

我国滨海盐碱地改良技术综述及案例研究

吕 航, 赵 月, 龚绪龙, 万佳俊, 郭 慧, 许书刚

Review of techniques and case studies for saline-alkali land amelioration in the coastal regions of China

LYU Hang, ZHAO Yue, GONG Xulong, WAN Jiajun, GUO Hui, and XU Shugang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202407052>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

旱区湿地周边盐渍化农田生态水位阈值与“水位-水量”双控技术

Threshold value of ecological water table and dual control technology of the water table and its quantity in the salinized farmland around wetland in arid areas

刘鹏飞, 张光辉, 崔尚进, 刘少玉, 聂振龙 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 42-51

基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究

An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique

何攀, 许强, 刘佳良, 蒲川豪, 陈达, 赵宽耀 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 142-149

荒漠-湿地生态系统区盐渍土特征及空间变异性

Characteristics and spatial variability of saline soil in desert-wet ecosystem area, Gansu Province, China

魏玉涛, 刘德玉, 张伟, 喻生波, 吴耀坤 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 183-190

冻融作用下纤维加筋固化盐渍土的抗压性能与微观结构

Compressive properties and microstructure of saline soil added fiber and lime under freezing-thawing cycles

柴寿喜, 张琳, 魏丽, 田萌萌 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 96-105

内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究

Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia

高萌萌, 刘琼, 王轶, 李小磊, 石鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 175-182

吉林省西部潜水资源与生态环境风险分析

Assessment of resources and ecological risks induced by groundwater utilization in the unconfined aquifer in the western Jilin Province: A case study in the Taoer River catchment

查恩爽, 肖霄 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 36-43



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202407052

吕航, 赵月, 龚绪龙, 等. 我国滨海盐碱地改良技术综述及案例研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 25-43.

LYU Hang, ZHAO Yue, GONG Xulong, et al. Review of techniques and case studies for saline-alkali land amelioration in the coastal regions of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 25-43.

我国滨海盐碱地改良技术综述及案例研究

吕 航^{1,2,3}, 赵 月^{1,2,3}, 龚绪龙^{4,5}, 万佳俊^{4,5}, 郭 慧^{4,5}, 许书刚^{4,5}

(1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021; 2. 吉林大学水资源与环境研究所, 吉林 长春 130021; 3. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130021; 4. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210049; 5. 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京 210049)

摘要: 土壤盐碱化是农业生产和生态环境建设面临的重大问题之一。随着我国滨海地区的快速发展, 土地资源愈发紧缺, 改良利用滨海盐碱地的需求日益迫切, 相关研究成果不断丰富。然而, 现有针对滨海盐碱地改良技术的综述研究多以物理、化学等基于学科的分类方式划分改良技术, 难以指导实际工程中改良技术的选择和应用。因此, 文章旨在系统梳理现有滨海盐碱地改良技术, 总结更易于实践的技术分类方式, 以指导实际工程应用。文章通过系统收集和筛选我国滨海盐碱地改良相关研究文献, 综合对比和总结不同改良技术的优劣性及适用范围, 依据其调控改良目标进行技术分类, 并选取不同条件下高效改良方案进行案例分析。研究结果表明: (1) 滨海盐碱地主要成因为成土盐分高、土壤理化性质差、毛细返盐作用强; (2) 滨海盐碱地改良技术可根据调控改良目标划分为淋滤除盐技术、土壤理化性质改良技术、抑制返盐技术、生物改良技术四类; (3) 淋滤除盐与土壤理化性质改良技术在滨海地区应用最广泛, 抑制返盐技术多用于高盐地区, 生物改良技术应根据盐分水平的不同选择适宜的植物品种, 在轻度盐碱化土壤中, 适宜种植耐盐作物从而兼顾生态与经济效益。基于对改良技术的总结分析, 文章提出了滨海盐碱地针对性改良技术体系构建、滨海盐碱土改良过程中水资源的高效与安全利用、加强多学科交叉的滨海盐碱地改良技术方法研究及滨海盐碱地改良的长效性管理等研究方向, 以期对滨海盐碱地的高效治理及可持续利用提供参考。

关键词: 滨海盐碱地; 土壤盐碱化; 脱盐技术; 改良策略; 水盐调控

中图分类号: X141

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0025-19

Review of techniques and case studies for saline-alkali land amelioration in the coastal regions of China

LYU Hang^{1,2,3}, ZHAO Yue^{1,2,3}, GONG Xulong^{4,5}, WAN Jiajun^{4,5}, GUO Hui^{4,5}, XU Shugang^{4,5}

(1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 2. Institute of Water Resources and Environment, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 3. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 4. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210049, China; 5. Key Laboratory of Earth Fissure Geological Disaster, Ministry of Natural Resources, Nanjing, Jiangsu 210049, China)

Abstract: Soil salinization is one of the major challenges in agricultural production and ecological development. With the rapid development of China's coastal areas, land resources are becoming increasingly scarce, creating an

收稿日期: 2024-07-27; 修订日期: 2024-11-08

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 江苏省矿地融合试点项目(苏财资环[2022]19号); 江苏省地质勘查项目(苏财资环[2022]27号; 苏财资环[2023]30号)

第一作者: 吕航(1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下水土有毒有害物质的迁移转化研究。E-mail: lvhangmail@163.com

urgent need for the improvement and utilization of coastal saline-alkali land. Research findings in this area are continually expanding. However, most existing reviews of coastal saline-alkali land improvement technologies are classified based on disciplines such as physics and chemistry, which limits their guidance on technology selection and application in practical engineering. Therefore, this paper aims to systematically review current coastal saline-alkali land improvement technologies and summarize classification methods that are more practical for guiding real-world engineering applications. This paper systematically collected and screened relevant literature on the improvement of coastal saline-alkali land in China, comprehensively compared and summarized the advantages, disadvantages, and application scopes of various improvement technologies, categorized these technologies according to their regulatory and improvement objectives, and selected efficient improvement schemes under different conditions for case analysis. The findings indicate that: (1) The primary causes of coastal saline-alkali land are high soil salinity, poor physical and chemical properties of the soil, and strong capillary rise of salts. (2) Coastal saline-alkali land improvement technologies can be divided into four categories based on regulatory and improvement objectives: leaching and desalination technology, soil physical and chemical properties improvement technology, salt rise inhibition technology, and biological improvement technology. (3) Leaching and desalination, as well as soil physical and chemical properties improvement, are the most widely applied technologies in coastal areas. Salt rise inhibition technology is mainly used in areas with high salinity, while biological improvement technology involves selecting suitable plant varieties according to different salt levels. In mildly salinized soil, planting salt-tolerant crops can balance ecological and economic benefits. Based on the summary and analysis of improvement technologies, this paper proposes research directions for constructing targeted improvement technology systems for coastal saline-alkali land, ensuring efficient and safe utilization of water resources during the amelioration process, strengthening interdisciplinary research on improvement techniques, and establishing long-term management practices. These insights aim to provide basic information for efficient management and sustainable use of coastal saline-alkali land.

Keywords: coastal saline-alkali land; soil salinization; desalination technology; amelioration strategy; water and salt regulation

土壤对人类的生存至关重要,它关系到粮食安全、生物多样性、淡水管理等多个关键问题^[1]。然而,全球可用的土地资源正在逐步减少,而土壤盐碱化是导致这一问题的主要原因之一^[2]。据统计,全球受到盐碱化威胁的土壤面积约为 $1 \times 10^9 \text{ hm}^2$,约占地球陆地表面的 7%,影响着全球 10% 的耕地;其中,次生盐碱化土壤的面积 $4.5 \times 10^7 \sim 8.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占有灌溉土地的 20%~30%,且约一半位于中国、美国、印度和巴基斯坦等 4 个国家。此外,由于不当的灌溉措施以及海平面上升等原因,目前盐碱化土壤的面积正以每年 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的速度持续增加^[3]。作为世界性的生态环境问题,土壤盐碱化会导致农业作物减产、土壤结构退化、水资源利用效率降低、生态多样性减少及建筑结构腐蚀等问题,造成严重的环境风险与生态危害^[4-5]。联合国粮农组织将 2021 年世界土壤日的主题定为“遏止土壤盐碱化,提高土壤生产力”,也体现了土壤盐碱化问题的严重性和解决这一问题的紧迫性。

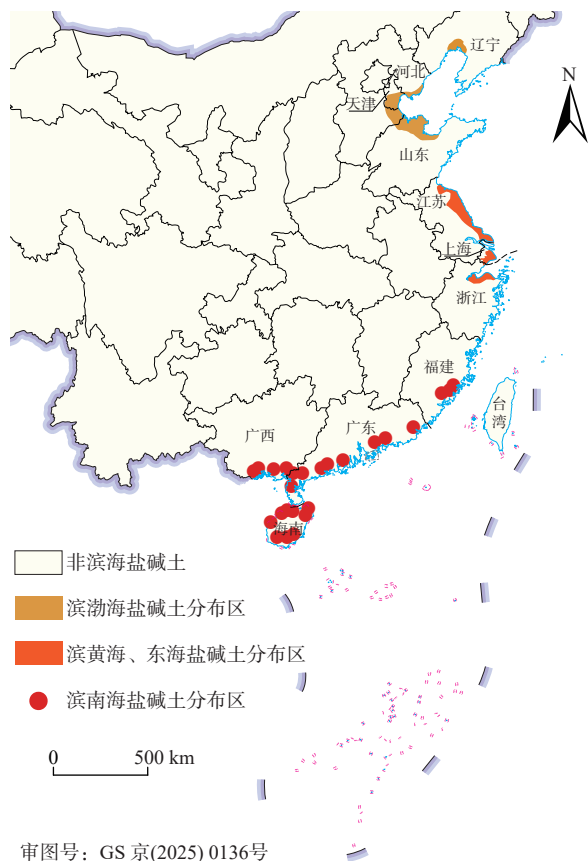
我国是世界上受土壤盐碱化危害最严重的国家之一,盐碱地分布广泛,类型多样。我国高度重视盐碱化土壤资源,指出盐碱地利用对保障国家粮食安全、改善生态环境具有重要意义,多次强调要加强盐碱地的综合利用^[6-7]。而在我国众多的盐碱地类型之中,滨海盐碱地因其主要分布于东南滨海等经济发达地区且资源丰富而具备较大的开发潜力,是我国最主要的盐碱地类型之一,总面积接近 $7 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[8]。滨海盐碱地作为潜在的土地资源,对其进行科学有效的改良利用,对滨海地区粮食安全、生态环境建设与经济发展等具有重要意义^[9]。

近年来,关于盐碱地改良措施的研究成为土地资源开发领域的重点^[10]。针对该类研究进行综述有助于总结现有成果、问题与趋势,也可响应国家科技引领、因地制宜等盐碱地综合利用方略^[11]。滨海盐碱土是我国盐碱地攻坚工作中的重要组成部分,相关成果较多。然而,缺乏系统性的基于水文地质角度的改良

技术机理总结,且现有研究多以物理、化学等基于学科的方式划分改良技术,难以体现实际应用中改良技术选择的依据。因此,本文基于我国滨海盐碱地的形成原因、系统整理并分析了现有改良技术及具体案例,从水文地质角度挖掘改良技术的优缺点,梳理出适合我国滨海地区的盐碱地改良的核心模式,同时结合我国滨海盐碱地治理现状及需求,提出了未来我国滨海盐碱地改良的研究方向,以期为我国滨海盐碱地的高效改良利用及改良技术的进一步研究提供参考。

