

吴金芝, 黄明, 王志敏, 等. 干旱对冬小麦旗叶光合参数、产量和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1108-1118.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.05.003

# 干旱对冬小麦旗叶光合参数、产量和水分利用效率的影响

吴金芝<sup>1</sup>, 黄明<sup>1</sup>, 王志敏<sup>2</sup>, 李友军<sup>1</sup>, 张振旺<sup>1</sup>, 王贺正<sup>1</sup>, 付国占<sup>1</sup>, 陈明灿<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003; 2. 中国农业大学农学院, 北京 100193)

**摘要:** 为了探讨干旱对不同抗旱性冬小麦旗叶光合特性、产量和水分利用效率的影响, 2013–2015 年, 在防雨棚池栽培条件下, 以强抗旱性冬小麦品种晋麦 47(JM47) 和弱抗旱性冬小麦品种偃展 4110(YZ4110) 为材料, 设置拔节后持续干旱处理( $W_1$  处理, 0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的 $50\% \pm 5\%$ )、花后干旱处理( $W_2$  处理, 拔节期-孕穗期 0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的 $70\% \pm 5\%$ , 花后 0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的 $50\% \pm 5\%$ )、拔节后适墒处理( $W_3$  处理, 0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的 $75\% \pm 5\%$ ) 3 个水分处理, 分析上午(6:00–12:00)、下午(12:00–18:00)及白天(6:00–18:00)冬小麦旗叶光合参数的均值、籽粒产量和水分利用效率。结果表明, 与  $W_3$  处理相比,  $W_1$ 、 $W_2$  处理降低了旗叶净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )的均值, 且下午的降幅大于上午, 灌浆中期的降幅大于灌浆前期。与 YZ4110 相比, 在相同土壤水分条件下 JM47 旗叶  $P_n$  均值在灌浆前期下午及灌浆中期上午、下午、白天都显著高于 YZ4110; 旗叶  $G_s$  均值表现为在  $W_3$  处理下灌浆前期下午、白天及 2013–2014 生长季灌浆中期白天显著高于 YZ4110; 在灌浆中期旗叶  $T_r$  均值表现为在  $W_3$ 、 $W_2$ 、 $W_1$  处理的上午、下午、白天显著高于 YZ4110; 旗叶  $C_i$  均值表现为在  $W_2$  处理下灌浆前期上午显著低于 YZ4110。与  $W_3$  处理相比,  $W_1$  处理下 JM47、YZ4110 的产量分别降低了 12.5%、24.2%, 水分利用效率分别提高了 23.3%、18.2%,  $W_2$  处理下水分利用效率分别提高了 13.2%、13.7%, 而产量仅 YZ4110 显著降低了 9.4%。除瞬时水分利用效率( $IWUE$ )和灌浆中期胞间二氧化碳浓度外, 旗叶光合参数与籽粒产量呈正相关, 与水分利用效率呈负相关, 且相关系数的绝对值总体表现为下午大于上午、灌浆中期大于灌浆前期。总体看出, 种植强抗旱性冬小麦品种有利于改善旗叶光合特性, 特别是下午时段和灌浆中期的旗叶光合特性, 从而提高冬小麦产量。

**关键词:** 冬小麦; 干旱; 光合特性; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S512.1<sup>+</sup>101

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2021)05-1108-11

## Effects of drought on flag leaf photosynthetic parameters, grain yield and water use efficiency in winter wheat

WU Jin-zhi<sup>1</sup>, HUANG Ming<sup>1</sup>, WANG Zhi-min<sup>2</sup>, LI You-jun<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-wang<sup>1</sup>, WANG He-zheng<sup>1</sup>, FU Guo-zhan<sup>1</sup>, CHEN Ming-can<sup>1</sup>

(1. School of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

收稿日期: 2020-09-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31801297); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300400); 河南科技大学博士科研启动基金项目(13480082)

**作者简介:** 吴金芝(1978–), 女, 河南潢川人, 博士, 副教授, 研究方向为旱作栽培与作物生理。(E-mail) ywujz@126.com

**通讯作者:** 黄明, (E-mail) huangming\_2003@126.com; 王志敏, (E-mail) zhimin206@263.net

**Abstract:** To investigate the effects of drought on flag leaf photosynthetic characteristics, grain yield and water use efficiency of winter wheat with different drought resistance, three soil moisture treatments were set up under the condition of rain-proof shed cultivation in the pool, and strong drought resistant winter wheat variety Jinmai 47 (JM47) and weak drought resistant winter wheat variety

Yanzhan 4110 (YZ4110) were used as materials in 2013–2015, such as persistent drought treatment after jointing ( $W_1$  treatment, the relative water content of 0–140 cm soil layer was  $50\% \pm 5\%$  of the maximum field water capacity), drought treatment after flowering ( $W_2$  treatment, the relative water content of 0–140 cm soil layer from jointing to booting was  $70\% \pm 5\%$  of the maximum field water capacity, and the relative water content of 0–140 cm soil layer after flowering was  $50\% \pm 5\%$  of the maximum field water capacity), well-irrigation treatment after jointing ( $W_3$  treatment, the relative water content of 0–140 cm soil layer was  $75\% \pm 5\%$  of the maximum field water capacity). The mean values of different photosynthetic parameters, grain yield and water use efficiency in flag leaves of winter wheat during morning (6:00–12:00), afternoon (12:00–18:00) and daytime (6:00–18:00) were analyzed. The results showed that the mean values of net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $T_r$ ) in the flag leaves under  $W_1$  and  $W_2$  treatments were decreased compared with those under  $W_3$  treatment, and the decreasing range in the afternoon or during the medium grain filling stage was greater than that in the morning or during the early grain filling stage. Under the same soil moisture condition, the mean  $P_n$  values of JM47 flag leaves in the afternoon of the early grain filling stage and in the morning, afternoon and daytime of the medium grain filling stage were all significantly higher than those of YZ4110. The mean  $G_s$  of JM47 flag leaves in the afternoon and daytime of the early grain filling stage, in the daytime of the medium grain filling stage of the growing season in 2013–2014 was significantly higher than that of YZ4110 under  $W_3$  treatment. The mean  $T_r$  value of JM47 flag leaves was significantly higher than that of YZ4110 in the morning, afternoon and daytime under  $W_3$ ,  $W_2$  and  $W_1$  treatments in the medium grain filling stage. In addition, the mean value of intercellular carbon dioxide concentration ( $C_i$ ) of JM47 flag leaves in the morning of the early grain filling stage was significantly lower than that of YZ4110 under  $W_2$  treatment. Compared with  $W_3$  treatment, the grain yield of JM47 and YZ4110 under  $W_1$  treatment decreased by 12.5% and 24.2% respectively, and the water use efficiency increased by 23.3% and 18.2% respectively, while the water use efficiency under  $W_2$  treatment increased by 13.2% and 13.7% respectively. The grain yield of YZ4110 decreased by 9.4% significantly. The photosynthetic parameters in flag leaves were positively correlated with grain yield except for instant water utilization efficiency ( $IWUE$ ) and intercellular carbon dioxide concentration in the medium grain filling stage and were negatively correlated with water use efficiency, while the absolute values of the correlation coefficients in the afternoon and during the medium grain filling stage were generally higher than those in the morning and during the early grain filling stage. In conclusion, planting winter wheat varieties with strong drought resistance is beneficial to increase grain yield by improving the photosynthetic characteristics of flag leaves, especially during afternoon and medium grain filling stage.

