

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.05.010 CSTR:32310.14.stbcb.2025.05.010

蔡婧晖, 黄立华, 刘伯顺, 等. 盐碱土与非盐碱土团聚体差异、改良影响及启示[J]. 水土保持学报, 2025, 39(5)

CAI Jinghui, HUANG Lihua, LIU Baishun, et al. Comparative analysis of differences, improvement effects, and implications of aggregates in saline-alkali soils and non-saline-alkali soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5)

## 盐碱土与非盐碱土团聚体差异、改良影响及启示

蔡婧晖<sup>1,2</sup>, 黄立华<sup>1,3</sup>, 刘伯顺<sup>1,2</sup>, 黄广志<sup>1,2</sup>, 梁燕萍<sup>1,2</sup>, 蒋小瞳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 吉林大安农田生态系统国家野外科学观测研究站, 吉林 大安 131317)

**摘要:** [目的] 团聚体是土壤肥力的重要指标, 其稳定性直接影响土壤物理、化学和生物特性。在盐碱化条件下, 团聚体受到土壤高盐分或强碱性的影响, 易导致土壤结构退化和功能降低, 严重限制农业生产。旨在总结盐碱土与非盐碱土团聚体的差异, 分析盐碱化条件下影响团聚体形成和稳定性的因素。[方法] 探讨改善盐碱土团聚体结构的方法与策略及非盐碱土团聚体研究对盐碱土的启示。[结果] 综合分析发现, 盐碱环境破坏土壤结构, 降低微生物多样性和活性, 导致大团聚体数量减少, 微团聚体比例上升, 团聚体稳定性较差。非盐碱土大团聚体和微团聚体数量均较高, 且分布层次分明, 生物多样性丰富, 团聚体稳定性较高主要得益于丰富的有机质和活跃的微生物活动。[结论] 为改善盐碱土团聚体结构, 需要综合运用水利、物理、化学和生物措施来降低土壤盐碱质量分数, 调节土壤pH, 改善土壤结构, 提高水分保持能力和增加养分有效性。未来研究应着重开发新的技术手段评估团聚体结构, 优化改良技术, 整合多尺度数据等, 促进盐碱土特性的逐步改善和农业的可持续发展。

**关键词:** 土壤团聚体; 盐碱土; 非盐碱土; 改良措施; 稳定性

**中图分类号:** S152.4<sup>+</sup>5 **文献标识码:** A

## Comparative Analysis of Differences, Improvement Effects, and Implications of Aggregates in Saline-Alkali Soils and Non-Saline-Alkali Soils

CAI Jinghui<sup>1,2</sup>, HUANG Lihua<sup>1,3</sup>, LIU Baishun<sup>1,2</sup>, HUANG Guangzhi<sup>1,2</sup>, LIANG Yanping<sup>1,2</sup>, JIANG Xiaotong<sup>1</sup>

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;*

*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jilin Da'an National Field*

*Observation and Research Station of Agroecosystem, Da'an, Jilin 131317, China)*

**Abstract:** [Objective] Soil aggregates serve as crucial indicators of soil fertility, with their stability directly governing the physical, chemical, and biological characteristics of soil. Under saline-alkali conditions, however, aggregates are adversely impacted by high salinity and strong alkalinity, leading to structural degradation and functional deterioration, which severely constrains agricultural productivity. This article aims to summarize the disparities in aggregates between saline-alkali and non-saline-alkali soil and elucidate the factors influencing aggregate formation and stability under saline-alkali conditions. [Methods] The study explored methods and strategies for improving the saline-alkali soil aggregate structure, and the implications of non-saline-alkali soil aggregate research for saline-alkali soil. [Results] Comprehensive analysis indicated that saline-alkali conditions undermined soil structure, diminished microbial diversity and activity, and ultimately led to a decrease in the quantity of macro-aggregates, an increase in the proportion of micro-aggregates, and weakened aggregate stability. In contrast, non-saline-alkali soil exhibited higher quantities of both macro-aggregates and micro-aggregates, a well-defined hierarchical distribution, rich biodiversity, and enhanced aggregate stability.

收稿日期: 2025-01-12 修回日期: 2025-02-26 录用日期: 2025-03-11

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500502-7); 国家自然科学基金面上项目(41977148); 吉林省重大科技专项(20230302009NC)

第一作者: 蔡婧晖(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事盐碱土改良研究。E-mail: caijinghui23@mailsucas.ac.cn

通信作者: 黄立华(1974—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事盐碱地生态治理与农业高效利用、土壤生态及植物逆境营养等研究。E-mail: huanglihua@iga.ac.cn

<http://stbcb.alljournal.com.cn>

attributed to abundant organic matter content and more dynamic microbial activities. [Conclusion] To improve the aggregate structure of saline-alkali soil, an integrated approach combining hydraulic, physical, chemical, and biological measures is essential. This comprehensive strategy needs to focus on reducing soil salinity and alkalinity levels, regulating soil pH, improving soil structure, enhancing water retention capacity, and increasing nutrient availability. Future research should prioritize developing innovative techniques for aggregate structure assessment, optimizing soil amendment technologies, and integrating multi-scale data to facilitate progressive improvement of saline-alkali soil properties and support sustainable agriculture development.

**Keywords:** soil aggregates; saline-alkali soil; non-saline-alkali soil; soil improvement measures; stability

Received: 2025-01-12      Revised: 2025-02-26      Accepted: 2025-03-11

盐碱土的广泛分布严重制约全球农业生产。土壤盐分的积累不仅限制作物生产力,而且对粮食安全和生态系统的长期可持续性构成严重威胁<sup>[1]</sup>。土壤团聚体作为土壤健康的重要指标,其在维持土壤肥力和生产力方面发挥着重要作用。团聚体不仅对土壤水分保持、微生物生存和植物根系穿透具有显著的正面影响,而且与土壤养分循环紧密相关,这些功能对于保持土壤的长期生产力和生态平衡至关重要<sup>[2]</sup>。盐碱化环境下,团聚体的结构和功能面临严峻挑战,土壤中大量盐碱的存在破坏团聚体的结构,削弱其稳定性,从而对土壤功能产生负面影响<sup>[3]</sup>。盐碱土团聚体与非盐碱土团聚体在稳定性、组成和功能等方面存在显著差异<sup>[2-4]</sup>,明确这些差异对于有效制定盐碱土改良策略、提高土壤质量和农作物产量具有重要意义<sup>[5]</sup>。

本文综述盐碱化和非盐碱化条件下土壤团聚体结构及其功能的研究进展,深入探讨影响团聚体形成和稳定性的多种因素在2种环境下的差异;分析盐碱土改良对团聚体结构和功能的影响,进而提出改善盐碱土团聚体结构的方法和策略,旨在增进人们对盐碱土生态状况的理解,为促进土壤质量提升和植物生长,实现农业的可持续发展提供科学依据和实践指导。

### 1 盐碱土与非盐碱土团聚体的差异

盐碱土与非盐碱土团聚体在特征上呈现显著差异,主要受土壤化学特性、有机质质量分数、微生物活性及离子组成等因素的影响。盐碱土团聚体以低稳定性和高破碎率为特点,非盐碱土团聚体则相反。此类差异主要通过团聚体的大小、组成和分布及生物多样性得以体现,具体差异见图1。

