

微咸水与再生水混灌对作物生理特性的影响

刘春成^{1,2,3}, 崔丙健^{1,3}, 胡超^{1,3}, 吴海卿^{1,3}, 马欢欢^{1,2}, 崔二革^{1,3},
马天^{1,2}, 刘源^{1,3}, 李中阳^{1,3}, 樊向阳^{1,3}, 李浩¹, 高峰^{1,3}

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南 新乡 453002;2.中国农业科学院研究生院,北京 100081;

3.中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站,农业水资源高效安全利用重点开放实验室,河南 新乡 453000)

摘要: 为了探讨淡水资源匮乏地区微咸水与再生水的安全合理利用,通过盆栽上海青试验,以清水灌溉为对照,设置再生水灌溉(T1)、微咸水—再生水 1:2 灌溉(T2)、微咸水—再生水 1:1 灌溉(T3)、微咸水灌溉(T4)4 种灌溉方式,研究了不同比例微咸水与再生水混合灌溉对土壤水盐、作物生物量(地上部和地下部)、叶片叶绿素含量、可溶性蛋白含量、丙二醛(MDA)含量、过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性的影响。结果表明:(1)上海青收获后,不同比例微咸水与再生水混合灌溉处理土壤含水率和含盐量较清水灌溉(CK)均有所升高,其中 T1、T2、T3 处理土壤含水率与 CK 差异不显著,T4 处理土壤含水率较 CK 差异显著($P<0.05$),而各处理土壤含盐量与 CK 均差异显著;与 T1 处理相比,随着灌溉水中微咸水比重的升高,土壤含水率逐渐升高,且至 T4 处理时差异显著。(2)微咸水与再生水混灌对上海青地上部鲜重有一定影响,而对地上部干重以及地下部生物量无显著影响。与 T1 相比,T2、T3、T4 处理上海青地上部鲜重均显著降低($P<0.05$),降幅为 24.78%~26.36%,地上部干重亦均降低,但差异不显著,降幅为 19.14%~24.54%,地下部鲜重和干重无显著性变化。(3)微咸水与再生水混灌对上海青生理指标(叶绿素含量、可溶性蛋白含量、MDA 含量、POD 活性、CAT 活性)没有显著影响,对 SOD 活性具有显著的提升作用。与 T1 相比,T2、T3、T4 处理叶绿素 a 含量分别降低 4.98%,3.82%和 9.26%,叶绿素 b 含量分别降低 10.88%,8.20%和 13.46%,叶绿素总量分别降低 9.76%,6.12%和 10.15%,CAT 活性分别提高 8.51%,8.51%和 -19.15%,POD 活性分别提高 1.92%,17.24%和 -2.87%,SOD 活性分别提高 104.07%,62.20%和 41.67%。随着混合液中微咸水比重的升高,上海青可溶性蛋白含量先降低后升高,MDA 含量先升高后降低。(4)基于第二代综合生物响应指数(integrated biological response version 2,IBR_{v2}),综合考虑土壤水盐、作物生理指标以及再生水资源本身的局限性,在淡水资源匮乏地区利用微咸水灌溉时,可以考虑用再生水作为替代清水水源与微咸水配合使用,微咸水—再生水混灌比例以 1:1 为宜。研究结果可为淡水不足地区利用微咸水(3 g/L)灌溉提供参考。

关键词: 微咸水;再生水;混灌;矿化度;生物量;酶活性

中图分类号: S154.3; S155.4⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)04-0327-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.045

Mixed Irrigation of Brackish Water and Reclaimed Water Affects Crop Physiological Characteristics

LIU Chuncheng^{1,2,3}, CUI Bingjian^{1,3}, HU Chao^{1,3}, WU Haiqing^{1,3}, MA Huanhuan^{1,2}, CUI Erping^{1,3},
MA Tian^{1,2}, LIU Yuan^{1,3}, LI Zhongyang^{1,3}, FAN Xiangyang^{1,3}, LI Hao¹, GAO Feng^{1,3}

(1.Institute of Farmland and Irrigation, CAAS, Xinxiang, Henan 453002;

2.School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3.Agriculture Water

and Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang City of Henan Province, Key

Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources of CAAS, Xinxiang, Henan 453000)

Abstract: It is an effective way to alleviate the scarcity of fresh water resources to use unconventional water resources. In areas rich in brackish water, the freshwater resources are generally inadequate, but there are abundant reclaimed water resources. In order to explore the reasonable utilization of brackish water and reclaimed water in areas where freshwater was scarce, by using Shanghai green pot experiment, this research

收稿日期: 2021-01-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403503-2,2017YFC0403302-1);河南省重点研发与推广专项(202102110264,202102110279);
河南省自然科学基金项目(202300410552);中央级科研院所基本科研业务费专项(FIRI202001-02,FIRI202002-03,FIRI20210302)

