

文章编号: 1672-3317(2023)08-0016-10

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

张通港¹, 胡行路³, 罗敏¹, 王春¹,
闫思慧¹, 程煜¹, 梁青¹, 冯浩^{2,3}, 张体彬^{2,3*}

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学
水土保持研究所, 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: 微咸水灌溉是缓解旱区农业用水危机的主要途径之一, 而微咸水中的离子组成特征影响着土壤性质进而影响作物生长。【目的】探讨不同阳离子组成微咸水对土壤理化性质和作物生长的影响。【方法】于2021年4—9月, 在内蒙古河套灌区, 以膜下滴灌的模式种植春玉米, 开展微咸水灌溉田间定位试验。以当地地下水为对照(CK), 向地下水中分别添加相同物质的量浓度(20 mmol/L)、不同类型氯化盐(NaCl、KCl、CaCl₂、MgCl₂), 形成相近的电导率(EC)、而不同阳离子组成微咸水处理(分别标记为T1、T2、T3、T4), 研究土壤结构特性变化、水盐运移过程和作物生长响应。【结果】①与CK相比, 添加Na⁺(T1处理)后0~20 cm土层小孔隙数量和储水量显著增加, 尤其在灌水较多的拔节期; 而T3处理和T4处理小孔隙度比T1处理分别降低147.73%和132.01%, 有利于土壤孔隙结构的发育和水分的运移, 降低了表层土壤储水量。②与CK相比, T1、T2、T3处理和T4处理分别提升了作物根区0~60 cm土壤中Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺物质的量浓度, 除T1处理外, T2、T3处理和T4处理对应的K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺物质的量浓度均显著高于CK。T1处理在作物根区表层土壤有明显积盐现象, 其他处理无明显变化, 相反T3处理和T4处理土壤盐分整体向膜外运移, T4处理更为明显。受灌溉水EC影响, 根区土壤饱和浸提液电导率(EC_e)均在3~4 dS/m内。③作物地上部器官离子量中K⁺量最高, Na⁺量最低且显著低于K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻量。Na⁺、K⁺、Cl⁻量均表现为叶<茎, Ca²⁺和Mg²⁺离子量表现为叶>茎。T1—T4处理作物产量均有所增加, 其中T4处理产量最大, 较CK提升17.33%。【结论】含有较多Na⁺的微咸水灌溉提高了土壤表层小孔隙度, 影响了土壤水分下渗, 造成表层土壤盐分积累, 而较多的K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺则减少了土壤表层小孔隙度, 有利于表层盐分淋洗。微咸水灌溉下, 相对于较多的Na⁺带来显著负面效应, 灌溉水中适当物质的量浓度的K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺均有助于提高作物产量。研究结果可为河套灌区地下微咸水的安全利用提供理论依据。

关键词: 孔隙度; 水盐分布; 阳离子; 作物生长

中图分类号: S513; S156.44

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022576

OSID: 

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 Tonggang, HU Xinglu, LUO Min, 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.

0 引言

【研究意义】内蒙古河套灌区是中国三大一首制自流灌区之一^[1]。近年来, 随着节水工程建设和国家政策性节水措施的实施, 河套灌区年均引水量由20世纪90年代的50亿m³减少到目前的40亿m³^[2], 地表淡水资源紧缺和土壤盐渍化问题日益突出; 而同时河套灌区地下微咸水资源丰富, 如何高效利用地下微咸水资源, 对河套灌区土壤盐渍化防治和农业生产可

持续发展具有重要作用。

【研究进展】膜下滴灌节水、抑盐、保温等特点使其在西北盐碱地区得到大力推广。目前, 诸多学者对微咸水膜下滴灌制度开展了大量研究。丁运韬等^[3]在河套灌区开展膜下滴灌不同灌水下限深层土壤水分对作物根区的补给作用及根系吸水的响应研究, 结果表明春玉米膜下滴灌的灌水下限设置为-30 kPa, 生育期内灌水定额在240~300 mm的灌溉制度不仅可以提高水分利用效率, 还能充分利用深层土壤水分, 提高根系吸水能力。齐智娟等^[4]在河套地区开展不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究, 结果表明全覆膜处理保水抑蒸效果明显, 压盐效果显著。姚宝林等^[5]通过矮化密植枣树微咸水滴灌田间试验, 发现微咸水灌溉土壤积盐程度随灌溉水矿化度的提高而增加, 且表聚明显。李金刚等^[6]研究表明在微咸水覆膜滴灌条

收稿日期: 2022-10-17 修回日期: 2023-04-29 网络出版日期: 2023-05-15
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900700); 陕西省创新能力支撑计划项目(2022PT-23)

作者简介: 张通港(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉研究。
E-mail: 906077359@qq.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

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

件下,不同灌水定额对土壤中盐分离子的分布影响显著,其中 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 和 K^+ 容易随水分移动。

微咸水灌溉下,不同盐分离子对土壤渗透性能、作物生长发育的影响也极为重要。微咸水入渗过程中,水体盐分离子与土壤胶体颗粒发生作用,会改变土壤孔隙结构,影响土壤的入渗过程^[7]。盛丰等^[8]通过研究灌溉水盐分浓度和灌溉频率对土壤结构的影响,结果表明低频率、高定额的微咸水或低于 3 g/L 的微咸水与淡水交替灌溉均有利于稳定土壤团聚结构,提高盐分淋洗效率,提高土壤水分入渗;但高矿化度的灌溉水不利于土壤团聚结构的稳定,使土壤发生板结,降低土壤入渗能力。李慧等^[9]通过设置不同盐分浓度的土柱入渗试验,表明 NaCl 溶液浓度越高,土壤渗透性能降低程度越大; CaCl_2 、 MgCl_2 溶液均能提升土壤的渗透性能,但提升程度会随着溶液浓度的升高而逐渐放缓。同时诸多研究^[10-14]也表明不同盐分离子在作物各器官内含量差异显著,并且对作物生长的影响也有所不同。【切入点】由此可见,前人关于微咸水灌溉的研究更多关注灌水制度和灌溉方式,而相同矿化度、不同阳离子组成的微咸水对土壤结构特性、水盐运移及作物生长影响的综合研究鲜有报道。

【拟解决的关键问题】因此,本研究针对河套灌区中度盐渍化农田,开展田间定位试验,进行春玉米种植,在生育期内利用微咸水膜下滴灌,向地下水添加不同氯化盐,形成不同阳离子组成的微咸水处理,研究土壤孔隙结构特性、水盐时空分布,以及作物生长和产量形成,分析膜下滴灌条件下不同阳离子组成

微咸水对土壤理化性质和作物生长的影响,以期为河套灌区地下微咸水的安全利用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

田间试验于 2021 年玉米生长季(4—9 月)在内蒙古河套灌区曙光试验站(107°13'E, 40°43'N, 海拔 1 041 m)进行。该地区属中温带干旱气候,多年平均降水量 134 mm,蒸发量大于 2 200 mm,平均气温 8.0 °C,无霜期 130~150 d,年日照时间 3 100~3 300 h。

试验区农田 0~40 cm 平均土壤饱和浸提液电导率(EC_e)为 7.1 dS/m, pH 值大于 8.0,属于中度盐渍化水平^[15],其他土壤理化性质见表 1。地下微咸水电导率(EC)和钠吸附比(SAR)分别为 1.8 dS/m 和 4.3 (mmol/L)^{0.5},其主要阳离子组成见表 2。试验过程中地下水埋深在 2~3 m 之间,累积蒸发量和降水量分别为 911.2 mm 和 63.4 mm(图 1)。

表 1 试验区玉米播种前土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties before corn sowed in experimental area

土层深度/cm	颗粒组成/%			土壤质地	体积质量 ρ /(g·cm ⁻³)	EC_e /(dS·m ⁻¹)	pH 值
	黏粒	粉粒	沙粒				
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

