

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.010

刘祯媛, 张体彬, 梁青, 等. 不同浓度微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 378-386.

LIU Zhenyuan, ZHANG Tibin, LIANG Qing, et al. Effects of saline water irrigation with different concentrations on soil water and salt distribution and growth of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 378-386.

不同浓度微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响

刘祯媛^{1,2}, 张体彬^{1,3,4}, 梁青^{1,2}, 胡行路⁴, 程煜^{1,2}, 闫思慧^{1,2}, 冯浩^{1,3,4}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 微咸水灌溉是缓解农业用水紧张、保障粮食生产的重要途径之一, 但灌溉水中的可溶性盐会导致土壤盐分累积, 进而影响作物生长, 寻求适宜的灌溉水盐分浓度是咸水、微咸水资源得到安全利用的有利保障。[方法] 研究采用遮雨盆栽试验种植冬小麦, 以去离子水为对照(CK), 添加氯化盐形成不同浓度的微咸水处理, 灌溉水电导率(EC_w)分别为: 0.26(CK), 3.00(S1), 5.26(S2), 7.07(S3), 9.24(S4) dS/m, 研究土壤水盐分布和冬小麦生长、光合生理及产量形成的响应。[结果] 不同浓度微咸水灌溉下土壤含水率、土壤含盐量随盐分浓度的增加而增大。当灌溉水电导率为 9.24 dS/m 时, 土壤含水率分别比 CK 高 5.43% (0—10 cm), 4.21% (10—20 cm), 4.98% (20—40 cm); 冬小麦收获后 CK 及 S1—S4 处理下 0—40 cm 土层土壤饱和浸提液电导率(EC_e)分别为 0.66, 4.89, 7.88, 9.34, 10.16 dS/m; 与 CK 相比, 灌溉水电导率为 3.00, 5.26 dS/m 时, 冬小麦生长、光合生理指标、产量无显著差异, 而为 7.07, 9.24 dS/m 时显著降低, 当灌溉水电导率为 9.24 dS/m 时, 冬小麦净光合速率、最大株高、最大叶面积、成熟期地上部干物质量、根系干物质量及产量相比 CK 分别降低 71.00%, 2.81%, 15.33%, 15.55%, 47.25%, 27.53%。利用 FAO 分段函数拟合计算得冬小麦灌溉微咸水电导率阈值为 5.82 dS/m, 超过该值, 每增加 1 dS/m, 冬小麦相对产量下降 8.80%。[结论] 综上所述, 灌溉水盐分浓度越高, 对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响越大, 5.82 dS/m 为冬小麦的灌溉微咸水电导率阈值。综合考虑冬小麦生长、光合生理指标及土壤理化性质, 建议使用微咸水灌溉冬小麦时, EC_w 不宜超过 5.82 dS/m。该研究结果可为微咸水安全利用提供理论支撑。

关键词: 微咸水; 冬小麦; 耐盐阈值; 产量

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0378-09

Effects of Saline Water Irrigation with Different Concentrations on Soil Water and Salt Distribution and Growth of Winter Wheat

LIU Zhenyuan^{1,2}, ZHANG Tibin^{1,3,4}, LIANG Qing^{1,2}, HU Xinglu⁴, CHENG Yu^{1,2},

YAN Sihui^{1,2}, FENG Hao^{1,3,4}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Saline water irrigation is one of the important ways to alleviate the shortage of agricultural water and ensure food production. However, soluble salt in irrigation water leads to soil salt accumulation, which affects the growth of crops. Seeking a suitable salt concentration in irrigation water is a favorable guarantee for the safe utilization of saline water resources. [Methods] In this study, a rain-shielding pot experiment was conducted to plant winter wheat. The deionized water was used as a control (CK), and

收稿日期: 2023-05-15

修回日期: 2023-06-19

录用日期: 2023-07-11

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-10-17

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900700); 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-53); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(XAB2022YW04)

第一作者: 刘祯媛(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: liuzhenyuan2021@163.com

通信作者: 张体彬(1983—), 男, 副研究员, 主要从事农业节水灌溉和盐碱地改良利用研究。E-mail: zhangtibin@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

chloride salts were added to form saline water with different salt concentrations. The electrical conductivity of irrigation water (EC_w) was 0.26 (CK), 3.00 (S1), 5.26 (S2), 7.07 (S3), and 9.24 (S4) dS/m respectively. The soil water and salt distribution, growth, photosynthetic physiology, and yield formation of winter wheat were studied. [Results] Soil water content and electrical conductivity increased with the increase of saline water salt concentration under saline water irrigation. When the conductivity of irrigation water was 9.24 dS/m, the soil moisture content was 5.43% (0—10 cm), 4.21% (10—20 cm), and 4.98% (20—40 cm) higher than CK, respectively. The electrical conductivity of soil extract (EC_e) in 0—40 cm soil layer was 0.66, 4.89, 7.88, 9.34, and 10.16 dS/m under CK and S1—S4 treatments after winter wheat harvest, respectively. Compared with CK, there was no significant difference in the growth, photosynthetic physiological indexes, and yield of winter wheat when the conductivity of irrigation water was 3.00 and 5.26 dS/m, but it was significantly reduced when the conductivity of irrigation water was 7.07 and 9.24 dS/m. The net photosynthetic rate, maximum plant height, maximum leaf area, shoot dry matter mass at maturity stage, root dry matter mass and yield of winter wheat under 9.24 dS/m were decreased by 71.00%, 2.81%, 15.33%, 15.55%, 47.25%, and 27.53% compared with CK, respectively. The threshold of saline water conductivity for irrigation of winter wheat was calculated as 5.82 dS/m using the fitting sum of FAO piecewise function, if the value exceeded, the relative yield of winter wheat decreased by 8.80% with each increase of 1 dS/m. [Conclusion] In summary, the higher the salt concentration of irrigation water, the greater the impact on soil water and salt distribution and winter wheat growth, 5.82 dS/m is the threshold of saline water conductivity of winter wheat irrigation. Considering the growth, photosynthetic physiological indexes of winter wheat and soil physical and chemical properties, it is suggested that EC_w should not exceed 5.82 dS/m when saline water is used to irrigate winter wheat. This study can provide theoretical support for the safe utilization of saline water.

