



# 微生物矿化与植物共同作用下荒漠风积沙固化试验研究

孔剑捷, 陈 萍, 黄顺心, 李 庆, 徐 辉

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 利用巴氏芽孢八叠球菌和沙蒿、沙打旺开展荒漠风积沙固化试验以及固化沙样风蚀试验, 探讨微生物诱导碳酸盐沉淀(Microbial induced carbonate precipitation, MICP)技术固沙、植物固沙及两者共同作用固沙效果, 以获得适宜于荒漠风积沙的微生物种类、植物种类及胶结液浓度范围。结果表明: 利用 MICP 技术进行荒漠风积沙固化是可行的, 当胶结液浓度为 0.15 mol/L, 温度为 20 ℃, 菌液 OD<sub>600</sub> = 0.6 时, MICP 技术可提高荒漠风积沙的抗风力侵蚀能力约为 39.83%; 利用 MICP 技术结合荒漠植物可以进一步提高固沙效率, 提高荒漠风积沙的抗风力侵蚀能力约为 44.08%; 沙蒿具有一定的耐碱性, 微生物胶结液浓度约为 0.15 mol/L 时, 沙蒿存活率较高且固沙效果较好。研究结果为解决土地荒漠化问题提供了新的思路。

**关键词:** 微生物诱导碳酸盐沉淀; 荒漠植物; 固沙; 风蚀试验

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)09-0688-09

## Experimental investigation on solidifying the desert aeolian sand under combined action of MICP and vegetation

KONG Jianjie, CHEN Ping, HUANG Shunxin, LI Qing, XU Hui

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The sand-stabilization experiment and the wind erosion experiment were carried out by the employment of *Sporosarcina pasteurii* combined with *Artemisia desertorum* and *Astragalus adsurgens* to discuss the sand-stabilization effect of sand stabilization by microbial induced carbonate precipitation (MICP), sand stabilization by vegetation and the combined action of them, and the appropriate type of bacteria, vegetation species and the concentration scope of consolidating fluid suitable for the desert aeolian sand were finally gained. The results showed that MICP technique is feasible for stabilizing desert sand. MICP technique could increase wind erosion resistance capacity of desert aeolian sand by about 39.83% under the following conditions: concentration of consolidating fluid 0.15 mol/L, temperature 20 ℃, and bacterial solution OD<sub>600</sub> = 0.6. The resistance of wind erosion could further improve by 44.08% when MICP was combined with desert vegetation. *A. desertorum* has certain alkali resistance. When the concentration of consolidating fluid was about 0.15 mol/L, the survival rate of *A. desertorum* was higher and the effect of sand fixation was better. The results provide a new idea for solving the problem of land desertification.

**Key words:** microbial induced carbonate precipitation; desert vegetation; sand stabilization; wind erosion experiment

收稿日期: 2019-04-21 网络出版日期: 2019-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578508); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201710338013)

作者简介: 孔剑捷(1997-), 男, 浙江金华人, 本科生, 主要从事环境土工方面的研究。

通信作者: 徐 辉, E-mail: xuhui@zstu.edu.cn

## 0 引言

随着人类社会的不断发展,因各项生产活动对生态环境保护的忽视,土地荒漠化现象不断加重,中国受风蚀影响土地面积超过国土面积的一半<sup>[1]</sup>。在中国的西北地区,受各种季风带影响出现的常年大风天气,具有风速大、影响范围广、持续时间长的特点。风蚀环境是草地荒漠化、土壤沙化进程加剧的一个重要原因<sup>[1]</sup>。随着中国“一带一路”建设和西部大开发战略的推进,对固沙新工艺和新材料的需求也越来越紧迫<sup>[2]</sup>。

传统的固沙技术主要包括工程固沙技术、生物固沙技术、化学固沙技术及综合固沙技术<sup>[3-6]</sup>。工程固沙技术以麦草、稻草、尼龙网<sup>[7]</sup>和高密度聚乙烯<sup>[5]</sup>等材料在沙丘上设置障碍物以达到防风固沙的效果。工程固沙在布设后的前两年防风固沙效果最好,但作用效果随时间递减较快,且维护成本较高,因此采用工程固沙只是暂时性的措施<sup>[3]</sup>。化学固沙是指利用化学胶结材料在流动沙丘表面形成覆盖层,把松散的沙粒聚集成一个固结层,从而达到防沙治沙的目的<sup>[8]</sup>。化学固沙收效快,但成本高昂,且化学固结层常因强度不够高被风沙流掏蚀<sup>[9]</sup>。生物固沙技术主要通过退耕还林还草、围栏封育等途径扩大绿色植被面积,从而增加沙丘表面粗糙度和降低地表风速,最终减少沙层被侵蚀<sup>[3]</sup>。沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng. Syst. Veg)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall)是中国西北、华北和东北荒漠、半荒漠地区的主要标志性植物,为固沙先锋植物<sup>[10]</sup>。沙蒿能够适应干旱的沙地环境,具有耐沙埋、耐贫瘠、抗风蚀、分枝和结实性良好等特性,在荒漠生态系统的重建与恢复中起着非常重要的作用<sup>[10]</sup>。沙打旺有较强的防风固沙能力,因此,在风沙危害严重的地区,如黄土高原、黄河故道等,可种植沙打旺来减少风沙危害、改良土壤和防止水土流失,从而改善生态环境<sup>[11]</sup>。由于荒漠地区气候环境恶劣,植物的存活率较低,植物幼苗死亡率高,生长周期长等原因,荒漠地区的整体治理效果并未得到很大的改善。

