

氮肥减量后移对小麦籽粒产量及品质的影响

蔡文良¹, 宋孝红², 魏杰³, 刘兴强³, 李琳琳^{4,5}, 刘晓燕^{4,5}, 李中华^{4,5},
王鹏^{4,5}, 崔冲霄^{4,5}, 陈广周⁴, 张宾⁴, 赵凯男⁴, 李升东⁴

(1. 济宁市农业技术推广中心, 山东济宁 272000; 2. 山东省德州市齐河县农副渔业发展中心, 山东德州 251100;
3. 滕州市农业技术推广中心, 山东枣庄 277599; 4. 山东省农业科学院作物研究所, 山东济南 250100;
5. 青岛农业大学农学院, 山东青岛 266109)

摘要:为明确氮肥减量后移对黄淮海平原小麦籽粒产量和品质的调控效应,于2020年10月至2023年6月3个年度在山东省农业科学院济阳基地进行氮肥相关试验,分析了传统农户处理(F_{200} ,基肥 $130\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +返青肥 $70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、施氮模式1(N_1 ,基肥和返青肥各 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、施氮模式2(N_2 ,返青肥 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +抽穗肥 $80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、施氮模式3(N_3 ,基肥 $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +返青肥 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +抽穗肥 $80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)4种氮肥处理对小麦产量及构成要素、植株氮素积累特性、蛋白质及组分含量、一次加工品质以及二次加工品质的影响。结果表明,氮肥减量后移有利于提高小麦籽粒产量及构成要素,其中 N_2 处理表现最佳,其3年平均籽粒产量显著高于 F_{200} 、 N_1 和 N_3 处理,增幅分别为20.5%、13.5%和7.6%。与 F_{200} 和 N_1 处理相比, N_2 和 N_3 处理成熟期植株氮素积累量显著提高,增幅3年平均为12.6%~20.8%; N_2 处理籽粒氮素积累量较 F_{200} 、 N_1 和 N_3 处理显著提高,增幅3年平均分别为16.4%、15.0%和5.8%。与 F_{200} 相比, N_1 处理氮肥用量较低,导致籽粒总蛋白含量、籽粒硬度、容重、出粉率和面团形成时间显著降低,而 N_2 和 N_3 处理由于氮肥后移量增加,显著提高了面团稳定时间、吸水率、湿面筋含量和沉降值。综上所述, N_2 模式施氮量最少,且能达到增产优质的生产目的,是实现黄淮海平原小麦籽粒产量和加工品质协同提升的较优施氮模式。

关键词: 氮肥减量;氮肥后移;小麦;蛋白质含量;加工品质;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)07-0942-10

Effects of Nitrogen Fertilizer Reduction and Postponing on Grain Yield and Quality of Wheat

CAI Wenliang¹, SONG Xiaohong², WEI Jie³, LIU Xingqiang³, LI Linlin^{4,5}, LIU Xiaoyan^{4,5}, LI Zhonghua^{4,5},
WANG Peng^{4,5}, CUI Chongxiao^{4,5}, CHEN Guangzhou⁴, ZHANG Bin⁴, ZHAO Kainan⁴, LI Shengdong⁴

(1. Jining Agro-Tech Extension Center, Jining, Shandong 272000, China; 2. Qihe County Agricultural and Sideline Fishery Development Center, Dezhou, Shandong 251100, China; 3. Tengzhou Agro-Tech Extension Center, Zaozhuang, Shandong 277599, China;
4. Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong 250100, China;
5. College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: To clarify the regulatory effect of nitrogen (N) fertilizer reduction and postponing on the grain yield and quality of wheat in Huang-Huai-Hai Plain, the N fertilizer experiment of wheat was established under four N application treatments: N fertilizer application $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of traditional farmer treatment (F_{200} , basal fertilizer $130\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ + regreening fertilizer $70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), N fertilizer application mode 1 (N_1 , basal fertilizer $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ + regreening fertilizer $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), N fertilizer application mode 2 (N_2 , regreening fertilizer $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ + heading fertilizer $80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

收稿日期:2024-08-16

修回日期:2024-10-13

基金项目:山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2024D01);国家现代农业产业技术体系专项(CARS-03-22)

第一作者 E-mail:cai13963737788@163.com(蔡文良)

