

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.036

# 微咸水灌溉下冬小麦光合作用与光响应曲线模拟

庞桂斌<sup>1,2</sup> 张立志<sup>3</sup> 丛鑫<sup>1</sup> 潘维艳<sup>1</sup> 徐征和<sup>1,4</sup> 徐俊增<sup>5</sup>

(1. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022; 2. 山东省地下水数值模拟与污染控制工程技术研究中心, 济南 250022;  
3. 山东省水利科学研究院, 济南 250014; 4. 山东省生态固碳与捕集利用工程技术研究中心, 济南 250022;  
5. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 为揭示微咸水灌溉下冬小麦的光合生理响应机理, 在黄河三角洲地区的典型引黄灌区开展了冬小麦微咸水灌溉大田试验, 研究了两种灌溉处理(淡水处理(矿化度 0 g/L)和微咸水处理(矿化度 3 g/L))条件下, 冬小麦抽穗期(2016年5月1日和2017年5月1日)和开花期(2016年5月10日和2017年5月12日)蒸腾速率、净光合速率、气孔限制值及光响应曲线模拟特征参数等指标变化规律。结果表明, 与淡水处理相比, 2016、2017年微咸水灌溉导致浅层(0~40 cm)土壤含盐量显著增加了 37.8%、64.3%; 抑制了抽穗开花期冬小麦的蒸腾作用, 2016、2017年微咸水灌溉处理冬小麦抽穗期蒸腾速率降低了 19.1%、31.4%, 开花期降低了 11.6%、11.0%; 午前净光合速率的下降主要受到气孔因素和非气孔因素共同影响, 午后由于非气孔因素的改善, 微咸水处理冬小麦净光合速率超过淡水处理, 却伴随着较高的气孔限制值。引入直角双曲线修正模型进行光合特征参数拟合发现, 微咸水灌溉有利于增强抽穗开花期冬小麦对于强光和高温的适应能力并且可以提升冬小麦利用弱光的能力, 暗呼吸速率的下降可以保证较快的干物质累积。因此, 微咸水灌溉并未对冬小麦抽穗开花期叶片光合作用产生负面影响, 反而一定程度上促进了冬小麦利用光能的潜力。

**关键词:** 冬小麦; 微咸水灌溉; 光合作用; 光响应模型

中图分类号: S274.1; S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0333-10

OSID:



## Leaf Photosynthesis and Light Response Curve Simulation of Winter Wheat under Brackish Water Irrigation

PANG Guibin<sup>1,2</sup> ZHANG Lizhi<sup>3</sup> CONG Xin<sup>1</sup> PAN Weiyang<sup>1</sup> XU Zhenghe<sup>1,4</sup> XU Junzeng<sup>5</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Ji'nan 250022, China

2. Shandong Provincial Engineering Technology Research Center for Groundwater Numerical Simulation and Contamination Control, Ji'nan 250022, China

3. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250014, China

4. Shandong Provincial Engineering Technology Research Center for Ecological Carbon Sink and Capture Utilization, Ji'nan 250022, China

5. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to reveal the photosynthetic physiological response mechanism for winter wheat under brackish water irrigation, a two-year field test was conducted in Yellow River Delta (2015—2016 and 2016—2017), Shandong Province, North China. Two irrigation treatments (irrigating 80 mm with fresh water each at jointing, heading and milking stages, and irrigating 80 mm with fresh (0 g/L)-saline (3 g/L)-saline (3 g/L) water each at jointing, heading and milking stages) were designed. Test items included transpiration rate, net photosynthetic rate and stomatal conductance at the heading and flowering stages of winter wheat. Stomatal limitation and non-stomatal limitation values of leaf photosynthesis were calculated, meanwhile, changes of winter wheat leaf photosynthetic parameters of light response curve were observed. The results showed that in comparison with fresh water irrigation (CK), brackish water irrigation resulted in a significant increase of 37.8% and 64.3% of salt content in shallow soil layer (0~40 cm) in 2016 and 2017, respectively, inhibited the transpiration at heading and flowering stages of winter wheat. Transpiration rate was decreased by 19.1% and 31.4% at heading stage, and by 11.6%

收稿日期: 2020-11-23 修回日期: 2021-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509105)和山东省自然科学基金项目(ZR2020ME255)

作者简介: 庞桂斌(1981—),男,副教授,博士,主要从事节水灌溉与农田生态环境研究, E-mail: stu\_panggb@ujn.edu.cn

and 11.0% at flowering stage in 2016 and 2017, respectively, the net photosynthetic rate was decreased before noon in the day, in which stomatal factors and non-stomatal factors inhibited leaf photosynthesis of winter wheat, but it can increase net photosynthetic rate in the afternoon, with a higher stomatal limitation value indicated that the non-stomatal factors were improved. The modified rectangular hyperbolic model of light response were introduced to obtain the photosynthesis parameters, the maximum net photosynthetic rate ( $P_{nmax}$ ) of winter wheat under brackish water irrigation in 2015—2016 were increased by  $2.27 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $1.58 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  at the heading and flowering stages, respectively, light saturation point (LSP) were increased by  $29.27 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $70.11 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , light compensation point (LCP) was decreased by  $19.38 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $4.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , dark respiration rate ( $R_d$ ) was decreased by  $0.96 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $1.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  compared with fresh water irrigation, while in 2016—2017, the maximum net photosynthetic rate ( $P_{nmax}$ ) under brackish water irrigation were increased by  $1.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $1.83 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  at the heading and flowering stages respectively, light saturation point (LSP) were increased by  $15.07 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $19.9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , light compensation point (LCP) was decreased by  $7.87 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $18.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , dark respiration rate ( $R_d$ ) was decreased by  $3.33 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $5.17 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  compared with fresh water irrigation, it was showed that the saline water treatment enhanced the adaptability against strong light and high temperature conditions at the heading and flowering stages, promoted the ability using weak light of winter wheat. Therefore, brackish water irrigation did not negatively affect leaf photosynthesis in heading and flowering stage of winter wheat, but promoted the potential of utilizing light energy of winter wheat to some extent.

