

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2010.00673

## 花后遮阴对小麦旗叶光合特性及籽粒产量和品质的影响

郭翠花 高志强\* 苗果园

山西农业大学农学院, 山西太谷 030801

**摘 要:** 为阐明麦田遮阴对小麦旗叶光合特性与产量品质的影响, 2008—2009 年在大田生产条件下, 于小麦开花后设置不同程度的遮阴处理, 分析了对旗叶光合参数及籽粒产量和主要品质性状的影响。结果表明, 遮阴使不育小穗增加, 穗粒重和千粒重降低, 导致明显减产, 遮阴 20%、50%和 80%处理分别比对照产量降低 27.6%、49.0%和 60.2%。遮阴后小麦旗叶的叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量均增加, 但叶绿素 a/b 的比值降低; 遮阴使旗叶净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著降低, 但胞间 CO<sub>2</sub> 浓度有所增加。净光合速率受影响程度的时间排序为灌浆初期>灌浆中期>灌浆后期。遮阴使小麦籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、谷蛋白和醇溶蛋白含量以及谷蛋白/醇溶蛋白的比值都显著提高 ( $P<0.05$ ), 其中谷蛋白/醇溶蛋白比值增加说明小麦开花后遮阴对谷蛋白的影响强度大于对醇溶蛋白的影响。遮阴虽然导致产量明显降低, 但提高了面团延展性、形成时间、稳定时间和面团吸水率等面团流变学特性, 由此可见小麦籽粒形成期光照强弱的巨大差异, 导致在淀粉与蛋白合成过程中量比关系发生紊乱, 进而引起不同光照下产量与品质的显著不同。

**关键词:** 小麦; 遮阴强度; 光合特性; 产量; 品质

## Effect of Shading at Post Flowering on Photosynthetic Characteristics of Flag Leaf and Response of Grain Yield and Quality to Shading in Wheat

GUO Cui-Hua, GAO Zhi-Qiang\*, and MIAO Guo-Yuan

College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

**Abstract:** Shading post flowering, caused by cloudy weather and the surrounding protective trees, often occurs in some wheat (*Triticum aestivum* L.) area in north China. In general, wheat yield is negatively influenced by shading post flowering, but the effect on grain quality is reported discrepantly. This study aimed at disclosing the effects of post-flowering shading on photosynthesis of leaf and yield and quality of grain in wheat, accordingly, giving suggestions to wheat production. Three treatments were designed with shading of 20%, 50%, and 80% for 30 d, respectively. The normal condition was taken as the control. The results showed that shading treatments had significant influences on photosynthetic characteristics of flag leaf. The shading treatments increased the number of sterile spikelet and reduced the grain weight per spike and the 1000-grain weight. As a result, the grain yield of the three shading treatments significantly decreased by 27.6%, 49.0%, and 60.2% compared with the control. In the shading treatments, the contents of the chlorophylls a and b increased, whereas the ratio of chlorophyll a to chlorophyll b decreased. Moreover, the net photosynthetic rate, the stomatal conductance, and the transpiration rate were also significantly reduced, but the intercellular CO<sub>2</sub> concentration was promoted. The shading depression on net photosynthetic rate became smaller in the process of grain filling, with the largest effect at early stage of grain filling and the smallest effect at late stage of grain filling stage. The contents of protein, wet gluten, glutenin, gliadin and the ratio of glutenin to gliadin in grains increased significantly with the increase of shading. The shading influence on glutenin was greater than that on gliadin. Although the shading treatments decreased grain yield obviously, it raised some quality parameters, such as extensibility, development time, stability time, and water absorption of dough. The responses of yield and quality of wheat grain to shading were different because of the discrepant synthesis mechanisms of starch and protein under weak light condition. In wheat protective areas, yield is a priority factor and the tree-wheat intercropping mode should be avoided.

本研究由高等学校博士学科点专项科研基金(20070113001)和教育部科学研究重点项目(206019)资助。

\* 通讯作者(Corresponding author): 高志强, E-mail: gaozhiqiang1964@126.com

第一作者联系方式: E-mail: guocuihua20051@163.com

Received(收稿日期): 2009-11-20; Accepted(接受日期): 2010-02-05.