现阶段的各类固沙技术均有明显的优缺点以及对土壤、水文等生态要素的忽视,在很大程度上限制了防沙治沙的可持续性,所以需要转变单纯以固沙为主要目标的传统治沙理念,积极解决传统措施所存在的不可持续问题,为沙化土地持续恢复和生态环境的持续改善提供有效途径<sup>[1]</sup>。因此,找到一种

经济、高效、环保、对植物生长无危害的荒漠化治理措施显得十分必要。

基于微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbial induced carbonate precipitation, MICP)的土壤固化技术是一种全新的技术,具有反应速度快、效率高、环境友好等特点<sup>[12]</sup>,在土壤改良、土体防渗、混凝土裂缝修复等领域进行了试验研究,且取得较好效果<sup>[13]</sup>。将该技术应用用于荒漠风积沙的表层固化,被认为是最可能首先实现的一项应用研究<sup>[14]</sup>。

国内外关于 MICP 固化技术的研究已有近三十年,对该技术的研究与应用日渐成熟。Boquet 等<sup>[15]</sup>发现巴氏芽孢八叠球菌等细菌可以诱导生成碳酸盐沉淀,其中巴氏芽孢八叠球菌具有高产高活性脲酶。随后国内外不断有研究进行证实,并且对它的应用做研究与分析<sup>[16-18]</sup>。此外,还有一系列对生物固化控制侵蚀效果、影响因素等实验分析,如不稳定土的侵蚀控制试验,沉淀速率的影响因素等<sup>[19-20]</sup>。许朝阳等<sup>[21]</sup>对土体中的颗粒形态、连接形式等也做了观测,发现土样中的粗颗粒表面及空隙中都存在碳酸钙晶体颗粒。Qian 等<sup>[22]</sup>研究发现,在松散沙体中加入菌液,并注入一定量钙盐后,在松散沙颗粒表面及颗粒之间形成了一定量  $\text{CaCO}_3$  晶体,增大了砂的颗粒粒径,并且随  $\text{CaCO}_3$  沉积量的增加,相邻松散颗粒被连接团聚起来,形成了具有一定强度的整体。Burbank 等<sup>[23]</sup>对 MICP 技术处理后的沙土试样进行三轴剪切试验,结果表明,利用 MICP 技术能够有效粘结沙土。张莉<sup>[24]</sup>在利用 MICP 技术对粉土性能改性方面进行了研究,发现 MICP 技术显著改善了粉土的力学性能。沈吉云<sup>[25]</sup>制备了长 160 mm 的 MICP 砂柱,测得沙柱的单轴抗压强度达到 1.38 MPa。钱春香等<sup>[26]</sup>利用 MICP 技术制备了长 60 mm,直径 30 mm 的沙柱,测得在 20 d 龄期下沙柱的单轴抗压强度达到 12 MPa。

目前国内外利用 MICP 技术进行沙土流失防治的研究较少。高玉峰等<sup>[27]</sup>利用 MICP 技术进行防风固沙的试验研究表明,当温度为 20 °C、处理液浓度为 0.10 mol/L,菌液的吸光度( $\text{OD}_{600}$ )为 0.60 时,在沙样表面形成硬壳层,所加固的试样具有良好的抗风力侵蚀能力。但与化学固沙形成的硬壳层相似,在恶劣气候环境下会被风沙流掏蚀或掩埋,只可作为植物固沙的过渡性措施,提高早期植物幼苗的存活率,辅助植物固沙来改善土壤条件,以达到可持续的防风固沙效果。因此,若能够将 MICP 和植物固沙技术联合起来对荒漠化沙土进行固化处理,将

具有较大的学术研究价值和工程应用前景。但是,目前关于这方面的研究较为缺乏。

为了将 MICP 技术与植物固沙技术联合应用于荒漠风积沙的表层固化,需要研究较优的微生物和植物种类、适宜的微生物胶结液浓度范围等。本文主要开展下研究工作:a)微生物胶结液浓度对植物生长状况的影响试验,确定适宜沙蒿生长的微生物胶结液浓度;b)植物生长龄期对固沙效果的影响试验,并确定较优的固沙植物类型;c)沙蒿与 MICP 共同作用下的固沙效果试验,并分析联合固沙机理。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用的荒漠风积沙采自甘肃省武威市民勤县荒漠地区。根据《GB/T 50123—1999 土工试验标准》,测得荒漠风积沙的基本物理性质。荒漠风积沙的比重为 2.58,与一般沙土接近;天然含水量较低,为 0.43%;曲率系数  $C_u$  和不均匀系数  $C_w$  分别为 0.85 和 1.57,属于级配不良土;孔隙度为 0.45 时,渗透系数为  $1.06 \times 10^{-3}$  cm/s。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 菌种选择及菌液制备

巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*)具有生命力强、产脲酶能力高、环境适应性好等特点<sup>[28-32]</sup>,是目前 MICP 领域中固化沙土最常用的菌种之一。本文选用巴氏芽孢八叠球菌,细菌数量可以通过测量菌液的吸光度(比浊法)来表示,具体测定方法参考文献<sup>[33]</sup>。