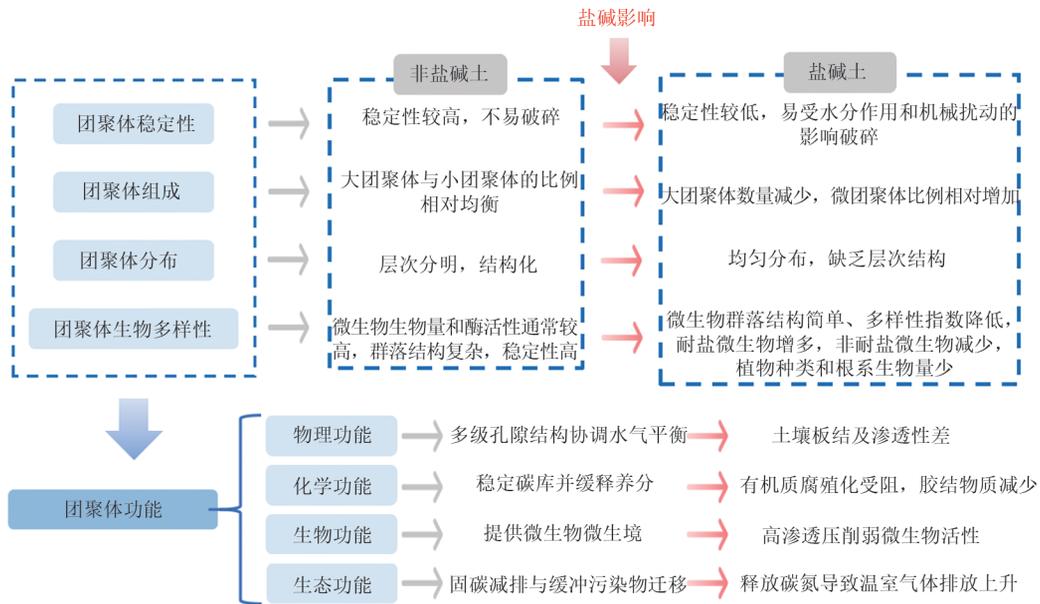


图 1 盐碱土与非盐碱土团聚体的差异比较

Fig. 1 Comparison of soil aggregates between saline-alkali and non-saline-alkali soils

#### 1.1 团聚体稳定性

盐碱土团聚体的稳定性普遍呈现较弱态势。高

盐分质量分数通过离子交换作用改变土壤胶体的离子组成,当二价阳离子(如  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$ )被一价阳离子

子 $\text{Na}^+$ 所取代时,破坏土壤颗粒间的离子桥作用,导致团聚体稳定性下降<sup>[6-7]</sup>。有研究<sup>[8]</sup>指出,土壤有机碳(SOC)质量分数与土壤pH和碱化度(ESP)呈负相关,表明土壤碱性增强或钠离子质量分数上升时,土壤碳质量分数趋于减少,碳质量分数亦与土壤电导率(EC)呈负相关。因此, $\text{Na}^+$ 的强分散作用不仅破坏土壤结构,也加速有机碳的分解,从而削弱团聚体的稳定性。同时,盐碱土中的微生物活动受到盐分的抑制,也对团聚体的稳定性产生负面影响。研究<sup>[9-10]</sup>表明,盐碱土中的微生物数量与多样性较低,尤其是丛枝菌根真菌的丰度和活性下降,导致其分泌的球囊霉素相关蛋白(GRP)含量减少,这些蛋白对于团聚体的稳定性和土壤有机碳的固存具有关键作用。非盐碱土团聚体稳定性高于盐碱土,归因于非盐碱土通常具有较高质量分数的有机质,有机质是团聚体形成的黏结剂,能够增强土壤颗粒间的结合力<sup>[11]</sup>;非盐碱土的微生物活动也更为活跃,产生的多糖和其他生物大分子有效促进土壤颗粒的聚集和团聚体的形成<sup>[12]</sup>。此生物化学过程不仅有助于稳固土壤结构,同时也为土壤提供丰富的养分,增强团聚体的稳定性及生态功能。

## 1.2 团聚体组成与分布

土壤的化学特性、物理结构及生物活性共同作用于团聚体,导致其在组成与分布上呈现差异性。盐碱土团聚体的组成受到盐分的影响,通常表现为大团聚体数量减少,微团聚体比例相对增加。相关研究<sup>[13]</sup>指出,盐碱土较高的盐分含量导致土壤颗粒的分散,减少大团聚体而增加微团聚体的生成。由于盐碱土团聚体稳定性普遍较低,在水分作用和机械扰动的影响下易于破碎,导致大团聚体比例进一步降低<sup>[14]</sup>。非盐碱土团聚体的组成表现出更为均衡的特性,其中大团聚体与微小团聚体的数量均相对较高,归因于非盐碱土有机质质量分数通常较高,有助于形成稳定的大团聚体<sup>[15]</sup>。非盐碱土的微生物活动也显著增强,其生命活动过程及代谢产物有效促进土壤颗粒的聚集,有利于形成更多大团聚体<sup>[13]</sup>。

在团聚体的分布上,盐碱土团聚体普遍表现均一的分布特征,缺乏明显的层次结构,可能是由于盐分的大量存在抑制土壤动物和微生物的活动,减少它们对土壤颗粒的翻动和混合作用<sup>[16]</sup>。这种均匀的团聚体分布有助于维持土壤的结构强度,但限制土壤的通气性和渗透性,影响土壤肥力和植物生长。非盐碱土受到更多土壤动物和微生物活动的影响,分布往往呈现层次分明、结构化的特征,通常情况下表层土壤的大团聚体比例较高,有助于提高土壤的

通气性和保水能力,促进植物根系的生长和养分吸收。随着土层深度的增加,团聚体的大小和数量逐渐减少,形成较为紧密的土壤层次结构<sup>[17]</sup>。这种分布模式反映土壤生物对土壤结构的调控作用,表明土壤生态功能的垂直分异。

## 1.3 团聚体生物多样性

由于高盐分和碱性环境对微生物的生长及其多样性有显著的抑制作用,盐碱土团聚体的生物多样性普遍较低。有研究<sup>[18]</sup>表明,盐碱土微生物群落结构相对简单,多样性指数随盐碱化程度的增加呈下降趋势,大团聚体微生物多样性受到的影响尤为明显。随着土壤盐分的增加,团聚体细菌群落组成发生显著变化,耐盐性强的微生物增多,耐盐性较差的微生物种群丰度下降<sup>[19]</sup>。也有研究<sup>[20]</sup>表明,来自盐碱土的微生物似乎并不比来自非盐碱土的微生物更能耐受盐度增加。盐碱土植物种类和根系生物量的匮乏也限制共生性微生物,从而对团聚体中的生物多样性产生负面影响。有研究<sup>[21]</sup>发现,盐碱土的菌根真菌多样性较低,影响团聚体的形成和稳定性,强调盐碱土生态系统中微生物多样性与土壤结构之间的复杂相互作用。相较于盐碱土,非盐碱土团聚体生物多样性更为丰富,群落结构也更加复杂,不同菌门和菌属的相对丰度更加均衡。非盐碱土微生物群落结构受到环境因素的影响相对较小,群落稳定性更高<sup>[22]</sup>。

## 1.4 团聚体功能

非盐碱土团聚体具备稳定的结构和多功能性。其物理功能表现为多级孔隙结构协调土壤水气平衡,提升持水性和透水性<sup>[23]</sup>;化学功能基于有机质与矿物颗粒的结合,形成胶结物质以稳定碳库并缓释养分,维持土壤肥力<sup>[24]</sup>;生物功能为微生物提供微生境,促进酶活性及碳氮循环,形成“团聚体-微生物-养分”协同网络<sup>[25]</sup>;生态功能在于固碳减排及缓冲污染物迁移,保障土壤生态安全<sup>[26]</sup>。相较而言,盐碱土团聚体因高盐分、低有机质和弱胶结作用导致团聚体功能显著退化。其物理功能障碍表现为 $\text{Na}^+$ 分散黏粒,破坏孔隙连通性,导致土壤板结及渗透性差<sup>[27]</sup>;化学功能抑制延缓有机质的腐殖化过程,同时减少多糖、多酚等胶结物质的合成与积累;生物抑制表现为高渗透压和离子毒性削弱微生物活性,降低碳转化效率<sup>[28]</sup>;生态功能中,盐分淋溶加剧养分流失,同时释放封存的碳氮,引发温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )排放量上升<sup>[29]</sup>。

