

网络出版日期:2015-06-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20150622.2241.006.html>

## 水氮耦合对小麦旗叶光合特性及籽粒产量的影响

李孟洁<sup>1,2</sup>, 李红兵<sup>2</sup>, 王林林<sup>1,2</sup>, 陈晓丽<sup>2</sup>, 李雨霖<sup>2</sup>, 邓西平<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 在盆栽条件下,以旱地小麦品种‘长旱 58’为材料,研究水氮耦合对冬小麦旗叶主要光合特性及小麦籽粒产量的影响。结果表明,在 2 种水分处理下小麦旗叶的叶绿素 SPAD 值、净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )及产量等都随氮肥施用量增加而增加,氮肥主要通过影响小麦旗叶  $P_n$  和小麦的穗数、穗粒数来影响产量。在不施氮( $N0, 0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )及正常施氮( $N1, 0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )处理下,中度水分胁迫(W2, 土壤含水量为田间持水量的 50%~60%)处理的小麦旗叶的光合速率及产量大于充分灌溉处理(W1, 土壤含水量为田间持水量的 70%~80%),而在高氮( $N2, 0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )处理下则相反。说明,适度水氮运筹会提高小麦旗叶光合能力及籽粒产量形成,主要表现为粒质量的增加。

**关键词** 小麦;水氮耦合;旗叶;光合特性;产量构成

中图分类号 S512.1

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2015)06-0034-07

## Coupling Effects of Water and Nitrogen on Photosynthetic Characteristics and Kernel Yield of Wheat

LI Mengjie<sup>1,2</sup>, LI Hongbing<sup>2</sup>, WANG Linlin<sup>1,2</sup>,  
CHEN Xiaoli<sup>2</sup>, LI Yulin<sup>2</sup> and DENG Xiping<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100, China)

**Abstract** The wheat cultivar Changhan 58 was used to investigate coupling effects of water and nitrogen on photosynthetic characteristics of flag leaf and grain yield through systematic experiments under pot conditions. The results indicate that the photosynthetic characteristics including relative chlorophyll content (SPAD value), photosynthetic net rate ( $P_n$ ), conductance ( $G_s$ ), transpiration rate ( $T_r$ ) and grain yield increased with increasing nitrogen amount application under two water treatments, nitrogen affect the grain yield is mainly through the influences of flag leaf photosynthetic rate, spike numbers and kernels of per spike of winter wheat. Under the nitrogen 0 ( $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and normal nitrogen level ( $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) treatments, moderate water stress (soil water content was 50%–60% of the field capacity) enhanced the flag leaf photosynthetic rate and grain yield compared to the full irrigation treatment (soil water content was 70%–80% of the field capacity), while the opposite conclusions was obtained under high nitrogen treatment ( $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The results indicat that moderate water and nitrogen coupling can improve the wheat flag leaf photosynthetic capacity and grain yield

收稿日期 2014-11-19 修回日期 2014-12-15

基金项目 国家重点基础研究发展计划(2015CB150402);国家自然科学基金(51479189);西北农林科技大学科研启动资金(Z109021304)。

第一作者 李孟洁,女,硕士研究生,从事植物水分生理生态研究。E-mail: limitin@126.com

通信作者 邓西平,男,教授,博士生导师,从事植物水分生理生态研究。E-mail: dengxp@ms.iswc.ac.cn

formation, mainly for the increase of kernel mass.

**Key words** Wheat; Coupling effects of water and nitrogen; Flag leaf; Photosynthetic characteristics; Yield component

水分和氮肥是影响小麦生长的两个重要因子,同时也是一对互相作用,互相耦合的因子<sup>[1-2]</sup>。土壤水分会影响养分在土壤中的转化、迁移,通过影响植物体的代谢过程从而影响植物对养分的吸收、转运及分布等。水分不足会限制氮肥肥效的正常发挥,水分过多则导致氮肥淋溶损失和小麦的减产。养分影响植物水分状况和干旱胁迫的过程。施肥能够补偿水分胁迫对小麦生长发育及产量的抑制,明显改善受干旱胁迫小麦的生理代谢过程,起到干旱增产的作用;氮肥过量或不足都将影响水分利用率的提高,并最终影响小麦产量的提高<sup>[3-5]</sup>。研究表明,适当减少灌溉量和施肥量,不仅不会影响作物产量,反而可以显著提高水分和氮肥利用率<sup>[6-8]</sup>。

