

DOI: 10.11779/CJGE20221268

# 生物高分子聚合物生态固沙效果初探

童小东<sup>1,2</sup>, 慈祥<sup>1</sup>, 孙任运<sup>3</sup>

(1. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 211189;  
3. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 沙漠化治理是一个全球性的难题。相较于传统的沙漠固沙技术, 作为环境友好型固化材料的生物高分子聚合物, 不仅能有效胶结沙漠砂以抵抗风蚀作用, 还能提高沙漠砂的促生性能以促进植物生长, 最终达到利用植被实现永久固沙的效果。基于前述设想, 通过表面硬度试验、保水性能试验和植物生长试验研究了黄原胶(XG)、瓜尔胶(GG)以及二者的等质量混合胶(MG)生态固沙的效果。表面硬度试验表明生物高分子聚合物能有效胶结沙漠砂颗粒, 质量分数为0.1%的XG、GG和MG溶液分别将沙漠砂的表面压力强度提高了9.4倍、5.3倍和8.0倍; 保水性能试验表明生物高分子聚合物对沙漠砂保水性能的提升效果随溶液质量分数的增大而增大, 在40°C高温养护条件下, 生物高分子聚合物保水性能的比较结果为: XG>MG>GG; 植物生长试验表明, 在室内条件下, 生物高分子聚合物能缩短植物出苗时间、提升植物的出苗率和幼苗高度, 明显提高沙漠砂的促生性能。本文的研究初步表明, 采用生物高分子聚合物实现生态固沙具备理论上的可行性。

**关键词:** 生物高分子聚合物; 生态固沙; 表面硬度; 保水性能

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2025)01-0144-09

**作者简介:** 童小东(1971—), 男, 教授, 主要从事地基处理、基础工程、基坑工程等领域的教学与科研工作。E-mail: tongxiaodong88@163.com。

## Preliminary study on ecological sand fixation effects of biopolymers

TONG Xiaodong<sup>1,2</sup>, CI Xiang<sup>1</sup>, SUN Renyun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures, Ministry of Education (Southeast University), Nanjing 211189, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The desertification control is a global challenge. Compared to the traditional desert sand fixation techniques, the biopolymers as environmentally friendly solidification materials can effectively bond desert sand to resist wind erosion and improve its growth promoting properties to promote plant growth, ultimately achieving permanent sand fixation. Based on the aforementioned ideas, the ecological sand fixation effects of xanthan gum (XG), guar gum (GG) and their equal mass mixed gum (MG) are studied through the surface hardness tests, water retention performance tests and plant growth tests. The surface hardness tests show that the biopolymers can effectively bond desert sand particles. The XG, GG and MG solutions with a mass fraction of 0.1% increase the surface pressure strength of desert sand by 9.4, 5.3 and 8.0 times, respectively. The water retention performance tests show that the improvement effects of the biopolymers on the water retention performance of desert sand increase with the increase of solution mass fraction. Moreover, under high temperature curing conditions at 40°C, the comparative results of the water retention performance of the three biopolymers are as follows: XG>MG>GG. The plant growth tests indicate that under indoor conditions, the biopolymers can shorten plant emergence time, increase plant emergence rate and seedling height, and significantly improve the growth promoting performance of desert sand. The preliminary researches indicate that the use of the biopolymers for ecological sand fixation is theoretically feasible.

**Key words:** biopolymer; ecological sand fixation; surface hardness; water retention performance

## 0 引言

中国是沙漠化最严重的国家之一。根据《第五次中国荒漠化和沙化状况公报》, 截至2014年, 中国沙

漠化土地面积达到了172.12万平方公里, 约占全国土

地面积的 17.93%。土地沙漠化会导致风沙灾害和土壤肥力流失等生态环境问题, 给人类的生存与发展带来严峻挑战。因此, 必须采取防风固沙措施以遏制土地的沙漠化进程。在传统防风固沙技术中, 机械固沙通过设置草方格等沙障设施以减轻风沙对地表的侵蚀, 实现防风固沙的效果, 然而其防护时间有限, 通常用作临时性和辅助性的固沙手段<sup>[1]</sup>。化学固沙通过固沙材料的胶凝作用, 将松散的沙漠砂黏结成整体, 从而提高其抗风沙侵蚀的能力, 虽然效果明显, 但传统的固沙材料存在土壤碱化、妨害植物生长等生态隐患<sup>[1-4]</sup>。植物固沙通过种植优势植物种来建立或恢复植物群落, 以提高沙漠化地区的水土保持能力, 从而实现固沙的目的, 植物固沙效果持久, 且能改变沙漠化地区的生态环境, 是最理想的固沙手段<sup>[1]</sup>。然而沙漠地区的土壤肥力差、保水能力弱, 单一的植物固沙难以推广应用。

近些年来, 以结合化学固沙和植物固沙为特点的生态固沙技术备受关注。生态固沙技术采用环境友好型的固沙材料处理沙漠砂, 在提高沙漠砂抗风蚀能力的同时, 改善沙漠砂的肥力和保水能力以促进植物生长, 从而实现植物固沙的效果<sup>[5]</sup>。目前采用的环境友好型固沙材料主要包括聚乙酸乙烯酯 (PVAc) 和聚乙烯醇 (PVA)。二者属新型有机高分子材料, 均能促进植物生长<sup>[5-8]</sup>, 但存在热氧老化和光氧老化现象, 且其生产过程中会用到石油等一些不可再生资源, 造成生产原料与生产工艺受限<sup>[1]</sup>。因此有必要探索一种易于获得、稳定性高、固沙效果好且能促进植物生长的生态固沙材料。

