

微生物菌剂对沙化土壤保水及促生长效应的影响

皇晓刚, 陈敏洁, 郑春丽, 王哲

(内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: [目的] 探究微生物菌剂对沙化土壤保水性能的改良作用及其植物促生效应的机制, 为沙化土壤的水分保持能力提升和农业可持续发展提供参考。[方法] 选取 3 种芽孢杆菌为试验材料, 采用室内渗透蒸发试验与田间试验相结合, 从土壤保水性能、团聚体组成、酶活性及植物生理等指标, 综合评价不同微生物菌剂对沙化土壤的改良效果。[结果] 与对照相比, 3 种菌剂和双菌剂处理分别使大团聚体 (>0.25 mm) 比例增加 23.09% 和 32.51%; 3 种菌剂处理使有机碳含量增加 2.96 g/kg, 总氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别增加 21.54%, 61.50%, 312.16% 和 30.17%; 不同菌剂对土壤酶活性的影响存在差异, 3 种菌剂处理显著提高过氧化物酶和蔗糖酶活性; 3 种菌剂处理显著促进植物生长, 表现为株高、根长及地下生物量占比的显著增加, 根冠比较对照高 5.0%。[结论] 芽孢杆菌菌剂可有效改良沙化土壤, 通过改善土壤结构, 降低水分蒸发量, 提高养分含量等途径实现促生效应。其中, 3 种菌剂处理在植物促生方面表现出显著优于单菌剂处理的协同效应。

关键词: 微生物菌剂; 沙化土壤改良; 土壤保水性能; 植物促生

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0153-08

中图分类号: X172, S156.5

文献参数: 皇晓刚, 陈敏洁, 郑春丽, 等. 微生物菌剂对沙化土壤保水及促生长效应的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 153-160. Huang Xiaogang, Chen Minjie, Zheng Chunli, et al. Effects of microbial inoculants on soil water retention and promotion of plant growth efficiency in desertified soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 153-160. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.012; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.012.

Effects of microbial inoculants on soil water retention and promotion of plant growth efficiency in desertified soil

Huang Xiaogang, Chen Minjie, Zheng Chunli, Wang Zhe

(School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: [Objective] The effects of microbial inoculants on soil water-retention capacity and plant growth-promotion mechanism in desertified soil were explored in order to provide references for water-retention capacity improvement and sustainable agricultural development. [Methods] Three *Bacillus* spp. were used. By combining indoor infiltration evaporation experiments with field experiments, the effects of different microbial inoculants on desertified soil were comprehensively evaluated using indicators such as soil water retention performance, aggregate composition, enzyme activity, and plant physiology. [Results] Compared with the control group, the triple and dual bacterial inoculant treatments increased the proportion of large aggregates (>0.25 mm) by 23.09% and 32.51%, respectively. The triple bacterial inoculant treatment increased the organic carbon content by 2.96 g/kg, and the total and alkali-hydrolyzed nitrogen, and available phosphorus and potassium contents by 21.54%, 61.50%, 312.16% and 30.17%, respectively. The effects of different bacterial inoculants on soil enzyme activity vary. The triple bacterial inoculant treatment significantly increased peroxidase and sucrase activity and significantly promoted plant growth, which manifested as a significant increase in plant height, root length, proportion of underground biomass, and the root cap increased by 5.0% compared with the control treatment. [Conclusion]

收稿日期: 2025-01-07

修回日期: 2025-03-28

采用日期: 2025-03-31

资助项目: 自治区直属高校基本科研业务费项目“绿色生物肥料结合微生物菌剂混配技术对黄河几字湾流域生态脆弱区土壤改良效果的研究”(2023XKJX015); 国家自然科学基金: “蓝藻结皮—生物炭对北方轻稀土尾矿库周围土壤中重金属风蚀和淋滤迁移扩散的长效阻控机制”(52264013)

第一作者: 皇晓刚(1999—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境修复。Email: huangxg1213@163.com。

通信作者: 郑春丽(1979—), 女(汉族), 内蒙古自治区兴安盟人, 博士, 教授, 主要从事矿区生态环境修复研究。Email: zhengchunli1979@163.com。

Bacillus inoculants can effectively improve desertified soil and achieve growth-promotion effects by improving the soil structure, reducing water evaporation and increasing nutrient content. Among them, the triple bacterial inoculant treatment showed a significantly improved synergistic effect than a single bacterial inoculant treatment in promoting plant growth.

Keywords: microbial inoculants; improvement of desertified soil; soil water retention capacity; promotion of plant growth

中国是全球受土地沙化影响最显著的国家之一^[1]。内蒙古西部地区因叠加性自然因素与人为扰动的双重作用,形成了以风蚀为主,水蚀为辅的复合侵蚀格局,现已成为中国沙化土地分布最密集、退化程度最严重的典型区域^[2]。当前沙化治理技术体系主要包含工程、化学及生物3类传统方法,但均存在显著局限性:工程治沙虽见效迅速但存在工程体量庞大、防护稳定性差的特性,仅能作为应急性临时措施;化学固沙剂虽能快速形成结皮却面临成本高昂及生态风险的双重制约;而生物治沙虽具生态安全性,但受制于植物生长周期长,立地条件适应性差等瓶颈,导致治理效能难以持续提升^[3]。