**Keywords:** Wheat; Shading severity; Photosynthetic characteristics; Yield; Quality

光照强度是影响小麦光合生产、生长发育、产量与品质的重要因素。小麦开花后光合产物是籽粒物质积累的主要来源,旗叶的生理活性直接影响干物质的积累与运转,此时的环境条件特别是光照条件又是物质生产的首要能源<sup>[1]</sup>。归纳前人在这方面的研究不外乎遮阴对作物形态建成<sup>[2-3]</sup>,产量构成<sup>[2-6]</sup>,作物冠层叶面积指数、叶绿素含量、净光合速率、RuBPCase 和 PEPCase<sup>[6-8]</sup>,以及小麦蛋白面筋及加工品质等<sup>[8-9]</sup>的影响。此外,近年来随着种植结构的调整,追求高产高效,不少地区经济林木进入农田,这种林粮间作农田林网化虽有利于提高土地利用率和经济效益<sup>[10]</sup>,但与粮争地、与粮争光的现象在一定程度上影响了粮食生产,尤其使矮生的小麦经常受到早晚遮阴,而影响产量和品质<sup>[11-12]</sup>。鉴于前人研究目标相对单一,综合研究少,特别是遮阴对小麦加工品质的研究尚处于初期阶段,且结果不一<sup>[8-9,13-16]</sup>。在试验设计处理上也相对较少,不少研究是在室内盆栽条件下进行,即使在大田进行,往往处理面积也相对较小,小区之间不可避免存在相互影响的误差。本试验在大田条件下,利用人工遮阴方法,设置 3 种遮阴强度,围绕光合生产,产量构成以及品质

形成进行综合研究,以期为高产、优质、高效、节能的小麦生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

2008—2009 小麦生长季,在山西农业大学农场试验站进行田间试验,试验田为井灌区,0~20 cm 耕层土壤为中壤,含有机质 11.3 g kg<sup>-1</sup>、全氮 0.7 g kg<sup>-1</sup>、碱解氮 57.0 g kg<sup>-1</sup>、速效磷 25.7 g kg<sup>-1</sup>、速效钾 106.0 mg kg<sup>-1</sup>。小麦生育期内气候干旱,从开花到成熟降雨量为 82.1 mm,平均最高和最低温度分别为 27.31℃和 14.35℃。

从小麦开花期开始用不同透光度的黑色尼龙网遮阴,设遮阴 20%(S20)、50%(S50)和 80%(S80) 3 处理,以正常光照为对照。遮阴处理 30 d,遮阴网的水平高度距小麦群体穗层上部 1 m 左右,连续 10 d 测定遮阴网内麦田小气候特征值(表 1)。

供试品种为山农 129,于 2008 年 9 月 26 日播种,播种密度为每公顷 375 万基本苗,小区面积为 6.67 m × 10 m (66.7 m<sup>2</sup>),随机区组排列,3 次重复,按当地高产灌溉田生产技术进行田间管理。

表 1 不同遮阴处理的麦田小气候特征值  
Table 1 Effects of different shading treatments on microclimate in experimental field

处理 Treatment	CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> concentration (μmol mol <sup>-1</sup> )	光合有效辐射 PAR (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	相对湿度 Relative humidity (%)	气温 Air temperature ( )
对照 Control	331.0±2.00 a	1056.2±5.78 a	68.9±0.56 a	25.24±0.45 a
S20	331.5±1.23 a	835.6±4.95 b	69.0±0.54 a	23.67±0.37 b
S50	332.3±1.01 a	516.7±4.70 c	69.4±0.67 a	23.41±0.34 b
S80	332.7±0.70 a	224.9±3.23 d	70.2±0.90 a	23.22±0.28 b

表中数据为连续 10 d 测定值的平均值±标准误。对照为正常光照,S20、S50 和 S80 分别表示遮阴强度为 20%、50%和 80%。

Data are mean±SE of 10 measurements in consecutive days. Control is the natural condition and S20, S50, and S80 denote shading of 20%, 50%, and 80%, respectively. PAR: photosynthetically active radiation.

### 1.2 小气候特征测定

利用 LI-6400 便携式光合仪(LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)的外置光量子传感仪测定距小麦冠层 20 cm 的有效光合辐射(PAR 值);用便携式红外线 CO<sub>2</sub> 分析仪、气温计和湿度计于每天 11:00 分别测定 CO<sub>2</sub> 浓度、温度和相对湿度。

### 1.3 净光合速率及叶绿素含量的测定

于晴天上午 9:30~11:30,用 LI-6400 便携式光合仪测定系统测定旗叶的净光合速率。每处理测定 5 片主茎旗叶的中部,每叶重复测定 3 次。同时每处

理随机选取 5 片旗叶,按 Arnon 的方法用 80%丙酮提取<sup>[17]</sup>,测定叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量。

### 1.4 品质指标及其测定

采用半微量凯氏定氮法测定籽粒蛋白质含量和籽粒蛋白组分含量<sup>[18]</sup>。用德国 Brabender 公司生产的粉质仪分析测定面团稳定时间和形成时间及吸水率等面团流变学特性。

### 1.5 产量及其构成因素测定

成熟期每小区随机取 10 株进行室内考种,分别测定每穗粒数和穗粒重,计算结实率。每小区按实

收计算产量。

1.6 数据分析

应用 Microsoft Excel 和 DPS 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 遮阴对小麦产量及产量结构的影响