Keywords: saline water; winter wheat; salt tolerance threshold; yield

Received: 2023-05-15

Revised: 2023-06-19

Accepted: 2023-07-11

Online(www.cnki.net): 2023-10-17

冬小麦是我国主要的粮食作物之一,主要种植在西南、西北、华北和黄淮海、长江中下游 4 个区域。在西北旱区,冬小麦生育期内降雨较少,往往通过过度灌溉淡水来满足作物增产,而旱区淡水资源短缺,这进一步加剧了淡水资源供需矛盾。西北旱区微咸水资源丰富,利用微咸水灌溉有利于缓解水资源匮乏^[1]。因此,合理开发微咸水资源对于缓解旱区水资源压力、保障农业生产具有重大意义。

利用微咸水、咸水灌溉,国内外开展了大量研究和应用工作。有研究表明利用微咸水灌溉会导致土壤结构恶化,例如,吴雨晴等^[2]在长期定位咸水灌溉试验(始于 2006 年)的基础上,研究不同矿化度咸水连续灌溉第 13~14 年农田土壤,结果表明,咸水灌溉降低土壤水稳性团聚体的稳定性,随灌溉水矿化度的增加,土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径减小,分形维数增大;王艺乔等^[3]研究指出, ≥ 4 g/L 的咸水灌溉显著增加土壤盐度,降低有机质含量,破坏土壤团粒结构,应谨慎使用。微咸水灌溉同时也会增加土壤盐分,张美桃等^[4]以河套灌区春玉米为研究对象,设置不同灌溉水含盐量和不同灌水量进行大田试验,结果表明,5.0 g/L 微咸水灌溉处理 0—100 cm 土

层土壤平均电导率相比 1.1 g/L 地下水灌溉处理显著增加;高聪帅等^[5]的研究发现,不同矿化度微咸水灌溉增加 1 m 以上土层的含盐量,且有随矿化度升高呈增加的趋势,1 m 以下的土层不明显;刘宗潇等^[6]研究表明,灌溉水矿化度主要影响土壤总体 EC 值,随灌溉水矿化度增加,土壤总 EC 值变大。微咸水灌溉对作物的生长以及最终产量也有一定的影响,苏寒等^[7]利用不同质量浓度咸水灌溉冬小麦,结果表明,随咸水质量浓度的增加,冬小麦产量要素、生长性状、生理性状显著下降;乔若楠等^[8]利用不同阳离子组成微咸水灌溉盆栽生菜,结果表明,微咸水灌溉显著降低生菜净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等光合特性;王罕博等^[9]利用不同矿化度微咸水在河北低平原地区开展了冬小麦微咸水喷灌试验,结果表明,与淡水喷灌相比,采用矿化度为 3 g/L 的微咸水喷灌会导致冬小麦叶片蒸腾速率、气孔导度和净光合速率显著下降,平均产量比淡水喷灌处理显著降低 25.9%。综上所述,利用微咸水、咸水进行灌溉,在补充土壤水分的同时也给土壤带来了盐分,导致土壤理化性质的改变同时也影响了作物的生长。前人对于微咸水灌溉开展了大量的研究,多是在大田条件下进行,外界

影响因素较多,同时对于西北旱区利用微咸水对冬小麦进行灌溉,寻求适宜的灌溉水盐分浓度研究较少。

因此,本研究采用控雨下的盆栽试验,通过设置不同浓度微咸水处理,研究土壤水盐分布和冬小麦生长响应,试图寻求适宜的灌溉微咸水电导率阈值,以为微咸水的安全利用提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自陕西杨凌(108°03'18"E,34°16'22"N)典型农田表层 0—30 cm。该区域属于暖温带半湿润气候区,多年平均气温为 12.9℃,多年平均降水量为 584 mm,降水多集中在 7—10 月。供试土壤初始含水率为 1.03%,饱和含水率为 33.32%,容重为 1.3 g/cm³,土壤饱和浸提液电导率(EC_e)为 0.70 dS/m, pH 为 7.66,土壤八大离子 HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Mg²⁺、Ca²⁺、Na⁺、K⁺ 浓度分别为 0.60、0.22、2.16、0.30、0.52、0.10、<0.01 mmol/L,土壤类型为壤土。

1.2 试验方法

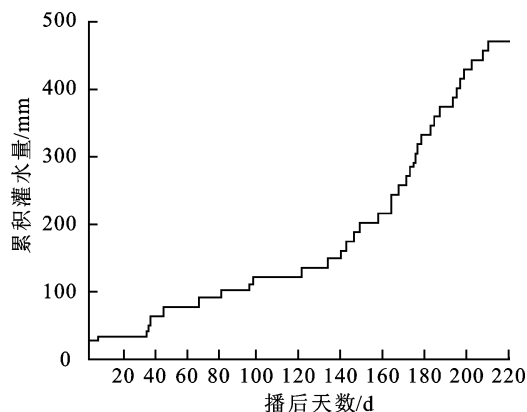
1.2.1 试验材料 本试验为盆栽试验,采用棱台型黑色塑料盆,盆高 44 cm,上宽 20 cm,下宽 12 cm,盆底对称打 8 个 2 mm 小孔排水,将盆放置在 3 cm 高的隔空置板上,以便盆底部通风透气。供试土壤经风干后过 5 mm 筛,按照容重 1.3 g/cm³装盆,装盆高度为 40 cm。于 2021 年 10 月 20 日播种冬小麦,每盆 2 行,每行播种 10 粒,最后保留全部株数,品种为“小偃 22”。播种前施基肥,水平为纯 N 120 kg/hm²、P₂O₅ 100 kg/hm²,来源为尿素(0.721 g/盆)和磷酸二胺(0.909 g/盆)。拔节期追施纯 N 180 kg/hm²,来源为尿素(1.44 g/盆)。

1.2.2 试验设计 试验于 2021 年 10 月 20 日至 2022 年 5 月 30 日在陕西杨凌西北农林科技大学灌溉试验站(108°04'20"E,34°17'43"N,海拔 507 m)旱棚内进行,试验周期共 225 天。采用盆栽种植冬小麦,设置 5 个灌溉微咸水浓度处理,灌溉水电导率(EC_w)分别为 0.26(去离子水,CK),3.00(S1),5.26(S2),7.07(S3),9.24(S4)dS/m。不同浓度微咸水具体盐分配比见表 1。每个处理设置 8 个重复。用遮雨棚控制降雨的影响。用称重法控制灌溉上下限(已知塑料盆和土壤的重量,根据指定容重和田间持水率计算土壤到达田间持水率的重量,再根据重量的差值计算每次所需灌溉的水量),各处理灌溉时间和灌溉量一致,灌水上限为田间持水量(0.26 cm³/cm³),下限为 60%田间持水量(0.16 cm³/cm³)。试验过程中共计灌水 35 次,累积灌水量为 471 mm,具体灌溉时间与灌水量见图 1。

