

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

乔若楠^{1,2}, 程煜^{1,2}, 闫思慧^{1,2}, 罗敏^{1,2}, 张通港^{1,2}, 王春^{1,2}, 张体彬^{1,3}, 冯浩^{1,3}

(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.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究不同微咸水水质对土壤盐分和作物生长的影响,在日光温室条件下,以生菜为供试对象开展盆栽试验,以 CaSO_4 的饱和溶液为对照(CK),向去离子水中添加氯化盐形成不同阳离子组成的微咸水处理(Na^+ , T_{Na} ; Na^+/K^+ 比为 1:1, $\text{T}_{\text{Na-K}}$; K^+ , T_{K}),各处理添加盐分总摩尔量相同,研究灌溉水中不同阳离子组成对土壤盐分、阳离子含量以及生菜光合特性、离子吸收和生长的影响。结果表明:(1)微咸水灌溉下生菜生长季末(播后 80 天)各处理 0—20 cm 土壤饱和提取液电导率(EC_e)较播种前和播种后 50 天显著升高,其中,CK 处理显著低于其他处理($P<0.05$)。土壤 pH 在不同处理和不同土层深度上差异均不显著($P>0.05$)。生长季末土壤盐分阳离子大多积累在表层,与盐分分布一致。(2)与 CK 相比,单盐离子胁迫(T_{Na} 和 T_{K} 处理)显著降低生菜净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等光合特性($P<0.05$),从而降低产量, T_{Na} 处理最低;而 $\text{T}_{\text{Na-K}}$ 处理光合特性虽显著低于 CK 处理,但高于 T_{Na} 和 T_{K} 处理,说明 $\text{T}_{\text{Na-K}}$ 处理的盐离子组成缓解了单个盐离子对生菜生长的危害,且生菜产量较 T_{Na} 和 T_{K} 处理有所升高,但差异不显著($P>0.05$)。(3)与 CK 相比, T_{Na} 和 T_{K} 分别显著提高生菜叶片中 Na^+ 和 K^+ 含量;而 $\text{T}_{\text{Na-K}}$ 处理叶片 Cl^- 含量虽然高于 CK,但显著低于 T_{Na} 和 T_{K} 处理($P<0.05$)。微咸水中 Na^+ 、 K^+ 阳离子比为 1:1 的盐分组成维持了生菜植株的离子平衡,缓解了单个一价阳离子对生菜生长的盐胁迫效应,而对于单个离子来说, Na^+ 对生菜的毒害作用明显大于 K^+ 。研究结果为微咸水灌溉管理提供科学依据。

关键词:微咸水;光合特性;生菜产量;离子吸收

中图分类号:S274.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)02-0378-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.02.048

Effect of Saline Water Irrigation with Different Cations Compositions on Lettuce Photosynthesis and Ions Uptake Characteristics

QIAO Ruonan^{1,2}, CHENG Yu^{1,2}, YAN Sihui^{1,2}, LUO Min^{1,2},

ZHANG Tonggang^{1,2}, WANG Chun^{1,2}, ZHANG Tibin^{1,3}, FENG Hao^{1,3}

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

Abstract: The purpose of this study was to explore the effects of different saline water quality on soil salt properties and crop growth, and to provide scientific basis for saline water irrigation management. A pot experiment was carried out for cropping lettuce in the solar greenhouse. Taking the saturated solution of CaSO_4 as a control (CK), different chlorides were added to deionized water to form three saline water treatments with different cationic compositions (Na^+ , T_{Na} ; Na^+/K^+ of 1:1, $\text{T}_{\text{Na-K}}$; K^+ , T_{K}) on the premise of the same total mole concentration added. The soil salt contents, cations contents, and photosynthetic characteristics, ions uptake and growth of lettuce were studied. The results showed that: (1) At the end of lettuce growing season (80 days after sowing, DAS), the electrical conductivity of saturated extract (EC_e) of soil at 0—20 cm depth was significantly higher than those before sowing and 50 DAS, where CK was significantly lower than others ($P<0.05$). The differences of soil pH values were not significant among different treatments and depths ($P>0.05$). At the end of the growth season, the soil salt cations mostly

收稿日期:2021-08-27

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0403303);陕西省重点研发计划一般项目(2019NY-001);中央高校基本科研业务费专项(2452019079)

第一作者:乔若楠(1997—),女,硕士研究生,主要从事节水灌溉研究。E-mail:qiaoruonan521@163.com

通信作者:张体彬(1983—),男,副研究员,主要从事节水灌溉和水土资源高效利用研究。E-mail:zhangtb@ms.iswc.ac.cn

accumulated on the surface layer and were consistent with the salt distribution. (2) Compared with CK, single salt ion stresses (T_{Na} and T_K treatments) significantly reduced the photosynthetic properties, including net photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance of lettuce ($P<0.05$), thus resulting in the reduced yield, where the T_{Na} gave the lowest yield per pot. The photosynthetic properties of T_{Na-K} were significantly lower than that of CK, but higher than those of T_{Na} and T_K , indicating that T_{Na-K} treatment alleviated the harm of single salt ions to the growth of lettuce. And T_{Na-K} increased yield compared with T_{Na} and T_K treatment, but without significantly difference ($P>0.05$). (3) Compared with CK, T_{Na} and T_K significantly increased the Na^+ and K^+ contents in the lettuce leaves, respectively; while the Cl^- content of T_{Na-K} treatment were higher than CK, but significantly lower than T_{Na} and T_K ($P<0.05$). The salt composition with Na^+/K^+ of 1 : 1 in saline water could maintain the ion balance of lettuce plants and alleviate the salt stress of single salt ion on lettuce growth, while as for the single ion stress, Na^+ should cause the more stress than K^+ .