微生物改良相较传统治沙手段具有显著成本优势,尤其在长期和大规模工程中体现突出^[4]。芽孢杆菌作为土壤分布广泛的生防菌,其突出的环境适应性和抗逆特性使其成为理想生物改良剂。研究表明其分泌的多糖类代谢产物可作为生物胶结剂,通过促进土壤微颗粒聚合成大团聚体,有效抑制风蚀水蚀导致的颗粒迁移,同步提升土壤结构稳定性与水力渗透性^[5-6]。此外,芽孢杆菌的活动还会增加土壤中的孔隙度,建立了高效的水气传输通道,提升植物根系在干旱条件下水分获取效率^[7]。芽孢杆菌属微生物通过分泌胞外磷酸酶、蛋白酶及有机酸代谢产物,可有效活化土壤中难溶性矿质养分(如磷、钾等),促进其向植物有效态转化,进而提升土壤养分生物有效性^[8]。该生理过程同步改善土壤物理结构(如土壤团聚体形成及孔隙度优化),显著增强土壤保水蓄肥能力^[9]。在沙化土壤区域,这种“养分活化—结构改良”的协同效应为先锋植物提供了必要的营养基础与立地条件,通过提高根际微生物活性与

有机质积累,最终促进植物群落定居并加速生态系统的正向演替^[10]。

基于此,本研究以沙化土壤为研究对象,3种不同芽孢杆菌为研究材料,通过对比不同微生物菌株处理下的沙化土壤,分析了保水能力、土壤酶活性的变化以及植物生长状况。研究结果为沙化土壤的持水保水能力和促进植物生长提供实用技术策略。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验菌株及培养基

(1) 研究选用本实验室自稀土矿区筛选量产的一种高效产脲酶巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*)(现保藏于中国微生物保藏中心,CGMCC, 27 818,有效活菌数 $\geq 1.00 \times 10^{11}$ CFU/g),其余2种菌粉产品——胶冻样芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)(有效活菌数 $\geq 1.00 \times 10^{10}$ CFU/g)和巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)(有效活菌数 $\geq 2 \times 10^{10}$ CFU/g)均购自于内蒙古邦吉生物科技有限公司。

(2) 培养基有15 g/L糖蜜,5 g/L大豆蛋白胨,0.4 mol/L尿素,0.5 g/L磷酸二氢钾。

1.1.2 采样点布设及测试土壤理化性质

研究区属温带大陆性气候,年均降水量375~415 mm,主要集中于6—8月。研究区土壤类型为灰褐土,质地为砂质黏壤土。供试土壤于2023年7月5日从内蒙古自治区呼和浩特市盛乐镇六犏牛村(40°61'28"N, 111°87'07"E)采集,按5点采样法采集0—20 cm土壤,混匀过5 mm筛,带回实验室供室内试验使用。供试土壤基本理化性质见表1。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of test soil

| 项目 | pH值 | 电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$) | 容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 含水率/ % | 有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 总氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|----|------|---|--|-----------|---|--|--|--|--|
| 数值 | 8.33 | 370.67 | 1.57 | 6.49 | 4.97 | 0.817 | 129.543 | 8.39 | 87.553 |

1.2 试验方法

1.2.1 保水持水能力试验

试验装置由有机玻璃材质土柱(直径8 cm×高

25 cm)和恒压供水系统构成。土柱底端设置0.5 cm厚底板,中央预留直径0.2 cm排气孔,底部内置双层纱布与定量滤纸防止沙土渗出,柱体内壁均匀涂布

凡士林密封层以防止侧渗。参照原土 1.57 g/cm^3 容重标准,将菌粉按设定质量比例与风干土样充分混匀后,分层均质填装。供水系统采用输液袋改装的恒压供水装置,通过水位调节阀维持土柱顶端恒定水头。试验启动后,记录湿润锋运移过程:初始阶段每1分钟精密测定湿润锋距柱底距离,连续获取5组数据后调整为2 min间隔记录,直至湿润锋抵达底部排气孔即终止试验^[11],每组试验重复3次。将上述试验土柱继续注水,在土柱完全吸水至饱和时,撤掉供水,将土柱置于自然环境中,每隔1周测定土柱质量,直到土柱质量不发生明显变化时停止记录。

1.2.2 田间试验设计

田间试验于六犏牛村开展,试验分为7个组,每组试验样地设置3个长13.5 m,宽8 m的重复样方,为防止出现菌剂相互渗透影响试验结果,每组试验样地之间相隔1 m。田间试验所需菌液均由大白桶培养活化。其中,巨大芽孢杆菌与胶冻样芽孢杆菌均需按照每1 kg菌粉配以500 g糖蜜,25 L水在20~30 °C下培养12~24 h,每666.7 m²地施用150 L培养后的菌液;巴氏芽孢杆菌则是需按每666.7 m²面积150 L培养基添加3.5 kg菌粉直接施加。将培养好的菌液按分区要求,分别喷洒在不同处理组中,采用农用旋耕机进行翻耕,深度为20 cm。持续监测pH值变化,直至pH值回落到正常水平开始播种。

植物选用当地抗旱先锋植物迷迭香(*Salvia rosmarinus*),于春季进行播种,植物指标于2023年9月16日进行采集重复测定3次。该植物喜温暖,较耐旱且可作药用,砂质土壤由于较好的排水性更有利于该植物生长发育。

