

DOI: 10.11766/trxb202110270578

杨劲松, 姚荣江, 王相平, 谢文萍, 张新, 朱伟, 张璐, 孙瑞娟. 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 Jingsong, YAO Rongjiang, WANG Xiangping, XIE Wenping, ZHANG Xin, ZHU Wei, ZHANG Lu, SUN Ruijuan. Research on Salt-affected Soils in China: History, Status Quo and Prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10–27.

中国盐渍土研究: 历程、现状与展望*

杨劲松, 姚荣江, 王相平, 谢文萍, 张新, 朱伟, 张璐,
孙瑞娟

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 盐渍土研究是以盐渍土和盐渍生境作为主要研究对象, 以盐渍土和盐渍化的发生与演变过程、环境要素和人类活动对盐渍化的影响与作用机制、盐渍土的治理、改良和利用的理论和技术为主体的研究领域。我国盐渍土面积巨大、种类繁多, 盐渍化问题突出, 对农业生产和生态环境造成不同程度的影响。我国科学家提出的盐渍土“水盐调控”、“水盐平衡”, “淡化肥沃层”和“障碍消减”等理论与技术方法, 为发展农业生产、提高土地产能、保障粮食安全、拓展耕地资源等发挥了积极作用。近期我国在土壤盐渍化演变过程的监测与多源数据融合、土壤水盐运移过程模拟与尺度拓展、盐渍农田养分循环与减损增效、盐渍障碍的生态消减、盐渍障碍微生物修复、盐渍农田灌排优化管理与边际水安全利用等方面取得了积极的进展和成果。建议今后深入开展盐渍土精准控盐的高效和安全用水理论与技术、土壤盐渍障碍的绿色消减与健康保育、盐渍农田养分库容扩增与增碳减排、土壤盐渍化与区域生态的耦合响应和协同适应等方面的理论与技术研究。应面向农业、资源、生态、环境等领域和行业, 致力于拓展理论和新技术的研究, 为国家农业升级、粮食安全、耕地保障、生态安全、高质量发展发挥重要作用。本文回顾了我国盐渍土研究工作的发展历程以及国内外研究之间的联系, 系统分析了近期盐渍土相关研究工作的特色进展, 结合目前国内外相关研究的前沿热点和国家需求, 提出了我国盐渍土研究的展望。

关键词: 盐渍土; 盐渍化防控; 障碍消减; 生态治理; 水盐调控; 盐碱地

中图分类号: S152.4 **文献标志码:** A

Research on Salt-affected Soils in China: History, Status Quo and Prospect

YANG Jingsong, YAO Rongjiang, WANG Xiangping, XIE Wenping, ZHANG Xin, ZHU Wei, ZHANG Lu, SUN Ruijuan

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Taking salt-affected soils and salt-affected habitat as the main research objects, salt-affected soil research is a field focusing on genesis and evolution process of salt-affected soils and salinization, on impact and mechanism of environmental

* 国家自然科学基金项目(U1806215, U1906221, 42077084, 41977015)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. U1806215, U1906221, 42077084, 41977015)

作者简介: 杨劲松(1959—), 男, 江苏靖江人, 博士, 研究员, 研究方向: 盐渍土治理利用与盐渍化防控。E-mail: jsyang@issas.ac.cn

姚荣江(1980—), 男, 江苏靖江人, 博士, 副研究员, 研究方向: 土壤盐渍障碍生态消减机制。E-mail: rjyao@issas.ac.cn

收稿日期: 2021-10-27; 收到修改稿日期: 2021-10-31; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-11-

factors and human activities on salinization, and on theory and technology of salt-affected soils management, improvement and utilization. With huge area and a wide variety, salinization has prominent impact on agricultural production and ecological environment in China. On salt-affected soil research, the theories and technical methods proposed by Chinese scientists, such as “water and salt regulation”, “water and salt balance”, “salt-free fertile layer” and “obstacle reduction”, have played a positive role in developing agricultural production, improving land productivity, ensuring food security and expanding cultivated land resources. Recently, China has made positive progress and achievements in monitoring the evolution process of soil salinization and multi-source data fusion, simulation and scale expansion of soil water and salt transport process, nutrient circulation-loss control-efficiency increase of salt-affected farmland, ecological reduction of saline obstacles, microbial remediation of saline obstacles, optimal management of irrigation and drainage of saline farmland and safe utilization of marginal water. It is suggested to carry out theoretical and technical research on efficient and safe water use theory and technology for precise salt control of salt-affected soils, green reduction and health conservation of soil salinity barriers, expansion of nutrient storage capacity of saline farmland, carbon increase and emission reduction, coupling response and collaborative adaptation of soil salinization and regional ecology. We should strive to expand the theoretical research and develop new technology for agriculture resources, ecology, environment and other industries and fields, and play more important role in the country's agricultural upgrading, food security, cultivated land security, ecological security and high-quality development. This paper reviews the development process of salt-affected soils research in China and the relationship between domestic and foreign research, systematically analyzes the characteristics and progress of recent salt-affected soils related research, and puts forward the research prospect of salt-affected soils in China in combination with the frontier hotspots and national needs of relevant research at home and abroad.

Key words: Salt-affected soils; Salinization prevention and control; Obstacle reduction; Ecological management; Water salt regime regulation; Saline-alkaline land

盐渍土是指土壤中存在较高浓度的可溶性盐分离子，对土壤的物理、化学、生物等特性和植物生长造成不利影响的各种类型土壤的统称，包括盐化土壤、碱化土壤、盐土和碱土等^[1]。而土壤盐渍化是可溶性盐分在土壤中积聚，导致土壤基本特性恶化和质量下降的过程。盐渍土作为生态系统的一部分，其独特的土壤理化、生物学性质往往产生异于寻常的生态系统物质、能量循环过程，引起农业资源的浪费和脆弱的生态环境，并造成经济损失和次生危害^[2]。当前，全球范围内的土壤盐渍化程度仍呈现上升趋势，全球盐渍土的总面积约 $1.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ，其中 14% 为被定义为不适宜生产的林地、湿地和自然保护区，据测算其余 86% 的盐渍土提供了目前全球 11% 的生物量产量^[3]。在我国，盐渍土总面积为 $3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，分布于从热带到寒温带、滨海到内陆、湿润地区到极端干旱区的广袤地区^[1, 4-5]。用好盐渍土资源事关国家粮食安全，党和国家领导人对盐渍土地的治理和利用工作极为重视。盐渍化耕地作为我国最主要的中低产田类型之一，其土壤有机质含量不足 1% 的面积达到 26%，整体有机质含量低于欧洲同类土壤的 $1/2$ ^[6]，因而提高其耕地质量与生产力

水平对提升全国耕地质量等级的意义重大。同时，治理开发未利用盐渍土地，可以有效扩增国家的耕地资源，拓展农业发展空间^[7]。目前，全球范围内土壤盐渍化表现出局部减缓与全局加剧并存、原生与次生并存、自然演替和极端气象扰动并存等特征^[8]，同时在气候增温和水资源配置调整的未来场景下，盐渍化演变过程加快并愈发敏感，对人类不当利用和自然灾害的抵御能力减弱，特别是在脆弱生态区盐渍化导致“山水林田湖草沙”系统的生产和生态功能退化、干旱区水资源利用导致次生盐渍化、东部沿海地区的海水入侵引发次生退化等，近年来备受广大科技工作者和社会的关注。

本文回顾了我国盐渍土研究工作的发展历程以及国内外研究之间的联系，系统分析了近期盐渍土相关研究工作的进展，结合目前国内外相关研究的前沿热点和国家需求，提出了未来我国盐渍土方向的研究展望。

1 中国盐渍土研究发展历程与重要性

中国盐渍土研究始于 20 世纪 50 年代，从继承

前苏联关于盐渍地球化学理论的认识和经验,到学习和吸收欧美、以色列的盐土农业(Biosaline)生物治理的概念,引进和发展美国、荷兰、以色列等国家关于水盐运移、节水灌溉、排水管理与劣质水安全利用的理念,直至融合了我国对盐渍土障碍消减、地力提升与生态提质的自身需求,形成了服务于农业与生态、特色明显、多学科交融的盐渍土生态治理理论和方法体系^[7]。总体上,我国的盐渍土研究历程大致可分为资源清查、水利改良、综合治理和可持续管理四个阶段^[7,9]。正是通过这四个阶段的工作,我国的盐渍土研究在发展农业生产、提高土地产能、保障粮食安全、拓展耕地资源等方面发挥了积极而重要的作用。“十一五”到“十三五”期间,我国分别部署和实施了面向全国的公益性行业(农业)专项经费项目“盐碱地农业高效利用配套技术模式研究与示范”,面向东北、河套平原和新疆干旱区的盐碱地生态治理关键技术研发与集成示范等三个国家重点研发计划项目,面向环渤海区域的国家科技支撑项目“渤海粮仓科技示范工程”等国家重大项目,有力地推动了我国盐渍土研究的发展和深入以及研究队伍的建设。

近年来,国际土壤科学联合会(IUSS)涉及的盐渍土学科主要在土壤盐渍化发生演变、水分高效利用、植物耐盐性三大方向,比如2018年在巴西里约召开的第21届世界土壤学大会,有关盐渍土领域的主题包括:多源数据融合与盐渍化反演、盐渍化演变过程模拟、劣质水安全利用、盐渍化的生态水文过程、盐渍障碍修复与作物响应等^[10-11]。2021年世界土壤日(WSD)主题为“防止土壤盐渍化,提高土壤生产力”。目前,我国的盐渍土专题既涵盖了国际盐渍土的方向和内容,又突出了国内特色,注重科学需求和国家需求的有机结合,研究内涵更为丰富,涉及面更加宽广,学科交叉更多。

根据Web of Science核心合集数据,选择了Soil salinization、salt-affected soil、salinized soil、saline-alkaline soil和alkaline soil作为主题词,对2001—2020年间发表的相关论文进行了检索,共计发表13 166篇文章。从国家间对比来看,我国学者共发表了3 499篇论文,占比26.6%,美国学者发表了1 689篇,占比12.8%,印度学者发表了

