

## 施肥对不同时期遮阴小麦光合、产量和品质的影响

刘迎霞, 娄运生, 高安妮, 杜泽云

引用本文:

刘迎霞, 娄运生, 高安妮, 杜泽云. 施肥对不同时期遮阴小麦光合、产量和品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 496-503.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0619>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 不同遮阴处理下施肥对水稻生长及生理特性的影响

刘迎霞, 娄运生, 王坤, 邢钰媛, 刘健, 苏磊, 汤丽玲

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2603-2613 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0317>

#### 不同遮阴处理下施肥对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464-472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

#### 施用生物炭和硅肥对增温水稻叶片光合及荧光特性的影响

邢钰媛, 娄运生, 王坤, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 451-463 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0879>

#### 清液肥对滴灌棉田NH<sub>3</sub>挥发和N<sub>2</sub>O排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354-2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

#### 京津冀化肥投入特征与污染防控对策研究

串丽敏, 郑怀国, 王爱玲, 赵静娟, 颜志辉, 齐世杰

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 54-61 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0737>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘迎霞, 娄运生, 高安妮, 等. 施肥对不同时期遮阴小麦光合、产量和品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 496-503.

LIU Y X, LOU Y S, GAO A N, et al. Effects of fertilization on photosynthetic characteristics, yield and quality in winter wheat under different shading periods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 496-503.



开放科学 OSID

# 施肥对不同时期遮阴小麦光合、产量和品质的影响

刘迎霞<sup>1,2</sup>, 娄运生<sup>1,3\*</sup>, 高安妮<sup>3</sup>, 杜泽云<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 广东省肇庆市气象局, 广东 肇庆 526000; 3. 南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044)

**摘要:**为探究通过施肥能否减缓太阳辐射减弱对小麦生长发育及产量形成的不利影响,通过田间模拟试验,研究了不同生育期遮阴下施肥对冬小麦植株光合生理、产量和品质的影响。采用3因素3水平正交试验设计,遮阴设3水平,即不遮阴(S0,遮阴率0)、开花-成熟期遮阴(S1,平均遮阴率68%)、分蘖-成熟期遮阴(S2,平均遮阴率68%);复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)施用量设3水平,即100 kg·hm<sup>-2</sup>(F1)、200 kg·hm<sup>-2</sup>(F2)和300 kg·hm<sup>-2</sup>(F3);硅肥施用量(以SiO<sub>2</sub>计)设3水平,即0(R0)、200 kg·hm<sup>-2</sup>(R1)和400 kg·hm<sup>-2</sup>(R2)。结果表明:S1提高冬小麦开花-灌浆期旗叶净光合速率(P<sub>n</sub>),S1和S2降低开花-灌浆期气孔导度(G<sub>s</sub>)和灌浆期蒸腾速率(Tr),提高胞间CO<sub>2</sub>浓度(C<sub>i</sub>);S1和S2降低千粒质量、结实率、产量,减少籽粒直链淀粉含量和总淀粉含量,提高籽粒蛋白质含量。F1、F2分别提高开花期P<sub>n</sub>、G<sub>s</sub>、Tr和灌浆期P<sub>n</sub>、G<sub>s</sub>、Tr;F3提高籽粒千粒质量、结实率、产量、直链淀粉含量和总淀粉含量。施硅提高冬小麦灌浆期旗叶P<sub>n</sub>,R1提高千粒质量、结实率和产量,降低籽粒直链淀粉含量、总淀粉含量和蛋白质含量。研究认为,尽管开花-成熟期遮阴提高冬小麦开花-灌浆期旗叶P<sub>n</sub>,但抑制小麦灌浆期叶片蒸腾作用,影响产量形成,而施复合肥300 kg·hm<sup>-2</sup>配施硅肥200 kg·hm<sup>-2</sup>可促进冬小麦光合和蒸腾作用,提高产量和改善品质,缓解遮阴带来的不利影响。

**关键词:**遮阴;施复合肥;施硅肥;冬小麦;光合作用;产量;品质

中图分类号:S512.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)03-0496-08 doi:10.11654/jaes.2023-0619

## Effects of fertilization on photosynthetic characteristics, yield and quality in winter wheat under different shading periods

LIU Yingxia<sup>1,2</sup>, LOU Yunsheng<sup>1,3\*</sup>, GAO Anni<sup>3</sup>, DU Zeyun<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Zhaoqing Meteorological Bureau, Zhaoqing 526000, China; 3. School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Solar radiation is one of the important factors for crop production. Decreasing solar radiation is not conducive to the growth and yield formation of wheat. Currently, it is unclear whether fertilization can alleviate adverse effects of decreasing solar radiation on wheat production. A field experiment was conducted to investigate the effects of fertilization on photosynthetic characteristics, yield and quality in winter wheat under shading with different growth stages. The orthogonal design with three factors and three levels was adopted in the experiment. Shading was set at three levels, i.e., no shading (S0, shading rate 0%), shading with flowering-maturity period (S1, average shading rate 68%), and shading with tiller-maturity period (S2, average shading rate 68%). NPK compound fertilizer was set at three supply rates, i.e., 100 (F1), 200 (F2), and 300 kg·hm<sup>-2</sup> (F3); The silicate fertilizer (SiO<sub>2</sub>) as steel slag was also set at three supply rates, i.