#### 1.2.2 微生物胶结液制备

胶结液溶质由 Urea 和  $\text{CaCl}_2$  组成,其中 Urea 为微生物生长提供碳源和氮源, $\text{CaCl}_2$  为 MICP 过程提供钙源。通过分析 MICP 化学过程反应原理,采用  $n_{\text{CaCl}_2} : n_{\text{Urea}} = 1:1$ ,即加入的溶质 Urea 和  $\text{CaCl}_2$  物质的量应相等,在喷洒时将等体积等浓度的两种溶液均匀混合。

#### 1.2.3 荒漠植物选择

荒漠地区气候条件恶劣,适合在荒漠地区生长的植物种类较少,生长周期长,且植物成活率较低(小于 30%),本文选取荒漠地区常见的沙蒿与沙打旺作为材料进行固化实验。

#### 1.2.4 胶结液浓度对植物幼苗存活率影响试验

为了获得较适宜荒漠植物生长的微生物胶结液浓度,对胶结液浓度对荒漠植物存活率的影响进行分析。选取沙蒿和沙打旺作为研究对象,共设置 10

个组别,相应的胶结液浓度为 0~0.45 mol/L,如表 1 所示。试验步骤如下:a)称取 7 kg 沙样置于模具中,所用模具尺寸为:长×宽×高=36 cm×27 cm×6 cm;b)开沟 1 cm 深,选取新鲜、水分饱满的当年种子进行播种,撒种行距为 3~5 cm;c)覆上 1 cm 厚的荒漠风积沙,整平沙面,充分灌溉;d)对幼苗每隔三天喷洒一次对应浓度的胶结液 150 mL;e)将植物培养 30 d,观察并记录各组幼苗的存活情况,分析计算存活率。

表 1 不同胶结液浓度植物分组

植物类型	胶结液浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )
沙打旺	0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45
沙蒿	0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45

### 1.2.5 龄期对荒漠植物固沙效果的影响试验

为了探究植物龄期对植物固沙效果的影响,选用不同龄期的沙蒿与沙打旺开展了风蚀试验,试验工况如表 2 所示。2-1—2-3 为对照组,无植物,与实验组放在相同的实验条件下,探究荒漠风积沙在自然环境经过 30、60 d 和 90 d 后的表面强度变化;2-4—2-6 采用 30、60 d 和 90 d 龄期的沙打旺固化风积沙,探究不同龄期的沙打旺对荒漠风积沙固化效果的影响;2-7—2-9 采用 30、60 d 和 90 d 龄期的沙打旺固化风积沙,探究不同龄期的沙蒿对荒漠风积沙固化效果的影响。

试验步骤如下:a)称取六份沙样置于模具中,每份 7 kg;b)每隔 30 d 播种一次,在相同且适宜的环境下培育幼苗,得到龄期分别为 30、60 d 和 90 d 的沙蒿、沙打旺幼苗共六组;c)对各组沙样开展风蚀试验:通过风速仪调节风速为 15 m/s,每组试样在凹槽中持续的时间为 1 min,分别记录试验前后的质量,差值即为试样在风蚀试验中的质量损失量(详细描述见 1.2.7)。

表 2 不同龄期荒漠植物固沙效果试验工况

试验组	植物类型	植物龄期/d
2-1	无植物	30*
2-2	无植物	60*
2-3	无植物	90*
2-4	沙打旺	30
2-5	沙打旺	60
2-6	沙打旺	90
2-7	沙蒿	30
2-8	沙蒿	60
2-9	沙蒿	90

注:\*对照组,试样在与试验组相同环境下静置 30、60 d 和 90 d。

### 1.2.6 MICP 联合植物固化荒漠风积沙试验

为了分析 MICP 联合植物方式对荒漠风积沙的固化效果,开展了 4 组不同固化方式的试验,如表 3 所示。3-1 试验组为对照组,只喷洒无菌溶液,以排除无菌培养液对沙土固化强度提高带来的影响;3-2 试验组对荒漠风积沙喷洒菌液和胶结液,以探究 MICP 技术的固化效果;3-3 试验组栽种有 60 d 龄期沙蒿,喷洒胶结液和无菌培养液,探究沙蒿的固沙效果;3-4 试验组栽种有 60 d 龄期的沙蒿,同时喷洒菌液和胶结液,探究 MICP 技术与荒漠植物的共同固沙效果。

表 3 荒漠风积沙固化实验工况

试验组	固化方式
3-1	无菌培养液
3-2	菌液+胶结液
3-3	60 d 龄期沙蒿+胶结液+无菌培养液
3-4	60 d 龄期沙蒿+菌液+胶结液

具体试验操作过程如下:a)称取 2 份沙样置于沙盘,每份 7 kg,通过振动压实,使沙样高度保持在 5 cm 左右,此时沙样密度为  $1.620 \text{ g/cm}^3$ ;b)将龄期为 60 d 的沙蒿幼苗栽种在沙盘上,作为试验组 3 和 4;c)用量筒量取 42 mL 细菌溶液,利用手持式喷壶均匀喷洒在试验组 2 和 4 的沙土表面,以同样方法对试验组 1 和 3 喷洒等量无菌培养液;d)喷洒菌液(或无菌培养液)结束后 30 min,用量筒量取 50 mL 胶结液,并均匀喷洒在试验组 2、3 和 4 的沙土表面;e)此后每隔 1.5 h,待沙表面水分部分蒸发后,重复以上两个步骤,总计两次,即每个试样共计喷洒菌液(或无菌培养液)125 mL,胶结液 150 mL;f)之后每隔 9 h,分三次再次补充喷洒胶结液 150 mL;g)待菌液和胶结液全部喷洒结束后,将所有试样置于干燥、通风环境中养护 5 d。每组试验平行开展三次。

