

网络出版时间:2024-08-20

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20240819.1243.006

施氮量和种植密度对强筋小麦冠层光截获特性和籽粒产量的影响

郝倩倩, 兰会杰, 董文楠, 秦保平, 张敏, 蔡瑞国, 杨晴, 李昊昱, 杨敏

(河北科技师范学院农学与生物科技学院/河北省作物逆境生物学重点实验室, 河北秦皇岛 066600)

摘要:为明确施氮量和种植密度对强筋小麦冠层光截获特性和籽粒产量的影响,以强筋小麦品种中麦578为材料,通过田间试验,设置4个施氮水平(0、180、240和300 kg·hm⁻²,分别用N₀、N₁、N₂和N₃表示)和3个种植密度(3.0×10⁶、4.5×10⁶和6.0×10⁶株·hm⁻²,分别用D₁、D₂和D₃表示),分析了不同处理下强筋小麦光合有效辐射(PAR)截获率和透光率、干物质积累与转运、籽粒产量与品质的差异。结果表明,小麦产量及其构成因素受施氮量的影响较种植密度大,小麦在N₂和N₃条件下能够获得较高的穗数、穗粒数和籽粒产量,其中以N₂D₂处理的产量最高,达到9 957.73 kg·hm⁻²。除N₃外,随着施氮量或种植密度的增加,冠层PAR截获率均逐渐增大,透光率显著下降。施氮量、种植密度和二者交互显著影响强筋小麦干物质积累与转运;在同一施氮条件下,适度增加种植密度可提高花后干物质积累量及其对籽粒产量贡献率,二者均以N₂D₂处理下最大。增施氮肥有利于沉降值和面筋指数的增加,面筋指数在N₂D₂处理下到达最佳。综合考虑强筋小麦冠层光合有效辐射的利用、干物质的积累和转运、籽粒产量和品质,240 kg N·hm⁻²的施氮量和4.5×10⁶株·hm⁻²的种植密度是本试验条件下强筋小麦生产中的最优氮密组合。

关键词:强筋小麦;施氮量;种植密度;冠层光截获;籽粒产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)04-0482-10

Effects of Nitrogen Application Amount and Plant Density on Canopy Light Interception Characteristics and Grain Yield of Strong Gluten Wheat

HAO Qianqian, LAN Huijie, DONG Wennan, QIN Baoping, ZHANG Min,
CAI Ruiguo, YANG Qing, LI Haoyu, YANG Min

(College of Agronomy and Biotechnology, Hebei Normal University of Science and Technology/
Hebei Key Laboratory of Crop Stress Biology, Qinhuangdao, Hebei 066600, China)

Abstract: In order to determine the effects of different nitrogen(N) application amount and plant density on canopy light interception characteristics and grain yield of strong gluten wheat, Zhongmai 578, a strong gluten wheat cultivar, was used as material. Four nitrogen application levels(0, 180, 240, and 300 kg·hm⁻², represented by N₀, N₁, N₂, and N₃, respectively) and three planting densities(3.0×10⁶, 4.5×10⁶ and 6.0×10⁶ plants·hm⁻², represented by D₁, D₂, and D₃, respectively) were set up in the field. The differences of photosynthetic active radiation(PAR) interception rate and penetration rate, dry matter accumulation and transport, grain yield and quality of strong gluten wheat under different treatments were analyzed. The results showed that the yield and its components of wheat were affected more by N application amount than plant density. There weret more spike number, grain number per spike and grain yield under N₂ and N₃ conditions, among which the yield of N₂D₂ treatment was the highest, reaching 9 957.73 kg·hm⁻². Except for N₃ treatment, canopy PAR in-

收稿日期:2024-03-29

修回日期:2024-05-09

基金项目:河北省自然科学基金项目(C2020407038,C2022407015);“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0300402-2)

第一作者 E-mail:15254086112@163.com(郝倩倩)

通讯作者 E-mail:86553117@163.com(杨敏)

terception rate increased gradually and penetration rate decreased significantly with the increase of N application amount or plant density. N application amount, plant density and their interaction significantly affected dry matter accumulation and transport of the strong gluten wheat. Under the same N application conditions, moderately increasing plant density increased dry matter accumulation amount and contribution rate to grain yield after anthesis, which were the highest under N2D2 treatment. The sedimentation and gluten index increased with the increase of nitrogen fertilizer application amount, and gluten index reached the optimum under N2D2 treatment. Synthetically considering the utilization of photosynthetic active radiation, accumulation and transportation of dry matter, grain yield and quality of the strong gluten wheat canopy, N application amount of $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ and plant density of $4.5 \times 10^6 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ were the optimum combination for strong gluten wheat production under this experimental conditions.

Keywords: Strong gluten wheat; Nitrogen application amount; Plant density; Canopy photosynthetic active radiation interception; Grain yield

小麦是保障国家粮食安全和人民生活需求的主要粮食作物之一^[1-2]。遗传因子和栽培管理是调控小麦的群体质量和籽粒产量的主要因素^[3-4]。种植方式^[2, 5]、品种^[6]、肥水^[7]等因素均影响小麦冠层发育和籽粒产量。增施氮肥可有效提高小麦的氮素吸收量和籽粒产量,但过量施肥后增产效果不显著,甚至会出现减产、土壤退化等问题^[8-9]。合理的种植密度有利于小麦群体质量的提高,但种植密度过大会限制植株个体生长发育,最终影响产量^[10]。这说明氮肥施用和种植密度的科学管理对促进小麦生长发育、调控籽粒产量形成具有直接作用^[11],因而分析不同施氮量和种植密度下小麦的生长发育、干物质积累转运和籽粒产量形成的特点,对小麦高产高效栽培具有重要意义。

