

# 遮阴及氮肥对新疆南疆冬小麦粒重和灌浆特性的影响

张宏芝<sup>1,2</sup> 王立红<sup>2</sup> 陈阜<sup>1\*</sup> 赵奇<sup>2\*</sup> 孔德鹏<sup>3</sup> 胡爱芝<sup>4</sup>  
王重<sup>2</sup> 张跃强<sup>2</sup> 樊哲儒<sup>2</sup> 李剑峰<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学 农学院/农业农村部农作制度重点实验室,北京 100193;

2. 新疆农业科学院 核技术生物技术研究所/农业农村部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室,乌鲁木齐 830091;

3. 新疆维吾尔自治区农业技术推广总站,乌鲁木齐 830000;

4. 新疆维吾尔自治区喀什地区农业技术推广中心,新疆 喀什 844000)

**摘要** 为明确遮阴及氮肥对新疆南疆冬小麦籽粒灌浆特性的影响,大田条件下以‘新冬20号’为材料,设置4种遮阴处理( $S_0, S_1, S_2$ 和 $S_3$ )和4种氮肥水平( $N_0, N_1, N_2$ 和 $N_3$ ),分析遮阴和氮肥互作对南疆冬小麦粒重和籽粒灌浆特性的影响。结果表明,遮阴和施氮对冬小麦千粒重的影响均达显著水平,且遮阴处理对冬小麦千粒重的影响大于施氮影响。千粒重与灌浆速率、阶段籽粒积累量呈极显著正相关。不遮阴( $S_0$ )和轻度遮阴( $S_1$ )处理,灌浆速率随着施氮量的增加先增加后降低,随遮阴程度的增加而降低;灌浆持续时间随遮阴程度和施氮量的增加而延长; $N_2S_1$ 处理阶段籽粒重量和千粒重高于其他处理(除 $N_0S_1$ 外);在中度遮阴( $S_2$ )和重度遮阴( $S_3$ )条件下,灌浆速率随遮阴程度和施氮量的增加而降低,虽然快增期和缓增期持续时间有所延长,但阶段籽粒重量和千粒重随遮阴程度和施氮量的增加而降低。因此,在轻度遮阴(拔节期~抽穗期遮阴10%,抽穗期~成熟期遮阴25%)条件下,可以通过适量增施氮肥延长灌浆持续时间来弥补遮阴导致的灌浆速率下降,进而增加小麦粒重;在中度遮阴(拔节期~抽穗期遮阴20%,抽穗期~成熟期遮阴50%)和重度遮阴(拔节期~抽穗期遮阴30%,抽穗期~成熟期遮阴75%)条件下,应控制氮肥用量,拔节期追施纯氮 $103.5\text{ kg/hm}^2$ 以上虽然快增期和缓增期持续时间延长,但无法弥补遮阴和施氮下灌浆速率下降的不利影响,阶段籽粒重量和千粒重降低。

**关键词** 遮阴; 氮肥; 粒重; 灌浆特性; 小麦

中图分类号 S512.1;S311

文章编号 1007-4333(2020)07-0010-10

文献标志码 A

## Effects of shading and nitrogen fertilizer on grain weight and grain-filling characteristics of winter wheat in Southern Xinjiang

ZHANG Hongzhi<sup>1,2</sup>, WANG Lihong<sup>2</sup>, CHEN Fu<sup>1\*</sup>, ZHAO Qi<sup>2\*</sup>, KONG Depeng<sup>3</sup>, HU Aizhi<sup>4</sup>,  
WANG Zhong<sup>2</sup>, ZHANG Yueqiang<sup>2</sup>, FAN Zheru<sup>2</sup>, LI Jianfeng<sup>2</sup>

(1. College of Agronomy and Biotechnology/Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture and Rural Affairs,  
China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Institute of Nuclear and Biological Technologies/Key Laboratory of Oasis-Desert Crop Physiology Ecology and Cultivation of  
Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi 830091, China;

3. Agricultural Technology Extension Station of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, China;

4. Center of Agricultural Techniques Extension of Kashi Area in Xinjiang, Kashi 844000, China)

收稿日期: 2019-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(31560370);国家重点研发计划(2016YFD0300110);新疆维吾尔自治区农业科学院青年科技骨干创新能力培养项目(xjnkq-2019013);农业部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室开放课题(25107020-201506)

第一作者: 张宏芝,副研究员,主要从事小麦高产栽培研究,E-mail:dreamzhz@163.com

通讯作者: 陈阜,教授,主要从事气候变化与农作制度研究,E-mail:chenfu@cau.edu.cn

赵奇,研究员,主要从事粮食作物高产栽培研究,E-mail:zhaoshi@xaas.ac.cn

**Abstract** This study aims to determine the effects of different shading and nitrogen application rates on grain filling characteristics of winter wheat, and to provide theoretical basis for high yield and high efficiency cultivation of wheat under “Fruit-Wheat” intercropping mode in Southern Xinjiang. ‘Xindong 20’ was used as experimental material. Four levels of shading treatments ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$ ) were designed and four levels of nitrogen fertilizer ( $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  and  $N_3$ ) treatments were set at the jointing stage (after shading) to analyze that effect of different shading and nitrogen application rates on the grain weight and grain filling characteristics of winter wheat. The results showed that: The effects of shading and nitrogen application rates had an extremely significant effect on 1 000-grain weight of wheat, and the effect of shading on 1 000-grain weight was greater than that of nitrogen application. Correlation analysis between grain filling parameters and 1 000-grain weight indicated that 1 000-grain weight was positively correlated with grain filling rate and stage grain accumulation, and negatively correlated with grain filling duration. Under the conditions of no shading ( $S_0$ ) and slight shading ( $S_1$ ), the grain filling rate increased and then decreased with the increase of nitrogen application rates and it decreased with the increase of shading extent. The grain filling duration prolonged with the increase of shading extent and nitrogen application rates. The grain weight at growth stages and 1 000-grain weight of  $N_2S_1$  treatment were higher than those of other treatments (except  $N_0S_1$ ). The grain filling rate decreased with the increase of shading extent and nitrogen application rate under the moderate shading ( $S_2$ ) and severe shading ( $S_3$ ) treatments. Although the duration of rapidly and slowly growth stages were prolonged, the grain weight at growth stages and 1 000-grain weight decreased with the increase of shading extent and nitrogen application rate. Therefore, under the slight shading (shading at jointing stage-heading stage 10%, shading at heading stage-maturity stage 25%), the declining grain filling rate caused by shading can be compensated by increasing application of nitrogen fertilizer to prolong the filling duration at the gradually, rapidly and slowly growth stages, thus increasing the grain weight of wheat. Under the conditions of moderate shading (shading at jointing stage-heading stage 20%, shading at heading stage-maturity stage 50%) and severe shading (shading at jointing stage-heading stage 30%, shading at heading stage-maturity stage 75%), the duration of rapidly and slowly growth stages prolonged more than 103.5 kg/hm<sup>2</sup> of pure nitrogen at jointing stage. However, it was unable to make up for the reduction of grain filling rate caused by shading and nitrogen application rates, and finally led to the decrease of grain weight at growth stages and 1 000-grain weight.

