

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.007

高伟强,张体彬,童建康,等.不同钠钾比微咸水对土壤水盐特性和冬小麦生长的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):372-380.

GAO Weiqiang, ZHANG Tibin, TONG Jiankang, et al. Effects of brackish water with different sodium-potassium ratios on soil water-salt characteristics and winter wheat growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 372-380.

不同钠钾比微咸水对土壤水盐特性和冬小麦生长的影响

高伟强^{1,2}, 张体彬^{1,3,4}, 童建康^{1,2}, 刘祯媛^{1,2}, 梁青^{1,2},
邝雨欣⁴, 程煜^{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] 研究微咸水灌溉对土壤水盐特性和作物生长的影响,有助于指导微咸水的安全利用。[方法] 在遮雨条件下开展冬小麦盆栽试验,以去离子水作为对照(CK),设置电导率为 4 dS/m,钠钾比为 1:0(T1),1:1(T2),0:1(T3)的 3 种微咸水水质处理,研究土壤水盐特性,冬小麦光合生理、生长发育和产量形成。[结果] 与 CK 相比,T1、T2、T3 微咸水灌溉下 0—40 cm 土层土壤含水率分别增加 19%,8%,14% ($p < 0.05$),土壤 $EC_{1:5}$ (土水比 1:5 浸提液电导率)和 Na^+ 、 K^+ 浓度随着冬小麦生育期持续增加,T1、T2、T3 处理 0—40 cm 土层土壤盐分分别增加 252%,223%,234% ($p < 0.05$),且盐分大部分积累在 10—20 cm 土层。与 CK 相比,T1 处理的冬小麦净光合速率显著降低 16% ($p < 0.05$),而 T2、T3 处理与 CK 相比无显著性差异 ($p > 0.05$)。T2 处理提升冬小麦的株高、单株叶面积和地上部干物质量,与 CK 相比产量增加 8.41% ($p < 0.05$);而各处理地下部干物质量之间没有显著差异 ($p > 0.05$)。[结论] 利用 4 dS/m 微咸水灌溉改变土壤原有水盐特性,使盐分积累在土壤中,短期内对冬小麦生长有一定促进作用。在本研究中,使用钠钾比为 1:1 的微咸水对冬小麦生长和产量提升效果更好。研究结果可为微咸水可持续利用提供理论依据。

关键词: 微咸水; 钠钾比; 冬小麦; 水盐分布; 光合特性

中图分类号: S273.2; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0372-09

Effects of Brackish Water with Different Sodium-Potassium Ratios on Soil Water-Salt Characteristics and Winter Wheat Growth

GAO Weiqiang^{1,2}, ZHANG Tibin^{1,3,4}, TONG Jiankang^{1,2}, LIU Zhenyuan^{1,2},
LIANG Qing^{1,2}, KUANG Yuxin⁴, CHENG Yu^{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 for Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To study the effects of brackish water irrigation on soil water and salt characteristics and crop growth is helpful to guide the safe utilization of brackish water. [Methods] A pot experiment of winter wheat was carried out under the condition of rain-shielding. Deionized water was used as the control (CK). Three kinds of brackish water treatments with conductivity of 4 dS/m and different sodium-potassium ratios were set up, including sodium-potassium ratio of 1:0 (T1), sodium-potassium ratio of 1:1 (T2), sodium-potassium ratio of 0:1 (T3). The water-salt characteristics of the soil, the photosynthetic physiology, growth and development as well as yield formation of winter wheat were studied. [Results] Compared with

收稿日期: 2024-05-28

修回日期: 2024-07-10

录用日期: 2024-07-20

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-10-28

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2001404); 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-53)

第一作者: 高伟强(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事微咸水利用和盐碱地改良研究。E-mail: 15036865803@163.com

通信作者: 张体彬(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农业水资源高效利用和盐碱地改良研究。E-mail: zhangtibin@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

CK, the 0–40 cm soil moisture content under T1, T2 and T3 brackish water irrigation increased by 19%, 8% and 14% ($p < 0.05$), respectively. Soil $EC_{1:5}$ (soil water ratio 1 : 5 extract conductivity) and Na^+ and K^+ concentrations continued to increase with the growth period of winter wheat. The 0–40 cm soil salinity of T1, T2 and T3 treatments increased by 252%, 223% and 234% ($p < 0.05$), respectively, and most of the salt accumulated in the 10–20 cm soil layer. The net photosynthetic rate of winter wheat was significantly reduced (by 16%, $p < 0.05$) in the T1 treatment compared to CK, while there was no significant differences ($p > 0.05$) between the T2 and T3 treatments and CK. The T2 treatment enhanced plant height, leaf area per plant and aboveground dry matter mass of winter wheat, and increased the yield by 8.41% ($p < 0.05$) compared to CK; while there was no significant difference in underground dry matter mass among treatments ($p > 0.05$). [Conclusion] In summary, irrigation using 4 dS/m brackish water changed the original water-salt characteristics of the soil, caused salts to accumulate in the soil and promoted winter wheat growth in the short term. In this study, the use of brackish water with a sodium-potassium ratio of 1 : 1 had a better effect on winter wheat growth and yield enhancement. The results can provide a theoretical basis for sustainable utilization of brackish water.

Keywords: brackish water; sodium-potassium ratio; winter wheat; water and salt distribution; photosynthetic characteristics

Received: 2024-05-28

Revised: 2024-07-10

Accepted: 2024-07-20

Online(www.cnki.net): 2024-10-28

我国是一个农业大国,淡水资源短缺严重限制农田灌溉用水量,阻碍农业的可持续发展^[1]。微咸水作为非常规水资源,能够有效补充农业用水量和缓解农业用水危机^[2]。据统计^[3],中国有丰富的地下微咸水资源,其年可开采量为 130 亿 m^3 ,主要分布于地下 10–100 m,具备巨大的开发潜力和利用价值。倘若能开采利用,一定程度上能提高水资源利用效率,同时缓解农田干旱,补充大田作物所需要的水分,提升旱作物产量^[4]。

