DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.015 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.015
单小凤, 陈晓龙, 董智, 等. 淀粉基固沙剂对达拉特旗沙化耕地土壤改良效果研究[J]. 水土保持研究,2026,33(6):201-211,221.
Shan Xiaofeng, Chen Xiaolong, Dong Zhi, et al. Research on soil improvement effects of starch-based sand-fixing agents on desertified farmland in Dalad Banner[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):201-211,221.

淀粉基固沙剂对达拉特旗沙化耕地土壤改良效果研究

单小凤[1], 陈晓龙[1], 董 智[1,2], 孙飞洋[1], 秦韵涵[3], 安淳淳[1,2]
(1.山东农业大学 林学院 泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018; 2.山东省高等学校黄河流域水土保持与林草生态保育协同创新中心, 山东 泰安 271018; 3.润涵(山东)生态科技有限公司, 济南 250119)

摘 要:[目的]探究淀粉基固沙剂对沙化耕地土壤性质的影响,为干旱半干旱地区沙化土地修复与质量提升提供理论依据与实践指导。[方法]采用随机区组设计,于内蒙古达拉特旗沙化耕地设置对照(CK)及1∶35(G35),1∶75(G75),1∶125(G125)3个浓度处理,测定0—20 cm土层土壤理化及微生物等指标,通过构建最小数据集(MDS)量化了土壤改良效果。[结果]G75处理120 d后,土壤有机碳、全氮、速效磷、速效钾含量较CK分别提高15.61%,14.97%,7.89%,19.74%,G35处理后养分提升幅度更高;土壤酶活性呈浓度依赖性增强,G35处理后的土壤酶活性达到峰值,细菌丰富度和均匀度较CK分别下降11.9%,2.2%,黏球菌门相对丰度升至5.15%,菌群结构差异显著,G75处理表现出较优的生态稳定性;通过MDS计算出的土壤质量指数(SQI)排序为G35(0.69)>G75(0.48)>CK(0.41)>G125(0.30),其中CK与G125差异不显著,G35改土效率最优。[结论]淀粉基固沙剂通过"外源碳-微生物-养分"耦合机制发挥改土作用,高浓度以抑制微生物多样性为代价提升SQI,中浓度实现改土效率与生态安全的平衡,可为区域固沙剂优化配置及沙化耕地可持续管理提供理论支撑。

关键词:土壤改良; 淀粉基固沙剂; 沙化耕地; 土壤质量评价
中图分类号:S154.3; S152 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0201-11

Research on soil improvement effects of starch-based sand-fixing agents on desertified farmland in Dalad Banner

Shan Xiaofeng[1], Chen Xiaolong[1], Dong Zhi[1,2], Sun Feiyang[1], Qin Yunhan[3], An Chunchun[1,2]
(1.*Taishan Forest Ecosystem Research Station, College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong* 271018, *China*; 2.*Co-innovation Center for Soil-Water and Forest-Grass Ecological Conservation in Yellow River Basin of Shandong Higher Education Institutions, Tai'an, Shandong* 271018, *China*; 3.*Runhan (Shandong) Ecological Technology Co., Ltd., Jinan* 250119, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study explores the effect of starch-based sand-fixing agents on the soil properties of desertified farmland, thereby providing a theoretical basis and practical guidance for the restoration and quality improvement of desertified land in arid and semi-arid regions. [**Methods**] A randomized block design was adopted, and a control (CK) and three concentration treatments of 1∶35 (G35), 1∶75 (G75), and 1∶125 (G125) were set up in the desertified farmland of Dalad Banner, Inner Mongolia. Soil physicochemical and microbial indicators in the 0—20 cm soil layer were measured, and the soil improvement effect was quantified by constructing a minimum dataset (MDS). [**Results**] After 120 days of G75 treatment, the contents of soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium increased by 15.61%, 14.97%, 7.89%, and 19.74%, respectively, compared with CK. The nutrient increase under the G35 treatment was higher. Soil enzyme activity increased in a concentration-dependent manner, reaching a peak after the G35 treatment. Bacterial

收稿日期:2025-12-18 **修回日期:**2026-01-25 **接受日期:**2026-02-07
资助项目:内蒙古自治区科技计划(2025YFHH0153);内蒙古自治区"揭榜挂帅"项目(2024JBGS0013);国家自然科学基金(42071021)
第一作者:单小凤(2001—),女,湖南衡阳人,硕士研究生,研究方向为水土保持监测。E-mail:19860939659@163.com
通信作者:安淳淳(1992—),女,山东临沂人,博士,讲师,主要从事水土保持监测研究。E-mail:anchunchun213@163.com

richness and evenness decreased by 11.9% and 2.2%, respectively, compared with CK, while the relative abundance of Myxococcota increased to 5.15%, indicating significant differences in the microbial community structure. The G75 treatment showed better ecological stability. The soil quality index (SQI) calculated from the MDS was ranked as G35 (0.69) > G75 (0.48) > CK (0.41) > G125 (0.30), with no significant difference between CK and G125, and G35 exhibiting the best soil improvement efficiency. [**Conclusion**] Starch-based sand-fixing agents exert soil improvement effects through an "exogenous carbon-microorganisms-nutrient" coupled mechanism. High concentrations increase SQI at the expense of microbial diversity, while medium concentrations achieve a balance between soil improvement efficiency and ecological security. The findings provide theoretical support for the optimal allocation of sand-fixing agents and the sustainable management of desertified farmland in the region.

Keywords: soil improvement; starch-based sand-fixing agent; desertified farmland; soil quality assessment

土地沙化是中国国土安全和生态安全面临的主要威胁之一[1]。沙化土地一旦形成且未及时防控,在人类干扰与风力等因素共同作用下,其范围会持续扩大[2]。风蚀作用驱动下的沙化土地扩张,是引发干旱半干旱区耕地及绿洲农田土壤沙化的核心诱因。而耕地长期遭受风沙侵袭,就会逐步显现出土壤结构松散、表土粗化、保水保肥能力降低等明显的沙化与退化特征,这一系列变化最终造成耕地产能大幅降低,不仅影响区域农业生产稳定,更对当地经济发展形成严重制约[3]。内蒙古达拉特旗昭君镇位于库布其沙漠东缘,属典型沙化耕地分布区,土壤为砂壤土,黏结性差且风蚀风险高。该区域春季风频高、土壤干旱,地表裸露导致农田沙害频发,直接影响作物播种出苗效率。为防治沙化耕地的扩张蔓延与控制农田风蚀,生产上常采用营造防护林、采取保护性耕作、开展化学固沙等措施[4]。传统地膜覆盖防沙措施易在沙尘暴中破损,不仅增加农业生产成本,还会因地膜残留造成"白色污染",阻碍水肥运移并破坏土壤生态平衡[5]。

随着绿色发展与环保需求提升,传统化学固沙材料难降解、易残留,污染环境且易破坏生态平衡等局限性制约了其推广应用,并促进其向多元化发展[6]。当前化学固沙材料已突破传统无机、有机技术框架,衍生出改性木质素类、高分子聚合物类及植物基黏性胶等类型[7]。其中,淀粉基固沙剂以植物胶或改性淀粉为主体,因其可降解、无毒、低成本而成为近年来的热门固沙材料[8]。Yang等[9]将氧化玉米淀粉(OCS)作为基材制备的液态固沙抑尘剂抗水腐蚀能力可达96.82%。Dang等[10]制备出的聚丙烯酸-玉米淀粉(PACS)化学固沙材料具有优异的吸水与保水能力,同时表现出高达99.5%的优异固沙率。淀粉基固沙剂可以控制风蚀,避免土壤细粒物质与肥力损失。张晨旭[11]、杨子晋等[12]则研究了润涵(山东)生态科技有限公司生产的淀粉类液态固沙剂的抗水蚀、抗风蚀性能,为固沙剂应用于新疆、甘肃、内蒙古等风沙区农田风蚀控制提供了理论基础与数据支撑。目前淀粉基固沙剂在防风蚀与保水等方面已显优势,但是现有研究对于淀粉基固沙剂改土机制的解析有限,固沙改土与生态安全的平衡机制仍不明确,并且对于固沙剂浓度效应的研究不足,淀粉基固沙剂施用量与土壤改良效果的定量关系尚未建立,过高或过低浓度的生态风险(如孔隙堵塞、微生物抑制等)缺乏兼顾科学性与实用性的定量评价体系[13]。