施氮对小麦干物质生产和籽粒产量的调节作用与其影响小麦光能转化效率有关^[12]。适量施氮可显著提高小麦冠层光合有效辐射截获率,促进干物质向籽粒的分配,有利于高产^[13-14]。种植密度也影响小麦群体光能利用。增加植株密度可增加小麦叶面积指数,有利于光能利用^[15]。冠层光合辐射高效利用是小麦高产的必要条件^[16]。适宜的种植密度不仅可提高冬小麦灌浆期冠层光合有效辐射截获率,还能有效增加花后干物质积累量及其对籽粒产量的贡献率^[17]。然而,当前的小麦生产中为追求高产,过量施氮和过高播种密度比较普遍,导致穗粒数和千粒重降低,影响最终籽粒产量^[10, 14, 18]。施肥量和种植密度对小麦品质也具有显著影响,在一定范围内增加施肥量和种植密度能显著提高沉降值、湿面筋含量等品质指标^[19]。当前,有关施氮量和种植密度对小麦干物

质积累、转运和产量影响的研究较多,但不同地区生态等条件存在差异,小麦高产优质高效生产对施氮量和种植密度的要求不同,因而适宜施氮量和种植密度的确定应该因地制宜。冀东地区属于强筋小麦生产区,虽然有关该地区强筋小麦氮肥和种植密度管理的研究已有报道,但针对施氮量和种植密度对强筋小麦高冠层光截获特性和籽粒产量调节效应尚需更多的试验证据。本试验选用强筋小麦中麦 578 为试验材料,研究施氮量种植密度对强筋小麦的 SPAD 值、群体叶面积指数、冠层光截获特性、干物质积累、籽粒产量及其构成因素和品质的影响,明确其适宜的氮密组合,以期冀东地区强筋小麦合理施氮和适宜种植密度配置提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 10 月—2023 年 6 月在河北科技师范学院农学与生物科技学院农学实验站 ($39^{\circ}44'N$ 、 $119^{\circ}13'E$) 进行,该区属于温带大陆性季风气候。试验地土质为壤土,前茬作物为青贮玉米。播前 0~20 cm 土层土壤全氮含量 $1.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮含量 $115.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $18.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $136.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $15.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。图 1 为本地区试验年度气温与降水情况。

1.2 试验设计

本试验选用强筋小麦品种中麦 578 为材料,采用裂区设计:施氮量为主区,设 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N0)、 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N1)、 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N2)

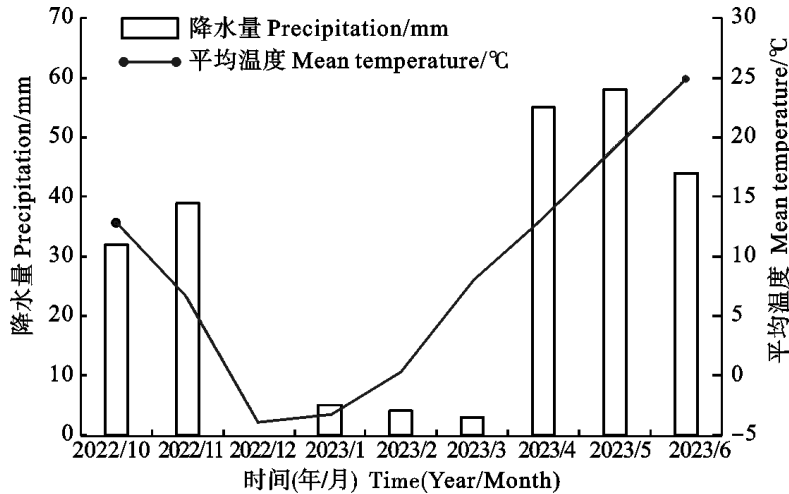


图 1 2022—2023 年小麦生长季的降水量和气温变化

Fig. 1 Precipitation and temperature change in wheat growing season from 2022 to 2023

和 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N3) 4 个水平; 种植密度为副区, 设 $3.0 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (D1)、 $4.5 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (D2) 和 $6.0 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (D3) 3 个水平。氮肥为尿素(含 N 46%), 底肥和拔节肥各占 50%; 磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%), 钾肥为硫酸钾(含 K_2O 50%), P_2O_5 和 K_2O 施用量均为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 全部底施。2022 年 10 月 6 日适墒机械播种, 小区面积 15 m^2 ($6 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$), 行距 15 cm, 重复 3 次。分别在越冬初期、拔节期和开花期灌水, 每次 $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 其余管理方法同一般高产大田。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 小麦叶面积指数的测定

于开花后 0、10、20、30 d, 各小区随机选取 15 株小麦, 参照王一帆等^[5]的方法测定单株叶面积并计算叶面积指数(LAI)。

1.3.2 旗叶 SPAD 值测定

于田间小麦开花后 0、10、20、30 d, 每个小区各选取 10 个单茎, 使用 SPAD-502 PLUS 叶绿素测定仪测定旗叶基部 1/3、1/2 和 2/3 位置的数值, 以其平均值作为该叶片的 SPAD 值。

1.3.3 小麦群体冠层光合有效辐射的测定

于田间小麦开花后 0、10、20、30 d, 采用 AccuPAR LP-80 型冠层分析系统(METER, 美国)分别测定麦穗上方 20 cm 处的光合有效辐射(PAR)、冠层光反射(CR)和群体内部地面以上 10 cm 处的光合有效辐射(TPAR)。计算冠层 PAR 截获率(CaR)和透光率(PeR)^[6, 20]; $\text{CaR} = (\text{PAR} - \text{CR} - \text{TPAR}) / \text{PAR} \times 100\%$; $\text{PeR} =$

$\text{TPAR} / \text{PAR} \times 100\%$ 。

1.3.4 小麦植株干物质积累量的测定及相关指标计算

于小麦开花期与成熟期, 每个小区分别取 50 个单茎, 成熟期植株样品分为秸秆和籽粒两部分。于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min 后, $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒重, 参照陈猛等^[10]的方法计算干物质积累量、转运量、转运效率及对籽粒产量的贡献率。

