

微咸水灌溉对冬小麦叶片抗干热风能力的影响

赵风华, 朱康莹, 龙步菊, 田振荣, 来剑斌, 孙志刚

引用本文:

赵风华, 朱康莹, 龙步菊, 等. 微咸水灌溉对冬小麦叶片抗干热风能力的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(10): 1609–1617.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200077>

(向下翻页, 阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微咸水灌溉对土壤盐分平衡与作物产量的影响

Effect of brackish water irrigation on soil salt balance and yield of both winter wheat and summer maize

中国生态农业学报. 2016, 24(8): 1049–1058 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160075>

河北低平原冬小麦长期咸水灌溉矿化度阈值研究

Salinity threshold of long-term saline water irrigation for winter wheat in Hebei Lowland Plain

中国生态农业学报. 2016, 24(5): 643–651 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160006>

水分调控降低盐分对夏玉米的影响

Moisture control reduces soil salt effect on summer maize

中国生态农业学报. 2018, 26(9): 1388–1397 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180095>

基于HYDRUS-1D模型的华北低平原区不同微咸水利用模式下土壤水盐运移的模拟

HYDRUS-1D model simulation of soil water and salt movement under various brackish water use schemes in the North China Lowplain

中国生态农业学报. 2016, 24(8): 1059–1070 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160199>

环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究

Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea

中国生态农业学报. 2016, 24(8): 995–1004 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160162>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200077

赵风华, 朱康莹, 龙步菊, 田振荣, 来剑斌, 孙志刚. 微咸水灌溉对冬小麦叶片抗干热风能力的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1609–1617

ZHAO F H, ZHU K Y, LONG B J, TIAN Z R, LAI J B, SUN Z G. Effect of brackish water irrigation on the resistibility of winter wheat leaf to dry-hot wind[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1609–1617

微咸水灌溉对冬小麦叶片抗干热风能力的影响*

赵风华^{1†}, 朱康莹^{1,2†}, 龙步菊^{3**}, 田振荣¹, 来剑斌¹, 孙志刚^{1,2**}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院 北京 100049; 3. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193)

摘要: 干热风是华北地区冬小麦生产的主要气象灾害之一, 同时该区农业用水资源严重短缺, 为缓解灌溉水资源不足, 华北地区开展了微咸水灌溉应用技术, 而微咸水灌溉对冬小麦抗干热风能力的影响尚无定论。为此, 在中国科学院禹城综合试验站设置 1 g·L⁻¹(淡水对照)、3 g·L⁻¹ 和 5 g·L⁻¹ 3 个矿化度微咸水在返青—拔节期和开花—灌浆期分别对冬小麦进行灌溉处理, 在灌浆期进行干热风模拟试验, 观测冬小麦叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度等生理参数。综合 4 年(2016—2019 年)4 次试验结果, 发现: 1) 与 1 g·L⁻¹ 矿化度微咸水灌溉相比, 3 g·L⁻¹ 和 5 g·L⁻¹ 矿化度微咸水灌溉可以显著降低冬小麦叶片光合速率 32.2% 和 59.3%、蒸腾速率 29.2% 和 51.9%、气孔导度 30.7% 和 54.8%。2) 干热风可以显著降低叶片光合速率 35.4%~86.6%、蒸腾速率 35.6%~67.5%、气孔导度 36.4%~69.4%。3) 在 1 g·L⁻¹、3 g·L⁻¹ 和 5 g·L⁻¹ 矿化度微咸水灌溉下, 叶片光合速率干热风胁迫指数 4 年均值分别为 0.55、0.45 和 0.74; 叶片标准化蒸腾速率(蒸腾速率/水汽压饱和差)热风胁迫指数 4 年均值分别为 0.54、0.26 和 0.41; 气孔导度干热风胁迫指数 4 年均值分别为 0.56、0.28 和 0.43。这些结果表明: 1) 微咸水灌溉的生理胁迫作用与干热风的生理胁迫作用对叶片光合蒸腾和气孔行为产生的影响具有相似性; 2) 3 g·L⁻¹ 矿化度微咸水灌溉比淡水提高了叶片对干热风的生理适应能力, 证明适量微咸水灌溉可以提高冬小麦叶片适应干热风的能力。

关键词: 盐分胁迫; 干旱胁迫; 微咸水灌溉; 干热风; 生理适应; 冬小麦

中图分类号: S429

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effect of brackish water irrigation on the resistibility of winter wheat leaf to dry-hot wind*

ZHAO Fenghua^{1†}, ZHU Kangying^{1,2†}, LONG Bujū^{3**}, TIAN Zhenrong¹, LAI Jianbin¹, SUN Zhigang^{1,2**}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

* 国家自然科学基金项目(31570472)和中国科学院战略性先导科技课题(XDA230501002)资助

** 通信作者: 孙志刚, 主要研究方向为生态遥感与区域生态, E-mail: sun.zhigang@igsrr.ac.cn; 龙步菊, 主要研究方向为农业气象学, E-mail: longbujū@cau.edu.cn

† 同等贡献者: 赵风华, 主要研究方向为农田生态学, E-mail: zhaofh@igsrr.ac.cn; 朱康莹, 主要研究方向为生态遥感与区域生态, E-mail: zhuky.18b@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2020-03-05 接受日期: 2020-06-15

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31570472) and the Strategic Leading Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences (XDA230501002).

