

# 土壤调理剂在盐渍化农田粮油兼用作物生产领域的研究现状与前景<sup>①</sup>

郭刘明, 卢树昌\*

(天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300392)

**摘要:** 盐渍化农田作为宝贵的后备耕地资源, 其改良利用对保障我国粮食安全具有重要战略意义。土壤调理剂具有改善土壤性状、提升土壤质量、提高作物产量与品质的作用。本文系统综述了土壤调理剂在盐渍化农田粮油兼用作物生长、产量及品质、土壤性状改善等方面的研究进展状况, 提出了土壤调理剂综合研究存在新型复合环保土壤调理剂研究不深入、综合改良措施研究不全面、调理剂应用结合新型钾肥开发研制与养分增效综合研究不充分等问题。最后指出, 我国可以依托农业废弃资源循环利用, 研制具有改善盐渍化土壤性状、产品成本适中和效果稳定的土壤调理剂, 在盐渍化农田应用与扩种粮油兼用作物, 对有效利用我国盐渍化农田后备耕地资源与保障国家粮油安全等具有较好应用前景。

**关键词:** 盐渍化农田; 土壤改良; 综合改良措施; 土壤质量提升; 粮油安全; 农业可持续发展

**中图分类号:** S156.2; S565      **文献标志码:** A

## Research Status and Prospects of Soil Conditioners in Production of Grain and Oil Crops in Salinized Farmland

GUO Liuming, LU Shuchang\*

(College of Agronomy & Resources and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

**Abstract:** As a critical reserve of arable land, the enhancement and utilization of salinized farmlands play a significant strategic role in safeguarding China's food security. Soil amendments are served to improve soil properties, enhance soil quality, and increase both crop yield and quality. In this study, a comprehensive review was conducted on research progress regarding the impact of soil amendments on the growth, yield, and quality of cereal and oilseed crops, as well as their roles in enhancing soil properties in salinized farmland. Several issues in the comprehensive study of soil amendments were identified, such as the insufficient research on novel composite, eco-friendly soil amendments, the lack of thorough research on integrated remediation strategies, and the limited investigation into the synergistic development of soil amendment applications and novel potassium fertilizers, along with their nutrient use efficiency. Finally, it was emphasized that the recycling of agricultural by-products could be utilized in China to develop soil amendments that improve the properties of salinized soil, balance product cost, and deliver stable results. This approach expands the cultivation of cereal and oilseed crops in salinized farmland and holds promising potential for the effective utilization of reserved arable land resources, ultimately ensuring national food security.

**Key words:** Salinized farmland; Soil improvement; Comprehensive improvement measures; Soil quality improvement; Grain and oil security; Sustainable development of agriculture

目前, 我国种植作物按用途可分为多种<sup>[1]</sup>。例如, 大豆、花生、向日葵等富含蛋白质和油脂的作物, 不仅可以作为油料作物, 还可用作豆制品、饮料、坚果等食品的加工原料。其籽粒鲜食时风味独特, 且富含

维生素、酚类等营养成分, 是重要的粮油兼用型经济作物<sup>[2-3]</sup>。作为全球主要的油料消费大国, 我国大宗油料作物的栽培面临土壤质量较差、耕地资源有限等多重问题, 导致单产低、效益差、自给率持续偏低,

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFE0104700)和企业横向科研项目(TNHXKJ2024050)资助。

\* 通信作者(lsc9707@163.com)

作者简介: 郭刘明(1999—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤与作物生长环境方面的研究。E-mail: 1459275045@qq.com

严重依赖进口的现状使得我国粮油安全面临严峻挑战。其中，大豆一直是我国进口量最大的油料作物，其进口量在油料进口总量中长期占比超过 90%<sup>[4]</sup>。有学者分析我国大豆、花生和油菜三大油料作物主产区省份的数据发现，土地是油料作物生产的关键要素<sup>[5]</sup>。因此，稳步开发和利用盐渍化土地种植大豆及其他油料作物，对保障粮油安全具有重要意义。此外，耐盐种质资源的开发与土壤调理剂的应用，进一步推动了油料作物在盐渍化农田中种植的研究与实践，显著提高了盐渍化农田的利用率<sup>[6-7]</sup>。