合理水氮运筹对小麦光合特性具有明显的调控效应,是实现小麦优质高产高效的重要措施。开花后土壤水分亏缺导致植株上部叶片的光合功能迅速衰退,光合速率和籽粒灌浆速率降低,产量下降<sup>[9]</sup>;适量施氮可显著提高叶片光合速率,部分弥补因干旱导致的光合速率降低的损失<sup>[10]</sup>。以往研究侧重于单因子对小麦光合特性及产量的调控效应,有关水分和氮素对冬小麦灌浆期旗叶光合特性及其产量影响的研究尚不够深入<sup>[11]</sup>。因此,本试验研究了水分和氮素耦合对冬小麦灌浆期旗叶光合特性及其产量的影响,旨在研究通过提高水分和氮肥利用率增加籽粒产量的途径,为干旱地区冬小麦节水省肥的栽培管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与处理

盆栽试验选用旱地小麦品种‘长旱 58’,盆栽土采用当地耕层 0~20 cm 土壤。土壤类型为关中瘠土,风干土土壤含水量 2.01%,土壤田间持水量 28%。盆栽采用直径 29 cm,深度 27 cm 的塑料桶。每盆装风干土 13 kg,按照每千克干土施  $P_2O_5$  0.2 g、磷酸二氢钾 0.33 g,氮肥按试验设计设置 3 个水平,装盆前将土与肥料充分混匀。小麦种子用体积分数为 30% 的  $NaClO_4$  消毒后,28 °C 催芽 24 h,于 2012-10-19 播种,每桶 12 穴,

每穴 2 粒,5 叶 1 心期定苗,每盆最终留苗 12 株。定苗后在每个栽培桶表层均匀铺洒珍珠岩 50 g,以减少土壤水分蒸发。

### 1.2 试验基础与设计

试验于 2012—2013 年在中国科学院水土保持研究所干旱棚下进行。设置 3 个氮肥水平:  $N_0$  (不施氮:  $0 g \cdot kg^{-1}$ ),  $N_1$  (正常施氮水平:  $0.2 g \cdot kg^{-1}$ ),  $N_2$  (高氮:  $0.4 g \cdot kg^{-1}$ )。从播种到开花前,所有盆栽小麦均充分供水,开花后开始控水。灌浆期设 2 个水分处理:  $W_1$  (充分灌溉处理:土壤含水量为田间持水量的 70%~80%),  $W_2$  (中度水分胁迫:土壤含水量为田间持水量的 50%~60%)。试验共 6 个处理,每处理重复 10 盆,共 60 盆。花后 0 d 开始控水至籽粒成熟。在控水处理期间,每天通过称量法补充灌水。

### 1.3 测定项目与方法

在小麦灌浆期,选择同一天开花、旗叶大小均匀的植株标记。每 6 d 于 9:00—11:00 采用美国 LI-COR 公司的 LI-6400 便携式光合仪测定生理指标,主要包括不同水肥处理小麦旗叶的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  摩尔分数( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ ),每处理测定 5 株,交叉测量,以排除太阳辐射对不同水分处理的影响。采用日产 SPAD-502 型叶绿素计测定叶片叶绿素 SPAD 值,距叶尖 1/3 处测定 3 次 SPAD 读数,每处理测定 5 株,交叉测量,取平均值表示旗叶叶绿素 SPAD 值。

### 1.4 数据分析

使用 SPSS 16.0 软件处理数据,用 Excel 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮耦合对小麦旗叶叶绿素 SPAD 值的影响

从图 1 可以看出,小麦旗叶叶绿素 SPAD 值随灌浆时间延长逐渐下降,且在灌浆后期降幅加快。在水分一定的条件下,小麦旗叶叶绿素 SPAD 值随氮肥施用量的增加而增加,且差异明显。表明增施氮肥能够提高叶片 SPAD 值,进而延长旗叶功能期,提高其光合效率。在中等和高

