



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

不同氮肥与矿化度水平微咸水喷灌对冬小麦光合特征及产量的影响

王罕博, 张栓堂, 焦艳平, 陈文彬, 李洁

引用本文:

王罕博, 张栓堂, 焦艳平, 等. 不同氮肥与矿化度水平微咸水喷灌对冬小麦光合特征及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 99–106.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0745>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外源硒对川党参生长的影响及其可能作用机制

周武先, 刘翠君, 段媛媛, 张美德, 艾伦强, 魏海英, 张雅娟

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 618–625 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0382>

芸苔素内酯·吡唑乙酸·赤霉素在不同氮浓度下对小白菜产量和品质的影响

王庆彬, 彭春娥, 孟慧, 王洪凤, 王晓琪, 贾春花, 李泽丽, 李洋, 耿全政, 刘之广, 张民

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 626–635 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0486>

有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响

李春喜, 刘晴, 邵云, 李斯斯, 李晓波, 翁正鹏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 527–536 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0150>

增氧方式对水芹菜-微生物联合作用处理冬季养殖废水的影响

刘方剑, 杨海龙, 陈晓露, 李琳秋, 周化斌

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 770–776 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0345>

小麦秸秆生物质炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响

任心豪, 陈乔, 李锦, 贺飞, 吴思沛, 郭军康

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 119–126 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0012>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王罕博, 张栓堂, 焦艳平, 等. 不同氮肥与矿化度水平微咸水喷灌对冬小麦光合特征及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 99–106.

WANG H B, ZHANG S T, JIAO Y P, et al. Effect of brackish water sprinkling irrigation with different nitrogen and salinity levels on photosynthesis characteristics and yield of winter wheat[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 99–106.



开放科学 OSID

不同氮肥与矿化度水平微咸水喷灌对冬小麦光合特征及产量的影响

王罕博^{1,2}, 张栓堂^{1,2}, 焦艳平^{1,2*}, 陈文彬^{1,2}, 李洁^{1,2}

(1.河北省水利科学研究院, 石家庄 050051; 2.河北省农业节水技术创新中心, 石家庄 050051)

摘要:为寻求合理的微咸水利用方式,揭示微咸水喷灌下作物生理生长响应机理,在河北低平原地区开展了冬小麦微咸水喷灌试验,研究了225 kg·hm⁻²施氮量条件下不同矿化度(2、3 g·L⁻¹)微咸水灌溉和不同施氮量条件(高氮275 kg·hm⁻²,中氮225 kg·hm⁻²,低氮175 kg·hm⁻²)下2 g·L⁻¹矿化度微咸水喷灌对冬小麦光合特性、生长和产量的影响。结果表明,与淡水喷灌相比,采用矿化度3 g·L⁻¹微咸水喷灌会导致冬小麦叶片蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和净光合速率(P_n)显著下降,但叶片水分利用效率提高了37.0%~106.8%;2 g·L⁻¹微咸水喷灌高氮和中氮处理的 G_s 、 P_n 与淡水喷灌无显著差异,且拔节期高氮处理的叶片 P_n 略高于淡水喷灌处理5.0%。2 g·L⁻¹微咸水喷灌对冬小麦的叶面积指数和株高影响不显著,3 g·L⁻¹矿化度微咸水喷灌对冬小麦的叶面积指数和群体密度造成不利影响。2 g·L⁻¹微咸水喷灌3个处理冬小麦产量与淡水喷灌处理均无显著差异,但3 g·L⁻¹矿化度处理冬小麦平均产量比淡水喷灌处理显著降低了25.9%。综上所述,矿化度不大于2 g·L⁻¹的咸淡混合水喷灌适用于河北低平原地区冬小麦田间灌溉,添加适量氮肥会促进作物产量的增加。

关键词:微咸水;喷灌;冬小麦;光合特征;产量

中图分类号:S512.11

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)01-0099-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0745

Effect of brackish water sprinkling irrigation with different nitrogen and salinity levels on photosynthesis characteristics and yield of winter wheat

WANG Hanbo^{1,2}, ZHANG Shuantang^{1,2}, JIAO Yanping^{1,2*}, CHEN Wenbin^{1,2}, LI Jie^{1,2}

(1.Hebei Academy of Water Resources, Shijiazhuang 050051, China; 2.Hebei Technology Innovation Center of Agricultural Water Saving, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The study aims to obtain a suitable alternative of brackish water irrigation pattern and reveal the physiological growth response mechanism of crops under brackish water sprinkling irrigation. A field experiment was conducted in a low plain area of Hebei Province, north China. Effects of different salinity (2 g·L⁻¹, 3 g·L⁻¹) brackish water irrigation under the same nitrogen application rate (225 kg·hm⁻²) and different nitrogen application rates (high N: 275 kg·hm⁻², medium N: 225 kg·hm⁻², low N: 175 kg·hm⁻²) with 2 g·L⁻¹ brackish water sprinkler irrigation on photosynthetic characteristics, growth and yield of winter wheat were studied. The results showed that compared with sprinkler with fresh water, transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), and net photosynthetic rate (P_n) of wheat by sprinkling with 3 g·L⁻¹ brackish water showed a significant decrease in trend, but the water-use efficiency of leaf increased by 37.0%~106.8%. The G_s and P_n of 2 g·L⁻¹ brackish water sprinkling treated with high N and medium N were not significantly different from that of freshwater sprinkling, and P_n of the leaf treated with high N at jointing stage was 5.0% slightly higher than those treated with freshwater sprinkling. Sprinkling with 2 g·L⁻¹ brackish water had no significant influence on leaf area index and plant height of winter wheat, while sprinkling with 3 g·L⁻¹

收稿日期: 2020-12-15 录用日期: 2021-04-10

作者简介: 王罕博(1986—),男,湖北襄阳人,博士,工程师,从事农田水利、农业非常规水应用研究。E-mail: wanghanbo0014@163.com

*通信作者: 焦艳平 E-mail: yanpingjiao@163.com

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0401403); 河北省水利科技计划项目(2017-05, 2019-09)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0401403); Water Conservancy Science and Technology Plan of Hebei Province (2017-05, 2019-09)

had adverse effects on leaf area index and population density of winter wheat. Compared with sprinkling with freshwater, the yield of $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ brackish water treatments were not statistically significant. However, compared with freshwater treatment, the yield of $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ treatment was significantly reduced by 25.9%. In conclusion, sprinkling irrigation system with no more than $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ mixing of brackish and fresh water can be used for field irrigation of winter wheat in this region, and adding an appropriate amount of nitrogen fertilizer may promote the increase of crop yield.

