DOI：10.11766/trxb202501060011 CSTR：32215.14.trxb202501060011
李思岩，梁晓艳，王辰，王雨晴，谢威，杨迪，张明聪. 改良措施对苏打盐化草甸土团聚体稳定性及腐殖质组成的影响[J]. 土壤学报，2026，63（6）：1987–1999.
LI Siyan，LIANG Xiaoyan，WANG Chen，WANG Yuqing，XIE Wei，YANG Di，ZHANG Mingcong. Effects of Improvement Measures on Aggregate Stability and Humus Composition of Soda Saline Meadow Soil[J]. Acta Pedologica Sinica，2026，63（6）：1987–1999.

改良措施对苏打盐化草甸土团聚体稳定性及腐殖质组成的影响*

李思岩[1]，梁晓艳[1]，王 辰[1]，王雨晴[1]，谢 威[1]，杨 迪[1]，张明聪[1, 2†]
（1. 黑龙江八一农垦大学农学院，黑龙江大庆 163319；2. 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室，黑龙江大庆 163319）

摘 要：为研究不同改良措施对苏打盐碱地土壤结构及腐殖质特性的调控机制，采用大田对比试验，设置常规（CK）、生物炭（T1）、有机肥（T2）和复合改良剂（T3）改良处理，研究其对苏打盐化草甸土团聚体稳定性及腐殖质组成及大豆产量的影响。结果表明，与 CK 相比，T1、T2 和 T3 处理均显著促进微团聚体向大团聚体的转化。T3 处理效果最为显著，>2 mm 粒径团聚体质量分数增加 12.66%（$P<0.05$），显著高于 T1 和 T2。T3 处理通过降低土壤 pH 3.02%并同步提高有效磷（67.84%）、碱解氮（7.98%）含量，显著改善养分有效性；其土壤平均重量直径和几何平均直径值分别提高 7.99%和 2.39%，同时微团聚体（0.053～0.25 mm）有机碳含量提升 24.58%～31.14%，显著高于其他处理。在腐殖质组分上，T3 处理各粒径胡敏酸、富里酸和胡敏素含量增幅分别为 19.95%～29.62%、3.64%～6.48%和 7.33%～36.92%，均优于 T1 和 T2 处理；T3 处理显著提升腐殖质复杂程度，E4/E6 比值显著增加 84.84%。偏最小二乘路径模型揭示土壤有机碳（路径系数 0.96）通过调控腐殖酸总量（1.13）和胡敏素（1.29）显著影响团聚体稳定性。产量分析表明 T3 处理通过增加株高（61.32%）和单株荚数（11.96%）实现大豆产量 2 654 kg·hm^{-2}，增产 42.67%。研究表明复合改良剂（T3）通过重构腐殖质分子结构，使大粒级团聚体分子结构复杂化，促进胶结物质增加，提高有机碳含量，显著提高了>2 mm 粒径团聚体质量分数和土壤团聚体稳定性，有效改善了苏打盐化草甸土耕层土壤结构，为苏打盐碱地改良与产能协同提升提供理论依据。

关键词：土壤改良剂；苏打盐碱土；土壤团聚体；土壤腐殖质组成
中图分类号：S156.4+4 **文献标志码：**A

Effects of Improvement Measures on Aggregate Stability and Humus Composition of Soda Saline Meadow Soil

LI Siyan[1], LIANG Xiaoyan[1], WANG Chen[1], WANG Yuqing[1], XIE Wei[1], YANG Di[1], ZHANG Mingcong[1, 2†]
(1. *College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing*, *Heilongjiang* 163319, *China*; 2. *Key Laboratory of*

* 国家重点研发计划项目（2023YFD2300102）、黑龙江省自然科学基金联合引导项目（LH2022D019）和黑龙江省博士后科研启动金资助项目（LBH-Q21162）共同资助 Supported by the National Key R&D Program of China（No. 2023YFD2300102），the Joint Guidance Project of Heilongjiang Provincial Natural Science Foundation（No. LH2022D019），and the Postdoctoral Research Startup Fund Project of Heilongjiang Province（No. LBH-Q21162）
† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhangmingcong@163.com
作者简介：李思岩（2000—），女，辽宁鞍山人，硕士研究生，主要从事盐碱土改良相关研究。E-mail：16604123665@ 163.com
收稿日期：2025–01–06；收到修改稿日期：2025–04–14；网络首发日期（www.cnki.net）：2025–06–06

Low-carbon Green Agriculture in Northeastern China, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs P. R. China*, *Daqing*, *Heilongjiang* 163319, *China*)

Abstract: 【Objective】This study aimed to investigate the regulation mechanisms of different improvement measures on soil structure and humus characteristics of soda saline-alkali land.【Method】A field comparative experiment was conducted to study the effects of conventional (CK), biochar (T1), organic fertilizer (T2), and compound modifier (T3) on aggregate stability, humus composition, and soybean yield in soda saline meadow soil.【Result】The results showed that compared with CK, T1, T2 and T3 treatments significantly promoted the transformation of microaggregates to macroaggregates. The effect of T3 treatment was the most significant, and the mass fraction of >2 mm aggregates increased by 12.66% (P<0.05), which was significantly higher than that of T1 and T2. T3 treatment significantly improved nutrient availability by reducing soil pH by 3.02% and simultaneously increasing available phosphorus (67.84%) and alkali-hydrolyzable nitrogen (7.98%) content. The average weight diameter and geometric mean diameter of soil increased by 7.99% and 2.39%, respectively, and the organic carbon content of microaggregates (0.053-0.25 mm)increased by 24.58%-31.14%, which was significantly higher than other treatments. In terms of humus components, the contents of humic acid, fulvic acid, and humin in each particle size of T3 treatment increased by 19.95%-29.62%, 3.64%-6.48%, and 7.33%-36.92%, respectively, which were better than those of T1 and T2 treatments. T3 treatment significantly increased the complexity of humus, and the ratio of E4/E6 significantly increased by 84.84%. The PLS-PM structural equation model revealed that soil organic carbon (path coefficient 0.96) significantly affected aggregate stability by regulating total humic acid (1.13) and humin (1.29). Yield analysis showed that T3 treatment achieved a soybean yield of 2 654 kg·hm^{-2} by increasing plant height (61.32%) and pod number per plant (11.96%), with an increase of 42.67%.【Conclusion】The results showed that the compound modifier (T3) complicated the molecular structure of large-grained aggregates by reconstructing the molecular structure of humus, promoted the increase of cementing materials, increased the content of organic carbon, significantly increased the mass fraction of aggregates with >2 mm particle size and the stability of soil aggregates, and effectively improved the soil structure of the plough layer of soda-saline meadow soil. This provides a theoretical basis for the improvement of soda saline-alkali land and the synergistic improvement of production capacity.