生物高分子聚合物是由生物体在细胞新陈代谢过程中产生的天然高分子聚合物, 因其普遍具备黏度高、保水性好、稳定性高和无污染等优点而被广泛应用于土体加固和生态岩土工程。Ayeldeen 等<sup>[9]</sup>通过直剪试验发现, 黄原胶、瓜尔胶和改性淀粉可显著提高砂土的抗剪强度; Ayeldeen 等<sup>[10]</sup>通过直剪试验发现, 黄原胶和瓜尔胶能显著提高湿陷性土的黏聚力; Bozyigit 等<sup>[11]</sup>通过无侧限压缩试验发现, 黄原胶和瓜尔胶能显著提高高岭土的抗压强度; Chang 等<sup>[12]</sup>通过无侧限压缩试验发现, 掺 2% 结冷胶的砂土具有相当于掺 12% 水泥的强度; 周天宝等<sup>[13]</sup>研究发现, 掺 0.75% 黄原胶的粉土, 其 28 d 的无侧限抗压强度是 4.6 倍; 古佳雨等<sup>[14]</sup>通过直剪试验发现, 质量分数为 2% 的黄原胶溶液可使砂土 28 d 的抗剪强度提高 1 倍; 倪静等<sup>[15]</sup>通过试验发现  $\beta$ -葡聚糖能促进燕麦在淤泥质土中的生长; Chang 等<sup>[16]</sup>研究发现  $\beta$ -葡聚糖和黄原胶可有效促进燕麦在红黄土中的生长; 刘军等<sup>[17]</sup>研究发现沙蒿胶不仅能提高风沙土的起沙风速, 还能促进植物种子的萌发

和幼苗的生长。

与上述文献中的土体不同, 沙漠砂的保水性能和土壤肥力很差, 生物高分子聚合物对沙漠砂的改善效果尚不清楚。此外, 沙漠化地区空气干燥、昼夜温差大, 温度对生物高分子聚合物生态固沙效果的影响也亟待研究。鉴于此, 选取沙漠砂作为研究对象, 选用黄原胶 (XG)、瓜尔胶 (GG) 以及二者的等质量混合胶 (MG) 作为固沙材料, 对生物高分子聚合物的生态固沙效果作初步探索。本研究在试样经高温干燥养护后开展表面硬度试验, 探究高温干燥环境下生物高分子聚合物加固沙漠砂的力学性能; 通过保水性能试验和植物生长试验分别探究生物高分子聚合物对沙漠砂保水性能和促生性能的影响; 而后根据生物高分子聚合物的物理化学作用初步分析其固沙和促生机理。本文的研究成果可为生态固沙材料的选择提供新思路。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

#### (1) 沙漠砂

试验所用的沙漠砂取自中国甘肃省民勤县境内的腾格里沙漠, 土粒相对质量密度  $G_s=2.62$ 。沙漠砂的颗粒级配曲线如图 1 所示, 粒径主要分布在 0.15~0.20 mm, 其不均匀系数  $C_u=1.22$ , 曲率系数  $C_c=1.10$ , 属级配不良砂。

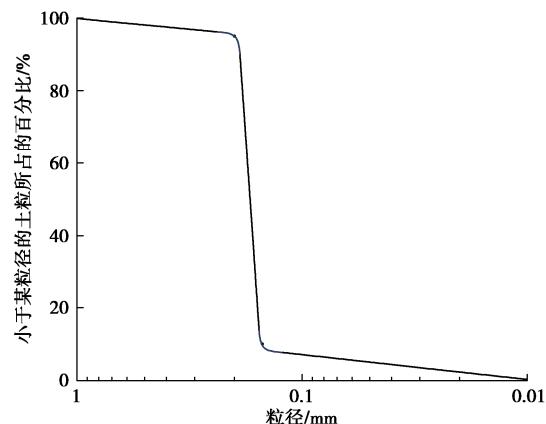


图 1 沙漠砂的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of desert sand

#### (2) 生物高分子聚合物

试验所用的生物高分子聚合物包括黄原胶 (XG)、瓜尔胶 (GG) 及二者的等质量混合胶 (MG), 纯度均不低于 99%。XG 是单胞杆菌经耗氧发酵生成的一种水溶性胞外多糖 (图 2 (a)), GG 是从自豆科植物所产豆荚的胚乳部分提取出的高纯化天然多糖 (图 2 (b)), 二者均属亲水性多糖, 因具备吸水性强、黏度高、稳定性强而被广泛应用于食品与化妆品等行业<sup>[18]</sup>。考虑到

XG 与 GG 之间可能存在协同增效作用, 将二者等质量混合制成 MG。



图 2 粉末状的 XG 和 GG  
Fig. 2 Powdered XG and GG

### (3) 植物

试验所用的植物为紫花苜蓿, 其人工栽培历史悠久, 根系发达且具有抗寒耐旱、耐盐碱、抗逆性与适应性强等特点。若能使紫花苜蓿植根于沙漠化地区, 其发达的根系会对沙漠砂起到握裹作用, 改善沙漠砂的水土保持能力。图 3 为本试验所用的紫花苜蓿种子。



图 3 紫花苜蓿种子  
Fig. 3 Alfalfa seeds

## 1.2 试验方法

### (1) 表面硬度试验

表面硬度指土体抵抗外部机械嵌入的能力, 是土体含水率、密实度与黏结力的综合表现。对于密实度相近的干燥试样, 表面硬度则主要反映试样的黏结力, 从而体现生物高分子聚合物的胶结作用。

试验采用喷洒溶液的方式处理沙漠砂, 分别配制了质量分数为 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.3% 和 0.5% 的生物高分子聚合物溶液, 并设置纯水处理的试样作为对照组。由于生物高分子聚合物与水混合成均相分散体系需要一定的时间, 因此将溶液在室内环境下密封放置 24 h<sup>[19]</sup>。考虑到喷洒密度过小时, 生物高分子聚合物无法充分下渗, 难以胶结沙漠砂; 喷洒密度过大时, 由于溶液的下渗深度有限, 表面沙漠砂的含水率过高, 导致试样的干缩变形过大。本文参照文献[20]并通过比较发现, 喷洒密度控制在 3 L/m<sup>2</sup> 左右最合适。此外, 由于生物高分子聚合物可在干燥失水过程中形成强度, 为模拟沙漠地区夏季炎热干燥的环境, 本文将试样放置在 40°C 的恒温干燥箱内养护。试样制作的完整过程如下: 称取 300 g 沙漠砂从同一高度处缓慢倒入直径为 100 mm 的烧杯中, 轻轻摇晃并敲击烧杯使沙漠砂的表面平整, 此时试验组和对照组沙漠砂的密实

