

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.031

咸淡水交替灌溉对滨海垦区夏玉米生理生长的影响

朱成立^{1,2} 强超² 黄明逸² 翟亚明^{1,2} 吕雯²

(1. 南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学农业工程学院, 南京 210098)

摘要: 我国东部滨海地区拥有大量滩涂和微咸水资源, 但土壤含盐量高、淡水资源缺乏, 探究合理的咸淡水交替灌溉方法, 可以促进滨海垦区土地资源的高效利用。选取江苏省滨海垦区典型土壤, 使用3种不同矿化度(1, 3, 5 g/L)的微咸水在夏玉米3个不同生育期(壮苗期、拔节抽雄期、灌浆成熟期)进行咸淡水交替灌溉(“咸淡淡”、“淡咸淡”、“淡淡咸”)盆栽试验。结果表明, 微咸水灌溉后土壤上层积盐明显, 夏玉米叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)减小, 胞间 CO_2 浓度(C_i)由于气孔限制而减小, 但随着矿化度的增大, 非气孔限制引起 C_i 增大。微咸水灌溉后夏玉米叶片中过氧化氢(H_2O_2)和丙二醛(MDA)含量增加, 同时伴随着超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)酶活性的增强。高矿化度咸淡水交替灌溉抑制了玉米的生长和生产, 拔节抽雄期夏玉米耗水量大幅增加, 导致微咸水灌溉量增加, 盐胁迫最强烈, 致使“淡咸淡”的灌溉方式表现最差。夏玉米在灌浆成熟期的抗性增强, 此时微咸水灌溉对各生理指标影响较弱。在滨海垦区进行夏玉米种植, 可在壮苗期采用较低矿化度的微咸水进行灌溉, 而较高矿化度的微咸水仅适合在灌浆成熟期进行。

关键词: 夏玉米; 微咸水; 交替灌溉; 光合作用; 氧化应激; 产量

中图分类号: S275 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)12-0253-09

Effect of Alternate Irrigation with Fresh and Slight Saline Water on Physiological Growth of Summer Maize in Coastal Reclamation Area

ZHU Chengli^{1,2} QIANG Chao¹ HUANG Mingyi² ZHAI Yaming^{1,2} LÜ Wen¹

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-drainage and Agricultural Soil-water Environment in Southern China, Ministry of Education, Nanjing 210098, China

2. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Coastal areas in eastern China have a large amount of reclaimed land and slight saline water resources. In order to exploit the reasonable and sustainable utilization of them, a pot experiment was carried out to investigate the characteristics of soil salinity, photosynthesis parameters, oxidation parameters, antioxidant enzymes activities, growth, yield and water use efficiency of summer maize (*Zea mays* L.) subjected to three alternate sequences (i. e., BFF: in which maize was irrigated with saline water at the seedling stage and fresh water at other stages; FBF: in which saline water was irrigated at the jointing stage and fresh water at other stages; FFB: in which plants were watered with saline water at the reproductive stage and fresh water at other stages) with three levels (i. e., 1 was 1 g/L NaCl; 3 was 3 g/L NaCl; 5 was 5 g/L NaCl). The result showed that under the same salinity of saline water irrigation, the descending order of soil salt content distribution in upper layer was FBF, FFB and BFF. Net photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance (G_s) of summer maize leaves under slight saline water irrigation were decreased compared with that under fresh water irrigation throughout the whole growth period (CK). Under the same salinity irrigation, the descending order of P_n and G_s was FFB, BFF and FBF. Intercellular carbon dioxide concentration (C_i) was decreased due to stomatal limitation, but with the increase of irrigation water salinity, non-stomatal limitation caused C_i to increase in 5 g/L treatment. FBF5 had a maximum increase of 19.44% at 81 d and FFB5 had a minimum increase of 1.38% at 108 d. Hydrogen peroxide and malondialdehyde (MDA) in maize leaves under saline irrigation

收稿日期: 2018-06-28 修回日期: 2018-08-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)和国家自然科学基金青年基金项目(51409086)

作者简介: 朱成立(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事农业水土资源规划、高效灌排理论与技术研究, E-mail: clz@hhu.edu.cn

was higher than those under freshwater irrigation. At the same time, the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) were also increased. However, limitation of the activities of POD and CAT was observed in FBF5 treatment, but it was still higher than those of CK by 37.67% and 13.71%. Compared with CK, alternate irrigation with fresh and slight saline water inhibited the growth and production of maize, resulting in the reduction of plant height, leaf area, growth, yield and water use efficiency. In addition, these adverse effects were more evident in BFF and FBF, because the salt resistance of summer maize was not fully developed and it was more sensitive to salt stress caused by brackish water irrigation. Maize suffered from the most deleterious impact due to saline irrigation during the jointing stage, leading to the most loss of growth and yield. It was confirmed that although maize became more tolerance as crops developing, enhanced crop evapotranspiration also caused more intense salt stress at the jointing stage. Its increasing salt resistance was still insufficient to overcome the corresponding salt stress. In all alternate sequences, the order of water use efficiency (WUE) of summer maize from high to low was FBF, BFF and FFB. As the degree of salinity was increased, the WUE of FBF5 was the lowest, which was decreased by 38.04% compared with that of CK. Based on the analysis of the experimental results, 1 g/L and 3 g/L salinity water irrigation can be applied at the seedling stage with negligent negative impacts on maize production, and higher salinity irrigation can be used at the reproductive stage, while freshwater irrigation was more appropriate during the jointing stage.

