

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

曲文凯, 徐学欣, 赵金科, 刘帅, 郝天佳, 贾靖, 曹志浩, 李柯煜, 赵长星

(山东省旱作农业技术重点实验室, 青岛农业大学农学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 为阐明黄淮海平原滴灌条件下施氮对不同高产冬小麦品种的调控机理, 明确高产高效优质的施氮方式, 以高产品种济麦 22 和烟农 1212 为试材, 于 2018—2020 年 2 年间在大田滴灌条件下设置 0, 150, 210, 270 kg/hm² 4 个施氮水平(济麦 22 用 J0, J1, J2, J3; 烟农 1212 用 Y0, Y1, Y2, Y3), 研究不同施氮量对滴灌冬小麦光合生理特性、籽粒灌浆特性、产量和品质的影响。结果表明: 施氮可显著提高冬小麦上三叶的 SPAD 值, 适量施氮显著提高了灌浆中后期的 SPAD 值和旗叶净光合速率(P_n), 小麦旗叶 SOD 活性呈现单峰曲线的变化规律, 各施氮处理的 SOD 活性均在花后 14 天达到最大值, N0 处理的 SOD 活性在花后 7 天达到最大值, N2 施氮水平下, 2 品种灌浆中后期旗叶 SOD 活性均最高。适量施氮能降低生育后期叶片膜脂过氧化程度, 降低叶片 MDA 含量, 使叶片功能期延长, 从而提高生育后期的光合性能。随着施氮量的提高, 2 个品种的籽粒灌浆速率和最大理论千粒重均先增高后降低, 不施氮处理下的 T_m 较各个施氮处理相对提前, 济麦 22 的最大灌浆速率、最大理论千粒重在 N1 处理下最大, 烟农 1212 则在 N2 处理下最高, 2 个品种的产量均随施氮量的增加而先增加后降低, 且均在 N2 处理处最大, 在 N0, N1 水平下, 济麦 22 的产量高于烟农 1212, 在 N2, N3 水平下济麦 22 的产量低于烟农 1212, 说明烟农 1212 对氮肥较敏感, 在高肥水条件下有更高的产量潜力, 而济麦 22 有较强的氮肥适应性, 在中低肥条件下表现更优。施氮对 2 个品种产量构成因素的调控存在差异, 济麦 22 产量的提高主要依靠穗数、穗粒数, 而烟农 1212 产量的提高则是依靠穗数、穗粒数、千粒重的协同作用。施氮显著提高 2 个品种的蛋白、湿面筋和沉降值, 2 个品种受氮素的调控效应不同, 烟农 1212 的品质在 0~150 kg/hm² 随着施氮量的提高而提高, 而济麦 22 则是在 0~210 kg/hm² 范围内随着施氮量的提高而提高。在试验条件下, 滴灌分次施肥 210 kg/hm² 时, 济麦 22 和烟农 1212 的光合特性、酶活性、灌浆特性、产量和品质均优于其他处理, 是最优施氮量。

关键词: 冬小麦; 滴灌; 施氮量; 调控; 光合生理; 灌浆特性

中图分类号:S512.1; S143.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)05-0327-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.040

Effect of Nitrogen Application on Photosynthetic Physiology, Grain-Filling Characteristics and Yield and Quality After Anthesis of Winter Wheat Under Drip Irrigation

QU Wenkai, XU Xuexin, ZHAO Jinke, LIU Shuai, HAO Tianjia,

JIA Jing, CAO Zhihao, LI Keyu, ZHAO Changxing

(Shandong Provincial Key Laboratory of Dryland Farming Technology,

College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109)

Abstract: In order to study the high-yield, high-efficiency and high-quality nitrogen application rate under drip irrigation in the Huang-Huai-Hai Plain, a field trial was conducted using two high-yield varieties Jimai-22 and Yannong-1212 with 4 nitrogen levels, 0, 150, 210 and 270 kg/hm², under field drip irrigation during 2018—2020. The photosynthetic physiological characteristics, grain filling characteristics and grain yield were studied. The results showed that nitrogen application could significantly increase the SPAD value of the upper three leaves of winter wheat. Appropriate nitrogen application could significantly increase the relative

收稿日期:2022-02-16

资助项目: 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010716); 青岛市现代农业产业技术体系小麦创新推广团队项目(6622316104); 山东省高等学校青创科技支持计划项目(2019KJF013); 青岛农业大学高层次人才基金项目(663/1119022)

第一作者: 曲文凯(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事小麦节水高产栽培生理研究。E-mail: 1901355474@qq.com

通信作者: 赵长星(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事小麦节水高产栽培生理生态研究。E-mail: zhaochangxing@126.com

chlorophyll content and flag leaf net photosynthetic rate (P_n) in the middle and late stages of grain filling. The SOD activity of wheat flag leaves showed a single peak curve. The SOD activity of each nitrogen treatment reached the maximum at 14 days after anthesis, and the SOD activity of N0 treatment reached the maximum at 7 days after anthesis. Under N2 nitrogen level, the flag leaf SOD activity of the two varieties was the highest in the middle and late filling stages. An appropriate rate of nitrogen application could reduce leaf membrane lipid peroxidation in late growth period and leaf MDA content, prolong leaf function period, and improve photosynthetic performance in late growth period. With the increases of nitrogen application rates, the grain filling rate and maximum theoretical 1000-grain weight of the two varieties increased first and then decreased. The T_m of the non-nitrogen treatments was relatively earlier than that of the various nitrogen treatments. For the maximum grain filling rate and maximum theoretical 1000-grain weight, Jimai-22 and Yannong-1212 appeared as the largest under N1 and N2 treatments, respectively. The yields of the two varieties first increased and then decreased with the increases of nitrogen application rates, and both were the largest at N2 treatment. The yield of Jimai-22 was higher than that of Yannong-1212 under N0 and N1 levels, but lower than that of Yannong-1212 under N2 and N3 levels, indicating that Yannong-1212 was more sensitive to nitrogen fertilizer and had a higher yield potential under high fertility and water conditions while Jimai 22 had a strong adaptability with a better performance under the low and medium fertilization. There were differences in the nitrogen responses on the yield components of the two varieties. The yield of Jimai-22 mainly depended on the number of ears and grains per ear, while the yield of Yannong-1212 was of a synergistic effect of the number of ears, grains per ear, and 1 000-grain weight. Nitrogen application significantly increased the protein, wet gluten, and sedimentation value of the two varieties. The quality of Yannong-1212 increased with the increases of nitrogen application in the range of 0~150 kg/hm², while Jimai-22 increased with the increases of nitrogen application in the range of 0~210 kg/hm². In summary, under this experimental conditions, the 210 kg/hm² of nitrogen applied under drip irrigation resulted in better photosynthetic characteristics, enzyme activity, grain filling characteristics, yield and quality of both cultivars and therefore should be the optimal nitrogen application rate.