第一作者: 刘春成(1986—),男,安徽界首人,助理研究员,博士研究生,主要从事非常规水资源安全利用研究。E-mail: liuchuncheng986@sohu.com
通信作者: 高峰(1963—),男,河南驻马店人,研究员,博士,博士生导师,主要从事非常规水资源安全利用研究。E-mail: gfyx@sina.com

studied the soil salt-water dynamics, crop biomass including aboveground biomass and underground biomass, and crop physiological characteristics such as chlorophyll content of leaves, soluble protein content, malondialdehyde (MDA) content, activities of catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), and peroxidase (POD) under mixed irrigation of brackish water and reclaimed water at different ratios. There were four treatments, including reclaimed water irrigation (T1), mixed irrigation of brackish water and reclaimed water at 1 : 2 (T2), mixed irrigation of brackish water and reclaimed water at 1 : 1 (T3) and brackish water irrigation (T4), taking the fresh water irrigation (CK) as control. The saline degree of brackish water was 3 g/L. The results indicated that: (1) Both soil water content and soil salt content were improved under different mixed irrigation compared with CK, among which, the difference of soil water content under T4 and CK reached a significant level ($P < 0.05$), and no difference between T1, T2, T3 and CK. While, soil salt contents in all mixed irrigation treatments had significant differences with CK. Compared with T1, soil water content and soil salt content (except T2 and T3) gradually increased significantly with the increase of brackish water proportion in the mixed solution. (2) Mixed irrigation with brackish water and reclaimed water affected aboveground fresh weight of crop while mixed irrigation had no obvious effects on aboveground dry weight and underground biomass. Compared with T1, aboveground fresh weights under T2, T3, and T4 decreased by 24.78% to 26.36% significantly, aboveground dry weights reduced by 19.14% to 24.54% insignificantly, and the fresh and dry weight of underground changed slightly. (3) Mixed irrigation with brackish water and reclaimed water promoted the activity of SOD significantly, but had no obvious effects on crop physiological characteristics including chlorophyll content, soluble protein content, MDA content, POD activity and CAT activity. Compared with T1, chlorophyll-a content decreased by 4.98%, 3.82% and 9.26%, chlorophyll-b content reduced by 10.88%, 8.20% and 13.46%, total chlorophyll content decreased by 9.76%, 6.12% and 10.15%, CAT activity improved by 8.51%, 8.51% and -19.15%, POD activity increased by 1.92%, 17.24% and -2.87%, and SOD activity improved by 104.07%, 62.20% and 41.67% respectively under T2, T3 and T4. The soluble protein content decreased first and then increased while MDA content increased first and then decreased with the increase of brackish water proportion in mixed solution. Therefore, considering soil water-salt dynamic, crop physiological characteristics and the limits of reclaimed water, it could be used as an alternative source of fresh water to mix with brackish water (3 g/L), the suitable mixed proportion would be 1 : 1 based on the integrated biological response version 2 (IBR_{v2}). The research results could provide the reference for the utilization of brackish water in the areas where fresh water is short.

Keywords: brackish water; reclaimed water; mixed irrigation; salinity; biomass; enzyme activity

我国水资源十分短缺,而且时空分布不均,其中农业用水占总用水量的 60% 以上,我国水资源时空分布与耕地资源的不匹配性使北方地区农业用水难以得到满足,严重制约了农业的可持续发展。非常规水资源作为一种替代资源,合理利用可以用来灌溉农业,缓解淡水资源不足的压力,因此非常规水资源的安全开发利用引起了国家的重视。2017 年水利部文件《水利部关于非常规水源纳入水资源统一配置的指导意见》^[1]明确指出,将再生水、微咸水等非常规水源纳入水资源统一配置。我国再生水等非常规水资源丰富,2015 年再生水农田灌水量为 $1.101 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[2]。根据九部委联合发布的《全民节水行动》^[3],要求到 2020 年缺水城市再生水利用率达到 20% 以上,京津冀区域达到 30% 以上,这远低于国外一些国家再生水利用率(达 70% 以上)。微咸水灌溉地区灌

溉水含盐量是制约作物产量的主要因素,利用再生水代替淡水与微咸水进行混灌或轮灌既可以缓解农业水资源不足的压力,又可以提高微咸水灌溉地区作物产量及改善土壤积盐等问题^[4-5]。

近年来,国内外对再生水和微咸水进行了大量研究。再生水利用研究主要涉及再生水灌溉对作物生长及品质和土壤环境的影响^[6]、再生水灌溉对土壤微生物群落结构的影响^[7]、再生水灌溉对地下水的影响^[8]、再生水适宜灌水技术^[9]等。微咸水利用主要从微咸水矿化度、灌溉土壤质地、适宜作物以及田间管理等方面进行了大量的实践研究,并逐步形成了较为完整的技术体系。在一定范围内,微咸水灌溉可刺激作物的生长、不显著减产或提高产量^[10],同时也可以提高水分利用效率^[11]。短期微咸水灌溉对土壤化学性质和土壤盐渍化无明显影响,而长期微咸水灌溉可