Key words: summer maize; slight saline water; alternate irrigation; photosynthesis; oxidative stress; yield

0 引言

随着沿海地区经济的迅速发展,对土地资源的需求也日益增长。近年来,由于耕地占补平衡制度的推行,大量沿海滩涂被相继开垦用于农业生产,至今我国东部沿海滩涂围垦耕地面积已逾 2 600 km²^[1],利用这一潜在的土地资源以扩大农业生产已经引起了全球关注。新围滨海垦区土壤盐分含量较高,土壤质量较差,对作物的生长及产量有较大影响^[2]。此外,滨海围垦活动使得垦区从海洋系统向陆地系统转化^[3],因其地下水位浅、矿化度高,加之灌排管理不善等,极易发生土壤次生盐渍化。同时,水资源时空分布不均致使部分滨海地区经常发生季节性干旱。因此,淡水资源缺乏和不稳定性加剧了沿海农业水资源的供需矛盾,阻碍了沿海农业的发展。

滨海地区微咸水分布广,储量大,研究表明:利用微咸水灌溉可以有效解决淡水资源不足的问题,提高粮食产量^[4-5],但过多地利用微咸水进行灌溉,会增加土壤中的盐分,导致土壤退化,从而对土地资源的可持续利用产生不利的影响^[6-7]。作物不同的生育期对土壤的耐盐程度不同,如果土壤含盐量超过了作物的耐盐程度,就会影响作物体内部分重要的代谢过程,包括光合作用、呼吸作用和植物体内酶活性等^[8-10]。此外,盐分胁迫还通过增加活性氧物质对植物造成二次氧化应激,导致玉米叶片净光合速率降低,气孔导度减小,胞间 CO₂ 浓度增大^[11],植物体内活性氧含量及膜脂过氧化程度上升,抗氧化

酶活性也随之升高,但随着胁迫的增强,活性氧消除速度低于活性氧产生速度,对植物细胞造成伤害,抑制植物生长^[12]。因此,采用的微咸水灌溉方式以减轻盐分胁迫造成的植物损伤和减产至关重要。已有研究表明,微咸水与淡水交替灌溉是一种有效的方式^[13-14]。咸淡水交替灌溉的重点在于选择作物耐盐生长阶段进行微咸水灌溉,而在作物盐分胁迫敏感阶段灌溉淡水。玉米作为对盐分中度敏感的作物^[15],是滨海地区的主要粮食作物之一,是用于研究盐分胁迫的良好材料。本文针对我国滨海垦区水土资源现状,采集具有区域代表性的垦区土壤,通过盆栽试验,研究不同矿化度微咸水灌溉模式下,夏玉米不同生育阶段对盐分胁迫的抗性,以确定适宜夏玉米生长的咸淡水交替灌溉模式,为滨海垦区水土资源农业可持续利用提供科学依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 年 6 月 23 日—10 月 29 日在河海大学节水园区节水与农业生态试验场中的大棚内进行,试验区地处北纬 31°86′、东经 118°60′,属亚热带湿润气候。

1.2 供试土壤基本性质

根据《国际制土壤质地分级标准》,供试土壤为滨海垦区粉砂质粘壤土,取自东南沿海的盐城市东川农场滨海垦区(北纬 32°96′、东经 120°87′),与试验地点同属亚热带湿润气候,年平均气温与年降雨量相近。土壤基本物理性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of experimental soil

土壤质地	土壤粒径分布/%			土壤容重 γ_s / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水率 / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	电导率 / ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)
	砂粒 (0.02 ~ 2 mm)	粉粒 (0.002 ~ 0.02 mm)	黏粒 (0 ~ 0.002 mm)			
粘壤土	24.77	45.16	30.07	1.38	31.9	2.18

注:田间持水率以质量分数计。

1.3 试验设计

采用直径 35 cm、高 65 cm 的圆桶进行夏玉米避雨盆栽试验,供试品种为当地广泛种植的苏玉 29。每盆使用 79.7 kg 土壤,土壤经过室外风干后过 2 mm 筛,然后均匀地填充至 60 cm 高度,平均土壤容重为原农田实际土壤容重 1.38 g/cm^3 。于桶的底部用电钻在四周钻出 4 个直径为 2 cm 的排水孔。玉米生长所需的肥料在播种前被均匀地混合到 0 ~ 20 cm 的土壤中。

以玉米不同生育期灌溉不同矿化度的微咸水为双因素进行完全试验,设置 1 个全生育期灌溉淡水 (0.12 g/L NaCl) 对照处理 (CK)。玉米种子于 2017 年 6 月 23 日播种,结合往年试验及当地灌溉经验,

根据作物耗水量将整个生育期划分为 3 个阶段:壮苗期 (第 3 叶至第 8 叶期,19 ~ 41 d)、拔节抽雄期 (第 8 叶至抽雄期,42 ~ 83 d) 和灌浆成熟期 (吐丝期至成熟期,84 ~ 129 d),灌溉期同生育期^[16-17]。本次试验共设置 3 种咸淡交替灌溉方式:①“咸淡淡” (BFF) 指壮苗期灌溉微咸水,其他时期灌溉淡水。②“淡咸淡” (FBF) 指拔节抽雄期灌溉微咸水,其他时期灌溉淡水。③“淡淡咸” (FFB) 指灌浆成熟期灌溉微咸水,其他时期灌溉淡水,并设置整个生长季淡水灌溉的对照处理 (CK)。微咸水矿化度设 3 种水平盐分含量 (1、3、5 g/L)。共 10 个处理,每个处理 3 次重复,共计 30 个盆栽进行试验,具体灌溉方式见表 2。

表 2 咸淡水交替灌溉试验方案

Tab. 2 Experimental design for alternate irrigation with fresh and brackish water

生育期	g/L									
	CK	BFF1	BFF3	BFF5	FBF1	FBF3	FBF5	FFB1	FFB3	FFB5
壮苗期	F	1	3	5	F	F	F	F	F	F
拔节抽雄期	F	F	F	F	1	3	5	F	F	F
灌浆成熟期	F	F	F	F	F	F	F	1	3	5

注:F 代表淡水灌溉,数字代表不同矿化度的微咸水灌溉。

播种前采用淡水灌溉,使土壤含水率达到 70% ~ 80% 的田间持水率,以保证出芽率及玉米幼苗的前期生长。每盆播种 5 颗玉米种子,5 d 后全部出苗,在三叶期时定苗。不同矿化度微咸水均由 NaCl 配置而成。每隔 3 d 用便携式时域反射仪 (TDR) 监测土壤含水率 (SWC)。将一对 TDR 探针分别水平放置在 0 ~ 15 cm、15 ~ 30 cm、30 ~ 45 cm、45 ~ 60 cm

