

·灌溉技术与装备·

文章编号: 1672-3317(2023) Supp.1-0123-06

# 咸水淡化技术在农业灌溉中的应用与展望

黄潜豪<sup>1,2,3</sup>, 李蓓<sup>1,2,3</sup>, 陈少周<sup>1,2,3</sup>, 高晓静<sup>1,2,3</sup>,  
杜凤凤<sup>1,2,3</sup>, 刘晓静<sup>1,2,3\*</sup>, 姚东瑞<sup>1,2,3\*</sup>

(1.江苏省中国科学院植物研究所, 南京中山植物园, 南京 210014

2.江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 南京 210014

3.江苏省水生植物资源与水环境修复工程研究中心, 南京 210014)

**摘要:** 本文围绕咸水淡化技术在农业灌溉中的应用, 归纳与评述了各类咸水淡化技术在农业方面的应用场景与处理效果。目前淡化水灌溉技术已经在以色列、西班牙、澳大利亚等国家广泛应用。其中反渗透技术是应用于农业最广的咸水淡化技术, 电吸附技术被认为是实现低耗淡化水的关键技术, 太阳能蒸馏与海冰水淡化可以因地制宜地淡化咸水。咸水淡化技术具有提高作物产量、保护土壤等优势, 但存在环境污染、成本较高等局限, 本文展望了淡化灌溉水的应用前景与发展方向, 为咸水淡化技术在我国农业灌溉方面的研究提供参考。

**关键词:** 咸水淡化; 农业灌溉; 膜处理技术; 电吸附技术

中图分类号: P747

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023341

黄潜豪, 李蓓, 陈少周, 等. 咸水淡化技术在农业灌溉中的应用与展望[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 123-128.

HUANG Qianhao, LI Bei, CHEN Shaozhou, et al. Application and Prospect of Desalination Technology in Agricultural Irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 123-128.

## 0 引言

水资源是人类生活与生产必需的宝贵资源。农业作为我国重要的支柱产业, 用水量与耗水量都是巨大的。2020年全国用水总量是5 812.9亿 $m^3$ , 其中, 农业用水3 612.4亿 $m^3$ , 占用水总量的62.1%。全国耗水总量3 141.7亿 $m^3$ , 农业耗水量2 354.6亿 $m^3$ , 占耗水总量的74.9%, 耕地实际灌溉亩均用水量356 $m^3$ 。开发咸水淡化技术可有效缓解水资源供需矛盾。

利用水处理技术淡化咸水, 使其达到灌溉水质标准, 可以补充干旱地区与盐碱地区灌溉用水。目前, 淡化水灌溉技术已经在以色列、西班牙、澳大利亚等国家得以应用。以色列是最早提出淡化海水用于农业灌溉水的国家<sup>[2]</sup>。2005年以色列Ashkelon淡化水厂开始运行, 年产1亿 $m^3$ 淡化水; 2007年Palmachim淡化水厂投入使用, 年产0.3亿 $m^3$ 淡化水; 这2个淡化水厂向以色列东部沿海地区居民提供淡水, 占淡

水使用的25%, 并有部分用于农业灌溉<sup>[3]</sup>。西班牙也是淡化水生产大国, 1964年建立了欧洲第一家淡化水厂, 目前西班牙每年生产的淡化水占欧洲的50%以上<sup>[4]</sup>。西班牙Murcia和Valencia地区, 由于淡水资源匮乏, 当地17家淡化水厂年产4.4亿 $m^3$ 淡化水, 补充了当地生活与农业用水<sup>[5]</sup>。据《2020年全国海水利用报告》显示<sup>[6]</sup>, 截止2020年底, 我国有海水淡化工程135个, 日产水量达165万 $m^3$ , 其主要用途是电力、冶金等工业用水及海岛地区生活用水。河北、海南等省份也有地区使用了淡化水灌溉, 并取得了一定的经济效益。

国外使用淡化水灌溉的成功经验对我国农业发展具有重要的借鉴意义。本文重点关注各类咸水淡化技术在农业灌溉方面的成效与局限, 并为其在我国的应用推广提供参考。

## 1 灌溉水淡化技术

脱盐的过程需要消耗能量, 依据消耗能量的类型, 将用于灌溉的咸水淡化技术大致分为三类: 压力驱动、电势驱动以及其他类型。

### 1.1 压力驱动

#### 1.1.1 反渗透技术 (Reverse Osmosis, RO)

反渗透技术是现如今应用最广泛的膜分离技术。其原理是向高渗透压的水施加压力使其通过渗透膜

收稿日期: 2023-07-31 修回日期: 2023-11-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52100009); 江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2022]09)