收稿日期:2023-08-01 录用日期:2023-11-29

作者简介:刘迎霞(1997—),女,河南商丘人,硕士研究生,助理工程师,从事气候变化与农业研究。E-mail:1844306670@qq.com

\*通信作者:娄运生 E-mail:yunshlou@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41875177)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(41875177)

e., 0(R0), 200(R1), and 400 kg·hm<sup>-2</sup>(R2). Results showed that: S1 increased net photosynthetic rate (Pn) in flag leaves at winter wheat flowering–filling stage. S1 and S2 decreased stomatal conductance (Gs) at grain flowering stage, and decreased transpiration rate (Tr) during the filling period, but increased intercellular CO<sub>2</sub> concentration (Ci). S1 and S2 decreased 1000–grain weight, seed setting rate and yield, as well as rain amylose content and total starch content, but increased grain protein content. F1 and F2 increased Pn, Gs, Tr during flowering and filling stage, respectively; F3 increased 1000–grain weight, seed setting rate, yield, amylose content, and total starch content. Silicate supply increased Pn in flag leaves during the filling period of winter wheat. R1 increased 1000–grain weight, seed setting rate, and yield, but reduced the content of amylose, total starch and protein in grains. This study suggests that shading with the flowering–maturity period increased Pn in the flag leaves of winter wheat, but inhibited the transpiration rate at the grain filling stage and affected yield formation. Supplying compound fertilizer at 300 kg·hm<sup>-2</sup> and silicate fertilizer (steel slag) at 200 kg SiO<sub>2</sub>·hm<sup>-2</sup> could promote photosynthesis and transpiration, improve the yield and quality, and alleviate the adverse effects of shading on winter wheat production.

**Keywords:** shading; fertilization; winter wheat; photosynthesis; yield; quality

据报道,我国地表太阳总辐射量以每10年1.06 W·m<sup>-2</sup>的速度降低,80%以上的城市日照时数平均下降16.7%<sup>[1-2]</sup>。冬小麦是主要粮食作物之一,其生长发育和产量形成与光照条件密切相关<sup>[3-4]</sup>,光照不足已成为小麦生产面临的主要胁迫之一<sup>[5]</sup>。大多研究表明,光照不足降低小麦旗叶净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)<sup>[6-7]</sup>,抑制籽粒灌浆速率<sup>[8]</sup>,减少干物质积累量、结实率和千粒质量,导致小麦减产<sup>[9-10]</sup>。不同遮阴处理对小麦植株生理特性和产量的影响存在差异,可能与不同遮阴时期、遮阴强度和供试品种等有关。据报道,遮阴35%和75%条件下,冬小麦灌浆期旗叶Pn和Tr降低<sup>[11]</sup>;但开花–成熟期遮阴60%则降低Pn,而提高Tr、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)<sup>[12]</sup>;花后遮阴50%条件下,小麦灌浆期和成熟期干物质积累量降低,千粒质量和产量也显著降低<sup>[13]</sup>。不同遮阴对小麦籽粒品质也有一定影响。遮阴50%可增加籽粒蛋白质含量,提高面团形成时间、稳定时间和延伸度<sup>[14]</sup>;抽穗–蜡熟期遮阴25%和50%条件下,也有相似结论<sup>[15]</sup>,有关遮阴对小麦籽粒品质的影响报道较少,还需进一步研究。

施用氮、磷、钾肥可有效增强小麦旗叶光合速率<sup>[16-17]</sup>,提高小麦产量<sup>[18-19]</sup>,改善籽粒品质<sup>[20-22]</sup>。施用氮或钾肥可提高小麦籽粒蛋白质含量<sup>[23-24]</sup>,但对淀粉含量的影响报道较少。小麦是典型的喜硅作物,施硅可优化小麦植株形态,增强茎秆抗倒伏能力,提高对病虫害、干旱、高温等生物和非生物胁迫的抗性<sup>[25]</sup>。施硅可增大小麦叶片光合面积,提高Pn,增加产量<sup>[26-28]</sup>。施硅量对小麦生产有一定影响。据报道,随施硅量增加,小麦籽粒千粒质量、每穗实粒数呈先上升后下降趋势,过量施硅或造成小麦减产<sup>[25]</sup>。施硅对小麦籽粒品质也有不同影响。研究发现,锌、硅肥施用量超过75 kg·hm<sup>-2</sup>不利于籽粒营养品质<sup>[29]</sup>;基施硅

肥可增加小麦籽粒蛋白质含量,改善面筋质量<sup>[30]</sup>。有关施硅对小麦籽粒蛋白质和淀粉含量的影响报道较少,还需开展深入研究。

有关遮阴或施肥(氮、磷、钾和硅)对小麦植株光合特性、产量和品质的影响已有报道,但多集中于单一或两因素,如不同施肥量、遮阴强度等,而大田试验受多因素影响,有关多因素对小麦生产的影响,如不同复合肥配施硅肥、不同生育期遮阴等,鲜见报道。因此,本研究通过大田模拟试验,研究了氮、磷、钾肥配施硅肥对不同生育期遮阴小麦植株光合生理特性、产量和品质的影响,旨在探讨通过合理施肥能否调控小麦生产以应对太阳辐射减弱,为保障小麦可持续生产提供试验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

田间试验于2020年11月至2021年6月在南京市江北新区农业气象试验站(32.0°N, 118.8°E)进行。该站位于北亚热带湿润气候区,年均气温15.6℃,年均降水量1100 mm。供试土壤为潴育型水稻土,灰马肝土属。土壤基本理化性质为:有机碳含量19.4 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量1.5 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量16.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量112.6 mg·kg<sup>-1</sup>,pH值6.2(1:1土水比),质地为壤质黏土,黏粒含量26.1 g·kg<sup>-1</sup>。供试氮、磷、钾肥为高浓度复合肥(15–15–15),供试硅肥为钢渣硅肥,有效硅含量(SiO<sub>2</sub>)14.2%。供试冬小麦品种为“机麦211”。