土壤隔壁的中部,测定 8 个 TDR 探针平均土壤含水率,以确定是否需要灌溉。壮苗期土壤含水率控制在田间持水率的 65% ~ 80%,拔节抽雄期和灌浆成熟期土壤含水率控制在田间持水率的 75% ~ 90%,每次灌溉 2.5 L 水量,成熟期不再灌水,玉米在第 128 天后收获,具体灌溉制度见表 3。

表 3 各处理灌水定额

Tab. 3 Irrigation amount for each irrigation treatment

处理	7月12日	7月19日	7月30日	8月8日	8月11日	8月23日	8月29日	9月3日	9月10日	9月16日	9月22日	9月28日	10月7日
CK	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
BFF1	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
BFF3	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
BFF5	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
FBF1	2.5	2.5	2.5	2.5 [#]	2.5	2.5	2.5	2.5					
FBF3	2.5	2.5	2.5	2.5 [#]	2.5	2.5	2.5	2.5					
FBF5	2.5	2.5	2.5	2.5 [#]	2.5	2.5	2.5	2.5					
FFB1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5 [#]
FFB3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5 [#]
FFB5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5 [#]	2.5 [#]

注:#表示灌溉微咸水,其他为灌溉淡水,数字代表灌溉水量。

1.4 指标测定方法

(1) 土壤含盐量

在最后一次灌水结束 2 d 后用土钻分层 (0 ~ 15 cm、15 ~ 30 cm、30 ~ 45 cm、45 ~ 60 cm) 取土进行测量,土样经风干、充分研磨后过 1 mm 筛,采用土水体积比 1:5 的方法配制和提取土壤饱和浸提液,用 DS-307A 型电导率仪测定土壤饱和浸提液的电导率 (ECe)。

(2) 光合作用交换参数

玉米出苗 14 d 后以及 39 d (壮苗期灌水结束后)、63 d (拔节抽雄期灌水 3 次后)、81 d (拔节抽雄期灌水结束后)、108 d (灌浆成熟期灌水结束后) 时在自上向下数第 3 个完全展开的叶片上,分别测定对照处理和 3 个微咸水盐分处理的玉米光合作用、氧化参数和抗氧化酶活性。在晴天观测日的 09:00—11:00,采用 TPS-2 型便携式光合作用测定系统 (PP, Systems, 美国) 在 $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下测量各处理的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)。

(3) 氧化参数和抗氧化酶活性

采用分光光度法测定玉米叶片中的过氧化氢 (H_2O_2) 含量^[18];TBA 法测定丙二醛 (MDA) 含量^[18];NBT 光化还原法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性,以抑制 NBT 光化还原 50% 为一个活力单位表示^[19];愈创木酚法测定过氧化物酶 (POD) 活性,以光吸收增加 0.001 min^{-1} 为一个酶活性单位来计算^[20];紫外吸收法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性,以每分钟 A_{240} (240 nm 处吸光度) 减少 0.1 酶量为一个酶活性单位^[20]。SOD、POD 和 CAT 活性的测定结果按蛋白质含量以叶质量的 U/g 表示。

(4) 生长指标及水分利用效率

在全生育期结束后,测定玉米株高和叶面积。株高采用卷尺测量植株自然状态下最高点至根茎部的垂直高度。叶面积采用 LI-3000A 型叶面积仪测

定玉米的第 2 片展开叶。

作物蒸散量 (ET) 根据各生育期和整个季节盆内土壤水分平衡估算^[21]。试验中无降水和径流,排水可忽略不计。土壤水分平衡方程为

$$ET = I + V(\theta_i - \theta_f) \quad (1)$$

式中 I ——时段内的总灌溉量, L

V ——土壤体积, L

θ_i ——TDR 测量的初始土壤含水率, %

θ_f ——TDR 测量的最终土壤含水率, %

收集茎叶、洗涤过的根和玉米果实,先在 105°C 干燥箱中杀青 2 h,后在 65°C 干燥箱中干燥至恒定质量。测定茎叶、根的质量以及籽粒产量。玉米的水分利用效率 (WUE) 计算为

$$WUE = W/ET \quad (2)$$

式中 W ——地上干物质量, g

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 进行记录和整理,采用 SPSS 20.0 统计软件对不同灌溉水矿化度和不同咸淡水交替灌溉方式 2 个主效应进行方差分析,采用 Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 咸淡水交替灌溉对滨海垦区土壤盐分的影响

咸淡水交替灌溉对土壤盐分的影响如图 1 所示。土壤含盐量随灌溉水矿化度的增加而增加,0 ~ 15 cm、15 ~ 30 cm 土层的土壤盐分增幅较大。FBF 处理的上层土壤含盐量上升最为明显,其次是 FFB 处理,而 BFF 处理则较低。BFF5 处理的电导率在玉米主根区 (0 ~ 15 cm、15 ~ 30 cm) 相比 CK 处理分别上升了 18.4% 和 174.2%,FBF5 处理为 84.1% 和 323.6%,FFB5 处理为 52.2% 和 220.4%。

2.2 咸淡水交替灌溉对夏玉米叶片光合作用交换参数的影响

如表 4 所示,灌溉处理前,各处理夏玉米叶片净

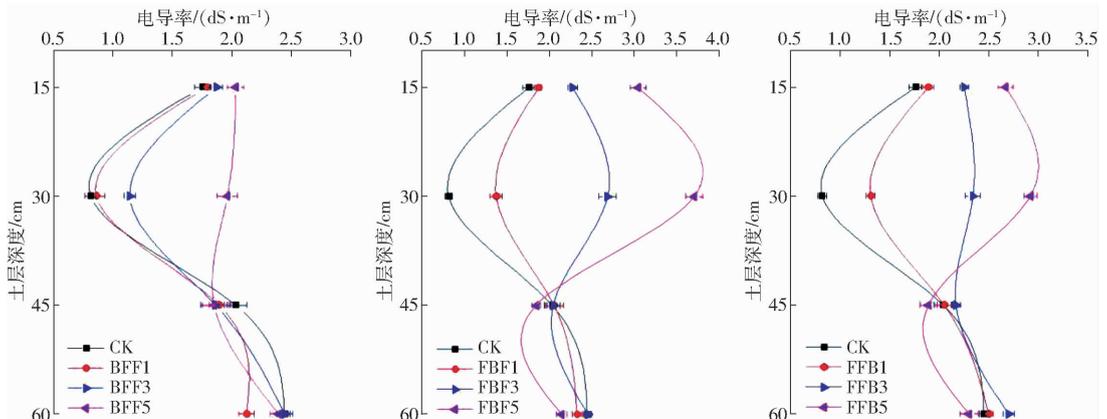


图 1 不同灌水处理各层土壤饱和浸滴液电导率

Fig. 1 Electrical conductivity of soil saturated extract in different soil layers with different irrigation treatments