能引起土壤盐渍化,但也有学者^[12]认为可以提高籽粒蛋白含量;此外,微咸水灌溉可能产生土壤斥水性^[13]。营养生长阶段灌溉淡水(1.2 dS/m)可以提高潜在产量,生殖阶段灌溉 7 dS/m 咸水可以提高果实品质,同时全生育期也可以使用中度微咸水(<4.5 dS/m)灌溉^[14]。HYDRUS 模拟结果^[15]表明,与非均质土壤相比,华北地区连续 20 年微咸水(3 g/L)灌溉小麦和玉米相对更适宜均质土壤。然而,目前微咸水和再生水灌溉研究多是单独研究微咸水灌溉或是再生水灌溉对土壤性质、作物生长发育以及适宜作物类型等方面,二者组合灌溉相关方面的研究鲜见报道。从土壤含盐量角度考虑,再生水中的盐分相比咸水或微咸水而言较低,用再生水灌溉能够起到淋洗盐分的作用,但微咸水与再生水结合使用是否具有趋利避害、提升水质的效果,是否可以相互稀释进而降低微咸水矿化度和再生水有害物质浓度,以及二者混合是否会产生沉淀或通过络合反应固定土壤或再生水中重金属进而降低有害物质对作物的影响等,有必要进行深入研究探讨。上海青,又名小白菜、青菜等,是国内外栽培的主要速生菜,味道鲜美,营养丰富,素有“菜中之王”的美称。50,100 mmol/L 的 NaCl 处理对幼苗期小白菜的地上部鲜重、根鲜重、植株鲜重均无显著影响,而成株期 NaCl 处理小白菜产量反而有所提高^[16]。为此,本研究通过盆栽试验,设置不同微咸水与再生水混合比例,探索微咸水与再生水混合灌溉对上海青生理指标的影响,以期对微咸水灌溉地区再生水的安全利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自河南省新乡市七里营试验基地大田耕层 0—20 cm,土壤经风干、碾碎、过筛(2 mm)后备用。土壤容重为 1.40 g/cm³,土壤田间质量持水率为 23.02%,1:5 土水比土壤浸提液电导率为 372 μ S/cm,

表 1 再生水、微咸水、清水水质

用水类型	EC/ (μ S·cm ⁻¹)	钠吸附比 SAR	离子含量/(mg·L ⁻¹)							
			Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
清水	321	0.34	10	1.6	39	15	30	120	104	—
再生水	2120	5.82	310	13.9	91	74	314	278	507	—
微咸水	6100	43.30	1330	2.1	43	17	1921	142	92	—

1.3 测定指标与方法

(1)土壤水盐含量。收获(6月28日)后取土样,采用烘干法测定土壤含水率;同时对土壤样品风干、磨碎、过筛(2 mm),采用电导率仪测定土水比 1:5 土壤浸提液电导率 EC_{1:5}。

(2)作物生长指标。收获(6月28日)后,将地上部、地下部分开后,用蒸馏水冲洗干净并晾干,用天平

有机质质量分数为 2.66%。采用 BT—9300HT 型激光粒度仪对土样颗粒分析,黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和砂粒(0.02~2 mm)占比分别为 13.05%,62.46%和 24.49%,土壤质地属于粉壤土(国际制)。

1.2 试验装置与方案

试验于 2020 年 5—6 月在中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站温室大棚进行。该站地处北纬 35.27°,东经 113.93°,海拔 73.2 m,年均气温为 14.1 °C,多年平均降水量和蒸发量分别为 588,2 000 mm,无霜期为 210 天,多年平均日照时间为 2 398 h。

试验采用盆栽试验,供试用盆的规格为上口径 25 cm,下口径 14.5 cm,高 19 cm。每盆装土 7 kg,所有处理均施复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15),且全部作为基肥施入,施肥量为 1 g/kg(参考当地常规施肥量,按照土层 20 cm 厚进行换算为盆栽施肥量)。供试作物为“绿秀青梗菜”(Pakchoi,俗称上海青),播种前所有处理均灌清水造墒。于 2020 年 5 月 27 日播种,每盆均匀撒播,待 2 叶 1 心时(6 月 11 日)每盆定植 5 棵幼苗,并开始不同水源灌水处理,每次灌水量为 400 mL(灌水下限为田间持水率的 75%),前期约每隔 1 天灌 1 次,后期随着作物需水量的增大平均每天灌 1 次水,灌水量为 400 mL。试验中微咸水与再生水混合比例设 4 个水平,即再生水、微咸水—再生水 1:2、微咸水—再生水 1:1、微咸水,分别记为 T1、T2、T3、T4 处理,并以清水灌溉为对照(CK),微咸水矿化度为 3 g/L。微咸水、再生水水质情况见表 1。试验用再生水取自河南省新乡市骆驼湾生活污水处理厂,该污水处理厂采用的工艺为 A/O 处理,污水处理后水质符合《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)^[17],清水取自当地地下水,微咸水通过向清水里面添加海盐进行配制。

称量计算地上部和地下部鲜质量,然后 105 °C 杀青 15 min 后于 75 °C 烘至恒重,用天平称量计算地上部和地下部干质量。

(3)作物生理指标。收获后,于 6 月 29—30 日采用植物叶绿素含量检测试剂盒(索莱宝,北京)测定植物叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量;采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量;采用紫外吸收法测定植

物 CAT 活性, 氮蓝四唑光化还原法测定植物超氧化物歧化酶(SOD)活性, 愈创木酚法测定植物过氧化物酶(POD)活性, 采用硫代巴比妥酸法测定植物丙二醛(MDA)含量。

(4) 第二代综合生物响应指数(integrated biological response version 2, IBR_{v2})的计算。根据相关性分析结果, 选出相关性强的影响因素, 计算 IBR_{v2}, 其值越大, 表示偏差越大。

$$IBR_{v2} = \sum_{i=1}^n |A_i| \quad (1)$$

$$A_i = \left[\frac{\log \frac{x_i}{x_0} - \mu}{\sigma} \right] - Z_0 \quad (2)$$

