

咸淡水交替滴灌对滨海盐渍土 水盐动态和作物生长的影响

王茜¹, 董世德², 崔光旭², 马倩², 李涵博³, 苏圣甲⁴, 王光美^{2*}

(1.鲁东大学 生命科学学院, 山东 烟台 264025; 2.中国科学院 烟台海岸带研究所/中国科学院
海岸带环境过程与生态修复重点实验室/山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003;

3.吉林建筑大学 松辽流域水环境教育部重点实验室, 长春 130118;

4.山东盐碱地现代农业有限责任公司, 山东 东营 257300)

摘要:【目的】研究黄河三角洲地区不同咸淡水交替滴灌频率对土壤水盐分布状况和作物生长的影响。【方法】以毛叶苕子-玉米轮作为研究对象, 开展两季作物咸、淡水交替滴灌田间试验。试验设置 3 个咸淡水交替滴灌频率, 对应的咸(咸水矿化度 4 g/L 左右)、淡(淡水矿化度 1 g/L 左右)水灌溉频率比分别为 1:3 (T2 处理)、1:1 (T3 处理)、3:1 (T4 处理), 此外, 设置仅灌淡水 (T1 处理) 和仅灌咸水 (T5 处理) 作为对照。通过测定作物生育期内的土壤 EC 值、作物生物量和产量, 探究咸淡水交替滴灌频率对黄河三角洲地区土壤水盐运移和玉米产量影响。【结果】①在非雨季土壤水分动态主要受灌溉控制, 随着咸水灌溉频率的增加, 土壤盐分显著增加; 雨季土壤水分动态主要受降水影响, 各处理土壤盐分逐渐降低。整体来看, 0~20 cm 土层周年盐分维持平衡; 从毛叶苕子返青期到玉米成熟期, T1—T4 处理 20~60 cm 土层盐分均呈下降趋势, 分别下降 26.14%、11.61%、13.17%、6.43%, 而 T5 处理则增加 21.26%。②毛叶苕子鲜草产量和干物质产量随咸水灌溉频率的增加而降低, T2—T4 处理与 T1 处理之间无显著差异, 而 T5 处理的鲜草产量和干物质产量较 T1 处理分别显著降低 15.54% 和 19.69%。③玉米产量随微咸水灌溉频率的增加呈先增加后降低的趋势, T2 处理的籽粒产量显著高于 T5 处理, 但与 T1、T3、T4 处理差异不显著。T3、T4、T5 处理籽粒产量较 T1 处理分别降低了 4.33%、4.58%、7.87%。【结论】咸、淡水交替滴灌频率比为 3:1 (T4 处理) 可减少淡水灌溉量, 维持土壤周年盐分平衡, 稳定苕子生物量和玉米产量, 可作为黄河三角洲盐渍农田最佳咸淡水交替灌溉方案。

关键词: 微咸水; 咸淡水交替灌溉; 黄河三角洲; 土壤盐分; 玉米

中图分类号: S274

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023176

王茜, 董世德, 崔光旭, 等. 咸淡水交替滴灌对滨海盐渍土水盐动态和作物生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 18-25.

WANG Qian, DONG Shide, CUI Guangxu, et al. Effects of Alternate Saline and Fresh Water Drip Irrigation on Water and Salt Dynamics and Crop Growth in Coastal Saline Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 18-25.

0 引言

【研究意义】种植冬绿肥可增加春季地表覆盖, 翻压后可改善盐碱土结构, 为后茬作物提供大量养分^[1], 采用绿肥-玉米轮作已成为黄河三角洲滨海盐碱地新型高效农业种植模式。然而, 黄河三角洲淡水资源紧缺, 浅层地下微咸水资源比较丰富^[2], 若能有效利用微咸水进行补充灌溉, 对地区节水与绿肥-玉米

轮作稳产有重要意义。【研究进展】微咸水长期直接灌溉可能会造成土壤次生盐渍化^[3], 目前多采用咸淡水混合灌溉或交替灌溉进行水盐调控。咸淡水交替灌溉相比混合灌溉可以减缓微咸水对土壤和作物的不良影响^[4]。同时, 在相同盐分水平下, 咸淡水交替灌溉比咸淡水混灌增产效果更明显^[5-7]。滴灌是咸淡水交替灌溉最主要的方式之一, 更能发挥咸淡水交替灌溉节水稳产的优势^[8]。干旱、半干旱地区咸淡水交替滴灌玉米试验表明, 当咸淡水灌溉频率为 1:1 时, 生物量和产量较常规地表滴灌提高了 7.0% 和 13.3%^[9]; 当考虑微咸水滴灌和淡水淋洗对土壤盐分动态影响时, 咸淡水灌溉频率为 2:1 时, 根区脱盐率最高为 69%^[10]。在湿润气候条件下, 可在玉米壮苗期、灌浆成熟期采用微咸水灌溉, 在拔节抽雄期进行淡水灌溉, 不仅对

收稿日期: 2023-04-21 修回日期: 2023-05-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900902); 山东省自然科学基金项目 (ZR2022QE208); 黄三角国家农高区科技专项 (2022SZX01)

作者简介: 王茜 (1996-), 女, 辽宁辽阳人。硕士研究生, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: 1132684374@qq.com

通信作者: 王光美 (1979-), 男, 山东淄博人。正高级工程师, 主要从事盐碱地综合利用研究。E-mail: gmwang@yic.ac.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

