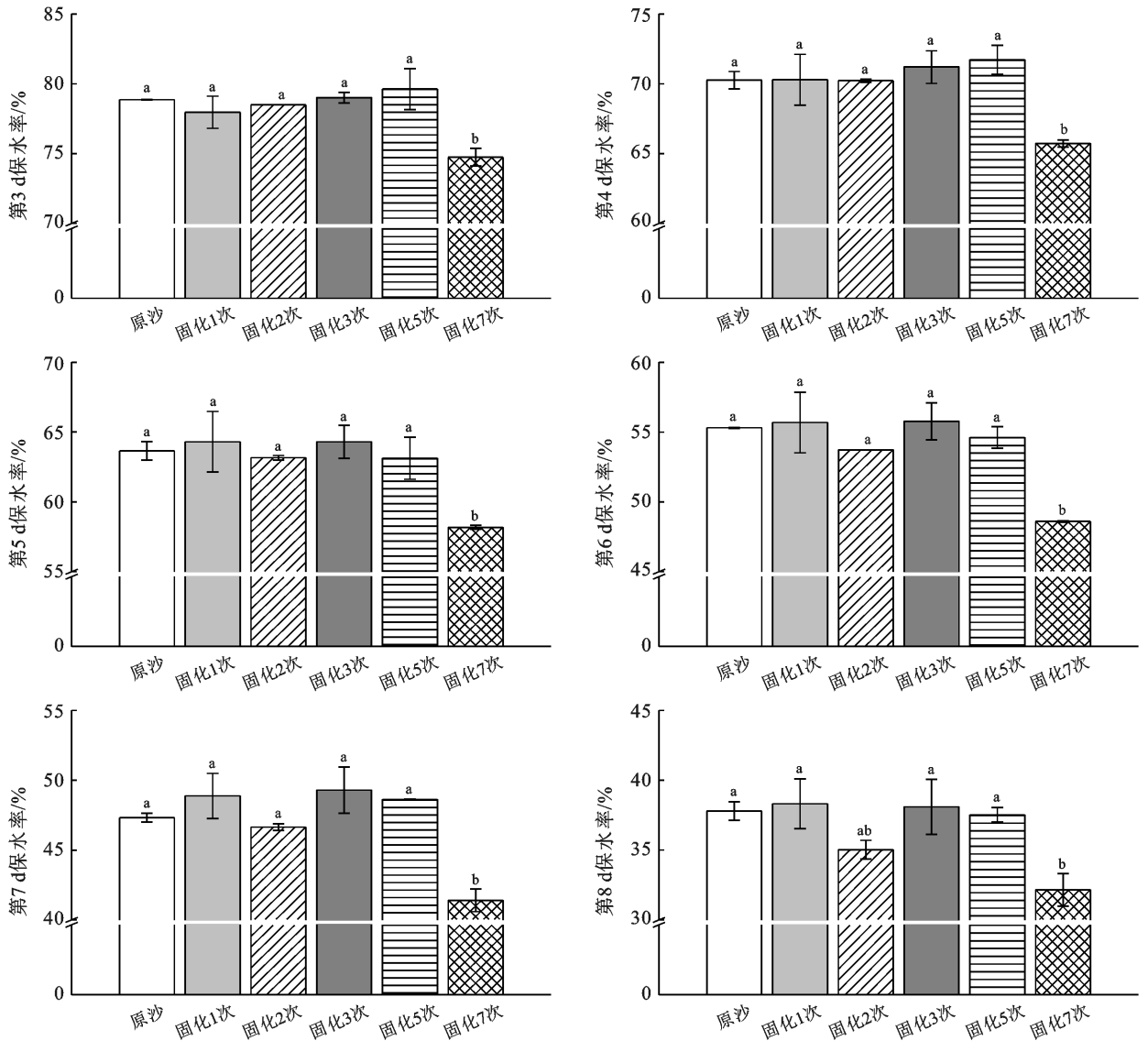


图 10 第 3—8 d 不同固化处理试样保水率之间的差异

Fig.10 Differences in water retention rates of samples treated with different curing treatments during the 3—8th days

图 11 为第 9—10 d 不同固化处理试样保水率之间的差异。由图 11 可知,在保水性试验的第 9 d 和第 10 d,原沙及各固化试样保水率之间均无显著性差