土壤盐渍化是影响农田生产力提高的重要制约因素。研究表明，全球近 20% 耕地和 33% 灌溉农田受到盐渍化危害，并且受不同程度盐渍化影响的农田面积仍不断增长，预计在未来 35 年内，全球将会有一半的耕地受到盐渍化的影响<sup>[8-9]</sup>。截至 2019 年底，我国盐渍化土地(土地利用类型为未利用地)面积约为  $7.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，且面积仍在不断增长<sup>[10]</sup>。盐渍化农田中富含大量  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  等盐分离子，尤其由于  $\text{CO}_3^{2-}$  的积累，常伴随大量  $\text{Na}^+$  的积累，这些离子在土壤中过度累积导致土壤肥力和养分有效性下降，干扰作物的正常生理代谢功能，进而影响植物的生长发育<sup>[11]</sup>。 $\text{Na}^+$  有较强的吸水性能，使得土壤胶体在遇水时发生分散，土壤中的孔隙结构遭到堵塞，最终破坏土壤的结构和稳定性，更易使土壤中的盐分反复积累；在土壤物理结构恶化的同时，土壤养分的流失也进一步加剧；盐渍化还对土壤微生物的分布和生物特性产生直接或间接的影响<sup>[12]</sup>。作为重要的后备耕地，盐渍化农田开发利用潜力较大，加强现有盐渍化耕地改造提升，充分挖掘盐渍化农田综合利用潜力，对我国严守耕地红线、保障国家粮油安全具有重要意义<sup>[13]</sup>。通过物理改良、化学改良、生物改良等措施对盐渍化土壤进行排盐控盐、改善土壤理化性质、减轻离子毒害等作用，对盐渍化农田有较好的改良效果<sup>[14-15]</sup>。但单一的物理或化学改良措施存在投入高、改良效果不稳定、潜在风险较难预见等局限性<sup>[16]</sup>。近年来，研究者提出了将土壤调理剂应用与生物措施结合的综合改良措施，以实现效果显著、投入低廉的盐渍化农田综合改良方案。因此，本文对土壤调理剂在盐渍化农田土壤及作物生长中的应用效果进行综述，旨在为提高我国盐渍化农田利用，保障粮油安全提供重要参考。

## 1 土壤调理剂的定义和类型

土壤调理剂的研究近年来引起了广泛关注，然而

在学术界，由于土壤调理剂具有多样化的特性，尚未形成统一的定义。部分学者将其与土壤改良剂等同，而另一些学者则在功能和应用领域上对二者做出了区别。蔡海林等<sup>[17]</sup>认为，土壤调理剂主要用于改善土壤的物理、化学性质，以便为作物的生长提供更为适宜的环境，而其核心功能不包括单纯提供养分的物质。张建鹏<sup>[18]</sup>则指出，土壤调理剂通常是由多种矿物质原料调配而成，能够有效提高土壤孔隙度，减少土壤容重，增强土壤的水分保持与肥料保留能力。分类标准方面，白博文等<sup>[19]</sup>根据土壤调理剂的来源与性质，将其分为天然调理剂和人工调理剂两个类别。在盐渍化农田改良实践中，有学者根据土壤调理剂的性质，将其划分为物理调理剂、化学调理剂和生物调理剂<sup>[20]</sup>。

## 2 土壤调理剂在盐渍化农田粮油兼用作物生产中的应用研究

### 2.1 粮油兼用作物生长性状研究

施用土壤调理剂对盐渍化农田中粮油兼用作物的生长发育具有显著影响。Otitoloju<sup>[21]</sup>研究表明，调理剂能够改善土壤的物理特性和生物特性，从而促进花生主茎高度和侧枝生长，进而改善其农艺性状。徐婷<sup>[22]</sup>的研究也发现，施用调理剂后有利于花生生长，茎叶和根干物质质量显著增加。有研究表明，生物质炭通过影响大豆叶面积指数、维持光合色素的稳定以及改善盐分离子状况，可以有效缓解大豆在盐胁迫下的逆境反应，进而提高群体的光合作用<sup>[23]</sup>。Li 等<sup>[24]</sup>、鹿鑫等<sup>[25]</sup>研究指出，芽孢杆菌属调理剂能够通过寄生在植物根系，诱导其产生植物激素或萜类物质，从而使植物的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和丙二醛(MDA)等生理指标得到调节，减轻盐胁迫对植物的负面影响，促进大豆各生长期功能叶的发育。此外，土壤微生物群落结构的变化与植物生物量之间也存在一定程度的关联。李娜等<sup>[26]</sup>研究表明，采用含有小分子纤维素、磺酸基、酚羟基、醇羟基等活性基团的生物基磺酸盐调理剂，通过保护油葵的酶系统，有效缓解了盐胁迫对油葵细胞组织的损害，改善其生长状态。Yang 等<sup>[27]</sup>研究指出，土壤的碱度对盐渍化土壤中向日葵的生长产生了重要影响。因此，使用脱硫石膏调理剂能够有效改善土壤溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^+$  的比例，调节土壤碱度，从而为作物生长创造更加有利的土壤环境。邹璐等<sup>[28]</sup>发现，脱硫石膏能够减缓土壤盐分对植物的胁迫，改善植株的水分亏缺和叶片气孔关闭的状况，从而提高叶片对  $\text{CO}_2$  的