作者简介: 黄潜豪(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电容去离子技术与农业灌溉。E-mail: huangqianhao1@163.com

通信作者: 姚东瑞(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事水生植物资源研究和开发利用。E-mail: shuishengzu@126.com

刘晓静(1981-), 女, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事水生植物资源研究和开发利用。E-mail: liuxiaojingcau@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

成为低渗透压的水。反渗透技术操作压力一般为 1.5~10.5 MPa。反渗透膜的截留组分直径为 0.1~1 nm, 水分子可以通过膜, 而盐离子则会被截留。在不施加压力且在溶液存在浓度差的情况下, 溶剂分子会在渗透压的作用下由低浓度一侧通过半透膜进入高浓度一侧。而向高浓度溶液施加压力, 可以驱使水分子通过反渗透膜流向低浓度的一侧, 这就是反渗透现象, 也称高滤 (hyperfiltration)<sup>[7]</sup>。

反渗透技术也是最早用于灌溉水脱盐的咸水淡化技术。反渗透技术生产淡化水的成本为 0.5~1 美元/t, 主要用于市政用水, 其次是工业用水, 仅有少部分用于农业灌溉<sup>[8]</sup>。以色列、西班牙和澳大利亚等是少有的大规模运用反渗透淡化水灌溉的国家。以色列的电力海水淡化多采用反渗透技术<sup>[9]</sup>。以色列通过建立 5 个大型海水淡化厂, 年产水量总计可达 6 亿 m<sup>3</sup>, 解决了包括农业用水缺乏在内的水资源短缺问题<sup>[10]</sup>。目前, 以色列利用反渗透技术生产的淡化水有 30% 用于灌溉, 满足 50% 的农业灌溉水需求<sup>[11]</sup>。西班牙和澳大利亚运用反渗透技术生产的淡化水分别有 22% 和 28% 用于农业灌溉<sup>[12]</sup>。据《2020 年全国海水利用报告》显示<sup>[6]</sup>, 截至 2020 年底, 全国应用反渗透技术的工程 118 个, 工程规模 107 万 m<sup>3</sup>/d 占总工程规模的 65.32%, 主要用途仍是工业用水与生活用水, 在报告中并未提及农业用水。依照目前全球淡化水的应用现状与我国当前的农业发展状况, 如果要大面积推广淡化水灌溉, 可优先选用反渗透技术淡化海水。

目前, 世界各国已有许多关于反渗透技术淡化灌溉水对作物影响的研究。Silber 等<sup>[13]</sup>利用反渗透技术将咸水电导率由 1 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  降至 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 使用咸水灌溉的香蕉出现了叶面边缘焦黄等明显的盐害症状, 且根系生长受阻, 单株产量 19.3 kg, 单果质量 113 g, 而使用淡化水灌溉的香蕉生长状况良好, 根系覆盖范围是使用咸水灌溉的 1.5 倍, 单株产量 26.4 kg, 单果质量 154 g, 反渗透技术处理的淡化水可以显著提升香蕉的产量。Antolinos 等<sup>[14]</sup>采用电导率为 3 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  的咸水与电导率为 2 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  的淡化水水培番茄, 番茄的茄红素量由 30.6 mg/kg 提升至 41.1 mg/kg, 抗坏血酸量由 196 mg/kg 提升至 230 mg/kg, 总抗氧化能力由 1 243  $\mu\text{mol}/\text{kg}$  提升至 1 637  $\mu\text{mol}/\text{kg}$ , 营养价值更高, 并且使用淡化水培养的番茄, 色泽、硬度等形态指标也显著提升。Rahimi 等<sup>[15]</sup>利用反渗透技术将开心果园灌溉用水—地下水全盐量降至 2 300 mg/L 左右, 果园开心果产量提升至 2 000 kg/hm<sup>2</sup>, 果园净效益提升 17 倍。我国天津的滨海盐碱耕地应用反渗透技术后, 盐碱地灌溉原水全盐量由 7 000 mg/L 降至 500 mg/L, 淋洗水全盐量由 1 025 mg/L 降至 324

mg/L<sup>[16]</sup>。因此, 反渗透技术能够有效改善灌溉水水质, 缓解灌溉水不足的问题, 提升作物产量。

### 1.1.2 纳滤技术 (Nanofiltration, NF)

纳滤技术是一种由反渗透技术发展来的新型压力驱动膜分离技术。纳滤技术与反渗透技术的原理接近。与反渗透技术相比, 纳滤技术的操作压力更低, 一般为 0.5~2.0 MPa。纳滤膜孔径较反渗透膜孔径更大, 一般为 1 nm 左右。因此纳滤技术能在较低的操作压力下保持较高的渗透通量, 适应工业需求的同时也可以降低成本<sup>[7]</sup>。纳滤膜可以截留二价或多价离子和含量较大的单价离子, Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>被除去的比例更高, 而 Na<sup>+</sup>与 Cl<sup>-</sup>被保留的比例较高<sup>[7]</sup>。

