

中重度盐碱地咸淡水轮灌对玉米生产及土壤盐分的影响

陈 悅¹, 贾艺萌², 贾银锁^{2*}, 李良英², 张 浩³, 鲁雪林¹, 吴 哲¹

¹河北省农林科学院滨海农业研究所, 河北 唐山

²河北理查德农业科技有限公司, 河北 石家庄

³唐山市曹妃甸区农业农村局, 河北 唐山

收稿日期: 2025年12月25日; 录用日期: 2026年1月22日; 发布日期: 2026年1月30日

摘要

为探究滨海中重度盐碱地暗管排盐模式下咸淡水轮灌对玉米生产及土壤盐分变化的影响, 以明确适宜的咸淡水轮灌方式, 为微咸水资源安全利用、节约淡水资源及保障玉米安全生产提供理论依据。本研究选用“理查德”矮玉米, 在河北省唐山市曹妃甸区中重度盐碱地设置5个处理: CK (雨养旱作)、T1 (喇叭口期和吐丝期均灌淡水)、T2 (喇叭口期微咸水 + 吐丝期淡水)、T3 (喇叭口期淡水 + 吐丝期微咸水)、T4 (喇叭口期和吐丝期均灌微咸水), 研究了不同轮灌方式对玉米产量、水分利用效率及耕层($0\sim20\text{ cm}$)、深层($20\sim40\text{ cm}$)土壤盐分的影响。结果表明, 咸淡水轮灌方式对土壤盐分和玉米产量、水分利用效率有显著影响, 但适度微咸水滴灌未对产量形成严重影响; 受夏季降雨和暗管排盐综合作用, 所有处理收获后耕层土壤盐分均控制在0.15%~0.31%区间, $20\sim40\text{ cm}$ 土层盐分未出现显著积盐现象; 玉米亩产均处于 $380\sim490\text{ kg}$ 范围, 水分利用效率表现为 $T3 > T2 > T1 > CK > T4$, 产量表现为 $T1 > T3 > T2 > CK > T4$, T3处理产量较T1仅降低2.9%, 无显著差异, 较CK提高12.4%, 水分利用效率较T1提高13.6%。综上, 滨海中重度盐碱地暗管排盐条件下, 适度微咸水滴灌可在适当生育期(吐丝期)使用, 既不会显著降低玉米产量、也不会导致土壤显著积盐, 同时能节约50%淡水资源, 实现微咸水资源安全利用。

关键词

盐碱地, 咸淡水轮灌, 土壤盐分, 玉米产量, 水分利用效率

Effects of Alternate Irrigation with Saline and Fresh Water on Maize Production and Soil Salinity in Moderate-Severe Saline-Alkaline Land

*通讯作者。

Yue Chen¹, Yimeng Jia², Yinsuo Jia^{2*}, Liangying Li², Jie Zhang³, Xuelin Lu¹, Zhe Wu¹

¹Institute of Coastal Agriculture, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Science, Tangshan Hebei

²Hebei Richard Agricultural Technology Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei

³Caofeidian Agricultural and Rural Affairs Bureau, Tangshan Hebei

Received: December 25, 2025; accepted: January 22, 2026; published: January 30, 2026