**Key words:** winter wheat; drought; photosynthetic characteristics; grain yield; water use efficiency

小麦是全球35%~40%人口的主食作物,其产量高低直接关系到人类的粮食安全<sup>[1]</sup>。全球约有75%的小麦种植在干旱和半干旱地区<sup>[2]</sup>。中国小麦的生产量和消费量均位居全球首位,主要种植在北方旱地<sup>[3]</sup>。由于旱地小麦生产区水资源严重匮乏,加上生长季干旱少雨,导致干旱已经成为限制全球和中国小麦产量提高的主要因素之一,因而提高小麦抗旱能力对于提高小麦产量和水分利用效率具有重要意义。光合作用对小麦产量的贡献率高达90%以上,但对水分非常敏感,因而在小麦抗旱能力的研究中备受关注<sup>[4-5]</sup>。已有的研究发现,干旱不仅会导致小麦光合器官的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和蒸腾速率( $T_r$ )降低<sup>[4-5]</sup>,还会造成光合午休时间提前、光合午休程度加重<sup>[6-7]</sup>,从而降低小麦产量,特别是随着干旱程度的加重,光合作用受影响程度加大,减产幅度也更

大<sup>[7]</sup>。有研究发现,干旱对小麦光合特性的影响因品种而异,人们正致力于培育、筛选和优化栽培品种,从而减轻或消除干旱对小麦产量的不利影响。如张雅倩等<sup>[8]</sup>研究发现,干旱条件下旱地品种的 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 和瞬时水分利用效率( $IWUE$ )较水地品种高且降幅较小;Sikder等<sup>[4]</sup>通过盆栽试验发现,干旱条件下不同小麦品种的 $P_n$ 及其他光合性状存在明显差异,水分利用效率高的品种(Barigom-23)表现出了明显的光合优势;Thapa等<sup>[5]</sup>研究发现,干旱条件下灌浆期旗叶胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )、 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $T_r$ 较低,而水分利用效率较高的小麦品种对干旱的适应性强、籽粒产量高;杨彦会等<sup>[9]</sup>通过温室培养试验发现,多蜡质小麦品系JM205在中度干旱条件下的气孔限制较轻,光合性状优。笔者所在课题组通过前期研究发现,干旱条件下强抗旱性冬小麦品种晋麦47(JM47)的荧光特性

优于弱抗旱性冬小麦品种偃展 4110(YZ4110),减产幅度小<sup>[10]</sup>。前人的研究还发现, JM47 可以通过改善光合特性以保持较强的抗旱性<sup>[11]</sup>, 在轻度干旱条件下, YZ4110 在 23 个供试小麦品种中表现为弱抗旱性<sup>[12]</sup>。国内外学者通过广泛研究发现, 小麦光合参数随着白天环境因子的不断变化而呈现出明显的日变化特征, 利用某一时间点的光合特征代表某一品种的光合能力难免存在一定的不足。李银坤等<sup>[13]</sup>研究发现, 光合参数的日均值能避免光合参数瞬时值的浮动性并降低环境的影响, 从而更好地代表当天的光合特征。然而, 目前有关不同抗旱性小麦光合特性的研究多是在光照充足且光合相对稳定时段(9:00-11:00)或围绕光合日变化特征进行的, 而针对上午、下午光合参数均值的报道较少, 特别是干旱如何影响不同抗旱性小麦旗叶在上午、下午的光合参数均值尚未见报道。因此, 本研究以 JM47、YZ4110 冬小麦为试验材料, 设置拔节后持续干旱、花后干旱、拔节后适墒 3 个水分处理, 研究水分和品种对冬小麦旗叶光合参数在上午、下午、白天的均值及产量、水分利用效率的影响, 以期进一步明确干旱条件下不同抗旱性冬小麦的光合作用差异机制, 为提高冬小麦产量、优化冬小麦栽培技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本试验于 2013-2014 年、2014-2015 年连续 2 个生长季在位于河南省洛阳市洛龙区的河南科技大学试验农场防雨棚内进行, 土壤为壤质土。试验开始前, 0~20.0 cm、20.1~40.0 cm 土层的 pH 值分别为 8.17、8.10, 分别含有机质 12.3 g/kg、10.5 g/kg, 碱解氮 54.7 mg/kg、20.7 mg/kg, 速效磷 6.6 mg/kg、2.9 mg/kg, 速效钾 128.8 mg/kg、88.7 mg/kg; 池内小区面积为 7.2 m<sup>2</sup> (3.0 m×2.4 m), 土深 200 cm, 0~140 cm 土层田间最大持水量(体积分数)均值为 37.8%, 地下水位在 5 m 以上, 小区之间无水分侧渗, 其上建有可移动防雨棚, 可控制降水。

试验采用裂区设计, 主区为水分处理, 副区为品种, 设 3 次重复。主区在播前调节 0~140 cm 土层平均土壤含水量达田间最大持水量的 80%。在保证冬小麦安全越冬的基础上, 参照张雅倩等<sup>[8]</sup>描述的干旱处理和周苏玖等<sup>[14]</sup>描述的适墒处理设置 3 个水分处理: 拔节后持续干旱处理(W1 处理, 拔节期

至成熟期控制 0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的 50%±5%)、花后干旱处理(W2 处理, 拔节期至孕穗期控制 0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的 75%±5%, 开花期至成熟期控制 0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的 50%±5%) 和拔节后适墒处理(W3 处理, 拔节期至成熟期控制 0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的 75%±5%), 采用段文学等<sup>[15]</sup>描述的测墒补灌技术进行播前及小麦拔节后的水分控制。副区包括强抗旱性品种 JM47 和弱抗旱性品种 YZ4110, 这 2 个品种是在 2011-2012 年豫西地区冬小麦品种抗旱性鉴定试验中筛选确定的<sup>[10]</sup>。Su 等<sup>[11-12]</sup>的研究也发现了这 2 个品种之间的抗旱性差异。在播种前按小区分别底施氮肥(N) 180 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 172.5 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥(K<sub>2</sub>O) 112.5 kg/hm<sup>2</sup>, 生育期不再施用任何肥料, 所用氮、磷、钾肥分别为尿素(含 46% N)、过磷酸钙(含 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、氯化钾(含 63% K<sub>2</sub>O)。分别于 2013 年 10 月 13 日、2014 年 10 月 20 日播种, 播量分别为 120 kg/hm<sup>2</sup>、150 kg/hm<sup>2</sup>, 行距为 20 cm, 播深为 4~5 cm, 3 叶期定苗密度为 1 m<sup>2</sup> 240 株, 分别于 2014 年 5 月 27 日至 6 月 1 日、2015 年 5 月 25 日至 5 月 28 日依成熟度分次收获。降水前移动防雨棚以遮盖所有试验小区, 从而保证生育期耗水全部由灌溉水、土壤水供给, 降水结束后移开防雨棚。其他管理同当地丰产大田。

### 1.2 测墒补灌方法及土壤含水量的测定

从拔节期开始, 利用每个小区中央埋设的深度为 180 cm 的中空管, 用 TRIME-PICO TDR 土壤水分测量仪(德国 IMKO 公司生产), 每隔 10 d 测定 1 次土壤墒情, 按照公式  $m = H(\beta_i - \beta_j)$  计算灌水量。式中,  $m$  为补灌量(mm),  $H$  为计划湿润土层深度(cm),  $\beta_i$  为目标含水量,  $\beta_j$  为补灌前 0~140 cm 土层土壤含水量的均值。在每次测定后灌水, 用水表计测量实际灌水量。土壤相对含水量 = (土壤含水量/田间最大持水量) × 100%。由表 1 可以看出, 冬小麦播前及主要生育时期不同处理的土壤含水量可以控制在本试验所设定的范围内。