1 241篇,占比9.4%,澳大利亚学者发表了940篇,占比7.1%。从图1a给出的中、美、印、澳等主要国家逐年SCI论文数来看,21世纪以来SCI发文量呈现快速上升趋势;在2001—2008年间我国科学家的SCI论文数为312篇,略高于澳大利亚和印度,但低于美国523篇,我国单篇平均引用次数为32次,低于美国的51次;2009年以后中国学者的SCI论文急剧增长,其中2009—2016年为稳定增长期,这一期间中国学者发文量1 390篇,已显著高于美国645篇,平均引用25次,低于美国的42次;2017年以后为爆发式增长期,2017—2020年中国学者共发文1 799篇,大幅领先美国的521篇,平均引用11次,略低于美国的13次。从学科类别来看,2001—2020年间盐渍土研究发表在环境学领域的文章占比30.8%,土壤学占比20.0%,农艺占比9.9%,水资源占比8.7%;在2005年以前,全球盐渍土研究在土壤学领域的SCI论文数要高于环境学,此后土壤学领域论文占比逐年降低,由2004年占比35.2%降至2020年的16.6%;从2012年起,环境学领域论文占比大幅升高,由2012年的25.8%增加至2020年的39.1%;农艺和水资源领域的论文占比基本稳定(图1b);我国盐渍土研究SCI论文学科分类与国外略有差异,表现在土壤学、农艺和水资源领域的论文占比一直较稳定,环境学领域论文占比在2014年之前亦较稳定,2015年后环境学领域论文占比迅速攀升,由2015年的32.2%升至2020年的47.1%。总体上,自2009年后我国盐渍土研究文章数量与质量同步提升较快,尤其是2017年开始爆发式数量增长,在国际上属于异军突起的学科队伍,这与“十三五”期间我国部署了“典型脆弱生态修复与保护研究”、“水资源高效开发利用”等一批国家重点研发专项项目所取得的成果密切相关;然而,我国文章的影响力与欧美相比仍存在一定差距,论文原创性和影响力有待提升,高被引频次前100篇论文中来自中国学者的仅10篇。盐渍土研究的学科交叉特点越来越明显,环境、生态和生物等学科的方法和理念被越来越多地引入盐渍土研究,推动其由传统的农业资源功能研究向环境生态和农业资源复合功能研究的方向转变^[12]。

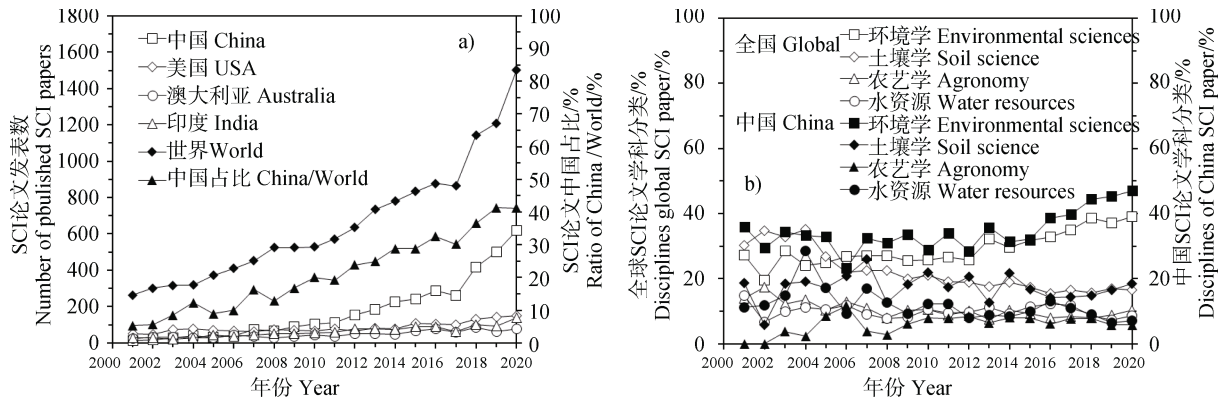


图 1 2001—2020 年中、美、澳、印四国发表 SCI 论文的数量、比例以及全球和中国发表 SCI 论文的学科分类

Fig. 1 The SCI paper numbers published by China, United States, Australia and India, the contribution of China to the global, and the discipline classifications of the published SCI papers by global and China from 2001 to 2020

2 盐渍土改良与盐渍化治理的主要机制

盐渍化的发生和盐渍土的形成,主要是受自然和人为等多种因素影响下的水分和盐分在土体中迁移与再分配的水盐运动过程所控制。当前,土壤水盐运动过程及其调控机理仍然是盐渍土研究的核心问题^[13],目前盐渍土的改良和盐渍化治理包含各类物理、化学、水利和生物等途径,其实质是通过改变土壤的上、下边界条件和相关土-水-气-生参数,定向调节土壤盐分的运动与聚集过程,例如:通过水分管理加速耕层盐分淋洗以形成“淡化肥沃层”或局部“水肥储蓄层”、减少土面蒸发和作物蒸腾以抑制盐分表聚、创建疏松隔层以阻滞盐分上行、增加土壤排水以加快土体排盐,或定向引导盐分聚集以根区避盐等^[14]。盐渍土改良与水盐调控的主要机制包括:

2.1 物理调控

物理调控主要是通过改变耕层土壤物理结构、降低蒸散量、增加深层渗漏量来调节土壤水盐运动过程,从而提高土壤入渗淋盐性能,抑制土壤盐分上行并减少其耕层聚集量(图 2)。传统上,盐渍土水盐运动的物理调控措施主要包括耕作(深耕晒垡、深松破板和粉垄深旋等)和农艺(地面覆盖、蒸腾抑制剂和秸秆深埋等)措施^[5]。随着近年来材料科学研究的不断深入,出现了可降解液态地膜、生物材料、多孔吸附材料等盐渍化物理调控的新方法。在农艺措施方面,王婧等^[15]研究发现地膜覆盖与秸秆深埋(P+S)能够蓄水保墒和抑制矿化度较高的潜水蒸发,有利于建立“高水低盐”的土壤溶液系

统; Cui 等^[16]研究了降雨联合麦秸覆盖对重盐渍化土壤脱盐淋滤效果,发现秸秆覆盖增强了降雨对土壤盐淋的影响,特别是在剖面 0~80 cm 土层;姚全胜等^[17]研究表明蒸腾抑制剂降低了毛叶枣叶片气孔导度,并降低每日蒸腾作用高峰时段的叶片蒸腾速率。耕作措施除了具有提高孔隙度加速盐分淋洗的直接效应,还有改善土壤团粒结构并促进淋盐的间接效应;杨博等^[18]研究表明河套灌区盐渍土粉垄耕作 0~40 cm 深度,显著提高土壤孔隙度,增加 0.25~1.00 mm 粒径的团聚体含量,快速降低耕层土壤可溶性全盐;此外,研究发现季节性冻融可显著增加耕作土壤 2 mm 干筛团聚体和 0.25~1.0 mm 团聚体的含量,降低平均孔隙面积以及弗理特(Feret)直径,且耕作对冻融条件下土壤结构形成的正效应强于机械压实的负效应^[19]。总体来看,物理调控措施的机理相对明确,操作性较强,物理调控的效果根据土壤质地、剖面构型、气象和地下水条件、灌溉水质水量等状况不同存在差异。

2.2 化学调理

化学调理以离子代换、酸碱中和、离子均衡为主要原理,运用 Ca^{2+} 置换出土壤胶体上的 Na^+ 并淋洗出土体以降低或消除其水解碱度,利用无机酸释放、有机酸解离和 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 水解形成的 H^+ 与土壤溶液中的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 中和以清除土壤溶液中的 OH^- ,通过降低土壤碱化度(ESP)和 pH 的方式消除碱化危害,主要适用于碱土、盐化碱土和碱化盐土(图 3)。目前常用的化学调理材料分为钙基(脱硫石膏、磷石膏等)、酸性盐(磷酸二氢钾、磷酸二氢钠等)、强酸弱碱盐(硫酸亚铁、硫酸铝等)和有

机酸（腐殖酸、糠醛渣等）四类^[20]。石膏施用后溶解的 Ca^{2+} 与土壤胶体 Na^+ 交换并淋洗，降低土壤胶体吸附的交换态钠^[21]。报道显示，石膏施用在降碱排盐、提高微生物活性、促进植株生长发育等方面均具有显著效果^[22-23]；但是，受土壤碱化度、阳离子交换量和石膏溶解度等多种因素的影响，石膏用量过高会抑制植物生长^[24]。诸多研究表明多种材料联用能显著提升盐渍土碱化特性的调理效应，在保证灌溉量的基础上，与单施腐殖酸相比，石膏与腐殖酸配施更显著地降低土壤 pH、交换态 Na^+ 和钠吸附比（SAR）^[25-26]。有机酸类材料对盐渍土除了具

有酸碱中和、降低 pH 的直接效应，还有提高土壤缓冲性能、提升养分库容的间接效应^[27-28]。此外，高分子材料亦被用于盐渍土调理研究，王启龙^[29]发现高分子聚丙烯酰胺（PAM）通过絮凝和团聚作用以抑制蒸发积盐；宋纪雷等^[30]研究表明苯乙烯系阴离子交换树脂对土壤盐碱离子具有显著钝化效果，降低水溶性全盐含量 30.6%。总体上，化学调理具有见效快、材料配方灵活多样等特点，但存在效果单一、持续时间短、可能发生二次污染等问题，应加强生命周期评价（LCA）以评估其安全性、经济性和长效性。

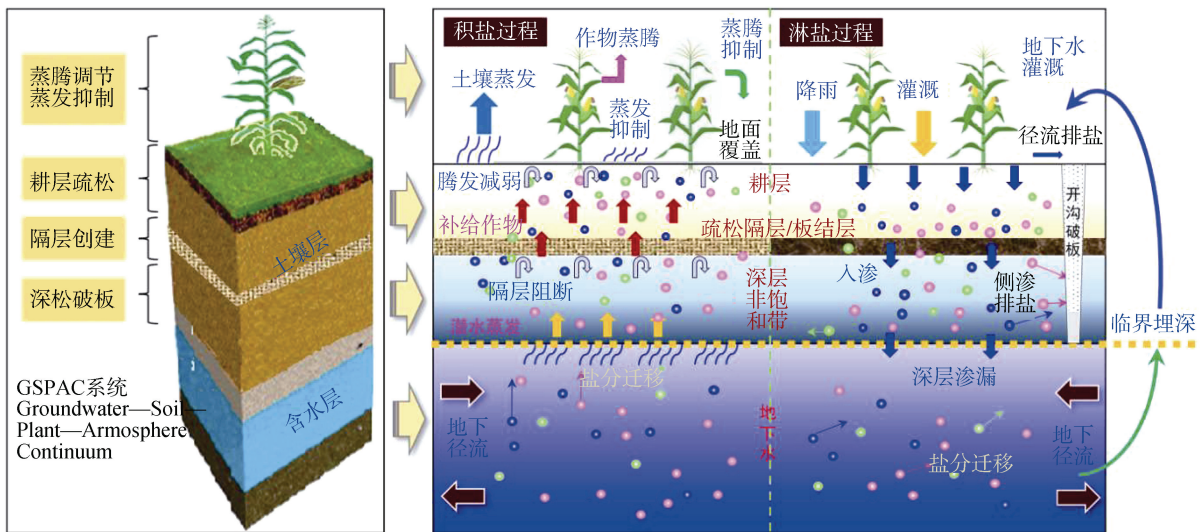


图 2 盐渍土水盐运动的物理调控原理

Fig. 2 Theory on the physical regulation of water-salt migration on salt-affected soil