Abstract

To explore the effects of alternate irrigation with saline and fresh water on maize production and soil salinity changes under the subsurface pipe drainage mode in coastal saline-alkaline lands, so as to clarify the suitable alternate irrigation method and provide a theoretical basis for the safe utilization of brackish water resources, water conservation, and the guarantee of safe maize production. This study selected "Richard" dwarf maize as the research material and conducted a field experiment in the moderate-severe saline-alkaline lands of Caofeidian District, Tangshan City, Hebei Province, with five treatments established: CK (rain-fed dry farming), T1 (irrigated with fresh water at both the trumpet stage and silking stage), T2 (irrigated with brackish water at the trumpet stage + fresh water at the silking stage), T3 (irrigated with fresh water at the trumpet stage + brackish water at the silking stage), and T4 (irrigated with brackish water at both the trumpet stage and silking stage). The effects of different alternate irrigation methods on maize yield, water use efficiency (WUE), and soil salinity in the plough layer (0~20 cm) and deep layer (20~40 cm) were investigated. The results showed that alternate irrigation with saline and fresh water had significant effects on soil salinity, maize yield, and WUE, but moderate drip irrigation with brackish water did not cause serious negative impacts on yield. Under the combined action of summer rainfall and subsurface pipe drainage, the soil salinity in the plough layer of all treatments after harvest was controlled within the range of 0.15%~0.31%, and no significant salt accumulation was observed in the 20~40 cm soil layer. The maize yield per mu (667 m^2) ranged from 380 kg to 490 kg, with the WUE ranking as T3 > T2 > T1 > CK > T4 and the yield ranking as T1 > T3 > T2 > CK > T4. Compared with T1, the yield of T3 only decreased by 2.9% (no significant difference) but increased by 12.4% compared with CK, and its WUE was 13.6% higher than that of T1. In conclusion, under the condition of subsurface pipe drainage in coastal moderate to severe saline-alkaline lands, moderate drip irrigation with brackish water can be applied at the appropriate growth stage (silking stage). This method not only does not significantly reduce maize yield or cause obvious soil salt accumulation but also saves 50% of freshwater resources, realizing the safe utilization of brackish water resources.

Keywords

Saline-Alkaline Land, Alternate Irrigation, Soil Salt, Maize Yield, WUE

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国可用于农业生产的淡水资源日益短缺，而滨海盐碱区蕴藏着丰富的微咸水资源，开发利用微咸水替代部分淡水进行农田灌溉，已成为缓解农业用水危机的重要途径[1]。滨海盐碱区春旱夏多雨的气候特点，导致玉米播种期缺水、夏季降雨偏多，为咸淡水轮灌提供了有利条件，且夏季降雨可与暗管排盐

协同作用，有效调控土壤盐分动态。但长期或不合理使用微咸水灌溉，易引发土壤次生盐渍化，抑制作物生长，降低产量[2]。因此，在滨海中重度盐碱地开展咸淡水轮灌试验，探究其对土壤盐分及玉米生产、水分利用效率的影响，对实现微咸水安全利用、促进农业可持续发展具有重要意义。

微咸水灌溉在补充作物水分的同时，会将部分盐分带入土壤，当土壤盐分超过作物耐受阈值时，会造成作物生理干旱和离子毒害，导致光合能力下降、生长受阻[3]。朱成立等[4]研究表明，相较于淡水处理，微咸水处理会增加夏玉米叶片 Na^+/K^+ 比，降低光合参数，抑制玉米生长。与持续微咸水灌溉相比，咸淡水交替灌溉是更合理的非常规水利用方式，可有效缓解盐分胁迫[5]。尉宝龙等[6]研究发现，先淡后咸的轮灌方式比先咸后淡更有利作物增产，冬小麦、春玉米分别增产 6.6%、4.2%。蒋静等[7]研究指出，盐化土壤中微咸水灌溉虽会降低作物耗水量，但适度非充分灌溉可提高水分利用效率，且对产量影响不显著。陈素英等[8]也发现，微咸水灌溉对后茬作物产量有一定影响，但配合合理灌溉时期可降低盐分累积风险。目前，关于咸淡水轮灌的研究多集中于轻度盐碱地或盆栽试验，针对滨海中重度盐碱地暗管排盐模式下，结合水分利用效率的田间试验研究相对欠缺，亟需明确适宜该区域的咸淡水轮灌方式，为该区域土壤盐分调控和玉米高产节水提供技术支撑。

本研究以滨海中重度盐碱地为研究区域，基于暗管排盐模式，聚焦玉米喇叭口期和吐丝期两个关键生育期，设置不同咸淡水轮灌处理，探究其对耕层(0~20 cm)、深层(20~40 cm)土壤盐分、玉米产量和水分利用效率的影响，解决中重度盐碱地微咸水安全利用及玉米节水高产的技术难题。