### 1.3 旗叶光合参数的测定

分别于灌浆前期、灌浆中期选择无风或微风的晴天(光照度、气温和相对湿度的变化见图 1), 用 LI-6400XT 便携式光合作用测量系统(LI-COR, 美

国)于6:00–18:00每1 h测定1次旗叶 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ ,每个小区随机选取2株旗叶长势、叶面积大小相当且受光方向相同的植株进行测定,取平均值作为测定值。根据光照度实测值,利用人工光源设置光

照度(图1),测定旗叶 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ ,并计算 $IWUE$ ( $IWUE = P_n/T_r$ )。依据6:00–12:00、13:00–18:00和6:00–18:00的光合参数测定值计算上午、下午及白天的光合参数均值。

表1 不同处理下冬小麦播前和不同生育时期的土壤含水量

Table 1 Soil moisture content under different treatments at pre-seeding and different growing stages of winter wheat

| 生长季         | 干旱处理           | 品种     | 土壤含水量 (%) |      |      |      |      |      |
|-------------|----------------|--------|-----------|------|------|------|------|------|
|             |                |        | 播种前       | 拔节期  | 孕穗期  | 开花期  | 灌浆期  | 成熟期  |
| 2013–2014 年 | W <sub>1</sub> | JM47   | 30.0      | 22.0 | 19.0 | 18.2 | 18.9 | 19.5 |
|             | W <sub>2</sub> | JM47   | 29.6      | 21.9 | 23.9 | 21.8 | 19.1 | 19.3 |
|             | W <sub>3</sub> | JM47   | 29.9      | 22.1 | 28.9 | 26.3 | 26.2 | 27.1 |
|             | W <sub>1</sub> | YZ4110 | 29.9      | 23.4 | 20.2 | 18.8 | 18.8 | 19.6 |
|             | W <sub>2</sub> | YZ4110 | 29.4      | 23.7 | 23.9 | 21.9 | 18.7 | 19.6 |
|             | W <sub>3</sub> | YZ4110 | 30.3      | 23.7 | 29.5 | 26.9 | 27.0 | 27.5 |
| 2014–2015 年 | W <sub>1</sub> | JM47   | 29.0      | 21.1 | 18.8 | 16.8 | 19.7 | 17.5 |
|             | W <sub>2</sub> | JM47   | 29.6      | 21.0 | 24.3 | 20.1 | 19.0 | 17.6 |
|             | W <sub>3</sub> | JM47   | 29.7      | 21.1 | 27.2 | 26.3 | 27.2 | 27.1 |
|             | W <sub>1</sub> | YZ4110 | 29.8      | 21.4 | 18.2 | 18.8 | 19.5 | 18.6 |
|             | W <sub>2</sub> | YZ4110 | 29.7      | 21.1 | 25.7 | 20.8 | 18.9 | 18.3 |
|             | W <sub>3</sub> | YZ4110 | 30.1      | 22.7 | 27.0 | 26.9 | 27.6 | 27.5 |

JM47; 晋麦 47; YZ4110; 偃展 4110。W<sub>1</sub>:拔节后持续干旱处理(拔节期至成熟期控制0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的50%±5%),W<sub>2</sub>:花后干旱处理(拔节期至孕穗期控制0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的75%±5%),开花期至成熟期控制0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的50%±5%),W<sub>3</sub>:拔节后适墒处理(拔节期至成熟期控制0~140 cm 土层的相对含水量为田间最大持水量的75%±5%)。

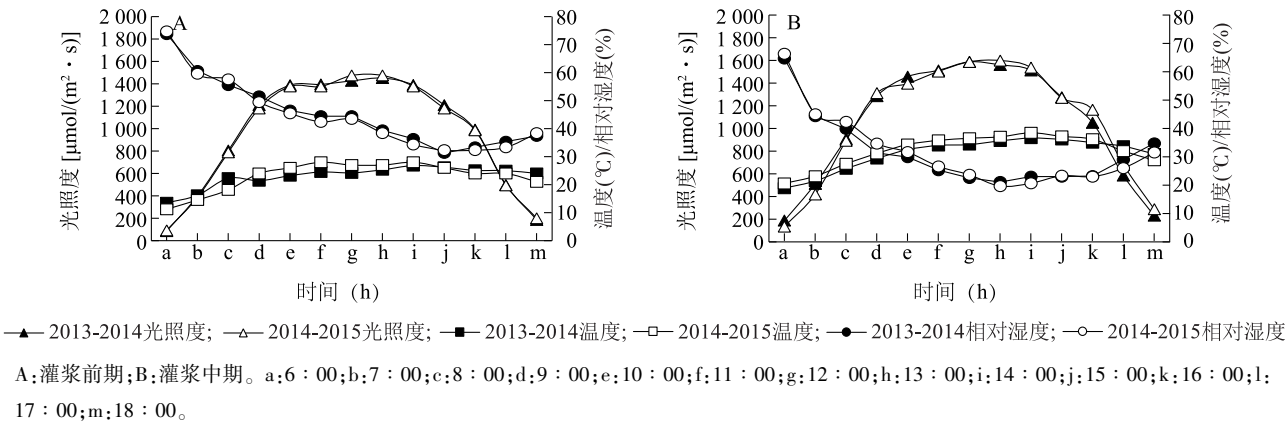


图1 灌浆前期和灌浆中期光照度、气温和相对湿度的日变化

Fig.1 Diurnal variations of light intensity, air temperature and relative humidity during early and medium grain filling stages

1.4 籽粒产量的测定

在苗期,每小区标定1个1 m长、6行的样方(面积为1.2 m<sup>2</sup>),全生育期内不取样。在成熟期,收获全部植株,风干后脱粒、称质量并测定风干籽粒的含水量,然后按12.5%的含水量折算成单位面积产量。

1.5 耗水量和水分利用效率的计算

根据周苏玫等<sup>[14]</sup>的方法,采用水分平衡法计算冬小麦生育期耗水量( $ET$ , mm),计算公式为 $ET = P + I + \Delta WS$ 。式中, $P$ 为冬小麦生育期内降水量,在本试验条件下,由于降水时移动防雨棚遮盖,因此 $P = 0$ ;  $I$ 为灌水量(mm);  $\Delta WS$ 为冬小麦生育期内土壤贮水消



耗量(mm)。水分利用效率=籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>)/作物生育期耗水量(mm)。

### 1.6 数据处理

用 Excel 2010 软件进行数据统计分析,用 SPSS18.0 统计分析软件进行差异显著性检验[最小显著性差异(Least significant difference, LSD)法]和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对冬小麦旗叶光合参数的影响

**2.1.1 净光合速率** 从表 2 可以看出,在冬小麦 2 个生长季的上午、下午及白天,不同处理对冬小麦旗叶  $P_n$  均值的影响规律基本一致,  $W_1$ 、 $W_2$  处理均较  $W_3$  处理显著降低了冬小麦灌浆期旗叶的  $P_n$  均值(除了 2013–2014 年生长季灌浆前期上午 YZ4110 品种  $W_2$  处理的  $P_n$  均值),且以灌浆中期更为突出,但降低幅度因品种而异。从冬小麦旗叶 2 年上午的  $P_n$  均值看,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种在灌浆前期  $W_1$ 、 $W_2$  处理的  $P_n$  均值分别降低了 24.9%、9.0%,在灌浆中期分别降低了 37.8%、11.2%。对于 YZ4110 品种而言,在灌浆前期的上午,