式中: A_i 为每个指标相对于对照的偏离指数, $A_i > 0$ 或 $A_i < 0$ 时, 分别表示指标被诱导或受到抑制; x_i 为每个指标的测定值; x_0 为对照参考值; σ 、 μ 为某因素对数标准化值所在处理组中的总平均值和标准差; Z_0 位对照组标准化后的均一化值。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 软件整理试验数据, SPSS 25.0 软件进行单变量方差分析, 采用最小显著差异法(least significant difference method, LSD)进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 微咸水与再生水混灌对土壤水盐的影响

土壤水是土壤内部物理、化学和生物过程不可缺少的介质, 是土壤肥力的重要因素, 也是作物吸收水分的主要来源。土壤中的盐分, 特别是易溶盐的含量很大程度上影响土壤的物理特性和水力性能。土壤含盐量是土壤盐分状况的主要参数, 也是土壤盐渍化的主要指标。而土壤含盐量与土壤浸提液 $EC_{1:5}$ 高度正相关, 土壤浸提液 $EC_{1:5}$ 测定简单易行, 一般常用土壤浸提液 $EC_{1:5}$ 表征土壤含盐量。上海青收获后, 不同微咸水与再生水混灌处理土壤含水率和电导率的变化情况见表 2。

表 2 上海青收获后不同处理下土壤水盐变化

处理	土壤质量含水率/%	$EC_{1:5}/(\mu S \cdot cm^{-1})$
CK	11.94±0.87b	427.67±61.74d
T1	13.17±0.91b	846.86±35.15c
T2	14.47±2.00b	947.22±34.41bc
T3	16.38±1.54ab	1043.16±28.49b
T4	18.93±2.19a	1198.51±65.39a

注: 表中数据为平均值±标准差; 同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

从表 2 可以看出: (1) 对于土壤含水率而言, 不同处理灌溉上海青后, 较清水灌溉(CK)相比, 再生水灌溉(T1)后土壤含水率略有升高, 增幅为 10.30%, 但

差异不显著。随着混合液中微咸水比重的提高, 土壤含水率逐渐升高, 其中微咸水—再生水 1:2 灌溉(T3)、微咸水—再生水 1:1 灌溉(T2)、再生水灌溉(T1)与 CK 间土壤含水率差异不显著, 但至纯微咸水灌溉(T4)时土壤含水率较 CK 显著提高 58.54% ($P < 0.05$)。可见, 随着混合液中微咸水比重的提高, 作物对水分的吸收受到一定的限制。

(2) 对于土壤含盐量而言, 上海青收获后不同比例微咸水与再生水混合灌溉处理土壤 $EC_{1:5}$ 均显著高于 CK, 且处理间差异显著($P < 0.05$)。可见, 随着微咸水与再生水混合液中微咸水比重的提升, 土壤盐分越高, 主要是由于灌溉水中的盐分含量决定的。这与土壤含水率的变化规律相吻合, 因为盐分越高, 对作物吸收水分的限制作用越强, 留在土壤中的水分越多。

2.2 微咸水与再生水混灌对上海青生物量的影响

植株生物量是时段内植物积累物质的数量, 一般分为地上部和地下部两部分。生物量对生态系统结构和功能的形成具有十分重要的作用。不同微咸水与再生水混灌后上海青地上部和地下部生物量(鲜重和干重)的变化见表 3。

表 3 不同微咸水与再生水混灌下上海青生物量的变化
单位: g/株

处理	地上部		地下部	
	鲜重	干重	鲜重	干重
CK	36.18±5.74a	2.84±0.37a	0.83±0.06a	0.10±0.05a
T1	36.00±4.29a	3.00±0.51a	0.79±0.11a	0.12±0.01a
T2	26.65±1.57b	2.42±0.43a	0.77±0.08a	0.11±0.01a
T3	27.08±1.35b	2.34±0.14a	0.81±0.05a	0.12±0.01a
T4	26.51±6.25b	2.26±0.55a	0.79±0.21a	0.11±0.04a

从表 3 可以看出: (1) 对于上海青地上部而言, 较清水灌溉(CK)相比, 再生水灌溉(T1)上海青鲜重降低 0.50%, 干重升高 5.64%, 但均无显著性差异, 说明再生水灌溉不会明显降低作物产量。此外, 总体上, 微咸水—再生水混合液中微咸水占比越高, 地上部生物量(鲜重和干重)越低; 与再生水灌溉(T1)相比, 微咸水—再生水混合灌溉(T2、T3)和微咸水灌溉(T4)处理上海青鲜重均显著降低($P < 0.05$), 降幅为 24.78%~26.36%, 干重亦均降低, 但差异不显著, 降幅为 19.14%~24.54%。说明随着混合液中微咸水比重的升高, 作物对水分的吸收作用越弱, 相同灌水量与蒸发条件下土壤水分越高, 这与土壤含水率的变化规律相吻合。可见, 微咸水与再生水混灌由于抑制作物对水分的吸收, 进而对上海青地上部鲜重有一定影响, 而对干重无显著影响。

(2) 对于上海青地下部而言, 较清水灌溉(CK)相比, 再生水灌溉(T1)处理鲜重降低 4.80%, 干重提高 17.14%, 但均无显著差异($P > 0.05$), 且随着微咸

水—再生水混合液中微咸水比重的升高,鲜重和干重亦无显著差异。可见,微咸水与再生水混灌对上海青地下部生物量无显著影响。

2.3 微咸水与再生水混灌对上海青生理指标的影响

2.3.1 叶绿素 植物叶绿素广泛存在于绿色植物组织中,是光合作用的细胞器,其含量与光合作用、营养状况密切相关,是反映植物生长状况的重要指标。高等植物叶绿体中的叶绿素主要有叶绿素 a 和叶绿素 b。不同比例微咸水与再生水混灌后上海青叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量的变化情况见图 1。