然而,不合理的微咸水灌溉会增加土壤盐分,进而影响作物生长。当前微咸水安全可持续利用已成为农业水资源管理领域亟需解决的重要课题。为此,国内外均投入大量资源,展开广泛的研究与实践。YANG 等^[5]利用不同矿化度微咸水灌溉表明,各梯度的微咸水灌溉后都造成盐分积累,且表层土壤积累的盐分显著高于深层土壤。微咸水的矿化度决定着土壤盐分的积累量,当灌溉的微咸水矿化度 > 4 g/L 时,显著增加土壤盐度,破坏土壤结构^[6]。当微咸水的矿化度较小时,虽然也增加土壤盐分,但短期内不会对作物造成危害。刘祯媛等^[7]研究表明,使用 5.82 dS/m 以下的微咸水进行灌溉不会对冬小麦的生长造成负面影响。有研究^[8]表明,在微咸水灌溉条件下,虽然冬小麦在灌浆期蒸腾速率显著下降,但净光合速率、叶面积指数及产量差异并不显著;也有研究^[9]表明,微咸水灌溉提升冬小麦净光合速率。微咸水灌溉对土壤和作物的影响不仅与微咸水矿化度相关,也取决于微咸水

的离子组成^[10]。闫思慧等^[11]探究了不同钠、钾离子组成微咸水对水盐运移的影响表明,钠钾比越高,土壤的盐分累积效应越大;SUN 等^[12]在中等盐胁迫下,通过降低土壤钠钾比,棉花的纤维品质和棉籽产量均得到显著提升;宋珊等^[13]研究发现,在钠钾比为 20 : 1 的微咸水灌溉下,长春花能够缓解盐胁迫造成的离子失衡,从而提高其光合作用效率;杨然等^[14]利用不同钠钾比的微咸水灌溉表明,钠钾比为 1 : 1 的微咸水显著促进番茄的生长。由此可见,适宜的钠钾比有利于缓解盐胁迫对作物的影响,维持植株的离子平衡,进而促进植株生长和发育。

综上所述,关于微咸水的研究大都集中于不同矿化度微咸水对土壤和作物的影响,而相同矿化度下,不同钠钾比微咸水对土壤和粮食作物(如小麦)的影响鲜有报道。因此,本研究通过冬小麦盆栽试验,在相同电导率下,设置钠钾比不同的微咸水水质处理,分析不同钠钾比微咸水对土壤水盐特性和对冬小麦生理生长的影响,旨在为微咸水合理利用和农业生产的可持续发展提供理论基础和科学支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自陕西杨凌(108°03′18″E, 34°16′22″N)典型农田 0–30 cm 土层,土壤质地为粉壤土,其中砂粒占比 24.05%,粉粒占比 70.94%,黏粒占比 5.01%,土壤质量密度为 1.3 g/cm³,pH 为 7.66,土壤中 Na^+ 和 K^+ 质量分数分别为 32.67, 22.35 mg/kg。供试土样经自然风干、

去除杂质后,过 5 mm 筛再充分混合均匀留取备用。

1.2 试验方法

1.2.1 试验材料 本研究采取盆栽试验,采用高度 44 cm,上宽 20 cm,下宽 12 cm 的黑色塑料盆,为方便盆底部通风透气,在盆底打 8 个对称的 2 mm 小孔排水,同时将塑料盆放置在 3 cm 高的隔空架上。装土时在盆底部铺设 2 层滤纸,防止盆中土壤流失,将供试土壤按照质量密度 1.3 g/cm^3 分层装填,高度为 40 cm。试验于 2022 年 10 月 18 日进行冬小麦的播种,在盆中间均匀播种 2 行,行距设置为 6 cm,每行播种 10 粒小麦,每盆播种 20 粒小麦,保留全部株数以供试验。试验所采用的冬小麦品种为“小偃 22”。

1.2.2 试验设计 试验于 2022 年 10 月 18 日至 2023 年 5 月 21 日在陕西杨凌西北农林科技大学灌溉试验站($108^{\circ}04'20''\text{E}$, $34^{\circ}17'43''\text{N}$)旱棚内进行,试验周期共 215 天。以去离子水灌溉作为对照(CK),在保持电导率 4 dS/m 条件下,设置钠钾比不同的 3 种微咸水处理,分别为钠钾比 1:0(T1)、钠钾比 1:1(T2)、钠钾比 0:1(T3)。具体试验处理见表 1,每个处理设置 8 个重复。冬小麦的灌溉上下限采用称重法控制,灌水上限为田间持水量(23%),下限为 60% 田间持水量(13.8%)。本试验保持冬小麦的灌溉时间和灌溉用水量都相同,冬小麦整个生育期共计灌水 32 次,累积灌水量为 360 mm。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理	灌溉水盐分组成/(mmol·L ⁻¹)			设定电导率/(dS·m ⁻¹)	实测电导率/(dS·m ⁻¹)
	NaCl	KCl	CaCl ₂ ·2H ₂ O		
CK	0	0	0	0	0.2
T1	35.0	0	2.5	4	3.8
T2	17.5	17.5	2.5	4	4.1
T3	0	35.0	2.5	4	4.3

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水盐 用土钻在冬小麦关键生长阶段(拔节期、抽穗期、灌浆期及成熟期)取土,采集 0—10,10—20,20—40 cm 土层,每个处理取 3 次重复,将土壤分为 2 部分,一部分利用烘干法测量土壤含水率;另一部分经自然风干后过 2 mm 筛,采用土水比 1:5 的方法^[15]测定盐分特性:向 5 g 风干土样中加入 25 mL 去离子水,振荡 30 min 后再过滤得到清澈的土壤浸提液,用电导率仪测量 $EC_{1:5}$,用原子吸收分光光度计测量土壤的 Na^+ 和 K^+ 。

1.3.2 冬小麦光合特性 在冬小麦开花期,每个处理选取 3 片具有代表性植株的旗叶用便携式光合作用测定系统测定光合指标,包括光合速率、胞间 CO_2

浓度、蒸腾速率和气孔导度。在天气晴朗且无风的情况下,选择时间为上午 10:00—12:00 进行测量。

1.3.3 冬小麦株高、叶面积 在冬小麦关键生长阶段(拔节期、抽穗期、灌浆期及成熟期),每个处理选取 6 株具有代表性的冬小麦,测量其株高和叶面积。使用精度 0.1 cm 的卷尺量取株高,同时量取叶片的长度及其最宽处的宽度,叶面积用长×宽×0.83 折算法^[7]计算。