表 2 微咸水处理设置

Table 2 Treatment table of slightly saline water

简称	处理	阳离子组成/(mmol·L ⁻¹)				EC /(dS·m ⁻¹)	SAR /(mmol·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
T1	GW+20 mmol/L NaCl	30.3	0.2	4.0	7.4	3.7	12.7
T2	GW+20 mmol/L KCl	10.3	20.2	4.0	7.4	4.0	4.3
T3	GW+20 mmol/L CaCl ₂	10.3	0.2	24.0	7.4	3.4	2.6
T4	GW+20 mmol/L MgCl ₂	10.3	0.2	4.0	27.4	4.1	2.6

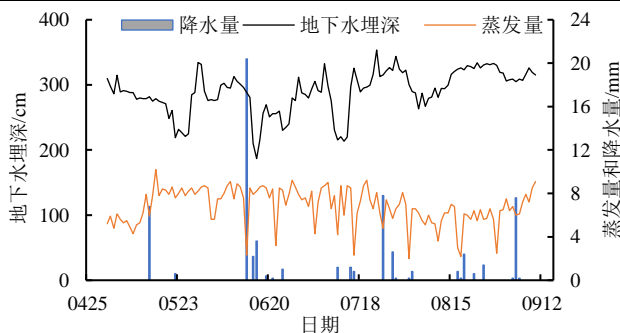


图 1 玉米全生育期地下水埋深、水面蒸发量和降水量
Fig.1 Groundwater depth, water surface evaporation and rainfall during growing stages of corn

1.2 试验处理设置

供试作物为春玉米,品种为当地主栽品种‘金萃 628’。采用“一膜一管双行”的膜下滴灌种植模式(图 2)。玉米株距 30 cm,膜下行距 30 cm,膜间行距 70 cm。采用贴片式滴灌带,滴头间距 30 cm,流量 2.7 L/h。以当地地下微咸水为对照(CK),分别添加相同摩尔当量、不同类型氯化盐,形成近似电导率、不同阳离子组成的微咸水处理(表 2)。试验共 5 个处理,每处理重复 3 个小区。小区宽 4 m,长 15 m,种植 8 行玉米。

根据前期研究成果^[16-17],针对此土壤和地下水条

件,将滴头正下方 20 cm 深度处的土壤基质势下限控制为-30 kPa,用来指导灌溉。考虑地下水 EC (1.8 dS/m) 接近玉米耐盐阈值 (1.7 dS/m) [18], 所以地下水灌溉处理 (CK) 未设置淋洗率 (LR), 单次灌水定额为 10 mm, 而其他添加盐分处理灌溉水 EC 大致在 3.8 dS/m 左右, 按照式(1)、式(2)计算, LR 约为 19%, 实际灌水定额为 12.3 mm。以 T1 处理为例, 根据单次灌水量及需添加 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。CK 和添加不同阳离子微咸水灌溉处理 (T1—T4) 生育期内总灌水量分别为 330 mm 和 406 mm。 LR 计算式为:

$$LR = \frac{EC}{2(EC_{max})}, \quad (1)$$

$$AW = \frac{AW_{CK}}{1 - LR}, \quad (2)$$

式中: LR 为淋洗率(%); EC 为灌溉水电导率(dS/m); EC_{max} 为作物产量降为 0 时的灌溉水 EC (dS/m); AW 为实际灌水量 (mm); AW_{CK} 为作物实际灌水量 (此处取值为 CK 的灌水定额 10 mm)。

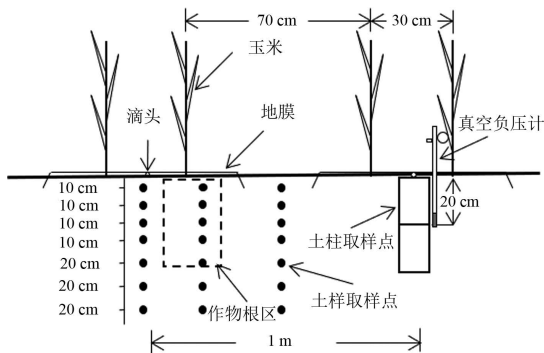


图2 种植模式示意图

Fig.2 Schematic diagram of planting pattern

基肥于播种之前耕翻时施入, 采用尿素(N: 46%)、磷酸二铵 (N: 18%, P_2O_5 : 42%), 按照 N、P 分别为 150、180 kg/hm² 的施用量均匀撒于地表。玉米生育期内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, 且保证各处理施肥量一致, 玉米全生育期内纯氮累积施入量为 300 kg/hm²。其他田间管理, 如除草、病虫害防治等同周边农田一致。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤性质测定

为研究土壤孔隙特性, 在玉米成熟期, 采用直径为 75 mm 的 PVC 管取 0~40 cm 土层深度原状土柱, 取土位置为滴头下方。对原状土柱进行 CT 扫描 (uMI 780 PET/CT 扫描仪), 利用 Image J 软件进行图像处理, 获取土壤孔隙特性指标, 图像取样区域为 4 mm×4 mm。根据 Wang 等 [19] 对孔隙度划分方法进行划分,

将孔隙面积 < 0.8 mm² 孔隙划分为小孔隙, 孔隙面积 > 0.8 mm² 孔隙划分为大孔隙。

土壤体积质量采用环刀法测定, 计算式为:

$$\gamma = \frac{M}{V}, \quad (3)$$

式中: γ 为土壤体积质量 (g/cm³); M 为环刀内干土质量 (g); V 为环刀容积 (cm³)。

土壤含水率采用烘干法测定质量含水率, 然后利用容重换算成体积含水率, 土壤剖面储水量计算为:

$$W = \sum (W_i \times \gamma \times H_i \times 10), \quad (4)$$

式中: W 为土层储水量 (mm); W_i 为某土层质量含水率 (g/g); γ 为某土层体积质量 (g/cm³); H_i 为土层厚度 (cm)。

土样经风干、过筛后, 进行盐分特性测定。土壤盐分特性测定采用饱和泥浆法进行。具体步骤为: 20 g 风干土壤加少量水浸泡过夜后, 调制饱和泥浆, 然后将饱和泥浆离心 (4 000 rpm, 30 min), 得到饱和浸提液。利用电导率仪 (PHS-3C 型, 上海雷磁) 测定 EC_e ; Na^+ 、 K^+ 采用火焰光度法; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用 EDTA 滴定法; Cl^- 采用硝酸银滴定法, 植物样品经硫酸-双氧水消解后, 离子量测定方法同上。

1.3.2 作物干物质及产量测定

在玉米不同生育期内取样, 其中苗期和拔节期, 将植株分为茎和叶二部分, 而抽雄期、灌浆、成熟期分为茎、叶及穗 3 部分, 每个处理取 3 次重复。把植株样品放在烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 然后将温度调到 75 °C 烘干至恒质量。在玉米的成熟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, 自然状态下将其风干, 然后人工脱粒, 测定玉米产量。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2019 和 Image J 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, 使用 Surfer 19.2 和 Origin 2021b 软件进行科学绘图。

2 结果与分析

2.1 不同阳离子组成微咸水对土壤孔隙率的影响

相较于 CK, T1、T2 处理和 T4 处理 0~20 cm 土层大孔隙分别提高了 114.27%、145.20% 和 62.47%, T3 处理无明显变化; T1、T2、T3 处理和 T4 处理 20~40 cm 土层大孔隙分别降低了 29.70%、38.18%、32.84% 和 61.11% (图 3)。与 CK 相比, T1 处理 0~20 cm 土层小孔隙提高了 144.60%, 其余处理变化无显著差异; T1—T4 处理 20~40 cm 土层小孔隙度相较 CK 分别降低 30.50%、84.23%、43.89% 和 85.09%。T2、T3 处理和 T4 处理 0~20 cm 小孔隙度相较 T1 处理分别降低了 128.72%、147.73% 和 132.01%。