近年来,最小数据集(Minimum Data Set, MDS)与土壤质量指数(Soil Quality Index, SQI)的结合为定量评价管理措施效应提供了新思路。大量研究采用最小数据集筛选核心指标以保障土壤质量评价的有效性,土壤质量指数法则通过整合实测值、权重及指标互作,实现更精准的土壤质量优劣判断[14]。近两年达拉特旗试验区应用淀粉基固沙剂喷洒技术后,已实现丰产增收,但施用浓度仍依赖经验估算,缺乏适配区域土壤类型与作物需求的量化标准,最优浓度的科学性尚未验证。基于此,本研究在当地农户农田中设置梯度浓度试验,聚焦0—20 cm耕作层,系统探究不同浓度固沙剂对土壤理化性质、酶活性及微生物群落的影响,通过耦合MDS与SQI构建定量评价体系,明确固沙剂浓度与土壤质量的关联及适宜阈值,为沙化耕地精准改良与固沙剂规范化推广提供实践支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗西部的昭君镇(40.226 87°N,109.613 73°E)。该区域属典型温带大陆性干旱季风气候,年平均日照时数约3 000 h,≥10 ℃积温为3 197.4 ℃,光能利用潜力较高;年均降水量311.8 mm,且降水多集中在7—9月;

多年平均风速为3.5 m/s,主导风向为W与NW。植被以沙生、旱生半灌木为主体,构成干草原与荒漠草原景观;粮食作物则以小麦、玉米为主要种植品种。为明确试验地土壤初始本底特征,于2024年5月固沙剂施用前采集0—20 cm土层样品,测定核心理化与生物指标。由表1可知,试验地土壤结构松散、黏结性差,符合沙化耕地典型特征;土壤pH值呈中性,电导率约为169.48 μs/cm,无盐碱化风险;土壤整体养分水平偏低,微生物群落结构稳定。该初始数据为后续评估固沙剂改土效应提供了重要本底参考。

表1　试验地0—20 cm土壤初始理化与生物性质

Table 1　Initial physicochemical and biological properties of 0—20 cm soil at test site

指标(简称)	值	单位
电导率(EC)	169.48±24.35	μS/cm
土壤pH值(pH)	7.19±0.11	—
容重(BD)	1.4±0.03	g/cm^3
毛管孔隙度(CP)	34.14±2.45	%
平均质量直径(MWD)	0.32±0.02	mm
几何平均直径(GMD)	0.18±0.00	mm
全氮(TN)	0.25±0.06	g/kg
碱解氮(AHN)	37.03±2.78	mg/kg
有机碳(SOC)	5.2±0.36	g/kg
速效磷(AP)	34.63±8.32	mg/kg
速效钾(AK)	87.42±9.32	mg/kg
淀粉酶活性(AA)	1951.68±324.64	μg/(h·g)
过氧化氢酶活性(CAT)	304.85±47.29	μmol/(h·g)
脲酶活性(UA)	660.88±65.37	U/g
蔗糖酶活性(SA)	56.83±7.9	U/g
中性磷酸酶活性(NPA)	52.84±5.83	nmol/(h·g)
均匀度指数(Pielou)	0.87±0.03	—
细菌丰富度(Nsp)	2708.8±379.85	—

注:“—”代表指标为无量纲数值。

1.2　试验材料

试验所用淀粉基固沙剂由润涵(山东)生态科技有限公司提供,为易溶于水的乳白色液体,主要成分为植物胶、改性淀粉。2024年5—9月在研究区采用随机区组设计,设4个处理:对照(记为CK,喷施等量清水),1∶35(G35),1∶75(G75),1∶125(G125)(固沙剂∶水,质量比),设3次重复,共12个小区(5 m×5 m)。2024年5月上旬播种春玉米(品种:吉农大889),采用机械化播种方式,株距25 cm、行距60 cm,播种深度3—5 cm,播种后24 h内按浓度配制溶液,使用背负式电动喷雾器均匀喷施土壤表层,喷液量500 g/m^2。试验区底肥施用复合肥400 kg/hm^2,种肥施用磷酸二铵60 kg/hm^2,追肥施用尿素300 kg/hm^2,灌溉方式为滴灌,所有田间作业均采用同一机械与操作标准,避免人为干扰,保证田间管理一致。分别于2024年5月上旬与9月上旬采集0—20 cm土层土壤样品,测定土壤理化性质、酶活性及微生物群落结构。

1.3　研究方法

1.3.1　*样品采集与处理*　土壤样品的采集与处理以及土壤指标测定的具体试验方法参照《土壤农化分析》[15]。采用对角线五点取样法挖取0—20 cm土壤剖面,使用不锈钢土钻采样,确保采样深度精准,将土钻取得的土样用铲刀横向切取土块,其间避免垂直挤压,装入铝盒用于测定团聚体特征;在每个采样点剖面附近用环刀采集原状土,用于测定容重与毛管孔隙度;在5个采样点采集0—20 cm土壤,去除砾石、植物根系等杂质后,按四分法混合,从中取适量新鲜样品装入2 ml无菌离心管,置于含干冰的泡沫盒中,运输至实验室后立即存入−80 ℃超低温冰箱,用于微生物群落测定,其余土样装入无菌自封袋运回,于室内通风阴凉处自然风干后磨细,分别过1.00 mm,0.25 mm不锈钢筛,用于测定土壤理化性质与酶活性。

1.3.2　*土壤指标测定*　采用环刀法测定土壤容重;毛管孔隙度采用浸泡法测定(将环刀样品浸泡在去离子水中,吸足水分后称重,计算毛管孔隙度)。将土块样品自然风干至含水量10%左右,用手掰成1 cm左右团块,避免机械破碎;采用干筛法分级,将样品置于顶部8 mm筛,依次叠放1,0.5,0.25,0.052 mm孔径土壤筛(筛子直径20 cm),在振筛机上振荡10 min,收集各级筛上土壤,烘干至恒重后称重,计算各级团聚体占比;结合粒级质量分布计算平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)与几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GMD),计算见公式(1)—(2)。

$$\mathrm{MWD}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\overline{Y}_i Z_i}{\sum_{i=1}^{n}Z_i} \tag{1}$$

$$\mathrm{GMD}=\exp\frac{\sum_{i=1}^{n}Z_i \ln \overline{Y}_i}{\sum_{i=1}^{n}Z_i} \tag{2}$$

式中:MWD为团聚体平均质量直径(mm);GMD为几何平均直径(mm);i为粒级序号;n为粒级总数;$\overline{Y}_i$为土壤粒级的平均直径(mm);Z_i为不同土壤粒级团聚体占总团聚体的比例。

土壤pH值和电导率分别使用电位法和电导率仪电极法进行测定。土壤有机碳含量通过重铬酸钾容量-外加热法(硫酸亚铁滴定)测定,全氮含量使用凯氏定氮法(全自动凯氏定氮仪)测定,碱解氮、速效

磷及速效钾含量分别通过碱解扩散法、碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法和分光光度计法测得。

土壤酶活性均用微板法测定，其中脲酶、蔗糖酶活性用北京索莱宝科技有限公司试剂盒测定，淀粉酶、过氧化氢酶和中性磷酸酶活性用苏州格锐思生物科技有限公司试剂盒测定。将取得的用于微生物群落测定的土样统一送北京诺禾致源科技股份有限公司，通过16SrDNA扩增子测序测定细菌群落结构。

