

DOI: 10.12357/cjea.20210850

陈佩, 王金涛, 董心亮, 田柳, 张雪佳, 刘小京, 孙宏勇. 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, TIAN L, ZHANG X J, LIU X J, SUN H Y. 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

蔬菜咸水灌溉研究进展*

陈佩^{1,2}, 王金涛¹, 董心亮¹, 田柳^{1,2}, 张雪佳^{1,2}, 刘小京^{1,2}, 孙宏勇^{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 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 我国淡水资源严重短缺且分布不均, 开发利用储量丰富的咸水资源对于保障水安全战略具有重要的意义。我国蔬菜种植面积和产量居世界首位, 蔬菜既是产量较高也是耗水量较大的经济作物。如何安全利用咸水资源, 拓宽蔬菜灌溉用水供应来源, 保证蔬菜生产是淡水短缺地区面临的主要问题, 也是当今咸水利用方面的研究重点和难点。因此, 本文从咸水资源利用潜力、咸水灌溉应用状况、咸水灌溉对蔬菜生长、产量和品质的影响等方面对咸水灌溉在蔬菜种植中的高效利用机理、技术及未来发展趋势进行了综述。利用 $2.4\sim 11.83\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 的咸水灌溉虽使蔬菜产量降低 $6.21\%\sim 63.05\%$, 但蔬菜品质提高 $6.25\%\sim 74.07\%$, 采用适宜的咸水灌溉调控技术, 优化灌溉策略可提高咸水灌溉的利用效率, 在未来微咸水利用和扩大蔬菜种植面积中可发挥重要作用。

关键词: 咸水灌溉; 耐盐度; 蔬菜品质; 灌溉策略; 生态效应

中图分类号: S607.1

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Review of research development associated with the application of saline water irrigation to vegetables*

CHEN Pei^{1,2}, WANG Jintao¹, DONG Xinliang¹, TIAN Liu^{1,2}, ZHANG Xuejia^{1,2}, LIU Xiaojing^{1,2},
SUN Hongyong^{1,2**}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Freshwater resources are scarce and unevenly distributed in China. The exploitation of saline water resources is of great significance to the success of water security strategies. Currently, there are researches focusing on overcoming the difficulties associated with saline-water utilization. The sowing area and yield of vegetables are the highest in the world, but vegetables are economic crops with relatively large water consumptions. The main problem faced by freshwater shortage regions is how to safely use saline water resources, broaden the supply source of vegetable irrigation water, and ensure vegetable production. Therefore, this paper reviews the mechanisms and technologies associated with the application and future development of saline water irrigation in vegetable planting from the aspects of the utilization potential of saline water resources; application status of saline water irrigation; and effects of saline water irrigation on vegetable growth, yield, and quality to provide water resources that guarantee the high-quality green development of agriculture. The results showed that using $2.4\sim 11.83\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ saline water irrigation reduced vegetable yields by $6.21\%\sim 63.05\%$ but improved vegetable quality by $6.25\%\sim 74.07\%$. Using suitable saline water irrigation regulation technologies and

* 中国科学院盐碱地资源高效利用工程实验室(KFJ-PTXM-017)和河北省重点研发计划项目(21326408D)资助

** 通信作者: 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

陈佩, 主要研究方向为农田水盐运移过程及调控。E-mail: chenpei19@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2021-11-30 接受日期: 2022-03-24

* The study was supported by the CAS Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Saline Resources (KFJ-PTXM-017) and Hebei Province Science and Technology Support Program (21326408D).

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

Received Nov. 30, 2021; accepted Mar. 24, 2022

optimizing irrigation strategies can improve the utilization efficiency of saline water irrigation and play an important role in the sustainable development of agriculture in the future.

Keywords: Saline water irrigation; Salt tolerance; Vegetable quality; Irrigation strategy; Ecological effect

蔬菜是人们日常生活中不可缺少的食物,随着人民生活水平的不断提高,对蔬菜的需求量也不断增加,2019 年我国蔬菜种植面积达 2086.3 万 hm^2 ,年产量 7.21 亿 t,人均占有量超 500 kg,均居世界第一位^[1]。同时,蔬菜也是耗水量较大作物,30% 的农田用水用于蔬菜灌溉,年耗水量在 750.6~893.1 mm 之间^[2-3]。水是支撑社会经济和农业生产可持续发展不可或缺的重要资源,我国是水资源相对匮乏的国家,人均水资源量仅占全球平均水资源量的 1/4 左右^[4]。从 20 世纪 70 年代开始,我国北方地区为了追求农业高产过度抽取地下水灌溉导致了地下水水位的不断下降,引发了一系列的生态环境问题。发展节水技术和开发利用水源成为环境水资源供需矛盾的重要途径。世界范围内浅层地下咸水资源较为丰富,科学合理开发利用咸水资源已成为咸水分布地区解决水资源短缺问题的有效途径。国内外大量研究和实践证明,科学合理地开发利用咸水资源,不仅对缓解淡水资源短缺、扩大农业水源、抗旱增产具有重要作用,对地下水资源更新、淡水存储和生态环境保护也具有积极作用^[5]。咸水灌溉虽然可以提供作物生长所需要的水分,但是同时也带来了盐分,直接或间接地影响作物的生长发育。因此,科学合理安全高效地利用咸水资源一直是世界范围内缺水地区研究的热点和难点问题。咸水灌溉既增辟了灌溉水源,又有效提高了作物的灌溉保障率,是缓解水资源短缺和农业生产矛盾的重要举措之一。本文就国内外咸水安全利用现状和潜力、咸水灌溉对蔬菜产量和品质的影响机理、调控措施及未来发展趋势进行总结,以期为缺水地区农业高质量绿色发展提供水资源保障。

1 咸水资源安全利用潜力与现状

1.1 咸水资源利用潜力

水资源是指具有一定数量和可用质量能从自然界获得补充并可资利用的水。咸水资源是针对水体矿化度(即每升水含有的矿物质含量)而言,把矿化度 $>1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水资源定义为咸水资源。一般而言,矿化度 $<1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水被认为是淡水(电导率 $<1.43\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$);矿化度在 $1\sim5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水为低盐度咸水,包括微咸水(矿化度为 $1\sim3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和半咸水(矿化度 $3\sim5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$);矿

化度在 $5\sim10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水为中盐度咸水;矿化度 $>10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水为高盐度咸水;矿化度在 $50\sim500\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水为卤水^[6]。 $<5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的地下水区域面积占全国地下水总面积的 93.88%,矿化度为 $5\sim10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的地下咸水分布面积占 4.87%,矿化度 $10\sim50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的地下咸水分布面积占 0.58%,矿化度 $50\sim200\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的地下咸水分布面积占 0.55%,矿化度 $>200\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的地下咸水分布面积占 0.12%^[7]。