** Corresponding authors: SUN Zhigang, E-mail: sun.zhigang@igsrr.ac.cn; LONG Bujū, E-mail: longbujū@cau.edu.cn

† Equivallent contributors

Received Mar. 5, 2020; accepted Jun. 15, 2020

Abstract: Brackish water irrigation was carried out in the North China Plain to alleviate the shortage of irrigation water resources. Dry-hot wind is one of the main meteorological disasters for winter wheat in the region; the effect of brackish water irrigation on the ability of winter wheat to resist dry-hot wind is yet inconclusive. Therefore, we conducted field experiments on winter wheat at the Yucheng Comprehensive Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences. Brackish water irrigation with three salinity levels of $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, and $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ was set up, and the dry-hot wind simulation was conducted in the filling period. In this study, physiological parameters of winter wheat, such as photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance of winter wheat were observed. The analysis of the experimental data during four consecutive years (2016–2019), showed the following results: 1) the brackish water with the salinities of $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ could reduce the photosynthetic rate of winter wheat leaves by 32.2% and 59.3%, the transpiration rate by 29.2% and 51.9%, and the stomatal conductance by 30.7% and 54.8% ($P<0.05$), respectively. 2) Dry-hot wind could reduce the photosynthetic rate by 35.4%–86.6%, the transpiration rate by 35.6%–67.5%, and the stomatal conductance by 36.4%–69.4%, respectively. The irrigation with the salinity levels of $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, and $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ decreased the four-year average dry-hot wind stress index of the photosynthetic rate of winter wheat leaves from 0.55 to 0.45 and then increased to 0.74, while the leaf transpiration rate (the difference in the saturation of water vapor pressure) decreased from 0.54 to 0.26, then increased to 0.41; the four-year average dry-hot wind stress index of the stomatal conductance decreased from 0.56 to 0.28, then increased to 0.43. The above results showed that the physiological stress of brackish water irrigation on photosynthesis, transpiration, and stomatal behavior was similar to that of dry-hot wind, and the brackish salinity water ($3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) irrigation could improve the physiological adaptability of winter wheat leaves to dry-hot wind, reducing the damage caused by dry-hot wind.

Keywords: Salt stress; Drought stress; Brackish water irrigation; Dry-hot wind; Physiological adaption; Winter wheat

淡水资源不足是制约华北冬小麦(*Triticum aestivum*)生产的主要因素。该区域虽然淡水缺乏,但却拥有较丰富的地下浅层咸水资源,其中 80%是微咸水(矿化度为 $2\sim 5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),面积约 $4.7\times 10^4 \text{ km}^2$,年补给水量约 $5.4\times 10^9 \text{ m}^3$,为解决水资源危机提供了可能途径^[1-4]。目前,已在河北、山东、河南等地进行了较多微咸水灌溉应用研究。研究发现,适当的微咸水灌溉能保证小麦产量比淡水灌溉不显著减少,同时由于后期雨季对表层盐分的淋洗,也能保证土壤表层不会发生持续的盐分表集现象^[2-4]。

干热风(dry-hot wind, DHW)是一种高温、低湿并伴有一定风力的农业灾害性天气,是危害华北冬小麦高产的主要气象灾害之一^[5]。华北平原冬小麦灌浆中后期和成熟期时,气温回升快且干旱少雨,易发生高温低湿型干热风。随着华北平原气候暖干化趋势加重,干热风发生的频率和范围都很可能增大^[6-7]。干热风的危害主要是空气干燥,而较高的气温($>32^\circ\text{C}$)和较大的风速($>3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)会加剧叶片失水,造成冬小麦叶片在短时间内迅速失水导致严重生理干旱。

植物对于短期胁迫会有应激性保护反应,而对于持续胁迫会形成相对稳定的适应性保护反应。对于干热风造成的短期叶片生理干旱,冬小麦的应激性保护反应主要是气孔导度减小,甚至叶片卷起,以减少水分散失;相应的光合速率和蒸腾速率下降,并影响灌浆速率和籽粒产量;这已被许多研究者观测证实^[8-9]。这些变化主要是由于叶片气孔的闭合引

起,是短时间的保卫细胞应激反应。

与干热风相比,微咸水灌溉对冬小麦叶片光合的胁迫持续时间较长,会引发冬小麦产生一些适应性保护反应。微咸水灌溉条件下,冬小麦的适应性保护反应主要表现是蒸腾速率降低,叶片保卫细胞变小,气孔数量减少,气孔导度变小,叶片水分利用效率提高,叶片比表面积减少等^[10-13]。其中叶片生长形态性状的变化是由于较长时间适应下的反应,会相对稳定的保持下来。而这些反应都会增强叶片的抗旱保水能力,增强对叶片生理干旱的耐受能力。

微咸水灌溉能否增强冬小麦叶片对干热风的耐受能力?目前少见报道。本研究通过设置田间试验,设计不同水平的微咸水灌溉处理,模拟干热风发生,对叶片尺度上生理学特征开展观测分析,探讨微咸水灌溉对冬小麦抗干热风能力的影响,对缓解华北平原农业水资源危机及抵御农业气候灾害具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 试验时间和地点

试验于 2016—2019 年在中国科学院禹城综合试验站进行($36^\circ 57' \text{N}$, $116^\circ 36' \text{E}$, 海拔 28 m)。试验站地处华北平原的黄河冲积平原,属暖温带半湿润季风气候,春季干旱少雨。在冬小麦灌浆中后期(5 月中下旬),阳光强烈气温回升快而降水少,一般会发生干热风(1~3 d)。据统计,在 2016—2019 年,该地区

这一时段天气多为晴朗, 日最高气温 30~33, 降水少, 易发生干热风。

1.2 冬小麦微咸水灌溉

冬小麦品种为当地主导品种‘济麦 22’。共设 3 个灌溉处理: 淡水处理(矿化度 $1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、轻度微咸水处理(矿化度为 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和重度微咸水处理(矿化度为 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)。微咸水由黄河水(淡水)与海盐(NaCl 含量 $800 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)配比调制而成。灌溉小区面积 50 m^2 , 重复 2 次。采用当地常规灌溉制度, 足墒播种; 两水

灌溉: 返青—拔节期(3 月 20 日)灌溉 70 mm , 开花—灌浆期(5 月 10 日前后)灌溉 50 mm 。微咸水灌溉后盐分存留在土壤中, 冬小麦所受盐分胁迫可达 80~90 d。在 2016 年 5 月 26 日、2017 年在 5 月 27 日、2018 年 5 月 24 日、2019 年 5 月 25 日, 距离灌浆期的微咸水灌溉 15 d 左右, 测算土壤表层 0~10 cm 相对含水量为田间持水量的 62.3%~66.7%, 属于较为适宜的土壤水分状况; 同期, 土壤表层 0~10 cm 含盐量如表 1 所示。