### 1.2.7 风力侵蚀试验

将仪器整体固定在试验台上(图 1),调整鼓风机高度及角度,将其出风口置于高口处,以  $15^\circ$  的角度斜向下对准试样表面,并在模具与鼓风机(功率为 1100 W)之间留有 5 cm 的空隙,使风均匀地接触沙面,更真实地模拟荒漠环境中的风蚀活动。由于荒漠地区的平均风速为  $7 \text{ m/s}$ <sup>[34]</sup>,为使实验效果更加明显,本文采用模拟风速为  $15 \text{ m/s}$ 。

首先将养护后的试样平放于装置凹槽内,称量原始沙盘的质量,记作  $m_1$ ;然后利用鼓风机将风速调至  $15 \text{ m/s}$ ,持续对沙表面吹风 1 min,称量风蚀试验结束后的沙盘质量,记作  $m_2$ 。荒漠风积沙流失率

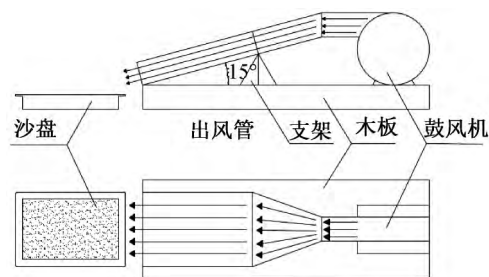


图 1 风蚀试验装置示意图

$R_1$  表示试样在风蚀试验前后质量之差与初始质量的比值,即  $R_1 = (m_1 - m_2) / m_1$ 。

## 2 结果及分析

### 2.1 胶结液浓度对两种荒漠植物生长存活的影响

图 2 为不同胶结液浓度下沙蒿和沙打旺幼苗的存活率。由图 2 可知,当胶结液浓度为  $0 \text{ mol/L}$  时,沙蒿幼苗和沙打旺幼苗的存活率较高,分别为  $79.12\%$  和  $82.01\%$ 。当胶结液浓度从  $0.05 \text{ mol/L}$  依次增加至  $0.45 \text{ mol/L}$  时,沙蒿幼苗的存活率自  $76.88\%$  上升至  $81.21\%$  之后逐渐下降至  $1.81\%$ 。胶结液浓度为  $0.10 \text{ mol/L}$  时,沙蒿幼苗的存活率最高( $81.21\%$ ),相对初始状态( $79.12\%$ )提高了  $2.09\%$ 。当胶结液浓度从  $0.05 \text{ mol/L}$  依次增加至  $0.45 \text{ mol/L}$  时,沙打旺幼苗的存活率自  $84.91\%$  逐渐下降至  $0.12\%$ 。其中,胶结液浓度为  $0.05 \text{ mol/L}$  时,沙蒿幼苗的存活率最高( $84.91\%$ ),相对初始状态( $82.01\%$ )提高  $2.90\%$ 。

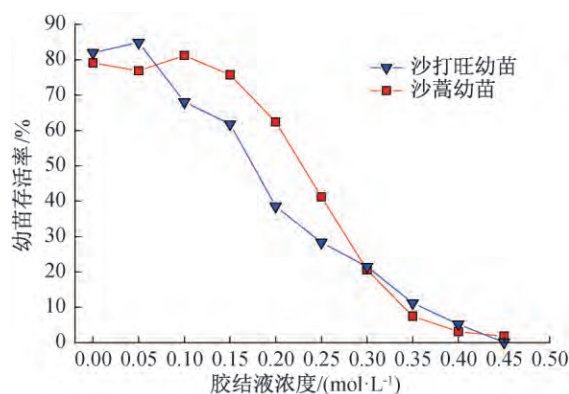


图 2 不同胶结液浓度下荒漠植物幼苗的存活率

上述试验结果表明:当胶结液浓度较低时,对荒漠植物生长具有一定的促进作用;当胶结液浓度超过一定值后,则会对荒漠植物生长产生一定的抑制作用。胶结液浓度较低时,其中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  等离子能够作为植物生长所必需的营养物质<sup>[35]</sup>。当植物根系所处的环境有较高的离子浓度时,植物会分泌并产生渗透调节物质如甘油、脯氨



酸、可溶性糖、甜菜碱、多胺等来调节植物细胞内外的渗透平衡<sup>[36]</sup>。但随着胶结液浓度的提高,沙土的盐分越来越高,会造成胶结液的渗透势下降,从而导致植物吸水困难,导致生理干旱,称为渗透胁迫<sup>[37]</sup>。胶结液浓度的提高还会导致植物周围环境的 pH 值升高,高 pH 值会导致植物周围环境中的金属离子和含磷化合物产生沉淀,并影响  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  等无机离子的吸收,称为高 pH 胁迫<sup>[38]</sup>。