**Keywords** shading; nitrogen fertilizer; grain weight; grain-filling characteristics; wheat

新疆维吾尔自治区南疆三地州包括喀什地区、和田地区和克孜勒苏柯尔克孜自治州，三地州特色的果树(核桃、杏子和红枣)区域优势，在新疆林果产业中占有举足轻重的地位。该区域有 80% 以上的果树是以农果间作形式存在，有 70% 左右的粮食和棉花等大田农作物与果树间作，形成了南疆三地州特有的林果、种植业复合生产模式。特色林果的发展已在当地农村经济发展和农民收入增加中占有举足轻重的地位<sup>[1]</sup>。但随着林果种植农田面积的扩大、果树树龄及树冠的扩大，果树对小麦遮阴加重造成小麦粒重降低及减产<sup>[1-3]</sup>。因此，研究氮肥对不同遮阴条件下小麦粒重及灌浆特性的调控效应，将对提高果麦间作模式下小麦产量有重要意义。灌浆过程是小麦的整个生育期中十分重要的生理过程，其持续时间和速率决定小麦籽粒大小或品质<sup>[4-5]</sup>。遮阴较自然光条件明显降低籽粒灌浆速率<sup>[6]</sup>。弱光处理后籽粒重的降低主要是平均灌浆速率显著降低所致，而灌浆持续期长短对其影响较小<sup>[7]</sup>。孕穗期追施氮肥

可以保证灌浆后期有充足的氮素供应，延长小麦灌浆缓增期的灌浆持续时间，进而有利于粒重和产量的提高<sup>[8]</sup>。灌浆前期增施氮肥可以提高小麦灌浆的起步速率，中后期过多施氮会抑制灌浆速率<sup>[9]</sup>。关于遮阴和氮素单因素对小麦粒重和灌浆特性的影响已有较多研究<sup>[10-18]</sup>，但氮肥对长期遮阴(拔节期-成熟期)条件下小麦粒重和灌浆特性影响的研究鲜有报道。本研究考虑到新疆特有的果树(核桃、杏和红枣)与小麦间作对冬小麦的影响，选择在果树与小麦物候交错期(从小麦拔节期至成熟期)，人工设置遮阴处理模拟 3 种果树在小麦生长中后期不同程度的遮阴，测定灌浆速率和千粒重，旨在明确遮阴和氮肥互作对冬小麦粒重和灌浆特性的影响，以期为南疆果树-小麦间作模式下小麦高产栽培及氮高效管理提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验于 2016—2017 年在新疆维吾尔自治区喀

什地区泽普县种子公司脱绒厂(新疆小麦育种家泽普基地)进行(77°16' E, 38°10' N), 海拔 1 266 m,

土壤类型为沙壤土, 土壤肥力条件见表 1。供试冬小麦品种为‘新冬 20 号’。

表 1 试验地土壤肥力条件

Table 1 Soil fertility conditions of the trial site

土层 深度/ cm Soil depth	含量 Content						
	有机质/ (g/kg) Organic substance	全氮/ (g/kg) Total nitrogen	全磷/ (g/kg) Total phosphorus	全钾/ (g/kg) Total potassium	速效氮/ (mg/kg) Available nitrogen	速效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	速效钾/ (mg/kg) Available potassium
0~20	1.487	0.635	0.796	19.019	37.3	18.2	104
20~40	1.413	0.464	0.668	19.534	33.7	4.6	94

## 1.2 试验设计

试验采用裂区设计, 氮肥处理为主区, 遮阴处理为副区。氮肥处理设置 4 个水平:  $N_0$ : 整个生育期不施肥,  $N_1$ , 拔节期(遮阴后)追施纯氮 103.5 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_2$ , 138.0 kg/hm<sup>2</sup> 和  $N_3$ , 172.5 kg/hm<sup>2</sup>。遮阴处理设 4 个水平:  $S_0$ , 不遮阴;  $S_1$ , 轻度遮阴(拔节期~抽穗期遮阴 10%, 抽穗期~成熟期遮阴 25%);  $S_2$ , 中度遮阴(拔节期~抽穗期遮阴 20%, 抽穗期~成熟期遮阴 50%);  $S_3$ , 重度遮阴(拔节期~抽穗期遮阴 30%, 抽穗期~成熟期遮阴 75%)。每处理 3 次重复。每个小区面积 8 m<sup>2</sup> (4 m×2 m)。播种量 270.0 kg/hm<sup>2</sup>, 人工播种, 行距 20 cm。全生育期灌水 6 次(越冬、返青期、拔节期、孕穗期、扬花期和灌浆期), 灌水采用滴灌。小麦播种前施尿素 150.0 kg/hm<sup>2</sup>, 磷酸二铵 375.0 kg/hm<sup>2</sup>, 作为基肥一次性施入( $N_0$  处理整个生育期不施肥)。返青期追施尿素 150.0 kg/hm<sup>2</sup>, 随水滴施。其他管理措施同当地大田。

## 1.3 测定项目及方法

### 1.3.1 灌浆速率

2017 年于小麦开花期每处理选择同一天开花、生长整齐的麦穗 200 个挂牌标记, 自开花至收获, 每隔 5 d 取标记穗 10 个, 每穗取从穗基部往上第 7 个小穗的第一朵小花的籽粒, 置烘箱中经 105 °C 杀青 0.5 h, 再降至 80 °C 烘干至恒重, 称籽粒干重。