Keywords: winter wheat; drip irrigation; nitrogen application rate; regulation; photosynthetic physiology; grain filling characteristics

水资源是限制黄淮海地区小麦稳产增产的重要因素^[1],该地区冬小麦农田灌水方式以大水漫灌和肥料撒施为主,加之生产中氮素投入量高,导致水肥流失严重并且污染环境^[2],滴灌作为有效的节水灌溉方式之一,具有节水省肥、提高品质、大幅提高产量的效果^[3]。氮素是作物生长发育所需的大量元素之一,在作物的生长发育中起了至关重要的作用,研究^[4]表明,适量施氮可以提高小麦叶片光合性能,提高抗氧化酶活性,延缓叶片衰老,促进干物质的积累和向籽粒的转运,从而提高产量。叶绿素相对含量(SPAD)是植株光合作用的强弱的体现,一定程度上反映了植株的光合能力。有研究^[5]表明,施氮可提高叶片叶绿素相对含量,从而提高叶片光合能力,过量施氮会加快小麦旗叶叶片后期的衰老和光合能力的衰退,进而降低产量和品质^[6];周苏攻等^[7]研究表明,河南地区较常规施氮减氮25%~30%可显著增强小麦旗叶功

能期的光合性能,在小麦生育后期,抗氧化酶尤其是超氧化物歧化酶(SOD)发挥重要作用,能够清除超氧阴离子自由基,延缓植株叶片衰老^[8],合理施氮能提高抗氧化酶活性^[9],适量施氮可显著提高小麦穗数、穗粒数和产量,施氮对小麦千粒重的影响因品种而异^[10],施氮对籽粒品质有极显著影响;李莎莎等^[11]研究表明,适量施氮可提高小麦产量和籽粒加工品质。前人研究主要是以传统灌溉施肥方式下,施氮对小麦生理特性、产量影响为主,在滴灌和定量灌溉条件下,研究分次施氮下不同施氮量对不同小麦品种产量、光合生理特性的影响鲜见,本试验在定量滴灌条件下,以2个高产小麦品种(济麦22和烟农1212)为试验材料,研究了滴灌分次施氮下不同施氮量对不同冬小麦高产品种光合生理、籽粒灌浆特性、产量和籽粒品质的调控效应,以期阐明黄淮海冬麦区滴灌条件下施氮对不同高产冬小麦品种的调控机理,明确高产高效优质的施氮方式。

1 材料与方法

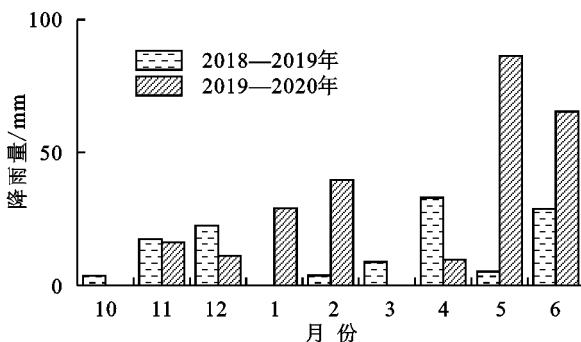
1.1 试验设计

试验于2018年10月至2020月10月在青岛农业大学胶州现代农业示范园($35^{\circ}31'48''N, 119^{\circ}34'48''E$)进行,该地属半湿润季风气候,土壤类型为砂姜黑土。播前玉米秸秆全部还田。播前0—20 cm土层有机质含量为18.11 g/kg,全氮含量0.79 g/kg,碱解氮含量96.2 mg/kg,速效磷含量17.2 mg/kg,速效钾含量142.2 mg/kg。小麦生长季的施氮量设0,150,210,270 kg/hm²4个水平(分别用N0、N1、N2和N3表示),各施氮处理均底施纯氮90 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²和K₂O 90 kg/hm²,N0底施P₂O₅ 90 kg/hm²和K₂O 90 kg/hm²,过磷酸钙作磷肥、硫酸钾作钾肥、尿素作氮肥,每小区12行小麦,行距20 cm,滴灌管铺设“1管3行”。小区面积60 m²,重复3次,分别于小麦拔节、开花和灌浆期进行滴灌追肥,并于每次定量灌溉40 mm(表1)。供试小麦品种为生产上大面积推广应用的济麦22、烟农1212,2年度分别于2018年10月13日和2019年10月13日播种,2019年6月12日和2020年6月16日收获,试验采用裂区设计,品种为主区,施氮量为副区。2018—2019年小麦季全生育期降水量122.7 mm,2019—2020年小麦季全生育期降水量257.1 mm(图1)。

表1 小麦各处理施氮量及施氮时间

单位:kg/hm²

处理编号		氮肥 处理	底施 纯氮	拔节期	开花期	灌浆 中期
济麦22	烟农1212	N0	0	0	0	0
J0	Y0	N1	90	20	20	20
J1	Y1	N2	90	40	40	40
J2	Y2	N3	90	60	60	60



1.2 测定项目

1.2.1 叶绿素相对含量(SPAD) 叶绿素相对含量(SPAD)测定:冬小麦分别于开花期、开花后14天及开花后28天每小区选定代表性植株10株,采用日本美能达公司生产的SPAD-502型叶绿素仪测量小

麦旗叶、倒二叶和倒三叶的叶绿素相对含量。

1.2.2 旗叶光合特性 于开花后第0,7,14,21,28天的上午9:30—11:00,在自然光照下使用LI-6400便携式光合仪(美国LI-COR公司)测定旗叶净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s),每个处理选取有代表性的9株小麦,重复3次。

1.2.3 酶活性 于开花后第0,7,14,21,28天取旗叶鲜样液氮速冻,用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定旗叶中超氧化物歧化酶(SOD)的含量,用硫代巴比妥酸法^[12]测定丙二醛(MDA)含量。

1.2.4 籽粒灌浆速率 于开花后第7天开始取样,每隔7天取样麦穗中部的籽粒。籽粒放在烘箱中105 °C杀青30 min,然后75 °C下烘干至恒重。开花后天数(t)为自变量,籽粒干千粒重(y)为因变量,用Lo-gistic方程 $y=a/(1+b \times e^{-c \times t})$ 拟合籽粒的灌浆过程,得出不同处理下的籽粒灌浆方程。其中a表示最大理论千粒重,通过公式 $V_m=ac/4$ 。 $T_m=\ln b/c$ 计算最大灌浆速率(V_m)、最大灌浆速率(T_m)出现时间。

1.2.5 籽粒特性 成熟期调查穗数、穗粒数、千粒重进行理论测产,每个小区选4.8 m²面积进行脱粒实收测产,选取干净籽粒用德国MATRX-I傅里叶近红外品质分析仪分析籽粒蛋白质、湿面筋、沉降值、吸水率、延展性、容重等品质参数^[13]。