通讯作者 E-mail:575611817@qq.com(赵凯男);Lsd01@163.com(李升东)

and N fertilizer application mode 3(N₃, basal fertilizer 40 kg · hm⁻² + regreening fertilizer 60 kg · hm⁻² + heading fertilizer 80 kg · hm⁻²) from October 2020 to June 2023 at Jiyang Experimental station of the Shangdong Academy of Agricultural Sciences in Jinan. The effects of the four N fertilizer treatments on grain yield and its components, N accumulation characteristics, grain protein and its components, and processing quality of wheat were tested. The results indicated that N fertilizer postponing was beneficial to increase grain yield and its components of wheat under the conditions of N reduction, and the best performance was under N₂ treatment; the average yield across the three years under N₂ was significantly increased by 20.5%, 13.5% and 7.6%, respectively, compared with F₂₀₀, N₁ and N₃. Compared with F₂₀₀ and N₁ treatments, N₂ and N₃ treatments significantly increased the plant N accumulation by 12.6%–20.8%, while the grain N accumulation of N₂ treatment was significantly increased by 16.4%, 15.0% and 5.8%, respectively, compared with F₂₀₀, N₁ and N₃ treatments. Compared with F₂₀₀, N₁ treatment significantly reduced grain protein content, grain rigidity, test weight, flour yield and dough development time due to the lower N fertilizer, but postponing increased amount of N fertilizer under N₂ and N₃ treatments significantly increased the dough stability time, water absorption, wet gluten and sedimentation value. Therefore, although N₂ mode had the least of N application, it can achieve the production purpose of increasing yield and quality by increasing the amount of nitrogen fertilizer postponing, which was a better nitrogen application model to achieve the synergistic improvement of wheat grain yield and processing quality in the Huang-Huai-Hai Plain.

Keywords: Nitrogen fertilizer reduction; Nitrogen fertilizer postponing; Wheat; Protein content; Processing quality; Yield

小麦是中国主要的粮食作物,对满足人民生活需求和确保国家粮食安全具有重要意义。随着生活水平的不断提高,人们对小麦营养品质的需求不断增加,迫切需要优化栽培管理措施提高品种的遗传潜力^[1-2]。研究表明,氮肥对小麦籽粒产量和品质具有协同提高效应^[3];适宜的氮肥用量有利于优化小麦群体结构,合理的氮肥后移可以改善籽粒氮素积累特性,提高加工品质,实现产量和品质的协同提升^[4-5]。崔秀珍等^[6]研究表明,在相同氮肥用量下,氮肥分次追施有利于小麦产量和品质的协同提升,且拔节期40%+孕穗期10%处理效果最佳。马瑞琦^[8]等研究表明,在施氮量0~240 kg · hm⁻²范围内,随施氮量增加,籽粒品质显著提高,而籽粒产量在施氮量高于240 kg · hm⁻²后并不会持续增加,甚至会出现显著降低的现象。李春游等^[9]对强筋小麦西农509研究表明,在施氮量240 kg · hm⁻²条件下,氮肥后移可显著提高小麦产量,增幅达到6.6%~15.6%,但显著降低了面团形成时间和湿面筋含量,降幅分别为10.8%~34.5%和3.5%~7.7%。前人围绕氮肥运筹对小麦生产的影响已进行大量研究,但不同研究间结论存在差异。鉴于此,本研究在

山东省农业科学院济阳试验基地连续3年(2020–2023年)进行大田试验,分析氮肥减量后移对小麦籽粒产量、蛋白质含量及加工品质的影响,为优化黄淮海平原麦田施氮制度提供理论依据和技术参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验点位于山东省农业科学院济阳试验场。该区域属于温带大陆性季风气候,年降水量在600~800 mm间,2020–2023年降水分布如图1。试验地势较为平坦,海拔约19.4 m,连续3年播前0~20 cm土层土壤养分含量见表1。

1.2 试验设计

供试小麦品种为济麦44。于2020年10月初至2023年6月中旬,采用单因素随机区组设计,分别设置传统农户处理(F₂₀₀,基肥130 kg · hm⁻²+返青肥70 kg · hm⁻²)、施氮模式1(N₁,基肥和返青肥各90 kg · hm⁻²)、施氮模式2(N₂,返青肥60 kg · hm⁻²+抽穗肥80 kg · hm⁻²)、施氮模式3(N₃,基肥40 kg · hm⁻²+返青肥60 kg · hm⁻²+抽穗肥80 kg · hm⁻²)4种施氮处理(表