## 1.5 影响团聚体差异的主要因素

土壤团聚体的形成与稳定性受到多种因素的影

响,包括有机质质量分数、微生物活动、离子桥作用及土壤黏粒的黏结能力。盐碱土的理化特性对这些

因素产生显著影响,进而影响团聚体的结构与功能(图2)。

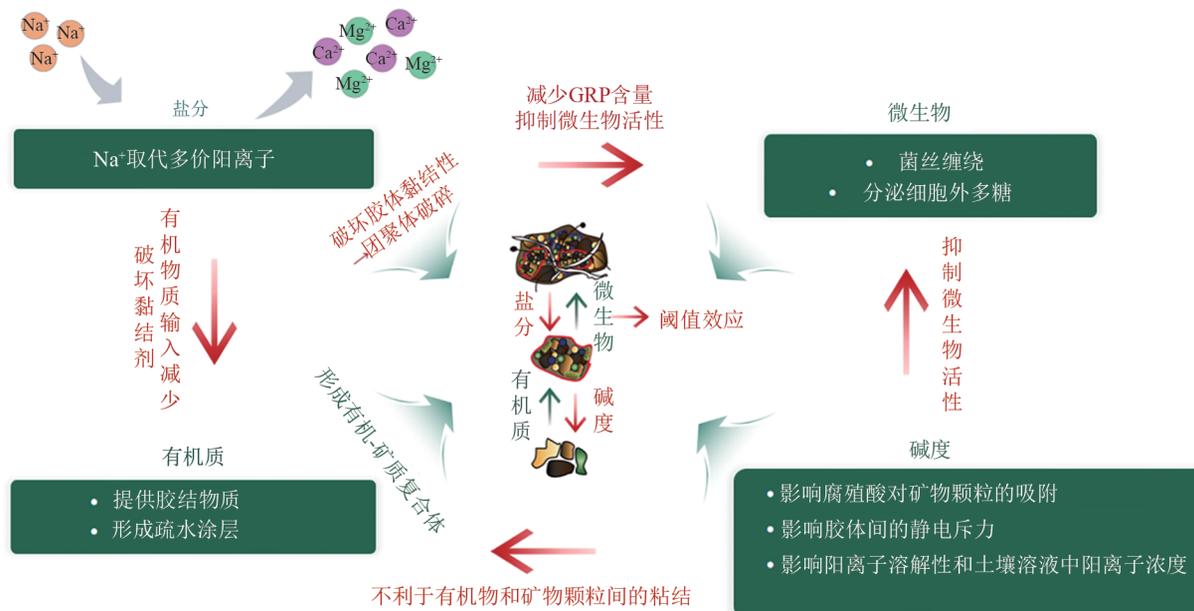


图2 土壤盐碱对团聚体的影响机制

Fig. 2 Mechanism of impact of soil salinity and alkalinity on soil aggregates

### 1) 盐分

当盐碱土接触水分时,土壤中的盐分通过离子交换或阳离子桥作用改变土壤胶体的离子组成,破坏黏结性,引发土壤膨胀与解体现象,加速团聚体的破碎和有机碳的分解<sup>[2,30]</sup>。二价阳离子,如 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ ,尤其是 $\text{Ca}^{2+}$ ,因其强大的离子桥接和阳离子极化作用,增强土壤颗粒与腐殖质等胶体间的黏结,促进团聚体的构建与稳定<sup>[6-7]</sup>。盐碱土中这些多价阳离子常被 $\text{Na}^+$ 所取代, $\text{Na}^+$ 作为一种强分散剂,不仅破坏土壤结构,还加速有机碳的分解,对团聚体的构建与稳定构成阻碍<sup>[31-32]</sup>。

### 2) 有机质

土壤有机质通过多重胶结路径驱动盐碱土团聚体形成。其多糖、脂类等组分可直接黏结黏土矿物,形成疏水性的有机-矿质复合体<sup>[28]</sup>。电镜观测表明,有机分子优先吸附于蒙脱石等2:1型层状硅酸盐黏土矿物的层间域,形成稳定的有机-矿质夹层结构,显著提升团聚体的抗剪强度<sup>[33]</sup>。有机质输入类型决定团聚体形成路径:水溶性糖类刺激细菌分泌胞外多糖(EPS),促进微团聚体稳定;木质素衍生物则诱导真菌合成球囊霉素相关蛋白(GRP),通过菌丝缠绕和胞外多糖分泌构建大团聚体<sup>[34]</sup>。盐分胁迫下有机质呈现动态抗盐响应。高浓度 $\text{Na}^+$ 通过竞争性置换 $\text{Ca}^{2+}$ 桥键,破坏矿质-有机复合体,导致团聚体崩解速率增加。根源有机物中的亲脂性物质可形成疏水涂层,降低土壤润湿性,减少崩解,增强团聚体稳定

性<sup>[35]</sup>。土壤有机质与团聚体间存在协同互作关系,其抗盐机制核心在于通过有机-矿物复合体形成及离子调控缓解盐分胁迫<sup>[36]</sup>。结合外源有机质输入可提升 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 交换效率,通过羧基对 $\text{Ca}^{2+}$ 的选择性络合及竞争吸附置换胶体表面 $\text{Na}^+$ ,促进离子桥接作用,重构大团聚体孔隙结构<sup>[28]</sup>。

### 3) 微生物

盐碱土较高的盐分质量分数和碱性对土壤微生物的生长与活性产生抑制作用,尤其是真菌和放线菌,在团聚体的构建与稳定方面扮演着重要角色<sup>[37-39]</sup>。微生物通过菌丝缠绕和分泌胞外多糖等机制,促进土壤颗粒的聚合,增强团聚体的构建与稳定性<sup>[40]</sup>。微生物及其活动也是土壤有机碳在团聚体内固存的重要途径<sup>[41]</sup>。丛枝菌根真菌分泌的球囊霉素相关蛋白(GRP)在团聚体的构建、稳定及土壤有机碳的储存中发挥着重要作用<sup>[9]</sup>。土壤盐碱化减少GRP的质量分数,尤其是稳定性较高的GRP,对团聚体的构建与稳定产生负面影响<sup>[10]</sup>。尽管部分微生物能够通过适应策略在一定程度上耐受盐度,但这种耐受性存在一定的阈值,超过该阈值后,微生物的生存与生长将受到限制<sup>[42]</sup>。因此,盐碱化导致的土壤微生物数量与活性的降低,是抑制团聚体形成与稳定的关键因素之一。

### 4) 碱度

团聚体的组成差异在SOC质量分数相似的土壤中主要归因于黏粒质量分数的不同<sup>[43]</sup>。有研

究<sup>[44]</sup>发现,在SOC质量分数相近的情况下,酸性土壤相比中性至弱碱性的土壤具有更高的水稳性团聚体比例。表明pH在团聚体的形成与稳定中扮演着重要角色,其作用在SOC质量分数相近的土壤中尤为显著<sup>[45]</sup>。

pH对团聚体的影响主要体现在3个方面:①随着pH的降低,腐殖酸对铁氧化物和黏土矿物的吸附作用增强,而在盐碱土中较高的pH减少这种吸附<sup>[46]</sup>;②pH降低时,负电荷胶体间的静电斥力减少,有利于有机物和矿物颗粒间的黏结<sup>[47]</sup>,盐碱土的pH较高,黏土颗粒表面的负电荷增多,增强颗粒间的排斥作用;③在高pH条件下, $\text{Fe}^{3+}$ 等阳离子接近零电荷点降低铁氧化物之间的静电排斥,促进土壤颗粒的团聚<sup>[48]</sup>。同时高pH环境中的 $\text{Fe}^{3+}$ 等氧化物对有机质的吸附能力下降,使更多的有机质参与到土壤颗粒的聚集过程中<sup>[49]</sup>。

pH对团聚体形成和稳定的影响不仅与 $\text{H}^+$ 浓度有关,还与土壤中多价阳离子的溶解性密切相关。高浓度的 $\text{Na}^+$ 对团聚体具有较强的分散作用, $\text{Ca}^{2+}$ 则有助于团聚体的形成,但 $\text{Ca}^{2+}$ 的浓度通常随着pH的升高而减少<sup>[50]</sup>,且高pH抑制含铁/铝氧化物矿物的溶解而导致 $\text{Al}^{3+}$ 和 $\text{Fe}^{3+}$ 的浓度下降。由于这些阳离子在黏土矿物和有机分子之间形成桥键,土壤溶液中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 和 $\text{Fe}^{3+}$ 浓度的降低抑制团聚体的形成。最终土壤的阳离子交换量(CEC)及可交换阳离子的组成,特别是Na和Mg质量分数都对团聚体的稳定性强度产生影响<sup>[3]</sup>。