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2010软件对数据进行处理,用Origin2018软件作图,采用DPS软件进行方差分析,多重比较方法采用Duncan法。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理下的冬小麦上三叶SPAD值的变化

从表2可以看出,施氮可显著提高冬小麦上三叶的SPAD值,旗叶和倒二叶的SPAD值高于倒三叶,在花后0~14天,2品种的N1、N2处理上三叶SPAD值显著高于N1、N0处理。花后14~28天,各处理旗叶、倒二叶和倒三叶SPAD值均开始迅速下降,花后28天,烟农1212的旗叶SPAD值高于济麦22。开花后28天,第1年济麦22旗叶、倒二叶和倒三叶SPAD值分别表现为N1、N2>N3>N0,N2、N3>N1>N0,N2、N3>N1>N0的规律;第2年分别为N2>N3、N1>N0,N2、N3>N1>N0,N2>N3>N1>N0的规律。开花后28天,第1年,烟农1212旗叶、倒二叶和倒三叶分别为N2>N3、N1>N0,N2、N3>N1>N0,N2>N3>N1>N0的规律;第2年分别为N2>N3>N1>N0,N2>N3>N1>N0,N2>N3>N1>N0的规律,表明滴灌下小麦灌浆期施肥可延缓生育后期的叶片衰老,提高后期群体光合性能。

表 2 施氮量对小麦旗叶、倒二叶、倒三叶 SPAD 值的影响

年份	处理	花后 0 天			花后 14 天			花后 28 天		
		旗叶	倒二叶	倒三叶	旗叶	倒二叶	倒三叶	旗叶	倒二叶	倒三叶
2019	J0	48.2c	44.7c	35.2c	40.0c	39.3c	31.6c	5.0c	0	0
	J1	58.4b	57.1b	46.3b	58.3b	58.7b	44.3b	48.1a	48.3b	34.9b
	J2	62.3a	60.5a	54.9a	62.6a	62.5a	55.0a	46.9a	52.0a	44.5a
	J3	62.7a	60.9a	54.7a	62.8a	62.2a	53.8a	41.6b	51.7a	41.5a
	Y0	43.9C	40.2C	33.9C	38.8C	28.5C	25.0C	8.0C	2.6C	0
	Y1	53.4B	55.4B	45.1B	56.6B	54.0B	42.8B	44.6B	43.8B	33.4C
	Y2	58.2A	57.2A	53.4A	58.8A	58.0A	53.0A	50.1A	48.5A	39.6A
	Y3	59.2A	58.2A	54.8A	60.9A	58.5A	52.3A	47.4B	46.9A	37.3B
2020	J0	41.0c	40.1c	30.2c	37.2c	38.9c	28.4c	2.3c	3.6c	0
	J1	52.2b	50.2b	40.4b	53.5b	53.5b	38.6b	33.6b	37.4b	27.1c
	J2	58.3a	57.2a	47.3a	57.4a	59.3a	49.4a	40.7a	43.1a	38.4a
	J3	60.6a	58.2a	48.4a	60.3a	61.0a	51.0a	35.2b	41.5a	31.4b
	Y0	41.6C	37.8C	29.5C	36.2C	32.6C	28.4C	0	0	0
	Y1	52.1B	48.5B	37.9B	51.8B	48.2B	35.7B	35.3C	34.4C	25.5C
	Y2	57.8A	57.3A	47.3A	59.2A	58.9A	48.6A	46.6A	43.5A	38.3A
	Y3	58.5A	57.8A	47.3A	60.8A	58.9A	48.5A	41.8B	40.4B	30.9B

注:同一年份同列数据后不同大(小)写字母表示同一品种不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同施氮处理下冬小麦旗叶净光合速率和气孔导度的变化

由图 2、图 3 可知,施氮均显著提高 2 品种的 P_n 和 G_s ,2 年中,花后 0~14 天,济麦 22 的各个施氮处理的旗叶净光合速率显著高于 N0 处理,N2 和 N3 处理的净光合速率高于其他处理,且 N2 和 N3 处理间无显著差异,第 1 年,花后 21 天呈现出 N2、N3>N1>N0 的规律,花后 28 天呈现出 N2、N3>N1>N0 的规律,第 2 年,花后 21 天呈现出 N2、N3>N1>N0 的规律,花后 28 天呈现出 N2>N3>N1>N0 的规律;第 1 年,开花—花后 21 天烟农 1212 的 N2、N3 处理均显著高于 N1、N0 处理(除花后 14 天呈现 N3、N2、N1>N0 规律外),且 N2 和 N3 处理间无显著差异,第 2 年,烟农 1212 旗叶净光合速率的变化在花后 0~21 天的 N2、N3 处理均显著高于 N1、N0 处理(除花后 7 天 N1、N2、N3 之间差异不显著),2 年中,烟农 1212 花后 28 天的净光合速率以 N2 处理为最高,花后 21 天和花后 28 天,烟农 1212 的 N2、N3 处理旗叶净光合速率高于济麦 22,2 年规律基本一致,花后 0~28 天,2 品种 G_s 显著高于 N0 处理,灌浆中后期, N2 处理的 G_s 均高于其他处理。说明 N2 处理较其他处理在小麦生育后期的光合能力较强,有利于籽粒灌浆和产量形成。

2.3 不同施氮处理下冬小麦旗叶超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化

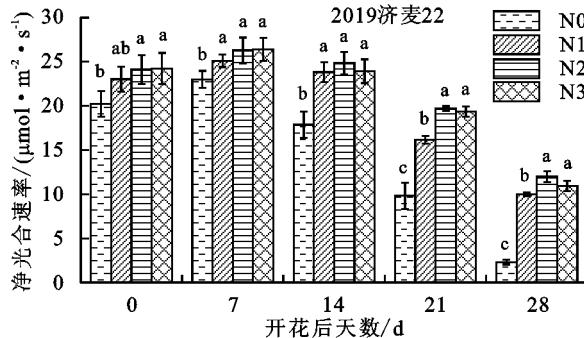
由图 4 可知,小麦旗叶 SOD 活性的变化呈现单峰

曲线的变化规律,施氮对 2 品种 SOD 活性的影响基本一致,2 品种的各个施氮处理 N1、N2、N3 各个处理的 SOD 活性均在花后 14 天达到最大值,不施氮处理 N0 的 SOD 活性均在花后 7 天达到最大值。小麦品种济麦 22 在花后 0~14 天,N2、N3 各个处理的 SOD 活性显著高于 N1、N0 处理,且 N2、N3 处理间差异不显著,2 年规律一致,花后 28 天,第 1 年呈现出 N2、N3、N1>N0 的规律,第 2 年呈现出 N2、N3>N1>N0 的规律,灌浆中后期 N2 处理的 SOD 活性均高于其他处理,表明滴灌分次施肥条件下适量施氮可提高衰老酶活性,延缓叶片衰老。烟农 1212 在花后 0~28 天均呈现出 N2、N3 处理显著高于 N1、N0 处理的规律,2 年规律一致。受第 2 年前期的相对干旱和后期的过多降雨的影响,第 2 年度小麦旗叶 SOD 活性相较第 1 年有所下降,花后 21 天和 28 天, N2 和 N3 处理下,济麦 22 的 SOD 活性高于烟农 1212。