作物各生理指标影响较弱,而且可以降低土壤次生盐渍化的风险^[11];冬小麦灌浆期采用微咸水灌溉后,千粒质量有一定增加,较全淡水灌溉最终产量提高12.24%,收获前,由于雨水淋洗,土壤含盐量显著降低^[12]。因此,咸淡水交替滴灌频率受气候条件、作物类型、土壤性质^[13]、水质条件等多因素影响,在地区上有较大差异。

【切入点】目前,国内外尚缺乏绿肥-粮食作物轮作种植体系下咸淡水滴灌水盐调控方面的研究。

【拟解决的关键问题】为此,采用咸淡水交替滴灌进行毛叶苕子-玉米轮作种植试验,研究不同咸、淡水交替滴灌频率对周年水盐动态和作物生长、产量等的影响,以期为本地区微咸水合理利用和盐碱地农业生产提供科学参考。

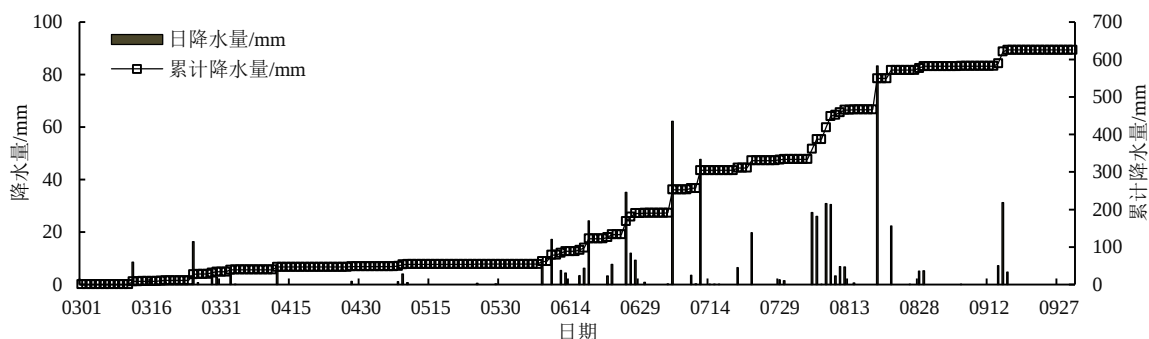


图1 2022年作物生育期降水量

Fig.1 Rainfall during the 2022 crop growth period

该地区农业灌溉淡水资源不足,地下水埋深浅,且多为咸水,矿化度为3~5 g/L。耕层土壤(0~40 cm)质地以粉壤土为主,土壤体积质量为1.46 g/cm³,有

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021—2022年在中国科学院烟台海岸带研究所黄河三角洲盐碱地农田生态系统观测研究站(37°18'0.13"N, 118°39'4.64"E)进行。该试验基地位于山东省东营市国家级农高区,试验区属温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温12.8℃,年平均降水量545 mm。降水量年内分配不均且年际变化大,且主要集中在6—8月。2022年3—5月毛叶苕子生育期内总降水量54.5 mm,有效降水4次(>5 mm);2022年6—9月玉米生育期内总降水量570.7 mm,有效降水25次。作物生育期内降水量见图1。

机质量为10.01~14.74 g/kg,总氮量为0.46~0.84 g/kg,总磷量为0.47~0.83 g/kg,总钾量为24.33~36.45 g/kg。试验地土壤层次划分及其基本物理参数见表1。

表1 土壤基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil

土壤深度/cm	体积质量/(g cm ⁻³)	EC 值/(μS cm ⁻¹)	pH 值	土壤颗粒粒径占比/%			土壤质地
				$d \leq 0.002$ mm	$0.002 < d \leq 0.05$ mm	$d > 0.05$ mm	
0~20	1.43	272	8.49	14.0	78.8	7.2	粉壤土
20~40	1.48	454	8.45	13.8	76.9	9.3	粉壤土
40~60	1.47	528	8.36	13.6	80.4	6.0	粉壤土

注 表中 d 为土壤颗粒直径。

1.2 试验设计

设置3个咸、淡水交替灌溉频率,分别为T2、T3、T4处理,对应的咸水(咸水矿化度4 g/L左右;源自试验地南侧沟渠地下水)、淡水(淡水矿化度1 g/L左右;源自园区管道供水)灌溉频率比分别为1:3、1:1和3:1。以T2处理为例,灌溉时,灌溉1次咸水后,再连续灌溉3次淡水,并按此循环灌溉。同时设置2个对照T1(仅灌淡水)、T5处理(仅灌咸水)。每个处理重复3次,共15个试验小区。每个小区面积为36 m²(6 m×6 m),小区之间横向设置0.5 m

的隔离带,纵向设置1 m的隔离带,以避免相邻试验田之间可能产生的相互影响。每个处理中的3个重复小区共用1套田间首部,每个首部系统由重力滴灌桶、铁架和过滤器等组成,与田间管道相连。每个小区10条滴灌带,铺设间距为0.6 m,滴头流量在2.5 m压力水头下为1.25 L/h,试验期间滴灌系统的流量和压力稳定。

夏秋季种植作物为玉米,冬春季种植作物为毛叶苕子,其栽植方式如图2所示。供试毛叶苕子品种为鲁苕5号,播种时间为2021年10月,于次年5月翻

压。平均行距 0.4 m, 播种量 52.5 kg/hm^2 , 人工播种。供试玉米品种为登海 111, 于 2022 年 6 月播种, 同年 9 月收获, 平均行距 0.6 m, 播种量为 30 kg/hm^2 。每季作物播种后, 各处理立即灌淡水 30 mm, 出苗后,