1.3.4 冬小麦干物质量及产量 在冬小麦成熟期针对每个处理随机选取 3 盆样本进行测产,并分别称取地上与地下部干物质量。对于地上部干物质,取地上部全部植株,在 105 °C 下进行杀青,随后转至 75 °C 烘干至恒重,最后称量得到地上部干物质量。对于地下部根系,则将盆内土壤倒入 0.25 mm 的尼龙网袋中,用水冲洗以去除附着土壤,保留全部根系并烘干至恒重后称量得到地下部干物质量。

1.4 统计分析

数据收集与处理采用 Microsoft Excel 2021 软件,数据分析使用 SPSS 26.0 软件,绘图利用 Origin 2024 软件完成。不同处理间的显著性差异,使用单因素方差分析(ANOVA)检验,其中统计检验的显著性水平为 $p=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同钠钾比微咸水对土壤水盐的影响

2.1.1 土壤水分 由图 1 可知,各土层随着冬小麦生育期总体上呈现出在抽穗期和成熟期含水率上升,在灌浆期下降的趋势。CK 处理在各土层的含水率均不同程度的小于 3 种钠钾比微咸水(T1、T2、T3)处理。从土层来看,0—10 cm 土层的土壤含水率整体上大于 10—20,20—40 cm 的土层。不同处理在各土层生育期的平均含水率表现为 $T1>T3>T2$ 。且 T1 处理各土层的土壤含水率在冬小麦抽穗期、灌浆期、成熟期均表现最高,生育期内含水率的最大值出现在 T1 处理,分别为 19.60%(0—10 cm),18.90%(10—20 cm),18.90%(20—40 cm),在冬小麦成熟期 T1 处理比 CK 处理的含水率分别提升 30.77%(0—10 cm),18.66%(10—20 cm),14.75%(20—40 cm)($p<0.05$)。

2.1.2 土壤盐分 由图 2、表 2 可知,随着冬小麦生育期的递进,T1、T2、T3 处理下各土层土壤盐分有不断增长的趋势,0—10 cm 土层的盐分增长相对比较平缓,不同土层盐分增长的幅度大小表现为 10—20 cm>20—40 cm>0—10 cm。CK 处理在不同生育期内不同土层盐分变化均不明显。土壤盐分在生育期内不断积累,盐分积累多集中在 10—20 cm 土层。土壤盐分最大值出现在 10—20 cm 土层处于冬小麦成熟

期的 T1 处理(1.93 dS/m),此时 T1 处理的盐分含量比 T2、T3 处理分别增加 14.00%,7.00% ($p < 0.05$)。在各土层中,T1、T2、T3 处理在冬小麦成熟期的平均盐分含量分别是 CK 处理的 4.35、4.00、4.18 倍,平均土壤盐

分分别提升 252.00%,223.00%,234.00% ($p < 0.05$)。T1 处理在冬小麦拔节期到成熟期,各土层的盐分分别提升 0.69 倍(0—10 cm),2.00 倍(10—20 cm)和 1.86 倍(20—40 cm)。

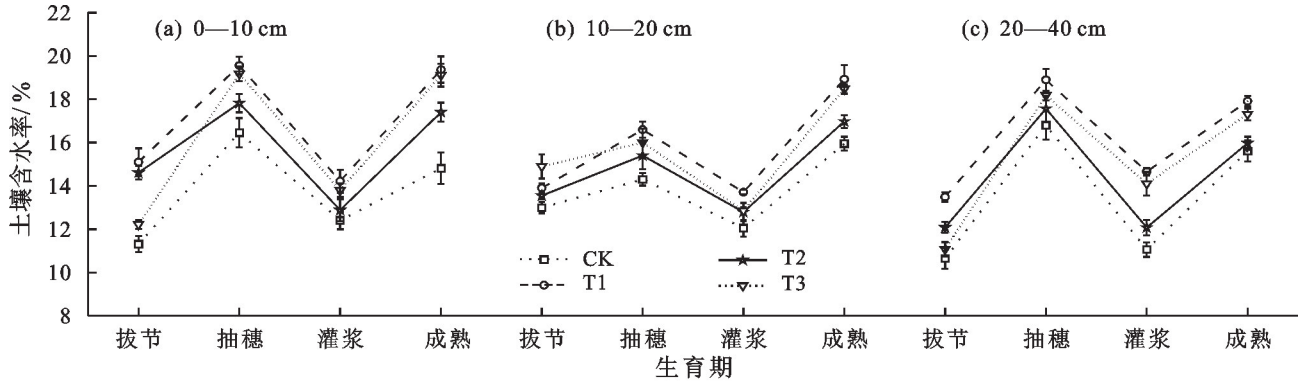


图 1 不同钠钾比处理各土层土壤含水率

Fig.1 Soil moisture content of each soil layer under treatments with different sodium-potassium ratios

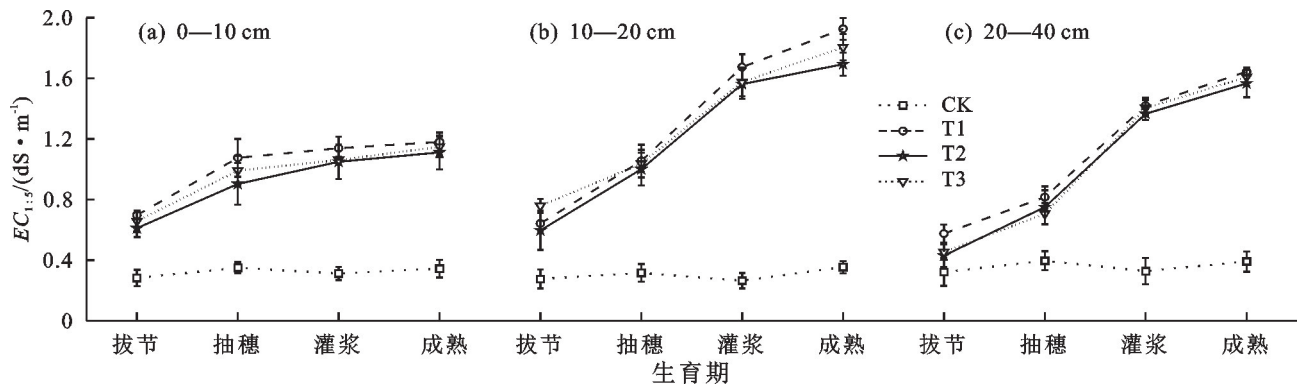


图 2 不同钠钾比处理各土层土壤电导率

Fig.2 Soil electrical conductivity in different soil layers under treatments with different sodium-potassium ratios

