

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.01.003

黄晶, 孔亚丽, 徐青山, 等. 盐渍土壤特征及改良措施研究进展. 土壤, 2022, 54(1): 18–23.

盐渍土壤特征及改良措施研究进展^①

黄晶¹, 孔亚丽¹, 徐青山¹, 朱春权¹, 朱练峰¹, 曹小闯¹, 洪小智², 张均华^{1*}

(1 水稻生物学国家重点实验室, 中国水稻研究所, 杭州 310006; 2 蚌埠市亿丰生物有机肥有限公司, 安徽蚌埠 233300)

摘要: 全球盐渍土壤面积大、分布广, 且近年来在自然和人为因素等综合影响下, 土壤盐渍化进程加速。盐渍化对土壤环境以及作物生长发育造成严重不良影响, 盐渍土壤改良对改善土壤环境、提高作物生产力尤为重要。我国盐渍土壤占世界盐渍土壤面积近1/10, 盐渍土壤复垦和土壤盐渍化防治已成为我国农业可持续发展的当务之急。因此, 采取适当且具有成本优势的措施缓解盐渍土壤对作物生长的影响, 已成为我国农业技术发展的重要需求。本文总结了盐渍土壤特征, 从降盐措施、改良及培肥措施、生物应对措施3个方面综述了盐渍土壤改良途径, 为进一步开展盐渍土壤改良研究提供理论支撑。

关键词: 盐渍化; 土壤改良; 作物增产

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Progresses for Characteristics and Amelioration Measures of Saline Soil

HUANG Jing¹, KONG Yali¹, XU Qingshan¹, ZHU Chunquan¹, ZHU Lianfeng¹, CAO Xiaochuang¹, HONG Xiaozhi², ZHANG Junhua^{1*}

(1 China National Rice Research Institute, State Key Laboratory of Rice Biology, Hangzhou 310006, China; 2 Bengbu Yifeng Biological Organic Fertilizer Co., Ltd., Bengbu, Anhui 233300, China)

Abstract: Saline soil has a large area and wide distribution in the world. In recent years, the process of soil salinization has been accelerated under the comprehensive action of natural and man-made factors. Soil salinization has serious adverse effects on soil environment and crop growing. So the study of saline soil improvement is particularly important to improve soil environment and increase crop productivity. China's saline soil occupies nearly one tenth of the world's saline soil area. Reclamation of saline soil and prevention of soil salinization have become the top priority of agricultural sustainable development in China. Therefore, taking appropriate and cost-effective measures to alleviate the impact of saline soil on crop growth has become an important need for the development of agricultural technology in China. This paper summarizes the characteristics of saline soil. Then the improvement measures of salinized soil are summarized from three aspects: salt reduction measures, improvement and fertilization measures, biological response measures. This study hope to provide theoretical support for further research on salinized soil amelioration.

Key words: Soil salinization; Improvement of saline soil; Crop yield increase

据统计,全球受盐渍化影响的土壤面积高达9.54亿 hm²^[1]。澳大利亚及其周边地区盐渍土壤面积最大,亚洲中东部次之,南亚以及非洲北部等粮食产区均分布有不同程度的盐渍土壤。中国盐渍土壤面积约1亿 hm²,占世界盐渍土壤面积近1/10,其中现代盐渍土、残积盐渍土、潜在盐渍土各占37%、45%、18%;主要分布在新疆、青海、甘肃等西北干旱地区的低洼盆地和平原^[2]。此外,在辽东湾、渤海湾沿岸

以及包括台湾在内的岛屿沿岸也分布有滨海盐渍土壤^[3]。总体上,西北、华北、东北地区及沿海是我国盐渍土壤的主要集中分布地区^[4],且受地形、母质、气候、生物、时间等自然因素和不合理灌溉、过度施肥等人为活动因素的影响,盐渍土壤分布愈加广泛。在我国人口不断增长,耕地面积逐渐减少的情况下,对盐渍土壤加以改良利用潜力巨大,具有重要意义。