2), 小区面积 40 m² (2.5 m × 16 m), 3 次重复。

选用尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和硫酸钾(含 K₂O 50%)为供试肥料。整地时将基肥氮以及全部磷肥(P₂O₅, 90 kg · hm⁻²)、钾肥(K₂O, 60 kg · hm⁻²)均匀撒入各小区内, 采用翻耕和旋耕组合方式将肥料混入耕层中, 其余

氮肥按照设计在相应生育时期随灌水均匀追施。每年于 10 月 10 至 15 日常规条播, 行距为 20 cm, 播量为 187.5 kg · hm⁻², 于次年 6 月 5 至 10 日收获。返青期和抽穗期追肥时灌溉量分别为 900 m³ · hm⁻² (大水漫灌) 和 5.0 m³ · hm⁻² (喷灌)。田间其他管理措施同当地大田。

表 1 连续 3 年播前 0~20 cm 土层土壤养分含量

Table 1 Soil nutrient content in 0–20 cm soil layer before sowing for three years

年度 Year	处理 Treatment	有机质 Organic matter/ (g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g · kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg · kg ⁻¹)	硝态氮积累量 NO ₃ ⁻ -N accumulation/ (kg · hm ⁻²)
2020–2021	基础值 Initial value	10.98	1.15	35.8	110.2	80.6
2021–2022	F ₂₀₀	11.01	1.21	40.1	136.8	190.4
	N ₁	10.77	1.17	37.5	126.5	169.6
	N ₂	10.87	1.20	38.1	131.5	165.1
	N ₃	10.76	1.16	38.9	133.5	162.2
2022–2023	F ₂₀₀	11.25	1.24	41.2	139.4	194.2
	N ₁	11.01	1.18	37.9	130.5	182.1
	N ₂	10.94	1.22	39.1	136.5	173.6
	N ₃	10.90	1.19	39.4	134.1	171.3

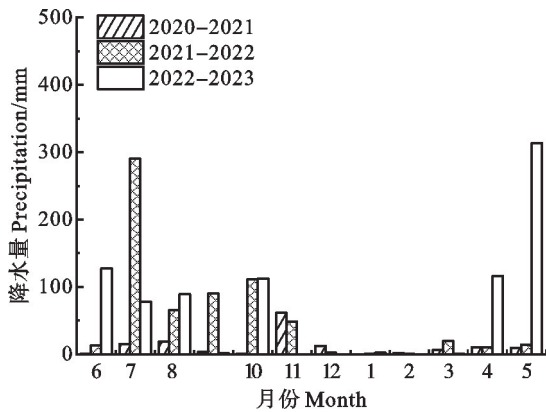


图 1 2020–2023 年降水量

Fig. 1 Precipitation from 2020 to 2023

表 2 小麦施氮量设置

Table 2 N fertilizer regimes of wheat

处理 Treatment	氮肥总量 Total N	基肥 Basal fertilizer	返青期追肥 Regreening fertilizer	抽穗期追肥 Heading fertilizer
F ₂₀₀	200	130	70	0
N ₁	180	90	90	0
N ₂	140	0	60	80
N ₃	180	40	60	80

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及构成因素测定

于小麦 4 叶期, 各小区选择长势均匀的 1 m 双行进行两端插排定苗, 全生育期不进行采样工作, 用以统计有效穗数。于小麦收获季, 每小区选择 3 个具有代表性的 1 m² (1 m × 1 m) 样方, 收获麦穗, 混合后脱粒称重, 并计算籽粒产量; 各小区随机取 50 株小麦测定其穗粒数和千粒重。

1.3.2 氮素相关指标测定和计算

将成熟期植株样品(50 株)分为籽粒、茎+叶+鞘(简称茎鞘)、颖壳+穗轴(简称穗壳), 于烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重。称取 0.500 0 ± 0.000 5 g 粉碎后的样品, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 方式进行消煮, 并采用 AA3 连续流动分析仪测定全氮含量。计算各个器官的氮素积累量(该器官干物质量与其氮含量的乘积), 植株地上部氮素积累量为各器官氮素积累量之和^[10]。