表 1 不同矿化度微咸水灌溉处理的土壤表层 0~10 cm 含盐量和相对含水量

Table 1 Salt content and relative water content in top 10 cm soil layer under irrigation treatments of brackish water with different salinities

测定日期 (年-月-日) Measure date (year-month-day)	灌溉水矿化度 Salinity of irrigation water ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)					
	1		3		5	
	含盐量 Salt content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	相对含水量 Relative water content (%)	含盐量 Salt content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	相对含水量 Relative water content (%)	含盐量 Salt content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	相对含水量 Relative water content (%)
2016-05-26	0.751	65.1	0.974	66.5	1.092	65.1
2017-05-27	0.643	63.4	0.871	64.9	1.004	62.3
2018-05-24	0.806	66.7	1.012	64.8	1.134	64.9
2019-05-25	0.755	62.7	0.982	63.8	1.064	62.6

1.3 冬小麦干热风处理

采用赵风华等^[8]研制的便携式干热风模拟装置进行干热风处理。干热风发生装置透明箱体控制微区规格为 $0.4 \text{ m}\times 1.0 \text{ m}$, 一个箱体可以控制冬小麦 220~250 株。干热风模拟试验分别在 2016 年 5 月 26 日、2017 年在 5 月 27 日、2018 年 5 月 24 日、2019 年 5 月 25 日进行, 冬小麦处于灌浆中后期, 距离灌浆期的微咸水灌溉 15 d 左右; 在干热风处理之前没有自然干热风发生。干热风处理当天, 天气晴朗, 选择长势均匀具有代表性的样点进行干热风处理, 处理时段为 13:00—15:00。控制箱体内气温 $33.0\sim 35.0$, 风速 $3.0\sim 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 空气相对湿度 25%~28%, 符合干热风气象标准^[14]。

1.4 叶片光合蒸腾生理参数观测

每个小区选择 5 片大小、长势一致的冬小麦旗叶, 每个灌溉处理共 10 片, 用于测定叶片光合蒸腾生理指标。在干热风处理前和处理后, 使用 LI-6400X 光合蒸腾观测系统(LI-COR, USA)分别测定 1 次。观测的主要参数有: 光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、叶片表面水汽压饱和差(VPD_L, kPa)。仪器 CO₂ 浓度设定为 $380 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 光合有效辐射设定为 $1\ 000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.5 蒸腾速率(T_r)标准化处理

前后两次观测时 VPD_L 差异较大(差异一方面来源于干热风处理, 另一方面来源于天气条件的变化), 这会对 T_r 有较大的影响。为消除由 VPD_L 带来的变异, 更好地反映叶片对 T_r 的生物学控制作用, 参考前人^[15-16]研究方法, 采用 T_r 除以对应叶片的同步 VPD_L 即 T_r/VPD_L 进行标准化处理。

1.6 干热风胁迫指数计算

为衡量干热风对光合速率、蒸腾速率、气孔导度等生理指标的胁迫作用, 并且可以进行多情景、多时段比较, 引入无量纲参数——干热风胁迫指数(stress index of dry-hot wind, SI), 其计算方法为^[8]:

$$\text{SI}=(X_a-X_b)/X_a \quad (1)$$

式中: X 代表 P_n 、 T_r/VPD_L 、 G_s 等生理参数, X_a 是干热风处理前数值, X_b 是干热风处理后数值。SI 的变化可以反映叶片抗干热风能力的变化。SI 降低表示抗干热风能力变强, SI 升高表示抗干热风能力变弱。

1.7 数据分析方法

本文数据使用 Excel 进行数据处理和单因素方差分析 F 检验。

2 结果与分析

2.1 冬小麦光合速率变化

虽然存在一定的年际差异, 但从 4 年整体上看,

与淡水处理相比, 矿化度 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水处理下, 小麦叶片 P_n 显著降低, 下降幅度为 $32.2\% \sim 59.3\%$ (图 1)。这表明矿化度 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉对灌浆期叶片光合作用有一定抑制作用。

这与吴忠东等^[12]及陈素英等^[11]的试验结果一致。干热风对叶片光合作用的胁迫表现的更加明显, 干热风发生后 P_n 全部显著降低, 降低幅度为 $35.4\% \sim 86.6\%$ (图 1)。这与之前报道^[8-9]的研究结果类似。

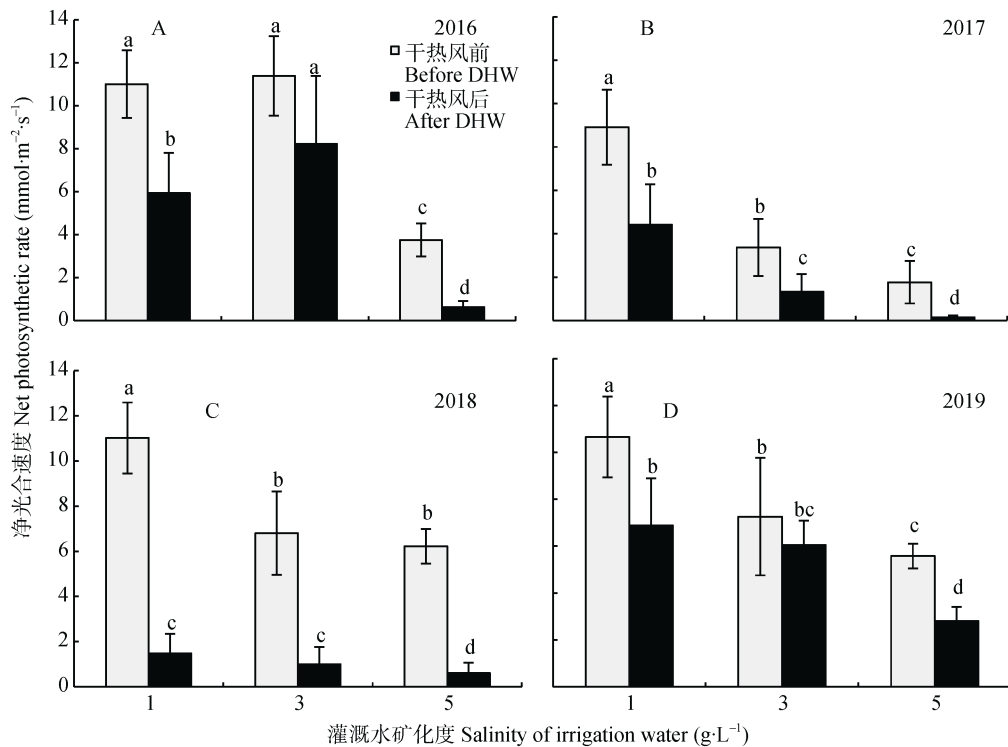


图 1 不同矿化度微咸水灌溉和干热风对冬小麦叶片净光合速率的影响

Fig. 1 Effects of brackish water irrigation with different salinities and dry-hot wind (DHW) on winter wheat leaf net photosynthetic rate
图中不同小写字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters above bars indicate significant differences at $P < 0.05$ level among different treatments.

