

陈晓东, 赵维彬, 王树凤, 肖江, 陈光才. 生物基改良剂对滨海盐碱土的改良效应: 基于土壤质量指数的评价[J]. 土壤学报, 2027,
CHEN Xiaodong, ZHAO Weibin, WANG Shufeng, XIAO Jiang, CHEN Guangcai. Amelioration Assessment of Coastal Saline-Alkali Soil by
Bio-based Amendment via Soil Quality Index [J]. Acta Pedologica Sinica, 2027,

生物基改良剂对滨海盐碱土的改良效应: 基于土壤质量指数的评价*

陈晓东^{1,2}, 赵维彬¹, 王树凤¹, 肖江¹, 陈光才^{1†}

(1 华东森林培育经营国家林业和草原局重点实验室, 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400; 2 南京林业大学林草学院, 南京 210037)

摘要: 滨海盐碱土存在高盐、结构不良与养分失衡等突出问题, 严重制约植被恢复与质量提升, 威胁区域生态安全。施用生物基改良剂是改良盐碱土的有效措施, 但其对滨海盐碱土壤质量的改良效应尚不清楚。以油橄榄和墨西哥落羽杉为供试树种, 以台州市滨海围垦区盐碱土为研究对象, 选用改良剂 1 (油茶壳+腐殖酸, 1:1, *m:m*) 和改良剂 2 (生物质炭+腐殖酸, 1:1, *m:m*) 为生物基改良剂, 共设置 5 个处理: CK (不添加改良剂)、T1 (改良剂 1, 2.5 kg·plant⁻¹)、T2 (改良剂 1, 5.0 kg·plant⁻¹)、T3 (改良剂 2, 2.5 kg·plant⁻¹)、T4 (改良剂 2, 5.0 kg·plant⁻¹)。通过三年野外试验, 系统测定土壤物理结构、化学性质及酶活性的指标, 采用主成分分析法分别构建全数据集与最小数据集的土壤质量指数, 综合评价不同改良方案的改良效果。结果表明, (1) 两种生物基改良剂对盐碱土均表现出一定的改良作用, 其中 T3 生物质炭改良剂在滨海盐碱土改良中综合效果最优, 能显著提高土壤团聚体稳定性, 增加有机碳、全氮和全磷含量, 促进钙、镁元素积累并降低钠元素相对占比, 有效提升土壤脲酶和多酚氧化酶活性; (2) 主成分分析结果表明, 容重、平均重量直径、土壤有机碳、全磷、氮磷比和脲酶可作为滨海盐碱土 0~20 cm 土层土壤质量评价的最小数据集, 而 20~40 cm 土层最小数据集为容重、大团聚体含量、土壤有机碳、阳离子交换量、碳磷比、钙及钠镁比; (3) 土壤质量指数评价结果表明, T3 处理土壤质量指数高于其他处理; (4) 回归分析结果表明, 基于全数据集和最小数据集构建的土壤质量指数在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中均呈极显著正相关关系 ($P<0.001$), 验证了最小数据集可作为表征滨海盐碱土改良效果的评价指标。综上, 施用生物质炭复配处理 (2.5 kg·plant⁻¹) 对滨海盐碱土的改良效果最为显著且全面, 实现土壤质量的综合提升, 具备良好的推广应用价值。本研究建立的分层最小数据集可为该区域土壤质量的监测与评价提供数据支撑。

关键词: 生物质炭; 油茶壳; 滨海盐碱土; 土壤质量评价; 分层最小数据集

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

Amelioration Assessment of Coastal Saline-Alkali Soil by Bio-based Amendment via Soil Quality Index

CHEN Xiaodong^{1,2}, ZHAO Weibin¹, WANG Shufeng¹, XIAO Jiang¹, CHEN Guangcai^{1†}

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest Cultivation and Management in East China, Research

*浙江省高层次人才特殊支持计划科技创新领军人才项目 (2021R52047) 资助 Supported by the Science and Technology Innovation Leader Project under the Zhejiang Provincial Special Support Program for High-Level Talents, China (No. 2021R52047)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: guangcaichen@sohu.com

作者简介: 陈晓东 (1993—), 男, 山西孟县人, 博士研究生, 工程师, 主要从事土壤改良材料的研发、滨海盐碱地生态修复方向的研究。
E-mail: 13161796388@163.com

收稿日期: 2025-12-23; 收到修改稿日期: 2026-07-21; 网络首发日期 (www.cnki.net): 202 - -

Abstract: 【Objective】 Coastal saline-alkali soil is plagued by prominent issues such as high salinity, poor structure, and nutrient imbalance, which severely restrict regional ecological security. The application of bio-based amendments is an effective measure for ameliorating saline-alkali soil; however, its effect on the quality of coastal saline-alkali soil remains unclear. 【Method】 Using *Olea europaea* L. and *Taxodium mucronatum* Ten. as test tree species, and coastal saline-alkali soil in the reclamation area of Taizhou City as the research object, two bio-based amendments, Amendment 1 (*Camellia oleifera* husk + humic acid, 1:1, *m:m*) and Amendment 2 (biochar + humic acid, 1:1, *m:m*), were applied at five treatment levels: CK (no amendment), T1 (Amendment 1, 2.5 kg·plant⁻¹), T2 (Amendment 1, 5.0 kg·plant⁻¹), T3 (Amendment 2, 2.5 kg·plant⁻¹), and T4 (Amendment 2, 5.0 kg·plant⁻¹), to evaluate their effects on soil quality. A three-year field experiment was conducted to systematically determine the indicators of soil physical structure, chemical properties, and enzyme activities. Principal component analysis (PCA) was employed to construct soil quality indices based on the total data set (TDS) and the minimum data set (MDS), respectively, for comprehensively evaluating the improvement effects of different amendment schemes.

【Result】 Soil quality was comprehensively evaluated by establishing both TDS and MDS based on PCA. The results showed that: (1) Both bio-based amendments demonstrated certain ameliorative effects on the saline-alkali soil. Among them, the 2.5 kg·plant⁻¹ biochar treatment showed the most comprehensive improvement in coastal saline-alkali soil, significantly enhancing soil aggregate stability, increasing the contents of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus. This treatment also promoted the accumulation of calcium and magnesium ions while reducing the relative proportion of sodium ions, and effectively boosting the activities of soil urease and polyphenol oxidase. (2) The PCA results indicated that bulk density, mean weight diameter, soil organic carbon, total phosphorus, nitrogen-phosphorus ratio, and urease could serve as MDS for soil quality evaluation in the 0-20 cm soil layer of coastal saline-alkali soil, while the MDS for the 20-40 cm soil layer included bulk density, $R_{0.25}$, organic carbon, cation exchange capacity, carbon-phosphorus ratio, Ca, and Na/Mg. (3) The evaluation results of soil quality index (SQI) showed that the SQI of the T3 treatment was higher than that of other treatments. (4) Regression analysis results revealed that the SQI constructed based on TDS and MDS in both 0-20 cm and 20-40 cm soil layers showed an extremely significant positive correlation ($P < 0.001$), verifying that the MDS could be used as an evaluation indicator to characterize the improvement effect of coastal saline-alkali soil. 【Conclusion】 The combined biochar treatment (2.5 kg·plant⁻¹) exhibits the greatest and most comprehensive improvement in coastal saline-alkali soil, achieving a significant enhancement of soil quality with considerable potential for popularization and application. In addition, the layered minimum data set established in this study can provide data support for the monitoring and evaluation of soil quality in this region.