### 1.2 试验设计

采用3因素3水平正交试验设计,因素A为遮阴,设3水平,即S0(对照不遮阴,遮阴率0%)、S1(开花–成熟期遮阴,平均遮阴率68%)和S2(分蘖–成熟期遮阴,平均遮阴率68%);因素B为复合肥施用量,设3

水平,即F1、F2和F3,施用量分别为100、200 kg·hm<sup>-2</sup>和300 kg·hm<sup>-2</sup>;因素C为钢渣硅肥施用量,设3水平,即R0、R1和R2,施硅量分别为0、200 kg·hm<sup>-2</sup>和400 kg·hm<sup>-2</sup>。采用黑色遮阳网覆盖植株冠层,根据植株生长进程及时调整遮阳网高度,使其和植株冠层间距保持30 cm。试验根据L9(3<sup>4</sup>)正交设计表布置处理,共计9个处理,小区面积为2 m×2 m=4 m<sup>2</sup>。

冬小麦于2020年11月5号播种,播种前1 d施肥,按照各小区处理将复合肥与钢渣硅肥以基肥方式施入土壤。按试验设计于冬小麦分蘖期和开花期分别进行遮阴处理。除草和病虫害防治等田间管理,依照实际情况实施。

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 光合参数

冬小麦生育期内,分别于分蘖-成熟期和开花-成熟期遮阴处理后,每隔5~7 d选择晴朗天气测定光合参数,测定时间为上午9:00—11:00。采用Li-6400便携式光合仪,每小区选取3株代表性植株,测定旗叶Pn、Gs、Ci和Tr,计算平均值。

#### 1.3.2 产量和品质

冬小麦成熟后,每小区选取小区中心0.25 m<sup>2</sup>作为考种样区,剪下该样区内所有麦穗,随机选20个麦穗记录空粒数、秕粒数和饱满粒数,计算结实率。样区内麦穗经3 d晾晒,用脱谷机脱粒并称质量,记录千粒质量和产量。参照国家标准GB/T 5009.5—2016和GB/T 15683—2008分别测定籽粒蛋白质含量、直链淀粉含量和总淀粉含量。

#### 1.3.3 遮阴率计算

冬小麦生育期内选择晴朗天气,采用AccuPAR植物冠层分析仪(DECAGOB LP-80)测定光合有效辐射(PAR)。测定前对仪器进行标准校正,测定时间为11:00—14:00,在覆盖遮阳网的试验小区冠层处测定网内和网外PAR,遮阴率计算公式如下:

$$\text{遮阴率}(\%) = \left(1 - \frac{\text{PAR}_{\text{内}}}{\text{PAR}_{\text{外}}}\right) \times 100\%$$

### 1.4 数据处理与分析

采用Excel 2019软件对试验数据汇总整理和极差计算分析,使用SPSS 22.0统计软件进行方差分析(one-way ANOVA),采用Origin软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬小麦生长季气温和降水变化

冬小麦生长季平均气温为11.39℃,累积降水量

385.4 mm(图1)。2020年12月底至1月初,降温幅度较大,最低气温-5.63℃,0℃以下低温日数达7日;1月中旬气温逐步回升,2月下旬,气温维持偏高趋势,最高温度达19.17℃,热量条件较充足,有利于冬小麦前期生长。降水趋势表明(图1),2020年11月中下旬出现连续降水过程,缓解了前期旱情。2月下旬后期至3月上中旬降水日数达10日,持续的阴雨寡照天气使田间土壤湿度过高、光照不足。4月下旬至5月中旬,冬小麦处于抽穗开花-灌浆期,灌浆后期有明显降水过程,局部植株出现赤霉病,影响籽粒灌浆结实,5月下旬,气象条件转好,利于小麦成熟收获。

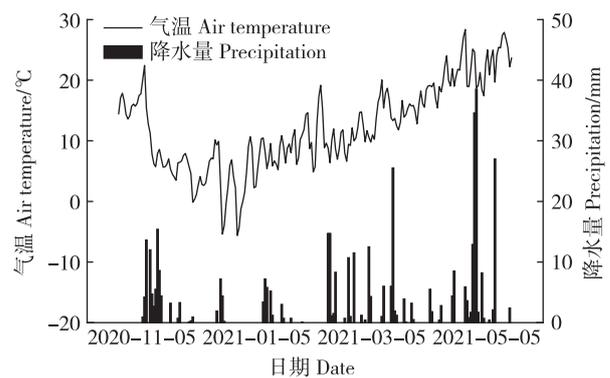


图1 冬小麦生长季内环境气温和降水变化

Figure 1 Air temperature and precipitation during the wheat growth period

### 2.2 开花期叶片光合生理参数

3因素对冬小麦开花期叶片Pn、Gs、Ci和Tr的影响大小为:遮阴>施复合肥>施硅。遮阴对开花期Pn、Gs、Ci和Tr的影响未达显著水平( $P>0.05$ ),施复合肥、施硅肥对上述光合参数均无显著影响(表1、表2)。可见,遮阴是影响冬小麦开花期Pn、Gs、Ci和Tr的主要因素。