Ghermandi 等<sup>[17]</sup>以辣椒为研究对象, 对比纳滤技术与反渗透技术淡化水对辣椒生长研究表明, 井水的全盐量为 1 178 mg/L, 纳滤装置产出的淡化水全盐量为 318 mg/L, 反渗透装置产出的淡化水全盐量为 65 mg/L, 均符合灌溉水标准; 但纳滤装置的能源使用量较反渗透技术降低 40%, 抽取的地下水减少 34%, 使用纳滤淡化水灌溉辣椒的生物量较地下咸水灌溉增加了 18%。Lew 等<sup>[18]</sup>研究表明, 与地下咸水灌溉相比, 纳滤淡化水灌溉后辣椒果实的总可溶性物质由 7.13% 降至 6.28%, 抗坏血酸量由 152 mg/kg 提升至 179 mg/kg, 辣椒的营养物质更为丰富, 此外硬度与色泽也有所提升。另外, 农业光伏纳滤 (NF-PV) 淡化系统处理全盐量为 2 539 mg/L 的咸水时功率为 1.55 kWh/m<sup>3</sup>, 可以除去 94.2% 的盐分, 该系统可生产淡化水 2.16~4.8 m<sup>3</sup>/d<sup>[19]</sup>。

## 1.2 电势驱动

### 1.2.1 电渗析技术 (Electrodialysis, ED)

电渗析技术是向溶液施加直流电场, 使离子受到电场力定向迁移并透过离子交换膜, 实现离子的浓缩和脱除。电渗析器主要由电极、阴阳离子交换膜、隔板等部分组成。电渗析器各隔室中充满溶液, 在电场的作用下阳离子穿过阳离子交换膜向阴极迁移, 阴离子穿过阴离子交换膜向阳极移动, 并且阳离子不能穿过阴膜, 阴离子不能穿过阳膜。在这个过程中除盐室离子浓度降低, 浓缩室离子浓度升高, 最终得到离子浓度低的淡化液与离子浓度高的浓缩液<sup>[7]</sup>。

灌溉水中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等营养盐可以被作物吸收利用, 而反渗透与纳滤技术处理过程中营养盐被除去的比例较高。Cohen 等<sup>[20]</sup>研究表明, 使用壳寡糖 (CSO) 制造的膜具有极佳的单价离子选择性, Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的去除率约为 52%、44%、24%; 使用聚乙烯亚胺 (PEI) 制作的离子膜, Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的去除效率分别达到 90%、12% 左右, 可以除去较多的对植物有害的 Cl<sup>-</sup>, 保留更多的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>满足作物的营养需求,

并且 SAR 由 12 降至 2.3, 碱化风险较低, 适宜用作灌溉水。Ahdab 等<sup>[21]</sup>选用单价选择性电渗析(MSED-R)处理灌溉水,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的去除率约为 65%、19%、11%,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 的去除效率分别约为 64%、11%。因此, 使用电渗析技术处理灌溉水可以在除去  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 的同时, 保留更多的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等营养盐, 而且可以降低土壤碱化风险, 对环境影响较小, 但电渗析技术价格比较高, 应用推广受到限制。

### 1.2.2 电容去离子技术 (Capacitive Deionization, CDI)

电容去离子技术指通过施加静电场强制离子向带有相反电荷的电极处移动。由碳材料如活性炭和碳气凝胶等制成的电极, 不仅导电性能良好, 而且具有很大的比表面积, 置于静电场中时会在其与电解质溶液界面处产生很强的双电层。双电层的厚度有 1~10 nm, 能吸附大量的离子, 并储存一定能量。当电场消失或者施加反向电场, 吸引的离子被释放到本体溶液中, 溶液离子浓度升高, 完成脱附过程<sup>[22]</sup>。电容去离子具有很高的能量利用率, 与电渗析技术相比, 不需要提供高电势驱动<sup>[23]</sup>。