Key words: Biochar; *Camellia oleifera* husk; Coastal saline-alkali soil; Soil quality evaluation; The layered minimum data set

土壤盐碱化是严峻的环境问题之一,其导致土壤盐分积累、透水性差、养分流失和物理结构恶化,严重制约农业生产与生态安全^[1]。我国东部沿海地区,受较长海岸线及强烈人类活动的影响,土壤盐渍化程度不断加剧,严重威胁区域生态安全与可持续发展,亟需一种长效、绿色、稳定且可行的改良措施进行改善^[2-3]。

为应对这一挑战,通常采用物理、生物和化学三大类措施进行盐碱土改良。然而,物理措施(如秸秆覆盖、淋洗、铺设暗管)虽能调控水盐运移,但通常工程量大、成本高昂^[4];化学措施(如施用脱硫石膏、硫酸亚铁等改良剂)在调节酸碱、增加养分方面效果显著,但普遍存在稳定性差、易降解、改良效果难以维持等问题^[5];生物措施(如种植耐盐植物、施用菌剂)虽环境友好,但见效慢、耗时长^[6]。因此,开发兼具高效、稳定、环境友好和经济可行的新型改良策略,已成为当前盐碱土改良的关键研究方向。

在众多改良材料中,生物质炭因其高比表面积、多孔结构、高阳离子交换量及丰富的官能团等特性而备受学界关注。研究表明,施用生物质炭能有效降低土壤盐分,提高土壤孔隙度和持水能力,

显著提升土壤阳离子交换量，并通过其富含的有机质和灰分组分提高土壤养分含量与有效性，从而综合改善盐碱土质量^[7-8]。与此同时，以油茶壳、籽饼等农业废弃物为原料制备的生物基改良剂也日益受到重视，为废弃物资源化利用提供了有效途径^[9]。然而，不同生物基改良材料之间（如生物质炭与油茶壳）的改良效果均受原料特性、制备工艺及土壤类型显著影响，作用机制复杂且缺乏系统性比较^[10]。同时，现有改良效果评价多侧重于土壤物理或化学性质的单一维度，未能整合物理、化学与生物指标进行系统综合评价，且常规方法指标繁多、数据冗余，导致研究成本增加，对关键指标与土壤功能的关联了解受限，难以评估长期改良成效^[11]。

基于上述背景，本研究以生物质炭和油茶壳改良剂为对象，系统分析二者对滨海盐碱土物理结构、化学性质及生物活性的影响，并运用主成分分析法构建最小数据集，建立基于土壤质量指数的综合评价体系，以量化评估不同改良措施的修复效果^[12]。最终筛选出高效、可持续的滨海盐碱土改良方案，并为农业废弃物的高值资源化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于浙江省台州市台州湾新区（28°34'59" N，121°34'18" E）。试验区属于中亚热带季风区，气候受海洋水体调节，较同纬度内陆地区温和湿润，年平均气温 17.6 °C，年平均无霜期 257 d；年均日照 1 726 h；年均降水量 1 583.8 mm；年均蒸发量 980.9 mm；滨海滩涂为盐土亚类。供试区土壤基本化学性质见表 1。

表 1 试验土壤基本化学性质
Table 1 The basic properties of soil in current study

土层 Soil layer	pH	土壤盐分 ^① / (g·kg ⁻¹)	阳离子交换量 ^② / (cmol·kg ⁻¹)	土壤有机质 ^③ / (g·kg ⁻¹)	碱解氮 ^④ / (mg·kg ⁻¹)	有效磷 ^⑤ / (mg·kg ⁻¹)	速效钾 ^⑥ / (mg·kg ⁻¹)
0~20 cm	8.62	2.39	14	11.8	29.2	17.8	560
20~40 cm	8.95	5.58	13.8	11.6	29.2	18.3	601

①Soil salt, ②Cation exchange capacity, ③Soil organic matter, ④Alkali-hydrolyzable nitrogen, ⑤Available phosphorus, ⑥Available potassium.

1.2 试验设计

试验地于 2021 年 5 月进行 70 cm 深翻、开沟及起垄，完成全面整地。试验采用单因素随机区组设计，比较两种改良剂在不同施用剂量下的效果，改良剂 1 为油茶壳+腐殖酸（1:1, *m:m*），改良剂 2 为生物质炭+腐殖酸（1:1, *m:m*）。依据不同配方和施用量共设置 5 个处理：空白对照（CK，不添加改良剂）；T1（配方 1, 2.5 kg·plant⁻¹）；T2（配方 1, 5.0 kg·plant⁻¹）；T3（配方 2, 2.5 kg·plant⁻¹）；T4（配方 2, 5.0 kg·plant⁻¹）。供试树种为油橄榄（*Olea europaea* L.）和墨西哥落羽杉（*Taxodium mucronatum* Ten.），按 1.5 m 行距定植。供试改良剂的性质如下，油茶壳理化性质：pH 5.8，全碳 486 g·kg⁻¹，全氮 4.2 g·kg⁻¹，全磷 0.017 g·kg⁻¹，全钾 8.54 g·kg⁻¹；生物质炭理化性质：pH 7.93，全碳 104 g·kg⁻¹，全氮 26 g·kg⁻¹，全磷 21.2 g·kg⁻¹，全钾 0.13 g·kg⁻¹。

1.3 样品采集与测定

于 2024 年 5 月采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的非根际土，经自然风干，研磨粉碎过 2 mm 筛待测。土壤理化及养分指标采用常规分析方法^[13]。土壤容重（Bulk density, BD）、孔隙度（Soil porosity, SP）通过环刀法测定；土壤 pH 采用电位法测定（土水质量比 1:2.5）；阳离子交换量（Cation exchange capacity, CEC）采用三氯化六氨合钴浸提—分光光度法测定；土壤有机碳（Soil organic carbon, SOC）经 0.5 mol·L⁻¹ HCl 酸化预处理后，使用总有机碳总氮分析仪（Multi N/C 3100, Analytik Jena AG，

德国)测定^[14],土壤全氮(Total nitrogen, TN)根据凯氏定氮法测定^[15];土壤全磷(Total phosphorus, TP)采用硫酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法测定^[13];全量钠(Na)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)采用采用硝酸-盐酸-氢氟酸消解法提取,电感耦合等离子体光谱法测定^[16];土壤脲酶(Soil urease, S-UE)和多酚氧化酶(Soil polyphenol oxidase, S-PPO)活性均采用试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司)测定,测定原理分别为靛酚蓝比色法和邻苯三酚比色法。

湿筛法筛分土壤各级团聚体,分离出大于 2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和小于 0.053 mm 的团聚体组分^[8]。大团聚体含量(Large aggregate content, $R_{0.25}$)、平均重量直径(Mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)计算方法如下。

$$R_{0.25}=M_{r>0.25}/M_T \quad (1)$$

式中, $M_{r>0.25}$ 为粒径大于 0.25mm 的团聚体的质量, g; M_T 为团聚体的总质量, g。

$$\text{MWD/mm}=\frac{\sum_i^n x_i w_i}{\sum_i^n w_i} \quad (2)$$

$$\text{GMD/mm}=\exp\left[\frac{\sum_i^n w_i \ln x_i}{\sum_i^n w_i}\right] \quad (3)$$

式中, x_i 为各粒级团聚体的平均直径, mm; w_i 为各粒级团聚体的质量占比, %。

1.4 土壤质量评价方法

本研究采用全数据集(Total data set, TDS)和最小数据集(Minimum data set, MDS)对生物基改良滨海盐碱土壤质量进行综合评价,具体步骤如下:

(1) 最小数据集构建。选取 20 个影响土壤质量的指标构建 TDS。综合运用主成分分析和皮尔逊(Pearson)相关性分析构建 MDS。选取特征值大于 1 的主成分,并提取各主成分中因子载荷较高的指标(即载荷值最大或达到最大值 90%的指标)。若某主成分仅有一项高载荷指标,则直接入选 MDS;若存在多项高载荷指标,则检验其相关性:若相关系数 $|r|<0.6$,表明指标间信息独立,全部入选 MDS;反之,若 $|r|\geq 0.6$,则表明存在冗余指标,选择载荷值最高的指标预入选 MDS^[17]。其中, r 为两个指标之间的 Pearson 相关系数,反映指标间的线性相关程度, $|r|$ 越接近 1 表明相关性越强,越接近 0 表明信息越独立。