光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)及气孔导度(G_s)均无明显差异。灌溉水矿化度对玉米各生育期光合作用交换参数(P_n 、 C_i 、 G_s)具有显著影响($P < 0.01$)。光合作用能力随着玉米的生长而增强,在拔节抽雄期达到峰值,在灌浆成熟期减弱。由图 2 可以看出,随着矿化度的增加,全生育期的 P_n 、 G_s 呈

逐渐减小趋势。BFF 和 FFB 处理中,玉米的 C_i 在灌溉 0.12、1.3 g/L 微咸水时下降,在灌溉 5 g/L 微咸水时上升,FBF 处理玉米的 C_i 在第 63 天时规律与前者相同,而在第 81 天时则在灌溉 0.12、1 g/L 微咸水时下降,在灌溉 3、5 g/L 微咸水时上升。相同矿化度微咸水灌溉下,灌溉时期对光合作用交换参数

表 4 灌溉方式与微咸水矿化度对各参数影响的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient between irrigation method and salinity of brackish water on each parameter

参数	灌溉前(19 d)		壮苗期(39 d)		拔节抽雄期(63 d)		拔节抽雄期(81 d)		灌浆成熟期(108 d)	
	灌溉方式	矿化度	灌溉方式	矿化度	灌溉方式	矿化度	灌溉方式	矿化度	灌溉方式	矿化度
P_n	0.482	0.585	***	***	**	***	***	***	**	**
G_s	0.542	0.186	***	***	***	***	***	***	**	***
C_i	0.741	0.944	0.707	***	0.886	**	*	***	0.060	**
H_2O_2 含量	0.708	0.604	***	***	**	***	***	***	***	0.333
MDA 含量	0.386	0.208	***	***	***	***	***	***	**	***
SOD 活性	0.569	0.313	***	***	***	***	***	***	***	***
POD 活性	0.826	0.862	***	**	***	***	***	***	***	***
CAT 活性	0.637	0.986	**	*	***	**	***	**	0.07	***

注: ***表示在 $P < 0.001$ 水平上显著, **表示在 $P < 0.01$ 水平上显著, *表示在 $P < 0.05$ 水平上显著。

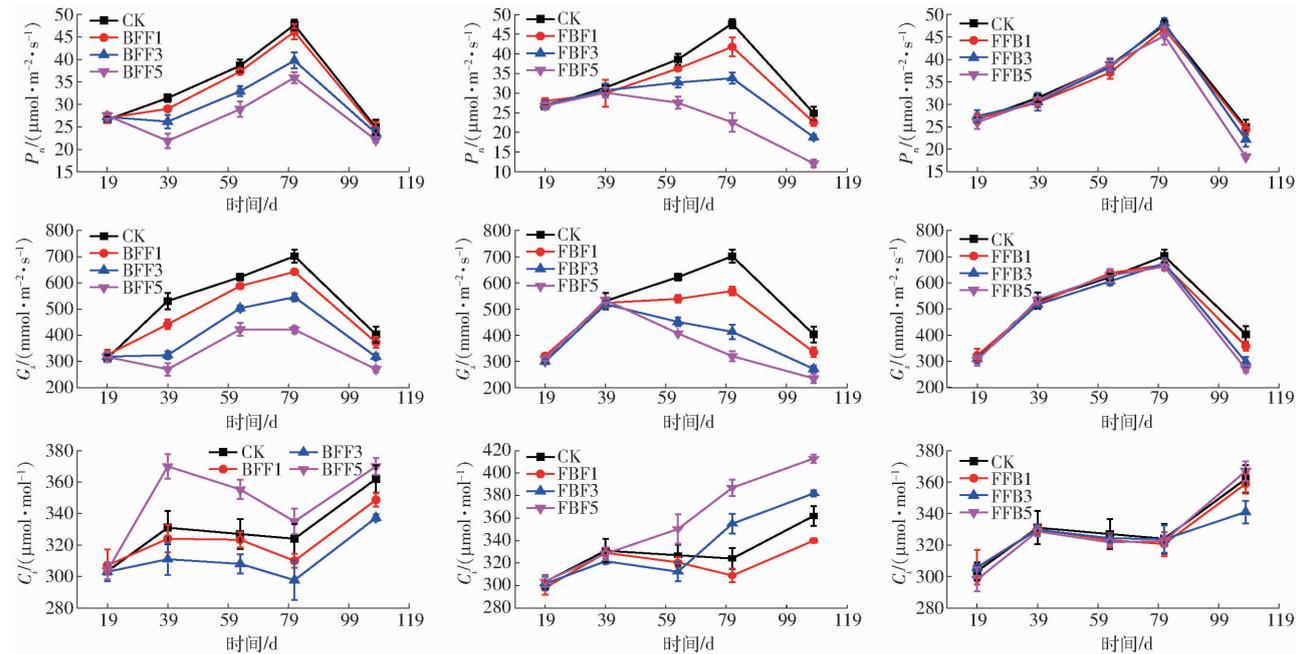


图 2 不同灌溉处理下光合作用参数变化

Fig. 2 Changes of photosynthetic parameters under different irrigation treatments

影响由大到小表现为 FBF、BFF、FFB。

与全生育期淡水灌溉处理(CK)相比,在第 108 天时 FFB1 的 P_n 降低幅度最小,为 2.14%,第 81 天 FBF5 降低幅度最大为 52.69%。FFB1 处理 G_s 降低幅度最小,为 11.17%,FBF5 同样在第 81 天降低幅度最大,为 54.42%。玉米叶片中的 C_i 在高盐胁迫下有明显的上升趋势,BFF5、FBF5、FFB5 的 C_i 均高于 CK,其中 FBF5 在第 81 天时上升幅度最大,为 19.44%,FFB5 上升幅度最小,为 1.38%。在灌溉微咸水水量相同的情况下(39 d 与 63 d),63 d 玉米