1.3.3 土壤质量评价 最小数据集法是一种通过选择最少的样本和指标来有效评估特定特征或质量的方法，可用于评价耕层土壤质量。本研究采用最小数据集筛选土壤质量敏感指标，最终选取的指标应具有全面性、独立性及敏感性。首先将全部理化及生物指标进行主成分分析，提取特征值≥1的主成分，按载荷值≥0.5分组；若指标在多主成分中载荷≥0.5，则并入与组内其他指标相关性最弱的组以减少信息重叠。随后计算各组指标Norm值，保留每组最大Norm值10%范围内的指标；组内仅1项则直接入MDS，多项则看与最大Norm值指标的相关性（独立或负相关则全留，显著正相关仅留与其余指标相关系数最高者）。最终精简指标集即为土壤质量评价MDS。Norm值计算见公式（3）

$$\mathrm{Norm}_i=\sqrt{\sum_{k=1}^{K}\left(u_{ik}^2\lambda_k\right)} \tag{3}$$

式中：Norm_i为特征值≥1的前K个主成分中i变量的荷载；K为特征值≥1的主成分个数；u_{ik}为第k个主成分中i变量的荷载；λ_k为k主成分的特征值。

为消除量纲差异，先采用极值法将最小数据集指标统一转换至0～1区间，随后对标准化后的指标进行因子分析，以各指标公因子方差占公因子方差总和的比例确定其权重，最终按加权求和模型计算土壤质量指数，实现土壤状况的定量表达。公式（4）—（6）分别为标准化、权重、土壤质量指数的计算公式。

$$X_i=\frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}\text{或}x_i=\frac{x_{\max}-x}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{4}$$

式中：X_i为标准化后的值，即隶属度值；x为原始值；$x_{\max}$为评价指标最大值；$x_{\min}$为最小值。

$$W_i=\frac{C_i}{\sum_{i=1}^{n}C_i} \tag{5}$$

式中：W_i为i指标的权重值；C_i为i指标的公因子方差。

$$\mathrm{SQI}=\sum_{i=1}^{n}X_iW_i \tag{6}$$

式中：SQI为土壤质量指数；X_i为每个指标的隶属度值；W_i为i指标的权重；n为评价的指标数量。

1.4 数据处理及分析

使用Microsoft Excel 2021进行数据整理，使用SPSS 25.0进行正态性检验、方差齐性检验及方差膨胀因子（Variance Inflation Factor，VIF）检验，符合正态分布与方差齐性的数据采用单因素方差分析法检验产生的显著性影响，使用Origin 2021进行柱形图与散点图的绘制，相关性热图及PCA分析图使用RStudio的linkET，Vegan及ggplot2包绘制。使用土壤质量指数法评价不同处理下的土壤质量，用Spearman相关性检验最小数据集与全数据集（Total Data Set，TDS）SQI的吻合度（R^2＞0.7通常可接受）。所有图表均标注误差线（标准误差，n=3），显著性差异用小写字母（a，b，c）标注。

2 结果与分析

2.1 固沙剂施用水平对土壤理化性质的影响

在沙化耕地施用不同浓度固沙剂后土壤理化性质在一定程度上发生改变，图1展示了土壤容重、电导率、团聚体平均质量直径以及土壤毛管孔隙度的差异情况。G125处理的土壤容重较G35显著降低了6.08%（p＜0.05，图1A），说明适宜浓度的固沙剂可有效改善土壤结构。固沙剂可显著提高土壤电导率，与对照组相比，G35和G75处理下电导率分别显著提高13.88%和16.75%（p＜0.05，图1B）。土壤平均质量直径从低到高依次为CK（0.250 mm）、G125（0.253 mm）、G75（0.260 mm）、G35（0.313 mm），表现出随固沙剂浓度的升高而增加的趋势（图1C）。各组土壤毛管孔隙度为35.24%～38.00%，组间未表现出显著性差异（图1D）。固沙剂添加下土壤平均质量直径和毛管孔隙度与空白对照组无显著差异。

施用不同浓度的淀粉基固沙剂后，沙化耕地土壤有机碳、全氮、碱解氮以及土壤速效磷和速效钾含量如图2所示。由图2A可知，土壤有机碳含量表现出随浓度升高而增加的趋势，其中G35和G75有机碳含量分别为5.51，5.06 g/kg，显著高于G125（4.40 g/kg）和CK（4.27 g/kg）。固沙剂添加可显著提高土壤全氮含量，其中G35和G75土壤全氮含量较对照组分别显著提高了40.59%和14.97%，各处理组土壤全氮含量表现为G35＞G75＞G125（图2B）。土壤碱解氮含量总体呈现随浓度升高而增加的趋势，G35土壤碱解氮含量较G75和G125分别提高了26.06%和35.35%，对照组碱解氮含量与各处理组间未表现出显著差异（图2C）。土壤速效磷含量表现与全氮量相同，为G35＞G75＞G125，G35和G75土壤速效磷含量较对

照组分别显著提高了44.24%和7.98%,较G125分别显著提高了52.36%和21.39%(图2D)。与对照组相比,G35,G75和G125处理下土壤速效钾含量分别显著提高了16.19%,19.74%和17.90%(图2E)。