根据土壤墒情, 每次灌水 15 mm, 直到作物定苗。定苗后, 在每个处理的第 2 个小区代表性滴头正下方 20 cm 处埋设 1 支负压计来监测土壤水基质势并指导灌溉^[14], 其余施肥措施和田间管理方式与当地一致。

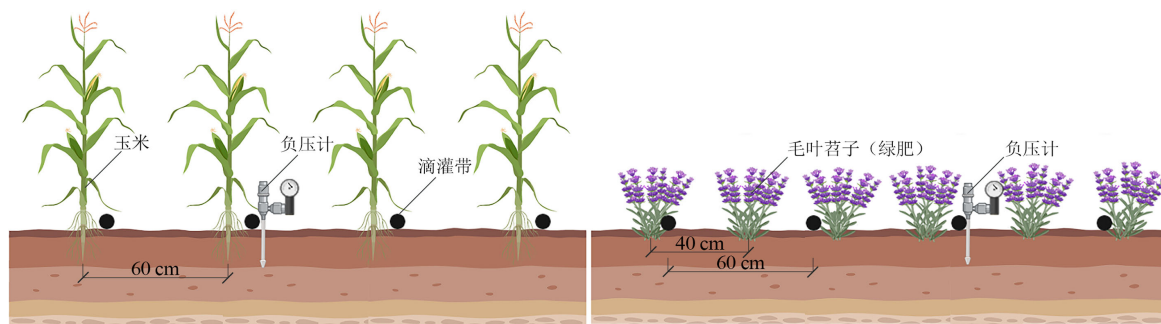


图 2 田间作物栽培示意

Fig.2 Details of crop planting in the field

1.3 观测指标与方法

通过云平台实时获取每个处理的负压计读数。在毛叶苕子越冬后 (3 月 7 日)、翻压前 (5 月 17 日); 玉米种植前 (6 月 18 日)、收获前 (9 月 24 日) 用不锈钢土钻分别在距离滴灌带滴头水平距离 0、15、30 cm 处, 采集各小区 0~10、10~20、20~40、40~60 cm 土层土壤样品。土样经风干、充分研磨后过 2 mm 筛, 采用土水比 1:5 的方法, 称取 5 g 土, 并加 25 mL 蒸馏水配成溶液, 震荡离心后获得浸提液, 用 DDS-307A 电导率仪测定土壤 EC 值。

毛叶苕子翻压前, 选取 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方, 测定毛叶苕子地上部分鲜质量并计算鲜草产量; 从样方中留取一部分称量鲜质量后, 在 105°C 下杀青 2 h, 然后在 75°C 下烘干至质量恒定后称量干质量, 计算毛叶苕子干质量与鲜质量百分比和干物质产量。玉米灌浆期、成熟期在每个小区随机选取 3 株具有代表性的玉米植株, 测定其茎、叶、穗鲜质量, 在烘箱内 105°C 杀青 2 h, 然后在 75°C 下烘干至恒质量测定干质量。夏玉米成熟时, 各小区单独收获, 将样方内玉米晾晒、脱粒、测定产量及产量构成要素 (穗长、百粒质量、

出籽率、收获指数), 收获指数 (HI) 计算为籽粒产量除以生理成熟期地上部总生物量^[15]。

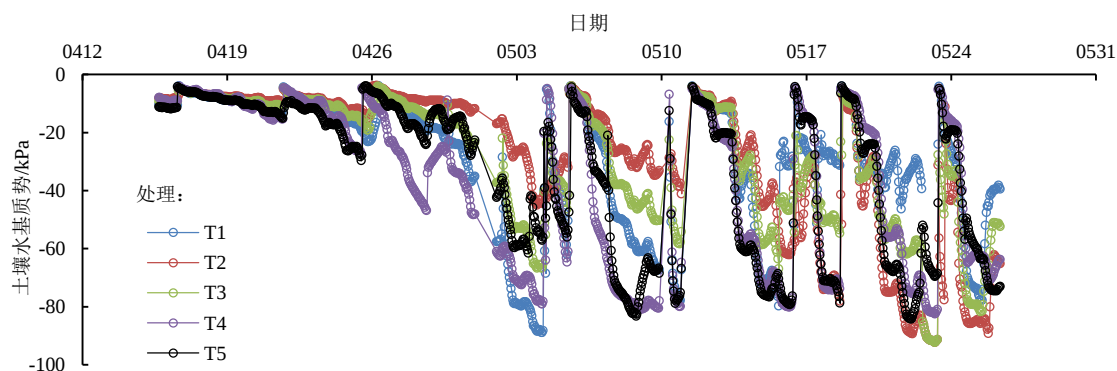
1.4 数据处理及分析方法

采用 Microsoft Excel 处理试验数据, 用 Surfer14 软件制图, 采用 SPSS 软件进行方差分析, 采用最小显著差异 (LSD) 和 Duncan method 进行组间差异显著性检验, 显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤水基质势与灌水量

毛叶苕子季土壤水基质势动态变化如图 3 (a) 所示。苕子返青前期, 负压计读数在 -20 kPa 左右, 无显著变化。4 月 26 日后, 各处理土壤水基质势急剧下降, 至 5 月 31 日, 无有效降水, 共补充灌溉 105 mm (表 2), 其中咸、淡水灌水量与相应的灌水频率一致。土壤水基质势在无降水时段内主要受灌溉调控, 随着毛叶苕子生长需水量增加, 消耗土壤水分, 土壤水基质势值再次下降, 当降低到 -80 kPa 时, 各处理补充灌溉。后续毛叶苕子季土壤水基质势在阈值附近上下波动。