**Key words:** winter wheat; brackish water irrigation; photosynthesis; light response model

## 0 引言

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、抗旱增产有着极其重要的作用。微咸水用于灌溉,在提供作物生长所需水分的同时,也给土壤带入大量盐分<sup>[1-2]</sup>。目前的研究主要关注微咸水灌溉方法及其水土环境效应、作物影响等方面,包括灌溉技术<sup>[3-5]</sup>、灌溉制度<sup>[6-7]</sup>、灌溉水质<sup>[8]</sup>、土壤水盐运移<sup>[9-11]</sup>、土壤理化性质<sup>[12-13]</sup>、地下水环境<sup>[14]</sup>、作物生长和产量品质<sup>[15-17]</sup>等,积累了较多的经验,而微咸水灌溉对不同作物生长影响的内在机理及作物遭受盐分胁迫后的调节机制仍需进一步研究。微咸水灌溉导致土壤含盐量增加,势必会影响土壤溶液的渗透势,从而会改变土壤水分的有效性,可能会引发生理干旱,同时土壤-植物根系-植物叶片水势梯度的变化,会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<sup>[18-20]</sup>,因此微咸水灌溉下的作物生理响应规律及其适应机制有待进一步深入研究。

光合作用是作物生长发育的基础和生产力的决定性因素,是作物育种、栽培以及作物应对环境胁迫领域研究的重要指标。为了定量研究作物光合速率对光照强度的响应特征,国内外学者通过建立光响应模型,例如直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数模型、直角双曲线修正模型等<sup>[21-22]</sup>,模拟得出

反映作物光合生理生态过程的基础参数,学者们还对不同水肥调控、逆境胁迫下的多种作物进行光响应曲线模型比较研究<sup>[23]</sup>,但针对冬小麦在微咸水灌溉条件下的光响应特征相关研究报道相对较少。以往的研究表明,修正的直角双曲线模型克服了其他几类模型无法直接获得植物的最大净光合速率和饱和光照强度等指标的缺陷,可以直接求得最大净光合速率、光补偿点和饱和光照强度等参数,而且其参数拟合效果较好<sup>[24]</sup>。本文以黄河三角洲地区的主要灌溉粮食作物冬小麦作为研究对象,选择直角双曲线修正模型<sup>[25]</sup>,研究微咸水灌溉条件下抽穗期和开花期冬小麦旗叶的光合作用及光响应特征,揭示微咸水灌溉下冬小麦的光合生理响应规律与调节机制,为该类地区制定较为合理的微咸水灌溉策略提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于山东省滨州市沾化区下洼镇张王二村(图1a),地处韩墩引黄灌区的梢段,北纬 $37^{\circ}34'$ ,东经 $117^{\circ}45'$ ,属于暖温带季风气候区,大陆性气候特征明显,四季差别显著。年平均日照时数为 $2\,690.3\text{ h}$ ,年平均气温 $12^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量 $575.5\text{ mm}$ ,年内降水量季节分配不均匀,年均蒸降比为 $3.22$ ,易造成地下水上升,土壤返盐,形成土壤盐碱化。试验区地下水位埋深在 $2\sim 3\text{ m}$ ,浅层地下水矿化度为 $5\sim 10\text{ g/L}$ 。试验区 $0\sim 40\text{ cm}$ 土壤平均

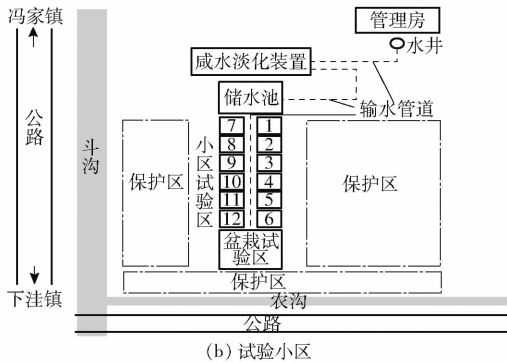
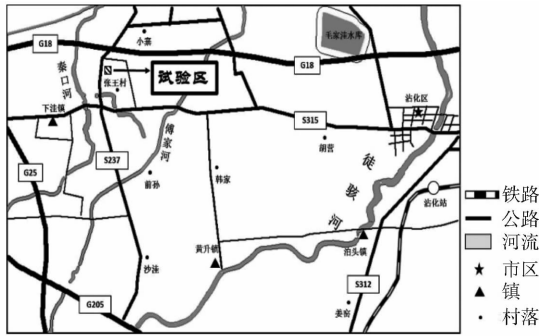


图 1 试验区位置和试验小区布置图

Fig. 1 Location of experimental site and layout for experimental plots

含盐量为 2.11 g/kg,按照土壤盐渍化分布等级<sup>[26]</sup>,属于中度盐碱地。根据土壤粒径分析,0~20 cm 为壤土,20~40 cm 为砂质壤土,40~60 cm 为砂质壤土,60~80 cm 为壤质砂土,80~100 cm 为壤土,土壤理化性质见表 1。2015—2016 年小麦生育期内降雨总量为 139.1 mm,2016—2017 年小麦生育期内降雨总量为 117.5 mm,如图 2 所示。

1.2 试验设计

设置 2 种灌溉处理(微咸水和淡水处理(对照处理)),每个处理设 3 次重复,共 6 个试验小区,小区面积为 18 m<sup>2</sup>(6 m × 3 m)(图 1b)。为避免侧渗干扰,小区之间设置 0.5 m 隔离带和 1.5 m 深塑料薄膜。供试作物为冬小麦,2015—2016 年生长季播种日期为 2015 年 10 月 8 日,次年 6 月 13 日收获,生育期为 249 d,2016—2017 年生长季播种日期为 2016 年 10 月 8 日,次年 6 月 12 日收获,生育期为 248 d。其他措施与常规大田生产相同,并保持所有处理一致。

微咸水灌溉所用水源来自试验区浅层地下水,经咸水淡化装置淡化处理后的矿化度低至 0.20 ~

表 1 试验区土壤理化性质

Tab. 1 Soil physical and chemical properties of experimental area

| 土层深度/<br>cm | pH 值 | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup>               | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Ca <sup>2+</sup>              | Mg <sup>2+</sup>              | K <sup>+</sup>                | Na <sup>+</sup>               | 全盐含量/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------|------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|             |      |                              | 质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |                                |
| 0~20        | 7.30 | 1.39                         | 0.01                          | 0.01                          | 0.51                          | 0.46                          | 0.1                           | 0.03                          | 0.1                           | 0.14                          | 1.36                           |
| 20~40       | 7.13 | 1.33                         | 0.01                          | 0.02                          | 1.95                          | 0.42                          | 0.12                          | 0.02                          | 0.08                          | 0.24                          | 2.86                           |
| 40~60       | 7.07 | 1.32                         | 0.01                          | 0.02                          | 0.76                          | 0.36                          | 0.07                          | 0.02                          | 0.08                          | 0.23                          | 1.56                           |
| 60~80       | 7.03 | 1.36                         | 0.01                          | 0.01                          | 0.25                          | 0.18                          | 0.1                           | 0.03                          | 0.07                          | 0.12                          | 0.78                           |
| 80~100      | 7.03 | 1.46                         | 0                             | 0.01                          | 0.27                          | 0.22                          | 0.14                          | 0.02                          | 0.06                          | 0.14                          | 0.85                           |