Key words: Soil improver; Soda saline-alkali soil; Soil aggregates; Soil humus composition

松嫩平原是我国重要粮食产区[1]，也是世界三大苏打盐碱土集中分布区之一[2]。该区域土壤盐碱化以高浓度 Na_2CO_3 和 $NaHCO_3$ 为主，具有碱性强、质地黏重板结、透水透气性差、养分有效性低、腐殖质易淋失等特点，严重影响当地农业生产[3]。如何通过外源改良措施协同调控改善苏打盐碱地土壤结构、降低盐碱含量、提高水分入渗速率，已成为苏打盐碱地治理的核心科学问题[4]。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元[5]，其稳定性是评价土壤结构的重要指标[6]。近年来，生物炭、有机肥及复合改良剂等材料被广泛用于盐碱土修复。生物炭有高孔隙度和表面负电荷特性[7]，可吸附钠离子并改善土壤通透性[8-9]；有机肥通过输入活性有机碳（如多糖、脂类）促进微生物分泌胶结物质，增强微团聚体形成[10-11]；复合改良剂（如石膏-腐植酸体系）则通过 Ca^{+}/Na^{+}置换和有机-无机复合胶结降低土壤碱化度[3]。提高土壤胶体中含氧官能团的数量，增强土壤络合性，对于胶结土壤颗粒有显著影响[10-11]。然而，现有研究对改良措施作用下团聚体形成机制及腐殖质组分响应的系统性解析仍显不足，尤其缺乏田间尺度下“碳输入-结构改良-腐殖质转化”的耦合效应研究。

土壤腐殖质是团聚体形成的胶结物质[12]，其形成与转化是维持团聚体稳定性的关键因素[13]。胡敏酸和富里酸作为土壤腐殖质重要组成部分，其结构和性质的变化与土壤状况关联密切[14]。胡敏酸通过羧基与黏粒矿物配位形成有机-无机复合胶膜，而富里酸则通过促进铁铝氧化物胶结增强微团聚体稳定性[15]。苏打盐碱土高 pH 环境会加速腐殖质解聚，导致传统改良材料在腐殖质定向调控方面存在局限性。现阶段大多研究关注大团聚体中腐殖质的组分变化，而关于不同粒级团聚体中腐殖质组分对苏打

盐化草甸土团聚体稳定性的影响尚不明晰。鉴于此，本研究采用大田试验方法，研究不同改良措施对土壤团聚体形成与腐殖质组成的关系，以期为松嫩平原苏打盐碱土的改良和规模化利用提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于黑龙江北大荒农垦集团四方山农场有限公司进行，试验地处于黑龙江省绥化市肇东市境内（46°12'—46°22'N，125°45'—126°30'E），位于中国东北松嫩平原中部，属中温带大陆性气候，雨热同季，全年无霜期约 120 d。供试土壤类型为苏打盐化草甸土，土壤 pH 9.0、电导率 318 μS·cm^{-1}、有机质 17.83 g·kg^{-1}、有效磷 25.06 mg·kg^{-1}、速效钾 156.67 mg·kg^{-1}、碱解氮 165.36 mg·kg^{-1}。

1.2　供试材料

供试作物为大豆，品种为“农庆豆 28”。供试肥料：尿素（N≥46%）、硫酸铵（N≥21%）；磷酸二铵（N≥18%、P_2O_5≥46%）；硫酸钾镁（K_2O≥24%、Mg≥6%），均为市场销售生产资料。

生物炭源自黑龙江密山市玉米秸秆炭烧，比表面积 7.29 m^2·g^{-1}、灰分 27.90%、pH 8.46、C 55.31%、N 1.35%、P 0.56%、K 1.42%、CEC 24.60 cmol·kg^{-1}。

商品有机肥来自黑龙江宏泰生物有机肥料有限责任公司，总养分≥5%，有机质 36.8%、N 0.84%、P_2O_5 1.85%、K_2O 0.96%。

供试改良剂由大庆市启隆农业科技有限公司生产。以硫酸铵和凹凸棒土作为载体，按一定比例加入生物炭基肥、褪黑素、柠檬酸、硫酸铝、硫酸锌、硫酸亚铁、DTA-6 和脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸酯盐等，制成复合型盐碱土壤改良剂。（发明专利号：ZL201811502623.3）。

1.3　试验设计

试验于 2024 年在北大荒集团黑龙江四方山农场进行，设置 4 个处理，分别为 CK：当地常规施肥处理；T1：常规施肥+1.0 t·hm^{-2} 生物炭；T2：常规施肥+1 500 kg·hm^{-2} 商品有机肥；T3：常规施肥+60 kg·hm^{-2} 复合改良剂。各处理根据预试验结果确定最优用量。常规施肥的化肥施肥量参考当地常规大豆生产田，按 N、P_2O_5、K_2O 60、70、30 kg·hm^{-2} 的用量施用尿素 32.61 kg·hm^{-2}、硫酸铵 85.71 kg·hm^{-2}、磷酸二铵 150 kg·hm^{-2}、硫酸钾镁 60 kg·hm^{-2}。各处理氮、磷、钾肥于基肥一次性施入，有机肥和改良剂均与肥料掺混后随肥料一起施用，其他田间管理同当地生产一致。5 月播种，9 月大豆收获后，于试验小区挖剖面用铝盒采集 0～20 cm 土壤样品，在实验室中将原状土沿自然裂缝剥离至约 1 cm，风干后剔除石块和腐殖质残留物，取 500 g 土进行土壤团聚体分析。另按照 S 型五点采样法采集 0～20 cm 土壤样品，将土样混匀后风干研磨，分别过 0.25 mm 和 2 mm 筛后密封保存，备用。

1.4　测定项目及方法

1.4.1　土壤理化性质测定　土壤 pH 与电导率（EC）按照 5∶1 水土比，采用 pH 计和电导率仪测定；土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法测定；土壤速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定；土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定；土壤碱解氮采用碱解扩散法测定。

1.4.2　土壤团聚体分级　采用湿筛法对土壤团聚体进行分级（套筛直径为 2、0.25、0.053 mm）[16]。利用重铬酸钾−外加热法测定各粒级水稳性团聚体有机碳含量。

土壤团聚体稳定性的评价指标[16-17]：平均重量直径（MWD）、几何平均直径（GMD）、稳定性团聚体质量百分数（$R_{>0.25}$）和分形维数（D），具体计算公式如下：

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}W_i\bar{X}_i \tag{1}$$

$$\mathrm{GWD}=\exp\left[\sum_{i=1}^{n}W_i\ln\bar{X}_i\right] \tag{2}$$

式中，$\bar{X}_i$ 为 i 组粒级团聚体的平均直径，mm；W_i 为第 i 组粒级团聚体的质量分数。

$$R_{>0.25}=\frac{M_{>0.25}}{M_t} \tag{3}$$

式中，$M_{>0.25}$ 为粒级>0.25 mm 团聚体质量总数，g；M_t 为供试土壤团聚体总质量，g。

$$\frac{M(\delta < \bar{X}_i)}{M_t} = \left(\frac{\bar{X}_i}{\bar{X}_{\max}}\right)^{3-D} \quad (4)$$

式中，$M(\delta < \bar{X}_i)$ 为小于 $\bar{X}_i$ 的土粒累计质量，M_t 为各粒级团聚体总质量，$\bar{X}_{\max}$ 为最大粒级平均直径。分形维数 D 根据杨培岭等[18]推导出的公式，分别以 log（M_i/M_t）、log $\bar{X}_i/\bar{X}_{\max}$ 为纵、横坐标得出两式的直线，3-D 为两式直线的斜率。

1.4.3 土壤腐殖质组成提取测定 各粒级土壤团聚体腐殖质采用腐殖质组成修改法进行提取[19]。以 0.1 mol·L^{-1} $Na_4P_2O_7$+0.1 mol·L^{-1} NaOH 混合液为提取剂从土壤中提取腐殖酸（HE），用 0.5 mol·L^{-1} H_2SO_4 分离腐殖酸（HE）得到胡敏酸（HA）与富里酸（FA），剩余为胡敏素（HU）。各组分含碳量采用重铬酸钾容量法测定。

腐殖化系数（PQ）计算：

$$PQ = C_{HA} / C_{HE}$$

式中，C_{HA} 为 HA 含碳量，g·kg^{-1}；C_{HE} 为 HE 含碳量，g·kg^{-1}。

1.4.4 腐殖质的光学性质测定 采用紫外可见分光光度法测定 HA 和 FA 溶液在 400、465、600、665 nm 吸光值，并计算色调系数（Δ log K）：

$$\Delta \log K = \lg A400 - \lg A600$$

式中，lg A400 为溶液在波长为 400 nm 处的色调系数值；lg A600 为溶液在波长为 600 nm 处的色调系数值。

E4/E6 值计算：

$$E4/E6 = K465/K665$$

1.5 数据分析

通过 Excel 2016 对基础试验数据进行分析，不同处理和不同粒径之间通过 SPSS 26.0 进行单因素方差分析（One-way ANOVA），数据通过 Duncan 法进行多重比较，采用 Origin 2018 软件采用进行绘图，使用 R 语言构建偏最小二乘路径模型（PLS-PM）。