## 2.2 不同龄期植物固化下的沙土流失率

图3为不同龄期的沙蒿与沙打旺作用下的沙土流失率。无植物作用时,对照组的沙土流失率介于48.62%~52.81%之间。在龄期为30、60 d和90 d的沙蒿作用下,其试验组的沙土流失率分别为34.57%、26.63%、20.21%,相对于对照组分别降低了15.75%、26.18%、28.41%。在龄期为30、60 d和90 d的沙打旺作用下,其试验组的沙土流失率分别为36.47%、31.13%、26.63%,相对于对照组分别降低了13.85%、21.68%、21.99%。因此,植物龄期越高,固化沙土的效果越好;在相同龄期下,沙蒿组的沙土流失率均低于沙打旺组,且随着植物龄期的增长这种差异越来越显著。以上结果表明沙蒿组固沙能力要优于沙打旺组。

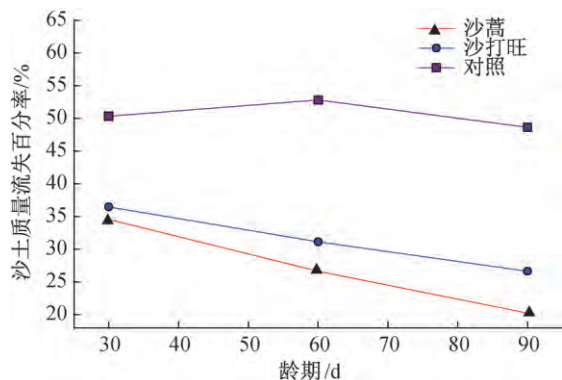


图3 不同龄期植物固化下的沙土流失率

沙蒿成苗具有直根系,并且根系发达,在半固定、固定沙地上主要分布在20~45 cm深的土层中,在流动沙地上根系可以达到100 cm深,有时可达200 cm<sup>[39-40]</sup>。沙打旺成苗主根边缘着生大量根瘤,细根较少,入土深度一般为100~200 mm<sup>[41]</sup>。植物根系强化土壤的关键因素是根-土之间的相互作用,在土体与植物根系相互作用过程中,作用在土体中的剪应力一部分转移给了植物根系,使得根系承受一部分拉力,进而土体抗剪强度增强,可将之看作根系加筋土体系<sup>[42]</sup>。沙蒿与沙打旺的固沙效果均随龄期的增长而增强,根系在土体内的生长促使根-土

界面的摩擦力不断增加,同时根系自身的抗拉、抗剪性能也使土体的抗剪切能力不断在增强<sup>[42]</sup>。图4(a)为沙蒿幼苗,主根粗壮,侧根系较为发达,图4(b)为沙打旺幼苗,相较于沙蒿幼苗,根茎较细且侧根稀疏。沙蒿的根系密度平均值远大于沙打旺,有着更大的黏聚力。以上结果显示,在相同龄期下,沙蒿幼苗的固沙能力要优于沙打旺幼苗。



(a) 沙蒿幼苗根系 (b) 沙打旺幼苗根系

图4 荒漠植物幼苗根系

## 2.3 沙蒿与 MICP 共同作用下的固沙效果

MICP 技术固化荒漠风积沙的效果与菌液浓度相关,本文用比浊法测得所用菌液吸光度( $\text{OD}_{600}$ )为0.438,由此可知菌液浓度约为 $2.79 \times 10^7$  个/mL。图5为不同固化工况下荒漠风积沙的风力侵蚀试验结果,图6为相应的风积沙流失率统计图。由图5和图6可知,仅在无菌培养液作用下(对照组),沙土流失率介于47.75%~52.45%之间。种植沙蒿后,沙土流失率在20.45%~24.44%之间,较对照组降低23.31%以上。经过 MICP 处理后,沙土流失率在5.25%~7.92%之间,较对照组降低了39.83%以上。经过 MICP 处理联合种植沙蒿后,沙土流失率仅为0.78~3.67%,较对照组降低了44.08%以上。因此,采用 MICP 联合种植植物的方式进行固沙,效果显著,且优于其它单一处理方法。