Keywords: saline water; photosynthetic characteristics; lettuce yield; ions uptake

淡水资源短缺已成为制约我国干旱半干旱地区农业发展的主要因子之一。而在一些地区,地下水咸水、微咸水资源相对丰富,据统计^[1],中国地下微咸水资源约 200 亿 m^3/a ,其中可开采量为 130 亿 m^3 ,且绝大部分埋藏于地下 10—100 m 处,适宜被开发利用。因此,科学利用微咸水资源,对于缓解淡水资源危机、扩大农业水源等方面有着极其重要的作用。

与淡水灌溉相比,微咸水灌溉具有双重效应:一方面为作物提供生长所需要的水分,节约淡水资源;另一方面,增加土壤的含盐量,进而影响作物生长^[2]。目前,我国已经开展了许多微咸水灌溉对土壤水盐及作物生长影响的研究工作。李慧等^[3]研究发现,在微咸水灌溉过程中容易发生土壤积盐情况,且土壤含盐量与入渗水的种类有关;郑复乐等^[4]研究发现,采用微咸水滴灌葵花不会造成显著的盐分积累,但土壤盐分中 Na^+ 、 Cl^- 含量显著增加,引起土壤钠质化;王艳娜等^[5]通过大田试验研究了咸水灌溉对棉花生长和离子吸收的影响,结果表明,棉株体内 Cl^- 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 含量在棉花生育期内整体呈升高趋势。光合作用是植物进行生命活动的能量源泉,一般认为,盐分胁迫抑制植物的光合作用,但也有一些研究^[6-7]发现,低盐胁迫对作物的光合作用没有影响,甚至能够加强作物的光合能力。宋姗姗等^[8]研究发现,调节 Na^+ 、 K^+ 比为 20 : 1 时,能改善叶片的光合性能,有利于叶绿素的合成,从而提高长春花的生物量;雷晶等^[9]研究发现,不同钠钾比例对棉苗生长和叶片光合性能的影响不同。

虽然前人关于微咸水对作物生长的影响开展了大量的工作,但对于不同离子组成微咸水下作物光合特性效应方面仍有待研究。另外, Na^+ 和 K^+ 是灌溉水中存在的主要盐分阳离子,其组成比例不同对土壤和作物产生不同的影响,而前人关于微咸水灌溉的负面效应研究方面,更多关注的是整体盐分输入带来的盐分胁迫,而

较少关注不同阳离子组成可能产生的效应差异。本研究通过温室盆栽试验,研究不同阳离子组成微咸水对土壤盐分和生菜光合、离子吸收特性及生长的影响,以期微咸水的安全利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2020 年 10—12 月在西北农林科技大学科研温室进行。试验期间日光温室平均温度 17.3 $^{\circ}C$,平均湿度 56.1%(图 1)。供试土壤取自陕西省杨陵示范区典型农田(34 $^{\circ}16'49''N$,108 $^{\circ}02'54''E$),采集深度为 0—30 cm 耕作层。土壤类型为壤土,砂粒、粉粒、黏粒组成分别为 25%,44%,31%;供试土壤的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子含量分别为 2.47,0.04,4.80,1.90,3.06,8.65 mmol/L;土壤饱和提取液电导率 1.64 dS/m,土壤 pH 7.6。试验所用塑料盆内径 24 cm,盆高 26 cm。土壤均匀混合经风干、过 5 mm 筛后,盆底部铺设 2 层滤纸,按照容重 1.30 g/ cm^3 分层装盆,层间打毛,盆内装土总高度为 22 cm。同时,室内测定过筛土的持水性能(water holding capacity,WHC)为 41.2%。盆下放置塑料托盘,用来收集灌溉水渗出液。盆栽放置在 3 cm 高的隔空垫板上,以保证盆底部透风通气。

