

施氮量对测墒补灌小麦光合特性、籽粒灌浆及产量的影响

董亚博, 尤薇, 石玉, 张永丽, 张振

(山东农业大学农学院/小麦育种国家重点实验室/农业农村部作物生理生态与耕作重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要:为探究黄淮海地区小麦高产的适宜施氮量,以小麦品种烟农 1212 为供试材料,通过大田试验,设置 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N0)、 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N150)、 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N210)、 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N270) 共 4 个施氮水平,分析了施氮量对测墒补灌小麦旗叶光合特性和籽粒灌浆的影响。结果表明,N210 处理下小麦花后 14~28 d 旗叶 SPAD 值显著高于 N0 和 N150 处理,与 N270 处理差异不显著。N210 处理下小麦花后 14~28 d 旗叶光合参数及光合酶活性均显著高于 N0 和 N150 处理,但施氮量增至 N270 时,旗叶光合参数及光合酶活性无显著变化。N210 处理下籽粒平均灌浆速率和最大灌浆速率均显著高于其他处理,有利于粒重的提高。N210 处理下千粒重和籽粒产量最高,其中产量较 N0、N150 和 N270 处理分别增加了 43.93%、12.35% 和 4.36%。综上所述,施氮量 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是本试验条件下高产的最佳施氮量。

关键词: 施氮量; 小麦; 光合特性; 籽粒灌浆; 产量

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)06-0782-08

Effects of Nitrogen Application Rate on Photosynthetic Characteristics, Grain Filling and Yield of Wheat under Supplemental Irrigation Based on Soil Moisture Measurement

DONG Yabo, YOU Wei, SHI Yu, ZHANG Yongli, ZHANG Zhen

(College of Agriculture, Shandong Agricultural University / National Key Laboratory of Wheat Breeding / Key Laboratory of Crop Physiology and Tillage, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: In order to explore the suitable nitrogen application rate for high-yield wheat in Huang-Huai-Hai region, the wheat variety Yannong 1212 was used as the test material. Four nitrogen application rates ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N0), $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N150), $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N210), and $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N270)) were set up in the field, and the effects of nitrogen application rate on the photosynthetic characteristics of flag leaves and grain filling of wheat under supplemental irrigation were analyzed. The results showed that the SPAD value of flag leaf at 14–28 days after anthesis under N210 treatment was significantly higher than that under N0 and N150 treatments, but not significantly different from that under N270 treatment. The photosynthetic gas parameters and photosynthetic enzyme activities of flag leaves under N210 treatment were significantly higher than those under N0 and N150 treatments at 14–28 days after anthesis, yet there was no significant change in photosynthetic parameters and photosynthetic enzyme activities of flag leaves when the nitrogen application rate increased to N270. The average grain filling rate and maximum grain filling rate under N210 treatment were significantly higher than those under other treatments, which was beneficial to the increase of grain weight. Compared with N0, N150 and N270, the 1 000-grain weight and grain yield under N210 treatment were

收稿日期: 2024-04-19 修回日期: 2024-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172114); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03-18); 泰山学者工程专项(tsqn202211094)

第一作者 E-mail: dybxiaomai@163.com(董亚博)

通讯作者 E-mail: shiyu@sdau.edu.cn(石玉)

the highest, and the yield increased 43.93%, 12.35% and 4.36%, respectively. In summary, the nitrogen application rate of 210 kg · hm⁻² is the best nitrogen application rate for high yield under the conditions of this experiment.

Keywords: Nitrogen application; Wheat; Photosynthetic characteristics; Grain filling; yield

黄淮海地区作为中国小麦主产区之一,其小麦播种面积约占全国总面积的三分之二,提高该地区小麦产量对保障中国粮食安全具有重要意义^[1]。该地区小麦生育期内降水量少,仅占小麦生育期耗水量的25%~40%,地下水补充灌溉是保证该地区小麦生产的主要措施,但常年地下水补充灌溉导致地下水资源日益匮乏,因此发展节水栽培技术是该地区小麦可持续生产的必要途径^[2]。氮肥是小麦生长发育过程中所需氮素的主要来源^[3],但在小麦种植过程中为追求高产,过量施氮现象经常出现,导致水肥流失严重、氮肥利用率低下,不利于小麦高产高效生产^[4-6]。在节水栽培条件下如何合理施氮是黄淮海地区小麦生产亟待解决的问题。