$W_1$ 、 $W_2$  处理的旗叶  $P_n$  均值分别较  $W_3$  处理降低了 14.4%、6.3%,在灌浆中期分别较  $W_3$  处理降低了 28.6%、21.0%。从 2 年下午的冬小麦旗叶  $P_n$  均值看,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种在灌浆前期  $W_1$ 、 $W_2$  处理的旗叶  $P_n$  均值分别降低了 30.1%、17.5%,在灌浆中期分别降低了 56.1%、37.9%;与  $W_3$  处理相比, YZ4110 品种在灌浆前期  $W_1$ 、 $W_2$  处理的旗叶  $P_n$  均值分别降低了 31.1%、16.5%,在灌浆中期分别降低了 64.1%、37.6%。从 2 年白天的旗叶  $P_n$  均值看,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种在灌浆前期  $W_1$ 、 $W_2$  处理的旗叶  $P_n$  均值分别降低了 27.0%、12.5%,在灌浆中期分别降低了 44.7%、21.3%, YZ4110 品种在灌浆前期  $W_1$ 、 $W_2$  处理的旗叶  $P_n$  均值分别降低了 21.3%、10.6%,在灌浆中期分别降低了 41.6%、27.1%。在相同水分处理下, JM47 品种旗叶  $P_n$  在灌浆前期下午、白天的均值及灌浆中期上午、下午和白天的均值均显著高于 YZ4110 品种。由此可见,干旱会显著降低冬小麦旗叶  $P_n$ ,且拔节后持续干旱对冬小麦旗叶  $P_n$  的降低幅度大于花后干旱,下午的降低幅度大于上午,但强抗旱性冬小麦品种能够在干旱和下午保持较高的旗叶净光合速率。

表 2 不同处理对冬小麦旗叶  $P_n$  上午、下午及白天均值的影响

Table 2 Effects of different treatments on the mean net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of flag leaves in winter wheat in the morning, afternoon and daytime

| 生长季         | 干旱处理  | 品种     | 灌浆前期净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] |        |        | 灌浆中期净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] |       |       |
|-------------|-------|--------|---|--------|--------|---|-------|-------|
|             |       |        | 上午  | 下午     | 白天     | 上午  | 下午    | 白天    |
| 2013–2014 年 | $W_1$ | JM47   | 11.91d  | 8.54e  | 10.36d | 5.08c   | 2.36c | 3.82c |
|             | $W_2$ | JM47   | 14.58b  | 10.34c | 12.62c | 7.26b   | 3.32b | 5.44b |
|             | $W_3$ | JM47   | 16.01a  | 12.66a | 14.46a | 8.09a   | 5.34a | 6.82a |
|             | $W_1$ | YZ4110 | 13.00c  | 8.04f  | 10.71d | 4.64d   | 1.46d | 3.17d |
|             | $W_2$ | YZ4110 | 14.69b  | 9.56d  | 12.32c | 5.13c   | 2.51c | 3.92c |
|             | $W_3$ | YZ4110 | 14.82b  | 11.57b | 13.32b | 6.50b   | 4.06b | 5.37b |
| 2014–2015 年 | $W_1$ | JM47   | 8.26c   | 6.80d  | 7.58e  | 5.05e   | 2.32d | 3.69c |
|             | $W_2$ | JM47   | 9.86b   | 7.77c  | 8.89c  | 7.21b   | 3.31c | 5.26b |
|             | $W_3$ | JM47   | 10.84a  | 9.29a  | 10.13a | 8.20a   | 5.33a | 6.77a |
|             | $W_1$ | YZ4110 | 8.18c   | 6.01e  | 7.18f  | 4.63f   | 1.45e | 3.04d |
|             | $W_2$ | YZ4110 | 8.49c   | 7.47c  | 8.02d  | 5.13d   | 2.55d | 3.84c |
|             | $W_3$ | YZ4110 | 9.92b   | 8.83b  | 9.42b  | 6.48c   | 4.05b | 5.27b |

同一生长季同一列数据后标有不同小写字母表示差异达 0.05 水平。JM47: 晋麦 47; YZ4110: 偃展 4110。处理  $W_1 \sim W_3$  见表 1 注。

**2.1.2 气孔导度** 由表 3 可以看出,在上午、下午及白天,干旱对冬小麦旗叶的  $G_s$  均值都具有显著影响,但影响效果因生长季、灌浆时期和品种而异。在冬小麦 2 个生长季的灌浆前期(除 2013–2014 年上午外)和 2013–2014 年冬小麦生长季灌浆中期的白天,  $W_3$  处理条件下

JM47 品种的旗叶  $G_s$  较 YZ4110 品种显著提高,  $W_2$  处理条件下 JM47 品种的旗叶  $G_s$  均值与 YZ4110 品种相比则无显著差异,  $W_1$  处理条件下 JM47 品种的旗叶  $G_s$  均值与 YZ4110 品种相比反而降低,说明干旱条件下强抗旱性冬小麦品种的旗叶  $G_s$  并无优势。

表3 不同处理对冬小麦旗叶  $G_s$  上午、下午及白天均值的影响Table 3 Effects of different treatments on the mean stomatal conductance( $G_s$ ) of flag leaves in winter wheat in the morning, afternoon and daytime

| 生长季         | 干旱处理           | 品种     | 灌浆前期的气孔导度 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] |        |       | 灌浆中期的气孔导度 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] |        |        |
|-------------|----------------|--------|---|--------|-------|---|--------|--------|
|             |                |        | 上午  | 下午     | 白天    | 上午  | 下午     | 白天     |
| 2013-2014 年 | W <sub>1</sub> | JM47   | 0.13d   | 0.09d  | 0.11d | 0.06d   | 0.03c  | 0.05d  |
|             | W <sub>2</sub> | JM47   | 0.25b   | 0.14bc | 0.20b | 0.12b   | 0.05b  | 0.08c  |
|             | W <sub>3</sub> | JM47   | 0.29a   | 0.19a  | 0.25a | 0.17a   | 0.08a  | 0.13a  |
|             | W <sub>1</sub> | YZ4110 | 0.21c   | 0.09d  | 0.15c | 0.09c   | 0.03c  | 0.06d  |
|             | W <sub>2</sub> | YZ4110 | 0.25b   | 0.13c  | 0.20b | 0.11b   | 0.04bc | 0.08c  |
|             | W <sub>3</sub> | YZ4110 | 0.28a   | 0.15b  | 0.22b | 0.16a   | 0.08a  | 0.12b  |
| 2014-2015 年 | W <sub>1</sub> | JM47   | 0.13e   | 0.08d  | 0.10e | 0.05e   | 0.03c  | 0.04d  |
|             | W <sub>2</sub> | JM47   | 0.18c   | 0.13c  | 0.16c | 0.13b   | 0.06b  | 0.10b  |
|             | W <sub>3</sub> | JM47   | 0.24a   | 0.20a  | 0.22a | 0.18a   | 0.09a  | 0.14a  |
|             | W <sub>1</sub> | YZ4110 | 0.16d   | 0.09d  | 0.13d | 0.08d   | 0.03c  | 0.06cd |
|             | W <sub>2</sub> | YZ4110 | 0.21b   | 0.16b  | 0.19b | 0.11c   | 0.05bc | 0.08c  |
|             | W <sub>3</sub> | YZ4110 | 0.21b   | 0.17b  | 0.19b | 0.17a   | 0.09a  | 0.13ab |

同一生长季同一列数据后标有不同小写字母表示差异达 0.05 水平。JM47:晋麦 47;YZ4110:偃展 4110。处理 W<sub>1</sub>~W<sub>3</sub> 见表 1 注。

2.1.3 胞间二氧化碳浓度 由表 4 可以看出,在不同处理下,上午、下午及白天冬小麦旗叶  $C_i$  均值因灌浆时期和品种而异。在灌浆前期的上午、下午及白天,冬小麦旗叶  $C_i$  均值表现为 W<sub>3</sub>>W<sub>2</sub>>W<sub>1</sub>,JM47 品种旗叶  $C_i$  均值在 3 个水分处理间差异显著,而 YZ4110 品种 W<sub>3</sub> 处理与 W<sub>2</sub> 处理间的  $C_i$  均值无显著差异,但二者均显著高于 W<sub>1</sub> 处理(除 2014-2015 生