1.2.3 指标测试方法

土壤pH值由pH计(pHS-3 C型)按水土比2.5:1(W/V)测定,土壤酶活由南京建成生物工程研究所酶活试剂盒(货号分别为A121-1-1;T005-1-1;T007-1-1)测定,土壤有机碳含量采用NY/T 1121.6-2006中土壤检测第6部分:土壤有机质-重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤全氮含量采用LY/T 1228—2015森林土壤氮-硫酸-加速剂消解,凯氏法测定;土壤碱解氮含量采用LY/T 1228—2015森林土壤水解性氮-碱解扩散法测定;土壤有效磷采用NY/T 1121.7—2014中土壤检测第7部分:土壤有效磷-碳酸氢钠溶液浸提,钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用NY/T 889—2004土壤速效钾和缓效钾-乙酸铵浸提-火焰光度计测定土壤速效钾含量,土壤团聚体采用干筛法测定。植物鲜重及根冠比的测量都是从不同处理组中随机取5株植株,装于自封袋带回实验

室测定,根冠比由植物地上部分和地下部分的干重比值确定。

1.2.4 数据分析

用Excel 2021和SPSS 21进行数据处理,Origin 2024进行作图,以Duncan检验法检验处理间差异显著性($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同微生物菌剂对沙化土壤保水持水能力和团聚体的影响

2.1.1 不同处理对土壤保水持水能力的影响

经过不同微生物菌剂处理,菌剂处理组的湿润锋移动速度明显增加(图1a),单菌处理组中巴氏芽孢杆菌的湿润锋移动更快,在8 min时就已经到达了土柱底部,表明巴氏芽孢杆菌处理较其他2种菌剂处理后土壤的渗透性更好;同时双菌剂处理较3种菌剂处理组的湿润锋移动更快,湿润峰在更短的时间内到达了土柱的底部,这表明其渗透性较3种菌剂处理更好。从处理后土壤的渗透性来看,巴氏芽孢杆菌处理>双菌剂处理>胶冻样芽孢杆菌处理>3种菌剂处理。保水试验结果显示,单菌剂处理组的保水能力较双菌剂及3种菌剂处理组强,单菌剂处理组中保水能力最强的是巨大芽孢杆菌处理组(图1a),两个月时间的水分蒸发量只有6.93%,较双菌剂处理组的水分蒸发量降低了6.87%。双菌剂处理组水分蒸发量较对照并没有明显降低,但是3种菌剂处理组的水分蒸发量相对对照组反而有所上升,两个月的水分蒸发量达到18.82%,较对照增加了3.67%。

2.1.2 不同处理对土壤团聚体的影响

田间土壤在施加菌剂7~9 d后,将不同菌剂处理土壤按照原来的结构面取样,去除表层土壤和土铲触面的土壤。均匀地自0—20 cm土层取约2 kg土壤,去除植物根系和石块,置于不易变形的容器中带回实验室风干后进行干筛试验。结果显示,所有处理组都会增加大团聚体(>0.25 mm)的占比(表2),其中大团聚体占比显著增加的为双菌剂处理和3种菌剂处理组,大团聚体占比分别达到了69.06%和59.64%,较对照分别增加了32.51%和23.09%。巴氏芽孢杆菌处理组增加最不显著,较对照仅增加了14.81%,其中粒径大于0.5 mm的大团聚体的增加仅占到6.1%。

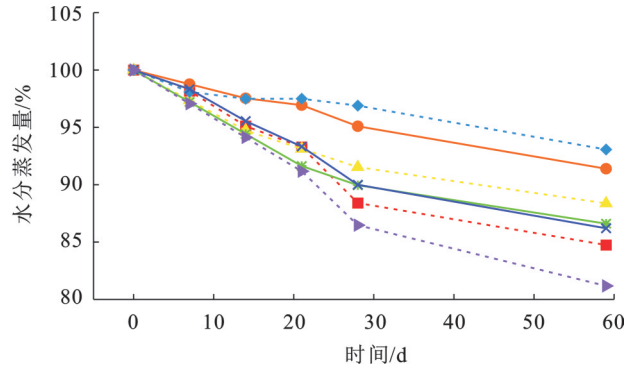
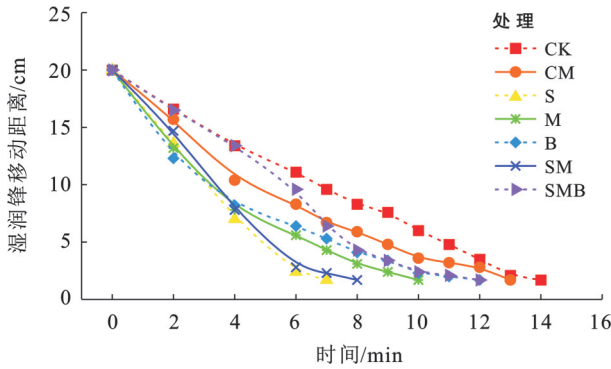
2.2 不同微生物菌剂对沙化土壤理化指标和酶活性的影响