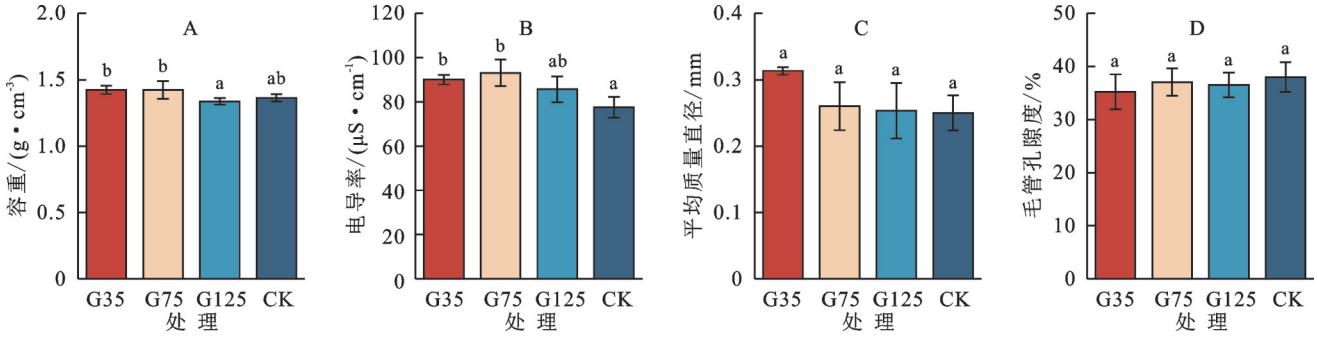


图1　不同处理土壤物理性状比较

Fig. 1　Comparison of soil physical properties under different treatments

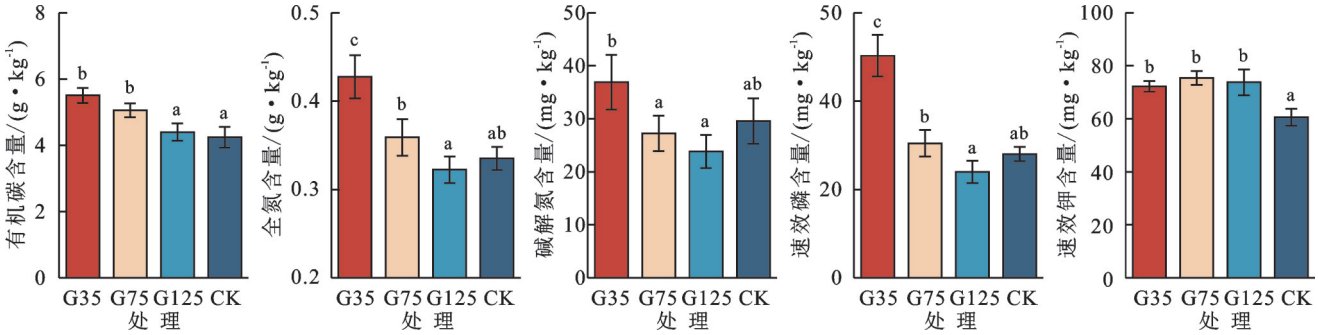


图2　不同处理土壤化学性状比较

Fig. 2　Comparison of soil chemical properties under different treatments

2.2　固沙剂施用水平对土壤生物性质的影响

由图3可知,固沙剂施用可在一定程度上提高土壤淀粉酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶以及中性磷酸酶的活性,整体表现为随固沙剂浓度升高,酶活性增加,但不同酶表现出一定差异。固沙剂浓度对土壤淀粉酶活性影响显著,G35土壤淀粉酶活性为2 830.51 μg/(h·g),分别较G75,G125和CK提高了20.93%,40.23%和56.69%,G75土壤淀粉酶活性较G125和CK分别提高了24.41%和45.22%(图3A)。G35土壤蔗糖酶活性为35.60 U/g,与其他处理下的土壤蔗糖酶活性之间存在显著差异,较G75,G125和CK分别提高了21.69%,30.91%和20.79%,除G35外其他处理间土壤蔗糖酶活性未表现出显著差异(图3B)。土壤脲酶活性与过氧化氢酶活性表现相似,G35脲酶活性、过氧化氢酶活性分别较CK提高了19.47%,19.55%,G75脲酶活性、过氧化氢酶活性分别较CK提高了16.06%,17.08%(图3C、图3D)。土壤中性磷酸酶活性表现与蔗糖酶活性相似,G35中性磷酸酶活性为64.29 nmol/(h·g),较G75,G125,CK显著提高了18.63%~31.15%(图3E)。

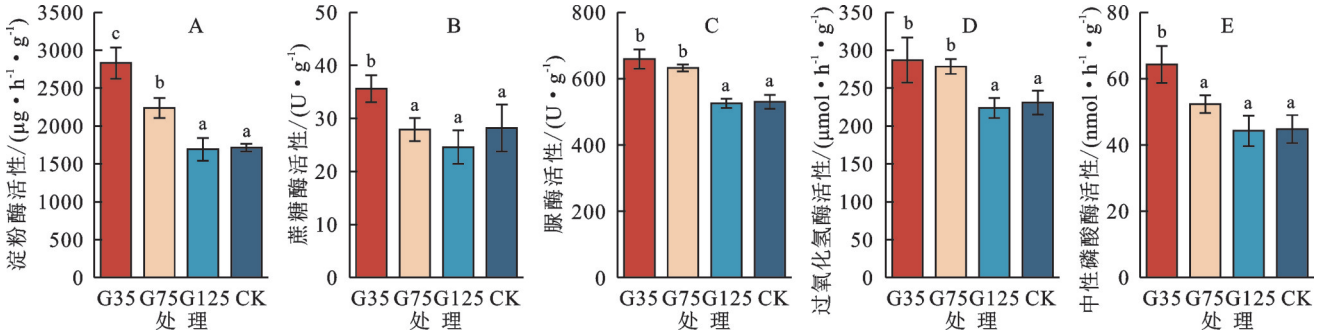


图3　不同处理的土壤酶活性比较

Fig. 3　Comparison of soil enzyme activities under different treatments

2.3　固沙剂施用水平对土壤微生物群落结构的影响

图4反映了沙化耕地在施加不同浓度固沙剂后土壤细菌丰富度及均匀度的差异情况。结果表明,施用最高浓度固沙剂的处理组G35细菌丰富度和均匀度较CK分别降低了11.90%和2.18%,G75的细菌

均匀度与CK间无显著差异，细菌丰富度较CK显著降低了17.38%，G125的细菌均匀度及丰富度与CK间均无显著差异。UPGMA聚类图展示了不同处理下土壤相对丰度前10的细菌门分布情况和差异性（图5）。由图可知，各组相对丰度最高的菌门均为变形菌门（Proteobacteria），在G35所有菌门中占比30.28%，G75，G125和CK的变形菌门分别占26.53%，21.38%和30.19%。除变形菌门外，酸杆菌门（Acidobacteriota）、放线菌门（Actinobacteria）和芽孢单胞菌门（Gemmatimonadetes）也是各组土壤中的优势菌门。值得注意的是，G35处理的土壤中黏球菌门（Myxococcota）相对丰度为5.15%，显著高于其他组，其余几组黏球菌门相对丰度表现为CK（3.52%）>G75（2.68%）>G125（2.43%）。各组之间的Bray-Curtis距离表明，G75，G125与CK之间菌门组成差异性较小，G35与其余三组具有较大差异性。

