

盐碱地咸水/微咸水农业安全与高效利用研究进展与展望

倪刚, 贺晨, 曾溢, 张俊伶, 王光州*
(中国农业大学, 北京 100193)

摘要: 盐碱地是我国重要的后备耕地资源, 主要分布于北方干旱半干旱地区, 淡水资源短缺限制了盐碱地的开发利用。我国地下咸水、微咸水资源丰富, 但利用率较低, 研究咸水/微咸水资源的安全、高效利用的原理和技术对盐碱地农业开发利用意义重大。本文总结了盐碱地农田咸水/微咸水直接灌溉、咸-淡水交替灌溉等农田咸水/微咸水开发利用方式, 分析了不同利用方式对土壤和作物生长的影响, 归纳了当前常见的咸水处理技术以及覆盖、土壤培肥等配套农艺措施对咸水/微咸水安全利用的作用效果。总结了不同咸水/微咸水灌溉及配套措施对土壤盐分、有机质、养分、团聚体、微生物群落特征、作物养分吸收及产量的影响。从因地制宜进行咸水/微咸水资源开发利用、水资源受限条件下根域耐盐适生、智慧化灌溉技术研发等方面提出了未来研究展望, 以期对咸水、微咸水安全高效利用提供借鉴。

关键词: 咸水; 微咸水; 盐渍化; 灌溉; 农业生产

中图分类号: X820.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2023210

OSID: 

倪刚, 贺晨, 曾溢, 等. 盐碱地咸水/微咸水农业安全与高效利用研究进展与展望[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 149-156.
NI Gang, HE Chen, ZENG Yi, et al. Safe and Efficient Utilization of Saline and Brackish Water in Saline-alkali Farmland: Progress and Perspective[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 149-156.

0 引言

【研究意义】盐碱地是我国重要的后备耕地资源, 是国家粮食安全战略保障体系的重要组成部分。我国目前存在各类可利用的盐碱地面积约为 $0.37 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 其中具有农业利用与开发潜力的盐碱地面积约为 $0.67 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[1], 主要分布于北方干旱半干旱地区。在盐碱地改良与利用过程中, 通过淡水灌溉压盐、排盐是最根本、有效的措施。然而, 我国淡水资源匮乏, 人均淡水资源占有量仅为 2100 m^3 , 是世界上 13 个最缺水的国家之一^[2]。此外, 我国水资源分配不均, 淮河以北地区耕地面积占全国总耕地面积的 64%, 但其水资源量仅占全国水资源量的 19%。因此, 淡水资源不足成为制约盐碱地改良和利用的主要瓶颈, 在盐碱地利用过程中, 节约淡水资源、开发和利用非常规水资源尤为重要。【研究进展】咸水(矿化度 $>5 \text{ g/L}$)和微咸水(矿化度为 $2 \sim 5 \text{ g/L}$)是我国重要的非常规水资源。中国地下微咸水资源量约为 $2 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$, 其中可开采量为 $1.3 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ^[3]。我国自从 20 世纪 60 年代开始出现微咸水利用研究, 在土壤盐渍化地区合理利用微咸

水资源, 在保证作物水分需求的同时, 可淋洗表土盐分, 降低土壤盐渍化程度^[4]。然而, 目前我国微咸水利用量仍偏低, 每年仅为 $1.48 \times 10^9 \text{ m}^3$, 主要分布于华北、山西、陕西等地区^[5]。【切入点】淡水资源紧缺限制了盐碱地治理, 合理利用咸水/微咸水资源有助于节约淡水资源, 增加可利用耕地面积, 提高耕地产能。【拟解决的关键问题】微咸水安全高效利用技术的核心是最大程度减轻咸水/微咸水灌溉造成的土壤盐害问题, 保障作物正常生长。本研究首先阐述了盐碱地咸水/微咸水安全、高效利用方法, 分析咸水/微咸水对土壤和作物造成的危害, 进一步介绍了咸水/微咸水处理技术及咸水/微咸水灌溉条件下适宜的配套农艺措施, 最后提出未来研究方向与展望, 以期对咸水/微咸水灌溉条件下作物高产、资源与环境的协调可持续发展提供参考和借鉴。

1 盐碱地咸水/微咸水农业开发利用方式

咸水/微咸水的灌溉方式包括直接灌溉、咸淡水混灌、咸淡水交替灌溉等。区域气候类型、土壤盐渍化程度、灌溉水矿化度、灌溉时期以及灌溉量均会显著影响灌溉效果。在实际利用过程中, 咸水/微咸水灌溉一般需与其他农业管理措施配套结合, 以减轻过量盐分对土壤环境及作物生长的不利影响^[6]。

1.1 咸水/微咸水直接灌溉

直接灌溉即是采用适宜矿化度的微咸水, 通过一次性或分次灌溉满足作物需水量。若咸水矿化度

收稿日期: 2023-05-12

修回日期: 2023-08-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900102)

作者简介: 倪刚(1996-), 男, 博士研究生, 主要从事盐碱地生态研究。
E-mail: nig268@cau.edu.cn

通信作者: 王光州(1989-), 男, 副教授, 博士, 主要从事盐碱地生态及生物修复研究。E-mail: wanggz@cau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

过高, 直接通过沟灌等方式进行咸水灌溉会导致耕作层盐分累积, 破坏土壤结构^[7]。吴雨晴等^[8]利用矿化度为 2~10 g/L 的咸水在河北棉田的试验结果表明, 咸水直接灌溉(灌水量为 75~150 mm) 10 a 后的耕作层土壤含盐量相对于淡水灌溉有所上升。由于不同作物耐盐性存在差异, 咸水灌溉也需要考虑作物类型。常规作物在咸水灌溉条件下的适应性排序为: 棉花>小麦>玉米>番茄>辣椒^[9]。研究表明, 在灌溉量及灌溉方式适宜的情况下, 矿化度为 3~4 g/L 微咸水可用于小麦灌溉并保障其高产^[10-12], 玉米的微咸水灌溉矿化度阈值一般低于 2 g/L^[11,13-14], 而棉花最高可达到 5 g/L^[15-17]。