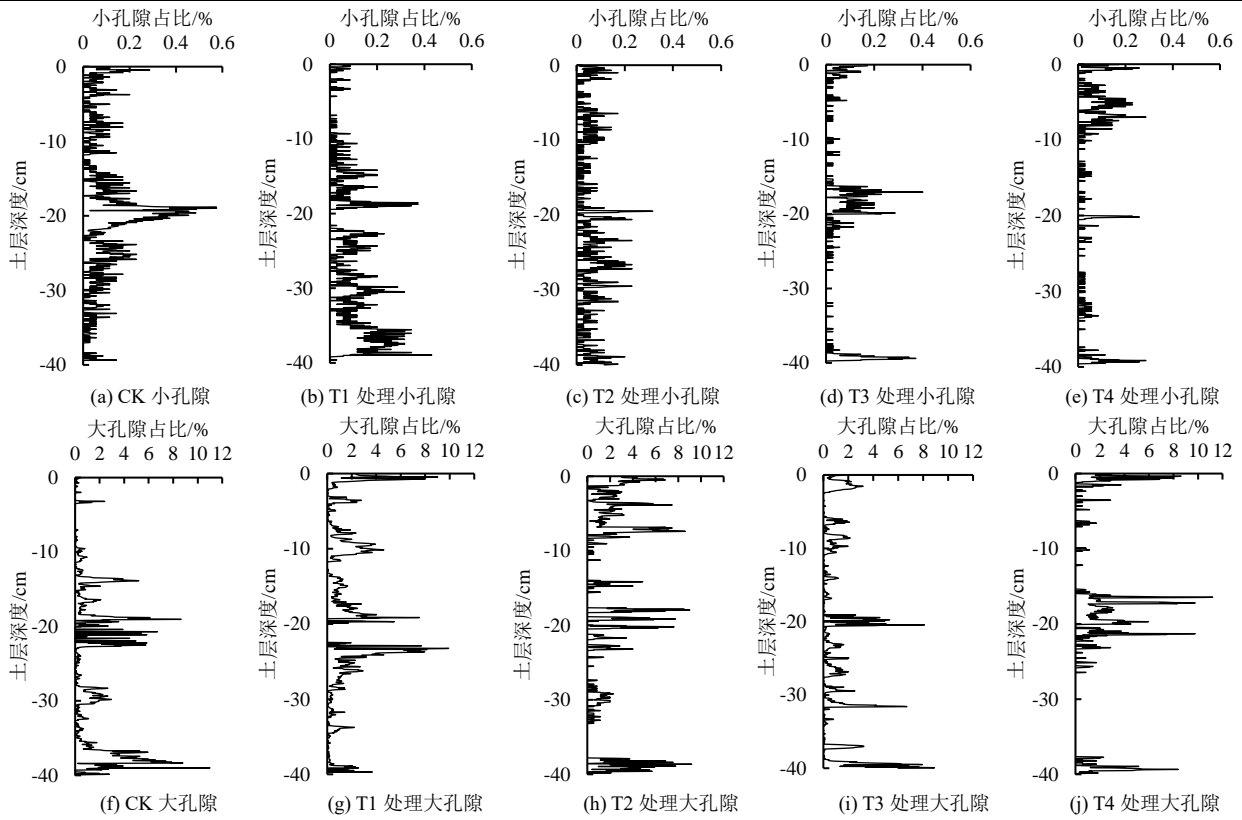


图3 不同阳离子组成微咸水灌溉各处理 0~40 cm 土层孔隙度

Fig.3 The soil porosity in 0~40 cm depth under saline water irrigation with different cation composition

2.2 不同阳离子组成微咸水对土壤水盐分布特性的影响

随着土层深度增加，苗期和拔节期土壤含水率整体呈先增大后减小的变化趋势，含水率变化突变点在 60 cm 土层，抽雄期土壤含水率整体降低（图 4）。

随着滴灌频率增加，灌浆期土壤含水率继续保持先增多后减小趋势，0~100 cm 各处理土壤含水率浮动范围较为稳定。成熟期各处理 0~30 cm 土壤体积含水率均降低，且低于 CK，40 cm 土层土壤含水率有所提升，之后随土壤深度变化逐渐降低至稳定。

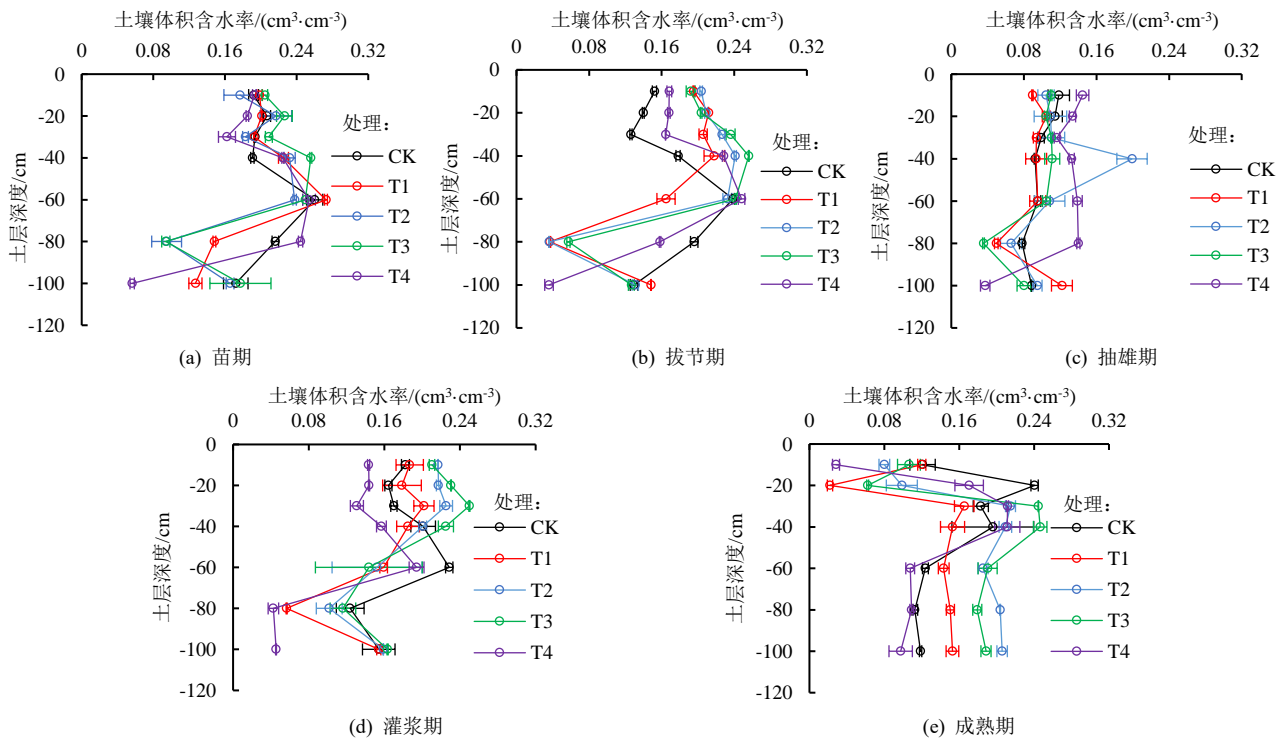


图4 不同阳离子组成微咸水灌溉下各生育期土壤剖面含水率

Fig.4 The water content of soil profile under saline water irrigation with different cation compositions at different growth stages

全生育期土壤储水量整体呈现从高到低的变化趋势（图 5，图中不同字母表示各处理间在该土层存在显著差异（ $P<0.05$ ））。作物生长初期 0~100 cm 土层土壤储水量处于高水平，抽雄期土壤储水量达到最低水平，灌浆期逐渐升高。成熟期 T2、T3 处理土壤储水量相比 CK、T1、T4 处理有所提升，数值上呈显著差异（ $P<0.05$ ），0~20 cm 土层中 T1、T2、T3、T4 处理储水量显著低于 CK（ $P<0.05$ ）。在抽雄期、灌浆期、成熟期，0~60 cm 土层中 T2 处理和 T3 处理