蛋白组分采用连续震荡法提取^[11], 使用凯氏定氮仪测定其含量。计算蛋白质含量(籽粒含氮量 × 5.7)和氮素收获指数(籽粒氮素积累量/植株氮素积累量)。

1.3.3 品质指标测定

籽粒容重: 采用 HGT-1000 型容重器测定。

籽粒硬度:采用 JYDB 100X40 硬度仪测定。

出粉率:采用德国生产的 Brabender 小型实验磨粉机磨粉,过 80 目筛,出粉率=面粉重量/润后籽粒重量 $\times 100\%$ 。

面团流变学特性:用德国 Brabender 公司的 Farinograph-E 粉质仪,参照 AACC56-21 方法测定。

沉降值:用德国 Brabender 公司生产的沉降值测定仪,按照 AACC56-60 Zeleny 沉降值方法测定。

湿面筋含量:采用瑞典波通公司生产的 2200 型面筋专用测定仪测定。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2019 进行统计,使用 Origin 2021 制图,采用 SPSS 23 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥减量后移下小麦产量表现

由表 3 可知,氮肥处理对小麦产量及其构成要素均具有显著影响($P < 0.05$),但不同年度间变化规律存在差异。从产量看,2020—2021 年

度, N_2 与 N_1 和 N_3 处理间差异不显著,但较 F_{200} 处理均显著提高,增幅为 17.8%;2021—2022 年度, N_2 与 N_3 处理间差异不显著,但较 F_{200} 和 N_1 处理均显著提高,增幅分别为 14.7%和 11.6%;2022—2023 年度及 3 年平均, N_2 处理均显著高于 F_{200} 、 N_1 和 N_3 处理,增幅分别为 9.7%~33.1%和 7.6%~20.5%。在穗数上,2020—2021 和 2021—2022 年度各处理变化规律一致,均表现为 N_1 、 N_2 和 N_3 处理间差异不显著, N_2 处理较 F_{200} 处理显著提高,增幅为 10.8%和 9.3%;2022—2023 年度及 3 年平均,各处理变化规律一致,均表现为 N_2 与 N_3 处理间差异不显著, N_2 较 F_{200} 和 N_1 处理分别提高 25.2%、10.6%和 13.6%、5.1%。穗粒数在 3 个年度中变化规律存在较大差异, N_2 处理均最高,3 年平均较 F_{200} 和 N_1 处理均显著提高,增幅分别为 5.5%和 5.0%。千粒重在各年度变化规律较为一致,连续 3 个年度, N_1 、 N_2 和 N_3 处理间差异均不显著,但均高于 F_{200} 处理,3 年平均较 F_{200} 处理显著提高,增幅

表 3 不同处理对小麦产量及构成要素的影响

Table 3 Effects of different treatments on grain yield and its components of wheat

年度 Year	处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	穗数 Spike number/ ($\times 10^4$ ·hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1 000-grain weight/g
2020—2021	F_{200}	8 447b	595.2b	39.1ab	41.9b
	N_1	8 907ab	636.4ab	37.5c	43.9a
	N_2	9 949a	659.7a	40.3a	44.0a
	N_3	9 243ab	641.9ab	38.5bc	43.9a
2021—2022	F_{200}	8 382b	594.2b	40.0a	41.5b
	N_1	8 619b	630.7ab	37.3b	43.1ab
	N_2	9 618a	649.5a	40.1a	43.4a
	N_3	9 074ab	634.8ab	38.6ab	43.5a
2022—2023	F_{200}	5 300c	367.5c	43.1b	31.1b
	N_1	5 934b	416.2b	45.3ab	32.2ab
	N_2	7 056a	460.2a	45.7a	33.6a
	N_3	6 432b	442.2ab	46.9a	31.9ab
3 年平均 3-year average	F_{200}	7 367c	519.0c	40.7b	38.2b
	N_1	7 820b	561.1b	40.0b	39.7a
	N_2	8 874a	589.8a	42.0a	40.3a
	N_3	8 250b	573.0ab	41.3ab	39.8a

同一年度同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters following data in the same column and year indicate significant difference among treatments($P < 0.05$). The same in tables 4—8.