1.2 咸-淡水混灌

除直接灌溉外, 利用淡水稀释地下咸水的咸-淡水混灌在华北平原等地区的应用也较为广泛。咸、淡水混合后降低了咸水矿化度, 在灌溉方式上与咸水/微咸水直接灌溉方式无异。灌溉水矿化度和灌溉时期的选择对咸水安全高效利用至关重要。在中科院南皮生态试验站, 以淡水与 5 g/L 咸水混合而成的不同矿化度混灌水灌溉冬小麦, 在持续 3 a 进行 3 g/L 的混灌水灌溉后, 0~100 cm 土壤积盐率为 4.67%, 而在 5 g/L 的咸水灌溉条件下的土壤积盐率显著高于前者, 为 33.83%^[18]。河北棉田试验表明, 造墒-蕾期咸淡水混灌(3 g/L) 2 a 后的棉花产量相对于淡水灌溉无显著差异, 而 5 g/L 咸水灌溉下的棉花产量相对于淡水灌溉显著降低^[19-20]。

1.3 咸-淡水交替灌溉

合理制定灌溉制度既可以节约淡水资源, 还能够在一定程度上降低土壤盐渍化程度、维持土壤盐分平衡。在轻、中度土壤盐渍化农田, 可针对耐盐性较强的作物采用微咸水灌溉, 而对于耐盐性较差的作物则使用淡水灌溉。例如, 利用冬小麦耐盐性强于夏玉米的特点, 在冬小麦拔节期进行微咸水(3~5 g/L) 灌溉, 其产量相对于淡水灌溉无显著差异; 而对于夏玉米, 淡水灌溉可使耕层土壤盐分量降至 1 g/kg 以下, 且玉米产量未受前期微咸水灌溉的影响^[11]。作物不同生育期耐盐性差异较大, 在耐盐性较强的生育期可采用适量微咸水代替淡水进行灌溉^[10,20]。因冬小麦返青期根系较浅, 耐盐性较低, 返青期后耐盐性逐渐增强, 冬小麦返青期进行淡水灌溉(80 mm), 拔节-开花期进行微咸水灌溉(3 g/L, 160 mm), 咸水-淡水交替灌溉 2 a 后土壤含盐量相对于纯淡水灌溉未发生显著变化, 且产量相对于淡水灌溉提升了 470 kg/hm²^[12]。针对河北省曲周县微咸水灌溉的冬小麦-夏玉米轮作体系, 在保障冬小麦、夏玉米底墒水及播种水充足的条件下, 于冬

小麦拔节期、灌浆期以及夏玉米抽雄期分别采用微咸水灌溉, 作物产量相比淡水灌溉略微下降, 但淡水使用量可减少 60%~75%^[14]。玉米灌浆期耐盐性较强, 此时利用微咸水代替淡水灌溉对其光合效率及抗氧化酶活性的影响较小^[21]。在滨海垦区, 于玉米苗期、抽雄期、灌浆期采用淡水-淡水-微咸水灌溉对其各项生理指标及产量影响最小^[22]。

2 咸水/微咸水灌溉对土壤及作物的影响

合理利用咸水/微咸水进行灌溉可在保障作物产量的基础上, 降低土壤含盐量。然而, 不合理的开发与利用将造成土壤物理、生物、化学性状恶化, 降低作物产量。咸水中携带的 Na⁺会导致土壤钠质化、土壤颗粒分散、水稳性大团聚体结构遭到破坏、土壤孔隙度和导水性降低, 从而限制作物根系对水分和养分的吸收。研究表明, 微咸水(2 dS/m)灌溉 80 d 后, 表层土壤盐分量与土壤体积质量显著增加, 孔隙度显著降低, 土壤渗透能力下降^[23]。以 2.5 g/L 微咸水灌溉番茄生长土壤, 收获季表层土壤速效氮、速效磷量相对于淡水灌溉显著降低, 有机质及其他养分量也在不同程度上降低^[24]。由于土壤性状对微生物群落结构和代谢活性影响较大, 长期咸水灌溉在改变土壤理化性质的同时也会对作物根际微生物产生影响。研究发现, 咸水(8.04 dS/m)灌溉 8 a 后, 20~40 cm 土层的土壤微生物量碳相比淡水灌溉降低了 28.32%, 咸水灌溉土壤微生物群落活性、碳水化合物、氨基酸、羧酸等底物的利用率均低于淡水灌溉^[25]。同时, 土壤养分循环相关酶活性也会因咸水灌溉而发生变化。棉田经微咸水(1.05 dS/m)灌溉 10 a 后, 其土壤脲酶活性相对于淡水滴灌 10 a 降低 50%, 碱性磷酸酶活性提高 50%^[26]。

盐碱土壤产生的渗透胁迫会造成作物生理干旱, 影响种子萌发与出苗^[27]。种子萌发时期, 盐分胁迫会诱导种子积累大量 ROS, 削弱种子细胞膜系统完整度, 降低种子活性, 从而抑制作物种子萌发^[28]。3 g/L 微咸水灌溉下的小麦种子发芽势相对于淡水灌溉降低了 0.5%~38.0%^[29]。过量的盐基离子(Na⁺、Cl⁻等)进入植物体内, 产生的渗透胁迫和离子毒害会对植物细胞组织造成破坏, 不仅损害植物代谢过程, 还会降低植物光合速率^[30]。咸水(8.04 dS/m)和微咸水(4.61 dS/m)灌溉相比淡水灌溉, 使棉花植株叶片气孔导度降低 43.34%~63.46%, 叶绿素量降低 18.12%~22.82%, 显著抑制了棉花植株生长, 产量降低 12.6%~25.72%^[31]。微咸水(3.6 dS/m)灌溉下的上海青产量仅为 0.5 t/hm², 相比淡水灌溉产量降低 2.1 倍^[32]。此外, 作物品质也会因灌溉水矿化度的差

异而产生变化, 使用 4 g/L 微咸水灌溉番茄可使其可溶性固形物量增加 14.50%, 而使用 8 g/L 咸水灌溉后的番茄可溶性固形物量降低了 20.0%^[33]。相对于全生育期淡水灌溉, 仅在拔节期进行微咸水 (3 g/L) 灌溉使小麦产量降低约 12.86%^[34]; 微咸水 (3 g/L) 灌溉 2 a 后的春玉米产量相比淡水灌溉降低 10.5%^[35]。

3 咸水/微咸水处理技术

3.1 咸水处理技术

对于一些矿化度特别高而无法直接利用的咸水, 可经过一定的处理技术转化为淡水或微咸水, 实现咸水资源的安全利用。目前主要的咸水处理技术包括磁化水处理技术、海水淡化技术、太阳能脱盐技术、电渗析技术等。