(2) 隶属度函数值计算。为消除不同指标间量纲的影响,采用隶属度函数对原始测定值进行标准化处理,将其转化为 0~1 的无量纲得分值。根据各指标与土壤质量的功能关系,将标准化函数划分为升型函数(值越大越好)、最优型函数(值在最优范围内最佳)以及降型函数(值越小越好)三类^[17]。结合盐碱地的特定环境条件,确定各指标的隶属度类型:将团聚体相关指标(MWD、GMD、 $R_{0.25}$)、土壤养分(SOC、TN、TP)及其化学计量比(C/N、C/P、N/P)、土壤酶活性等对土壤质量起促进作用的指标归为升型函数;将 pH 作为最优型函数;将容重(BD)以及盐碱胁迫指标(Na、Na/Ca、Na/Mg)归为降型函数。

升型函数公式如下:

$$X'(X)=\begin{cases} 1.0 & X \geq X_2 \\ 0.1+0.9(X-X_1)/(X_2-X_1) & X_1 < X < X_2 \\ 0.1 & X \leq X_1 \end{cases} \quad (4)$$

最优型函数公式如下:

$$X'(X) = \begin{cases} 0.1 & X \leq X_1, X \geq X_2 \\ 0.1 + 0.9(X - X_1)/(O_1 - X_1) & X_1 < X < O_1 \\ 1.0 & O_1 \leq X \leq O_2 \\ 1.0 - 0.9(X - O_2)/(X_2 - O_2) & O_2 \leq X < X_2 \end{cases} \quad (5)$$

降型函数公式如下：

$$X'(X) = \begin{cases} 0.1 & X \geq X_2 \\ 1.0 - 0.9(X - X_1)/(X_2 - X_1) & X_1 < X < X_2 \\ 1.0 & X \leq X_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中， X 为各指标的实测值， X_1 为下限值， X_2 为上限值， O_1 为最低基准值， O_2 为最高基准值。

(3) 指标权重计算。将所有参评指标通过主成分分析，各指标的公因子方差与所有指标公因子方差和的比值为该指标的权重值。

(4) 土壤质量指数计算。依据加权乘法原则，土壤质量指数 (Soil quality index, SQI) 计算公式如下：

$$SQI = \sum_{i=1}^n (W_i X'_i) \quad (7)$$

式中， W_i 为指标权重， X'_i 为隶属度值。SQI 范围在 0~1 之间，参照土壤质量分级标准，将研究区 SQI 划分为五个等级：I 级 (≥ 0.5)、II 级 (0.4~0.5)、III 级 (0.3~0.4)、IV 级 (0.2~0.3)、V 级 (< 0.2)，由 I 级至 V 级土壤质量依次降低^[18]。

(5) 最小数据集合理性验证。对 TDS 和 MDS 构建的土壤质量指数进行回归分析，若二者存在显著正相关关系，表明构建的 MDS 可较好反映 TDS 的评价结果，反之则说明不能。

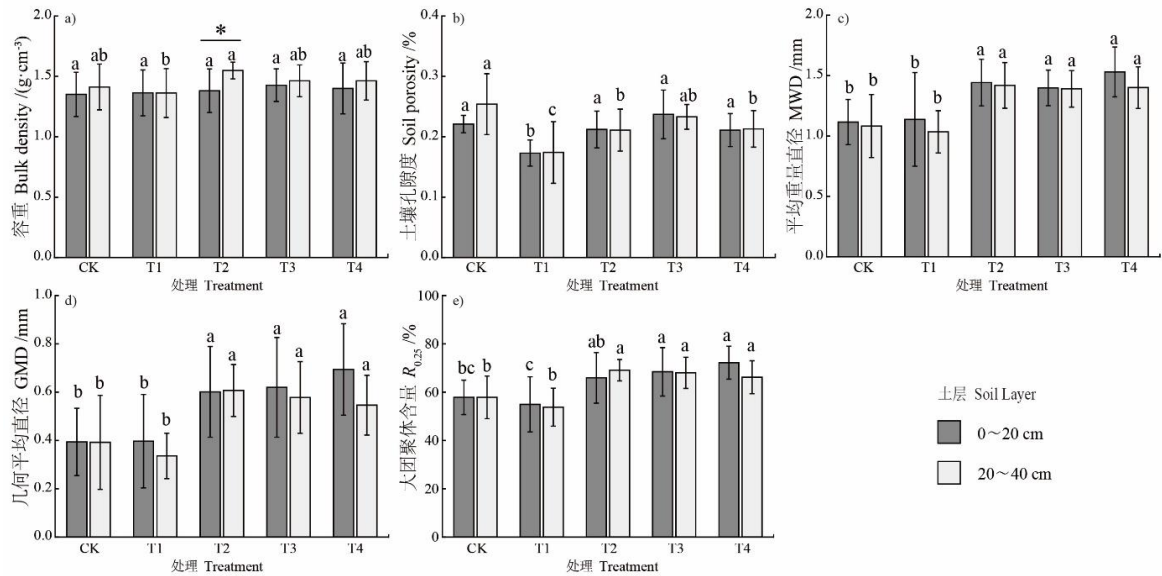
1.5 数据处理

采用 Excel 2021 进行数据整理，采用 SPSS 30.0 进行统计分析，包括独立样本 t 检验、单因素方差分析 (One-way ANOVA)、最小显著差异法 (LSD) 多重比较 ($P < 0.05$)、Pearson 相关分析和主成分分析。采用 R 4.4.2 和 Adobe Illustrator 2024 进行图表制作。

2 结果

2.1 生物基改良剂对滨海盐碱土壤物理性质的影响

生物基改良剂对土壤物理结构的影响呈现明显的指标差异性。各处理间土壤容重与 CK 无显著差异，表明改良剂对容重调控作用有限 (图 1a)。土壤孔隙度对改良剂的响应则表现出显著土层差异 (图 1b)，在 0~20 cm 土层，仅 T1 处理土壤孔隙度 (SP) 显著降低了 21.72%；而在 20~40 cm 土层，除 T3 外其余处理 SP 均显著低于 CK (降幅 8.27%~31.50%)。改良剂显著提高团聚体稳定性 (图 1c~图 1e)。在两个土层中，T2~T4 处理均显著提高了 MWD 和 GMD；其中，0~20 cm 土层以 T4 处理提升幅度最大，较 CK 分别增加 36.6% 和 76.9%。此外，在 0~20 cm 土层，T3 和 T4 处理显著提高了 $R_{0.25}$ ，分别提高 18.3% 和 24.8%。



注:

图中数据为均值 $\pm$ 标准差 ($n=5$)；同色柱子上不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P<0.05$)；*，**，和***分别表示同一处理不同土层间差异达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 显著水平。CK，不添加改良剂；T1，改良剂1（油茶壳+腐殖酸，1:1，m:m），2.5 kg·plant⁻¹；T2，改良剂1，5.0 kg·plant⁻¹；T3，改良剂2（生物质炭+腐殖酸，1:1，m:m），2.5 kg·plant⁻¹；T4，改良剂2，5.0 kg·plant⁻¹。下同。Note: Data in the figure are presented as mean $\pm$ standard deviation ($n=5$). Different lowercase letters above the columns of the same color indicate significant differences among different treatments within the same soil layer at the 0.05 level. *, **, and *** indicate significant differences between soil layers within the same treatment at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively. CK, no amendment; T1, Amendment 1 (*Camellia oleifera* husk + humic acid, 1:1, m:m) at 2.5 kg·plant⁻¹; T2, Amendment 1 at 5.0 kg·plant⁻¹; T3, Amendment 2 (Biochar + humic acid, 1:1, m:m) at 2.5 kg·plant⁻¹; T4, Amendment 2 at 5.0 kg·plant⁻¹. The same below.