光合作用参数相较 CK 变化幅度均小于 39 d,尽管 FFB 处理在第 108 天已经灌溉了 4 次微咸水,但其相对 CK 变化幅度仍小于其他处理。

2.3 咸淡水交替灌溉对夏玉米叶片氧化参数和抗氧化酶活性的影响

灌溉不同矿化度微咸水对玉米的 H_2O_2 、MDA 含量和抗氧化酶活性有显著影响($P < 0.05$),不同微咸水处理下夏玉米叶片氧化参数变化如图 3 所示。在对照处理(CK)中,玉米叶片中 H_2O_2 含量整个生育期呈下降趋势,MDA 含量整个生育期呈上升

趋势。相同灌溉方式下,玉米中的 H_2O_2 含量和 MDA 含量随着灌溉水矿化度增大而增大,且均在 FBF5 处理第 81 天达到最大值,分别高出同时期 CK 处理的 82.56% 和 76.01%。相同矿化度不同灌溉

方式下,灌溉微咸水玉米叶片中 H_2O_2 和 MDA 含量增幅由大到小表现为 FBF、BFF、FFB。其中 FFB 与 CK 的 H_2O_2 含量以及 FFB1、FFB3 与 CK 的 MDA 含量差异不显著 ($P > 0.05$)。

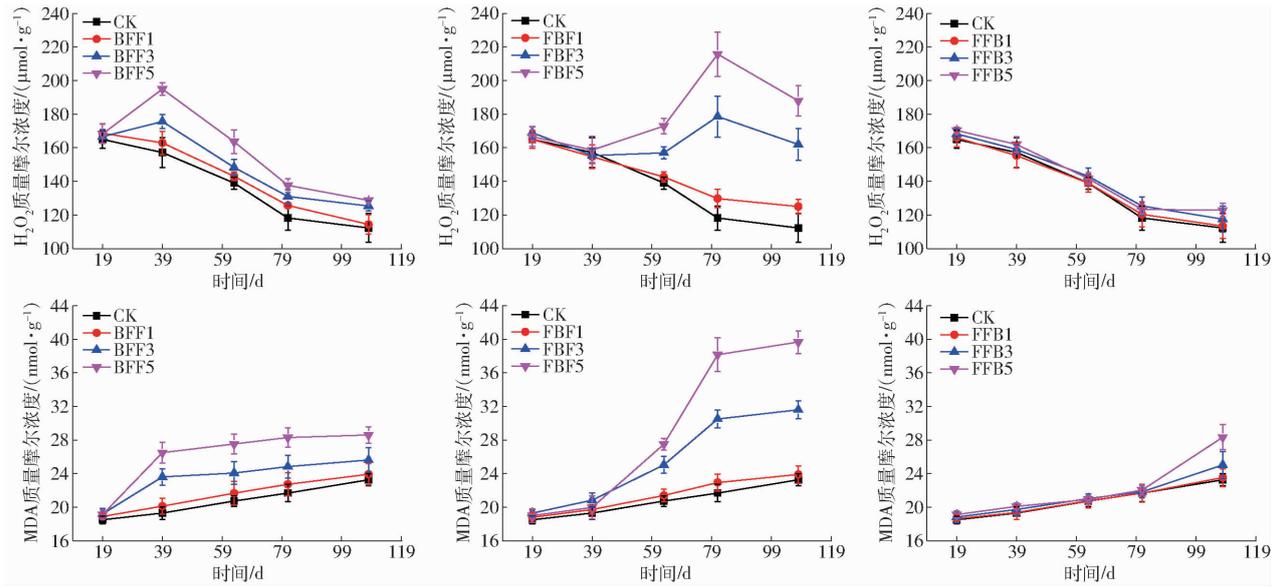


图3 不同灌水处理下玉米叶片氧化参数变化

Fig. 3 Changes of oxidation parameters of maize leaves under different irrigation treatments

夏玉米不同生育期灌溉水矿化度对抗氧化酶活性的影响如图4所示,玉米叶片中 SOD 和 CAT 活性均在 FBF 处理第 81 天达到峰值,在灌浆成熟期减弱,而 POD 活性在整个生育期呈上升趋势。相同灌溉方式下,抗氧化酶活性随着灌溉水矿化度增大而

增大,且灌浆成熟期比壮苗期和拔节抽雄期增长更为明显。FBF5 处理存在对部分酶活性的限制,相比 FBF3 处理,POD 活性以及 CAT 活性在第 81 天分别下降了 11.27% 和 22.42%,但两者仍比同时期 CK 处理的酶活性高出 37.67% 和 13.71%。