2 结 果

2.1 不同改良措施对土壤理化性质的影响

不同改良措施对土壤物理性状的影响如表 1 所示。T3 处理显著提高土壤含水量，较 CK 增加 9.57%，T1 处理与 CK 无显著差异，而 T2 处理含水量较 CK 有所下降，显著低于其他处理（P<0.05）。各改良措施的土壤容重均显著高于 CK，与 CK 相比，T1、T2、T3 处理土壤容重分别提高了 15.40%、9.03%、11.88%（P<0.05）。各改良措施的土壤孔隙度均显著低于 CK，与 CK 相比，T1、T2、T3 处理土壤孔隙度分别降低了 14.26%、8.36%、11.00%（P<0.05）。

表 1 不同处理对土壤物理性质的影响

Table 1 Effects of different treatments on soil physical properties

处理 Treatment	土壤含水量 Soil moisture content/%	土壤容重 Soil bulk density/（g·cm^{-3}）	土壤孔隙度 Soil porosity/%
CK	25.06±0.70b	1.27±0.01c	51.92±0.40a
T1	25.32±0.41b	1.47±0.02a	44.52±0.85c
T2	22.51±0.87c	1.39±0.01b	47.58±0.34b
T3	27.45±0.25a	1.43±0.01ab	46.21±0.53bc

注：CK，常规施肥处理；T1，添加生物炭；T2，添加有机肥；T3，添加复合改良剂。表中的数值表示平均值 ± 标准误（n=3）。同一列中小写字母不同表示处理间存在显著差异（P<0.05）。下同。Note：CK, conventional fertilization treatment; T1, adding biochar; T2, adding organic fertilizer; T3, adding compound modifier. The values in the table represent mean ± standard error（n=3）. Different lowercase letters indicated significant differences between treatments（P<0.05）. The same below.

如表 2 所示，与常规处理（CK）相比，生物炭（T1）、有机肥（T2）及复合改良剂（T3）处理对土壤化学性质的影响呈现显著差异。各处理中，土壤 pH 表现为 T2>CK>T1>T3，T3 处理土壤 pH 较 CK 显著降低 3.02%（P<0.05）。T3 处理显著提高土壤电导率，较 CK 提高 18.57%，T1 与 T2 处理电导率最低，显著低于 CK 和 T3 处理（P<0.05）。有机碳含量以 T1 处理最高，较 CK 增加 6.45%，而 T2 处理最低；碱解氮含量则以 T3 处理最高，较 CK 增加 7.98%（P<0.05）。有效磷和速效钾含量在 T3 处理中表现最优，T3 处理的有效磷含量较 CK 显著增加 67.84%；T3 处理的速效钾含量与 CK 无显著差异，但显著高于 T1 和 T2 处理。综上，复合改良剂（T3）可显著降低土壤 pH 并协同提升

有效磷、碱解氮及速效钾含量，而有机肥（T2）虽增加有效磷，却导致速效钾和碱解氮含量下降，表明不同改良措施对土壤化学性质的调控存在显著权衡效应。

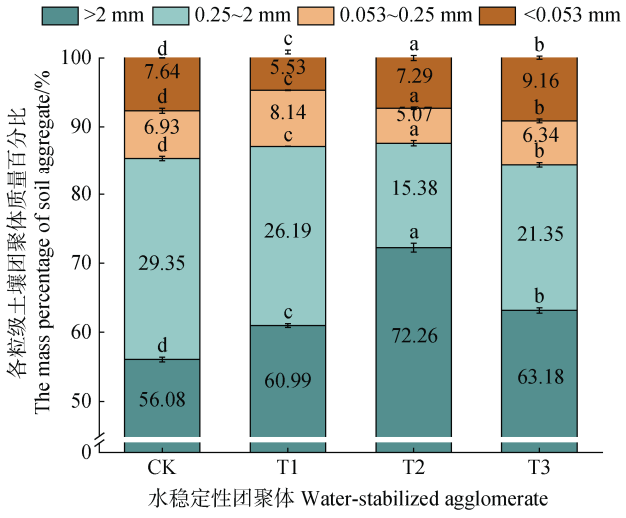
表 2　不同处理对土壤化学性质的影响

Table 2　Effects of different treatments on soil chemical properties

处理 Treatment	pH	电导率 EC/（μS·cm^{-1}）	有机碳 SOC/（g·kg^{-1}）	有效磷 AP/（mg·kg^{-1}）	速效钾 AK/（mg·kg^{-1}）	碱解氮 AN/（mg·kg^{-1}）
CK	8.62±0.01b	409.3±3.2b	20.57±0.08c	9.67±0.74c	164.3±0.3a	143.8±2.0c
T1	8.50±0.04c	357.0±18.8c	21.89±0.18a	12.84±0.32b	161.0±0.6b	149.0±1.7b
T2	8.81±0.02a	359.3±12.2c	18.67±0.18d	14.01±0.51b	153.5±0.9c	123.5±1.3d
T3	8.36±0.02d	485.3±18.0a	21.08±0.12b	16.23±0.29a	166.0±0.6a	155.3±0.9a

2.2　不同改良措施对土壤团聚体的影响

由图 1 可知，与 CK 相比，T1、T2 和 T3 处理均能不同程度地影响土壤各粒径水稳定性团聚体的质量分数，土壤结构整体呈现出微团聚体向大团聚体转化的趋势。各改良措施的>2 mm 粒级团聚体质量百分数均高于 CK 处理，而各改良措施的 0.25～2 mm 粒级团聚体质量百分数均小于 CK 处理。其中，T3 处理效果最好，>2 mm 粒径的团聚体质量分数较 CK 显著增加 12.66%（P<0.05），<0.053 mm 粒径的团聚体质量分数增加 19.83%（P<0.05）。其次为 T2 处理，>2 mm 粒级团聚体质量分数增加 28.85%（P<0.05）。T1 处理>2 mm 和 0.053～0.25 mm 粒径的团聚体质量分数分别增加 8.76%和 17.44%（P<0.05）。



注：不同小写字母表示不同处理间同一粒级团聚体质量百分比差异显著（P<0.05）。Note：Different lowercase letters indicated significant difference in the mass percentage of aggregates of the same particle size between treatments（P<0.05）.

图 1　不同处理对土壤团聚体粒级分布的影响

Fig. 1　Effects of different treatments on soil aggregate size distribution

土壤团聚体指数 MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体稳定性的重要指标。由表 3 可知，各改良措施的 MWD、GMD 值均显著高于 CK 处理，与 CK 相比，T1、T2、T3 处理 MWD 值提高了 6.51%、19.85%、7.99%，均达 5%显著水平；GMD 值提高了 6.94%（P<0.05）、12.73%（P<0.05）、2.39%。土壤稳定性团聚体（$R_{>0.25}$）表现为 T2>T1>CK>T3，分形维数 D 表现为 T3>T2>CK>T1。

2.3　不同改良措施对土壤团聚体有机碳含量的影响

如图 2 所示，T1 和 T3 处理的土壤水稳性团聚体各粒级有机碳含量均显著高于 CK 处理。与 CK 处理相比，T1 和 T3 处理的粗大团聚体（>2 mm）、细大团聚体（0.25～2 mm）、微团聚体（0.053～0.25 mm）和粉黏粒（<0.053 mm）土壤有机碳含量分别显著提高 0.05%～7.43%、7.64%～13.96%、24.58%～31.14%和 1.72%～14.47%。而 T2 处理细大团聚体（0.25～2 mm）和微团聚体（0.053～0.25 mm）土壤有机碳含量较 CK 处理分别提高 4.36%和 10.52%（P<0.05）。