图1 不同土壤改良处理下滨海盐碱土的物理性质 (a. 土壤容重 (BD)，b. 土壤孔隙度 (SP)，c. 团聚体平均重量直径 (MWD)，d. 几何平均直径 (GMD)，e. 大团聚体含量 ($R_{0.25}$))

Fig. 1 Soil physical properties of coastal saline-alkali soil under different amendment treatments (a. soil bulk density (BD), b. soil porosity (SP), c. mean weight diameter (MWD) of aggregate, d. geometric mean diameter (GMD) of aggregate, e. large aggregate content ($R_{0.25}$))

2.2 生物基改良剂对滨海盐碱土壤化学性质的影响

生物基改良剂对盐碱土壤化学性质的影响也呈现明显的指标差异。生物基改良剂类型及用量对 pH 影响显著 ($P<0.05$) (图 2a)。0~20 cm 土层中，T1、T2 降低土壤 pH，其中 T2 使 pH 显著降至 7.64，较 CK 降低 2.7%；而 T3、T4 则显著提高 pH，T4 处理使 pH 升至 8.14，较 CK 提高 3.7%。除 CK 处理外，同一处理的不同土层间 pH 均无显著差异。生物基改良剂对不同土层 CEC 影响不一 (图 2b)。在 0~20 cm 土层，各处理间 CEC 无显著差异；而在 20~40 cm 土层，T1 和 T4 处理显著降低 CEC，降幅分别为 30.5%和 33.2%，T2 和 T3 处理则与 CK 无显著差异。

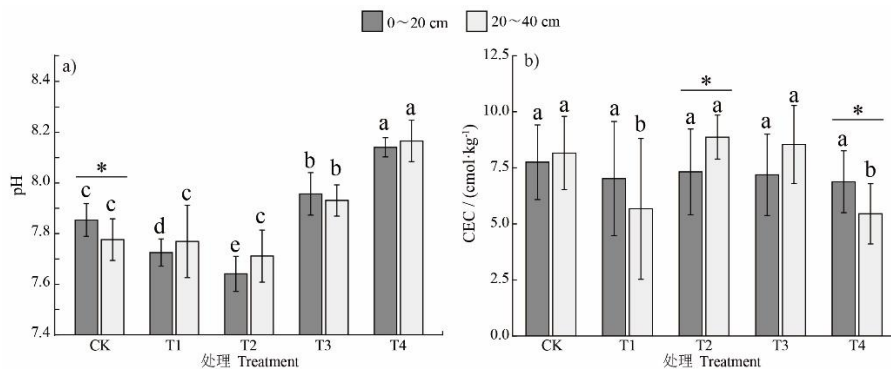


图2 不同土壤改良处理下滨海盐碱土的化学性质 (a. 土壤 pH (pH), b. 土壤阳离子交换量 (CEC))

Fig. 2 Soil chemical properties of coastal saline-alkali soil under different amendment treatments (a. soil pH (pH), b. soil cation exchange capacity (CEC))

2.3 生物基改良剂对滨海盐碱土壤养分的影响

生物基改良剂显著影响不同土层土壤养分含量。在两个土层中, T2~T4 处理均显著提高了 SOC 含量。其中, 0~20 cm 土层以 T3 和 T4 处理效果最优, 较 CK 分别显著增加 46.0%和 56.0%(图 3a); 20~40 cm 土层则以 T2 和 T3 处理效果最优, 较 CK 分别显著增加 40.3%和 46.2%。在 0~20 cm 土层, T3 处理的 TN 和 TP 含量最高, 分别较 CK 显著提升 57.7%和 90.5%; 在 20~40 cm 土层, T3 处理的 TN 最高, 而 T1 处理的 TN 含量降至 0.55 g·kg⁻¹, 表明 T1 处理不利于深层土壤氮素积累; T3 处理中 TP 显著高于 CK, 其余处理与 CK 无显著差异 (图 3b~图 3c)。土壤化学计量特征对改良剂的响应存在差异 (图 3d~图 3f)。相较于 CK, T1 处理显著提高了两个土层的 C/N, 增幅分别为 70.26%和 57.12%; T2 处理显著提高了两个土层的 C/P; 各处理间的 N/P 无显著差异 (除 20~40 cm 土层, T2 显著高于 T1 外)。此外, CK 和 T4 处理的 SOC 和 C/P, 以及 T1 和 T3 处理的 TP, 均表现为 0~20 cm 土层显著高于 20~40 cm 土层。总体而言, T3 处理在提升土壤 SOC、TN 和 TP 方面效果最优; 而 T1 处理则导致 C/N 过高, 可能破坏养分平衡。

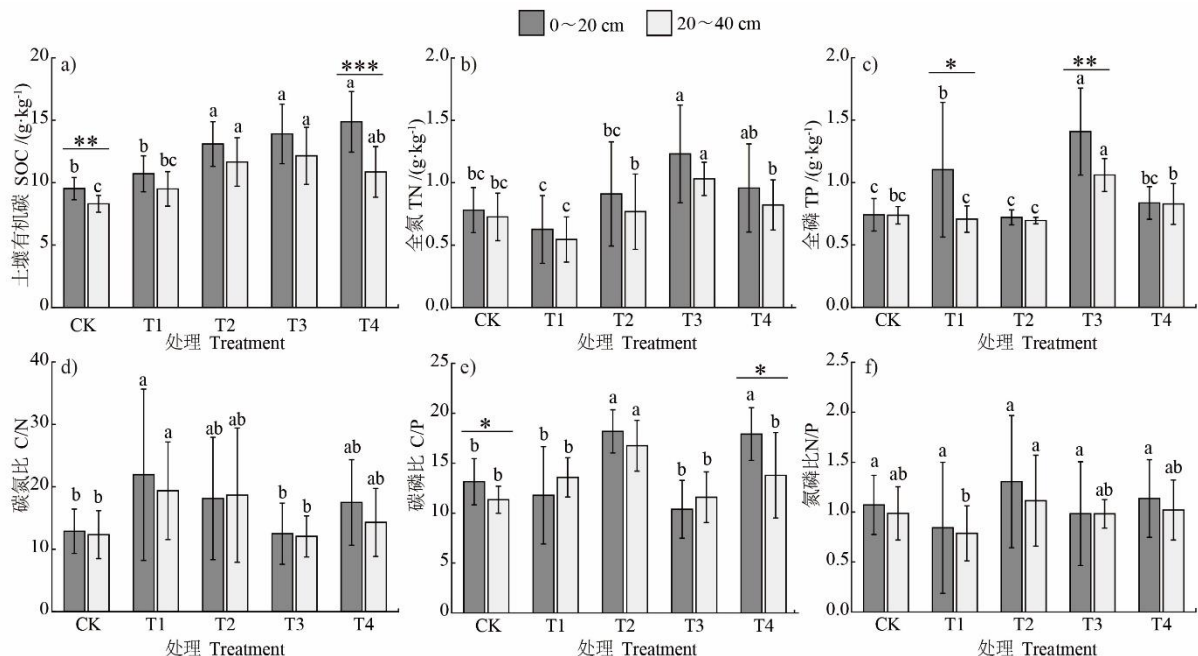


图3 不同土壤改良处理下滨海盐碱土的养分含量 (a. 土壤有机碳 (SOC), b. 土壤全氮 (TN), c. 土壤全磷 (TP), d. 碳氮比 (C/N), e. 碳磷比 (C/P), f. 氮磷比 (N/P))

Fig. 3 Soil nutrient contents of coastal saline-alkali soil under different amendment treatments (a. soil organic carbon (SOC), b. total nitrogen (TN), c. total phosphorus (TP), d. C:N ratio (C/N), e. C:P ratio (C/P), f. N:P ratio (N/P))

2.4 生物基改良剂对滨海盐碱土壤盐基元素的影响

生物基改良剂显著影响盐基元素含量及组成。两个土层中, 各改良处理 Na 含量与 CK 均无显著差异 (图 4a)。T3 处理 Ca 含量在 0~20 cm 土层最高, 较 CK 显著提高 39.8%。在 20~40 cm 土层中, 所有处理 Ca 含量均显著高于 CK (图 4b)。T3 处理 Mg 含量在两个土层中均最高, 较 CK 分别显著提高 14.1%和 17.7%; T4 处理在 20~40 cm 土层的 Mg 含量显著低于 0~20 cm 土层 (图 4c)。盐基元素 Na/Ca 比值, 各处理较 CK 均显著降低 (除 20~40 cm 土层 T4 处理外), 其中, 0~20 cm 土层以 T3 处理降幅最大; 20~40 cm 土层则以 T2 和 T3 处理降幅较大, 且二者间无显著差异 (图 4d)。盐基元素 Na/Mg 比值, 各改良处理在两个土层与 CK 均无显著差异 (图 4e)。综合而言, T3 处理在优化土壤盐基元素组成方面效果最佳, 能有效促进 Ca、Mg 积累并降低 Na 的相对比例。