(a) 苕子季

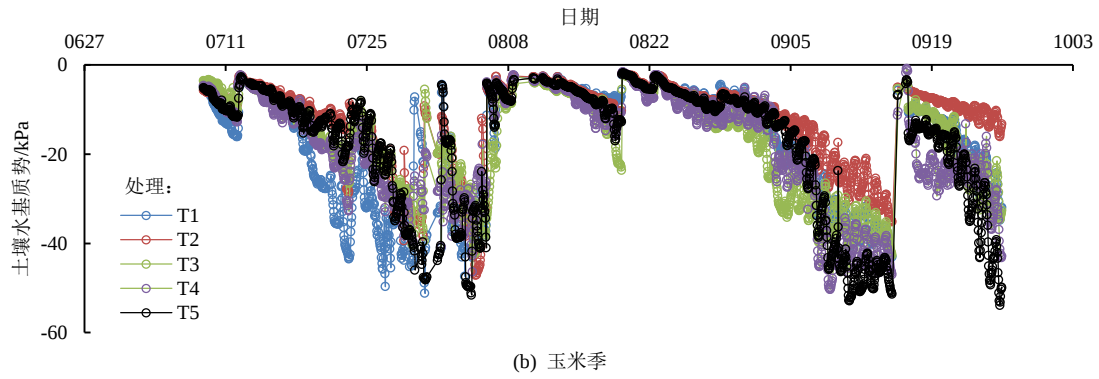


图3 苕子和玉米生长季土壤水基质势动态

Fig.3 Dynamics of soil water matrix potential in the growing season of *V. villosa* and maize

夏玉米生长季各处理土壤水基质势变化趋势相似(图3(b)),各处理间无显著差异。拔节期一大喇叭口期下降,7月30日开始灌水后土壤水基质势上升。受降水年内分配不均匀影响,夏季玉米生育期内灌水量大幅低于春季苕子灌水量,咸水灌水量和淡水灌水量基本与设定的灌溉比例一致(表2)。8月5—12日,受持续降水影响,土壤水基质势在降水集中时段内普遍较高(-10 kPa以上),随着玉米耗水量增加,土壤水基质势下降,后期受多次有效降水的影响,土壤水基质势有所上升。雨季结束(9月后),土壤水基质势重新保持波动变化。以上表明,土壤水基质势受灌溉、降水和作物耗水的影响而动态变化,除受降水影响外,本试验中土壤水基质势动态与灌溉频率有一致性,而与灌溉水种类(咸水或淡水)无关。

2.2 土壤EC值

不同咸淡水滴灌频率处理后,各处理土壤剖面EC值的空间动态变化过程如图4所示。苕子越冬后(3月7日,灌溉处理前),各土层土壤EC值呈下层高上层低的状态。苕子翻压前(5月17日),各土层土壤EC值变化较大,有表聚趋势,T4、T5处理土壤

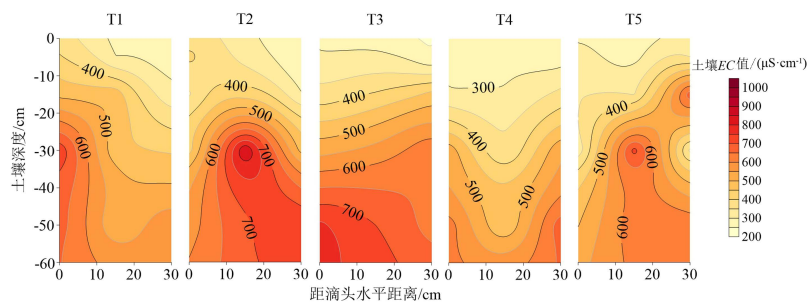
EC值最大,T3处理次之,T1、T2处理最小。各处理土壤EC值随灌溉咸水频率的增加而升高(图4(b))。

表2 不同处理咸淡水灌水量

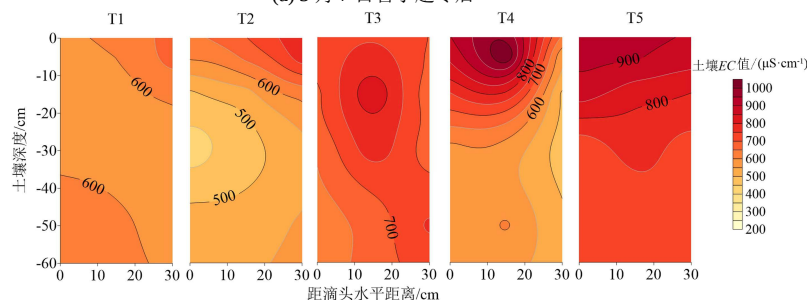
Table 2 Irrigation amount of brackish and fresh water

作物生长时段	灌溉水类型	灌水量/mm				
		T1	T2	T3	T4	T5
苕子调控灌溉期 (4月21日—5月21日)	淡水	105	80	50	25	0
	咸水	0	25	55	80	105
玉米调控灌溉期 (7月30日—8月5日)	淡水	45	30	15	0	0
	咸水	0	15	30	45	45

玉米种植前(6月18日),各处理土壤盐分增加量与咸水灌溉比例成正比,并与苕子翻压前保持一致(图4(c)),T5处理土壤EC值最大,T2—T4处理次之,T1处理最小。玉米收获前(9月24日),T1、T2、T3、T4处理土壤剖面EC值与灌溉前(3月7日)相比保持不变或有所降低,而T5处理土壤剖面EC值升高(图4(d))。从周年盐分空间变化来看,T1、T2、T3、T4处理20~60 cm土层土壤EC值从毛叶苕子返青期到玉米成熟期均呈下降趋势,分别下降26.14%、11.61%、13.17%、6.43%,而T5处理升高21.26%。