表 1 试验处理

Table 1 Test treatment

处理	灌溉水盐分构成/(g·L ⁻¹)			目标 EC _w / (dS·m ⁻¹)	实测 EC _w / (dS·m ⁻¹)	SAR
	NaCl	CaCl ₂	MgCl ₂			
CK	0	0	0	0	0.26	—
S1	1.17	0.15	0.2	2	3.00	7.07
S2	2.34	0.15	0.2	4	5.26	14.14
S3	3.51	0.15	0.2	6	7.07	21.21
S4	4.68	0.15	0.2	8	9.24	28.28



注:SAR 为钠吸附比。

图 1 冬小麦生长期累积灌水量

Fig. 1 Cumulative irrigation during winter wheat growth

1.3 测定项目与方法

1.3.1 作物指标 在冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期,每个处理分别选取具有代表性的 6 株冬小麦植株测量株高、叶面积、有效穗数。株高用精度为 0.1 cm 的卷尺量取,叶片长度和叶片最宽处的宽度用精度为 0.1 cm 的钢尺测量,叶面积用长×宽×0.83 折算法计算。在冬小麦开花期,用“LI-6800”便携式光合作用测定系统测定旗叶光合指标,具体测定时间为晴朗无风的 10:00—12:00,每个处理选取 4 片具有代表性的不同植株的叶片进行测量。收获后进行考种测产,并测量地上、地下部干物质重。每个处理选择 3 盆,从地表处剪断,地上所有干物质 105℃杀青 30 min 后,70℃烘干至恒重,得地上部干物质重;同时将盆内土壤完整倒出,置于孔径为 0.25 mm 的尼龙筛网滤袋中,用流水反复冲洗,取全部可见根系,烘干至恒重后得地下根系干重。

1.3.2 土壤指标 在冬小麦拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期用土钻取土,采集土层为 0—10,10—20,20—40 cm,利用烘干法测量各层土壤含水率。剩余的采集土自然阴干后过 2 mm 筛,采用饱和泥浆法测定盐分特性,测定方法为:将 20 g 风干土样加适量去离子水浸泡过夜后调制成饱和泥浆,后使用离心机离心饱和泥浆(4 000 r/min,30 min),获得的上清液即为土壤饱和浸提液^[10]。测量土壤饱和浸提液的 pH

和电导率(EC_e),pH 用 pH 计(PHS-3C,上海精密科学仪器有限公司)测量, EC_e 用电导率仪(DDS-11A,上海精密科学仪器有限公司)测量。

1.3.3 冬小麦灌溉微咸水电导率阈值计算方法 将冬小麦产量换算为相对产量,公式为:

$$Y_r = \frac{Y_a}{Y_{ck}} \times 100 \tag{1}$$

式中: Y_r 为相对产量; Y_a 为不同处理冬小麦成熟期实际籽粒产量(g/盆); Y_{ck} 为对照组成熟期实际籽粒产量(g/盆)。

根据 FAO 分段函数法^[11],利用不同盐分含量微咸水及其所对应产量之间的关系,计算冬小麦灌溉微咸水电导率阈值。公式为:

$$Y_r = \begin{cases} 1 & (EC_w < EC_w^{threshold}) \\ 1 - \frac{b(EC_w - EC_w^{threshold})}{100} & (EC_w > EC_w^{threshold}) \end{cases} \tag{2}$$

式中: Y_r 为相对产量; EC_w 为灌溉水电导率(dS/m); $EC_w^{threshold}$ 为灌溉水电导率阈值(dS/m); b 为电导率增加每单位后产量的降低率。

1.3.4 数据处理方法 试验数据利用 Excel 2016 软件进行整理,利用 IBM SPSS Statistics 26 软件(IBM Corp., Armonk, New York, NY, USA)与 Origin

2023 软件(Origin Lab Corporation, Northampton, MA, USA)进行计算分析和作图,不同处理间数据采用单因素分析法进行分析,组内采用最小显著差数法(LSD)进行两两比较。

2 结果与分析

2.1 不同浓度微咸水灌溉对土壤水分的影响

不同处理对土壤水分含量时空变化显著影响($p<0.05$),总体上呈现在抽穗期含水率下降,在灌浆期和成熟期上升。4 个生育期内土壤平均含水率随着微咸水浓度的增加呈升高趋势。

由图 2 可知,S4 处理不同土层土壤在 4 个生育期的平均质量含水率均为最高,分别为 22.58%(0—10 cm),22.31%(10—20 cm),23.08%(20—40 cm);CK 处理的平均质量含水率最低,分别为 17.15%(0—10 cm),18.10%(10—20 cm),19.79%(20—40 cm)。在灌浆期,CK、S1 处理 20—40 cm 土层土壤含水率比 0—10,10—20 cm 土层低,而同时期 S2、S3、S4 处理 20—40 cm 土层土壤含水率却比 0—10,10—20 cm 的高;在成熟期,不同处理 20—40 cm 土层土壤含水率在 3 个土层中均为最高,与前 3 个生育期不同,该层 EC_w 较高的 S3、S4 处理土壤含水率却低于 CK、S1、S2 处理。