Keywords: brackish water; sprinkling irrigation; winter wheat; photosynthesis characteristics; yield

开发利用微咸水资源对于缓解淡水资源短缺、扩大农业水源、抗旱增产具有极其重要的作用^[1]。河北低平原地区地表淡水资源量较少,但是地下咸水总储量比较丰富,约为 $1\,700 \text{ 亿 m}^3$,其中 $2\sim 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 微咸水年可开采资源量为 $22.5 \text{ 亿 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,与区域总淡水资源量相当,咸水资源利用受到越来越多的重视^[2-3]。喷灌具有节省水量、不破坏土壤结构和调节地面气候等优点^[4],但微咸水喷灌条件下,作物会受到土壤盐分的胁迫,叶片也会因吸收盐分而受到损伤,从而影响叶片生理代谢和作物产量^[5]。冬小麦属于中度耐盐作物,是河北低平原地区的主要农作物之一^[6]。本研究选择冬小麦作为研究对象,为该地区地下咸水资源的开发利用及灌溉农业的可持续发展提供科学依据。

咸水和微咸水用于灌溉,一方面提供了作物生长所需的水分,另一方面给土壤带入大量的盐分,影响了土壤的理化特性。研究显示,微咸水灌溉影响土壤的渗透势,使土壤的孔隙度降低,短期灌溉能破坏土壤水稳性团聚体^[7],长期灌溉使土壤物理结构受到严重破坏,土壤初始入渗率逐年降低,土壤发生盐渍化,根系层盐分聚集,抑制根系对水肥的吸收,从而影响产量^[8]。在冬小麦种植区 $1\sim 2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 微咸水胁迫下,土壤渗透势会有所提高,反而促进作物根系对土壤水分的吸收^[9];当土壤饱和电导率(EC_e)超过 $4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、灌水矿化度大于 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,冬小麦的生长受到抑制;当 EC_e 超过 $6 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, EC_e 每上升 $1 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,其产量减少 7%;当 EC_e 达到 $13 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,其产量减少 50%^[10-12]。氮素是作物生长发育必需的大量元素之一,是叶绿素的重要组成成分,适宜的施氮量可能会减轻盐分对作物生长和产量的不利影响^[13-14]。微咸水喷灌一方面改变了土壤水分的有效性,引发土壤-植物根系-植物叶片的水势梯度变化,另一方面微咸水喷灌对叶片生理活动产生一定的影响,诱导叶片细胞膨压的改变,导致气孔导度、蒸腾作用和光合特性等一系列生理指标的调节与适应,从而对光合产物积累及其在根、茎、叶和籽粒间的分配产生显著影响^[15-16]。研究

表明,半干旱地区长期使用微咸水($EC_e \approx 3.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$)灌溉柑橘树会使叶片硼元素的含量显著提高,果实负载量显著下降,但对叶片的气孔导度和净光合速率均无显著影响^[17]。在黄河三角洲地区,微咸水灌溉冬小麦试验表明,冬小麦拔节至开花阶段,盐胁迫对光合作用有显著的抑制作用,但到了灌浆期,干旱胁迫比盐胁迫的影响更严重^[18]。目前的研究热点主要是微咸水灌溉技术与制度^[19]以及微咸水灌溉下土壤水盐运移规律与模型^[20]、土壤微生物多样性^[21-22]、作物生长和产量品质等方面,而微咸水喷灌对作物生长影响的内在生理机理及作物叶片直接受咸水喷灌影响的调节机制仍需要进一步研究。

因此,为了进一步寻求合理的微咸水利用方式,揭示微咸水喷灌下作物生理生态响应机理,本研究选择河北低平原地区的主要粮食作物——冬小麦作为研究对象,开展冬小麦微咸水喷灌田间试验研究,以期该类地区地下非常规水资源的开发利用及灌溉农业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

冬小麦微咸水喷灌大田试验 2018—2019 年在中国农业大学曲周实验站进行。该站位于北纬 $36^{\circ}40'$ 、东经 $114^{\circ}55'$,海拔 39 m。属于暖温带半湿润半干旱大陆性气候,多年平均气温 13.2°C ,多年平均日照时数 $2\,454.4 \text{ h}$,多年平均无霜期 206.6 d ,多年平均降水量 518.5 mm ^[12]。该站潜水地下水埋深 15 m,浅层咸水含盐量约为 $5.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,深层淡水含盐量约为 $1.04 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,1 m 土层田间持水量(质量含水量)为 21.9%,土壤容重为 $1.46 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土壤质地为潮土类砂壤土,耕作层土壤基本理化性质见表 1。2018—2019 年冬小麦全生育期的累计降水量为 112.6 mm ,2018 年 10 月至 2019 年 3 月的累计降水 12.9 mm ,2019 年 4 月为 63.5 mm ,5 月至收获期为 36.2 mm ,即为偏枯水年。