### 1.3.2 千粒重

于成熟期每个小区收获 2 个 1 m<sup>2</sup> 样方, 脱粒后称千粒重, 每处理 6 次重复。

## 1.4 模型的拟合

以开花后的天数( $t$ )为自变量, 每次测得的千粒重量( $Y$ )为因变量, 用 Logistic 方程  $Y = K / (1 + e^{A+Bt})$  对籽粒生长过程进行拟合, 其中,  $K$  为灌浆

结束时所能达到的最大千粒重量,  $A$ 、 $B$  为方程参数, 用决定系数  $R^2$  ( $Y$  依  $t$  的回归平方和占总平方和的比率) 表示其拟合优度。根据 Logistic 方程和该方程的一级和二级导数, 推导出一系列灌浆参数。

1) 灌浆高峰期开始日期  $t_1 = [A - \ln(2 + 1.732)] / (-B)$ ;

2) 灌浆高峰期结束日期  $t_2 = [A + \ln(2 + 1.732)] / (-B)$ ;

3) 灌浆终期( $Y$  达 99% $K$ ) 日期  $t_3 = (4.59512 + A) / (-B)$ ;

4) 最大灌浆速率出现日期  $T_m = -A/B$ , 最大灌浆速率  $V_m = -BK/4$ ;

5)  $T_1$ 、 $W_1$ 、 $V_1$ ,  $T_2$ 、 $W_2$ 、 $V_2$ ,  $T_3$ 、 $W_3$ 、 $V_3$  分别表示籽粒灌浆渐增期、快增期和缓增期持续时间、积累量和阶段灌浆速率,  $T_1 = t_1$ ,  $T_2 = t_2 - t_1$ ,  $T_3 = t_3 - t_2$ ;

6) 灌浆总天数  $T = t_3$ , 平均灌浆速率  $V_a = K/t_3$ 。

## 1.5 数据处理

数据统计分析采用 SPSS 18.0 软件; 作图采用 Excel 2007 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理冬小麦千粒重的变化

由表 2 和表 3 可知, 遮阴和施氮对冬小麦千粒重的影响均达显著水平, 且遮阴对千粒重影响大于施氮。不同遮阴处理下千粒重表现为  $S_1 > S_0 > S_2 > S_3$ , 不同施氮水平下表现为  $N_0$  显著高于其他处理。遮阴和施氮对冬小麦千粒重的影响存在显著的交互效应, 在  $S_0$  和  $S_1$  条件下, 随着施氮量的增加千粒重呈先增加后降低的趋势, 而在  $S_2$  和  $S_3$  条件下, 随着施氮量的增加千粒重降低。

表 2 遮阴、施氮及其互作冬小麦的千粒重

Table 2 Effects of shading and nitrogen fertilizer on 1 000-kernel weight of winter wheat

处理 Treatment	千粒重/g 1 000-grain weight	处理 Treatment	千粒重/g 1 000-grain weight
N <sub>0</sub>	41.91±2.07 a	S <sub>0</sub>	40.52±1.26 b
N <sub>1</sub>	37.01±4.91 b	S <sub>1</sub>	42.56±1.85 a
N <sub>2</sub>	37.11±5.72 b	S <sub>2</sub>	36.94±4.16 c
N <sub>3</sub>	36.18±5.69 b	S <sub>3</sub>	32.17±5.25 d
N <sub>0</sub> S <sub>0</sub>	40.35±0.96 bc	N <sub>2</sub> S <sub>0</sub>	41.02±0.95 bc
N <sub>0</sub> S <sub>1</sub>	44.35±1.54 a	N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	42.48±0.38 ab
N <sub>0</sub> S <sub>2</sub>	42.18±1.22 bc	N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	35.27±1.09 de
N <sub>0</sub> S <sub>3</sub>	40.75±1.77 bc	N <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	29.68±0.64 f
N <sub>1</sub> S <sub>0</sub>	40.66±1.96 bc	N <sub>3</sub> S <sub>0</sub>	40.07±1.01 c
N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	41.20±2.00 bc	N <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	42.23±1.74 ab
N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	36.32±0.97 d	N <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	34.00±2.01 e
N <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	29.83±1.69 f	N <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	28.42±1.00 f

注：N<sub>0</sub>，整个生育期不施肥；N<sub>1</sub>，拔节期追施纯氮 103.5 kg/hm<sup>2</sup>；N<sub>2</sub>，拔节期追施纯氮 138.0 kg/hm<sup>2</sup>；N<sub>3</sub>，拔节期追施纯氮 172.5 kg/hm<sup>2</sup>；S<sub>0</sub>，不遮阴；S<sub>1</sub>，轻度遮阴（拔节期～抽穗期遮阴 10%，抽穗期～成熟期遮阴 25%）；S<sub>2</sub>，中度遮阴（拔节期～抽穗期遮阴 20%，抽穗期～成熟期遮阴 50%）；S<sub>3</sub>，重度遮阴（拔节期～抽穗期遮阴 30%，抽穗期～成熟期遮阴 75%）。同列中的不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。下同。

Note: N<sub>0</sub>, no fertilizer; N<sub>1</sub>, jointing stage (after shading) nitrogen 103.5 kg/hm<sup>2</sup>; N<sub>2</sub>, jointing stage (after shading) nitrogen 138 kg/hm<sup>2</sup>; N<sub>3</sub>, jointing stage (after shading) nitrogen 172.5 kg/hm<sup>2</sup>. S<sub>0</sub>, not shading at the pulling stage; S<sub>1</sub>, slight shading (shading at jointing stage~heading stage 10%, shading at heading stage~maturity stage 25%); S<sub>2</sub>, moderate shading (shading at jointing stage~heading stage 20%, shading at heading stage~maturity stage 50%); S<sub>3</sub>, severe shading (shading at jointing stage~heading stage 30%, shading at heading stage~maturity stage 75%). Values followed by lowercases in the same column are significantly different at 0.05 probability level. The same below.