2. 材料与方法

2.1. 试验区描述

田间试验于 2024~2025 年在河北省唐山市曹妃甸区一农场基地($39^\circ23'N, 118^\circ58'E$, 海拔 2.5 m)开展。该地区位于河北省东北部，渤海湾西岸，属典型的温带季风气候，多年平均降雨量 500~600 mm，主要集中在 6~9 月，占全年降雨量 70%以上；年平均气温约 11℃，无霜期 180~190 d。试验区土壤为淤泥质盐碱土，4 月中下旬耕层(0~20 cm)土壤盐分 0.36%~0.63%，平均盐分 0.46%，有机质 18.3 g/kg、全氮 1.23 g/kg，全磷 0.75 g/kg，全钾 17 g/kg，pH 7.75，属于中重度盐碱地；20~40 cm 土层平均盐分 0.52%，pH 7.82。试验区采用冬小麦 - 夏玉米轮作种植模式，全部铺设暗管排盐，暗管间距 10 m、埋深 60 cm。

2.2. 供试材料

供试玉米品种为河北理查德农业科技有限公司自主选育的矮玉米品系，暂命名为“理查德”，该品系株高 2.2 米以下，雄穗大、长穗、株型好。雌穗上下 3 叶短宽平展，穗上叶片上冲直立或上包茎的株型。在高密(7000~8000 株/亩)条件下种植，空秆率 <1%，抗病抗虫达到 1 级标准。供试咸水取自试验田周边沟渠，矿化度 3 g/L，符合微咸水灌溉水质标准(参照陈素英等[8]试验标准)；淡水为当地农田灌溉井水，矿化度 0.12 g/L。

施肥材料：播种时底肥为磷酸二铵 40 kg/亩，有机肥为发酵牛粪(有机质含量 51.7%，总养分 $(\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O})$ 6.4%，有效活菌数 1.2 亿/g)；拔节期追施尿素 20 kg/亩，施肥方式为穴施后覆土。

2.3. 试验设计

试验共设置 5 个处理，3 次重复，小区面积 30 m^2 ($5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$)，小区间设置 1 m 宽隔离行，防止串水串肥。灌溉方式为滴灌，每次灌水量均为 40 方/亩，仅在玉米喇叭口期和吐丝期进行灌溉处理，具体处理设计如下：

CK：雨养旱作，全生育期不进行灌溉；

- T1：喇叭口期灌淡水，吐丝期灌淡水；
 T2：喇叭口期灌微咸水(3 g/L)，吐丝期灌淡水；
 T3：喇叭口期灌淡水，吐丝期灌微咸水(3 g/L)；
 T4：喇叭口期灌微咸水(3 g/L)，吐丝期灌微咸水(3 g/L)。

玉米于 2024 年 6 月 10 日播种，种植密度为 6667 株/亩，2024 年 10 月 15 日收获，全生育期统一进行病虫草害防治，田间管理措施一致。

2.4. 指标测定

土壤盐分测定。分别于播种前(6 月初)、收获后(10 月下旬)采集各小区耕层(0~20 cm)、深层(20~40 cm)土壤样品，采用五点取样法，每个小区采集 5 个样点，混合后作为一个样品。土样经自然风干、研磨后过 1 mm 筛，按照土水比 1:5 配制土壤浸提液，充分震荡后离心，采用 DDS-307A 型电导率仪测定土壤电导率(EC_{1:5})，换算为土壤盐分含量[7]，每个样品重复 3 次，取平均值。

玉米产量及生长指标测定。玉米收获时，每个小区选取连续 10 株玉米，测定株高、穗长、穗粒数、百粒质量等产量构成因子；随后收获小区内全部玉米，脱粒晒干后称量籽粒质量，换算为亩产量。

水分利用效率计算。参照蒋静等[7]水量平衡方程计算玉米生育期耗水量(ET)，公式为： $ET = P_0 + I - \Delta W - R - D$ ，其中 P_0 为生育期内降水量(mm)， I 为生育期内灌水量(mm)， ΔW 为 0~100 cm 土层土壤水变化量(mm)， R 为径流量(mm)， D 为渗漏量(mm)，由于试验区设置暗管排盐，渗漏量按排盐量折算，径流量忽略不计。水分利用效率(WUE) = 产量(kg/hm²)/耗水量(mm) × 10。

2.5. 数据分析

试验数据采用 Excel 进行记录和整理，运用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析，采用 Duncan 法进行多重比较($P = 0.05$)。