2.2.1 施加菌剂对土壤pH值和电导率的影响

田间土壤在施加菌剂7~9 d内,pH值会发生较大的变化,待到该周期结束后,pH值会逐渐趋于稳

定。表 3 表明,双菌剂处理和 3 种菌剂处理组的 pH 值都发生了下降,分别较对照 pH 值下降了 0.6 和 0.13;3 种菌剂处理组的电导率也显著升高,较对照提升了 1 303.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$,为对照组的 4.5 倍;土壤有机碳含量只有胶冻样芽孢杆菌处理轻微降低,其他

所有菌剂处理组有机碳含量较对照显著提高,涨幅达到了 21.39%~184.85%,增加最显著的为巨大芽孢杆菌处理和 3 种菌剂处理组,有机碳含量达到 14.157 g/kg 和 7.933 g/kg,较对照组分别增加了 9.19 g/kg 和 2.96 g/kg。



注:CK为对照处理组;CM为基质处理组;S为巴氏芽孢杆菌;M为胶质芽孢杆菌;B为巨大芽孢杆菌;SM为巴氏+胶质芽孢杆菌;SMB为巴氏+胶质+巨大芽孢杆菌。下同。

图 1 不同微生物菌剂处理对土壤入渗和水分损失的影响

Fig.1 Effect of different microbial agent treatments on soil infiltration and water loss

表 2 处理后不同粒径团聚体占比

Table 2 Agglomerate percentage of different size particles after treatment

| 处理 | 不同粒径团聚体占比/% | | | | | |
|-----|-------------|-------------|----------|--------|--------|-------|
| | <0.25 mm | 0.25~0.5 mm | 0.5~1 mm | 1~2 mm | 2~5 mm | >5 mm |
| CK | 63.45 | 18.25 | 5.60 | 3.75 | 4.10 | 4.85 |
| CM | 41.20 | 13.65 | 13.55 | 12.25 | 10.40 | 8.95 |
| S | 48.64 | 26.96 | 8.76 | 4.92 | 4.56 | 6.16 |
| M | 46.30 | 11.86 | 10.64 | 9.66 | 11.40 | 10.14 |
| B | 41.06 | 19.68 | 15.78 | 10.8 | 9.22 | 3.46 |
| SM | 30.98 | 23.68 | 16.22 | 10.52 | 9.68 | 8.92 |
| SMB | 40.36 | 14.24 | 12.04 | 11.78 | 12.48 | 9.10 |

表 3 不同处理的 pH 值、电导率和有机碳变化
Table 3 Changes in pH value, EC and organic matter in different treatments

| 处理 | pH 值 | 电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$ | 有机碳/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ |
|-----|------------------------|---|--|
| CK | 8.33±0.17 ^b | 370.67±7.84 ^f | 4.97±0.31 ^d |
| CM | 7.83±0.18 ^a | 1 192.67±21.45 ^d | 7.23±0.67 ^b |
| S | 8.35±0.13 ^b | 551.33±3.18 ^e | 6.03±0.46 ^c |
| M | 8.38±0.14 ^b | 1 449.67±17.66 ^b | 4.82±0.36 ^d |
| B | 8.30±0.13 ^b | 1 209.33±13.28 ^d | 14.16±1.08 ^a |
| SM | 8.28±0.17 ^b | 1 674.00±23.79 ^a | 6.26±0.47 ^c |
| SMB | 8.20±0.03 ^b | 1 411.00±23.22 ^c | 7.93±0.26 ^b |

注:不同小写字母代表不同处理土壤间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2.2 施加菌剂对氮磷钾含量的影响

由图 2 可知,所有微生物菌剂处理都显著提升土壤总氮、碱解氮、有效磷及速效钾。其中巨大芽孢杆菌处理对总氮、有效磷和速效钾的提升最为显著,分别较对照提高了 60.71%, 524.19%, 262.49%; 双菌

剂处理较对照分别提高了 19.58%, 288.91%, 105.93%; 3 种菌剂处理组分别增加了 21.54%, 312.16%, 130.17%。此外,碱解氮则是胶冻样芽孢杆菌提升最显著,较对照提升了 258.56%, 双菌剂和 3 种菌剂处理组分别提高了 154.28% 和 61.50%。总体来看,3 种菌剂处理后对土壤中氮磷钾的含量均有较显著提升。

2.2.3 施加菌剂对土壤酶活性的影响

不同微生物菌剂对土壤酶活表现为不同的影响(表 4)。其中,单施巴氏芽孢杆菌处理组的脲酶增强最显著,较对照显著增加了 84.74%。3 种菌剂处理组土壤脲酶活性较对照下降了 32.27%,但其过氧化物酶活性和蔗糖酶活性较其他处理组显著增加,较对照土壤过氧化物酶和蔗糖酶活性分别显著增加了 15.24% 和 125.54%,其中单施巴氏芽孢杆菌及胶冻样芽孢杆菌的处理组过氧化物酶活性较对照分别下降了 18.38% 和 3.27%。