度相近; 接着将溶液以 3 L/m<sup>2</sup> 的喷洒密度均匀喷洒在沙漠砂的表面 (对照组为纯水喷洒); 待溶液下渗稳定后将置于烧杯中的试样放入 40°C 的恒温干燥箱内养护 72 h<sup>[20]</sup> 使试样完全干燥。

养护结束后, 取出试样并放置于平整的桌面上, 将土壤硬度计的锥尖垂直于沙漠砂的表面。用力压进固化层后使其自然弹出, 读取此刻度盘的内圈与外圈的指数, 分别作为压力强度  $P$ (kPa) 和表面硬度  $Y$ (mm)。经土壤硬度计按压后, 试样固化层中会形成一个圆孔, 将下部松散的沙漠砂从圆孔中倒出使固化层显现 (图 4), 然后用精度为 0.1 mm 的直尺测量固化层 6 个不同位置处的厚度, 取其算术平均值作为试样的固化层厚度。

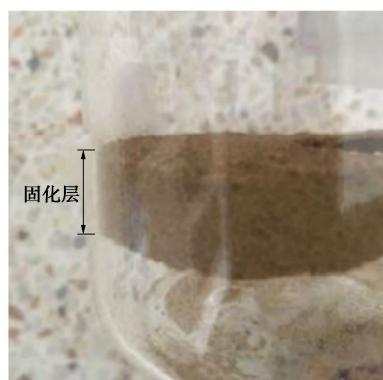


图 4 固化层照片

Fig. 4 Photo of solidified layer

每组试验均设置 3 个平行试样, 试验结果取 3 个试样测值的算术平均值; 若 3 个测值的最大值和最小值中有一个与中间值的差值超过中间值的 15% 时, 舍去最大值与最小值, 取中间值作为该组试验结果; 若不满足前述要求, 表明试样差异性过大, 则该组试验结果作废, 需重新制样并开展试验。

### (2) 保水性能试验

本试验采用与表面硬度试验相同的制样方式。试样在 40°C 的恒温干燥箱内养护 72 h 后, 向烧杯内倒入 50 g 水并将试样放置在室内条件下 (温度 16~23°C, 相对湿度 30%~50%), 每隔 24 h 用称重法测定试样的含水率, 直至试样含水率不再变化时停止试验<sup>[20]</sup>。每组试验设置 3 个平行试样, 试验数据的处理方法同表面硬度试验。

为探究高温对 3 种生物高分子聚合物固化沙漠砂保水性能的影响, 采用掺粉加水法并按 5% 胶砂比 (生物高分子聚合物与干燥沙漠砂的质量之比) 制备边长为 50 mm、初始含水率为 15% 的固化沙漠砂立方体试样。将试样放置于 40°C 恒温干燥箱内养护, 每隔 24 h 用称重法测定试样的含水率, 直至试样含水率为 0 时停止试验。每组均设置 3 个平行试样, 控制不同试样的干密度差异在 0.05 g/cm<sup>3</sup> 以内, 试验数据的处理方

法同表面硬度试验。

### (3) 植物生长试验

试验采用喷洒溶液的方式处理沙漠砂。考虑到过高浓度的溶液会使得固化沙漠砂的表面硬度过大, 不利于植物的发芽与生长<sup>[21]</sup>, 因此本文参照文献[21], 结合表面硬度试验的结果, 选取质量分数为 0.1% 和 0.2% 的生物高分子聚合物溶液处理沙漠砂, 并以纯水处理的试样作为对照。

将 500 g 沙漠砂从同一高度处缓慢倒入直径为 100 mm 的烧杯内并摇晃敲击烧杯使沙漠砂表面平整, 以控制试样密实度相近; 接着向沙漠砂表面均匀播撒 20 粒紫花苜蓿种子并上覆厚度约 0.5 mm 的沙漠砂; 然后按 3 L/m<sup>2</sup> 的喷洒密度向沙漠砂表面均匀喷洒生物高分子聚合物溶液 (对照组为纯水喷洒); 最后将试样放置在室内条件下 (温度 16°C~23°C, 相对湿度 30%~50%) 培育 30 d, 并按照表 1 规定的洒水量定期洒水, 统计出苗时间、出苗率和 30 d 培育期时幼苗的平均高度。

表 1 培育期的洒水量

Table 1 Water sprinkling amounts during cultivation period

洒水量/mL	洒水时刻
50	第 3 天、第 6 天、第 9 天
25	第 12 天、第 15 天、第 18 天、第 24 天

### 1.3 试验仪器

试验仪器主要包括恒温干燥箱和土壤硬度计。恒温干燥箱为上海捷呈实验仪器有限公司生产, 型号为 DHG-9245A (图 5 (a)); 土壤硬度计为浙江托普仪器有限公司生产的 TYD-1 型硬度计 (图 5 (b))。



图 5 试验仪器照片

Fig. 5 Photos of testing instruments

## 2 试验结果与分析

### 2.1 表面硬度试验

表面硬度试验的结果如表 2 所示, 对照组试样的表面硬度为 3.9 mm, 压力强度仅为 37.63 kPa, 而试验组试样的表面硬度明显高于对照组。以质量分数为 0.1% 的试验组为例, 经 XG、GG 和 MG 溶液处理并恒温养护失水后, 沙漠砂的表面硬度分别是对照组的 4.3 倍、3.4 倍和 4.1 倍, 压力强度分别是对照组的 10.4 倍、6.3 倍和 9.0 倍。试验结果表明, 生物高分子聚合物可以有效胶结沙漠砂颗粒, 具备良好的加固效果。