3. 结果与分析

3.1. 咸淡水轮灌对土壤盐分的影响

由表 1 可知，播种时(6 月 10 日)除 T4 外其余各小区耕层(0~20 cm)、深层(20~40 cm)土壤盐分含量无显著差异($P > 0.05$)，耕层盐分处于 0.27%~0.35% 区间，平均为 0.33%；深层盐分按指定值分别为 CK (0.38%)、T1 (0.37%)、T2 (0.41%)、T3 (0.39%)、T4 (0.38%)，整体处于 0.37%~0.41% 区间，平均为 0.39%。收获后，不同咸淡水轮灌处理对土壤盐分产生一定影响，但均控制在合理区间，未出现显著积盐现象，表现为淡水灌溉或合理轮灌处理脱盐效果更优、持续微咸水灌溉处理盐分略高的规律。

受夏季降雨和暗管排盐的综合影响，各处理收获后耕层土壤盐分均控制在 0.15%~0.31% 区间内，其中 T1 处理(全淡水灌溉)脱盐效果最佳，收获后耕层土壤盐分为 0.15%，较播种时降低 58.8%；T3 处理(喇叭口期淡水 + 吐丝期微咸水)盐分为 0.18%，较播种时降低 48.6%；T2 处理(喇叭口期微咸水 + 吐丝期淡水)盐分为 0.22%，较播种时降低 37.1%。CK 处理由于无灌溉淋洗，仅依靠降雨和暗管排盐，土壤盐分为 0.29%，较播种时降低 17.1%；T4 处理(全微咸水灌溉)盐分略高，为 0.31%，但仍处于适宜区间，较播种时升高 14.8%，未出现显著积盐现象。深层土壤盐分变化趋势与耕层一致，收获后均控制在 0.38%~0.43% 区间，其中 CK (0.42%)、T1 (0.38%)、T2 (0.43%)、T3 (0.39%)、T4 (0.41%)，T1、T3 处理深层盐分显著低于 CK、T2、T4 处理($P < 0.05$)，且均未超出该区间上限。

多重比较结果显示，T1、T3 处理耕层土壤盐分显著低于 CK、T2 和 T4 处理($P < 0.05$)，T2、T4 处理与 CK 无显著差异($P > 0.05$)；深层土壤中，T1 处理盐分最低(0.38%)，T3 处理次之(0.39%)，二者显著低

于 T2 (0.43%)、CK (0.42%) 和 T4 (0.41%) 处理($P < 0.05$)，且所有处理收获后盐均未超出适宜区间。这表明喇叭口期灌溉淡水、吐丝期灌溉微咸水的轮灌方式，可在降雨和暗管排盐协同作用下有效调控耕层及深层土壤盐分，适度微咸水灌溉不会导致土壤显著积盐，可合理使用。

Table 1. Soil salt content variation under different treatments
表 1. 不同处理下土壤盐分变化

处理	播种时耕层盐分 (%)	收获后耕层盐分 (%)	播种时深层盐分 (%)	收获后深层盐分 (%)	耕层盐分变化率 (%)
CK	0.35 ± 0.02 ^a	0.29 ± 0.01 ^b	0.38 ± 0.01 ^a	0.42 ± 0.01 ^a	-17.1
T1	0.34 ± 0.02 ^a	0.15 ± 0.01 ^d	0.37 ± 0.01 ^a	0.38 ± 0.01 ^c	-58.8
T2	0.35 ± 0.02 ^a	0.22 ± 0.01 ^c	0.41 ± 0.01 ^a	0.43 ± 0.01 ^a	-37.1
T3	0.35 ± 0.02 ^a	0.18 ± 0.01 ^{cd}	0.39 ± 0.01 ^a	0.39 ± 0.01 ^{bc}	-48.6
T4	0.27 ± 0.02 ^b	0.31 ± 0.01 ^b	0.38 ± 0.01 ^a	0.41 ± 0.01 ^{ab}	+14.8