由于盐渍土壤成因复杂,各地盐渍土壤中水盐运

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200801)和国家自然科学基金项目(31872857, 31771733)资助。

* 通讯作者(zhangjunhua@caas.cn)

作者简介: 黄晶(1996—),女,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为盐渍土壤改良。E-mail: hj15163859612@163.com

动情况不同, 积盐返盐现象频发, 盐渍土壤改良已成为全球范围内亟待解决的难题。我国盐渍土改良研究迄今已有 70 多年历史, 仍尚未成功解决这一难题。从 20 世纪 50 年代开始^[5]到 20 世纪末, 研究一直处于缓慢平稳状态。进入 21 世纪以来, 盐渍土壤改良研究的关注度在起伏中升高。早期研究主要集中在盐渍土壤形成^[6]、特性和分布规律方面, 根据其形成机理和各地不同盐渍土壤特性初步提出改良盐渍土壤的措施; 发展盛期研究学者提出淡水洗盐、添加石灰、种植苜蓿等多种改良方法和措施。盐渍土壤改良研究由于其优势众多而广受关注, 其不仅对平衡水盐运动、修复生态环境具有良好效果, 还可以提高盐渍区作物生产力。但目前盐渍土壤改良研究较为分散, 尤其是一些创新性改良措施尚未进行系统归纳。本文总结了盐渍土壤特征, 从降盐措施、改良及培肥措施、生物应对措施 3 个方面综述了盐渍土壤改良途径, 并对盐渍土壤改良未来发展方向进行了展望, 以期对盐渍土壤改良进一步研究提供理论支持与技术支撑。

1 盐渍土壤特征

盐渍土壤主要特征首先表现为土体中盐分含量高, 总盐分含量与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 含量均为显著正相关关系^[7]。土壤盐分含量受多种因素综合影响, 发生机制和变化过程都极其复杂^[8], 各地盐渍区含盐量差异较大, 大部分属于轻度及中度盐渍土^[9]。河套灌区土壤含盐量的主要影响因素包括地下水埋深、排水量以及年蒸发量, 次要影响因素包括地下水矿化度、引水量以及降雨量等^[8]。黄河三角洲土壤盐分组成以氯化物为主^[10]。此外, 东北松嫩平原苏打盐渍土放牧草原剖面的可溶盐含量自下向上逐渐增多, 盐分表聚非常显著^[11]。在以 Na^{+} 、 Cl^{-} 为主的盐渍土中, 土壤表层及土体因积盐一般表现为白色或灰白色盐斑。

盐渍土壤特征其次表现为土壤肥力水平低, 且肥力水平低与盐分含量高紧密相关。土壤盐渍化不仅会直接导致土壤碳库大量损失, 也是造成碱解氮缺乏的重要原因。在河西走廊盐渍土壤中, 随盐渍化程度加深, 土壤有机碳和全氮含量显著降低^[12]。滨海盐渍化土壤还存在磷素有效性低的问题^[13]。新疆干旱区盐渍化弃耕地土壤有机碳和速效氮、磷含量呈正相关^[14]。盐渍土壤溶液离子浓度大、pH 高, 显著影响土壤微生物的活性和酶的活性, 进而影响土壤有机质的转化。例如土壤糖苷酶、几丁质酶、亮氨酸氨基肽酶、碱性磷酸酶、酚氧化酶和过氧化物酶等活性均

随盐浓度的增加呈逐渐降低趋势^[15]。土壤盐渍化抑制微生物驱动的土壤氮素矿化作用, 且在中度盐渍土(盐分含量 3 ~ 5 g/kg)中抑制作用显著^[16]。随盐分升高, 表观氨挥发损失率增大, 损失率随盐分在 1.1% ~ 15.8% 范围内变化^[17]。此外, 盐分可以直接抑制参与反硝化过程的微生物活性^[18], 盐分过高时, 反硝化过程完全终止。由此可见, 盐分通过影响微生物的活性间接影响土壤氮素矿化和转化, 进而使土壤氮素利用率下降。因此, 盐渍土壤的高盐分以及高 pH 影响土壤碳、氮的转化, 进而导致有机质含量和养分含量降低, 土壤肥力下降。