1.3.5 籽粒产量及其构成因素测定

于田间小麦成熟期, 各小区选取 1 m 双行样段调查有效穗数, 折算为单位面积穗数; 各小区随机连续抓取 20 穗, 调查穗粒数; 收获期各小区收获 1 m 6 行的麦穗, 置于网袋中, 脱粒、晒干后称重(13% 籽粒含水量), 测定千粒重和产量, 重复 3 次。

1.3.6 籽粒品质的测定

使用 JMG-III 型面筋仪测定面粉湿面筋含量(GB/T 23454-2016), Zeleny 法测定小麦面粉沉降值, JMLD 150 型面团拉伸仪测定拉伸参数; 将小麦籽粒磨出全粉后, 用半微量凯氏定氮法测定籽粒含氮量后计算籽粒粗蛋白含量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理和作图, 用 SPSS 26.0 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 施氮量和种植密度对强筋小麦产量及其构成因素的影响

施氮量显著影响强筋小麦的穗数、穗粒数、千粒重和产量, 种植密度显著影响穗数和穗粒数, 氮

密互作效应在穗数、穗粒数和籽粒产量上均显著(表1)。同一种植密度下,籽粒产量、穗数和穗粒数随施氮量的增加呈先升后降或增加趋势,而千粒重变化较小,其中N1、N2和N3的产量较N0分别增加19.56%、33.78%和28.44%。相同施氮量下,D2和D3的穗数均高于D1,穗粒数也表现出相似的规律,籽粒产量在N0、N1和N3条件下随种植密度的增大呈下降趋势,而在N2下呈先升后降的趋势。总体而言,施氮对小麦产量及其构成的影响较种植密度大,在N2和N3条件下小麦的穗数、穗粒数和产量较高,其中N2D2处理产量和穗粒数最高,其产量达到9 957.73 kg·hm⁻²。这表明适宜的施氮量和种植密度可增加中麦578的穗数和穗粒数,有利于强筋小麦籽粒产量的形成和增加。

2.2 施氮量和种植密度对强筋小麦群体叶面积指数动态的影响

随生育进程的推进,中麦578的LAI逐渐降低,花后30 d的LAI显著下降(图2)。在同一种植密度下花后各时期的LAI随施氮量的增加而增加,N2和N3条件下花后LAI处于较高水平,

高于N0和N1,且差异多数达显著水平。从开花期至花后30 d,在同一施氮水平下,小麦LAI随种植密度的增大总体上呈先增后降或增加趋势,以N2D2和N3D2处理总体表现最优。由此可见,通过施氮和种植密度可有效调节小麦花后的LAI,有助于小麦光合产物的生产。

2.3 施氮量和种植密度对强筋小麦旗叶SPAD值的影响

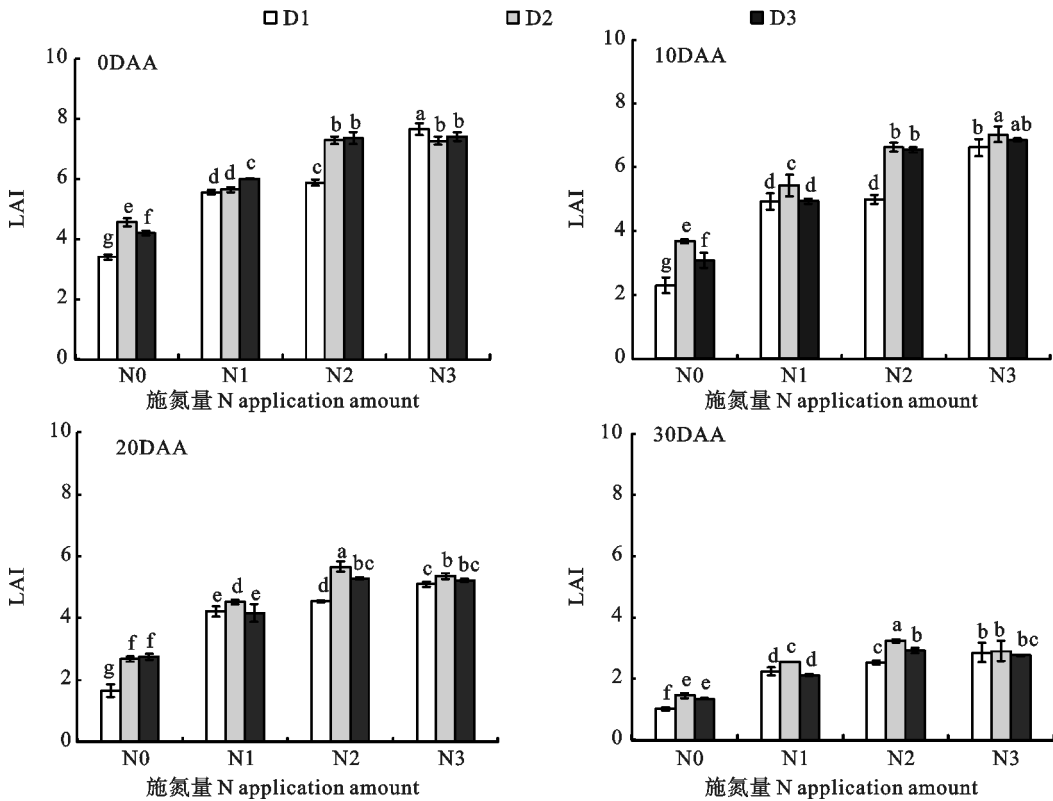
随生育进程的推进,中麦578的旗叶SPAD值逐渐下降(图3)。施氮条件下花后旗叶SPAD值显著高于不施氮。与N0相比,N1、N2和N3的SPAD平均值在开花期分别增加7.49%、8.80%和6.36%,在花后10 d分别增加5.22%、9.89%和7.10%,在花后20 d分别增加5.51%、14.34%和16.43%,在花后30 d分别增加11.93%、16.12%和16.13%。同一施氮条件下,随种植密度的增加,花后各时期旗叶SPAD值整体呈下降趋势。这说明增加种植密度不利于花后旗叶SPAD值的增加,适量施氮有利于维持花后较高的旗叶叶绿素含量,减缓叶片衰老,增强叶片光合能力。