从图 1 可以看出,叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量处理间均差异不显著,且其变化趋势一致,即再生水灌溉(T1)处理较清水灌溉(CK)分别略高 9.47%,5.61%和 4.47%。与再生水灌溉(T1)相比,微咸水—再生水 1:2 灌溉(T2)、微咸水—再生水 1:1 灌溉(T3)和微咸水灌溉(T4)处理叶绿素 a 含量分别降低 4.98%,3.82%和 9.26%,叶绿素 b 含量分别降低 10.88%,8.20%和 13.46%,叶绿素总量分别

降低 9.76%,6.12%和 10.15%。可见,微咸水—再生水混灌处理对上海青叶绿素含量没有显著影响。

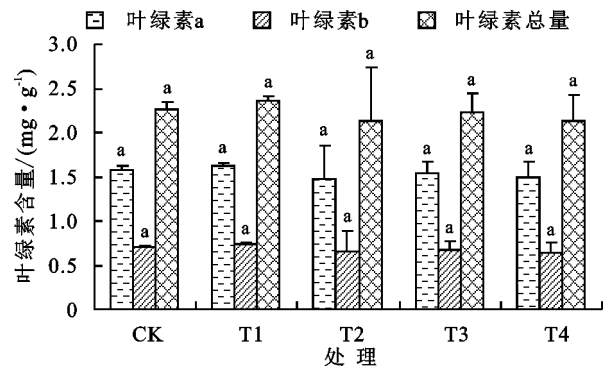


图 1 微咸水与再生水混灌后上海青叶绿素含量的变化

2.3.2 可溶性蛋白含量 可溶性蛋白是一个重要的生理生化指标,是重要的渗透调节物质和营养物质,其在植物体中增加和积累可提高细胞的保水能力,对细胞的生命物质及生物膜起到保护作用,因此经常用作筛选抗性的指标之一。不同比例微咸水与再生水混灌后上海青可溶性蛋白含量的变化情况见表 4。

表 4 微咸水与再生水混灌下上海青生理指标

处理	可溶性蛋白含量/ (mg·g ⁻¹)	MDA 含量/ (μg ⁻¹ ·g ⁻¹)	CAT 活性/ (U·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	SOD 活性/ (U·g ⁻¹)	POD 活性/ (U·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	IBR _{v2}
CK	155.879±7.872a	0.0265±0.0001a	1.840±0.923a	211.069±88.885b	3.484±1.202a	0
T1	154.504±8.918a	0.0263±0.0037a	1.253±0.257ab	163.795±36.710b	4.640±0.828a	5.62
T2	141.716±10.733a	0.0270±0.0067a	1.360±0.240ab	334.249±29.667a	4.729±0.920a	9.00
T3	148.588±10.297a	0.0240±0.0048a	1.360±0.212ab	265.668±66.618ab	5.440±3.422a	8.96
T4	155.421±11.306a	0.0235±0.0035a	1.013±0.046b	232.043±12.488b	4.507±1.957a	11.35

从表 4 可以看出,总体上不同处理间上海青可溶性蛋白含量无显著性差异($P>0.05$)。与清水灌溉(CK)相比,再生水灌溉(T1)处理上海青可溶性蛋白含量略微降低 0.88%。与再生水灌溉(T1)相比,随着混合液中微咸水比重的升高,上海青可溶性蛋白含量先降低后升高。可见,微咸水—再生水混灌处理对上海青可溶性蛋白含量没有显著影响。

2.3.3 丙二醛(MDA)含量 丙二醛(MDA)是膜脂过氧化最重要的产物之一,它的产生能加剧膜的损伤,在植物衰老生理和抗性生理研究中 MDA 含量是一个常用指标,可通过 MDA 了解膜脂过氧化的程度,以间接测定膜系统受损程度以及植物的抗逆性。不同比例微咸水与再生水混灌后上海青 MDA 含量的变化情况见表 4。

从表 4 可以看出,总体上不同处理间上海青 MDA 含量无显著性差异($P>0.05$)。与清水灌溉(CK)相比,再生水灌溉(T1)处理上海青 MDA 含量略微降低 0.62%。与再生水灌溉(T1)相比,随着混合液中微咸水比重的升高,上海青丙二醛含量先升高后降低,于微咸水—再生水 1:2 灌溉(T2)处理升至最高,为 0.027 μg/g,微咸水—再生水 1:2 灌溉

(T3)处理 MDA 含量降低 8.87%。可见,微咸水—再生水混灌处理对上海青 MDA 含量没有显著影响。

2.3.4 酶活性 抗氧化酶是超氧化物歧化酶、过氧化物酶、硫氧还蛋白过氧化物酶、谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶等的统称,具有将体内形成过氧化物转换为毒害较低或无害物质的功效。其中超氧化物歧化酶(SOD)是植物与病原物识别过程中产生初始抗性信息的关键酶,它的主要功能是通过歧化反应清除超氧阴离子自由基,在生物抗氧化系统中具有重要作用。过氧化物酶(POD)可催化过氧化氢氧化酚类和胺类化合物,具有消除过氧化氢和酚类、胺类毒性的双重作用。过氧化氢酶(CAT)是最主要的 H₂O₂ 清除酶,在活性氧清除系统中具有重要作用。不同比例微咸水与再生水混灌后上海青抗氧化酶活性的变化情况见表 4。