表 3 遮阴、施氮及其互作对冬小麦千粒重影响的方差分析

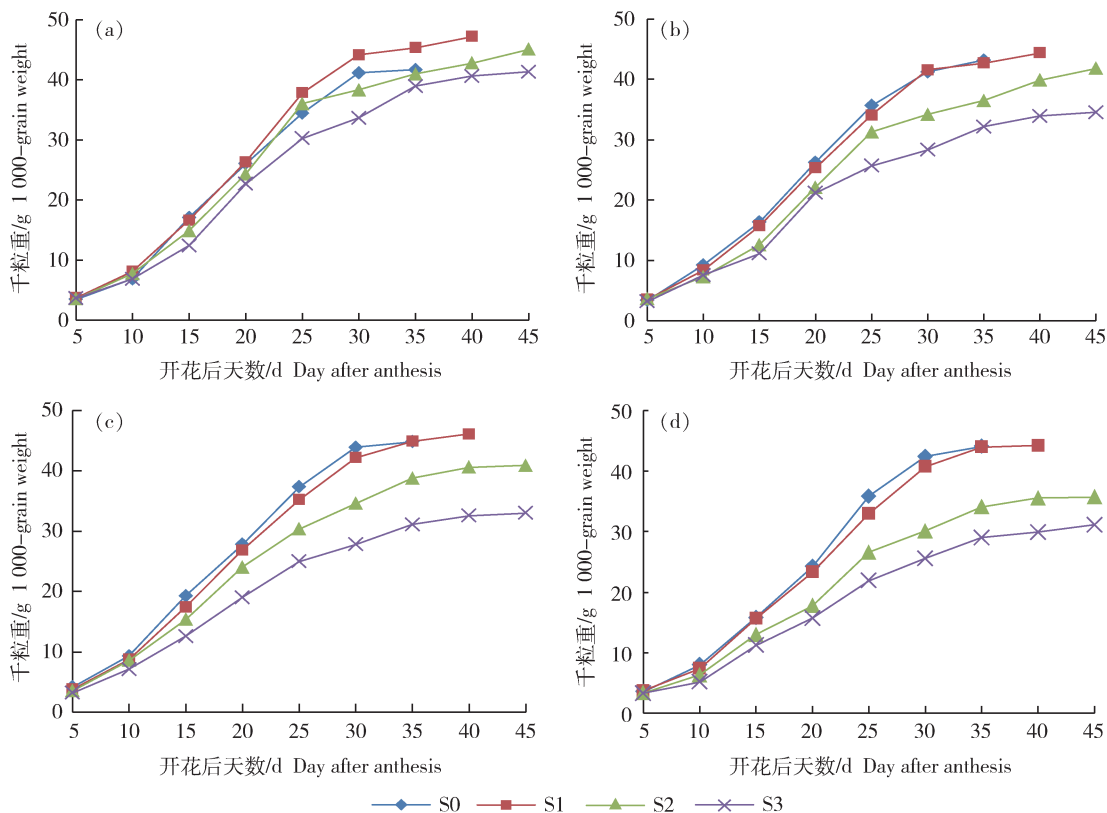
Table 3 Anova of shading and nitrogen fertilizer on 1 000-kernel weight of winter wheat

处理 Treatment	F 值	P 值
N	31.93	0.000
S	88.94	0.000
N×S	7.99	0.000

2.2 不同处理冬小麦阶段粒重的变化

由图 1 可知，小麦灌浆期籽粒粒重的增长呈

“S”型曲线。随着遮阴程度的增加粒重呈降低的趋势，尤其是 S<sub>2</sub> 和 S<sub>3</sub> 处理开花 25 d 后下降程度较明显。在不施肥 (N<sub>0</sub>) 条件下，轻度遮阴 (S<sub>1</sub>) 处理中后期粒重高于对照 (S<sub>0</sub>) 处理，而在施肥 (N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>) 条件下，S<sub>1</sub> 处理粒重与 S<sub>0</sub> 处理无明显差异，但高于 S<sub>2</sub> 和 S<sub>3</sub> 处理。在 S<sub>0</sub> 和 S<sub>1</sub> 条件下，随着施氮量的增加粒重先增加后降低，而在 S<sub>2</sub> 和 S<sub>3</sub> 条件下，随着施氮量的增加粒重降低，尤其在生育中后期降低幅度增大。说明在不遮阴和轻度遮阴条件下，适宜施氮量有利于增加小麦粒重，而在中度和重度遮阴条件下，增加施氮量对小麦粒重增加不利。



(a)  $N_0$ , 整个生育期不施肥; (b)  $N_1$ , 拔节期追施纯氮  $103.5 \text{ kg/hm}^2$ ; (c)  $N_2$ , 拔节期追施纯氮  $138 \text{ kg/hm}^2$ ; (d)  $N_3$ , 拔节期追施纯氮  $172.5 \text{ kg/hm}^2$

(a)  $N_0$ , no fertilizer; (b)  $N_1$ , jointing stage (after shading) nitrogen  $103.5 \text{ kg/hm}^2$ ; (c)  $N_2$ , jointing stage (after shading) nitrogen  $138 \text{ kg/hm}^2$ ; (d)  $N_3$ , jointing stage (after shading) nitrogen  $172.5 \text{ kg/hm}^2$

图1 不同遮阴和施氮处理冬小麦粒重动态变化

Fig. 1 Dynamics of grain weight of winter wheat in different light and nitrogen treatment

### 2.3 不同处理冬小麦籽粒灌浆模型及特征参数

由表3可知,各方程的决定系数均达到极显著水平,拟合度高,这说明 Logistic 模型能准确描述本试验冬小麦籽粒的灌浆过程。分析不同处理籽粒灌浆特征参数可以看出,不同处理最大灌浆速率出现时间和渐增期持续时间差异不明显。灌浆总天数、

快增期和缓增期灌浆持续时间随着遮阴程度的增加和施氮量的增加而增加。在不施肥( $N_0$ )条件下,最大灌浆速率和平均灌浆速率、渐增期、快增期和缓增期灌浆速率、阶段籽粒重量均表现为  $S_1 > S_0 > S_2 > S_3$ ,而在施肥条件下( $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$ ),最大灌浆速率、平均灌浆速率、渐增期、快增期和缓增期灌浆速率随