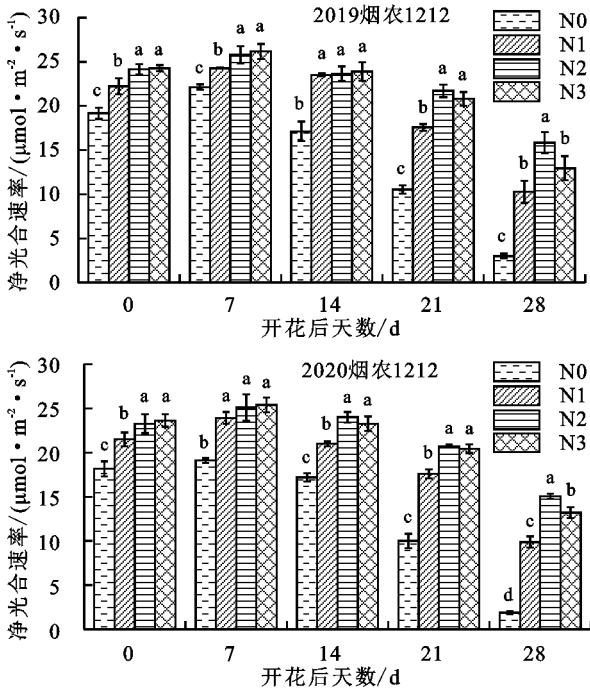
2.4 不同施氮处理下冬小麦旗叶丙二醛(MDA)含量的变化

由图 5 可知,小麦旗叶中 MDA 含量均随旗叶衰老而呈现逐渐增加的趋势(第 1 年花后 0~7 天略有下降),施氮对 2 品种的 MDA 含量影响基本一致。花后 0~14 天,MDA 含量略有上升,花后 14~28 天,MDA 含量上升速度加快,第 1 年,花后 28 天,济麦 22 旗叶 MDA 含量呈现出 N0>N3、N1>N2 的规律,烟农 1212 呈现出 N0>N1>N3>N2 的规律,第 2 年,花后 28 天,济麦 22 旗叶 MDA 含量呈现出 N0>N1、N3、N2 的规律,烟农

1212 呈现出 $N_0 > N_1 > N_3, N_2$ 的规律,结果表明,适量施氮能降低生育后期叶片膜脂过氧化程度,降低叶片



MDA 含量,使叶片功能期延长,从而提高生育后期的光合性能,增加干物质积累量。



注:图柱上方不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达显著水平($p < 0.05$)。下同。

图 2 施氮对小麦旗叶净光合速率的影响

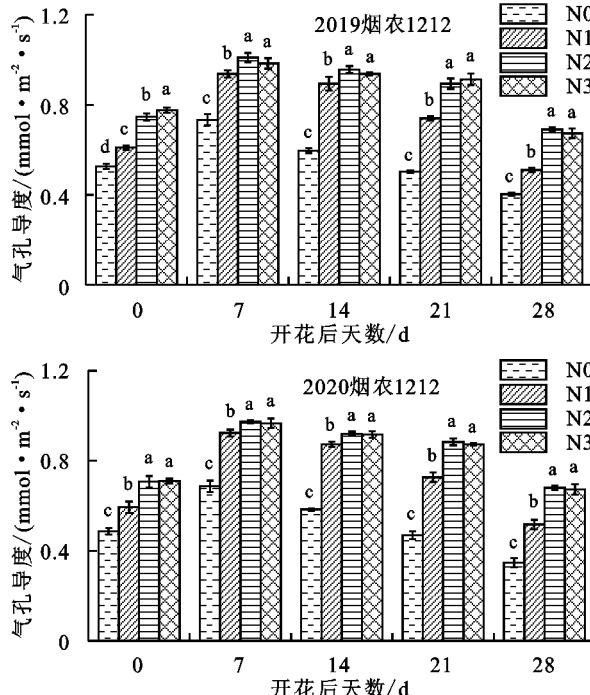
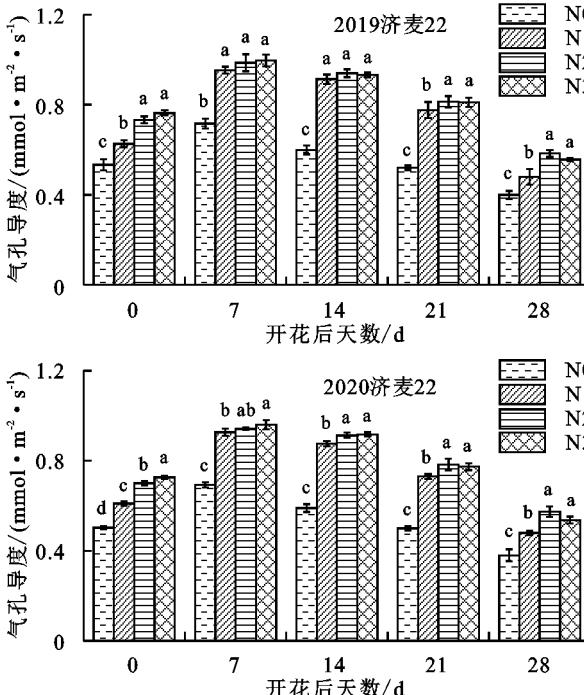


图 3 施氮对小麦旗叶气孔导度的影响

2.5 不同施氮处理下冬小麦籽粒灌浆动态

由表 3 可知,随着施氮量的增加,济麦 22 和烟农 1212 的最大灌浆速率(V_m)均先增高后降低,济麦 22 的 V_m 均在 N1 处理下达到最高值,2 年分别为 2.60, 2.51 g/(1000 grain · d), 烟农 1212 的 V_m 均在 N2 处理下达到最大值,2 年分别为 2.64, 2.70 g/(1000 grain · d)。随着施氮量的提高,2 品种的理论最大千

粒重先增高后降低,但是 2 品种受氮素的调控不同,济麦 22 的最大理论千粒重均在 N1 处理下最高,2 年分别为 49.8, 48.8 g, 而烟农 1212 的最大理论千粒重在 N2 处理下最高,2 年均为 51.7 g。烟农 1212 的最大理论千粒重高于济麦 22。适宜的施氮量有利于小麦籽粒灌浆,但是随着施氮量的持续增加,灌浆过程将受到抑制。