Bales 等<sup>[24]</sup>开发了一个电容去离子装置: 在种植香橙的试验中, 将咸水的电导率由 3 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  降至 1 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 淡化成本为 0.82 澳元/ $\text{m}^3$ , 收益率由 14.0% 提升至 26.9%。Bales 等<sup>[25]</sup>还开发了一套利用光伏发电的电容去离子装置, 该装置适合处理电导率低于 2 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  的咸水, 可以将电导率降低至 1 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 使土地收益提高了 2 500 澳元/ $\text{hm}^2$ 。

## 1.3 其他咸水淡化技术

### 1.3.1 太阳能蒸馏器

太阳能的热效应和光效应是太阳能蒸馏的 2 种能量利用方式, 分为直接法太阳能蒸馏和间接法太阳能蒸馏。直接法太阳能蒸馏是直接利用太阳热能驱动水分蒸发, 蒸汽冷凝收集得到淡水的海水淡化方式。间接法是将太阳能存储后再蒸馏, 储能装置与蒸馏装置可以分离, 也可以将白天储存的太阳能在夜间使用。太阳能蒸馏技术具有零排放、零油耗、设备环保、维护成本低等优点。但由于蒸馏过程较慢, 性能较低, 空间较大, 对太阳辐射强度的要求较高限制了其推广应用。目前太阳能蒸馏器仍应用于海上救援、海岛海水淡化、偏远地区苦咸水淡化等领域<sup>[26]</sup>。

Rabhy 等<sup>[27]</sup>建立了一套温室集成太阳能蒸馏器系统, 该温室在顶部安装若干太阳能蒸馏器装置, 可以吸收多余阳光, 产生的蒸馏水约占温室平均灌溉需水量的 37.5%, 此外降低了温室降温成本的 60%。Fang 等<sup>[28]</sup>提出将反渗透技术与太阳能蒸馏器耦合的方法处理灌溉水。新疆太阳能资源丰富, 一方面可以将光能转化为电能用于反渗透技术, 另一方面, 将反渗透

装置产生的高浓度咸水利用太阳能热能进一步加热并淡化, 此方法目前正处于研究阶段。

### 1.3.2 海冰水淡化

开展海冰资源综合利用研究是我国科研人员的首创。海冰含盐量较低, 海冰在经过处理后融化成海冰水, 全盐量为 1 000~3 000 mg/L。海冰水的盐分主要来自冰晶中包裹的海水<sup>[29]</sup>。海冰水淡化分为固体海冰淡化与液体海冰淡化。液体海冰淡化即海冰融化后利用脱盐装置处理, 方法与上述介绍水处理技术大致相同, 在此不作赘述。固体海冰淡化的主要原理是通过各种方法去除海冰包裹的海水。目前主要有 2 种方法, 颗粒化离心脱盐与控温重力脱盐。颗粒化离心脱盐是将海冰破碎, 破坏其中卤水胞结构, 再利用离心, 将海水分离。控温重力脱盐是控制温度, 将海冰轻微融化, 冰块中的缝隙扩大, 海水也随之流出<sup>[30]</sup>。

我国河北、天津等滨海盐碱耕地将海冰水作为灌溉水。冬季, 直接将海冰放在耕地上, 轻微融化时海冰中少量的高盐度海水先进入土壤, 完全融化时海冰水可以其起到淋洗效果, 降低土壤表层盐分<sup>[31]</sup>。海冰也可以在冬季存储起来, 在春季用海冰水灌溉。张化等<sup>[32]</sup>利用全盐量 3 000 mg/L 的海冰水灌溉, 种植一季后, 耕作层含盐量较之前变化不显著。与无灌溉处理对比, 海冰水灌溉油葵、甜高粱和紫花苜蓿产量分别增加 27.0%、31.3%、21.2%。

## 2 咸水淡化灌溉存在的问题

目前脱盐技术已经高度发展, 但仍存在一些问题有待解决, 如前端能源与装置等成本问题, 以及后端废水排放、土壤盐分积累等环境问题。

### 2.1 成本问题

处理咸水的成本包括许多方面, 以工厂化的反渗透淡化技术为例, 淡化水工厂的运行需要技术成本、装置成本、能源成本、人工成本与设备损耗等<sup>[33]</sup>。为延长设备使用寿命, 脱盐处理前需添加凝絮剂与助凝剂并过滤处理, 这些都提高了淡化水的成本<sup>[34]</sup>。目前, 淡化水成本约为 1~0.5 美元/ $\text{m}^3$ , 淡化海水需要 3~10 kWh/ $\text{m}^3$  的电力, 淡化微咸水需要 0.5~2.5 kWh/ $\text{m}^3$  的电力, 研发低能耗高效率的脱盐装置是有效降低淡化成本的方法<sup>[35]</sup>。使用其他能源可以降低能源成本, 如利用太阳能、风能、潮汐能等进行发电用于脱盐, 但是装置成本也相应提高<sup>[36]</sup>。