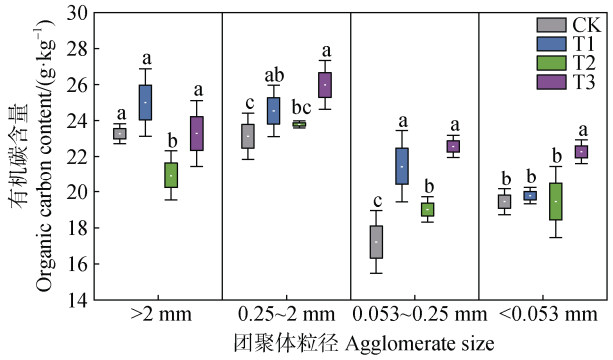
2.4　不同改良措施对土壤腐殖质组成的影响

由图 3 可知，T3 处理显著影响了盐碱土团聚体腐殖质含量（P<0.05），T3 处理下细大团聚体、微团聚体和粉黏粒的腐殖酸与胡敏酸含量相较于 CK 均有显著提升，其中腐殖酸增幅为 3.64%～6.48%，胡敏酸增幅更为显著，达到 19.95%～29.62%

表 3 不同处理对土壤团聚体稳定性的影响

Table 3 Effects of different treatments on the stability of soil aggregates

处理 Treatment	平均重量直径 MWD/mm	几何平均直径 GMD/mm	$R_{>0.25}$/%	D
CK	2.87±0.02c	1.23±0.01c	85.43±0.48ab	2.49±0.01b
T1	3.05±0.01b	1.31±0.00b	87.18±0.22a	2.41±0.01c
T2	3.44±0.05a	1.38±0.03a	87.64±1.14a	2.51±0.01b
T3	3.10±0.01b	1.26±0.01c	84.53±0.21b	2.54±0.01a



注：图中误差线表示标准差。不同小写字母表示处理间存在显著差异（P<0.05）。Note: The error bar in the figure represents the standard deviation. Different lowercase letters indicated significant difference between treatments（P<0.05）.

图 2 不同处理下土壤水稳性团聚体各粒级有机碳含量

Fig. 2 The content of organic carbon in each particle size of soil water-stable aggregates under different treatments

（P<0.05）。T3 处理土壤各粒径团聚体胡敏素含量相较于 CK 均显著提高，增幅为 7.33%～36.92%（P<0.05）。T1 处理也影响了盐碱土团聚体腐殖酸、胡敏酸和胡敏素含量（P<0.05）。与 CK 相比，T1 处理显著提高了细大团聚体、微团聚体和粉黏粒的腐殖酸含量，及各粒径团聚体胡敏酸和胡敏素含量。此外，T2 处理也显著提高了各粒径团聚体胡敏酸含量，与 CK 相比，T2 处理提高了微团聚体腐殖酸含量及细大团聚体、微团聚体和粉黏粒的胡敏素含量。

2.5 不同改良措施对土壤光学性质的影响

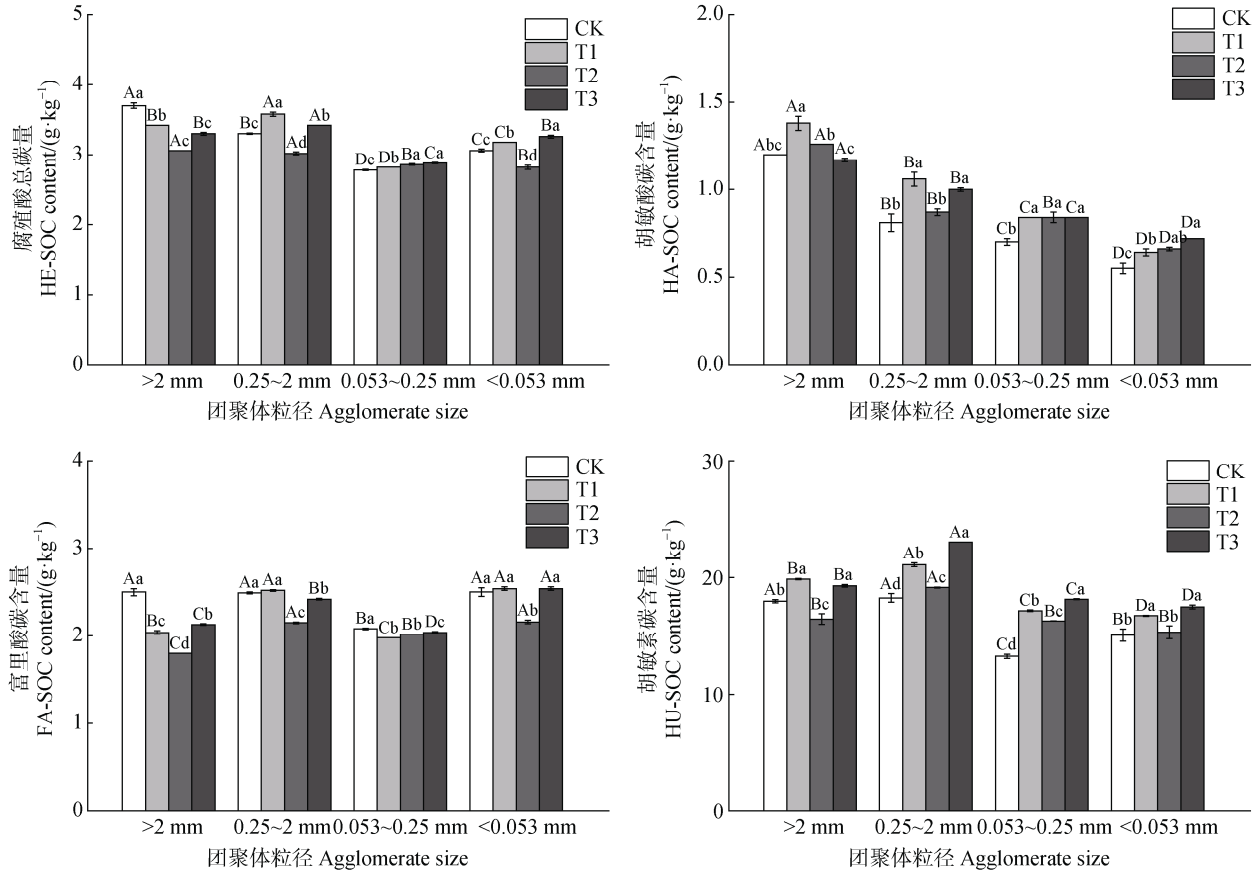
不同改良措施对土壤团聚体富里酸和胡敏酸的色调系数影响见图 4 所示，土壤腐殖质Δ log K 可作为判断土壤腐殖质复杂程度的指标。各改良措施的粗大团聚体富里酸Δ log K 值均高于 CK，而各改良措施的微团聚体富里酸Δ log K 值均小于 CK，说明不同改良措施能使大粒级团聚体分子结构复杂化，小粒级团聚体分子结构趋于简单。T1 处理除粗大团聚体外，其余三个粒径团聚体富里酸Δ log K 值较 CK 显著提高，增幅为 8.09%～32.36%（P<0.05）。T2 处理除微团聚体外，其余三个粒级团聚体富里酸Δ log K 值较 CK 显著降低，降幅为 14.46%～37.70%（P<0.05）。与 CK 相比，T3 处理显著降低了粗大团聚体和细大团聚体富里酸Δ log K 值，降幅均为 11.89%～12.04%（P<0.05）。T3 处理下微团聚体和粉黏粒团聚体富里酸Δ log K 值分别提高 24.63%和 17.32%（P<0.05）。各改良措施的不同粒径团聚体胡敏酸Δ log K 值与 CK 相比均呈现先降低再升高趋势。在粉黏粒团聚体中，T1 处理和 T3 处理胡敏酸Δ log K 值相较于 CK 显著提高 1.47%和 1.63%，而 T2 处理降低了 3.00%（P<0.05）。