表3 不同处理灌浆 Logistic 模型及灌浆特征参数

Table 3 Logistic equation and characteristic parameters of grain filling in different treatment

处理 Treatment	模拟方程 Logistic equation	$R^2$	$T_m/d$	$V_m/(\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{粒}))$	$T/d$	$V_a/(\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{粒}))$	$T_1/d$
$N_0 S_0$	$Y=43.4456/(1+e^{3.5514-0.200002x})$	0.9970**	17.76	2.17	40.73	1.07	11.17
$N_0 S_1$	$Y=47.9147/(1+e^{3.5728-0.193425x})$	0.9983**	18.47	2.32	42.23	1.13	11.66
$N_0 S_2$	$Y=43.8657/(1+e^{3.5087-0.190316x})$	0.9959**	18.44	2.09	42.58	1.03	11.52
$N_0 S_3$	$Y=41.4896/(1+e^{3.3215-0.180175x})$	0.9966**	18.43	1.87	43.94	0.94	11.13
$N_1 S_0$	$Y=45.2225/(1+e^{3.3706-0.186906x})$	0.9982**	18.03	2.11	42.62	1.06	10.99

表 3(续)

处理 Treatment	模拟方程 Logistic equation	$R^2$	$T_m/d$	$V_m/$ (mg/ (d·粒))	$T/d$	$V_a/$ (mg/ (d·粒))	$T_1/d$
N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	$Y=45.3136/(1+e^{3.4017-0.183338t})$	0.9972**	18.55	2.08	43.62	1.04	11.37
N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	$Y=40.7851/(1+e^{3.3017-0.172108t})$	0.9947**	19.18	1.75	45.88	0.89	11.53
N <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	$Y=34.3307/(1+e^{3.0689-0.166648t})$	0.9929**	18.42	1.44	45.99	0.75	10.51
N <sub>2</sub> S <sub>0</sub>	$Y=46.9915/(1+e^{3.2658-0.186456t})$	0.9969**	17.52	2.23	42.16	1.14	10.45
N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	$Y=47.0359/(1+e^{3.2786-0.178533t})$	0.9983**	18.36	2.10	44.10	1.07	10.99
N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	$Y=41.1070/(1+e^{3.0323-0.165104t})$	0.9969**	18.37	1.69	46.20	0.89	10.39
N <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	$Y=33.1106/(1+e^{2.9848-0.163443t})$	0.9971**	18.26	1.35	46.38	0.71	10.20
N <sub>3</sub> S <sub>0</sub>	$Y=47.0926/(1+e^{3.5096-0.184313t})$	0.9972**	19.04	2.17	43.97	1.07	11.90
N <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	$Y=46.2181/(1+e^{3.4025-0.174795t})$	0.9975**	19.47	2.02	45.75	1.01	11.93
N <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	$Y=36.5135/(1+e^{3.1590-0.161724t})$	0.9963**	19.53	1.48	47.95	0.76	11.39
N <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	$Y=31.4145/(1+e^{3.0581-0.155165t})$	0.9968**	19.71	1.22	49.32	0.64	11.22

处理 Treatment	$T_2/d$	$T_3/d$	$V_1/$ (mg/ (d·粒))	$V_2/$ (mg/ (d·粒))	$V_3/$ (mg/ (d·粒))	$W_1/$ (g/ 1 000 粒)	$W_2/$ (g/ 1 000 粒)	$W_3/$ (g/ 1 000 粒)
N <sub>0</sub> S <sub>0</sub>	13.17	16.39	0.82	1.90	0.53	9.18	25.08	8.75
N <sub>0</sub> S <sub>1</sub>	13.62	16.95	0.87	2.03	0.57	10.13	27.66	9.65
N <sub>0</sub> S <sub>2</sub>	13.84	17.22	0.80	1.83	0.51	9.27	25.33	8.83
N <sub>0</sub> S <sub>3</sub>	14.62	18.19	0.79	1.64	0.46	8.77	23.95	8.35
N <sub>1</sub> S <sub>0</sub>	14.09	17.54	0.87	1.85	0.52	9.56	26.11	9.10
N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	14.37	17.88	0.84	1.82	0.51	9.58	26.16	9.12
N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	15.30	19.05	0.75	1.54	0.43	8.62	23.55	8.21
N <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	15.81	19.67	0.70	1.27	0.35	7.33	20.02	6.98
N <sub>2</sub> S <sub>0</sub>	14.13	17.55	0.95	1.92	0.53	9.92	27.12	9.30
N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	14.75	18.36	0.90	1.84	0.52	9.94	27.16	9.47
N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	15.95	19.86	0.83	1.48	0.42	8.67	23.68	8.26
N <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	16.12	20.06	0.69	1.19	0.33	7.00	19.12	6.67
N <sub>3</sub> S <sub>0</sub>	14.29	17.79	0.84	1.90	0.53	9.95	27.19	9.48
N <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	15.07	18.75	0.82	1.77	0.50	9.77	26.68	9.30
N <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	16.29	20.27	0.68	1.29	0.36	7.72	21.08	7.35
N <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	16.97	21.13	0.59	1.07	0.30	6.64	18.14	6.32

注:Y, 千粒重; t, 开花后的天数;  $R^2$ , 决定系数;  $T_m$ , 最大灌浆速率出现日期;  $V_m$ , 最大灌浆速率; T, 灌浆总天数;  $V_a$ , 平均灌浆速率;  $T_1$ , 渐增期持续时间;  $T_2$ , 快增期持续时间;  $T_3$ , 缓增期持续时间;  $V_1$ , 渐增期灌浆速率;  $V_2$ , 快增期灌浆速率;  $V_3$ , 缓增期灌浆速率;  $W_1$ , 渐增期积累量;  $W_2$ , 快增期积累量;  $W_3$ , 缓增期积累量。下同。

Note: Y, 1 000-grain weight; t, Days after flowering;  $R^2$ , determination coefficient;  $T_m$ , the time reaching the maximum grain-filling rate;  $V_m$ , maximum grain-filling rate; T, the duration of grain filling mainly;  $V_a$ , average grain-filling rate;  $T_1$ , duration of the slight-increase period;  $T_2$ , duration of fast-increase period;  $T_3$ , duration of the slow-increase period;  $V_1$ , grain-filling rate of the slight-increase period;  $V_2$ , grain-filling rate of fast-increase period;  $V_3$ , grain-filling rate of the slow-increase period;  $W_1$ , accumulation of the slight-increase period;  $W_2$ , accumulation of fast-increase period;  $W_3$ , accumulation of the slow-increase period. The same below.