磁化水处理技术可提高微咸水安全利用阈值^[36]。咸水经磁化处理后, 水中溶解氧量增加、表面张力系数减小、水分子氢键减弱, 经磁化水灌溉的土壤盐分淋溶速率加快、有效养分量增加、酶活性增强^[37-38]。相对于未磁化处理, 磁化后的咸水/微咸水灌溉的土壤速效磷、速效钾及 Fe、Mn 等微量元素量增加, 进而显著促进作物生长^[39]。目前, 我国主要利用磁化水处理技术进行浸种、育苗等研究。然而, 由于相关操作标准尚未确定, 应用于盐碱地的磁化设备参数仍需探索。

海水淡化技术是将海水中的溶解性盐分和矿物质进行分离, 从而获得淡水的工艺过程。目前, 大规模采用的淡化方法主要包括低温多效蒸馏法、多级闪蒸法和反渗透法^[40]。这些技术主要适用于滨海盐碱地, 这些地区海水资源丰富, 可利用相关技术转化为淡水资源后实现对咸水资源的开发利用。当前, 海水脱盐已成为一种重要的淡水供应方式, 是实现水资源高效利用的开源增量途径, 有助于实现干旱地区灌溉农业的可持续发展。例如, 以色列发展出一套较为成熟的海水脱盐技术, 通过咸水资源的开发利用满足了大规模的农业灌溉水需求^[41]。受限于工艺成本和运输成本, 目前海水淡化技术更多被用于生活用水开发。在农业水资源利用方面, 一方面要考虑降低生产成本, 另一方面在运输管道的设计上, 应向以色列等国家学习, 从生产端、运输端及农田灌溉端进行系统设计, 减少运输过程的损耗, 提高使用效率。

太阳能脱盐技术是一种以太阳能为基础的新型海水淡化技术, 在实现海水的可持续循环利用的同时大幅度降低化石能源的损耗和碳排放污染^[42-43]。太阳能脱盐技术主要利用太阳能的热效应和光效应, 通过光热转换材料将太阳能转化为热量后传递到咸水

中加速淡水转化, 具有绿色无污染、高效低能耗等优点^[44]。因此, 作为太阳能脱盐技术的核心部分, 优异的光热转换材料能够最大限度地提高热能转换效率, 对于实现海水资源的高效利用具有重大意义^[45]。充分利用太阳能资源将有助于满足水和能源需求的可持续发展^[46]。但由于整条产业链的投入较高, 且技术要求较高, 目前此技术在我国盐碱地改良中并未得到有效使用。

电渗析技术是一种常用的膜分离技术, 是我国最早研究应用的咸水处理技术, 具有回收率高、稳定性强、绿色环保等优势, 主要应用于中、低盐度的咸水淡化^[47]。电渗析法是在外加电流的作用下, 利用离子交换膜的选择透过性使溶液中的阴、阳离子发生迁移, 导致盐分浓度降低^[48]。电渗析技术可以通过改变电流、电压满足不同盐分浓度咸水淡化的要求, 同时还能有效去除水中多余的硝酸盐、氟化物等污染物^[49], 已得到大规模应用。目前, 美国、日本以及中东地区应用电渗析技术处理咸水的工艺已较为成熟, 其节能和实用环保的特点符合现代工业要求^[50]。然而, 在盐碱地咸水/微咸水资源的利用中, 高效低成本的电渗析设备研制是当前制约该项技术在田间应用的最大障碍。

针对目前淡水资源短缺危机, 咸水资源开发和循环利用至关重要。磁化水处理技术、海水淡化技术、太阳能脱盐技术以及电渗析技术都是目前广泛应用的咸水处理技术, 正在为解决世界缺水危机做出巨大贡献。然而, 低成本、绿色、环保、高效的咸水处理技术仍有待进一步开发, 以满足未来盐碱地开发与利用的水资源需求。

3.2 咸水结冰灌溉

除以上物理化学处理技术外, 利用咸水与淡水冰点温度的差异进行咸水结冰灌溉是盐碱地改良的一项特色技术。对于大部分盐渍化地区, 冬季温度可降至咸水冰点, 在 12 月一次年 1 月, 温度低于 -5 °C 时可进行咸水结冰灌溉^[51]。灌溉后表层土壤中的咸水结冰, 由于咸水冰点低于淡水, 春季气温回升后, 咸、淡水分离入渗, 表现为矿化度较高的咸水先融出, 矿化度较低的淡水后融出, 淡水冰融化后能够淋洗前期咸水冰融化所积累的盐分 (图 1)。此外, 咸水冰富含的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 水合半径较小, 且易置换出土壤胶体上的 Na^+ , 淡水冰融化后, Na^+ 随融水下渗而淋洗至深层土壤, 减少作物根区盐分量^[52]。土壤中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的移动性弱于 Na^+ , 故咸水冰融化下渗后发生的离子交换过程可导致土壤 SAR 逐渐降低^[53]。在置换 Na^+ 、降低 SAR 的同时, 随水分渗入的大量阳离子使土壤总电解质浓度升高, 促进阳离子迁移

至土壤表面, 土壤颗粒的絮凝作用增强, 有益于团聚体形成, 使盐渍化土壤团聚性增强^[51]。Ju 等^[54]研究发现, 咸水结冰灌溉不仅降低了土壤 (0~30 cm)

盐分量, 还使土壤团聚体中 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 HCO_3^{-} 等离子浓度提高, 增加土壤团聚体平均质量直径, 有利于土壤离子平衡、改善土壤结构。