Villar-navascués 等<sup>[37]</sup>调查显示, 在西班牙东南地区的各个灌区淡化水占总用水比例不同, 有的灌区为 20%~30%, 最高可达 90%。大部分灌区通常采用淡化水混合咸水的方式灌溉。淡化水价格是阻碍淡化水推广使用的主要因素。2018 年之前, 淡化水价格为

0.47~0.80 欧元/m<sup>3</sup>，价格是井水的 6 倍。通过农业经济学模型分析，当灌溉水价格为 0.3 欧元/m<sup>3</sup>，绝大部分作物时可以实现盈利，但当价格超过 0.6 欧元/m<sup>3</sup>时，就几乎无法盈利。因此 2018 年当地政府开始提供补贴，将淡化水价格调整为 0.3 欧元/m<sup>3</sup>。海水淡化厂提供的淡化水电导率为 400~600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，依据作物耐盐能力不同，可能混合井水使电导率达到 800~1 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，并且农民更倾向于种植柑橘、葡萄等市场价格高、需水量较少的水果。

## 2.2 环境问题

### 2.2.1 卤水排放对环境的影响

淡化水产生的高盐度卤水排放污染问题一直是咸水淡化产业的难题。以色列的 Ashkelon 海水淡化厂，会排放超过 2 亿 m<sup>3</sup> 以上的卤水，其盐度达到 7.35%，是海水的 1.86 倍，对海洋环境影响较大<sup>[38]</sup>。此外卤水中含有大量悬浮颗粒、防垢剂、抗蚀剂和洗涤剂等化学物质，对海洋水体造成污染<sup>[39]</sup>。卤水的排放可能造成海底生态系统水柱底层缺氧<sup>[40]</sup>；卤水浊度影响海水透光性<sup>[41]</sup>；高盐度海水阻碍海草生长<sup>[42]</sup>；海胆与海参等海洋底栖生物减少<sup>[43]</sup>。目前，大部分卤水排放也只是通过进一步处理除去污染物与稀释降低盐度后排放<sup>[39]</sup>，卤水排放前进一步处理还有待研究。

为了避免卤水排放带来的环境问题，对卤水进一步处理，实现卤水零排放也有重要的经济与环境效益。目前卤水零排放技术主要有蒸发塘技术、膜-蒸发结晶技术和多效蒸发-蒸发结晶技术，以及由这 3 种技术进一步发展而来的其他技术<sup>[44]</sup>。

### 2.2.2 淡化水灌溉对土壤的影响

淡化水对土壤的影响需要基于灌溉水质与灌溉水量考虑。如果盐度超标或者显著高于当地水源，短期灌溉可能不会产生较大影响，如果长期灌溉会导致盐分在土壤积累。盐分积累的位置与单次灌水量有关。如果少量多次灌溉，盐分会在土壤表层累积直接影响作物生长。如果每次灌水量较大，土壤盐分将迁移至土壤深层，受作物蒸发及土壤蒸腾影响，盐分可能通过土壤毛细管迁移至表层，造成返盐现象，或者进一步下渗污染地下水<sup>[45]</sup>。为了减少盐分积累的伤害，在脱盐时需要尽可能将含盐量降至自然淡水水平，可以采用滴灌与调亏灌溉方式。滴灌可以节约灌水量，进而减少盐分迁入<sup>[46]</sup>。植物生长的不同阶段对水分的需求不同。调亏灌溉是在对水分要求不严格时期减少灌溉量使植物适应干旱，在对水分需求较高的时期增加灌溉量。微咸水调亏灌溉一方面可以减少盐分随灌溉水进入土壤，另一方面在水分敏感期可以利用灌溉淋洗，减少土壤表层盐分积累<sup>[47]</sup>。

在反渗透技术处理过程中，水中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的损失将导致水的缓冲能力下降，对土壤 pH 值有一定影响，因此淡化水还需要经过矿化处理才可使用<sup>[48]</sup>。脱盐技术虽然可以除去咸水中 Na<sup>+</sup>，同时也会除去 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>。土壤颗粒团聚体是土壤的基本组成单位，Na<sup>+</sup>比例升高，土壤离子交换量随之增加，使大团聚体解构，透气性与透水性降低。这种情况下需要施加生物炭、石膏等土壤改良剂改良土壤<sup>[49]</sup>。