1.2 试验设计

试验区种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟制,

表1 耕层土壤主要理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the surface soil

土层 Soil layer/ cm	pH	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全盐 Total salinity/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)
0~20	8.20	1.15	0.85	22.23	16.83	1.66	72.45	20.40	195.50
20~40	8.43	0.53	0.61	21.64	7.85	0.74	36.23	2.94	95.50

供试冬小麦品种为龙堂1号,播种量187.5 kg·hm⁻²,行距为15 cm,2018年10月上旬播种,次年6月上旬收获。微咸水喷灌试验采用大区试验,试验区总面积72 m×216 m,采用全移动管道式喷灌系统,支管和喷头间距均为12 m,喷头正方形布置,每个处理一个小区,每个小区2条支管,每条支管5个喷头,小区面积72 m×36 m,每个处理3个重复,每个重复面积为24 m×36 m。试验处理包括淡水喷灌中氮(FSM)、2 g·L⁻¹微咸水喷灌高氮(2SH)、2 g·L⁻¹微咸水喷灌中氮(2SM)、2 g·L⁻¹微咸水喷灌低氮(2SL)、3 g·L⁻¹微咸水喷灌中氮(3SM)、淡水小畦田地灌中氮(FBM)6个处理。利用供水网络和地下蓄水池配置不同矿化度的混合水,然后通过潜水泵加压进行喷灌和地面灌试验。灌溉计划在考虑降水预报的前提下,根据田间土壤墒情监测站监测数据,0~40 cm的平均土壤含水量达到田间持水量的60%~70%开始灌溉,2019年3月14日和5月6日分别为春一水和春二水,喷灌灌水定额675 m³·hm⁻²,地面灌灌水定额750 m³·hm⁻²。冬小麦畦灌处理中,将全部的磷、钾肥和50%的氮肥作基肥底施,其余50%的氮肥(尿素)随春一水追施;冬小麦喷灌试验,将全部的磷、钾肥和40%的氮肥作基肥底施,其余60%的氮肥随春一水和春二水喷施。冬小麦高氮处理的用氮量为275 kg·hm⁻²,中氮处理的用氮量为225 kg·hm⁻²,低氮处理的用氮量为175 kg·hm⁻²;不同处理的磷、钾肥用量和其他田间管理措施一致,磷肥(P₂O₅)用量150 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)用量75 kg·hm⁻²。

1.3 观测指标及方法

生理指标:在2019年冬小麦拔节期、抽穗期和开花期,每个小区选6株长势一致的植株,于晴天上午8时至10时开始对顶端嫩叶(自下而上倒数第一片完全展开叶)使用LI-6400型光合测定仪(环境温度和CO₂浓度不控制,控制光强避免外界环境剧烈变化,设置6400-02B红蓝光源,蓝光占10%,叶室内光合有效辐射设定为1 500 μmol·m⁻²·s⁻¹,流速设定为300 μmol·s⁻¹)测量冬小麦叶片光合速率P_n(μmol·m⁻²·

s⁻¹)、蒸腾速率T_r(mmol·m⁻²·s⁻¹)、气孔导度G_s(mol·m⁻²·s⁻¹)、胞间CO₂浓度C_i(μmol·mol⁻¹)等生理指标,并计算生态指标^[23-24]:

叶片水分利用效率LWUE(μmol·mmol⁻¹)=P_n/T_r

光能利用效率LUE(μmol·μmol⁻¹)=P_n/PAR

气孔限制值L_s=(1-C_i/C_a)×100%,

式中:PAR为有效光合辐射,μmol·mol⁻¹;C_a为大气CO₂摩尔分数,μmol·mol⁻¹。

叶面积指数(Leaf area index, LAI)和株高、群体密度:选取有代表性长势均匀的1 m²面积小麦,每个区选3块并做标记,利用钢尺测量选定7株小麦的株高和所有有效叶片长和宽,数出该1 m²面积内小麦的株数(群体密度),计算每个试验小区单位面积上的叶面积,推求叶面积指数和株高,校准参数设为0.7^[25]。

考种测产:取各处理区已作标记的1 m²面积小麦,全部收获,每个处理3个重复,每个区取回的植株先数总植株穗数,从中选出18个有代表性的进行剪穗,测穗粒鲜质量、穗粒干质量;最后将1 m²的所有植株穗打出籽粒,晒干扬净后测量籽粒总质量,并计算千粒重。

1.4 统计分析

使用IBM SPSS 19.0软件通过单因素和双因素(不完全设计)方差分析检验各水平之间的差异显著性,显著水平α=0.05。使用Excel 2016绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理不同生育时期叶片光合特征参数

表2是春一水灌溉后拔节期不同处理的叶片光合特征参数,由表2可见,3SM处理的叶片P_n、G_s、C_i和T_r均呈现显著降低的趋势(P<0.05,下同),较其他5个处理分别平均降低了20.0%、43.8%、10.9%和50.1%,LWUE和L_s均显著高于其他5个处理,分别平均提升了65.1%和34.6%。2SH和2SM处理的叶片P_n、G_s、LUE与FSM处理无显著差异,2SH处理的叶片P_n略高于FSM处理5.0%,两者T_r均显著高于FSM处理(平均高出24.4%),且2SH处理的C_i、LWUE和L_s与FSM处

理也无显著差异;2SL处理除了叶片 P_n 显著低于FSM处理12.4%外,其他光合参数与FSM处理也无显著差异。FBM处理的叶片 C_i 和 T_r 显著高于其他5个处理,分别平均增加了15.2%和55.7%,而 $LWUE$ 为最低,显著低于其他5个处理,平均降低了44.3%。