图 2 显示 3 个灌溉水矿化梯度处理下冬小麦叶片光合速率(P_n)的干热风胁迫指数(SI)虽然存在一定年际间差异, 但从整体上看, 随着灌溉水矿化度由 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 再增加到 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, SI 呈先降低后升高态势。灌溉水矿化度为 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SI 最小, 4 个生长季平均为 0.45; 灌溉水矿化度为 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SI 最大, 为 0.74; 在灌溉水矿化度为 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SI 介于两者之间, 为 0.55。由此可见在这 3 个灌溉水矿化梯度处理中, 并不是淡水处理叶片光合作用耐受干热风的能力最强, 而是矿化度为 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水处理最强。这表明, 较低浓度的微咸水灌溉(矿化度为 $1 \sim 3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)可以增强冬小麦叶片光合作用对干热风的耐受能力; 而当灌溉水的矿化度升高到一定程度后(矿化度 $> 5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)这种作用会消失, 直至表现为干热风-盐分双重胁迫叠加。

51.9%(图 3)。这表明矿化度 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 灌溉对灌浆期叶片蒸腾作用有一定抑制作用, 与吴忠东

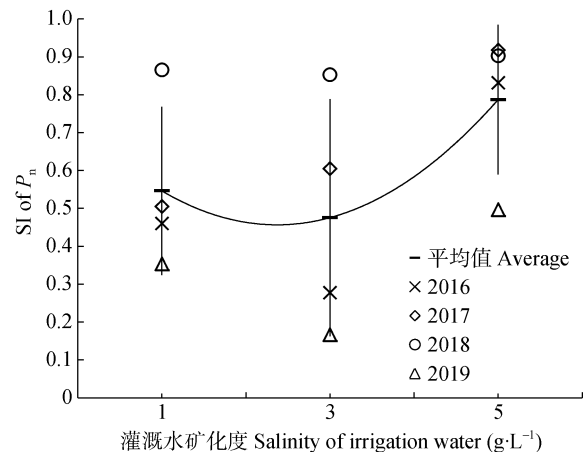


图 2 冬小麦净光合速率(P_n)的干热风胁迫指数(SI)随灌溉水矿化度升高的变化

Fig. 2 Changes of dry-hot wind stress index (SI) of net photosynthetic rate (P_n) of winter wheat with increased salinity of irrigation water

2.2 冬小麦蒸腾速率变化

从 4 年整体来看, 与淡水处理相比, 微咸水处理的叶片 T_i/VPD_L 明显偏低, 降低了 $29.2\% \sim$

等^[12]及陈素英等^[11]田间试验结果类似。干热风对叶片蒸腾作用的胁迫作用表现的更加明显, 干热风发生后 T_r/VPD_L 全部显著降低, 降低幅度在 35.6%~67.5%(图 3)。同样的现象也被其他研究者报道过^[8-9]。

随着灌溉水矿化度的增加, 冬小麦叶片 T_r/VPD_L 的 SI 呈先降低再略有升高的趋势(图 4)。这

与 P_n 的 SI 变化形式基本相同。当灌溉水矿化度为 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 4 个生长季 T_r/VPD_L 的 SI 平均值为 0.54; 在灌溉水矿化度为 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SI 迅速降低为 0.26; 在灌溉水矿化度为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SI 又回升为 0.41。这表明较低矿化度的微咸水灌溉(矿化度为 $1\sim 3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)能增强叶片蒸腾作用对干热风的耐受能力。