如图 5 所示，不同改良措施显著影响了土壤团聚体富里酸和胡敏酸的光学特性（E4/E6）。E4/E6 比值与腐殖物质的分子质量、芳香环的缩合度和含氧量有关，能反映腐殖物质分子的复杂程度。T3 处理各粒径团聚体的富里酸 E4/E6 值均显著高于 CK，增幅为 3.65%～84.84%（P<0.05）。与 CK 相比，T1 处理微团聚体和粉黏粒团聚体的富里酸 E4/E6 值显著增加了 2.87%和 13.65%（P<0.05），T2 处理细大团聚体和粉黏粒团聚体的富里酸 E4/E6 值显著增加了 31.32%和 24.12%（P<0.05）。T1 和 T2 处理均提高了粗大团聚体和微团聚体胡敏酸 E4/E6 值，而 T3 处理仅粉黏粒团聚体的胡敏酸 E4/E6 值高于 CK。

2.6 不同改良措施对土壤腐殖化程度的影响

不同改良措施对土壤各粒径团聚体腐殖质 PQ 值和 HA/FA 均有显著影响（P<0.05），由图 6 可知，各改良措施的各粒径团聚体腐殖质 PQ 值和 HA/FA 均显著高于 CK，说明三种不同改良措施均利于增加

土壤各粒径团聚体的腐殖化程度。与 CK 相比，T2 处理的各粒径团聚体腐殖质 PQ 值和 HA/FA 提高幅度最大，增幅分别为 16.60%～26.95%和 23.52%～45.68%（$P<0.05$）；T1 处理的各粒径团聚体腐殖质



注：不同大写字母表示相同处理不同粒径团聚体间腐殖质组分碳含量差异显著，不同小写字母表示不同处理间同一粒径团聚体腐殖质组分碳含量差异显著（$P<0.05$）。Note：Different capital letters indicate significant differences in the carbon content of humic components between different particle size aggregates of the same treatment, and different lowercase letters indicate significant differences in the carbon content of humic components of the same particle size between different treatments（$P<0.05$）.

图 3　不同处理下土壤团聚体腐殖质组分碳含量

Fig. 3　Carbon content of humus components in soil aggregates under different treatments

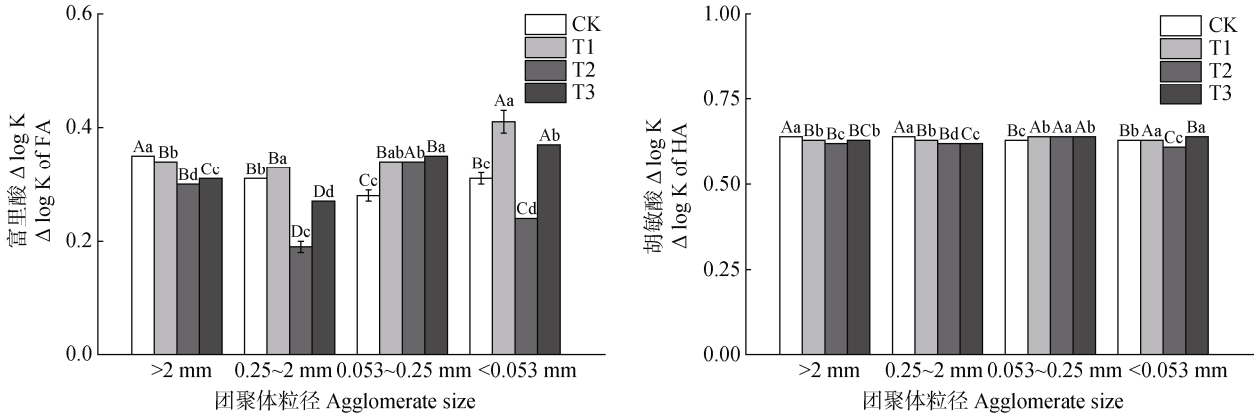


图 4　不同处理下土壤团聚体富里酸和胡敏酸 Δ log K 值

Fig. 4　The Δ log K values of fulvic acid and humic acid in soil aggregates under different treatments

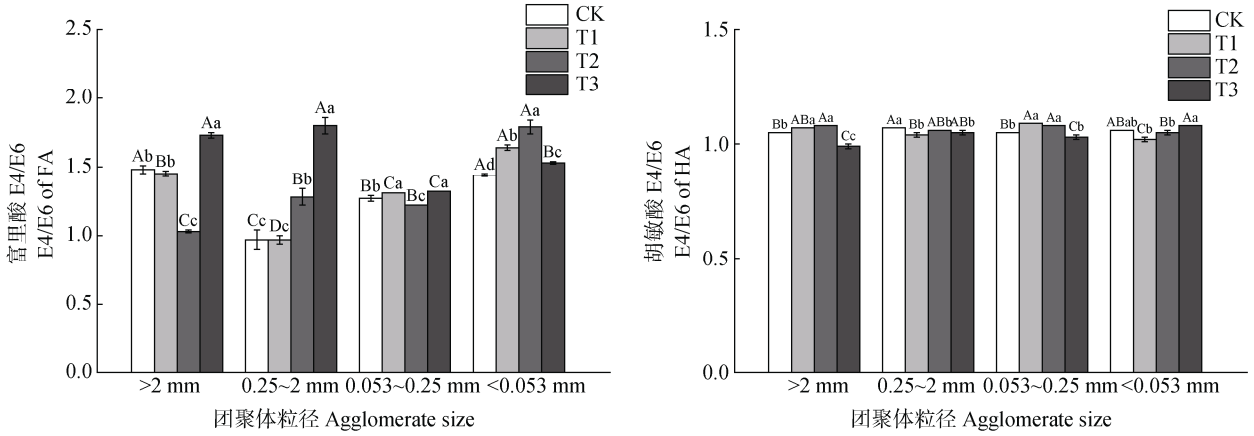


图 5 不同处理下土壤团聚体富里酸和胡敏酸光学特性（E4/E6）值

Fig. 5 Values of fulvic acid and humic acid optical properties（E4/E6）of soil aggregates under different treatments

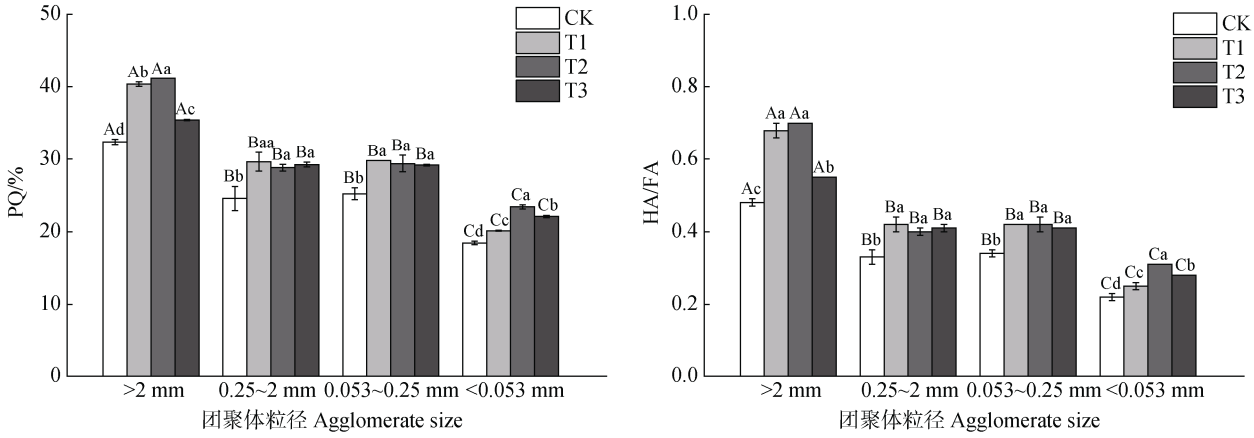


图 6 不同处理对土壤团聚体腐殖化系数（PQ）和 HA/FA 的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on humification coefficient（PQ）and HA/FA of soil aggregates