我国咸水资源储量丰富,地下微咸水资源和半咸水资源分别为 277 亿 m^3 和 121 亿 m^3 ,其中有开采价值尚待开采利用的微咸水和半咸水资源量分别为 144 亿 m^3 和 56.46 亿 m^3 ^[8],绝大部分位于地下 10~100 m 处,宜于开采利用^[9]。咸水的合理开发利用,对于缓解水资源矛盾、扩大农业水源、抗旱增产等方面有非常重要的意义。

1.2 咸水灌溉的应用现状

咸水灌溉在国内外已经有百年的历史,许多国家设立了咸水灌溉研究机构,研究咸水灌溉的理论和技術,在灌溉制度(灌溉水盐浓度、咸水灌溉量和灌溉时期)、灌溉方法(喷灌、漫灌、沟灌、滴灌)以及咸水灌溉对作物产量、耗水量和水分利用效率的影响机理等方面进行了深入的理论和技术研究^[10]。

国外利用微咸水灌溉拥有较长的历史和丰富的经验,主要分布在淡水资源相对短缺而咸水资源相对丰富的地区,如日本、西班牙、突尼斯、摩洛哥、奥地利、以色列、伊拉克、科威特等国家和地区。在意大利的一些地区咸水已多年被用于灌溉,农田土壤未发生积盐现象。埃及是一个极度干旱的国家,50 多年来成功地利用咸水进行农业灌溉,土壤从沙土到黏土,种植作物包括水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)、甜菜(*Beta vulgaris*)和棉花(*Gossypium* spp.)等^[11]。中国北方干旱、半干旱和沿海地区在咸水灌溉实践中取得了显著成效,天津、河北、河南、宁夏、甘肃、内蒙古、陕西、山东等省(自治区、直辖市),都已进行咸水灌溉实践^[10]。宁夏南部山区地下咸水灌溉已有五十多年的历史,用咸水灌溉小麦、大麦(*Hordeum vulgare*)的产量可比旱地提高 3~4 倍,并根据取得的经验制定了适于当地咸水灌溉的水质评价指标^[11]。从 20 世纪 70 年代开始,河北省沧州地区一直采用矿化度小于 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水

灌溉小麦,与旱地种植相比,小麦产量可增加10%~30%,最高可达49%;1990年衡水地区开始大规模采用咸、淡混合灌溉技术,使小麦、玉米(*Zea mays*)、棉花普遍增产^[12]。天津市农业科学院利用咸水灌溉小麦,发现4.5 g·L⁻¹咸水灌溉较早作小麦生物量 and 经济产量分别增加15%~40%和10%~30%^[13]。1991—1995年,中国农业科学院土壤肥料研究所利用咸水灌溉总面积约8.7万hm²,增产粮食5.15亿kg,棉花513万kg,获经济效益2.5亿元^[14]。这些咸水灌溉的成功经验,为淡水资源短缺地区的农业生产提供了保障。

2 国内外蔬菜咸水灌溉研究进展

2.1 不同蔬菜种类的耐盐性

耐盐临界值作为评价耐盐性的指标,即由低盐到高盐胁迫的中转浓度,是所有耐盐指标由低盐处理不规律变化到高盐处理受抑制过程中的一个转折点。耐盐性强的作物在不同生长期,其耐盐性也存在差异。对各蔬菜耐盐阈值的研究结果表明:百合科(Liliaceae)和十字花科(Brassicaceae)耐盐性较强,茄科(Solanaceae)耐盐性最弱,葫芦科(Cucurbitaceae)、豆科(Leguminosae)和伞形科(Apiaceae)居中^[15]。表1

表1 蔬菜作物耐盐度
Table 1 Salt tolerance of vegetables

作物 ¹⁾ Crop ¹⁾	电导率上限 ²⁾ Electrical conductivity up limit ²⁾ (dS·m ⁻¹)	b ³⁾ (%/dS·m ⁻¹)	耐盐等级 ⁴⁾ Rating ⁴⁾
小型蔬菜 Small vegetables			
青花椰菜 Broccoli	2.8	9.2	MS
布鲁塞尔芽菜 Brussels sprouts	1.8	9.7	MS
甘蓝 Cabbage	1.0~1.8	9.8~14.0	MS
花椰菜 Cauliflower	1.8	6.2	MS
芹菜 Celery	1.8~2.5	6.2~13.0	MS
卷心菜 Lettuce	1.3~1.7	12.0	MS
洋葱 Onion	1.2	16.0	S
菠菜 Spinach	2.0~3.2	7.7~16.0	MS
萝卜 Radishes	1.2~2.0	7.6~13.0	MS
茄科蔬菜 Solanaceae vegetables			
茄子 Egg plant	—	—	MS
胡椒 Peppers	1.5~1.7	12.0~14.0	MS
番茄 Tomato	0.9~2.5	9.0	MS
葫芦科蔬菜 Cucurbitaceae vegetables			
黄瓜 Cucumber	1.1~2.5	7.0~13.0	MS
南瓜、冬瓜 Pumpkin, winter squash	1.2	13.0	MS
西葫芦 Zucchini	4.7	10.0	MT
笋瓜(小胡瓜) Squash (scallop)	3.2	16.0	MS
西瓜 Watermelon	—	—	MS
根茎和块茎 Roots and tubers			
甜菜 Beets	4.0	9.0	MT
欧洲萝卜 Parsnip	—	—	S
马铃薯 Potato	1.7	12.0	MS
甘薯(红薯) Sweet potato	1.5~2.5	10.0	MS
芜菁 Turnip	0.9	9.0	MS
胡萝卜 Sugar beet	7.0	5.9	T
豆科植物 Leguminosae crops			
豆角(鲜) Beans	1.0	19.0	S
蚕豆 Broadbean	1.5~1.6	9.6	MS
黎豆 Cowpea	4.9	12.0	MT
花生 Peanut	3.2	29.0	MS
豌豆 Peas	1.5	14.0	S
黄豆 Soybeans	5.0	20.0	MT

1)表中数据仅是一种指南,因为耐盐度随气候、土壤条件和耕作方法而变化,作物经常在发芽期和结籽期耐盐度较低;2)电导率上限指产量开始降低时根系盐分的平均值;3) b 是指电导率超过电导率上限后每增加一个单位电导率作物产量减少的百分数;4)耐盐等级分为耐盐(T)、中等耐盐(MT)、中度敏感(MS)和敏感(S)。1) The data serve only as a guideline: Tolerance varies depending upon climate, soil conditions and cultural practices. Crops are often less tolerant during germination and seedling stage. 2) Electrical conductivity up limit is the average root zone salinity at which yield starts to decline. 3) b is the reducing percentage in crop yield per 1 dS·m⁻¹ increase when electrical conductivity beyond its' up limit. 4) Ratings is salt tolerant rank, which is divided into four grades: tolerant (T), moderately tolerant (MT), moderately sensitive (MS) and sensitive (S).

