

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.01.019

CSTR:32310.14.stbxb.2026.01.019

屈加玥,张体彬,程煜,等.微咸水滴灌下不同离子组成对土壤盐分、玉米离子吸收特性及产量的影响[J].水土保持学报,2026,40(1):177-186,197.

QU Jiayue, ZHANG Tibin, CHENG Yu, et al. Effects of different ion compositions in brackish water drip irrigation on soil salinity, maize ion uptake characteristics, and yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):177-186,197.

微咸水滴灌下不同离子组成对土壤盐分、 玉米离子吸收特性及产量的影响

屈加玥^{1,2}, 张体彬³, 程煜^{1,3}, 胡行路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: [目的] 为研究地下水加入不同种类阳离子后,对玉米进行覆膜滴灌对土壤盐分特性、作物产量及阳离子吸收的影响。[方法] 于 2021—2023 年在河套灌区开展膜下滴灌玉米试验,以当地地下水为对照,分别向其中添加相同摩尔质量的 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 4 种氯化盐,形成相同 EC(约 4 dS/m、不同离子组成的微咸水处理,分别为 T_{Na}、T_K、T_{Ca}、T_{Mg},主要研究土壤盐分及阳离子分布特征,以及作物生长、产量构成及阳离子吸收特性。[结果] 不同离子组成的微咸水滴灌显著影响土壤盐分运移及根区土壤阳离子的分布特性。T_{Ca} 和 T_{Mg} 处理的盐分向膜外扩散较为显著,尤其是在 25~50 cm 区域,EC 增幅超过 80%;而 T_{Na} 处理则盐分滞留在根区,盐分淋洗效果不明显。在不同处理下,T_K 处理显著提高叶片 K⁺ 浓度,与产量呈强正相关。T_{Na} 处理 Na⁺ 积累最为显著,0~20 cm 土层土壤 Na⁺ 浓度增幅最高,与产量呈负相关。T_{Ca} 与 T_{Mg} 处理显著提高土壤 Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 浓度,且有效控制积盐的累积。T_{Mg} 处理在 3 a 中的产量最高(2023 年达 1.797 7 kg/m²),CK 产量最低(1.394 7 kg/m²)。[结论] 在当地高钠离子比例的微咸水中添加适量的 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 调整离子比例后再进行滴灌有助于改善土壤水盐环境,提高作物产量。研究结果为河套灌区微咸水的安全利用及盐渍化防治提供理论指导。

关键词: 微咸水灌溉; 产量; 土壤积盐量; 作物离子吸收特性; 河套灌区

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0177-10

Effects of Different Ion Compositions in Brackish Water Drip Irrigation on Soil Salinity, Maize Ion Uptake Characteristics, and Yield

QU Jiayue^{1,2}, ZHANG Tibin³, CHENG Yu^{1,3}, HU Xinglu³, 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, China; 2.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of drip irrigation under mulch with groundwater amended by different cation types on soil salinity characteristics, crop yield, and cation uptake in maize. [Methods] Field experiments with mulched drip-irrigated maize were conducted in the Hetao Irrigation Area during 2021—2023. Using local groundwater as the control, four chloride salts (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺) with identical molar masses were added to create brackish water treatments (EC≈4 dS/m) with distinct ion compositions, designated as T_{Na}, T_K, T_{Ca}, and T_{Mg}. The study primarily focused on soil salinity and cation distribution, as well as crop growth, yield components, and cation uptake characteristics. [Results] Brackish water drip irrigation with different ion compositions significantly altered soil salinity movement and cation

收稿日期: 2025-06-18

修回日期: 2025-08-27

录用日期: 2025-09-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-12

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2001400); 陕西省重点研发计划项目(2024NC-YBXM-234); 中国科学院“西部之光”项目(XAB2022YW04)

第一作者: 屈加玥(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事盐碱地改良研究。E-mail: qujiayue@nwafu.edu.cn

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

http://stbxb.alljournal.com.cn

distribution in the root zone. The T_{Ca} and T_{Mg} treatments promoted substantial salt diffusion beyond the mulch, particularly in the 20–50 cm soil layer, where ECe increased by over 80%. In contrast, T_{Na} treatment retained salts within the root zone, indicating ineffective salt leaching. Under the different treatments, the T_K treatment significantly increased leaf K^+ concentration, showing a strong positive correlation with yield. The T_{Na} treatment resulted in the most significant Na^+ accumulation, with the highest increase in soil Na^+ concentration in the 0–20 cm layer, exhibiting a negative correlation with yield. The T_{Ca} and T_{Mg} treatments significantly elevated soil Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations while effectively limiting salt accumulation. The T_{Mg} treatment achieved the highest yield over three-year period (1.797 7 kg/m² in 2023), whereas the CK treatment yielded the least (1.394 7 kg/m²). [Conclusion] Adjusting ion ratios by adding appropriate amounts of K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} to locally high-sodium brackish water prior to drip irrigation improves soil water-salt conditions and increases crop yield. These findings provide theoretical guidance for safe brackish water utilization and salinity control in the Hetao Irrigation Area.

Keywords: brackish water irrigation; yield; soil salt accumulation; crop ion uptake characteristics; Hetao Irrigation Area

Received: 2025-06-18

Revised: 2025-08-27

Accepted: 2025-09-25

Online(www.cnki.net): 2025-11-12

内蒙古河套灌区是我国重要的粮食生产基地,根据气象水文资料显示,黄河水资源的开发利用现状已不允许河套灌区新增黄河用水指标^[1]。因此,仅使用淡水资源难以满足河套地区的农业灌溉需求,利用微咸水灌溉,已成为灌区缓解灌溉压力、保障农业生产的必然趋势。内蒙古河套地区共有 4 条咸水带,微咸水可利用量达 30 亿 m³,当前利用率不足 2%^[2]。过去 10 a 内,微咸水覆膜滴灌已在河套灌区棉花、玉米等作物上开展大量研究^[3-4],明确了 2.5~4.0 dS/m 为玉米耐盐阈值区间,并提出“少量多次”“淡咸交替”等灌溉制度,在微咸水覆膜滴灌对土壤孔隙结构、盐分分布的影响等方面积累丰富数据^[5]。然而,该研究普遍以总盐量(EC)或矿化度为唯一变量,忽略离子组成差异对作物生理与产量形成的重要作用。

前人^[6-7]试验发现,河套地区地下微咸水以钠离子为主要阳离子, Na^+ 平均浓度 22~35 mmol/L,占总阳离子 60% 以上,而 K^+ 仅 0.5~2.0 mmol/L, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 比例严重失衡;当地的高 Na^+ 微咸水用于灌溉直接抑制玉米根系生长,降低玉米产量^[8]。国内外研究^[9-10]表明,降低高钠微咸水灌溉对作物生长影响的重点在于利用其他离子抑制 Na^+ 吸收。国内也已有试验^[11]证实,在电导率相同情况下,与单一钠盐微咸水相比,钠钾比为 1:1 的微咸水对作物生长有更好的促进作用。已有盆栽试验^[12]证实,提高灌溉水 K^+/Na^+ 或 Ca^{2+}/Na^+ 摩尔比可显著降低植株 Na^+ 吸收,提升 K^+ 在叶片中的分配比例,从而缓解盐胁迫。由此可见,关于盐分离离子效应的研究多是基于控制条件下的盆栽和室内模式试验,而多年的田间定位试验研究,将有助于在前人研究的基础上更好地评估盐分