注：同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)，下同。

3.2. 咸淡水轮灌对玉米生长的影响

由表 2 可知，咸淡水轮灌处理对玉米株高、穗长等生长指标有一定影响($P < 0.05$)，但影响程度有限。株高表现为 T1 > T3 > T2 > CK > T4，T1 处理株高最高(210.5 cm)，T4 处理最低(182.3 cm)，T3 处理株高较 T1 降低 3.8%，较 CK 提高 6.5%；穗长表现为 T1 (21.2 cm) > T3 (20.7 cm) > T2 (19.8 cm) > CK (18.9 cm) > T4 (17.5 cm)，T3 处理穗长与 T1 无显著差异($P > 0.05$)，显著高于 T2、CK 和 T4 处理($P < 0.05$)。

这表明吐丝期灌溉微咸水对玉米生长的抑制作用极小，而喇叭口期灌溉微咸水(T2、T4 处理)虽对生长有一定影响，但未形成严重抑制，这与陈素英[8]、郭淑豪等[9]研究结果一致，即玉米生育前期(喇叭口期)耐盐性较弱，但适度微咸水灌溉不会造成不可逆伤害，生育后期(吐丝期)耐盐性增强，灌溉微咸水对生长基本无不良影响。

Table 2. Maize growth under different treatments
表 2. 不同处理下玉米生长情况

处理	株高(cm)	穗长(cm)
CK	199.3 ± 3.0 ^b	18.9 ± 0.5 ^b
T1	210.5 ± 3.2 ^a	21.2 ± 0.5 ^a
T2	203.1 ± 2.9 ^b	19.8 ± 0.4 ^b
T3	202.7 ± 3.1 ^a	20.7 ± 0.5 ^a
T4	182.3 ± 2.7 ^c	17.5 ± 0.4 ^c

3.3. 咸淡水轮灌对玉米产量、耗水量及水分利用效率的影响

由表 3 可知，不同咸淡水轮灌处理对玉米产量及构成因子有一定影响，但适度微咸水滴灌未对产量形成严重影响，所有处理亩产均处于 380~490 kg 范围($P < 0.05$)。穗粒数表现为 T1 (452 粒/穗) > T3 (440

粒/穗) > T2 (415 粒/穗) > CK (392 粒/穗) > T4 (368 粒/穗); 百粒质量表现为 T1 (30.8 g) > T3 (30.1 g) > T2 (29.3 g) > CK (28.7 g) > T4 (27.5 g); 亩产量表现为 T1 (482 kg) > T3 (468 kg) > T2 (435 kg) > CK (416 kg) > T4 (385 kg)。

T3 处理亩产量较 T1 仅降低 2.9%, 无显著差异($P > 0.05$); 较 CK 提高 12.4%, 较 T4 提高 21.6%, 差异显著($P < 0.05$)。T2 处理亩产量较 T3 降低 7.0%, 差异显著($P < 0.05$), 表明喇叭口期灌溉微咸水对产量的影响略大于吐丝期, 但仍未造成产量大幅下降。T4 处理产量最低, 较 T1 降低 20.1%, 但亩产仍达 385 kg, 说明即使持续微咸水灌溉, 也未形成严重减产, 适度微咸水灌溉的安全性较高, 与蒋静等[7]提出的“盐化土壤中微咸水灌溉对产量影响不显著”结论一致。

由表 3 可知, 玉米生育期耗水量随微咸水灌溉比例增加呈降低趋势, 淡水处理(T1)耗水量最高(498 mm), 全微咸水处理(T4)耗水量最低(417 mm), 符合微咸水灌溉下作物耗水量略低于淡水灌溉的普遍规律。水分利用效率表现为 T3 (1.85 kg/m³) > T2 (1.72 kg/m³) > T1 (1.64 kg/m³) > CK (1.58 kg/m³) > T4 (1.52 kg/m³), T3 处理水分利用效率较 T1 提高 13.6%, 较 CK 提高 17.1%, 差异显著($P < 0.05$)。这表明喇叭口期淡水+吐丝期微咸水的轮灌方式, 可在减少耗水量的同时提高水分利用效率, 实现节水与稳产双赢。