水平氮肥条件下,花后水分胁迫能够降低旗叶 SPAD 值;不施氮肥条件下,花后水分胁迫反而增加旗叶的 SPAD 值。

### 2.2 水氮耦合对小麦光合特性的影响

2.2.1 水氮耦合对小麦旗叶  $P_n$  的影响 小麦旗叶  $P_n$  是植物光合作用的特征值,是决定其产量的关键因素<sup>[12]</sup>。从图 2 可以看出,水氮耦合对灌浆期小麦旗叶  $P_n$  影响不同。花后小麦旗叶  $P_n$  随灌浆时间延长整体上呈先升后降趋势,峰值出现在花后 6 d。在充分灌溉和水分胁迫 2 种条件

下分别比较 3 种氮肥处理,发现小麦旗叶的  $P_n$  随施氮量增加而增大(图 2);在施氮量一定的情况下比较 2 种水分处理对小麦旗叶  $P_n$  的影响,发现在 N0 和 N1 条件下,小麦旗叶的  $P_n$  在水分胁迫下大于充分灌溉处理;但在 N2 条件下,充分灌溉下小麦旗叶的  $P_n$  大于水分胁迫处理。说明在一定的氮肥用量下,适度水分胁迫可以提高  $P_n$ ,但随氮肥施用量增加,小麦对水分的需求也增加,水分胁迫使小麦旗叶  $P_n$  降低。