## 2 盐碱土改良措施对团聚体影响的差异化路径与机理

我国盐碱土类型多样,为科学研究提供多样化的课题及特色鲜明的研究对象。改良工作需根据区域环境因子,实施差异化技术策略。盐碱土主要特征表现为高盐离子浓度、高碱度、结构性差、低孔隙度、渗透性差、易板结、地下水位高、排水不良、养分匮乏及微生物活性低等,这些特性共同导致植物生长受阻,限制农业产出<sup>[54-55]</sup>。盐碱土改良的目标是降低土壤含盐量、调节土壤pH、改善土壤结构、增强水分保持能力及提高养分有效性<sup>[56]</sup>,最终实现土地产能和生态功能的提升。通常改良方法涵盖水利工程、物理措施、化学措施和生物措施,这些改良方法对土壤团聚体结构和功能特性也产生一定的影响。本研究从降盐消碱、土壤培肥及耐盐作物种植的递进路径,结合团聚体功能提升的核心目标,系统总结不同盐碱土类型的关键改良措施。

### 2.1 降盐消碱:以水利工程与化学措施为核心

降盐消碱技术体系通过综合水利调控与化学改良手段,实现土壤盐分动态平衡与结构修复,旨在降低土壤盐分浓度及 $\text{Na}^+$ 质量分数,缓解盐分离子对团聚体的分散效应,改善土壤结构与功能。针对苏打盐碱土高pH、高 $\text{Na}^+$ 质量分数、低渗透性特征,淡水淋洗结合排水沟渠或暗管系统可有效降低表层盐分浓度并调控地下水位,防止盐分表聚<sup>[54]</sup>。配合石膏或脱硫石膏等钙源改良剂的施用,利用 $\text{Ca}^{2+}$ 置换土壤中的 $\text{Na}^+$ ,促进黏粒与有机质之间的阳离子桥键作用,增强矿质土粒的团聚,提高土壤机械稳定性和水稳性团聚体数量<sup>[57]</sup>。硫酸盐/氯化物盐碱土的治理侧重于强化盐分淋洗效率,如采用滴灌或间歇性大水漫灌<sup>[54]</sup>结合二价阳离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )含量较高的咸水进行梯度淋洗。田宇等<sup>[58]</sup>研究指出,高矿化度咸水先入渗,为后续的低矿化度咸水和淡水创造良好的入渗条件,实现土壤盐分的有效淋洗。咸水中的二价阳离子与土壤胶体吸附的单价阳离子发生交换吸附作用,促进土壤颗粒的絮凝,同时施用有机改良剂增强胶体絮凝能力,优化盐分迁移路径<sup>[59]</sup>。

水利工程实践中需关注区域适应性,如干旱区采用咸水结冰冻融等节水技术。咸水结冰冻融可有效降低表层土壤盐度,盐冰融化促使相对新鲜的融水渗透土壤,显著降低表层土壤盐浓度;冻融循环引起土壤微观结构的变化则可促使土块分解为更小、易管理尺寸的土壤团聚体<sup>[56]</sup>。化学措施中,酸性盐类(如硫酸亚铁)的应用能溶解土壤中的钙源,提供置换 $\text{Na}^+$ 所需的 $\text{Ca}^{2+}$ ,抑制碱性环境下 $\text{Na}^+$ 的分散活性<sup>[59]</sup>。聚丙烯酰胺(PAM)可通过凝聚土壤颗粒,加固土壤结构,高温及高盐分条件下,PAM易水解,这种降解限制其在盐碱土中的长期应用<sup>[60]</sup>。苯乙烯基阴离子交换树脂通过离子交换过程有效去除盐碱土中多余的盐分而增强团聚体稳定性,且阴离子交换树脂通常可再生和重复使用,较PAM等一次性聚合物,更具可持续性<sup>[61]</sup>。但2种高分子材料均存在成本过高和环境问题的不确定性,需长期实地研究评估其在实际条件下的有效性及环境影响。并且化学改良存在次生风险,如过量石膏可能导致土壤导水率下降<sup>[62]</sup>;酸性物质可能活化重金属在作物中的富集,需结合区域条件优化施用量<sup>[59]</sup>。

总体而言,水利工程通过水盐运移调控实现盐分空间再分配,化学措施聚焦于离子交换与酸碱中和,二者协同为土壤培肥与生物改良奠定基础,体现“以水压盐、以钙代钠、以酸调碱”的治理逻辑(图3)。

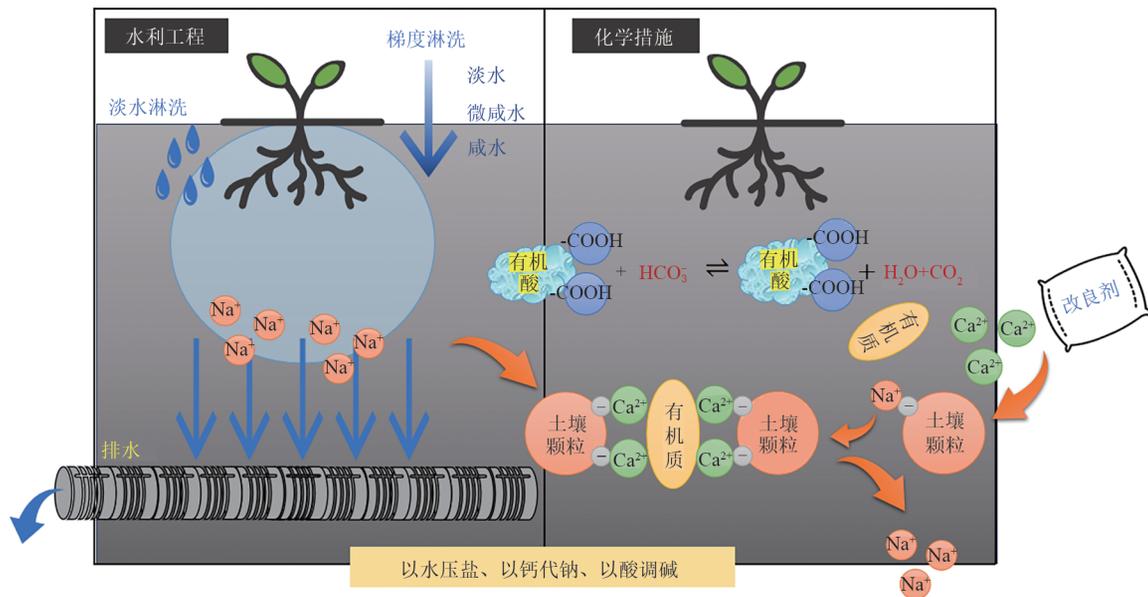


图 3 盐碱土降盐消碱对团聚体影响的原理示意

Fig. 3 Schematic diagram of mechanism by which salinity and alkalinity reduction influences soil aggregates in saline-alkali soils