1 我国滨海盐碱地的分布与成因

滨海盐碱地多位于泥质海岸带,地貌类型以三角洲、滩涂为主^[12]。而我国拥有着辽阔的海域与长达 3.2×10^4 km 的广袤海岸线^[13],滨海盐碱地区分布极为广泛,纬度跨度大,气候、地质等条件差异明显,也因此塑造出了具有不同特征的盐碱土壤分布区,从北至南总体可分为如下三类(图 1,原图绘于 1979 年,主要参照 1956—1968 年间的多次考察、调查资料^[14])。



审图号: GS 京(2025) 0136号

图 1 我国滨海盐碱土分布图(据王遵亲等^[14],作者进行了重绘)

Fig. 1 Distribution of coastal saline-alkali soil in China (redrawn by the author based on WANG Zunqin et al^[14])

(1)滨渤海盐碱土分布区:该区块分布于我国辽宁、河北、天津及山东四省市,存在大片淤泥质滨海平原,土壤及地下水盐分含量总体上由内陆向海岸逐渐增加,盐分组成大多以氯化物为主,部分地区土壤中存在苏打。区块位于暖温带半湿润季风气候区^[15],年降水量为 550~650 mm,仅为蒸发量的 1/3^[16],且近 70% 的降水集中于夏季,因此雨季脱盐、春秋季节积盐的特征显著。

(2)滨黄海、东海盐碱土分布区:该区块分布于我国江苏、浙江及上海三省市,海岸淤泥质土壤较多,土壤盐分及地下水总溶解固体空间变化规律与滨渤海地区类似,由内陆向海岸逐渐增加,盐分组成以氯化物为主。位于暖温带湿润季风及亚热带季风气候区,年降水量为 900~1 400 mm,与蒸发量较为接近^[17-18]。

(3)滨南海盐碱土分布区:该区块主要分布于我国福建、广东、广西及海南四省,多石质海岸,海岸线曲折,盐碱土分布零散,盐分组成以氯化物、酸性硫酸盐为主。区块位于热带季风及亚热带季风气候区,年降水量超 1 600 mm,大于蒸发量,自然淋洗较强。

滨海各地区盐碱土的主要形成机制较为相似(图 2)。首先,滨海盐碱土的成土母质多为海相与河相的沉积物,长期受潮汐作用影响,被海水浸渍,导致滨海盐碱土在形成之初往往就有较高盐分积累^[19]。其次,地下水中的矿物质也是滨海盐碱土主要的盐分来源。滨海地区浅层地下水易受海水影响而具有较高的含盐量^[20],加之滨海地区普遍地形平坦,地下水埋深较浅^[21],在旱季强烈蒸发作用下,毛细水易带动盐分迁移至土壤表面,导致盐分在土壤表层积聚^[22]。此外,由于滨海盐碱土壤大多质地黏重,水盐运移速率较低^[23],导致降雨又难以将根区土壤的盐分充分淋滤,造成了土壤盐分的持续累积。除以上自然原因外,人类活动也会加剧土壤盐碱化。例如,在灌溉时使用咸水过多或未设排水设施,会使地下水与土壤中盐分积累,引发次生盐碱化^[24]。而当沿海地区过度开采浅层地下水时,会使地下淡水-咸水界面向内陆迁移,促使地下咸水的横向与垂向输送,导致更广泛、更严重的土壤盐碱化^[25]。

不同类型滨海盐碱土虽成因相似,但仍有区别(图 2)。例如,在滨南海地区,由于红树林生态系统具有丰富的有机质、硫酸根及铁源,导致硫铁矿富积并被氧化成硫酸,从而形成了酸性硫酸盐土^[26]。此外,气候因素对不同滨海盐碱土分布区的影响也有差异。各区域不同的降雨、蒸发条件,会显著影响地下水埋

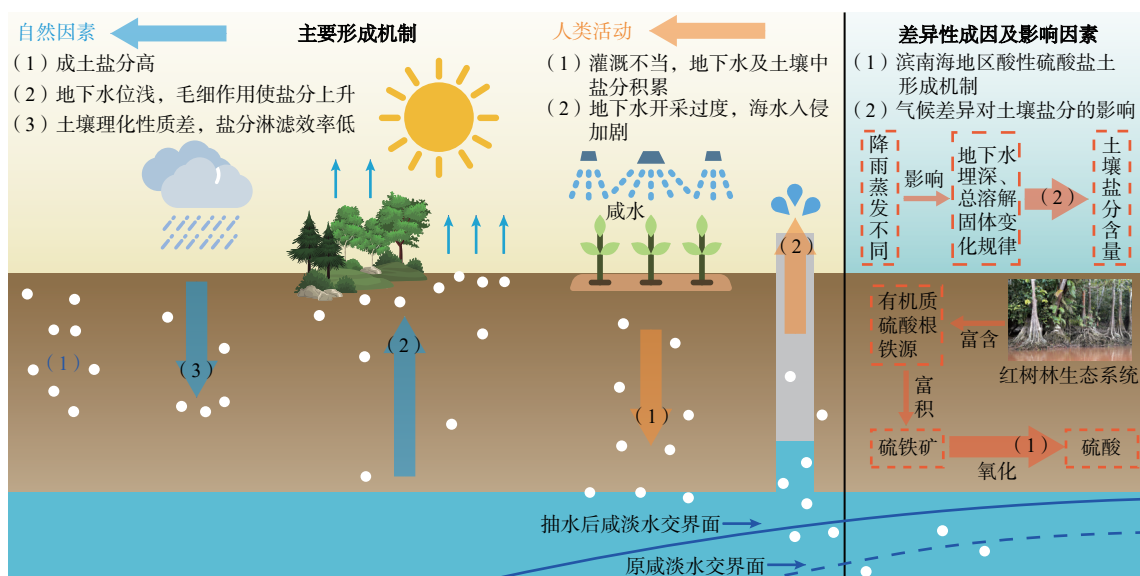


图 2 我国滨海盐碱土成因示意图

Fig. 2 Principle diagram of the causes of coastal saline-alkali soil in China

深与总溶解固体的变化规律, 从而影响土壤盐分含量^[27]。总体而言, 由南至北, 蒸降比逐渐升高, 土壤盐碱化程度逐渐加重, 地下水及土壤盐分含量的年内变化也更剧烈^[14]。

2 滨海盐碱地改良技术总结

有效改良盐碱地需要因地制宜, 开展针对性的治理工作^[28]。本文根据前文所述滨海盐碱地的三个主要自然成因: 成土盐分高、土壤理化性质差、地下水埋深浅且毛细返盐作用强及其对应的调控改良目标, 将滨海地区盐碱地改良技术划分为淋滤除盐技术、

土壤理化性质改良技术及抑制返盐技术三类。此外, 盐碱地改良通过降低盐分来支持植物生长, 而对于耐盐植被及微生物的研究也为盐碱地改良提供了解决方案, 故本文将生物改良技术作为第四类技术加以总结。

2.1 淋滤除盐技术

对于表土含盐量高的滨海地区来说, 淋滤是去除土壤盐分、恢复土壤生态功能的重要策略^[29]。淋滤除盐技术即通过灌排措施的应用调控土壤水盐运移, 去除土壤盐分, 在滨海盐碱地的治理过程中应用广泛 (图 3)。

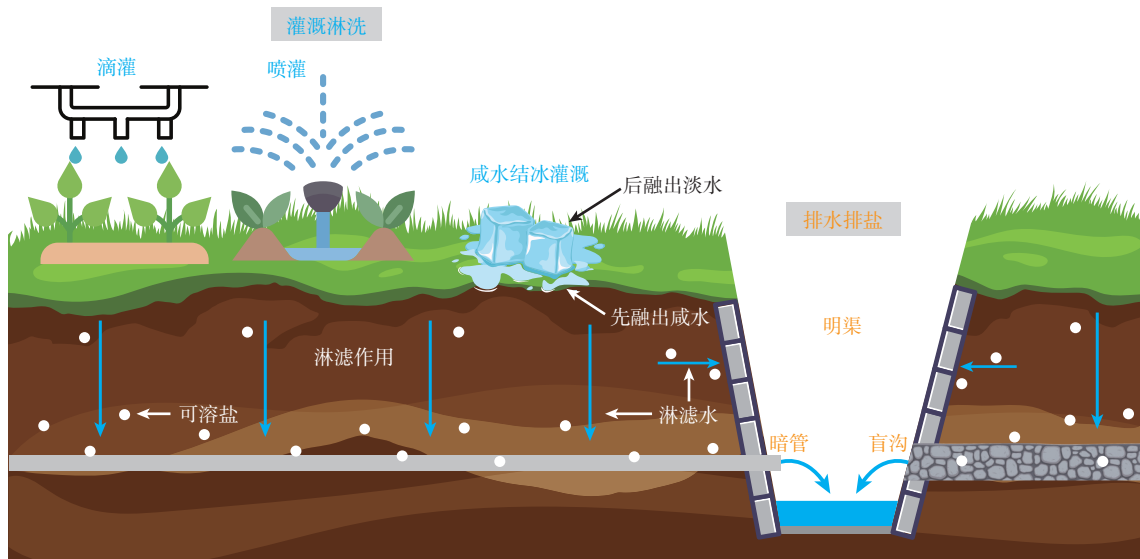


图 3 淋滤除盐技术原理示意图

Fig. 3 Principle diagram of leaching and desalination technology

2.1.1 技术优劣势及适用范围

受滨海地区气候与土质所限,自然条件下,土壤盐分常难以充分浸出。因此,在改良盐碱土壤时,人工灌溉淋洗常是必要的措施^[30]。使用淡水可以有效淋洗掉土壤中的盐分,但是沿海地区往往淡水资源较紧缺,因此高效的淋盐策略至关重要。例如,相对于连续淋洗,间歇淋洗具有更佳的节水潜力,在淋洗黏性土壤时可以有效节水^[31];微喷灌能高精度施用水分与养分,可以使用较少的水分将盐分淋滤至深层土壤中^[32];滴灌具备流量小、频率高的特点,也可高效地降低植物根区土壤盐分^[33]。部分滨海盐碱化地区淡水短缺,但地下咸水资源丰富,在灌溉淋洗时可用微咸水替代淡水或与淡水轮替^[34-35]。此外,也可以采取咸水结冰灌溉技术,即在冬季对盐碱地进行结冰灌溉,待到春季盐冰会先融出高盐度水,而后融化出微咸水和淡水^[36],从而有效淋滤表层土壤盐分,为作物出苗和植物生长创造相对低盐的土壤条件^[37]。

咸水灌溉提供了一种资源紧缺情况下兼具实用性和创新性的解决方案,但也可能产生不利影响。咸水会向地下水与土壤中输入额外的盐分,在排水较差的地区会造成盐分的积累^[38],若地下水位过浅,盐分又会随着毛细水再次向地表迁移^[39]。因此,灌溉淋洗时常需配合布设排水排盐装置,以起到排出淋滤水、控制地下水位的作用。如 Gao 等^[40]发现,采用地下排水措施时,连续两年采用盐分含量为 6 g/L 的咸水灌溉盐碱土,土壤并未发生盐分积累,且作物产量为未灌溉情况下的 1.5 倍以上。咸水灌溉过程中的排水排盐措施主要包括地上的渠道以及地下的暗管、盲沟等。其中,地上渠道是一种通过挖掘开放渠道来排涝降渍的方法,技术简单且生态效应好,旱季时还可储水灌溉^[41],但是地上渠道也有着占用土地资源、边坡不稳定等缺点^[42]。而地下排水则不会占用土地,常用措施有鼠洞排水、盲沟、暗管等^[43]。总之,不同的地下水埋深和地下水流动路径对盐分的迁移及排出影响重大。对于地下水埋深较浅的地区,需将排水系统作为改良的基础,确保土壤中水盐运移方向以下行为主,从而降低盐分随毛细水上升的风险。