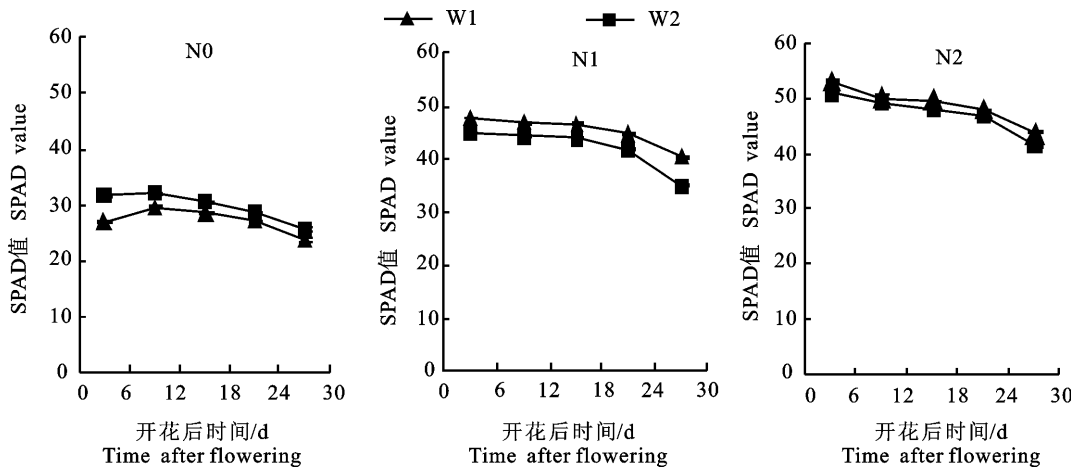


图 1 小麦旗叶叶绿素 SPAD 值的变化

Fig. 1 Changes of relative chlorophyll SPAD value of flag leaf in wheat

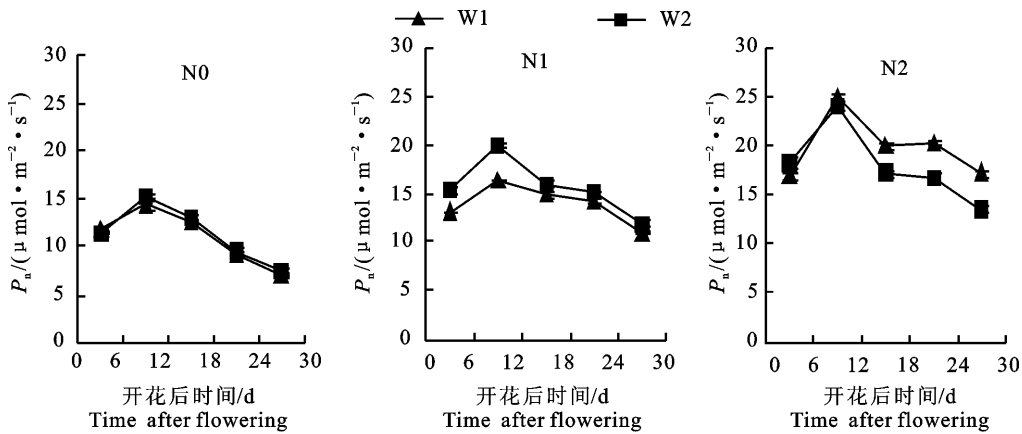


图 2 小麦旗叶  $P_n$  的变化

Fig. 2 Changes of photosynthetic net rate of flag leaf in wheat

2.2.2 水氮耦合对小麦旗叶  $T_r$  的影响 图 3 表明,在小麦灌浆期  $T_r$  整体呈先上升后下降趋势,峰值同  $P_n$  一样出现在花后 6 d。在水分条件一定的情况下,小麦旗叶的  $T_r$  随施氮量增加而增加,说明氮素可以影响植物的蒸腾作用。在施氮量一定时,水分影响  $T_r$ ,在不施氮及正常施氮处

理下花后适度水分胁迫处理可以提高  $T_r$ ,而在高氮处理下花后水分胁迫则降低了叶片的  $T_r$ 。

2.2.3 水氮耦合对小麦旗叶  $G_s$  的影响 气孔作为水分和  $CO_2$  进出的窗口,是植物叶片与外界进行气体交换的主要通道,对光合作用和  $T_r$  具有调节作用。 $G_s$  反映气孔开度的大小。 $G_s$  能反应单

位叶面积的蒸腾失水情况和气孔对干旱的敏感性<sup>[13]</sup>。不同水分条件下氮素营养对小麦旗叶  $G_s$  ( $G_s$ ) 的影响与对光合速率的影响基本一致,整体趋势呈先上升后下降,在花后 6 d 达到最大值。

在水分条件一定的情况下,小麦旗叶的  $G_s$  随施氮量增加而增加(图 4);在不施氮及正常施氮处理下花后适度水分胁迫处理可以提高  $G_s$ ,而在高氮处理下花后水分胁迫处理则降低叶片的  $G_s$ 。