表1 不同施氮量和种植密度处理下强筋小麦产量及其构成因素
Table 1 Grain yield and its components of strong gluten wheat under different N application amount and plant density 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/(kg·hm ⁻²)	
N0	D1	503.33f	30.15f	52.29a	7 184.02f
	D2	536.67e	29.95f	52.18a	7 055.91f
	D3	545.56e	31.35f	52.69a	6 877.30f
N1	D1	677.78d	32.27de	50.75ab	8 306.34de
	D2	723.30c	35.92ab	49.90ab	8 213.68e
	D3	688.89d	33.32cd	49.64ab	8 727.51d
N2	D1	722.22c	33.85bcd	50.97ab	9 035.14bcd
	D2	738.33bc	36.69a	48.87ab	9 957.73a
	D3	786.67a	33.94bcd	46.75b	9 257.58bc
N3	D1	761.67ab	34.37bc	49.45ab	9 390.53b
	D2	772.22a	35.23abc	48.90ab	8 915.09cd
	D3	776.67a	34.98abc	46.50b	8 818.08d
F 值 F value	N	278.11**	31.91**	4.23**	76.82**
	D	9.51**	8.04**	1.65	0.31
	N×D	2.61**	3.04*	0.49	3.22**

同一列数据后不同字母表示处理间在0.05水平差异显著。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。下同。

Values followed by different lowercase letters in same column are significantly different among different treatments at 0.05 level. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. The same in tables 1-3.



0DAA~30DAA: 花后 0~30 d. 各处理误差线上方不同字母表示同一生育期处理间在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

0DAA-30DAA: 0-30 d after anthesis. Different letters above error bars indicate significant difference among treatments at 0.05 level at the same stage. The same in figures 2-5.

图 2 不同施氮量和种植密度处理下强筋小麦叶面积指数 (LAI)

Fig. 2 Leaf area index(LAI) of strong gluten wheat under different N application amount and plant density treatments

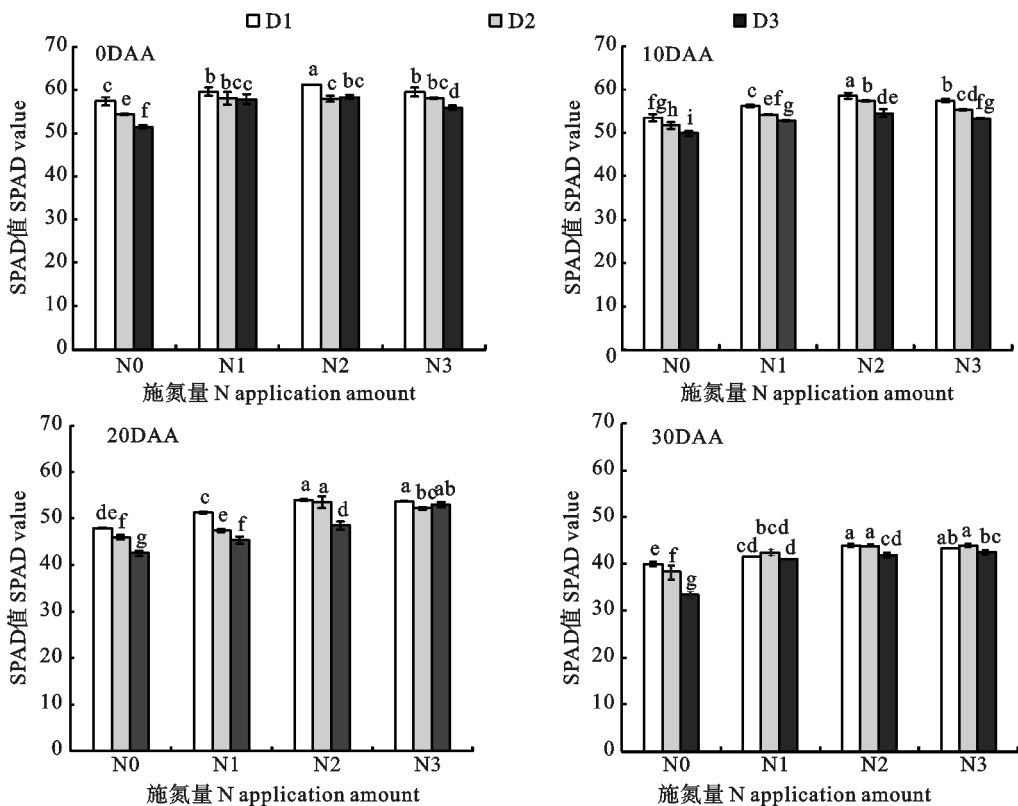


图 3 不同施氮量和种植密度处理下强筋小麦旗叶 SPAD 值

Fig. 3 SPAD value of flag leaves in strong gluten wheat under different N application amount and plant density treatments

2.4 施氮量和种植密度对强筋小麦冠层光截获特性的影响

施氮条件下小麦冠层 PAR 截获率(CaR)均高于不施氮, N2、N3 条件下 CaR 显著高于 N0, N3 和 N2 间差异较小(图 4)。N0 和 N1 条件下, 各时期的 CaR 随种植密度的增加而逐渐提高且处理间差异多数显著, 开花期 D2、D3 处理较 D1 分别增加 1.71%、2.28%、2.57% 和 3.02%。N2 和 N3 条件下, 花后 0 和 10 d 的 CaR 在不同种植密度间差异不显著, 而花后 20 和 30 d 的 CaR 随种植密度的增加总体表现为上升趋势。此外, 随施氮量的增加, 花后小麦冠层 PAR 透光率(PeR)呈明显的下降趋势。在同一施氮水平下, 花后 PeR 随种植密度的增加均呈下降趋势(图 5)。由此看出, 合理的施氮量和种植密度可提高强筋小麦的光截获能力, 促进植株光合作用。