2.1.2 技术局限性及研究建议

淋滤除盐技术原理简单、效果显著,但其在滨海地区的大规模应用仍面临着诸多挑战。首先,淋滤除盐技术的应用受到水资源的限制,在淡水缺乏地区采用咸水灌溉有可能会导导致盐水渗入地下水,从而发生返盐现象并引发次生盐碱化问题^[44],而即便是在淡水

资源尚且充足地区,不合理的灌溉策略也会造成水资源的浪费,威胁到淡水资源的可持续性利用。此外,排水装置的建设和维护成本高昂,在大规模应用时会产生较大的经济负担,且排水装置所排出的水中可能含有农药、化肥等污染物,这会增加环境污染的风险^[44]。

针对上述问题,未来的研究应加强对水资源的高效利用,如通过开发高精度、低成本传感器实时监测土壤水盐动态,结合云计算等技术相应调整淋滤或灌溉策略,有效利用自然降水资源,提高排盐效率;同时应从经济性及环保性两方面改进排水装置,如针对暗管技术研发成本更低的管材与智能化铺设装置,采取控制排水策略减少养分淋失,或将排水技术与废水处理技术结合,以增强淋滤除盐技术的可持续性。

2.2 土壤理化性质改良技术

淋滤除盐是改良滨海盐碱地的重要技术,可以去除土壤盐分。然而,由于滨海盐碱土壤的物理性质差,渗透性低,盐分的淋出受到了严重的限制^[45]。同时,滨海盐碱土的化学性质也不佳,其高盐分、低肥力的特征使得植物生长受限,破坏了土壤的生态功能^[46]。此外,滨海盐碱土中高浓度的氯离子侵入钢筋混凝土还会腐蚀钢材,损坏建筑结构,破坏土壤的非生态功能^[47]。因此,需要采用适当的措施改良滨海盐碱土的理化性质,以增强其盐分浸出能力并消减生态与非生态危害(图 4)。

2.2.1 技术优劣势及适用范围

使用理化性质较好的客土替代原有的盐碱土壤能够在短期内达到改良效果,显著降低土壤含盐量并增加土壤有机质^[48]。但是客土的来源少、成本高,采集过程还可能破坏来源地生态,而且受滨海盐碱化地区的气候、水文条件的影响,客土也易发生盐分积累,造成改良的可持续性差。因此,客土改良法难以作为优先的土壤理化性质改良方式而被广泛应用^[49]。

针对原土的改良方法包括土壤旋耕与添加改良剂等。其中,土壤旋耕通过改变土壤的物理结构影响水盐运移,调节土壤优势流和水分入渗速率,从而促进盐分浸出^[49]。但是,由于土壤的水盐运移直接决定了水分与盐分在土壤中的分布和积累,不当的旋耕方式如浅而频繁的旋耕反而会起反作用,导致表层土壤的蒸发量增加、含水率降低^[50]。目前较为常用的旋耕方式为粉垄耕作及立式深旋耕,二者都可作用于较深层的土壤,增加土壤渗透性,进而增强水盐运移效率^[51-52]。在实际应用中,还需结合水文地质条件等因素优化旋耕深度、频率等参数,以确保旋耕后创造出

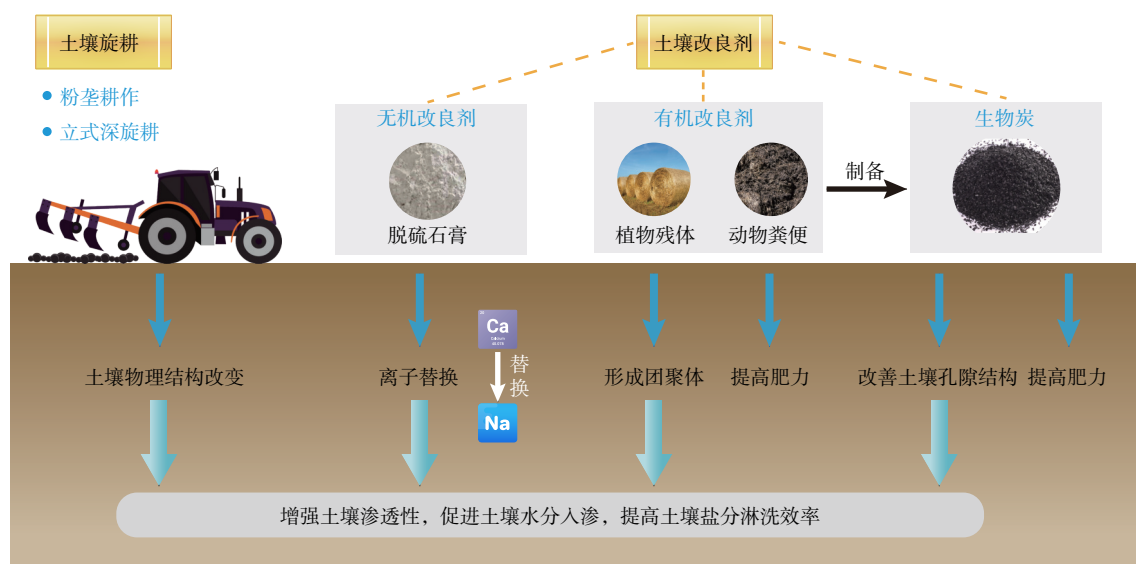


图 4 土壤理化性质改良技术原理示意图

Fig. 4 Principle diagram of poor soil physical and chemical properties technology

适当的土壤水盐运移条件。

添加土壤改良剂是滨海地区常用的盐碱土壤理化性质改良方法,而土壤改良剂又分为无机与有机两类。其中,无机改良剂主要包括钙基改良剂(石膏、脱硫石膏等)、酸性盐及砂砾等,这些改良剂通过离子替换、酸碱中和等化学反应及对土壤孔隙结构的改变来改善盐碱土壤理化性质^[53-54]。在滨海地区,由于盐碱土的盐分以氯化钠为主,因此能够用 Ca^{2+} 替代 Na^{+} ,从而增加土壤的渗透性与盐分浸出效率的钙基改良剂应用最广泛^[55],但是钙基改良剂的过度使用有增加盐分和重金属积累的风险^[56]。除无机改良剂外,利用植物残体、动物粪便等土壤有机改良剂改良盐碱土壤也是一种被广泛采用的方法^[57]。这种方法主要利用有机质改善盐碱土壤理化性质的能力^[58]。首先,有机质具有胶体特性与吸附能力,可以黏合土壤颗粒形成团聚体,从而改善土壤的渗透性^[59];此外,有机质也可以提高土壤肥力,并增强土壤对酸碱的缓冲能力^[60]。但是部分有机改良剂(如粪肥)在应用过程中存在着污染地下水的风险,在应用时需注意避免肥料对环境产生的二次污染。此外,有机改良剂与无机改良剂合理的混合施加有助于进一步改善土壤理化性质^[61]。例如,相对于单独添加腐殖酸,脱硫石膏与腐殖酸的混用可以更显著地提高土壤渗透性,促进盐分淋滤,并降低土壤 pH 值^[62]。但是并非所有的改良剂混合方案均会对盐碱土壤产生更佳的改良效果,如相对于单独添加腐殖酸,腐殖酸与膨润土混用并未更显著降低盐碱土 Na^{+} 含量,甚至一定程度上抑制了土壤渗透性^[63]。因

此,在混合施加改良剂时,应根据具体情况选择合适的土壤改良剂种类并确定其搭配比例,不可盲目混用。

目前,使用生物炭改良盐碱土壤理化性质成为了盐碱土改良的研究热点,诸多研究表明生物炭能有效改良盐碱土壤的理化性质并促进植物生长^[64]。例如,Wang 等^[65]统计了 99 篇相关文献的成果发现生物炭的施加能够改善土壤孔隙结构,创造有利于盐分淋失的导水通道,增强土壤渗透性与土壤水盐运移效率,从而促进盐分淋滤;同时,Cui 等^[66]通过盆栽试验得出结论,生物炭可以改善滨海盐碱土的土壤肥力,增强酶活性与植物吸收养分能力,从而促进植物生长,且相较于未添加生物炭的对照组,添加生物炭后大麻草的总生物量提高了 114%。但是利用生物炭改良盐碱土壤的研究目前仍然存在一些问题,如虽然许多研究提出生物炭在改良盐碱土壤时有多方面积极影响,但研究多以盆栽或小规模试验田为主,缺乏田间试验等大尺度研究,难以反映实际田间复杂的水盐运移、微气候变化等,不能代表大规模应用的真实效果;而且,生物炭改良盐碱地存在不确定性,如生物炭本身多呈碱性,不会改善土壤 pH 值,然而少量研究发现施用生物炭可降低土壤 pH 值 1.8%~11.4%^[67];此外,生物炭、盐碱土壤和作物之间的互相作用机制等基础理论问题仍需进一步系统研究。

2.2.2 技术局限性及研究建议

土壤理化性质改良可快速改善土壤条件,提高土壤的可耕作性与生产力,而其面临的主要问题为改良效果的长效性不足及潜在的环境污染^[68]。此外,添加

土壤改良剂的核心目标在于改善土壤渗透性,促进水盐下渗,但不同的水文地质条件及土壤改良剂特性会导致土壤渗透性的改良效果差异巨大^[69]。因此,未来的研究应重点关注土壤理化性质改良技术的持久效果和环保性,需对应用现有改良技术后的盐碱土壤进行长期监测并开展安全性评价,同时研发生态友好的新型滨海盐碱土壤改良剂;其次,考虑到该技术在材料使用上的多样性,以及不同改良剂之间改良效果的差异性,建议构建滨海盐碱地理化性质改良数据库。例如,未来研究可针对滨海不同盐碱地区水文地质条

件及资源状况,以就地取材为原则,推荐相应的土壤改良剂,从而提高土壤改良的经济效益与可持续性。

2.3 抑制返盐技术

滨海盐碱化地区具备地下水埋深浅、蒸发强烈、毛细作用强等特点,因此盐分易随毛细水迁移至地表,常导致淋滤脱盐后的土壤再次发生盐分积累^[70]。为确保盐碱地改良的长效性,滨海盐碱化地区的返盐现象需通过技术手段加以抑制,目前主要的抑制返盐的思路包括减少蒸发、增大地下水埋深以及切断毛细水传输等(图5)。

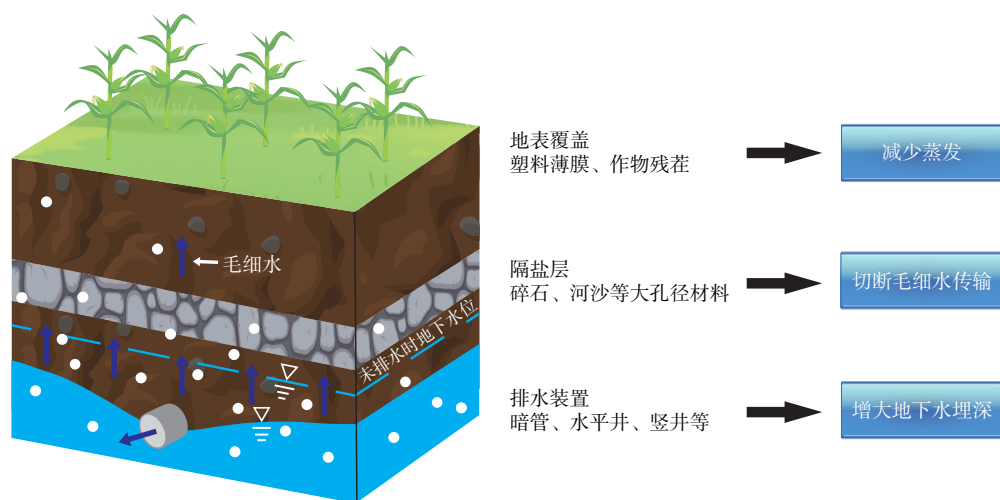


图5 抑制返盐技术原理示意图

Fig. 5 Principle diagram of inhibiting salt rise technology

2.3.1 技术优劣势及适用范围

使用塑料薄膜、作物残茬对地表进行覆盖可以简单地减少土壤水分蒸发,保持土壤水分,从而抑制“水去盐留”所导致的盐分积聚^[71-72]。其中,地膜覆盖可能会降低表土的土壤有机碳含量,影响土壤肥力^[73],故常与土壤改良剂结合使用以获取更佳的改良效果,创造出更有利于植物生长的土壤环境^[74]。然而,地表覆盖技术主要影响土壤表层的盐分动态,而对于解决深层土壤的盐分积累问题效果有限^[75-76]。

