

# 施氮量对小麦旗叶光合速率和光化学效率、 籽粒产量与蛋白质含量的影响

赵俊晔<sup>1,2</sup>, 于振文<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学农业部小麦栽培生理与遗传改良重点开放实验室, 山东泰安 271018; 2. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081)

**摘要:** 为给小麦高产高效栽培提供依据, 在大田高产条件下, 研究了施氮量对开花后小麦旗叶光合速率和光化学效率、旗叶和籽粒蔗糖含量及籽粒产量和蛋白质含量的影响。结果表明, 适量施氮有利于提高灌浆中、后期的旗叶光合速率、旗叶 PS 实际光化学效率, 以及灌浆末期旗叶 PS 最大光化学效率; 施氮过多不仅不能继续提高旗叶光合速率, 而且使 PS 实际光化学效率降低。施氮有利于提高旗叶蔗糖含量, 促进灌浆前期籽粒中蔗糖的供应; 施氮较多的处理中, 灌浆后期有较多蔗糖滞留于旗叶中, 致使施氮处理间籽粒蔗糖含量无显著差异。与不施氮的处理相比较, 施氮 105~195 kg·ha<sup>-1</sup> 显著提高籽粒产量, 施氮 105~240 kg·ha<sup>-1</sup> 显著提高籽粒蛋白质含量; 继续增施氮肥至 285 kg·ha<sup>-1</sup>, 籽粒蛋白质含量、粒重和籽粒产量均降低。综合考虑籽粒产量和蛋白质含量, 施氮量以 150~195 kg·ha<sup>-1</sup> 为宜。

**关键词:** 冬小麦; 施氮量; 光合速率; 光化学效率; 产量; 蛋白质含量

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2006)05-0092-05

## Effect of Nitrogen Fertilizer Rate on Photosynthetic Rate and Photochemical Efficiency of Flag Leaf, Grain Yield and Protein Content of Winter Wheat

ZHAO Jun-ye<sup>1,2</sup>, YU Zhen-wen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Wheat Physiology and Genetic Improvement, Ministry of Agriculture, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 2. Institute of Agricultural Information, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted on high-yielding conditions to evaluate the effects of nitrogen fertilizer rate on changes of photosynthetic rate and photochemical efficiency in flag leaf, changes of sucrose content in flag leaf and grain after anthesis, and grain yield and protein content of winter wheat. The application of nitrogen fertilizer would increase photosynthetic rate and photochemical efficiency of PS in flag leaf during the mid and late filling stage, increase the ratio of  $F_v/F_m$  at the end of grain filling stage. With the application of excessive nitrogen, the photosynthetic rate do not increase and photochemical efficiency of PS decrease. The application of nitrogen fertilizer would increase sucrose content in flag leaf and promote sucrose supply in grain during early filling stages. During late filling stages, the nitrogen application at high rate would increase the amount of sucrose left in flag leaf, so the differences of sucrose content in grains among treatments of different nitrogen application rate were not significant. Compared with no nitrogen applied, the nitrogen application rate at 105~195 kg·ha<sup>-1</sup> increased grain yield significantly and the nitrogen application rate at 105~240 kg·ha<sup>-1</sup> increased protein content significantly. When the nitrogen application rate increased to 285 kg·ha<sup>-1</sup>, grain weight, grain yield and protein content decreased. With the yield and protein content were concerned, the nitrogen application rate at 105~240 kg·ha<sup>-1</sup> was recommended.

**Key words:** Winter wheat; Nitrogen fertilizer rate; Photosynthetic rate; Photochemical efficiency; Yield; Protein content

收稿日期: 2006-02-09

修回日期: 2006-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(30471026); “十五”国家科技攻关项目(2002BA516A12)。

作者简介: 赵俊晔(1978-), 女, 博士, 主要从事农业信息分析和小麦生理生态研究。

通讯作者: 于振文(1944-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事作物栽培与生理生态研究。

开花至成熟阶段是小麦籽粒产量形成的重要时期,成熟籽粒中 70% 以上的干物质来自于开花后光合器官生产的光合产物<sup>[1,2]</sup>。开花后,叶片合成的碳水化合物主要以蔗糖的形式通过韧皮部运输到籽粒中,并在籽粒中降解合成为淀粉<sup>[3]</sup>,这一过程一方面与源器官的光合作用密切相关,一方面与籽粒库的形成密切联系。所以要获得高产既要求光合源特别是旗叶有较强的光合物质生产能力,又要求叶片中的光合产物较多地分配到籽粒中,从而提高粒重和产量。