施氮量对小麦生理和产量有显著的影响^[7]。研究表明,与施氮量138和276 kg · hm⁻²相比,施氮量207 kg · hm⁻²条件下小麦的净光合速率、蒸腾速率及气孔导度均显著提高^[12]。适量施氮能够增强小麦旗叶光合酶活性,增加叶绿素含量,延长花后光合速率的峰值持续期,有利于花后旗叶光合能力的提高^[8-11]。小麦灌浆期是决定粒重的关键时期^[13]。研究发现,与施氮量120和360 kg · hm⁻²相比,施氮量240 kg · hm⁻²显著提高了小麦籽粒灌浆速率和灌浆强度,进而促进籽粒物质充实和粒重增加^[14]。在拔节期定量灌溉750 m³ · hm⁻²条件下,240 kg · hm⁻²施氮处理下小麦产量较180和300 kg · hm⁻²施氮处理显著提高^[15]。目前关于施氮量对小麦光合特性及产量的研究报道较多,但这些研究多是在定量灌溉或大水漫灌条件下进行,缺乏对土壤水分、降水量等因素的综合考虑,得到的最佳施氮量并不准确。本研究在测墒补灌节水条件下设置不同施氮量处理,分析了小麦旗叶光合作用和籽粒灌浆特征,以期为黄淮海地区小麦产量的提高和水肥的高效利用提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

大田试验于2022—2023年在山东省济宁市

小孟镇史王村院士工作站(35°24'N,116°24'E)进行。该地属暖温带大陆性季风气候区。试验田前茬作物为玉米,玉米收获后将秸秆全部还田。试验田土壤类型为褐潮土,质地为中性壤土,播前0~20 cm土层土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为14.25 g · kg⁻¹、1.06 g · kg⁻¹、119.5 mg · kg⁻¹、33.12 mg · kg⁻¹和121.16 mg · kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验以冬小麦品种烟农1212为材料,设0 kg · hm⁻²(N0)、150 kg · hm⁻²(N150)、210 kg · hm⁻²(N210)和270 kg · hm⁻²(N270)4个施氮量处理。每小区均基施P₂O₅ 135 kg · hm⁻²和K₂O 150 kg · hm⁻²。氮肥一半基施,剩余拔节期追施。氮磷钾肥料种类分别为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)和硫酸钾(含K₂O 50%)。于拔节期和开花期将0~40 cm土层土壤相对含水量补灌至70%。补灌公式为 $M=10 \times r \times H \times (B_i - B_j)$ ^[16]。式中M为灌水量(mm);r代表土壤容重(g · cm⁻³);H代表土层深度(cm);B_i代表目标土壤质量含水量(%);B_j代表灌溉前土壤平均质量含水量(%)。小区长10 m,宽2 m,小区间设2 m隔离区,随机区组排列,重复3次。小麦于2022年10月17日播种,三叶期定苗,播种密度为270万株 · hm⁻²,于次年的6月11日收获。其他管理措施参照当地高产田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 旗叶绿素相对含量(SPAD值)和光合参数的测定

在花后0、7、14、21和28 d,每小区选取20片具有代表性的旗叶,用美国产CCM-200型叶绿素仪在上午9:30—11:30测定SPAD值^[17]。同时,用美国产的LI-6800便捷式光合仪(LI-COR)在花后0、7、14、21和28 d的上午9:30—11:30测定所选旗叶的相关光合参数^[18]。

1.3.2 旗叶光合酶活性

于开花期标记同天开花且生长正常、长势长相、穗子大小情况基本相同的小麦单茎。分别于花后0、7、14、21和28 d晴天上午9:00—11:00

取各处理标记单茎的小麦旗叶鲜样 20 片,随后立即置入液氮中速冻 30 min,放入 -80 °C 冰箱保存。参照王海琪等^[19]的方法测定旗叶 RuBP、PEP 羧化酶活性。

1.3.3 籽粒灌浆参数测定

在开花期选取同日开花、长势一致的麦穗对其进行标记,每隔 7 d 取标记的麦穗 30 个,剥去全部籽粒测定鲜重,在 105 °C 杀青 30 min,后于 75 °C 烘干至恒重并称量,折算成千粒重。

分别以开花后天数(*t*)和千粒重(*m*)为自变量和因变量,使用 Logistic 模型 [$m = a / (1 + be^{-ct})$]来进行小麦籽粒灌浆进程的拟合。其中,*a* 代表最大千粒重,*b* 是初始值,*c* 为灌浆速率参数,并按下列公式计算小麦灌浆速率达到最大的时间(T_{max})、灌浆持续时间(P_d)、平均灌浆速率(V_{mean})和最大灌浆速率(V_{max})^[20]:

$$T_{max} = \ln b/c; P_d = \ln 99b/c; V_{mean} = ac/\ln b + 4.595 12; V_{max} = ac/4$$