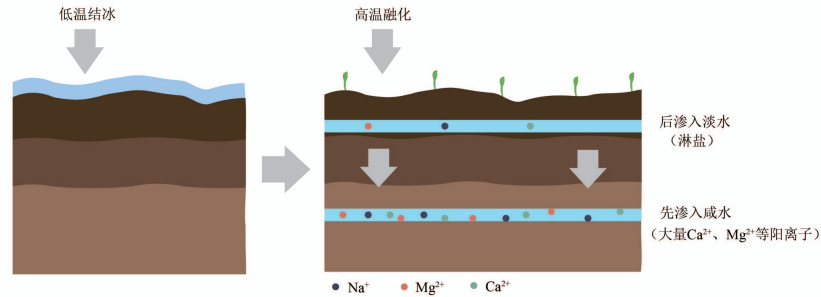


图1 咸水结冰灌溉融水过程

Fig.1 The melting process of freezing saline water irrigation

咸水结冰灌溉可充分利用咸水资源, 10 g/L 咸水冰融化即可产生约 50%淡水及微咸水 (<3 g/L); 而 SAR 10、5~15 g/L 咸水冰融化可产生 60%~65%的微咸水 (<5 g/L) 及淡水^[55-56]。此部分微咸水及淡水在盐渍化土壤修复过程中起着淋盐的作用。研究表明, 分别采用 2 700 mL 咸水 (5 g/L) 和淡水结冰灌溉, 前者的盐渍土表层土壤脱盐率较后者高 10%, 且相对于淡水冰融化入渗, 咸水冰融化后水分入渗速率更快、脱盐深度更深^[57]。土柱试验结果表明, 1 600~2 400 mL 的咸水冰融化入渗的脱盐率与淡水冰融化入渗无显著差异, 但咸水灌溉体积增加至 3 200 mL 后, 其脱盐率显著高于淡水^[58]。经 90、135、180 mm 咸水结冰灌溉的土壤脱盐率为 13.1%~80.8%^[59], 灌溉水量越大, 脱盐效果越显著。

4 咸水/微咸水灌溉与配套管理措施

4.1 咸水/微咸水灌溉与地表覆盖

合理的咸-淡水轮灌可有效保障作物产量, 在此基础上结合地表覆盖, 可有效抑制土壤盐分在表层聚

集, 改善作物生长环境, 使玉米等耐盐性较差的作物也可正常生长 (表 1)。在土壤水分蒸发量较大时期, 地表覆盖的秸秆可有效阻止水分蒸发, 缓解盐分对作物的胁迫。此外, 微咸水膜下滴灌也可达到保墒、抑盐的作用。利用 3 g/L 微咸水对新疆石河子地区的棉花进行膜下滴灌, 土壤溶液中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 增多, 而土壤含水率相对于淡水膜下滴灌无显著差异, 棉花产量相对于淡水膜下滴灌有所提高^[15]。咸水结冰灌溉也可结合地表覆盖, 其保墒抑盐效果优于仅进行咸水结冰灌溉的处理^[60]。采用地膜或秸秆覆盖均可提高咸水结冰灌溉的效果, 由于地表覆盖避免了春季土壤水分的大量蒸发损失, 最大程度保证了作物萌芽时的水分供应, 使作物正常渡过生长期, 夏季充足的降水可保障作物获得较高的产量^[61]。棉花覆膜处理后的表层土壤 (0~10 cm) 含盐量降低了 36.8%, 含水率增加了 16.5%~17.8%^[62]。咸水结冰灌溉效果同样受到覆膜时间的影响, 咸水冰融水完全入渗后覆膜的抑盐效果优于咸水结冰灌溉后播种时期覆膜, 且前者棉花播种期表层土壤含水率更高^[63]。

表 1 农业生产中咸水/微咸水灌溉及配套措施

Table 1 Salt water/brackish water irrigation and supporting measures in agricultural production

地区	作物	生育期+灌溉水	产量/(t·hm ⁻²)	灌溉措施	文献
环渤海低平原	冬小麦	越冬期 60 mm 淡水, 返青期 60 mm 微咸水 2.8/(dS·m ⁻¹)	5.2	淡水-微咸水轮灌 3 a	Liu 等 ^[64]
渤海滨海盐碱地	棉花	冬季 180 mm 咸水 12.15/(g·L ⁻¹)	2.0	咸水结冰灌溉+玉米秸秆覆盖	封晓辉等 ^[65]
渤海滨海盐碱地	棉花	播种前 12.3~13.8/(g·L ⁻¹)	4.1	咸水结冰灌溉+覆膜 4 a	Guo 等 ^[60]
新疆	棉花	现蕾期 106 mm, 开花期 160 mm, 花铃期 160 mm, 吐絮期 53.4 mm(6.0 g·L ⁻¹)	2.5	覆膜滴灌	Yang 等 ^[66]
河套灌区	玉米	播种前 180 mm (6.6~8.3 dS·m ⁻¹)	12.3	咸水结冰灌溉+覆膜 3 a	Guo 等 ^[61]
河套灌区	玉米	全生育期 300 mm(2.0 g·L ⁻¹)	14.5	地下水-微咸水-微咸水交替覆膜滴灌	杨培岭等 ^[13]

4.2 咸水/微咸水灌溉与土壤调理剂

有机肥、秸秆、磷石膏、脱硫石膏等土壤调理剂广泛应用于盐碱土修复^[67-69]。在咸水/微咸水灌溉的背景下, 使用有机肥可提高土壤肥力, 促进土壤大团聚体形成, 改善土壤结构, 增强土壤微生物活性, 改善作物根区土壤环境^[70-71]。在咸水/微咸水灌

溉 (1~6 g/L) 的小麦-玉米轮作体系中, 施用牛粪有机肥 (75 m³/hm²) 下的玉米收获季耕层土壤有机质量相对于未施用有机肥提高了 127%, 水稳性大团聚体量增加 10.36%~90.44%, EC 值降低 4.6%~48.3%^[72]。秸秆还田可有效增加微咸水灌溉的农田土壤有机质量, 秸秆与土壤颗粒形成的孔隙有利于调节田间水、

气、热状况,使土壤环境更适于微生物生长^[73-74]。连续 2 a 向咸水灌溉(8.04 dS/m)的棉田施用秸秆(6 t/hm²),不仅增加了土壤养分量,蔗糖酶活性也有所提高^[75]。相对于未施秸秆的微咸水灌溉农田,施用秸秆的农田土壤 EC 值降低 64.5%,真菌多样性及丰度有所增加^[76]。

磷石膏、脱硫石膏等调理剂富含 Ca²⁺与 Mg²⁺,在增大土壤电解质浓度的同时,可与土壤胶体上的 Na⁺发生离子交换,降低土壤交换性钠量。施用调理剂引入的高价阳离子还可消除土壤中大量负电荷互斥产生的电势,降低土壤胶体离散程度,缓解高钠环境对土壤团聚体结构的破坏。研究表明,微咸水膜下滴灌施用磷石膏可使土壤 Na⁺量降低 37.24%^[77]。