从表 4 可以看出:(1)对于上海青 CAT 活性而言,与清水灌溉(CK)相比,再生水灌溉(T1)处理上海青 CAT 活性降低 31.88%,但差异不显著($P>0.05$)。与再生水灌溉(T1)相比,微咸水—再生水 1:2 灌溉(T2)和微咸水—再生水 1:1 灌溉(T3)处理上海青 CAT 活性均提高 8.51%,差异不显著($P>$

0.05), 而微咸水灌溉(T4)则降低 19.15%, 差异不显著($P > 0.05$)。可见, 微咸水—再生水混灌处理对上海青 CAT 活性没有显著影响。

(2) 对于上海青 SOD 活性而言, 与清水灌溉(CK)相比, 再生水灌溉(T1)处理上海青 SOD 活性降低 22.40%, 但差异不显著($P > 0.05$)。与再生水灌溉(T1)相比, 微咸水—再生水 1:2 灌溉(T2)和微咸水—再生水 1:1 灌溉(T3)处理上海青 SOD 活性分别提高 104.07% 和 62.20%, 差异显著($P < 0.05$), 但 T2 与 T3 处理间差异不显著, 微咸水灌溉(T4)处理上海青 SOD 活性升高 41.67%, 差异不显著($P > 0.05$)。可见, 微咸水—再生水混灌处理对上海青 SOD 活性有一定的提升效果。

(3) 对于上海青 POD 活性而言, 不同处理间上海青 POD 活性均无显著性差异($P > 0.05$)。与清水灌溉(CK)相比, 再生水灌溉(T1)处理上海青 POD 活性提高 33.16%。与再生水灌溉(T1)相比, 微咸水—再生水 1:2 灌溉(T2)和微咸水—再生水 1:1 灌溉(T3)处理上海青 POD 活性分别提高 1.92% 和 17.24%, 而微咸水灌溉(T4)处理上海青 POD 活性则降低 2.87%。可见, 微咸水—再生水混灌处理对上海青 POD 活性无显著影响。

2.4 基于 IBR_{v2} 的微咸水与再生水混灌效应评价

IBR_{v2} 起初应用于环境污染对生物体的毒害评价, 后来逐渐应用于阐释灌溉对酶活性的影响。基于前文, 筛选出 5 种(含水率、电导率、地上部鲜重、CAT 活性、SOD 活性)对微咸水—再生水灌溉处理影响相对明显的土壤与作物指标, 对 CK 的指标测定值作为对照参考, 计算不同处理 IBR_{v2} 的变化见表 4。

从表 4 可以看出, T1 处理 IBR_{v2} 最小, T2 和 T3 处理次之, T4 处理最大, 说明再生水灌溉处理效果最佳, 然而再生水总量虽然大, 但日排放量有限, 以及再生水管网不健全等自身的约束性, 因此在淡水资源不足地区利用微咸水灌溉时, 可以考虑利用微咸水与再生水混灌, 混灌比例以 1:1 为宜。

3 讨论

3.1 微咸水与再生水混灌对土壤水盐的影响

本试验研究表明, 与清水灌溉作物相比, 纯再生水灌溉后土壤含水率和含盐量较高, 且在微咸水与再生水混合溶液中随着微咸水比重的提升, 土壤含水率和土壤含盐量也均呈逐渐升高趋势。杨培岭等^[18]研究表明, 相同土层深度时土壤含水率和电导率与微咸水矿化度正相关; Yang 等^[19]研究表明, 微咸水矿化度在 1~6 g/L 范围内变化时, 微咸水矿化度越大, 土壤水分越高; 而微咸水矿化度在 9~12 g/L 范围内变

化时, 土壤含水率与微咸水矿化度负相关。Zhang 等^[20]研究表明, 土壤盐分随着微咸水矿化度的增加而逐渐增加。因此, 本文研究结果与前人研究结果相吻合。这是因为再生水中盐分较清水高, 而在微咸水与再生水混合液中随着微咸水比重的提高, 盐分含量也越高, 灌溉后土壤含盐量较高, 土壤盐分在一定程度上会抑制作物对水分的吸收, 因此在灌水量一致的情况下, 随着矿化度的升高, 由于作物对水分吸收的减少, 土壤含水率也越高。

3.2 微咸水与再生水混灌对上海青生物量的影响

生物量是作物产量的重要指标之一。本试验结果表明, 微咸水与再生水混灌对地上部干重没有显著影响, 但较再生水灌溉显著降低了地上部鲜重, 这与土壤水分的变化规律相吻合, 即微咸水与再生水混灌土壤含水率较高, 相同灌水量与气象条件下作物吸收的水分越少, 进而植物体内含水量越低, 干重无明显差异情况下就表现为鲜重显著降低。吴文勇等^[21]研究表明, 与清水灌溉相比, 再生水灌溉可显著增加果菜类蔬菜产量; 王璐璐等^[22]研究表明, 再生水灌溉黄瓜光合作用与产量指标均大于自来水灌溉。而本试验结果表明, 再生水灌溉上海青生物量与清水灌溉无显著差异, 这可能与不同地区再生水水质构成有关。张继峰等^[23]研究结果表明, 加工番茄的鲜果产量总体上符合“盐高产低”的规律, 这与本文试验结果基本吻合; 冯棣等^[24]研究表明, 甜脆豌豆的地上部生物量(鲜重和干重)随灌溉水矿化度的增加而显著降低($P < 0.05$), 这与本文结果“地上部干重差异不显著”略有不同, 可能是由于作物类型的不同或者基质栽培与土培的差异所引起的。