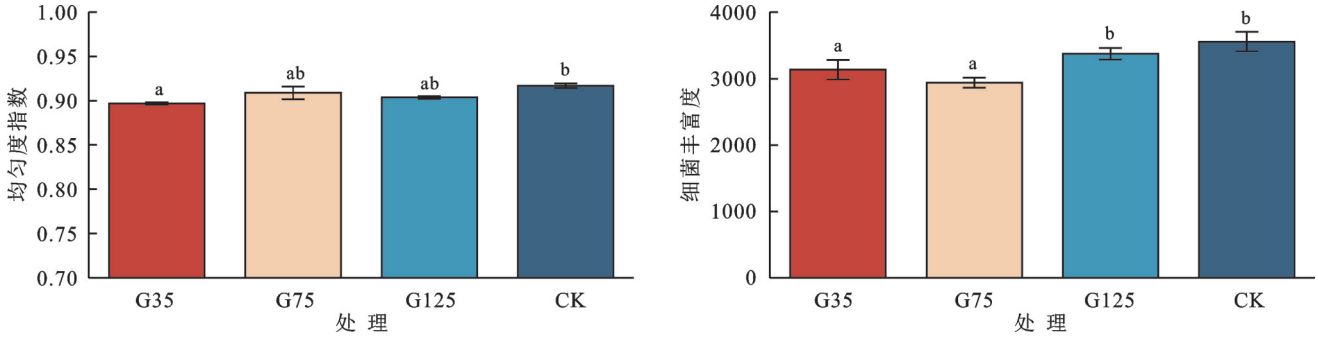


图4 不同处理细菌均匀度和丰富度

Fig. 4 Evenness and richness of bacteria under different treatments

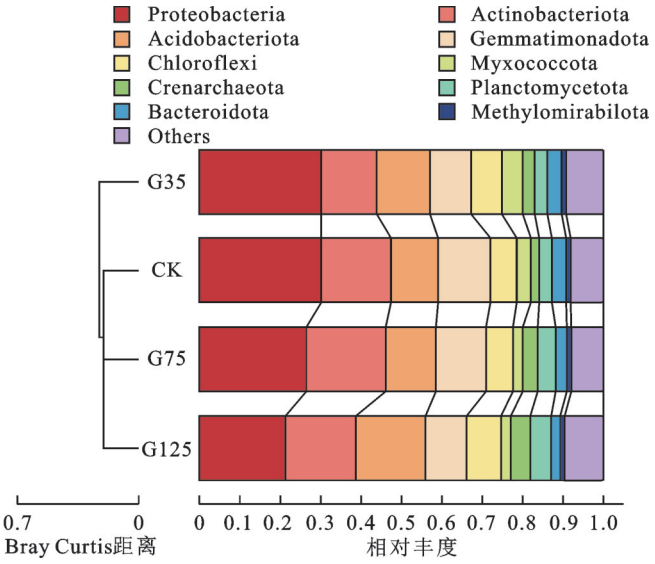


图5 不同处理门水平细菌UPGMA聚类图

Fig. 5 UPGMA clustering of bacteria at phylum level under different treatments

基于对土壤物理、化学与生物学性质的系统评估，进一步通过Mantel分析可得到土壤环境因子与细菌群落结构之间的空间相关性，以明确驱动群落变异的核心土壤属性。图6Mantel连线展示了土壤前10个细菌门的相对丰度（Phylum）、Shannon多样性（Shannon）以及各处理组与对照组之间的Bray-Curtis距离（Bray-Curtis）3个指示微生物群落结构的指标与土壤环境因子的相关性，矩阵反映了土壤环境因子之间的相似度。结果表明，驱动土壤前10个细菌门相对丰度在各处理之间表现出差异的关键因子为细菌均匀度Pi，二者之间具有显著的强相关性（$p<0.05$，$r\geqslant0.4$），Shannon多样性与土壤细菌丰富度具有极显著的强相关性（$p<0.01$，$r\geqslant0.4$），与土壤电导率和有机碳含量之间具有显著的中度相关性（$p<0.05$，$0.2<r<0.4$），Bray-Curtis距离与土壤速效钾含量具有显著的强相关性（$p<0.05$，$r\geqslant0.4$）。热图结果显示，电导率与有机碳、全氮、速效磷、速效钾含量及5种酶活性均呈正相关关系，相关系数为0.3～0.6，与有机碳、速效钾含量及淀粉酶、过氧化氢酶、脲酶活性正相关关系显著（$p<0.05$）；电导率与细菌多样性（Pi，Nsp）呈负相关关系，相关系数为0.3～0.8。

2.4 土壤质量评价体系的构建

2.4.1 主成分分析 在明确关键环境因子与细菌群落结构的空间耦合关系后，进一步通过主成分分析（PCA）将这些土壤指标降维可视化，以综合评估不同处理对土壤整体质量的影响与分化程度。图7反映了将不同土壤指标降维后前两个主成分对各组差异的解释程度及各指标对PC1和PC2的贡献程度，同时结合边际密度曲线分别展示了各组在PC1和PC2上的相似性和差异性。结果表明，PC1和PC2分别解释了54.67%和18.07%的方差，二者累积贡献率达到了72.74%。SOC，TN，UA及NPA在PC1上的载荷值大于0.9（表2），是构成PC1的核心变量，在PC1上各处理组与对照组的相似程度表现为G125>G75>G35，反映出构建PC1的核心变量之间的相似程度；EC，pH，AHN以及AK作为构成PC2的核心变量，其载荷绝对值均大于0.6，CK和G35，G125和G75分别在PC2上表现出较强相似性（图7）。

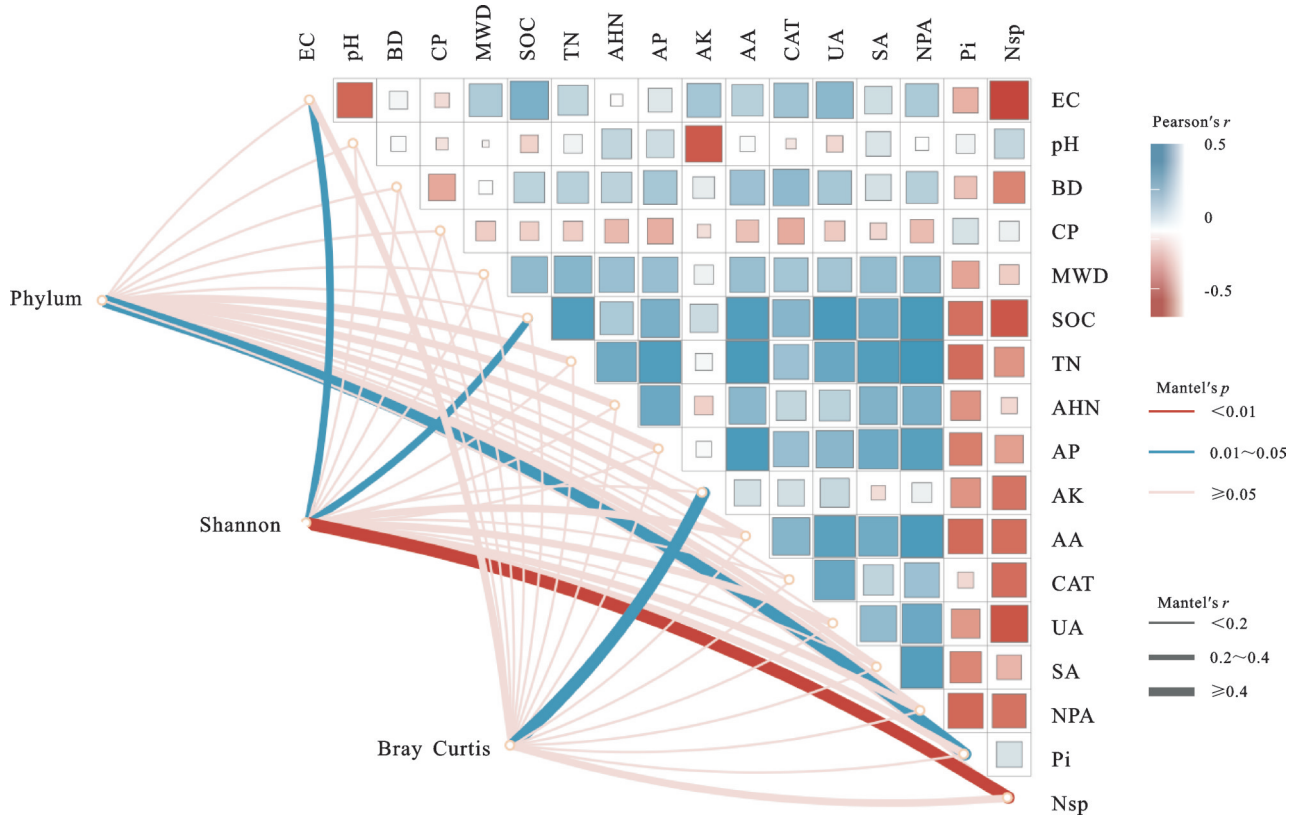


图 6　土壤指标与细菌群落结构相关性 Mantel 分析

Fig. 6　Mantel analysis of correlation between soil indicators and bacterial community structure