开花后各遮阴处理对穗数和小穗数影响不显著，而对小穗育性、穗重及穗粒重影响达显著水平(表 2)。与对照相比，S20、S50 和 S80 处理分别减产达 27.6%、49.0%和 60.2%。从主茎穗粒重和群体平均穗粒重差异来看，遮阴对分蘖穗的影响较大。

2.2 遮阴对小麦叶片光合特性及叶绿素含量的影响

2.2.1 叶绿素含量 遮阴后小麦旗叶叶绿素 a、叶绿素 b 和总的叶绿素含量都呈增加的趋势，增加幅度随遮阴强度的增强而加大；遮阴使得叶绿素 a/b 比值降低，降低幅度也随遮阴强度的增加而加大。遮阴结束后，叶片叶绿素 a 含量迅速降低，下降幅度随遮阴强度的加强而加剧，最终叶绿素 a 含量低于对照。叶绿素 b 在遮阴期间呈先增加而后降低的趋势(图 1)。总之，遮阴对叶绿素 b 的影响大于对叶绿素 a，恢复光照后叶绿素 a 恢复得较快。遮阴促进叶绿素 a 与 b 的增加，是叶绿素对光合反应降低的一种适应性，即通过强化提高叶绿素含量适应光照不

表 2 不同遮阴强度对小麦产量结构的影响  
Table 2 Grain yield and its components of wheat under different shade treatments

处理 Treatment	主茎 Main stem				群体 Population			
	小穗数 Number of spikelet	不育小穗数 Number of sterile spikelet	穗重 Spike weight (g)	穗粒重 Grain weight per spike (g)	穗数 Spike number ( $\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ )	穗粒重 Grain weight per spike (g)	产量 Yield ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	减产率 Rate of yield reduction (%)
对照 Control	15.89 a	1.35 c	2.12 a	1.70 a	532.95 a	1.158 a	6171.40 a	□
S20	16.47 a	2.30 b	1.87 b	1.55 b	535.05 a	0.835 b	4466.95 b	27.6
S50	16.42 a	2.61 b	1.52 c	1.13 c	523.20 a	0.601 c	3145.60 c	49.0
S80	16.63 a	3.95 a	1.23 d	0.89 d	511.80 a	0.479 d	2454.30 d	60.2

对照为正常光照，S20、S50 和 S80 分别表示遮阴强度为 20%、50%和 80%。每列中标以相同字母的值差异不显著( $P < 0.05$ )。  
Control is the natural condition and S20, S50, and S80 denote shading of 20%, 50%, and 80%, respectively. In each column, data followed by the same letter are not significantly different at  $P < 0.05$ .

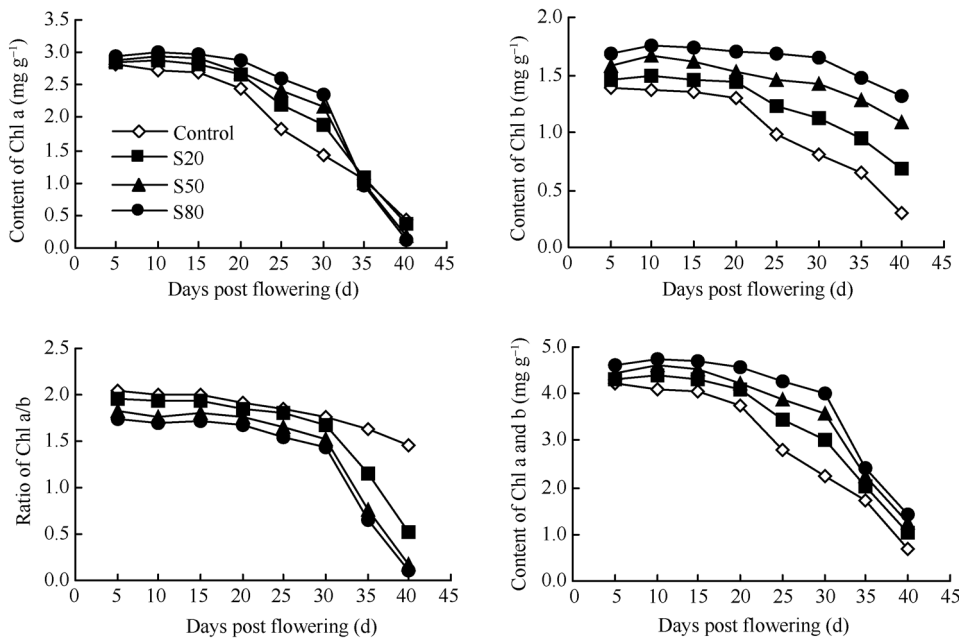


图 1 花后遮阴对小麦旗叶叶绿素含量及叶绿素 a/b 的影响

Fig. 1 Effects of shading on contents of chlorophyll and ratio of chlorophyll a to chlorophyll b of flag leaves in wheat post flowering