表3为抽穗期不同处理的叶片光合特征参数,3SM处理的叶片 G_s 和 T_r 均显著低于其他5个处理,分别平均降低了31.3%和58.1%, $LWUE$ 和 L_s 均显著高于其他5个处理,分别平均提升了106.8%和17.2%;与拔节期不同的是,此时3SM处理的 C_i 略低于其他5个处理,差异不显著,3SM处理的 P_n 仅显著低于FSM处理,平均降低了25.0%,与其他4个处理差异不显著。2 g·L⁻¹矿化度喷灌3个处理的 C_i 、 $LWUE$ 、 L_s 与FSM处理差异不显著,仅2SM和2SL处理的叶片 P_n 显著低于FSM处理,平均降低了21.0%,2SM处理的 G_s 和 T_r 均显著低于FSM处理,分别降低了23.6%和27.1%,其他处理的叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 与FSM处理差异不显著。FBM处理的叶片 T_r 显著低于2 g·L⁻¹矿化度喷

灌3个处理和FSM处理,平均降幅34.2%,显著高于3SM处理68.8%;而FBM处理的 $LWUE$ 显著高于2 g·L⁻¹矿化度喷灌和FSM处理,平均增加34.8%,显著低于3SM处理39.1%,而FBM处理叶片 P_n 、 G_s 、 C_i 、 L_s 与2SM和2SL处理的差异不显著。

表4显示了开花期不同处理的叶片光合特征参数,3SM处理的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 均显著低于2 g·L⁻¹矿化度喷灌的3个处理,分别平均降低了34.7%、54.3%、20.9%和43.5%;3SM处理的 $LWUE$ 显著高于2SH和2SM处理,平均高出37.0%;3SM处理的叶片 L_s 显著高于2 g·L⁻¹矿化度喷灌和FSM 4个处理,平均高出38.0%。2SH和2SM处理的叶片 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 和 L_s 与FSM处理的差异不显著,而2SH和2SM处理的 $LWUE$ 和 LUE 显著低于FSM处理,分别平均降低了41.9%和20.2%;2SH处理的 L_s 高于2SM和2SL处理,但2SH处理的 P_n 仍高于2SM和2SL处理,分析这三个处理的叶片 C_i 可知,高氮处理的 C_i 为272.01 μmol·mol⁻¹,低于中氮和低氮处理的299.91 μmol·mol⁻¹和293.22 μmol·

表2 不同矿化度微咸水灌溉和不同施氮量水平下的拔节期叶片光合特征参数

Table 2 Photosynthetic characteristic parameters of leaf at jointing stage under different salinity brackish water irrigation and different nitrogen application rate

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate(P_n)/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 Stomatal conductance(G_s)/ (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration(C_i)/ (μmol·mol ⁻¹)	蒸腾速率 Transpiration rate (T_r)/ (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	叶片水分利用效率 Leaf water use efficiency($LWUE$)/ (μmol·mmol ⁻¹)	光能利用效率 Light use efficiency (LUE)/ (μmol·μmol ⁻¹)	气孔限制值 Stomatal limitation (L_s)/%
FBM	20.26±3.69ab	0.42±0.10a	332.13±13.20a	3.24±0.65a	6.29±0.46d	0.014±0.002bc	0.21±0.03c
FSM	23.80±3.41a	0.34±0.06ab	284.99±15.78b	2.04±0.37c	12.03±2.75b	0.016±0.002ab	0.30±0.03b
2SM	22.25±4.54ab	0.41±0.03a	314.19±19.41a	2.56±0.30b	8.62±1.09c	0.015±0.003ab	0.23±0.04c
2SL	20.86±2.11b	0.32±0.02b	283.60±15.60b	2.06±0.21c	10.13±0.77b	0.014±0.001bc	0.28±0.02b
2SH	25.00±1.52a	0.39±0.06a	290.66±8.43b	2.51±0.33b	10.10±1.16b	0.017±0.001a	0.28±0.03b
3SM	17.94±3.32c	0.21±0.05c	268.28±12.05c	1.24±0.38d	15.57±3.81a	0.012±0.002c	0.35±0.03a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level. The same below.

表3 不同矿化度微咸水灌溉和不同施氮量水平下的抽穗期叶片光合特征参数

Table 3 Photosynthetic characteristic parameters of leaf at heading stage under different salinity brackish water irrigation and different nitrogen application rate

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate(P_n)/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 Stomatal conductance(G_s)/ (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration(C_i)/ (μmol·mol ⁻¹)	蒸腾速率 Transpiration rate (T_r)/ (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	叶片水分利用效率 Leaf water use efficiency($LWUE$)/ (μmol·mmol ⁻¹)	光能利用效率 Light use efficiency (LUE)/ (μmol·μmol ⁻¹)	气孔限制值 Stomatal limitation (L_s)/%
FBM	19.39±4.13b	0.35±0.05b	295.41±11.61a	2.81±0.43d	6.84±0.62b	0.013±0.003bc	0.25±0.03b
FSM	24.87±2.84a	0.46±0.05a	283.24±6.29b	4.88±0.36a	5.09±0.37c	0.017±0.002a	0.26±0.01b
2SM	18.67±2.57b	0.35±0.06b	284.82±7.94ab	3.56±0.64c	5.32±0.53c	0.012±0.002bc	0.25±0.02b
2SL	20.61±3.92b	0.41±0.08ab	284.92±6.52ab	4.32±0.67ab	4.80±0.67c	0.014±0.003b	0.24±0.02b
2SH	22.02±3.72ab	0.42±0.03a	284.22±11.57ab	4.29±0.23b	5.10±0.63c	0.015±0.002ab	0.25±0.03b
3SM	18.65±1.61b	0.27±0.01c	284.16±11.45ab	1.66±0.14c	11.23±0.41a	0.012±0.001c	0.29±0.03a

表4 不同矿化度微咸水灌溉和不同施氮量水平下的开花期叶片光合特征参数

Table 4 Photosynthetic characteristic parameters of leaf at flowering stage under different salinity brackish water irrigation and different nitrogen application rate