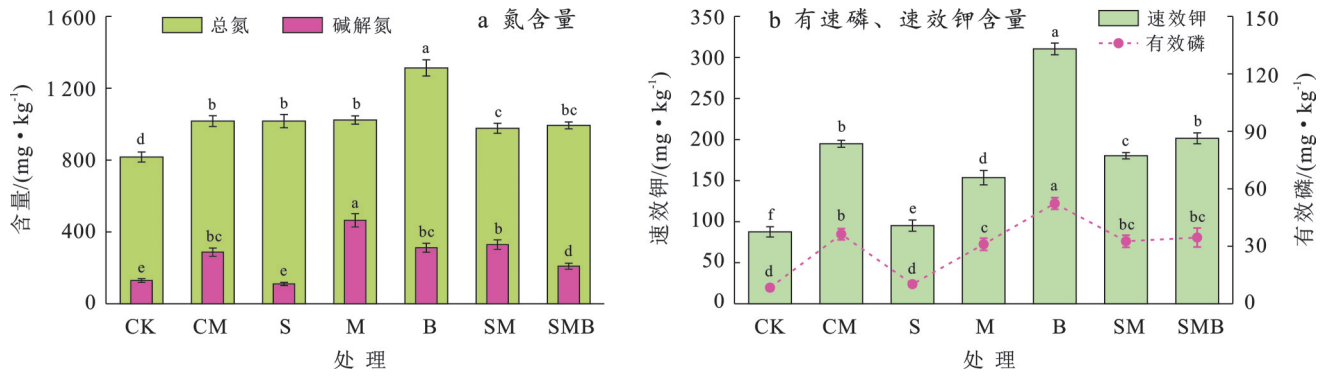


图2 不同微生物菌剂对土壤总氮、碱解氮(a)和有效磷、速效钾(b)的影响
Fig.2 Effects of different microbial inoculants on soil total nitrogen, alkaline dissolved nitrogen (a), and effective phosphorus, quick potassium (b)

表4 不同微生物菌剂对酶活性的影响
Table 4 Effect of different microbial inoculants on enzyme activities

| 处理 | 脲酶/ (U·g ⁻¹) | 过氧化物酶/ (μmol·h ⁻¹ ·g ⁻¹) | 蔗糖酶/ (mg·d ⁻¹ ·g ⁻¹) |
|-----|------------------------------|--|--|
| CK | 970.48±32.33 ^c | 262.862±13.12 ^c | 4.189±0.45 ^d |
| CM | 1 031.28±33.24 ^{cd} | 296.851±14.12 ^b | 7.333±0.44 ^{bc} |
| S | 1 792.88±32.1 ^a | 214.562±13.12 ^d | 9.619±0.62 ^a |
| M | 1 103.44±46.48 ^b | 254.275±13.61 ^c | 6.876±0.43 ^{bc} |
| B | 1 065.12±29.67 ^{bc} | 309.016±14.31 ^{ab} | 6.576±0.31 ^c |
| SM | 1 002.00±30.31 ^{de} | 323.685±13.64 ^a | 7.619±0.64 ^b |
| SMB | 657.28±26.42 ^f | 302.934±14.15 ^{ab} | 9.448±0.84 ^a |

2.3 不同微生物菌剂对植物的促生效应

无论是单菌剂还是多菌剂处理均对植物的生长

有显著促进作用。其中,3种菌剂处理组的效果较其他处理组更加显著(图3)。

菌剂处理显著增加植物的株高、根长及地上部分鲜重。由图3可见植物株高、根长及地上部分鲜重分别增加了32.28%~205.47%,3.14%~127.79%,27.72%~286.14%。

3种菌剂处理对鲜重和株高的促进效果最强,对根系的影响也是最大,株高、根长和鲜重分别较对照增加15.02 cm,13.84 cm和32.82 g,同时,单施巴氏芽孢杆菌对鲜重和株高的促进效果也很明显,分别增加了232.26%和171.27%。微生物菌剂处理后植物的根冠比显著升高,其中最显著的是3种菌剂处理组,升高了5.0%。

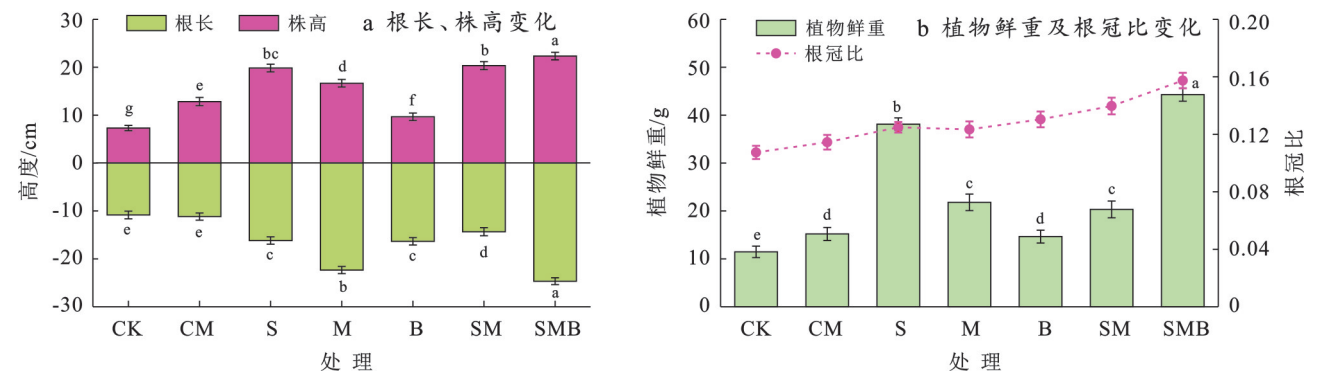


图3 不同微生物菌剂对植物株高、根长(a)和鲜重、根冠比(b)的影响
Fig.3 Effect of different microbial inoculants on plant height, root length (a), and fresh weight, root-crown ratio (b) of plants