1.3.4 产量及其构成因素测定

在小麦成熟期每小区选取 3 m² 样区调查单位面积穗数,采收后风干、脱粒称重,测得千粒重,计算籽粒产量;在采收前每小区各随机选取 50 个具有代表性的单茎,测定穗粒数。

1.4 数据处理

使用 Excel 2021、R 4.2.0 软件对数据整理,用 SPSS 21 软件进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 施氮量对小麦旗叶 SPAD 值的影响

施氮量对小麦旗叶花后 SPAD 值有显著影响(图 1)。花后 0 d,旗叶 SPAD 值在不同处理间无显著差异;花后 7 d,旗叶 SPAD 值在施氮处理间差异不显著,施氮处理均显著高于 N0 处理;花后 14~28 d,旗叶 SPAD 值均表现为 N210 处理最高,且与 N0 和 N150 处理差异均显著,与 N270 处理差异不显著,说明适量施氮可使小麦灌浆中后期的旗叶 SPAD 值维持在较高水平,继续增施氮肥对旗叶 SPAD 值无显著提升效果。

2.2 施氮量对小麦旗叶光合参数的影响

小麦旗叶花后的光合参数随灌浆进程均表现为先增加后降低的趋势(图 2)。在花后 0 d,旗叶净光合速率和气孔导度在施氮处理间均无显著差异,蒸腾速率在不同处理间差异均不显著;花后 7

d,旗叶的净光合速率和蒸腾速率在施氮处理间均无显著差异,气孔导度表现为 N210 和 N270 处理显著高于 N150 处理,N0 处理最低;花后 14~28 d,旗叶净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均表现为 N210 处理显著高于 N0 和 N150 处理,与 N270 处理无显著差异,说明 N210 处理能够提高灌浆中后期小麦旗叶的光合能力,继续增加施氮量时旗叶光合能力无显著变化。

2.3 施氮量对小麦旗叶光合酶活性的影响

施氮量对小麦花后旗叶 RuBP 和 PEP 羧化酶活性均有影响(图 3)。花后 0 d,两种酶活性在不同处理间无显著差异;花后 7 d,施氮处理显著高于不施氮处理,但施氮处理间无显著差异;花后 14~28 d,N210 处理的旗叶光合酶活性均最高,且与 N0 和 N150 处理差异均显著,与 N270 处理无显著差异。这表明适量施氮能够提高小麦灌浆中后期旗叶光合酶活性,有助于籽粒灌浆。

2.4 施氮量对小麦粒重和籽粒灌浆速率的影响

各处理小麦粒重在灌浆期均呈“S”型变化,灌浆速率的变化趋势均呈单峰曲线(图 4)。花后 7 d,粒重在不同处理间无显著差异;花后 14 d,N210 和 N270 处理间粒重无显著差异,但二者均显著高于 N0、N150 处理;花后 21~35 d,N210 处理粒重显著高于其他处理,其中 N0 处理最低。花后 0~7 d,灌浆速率在不同处理间无显著差异;花后 7~28 d,灌浆速率均表现为 N210 处理显著

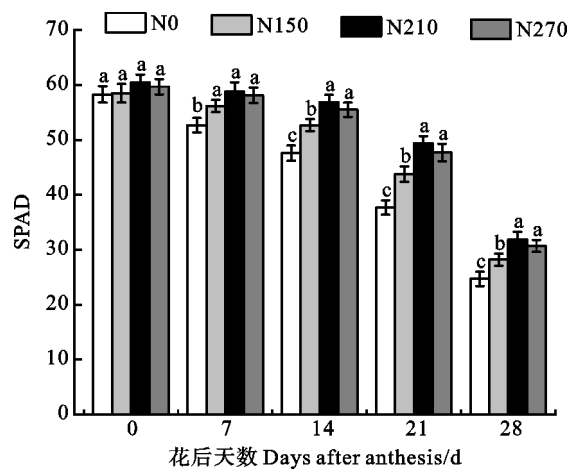


图 1 不同施氮量处理下小麦花后旗叶 SPAD 值
图柱上不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Different letters above the bar indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same in figures 2-4.