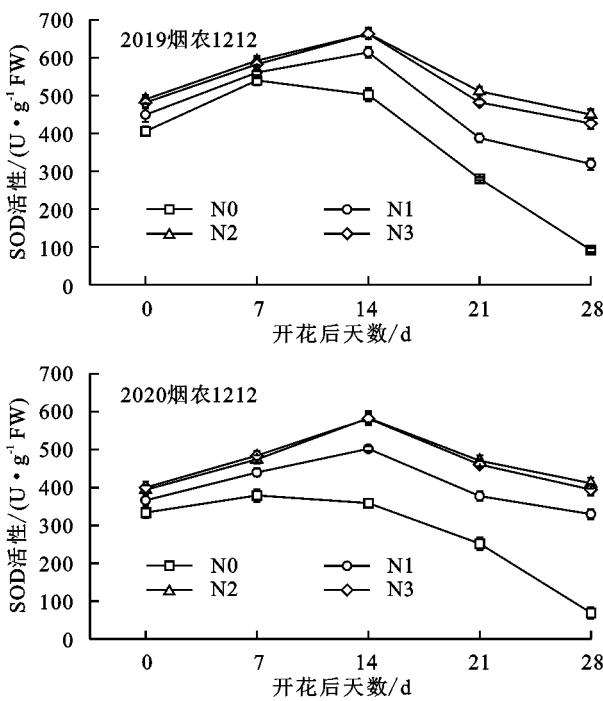
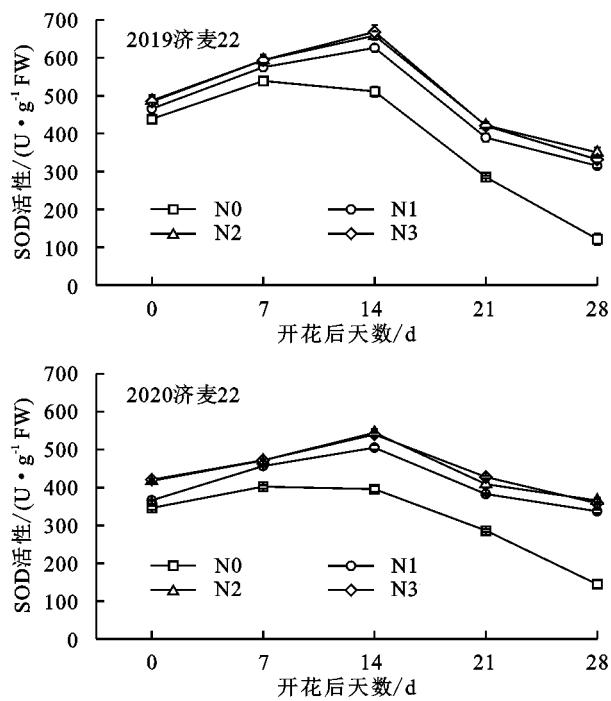


图 4 施氮对小麦旗叶超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

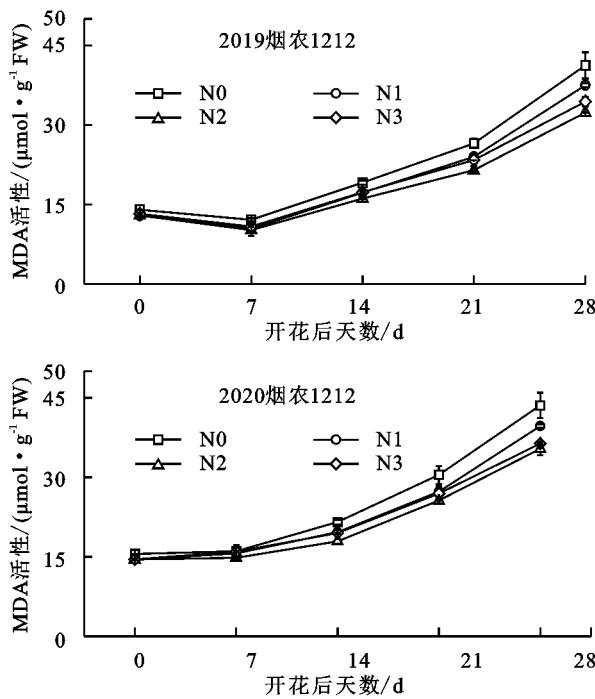
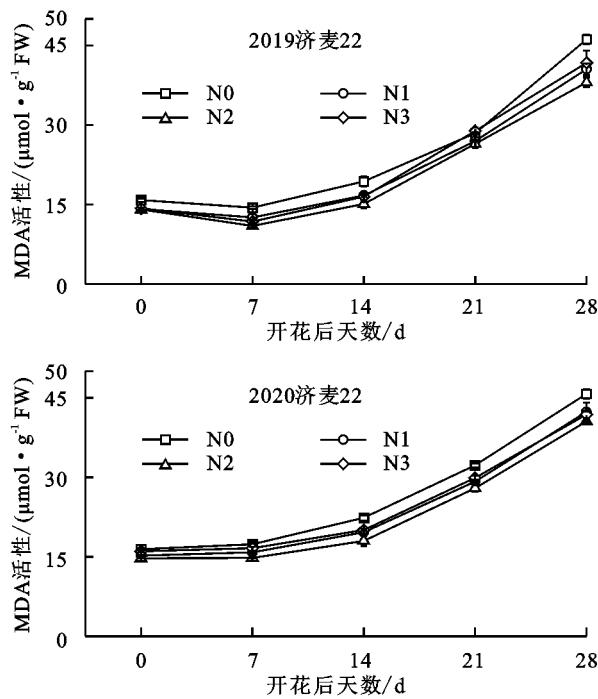


图 5 施氮对小麦旗叶丙二醛含量的影响

2.6 不同施氮处理的冬小麦产量及其构成因素

2 年中,济麦 22 和烟农 1212 的产量均随施氮量的增加而先增加后降低,均在 N2 处理处获得最高产量且显著高于其他各处理,2018—2019 年分别为 9 272.2,9 827.0 kg/hm²,2019—2020 年分别为 8 502.0,8 946.1 kg/hm²(表 4)。2 年中,随施氮量的增加,济麦 22 穗数、穗粒数和产量均呈增加趋势,而千粒重随着施氮的增加呈现降低的趋势,表明其产量的提高主要依靠穗数和穗粒数的提高。2 年中,济麦 22 的产量均表现为 N2>N3>N1>N0;烟农 1212 的产量 2 年中均表现为 N2>

