

DOI: 10.12357/cjea.20220899

孙宏勇, 张雪佳, 田柳, 娄泊远, 刘彤, 王金涛, 董心亮, 郭凯, 刘小京. 咸水灌溉影响耕地质量和作物生产的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 354–363
SUN H Y, ZHANG X J, TIAN L, LOU B Y, LIU T, WANG J T, DONG X L, GUO K, LIU X J. Effects of saline water irrigation on soil quality and crop production: a review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(3): 354–363

咸水灌溉影响耕地质量和作物生产的研究进展*

孙宏勇^{1,2}, 张雪佳^{1,2}, 田柳^{1,2}, 娄泊远^{1,2}, 刘彤^{1,2}, 王金涛¹, 董心亮¹, 郭凯¹, 刘小京^{1,2}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 水资源是基础性自然资源和重要的战略资源。盐碱地多分布于干旱半干旱地区, 淡水资源短缺是盐碱区农业可持续发展的主要限制因素。同时盐碱区较为丰富的咸水微咸水资源、土地资源和光热资源等为盐碱区农业可持续发展提供了可能。本文针对咸水灌溉影响耕地质量、作物生长、产量和品质等问题, 综述了基于水质的咸水分类、咸水灌溉制度与灌溉方式和地下水埋深等影响咸水在农业生产中安全利用的因素, 阐述了不同矿化度咸水灌溉、土壤水力特性、理化性质、温室气体排放等土壤质量变化情况和对作物生长发育、产量和品质的影响, 明确了有机物料、咸水灌溉制度、覆盖和耕作等农艺措施、水肥盐多因素调控和耐盐作物适盐种植等农业措施的作用。咸水灌溉下土壤质量呈下降趋势, 有机物料的施用、秸秆还田和合理的耕作等调控措施通过影响土壤质量保证咸水的安全利用。与旱作相比, 咸水灌溉可以起到明显的增产作用, 在合理的咸水范围内还能提升品质。在新形势下, 未来将面向国家粮食安全重大需求, 以协同提升土壤质量、作物产量和品质为多目标, 系统开展咸水非充分灌溉、水肥盐综合调控、咸水灌溉对土壤质量和作物咸水精准灌溉机理过程研究、技术研发和模式示范工作, 为缺水盐渍区农业可持续发展提供理论依据和技术支撑。

关键词: 咸水灌溉; 耕地质量; 作物生产; 调控措施

中图分类号: S641.2

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effects of saline water irrigation on soil quality and crop production: a review*

SUN Hongyong^{1,2}, ZHANG Xuejia^{1,2}, TIAN Liu^{1,2}, LOU Boyuan^{1,2}, LIU Tong^{1,2}, WANG Jintao¹, DONG Xinliang¹, GUO Kai¹, LIU Xiaojing^{1,2}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Fresh water is a basic natural and important strategic resource. Most salt-affected soils are distributed in arid and semi-arid areas, and a shortage of freshwater resources is the most important limiting factor for sustainable agricultural development. However, the relatively rich saline water, land, solar, and thermal resources in saline-alkali areas provide sustainable regional agriculture development potential. To address challenges of soil quality decline and crop yield reduction induced by saline water irrigation, this study

* 中国科学院战略性先导科技专项 A 类(XDA26040102) 和河北省重点研发计划项目(21326411D, 21326408D) 资助

孙宏勇, 主要研究方向为农田水盐运移过程机理与调控。E-mail: hysun@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2022-11-17 接受日期: 2023-01-12

* This study was supported by the Special Project of Strategic Leading Science and Technology of Chinese Academy of Sciences (XDA26040102) and the Key Research and Development Project in Hebei Province, China (21326411D, 21326408D).

Corresponding author, SUN Hongyong, E-mail: hysun@sjziam.ac.cn

Received Nov. 17, 2022; accepted Jan. 12, 2023

summarizes the factors affecting the safe utilization of saline water and the impact mechanism of saline water irrigation on soil hydraulic characteristics, soil physicochemical properties, crop growth, grain yield, and quality. First, freshwater, brackish water, and saline water classifications were as previously described. Factors affecting the safe utilization of saline water include saline water quality, irrigation amount, irrigation methods, and the groundwater table. Second, saline water irrigation has negative effects on soil quality, which increases the salinity of the surface soil, destroys the soil structure, and further affects the soil hydraulic characteristics, water infiltration, and salt distribution, affecting greenhouse gas emissions. Third, crops grow slowly and die because of the lower photosynthetic rate after saline water irrigation. However, most of the treatments irrigated using saline water improved the grain yield compared with the rainfed treatment and improved the grain quality under optimal salinity water. Furthermore, based on field experiments, most crops have optimal saline water thresholds. Finally, we analyzed the regulatory effects of agricultural practices such as organic fertilizer application, straw mulching, tillage, saline water irrigation schedules, cropping systems, and salt-tolerant crop planting. In the future, to ensure food and water security, it is necessary to conduct the mechanism process and technology research, and develop model to demonstrate the effects of saline water deficit irrigation and water-fertilizer-salt comprehensive regulation on the change in soil quality after saline water irrigation, and the effects of saline water precision irrigation on crop production and the ecosystem, which will provide a theoretical basis and technical support for the sustainable development of agriculture in water-deficient and saline areas.

Keywords: Saline water irrigation; Soil quality; Crop production; Regulation measures

水安全与食物安全是人类社会可持续发展的最基本支撑点,水资源短缺已成为我国食物安全和农业可持续发展的刚性约束^[1]。据估计,全球灌溉面积约为 $348.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 仅占耕地面积的 22.32%, 却贡献了世界粮食供应的 40%^[2]。灌溉对我国粮食增产的直接贡献率为 36.27%^[1]。但是,我国的粮食生产与区域水资源承载力之间存在不协调问题,尤其是我国北方从 20 世纪 70 年代开始为了追求粮食高产高强度持续抽取地下水灌溉产生了系列的生态环境问题,迫切需要降低灌溉用水量和开发利用新水源。咸水资源是可利用的新水源之一,其开发利用对保障农业可持续发展具有非常重要的意义。