异。其中固化 1,3,5 次的试样保水率均能够维持在高于原沙的水平,而固化 2 次和固化 7 次的试样保水率略低于原沙。

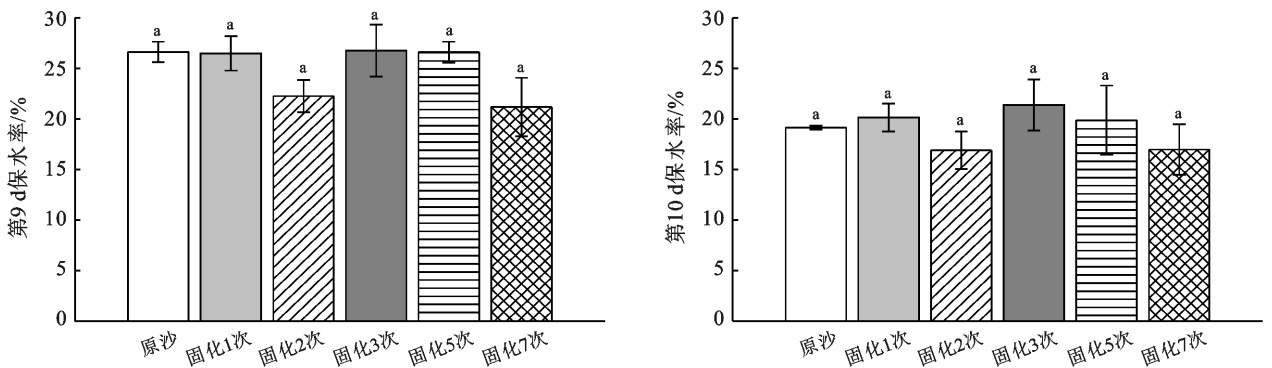


图 11 第 9—10 d 不同固化处理试样保水率之间的差异

Fig.11 Differences in water retention rates of samples treated with different curing treatments during the 9—10th days

由图 12 可知,在保水试验的第 11 d 和第 12 d, 固化处理后的风沙土试样保水率整体高于原沙保水率。固化 1,2,7 次的风沙土试样保水率与原沙试样

保水率相比均无显著的差异性,而固化 3 次及固化 5 次的风沙土试样保水率均与原沙试样保水率呈现出较大的差异。

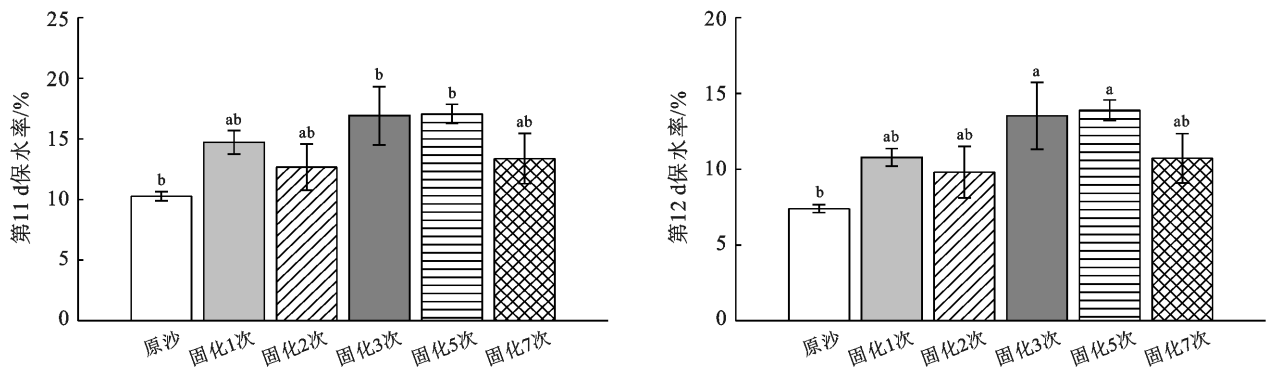


图 12 第 11—12 d 不同固化处理试样保水率之间的差异

Fig. 12 Differences in water retention rates of samples treated with different curing treatments during the 11—12ht days