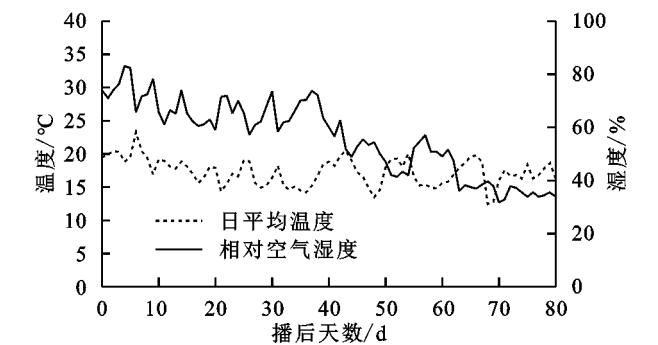


图 1 试验周期内日平均温度与空气相对湿度

1.2 处理设置

本研究考虑钠钾比对土壤和作物的影响^[10]以及

作物耐盐性^[11],以石膏(CaSO₄·2H₂O)的饱和溶液(实测 EC 值为 1.88 dS/m)为对照处理(CK),其他处理是在保持 EC 值和盐分阳离子总摩尔浓度相同的情况下,向去离子水中添加不同氯化物盐分,配置不同离子组成的微咸水处理,分别为 Na⁺(T_{Na})、Na⁺/K⁺ 比为 1∶1(T_{Na-K})和 K⁺(T_K)(表 1)。需要说明的是,之所以以石膏饱和溶液为对照,以及其他处理也均添加少量 Ca²⁺,是考虑 Ca²⁺ 作为土壤中常见的二价阳离子,能改善土壤结构,维持土壤物理性质^[12],缓解过量 Na⁺、K⁺ 等一价阳离子可能对土壤结构产生的破坏作用;另外,石膏中的阴离子为 SO₄²⁻,还可以作为判断其他添加氯盐处理是否存在 Cl⁻ 毒害的对照。所有处理均重复 8 盆。

供试作物为生菜。对于盐胁迫,生菜属于中度敏感型作物,耐盐阈值 EC_{min} 为 1.3 dS/m(EC 小于此值对产量无影响),EC_{max} 为 9 dS/m(EC 大于此值产量降为零)(此耐盐阈值是基于土壤 EC_e 提出)^[11]。每

盆点播 10 粒生菜种子,出苗后待植株生长稳定(约播后 20 天)进行间苗,每盆保留 3 株。之后进行微咸水灌溉处理,每 5 天灌水 1 次,灌水方式为输液器模拟滴灌。每次灌水前称盆栽重量得作物实际耗水量(ET_c),然后根据耐盐阈值和淋洗需求量(leaching requirement ratio,LR),实际灌水量^[11]计算公式为:

$$LR=EC/2(EC_{\max})$$

(1)

$$AW=ET_c/(1-LR)$$

(2)

式中:LR 为淋洗需求量(%);EC 为灌溉水电导率(dS/m);EC_{max} 为作物产量降为零时的土壤 EC_e (9 dS/m);AW 为实际灌水量(mm);ET_c 为作物实际耗水量(mm)。表 1 显示 EC 约为 2.1 dS/m,因此,根据公式(1)和公式(2),计算本试验灌溉水的 LR 为 12%,即每次灌水按照 12%的淋洗需求量执行。生菜全生育期 80 天,共灌微咸水 9 次,累积 150 mm。播种前没有添加基肥,播后 60 天时追肥 1 次,每盆 2 g 尿素(652 kg/hm²,含 N 46%)溶于水中,随灌水施入。

表 1 试验不同微咸水处理设置

处理	设定 EC/ (dS·m ⁻¹)	实测 EC/ (dS·m ⁻¹)	盐分添加量/(mmol·L ⁻¹)			SAR/ (mmol·L ⁻¹) ^{0.5}	CROSS/ (mmol·L ⁻¹) ^{0.5}
			NaCl	KCl	CaCl ₂		
T _{Na}	2.00	2.03	17.0	0	1.5	13.88	13.88
T _{Na-K}	2.00	2.11	8.5	8.5	1.5	6.94	10.83
T _K	2.00	2.16	0	17.0	1.5	0	7.77
CK	2.00	1.88					

注:CK 处理为石膏(CaSO₄·2H₂O)的饱和溶液;SAR 为钠吸附比;CROSS^[13] 为土壤结构稳定性的阳离子比,计算公式为 CROSS=(Na+0.56K)/√(Ca+0.60Mg);各离子含量单位为 mmol/L。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤盐分特性 于播种前、播种后 50 天及收获后(播种后 80 天)取 0—10,10—20 cm 土层土壤,土壤盐分测定采用调制饱和泥浆的方法^[14]。30 g 土样加少量水经浸泡 12 h 后,调制成饱和泥浆,经离心(4 000 r/min,30 min)获得提取液。然后,采用电导率仪(DDS-11A,上海精密科学仪器有限公司)测定土壤饱和提取液电导率(EC_e),pH 计(PHS-3C,上海精密科学仪器有限公司)测定 pH,火焰光度计测定土壤饱和提取液中 K⁺、Na⁺ 含量,滴定法测定 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 含量。

1.3.2 生菜光合特性 于收获期选择晴天条件下测定生菜光合特性。每个处理选 3 盆生菜,每盆选 3 个叶片,利用便携式光合荧光测量系统(LI-6800,美国 LI-LOR),采用荧光光源,设定光合有效辐射(PAR)为 1 200 μmol/(m²·s),大气 CO₂ 浓度(C_a) 为 400 μmol/mol,温度为 25 ℃,测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)等指标。水分利用效率(WUE)和气孔限制值(L_s)计算公式为:

$$WUE=P_n/T_r$$

(3)

$$L_s=1-C_i/C_a$$

(4)