据调查,我国地下微咸水资源约 $200 \text{ 亿 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 可开采量为 $130 \text{ 亿 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 其中黄淮海平原地区 $2 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的微咸水资源量达 $54 \text{ 亿 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ^[3]。河北省是微咸水分布最多的省份, $2 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的微咸水总储藏量达 990.55 亿 m^3 ^[3], 但利用率仅为 40%, 其中近 60% 微咸水资源未被农业所利用^[3]。同时,许多学者的研究表明,在干旱情况下利用咸水进行灌溉,在一定程度上可缓解农业干旱,实现作物增产^[4-7]。因此,适度开发和安全利用非常规水源对提高农业用水保障能力具有非常重要的意义。

伴随着咸水进入农田,可溶性盐离子也被带入到土壤中,将会对土壤理化性质和作物生长发育产生不同程度的影响。因此,咸水灌溉下如何能够既保持土壤质量健康又能减少盐分离子对作物胁迫的副作用是安全充分利用咸水资源的重要挑战。针对这些问题,本文综述了影响咸水灌溉的灌溉水水质、灌溉方式及灌溉方法等因素及其对土壤质量、作物

生长、产量和品质及生态环境的影响,以期为咸水安全高效利用提供理论依据和技术支撑。

1 影响咸水安全灌溉的主要因素

1.1 灌溉咸水水质

矿化度和电导率是评价和衡量水质状况的两项重要指标。矿化度是水中所含无机矿物质成分的总量,是农田灌溉用水适用性评价的主要指标之一,用于评价水中总含盐量,其基本单位为 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。电导率(EC)反映的是水中离子含量的多少,其与所含无机酸、碱、盐的量有一定关系,基本单位为 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 。由于矿化度和电导率均是由水溶液中离子的组成和离子的含量决定,它们之间存在一定的关系,其在某一特定区域关系相对较为稳定。因此,许多学者利用两者之间较好的相关关系选择利用现场容易测定的水电导率估算矿化度。不同地区和不同咸水浓度下水的矿化度和电导率存在一定差异,表 1 为鲁北平原区浅层地下水矿化度与电导率的相关关系,该区浅层地下水在矿化度 $\leq 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的情况下,矿化度和电导率之间的关系随水中不同阴离子化学类型稍有差异,但电导率与矿化度呈较强的线性相关性^[8]。天然水按照水质指标——矿化度(离子总量)可划分为不同类型(表 2),不同矿化度的天然水对土壤和作物的影响不同,不能全部作为灌溉水使用。按照《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021),农田灌溉水质基本控制项目中全盐量标准值为:非盐碱区全盐含量 $\leq 1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,盐碱土地区全盐含量 $\leq 2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。具有一定的水利灌排设施,能保证一定的排水和地下水径流条件的地区,或有一定淡水资源能满足冲洗土体中盐分的地区,农田灌溉水质全盐量指标可以

适当放宽。结合盐碱区淡水极度缺乏的情况和前人的研究^[4,9-12],可按照可灌溉水的总矿化度和电导率划分用于灌溉的咸水等级。郭凯等^[13]利用 $12\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水在滨海重盐碱区进行结冰灌溉,结果表明灌溉水量为 180 mm 时可以使 $0\sim 40\text{ cm}$ 根层土壤含盐量

降低到 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,适于种植棉花 (*Gossypium* spp.)、油葵 (*Helianthus annuus*) 等耐盐植物。因此,随着科学技术的不断进步,新材料、新方法和新技术不断创新,可用于灌溉的咸水矿化度将逐渐增加,越来越可以被资源化利用。

表 1 不同阴离子水化学类型矿化度与电导率的关系^[8]

Table 1 Relationship between the anionic type mineralization and electrical conductivity of saline water

阴离子水化学类型 Anionic type	样品组数 Number of samples	线性回归方程 Equation	相关系数 Correlation coefficient
重碳酸型 Bicarbonate type	144	$M=0.882\times\text{EC}+21.45$	0.967
重碳酸氯化物硫酸型 Bicarbonate chloride sulfate type	115	$M=0.818\times\text{EC}-15.39$	0.971
重碳酸氯化物型 Bicarbonate chloride type	125	$M=0.777\times\text{EC}+76.77$	0.927
重碳酸硫酸型 Bicarbonate sulfuric acid type	36	$M=0.888\times\text{EC}-20.39$	0.992
硫酸氯化物重碳酸型 Sulfuric chloride bicarbonate type	19	$M=0.805\times\text{EC}+6.759$	0.880
氯化物重碳酸硫酸型 Chloride bicarbonate sulfuric acid type	46	$M=0.792\times\text{EC}-47.43$	0.990
氯化物硫酸重碳酸型 Chloride sulfuric acid bicarbonate type	35	$M=0.854\times\text{EC}-231.82$	0.979
氯化物重碳酸型 Chloride bicarbonate type	27	$M=0.725\times\text{EC}+49.16$	0.961
重碳酸硫酸氯化物型 Bicarbonate sulfate chloride type	72	$M=0.864\times\text{EC}-54.52$	0.986
平均 Mean	626	$M=0.766\times\text{EC}+109.89$	0.982

公式中, M 为矿化度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), EC 为电导率($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)。In the equation, M is mineralization degree ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), EC is electrical conductivity ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

表 2 天然水水质的分类

Table 2 Classification of natural water

$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

	O. A. Aleken分类(1970) O. A. Aleken (1970) classification	美国分类 (1970) American classification (1970)	中国分类 Chinese classification	舒卡列夫分类 Shukalev classification
淡水 Freshwater	<1	<1	<1.0	<1.5
微咸水 Brackish water	1~25	1~10	1.0~3.0	1.5~10.0
咸水 Saline water	25~50	10~100	3.0~10.0	10.0~40.0
盐水 Brine	>50	>100	10.0~50.0	>40.0
卤水 Bittern			>50.0	