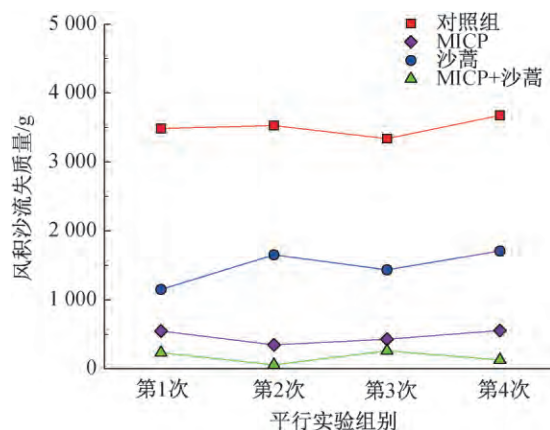


图5 不同固化条件下沙土流失质量

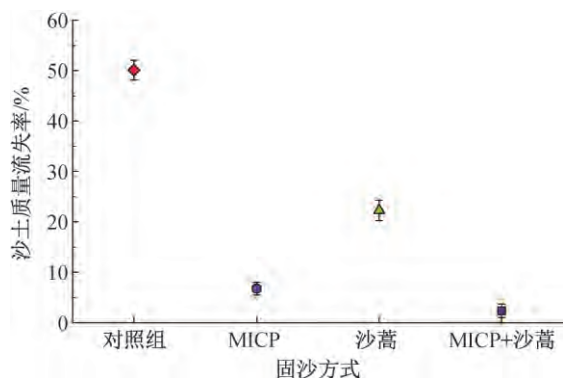


图6 不同固化条件下沙土流失率

### 3 讨论

#### 3.1 输沙率对比

输沙率常被用作衡量固沙效果优劣的指标之一,定义为单位面积沙土在单位时间内流失的质量<sup>[43]</sup>。根据本文风力侵蚀试验数据,可以计算得到相应的输沙率:仅在无菌培养液作用下(对照组),其输沙率在 $3\sim 4\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ 之间;经过MICP处理后,其输沙率在 $0\sim 1\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ 之间;种植沙蒿后,沙蒿盖度为 $18.07\%$ ,其输沙率在 $1\sim 2\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ 之间;经过MICP处理联合种植沙蒿后,沙蒿盖度为 $20.12\%$ ,其输沙率几乎为零。

为了进一步探讨本文试验所达到的固沙效果,将本文结果与余沛东等<sup>[44]</sup>的风蚀实验进行了对比(图7)。本文未经固化的风积沙在 $15\text{ m/s}$ 的风速条件下的输沙率为 $3.65\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ ,与文献中相同条件下的原位观测结果( $3.80\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ )较为相近。此外,本试验在沙蒿盖度为 $18.07\%$ 、风速为 $15\text{ m/s}$ 的条件下的输沙率为 $1.72\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ ,与文献中在相近条件下的输沙率( $1.58\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ )较为接近。上述结果表明本文风蚀实验所得数据是比较可靠的。本文在植被盖度为 $0\%$ 、风速为 $15\text{ m/s}$ 的条件下,经过MICP处理沙样的输沙率为 $0.48\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ ,余沛东等<sup>[44]</sup>在植被盖度为 $0\%$ 、风速为 $9\text{ m/s}$ 的条件下的输沙率为 $0.50\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ ,两者较为接近。经MICP处理后的沙样可以抵抗更大风力,说明MICP技术可以提高沙样表面的抗风力侵蚀能力。本文中经过沙蒿与MICP共同处理的试样(植被盖度为 $20.12\%$ )在 $15\text{ m/s}$ 的风速条件下的输沙率为 $0.17\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ ,文献中在植被盖度为 $17.00\%$ 、风速为 $7\text{ m/s}$ 条件下的输沙率为 $0.20\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ ,两者的风蚀结果相近。由此可见,在植被盖度相近的条件下,经MICP技术处理后

的风积沙可以抵抗更大的风力。综上可知,MICP技术的固沙效果较高,且其与植被作用下的固沙效果最佳。

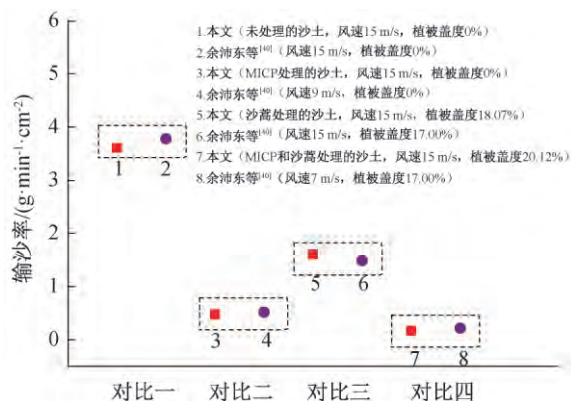


图7 不同固化条件下输沙率对比

#### 3.2 风蚀试验机理分析

图8为不同固化条件下风力侵蚀效果示意图。图8(a)为未经处理的荒漠风积沙在风蚀试验中沙土大量流失,其原因主要是荒漠风积沙无黏聚力,表层沙竖向应力较小,从而导致沙土的抗剪强度很低<sup>[45]</sup>。图8(b)为经过MICP处理的沙样在风蚀实验中沙子被少量侵蚀,流失率较低。由于荒漠风积沙经过MICP处理后,微生物诱导生成的碳酸钙填充了沙粒间的孔隙,联结了松散的沙粒,增大了表层沙之间的黏聚力,从而提高了其抗剪强度;另一方面由于碳酸钙的胶结作用在沙层表面形成一个壳状保护层,隔断风力对下层沙面的作用,从而增强了抗风力侵蚀的能力<sup>[27]</sup>。图8(c)为沙样表层种植沙蒿后的抗风蚀效果,沙样表面完整性差,但根系周围沙土固化效果较好。沙蒿的根系固沙作用主要通过根系与沙体之间的摩擦力产生作用,沙蒿根系与沙土组成的根土复合体类似于一种加筋土体系<sup>[46]</sup>。沙蒿根系相当于加筋材料,由于根系的加筋作用,根系所在沙层的抗剪强度得到了提高,侧向位移也受到了约束,从而沙土整体性与稳定性也相应提高;另一方面,沙蒿的茎叶提高了地表植被盖度,可以减小风力对沙面的直接吹蚀面积<sup>[46]</sup>。图8(d)为MICP技术和植被共同作用下的沙样的抗风蚀效果。相比于前三种工况,这种工况下的沙土流失率最低,固沙效果最好,由于结合了MICP固沙和植被固沙的效果,从而大大提高了沙样的抗风蚀能力。