离子拮抗/协同效应对作物生产的长期影响。

因此,本研究针对河套灌区盐渍化农田,开展为期 3 a 的田间定位试验,向当地地下微咸水中添加不同类型氯化盐,形成不同阳离子组成的微咸水滴灌处理,主要研究:1)不同离子组成微咸水滴灌下土壤盐分及根区土壤阳离子分布特性;2)作物对盐分离子的吸收特性及作物产量,以期为河套灌区地下微咸水利用与盐渍化防治提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究于 2021—2023 年 4—9 月,在内蒙古巴彦淖尔市临河区曙光试验站(40°46'N, 107°24'E)开展田间试验。试验区,海拔 1 041 m,位于温带大陆性干旱气候带,年平均降水量约 110 mm,年平均蒸发量约 2 300 mm,年平均风速为 2.8~2.9 m/s。年平均日照时间为 3 190~3 260 h,日照充足。年平均气温为 7.9 °C,且昼夜温差大。试验区域土壤类型为黄河冲积土,土壤剖面具有明显层次结构。在试验田的表层土壤中,0~60 cm 土层为黏壤土质地,60~80 cm 深度的土层为砂土,而 80~100 cm 土层则为壤质砂土(表 1),0~40 cm 土壤饱和浸提液电导率(ECe)为 7.1 dS/m,为中度盐渍化水平。

1.2 试验设计

本试验采用“一膜单管双行”的膜下滴灌种植方式,旨在探究不同类型氯化盐对春玉米生长的影响。试验作物为春玉米,选用当地主栽品种“金萃 628”。种植方式为玉米株距 30 cm,膜下行距 30 cm,膜间行距 70 cm。滴灌系统采用贴片式滴灌带,滴头间距 30 cm,流量为 2.7 L/h。

表 1 试验区玉米播种前土壤理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties before maize sowing in experimental site

土层深度/cm	土壤粒径/%			土壤质地	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	饱和浸提液电导率/ (dS·m ⁻¹)	pH
	黏粒	粉粒	砂粒				
0~20	23.5	44.7	31.8	黏壤土	1.42	8.30	8.42
20~40	21.4	49.1	29.5	黏壤土	1.44	6.10	8.63
40~60	24.8	46.5	28.7	黏壤土	1.42	4.18	8.54
60~80	4.3	4.9	90.8	砂土	1.52	2.36	8.50
80~100	7.7	9.7	82.6	砂壤土	1.49	1.83	8.54

田间试验以当地地下微咸水为对照(CK),向其中加入不同类型阳离子氯化盐(NaCl、KCl、CaCl₂、MgCl₂),组成4种不同离子组成的微咸水处理(T_{Na}、T_K、T_{Ca}、T_{Mg})(表2)。根据玉米的耐盐阈值,需要将各处理的微咸水电导率(EC)控制在4.0 dS/m,同时确保各处理中添加的氯化盐物质的量浓度一致,从而仅改变阳离子组成,以便研究不同离子组成对土壤盐分

特性、作物生长及离子吸收特性的影响,经过计算得出结论可在当地地下水中添加20 mmol_c/L的盐溶液。每个处理设置3个重复。小区宽度为4 m,长度为15 m,种植8行玉米。播种时间分别为2021年5月6日、2022年5月10日和2023年5月2日,收获日期分别为2021年9月10日、2022年9月15日和2023年9月20日。3 a生育期内降雨量分别为63.4、61.6、65.7 mm。

表 2 不同离子组成的微咸水滴灌田间试验处理
Table 2 Field treatments of brackish water drip irrigation with different ion compositions

处理	添加盐分	阳离子组成/(mmol _c ·L ⁻¹)				EC/ (dS·m ⁻¹)	SAR/ (mmol _c ·L ⁻¹) ^{0.5}
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		
CK	地下水(GW)	10.3	0.2	4.0	7.4	1.8	4.3
T _{Na}	GW+20 mmol _c /L NaCl	30.3	0.2	4.0	7.4	3.8	12.7
T _K	GW+20 mmol _c /L KCl	10.3	20.2	4.0	7.4	4.2	4.3
T _{Ca}	GW+20 mmol _c /L CaCl ₂	10.3	0.2	24.0	7.4	3.7	2.6
T _{Mg}	GW+20 mmol _c /L MgCl ₂	10.3	0.2	4.0	27.4	3.6	2.6

根据前期研究^[5]成果,针对本地区土壤和地下水条件,将土壤基质势下限控制为-30 kPa,以指导灌溉。考虑到地下水的电导率(1.8 dS/m)接近玉米耐盐阈值(1.7 dS/m),对照组(CK)未设置淋洗率(LR),灌水定额为10 mm。其他添加盐分处理的灌溉水EC大致为3.8 dS/m,计算得到LR约为19%,实际灌水定额为12.3 mm。以T_{Na}处理为例,根据灌水定额和所需添加NaCl浓度,计算单次灌水所用盐量。灌溉前将NaCl倒入施肥桶中加水充分溶解,利用比例施肥泵将溶液与地下水混合,进入管道均匀灌溉。

2021年、2022年和2023年生育期内,CK处理和添加不同阳离子微咸水灌溉处理(T_{Na}-T_{Mg})的灌水次数分别为33、34、35次,总灌水量分别为330和406 mm、340和418 mm、350和430 mm。

基肥在播种前耕翻时施入,使用尿素(N:46%)和磷酸二铵(N:18%, P₂O₅:42%),按照N、P分别为150、180 kg/hm²的施用量均匀撒于地表,然后翻耕。玉米拔节期后追施水溶性较好的尿素,于灌水前溶于施肥罐中,随灌水施入,确保各处理施肥量一致。玉米全生育期内纯氮累积施入量为300 kg/hm²。其他田间管理措施,如除草、病虫害防治等,与周边农田保持一致。

1.3 数据收集和测量

1) 土壤盐分和离子

在春玉米播前(2021年5月1日、2022年5月8日、2023年5月2日)和收获后(2021年9月10日、2022年9月15日、2023年9月20日),用土钻取土,取土位置分别为滴头正下方、距离滴头25、50 cm处,取土深度为0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm(图1)。