吸收能力,显著提升油葵叶片的净光合速率,进而促进油葵生长和干物质的积累。

## 2.2 粮油兼用作物产量及品质研究

有学者通过对全球范围内不同调理剂对盐渍化农田作物改良效果的系统分析表明,施用调理剂能够显著提高盐渍化农田作物的产量和品质,增幅达到 50.70%<sup>[29]</sup>。该研究结果凸显了调理剂在改善土壤质量、提升作物产量以及保障粮食安全方面的关键作用,具有重要的理论和实践意义。胡宇迪等<sup>[30]</sup>、Wang 等<sup>[31]</sup>分别探讨了生物质炭调理剂对盐渍化农田花生、大豆产量的影响,发现使用调理剂后,大豆和花生的饱果率、籽仁率、百果重等产量构成因子均有所提升;同时,蛋白质、脂肪和油酸等品质指标也得到了改善。这一结果与生物质炭中富含氮、磷、钾等养分密切相关,这些养分的供给促进了作物产量和品质的提高。Rashmi 等<sup>[32]</sup>的研究认为,石膏调理剂中的  $\text{Ca}^{2+}$  通过增加种子中代谢物的积累并改善光合作用,进而提升千粒重等产量构成因子,对增产效果显著。徐钰等<sup>[33]</sup>、Wang 等<sup>[34]</sup>的研究表明,采用不同调理剂改良措施能够在不同程度上改善盐渍化农田作物的产量及其籽粒中蛋白质和粗脂肪含量等品质指标,特别是综合改良措施的效果最为显著。这表明,多种措施的协同作用能够为土壤-作物系统提供全面且适宜的生长环境,从而优化改善效果,并提升经济效益。田荣荣等<sup>[35]</sup>的研究进一步指出,有机-无机复配调理剂在根区的施用方式能够延长其作用时间,显著提高改良效率,从而有效提升油葵的出苗率和产量。

## 3 土壤调理剂在盐渍化农田土壤理化性状方面的研究

### 3.1 盐渍化农田土壤物理状况

盐渍化农田土壤由于特殊的离子属性,导致土壤颗粒崩解、膨胀和分散,最终破坏土壤结构,引起土壤物理性质恶化、团粒结构差、通气性不足等问题,这些问题直接或间接影响植物的健康生长<sup>[36]</sup>。生物质炭较大的比表面积以及独特的物理化学特性,表现出显著的土壤改善潜力。生物质炭能够有效降低土壤容重,提高土壤孔隙率,改善土壤的渗透性和水力特性,进而优化盐渍土壤表层水盐分布,从而实现盐渍农田的有效改良<sup>[37]</sup>。此外,生物质炭的施用还能够通过改变土壤颜色,使土壤变暗,并提高土壤温度,为土壤微生物群落提供更加适宜的生长环境<sup>[38]</sup>。郭彦钊等<sup>[39]</sup>通过生物调理剂研究表明,活性微生物细

胞由于自身带有负电荷,可以通过静电引力吸附于土壤颗粒表面,从而成为土壤团聚体的核。此外,微生物的次级代谢产物胞外多糖在土壤团聚体的形成及其稳定性维持过程中也发挥了重要作用。Kulikova 等<sup>[40]</sup>基于改性腐殖质开发的新型土壤调理剂研究发现,该调理剂施用后可以与土壤矿物形成某种键合,从而使土壤结构在宏观和微观团聚体水平上都有所改善。Chen 等<sup>[41]</sup>通过长期定位试验的研究发现,褐煤调理剂可以减少盐渍化土壤团聚体的破坏,提高土壤团粒结构的稳定性。Song 等<sup>[42]</sup>、Fei 等<sup>[43]</sup>的研究表明,有机调理剂疏松多孔的特点可以吸附聚集土壤盐分,并且有助于土壤孔隙结构的形成,从而改善土壤疏松性,有助于改善土壤通气性,加速水盐的淋溶。董少文等<sup>[44]</sup>研究发现,粉煤灰调理剂可以提高土壤中无机胶结物质  $\text{CaCO}_3$  含量,促进土壤中的细小黏粒胶结,进一步形成大的团聚体,从而有效改善土壤结构。王德领等<sup>[45]</sup>的研究还指出,糠醛渣调理剂通过其含有的大量有机质和矿质养分,来增加土壤腐殖质含量,从而促进土壤团粒结构的形成,改善盐渍化土壤结构。