氮素运筹是提高小麦产量、改善籽粒品质的重要措施<sup>[4-7]</sup>,但过量或不合理施氮不仅不能达到高产优质的目的,还会降低氮肥利用率,增加氮肥损失,污染环境<sup>[8]</sup>。关于施氮量对小麦光合特性、光合产物分配及籽粒产量的影响,已有较多报道,多数研究指出施氮提高灌浆期间旗叶光合速率和蔗糖含量,促进籽粒淀粉积累,有利于提高籽粒产量<sup>[9-14]</sup>。但过量施氮对小麦产量形成的影响及其生理原因,尚需要进一步研究阐明。叶绿素荧光分析技术已广泛应用于强光、高温、低温及干旱等小麦逆境生理的研究<sup>[15-17]</sup>。李友军等通过研究不同小麦品种的叶绿素荧光特性,提出籽粒产量与开花期、灌浆前期和灌浆后期的  $F_v/F_m$ 、PS 显著正相关<sup>[18]</sup>,而关于施氮量对小麦开花后旗叶叶绿素荧光参数的影响及其与籽粒产量形成的关系还较少报道。为此进行本试验,研究施氮量对高产小麦旗叶光合速率、光化学效率的变化规律,及旗叶和籽粒蔗糖含量变化与籽粒产量和蛋白质含量的影响,为小麦高产、高效生产中的氮肥决策提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计与取样

田间试验于 2002~2003 年度在山东省龙口市前诸留村高产田进行。试验地为棕壤,每公顷施用 240 kg N、135 kg  $P_2O_5$  和 105 kg  $K_2O$  为当地生产传统施肥量。小麦播种前,0~20 和 20~40 cm 土层土壤有机质含量分别为 1.33% 和 0.66%,全氮为 82 和 49 g/kg,碱解氮为 85.87 和 36.53 mg/kg,速效磷为 27.48 和 5.24 mg/kg,速效钾为 129.7 和 93.7 mg/kg。供试品种为高产强筋小麦济麦 20。试验设 0、105、150、195、240 和 285 kg N/ha 共 6 个施氮量处理,分别以  $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  和  $N_5$  表示;同时每公顷施 135 和

105 kg  $K_2O$ 。氮肥采用尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含  $P_2O_5$  17%),钾肥为氯化钾(含  $K_2O$  60%)。播前氮肥总量的 1/2、全部磷肥和钾肥均匀撒于小区后翻入地下,余下 1/2 氮肥于拔节期(雌雄蕊原基分化期)结合浇水开沟施入。前茬玉米秸秆全部于播种前翻压还田。2002 年 10 月 8 日播种,基本苗 120 株/ $m^2$ ,小区面积 3 m × 8 m = 24  $m^2$ ,随机区组设计,3 次重复。其他管理同一般高产田。于开花期标记长相一致、同一日开花的麦穗,开花后 7、14、21、28、35 d 取旗叶和籽粒样品,70 ℃ 烘至恒重后,用于测定旗叶和籽粒蔗糖含量。于小麦蜡熟末期(开花后 39 d)实收测产,并留取籽粒测定蛋白质含量。

### 1.2 测定项目与方法

光合速率测定:在开花后 0、21、28、35 d,用英国产 CIRAS-2 光合作用测定系统,采用开放式气路,于晴朗上午 9:00~11:00 测定自然光照下旗叶光合速率。叶绿素荧光参数测定:在开花后 0、7、14、21、35 d,采用英国 Hansatech 公司产 FMS-2 型荧光仪于晴天进行田间活体测定。测定时选取生长一致且受光方向相同的旗叶,暗适应 20 min 后,先进行暗适应测定,重复 5 次,再进行光适应测定,重复 5~10 次。蔗糖含量采用蒽酮比色法测定;蛋白质含量采用 NY/T 3-1982《谷类、豆类作物种子粗蛋白测定法》测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量对开花后小麦旗叶光合速率的影响

施氮量对旗叶光合速率的影响随灌浆进程而变化(图 1)。开花期,处理间无显著差异。开花后 21 d,从  $N_0$  至  $N_4$  处理,随施氮量增加,旗叶光合速率增加;继续增加施氮量至  $N_5$  处理,光合速率下降。此时是小麦籽粒的线性增重期,较高的旗叶光合速率,有利于光合产物的形成和粒重的提高。开花后 28 d, $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$ 、 $N_5$  处理间的旗叶光合速率间无显著差异,但显著大于  $N_0$  和  $N_1$  处理。开花后 35 d,随施氮量增加,旗叶光合速率增加,而  $N_4$  与  $N_5$  处理之间无显著差异。说明增施氮肥有利于提高灌浆后期的旗叶光合速率,施氮量过多( $N_5$ )无提高旗叶光合速率的效应。