2.4 土壤理化指标相关性分析

由以上土壤理化指标分析可知,不同微生物菌剂和不同组合施用会对沙化土壤的物理结构及理化性质产生影响,为了进一步地了解沙化土壤在微生物菌剂处理后其物理结构和理化指标之间的相关性,本研究利用SPSS进行了相关性分析。

图4为土壤不同指标之间的相关性分析,土壤中

与有机碳与总氮、速效钾、有效磷呈显著正相关($p < 0.05$);土壤总氮与有效磷、速效钾呈显著正相关($p < 0.05$);有效磷与速效钾呈正相关;脲酶与过氧化物酶活性呈显著负相关($p < 0.05$)。渗透系数、团聚体、水分蒸发量与土壤指标相关性分析结果显示,团聚体与电导率、有效磷呈显著正相关($p < 0.05$);水分蒸发量与有机碳呈正相关($p = 0.046$)。研究结果表明,土

壤有机碳含量越多,土壤的水分挥发量越大;土壤电导率与有效磷含量越高,土壤的大团聚体颗粒就越多。

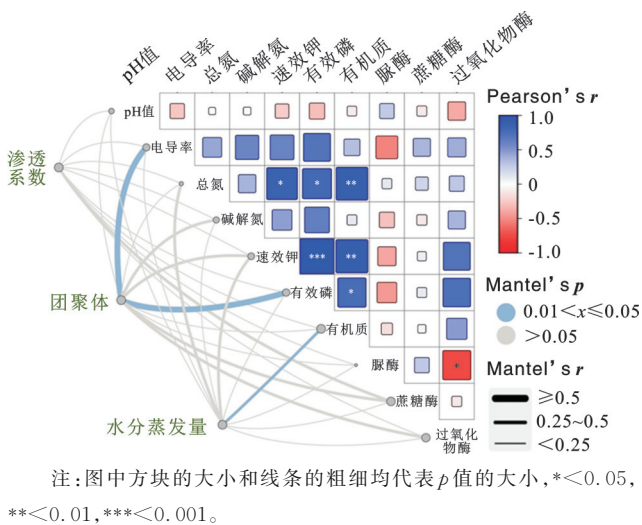


图4 不同微生物菌剂处理下土壤保水性能与理化指标的相关性

Fig.4 Correlation between soil water retention properties and physicochemical indicators under different microbial inoculants treatments

3 讨论

3.1 不同处理对沙化土壤物理结构及保水能力的影响

研究表明,3种菌剂与双菌剂处理显著促进了土壤中大团聚体的形成,进而提升了土壤的渗透性能。这一现象可能与微生物生长代谢产物及植物根系分泌物的协同作用密切相关,两者共同促进了小粒径土壤颗粒的胶结,形成大团聚体^[12-13]。大团聚体之间形成的较大孔隙有利于水分的贮存,从而减少地表径流,增强土壤的持水能力,这一发现与曹丽花等^[14]的研究结果一致。此外,团聚体内部存在大量持水孔隙,其保水能力强,微生物菌剂处理后,通过优化孔隙结构,显著提升了沙化土壤的保水性能。需要指出的是,土壤孔隙过大或过小均不利于水分的保持,而水分蒸发量试验结果进一步验证了这一结论。

3.2 不同处理对沙化土壤指标和酶活性的影响

微生物菌剂在土壤中的作用机制具有高度复杂性。本研究表明,微生物菌剂对土壤电导率及有机碳含量的影响尤为显著,且不同菌种的作用效果存在显著差异。具体而言,胶冻样芽孢杆菌显著提高了土壤电导率与碱解氮含量,而巨大芽孢杆菌则显著提升了土壤有机碳含量。当3种菌剂复合施用,土壤有机碳、氮、磷、钾含量均呈现显著增加趋势,

这一结果与江丽华等^[15]、马馥扬等^[16]在盐碱土壤中施用芽孢杆菌菌剂的研究结论一致。上述差异可能与菌剂的最大添加量及施用方式等因素密切相关。综合分析表明,土壤理化指标的变化动态受菌剂类型、添加量及施用方式等多种因素的共同调控。

本试验采用的3种芽孢杆菌菌粉均具备一定的产脲酶能力。研究表明,产脲酶菌能够通过尿素水解作用调节或维持生长环境的pH值^[17]。本试验区域土壤偏碱性,经微生物菌剂处理后,所有处理组的pH值并无显著变化,只有基质处理和3种菌剂处理组较对照处理分别使pH值下降了0.6和0.13。这一现象归因于芽孢杆菌在适宜pH范围内通过尿素水解作用调节环境pH值,以优化其生长条件,从而导致土壤pH值降低^[18]。脲酶活性检测结果表明,巴氏芽孢杆菌的产脲酶能力显著高于其他2种芽孢杆菌菌株及混合菌剂处理组。然而,巴氏芽孢杆菌处理组的过氧化物酶活性显著低于其他处理组,这一结果与颜路明等^[19]的研究趋势一致。该现象可能与其他处理组中较高的盐离子浓度对土壤微生物与植物生理活动有关^[20]。盐离子浓度一方面抑制了土壤微生物分泌脲酶的能力,同时降低了原土壤中酶的活性;另一方面,高盐浓度诱导了土壤微生物与植物的氧化胁迫,促使过氧化物酶合成增加,以维持其氧化平衡并改善土壤环境^[21]。