表 2 生物高分子聚合物固化沙漠砂的表面硬度和固化层厚度

Table 2 Surface hardnesses and solidified layer thicknesses of

desert sand solidified by biopolymers

生物高分子聚合物	质量分数/%	表面硬度 Y/mm	压力强度 p/kPa	固化层厚度/mm
无 (对照组)	0	3.9	37.63	0
XG	0.05	12.8	241.75	6.2
	0.10	16.8	392.52	12.9
	0.20	23.7	1121.75	10.4
	0.30	28.1	2495.38	9.5
	0.50	28.4	2654.15	9.0
GG	0.05	8.4	105.79	13.9
	0.10	13.4	238.16	21.5
	0.20	19.7	601.17	18.5
	0.30	27.2	2087.72	14.3
	0.50	28.8	2887.22	12.5
MG	0.05	9.8	130.63	19.7
	0.10	15.8	339.27	20.5
	0.20	21.8	827.63	16.9
	0.30	27.7	2302.47	15.6
	0.50	29.2	3148.18	12.0

图 6 为 3 种生物高分子聚合物固化沙漠砂的表面硬度、固化层厚度与溶液质量分数的关系曲线。可以看出, 随着溶液质量分数的增大, 固化沙漠砂的表面硬度逐渐增大且增长趋势逐渐减缓, 而固化层厚度则先增大后减小, 在溶液质量分数为 0.1% 时达到最大值。分析认为, 随着质量分数的增大, 溶液的黏度逐渐增大, 对砂粒的胶结作用逐渐增强, 因此表面硬度随之增大; 但由于溶液下渗有限, 可胶结的砂粒数量有限, 因此表面硬度的增长趋势会减缓。当溶液浓度较低时, 虽然溶液更容易下渗, 但对沙漠砂胶结效果较差, 失水后无法形成足够厚度的固化层; 当溶液浓度较高时, 生物高分子聚合物虽然能充分胶结砂粒, 但下渗难度增大, 因此固化层厚度随溶液浓度的增大而先增后减。

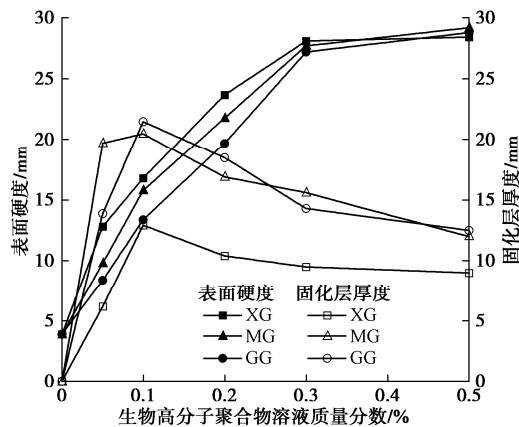


图 6 3 种生物高分子聚合物固化沙漠砂的表面硬度、固化层厚度与溶液质量分数的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of surface hardness, solidified layer thickness and solution mass fraction of desert sand solidified by three kinds of biopolymers

由图 6 可知, 在溶液质量分数相同的条件下, 3 种固化沙漠砂的表面硬度比较结果为  $XG > MG > GG$ ; 当溶液质量分数  $< 0.1\%$  时, 3 种固化沙漠砂的固化层厚度比较结果为  $MG > GG > XG$ ; 当溶液质量分数  $\geq 0.1\%$  时,  $MG$  与  $GG$  的固化层厚度接近, 且明显大于  $XG$  的固化层厚度。

## 2.2 保水性能试验

3 种生物高分子聚合物固化沙漠砂的试样含水率随时间的变化曲线(喷洒试样)如图 7 所示。在试验初期, 对照组与试验组的试样含水率随时间的变化曲线几乎重合, 表明试验初期对照组和试验组的失水速率非常接近; 而后随着时间的延长, 对照组的曲线相较于试验组逐渐下移, 失水速率逐渐高于试验组的试样。当对照组的含水率低于 0.5% 时, 试验组的试样含水率仍保持为 0.64%~2.27%, 并且试样的含水率随着溶液质量分数的增大而增大。试验结果表明, 生物高分子聚合物能提升沙漠砂的保水性能。

图 8 为 3 种生物高分子聚合物固化沙漠砂的试样含水率随 40°C 高温养护时间的变化曲线(立方体试样)。3 种固化沙漠砂分别在恒温干燥 6 d (XG 固化沙漠砂)、5 d (MG 固化沙漠砂) 和 4 d (GG 固化沙漠砂) 后失去了全部自由水。在整个失水过程中, GG 固化沙漠砂的失水速率始终最高, MG 固化沙漠砂次之, XG 固化沙漠砂的失水速率最低。试验结果表明, 40°C 高温养护条件下, 3 种生物高分子聚合物固化沙漠砂保水性能的强弱顺序为  $XG > MG > GG$ 。