## 2.2 土壤培肥与有机质提升:物理、化学与生物措施协同

针对盐碱土有机质贫瘠与团聚体稳定性差的核心问题,土壤培肥以提升有机质质量分数为核心目标,增强团聚体胶结物质稳定性,优化碳氮循环,并构建“有机输入-结构修复-功能强化”的协同改良路径<sup>[63]</sup>。对于贫瘠型盐碱土,快速提升碳库容量是关键。研究<sup>[45,64]</sup>表明,秸秆深埋结合腐殖酸施用可显著增加土壤有机质质量分数,秸秆分解产生的腐殖酸通过羧基、酚羟基等官能团与黏土矿物形成有机-无机复合胶结体,促进水稳性团聚体的形成,同时腐殖酸的络合作用可钝化 $\text{Na}^+$ 对胶体的分散效应。微生物活化腐殖酸能刺激放线菌等有益菌群增殖,加速有机质矿化并向稳定态碳转化,提升土壤碳库储量。但高碳输入可能导致C/N失衡,引发氮素固定问题,需配施速效氮肥调节碳氮比,确保土壤培肥效果的可持续性<sup>[28]</sup>。结构性退化盐碱土(团聚体破碎、孔隙度低)需采用有机-无机复合改良策略。研究<sup>[65]</sup>表明,脱硫石膏与生物炭复配施用可形成协同效应:石膏中的 $\text{Ca}^{2+}$ 置换土壤中的 $\text{Na}^+$ ,降低土壤分散性;酸化生物炭(HBC)改善生物炭的保水和 $\text{Na}^+$ 吸附能力。通过调控养分循环和固定土壤碳素,有效降低土壤体体积质量和交换性钠胁迫,显著提升土壤持水能力与有机质质量分数,促进水稳性大团聚体的形成<sup>[66]</sup>。可降解液态地膜覆盖能抑制盐分表聚,其降解产物与土壤颗粒结合形成有机-无机复合胶膜,显著提升表层大团聚体的孔隙连通性<sup>[67]</sup>。在分子生物学层面,耐盐菌剂接种能够分泌胞外多糖,强化团聚

体胶结作用,但高盐环境抑制微生物活性,需通过腐殖酸-微生物复合制剂提升功能菌的耐盐性<sup>[68]</sup>。

综合应用表明,物理措施提供碳源框架,化学措施调控离子平衡与输入养分,生物措施增强代谢驱动力,此协同模式可提升盐碱土有机质质量分数及水稳性团聚体比例(图4)。过度施肥易导致养分失衡和毒性,危害植物生长及微生物活性;特定营养素过量引发土壤盐度增加,加速团聚体破碎<sup>[69]</sup>;高分子材料的降解产物可能带来生态风险。未来需研发基于区域盐碱类型的精准配施模型,探讨施肥策略的长期影响与机制,精细化肥料组合与用量,以实现盐碱土的可持续改良。

## 2.3 耐盐作物种植与生态功能提升:生物措施主导

盐碱土生物改良的核心目标是通过植物-土壤互作机制,持续优化团聚体结构,实现生态恢复与农业生产的协同发展(图5)。其理论依据植根于植物耐盐性、土壤理化性质改善及植物收获物除盐<sup>[70]</sup>。通过耐盐作物的适应性种植和分子生物学技术应用,可有效促进盐分淋滤、有机质积累及团聚体结构优化,形成可持续的盐碱土改良模式。盐碱土类型对植物配置策略具有决定性影响。中轻度盐碱土适宜选用深根性耐盐经济作物。此类作物根系可穿透土壤板结层形成大孔隙,增强水分下渗,促进盐分淋洗。同时根系分泌的黏胶物质直接胶结微团聚体,提升土壤结构稳定性<sup>[71]</sup>。重度盐碱土优先采用先锋盐生植物如碱蓬、海蓬子等,其泌盐作用可移除根区盐分,显著降低 $\text{Na}^+$ 对团聚体的分散效应,并通过凋落物输入有机质,改善表层土壤结构<sup>[72]</sup>。

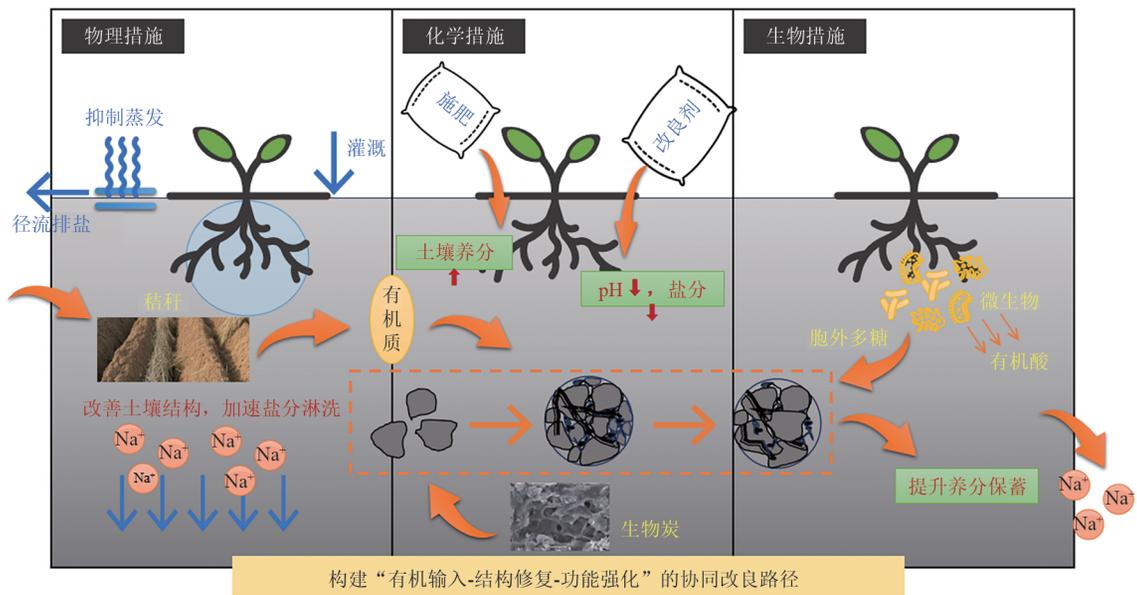


图 4 盐碱土培肥对团聚体影响的原理示意

Fig. 4 Schematic diagram of mechanism by which fertility improvement affects soil aggregates in saline-alkali soils

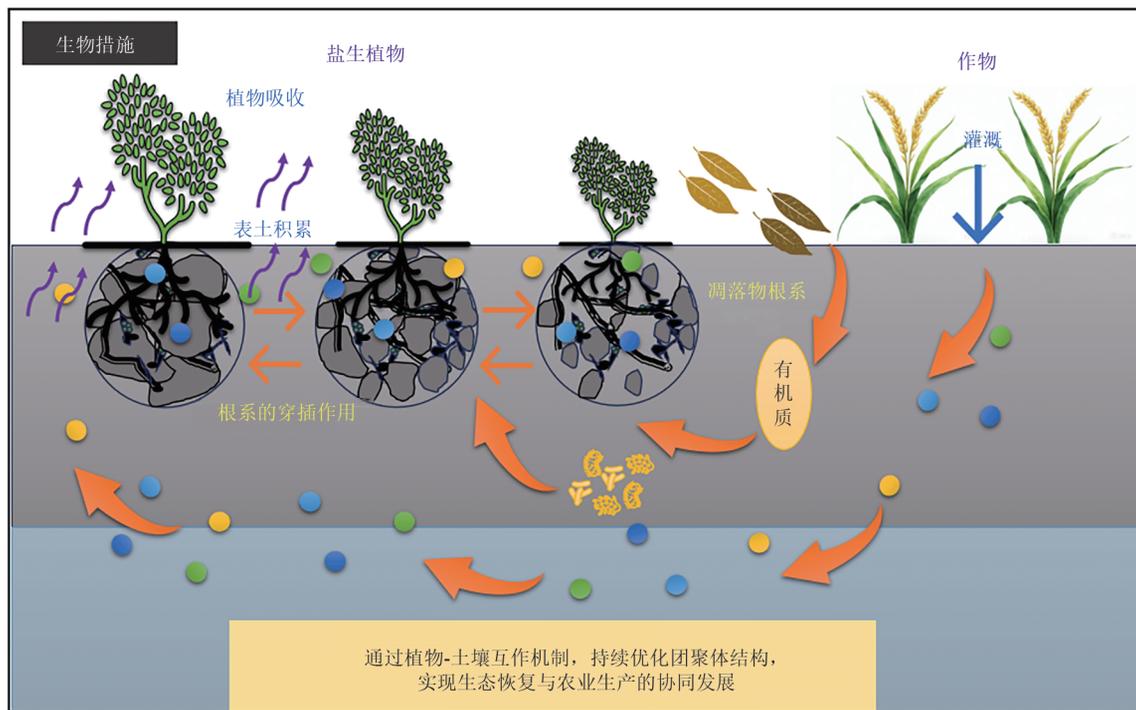


图 5 盐碱土耐盐作物种植对团聚体影响的原理示意

Fig. 5 Schematic diagram of mechanism by which cultivation of salt-tolerant crop affects soil aggregates in saline-alkali soils