综合 12 d 各试样的物理化学特性及保水率情况可知,在试验前期,固化处理的风沙土试样均呈现出较好的保水性能;随着固化天数的增加,在保水性试验中期,固化 2 次以及固化 7 次的风沙土试样所呈现出的保水性能较差,保水率一度低于原沙试样;在保水性试验后期,各试样间的保水率变化幅度较小,此时,经过固化处理的试样保水率仍旧高于原沙试样,且固化 3 次及固化 5 次的试样保水性能优于其他试样。无论是在保水率试验的哪一个阶段,固化 3 次和固化 5 次的试样保水率始终处于较高水平。这是由于土壤的保水性能与土壤团聚体<sup>[21]</sup>比例正相关,而风沙土所含黏粒物质较少且质地松散,因而其保水性能较差。在试验初期,固化次数较少,MICP 过程中生成的碳酸钙晶体主要填补了沙粒间的大空隙,同时使得沙粒胶结在一起<sup>[22]</sup>,有效减少了水分的散失。相关研究表明,碳酸钙作为许多保水剂<sup>[23]</sup>制备时添加的材料,其本身能够吸取并保留一些水分,因此当碳酸钙结晶适量存在于固化试样中时,既保留了一定的水流通路,又显著提升了风沙土的保水性能。但当固化次数不断增加时,固化风沙土的渗透系数逐渐减低,干密度显著增加,此时大量的碳酸钙结晶堵塞了水流通路<sup>[24]</sup>,使得固化试样保水性能变差。

### 3 讨论

从固化效果方面来说,当前微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术广泛应用于多种材料的裂隙修复<sup>[25-26]</sup>、重金属离子的矿化<sup>[27]</sup>以及土体加固中。相关研究发现通过改变钙源种类<sup>[28]</sup>、反应温度<sup>[13]</sup>以及灌浆方式<sup>[29]</sup>、混合多种改性物质<sup>[30-31]</sup>均可提升 MICP 加固风沙土的效果。而本研究采取的增加固化处理

次数的方法同样在一定程度上提升了风沙土试样的固化效果。这与王怀星等<sup>[32]</sup>人在固化黄土时得到的结果一致。在干旱及半干旱地区,荒漠化的成因较为复杂,但风沙土颗粒级配不良,区域雨水不足且风速较大均为主要因素。因此防治风蚀的关键在于固定流沙,经一系列风洞试验<sup>[18]</sup>表明,MICP 技术固化处理后的样本,在较高风速下仍然能够有效控制风蚀。同时在固化沙样的过程中,胶结液浓度和固化处理次数的增加<sup>[22-33]</sup>均能增加固化层的厚度。

在保水性能方面,当前各类高分子化合物<sup>[34-36]</sup>以及化学保水剂<sup>[21,37]</sup>的添加均能够提高风沙土的保水性能。而经过 MICP 技术固化后的风沙土试样,生成的污染物质较少,制备过程简洁,且更多依据的是环境中固有的成分,对环境扰动较小。从为期 12 d 的保水试验中可以发现,固化 3~5 次试样保水率在较长时间内都能够维持较高的水平。

综上,采用 MICP 技术固化后的风沙土,随着固化次数的增加,固化层厚度、碳酸钙含量以及干密度均显著增加,渗透系数随之逐渐降低。固化 1~5 次的试样不仅优化了风沙土的物理化学特性,同时将其保水率提升至较高的水平,其中固化 3 次和 5 次的试样效果最佳,但整体差别不显著。而固化 7 次的试样虽然显著提升了风沙土的理化性质,但过厚的固化层也使得风沙土密度显著增大,孔隙比过小,造成饱和和含水率降低,导热率增大,呈现出的保水效果不佳。因此,综合考虑固化效果和经济耗损,采用浓度为 0.5 mol/L 胶结液,固化处理 3 次为最佳方法。

### 4 结论

(1) MICP 技术固化风沙土的效果较为显著,该



方法能够在短期内使得松散沙颗粒固结成具有一定力学性质的整体。

(2) 随着固化次数的增加,风沙土试样固化层的厚度、碳酸钙含量及干密度逐渐增加,渗透系数逐渐降低。

(3) 固化风沙土保水率随着固化次数的增加而增加,处理 3 次与 5 次的试样保水率差别不大。当固化次数超过 5 次时,风沙土孔隙比过小,水分蒸散加快,保水率开始下降,甚至一度低于原沙。基于固化成本及保水性能综合考虑,浓度为 0.5 mol/L 的胶结液处理 3 次为最佳的固化处理方法。