PQ 值和 HA/FA 增幅分别为 9.17%～24.39%和 13.51%～40.83%（$P<0.05$）；T3 处理的各粒径团聚体腐殖质 PQ 值和 HA/FA 增幅分别为 9.28%～19.77%和 14.37%～27.58%（$P<0.05$）。

2.7 不同改良措施影响腐殖质组分的 PLS-PM 结构方程模型

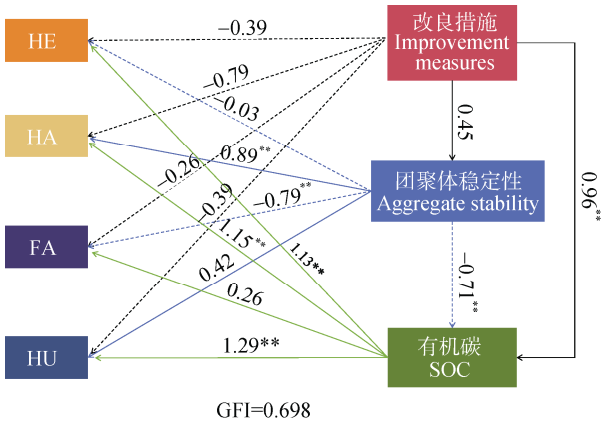
采用偏最小二乘法（PLS）构建不同改良措施是否影响土壤团聚体稳定性、有机碳及土壤腐殖质的路径模型（图 7），模型拟合优度（GFI）为 0.698，土壤团聚体的不同粒级为潜变量，不同改良措施、团聚体稳定性、有机碳及腐殖质组分（腐殖酸总量、胡敏酸、富里酸、胡敏素）为响应变量。

不同改良措施对土壤有机碳影响较大，其路径系数为 0.96，达到显著水平。土壤团聚体稳定性主要受土壤有机碳含量、胡敏酸含量和富里酸含量影响较大，其路径系数分别为–0.71、0.89 和–0.79，均达显著水平。土壤有机碳主要对腐殖酸总量（1.13）、胡敏酸含量（1.15）和胡敏素含量（1.29）影响较大，均达显著水平。

2.8 不同改良措施对大豆产量的影响

如表 4 所示，与 CK 相比，T1、T2 和 T3 处理的大豆产量分别显著提高 30.10%、42.29%和 42.67%，其中 T2 与 T3 产量无显著差异（$P<0.05$）。从产量构成因素分析，T2 处理的单株粒重和百粒重表现最优，较 CK 分别提升 73.80%和 5.13%，显著高于其他处理（$P<0.05$）。T3 处理的株高和单株荚数，较 CK 分别显著增加 61.32%和 11.96%（$P<0.05$）。各改良措施中，T1 的茎粗增幅最大，较 CK 提高

20.61%，但其百粒重较 CK 降低 5.55%（$P<0.05$）。



注：SOC：土壤有机碳；HE：腐殖酸总量；HA：胡敏酸；FA：富里酸；HU：胡敏素。箭头旁边的数字表示路径系数，实线表示具有正向影响，虚线表示具有负向影响。*、**分别表示相关性达到 0.05、0.01 显著水平。Note：SOC：soil organic carbon；HE：total humic acid；HA：humic acid；FA：fulvic acid；HU：humin. The number next to the arrow represents the path coefficient，the solid line represents a positive effect，and the dotted line represents a negative effect. * and ** represent the significances of correlation reach 0.05 and 0.01 probability levels，respectively.

图 7　不同改良措施影响土壤腐殖质的偏最小二乘路径模型分析

Fig. 7　Partial least squares path model（PLS-PM）analysis of the effects of different improvement measures on soil humus

3　讨　论

3.1　不同改良措施对土壤理化性质及团聚体稳定性的影响

盐碱土的高钠离子浓度与碱性环境严重破坏土壤结构，而不同改良措施的应用通过多途径协同作用可重塑土壤微生态。生物炭（T1）通过多孔结构和表面官能团的双重作用，显著吸附 Na^+等盐基离子并提高土壤容重，其机制与 Zhao 等[20]提出的生物炭-黏粒电荷中和效应一致。然而，其芳香化碳骨架的抗分解性虽利于长期碳封存，但可能延缓微生物驱动的团聚体重构[21]，这解释了生物炭处理下大团聚体比例提升但分形维数（D）较低的现象。相较而言，有机肥（T2）通过高活性有机质输入快速提升持水性，但其矿化过程中盐分释放导致的 EC 值升高揭示了盐碱土中传统有机肥改良的局限性，需结合淋洗或碳氮比调控（如秸秆添加）以规避次生盐碱化风险[22-23]，这与 Chen 等[24]在盐碱稻作系统的结论形成呼应。复合改良剂（T3）展现出多靶点协同优势，硫酸铵水解产酸与柠檬酸螯合协同降低 pH[25]，凹凸棒土的多孔网络通过物理架桥作用提升孔隙连通性[26]，而 DTA-6 等生长调节剂通过根系分泌物激活养分循环[27]。这种“化学-物理-生物”耦合机制与马列等[28]提出的改良剂效果相似，但本研究复合改良剂在铝离子（Al^{3+}）介导的钠质黏粒絮凝效率上更具优势。

在苏打盐碱地中，土壤团聚体结构往往受到破坏，稳定性较差，影响了土壤的生态功能和农作物的生长。因此，良好的团聚体组成能够协调土壤水、肥、气、热，改善土壤养分供应能力[3]。本研究发现土壤团聚体稳定性提升的机制因改良措施而异。生物炭（T1）通过疏水表面和 Ca^{2+}/Mg^{2+}离子桥作用抑制黏粒分散，其多孔结构为放线菌等耐盐菌群提供微生境，促进疏水性胞外多糖（EPS）分泌[29]，从而增强大团聚体机械稳定性。然而，其抗分解特性导致微团聚体有机碳富集，暗示碳固存与团聚体演化的解耦风险[8]。有机肥（T2）通过激发效应驱动微生物介导的黏粒-腐殖质复合体形成[30]，这与于菲等[31]提出的有机肥长期效应模型一致。复合改良

表 4　不同改良措施对大豆产量及产量构成因素的影响

Table 4　Effects of different improvement measures on soybean yield and yield components

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	单株荚数 Pods per plant	单株粒重 Weight per plant/g	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield/（kg·hm^{-2}）
CK	52.32±1.29c	6.60±0.39b	33.85±0.48b	9.09±0.36c	16.16±0.20b	1 860±22c
T1	82.30±0.83ab	7.96±0.27a	37.70±0.60a	14.33±0.34b	15.26±0.15c	2 420±46b
T2	80.34±0.34b	6.79±0.46ab	37.96±0.48a	15.80±0.33a	16.99±0.09a	2 647±69a
T3	84.41±1.04a	7.09±0.23ab	37.89±0.12a	14.45±0.12b	15.43±0.33c	2 654±75a