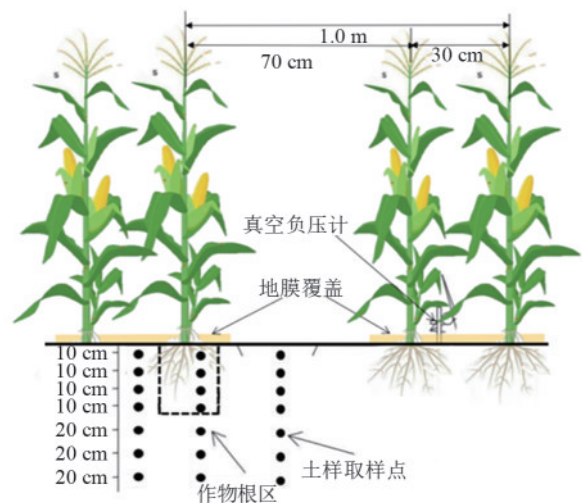


图 1 田间试验种植模式及采样点位置

Fig. 1 Planting pattern and sampling point locations in field experiment

ECe测定方法:土样经过自然风干后,过2 mm筛,制备饱和泥浆进行离子质量分数及盐分的测定。具体步骤为取风干过筛后土壤40 g于烧杯之中,向杯中一次性加入16 mL水量静置过夜,杯口用密封袋封住,第2 d调制饱和泥浆。随后,将制备的饱和泥浆进行离心处理(速度为4 000 r/min,时间为30 min),得到土壤饱和浸提液。接着测定土壤饱和浸提液的电导率,利用电导率仪(PHS-3 C型,上海雷磁)测定。

土壤饱和浸提液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用EDTA络合滴定法, Na^+ 和 K^+ 采用火焰光度法测定。

2) 作物指标

植物阳离子在玉米收获期进行取样。将植株的根、茎和叶分开,取3个重复样品。把植株样品放在烘箱中105℃杀青30 min,然后将温度调到75℃烘干至恒重。用粉碎机将植物的茎、叶的组织器官分别进行粉碎研磨,酸消解为溶液备用待测,测定方法同土壤饱和浸提液测定方法。

产量在玉米的收获期对试验地的每个处理小区进行产量测定。每个小区取10株玉米放入网兜中,自然状态下将其风干,然后人工对玉米进行脱粒,然后计算玉米产量。各组织经消煮提取后,离子质量分数测定方法同上。

1.4 数据处理及统计分析

利用Microsoft Excel 2019软件进行数据整理分析,采用IBM SPSS Statistics 24统计分析软件对试验数据进行方差分析,多元线性回归分析,使用Origin 2025 b软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同离子组成微咸水滴灌下土壤盐分特征

2.1.1 土壤ECe分布特征 由图2可知,不同离子组成的微咸水滴灌对土壤电导率(ECe)产生显著影响。2021年,试验中各处理收获后根区土壤ECe呈明显差异,在不同深度土层中,相比播种前盐分均有积累。其中 T_{Na} 和 T_{Mg} 处理在0~20 cm土层的盐分积累较为显著, T_{Mg} 处理0~20 cm土层ECe从1.4 dS/m提高至5.8 dS/m。2022年,盐分表聚效应进一步加剧,特别是在 T_{Na} 和 T_{Mg} 处理的0~10 cm土层。 T_{Na} 处理的距滴头水平距离25 cm处,ECe由播种前的2.4 dS/m提高至8.3 dS/m,而 T_{Mg} 处理则从2.0 dS/m升至7.0 dS/m。 T_{Ca} 处理在膜外50 cm的盐分运移显著,ECe增幅超过90%。 T_{K} 处理盐分分布变化不明显。2023年, T_{Ca} 处理在根区30~40 cm土层ECe较第1 a增加46%,而 T_{K} 处理的盐分变化较小,其40~60 cm土层ECe值几乎保持稳定。 T_{Mg} 处理的ECe在膜外

区域持续增加,呈盐分向远距离扩散趋势。总体来看,收获后土壤对比播种前,0~20 cm土层积盐现象明显,而在60~100 cm土层,CK处理的ECe有所下降(降幅23%)。 T_{Ca} 和 T_{Mg} 处理的盐分向膜外扩散较为显著,尤其是在距离滴头水平距离25~50 cm区域,ECe增幅超过80%。 T_{Na} 处理则盐分滞留在根区,未发生显著的淋洗作用。

2.1.2 不同深度土壤盐分质量分数变化 试验过程中分别取当年播种前和收获后距滴头距离0、25、50 cm处的0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm土层土样,测土壤ECe,计算每层土壤的土壤ECe之差,按照0~20 cm为表层土,20~60 cm为中层土,60~100 cm为深层土将土样分组,每组内土样的ECe求和,得出代表该土层的当年盐分变化并制图。由图3可知,各处理在不同土层和距离滴头区域的盐分积累(ECe差值)呈显著差异, T_{Ca} 处理的表层土壤(20 cm)盐分积累在滴头正下方(0 cm)极为显著,在滴头正下方ECe差值连续3 a均居各处理之首,其中2021年、2022年、2023年ECe差值分别为4.80、4.33、4.56 dS/m。 T_{Na} 处理在25 cm区域的0~20 cm土层ECe差值明显高于其他处理,2023年ECe差值为12.56 dS/m。 T_{Ca} 和 T_{Mg} 处理下的土壤在距滴头水平距离50 cm区域盐分扩散显著,3 a ECe差值均在10 dS/m左右,体现出明显的积盐现象。在垂直分布上,60~100 cm土层普遍表现为盐分减少(如CK处理3 a平均ECe差值-0.35 dS/m),但 T_{Ca} 处理在2023年该层出现积盐现象(2.23 dS/m),表明深层盐分积累风险较高。综合来看,微咸水灌溉导致土壤表层及25~50 cm远距离区域的盐分积累,在 T_{Ca} 和 T_{Mg} 处理中,盐分向远距离扩散尤为明显。

2.1.3 根区土壤阳离子质量分数 由图4可知,不同年份播种前和收获后的土壤溶液中各离子质量分数,各处理微咸水对其相应离子均表现出显著的富集效应,其中 T_{Na} 处理使土壤 Na^+ 质量分数在收获期达到24.03~29.34 mg/kg,较播前增幅达119%~186%($p<0.05$); T_{K} 处理在2021年使 K^+ 质量分数升高至7.45 mg/kg(播前0.70 mg/kg); T_{Ca} 和 T_{Mg} 处理分别使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量分数在2023年分别达到18.68、22.24 mg/kg。通过3 a整体比较可以看出, T_{Ca} 、 T_{Mg} 处理的相对应离子质量分数呈稳定增长趋势(Ca^{2+} 年平均增长32%, Mg^{2+} 年平均增长41%)。而相比2021年(7.45 mg/kg), T_{K} 处理的 K^+ 富集效果在2023年(6.41 mg/kg)有所降低。对照(CK)各离子质量分数保持相对稳定。