### 4 结论

本文通过开展系列室内试验,分析微生物胶结液浓度对植物生长状况的影响、植物生长龄期对固

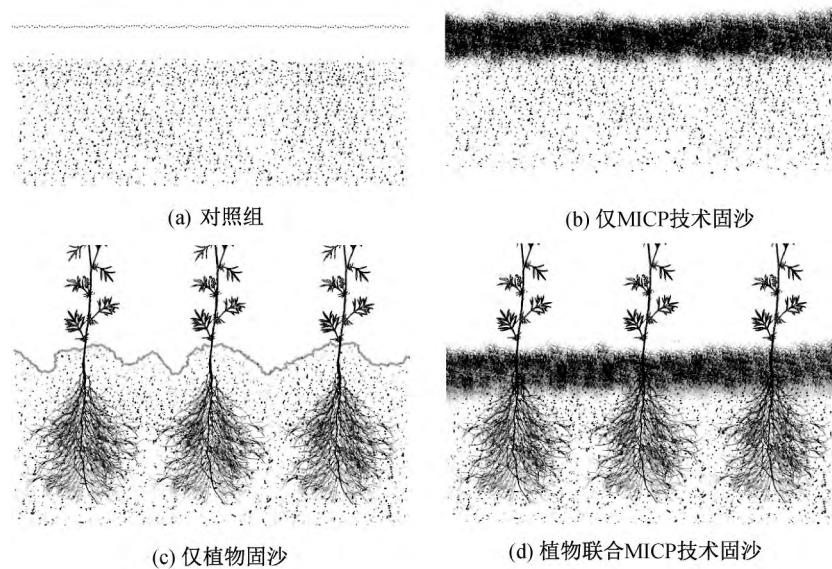


图8 不同固化条件下风蚀结果示意图

沙效果的影响以及 MICP 与植物共同作用下的固沙效果,并探讨不同固沙方式的作用机理,主要获得以下结论:

a) 利用 MICP 技术可提高荒漠风积沙抗风力侵蚀能力,微生物产生的碳酸钙会在沙样表面生成一个结皮层,结皮层强度越高,沙样输沙率越低,抗风蚀能力越强;经过 MICP 技术处理的沙样抗风蚀能力可提高约 39.83%。

b) 利用 MICP 技术固沙的同时结合沙蒿可以提高固沙效率,MICP 技术处理可增大表层沙的抗剪强度,同时沙蒿根系可固化深层沙土,进一步增强固沙效果。MICP 技术与植物两者共同固沙可提高沙样抗风蚀能力约 44.08%。

c) 荒漠植物沙蒿有一定的耐碱性,但应选择恰当浓度的胶结液,避免因沙土中离子浓度过高,植物根细胞失水而降低植物的存活率;微生物胶结液浓度约为 0.15 mol/L 时,沙蒿存活率较高且固沙效果较好。

微生物诱导碳酸钙沉淀与植物联合固化荒漠风积沙技术是一种新的防沙固沙的方法,国内外学者对此项技术的研究比较缺乏。本文结合实验对 MICP 技术联合荒漠植物固沙的防治效果开展了初步的研究,但仍有一些问题亟待解决:

a) 对于 MICP 与植物联合固化荒漠风积沙技术的作用机理仍需进一步研究。本实验中经 MICP 处理的沙蒿生长状况较佳,推测其原因是由于胶结液中

的尿素在细菌脲解生成  $\text{CO}_3^{2-}$  的同时,给植物的生长提供了氮源,促进了荒漠植物的生长,进一步提高了固沙效果。因此,未来可以开展更加深入的研究。

b) 本文选择了沙蒿和沙打旺作为荒漠植物进行固化沙土实验,所选植物种类较为单一,有必要进一步开展 MICP 技术联合其他种类的荒漠植物共同固沙的研究。

c) 目前绝大部分固沙试验仍在实验室环境下进行,需进一步开展现场中试试验研究。

#### 参考文献:

- [1] 王涛. 荒漠化治理中生态系统、社会经济系统协调发展问题探析:以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7045-7048.
- [2] 黄为民, 赵虹, 崔雪梅. 新型化学液膜固沙方法的研究[J]. 甘肃科技, 2005, 21(12): 93-95.
- [3] 赖俊华, 张凯, 王维树, 等. 化学固沙材料研究进展及展望[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 644-658.
- [4] 汪万福, 王涛, 樊锦诗, 等. 敦煌莫高窟顶尼龙网栅栏防护效应研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 640-648.
- [5] 屈建军, 喻文波, 秦晓波, 等. HDPE 功能性固沙障防风效应试验[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1185-1193.
- [6] 高菲, 高永, 高强, 等. 沙柳沙障对土壤理化性质的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2006, 27(2): 39-42.
- [7] 汪万福, 王涛, 樊锦诗, 等. 敦煌莫高窟顶尼龙网栅栏防护效应研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 640-648.
- [8] 杨明坤. 纤维素基环保固沙剂的制备与性能研究[D].