2.1.3 土壤钠离子 由图 3 可知,T1、T2 处理由于钠盐的加入,土壤中的 Na⁺ 明显增多,各土层 T1、T2 处理随着生育期的递进各土层呈不断增大趋势,均在成熟期达到最大值。在不同生育期内各土层 T1 处理 Na⁺ 的浓度显著高于其他处理 ($p < 0.05$),在整体上呈 T1>T2>T3。Na⁺ 浓度的最大值出现在 10—20 cm 土层处于冬小麦成熟期的 T1 处理为 1 147.43 mg/kg。在 0—10、20—40 cm 土层,CK 和 T3 没有显著性差异 ($p > 0.05$),在 10—20 cm 土层 CK 和 T3 均小于 T1、T2 处理 ($p < 0.05$)。Na⁺ 的分布主要集中在 0—20 cm 土层。在冬小麦成熟期,T1 处理在 10—20 cm 土层土壤的 Na⁺ 浓度比 0—10、20—40 cm 分别增多 18.17%,12.22%。T1 处理在冬小麦拔节期到成熟期,各土层的 Na⁺ 含量分别提升 1.00 倍(0—10 cm),2.24 倍(10—20 cm)和 4.48 倍(20—40 cm)。

2.1.4 土壤钾离子 随着钾盐的加入,各土层土壤中的 K⁺ 积累量没有 Na⁺ 多,但 K⁺ 和 Na⁺ 在各土层土壤中有着相同的变化趋势(图 4)。T2、T3 处理在冬小麦生育期内不同土层均呈不断增大的趋势,K⁺ 浓度在冬小

麦成熟期达到最大值,最大值出现在 10—20 cm 土层,为 828.95 mg/kg。T3 处理 K⁺ 浓度显著大于 T2 处理 ($p < 0.05$),K⁺ 的分布主要集中在 0—20 cm 土层。T3 处理在 10—20 cm 土层土壤的 K⁺ 浓度比 0—10、20—40 cm 分别增多 28.60%,23.90%。T3 处理在冬小麦拔节期到成熟期,各土层的 K⁺ 含量分别提升 1.10 倍(0—10 cm),1.06 倍(10—20 cm)和 2.32 倍(20—40 cm)。

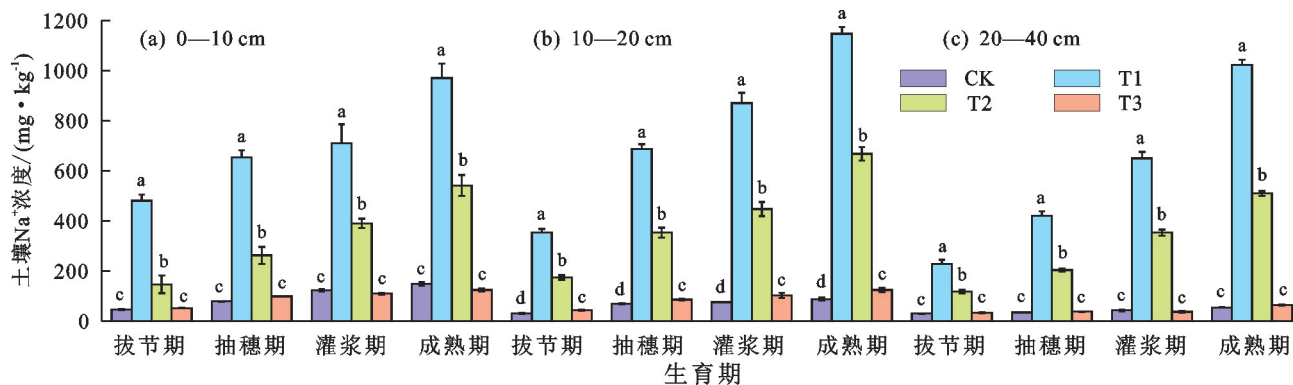
2.2 不同钠钾比微咸水对冬小麦光合特性和生长的影响

2.2.1 冬小麦光合特性 由图 5 可知,T1 处理的冬小麦净光合速率、气孔导度、蒸腾速率相较于 CK 处理显著降低 16.00%,13.14%,12.10%,蒸腾速率显著增加 10.00% ($p < 0.05$)。T2 和 T3 处理的冬小麦净光合速率、气孔导度及胞间 CO₂ 浓度与 CK 和 T1 处理相比,无显著性差异 ($p > 0.05$)。T3 处理的冬小麦蒸腾速率比 CK 处理显著降低 9.30%。总体上呈 CK 处理冬小麦光合特性与 T2 处理无显著性差异 ($p > 0.05$),而 T1 却显著降低冬小麦光合特性。

2.2.2 冬小麦株高和叶面积 不同处理冬小麦的株

高均随着生育期的递进而增高,冬小麦株高的最大值稳定于成熟期(图 6a)。T2、T3 处理的株高在冬小麦抽穗、灌浆、成熟期差异不显著($p>0.05$)。在冬小麦拔节期,CK 处理的株高显著低于 T1、T2 处理,但与 T3 差异不显著。在抽穗期,T1、T2、T3 处理相较于 CK 处理分别提高 3.56%,8.11%,9.60%($p<0.05$)。在灌浆期,T1、T2、T3 处理相较于 CK 处理分别提高 7.42%,8.39%,9.27%($p>0.05$)。在成熟期,T3 处理比 CK 提高 1.89%。冬小麦在拔节期叶面积持续增加,在抽穗期达到叶面积最大值,在灌浆和成熟期叶面积逐渐减少(图 6b)。T2、T3 处理在冬小麦生育期内叶面积差异性不显著($p<0.05$)。T1、T2、T3 处理在拔节、抽穗、灌浆期相比于 CK 处理叶面积分别增大 23.70%,39.00%,44.60%、11.22%,18.19%,17.56%和 31.58%,35.79%,26.16%($p<0.05$)。在成熟期,T2 相较于 CK 的叶面积提升 18.52%,T1、T3 与 CK 间无显著性差异。在各处理之间,冬小麦的株高和叶面积有着相同的趋势,T2、T3 的差异均不显著,且 CK 处理明显低于其他处理。