(4) MICP 技术固化后的风沙土不仅具有一定的抗风蚀效果,同时能够有效保持沙地中的水分,为后续生态修复提供良好的环境条件。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Yuanyuan Z, Jianguo W, Chunyang H, et al. Linking wind erosion to ecosystem services in drylands: A landscape ecological approach [J]. *Landscape Ecology*, 2017, 32(12): 2399-2417.
- [2] Wang Tao, Zhu Zhenda, Wu Wei. Sandy desertification in the north of China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2002, 45(1): 23-34.
- [3] 韩梅, 郭晗, 韩柏, 等. 鄂尔多斯地区毛乌素沙地荒漠化形成因素及治理措施 [J]. *农业与技术*, 2021, 41(18): 111-115.
- [4] 杭利军, 童淑敏. 浅论干旱、半干旱地区土壤风蚀发生机理及防治措施 [J]. *内蒙古林业科技*, 2003(2): 49-50.
- [5] Wang T. Aeolian desertification and its control in Northern China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2014, 2(4): 34-41.
- [6] 吴波, 慈龙骏. 五十年代以来毛乌素沙地荒漠化扩展及其原因 [J]. *第四纪研究*, 1998(2): 165-172.
- [7] 顿耀权, 屈建军, 康文岩, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系研究综述 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 66-74.
- [8] 邓友生, 彭程谱, 刘俊聪, 等. 沙漠公路灾害防治方法及其工程应用 [J]. *公路*, 2021, 66(6): 345-351.
- [9] 居炎飞, 邱明喜, 朱纪康, 等. 我国固沙材料研究进展与应用前景 [J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(10): 138-144.
- [10] 李元元, 王占礼. 聚丙烯酰胺(PAM)防治土壤风蚀的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 1002-1008.
- [11] 唐艳, 刘连友, 屈志强, 等. 植物阻沙能力研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 43-48.
- [12] Victoria S W, Leon A V P, Marien P H. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [13] 彭劫, 冯清鹏, 孙益成. 温度对微生物诱导碳酸钙沉积加固砂土的影响研究 [J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(6): 1048-1055.
- [14] Fahmi A, Katebi H, Hajialilue B M, et al. Microbial sand stabilization using corn steep liquor culture media and industrial calcium reagents in cementation solutions [J]. *Industrial Biotechnology*, 2018, 14(5): 270-275.
- [15] Gowthaman S, Chen M, Nakashima K, et al. Effect of Scallop powder addition on micp treatment of amorphous peat [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9(6): 1-13.
- [16] 中华人民共和国水利部. GB/T50123-2019 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [17] 吴雨瑶. 风沙土的微生物固化及其抗风蚀试验研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [18] Kanliang T, Yuyao W, Huili Z, et al. Increasing wind erosion resistance of aeolian sandy soil by microbially induced calcium carbonate precipitation [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(12): 4271-4281.
- [19] 彭新华, 张斌, 李江涛, 等. 对多孔介质物体孔隙度一蜡封法改进的探讨: 以土壤团聚体为例 [J]. *土壤通报*, 2003, 34(1): 19-20.
- [20] 宫辛玲, 高军侠, 尹光华, 等. 4 种不同类型土壤保水剂保水性能的比较 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27(4): 652-656.
- [21] 汪亚峰, 李茂松, 宋吉青, 等. 保水剂对土壤体积膨胀率及土壤团聚体影响研究 [J]. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1022-1025.
- [22] 李多. 微生物诱导碳酸钙沉淀固化沙漠风积砂的研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [23] 陈利轩. 碳酸钙改性高吸水树脂的合成及其性能研究 [D]. 甘肃 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [24] 李涛, 高颖, 张嘉睿, 等. 陕北保水采煤背景下 MICP 再造隔水土层的试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 2984-2994.
- [25] 刘小军, 部鑫, 潘超钊. MICP 固化土遗址裂隙的剪切强度试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2022, 55(4): 88-94.
- [26] 支永艳, 邓华锋, 肖瑶, 等. 微生物灌浆加固裂隙岩体的渗流特性分析 [J]. *岩土力学*, 2019, (A01): 237-244.
- [27] Zhang Junke, Su Peidong, Li Lin. Bioremediation of stainless steel pickling sludge through microbially induced carbonate precipitation [J]. *Chemosphere*, 2022, 298: 1-8.
- [28] 王维大, 秦思远, 肖宇, 等. 不同钙源对 MICP 固化氰化尾渣的影响 [J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(7): 131-137.
- [29] 葛鑫. 不同灌浆方式对 MICP 固化沙漠风积砂的影响研究 [D]. 江苏 南京: 东南大学, 2021.
- [30] 王瑞, 泮晓华, 唐朝生, 等. MICP 联合纤维加筋改性钙质砂的动力特性研究 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(10): 2643-2654.