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate(P_n)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance(G_s)/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration(C_i)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate(T_r)/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	叶片水分利用效率 Leaf water use efficiency($LWUE$)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	光能利用效率 Light use efficiency(LUE)/ ($\mu\text{mol}\cdot\mu\text{mol}^{-1}$)	气孔限制值 Stomatal limitation(L_s)/%
FBM	10.12±3.85bc	0.09±0.03bc	240.19±27.02bc	1.90±0.73bc	5.41±0.47b	0.007±0.003b	0.47±0.06a
FSM	16.18±1.84a	0.17±0.05a	288.97±41.59a	2.21±0.64b	7.84±1.87a	0.011±0.001a	0.38±0.09b
2SM	12.71±3.76ab	0.16±0.06a	299.91±22.62a	2.90±1.00ab	4.58±0.66c	0.008±0.003b	0.33±0.05b
2SL	10.87±2.42bc	0.12±0.03b	293.22±18.77a	1.98±0.52bc	5.55±0.30b	0.007±0.002b	0.36±0.03b
2SH	13.11±3.38ab	0.14±0.04ab	272.01±42.93ab	2.98±0.73a	4.52±0.90c	0.009±0.002ab	0.39±0.09b
3SM	9.15±2.89c	0.07±0.03c	226.88±34.04c	1.52±0.58c	6.23±0.87ab	0.006±0.002b	0.50±0.08a

mol^{-1} ,说明开花期之后,高氮处理 P_n 的提升主要不是因为减少了气孔因素对光合作用的限制,而是提高了胞间 CO_2 的利用率,使胞间 CO_2 摩尔分数降低,从而减少了非气孔因素对光合作用的限制,提升了 P_n 。FBM处理叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 、 $LWUE$ 与2SL和3SM处理的差异不显著。

2.2 不同处理冬小麦叶面积指数、株高和群体密度

冬小麦返青期至收获期的 LAI 、株高和群体密度变化情况如图1所示。拔节期,2SH处理的冬小麦 LAI 均显著高于其他处理(平均高出8.4%),表明充足的氮肥促进了作物叶片生长和光合作用,作物提前进入拔节期,也验证了前面的结论,高氮处理拔节期的叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 高于FSM处理。随后,2SH和FSM处理的冬小麦 LAI 差异逐渐减小,生育后期没有显著差异。全生育期,2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度喷灌的3个处理冬小麦 LAI 平均值与FSM处理差异不显著,3SM处理的冬小麦 LAI 平均值显著低于其他处理,平均降低了10.7%。全生育期不同处理间的冬小麦株高平均值无显著差异。FSM处理的各生育期分蘖数最高(平均高出其他处理5.4%~27.3%),其次是2SH处理(较2SM和2SL处理分别平均高出9.4%和16.6%),3SM处理最小。上述试验结果说明,2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度喷灌对作物的 LAI 、株高和群体密度无显著影响,3 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度喷灌对作物的 LAI 和群体密度产生显著不利影响,高氮处理的作物生长发育良好,对叶面积和群体密度有明显促进作用。

2.3 不同处理冬小麦产量构成因素

图2为不同处理冬小麦产量及构成因素。由图2可知,FSM处理的产量最高,2SH处理次之,之后依次是FBM、2SM、2SL、3SM处理,3SM比FSM处理的产量显著降低了25.9%。2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度3个处理的产量与FSM处理均无显著差异,2SM处理的产量比3SM显著

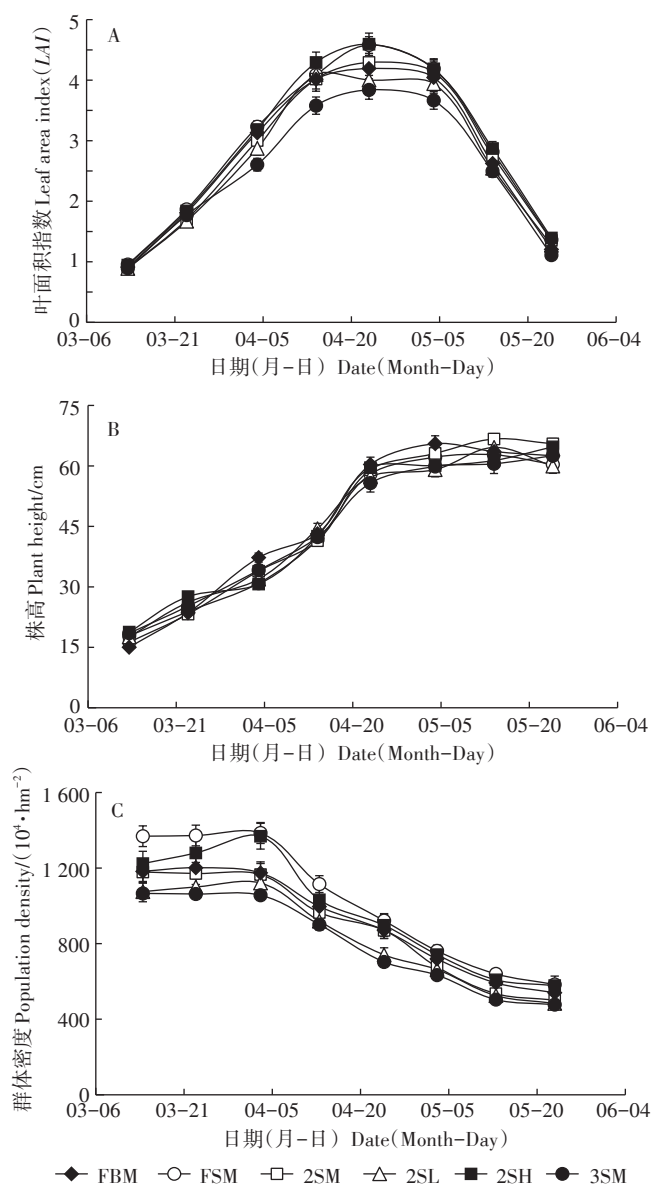


图1 不同处理冬小麦叶面积指数、株高和群体密度的动态变化

Figure 1 Dynamic change of leaf area index, plant height and population density of winter wheat under different treatments