1.2 咸水灌溉制度与灌溉方式

土壤盐分含量除取决于灌溉水质外,还与灌溉水量和灌溉时间有关,而灌溉水量与灌溉方法和灌溉方式有关。控制土壤中的盐分是确定合理灌溉制度选择适宜灌溉方式的关键。咸水灌溉方式主要包括咸水直灌、轮灌和混灌等^[14]。Saggu 等^[15]研究表明使用沟灌方式可调控土壤水分分布、提高灌溉水利用率、缓解地下水水位上升速度,利于土壤盐分随沟内水分淋失。国内一些学者发现土壤盐分含量对沟灌方法和灌溉量较为敏感,灌溉量越大洗盐效果越好;垄膜沟灌模式能降低土壤表层含盐量,保留土壤水分,在相同灌水量情况下,沟灌的抑盐效果显著高于畦灌^[16-17],如垄膜沟灌 350 mm 是河套灌区春玉米田节水抑盐、增产提质的合理模式^[18]。李国安等^[19]在石羊河流域研究结果表明利用 $3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水在拔节到灌浆期灌溉,灌水量在 $205\sim 355\text{ mm}$ 可以保证土壤水盐平衡和春小麦 (*Triticum aestivum*) 产量。陈素英等^[20]发现畦灌方式下上季冬小麦微咸水灌溉

后夏玉米 (*Zea mays*) 播种前利用 $67.5\sim 75.0\text{ mm}$ 的淡水可满足耕层淋盐,达到夏玉米生长的安全阈值,夏季降雨量大于 300 mm 时周年土体盐分可达平衡。郭凯等^[13]发现利用矿化度为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和水量分别为 90 mm 、 135 mm 和 180 mm 的咸水冰融水入渗滨海盐土后, $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤的脱盐率分别为 29.7% 、 56.7% 和 96.2% 。因此,咸水安全利用不仅与灌溉水量和水质相关,还与灌溉制度和灌溉方式等管理方式相关。

1.3 地下水埋深

地下水埋深和矿化度不同会通过影响土壤中盐分的迁移和累积,进而影响咸水灌溉的安全利用。地下水临界深度与土壤质地、大气蒸发力、地表植被和排水等均有一定的关系。Liu^[21]认为,基于土壤水量平衡、土壤盐分平衡和潜水平衡的咸水灌溉安全地下水埋深临界深度不一致。许多学者^[22-24]对咸水灌溉安全地下水埋深的阈值进行了研究,发现定水位情况下,当地下水埋深为 1.5 m 时冬小麦产量、

水分利用效率较高;当地下水埋深小于 1.5 m 时,受上层土壤含水量高和通气性差的影响,盐分积累量增加,盐害明显;当地下水埋深大于 1.5 m 时,由于上层土壤含水量低,冬小麦根系较难利用浅层地下水,其生长也受到抑制。

2 咸水灌溉对土壤质量的影响

2.1 对土壤水力特性的影响

微咸水在土壤入渗过程中,由于盐分离子与土壤胶体颗粒发生作用,改变了土壤孔隙结构,影响入渗过程。张盼盼等^[25]利用室内土柱试验研究了微咸水灌溉对土壤水盐运移的影响,发现土壤入渗能力与灌溉水矿化度呈正比,土壤累积入渗量与湿润锋推进距离呈线性关系;土壤脱盐深度为 15~18 cm (脱 Na^+ 深度为 15~16 cm, 脱 Cl^- 深度为 22~23 cm), 并与矿化度水平呈反比;随着灌溉水矿化度的增加,积盐区各土层含水率、含盐量及其 Na^+ 、 Cl^- 含量总体上逐渐增大,但脱盐区差异不明显。唐胜强等^[26]研究了灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响,发现粉砂土和黄棕壤土采用微咸水入渗时,饱和导水率比淡水入渗分别增大 3.5% 与 28.6%,土壤吸渗率分别增加 2.7% 与 7.6%;在 0~3.2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度范围内,入渗水矿化度的增加增大了盐碱土的入渗率及湿润锋推进速度; $>3.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度时,入渗水矿化度和 Na^+ 总量共同影响土壤结构,土壤入渗能力随灌水矿化度增加而增加的幅度减小。刘淙琮等^[27]研究了不同矿化度咸水 (0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 在滨海盐碱区典型植被白茅 (*Imperata cylindrica*)、盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*) 和裸地的水分入渗特征,发现同一地块初始入渗率、稳定入渗率和累积入渗量均随咸水矿化度的升高逐渐增大,相同矿化度咸水入渗下,稳定入渗率和累积入渗量由大到小依次为白茅地、盐地碱蓬地和裸地;植被类型对滨海盐碱地水分入渗特性的影响大于入渗水的矿化度。目前,较多试验研究表明随灌溉水矿化度增加入渗能力先增大后减小,引起入渗能力突变的微咸水矿化度阈值^[14,26],一部分研究结果认为是 3 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,还有一部分研究结果认为是 2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.2 对土壤理化性质的影响

由于土壤对不同离子的交换吸附作用不同,随着微咸水灌溉给土壤带进不同的离子,进而影响土壤理化性质。 Na^+ 含量的增加,使土壤钠质化,引起土壤颗粒收缩、胶体颗粒的分散和膨胀,破坏土壤水稳性团聚体,影响土壤通透性。张余良等^[28]在天津

通过连续多年的微咸水灌溉模拟试验发现,长期灌溉微咸水有恶化土壤理化性状的趋势,土壤表层聚盐、氯钠离子比例提高、土壤初始入渗率逐年降低,短期灌溉则会破坏土壤水稳性团聚体。冯棣等^[29]研究了咸水灌溉对棉田土壤理化性质及酶活性的影响,随灌溉水矿化度增加,0~20 cm 土层的盐分、容重和 pH 呈增加趋势,土壤酶活性和有机质含量降低。研究表明,当灌溉水矿化度 $>3.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,土壤中 Na^+ 总量增加,导致土壤入渗能力增加幅度变缓,累积入渗量和稳渗率随矿化度的继续升高而减小,同时由于土壤含盐量增加,使土壤通透性降低,造成土壤板结,进而抑制土壤酶活性,降低土壤微生物数量,最终影响土壤肥力和作物产量^[30-31]。Dong 等^[32]发现经过 14 年的咸水长期灌溉,4 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水灌溉对土壤有机碳和无机碳没有明显影响,而利用 8 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水灌溉对土壤有机碳和无机碳均有显著影响。高聪帅^[33]研究表明,随咸水矿化度的升高,土壤大团聚体 ($>0.25 \text{ mm}$) 所占比例和团聚体稳定性呈下降趋势,下季作物表层土壤中微生物数量减少,与灌溉 1 次微咸水相比,灌溉 2 次微咸水抑制了土壤中微生物的数量。同时,盐分也是影响氮素迁移转化和吸收利用的重要因素,影响氮素矿化、硝化等过程。研究表明,盐分会抑制以脲酶为主驱动的氮素矿化,在中轻度盐碱土中脲酶活性随着盐碱化程度加重而降低,进而造成矿化速率降低^[34],土壤硝化速率也与盐分呈显著负相关,在中度盐碱土中,盐分对亚硝酸盐氧化作用的抑制程度强于氨氧化作用,会造成 NO_2^- -N 的累积^[35]。总之,咸水灌溉下耕地质量呈下降趋势,所以咸水灌溉下如何提升耕地质量仍是当前研究的一个热点问题。