5 结论与展望

盐碱地咸水/微咸水安全高效利用旨在充分挖掘边际水资源,节约农业淡水资源,起到改良盐碱地和保障作物水分需求的目的。在有条件利用咸水/微咸水资源进行灌溉的区域,首先应结合当地资源条件,充分考虑灌溉水资源矿化度、作物耐盐性、作物生育期需水量等因素选择合适的水资源利用方式及配套管理措施,同时在生育期内对农田土壤性质、作物生理特性进行监控,明确节水控盐与作物高产协同利用方式,在部分区域还可开发咸水/微咸水处理技术,以进一步优化传统的开发利用方式。

5.1 因地制宜进行咸水/微咸水资源综合开发利用

在我国不同的盐碱区域,尚无成熟的咸水/微咸水安全利用标准或技术规程,未来应充分考虑全国适宜咸水或微咸水灌溉盐渍化区域的气候条件、土壤类型、土壤盐渍化程度、作物种类等因素,形成适合当地区域特点的微咸水利用综合技术体系。根据各区域温度和降水特征,咸水/微咸水资源量,典型作物生产体系在各生育期的耐盐能力等合理设计灌溉制度和灌溉定额。鉴于我国淡水资源紧张与盐碱土地开发利用之间的矛盾,需坚持“以水定地,以水定产”原则,明确各区域淡水资源及边际水资源的开发与保护关系,注重区域水资源生态平衡,合理规划其空间分布特征,确定最适宜的农业利用模式。

5.2 开展作物根域水肥盐适生研究

当前对咸水/微咸水资源的利用更多是从水利工程或农学角度出发,集中于灌溉措施、作物最适宜生育期等方面的研究。然而,盐碱地咸水/微咸水灌溉最根本的前提是最小化土壤固有盐分及灌溉水带来的土壤盐分对作物产量与品质的影响。根际是植物-土壤、植物-微生物互作最活跃的热点区域,根际生长环境的优化对作物生长发育至关重要。在利用

咸水/微咸水资源改良盐碱地的同时,最大程度减轻其对作物根际的危害,构建以根际调控为核心的盐碱地咸水/微咸水灌溉安全利用技术,有助于充分发挥作物生长潜力,提升作物耐盐、抗盐能力,促进盐碱地农业高质量发展。

5.3 咸水/微咸水轻简智慧化灌溉技术

限制盐碱地咸水/微咸水技术推广与应用落地的关键因素是如何精确快速诊断土壤、灌溉水中含盐量并量化其对作物生长及产量的影响。未来应通过大数据分析已有的技术和应用效果,提出针对性的咸水/微咸水资源综合利用技术及配套解决方案,构建盐碱地轻简、智慧化综合利用体系。因此,在未来的研究中,需综合运用土壤学、植物营养学、农田水力学、计算机、微电子等学科知识,突破田间土壤水分、盐分、养分和作物生长动态的精准监测技术,基于区域气象、土壤、作物生长等各项指标,运用大数据分析、人工智能算法构建水肥盐耦合增效的精准决策系统,结合水肥一体化、智能化农机、物联网等手段,构建低成本、智慧化、整装式的盐碱地咸水/微咸水灌溉农业高效生产模式。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 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(Z1):162-170.
YANG Jingsong, YAO Rongjiang. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(Z1): 162-170.
- [2] 王浩,王建华.中国水资源与可持续发展[J].中国科学院院刊,2012,27(3):352-358,331.
WANG Hao, WANG Jianhua. Sustainable utilization of China's water resources[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 352-358, 331.
- [3] 刘友兆,付光辉.中国微咸水资源化若干问题研究[J].地理与地理信息科学,2004,20(2):57-60.
LIU Youzhao, FU Guanghui. Utilization of gentle salty water resource in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(2): 57-60.
- [4] 牛君仿,冯俊霞,路杨,等.咸水安全利用农田调控技术措施研究进展[J].中国生态农业学报,2016,24(8):1 005-1 015.
NIU Junfang, FENG Junxia, LU Yang, et al. Advances in agricultural practices for attenuating salt stress under saline water irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1 005-1 015.
- [5] 胡雅琪,吴文勇.中国农业非常规水资源灌溉现状与发展策略[J].中国工程科学,2018,20(5):69-76.
HU Yaqi, WU Wenyong. Review and development strategy of irrigation with unconventional water resources in China[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5): 69-76.
- [6] AL-TABBAL J, HADDAD M, BANI-HANI N, et al. Growth and biomass yield of hydroponically grown thyme (*Thymus vulgaris* L.) in response to brackish water-induced stress[J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69(4): 903-913.
- [7] WANG Qingming, HUO Zailin, ZHANG Liudong, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 125-138.