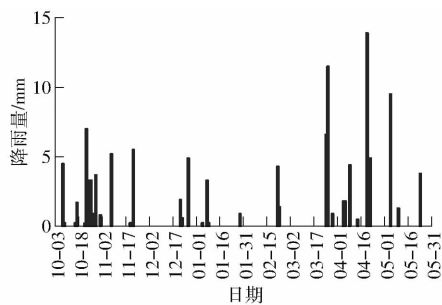
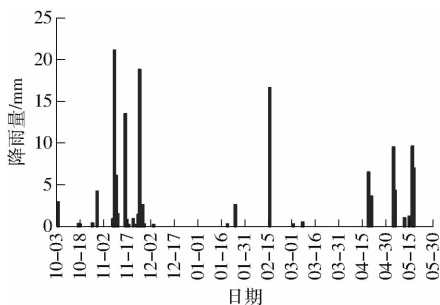


图 2 2015—2016 年和 2016—2017 年小麦生育期降雨量

Fig. 2 Precipitation in winter wheat growing seasons of 2015—2016 and 2016—2017

0.23 g/L,直接作为淡水水源。将处理后的淡水和抽取的地下咸水储存在蓄水池进行充分混合,将矿化度调至 3 g/L,作为微咸水灌溉水源。根据以往研究发现,冬小麦幼苗期对盐分比较敏感<sup>[27]</sup>,因此在灌溉试验设计时返青—拔节期间使用淡水。中后期采用了拔节—抽穗期和抽穗—灌浆期灌溉微咸水的组

合方案,2016 年分别于 3 月 11 日、4 月 21 日和 5 月 15 日进行灌溉,2017 年分别于 3 月 15 日、4 月 23 日和 5 月 12 日进行灌溉。具体灌水方案见表 2。

1.3 观测内容与与方法

土壤含盐量:采用对角线(三点法)取样,在返青后各个生育期和灌溉后采用取土钻分别采集 0~

表2 冬小麦微咸水灌溉方案

Tab.2 Brackish water irrigation scheme of winter wheat

| 灌溉处理 | 灌水定额 | mm                     |                        |                     |
|------|------|------------------------|------------------------|---------------------|
|      |      | 返青-拔节期<br>(3月5日—4月15日) | 拔节-抽穗期<br>(4月16日—5月4日) | 抽穗-灌浆期<br>(5月5—24日) |
| 微咸水  | 240  | 80(淡水)                 | 80(3 g/L 微咸水)          | 80(3 g/L 微咸水)       |
| 淡水   | 240  | 80(淡水)                 | 80(淡水)                 | 80(淡水)              |

20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 层土壤,参考《土壤农业化学分析方法》,采用水土质量比为 5:1 的土壤浸提液滴定法测定各盐离子含量,并计算出相应的土壤全盐含量。

光合特性:采用英国 ADC 公司生产的 LCpro-SD 型便携式光合作仪,测量冬小麦叶片净光合速率( $P_n$ ,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、蒸腾速率( $T_r$ ,  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、气孔导度( $G_s$ ,  $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ ,  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )、大气  $\text{CO}_2$  浓度( $C_a$ ,  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )等生理指标。在冬小麦抽穗期、开花期、灌浆期和乳熟期选择典型晴好天气,沿小区对角线选择 3 片旗叶,于 08:00—16:00 每隔 2 h 进行测定。

光响应特征曲线:在拔节期微咸水灌溉后的抽穗期和开花期,选择典型晴好天气,在观测日的 10:00—12:00 期间,采用 LCpro-SD 便携式光合作仪,测定冬小麦旗叶的光响应特征。测定时利用人工光源自动控制光合有效辐射通量密度,分别设定为 2 000、1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、100、50、0  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (共 13 个梯度),每个光照强度梯度下测定时间为 120 s。光响应特征曲线模拟采用直角双曲线修正模型,模型表达式为

$$P_n(I) = \alpha I \frac{1 - \beta I}{1 - \gamma I} - R_d \quad (1)$$

式中  $P_n(I)$ ——净光合速率函数

$\alpha, \beta, \gamma$ ——系数

$I$ ——光合有效辐射,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$R_d$ ——植物的暗呼吸速率,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

模型特征参数的计算方法参照文献[24]。

气孔限制值<sup>[28]</sup>( $L_s, \%$ )计算公式为

$$L_s = (C_a - C_i) / C_a \times 100\% \quad (2)$$

## 1.4 数据分析

统计分析和显著性检验采用 IBM SPSS Statistics 22.0 完成,非线性模型模拟参数求解采用 1stopt 1.5 专业版完成,图表绘制采用 Microsoft Excel 2013 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 微咸水灌溉对土壤盐分的影响

返青期两个处理采用淡水灌溉,土壤盐分经水

分淋洗向下运移,盐分下降明显。至拔节期灌溉前,土壤含盐量变化较小,返盐不明显。拔节期灌溉后,淡水处理土壤含盐量进一步下降,微咸水处理由于盐分进入土壤,土壤表层含盐量增加。由图 3 可知,在 2016、2017 年 0~20 cm 土壤含盐量分别增加 0.8、0.49 g/kg; 20~40 cm 土壤含盐量分别增加 0.92、0.05 g/kg。至冬小麦灌浆期灌溉前,气温升高,土壤水分蒸发加强,各处理均出现不同程度的返盐。灌浆期灌溉后,两年的淡水处理土壤浅层(0~40 cm)土壤全盐含量分别下降至 2.25、2.28 g/kg,微咸水灌溉处理土壤浅层(0~40 cm)全盐含量分别上升了 1.68、2.67 g/kg。从整个生育期来看,与淡水处理相比,2016、2017 年微咸水灌溉导致浅层(0~40 cm)土壤含盐量显著增加了 37.8% 和 64.3%,而深层(40~60 cm)土壤含盐量分别增加了 9.1% 和减少了 8.3%,变化不显著( $p > 0.05$ )。此外,该区域自 4 月下旬开始,降雨逐渐增多,可以对盐分进行淋洗,降低土壤含盐量,减轻微咸水灌溉对作物生长的影响以及下茬轮作种植的影响。

### 2.2 微咸水灌溉对冬小麦蒸腾速率的影响

选取拔节期灌溉后典型日 08:00—16:00 期间 5 个时刻测定的冬小麦叶片蒸腾速率,分析微咸水灌溉对冬小麦叶片蒸腾速率日变化的影响(图 4)。

由图 4 可以看出,冬小麦叶片蒸腾速率日变化呈现出“单峰型”(2017 年 5 月 12 日)和“双峰型”(2016 年 5 月 1 日、2016 年 5 月 10 日、2017 年 5 月 1 日)的变化规律,“单峰型”在 12:00 左右达到峰值,由于当天午间为多云天气,气孔蒸腾在午间仍然保持在较高水平。“双峰型”在 10:00 左右达到第 1 个峰值,在 12:00 左右有所下降,到 14:00 左右达到第 2 个峰值,这是由于在光照较为强烈的午间,作物为了控制自身失水过多关闭了部分气孔,导致蒸腾速率的下降。