适应性种植涉及耐盐植物栽培,其根系分泌的多糖、蛋白质等有机化合物作为胶结剂,能够促进土壤颗粒聚集,形成稳定团聚体,提高其抗侵蚀和水稳定性。植物根系的穿插作用有助于形成较大团聚体,优化孔隙度,促进水分渗透和气体交换,改善土壤的通气透水性能<sup>[71]</sup>。植物根系的死亡和分解为土壤提供有机质,提高团聚体的稳定性,增加碳储存。微生物活动的增强也促进团聚体的形成<sup>[73]</sup>。耐盐基

因工程通过调控植物生理代谢路径实现团聚体稳定性提升。以转 AtNHX1 基因水稻为例,其能够更有效地将 Na<sup>+</sup> 积累在液泡中,降低细胞质中的 Na<sup>+</sup> 浓度,维持较高的 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 比值,减轻盐胁迫对细胞的伤害,维持根系活力,在盐胁迫下持续分泌胶结物质,提高水稳性团聚体比例<sup>[74]</sup>。

当前生物改良技术仍面临双重挑战:1)盐生植物吸盐后若未及时收割移除,其凋落物分解将导致

盐分重返土壤-地下水系统,需建立动态监测与周期性收割制度;2)基因改良作物的生态安全性需长期验证,包括基因流风险及对土壤微生物组的影响<sup>[5]</sup>。与水利工程所伴随的高耗水风险、物理化学改良所依赖的材料性相比,生物措施凸显出生态友好性与可持续性优势。但在极端盐碱化区域,单一生物措施的功效受限,宜采纳多元改良方法相结合的复合策略。

### 3 非盐碱土团聚体研究对盐碱土的启示

团聚体作为土壤结构的基本单元,其研究对于理解土壤生态功能和提高土壤质量具有重要意义。非盐碱土团聚体研究通过采用多尺度分析策略,揭示团聚体在土壤生态系统中的复杂行为和功能。而盐碱土团聚体的研究面临着认知上的局限和方法学上的挑战,其特殊的环境条件对团聚体的形成与稳定机制提出新的研究需求。借鉴非盐碱土团聚体研究的先进理念和方法,深化对盐碱土团聚体结构与性质的理解,并揭示其在盐碱土改良和生态恢复中的关键作用。通过对比分析非盐碱土与盐碱土团聚体的研究差异,为盐碱土团聚体研究提供新的视角。

#### 3.1 新型土壤改良剂的智能化研发与应用

团聚体的物理结构及其生物活性是影响肥料和改良剂吸附、分布及有效性的关键因素。肥料和改良剂的应用改变土壤的化学性质和生物活性,这些变化又反馈性地影响团聚体的形成与稳定性,形成一种动态的双向互动关系。改良措施通过不同的作用机制影响团聚体的形成与稳定,揭示盐碱土团聚体在特性上的多样性和复杂性。因此,对盐碱土团聚体的研究不应简单套用非盐碱土的研究成果,需要深入探究其独特的性质和形成机制,突破传统非盐碱土研究框架,重点开发针对性改良技术。非盐碱土通过添加土壤结构改良剂以提高土壤质量的策略,为盐碱土改良提供思路。非盐碱土研究突出现代化学合成技术在开发新型改良剂中的重要性<sup>[34]</sup>。基于非盐碱土的研究经验,可利用化学合成技术研制既能降低盐分又能改善土壤结构的复合改良剂,克服传统化学改良方法中单一侧重于降盐碱处理的局限性,全面提升盐碱土的改良效果和土壤质量。非盐碱土研究对改良剂稳定性的关注也提醒盐碱土改良需兼顾短期团聚体增加与长期稳定性维持。例如,研发pH/盐度响应型控释材料,借助智能感知土壤环境,自动释放Ca<sup>2+</sup>及有机酸,实现盐碱土团聚体稳定性的动态调控<sup>[75]</sup>。构建改良效果的持续性保障

机制,在提升短期团聚体数量的同时,利用材料缓释技术确保胶结物质的持续供给,保障团聚体结构的长期稳定性。这种智能化改良策略,不仅汲取非盐碱土研究中现代化学合成技术的关键经验,也通过环境响应机制的创新,有效应对盐碱土特殊生境下的改良可持续性挑战。

#### 3.2 构建盐碱土团聚体多维度研究体系

在盐碱土中,团聚体扮演着储存与供应氮、磷、钾等养分的重要角色<sup>[76]</sup>,目前对此类土壤中不同粒径团聚体养分分布的研究不足。针对盐碱土团聚体研究存在的问题,需建立涵盖结构表征-养分动态-生态功能的全链条研究体系。首先,应重点突破分级标准缺失问题,借鉴非盐碱土团聚体研究的既有成果,充分考虑盐碱土的特殊理化性质,确立一套针对盐碱土特性的团聚体精确分级与评价标准,降低人为误差,确保筛分结果的客观性与准确性。由于盐碱土团聚体稳定机制与非盐碱土存在本质差异,现有筛分方法易产生偏差。利用X-射线光谱显微镜、断层扫描等原位分析技术,结合盐碱土特有的电导率、pH、钠吸附比等理化参数,开发空间结构建模新方法,建立包含微孔隙分布、胶结物质组成的多参数分级标准,消除传统湿筛法的人为误差。在明确团聚体结构特征的基础上,需系统揭示不同粒径团聚体的养分运移规律。采用纳米二次离子质谱(NanoSIMS)<sup>[77]</sup>等高分辨率技术,定量解析C/N/P等元素在纳米尺度上的空间异质性分布,建立“团聚体-养分”的三维数据库,为后续分析提供基础数据支持。同时结合<sup>13</sup>C同位素标记示踪技术,动态模拟有机质在不同粒径单元中的周转路径,阐明盐碱胁迫下团聚体“养分库”功能的特殊性。

生态功能研究需聚焦微生物互作机制,构建“结构-养分-生物”耦合评价体系。研究不同粒径团聚体的生态功能分异规律和形成机制,对于揭示土壤微生物的“孵化器”作用至关重要<sup>[78]</sup>。不同粒径团聚体为微生物提供特定的栖息环境,影响微生物的数量和群落结构及营养物质的可用性和水分状况。目前关于盐碱土中微生物生长、活性及功能在不同粒径团聚体中的分布关系的研究尚不充分,深化对盐碱土团聚体微环境与特定微生物功能相互作用反馈机制的理解,是解析土壤整体功能实现过程的关键所在。通过宏基因组测序与荧光原位杂交(FISH)联用<sup>[77]</sup>,建立粒径分级与特定微生物类群(如耐盐菌群)的空间映射关系。利用机器学习方法,整合孔隙连通度、酶活性阈值、微生物多样性等多项指标,定量评估不同粒径单元作为微生物“孵化器”的效能差