2.3 对土壤温室气体排放的影响

国内外许多学者研究了土壤环境因素 (湿度、温度、pH、质地等)、水肥管理及栽培耕作措施对农田温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 排放的影响。灌溉水矿化度的差异将会影响土壤微生物、土壤动物和各种真菌的数量与活性,导致土壤环境因素发生变化,进而影响土壤温室气体排放。王帅杰等^[36]研究了微咸水灌溉下春玉米田温室气体排放规律,发现 3.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉处理 CO_2 气体日均排放通量比 2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉处理分别低 27.82% 和 31.16%, N_2O 气体日平均排放通量分别低 4.46% 和 8.23%。邹其会^[37]发现不同矿化度咸水和淡水灌溉对 CO_2 和 N_2O 排放通量存在显著差异,随着矿化度增加 CO_2 和 N_2O 排放通量降低。李双男等^[38]研究了咸水滴灌对棉田土壤 N_2O 排放的影响,发现微咸水

与咸水灌溉处理土壤累积 N_2O 排放量比淡水处理分别增加 22.2% 和 6.8%。Kontopoulou 等^[39] 发现咸水灌溉大豆 (*Glycine max*) 时, 灌溉水矿化度不会影响土壤 CO_2 、 N_2O 排放。在盐分影响温室气体排放方面, 研究相对较少, 且研究结论尚未达成一致, 这可能是不同区域的外界环境差异及土壤环境差异造成。

3 咸水灌溉对作物的影响

3.1 咸水灌溉对作物生长的影响

盐分胁迫对作物的危害途径主要包括: 渗透胁迫、离子毒害和营养失衡等, 作物通过提前生育进程、减缓植物组织和器官的生长和分化来响应^[40]。Munns 等^[41] 的盐害学说包括: 1) 植物新叶生长速度减慢是对盐胁迫最敏感的生理表现; 2) 叶片含盐量过高导致老叶死亡; 3) 碳水化合物消耗殆尽, 导致植株生长速度下降, 甚至死亡。根系由于最早感受逆境胁迫信号并传导, 对盐胁迫的敏感度高于地上部分^[42-43]。油葵和水稻 (*Oryza sativa*) 的生育进程随土壤含盐量的增加呈现延长趋势^[44-45], 而冬小麦生育期受盐分胁迫影响缩短。因此, 盐分胁迫对不同作物生育期长短的影响表现不一, 这仍需进一步深入研究^[46]。利用 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水灌溉冬小麦, 其株高比 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理分别降低 5.97%、14.08% 和 21.89%, 相应的根系生物量降低 25.81%、45.16% 和 53.23%, 这说明盐分胁迫对根系生长的抑制大于对地上部分的抑制^[47]。由于盐胁迫后光合作用减弱, 使地上部碳水化合物合成减少, 进而向地下部分运输减少, 最后导致地下生物量减少。于潇等^[48] 发现盐分胁迫会改变作物对有效光辐射的利用方式, 采用 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉会促进冬小麦对低有效光辐射的利用效率, 而 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 灌溉影响冬小麦的叶片结构, 降低叶片对高有效光辐射的响应, 导致光合作用下降。盐分胁迫会增加作物的初始荧光, 使叶片的最大荧光产量降低, 内禀光能转换效率降低。从作物不同生育时期对盐分的敏感程度来看, 一般作物萌芽期和幼苗期对盐分较为敏感, 成熟期对盐分敏感性较差^[49-50]。

3.2 咸水灌溉对作物产量的影响

大量研究表明, 利用咸水或微咸水灌溉可使作物产量接近淡水灌溉水平, 较早作处理有明显的增产作用^[4,41,49-50]。尚伟等^[51] 对 103 组微咸水灌溉冬小麦的试验结果进行统计分析, 发现充分灌溉下小麦相对产量与灌溉水矿化度呈负相关关系, 当灌溉水矿化度为 $2\sim 3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 小麦相对产量为 0.87~0.93, 比

淡水灌溉减产 7%~13%。陈素英等^[4] 研究了不同矿化度微咸水灌溉对冬小麦-夏玉米周年轮作的综合影响, 发现与淡水灌溉相比, 利用小于 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉, 灌溉 1 次微咸水比雨养旱作处理增产 10%~30%, 下茬玉米季利用 45~50 mm 淡水灌溉可实现土壤耕层盐分淋洗, 降低对玉米产量的影响。王辉^[52] 综合分析了冬小麦、棉花和玉米 3 种作物可利用灌溉水的矿化度阈值, 其耐盐阈值范围分别为 $3\sim 4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1\sim 5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3\sim 4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。李佳等^[7] 通过 9 年的田间试验发现, 冬小麦咸水矿化度阈值为 $2.14\sim 3.95\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Zhang 等^[53] 研究结果表明, 长期咸水灌溉棉田存在土壤积盐风险, 提出了 $0.45\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 的灌溉水盐分阈值, 建立了微咸水灌溉棉花的水分生产函数, 适宜微咸水灌溉棉花的产量为 $3.1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 水分生产力为 $0.76\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。毛振强等^[54] 研究结果表明, 当 $20\sim 60\text{ cm}$ 土壤溶液电导率小于 $8\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 对夏玉米产量无显著影响。作物种类、土壤类型、地下水埋深和气象等因素综合影响咸水灌溉下作物的产量, 需要建立基于多因素的水盐生产函数, 进而明确不同区域和不同作物的咸水灌溉阈值。