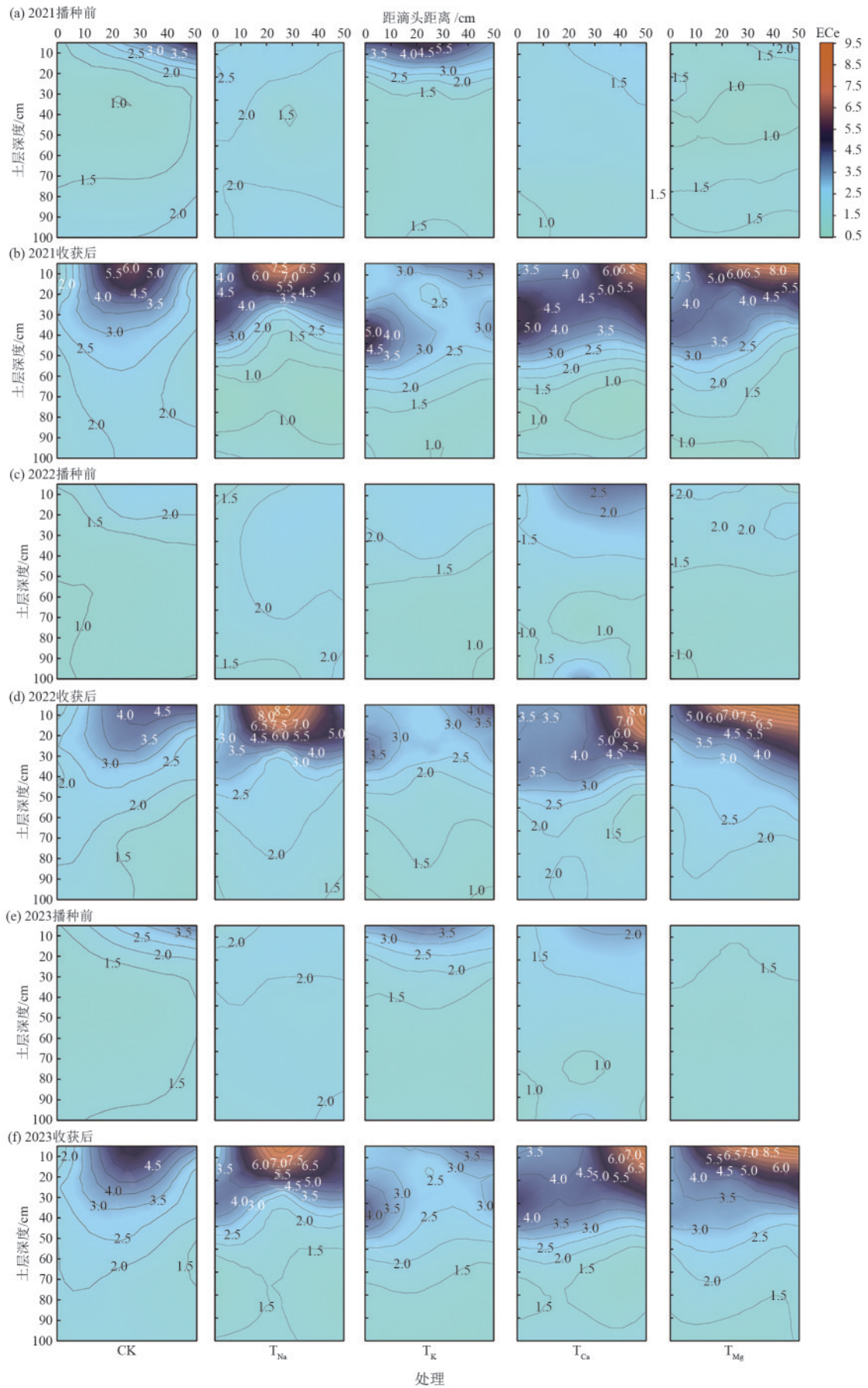
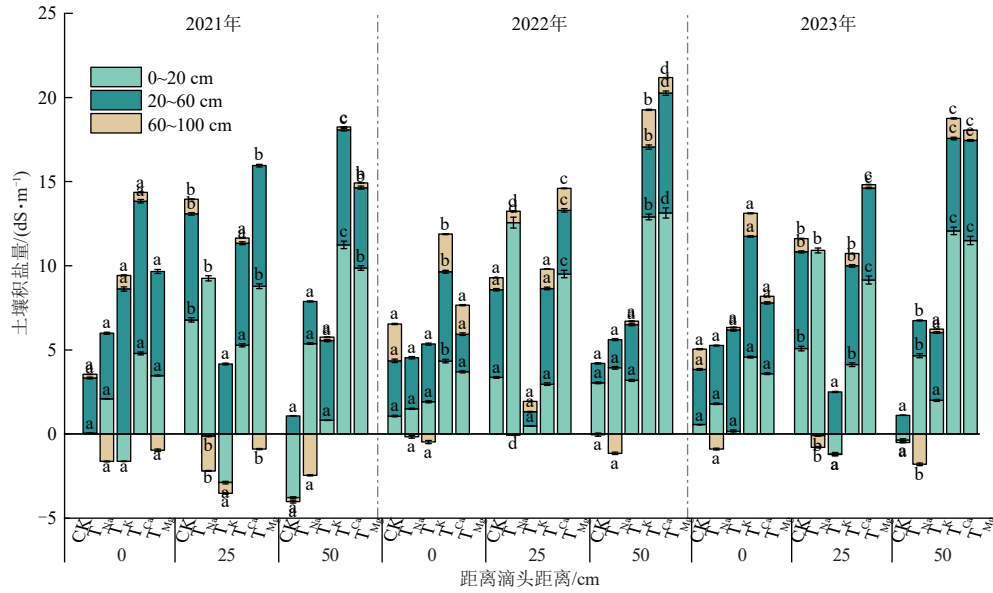


图 2 2021—2023年播种前及收获后根区土壤 ECe

Fig. 2 Soil ECe in root zone before sowing and after harvest from 2021 to 2023



注:图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 3 2021—2023年作物生长期根区不同土层土壤含盐量

Fig. 3 Salinity content in different soil layers of root zone during crop growing period from 2021 to 2023