图 1 不同施氮量处理下小麦花后旗叶 SPAD 值
Fig. 1 SPAD value of flag leaves after wheat anthesis under different nitrogen application rate treatments

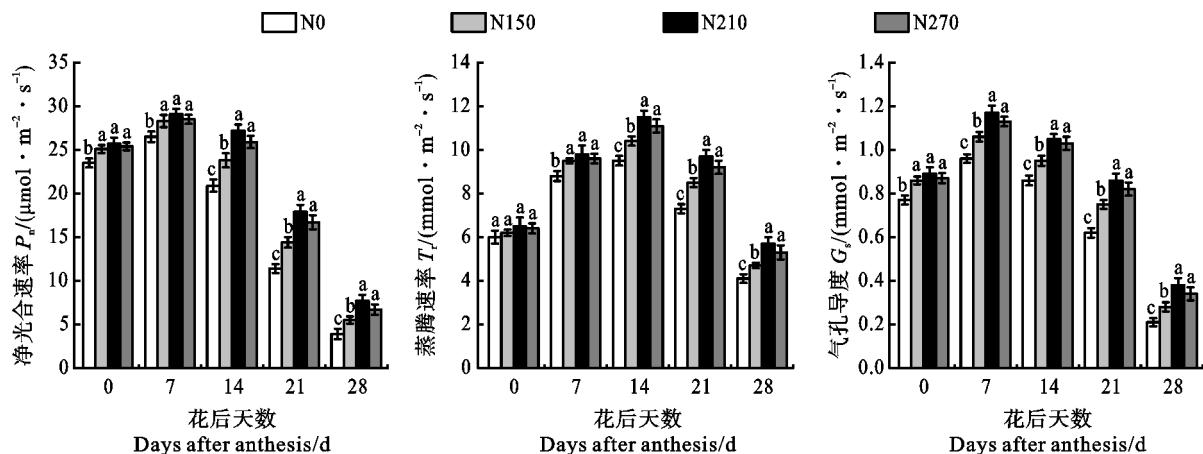


图 2 不同施氮量处理下小麦花后旗叶光合特性

Fig. 2 Photosynthetic characteristics of flag leaves of wheat after anthesis under different nitrogen application rate treatments

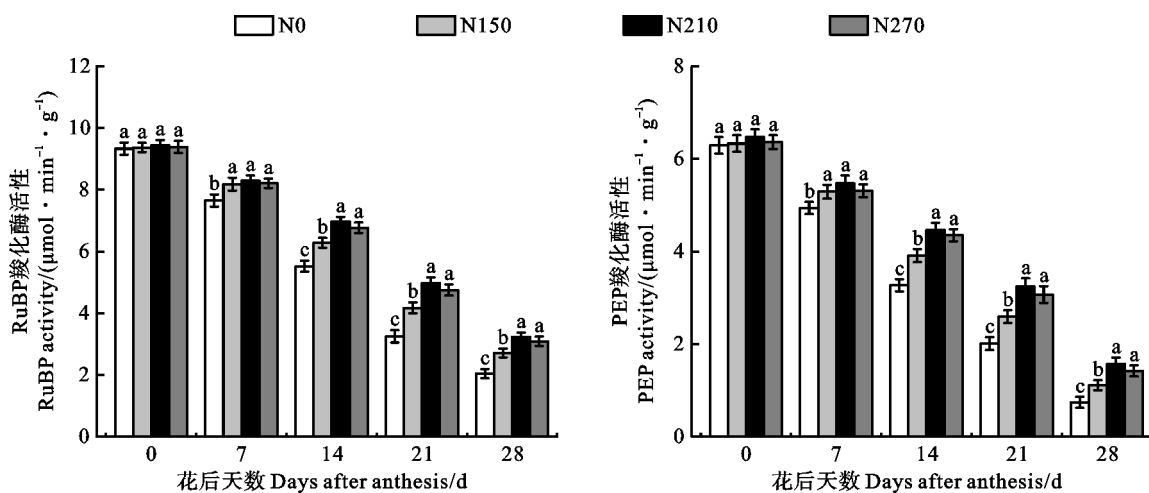


图 3 不同施氮量处理下小麦旗叶光合酶活性

Fig. 3 Photosynthetic enzyme activity of wheat flag leaves under different nitrogen application rate treatments