长季上午的旗叶  $C_i$  均值外),说明干旱降低了灌浆前期旗叶的  $C_i$ ,且强抗旱性冬小麦品种的旗叶  $C_i$  对干旱更为敏感。在灌浆中期,2 个生长季的冬小麦  $C_i$  变化规律一致,除 W<sub>2</sub> 处理的 JM47 品种显著低于 W<sub>3</sub> 处理的 JM47 品种外,其他处理间无显著差异。由此可见,干旱对冬小麦灌浆中期旗叶  $C_i$  的影响较小,且弱抗旱性品种的表现较为突出。

表4 不同处理对冬小麦旗叶  $C_i$  上午、下午及白天均值的影响Table 4 Effects of different treatments on the mean intercellular carbon dioxide concentration( $C_i$ ) of flag leaves in winter wheat in the morning, afternoon and daytime

| 生长季         | 干旱处理           | 品种     | 灌浆前期的胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) |         |         | 灌浆中期的胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) |         |         |
|-------------|----------------|--------|--|---------|---------|--|---------|---------|
|             |                |        | 上午   | 下午      | 白天      | 上午   | 下午      | 白天      |
| 2013-2014 年 | W <sub>1</sub> | JM47   | 255.8c   | 221.5c  | 240.0c  | 250.9ab  | 259.3ab | 254.8ab |
|             | W <sub>2</sub> | JM47   | 281.6b   | 243.0b  | 263.8b  | 241.6b   | 244.1b  | 242.8b  |
|             | W <sub>3</sub> | JM47   | 297.1a   | 265.7a  | 282.6a  | 271.3a   | 263.9a  | 267.9a  |
|             | W <sub>1</sub> | YZ4110 | 277.7b   | 215.5c  | 249.0c  | 265.1a   | 272.4a  | 268.4a  |
|             | W <sub>2</sub> | YZ4110 | 296.8a   | 244.3b  | 272.6ab | 265.4a   | 276.7a  | 270.6a  |
|             | W <sub>3</sub> | YZ4110 | 302.1a   | 248.4b  | 277.3a  | 273.3a   | 275.3a  | 274.2a  |
| 2014-2015 年 | W <sub>1</sub> | JM47   | 259.3c   | 230.9c  | 246.2d  | 250.4ab  | 257.8ab | 254.1ab |
|             | W <sub>2</sub> | JM47   | 296.6b   | 257.5b  | 278.6bc | 241.3b   | 243.8b  | 242.6b  |
|             | W <sub>3</sub> | JM47   | 318.7a   | 280.2a  | 300.9a  | 270.9a   | 261.4a  | 266.2a  |
|             | W <sub>1</sub> | YZ4110 | 296.5b   | 237.8c  | 269.4c  | 264.5a   | 271.4a  | 268.0a  |
|             | W <sub>2</sub> | YZ4110 | 309.4ab  | 261.4b  | 287.2ab | 264.9a   | 276.2a  | 270.6a  |
|             | W <sub>3</sub> | YZ4110 | 317.0a   | 269.6ab | 295.1a  | 272.9a   | 274.5a  | 273.7a  |

同一生长季同一列数据后标有不同小写字母表示差异达 0.05 水平。JM47:晋麦 47;YZ4110:偃展 4110。处理 W<sub>1</sub>~W<sub>3</sub> 见表 1 注。

2.1.4 蒸腾速率 由表 5 可以看出,在 2 个冬小麦生长季的上午、下午及白天,不同处理对冬小麦旗叶  $T_r$  均值的影响规律基本一致。与  $W_3$  处理相比,除 2013–2014 年生长季  $W_2$  处理下 YZ4110 品种的  $T_r$  均值在灌浆前期无显著降低外,其他  $W_1$ 、 $W_2$  处理的灌浆期冬小麦旗叶  $T_r$  均值均显著降低,但降低幅度因品种而异。与 YZ4110 品种相比, JM47 品种旗叶的  $T_r$  均值在  $W_3$ 、 $W_2$  处理下整体上显著提高,在  $W_1$  处理下, JM47 品种的旗叶  $T_r$  均值在灌浆中期也较 YZ4110 品种显著提高。从 2 个生长季的  $T_r$  均值来看,在上午时段,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种  $W_1$ 、 $W_2$  处理旗叶的  $T_r$  均值降幅在灌浆前期分别为 44.0%、10.7%、在灌浆中期分别为 52.0%、26.7%, YZ4110 品种  $W_1$ 、 $W_2$  处理旗叶  $T_r$  的均值降幅在灌浆前期分

别为 20.6%、4.2%,在灌浆中期分别为 46.6%、26.2%;在下午时段,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种  $W_1$ 、 $W_2$  处理旗叶的  $T_r$  降幅均值在灌浆前期分别为 48.0%、23.9%,在灌浆中期分别为 42.8%、27.8%, YZ4110 品种  $W_1$ 、 $W_2$  处理旗叶的  $T_r$  降幅均值在灌浆前期分别为 37.0%、6.9%,在灌浆中期分别为 51.1%、32.7%;在白天时段,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种  $W_1$ 、 $W_2$  处理旗叶的  $T_r$  降幅均值在灌浆前期分别为 46.0%、17.2%,在灌浆中期分别为 47.6%、27.2%, YZ4110 品种  $W_1$ 、 $W_2$  处理旗叶的  $T_r$  降幅均值在灌浆前期分别为 29.1%、5.7%,在灌浆中期分别为 48.7%、29.4%。以上结果说明,干旱显著降低了冬小麦旗叶  $T_r$ ,并且在灌浆中期的降低幅度大于灌浆前期。

表 5 不同处理对冬小麦旗叶  $T_r$  上午、下午及白天均值的影响

Table 5 Effects of different treatments on the mean transpiration rate ( $T_r$ ) of flag leaves in winter wheat in the morning, afternoon and day-time

| 生长季         | 干旱处理  | 品种     | 灌浆前期的蒸腾速率 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] |       |       | 灌浆中期的蒸腾速率 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] |       |       |
|-------------|-------|--------|---|-------|-------|---|-------|-------|
|             |       |        | 上午  | 下午    | 白天    | 上午  | 下午    | 白天    |
| 2013–2014 年 | $W_1$ | JM47   | 2.75d   | 2.48e | 2.62e | 2.39d   | 2.75d | 2.56d |
|             | $W_2$ | JM47   | 4.47b   | 3.68c | 4.11c | 3.60b   | 3.46c | 3.54c |
|             | $W_3$ | JM47   | 5.23a   | 4.95a | 5.10a | 4.96a   | 4.78a | 4.88a |
|             | $W_1$ | YZ4110 | 3.61c   | 3.00d | 3.33d | 2.06e   | 1.92e | 2.00e |
|             | $W_2$ | YZ4110 | 4.33b   | 4.60b | 4.45b | 2.83c   | 2.68d | 2.76d |
|             | $W_3$ | YZ4110 | 4.32b   | 4.51b | 4.41b | 3.89b   | 3.94b | 3.91b |
| 2014–2015 年 | $W_1$ | JM47   | 2.49e   | 2.98c | 2.72e | 2.37e   | 2.72d | 2.55c |
|             | $W_2$ | JM47   | 3.88b   | 4.32b | 4.08c | 3.66c   | 3.45c | 3.56b |
|             | $W_3$ | JM47   | 4.12a   | 5.56a | 4.79a | 4.95a   | 4.79a | 4.87a |
|             | $W_1$ | YZ4110 | 2.59e   | 3.20c | 2.87e | 2.05f   | 1.92e | 1.99d |
|             | $W_2$ | YZ4110 | 3.15d   | 4.56b | 3.80d | 2.85d   | 2.61d | 2.73c |
|             | $W_3$ | YZ4110 | 3.49c   | 5.33a | 4.34b | 3.81b   | 3.92b | 3.87b |