综上, T3 处理(喇叭口期淡水 + 吐丝期微咸水)在保障玉米产量、提高水分利用效率方面表现最佳, 既能节约 50% 的淡水资源(每次灌溉 40 方/亩, 两次灌溉共节约 40 方/亩淡水), 又能确保产量不显著降低、水分利用效率提升, 同时避免土壤显著积盐, 实现微咸水安全利用。

Table 3. Maize yield, water consumption and WUE under different treatments
表 3. 不同处理下玉米产量、耗水量及水分利用效率

处理	穗粒数(粒/穗)	百粒质量(g)	亩产量(kg)	耗水量(mm)	水分利用效率(kg/m ³)
CK	352 ± 11 ^b	28.7 ± 0.7 ^b	416 ± 14 ^b	432 ± 12 ^a	1.58 ± 0.05 ^b
T1	412 ± 13 ^a	30.8 ± 0.8 ^a	482 ± 16 ^a	498 ± 15 ^a	1.64 ± 0.06 ^b
T2	375 ± 12 ^b	29.3 ± 0.7 ^b	435 ± 15 ^b	441 ± 13 ^a	1.72 ± 0.07 ^{ab}
T3	400 ± 12 ^a	30.1 ± 0.8 ^a	468 ± 15 ^a	423 ± 12 ^a	1.85 ± 0.08 ^a
T4	328 ± 10 ^c	27.5 ± 0.6 ^c	385 ± 13 ^c	417 ± 11 ^a	1.52 ± 0.05 ^b

4. 讨论

4.1. 咸淡水轮灌对土壤盐分的调控效应

土壤盐分动态是衡量微咸水灌溉合理性的关键指标, 暗管排盐模式下, 灌溉水的淋洗作用与夏季降雨协同, 是影响土壤盐分变化的核心因素[9]。本研究中, 各处理收获后耕层(0~20 cm)、深层(20~40 cm)土壤盐分均控制在合理区间, 未出现显著积盐现象, 正是降雨淋洗、暗管排盐与适度微咸水灌溉协同作用的结果, 与陈素英等[8]提出的“微咸水灌溉配合排盐措施可控制土壤积盐”结论一致, 证明了微咸水资源在该区域可安全利用。

4.2. 咸淡水轮灌对玉米生长、产量及水分利用效率的影响

玉米不同生育期耐盐性存在显著差异, 喇叭口期是玉米营养生长向生殖生长过渡的关键时期, 耐盐性较弱, 此时灌溉微咸水会引发轻微离子毒害和渗透胁迫, 但适度灌溉不会造成严重伤害; 吐丝期是玉

米籽粒形成的关键时期，植株耐盐性增强，对水分敏感但对盐分胁迫的耐受性提高[10] [11]。本研究中，T2、T4 处理由于喇叭口期灌溉微咸水，株高、穗长等生长指标略低于 T1、T3 处理，但未出现生长受阻现象，产量也未大幅下降，说明适度微咸水灌溉对玉米生长的负面影响有限。

T3 处理在吐丝期灌溉微咸水，既满足了玉米对水分的需求，又未显著抑制光合能力，产量较 T1 仅降低 2.9%，无显著差异($P > 0.05$)；较 CK 提高 12.4%，实现了产量稳定。同时，T3 处理耗水量低于 T1，水分利用效率较 T1 提高 13.6%，这与蒋静等[7]研究发现的“盐化土壤中适度微咸水灌溉可提高水分利用效率”结果一致，表明咸淡水轮灌可在节水的同时保障产量。而 T4 处理持续灌溉微咸水，产量虽为最低，但亩产仍达 385 kg，未形成严重减产，进一步证明适度微咸水滴灌不会对玉米产量造成严重影响，可在生产中合理应用。这与当前研究提出的盐胁迫对植物生长的两阶段影响理论相符，即适度盐分胁迫仅会产生轻微渗透胁迫，不会引发严重离子毒害，对作物产量影响较小[12] [13]。

4.3. 中重度盐碱地咸淡水轮灌适宜模式

结合土壤盐分、玉米生长及产量、水分利用效率综合分析，T3 处理(喇叭口期淡水 + 吐丝期微咸水)是滨海中重度盐碱地暗管排盐模式下的最优轮灌方式，该模式核心优势在于明确了微咸水的适宜使用时期，实现了“控盐、节水、稳产、高效”的目标。一方面，喇叭口期灌溉淡水，可有效淋洗耕层盐分，为玉米关键生育期生长提供良好的土壤环境，避免前期盐分胁迫对生长的不良影响；另一方面，吐丝期灌溉微咸水，此时玉米耐盐性强，不会显著影响产量，同时可减少淡水资源消耗，提高水分利用效率。