盐渍土壤特征还包括土壤耕性差。土壤盐渍化引起土壤板结、团粒结构破坏、孔隙结构低劣、透气性差、持水性能降低等次生障碍, 影响盐渍土壤耕性^[17]。尤其是苏打盐渍土中含有大量的黏土矿物^[19], 土体结构相对较为紧实, 孔隙度小, 透水透气性差, 因其交换性钠含量较高而具有极差的物理性质^[20]。盐渍土中水盐关系密切, 干旱缺水时土壤硬度变大, 结成块状; 湿润多水时土壤土粒分散, 体积变大, 质地黏重^[21], 土体耕性弱; 强降水时易发生地表径流和水土流失等自然灾害。

2 盐渍土壤改良措施

2.1 降盐措施

降盐措施主要分为工程降盐措施和农业降盐措施两部分。

工程降盐措施改良盐渍土壤主要根据土壤水盐运动的特点, 建设相关水利设施创造良好的排水条件, 将水引入盐渍土壤中, 使土壤表层的盐碱离子溶解后通过水的下渗作用进入排水沟或深层土壤, 进而降低表层土壤的盐分。因此工程降盐措施主要是通过淋水、灌水、排水等方式进行盐渍土洗盐、排盐。在宁夏、新疆等干旱缺水地区主要通过建设暗管, 同时辅以滴灌等其他措施排盐^[22]。刘虎俊等^[23]在河西走廊的盐渍化土地上建立明沟排水、井排和干排(植物)的排水系统, 辅以淡水洗盐、地表覆盖等技术取得良好降盐效果。该研究含盐量较高的地块(0 ~ 30 cm 土层含盐量 21.0 g/kg)经 4 ~ 5 次淡水洗盐后, 土壤盐分一般能够降到 8.0 g/kg 以下, 随后种植沙打旺等较耐盐植物或采用地面覆盖巩固淋盐成果, 该治理区盐渍土壤上粮食产量提高了 69.13%。可见, 在水利改良措施中, 淋洗技术是一项降低土壤盐分的实用技术。磁化水一般是指静置在磁场中或以一定流速经过磁场的水, 水磁化后性质发生改变, 可对盐离子产生

特殊淋洗作用。徐莉等^[24]通过田间小区试验证明,磁化水滴灌能有效增强对土壤盐分的淋洗作用,使土壤中的盐分含量降低 32.83%。

农业降盐措施主要针对土壤板结、养分低的盐渍土壤,采取一系列改善土壤结构、增加土壤含水量以及养分含量的措施,进而改善土壤环境,促进植物生长,主要包括深耕、平整、覆盖、施肥等措施。深耕可将土壤板结层打破,重塑土壤团粒结构,切断盐分上移,有效降低土壤容重,是改良结构紧实、渗透性差的苏打盐渍土的有效耕作方式^[25]。司振江^[26]的研究表明,经过深耕的土壤水分及盐分的运移速度更快,在相同的雨强、降雨历时下,垂直入渗的深度更深,更有利于土壤脱盐。在干旱地区,土壤水分蒸发与降水不平衡会加剧土壤盐渍化。土表不平造成积水,水分蒸发程度不同易形成盐斑,因此平整土地是改良盐渍土的有效措施。利用地膜、秸秆等覆盖地表可以有效保持盐渍土表层和根系层土壤水分,减少盐分积累,抑制盐分表聚,缓解水盐运动剧烈变化。秸秆覆盖+深埋处理可使 0~50 cm 表层土壤含盐量显著降低 52.77%^[27]。