同一生长季同一列数据后标有不同小写字母表示差异达 0.05 水平。JM47:晋麦 47;YZ4110:偃展 4110。处理  $W_1 \sim W_3$  见表 1 注。

2.1.5 瞬时水分利用效率 由表 6 可以看出,在上午、下午及白天时段,不同处理对冬小麦旗叶  $IWUE$  均值的影响因灌浆时期和品种而异。对于 JM47 品种而言,旗叶  $IWUE$  在灌浆前期上午、下午及白天时段的均值和灌浆中期上午时段的均值表现为  $W_3 < W_2 < W_1$ ,且 3 个水分处理之间的旗叶  $IWUE$  均值差异显著,而灌浆中期下午时段  $W_2$  处理的旗叶  $IWUE$  均值呈相反规律,表现为  $W_3 > W_2 > W_1$ 。对于 YZ4110 品种而言,  $W_2$  处理下灌浆前期的上午、下午及白天时段  $W_2$  处理的旗叶  $IWUE$  均值和灌浆中期上午时段的旗叶  $IWUE$  均值低于或显著低于  $W_1$ 、 $W_3$  处理,

在灌浆中期下午时段  $W_2$  处理的旗叶  $IWUE$  均值显著高于  $W_1$  处理,但低于或显著低于  $W_3$  处理。总体来看,干旱显著提高了灌浆前期、灌浆中期上午时段的冬小麦旗叶  $IWUE$ ,但降低了灌浆中期下午时段旗叶的  $IWUE$ ,且  $W_1$  处理下 JM47 品种的降低幅度小于 YZ4110 品种。

## 2.2 不同处理对冬小麦籽粒产量和水分利用效率的影响

由表 7 可以看出,随着灌水量的增加,冬小麦生育期耗水量、籽粒产量增加,而土壤水消耗量和水分利用效率整体表现为降低趋势。从 2 个生长季各指

标的均值来看,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种在  $W_1$ 、 $W_2$  处理下的土壤水消耗量分别提高了 227.7%、212.5%, YZ4110 品种在  $W_1$ 、 $W_2$  处理下的土壤水消耗量分别提高了 198.6%、198.5%。在生育期耗水量方面,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种在  $W_1$ 、 $W_2$  处理下的平均生育期耗水量分别降低了 29.2%、13.6%, YZ4110 品种在  $W_1$ 、 $W_2$  处理下的平均生育期耗水量分别降低了 35.7%、16.5%。在籽粒产量方面,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种在  $W_1$ 、 $W_2$  处理下的平均籽粒产量分别降低了 12.5%、2.4%, YZ4110 品种在  $W_1$ 、 $W_2$  处理下

的平均籽粒产量分别降低了 24.2%、9.4%。在水分利用效率方面,与  $W_3$  处理相比, JM47 品种在  $W_1$ 、 $W_2$  处理下的平均水分利用效率分别提高了 23.3%、13.2%, YZ4110 品种在  $W_1$ 、 $W_2$  处理下的平均水分利用效率分别提高了 18.2%、13.7%。与 YZ4110 品种相比,  $W_1$ 、 $W_2$  处理下 JM47 品种的籽粒产量、2013–2014 生长季  $W_1$  处理下的土壤耗水量以及  $W_1$ 、 $W_3$  处理下的水分利用效率、2014–2015 生长季  $W_1$  处理下的生育期耗水量都显著提高,其他相同水分条件下的产量、水分利用效率在 2 个品种间无显著差异。

表 6 不同处理对冬小麦旗叶瞬时水分利用效率上、下午及白天均值的影响

Table 6 Effects of different treatments on the mean instant water utilization efficiency (IWUE) of flag leaves in winter wheat in the morning, afternoon and daytime

| 生长季         | 干旱处理  | 品种     | 灌浆前期的瞬时水分利用效率 ( $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) |        |        | 灌浆中期的瞬时水分利用效率 ( $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) |        |        |
|-------------|-------|--------|---|--------|--------|---|--------|--------|
|             |       |        | 上午  | 下午     | 白天     | 上午  | 下午     | 白天     |
| 2013–2014 年 | $W_1$ | JM47   | 4.32a   | 3.34a  | 3.87a  | 2.34a   | 0.91b  | 1.68a  |
|             | $W_2$ | JM47   | 3.48c   | 2.79b  | 3.16b  | 2.17b   | 1.00ab | 1.63a  |
|             | $W_3$ | JM47   | 3.25d   | 2.44c  | 2.88c  | 1.68d   | 1.06a  | 1.40c  |
|             | $W_1$ | YZ4110 | 3.77b   | 2.50c  | 3.18b  | 2.16b   | 0.77c  | 1.51b  |
|             | $W_2$ | YZ4110 | 3.60b   | 2.00d  | 2.86c  | 1.81c   | 0.94b  | 1.41c  |
|             | $W_3$ | YZ4110 | 3.75b   | 2.62bc | 3.23b  | 1.67d   | 1.09a  | 1.40c  |
| 2014–2015 年 | $W_1$ | JM47   | 3.23a   | 2.25a  | 2.78a  | 2.13b   | 0.85d  | 1.45b  |
|             | $W_2$ | JM47   | 2.74c   | 1.69c  | 2.25cd | 1.98c   | 0.96c  | 1.49ab |
|             | $W_3$ | JM47   | 2.55d   | 1.62c  | 2.12d  | 1.66e   | 1.11a  | 1.39c  |
|             | $W_1$ | YZ4110 | 3.12ab  | 1.93b  | 2.57b  | 2.26a   | 0.76e  | 1.53a  |
|             | $W_2$ | YZ4110 | 2.74c   | 1.59c  | 2.21cd | 1.80d   | 0.98bc | 1.41bc |
|             | $W_3$ | YZ4110 | 2.99b   | 1.61c  | 2.35c  | 1.70de  | 1.03b  | 1.36d  |

同一生长季同一列数据后标有不同小写字母表示差异达 0.05 水平。JM47: 晋麦 47; YZ4110: 偃展 4110。处理  $W_1 \sim W_3$  见表 1 注。

表 7 不同处理对冬小麦籽粒产量和水分利用效率的影响

Table 7 Effects of different treatments on grain yield and water use efficiency in winter wheat

| 生长季         | 干旱处理  | 品种     | 灌溉水量<br>(mm) | 土壤水消耗量<br>(mm) | 生育期耗水量<br>(mm) | 籽粒产量<br>( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) | 水分利用效率<br>[ $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ] |
|-------------|-------|--------|--------------|----------------|----------------|-------------------------------------|---|
| 2013–2014 年 | $W_1$ | JM47   | 119.9c       | 199.7a         | 319.6c         | 6 544bc                             | 20.5a   |
|             | $W_2$ | JM47   | 178.7b       | 185.1ab        | 363.8b         | 7 041a                              | 19.4ab  |
|             | $W_3$ | JM47   | 393.6a       | 50.2c          | 443.8a         | 7 048a                              | 15.9c   |
|             | $W_1$ | YZ4110 | 121.4c       | 176.2b         | 297.6c         | 5 239d                              | 17.6b   |
|             | $W_2$ | YZ4110 | 180.9b       | 167.3b         | 348.2b         | 6 230c                              | 17.9b   |
|             | $W_3$ | YZ4110 | 411.4a       | 49.8c          | 461.2a         | 6 770ab                             | 14.5d   |
| 2014–2015 年 | $W_1$ | JM47   | 133.7c       | 169.9a         | 303.6c         | 5 977c                              | 19.7a   |
|             | $W_2$ | JM47   | 229.3b       | 167.4a         | 396.7b         | 6 926a                              | 17.5b   |
|             | $W_3$ | JM47   | 373.6a       | 62.6b          | 436.1a         | 7 265a                              | 16.7c   |
|             | $W_1$ | YZ4110 | 114.2d       | 158.5a         | 272.6d         | 5 303d                              | 19.4a   |
|             | $W_2$ | YZ4110 | 224.4b       | 167.3a         | 391.7b         | 6 359b                              | 17.7b   |
|             | $W_3$ | YZ4110 | 362.8a       | 62.3b          | 425.1a         | 7 130a                              | 16.8c   |