土壤储水量显著高于 T1 处理（ $P<0.05$ ），T2 处理和 T3 处理之间无显著差异（ $P>0.05$ ）。60~100 cm 土层中灌浆期和成熟期 T1 处理和 T4 处理差异明显，T4 处理较 T1 处理分别降低 58.05%、31.34%。T2 处理和 T3 处理储水量呈上升趋势，数值上差异不显著（ $P>0.05$ ）。除 CK 外，在灌浆期和成熟期，T1 处理和 T4 处理 0~100 cm 土层储水量处于较低水平；T2 处理和 T3 处理 0~100 cm 土层储水量较大，始终高于 T1 处理和 T4 处理。

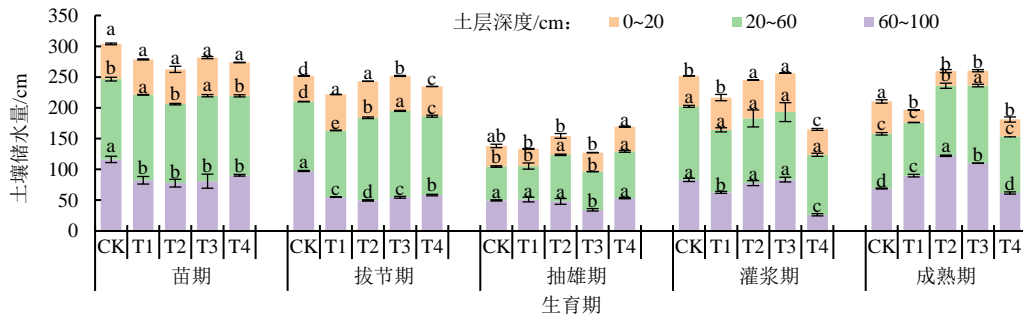


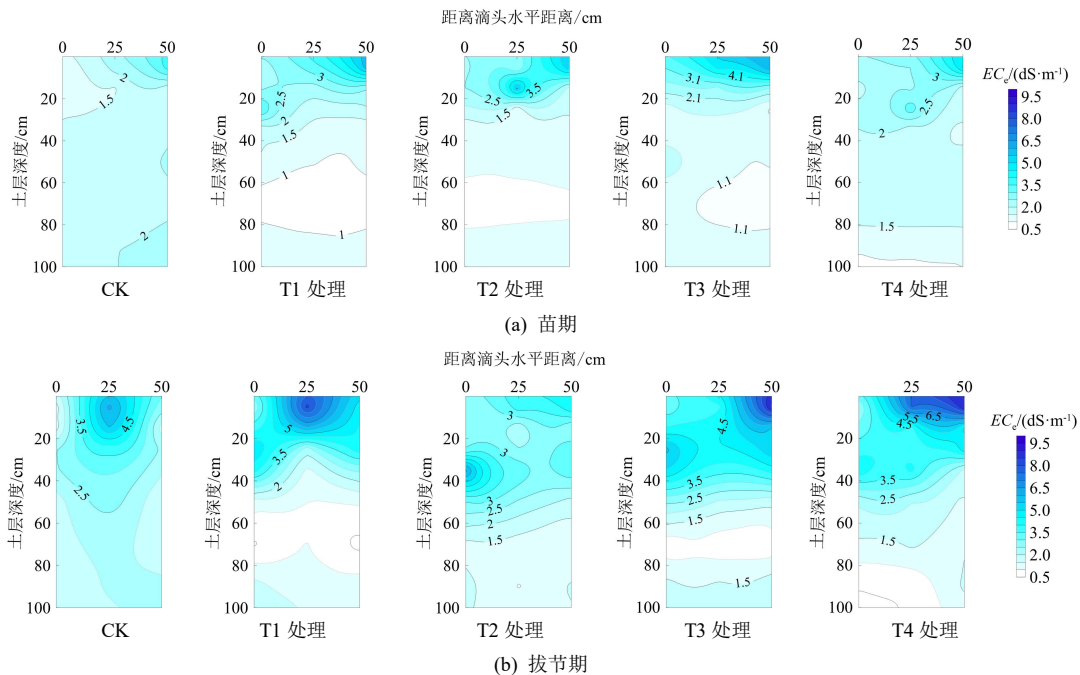
图 5 不同阳离子组成微咸水灌溉下各生育期土壤剖面储水量

Fig.5 The water storage capacity of soil profile under saline water irrigation with different cation compositions at different growth stages

添加不同阳离子的微咸水灌溉处理明显影响作物全生育期土壤剖面盐分动态变化过程（图 6）。受灌溉水 EC_e 影响，各处理根区平均 EC_e 分别为 3.06、3.55、3.15、3.88、3.73 dS/m。受夹砂层的影响，各处理 60~100 cm 土层 EC_e 整体低于 0~60 cm，0~20 cm 土层均有不同程度积盐现象，并且大都分布于 25~50 cm（图 6），表明滴灌带淋洗效果明显。随着作物生长，T1 处理积盐区从 0~10 cm 土层逐渐下移至 20 cm。T2 处理盐分向膜外运移规律不明显。不同的是 T3、T4 处理土壤盐分整体移向膜外区域，T4 处理更为明显，同时在根区 20~30 cm 土层也有较小程度的盐分累积。从图 6 可以看出，在生育期内 T1 处理作物根区

0~20 cm 土壤 EC_e 值逐渐增高；T3、T4 处理膜外土壤 EC_e 呈增大趋势，说明更多的盐分向膜外运移。

图 7 为苗期和成熟期不同阳离子组成微咸水灌溉下 0~60 cm 根区土壤阳离子物质的量浓度。由图 7 可知， Na^+ 是河套灌区盐渍土主要的盐分阳离子，其物质的量浓度远超前于 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，且 K^+ 物质的量浓度最低。在苗期，T1—T4 处理土壤阳离子物质的量浓度均低于 CK。在成熟期，与 CK 相比，T1 处理 Na^+ 物质的量浓度无显著差异（ $P>0.05$ ），T2、T3、T4 处理 Na^+ 物质的量浓度显著降低（ $P<0.05$ ），T2、T3、T4 处理所对应添加的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 物质的量浓度显著增高（ $P<0.05$ ），降低了 Na^+ 在阳离子中的占比。