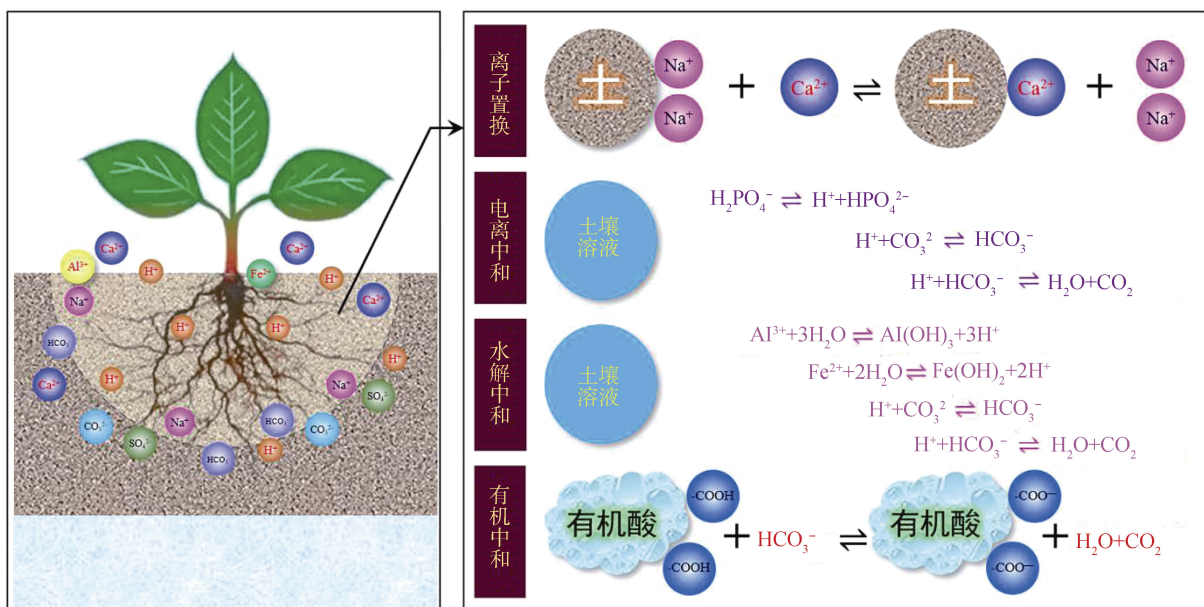


图 3 盐渍土化学调理原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of chemically conditioning on salt-affected soil

2.3 灌排管理

灌排管理是通过不同类型的灌溉手段结合明沟、暗管、竖井等排水方式，控制或降低地下水位、维持耕层或植物根系分布区的水盐平衡、促进土体盐分排出的水盐调控方式（图 4）。除了传统的大水漫灌和明沟排盐，微咸水安全利用、咸水结冰冻融、膜下滴灌、暗管排水等都是目前较为常用的灌排管理措施^[31-32]。在非常规水资源的安全利用方面，刘海曼等^[33]研究发现高矿化度咸水灌溉后覆盖地膜，膜下蒸汽水凝结成淡水在地表形成淡化薄层，为作物出苗提供适宜的土壤水分和微域低盐环境；一些学者利用冬季咸水结冰冻融过程咸淡水分离的原理，即低温时咸水结冰，融化时高盐浓度的冰先融化入渗，低盐浓度的冰后融化入渗，起到咸淡水梯次入渗使土壤表层脱盐^[34]。节水灌溉为盐渍土根区水盐调控提供重要依据，大量研究表明膜下滴灌有利于在植物根系形成局部的淡化环境，亦有学者针对灌溉过程中土壤缺氧问题，利用曝气滴灌水肥一体化将大量微气泡与水肥同步输送到根区^[35]；然而，节水灌溉下非充分淋洗引起土壤盐分在亚表层聚集以及如何维持年际间土体水盐平衡备受关注。暗管排盐是通过在地下一定深度铺设打孔排水管网，保

持地下水位在临界埋深以下，或利用雨水和灌溉水淋洗出土壤盐分，实现土体排盐，适合地势低洼、地下水埋深浅或次生盐渍化灌区^[36]。暗管排盐效率与灌溉定额、吸水管的埋深、间距、管径等参数密切相关，增大暗管间距将降低灌溉水平均入渗强度，增加灌溉水量分配的空间差异，引起土壤脱盐不均衡^[37-38]。盐渍土的灌排管理需根据不同形成、驱动机制下的水盐运动实际情况进行确定，随着近年来气候变化、极端气候频繁和降雨带北进西移趋势的影响，开展水资源格局再分配、再平衡背景下的土壤盐渍化灌排管理研究至关重要。

2.4 生物改良

生物改良是指通过提升植物的耐盐抗逆能力并在盐渍土上进行适应性种植，利用植物根系生长改善盐渍土理化性质，或最大化植物生物量并结合收获物移除根区部分盐分，主要机制表现在植物耐盐性、植物生长对土壤质量提升、植物收获物除盐三个方面^[39]。大多数盐生植物和耐盐植物，如碱蓬、海蓬子、田菁、芦苇、羊草和柽柳等，都具备特殊的渗透调节机制或盐分泌机制，使得它们能够在高盐分的土壤中生长。伊朗、以色列和美国等国家通过种植盐生植物海马齿、海蓬子和盐地碱蓬以保持

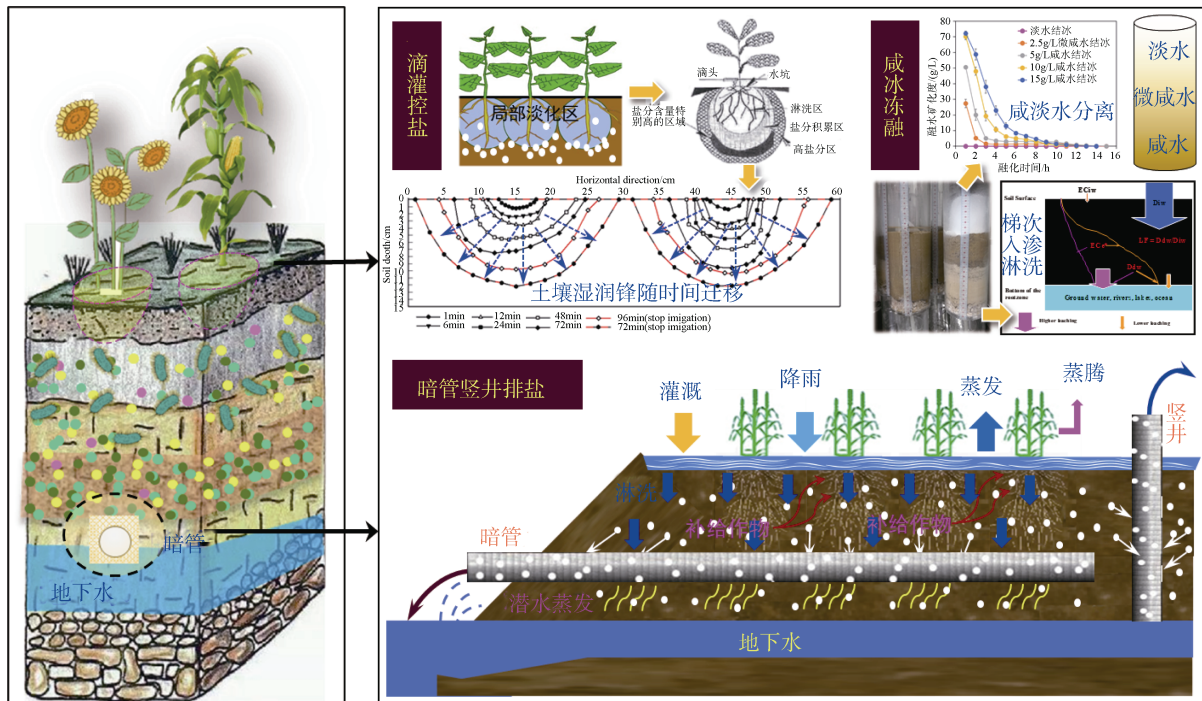


图 4 盐渍土灌排管理主要原理示意图

Fig. 4 Primary schematic diagram of irrigation and drainage management on salt-affected soil

盐渍土农业生态系统稳定^[40-41]。近年来,分子生物学的发展使得耐盐基因克隆和表达成为可能,如 Kumari 和 Jha^[42]克隆了一种新型基因 SbRPC5L,赋予植物非生物抗逆性的潜力,在盐胁迫下生长良好。盐生植物亦通过根系生长穿插和分泌物改善盐渍土的理化和生物学性质;曾玉彬^[43]研究发现盐渍土种植柽柳、西伯利亚白刺、沙枣等盐生植物降低土壤盐分、pH 和容重,提高土壤微生物数量,增强土壤纤维素酶、脲酶和脱氢酶活性。学者提出“干排盐”和“植物聚盐”的思路(图 5),即在盐渍区留出一定面积比例的低洼荒地承接周边多余的灌溉水与高盐分地下水,通过蒸发和蒸腾作用将盐分聚集到地

表或被植物吸收,利用该低洼荒地的积盐保证周边区域的土壤盐分平衡^[44-45];在干排盐系统中,盐生植物通过蒸腾作用促进土壤水分运动,使得土壤盐分在空间上分散,有效提高盐荒地聚集盐分的效率^[46-47];赵振勇等^[48]研究发现重度盐渍土种植海蓬子和盐地碱蓬可从土壤中带走 $4\ 709.98\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 和 $5\ 184.96\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 盐分,且海蓬子植株对 Na^+ 和 Cl^- 的积聚效率是盐地碱蓬的 2.2 倍~2.3 倍。“植物聚盐”为盐渍土的生物适应性改良提供了重要思路,尽管盐生植物生物吸盐效果较好,但盐渍土区土壤和地下水往往存在频繁的盐分交换,“植物聚盐”对盐渍土生物适应性改良的长效性仍有待长期观测。

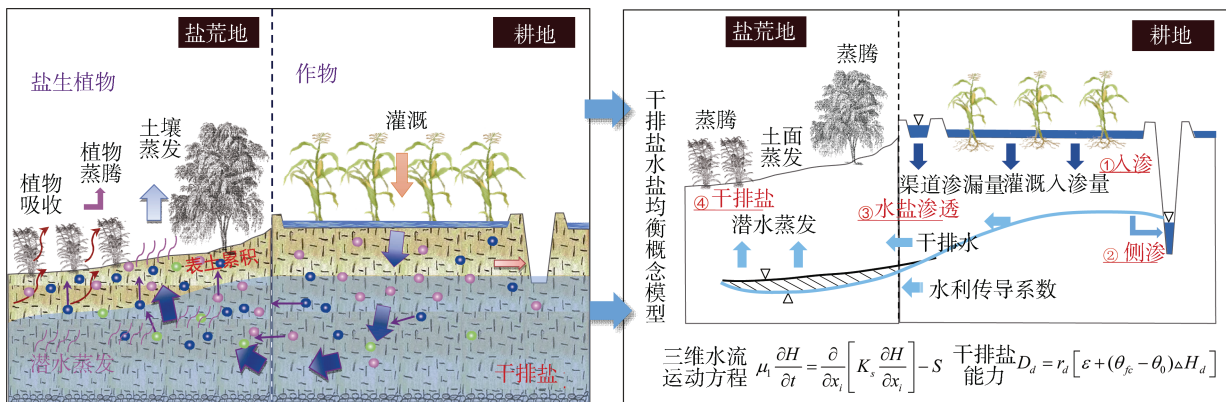


图 5 盐渍土生物干排盐原理示意图及其概念模型

Fig. 5 Schematic diagram and conceptual model of biological dry drainage of salt-affected soil