异,形成可揭示“团聚体微环境-养分有效性-微生物功能”正反馈机制的系统研究框架。

### 3.3 推动多尺度分析与量化方法整合

在非盐碱土团聚体研究领域,多尺度的分析策略已被广泛采用,涵盖从毫米尺度的颗粒组成到纳米尺度的结构单元。跨尺度的数据整合与分析为深入洞察团聚体的形成、稳定性维持机制及其在土壤生态系统中的功能提供全面的视角<sup>[34]</sup>。现有的盐碱土团聚体研究往往受限于单一尺度的考察,未能充分揭示其在盐碱环境中的复杂动态行为,未来研究应当强化跨尺度方法的运用,促进对盐碱土团聚体结构和性质的多维度理解,阐明其在盐碱土改良和生态恢复中的关键作用。同时,在非盐碱土团聚体的研究领域,研究者们已广泛运用包括扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、同步辐射X射线近边吸收光谱、纳米二次离子质谱及生物组学等先进分析技术,并强调量化分析的重要性<sup>[77]</sup>,这些高分辨率仪器为精确描绘团聚体的形态与结构特征提供技术支持。众多研究者通过尖端的纳米尺度探测技术,进行团聚体微结构和微表面元素分布的量化研究。相较之下,盐碱土团聚体研究在技术采纳方面存在明显不足,限制对其微观结构特性的深入认识。为提高研究水平,盐碱土团聚体研究需要整合更多尖端的分析技术和仪器,提高研究的精确度和深度;研究方法的系统化和定量化也是揭示盐碱土团聚体在特定环境中的行为和功能的关键,有助于更全面地理解其在盐碱土生态系统中的作用。

#### 参考文献:

- [1] SUN H J, LU H Y, CHU L, et al. Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH<sub>3</sub> volatilization in a coastal saline soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 820-825.
- [2] YANG Y N, SHENG Q, ZHANG L, et al. Desalination of saline farmland drainage water through wetland plants[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 156: 19-29.
- [3] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [4] MANDAL U K, WARRINGTON D N, BHARDWAJ A K, et al. Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis[J]. *Geoderma*, 2008, 144(1/2): 189-197.
- [5] 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.  
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.
- [6] TOTSCHKE K U, AMELUNG W, GERZABEK M H, et al. Microaggregates in soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(1): 104-136.
- [7] HUANG X R, LI H, LI S, et al. Role of cationic polarization in humus-increased soil aggregate stability [J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(3): 341-350.
- [8] BHARDWAJ A K, MISHRA V K, SINGH A K, et al. Soil salinity and land use-land cover interactions with soil carbon in a salt-affected irrigation canal command of Indo-Gangetic plain[J]. *Catena*, 2019, 180: 392-400.
- [9] EMRAN M, DONI S, MACCI C, et al. Susceptible soil organic matter, SOM, fractions to agricultural management practices in salt-affected soils [J]. *Geoderma*, 2020, 366: e114257.
- [10] KOHLER J, CARAVACA F, ROLDÁN A. An AM fungus and a PGPR intensify the adverse effects of salinity on the stability of rhizosphere soil aggregates of *Lactuca sativa* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(3): 429-434.
- [11] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3): 1042-1049.
- [12] ALGAYER B, LEBISSONNAIS Y, DARBOUX F. Short-term dynamics of soil aggregate stability in the field [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(4): 1168-1176.
- [13] MA P P, NAN S Z, YANG X G, et al. Macroaggregation is promoted more effectively by organic than inorganic fertilizers in farmland ecosystems of China: A meta-analysis [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 221: e105394.
- [14] OADES J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management [J]. *Plant and Soil*, 1984, 76(1): 319-337.
- [15] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [16] 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.
- [17] WANG R Z, DORODNIKOV M, YANG S, et al. Responses of enzymatic activities within soil aggregates to 9-year nitrogen and water addition in a semi-arid grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 159-167.
- [18] WU Q C, CHEN Y, DOU X H, et al. Microbial fertilizers improve soil quality and crop yield in coastal saline soils by regulating soil bacterial and fungal community structure [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 949: e175127.
- [19] FU G P, HAN J Y, YU T Y, et al. The structure of denitrifying microbial communities in constructed man-

- grove wetlands in response to fluctuating salinities [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 238: 1-9.
- [20] YAN N, MARSCHNER P. Response of microbial activity and biomass to increasing salinity depends on the final salinity, not the original salinity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 53: 50-55.
- [21] XU X, GUO L, WANG S B, et al. Effective strategies for reclamation of saline-alkali soil and response mechanisms of the soil-plant system [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: e167179.
- [22] 王良梅, 陈捷, 范之馨, 等. 外源有机物料添加对滨海盐碱土细菌群落结构的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(1): 85-95.
- WANG G M, CHEN J, FAN Z X, et al. The shift of bacterial community structure in coastal saline-alkaline soil upon addition of different organic materials [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(1): 85-95.
- [23] BARBOSA L A P, MUNKHOLM L J, OBOUR P B, et al. Impact of compaction and post-compaction vegetation management on aggregate properties, weibull modulus, and interactions with intra-aggregate pore structure [J]. *Geoderma*, 2020, 374: e114430.
- [24] SARKER T C, INCERTI G, SPACCINI R, et al. Linking organic matter chemistry with soil aggregate stability: Insight from  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 175-184.
- [25] 刘艳玲, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江与嘉陵江源区土壤团聚体分布特征及机制研究 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 235-242.
- LIU Y L, PANG J L, HUANG C C, et al. Study on the distribution characteristics and mechanism of soil aggregates in the source area of Hanjiang River and Jialing River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 235-242.
- [26] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- ZHANG W L, WU S X, JI H J, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating Strategies I. estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [27] 赵硕. 长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土壤团聚体稳定性的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- ZHAO S. Long-term effects of organic manure application on soil aggregate stability of saline-sodic soil in western Songnen Plain [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [28] 董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化团聚体和微生物与有机质关系研究进展 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(3): 364-372.
- DONG X L, WANG J T, TIAN L, et al. Review of relationships between soil aggregates, microorganisms and soil organic matter in salt-affected soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(3): 364-372.
- [29] 张倩, 刘冰洁, 余璐, 等. 生物炭对滨海湿地盐碱土壤碳氮循环的影响 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2529-2543.
- ZHANG Q, LIU B J, YU L, et al. Effects of biochar amendment on carbon and nitrogen cycling in coastal saline soils: A review [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2529-2543.
- [30] ISHIGURO M, NAKAJIMA T. Hydraulic conductivity of an allophanic andisol leached with dilute acid solutions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3): 813-818.
- [31] TEDESCHI A, DELL' AQUILA R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 77(1/2/3): 308-322.
- [32] HAYNES R J, BEARE M H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(11/12): 1647-1653.
- [33] 刘冬, 黄传琴, 肖可青, 等. 土壤黏土矿物层间对有机碳的“超稳”固定机制及其增汇效应 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(11): 3664-3667.
- LIU D, HUANG C Q, XIAO K Q, et al. 'Super-stable' interlayer organic carbon in soil clay minerals and its impact on soil carbon sequestration [J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 54(11): 3664-3667.
- [34] 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.
- 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.
- [35] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 267-273.
- LIU J Y, ZHOU Z C, SU X M. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 267-273.
- [36] ZHAO T X, XU S, HAO F. Differential adsorption of clay minerals: Implications for organic matter enrichment [J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 246: e104598.
- [37] THOMPSON L R, SANDERS J G, MCDONALD D, et al. A communal catalogue reveals Earth's multiscale microbial diversity [J]. *Nature*, 2017, 551(7681): 457-463.
- [38] BAREA J M, POZO M J, AZCÓN R, et al. Microbial co-operation in the rhizosphere [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(417): 1761-1778.
- [39] WILSON G W T, RICE C W, RILLIG M C, et al. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly cor-