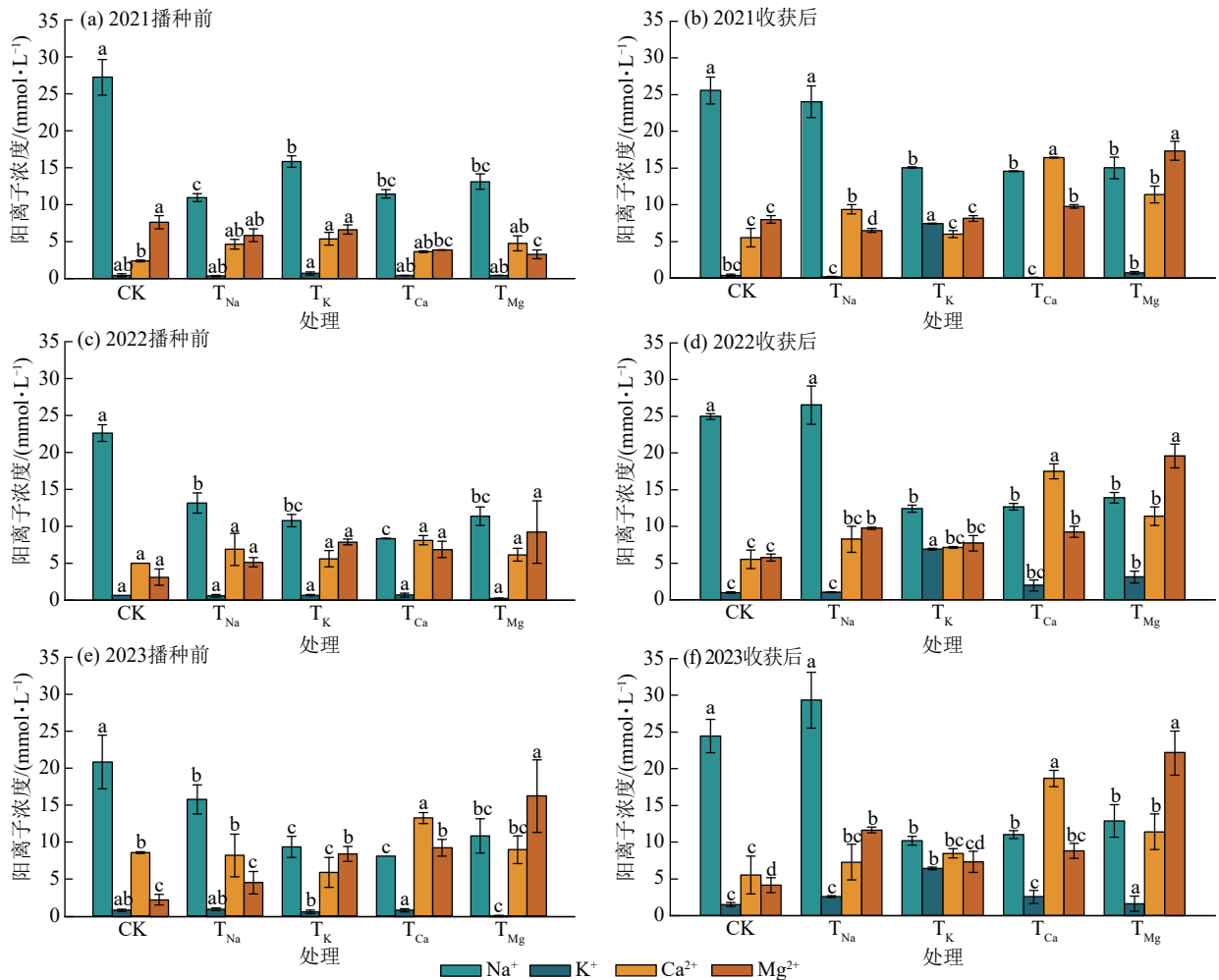


图 4 2021—2023年播种前及收获后根区土壤阳离子浓度

Fig. 4 Cation concentrations in soil of root zone before sowing and after harvest from 2021 to 2023

2.2 不同离子组成微咸水滴灌对玉米离子吸收及产量的影响

2.2.1 离子吸收特性 本研究系统分析2021—2023年

不同离子型微咸水灌溉对作物离子吸收与分配的影响,表明各处理均导致对应阳离子在作物中的积累。

由图5可知,不同年际和不同处理阳离子在植物体不

同部位的分布都呈显著差异。在茎部, T_{Na} 处理导致 Na^+ 质量分数显著增加, 2022 年达到 225 mg/kg (CK: 73 mg/kg), 且叶片/茎部比值从 2021 年的 0.7 增至 2023 年的 0.9, 呈逐年上升趋势。 T_{Ca} 和 T_{Mg} 处理分别促进 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在叶片的优先累积, T_{Mg} 处理 2023 年叶片 Mg^{2+} 质量分数达 5 480 mg/kg (CK 的 1.7 倍)。

且与其他离子相比, Mg 离子在作物中表现出独特的分配特征, 叶片 Mg^{2+} 质量分数显著高于茎部。值得注意的是, T_{Na} 处理下作物体内除钠离子外其余 3 种阳离子质量分数都低于对照组 CK, 3 a T_{Ca} 处理的玉米叶片和茎部钠离子质量分数低于 CK, T_{Mg} 处理下的作物体内其余离子质量分数均与 CK 相近。

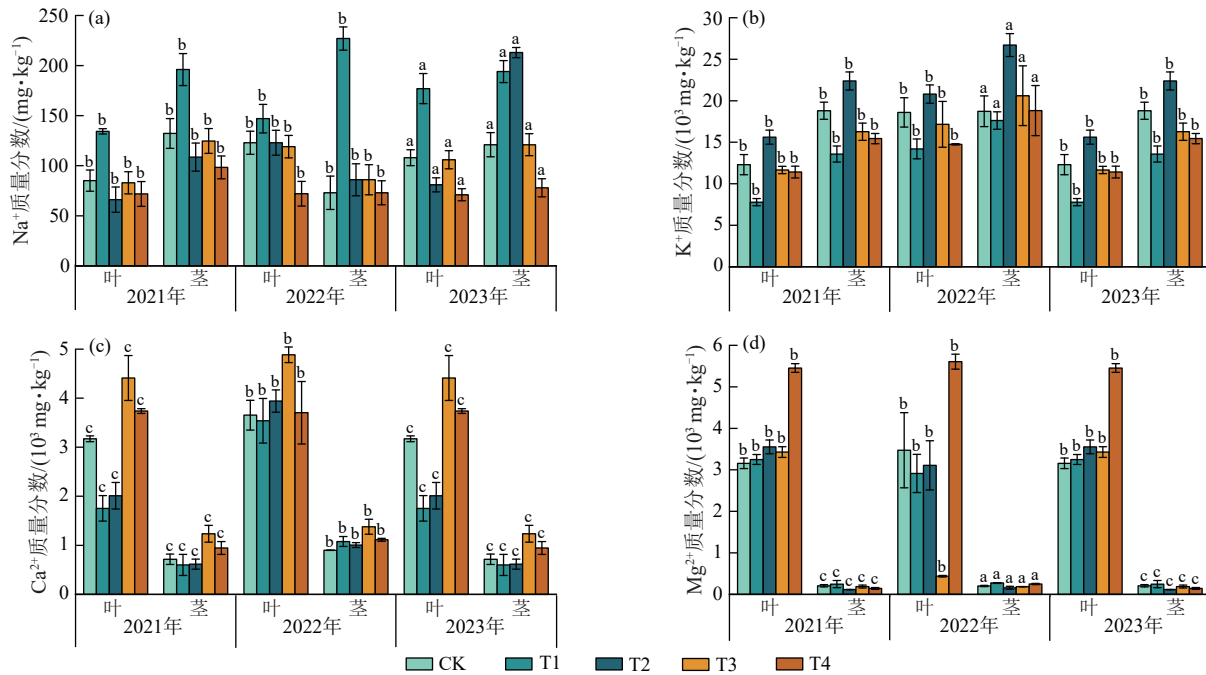


图 5 2023 年不同处理下作物茎叶阳离子质量分数

Fig. 5 Cation contents in crop stems and leaves under different treatments (2023)