毛细水的上升高度会受到毛细管半径的影响,而土壤粒径与孔隙度越小,毛细管半径就越小,毛细作用就越强^[77]。因此,对土壤孔隙结构等物理性质的改善在增强淋滤的同时也有助于抑制其毛细作用,从而调控水盐运移,减少盐分表聚^[52]。但是仅进行土壤理化性质改良对毛细作用的抑制作用往往是有限的,更为有效的方法是利用碎石、河沙等大孔隙材料在地下铺设隔盐层,利用其孔隙结构切断毛细水传输通道,

形成毛细屏障,阻止水分及盐分向地表的运移,从而避免改良后的土壤再次发生盐碱化^[78]。

排盐核心在于控水,排水措施可通过控制地下水位避免毛细水上升至地表,减少盐分表聚^[79]。地下排水暗管因其稳定高效的排水效果而得到了广泛的应用,可以促使水盐向管道运移并排出,其布设过程中的主要参数为暗管埋深与间距,而合理的参数是调控水盐运移的关键,需根据水文地质条件确定^[80]。例如,针对滨海地区地下水位埋深浅、土质黏重的特点,张万钧等^[81]提出了“允许深度”概念,并据此提出了以水平距离换取垂向深度的“浅密式”暗管布局。但小间距排水系统存在着经济成本较高的缺点,因此一些结构相对简陋、价格低廉的替代排水措施也有一定的应用价值,如将捆扎玉米秸秆作为地下排水管等^[82]。此外,竖井、水平井等抽水措施在获取灌溉或生活用水的同时也可起到控制地下水位的作用^[83],竖井适用于含水层富水性较好的地区,对于富水性差渗透系数

低的滨海地区,水平井具有更高的排水效率,自然条件下的盐分淡化效率为4%~18%^[84]。

2.3.2 技术局限性及研究建议

抑制返盐技术是防止已改良盐碱地再盐碱化的有效方法。其中地表覆盖的方法相对简单,但是仅能控制表层土壤盐分^[76],而作用范围更深的排水、抽水措施及隔盐层的布设都要面对成本高的问题。其次,多数研究采用秸秆作为覆盖或隔盐材料,而园艺业产生的大量枯枝落叶等废弃物却少有研究利用^[85]。此外,切断毛细水传输可能会导致土壤湿度降低,产生

不利于植物生长的负面影响^[86]。因此,未来研究应重视研发低成本的排水、抽水措施及隔盐层布设技术。同时,应加强园艺业废弃物再利用的研究。而对于切断毛细水可能产生副作用的问题,可通过数值模拟等方法加以评估,从而根据气候条件确定合适的隔盐深度,必要时需搭配灌溉措施辅助解决该问题。

2.4 生物改良技术

生物改良技术利用植物的吸盐、根系生长能力以及微生物的生命活动来修复盐碱土(图6)。

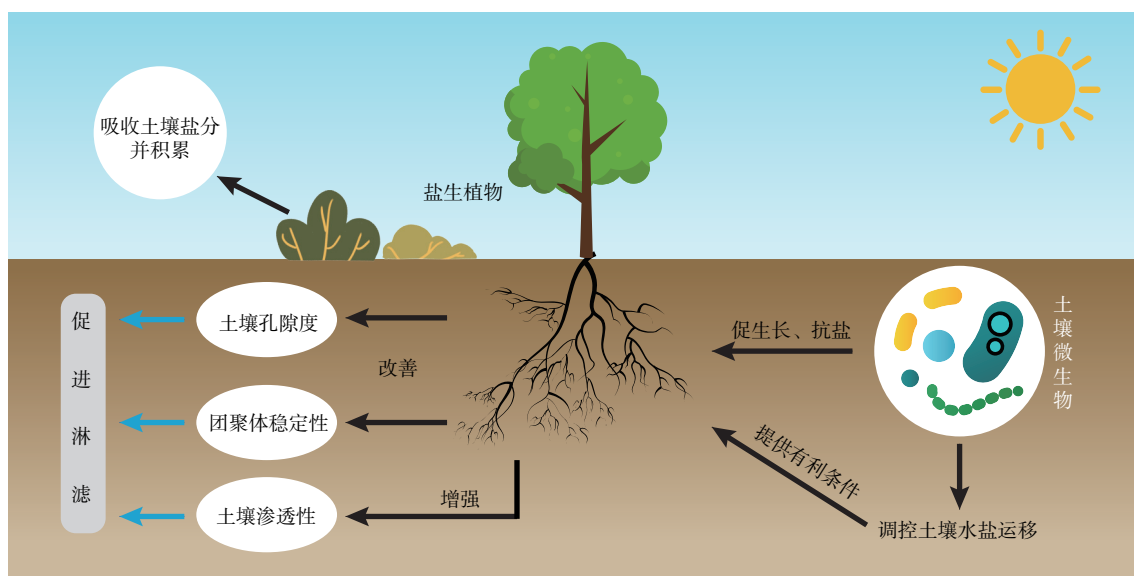


图6 生物改良技术原理示意图

Fig. 6 Principle diagram of biological improvement technology

2.4.1 技术优劣势及适用范围

植物是陆地生态系统的重要组成部分,可以起到调控土壤水盐运移,降低土壤盐分的作用,是土壤环境修复的关键^[87]。但是在滨海盐碱化地区,大多数植物的生长受限,故在用植物修复盐碱土壤时,能够在高盐环境中生存的盐生植物就扮演了重要角色^[88]。盐生植物的耐盐性是通过基因、细胞和生理水平的复杂相互作用实现的,耐盐机制多样^[89]。因此,不同盐生植物修复盐碱土壤的机理也有所区别。其中少部分植物,如碱蓬、北美海蓬子、大洋洲滨藜等可在其组织中积累较高浓度的盐离子,从而有效除去盐碱土中的盐分^[90]。而大部分盐生植物主要通过其根系的生长与分布改善土壤的孔隙度、团聚体稳定性,并增强土壤渗透性,从而促进降雨对土壤盐分的淋滤,修复盐碱化土壤^[91-92]。引起这些性质改变的主要因素是植物根系的生长与分布,且由于植物根系主要分布在距

地表0~20 cm深处,因此植被对表土层水盐运移的影响更为显著^[93]。

盐生植物会引起土壤酶活性以及微生物种群的变化^[94-95],同时根际微生物过程对维持和促进植物生长也至关重要^[96],植物、微生物及土壤之间的相互作用,对滨海盐碱土生态系统的修复具有重要作用。有益微生物可以作为生物肥料、生物刺激剂和生物农药。如HT-PGPB(耐盐植物促生菌)具有显著的促生长和抗盐特性,可以提高宿主植物对盐分甚至生物胁迫的耐受性^[97];土壤微藻则可以起到调控土壤水分与盐分运移的作用,为植物生长发育提供有利条件^[98]。此外,多种微生物常联合使用,以期获取更好的土壤改良效果。如固氮杆菌与蛋白核小球藻联用可有效提高小麦植株生物量、耐盐性和土壤肥力^[99]。

2.4.2 技术局限性及研究建议

生物修复是一种生态良好且经济高效的技术^[100],

但是目前的研究仍有局限性。如缺乏一种整合基因组学、转录组学、代谢组学等研究的全面方法来揭示决定盐生植物耐盐性的主要机制^[89]; 土壤微生物群落对其他改良措施的响应也仍需研究^[101]。此外, 应用生物改良技术时还需考虑引入外来物种可能带来的生态风险。未来的研究应继续关注生物修复的底层机制, 并分析合理的生物修复措施, 如植被模式、间作策略等^[102-103]。同时, 有必要进一步加强对优质盐生植物的选育以及保护, 实现盐生植物保护与利用的协调发展。而近年来, 基因组学的发展为耐盐植物选育提供了新的有效途径, 未来可探索植物基因库中的特殊性状与结构, 并利用它们提高植物耐盐性^[104]。

3 我国滨海盐碱地改良案例分析

在实际的滨海盐碱地治理过程中, 常会同时应用多种改良技术, 以实现各技术之间的优势互补, 从而获得更佳的改良效果。具体的改良技术组合需要根

据改良地区的实际条件来确定^[105]; 一方面是因为各地区的盐碱化程度不同, 改良难度不一; 另一方面是因为各改良技术的应用也需要一系列的资源与条件, 如水资源、能源、气候等^[106]。

基于上述差异性条件, 本文以土壤盐度、水资源与气候条件, 以及案例所处地区为依据筛选了近年来我国滨海盐碱地区改良效果较好的 13 个实际改良案例(表 1, 按所处地区由北至南排列)^[107-118], 以求所选案例能反映我国滨海盐碱土改良利用总体情况, 从而体现出不同条件下影响改良技术选择的关键性因素, 帮助探究效果良好的核心改良技术与推广价值较高的综合改良方案。

通过比较不同条件下各改良方案在技术选择上的差异, 可以发现土壤含盐量对于改良技术的选择影响最大。本研究以第二次全国土壤普查的盐碱土分级标准及美国盐土实验室现有分级标准为依据将改良前土壤划分为非盐土与盐土进行对比^[119-120], 其中

表 1 我国滨海盐碱地改良案例
Table 1 Case studies on the amelioration of coastal saline-alkali land in China