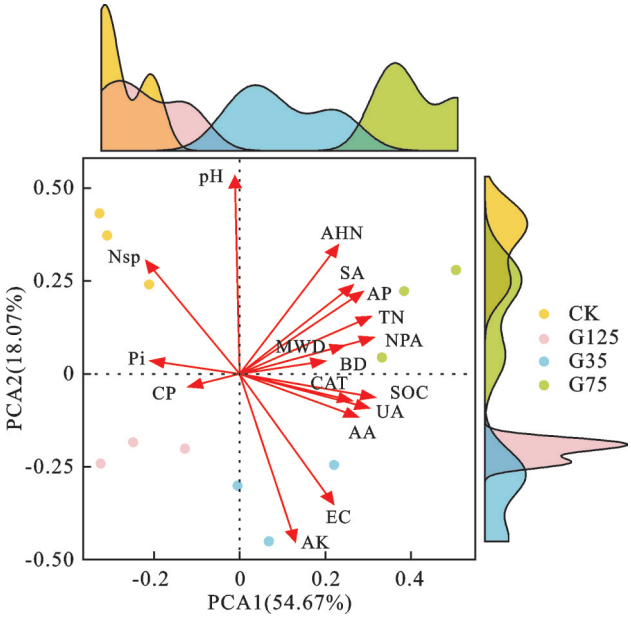


图 7　土壤指标主成分分析

Fig. 7　Principal component analysis of soil indicators

2.4.2　最小数据集的构建　利用主成分分析法对土壤指标进行降维分组后,根据土壤指标成分矩阵结果提取主成分特征值≥1的因子,即前 4 个主成分,再分别将这 4 个主成分上载荷大于 0.5 的指标分为一组,由于 EC,AHN 及 Nsp 指标在 PC1 和 PC2 上重复,BD 和 Pi 指标在 PC1 和 PC3 上重复,因此根据相关性分析结果(图 6)将指标归于相关性弱的成分上,最终得到第 1 组指标为 EC,MWD,SOC,TN,AP,AA,CAT,UA,SA,NPA,第 2 组指标为 pH,AHN,Nsp,第 3 组为 CP 和 BD,第 4 组为 Pi,根据计算出的 Norm 值和相关性分析结果得出最终纳入最小数据集的指标为 SOC,NPA,AHN,Nsp,BD 及 Pi,最终根据公因子方差计算出最小数据集中各指标权重分别为 0.231,0.245,0.142,0.130,0.130,0.122(表 2),SOC 和 NPA 两个指标权重相对较大,是这些指标里对土壤质量指数变化最敏感的核心指标。同时,这 6 个指标覆盖了土壤核心功能维度,包含了物理、化学及生物 3 个维度的指标。方差膨胀因子(VIF)检验显示,最小数据集(MDS)中 SOC 和 NPA 的 VIF 值分别为 11.258,12.370,略高于临界值 10,存在轻微多重共线性;AHN,Nsp,BD,Pi 的 VIF 值分别为 4.485,1.000,1.467,6.413,无共线性问题,说明这些指标之间具有较强的独立性。从指标的全面性、独立性及敏感性来看,该最小数据集满足用于土壤质量评价的基本要求。

2.4.3　土壤质量评价　通过统计筛选剔除冗余构建出最小数据集,计算出最小数据集的权重,最终加权求和得到各组土壤质量指数,可确保评价结果既科学可靠又经济高效。图 8A 展示了各组通过最小数据集计算出的土壤质量指数之间的差异性表现以及各指标对各组土壤质量的贡献率,结果表明,在施加固沙剂的 3 个处理组中存在随浓度的升高土壤质量增加的

趋势，即G35>G75>G125，其中G35的土壤质量较对照组显著提升了39.85%，G75的土壤质量较对照组提高了16.98%，G125的土壤质量较对照组降低了27.26%。此外，将通过主成分分析得到的全数据集同时进行分析统计，得到由全数据集计算出的土壤质量指数，其趋势与最小数据集得到的趋势相同，但在各组之间的差异性表现上稍有不同，G35和G75的土壤质量较CK分别提高了48.35%和25.71%，G125的土壤质量与CK之间表现出较强相似性（图8B）。将全数据集和最小数据集得到的结果进行线性拟合，发现二者之间存在极显著的线性关系（R^2=0.9215，图9）。土壤质量指数与最小数据集的相关性分析结果表明，MDS包含的6项指标与由最小数据集指标计算出的土壤质量指数（SQI-MDS）的关联特征存在显著分化：其中土壤容重（BD）和有机碳含量（SOC）与SQI-MDS未呈现显著相关性（p>0.05）；碱解氮含量（AHN）与SQI-MDS呈显著正相关（r=0.636，p<0.05），中性磷酸酶活性（NPA）与SQI-MDS呈极显著正相关（r=0.811，p<0.01），二者可作为表征土壤质量提升的核心正向指标；细菌群落结构相关指标则与SQI-MDS均呈极显著负相关，其中细菌均匀度（Pi）与SQI-MDS的相关系数为−0.898（p<0.01），细菌丰富度（Nsp）与SQI-MDS的相关系数为−0.734（p<0.01），反映出土壤质量提升与微生物多样性之间的权衡关系。这一结果为理解淀粉基固沙剂的改土机制及MDS指标的科学性提供了直接数据支撑。

表2 土壤指标公因子方差与权重（全数据集vs最小数据集）

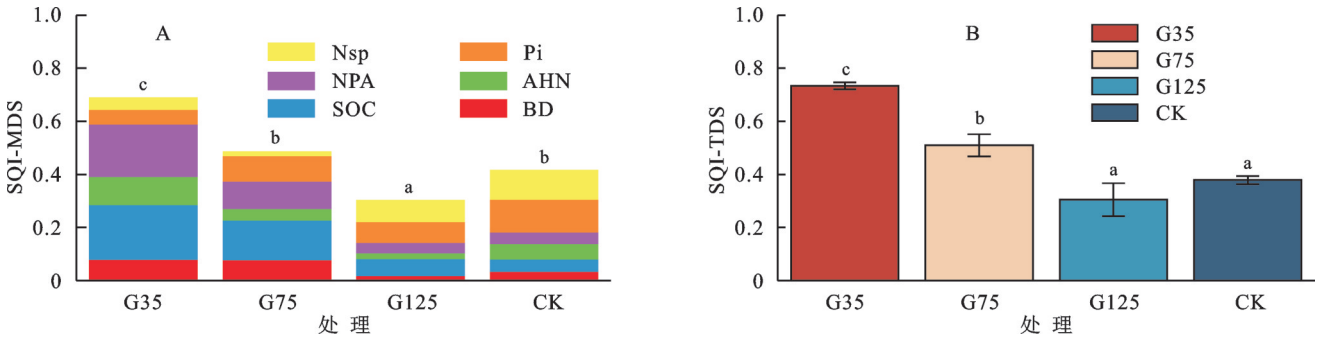
Table 2 Variance and weight of common factors for soil indicators (full dataset vs minimum dataset)

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	Norm值	TDS公因子方差	TDS权重	MDS公因子方差	MDS权重
EC	0.668	−0.613	0.259	0.155	2.328	0.913	0.061		
pH	−0.035	0.932	−0.175	0.094	1.653	0.909	0.061		
BD	0.606	0.060	−0.654	0.218	2.016	0.846	0.057	0.459	0.122
CP	−0.364	−0.060	0.609	0.476	1.417	0.733	0.049		
MWD	0.742	0.132	0.374	−0.078	2.317	0.715	0.048		
SOC	0.960	−0.110	0.183	0.095	2.943	0.976	0.066	0.869	0.231
TN	0.931	0.270	0.161	0.017	2.884	0.967	0.065		
AHN	0.701	0.607	−0.006	−0.076	2.389	0.865	0.058	0.536	0.142
AP	0.877	0.387	−0.082	−0.027	2.760	0.926	0.062		
AK	0.396	−0.790	−0.083	−0.227	1.856	0.840	0.056		
AA	0.842	−0.203	−0.139	−0.274	2.613	0.844	0.057		
CAT	0.797	−0.126	−0.306	0.366	2.497	0.878	0.059		
UA	0.919	−0.160	−0.020	0.229	2.827	0.924	0.062		
SA	0.806	0.419	0.292	0.063	2.588	0.915	0.061		
NPA	0.952	0.171	0.124	0.002	2.921	0.951	0.064	0.925	0.245
Pi	−0.634	0.062	−0.127	0.667	2.069	0.867	0.058	0.491	0.130
Nsp	−0.667	0.532	0.165	−0.235	2.259	0.811	0.055	0.489	0.130
特征值	9.295	3.072	1.366	1.147					
方差百分比/%	54.674	18.069	8.033	6.747					
累积方差贡献率/%	54.674	72.744	80.777	87.524					

3 讨 论

3.1 淀粉基固沙剂对土壤理化性质的调控机制

淀粉基固沙剂的胶结作用对土壤结构的影响具有表层集中性特征。本研究中，各处理土壤容重、毛管孔隙度均无显著变化，团聚体平均质量直径虽呈现随固沙剂浓度升高而增加的趋势，但未达到统计学显著水平。本结果与Sen等[16]结论一致，即淀粉基胶结材料仅在土壤表层生成微团聚体，短期内无法显著改良土壤结构；但龙明杰等[17]发现淀粉接枝共聚物可改变土壤结构，亦有研究表明植物基固沙剂能显著调控土壤物理性质[13]，与本研究结果存在差异。推测这一差异的成因与野外复杂环境条件、施用方式等密切相关。本试验历时120 d，地表结皮层会经历自然降解过程，而淀粉基固沙剂易溶于水的特性，可能使其在降雨或灌溉作用下通过淋溶进入下层土壤，导致其对表层土壤结构的胶结效应被削弱，最终未表现出显著的结构改良效果。