3.3 咸水灌溉对作物品质的影响

咸水灌溉带来的盐分参与作物代谢, 进而影响品质。微咸水灌溉对作物品质的研究多集中在果蔬方面, 许多研究表明咸水灌溉可以增加果蔬的可溶性固形物、有机酸和糖含量, 从而有利于改善风味品质、营养品质和储藏品质等。由于盐胁迫下植物体内会产生胁迫蛋白(盐胁迫蛋白、渗透蛋白、抗冻蛋白和热激蛋白等), 这些微量蛋白直接影响作物的营养价值和口感^[55-56]。有研究表明利用 $<10\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 的咸水灌溉 6 种牧草, 其产量随盐水浓度增加而提高, 纤维素含量无明显增加, 干草消化率随灌溉水矿化度增加而增加, 这主要是由于部分盐离子沉积在牧草体内, 提高了牧草的味感, 增强了喜食性^[57]。马玉沼等^[58] 研究结果表明, 与淡水灌溉相比, 利用矿化度 $>2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉时可显著增加冬小麦籽粒含水量、面团形成时间、沉降值、湿面筋和粗蛋白含量, 显著降低出粉率、面团稳定时间和面筋指数。肖丹丹^[59] 对不同矿化度咸水灌溉下的水稻产量和品质进行了研究, 发现在 $1.0\sim 1.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下, 稻米直链淀粉含量显著降低, 糙米率、精米率和整精米率增加, 稻米淀粉黏滞特性的峰值黏度、热浆黏度和最终黏度增加, 其品质总体有一定的改善, 而到 $2.0\sim 3.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 稻米的加工品质、蒸煮食味品质和稻米淀粉黏滞特性明显降低。翟彩娇等^[60] 研究了盐

胁迫和品种对稻米品质的影响,在盐胁迫对食味值和相关参数的影响方面,盐胁迫及盐胁迫与品种互作均达显著或极显著水平,而品种的影响未达显著水平。但是,目前这些研究多集中在加工品质方面,且对大田主要作物小麦玉米的研究较少,尤其是微咸水灌溉对小麦玉米营养品质、风味品质等方面的研究。

4 农业措施对咸水灌溉下土壤盐分的调控作用

4.1 有机物料对土壤盐分的调控作用

在盐碱土壤施用有机物料,可增加土壤有机质,促进团聚体形成,改善土壤结构,降低 pH,降低土壤中水溶性钠和交换性钠的比例,使交换性钠饱和度(ESP)和钠吸附比(SAR)值减小。有机物料经微生物分解、转化形成腐殖质。腐殖质通过促进土壤团粒结构形成,增加孔隙度,有利于淋盐,提高土壤的缓冲能力,还可以与碳酸钠作用形成腐殖酸钠,降低土壤碱性^[61]。同时,有机质在分解过程中会产生有机酸,可中和碱性土壤并活化磷,提升养分转化利用效率。Su等^[6]研究结果表明,与施用化肥相比,施用有机肥可使0~160 cm土壤EC值降低18.3%,使冬小麦增产21.7%。在山东省滨海盐碱地的研究结果表明^[61],有机肥替代低量、中量和高量化肥,显著降低土壤水溶性盐总量、pH、水溶性钠和交换性钠的比例,ESP和SAR值减小,与施用化肥相比冬小麦分别增产7.5%、18.8%和26.4%。

4.2 农艺措施对土壤盐分的调控作用

对盐分调控的农艺措施主要包括覆盖、耕作、灌溉制度和优化施肥等技术^[62]。覆盖通过改变土壤

水分运动进而影响盐分的时空分布,利于作物生长,其主要包括秸秆覆盖、地膜覆盖等。耕作措施是通过深耕、深松和轮作等不同措施改善土壤结构,提高土壤透气透水性和土壤温度,加速土壤脱盐。灌溉制度是根据作物的需耗水规律和土壤水盐运移情况,调控灌溉方式、灌溉量和灌溉时期,降低水盐环境对作物正常生长的危害。绿肥与作物的轮间套作可以减少盐分对作物的危害,种植绿肥可增加土壤覆盖度,减少水分蒸发,改善土壤理化性状,培肥土壤,减轻对下一季作物的盐害。余世鹏等^[63]通过多因子和不同因子水平下的微区玉米-小麦轮作试验发现,单一的高氮投入措施利于轻度盐碱耕地增产,但对中度盐碱耕地产量提升和盐渍害防控效果不显著。秸秆覆盖能显著提升土壤保水能力、抑制表土盐碱害,但其对作物根层盐碱抑制效果不明显,需结合优化灌溉来加速根层盐分淋洗。有机肥施用可有效培肥土壤、促进土壤排盐抑碱、提升生产力。水肥盐优化调控措施可提升盐碱土壤供氮能力、减少化肥用量,利于降低成本并改善土壤生态环境。因此,农艺措施的综合应用对调控土壤盐分具有非常重要的作用,也是未来的发展趋势。

4.3 耐盐作物对盐分的适应

不同作物种类对盐分的敏感程度不同,其途径主要是通过加强水分吸收与减少水分蒸腾散失,从而减轻渗透胁迫,通过排出叶内的 Na^+ 以及将 Na^+ 分隔到液泡中减轻 Na^+ 的胁迫^[64]。作物对盐度的敏感性可通过相对产量(Y/Y_0)和土壤饱和浸提液EC之间的线性关系进行划分。表3为主要大田农作物的耐盐能力。

表3 基于相对产量和土壤电导率关系的主要大田农作物的耐盐能力
Table 3 Salt tolerance of main field crops based on the relative yield and electrical conductivity

盐分敏感程度 Salinity sensitivity	作物 Crop	电导率阈值 Threshold of electrical conductivity ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	敏感性 Sensitivity [$\%(\text{dS}\cdot\text{m}^{-1})^{-1}$]
敏感 Sensitive	菜豆 Beans	1.0	17.0
	水稻 Rice	3.0	12.0
	玉米 Maize	1.7	12.0
中等敏感 Moderate sensitive	苜蓿 Alfalfa	2.0	7.3
中等耐受 Moderate tolerance	小麦 Wheat	6.0	7.1
	大豆 Soybean	5.0	20.0
	高粱 Sorghum	6.8	16.0
耐盐 Tolerant	棉花 Cotton	7.7	5.2
	大麦 Oats	8.0	5.0