3 我国盐渍土研究的主要进展

3.1 盐渍化演变多源数据融合与水盐运移过程多尺度模拟

精确获取土壤盐渍化多尺度、多要素的时空动态,对精准解析自然、人为要素驱动下的盐渍化演变机制具有重要意义。近年来,随着遥感和近地传感技术的不断发展,使得土壤盐渍化多要素、多尺度、一体化监测成为可能,如航空/卫星光学/微波遥感影像^[49]、磁感式大地电导率仪^[50]、探地雷达^[51]、时域反射仪(TDR)和频域反射仪(FDR)^[52-53]等;其中,遥感和磁感式大地电导率仪因为其非接触式、快速高效、与盐分相关性强等优势,近年来被广泛用于土壤盐渍化的测评反演。基于多光谱遥感影像,陈实等^[54]基于 MODIS 数据建立了土壤盐渍化遥感监测模型,分析了北疆农区土壤盐渍化空间动态及其主要驱动因素;李艳华等^[55]以 Landsat-TM 多光谱

遥感影像为基础数据源,建立了土壤盐渍化监测指数模型,对渭干河-库车河流域土壤盐渍化进行估算。在土壤盐渍化的近地传感监测方面,邓凯等^[56]建立了磁感式表观电导率和土壤盐分实测值之间的线性混合模型,评估土壤剖面盐分的空间分布;Xie 等^[57]构建了磁感式大地电导率和土壤盐分之间的回归模型,定量评估了河口区近 10 a 来土壤盐渍化的时空演变。近年来,国内学者更多关注不同尺度、观测要素和数据之间的融合以提高土壤盐渍化的反演精度;吴亚坤等^[58]将 Landsat 影像与磁感应电导率仪(EM38)数据相结合研究了区域土壤盐分的空间变异性;陈俊英等^[59]构建了基于无人机多光谱遥感和 GF-1 卫星遥感数据的土壤盐渍化监测模型,采用改进的 TsHARP 尺度转换方法,实现无人机-卫星遥感升尺度的土壤盐渍化监测。总体上,将土壤盐渍化多要素、多尺度的“空天地”观测数据相结合,利用机器学习算法开展多元数据融合同化,以精准

推演盐渍化的时空演变过程，揭示盐渍化驱动机制成为未来研究热点。

土壤溶质运移模型是近似描述盐渍土水盐运移规律的有效方法，目前较成熟的商业化水盐运移数值模型包括 HYDRUS、SWAT、DRAINMOD、SHAW 和 COMSOL 等，其中 HYDRUS 模型能够较好地模拟点源交汇条件下饱和-非饱和渗流区水、热及多组分溶质的迁移与转化过程，也是目前最为广泛应用的模型^[60]。此外，SHAW 模型适用于季节性冻融区土壤水盐运移模拟^[61]，基于有限元理论的数值仿真模型 COMSOL 则适用于模拟地下水流动、土壤盐分运移等问题，在一些特定的土壤溶质运移过程模拟研究中，如盐分结晶、多组分耦合运移，具有广泛应用前景^[62-63]。土壤溶质运移过程的非线性，使得尺度转换一直是土壤水盐运移过程研究的难点；此外，土壤水盐运动的驱动因子随空间尺度的变化而变化，在剖面 and 景观尺度，水盐运动主要受植被、微地形和土壤质地等影响，而在灌区和流域尺度，水盐运动受灌排格局、河湖尾闾、灌溉扩张等因素控制^[64]。目前主要采用两种思路进行土壤盐渍化尺度上推研究：一种是将溶质运移模型和地理信息系统 GIS、遥感 RS 松散结合形成区域尺度下土壤溶质运移数值模型；如李彦^[65]将 SWAP 模型与 GIS 和 RS 相结合，对节水灌溉条件下区域尺度土壤水盐时空演变进行分布式模拟预测；另外一种思路是采用数据同化方法，以水盐运移模型作为模型算子，以大尺度观测数据作为驱动数据，采用同化算法将观测数据同化到模型中，如 Yao 等^[66]利用集合卡尔曼滤波算法将磁感式大地电导率数据同化到 HYDRUS-1D 模型，提高了土壤盐分时空动态的估算精度；丁建丽等^[67]利用集合卡尔曼滤波方法将 MODIS 与 Landsat TM 数据信息同化到 HYDRUS-1D 中。目前，关于土壤盐分运动的尺度转化研究尚不成熟，主要原因在于盐分迁移基于土壤水文过程，其驱动要素和控制因子更为复杂且具有时间和空间依赖性，未来研究应加强不同尺度观测数据的集成，构建普适性的尺度转换函数。

3.2 盐渍农田养分循环与减损增效

土壤盐渍化显著影响农田氮、磷等大量营养元素的迁移转化与吸收利用过程。研究表明，盐渍化农田化肥氮素利用率仅 14%~29%，磷肥利用率为 10%~25%，低于常规农田氮磷肥利用效率^[68]。土

壤盐渍化降低氮素养分利用效率的制约机制包括：

1) 影响土壤中氮磷迁移转化过程，如增大氨挥发和氮淋失、降低速效磷含量等降低土壤氮磷养分有效性；2) 抑制作物生长，降低作物吸水和氮磷吸收量，降低养分利用效率^[69]。盐分通常被认为是土壤有机氮矿化的制约因子，但也有研究表明有机氮矿化对土壤盐分有一个响应阈值，只有当盐分超过这一阈值时，才会对矿化起到抑制作用^[70]。袁军虎等^[71]发现盐分对土壤微生物量和微生物活性均有抑制作用。硝化作用是氮素转化的中心环节，影响到氮素迁移及其生物有效性^[72]。同样，有研究者认为土壤盐分抑制了硝化过程，硝化速率与土壤含盐量呈负相关关系^[73]；也有研究认为盐分对硝化的影响也存在一个阈值，低于该值时，盐分对硝化过程影响并不明显，只有当盐分超过这一阈值时，才会对硝化过程起抑制作用^[74]；最近的研究发现盐渍土对硝化的抑制作用不仅与盐分含量相关，还与盐离子组成密切相关^[75]。学者也从硝化功能微生物的角度深入阐明盐分对硝化过程的影响，发现在盐渍化土壤中氨氧化古菌（AOA）是其主导微生物^[76]。在盐渍化农田中，氨挥发和氮淋失是化肥氮素损失的主要途径，国内主流研究认为氨挥发量随盐分含量的升高而升高，但也有个别研究认为盐分升高抑制肥料水解，从而降低氨挥发^[77]。针对以上过程，国内学者重点从生物质材料、秸秆还田、石膏、化肥有机替代等角度开展盐渍农田障碍消减和氮素增效的调控研究。Zhu 等^[78]和 Xiao 等^[79]发现生物质炭可提升土壤质量，增大土壤孔隙，在改良盐渍土的同时增加土壤中速效养分，延长肥效，减少土壤铵态氮的淋失量，提高作物养分吸收和利用；此外，石膏施入盐渍土，土壤盐分、pH 值随土壤年限延长逐年下降，有机质含量，速效养分逐年增加，实现肥料利用率的增加^[80]；朱海等^[68]研究认为盐渍土作物生育期内投入化学氮肥的 30%采用有机肥替代，可提高大麦和玉米产量及养分利用效率。在盐渍土中，磷素移动性差且易与土壤胶 Ca²⁺结合形成沉淀，同时盐渍土中大量 Na⁺使土壤可溶性磷以磷酸钠盐的形式存在，危害作物生长，降低磷肥生物有效性^[81]，因此关于盐渍土磷素的研究更多从磷素活化方面开展。苏倩等^[82]在灰漠土上的研究表明，生物炭与磷肥配施能提高土壤中 Ca₂-P 的含量。刘娜等^[83]发现在盐渍土中添加生物炭、有机酸改变了根际土壤微

生物的群落结构,降低土壤 pH 和含盐量,提高根际速效磷含量。高珊等^[84]研究发现,在重度盐渍土中施用生物质炭,可以提高土壤中可吸收态磷素含量和提高碱性磷酸酶活性。

3.3 盐渍障碍生态消减

在高强度的人为改造影响条件下,土壤盐渍障碍快速消减,生产功能迅速提升,但生态系统形成与稳定具有滞后性和长期性,盐渍土的生态治理是指兼顾农田生产和生态功能、短期性与长效性、资源节约与环境友好的治理方式,其最主要的特征包括:生物适应性、资源节约性和环境友好型^[85]。(一)生物适应型盐渍障碍消减是指在减少人为干扰下,充分利用植物耐盐抗逆能力和适应性种植,通过植物生长改善盐渍土壤理化性质,同时通过增加植物生物量并移除植物根区收获部盐分来降低土壤盐渍化程度。Rozema 和 Flowers^[86]在 *Science* 撰文指出生物技术有助于解决全球不可逆的土壤盐渍化问题,盐生植物可在盐渍化程度较高的土地上生长,可以充分利用海水资源和边际水资源,避免使用紧缺的淡水资源改良盐碱地。植物修复被认为在盐渍土治理很有潜力,如培育耐盐物种,以去土壤中的盐离子来达到恢复盐化土壤^[87],植物修复与石膏改良相比可以去除多余的土壤深层的盐分,同时其从地上部和地下部均起到了固碳的作用。国内学者研究发现重度盐渍土种植盐生植物海蓬子和盐地碱蓬可从土壤中带走大量盐分^[48],此外,盐生植物通过蒸腾作用促进土壤水分运动,有效提高盐荒地聚集盐分的效率^[46]。(二)资源节约型盐渍障碍消减是指采用节约水资源和充分利用边际水资源,结合节水灌溉方式维持局部淡化层的有限治理方式,精细化节水控盐已成为当前及未来盐渍土治理的重要研究方向。Sun 等^[88]发现滴灌能显著降低土壤盐分含量,改善土壤结构,使原生植被从盐生植被演替为低耐盐植物。衡通等^[89]表明滴灌结合暗管排盐可实现当季降低土壤盐分 14.34 g kg^{-1} ,大幅减少了洗盐用水量。王振华等^[90]发现 5~7 年连续膜下滴灌棉田膜内根区 0~60 cm 土壤盐分低于 5 g kg^{-1} ,适合棉花种植。Guo 和 Liu^[91]、张越等^[92]发现在冬季抽取浅层地下咸水进行结冰灌溉,融水入渗后,咸淡水分离梯次入渗显著降低土壤盐度和 SAR,咸水结冰灌溉较直接灌溉咸水或淡水有更好脱盐效果。(三)环境友好型盐渍障碍消减是指将符合安全标准的农