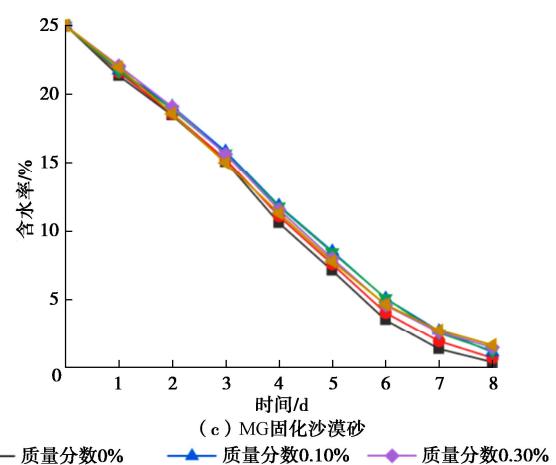
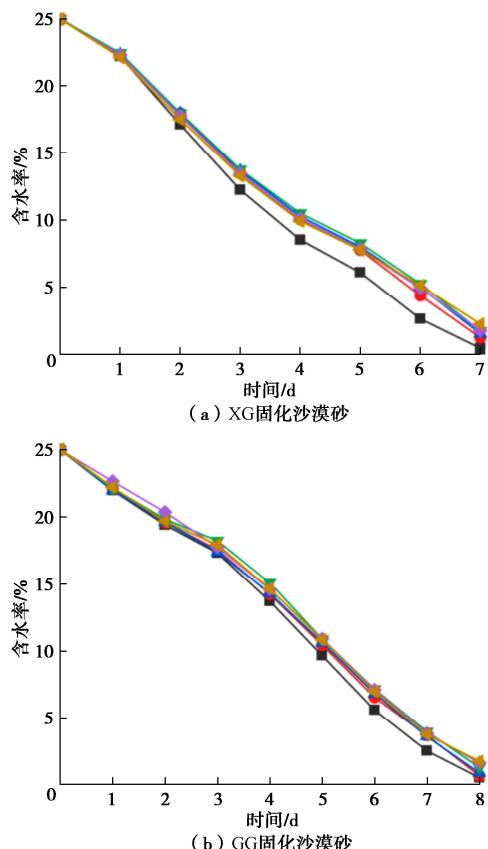


图 7 3 种生物高分子聚合物固化沙漠砂的试样含水率随时间的变化曲线(喷洒试样)

Fig. 7 Relationship curves of moisture content and curing time of desert sand solidified by three kinds of biopolymers (sprayed samples)

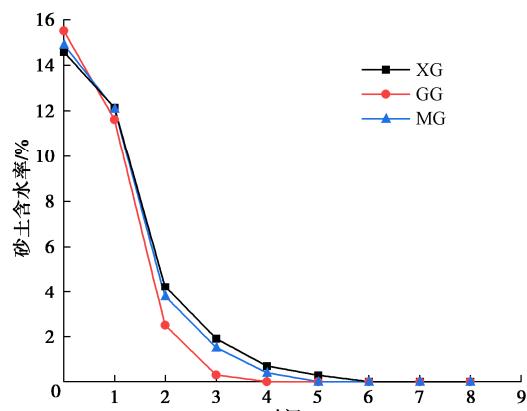


图 8 3 种生物高分子聚合物固化沙漠砂的试样含水率随 40°C 高温养护时间的变化曲线(立方体试样)

Fig. 8 Relationship curves of moisture content and 40°C high-temperature curing time of desert sand solidified by three kinds of biopolymers (cube samples)

## 2.3 植物生长试验

表 3 展示了对照组和各试验组试样中紫花苜蓿的出苗率、出苗时间和 30 d 培育期时的幼苗平均高度; 图 9 为 30 d 培育期时, 紫花苜蓿幼苗的生长状况照片。

由表 3 可知, 紫花苜蓿在对照组的试样中培育 7 d 才出苗, 且出苗率仅为 20%; 而在试验组的试样中培育 4~5 d 即出苗, 且出苗率不低于 50%; 质量分数为 0.1% 的 GG 溶液和质量分数为 0.2% 的 MG 溶液更是分别将出苗率提高到了 70%, 75%。从图 9 可以看出, 30 d 培育期时, 试验组中的幼苗平均高度要明显高于对照组; 以溶液质量分数为 0.1% 的试验组结果为例, 经 XG、GG 和 MG 处理后, 30 d 培育期时幼苗的平均高度分别是对照组的 1.7 倍、1.8 倍和 1.9 倍。试验结果

初步表明, 在室内条件下, 生物高分子聚合物能明显提高沙漠砂的促生性能。

表3 紫花苜蓿在生物高分子聚合物固化沙漠砂中的生长状况  
Table 3 Growth of alfalfa in desert sand solidified by biopolymers

生物高分子聚合物	质量分数/%	出苗率/%	出苗时间/d	30 d 培育期时幼苗平均高度/mm
无(对照组)	0	20	7	15.0
XG	0.1	50	5	25.2
	0.2	60	5	22.8
GG	0.1	70	4	27.3
	0.2	65	4	29.2
MG	0.1	65	4	28.5
	0.2	75	5	31.7

在相同溶液质量分数条件下, 从出苗率结果来看, MG 的促生效果最优, GG 次之, XG 最差; 从出苗时间来看, MG 的促生效果稍逊于 GG, 但优于 XG; 从 30d 幼苗平均高度来看, MG 的促生效果最优, GG 次之, 而 XG 最差。综合评价 3 种生物高分子聚合物促生性能的结果为: MG>GG>XG。

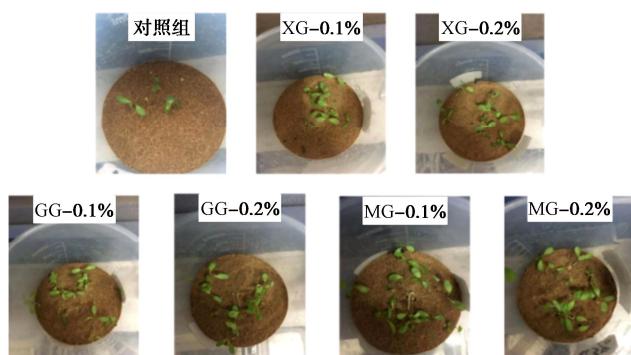


图9 30 d 培育期时紫花苜蓿幼苗的生长状况照片

Fig. 9 Photos of growth of alfalfa in solidified desert sand at 30th cultivation day

### 3 机理初探

#### 3.1 固沙机理分析

因本文仅为基础性探索, 并未开展相关机理性试验研究。经对相关文献进行分析, 生物高分子聚合物固化沙漠砂的机理应该与合成类有机高分子材料类似, 都是通过一系列物理化学作用来提高沙漠砂的力学性能。