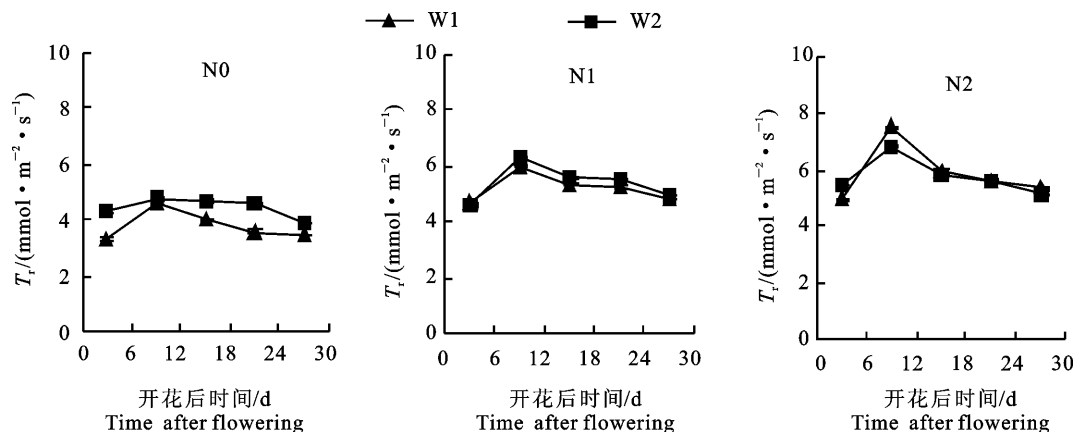


图 3 小麦旗叶  $T_r$  的变化

Fig. 3 Changes of transpiration rate of flag leaf in wheat

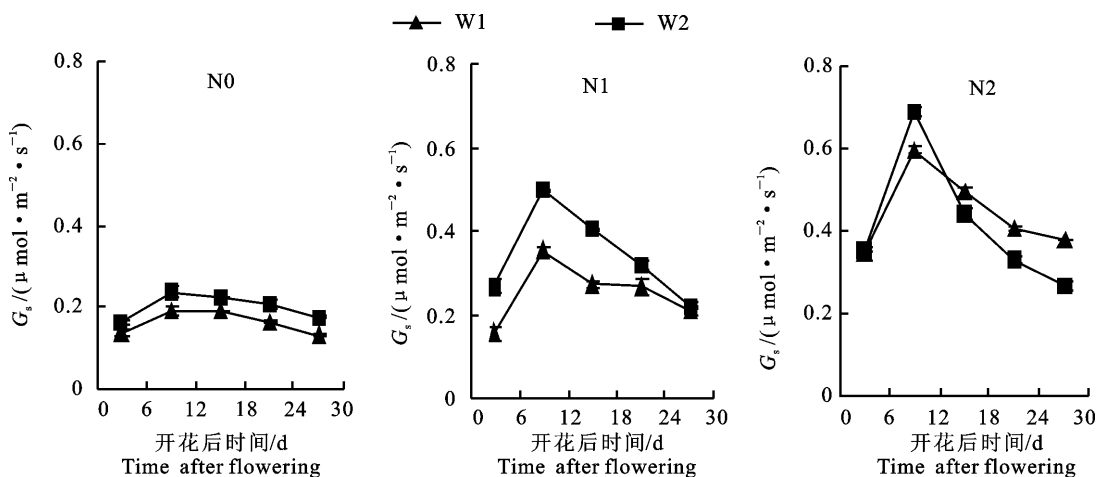


图 4 小麦旗叶  $G_s$  的变化

Fig. 4 Changes of stomatal conductance of flag leaf in wheat

2.2.4 水氮耦合对小麦  $C_i$  的影响 许多环境因素如水分、空气湿度和大气  $\text{CO}_2$  摩尔分数等都会影响气孔的开闭,进而影响细胞间隙  $\text{CO}_2$  摩尔分数,最终影响植物的光合作用。分析不同水氮组合处理下小麦花后旗叶  $C_i$  变化可以看出,小麦旗叶  $C_i$  均呈先上升后下降再上升趋势,其第 1 个峰值出现在花后 6 d(图 5)。从图中可以看出,在水分处理相同的条件下, $C_i$  随氮肥用量的增加略有增加,氮素可能是通过影响光合作用而影响  $C_i$  的。在不施氮和正常氮素水平下,花后水分胁迫处理降低了灌浆前期  $C_i$ (可能是由于水分胁迫使气孔闭合, $G_s$  降低,限制  $\text{CO}_2$  向胞间的扩散,为气

孔限制)而增加了灌浆后期的  $C_i$ (非气孔限制);在高氮水平下, $C_i$  在花后水分胁迫下的变化趋势则刚好与中低氮水平下的变化趋势相反。

### 2.3 水氮耦合对小麦产量及其构成因素的影响

水氮耦合对小麦籽粒产量及其构成因素的作用不同。由图 6 可看出,小麦籽粒的质量随灌浆时间的延长逐渐增加,在充分灌水的情况下,籽粒单粒质量随施氮量增加而增加。在不施氮以及正常施氮处理下,中度水分胁迫可以提高小麦单粒质量。