2.2.3 冬小麦干物质量 冬小麦地上部干物质量由穗、叶、茎组成,其中穗占干物质量主要部分(图 7a),T1、T2、T3 处理的穗重相比于 CK 分别提升 10.00%,15.38%,11.20%($p<0.05$)。但 T1、T2、T3 处理的冬小麦穗重没有显著性差异($p>0.05$)。T3 处理的叶、茎重相较于 CK 分别提升 5.63%,6.45%。CK、T1、T2 处理之间的冬小麦叶、茎重差异不显著($p>0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示各处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 3 不同钠钾比处理各土层土壤 Na^+ 浓度

Fig.3 Na^+ concentrations in soil layers under different sodium-potassium ratios treatments

2.2.4 冬小麦产量 由表 3 可知,不同的处理对冬小麦穗粒数没有显著性差异($p>0.05$),穗粒数在数值上无明显变化。T1、T2、T3 处理与 CK 相比冬小麦的千粒重分别增加 5.01%,7.38%,7.25%($p<0.05$)。但 T1、T2、T3 处理之间无显著差异($p>0.05$)。T2、T3 处理在产量上比 CK 有显著提升($p<0.05$),相比 CK,每盆的产量分别增产 8.41%,7.57%。T2、T3 在产量

从整体来看,地上部干物质量表现为 $T2>T3>T1>CK$,T1、T2、T3 处理的地上部干物质量分别增加 5.38%,10.20%,9.42%。地下部干物质量是指冬小麦的根干重,各处理之间没有显著性差异($p>0.05$)。

表 2 不同钠钾比处理各土层土壤电导率方差分析

Table 2 Variance analysis of soil electrical conductivity in different soil layers under treatments with different sodium-potassium ratios

土层深度/cm	处理	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
0—10	CK vs. T1	<0.001	0.002	<0.001	<0.001
	CK vs. T2	<0.001	0.002	<0.001	<0.001
	CK vs. T3	<0.001	0.003	<0.001	<0.001
	T1 vs. T2	0.058	0.797	0.862	0.029
	T1 vs. T3	0.328	0.602	0.204	0.043
	T2 vs. T3	0.277	0.789	0.157	0.039
10—20	CK vs. T1	0.036	0.023	<0.001	<0.001
	CK vs. T2	0.048	0.032	<0.001	<0.001
	CK vs. T3	0.011	0.026	<0.001	<0.001
	T1 vs. T2	0.076	0.840	0.918	0.021
	T1 vs. T3	0.451	0.943	0.271	0.042
	T2 vs. T3	0.300	0.897	0.313	0.022
20—40	CK vs. T1	0.048	0.031	<0.001	<0.001
	CK vs. T2	0.026	0.016	<0.001	<0.001
	CK vs. T3	0.017	0.039	<0.001	<0.001
	T1 vs. T2	0.023	0.054	0.063	0.038
	T1 vs. T3	0.016	0.081	0.098	0.022
	T2 vs. T3	0.079	0.077	0.062	0.023

上无显著性差异。

3 讨论

3.1 不同钠钾比微咸水对土壤水盐的影响

本研究中,微咸水处理土壤含水量均大于 CK 处理(图 1)。已有研究^[16]表明,微咸水中的盐分在土壤中逐渐积累,导致土壤渗透势被破坏,影响水分运移,并导致土壤含水量增加^[17],而 0—10 cm 土层比 10—

20, 20—40 cm 土层含水率高, 主要是因为盐分的积累和灌溉的次数与频率导致^[7]。土壤中存在 Na⁺ 导致土壤团粒结构分散, 形成单个土壤颗粒, 堵塞土壤