(a) 3月7日苕子越冬后



(b) 5月17日苕子翻压前

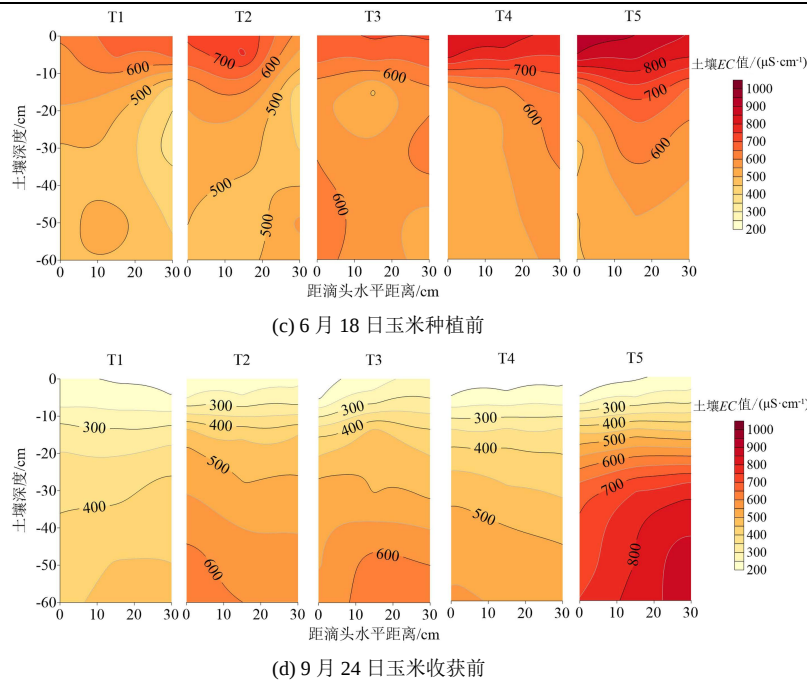


图4 作物生长期前后各处理土壤EC值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil EC before and after crop growth period

2.3 苕子和玉米生长

不同咸淡水灌溉频率对毛叶苕子平均干物质质量无显著影响,但对平均鲜草产量和平均干物质产量有显著影响(表3)。毛叶苕子平均鲜草产量随咸水灌溉比例的增加呈先增加后降低的趋势,T2处理与T5处理差异显著,T5处理平均鲜草产量较T1处理降低15.54%;毛叶苕子平均干物质产量随咸水灌溉比例的增加而逐渐降低,T1—T4处理无显著性差异,而T5处理与T1、T2处理差异显著,T5处理平均干物质产量较T1处理降低19.69%。

夏玉米灌浆期和成熟期茎、叶、穗鲜质量和干质量的变化情况如表4所示。灌浆期是玉米生长周期中决定最终粒质量、产量和品质的关键时期^[16]。灌浆期夏玉米茎鲜质量组间差异不显著,T5处理叶鲜质量显著低于T2处理($P<0.05$);T4处理穗鲜质量显著低于T2处理($P<0.05$)。灌浆期各处理夏玉米叶、穗

干质量差异不显著($P>0.05$),而T5处理茎干质量显著低于T2处理($P<0.05$)。成熟期夏玉米各处理叶、穗鲜质量差异不显著,而T4处理茎鲜质量显著低于T2、T3处理($P<0.05$)。成熟期夏玉米各处理叶干质量差异不显著,而T4处理茎干质量显著低于T2、T3、T5处理($P<0.05$),T4、T5处理穗干质量显著低于T2处理($P<0.05$)。

表3 各处理苕子地上部生物量

Table 3 Above ground biomass of the *V. villosa* under each treatment

处理	干质量与鲜质量 百分比/%	平均鲜草 产量/(kg hm ⁻²)	平均干物质 产量/(kg hm ⁻²)
T1	17.5±0.63a	35 400±981ab	6 195±172a
T2	16.5±0.34a	37 133±3 409a	6 142±564a
T3	17.2±0.88a	33 300±416ab	5 718±71ab
T4	17.4±0.91a	31 500±1 212ab	5 472±211ab
T5	16.6±1.70a	29 900±1 137b	4 975±189b

表4 各处理夏玉米生物量

Table 4 Biomass of summer maize under each treatment

生育期	处理	茎鲜质量/kg	叶鲜质量/kg	穗鲜质量/kg	茎干质量/g	叶干质量/g	穗干质量/g
灌浆期	T1	0.48±0.03a	0.18±0.01ab	0.21±0.01ab	80.7±4.5ab	48.1±3.5a	34.2±2.3a
	T2	0.54±0.02a	0.21±0.01a	0.25±0.02a	92.3±3.1a	53.0±1.8a	44.1±4.1a
	T3	0.51±0.02a	0.19±0.01ab	0.22±0.02ab	76.2±3.6ab	48.2±1.9a	35.0±3.8a
	T4	0.51±0.02a	0.20±0.01ab	0.22±0.01b	79.7±7.7ab	44.9±2.6a	35.1±3.4a
	T5	0.48±0.03a	0.17±0.01b	0.22±0.02ab	69.4±6.3b	44.9±3.2a	34.2±3.4a
成熟期	T1	0.45±0.04ab	0.09±0.01a	0.33±0.03a	104.3±8.7ab	34.5±2.4a	192.0±16.0ab
	T2	0.52±0.02a	0.10±0.01a	0.35±0.01a	124.4±6.2a	40.2±2.1a	204.5±7.6a
	T3	0.51±0.03a	0.11±0.01a	0.34±0.01a	122.5±7.8a	39.7±2.1a	197.7±7.5ab
	T4	0.42±0.02b	0.10±0.01a	0.29±0.02a	94.6±6.6b	38.3±1.4a	166.1±10.8b
	T5	0.48±0.03ab	0.11±0.01a	0.28±0.03a	122.8±8.2a	40.4±2.5a	164.0±15.3b