## 3 总结与展望

淡化咸水的目的是为了改善水质，使其水质能符合灌溉水标准，在补充淡水灌溉的同时，降低其对作物与土壤的伤害。淡化水灌溉是当前面临水资源短缺与沿海地区灌溉农业的解决方案之一。在一些淡水资源缺乏的国家和地区，已经使用了脱盐技术淡化咸水用于灌溉并取得一定成效。

目前，常用的脱盐技术有反渗透、纳滤、电渗析与电容去离子等技术，其中反渗透技术是目前应用范围最广的脱盐技术。评价一种脱盐技术是否适用于农业灌溉，还应当基于其生产出的淡化水是否符合灌溉水质指标。盐度是最重要的指标，盐分会在土壤中累积对作物造成危害，而钠吸附比的影响也是基于盐度，因此脱盐技术需要尽可能脱去水中 Na<sup>+</sup>，保留水中 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>。此外咸水中的氯与硼也会对作物造成伤害，应尽可能除去。限制脱盐技术推广的因素主要有成本问题与环境问题。如果装置成本与能源成本能进一步降低，并减少对环境影响，将进一步推动淡化咸水灌溉，更低能耗、更高效、更适用于农业灌溉的脱盐技术也有待研发。

在淡化水生产方面，开发适用于农业灌溉的脱盐系统有待进一步研究。目前已有的淡化水厂所提供的淡化水主要是供给居民生活用水与工业生产用水，对水质要求严格。而灌溉用水可以适当降低对水质的要求<sup>[48]</sup>，以降低成本。其次是淡化水的生产能力与不同时期灌溉水需求不匹配。作物不同生育期以及季节、气候的变化，都会引起作物需水量的变化，因此可以依据作物的需水量调控淡化水生产<sup>[37]</sup>，以节约产能。

在淡化水应用方面，耐盐、耐旱作物品种培育以及节水灌溉模式开发有待进一步研究。培育耐盐、耐旱的作物品种可以降低作物对水质与水量的需求，降低灌溉成本。开发节水灌溉模式，如调亏灌溉、滴灌等，可以节约淡化水的使用<sup>[46]</sup>。以色列之所以能够推广大面积的淡化水灌溉，很大程度上得益于长期发展的精细农业<sup>[11]</sup>，其滴灌装置甚至可以减少 70% 的用水量<sup>[50]</sup>。

综上，淡化咸水灌溉需要综合考虑水-作物-土壤

三者关系，需要尽可能降低水处理成本，节约淡化水的使用，减轻对作物和环境的影响，以期取得更高的经济效益与环境效益。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