- [8] 吴雨晴, 郑春莲, 孙景生, 等. 长期咸水灌溉对棉田土壤水稳性团聚体的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 58-64, 107.
WU Yuqing, ZHENG Chunlian, SUN Jingsheng, et al. The effects of long-term saline water irrigation on stability of soil aggregates in a cotton field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 58-64, 107.
- [9] CHENG Minghui, WANG Haidong, FAN Junliang, et al. Crop yield and water productivity under salty water irrigation: A global meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2021, 256: 107-105.
- [10] 陈素英, 邵立威, 孙宏勇, 等. 微咸水灌溉对土壤盐分平衡与作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1 049-1 058.
CHEN Suying, SHAO Liwei, SUN Hongyong, et al. Effect of brackish water irrigation on soil salt balance and yield of both winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1 049-1 058.
- [11] 高聪帅, 邵立威, 闫宗正, 等. 不同矿化度微咸水灌溉冬小麦对下季作物产量和周年土壤盐分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(5): 809-820.
GAO Congshuai, SHAO Liwei, YAN Zongzheng, et al. Annual soil salt balance and crop performance under brackish water irrigation during the winter wheat season[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(5): 809-820.
- [12] WANG Tianyu, XU Zhenghe, PANG Guibin. Effects of irrigating with brackish water on soil moisture, soil salinity, and the agronomic response of winter wheat in the Yellow River Delta[J]. Sustainability, 2019, 11(20): 5 801.
- [13] 杨培岭, 王瑜, 任树梅, 等. 咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 273-281.
YANG Peiling, WANG Yu, REN Shumei, et al. Soil moisture and saline distribution characteristics and maize stem water uptake under alternate irrigation between saline water and groundwater[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 273-281.
- [14] 马文军, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 73-80.
MA Wenjun, CHENG Qinyuan, LI Liangtao, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 73-80.
- [15] YANG Guang, LI Fadong, TIAN Lijun, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104-112.
- [16] 花永辉, 刘洪波. 不同矿化度水平微咸水灌溉对棉花生长发育的影响[J]. 陕西水利, 2023(3): 70-72.
HUA Yonghui, LIU Hongbo. Effects of brackish water irrigation with different salinity levels on cotton growth and development[J]. Shaanxi Water Resources, 2023(3): 70-72.
- [17] 张俊鹏, 冯棣, 曹彩云, 等. 咸水灌溉对覆膜棉花生长与水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学, 2014, 32(5): 448-455.
ZHANG Junpeng, FENG Di, CAO Caiyun, et al. Effects of irrigation with saline water on growth and water use efficiency of film-mulched cotton plant[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5): 448-455.
- [18] 吴忠东, 王全九. 微咸水混灌对土壤理化性质及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 69-73.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effects of blending irrigation with brackish water on soil physico-chemical properties and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 69-73.
- [19] 王广恩, 郭丽, 钱玉源, 等. 不同咸水利用方式对棉花叶绿素荧光参数及土壤盐分的影响[J]. 棉花学报, 2021, 33(1): 13-21.
WANG Guang'en, GUO Li, QIAN Yuyuan, et al. Effects of different saline water irrigation on chlorophyll fluorescence parameters in cotton and the soil salt content[J]. Cotton Science, 2021, 33(1): 13-21.
- [20] 闵勇, 朱成立, 舒慕晨, 等. 微咸水-淡水交替灌溉对夏玉米光合日变化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 9-17.
MIN Yong, ZHU Chengli, SHU Muchen, et al. Effects of alternate fresh and brackish water irrigation on the diurnal variation of photosynthesis of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 9-17.
- [21] 朱成立, 舒慕晨, 张展羽, 等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 220-228, 201.
ZHU Chengli, SHU Muchen, ZHANG Zhanyu, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 220-228, 201.
- [22] 朱成立, 强超, 黄明逸, 等. 咸淡水交替灌溉对滨海垦区夏玉米生理生长的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 253-261.
ZHU Chengli, QIANG Chao, HUANG Mingyi, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and slight saline water on physiological growth of summer maize in coastal reclamation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 253-261.
- [23] 乔若楠, 程煜, 闫思慧, 等. 不同离子微咸水对土壤水力特性和生菜生长的影响[J]. 排灌机械工程学, 2023, 41(3): 288-295.
QIAO Ruonan, CHENG Yu, YAN Sihui, et al. Effects of saline water with different cations on soil hydraulic properties and lettuce growth[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(3): 288-295.
- [24] CAO Yun'e, GAO Yanming, LI Jianshe, et al. Straw composts, gypsum and their mixtures enhance tomato yields under continuous saline water irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2019, 223: 105-112.
- [25] GUO Huijuan, HU Zhiqiang, ZHANG Huimin, et al. Soil microbial metabolic activity and community structure in drip-irrigated calcareous soil as affected by irrigation water salinity[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2019, 230(2): 44.
- [26] 王国栋, 褚贵新, 刘瑜, 等. 干旱绿洲长期微咸地下水灌溉对棉田土壤微生物量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 44-48.
WANG Guodong, CHU Guixin, LIU Yu, et al. Effects of long-term irrigation with brackish groundwater on soil microbial biomass in cotton field in arid oasis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 44-48.
- [27] 聂佳俊, 白璐嘉, 韦云飞, 等. 盐胁迫过程中渗透胁迫和离子胁迫对水稻种子萌发的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(3): 959-966.
NIE Jiajun, BAI Lujia, WEI Yunfei, et al. Effects of osmotic stress and ion stress on rice seed germination during salt stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(3): 959-966.
- [28] LUO Xiaofeng, DAI Yujia, ZHENG Chuan, et al. The ABI4-RbohD/VTC2 regulatory module promotes reactive oxygen species (ROS) accumulation to decrease seed germination under salinity stress[J]. New Phytologist, 2021, 229(2): 950-962.
- [29] 师长海, 李玉欣, 翟红梅, 等. 微咸水对冬小麦萌发及苗期生长发育的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1 343-1 347.
SHI Changhai, LI Yuxin, ZHAI Hongmei, et al. Effect of brackish water on winter wheat seed germination and seedling growth[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1 343-1 347.
- [30] VAN ZELM E, ZHANG Y X, TESTERINK C. Salt tolerance mechanisms of plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2020, 71: 403-433.
- [31] 周永学, 李美琪, 黄志杰, 等. 长期咸水滴灌对灰漠土壤理化性质及棉花生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 12-20.
ZHOU Yongxue, LI Meiqi, HUANG Zhijie, et al. Effects of long-term saline water drip irrigation on physicochemical properties and cotton growth in grey desert soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 12-20.
- [32] 蒋丽媛, 赵伟, 杨圆圆, 等. 微咸水灌溉对蔬菜产量及土壤盐分离子影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S2): 17-21.
JIANG Liyuan, ZHAO Wei, YANG Yuanyuan, et al. Effects of brackish water irrigation with different water quality on vegetable yield and soil salt ions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(S2): 17-21.
- [33] 马嘉莹, 王兴鹏, 王洪博, 等. 咸水灌溉对土壤盐分分布及设施番茄生