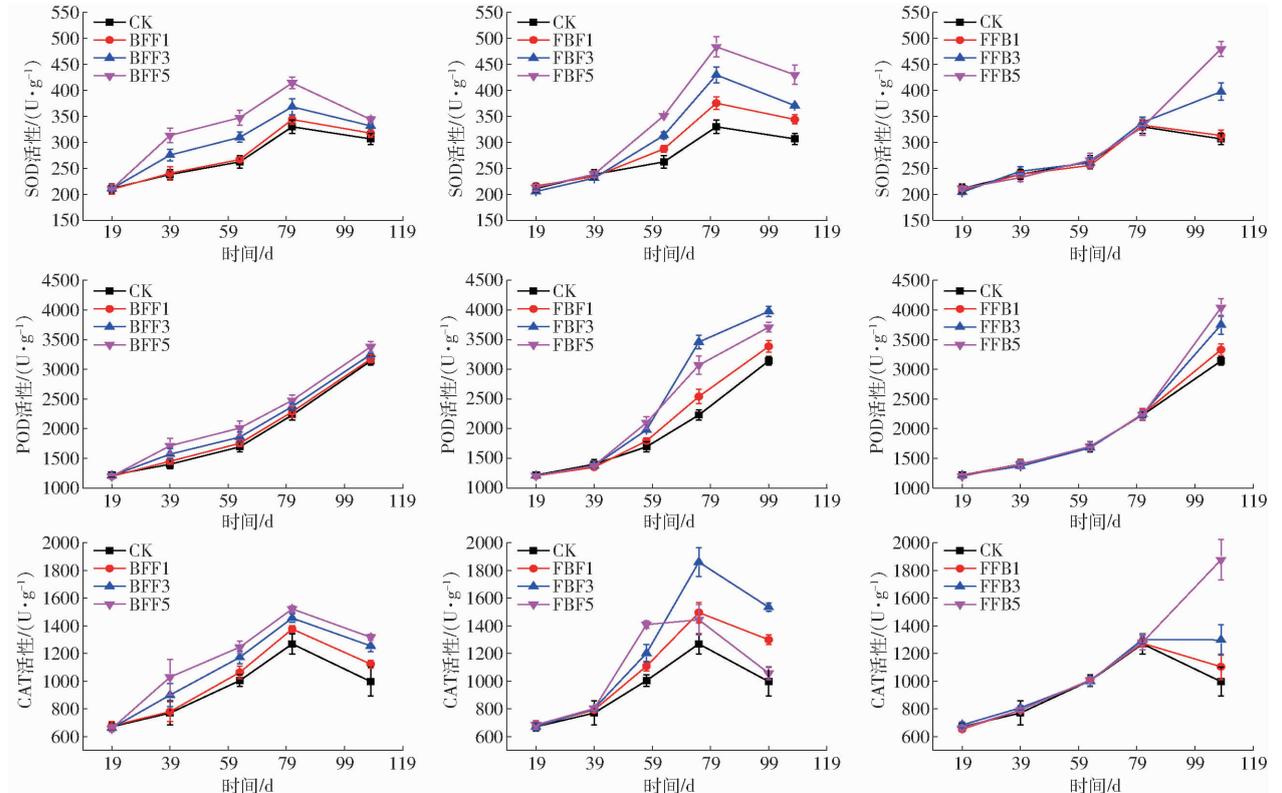


图4 不同灌水处理下玉米叶片抗氧化酶活性变化

Fig. 4 Changes of antioxidant enzyme activities in maize leaves under different irrigation treatments

2.4 咸淡水交替灌溉对夏玉米生长和产量的影响

表 5 表明,不同灌溉方式下夏玉米的株高、叶面积、地上干物质量、籽粒产量以及水分利用效率均随灌溉水矿化度增加而降低。对照处理和灌溉 1 g/L 微咸水处理株高、叶面积等无显著差异。FFB 处理株高、叶面积以及地上干物质量与同矿化度下其他

处理相比较,但随着灌溉水矿化度增加,FFB 处理籽粒产量下降幅度大于 BFF 的处理。FBF 处理各项参数减少幅度最大,其中 FBF5 处理的各收获参数均为所有处理中的最小值,水分利用效率相比 CK 减小了 38.04%。相同矿化度微咸水灌溉下,水分利用效率由高到低为 FFB、BFF、FBF。

表 5 不同处理对夏玉米生长指标、产量及水分利用效率的影响

Tab.5 Effects of different treatments on growth, yield and water use efficiency of summer maize

处理	株高/cm	叶面积/cm ²	地上干物质量/(g·株 ⁻¹)	籽粒产量/(g·株 ⁻¹)	水分利用效率/(kg·m ⁻³)
CK	(172.5 ± 6.81) ^d	(406.3 ± 16.89) ^{de}	(268.7 ± 13.62) ^f	(86.3 ± 7.01) ^d	(6.12 ± 0.21) ^e
BFF1	(169.9 ± 8.52) ^{cd}	(400.9 ± 9.00) ^{de}	(257.5 ± 9.18) ^{ef}	(85.8 ± 5.39) ^d	(5.86 ± 0.45) ^{cd}
BFF3	(163.5 ± 5.49) ^{bed}	(382.8 ± 18.25) ^{cd}	(239.7 ± 15.98) ^{ede}	(81.3 ± 5.10) ^{cd}	(5.63 ± 0.29) ^{cd}
BFF5	(152.4 ± 6.58) ^b	(371.7 ± 15.03) ^c	(223.8 ± 7.77) ^c	(75.2 ± 4.88) ^{bcd}	(5.46 ± 0.41) ^{cd}
FBF1	(167.5 ± 5.69) ^{cd}	(394.3 ± 10.22) ^{cde}	(233.1 ± 9.11) ^{cd}	(77.9 ± 6.49) ^{cd}	(5.34 ± 0.11) ^c
FBF3	(157.4 ± 8.46) ^{bc}	(346.2 ± 12.75) ^b	(196.1 ± 4.14) ^b	(63.2 ± 6.63) ^b	(4.63 ± 0.12) ^b
FBF5	(140.6 ± 6.45) ^a	(284.8 ± 23.03) ^a	(152.7 ± 0.98) ^a	(49.7 ± 2.52) ^a	(3.79 ± 0.18) ^a
FFB1	(175.2 ± 9.66) ^d	(411.6 ± 11.44) ^e	(266.3 ± 1.31) ^f	(87.2 ± 9.78) ^d	(5.99 ± 0.29) ^{cd}
FFB3	(170.4 ± 3.57) ^{cd}	(398.8 ± 8.85) ^{de}	(253.2 ± 17.41) ^{def}	(79.6 ± 10.27) ^{cd}	(5.97 ± 0.45) ^{cd}
FFB5	(168.5 ± 6.30) ^{cd}	(390.6 ± 7.18) ^{cde}	(238.3 ± 23.19) ^{cde}	(70.9 ± 7.35) ^{bc}	(5.83 ± 0.58) ^{cd}

注:数据为平均值 ± 标准差,同一列数据后不同小写字母表明不同矿化度处理下差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

微咸水灌溉会增加土壤中盐分累积,对土壤性质和作物生长产生不利影响,通过咸淡水交替灌溉则能有效降低土壤中灌溉水带来的盐分^[22]。本研究发现,BFF 处理上层土壤盐分累积较少,这可能是后期的淡水灌溉使土壤中的盐分向下层聚集。FBF 和 FFB 处理的土壤盐分积累更为明显,FFB 处理由于后期没有淡水淋洗,导致土壤盐分累积较高,尽管 FBF 处理最后阶段使用淡水灌溉,但上层仍有更多的盐分累积,这可能与土壤前期盐分累积,入渗能力下降有关,导致淡水灌溉时,盐分向下运移受到阻碍^[23]。因此 FBF 和 FFB 处理在下一轮种植前仍需采用淡水灌溉进行淋洗,以保证土地的可持续利用。