N3>N1>N0,随着施氮量的增加,烟农 1212 的穗数、穗粒数增加,千粒重先增加后降低,表明烟农 1212 产量的提高是穗数、穗粒数和千粒重三者协同作用的结果。由图 6 可知,在 N1 和 N0 施氮水平下烟农 1212 的产量低于济麦 22,而在 N2、N3 施氮水平下其产量高于济麦 22,表明济麦 22 具有较强的氮肥适应性而烟农 1212 在高肥水条件下有更大的高产潜力。

2.7 不同施氮处理的冬小麦籽粒品质

由表 5 可知,施氮显著提高了小麦籽粒品质,济麦 22 的 N1、N2、N3 各处理的籽粒蛋白含量 2 年中

平均较 N0 处理提高 5.1%, 7.3%, 9.5%; 粒湿面筋含量平均较 N0 提高 3.6%, 7.7%, 8.3%; 沉降值平均较 N0 提高 27.0%, 42.4%, 43.9%; 吸水率平均较 N0 提高 3.5%, 7.0%, 6.0%; 延展性平均较 N0 提高 12.1%, 23.6%, 18.7%。烟农 1212 的 N1、N2、N3 各处理的籽粒蛋白含量 2 年中平均较 N0 提高 9.2%, 10.1%, 8.4%; 粒湿面筋含量平均较 N0 提高 16.6%,

17.0%, 12.1%; 沉降值平均较 N0 提高 37.8%, 35.1%, 36.2%; 吸水率平均较 N0 提高 9.4%, 8.1%, 8.4%; 延展性平均较 N0 提高 32.0%, 35.0%, 30.1%; 济麦 22 的籽粒品质在 0~210 kg/hm² 范围内与施氮量呈正相关; 烟农 1212 的品质在 0~150 kg/hm² 范围内与施氮量呈正相关, 随着施氮量的继续提高其籽粒品质不在提升。

表 3 施氮量对冬小麦籽粒灌浆的影响

年份	处理	方程	Vm /	Tm	最大理论 千粒重/g	R ²
			(g · 1000 grain ⁻¹ · d ⁻¹)			
2019	J0	$y = 48.7 / (1 + 39.9e^{-0.207x})$	2.52	17.8	48.7	0.9987**
	J1	$y = 49.8 / (1 + 44.4e^{-0.209x})$	2.60	18.1	49.8	0.9975**
	J2	$y = 47.8 / (1 + 43.2e^{-0.210x})$	2.51	17.9	47.8	0.9987**
	J3	$y = 47.0 / (1 + 42.1e^{-0.205x})$	2.41	18.2	47.0	0.9987**
	Y0	$y = 48.2 / (1 + 36.7e^{-0.206x})$	2.48	17.5	48.2	0.9989**
	Y1	$y = 50.4 / (1 + 38.3e^{-0.206x})$	2.60	17.7	50.4	0.9981**
	Y2	$y = 51.7 / (1 + 37.1e^{-0.204x})$	2.64	17.7	51.7	0.9985**
	Y3	$y = 49.3 / (1 + 35.6e^{-0.203x})$	2.50	17.6	49.3	0.9987**
	J0	$y = 48.5 / (1 + 39.1e^{-0.207x})$	2.51	17.7	48.5	0.9974**
	J1	$y = 48.8 / (1 + 39.2e^{-0.206x})$	2.51	17.8	48.8	0.9976**
2020	J2	$y = 47.1 / (1 + 42.1e^{-0.209x})$	2.46	17.9	47.1	0.9970**
	J3	$y = 44.5 / (1 + 41.4e^{-0.210x})$	2.34	17.7	44.5	0.9976**
	Y0	$y = 47.8 / (1 + 41.8e^{-0.212x})$	2.53	17.6	47.8	0.9972**
	Y1	$y = 49.5 / (1 + 41.7e^{-0.208x})$	2.57	17.9	49.5	0.9996**
	Y2	$y = 51.7 / (1 + 43.8e^{-0.209x})$	2.70	18.1	51.7	0.9971**
	Y3	$y = 49.4 / (1 + 40.7e^{-0.207x})$	2.56	17.9	49.4	0.9998**

注: ** 表示 $p < 0.01$ 。

表 4 施氮量对冬小麦产量及其构成因素的影响

年份	处理	穗数 /	穗粒数	千粒重 /	产量 /
		(10 ⁴ · hm ⁻²)		g	
2019	J0	457.5c	24.6d	51.0a	4788.9d
	J1	628.5b	30.2c	51.1a	8201.1c
	J2	684.0a	32.1a	49.7b	9272.2a
	J3	685.5a	32.3a	48.4c	9084.9b
	Y0	430.0C	22.6C	52.6D	4317.1D
	Y1	610.2B	29.2B	53.9B	8140.5C
	Y2	677.5A	31.5A	54.3A	9827.0A
	Y3	675.7A	31.3A	53.1C	9523.1B
	J0	325.5c	18.5c	51.8a	2622.5d
	J1	615.0b	26.6b	51.6a	7168.0c
2020	J2	675.0a	29.2a	50.9b	8502.0a
	J3	673.5a	29.2a	49.7c	8319.3b
	Y0	259.2C	21.4C	51.1C	2391.4D
	Y1	588.7B	26.8B	52.8B	7020.9C
	Y2	670.4A	29.4A	53.6A	8946.1A
	Y3	660.4A	29.2A	52.7B	8596.0B

3 讨论

3.1 施氮量对滴灌冬小麦叶片 SPAD 值和旗叶光合特性的影响

冬小麦 SPAD 值与籽粒产量和生物学产量有很好的相关性, 旗叶、倒二叶和倒三叶的 SPAD 值可直接反映植株氮营养水平, 与叶片光合能力有着显著正相关关系^[14]。本研究表明, 在滴灌条件下施氮可显著提高冬小麦上三叶的叶片 SPAD 值, 旗叶和倒二叶的 SPAD 值高于倒三叶, 开花后 21, 28 天, 烟农 1212 的旗叶 SPAD 高于济麦 22, N2 处理在生育前期 SPAD 值高, 生育后期仍能维持较高的 SPAD, 表明 N2 施肥处理有效防止了生育前期营养生长过旺, 生育后期急速衰老的现象。光合速率是植株碳代谢能力的体现与产量密切相关^[15], 王志强等^[16]研究表明, 随着生育期的推进, 小麦旗叶净光合速率先增加后降低, 适量施氮可以提高小麦叶片光合性能。

本研究表明, 小麦旗叶净光合速率随生育期的推进呈单峰曲线的规律, 且均在花后 7 天达到最大值,

这与蔡瑞国等^[17]研究一致,滴灌施氮对济麦 22 和烟农 1212 开花后旗叶净光合速率的影响基本一致。施氮均显著提高了 2 个品种的光合速率,开花后 21,28 天,烟农 1212 的 N2、N3 处理旗叶净光合速率高于济