- 理特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 64-71, 99.
- MA Jiaying, WANG Xingpeng, WANG Hongbo, et al. The effects of saline water irrigation on soil salinity and physiology of greenhouse tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 64-71, 99.
- [34] 董欢欢, 李梅杭, 谷强远, 等. 微咸水补灌对黄河三角洲小麦旗叶衰老及产量构成的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(11): 21-27.
- DONG Huanhuan, LI Meizhen, GU Qiangyuan, et al. Effects of supplementary irrigation with brackish water on flag leaf senescence and yield components of wheat in the Yellow River Delta[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(11): 21-27.
- [35] 郝远远, 郑建华, 黄权中. 微咸水灌溉对土壤水盐及春玉米产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 36-41.
- HAO Yuanyuan, ZHENG Jianhua, HUANG Quanzhong. Effects of saline water irrigation on soil water salinity and spring maize yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(10): 36-41.
- [36] 王全九, 许紫月, 单鱼洋, 等. 磁化微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 198-206.
- WANG Quanjiu, XU Ziyue, SHAN Yuyang, et al. Effect of salinity of magnetized brackish water on salt and water movement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 198-206.
- [37] AHMADI Madeh, GHASEMNEZHAD Azim, MAHOONAK Alireza Sadeghi, et al. Effect of magnetized and saline water on the biomass yield of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni.)[J]. Advances in Bioresearch, 2016, 7(1):158-166.
- [38] ELHINDI K M, AL-MANA F A, ALGAHTANI A M, et al. Effect of irrigation with saline magnetized water and different soil amendments on growth and flower production of *Calendula officinalis* L. plants[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2020, 27(11): 3 072-3 078.
- [39] 王淦, 郭建曜, 毕思圣, 等. 磁化咸水灌溉对葡萄生长和土壤矿质养分的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(12): 1 683-1 692.
- WANG Lu, GUO Jianyao, BI Sisheng, et al. Effects of irrigation with magnetized saline water on *Vitis vinifera* growth and soil mineral nutrients[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(12): 1 683-1 692.
- [40] 刘承芳, 李梅, 王永强, 等. 海水淡化技术的进展及应用[J]. 城镇供水, 2019(2): 54-58, 62.
- LIU Chengfang, LI Mei, WANG Yongqiang, et al. Progress and application of seawater desalination technology[J]. City and Town Water Supply, 2019(2): 54-58, 62.
- [41] RAVEH E, BEN-GAL A. Leveraging sustainable irrigated agriculture via desalination: Evidence from a macro-data case study in Israel[J]. Sustainability, 2018, 10(4): 974.
- [42] AHMED F E, HASHAIKEH R, HILAL N. Solar powered desalination - Technology, energy and future outlook[J]. Desalination, 2019, 453: 54-76.
- [43] LI Zhengtong, XU Xingtao, SHENG Xinran, et al. Solar-powered sustainable water production: State-of-the-art technologies for sunlight-energy-water nexus[J]. ACS nano, 2021, 15(8): 12 535-12 566.
- [44] DELGADO William R, BEACH Timothy, LUZZADDER-BEACH Sheryl. Solar desalination: Cases, synthesis, and challenges[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2020, 7(3): e1 434.
- [45] LUO Xiao, SHI Jincheng, ZHAO Changying, et al. The energy efficiency of interfacial solar desalination[J]. Applied Energy, 2021, 302: 117 581.
- [46] ULLAH I, RASUL M G. Recent developments in solar thermal desalination technologies: A review[J]. Energies, 2018, 12(1): 119.
- [47] 董林, 陈青柏, 王建友, 等. 电渗析苦咸水淡化技术研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(4): 2 102-2 114.
- DONG Lin, CHEN Qingbai, WANG Jianyou, et al. Research progress in brackish water electrodialysis desalination technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(4): 2 102-2 114.
- [48] DOORNBUSCH G J, TEDESCO M, POST J W, et al. Experimental investigation of multistage electrodialysis for seawater desalination[J]. Desalination, 2019, 464: 105-114.
- [49] SHI Jihong, GONG Liang, ZHANG Tao, et al. Study of the seawater desalination performance by electrodialysis[J]. Membranes, 2022, 12(8): 767.
- [50] SUN Bo, ZHANG Muxing, HUANG Shifang, et al. Study on mass transfer performance and membrane resistance in concentration of high salinity solutions by electrodialysis[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 281: 119 907.
- [51] 张璐, 杨帆, 王志春. 咸水结冰灌溉融水淋盐改良盐渍土研究进展[J]. 土壤与作物, 2021, 10(2): 202-212.
- ZHANG Lu, YANG Fan, WANG Zhichun. Research advances of saline soil reclamation by freezing saline water irrigation and meltwater leaching[J]. Soils and Crops, 2021, 10(2): 202-212.
- [52] 车升国, 林治安, 赵秉强, 等. 咸水结冰灌溉对盐化潮土盐基离子剖面迁移规律的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 88-93.
- CHE Shengguo, LIN Zhian, ZHAO Bingqiang, et al. Effects of agricultural irrigation by melting saline water ice on soil salt and ion movement under fluvo-aquic soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 88-93.
- [53] SMITH C J, OSTER J D, SPOSITO G. Potassium and magnesium in irrigation water quality assessment[J]. Agricultural Water Management, 2015, 157: 59-64.
- [54] JU Zhaoqiang, DU Zhangliu, LIU Xiaojing, et al. Irrigation with freezing saline water for 6 years alters salt ion distribution within soil aggregates[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 97-105.
- [55] GUO Kai, LIU Xiaojing. Dynamics of meltwater quality and quantity during saline ice melting and its effects on the infiltration and desalinization of coastal saline soils[J]. Agricultural Water Management, 2014, 139: 1-6.
- [56] 郭凯, 刘小京. 咸水结冰融化过程中水质与水量的变化规律初步研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 56-60.
- GUO Kai, LIU Xiaojing. The primary research on the variation of melted water quality and quantity during saline ice melting[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(1): 56-60.
- [57] LI Zhigang, LIU Xiaojing, ZHANG Xiumei, et al. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 498-502.
- [58] XIAO Ye, HUANG Zhigang, LIU Zhijun, et al. Dynamics of soil moisture and salt content after infiltration of saline ice meltwater in saline-sodic soil columns[J]. Pedosphere, 2017, 27(6): 1 116-1 124.
- [59] 李志刚, 刘小京, 张秀梅, 等. 冬季咸水结冰灌溉后土壤水盐运移规律的初步研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(S1): 187-192.
- LI Zhigang, LIU Xiaojing, ZHANG Xiumei, et al. A primary study on the reclamation of coastal saline soil with freezing irrigation of saline water in winter[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(S1): 187-192.
- [60] GUO Kai, LIU Xiaojing. 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): 441-452.
- [61] GUO Kai, LIU Xiaojing. Reclamation effect of freezing saline water irrigation on heavy saline-alkali soil in the Hetao Irrigation District of North China[J]. Catena, 2021, 204: 105 420.
- [62] 肖辉, 潘洁, 程文娟, 等. 咸水结冰灌溉与覆膜对滨海盐土水盐动态的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 180-183, 187.
- XIAO Hui, PAN Jie, CHENG Wenjuan, et al. Effect of freezing irrigation with saline water and covering on the water and salt dynamic of coastal saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1): 180-183, 187.
- [63] 郭凯, 张秀梅, 刘小京. 咸水结冰灌溉下覆膜时间对滨海盐土水盐运移的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1 202-1 212.
- GUO Kai, ZHANG Xiumei, LIU Xiaojing. Effect of timing of plastic film mulching on water and salt movements in coastal saline soil under freezing saline water irrigation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(6): 1 202-1 212.