孔隙, 恶化土壤结构, 导致土壤渗透能力下降, 因此, 在冬小麦拔节期, T1 处理的微咸水 Na⁺ 含量最多, 导致含水率相对其他处理较高(图 1)。

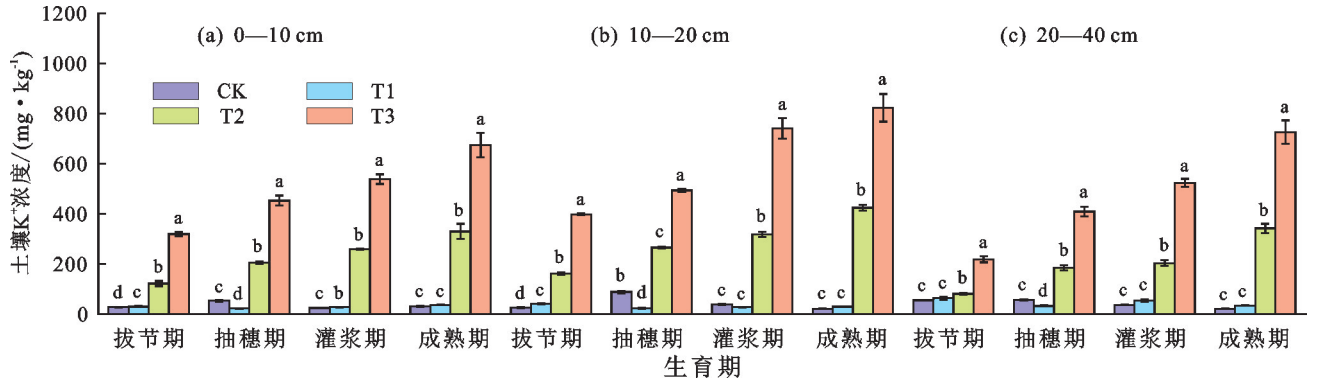


图 4 不同钠钾比处理各土层土壤 K⁺ 浓度

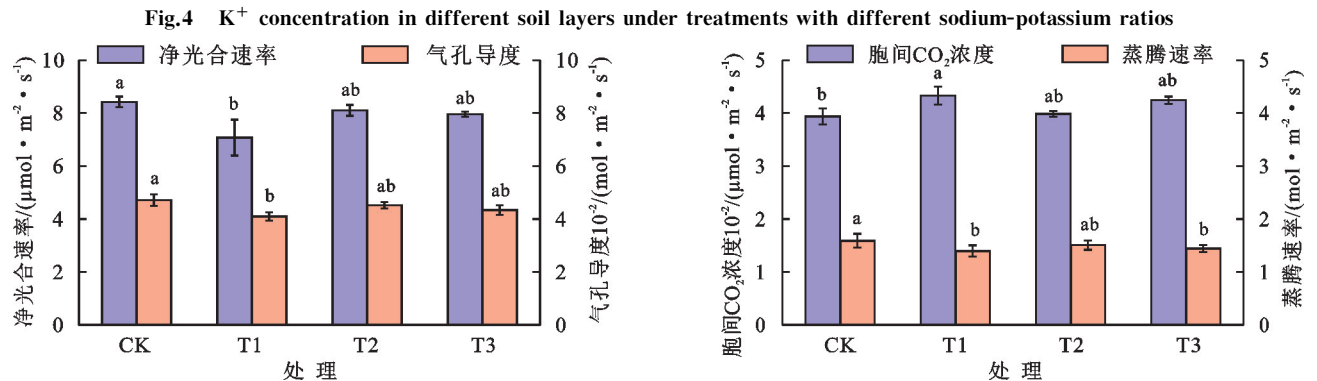


图 5 不同钠钾比处理下冬小麦光合参数

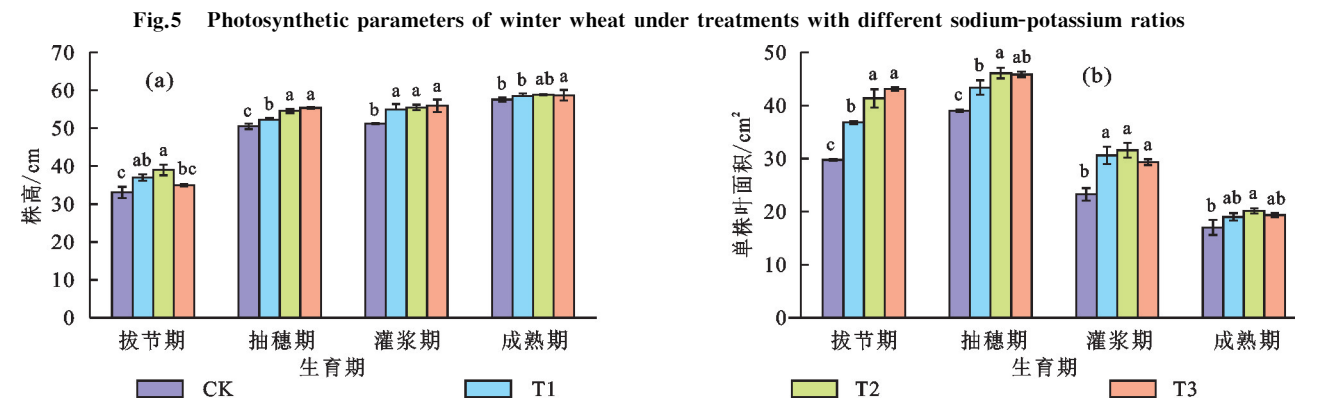


图 6 不同钠钾比处理下冬小麦株高和单株叶面积

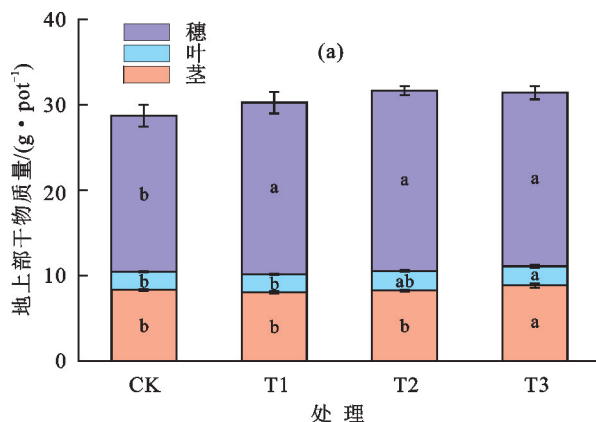
Fig.6 Winter wheat plant height, leaf area per plant under treatments with different sodium-potassium ratios

已有研究^[18]表明, K⁺ 可以吸附在土壤颗粒表面, 有助于保存土壤养分。但是 K⁺ 作为一种单价阳离子, 与钠离子具有相似的危害。SMITH 等^[19] 研究表明, K⁺ 对土壤的破坏作用约为 Na⁺ 的 1/3, 且 K⁺ 降低土壤水分渗透速率, 影响土壤水力特性。但当钠钾离子同时存在时, 由于 K⁺ 具有更高的离子交换亲和力, 使得在 K⁺ 含量相对较高的条件下, K⁺ 能够有效置换土壤胶体表面的 Na⁺。这一置换过程实质上是 K⁺ 取代原本可交换的 Na⁺。通过这种置换作用, 灌溉水中的 K⁺ 不仅有助于缓解由 Na⁺ 导致的土壤团粒结构破坏问题, 而且在一定程度上增强土壤的导

水性能, 从而导致 T3 处理的土壤含水率大于 T2。乔若楠等^[3] 研究指出, 钠钾比为 1 : 1 时缓解土壤渗透性的减弱, 与本试验 T2 处理含水率相比于 T1、T2 处理较低结果相同。

随着微咸水的不断加入, 土壤盐分随着水分的入渗随着土层深度增加而增加, 本试验的结果表明, 10—20 cm 土层随着生育期盐分上升幅度最大, 其可能原因是随着水分的入渗, 有一部分盐分在土壤下层随着水分蒸发盐分聚集在上层, 而最上层的盐分虽然也积累一部分盐分, 但是随着微咸水的灌溉, 土壤表层的盐分淋洗到更深处, 从而导致 10—20 cm