### 3.2 盐渍化农田土壤含盐量和 pH 状况

盐渍化农田土壤中由于积聚大量水溶性盐分离子而具有较高渗透压特征,高浓度盐分会增加渗透压,降低土壤溶液的水势,导致植物缺水死亡,此外  $\text{Na}^+$  与其他重要矿质养分也存在竞争关系<sup>[46]</sup>。因此,降低土壤可溶性盐分含量,可以有效缓解盐胁迫对粮油兼用作物生长的危害。Mao 等<sup>[47]</sup>的研究表明,不同种类的有机土壤调理剂能够提高土壤中耐盐微生物类群的相对丰度,降低土壤水溶性总盐含量。在不同处理中,生物质炭处理在减少土壤水溶性总盐含量方面表现出较为显著的效果。Cui 等<sup>[48]</sup>的研究采用了不同用量的生物质炭,并通过为期 3 年的田间试验发现,添加生物质炭后土壤总可溶性盐含量相比第一年依次降低,分别降低了 15.90%~23.70%、28.60%~54.60%、11.70%~42.20%。Wang 等<sup>[49]</sup>指出,石膏调理剂中含有的大量  $\text{Ca}^{2+}$  可以通过置换盐渍化土壤中的  $\text{Na}^+$  来降低土壤的碱化程度,降低土壤 pH。另外,Zhang 等<sup>[50]</sup>通过定位试验研究表明,随着石膏调理剂施用时间的增加,深层次土壤的含盐量也得到降低。吴洪生等<sup>[51]</sup>的研究结果指出,磷石膏本身呈酸性,施入土壤后其中的游离酸可以快速中和土壤碱度,引起土壤 pH 下降;此外,磷石膏中的  $\text{Ca}^{2+}$  还可以与土壤中的  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  发生化学反应,降低土壤盐分离子含量。An 等<sup>[52]</sup>研究指出,粉煤灰基调理

剂的添加可以交换替代盐分离子来降低可溶性盐含量和土壤 pH。韩剑宏等<sup>[53]</sup>利用果蔬垃圾制备的环保酵素调理剂可以在短期内明显降低盐渍化土壤的 pH 和电导率。有学者研究表明,生物微藻调理剂可以通过摄取土壤中的盐分离子来降低土壤盐分含量、改善土壤 pH<sup>[54]</sup>。菌糠-凹凸棒石调理剂富含多种矿质元素和残余菌丝体,且具有良好的吸附性能。该调理剂在改善盐渍化土壤的 pH 和电导率方面表现出较好的效果<sup>[55]</sup>。杨肖飞等<sup>[56]</sup>研究发现,木醋液配施生物质炭可以增加盐渍化土壤中水溶性  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  和部分酸根离子含量,从而降低盐渍化土壤的 pH 和电导率。