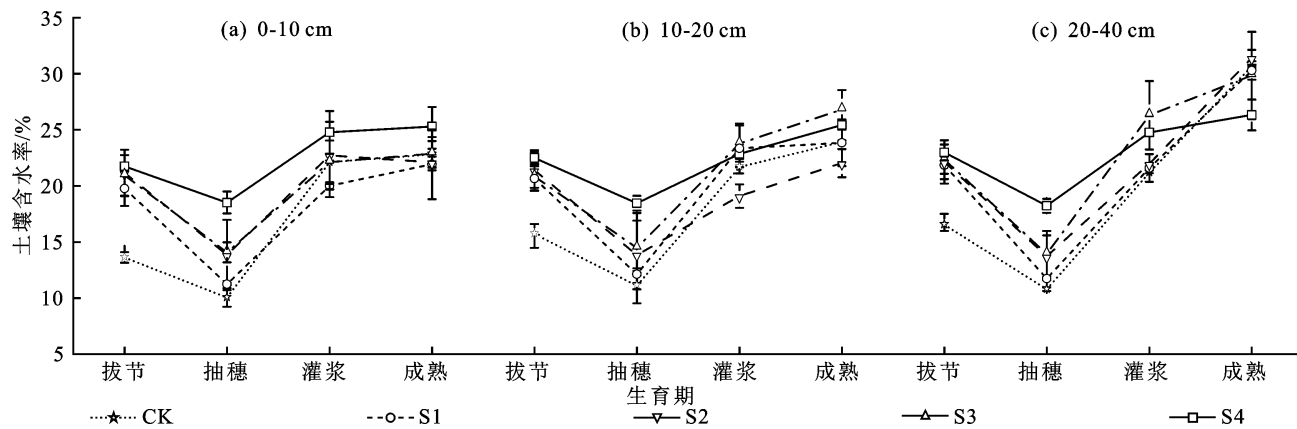


图 2 冬小麦各个处理不同土层土壤含水率

Fig. 2 Average soil moisture content of different soil layers in each treatment of winter wheat

2.2 不同浓度微咸水灌溉对土壤盐分变化的影响

由表 1 可知,冬小麦种植前,不同处理 EC_e 均为 0.70 dS/m。由图 3 可知,不同浓度微咸水处理下不同土层 EC_e 值随着时间以及灌溉水盐分浓度的增加而增加,生育期内 EC_e 最高值出现在 S4 处理,分别为 9.91 dS/m(0—10 cm),9.84 dS/m(10—20 cm),13.45 dS/m(20—40 cm);最低值出现在 CK 处理,分别为 0.61 dS/m(0—10 cm),0.49 dS/m(10—20 cm),0.46 dS/m(20—40 cm)。

在拔节期,土壤总体盐分有轻微积累,且与灌溉水盐分浓度呈正比,盐分多集中于 0—20 cm 土层。随着时间的推移,在冬小麦抽穗期、灌浆期、成熟期,CK 处理各个土层土壤盐分无显著变化($p>0.05$),其余处理 0—40 cm 土层土壤盐分显著增加($p<0.05$),且盐分多集中于 20—40 cm 土层。相比灌浆期,成熟期 S4 处理 10—20 cm 土层 EC_e 略有降低,20—40 cm 土层 EC_e 显著降低($p<0.05$),而 0—10 cm 土层 EC_e 有显著提升($p<0.05$),同时期 S1、S2、S3 处理 0—10,20—40 cm 土层 EC_e 仍在累积。

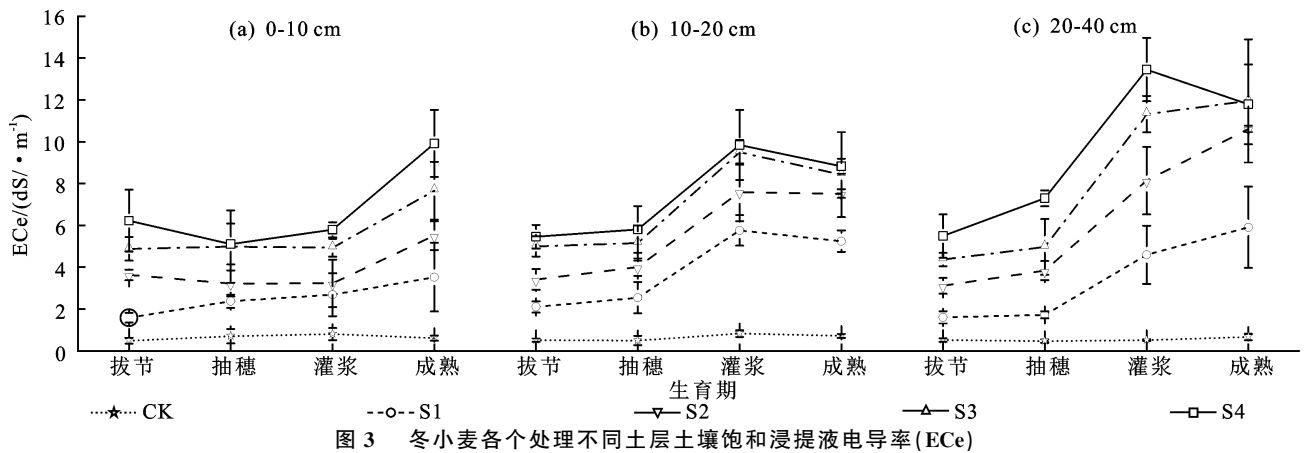
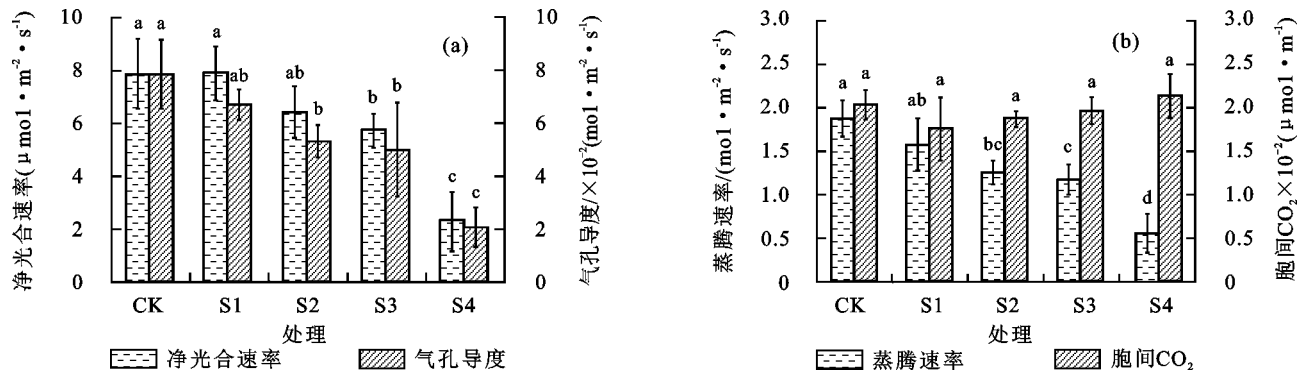