- 北京:北京化工大学, 2012: 1-70.
- [9] 程道远. 国外化学固沙简介[J]. 世界沙漠研究, 1980 (1): 33-37.
- [10] 程建雄. 保持水土、防风固沙植物之最:沙棘[J]. 北京农业, 2016(4): 92-93.
- [11] 王宝增, 韩晓光, 刘玉杰. 水杨酸对沙打旺幼苗耐盐性的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(18): 4525-4528.
- [12] 苗晨曦, 李亚梅, 郑俊杰, 等. 微生物改性土体研究进展[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(1): 25-29.
- [13] Bang S S, Galinat J K, Ramakrishnan V. Calcite precipitation induced by polyurethane — immobilized *Bacillus pasteurii* [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2001, 28(4/5): 404-409.
- [14] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 643-653.
- [15] Boquet E, Boronat A, Ramos-Cormenzana A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon [J]. Nature, 1973, 246: 527-529.
- [16] 周琴芳, 罗鸿禧, 王银善. 微生物对某些岩土工程性质的影响[J]. 岩土工程, 1997, 18(2): 17-22.
- [17] 薛中会, 武超, 戴树玺, 等. 生物矿化研究进展[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 21-25.
- [18] Soon N W, Lee L M, Khun T C, et al. Improvements in engineering properties of soils through microbial — induced calcite precipitation[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17 (4): 718-728.
- [19] De Muynck W, Verbeken K, de Belie N, et al. Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 99-111.
- [20] Duraisamy Y, Airey D W, Maggi F. Urea hydrolysis rate of *B. Megaterium* for soil bio — cementation[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(2): 1143-1150.
- [21] 许朝阳, 张莉. 生物改性对粉土工程性质影响的研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(3): 60-63, 38.
- [22] Qian C X, Pan Q F, Wang R X. Cementation of sand grains based on carbonate precipitation induced by microorganism [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(8): 2198-2206.
- [23] Burbank M B, Weaver T J, Green T L, et al. Precipitation of calcite by indigenous microorganisms to strengthen liquefiable soils [J]. Geomicrobiology Journal, 2011, 28(4): 301-312.
- [24] 张莉. 微生物改性粉土的试验及机理研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2008: 8-22.
- [25] 沈吉云. 微生物成因土工材料实验及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2009: 23-48.
- [26] 王瑞兴, 钱春香, 王剑云. 微生物沉积碳酸钙研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(s1): 191-195.
- [27] 高玉峰, 杨恩杰, 何稼. 基于微生物诱导碳酸钙沉积的防风固沙试验研究 [J]. 河南科学, 2019, 37 (1): 144-150.
- [28] Onal O T, Frigi R D. High throughput colorimetric assay for rapid urease activity quantification[J]. Journal of Microbiological Methods, 2013, 95(3): 324-326.
- [29] Dick J, de Winet W, de Graef B, et al. Bio — deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species [J]. Biodegradation, 2006, 17 (4): 357-367.
- [30] Bhaduri S, Debnath N, Mitra S, et al. Microbiologically induced calcite precipitation mediated by *sporosarcina pasteurii* [J]. Journal of Visualized Experiments, 2016(110): 532-536.
- [31] Jonkers H M, Thijssen A, Muyzer G, et al. Application of bacteria as self — healing agent for the development of sustainable concrete [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 230-235.
- [32] 陈歆, 韩依璇, 张国荣, 等. 巴氏生孢八叠球菌用作混凝土裂缝愈合剂的活性研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 484-489.
- [33] 毋雪梅, 高耀宾, 杨久俊. 浸渍法强化再生骨料配制再生混凝土的试验[J]. 河南建材, 2009, (1): 56-57.
- [34] Alamdari P, Nematollahi O, Mirhosseini M. Assessment of wind energy in Iran: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16 (1): 836-860.
- [35] 祁栋灵, 郭桂珍, 李明哲, 等. 水稻耐盐碱性生理和遗传研究进展 [J]. 植物遗传资源学报, 2007, 8 (4): 486-493.
- [36] 易善军, 孙振元, 韩蕾, 等. 植物耐碱机理及相关基因研究进展[J]. 世界林业研究, 2011, 24(1): 28-32.
- [37] 李瑞昌, 曹帮华. 盐碱胁迫对两种地被竹生长指标的影响[J]. 北方园艺, 2011(13): 83-87.
- [38] 唐相亭, 金研铭. 耐盐碱植物研究进展[J]. 北方园艺, 2012(22): 181-184.
- [39] 杨洪晓, 张金屯, 吴波, 等. 油蒿 *Artemisia ordosica* 对半干旱区沙地生境的适应及其生态作用[J]. 北京范大学学报(自然科学版), 2004, 40(5): 684-690.
- [40] 王庆锁, 董学军, 陈旭东, 等. 油蒿群落不同演替阶段某些群落特征的研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21 (6): 531-538.
- [41] 刘益良, 刘晓立, 付旭, 等. 锦鸡儿、沙打旺根系对边坡土体抗剪强度影响的试验研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2016, 26(3): 24-28.



- [42] 朱菁, 肖长永, 王敏. 植物根系固坡机理的理论分析[J]. 产业与科技论坛, 2017, 16(11): 67-68.
- [43] 王余彦. 方格沙障对输电线塔基风蚀特征影响的风洞试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016: 7-16.
- [44] 余沛东, 陈银萍, 李玉强, 等. 植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 31-33.
- [45] 朱珊, 邵军义. 根系黄土抗剪强度的特性[J]. 青岛建筑工程学院学报, 1997, 18(1): 5-9.
- [46] 李自蹊. 草本植物根系模型构建与力学试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 4-9.

(责任编辑: 廖乾生)