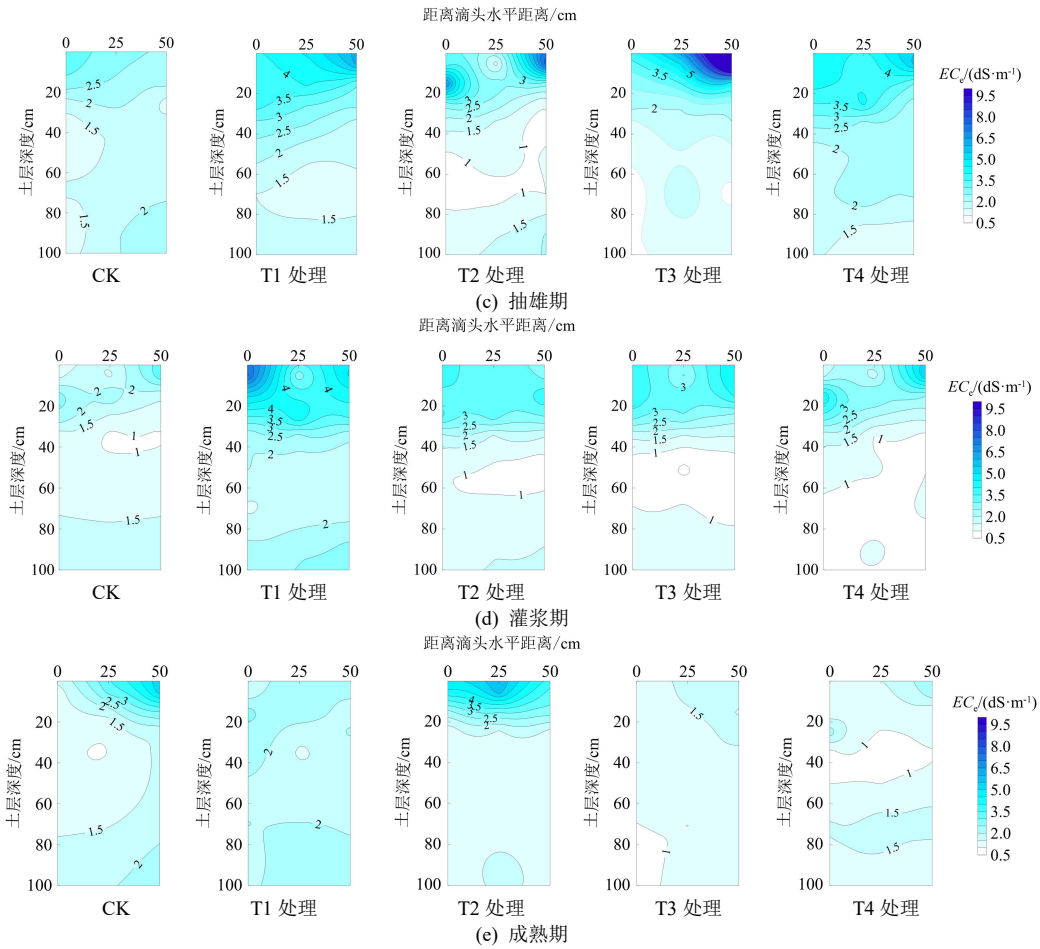


图 6 不同阳离子组成微咸水灌溉下各生育期土壤剖面 EC_e 。

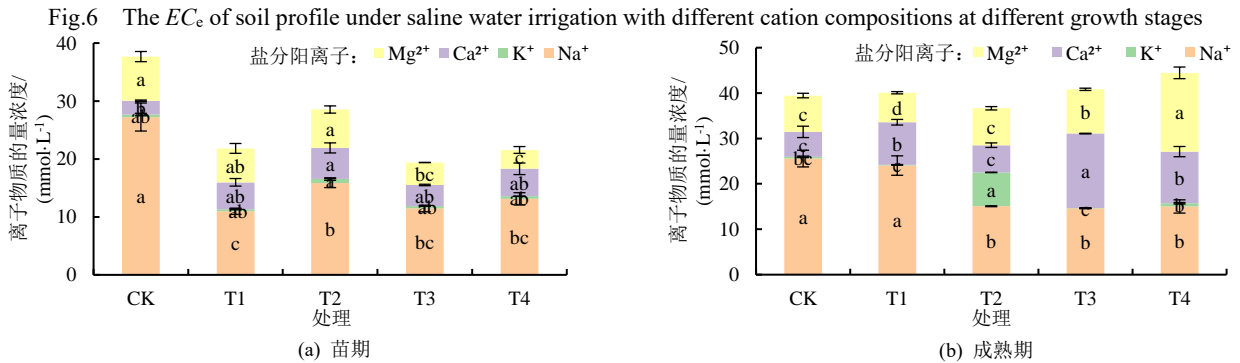


图 7 苗期和成熟期不同阳离子组成微咸水灌溉下 0~60 cm 根区土壤阳离子物质的量浓度

Fig.7 The soil cation concentration in 0~60 cm root zone under saline water irrigation with different cation compositions at seedling stage and mature stage

2.3 不同阳离子组成微咸水对作物生长的影响

图 8 为不同阳离子组成微咸水灌溉下玉米茎、叶中离子量。由图 8 可知，玉米地上部器官中各离子量变化趋势接近，由于各处理添加了不同类型氯化盐，其对应的阳离子量就会较其他处理显著增高 ($P < 0.05$)。研究发现玉米地上部器官离子量中 K^+ 量最高， Na^+ 量最低且显著低于 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 量和 Cl^- 量 ($P < 0.05$)。 Na^+ 、 K^+ 量和 Cl^- 量均表现为叶 $<$ 茎， Ca^{2+} 量和 Mg^{2+} 量表现为叶 $>$ 茎。

图 9 为不同阳离子组成微咸水灌溉下玉米各生育期叶、茎干质量。由图 9 可知，拔节期和抽雄期 T1 处理的单株茎、叶干质量均高于 CK、T2 处理，

但是灌浆期、蜡熟期、成熟期 T1 处理的单株茎、叶干质量变化整体均低于其他处理。T2 处理各生育期内茎叶干质量均高于 T1 处理，差异不显著 ($P > 0.05$)。成熟期 T3 处理的茎干质量表现为高于 T1 处理，低于 CK、T2、T4 处理，叶干质量高于 CK、T1、T2 处理，低于 T4 处理。T4 处理的茎、叶干质量整体高于其他添加盐分处理，整体变化数值上差异不显著 ($P > 0.05$)。

从产量构成来看 (表 3)，各处理之间单株穗粒数无显著差异 ($P > 0.05$)，T2、T3 处理对比 CK 百粒质量显著增加 14.4% 和 20.14% ($P < 0.05$)，其他处理之间无显著差异 ($P > 0.05$)。从最终产量来看，T1、T2、T3、T4 处理分别较 CK 提高了 6.78%、10.44%、

13.00%、17.33%。

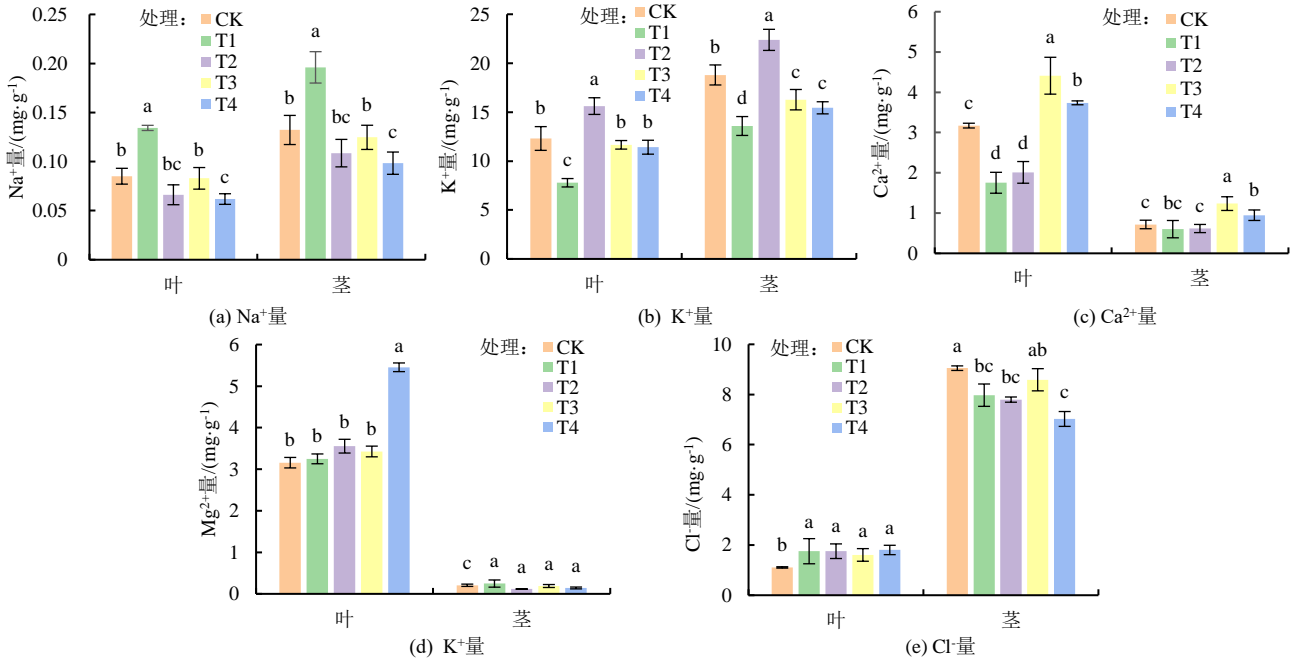


图 8 不同阳离子组成微咸水灌溉下玉米茎、叶中离子量

Fig.8 The ions contents in corn stems and leaves under saline water irrigation with different cation compositions