1.3.3 叶片叶绿素含量 在测定光合特性的同时,针对同一叶片利用叶绿素仪(MC-100,美国)测定生菜叶片叶绿素含量。

1.3.4 生菜产量 收获期(播种后 80 天)将生菜从地表处剪断,称地上部鲜重,即为生菜产量,然后在 105 ℃干燥箱中杀青 30 min,调至 60 ℃干燥至质量恒定后,称其干重,计算植株含水量。

1.3.5 植株离子含量 将烘干的生菜样品用植物粉碎机磨细,过 1 mm 筛,称取 1 g 生菜样品,加入 30 mL 硝酸—高氯酸混合酸消煮,然后用原子吸收分光光度计(ICE, THERMO)测定 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量,滴定法测定 Cl⁻ 含量。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理和分析,采用 LSD (least significant difference)法进行单因素方差分析和差异显著性检验(α=0.05),同时采用 Origin 2021 软件作图。

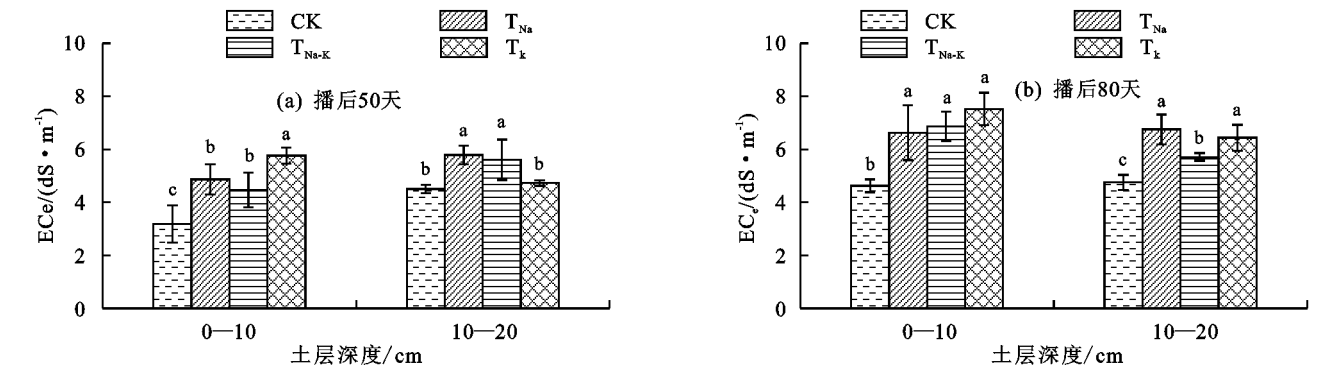
2 结果与分析

2.1 微咸水灌溉对土壤 EC_e 和 pH 的影响

在微咸水灌溉过程中,土壤盐分的积累是影响作

物生长的主要因素。图 2 为生菜播后 50 天和播后 80 天不同层次土壤 EC_e 变化情况。与播前供试土样的 EC_e (1.64 dS/m) 相比,经过 1 个生育期的微咸水灌溉,各处理盐分均有不同程度的累积。灌水过程中,土壤盐分随着水分的入渗和再分布过程而运移,整体来看,微咸水灌溉下,生菜生长季末(图 2b)各处理 0—20 cm 土壤 EC_e 较播后 50 天(图 2a)有一定的

升高,并且 CK 处理的 EC_e 显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。进一步分析不同时期土壤盐分的剖面分布特征可以发现,生菜生长季末,CK 处理的盐分割面表现为各层相近的特征,而微咸水处理的 T_{Na} 、 T_{Na-K} 和 T_K 的含盐量则基本表现为“上高下低”型,也就是 0—10 cm 发生了比 10—20 cm 更强烈的积盐现象,但差异并不显著 ($P > 0.05$)。



注:同一土层深度内不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 2 不同微咸水灌溉处理土壤盐分

土壤 pH 与土壤微生物活性、各种物质的转化以及土壤保肥保水的能力等有关。由图 3 可知,无论是生

菜播后 50 天还是播后 80 天,土壤 pH 整体呈现 $CK > T_{Na} > T_{Na-K} > T_K$ 的规律,但差异不显著 ($P > 0.05$)。