Fig. 3 Electrical conductivity of soil extract in different soil layers under each treatment of winter wheat

2.3 不同浓度微咸水灌溉对冬小麦生长的影响

2.3.1 冬小麦光合生理 由图 4 可知,不同浓度微咸水处理之间胞间 CO_2 浓度无显著差异 ($p > 0.05$),气孔导度、蒸腾速率、净光合速率均有随着灌溉水盐分浓度的增加呈减小的趋势。气孔导度、蒸腾速率在

CK、S1 处理之间无显著差异 ($p > 0.05$),净光合速率在 CK、S1、S2 之间无显著差异 ($p > 0.05$),S3、S4 处理的气孔导度、蒸腾速率、净光合速率与 CK 相比分别下降 36.23%, 37.39%, 27.38% 和 73.56%, 70.31%, 71.00%。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著性 ($p < 0.05$);误差棒为标准误差。下同。

图 4 不同浓度微咸水处理下冬小麦光合参数

Fig. 4 Photosynthetic parameters of winter wheat under saline water treatment with different concentrations

2.3.2 冬小麦株高、叶面积 由图 5 可知,不同处理冬小麦株高均随着播种天数的增加而增加,株高最大值基本处于灌浆期,在成熟期略有下降。不同处理之间在拔节期的株高变化并不显著 ($p > 0.05$),抽穗期后,株高随着灌溉水盐分浓度的增加呈现先升后降的趋势,大小顺序为 $\text{S2} > \text{S1} > \text{CK} > \text{S3} > \text{S4}$,S2 处理株高比 CK 增加 3.36%,S4 处理株高比 CK

降低 3.68%。

不同处理对叶面积的影响在 4 个生育期均显著 ($p < 0.05$),总体上呈现随着灌溉水盐分浓度的增加而降低。拔节期后 S1 处理叶面积指数最高,S4 处理叶面积指数最低;在抽穗期和灌浆期,与 CK 相比,S1、S2 处理叶面积指数无显著差异 ($p > 0.05$),S3、S4 处理叶面积指数显著降低 ($p < 0.05$)。

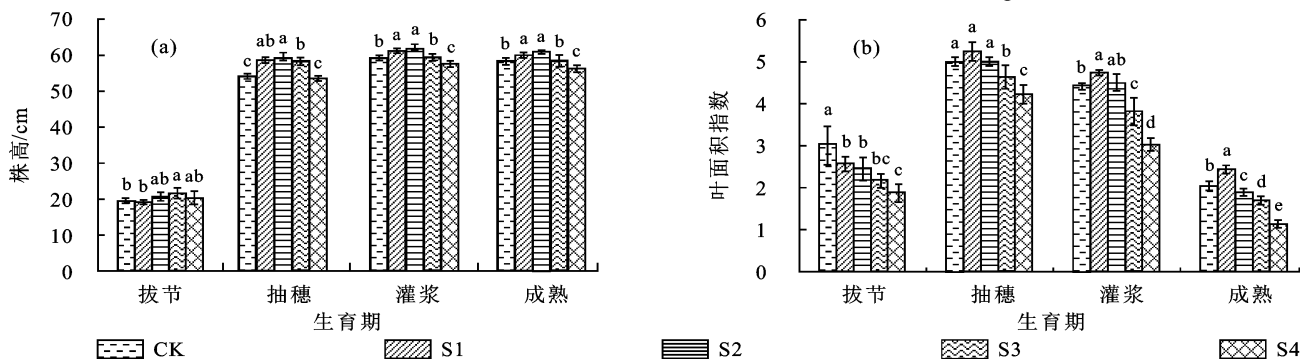


图 5 不同浓度微咸水处理下冬小麦株高、叶面积随生育期动态变化

Fig. 5 Plant height and leaf area of winter wheat changed dynamically during the growth period under saline water treatment with different concentrations

2.3.3 冬小麦干物质量 由图 6 可知,冬小麦不同浓度微咸水处理地上和地下部干物质量之间差异显著($p<0.05$)。地下部干物质量随灌溉水盐分浓度的升高而降低,与 CK 相比,S1、S2 处理间无显著差异($p>0.05$),S3、S4 处理显著降低($p<0.05$),S4 处理比 CK、S1、S2、S3 处理分别降低 47.25%,44.44%,44.18%,29.28%;地上部干物质量由籽粒、穗轴、叶片、茎秆组成,地上部干物质量随灌溉水盐分浓度增

加呈先升后降的趋势,S2 处理为最大值,与 CK 相比,S1、S2、S3 处理间无显著差异($p>0.05$),S4 处理差异显著($p<0.05$),S4 处理比 CK、S1、S2、S3 处理分别降低 15.55%,19.31%,22.00%,7.51%;根冠比与灌溉水盐分浓度成反比,盐分浓度越高、根冠比越小,CK 与 S1、S2 处理之间差异不显著($p>0.05$),与 S3、S4 处理差异显著($p<0.05$),S4 处理比 CK、S1、S2、S3 处理分别降低 39.39%,33.33%,31.03%,23.08%。

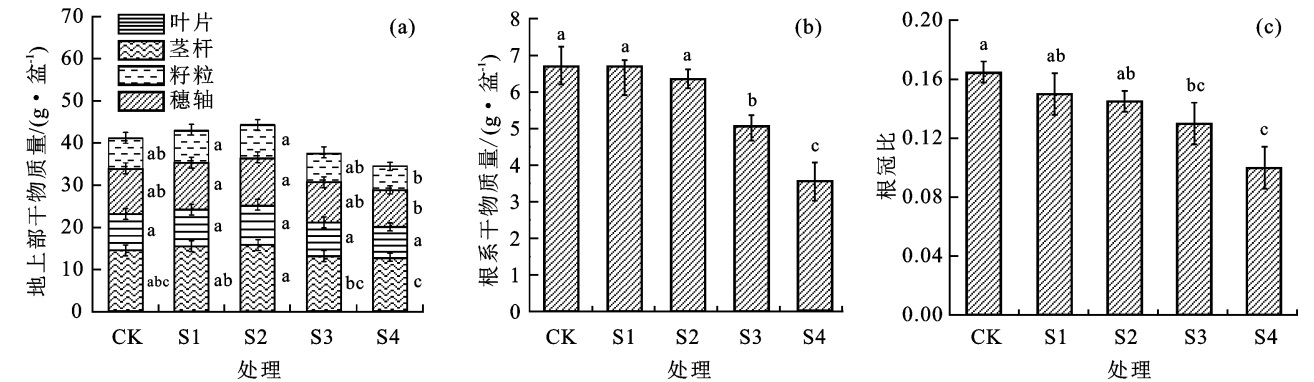


图 6 不同浓度微咸水处理下冬小麦成熟期地上部、根系干物质量及根冠比

Fig. 6 Dry mass of shoot and root and root—shoot ratio of winter wheat at maturity under saline water treatment with different concentrations