由表 1 可知,不同水氮耦合处理对小麦籽粒产量的影响有所不同。氮肥施用增加可以显著提

高产量,表现为穗数、穗粒数、干粒质量随施氮量增加而增加。水分处理对穗数、穗粒数、干粒质量

和产量的影响差异不显著,但在正常施氮水平下,花后适度水分胁迫可以提高单粒质量及产量。

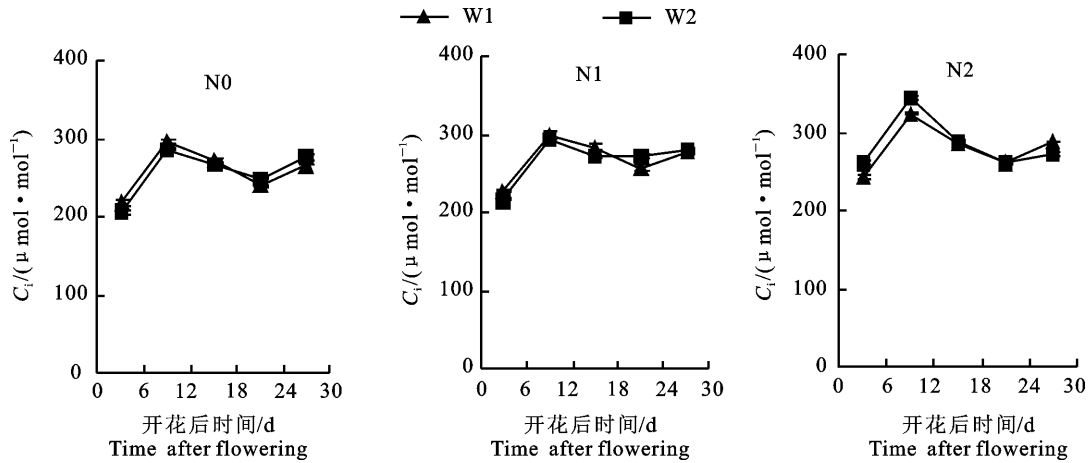


图 5 小麦旗叶  $C_i$  的变化

Fig. 5 Changes of intercellular  $CO_2$  mole fraction of flag leaf in wheat

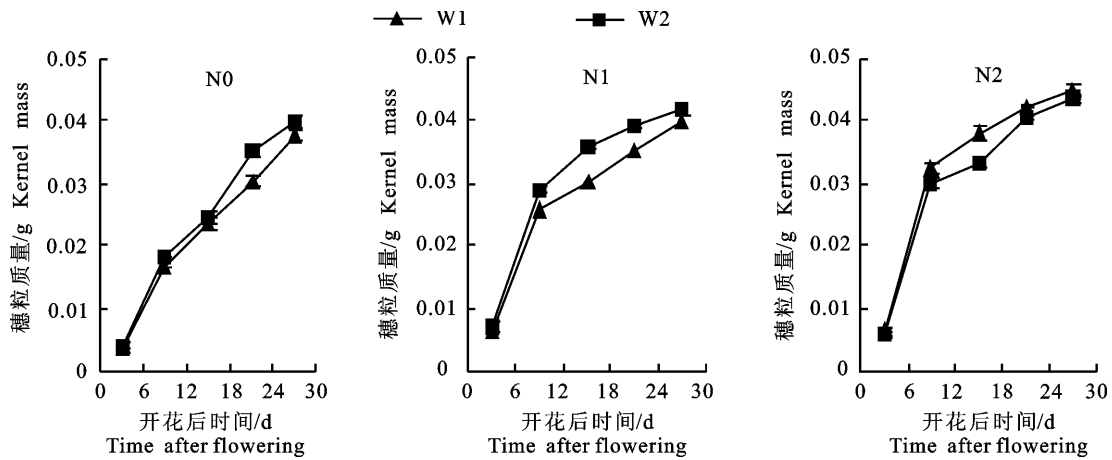


图 6 水氮耦合对小麦单粒质量的影响

Fig. 6 Coupling effects of water and nitrogen on kernel mass in wheat

表 1 水氮耦合对小麦产量构成的影响

Table 1 Coupling effects of water and nitrogen on yield components of wheat

处理 Treatment		每盆穗数 No. of spike	每穗粒数 Kernels of per spike	干粒质量/g 1 000-grain mass	每盆产量/g Grain yield
N0	W1	12.00 c	25.17 c	37.75 d	19.88 d
	W2	12.00 c	24.38 c	39.34 d	19.50 d
N1	W1	18.33 b	46.60 b	42.95 c	35.00 c
	W2	17.25 b	46.38 b	45.83 b	37.48 b
N2	W1	23.67 a	53.83 a	47.77 a	41.45 a
	W2	20.67 a	52.27 a	44.51 bc	40.54 a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letter means significant difference ( $P < 0.05$ ).

### 3 结论与讨论

本研究通过对花后旗叶 SPAD、 $P_n$ 、 $T_r$  以及

$G_s$  的变化分析表明,在冬小麦的整个灌浆期除 SPAD 值缓慢下降外, $P_n$ 、 $G_s$  以及  $T_r$  基本上呈现先上升后降低的变化趋势,峰值出现在花后 6 d。