- related with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: Results from long-term field experiments[J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(5):452-461.
- [40] CONG P F, OUYANG Z, HOU R X, et al. Effects of application of microbial fertilizer on aggregation and aggregate-associated carbon in saline soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 168:33-41.
- [41] RABBI S M F, MINASNY B, MCBRATNEY A B, et al. Microbial processing of organic matter drives stability and pore geometry of soil aggregates [J]. *Geoderma*, 2020, 360:e114033.
- [42] RATH K M, FIERER N, MURPHY D V, et al. Linking bacterial community composition to soil salinity along environmental gradients [J]. *The ISME Journal*, 2019, 13(3):836-846.
- [43] ASANO M, WAGAI R. Evidence of aggregate hierarchy at micro- to submicron scales in an allophanic Andisol [J]. *Geoderma*, 2014, 216:62-74.
- [44] REGELINK I C, STOOF C R, ROUSSEVA S, et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties [J]. *Geoderma*, 2015, 247:24-37.
- [45] 王超, 姜坤, 卢瑛, 等. 不同有机物料施用对砖红壤团聚体组成和稳定性的影响 [J]. *土壤通报*, 2019, 50(6):1328-1334.
- WANG C, JIANG K, LU Y, et al. Effects of different organic material application on aggregate composition and stability of latosol [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6):1328-1334.
- [46] WENG L P, VAN RIEMSDIJK W H, HIEMSTRA T. Humic nanoparticles at the oxide-water interface: Interactions with phosphate ion adsorption [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(23):8747-8752.
- [47] NGUETNKAM J P, DULTZ S. Soil degradation in central north Cameroon: Water-dispersible clay in relation to surface charge in oxisol A and B horizons [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 113(1):38-47.
- [48] KOSMULSKI M. pH-dependent surface charging and points of zero charge III. Update [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 298(2):730-741.
- [49] AL-KAISI M M, DOUELLE A, KWAW-MENSAH D. Soil microaggregate and macroaggregate decay over time and soil carbon change as influenced by different tillage systems [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(6):574-580.
- [50] WENG L P, VEGA F A, VAN RIEMSDIJK W H. Competitive and synergistic effects in pH dependent phosphate adsorption in soils: LCD modeling [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(19):8420-8428.
- [51] AMUNDSON R, BERHE A A, HOPMANS J W, et al. Soil science. Soil and human security in the 21st century [J]. *Science*, 2015, 348(6235):e1261071.
- [52] ZHANG T, WANG T, LIU K, et al. Effects of different amendments for the reclamation of coastal saline soil on soil nutrient dynamics and electrical conductivity responses [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159:115-122.
- [53] YU J B, WANG Z C, MEIXNER F X, et al. Biogeochemical characterizations and reclamation strategies of saline sodic soil in northeastern China [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2010, 38(11):1010-1016.
- [54] WEI K, WANG Q J, DENG M J, et al. Response of cotton growth, yield, and water and nitrogen use efficiency to nitrogen application rate and ionized brackish water irrigation under film-mulched drip fertigation [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15:e1361202.
- [55] WANG Y Q, GAO M, CHEN H T, et al. Organic Amendments promote saline-alkali soil desalinization and enhance maize growth [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:e1177209.
- [56] DING S J, LI S M, KONG S, et al. Changing of mechanical property and bearing capacity of strongly chlorine saline soil under freeze-thaw cycles [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1):e6203.
- [57] 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.
- 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.
- [58] 田宇, 陈环宇, 郭凯, 等. 不同咸水梯次滨海盐土入渗过程及水盐分布特征 [J]. *土壤学报*, 2021, 58(4):911-920.
- TIAN Y, CHEN H Y, GUO K, et al. Saline water infiltration process and water-salt distributions in coastal saline soil relative to concentration of the saline water [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4):911-920.
- [59] 苗月, 杨帆, 王志春, 等. 酸性物质对苏打盐碱土改良的研究进展 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(3):373-384.
- MIAO Y, YANG F, WANG Z C, et al. Progress of research on the improvement of saline-sodic soil using acidic substances [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(3):373-384.
- [60] ZHANG T, DENG Y, LAN H, et al. Experimental investigation of the compactability and cracking behavior of polyacrylamide-treated saline soil in Gansu Province, China [J]. *Polymers (Basel)*, 2019, 11(1):e90.
- [61] JUNG J, KU T, AHN J. Small strain stiffness of unsaturated sands containing a polyacrylamide solution [J]. *Materials (Basel)*, 2017, 10(4):e401.
- [62] 赵永敢, 王淑娟, 李彦, 等. 脱硫酸石膏改良盐碱土技术发

- 展历程与展望[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(4):735-745.
- ZHAO Y G, WANG S J, LI Y, et al. Prospects of using flue gas desulfurization gypsum to ameliorate saline-alkaline soils[J].Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2022,62(4):735-745.
- [63] 赵旭,夏龙龙,夏永秋,等.土壤碳氮循环综合研究支撑农业可持续发展[J].中国科学院院刊,2024,39(7):1276-1287.
- ZHAO X, XIA L L, XIA Y Q, et al. Fundamental theory and technological innovation in soil carbon and nitrogen cycling: Promoting sustainable development of agriculture[J].Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2024,39(7):1276-1287.
- [64] HU Y W, LI Q K, SONG C J, et al. Effect of humic acid combined with fertilizer on the improvement of saline-alkali land and cotton growth[J].Applied Ecology and Environmental Research,2021,19(2):1279-1294.
- [65] 张伶俐,陈广锋,田晓红,等.盐碱土石膏与有机物料组合对作物产量与籽粒养分含量的影响[J].中国农学通报,2017,33(12):12-17.
- ZHANG L B, CHEN G F, TIAN X H, et al. Effect of combined application of gypsum and organic materials on crop yield and grain nutrient content in saline-alkali soil[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2017,33(12):12-17.
- [66] DUAN M L, LIU G H, ZHOU B B, et al. Effects of modified biochar on water and salt distribution and water-stable macro-aggregates in saline-alkaline soil[J].Journal of Soils and Sediments,2021,21(6):2192-2202.
- [67] PENG X H, ZHU Q H, ZHANG Z B, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J].Soil Biology and Biochemistry,2017,109:81-94.
- [68] 鲁凯珩,金杰人,肖明.微生物肥料在盐碱土壤中的应用展望[J].微生物学通报,2019,46(7):1695-1705.
- LU K H, JIN J R, XIAO M. Prospect of microbial fertilizer in saline soil[J].Microbiology China,2019,46(7):1695-1705.
- [69] WANG X, DING J L, WANG J J, et al. Ameliorating saline-sodic soils: A global meta-analysis of field studies on the influence of exogenous amendments on crop yield[J].Land Degradation and Development,2024,35(10):3330-3343.
- [70] ZHENG H, WANG X, CHEN L, et al. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: Roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation[J].Plant Cell Environ,2018,41(3):517-532.
- [71] 肖弘扬,李谟志,林启美,等.8种耐盐植物与脱硫石膏对河套灌区盐碱土水稳定性团聚体的影响[J].中国农学通报,2021,37(34):90-96.
- XIAO H Y, LI M Z, LIN Q M, et al. Effects of 8 salt-tolerant plants and desulfurization gypsum on the water-stable aggregates of saline-alkali soil in Hetao irrigation district[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2021,37(34):90-96.
- [72] 陈小兵,杨劲松,杨朝晖,等.渭干河灌区灌排管理与水盐平衡研究[J].农业工程学报,2008,24(4):59-65.
- CHEN X B, YANG J S, YANG Z H, et al. Irrigation-drainage management and hydro-salinity balance in Weigan River Irrigation District[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(4):59-65.
- [73] XU Z K, SHAO T Y, LV Z X, et al. The mechanisms of improving coastal saline soils by planting rice[J].Science of the Total Environment,2020,703:e135529.
- [74] KUMARI A, JHA B. Engineering of a novel gene from a halophyte: Potential for agriculture in degraded coastal saline soil[J].Land Degradation and Development,2019,30(6):595-607.
- [75] LI H, WANG J, LUO Y, et al. pH-responsive eco-friendly chitosan-chlorella hydrogel beads for water retention and controlled release of humic acid[J].Water,2022,14(8):e1190.
- [76] 魏守才,谢文军,夏江宝,等.盐渍化条件下土壤团聚体及其有机碳研究进展[J].应用生态学报,2021,32(1):369-376.
- WEI S C, XIE W J, XIA J B, et al. Research progress on soil aggregates and associated organic carbon in salinized soils[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(1):369-376.
- [77] REMUSAT L, HATTON P J, NICO P S, et al. NanoSIMS study of organic matter associated with soil aggregates: Advantages, limitations, and combination with STXM[J].Environmental Science and Technology,2012,46(7):3943-3949.
- [78] RILLIG M C, MULLER L A, LEHMANN A. Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators[J].ISME J,2017,11(9):1943-1948.