降盐措施改良盐渍土壤优点在于见效快,土壤盐分含量降低显著,同时还可将农田秸秆等加以利用,减少秸秆焚烧,保护环境;缺点在于工程造价高,效益回报缓慢,推广需要较高经济条件。

2.2 改良及培肥措施

改良及培肥措施改善盐渍土壤的关键在于添加土壤改良剂及有机肥等。改良剂多具有膨胀、分散、黏着等特性^[25],能使分散的盐渍土壤颗粒聚结从而改变土壤的孔隙度,提高土壤通透性,改善土壤结构。改良剂种类众多,主要分为钙质改良剂、降碱改良剂和有机改良剂等不同类型。有机肥可以减少土壤对磷的固定,促进磷的形态转化,为作物提供有效磷源^[28]。有机肥代替化肥^[29]也是一种改良措施,张乃丹等^[30]在滨海盐渍土改良培肥中使用氮肥配施部分有机肥,并翻耕混匀,能够有效降低滨海盐渍土耕层盐分,提升耕层土壤的供氮能力。

钙质改良剂改良盐渍土壤机理主要是利用 Ca^{2+} 与 Na^+ 的交换作用,置换出 Na^+ , Na^+ 随水淋洗出土体,进而降低盐渍土壤 Na^+ 含量,促进植物正常生长。施用钙质改良剂,如磷石膏(PG)^[31]和脱硫石膏,降低了盐渍土壤 0~20 cm 土层中的交换性 Na^+ 含量(15.5% 和 24.9%)和钠的吸附比(SAR, 18.3% 和 27.9%)^[32]。张立力等^[33]研究表明,高镁镍渣(HMNS)和磷石膏等工业固体废弃物能够固化和改良盐渍淤

泥,其中磷石膏能够析出盐分,提高土壤团聚体含量,减少盐胀等危害。此外,利用脱硫石膏与废弃有机物料联合施用可显著改善盐渍土壤耕性。例如园林废弃物堆肥后与脱硫石膏混合施用,堆肥中的腐解酸与土壤碱性物质发生中和反应,降低土壤 pH,施加该改良剂后土壤 pH 由 8.61 降至 7.67,降幅为 10.9%^[34],该组合为城市固废的适宜处置方式和综合利用途径提供了参考。Murtaza 等^[35]通过 2 年的试验得出,在盐渍土上施用石膏需要量的 50% 还可以提高氮肥利用率。

降碱改良剂是能够直接中和盐渍土中碱性物质、降低土壤 pH 的一些酸性物质,如硫酸铝和腐植酸等。向苏打盐渍土中添加 20 g/kg 的硫酸铝后,土壤 pH 下降 2.55^[36];腐植酸配合生物质炭施用可使土壤 pH 降低 13.98%^[37],提升土壤氮素有效性^[38],但腐植酸在轻度盐渍土上的调控效果优于中度盐渍土^[39]。此外,黄腐酸处理盐渍土壤表层可降低土壤盐分、增强水稳性大团聚体含量和稳定性、提升有机碳含量,有效改善盐渍土壤结构及稳定性^[40]。高婧等^[41]在滨海盐渍土上的试验表明,施用高量黄腐酸处理较单施化肥处理土壤表层盐分降低 95%。

有机改良剂不仅可以改善土壤结构,培肥土壤,还可影响水溶性盐离子的运动,抑制水盐上移,促进土壤脱盐。生物质炭是一种障碍土壤的有机改良剂^[42-43],其良好的孔性结构能够吸附土壤中的有害物质,提高土壤孔隙度和导水率^[44],其中含有的丰富养分可以促进植株生长发育^[45]。生物质炭及脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂双氰胺(DCD)联合施用可以降低氮的表观损失,提高氮肥利用率^[46]。生物质炭浸提液能提高盐胁迫下水稻幼苗的抗氧化能力和对盐胁迫的耐受性,使水稻钾离子转运蛋白编码基因 *OsHAK7* 和 *OsHAK10* 的表达量分别提高 2.5 倍和 3.4 倍^[47]。此外,有机改良剂与无机改良剂配合施用可降低土壤盐分的同时,还可以提高土壤有机碳含量、土壤酶活性和微生物量,进而提高土壤肥力^[48]。