固化沙漠砂强度的形成主要经历了图 10 所示的 4 个阶段<sup>[22]</sup>: ①自然状态下, 沙漠砂的结构松散、颗粒间无黏聚力, 具备一定的流动性。②将沙漠砂、生物高分子聚合物和水混合后, 聚合物凝胶形成的高分子膜紧密地包裹砂粒, 在填充砂土孔隙的同时, 增大砂粒间的接触面积<sup>[23]</sup>。③随着水分的逐渐蒸发, 聚合物

凝胶逐渐收缩并固化, 聚合物之间的交联作用和砂粒之间的黏聚力逐渐增强。④聚合物完全固化, 凝胶干燥后会变成纤维, 以线和织物的形式与砂粒连接并缠绕在一起。

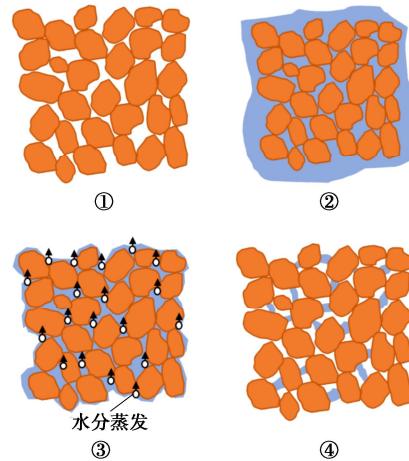


图10 固化沙漠砂强度的形成过程<sup>[22]</sup>

Fig. 10 Formation process of strength of solidified desert sand<sup>[22]</sup>

生物高分子聚合物固化沙漠砂的机理主要包括加筋作用和界面作用。加筋作用是指在失水过程中, 生物高分子链间会通过交联反应连接成网状结构, 约束砂粒之间的相对运动; 界面作用是指生物高分子聚合物凝胶在填充砂土孔隙之后, 砂粒由自然状态下的点接触转变为砂粒与生物高分子聚合物之间的黏附作用以及聚合物分子链间的架桥作用<sup>[24]</sup> (图 11)。加筋作用和界面作用会使得砂土形成紧密的整体, 从而提高砂土的强度。

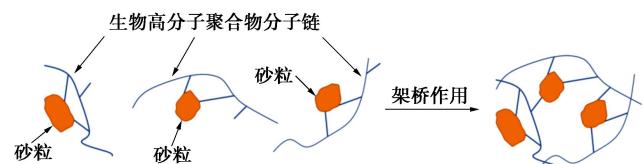


图11 架桥作用示意<sup>[24]</sup>

Fig. 11 Diagram of bridging effects<sup>[24]</sup>

由固化机理可知, 生物高分子聚合物的含量越高, 对砂粒的包裹和砂粒间孔隙的填充就越充分, 水分完全蒸发后的加筋作用和界面作用也就越强。因此固化沙漠砂的表面硬度随着聚合物溶液浓度的增大而增大。

不同种类生物高分子聚合物固沙效果的差异主要源于分子结构的差异。XG 的分子结构是螺旋结构结合成的三维网状结构; GG 的分子结构则呈“毛刺”状, 主链存在较多的光滑区段; 由于 MG 溶液的体积弹性模量要高于 XG 与 GG 溶液<sup>[25-26]</sup>, 因此可以认为 MG 网状结构的力学性能要优于 XG 和 GG。因此, 3 种生物高分子聚合物网状结构力学性能的高低顺序为

MG>XG>GG。然而由于 XG 溶液在沙漠砂中下渗的深度明显小于 MG 溶液, 使得更多的 XG 分子聚集在上部砂土, 导致 XG 固化层的力学性质要优于 MG, 因此出现 XG 固化层表面硬度大于 MG 的现象。

### 3.2 促生机理分析

从土壤学角度来看, 生物高分子聚合物的胶结作用会使得沙漠砂内形成团粒结构。团粒结构可增强砂粒间的毛细管作用, 有利于沙漠砂保持水分。当供水过程结束后, 团粒结构间的水分很快被排空并实现气体交换, 导致好氧菌活动旺盛, 团粒结构表面的有机质快速矿化以向植物供肥; 而团粒结构内部水分多、空气少, 好氧菌的活动受到抑制, 有机质进行缓慢的嫌气分解<sup>[27]</sup>, 有利于沙漠砂保肥。

此外, XG 和 GG 都属于多糖物质, 进入沙漠砂内部后在真菌和细菌分泌的糖类水解酶作用下, 先水解成葡萄糖, 接着继续氧化, 最后分解成无机化合物并释放能量以供植物生长<sup>[28-30]</sup>。随着植物生长进程的持续, 新陈代谢产生的废物和植物的枯茎落叶会形成腐殖质, 而腐殖质也会通过矿质化过程为植物的生长提供养分<sup>[31]</sup>。有机质的累积和分解与腐殖质的合成会使得营养元素在土壤表层的集中与累积<sup>[32]</sup>。因此, 在团粒结构与外源有机质的共同作用下, 沙漠砂的促生性能得到提高。

## 4 结 论

本文选取黄原胶 (XG)、瓜尔胶 (GG) 以及二者等质量混合胶 (MG) 作为固化沙漠砂的材料, 通过表面硬度试验、保水性能试验和植物生长试验, 初步证实了生物高分子聚合物生态固沙的理论可行性, 并根据生物高分子聚合物的物理化学作用对固化机理和促生机理开展了分析。

(1) 在 40℃恒温干燥环境下生物高分子聚合物的固沙效果良好, 质量分数为 0.5%的生物高分子聚合物溶液即可使固化沙漠砂的表面压力强度超过 2.6 MPa。固化沙漠砂的表面压力强度随溶液质量分数的增大而增大, 而固化层厚度则随着溶液质量分数的增大先增后减, 在质量分数为 0.1%时达到最大值。3 种生物高分子聚合物固化沙漠砂表面压力强度的比较结果为 XG>MG>GG。