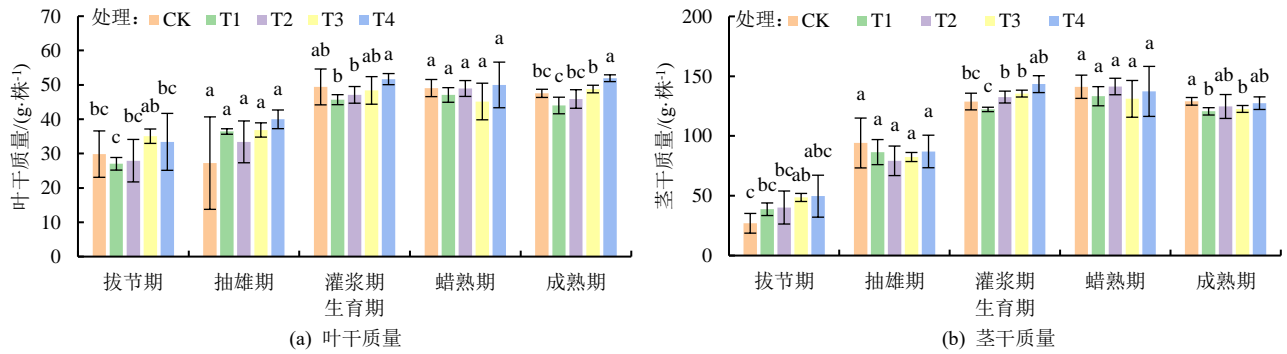


图 9 不同阳离子组成微咸水灌溉下玉米各生育期叶、茎干质量

Fig.9 The leaves and stems dry weight of corn under saline water irrigation with different cation compositions at different growth stages

表 3 不同阳离子组成微咸水灌溉下玉米产量构成

Table 3 The corn yields and yield components under saline water irrigation with different cation compositions at different growth stages

处理	穗粒数/粒	百粒质量/g	产量/(t·hm ⁻²)
CK	719.93±82.23a	38.44±3.36b	13.95d
T1	711.87±33.71a	44.82±1.10ab	14.89c
T2	725.33±24.87a	44.91±0.56a	15.40b
T3	734.27±6.82a	48.14±5.87a	15.76b
T4	748.67±19.40a	44.69±1.23ab	16.36a

3 讨论

3.1 不同阳离子组成微咸水对土壤理化性质的影响

膜下滴灌是微咸水灌溉的主要方式，其具有很好的脱盐、抑盐效果，并且能够保持土壤水分，防止土壤水分蒸发和盐分累积，为作物提供良好的生长环境^[20-21]。由于砂土孔隙度小于壤土孔隙度，土壤持水性能较差，因此在灌溉阶段各处理 60~80 cm 土层土壤含水率有所降低，直到收获阶段这种现象才消

失，推测是因为在高频率稳定灌水条件下，当土壤中存在砂质夹层时，由于土层间水分入渗能力的差异，水势差逆向而出现暂时性的水分下移^[22]，到成熟期灌水频率逐渐降低直到停止，受重力作用砂层水分逐渐下移，上层水分向下补给，这种现象才逐渐消失。本研究发现在抽雄期各处理 0~100 cm 土壤储水量达到最低水平，这是由于抽雄期作物需水量逐渐增大，储水量整体降低。随着灌溉频率增加，储水量有所上升，但整体低于苗期土壤储水量。由于成熟期降低了灌水频率，同时作物根系吸水速率降低，作物需水量减小，地表蒸发强烈，使各处理土壤表层储水量呈降低趋势。另外成熟期 0~20 cm 土层各处理土壤储水量显著低于 CK，这可能是由于微咸水入渗过程中，水体盐分离子与土壤胶体颗粒发生作用，改变了土壤的孔隙结构，影响土壤的入渗过程^[7]。在抽雄期和成熟期，T1 处理 20~60 cm 土壤储水量显著低于 T2 处理和 T3 处理 ($P<0.05$)，灌浆期差异虽不显著 ($P>0.05$)，但

T1 处理土壤储水量仍低于 T2 处理和 T3 处理，而 T2 处理和 T3 处理之间无显著差异 ($P>0.05$)，导致这种现象发生的原因是 T1 处理 Na^+ 物质的量浓度高于其他处理，造成土壤黏粒分散^[23]，土壤胶体中吸附的 Na^+ 物质的量浓度增加，土壤表层的小孔隙数量增多，使土壤的导水能力下降^[24]。有研究表明 CaCl_2 是一种很好的化学稳定剂，有利于减轻土壤膨胀，有利于稳定土壤结构，并且滴灌对土壤表层 Ca^{2+} 淋洗效果明显^[25]，这也与本文中 T3 处理 20~60 cm 土壤储水量整体高于其他处理的研究结果一致。本试验表明 T2、T3、T4 处理土壤小孔隙数量都低于 T1 处理，同时根区土壤中 Na^+ 物质的量浓度均低于 T1 处理，表明添加 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的灌溉水一定程度上降低了土壤中 Na^+ 物质的量浓度，减少了土壤小孔隙的形成。 K^+ 对土壤颗粒表面吸附能力强于 Na^+ ，一般认为土壤中 K^+ 量增高有利于缓解 Na^+ 对土壤黏粒的分散作用^[26]。同时 MgCl_2 也是一种良好的化学稳定剂^[27]，有抑制土壤黏粒分散，减少土壤膨胀，提高土壤孔隙的连通性的作用^[28-29]。

采用不同阳离子组成微咸水灌溉对土壤孔隙度影响不同，导致对土壤环境的影响程度有所差异。在苗期 T1—T4 处理土壤阳离子物质的量浓度均低于 CK，这是因为其他处理灌溉时设置了淋洗率，增加了盐分的淋洗。但是随着生育期延长，灌水增多，成熟期各添加盐分处理阳离子总物质的量浓度均有所上升，但处理间无明显差异。本研究随着灌水的次数增多，T1 处理土壤积盐程度逐渐加重，20 cm 土层以下 EC_e 明显降低，同时 T1 处理 0~20 cm 土壤小孔隙度明显增大，说明添加 NaCl 的灌溉水使得土壤表层发生积盐现象，导致这一现象的原因是较多的 Na^+ 破坏了土壤中的 Na^+ 和 K^+ 的平衡，致使更多土壤团聚体分散，提高了土壤小孔隙度，大孔隙堵塞导致连通性降低，影响了灌溉水下移。T2 处理由于 K^+ 增多，并且 T2 处理土壤表层大孔隙数量大于 T1 处理，表明 K^+ 存在较多的土壤中，土壤孔隙分散现象得到一定程度缓解，提高了土壤入渗能力，因此土壤表层积盐现象不明显。研究表明土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 增加会置换土壤中 Na^+ ，防止土壤黏粒分散，提高土壤入渗能力，可以改善土壤环境^[9,29-31]。这也与本研究中 T3 处理和 T4 处理小孔隙度减少，土壤中 Na^+ 物质的量浓度相对降低的结果一致。