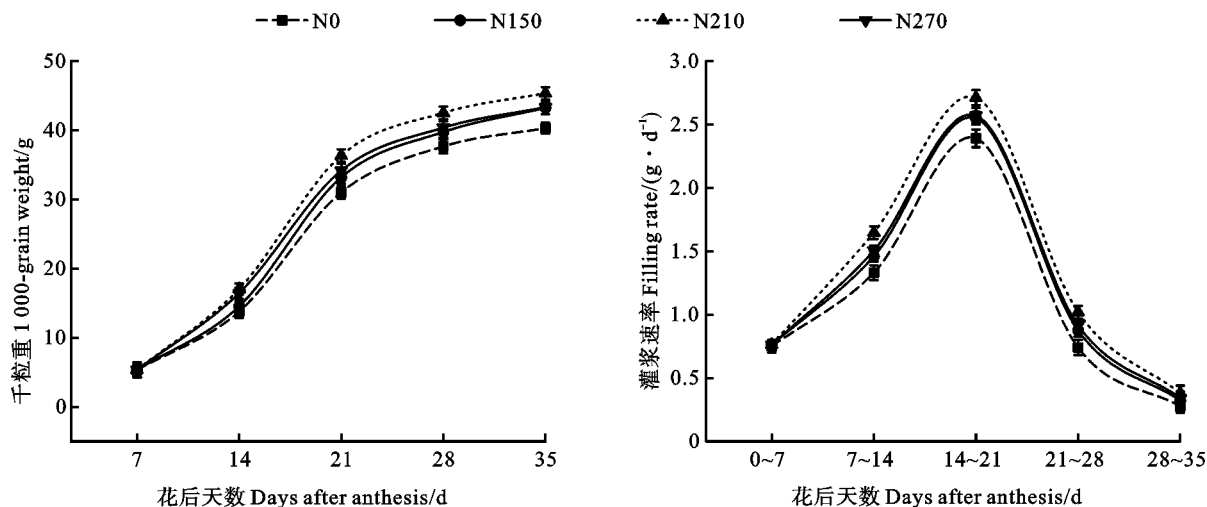


图 4 不同施氮量处理下小麦粒重和灌浆速率在灌浆期的变化

Fig. 4 Changes of grain weight and filling rate of wheat during filling period under different nitrogen application rate treatments

高于其他处理,以 N0 处理最低;花后 28~35 d,灌浆速率在不同处理间无显著差异。这说明适量施氮能够提高小麦籽粒灌浆速率,促进粒重提高。

2.5 施氮量对小麦籽粒灌浆参数的影响

用 Logistic 模型模拟小麦籽粒灌浆,得到的籽粒灌浆方程的决定系数 R^2 均超过 0.999,说明方程的拟合度较高,可以用于分析小麦籽粒灌浆特性(表 1)。从计算结果看,在 4 个处理中,N210 处理的 V_{max} 和 V_{mean} 均最高; T_{max} 表现为 N210 处理显著高于 N0、N150 处理,与 N270 无显著差异; P_d 在不同处理间均无显著差异,说明在 N210

处理最有利于小麦籽粒灌浆。

2.6 施氮量对小麦籽粒产量及其构成三因素的影响

小麦产量和千粒重在不同处理间差异均显著,且随施氮量的增加呈先增后降趋势,以 N210 处理最高。小麦穗数随施氮量增加呈上升趋势,但 N210 和 N270 处理间差异不显著。小麦穗粒数在施氮处理间差异不显著,但施氮处理均显著高于 N0 处理(表 2)。这表明适量施氮可促进小麦产量结构协调提升,尤其是增加粒重,最终实现增产。

表 1 不同施氮量处理下小麦籽粒灌浆参数

Table 1 Grain filling parameters of wheat under different nitrogen application rate treatments

处理 Treatment	增长曲线方程 Growth curve equation	R^2	T_{max}/d	$V_{mean}/(g \cdot d^{-1})$	$V_{max}/(g \cdot d^{-1})$	P_d/d
N0	$Y=40.81/(1+43.98e^{-0.23x})$	0.999 6	16.45b	1.12c	2.35c	25.47a
N150	$Y=43.41/(1+47.39e^{-0.23x})$	0.999 8	16.49b	1.20b	2.54b	25.83a
N210	$Y=45.40/(1+50.17e^{-0.24x})$	0.999 9	17.79a	1.32a	2.81a	25.88a
N270	$Y=43.46/(1+42.30e^{-0.23x})$	0.999 8	17.87a	1.23b	2.56b	26.00a

同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Different values in the same columns indicate significant differences between treatments($P < 0.05$). The same in table 2.

表 2 不同施氮量处理下小麦籽粒产量及其构成三因素

Table 2 Wheat grain yield and yield components under different nitrogen application rate treatments

处理 Treatment	穗数 Spike number/ $(\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	籽粒产量 Grain yield/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
N0	471.35c	35.66b	40.32c	6 341.47d
N150	542.95b	38.21a	43.24b	8 123.62c
N210	587.19a	39.64a	45.36a	9 126.99a
N270	601.34a	38.51a	43.34b	8 745.38b

3 讨论

3.1 施氮量对小麦旗叶光合特性的影响

光合作用是作物生产的基础。适量施氮可以提高小麦旗叶 SPAD 值,有利于光合作用的进行^[21]。有研究表明,在定量灌溉 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下,施氮量 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 较施氮量 135 和 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 显著提高了小麦花后旗叶的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度^[22];也有学者将施氮量 90、180 和 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 进行比较,得出施氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可显著提高了小麦 SPAD 值、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度^[23];但有人提出与 180 和 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量相比, $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量下小麦旗叶的光合速率和产量最高^[24]。本试验中,在测墒补灌节水栽培条件下,