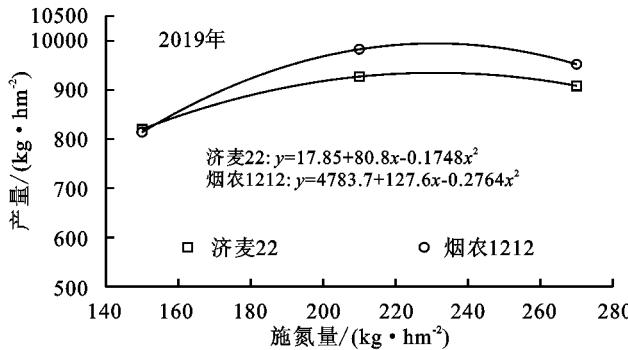
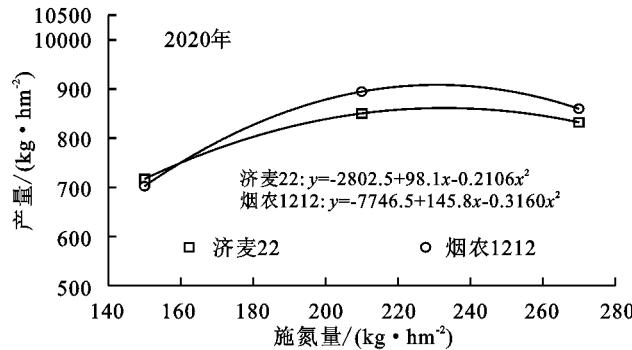


图 6 小麦籽粒产量与施氮量的关系

3.2 施氮量对滴灌冬小麦旗叶衰老特性和籽粒灌浆特性的影响

超氧化物歧化酶是抗衰老的最重要的酶之一,其能够清除叶片中的超氧阴离子自由基 O_2^- ,延长叶片功能期,适量施氮可提高其活性^[18-19]。冯波等^[20]研究表明,施氮显著提高了 SOD 和 CAT 等衰老酶的活性,使叶片中活性氧产生与清除之间达到平衡状态,避免叶片细胞内积累过多过氧化物,在本试验条件下,小麦旗叶 SOD 活性的变化呈现单峰曲线的变化规律,除 N0 不施氮处理是在花后 7 天达到最大值外,其余各施氮处理均在花后 14 天达到最大值,这可能与开花期追肥有关,施氮对 2 品种的超氧化物歧化酶活性影响基本一致,施氮显著提高了各个时期的超氧化物歧化酶活性。曲超等^[21]研究发现,小麦旗叶中 MDA 含量随着叶片生长呈逐渐增加的趋势;张玉霞等^[22]研究表明,施氮过多导致燕麦叶片中 MDA 含量上升加速叶片衰老。本研究发现,小麦旗叶中 MDA 含量均随旗叶衰老而呈现逐渐增加的趋势,开花 14 天后,MDA 含量上升速度加快,适量施氮能降低生育后期叶片膜脂过氧化程度,降低叶片 MDA 含量,延长叶片功能期。李彦旬等^[23]研究表明,随着施氮量的降低,小麦籽粒达到最大灌浆速率的时间(t_m)相对提前,同时 V_m 和粒重积累持续时间(Δt)均增加;赵玉霞等^[24]研究表明,适宜的氮硫配施能增大籽粒灌浆进程和籽粒灌浆速率,增加千粒重。本研究表明,滴灌条件下随着施氮量的增加,济麦 22 和烟农 1212 的最大灌浆速率(V_m)均先增高后降低,济麦 22 的 V_m 均在 N1 处理下达到最高值,烟农 1212 的 V_m 均在 N2 处理下达到最大值。随着施氮量的提高,2 个品种的理论最大千粒重先增高后降低,但是 2 品种受氮素的调控不同,济麦 22 的

麦 22, N2 处理较其他处理在小麦生育后期的光合能力较高,提高了灌浆中后期的叶片光合能力和碳素代谢水平,有利于有机物向籽粒的转运,从而提高产量和品质。



最大理论千粒重均在 N1 处理下最高,而烟农 1212 的最大理论千粒重在 N2 处理下最高,济麦 22 在较低施氮量下相比烟农 1212 其灌浆过程受影响较小,这也是其有较强氮肥适应性的原因,烟农 1212 的最大理论千粒重高于济麦 22。在滴灌条件下,适量的施氮有利于小麦籽粒灌浆,但是随着施氮量的持续增加,灌浆过程将受到抑制,关于氮素对不同品种灌浆过程的调控有待进一步探究。

3.3 施氮量对滴灌冬小麦产量及产量构成因素和籽粒品质的影响

适量施氮可提高小麦的分蘖能力,增加小花数和小穗数,从而协同提高穗数、穗粒数和千粒重^[25-27],前人^[28]研究表明,施氮量 $0 \sim 90 \text{ kg}/\text{hm}^2$,小麦千粒重和穗粒数随着施氮量增加而增加,施氮量超过 $90 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,穗粒数增加不显著,超过 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,千粒重增加不显著,刘卫星等^[29]研究表明,产量由低产到中产水平主要依靠穗数的增加,而由中产到高产水平主要依靠穗粒数的增加。本研究表明,在定量滴灌条件下冬小麦产量均随施氮量的增加而先增加后降低,施氮 $210 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 下产量最高,施氮对产量构成因素的影响因品种而异。济麦 22 穗数、穗粒数随着施氮量的提高呈增加趋势,而千粒重呈现降低的趋势,烟农 1212 的穗数、穗粒数随着施氮量增加而增加,千粒重则先增加后降低,表明烟农 1212 产量的提高是穗数、穗粒数和千粒重三者协同作用的结果。第 2 年,降雨量分布极不均衡,小麦返青期一起身期,起身期—孕穗期几乎没有降雨,而小麦生育后期降雨量极大,前期的相对干旱和后期的过多降雨影响了小麦穗原基的分化,降低了第 2 年小麦穗的小穗数和小花数,导致第 2 年穗粒数整体低于第 1 年,进而影响了

产量。本研究还发现,定量滴灌条件下烟农 1212 对氮肥较为敏感,减少施氮量对烟农 1212 影响更为明显,其在高肥水条件下可获得更高产量而济麦 22 适应能力更强。前人^[30]研究表明,随着施氮量的增加,籽粒品质提高,本研究表明,施氮显著提高了济麦 22

和烟农 1212 的品质;本研究还表明,2 个高产小麦品种的品质指标受氮素调控效应不同,滴灌分次施肥条件下 0~210 kg/hm² 施氮范围内,济麦 22 的品质随着施氮量的提高而提高,0~150 kg/hm² 施氮范围内,烟农 1212 的品质随着施氮量的提高而提高。