为 FAO56^[16] 提供的用饱和土壤提取液的电导率上限 (EC_e threshold) 和作物产量随盐分增加而下降的斜率 b 表示的蔬菜作物的耐盐度。

2.2 咸水灌溉对蔬菜生理生态指标的影响

咸水灌溉使蔬菜处在盐渍环境下, 盐分胁迫会干扰作物各种生理和代谢上的反应, 作物对盐分的敏感程度因其品种、生育阶段以及器官的不同而不同^[17]。Wang 等^[18] 发现在 $40\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 处理下花椰菜 (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) 芽期叶片的脱落酸、细胞分裂素、黄铜内酯、吲哚-3-乙酸和赤霉素的水平显著提高, 净光合速率也随着叶绿素含量的提高和光系统 II 活性增加而增加。对番茄开花坐果期灌溉研究结果表明^[19], 随着灌溉水电导率 (EC 在 $0.7\sim 7.8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 之间) 的增加, 不同处理番茄叶片中叶绿素总量、类胡萝卜素、丙二醛和脯氨酸量差异不显著, 但可溶性糖量显著降低, 叶面积指数、地上部和地下部生物量也都随着 EC 的增加先增加, 但当 $EC>4.7\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 时番茄 (*Lycopersicon esculentum*) 生长明显受到抑制。万书勤等^[20] 研究结果显示, 不同盐分浓度咸水 ($1.1\sim 4.9\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 处理对番茄根干质量密度、根长密度、最大叶面积指数、总叶绿素含量等均无显著影响。武育芳等^[21] 研究表明, 在草炭+蚯蚓粪复合基质栽培条件下, 相比于淡水灌溉 ($1.15\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), 咸水灌溉 ($3\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 处理使番茄叶片蒸腾速率增高 49.29% 、气孔导度增高 222% 。汪洋等^[22] 发现咸水灌溉 ($5.16\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 与淡水灌溉 ($0.32\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 相比, 番茄株高降低 21.17% , 茎粗降低 9.83% , 叶片叶绿素增高 15.50% 。Chisari 等^[23] 研究表明随着盐分浓度 ($2.8\sim 4.8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 的增加生菜 (*Lactuca sativa* cv. Duende) 叶片中总酚类化合物含量缓慢下降且抗氧化活性受到抑制。翟红梅等^[24] 发现微咸水 ($3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 灌溉下蔬菜受到盐分胁迫, 植株耐盐性能降低, 细胞膜完整性被破坏, 导致番茄、青椒 (*Capsicum annuum*) 和茄子的光合速率分别下降 18.5% 、 15.3% 和 14.1% 。

2.3 咸水灌溉对蔬菜产量的影响

盐分胁迫对作物的生长发育有一定程度的干扰, 可能会导致其生长受到抑制。咸水灌溉条件下对蔬菜作物的产量研究存在差异, 但基本呈现降低的趋势。张芥文等^[25] 研究发现相比于淡水灌溉 ($0.32\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), $2.74\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉使黄瓜 (*Cucumis sativus*) 产量下降 6.21% , $5.16\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉使黄瓜产量下降 17.71% 。汪洋等^[22] 发现相对于淡水灌溉 ($0.32\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), 咸水灌溉 ($5.16\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 使番茄产量下

降 44.8% 。翟红梅等^[24] 发现基质栽培条件下用 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉对番茄和茄子 (*Solanum melongena*) 的生长发育有明显抑制作用, 与土壤栽培相比株高分别下降 44.1% 和 25.1% , 生物量分别下降 80.4% 和 48.9% , 产量下降 49.2% 和 27.6% , 青椒的株高和生物量分别下降 15.2% 和 27.0% , 但产量无显著变化。Pasternak 等^[26] 研究发现在沙培条件下相对于淡水灌溉 ($1.2\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), 用 $6.2\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 的咸水灌溉番茄产量下降 56.42% 。Gawad 等^[27] 发现相对于淡水灌溉 ($1.2\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), $7.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉使番茄产量下降 50% 。李丹等^[19] 发现当灌溉咸水电导率 (EC) 在 $0.7\sim 7.8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 之间时, 番茄的产量随着 EC 的增加而降低, 当 $EC>1.4\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 时, EC 每增加 $1\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 番茄的产量降低 9.7% 。Patel 等^[28] 研究发现利用咸水 ($1\sim 9\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 地下渗灌技术对马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 进行灌溉时, 各处理间马铃薯的最终产量差异不明显。焦艳平等^[29] 研究表明相对于 $0.72\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 淡水灌溉, $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉对大白菜 (*Brassica pekinensis*) 的产量影响没有差异, 但 $4.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水灌溉可使其产量降低 9.0% 。Savvas 等^[30] 研究表明相较于基础营养液 ($2.1\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 滴灌, 加入 $25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 的咸水 ($4.7\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 滴灌使茄子产量下降 19.73% 。Mendlinger^[31] 研究发现在沙培条件下相对于淡水灌溉 ($1.2\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), 用 $6\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 或 $8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉甜瓜 (*Cucumis melo*), 均使其产量下降 13.55% 。Sahin 等^[32] 研究发现相对于淡水灌溉 ($0.25\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), 用 $5.7\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉白菜 (*Brassica oleracea* var. *capitata*), 其产量下降 45.97% ; 用 $11.82\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉白菜, 使其产量下降可达 63.05% 。Amor 等^[33] 研究发现相较于对照 ($2\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), $4\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉使甜瓜产量下降 14.5% , $6\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉使甜瓜产量下降 38.53% , $8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉使甜瓜产量下降 49.35% 。江雪飞等^[34] 研究结果表明与淡水灌溉相比, 在伸蔓期用矿化度为 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水进行灌溉能够提高甜瓜的产量, 用矿化度为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水灌溉的甜瓜产量没有显著差异, 但用矿化度为 $9\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水灌溉可显著降低甜瓜的产量。总之, 不同蔬菜种类由于耐盐阈值的差异, 在利用不同矿化度咸水进行灌溉时, 蔬菜的产量有随着咸水浓度增加而降低的趋势, 但不同蔬菜种类其咸水灌溉阈值不同。