3.3 微咸水与再生水混灌对上海青生理指标的影响

植物叶绿素含量与光合作用是反映植物生长状况的重要指标。王璐璐等^[22]研究结果表明, 在灌溉定额相同条件下, 再生水处理 SPAD 值平均比自来水处理高 5.54%; 雷琼等^[25]研究表明, 再生水灌溉可以显著提高草坪草的叶绿素含量, 这与本文试验结果“再生水灌溉叶绿素含量高于清水灌溉”相似。MDA 是膜脂氧化的终产物之一, 其含量高低可以作为考察细胞受到胁迫严重程度的指标; CAT 是最主要的 H₂O₂ 清除酶, 在活性氧清除系统中具有重要作用。雷琼等^[25]试验结果显示, 再生水灌溉增加草坪草的 MDA 含量, 提高了 CAT 活性, 而本试验结果表明, 再生水灌溉与清水灌溉处理间 MDA 含量和 CAT 活性无明显差异, 原因可能主要在于前者使用的再生水是工业和生活混合出水, 而本试验中用的是生活污水处理出水, 水质差异引起的。POD 具有消除过氧化氢和酚类、胺类毒性的双重作用。闫利军等^[26]研究

表明,矿井再生水灌溉处理叶片 POD 和 CAT 活性增幅较大,MDA 含量显著提高。其中 POD 活性的变化与本试验结果相似,而 CAT 活性和 MDA 含量的变化则略有不同,究其原因:一方面可能由于再生水来源不同或水质构成差异;另一方面,则是作物类型的不同引起的。李丹等^[27]研究表明,微咸水灌溉处理番茄叶片中叶绿素含量和 MDA 含量与清水灌溉差异不显著;李强等^[28]研究也表明,咸水灌溉(2~10 g/L)与淡水灌溉处理间油葵叶绿素含量和 MDA 含量差异不显著,这与本文试验结果相似。

4 结论

(1)随着微咸水与再生水混合液中微咸水比重的提升,土壤含水率和含盐量逐渐升高,进而说明相同灌水量与气象条件下作物对水分的吸收越少。

(2)微咸水与再生水混灌对上海青地上部鲜重有一定影响,而对地上部干重以及地下部生物量无显著影响。

(3)微咸水与再生水混灌对上海青生理指标(叶绿素含量、可溶性蛋白含量、MDA 含量、POD 活性、CAT 活性)没有显著影响,对 SOD 活性具有显著的提升作用。

(4)基于第二代综合生物响应指数(integrated biological response version 2, IBR_{v2}),综合考虑土壤水盐、作物生理指标以及再生水资源量本身的局限性,在淡水资源匮乏地区利用微咸水灌溉时,可以考虑用再生水作为替代清水水源与微咸水配合使用,微咸水—再生水混灌比例以 1:1 为宜。

本试验仅考虑 3 g/L 微咸水与再生水混合灌溉处理,尚未考虑不同矿化度微咸水与再生水的混合灌溉处理;其次,咸淡轮灌是目前较为适宜的微咸水利用方式,不同矿化度的微咸水与再生水轮灌处理也有待下一步试验研究;再者,试验采用的是盆栽试验,由于盆的高度有限,无法体现土壤盐分的剖面分布,无法进行长期试验研究,后期有待进行田间试验研究。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部.水利部关于非常规水源纳入水资源统一配置的指导意见(水资源司[2017]274号[Z].北京,2017.

[2] 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.

[3] 国家发展改革委,水利部,住房城乡建设部,农业部,工业和信息化部,科技部,教育部,国家质检总局,国家机关事务管理局.关于印发《全民节水行动计划》的通知(发改环资[2016]2259号)[Z],2016.

[4] Petousi I, Daskalakis G, Fountoulakis M S, et al. Effects of

treated wastewater irrigation on the establishment of young grapevines[J].Science of The Total Environment,2019,658:485-492.

- [5] Pedrero F, Camposeo S, Pace B, et al. Use of reclaimed wastewater on fruit quality of nectarine in Southern Italy[J].Agricultural Water Management,2018,203:186-192.
- [6] 韩洋,李平,齐学斌,等.再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响[J].环境科学,2018,39(9):4366-4374.
- [7] 郭魏,齐学斌,李平,等.不同施氮水平下再生水灌溉对土壤细菌群落结构影响研究[J].环境科学学报,2017,37(1):280-287.
- [8] Lesser L E, Mora A, Moreau C, et al. Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico[J].Chemosphere,2018,198:510-521.
- [9] Lu S B, Zhang X L, Liang P. Influence of drip irrigation by reclaimed water on the dynamic change of the nitrogen element in soil and tomato yield and quality[J].Journal of Cleaner Production,2016,139:561-566.
- [10] Yuan C F, Feng S Y, Huo Z L, et al. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China[J].Agricultural Water Management,2019,212:424-432.
- [11] Tahtouh J, Mohtar R, AssiSSI A, et al. Impact of brackish groundwater and treated wastewater on soil chemical and mineralogical properties[J].Science of the Total Environment,2019,647:99-109.
- [12] Cucci G, Lacolla G, Boari F, et al. Effect of water salinity and irrigation regime on maize (*Zea mays* L.) cultivated on clay loam soil and irrigated by furrow in Southern Italy[J].Agricultural Water Management,2019,222:118-124.
- [13] 刘春成,李毅,郭丽俊,等.微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2011,27(8):39-45.
- [14] Buatan A, Cohen S, Malach Y D, et al. Effects of timing and duration of brackish irrigation water on fruit yield and quality of late summer melons[J].Agricultural Water Management,2005,74(2):123-134.
- [15] Liu B X, Wang S Q, Kong X L, et al. Modeling and assessing feasibility of long-term brackish water irrigation in vertically homogeneous and heterogeneous cultivated lowland in the North China Plain[J].Agricultural Water Management,2019,211:98-110.
- [16] 朱进.NaCl 胁迫对不同生育时期小白菜的影响[J].湖北农业科学,2012,51(19):4278-4279,4283.
- [17] 生态环境部.GB 5084—2005 农田灌溉水质标准[S].北京:中国环境出版社,2005.