N210 处理较 N150 处理可显著提高灌浆中后期旗叶 SPAD 值,有利于光合作用的进行,究其原因可能是适量施氮延缓了小麦旗叶在灌浆中后期的衰老,使旗叶持续保持较高的光合能力,随后继续增加施氮量至 N270 处理,旗叶 SPAD 值、光合参数均无显著变化。本试验还发现,施氮 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理较全生育期不施氮和施氮 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理显著提高了灌浆中后期旗叶 1,5 二磷酸核酮糖羧化酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性,继续增加施氮量至 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,光合酶活性无显著变化,说明适宜施氮量下小麦旗叶光合酶活性可保持在较高水平,可促进叶片光合作用。

3.2 施氮量对小麦籽粒灌浆特性的影响

灌浆期是小麦产量形成的重要时期^[25]。有研究指出,在滴灌条件下,施氮 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 较

施氮 225 和 275 kg · hm⁻² 显著延长小麦灌浆活跃期,提高籽粒的灌浆速率,有利于高粒重的形成^[26]。本研究亦得出相似结果,施氮量 210 kg · hm⁻² 较全生育期不施氮和施氮量 150 kg · hm⁻² 提高了籽粒平均灌浆速率和最大灌浆速率,继续增加施氮量至 270 kg · hm⁻² 后上述两个指标均减小,表明适宜的施氮量能够促进籽粒灌浆,过量施氮时灌浆进程则会受到抑制。另有研究表明,在黄土高原地区,施氮量 180 kg · hm⁻² 较施氮量 120 和 240 kg · hm⁻² 延长了小麦籽粒达到灌浆最大速率的时间,最终使粒重增加^[27]。在总滴灌量为 525 mm 条件下,施氮量为 300~450 kg · hm⁻² 较施氮量 150 和 600 kg · hm⁻² 能够显著延长小麦籽粒的灌浆持续天数,从而增产^[28]。本研究也发现,施氮量 210 kg · hm⁻² 延长了小麦籽粒达到灌浆的最大速率所需的时间,与施氮量 270 kg · hm⁻² 无显著差异。这说明,适量施氮可通过延长籽粒灌浆时间、提高灌浆速率两个方面促进籽粒灌浆和粒重的形成。

3.3 施氮量对小麦籽粒产量和构成三因素的影响

小麦籽粒产量与氮素的营养水平关系密切,适量施氮可显著提高籽粒产量^[29-31]。研究表明,施氮 180 kg · hm⁻² 处理的小麦籽粒产量较 135 kg · hm⁻² 处理增加 13.47%,但与 225 kg · hm⁻² 处理无显著差异^[32];有研究认为,过量施氮处理的小麦产量较适宜施氮处理^[33,34]。本试验结果显示,施氮 210 kg · hm⁻² 处理的小麦千粒重和籽粒产量均显著高于其他处理;小麦穗数随施氮量的增加呈提高趋势,但施氮 210 和 270 kg · hm⁻² 处理间无显著差异;而施氮有助于穗粒数增加,但不同施氮处理间差异不显著。这表明适宜的施氮量有助于促进小麦产量结构因素的协同提升,尤其是千粒重的提高,进而实现增产。这与前人研究结果一致^[35]。

4 结论

在黄淮海地区测墒补灌节水栽培条件下,施氮量 210 kg · hm⁻² 处理通过提升小麦旗叶的光合能力,进而提高籽粒平均灌浆速率和最大灌浆速率,延长籽粒达到最大灌浆速率所需的时间,有利于粒重的增加,并获得最高的籽粒产量,是本试验条件下最优施氮量。

参考文献:

[1]何昕楠,林祥,谷淑波,等.微喷补灌对麦田土壤物理性状及

冬小麦耗水和产量的影响[J].作物学报,2019,45(6):879.

HE X N, LIN X, GU S B, *et al.* Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on soil physical properties, water consumption and grain yield of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(6): 879.

[2]郑雪娇,张永丽,吴复学,等.测墒补灌条件下施氮量对冬小麦耗水特性和水氮利用效率的影响[J].麦类作物学报,2017,37(10):1358.

ZHENG X J, ZHANG Y L, WU F X, *et al.* Effect of nitrogen application on water use consumption characteristics and the water and nitrogen use of winter wheat under supplemental irrigation based on measuring soil moisture [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(10): 1358.