注:(1)SQI-MDS指由最小数据集指标计算出的土壤质量指数;(2)SQI-TDS指由全数据集指标计算出的土壤质量指数。

图 8　基于最小数据集与全数据集的土壤质量指数

Fig. 8　Soil quality indices based on minimum dataset and full dataset

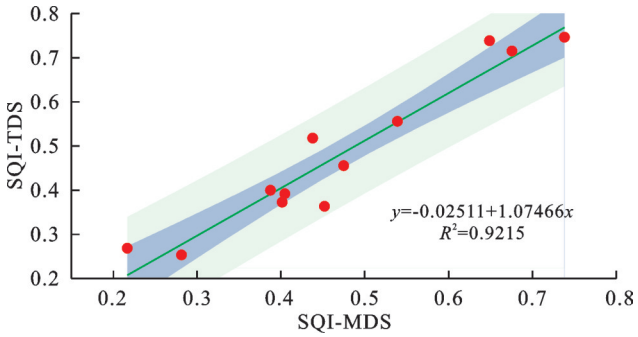


图 9　基于最小数据集与全数据集的土壤质量指数拟合关系

Fig. 9　Fitting relationship of soil quality indices based on minimum dataset and full dataset

淀粉基固沙剂对土壤养分的提升并非简单的外源添加效应,而是通过多环节协同调控实现的链式反应。固沙剂喷施后在沙粒表面形成柔性胶结膜,显著提升表层土壤持水量,在干旱区强蒸发驱动下,形成连续毛细上升通道,将深层土壤中的可溶性盐、风化释放的钾素和磷素迁移至表层,直接导致电导率升高和速效钾、速效磷的表聚[18]。G75处理电导率提升幅度高于G35,既为养分离子迁移提供了适宜的电化学环境,又未出现盐分过量累积,而G35的高养分含量则源于更高浓度外源碳对这一迁移过程的强化。从碳循环机制来看,淀粉作为高分子多糖,是土壤有机碳的直接来源[19],其降解过程为土壤微生物代谢提供了充足底物。

3.2　酶活性和微生物群落对淀粉基固沙剂浓度的响应机制

土壤酶活性的浓度梯度差异与微生物群落结构分化密切相关,核心受控于底物诱导、胁迫缓解与生态位竞争的综合作用。淀粉作为淀粉酶、蔗糖酶的特异性底物,其施入直接诱导微生物分泌相关水解酶,导致G35处理淀粉酶活性较CK大幅提升,这与郭东权等[20]证实的"底物-酶活性"正反馈机制一致。同时,固沙剂胶结层提升的表层含水量缓解了干旱胁迫,既为激活酶活性提供了适宜水分条件,也为微生物生长创造了稳定环境,使得G75处理淀粉酶、脲酶、过氧化氢酶活性显著提升,细菌均匀度未发生显著改变。脲酶活性的提升与碳氮比调控密切相关,高浓度G35输入降低土壤碳氮比至12.10,处于脲酶活性最优范围[21],解除了微生物氮限制,促进脲酶合成以矿化有机氮。中性磷酸酶、过氧化氢酶的活性提升则与有机碳输入后的代谢强化相关,有机碳累积提高微生物整体代谢强度,同步刺激磷素转化酶和抗氧化酶分泌[22],且淀粉降解过程中产生的H_2O_2进一步诱导过氧化氢酶合成,以缓解氧化胁迫。

细菌群落结构的浓度依赖性分化,本质是选择性富集与生态位竞争共同作用的结果。固沙剂输入的外源碳为特定功能菌群提供了优势资源,导致优势菌群扩张、弱势菌群被排挤的群落重构。变形菌门作为碳氮循环核心菌群,其相对丰度在各处理中呈现特定分布特征,这种分布正是菌群对外源碳资源的选择性响应体现。黏球菌门在G35处理中相对丰度显著升高至5.15%,该菌门具有强代谢能力和捕食特性,其异常增殖可能会进一步挤压其他菌群生态位,导致细菌丰富度和均匀度下降。Villafuerte等[23]的研究发现,有机化合物和养分供应的差异会造成酶活性和细菌群落的改变,进而影响丰富度和均匀度;洪琦等[24]的研究则认为,有机质能够为微生物提供丰富的碳源,但并非所有细菌都能同样高效地利用这些资源;温学飞[25]关于化学固沙剂对土壤微生物影响的研究,得到了随着固沙剂施用量增加微生物均匀度降低的结论。本试验中施用固沙剂后有机质含量提高,使得某些快速生长的类群在资源丰富的条件下迅速扩张,形成优势种群,从而抑制其他类群的生长,导致整体细菌多样性下降。G75处理的细菌均匀度与CK无显著差异,菌门组成与CK的Bray-Curtis距离最小,可能是由于中浓度碳输入与盐分累积未超出微生物群落的适应范围,优势菌群扩张与弱势菌群存活达到动态平衡,避免了单一菌群过度优势导致的生态稳定性下降。

3.3　淀粉基固沙剂对改土效率与生态安全的平衡机制

通过综合主成分分析、相关性分析与敏感性分

析，并结合各指标Norm值，构建研究区土壤质量评价最小数据集，可以在显著压缩数据冗余的同时有效弥补关键指标信息的缺失[26]。MDS筛选的6项指标涵盖理化基础、生物功能、生态稳定三大维度，权重分配反映了各维度对土壤质量的贡献差异，其中有机碳和中性磷酸酶作为核心敏感指标，直接表征碳库功能与磷素转化效率，是质量提升的效率核心；细菌丰富度和均匀度作为微生物多样性指标，是生态安全的稳定保障。MDS与TDS土壤质量指数拟合度达R^2=0.92，验证了指标选择的科学性。其中，有机碳与中性磷酸酶的高权重、高敏感性，印证了碳库功能与磷素转化是沙化耕地改良的核心路径；细菌丰富度、均匀度与土壤质量指数的极显著负相关，则警示高浓度处理的生态风险，为改土效率与生态安全的权衡提供了量化依据。这一评价体系既精简了指标冗余，又精准捕捉了沙化耕地改良的核心机制，为区域土壤质量快速诊断提供了高效范式。

本研究中土壤质量指数表现出随固沙剂施用浓度的升高而增加的趋势，G35处理土壤质量指数最高，体现了改土效率的最大化，但效率指标的高强度激活以稳定指标的显著下降为代价，存在生态脆弱性风险。G75处理土壤质量指数较CK稳步提升，虽效率低于G35，但效率指标与稳定指标协同优化，实现了改土效率与生态安全的平衡。G125处理区土壤质量指数未升反降，源于碳输入量未达到有效阈值，无法激活多环节协同的改良机制。多项研究表明，外源碳的输入能够改善土壤质量，粉煤灰、脱硫石膏、牛粪3种固沙材料在不同程度上均可提高复配土壤的质量[27]；施用生物炭通过提高土壤SOC含量改善土壤养分供应与微生物群落结构、促进作物生长[28]；有机-无机物料通过改善土壤盐碱程度和增加土壤养分两方面提升基于全数据集的土壤质量指数[29]。本研究进一步证实，淀粉基固沙剂带来的外源碳输入对沙化耕地质量的提升并非简单线性响应，同时也依赖浓度与土壤微生物代谢、养分循环的适配性。

3.4 研究不足与展望

研究创新在于把淀粉基固沙剂纳入“外源碳-微生物-养分”耦合框架，揭示高浓度处理在120 d内使耕层土壤SQI提升39.9%的同时抑制微生物多样性，而1∶75浓度可实现高效改土与生态安全的平衡，并构建6指标MDS精简评价范式，为沙区土壤质量快速诊断和精准配施提供了新的理论依据和技术范式；然而试验周期仅120 d，尚未覆盖冻融循环与年际降解过程，且缺乏作物产量、经济效益及不同质地、气候区的对比验证，后续需通过长期定位观测进一步明确最优浓度阈值与生态风险，为区域沙地农田土壤质量提升和可持续利用提供精准理论依据。