2.4 玉米产量及产量构成要素

各处理玉米产量和产量构成要素如表 5 所示。不同咸淡水滴灌频率处理的籽粒产量以 T2 处理最高, T1、T3、T4 处理次之, T5 处理最低, 且 T2 处理和 T5 处理差异显著 ($P<0.05$)。与 T1 处理相比, T2 处理的籽粒产量基本持平, 而 T3、T4、T5 处理籽粒产量分别降低了 4.33%、4.58%、7.87%。T2 处理穗长最大, T3、T1、T4 处理次之, T5 处理最低, 且 T2 处理和 T5 处理差异显著 ($P<0.05$)。与 T1 处理相比,

T2、T3 处理的果穗长度分别提高了 8.21%、6.67%, 而 T4 处理和 T5 处理则降低了 0.51%、5.13%。各处理夏玉米百粒质量和出籽率差异不显著。随着微咸水滴灌频率的增加, 玉米产量先升高后降低, T2 处理产量最高, 随着微咸水滴灌频率继续增加, 玉米产量下降, 但与 T1 处理相比, 产量下降均未达到显著性水平。微咸水灌溉频率的增加显著影响收获指数 (HI), T1 处理 HI 最高, T2、T3、T4 处理次之, T5 处理最低, T5 处理较 T1 处理显著降低 7.39%。

表 5 不同处理夏玉米产量及产量构成要素

Table 5 Yield and yield components of summer maize under different treatments

处理	产量/(kg hm ⁻²)	穗长/cm	百粒质量/g	出籽率/%	收获指数
T1	7 791.7±206.9ab	19.5±1.1ab	37.8±1.7a	0.843±0.006a	0.487±0.016a
T2	7 874.1±109.7a	21.1±0.4a	38.7±0.7a	0.843±0.004a	0.467±0.012ab
T3	7 454.7±274.7ab	20.8±0.9ab	37.7±1.6a	0.839±0.006a	0.465±0.008ab
T4	7 435.7±242.5ab	19.4±1.9ab	38.2±1.4a	0.844±0.016a	0.481±0.024ab
T5	7 178.7±103.9b	18.5±1.3b	38.9±1.5a	0.847±0.007a	0.451±0.019b

注 同列不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平时差异显著。

3 讨论

Zhang 等^[17]研究表明, 微咸水灌溉频率越高, 平均电导率越大, 盐胁迫持续时间越长, 盐胁迫面积越大。本研究中, 苕子翻压前, 随着咸水灌溉频率的增加, 土壤盐分在非雨季逐渐积累。由于该时期黄河三角洲地区蒸发量大而降水量小, 随着微咸水灌溉频率的增加, 缺少淡水的淋洗作用, 同时土壤水分蒸发, 灌溉咸水及下层土壤盐分向上运移, 土壤盐分表聚现象明显, 导致上层土壤含盐量增加, 这与上述研究结果一致。然而, 土壤盐分变化一方面受灌水量影响, 另一方面受降水影响。黄河三角洲地区夏季降水量大, 随着雨季降水增加, 前期咸水灌溉导致的表层盐分积累受淋洗影响, 随降水逐渐向下层土壤运移后汇入地下水, 土壤盐分逐渐降低, 这一规律与湿润、半湿润区各试验结果一致^[18-20]。玉米生育期结束后, T1、T2、T3、T4 处理土壤剖面盐分较毛叶苕子返青期土壤盐分普遍降低; 而 T5 处理出现深层土壤盐分积累的现象 (图 4 (d))。这说明本地区气候条件下, 采用咸淡水灌溉频率不超过 3:1 (T4 处理) 的灌溉方法, 可充分利用雨季降水淋洗, 基本保持土壤盐分的周年平衡。

咸水灌溉会将一部分盐分带入土壤, 使耕层土壤含盐量超过作物的耐盐度, 影响作物生长和产量^[21]。Xue 等^[22]在河套灌区采用浅层地下微咸水代替部分淡水进行灌溉试验表明, 与只灌溉淡水处理相比, 微咸水和淡水交替灌溉比例为 1:1, 春玉米和向日葵的年平均产量分别提高了 5.3%和 8.2%。Wang 等^[23]在湿润、半湿润区, 咸淡水灌溉比例为 1:1, 在灌水量

减少 40%的情况下, 西瓜产量与常规足量滴灌相比基本持平。本研究发现, 与只灌溉淡水的 T1 处理相比, 当咸、淡水交替滴灌频率为 1:3 时, 夏玉米平均籽粒产量提高了 1.04%, 而随着咸水滴灌频率增加到 1:1 和 3:1, 玉米产量分别降低 4.33%和 4.58%, 但与 T1 处理差异不显著; 当完全采用咸水灌溉时, 土壤盐分显著积累, 玉米生长受到一定的盐胁迫, 产量显著降低 7.87%。