[3]RoXANA S, VICTOR O S, GUSTAVO A S. Benchmarking nitrogen utilisation efficiency in wheat for Mediterranean and non-Mediterranean European regions [J]. *Field Crops Research*, 2019, 241: 107573.

[4]LI J P, ZHANG Z, YAO C S, *et al.* Improving winter wheat grain yield and water-/ nitrogen-use efficiency by optimizing the micro-sprinkling irrigation amount and nitrogen application rate [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(2): 606.

[5]李红星,高飞,任佰朝,等.夏玉米秸秆还田量和施氮量对冬小麦产量和氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(7):1260.

LI H X, GAO F, REN B Z, *et al.* Effects of straw incorporation and nitrogen application rate on winter wheat yield and nitrogen utilization [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7): 1260.

[6]付江鹏,贺正,贾彪,等.滴灌玉米临界氮稀释曲线与氮素营养诊断研究[J].作物学报,2020,46(2):290.

FU J P, HE Z, JIA B, *et al.* Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition diagnosis of maize with drip irrigation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(2): 290.

[7]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.

QU W K, XU X X, ZHAO J K, *et al.* Effect of nitrogen application on photosynthetic physiology, grain-filling characteristics and yield and quality after anthesis of winter wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 327.

[8]巨晓棠,张翀.论合理施氮的原则和指标[J].土壤学报,2021,58(1):1.

JU X T, ZHANG C. The principles and indicators of rational N fertilization [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 1.

[9]徐龙龙,殷文,胡发龙,等.水氮减量对地膜玉米免耕轮作小麦主要光合生理参数的影响[J].作物学报,2022,48(2):437.

XU L L, YIN W, HU F L, *et al.* Effect of water and nitrogen reduction on main photosynthetic physiological parameters of film-mulched maize no-tillage rotation wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2): 437.

- [10] 闫恒辉, 温樱, 王东. 底肥分层条施对冬小麦旗叶衰老和光合特性、籽粒产量和肥料利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(5): 813.
YAN H H, WEN Y, WANG D. Effects of basal fertilization in strips at different soil depths on flag leaf senescence and photosynthetic characteristics, grain yield and fertilizer use efficiency of winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(5): 813.
- [11] 谢迎新, 谢旭东, 白雪莹, 等. 氮肥施用对豫南稻茬小麦群体质量指标及产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(1): 165.
XIE Y X, XIE X D, BAI X Y, *et al.* Effects of nitrogen application on population quality index and grain yield of wheat planted on the paddy field in southern Henan Province [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(1): 165.
- [12] 张松超, 张建芳, 王冀川, 等. 不同种植方式和施氮量对滴灌冬小麦生理特征及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(4): 522.
ZHANG S C, ZHANG J F, WANG J C, *et al.* Effects of different planting patterns and nitrogen applications on physiological characteristics and yield of winter wheat under drip irrigation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(4): 522.
- [13] 周袁慧, 马尚宇, 王艳艳, 等. 花后渍水对小麦旗叶光合和籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(S1): 111.
ZHOU Y H, MA S Y, WANG Y Y, *et al.* Effects of waterlogging after anthesis on flag leaf photosynthesis, grain filling characteristics and yield of wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(S1): 111.
- [14] 王振峰, 王小明, 朱云集, 等. 不同施氮量对冬小麦籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 40.
WANG Z F, WANG X M, ZHU Y J, *et al.* Effects of nitrogen application rate on grain-filling characteristics of winter wheat [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(5): 40.
- [15] SI Z Y, ZAIN M, MEHMOOD F, *et al.* Effects of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: 106002.
- [16] 张振, 于振文, 张永丽, 等. 氮肥基追比例对测墒补灌小麦冠层不同层次光能利用及干物质转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 97.
ZHANG Z, YU Z W, ZHANG Y L, *et al.* Effects of basal/topdressing nitrogen ratio on light interception and dry matter transport at different layers of wheat canopy under supplemental irrigation based on soil moisture [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 97.
- [17] 王磊, 董树亭, 刘鹏, 等. 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 301.
WANG L, DONG S T, LIU P, *et al.* Effects of water and nitrogen interaction on physiological and photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 301.
- [18] ZHANG Y H, XUE Q W, LI J P, *et al.* Dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in wheat as affected by genotype and irrigation [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, 40(16): 2279.
- [19] 王海琪, 王荣荣, 蒋桂英, 等. 施氮量对滴灌春小麦叶片光合生理性状的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(1): 211.
WANG H Q, WANG R R, JIANG G Y, *et al.* Effect of amount of nitrogen fertilizer applied on photosynthetic physiological characteristics of drip irrigated spring wheat leaves [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(1): 211.
- [20] 白芳芳, 李平, 乔冬梅, 等. 地下水埋深和施氮量对冬小麦灌浆及水氮利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(12): 1275.
BAI F F, LI P, QIAO D M, *et al.* Effects of groundwater depth and nitrogen application rate on grain filling and water and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(12): 1275.
- [21] 李莎莎, 马耕, 刘卫星, 等. 大田长期水氮处理对土壤氮素及小麦籽粒淀粉糊化特性的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(7): 1067.
LI S S, MA G, LIU W X, *et al.* Effects of long-term irrigation and nitrogen regimes on soil nitrogen content and paste property of wheat grain [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(7): 1067.
- [22] 吕广德, 王超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2593.
LYU G D, WANG C, JIN X M, *et al.* Effects of water-nitrogen combination on dry matter, nitrogen accumulation and yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2593.
- [23] 朱倩, 孟自力, 倪雪峰, 等. 施氮量对不同筋型小麦光合特性、品质及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(3): 131.
ZHU Q, MENG Z L, NI X F, *et al.* Impacts of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics, quality and yield of wheat with different gluten types [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(3): 131.
- [24] 刘卫星, 王家瑞, 王晨阳, 等. 施氮量对不同土壤肥力条件下冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(5): 604.
LIU W X, WANG J R, WANG C Y, *et al.* Effect of nitrogen application rates on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat under different soil fertility conditions [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(5): 604.
- [25] 贾峥嵘, 郝佳丽, 郝艳芳, 等. 不同施氮量对冬小麦灌浆特性及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(6): 823.
JIA Z R, HAO J L, HAO Y F, *et al.* Effect of different nitrogen application on grain filling characteristics and yield of winter wheat [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(6): 823.