#### 参考文献：

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [2] LAHAV O, KOCHVA M, TARCHITZKY J. Potential drawbacks associated with agricultural irrigation with treated wastewaters from desalinated water origin and possible remedies[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 61(10): 2 451-2 460.
- [3] YERMIYAHU U, TAL A, BEN-GAL A, et al. Rethinking desalinated water quality and agriculture[J]. *Science*, 2007, 318(5852): 920-921.
- [4] PALOMAR P, LOSADA I J. Desalination in Spain: Recent developments and recommendations[J]. *Desalination*, 2010, 255(1/2/3): 97-106.
- [5] LIBUTTI A, GATTA G, GAGLIARDI A, et al. Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 196: 1-14.
- [6] 自然资源部海洋战略规划与经济司. 全国海水利用报告[R]. 北京: 自然资源部, 2021.
- [7] 王湛, 王志, 高学理, 等. 膜分离技术基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [8] CONG V H. Desalination of brackish water for agriculture: Challenges and future perspectives for seawater intrusion areas in Vietnam[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2018, 67(3): 211-217.
- [9] QUIST-JENSEN C A, MACEDONIO F, DRIOLI E. Membrane technology for water production in agriculture: Desalination and wastewater reuse[J]. *Desalination*, 2015, 364: 17-32.
- [10] SHEMER H, SEMIAT R. Sustainable RO desalination-Energy demand and environmental impact[J]. *Desalination*, 2017, 424: 10-16.
- [11] 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.
- [12] BARRON O, ALI R, HODGSON G, et al. Feasibility assessment of desalination application in Australian traditional agriculture[J]. *Desalination*, 2015, 364: 33-45.
- [13] SILBER A, ISRAELI Y, ELINGOLD I, et al. Irrigation with desalinated water: A step toward increasing water saving and crop yields[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(1): 450-464.
- [14] ANTOLINOS V, SÁNCHEZ-MARTÍNEZ M J, MAESTRE-VALERO J F, et al. Effects of irrigation with desalinated seawater and hydroponic system on tomato quality[J]. *Water*, 2020, 12(2): 518.
- [15] RAHIMI B, AFZALI M, FARHADI F, et al. Reverse osmosis desalination for irrigation in a pistachio orchard[J]. *Desalination*, 2021, 516: 115 236.
- [16] 王晓丽, 马世贤, 王生辉, 等. 反渗透在盐碱地改良淋洗水处理工程中的应用[J]. *水处理技术*, 2022, 48(1): 147-149, 156.
- [17] GHERMANDI A, MESSALEM R. The advantages of NF desalination of brackish water for sustainable irrigation: The case of the Arava Valley in Israel[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2009, 10(1/2/3): 101-107.
- [18] LEW B, TARNAPOLSKI O, AFGIN Y, et al. Irrigation with permeates to upgrade the quality of red pepper: A case study in Arava Region, Israel[J]. *Environmental Technology*, 2022, 43(2): 264-274.
- [19] DEHESA-CARRASCO U, RAMÍREZ-LUNA J J, CALDERÓN-MÓLGORA C, et al. Experimental evaluation of a low pressure desalination system (NF-PV), without battery support, for application in sustainable agriculture in rural areas[J]. *Water Supply*, 2017, 17(2): 579-587.
- [20] COHEN B, LAZAROVITCH N, GILRON J. Upgrading groundwater for irrigation using monovalent selective electro dialysis[J]. *Desalination*, 2018, 431: 126-139.
- [21] AHDAB Y D, REHMAN D, LIENHARD J H. Brackish water desalination for greenhouses: Improving groundwater quality for irrigation using monovalent selective electro dialysis reversal[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 610: 118 072.
- [22] LI B, ZHENG T Y, RAN S J, et al. Performance recovery in degraded carbon-based electrodes for capacitive deionization[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(3): 1 848-1 856.
- [23] WANG L, DYKSTRA J E, LIN S H. Energy efficiency of capacitive deionization[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(7): 3 366-3 378.
- [24] BALES C, KOVALSKY P, FLETCHER J, et al. Low cost desalination of brackish groundwaters by Capacitive Deionization (CDI)-Implications for irrigated agriculture[J]. *Desalination*, 2019, 453: 37-53.
- [25] BALES C, LIAN B Y, FLETCHER J, et al. Site specific assessment of the viability of membrane Capacitive Deionization (mCDI) in desalination of brackish groundwaters for selected crop watering[J]. *Desalination*, 2021, 502: 114 913.
- [26] 李蛟, 刘俊成, 高从堦, 等. 太阳能在海水淡化产业中的应用与研究进展[J]. *水处理技术*, 2009, 35(10): 11-15.
- [27] RABHY O O, ADAM I G, ELSAYED YOUSSEF M, et al. Numerical and experimental analyses of a transparent solar distiller for an agricultural greenhouse[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113 564.
- [28] FANG S B, TU W R, MU L, et al. Saline alkali water desalination project in Southern Xinjiang of China: A review of desalination planning, desalination schemes and economic analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109 268.
- [29] 史培军, 顾卫, 王静爱, 等. 海冰资源淡化研究与利用技术开发[J]. *资源科学*, 2010, 32(3): 394-404.
- [30] 张岩, 赵同国, 任方云, 等. 冷冻法海水淡化技术研究进展[J]. *水处理技术*, 2022, 48(5): 7-11.
- [31] 王静爱, 苏筠, 刘目兴. 渤海海冰作为淡水资源的开发利用与区域可持续发展[J]. *北京师范大学学报(社会科学版)*, 2003(3): 85-92.
- [32] 张化, 张峰, 岳耀杰, 等. 环渤海地区海冰水资源农业利用研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(S1): 321-324, 394.
- [33] GARCIA C, MOLINA F, ZARZO D. 7 year operation of a BWRO plant with raw water from a coastal aquifer for agricultural irrigation[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 31(1/2/3): 331-338.
- [34] TRAN T, HOANG M, DUONG T, et al. Improving pollutant removal and membrane performance via pre-treatment with a specific formulation of polysilicato-iron[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 34(1/2/3): 106-111.
- [35] GHAFFOUR N, MISSIMER T M, AMY G L. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability[J]. *Desalination*, 2013, 309: 197-207.
- [36] AL-KARAGHOULI A, RENNE D, KAZMERSKI L L. Technical and economic assessment of photovoltaic-driven desalination systems[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(2): 323-328.
- [37] VILLAR-NAVASCUÉS R, RICART S, GIL-GUIRADO S, et al. Why (not) desalination? exploring driving factors from irrigation communities' perception in South-East Spain[J]. *Water*, 2020, 12(9): 2 408.
- [38] EINAV R, LOKIEC F. Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon[J]. *Desalination*, 2003, 156(1/2/3): 79-85.
- [39] MAUGUIN G, CORSIN P. Concentrate and other waste disposals from