光合作用是作物物质积累的重要方式,也是作物产量形成的基础,其对环境胁迫的变化较为敏感,可有效地评价作物对环境胁迫的抗性^[24]。微咸水灌溉处理的夏玉米叶片光合作用受气孔因素和非气孔因素的影响, C_i 的变化可以作为区分光合速率降低是气孔还是非气孔因素的主要依据^[25-26]。其中气孔限制在低浓度微咸水灌溉处理和 FFB 处理中比较显著,随着灌溉水矿化度的增加, P_n 逐渐下降, G_s 也随之下降,与 C_i 变化趋势一致,说明气孔关闭限制了玉米叶片的光合作用能力,主根区的盐分累积导致作物渗透失衡,引发气孔反应,阻碍 CO_2 进入叶绿体内,降低了 CO_2 的可用性^[27]。而在 BFF 和 FBF 灌溉高矿化度微咸水的处理中,尽管出现了 P_n

和 G_s 大幅下降,但伴随着 C_i 的上升,说明是非气孔因素引起光合作用的大幅减小,导致 P_n 的降低,这可能与高盐条件下叶绿素的降解有关^[28]。灌溉水量相同时,BFF 处理各光合作用交换参数相对于 CK 的变化幅度均大于 FBF,说明夏玉米在壮苗期灌溉微咸水相较拔节抽雄期灌溉微咸水更为敏感,但是由于拔节抽雄期作物需水量较大导致灌水量较大,以及夏玉米主根区逐渐延伸至高含盐量土层,盐分胁迫加剧^[29],导致最终在第 81 天时 FBF 的处理对光合作用的抑制更为明显。

氧化胁迫是盐胁迫的重要组成部分,它严重破坏作物正常的细胞代谢^[30]。盐胁迫限制了作物体内的卡尔文循环,使叶绿体承受过多的激发能,激发能在叶绿素分子之间传递时易形成³Chl,与 O_2 反应生成单线态氧(1O_2)^[31-32],从而增加了活性氧的产生,进而导致光合作用抑制、氧化损伤和植物生长受阻^[28,33]。植物体内的过氧化氢(H_2O_2)含量和丙二醛(MDA)含量通常被视作评估氧化损伤程度的指标。本文通过分析玉米叶片中氧化应激指标进一步探究滨海垦区夏玉米对咸淡水交替灌溉的响应。在本试验中,两个氧化参数随着灌溉水矿化度上升而上升,同矿化度微咸水灌溉下 FBF 处理在第 81 天时 H_2O_2 和 MDA 的含量最大且增幅最高,说明夏玉米此时受到的氧化胁迫最为严重。FFB 处理的氧化参数增幅较小,这可能与氧化损伤的减轻或酶系统的发育完全有关^[11]。在盐胁迫下,玉米体内活性氧代谢失调,包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶

(POD)和过氧化氢酶(CAT)等内源活性氧清除剂构成的酶保护系统被激活,以减缓胁迫对玉米造成的危害,随着酶系统的逐渐发育完善这种趋势在拔节抽雄期和灌浆成熟期灌溉微咸水的处理更加明显。然而,在FBF5的处理中,POD和CAT的酶活性有下降趋势,可能是因为过量的盐分胁迫引起的离子毒害破坏了酶结构和蛋白质的合成^[11]。这些氧化应激指标再次反映了夏玉米在壮苗期对盐分胁迫最为敏感,但拔节抽雄期灌溉高矿化度微咸水受到的损伤最大。

灌溉微咸水导致水分利用效率下降主要是由于抑制了光合作用,减少了生物量。玉米壮苗期对盐分胁迫最为敏感,但BFF处理能够比FBF处理获得更高的产量,可能是由于后续淡水灌溉减轻了负面影响。相同矿化度微咸水灌溉下,FBF的处理生物量最小,在这个时期,灌溉微咸水量较大,更高的盐胁迫导致光合作用降低幅度更大,玉米生长受到抑制。FBF处理中,尽管株高、叶面积、地上干物质量大于BFF,但玉米籽粒质量随着矿化度的上升而下降的幅度大于BFF,可能是由于这个时期盐胁迫下籽粒发育中的库限制和酸性转化酶活性降低^[33]。

然而,这个时期灌溉微咸水生物量的损失是同矿化度处理下最小的,表现出更高的水分利用效率。

4 结束语

以滨海垦区夏玉米为研究对象,进行了不同矿化度咸淡水交替灌溉对土壤盐分含量、玉米光合作用交换参数、氧化参数、抗氧化酶活性、生长指标和水分利用效率的影响试验。结果表明,壮苗期夏玉米对微咸水灌溉土壤表层积盐较少,虽然此时玉米对盐分胁迫最为敏感,但是由于拔节抽雄期需水量较大,灌溉微咸水造成的土壤盐分累积更高,盐分胁迫更强,光合作用能力下降最显著,水分利用效率最低。相较而言,灌浆成熟期灌溉微咸水对光合作用抑制较小,氧化损伤较低,且随着酶系统的发育完善,抗氧化酶活性在遭受盐胁迫时上升幅度也有所提高。结合试验结果分析,在滨海垦区采用微咸水灌溉夏玉米,可在壮苗期采用较低矿化度的微咸水进行灌溉,而较高矿化度的微咸水仅适合在灌浆成熟期进行,在拔节抽雄期仅适合使用淡水进行灌溉,同时需要通过非生育期降雨或灌溉淋洗以降低土壤次生盐碱化的风险。