S1和S2提高了开花期叶片Pn、Gs、Ci和Tr,S1处理下Pn、Gs、Ci和Tr较S0分别增加1.22%、8.16%、14.67%和43.73%,增幅较大,但S2降低Pn和Gs,Tr也较S1下降11.98%。F1处理下Pn、Gs和Tr值最大。R1处理提高Ci,但施硅对Pn、Gs和Tr的增幅并不明显。因此,开花-成熟期遮阴和施复合肥可促进开花期小麦叶片光合和蒸腾作用,最佳处理组为S1F1R0。

### 2.3 灌浆期光合生理参数

3因素对冬小麦灌浆期叶片Pn、Gs和Tr的影响大小为:遮阴>施复合肥>施硅,对Ci的影响主次为:遮阴>施硅>施复合肥,遮阴对灌浆期Pn有极显著影响( $P<0.01$ ),对Gs、Ci和Tr的影响达显著水平( $P<$

表1 冬小麦开花期光合参数极差分析

Table 1 Range analysis of the photosynthetic parameters during the flowering period in winter wheat

光合参数 Photosynthetic parameter	因素 Factor	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$R$	影响主次 Impact order	最优处理 Optimal processing
Pn/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	A(S)	61.40	62.17	48.71	20.47	20.72	16.24	4.48	A>B>C	S1F1R0
	B(F)	64.84	55.03	52.41	21.61	18.34	17.47	4.14		
	C(R)	63.94	57.54	50.81	21.31	19.18	16.94	4.38		
Gs/( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	A(S)	1.48	1.59	1.35	0.49	0.53	0.45	0.23	A>B>C	S1F1R0
	B(F)	1.42	1.36	1.06	0.47	0.45	0.35	0.12		
	C(R)	1.34	1.31	1.18	0.45	0.44	0.39	0.05		
Ci/( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	A(S)	863.74	990.40	992.68	287.91	330.13	330.89	42.98	A>B>C	S1F2R2
	B(F)	932.95	976.00	937.87	310.98	325.33	312.62	14.35		
	C(R)	939.45	948.15	959.22	313.15	316.05	319.74	6.59		
Tr/( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	A(S)	10.77	15.47	14.20	3.59	5.16	4.73	1.57	A>B>C	S1F1R0
	B(F)	14.50	13.79	12.15	4.83	4.60	4.05	0.78		
	C(R)	13.90	13.85	12.70	4.63	4.62	4.23	0.40		

注: $K_i$ 表示同一因素试验水平之和, $\bar{K}_i$ 表示 $K_i$ 的均值, $R$ 值表示极差。下同。

Note:  $K_i$  represents the sum of experimental levels for the same factor,  $\bar{K}_i$  represents the mean of  $K_i$ , and the  $R$ -value represents the range. The same below.

表2 冬小麦开花-灌浆期生育期光合参数方差分析( $F$ 值)Table 2 Variance analysis of photosynthetic parameters during the flowering-filling period in winter wheat ( $F$  value)

光合参数 Photosynthetic parameter	因素 Factor	开花期 Flowering period	灌浆期 Filling period
Pn/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	A(S)	0.32	75.62**
	B(F)	0.24	31.08
	C(R)	0.24	14.22
Gs/( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	A(S)	2.68	47.04*
	B(F)	0.77	3.76
	C(R)	0.15	1.97
Ci/( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	A(S)	4.38	1 331.52**
	B(F)	0.45	9.77
	C(R)	0.08	138.80**
Tr/( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	A(S)	3.07	19.22*
	B(F)	0.75	2.65
	C(R)	0.24	1.57

注:\* $P<0.05$ ,\*\* $P<0.01$ 。下同。

Note:\*  $P<0.05$ ,\*\*  $P<0.01$ . The same below.

0.05),施硅仅对Ci有显著影响( $P<0.01$ ),施复合肥则对上述光合参数均无显著影响(表2、表3)。因此,遮阴是影响冬小麦灌浆期叶片Pn、Gs、Ci和Tr的主要因素。

与S0相比,S1处理下Pn、Ci分别增加28.70%和11.20%,S2处理下Pn较S1降低了14.24%,S1处理更有利于提高灌浆期叶片Pn,S1、S2处理下Gs和Tr较S0分别降低37.50%、36.36%和10.32%、16.24%,Gs和Tr均随遮阴时间延长而降低,叶片蒸腾作用受到抑

制。F2处理下Pn、Gs、Ci和Tr值最大,与R0相比,R1和R2处理下Pn分别增加5.46%和12.03%,有利于提高灌浆期叶片Pn的最优处理组合为S1F2R2。

## 2.4 籽粒产量

3因素对冬小麦产量和千粒质量的影响大小为:遮阴>施复合肥>施硅,对结实率的影响大小为:遮阴>施硅>施复合肥(表4)。遮阴对结实率和产量的影响达显著水平( $P<0.05$ ),施复合肥和施硅对千粒质量、结实率和产量的影响均未达显著水平(表5)。可见,遮阴是影响冬小麦产量的主要因素。

与S0相比,S1和S2均降低千粒质量、结实率和产量,其中S1处理下产量和千粒质量降幅较大,S2处理下结实率降幅最大,与遮阴持续时间成正比。与F1相比,施复合肥F3处理下千粒质量、结实率和产量最高,分别增加8.58%、5.83%和6.68%,上述指标均随复合肥施用量的增加而增加。R1处理较R0提高结实率、千粒质量和产量。因此,遮阴抑制冬小麦产量形成,降低产量,施复合肥 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和硅肥 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增产效果明显,最优处理组合为S0F3R1。