2.4 咸水灌溉对蔬菜品质的影响

蔬菜品质的变化特征主要体现在可溶性固形物、有机酸、糖、维生素 C、酚类化合物、类胡萝卜素等因素方面。许多研究表明咸水灌溉可以使蔬果的

可溶性固形物、有机酸和糖含量增加,从而改善果实品质。武育芳等^[21]研究发现在草炭+生物炭复合基质栽培条件下咸水 ($3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 灌溉使番茄果实维生素 C 及可溶性糖含量相对于淡水 ($1.15 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 灌溉分别增加 37.43% 和 6.25%。汪洋等^[22]发现相对于淡水 ($0.32 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 灌溉, $5.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉使番茄果实可溶性固形物含量增加 74.07%、可溶性总糖含量增加 41.60%、有机酸含量增加 50.00%、维生素 C 含量增加 47.42%。吴蕴玉等^[35]研究表明秸秆覆盖条件下咸水灌溉 ($5.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 与淡水灌溉 ($1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 相比, 番茄可溶性固形物含量增加 13.20%, 总酸增加 19.27%, 维生素 C 含量增加 10.64%, 糖酸比增加 5.86%。李丹等^[19]发现当灌溉咸水 EC 为 $0.7\sim 7.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 时, 番茄果实中可溶性固形物、还原糖、有机酸含量随着 EC 的升高而增加, 但果实糖酸比逐渐降低。Gawad 等^[27]研究发现相对于淡水 ($0.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 灌溉, 咸水 ($2.3\sim 7.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 灌溉可提高番茄的可溶性固形物含量和含糖量, 但果实大小会随盐分质量浓度的增大而减小。类似的结果在茄子^[30,36]、甜瓜^[31,33]、辣椒^[37]、南瓜 (*Cucurbita moschata*)^[38] 均有发现。但是, 部分研究表明, 咸水 ($8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 灌溉时甜椒果实的总可溶性固形物、果糖、葡萄糖和氨基酸的含量显著降低^[39]。Sakamoto 等^[40]研究发现咸水 ($12.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 或海水 ($10.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 灌溉处理下红叶生菜 (*Lactuca sativa* cv. mother-red) 的花青素含量都较高, 但只有在海水灌溉处理下红叶生菜的叶绿素和类胡萝卜素含量才会增加。Neocleous 等^[41]研究表明在 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl ($3.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 浓度处理下, 绿叶莴苣 (*Lactuca sativa* cv green) 和红叶莴苣 (*Lactuca sativa* cv red-pigmented) 中的抗坏血酸含量显著高于对照处理 ($2.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 和 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 处理 ($4.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), 但酚类化合物没有增加。Kim 等^[42]研究表明生菜 (*Lactuca sativa* var. ramosa) 在长期咸水 ($0\sim 16.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 灌溉处理下类胡萝卜素含量高于短期高盐度 ($>8.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 处理, 总酚类物质含量在各处理间无差异。总之, 一般蔬菜在利用 $<8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 咸水灌溉时, 其品质有提升的趋势; 而大于该浓度咸水灌溉后, 不同种类的蔬菜品质变化趋势不一致。

2.5 咸水灌溉对土壤水盐运移的影响

土壤盐分在土体中的运移具有“盐随水来, 盐随水去”的特征^[30], 土壤含盐量随着灌溉水矿化度的提高总体呈增加趋势^[29]。李国安等^[43]研究结果表明, 淡水灌溉条件下, 土壤积盐率不超过 15%, 当灌水矿化度在 $3.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上时, 土壤剖面盐分积累峰值在 20~

40 cm 土层, 灌溉水带入的盐分有 40%~80% 积累在 60 cm 深度。土壤浸出物的电导率随灌水含盐量 ($1.2\sim 8.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 的增加而显著升高, 随灌水深度 (5~90 cm) 的增加而显著降低。陈丽娟等^[44]研究了咸水灌溉条件下黏土夹层对土壤水盐运移的影响, 结果表明, 黏土夹层对土壤水盐运移具有显著的阻滞作用。Liu 等^[45]研究发现, 土壤质地及其垂直非均质性使层状土壤剖面中水盐时空分布与均质土壤相比有很大差异: 均质土壤有利于水分入渗、盐分浸出和地下水补给; 在非均质土壤中, 水流受阻, 盐分积累明显; 然而与黏土相比, 黏土对水盐运移具有更为显著的阻滞作用。马文军等^[46]研究表明土壤水盐动态受灌溉和降雨影响的短期波动和受季节更替影响的长期波动; 在正常降雨年份, 可采用微咸水灌溉, 不会导致土壤次生盐渍化。总之, 咸水灌溉会增加土壤含盐量, 而盐分的分布主要与土壤质地、灌溉水量、降水量等因素相关。

2.6 咸水灌溉调控技术

2.6.1 不同咸水灌溉模式对蔬菜的影响

目前, 咸水灌溉技术主要包括咸淡水混灌和轮灌, 而灌溉方法主要包括滴灌、畦灌、喷灌和沟灌等^[47]。宋露露等^[48]研究认为利用处理后的淡化水和微咸水的混合灌溉方式是在淡水资源缺乏而微咸水丰富的条件下种植甜瓜的最佳灌溉方式。刘小媛等^[49]通过室内土柱入渗试验, 发现咸淡水间歇组合灌溉下的累积入渗率以及土壤含水量、灌水均匀度高于淡水灌溉, 并且咸淡水间歇组合灌溉下根层土壤脱盐率较微咸水直接灌溉显著增加。杨树青等^[50]对咸淡水轮灌的数值模拟研究表明, 在淡咸咸、咸咸淡和咸淡咸 3 种咸淡水轮灌方案中, 淡咸咸灌溉模式下不同土层的盐分、地下水矿化度以及含水层的盐分较低, 并且长期预测中淡咸咸灌溉模式下, 研究区土壤在作物非生育期的脱盐量高于生育期的积盐量, 土壤整体表现出脱盐趋势。

对于淡水资源极度贫乏的地区, 可以利用咸水直接灌溉, 但必须保证土壤含盐量和溶液浓度在作物耐受范围之内才能保证作物产量。沟灌和漫灌下作物耗水量较大, 滴灌和喷灌下作物耗水量较小。但是, 在喷灌过程中, 由于咸水会烧伤叶片, 进而导致作物产量降低。因此, 滴灌是最为安全有效的咸水灌溉方法^[51]。咸水滴灌主要有两个优点: 第一, 它避免了叶面损伤; 其次, 由于滴灌的淋洗作用, 盐分向湿润锋附近积聚。因此, 在滴灌头下的土壤含盐量相对较小, 有利于作物生长, 并且保持较高的基质

势。同时在滴灌条件下,土壤含水量分布与盐分分布正好相反,有利于作物根系的发育和生长,有利于水分和养分的吸收利用^[52]。膜下滴灌既具备滴灌的防止深层渗漏、减少棵间蒸发、节水、节肥的特点,同时还具备地膜栽培技术的增温、保墒作用,因此覆盖和滴灌相结合的咸水膜下滴灌模式可以做为干旱半干旱地区咸水资源的有效利用方式之一^[46]。