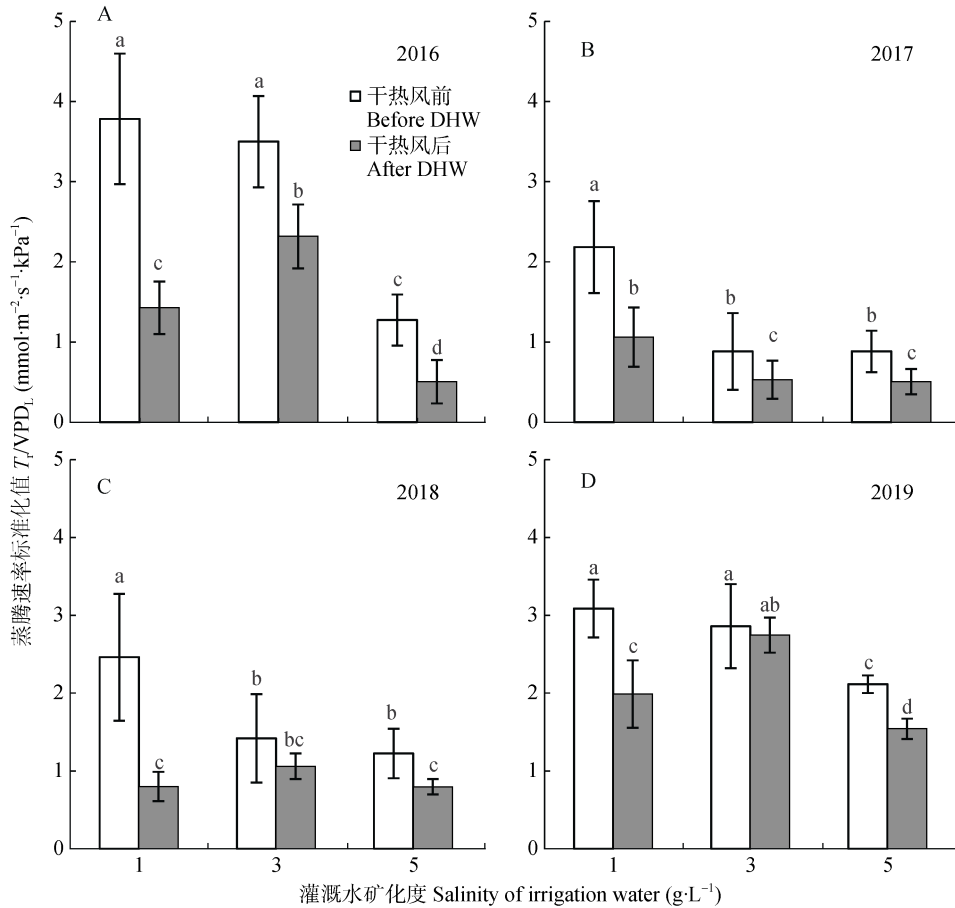


图 3 不同矿化度微咸水灌溉和干热风对冬小麦叶片蒸腾速率标准化值(蒸腾速率/水汽压饱和差)的影响

Fig. 3 Effects of irrigation water with different salinities and dry-hot wind on winter wheat leaf standardized transpiration rate [transpiration rate (T_r)/vapor pressure saturation difference (VPD_L)]

图中不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters above bars indicate significant differences at $P<0.05$ level among different treatments.

2.3 冬小麦气孔导度变化

气孔是植物控制叶片水分散失和 CO_2 交换的主要器官。综合 4 年结果分析, 与淡水处理相比, 微咸水处理的冬小麦叶片 G_s 显著降低, 下降幅度为 30.7%~54.8%(图 5)。这表明矿化度 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 灌溉处理对灌浆期叶片蒸腾作用有一定抑制作用。这与杨婷等^[13]的试验结果一致。干热风对叶片 G_s 的胁迫作用表现的更加明显, 干热风发生后 G_s 全部显著降低, 降低幅度在 36.4%~69.4%(图 5)。这与已有报道相符合^[8-9]。

冬小麦旗叶 G_s 的干热风胁迫指数(SI)随着灌溉

水矿化度的增加, 呈现先大幅度降低再略有回升的态势(图 6), 与 T_r/VPD_L 的 SI 变化情况一致。在灌溉水矿化度为 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 4 个生长季 G_s 的 SI 平均值最大, 为 0.56; 在灌溉水矿化度为 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SI 降低到最小 0.28; 在矿化度为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SI 又略升高为 0.43。这表明在微咸水灌溉(矿化度为 $3\sim 5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下, 冬小麦叶片气孔对干热风胁迫有一定的自适应调节能力。 G_s 与 T_r/VPD_L 的变化情况一致, 印证了微咸水灌溉对叶片控制水分散失速率和抵御干热风胁迫的作用特征, 即适度微咸水灌溉能增强叶片保水能力, 增强对干热风胁迫的抵御能力。

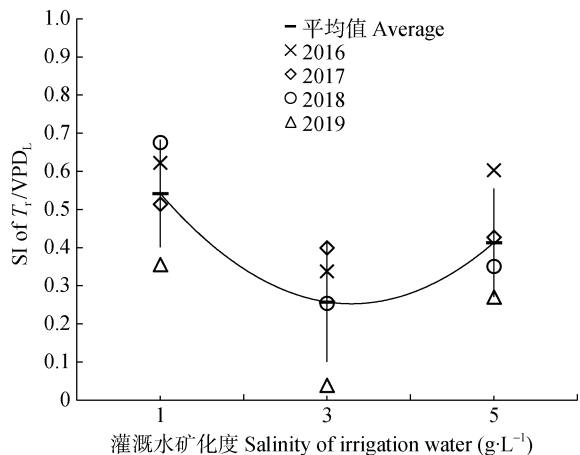


图 4 冬小麦叶片蒸腾速率标准化值(蒸腾速率/水汽压饱和差)的干热风胁迫指数(SI)随灌溉水矿化度升高的变化
Fig. 4 Changes of dry-hot wind stress index (SI) of standardized transpiration rate [transpiration rate (T_r)/vapor pressure saturation difference (VPD_L)] of winter wheat leaf with increasing salinity of irrigation water

3 讨论

3.1 冬小麦抗干热风生理适应指数与灌溉水矿化度的关系

随着灌溉水矿化度升高,冬小麦 P_n 、 T_r/VPD_L 和 G_s 的 SI 均呈现出相似的变化形态:先降低而后升高。这表明随着矿化度的提高,冬小麦叶片抗干热风生理适应能力先增强后减弱。为衡量生理适应能力,引入生理适应指数(physiological adaption index, PAI):

$$PAI = 1 - SI \quad (2)$$

将公式(1)代入公式(2):