不同灌溉处理的差异明显,微咸水灌溉处理冬小麦叶片蒸腾速率日均值均低于淡水处理,2016 年和 2017 年抽穗期分别降低了 19.1% 和 31.4%,处理间差异显著( $p < 0.05$ ),而 2016 年和 2017 年开花期分别降低了 11.6% 和 11.0%,处理间差异并不显著。由 2.1 节可知,拔节期微咸水处理灌后 0~40 cm 表层土壤含盐量较灌溉前增加了 73.3%

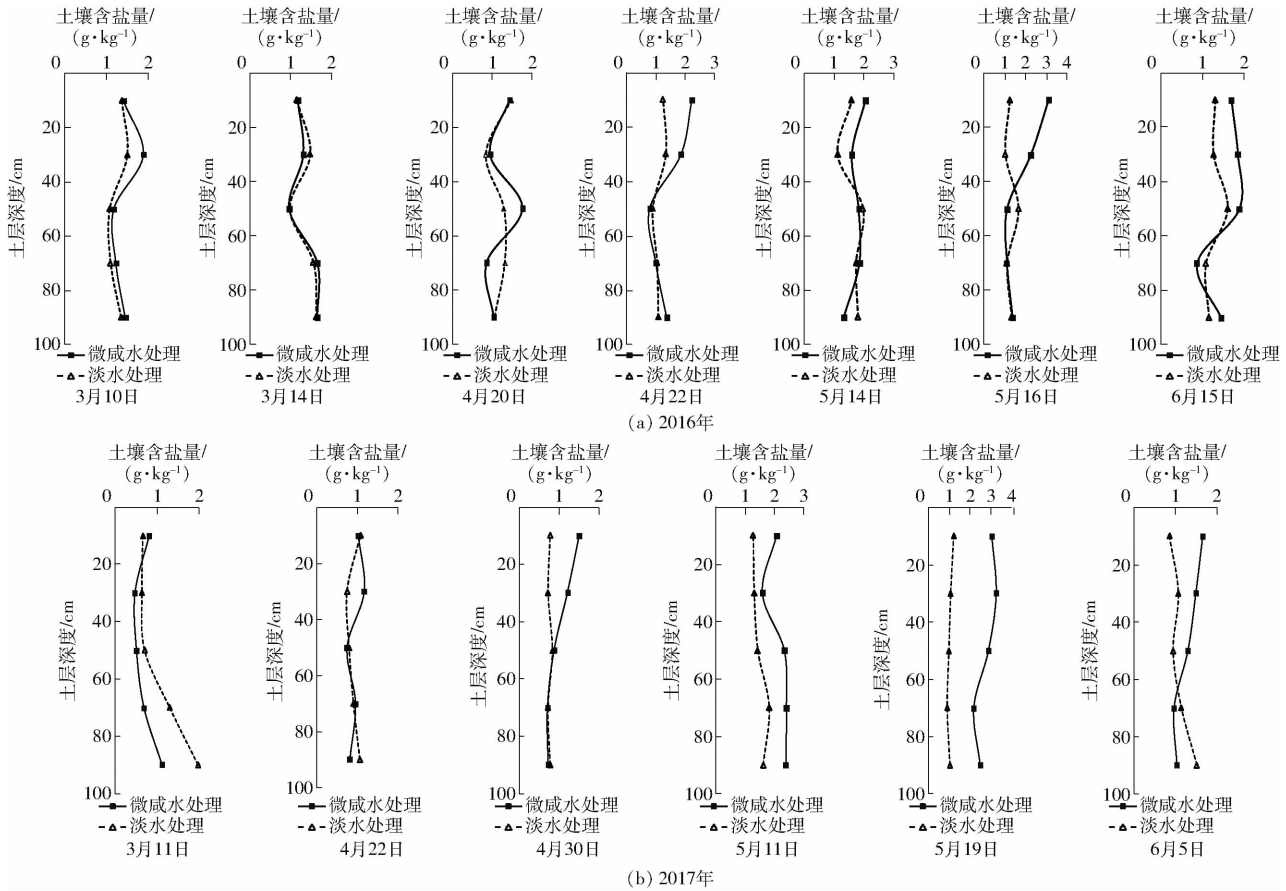


图 3 2016 年和 2017 年各处理土壤含盐量变化曲线

Fig. 3 Change curves of soil salinity in different treatments

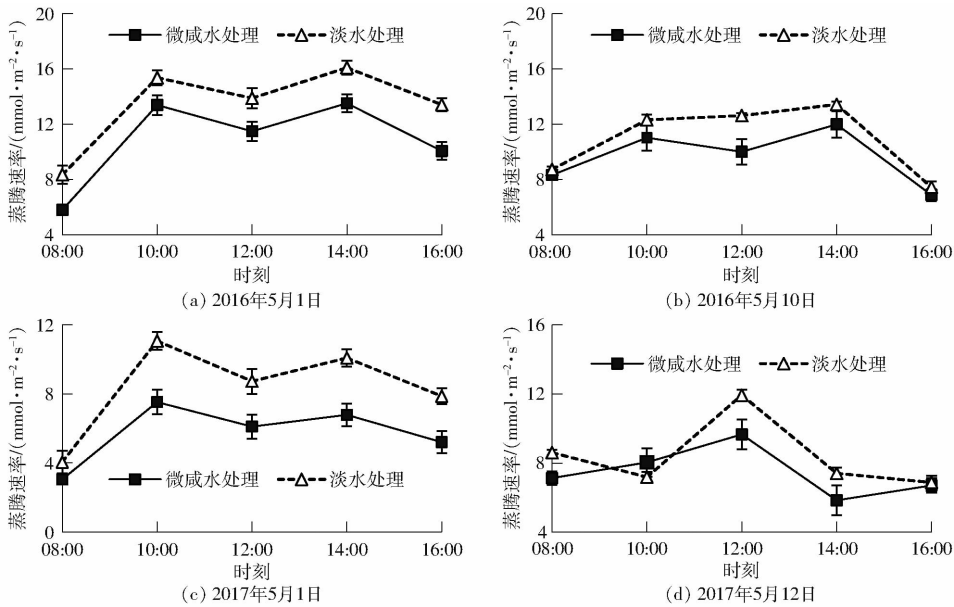


图 4 冬小麦叶片蒸腾速率日变化曲线

Fig. 4 Leaf transpiration rate diurnal change curves of winter wheat

(图 3), 微咸水灌溉使得土壤含盐量上升, 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, 引起部分气孔关闭, 冬小麦叶片的蒸腾速率下降。但是随着时间推移, 微咸水灌溉对作物蒸腾速率的负面影响在降低, 这与作物自身对盐分的适应调节机制及土壤