(2) 生物高分子聚合物不仅可以提高沙漠砂的保水性能, 还能改善沙漠砂的促生性能, 且 3 种生物高分子聚合物促生性能的比较结果为 MG>GG>XG。

(3) 研究结果表明, XG 与 GG 之间存在一定的协同增效效应。MG 的固沙效果和促生性能均优于 XG 和 GG。3 种生物高分子聚合物生态固沙效果的比较结

果为 MG>GG>XG。

(4) 当前研究初步证明了生物高分子聚合物具备良好的生态固沙效果, 但后续需开展不同温度条件以及温度循环作用和风沙侵蚀对加固效果影响的研究, 并开展沙漠化地区光照和温、湿度条件下的植物生长试验, 以进一步探究生物高分子聚合物加固沙漠砂的耐久性和促生性能。

基于针对沙漠化治理这一全球性的难题和对环境保护愈来愈高的呼声和期望, 笔者根据前期调研和设想, 主要通过室内试验, 对采用生物高分子聚合物进行生态固沙开展了基础性的探索和尝试。试验结果初步表明生物高分子聚合物不仅可以充分地胶结沙漠砂, 还能明显提高沙漠砂的保水性能和促生性能。相关的研究计划可能不够完善, 考虑得也不够周全, 但撰写本文的目的在于将当前的研究设想和初步成效分享给感兴趣的研究者, 以利于大家共同开展研究, 为保护人类共同的家园做出贡献。

## 参 考 文 献:

- [1] 铁生年, 姜 雄, 汪长安. 沙漠化防治化学固沙材料研究进展[J]. 科技导报, 2013, 31(5/6): 106-111. (TIE Shengnian, JIANG Xiong, WANG Chang'an. Research progress in chemical sand fixation materials for desertification control[J]. Science and Technology Bulletin, 2013, 31(5/6): 106-111. (in Chinese))
- [2] BASU D, MISRA A, PUPPALA A J. Sustainability and geotechnical engineering: perspectives and review[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(1): 96-113.
- [3] 钱春香, 王安辉, 王 欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1537-1548. (QIAN Chunxiang, WANG Anhui, WANG Xin. Research progress in soil solidification by microbial grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 24-35. (in Chinese))
- [4] SHERWOOD P T. Soil Stabilization with Cement and Lime[M]. London: Her Majesty Stationery Office, 1993.
- [5] 龚 伟, 李美兰, 李 叶, 等. 聚乙烯醇的分子量对生态固沙性能的影响[J]. 塑料, 2019, 48(2): 114-118. (GONG Wei, LI Meilan, LI Ye, et al. Effect of molecular weight of polyvinyl alcohol on ecological sand fixation performance[J]. Plastics, 2019, 48(2): 114-118. (in Chinese))
- [6] GONG W, ZANG Y, LIU B, et al. Effect of using polymeric materials in ecological sand-fixing of Kerqin Sandy Land of China[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(43).
- [7] SHERWOOD P T. Soil Stabilization with Cement and

- Lime[M]. London: Her Majesty Stationery Office, 1993.
- [8] 冯 箕, 李生宇, 徐新文, 等. 醋酸乙烯酯类固沙剂固沙效果的风洞实验[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 61-65. (FENG Xiao, LI Shengyu, XU Xinwen, et al. Wind tunnel experiment on sand fixation effect of vinyl acetate sand fixation agent[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 61-65. (in Chinese))
- [9] AYELDEEN M K, NEGM A M, EL SAWWAF M A. Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(5): 371.
- [10] AYELDEEN M, NEGM A, EL-SAWWAF M, et al. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(2): 329-339.
- [11] BOZYIGIT I, JAVADI A, ALTUN S. Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(5): 1160-1172.
- [12] CHANG I, IM J, CHO G C. Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(10): 1658-1670.
- [13] 周天宝, 张福海, 周炳生, 等. 生物聚合物固化粉土室内试验与机理研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 107-110, 116. (ZHOU Tian-bao, ZHANG Fu-hai, ZHOU Bing-sheng, et al. Laboratory Test and Mechanism Study on Biopolymer Solidification of Silt[J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2019, 36(1): 107-110, 116. (in Chinese))
- [14] 古佳雨, 彭泽森, 吴 立, 等. 生物聚合物对砂土强度影响的研究[C]// 第十一届全国工程地质大会. 武汉, 2020. (GU Jiayu, PENG Zesen, WU Li, et al. Study on the influence of biopolymer on sand strength[C]// Geological Society of China Proceedings of the 11th National Engineering Geology Conference. Wuhan, 2020. (in Chinese))
- [15] 倪 静, 王子腾, 耿雪玉. 植物-生物聚合物联合法固土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2131-2137. (NI Jing, WANG Ziteng, GENG Xueyu. Experimental study on soil consolidation by plant biopolymer combined method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 2131-2137. (in Chinese))
- [16] CHANG I, PRASIDHI A K, IM J, et al. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes[J]. Geoderma, 2015, 253: 39-47.
- [17] 刘 军, 张宇清, 秦树高, 等. 不同喷洒浓度沙蒿胶固沙效果试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 149-155. (LIU Jun, ZHANG Yuqing, QIN Shugao, et al. Sand fixation experiment of Artemisia sphaerocephala Krasch. gum with different concentrations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 149-155. (in Chinese))
- [18] 蒋建新. 功能性多糖胶开发与应用[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2013: 6-7. (JIANG Jianxin. Development and Application of Functional Polysaccharide Gum[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013: 6-7. (in Chinese))
- [19] 王习光. 改性瓜尔胶高吸水性树脂的制备及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012. (WANG Xiguang. Preparation and Properties of Modified Guar Gum Super Absorbent Resin[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [20] MA Guofu, FENG Enke, RAN Feitian, et al. Preparation and sand-fixing property of a novel and eco-friendly organic-inorganic composite[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2014, 54(7): 703-710.
- [21] 杨金玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 土壤压实指标在城市土壤评价中的应用与比较[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 51-55. (YANG Jinling, ZHANG Ganlin, ZHAO Yuguo, et al. Application and comparison of soil compaction index in urban soil evaluation[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2005, 21(5): 51-55. (in Chinese))
- [22] ZANG Y X, GONG W, et al. Chemical sand stabilization: A review of material, mechanism, and problems[J]. Environmental Technology Reviews, 2015, 4(1): 119-132.
- [23] CHEN C, WU L, PERDJON M, et al. The drying effect on xanthan gum biopolymer treated sandy soil shear strength[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 271-279.
- [24] 王 志, 袁辉洲. 微生物絮凝剂 G5 絮凝机理的初步研究[J]. 给水排水, 2010(增刊 2): 20-24. (WANG Zhi, YUAN Huizhou. Preliminary study on flocculation mechanism of microbial flocculant G5[J]. Water Supply and Drainage, 2010(S2): 20-24. (in Chinese))
- [25] 朱 慧, 吴伟都, 潘永明, 等. 黄原胶与阴离子瓜尔胶复配溶液的流变特性研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(5): 55-62. (ZHU Hui, WU Weidu, PAN Yongming, et al. Rheological properties of xanthan gum and anionic guar gum mixed solution[J]. Chinese Journal of Food, 2014, 14(5):