### 2.2 施氮量对开花后小麦旗叶光化学效率的影响

从图 2 可以看出,不同处理旗叶  $F_v/F_m$  随施氮量增加而提高,但仅在开花后 35 d 差异显

著。说明在本试验条件下,增加施氮量仅有利于灌浆末期旗叶 PS 最大光化学效率的提高。

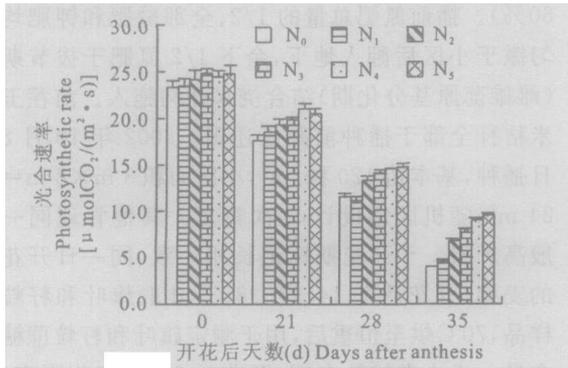


图1 施氮量对旗叶光合速率的影响

Fig.1 Effect of nitrogen fertilizer rate on photosynthetic rate of wheat flag leaf

除开花后 7 d 外,随施氮量增加, PS 均呈先增加后降低的趋势(图 3);开花期和开花后 14 d, PS 在 N<sub>2</sub> 处理达到峰值;随籽粒灌浆进程的推进,处理间差异变大, PS 达到峰值的施氮量提高,开花后 21 和 35 d,分别在 N<sub>3</sub> 和 N<sub>4</sub> 处理达到峰值。说明适量施氮有利于提高灌浆期间旗叶的 PS 实际光化学效率,施氮过多则不利。

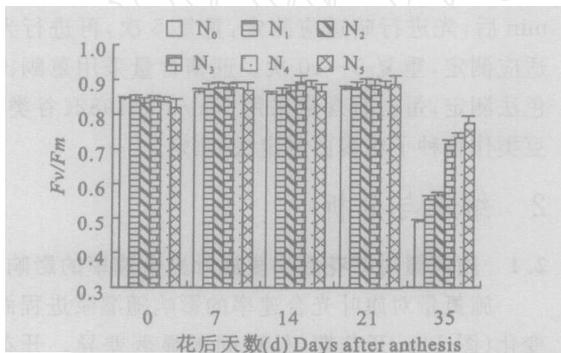


图2 施氮量对旗叶 Fv/ Fm 的影响

Fig.2 Effect of nitrogen fertilizer rate on Fv/ Fm of wheat flag leaf

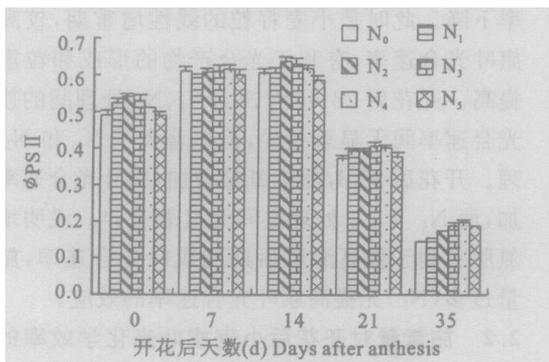


图3 施氮量对旗叶 PS 的影响

Fig.3 Effect of nitrogen fertilizer rate on PS of wheat flag leaf

### 2.3 施氮量对开花后小麦旗叶和籽粒蔗糖含量变化的影响

随籽粒灌浆进程,旗叶蔗糖含量先增加后降低(图 4),开花后 7 d 至 21 d,N<sub>5</sub> 处理大于 N<sub>4</sub> 处理,这两个处理均大于其他处理,N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub> 处理间无显著差异;开花后 28 d 至 35 d,随施氮量增加,蔗糖含量提高。说明增加施氮量有利于旗叶蔗糖含量的提高,同时施氮量较高的处理在灌浆后期有较多的蔗糖滞留于旗叶中。