$$PAI = 1 - SI = 1 - \frac{X_a - X_b}{X_a} = \frac{X_b}{X_a} \quad (3)$$

式中: X 代表 P_n 、 T_r/VPD_L 、 G_s 等生理参数; X_a 是干热风处理前数值, X_b 是干热风处理后数值。PAI 的变

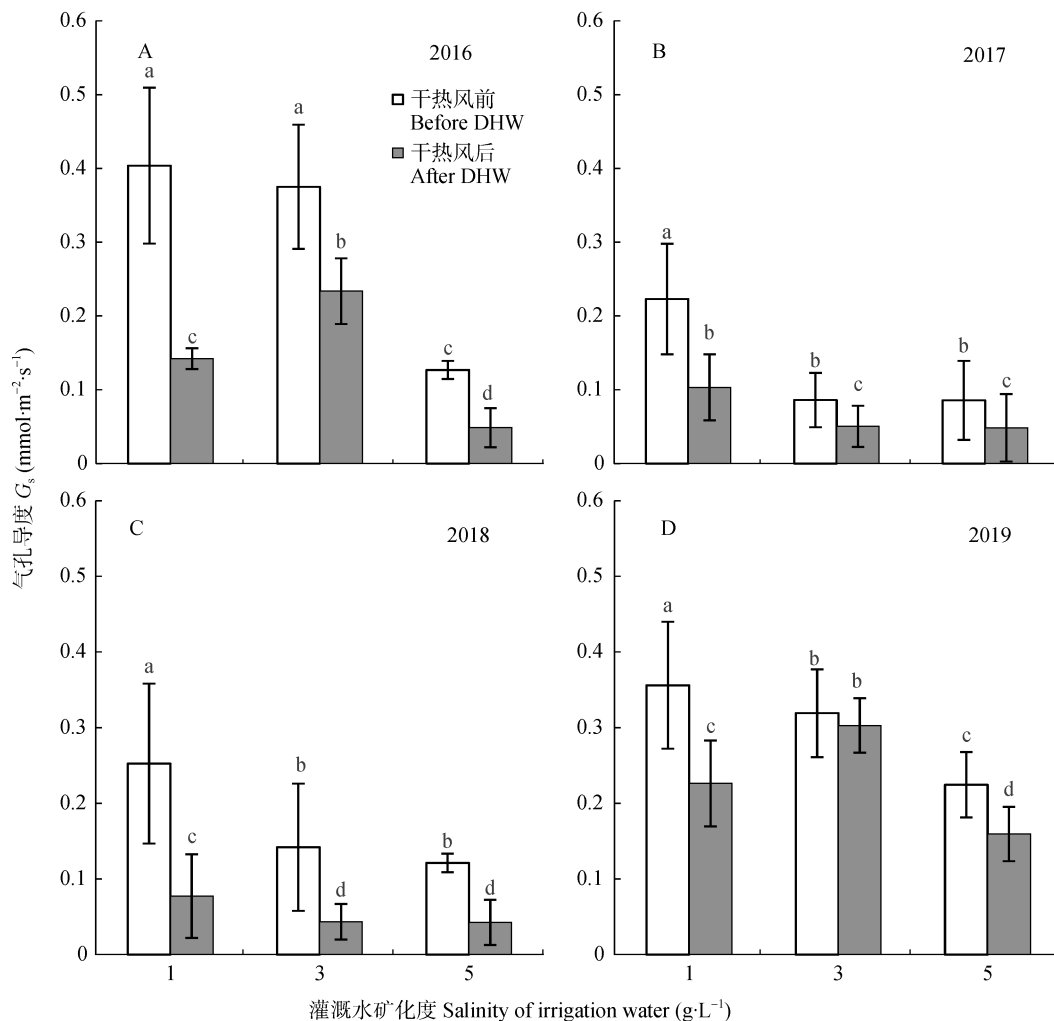


图 5 不同矿化度的灌溉水和干热风对冬小麦叶片气孔导度(G_s)的影响。

Fig. 5 Effects of irrigation water with different salinities and dry-hot wind on winter wheat leaf stomatal conductance (G_s)
图中不同小写字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters with bars indicate significant differences at $P < 0.05$ level among different treatments.

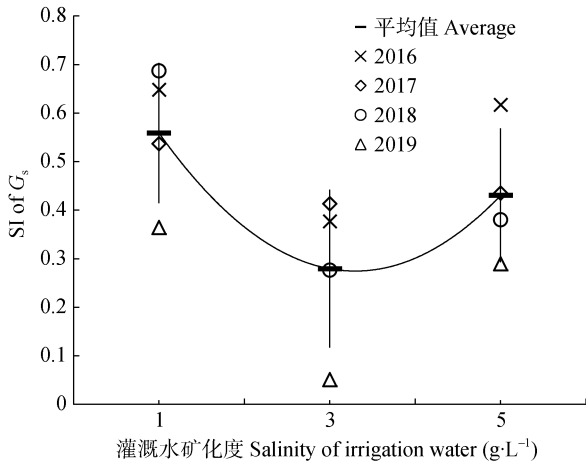


图 6 冬小麦叶片气孔导度(G_s)的干热风胁迫指数(SI)随灌溉水矿化度升高的变化

Fig. 6 Changes of dry-hot wind stress index (SI) of stomatal conductance (G_s) of winter wheat leaf with increasing salinity of irrigation water

化可以反映抗干热风生理适应能力的变化, PAI 变大表示抗干热风生理适应能力提高, PAI 减小表示抗干热风生理适应能力降低。

随着灌溉水矿化度的升高, 冬小麦叶片抗干热风生理适应能力变化过程应该可以划分为如图 7 所示的 3 个阶段: 1) 灌溉水从淡水开始轻微增加矿化度时(1~3 $g \cdot L^{-1}$), 生理适应能力增强, 表现为 PAI 变大而 SI 减小; 2) 灌溉水矿化度进一步升高时(3~5 $g \cdot L^{-1}$), 生理适应能力减弱, 表现为 PAI 减小而 SI 变大; 3) 灌溉水矿化度再升高时, 超过作物生理适应调控范围, 光合、蒸腾、气孔调控等生理过程受到严重胁迫直至停止, 生理适应能力丧失, 表现为 PAI 减小至 0 而 SI 增大至 1^[17]。

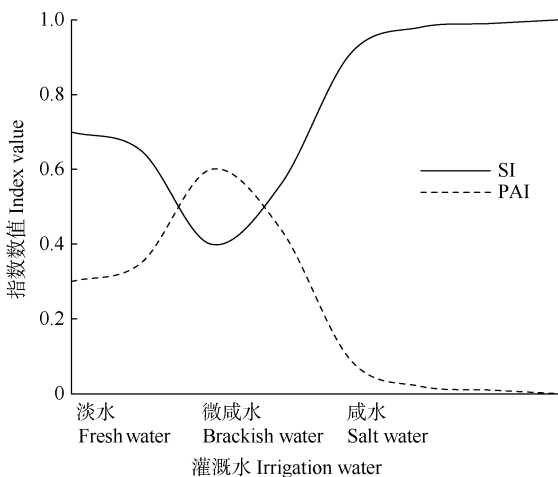


图 7 灌溉水矿化度与干热风胁迫指数(SI)、生理适应指数(PAI)的关系

Fig. 7 Patterns of dry-hot wind stress index (SI) and physiological adaptation index (PAI) with increasing salinity of irrigation water