剂（T3）通过硫酸铝的多核羟基络合物与凹凸棒土的硅氧四面体网络协同作用[32-33]，促进 0.25～2 mm 粒径团聚体的形成，其机制与磷石膏的 Ca^{2+}桥接作用形成互补，但避免了硫酸盐淋溶引发的酸化风险，与冯志珍等[26]在凹凸棒石基复合材料土壤改良效果研究中的观点相吻合。复合型改良剂中的某些成分促进土壤颗粒的黏结，而另一些成分可能影响土壤微生物活性，促进土壤有机质的分解和团聚体的形成，从而增加土壤结构的复杂度；其富含一些特定物质，可以加速 Na^{+}淋洗，减缓植物和微生物的盐分胁迫，增加土壤有机质含量并维持一定电解质浓度，促进生物分泌有机酸等物质从而提高 Ca^{2+}溶解度。多价离子能使带负电荷的土壤黏粒与土壤有机质相结合，降低土壤有机质矿化风险并增强团聚体稳定性。此外，复合改良剂还间接增加有机碳与无机物含量，有机分子利于多价阳离子与黏土颗粒结合，无机物中的 Ca^{2+}、K^{+}、Mg^{2+}等阳离子可与盐碱地钠离子交换，抑制土壤胶体分散，促使土壤絮凝，最终促进土壤团聚体形成与稳定，改善盐碱地土壤结构与理化性质。

3.2 不同改良措施对土壤腐殖质组成的影响

土壤团聚体的形成与稳定性主要依赖于胶结物质的种类及含量，其中腐殖质（包括胡敏酸、富里酸和胡敏素）是土壤有机胶体的核心组分。本研究表明，不同改良措施通过调控腐殖质组成及光学特性，显著影响土壤团聚体的胶结过程。复合改良剂（T3）在各粒级团聚体中胡敏素（HU）含量显著提升，其作用机制突破了传统腐殖质形成的微生物主导理论，硫酸铝水解产生的 Al^{3+}通过金属-有机配位直接促进 HU 的缩合，形成稳定的 Al-O-C 键网络结构；柠檬酸通过螯合作用释放矿物结合态碳，为 HU 合成提供前体物质。这一发现与韩雨航等[34]提出的有机酸活化矿物碳理论形成互补。复合改良剂（T3）显著提高大团聚体 FA 的 E4/E6 值，反映其 FA 分子缩合度增强，与疏水作用介导的抗崩解能力提升直接相关，这与苑佰飞等[35]的水稻种植改良盐碱土结论一致，但本研究在复合改良剂处理中观察到 FA 分子复杂化对大团聚体稳定性的主导作用。

生物炭（T1）在>2 mm 团聚体中胡敏酸（HA）的 Δlog K 值显著降低，表明其芳香缩合度提高。生物炭表面 Fe/Mn 氧化物与盐碱土高 pH 环境协同催化 HA 的脱羧和缩合反应，形成类石墨烯结构，此发现与李红宇等[36]的生物炭提升腐殖质稳定性结论一致，但本研究发现生物炭对微团聚体 FA 的 E4/E6 值提升更为显著，说明其通过疏水作用增强微团聚体稳定性，这一现象在盐碱土中鲜见报道。此外，生物炭（T1）下微团聚体 FA 的 Δlog K 值增加，表明生物炭通过表面官能团（如羧基）与 FA 分子共价结合，形成稳定的有机-矿物复合体，这一机制与周明星等[37]的生物炭-黏土相互作用理论相印证，但本研究进一步揭示了盐碱土中 Na^{+}竞争吸附对 FA 分子构型的影响。

有机肥（T2）显著提升腐殖化系数（PQ 值）和 HA/FA 比值，表明有机肥通过快速矿化加速腐殖质成熟化进程。这一结果与 Bronick 和 Lal[21]的有机质矿化-腐殖化耦合理论一致，但本研究发现盐碱土中高 pH 环境抑制了 FA 的进一步缩合，导致 T2 处理的大团聚体 FA 含量降低，揭示了盐碱胁迫下腐殖质组分转化的特殊路径。

PLS-PM 模型进一步表明，土壤有机碳（SOC）对腐殖质组分的正向调控路径系数达 1.13～1.29，但 SOC 过高可能通过改变胶结物质分布对团聚体稳定性产生负向效应，这一矛盾现象提示盐碱土改良需在 SOC 积累与腐殖质组分优化间寻求平衡，为后续研究提供了新方向。总体而言，不同改良措施通过增加有机碳和腐殖质含量，间接调控了土壤团聚体的稳定性，为优化土壤管理提供了理论依据。

4 结 论

本研究揭示了盐碱土改良过程中有机-无机协同调控对土壤结构稳定性与碳库功能的关键作用机制。复合改良剂通过促进大团聚体形成和微团聚体有机碳富集，同步改善土壤孔隙结构和速效养分供给，其作用机制与胡敏素的显著积累及富里酸分子缩合度的增强密切相关，通过有机-无机复合体的形成使胡敏酸含量提升并促使腐殖质分子结构复杂化，最终通过增强株高和单株荚数实现大豆产量提高。生物炭改良虽能提升各粒级团聚体有机碳含量，但受限于微团聚体碳固持能力不足；有机肥快速矿化虽可丰富腐殖质组分，却因腐殖质分子结构简化导致碳稳定性降低。研究证实提升腐殖质结构复杂

性与促进矿物-有机复合体形成是增强土壤团聚体稳定性和有机碳库容的关键途径，为苏打盐碱土“快速降碱-结构稳碳-增产增效”的一体化改良措施提供了理论依据。

参考文献（References）

[1] 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.]

[2] Liu X J，Guo K，Feng X H，et al. Discussion on the agricultural efficient utilization of saline-alkali land resources[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2023，31（3）：345—353. [刘小京，郭凯，封晓辉，等. 农业高效利用盐碱地资源探讨[J]. 中国生态农业学报，2023，31（3）：345—353.]

[3] Huang G Z，Huang L H，Liu B S，et al. Evaluation of improvement effect and analysis of influencing factors of different amendments on saline-sodic soils based on a meta-analysis[J]. Acta Pedologica Sinica，2025，62（2）：388—399. [黄广志，黄立华，刘伯顺，等. 基于 Meta 分析的苏打盐碱土改良效果评估[J]. 土壤学报，2025，62（2）：388—399.]

[4] Mishra A K，Das R，George Kerry R，et al. Promising management strategies to improve crop sustainability and to amend soil salinity[J]. Frontiers in Environmental Science，2023，10：962581.

[5] Liu Y L，Wang P，Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates：Progress and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica，2023，60（3）：627—643. [刘亚龙，王萍，汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制：研究进展与展望[J]. 土壤学报，2023，60（3）：627—643.]

[6] Six J，Elliott E T，Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation：A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology & Biochemistry，2000，32（14）：2099—2103.

[7] Wang Q，Zhu Y X，Xu L Z，et al. Effects of biochars application on humus composition and water-stable aggregates distribution of black soil[J]. Soils，2023，55（3）：605—611. [王琪，朱莹雪，许连周，等. 施用生物质炭对黑土腐殖质组成及水稳性团聚体分布的影响[J]. 土壤，2023，55（3）：605—611.]

[8] Lee M H，Chang E H，Lee C H，et al. Effects of biochar on soil aggregation and distribution of organic carbon fractions in aggregates[J]. Processes，2021，9（8）：1431.

[9] Sun Q，Meng J，Lan Y，et al. Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown earth[J]. Catena，2021，205：105460.

[10] Yang X，Bao Y W，Li B W，et al. Effects of fertilization applications on soil aggregate organic carbon content and assessment of their influencing factors：A meta-analysis[J]. Catena，2024，242：108135.

[11] Zhu Y C，Zhang M，Han X Z，et al. Evaluation of the soil aggregate stability under long term manure and chemical fertilizer applications：Insights from organic carbon and humic acid structure in aggregates[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2024，376：109217.

[12] Li K，Dou S，Han X Z，et al. Effects of long-term fertilization on composition of humic substances in black soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica，2010，47（3）：579—583. [李凯，窦森，韩晓增，等. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响[J]. 土壤学报，2010，47（3）：579—583.]