其他类型土壤改良剂仍有许多。如聚丙烯酰胺(PAM)等高分子聚合物因具有很强的黏聚作用,能够维持并且增加团聚体的数量^[49]。各种类型改良剂效果不同,可混合施用以达到取长补短的效果,加速盐渍土壤改良,提高土壤改良剂利用效率。如石膏和腐植酸质量配比 9:1 混合施用 3 000 kg/hm²,其可使 0~20 cm 土壤含盐量较对照下降 24.3%^[50]。

改良及培肥措施改善盐渍土壤优点在于改良剂

可来源于各类工业固体废弃物,同时施用有机肥等可在缓解环境压力的同时提高土壤肥力,缺点在于改良剂的施用具有一定经济成本,且效果不够持久,需长期施用。

2.3 生物应对措施

生物应对措施改良土壤盐渍化重点在于生物与土壤盐分的相互作用机制,主要包括恢复植被的种植和外源接种植物生长根际促生菌(PGPR)等有益微生物两种措施。

引进和种植恢复植被是生物改良利用盐渍土的重要措施之一。可在盐渍土壤上种植的植物须有一定耐盐碱能力。李青楠等^[51]在黑龙江筛选耐盐植物发现,草木犀、盐地碱蓬、怪柳、火炬树、狗牙根、狗尾草、虎尾草、芦苇和碱蒿可归为重度耐盐植物,可在可溶性盐含量 20 g/kg 以上的盐渍土中生长。其中,盐地碱蓬是滨海盐碱地生态系统群落演替中的先锋物种,也是植被建设的重要植物^[52]。这些耐盐碱的植物通常具有富集 Na^+ 和 Cl^- 的能力,能够降低土壤中盐离子含量,促进土壤脱盐。例如,盐生植物种植一个季度后,每季盐爪爪(*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.)从土壤中吸 Na^+ 量可达 9 345.6 kg/hm²,盐地碱蓬(*Suaeda salsa* (L.) Pall.)吸 Na^+ 量达 6 851.4 kg/hm²,西伯利亚白刺(*Nitraria sibirica* Pall.)、中亚滨藜(*Atriplex centralasiatica* Iljin)吸 Na^+ 量分别达 6 019.2、6 098.4 kg/hm²,可显著降低盐渍土壤 Na^+ 含量^[53]。此外,植物根系分泌的有机酸能够降低土壤 pH,活化土壤矿物钾及缓效钾转化成植株能够直接吸收利用的有效钾^[54],改善植物生长环境。

土壤微生物不仅参与土壤养分转化,还能在一定程度上缓解土壤因盐分含量高而产生的渗透胁迫,清除活性氧(ROS),对于盐渍土改良具有良好效果。PGPR 是指生活在根际土壤或依附于植物根系的有益细菌,部分 PGPR 可以分解土壤中难溶性矿物质,并将其转化为可被植物吸收利用的矿质元素形态,增加土壤中营养元素的可溶性^[55]。盐渍土壤中含量较高的 Na^+ 和 Cl^- 不仅本身对作物造成单盐毒害作用,还会干扰作物其他必需营养离子的吸收或代谢。 Na^+ 能够和 K^+ 竞争性结合酶的活性中心,从而抑制酶的活性^[56]。Bazihizina 等^[57]研究发现, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 与 Cl^- 由相同的非选择性阴离子转运体介导,过多的 Cl^- 占据转运体,有可能会阻碍氮、磷元素的吸收。此外,土壤中的高盐分导致土壤水势降低^[56],作物吸水困难,产生渗透胁迫,影响作物生长。盐胁迫下一些 PGPR 通过调控植物体内相关基因变化使植物体内