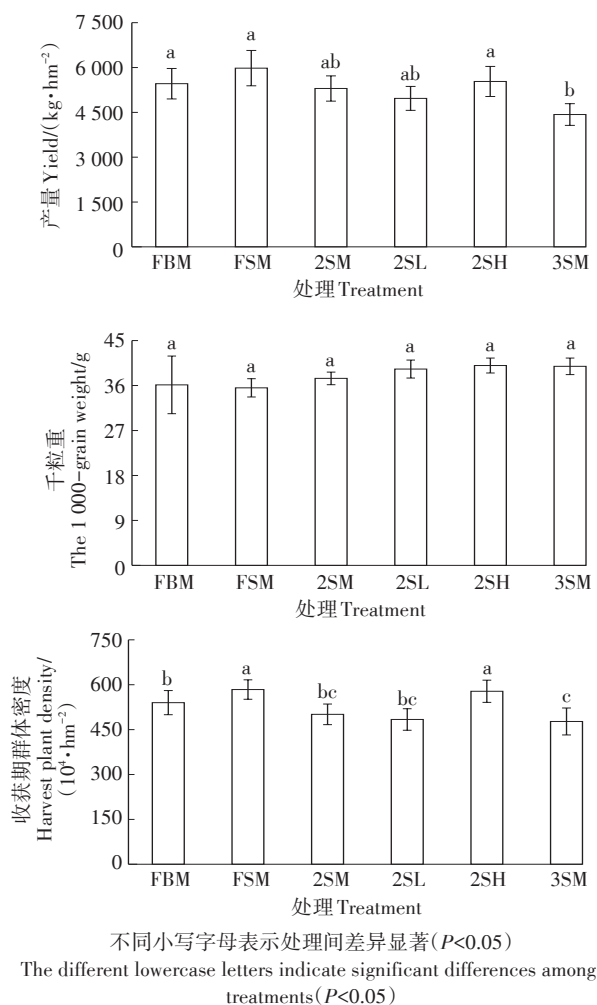


图2 不同处理冬小麦产量及构成因素
Figure 2 Yield components of winter wheat under different treatments

增加了19.7%。6个处理之间的千粒重差异不显著。冬小麦收获期FSM处理的群体密度最高,其次是2SH处理,最小的是3SM处理,其中 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度喷灌3个处理的平均群体密度低于FSM处理,平均降低了10.8%,3SM处理的群体密度较FSM处理显著降低了18.3%,表明 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度微咸水喷灌对作物的群体密度和产量无显著影响, $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度喷灌对作物产量和群体密度造成显著不利影响,与前人研究结论^[9,12]一致。此外,本研究将FSM、2SH、2SM、2SL和3SM的5个喷灌处理进行了双因素(矿化度和施氮量为两个因素,产量为因变量)方差分析,统计结果显示,用Shapiro-Wilk检验数据正态性,任一分类都具有等方差性(P 值为0.901)。主体间效应的检验结果显示,中氮(P 值为0.023)的3个不同矿化度微咸水喷灌对产量的简单主效应不同,差异具有统计学意义,施氮量(P 值为0.495)对产量影响不大,由于本试验

未设置淡水喷灌低氮和高氮、 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度低氮和高氮的处理,所以未显示交互作用的 P 值。

3 讨论

一般认为,微咸水灌溉会对作物产生毒害,如降低膨压、减小细胞扩张速度、破坏叶绿体等,从而导致生长速度和光合作用降低,最终对干物质积累和产量产生不良影响^[26-27]。田德龙等^[28]的研究表明,随着灌溉水电导率增加,向日葵的叶片 T_r 随之下降, $LWUE$ 和 L_s 会随之提高。张余良等^[29]指出,在 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 灌水量下,矿化度 $3.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水处理的冬小麦叶片 T_r 和 G_s 分别比淡水处理降低了19%和23%。HNI-LIČKOVÁ等^[30]发现,当NaCl溶液浓度大于 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,芝麻菜叶片的 T_r 开始下降,到 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶片的 G_s 和 P_n 也开始显著降低, $LWUE$ 有所增加,但是当浓度超过 $200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶片的 T_r 、 G_s 和 P_n 不随盐分浓度增加而改变。WANG等^[31]的研究也得出,在盐胁迫处理期间,黄瓜幼苗的根系活力和 $LWUE$ 呈先升高后降低的趋势。LI等^[32]的研究表明,小麦 P_n 和 T_r 对干旱的响应程度不同,适度干旱条件下 T_r 对干旱的响应程度高于 P_n , $LWUE$ 提高。YANG等^[33]也指出,土壤盐分含量为0.6%时,盐胁迫引发的气孔因素占主导,所以 $LWUE$ 增加,但盐分含量增加到0.9%时,非气孔因素占主导, $LWUE$ 显著降低。以上研究均说明微咸水灌溉后土壤含盐量缓慢上升,土壤溶液的渗透势随之增长,降低了土壤水分的有效性,土壤-根系-叶片的水势梯度减小,起初引起部分气孔关闭,导致叶片 G_s 和 T_r 一定程度下降, $LWUE$ 提高;随着土壤含盐量继续增加,非气孔因素逐渐成为主导,光合器官光合活性显著下降,叶片 P_n 呈现显著降低趋势。本研究对比分析三个生育时期的不同处理叶片光合特征参数发现, $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度微咸水喷灌处理一方面会增加土壤含盐量,另一方面喷灌对叶片的直接作用以及该年降水量偏低等因素导致作物生理干旱,作物为了避免自身失水过多,减小叶片的气孔开度, T_r 随之降低,由于 P_n 对盐胁迫响应的滞后效应,短时间内 $LWUE$ 有所增加,但非气孔因素也受到不利影响,多种因素耦合对作物的光合作用产生明显的抑制效应,最终影响到作物的生物量和产量。