2.3.4 冬小麦产量 表 2 为冬小麦产量及产量构成要素指标。不同浓度微咸水处理对冬小麦穗数没有显著影响($p>0.05$),对穗粒数、穗长、千粒重、产量影响显著($p<0.05$)。穗粒数、穗长、千粒重和产量有随着灌溉水盐分浓度的增加呈现先增大后减小的趋势,最大值为 S2 处理,分别为 35.00 粒、5.74 cm、39.80 g、24.52 g/盆;最小值为 S4 处理,分别为 29.8粒、5.10 cm、34.40 g、16.61 g/盆。各处理产量变化范围为

16.61~24.52 g/盆,CK 与 S1、S2 处理之间无显著差异($p>0.05$),S3、S4 处理与前 3 个处理之间差异显著($p<0.05$),S2 处理产量最高,为 24.52 g/盆,S4 处理产量最低,为 16.61 g/盆,S3、S4 处理相比 CK 处理分别减产 11.04%,27.53%。

根据 FAO 分段函数法计算冬小麦灌溉微咸水电导率阈值(图 7),得出冬小麦灌溉微咸水电导率阈值为 5.82 dS/m。

表 2 不同处理下冬小麦产量及其构成因素

Table 2 Yield and its components of winter wheat under different treatments

处理	穗数/(穗·盆 ⁻¹)	穗粒数/粒	穗长/cm	千粒重/g	产量/(g·盆 ⁻¹)
CK	18.00±1.87a	33.20±1.48b	5.30±0.25bc	38.35±1.77a	22.92±1.06a
S1	17.40±2.70a	33.40±1.34b	5.46±0.25b	39.65±0.78a	23.04±0.45a
S2	17.60±1.67a	35.00±1.20a	5.74±0.37a	39.80±1.13a	24.52±0.70a
S3	17.00±1.22a	31.60±0.89c	5.20±0.43bc	37.95±1.06a	20.39±0.57b
S4	16.20±1.48a	29.80±0.84d	5.10±0.15c	34.40±1.41b	16.61±0.68c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

3 讨论

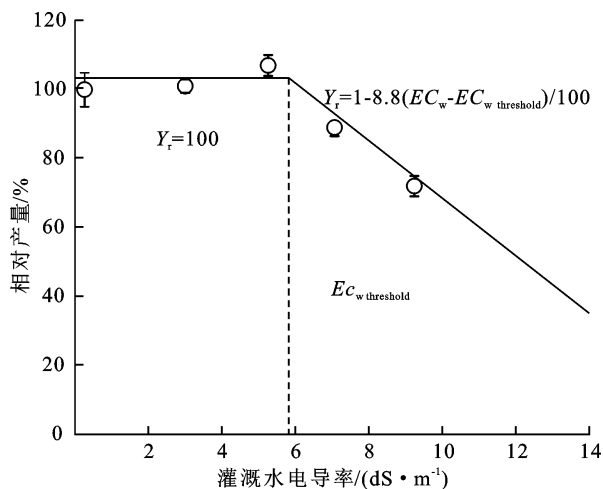
微咸水灌溉导致土壤结构恶化,增加土壤盐分含量,进而对作物造成盐分胁迫,影响作物的生长及最终产量。为此应寻找适宜的灌溉微咸水浓度以不影响冬小麦的生长,同时保护土壤环境,实现区域农业可持续发展。

3.1 微咸水灌溉对土壤水盐环境的影响

微咸水中含有的盐分通过灌溉进入土壤,形成盐分胁迫,阻碍作物根系吸收,提高土壤含水率。本

研究发现,微咸水灌溉增加表层土壤含水率,且微咸水浓度越高,土壤含水率越大(图 2)。土壤表层(0—20 cm)含水率随着灌溉水盐分浓度的增大而增大,这一方面是因为微咸水中的 Na⁺使得土壤颗粒收缩,破坏土壤团聚体结构,造成土壤的导水和持水能力发生变化^[12];另一方面,是因为微咸水带入土壤中的盐分降低土壤水势,进而对作物造成盐分胁迫,抑制作物从土壤中吸水,从而导致高浓度微咸水灌溉下土壤含水率较高^[13]。杨培岭等^[14]、WANG 等^[15]开

展的微咸水灌溉田间试验均有类似结论。本研究中当 EC_w 为 7.07, 9.24 dS/m 时, 20—40 cm 土层土壤含水率较 0.26, 3.00, 5.26 dS/m 灌溉水处理小(图 2), 这是因为当灌溉水盐分浓度达到一定值时, 土壤入渗能力将逐步减弱^[16-17], 导致土壤水难以入渗到下层, 故浓度较高的微咸水灌溉下 20—40 cm 土层土壤含水率较小。



注: Y_r 为相对产量; EC_w 为灌溉水电导率 (dS/m); $EC_w threshold$ 为灌溉水电导率阈值 (dS/m); 8.8 为线性拟合计算的斜率, 表示电导率增加每单位产量的降低率。

图 6 相对产量与微咸水电导率之间的分段函数

Fig. 6 Piecewise function between relative yield and conductivity of saline water