- SWRO plants: Characterization and reduction of their environmental impact[J]. *Desalination*, 2005, 182(1/2/3): 355-364.
- [40] GACIA E, INVERS O, MANZANERA M, et al. Impact of the brine from a desalination plant on a shallow seagrass (*Posidonia oceanica*) meadow[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 72(4): 579-590.
- [41] SABINE L, THOMAS H. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination[J]. *Desalination*, 2008, 202, 1-15.
- [42] SÁNCHEZ-LIZASO J L, ROMERO J, RUIZ J, et al. Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: Recommendations to minimize the impact of brine discharges from desalination plants[J]. *Desalination*, 2008, 221(1/2/3): 602-607.
- [43] CASADO-MARTÍNEZ M C. Interlaboratory assessment of marine bioassays to evaluate the environmental quality of coastal sediments in Spain. III. Bioassay using embryos of the sea urchin *Paracentrotus lividus*[J]. *Ciencias Marinas*, 2006, 32(1B): 139-147.
- [44] 马学虎, 郝婷婷, 兰忠, 等. 浓盐水零排放技术研究进展[J]. *水处理技术*, 2015, 41(10): 31-41.
- [45] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区不同地类盐分迁移估算及与地下水埋深的关系[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 255-269.
- [46] ORON G, CAMPOS C, GILLERMAN L, et al. Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 38(3): 223-234.
- [47] OUDA S, NORELDIN T. Deficit irrigation and water conservation[M]. *Deficit Irrigation*. Cham: Springer International Publishing, 2020: 15-27.
- [48] MARTÍNEZ-ALVAREZ V, MARTIN-GORRIZ B, SOTO-GARCÍA M. Seawater desalination for crop irrigation: A review of current experiences and revealed key issues[J]. *Desalination*, 2016, 381: 58-70.
- [49] LAHAV O, SALOMONS E, OSTFELD A. Chemical stability of inline blends of desalinated, surface and ground waters: The need for higher alkalinity values in desalinated water[J]. *Desalination*, 2009, 239(1/2/3): 334-345.
- [50] GIRMA M, JEMAL A. Irrigation system in Israel: A review[J]. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 2015, 7(3): 29-37.

## Application and Prospect of Desalination Technology in Agricultural Irrigation

HUANG Qianhao<sup>1,2,3</sup>, LI Bei<sup>1,2,3</sup>, CHEN Shaozhou<sup>1,2,3</sup>, GAO Xiaojing<sup>1,2,3</sup>,  
DU Fengfeng<sup>1,2,3</sup>, LIU Xiaojing<sup>1,2,3\*</sup>, YAO Dongrui<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen, Nanjing 210014, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Nanjing 210014, China; 3. Jiangsu Engineering Research Center of Aquatic Plant Resources and Water Environment Remediation, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In order to get more irrigation water and to reduce the impact of salt on plants and soil, people have used desalination technology to produce freshwater in some areas. This paper focused on the application of desalination technology in agricultural irrigation, summarized and reviewed the application scenarios and treatment effects of various types of technology in agriculture. At present, desalinated water irrigation technology has been widely used in Israel, Spain, Australia and other countries. Reverse osmosis technology was the most widely used desalination technology for agriculture. Electrosorption technology was considered to be the key technology for realizing low-consumption desalination water. Solar energy distillation and sea-ice water desalination could desalinate brackish water according to local conditions. The application of desalination technology has advantages of improving crop yield and protecting soil, but also has limitations in terms of environmental pollution and high cost. At the end, the agricultural application prospect and development direction of desalination technology were concluded. This study provides reference for the development of water desalination technology in agricultural irrigation in China.

**Key words:** saltwater desalination; agricultural irrigation; membrane technology; electrosorption technology

责任编辑: 白芳芳