## 2.5 籽粒品质

3因素对籽粒直链淀粉含量和总淀粉含量的影响大小为:遮阴>施复合肥>施硅,对蛋白质含量的影响大小为:施复合肥>施硅>遮阴(表6)。方差分析表明(表7),3因素对上述营养品质指标的影响均未达显著水平。

表3 冬小麦灌浆期光合参数极差分析

Table 3 Range analysis of the photosynthetic parameters during the filling period in winter wheat

光合参数 Photosynthetic parameter	因素 Factor	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$R$	影响主次 Impact order	最优处理 Optimal processing
$Pn/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	A(S)	35.63	45.88	38.89	11.88	15.29	12.96	3.42	A>B>C	S1F2R2
	B(F)	36.30	42.55	41.54	12.10	14.18	13.85	2.08		
	C(R)	37.93	39.99	42.47	12.64	13.33	14.16	1.51		
$Gs/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	A(S)	1.65	1.20	1.04	0.55	0.40	0.35	0.21	A>B>C	S0F2R0
	B(F)	1.24	1.40	1.25	0.41	0.47	0.42	0.17		
	C(R)	1.36	1.30	1.23	0.45	0.43	0.41	0.04		
$Ci/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	A(S)	882.07	980.89	991.48	294.02	326.96	330.49	36.47	A>C>B	S2F2R0
	B(F)	952.04	956.34	946.05	317.35	318.78	315.35	3.43		
	C(R)	973.48	944.56	936.40	324.49	314.85	312.13	12.36		
$Tr/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	A(S)	19.78	17.74	16.56	6.59	5.91	5.52	1.08	A>B>C	S0F2R0
	B(F)	17.57	18.71	17.80	5.86	6.24	5.93	0.38		
	C(R)	18.55	17.55	17.67	6.18	5.85	5.89	0.34		

表4 冬小麦产量极差分析

Table 4 Range analysis of yield in winter wheat

产量指标 Yield indicator	因素 Factor	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$R$	影响主次 Impact order	最优处理 Optimal processing
产量/( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	A(S)	61.01	32.14	47.52	20.34	10.71	15.84	9.62	A>B>C	S0F3R1
	B(F)	46.29	44.99	49.39	15.43	15.00	16.46	1.47		
	C(R)	46.99	47.14	45.68	15.66	15.71	15.23	0.49		
千粒质量/g	A(S)	129.29	88.90	118.87	43.10	29.63	39.62	13.46	A>B>C	S0F3R1
	B(F)	109.45	108.77	118.84	36.48	36.26	39.61	3.36		
	C(R)	112.29	112.63	112.14	37.43	37.54	37.38	0.16		
结实率/%	A(S)	233.11	228.15	197.76	77.70	76.05	65.92	11.78	A>C>B	S0F3R1
	B(F)	214.42	217.67	226.93	71.47	72.56	75.64	4.17		
	C(R)	210.76	227.15	221.11	70.25	75.72	73.70	5.46		

表5 冬小麦产量方差分析( $F$ 值)Table 5 Variance analysis of yield in winter wheat( $F$  value)

因素 Factor	产量 Yield/( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	千粒质量/g 1000-grain weight	结实率/%
A(S)	18.31*	9.18	23.56
B(F)	0.45	0.66	2.71
C(R)	0.11	0.01	4.42

与S0相比,S1和S2处理下籽粒直链淀粉含量和总淀粉含量降低,但S2处理下蛋白质含量较S0小幅增加;施复合肥可增加直链淀粉含量和总淀粉含量,淀粉含量随施肥量增加而增加,但蛋白质含量随施肥量的增加而降低;施硅降低籽粒直链淀粉含量、总淀粉含量和蛋白质含量,随施硅量增加降幅越大。可见,遮阴影响籽粒营养品质,施复合肥 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可改善籽粒品质,施硅则无明显改善作用,有利于籽粒营养品质的最优处理组合为S0F3R0。

### 3 讨论

光合作用是作物最重要的光化学反应之一,对小麦生长发育起重要作用。据报道,花后60%弱光处理,35%和75%遮阴处理均降低小麦叶片 $Pn^{[11-12]}$ 。本研究中,开花-成熟期遮阴和分蘖-成熟期遮阴68%,均提高开花期-灌浆期叶片 $Pn$ ,与前人研究结果不同。原因在于,不同小麦品种对弱光反应存在差异<sup>[12]</sup>;此外,由于开花期气温较高,热量充足,遮阴可缓解高温强光对功能叶片的不利影响<sup>[31]</sup>,前人研究也有类似发现,拔节-成熟期遮阴50%可提高小麦灌浆后期 $Pn^{[7]}$ ,遮阴可通过延缓叶片衰老,提高叶绿素含量,弥补冠层光能捕获的减少<sup>[31]</sup>。氮、磷、钾是植物必需三大营养元素,施氮量 $150\sim 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可提高小麦叶片灌浆期 $Pn$ 和籽粒灌浆速率<sup>[16]</sup>,施氮量 $210\sim 270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可提高小麦花后0~14 d和21~28 d叶片 $Pn^{[30]}$ ;