2.2.2 玉米茎叶干重及产量特征 3 a 连续观测表明, 不同处理对作物物质分配及产量具有显著影响 (表 3)。总体产量排序表现为 $T_{Mg} > T_{Ca} > T_K > T_{Na} > CK$, 收获指数排序为 $T_{Mg} > T_{Ca} > T_K > T_{Na} > CK$ 。 T_{Mg} 处理 3 a 产量持续增长, 2021 年为 1.636 4 kg/m^2 , 2023 年达 1.797 7 kg/m^2 , 增幅达 10.0%。收获指数方面, T_{Mg} 处理在 2021 年为 0.58, 2023 年提升至 0.59, 表现稳定且略有上升, 反映出其较高的光合产物分配效率。 T_{Ca} 处理收获指数从 2021 年 0.56 上升至 2023 年 0.59, 虽增幅明显, 但由于其前期基数低, 整体光能转化效率仍低于 T_{Mg} 。 T_K 处理收获指数 2021 年为 0.61, 属于高起点, 但 2022 年下降至 0.57, 2023 年回升至 0.58, 呈先降后升的波动趋势。 T_{Na} 处理收获指数 3 a 平均值最低, 2021 年为 0.56, 2023 年为 0.58, 增长缓慢。CK 对照组收获指数从 2021 年 0.59 下降至 2023 年 0.54, 下降幅度达 8.5%。

处理特异性响应方面, T_{Ca} 处理茎干重从 2021 年 0.845 65 kg/m^2 增加至 2023 年 0.884 88 kg/m^2 , 呈上升趋势, 但其百粒重优势逐年减弱, 2021 年为 48.14 g, 2023 年降至 45.48 g, 3 a 降幅 5.5%。 T_{Mg} 处理表现出稳定性, 产量从 2021—2022 年微增 0.36%, 2022—2023 年显著提升

9.4%。 T_{Na} 处理叶干重年际波动较大, 2021 年叶干重 0.301 51 kg/m^2 , 2023 年叶干重 0.318 51 kg/m^2 , 但其 2023 年产量显著回升至 1.609 2 kg/m^2 , 较 CK 2021 年增幅为 15.3%。CK 处理的百粒重在 2021 年为 38.44 g, 2022 年降至 36.16 g, 2023 年有所回升至 38.86 g。 T_K 处理的百粒重相对稳定, 2021 年、2022 年、2023 年分别为 44.92、36.81、43.3 g, 产量从 2021—2023 年整体呈上升趋势, 由 1.540 2 kg/m^2 增至 1.655 7 kg/m^2 , 增幅 7.5%。

2.2.3 不同部位各阳离子质量分数与产量构成要素的相关性 基于 2021—2023 年不同处理下作物茎、叶阳离子质量分数与产量因素的相关性热图 (图 6), 表明各参数间存在显著相关性。叶片钾离子 (K^+) 与产量呈强正相关 (2021 年 $r=0.85, p<0.001$; 2022 年 $r=0.72, p<0.01$; 2023 年 $r=0.78, p<0.001$), 同时与百粒重呈正相关 (3 a 平均 $r>0.76$)。茎部钠离子 (Na^+) 则与产量表现出负相关 (2021 年 $r=-0.68, p<0.01$; 2023 年 $r=-0.61, p<0.01$), 其与百粒重显著负相关 ($r=-0.59\sim-0.49$)。值得注意的是, 叶片镁离子 (Mg^{2+}) 与产量的正相关逐年增强, 从 2021 年的中等相关 ($r=0.51, p<0.05$) 提升至 2023 年的强相关 ($r=0.67, p<0.01$)。相比之下, 茎部钙离子 (Ca^{2+}) 与各产量参数

的相关性较弱($|r| < 0.4, p > 0.05$), 且其与百粒重的相关性从 2021 年的中等负相关($r = -0.31$)减弱至 2023 年无统计学意义($r = 0.08$)。从器官特异性来看, 茎部离子

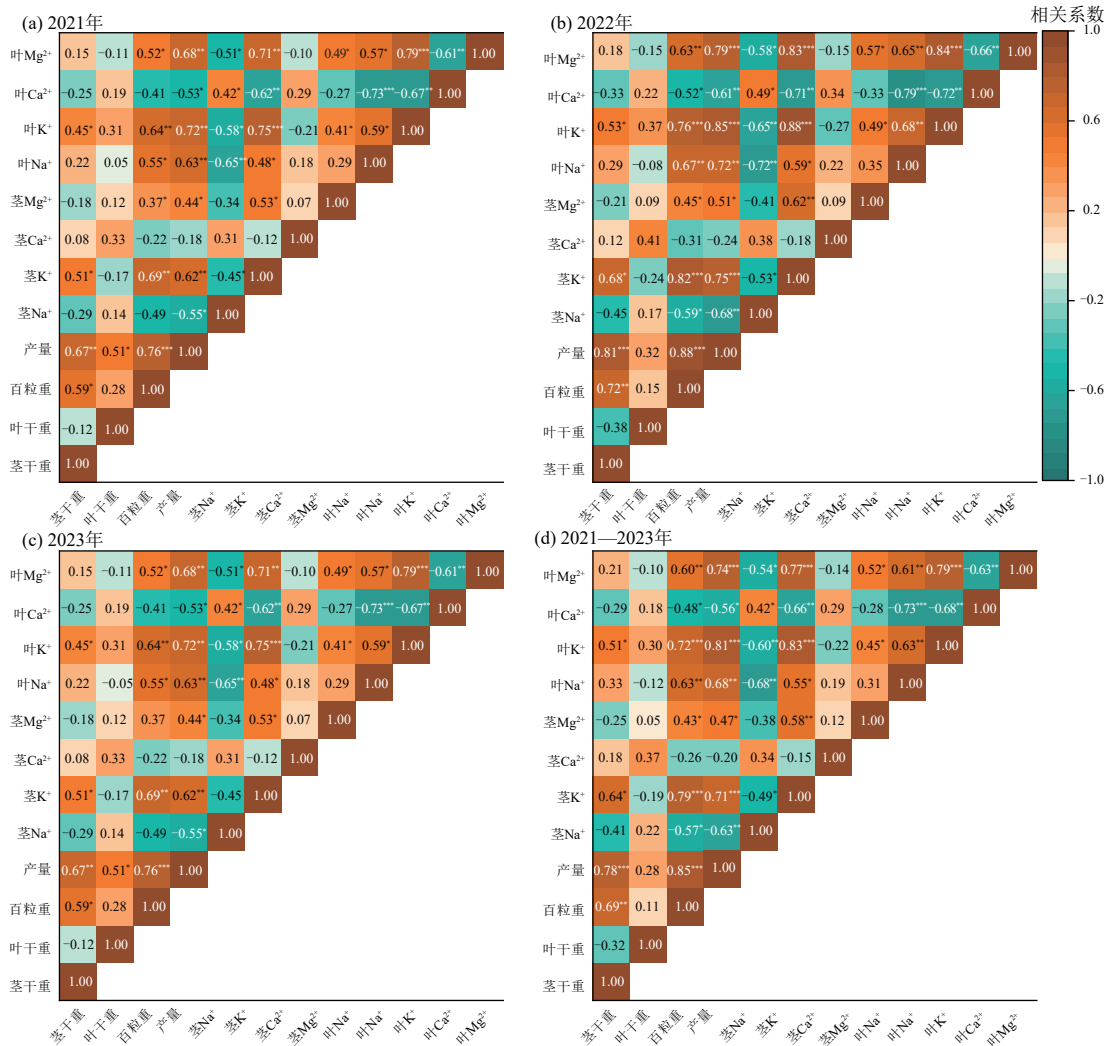
(如 Na^+ 、 Ca^{2+}) 多与产量呈负相关或弱相关。总体来看, 叶片 K^+ 与 Mg^{2+} 的浓度与产量呈显著正相关, 而茎部 Na^+ 浓度则与产量表现出负相关或弱相关趋势。