3.3 不同处理对植物的促生效应

芽孢杆菌所产生的物质能够充当植物应对水分胁迫的内在调节剂,助力植物在干旱环境中实现更好的生存^[22]。植物的生长状况可通过多个指标来衡量,其中株高是直观反映植物生长状况的重要指标。此外,植物根系发育对养分吸收及器官生长具有决定性作用。试验结果表明,微生物菌剂处理后,植物株高均显著增加,其中3种菌剂处理对株高和根长的促进作用尤为显著。研究表明,在干旱条件下,微生物菌剂可通过在植物根系合成生长素,增加根系长度及比表面积,从而增强植物抗逆性,促进其生长发育^[23]。为进一步验证微生物菌剂对植物根系的影响,本研究测定了植物根冠比,结果显示,3种菌剂处理组的根系发育最为显著,其根冠比显著高于其他处理组。这一现象归因于微生物在3种菌剂处理组植物根系中的高效定殖^[24],定殖微生物通过多种途径合成生长激素^[25],显著提升了植物抗逆性,进而促进3种菌剂处理组植物生物量的增加^[26]。

本研究初步探讨了不同微生物菌剂在水分胁迫条件下对土壤理化指标及植物生长的影响,为微生物菌剂在沙化土壤中的应用提供了科学依据。然

而,研究区域具有局限性,未来可进一步拓展至其他类型沙化土壤中进行验证。此外,3种菌剂处理组对土壤的改良机制尚未完全阐明,后续研究可聚焦于土壤微生物群落结构及其代谢产物的分析,以明确微生物对沙化土壤改良的作用机理。

4 结论

(1) 与对照相比,微生物菌剂处理能够显著提升沙化土壤渗透性和保水性能,同时能够显著增加土壤中大团聚体($>0.25\text{ mm}$)的比例,3种菌剂处理组较对照提高了23.09%。

(2) 3种菌剂处理组有机碳含量较对照增加了2.96 g/kg。显著提高了土壤养分含量,其总氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量,分别较对照增加了21.54%,61.50%,312.16%和30.17%,差异均达到显著水平($p<0.05$)。不同微生物菌剂对土壤酶活性的影响存在显著差异($p<0.05$)。巴氏芽孢杆菌处理表现出较强的脲酶活性,但其过氧化物酶活性相对较低。相比之下,3种菌剂处理显著提高了土壤过氧化物酶和蔗糖酶活性,但其脲酶活性相对较低。

(3) 3种菌剂处理组的株高和根长分别较对照增加了18.7%和22.3%($p<0.05$)。同时显著提升了植物地下生物量的比例,使根冠比达到最大值,较对照增加了5.0%。这一变化增强了植物应对干旱胁迫的能力,有助于植物在干旱环境中更好地生长。

参考文献(References)

- [1] 郭瑞霞,管晓丹,张艳婷.我国荒漠化主要研究进展[J].干旱气象,2015,33(3):505-513.
Guo Ruixia, Guan Xiaodan, Zhang Yanting. Main advances in desertification research in China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2015,33(3):505-513.
- [2] 杨朔,杨雯静,王勇胜.呼包鄂榆城市群生境质量时空分异及影响因素研究[J].西北林学院学报,2024,39(3):196-204.
Yang Shuo, Yang Wenjing, Wang Yongsheng. Spatio-temporal characteristics of habitat quality and its influencing factors in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(3):196-204.
- [3] 王涛.中国防沙治沙实践与沙漠科学发展的70年:II.开拓篇(2)[J].中国沙漠,2023,43(3):1-8.
Wang Tao. The practice on prevention and control of aeolian desertification and the development of desert science in China for 70 years: Pioneering part (2) [J]. Journal of Desert Research, 2023,43(3):1-8.
- [4] 曹蕾,韩天虎,贺访印,等.微生态制剂在生态环境治理中的应用[J].甘肃林业科技,2024,49(2):77-82.
Cao Lei, Han Tianhu, He Fangyin, et al. The application of microbial ecological agents in ecological environment governance [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2024,49(2):77-82.
- [5] 刘文谨,蒋福祯,祁凯斌,等.不同施肥量和播种量对高寒矿区植被恢复和土壤质量的影响及综合评价[J].草业学报,2025,34(5):27-39.
Liu Wenjin, Jiang Fuzhen, Qi Kaibin, et al. Effects of different fertilizer application and seeding rate on vegetation recovery and soil quality in alpine mining area and comprehensive evaluation [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025,34(5):27-39.
- [6] 王一腾,钱怡雯,刁琦,等.耐旱菌研究热点变迁及其提高植物耐旱性的机制[J].微生物学通报,2024,51(11):4370-4382.
Wang Yiteng, Qian Yiwen, Diao Qi, et al. Drought-tolerant microorganisms: Changes in research hotspots and mechanisms of improving plant drought tolerance [J]. Microbiology China, 2024,51(11):4370-4382.
- [7] Aqel H, Farah H, Al-Hunaiti A. Ecological versatility and biotechnological promise: Comprehensive characterization of the isolated thermophilic *Bacillus* strains [J]. PLoS One, 2024,19(4):e0297217.
- [8] 邓杰文,石杨,李斌,等.微生物在沙化土壤修复中的应用研究进展[J].应用与环境生物学报,2022,28(5):1367-1374.
Deng Jiewen, Shi Yang, Li Bin, et al. Research progress on the application of microorganisms in sandy land remediation [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022,28(5):1367-1374.
- [9] Castro-Restrepo D, Dominguez M I, Gaviria-Gutiérrez B, et al. Biotization of endophytes *Trichoderma asperellum* and *Bacillus subtilis* in mentha spicata microplants to promote growth, pathogen tolerance and specialized plant metabolites [J]. Plants, 2022,11(11):1474.
- [10] 丁娜,林华,张学洪,等.植物根系分泌物与根际微生物交互作用机制研究进展[J].土壤通报,2022,53(5):1212-1219.
Ding Na, Lin Hua, Zhang Xuehong, et al. Interaction mechanism between root secretion and rhizosphere microorganisms: A review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022,53(5):1212-1219.
- [11] Zhang Jihong, Wang Quanjiu, Mu Weiyi, et al. Experimental investigation of the different polyacrylamide dosages on soil water movement under brackish water infiltration [J]. Polymers, 2022,14(12):2495.
- [12] 谭文峰,许运,史志华,等.胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J].土壤学报,2023,60(5):1297-1308.
Tan Wenfeng, Xu Yun, Shi Zhihua, et al. The forma-