### 3.3 盐渍化农田土壤养分状况

盐渍化农田土壤作为我国中低产土壤的主要类型之一,具有有机质含量低、养分失衡及有效养分易淋溶流失等特点。这些特性通过影响植物对养分和水分的吸收,直接制约了植物的生长,从而限制了土壤的生产力<sup>[57]</sup>。由于  $K^+$  与  $Na^+$  在原子半径及电荷方面具有相似的特性,在盐渍化农田土壤中,若提高土壤中钾素有效水平,可以有效减轻盐渍化土壤中  $Na^+$  对作物产生的毒害作用<sup>[58]</sup>。此外,钾素在植物光合作用、有机物质运输、生理代谢等过程以及在改善作物抗性、提高作物产量、改善作物品质等方面也发挥着重要作用<sup>[59]</sup>。在生物质炭改良盐渍化土壤的长期实践中发现,生物质炭富含的  $K^+$  等阳离子通过对钙镁离子的置换作用,显著提高了土壤速效钾的浓度和土壤阳离子交换量,进而促进了  $Na^+$  与土壤阳离子之间的交换,降低了土壤 pH,减缓了土壤中氮等有效养分的损失。同时,生物质炭还可以改善土壤酶活性和微生物生长状况,促进养分的有效性转化,从而提高养分的利用效率<sup>[60]</sup>。Xu 等<sup>[61]</sup>在研究中发现,通过单独或联合利用生物质炭和脱硫石膏的吸附性能和离子交换能力可以减少有效氮、磷、钾养分的流失;聚马来酸酐调理剂可以通过产生水解酸降低土壤的 pH,从而有助于活化土壤磷以改善土壤有效磷水平。此外,有研究强调,通过改性处理后的生物质炭在提高盐渍化土壤中磷的有效性和减少磷的浸出流失方面表现更为突出,这可能与改性后生物质炭表面形态的改变有关<sup>[62]</sup>。姜雪等<sup>[63]</sup>研究指出,不同种类的调理剂通过改善土壤物理性状、提高土壤缓冲能力等作用,不仅在提高表层土壤有效氮、磷、钾上有较好效果,在提高 30~60 cm 深层土壤有效养分的效果上也同样明显。张宇航等<sup>[64]</sup>研究发现,随着煤矸石调理剂用量的增加,盐渍化土壤养分含量增加,这与煤矸

石中释放进入到土壤中的养分有关。近年来,采用天然物质制备而成的生物刺激素调理剂,其不仅具有环境污染风险较低的优点,还能促进养分有效性转化,从而提高土壤肥力<sup>[65]</sup>。

## 4 土壤调理剂在盐渍化农田粮油兼用领域研究应用中存在的主要问题

### 4.1 新型、复合、环保土壤调理剂研究不充分

土壤调理剂可以改善盐渍化土壤结构、调节土壤酸碱度、改善微生物环境,对增强土壤养分有效性、提高盐渍化土壤生产力有重要作用<sup>[66]</sup>。目前,土壤调理剂在定义和分类方面尚未达成统一,且其作用通常较为单一。此外,土壤调理剂的原料来源复杂且种类繁多,且其制备工艺也存在不足,导致无法实现完全的无害化处理。这可能导致有害成分转移到农田土壤中,从而给土壤环境带来潜在风险。这些因素在一定程度上制约了土壤调理剂的广泛应用与推广<sup>[67]</sup>。因此,针对环境友好、资源高效并能够协调作用于地上与地下的新型综合调理剂的研究仍显不足,亟须进一步深入和系统化应用。

### 4.2 综合改良措施研究不深入

基于国内外文献分析,盐渍化农田利用的改良研究得到广泛关注,但大多数集中于单一改良治理模式,基于耐盐油料作物栽培对盐渍化农田种养结合的高效综合治理模式的研究较少,亟待加强相关研究<sup>[68]</sup>。同时,2021年《中共中央 国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》指出,确保粮、棉、油、糖、肉等供给安全,稳定大豆生产,多措并举发展油菜、花生等油料作物。油料作物的生产不仅是保障国家粮油安全的关键举措,也是农民增收致富的重要经济来源。因此,改良和利用盐渍化农田,推动油料作物的种植,对于保障我国粮油安全、提升农民收入以及进一步深入完善盐渍化农田的综合治理措施具有重要战略意义。

### 4.3 调理剂应用结合新型钾肥开发研制与养分增效综合研究不全面

钾素作为作物生长的三大要素之一,在作物的生长以及产量和品质中起着至关重要的作用,但我国钾资源短缺的现状,导致国产钾肥很难满足农业生产中日益增加的钾肥需求<sup>[69]</sup>。相关研究表明,通过施用与化工副产品有机结合的多元化新型钾肥,可以明显提高钾素利用效率以及改善土壤钾素供应状况<sup>[70]</sup>。目前,关于粮油兼用作物的新型钾肥开发及调理剂在钾养分增效方面的研究尚显不足,这在一定程度上制