- [64] LIU X W, FEIKE T, CHEN S Y, et al. Effects of saline irrigation on soil salt accumulation and grain yield in the winter wheat-summer maize double cropping system in the low plain of North China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(12): 2 886-2 898.
- [65] 封晓辉, 张秀梅, 郭凯, 等. 覆盖措施对咸水结冰灌溉后土壤水盐动态和棉花生产的影响[J]. *棉花学报*, 2015, 27(2): 135-142.
FENG Xiaohui, ZHANG Xiumei, GUO Kai, et al. Effects of different salt control measures after saline water freezing irrigation to soil water, salt dynamics, cotton emergence and yield[J]. *Cotton Science*, 2015, 27(2): 135-142.
- [66] YANG Guang, LI Fadong, HE Xinlin, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199: 104 592.
- [67] 杨帆, 王志春, 肖烨. 冬季结冰灌溉对苏打盐碱土水盐变化的影响[J]. *地理科学*, 2012, 32(10): 1 241-1 246.
YANG Fan, WANG Zhichun, XIAO Ye. Effect of freezing water irrigation on the changes of soil water and salt in saline-sodic soil area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(10): 1 241-1 246.
- [68] ZHAO Yonggan, WANG Shujuan, LI Yan, et al. Extensive reclamation of saline-sodic soils with flue gas desulfurization gypsum on the Songnen Plain, Northeast China[J]. *Geoderma*, 2018, 321: 52-60.
- [69] PISTOCCHI C, RAGAGLINI G, COLLA V, et al. Exchangeable sodium percentage decrease in saline sodic soil after basic oxygen furnace slag application in a lysimeter trial[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 203: 896-906.
- [70] 王逸筠, 赵文栋, 孙泽强, 等. 有机肥替代对鲁西北轻度盐碱地土壤性状和小麦、玉米产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(1): 93-99.
WANG Yijun, ZHAO Wendong, SUN Zeqiang, et al. Effects of organic manure substitution on soil properties and yield of wheat and maize in lightly salinized land in Northwest Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(1): 93-99.
- [71] 司海丽, 纪立东, 李磊, 等. 生物有机肥对宁夏盐碱地土壤养分和生物学特性的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(6): 1 124-1 131.
SI Haili, JI Lidong, LI Lei, et al. Effects of long-term application of bioorganic fertilizer on soil nutrients and biological characteristics of saline alkali land in Ningxia[J]. *Soils*, 2022, 54(6): 1 124-1 131.
- [72] 王艺乔, 郑春莲, 李科江, 等. 施用有机肥对咸水灌溉农田耕层土壤有机质及水稳性团聚体的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 268-274.
WANG Yiqiao, ZHENG Chunlian, LI Kejiang, et al. Effects of organic fertilizer application on soil organic matter and water-stable aggregates of plow layer in farmland with saline water irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 268-274.
- [73] PAN F X, LI Y Y, CHAPMAN S J, et al. Effect of rice straw application on microbial community and activity in paddy soil under different water status[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(6): 5 941-5 948.
- [74] ZHANG Zemin, ZHANG Zhanyu, LU Peirong, et al. Soil water-salt dynamics and maize growth as affected by cutting length of topsoil incorporation straw under brackish water irrigation[J]. *Agronomy*, 2020, 10(2): 246.
- [75] 周永学, 陈静, 李远, 等. 棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2 192-2 203.
ZHOU Yongxue, CHEN Jing, LI Yuan, et al. Effects of cotton stalk returning on soil enzyme activity and bacterial community structure diversity in cotton field with long-term saline water irrigation[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2 192-2 203.
- [76] 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 等. 生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(9): 4 625-4 635.
GUO Xiaowen, CHEN Jing, LU Xiaoyu, et al. Effects of biochar and straw returning on soil fungal community structure diversity in cotton field with long-term brackish water irrigation[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9): 4 625-4 635.
- [77] 刘易, 冯耀祖, 黄建, 等. 微咸水灌溉条件下施用不同改良剂对盐渍化土壤盐分离子分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 146-152.
LIU Yi, FENG Yaoyu, HUANG Jian, et al. Effects of modifiers on saline soil salt distribution under brackish water irrigation conditions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(1): 146-152.

Safe and Efficient Utilization of Saline and Brackish Water in Saline-alkali Farmland: Progress and Perspective

NI Gang, HE Chen, ZENG Yi, ZHANG Junling, WANG Guangzhou*

(China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: 【Objective】 Saline-alkali soils are an important reserve cultivated land resource in China. They are mainly distributed in arid and semi-arid areas in the north, but the shortage of fresh water resources restricts the exploitation of saline-alkali land for agricultural production. There is a shortage of agricultural freshwater resources while the utilization of saline groundwater and brackish water is low. Research on the safety and efficient utilization of saline and brackish water is of hence great significance to agricultural production and saline soil improvement. 【Method】 We provide a comprehensive overview of agricultural development practices concerning use of saline and brackish water, including approaches such as directly using brackish water for irrigation and alternate irrigation using saline and freshwater. We elucidate the adverse effect of inappropriate utilization of brackish water on soil and crop health. Furthermore, we review the contemporary advanced technologies for brackish water treatment and underscores the supportive role of agronomic practices like mulching and soil fertilization in promoting the safe utilization of saline and brackish water. 【Result】 The study synthesizes the impact of different irrigation methods on soil salt content, organic matter, nutrient levels, aggregate structure, and crop yields. 【Conclusion】 In regions amenable to saline water and brackish water irrigation, a holistic assessment of factors such as soil type and crop variety should help to manage irrigation decisions. We conclude by outlining research prospects in the future, which encompass tailored development and utilization of saline water and brackish water, understanding rhizosphere adaptations in water-constrained environments, and the application of intelligent irrigation technologies to enhance sustainability.

Key words: saline water; brackish water; salinization; irrigation; agricultural production

责任编辑: 韩 洋