2.6.2 咸水灌溉下施用不同调控物质对蔬菜的影响

生物炭具有很强的吸附特性,其有很高的孔隙率、比表面积和阳离子交换能力^[53]。外源添加生物炭改良剂可以通过吸附减少瞬态钠离子,并将钾、钙、镁等矿质养分释放到土壤溶液中^[54]。Novak 等^[53]研究发现生物炭的添加增加了土壤中大孔隙的比例,从而增加了土壤水分保持能力,使植物更容易吸收水分。She 等^[55]研究结果表明在较高施用速率下,生物炭可以用来补偿盐度对番茄叶片蒸腾速率的负面影响;咸水 ($3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 灌溉+生物炭(土壤质量 8%)处理组的番茄比咸水 ($3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 灌溉不加生物炭处理组的地上部生物量、地下部生物量、产量分别提高 39.48%、15.79% 和 49.16%;但咸水 ($3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 灌溉+生物炭(土壤质量 8%)处理组的番茄比淡水灌溉的地上部生物量、地下部生物量分别降低 0.04% 和 4.72%,产量升高 13.14%。因此外源添加生物炭改良剂具有缓解盐分胁迫和提高作物产量的潜力。

大气中应用微量一氧化氮气体可能是提高盐胁迫下菠菜 (*Spinacia oleracea*) 生物量产量和营养质量的有效策略。Du 等^[56]研究了在菠菜生长室注入 $200 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ NO 气体对 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 盐胁迫的缓解效果,结果表明 NaCl+NO 处理组菠菜食用部分的鲜重和干重比 NaCl 组分别增加 60% 和 27%,并且 NaCl+NO 处理组菠菜抗坏血酸、谷胱甘肽、总酚类和黄酮比 NaCl 组分别增加 28.15%、13.64%、16.74% 和 33.33%。外源性 NO 气体可以减轻盐胁迫诱导的氧化损伤,从而解除了盐胁迫对植物光合作用和生长的抑制^[57]。

外源喷施水杨酸 (SA) 激活黄瓜叶片的防御反应和系统获得性抗性^[58],还可以通过加速番茄叶片生长、改善叶片生理过程和减少植物氧化损伤来缓解盐胁迫^[59]。此外,在黄瓜和莴苣 (*Lactuca sativa*) 中,SA 可通过调节细胞氧化还原状态诱导 NRP1 的防御反应,通过上调谷胱甘肽转移酶 (GSTs) 如 SIGSTL3、SIGSTS2 和 SIGSTZ2 的表达来减少氧化损伤^[23,60]。Miao 等^[61]研究表明与 NaCl 处理相比,NaCl+SA 处理显著增加了黄瓜叶片光合 (F_v/F_m 、 $\Phi \text{ II}$ 和 P_n) 和

RSA (总根长、根表面积、一级和二级侧根的数量和总长度) 参数。外源补充施用 Ca^{2+} 可以减少番茄 Na^+ 的积累和改善 K^+ 和 Ca^{2+} 的吸收^[62]。另外还有许多研究报道外源施用脱落酸^[63]、腐胺^[64]、谷胱甘肽^[65] 物质能够显著降低黄瓜、番茄等植株叶片或根系 Na^+ 和 Cl^- 含量,提高 K^+/Na^+ 和 K^+/Cl^- 比值,从而维持植物细胞的离子稳态,提高植株的抗盐性。

黄腐酸 (FA) 是腐植酸的一种,可从褐煤、草炭等中提取出来,具有无毒无臭、环保、生物活性强等特点,其含有多种活性官能团,易被植物吸收。FA 可以控制作物叶面气孔的开放度,减少蒸腾,增强根系发育和根系活力,促进植物的生长,从而增加抗逆能力^[66]。外源施加 FA 可以降低油菜 (*Brassica napus*) 叶片叶绿素 a 的钝化反应中心数量,增加电子传递量子产率和醌的平均氧化还原状态,从而抑制活性氧的产生,降低细胞的脂质过氧化^[67]。适宜浓度的 FA 可以促进盐胁迫下大豆 (*Glycine max*) 种子萌发且提高其萌发过程中根部过氧化氢酶及过氧化物酶的活性,提高其抗盐能力^[68]。庞晓燕^[69]研究了 FA 对盐胁迫条件下黄瓜的影响,结果表明 FA 对黄瓜叶片叶绿素含量具有显著促进作用,且促进叶面积的增加,提高了光合速率;另外,FA 还可以提高细胞膜透性,促进营养吸收,可促进糖转化酶、淀粉磷酸化酶及一些与蛋白质、脂肪合成有关的酶的活性,使糖分、淀粉、蛋白质、脂肪、核酸、维生素等物质的合成、累积增加,并促进转移酶的活性,加速各种代谢产物从茎叶或根部向果实和籽粒运转,对提高并改善黄瓜的产量和品质有直接影响。

虽然信号物质^[56-57]、矿质营养^[62]、化控调节物质^[23,58-61]、有机化合物^[64-69] 等各种外源调节物质的作用机理不同,但都对各蔬菜作物抗盐性的提高有一定的激发效应,这些调控手段的长期效应、阈值范畴、施用适期等对蔬菜抵御盐胁迫的效果如何,还有待于进一步研究,尤其是这些调控措施的组合施用对蔬菜咸水灌溉的影响也是今后研究的重点之一。

3 存在的问题

3.1 咸水灌溉下区域的生态效应

咸水资源的开发利用可缓解淡水资源短缺与蔬菜生产之间的矛盾。一般咸水资源分布在我国干旱、半干旱或滨海地区,这些区域的土壤多为盐碱土,其受盐碱和贫瘠的影响利用程度较低。但是,这些区域土地资源相对较为丰富,是潜在的后备耕地资源,具有发展蔬菜种植较为宽阔的空间。同时,这些区

域的光热资源较为丰沛,也为蔬菜种植提供了较为适宜的环境条件。随着由治理盐碱地适应作物向选育耐盐植物适应盐碱地观念的转变,在这些区域发展蔬菜种植可以减轻耕地资源较为紧张的压力。但是,利用咸水资源长期灌溉,盐分在土体中的累积,要从长期的视觉分析其对环境的影响,比如长期的咸水灌溉带来的盐分淋溶会降低排水水质,水质差的灌溉回流是排水口下游地表水体的污染源。再者,要进行经济、社会和生态效益的综合评价,进而研发适宜区域资源特点的咸水灌溉蔬菜关键核心技术,为保障国家粮食安全,端牢中国饭碗提供技术支撑。