3.2 微咸水提高作物干热风生理适应能力的机理

微咸水比淡水矿化度高, 微咸水灌溉使得土壤水势降低, 会影响作物根系吸水, 容易造成生理缺水。为应对这种持续的生理缺水, 作物一般会主动调低气孔导度, 减少蒸腾^[10-13]。因此, 微咸水灌溉对作物有类似于干旱驯化的作用。而这种驯化作用主要是通过气孔行为实现的, 调低气孔导度, 减少水分散失, 增强叶片保水能力。因此这种驯化作用会在一定程度上增强作物干热风生理适应能力。

干热风对作物的危害是迅速而急性的生理干旱。高温低湿的大气环境中, 叶片表面的水汽压饱和和差(VPD)很高, 对作物叶片有很强的蒸腾拉力, 而 3 级以上的风速会增强这种蒸腾拉力, 可以在几十分钟内造成作物叶片迅速失水, 从而造成严重的生理干旱(图 8)^[8-9]。很多时候, 即使土壤还较为湿润, 也难以及时补充叶片失水。

微咸水和干热风都会对作物产生生理干旱胁迫, 但两者又有明显的不同。微咸水灌溉对作物的生理干旱胁迫是温和而长时间的, 而干热风是剧烈而短时间的。因此, 在适度微咸水灌溉条件下, 为了适应微咸水灌溉带来的长期生理胁迫, 作物生理状态发生的变化能够增强适应生理干旱的能力。其中, 气孔导度降低就是其驯化作用的主要表现, 通过关闭部分气孔, 减少叶片与外界气体和水分的交换, 起到一定保水效果, 从而能够降低干旱灾害程度(图 8)。这种经过微咸水灌溉驯化得来的生理适应能力对于抵御生育后期(灌浆中后期)的干热风有一定的积极作用。在本试验中, 在灌溉水矿化度为 3 $g \cdot L^{-1}$ 处理下, 叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度的干热风胁迫指数都表现为比淡水处理的低, 这是驯化作用存在的证据, 也是作物生理适应能力的证据。

虽然本研究结果存在一定的年际间差异, 但整体趋势仍能够较清晰地反映出微咸水与干热风交互作用下冬小麦叶片的响应。而存在的年际间细微差异可能是由于不同年份降水量、气温的变化导致冬小麦的生长条件存在年际间差异引起, 也有可能是由于所选择观测冬小麦生育期日期的细微差别引起, 但具体原因仍需要进一步通过实验来探究。

此外, 除叶片生理层面的气孔调控作用之外, 微咸水和干热风胁迫下叶肉细胞光合活性等生化过程也可能受到影响, 发生非气孔限制作用。于潇等^[18]观测到 3 $g \cdot L^{-1}$ 矿化度微咸水对冬小麦叶片叶绿素和荧光产量影响很小, 而 5 $g \cdot L^{-1}$ 矿化度微咸水则

会明显降低叶绿素和荧光产量。燕辉等^[19]报道在干旱胁迫下冬小麦叶片 PS 最大光化学效率显著降低,表现出明显的叶肉细胞光合能力下降。赵风华等^[8]通过轻度和重度干热风对比试验发现干热风引起气孔部分闭合,气孔导度减小是光合蒸腾受抑制的主要原因,重干热风下光合还明显受到非气孔限制;非气孔因素是导致同等干热风条件下光合受抑制程度大于蒸腾的原因。但目前还没有在微咸水和干热

风双重胁迫下,叶片光合非气孔限制的观测数据和分析。在本研究中我们观测到了微咸水和干热风处理下气孔导度减小,在 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉条件下干热风胁迫指数减小,这些可以证实气孔调控作用的存在和对提高生理适应能力的作用。为深入和全面解析,微咸水和干热风对叶片光合作用的影响,还需要对叶肉细胞光合活性、叶绿素含量、荧光参数等生化层面的指标进行更多研究。

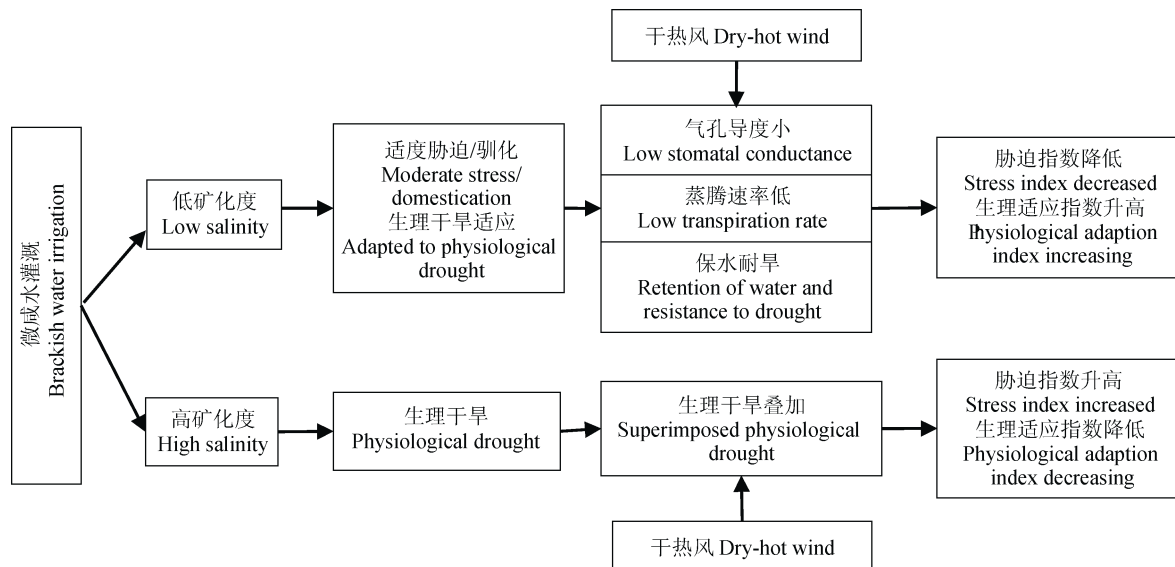


图 8 微咸水灌溉对作物干热风适应能力的驯化提高作用示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the acclimation by brackish water irrigation against the dry-hot wind stress on crops