水分等因素有关。

### 2.3 微咸水灌溉对冬小麦净光合速率的影响

分析冬小麦叶片净光合速率的日变化规律 (图 5) 可以看出, 日变化趋势不尽相同, 有的呈现“单峰型”曲线变化, 有的呈现“双峰型”曲线变化, 还有的呈现“下降型”变化趋势, 这是由于光合速率受作物

自身、土壤水盐以及气候环境等因素的综合影响所致。但是可以看出,一天当中净光合速率的最高值出

现在午前,而作物午间受到强光照胁迫时出现了“光合午休”的现象,这与前人的研究结果一致<sup>[29]</sup>。

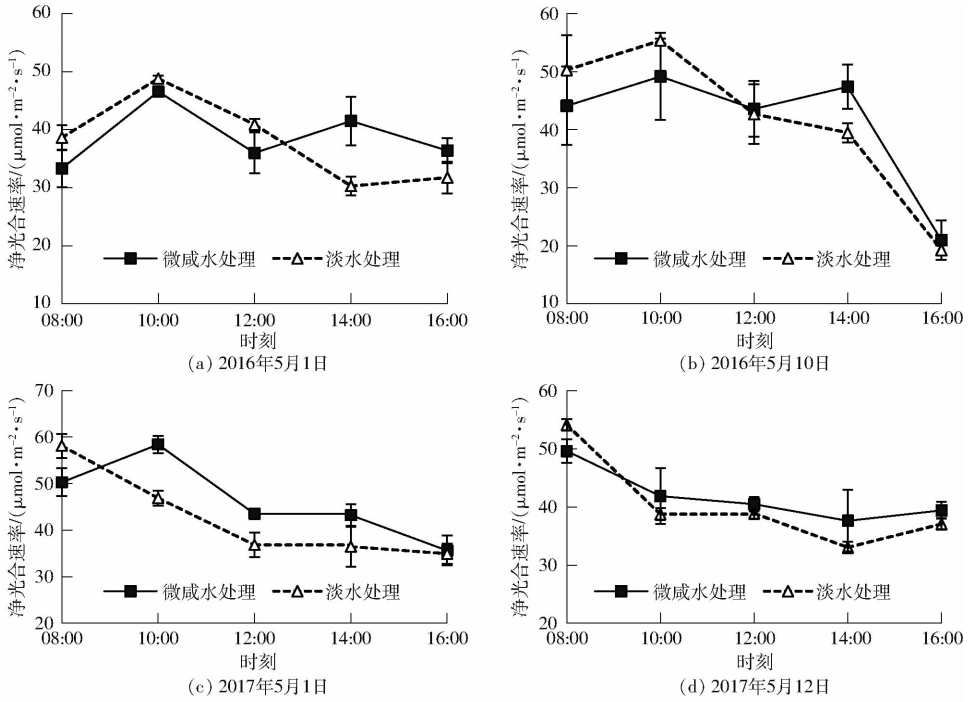


图5 冬小麦叶片净光合速率日变化曲线

Fig. 5 Leaf net photosynthetic rate diurnal change curves of winter wheat

比较两种灌溉处理的净光合速率的日变化差异可以看出,在2016年的抽穗期和开花期,12:00之前,微咸水灌溉处理的净光合速率较淡水处理降低了9.7%和7.7%,在12:00之后,微咸水灌溉处理的净光合速率出现反弹,而微咸水灌溉处理净光合速率日均值仅降低了0.8%和0.9%。2017年抽穗期和开花期,两种灌溉处理也表现出相似的变化规律,只是微咸水灌溉处理高于淡水处理的时间提前到10:00,计算净光合速率日均值可以发现,微咸水灌溉处理较淡水处理增加了8.3%和3.5%,处理间

差异并不显著( $p > 0.05$ ),这也表明微咸水灌溉并没有显著降低冬小麦抽穗开花期叶片净光合速率,反而提高了叶片午后的光合效率,可见盐分处理的作物在高温和强光下具有更高的光合速率<sup>[19]</sup>。

#### 2.4 微咸水灌溉对冬小麦气孔限制值的影响

冬小麦叶片光合作用主要受气孔因素和非气孔因素影响,在不同的条件下占主导地位的因素不同<sup>[30]</sup>。分析不同灌溉处理下的冬小麦气孔限制值变化规律(图6)可知,抽穗期(2016年5月1日、2017年5月1日)和开花期(2016年5月10日、

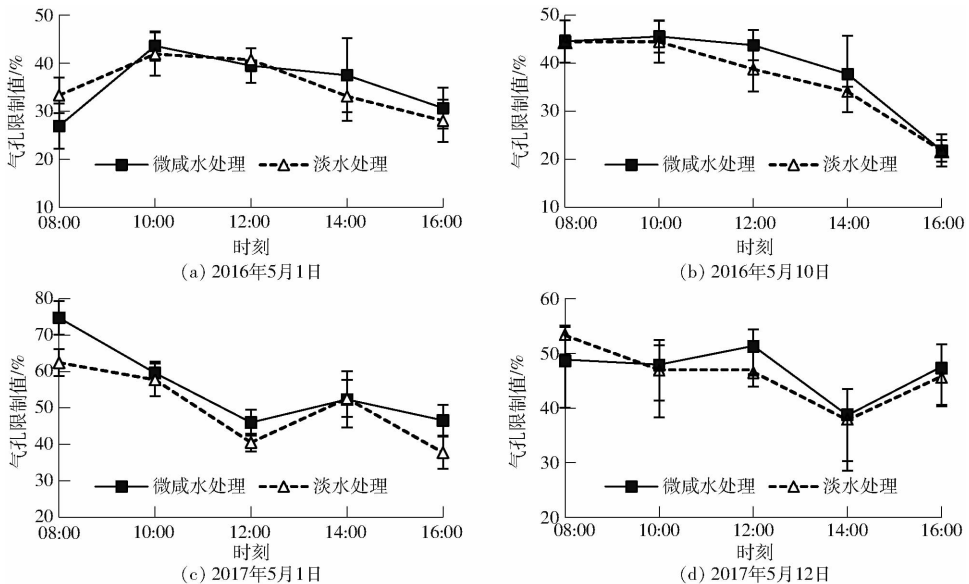


图6 冬小麦叶片气孔限制值日变化曲线

Fig. 6 Leaf stomatal limitation value diurnal change curves of winter wheat

2017 年 5 月 12 日), 微咸水灌溉处理叶片气孔限制值在午前部分时段(2016 年 5 月 1 日、2017 年 5 月 12 日) 出现了低于淡水处理的现象, 有部分时段(2016 年 5 月 10 日、2017 年 5 月 1 日) 出现了高于对照的现象, 而午后均表现为高于淡水处理的趋势, 不同灌溉处理之间的对比差异与光合速率变化规律类似。这表明了微咸水灌溉处理午前叶片净光合速率的下降受到气孔因素和非气孔因素的共同影响, 而午后净光合速率的增加均伴随着较高的气孔限制