着遮阴幅度的增大而降低。在  $S_0$  和  $S_1$  条件下,最大灌浆速率、平均灌浆速率和阶段灌浆速率随着施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,而在  $S_2$  和  $S_3$  条件下,灌浆速率均随着施氮量的增加而降低。

## 2.4 不同处理小麦籽粒灌浆参数与籽粒重量的关系

从不同灌浆时段籽粒灌浆参数与千粒重的相关分析可知(表4),千粒重与最大灌浆速率( $V_m$ )、平均灌浆速率( $V_a$ )、快增期灌浆速率( $V_2$ )、缓增期灌浆速率( $V_3$ )、渐增期累积籽粒重量( $W_1$ )、快增期累积籽粒重量( $W_2$ )、缓增期累积籽粒重量( $W_3$ )均呈显著正相关( $P < 0.01$ );与最大灌浆速率出现时间( $T_m$ )、灌浆总天数( $T$ )、快增期持续时间( $T_2$ )、缓增期持续时间( $T_3$ )呈负相关,但不显著。说明遮阴与施氮互作下影响粒重的主要因素是籽粒灌浆速率,灌浆时间对粒重影响较小。

## 3 讨论

光照与作物产量有重要的相关性,降低光照强度或者缩短光照时长均会显著影响作物产量及其构成要素<sup>[19-20]</sup>。遮阴条件下光能转化效率降低,光合作用减弱,碳氮代谢酶活性下降,导致氮素吸收和积累减少,同化产物供应不足,影响籽粒形成和灌浆,籽粒败育增多,进而导致粒重下降<sup>[21]</sup>。施氮肥能够提高光合速率,增强碳氮代谢,促进碳水化合物和蛋白质的合成,有利于同化产物的积累,为籽粒充实提供充足的原料<sup>[22]</sup>。适量施氮能促进小麦的穗粒数、穗重和千粒重的提高,其中穗粒数和产量的相关性最强,千粒重次之<sup>[23]</sup>。本研究表明,在不遮阴( $S_0$ )和轻度遮阴( $S_1$ )条件下,随着施氮量的增加千粒重呈先增加后降低的趋势,千粒重在  $N_2$  条件下较高;而在中度遮阴( $S_2$ )和重度遮阴( $S_3$ )条件下,随着施氮量的增加千粒重降低。说明在不遮阴和轻度遮阴条件下,施氮对粒重的增加有促进作用,而在中度和重度遮阴条件下,增施氮肥反而对粒重的增加不利。遮阴使穗数、穗粒数、千粒重、生物量及收获指数均不同程度降低,最终导致产量显著下降。增施氮肥尽管降低粒重,但显著增加穗数、生物量和收获指数,缓解弱光胁迫对产量构成因素造成的不利影响,进而提高产量<sup>[21]</sup>。在遮阴条件下,光合速率下降,碳氮代谢关键酶活性受到抑制,影响了光合产物的积累和转运,导致同化物供应不足,降低了穗数、穗粒数、千粒重和生物量,从而严重

削弱了增施氮肥对优化产量构成因素、提高产量的作用<sup>[21]</sup>。

小麦籽粒最大粒重主要由灌浆速率和灌浆持续期来决定<sup>[24-25]</sup>。有研究表明灌浆速率的影响大于灌浆持续时间<sup>[26-27]</sup>。但也有研究认为,籽粒质量与灌浆持续时间的相关性高于灌浆速率<sup>[16]</sup>。本研究表明:在不同遮阴和施氮条件下千粒重与灌浆速率和阶段籽粒重量呈显著正相关,而与灌浆持续时间呈负相关。乔旭等<sup>[12,14,17]</sup>的研究也表明遮阴后主要降低的是小麦灌浆速率,而与灌浆时间和持续期影响较小。小麦花后不同强度遮光处理均降低2个小麦品种籽粒的最大灌浆速率,推迟籽粒最大灌浆速率出现的时间<sup>[28]</sup>。江晓东等<sup>[14]</sup>研究表明弱光条件下散射辐射比例增加,提高籽粒最大灌浆速率、平均灌浆速率以及渐增期、快增期和缓增期灌浆速率,促进籽粒粒重增加。郭天财等<sup>[15]</sup>研究认为,随追氮时期的后移,达到最大灌浆速率的时间缩短,灌浆速率增加。也有研究认为,灌浆前期增施氮肥可以提高小麦灌浆的起步速率,中后期过多施氮会抑制灌浆速率<sup>[9]</sup>。本研究表明,适量施氮( $N_2$ )灌浆持续时间延长弥补了轻度遮阴( $S_1$ )下灌浆速率的下降,阶段籽粒重量和千粒重增加;在中度( $S_2$ )和重度( $S_3$ )遮阴条件下,灌浆速率随着遮阴幅度和施氮量的增加而降低,虽然快增期和缓增期灌浆时间有所延长,但无法弥补遮阴和施氮下灌浆速率下降的不利影响,籽粒重量降低。这可能是由于在中度和重度遮阴条件下随着施氮量增加小麦光合速率、干物质积累量及光合同化产物向籽粒分配降低所致<sup>[29]</sup>。

## 4 结论

在轻度遮阴(拔节期~抽穗期遮阴10%,抽穗期~成熟期遮阴25%)条件下,可以通过适量施氮(拔节期追施纯氮138.0 kg/hm<sup>2</sup>)延长小麦灌浆渐增期、快增期和缓增期灌浆持续时间,弥补遮阴导致的阶段灌浆速率下降,阶段籽粒重量和千粒重增加。在中度遮阴(拔节期~抽穗期遮阴20%,抽穗期~成熟期遮阴50%)和重度遮阴(拔节期~抽穗期遮阴30%,抽穗期~成熟期遮阴75%)处理中,应控制氮肥用量,拔节期追施纯氮103.5 kg/hm<sup>2</sup>以上虽然快增期和缓增期持续时间延长,但无法弥补遮阴和施氮下(拔节期追施纯氮138.0 kg/hm<sup>2</sup>和172.5 kg/hm<sup>2</sup>)灌浆速率的下降,阶段籽粒重量和千粒重降低。