3.2 不同阳离子组成微咸水对作物生长的影响

盐胁迫会影响作物生长发育，主要会引起植物体内离子平衡失调，不利于作物生长^[32]。从玉米茎和叶部 Na^+ 量和干质量分析结果看，各处理玉米茎部 Na^+ 量均大于叶部，从而降低了 Na^+ 对叶片部分生长发育的干扰，但 T1 处理玉米器官内仍有较多的 Na^+ ，玉

米茎叶干质量均低于 CK，说明玉米体相对较多的 Na^+ 对茎和叶部干质量累积产生不利影响，但是 T1 处理产量高于 CK，说明本试验添加的 Na^+ 物质的量浓度并未使产量降低，只是对除产量外的器官干质量累积产生不利影响。前人研究发现 Na^+ 更多被玉米根茎部吸收，缓解了盐分对叶片造成的伤害，但 Na^+ 过量累积会破坏玉米体内营养物质平衡，抑制对 K^+ 吸收^[11]，这与本试验研究结果一致。从 Na^+ 和 K^+ 在作物体内的量来看，T1 处理 Na^+ 量提升， K^+ 量降低，相反 T2 处理 Na^+ 量降低， K^+ 量上升，这是因为 2 种阳离子在被作物吸收过程中处于竞争关系。而 T2 处理的茎叶干质量和产量均高于 T1 处理，说明玉米体内 K^+ 量的增加降低了玉米对 Na^+ 的吸收，有利于作物生长。玉米茎部 K^+ 量较高，使得玉米茎部对 Na^+ 吸收的抑制效果优于叶部^[10]。大量研究发现外源 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 有利于作物生物量的累积。 Ca^{2+} 在作物干旱或盐胁迫响应下起到了重要的信号调节作用，包括提高作物水分利用效率和光合速率，促进地上部生物量累积，有利于与作物生长，同时 Ca^{2+} 对稳定细胞稳定性有突出贡献^[14,33-34]。 Mg^{2+} 是植物生长发育不可或缺的元素， Mg^{2+} 缺失会严重影响植物生长发育及产量^[35]。本研究中叶部 Ca^{2+} 量和 Mg^{2+} 量显著高于茎部，并且研究发现随着 T3 处理和 T4 处理玉米茎和叶部 Ca^{2+} 量和 Mg^{2+} 量的提升， Na^+ 的吸收量降低，T3 处理和 T4 处理成熟期叶部干重累积量大于 CK、T1 处理和 T2 处理，产量上相较于其他处理也有所提升，表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在玉米体内量的提高有助于作物叶片生长发育，对产量提升效果较为明显，尤其是 Mg^{2+} 量高的处理。添加盐分处理产量提高的原因为：一是灌溉考虑了淋洗率，总灌水量增多；二是适量物质的量浓度的微咸水灌溉在不产生盐分胁迫的阈值内，还可以为作物提供一些 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等营养元素，更利于作物生长。

4 结论

灌溉水中较多的 Na^+ 增加了土壤表层小孔隙数量，不利于灌溉水下渗，使作物根区表层土壤发生积盐现象。灌溉水中较多的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 产生对土壤有利的影响，减少土壤中 Na^+ 物质的量浓度，降低土壤表层小孔隙比例，有利于盐分淋洗，作物根区无明显积盐现象。添加 CaCl_2 处理的灌溉水对土壤根区储水效果最好。微咸水灌溉下，玉米地上部器官内 Na^+ 物质的量浓度升高，显著抑制了茎、叶部干物质的累积；而灌溉水中适当物质的量浓度的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均有助于提高作物干质量累积以及最终的产量形成，其中 Mg^{2+} 对于提高玉米地上部生物量、产量效果最佳。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区耕地-荒地-海子系统间不同类型水分转移转化[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 832-842.
WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Study on migration of different types water during farmland-wasteland-lake system in Hetao Irrigation District[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 832-842.
- [2] 李毅, 王文焰, 王全九. 论膜下滴灌技术在干旱-半干旱地区节水抑盐灌溉中的应用[J]. 灌溉排水, 2001, 20(2): 42-46.
LI Yi, WANG Wenyan, WANG Quanjiu. A breakthrough thought for water saving and salinity control in arid and semi-arid area—under-film trickle irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(2): 42-46.
- [3] 丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 利用 HYDRUS-2D 模拟膜下滴灌玉米农田深层土壤水分动态与根系吸水[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 23-32.
DING Yuntao, CHENG Yu, ZHANG Tibin, et al. Modeling of dynamics of deep soil water and root uptake of maize with mulched drip irrigations using HYDRUS-2D[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 23-32.
- [4] 齐智娟, 冯浩, 张体彬, 等. 河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 301-308.
QI Zhijuan, FENG Hao, ZHANG Tibin, et al. A study on soil salinity movement of drip irrigation under different film mulching treatment in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 301-308.
- [5] 姚宝林, 叶含春, 孙三民, 等. 微咸水滴灌土壤盐分布规律与枣树耐盐性试验研究[J]. 节水灌溉, 2010(10): 32-34, 39.
YAO Baolin, YE Hanchun, SUN Sanmin, et al. Experimental study on soil salt distribution rule under subsurface drip irrigation with slight saline water and salt-tolerance of red jujube[J]. Water Saving Irrigation, 2010(10): 32-34, 39.
- [6] 李金刚, 屈忠义, 孙贵芳, 等. 微咸水膜下滴灌对土壤盐分离子分布和番茄产量的影响[J]. 节水灌溉, 2017(3): 31-35, 39.
LI Jingang, QU Zhongyi, SUN Guanfang, et al. Effect of saline water mulched drip irrigation on soil salt ions distribution and yield of tomato[J]. Water Saving Irrigation, 2017(3): 31-35, 39.
- [7] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
SHAO Ming'an, WANG Quanjiu, HUANG Mingbin. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [8] 盛丰, 张敏, 薛如霞, 等. 灌溉水中盐分对土壤结构性质及水流运动特征的影响[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 346-355.
SHENG Feng, ZHANG Min, XUE Ruxia, et al. Effects of salt in irrigation water on soil structural properties and water flow characteristics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 346-355.
- [9] 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 Hui, LIN Qing, XU Shaohui. 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.
- [10] 刘帆, 周青云, 张宝忠, 等. 盐碱地滴灌玉米体内 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的分布及运移特征[J]. 节水灌溉, 2019, (5): 77-82.
LIU Fan, ZHOU Qingyun, ZHANG Baozhong, et al. Distribution and transport characteristics of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in maize under drip irrigation saline land[J]. Water Saving Irrigation, 2019, (5): 77-82.
- [11] 彭云玲, 保杰, 叶龙山, 等. NaCl 胁迫对不同耐盐性玉米自交系萌动种子和幼苗离子稳态的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7 320-7 328.
PENG Yunling, BAO Jie, YE Longshan, et al. Ion homeostasis in germinating seeds and seedlings of three maize inbred lines under salt stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7 320-7 328.
- [12] ISLAM A T M T, KOEDSUK T, ULLAH H, et al. Salt tolerance of hybrid baby corn genotypes in relation to growth, yield, physiological, and biochemical characters[J]. South African Journal of Botany, 2022, 147: 808-819.
- [13] ULLAH S, BANO A, ULLAH A, et al. A comparative study of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and sowing methods on nutrient availability in wheat and rhizosphere soil under salinity stress[J]. Rhizosphere, 2022, 23: 100 571.
- [14] CUI X Y, MAO P, SUN S, et al. Phytoremediation of cadmium contaminated soils by *Amaranthus Hypochondriacus* L.: The effects of soil properties highlighting cation exchange capacity[J]. Chemosphere, 2021, 283: 131 067.
- [15] 毛任钊, 田魁祥, 松本聪, 等. 盐渍土盐分指标及其与化学组成的关系[J]. 土壤, 1997, 29(6): 326-330.
- [16] 丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 滴灌灌水下限对夹砂层农田土壤盐分布和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 733-744.
DING Yuntao, CHENG Yu, ZHANG Tibin, et al. Effects of different thresholds of mulched drip irrigation on water and salt distribution and water use efficiency of maize in a sand-layered soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 733-744.
- [17] 姬祥祥, 徐芳, 刘美含, 等. 土壤水基质势膜下滴灌春玉米生长和耗水特性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 230-239.
JI Xiangxiang, XU Fang, LIU Meihan, et al. Investigation on growth and water use of spring maize under mulched drip irrigation based on soil matric potential[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 230-239.
- [18] USDA-NRCS. National Engineering Handbook, Part 623 Irrigation, Chapter 7 Microirrigation[M]. Washington DC, 2013.
- [19] WANG M Y, XU S X, KONG C, et al. Assessing the effects of land use change from rice to vegetable on soil structural quality using X-ray CT[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104 343.
- [20] 王卫光, 张仁铎, 王修贵. 咸水灌溉下土壤水盐变化的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(3): 1-4, 13.
WANG Weiguang, ZHANG Renduo, WANG Xiugui. Water and salt transport on saline water irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(3): 1-4, 13.
- [21] ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, REA E, et al. Comparison of the subirrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and non-saline nutrient solutions[J]. Agricultural Water Management, 2006, 82: 99-117.
- [22] 曲晨晓, 王炜. 土壤剖面中砂质夹层的储水作用及机理研究[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(5): 349-356.
QU Chenxiao, WANG Wei. Mechanisms of water reserved by sand interlayer in soil profile[J]. Journal Huazhong Agricultural University, 1997, 16(5): 349-356.
- [23] 牛金璨, 张丽娜, 张亚美, 等. 钾钠离子添加对垆土土壤团聚体和有机碳矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(5): 786-797.
NIU Jincan, ZHANG Lina, ZHANG Yamei, et al. Impacts 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.
- [24] 王雪, 樊贵盛. Na^+ 含量对土壤入渗能力影响的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(4): 391-394.
WANG Xue, FAN Guisheng. Experimental study on the influence of sodium ion content on infiltration capability of soils[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(4): 391-394.
- [25] 王航, 周青云, 张宝忠, 等. 不同灌水处理对滨海盐碱地土壤阳离子组成及玉米干物质累积的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 84-92.
WANG Hang, ZHOU Qingyun, ZHANG Baozhong, et al. Effects of different irrigation treatments on cationic composition of soil and dry matter accumulation of maize in coastal saline-alkali area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 84-92.
- [26] 叶澜涛, 周青云, 李松敏, 等. 滨海盐碱地覆膜和灌溉对玉米盐分离子分布及生物量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 74-83.
YE Lantao, ZHOU Qingyun, LI Songmin, et al. Effects of plastic film-mulching and irrigation on the salt ion distribution and biomass of maize in coastal saline-alkali soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 74-83.