4 结 论

（1）淀粉基固沙剂通过胶结层形成与“碳泵”效应激活促进土壤养分矿化与表聚。G75处理120 d后，有机碳、全氮、速效磷、速效钾含量及电导率较CK分别显著提升15.61%，14.97%，7.89%，19.74%和16.75%，G35处理养分提升幅度更高。

（2）土壤酶活性呈浓度依赖性增强，高浓度抑制微生物多样性，中浓度维持生态稳定。G35处理酶活性峰值最高，但细菌丰富度、均匀度较CK分别下降11.9%，2.18%，黏球菌门相对丰度升至5.15%，菌群结构差异显著，存在生态失衡风险。G75处理细菌均匀度与CK无显著差异，菌门组成Bray-Curtis距离最接近CK，生态稳定性最优。

（3）构建包含SOC，NPA，AHN，Nsp，BD，Pi的最小数据集，指标权重0.12～0.25，与全数据集SQI拟合度达0.92。SQI表现为G35(0.69)＞G75(0.48)＞CK(0.41)＞G125(0.30)，CK与G125差异不显著(p＞0.05)，G75较CK提升16.98%，实现改土与生态安全平衡；G35虽改土效率最优，但外源碳-养分激增导致菌群单一化，系统脆弱性增加。

参考文献(References)：

[1] 邴丹珲，谈嫣蓉，陈文业，等.我国沙障的研究进展与应用综述[J].中国水土保持，2023(7)：37-40.
Bing D H, Tan Y R, Chen W Y, et al. Research progress and application of sand barriers in china[J]. China Soil and Water Conservation, 2023(7):37-40.

[2] 杨微，徐艳.基于沙漠化和适宜性的农牧交错带土地利用优化研究：以内蒙古科尔沁左翼后旗为例[J].中国农业大学学报，2018，23(3)：95-105.
Yang W, Xu Y. Optimization of land-use structure in the farming-grazing transitional zone based on desertification status and land adaptability: a case study of horqin left wing rear banner, Inner Mongolia[J]. Journal of China Agricultural University, 2018,23(3):95-105.

[3] 娄雨欣.乡村振兴战略下沙化耕地治理路径与对策研究：以杭锦旗为例[D].呼和浩特：内蒙古财经大学，2025.
Lou Y X. Research on the path and countermeasures of desertification control of farmland under the rural revitalization strategy: a case study of Hangjin Banner[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Finance and Economics, 2025.

[4] 程莉，宁志英，杨红玲，等.固沙措施对流动沙丘植被和土壤特性的影响[J].中国沙漠，2024，44(2)：273-282.
Cheng L, Ning Z Y, Yang H L, et al. Effects of different sand-fixation measures on vegetation and soil charac-

teristics of high and flat mobile dunes[J]. Journal of Desert Research, 2024,44(2):273-282.

[5] Zhao H B, Liu J F, Chen X W, et al. Straw mulch as an alternative to plastic film mulch: positive evidence from dryland wheat production on the Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019,676:782-791.

[6] 王方炯.环保型固沙-土壤化一体技术研究[D].西安:西安石油大学,2024.
Wang F J. Research on environmentally friendly integrated sand fixation-soiling technology [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.

[7] Ren T J, Yuan L M, Gao Y, et al. Development and optimization of a plant-based sand fixer: locust bean gum and its advanced materials[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025,309:142514.

[8] 任廷婕.植物基固沙剂在沙质耕地的应用效应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
Ren T J. Study on the application effect of plant-based sand fixing agents on sandy farmland[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.

[9] Yang X T, Gao H, Ma Y X, et al. Fabrication of flaxseed gum modification oxidized corn starch grafted polyacrylic acid liquid dust suppressant with environmental friendliness[J]. Powder Technology, 2025,457:120865.

[10] Dang X G, Chen H, Shan Z H. Preparation and characterization of poly(acrylic acid): corn starch blend for use as chemical sand-fixing materials[J]. Materials Research Express, 2017,4(7):075506.

[11] 张晨旭.基于风洞模拟试验的固沙剂防风固沙效果研究[D].山东泰安:山东农业大学,2024.
Zhang C X. Study on wind-proof and sand-fixing effect of sand-fixing agent based on wind tunnel simulation experiment[D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2024.

[12] 杨子晋,董智,李红丽,等.液态环保抑尘剂对模拟临时堆土坡面产流产沙的影响[J].干旱区资源与环境,2022,36(6):187-193.
Yang Z J, Dong Z, Li H L, et al. Effect of liquid environmental protection dust suppressant on runoff and sediment yield on simulated temporary soil pile slope [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(6):187-193.

[13] 刘玥,郭强,袁立敏,等.3种植物基固沙剂对风沙土水分入渗和蒸发的影响[J].干旱区研究,2025,42(4):658-667.
Liu Y, Guo Q, Yuan L M, et al. Effects of three plant-based sand-fixing agents on water infiltration and evaporation in aeolian sandy soil[J]. Arid Zone Research, 2025,42(4):658-667.

[14] Yang E J, Zhao X L, Qin W, et al. Temporal impacts of dryland-to-paddy conversion on soil quality in the typical black soil region of China: establishing the minimum data set[J]. Catena, 2023,231:107303.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao S D. Soil agricultural chemical analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[16] Sen C, Das M. Biodegradability of starch based self-supporting antimicrobial film and its effect on soil quality [J]. Journal of Polymers and the Environment, 2018,26(12):4331-4337.

[17] 龙明杰,张宏伟,曾繁森.高聚物土壤结构改良剂的研究.Ⅰ:淀粉接枝共聚物改良赤红壤的研究[J].土壤学报,2001,38(4):584-589.
Long M J, Zhang H W, Zeng F S. Studies on polymeric soil structure amendments Ⅰ: study of amelioration to lateritic red soil by starch-grafted copolymer[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001,38(4):584-589.

[18] 罗雅曦.不同材料沙障固沙林地土壤-植被系统变化及其生态效应评价[D].银川:宁夏大学,2019.
Luo Y X. Soil-vegetation system changes and its ecological evaluation following sand-binding revegetation within checkboard of different materials[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.

[19] 杨阳,王宝荣,窦艳星,等.植物源和微生物源土壤有机碳转化与稳定研究进展[J].应用生态学报,2024,35(1):111-123.
Yang Y, Wang B R, Dou Y X, et al. Advances in the research of transformation and stabilization of soil organic carbon from plant and microbe[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(1):111-123.

[20] 郭东权,饶良懿.保水剂的发展现状及在农林和荒漠化修复中的应用研究[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(6):1372-1385.
Guo D Q, Rao L Y. Development situation of superabsorbent polymer and its application in agroforestry and desertification restoration[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021,29(6):1372-1385.

[21] 程小峰,赵光影,宋艳宇,等.外源氮输入下大兴安岭冻土区泥炭地土壤中碳、氮含量和酶的活性[J].湿地科学,2022,20(2):196-204.
Cheng X F, Zhao G Y, Song Y Y, et al. Carbon and nitrogen contents and enzyme activities of soil in peatland of permafrost region in Greater Hinggan Mountains under exogenous nitrogen input[J]. Wetland Science, 2022,20(2):196-204.

[22] Yu X. Effects of asphalt on the enzymatic activity and bacterial community in soil[J]. African Journal of Microbiology Research, 2012,6(34):6399-6406.

[23] Villafuerte A B, Soria R, Rodríguez-Berbel N, et al. Short-term evaluation of soil physical, chemical and biochemical properties in an abandoned cropland treated with different soil organic amendments under semiarid conditions[J]. Journal of Environmental Management, 2024,349:119372.

(下转第 221 页)