资料来源: Maas^[65]和Tanji^[66]。表中数据根据公式 $Y/Y_0=100-b(\text{EC}-t)$ 计算。其中 Y/Y_0 为相对产量; b 是盐敏感性,表示为EC变化引起的相对产量降低幅度 $[\%(\text{dS}\cdot\text{m}^{-1})^{-1}]$; t 为电导率(EC)的阈值, $\text{EC}<t$, 对相对产量没有影响, $\text{EC}>t$, 相对产量降低。Source: Maas (1984)^[65]和Tanji (1990)^[66]。The data are calculated with the formula $Y/Y_0=100-b(\text{EC}-t)$. In the formula, Y/Y_0 is the relative yield; EC is electrical conductivity. b is the crop sensitivity to salinity, indicating decreasing of relative yield when EC increase $[\%(\text{dS}\cdot\text{m}^{-1})^{-1}]$. t is the threshold of EC ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$). There isn't impact of EC on relative yield when EC is below t . The relative yield will decrease when EC is higher than t .

5 研究展望

党的二十大指出,推动绿色发展,促进人与自然和谐共生。随着全球性水危机的不断加剧,在水资源严重短缺情况下保障国家食物安全和生态安全,通过科技创新利用咸水替代淡水是主要途径之一。因此,下一步要在人与自然和谐共生的理念下,开展基于不同水源特点的咸水灌溉制度及水盐综合调控机理研究、技术研发和产品装置研制,提高咸水灌溉的水分利用率和生产效率^[67-68],以实现土壤质量、作物产量和品质多重目标协同,服务于乡村振兴。

5.1 咸水非充分灌溉研究

非充分灌溉技术越来越多地被采用,该技术通过消除缺水对作物生长的最严重限制阶段来提高有限供水的利用效率。因此,下一步需要深入了解咸水非充分灌溉对农田水盐环境及作物的影响,明确土壤导水率和作物根系吸水对盐分的协同响应关系,定量描述灌溉定额及盐分对农田水盐运动及作物生长的影响机理,建立适应水资源特点的咸水非充分灌溉制度,为我国淡水匮乏咸水资源丰富地区的咸水非充分灌溉提供科学依据和技术支撑。

5.2 水肥盐综合调控提升生产力研究

针对缺水盐渍区水肥利用率低、土壤盐渍化和农业面源污染日益严重等问题,以节水、减排、控盐、提质、增效和绿色发展为目标,开展农田水分、养分和盐分的响应规律及其互馈机制研究,研究不同矿化度咸水灌溉下对 GSPAC 系统(地下水-土壤-植物-大气连续体)中水汽热运移和耗水规律,研究不同矿化度咸水灌溉对土壤水分、盐分和养分及作物生长的影响,研究不同矿化度咸水灌溉和不同肥料种类协同对土壤环境和作物生长的调控规律,研发盐渍化农田主要作物适宜的咸水高效利用的产品和装备。

5.3 咸水灌溉下盐碱耕地质量变化研究

针对咸水灌溉下土壤结构差、盐碱胁迫重的问题,以耕地质量与产能协同提升为目标,开展咸水灌溉下土壤水分、养分和盐分与作物生长关系的研究,研发有机质快速提升、肥沃耕层构建、生物强化、水肥运筹控盐与离子均衡调控、盐碱地绿色低碳改良、耐盐粮食作物适应性种植、水盐智能监测调控等关键技术、产品和装置,构建不同盐碱胁迫程度的耕地质量快速提升和作物提质增效协同的综合技术模式,为咸水灌溉区提供范式样板。

5.4 咸水精准高效灌溉研究

针对咸水灌溉中需要精准调控水盐对作物和土

壤环境影响的问题,以精准高效为目标,开展作物生长需水信息实时预报研究,研究作物需水感知现代技术,建设基于不同作物的咸水灌溉专家决策系统,研究咸水水网智慧管控和精准计量设备,研制系统高端节水装备,为咸水精准利用提供科技支撑。

参考文献 References

- [1] 康绍忠. 藏粮于水 藏水于技——发展高水效农业 保障国家粮食安全[J]. 中国水利, 2022(13): 1-5
KANG S Z. Store grain in water and technology— development of highly-efficient agricultural water use for ensuring national food security[J]. China Water Resources, 2022(13): 1-5
- [2] Food and Agriculture Organization of United Nations. Emissions totals[EB/OL]. [2022-11-07]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/GT>
- [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 Y Z, FU G H. Utilization of gentle salty water resource in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(2): 57-60
- [4] 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 579-585
CHEN S Y, ZHANG X Y, SHAO L W, et al. Effect of deficit irrigation with brackish water on growth and yield of winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 579-585
- [5] 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
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
- [6] SU H, SUN H Y, DONG X L, et al. Did manure improve saline water irrigation threshold of winter wheat? A 3-year field investigation[J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107203
- [7] 李佳, 曹彩云, 郑春莲, 等. 河北低平原冬小麦长期咸水灌溉矿化度阈值研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 643-651
LI J, CAO C Y, ZHENG C L, et al. Salinity threshold of long-term saline water irrigation for winter wheat in Hebei Lowland Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(5): 643-651
- [8] 刘中业, 徐建国, 祁晓凡, 等. 地下水电导率与矿化度相关关系分析——以鲁北平原为例[J]. 山东国土资源, 2013, 29(9): 57-60, 64
LIU Z Y, XU J G, QI X F, et al. Analysis on groundwater conductivity and salinity correlation — Setting Lubei Plain in Shandong Province as an example[J]. Shandong Land and Resources, 2013, 29(9): 57-60, 64
- [9] 高宗军, 郭健斌, 魏久传. 水文地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011