值, 可能是由于适度的盐分胁迫反而促进了根系下扎, 延缓了叶片衰老, 改善了叶肉细胞光合活性和叶片的光合能力, 提高了胞间  $\text{CO}_2$  的利用, 使胞间  $\text{CO}_2$  浓度降低, 从而减少了非气孔因素对光合作用的限制。

## 2.5 微咸水灌溉下冬小麦光响应曲线模拟

由表 3 可以看出, 光响应曲线模拟的相关系数达到 0.997 ~ 0.999, 说明了直角双曲线修正模型可以较好地模拟冬小麦叶片净光合速率对于光合有效辐射的响应关系。

表 3 不同灌溉处理冬小麦抽穗开花期光响应曲线特征参数

Tab. 3 Winter wheat leaf photosynthetic light response characteristics parameters at heading and flowering stages under different irrigation treatments

| 年份   | 生育期 | 处理  | 最大净光合速率 $P_{nmax}$ / ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 光补偿点与暗呼吸处连线的斜率 $k$ | 光补偿点处量子效率 $\varphi_c$ | 内禀量子效率 $\varphi_0$ | 光补偿点 (LCP) / ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 光饱和点 (LSP) / ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 暗呼吸速率 $R_d$ / ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 相关系数 $R$ |
|------|-----|-----|--|--------------------|-----------------------|--------------------|--|--|---|----------|
| 2016 | 抽穗期 | 微咸水 | 60.74  | 0.2800             | 0.2548                | 0.3076             | 37.48  | 1391.80  | 10.49   | 0.998    |
|      |     | 淡水  | 58.47  | 0.2013             | 0.1844                | 0.2196             | 56.86  | 1362.53  | 11.45   | 0.999    |
|      | 开花期 | 微咸水 | 62.70  | 0.2842             | 0.2547                | 0.3169             | 49.10  | 1311.07  | 13.96   | 0.999    |
|      |     | 淡水  | 61.12  | 0.2883             | 0.2560                | 0.3243             | 53.73  | 1240.96  | 15.49   | 0.997    |
| 2017 | 抽穗期 | 微咸水 | 61.50  | 0.2820             | 0.2550                | 0.3118             | 43.82  | 1269.93  | 12.36   | 0.999    |
|      |     | 淡水  | 60.38  | 0.3036             | 0.2679                | 0.3438             | 51.69  | 1254.86  | 15.69   | 0.998    |
|      | 开花期 | 微咸水 | 58.39  | 0.2816             | 0.2609                | 0.3039             | 30.66  | 1100.37  | 8.63  | 0.999    |
|      |     | 淡水  | 56.56  | 0.2790             | 0.2499                | 0.3112             | 49.46  | 1080.47  | 13.80   | 0.997    |

与淡水处理相比, 2016 年和 2017 年微咸水处理冬小麦抽穗期最大净光合速率  $P_{nmax}$  增加了 2.27、1.12  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 光饱和点 (LSP) 增加了 29.27、15.07  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 光补偿点 (LCP) 降低了 19.38、7.87  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 冬小麦开花期  $P_{nmax}$  增加了 1.58、1.83  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , LSP 增加了 70.11、19.9  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , LCP 降低了 4.63、18.8  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。说明微咸水灌溉改善了冬小麦的光合作用能力, 增强了冬小麦对于强光和高温的适应能力, 同时利用弱光的能力也有所提升。从不同灌溉处理内禀量子效率  $\varphi_0$  和光补偿点处量子效率  $\varphi_c$  的对比也可以发现, 抽穗期微咸水处理均高于淡水处理, 而到开花期两个处理几乎一致, 可见微咸水灌溉并未抑制冬小麦把光能转化为净能量的能力和利用光能的潜能, 部分生育阶段甚至优于对照。同时, 与淡水处理相比, 2016 年和 2017 年微咸水处理冬小麦抽穗期的暗呼吸速率  $R_d$  分别降低了 0.96、3.33  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 微咸水处理冬小麦开花期  $R_d$  分别降低了 1.53、5.17  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 较低的暗呼吸速率可以保证较快的干物质累积, 一定程度促发了冬小麦利用光能的潜力。

光响应曲线反映植物光照强度与光合速率间的

变化规律, 是评价植物光合能力的重要手段<sup>[31]</sup>。如图 7 所示, 在低光照强度 ( $0 \sim 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 下, 无论是淡水处理还是微咸水处理, 冬小麦叶片净光合速率均随着光照强度的增加而近乎直线上升, 而且微咸水处理的上升速率略快于淡水处理; 在中光照强度 ( $200 \sim 800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 下, 不同处理的净光合速率的增加变缓; 在高光照强度 ( $>800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 下, 冬小麦叶片净光合速率达到最大值, 然后随着光照强度的增加净光合速率趋于稳定, 甚至略有下降的趋势。但是在不同的光照梯度下, 无论是抽穗期还是开花期, 微咸水处理的净光合速率均呈现略高于淡水处理的现象, 这也进一步验证了 2.3 节中自然光照条件下, 微咸水灌溉并未明显抑制冬小麦净光合速率的研究结果。

## 3 讨论

一般认为, 灌溉水中的盐分会对作物产生毒害, 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<sup>[32]</sup>。张余良等<sup>[33]</sup>研究了微咸水灌溉对小麦生理特性及产量的影响, 在灌水量  $900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  条件下, 与淡水相比, 矿化度 3.5 g/L 微