约了新型钾肥的进一步研发和应用。因此,开展新型钾肥开发与调理剂结合施用的系统性研究,对于提高钾肥利用效率、保障我国钾资源及粮油安全具有重要的学术价值和实践意义。

## 5 研究趋向与发展前景

盐渍化农田土壤有机质较为缺乏,碳、氮、磷养分均有所下降,钾素含量丰富,但相较磷元素,盐渍化土壤中的养分与微生物代谢更易受到碳和氮的限制。随着盐渍化障碍增加,土壤碳氮限制程度也越明显<sup>[71]</sup>。因此,基于有机管理、氮素合理调控、钾素优化施用的综合改良措施研究在未来盐渍化土壤地力与产能提升方面有积极的意义。据统计,作为第一秸秆产量大国,我国每年农作物秸秆可收集资源量约为  $9 \times 10^8$  t,我国农业废弃物资源丰富,可利用潜力巨大<sup>[72]</sup>。同时有学者指出,农业废弃物制备的有机调理剂在维持盐渍化土壤健康方面具有重要潜力,并在推动可持续农业发展和环境保护方面发挥着关键作用<sup>[73]</sup>。盐渍化农田是重要的土地资源,我国具有农业利用前景的盐渍化农田面积约 670 万  $\text{hm}^2$ ,在增加耕地面积和保障重要农产品生产方面发挥着积极作用<sup>[74]</sup>,迫切需要加强盐渍化农田资源高效利用的理论与技术研究,推动盐渍化农田农业的高质量发展。同时,油料作物作为人们日常生活的重要部分,其生产也具有重要意义。在单一改良措施投入高、效益低、无机调理剂潜在风险不明确的背景下,利用农业废弃物资源,结合植物自身提取的物质重新组配出新型高效低成本土壤综合调理剂,并结合耐盐粮油兼用作物因地制宜、种养结合探索农业-人类-环境和谐共生的绿色、高效、新型改良治理模式,对降低改良治理成本、提高治理效果、促进盐渍化农田农业的健康可持续发展有着重要意义与广阔前景。

### 参考文献:

- [1] 王宏富,王爱萍. 农学概论[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2021.
- [2] Padalkar G, Mandlik R, Sudhakaran S, et al. Necessity and challenges for exploration of nutritional potential of staple-food grade soybean[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 117: 105093.
- [3] 孙泓希,任亮,王海新,等. 食用型花生外观和营养品质综合评价[J]. *中国油料作物学报*, 2023, 45(5): 907-915.
- [4] 施文华,严茂林,刘昌勇,等. 我国油料进口贸易的结构特征及对策分析[J]. *中国油脂*, 2023, 48(8): 1-8.
- [5] 方振,刘鹏凌. 我国三大油料作物产能提升的源泉[J]. *中国油料作物学报*, 2025, 47(2): 243-259.
- [6] 徐婷,柳延涛,王海江. 花生耐盐碱响应机制及缓解措施的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(16): 8-12.
- [7] Cao Y C, Zhang X C, Jia S H, et al. Genome-wide association among soybean accessions for the genetic basis of salinity-alkalinity tolerance during germination[J]. *Crop and Pasture Science*, 2021, 72(4): 255-267.
- [8] Shrivastava P, Kumar R. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2015, 22(2): 123-131.
- [9] Kumar Arora N, Fatima T, Mishra J, et al. Halo-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for improving productivity and remediation of saline soils[J]. *Journal of Advanced Research*, 2020, 26: 69-82.
- [10] 胡炎,杨帆,杨宁,等. 盐碱地资源分析及利用研究展望[J]. *土壤通报*, 2023, 54(2): 489-494.
- [11] Elmeknassi M, Elghali A, de Carvalho H W P, et al. A review of organic and inorganic amendments to treat saline-sodic soils: Emphasis on waste valorization for a circular economy approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 921: 171087.
- [12] 张璐,杨帆,王志春. 碱化对土壤性质和植物生理生态特征的影响[J]. *东北农业科学*, 2021, 46(2): 30-36.
- [13] 吕晓,徐慧,李丽,等. 盐碱地农业可持续利用及其评价[J]. *土壤*, 2012, 44(2): 203-207.
- [14] 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.
- [15] Stavi I, Thevs N, Priori S. Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 712831.
- [16] 王宇璇,李旭光,张弛,等. 植物修复盐碱地的作用机制[J]. *河北农业科学*, 2024, 28(6): 22-27.
- [17] 蔡海林,许丽娟,谢扬军,等. 烟田土壤调理剂的研究与应用现状[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(19): 6212-6213, 6271.
- [18] 张建鹏. 土壤调理剂配施有机肥对连作马铃薯土壤的改良效果[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(11): 219-226.
- [19] 白博文,刘善江,申俊峰,等. 土壤调理剂研发及应用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(3): 14-18.
- [20] 胡琛,屠春宝,胡山懿,等. 土壤调理剂对土壤和作物影响的研究进展[J]. *现代农业科技*, 2025(2): 147-151.
- [21] Otitoloju K. Effect of integrated use of soil conditioner with fertilizers on growth, chlorophyll content and yield of groundnut (*Arachis hypogea* L.)[J]. *Molecular Soil Biology*, 2014: 380-389.
- [22] 徐婷. 盐碱胁迫下花生生长发育及改良剂施用效果研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
- [23] 刘德福. 生物炭对盐碱化农田土壤微环境和大豆生长的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- [24] Li R, Sun B, Song M J, et al. Improvement of saline soil properties and *Brassica rapa* L. growth using biofertilizers[J]. *Sustainability*, 2024, 16(5): 2196.
- [25] 鹿鑫,赵敦厚,关法春,等. 复合菌剂添加对盐碱地大豆生长发育及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2022, 41(5): 588-593.