表6 冬小麦籽粒品质极差分析

Table 6 Range analysis of grain quality in winter wheat

品质指标 Quality indicator	因素 Factor	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$R$	影响主次 Impact order	最优处理 Optimal processing
直链淀粉含量/%	A(S)	94.17	74.32	78.29	31.39	24.77	26.10	6.62	A>B>C	S0F3R0
	B(F)	78.29	83.85	84.64	26.10	27.95	28.21	2.12		
	C(R)	84.64	82.26	79.88	28.21	27.42	26.63	1.59		
总淀粉含量/%	A(S)	280.60	240.74	240.13	93.53	80.25	80.04	13.49	A>B>C	S0F3R0
	B(F)	251.58	253.33	256.56	83.86	84.44	85.52	1.66		
	C(R)	259.32	249.90	252.25	86.44	83.30	84.08	3.14		
蛋白质含量/%	A(S)	30.95	29.28	31.13	10.32	9.76	10.38	0.62	A>C>B	S2F1R0
	B(F)	32.50	29.89	28.97	10.83	9.96	9.66	1.18		
	C(R)	31.68	30.32	29.36	10.56	10.11	9.79	0.77		

表7 冬小麦籽粒品质方差分析(F值)

Table 7 Variance analysis of grain quality in winter wheat  
(F value)

因素 Factor	直链淀粉含量 Amylose content/%	总淀粉含量 Total starch content/%	蛋白质含量 Protein content/%
A(S)	3.36	6.46	0.29
B(F)	0.36	0.08	0.92
C(R)	0.17	8.15	0.37

磷、钾通过促进小麦对氮素吸收,提高叶绿素含量和光合速率,促进光合暗反应 $\text{CO}_2$ 固定效率,影响碳代谢和同化物的产生及运输<sup>[24]</sup>。本研究中,氮磷钾施用量为 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,冬小麦开花-灌浆期Pn值最高,施肥量达到 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时灌浆期Gs、Ci和Tr进一步提升,因此,施肥量在 $100\sim 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时更有利于小麦光合作用和蒸腾作用。据报道,弱光胁迫下增加施硅量,小麦开花期、灌浆期Pn、Tr和Gs值呈现先升高后下降的趋势,施硅量 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,小麦Pn、Tr和Gs值最高<sup>[28]</sup>。本研究中,施硅对开花期叶片Pn、Gs和Tr无明显的促进作用,但施硅量 $200\sim 400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 提高灌浆期叶片Pn和Tr。弱光环境下通过合理施硅,更有利于增强小麦灌浆期光合能力。

据报道,遮阴影响冬小麦产量形成<sup>[4,6]</sup>。本研究中,分蘖-成熟期遮阴和开花-成熟期遮阴均降低冬小麦千粒质量、结实率和产量,遮阴时间越长降幅越大(表4、表5),与前人报道基本一致。尽管遮阴提高小麦开花-灌浆期Pn,但抑制开花-灌浆期Gs和灌浆期Tr,影响植株灌浆期蒸腾作用和光合同化物的转运和分配<sup>[6,24]</sup>,从而影响籽粒灌浆结实,造成小麦减产。施用氮、磷、钾可增强小麦光合生产力和抗逆性,调节氮代谢水平,促进花后干物质向籽粒转运与分配,提

高产量<sup>[18-19,32]</sup>。施硅促进小麦对氮磷钾吸收,增强抗逆性,提高生物量、有效穗数、穗粒质量、穗粒数和千粒质量,增加产量<sup>[28-29]</sup>。本研究中,复合肥施用量 $200\sim 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施硅肥 $200\sim 400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可提高冬小麦千粒质量、结实率和产量(表4、表5),有效缓解遮阴对产量的抑制作用。

小麦籽粒淀粉和蛋白质含量是影响品质的重要组成部分<sup>[19,33]</sup>。据前人报道,小麦拔节-开花期遮阴和拔节-成熟期遮阴77.6%,降低籽粒直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量,遮阴时间越长,降幅越大<sup>[34]</sup>;而小麦籽粒蛋白质含量,则随遮阴强度增加而增加<sup>[24]</sup>。本研究也有类似发现,冬小麦分蘖-成熟期遮阴68%,明显提高籽粒蛋白质含量,两种遮阴处理均降低籽粒直链淀粉和总淀粉含量(表6、表7)。原因在于,长时间遮阴处理导致小麦籽粒灌浆过程中干物质和胚乳淀粉积累不足,籽粒疵瘦,蛋白质含量相应提高,但遮阴改变了籽粒 $\alpha$ -淀粉酶的活性,进而影响淀粉品质;不同小麦品种对籽粒淀粉品质的影响,也存在差异<sup>[33]</sup>。据报道,遮光60%条件下,增施氮肥显著增加小麦籽粒蛋白质含量<sup>[19]</sup>,籽粒蛋白质含量与施氮量呈正相关<sup>[34]</sup>。本研究也发现,氮、磷、钾施用量为 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可提高籽粒蛋白质、直链淀粉和总淀粉含量。原因在于,增施氮、磷、钾肥可促进小麦植株氮代谢过程,有利于籽粒氨基酸转化为蛋白质<sup>[21]</sup>。据前人报道,施硅对小麦籽粒品质无明显影响<sup>[30]</sup>。本研究也发现,施硅对小麦籽粒品质的影响也未达显著水平,但可降低籽粒蛋白质、直链淀粉和总淀粉含量。可见,施硅可提高小麦灌浆期光合能力和产量,但对籽粒品质无明显的改善作用。硅是作物有益元素,不参与作物碳氮代谢过程,目前有关施硅对小麦籽粒品质影响的研究报

道较少,影响机理尚不清晰,还需开展进一步研究。

#### 4 结论

(1)遮阴是影响冬小麦光合作用、产量和品质的主要因素,其次是施复合肥、施硅肥。开花-成熟期遮阴(S1)提高冬小麦开花-灌浆期净光合速率(Pn),但降低开花-灌浆期叶片气孔导度(Gs)和灌浆期叶片蒸腾速率(Tr);分蘖-成熟期遮阴(S2)则降低开花期Pn、Gs和灌浆期Gs、Tr;尽管遮阴提高冬小麦开花期-灌浆期Pn,但抑制叶片气孔开度,影响蒸腾作用,不利于籽粒灌浆结实,因此两种遮阴处理均降低小麦千粒质量、结实率、产量,降低籽粒直链淀粉和总淀粉含量。