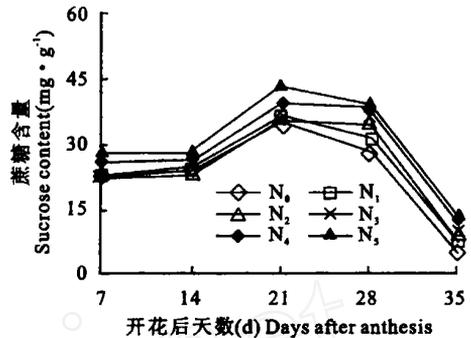


图4 施氮量对旗叶蔗糖含量的影响

Fig.4 Effect of nitrogen fertilizer rate on sucrose content in wheat flag leaf

籽粒蔗糖含量在灌浆过程中呈下降趋势(图 5)。开花后 7 d 处理间差异较大,随施氮量增加,籽粒蔗糖含量提高,N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 处理间无显著差异;随灌浆进程,处理之间差异变小,开花后 14 d 至 28 d,施氮处理间无显著差异;到花后 35 d,处理间均无明显差异。说明施氮促进灌浆前期籽粒中蔗糖的供应,对灌浆中后期籽粒中蔗糖含量无显著影响。结合图 4 可以看出,施氮量多的处理滞留在旗叶中的蔗糖多,致使籽粒中蔗糖含量提高不显著。

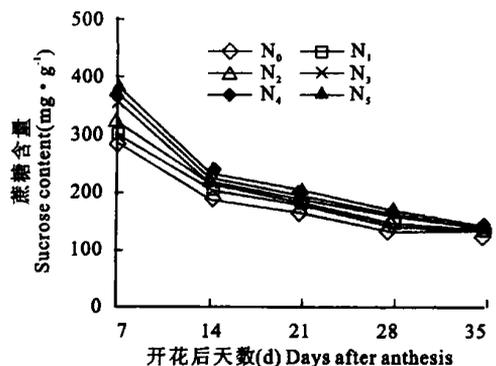


图5 施氮量对籽粒蔗糖含量的影响

Fig.5 Effect of nitrogen fertilizer rate on sucrose content in wheat grain

## 2.4 施氮量对小麦籽粒产量及蛋白质含量的影响

由表 1 可以看出,随施氮量增加,单位面积穗数呈先增加后降低的趋势,处理间无显著差异;穗粒数呈增加趋势;粒重呈先增加后降低的趋势, $N_5$  处理显著低于其他处理。施氮处理籽粒产量显著大于  $N_0$  处理; $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  处理间籽粒产量无显著差异,继续增加施氮量,籽粒产量降低。施氮处理的籽粒蛋白质含量大于不施氮肥的处理。随

施氮量增加,籽粒蛋白质含量呈先增加后降低的趋势, $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  处理大于  $N_1$  处理, $N_5$  处理的蛋白质含量尚低于  $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  处理。处理间的蛋白质产量表现为  $N_2$  和  $N_3$  处理显著大于  $N_0$  和  $N_5$  处理, $N_1$  和  $N_4$  居中。说明,在本试验较高土壤肥力条件下,适量施氮仍可提高籽粒产量和蛋白质含量,过量施氮不利于籽粒产量及蛋白质含量的提高。综合考虑籽粒产量和蛋白质含量,施氮量以  $150 \sim 195 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  为宜。

表 1 不同施氮量下小麦的籽粒产量和蛋白质含量

Table 1 Grain yield and protein content of wheat under different nitrogen fertilizer rates

处理 Treatment	穗数 Spike number ( $10^4 \cdot \text{ha}^{-1}$ )	穗粒数 Grain number per spike	粒重 Grain weight ( $\text{mg} \cdot \text{grain}^{-1}$ )	籽粒产量 Grain yield ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ )	蛋白质含量 Protein content (%)	蛋白质产量 Protein yield ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ )
$N_0$	653.2	35.9	36.0	8 526.67b	13.87c	1 182.65b
$N_1$	660.7	36.8	37.1	8 806.67a	14.11b	1 242.62ab
$N_2$	661.4	36.9	37.6	8 845.00a	14.22a	1 257.76a
$N_3$	660.9	38.1	37.2	8 800.00a	14.30a	1 258.40a
$N_4$	659.9	37.6	37.0	8 636.67ab	14.28a	1 233.32ab
$N_5$	656.5	39	34.9	8 525.00b	14.12b	1 203.73b

注:不同字母表示不同处理的差异显著性达 0.05 水平。

Note: Different letters mean significance of different treatment at 0.05 level.