- 还林树种生态系统碳储量和固碳潜力[J].生态学报, 2011, 31(15): 4277-4286.
- [34] 黄劲松, 邸雪颖. 帽儿山地区 6 种灌木地上生物量估算模型[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(5): 54-57.
- [35] 刘彦春. 川西亚高山主要森林类型恢复过程中地上生物量、生产力变化研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [36] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区 6 种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7842-7851.
- [37] 李刚, 赵祥, 刘碧荣. 晋北 4 种灌木地上生物量预测模型的构建[J]. 林业资源管理, 2014(1): 71-76.
- [38] 范玮熠. 子午岭森林群落特征及主要建群种更新机制[D]. 陕西 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [39] 胡建忠, 郑佳丽, 张春霞. 黄河上游退耕地植被组成、结构及水土保持功能评价[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 42-50.
- [40] 耿冰瑾, 王舒菲, 曹银贵, 等. 山西朔露天矿区不同年限复垦地植被重建特征对比分析[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3400-3419.
- [41] 程红梅, 田锴, 田兴军. 大蜀山孤岛状山体植被演替阶段物种多样性变化规律[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1830-1837.
- [42] 宋变兰. 黄土丘陵区两典型森林生态系统生物量、碳氮库和碳固存特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.
- [43] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 黄土高原子午岭森林碳储量与碳密度研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 123-126, 131.
- [44] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 527-537.
- [45] 王乃江. 陕西黄土高原黄龙林区森林经营及恢复机理研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [46] 薛立, 杨鹏. 森林生物量研究综述[J]. 福建林学院学报, 2004, 24(3): 283-288.
- [47] 何艺玲, 傅懋毅. 人工林林下植被的研究现状[J]. 林业科学研究, 2002(6): 727-733.
- [48] 王世雄, 王孝安, 李国庆, 等. 陕西子午岭植物群落演替过程中物种多样性变化与环境解释[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1638-1647.
- [49] Rothery E, Ford D, Cannell M G R. Competition within stands of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta* [J]. *Annals of Botany*, 1984, 53(3): 349-362.
- [50] 王建国, 樊军, 王全九, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区植被地上生物量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 556-564.
- [51] Prakash R, Vineeta, Gopal S, et al. Carbon storage of single tree and mixed tree dominant species stands in a reserve forest: Case study of the Eastern Sub-Himalayan Region of India[J]. *Land*, 2021, 10(4): 1-17.
- [52] 白雪娟, 曾全超, 安韶山, 等. 子午岭人工林土壤微生物生物量及酶活性[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2695-2704.
- [53] Arshad Ali, Yan E R, Scott X, et al. Community-weighted mean of leaf traits and divergence of wood traits predict aboveground biomass in secondary subtropical forests [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 654-662.
- [54] 许小明, 田起隆, 孙景梅, 等. 子午岭地区植被演替的土壤碳汇效应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 159-165.
- [55] 潘英杰, 何志瑞, 刘玉林, 等. 黄土高原天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳动态变化[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5195-5203.

(上接第 112 页)

- [31] 林泓民, 卫仁杰, 李亮亮, 等. 黄原胶改进 MICP 加固效果的试验研究[J]. 河南科学, 2022, 40(4): 618-627.
- [32] 王怀星. 黄土的微生物固化及抗侵蚀性能试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [33] 张世参, 骆亚生, 田堪良, 等. 风积沙的微生物固化试验研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(10): 144-149.
- [34] 陶玲, 杨欣, 吕莹, 等. 凹凸棒基高分子固沙材料的表征及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2): 547-552.
- [35] 陶艳, 苏冰琴, 张弛, 等. CMC-g-AA 对掺污泥泡沫混凝土吸水保水性能的影响[J]. 现代化工, 2020, 40(S1): 151-156.
- [36] 渠永平, 张增志. 十六烷基三甲基氯化铵改性黏土固沙保水性能[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 109-115.
- [37] 姜雄, 铁生年. 添加剂对石膏基固沙材料保水性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(6): 1303-1308.