文献	分布区	研究区	前期条件	改良技术类别	改良具体方案	改良效果
[107]		辽宁省 盘锦市	土壤体积电导率 5.32 dS/m, 生物多样性低	生物改良技术	建设防护林	土壤体积电导率 1.29 ~ 2.20 dS/m, 生物多样性显著提升
[108]		天津市 宁河区	土壤含盐量 2.27 g/kg, pH 值 8.87	淋滤除盐技术, 土壤理化性质 改良技术	灌溉淋洗, 添加土壤改良剂	土壤含盐量 1.42 g/kg, pH 值 8.47
[109]		天津市 滨海新区	土壤含盐量 13.04 ~ 14.32 g/kg	淋滤除盐技术, 抑制返盐技术	灌溉淋洗, 地下排水暗管	土壤含盐量 0.94 ~ 8.65 g/kg
[110]	滨渤海 盐碱土 分布区	河北省 唐山市	土壤容重平均 1.73 g/cm ³ , 土壤饱和电导率 25 dS/m, 水位埋深 0.5 ~ 3.0 m	淋滤除盐技术, 土壤理化性质 改良技术, 抑制返盐技术, 生物 改良技术	滴灌, 土壤旋耕, 铺设隔盐, 建 设防护林	土壤容重平均 1.45 g/cm ³ , 土壤饱和电导率 0.81 dS/m, 植被覆盖度显著增加
[110]		河北省 海兴县	土壤含盐量 7.74 g/kg, 水位埋深 0.9 ~ 1.5 m	淋滤除盐技术, 抑制返盐技术	咸水结冰灌溉, 地膜覆盖	土壤含盐量约 2 g/kg, 土壤细菌丰度显著增加
[111]		山东省 垦利县	土壤浸提液电导率 约 0.8 dS/m	土壤理化性质改良技术, 抑制 返盐技术	土壤旋耕, 地膜覆盖	土壤浸提液电导率约 0.3 dS/m
[112]		黄河三角洲	耕层含盐量大于 0.5%, 土壤有机质含量 13 g/kg	土壤理化性质改良技术, 生物 改良技术	生态种养循环: 耐盐牧草种 植-养殖-生物有机肥生产-盐 碱地改良和肥力提升	耕层含盐量小于 0.2%, 土壤有机质含量 16 g/kg
[113]	滨黄 海、东 海盐碱 土分布 区	江苏省 连云港市	土壤含盐量 32.3 g/kg, 水位埋深 0.56 ~ 150.00 cm	淋滤除盐技术, 土壤理化性质 改良技术, 抑制返盐技术	灌溉淋洗, 地下排水暗管, 基 质改良, 铺设隔盐层, 数值模 拟预测	土壤含盐量 2.3 g/kg, 有效抑制返盐
[114]		江苏省 南通市	土壤含盐量 2.6% ~ 4.2%, 有机质含量不足 0.1%, 水位埋深 1 m 左右	淋滤除盐技术, 土壤理化性质 改良技术, 抑制返盐技术, 生物 改良技术	灌溉淋洗, 地表深排沟, 地下 秸秆排水, 秸秆覆盖, 添加土 壤改良剂, 植物栽种	土壤含盐量 0.1% ~ 0.5%, 有机质含量 1.9%, 耐盐作物长势良好
[115]		浙江省 慈溪市	土壤含盐量超 10 g/kg, 有机质含量不足 6 g/kg	土壤理化性质改良技术, 抑制 返盐技术, 生物改良技术	地形整平, 排盐沟渠, 植物地 被覆盖, 铺设棉花秸秆隔盐层	土壤含盐量小于 2 g/kg, 有机质含量超 10 g/kg
[116]		福建省 平潭县	土壤含水量较低, 孔隙度不足 45%, pH 值 8.89	土壤理化性质改良技术	添加土壤改良剂	土壤含水量提高 24.8%, 孔隙度超 50%, pH 值 7.65
[117]	滨南海 盐碱土 分布区	广东省 湛江市	滨海酸性盐碱化土壤 (土壤含盐量 0.2% ~ 0.6%)	生物改良技术	种植海水稻	海水稻正常生长 微生物丰度及活性显著提升
[118]		海南省 文昌市	土壤含盐量 3.36 g/kg, pH 值 6.35, 有机质含量、微生物丰度低	淋滤除盐技术, 土壤理化性质 改良技术	灌溉淋洗, 添加土壤改良剂	土壤含盐量 2.86 ~ 3.13 g/kg, pH 值 7.43 ~ 7.51, 有机质含量、微生物丰度提高

非盐土(含盐量小于 0.6% 或体积电导率小于 16 dS/m)改良方案所应用的改良技术均不超过两种,具体包括灌溉淋洗、土壤旋耕、添加土壤改良剂、地表覆盖与植物种植^[107-108, 111-112, 116-118]。并且在非盐土地区可通过直接种植耐盐作物或防护林,创造良好的经济效益与生态效益^[107, 117]。当然,随着现代农业和环境保护要求的提高,对盐碱地的开发不再局限于改善土壤的物理和化学性质,还致力于生态系统的整体恢复和可持续发展,多学科交叉的生态修复工程在盐碱地改良中的应用越来越受到关注,如黄河三角洲地区牧草-养殖-有机肥-土壤改良的生态种养循环在改良土壤的同时,还发挥了植物、动物、微生物之间的生态协同功能,构建了稳定、经济、生态的生产系统^[112]。而对于盐土(含盐量大于 0.6% 或体积电导率大于 16 dS/m)地区,改良难度一般较大,且易发生返盐,除进行淋滤与土壤理化性质改良外,还需结合排水措施或隔盐措施确保改良技术的持续性,从根本上改善土壤环境^[109-110, 113-115]。建立起更繁茂、多样化的植被覆盖或种植经济性作物多被作为盐碱土改良的目标,但是在盐土地区,强抗逆性的盐生植物更适宜作为过渡植被在改良初期种植,当盐分降低后,方可种植多样化的植被或经济作物^[114]。

其次,气候与水资源的丰度也会制约改良方案的选择,如北方部分沿海地区蒸降比较高且水系发育程度差,淡水资源不充足,可以通过地膜覆盖减少土壤

的蒸发量^[111],或采取咸水结冰灌溉来淋洗土壤,从而降低盐碱土改良对于水资源的依赖^[110]。

而改良方案所处地区的差异则主要影响盐分含量与气候、水资源条件,进而影响到改良技术的选择。此外,由于不同地区土壤盐分种类的不同,添加改良剂的类型有所区别,滨渤海盐碱土分布区的盐碱土壤呈碱性,因此需添加酸性改良剂^[108],而滨南海盐碱土分布区的盐碱土壤呈酸性,因此所添加的土壤改良剂为碱性^[118]。

从改良技术应用的角度看,淋滤除盐与土壤理化性质改良技术在案例中应用最多,常用的具体措施包括灌溉淋洗、土壤旋耕以及添加土壤改良剂,其优势在于成本低廉、施工方便。轻度及中度盐碱地仅采用上述两类改良技术即可达到较为理想的改良效果,这是因为在应用土壤理化性质改良技术后,可以显著改善土壤的水理性质,从而促进淋滤除盐技术对土壤中盐分的淋滤,有效降低土壤含盐量^[108, 118]。而抑制返盐技术则主要应用于高盐分地区,原因在于高盐地区一般都受到高 TDS 地下水的影响,返盐现象显著^[113]。此外,生物改良技术在不同盐分地区都有应用,但应用方式不同。低盐分地区可种植具备经济效益的耐盐作物^[117];而高盐地区适宜种植强抗逆性的植物^[115]。微生物的大范围实际应用目前较少。各改良技术的优缺点及适用范围如表 2 所示。

表 2 滨海盐碱地改良技术优缺点及适用范围

Table 2 Advantages and disadvantages of coastal saline-alkali land improvement technology and its application scope

改良技术类别	优点	缺点	适用范围
淋滤除盐技术	原理简单,效果显著	消耗水资源,存在引发次生盐碱化及环境污染的风险	适用范围广泛,需根据水资源状况确定合理的盐分淋洗策略
土壤理化性质改良技术	快速生效,材料多样	改良的长效性不足,可能污染环境	适用范围广泛,可依据改良地区水文地质条件及资源状况选择适宜的改良剂
抑制返盐技术	机理明确,操作性强	成本高昂,参数需评估	主要应用于地下水埋深浅的高盐地区
生物改良技术	生态良好,经济高效	存在生态风险,耐盐品种有限	可根据改良区盐分含量确定植被类型

综合上述案例与分析,本文提出了不同条件下适用性较强、推广价值较高的改良方案。对于非盐土(含盐量小于 0.6% 或体积电导率小于 16 dS/m),土壤旋耕与添加土壤改良剂是经济高效的改良方法,改良后的土壤会利于降雨的淋滤作用,增加土壤盐分的浸出。若改良地区降雨稀少则应根据淡水资源的丰富程度选取合适的灌溉淋洗策略,水资源稀缺地区宜采取滴灌或咸水结冰灌溉等节水灌溉策略,同时也可结合地表覆盖减少水分蒸发。非盐土地区经恰当的改良,可

以作为农业用地,创造良好的经济与生态效益,建议进行生态修复工程,重视生物多样性和生态系统服务功能。

对于盐土(含盐量大于 0.6% 或体积电导率大于 16 dS/m),需同时应用多种改良技术,较为有效的改良方案为通过土壤旋耕与添加土壤改良剂改善土壤结构,利用灌溉措施淋洗盐分,同时布设隔盐层与地下排水暗管,有效排出淋盐后的废水并抑制毛细作用返盐。此外,对于高盐土壤而言,土壤盐分的去除与肥力的恢复需要一个较长的过程,特别是在缺少人工灌

溉, 依赖自然降雨淋盐的地区, 在此过程中常规的植被仍难以存活, 但是可以构建起耐盐植被景观, 利用耐盐植物的环境效应修复盐碱土壤。各改良技术的具体机理与效应如图 7 所示。对于高盐地区, 还应建立起智能管理系统, 通过实时监测和调控地下水位、土壤湿度、盐度, 实现精准管理, 进一步提升改良效果。

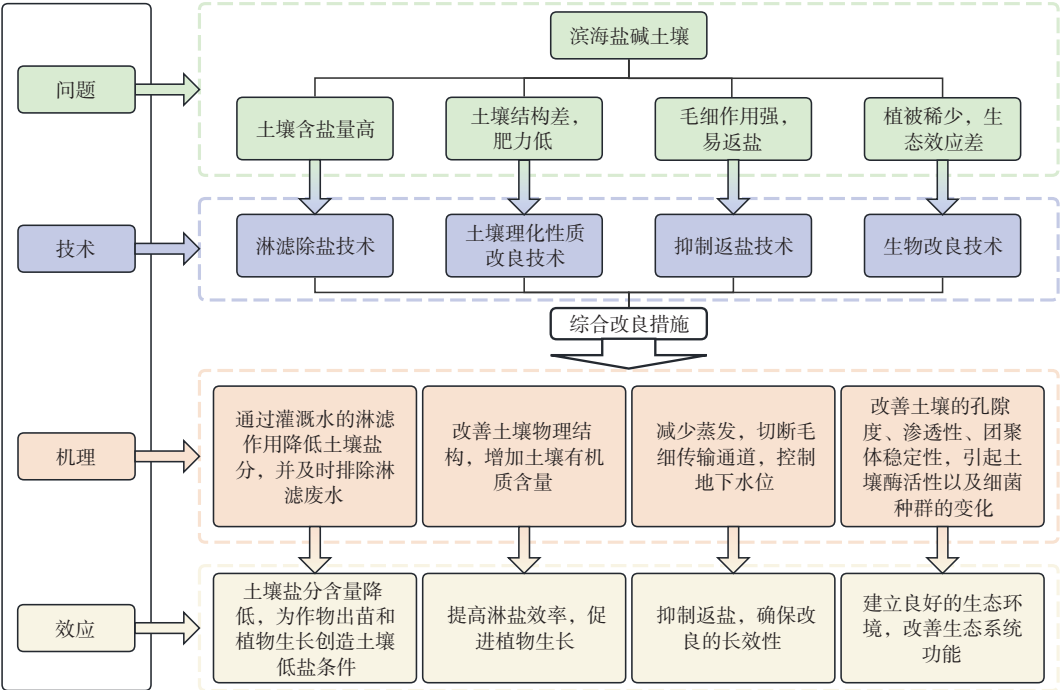


图 7 滨海盐碱土改良的机理与效应
Fig. 7 Mechanism and effects of coastal saline soil amelioration

尽管目前有关盐碱土改良的案例与研究成果较理想, 但仍存在不足之处。首先, 大部分研究以室内试验与短期的场地实验为主, 缺少对于改良方案环境效应的长期观测, 特别是植物、土壤与环境之间相互作用所产生的持续影响。此外, 现有研究中对于改良成本的论述大多不充足, 实际的盐碱地改良方案应以需求为导向, 基于土地用途与发展规划制定, 做到投入成本与改良效果的平衡。未来在制定改良方案时, 还应在利用好已有技术的基础上, 加强生态建设和智能管理, 从而在有效改良盐碱土壤的同时, 实现生态效益与经济效益的双赢。

4 结论与展望

本文对近年来我国滨海盐碱地改良研究进行了汇总与对比, 得到以下结论:

- (1) 我国滨海盐碱地主要分为三个分布区, 分别是滨渤海盐碱土分布区, 滨黄海、东海盐碱土分布区和滨南海盐碱土分布区。主要成因包括土壤含盐量高、土壤理化性质差、地下水位浅及易发生返盐。
- (2) 针对滨海盐碱土成因, 可以应用淋滤除盐、土

壤理化性质改良、抑制返盐、生物改良四类技术进行改良。其中, 淋滤除盐技术原理简单、效果显著, 适用范围广泛, 可根据水资源状况合理调整盐分淋洗策略; 土壤理化性质改良技术生效快速、材料多样, 可依据改良地区水文地质条件和资源状况选择适宜的改良剂; 抑制返盐技术机理明确、操作性强, 主要应用于地下水埋深浅的高盐地区; 生物改良技术生态良好、经济高效, 可根据改良区盐分含量确定植被类型。

(3) 在实际的盐碱地治理过程中, 多种改良技术常综合应用, 不同技术之间相互补充, 效果更佳, 具体改良技术的选择需根据改良地区的土壤盐分含量及气候等实际条件确定, 最常用的技术是淋滤除盐与土壤理化性质改良技术。

基于当前的研究进展, 未来滨海盐碱地改良研究应重点关注以下几个方面:

- (1) 滨海盐碱地针对性改良技术体系构建。
- 我国滨海盐碱地分布广泛, 盐分类型、土壤质地、气候条件等因素各异, 但相关研究多关注单一片区或某一无地域特征的技术, 不同地区研究存在重复性工作, 开发利用效率低。因此, 需要构建不同滨海盐碱

化地区相应的土壤改良技术体系,包括针对不同地区盐碱土理化性质改良的数据库等,再结合遥感、云计算、大数据等技术支持的区域尺度盐碱地精确感知、分析和规划,实现盐碱地改良的技术标准化与改良规模化。

(2)滨海盐碱土改良过程中水资源的高效与安全利用。

土壤盐分的去除需要水的淋滤,然而滨海盐碱地区地下咸水资源丰富,且部分地区淡水资源较为缺乏。因此,需要利用好自然降水与微咸水,优化水资源利用模式,根据植物类型、气候条件、土壤特征制定合理的灌溉或淋洗策略,即灌溉量、灌溉速率、灌溉时间节点等。此外,要根据区域特征,建立合理的水资源空间分配机制,对于盐碱农田、林地或改良中荒地,分别采取不同的水资源供给策略。

(3)加强多学科交叉的滨海盐碱地改良技术方法研究。

盐碱地改良是一个多学科问题,目前较前沿的盐碱地研究领域多存在学科交叉,如基于遥感的土壤盐碱化制图、耐盐植物有效耐盐途径研究与耐盐基因的选育等。未来的研究应继续加强不同学科知识的交叉应用,进一步引入信息科学、遥感、人工智能、生物、生态等学科的新技术、新理论,从土壤盐分动态监测、智能灌溉管理、生物改土等多个角度切入并解决滨海土壤盐碱化问题。

(4)滨海盐碱地改良的长效性管理。

目前我国缺乏对滨海盐碱地改良的系统管理,研究也大都考虑改良方案应用后的短期改良效果,而对经济、社会、环境等多方面的长期影响则缺乏关注。因此,后续研究要做好长期监测,利用水盐监测系统等持续跟踪改良措施的效果,探究各改良技术与区域生态之间的互馈机制,评价土壤改良剂长期施加的安全性问题,并建立土壤改良后的长期管理策略。

参考文献 (References) :

- [1] LIU Feng, WU Huayong, ZHAO Yuguo, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(3): 328 – 340.
- [2] PRÁVĚLIE R, PATRICHE C, BORRELLI P, et al. Arable lands under the pressure of multiple land degradation processes: A global perspective[J]. *Environmental Research*, 2021, 194: 110697.
- [3] HOPMANS J W, QURESHI A S, KISEKKA I, et al. Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity[J]. *Advances in Agronomy*, 2021, 169: 1 – 191.
- [4] 王高祥, 苏小四, 张岩, 等. 连云港徐圩新区盐渍土盐分时空分布特征及其主要影响因素分析[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(3): 16 – 24. [WANG Gaoxiang, SU Xiaosi, ZHANG Yan, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of salinity in saline soil and its main influencing factors in Xuwei New District of Lianyungang[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(3): 16 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [5] ONDRASEK G, RENGEL Z. Environmental salinization processes: Detection, implications & solutions[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142432.
- [6] 习近平. 切实加强耕地保护抓好盐碱地综合改造利用[EB/OL]. 北京: 中国政府网, (2023-11-30)[2024-09-10]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202311/content_6917806.htm.
- [7] 霍小光, 李凤双. 总书记强调做好盐碱地特色农业大文章[EB/OL]. (2023-05-13)[2024-09-10]. http://www.news.cn/2023-05/13/c_1129610964.htm.
- [8] 胥伟华, 王建林, 刘小京, 等. 建设“滨海草带”的科技缘由、内容与对策[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(2): 238 – 245. [XU Weihua, WANG Jianlin, LIU Xiaojing, et al. Scientific and technological reasons, contents and corresponding policies of constructing “coastal grass belt”[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(2): 238 – 245. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孙盛楠, 严学兵, 尹飞虎. 我国沿海滩涂盐碱地改良与综合利用现状与展望[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(2): 1 – 13. [SUN Shengnan, YAN Xuebing, YIN Feihu. Current situation and prospect of improvement and comprehensive utilization for saline-alkali land of coastal tidal flats in China[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 1 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赵英, 王丽, 赵惠丽, 等. 滨海盐碱地改良研究现状及展望[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(3): 67 – 74. [ZHAO Ying, WANG Li, ZHAO Huili, et al. Research status and prospects of saline-alkali land amelioration in the coastal region of China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(3): 67 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郑栅洁. 扎实推进盐碱地综合利用 做好盐碱地特

- 色农业大文章 [EB/OL]. (2023-10-14) [2024-09-10]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202310/content_6909201.htm.
- [12] 魏文杰,程知言,胡建,等. 滨海盐碱地形成及离子附着形态综述 [J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 1003 – 1007. [WEI Wenjie, CHENG Zhiyan, HU Jian, et al. A review on formation and ion attached form of coastal saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(4): 1003 – 1007. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LONG Xiaohua, LIU Liping, SHAO Tianyun, et al. Developing and sustainably utilize the coastal mudflat areas in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 1077 – 1086.
- [14] 王遵亲. 中国盐渍土 [M]. 北京: 科学出版社, 1993. [WANG Zunqin. Saline soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)]
- [15] 魏丹,李艳,秦程程,等. 环渤海地区设施蔬菜土壤障碍与治理措施 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021(5): 303 – 309. [WEI Dan, LI Yan, QIN Chengcheng, et al. Soil barrier and countermeasure of protected vegetable in the Bohai Rim[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(5): 303 – 309. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 钞锦龙,张化,李颖,等. 渤海湾滨海盐渍土地区农业灌溉用水可能途径探究 [J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 141 – 144. [CHAO Jinlong, ZHANG Hua, LI Ying, et al. The possible avenues of agricultural irrigation water in Bohai Bay coastal saline land area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(3): 141 – 144. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 祝瑜,褚琳琳,朱文东,等. 客土造林后滨海盐碱地土壤盐分分布及影响因素分析 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39(6): 149 – 157. [ZHU Yu, CHU Linlin, ZHU Wendong, et al. Spatial distribution pattern and influencing factors of soil salt in coastal saline-alkali land after afforestation with foreign soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(6): 149 – 157. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陆宏,厉仁安. 杭州湾南岸土壤演变及其开发利用研究 [J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 218 – 220. [LU Hong, LI Ren'an. Soil evolution on the South of Hangzhou Gulf and its exploiting and utilization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(2): 218 – 220. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 赵秀芳,杨劲松,姚荣江. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究 [J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 422 – 428. [ZHAO Xiufang, YANG Jinsong, YAO Rongjiang. Characteristics of soil salinization in mudflat of North Jiangsu Province based on canonical correspondence analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 422 – 428. (in Chinese with English abstract)]
- [20] ARULMATHI C, PORKODI G. Characteristics of coastal saline soil and their management: A review[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2020, 9(10): 1726 – 1734.
- [21] 韩笑晨,张贵芹,王亚辉,等. 土壤调理剂对滨海盐碱地土壤盐分含量及夏玉米产量的影响 [J]. 作物学报, 2024, 50(7): 1776 – 1786. [HAN Xiaochen, ZHANG Guiqin, WANG Yahui, et al. Effects of soil conditioners on soil salinity content and maize yield in coastal saline-alkali land[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(7): 1776 – 1786. (in Chinese with English abstract)]
- [22] YAO Rongjiang, YANG Jingsong, ZHANG Tongjuan, et al. Studies on soil water and salt balances and scenarios simulation using SaltMod in a coastal reclaimed farming area of eastern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131: 115 – 123.
- [23] 李晓彬,康跃虎. 滨海重度盐碱地微咸水滴灌水盐调控及月季根系生长响应研究 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 112 – 121. [LI Xiaobin, KANG Yuehu. Water-salt control and response of Chinese rose (*Rosa chinensis*) root on coastal saline soil using drip irrigation with brackish water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(11): 112 – 121. (in Chinese with English abstract)]
- [24] MOHANAVELU A, NAGANNA S R, AL-ANSARI N. Irrigation induced salinity and sodicity hazards on soil and groundwater: An overview of its causes, impacts and mitigation strategies[J]. *Agriculture*, 2021, 11(10): 983.
- [25] AKTER S, AHMED K R, MARANDI A, et al. Possible factors for increasing water salinity in an embanked coastal island in the southwest Bengal Delta of Bangladesh[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136668.
- [26] 章家恩. 酸性硫酸盐土的酸害暴发机制及其环境影响 [J]. *热带地理*, 1999, 19(2): 137 – 141. [ZHANG Jiaen. The process of acid hazards in acid sulfate soils and its environmental effects[J]. *Tropical Geography*, 1999, 19(2): 137 – 141. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [27] 赵君涵, 余冬立, 姚怀柱, 等. 地下水埋深及矿化度变化对番茄产量及品质的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 90 – 96. [ZHAO Junhan, SHE Dongli, YAO Huaizhu, et al. The change in yield and fruit quality of tomato as affected by groundwater depth and salinity in coastal regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 90 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张凤荣. 分区分类因地制宜综合改造利用盐碱地 [J]. 中国土地, 2023(8): 30 – 32. [ZHANG Fengrong. Zoning and classification for comprehensive improvement and utilization of saline-alkali land according to local conditions[J]. China Land, 2023(8): 30 – 32. (in Chinese)]
- [29] YU Xiayang, DAN Hancheng, XIN Pei. Method for improving leaching efficiency of coastal subsurface drainage systems[J]. [Journal of Irrigation and Drainage Engineering](#), 2018, 144(8): 04018019.
- [30] ZHENG Wenjuan, YANG Zhenlei, WANG Xiaoxuan, et al. Impacts of evaporation and inundation on near-surface salinity at a coastal wetland park[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 185(Pt B): 114373.
- [31] 王鹏山. 不同淋洗方式下滨海盐渍土改良效果研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012. [WANG Pengshan. The effect of different leaching way on improvement of coastal saline soil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [32] CHU Linlin, ZHU Yu, XIONG Ling, et al. Approach of water-salt regulation using micro-sprinkler irrigation in two coastal saline soils[J]. [Water Science and Engineering](#), 2023, 16(1): 106 – 112.
- [33] LI Xiaobin, ZHANG Chen. Effect of natural and artificial afforestation reclamation on soil properties and vegetation in coastal saline silt soils[J]. [Catena](#), 2021, 198: 105066.
- [34] ZHANG Chen, LI Xiaobin. Using saline water drip irrigation and soil matric potential control for tree establishment in coastal saline soil[J]. [Ecological Engineering](#), 2021, 170: 106337.
- [35] LIU Bingxia, WANG Shiqin, LIU Xiaojing, et al. Evaluating soil water and salt transport in response to varied rainfall events and hydrological years under brackish water irrigation in the North China Plain[J]. [Geoderma](#), 2022, 422: 115954.
- [36] 李俊杰, 屈忠义, 杨威, 等. 咸水结冰灌溉下盐碱地土壤水热盐动态迁移特征分析 [J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 377 – 384. [LI Junjie, QU Zhongyi, YANG Wei, et al. Analysis of dynamic migration characteristics of Soil water, heat, and salt in saline-alkali soils under saline water freezing irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 377 – 384. (in Chinese with English abstract)]
- [37] WANG Xiaogai, WANG Luming, YU Zhenhua, et al. Differential responses of bacterial communities in rhizosphere and bulk soils of cotton to long-term amelioration practices based on freezing saline water irrigation and plastic mulching in a coastal saline soil[J]. [Agronomy](#), 2024, 14(1): 103.
- [38] 高会, 赵亮, 刘斌, 等. 河北滨海盐碱地浅层轻度咸水资源冬小麦灌溉安全利用研究 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2023, 31(7): 1102 – 1109. [GAO Hui, ZHAO Liang, LIU Bin, et al. Study on shallow mild saline groundwater use safety in winter wheat irrigation based on the subsurface drainage system in the coastal area of Hebei Province in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(7): 1102 – 1109. (in Chinese with English abstract)]
- [39] SHOKRI - KUEHNI S M S, RAAIJMAKERS B, KURZ T, et al. Water table depth and soil salinization: From pore-scale processes to field-scale responses[J]. [Water Resources Research](#), 2020, 56(2): e2019WR026707.
- [40] GAO Hui, FU Tonggang, TANG Shoupu, et al. Effects of saline water irrigation on winter wheat and its safe utilization under a subsurface drainage system in coastal saline-alkali land of Hebei Province, China[J]. [Irrigation Science](#), 2023, 41(2): 251 – 260.
- [41] 陆海明, 孙金华, 邹鹰, 等. 农田排水沟渠的环境效应与生态功能综述 [J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 719 – 725. [LU Haiming, SUN Jinhua, ZOU Ying, et al. Review of environmental impact and ecological function of agricultural drainage ditches[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5): 719 – 725. (in Chinese with English abstract)]
- [42] AFRUZI A, NAZEMI A H, SADRAADDINI A A. Steady-state subsurface drainage of ponded fields by rectangular ditch drains: Subsurface drainage of ponded fields by ditch drains[J]. [Irrigation and Drainage](#), 2014, 63(5): 668 – 681.
- [43] TAO Yuan, WANG Shaoli, XU Di, et al. Experiment and analysis on flow rate of improved subsurface drainage with ponded water[J]. [Agricultural Water](#)