2.5 施氮量和种植密度对强筋小麦干物质积累与转运的影响

小麦花前、花后干物质的平均贡献率分别为 26.69% 和 73.31%, 说明本试验条件下, 花后干物质生产是强筋小麦产量的主要物质来源。施氮

量、种植密度和二者互作均显著影响中麦 578 的干物质积累与转运(表 2)。与不施氮条件相比, 施氮条件下花前干物质转运量、转运效率和对籽粒产量贡献率均下降, 花后干物质积累量及其贡献率均提高。同一施氮量下, 随种植密度的提高, 花前干物质转运量及其贡献率呈下降趋势; 花后干物质的积累量和贡献率在 N0、N1 和 N3 条件下呈升高趋势, 尤其是在 N0 和 N1 下比较明显, 在 N2 条件下, 花后干物质的积累量和贡献率随种植密度的增加呈先高后降趋势; 在所有处理中 N2D2 处理的花后干物质积累量和贡献率均最高。由此可见, 在一定施氮范围内增加种植密度, 有利于花后干物质的积累, 促进小麦高产。

2.6 施氮量和种植密度对强筋小麦籽粒品质的影响

施氮量、种植密度及其二因素互作效应对籽粒蛋白质含量、沉降值、稳定时间和面筋指数均有极显著影响, 湿面筋含量只对施氮量有显著的响应(表 3)。N0D2 处理下籽粒蛋白质含量达到最高, 显著高于其他处理, 其他处理间差异较小, 多数不显著。增施氮肥有助于提高湿面筋含量、面

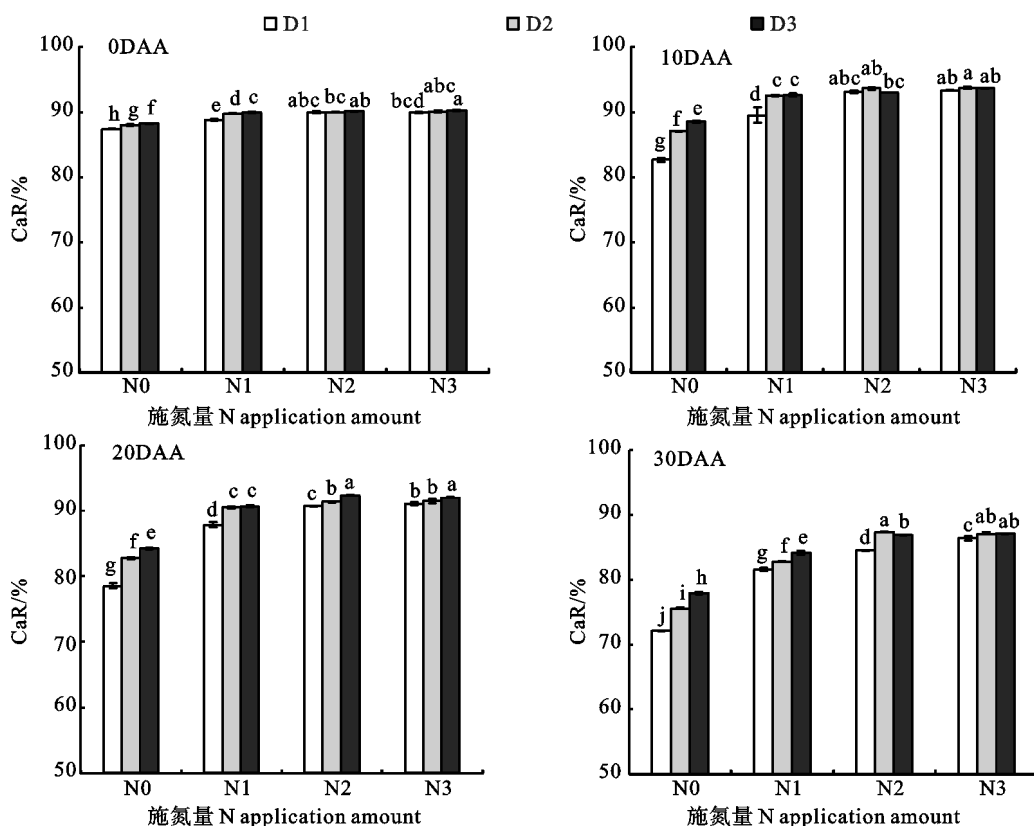


图 4 不同施氮量和种植密度处理下强筋小麦冠层 PAR 截获率 (CaR)

Fig. 4 PAR CaR of strong gluten wheat canopy under different N application amount and plant density treatments