依次为 3.9%、5.5%和 4.2%。

2.2 氮肥减量后移下小麦氮素积累特性

由表 4 可知,氮肥处理对氮素收获指数无显著影响,对植株氮素积累量和籽粒氮素积累量均有显著影响($P < 0.05$)。对植株氮素积累量,连续 3 年 N_2 和 N_3 处理均显著高于 F_{200} 和 N_1 处理,增幅分别为 16.8%~18.0%、10.4%~14.6%、

10.1%~32.2%,3 年平均提高 12.6%~20.8%。籽粒氮素积累量连续 3 年均以 N_2 处理最高,其中 2020—2021 和 2021—2022 年度显著高于 F_{200} 和 N_1 处理,增幅分别为 12.9%~13.3%和 10.8%~13.4%;2022—2023 年度和 3 年平均显著高于 F_{200} 、 N_1 和 N_3 处理,增幅分别为 9.1%~29.5%和 5.8%~16.4%。

表 4 不同处理对小麦氮素积累特性的影响

Table 4 Effects of different treatments on N accumulation characteristics of wheat

年度 Year	处理 Treatment	植株氮素积累量 Plant N accumulation/ (kg · hm ⁻²)	籽粒氮素积累量 Grain N accumulation/ (kg · hm ⁻²)	氮收获指数 N harvest index/%
2020—2021	F_{200}	291.6b	218.9b	75.1a
	N_1	293.1b	219.6b	75.0a
	N_2	344.2a	248.0a	72.1a
	N_3	342.2a	237.1ab	69.3a
2021—2022	F_{200}	268.0b	221.3b	82.7a
	N_1	272.4b	216.2b	79.4a
	N_2	307.2a	245.2a	79.8a
	N_3	300.6a	234.4ab	78.0a
2022—2023	F_{200}	215.2c	145.9c	67.8a
	N_1	247.6b	157.4c	63.6a
	N_2	284.6a	189.0a	66.4a
	N_3	272.6a	173.2b	63.5a
3 年平均 3-year average	F_{200}	258.3b	195.4c	75.6a
	N_1	271.0b	197.7c	72.9a
	N_2	312.0a	227.4a	72.9a
	N_3	305.1a	214.9b	70.4a