- [Management](#), 2016, 177: 1 – 9.
- [44] 杨鹏年, 孙珍珍, 汪昌树, 等. 绿洲灌区春灌效应及定额研究 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 29 – 33. [YANG Pengnian, SUN Zhenzhen, WANG Changshu, et al. A study of the effect and quota of spring irrigation on oasis irrigation areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(5): 29 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [45] SHAYGAN M, READING L P, BAUMGARTL T. Effect of physical amendments on salt leaching characteristics for reclamation[J]. *Geoderma*, 2017, 292: 96 – 110.
- [46] NAVEED M, DITTA A, AHMAD M, et al. Processed animal manure improves morpho-physiological and biochemical characteristics of Brassica napus L. under Nickel and salinity stress[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(33): 45629 – 45645.
- [47] WU Linjian, XIANG Zhouyu, JIANG Han, et al. A review of durability issues of reinforced concrete structures due to coastal soda residue soil in China[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(11): 1740.
- [48] 李品芳, 杨永利, 兰天, 等. 天津滨海盐渍土客土改良后的土壤理化性质与持水特性 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 149 – 156. [LI Pinfang, YANG Yongli, LAN Tian, et al. Physicochemical properties and water holding characteristics of Tianjin coastal saline soil improved by foreign soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7): 149 – 156. (in Chinese with English abstract)]
- [49] 刘洪光, 李智杰, 李玲, 等. 粉垄深松深耕改善南疆重度盐碱土理化性质和棉花产量及其后效 [J]. *农业工程学报*, 2024, 40(13): 45 – 57. [LIU Hongguang, LI Zhijie, LI Ling, et al. Effects of deep vertical rotary tillage depth on the improvement of soil physicochemical properties and cotton yield in the current year and the following year in severe saline land in Southern Xinjiang of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(13): 45 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [50] SCHWARTZ R C, BAUMHARDT R L, EVETT S R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(2): 221 – 229.
- [51] ZHENG Xu, CHEN Chaoqun, LI Luhua, et al. Ridge tillage increased halophyte fine root production and turnover rates by altering soil properties in an abandoned farmland in northwest China[J]. *Rhizosphere*, 2023, 27: 100742.
- [52] LI Wenxiu, YANG Jingsong, TANG Chong, et al. The temporal-spatial dynamic distributions of soil water and salt under deep vertical rotary tillage on coastal saline soil[J]. *Water*, 2022, 14(21): 3370.
- [53] 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 Jinsong, YAO Rongjiang, WANG Xiangping, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [54] LI Kesheng, KONG Weihang, XU Wenshuo, et al. Impacts of application patterns and incorporation rates of dredged Yellow River sediment on structure and infiltration of saline-alkali soil[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2022, 15(4): 139 – 146.
- [55] MAO Yumei, LI Xiaoping. Desalting effect of flue gas desulfurization gypsum (FGDG) on coastal saline-sodic soil with different textures[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23(2): 765 – 776.
- [56] WANG Jinman, YANG Peiling. Potential flue gas desulfurization gypsum utilization in agriculture: A comprehensive review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1969 – 1978.
- [57] YAO Rongjiang, LI Hongqiang, ZHU Wei, et al. Biochar and potassium humate shift the migration, transformation and redistribution of urea-N in salt-affected soil under drip fertigation: Soil column and incubation experiments[J]. *Irrigation Science*, 2022, 40(2): 267 – 282.
- [58] MAHDY A M. Soil properties and wheat growth and nutrients as affected by compost amendment under saline water irrigation[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 773 – 781.
- [59] HUANG Ruirui. The effect of humic acid on the desalinization of coastal clayey saline soil[J]. *Water Supply*, 2022, 22(9): 7242 – 7255.
- [60] BAI Yanchao, XUE Weijie, YAN Yiyun, et al. The challenge of improving coastal mudflat soil: Formation and stability of organo-mineral complexes[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(4): 1074 – 1080.

- [61] LI Shan, YAO Yuanyuan, YANG Mingchuan, et al. Effects of different amendments on aggregate stability and microbial communities of coastal saline-alkali soil in the Yellow River Delta[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(6): 1694 – 1707.
- [62] NAN Jiangkuan, CHEN Xiaomin, WANG Xiaoyang, et al. Effects of applying flue gas desulfurization gypsum and humic acid on soil physicochemical properties and rapeseed yield of a saline-sodic cropland in the eastern coastal area of China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(1): 38 – 50.
- [63] CHEN Jiancheng, HU Guoqing, WANG Hui, et al. Leaching and migration characteristics of nitrogen during coastal saline soil remediation by combining humic acid with gypsum and bentonite[J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2023, 68(1): 1 – 11.
- [64] LIANG Jiaping, LI Yi, SI Bingcheng, et al. Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 771: 144802.
- [65] WANG Xiao, DING Jianli, HAN Lijing, et al. Biochar addition reduces salinity in salt-affected soils with no impact on soil pH: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2024, 443: 116845.
- [66] CUI Qian, XIA Jiangbao, YANG Hongjun, et al. Biochar and effective microorganisms promote sesbania cannabina growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 143801.
- [67] 刘强, 袁延飞, 刘一帆, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2022, 37(10): 1005 – 1024. [LIU Qiang, YUAN Yanfei, LIU Yifan, et al. Research progress: The application of biochar in the remediation of salt-affected soils[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(10): 1005 – 1024. (in Chinese with English abstract)]
- [68] 朱建峰, 崔振荣, 吴春红, 等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望 [J]. *世界林业研究*, 2018, 31(4): 70 – 75. [ZHU Jianfeng, CUI Zhenrong, WU Chunhong, et al. Research advances and prospect of saline and alkali land greening in China[J]. *World Forestry Research*, 2018, 31(4): 70 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [69] ZHENG Hao, WANG Xiao, CHEN Lei, et al. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: Roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2018, 41(3): 517 – 532.
- [70] LI Xiaoqian, XIA Jiangbao, ZHAO Ximei, et al. Effects of planting *Tamarix chinensis* on shallow soil water and salt content under different groundwater depths in the Yellow River Delta[J]. *Geoderma*, 2019, 335: 104 – 111.
- [71] WANG Juan, CHEN Anquan, LI Yan, et al. Buried straw layer coupling film mulching regulates soil salinity of coastal tidal soil and improves maize (*Zea mays* L.) growth[J]. *Water*, 2022, 14(24): 4119.
- [72] ZHANG Yifu, WANG Wancheng, YUAN Wei, et al. Cattle manure application and combined straw mulching enhance maize (*Zea mays* L.) growth and water use for rain-fed cropping system of coastal saline soils[J]. *Agriculture*, 2021, 11(8): 745.
- [73] HUO Long, PANG Huancheng, ZHAO Yonggan, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 286 – 293.
- [74] ZHANG Hongyuan, PANG Huancheng, LU Chuang, et al. Subsurface organic amendment plus plastic mulching promotes salt leaching and yield of sunflower[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(1): 457 – 466.
- [75] 孟德臣, 宗宪春, 郗登宝, 等. 地膜覆盖对重度盐碱地土壤水盐状况及羊草移栽效果的影响 [J]. *吉林农业大学学报*, 2018, 40(6): 722 – 726. [MENG Dechen, ZONG Xianchun, XI Dengbao, et al. Effects of plastic film mulching on soil water and salt status and transplanting effect of *leymus chinensis* in heavy saline-alkali land[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(6): 722 – 726. (in Chinese with English abstract)]
- [76] 李小牛, 苏沛兰. 中度盐碱地不同秸秆覆盖量对土壤含盐量的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(增刊 1): 66 – 70. [LI Xiaoni, SU Peilan. Effect of different straw mulch quantities on soil salinity of moderate saline-alkali soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(Sup 1): 66 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [77] HULIN C, MERCURY L. Regeneration of capillary water in unsaturated zones[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 265: 279 – 291.
- [78] 陶彦臻, 苏春利, 谢先军, 等. 基于碎石屏障的土壤盐渍化改良技术及机理研究 [J]. *地球科学*, 2021,