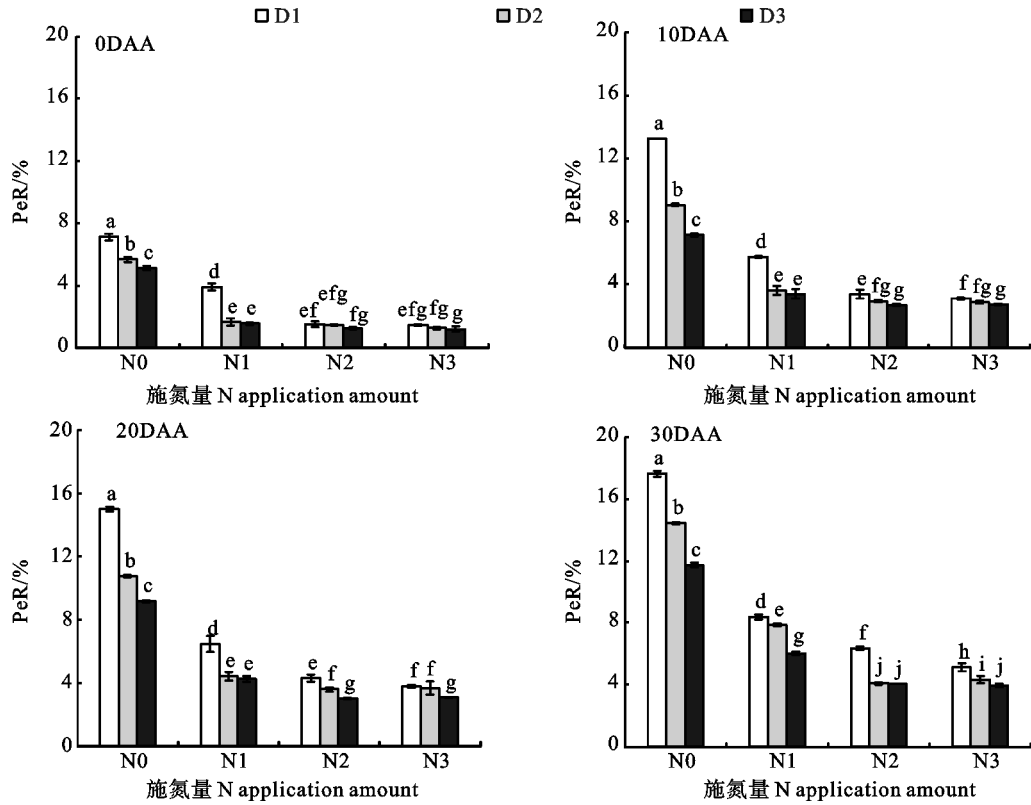


图 5 不同施氮量和种植密度处理下强筋小麦冠层 PAR 透光率 (PeR)

Fig. 5 PAR PeR of strong gluten wheat canopy under different N application amount and plant density treatments

表 2 不同施氮量和种植密度处理下的强筋小麦干物质转运特征

Table 2 Dry matter transport characteristics of strong gluten wheat under different N application amount and plant density treatments

处理 Treatment		花前干物质 Dry matter before anthesis			花后干物质 Dry matter after anthesis	
		转运量 Translocation amount/(kg · hm ⁻²)	转运效率 Translocation rate/%	贡献率 Contribution rate/%	积累量 Accumulation amount/(kg · hm ⁻²)	贡献率 Contribution rate/%
N0	D1	3 119.91a	28.34a	38.02a	5 087.78h	61.98h
	D2	2 899.14b	22.16c	32.63b	5 985.52g	67.37g
	D3	2 700.98c	23.78b	29.19c	6 554.97f	70.81f
N1	D1	2 985.04b	24.40b	28.56c	7 466.07e	71.44f
	D2	2 643.80cd	17.60e	26.14de	7 467.24e	73.86de
	D3	2 553.16de	18.02e	24.39fg	7 919.51d	75.61bc
N2	D1	2 478.96ef	18.42e	23.31g	8 155.77c	76.69b
	D2	2 430.17ef	15.23f	20.55h	9 391.93a	79.45a
	D3	2 355.45f	15.20f	21.69h	8 504.04b	78.31a
N3	D1	2 747.67c	20.85d	26.89d	7 469.76e	73.11e
	D2	2 532.12de	15.40f	24.90ef	7 639.21e	75.10c
	D3	2 542.55de	18.48e	23.98fg	8 057.01cd	76.02bc
F 值 F value	N	59.49 **	385.75 **	329.13 **	732.15 **	329.47 *
	D	43.64 **	314.28 **	97.32 **	102.50 **	97.47 **
	N×D	3.62 **	12.54 **	12.61 **	32.11 **	12.62 **

表 3 不同施氮量和种植密度处理下强筋小麦籽粒品质

Table 3 Grain quality of strong gluten wheat under different N application amount and plant density treatments

处理 Treatment		蛋白质含量 Grain protein content/%	湿面筋含量 Wet gluten/%	沉降值 Sedimentation/mL	稳定时间 Stability time/min	面筋指数 Gluten index/%
N0	D1	14.84cd	35.92de	37.94g	11.20fg	80.90f
	D2	16.74a	36.12de	40.52f	17.80b	86.85de
	D3	15.60b	36.05de	41.19ef	19.10a	85.00e
N1	D1	14.74cd	35.18e	41.58de	12.40e	87.42cd
	D2	15.09bcd	37.72abcd	42.66abc	14.30d	88.44bcd
	D3	14.95bcd	36.50bcde	42.21bcd	15.60c	87.17d
N2	D1	15.07bcd	37.33abcd	42.82ab	12.50e	89.60ab
	D2	15.04bcd	36.30cde	42.98ab	14.50d	91.00a
	D3	15.44bc	37.94abc	42.81ab	12.00ef	88.31bcd
N3	D1	15.40bcd	38.13ab	41.98cde	13.90d	88.66bcd
	D2	14.64d	38.41a	43.30a	10.30h	89.36ab
	D3	15.17bcd	37.07abcd	43.19a	10.60gh	89.18abc
F 值 F value	N	45.50**	5.16**	79.83**	131.29**	42.28**
	D	17.65**	0.65	29.21**	52.64**	12.83**
	N×D	41.35**	2.23	7.24**	91.93**	5.12**

积指数和沉降值,但会降低稳定时间。其中,湿面筋含量和沉降值均以 N3D2 处理表现最佳;面筋指数则在 N2 和 N3 条件下较高,以 N2D2 处理表现最佳。由此可见,适宜的施氮量和种植密度有助于强筋小麦获得较好的品质。

3 讨论

冠层结构是影响小麦冠层对光能吸收利用的重要因素,冠层光截获受 LAI 的影响较大,对小麦籽粒产量的形成具有重要作用^[21]。维持花后较高水平的冠层光截获率、LAI 和叶片 SPAD 值,减缓生育后期小麦植株叶片衰老的速度对小麦灌浆后期光合物质供应、干物质积累和增产具有重要意义^[6,22-23]。本试验中,花后各时期施氮条件下 LAI、旗叶 SPAD 值和 CaR 均显著高于不施氮;同一施氮量下,随种植密度的增加,花后 20 d 与 30 d 的 LAI 和 CaR 总体呈先升后降或增加趋势,花后各时期旗叶 SPAD 值和 PeR 均呈下降趋势,且旗叶 SPAD 值于 N2D1 或 N2D2 处理下达到最大,表明适宜的氮肥和密度组合可维持小麦生育后期较高的 LAI 和旗叶 SPAD 值,有利于群体受光面积的增加,进而提高冠层光截获能力,有助于生育后期强筋小麦光合作用的进行和物质积累与转运^[6,21]。240 kg·hm⁻² 的施氮量和 4.5 × 10⁶ 株·hm⁻² 的密度组合可有效改善强筋小麦冠层结构,提高冠层对光的吸收和利用能力进