表 4 小麦灌浆参数与千粒重的相关性  
Table 4 The correlation analysis of grain filling parameters with 1 000-kernel weight

参数 Parameter	$V_m$	$T_m$	$V_a$	$T$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$Y$
$V_m$	1.00													
$T_m$	-0.47	1.00												
$V_a$	1.00**	-0.50	1.00											
$T$	-0.88*	0.76	-0.88*	1.00										
$T_1$	0.40	0.57	0.33	-0.10	1.00									
$T_2$	-0.93*	0.60	-0.91*	0.98**	-0.32	1.00								
$T_3$	-0.93*	0.60	-0.91*	0.98**	-0.32	1.00**	1.00							
$V_1$	0.90*	-0.63	0.93*	-0.79	0.04	-0.76	-0.76	1.00						
$V_2$	1.00**	-0.47	1.00**	-0.89*	0.39	-0.93*	-0.93*	0.90*	1.00					
$V_3$	1.00**	-0.47	1.00**	-0.88*	0.39	-0.92	-0.92*	0.91*	1.00**	1.00				
$W_1$	0.97**	-0.37	0.98**	-0.77	0.40	-0.82	-0.82	0.93*	0.97**	0.98**	1.00			
$W_2$	0.97**	-0.37	0.98**	-0.77	0.40	-0.82	-0.82	0.93*	0.97**	0.98**	1.00**	1.00		
$W_3$	0.97**	-0.37	0.98**	-0.77	0.40	-0.82	-0.82	0.93*	0.97**	0.98**	1.00**	1.00**	1.00	
$Y$	0.95**	-0.35	0.95**	-0.76	0.42	-0.82	-0.82	0.89*	0.95**	0.95**	0.98**	0.98**	0.98**	1.00

注：\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平的差异。

Note: \* and \*\* mean significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.



## 参考文献 References

- [1] 乔旭, 赵奇, 雷钧杰, 高永红, 张宏芝, 陈兴武, 赛力汗·赛, 薛丽华. 核桃-小麦间作对小麦生长发育及产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(4): 734-738  
Qiao X, Zhao Q, Lei J J, Gao Y H, Zhang H Z, Chen X W, Sai L H S, Xue L H. Study on growth, development and yield formation of wheat under walnut-wheat intercropping system[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(4): 734-738 (in Chinese)
- [2] 乔旭, 张宏芝, 雷钧杰, 赵奇, 陈兴武, 张新志, 周琰. 遮阴条件下小麦穗粒数形成及产量构成因素分析[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(10): 1802-1806  
Qiao X, Zhang H Z, Lei J J, Zhao Q, Chen X W, Zhang X Z, Zhou Y. The for action of kernel number per spike an d analysis of yield components of wheat under shade condition [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(10): 1802-1806 (in Chinese)
- [3] 张建雄. 南疆绿洲灌区杏农复合系下作物生理特性及生态效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010  
Zhang J X. Study on the ecological effect and physiological characteristics of micro-climate in apricot-crop intercropping system of the oasis irrigation district in south of Xinjiang[D]. Yangling: Northwest Agricultural & Forest University, 2010 (in Chinese)
- [4] Pinthus M J, Shalom S Y. Day matter accumulation in the grains of wheat (*Triticum aestivum* L) cultivars differing in grain weight[J]. *Annals of Botany*, 1978, 42: 469-471
- [5] Wiegand C L, Cuellar J S. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature[J]. *Crop Science*, 1981, 21: 95-101
- [6] 张永强, 方辉, 陈传信, 陈兴武, 赛力汗·赛, 薛丽华, 雷钧杰. 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, Chen X W, Sai L H · S, Xue L H, Lei J J. Effects of shading and planting population on grain-filling properties and grain quality of winter wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(5): 10-19 (in Chinese)
- [7] 闫素辉, 李文阳, 杨安中, 王振林. 弱光对小麦花后旗叶光合及籽粒灌浆的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(1): 77-81  
Yan S H, Li W Y, Yang A Z, Wang Z L. Effects of weak light at grain filling stage on photosynthetic characteristics and grain filling of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(1): 77-81 (in Chinese)
- [8] 杨丽娟, 马华平, 蒋志凯, 盛坤, 董响, 刘朝辉. 氮肥追施时期对强筋小麦籽粒灌浆特性的影响[J]. 山东农业科学, 2014, 46(11): 72-74, 78  
Yang L J, Ma H P, Jiang Z K, Sheng K, Dong Y, Liu C H. Effect of nitrogen topdressing period on grain filling characteristics of strong gluten wheat [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2014, 46(11): 72-74, 78 (in Chinese)
- [9] 徐莹, 王林林, 陈炜, 李红兵, 邓西平. 施氮量对旱地小麦强势粒和弱勢粒灌浆及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(3): 489-494  
Xu Y, Wang L L, Chen W, Li H B, Deng X P. Effects of deferent nitrogen levels on grain-filling characteristics and yield of two dry land wheat cultivars for superior and inferior grain [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(3): 489-494 (in Chinese)
- [10] 韩金玲, 杨晴, 张敏, 王文颇, 周印富, 李彦生. 施氮方式对冬小麦品种京冬 11 籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(6): 1107-1110  
Han J L, Yang Q, Zhang M, Wang W P, Zhou Y F, Li Y S. Grain filling characteristics and yield of winter wheat Jingdong 11 under different application modes of nitrogen fertilizer[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(6): 1107-1110 (in Chinese)
- [11] 方辉, 范贵强, 高永红, 周安定, 吴新元, 张永强, 芦静, 黄天荣. 遮阴对不同冬小麦品种籽粒灌浆及品质特性的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(9): 1593-1600  
Fang H, Fan G Q, Gao Y H, Zhou A D, Wu X Y, Zhang Y Q, Lu J, Huang T R. Effects of shading on grain-filling and quality characteristics of different winter wheat varieties[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2018, 55(9): 1593-1600 (in Chinese)
- [12] 乔旭, 张宏芝, 雷钧杰, 王美, 赵奇, 薛丽华, 赛力汗·赛, 陈兴武. 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, Wang M, Zhao Q, Xue L H, Sai L H · S, Chen X W. Effect of shading on photosynthesis and grain-filling characteristics of wheat [J]. *Act Agriculturae Boreali occidentalis Sinica*, 2013, 22(8): 9-14 (in Chinese)
- [13] Wang Z, Yin Y, He M, Zhang Y, L S, Li Q, Shi S. Allocation of photosynthates and grain growth of two wheat cultivars with different potential grain growth in response to pre-and post-anthesis shading[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2003, 189: 280-285
- [14] 江晓东, 陈惠玲, 姜琳琳, 杨晓亚, 吕润, 华梦飞, 吴可人. 弱光条件下散射辐射比例增加对冬小麦籽粒灌浆进程的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(12): 753-760  
Jiang X D, Chen H L, Jiang L L, Yang X Y, Lv R, Hua M F, Wu K R. Effect of increasing diffuse radiation fraction under low light condition on the grain-filling process of winter wheat (*Triticum aestivum* L)[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(12): 753-760 (in Chinese)
- [15] 郭天财, 岳艳军, 马冬云, 查菲娜, 宋晓, 朱云集, 王晨阳, 王永华, 韩巧. 追氮时期对冬小麦籽粒灌浆及淀粉特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(5): 836-840  
Guo T C, Yue Y J, Ma D Y, Cha F N, Song X, Zhu Y J, Wang C Y, Wang Y H, Han Q. Effect of nitrogen fertilizer