- 46(11): 4118 – 4126. [TAO Yanzhen, SU Chunli, XIE Xianjun, et al. Technology and mechanism of soil salinization using gravel barrier[J]. *Earth Science*, 2021, 46(11): 4118 – 4126. (in Chinese with English abstract)]
- [79] ZHAO Li, HENG Tong, YANG Lili, et al. Study on the farmland improvement effect of drainage measures under film mulch with drip irrigation in saline-alkali land in arid areas[J]. *Sustainability*, 2021, 13(8): 4159.
- [80] HAN Danni, CHEN Chao, WANG Fan, et al. Effects of subsurface pipe drainage spacing on soil salinity movement in Jiangsu coastal reclamation area[J]. *Sustainability*, 2023, 15(18): 13932.
- [81] 张万钧, 龙怀玉, 郭育文, 等. 天津滨海园林绿化中盐土治理的理论及工艺 [J]. *北京林业大学学报*, 2000, 22(5): 40 – 44. [ZHANG Wanjun, LONG Huaiyu, GUO Yuwen, et al. The theory and techniques about the improvement of saline soil in Tianjin seashore region under landscape greening[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(5): 40 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [82] LU Peirong, ZHANG Zhanyu, SHENG Zhuping, et al. Assess effectiveness of salt removal by a subsurface drainage with bundled crop straws in coastal saline soil using HYDRUS-3D[J]. *Water*, 2019, 11(5): 943.
- [83] 刘鹏飞, 张光辉, 崔尚进, 等. 旱区湿地周边盐渍化农田生态水位阈值与“水位-水量”双控技术 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 42 – 51. [LIU Pengfei, ZHANG Guanghui, CUI Shangjin, et al. Threshold value of ecological water table and dual control technology of the water table and its quantity in the salinized farmland around wetland in arid areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 42 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [84] 何锦. 水平井开采条件下浅层地下咸水水盐运移规律与开发利用研究——以河北沧州地区为例 [D]. 长春: 吉林大学, 2021. [HE Jin. Utilization and water-salt migration characteristic in the shallow saline water under horizontal well mining conditions: A case study of Cangzhou region of Heibei[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [85] 邹荣松, 陈军华, 邓丞, 等. 盐渍化土壤隔盐脱盐材料及技术研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2023, 36(2): 20 – 25. [ZOU Rongsong, CHEN Junhua, DENG Cheng, et al. Research progress of materials and technologies for salt isolation and desalination of salinized soil[J]. *World Forestry Research*, 2023, 36(2): 20 – 25. (in Chinese with English abstract)]
- [86] CHÁVEZ-GARCÍA E, SIEBE C. Rehabilitation of a highly saline-sodic soil using a rubble barrier and organic amendments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 189: 176 – 188.
- [87] LI Jingsong, CHEN Huanyu, GUO Kai, et al. Changes in soil properties induced by pioneer vegetation patches in coastal ecosystem[J]. *Catena*, 2021, 204: 105393.
- [88] KOEVOETS I T, VENEMA J H, ELZENGA J T M, et al. Roots withstanding their environment: Exploiting root system architecture responses to abiotic stress to improve crop tolerance[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1335.
- [89] BALASUBRAMANIAM T, SHEN Guoxin, ESMAEILI N, et al. Plants' response mechanisms to salinity stress[J]. *Plants*, 2023, 12(12): 2253.
- [90] MANOUSAKI E, KALOGERAKIS N. Halophytes—an emerging trend in phytoremediation[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, 13(10): 959 – 969.
- [91] LI Jingsong, YANG Ce, HUSSAIN T, et al. Long-term effect of tamarisk plantation on soil physical properties and soil salt distribution in coastal saline land[J]. *Agronomy*, 2022, 12(8): 1947.
- [92] FANG Dong, GUO Kai, AMEEN A, et al. A root density tradeoff in an okra-assisted subsurface pipe drainage system for amelioration of saline soil[J]. *Agronomy*, 2022, 12(4): 866.
- [93] GUO Longmei, CAO Banghua, MAO Peili, et al. Fine root vertical-seasonal distribution of Robinia pseudoacacia in relation to abiotic factors in a chronosequence in coastal saline alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2021, 45(6): 750 – 765.
- [94] RATHORE A P, CHAUDHARY D R, JHA B. Seasonal patterns of microbial community structure and enzyme activities in coastal saline soils of perennial halophytes[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(5): 1779 – 1790.
- [95] JING Changliang, XU Zongchang, ZOU Ping, et al. Coastal halophytes alter properties and microbial community structure of the saline soils in the Yellow River Delta, China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 134: 1 – 7.
- [96] GU Chen, HUANG Weibin, SHAO Qing, et al. Effects of different growth patterns of *Tamarix chinensis* on

- saline-alkali soil; Implications for coastal restoration and management[J]. *Biotechnology Letters*, 2022, 44(12): 1519 – 1526.
- [97] TEO H M, A A, A W A, et al. Setting a plausible route for saline soil-based crop cultivations by application of beneficial halophyte-associated bacteria: A review[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(3): 657.
- [98] 崔丽洋, 谢茜, 毛青, 等. 土壤微藻对盐胁迫的响应及其对盐渍化土壤的改良作用 [J]. 地球科学, 2023, 48(11): 4270 – 4278. [CUI Liyang, XIE Qian, MAO Qing, et al. Response of soil microalgae to salt stress and its improvement effect on salinized soil[J]. *Earth Science*, 2023, 48(11): 4270 – 4278. (in Chinese with English abstract)]
- [99] ZHOU Lixiu, LIU Wei, DUAN Huijie, et al. Improved effects of combined application of nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter beijerinckii* and microalgae *Chlorella pyrenoidosa* on wheat growth and saline-alkali soil quality[J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137409.
- [100] ZHOU Di, YU Junbao, GUAN Bo, et al. A comparison of the development of wetland restoration techniques in China and other nations[J]. *Wetlands*, 2020, 40(6): 2755 – 2764.
- [101] SUN Ruibo, WANG Xiaogai, TIAN Yinping, et al. Long-term amelioration practices reshape the soil microbiome in a coastal saline soil and alter the richness and vertical distribution differently among bacterial, archaeal, and fungal communities[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 12: 768203.
- [102] YANG Hongjun, XIA Jiangbao, CUI Qian, et al. Effects of different *Tamarix chinensis*-grass patterns on the soil quality of coastal saline soil in the Yellow River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: 145501.
- [103] XIE Wei, ZHANG Kai, WANG Xiaoying, et al. Peanut and cotton intercropping increases productivity and economic returns through regulating plant nutrient accumulation and soil microbial communities[J]. *BMC Plant Biology*, 2022, 22(1): 121.
- [104] ATTA K, MONDAL S, GORAI S, et al. Impacts of salinity stress on crop plants: Improving salt tolerance through genetic and molecular dissection[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1241736.
- [105] NGUYEN H L, TRAN D H. Saline soils and crop production in coastal zones of Vietnam: Features, strategies for amelioration and management[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2020, 52(4): 1327 – 1333.
- [106] SHAYGAN M, BAUMGARTL T. Reclamation of salt-affected land: A review[J]. *Soil Systems*, 2022, 6(3): 61.
- [107] 陈罡, 邢献予, 潘文利, 等. 辽河三角洲杨树防护林对盐碱地改良效应研究 [J]. 北方园艺, 2017(5): 156 – 160. [CHEN Gang, XING Xianyu, PAN Wenli, et al. Improvement effect of poplar shelterbelts on saline-alkalized soil of Liaohe River delta[J]. *Northern Horticulture*, 2017(5): 156 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [108] XIAO Meng, LIU Guangming, JIANG Shengguo, et al. Bio-organic fertilizer combined with different amendments improves nutrient enhancement and salt leaching in saline soil: A soil column experiment[J]. *Water*, 2022, 14(24): 4084.
- [109] 张金龙, 闻铁, 王鹏山, 等. 暗管排水控制区土壤盐分淋洗研究 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 242 – 246. [ZHANG Jinlong, WEN Tie, WANG Pengshan, et al. Studies on salt-leaching of soil in the region between subsurface drains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 242 – 246. (in Chinese with English abstract)]
- [110] LI Xiaoguang, GUO Kai, FENG Xiaohui, et al. Soil respiration response to long-term freezing saline water irrigation with plastic mulching in coastal saline plain[J]. *Sustainability*, 2017, 9(4): 621.
- [111] ZHANG Jishi, BIAN Qianqian, MIAO Qi, et al. Maize productivity response to combined tillage and mulching in coastal saline zones[J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114(1): 784 – 794.
- [112] 欧阳竹, 王竑晟, 来剑斌, 等. 黄河三角洲农业高质量发展新模式 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 145 – 153. [OUYANG Zhu, WANG Hongsheng, LAI Jianbin, et al. New approach of high-quality agricultural development in the Yellow River Delta[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(2): 145 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [113] SU Xiaosi, WANG Yongqi, WANG Gaoxiang, et al. Assessment and prediction of coastal saline soil improvement effects combining substrate amendments and salt barrier materials in typical region of the Yangtze River Delta[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 223: 105483.
- [114] 姜月华, 倪化勇, 周权平, 等. 长江经济带生态修复示范关键技术及其应用 [J]. *中国地质*, 2021, 48(5):

- 1305 – 1333. [JIANG Yuehua, NI Huayong, ZHOU Quanping, et al. Key technology of ecological restoration demonstration in the Yangtze River Economic Zone and its application[J]. *Geology in China*, 2021, 48(5): 1305 – 1333. (in Chinese with English abstract)]
- [115] 崔心红, 朱义, 张群, 等. 棉花秸秆隔离层对滨海滩涂土壤及绿化植物的影响 [J]. *林业科学*, 2009, 45(1): 31 – 35. [CUI Xinhong, ZHU Yi, ZHANG Qun, et al. Effect of cotton stalk isolator layer in soil on garden plants and soil characters of coastal saline soils[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(1): 31 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [116] WANG Peijun, LIN Xiaolan, LIU Qi, et al. Interactions between flue gas desulfurization gypsum and biochar on water infiltration characteristics and physicochemical properties of saline-alkaline soil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(11): 1273.
- [117] 李高洋, 黄永相, 吴伟健, 等. 海水稻根际效应对滨海盐碱地土壤氨氧化微生物的影响 [J]. *土壤学报*, 2023, 60(2): 587 – 598. [LI Gaoyang, HUANG Yongxiang, WU Weijian, et al. Effects of seawater rice rhizosphere effect on soil ammonia-oxidizing microorganisms in coastal saline-alkali soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(2): 587 – 598. (in Chinese with English abstract)]
- [118] 邓晓, 武春媛, 杨桂生, 等. 椰壳生物炭对海南滨海土壤的改良效果 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(4): 723 – 731. [DENG Xiao, WU Chunyuan, YANG Guisheng, et al. Improvement effect of coconut-shell biochar on coastal soil in Hainan[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(4): 723 – 731. (in Chinese with English abstract)]
- [119] 陆宝金, 田生昌, 左忠, 等. 盐渍化土地可持续利用研究综述及展望 [J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(1): 79 – 88. [LU Baojin, TIAN Shengchang, ZUO Zhong, et al. Review and prospect on sustainable utilization of salinized land[J]. *Journal of Ningxia University(Natural Science Edition)*, 2023, 44(1): 79 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [120] WICKE B, SMEETS E, DORNBURG V, et al. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(8): 2669 – 2681.

编辑: 汪美华



吕航, 吉林大学“唐敖庆学者”领军教授, 博士生导师。吉林省首批“长白英才”青年英才, 吉林省省域拔尖人才(D类)。兼任《吉林大学学报》《地球科学》《水文地质工程地质》等期刊编委。获长春市高技能职工称号, 入选吉林大学优秀青年教师培养计划。曾获全国水利学科青年教师讲课比赛一等奖、吉林大学青年教师教学水平大赛一等奖等奖项。

长期从事“季节性冻土区水文过程和典型物质迁移转化”方面的研究与教学工作。先后承担和参加了国家自然科学基金委、国家水体污染控制与治理科技重大专项、国家重点研发计划项目、国家公益性行业科研专项、吉林省科技厅等科研项目 10 余项, 近 5 年以第一/通讯作者发表 SCI 论文 25 篇, 其中中科院一区 TOP 期刊论文 14 篇。