(2)施复合肥 200 kg·hm<sup>-2</sup>,配施硅肥 400 kg·hm<sup>-2</sup>提高冬小麦灌浆期Pn效果最佳;施复合肥 300 kg·hm<sup>-2</sup>可改善籽粒品质,复合肥 300 kg·hm<sup>-2</sup>配施硅肥 200 kg·hm<sup>-2</sup>增产效果最佳。因此,通过施用复合肥 200~300 kg·hm<sup>-2</sup>和硅肥 200~400 kg·hm<sup>-2</sup>可提高小麦光合能力,进而提高籽粒千粒质量、结实率和产量,改善籽粒品质,可缓解遮阴带来的不利影响。

#### 参考文献:

- [1] HE Y Y, WANG K C, ZHOU C L, et al. A revisit of global dimming and brightening based on the sunshine duration[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(9):4281-4289.
- [2] WANG Y W, YANG Y H, ZHAO N, et al. The magnitude of the effect of air pollution on sunshine hours in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(21):1928-1937.
- [3] MU H, JIANG D, WOLLENWEBER B, et al. Long-term low radiation decreases leaf photosynthesis, photochemical efficiency and grain yield in winter wheat[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2010, 196(1):38-47.
- [4] 郭翠花, 高志强, 苗果园. 花后遮阴对小麦旗叶光合特性及籽粒产量和品质的影响[J]. *作物学报*, 2010(4):673-679. GUO C H, GAO Z Q, MIAO G Y. Effects of post-anthesis shading on photosynthetic characteristics of flag leaves and grain yield and quality of wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010(4):673-679.
- [5] DONG B, YANG H, LIU H, et al. Effects of shading stress on grain number, yield, and photosynthesis during early reproductive growth in wheat[J]. *Crop Science*, 2019, 59(1):363-378.
- [6] 陆昱, 丁宇辉, 蔡沈林, 等. 太阳辐射减弱对冬小麦生长发育及产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(4):143-145. LU Y, DING Y H, CAI S L, et al. Effects of reduced solar radiation on growth and yield of winter wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(4):143-145.
- [7] 张元帅, 冯伟, 张海艳, 等. 遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9):1177-1184. ZHANG Y S, FENG W, ZHANG H Y, et al. Effects of shading and nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield of flag leaves of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(9):1177-1184.
- [8] LI H, CAI J, JIANG D, et al. Carbohydrates accumulation and remobilization in wheat plants as influenced by combined waterlogging and shading stress during grain filling[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2013, 199(1):38-48.
- [9] 汪敏, 王邵宇, 吴佳佳, 等. 花后阴雨对小麦籽粒淀粉合成和干物质积累的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(1):76-85. WANG M, WANG S Y, WU J J, et al. Effects of post-anthesis rain on starch synthesis and dry matter accumulation in wheat grains[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1):76-85.
- [10] MU HAMMAD ASAD NASEER, SADAM HUSSAIN, ZHANG N Y, et al. Shading under drought stress during grain filling attenuates photosynthesis, grain yield and quality of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2022, 208(2):255-263.
- [11] 乔旭, 张宏芝, 雷钧杰, 等. 遮阴强度对小麦光合及籽粒灌浆特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(8):9-14. QIAO X, ZHANG H Z, LEI J J, et al. Effects of shading intensity on photosynthesis and grain filling characteristics of wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(8):9-14.
- [12] 张玉春, 张敏, 刘希伟, 等. 花后持续弱光对冬小麦光合特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(8):1038-1046. ZHANG Y C, ZHANG M, LIU X W, et al. The effect of sustained weak light after flowering on the photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. *Journal of Wheat Crops*, 2017, 37(8):1038-1046.
- [13] 李秀, 李刘龙, 李慕嵘, 等. 不同小麦品种旗叶绿素含量叶片显微结构及产量对花后遮光的响应机理[J]. *作物学报*, 2023, 49(1):286-294. LI X, LI L L, LI M R, et al. The response mechanism of flag leaf chlorophyll content, leaf microstructure, and yield to post flowering shading in different wheat varieties[J]. *Journal of Crops*, 2023, 49(1):286-294.
- [14] 张永强, 方辉, 陈传信, 等. 遮阴和种植密度对冬小麦灌浆特性及籽粒品质的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(5):10-19. ZHANG Y Q, FANG H, CHEN C X, et al. Effects of shading and planting density on grain filling characteristics and grain quality of winter wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(5):10-19.
- [15] 杨俊华, 唐李军, 陈以相, 等. 弱光对小麦产量性状及品质特性的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(2):291-295. YANG J H, TANG L J, CHEN Y X, et al. The effect of low light on yield and quality characteristics of wheat[J]. *Southwest Agricultural Journal*, 2019, 32(2):291-295.
- [16] 何雨桔, 刘琼, 王焜, 等. 施氮量对不同株叶型小麦旗叶光合及籽粒灌浆特性的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2022, 40(5):707-713. HE Y J, LIU Q, WANG K, et al. Effects of nitrogen application rate on flag leaf photosynthesis and grain filling characteristics of different leaf types of wheat[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(5):707-713.