3.2 咸水灌溉下蔬菜生理代谢过程变化

蔬菜遇到盐害逆境胁迫时均会通过改变正常的生理代谢过程适应环境胁迫,土壤盐分过多时会降低土壤水势,使植物吸水困难,进一步导致植物地上部分的水势和膨压降低。叶片渗透势降低会阻碍许多生理反应,最终导致渗透胁迫^[70]。植物通过转运蛋白从土壤中吸收大量 Na^+ 会抑制细胞对 K^+ 的摄取,导致离子不平衡,离子毒性会干扰矿物质的吸收造成营养亏缺。 Na^+ 的大量积累还会降低酶活性,初级代谢(卡尔文循环,苯丙烷途径,糖酵解、多胺和淀粉合成)有关的酶多数受 K^+ 控制, Na^+ 取代 K^+ 参与这些酶反应,使效率更低,因此相比之下这些酶的活性受到抑制^[71]。 Cl^- 的大量摄入,也会阻碍和它用相同的(非选择性的)阴离子转运通道的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的吸收。盐分会提高植物细胞中的活性氧含量,细胞中过剩的活性氧会扰乱氧化还原稳态,产生氧化胁迫,导致脂质过氧化、膜变质以及 DNA、蛋白质损伤和酶降解^[72]。盐分降低了叶绿素和类胡萝卜素的含量,扭曲了叶绿体的超微结构和 PS II 系统,降低了气孔导度,从而阻碍了光合作用、蒸腾和气体交换^[73]。另外盐分胁迫会使 PEP 和 RUBP 羧化酶活性降低,类囊体膜损伤,叶绿素和类胡萝卜素的合成受到抑制,因此抑制了光合作用^[74]。但是,在咸水灌溉蔬菜方面的水盐碳氮过程耦合机理研究方面仍有待提高,要从分子、器官、植株和群体不同尺度进行生理代谢过程的研究。

4 研究展望

1) 完善咸水资源化,安全灌溉理论研究。开展不同土壤质地和肥力条件下的蔬菜咸水灌溉研究,揭示不同矿化度咸水灌溉下土壤盐分、土壤结构和蔬菜生长及品质的协同变化规律。

2) 提升咸水灌溉关键技术及产品和设备研发的

产业化。目前,我国尚未制定统一的咸水安全灌溉水质标准,只有少数地区制定了咸水灌溉地方标准,其实用有一定的局限性,制约了咸水资源的高效利用。

3) 协同提升咸水灌溉下的生态效应、经济效益和社会效益。将咸水灌溉方法和手段与农田调控和蔬菜生产目标相结合,形成咸水安全灌溉的综合技术模式,为缺水地区农业水资源高效利用提供样板。咸水资源的安全高效利用应从区域生态角度、咸水灌溉下带来的经济效益和社会效益共同考虑,从区域尺度和时间尺度的时空大尺度对其进行综合的评价,服务于国家粮食安全、水安全和生态安全战略。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020
Statistics Bureau of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020
- [2] 康绍忠, 孙景生, 张喜英. 中国北方主要作物需水量与耗水管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018
KANG S Z, SUN J S, ZHANG X Y. Water Demand and Water Consumption Management of Major Crops in Northern China[M]. Beijing: China Water&Power Press, 2018
- [3] 孟建, 姚旭擎, 杨晓琳, 等. 地下水超采区农业种植结构与作物耗水时空演变研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 302-312
MENG J, YAO X Q, YANG X L, et al. Spatial and temporal evolution of agricultural planting structure and crop water consumption in groundwater overdraft area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 302-312
- [4] 孙宏勇, 张喜英, 邵立威. 调亏灌溉在果树上的应用的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1288-1291
SUN H Y, ZHANG X Y, SHAO L W. Regulated deficit irrigation and its application on fruit trees[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(6): 1288-1291
- [5] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117-126
WANG Q J, SHAN Y Y. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126
- [6] 张伟. 咸水灌溉研究进展[J]. 山西水利科技, 2012(1): 12-13, 39
ZHANG W. Research progress of salt water irrigation[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2012(1): 12-13, 39
- [7] 刘昌明. 中国水文地理[M]. 北京: 科学出版社, 2014
LIU C M. Hydrogeography of China[M]. Beijing: Science Press, 2014
- [8] 高从塔. 海水淡化及海水与苦咸水利用发展建议[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007
GAO C J. Suggestions on Seawater Desalination and Utilization of Seawater and Brackish Water[M]. Beijing: Higher Education