## 3 讨论

小麦开花后旗叶的光合作用在小麦籽粒产量形成过程中起重要作用<sup>[19]</sup>。前人研究表明,一定范围内施氮能增加旗叶叶绿素含量,改善旗叶光合性能,提高籽粒产量<sup>[9]</sup>。本试验条件下,施氮对开花期旗叶光合速率无显著影响,但有利于提高灌浆中、后期的旗叶光合速率。关于氮肥对叶绿素荧光参数的影响,董彩霞(2002)研究了苗期不同浓度的硝酸盐对叶绿素荧光参数日变化的影响,指出缺氮、低氮和高氮条件下培养的幼苗在饱和光强下测定的  $F_v/F_m$  和 PS 比正常供氮水平( $15 \text{ mmol/L NO}_3^-$ )明显下降<sup>[16]</sup>。张雷明(2003)研究了长期施氮对旱地小麦叶绿素荧光参数的影响,结果表明,增施氮肥可提高 PS 反应中心的光能转换效率和潜在活性,但施氮  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  和  $180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  处理间对光合的促进作用差异不显著<sup>[15]</sup>。本试验研究结果表明,在开花至开花后 21 d,旗叶  $F_v/F_m$  对施氮量的影响反应不敏感,仅在灌浆末期表现为随施氮量增加,旗叶  $F_v/F_m$  提高。与  $F_v/F_m$  不同,施氮量对 PS 的影响较大,灌浆期间适量施氮可提高 PS,但当施氮量大于  $240 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  时,PS 降低,说明过量施氮降低 PS 反应中心的开放比例,实际

的光能转换效率下降。同时结果指出,与光合速率相比,PS 实际光化学效率更易受到过量施氮的影响。

小麦开花后,由叶片合成蔗糖,通过韧皮部运输到籽粒中,并在籽粒中降解为合成淀粉的原料;同时光合器官蔗糖的合成,还为氮代谢中氨基酸的合成提供碳架<sup>[20]</sup>。Jenner C F 等、张秋英等研究认为胚乳内淀粉的积累不受籽粒中蔗糖供应的限制,影响淀粉积累的主要因素是胚乳库容大小和淀粉的合成能力<sup>[21,22]</sup>。周琴采用花后离体穗培养表明,籽粒蔗糖含量变化趋势与培养基中蔗糖浓度变化一致,在相同的谷氨酰胺水平下,提高蔗糖供应水平能显著增加粒重,促进籽粒中淀粉积累,但降低蛋白质合成;在同样蔗糖水平下,提高谷氨酰胺供应水平,即有利于籽粒中蛋白质积累,也促进淀粉合成<sup>[23]</sup>。本研究指出,高产大田条件下,提高氮素供应水平有利于旗叶蔗糖的合成,促进籽粒中蔗糖的供应,但灌浆后期施氮量较高的处理有较多的蔗糖滞留于旗叶中,未能转移到籽粒中,使施氮处理间籽粒蔗糖含量无显著差异。结合施氮量对旗叶光合速率和光化学效率的影响,可以看出,施氮提高灌浆期间的旗叶蔗糖含量与提高光合速率在时间上具有一致性,与对光化学效率的影响则无直接对应关系。除开花后