另外,本研究也得出, $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度微咸水灌溉也引起了叶片部分气孔关闭,但各项光合参数并没有大幅降低,尤其是高氮处理,拔节期的叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 略高于淡水喷灌处理,这是因为充足的氮肥提供了作

物叶片生长所必需的氮元素,作物各生长阶段也早于其他处理。而冬小麦叶片光合作用主要受气孔因素和非气孔因素影响,氮肥可一定程度上调节和改善非气孔因素,弥补气孔关闭对 P_n 的负面影响,使得 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度微咸水灌溉并没有显著降低冬小麦叶片 P_n ,且在部分生育阶段甚至出现超过淡水处理的现象,该结果与前人的研究结果^[24,29]基本一致。

过去大量研究表明, $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉对华北地区冬小麦的株高、干物质质量产生不利影响,产量比淡水灌溉降低了11%~15%,但可节约淡水资源60%~70%^[11-12,34]。如果降水量达到年平均水平且灌溉制度合理,微咸水用于冬小麦-玉米田间灌溉前景广阔。本研究得出, $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度3个处理的冬小麦产量与FSM处理差异不显著, $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度处理的产量比FSM处理显著降低了25.9%,与前人的研究结论基本一致,但考虑到本研究中冬小麦全生育期降雨量偏低,耕层土壤的盐分含量较高,对作物影响的时间较长,因此对作物生长影响的负面作用较明显,在其他水文年型下可能会有不同的结果,还需进一步开展长期定位试验。此外,该地区种植制度主要是冬小麦-夏玉米轮作体系,微咸水灌溉对下茬玉米的影响还需要结合夏玉米生育期的降雨情况开展进一步的试验研究,才能获得较为客观的结论。

4 结论

(1) 微咸水 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 喷灌高氮和中氮处理的叶片光合速率、气孔导度、光能利用效率与淡水喷灌处理无显著差异,且仅拔节期微咸水 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 高氮处理的叶片光合速率高于淡水喷灌处理5.0%,抽穗期和开花期均略低于淡水喷灌处理,补氮肥可能会促进拔节期作物叶片生长和光合作用,还有待进一步试验验证。

(2) 与淡水喷灌相比,微咸水 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 喷灌处理的叶片光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率均显著降低,而叶片水分利用效率整体提升。 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度微咸水喷灌显著抑制作物叶片的光合作用。

(3) $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水喷灌对冬小麦的叶面积指数、株高、群体密度和产量无显著影响, $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度微咸水对冬小麦的叶面积指数、群体密度和产量造成显著不利影响,产量显著降低25.9%。

因此,为保障河北低平原区咸水安全利用,在控制咸淡混合水矿化度不大于 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的前提下,可采用喷灌技术,同时添加氮肥能提高冬小麦的光合作用,保证作物产量。

参考文献:

- [1] LETEY J, FENG G L. Dynamic versus steady-state approaches to evaluate irrigation management of saline waters[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90:165-180.
- [2] 吴普特, 冯浩. 中国节水农业发展战略初探[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6):152-157. WU P T, FENG H. Discussion of the development strategy of water saving agriculture in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6):152-157.
- [3] 张亚哲, 申建梅, 王莹, 等. 河北平原地下(微)咸水的分布特征及开发利用[J]. 农业环境与发展, 2009, 26(6):29-33. ZHANG Y Z, SHEN J M, WANG Y, et al. The distribution and utilization of underground (slightly) saline water in Hebei low-plain[J]. *Agro-Environment and Development*, 2009, 26(6):29-33.
- [4] LIU H J, YU L P, LUO Y, et al. Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(4):483-492.
- [5] 孙泽强, 董晓霞, 王学君, 等. 微咸水喷灌对作物影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6):1475-1479. SUN Z Q, DONG X X, WANG X J, et al. Review of the effect of sprinkler-irrigation with brackish water on crops[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6):1475-1479.
- [6] 王相平, 杨劲松, 余世鹏, 等. 基于蒸发皿水面蒸发量优化冬小麦微咸水灌溉制度[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4/5):6-10. WANG X P, YANG J S, YU S P, et al. Optimizing brackish water irrigation program based on water surface evaporation of a 20 cm standard pan[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(4/5):6-10.
- [7] 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):969-973. ZHANG Y L, LU W L, ZHANG W, et al. Effects of longterm brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):969-973.
- [8] 万书勤, 康跃虎, 王丹, 等. 微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉水利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3):30-35. WAN S Q, KANG Y H, WANG D, et al. Effects of saline water on cucumber yields and irrigation water use efficiency under drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(3):30-35.
- [9] 龚雨田, 孙书洪, 闫宏伟. 微咸水灌溉对冬小麦产量及农艺性状的影响[J]. 节水灌溉, 2017(9):33-37, 42. GONG Y T, SUN S H, YAN H W. Study on the impact of saline water with different materialization degree on growth characteristics and yield of winter wheat[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(9):33-37, 42.
- [10] 尉永平, 陈德立, 李保国. 农业水价调整对解决华北平原水资源短缺的有效性分析——河南省封丘县农业水价调查分析[J]. 资源科学, 2007, 29(2):40-45. WEI Y P, CHEN D L, LI B G. Effectiveness of agricultural water pricing on solving the water shortage of North China Plain: A case study in Fengqiu County of Henan Province [J]. *Resources Science*, 2007, 29(2):40-45.
- [11] 马文军, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):73-80. MA W J, CHENG Q J, LI L T, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop[J]. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering*, 2010, 26(1):73-80.
- [12] 焦艳平, 高巍, 潘增辉, 等. 微咸水灌溉对河北低平原土壤盐分动态和小麦、玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 134-140. JIAO Y P, GAO W, PAN Z H, et al. Effects of saline water irrigation on soil salt dynamics and yields of wheat and maize in low plain of Hebei Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(2):134-140.
 - [13] ALBASSAM B A. Effect of nitrate nutrition on growth and nitrogen assimilation of pearl millet exposed to sodium chloride stress[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24:1325-1335.
 - [14] 张文, 周广威, 闵伟, 等. 长期咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1583-1590. ZHANG W, ZHOU G W, MIN W, et al. Effects of drip irrigation with saline water on cotton yield, soil physical and chemical properties, and soil N_2O emission[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8):1583-1590.
 - [15] BEN-ASHER J, TSUYUKI I, BRAVDO B A, et al. Irrigation of grapevines with saline water: I. Leaf area index, stomatal conductance, transpiration and photosynthesis[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(1/2):13-21.
 - [16] 康绍忠, 杜太生, 孙景生, 等. 基于生命需水信息的作物高效节水调控理论与技术[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 661-667. KANG S Z, DU T S, SUN J S, et al. Theory and technology of improving irrigation water use efficiency based on crop growing water demand information[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(6): 661-667.
 - [17] NICOLÁS E, ALARCÓN J, MOUNZER O, et al. Long-term physiological and agronomic responses of mandarin trees to irrigation with saline reclaimed water[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 166:1-8.
 - [18] WANG T, XU Z, PANG G. Effects of irrigating with brackish water on soil moisture, soil salinity, and the agronomic response of winter wheat in the Yellow River Delta[J]. *Sustainability*, 2019, 11(20): 5801.
 - [19] MEI X N, SHEN Z Z, REN J, et al. Effects of dripper discharge and irrigation amount on soil-water dynamics under subsurface drip irrigation[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 347:2400-2403.
 - [20] CHEN L J, FENG Q, LI F R, et al. Simulation of soil water and salt transfer under mulched furrow irrigation with saline water[J]. *Geoderma*, 2015, 241/242:87-96.
 - [21] 梁悦萍, 李科江, 张俊鹏, 等. 咸水灌溉棉田休耕期土壤胞外酶活性和微生物多样性研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 732-740. LIANG Y P, LI K J, ZHANG J P, et al. Extracellular enzyme activity and microbial diversity of saline-irrigated cotton field soil during the fallow period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4):732-740.
 - [22] 马丽娟, 张慧敏, 侯振安, 等. 长期咸水滴灌对土壤氨氧化微生物丰度和群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2797-2807. MA L J, ZHANG H M, HOU Z A, et al. Effects of long-term saline water drip irrigation on the abundance and community structure of ammonia oxidizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12):2797-2807.
 - [23] 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 节水灌溉水稻叶片胞间 CO_2 浓度及气孔与非气孔限制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 76-80. XU J Z, PENG S Z, WEI Z, et al. Intercellular CO_2 concentration and stomatal or non-stomatal limitation of rice under water saving irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7):76-80.
 - [24] 庞桂斌, 徐征和, 王海霞, 等. 微咸水灌溉对冬小麦光合特征及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1):35-41. PANG G B, XU Z H, WANG H X, et al. Effect of irrigation with slight saline water on photosynthesis characteristics and yield of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(1):35-41.
 - [25] RICHARDS R A, RAWSON H M, JOHNSON D A. Glauconess in wheat: Its development and effect on water-use efficiency, gas exchange and photosynthetic tissue temperatures[J]. *Functional Plant Biology*, 1986, 13(4):465-473.
 - [26] Köhl K I. The effect of NaCl on growth, dry matter allocation and ion uptake in salt marsh and inland populations of *Armeria maritima*[J]. *The New Phytologist*, 1997, 135(2):213-225.
 - [27] 庞桂斌, 张立志, 王通, 等. 微咸水灌溉作物生理生态响应与调节机制研究进展[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2016, 30(4):250-255. PANG G B, ZHANG L Z, WANG T, et al. Review on plant physiological and growth responses and regulation mechanisms under slight saline water irrigation[J]. *Journal of University of Jinan (Sci & Tech)*, 2016, 30(4):250-255.
 - [28] 田德龙, 史海滨, 闫建文, 等. 盐分胁迫下水、肥对向日葵光合特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(5): 73-77. TIAN D L, SHI H B, YAN J W, et al. Effect of water and fertilizer on sunflower photosynthetic characteristics under the salt stress[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(5):73-77.
 - [29] 张余良, 陆文龙. 微咸水灌溉对小麦生理特性及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2007, 36(8):31-34. ZHANG Y L, LU W L. Effects of brackish water irrigation on output and physiological characters of wheat[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2007, 36(8):31-44.
 - [30] HNILÍČKOVÁ H, HNILÍČKA F, MARTINKOVÁ J, et al. Effects of salt stress on water status, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of rocket[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2017, 63(8): 362-367.
 - [31] WANG S, GUO S, LI J, et al. Effects of salt stress on the root growth and leaf water use efficiency of cucumber seedlings[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10):1883-1888.
 - [32] LI Q, DONG B, QIAO Y, et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in north China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10):1676-1682.
 - [33] YANG H, SHUKLA M K, MAO X M, et al. Interactive regimes of reduced irrigation and salt stress depressed tomato water use efficiency at leaf and plant scales by affecting leaf physiology and stem sap flow[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10:160.
 - [34] 吴忠东, 王全九. 微咸水连续灌溉对冬小麦产量和土壤理化性质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9):36-43. WU Z D, WANG Q J. Saline water continuous irrigation on winter wheat yield and soil physicochemical property[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9):36-43.