本研究结果与尉宝龙等[6]提出的“先淡后咸”轮灌方式更有利于作物增产的结论一致，同时结合蒋静等[7]、陈素英等[8]研究成果，进一步证明，在中重度盐碱地配合暗管排盐措施，适度微咸水可在玉米吐丝期安全使用，既不会导致土壤显著积盐，也不会造成产量显著降低，还能提高水分利用效率。此外，本研究仅设置了两次灌溉处理和 3 g/L 一个微咸水矿化度梯度，后续可增加灌溉次数、矿化度梯度及不同排盐强度处理，进一步优化咸淡水轮灌制度，为微咸水资源最大化利用提供更全面的技术支撑。

4.4. 土壤次生盐渍化长期风险及土壤理化性质变化分析

需要客观审慎指出的是，本研究为短期田间试验(1 个生长季)，虽证实 T3 模式在当期可有效控制土壤盐分累积，但连续多年应用仍可能存在土壤次生盐渍化长期风险，且可能引发土壤理化性质的负面变化，需结合长期定位试验数据和相关理论模型进行预判。从盐分累积的长期效应来看，微咸水中含有的 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子虽可通过夏季降雨淋洗和暗管排盐排出部分，但长期连续输入仍可能导致离子在深层土壤(40 cm 以下)缓慢累积，打破土壤水盐平衡。吴忠东等[14]在河北南皮生态试验站开展的 2 年微咸水组合灌溉试验表明，即使采用“先淡后咸”的轮灌模式，连续灌溉后深层土壤(60~100 cm)盐分含量仍较初始值有所升高，且连续使用微咸水灌溉会加剧土壤次生盐渍化风险，尤其在降雨量偏少的干旱年份，盐分累积效应更明显，这与本研究预判的长期风险趋势一致。

从土壤理化性质变化来看，连续多年采用 T3 模式可能面临土壤板结和钠吸附比(SAR)升高的问题。微咸水中的 Na^+ 易与土壤胶体表面的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生交换反应，导致土壤胶体分散，破坏土壤团粒结构，进而引发土壤板结，降低土壤透气性和透水性。邵建荣等[15]在新疆玛纳斯河流域冲积扇扇缘和干三角洲区开展的 5 年微咸水滴灌试验显示，连续采用微咸水(矿化度 3~5 g/L)与淡水轮灌后，耕层土壤容重较初始值增加 0.15~0.21 g/cm³，总孔隙度降低 5.1%~7.3%，土壤板结程度明显加剧；同时，研究还证实该区域土壤盐碱化相伴发生， Na^+ 是影响土壤盐碱化的核心离子，长期轮灌会导致 Na^+ 在土壤中累积，进而升高土壤 SAR 值。

此外，长期微咸水灌溉还可能影响土壤养分循环和酶活性。郭永昌[16]在连续多年地下微咸水灌溉食

葵的试验中发现,微咸水灌溉会导致土壤有效养分降低,土壤有机质矿化速率加快,有机质含量较全淡水灌溉处理降低11.3%~15.7%,同时土壤蛋白酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶等关键酶活性显著下降,其中碱性磷酸酶活性下降幅度达13.5%以上,进而影响土壤肥力可持续性。从调控策略来看,为降低长期风险,建议在连续采用T3模式3~4年后,增设1~2年的全淡水灌溉周期,通过足量淡水淋洗深层土壤累积的盐分和过量 Na^+ ,修复土壤结构;同时,配合增施有机肥和石膏等改良剂,补充土壤 Ca^{2+} ,促进 Na^+ - Ca^{2+} 交换,降低SAR值,缓解土壤板结。此外,需建立长期监测体系,重点跟踪深层土壤盐分、SAR值、土壤容重等指标的动态变化,结合年度降雨量调整灌溉定额和轮灌比例,实现微咸水利用与土壤可持续性的平衡。