- application at different growth stages on grain filling and starch properties in winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(5): 836-840 (in Chinese)
- [16] 李紫燕, 李世清, 伍维模, 邵明安, 张兴昌. 氮肥对半湿润区不同基因型冬小麦籽粒灌浆特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 75-79
- Li Z Y, Li S Q, Wu W M, Shao M A, Zhang X C. Grain-filling characters of different genotype winter wheat under nitrogen fertilization in semi-humid area of south loess plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1): 75-79 (in Chinese)
- [17] 刘霞, 尹燕秤, 姜春明, 贺明荣, 王振林. 花后不同时期弱光和高温胁迫对小麦旗叶荧光特性及籽粒灌浆进程的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 211-212
- Liu X, Yin Y P, Jiang C M, He M R, Wang Z L. Effects of weak light and high temperature stress after anthesis on flag leaf chlorophyll fluorescence and grain fill of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 211-212 (in Chinese)
- [18] Gaspar E C, Daniel J M, Gustavo A S. Yield determination in triticale as affected by radiation in different development phases[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28: 597-605
- [19] Estrada G. Yield determination in triticale as affected by radiation in different development phases [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(4): 597-605
- [20] Guo Z J, Yu Z W, Wang D, Shi Y, Zhang Y L. Photosynthesis and winter wheat yield responses to supplemental irrigation based on measurement of water content in various soil layers[J]. *Field Crops Research*, 2014, 166(9): 102-111
- [21] 张元帅. 不同遮荫条件下施氮对冬小麦光合特性及产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017
- Zhang Y S. Effects of nitrogen supply on photosynthetic traits and yield under different shading conditions in winter wheat [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [22] 赵俊晔, 于振文. 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[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(5): 92-96
- Zhao J Y, Yu Z W. Effect of nitrogen fertilizer rate on photosynthetic rate and photochemical efficiency of flag leaf, grain yield and protein content of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(5): 92-96 (in Chinese)
- [23] 蒋会利, 温晓霞, 廖允成. 施氮量对冬小麦产量的影响及土壤硝态氮运转特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 237-241
- Jiang H L, Wen X X, Liao Y C. Effect of nitrogen application on winter wheat yield and translation of soil  $\text{NO}_3^- \text{N}$ [J]. *Plant nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 237-241 (in Chinese)
- [24] 李文阳, 尹燕秤, 闫素辉, 戴忠民, 梁太波, 王振林. 不同粒型小麦品种籽粒内源激素变化与籽粒灌浆特征比较[J]. *华北农学报*, 2007, 22(1): 5-8
- Li W Y, Yin Y P, Yan S H, Dai Z M, Liang T B, Wang Z L. Hormonal changes in relation to filling characters in developing grains of two wheat cultivars differing in grain size[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(1): 5-8 (in Chinese)
- [25] 王立国, 许民安, 鲁晓芳, 褚素敏, 路继纯, 谢令琴. 冬小麦籽粒灌浆参数与千粒重相关性研究[J]. *河北农业大学学报*, 2003, 26(3): 30-32
- Wang L G, Xu M A, Lu X F, Chu S M, Lu J C, Xie L Q. Studies on the correlation between parameters of grain filling and 1 000-grain weight in wheat[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2003, 26(3): 30-32 (in Chinese)
- [26] 吴少辉, 高海涛, 张学品, 张艳霞, 赵岩涛. 播期对不同习性小麦品种籽粒灌浆特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2004, 24(4): 105-107
- Wu S H, Gao H T, Zhang X P, Zhang Y X, Zhao Y T. Effect of sowing date on grain filling characters in different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2004, 24(4): 105-107 (in Chinese)
- [27] 郭艳艳, 段巍巍. 不同冬小麦品种籽粒胚乳增殖和灌浆对粒重的影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(1): 84-89
- Guo Y Y, Duan W W. Studies on endosperm development and grain filling characteristics in different winter wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(1): 84-89 (in Chinese)
- [28] 陈二影. 花后弱光对小麦产量和蛋白质品质的影响及氮素调控研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012
- Chen E Y. Grain yield and protein quality in response to shading after anthesis and nitrogen regulation in wheat[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [29] 艾孜孜·居来提. 遮阴与氮肥互作对冬小麦生长发育及产量的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017
- Aizizi Julaiti. Effects of interaction between shading and nitrogen fertilizer on growth and yield of winter wheat[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