牧业废弃物、生物质、工业副产品等材料,直接应用或者将其发酵、改性、复配后施入,以快速或长效地提升盐渍土的理化、生物学性质。生物质炭加入盐渍土促进了有机质和腐殖质的形成,提高了土壤碳氮比(C:N),增加了土壤对氮、磷等养分的吸附量和吸持强度,进而提高了肥料利用率,减少了面源污染^[93-94]。Yue 等^[95]施用生物炭后,盐渍土改良时间缩短并可供植物正常生长。Zhu 等^[96]将木质素纤维作为隔层埋于盐渍土中,发现木质素纤维能够抑制土壤返盐,且效果优于生物质炭。有关学者利用黄腐酸改良盐渍土,发现其能够吸附土壤中有害阳离子、减少盐分积累、平衡酸碱度、改善土壤结构^[97]。工业副产品脱硫石膏也是苏打碱土最常用的改良剂,但其应用还需考虑其环境风险。Zhao 等^[22]施用脱硫石膏一年后,盐渍土的 pH 和碱化度显著降低,且土壤和作物中的重金属含量低于可检测限值。

3.4 盐渍障碍的微生物修复

土壤微生物是土壤养分循环的主要参与者,其数量可有效体现土壤养分和能量循环的活跃程度^[98]。盐渍土中蕴藏着丰富的微生物资源,微生物对土壤物质组分,理化性质和微环境表现出高度的响应特性,随着近年来微生物研究技术的发展,研究方法多样化,利用微生物对盐渍土进行治理修复也得到广泛关注^[99]。目前,国内学者围绕不同生物气候带盐渍土微生物多样性分布格局、微生物与盐渍土改良过程的互馈适应、功能性微生物对盐渍土的修复效应与资源利用等方面开展大量研究工作^[100-101]。从研究进展来看,笔者认为微生物对盐渍土治理修复具有直接和间接两个方面的效应,在直接和间接效应的共同作用下促进盐碱地理化、生物学性质的改良。在直接效应方面主要表现为微生物的活动促进土壤团聚化、养分有益循环与难溶土壤养分元素的活化:一些细菌也可通过分泌胞外多糖,将砂粒粘结在一起以促进砂粒团聚成块^[102];陈丽娜等^[103]利用扫描电镜(SEM)研究发现苏打盐渍土接种灰绿曲霉后,该真菌能够缠绕盐碱土颗粒生长,其代谢产物能够在土壤上形成纳米粒子,从而改善土壤团粒与微团粒结构;同时,土壤微生物分泌大量不同类型的酶,如脲酶可有效地将土壤中的酰胺态氮水解成 NH_4^+ ,蔗糖酶可将土壤中大分子糖分解成果糖和葡萄糖,促进土壤养分的有益转化循环^[98];

此外,微生物可以产生嗜盐菌素、抗生素、有机酸、胞外多糖和各种碱性酶类物质,可使土壤中难溶性钾、磷、硅等元素转变为可溶性元素^[104-105],产生磷酸酶、植酸酶等胞外酶类酶分解有机磷,且解磷微生物在生长代谢过程中产生的有机酸可降低土壤的 pH^[106]。土壤微生物对盐渍土治理修复的间接效应主要是通过微生物-植物共生互馈来实现,如提高植物的耐盐、抗逆与养分吸收,促进植物生长与根系穿插,并进而改良修复盐渍土。研究发现 α -变形菌 (*Alpha-Proteobacteria*) 在土壤中主要起到帮助植物抵抗土壤中病原真菌的作用,硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae*) 能够有效降低土壤中盐碱度,AM 真菌菌丝将富含碳的化合物释放到土壤中,刺激溶磷细菌增殖,增强磷矿化与释放,对植物起到促生作用。代金霞等^[107]发现放线菌门能吸收营养物质及作为 70% 抗生素的来源,是降解盐渍土木质素与纤维素的主要功能菌群;此外,绿弯菌门能够分解纤维素,酸杆菌门能够降解植物残体多聚物及光合作用,厚壁菌门可以产生芽孢抵御外界有害因子,浮霉菌门参与碳氮循环,这些微生物均在提升盐渍土作物抗逆能力、促进生长方面发挥重要作用^[108]。近年来,国内学者通过各种功能微生物的组合制备复合微生物的菌剂、菌肥等,并在改良修复盐渍土方面开展大量的研究,总体上,功能微生物均表现出较好的效果。汪顺义等^[101]发现在工厂废水中分离出的耐盐性硫氧化细菌具有较强的硫转化功能,添加进盐渍土中能催化硫循环,可将土壤 pH 降低 0.3 个单位;侯景清等^[109]发现乳酸菌复合制剂能有效降低盐碱地的 pH 并增加土壤铵态氮、硝态氮及有效磷含量,同时可增加土壤中的放线菌数量,降低病原微生物数量,对盐碱地的改良具有良好效果。

3.5 优化灌排治理盐渍土与边际水利用

淡水资源短缺是盐渍区农业生产发展的主要限制因素,为更好解决水资源制约条件下的盐渍土治理利用问题,新型的节水控盐灌溉方法和水分高效的优化灌排制度,以及咸水和微咸水资源等边际水资源的安全利用研究受到重视。在不同节水灌溉方式、灌溉制度的抑盐效应和优化灌排治理盐渍土研究方面,梁菊蓉^[110]研究发现渗灌、滴灌和沟灌三种灌溉方式均可降低土壤的盐分和 pH 值,而滴灌还可以提高土壤的速效养分和微生物特性。褚琳琳等^[111]通过对不同质地滨海盐碱地进行的喷灌模

拟试验,确定了提高盐分淋洗效果、维持土壤含水率的最佳喷灌强度。Lin 等^[112]确定了滴灌下土壤水盐空间分布及棉花产量的影响因素,提出了优化灌溉方案。于丹丹等^[113]研究了暗管排水与节水灌溉条件下盐渍化农田水盐分布特征,发现暗管排水条件下在油葵拔节期进行节水灌溉有利于土壤脱盐、脱碱。朱振学等^[114]研究了在苏打盐碱地玉米秸秆和稻壳结合不同供水压力暗管灌溉的特性,发现选择供合适的供水压力和玉米秸秆与土壤的合理混掺方案,可以优化水分在作物根系的供应,抑制盐碱危害,增加作物产量。在盐渍化农田的微咸水利用研究方面,确定作物适宜的灌溉水质阈值是实现咸水微咸水资源化高效安全利用的基础^[115]。咸水冰融化过程中,后融化的微咸水或淡水对土壤盐分具有较好的淋洗效果,使土壤表层脱盐^[91]。Zhang 等^[116]研究发现咸水结冰融水灌溉配合石膏的施用,可以有效提高土壤导水率和降低土壤 pH,有更好的改良和修复滨海盐渍土的效果。朱成立等^[117]研究了生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响,发现生物炭能缓解微咸水灌溉条件下土壤盐分表聚现象。冯根祥等^[118]研究发现,暗管排水措施可以有效排除微咸水灌溉过程中土壤中累积的盐分,预防微咸水长期灌溉引起的土壤积盐。张喜英等^[119]研究发现,在多年盐碱地土壤肥力的提升,灌溉冬小麦水质阈值可由原来的 3 g/L 提升到 5 g/L。李金刚等^[120]研究了微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移的影响,发现 -20 kPa 和 -30 kPa 灌水下限适中,既能较充分淋洗膜内表层土壤盐分,又不会造成微咸水中的盐分滞留累积,在玉米收获后 100cm 土体有积盐现象,通过秋浇或春汇淋洗土壤盐分,可保证耕地盐分不逐年累积。Wang 等^[121]利用数学模型和田间试验相结合的研究方法,预测了长期微咸水灌溉对冬小麦及土壤盐分含量的影响,发现低灌水量和高矿化度处理表现出一定盐分累积趋势,因此应用微咸水进行灌溉时要重视高矿化度和低灌水量情形,以安全利用微咸水资源。此外,张申^[122]针对宁夏银北盐碱区建立了太阳能发电+暗管排水条件下的玉米和油葵适宜的灌排制度,提出了利用冗余电能控水脱盐增产的模式。水肥一体化膜下滴灌技术因其节水控盐、增产增效、增温保墒等特点,在干旱区农业生产中也得到了广泛应用。

4 我国盐渍土研究展望

我国盐渍土研究队伍规模大,在国际上的重要性和影响力不断提升,从中国科学院、中国农业科学院等国家级科研单位和各类高等院校,到盐渍土分布省份和区域的省、市级农业科学院等,均开展针对性的研究工作,为我国的盐渍土资源利用、耕地质量提升和粮食增产作出了重要贡献。但是,必须清醒地看到我国盐渍土研究还存在许多不足:一是开创性研究有待加强,尽管我国盐渍土研究正蓬勃发展,但是基础理论、模型、软件、设备都掌握在欧美国家手中,水盐运动和水盐平衡理论后至今未有更大的突破;二是学科交叉不够,盐渍土的原生障碍和次生障碍如影随形且相互作用,这要求盐渍土研究要打破传统的单一农田水利思路,从水分管理、结构改善、肥力培育和功能提升等多个角度介入;三是缺乏长期的野外观测台站和区域之间的联网比对研究,我国盐渍土资源分布在不同生物气候带,土壤类型、资源禀赋、水热条件、种植方式差异较大,对主要盐渍土分布区土壤盐渍化发生、演变过程中共性与个性的规律、驱动机制、调控原理的对比研究不够,导致在全国尺度上的理论和技术突破存在一定的难度。

总之,类型多样、资源丰富、地域广袤的盐渍土作为我国重要土地资源,为我国土壤学家和农业专家提供了得天独厚的研究条件。东部低平原的滨海盐土,东北松嫩平原苏打盐碱土、新疆绿洲盐渍土、河套灌区灌淤盐渍土、黄淮海平原盐化潮土,河西走廊盐化耕灌草甸盐土、南方沿海酸性硫酸盐土、青新极端干旱区漠境盐土等,为我国盐渍土研究提出了多样化的科学问题和特色鲜明的研究对象。根据前文所述的研究现状与进展,我们提出今后建议关注的研究重点:

4.1 盐渍土精准控盐的高效和安全用水理论与技术

盐渍土分布区一般水资源较为短缺或严重分布不均,同时土壤盐渍障碍治理对水资源存在一定程度的依赖性,在“以水而定,量水而行”的水资源刚性约束下,“水”的高效和安全利用依然是未来盐渍土水盐调控的核心。要深化节水型盐渍土水盐优化调控研究,深入阐明各类节水条件下盐渍化的中

长期演变规律,进一步拓展节水型盐渍障碍消减、微咸水和咸水利用条件下土壤水盐平衡的调控机理与技术研究。还需要重点研究流域-灌域-景观-田块等多尺度上的水资源优化配给机制,分析作物物候相匹配的节水灌溉理论与制度,剖析微润与痕量灌溉对盐渍土作物精量水肥供施原理,揭示水盐运动过程精细刻画与精准控盐机理,以多尺度的高效用水实现田块和区域尺度的土壤盐渍化精准调控。