足与光合生产的不足,以维持基础代谢,而使叶片不致加速饥饿死亡。

2.2.2 光合速率及相关参数 遮阴处理旗叶的光合速率显著低于对照,遮阴 10 d 后, S20、S50 和 S80 处理分别较对照低 26.0%、42.9%和 62.0%;遮阴 20 d 后,分别较对照低 22.7%、41.0%和 56.5%;遮阴 30 d 后,分别低 14.4%、33.0%和 54.5%;遮阴结束 10 d 后,净光合速率变化更为明显,3 个遮阴处理分别比对照低 21.5%、69.2%和 94.7% (表 3)。

可见,在遮阴期间随着遮阴强度的增加,净光合速率降幅增大,严重者几乎处于光合停顿状态。在与光合速率有关的参数中,蒸腾速率,气孔导度与光合速率皆呈正相关,而细胞间隙 CO<sub>2</sub> 浓度与光合速率在遮光 10~30 d 内呈负相关(表 3)。表明遮阴导致光合速率与蒸腾速率降低,以及气孔导度的失控,使得叶片内外 CO<sub>2</sub> 不能正常平衡交换,导致细胞间隙 CO<sub>2</sub> 浓度过量积累,进一步影响光合速率及其相关参数。

表 3 遮阴对小麦叶片光合速率及其相关参数的影响  
Table 3 Effects of shading on photosynthetic rate and its relevant parameters of flag leaf in wheat

时期 Stage	处理 Treatment	光合速率 $P_n$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	蒸腾速率 $T_r$ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	气孔导度 $G_s$ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	细胞间隙 CO <sub>2</sub> 浓度 $C_i$ ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )
花后 10 d 10 d post flowering	对照 Control	20.82±1.23 a	4.03±0.20 a	194.33±2.20 a	243.00±2.19 c
	S20	15.47±1.04 b	3.57±0.23 b	158.00±1.81 b	259.00±2.47 b
	S50	11.93±0.89 c	2.90±0.21 c	131.67±1.21 c	289.67±2.90 a
	S80	7.93±0.63 d	1.63±0.17 d	113.00±1.03 d	296.00±2.78 a
花后 20 d 20 d post flowering	对照 Control	16.63±1.12 a	3.83±0.23 a	178.67±1.67 a	224.00±2.25 c
	S20	12.87±1.05 b	3.23±0.25 b	161.00±1.34 b	248.00±2.43 b
	S50	9.81±0.83 c	2.67±0.18 c	125.67±1.12 c	275.33±2.56 a
	S80	7.23±0.53 d	2.30±0.21 d	106.00±1.08 d	280.67±2.34 a
花后 30 d 30 d post flowering	对照 Control	13.47±0.87 a	3.33±0.18 a	152.33±1.32 a	190.67±1.68 c
	S20	11.53±0.67 b	2.80±0.15 b	144.33±1.24 a	218.00±2.13 b
	S50	9.03±0.34 c	2.50±0.13 b	113.33±1.04 b	235.33±2.11 a
	S80	6.13±0.23 d	1.63±0.20 c	86.67±0.98 c	244.00±1.93 a
花后 40 d 40 d post flowering	对照 Control	7.77±0.31 a	2.50±0.17 a	98.67±0.79 a	80.67±0.77 a
	S20	6.10±0.27 b	2.00±0.17 b	83.00±0.65 b	71.33±0.54 ab
	S50	2.40±0.18 c	1.10±0.09 c	71.67±0.50 c	68.67±0.50 b
	S80	0.41±0.02 d	0.77±0.12 c	43.33±0.50 d	50.67±0.50 c

对照为正常光照, S20、S50 和 S80 分别表示遮阴强度为 20%、50%和 80%。每列中标以相同字母的值差异不显著( $P < 0.05$ )。  
Control is the natural condition and S20, S50, and S80 denote shading of 20%, 50%, and 80%, respectively. In each column, data followed by the same letter are not significantly different at  $P < 0.05$ .

2.3 遮阴对小麦籽粒品质的影响

2.3.1 蛋白质和湿面筋含量 遮阴后籽粒磨粉品质指标出粉率显著降低,降低幅度随遮阴强度增强呈增加趋势,而蛋白质含量和湿面筋含量却显著升高,其中升高幅度随遮阴强度的加大而呈

递增趋势。S20、S50 和 S80 处理的蛋白质含量分别较对照高 7.2%、14.5%和 18.5%,湿面筋含量分别较对照高 5.8%、12.5%和 28.7%。表明随着遮阴强度的增强,湿面筋增加的幅度明显高于蛋白质(图 2)。