而促进干物质积累的增加。研究表明,小麦植株干物质积累与转运对籽粒产量具有重要影响^[13,24]。本研究结果中,施加氮肥可显著提高花后干物质的积累与转运,在 N2D2 处理下花后干物质积累量和对籽粒产量贡献率达到最大值。随种植密度的提高,N0、N1 和 N3 条件下及其花后干物质积累量及其对籽粒产量贡献率均显著增加,而花前干物质转运量则逐渐降低,说明在一定施氮量下,合理提高种植密度虽相对抑制花前干物质的积累,但有利于促进花后干物质积累,最终增加籽粒产量^[25]。

适宜的施氮量主要通过增大穗数和穗粒数来提高小麦产量,过量施氮对小麦增产无益^[13,26-27]。增加施氮量或种植密度均不利于小麦千粒重的提高,合理的氮肥和密度组合有利于小麦籽粒产量形成和提高^[28]。本研究发现,施氮量和种植密度交互显著影响小麦的穗数、穗粒数和籽粒产量,N2 和 N3 条件下小麦的穗数、穗粒数和产量较高,其产量于 N2D2 处理达到最高值,表明适宜的氮肥和密度组合可提高强筋小麦穗数和穗粒数,进而增加籽粒产量^[28]。施用氮肥可改善植株光合性能,协调产量的形成,进而提高籽粒产量和改善品质^[29-30]。适宜的施氮量或种植密度均可有效提高湿面筋含量、沉降值等指标^[31]。本试验中,除 N0D1 处理外,各处理下中麦 578 的籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值和稳定时间均达到小

麦品种品质分类标准(GB/T 17320-2013)中强筋小麦籽粒品质的要求^[32]。增加施氮量或种植密度可提高强筋小麦面筋指数和沉降值,面筋指数在 N2D2 处理下到达最优,表明增加施氮量或种植密度可改善小麦籽粒部分品质,这与他人研究结果不完全一致^[31],可能与环境气候和小麦遗传特性等因素有关。

4 结论

施氮量、种植密度及其互作显著影响强筋小麦花前、花后的干物质积累、穗数、籽粒产量和品质。合理的施氮量和种植密度组合可维持强筋小麦花后较高的旗叶 SPAD 值,调节冠层光截获,减少漏光损失,提高籽粒产量,并改善部分品质指标。在本试验条件下,施氮量 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和种植密度 $4.5 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的组合有助于强筋小麦冠层光合有效辐的利用、花后干物质积累、籽粒产量、沉降值和面筋指数的协同提高,是本区域强筋小麦种植中施氮量和种植密度的最优组合。

参考文献:

- [1] HUSENOV B, ASAAD S, MUMINJANOV H, *et al.* Sustainable wheat production and food security of domestic wheat in Tajikistan: Implications of seed health and protein quality [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(11): 5751.
- [2] 吴 祯, 张保军, 海江波, 等. 不同种植方式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(10): 1377.
WU Z, ZHANG B J, HAI J B, *et al.* Effect of different planting patterns on dry matter accumulation and distribution post-anthesis and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(10): 1377.
- [3] 肖 云, 陈松鹤, 杨洪坤, 等. 优化栽培管理对四川丘陵旱地不同穗型小麦分蘖质量与产量形成的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(11): 2616.
XIAO Y, CHEN S H, YANG H K, *et al.* Effects of optimal management on tillering quality and yield of two spike-type wheat cultivars in hilly dryland of Sichuan [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(11): 2616.
- [4] ZHENG B, JIANG J, WANG L, *et al.* Reducing nitrogen rate and increasing plant density accomplished high yields with satisfied grain quality of soft wheat *via* modifying the free amino acid supply and storage protein gene expression [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(7): 2146.
- [5] 王一帆, 殷文, 胡发龙, 等. 间作小麦光合性能对地上地下互作强度的响应[J]. 作物学报, 2021, 47(5): 929.
WANG Y F, YIN W, HU F L, *et al.* Response of photosynthetic performance of intercropped wheat to interaction intensity between above-and below-ground [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(5): 929.
- [6] 梁 鹏, 石 玉, 赵俊晔, 等. 不同产量潜力小麦品种冠层光截获特性及产量的差异[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(10): 1189.
LIANG P, SHI Y, ZHAO J Y, *et al.* Differences of canopy light interception characteristics and yield in different yield potential wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(10): 1189.
- [7] 刘孝成, 赵广才, 石书兵, 等. 肥水调控对冬小麦产量及籽粒蛋白质组分的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(7): 1404.
LIU X C, ZHAO G C, SHI S B, *et al.* Effects of fertilizer and water regulation on yield and grain protein components of winter wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(7): 1404.
- [8] 李传梁, 于振文, 张 娟, 等. 测墒补灌条件下施氮量对小麦干物质积累转运和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(8): 1039.
LI C L, YU Z W, ZHANG J, *et al.* Effect of nitrogen application rates on dry matter accumulation, transportation and yield of wheat under the conditions of soil moisture measurement and supplementary irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(8): 1039.
- [9] LUO S, YU L, LIU Y, *et al.* Effects of reduced nitrogen input on productivity and N_2O emissions in a sugarcane/soybean intercropping system [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 81: 78.
- [10] 陈 猛, 梁雪齐, 李 玲, 等. 种植密度对匀播冬小麦干物质积累、转运及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(2): 238.
CHEN M, LIANG X Q, LI L, *et al.* Effect of planting density on dry matter accumulation, translocation and grain yield of uniformly sown winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(2): 238.
- [11] 张永强. 氮肥和密度互作对关中灌区小麦产量及氮素利用效率的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
ZHANG Y Q. Effects of density and nitrogen on the grain yield and nitrogen utilization of wheat in Guanzhong irrigation area [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [12] 李 鹏, 贾永红, 张金汕, 等. 氮肥追施比例对匀播冬小麦光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(8): 1015.
LI P, JIA Y H, ZHANG J S, *et al.* Effects of nitrogen top-dressing ratio on photosynthetic traits and yield of winter wheat under uniform sowing [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(8): 1015.
- [13] 史辛凯, 于振文, 赵俊晔, 等. 施氮量对高产小麦光合特性、干物质积累分配与产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(6): 713.
SHI X K, YU Z W, ZHAO J Y, *et al.* Effect of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and distribution and yield of high-yielding winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(6): 713.
- [14] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 等. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1889.
WU X L, LI C S, TANG Y L, *et al.* Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1889.
- [15] DAI Y, FAN J, LIAO Z, *et al.* Supplemental irrigation and modified plant density improved photosynthesis, grain yield and water productivity of winter wheat under ridge-furrow mulching [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 274: 107985.