表 3 不同离子组成微咸水滴灌下 2021—2023 年作物茎叶干重及产量特征

Table 3 Crop stem and leaf dry weight and yield characteristics under brackish water drip irrigation with different ion compositions from 2021 to 2023

年份	处理	茎干重/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	叶干重/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	百粒重/g	产量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	收获指数
2021	CK	0.625 94±0.048 02b	0.324 84±0.024 47a	38.44±3.1c	1.394 70±0.105 30c	0.59±0.04a
	T _{Na}	0.854 90±0.094 16a	0.301 51±0.032 87b	44.82±4.8a	1.489 20±0.161 20b	0.56±0.05b
	T _K	0.687 21±0.006 98b	0.287 16±0.031 82c	44.92±4.9a	1.540 20±0.149 30b	0.61±0.04a
	T _{Ca}	0.845 65±0.087 79a	0.373 39±0.043 69a	48.14±5.2a	1.575 90±0.157 70a	0.56±0.05b
	T _{Mg}	0.818 86±0.081 00a	0.352 65±0.038 51a	44.69±4.7a	1.636 40±0.165 00a	0.58±0.04ab
2022	CK	0.877 06±0.065 79ab	0.323 27±0.023 85a	36.16±2.7b	1.404 20±0.105 84b	0.54±0.04b
	T _{Na}	0.820 08±0.107 81b	0.301 51±0.039 44b	36.81±5.1b	1.379 30±0.187 31c	0.55±0.06b
	T _K	0.847 76±0.084 77ab	0.312 05±0.034 72b	36.81±3.9b	1.544 70±0.154 03a	0.57±0.05a
	T _{Ca}	0.833 75±0.083 02b	0.336 33±0.037 32a	38.97±4.3a	1.532 60±0.153 28a	0.57±0.05a
	T _{Mg}	0.866 59±0.095 39a	0.353 19±0.039 17a	40.52±4.4a	1.642 30±0.178 43a	0.57±0.05a
2023	CK	0.930 85±0.073 04c	0.324 84±0.024 63c	38.86±2.9c	1.464 40±0.113 81c	0.54±0.04b
	T _{Na}	0.870 40±0.098 95b	0.318 51±0.035 81b	46.17±5.2a	1.609 20±0.177 48b	0.58±0.05a
	T _K	0.899 71±0.086 92b	0.313 62±0.034 05b	43.30±4.6b	1.655 70±0.156 33b	0.58±0.05a
	T _{Ca}	0.884 88±0.093 78b	0.337 96±0.037 22b	45.48±5.0a	1.761 70±0.189 42a	0.59±0.05a
	T _{Mg}	0.919 70±0.091 64a	0.354 89±0.038 98a	46.19±4.9a	1.797 70±0.178 85a	0.59±0.06a

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。

图 6 2021—2023 年不同处理下作物茎叶阳离子质量分数与产量的相关性

Fig. 6 Correlations between cation contents in crop stems and leaves and yield components under different treatments from 2021 to 2023

3 讨论

3.1 不同离子组成的微咸水对土壤盐分特征的影响

不同离子型微咸水灌溉处理对土壤盐分特征产生显著影响,结合图2、图3可以看出, T_{Na} 处理在3a内积盐水平显著高于其他处理,在表层(0~20 cm)的盐分累积最为明显。是 Na^+ 对土壤颗粒具有分散作用,使得土壤孔隙结构被破坏,入渗性能降低,导致盐分滞留在土壤表层^[13]。相对而言, T_K 处理在控制土壤盐分积累方面效果较好,可能是因为玉米生长发育对 K^+ 需求较大,通过作物吸收直接减少土壤溶液中的 K^+ ,且KCl在土壤无沉淀反应,所有盐分以离子形态存在,可随灌溉水完全淋洗^[14]。而 T_{Mg} 和 T_{Ca} 处理显示出明显侧向扩散现象,是由于钙镁离子促进土壤颗粒絮凝,形成大孔隙,但孔隙连通性下降^[8],盐分滞留在土壤溶液中,不易随水下渗,并且随着未覆膜区域的水分蒸发,盐分移动到距滴头较远的地面。相比 T_{Ca} 处理, T_{Mg} 处理的盐分更明显地聚集在距滴头水平距离较远的土壤表层,是由于在碱性环境下,在 Mg^{2+} 占优势的交换复合体中,土壤团聚体稳定性显著下降,表现为黏粒分散、孔隙堵塞、表层致密化,并伴随表面封闭现象^[15],以至于盐分累积。

由图4可知,与对照(CK,当地地下水)相比,除 T_{Na} 外,其余阳离子组成微咸水处理均显著抑制玉米生育期间土壤 Na^+ 的累积,是由于当外源 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进入土壤后,优先占据胶体交换位点,将吸附态 Na^+ 置换到土壤溶液中^[16], K^+ 虽为单价离子,但其水合半径小于 Na^+ ,可部分置换 Na^+ ,钠离子随灌溉水淋洗至深层,根区土壤中的 Na^+ 离子质量分数随之降低。值得注意的是, T_K 处理持续向土壤输入外源 K^+ ,致使其收获后 K^+ 质量分数显著高于CK;而 T_{Mg} 处理虽未额外施钾,但土壤 K^+ 浓度亦逐年高于CK,说明 Mg^{2+} 可能通过抑制作物对 K^+ 的吸收或改变土壤 K^+ 平衡,促进 K^+ 在根区的累积。反映出灌溉水中不同阳离子间的协同拮抗效应对土壤阳离子质量分数的影响。

3.2 不同离子组成微咸水对玉米离子吸收及产量的影响

由图5、图6可知, T_{Na} 处理植株除 Na^+ 外, K^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 质量分数均显著低于CK,证实灌溉水中过量的 Na^+ 可触发离子毒害并抑制养分吸收,与前人^[17-19]结论一致。相比之下, T_{Ca} 处理下各处理玉米不同部位各阳离子水平与CK接近,提示在盐分阈值附近,当地微咸水添加 Ca^{2+} 后对玉米养分吸收干扰有限,可能归因于盐分主要迁移至根区外侧表层,根际实际胁迫降低。而 T_{Mg} 处理3a试验中都体现出明显抑制玉米叶片和茎部对钠离子吸收的现象。