[13] Li N，Zhang Y H，Han X Z，et al. Effects of long-term vegetation cover changes on the organic carbon fractions in soil aggregates of mollisols[J]. Chinese Journal of Plant Ecology，2019，43（7）：624—634. [李娜，张一鹤，韩晓增，等. 长期不同植被覆盖对黑土团聚体内有机碳组分的影响[J]. 植物生态学报，2019，43（7）：624—634.]

[14] Wang W，Wu J G，Li Y H，et al. Effects of organic materials on the composition and structure of humic substance in the rhizosphere soil of different crops[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2017，31（2）：215—220. [王维，吴景贵，李蕴慧，等. 有机物料对不同作物根系土壤腐殖质组成和结构的影响[J]. 水土保持学报，2017，31（2）：215—220.]

[15] Li M C，Zhang H，Yang H Z，et al. Effects of different compost materials on carbon transformation and the change of humus during composting process[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2019，37（2）：81—87，94. [李孟婵，张鹤，杨慧珍，等. 不同原料好氧堆肥过程中碳转化特征及腐殖质组分的变化[J]. 干旱地区农业研究，2019，37（2）：81—87，94.]

[16] Chen X F，Li Z P，Liu M，et al. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China[J]. Scientia Agricultura Sinica，2013，46（5）：950—960. [陈晓芬，李忠佩，刘明，等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学，2013，46（5）：950—960.]

[17] Sun L X，Chen M N，Xue J F，et al. Short-term responses of soil aggregate characteristics to different annual straw incorperation rates in winter wheat-summer sorghum cropping system[J]. Research of Soil and Water Conservation，2018，25（6）：36—44. [孙隆祥，陈梦妮，薛建福，等. 秸秆还田对麦粱两熟农田土壤团聚体特征的短期效应[J]. 水土保持研究，2018，25（6）：36—44.]

[18] Yang P L，Luo Y P，Shi Y C. Soil fractal characteristics characterized by the weight distribution of grain size[J]. Chinese Science Bulletin，1993，38（20）：1896—1899. [杨培岭，罗远培，石元春. 用粒级的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报，1993，38（20）：1896—1899.]

[19] Kumada K，Sato O，Ohsumi Y，et al. Humus composition of mountain soils in central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid[J]. Soil Science and Plant Nutrition，1967，13（5）：151—158.

[20] Zhao W，Zhou Q，Tian Z Z，et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land，improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. Science of the Total Environment，2020，722：137428.

[21] Bronick C J，Lal R. Soil structure and management：A review[J]. Geoderma，2005，124（1/2）：3—22.

[22] Gao Y X，Feng H J，Zhang M，et al. Straw returning combined with controlled-release nitrogen fertilizer affected organic carbon storage and crop yield by changing humic acid composition and aggregate distribution[J]. Journal of Cleaner Production，2023，415：137783.

[23] Liu G H，Mai W X，Tian C Y，et al. Effects of organic fertilizer application on the improvement of saline soils：Meta analysis[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment，2023，40（1）：86—96. [刘国辉，买文选，田长彦. 施用有机肥对盐碱土的改良效果：Meta分析[J]. 农业资源与环境学报，2023，40（1）：86—96.]

[24] Chen M M，Zhang S R，Liu L，et al. Combined organic amendments and mineral fertilizer application increase rice yield by improving soil structure，P availability and root growth in saline-alkaline soil[J]. Soil & Tillage Research，2021，212：105060.

[25] Zhang J，Tian R R，Wang S J，et al. Effects of calcium-based amendments on saline-alkali soil improvement and sunflower yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2022（11）：68—76. [张菁，田荣荣，王淑娟，等. 钙基型土壤改良剂对盐碱土壤改良和向日葵产量的影响[J]. 中国土壤与肥料，2022（11）：68—76.]

[26] Feng Z Z，Yan H，Lu Y X，et al. Effects of attapulgite-based composites on soil improvement—Take desert-oasis farmland soil as an example[J]. China Environmental Science，2023，43（10）：5328—5338. [冯志珍，颜宏，卢雨欣，等. 凹凸棒石基复合材料土壤改良效果研究——以荒漠绿洲农田土壤为例[J]. 中国环境科学，2023，43（10）：5328—5338.]

[27] Shi L W，Wang C H，Zhou W，et al. Effects of a soil ameliorants on soil physicochemical properties with different depth soil layers and yield of soybean in saline meadow soil[J]. Soybean Science，2020，39（2）：269—276. [石礼文，王承昊，周伟，等. 改良剂对盐化草甸土不同土层理化性质及大豆产量的影响[J]. 大豆科学，2020，39（2）：269—276.]

[28] Ma L，Liu J H，Yang J M，et al. Effect of compound modifier on the improvement effect of soda saline-alkali soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2021（5）：144—149. [马列，刘金华，杨靖民，等. 新型复合改良剂对苏打盐碱土的改良效果研究[J]. 中国土壤与肥料，2021（5）：144—149.]

[29] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. Soil Biology & Biochemistry，1996，28（4/5）：665—676.

[30] Six J，Elliott E T，Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. Soil Science Society of America Journal，1999，63（5）：1350—1358.

[31] Yu F，Zhao S，Zhao Y，et al. Effects of long-term application of cattle manure on soil fertility and corn yield of saline-sodic soil in western Songnen Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2022，40（2）：172—180. [于菲，赵硕，赵影，等. 长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土肥力和玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究，2022，40（2）：172—180.]

[32] Zhang M C，Zhou W，Du J D，et al. The properties of soda saline-alkali soil and yield of rice in paddy fields added with a soil ameliorant[J]. Chinese Journal of Soil Science，2021，52（3）：658—669. [张明聪，周伟，杜吉到，等. 施用改良剂对苏打盐化草甸土土壤性状及水稻产量的影响[J]. 土壤通报，2021，52（3）：658—669.]

[33] Zhao J X，Zhou W，Zhan Y C，et al. Effects of a new soil ameliorants on soil physical properties and yield of rice in saline meadow soil[J]. Crops，2018（6）：138—143. [赵金星，周伟，战英策，等. 土壤改良剂对盐化草甸土物理性质及水稻产量的影响[J]. 作物杂志，2018（6）：138—143.]

[34] Han Y H，Ma Y T，Yuan B F，et al. Effect of manure fertilization on soda saline-alkali soil in western Jilin Province[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences，2022，37（3）：390—397. [韩雨航，马玉涛，苑佰飞，等. 粪肥对苏打盐碱地土壤有机碳组分特征的影响[J]. 福建农业学报，2022，37（3）：390—397.]

[35] Yuan B F，Ma Y T，Bao Y，et al. Effect of rice cultivation on ameliorating soil fertility of soda saline-alkali soil in

western Jilin Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2019，33（3）：320—326. [苑佰飞，马玉涛，包岩，等. 水稻种植对吉林省西部苏打盐碱土改良培肥效果[J]. 水土保持学报，2019，33（3）：320—326.]

[36] Li H Y，Lin T，Wang Z J，et al. Effects of biochar continuous returning on soil nutrients，enzyme activities and humus components in soda saline-alkali paddy field soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2022，40（4）：135—142. [李红宇，林添，王志君，等. 生物炭连续还田后效对盐碱土稻田养分、酶活性和腐殖质组分的影响[J]. 干旱地区农业研究，2022，40（4）：135—142.]

[37] Zhou M X，Fan J，Wang Q，et al. Effects of no-tillage mulching and biochar on aggregate stability and humus properties of black loessial soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2023，29（5）：848—859. [周明星，樊军，王茜，等. 免耕覆盖与生物炭对黑垆土团聚体稳定性和腐殖质性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2023，29（5）：848—859.]

（责任编辑：卢　萍）