- [16]TAO Z Q, WANG D M, MA S K, *et al.* Light interception and radiation use efficiency response to tridimensional uniform sowing in winter wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(3):566.
- [17]杨磊. 播量对冬小麦茎秆特性、光合特性及产量品质形成的影响[D]. 太谷:山西农业大学, 2021.
YANG L. Effects of sowing rate on stem characteristics, photosynthetic characteristics, yield and quality formation of winter wheat [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021.
- [18]LIU Y, LIAO Y, LIU W. 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*, 2021, 9(2):412.
- [19]张赵星, 刘芳亮, 张保军, 等. 肥密互作对旱地冬小麦品种普冰 151 旗叶光合特性、产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(8):1069.
ZHANG Z X, LIU F L, ZHANG B J, *et al.* Interactive effects of fertilizer and planting density on photosynthesis characteristics of flag leaf, yield and quality of pubing 151 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(8):1069.
- [20]杨传邦, 于振文, 张永丽, 等. 测墒补灌深度对济麦 22 冠层光截获和荧光特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(2):253.
YANG C B, YU Z W, ZHANG Y L, *et al.* Effect of soil depth with supplemental irrigation on canopy photosynthetically active radiation interception and chlorophyll fluorescence parameters in Jimai 22 [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(2):253.
- [21]黄波, 张妍, 孙建强, 等. 氮密互作对淮北砂姜黑土区冬小麦冠层光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(8):994.
HUANG B, ZHANG Y, SUN J Q, *et al.* Effect of nitrogen and density interaction on canopy photosynthetic characteristics and yield of winter wheat in Huabei lime concretion black soil region [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(8):994.
- [22]刘冲, 贾永红, 张金汕, 等. 播种方式和施磷对冬小麦群体结构、光合特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3):919.
LIU C, JIA Y H, ZHANG J S, *et al.* Effects of seeding pattern and phosphorus application on population structure, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3):919.
- [23]郑雪娇, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对测墒补灌小麦冠层不同层次光截获和干物质分布的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2):531.
ZHENG X J, YU Z W, ZHANG Y L, *et al.* Effects of nitrogen application rate on light interception and dry matter distribution at different layers in wheat canopy under supplemental irrigation based on measuring soil moisture [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(2):531.
- [24]肖治林, 吴昊, 顾汉柱, 等. 不同栽培措施集成对稻茬小麦产量、农艺及光合特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(8):988.
XIAO Z L, WU H, GU H Z, *et al.* Effect of different integrated cultivation modes on yield, agronomic and photosynthetic characteristics of wheat following rice stubble [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(8):988.
- [25]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.
MA S Y, WANG Y Y, LIU Y N, *et al.* Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3):375.
- [26]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 Jiangnan Plain [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(1):159.
- [27]郭瑞, 黄晓高, 温明星, 等. 追氮量和种植密度对春性强筋小麦镇麦 12 号籽粒产量和品质的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(8):1834.
GUO R, HUANG X G, WEN M X, *et al.* Effect of the nitrogen topdressing and plant density on grain yield and quality of spring strong gluten wheat cultivar Zhenmai 12 [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(8):1834.
- [28]傅晓艺, 史占良, 单子龙, 等. 氮肥和密度互作对冬小麦石 4366 群体、茎秆特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(1):81.
FU X Y, SHI Z L, SHAN Z L, *et al.* Effects of nitrogen-density interaction on population, stem characteristics and yield of winter wheat cultivar Shi 4366 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(1):81.
- [29]张文静, 江东国, 黄正来, 等. 氮肥施用对稻茬小麦冠层结构及产量、品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(2):164.
ZHANG W J, JIANG D G, HUANG Z L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application on canopy structure traits, grain yield and quality of wheat after rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(2):164.
- [30]张文霞, 李盼, 殷文, 等. 麦后复种绿肥及配施不同水平氮肥对小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(17):3317.
ZHANG W X, LI P, YIN W, *et al.* Effects of multiple green manure after wheat combined with different levels of nitrogen fertilization on wheat yield, grain quality, and nitrogen utilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(17):3317.
- [31]傅晓艺, 何明琦, 赵彦坤, 等. 长期定位施氮条件下种植密度对冬小麦石 4366 品质和氮肥利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(2):215.
FU X Y, HE M Q, ZHAO Y K, *et al.* Effect of planting density on quality characteristics and nitrogen utilization of winter wheat Shi 4366 under long-term positioning nitrogen application [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(2):215.
- [32]蒋佳丽, 刘丰, 谢凯, 等. 美国硬红冬和硬红春小麦籽粒品质比较及与中国强筋小麦标准对标分析[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(5):594.
JIANG J L, LIU F, XIE K, *et al.* Comparison of grain quality properties between hard red winter and hard red spring wheat from America and benchmarking analysis with strong gluten wheat standards of China [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(5):594.