- [17] 张宏芝, 王立红, 孔德鹏, 等. 氮肥对不同遮阴程度下冬小麦群体生长特性和产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(8): 1-12. ZHANG H Z, WANG L H, KONG D P, et al. Effects of nitrogen fertilizer on growth characteristics and yield of winter wheat under different shade levels[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(8): 1-12.
- [18] 张美微, 谢旭东, 王晨阳, 等. 不同生态条件下品种和施氮量对冬小麦产量及氮肥利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(10): 1362-1368. ZHANG M W, XIE X D, WANG C Y, et al. Effects of variety and nitrogen application rate on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat under different ecological conditions[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(10): 1362-1368.
- [19] 郭振清, 付陈陈, 李婧实, 等. 施氮对花后遮光条件下小麦产量与蛋白质含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(7): 883-890. GUO Z Q, FU C C, LI J S, et al. Effect of nitrogen application on yield and protein content of wheat under shading after anthesis[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(7): 883-890.
- [20] 张鑫尧, 王箫璇, 陈磊, 等. 钾肥减施对稻麦轮作区作物产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(4): 575-588. ZHANG X Y, WANG X X, CHEN L, et al. Effect of reduced potassium application on crop yield and quality in rice-wheat rotation area [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(4): 575-588.
- [21] 赵广才, 常旭虹, 杨玉双, 等. 氮磷钾运筹对不同小麦品种产量和品质的调节效应[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(1): 106-112. ZHAO G C, CHANG X H, YANG Y S, et al. The regulatory effect of nitrogen, phosphorus, and potassium management on yield and quality of different wheat varieties[J]. *Journal of Wheat Crops*, 2011, 31(1): 106-112.
- [22] HITZ K, CLARK A J, SANFORD D V. Identifying nitrogen-use efficient soft red winter wheat lines in high and low nitrogen environments [J]. *Field Crops Research*, 2017, 200: 1-9.
- [23] 左毅, 马冬云, 王晨阳, 等. 花后叶面喷施氮肥和锌肥对小麦粒重及营养品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(1): 123-128. ZUO Y, MA D Y, WANG C Y, et al. Effects of foliar spraying of nitrogen and zinc fertilizer after anthesis on grain weight and nutritional quality of wheat[J]. *Journal of Wheat Crops*, 2013, 33(1): 123-128.
- [24] 于振文, 梁晓芳, 李延奇, 等. 施钾量和施钾时期对小麦氮素和钾素吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2007(1): 69-74. YU Z W, LIANG X F, LI Y Q, et al. Effects of potassium application rate and period on nitrogen and potassium uptake and utilization in wheat[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007(1): 69-74.
- [25] 姜春月, 刘建中, 李明月, 等. 施用叶面硅肥对小麦扬麦23产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(11): 2143-2144, 2147. JIANG C Y, LIU J Z, LI Y M, et al. Effect of foliar silicon fertilizer on yield of wheat Yangmai 23[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(11): 2143-2144, 2147.
- [26] OTHMANI, AFEF, AYED, et al. Effect of silicon supply methods on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) response to drought stress[J]. *Silicon*, 2021, 13(9): 3047-3057.
- [27] BYBORDI, AHMAD. Influence of exogenous application of silicon and potassium on physiological responses, yield, and yield components of salt-stressed wheat[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46(1/3): 109-122.
- [28] 张永强, 方辉, 陈传信, 等. 外源硅滴施对弱光胁迫下冬小麦生长及生理特性的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(2): 336-343. ZHANG Y Q, FANG H, CHEN C X, et al. The effect of exogenous silicon drip application on the growth and physiological characteristics of winter wheat under weak light stress[J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2023, 60(2): 336-343.
- [29] 易杰忠, 刘萍英, 李洪华, 等. 锌硅肥对强筋小麦产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(1): 196-197. YI J Z, LIU P Y, LI H H, et al. The effect of zinc silicon fertilizer on the yield and quality of strong gluten wheat[J]. *Chinese Journal of Agriculture*, 2005, 21(1): 196-197.
- [30] 于立河, 高聚林. 硅对小麦产量与籽粒品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 469-473. YU L H, GAO J L. The effect of silicon on wheat yield and grain quality[J]. *Journal of Wheat Crops*, 2012, 32(3): 469-473.
- [31] XU C L, TAO H B, WANG P, et al. Slight shading after anthesis increases photosynthetic productivity and grain yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) due to the delaying of leaf senescence[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1): 63-75.
- [32] 魏庆薪, 于振文, 张永丽, 等. 氮磷钾用量对小麦冠层不同层次光截获和干物质分配的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(11): 1351-1356. WEI Q X, YU Z W, ZHANG Y L, et al. Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium usage on light interception and dry matter allocation at different levels of wheat canopy[J]. *Journal of Wheat Crops*, 2020, 40(11): 1351-1356.
- [33] 赵佳蓉, 马宏亮, 吴东明, 等. 遮阴时期对不同小麦品种淀粉组成结构及淀粉品质的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(5): 1056-1066. ZHAO J R, MA H L, WU D M, et al. Effects of shading period on starch composition structure and starch quality of different wheat varieties[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2023, 37(5): 1056-1066.
- [34] 曲文凯, 徐学欣, 赵金科, 等. 施氮对滴灌冬小麦花后光合生理、灌浆特性及产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 327-336. QU W K, XU X X, ZHAO J K, et al. Effects of nitrogen application on post flowering photosynthetic physiology, filling characteristics, and yield and quality of winter wheat under drip irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 327-336.

(责任编辑:叶飞)