Na^+ 外排,降低植物体内 Na^+ 含量^[58]。PGPR 还可通过分泌脯氨酸、多糖、甘氨酸甜菜碱等渗透调节物质进而增强植物的盐碱抗性^[59]。此外,丛枝菌根真菌(AMF)是一种普遍存在于土壤中的有益微生物,能够与大多数植物根系形成共生关系,其共生关系在多种逆境生态系统中均具有重要生态意义。AMF 具有增加植物细胞内多种抗氧化酶活性的能力,以清除某一特定的 ROS,提高抗氧化能力。但是,长期处于高盐环境下,AMF 对植物的侵染能力被抑制,多种酶活性下降,导致 AMF 作用效果不显著,且抗氧化酶在植物器官中的差异调控机制还需要深入研究^[60]。除 PGPR 和 AMF 外,还有许多微生物可用于盐渍土改良,如将固氮蓝藻加入盐渍土壤,可以使土壤 pH 和交换性 Na^+ 含量显著下降,土壤有机质及氮含量提高^[61]。SQ21 是从海边土壤筛选出的一株耐高盐同时可高产有机酸的微生物,经形态学和 ITS-rDNA 鉴定确定其为一种黑曲霉, SQ21 菌丝体和所分泌的酸促进了土壤团聚体的形成,一定程度改变了土壤物理结构^[55]。另外,分离和筛选耐盐菌株并探讨其对不同种类农作物的促生作用,还可以为进一步研制耐盐微生物菌肥制剂提供理论基础和科学依据^[62]。

3 展望

虽然现已发现许多耐盐植物,但将盐渍土壤改良与粮食作物增强耐盐性以增产相结合仍有许多问题亟待解决。而粮食作物耐盐性能的研究与盐渍土本身环境条件的改善相辅相成。我国海水稻的发展是该方向的代表,海水稻是耐盐碱水稻的俗称,通常指耐盐度在 3~6 g/kg、耐碱度在 pH 9 以上的耐盐碱水稻品种。

盐渍土改良问题不仅在于现有盐渍土盐分含量的降低,还要预防次生盐渍化的发生。因此盐渍土监测预警是盐渍土改良的重要发展方向,如利用无人机多光谱遥感和 GF-1 卫星遥感获取图像数据,并同步采集土壤表层含盐量数据^[63],可实现土壤盐渍化的区域监测,且大大节省人工及时间,提高准确度。此外,盐渍土壤改良亟待解决的问题是规模化、系统化,现有盐渍土的改良在各个地区各自展开,且一般作为试验田进行改良,大片盐渍土不能得到开发利用。未来盐渍土改良需因地制宜,结合各地自然条件,根据土壤水盐运动规律,选择适合的工程措施(新型节水灌溉系统等),添加新型土壤改良剂,接种有益微生物,各种措施相结合,在不破坏生态环境的条件下进行统一管理,使盐渍土壤这一后备土地资源发挥其生产潜力,提高耕地利用率,提高作物产量,提升作物

品质,保障粮食安全。

参考文献:

- [1] Sun H J, Shi W M, Zhou M Y, et al. Effect of biochar on nitrogen use efficiency, grain yield and amino acid content of wheat cultivated on saline soil[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2019, 65(2): 83–89.
- [2] 徐攸在,等. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [3] 温利强. 我国盐渍土的成因及分布特征[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [4] 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.
- [5] 席承藩. 山东沿海盐土荒地的改良利用问题[J]. *土壤学报*, 1953(2): 77–87.
- [6] B.A.柯夫达, 吴均. 新疆盐渍土的发生及其改良原则[J]. *土壤*, 1958(2): 17–20.
- [7] 王颖, 刘会玲, 崔江慧, 等. 环渤海地区盐渍土养分及盐离子分布特征[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(1): 344–348, 356.
- [8] 常晓敏, 王少丽, 陈皓锐, 等. 河套灌区土壤盐分时空变化特征及影响因素[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(10): 1000–1005.
- [9] 周在明, 张光辉, 王金哲, 等. 环渤海微咸水区土壤盐分及盐渍化程度的空间格局[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 15–20, 385.
- [10] 朱伟, 杨劲松, 姚荣江, 等. 黄河三角洲中重度盐渍土棉田水盐运移规律研究[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 817–825.
- [11] 赵兰坡, 冯君, 王宇, 等. 不同利用方式的苏打盐渍土剖面盐分组成及分布特征[J]. *土壤学报*, 2011, 48(5): 904–911.
- [12] 王燕, 赵哈林, 董治宝, 等. 荒漠绿洲农田盐渍化过程中土壤有机碳和全氮变化特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 200–205.
- [13] 高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 调控措施对滨海盐渍土磷素形态及作物磷素吸收的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 691–698.
- [14] 闫靖华, 张风华, 李瑞玺, 等. 盐渍化弃耕地不同恢复模式下土壤有机碳及呼吸速率的变化[J]. *土壤*, 2013, 45(4): 661–665.
- [15] 王丽贤, 张小云, 吴森. 盐碱土改良措施综述[J]. *安徽农学通报(上半月刊)*, 2012, 18(17): 99–102.
- [16] 张慧敏. 不同盐碱胁迫对土壤氮素转化和氨氧化微生物的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
- [17] 梁飞, 田长彦. 土壤盐渍化对尿素与磷酸脲挥发的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 3999–4006.
- [18] 李红强, 姚荣江, 杨劲松, 等. 盐渍化对农田氮素转化过程的影响机制和增效调控途径[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3915–3924.
- [19] 孔元元. 镇赉盐渍土冻融条件下水热盐运移试验及结构演变研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [20] 杨洪涛, 安丰华, 张璐, 等. 不同改良措施对苏打盐渍土物理性质的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3416–3424.
- [21] 尹勤瑞. 盐碱化对土壤物理及水动力学性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [22] 陈名媛, 黄介生, 曾文治, 等. 外包土工布暗管排盐条件下水盐运移规律[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 130–139.
- [23] 刘虎俊, 王继和, 杨自辉, 等. 干旱区盐渍化土地工程治理技术研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(4): 329–333.
- [24] 徐莉, 唐金, 陈淑英. 不同磁化水处理下盐渍化土壤脱盐效果研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5): 211–217.
- [25] 张谦, 陈凤丹, 冯国艺, 等. 盐碱土改良利用措施综述[J]. *天津农业科学*, 2016, 22(8): 35–39.
- [26] 司振江. 盐碱化草原农业改良技术及水盐运动规律研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
- [27] 杨东. 秸秆还田模式对滨海盐渍土的改良效果研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [28] Yan Z J, Chen S, Dari B, et al. Phosphorus transformation response to soil properties changes induced by manure application in a calcareous soil[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 163–171.
- [29] 李玉, 田宪艺, 王振林, 等. 有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(6): 1173–1182.
- [30] 张乃丹, 宋付朋, 张喜琦, 等. 速缓效氮肥配施有机肥对滨海盐渍土供氮能力及小麦产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 337–344.
- [31] 张子璇, 牛蓓蓓, 李新举. 不同改良模式对滨海盐渍土土壤理化性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 275–284.
- [32] 张济世, 于波涛, 张金凤, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土土壤理化性质和小麦生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 704–711.
- [33] 张立力, 华苏东, 诸华军, 等. 高镁镍渣-磷石膏基胶凝材料固化和改良盐渍土的性能[J]. *材料导报*, 2020, 34(9): 9034–9040.
- [34] 贺坤, 童莉, 盛钗, 等. 烟气脱硫石膏和园林废弃物堆肥混合施用对滨海盐渍土壤的改良[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(2): 552–559.
- [35] Murtaza B, Murtaza G, Sabir M, et al. Amelioration of saline-sodic soil with gypsum can increase yield and nitrogen use efficiency in rice-wheat cropping system[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(9): 1267–1280.
- [36] 王宇, 韩兴, 赵兰坡. 硫酸铝对苏打盐碱土的改良作用研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 50–53.
- [37] 孙一博. 生物炭和腐殖酸联合修复盐碱土的研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- [38] Zhang J H, Bai Z G, Huang J, et al. Biochar alleviated the salt stress of induced saline paddy soil and improved the biochemical characteristics of rice seedlings differing in salt tolerance[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104372.
- [39] 高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1219–1229.