- Press, 2007
- [9] 马中昇, 谭军利, 魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 70–75
MA Z S, TAN J L, WEI T. The variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 70–75
- [10] 阮明艳. 咸水灌溉的应用及发展措施[J]. 新疆农垦经济, 2006(4): 66–68
RUAN M Y. Application and development measures of salt water irrigation[J]. Xinjiang State Farms Economy, 2006(4): 66–68
- [11] 霍海霞, 张建国. 咸水灌溉下土壤盐分运移研究进展与展望[J]. 节水灌溉, 2015(4): 41–45
HUO H X, ZHANG J G. Advance and prospects of research on soil salt movement under saline irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2015(4): 41–45
- [12] 屈东星, 沈秀云, 刘晓燕. 河北沧州市粮食安全目标下的缺水问题及对策[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(4): 39–41
QU D X, SHEN X Y, LIU X Y. Water shortage and its countermeasures in Cangzhou City, Hebei Province under the target of food security[J]. China Flood & Drought Management, 2010, 20(4): 39–41
- [13] 张余良, 陆文龙. 微咸水灌溉对小麦生理特性及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2007, 36(8): 31–34
ZHANG Y L, LU W L. Affects of brackish water irrigation on output and physiological characters of wheat[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2007, 36(8): 31–34
- [14] 王卫光, 王修贵, 沈荣开, 等. 微咸水灌溉研究进展[J]. 节水灌溉, 2003(2): 9–11, 46
WANG W G, WANG X G, SHEN R K, et al. Progress of research on light salt water irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2003(2): 9–11, 46
- [15] 曹玲, 王艳芳, 陈宝悦, 等. 主要蔬菜作物耐盐性比较[J]. 华北农学报, 2013, 28(S1): 233–237
CAO L, WANG Y F, CHEN B Y, et al. The comparison of salt tolerance in major vegetable crops[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(S1): 233–237
- [16] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [J]. FAO, 1998
- [17] 张福海, 罗会, 崔松山, 等. 耐盐促生菌剂对盐碱环境下枸杞生长的影响[J]. 园艺与种苗, 2017, 37(7): 33–35
ZHANG F H, LUO H, CUI S S, et al. Effects of relieving-salt-stress and promoting growth microbial inoculum on *Lycium barbarum* in saline-alkali soil[J]. Horticulture & Seed, 2017, 37(7): 33–35
- [18] WANG P, LI X Y, TIAN L, et al. Low salinity promotes the growth of broccoli sprouts by regulating hormonal homeostasis and photosynthesis[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2019, 60(1): 19–30
- [19] 李丹, 万书勤, 康跃虎, 等. 滨海盐碱地微咸水滴灌水盐调控对番茄生长及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 39–50
LI D, WAN S Q, KANG Y H, et al. Effects of water-salt regulation on tomato growth and quality under drip irrigation with brackish water in coastal saline-alkali soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 39–50
- [20] 万书勤, 康跃虎, 王丹, 等. 华北半湿润地区微咸水滴灌对番茄生长和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 30–35
WAN S Q, KANG Y H, WANG D, et al. Effect of saline water on tomato growth and yield by drip irrigation in semi-humid regions of North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 30–35
- [21] 武育芳, 杨官凯, 曹行行, 等. 不同基质下咸、淡水灌溉对番茄生长和品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 153–159, 168
WU Y F, YANG G K, CAO H H, et al. Effects of brackish and fresh water irrigation on tomato growth and quality under different substrates[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 153–159, 168
- [22] 汪洋, 田军仓, 高艳明, 等. 非耕地温室番茄微咸水灌溉试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 12–16
WANG Y, TIAN J C, GAO Y M, et al. Brackish water irrigation of greenhouse tomato in non-cultivated land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(1): 12–16
- [23] CHISARI M, TODARO A, BARBAGALLO R N, et al. Salinity effects on enzymatic browning and antioxidant capacity of fresh-cut baby Romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Duende)[J]. Food Chemistry, 2010, 119(4): 1502–1506
- [24] 翟红梅, 董宝娣, 乔匀周, 等. 基质栽培对微咸水灌溉下不同种类蔬菜生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 11–15
ZHAI H M, DONG B D, QIAO Y Z, et al. Effect of substrate culture on the growth of different vegetables under brackish water irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 11–15
- [25] 张茅文, 吴昊. 微咸水膜下滴灌对沙漠温室黄瓜产量的影响研究[J]. 地下水, 2018, 40(6): 96–98
ZHANG J W, WU H. Effect of drip irrigation with brackish water under plastic film on cucumber yield in desert greenhouse[J]. Ground Water, 2018, 40(6): 96–98
- [26] PASTERNAK D, MALACH Y D. Irrigation with brackish water under desert conditions X. Irrigation management of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mills) on desert sand dunes[J]. Agricultural Water Management, 1995, 28(2): 121–132
- [27] GAWAD G A, ARSLAN A, GAIHBE A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999–2002)[J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1/2): 39–53
- [28] PATEL R M, PRASHER S O, DONNELLY D, et al. Subirrigation with brackish water for vegetable production in arid regions[J]. Bioresource Technology, 1999, 70(1): 33–37
- [29] 焦艳平, 张艳红, 潘增辉, 等. 不同矿化度微咸水灌溉对大白菜生长和土壤盐分累积的影响[J]. 节水灌溉, 2012(12): 4–8
JIAO Y P, ZHANG Y H, PAN Z H, et al. Effect of saline water

- irrigation on Chinese cabbage growth and soil salt accumulation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(12): 4–8
- [30] SAVVAS D, LENZ F. Effects of NaCl or nutrient-induced salinity on growth, yield, and composition of eggplants grown in rockwool[J]. *Scientia Horticulturae*, 2000, 84(1/2): 37–47
- [31] MENDLINGER S. Effect of increasing plant density and salinity on yield and fruit quality in muskmelon[J]. *Scientia Horticulturae*, 1994, 57(1/2): 41–49
- [32] SAHIN U, EKINCI M, ORS S, et al. Effects of individual and combined effects of salinity and drought on physiological, nutritional and biochemical properties of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 240: 196–204
- [33] DEL AMOR F M, MARTINEZ V, CERDÁ A. Salinity duration and concentration affect fruit yield and quality, and growth and mineral composition of melon plants grown in perlite[J]. *HortScience*, 1999, 34(7): 1234–1237
- [34] 江雪飞, 乔飞, 邹志荣. 不同生育期咸水灌溉对砂培甜瓜产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(10): 87–90
- JIANG X F, QIAO F, ZOU Z R. Effects of brackish irrigation on fruit yield and quality of melon in sand culture[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2006, 34(10): 87–90
- [35] 吴蕴玉, 金星, 徐元, 等. 秸秆覆盖条件下微咸水灌溉对番茄生长和产量品质的影响[J]. *节水灌溉*, 2015(7): 21–24
- WU Y Y, JIN X, XU Y, et al. Effects of saline water irrigation on tomato growth, quality and yield under straw mulching[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(7): 21–24
- [36] ZIPELEVISH E, GRINBERGE A, AMAR S, et al. Eggplant dry matter composition fruit yield and quality as affected by phosphate and total salinity caused by potassium fertilizers in the irrigation solution[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(4): 431–442
- [37] HAND M J, TAFFOUO V D, NOUCK A E, et al. Effects of salt stress on plant growth, nutrient partitioning, chlorophyll content, leaf relative water content, accumulation of osmolytes and antioxidant compounds in pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2017, 45(2): 481–490
- [38] VÍLLORA G, MORENO D A, PULGAR G, et al. Zucchini growth, yield, and fruit quality in response to sodium chloride stress[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22(6): 855–861
- [39] NAVARRO J M, GARRIDO C, CARVAJAL M, et al. Yield and fruit quality of pepper plants under sulphate and chloride salinity[J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2002, 77(1): 52–57
- [40] SAKAMOTO K, KOGI M, YANAGISAWA T. Effects of salinity and nutrients in seawater on hydroponic culture of red leaf lettuce[J]. *Environmental Control in Biology*, 2014, 52(3): 189–195
- [41] NEOCLEOUS D, KOUKOUNARAS A, SIOMOS A S, et al. Assessing the salinity effects on mineral composition and nutritional quality of green and red “baby” lettuce[J]. *Journal of Food Quality*, 2014, 37(1): 1–8
- [42] KIM H J, FONSECA J M, CHOI J H, et al. Salt in irrigation water affects the nutritional and visual properties of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L.)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(10): 3772–3776
- [43] 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
- [44] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 44–51
- CHEN L J, FENG Q, WANG Y, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 44–51
- [45] LIU B X, WANG S Q, KONG X L, et al. Soil matric potential and salt transport in response to different irrigated lands and soil heterogeneity in the North China Plain[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(12): 3982–3993
- [46] 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 W J, CHENG Q J, LI L T, 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
- [47] 刘静, 高占义. 中国利用微咸水灌溉研究与实践进展[J]. *水利水电技术*, 2012, 43(1): 101–104
- LIU J, GAO Z Y. Research and practice progress of brackish water irrigation in China[J]. *Water resources and hydropower technology*, 2012, 43(1): 101–104
- [48] 宋露露, 田军仓, 王怀博. 基于正交试验的温室甜瓜微咸水灌溉管理模式优化[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(2): 36–39
- SONG L L, TIAN J C, WANG H B. Optimization of brackish water irrigation management mode for greenhouse muskmelon based on orthogonal experimental design[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(2): 36–39
- [49] 刘小媛, 高佩玲, 杨大明, 等. 咸淡水间歇组合灌溉对盐碱耕地土壤水盐运移特性的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1404–1413
- LIU X Y, GAO P L, YANG D M, et al. Effects of intermittent combined irrigation on the characteristics of soil water and salt movement in farm land of salt-affected soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1404–1413
- [50] 杨树青, 叶志刚, 史海滨, 等. 内蒙河套灌区咸淡水交替灌溉模拟及预测[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 8–17
- YANG S Q, YE Z G, SHI H B, et al. Simulation and prediction of rotational irrigation with salty and fresh water in the Hetao irrigation area of Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 8–17
- [51] 王全九, 徐益敏, 王金栋, 等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]. *灌溉排水*, 2002, 21(4): 73–77
- WANG Q J, XU Y M, WANG J D, et al. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation[J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21(4): 73–77