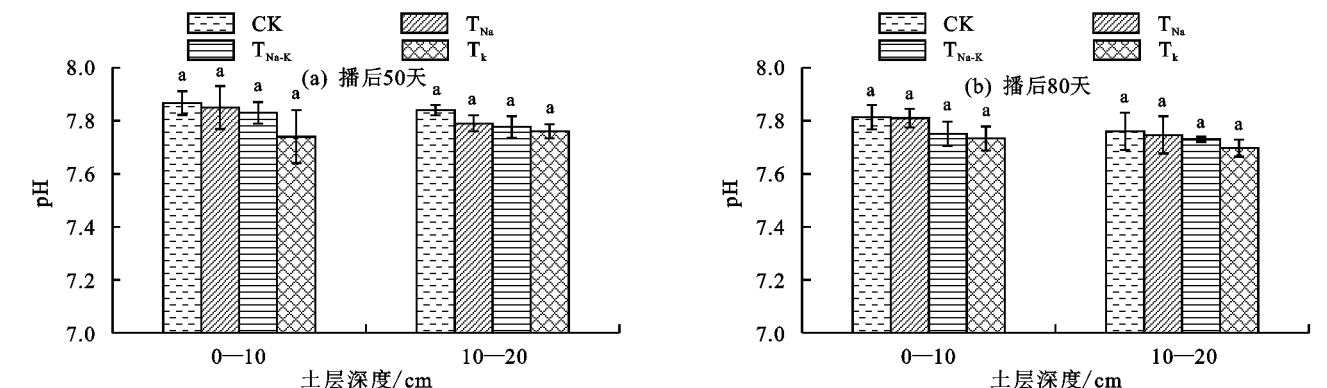


图 3 不同微咸水灌溉处理土壤 pH

2.2 微咸水灌溉对土壤盐分阳离子含量的影响

表 2 为生菜收获期不同微咸水灌溉处理下土壤盐分离子含量、SAR 及 CROSS 情况。生菜收获后各层各处理土壤盐分阳离子含量与初始土壤相比均有不同程度的增加。各处理不同土层深度下,土壤 Mg^{2+} 含量相差不大。从离子组成上来看, T_{Na} 、 T_{Na-K} 处理土壤主要离子的种类相同,即阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主,并占绝对优势,而对于 0—10 cm 土层, T_K 处理主要离子为 Ca^{2+} 和 K^+ 。进一步分析发现, T_{Na} 处理的 Na^+ 和 T_K 处理的 K^+ 含量均表现为“上高下低”型。收获后, T_{Na} 、 T_{Na-K} 处理土壤 SAR 均显著低于灌溉水的 SAR,但仍呈现 $T_{Na} > T_{Na-K} > T_K$,且表层的土壤 SAR 较高。各处理 CROSS 值的变化规律与 SAR 一致,但略高于 SAR。

2.3 微咸水灌溉对生菜光合特性和叶绿素含量的影响

光合作用是植物体内重要的生理代谢活动,是判

断植物生长和抗逆性强弱的重要标准^[15]。盐分胁迫导致生菜净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 显著降低 ($P < 0.05$) (表 3)。不同离子组成微咸水灌溉后,总体呈现 CK 处理 P_n 、 T_r 、 G_s 最大, T_{Na} 处理最小,当微咸水阳离子组成中 Na^+/K^+ 比为 1 : 1 时更接近 CK 处理。与对照 CK 相比,加盐胁迫 T_{Na} 、 T_{Na-K} 和 T_K 处理中 P_n 分别降低 115.27%, 47.25%, 72.61%, T_r 分别降低 195.33%, 39.90%, 64.74%, G_s 分别降低 107.92%, 15.31%, 39.25%, 均达到显著水平 ($P < 0.05$)。而胞间 CO_2 浓度 (C_i) 各处理间没有显著差异 ($P > 0.05$)。分析不同灌溉处理下生菜的叶片尺度水分利用效率 (WUE) 变化规律可知, T_{Na} 处理 WUE 最高, T_{Na-K} 和 T_K 处理次之,CK 处理最低。与 CK 相比,微咸水灌溉下 WUE 提高 19.04%~46.73%,各处理均表现出显著差异 ($P < 0.05$),表明微咸水灌溉显著提高生菜叶片水分利用效率。微咸水灌溉后, T_{Na} 、 T_{Na-K} 和 T_K

处理较 CK 处理的气孔限制值(L_s)分别提高 1.8%, 1.4%和 2.3%,未达显著水平($P>0.05$)。

表 2 生菜收获期土壤盐分特性

土层深度/cm	处理	土壤盐分离子含量/(mmol·L ⁻¹)				SAR/	CROSS/
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(mmol·L ⁻¹) ^{0.5}	(mmol·L ⁻¹) ^{0.5}
0—10	CK	3.22±0.06d	0.19±0.06c	24.57±3.66a	2.58±0.21a	0.87±0.03d	0.92±0.03d
	T _{Na}	31.88±2.18a	0.17±0.01c	20.94±4.76a	2.20±0.60a	9.37±0.32a	9.58±0.34a
	T _{Na-K}	16.01±0.45b	1.32±0.69b	23.61±1.19a	2.37±0.46a	4.44±0.12b	4.73±0.20b
	T _K	5.08±0.65c	8.33±0.00a	24.88±7.60a	2.86±1.34a	1.36±0.07c	2.67±0.27c
10—20	CK	3.96±0.15c	0.12±0.02c	23.38±2.42a	2.27±0.58a	1.10±0.05c	1.14±0.05c
	T _{Na}	10.76±1.69a	0.18±0.08b	22.30±6.49a	2.48±1.21a	3.06±0.67a	3.15±0.69a
	T _{Na-K}	8.12±1.33b	0.12±0.01c	20.72±0.19a	2.97±0.40a	2.36±0.28b	2.44±0.30b
	T _K	3.83±0.36c	0.32±0.08a	24.28±4.99a	2.40±0.98a	1.05±0.25c	1.12±0.06c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示各处理间存在显著差异($P<0.05$)。下同。