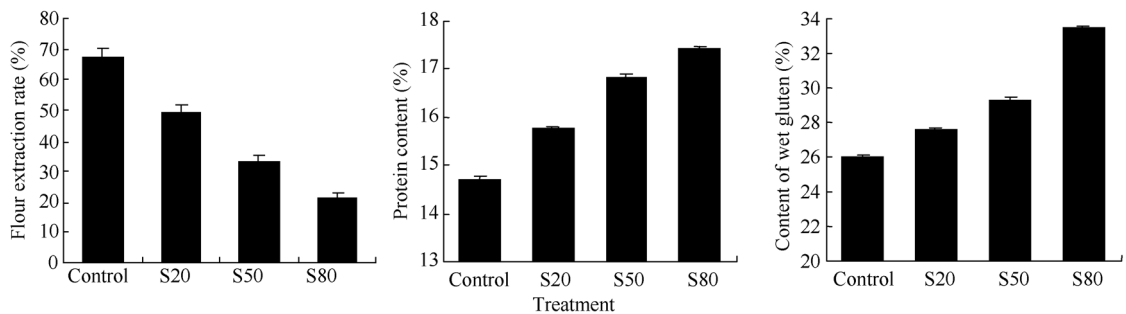


图 2 小麦开花后不同强度遮阴对籽粒出粉率、蛋白质和湿面筋含量的影响  
Fig. 2 Effect of shading after flowering on flour extraction rate, contents of protein, and wet gluten in grains of wheat

2.3.2 蛋白质组分 开花后遮阴使籽粒中的谷蛋白和醇溶蛋白都显著提高, S20、S50 和 S80 处理的醇溶蛋白分别较对照提高 4.3%、8.6%和 17.7%, 并随着遮阴强度的递增, 醇溶蛋白含量呈递增的趋

势。3 个遮阴处理的谷蛋白含量分别较对照高 8.1%、19.7%和 34.6%, 可以看出谷蛋白随遮阴强度的递增大于醇溶蛋白。因此谷蛋白与醇溶蛋白的比值也随遮阴强度的增加而呈递增的趋势(图 3)。

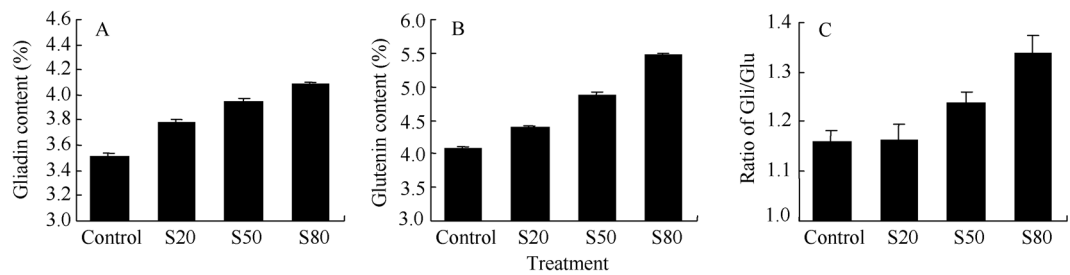


图 3 小麦开花后遮阴对籽粒麦谷蛋白和醇溶蛋白的影响  
Fig. 3 Effects of shading after flowering on glutenin and gliadin in grains of wheat

2.3.3 面团流变学特性 小麦开花后随着遮阴强度的增加小麦面粉吸水率、面团延展性、面团形成时间、稳定时间都显著提高, 而沉降值则显著降低(表 4)。表明花后遮阴明显影响小麦的面团流变学特性。回归分

析(表 5)表明, 在本试验范围内, 不同遮阴强度下光合有效辐射量与籽粒蛋白组分以及面团流变学特性都呈显著的负相关关系, 且符合直线回归方程  $y = a + bx$ 。但沉降值与光合有效辐射量呈正相关。

表 4 不同强度遮阴处理对面团流变学特性的影响  
Table 4 Effects of shading on rheologic peculiarities of dough

处理 Treatment	面团流变学特性指标 Rheologic peculiarities of dough				
	吸水率 Water absorption (%)	沉降值 Sedimentation volume (mL)	延展性 Tractility (mm)	形成时间 Development time (min)	稳定时间 Stability time (min)
对照 Control	58.13±0.29 d	39.07±0.43 a	20.80±0.06 d	11.20±0.40 c	9.30±0.09 d
S20	59.23±0.24 c	34.34±0.54 b	21.60±0.12 c	11.30±0.31 c	9.42±0.11 c
S50	60.07±0.38 b	30.11±0.25 c	22.50±0.12 b	12.10±0.10 b	9.71±0.08 b
S80	61.90±0.36 a	25.27±0.62 d	24.33±0.23 a	13.07±0.45 a	9.99±0.12 a

对照为正常光照, S20、S50 和 S80 分别表示遮阴强度为 20%、50%和 80%。每列中标以相同字母的值差异不显著( $P < 0.05$ )。  
Control is the natural condition and S20, S50, and S80 denote shading of 20%, 50%, and 80%, respectively. In each column, data followed by the same letter are not significantly different at  $P < 0.05$ .