- [52] 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
- [53] NOVAK J M, BUSSCHER W J, WATTS D W, et al. Biochars impact on soil-moisture storage in an ultisol and two aridisols[J]. *Soil Science*, 2012, 177(5): 310–320
- [54] AKHTAR S S, ANDERSEN M N, NAVEED M, et al. Interactive effect of biochar and plant growth-promoting bacterial endophytes on ameliorating salinity stress in maize[J]. *Functional Plant Biology: FPB*, 2015, 42(8): 770–781
- [55] SHE D L, SUN X Q, GAMARELDAWLA A H D, et al. Benefits of soil biochar amendments to tomato growth under saline water irrigation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 14743
- [56] DU S T, LIU Y, ZHANG P, et al. Atmospheric application of trace amounts of nitric oxide enhances tolerance to salt stress and improves nutritional quality in spinach (*Spinacia oleracea* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2015, 173: 905–911
- [57] UCHIDA A, JAGENDORF A T, HIBINO T, et al. Effects of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice[J]. *Plant Science*, 2002, 163(3): 515–523
- [58] DONG C J, WANG X L, SHANG Q M. Salicylic acid regulates sugar metabolism that confers tolerance to salinity stress in cucumber seedlings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129(4): 629–636
- [59] HORVÁTH E, CSISZÁR J, GALLÉ Á, et al. Hardening with salicylic acid induces concentration-dependent changes in abscisic acid biosynthesis of tomato under salt stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 183: 54–63
- [60] HAO J H, DONG C J, ZHANG Z G, et al. Insights into salicylic acid responses in cucumber (*Cucumis sativus* L.) cotyledons based on a comparative proteomic analysis[J]. *Plant Science: an International Journal of Experimental Plant Biology*, 2012, 187: 69–82
- [61] MIAO Y X, LUO X Y, GAO X X, et al. Exogenous salicylic acid alleviates salt stress by improving leaf photosynthesis and root system architecture in cucumber seedlings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 272: 109577
- [62] CUARTERO J, FERNÁNDEZ-MUÑOZ R. Tomato and salinity[J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 78(1/2/3/4): 83–125
- [63] 郭小俊, 谢成俊. 外源ABA对NaCl胁迫下黄瓜幼苗不同离子含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2008(9): 27–30
GUO X J, XIE C J. Effect of exogenous ABA on ionic contents of cucumber seedlings under NaCl stress[J]. *China Vegetables*, 2008(9): 27–30
- [64] 束胜, 孙锦, 郭世荣, 等. 外源腐胺对盐胁迫下黄瓜幼苗叶片PS II 光化学特性和体内离子分布的影响[J]. 园艺学报, 2010, 37(7): 1065–1072
SHU S, SUN J, GUO S R, et al. Effects of exogenous putrescine on PS II photochemistry and ion distribution of cucumber seedlings under salt stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(7): 1065–1072
- [65] 周艳, 刘慧英, 崔金霞, 等. 外源GSH对NaCl胁迫下番茄幼苗叶片及根系离子微域分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 964–972
ZHOU Y, LIU H Y, CUI J X, et al. Effects of exogenous glutathione on ions micro-distribution in leaf and root of tomato seedlings under NaCl stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 964–972
- [66] 庞强强, 孙光闻, 蔡兴来, 等. 硝酸盐胁迫下黄腐酸对小白菜活性氧代谢及相关基因表达的影响[J]. 分子植物育种, 2018, 16(17): 5812–5820
PANG Q Q, SUN G W, CAI X L, et al. Effects of fulvic acid on reactive oxygen metabolism and related gene expression in pakchoi under NO₃⁻ stress[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(17): 5812–5820
- [67] LOTFI R, PESSARAKLI M, GHARAVI-KOUCHEBAGH P, et al. Physiological responses of *Brassica napus* to fulvic acid under water stress: Chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activity[J]. *The Crop Journal*, 2015, 3(5): 434–439
- [68] 高同国, 袁红莉, 荣小焕, 等. 盐胁迫下黄腐酸对大豆种子萌发及抗氧化酶活性的影响[J]. 腐植酸, 2016(3): 22–25
GAO T G, YUAN H L, RONG X H, et al. Effects of fulvic acid on soybean germination and antioxidant enzymes activities under salt stress[J]. *Humic Acid*, 2016(3): 22–25
- [69] 庞晓燕. 营养液中添加不同剂量黄腐酸对基质栽培黄瓜生长、品质及产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017
PANG X Y. Effects of different doses of fulvic acid added in nutrient solution on growth, quality and yield of cucumber cultivated in organic substrate[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017
- [70] NAVADA S, VADSTEIN O, GAUMET F, et al. Biofilms remember: Osmotic stress priming as a microbial management strategy for improving salinity acclimation in nitrifying biofilms[J]. *Water Research*, 2020, 176: 115732
- [71] ISAYENKOV S V, MAATHUIS F J M. Plant salinity stress: many unanswered questions remain[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 80
- [72] EL GHAZALI GAMAL E B. *Suaeda vermiculata* forssk. ex J. F. gmel.: structural characteristics and adaptations to salinity and drought: a review[J]. *International Journal of Sciences*, 2020, 9(2): 28–33
- [73] PAN T, LIU M M, KRESLAVSKI V D, et al. Non-stomatal limitation of photosynthesis by soil salinity[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, 51(8): 1–35
- [74] TSAI Y C, CHEN K C, CHENG T S, et al. Chlorophyll fluorescence analysis in diverse rice varieties reveals the positive correlation between the seedlings salt tolerance and photosynthetic efficiency[J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19(1): 403