4.2 土壤盐渍障碍的绿色消减与健康保育

盐渍土治理利用过程水肥投入强度较大,造成养分大量淋失的风险。我们要积极推动和倡导通过植物、微生物等方式,结合环保、绿色的生物质物料和低扰动的人为调控方式来治理土壤盐渍化,实现盐渍障碍的绿色消减,营建健康和高质量的土壤环境。今后需要注重研究通过基因工程方法和根际微生物介入提高植物耐盐阈值的生物学机制,盐生植物拒盐和聚盐机理与功能仿生材料,有益功能微生物的筛选、驯化与高效定植模式,盐渍障碍消减与养分减损高效的水肥盐协同管理机理,盐渍土健康生境定向调节与保育原理,推动土壤盐渍障碍消减与土壤质量及功能提升,提高盐渍土壤生产力。

4.3 盐渍农田养分库容扩增与增碳减排

当前我国耕地资源形势严峻,耕地质量不高,且面临着一定退化风险。盐渍化耕地作为我国主要的中低产田类型之一,提升地力水平与养分库容,对粮食增产与增碳减排具有重要意义。今后需要重点研究盐渍化对土壤养分蓄纳和供给的抑制机制,土壤结构调理与养分库容扩增的互馈机理,农牧废弃物资源化利用的稳碳保氮机制,盐渍农田土壤有机碳调控与碳汇能力提升原理,探索“有机质-养分库-生物功能”协同驱动盐渍农田肥沃耕层培育增效理论,拓展盐渍生境的固碳机理与潜力研究,以养分扩库增容助推盐渍化土地碳汇提升。

4.4 土壤盐渍化与区域生态的耦合响应与协同适应

土壤盐渍化已经成为全球变化研究框架下的重要内容,而盐渍土分布区生态系统普遍较为脆弱。研究盐渍化与区域“山水林田湖草沙”系统互作互馈过程,对协调好盐渍土的利用开发和生态保护,实现盐渍土分布区农业生产和区域生态的高质量发展具有重要的现实意义。今后需要重点研究全球气

候变化背景下土壤盐渍化演变驱动机制及生态效应，土壤盐渍化与植被生态对节水场景的响应与过程模拟，盐渍区“山水林田湖草沙”生态系统稳定适宜结构与功能适配原理，盐渍土区土壤-植被-水文耦合响应与协同适应机制，土壤盐渍障碍消减与生态环境的互馈机制与效应，进一步深入开展盐渍土生态治理理论与技术研究，保障土壤盐渍化治理和防控与生态系统稳定协调发展。

总体而言，根据当前的科学需求和国家需求，依托丰富的盐渍土资源，我国盐渍土研究将在现有基础上，充分发挥自身学科优势，聚焦学科前沿，加强国际交流合作，拓展理论研究，发展新技术研究，面向农业、资源、生态、环境等行业和领域，积极服务于我国“藏粮于地、藏粮于技”和“黄河流域生态保护和高质量发展”等国家战略，为国家的农业升级、粮食安全、耕地保障、生态安全、高质量发展发挥重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Wang Z Q, Zhu S Q, Yu R P, et al. Salt-affected soils of China[M]. Beijing: Science Press, 1993. [王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.]
- [2] Li J G, Pu L J, Han M F, et al. Soil salinization research in China: Advances and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24 (5): 943—960.
- [3] Wicke B, Smeets E, Dornburg V, et al. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils[J]. Energy and Environmental Science, 2011, 4: 2669—2681.
- [4] Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5): 837—845. [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] Yang J S, Yao R J. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30 (S): 162—170. [杨劲松, 姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30 (S): 162—170.]
- [6] Shen R F, Wang C, Sun B. Soil related scientific and technological problems in implementing strategy of “Storing Grain in Land and Technology”[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2): 135—144. [沈仁芳, 王超, 孙波. “藏粮于地、藏粮于技”战略实施中的土壤科学与技术问题[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 135—144.]
- [7] Yun X X, Chen Y S. International development of saline-alkali land and its enlightenment to China[J]. Territory & Natural Resources Study, 2020 (1): 84—87. [云雪雪, 陈雨生. 国际盐碱地开发生态及其对我国的启示[J]. 国土与自然资源研究, 2020 (1): 84—87.]
- [8] Li J G, Pu L J, Zhu M, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67 (9): 1233—1245. [李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67 (9): 1233—1245.]
- [9] Wang J L, Huang X J, Zhong T Y, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66 (5): 673—684. [王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66 (5): 673—684.]
- [10] International Union of Soil Science, Proceedings 21st WCSS - Volume I (Abstracts of oral presentations). 21st World Congress of Soil Science, August 12—17, 2018, Rio de Janeiro, Brazil. https://www.iuss.org/index.php?rex_media_type=download&rex_media_file=proceedings_of_the_21wcscs_volume_i.pdf.
- [11] International Union of Soil Science, Proceedings 21st WCSS - Volume II (Abstracts of poster presentations). 21st World Congress of Soil Science, August 12—17, 2018, Rio de Janeiro, Brazil. https://www.iuss.org/index.php?rex_media_type=download&rex_media_file=proceedings_of_the_21wcscs_volume_ii.pdf.
- [12] Du X J, Hu S W. Research progress of saline-alkali land at home and abroad over the past 30 years based on bibliometric analysis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49 (18): 236—239, 242. [杜学军, 胡树文. 基于文献计量分析的近 30 年国内外盐碱地研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49 (18): 236—239, 242.]
- [13] Zhu W, Yang J S, Yao R J, et al. Soil water and salt transport in medium and heavy saline soils of Yellow River Delta[J]. Soils, 2021, 53 (4): 817—825. [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.]
- [14] Peng X H, Wang Y Q, Jia X X, et al. Some key research fields of Chinese Soil Physics in the New Era: Progresses and perspectives [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1071—1087. [彭新华, 王云强, 贾小旭, 等. 新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1071—1087.]
- [15] Wang J, Pang H C, Ren T Z, et al. Effect of plastic film mulching and straw buried on soil water-salt dynamic in Hetao Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (15): 52—59. [王婧, 逢焕成, 任天志, 等. 地膜覆盖与秸秆深埋对河套灌区盐渍土水盐运动的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28 (15): 52—59.]
- [16] Cui S, Zhang J, Sun M, et al. Leaching effectiveness of

- desalinization by rainfall combined with wheat straw mulching on heavy saline soil[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2018, 64 (7): 891—902.
- [17] Yao Q S, Lei X T, Su J B, et al. Effects of antitranspirants on photosynthetic parameters of *Ziziphus mauritiana* Lam leaves[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, 30 (2): 131—134. [姚全胜, 雷新涛, 苏俊波, 等. 喷施蒸腾抑制剂对毛叶枣叶片光合参数的影响[J]. 热带作物学报, 2009, 30 (2): 131—134.]
- [18] Yang B, Qu Z Y, Sun H H, et al. The effect of smash-ridging cultivation on properties of saline-alkali soil in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39 (8): 52—59. [杨博, 屈忠义, 孙慧慧, 等. 粉垄耕作对河套灌区盐碱地土壤性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39 (8): 52—59.]
- [19] Wang E H. Effect of machinery tillage and seasonal freezethaw on soil structure in black soil region[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011. [王恩姮. 机械耕作与季节性冻融对黑土结构的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.]
- [20] Zhu W. Research status and analysis of chemical improvement technology to saline-alkali soil in China based on patent perspective[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2020, 40 (10): 113—120. [朱伟. 基于专利视角的中国盐碱地化学改良技术研究现状与分析[J]. 热带农业科学, 2020, 40 (10): 113—120.]
- [21] 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.
- [22] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Long-term performance of flue gas desulfurization gypsum in a large-scale application in a saline-alkali wasteland in northwest China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 261: 115—124.
- [23] Nan J, Chen X, Wang X, 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.
- [24] Mao Y M, Li X P. Amelioration of flue gas desulfurization gypsum on saline-sodic soil of tidal flats and its effects on plant growth[J]. China Environmental Science, 2016, 36 (1): 225—231. [毛玉梅, 李小平. 烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36 (1): 225—231.]
- [25] Li X J, Shan Y Y, Wang Q J, et al. Effect of humic acid on characteristics of salt and water transport in coastal saline-alkali soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34 (6): 288—293. [李晓菊, 单鱼洋, 王全九, 等. 腐殖酸对滨海盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (6): 288—293.]
- [26] Li F Z, Huang Z B, Ma Y, et al. Improvement effects of different environmental materials on coastal saline-alkali soil in Yellow River Delta[C]//Materials Science Forum, 2018, 913: 879—886.
- [27] Lu X C, Zhang J S, Miao T, et al. Improvement effects of different ameliorants and their combinations on coastal saline-alkali soil in the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31 (6): 326—332. [卢星辰, 张济世, 苗琪, 等. 不同改良物料及其配施组合对黄河三角洲滨海盐碱土的改良效果[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (6): 326—332.]
- [28] He K, He G, Wang C, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes miscanthus growth in a coastal saline-alkali soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103674.
- [29] Wang Q L. Study on the improvement effect of polyacrylamide (PAM) on saline-alkaline soil[J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2018 (12): 48—51. [王启龙. 施用聚丙烯酰胺 (PAM) 对盐碱土改良效果研究[J]. 农业科技与信息, 2018 (12): 48—51.]
- [30] Song J L, Li Y J, Wang D, et al. Study on the effect of polymer adsorption resin combined with different acid materials on the passivation effect of salt and alkali[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46 (2): 31—36. [宋纪雷, 李跃进, 王鼎, 等. 高分子吸附树脂与酸性材料配施对盐碱离子钝化效果研究[J]. 北方农业学报, 2018, 46 (2): 31—36.]
- [31] Yao R J, Li H Q, Yang J S, et al. Regulation effect of biomass improved materials on migration of soil water, salt and nitrogen in salt-affected soil under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (11): 282—291. [姚荣江, 李红强, 杨劲松, 等. 滴灌下生物质改良材料对盐渍土水盐氮运移的调控效应[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (11): 282—291.]
- [32] Zhu J J, Sun J N, Zhang Z H, et al. Effect of alternate irrigation with brackish and fresh water on water and salt movement in coastal saline soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26 (5): 113—117, 122. [朱瑾瑾, 孙军娜, 张振华, 等. 咸淡水交替灌溉对滨海盐碱土水盐运移的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26 (5): 113—117, 122.]
- [33] Liu H M, Guo K, Li X G, et al. Effect of plastic film mulch on soil moisture and salt dynamics under saline water irrigation in coastal saline soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25 (12): 1761—1769. [刘海曼, 郭凯, 李晓光, 等. 地膜覆盖对春季咸水灌溉条件下滨海盐渍土水盐动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (12): 1761—1769.]
- [34] Yang G, Li F D, Tian L J, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield

- under brackish water mulched drip irrigation[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 199: 104592.
- [35] Lei H J, Zang M, Zhang Z H, et al. Impact of working pressure and surfactant concentration on air-water transmission in drip irrigation tape under cycle aeration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (22): 63—69. [雷宏军, 臧明, 张振华, 等. 循环曝气压力与活性剂浓度对滴灌带水气传输的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (22): 63—69.]
- [36] Geng Q M, Yan H H, Yang J Z, et al. Evaluation for soil improvement effect of open ditch and concealed drainage engineering on saline-alkali land development[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50 (3): 617—624. [耿其明, 闫慧慧, 杨金泽, 等. 明沟与暗管排水工程对盐碱地开发的土壤改良效果评价[J]. 土壤通报, 2019, 50 (3): 617—624.]
- [37] Yao R J, Yang J S, Wu D H, et al. Scenario simulation of field soil water and salt balances using sahysmod for salinity management in a coastal rainfed farmland[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66 (5): 872—883.
- [38] Zhang J L, Liu M, Qian H, et al. Spatial-temporal variation characteristics of water-salt movement in coastal saline soil improved by flooding and subsurface drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (6): 98—103. [张金龙, 刘明, 钱红, 等. 漫灌淋洗暗管排水协同改良滨海盐土水盐时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (6): 98—103.]
- [39] 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 and Environment, 2018, 41 (3): 517—532.
- [40] Kafi M, Hajar Asadi H, Ganjeali A. Possible utilization of high-salinity waters and application of low amounts of water for production of the halophyte *Kochia scoparia* as alternative fodder in saline agroecosystems[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97 (1): 139—147.
- [41] Ravindran K C, Venkatesan K, Balakrishnan V, et al. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39 (10): 2661—2664.
- [42] Kumari A, Jha B. Engineering of a novel gene from a halophyte: Potential for agriculture in degraded coastal saline soil[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30 (6): 595—607.
- [43] Zeng Y B. Effects of different salt-tolerant plants planting on soil physicochemical and biological properties of salines of saline soil[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015. [曾玉彬. 种植不同耐盐植物对盐渍化土壤理化和生物学性质的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.]
- [44] Chen X B, Yang J S, Yang C 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. [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.]
- [45] Jiao H Q. Soil water and salt dynamics under mulched drip irrigation in an oasis cotton field: model development and application[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. [焦会青. 绿洲棉田膜下滴灌土壤水盐运移模型构建及应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.]
- [46] Yang X, Zhu Q, Ma M C, et al. Research on the evaporation capacity and water-salt variation characteristics of different types of saline wasteland[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (9): 49—53. [杨煦, 朱勤, 马萌辰, 等. 不同类型盐荒地蒸发能力与水盐变化特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2019 (9): 49—53.]
- [47] Wang S L, Zhou H P, Qu X Y, et al. Study on directional salt transport and surface salt draining under mulched drip irrigation in arid areas[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (5): 549—555. [王少丽, 周和平, 瞿兴业, 等. 干旱区膜下滴灌定向排盐和盐分上移地表排模式研究[J]. 水利学报, 2013, 44 (5): 549—555.]
- [48] Zhao Z Y, Zhang K, Wang L, et al. Desalting effect of halophytes on heavily saline soil[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33 (5): 1420—1425. [赵振勇, 张科, 王雷, 等. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果[J]. 中国沙漠, 2013, 33 (5): 1420—1425.]
- [49] Tashpolat T Y P, Tursun H S, Hamid Ishmael, et al. Research progress and summary of remote sensing monitoring of soil salinization[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2008 (1): 1—7. [塔西甫拉提·特依拜, 吐尔逊·艾山, 海米提·司马义, 等. 土壤盐渍化遥感监测研究进展综述[J]. 新疆大学学报 (自然科学版), 2008 (1): 1—7.]
- [50] Yao R J, Yang J S, Wu D H, et al. Geostatistical monitoring of soil salinity for precision management using proximally sensed electromagnetic induction (EMI) method[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 1362.
- [51] Lambot S, Binley A, Slob E, et al. Ground penetrating radar in hydrogeophysics[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7 (1): 137—139.
- [52] Skierucha W. Temperature dependence of time domain reflectometry-measured soil dielectric permittivity[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172 (2): 186—193.
- [53] Liu B, Han W T, Weckler P, et al. Detection model for

- effect of soil salinity and temperature on FDR moisture content sensors[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2014, 30 (4): 573—582.
- [54] Chen S, Xu B, Jin Y X, et al. Remote sensing monitoring and spatial-temporal characteristics analysis of soil salinization in agricultural area of Northern Xinjiang[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(12): 1607—1615. [陈实, 徐斌, 金云翔, 等. 北疆农区土壤盐渍化遥感监测及其时空特征分析[J]. *地理科学*, 2015, 35(12): 1607—1615.]
- [55] Li Y H, Ding J L, Sun Y M, et al. Remote sensing monitoring models of soil salinization based on the three dimensional feature space of MSAVI-WI-SI[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(4): 113—117, 121. [李艳华, 丁建丽, 孙永猛, 等. 基于三维特征空间的土壤盐渍化遥感模型[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4): 113—117, 121.]
- [56] Deng K, Ding J L, Yang A X, et al. Modeling of the spatial distribution of soil profile salinity based on the electromagnetic induction technique[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20): 6387—6396. [邓凯, 丁建丽, 杨爱霞, 等. 基于电磁感应技术的土壤剖面盐分空间分布建模研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6387—6396.]
- [57] Xie W P, Yang J S, Yao R J, et al. Spatial and temporal variability of soil salinity in the Yangtze River estuary using electromagnetic induction[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 1875.
- [58] Wu Y K, Yang J S, Liu G M. Spatial variability of soil salinity using data from remote sensing and electromagnetic induction instruments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 148—152. [吴亚坤, 杨劲松, 刘广明. 基于遥感与电磁感应仪数据的土壤盐分空间变异性[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 148—152.]
- [59] Chen J Y, Wang X T, Zhang Z T, et al. Soil salinization monitoring method based on UAV-satellite remote sensing scale-up[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 161—169. [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.]
- [60] Šimůnek J, van Genuchten M T, Šejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(7): 25.
- [61] Lu S, Lu Y, Peng W, et al. A generalized relationship between thermal conductivity and matric suction of soils[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 491—497.
- [62] Wang D Y, Liu J K, Li X. Numerical simulation of coupled water and salt transfer in soil and a case study of the expansion of subgrade composed by saline soil[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 143: 315—322.
- [63] Jiao H Q, Sheng Y, Zhao C Y, et al. Modeling of multiple ions coupling transport for salinized soil in oasis based on COMSOL[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 100—107. [焦会青, 盛钰, 赵成义, 等. 基于 COMSOL 软件的绿洲盐渍化土壤中多离子耦合运移模型构建[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 100—107.]
- [64] Chang X M, Wang S L, Chen H R, et al. Spatiotemporal changes and influencing factors of soil salinity in Hetao Irrigation District[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(10): 1000—1005. [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.]
- [65] Li Y. SWAP Model distributed simulation of soil water and salt in Hetao irrigation with water-saving irrigation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. [李彦. 节水灌溉条件下河套灌区土壤水盐动态的 SWAP 模型分布式模拟预测[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.]
- [66] Yao R J, Yang J S, Wang X P, et al. Improving soil salinity simulation by assimilating electromagnetic induction data into HYDRUS model using ensemble Kalman filter[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2021, doi: 10.3808/jei.202100451.
- [67] Ding J L, Chen W Q, Wang L. Improving monitoring precision of soil moisture by assimilation of HYDRUS model and remote sensing-based data by ensemble Kalman filter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(14): 166—172. [丁建丽, 陈文倩, 王璐. HYDRUS 模型与遥感集合卡尔曼滤波同化提高土壤水分监测精度[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 166—172.]
- [68] Zhu H, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of partial substitution of organic nitrogen for inorganic nitrogen in fertilization on salinity and nitrogen utilization in salinized coastal soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(3): 441—450. [朱海, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机无机肥配施对滨海盐渍农田土壤盐分及作物氮素利用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(3): 441—450.]
- [69] Li H Q, Yao R J, Yang J S, et al. Influencing mechanism of soil salinization on nitrogen transformation processes and efficiency improving methods for high efficient utilization of nitrogen in salinized farmland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3915—3924. [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.]
- [70] Huang Q Z, Huang G H. Effect of NaCl salt on mineralization and nitrification of a silt loam soil in the North China Plain[J]. *International Journal of*

- Agricultural and Biological Engineering, 2009, 2 (2): 14—23.
- [71] Yuan J H, Zhang T, Wang L F, et al. Research and suggestions on classification of combination models of planting and feeding in Henan Province[J]. Henan Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2018, 39 (5): 6—7. [袁军虎, 张甜, 王龙飞, 等. 河南省种养结合模式的分类探究及建议[J]. 河南畜牧兽医: 综合版, 2018, 39 (5): 6—7.]
- [72] Chen Q, Qi L, Bi Q, et al. Comparative effects of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) and dicyandiamide (DCD) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in a vegetable soil[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99 (1): 477—487.
- [73] Li Y W, Xu J Z, Wei Q, et al. Soil nitrification process under different soil moisture and salinity conditions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36 (9): 909—913. [李亚威, 徐俊增, 卫琦, 等. 不同水盐条件下盐渍土硝化过程特征[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36 (9): 909—913.]
- [74] LI J B, Huang G H. Effect of NaCl on ammonia volatilization, nitrification and denitrification in silt loam soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25 (4): 945—948. [李建兵, 黄冠华. NaCl 对粉壤土氨挥发及硝化、反硝化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (4): 945—948.]
- [75] Tao J Y, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of soil salinity on nitrogen transformation in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, China[J]. Soils, 2020, 52(4): 802—810. [陶健宇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 河套灌区土壤盐分对化肥氮素转化过程的影响研究[J]. 土壤, 2020, 52(4): 802—810.]
- [76] Zhang Y, Chen L, Dai T, et al. The influence of salinity on the abundance, transcriptional activity, and diversity of AOA and AOB in an estuarine sediment: A microcosm study[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99 (22): 9825—9833.
- [77] Xu W L, Liu H, Zhang Y S. Characteristics of nitrogen mineralization and nitrification in salinized soils of Xinjiang[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2007, 35(11): 141—145. [徐万里, 刘骅, 张云舒. 新疆盐渍化土壤氮素矿化和硝化作用特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35 (11): 141—145.]
- [78] Zhu H, Yang J S, Yao R J, et al. Interactive effects of soil amendments (biochar and gypsum) and salinity on ammonia volatilization in coastal saline soil[J]. Catena, 2020, 190: 104527.
- [79] Xiao L, Yuan G, Feng L, et al. Soil properties and the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) in response to reed (*phragmites communis*) biochar use in a salt-affected soil in the Yellow River Delta[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 303: 107124.
- [80] 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. [张伶波, 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.]
- [81] Rochester Ian J. Phosphorus and potassium nutrition of cotton: Interaction with sodium[J]. Crop and Pasture Science, 2010, 61: 825—834.
- [82] Su Q, Hou Z A, Zhao J, et al. Effects of biochar on soil phosphorus content and cotton nutrient uptake[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(3): 642—650. [苏倩, 侯振安, 赵靓, 等. 生物炭对土壤磷素和棉花养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (3): 642—650.]
- [83] Liu N. Effect of biochar combined with organic acid on transformation and bioavailability of phosphate fertilizer in saline soil[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021. [刘娜. 生物炭与有机酸配施对磷素在盐渍土中转化及生物有效性的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.]
- [84] Gao S, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of soil amelioration measures mitigating soil salinity and improving crop P uptake in coastal area of North Jiangsu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1219—1229. [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.]
- [85] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Research on ecological management and ecological industry development model of saline-alkali land in the Hetao Plain, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (22): 7059—7063. [杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 河套平原盐碱地生态治理和生态产业发展模式[J]. 生态学报, 2016, 36 (22): 7059—7063.]
- [86] Rozema J, Flowers T. Crops for a salinized world[J]. Science, 2008, 322: 1478—1480.
- [87] Luo S S, Tian L, Chang C L, et al. Grass and maize vegetation systems restore saline-sodic soils in the Songnen Plain of northeast China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29 (4): 1107—1119.
- [88] Sun J X, Kang Y H, Wan S Q, et al. Soil salinity management with drip irrigation and its effects on soil hydraulic properties in north China coastal saline soils[J]. Agricultural Water Management, 2012, 115. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.08.006.
- [89] Heng T, Wang Z H, Li W H, et al. Impacts of diameter and depth of drainage pipes in fields under drip irrigation on soil salt[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (1):