穗长和百粒质量是影响玉米产量的重要产量构成要素, 是衡量作物产量的重要指标。本研究中, 各处理间百粒质量差异不显著 ($P>0.05$), 而各处理穗长与籽粒产量差异显著 (表 5)。玉米籽粒产量可以计算为生物量和收获指数 (HI) 的乘积, 也就是说, 生物量和收获指数是籽粒产量的决定因素^[24]。玉米收获指数很难提高, 因此, 主要关注增加生物量来提高籽粒产量^[25]。本研究发现, 咸、淡水交替滴灌频率为 3:1 的玉米生物量与 T1 处理相比差异不显著 (表 4), T1 处理收获指数与 T4 处理相差不大 (表 5), 即适当的咸水滴灌频率不会降低玉米生物量, 因对玉米产量无显著影响。微咸水中含有一定微量元素, 轻微的盐胁迫带入的盐分不会对农作物的产量和品质造成影响^[26], 相反能够刺激作物生长。在淡水资源不足条件下, 1~3 g/L 微咸水处理对土壤含盐量、作物产量影响较小, 可以替代淡水用来灌溉农作物, 节约较多的淡水资源^[27]。

综合考虑不同滴灌频率的微咸水灌溉处理对当地土壤盐分和玉米产量的影响, 认为春季咸、淡水交替滴灌频率为 3:1 是研究区域的最佳灌溉制度, 而夏季雨季则利用雨养淋洗, 既能节约农业淡水资源

源, 稳定作物产量, 又能促进盐分淋洗, 维持周年盐分平衡。

4 结 论

1) 当咸淡水灌溉频率不高于 3:1 时, 0~60 cm 土层土壤盐分通过降水或灌溉淋洗可实现年内平衡, 达到既保证产量、不积盐还能合理利用水资源的目的; 当采用完全微咸水灌溉时, 20~60 cm 土层土壤盐分积累, 较初始时刻增加 21.3%。

2) 在毛叶苕子-玉米轮作条件下, 当咸淡水交替滴灌频率不高于 3:1 时, 咸淡水灌溉频率对毛叶苕子平均鲜草产量和平均干物质产量无显著影响; 当采用完全微咸水灌溉时, 苕子鲜草产量和干物质产量较淡水对照分别降低 15.5%和 19.7%。

3) 适宜的咸淡水交替滴灌模式下, 微咸水灌溉对夏玉米产量无显著影响, 咸、淡水交替滴灌频率为 3:1 时, 玉米产量为 7 435.7 kg/hm², 较淡水对照降低 4.6%; 当采用完全微咸水灌溉时, 玉米产量显著降低, 较淡水对照降低 7.9%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 张成兰, 刘春增, 李本银, 等. 不同施肥条件下毛叶苕子的腐解及养分释放特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2 275-2 283.
- [2] 刘小媛, 高佩玲, 张晴雯, 等. 微咸水矿化度对重度盐碱土壤入渗特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 102-107.
- [3] HE Kangkang, YANG Yonghui, YANG Yanmin, et al. HYDRUS simulation of sustainable brackish water irrigation in a winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain[J]. Water, 2017, 9(7): 536.
- [4] LI Jianshe, GAO Yanming, ZHANG Xueyan, et al. Comprehensive comparison of different saline water irrigation strategies for tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 521-533.
- [5] MINHAS P S. Saline water management for irrigation in India[J]. Agricultural Water Management, 1996, 30(1): 1-24.
- [6] LI Na, KANG Yaohu, LI Xiaobin, et al. Response of tall fescue to the reclamation of severely saline coastal soil using treated effluent in Bohai Bay[J]. Agricultural Water Management, 2019, 218: 203-210.
- [7] 杨培岭, 王瑜, 任树梅, 等. 咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 273-281.
- [8] 郭力琼, 毕远杰, 马娟娟, 等. 交替滴灌对土壤水盐分布规律影响研究[J]. 节水灌溉, 2016(5): 6-11.
- [9] CAO Yuxin, CAI Huanjie, SUN Shikun, et al. Effects of drip irrigation methods on yield and water productivity of maize in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 259: 107 227.
- [10] ZHANG Y H, LI X Y, ŠIMŮNEK J, et al. Evaluating soil salt dynamics in a field drip-irrigated with brackish water and leached with freshwater during different crop growth stages[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106 601.
- [11] 朱成立, 强超, 黄明逸, 等. 咸淡水交替灌溉对滨海垦区夏玉米生理生长的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 253-261.
- [12] 王昱东, 庞桂斌, 傅新, 等. 咸淡水交替灌溉对冬小麦生理生化特征及产量的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2023, 37(2): 163-171.
- [13] WU Yang, BIAN Shaofeng, LIU Zhiming, et al. Drip irrigation incorporating water conservation measures: Effects on soil water-nitrogen utilization, root traits and grain production of spring maize in semi-arid areas[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(12): 3 127-3 142.
- [14] SUN Jiaxia, KANG Yaohu, WAN Shuqin, et al. Soil salinity management with drip irrigation and its effects on soil hydraulic properties in North China coastal saline soils[J]. Agricultural Water Management, 2012, 115: 10-19.
- [15] HÜTSCH B W, SCHUBERT S. Harvest index of maize (*Zea mays* L.): Are there possibilities for improvement?[M]. Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2017: 37-82.
- [16] LI Qiang, DU Lunjing, FENG Dongju, et al. Grain-filling characteristics and yield differences of maize cultivars with contrasting nitrogen efficiencies[J]. The Crop Journal, 2020, 8(6): 990-1 001.
- [17] ZHANG Y H, LI X Y, ŠIMŮNEK J, et al. Optimizing drip irrigation with alternate use of fresh and brackish waters by analyzing salt stress: The experimental and simulation approaches[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 219: 105 355.
- [18] FENG Di, NING Songrui, SUN Xiaolan, et al. Agricultural use of deserted saline land through an optimized drip irrigation system with mild salinized water[J]. Agricultural Water Management, 2023, 281: 108 261.
- [19] LIU Bingxia, WANG Shiqin, LIU Xiaojing, et al. Evaluating soil water and salt transport in response to varied rainfall events and hydrological years under brackish water irrigation in the North China Plain[J]. Geoderma, 2022, 422: 115 954.
- [20] CUCCI G, LACOLLA G, BOARI F, et al. Effect of water salinity and irrigation regime on maize (*Zea mays* L.) cultivated on clay loam soil and irrigated by furrow in Southern Italy[J]. Agricultural Water Management, 2019, 222: 118-124.
- [21] 孙宏勇, 刘小京, 张喜英. 盐碱地水盐调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1 528-1 536.
- [22] XUE Jing, REN Li. Conjunctive use of saline and non-saline water in an irrigation district of the Yellow River basin[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66(2): 147-162.
- [23] WANG Xingchen, LIU Rui, LUO Jia'nan, et al. Effects of water and NPK fertigation on watermelon yield, quality, irrigation-water, and nutrient use efficiency under alternate partial root-zone drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107 785.
- [24] LIU Wanmao, HOU Peng, LIU Guangzhou, et al. Contribution of total dry matter and harvest index to maize grain yield—A multisource data analysis[J]. Food and Energy Security, 2020, 9(4): 256.
- [25] DI MATTEO J A, FERREYRA J M, CERRUDO A A, et al. Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding[J]. Field Crops Research, 2016, 197: 107-116.
- [26] TALEBNEJAD R, SEPASKHAH A R. Effect of different saline groundwater depths and irrigation water salinities on yield and water use of quinoa in lysimeter[J]. Agricultural Water Management, 2015, 148: 177-188.
- [27] LIU C, HUANG L P, LIU M L, et al. Effects of seawater irrigation on fruit quality of grapevine, soil properties and microbial diversity[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 253: 80-86.