在水分一定的情况下,随着施氮量的增加,SPAD、 $P_n$ 、 $T_r$  以及  $G_s$  显著提高,表明增施氮肥对花后维持小麦旗叶较高的光合能力非常重要。旗叶光合作用是小麦籽粒产量形成的生理基础,研究表明,在小麦籽粒灌浆期间,约 70% 的灌浆物质来自抽穗至成熟阶段的光合同化产物,仅旗叶供给占其所需光合产物的 33% 以上<sup>[14-16]</sup>。因此,旗叶的叶绿素含量及光合速率高低对小麦籽粒产量的形成十分重要。增施氮肥可以明显改善冬小麦地上部分的光合性能,表现为 SPAD 增加, $T_r$  以及  $G_s$  明显增加,旗叶叶绿素含量及生理活性增加促进旗叶  $P_n$  的增加,从而提高干物质的积累与转移,小麦产量增加。相对于充分供水处理,在不施氮及正常施氮处理下,花后适度的水分胁迫提高旗叶的  $P_n$  和产量,这与以往的研究一致。一般认为,花后水分胁迫是抑制光合作用的重要环境因素<sup>[17]</sup>,小麦旗叶的光合速率会随着土壤含水量的减少而降低。有研究表明,开花后轻度水分胁迫时冬小麦  $P_n$  会升高,且能较长时间保持较高的光合速率,有利于籽粒产量的提高<sup>[18]</sup>。而在高氮情况下则相反,充分灌溉处理的光合速率和产量更高,可能是随施氮量增加植物对水分的需求也随之增加,所以高氮处理意味着同时要增加水分来提高产量;高氮水平下若水分不足会抑制肥效的发挥,致使增产效果不明显和氮肥利用率降低,因此,盲目过量施肥,既不符合作物的需肥特性,又会因氮素的挥发和淋失造成环境污染<sup>[19]</sup>。研究表明,水分和氮素存在明显的交互作用,水分不足时氮素向籽粒的转移受到限制,趋于基部叶片和根部累积,籽粒含氮量减少,籽粒产量和氮肥生产效率降低;水分供应充分条件下,需要相应提高施氮量,否则会降低水分利用率<sup>[11]</sup>。

不同水氮耦合对小麦籽粒产量及其构成因素的作用不同。小麦的籽粒产量随施氮量增加而增加;正常施氮水平下,花后水分胁迫提高旗叶  $P_n$ ,表明水氮互作同时提高水分与肥料的作用,使旗叶的  $P_n$  在中等氮肥处理下达到最大值;而高氮水平下,水分胁迫降低旗叶  $P_n$ ,同时说明施用氮肥过量与不足同样不利于旗叶  $P_n$  的提高。分析小麦籽粒的产量构成后发现,氮肥主要是通过影响小麦穗数和穗粒数来影响小麦产量的,在本试验中,从小麦播种至开花期,一直是在充分供水处理中,而小麦的穗数和穗粒数在花前已基本分化

完毕,这段时间影响小麦产量的主要因素是氮肥,花前增施氮肥会提高小麦的分蘖数和小穗数,因而增加小麦穗数和穗粒数;花后适度水分胁迫处理无法影响穗数和穗粒数,只能通过影响小麦的粒质量来影响小麦产量,在灌浆期提高小麦的单粒质量对产量的提高有重要作用。

#### Reference (参考文献):

- [1] LI Tingliang(李廷亮), XIE Yinghe(谢英荷), HONG Jianping(洪坚平), *et al.* Effects of Nitrogen Application Rate on Photosynthetic Characteristics, Yield, and Nitrogen Utilization in Rainfed Winter Wheat in Southern Shanxi [J]. *Acta Agronomica Sinica*(作物学报), 2013, 39(4): 704-711 (in Chinese with English abstract).
- [2] DUAN Wenxue(段文学), YU Zhenwen(于振文), SHI Yu(石玉), *et al.* Effects of Nitrogen Application Depth on Water Consumption Characteristics and Dry Matter Accumulation and Distribution in Rainfed Wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*(作物学报), 2013, 39(4): 657-664 (in Chinese with English abstract).
- [3] WANG Xiaoyan(王小燕), ZHANG Yongli(张永丽), YU Zhenwen(于振文). Effect of Water-nitrogen Interaction on Grain Protein Quality, Nitrogen Use Efficiency and Water Use Efficiency of Jimai 20 [J]. *Journal of Triticeae Crops*(麦类作物学报), 2010, 30(2): 318-325 (in Chinese with English abstract).
- [4] LÜ Jinyin(吕金印), LI Chenglong(李成龙), ZHANG Junlin(张俊林), *et al.* Effect of Drought on Different Genotypes of Spring Wheat in Carbon Assimilation Distribution [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*(干旱地区农业研究), 2005, 23(6): 84-87 (in Chinese).
- [5] ZHAI Bingnian(翟丙年), LI Shengxiu(李生秀). Effect of water and nitrogen cooperation on winter wheat yield and quality [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*(植物营养与肥料学报), 2003, 9(1): 26-32 (in Chinese with English abstract).
- [6] HUANG Mingli(黄明丽), DENG Xiping(邓西平), BAI Dengzhong(白登忠). Progress on Compensative Effects of Nitrogen and Phosphorus on Physiological Processes and Yield Formation of Wheat in Dryland [J]. *Journal of Triticeae Crops*(麦类作物学报), 2002, 22(4): 74-78 (in Chinese with English abstract).
- [7] XU Xuan(徐璇), ZHOU Rui(周瑞), GU Yanfang(谷艳芳). Effects of water and nitrogen interaction on main photosynthetic characteristics of wheat [J]. *Journal of Henan University*(河南大学学报), 2010, 40(1): 53-57 (in Chinese with English abstract).
- [8] XU Ying(徐莹), WANG Linlin(王林林), CHEN Wei(陈炜), *et al.* Effects of Different Nitrogen Levels on Grain-filling Characteristics and Yield of Two Dryland Wheat Cultivars for Superior and Inferior Grain [J]. *Journal of Triticeae*