同一生长季同一列数据后标有不同小写字母表示差异达 0.05 水平。JM47: 晋麦 47; YZ4110: 偃展 4110。处理  $W_1 \sim W_3$  见表 1 注。



### 2.3 冬小麦产量和水分利用效率与上午、下午及白天旗叶光合参数均值的相关性

由表 8 可以看出,冬小麦旗叶光合参数均值与产量、水分利用效率的相关性在不同灌浆时期以及上午、下午时段的表现不同。在灌浆前期,籽粒产量与下午  $P_n$  均值、下午及白天  $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$  均值呈显著或极显著正相关;水分利用效率与下午时段  $P_n$  均值,上午、下午及白天时段  $G_s$ 、 $C_i$  和  $T_r$  均值呈显著或极显著负相关,但产量、水分利用效率与旗叶  $IWUE$  的相关性均未达到显著水平。在灌浆中期,产量与上午、下午及

白天时段  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  均值及下午时段  $IWUE$  均值之间均表现为极显著正相关,水分利用效率与  $P_n$  下午、白天时段的均值及  $G_s$ 、 $T_r$  上午、下午及白天时段的均值、 $IWUE$  下午时段的均值却呈显著或极显著负相关,但与旗叶  $IWUE$  上午、白天时段的均值呈极显著正相关。总体而言,旗叶光合参数均值与产量、水分利用效率的相关系数绝对值表现为下午时段大于上午时段、灌浆中期大于灌浆前期,说明在本试验条件下,改善冬小麦灌浆期下午时段或灌浆中期的光合功能更有利于提高冬小麦籽粒产量。

表 8 冬小麦产量和水分利用效率与旗叶光合参数上午、下午及白天均值的相关系数

Table 8 Correlation coefficients of grain yield and water use efficiency with the mean value of different photosynthetic parameters in flag leaves of winter wheat in the morning, afternoon and daytime

| 生育时期 | 参数     | 产量与旗叶光合参数的相关系数 |          |          | 水分利用效率与旗叶光合参数的相关系数 |           |           |
|------|--------|----------------|----------|----------|--------------------|-----------|-----------|
|      |        | 上午             | 下午       | 白天       | 上午                 | 下午        | 白天        |
| 灌浆前期 | $P_n$  | 0.289          | 0.615 *  | 0.421    | -0.410             | -0.630 *  | -0.505    |
|      | $G_s$  | 0.449          | 0.778 ** | 0.614 *  | -0.777 **          | -0.697 *  | -0.784 ** |
|      | $C_i$  | 0.407          | 0.732 ** | 0.577 *  | -0.688 *           | -0.580 *  | -0.664 *  |
|      | $T_r$  | 0.566          | 0.671 *  | 0.691 *  | -0.659 *           | -0.744 ** | -0.783 *  |
|      | $IWUE$ | -0.286         | -0.085   | -0.194   | 0.253              | 0.296     | 0.280     |
| 灌浆中期 | $P_n$  | 0.858 **       | 0.868 ** | 0.879 ** | -0.517             | -0.651 *  | -0.591 *  |
|      | $G_s$  | 0.691 *        | 0.774 ** | 0.718 ** | -0.848 **          | -0.809 ** | -0.841 ** |
|      | $C_i$  | -0.130         | -0.364   | -0.180   | -0.662 *           | -0.370    | -0.548    |
|      | $T_r$  | 0.860 **       | 0.892 ** | 0.878 ** | -0.671 *           | -0.621 *  | -0.650 *  |
|      | $IWUE$ | -0.499         | 0.937 ** | -0.188   | 0.842 **           | -0.622 *  | 0.770 **  |

\*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平显著相关。 $P_n$ :净光合速率; $G_s$ :气孔导度; $C_i$ :胞间二氧化碳浓度; $T_r$ :蒸腾速率; $IWUE$ :瞬时水分利用效率。

## 3 讨论

小麦籽粒中的干物质有 20%~30% 来自旗叶的光合作用,维持良好的旗叶光合性能对小麦产量的形成至关重要<sup>[16]</sup>。当前的研究者普遍认为,干旱会降低小麦旗叶的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ <sup>[17-18]</sup>,使“光合午休”程度加剧<sup>[6]</sup>。本研究结果表明,干旱使小麦旗叶  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  降低,这与前人的研究结果一致。众所周知,由于一天中光、温、水、气条件发生着规律性变化,小麦旗叶的光合参数也呈规律性变化,其中净光合速率呈双峰或单峰曲线变化,在一天中保持较高的光合速率和较长的高光合速率持续期才能保证最终的较高光合物质积累量。张永平等<sup>[6]</sup>研究发现,在小麦灌浆期,下午累积的光合量仅略低于上午,占日总光合量的 38%~49%,且干旱对小麦上午时段

群体光合累积量的降低幅度小于下午时段。在本试验条件下,干旱引起的旗叶光合参数的降低幅度表现为下午时段大于上午时段、灌浆中期大于灌浆前期,即干旱对下午时段和灌浆中期旗叶光合参数的影响较大。这主要是由于一天中阳光不断变化,使下午不同处理间的光照度、气温、相对湿度等环境因素差异增大<sup>[19]</sup>。张向前等<sup>[7,20]</sup>研究发现,不同处理下的小麦旗叶净光合速率表现为下午>上午,与本研究结果相似。

已有的研究结果表明,环境对小麦旗叶光合特性的影响因品种而异,一般表现为强抗旱性小麦旗叶  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  较高且降低幅度较小<sup>[8-9,21-22]</sup>。本研究发现,与 YZ4110 相比, JM47 品种旗叶  $P_n$  在灌浆前期下午、白天时段的均值及灌浆中期上午、下午和白天时段的均值显著高于 YZ4110,但 2 个冬小麦品种

旗叶  $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$  的差异因生长季、灌浆时期和水分条件而异,白天时段在  $W_3$  处理下旗叶  $G_s$  灌浆前期和 2013–2014 年生长季的灌浆中期整体上显著提高,在  $W_1$  处理下整体上降低;旗叶  $C_i$  在  $W_2$  处理下灌浆前期上午时段的均值和灌浆中期上午、下午及白天时段的均值降低;在  $W_3$ 、 $W_2$  处理下旗叶  $T_r$  上午、下午及白天时段的均值及  $W_1$  处理下灌浆中期上午、下午及白天时段的均值整体上也显著提高。总体来看,干旱时强抗旱品种能够维持旗叶较优的光合性能,但 2 个冬小麦品种间的旗叶光合差异表现为下午 > 上午、灌浆中期 > 灌浆前期,这主要是因为上午和灌浆前期的光、温、水、气条件相对温和,冬小麦遭受的环境胁迫相对较轻,弱抗旱性冬小麦品种可保持较好的光合特性,因此与强抗旱性冬小麦品种间的差异较小,这也与强抗旱性冬小麦品种在逆境条件下的旗叶光合生理特性变化幅度较小的研究结果<sup>[23]</sup>一致。