表 3 不同微咸水灌溉处理生菜叶片光合特性

处理	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度/ ($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	水分利用效率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	气孔限 制值
CK	5.32±0.38a	1.76±0.17a	65.88±5.45a	324.78±20.45a	3.04±0.20c	0.25±0.03a
T _{Na}	2.47±0.27d	0.49±0.13c	31.69±4.79d	316.08±15.50a	5.05±0.37a	0.25±0.03a
T _{Na-K}	3.61±0.25b	1.03±0.13b	57.13±4.80b	319.36±12.98a	3.49±0.32b	0.25±0.03a
T _K	3.08±0.13c	0.88±0.11b	47.31±3.37c	294.04±15.22a	3.51±0.21b	0.25±0.03a

叶绿素是一种光合色素,参与光吸收,在植物光合作用中起重要作用。叶绿素含量可以作为植物生理学中研究植物耐逆性的重要指标^[16]。CK、T_{Na}、T_{Na-K}和 T_K 处理生菜叶绿素含量的平均值分别为 148.82,155.98,146.77,152.77 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$,各处理叶绿素含量没有显著差异($P>0.05$)。

2.4 微咸水灌溉对生菜产量的影响

微咸水灌溉显著降低生菜地上部生物量(表 4)。在相同灌溉定额下,T_{Na}、T_{Na-K}、T_K 处理的地上部鲜重均显著低于 CK 处理($P<0.05$),T_{Na} 处理较 CK 减产 33.52%,当微咸水阳离子组成中 Na⁺/K⁺ 比为 1:1 时,产量较 CK 处理减产 17.54%,T_K 处理较 CK 处理减产 19.83%,说明微咸水灌溉带入的盐分对生菜的生长发育产生抑制作用。而微咸水各处理间则表现为 T_{Na} 处理产量显著低于 T_{Na-K} 和 T_K 处理($P<0.05$)。对于生菜地上部干重,各处理变化规律与地上部鲜重一致。植株含水量反映植株叶片内水分状况,是田间作物水分状况监测的重要指标,常用来表示作物在遭受外界条件胁迫时叶片的持水能力^[17],各处理植株含水量没有显著差异($P>0.05$)。

表 4 生菜产量和植株含水量

处理	地上部鲜重/ (g·pot ⁻¹)	地上部干重/ (g·pot ⁻¹)	植株 含水量/%
CK	139.69±8.03a	9.67±0.74a	93.08±0.55a
T _{Na}	92.87±7.45c	7.81±0.43c	91.59±0.41a
T _{Na-K}	115.19±5.81b	9.07±0.23b	92.13±0.48a
T _K	111.99±7.09b	8.94±0.64b	92.02±0.68a

2.5 微咸水灌溉对生菜叶片离子含量的影响

在盐胁迫下,T_{Na} 处理生菜植株的钾离子含量与对照 CK 相比差异不显著($P>0.05$)(图 4),Na⁺ 和 Cl⁻ 含量均显著升高,K⁺/Na⁺ 值同对照相比显著下降($P<0.05$)。T_{Na-K} 处理下,当微咸水阳离子组成中 Na⁺/K⁺ 比为 1:1 时,生菜叶片的 K⁺ 与 T_{Na} 处理相比差异不显著,Na⁺、Cl⁻ 含量则显著下降,K⁺/Na⁺ 值较 T_{Na} 处理显著升高($P<0.05$)。T_K 处理的 K⁺、Cl⁻ 含量、K⁺/Na⁺ 比值较 T_{Na-K} 处理均显著升高,Na⁺ 含量则显著下降($P<0.05$)。各处理的 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量间没有显著差异($P>0.05$)。对于可能存在的 Cl⁻ 毒害,Na⁺/K⁺ 比为 1:1 时显著缓解单盐毒害效应,叶片 Cl⁻ 含量虽然高于 CK 处理,但显著低于 T_{Na} 和 T_K 处理($P<0.05$)。