玉米体内阳离子分布对产量形成的影响。总体来看,叶片 K^+ 与 Mg^{2+} 的浓度与产量呈显著正相关,而茎部 Na^+ 浓度则与产量表现出负相关趋势。是因为叶片中的 K^+ 通过调控气孔开闭、激活光合关键酶及促进同化物韧皮部运输提高源-库效率^[20];茎部 K^+ 还能竞争性抑制 Na^+ 向地上部转运,降低 Na^+/K^+ 比,从而缓解盐胁迫^[21],其效应与钾肥增产原理一致^[22]。茎部 Mg^{2+} 则通过加固细胞壁并介导信号转导提升抗盐性^[23-24]。叶片中的 Mg^{2+} 作为叶绿素的中心原子可直接提高PS II活性^[25]。尽管低浓度 Na^+ 可部分替代 K^+ 参与渗透调节,但其毒害效应远超营养作用,在盐胁迫条件下主要表现为生长抑制^[26]。

表3进一步表明,提高微咸水中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度均可提升产量。产量和收获指数都表现出 $T_{Mg} > T_{Ca} > T_K > T_{Na} > CK$ 的规律。试验组添加外源盐后产量高于CK,可能是因为灌溉考虑淋洗率,试验组总灌水量增多,而在灌溉水盐分质量分数未超过玉米耐盐阈值前,主导产量的因素仍然是水分,该结论与前人^[27]研究结果一致。相较于 T_K 处理, T_{Mg} 与 T_{Ca} 处理在产量及收获指数上的显著提升可归因于多重机制的协同作用。尽管 T_K 处理通过外源 K^+ 的输入在一定程度上缓解盐胁迫并提高作物产量,但 T_{Mg} 与 T_{Ca} 处理则通过改善土壤物理结构、补充必需矿质营养,并有效调控离子平衡,从而实现更优的增产效应。特别是 T_{Mg} 处理,其通过 Mg^{2+} 与 Na^+ 的竞争性吸收机制,显著抑制玉米对 Na^+ 的积累,降低钠离子对细胞代谢的毒性作用,最终表现出最强的增产潜力。

4 结论

1) 添加外源 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在当地地下水中,通过改变河套灌区地下微咸水离子组成结构,使其更适宜用于灌溉,相比直接使用,能够明显改善土壤盐分特征。

2) 向地下微咸水中添加适当量的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,再用于灌溉,均有助于提高玉米产量,其中添加 Mg^{2+} 处理效果最佳。

参考文献:

- [1] 刘素琴,尹慧,刘宇霞,等.浅析河套地区水资源的可持续利用[J].内蒙古水利,2013(3):30-31.
LIU S Q, YIN H, LIU Y X, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources in Hetao area[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2013(3):30-31.
- [2] 王琪.内蒙古河套平原地下咸淡水形成分布规律初步探讨[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2009,30(4):168-171.
WANG Q. Preliminary assessment of formation and

- distribution of salt-fresh water in the Ordos region of Inner Mongolia [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2009, 30(4): 168-171.
- [3] HASEGAWA P M. Sodium (Na^+) homeostasis and salt tolerance of plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 92: 19-31.
- [4] NIU J, ZHANG L N, ZHANG Y M, et al. Impact of exogenous potassium and sodium ions on soil aggregates and organic carbon mineralization in loessial soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(5): 786-797.
- [5] 胡行路, 张体彬, 张通港, 等. 微咸水离子组成对膜下滴灌土壤孔隙结构的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(3): 173-181.
- HU X L, ZHANG T B, ZHANG T G, et al. Effects of brackish water cation compositions on soil pore structure under submembrane drip irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(3): 173-181.
- [6] 李金刚, 屈忠义, 黄永平, 等. 微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 217-223.
- LI J G, QU Z Y, HUANG Y P, et al. Effects of control lower limit of saline water mulched drip irrigation on water salt movement and corn yield in saline soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 217-223.
- [7] GUO H M, ZHANG B, LI Y, et al. Hydrogeological and biogeochemical constrains of arsenic mobilization in shallow aquifers from the Hetao basin, Inner Mongolia [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(4): 876-883.
- [8] 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 W Q, ZHANG T B, TONG J K, et al. Effects of brackish water with different Na^+/K^+ ratios on soil water-salt characteristics and winter wheat growth [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6): 372-380.
- [9] 汪啸, 王在敏, 靳孟贵. 灌溉水中 NaCl 和 Mn 对棉花生长及产量的拮抗效应 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(5): 571-577.
- WANG X, WANG Z M, JIN M G. Antagonistic effect of Mn and NaCl in irrigation water on cotton growth and yield [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(5): 571-577.
- [10] SHABALA S, CUIN T A. Potassium transport and plant salt tolerance [J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133(4): 651-669.
- [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] 曾邯斌, 苏春利, 谢先军, 等. 河套灌区西部浅层地下水咸化机制 [J]. *地球科学*, 2021, 46(6): 2267-2277.
- ZENG H B, SU C L, XIE X J, et al. Mechanism of salinization of shallow groundwater in western Hetao irrigation area [J]. *Earth Science*, 2021, 46(6): 2267-2277.
- [13] MORSHEDI A, SAMENI A M. Hydraulic conductivity of calcareous soils as affected by salinity and sodicity. I. Effect of concentration and composition of leaching solution and type and amount of clay minerals of tested soils [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31(1/2): 51-67.
- [14] 袁金华, 徐仁扣, 俄胜哲, 等. 生物质炭中盐基离子存在形态及其与改良酸性土壤的关系 [J]. *土壤*, 2019, 51(1): 75-82.
- YUAN J H, XU R K, E S Z, et al. Forms of base cations in biochars and their roles in acid soil amelioration [J]. *Soils*, 2019, 51(1): 75-82.
- [15] ZHANG X C, NORTON L D. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 260(1/2/3/4): 194-205.
- [16] AMOROCHO J. Discussion of "physico-chemical properties of soils: Ion exchange phenomena" [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1959, 85(5): 171-177.
- [17] LIANG Y C. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress [J]. *Plant and Soil*, 1999, 209(2): 217-224.
- [18] 李春俭, 王正, 张福锁. 镁肥在我国主要作物上的提质增效作用 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022(3): 1-6.
- LI C J, WANG Z, ZHANG F S. The effect of magnesium fertilizer on the quality of main crops and nutrient use efficiency in China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(3): 1-6.
- [19] 李金刚, 何平如, 陈菁, 等. 灌溉水盐分组成对番茄生长及土壤盐碱的影响 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 423-436.
- LI J G, HE P R, CHEN J, et al. Effects of irrigation water salt compositions on tomato growth and soil salinization [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 423-436.
- [20] 杜琪, 王宁, 赵新华, 等. 低钾胁迫对玉米苗期光合特性和光系统 II 性能的影响 [J]. *核农学报*, 2019, 33(3): 592-599.
- DU Q, WANG N, ZHAO X H, et al. Effects of potassium deficiency on photosynthesis and performance of photosystem II in maize seedling stage [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(3): 592-599.

(下转第 197 页)