3.3 气候变暖背景下微咸水灌溉的应用前景

许多研究者认为未来几十年华北平原暖干化趋势^[14]。暖干化会增加冬小麦灌溉需水量,这将加剧水资源不足问题。另外,暖干化还会增加干热风发生频率和灾害等级。浅层微咸水灌溉有望弥补华北平原淡水资源不足。根据我们 4 个生长季的田间试验,含盐量 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右的微咸水可以增强冬小麦对干热风的生理适应能力。虽然目前这个发现仅限于叶片尺度光合蒸腾气孔行为等生理层面,但为未来合理应用微咸水并且避免受到干热风双重胁迫,提供了一个可能性依据。说明冬小麦本身是存在同时适应微咸水和干热风胁迫的能力的。如果掌握了其内在生理、生化、分子或基因层面的机理机制,有望进一步通过农艺调控、现代育种技术增强和稳定化或者通过化控等技术进行强化,这对开发利用微咸水资源保障冬小麦生产具有积极意义。

4 结论

综合本研究的大田微咸水灌溉-灌浆期干热风胁迫试验观测结果和相关研究结果,得到以下 3 点

结论:

1) 低矿化度的微咸水灌溉(矿化度 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)对冬小麦干热风生理适应能力有增强作用,具体表现为:与淡水灌溉相比,低矿化度微咸水灌溉处理的冬小麦叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度干热风胁迫指数均明显降低。

2) 在灌溉水矿化度升高后(矿化度达到 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),冬小麦干热风生理适应能力会削弱,其叶片光合、蒸腾、气孔的干热风胁迫指数均会升高。

3) 低矿化度微咸水灌溉增强干热风生理适应能力的生理基础是微咸水环境导致的轻度生理干旱适应,这种生理适应主要是通过减小气孔导度实现。

参考文献 References

- [1] 于静洁, 吴凯. 华北地区农业用水的发展历程与展望[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1493-1497
YU J J, WU K. Past and perspective of agricultural water supply in the North China[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1493-1497
- [2] 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 CSAE, 2010, 26(1): 73–80
- [3] 刘静, 高占义. 中国利用微咸水灌溉研究与实践进展[J]. 水利水电技术, 2012, 43(1): 101–104
LIU J, GAO Z Y. Advances in study and practice of brackish water irrigation in China[J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2012, 43(1): 101–104
- [4] 陈素英, 邵立威, 孙宏勇, 等. 微咸水灌溉对土壤盐分平衡与作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1049–1058
CHEN S Y, SHAO L W, SUN H Y, et al. Effect of brackish water irrigation on soil salt balance and yield of both winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1049–1058
- [5] 张朝, 王品, 陈一, 等. 1990 年以来中国小麦农业气象灾害时空变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1453–1460
ZHANG C, WANG P, CHEN Y, et al. Spatio-temporal changes of agrometeorological disasters for wheat production across China since 1990[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(11): 1453–1460
- [6] 邓振镛, 王强, 张强, 等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6278–6288
DENG Z Y, WANG Q, ZHANG Q, et al. Impact of climate warming and drying on food crops in northern China and the countermeasures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6278–6288
- [7] IPCC. Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report 2007[M]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007
- [8] 赵风华, 居辉, 欧阳竹. 干热风对灌浆期冬小麦旗叶光合蒸腾的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(5): 144–148
ZHAO F H, JU H, OUYANG Z. Effects of dry-hot wind on photosynthesis and transpiration of flag leaf of winter wheat at filling stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(5): 144–148
- [9] 张志红, 成林, 李书岭, 等. 干热风天气对冬小麦生理的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 712–717
ZHANG Z H, CHENG L, LI S L, et al. Dry-hot wind effects on physiology of winter wheat[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3): 712–717
- [10] EL-HENDAWY S E, HU Y C, YAKOUT G M, et al. Evaluating salt tolerance of wheat genotypes using multiple parameters[J]. European Journal of Agronomy, 2005, 22(3): 243–253
- [11] 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
CHEN S Y, ZHANG X Y, SHAO L W, et al. Effect of deficit irrigation with brackish water on growth and yield of winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 579–585
- [12] 吴忠东, 王全九. 黄淮海平原冬小麦对盐分胁迫的响应研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 99–104
WU Z D, WANG Q J. Response to salt stress about winter wheat in Huanghuaihai Plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 99–104
- [13] 杨婷, 谢志霞, 喻琼, 等. 局部根系盐胁迫对冬小麦生长和光合特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1074–1078
YANG T, XIE Z X, YU Q, et al. Effects of partial root salt stress on seedling growth and photosynthetic characteristics of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(9): 1074–1078
- [14] 中华人民共和国气象行业标准. 小麦干热风灾害等级[M]. 北京: 气象出版社, 2007
Meteorological Industry Standards of the People's Republic of China. Grades of Dry and Hot Wind Disasters in Wheat[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007
- [15] BIERHUIZEN J F, SLATYER R O. Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves[J]. Agricultural Meteorology, 1965, 2(4): 259–270
- [16] STEDUTO P, ALBRIZIO R. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea: Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(3/4): 269–281
- [17] 刘恩良, 任威, 马林, 等. 3 种盐胁迫对小麦三叶期生理功能的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(6): 21–25
LIU E L, REN W, MA L, et al. Influence of three salt stress on physiological function of wheat trefoil stage[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009, 32(6): 21–25
- [18] 于潇, 侯云寒, 徐征和, 等. 微咸水灌溉对冬小麦光合及荧光动力学参数的影响[J]. 节水灌溉, 2019, (2): 102–106
YU X, HOU Y H, XU Z H, et al. Effects of brackish water irrigation on photosynthetic characteristics and fluorescence kinetics parameters of winter wheat[J]. Water Saving Irrigation, 2019, (2): 102–106
- [19] 燕辉, 胡笑涛, 姚付启. 限量灌溉对冬小麦光合与叶绿素荧光的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 49–54
YAN H, HU X T, YAO F Q. Effects of limited irrigation on photosynthesis and fluorescence of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 49–54