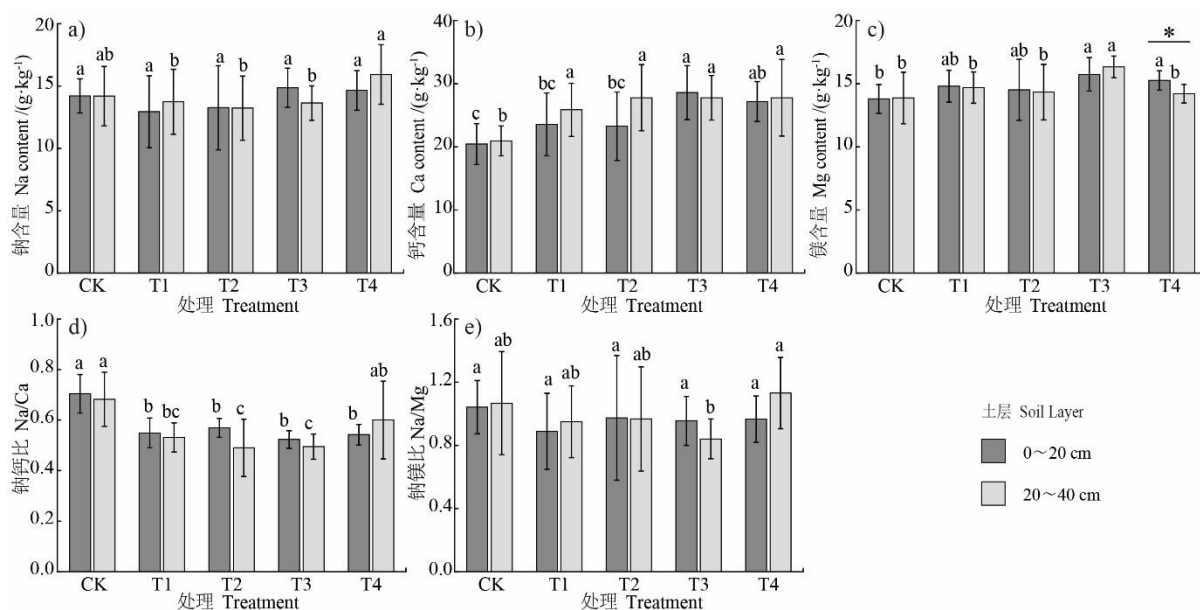


图 4 不同土壤改良处理下滨海盐碱土的盐基元素含量 (a. 钠含量 (Na), b. 钙含量 (Ca), c. 镁含量 (Mg), d. 钠钙比 (Na/Ca), e. 钠镁比 (Na/Mg))

Fig. 4 Soil base cation contents of coastal saline-alkali soil under different amendment treatments (a. sodium content (Na), b. calcium content (Ca), c. magnesium content (Mg), d. Na:Ca ratio (Na/Ca), e. Na:Mg ratio (Na/Mg))

2.5 生物基改良剂对滨海盐碱土壤酶活性的影响

生物基改良剂显著提高土壤酶活性。S-UE 活性在 0~20 cm 土层中, 所有处理均显著高于 CK, 增幅为 47.0%~82.6%, 其中, T4 处理增幅最大; 20~40 cm 土层中, T2 与 T3 处理显著高于 CK, 增幅分别为 44.9%和 35.1% (图 5a)。S-PPO 活性在两个土层中, T3 与 T4 处理均显著高于 CK, T1 和 T2 处理与 CK 均无显著差异 (除 0~20 cm 土层中 T1 处理 S-PPO 显著高于 CK 外) (图 5b)。综合来看, T3 和 T4 处理在提升 S-UE 与 S-PPO 活性方面表现最优。

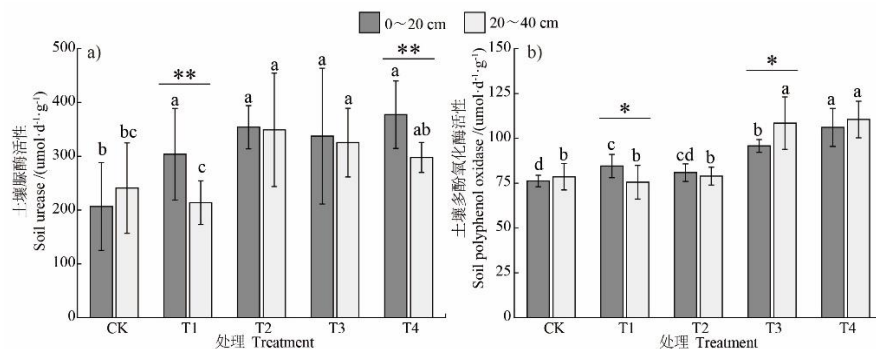


图 5 不同土壤改良处理下滨海盐碱土的土壤酶活性 (a. 土壤脲酶 (S-UE), b. 土壤多酚氧化酶 (S-PPO))

Fig. 5 Soil enzyme activities of coastal saline-alkali soil under different amendment treatments (a. soil urease (S-UE), b. soil polyphenol oxidase (S-PPO))

2.6 土壤质量评价

主成分分析表明, 0~20 cm 与 20~40 cm 土层累计方差贡献率分别为 84.29%与 83.90%, 均能有效反映原始土壤信息。结合相关分析构建最小数据集 (表 2, 图 6), 在 0~20 cm 土层包含 BD、MWD、SOC、TP、N/P 和 S-UE; 20~40 cm 土层包含 BD、 $R_{0.25}$ 、SOC、CEC、C/P、Ca 及 Na/Mg。根据土壤质量分级标准, 0~20 cm 土层中, 对照 (CK) 在 TDS-SQI 和 MDS-SQI 评价中分别处于 II

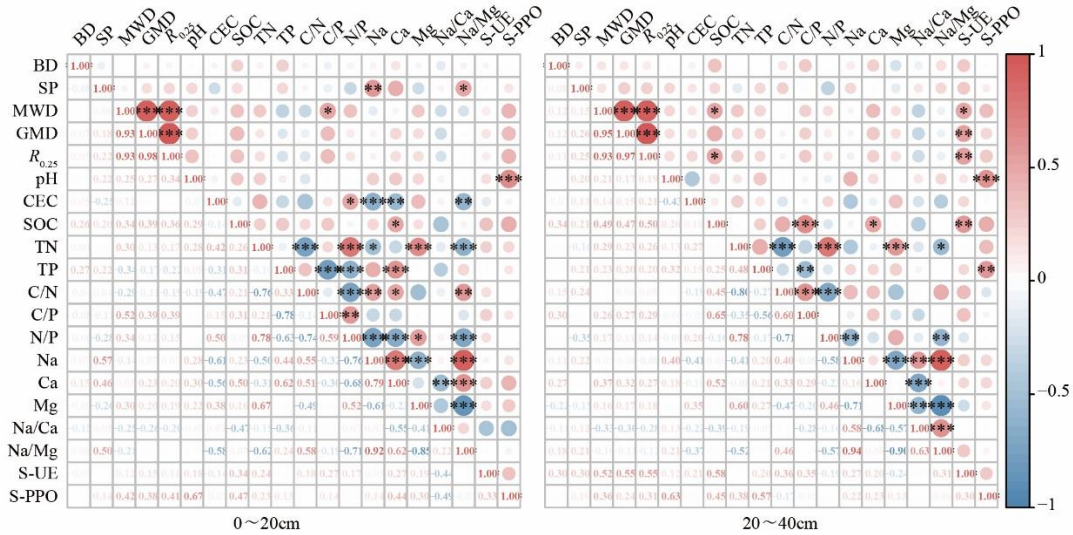
级和Ⅱ级, T1 处理为Ⅱ级, T2、T3、T4 处理均达到Ⅰ级; 20~40 cm 土层中, CK 在两种评价方法下均为Ⅱ级, T1 处理在 TDS 评价中为Ⅱ级, 在 MDS 评价中为Ⅰ级, T2、T3、T4 处理均稳定为Ⅰ级。两种评价方法下, 各处理 SQI 均显著高于 CK (图 7)。该分析表明, 0~20 cm 土层中 TDS 评价以 T4 最优, MDS 评价以 T3 最优, 20~40 cm 土层中 TDS 评价以 T3 最优, MDS 评价以 T2 最优。进一步线性拟合分析表明 (图 8), 两个土层中 TDS-SQI 与 MDS-SQI 均呈极显著正相关 ($P<0.001$), 说明所构建的 MDS 能够可靠替代 TDS, 用于滨海盐碱土改良后的土壤质量评价。