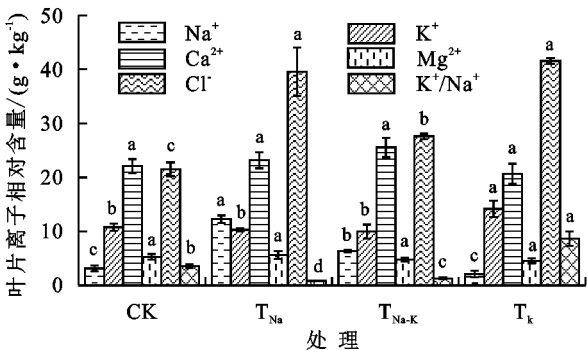


图 4 不同微咸水灌溉处理生菜叶片中离子含量

3 讨论

3.1 微咸水灌溉对土壤盐分特性的影响

本研究在灌溉过程中考虑了淋洗率,尽可能减少

盐分输入带来的土壤盐分积累。试验过程中,在收集淋洗液时发现,各处理间淋洗液的体积差异比较明显, T_{Na-K} 处理较高,而 T_{Na} 处理较低,是因为不同阳离子组成的微咸水灌溉对土壤结构产生差异性影响。本研究还发现,生菜生长季末各微咸水处理下 0—10 cm 比 10—20 cm 土层有更强烈的积盐现象,推测是因为微咸水灌溉处理对表层土壤的渗透性造成影响。前人^[18-19]利用灌溉水电导率(EC)和钠吸附比(SAR)的关系来表征灌溉水水质对土壤结构稳定性的影响, SAR 增大,意味着 Na^+ 相对于其他离子所占的比例增大,使土壤颗粒分散,黏粒膨胀,土壤中大孔隙的比例减少,影响土壤的渗透性。土壤表层的 SAR 较大,导水能力差,所以 T_{Na} 、 T_{Na-K} 和 T_K 处理更多的盐分留在表层土壤中,造成土壤表层 EC_e 较高。传统上, K^+ 在土壤上的应用被认为是有利的,大量研究^[20]表明, K^+ 对土壤和作物产量有着积极影响, K 作为一种单价阳离子,可以产生与 Na 类似的危害,它可能导致黏土的膨胀和分散,并增加整个土壤的盐分水平,从而降低土壤质量^[21]。随着土壤学的发展,人们逐步认识到土壤结构稳定性存在离子特异性效应,即同价位、不同阳离子对土壤结构效应也存在差异。所以,有必要推导和定义一个新比率来代替 SAR , $CROSS$ 考虑 Na 和 K 在分散黏土中的不同作用,以及 Mg 和 Ca 在絮凝黏土中的不同作用,因此,相对于 SAR , $CROSS$ 应该能够更合理反映灌溉水质对土壤性质的影响,但要想 $CROSS$ 得到更多利用,还需要针对不同土壤类型,甚至不同作物生产条件开展可行性和适用性的研究。

3.2 微咸水灌溉对作物生长的影响

盐分胁迫对植物造成伤害的主要原因是离子本身的毒害及盐离子所致的渗透效应和营养效应^[10]。本研究中,微咸水较 CK 处理的生菜净光合速率、蒸腾速率显著降低,但叶片的水分利用效率显著提高,是因为气孔导度的下降所引起,与庞桂斌等^[1]的研究结果基本一致。植物受到盐胁迫后离子平衡被打破, K^+/Na^+ 比失衡。 T_{Na} 处理生菜叶片由于不能维持体内正常的 K^+/Na^+ 比,即不能维持体内的离子平衡,生长受到显著抑制作用。只添加 K^+ 时,过量的 K^+ 也不利于植株体内离子的平衡,损害光合作用,对生菜的生长造成危害。贾娜尔·阿汗等^[22]的试验认为,高浓度 K 对植物生长的抑制作用是由于 K 在细胞中的不均匀分布。 KCl 胁迫下,大量的 K 无法全部积累在液泡中,以至于细胞质中大量积累 K ,对细胞质中的膜系统和生物大分子造成毒害^[22]。当微咸

水阳离子组成中 Na^+/K^+ 比为 1 : 1 时,缓解了盐胁迫造成的植株离子失衡,对生菜造成危害。另外, Cl^- 在植物体内过多积累也能产生毒害作用,Zang 等^[23]研究了 3 个浓度的 Cl^- 对玉米生长的毒害发现,高浓度的 Cl^- (757.1 mg/kg) 并不影响作物的生物量、光合作用和叶片含水量,但会降低叶绿素含量。考虑生菜与玉米同属中度敏感型作物,所以借鉴此阈值范围,经计算,本试验中引入的 Cl^- 浓度为 257 mg/kg,远小于此阈值;同时,在灌溉过程中均保证一定的淋洗定额。从试验结果可知,与 CK 相比,各处理叶绿素含量没有显著差异,所以,本研究中的 Cl^- 水平不会对供试植物生长造成损害。

通常土壤盐碱化和干旱问题一起发生,可能对作物生长产生协同的负面影响。水分胁迫主要是由于细胞周围的渗透势低于细胞的水势。当植物细胞周围的盐分浓度较高时,同样使细胞周围的渗透势降低,所以,土壤盐碱化在一定意义上也属于水分胁迫。由于细胞可以吸收盐离子,因此,出现的胁迫现象不仅是水分胁迫,还包括盐离子胁迫^[24]。前人的研究^[25-26]发现,土壤水分胁迫影响植株叶绿素的合成,降低叶绿素含量。在本研究中各处理的叶绿素含量没有明显差异,且在试验过程中,根据作物实际耗水量,以土壤最大持水量(WHC)和指定淋洗率进行灌溉,不存在单纯的水分胁迫,而叶绿素含量的响应也证明这一点,即作物的响应是盐离子胁迫,这为讨论不同离子组成微咸水可能的效应差异提供了前提条件。