- [26] 李娜, 张峰举, 许兴, 等. 生物基磺酸盐改良剂对盐碱土的改良效果及油葵生长的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(10): 1478–1484.
- [27] Yang F, Wang Z C, Zhu W D, et al. Long-term effects of combining gypsuming with brackish ice irrigation on soil desalinization and crop growth in abandoned saline-sodic land[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, 67(14): 2033–2047.
- [28] 邹璐, 范秀华, 孙兆军, 等. 盐碱地施用脱硫石膏对土壤养分及油葵光合特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(4): 575–581.
- [29] 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 & Development, 2024, 35(10): 3330–3343.
- [30] 胡宇迪, 汪玉瑛, 刘玉学, 等. 不同来源生物炭与化肥减量配施对土壤养分、花生产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 105–111.
- [31] Wang W H, Shi F F, Du J Q, et al. Soil factors that contribute to the abundance and structure of the diazotrophic community and soybean growth, yield, and quality under biochar amendment[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2023, 10(1): 54.
- [32] Rashmi I, Meena B P, Rajendiran S, et al. Can gypsum and organic amendments achieve sustainability, productivity and maintain soil health under soybean-mustard cropping in sodic soils of western India[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 240: 106075.
- [33] 徐钰, 杨岩, 江丽华, 等. 土壤改良措施对盐碱地大豆产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(11): 86–89.
- [34] Wang J, Zhao A Q, Ma F, et al. Amendment of saline-alkaline soil with flue-gas desulfurization gypsum in the Yinchuan Plain, northwest China[J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8658.
- [35] 田荣荣, 王淑娟, 刘嘉, 等. 根区施用生物炭和脱硫石膏提高盐碱土壤质量及向日葵产量[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 148–157.
- [36] 董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化土壤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.
- [37] 赖虹雨, 吕德生, 朱艳, 等. 生物炭施加对微咸水滴灌棉田土壤水热盐及棉花生长的影响[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 326–338.
- [38] Ahmad Bhat S, Kuriqi A, Dar M U D, et al. Application of biochar for improving physical, chemical, and hydrological soil properties: A systematic review[J]. Sustainability, 2022, 14(17): 11104.
- [39] 郭彦钊, 巨秦伟, 于烽, 等. 枯草芽孢杆菌 hs032 对盐碱土理化性质及弥散能力的影响[J]. 土壤, 2024, 56(4): 807–816.
- [40] Kulikova N A, Volikov A B, Filippova O I, et al. Modified humic substances as soil conditioners: Laboratory and field trials[J]. Agronomy, 2021, 11(1): 150.
- [41] Chen Z J, Li Y, Hu M, et al. Soil aggregate stability helps construct a stable nitrogen fixation system in lignite-based amendment-driven saline-sodic soil remediation[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 240: 106090.
- [42] Song J S, Zhang H Y, Chang F D, et al. Subsurface organic amendment of a saline soil increases ecosystem multifunctionality and sunflower yield[J]. Science of the Total Environment, 2024, 917: 170276.
- [43] Fei Y H, She D L, Yi J, et al. Roles of soil amendments in the water and salt transport of coastal saline soils through regulation of microstructure[J]. Land Degradation & Development, 2024, 35(7): 2382–2394.
- [44] 董少文, 马淑花, 初莱, 等. 粉煤灰基土壤调理剂作用下盐碱土壤微观结构变化规律[J]. 过程工程学报, 2022, 22(3): 357–365.
- [45] 王德领, 诸葛玉平, 杨全刚, 等. 3 种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 20–27.
- [46] Li J, Yang Y Q. How do plants maintain pH and ion homeostasis under saline-alkali stress [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1217193.
- [47] Mao X X, Yang Y, Guan P B, et al. Remediation of organic amendments on soil salinization: Focusing on the relationship between soil salts and microbial communities[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 239: 113616.
- [48] 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.
- [49] Wang S J, Chen Q, Li Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 121: 82–92.
- [50] Zhang W C, Zhao Y G, Wang S J, et al. Soil salinity and sodicity changes after a one-time application of flue gas desulfurization gypsum to paddy fields[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(15): 4193–4202.
- [51] 吴洪生, 陈小青, 马文舟, 等. 磷石膏改良滨海盐土效果及对小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1077–1087.
- [52] An C C, Han F L, Li N, et al. Improving physical and chemical properties of saline soils with fly ash saline and alkaline amendment materials[J]. Sustainability, 2024, 16(8): 3216.
- [53] 韩剑宏, 刘泽霞, 张连科, 等. 环保酵素对盐碱土关键化学性质的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 126–131.
- [54] Chen H Y, Yu S T, Yu Z, et al. Phycoremediation potential of salt-tolerant microalgal species: Motion, metabolic characteristics, and their application for saline-alkali soil improvement in eco-farms[J]. Microorganisms, 2024, 12(4): 676.
- [55] 王勤礼, 闫芳, 陈璐, 等. 菌糠-凹凸复合盐碱地调理剂对盐碱地改良效果及玉米产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(18): 222–226.