- 111—121. [衡通, 王振华, 李文昊, 等. 滴灌条件下排水暗管埋深及管径对土壤盐分的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55 (1): 111—121.]
- [90] Wang Z H, Yang P L, Zheng X R, et al. Soil salinity changes of root zone and arable in cotton field with drip irrigation under mulch for different years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (4): 90—99. [王振华, 杨培岭, 郑旭荣, 等. 膜下滴灌系统不同应用年限棉田根区盐分变化及适耕性[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (4): 90—99.]
- [91] Guo K, Liu X. Infiltration of meltwater from frozen saline water located on the soil can result in reclamation of a coastal saline soil[J]. Irrigation Science, 2015, 33 (6) .
- [92] Zhang Y, Yang J S, Yao R J. Effects of saline ice water irrigation on distribution of moisture and salt content in coastal saline soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (2): 388—400. [张越, 杨劲松, 姚荣江. 咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53 (2): 388—400.]
- [93] Gou M M, Qu Z Y, Wang F, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (7): 1—12. [勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49 (7): 1—12.]
- [94] Xu G, Lv Y C, Sun J N, et al. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications[J]. Clean – Soil, Air, Water, 2012, 40 (10): 1093—1098.
- [95] Yue Y, Guo W N, Lin Q M, et al. Improving salt leaching in a simulated saline soil column by three biochars derived from rice straw (*Oryza sativa* L.), sunflower straw (*Helianthus annuus*), and cow manure[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2016, 71 (6): 467—475.
- [96] Zhu W, Yang J S, Yao R J, et al. Buried layers change soil water flow and solute transport from the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021. DOI: 10.1007/s11368-020-02848-0.
- [97] Zuo Y. Effects of humic acid on cutting rooting of *Salix matsudana* under different salt stress[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2017. [左逸. 黄腐酸对盐胁迫下旱柳扦插生根的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2017.]
- [98] Lu K H, Jin J R, Xiao M. Prospect of microbial fertilizer in saline soil[J]. Microbiology China, 2019, 46 (7): 1695—1705. [鲁凯琦, 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.]
- [99] Yu B Q, Zhu L, Wei W. Microorganisms research in saline soil of China: Progress and prospects[J]. Soil and Crop, 2019, 8 (1): 60—69. [俞冰倩, 朱琳, 魏巍. 我国盐碱土土壤微生物研究及其展望[J]. 土壤与作物, 2019, 8 (1): 60—69.]
- [100] Zhou N Y. Microbial diversity in saline-alkali soil[J]. Microbiology China, 2012, 39 (7): 1030. [周宁一. 盐碱地微生物类群的多样性[J]. 微生物学通报, 2012, 39 (7): 1030.]
- [101] Wang S Y, Feng H J, Wang K Y, et al. Advances of soil microbial ecological characteristics in saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1): 233—239. [汪顺义, 冯浩杰, 王克英, 等. 盐碱地土壤微生物生态特性研究进展[J]. 土壤通报, 2019, 50 (1): 233—239.]
- [102] Ai X, Wang Y L, Zhang W, et al. Screening of halotolerant and alkalitolerant bacteria from the desert crust in the Qaidam and their effects of sand aggregation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29 (10): 145—151. [艾雪, 王艺霖, 张威, 等. 柴达木沙漠结皮中耐盐碱细菌的分离及其固沙作用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29 (10): 145—151.]
- [103] Chen L N, Xie X H, Wei Y. Application of SEM technology in situ in improvement of Soil-Fungi[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52 (1): 122—126. [陈丽娜, 谢修鸿, 魏毅. 应用原位扫描电镜技术检测“土壤-真菌”改良盐碱地的效果[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2020, 52 (1): 122—126.]
- [104] Sha Y X, Li M Y, Wu S H, et al. Microbial agents mixed with saline-alkaline soil: Effect of prevention of stem basal rot and growth-promoting on maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(5): 75—82. [沙月霞, 李明洋, 伍顺华, 等. 微生物菌剂拌土对盐碱地玉米茎基腐病的预防及促生效果[J]. 中国农学通报, 2021, 37 (5): 75—82.]
- [105] Wang W, Li J, Liu J S, et al. Isolation of the silicate bacteria strain and determination of the activity of releasing silicon and potassium[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37 (17): 7889—7891. [王伟, 李佳, 刘金淑, 等. 硅酸盐细菌菌株的分离及其解钾解硅活性初探[J]. 安徽农业科学. 2009, 37 (17): 7889—7891.]
- [106] Wang W Q, Yang L, Cheng Z B, et al. Study on soil microbial biomass carbon source metabolism in different types of sodic saline-alkali soil in arid area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33 (6): 158—166. [王巍琦, 杨磊, 程志博, 等. 干旱区不同类型盐碱地土壤微生物碳源代谢活性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33 (6): 158—166.]
- [107] Dai J X, Tian Y P, Zhang Y, et al. Rhizobacteria community structure and diversity of six salt-tolerant plants in Yinbei saline soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (8): 2705—2714. [代金霞, 田平雅, 张莹,

- 等. 银北盐渍化土壤中 6 种耐盐植物根际细菌群落结构及其多样性[J]. 生态学报, 2019, 39 (8): 2705—2714.]
- [108] Sun J P, Liu Y H, Zuo Y M, et al. The bacterial community structure and function of *Suaeda salsa* rhizosphere soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28 (10): 1618—1629. [孙建平, 刘雅辉, 左永梅, 等. 盐地碱蓬根际土壤细菌群落结构及其功能[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28 (10): 1618—1629.]
- [109] Hou J Q, Wang X, Chen Y H, et al. Effects of lactic acid bacteria compound preparation on improvement of saline-alkali soil and soil microbial community[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(4): 710—718. [侯景清, 王旭, 陈玉海, 等. 乳酸菌复合制剂对盐碱地改良及土壤微生物群落的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50 (4): 710—718.]
- [110] Liang J R. Effect of irrigation modes on physical and chemical properties and microbial properties on Xinjiang saline soil[J]. Water Saving Irrigation, 2012 (7): 18—20, 23. [梁菊蓉. 不同灌溉方式对新疆盐碱地土壤理化性质和微生物特性的影响[J]. 节水灌溉, 2012 (7): 18—20, 23]
- [111] Chu L L, Kang Y H, Chen X L, et al. Effect of watering intensity on characteristics of water and salt movement under sprinkle irrigation in coastal soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (7): 76—82. [褚琳琳, 康跃虎, 陈秀龙, 等. 喷灌强度对滨海盐碱地土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (7): 76—82.]
- [112] Lin X, Wang Z, Li J. Identifying the factors dominating the spatial distribution of water and salt in soil and cotton yield under arid environments of drip irrigation with different lateral lengths[J]. Agricultural Water Management, 2021, 250 (6): 106834.
- [113] Yu D D, Shi H B, Li Z, et al. Distribution characteristics of water and salt under closed saline drainage pipe and water-saving irrigation in saline soil[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(4): 252—260. [于丹丹, 史海滨, 李祯, 等. 暗管排水与节水灌溉条件下盐渍化农田水盐分布特征[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31 (4): 252—260.]
- [114] Zhu Z X, Xu H, Zhang L S, et al. Study on the characteristics of water and salt transport in concealed pipe irrigation under different water supply pressures and soil additives: A case study of soda saline alkaline soil in western Jilin Province[J]. Water Saving Irrigation, 2021 (5): 90—95. [朱振学, 徐航, 张礼绍, 等. 基于不同供水压力不同土壤添加物的暗管灌溉特性研究——以吉林西部苏打盐碱土为例[J]. 节水灌溉, 2021 (5): 90—95.]
- [115] Sun H Y, Liu X J, Zhang X Y. Regulations of salt and water of saline-alkali soil: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26 (10): 1528—1536. [孙宏勇, 刘小京, 张喜英. 盐碱地水盐调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (10): 1528—1536.]
- [116] Zhang Y, Yang J S, Huang Y H, et al. Use of freeze-thaw purified saline water to leach and reclaim gypsum-amended saline-alkali soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 2019, 83: 1333—1342.
- [117] Zhu C L, Lv W, Huang M Y, et al. Effects of biochar on coastal reclaimed soil salinity distribution and maize growth with cycle fresh and saline water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (1): 226—234. [朱成立, 吕雯, 黄明逸, 等. 生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50 (1): 226—234.]
- [118] Feng G X, Zhang Z Y, Fang G H, et al. Effects of saline water irrigation on soil salinity movement and summer maize growth under subsurface drainage[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36 (9): 880—885. [冯根祥, 张展羽, 方国华, 等. 暗管排水条件下微咸水灌溉对土壤盐分动态及夏玉米生长的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36 (9): 880—885.]
- [119] Zhang X Y, Liu X J, Chen S Y, et al. Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24 (8): 995—1004. [张喜英, 刘小京, 陈素英, 等. 环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24 (8): 995—1004.]
- [120] Li J G, Qu Z Y, Huang Y P, et al. Effects of control lower limit of saline water mulched drip irrigation on water salt movement and corn yield in saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31 (1): 217—223. [李金刚, 屈忠义, 黄永平, 等. 微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (1): 217—223.]
- [121] Wang X P, Liu G M, Yang J S, et al. Evaluating the effects of irrigation water salinity on water movement, crop yield and water use efficiency by means of a coupled hydrologic/crop growth model[J]. Agricultural Water Management, 2017, 185: 13—26.
- [122] Zhang S. Study on the effect of solar subsurface pipe drainage on saline-alkali land improvement and crop water production efficiency in Huinong District[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018. [张申. 太阳能暗管排水对惠农区盐碱地改良及作物水分生产效率的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.]

(责任编辑：陈德明)