4 结论

(1)微咸水灌溉下,生菜播后 80 天各处理 0—20 cm 土层 EC_e 较播前和播后 50 天均有一定升高,且显著高于 CK 处理($CaSO_4$ 饱和溶液)。土壤盐分阳离子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})含量和分布特征与 EC_e 变化基本一致。

(2)与 CK 相比,单独添加 Na^+ 或 K^+ 均显著降低生菜的光合能力和产量,且 Na^+ 的毒害作用显著大于 K^+ 。

(3)当微咸水阳离子组成中 Na^+/K^+ 为 1 : 1 时(T_{Na-K} 处理)可以促进生菜 K^+ 吸收,维持植株的离子平衡,而与 T_{Na} 和 T_K 相比, T_{Na-K} 处理降低 Cl^- 在叶片中的积累,缓解盐胁迫对生菜生长造成的危害。

参考文献:

[1] 庞桂斌,徐征和,王海霞,等.微咸水灌溉对冬小麦光合特征及产量的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(1):35-41.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 郑复乐,姚荣江,杨劲松,等.改良材料对微咸水滴灌农田土壤盐分分布与离子组成的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(8):60-71.
- [5] 王艳娜,侯振安,龚江,等.咸水滴灌对棉花生长和离子吸收的影响[J].棉花学报,2007,19(6):472-476.
- [6] Pang G B, Xu Z H, Wang T Y, et al. Photosynthetic light response characteristics of winter wheat at heading and flowering stages under saline water irrigation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2018,170(5):e052031.
- [7] 李学孚,倪智敏,吴月燕,等.盐胁迫对‘鄞红’葡萄光合特性及叶片细胞结构的影响[J].生态学报,2015,35(13):4436-4444.
- [8] 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.
- [9] 雷晶,郝艳淑,吴秀文,等.水培条件下钠钾替代对棉苗生长及其光合性能的影响[J].棉花学报,2015,27(4):310-316.
- [10] 杨然,张渊博,梁祎,等.不同钠钾配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.
- [11] USDA-NRCS. National Engineering Handbook, Part 623 Irrigation, Chapter 7. Microirrigation [M]. U. S. Department of Agriculture, Natural Resource and Conservation Service (USDA-NRCS), Washington D. C.,2013.
- [12] Rahman A, Nahar K, Hasanuzzaman M, et al. Calcium supplementation improves Na^+/K^+ ratio, antioxidant defense and glyoxalase systems in salt-stressed rice seedlings[J/OL].Frontiers in Plant Science,2016,7. DOI:10.3380/fpls.2015.00509.
- [13] Rengasamy P, Marchuk A. Cation ratio of soil structural stability (CROSS) [J]. Soil Research, 2011, 49(3):280-285.
- [14] 张体彬,展小云,康跃虎,等.浅层填沙滴灌种植枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地研究[J].农业机械学报,2016,47(10):139-149.
- [15] 刘秀梅,王华田,王延平,等.磁化微咸水灌溉促进欧美杨 I-107 生长及其光合特性分析[J].农业工程学报,2016,32(增刊 1):1-7.
- [16] 郭丽,郑春莲,曹彩云,等.长期咸水灌溉对小麦光合特性与土壤盐分的影响[J].农业机械学报,2017,48(1):183-190.
- [17] 庞桂斌,张立志,王通,等.微咸水灌溉作物生理生态响应与调节机制研究进展[J].济南大学学报(自然科学版),2016,30(4):250-255.
- [18] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J].农业机械学报,2015,46(12):117-126.
- [19] Kim H K, Kim S, Jeon J, et al. Effects of irrigation with desalinated water on lettuce grown under greenhouse in South Korea[J/OL].Applied Sciences,2020,10(7). DOI:10.3390/app10072207.
- [20] Arienzo M, Christen E W, Quale W, et al. A review of the fate of potassium in the soil-plant system after land application of wastewaters[J].Journal of Hazardous Materials,2009,164:415-422.
- [21] 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,2012,173/174:303-310.
- [22] 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):80-83.
- [23] Zang X D, Zorböör C, Kränzlein M, et al. The early stress response of maize (*Zea mays* L.) to chloride salinity[J].Journal of Agronomy and Crop Science,2019,22(4):1-12.
- [24] Chen D Q, Wang S W, Cao B B, et al. Genotypic variation in growth and physiological response to drought stress and re-watering reveals the critical role of recovery in drought adaptation in maize seedlings[J/OL].Frontiers in Plant Science,2016(6). DOI:10.3389/fpls.2015.01241.
- [25] 耿东梅,单立山,李毅,等.土壤水分胁迫对红砂幼苗叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响[J].植物学通报,2014,49(3):282-291.
- [26] 裴冬,孙振山,陈四龙,等.水分调亏对冬小麦生理生态的影响[J].农业工程学报,2006,22(8):68-72.