- [26]李彦旬,王荣荣,罗雪梅,等. 减量施氮对滴灌春小麦籽粒灌浆特性和氮代谢酶活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(7):794.
LI Y X, WANG R R, LUO X M, *et al.* Effect of reduced nitrogen application on grain filling characteristics and grain related enzyme metabolism of spring wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(7):794.
- [27]李娜,张保军,张正茂,等. 不同施氮量和播量对‘普冰151’干物质积累特征及籽粒灌浆特性的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(5):693.
LI N, ZHANG B J, ZHANG Z M, *et al.* Effects of different N application rate and seeding rate on dry matter accumulation and grain filling characteristics of ‘Pubing 151’ [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(5):693.
- [28]姚钊,王重阳,崔静. 施氮量对滴灌冬小麦不同穗位籽粒灌浆特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(4):576.
YAO Z, WANG C Y, CUI J. Effect of nitrogen application amount on grain filling characteristics of winter wheat at different panicle positions under drip irrigation [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(4):576.
- [29]QIAO X, XIAO L, GAO Y H, *et al.* Yield and quality of intercropped wheat in jujube-and walnut-based agroforestry systems in southern Xinjiang Province, China [J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(4):2676.
- [30]QIAO X, CHEN D M, LEI J J, *et al.* Apricot-based agroforestry system in southern Xinjiang Province of China: Influence on yield and quality of intercropping wheat [J]. *Agroforestry Systems*, 2020, 94(2):477.
- [31]马瑞琦,王德梅,陶志强,等. 施氮量对北部冬麦区种植弱筋小麦产量与品质的影响[J]. 作物杂志, 2023(1):163.
MA R Q, WANG D M, TAO Z Q, *et al.* Effects of nitrogen application rate on yield and quality of weak gluten wheat in northern winter wheat region [J]. *Crops*, 2023(1):163.
- [32]王壮志,杨蕊,李秀,等. 施氮量对江汉平原中低产田小麦产量及氮素吸收利用的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(1):159.
WANG Z Z, YANG R, LI X, *et al.* Effects of nitrogen application rate on wheat yield and nitrogen absorption and utilization in low-and medium-yield fields in the Jianghan Plain [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(1):159.
- [33]李金鹏,宋文越,姚春生,等. 微喷水肥一体化对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3):1.
LI J P, SONG W Y, YAO C S, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application and micro-sprinkling irrigation integration on grain yield and water use efficiency of winter wheat [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3):1.
- [34]ZHAO C, LIU G M, CHEN Y, *et al.* Excessive nitrogen application leads to lower rice yield and grain quality by inhibiting the grain filling of inferior grains [J]. *Agriculture*, 2022, 12(7):962.
- [35]吴强,张永平,谢岷,等. 节水灌溉模式下施肥量对小麦产量和加工品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3):9.
WU Q, ZHANG Y P, XIE M, *et al.* Effects of fertilization on wheat yield and processing quality under water-saving irrigation mode [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(3):9.