- 及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.
- [20] Zhan L C, Chen J S, Li L. Isotopic assessment of fog drip water contribution to vegetation during dry season in Junshan wetland, northern Dongting Lake[J].Wetlands Ecology and Management,2017,25(3):345-357.
- [21] Zhang Y, Zhang M J, Qu D Y, et al. Water use strategies of dominant species (*Caragana korshinskii* and *Reaumuria soongorica*) in natural shrubs based on stable isotopes in the Loess Hill, China[J/OL].Water,2020,12(7):1923. <https://doi.org/10.3390/w12071923>.
- [22] 孙双峰.三峡库区岸边植物水分利用研究[D].云南西双版纳:中国科学院研究生院(植物研究所),2006.
- [23] 王飞翔.不同海拔下大气中波红外透过率的理论研究和实际测量[D].昆明:云南师范大学,2020.
- [24] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J].Forest Ecology and Management,2010,259(4):660-684.
- [25] Shi F X, Song C C, Zhang X H, et al. Plant zonation patterns reflected by the differences in plant growth, biomass partitioning and root traits along a water level gradient among four common vascular plants in freshwater marshes of the Sanjiang Plain, Northeast China [J].Ecological Engineering,2015,81(1):158-164.
- [26] 朱金方.渤海海岸贝壳堤湿地灌木水分生态位时空分异研究[D].北京:中国矿业大学,2016.
- [27] 罗丹丹,王传宽,金鹰.植物水分调节对策:等水与非等水行为[J].植物生态学报,2017,41(9):1020-1032.
- [28] 付昕宇.岱海湖滨带湿地植物水分来源及利用策略研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2020.
- [29] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau[J].Science of the Total Environment,2017,609:27-37.
- [30] Xu Q, Li H, Chen J Q, et al. Water use patterns of three species in subalpine forest, Southwest China: The deuterium isotope approach [J]. Ecohydrology, 2011,4(2):236-244.
- [31] 邓建明,姚步青,周华坤,等.水氮添加条件下高寒草甸主要植物种氮素吸收分配的同位素示踪研究[J].植物生态学报,2014,38(2):116-124.
- [32] 王雪芹,蒋进,雷加强,等.短命植物分布与沙垄表层土壤水分的关系:以古尔班通古特沙漠为例[J].应用生态学报,2004,15(4):556-560.
- [33] 朱瑞清,张志山,刘立超,等.干旱沙漠边缘地带 7 种沙生植物适应性机理[J].生态学杂志,2015,34(10):2749-2756.
- [34] 39(5):18-25.
- [23] 张继峯,王振华,张金珠,等.滴灌下氮盐交互对加工番茄荧光特性及产量品质的影响[J].中国农业科学,2020,53(5):990-1003.
- [24] 冯棣,朱玉宁,周婷,等.咸水灌溉对基质栽培甜豌豆生长及营养品质的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(2):27-31.
- [25] 雷琼,李辉.城市二级污水灌溉对 3 种草坪草生理特性及土壤性状的影响[J].西南农业学报,2020,33(11):2545-2551.
- [26] 闫利军,米福贵,郭郁频,等.草地早熟禾幼苗对矿井再生水灌溉的生理响应[J].草地学报,2014,22(5):1031-1037.
- [27] 李丹,万书勤,康跃虎,等.滨海盐碱地微咸水滴灌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.
- [28] 李强,王秀萍,刘雅辉,等.微咸水灌溉对油葵生长和生理生化特性的影响[J].河北农业科学,2016,20(1):30-33.

(上接第 333 页)

- [18] 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.
- [19] Yang G, Liu S H, Yan K, et al. Effect of drip Irrigation with brackish water on the soil chemical properties for a typical desert plant (*Haloxylon Ammodendron*) in the Manas River Basin[J].Irrigation and Drainage, 2020,69(3):460-471.
- [20] Zhang A Q, Zheng C L, Li K J, et al. Responses of soil water-salt variation and cotton growth to drip irrigation with saline water in the low plain near the Bohai Sea[J].Irrigation and Drainage,2020,69(3):448-459.
- [21] 吴文勇,许翠平,刘洪禄,等.再生水滴灌对果菜类蔬菜产量及品质的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):36-40.
- [22] 王璐璐,田军仓,徐桂红,等.再生水滴灌对黄瓜叶绿素、光合、产量及品质的影响[J].灌溉排水学报,2020,