筛选并应用高抗旱性品种来抵御干旱是提高小麦产量和水分利用效率的有效途径<sup>[24–25]</sup>。任婕等<sup>[26]</sup>以 10 个冬小麦品种为材料进行连续 5 年的田间试验发现,对于相同小麦品种而言,平均产量为 4 825~6 617 kg/hm<sup>2</sup>,最高值与最低值之间相差 37%,强抗旱性冬小麦品种的产量受水分的影响较小,且水分利用效率在欠水年表现较优。董宝娣等<sup>[27]</sup>在河北栾城的研究发现,19 个具有不同抗旱节水性的冬小麦品种间产量最高相差 45%,水分利用效率最高相差 42%。本研究发现,在适墒条件下,不同抗旱性冬小麦品种间的产量无显著差异,而拔节后干旱条件下,JM47 品种的产量较 YZ4110 品种提高了 12.7%~24.9%,开花后干旱条件下的产量也会提高 8.9%~13.0%,2013–2014 生长季  $W_1$  处理下的冬小麦水分利用效率也显著提高,说明干旱条件下强抗旱性品种能够提高冬小麦产量和水分利用效率,这与张学品等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。相关分析发现,籽粒产量与灌浆前期旗叶  $P_n$  在下午时段的均值,与  $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$  在下午、白天时段的均值,与灌浆中期旗叶  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  在上午、下午及白天时段均值以及  $WUE$  在下午时段的均值之间均表现为显著正相关,且相关性表现为下午时段强于上午时段、灌浆中期强于灌浆前期。由此说明,改善冬小麦灌浆期下午时段或灌浆中期的光合功能更有利于提高冬小麦籽粒产量。然而,由于籽粒产量高时反而会使水分

利用率低,旗叶光合参数上午、下午均值与水分利用效率之间多呈显著或极显著负相关,可能是因为抗旱品种的优势不在于其对水分的吸收和利用,而在于其能否通过改善水分条件提高光合能力,具体机制还有待研究。

## 4 结 论

与拔节后适墒相比,拔节后干旱和花后干旱均降低或显著降低了冬小麦旗叶的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$ ,且降低幅度表现为下午时段大于上午时段、灌浆中期大于灌浆前期。与 YZ4110 品种相比, JM47 品种有利于提高灌浆前期下午时段以及灌浆中期上午、下午和白天时段旗叶的  $P_n$ ,但旗叶  $G_s$ 、 $C_i$  和  $T_r$  在不同水分条件和灌浆时期的表现不同。干旱显著降低了冬小麦籽粒产量,但有利于提高水分利用效率,其中在拔节后持续干旱条件下, JM47、YZ4110 品种的 2 年平均产量分别降低了 12.5%、24.2%,水分利用效率分别提高了 23.3%、18.2%,在花后干旱条件下水分利用效率分别提高了 13.2%、13.7%, YZ4110 的产量降低了 9.4%。在拔节后或开花后易发生干旱以及节水栽培的地区,种植在下午和灌浆中期能够保持较优旗叶光合特性的冬小麦品种,有利于提高冬小麦产量。

## 参考文献:

- [1] EVERSOLE K, FEUILLET C, MAYER K F X, et al. Slicing the wheat genome[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 285–287.
- [2] KHAN Z I, AHMAD K, REHMAN S, et al. Health risk assessment of heavy metals in wheat using different water qualities: implication for human health[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(1): 947–955.
- [3] ZHANG X, LI X H, LUO L C, et al. Monitoring wheat nitrogen requirement and top soil nitrate for nitrate residue controlling in drylands[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118372.
- [4] SIKDER S, QIAO Y Z, DONG B D, et al. Effect of water stress on leaf level gas exchange capacity and water-use efficiency of wheat cultivars[J]. *Indian Journal of Plant Physiology*, 2016, 21(3): 300–305.
- [5] THAPA S, REDDY S K, FUENTEALBA M P, et al. Physiological responses to water stress and yield of winter wheat cultivars differing in drought tolerance[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(4): 347–358.
- [6] 张永平, 张英华, 王志敏. 不同供水条件下冬小麦叶与非叶绿色器官光合日变化特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(5): 1312–1322.

- [7] 张向前,赵秀玲,王钰乔,等. 耕作方式对冬小麦灌浆期光合性能日变化和籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 885-893.
- [8] 张雅倩,林琪,刘家斌,等. 干旱胁迫对不同肥水类型小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4): 724-730.
- [9] 杨彦会,马晓,张子山,等. 干旱胁迫对蜡质含量不同小麦近等基因系光合特性的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(22): 4241-4251.
- [10] 吴金芝,王志敏,李友军,等. 不同冬小麦品种旗叶叶绿素荧光特性及其对干旱胁迫的响应[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(5): 699-706.
- [11] SU R N, CHEN L, WANG Z H, et al. Differential response of cuticular wax and photosynthetic capacity by glaucous and non-glaucous wheat cultivars under mild and severe droughts[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 147: 303-312.
- [12] 李春喜,郭雪妮,张黛静,等. 轻度干旱胁迫下黄淮麦区不同基因型小麦的响应分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(9): 1446-1452.
- [13] 李银坤,武雪萍,吴会军,等. 水氮条件对温室黄瓜光合日变化及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊1): 122-129.
- [14] 周苏玫,张珂珂,张嫚,等. 减氮适墒提高冬小麦旗叶光合潜力和籽粒产量[J]. 作物学报, 2016, 42(11): 1677-1688.
- [15] 段文学,张永丽,石玉,等. 测墒补灌对不同小麦品种耗水特性和氮素分配与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1309-1317.
- [16] 谭彩霞,封超年,郭文善,等. 不同品质类型小麦旗叶光合特性及其与产量的相关性研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2019, 40(6): 30-34.
- [17] 范雯雯,王志强,林同保,等. 不同土壤肥力下旱后复水对冬小麦光合特性及水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 362-365.
- [18] 刘丽平,欧阳竹,武兰芳,等. 阶段性干旱及复水对小麦光合特性和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2797-2803.
- [19] 谭念童,林琪,姜雯,等. 限量灌溉对旱地小麦旗叶光合特性日变化和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 805-811.
- [20] 杨彩红,柴强. 交替灌溉对绿洲灌区间作小麦光合日变化的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(8): 1028-1036.
- [21] 王月福,于振文,潘庆民. 不同水分处理对耐旱性不同小麦品种旗叶衰老的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 303-308.
- [22] 张绪成,上官周平. 施氮对不同抗旱性小麦叶片光合及生长特性的影响[J]. 中国农业生态学报, 2007, 15(6): 59-64.
- [23] SIKDER S, FOULKES J, WEST H, et al. Evaluation of photosynthetic potential of wheat genotypes under drought condition[J]. Photosynthetica, 2015, 53(1): 47-54.
- [24] 马斯霜,白海波,惠建,等. 旱胁迫下2个小麦RIL群体苗期性状主基因与多基因的遗传分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(14): 87-93.
- [25] 杨阳,申双和,王润元,等. 干旱胁迫对半干旱雨养区春小麦生长发育及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 82-85.
- [26] 任婕,孙敏,任爱霞,等. 不同抗旱性小麦品种耗水量及产量形成的差异[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 211-220.
- [27] 董宝娣,张正斌,刘孟雨,等. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 27-33.
- [28] 张学品,冯伟森,吴少辉,等. 干旱胁迫对不同冬小麦品种水分利用效率及产量性状的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(8): 21-25, 33.

(责任编辑:徐艳)