长时间的微咸水灌溉及灌溉微咸水的浓度增大都会导致土壤盐分的累积, 盐分也会随着灌溉水而下移至作物根层, 导致作物对水分和养分的吸收受到抑制。本研究结果表明, 0—40 cm 土层的土壤含盐量随着灌溉水盐分浓度的增加而增加, 当 EC_w 为 9.24 dS/m 时, 冬小麦收获后 0—40 cm 土层平均 E_{ce} 比对照组提高 9.51 dS/m(图 3)。高聪帅等^[5]、刘宗潇等^[6]的研究也有类似结论。这是因为随着灌溉水电导率的增加、灌水次数的增加及灌水水量的增加, 带入土壤中的盐分也随之增加, 从而导致土壤总盐分的累积。本研究中成熟期 S4 处理 20—40 cm 土层 E_{ce} 相比灌浆期显著降低 ($p < 0.05$), 而 0—10 cm 土层 E_{ce} 有显著提升 ($p < 0.05$)(图 3)。可能的原因是 S4 处理盐分浓度较高, 改变土壤入渗率, 导致土壤水分难以下渗, 故盐分也较少运移至土壤底层^[18-19]; 也有可能是因为在冬小麦生长后期, 随着气温的升高土壤水分蒸发强烈, 土壤盐分有表聚现象, 故底层土壤盐分随着水分的蒸发而上移到表层土壤中^[4, 20]。

3.2 微咸水灌溉下作物生长响应

作物物质累积的主要途径是光合作用, 光合作用也是作物产量形成的基础, 对环境胁迫的变化较为敏感, 可有效地评价作物对环境胁迫的抗性^[21]。冬小

麦光合作用有随着灌溉水盐分含量的增加呈现减弱的趋势, 当 EC_w 为 9.24 dS/m 时, 净光合速率相比对照组降低 71.00%(图 4)。WANG 等^[15]、CONG 等^[22]、苏寒等^[7]的研究均有类似结论。冬小麦的气孔导度、蒸腾速率和净光合速率随着灌溉水盐分浓度的增加而降低, 这是由于微咸水灌溉使得土壤可溶性盐含量增加, 改变土壤渗透势, 降低土壤水分的有效性, 引起冬小麦生理干旱^[23]。为了阻止冬小麦叶片失水并保持叶内较高的渗透水势, 会通过减少气孔开度来抑制蒸腾作用的发生, 与此同时, 也会阻碍进入叶肉细胞内参与光合作用的 CO_2 , 直接导致光合效率的下降^[24]。虽然冬小麦光合作用有随着灌溉水盐分浓度的增加呈减弱的趋势, 但本研究结果表明, EC_w 在 5.26 dS/m 以下的处理与对照组相比并不显著 ($p > 0.05$), 说明适量浓度的微咸水灌溉并不会对冬小麦光合作用造成较大影响。

植物对盐碱胁迫的形态响应主要是通过地上、地下生物量的分配体现的^[25]。本研究结果表明, 当灌溉水超过一定浓度后, 冬小麦生长指标有随着浓度的增加而呈下降的趋势, 相比于对照组, EC_w 为 9.24 dS/m 时, 冬小麦最大株高、最大叶面积、成熟期地上部干物质重、根系干物质重、产量分别降低 2.81%, 15.33%, 15.55%, 47.25%, 27.53%(图 6、图 7、表 2)。这与 SOOTHAR 等^[26]、WANG 等^[15]、龚雨田等^[27]的研究结果类似。这是因为盐分入渗到土壤后, 被根系吸收并扩散, 影响作物的生长^[15, 26-27]。本研究中使用 EC_w 低于 5.26 dS/m 的微咸水进行灌溉不会对冬小麦产生不利影响, 且相比于对照处理, 其最大株高、最大叶面积、成熟期地上部干物质质量、产量分别提高 4.30%, 0.75%, 8.29%, 6.98%(图 5、图 6、表 2)。在王天宇^[23]、马玉诏等^[28]、龚雨田等^[27]的研究中同样发现了类似结论。对于一些耐盐碱的作物, 适度的微咸水灌溉对其生长有一定促进作用, 这是因为少量的盐分胁迫使得土壤渗透势提高, 促进作物根系对水分的吸收, 并且在一定的盐胁迫下干物质向小麦籽粒中转移, 从而造成产量的一定提升^[23, 27, 29]。基于相对产量与微咸水电导率之间关系的分段函数拟合, 计算得出冬小麦灌溉微咸水电导率阈值为 5.82 dS/m(图 8), 高于 AYERS 等^[11]给出的小麦阈值 ($EC_w = 4$ dS/m), 这与冬小麦品种、土壤环境、天气状况、农田管理措施等因素都有较大关系。本研究使用的是由西北农林科技大学选育而成的“小偃 22”冬小麦品种, 该品种具有抗逆性强、适应性广等特点, 这可能是本研究冬小麦阈值相比 AYERS 等^[11]所给出的小麦阈值高的原因。

本试验通过盆栽种植冬小麦, 受干扰较小, 土壤水分养分充足, 不同处理下冬小麦的生长特征明显,

但与农田实际情况还有差异,试验结果有待在田间进一步验证。

4 结 论

(1)土壤含水率随着灌溉微咸水浓度的增加而增大,当灌溉微咸水电导率为 9.24 dS/m 时,土壤含水率分别比 CK 提高 5.43% (0—10 cm), 4.21% (10—20 cm), 4.98% (20—40 cm); 微咸水灌溉导致 0—40 cm 土层土壤盐分的累积,且灌溉水浓度越高累积量越多,当灌溉微咸水电导率为 9.24 dS/m 时,0—40 cm 土层土壤平均 E_{ce} 相比 CK 增加 9.51 dS/m。

(2)用电导率为 7.07, 9.24 dS/m 的微咸水进行灌溉造成冬小麦光合参数、株高、叶面积、地上和地下部干物质质量及最终产量的下降,产量相比 CK 分别下降 11.04%, 27.53%; 而用电导率为 3.00, 5.26 dS/m 的微咸水进行灌溉,冬小麦生长、光合生理作用及最终产量与 CK 相比无显著差异。

(3)冬小麦灌溉微咸水电导率阈值为 5.82 dS/m, 当超过该阈值时,每增加 1 dS/m, 冬小麦相对产量下降 8.80%。

参考文献:

- [1] 2021 年度《中国水资源公报》发布[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(7): 85.
China water resources bulletin for 2021[J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(7): 85.
- [2] 吴雨晴, 郑春莲, 李科江, 等. 咸水灌溉对麦—玉两熟制农田土壤水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 288-294.
WU Y Q, ZHENG C L, LI K J, et al. Effects of saline water irrigation on soil water-stable aggregates in wheat-maize crop double cropping system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 35(2): 288-294.
- [3] 王艺乔, 郑春莲, 李科江, 等. 施用有机肥对咸水灌溉农田耕层土壤有机质及水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 268-274.
WANG Y Q, ZHENG C L, LI K J, et al. Effects of organic fertilizer application on soil organic matter and water-stable aggregates of plow layer in farmland with saline water irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 268-274.
- [4] 张美桃, 杨培岭, 任树梅, 等. 灌溉水盐分及灌水量对土壤水盐分布与春玉米生长的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 290-298.
ZHANG M T, YANG P L, REN S M, et al. Effects of irrigation water salinity and irrigation amount on soil water and salt distribution and spring maize growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 290-298.
- [5] 高聪帅, 邵立威, 闫宗正, 等. 不同矿化度微咸水灌溉冬小麦对下季作物产量和周年土壤盐分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(5): 809-820.
GAO C S, SHAO L W, YAN Z Z, et al. Annual soil salt balance and crop performance under brackish water irrigation during the winter wheat season[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 29(5): 809-820.
- [6] 刘宗潇, 朱成立, 翟亚明, 等. 微咸水灌溉对土壤 EC 值及冬小麦产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 59-64.
LIU Z X, ZHU C L, ZHAI Y M, et al. Influence of brackish water irrigation on soil EC and yield of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(3): 59-64.
- [7] 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.
- [8] 乔若楠, 程煜, 闫思慧, 等. 不同阳离子组成微咸水灌溉对生菜光合和离子吸收特性的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 378-384.
QIAO R N, CHENG Y, YAN S H, et al. Effects of saline water irrigation with different cations compositions on lettuce photosynthesis and ions uptake characteristics [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 378-384.
- [9] 王罕博, 张栓堂, 焦艳平, 等. 不同氮肥与矿化度水平微咸水喷灌对冬小麦光合特征及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 99-106.
WANG H B, ZHANG S T, JIAO Y P, et al. Effects of brackish water sprinkling irrigation with different nitrogen and salinity levels on photosynthesis characteristics and yield of winter wheat[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(1): 99-106.
- [10] ZHANG T B, JI X X, ZHAN X Y, et al. Maize is stressed by salt rather than water under drip irrigation with soil matric potential higher than -50 kPa in an arid saline area[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2021, 207(4): 654-668.
- [11] AYERS R S, WESTCOT D W. Water quality for agriculture[M]. USA: UN-FAO, 1985: 29.
- [12] 刘小媛, 高佩玲, 张晴雯, 等. 微咸水矿化度对重度盐碱土壤入渗特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 102-107.
LIU X Y, GAO P L, ZHANG Q W, et al. Effect of mineralization degree of infiltration water on infiltration characteristics of severely saline-alkali soil[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2018, 36(1): 102-107.
- [13] 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.
- [14] 杨培岭, 王瑜, 任树梅, 等. 咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 273-281.
- YANG P L, WANG Y, REN S M, et al. Soil moisture and saline distribution characteristics and maize stem water uptake under alternate irrigation between saline water and groundwater[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 273-281.
- [15] WANG T Y, XU Z H, PANG G B. Effects of irrigating with brackish water on soil moisture, soil salinity, and the agronomic response of winter wheat in the Yellow River Delta[J]. Sustainability, 2019, 11(20): e5801.
- [16] WANG Y Q, LI Z, XIE L M, et al. Brackish water promote the ecological restoration of estuarine wetland[J]. Ecological Engineering, 2023, 187: e106843.
- [17] ZHU J J, MAO Y, SUN J N, et al. Response of water-salt migration to brackish water irrigation with different Irrigation intervals and sequences[J]. Water, 2019, 11(10): e2089.
- [18] 乔若楠. 不同离子组成微咸水灌溉对盆栽土壤理化性质和生菜生长的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- QIAO R N. Effects of saline water irrigation with different ionic composition on physical and chemical properties of potting soil and growth of lettuce[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [19] 闫思慧, 汪楠楠, 孟玉婷, 等. 不同钠钾比微咸水对土壤入渗性能和水盐分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 150-158.
- YAN S H, WANG N N, MENG Y T, et al. Effects of saline water with different sodium-to-potassium ratios on water infiltration and distribution of water and salt[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 150-158.
- [20] 贺文君. 微咸水灌溉对滨海盐碱土水盐分布和金银花生长的影响[D]. 山东 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2022.
- HE W J. Effect of brackish water irrigation on soil water and salt distribution and honeysuckle (*Lonicera japonica* Thunb.) growth in coastal saline land [D]. Yantai, Shandong: Yantai Institute of Coastal Zone Research, University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [21] 许大全. 光合作用效率[J]. 植物生理学通讯, 1988, 1(5): 1-7.
- XUN D Q. Photosynthetic efficiency[J]. Plant Physiology Communication, 1988, 1(5): 1-7.
- [22] CONG X, PANG G B, XU Z H, et al. Physiological responses of winter wheat (*Triticum Aestivum* L.) to alternate irrigation with fresh and brackish water [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2021, 19(4): 3137-3152.
- [23] 王天宇. 微咸水灌溉下土壤水盐动态与冬小麦胁迫调节机制[D]. 济南: 济南大学, 2018.
- WANG T Y. Soil salt dynamic and winter wheat stress regulation mechanism under brackish water irrigation [D]. Jinan: University of Jinan, 2018.
- [24] 王海霞, 徐征和, 庞桂斌, 等. 微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 291-297.
- WANG H X, XU Z H, PANG G B, et al. Effects of brackish water irrigation on water-salt distribution and winter wheat growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 291-297.
- [25] 王佳珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5565-5577.
- WANG Q Z, LIU Q, GAO Y N, et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5565-5577.
- [26] SOOTHAR R K, ZHANG W Y, LIU B H, et al. Sustaining yield of winter wheat under alternate irrigation using saline water at different growth stages: A case study in the north China plain[J]. Sustainability, 2019, 11(17): 1-16.
- [27] 龚雨田, 孙书洪, 闫宏伟. 微咸水灌溉对冬小麦产量及农艺性状的影响[J]. 节水灌溉, 2017(9): 33-37.
- GONG Y T, SUN S H, YAN H W. Study on the impact of saline water with different materialization degree on growth characteristics and yield of winter wheat[J]. Water Saving Irrigation, 2017(9): 33-37.
- [28] 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.
- [29] ORS S, SUAREZ D L. Spinach biomass yield and physiological response to interactive salinity and water stress[J]. Agricultural Water Management, 2017, 190: 31-41.