的盐分含量最高。本研究中 T1、T3 处理所添加的 K^+ 和 Na^+ 的浓度相同,但是 Na^+ 在土壤中的积累量



最大值却比 K^+ 更高,说明 K^+ 被小麦吸收,从而导致 K^+ 在土壤中的含量低于 Na^+ 。

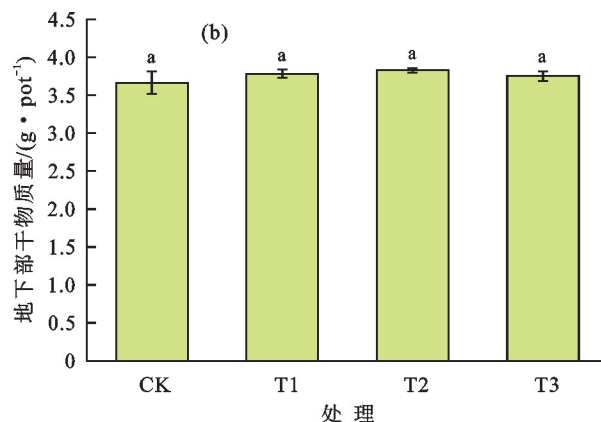


图 7 不同钠钾比处理下冬小麦地上、地下部干物质量

Fig.7 Dry matter mass of aboveground and belowground parts of winter wheat under treatments with different sodium-potassium ratios

表 3 不同钠钾比处理下冬小麦产量构成

Table 3 Yield components of winter wheat under treatments with different sodium-potassium ratios

处理	穗粒数/粒	千粒重/g	产量/(g·pot ⁻¹)
CK	23.68±0.39a	34.12±0.16b	16.16±0.34b
T1	23.73±0.11a	35.83±0.59a	17.01±0.36ab
T2	23.9±0.56a	36.65±0.57a	17.52±0.69a
T3	23.75±0.35a	36.60±0.48a	17.38±0.32a

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($p < 0.05$)。

3.2 不同钠钾比微咸水对冬小麦生长的影响

已有研究^[20]表明,3~5 g/L 为小麦微咸水灌溉的质量浓度阈值,在超过盐度阈值水平之前,土壤盐分升高不会影响作物生产^[21]。在作物耐盐阈值内,不同钠钾比微咸水提高抗氧化酶的活性,增强植物盐胁迫的耐受能力^[22],从而促进作物的生长发育,增加作物的产量^[7,23-24],与本文 T1、T2、T3 处理与 CK 相比促进冬小麦生长的结果一致。

本研究加入不同钠钾比微咸水均提升冬小麦株高和叶面积,这是因为钾是作物正常生长发育中不可或缺的营养元素之一,而钠和钾具有相似的水合半径,钠的离子状态与钾十分相似,从而钠在一定程度上能代替钾维持作物的生长发育功能^[25-26],然而这种代替的功能存在一定局限性,从而导致 T1 处理优于 CK 却低于 T2、T3 处理。少量盐分离子的加入提高土壤渗透压,加强根系的吸收能力,同时促进了光合产物的累积,有利于产量的提升^[27]。当钠钾比为 1:1 时,冬小麦植株可以更均衡地吸收利用土壤中的营养元素,从而与 CK 相比,T2 处理的产量增加最多。CK 与 T1、T2、T3 处理的地下部干物质量并无显著

性差异,可能原因是冬小麦根系在抽穗期之后几乎停止生长,而在冬小麦抽穗期各处理土壤的盐分及 Na^+ 、 K^+ 含量在冬小麦的耐受能力之内。

随着微咸水中 Na^+ 、 K^+ 的加入,冬小麦通过根系吸收一部分 Na^+ 、 K^+ ,从而转运到植株的各个部位,造成冬小麦生理干旱,进而增强叶绿素酶的活性,加速叶绿素的溶解^[28],对冬小麦的光合作用产生负面影响,导致其净光合速率降低,减少叶肉细胞同化 CO_2 的量^[23],从而导致本试验 T1、T2、T3 处理与 CK 处理相比冬小麦净光合速率、气孔导度、蒸腾速率下降,而胞间 CO_2 上升(图 5)。本试验的 T2 处理对冬小麦的生长促进作用优于 T1、T3 处理,原因是当钠钾比为 1:0 时,过量的 Na^+ 导致根系细胞受到渗透胁迫,难以维持正常的细胞膨压,进而影响根系的吸收功能^[14];当钠钾比为 0:1 时,细胞质中 K^+ 的过量积累对膜系统和生物大分子产生毒害作用^[29],在一定程度上抑制冬小麦生长。维持细胞钠钾比稳态是决定植物在盐胁迫期间生存能力的关键因素^[30],当钠钾比为 1:1 时,维护植株正常的离子平衡,从而保持植株体内正常的钠钾比,有利于冬小麦生长发育,与杨然等^[14]的研究结果相似。

本研究通过盆栽小麦试验,能够准确控制环境的可变性,不同处理间冬小麦生长差异明显,但结果对于农田实际的情况还有待进一步在大田验证。未来将开展更多不同梯度的钠钾比微咸水进行大田试验,以寻求更适宜的钠钾比微咸水灌溉方案。

4 结论

(1)灌溉不同的钠钾比微咸水后,各处理显著增加土壤含水率和盐分含量,在钠钾比为 1:0 时含水率、盐分含量最高,含水率、盐分含量相比于对照分别

增加 19.00%, 252.00%, 且盐分主要集中在 10—20 cm 土层。

(2)用钠钾比为 1 : 1 的微咸水灌溉冬小麦与对照组相比,净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度无显著差异,促进冬小麦的株高和叶面积、地上地下干物质量、产量的提升,产量相对对照提升 8.41%。

(3)在电导率为 4 dS/m 的条件下,钠钾比 1 : 1 的微咸水相比于钠钾比 0 : 1 和 1 : 0 的微咸水更适合灌溉。

参考文献:

- [1] 王辉.我国微咸水灌溉研究进展[J].节水灌溉,2016(6):59-63.
WANG H. Advances in study of brackish water irrigation in China[J].Water Saving Irrigation,2016(6):59-63.
- [2] 崔丙健,高峰,胡超,等.非常规水资源农业利用现状及研究进展[J].灌溉排水学报,2019,38(7):60-68.
CUI B J, GAO F, HU C, et al. The use of brackish and reclaimed waste water in agriculture: A review[J].Journal of Irrigation and Drainage,2019,38(7):60-68.
- [3] 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. Effect 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.
- [4] 倪刚,贺晨,曾溢,等.盐碱地咸水/微咸水农业安全与高效利用研究进展与展望[J].灌溉排水学报,2023,42(12):149-156.
NI G, HE C, ZENG Y, et al. Safe and efficient utilization of saline and brackish water in saline-alkali farmland: Progress and perspective[J].Journal of Irrigation and Drainage,2023,42(12):149-156.
- [5] YANG G, LI F D, TIAN L J, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation[J].Soil and Tillage Research,2020,199:e104592.
- [6] 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.
- [7] 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 Z Y, ZHANG T B, LIANG Q, 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.
- [8] 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.
- [9] 庞桂斌,张立志,丛鑫,等.微咸水灌溉下冬小麦光合作用与光响应曲线模拟[J].农业机械学报,2021,52(11):333-342.
PANG G B, ZHANG L Z, CONG X, et al. Leaf photosynthesis and light response curve simulation of winter wheat under brackish water irrigation[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(11):333-342.
- [10] 李慧,林青,徐绍辉.咸水/微咸水入渗对土壤渗透性和盐分阳离子运移的影响[J].土壤学报,2020,57(3):656-666.
LI H, LIN Q, XU S H. Effect of infiltration of saline water/brackish water on soil permeability and transport of salt cations in the soil[J].Acta Pedologica Sinica, 2020,57(3):656-666.
- [11] 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.
- [12] SUN L Y, WANG Z, XIONG C, et al. Improving the soil K⁺/Na⁺ ratio under moderate salt stress synergistically increases the yield and quality of cotton fiber and cotton seed [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 213:e118441.
- [13] 宋姗姗,隆小华,刘玲,等.钠钾比对盐胁迫下盛花期长春花离子分布和光合作用的影响[J].土壤学报,2011,48(4):883-887.
SONG S S, LONG X H, LIU L, et al. Effects of Na⁺/K⁺ on ion distribution in various organs and photosynthetic characteristics of *Catharanthus roseus* at the flowering stage under salt stress[J].Acta Pedologica Sinica, 2011,48(4):883-887.

- [14] 杨然,张渊博,梁祎,等.不同钠钾比对番茄幼苗生长及生理代谢的影响[J].西北农业学报,2021,30(10):1473-1483.
YANG R, ZHANG Y B, LIANG Y, et al. Effects of different sodium and potassium proportions on tomato seedling growth and physiological metabolism[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30(10): 1473-1483.
- [15] 郭新送,宋付朋,鞠正山.不同土水比土壤浸提液与饱和泥浆电导率的比较研究[J].土壤,2015,47(4):812-818.
GUO X S, SONG F P, JU Z S. Comparative study on electrical conductivity between saturated soil paste and saturated soil solutions under different soil/water ratios [J]. Soils, 2015, 47(4): 812-818.
- [16] 冯棣,张俊鹏,孙池涛,等.长期咸水灌溉对土壤理化性质和土壤酶活性的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):171-176.
FENG D, ZHANG J P, SUN C T, et al. Effects of long-term irrigation with saline water on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 171-176.
- [17] 乔若楠,程煜,闫思慧,等.不同离子微咸水对土壤水力特性和生菜生长的影响[J].排灌机械工程学报,2023,41(3):288-295.
QIAO R N, CHENG Y, YAN S H, et al. Effects of saline water with different cations on soil hydraulic properties and lettuce growth [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(3): 288-295.
- [18] ARIENZO M, CHRISTEN E W, JAYAWARDANE N S, et al. The relative effects of sodium and potassium on soil hydraulic conductivity and implications for winery wastewater management[J]. Geoderma, 2012, 173: 303-310.
- [19] SMITH C J, OSTER J D, SPOSITO G. Potassium and magnesium in irrigation water quality assessment [J]. Agricultural Water Management, 2015, 157: 59-64.
- [20] 吴忠东,王全九.微咸水混灌对土壤理化性质及冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2008,24(6):69-73.
WU Z D, WANG Q J. Effects of blending irrigation with brackish water on soil physico-chemical properties and winter wheat yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 69-73.
- [21] 张通港,胡行路,罗敏,等.微咸水离子组成对膜下滴灌土壤水盐分布和作物生长的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(8):16-25.
ZHANG T G, HU X L, LUO M, et al. The impact of ion composition in saline water on soil salinity, salt distribution, and crop growth under mulched drip irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 16-25.
- [22] OSTER J D. Irrigation with poor quality water [J]. Agricultural Water Management, 1994, 25(3): 271-297.
- [23] 董元杰,陈为峰,王文超,等.不同 NaCl 浓度微咸水灌溉对棉花幼苗生理特性的影响[J].土壤,2017,49(6):1140-1145.
DONG Y J, CHEN W F, WANG W C, et al. Effects of brackish water irrigation under different NaCl concentrations on physiological characteristics of cotton seedlings [J]. Soils, 2017, 49(6): 1140-1145.
- [24] 陈素英,张喜英,邵立威,等.微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(3):579-585.
CHEN S Y, ZHANG X Y, SHAO L W, et al. Effect of deficit irrigation with brackish water on growth and yield of winter wheat and summer maize [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 579-585.
- [25] GLENN E, PFISTER R, BROWN J J, et al. Na and K accumulation and salt tolerance of *Atriplex canescens* (Chenopodiaceae) genotypes [J]. American Journal of Botany, 1996, 83(8): e997.
- [26] WAKEEL A. Potassium-sodium interactions in soil and plant under saline-sodic conditions [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176(3): 344-354.
- [27] 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.
- [28] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2002:119-127.
CHEN J X, WANG X F. Laboratory instruction of plant physiology [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002: 119-127.
- [29] 贾娜尔·阿汗,杨春武,孙荣娜.钾、钠对水稻种子萌发抑制作用的比较[J].种子,2009,28(1):80-82.
JIANAER · A H, YANG C W, SUN R N. The inhibition action of K compare to Na on germination of rice seed [J]. Seed, 2009, 28(1): 80-82.
- [30] YANG Y Q, GUO Y. Unraveling salt stress signaling in plants [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2018, 60(9): 796-804.