- [40] 马栗炎, 姚荣江, 杨劲松. 氮肥及黄腐酸对盐渍土有机碳和团聚体特征的调控作用[J]. 土壤, 2020, 52(1): 33–39.
- [41] 高婧, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对滨海重度盐渍土质量和肥料利用效率的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 524–529.
- [42] Sun J N, He F H, Shao H B, et al. Effects of biochar application on *Suaeda salsa* growth and saline soil properties[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 1–6.
- [43] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324–3333.
- [44] Saifullah, Dahlawi S, Naeem A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 320–335.
- [45] 刘城志. 生物炭缓解山定子盐胁迫的生理基础研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [46] 唐冲, 杨劲松, 姚荣江, 等. 生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对滨海盐渍土土壤盐分及作物氮素吸收利用的影响[J]. 土壤, 2021, 53(2): 291–298.
- [47] 甄晓溪, 徐凡, 蒋太英, 等. 生物炭浸提液对盐胁迫水稻幼苗生长的调节作用机制[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(4): 471–475.
- [48] 李婧男, 孙向阳, 李素艳. 有机无机改良剂对滨海盐渍化土壤酶活性和土壤微生物量的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 160–165.
- [49] Lentz R D. Polyacrylamide and biopolymer effects on flocculation, aggregate stability, and water seepage in a silt loam[J]. Geoderma, 2015, 241/242: 289–294.
- [50] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 石膏和腐植酸配施对干旱盐碱区土壤改良及棉花生长的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 327–332.
- [51] 李青楠, 穆丹, 梁英辉, 等. 大庆肇源县耐盐植物筛选与耐盐性研究[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(9): 42–46.
- [52] 杨策, 陈环宇, 李劲松, 等. 盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10): 1578–1586.
- [53] 赵可夫, 范海, 江行玉, 等. 盐生植物在盐渍土壤改良中的作用[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 31–35.
- [54] 韩助君. 烟草根系分泌有机酸对根际土壤速效钾的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- [55] 潘晶, 黄翠华, 彭飞, 等. 植物根际促生菌诱导植物耐盐促生作用机制[J]. 生物技术通报, 2020, 36(9): 75–87.
- [56] 赵瑞, 陈少良. 杨树耐盐性调控的离子平衡与活性氧平衡信号网络[J]. 中国科学: 生命科学, 2020, 50(2): 167–175.
- [57] Bazihizina N, Colmer T D, Cuin T A, et al. Friend or foe? Chloride patterning in halophytes[J]. Trends in Plant Science, 2019, 24(2): 142–151.
- [58] 刘少芳, 王若愚. 植物根际促生细菌提高植物耐盐性研究进展[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 1–12.
- [59] 姜焕焕, 王通, 陈娜, 等. 根际促生菌提高植物抗盐碱性的研究进展[J]. 生物技术通报, 2019, 35(10): 189–197.
- [60] 孙思淼, 常伟, 宋福强. 丛枝菌根真菌提高盐胁迫植物抗氧化机制的研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3589–3596.
- [61] 张巍. 固氮蓝藻在松嫩平原盐碱土生态修复中作用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [62] 陈丽洁, 苏品, 张卓, 等. 一株耐盐类球红细菌的分离鉴定及其对不同作物的促生作用[J]. 南方农业学报, 2019, 50(5): 964–973.
- [63] 陈俊英, 王新涛, 张智韬, 等. 基于无人机-卫星遥感升尺度的土壤盐渍化监测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 161–169.