- tion process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5):1297-1308.
- [13] Ai Juanjuan, Banfield C C, Shao Guodong, et al. What controls the availability of organic and inorganic P sources in top-and subsoils? A ^{33}P isotopic labeling study with root exudate addition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 185:109129.
- [14] 曹丽花, 刘合满, 赵世伟. 不同改良剂对黄绵土水稳性团聚体的改良效果及其机制[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(5):37-41.
Cao Lihua, Liu Heman, Zhao Shiwei. Effect of soil conditioners on water stability of soil aggregates and its mechanisms in loessal soil [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(5):37-41.
- [15] 江丽华, 王梅, 张文君, 等. 固氮、解磷、解钾混合菌株协同固定化技术[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(12):18-21.
Jiang Lihua, Wang Mei, Zhang Wenjun, et al. Study of immobilization technique of nitrogen-fixing bacteria, phosphobacteria and silicate bacteria used for microbiological fertilizer [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(12):18-21.
- [16] 马馥扬, 曹巍巍, 彭昊, 等. 不同改良剂对盐渍土壤的综合改良效应研究[J]. *灌溉排水学报*, 2025, 44(1):89-96.
Ma Fuyang, Cao Weiwei, Peng Hao, et al. The effect of different soil amendment agents on physical and chemical properties of saline soils [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2025, 44(1):89-96.
- [17] Song Hewei, Wang Baoyu, Yu Zhiguo, et al. Multi-functional bacterium induced carbonate precipitation with low nitrogen effectively remediates cadmium polluted water [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 67:106204.
- [18] Xue Zhongfei, Cheng W C, Wang Lin, et al. Immobilizing lead in aqueous solution and loess soil using microbially induced carbonate/phosphate precipitation (MICP/MIPP) under harsh pH environments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 480:135884.
- [19] 颜路明, 郭祥泉. 盐碱胁迫对香樟幼苗根际土壤酶活性的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(4):733-737.
Yan Luming, Guo Xiangquan. Effect of salinity-alkalinity stress on the rhizosphere soil enzyme activity of camphor seedlings [J]. *Soils*, 2017, 49(4):733-737.
- [20] 谢显秋, 张瑞楠, 韦江璐, 等. 4株甘蔗固氮菌株活化土壤养分及影响土壤酶活的分析[J]. *分子植物育种*, 2024, 22(3):859-870.
Xie Xianqiu, Zhang Ruinan, Wei Jianglu, et al. Analysis of four nitrogen fixing sugarcane strains activating soil nutrients and affecting soil enzymes [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(3):859-870.
- [21] Liu Jie, Li Hui, Yuan Zhenyu, et al. Effects of microbial fertilizer and irrigation amount on growth, physiology and water use efficiency of tomato in greenhouse [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 323:112553.
- [22] Bi Yanpeng, Zhou Beibei, Ren Peiqi, et al. Effects of *Bacillus subtilis* on cotton physiology and growth under water and salt stress [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 303:109038.
- [23] 黄妍, 吴迪. 微生物合成吲哚乙酸及其对植物作用的研究进展[J]. *浙江农业科学*, 2024, 65(11):2659-2664.
Huang Yan, Wu Di. Research progress on microbial synthesis of indole-3-acetic acid and its effects on plants [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2024, 65(11):2659-2664.
- [24] Chen Qingchao, Hu Tao, Li Xiaohua, et al. Phosphorylation of SWEET sucrose transporters regulates plant root: Shoot ratio under drought [J]. *Nature Plants*, 2021, 8(1):68-77.
- [25] Narayanasamy S, Uthandi S. Plant growth promoting signatory volatiles emitted by a drought-tolerant bacterium *Bacillus altitudinis* FD48 and its role in moisture stress alleviation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant Stress*, 2024, 14:100621.
- [26] Moreno-Lora A, Velasco-Sánchez Á, Delgado A. Effects of microbial inoculants and organic amendments on wheat nutrition and development in a variety of soils [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(3):3329-3342.