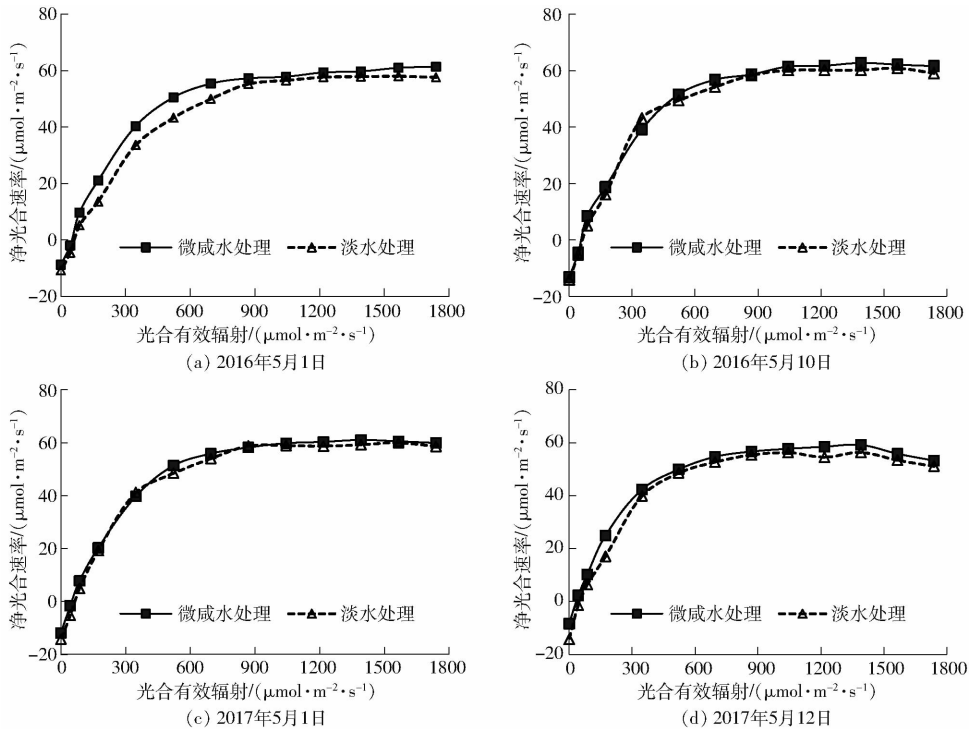


图7 不同灌溉处理冬小麦叶片光响应曲线

Fig.7 Winter wheat leaf photosynthetic light response curves under different irrigation treatments

咸水灌溉时,蒸腾速率和气孔导度分别下降了18.8%和22.5%,光合速率却没有降低,而灌入矿化度4.5 g/L微咸水时,光合速率下降了19.7%。史海滨等<sup>[19]</sup>对不同盐分处理对向日葵光合速率的影响研究表明,随着灌溉水盐分含量的增加,根系吸收水分的能力降低,叶片的蒸腾速率随之下降,同时12:00之前受到气孔限制的光合速率降低,而12:00后的光合速率和气孔限制值高于低盐处理。微咸水灌溉后土壤含盐量增加,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,引起部分气孔关闭,导致了叶片气孔导度和蒸腾速率下降<sup>[33]</sup>。本研究在微咸水灌溉冬小麦的试验中也发现了类似的规律。作物光合速率的变化受到气孔因素和非气孔因素的影响,本研究表明,微咸水灌溉降低了冬小麦12:00之前光合速率,抽穗期和开花期光合速率的下降主要是受到气孔因素和非气孔因素的共同影响,12:00之后微咸水处理冬小麦光合速率出现高于对照的情况,同时也伴随着较高的气孔限制值,主要是由于非气孔因素的改善所致,具体的非气孔因素还有待进一步研究。

郭丽等<sup>[31]</sup>通过长期的微咸水灌溉试验发现,矿化度控制在1.8 g/L咸淡混灌和3.6 g/L咸水与淡水轮灌处理并未导致产量及光合作用下降,此外,采用非直角双曲线方程对光响应曲线进行拟合得出,最大净光合速率、表观光量子效率、光饱和点、光补偿点和暗呼吸效率均没有显著差异。本研究表明,

无论是抽穗期还是开花期,在人工光源不同的光照强度梯度下,微咸水处理的净光合速率略高于淡水处理,同时,通过直角双曲线修正模型拟合可得,光补偿点和暗呼吸速率略有降低,但是最大净光合速率、表观光量子效率和光饱和点却呈现出超过淡水处理的现象,这与郭丽等<sup>[31]</sup>的研究结果相类似但有所差异,说明3 g/L微咸水灌溉改善了抽穗开花期冬小麦的光合作用能力,增强了冬小麦对于强光和高温的适应能力,同时利用弱光的能力也有所提升,表现出更高的光合效率。这可能是由于试验田初始含盐量并不高,短时间内微咸水带入土壤的盐分含量较少,不足以对作物生长和光合作用造成明显的影响。一般利用微咸水灌溉的前1~3年,可能出现比淡水灌溉更有利于作物生长的现象,随着微咸水灌溉年限延长,土壤盐分逐步增加,对作物生长影响的负面作用逐步显现<sup>[34]</sup>。此外,采用不同光响应曲线模型进行特征参数拟合,也可能会表现出不一样的变化规律,相关的研究结论需进一步的试验验证。

## 4 结论

(1)微咸水灌溉将盐分带入土壤,导致土壤浅层(0~40 cm)的含盐量增加,但对深层(60~100 cm)土壤含盐量的影响较小,对作物生长产生一定的影响。抽穗期和开花期,淡水处理(矿化度0 g/L)和微咸水处理(矿化度3 g/L)冬小麦叶片蒸腾速率日变化呈现出“单峰型”和“双峰型”的变化



规律,微咸水灌溉后土壤含盐量增加,降低了土壤水分的有效性,引起部分气孔关闭,导致了叶片蒸腾速率下降;冬小麦光合速率及气孔限制值日变化规律表明,与淡水处理相比,微咸水灌溉降低了冬小麦午前光合速率,光合速率的下降主要是受到气孔因素和非气孔因素的共同影响,午后微咸水处理冬小麦光合速率的增加却伴随着较高的气孔限制值,主要是由于非气孔因素的改善所致。

(2)在人工光源不同的光照强度梯度下,无论抽穗期还是开花期,微咸水处理冬小麦叶片净光合速率均超过了淡水处理,引入直角双曲线修正模型对光合特征参数进行拟合得出,2016年和2017年

微咸水处理冬小麦抽穗期  $P_{nmax}$  增加 2.27、1.12  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , LSP 增加 29.27、15.07  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , LCP 降低了 19.38、7.87  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $R_d$  降低了 0.96、3.33  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 2016 年和 2017 年冬小麦开花期  $P_{nmax}$  增加了 1.58、1.83  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , LSP 增加了 70.11、19.9  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , LCP 降低了 4.63、18.8  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $R_d$  降低了 1.53、5.17  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。说明微咸水处理较淡水处理表现出更高的光合效率,不但增强了抽穗开花期冬小麦对于强光和高温的适应能力,同时也提升了冬小麦利用弱光的能力,一定程度促进了冬小麦利用光能的潜力。