- 55-62. (in Chinese))
- [26] KHOURYIEH H A, HERALD T J, ARAMOUNI F, et al. Intrinsic viscosity and viscoelastic properties of xanthan/guar mixtures in dilute solutions: Effect of salt concentration on the polymer interactions[J]. *Food Research International*, 2007, **40**(7): 883-893.
- [27] 易秀, 杨胜科, 胡安焱. 土壤化学与环境[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 27-45. (YI Xiu, YANG Shengke, HU Anyan. *Soil Chemistry and Environment*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 27-45. (in Chinese))
- [28] 蔡苗. 农田生态系统土壤碳固持效应研究[J]. 绿色科技, 2017(18): 1-4, 17. (CAI Miao. Study on soil carbon sequestration effect of farmland ecosystem[J]. *Green Technology*, 2017 (18): 1-4, 17. (in Chinese))
- [29] 张焕军, 郁红艳, 丁维新. 土壤碳水化合物的转化与累积研究进展[J]. 土壤学报, 2013, **50**(6): 1200-1206. (ZHANG Huanjun, YU Hongyan, DING Weixin. Research progress on transformation and accumulation of soil carbohydrate[J]. *Journal of Soil Science*, 2013, **50**(6): 1200-1206. (in Chinese))
- [30] 黄巧云. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. (HUANG Qiaoyun. *Soil Science*[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [31] 郭继勋. 羊草枯枝落叶的分解与化学成份的变化[J]. 东北师大学报(自然科学版), 1988(2): 145-153. (GUO Jixun. Decomposition of Leymus chinensis litter and changes in chemical composition[J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 1988(2): 145-153. (in Chinese))
- [32] 曹志平. 土壤生态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. (CAO Zhiping. *Soil Ecology*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese))

## 第四届全国非饱和土与特殊土力学及工程学术研讨会（第一号通知）

为了及时总结和交流相关成果与经验,更好地推动非饱和土与特殊土力学的发展,中国土木工程土力学及岩土力学分会将于2025年7月召开“第四届全国非饱和土与特殊土力学及工程学术研讨会”。

研讨会将以促进非饱和土与特殊土力学的理论和技术发展为宗旨,以“探索前沿,服务工程,实事求是,百家争鸣”为方针,以发展新质生产力与科技创新为中心议题,对非饱和土、黄土、膨胀土、冻土、分散土、软土、盐渍土、红黏土、残积土、海洋土、人工填土等特殊土的基本性质、测试技术、理论模型、计算方法、工程应用、地基处理、基坑支护、桩基工程、地下工程、边坡工程、水土保持工程、生态修复与环境工程等方面研究的新成果、新技术、新材料、新工艺与新经验进行广泛深入的学术交流。

**主办单位:** 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 西北农林科技大学。

**承办单位:** 西北农林科技大学

**会议议题:** ①非饱和土与特殊土的基本特性研究(包括持水、渗水、渗气、变形、强度、屈服等静-动力学特性与热力学特性,电磁学特性与物理-化学特性等);②非饱和土与特殊土室内和现场测试新技术、新方法(包括量测吸力、水分、应力、变形、孔隙和微细观结构等方面);③非饱和土与特殊土的力学理论(包括应力理论、强度理论、本构理论、多相多场

耦合分析理论、土压力理论、承载力理论、变形局部化理论和边坡渐近破坏理论等);④非饱和土与特殊土的地基变形及控制、土与结构物的相互作用;⑤非饱和土与特殊土地区的基坑工程、基础工程和地下工程;⑥非饱和土与特殊土的地基处理及土体加固的新工艺、新材料;⑦非饱和土与特殊土地区的滑坡灾变机理及边坡治理与防护;⑧非饱和土与特殊土地区的地质灾害、水土流失的机理和防治;⑨非饱和土与特殊土相关的重大岩土工程实录和新经验(包括能源交通、水利水电、城乡建设、机场、矿山、通讯、国防等方面);⑩非饱和土与特殊土相关的绿色环保节能技术、废物处置与资源化利用;⑪非饱和土与特殊土相关问题的数值分析新方法、软件开发设计及工程应用;⑫“一带一路”沿线工程建设中的非饱和土与特殊土疑难问题的实践与认识;⑬人工智能技术在非饱和土与特殊土工程中的应用;⑭其他岩土力学与工程问题。

论文经本次会议学术委员会和组织委员会组织专家评选后,推荐到《岩土工程学报》(正刊和增刊)、《地震工程学报》、《中国水利水电科学院学报》、《水资源与水工程学报》、《水利与建筑工程学报》等刊物上发表。

**联系方式:** 孟敏强(15691850562), 孙增春(18716281569), 武智鹏(18272733775), 茹含(18700948223), 成晓峰(18040106751), 董欢(18492886514), 王雨静(18041106326); [tst2025@nwafu.edu.cn](mailto:tst2025@nwafu.edu.cn) (投稿专用邮箱)。