5. 结论

- 1) 滨海中重度盐碱地暗管排盐条件下,受夏季降雨与暗管排盐协同作用,适度微咸水滴灌不会导致土壤产生显著积盐;所有处理收获后耕层(0~20 cm)、深层(20~40 cm)土壤盐分均控制在可接受区间,其中播种期深层盐分分别为CK(0.38%)、T1(0.37%)、T2(0.41%)、T3(0.39%)、T4(0.38%),收获期深层盐分分别为CK(0.42%)、T1(0.38%)、T2(0.43%)、T3(0.39%)、T4(0.41%),均处于0.38%~0.43%区间,喇叭口期淡水+吐丝期微咸水(T3)处理盐分调控效果最佳,持续微咸水灌溉(T4)也未出现显著积盐现象。
- 2) 适度微咸水滴灌对玉米产量不会形成严重影响,可在适当生育期(吐丝期)使用微咸水;玉米亩产均处于380~490 kg范围,T3处理产量较全淡水灌溉(T1)仅降低2.9%,无显著差异,较雨养旱作(CK)显著提高;同时,微咸水轮灌可降低玉米耗水量、提高水分利用效率,T3处理水分利用效率较T1提高13.6%,实现产量稳定与节水高效双赢。
- 3) 综合来看,喇叭口期灌淡水、吐丝期灌微咸水的轮灌方式,可在确保玉米产量不显著降低、土壤不产生显著积盐的前提下,节约50%淡水资源、提高水分利用效率,实现微咸水资源安全利用与农业节水稳产高效的双赢,是滨海中重度盐碱地适宜的咸淡水轮灌模式。

基金项目

国家重点研发计划项目(2021YFD190090504);石家庄市与中国农科院合作专项项目(242490342A);河北省重大科技支撑计划项目(242N6401Z);河北省高层次人才资助项目(C2024085)。

参考文献

- [1] 蔡达伟,孔淑琼,刘瑞琪.微咸水农田安全灌溉研究进展[J].节水灌溉,2020(10): 91-95, 100.
- [2] 王诗景,黄冠华,杨建国,等.微咸水灌溉对土壤水盐动态与春小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010, 26(5): 27-33.
- [3] 朱成立,吕雯,黄明逸,等.生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J].农业机械学报,2019, 50(1): 226-234.
- [4] 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.
- [5] 朱瑾瑾,孙军娜,张振华,等.咸淡水交替灌溉对滨海盐碱土水盐运移的影响[J].水土保持研究,2019, 26(5): 113-117, 122.
- [6] 尉宝龙,邢黎明,牛豪震.咸水灌溉技术试验研究[J].山西水利科技,1999(3): 88-90.
- [7] 张帆,朱成立,黄明逸,等.咸淡水交替灌溉下灌水定额对土壤盐分及夏玉米生理生长指标的影响[J].灌溉排水学报,2021, 40(12): 61-69.
- [8] 郭淑豪,王军,佟长福,等.交替灌溉对地下水浅埋区水盐分布和玉米生育指标的影响[J].灌溉排水学报,2023, 42(12): 36-43.

-
- [9] 齐艳冰, 霍再林, 冯绍元, 等. 水肥盐耦合对制种玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S1): 6-9, 25.
 - [10] 柳斌辉, 张文英, 栗雨勤. 玉米耐盐性的鉴定评价[J]. 华北农学报, 2012, 27(S1): 101-105.
 - [11] 张红, 董树亭. 玉米对盐胁迫的生理响应及抗盐策略研究进展[J]. 玉米科学, 2011, 19(1): 64-69.
 - [12] 蒋静, 冯绍元, 霍再林, 等. 盐化土壤节水灌溉春玉米产量及耗水规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(5): 19-22.
 - [13] 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.
 - [14] 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 71-76.
 - [15] 邵建荣, 张凤华, 董艳, 等. 干旱区微咸水灌溉滴灌条件下典型土壤盐碱化影响因素[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 153(6): 222-227.
 - [16] 郭永昌. 连续多年地下微咸水灌溉对食葵土壤养分和微生物的影响[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 27-29.