表 2 土壤质量评价指标主成分分析

Table 2 Principal component analysis of soil quality evaluation indicators

指标	0~20 cm 主成分						入选	20~40cm 主成分						入选
Index	0-20 cm principal component						MDS	20-40 cm principal component						MDS
	1	2	3	4	5	6	④	1	2	3	4	5	6	④
BD	-0.07	0.13	-0.23	0.06	-0.52	0.70	是	0.04	0.36	-0.18	-0.03	0.27	0.69	是
SP	-0.40	0.34	0.18	0.46	0.27	0.14		-0.02	0.42	0.18	0.22	-0.50	-0.08	
MWD	0.44	0.72	0.40	0.04	-0.26	-0.14	是	0.69	0.54	0.05	0.25	0.14	-0.23	
GMD	0.22	0.78	0.40	0.05	-0.33	-0.14		0.66	0.56	0.00	0.33	0.05	-0.28	
R _{0.25}	0.25	0.78	0.43	0.15	-0.28	-0.13		0.68	0.55	0.01	0.35	0.05	-0.24	是
pH	0.02	0.57	-0.13	0.45	0.38	-0.04		0.06	0.36	0.59	-0.33	0.32	-0.28	
CEC	0.65	-0.21	-0.10	0.15	-0.16	0.07		0.44	-0.16	-0.14	0.34	-0.58	0.32	是
SOC	-0.07	0.72	-0.20	-0.22	-0.02	0.38	是	0.41	0.71	-0.19	-0.22	-0.02	0.23	是
TN	0.73	0.24	-0.35	0.25	0.23	0.28		0.73	-0.37	0.43	0.05	0.19	0.24	
TP	-0.58	0.15	-0.69	0.19	-0.23	-0.01	是	0.35	0.16	0.71	-0.25	-0.39	0.19	
C/N	-0.75	0.02	0.06	-0.52	-0.06	-0.12		-0.42	0.67	-0.46	-0.13	-0.18	-0.12	
C/P	0.51	0.27	0.56	-0.43	0.18	0.26		0.08	0.50	-0.70	0.02	0.32	0.03	是
N/P	0.92	-0.03	0.07	-0.03	0.21	0.21	是	0.56	-0.53	-0.01	0.24	0.50	0.14	
Na	-0.88	0.30	0.16	0.19	0.14	0.09		-0.60	0.57	0.47	-0.02	0.07	0.03	
Ca	-0.72	0.61	-0.21	-0.04	0.00	-0.02		0.27	0.53	-0.18	-0.62	-0.02	0.03	是
Mg	0.68	0.25	-0.53	0.04	-0.04	-0.25		0.74	-0.46	-0.02	-0.25	-0.19	-0.14	
Na/Ca	-0.02	-0.57	0.54	0.41	0.17	0.13		-0.64	-0.04	0.48	0.52	0.14	0.03	
Na/Mg	-0.87	0.09	0.38	0.08	0.11	0.19		-0.70	0.56	0.29	0.15	0.11	0.11	是
S-UE	0.06	0.43	-0.19	-0.53	0.48	0.12	是	0.22	0.73	0.03	0.34	-0.08	0.25	
S-PPO	0.06	0.74	-0.22	0.05	0.26	-0.18		0.38	0.35	0.60	-0.26	0.11	0.11	
特征值①	5.95	4.50	2.44	1.57	1.31	1.09		4.94	4.80	2.79	1.67	1.44	1.14	
方差贡献率②	29.74	22.48	12.20	7.84	6.56	5.46		24.72	24.01	13.94	8.34	7.20	5.69	
累计贡献率③	29.74	52.22	64.43	72.27	78.83	84.29		24.72	48.72	62.66	71.01	78.21	83.90	

注: MDS, 最小数据集。Note: MDS, Minimum data set. ①Eigenvalue, ②Variance contribution, ③Cumulative contribution rate, ④Selected into the MDS.



注：图中为各项土壤理化性质指标间的 Pearson 相关系数（左图，0~20 cm；右图，20~40 cm）。红色表示正相关，蓝色表示负相关，颜色深浅代表相关程度强弱；*、**、***分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平上显著相关。Note: Pearson correlation coefficients between soil physicochemical properties are shown (left, 0–20 cm; right, 20–40 cm). Red and blue colors indicate positive and negative correlations, respectively, with color intensity representing the strength of correlation. *, **, and *** indicate significant correlations at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

图 6 不同土层土壤性质相关性

Fig. 6 Correlation analysis of soil properties in different soil layers

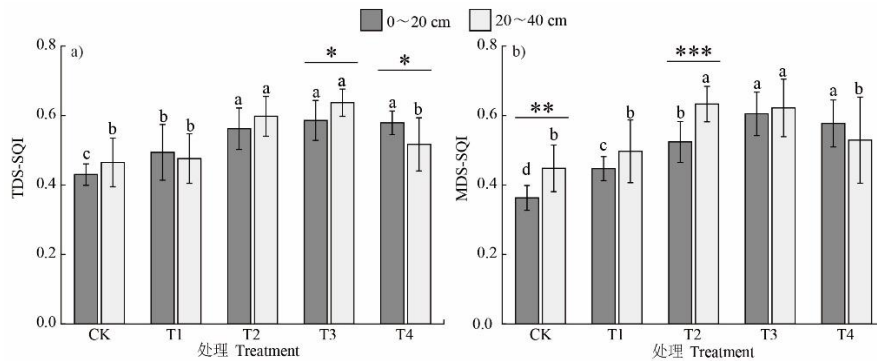
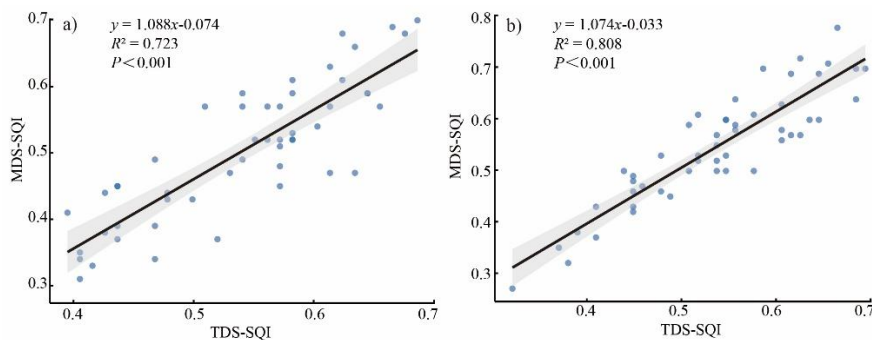


图 7 不同土壤改良处理下滨海盐碱土的土壤质量指数特征 (a. 基于全数据集的土壤质量指数 (TDS-SQI), b. 基于最小数据集的土壤质量指数 (MDS-SQI))

Fig. 7 Characteristics of soil quality index of coastal saline-alkali soil under different amendment treatments (a. soil quality index based on total data set (TDS-SQI), b. soil quality index based on minimum data set (MDS-SQI))



注：直线为线性回归拟合线，灰色区域为 95%置信区间。图中回归方程、决定系数 (R^2) 及显著性水平 ($P < 0.001$) 分别表征了不同土层下 MDS-SQI 对 TDS-SQI 的拟合优度与统计显著性。Note: The solid line is the linear regression fitting line, and the gray area is the 95%

confidence interval. The regression equation, coefficient of determination (R^2), and significance level ($P < 0.001$) are shown to characterize the goodness of fit and statistical significance of MDS-SQI in predicting TDS-SQI for different soil layers.