- [56] 杨肖飞, 李望舒, 王树峰, 等. 木醋液配施生物炭对盐碱土壤理化特性和甜菜产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(5): 113–119.
- [57] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837–845.
- [58] Nawaz A, Qamar Z U, Marghoob M U, et al. Contribution of potassium solubilizing bacteria in improved potassium assimilation and cytosolic K(+)/Na(+) ratio in rice (*Oryza sativa* L.) under saline-sodic conditions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1196024.
- [59] Liu J, Fan Y F, Sun J Y, et al. Effects of straw return with potassium fertilizer on the stem lodging resistance, grain quality and yield of spring maize (*Zea mays* L.)[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 20307.
- [60] 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.
- [61] Xu J W, Abbas S, Xiu H F, et al. Effects of different materials on desalting and fertility of coastal saline soil in Zhejiang Province, China[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, 234(7): 407.
- [62] Wu L P, Wei C B, Zhang S R, et al. MgO-modified biochar increases phosphate retention and rice yields in saline-alkaline soil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 901–909.
- [63] 姜雪, 郭丽琢, 牛济军, 等. 不同改良剂对河西灌区盐碱地土壤肥力状况的改良效应[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 1086–1098.
- [64] 张宇航, 宋子岭, 孔涛, 等. 煤矸石对盐碱土壤理化性质的改良效果[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 195–204.
- [65] Khalid F, Rasheed Y, Asif K, et al. Plant biostimulants: Mechanisms and applications for enhancing plant resilience to abiotic stresses[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(4): 6641–6690.
- [66] 姜增明, 费云鹏, 陈佳, 等. 土壤调理剂在盐碱地改良中的作用[J]. 北方园艺, 2014(20): 174–177.
- [67] 李晨昱, 卢树昌, 王茜. 土壤调理剂在农业领域研究现状、问题及前景[J]. 北方园艺, 2018(14): 154–160.
- [68] 贾信, 任珩, 孙平安然, 等. 盐碱地综合治理的国际研究态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2025, 47(1): 9–23.
- [69] 侯殿保, 贺茂勇, 陈育刚, 等. 资源优化配置与循环经济在钾资源开发利用中的应用[J]. 化工进展, 2023, 42(6): 3197–3208.
- [70] 袁国懋, 卢树昌, 裴子萱, 等. 新型钾肥对鲜食玉米生长和钾素吸收利用与供应影响研究[J]. 天津农业科学, 2023, 29(6): 21–25.
- [71] 陈玉琪, 徐灵颖, 王志旺, 等. 不同盐渍化土壤养分-微生物生物量-胞外酶活的化学计量特征[J]. 土壤学报, 2025, 62(3): 811–824.
- [72] 周治. 我国农业秸秆高值化利用现状与困境分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(2): 9–16.
- [73] Sulok K M T, Ahmed O H, Khew C Y, et al. Chemical and biological characteristics of organic amendments produced from selected agro-wastes with potential for sustaining soil health: A laboratory assessment[J]. *Sustainability*, 2021, 13(9): 4919.
- [74] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力[J]. 科学, 2021, 73(6): 30–34.

(责任编辑: 毛小芳)