表 5 光合有效辐射与小麦蛋白组分及面团流变学特性相关回归分析  
Table 5 Correlation analysis between photosynthetically active radiation (PAR) and quality traits of wheat

品质性状(x) Quality trait (x)	与有效光合辐射(y)回归方程 Regression equation with PAR (y)	F 值 F-value	相关系数 Correlation coefficient
醇溶蛋白含量 Gliadin content	$y = 5707.9712 - 1321.0258x$	26.19	-0.9639*
谷蛋白含量 Glutenin content	$y = 3448.7588 - 593.1771x$	280.13	-0.9857*
谷/醇比 Glutenin/gliadin ratio	$y = 5689.9833 - 4111.2120x$	21.07	-0.9557*
吸水率 Water absorption	$y = 14176.4651 - 225.9295x$	70.58	-0.9861*
延展性 Extensibility	$y = 5919.2008 - 235.8245x$	58.58	-0.9834*
形成时间 Development time	$y = 5524.9304 - 408.3843x$	33.51	-0.9714*
稳定时间 Stability time	$y = 17416.1472 - 1736.8593x$	29.70	-0.9679*

\*在 0.05 概率水平相关。\* Significance of correlation at the 0.05 probability level.

3 讨论

小麦品质与产量常呈负相关关系<sup>[19]</sup>。本研究中, 产量与蛋白质及面筋的关系, 粒重与籽粒饱满度与

籽粒蛋白质含量的关系, 甚至产量与多种面团品质流变学特性都成线性负相关关系, 遮阴对蛋白质面筋含量增加的原因可能是由于遮阴降低了光合生产效率, 导致籽粒胚乳内不同化学成分积累发生变

化。其中光照的减弱直接导致占籽粒 80%以上的胚乳淀粉明显减少,籽粒瘪瘦,出粉率降低,从而使籽粒蛋白质百分含量相对提高。已有报道,光线强度降低可增加籽粒中粗蛋白质含量<sup>[20]</sup>,发现籽粒灌浆中期的光照强度与蛋白质含量呈负相关<sup>[21]</sup>,随遮阴强度增加,籽粒蛋白含量增加<sup>[8-9]</sup>。本研究结果与这些报道相一致,而且本研究从光合速率的显著降低和光合相关因子的紊乱现象阐明了花后遮阴不利于碳运转,即不利于籽粒淀粉的积累,通过不同遮阴强度处理,揭示了光合速率的变化与碳运转的数量关系。

前人对花后不同遮阴对蛋白质组分与面团流变学特性的影响有不同观点<sup>[8-9]</sup>,有学者认为遮阴后小麦蛋白质各组分均有所提高<sup>[7-8]</sup>,但随遮阴强度增加,谷/醇比有降低<sup>[8]</sup>也有升高<sup>[9]</sup>。本研究结果支持于振文<sup>[9]</sup>的研究结果。这可能是两种储藏蛋白的含量除与环境有关外,与品种遗传基础也有关,其相关的复杂因素有待进一步探讨。

本研所得结果皆为遮阴条件下的非正常生长的结果,除遮阴 20%在北方有一定气候概率外,遮阴 50%甚至遮阴 80%的气候模拟几乎是特殊少见的,在这样的条件下,除处于抽穗后,顶端的旗叶之外,一天之中早晚绝大多数时间,绝大多数叶片都会处于光补偿点上下的逆境之中,带之而来的是与光合生产有关的叶器官、茎器官、根器官,特别是涉及产量品质形成的穗器官中物质合成、积累,运输都处于紊乱饥饿状态。在这样的情况下,如何在众多的研究观察指标中,判断对遮阴最具敏感性的指标,不能仅从显著性分析判断,而应从一般差异中寻找绝对量差异明显,或有违常规的指标中去探讨。例如,本研究中,在面团流变学特性分析中虽然吸水率、延展性、形成时间和稳定时间都与遮阴强度呈正相关关系,而且多数相关都达 0.05 显著水平,但差异的绝对值都在 0.01~3.00 之间(表 4),只有沉降值不仅与遮阴强度成负线性相关关系,而且处理间绝对值差异达 13.80,即由于遮阴的不同可引起沉降值由对照的 39.07 降低到 25.27,显然,沉降值是衡量遮阴对小麦品质影响的可靠指标,况且沉降值又是反映小麦品质的综合性状的主要指标。沉降值降低,表明小麦灌浆期光照不足,面筋蛋白含量虽有所增加但其品质有所下降。而表征品质的其他指标,如面团的稳定时间主要与面团抗拉伸性有关,遮阴使小麦面团的稳定时间延长,即面团抗拉伸性增