图 8 TDS-SQI 与 MDS-SQI 的线性拟合关系 (a. 0~20 cm, b. 20~40 cm)

Fig. 8 Linear fitting relationship between TDS-SQI and MDS-SQI (a. 0-20 cm, b. 20-40 cm)

3 讨论

3.1 生物基改良剂对滨海盐碱土性质的改良机理

改良剂施用能有效改善盐碱土的物理结构, 提升土壤养分并优化微生物功能, 提高土壤质量, 促进植物生长^[19]。研究结果发现, 在 $0\sim 5.0\text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 添加量范围内生物基改良剂通过增强团聚体稳定性, 改善滨海盐碱土物理结构, 其中, T2、T3 和 T4 处理均显著提高了土壤团聚体 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ (图 1), 这与前人研究结果^[20-21]一致。油茶壳与腐殖酸改良剂中, 腐殖酸通过离子键和氢键快速桥接土壤颗粒, 促进团聚体形成, 油茶壳分解产生的多糖为微生物提供碳源, 激发胞外聚合物分泌, 强化团聚作用^[22]。生物质炭与腐殖酸改良剂中, 生物质炭因其高比表面积和多孔结构可吸附并延缓腐殖酸降解, 促进持久稳定的有机-无机复合体形成^[19, 23]。

生物基改良剂对 pH 的影响呈现两种模式 (图 2): 油茶壳为主的 T1、T2 处理释放有机酸^[24]导致 pH 下降, 而以生物质炭为主的 T3、T4 处理则因富含碱性灰分物质^[25]而提高 pH。T3 处理提升 SOC、TN 和 TP 效果最优 (图 3), 得益于生物质炭稳定的芳香碳结构和多孔特性, 既能作为持久碳库, 又能为微生物提供栖息地并促进氮、磷养分固定^[1]。然而, T4 处理在深层土壤导致 SOC 降低, T1 处理导致 C/N 过高 (图 3), 表明不同配方的改良剂对于土壤养分的影响存在差异, 实际应用中需关注潜在的养分失衡风险^[26]。

土壤脲酶作为关键的水解酶, 可将土壤有机氮水解为铵态氮, 提高氮素利用率并驱动土壤氮素循环^[27]。所有处理在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层均提升了 S-UE 活性 (图 5), 表明生物基改良剂对微生物群落的激活效应^[28]。多酚氧化酶是介导顽固性有机碳分解的核心酶类, T3 和 T4 处理在两个土层中均显著提高了 S-PPO 活性 (图 5), 表明生物质炭所含芳香族化合物能特异性诱导微生物降解复杂碳源, 促进土壤碳循环向稳定性碳库转化^[29]。该结果表明, 生物质炭可促进土壤碳固存。相比之下, T1 和 T2 处理因油茶壳的碳组分更易被快速分解, 导致其对 S-PPO 活性影响不显著 (图 5)。

降低 Na 含量并调节 Ca、Mg 等比例是改善盐碱土中盐胁迫的关键^[30]。生物质炭富含盐基元素并能促进原生矿物中 Ca 溶出, 通过离子交换降低土壤钠吸附比^[31]。T3 处理显著提高 Ca、Mg 含量而降低 Na 含量 (图 4), 有益于滨海盐碱土改良。但 T4 处理在 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层中导致 Na 积累 (图 4), 实际应用中需谨慎评估。

3.2 最小数据集土层分异特征及改良剂效果评价

科学构建评价指标体系是土壤质量评价的核心环节。本研究发现滨海盐碱土 MDS 存在土层分异 (表 2): $0\sim 20\text{ cm}$ 土层 MDS 涵盖物理、化学及生物学指标, 而 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层则以物理和化学指标为主。BD 与 $R_{0.25}$ 在两土层中均入选 MDS (表 2), 与黑土、黄土等农业土壤的研究结果^[32-33]一致, 表明土壤结构退化是不同类型退化土壤的共同限制因子。与非盐碱土相比, 本研究所构建 MDS 中 Na/Ca、C/P 等指标的入选 (表 2), 表明盐分胁迫与养分失衡是制约盐碱土壤质量的关键因素^[34]。进一步分析土层分异特征发现, $0\sim 20\text{ cm}$ 土层中, 表层凋落物输入和根系活动导致微生物活性较高^[35], 因此, N/P 与 S-UE 入选该土层的 MDS。 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层 CEC、 Ca^{2+} 及 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 的入选 (表 2) 则主要归因于盐分离子的垂直迁移和淋溶累积作用^[36]。因此, 在滨海盐碱土质量评价中, 分层分析有助于提高评价结果的准确性和可靠性。

应用该评价体系发现, 所有生物基改良剂处理均显著提升土壤质量指数, 其中 T2、T3、T4 处理

在两个土层中均达到 I 级（图 7），表明生物基改良剂在提升滨海盐碱土质量方面具有显著效果。然而，不同评价方法筛选最优处理存在差异，0~20 cm 土层 TDS 评价显示 T4 最优，而 MDS 评价显示 T3 最优（图 7）。该差异表明，T4 处理在部分非核心指标上表现优异，但其优势可能被 MDS 评价忽略；而 T3 处理则在影响土壤质量的关键指标上表现更为稳健和全面，体现了 MDS 评价方法具有剔除冗余信息、提取有效信息的优势^[37]。进一步分析 T3 处理改良效果表明，该处理能显著提高团聚体稳定性，提升 SOC、TP、Ca 和 Mg 含量并抑制 Na 积累，提高 S-UE 和 S-PPO 活性^[11]。因此，T3 处理可有效缓解滨海盐碱土的盐分胁迫与养分贫瘠问题，显著提升土壤质量。综合考虑土壤质量的提升效果，T3 处理是本试验条件下滨海盐碱土改良的最优选择。

4 结 论

本研究系统评估了不同生物基改良剂对滨海盐碱土的修复效果，通过整合土壤物理结构、化学性质与生物学活性等指标，构建土壤质量指数进行定量评价。结果表明：（1）本研究所构建的 0~20 cm 与 20~40 cm 土层 MDS 均能有效表征土壤质量，MDS-SQI 与 TDS-SQI 呈极显著正相关，验证了该评价体系的可靠性；（2）T3 处理（2.5 kg·plant⁻¹ 改良剂 2）提高土壤团聚体稳定性、关键养分含量与酶活性，优化了盐基元素组成，表现出最优的综合改良效果；（3）不同改良剂的作用效果存在显著差异，T4 处理在深层土壤中引发 Na 积累与 SOC 降低，表明改良剂选择需兼顾其特异性与土层分异风险。综上，T3 处理（2.5 kg·plant⁻¹ 改良剂 2）为实现滨海盐碱土的快速、稳健且可持续修复提供了可靠方案。后续研究可重点关注该配方对植物生理特性及土壤微生态系统结构的长期影响，以进一步完善其应用技术体系。

致 谢 感谢中国林业科学研究院亚热带林业研究所张金萍研究员为本研究提供油茶壳土壤改良材料，谨致诚挚谢意。

参考文献（References）

- [1] Wang X L, Riaz M, Babar S, et al. Alterations in the composition and metabolite profiles of the saline-alkali soil microbial community through biochar application[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 352: 120033.
- [2] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10-27. [杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 10-27.]
- [3] Xie X F, Pu L J, Shen H Y, et al. Dynamics and prediction of soil salinization parameters under the amelioration of heavy coastal saline-alkali land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(6): 1504-1516. [解雪峰, 濮励杰, 沈洪运, 等. 滨海重度盐碱地改良土壤盐渍化动态特征及预测[J]. *土壤学报*, 2022, 59(6): 1504-1516.]
- [4] Zhao Y, Wang L, Zhao H L, et al. Research status and prospects of saline-alkali land amelioration in the coastal region of China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(3): 67-74. [赵英, 王丽, 赵惠丽, 等. 滨海盐碱地改良研究现状及展望[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(3): 67-74.]
- [5] Li S, Yang Y C, Li Y C, et al. Remediation of saline-sodic soil using organic and inorganic amendments: Physical, chemical, and enzyme activity properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(3): 1454-1467.
- [6] Li J B, Chen J L, Liu G M, et al. Progress of greening theory and technology for coastal saline land[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 246-251. [李金彪, 陈金林, 刘广明, 等. 滨海盐碱地绿化理论技术研究进展[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 246-251.]
- [7] Cui L Q, Liu Y M, Yan J L, et al. Revitalizing coastal saline-alkali soil with biochar application for improved crop growth[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 179: 106594.