- Crops(麦类作物学报), 2013, 33(3): 489-494 (in Chinese with English abstract).
- [9] LOU Chenghou(娄成后), WANG Xuechen(王学臣). The Physiological Bases of Crop Yield Formation(作物产量形成的生理学基础)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 52-63(in Chinese).
- [10] YU Xianfeng(于显枫), GUO Tianwen(郭天文), ZHANG Renzhi(张仁陟), *et al.* Effects of Water and Nitrogen on Gas Exchange and Chlorophyll Fluorescence Parameters of Spring Wheat [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica(西北农业学报), 2008, 17(3): 117-123 (in Chinese with English abstract).
- [11] GUO Tiancai(郭天财), FENG Wei(冯伟), ZHAO Huijie(赵会杰), *et al.* Effects of water and nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield of water wheat in the late growing and developing period [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica(西北植物学报), 2003, 23(9): 1512-1517(in Chinese with English abstract).
- [12] FENG Zhaozhong(冯兆忠), WANG Xiaoke(王效科), DUAN Xiaonan(段晓男), *et al.* Effects of nitrogen fertilization on diurnal changes of flag leaf photosynthetic rate in spring wheat [J]. Ecology(生态学杂志), 2003, 22(4): 90-92(in Chinese with English abstract).
- [13] LÜ Jinyin(吕金印), SHAN Lun(山仑), GAO Junfeng(高俊凤), *et al.* Effects of drought on grain filling stage of wheat flag leaf photosynthetic physiological characteristics [J]. Agricultural Research in the Arid Areas(干旱地区农业研究), 2003, 21(2): 77-81(in Chinese).
- [14] CAO Shuqing(曹树青), ZHAO Yongqiang(赵永强), WEN Jiali(温家立), *et al.* The relationship of photosynthesis of high-yield wheat with the grain filling process [J]. Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2000, 33(6): 19-25(in Chinese).
- [15] Cruz-Aguado J A, Rod S R, Ortega E, *et al.* Partitioning and conversion of <sup>14</sup>C-photoassimilates in developing grains of wheat plants grown under field conditions in Cuba[J]. Field Crops Research, 2001, 69(3): 191-199.
- [16] Ehdai B A, Madore G, Waines M. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat[J]. Crop Science, 2006, 46(5): 2093-2103.
- [17] Lu C, Wang Y. Study on evaluation regularities and absorption characteristics of sulfur during coal combustion [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 1999, 4: 80-87.
- [18] ZHANG Qiuying(张秋英), LIU Na(刘娜), JIN Jian(金剑), *et al.* Relationship between Starch, Protein Accumulation and Substrate Supply during Grain Filling in Spring Wheat [J]. Journal of Triticeae Crops(麦类作物学报), 2000, 20(1): 55-58 (in Chinese with English abstract).
- [19] LI Weimin(李卫民), ZHOU Lingyun(周凌云). Water and fertilization on the physiological and ecological effects of wheat [J]. Chinese Journal of Soil Science(土壤通报), 2004, 35(3): 271-274(in Chinese).