强。沉降值与稳定时间是反应品质的两个不同的特性指标,二者的关系有待进一步研究。

遮阴是导致功能叶片光合速率以及与光合产物有密切关系的叶绿素含量、蒸腾速率、气孔导度及叶细胞间隙  $\text{CO}_2$  浓度等功能的全面弱化、紊乱、衰变的结果。旗叶光合速率受光照强度的显著影响,弱光生境下小麦旗叶气孔形态发生变化,影响了植株蒸腾速率和气孔导度,光合产物合成受抑制,从而导致小麦灌浆速率显著下降<sup>[6,15,21-24]</sup>。叶片的功能除受遗传控制外,也受环境条件的显著影响,其中光照强度是最重要的影响因素<sup>[22-25]</sup>。遮阴条件下,单位叶面积的叶绿体数目减少,但叶绿体变大,叶绿素含量增加<sup>[21]</sup>。弱光下小麦旗叶的叶绿素含量尤其是叶绿素 b 的含量呈上升趋势<sup>[6,21]</sup>。试验研究表明,遮阴后小麦叶片的叶绿素 a、b 及 a+b 含量升高,对叶绿素 b 的影响大于叶绿素 a,致使叶绿素 a/b 比值变小,以适应弱光环境,光照强度越低对其影响越显著。而且叶绿素含量增加越多,叶绿素 a/b 比值就越小,光合速率降低的幅度越大。表明叶绿素 a 与叶绿素 b 含量的协调性,反应了叶片光合器官的自我调节机制。

林粮间作的生态改善作用已有较多研究,但对其造成遮阴而影响其间矮秆作物报道则很少。林粮间作虽然可以改善生态环境,提高整体经济效益,但对小麦来说即使蛋白质以及相关性状有所提高,而对产量形成影响极大,因此在以农为主的粮食产区,不宜推广。

本研究在综合前人研究的基础上,试验在大田条件下进行,小区面积大,避免了不同处理的相互影响,试验处理完全,观察项目结合籽粒形成期的光合生理产量构成与品质形成综合分析,有利于阐明因子间的因果关系。

## 4 结论

小麦开花后遮阴光照减弱至 20%以上时导致旗叶净光合速率及与光合速率有关的众多生理过程受阻、紊乱、衰变,光合产物积累明显降低,开花后遮阴越早,对产量的影响越大,最终导致小穗不育性增加,穗粒重减少,产量大幅度降低。与遮阴对产量负效应相反,遮阴对小麦主要品质指标蛋白质面筋含量,谷蛋白、醇溶蛋白含量,甚至对面粉吸水率、面团延展性、形成时间、稳定时间等加工品质都呈正相关效应。作者认为,在遮阴条件下,品质的提高

可能是光照严重不足导致灌浆过程中光合产物的胚乳淀粉积累严重不足, 籽粒疵瘦, 从而使蛋白质积累相对提高, 这种提高是否正常是否使品质真正改善有待进一步研究。同时本研究也从环境因素的角度验证了小麦产量与品质虽同处于同一麦粒中, 但产量是明显的数量性状, 而众多与加工有关的品质性状是质量性状, 二者对环境要求有异同, 对同一生态条件(遮阴)反应亦不同。