参 考 文 献

- ZHANG Huan, WU Pengbao, YIN Aijing, et al. Organic carbon and total nitrogen dynamics of reclaimed soils following intensive agricultural use in eastern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 235: 193–203.
- 陈金海,李艳丽,王磊,等. 两种基于芦苇秸秆还田的改良措施对崇明东滩围垦土壤理化性质和微生物呼吸的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011,30(2): 307–315.
- CHEN Jinhai, LI Yanli, WANG Lei, et al. Effect of two improving measures based on returning phragmites communis straw on soil phy-chemical properties and microbial respiration of the reclaimed lands in Chongming Dongtan, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2011,30(2): 307–315. (in Chinese)
- 王琪琪,濮励杰,朱明,等. 沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究:以江苏省如东县为例[J]. *地理科学*, 2016,36(2): 256–264.
- WANG Qiqi, PU Lijie, ZHU Ming, et al. Soil quality evolution in coastal reclamation zones: a case study of Rudong County of Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*,2016,36(2): 256–264. (in Chinese)
- A TEF H. General advancement of research on saline irrigation practices and management[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1993, 9(3): 134–137.
- 李法虎,BENHUR M,KEREN R. 劣质水灌溉对土壤盐碱化及作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2003,19(1): 63–66.
- LI Fahu, BENHUR M, KEREN R. Effect of marginal water irrigation on soil salinity, sodicity and crop yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003,19(1): 63–66. (in Chinese)
- CHEN Sheng, ZHANG Zhanyu, WANG Zhenchang, et al. Effects of uneven vertical distribution of soil salinity under a buried straw layer on the growth, fruit yield, and fruit quality of tomato plants[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 203: 131–142.
- HIRICH A, JELLOUL A, CHOUKR A R, et al. Saline water irrigation of quinoa and chickpea: seedling rate, stomatal conductance and yield responses[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2015, 200(5): 378–389.
- ANGELO B, GABRIELE B, GIACOMO M, et al. Complementary techniques to assess physical properties of a fine soil irrigated with saline water[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(7): 1797–1807.
- SÁNCHEZDÍAZ M. Drought enhances maize chilling tolerance. II. Photosynthetic traits and protective mechanisms against oxidative stress[J]. *Physiologia Plantarum*, 2010, 117(4): 540–549.
- YANG Xinghong. Photosynthesis is improved by exogenous glycinebetaine in salt-stressed maize plants [J]. *Physiologia Plantarum*, 2010, 124(3): 343–352.
- ESTRADA B, AROCA R, BAREA J M, et al. Native arbuscular mycorrhizal fungi isolated from a saline habitat improved maize antioxidant systems and plant tolerance to salinity[J]. *Plant Science*, 2013, 201–202(1): 42–51.

- 12 MALASH N, FLOWERS T J, RAGAB R. Effect of irrigation systems and water management practices using saline and non-saline water on tomato production[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1): 25–38.
- 13 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.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 71–76. (in Chinese)
- 14 KANG Yaohu, CHEN Ming, WAN Shuqi. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var. *ceratina Kulesh*) in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(9): 1303–1309.
- 15 HANWAY J J. Corn growth and composition in relation to soil fertility: II. Uptake of N, P, and K and their distribution in different plant parts during the growing season[J]. *Agronomy Journal*, 1962, 54(3): 351–361.
- 16 MAAS E V, HOFFMAN G J, CHABA G D, et al. Salt sensitivity of corn at various growth stages[J]. *Irrigation Science*, 1983, 4(1): 45–57.
- 17 VELIKOVA V, YORDANOV I, EDREVA A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants; protective role of exogenous polyamines. [J]. *Plant Science*, 2000, 151(1): 59–66.
- 18 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- 19 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 20 LI Xiaopeng, CHANG S X, SALIFU K F. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review[J]. *Environmental Reviews*, 2014, 22(1): 1–10.
- 21 MINHAS P S, BAJWA M S. Use and management of poor quality waters for the rice-wheat based production system[J]. *Journal of Crop Production*, 2001, 4(1): 273–306.
- 22 郭太龙, 迟道才, 王全九, 等. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊 1): 84–87.
GUO Tailong, CHI Daocai, WANG Quanjiu, et al. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Supp. 1): 84–87. (in Chinese)
- 23 YUN Jianying, YANG Jiading, ZHAO Halin. Research progress in the mechanism for drought and high temperature to affect plant photosynthesis[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(3): 641–648.
- 24 许大全. 光合作用效率[J]. *植物生理学通讯*, 1988(5): 3–9.
XU Daquan. Photosynthetic efficiency[J]. *Plant Physiology Communications*, 1988(5): 3–9. (in Chinese)
- 25 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 节水灌溉水稻叶片胞间 CO₂ 浓度及气孔与非气孔限制[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 76–80.
XU Junzeng, PENG Shizhang, WEI Zheng, et al. Intercellular CO₂ concentration and stomatal or non-stomatal limitation of rice under water saving irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 76–80. (in Chinese)
- 26 GEISLER N, HUSSIN S, KOYRO H. Elevated atmospheric CO₂ concentration ameliorates effects of NaCl salinity on photosynthesis and leaf structure of *Aster tripolium* L. [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(1): 137–151.
- 27 KOYRO H W, HUSSAIN T, HUCHZERMEYER B, et al. Photosynthetic and growth responses of a perennial halophytic grass *Panicum turgidum* to increasing NaCl concentrations[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2013, 91: 22–29.
- 28 ZHU Chengli, HUANG Mingyi, ZHAI Yaming, et al. Response of gas exchange and chlorophyll fluorescence of maize to alternate irrigation with fresh- and brackish water[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2017, 67(5): 474–484.
- 29 IMLAY J A. The molecular mechanisms and physiological consequences of oxidative stress: lessons from a model bacterium[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, 11(7): 443–454.
- 30 ASADA K, HEBER U, SCHREIBER U. Electron flow to the intersystem chain from stromal components and cyclic electron flow in maize chloroplasts, as detected in intact leaves by monitoring redox change of P700 and chlorophyll fluorescence[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1993, 34(1): 39–50.
- 31 OSMOND C B. What is photoinhibition? Some insights from comparisons of shade and sun plants [C] // *Photoinhibition of Photosynthesis: from Molecular Mechanisms to the Field*, 1994: 1–24.
- 32 ASHRAF M. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers [J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(1): 84–93.
- 33 MUHAMMAD F, HUSSAIN M, WAKEEL A, et al. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 461–481.