- [27] LATIFI N, RASHID A S A, SIDDIQUA S, et al. Micro-structural analysis of strength development in low- and high swelling clays stabilized with magnesium chloride solution: A green soil stabilizer[J]. Applied Clay Science, 2015, 118: 195-206.
- [28] SIDDIQUA S, BIGDELI A. Utilization of MgCl₂ solution to control collapse potential of soil[J]. Transportation Geotechnics, 2022, 33: 100-731.
- [29] TURKOZ M, SAVAS H, ACAZ A, et al. The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics[J]. Applied Clay Science, 2014, 101: 1-9.
- [30] SHABALA S, SHABALA L, VAN VOLKENBURGH E. Effect of calcium on root development and root ion fluxes in salinised barley seedlings[J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(5): 507-514.
- [31] PATEL N T, VAGHELA P M, PATEL A D, et al. Implications of calcium nutrition on the response of *Caesalpinia crista* (Fabaceae) to soil salinity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 24-30.
- [32] 李广鲁, 王文果, 陈志新, 等. 钙对盐胁迫下冰叶日中花不同器官离子含量和根部 K⁺、Na⁺吸收的影响[J]. 植物科学学报, 2018, 36(2): 282-290.
- LI Guanglu, WANG Wenguo, CHEN Zhixin, et al. Effect of calcium on ion contents in different organs and absorption of K⁺ and Na⁺ in the root tips of *Mesembryanthemum crystallinum* L. under NaCl stress[J]. Plant Science Journal, 2018, 36(2): 282-290.
- [33] 张浩, 郑云普, 叶嘉, 等. 外源钙离子对盐胁迫玉米气孔特征、光合作用和生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 923-930.
- ZHANG Hao, ZHENG Yunpu, YE Jia, et al. Effects of exogenous Ca²⁺ on stomatal traits, photosynthesis, and biomass of maize seedlings under salt stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 923-930.
- [34] 李映强. 土壤中镁的生物有效性及其动力学性质[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(3): 236-238.
- LI Yingqiang. The bioavailability and kinetic characteristics of magnesium in soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 1998, 7(3): 236-238.
- [35] 汪洪, 金继运. 铁、镁、锌营养胁迫对植物体内活性氧代谢影响机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 738-744.
- WANG Hong, JIN Jiyun. Possible effects of iron, magnesium and zinc on the metabolism of reactive oxygen species in plants[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 738-744.

The Impact of Ion Composition in Saline Water on Soil Salinity, Salt Distribution, and Crop Growth under Mulched Drip Irrigation

ZHANG Tonggang¹, HU Xinglu³, LUO Min¹, WANG Chun¹,
YAN Sihui¹, CHENG Yu¹, LIANG Qing¹, FENG Hao^{2,3}, ZHANG Tibin^{2,3*}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: 【Objective】 Saline water has been used as a supplementary irrigation resource in most countries to sustain agricultural production. The purpose of this paper is to study the influence of ionic composition in saline water on soil properties and growth of corn under mulched drip irrigation. 【Method】 The field experiment was conducted from April to September 2021 in the Hetao Irrigation District (HID) in Inner Mongolia. The saline water was created by adding different chloride salts: NaCl (T1), KCl (T2), CaCl₂ (T3) and MgCl₂ (T4) to fresh water. Irrigation with fresh underground water served as the control (CK). During each treatment, change in soil structure, transport of water and salt in soil, and crop growth were measured. 【Result】 ① Compared to CK, T1 significantly increased the number of small pores in the top 0~20 cm soil layer. This had a detrimental impact on soil structure but increased its water storage, particularly during the jointing stage. Compared to CK, T3 and T4 reduced the small porosity by 147.73% and 132.01%, respectively, but increased permeability of the soil. ② Compared to CK, all treatments increased the concentrations of Na⁺, K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ in the 0~60 cm soil layer. Except T1, other treatments increased the concentrations of K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺, compared to CK. T1 resulted in salt accumulation in the soil surface, while other treatments did not show noticeable impact on ion composition. It was found that T3 and T4 moved the salt out the zone controlled by the mulch in the lateral direction, particularly T4. The electrical conductivity (EC) of the saturated extract from the root zone soil was influenced by the EC of irrigation water and varied in the range of 3~4 dS/m. ③ Na⁺ and K⁺ contents were the lowest and highest in the aboveground part, respectively. Na⁺, K⁺, and Cl⁻ contents were higher in leaves than in stems, while Ca²⁺ and Mg²⁺ contents were higher in stem than in leaves. Increasing irrigation amount enhanced crop yield only in some treatments. Among all treatments, T4 gave the highest corn seed yield, 17.33% more than CK. 【Conclusion】 Irrigation with saline water containing high Na⁺ increased the small porosity of the topsoil, affecting soil water infiltration. In contrast, increasing K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺ contents reduced small porosity, promoting salt leaching due to the increased soil permeability. Keeping concentration of K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ at appropriate levels under saline water irrigation is beneficial to increasing dry matter accumulation and the final yield, as it offsets the negative effects of excessive Na⁺. These findings provide guidance for safe utilization of saline water for irrigation in HID.

Key words: porosity; water and salt distribution; cation; corn growth

责任编辑: 赵宇龙