表 5 施氮量对冬小麦品质的影响

年份	处理	蛋白/%	湿面筋/%	沉降值/mL	吸水率/%	延展性/mm	容重/(g·L ⁻¹)
2019	J0	12.6b	29.7c	24.8c	59.0b	119.5c	799.0a
	J1	13.8a	31.4b	34.0b	62.5ab	145.8b	814.1a
	J2	14.0a	33.0a	40.1a	65.7a	168.3a	815.7a
	J3	14.3a	33.0a	40.1a	65.0a	154.9b	809.3a
	Y0	10.9B	23.5B	18.8B	47.8B	89.3B	767.7B
	Y1	12.4A	29.9A	31.1A	55.5A	140.2A	812.8A
	Y2	12.6A	30.6A	30.2A	56.2A	148.2A	804.5A
	Y3	12.4A	28.7AB	30.7A	56.6A	140.9A	796.3A
2020	J0	14.3c	32.4b	29.4c	58.0 b	134.7b	805.1a
	J1	14.4bc	32.9b	34.4b	58.6 a	137.7b	808.9a
	J2	14.8ab	33.8a	36.2a	59.5 a	143.3a	804.3a
	J3	15.1a	34.2a	37.1a	59.1 a	145.3a	801.8a
	Y0	12.9B	28.6C	26.3B	52.3B	127.8C	799.6A
	Y1	13.5A	30.3A	29A	53.7A	136.7A	806.0A
	Y2	13.5A	29.7AB	28.8A	51.6B	133.1AB	803.4A
	Y3	13.3A	29.2BC	28.7A	51.5B	130.9BC	800.0A

4 结论

(1) 在本试验滴灌分次施肥条件下,滴灌分次施肥 210 kg/hm² 时,济麦 22 和烟农 1212 的光合特性、酶活性、灌浆特性、产量和品质均优于其他处理,是最优施氮量。

(2) 在本试验滴灌分次施肥条件下,氮素对不同品种小麦的调控存在差异,在 N2、N3 高氮处理下,烟农 1212 的产量潜力得以显现,其生育后期的光合能力和抗衰老酶活性均高于济麦 22,保证了光合产物向籽粒的转运和后期的干物质积累,促进了籽粒的灌浆和千粒重的增加,从而提高了产量,但在 N0、N1 等低氮水平下,烟农 1212 的产量潜力没有得到显现。

(3) 在本试验滴灌分次施肥条件下,随着施氮量的提高,济麦 22 产量的提高主要依靠穗数、穗粒数,而烟农 1212 产量的提高则是依靠穗数、穗粒数和千粒重的协同作用。

(4) 在本试验滴灌分次施肥条件下,济麦 22 和烟农 1212 的籽粒品质受施氮量的调控存在差异,济麦 22 的品质指标在 0~210 kg/hm² 施氮范围内随着施氮量的提高而提高,烟农 1212 的品质指标在 0~150 kg/hm² 施氮范围内随着施氮量的提高而提高。

参考文献:

- [1] 康绍忠,胡笑涛,蔡焕杰,等.现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J].水力学报,2016,35(12):1-7.
- [2] 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):290-299.
- [3] 锤文鹤,师祖姣,王旭敏,等.节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响[J].作物学报,2020,46(6):924-936.
- [4] 巨晓棠,张翀.论合理施氮的原则和指标[J].土壤学报,2021,58(1):1-13.
- [5] 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):437-447.
- [6] 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):813-821.
- [7] 周苏攻,张珂珂,张嫚,等.减氮适墒提高冬小麦旗叶光合潜力和籽粒产量[J].作物学报,2016,42(11):1677-1688.
- [8] 刘志鹏,陈曦,杨梦雅,等.氮量及减灌对冬小麦旗叶生理参数和细胞保护酶活性的影响[J].麦类作物学报,2018,38(2):175-182.
- [9] 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):794-801.
- [10] Liu Y, Han M K, Zhou X N, et al. Optimizing nitrogen fertilizer application under reduced irrigation strategies for winter wheat of the north China plain [J]. Irrigation Science, 2022, 40(2):255-265.
- [11] 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):1067-1076.
- [12] 中国科学院上海植物生理研究所、上海植物生理学会.现代植物生理学实验指南[M].北京:科学出版社,1999:304-315.
- [13] 李静雯,张正英,令利军,等.利用 RNAi 抑制 B-hordein 合成降低大麦籽粒蛋白质含量[J].中国农业科学,2014,47(19):3746-3756.
- [14] 杜盼,张娟娟,郭伟,等.施氮对不同肥力土壤小麦氮营养和产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(2):176-186.
- [15] Ainsworth E A, Davey P A, Long S P. A meta-analysis of elevated CO_2 effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield [J]. Global Change Biology, 2002, 8(8):695-709.
- [16] 王志强,李会,徐心志,等.氮肥水平对限制灌溉下冬小麦旗叶光合性能及产量的影响[J].麦类作物学报,2015,35(6):806-812.
- [17] 蔡瑞国,张敏,戴忠民,等.施氮水平对优质小麦旗叶光合特性和籽粒生长发育的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(1):49-55.
- [18] 李倩,齐凌云,殷俐娜,等.低氮诱导小麦灌浆期旗叶衰老与膜脂的关系[J].作物学报,2018,44(8):1221-1228.
- [19] 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):522-531.
- [20] 冯波,王法宏,刘延忠,等.施氮水平对不同种植模式小
麦旗叶衰老和产量的影响研究[J].中国农学通报,2010,26(8):189-193.
- [21] 曲超,刘俊梅,胡昌录,等.氮肥施用对旱地秸秆覆盖冬小麦旗叶生理特性的影响[J].麦类作物学报,2015,35(2):207-214.
- [22] 张玉霞,朱爱民,郭园,等.追施氮肥对灌浆期沙地饲用燕麦叶片衰老特性的影响[J].华北农学报,2019,34(1):124-130.
- [23] 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):794-801.
- [24] 赵玉霞,李娜,周芳,等.氮硫配施对冬小麦籽粒灌浆特性及产量的影响[J].应用生态学报,2014,25(5):1366-1372.
- [25] Yang L, Liao Y C, Liu W Z. High nitrogen application rate and planting density reduce wheat grain yield by reducing filling rate of inferior grain in middle spikelets [J]. The Crop Journal, 2020, 9(2):412-426.
- [26] 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):522-531.
- [27] 马尚宇,王艳艳,刘雅男,等.播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(3):375-385.
- [28] 叶优良,王桂良,朱云集,等.施氮对高产小麦群体动态、产量和土壤氮素变化的影响[J].应用生态学报,2010,21(2):351-358.
- [29] 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):604-612.
- [30] Zhang Y, Dai X L, Jia D Y, et al. Effects of plant density on grain yield, protein size distribution and bread-making quality of winter wheat grown under two nitrogen fertilisation rates [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 73:1-10.