Effects of Alternate Saline and Fresh Water Drip Irrigation on Water and Salt Dynamics and Crop Growth in Coastal Saline Soil

WANG Qian¹, DONG Shide², CUI Guangxu², MA Qian², LI Hanbo³, SU Shengjia⁴, WANG Guangmei^{2*}

(1. College of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation/Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences/Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai 264003, China; 3. Key Laboratory of Songliao Aquatic Environment, Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 4. Shandong Saline-alkali Land Modern Agriculture Co. Ltd., Dongying 257300, China)

Abstract: 【Objective】 The aim was to study the effects of different frequency of alternating saline and fresh water drip irrigation on soil water and salt distribution and crop growth in the Yellow River Delta Region.【Method】 A field experiment of alternating saline and fresh water drip irrigation for *Vicia villosa*(*V. villosa*)-maize(*Zea mays* L.) in two seasons was conducted. The experiment was divided into three frequency treatments of alternating saline and fresh water drip irrigation, and the corresponding irrigation frequency ratios of saline water (salinity of about 4 g/L) and fresh water (salinity of about 1 g/L) were 1 : 3, 1 : 1 and 3 : 1(T2—T4 treatments), respectively. Additionally, a treatment of fresh water irrigation only (T1 treatment) and a treatment of saline water irrigation only (T5 treatment) were set as the control. The effects of different frequency of alternating saline drip irrigation on soil water and salt transport and maize yield in Yellow River Delta Region were explored by measuring soil *EC* value, crop biomass and yield during crop growth period.【Result】 ①Soil water dynamics was mainly controlled by irrigation in non-rainy season, and soil salinity increased significantly with the increase of saline irrigation frequency. During the rainy season, soil water dynamics were mainly affected by rainfall, and the salinity in each treatment decreased gradually. On the whole, annual salinity in the 0-20 cm soil layer was balanced. In T1—T4 treatments, the salinity in the soil layer of 20-60 cm showed a decreasing trend from the regreening stage of *V. villosa* to the mature stage of maize, decreased by 26.14%, 11.61%, 13.17% and 6.43%, respectively, while that in T5 treatment increased by 21.26%. ②With the increase of saline irrigation frequency, the yield of fresh grass and dry matter yield decreased. There was no significant difference between T2—T4 treatments and T1 treatment, but the fresh grass yield and dry matter yield of T5 treatment were significantly reduced by 15.54% and 19.69%, respectively, compared with T1 treatment. ③Maize yield increased first and then decreased with the increase of saline water irrigation frequency. Grain yield for T2 treatment was significantly higher than that of T5 treatment, but there was no significant difference between T2 and T1 treatment, as well as T3 and T4 treatments. The grain yield of T3—T5 treatments was 4.33%, 4.58% and 7.87% lower than that of T1 treatment, respectively. 【Conclusion】 The frequency ratio of saline and fresh water alternating drip irrigation 3 : 1 (T4 treatment) can reduce the amount of fresh water irrigation, maintain the annual soil salt balance, and stabilize the biomass of the *V. villosa* and maize yield, which can be used as the best saline and fresh water alternating irrigation scheme for saline farmland in the Yellow River Delta Region. **Key words:** saline water; alternate irrigation with saline and fresh water; Yellow River Delta Region; soil salinity; maize

责任编辑：白芳芳