## References

- [1] Zhang L-P(张黎萍), Jing Q(荆奇), Dai T-B(戴廷波), Jiang D(姜东), Cao W-X(曹卫星). Effects of temperature and illumination on flag leaf photosynthetic characteristics and senescence of wheat cultivars with different grain quality. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2008, 19(2): 311–316 (in Chinese with English abstract)
- [2] Zhou Z-G(周治国), Meng Y-L(孟亚利), Shi P(施培). Effects of shading during seedling period on the structure of cotton stem and leaf and photosynthetic performance of functional leaf. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2001, 34(5): 519–525 (in Chinese with English abstract)
- [3] He M-R(贺明荣), Wang Z-L(王振林), Gao S-P(高淑萍). Analysis on adaptability of wheat cultivars to low light intensity during grain filling. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2001, 27(5): 640–644 (in Chinese with English abstract)
- [4] Ren W-J(任万军), Yang W-Y(杨文钰), Xu J-W(徐精文), Fan G-Q(樊高琼), Ma Z-H(马周华). Effects of low light on grains growth and quality in rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2003, 29(5): 785–790 (in Chinese with English abstract)
- [5] Yuan J-C(袁继超), Ding Z-Y(丁志勇), Zhao C(赵超), Zhu Q-S(朱庆森), Li J-Q(李俊青), Yang J-C(杨建昌). Effects of sunshine-shading, leaf-cutting and spikelet-removing on yield and quality of rice in the high altitude region. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2005, 31(11): 1429–1436 (in Chinese with English abstract)
- [6] Liu B(刘博), Han Y(韩勇), Xie W-X(解文孝), Li J-G(李建国), Liu J(刘军), Gao Q(高岐). The effects of low light on yield, physiological characteristics and quality of rice in the filling stage. *China Rice* (中国稻米), 2008, (5): 36–40 (in Chinese)
- [7] Zhang J-W(张吉旺), Dong S-Q(董树亭), Wang K-J(王空军), Hu C-H(胡昌浩), Liu P(刘鹏). Effects of shading in field on photosynthetic characteristics in summer corn. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(2): 216–222 (in Chinese with English abstract)
- [8] Zhang L-P(张黎萍). The Influence on Wheat Quality Formation and Physiological Mechanism in Different Quality Type Wheats under the High Temperature and Weak Light Condition. MS Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2007. pp 93–97 (in Chinese with English abstract)
- [9] Yu Z-W(于振文). Physiology of Wheat Yield and Quality and Cultivation Technique (小麦产量与品质生理及栽培技术). Beijing: China Agriculture Press, 2007. pp 352–356 (in Chinese)
- [10] Fang S-Z(方升佐), Huang B-L(黄宝龙), Xu X-Z(徐锡增). Establishment and potential application for effective agroforestry system of populus plantations. *J Southwest For Coll* (西南林学院学报), 2005, 25(4): 36–41 (in Chinese with English abstract)
- [11] Yu C-J(于成景), Fang S-Z(方升佐), Luo C-B(罗诚彬). A preliminary study on poplar-wheat intercropping patterns. *China For Sci Technol* (林业科技开发), 2007, 21(2): 47–51 (in Chinese with English abstract)
- [12] Yu X(余相). Effect on wheat yield and the quality due to variations of ecological factors by poplar intercropping with wheat. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), 2003, 31(5): 882–883 (in Chinese)
- [13] Liu X(刘霞), Yin Y-P(尹燕桦), Jiang C-M(姜春明), He M-R(贺明荣), Wang Z-L(王振林). Effects of low light and high temperature stress after anthesis on flag leaf chlorophyll fluorescence and grain fill of wheat. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2005, 16(11): 2117–2121 (in Chinese with English abstract)
- [14] Li Y-G(李永庚), Yu Z-W(于振文), Liang X-F(梁晓芳), Zhao J-Y(赵俊晔), Qiu X-B(邱希宾). Response of wheat yields and quality to low light intensity at different grain filling stages. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 2005, 29(5): 807–813 (in Chinese with English abstract)
- [15] Li X(李霞), Yan J-M(严建明), Ji B-H(季本华), Jiao D-M(焦德茂). Varietal difference in photosynthetic characteristics of rice under photooxidation and shading. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1999, 25(3): 301–308 (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhang L-F(张礼福), Zhu X-D(朱旭丹), Zhou X-H(周先华). Effects of shading on grain filling of different wheat cultivars. *J Huazhong Agric Univ* (华中农业大学学报), 2005, 7(4): 332–335 (in Chinese with English abstract)
- [17] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol*, 1949, 24: 1–5
- [18] Li H-S(李合生). Principle and Technology for Experiment in Plant Physiology and Biochemistry (植物生理生化实验原理与技术). Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [19] Jin S-B(金善宝). Wheat Science in China (中国小麦学). Beijing: China Agriculture Press, 1996. p 506 (in Chinese)
- [20] Campbell E P, Wrigley P J. Statistical correlation between quality attributes and grain-protein composition for 71 hexaploid wheat used as breeding parents. *Cereal Chem*, 1987, 64: 293–301
- [21] Benizian B. Protein concentration of grain in relation to some weather and soil factors during 17 years of English winter-wheat experiments. *J Sci Food Agric*, 1986, 37: 435–444
- [22] Jacques D, Jeanette B. Evidence for a light-harvesting chlorophylls a-protein complex in a chlorophyll b-less barely mutant. *Photosyn Res*, 1987, 11: 141–151
- [23] Xie W-X(解文孝), Liu B(刘博), Han Y(韩勇), Li J-G(李建国), Fu L(付亮), Gao Q(高岐). Effect of temperature and light on yield and quality of rice. *Heilongjiang Agric Sci* (黑龙江农业科学), 2008, (6): 26–30 (in Chinese with English abstract)
- [24] Yao Y-C(姚允聪), Wang S-H(王绍辉), Kong Y(孔云). Characteristics of photosynthesis mechanism in different peach species under low light intensity. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2007, 40(4): 855–863 (in Chinese with English abstract)
- [25] Du Z-C(杜占池), He M-G(何妙光), Yang Z-G(杨宗贵). Effect of poor light on photosynthetic characteristics of *Setaria italica* and *Araohis hypogaea*. *J Plant Ecol* (植物生态学报), 1982, 6(3): 219–226 (in Chinese with English abstract)