- GAO Z J, GUO J B, WEI J C. Hydrogeology[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2011
- [10] 中国环境科学研究院, 生态环境部南京环境科学研究所, 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 农业农村部环境保护科研监测所. GB 5084—2021. 《农田灌溉水质标准》[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2021
- Chinese Academy of Environmental Sciences, Nanjing Institute of Environmental Sciences of the Ministry of Ecology and Environment, Technical Center for Soil and Agriculture and Rural Ecological Environment Supervision of the Ministry of Ecological Environment; Environmental Protection Research and Monitoring Institute of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. GB 5084—2021. Standards for Irrigation Water Quality[S]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2021
- [11] AYERS R S, WESTCOTT D W. Water quality for agriculture[R]. Rome: FAO Irrigation & Drainage, 1985, Rev. 1
- [12] RHOADES J, KANDIAH A, MASHALI A. The use of saline waters for crop production[R]. Rome: FAO Irrigation & Drainage No 48, 1992: 5–6
- [13] 郭凯, 巨兆强, 封晓辉, 等. 咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1016–1024
- GUO K, JU Z Q, FENG X H, et al. Advances and expectations of researches on saline soil reclamation by freezing saline water irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1016–1024
- [14] 蔡达伟, 孔淑琼, 刘瑞琪. 微咸水农田安全灌溉研究进展[J]. 节水灌溉, 2020(10): 91–95, 100
- CAI D W, KONG S Q, LIU R Q. A review of brackish water for agricultural safe irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2020(10): 91–95, 100
- [15] SAGGU S, KAUSHAL M. Fresh and saline water irrigation through drip and furrow method[J]. International Journal of Tropical Agriculture, 1991, 9: 194–202
- [16] 余根坚. 节水灌溉条件下水盐运移与用水管理模式研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014
- YU G J. Research on water-salt migration and water management mode under water-saving irrigation conditions[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014
- [17] 李成, 冯浩, 罗帅, 等. 垄膜沟灌对旱区农田土壤盐分及硝态氮运移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 268–275
- LI C, FENG H, LUO S, et al. Effects of ridge with plastic mulch-furrow irrigation on soil salt and nitrate nitrogen transport characteristics in arid areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 268–275
- [18] 罗帅. 河套灌区垄膜沟灌模式下不同灌水量对春玉米田水盐氮运移特征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021
- LUO S. The influence of irrigation amounts on transport characteristics of soil water-salt-nitrogen in spring maize fields under ridge mulched with plastic film-furrow irrigation in Hetao irrigation district[D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forest University, 2021
- [19] 李国安, 蒋静, 马娟娟, 等. 咸水灌溉对土壤水盐分布和小麦产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(6): 544–552
- LI G A, JIANG J, MA J J, et al. Effect of saline water irrigation on water-salt distribution and yield of wheat[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(6): 544–552
- [20] 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): 1049–1058
- CHEN S Y, SHAO L W, SUN H Y, 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): 1049–1058
- [21] LIU C M. Soil salinity control regarding subsurface water regulation in North China Plain[J]. The Journal of Chinese Geography, 1996, 6(4): 28–37
- [22] SEPASKHAH A, KANOONI A, GHASEMI M. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(1): 67–79
- [23] NARJARY B, KUMAR S, MEENA M D, et al. Effects of shallow saline groundwater table depth and evaporative flux on soil salinity dynamics using hydrus-1D[J]. *Agricultural Research*, 2021, 10(1): 105–115
- [24] LIU T G, LUO Y. Effects of shallow water tables on the water use and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under rain-fed condition[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(13): 1692–1697
- [25] 张盼盼, 赵慧, 荣昊. 微咸水灌溉对盐碱土水盐运移的影响[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 198–202, 208
- ZHANG P P, ZHAO H, RONG H. Effect of brackishwater content on water and salt transport law in saline-alkali soil irrigation[J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 198–202, 208
- [26] 唐胜强, 余冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 108–114
- TANG S Q, SHE D L. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 108–114
- [27] 刘淙琼, 孙宏勇, 郭凯, 等. 不同矿化度咸水在滨海典型植被盐碱地中的入渗特性研究[J]. 土壤, 2022, 54(1): 177–183
- LIU C C, SUN H Y, GUO K, et al. Infiltration characteristics of saline water with different salinity in coastal saline-alkali land with typical vegetation[J]. Soils, 2022, 54(1): 177–183
- [28] 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969–973
- ZHANG Y L, LU W L, ZHANG W, et al. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 969–973
- [29] 冯棣, 张俊鹏, 孙池涛, 等. 长期咸水灌溉对土壤理化性质和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 171–176
- FENG D, ZHANG J P, SUN C T, et al. Effects of long-term irrigation with saline water on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 171–176
- [30] 时唯伟, 支月娥, 王景, 等. 土壤次生盐渍化与微生物数量