### 参 考 文 献

- [1] OSTER J D. Irrigation with poor quality water[J]. *Agricultural Water Management*, 1994, 25(3): 271-297.
- [2] 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.
- [3] PANG Guibin, ZHANG Lizhi, WANG Tong, et al. Review on plant physiological and growth responses and regulation mechanisms under slight saline water irrigation[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2016, 30(4): 250-255. (in Chinese)
- [4] MALASH N M, FLOWERS T J, RAGAB R. Effect of irrigation methods, management and salinity of irrigation water on tomato yield, soil moisture and salinity distribution[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(4): 313-323.
- [5] ISLA R, ARAGUES R. Response of alfalfa (*Medicago sativa*, L.) to diurnal and nocturnal saline sprinkler irrigations. I. Total dry matter and hay quality[J]. *Irrigation Science*, 2009, 27(6): 497-505.
- [6] 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 Shuqin, KANG Yuehu, WANG Dan, et al. Effects of saline water on cucumber yields and irrigation water use efficiency under drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(3): 30-35. (in Chinese)
- [6] 叶海燕, 王全九, 刘小京. 冬小麦微咸水灌溉制度的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 27-32. YE Haiyan, WANG Quanjiu, LIU Xiaojing. Slight saline water irrigation systems for winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(9): 27-32. (in Chinese)
- [7] 王卫光, 王修贵, 沈荣开, 等. 河套灌区咸水灌溉试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 92-96. WANG Weiguang, WANG Xiugui, SHEN Rongkai, et al. Experimental research on saline-water irrigation in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5): 92-96. (in Chinese)
- [8] 杨树青, 叶志刚, 史海滨, 等. 内蒙河套灌区咸淡水综合利用灌溉模式的研究[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 8-17. YANG Shuqing, YE Zhigang, SHI Haibin, et al. Simulation and prediction of rotational irrigation with salty and fresh water in the Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 8-17. (in Chinese)
- [9] 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. WANG Shijing, HUANG Guanhua, YANG Jianguo, et al. Effect of irrigation with saline water on water-salt dynamic and spring wheat yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 27-33. (in Chinese)
- [10] 吴忠东, 王全九. 微咸水入渗水量对土壤水盐运移特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11): 67-71. WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect on characteristics of soil water and salt movement about saline water infiltration with different infiltration amount[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 67-71. (in Chinese)
- [11] 张展羽, 冯根祥, 马海燕, 等. 微咸水膜孔沟灌土壤水盐分布与灌水质量分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 112-116. ZHANG Zhanyu, FENG Genxiang, MA Haiyan, et al. Analysis of soil water salt distribution and irrigation performance under brackish water film hole furrow irrigation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 112-116. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20131120&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131120&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.020. (in Chinese)
- [12] MURTAZA G, GHAFOR A, QADIR M. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton wheat rotation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1-2): 98-114.
- [13] 周立峰, 杨荣, 冯浩. 微咸水膜下滴灌对盐碱化农田土壤斥水特征的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 322-332. ZHOU Lifeng, YANG Rong, FENG Hao. Effect of mulched drip irrigation with brackish saline water on soil water repellency characteristics of saline-alkali field[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 322-332. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190735&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190735&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.035. (in Chinese)
- [14] 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, 144: 177-188.
- [15] BUSTANA A, SHABTAI C, YOEL D M, et al. Effects of timing and duration of brackish irrigation water on fruit yield and quality of late summer melons[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 74(2): 123-134.

- [16] 马文军,程琴娟,李良涛,等.微咸水灌溉下土壤水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 Wenjun, CHENG Qinjuan, LI Liangtao, 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. (in Chinese)
- [17] 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 Zhongdong, WANG Quanjiu. 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. (in Chinese)
- [18] 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 Shaosheng, DU Taisheng, SUN Jingsheng, 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. (in Chinese)
- [19] 史海滨,杨树清,李瑞平,等.作物水盐联合胁迫效应与水分高效利用研究[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [20] BENASHER J, TSUYUKI I, BRAVDO B. 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.
- [21] BOTE A D, ZANA Z, OCHO F L, et al. Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation level and rate of nitrogen supply II. Uptake and distribution of nitrogen, leaf photosynthesis and first bean yields [J]. European Journal of Agronomy, 2018, 92(1): 107-114.
- [22] 孙燕,王怡琛,王全九.增氧微咸水对小白菜光响应特征及产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(9):116-123.  
SUN Yan, WANG Yichen, WANG Quanjiu. Effects of oxygenated brackish water on light response characteristics and yield of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 116-123. (in Chinese)
- [23] 刘建华,朱济友,姚姜铭,等.土壤重金属胁迫对经济树种的光合响应特征研究[J/OL].农业机械学报,2020,51(9):211-216.  
LIU Jianhua, ZHU Jiyu, YAO Jiangming, et al. Photosynthetic response characteristics of economic tree species to heavy metal stress in soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 211-216. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200924&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200924&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.024. (in Chinese)
- [24] 段萌,杨伟才,毛晓敏.覆膜和水分亏缺对春小麦光合特性影响及模型比较[J/OL].农业机械学报,2018,49(1):219-227.  
DUAN Meng, YANG Weicai, MAO Xiaomin. Effects of water deficit on photosynthetic characteristics of spring wheat under plastic mulching and comparison of light response curve models [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 219-227. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180127&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180127&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.027. (in Chinese)
- [25] YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. Photosynthetica, 2007, 45(4): 637-640.
- [26] 杨树青,丁雪华,贾锦凤,等.盐渍化土壤环境下微咸水利用模式探讨[J].水利学报,2011,42(4):490-498.  
YANG Shuqing, DING Xuehua, JIA Jinfeng, et al. Light-saline water use pattern in saline soil environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 490-498. (in Chinese)
- [27] 王遵亲,祝寿泉,尤文瑞,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.
- [28] 李全起,沈加印,赵丹丹.灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2011,27(3):33-36.  
LI Quanqi, SHEN Jiayin, ZHAO Dandan. Effect of irrigation frequency on yield and leaf water use efficiency of winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 33-36. (in Chinese)
- [29] 王振华,裴磊,郑旭荣,等.盐碱地滴灌春小麦光合特性与耐盐指标研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(4):65-72,104.  
WANG Zhenhua, PEI Lei, ZHENG Xurong, et al. Photosynthetic characteristics and salt-tolerance indexes of spring wheat with drip irrigation in saline-alkali soils [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 65-72, 104. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160410&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160410&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.010. (in Chinese)
- [30] 徐俊增,彭世彰,魏征,等.节水灌溉水稻叶片胞间CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> 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)
- [31] 郭丽,郑春莲,曹彩云,等.长期咸水灌溉对小麦光合特性与土壤盐分的影响[J/OL].农业机械学报,2017,48(1):183-190.  
GUO Li, ZHENG Chunlian, CAO Caiyun, et al. Effect of long-term saline water irrigation on photosynthetic characteristics of winter wheat and soil salt content [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 183-190. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170124&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170124&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.024. (in Chinese)
- [32] 赵可夫.植物抗盐生理[M].北京:中国科学技术出版社,1993:22-24.
- [33] 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(8):31-34.  
ZHANG Yuliang, LU Wenlong. Effects of brackish water irrigation on output and physiological characters of wheat [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2007(8): 31-34. (in Chinese)
- [34] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J/OL].农业机械学报,2015,46(12):117-126.  
WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151217&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151217&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017. (in Chinese)