- [8] Luo S S, Wang S J, Tian L, et al. Aggregate-related changes in soil microbial communities under different ameliorant applications in saline-sodic soils[J]. *Geoderma*, 2018, 329: 108-117.
- [9] Zhang J P, Ying Y, Yao X H, et al. Degradations of tannin and saponin and changes in nutrition during co-composting of shell and seed cake of *Camellia oleifera* Abel[J]. *BioResources*, 2020, 15: 2721-2734.
- [10] She D L, Sun X Q, Gamareldawla A H D, et al. Benefits of soil biochar amendments to tomato growth under saline water irrigation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 14743.
- [11] Zhao W B, Tang L, Wang S, et al. Improvement effect of two biochars on coastal saline-alkaline soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(4): 678-686.[赵维彬, 唐丽, 王松, 等. 两种生物炭对滨海盐碱土的改良效果[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(4): 678-686.]
- [12] Lu Y W, Shi Z Y, Gao J W, et al. Evaluation of soil quality of natural *Betula platyphylla* forests under different stand densities in the eastern Qilian Mountains based on the minimum data set[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(15): 7603-7615. [鲁雅雯, 石正阳, 高佳文, 等. 基于最小数据集的祁连山东部不同林分密度白桦天然林土壤质量评价[J]. *生态学报*, 2025, 45(15): 7603-7615.]
- [13] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [14] Wang S M, Luan J W, Li S Y, et al. Litter quality and decomposer complexity co-drive effect of drought on decomposition[J]. *Forest Ecosystems*, 2024, 11: 100194.
- [15] Rong G H, Zhou J Y, Wu H Y, et al. Comparative study on the flow analyzer and the Kjeldahl nitrogen analyzer for measuring soil total nitrogen[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 204-208. [荣国华, 周景云, 吴鸿宇, 等. 流动分析仪与凯氏定氮仪测定土壤全氮含量之比较研究[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 204-208.]
- [16] Yang N. Rapid determination of silicon dioxide in saline soil by microwave digestion-inductively coupled plasma optical emission spectrometry[J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2024, 33(1): 53. [杨娜. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法快速测定盐渍土中二氧化硅[J]. *化学分析计量*, 2024, 33(1): 53.]
- [17] Huang F, Tu J M, Zhang F Y, et al. Soil health assessment of urban forests in Nanchang, China: Establishing a minimum data set model[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2025, 206: 109795.
- [18] Ma R P, Zhang G X, Sun Y S, et al. Analysis and evaluation of soil quality of facilities in coastal saline-alkali area of Hebei Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2025(8): 51-61. [马瑞萍, 张国新, 孙叶烁, 等. 河北滨海盐碱区设施土壤质量分析评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2025(8): 51-61.]
- [19] Zhao W B, Xiao J, Wang S F, et al. Bone biochar and humic acid improved soil quality and promoted *Olea europaea* growth in coastal saline soil by enhancing the stoichiometric homeostasis of nutrient elements[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 70.
- [20] Wu J J, Zhou B, Li Z C, et al. Biochar promoted soil organic carbon accumulation and aggregate stability by increasing the content of organic complex metal oxides in paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 254: 106713.
- [21] Ma S H, Cao Y D, Lu J W, et al. Organic amendment increases soil carbon sequestration by altering carbon stabilization pathways within soil aggregates[J]. *Soil and Tillage Research*, 2026, 256: 106868.
- [22] Jiang W T, Li T T, Ma J F, et al. Organic materials input promotes the soil aggregate sequestration through changing soil aggregates structure and stability[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 393: 127027.
- [23] Chen X D, Wu J G, Fan W, et al. Effect of organic materials on the characteristics and stability of micro-aggregates in the native saline-alkali soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 201-207. [陈晓东, 吴景贵, 范围, 等. 有机物料对原生盐碱土微团聚体特征及稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 201-207.]
- [24] Xia M L, Wang Y P, Zhang S M, et al. Research progress on comprehensive utilization of *Camellia oleifera* Abel shell[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2021, 55(6): 26-38. [夏美玲, 王允圃, 张淑梅, 等. 油茶壳综合利用研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2021, 55(6): 26-38.]
- [25] Yuan J H, Xu R K, Wang N, et al. Amendment of acid soils with crop residues and biochars[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(3): 302-308.
- [26] Zhang H J, Jiang L, Wang W. Soil carbon-to-nitrogen ratio can predict the grassland biodiversity-productivity relationship: Evidence from local, regional, and global scales[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(9): e70518.

- [27] He R C, Wu J G. Effect of amendment of organic materials on soil biological property in primary saline alkali soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3): 774-782. [何瑞成, 吴景贵. 有机物料对原生盐碱地土壤生物学性质的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 774-782.]
- [28] Zhang Y Y, Hu H Y, Ran Y G, et al. Enhanced priming effect in agricultural soils driven by high-quality exogenous organic carbon additions: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 962: 178387.
- [29] Luo X Z, Zhang L L, Lin Y B, et al. Nitrogen availability mediates soil organic carbon cycling in response to phosphorus supply: A global meta-analysis[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2023, 185: 109158.
- [30] Fei Y J, Jiao K R, Liu X Y, et al. A sulfate-palygorskite composite amendment for saline-alkali soil: Simultaneous alkalinity reduction, nutrient enrichment, and crop growth promotion[J]. *Soil and Tillage Research*, 2026, 256: 106872.
- [31] Jin F, Piao J L, Miao S H, et al. Long-term effects of biochar one-off application on soil physicochemical properties, salt concentration, nutrient availability, enzyme activity, and rice yield of highly saline-alkali paddy soils: Based on a 6-year field experiment[J]. *Biochar*, 2024, 6(1): 40.
- [32] Lu H Y, Chen X Y, Ma K, et al. Soil health assessment under different soil and irrigation types in the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. *Catena*, 2024, 235: 107655.
- [33] Wang X S, Zheng F L, Liang R, et al. Effects of spatial distribution of slope erosion-deposition on soil quality degradation in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2026, 257: 106966.
- [34] Zhao W B, Wang S, Liu L L, et al. Effect of biochar amendment on saline-alkaline soil amelioration and plant growth: A literature review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(2): 551-561. [赵维彬, 王松, 刘玲玲, 等. 生物炭改良盐碱地效果及其对植物生长的影响研究进展[J]. *土壤通报*, 2024, 55(2): 551-561.]
- [35] Tao L, Yin L M, Dijkstra F A, et al. Differences in priming effect of topsoil versus subsoil depends on ecosystem type[J]. *Catena*, 2026, 263: 109766.
- [36] Li H R, Zhang H Y, Chang F D, et al. Depth-dependent responses of soil microorganisms to the interaction of soil salinity and straw interlayer[J]. *Soil and Tillage Research*, 2026, 256: 106894.
- [37] Qian F K, Yu Y J, Dong X R, et al. Soil quality evaluation based on a minimum data set (MDS)—A case study of Tieling County, Northeast China[J]. *Land*, 2023, 12(6): 1263.

(责任编辑: 陈荣府)