35 d 外,施氮处理籽粒蔗糖含量均提高,但施氮处理间差异较小;与不施氮的处理相比较,适量施氮籽粒产量和蛋白质含量显著提高,继续增施氮肥至  $285 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,蛋白质含量、粒重和籽粒产量均降低,说明施氮量对籽粒产量和蛋白质含量的影响的生理基础还需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 张立言,刘树欣,李振国,等. 高产麦田开花后干物质积累、运转、分配与产量构成[J]. 北京农学院学报,1988,3(2):76-83.
- [2] Mccai T N, Clarke J M. Seasonal changes in nonstructural carbohydrate levels of wheat and oats grown in semiarid environment [J]. *Crop Science*,1982,22:963-970.
- [3] 潘庆民,于振文,王月福. 小麦开花后旗叶蔗糖合成与籽粒中蔗糖降解[J]. 植物生理与分子生物学学报,2002,28(3):235-240.
- [4] 朱新开,郭文善,周君良,等. 氮素对不同类型专用小麦营养和加工品质调控效应[J]. 中国农业科学,2003,36(6):640-645.
- [5] 王月福,于振文,李尚霞,等. 施氮量对小麦籽粒蛋白质组含量及加工品质的影响[J]. 中国农业科学,2002,35(9):1071-1078.
- [6] Souza EJ, Martin J M, Guttieri M J, *et al.* Influence of genotype, environment and nitrogen management on spring wheat quality[J]. *Crop Science*,2004,44(2):425-432.
- [7] Abad A, Lloveras J, Michelena A. Nitrogen fertilization and foliar urea effects on durum wheat yield and quality and on residual soil nitrate in irrigated Mediterranean conditions [J]. *Field Crops Research*,2004,87(2-3):257-269.
- [8] 朱兆良. 农田中 N 肥的损失与对策[J]. 土壤与环境,2000,9(1):1-6.
- [9] 姜东,于振文,李永庚,等. 施氮水平对高产小麦蔗糖含量和光合产物分配及籽粒淀粉积累的影响[J]. 中国农业科学,2002,35(2):157-162.
- [10] 蒋家慧. 氮肥运筹对小麦碳素同化、运转和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2004,24(3):69-72.
- [11] 郭天财,姚战军,王晨阳,等. 水肥运筹对小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 西北植物学报,2004,24(10):1786-1791.
- [12] 郭天财,冯伟,赵会杰,等. 两种穗型冬小麦品种旗叶光合特性及氮素调控效应[J]. 作物学报,2004,30(2):115-121.
- [13] 康国章,王永华,郭天财,等. 氮素施用对超高产小麦生育后期光合特性及产量的影响[J]. 作物学报,2003,29(1):82-86.
- [14] 王月福,于振文,李尚霞,等. 氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2002,22(2):55-59.
- [15] 张雷明,上官周平,毛明策,等. 长期施氮对旱地小麦灌浆期叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(5):695-698.
- [16] 董彩霞,赵世杰,田纪春,等. 不同浓度的硝酸盐对高蛋白小麦幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 作物学报,2002,28(1):59-64.
- [17] 张秋英,李发东,刘孟雨,等. 不同水分条件下小麦旗叶叶绿素 a 的荧光参数与灌浆速率[J]. 华北农学报,2003,18(1):26-28.
- [18] 李友军,熊瑛,陈明灿,等. 不同品质类型小麦叶绿素荧光特性及其与籽粒产量和淀粉积累的关系[J]. 麦类作物学报,2005,25(6):82-86.
- [19] 杜久元,周祥椿,杨立荣. 不同小麦品种植株光合器官受损对单穗籽粒产量的影响及其补偿效应[J]. 麦类作物学报,2004,24(1):35-39.
- [20] Champigny M L. Intergration of photosynthetic carbon and nitrogen metabolism in higher plants[J]. *Photosynthetica*,1995,46:117-127.
- [21] Jenner C F, Hawker J S. Sink strength: Soluble starch synthase as a measure of sink strength in wheat endosperm[J]. *Plant, Cell & Environment*,1993,16(9):1023-1024.
- [22] 张秋英,刘娜,金剑,等. 春小麦籽粒淀粉和蛋白质积累与底物供应的关系[J]. 麦类作物学报,2000,29(1):55-58.
- [23] 周琴,姜东,戴廷波,等. 灌浆前期碳、氮供应对冬小麦籽粒蛋白质和淀粉积累的影响[J]. 作物学报,2004,30(10):975-979.

## 欢迎订阅《粮食与饲料工业》(月刊)

《粮食与饲料工业》是由国家粮食局主管,国家粮食储备局武汉科学研究设计院主办,全国唯一集粮食与饲料于一刊的综合性技术类期刊。本刊系第二届国家期刊奖百种重点期刊、中文核心期刊、湖北省优秀期刊。

主要报道内容:粮食、饲料及粮油食品方面的技术、成果、研究报告、学术论文、综合评述、国内外行业动态、市场信息、专题报道等。设有小麦制粉、稻谷碾米、粮食流通与仓储、粮油食品及深加工、饲料加工、饲料资源开发利用、饲料添加剂、饲料及饲养、环保及通风除尘、检测分析等主要栏目。

常年为各类相关企、事业单位发布广告。

本刊为月刊,每期定价 5.00 元,全年 12 期 60 元(含邮费)。读者可到当地邮局订阅,邮发代号:38-151。也可将款汇至《粮食与饲料工业》编辑部订阅或补订。

编辑部地址:湖北省武汉市卓刀泉南路 3 号

邮编:430079

联系电话:027-50657638 87406138

传真:027-50657739

E-mail:lsyslg@126.com

http://www.whlky.cn