- 及土壤理化性质研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 166–170
- SHI W W, ZHI Y E, WANG J, et al. Secondary salinization of greenhouse soil and its effects on microbe number and soil physico-chemical properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 166–170
- [31] 周玲玲, 孟亚利, 王友华, 等. 盐胁迫对棉田土壤微生物数量与酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 241–246
- ZHOU L L, MENG Y L, WANG Y H, et al. Effects of salinity stress on cotton field soil microbe quantity and soil enzyme activity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 241–246
- [32] DONG X L, WANG J T, ZHANG X J, et al. Long-term saline water irrigation decreased soil organic carbon and inorganic carbon contents[J]. *Agricultural Water Management*, 2022. DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107760
- [33] 高聪帅. 环渤海低平原微咸水灌溉对土壤质量和作物影响及调控研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021
- GAO C S. Effects of brackish water irrigation on soil quality and crops near the Bohai Low Plain[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021
- [34] AKHTAR M, HUSSAIN F, ASHRAF M Y, et al. Influence of salinity on nitrogen transformations in soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2012, 43(12): 1674–1683
- [35] 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
- 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
- [36] 王帅杰, 杨培岭, 苏艳平, 等. 微咸水与淡水轮灌对春玉米土壤CO₂和N₂O排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(10): 41–48
- WANG S J, YANG P L, SU Y P, et al. Effects of alternative irrigation between brackish water and fresh water on CO₂ and N₂O emission from spring maize soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(10): 41–48
- [37] 邹其会. 不同水质灌溉对温室气体排放和氮素运移的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2013
- ZOU Q H. Effects of treated wastewater and brackish water irrigation on soil greenhouse gas emissions and nitrogen transportation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013
- [38] 李双男, 侯振安. 咸水滴灌对棉田土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2016, 34(3): 301–308
- LI S N, HOU Z A. Effect of drip irrigation with saline water on soil nitrous oxide emissions in cotton field[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2016, 34(3): 301–308
- [39] KONTOPOULOU C, BILALS D, PAPPAS V A, et al. Effects of organic farming practices and salinity on yield and greenhouse gas emission from a common bean crop[J]. *Scientia Horticulture*, 2015, 183: 48–57
- [40] MUNNS R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(2): 239–250
- [41] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651–681
- [42] CRAMER G R, LAUCHLI A, EPSTEIN E. Effects of NaCl and CaCl₂ on ion activities in complex nutrient solutions and root growth of cotton[J]. *Plant Physiology*, 1986, 81(3): 792–797
- [43] 弋良朋, 王祖伟. 盐胁迫下3种滨海盐生植物的根系生长和分布[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1195–1202
- YI L P, WANG Z W. Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1195–1202
- [44] 贾秀苹, 岳云, 陈炳东. 盐胁迫对油菜生育时期和农艺性状的影响分析[J]. 作物杂志, 2009(6): 45–48
- JIA X P, YUE Y, CHEN B D. Influence of salt stress on maturity and agronomic characters of oil sunflower[J]. *Crops*, 2009(6): 45–48
- [45] 李洪亮. 盐胁迫对水稻生育时期和农艺性状的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2010(11): 18–20
- LI H L. Effect of salt stress on maturity and agronomic characters of rice[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2010(11): 18–20
- [46] 郑延海. 冬小麦对盐分与臭氧胁迫的生理生态响应机理研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009
- ZHENG Y H. Ecophysiological response mechanism of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to salinity and ozone stresses[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2009
- [47] 苏寒, 王金涛, 董心亮, 等. 不同质量浓度咸水灌溉对冬小麦产量和生理生化特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 1–9
- SU H, WANG J T, DONG X L, et al. Effects of different saline water irrigation on yield, physiological and biochemical traits of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(8): 1–9
- [48] 于潇, 侯云寒, 徐征和, 等. 微咸水灌溉对冬小麦光合及荧光动力学参数的影响[J]. 节水灌溉, 2019(2): 102–106
- YU X, HOU Y H, XU Z H, et al. Effects of brackish water irrigation on photosynthetic characteristics and fluorescence kinetics parameters of winter wheat[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(2): 102–106
- [49] 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 71–76
- WU Z D, WANG Q J. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 71–76
- [50] 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
- 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
- [51] 尚伟, 石建初, 牛灵安, 等. 灌溉水矿化度及盐分带量对小麦相对产量影响的统计分析[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(5): 41–44
- SHANG W, SHI J C, NIU L A, et al. Statistical analysis of the relationship between irrigated saline water's mineralization degree/salt mass and the relative yield of wheat[J]. *Journal of*

- Irrigation and Drainage, 2009, 28(5): 41–44
- [52] 王辉. 我国微咸水灌溉研究进展[J]. 节水灌溉, 2016(6): 59–63
WANG H. Advances in study of brackish water irrigation in China[J]. Water Saving Irrigation, 2016(6): 59–63
- [53] ZHANG J P, LI K J, GAO Y, et al. Evaluation of saline water irrigation on cotton growth and yield using the AquaCrop crop simulation model[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 261: 107355
- [54] 毛振强, 宇振荣, 马永良. 微咸水灌溉对土壤盐分及冬小麦和夏玉米产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(S1): 20–25
MAO Z Q, YU Z R, MA Y L. Influence of brackish water on the soil salt regime and yield of winter wheat and summer maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(S1): 20–25
- [55] 陈佩, 王金涛, 董心亮, 等. 蔬菜咸水灌溉研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(5): 799–808
CHEN P, WANG J T, DONG X L, et al. Review of research development associated with the application of saline water irrigation to vegetables[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(5): 799–808
- [56] 徐云岭, 余叔文. 植物盐胁迫蛋白[J]. 植物生理学通讯, 1989, 25(2): 12–16
XU Y L, YU S W. Salt-stress proteins in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1989, 25(2): 12–16
- [57] 周瑞莲, Pasternak Dov, 赵哈林. 沙漠地区盐灌对牧草产量及品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 985–989
ZHOU R L, PASTERNAK D, ZHAO H L. Influence of saltwater irrigation on the yield and quality of *Cynodon dactylon* under desert conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 985–989
- [58] 马玉诏, 党红凯, 李科江, 等. 咸水灌溉对冬小麦籽粒品质特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 1063–1068
MA Y Z, DANG H K, LI K J, et al. Effects of brackish water irrigation on grain quality characteristics and yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 1063–1068
- [59] 肖丹丹. 不同浓度盐灌对水稻产量、叶片生理特征及品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2021
XIAO D D. Effects of salty water irrigation with different concentrations on rice yield, leaf physiological characteristics and grain quality[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021
- [60] 翟彩娇, 邓先亮, 张蛟, 等. 盐胁迫对稻米品质性状的影响[J]. *中国稻米*, 2020, 26(2): 44–48
ZHAI C J, DENG X L, ZHANG J, et al. Effects of salt stress on quality traits of Japonica rice[J]. *China Rice*, 2020, 26(2): 44–48
- [61] 李玉, 田宪艺, 王振林, 等. 有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(6): 1173–1182
LI Y, TIAN X Y, WANG Z L, et al. Effects of substitution of partial chemical fertilizers with organic fertilizers on soil improvement and wheat yield in coastal saline and alkaline land[J]. *Soils*, 2019, 51(6): 1173–1182
- [62] 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): 1005–1015
NIU J F, FENG J X, LU Y, et al. Advances in agricultural practices for attenuating salt stress under saline water irrigation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(8): 1005–1015
- [63] 余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 不同水肥盐调控措施对盐碱耕地综合质量的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(4): 942–947
YU S P, YANG J S, LIU G M. Impacts of different water-fertilizer-salt regulation measures on saline farmland quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 942–947
- [64] DEINLEIN U, STEPHAN A B, HORIE T, et al. Plant salt-tolerance mechanisms[J]. *Trends Plant Sciences*, 2014, 19: 371–379
- [65] MAAS E V. Crop tolerance[J]. *California Agriculture*, 1984, 38(10): 20–21
- [66] TANJI K K. Agricultural salinity assessment and management[C]. New York, USA: American Society of Civil Engineers, 1990: 413–415
- [67] 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 J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10–27
- [68] 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
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