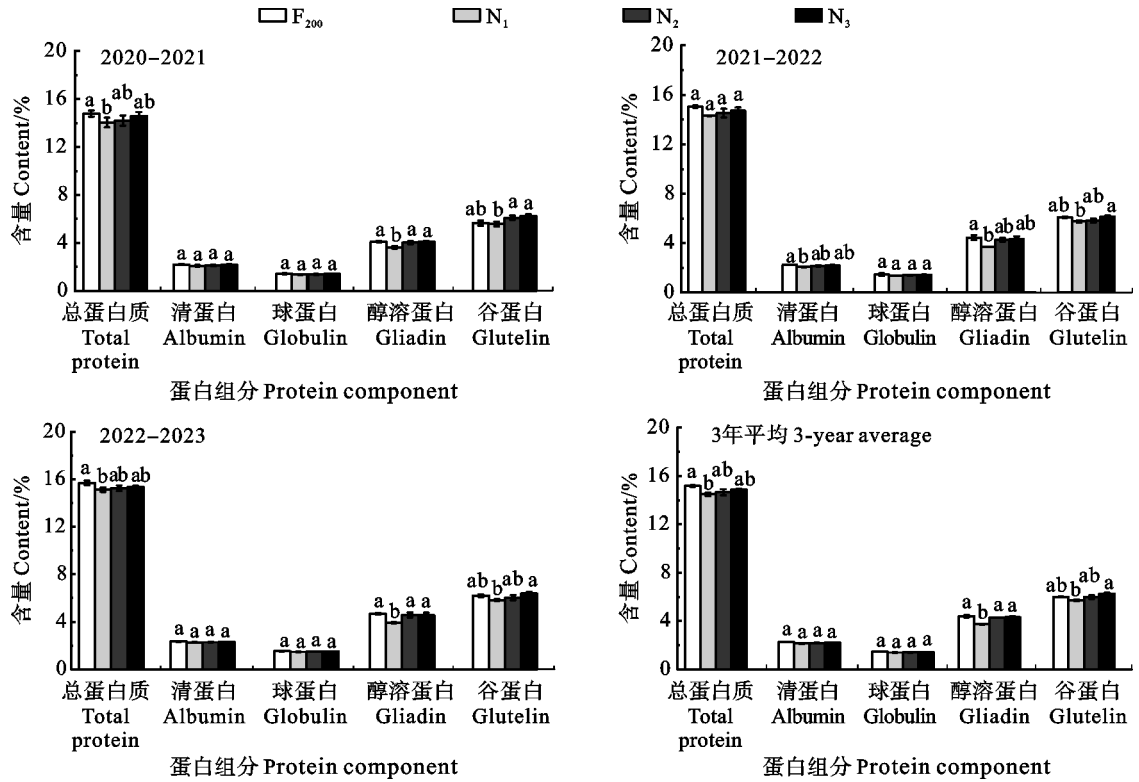
2.3 氮肥减量后移对小麦籽粒总蛋白质及其组分含量的影响

由图 2 可知,氮肥处理对小麦籽粒总蛋白质及其组分含量的影响在不同年度间存在差异。就总蛋白质含量而言,2020—2021、2022—2023 年度以及 3 年平均, F_{200} 、 N_2 和 N_3 处理间差异不显著,但 F_{200} 处理显著高于 N_1 处理($P < 0.05$),增幅分别为 5.3%、3.8%和 4.8%。从蛋白组分看,氮肥处理对小麦籽粒清蛋白和球蛋白含量无显著影响(除 2021—2022 年度清蛋白外),但显著影响醇溶蛋白和谷蛋白含量,其中,2020—2021、2022—2023 及 3 年平均,醇溶蛋白含量在 F_{200} 、 N_2 和 N_3 处理下显著高于 N_1 处理,增幅分别为 10.7%~12.9%、16.4%~19.4%和 14.4%~17.6%;谷蛋白含量在 2020—2021 年度, N_2 和 N_3 较 N_1 处理显著提高,增幅分别为 9.3%和 11.8%,在 2021—2022、2022—2023 年度及 3 年平均, N_3 显著高于 N_1 处理,增幅分别为 6.9%、9.3%和 9.5%。

2.4 氮肥减量后移下小麦一次加工品质特点

由表 5 可知,氮肥处理对小麦籽粒硬度、容重

和出粉率具有显著的调控作用($P < 0.05$)。对籽粒硬度分析可知,2020—2021、2022—2023 及 3 年平均变化规律一致,均表现为 F_{200} 和 N_3 处理显著高于 N_1 处理,增幅分别为 4.2%~6.1%、4.4%~5.5%和 3.7%~4.8%,但三者均与 N_2 处理间差异不显著。籽粒容重在不同年份间变化规律存在差异,其中 2020—2021 年度, N_3 处理显著高于 N_1 和 N_2 处理,增幅分别为 2.1%和 1.2%;2021—2022 年度, N_3 处理显著高于 N_1 处理,增幅为 2.3%;2022—2023 年度, F_{200} 、 N_2 和 N_3 处理均显著高于 N_1 处理,增幅分别为 1.7%、1.2%和 2.1%;3 年平均 N_3 处理显著高于 N_1 和 N_2 处理,增幅 2.1%和 1.1%。籽粒出粉率在 2021—2022 年度以 N_2 和 N_3 处理表现较佳,且 N_3 处理显著高于 F_{200} 和 N_1 处理,增幅分别为 4.2%和 20.0%;2020—2021、2022—2023 及 3 年平均在 F_{200} 、 N_2 、 N_3 处理间差异不显著,但 F_{200} 和 N_3 处理均显著高于 N_1 处理,增幅分别为 14.3%、5.4%、11.5%和 14.2%、5.4%、12.9%。



相同蛋白组分图柱上不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Different lowercase letters above columns of same protein component indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

图 2 不同处理对小麦蛋白质及其组分的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on grain protein and components of wheat

表 5 不同处理对小麦一次加工品质的影响

Table 5 Effects of different treatments on the quality of primary processing of wheat

年度 Year	处理 Treatment	硬度 Rigidity	容重 Test weight/(g · L ⁻¹)	出粉率 Flour yield/%
2020—2021	F ₂₀₀	65.2a	805.5ab	68.6a
	N ₁	62.6b	793.5c	60.0b
	N ₂	64.7ab	800.8bc	66.6a
	N ₃	66.4a	810.0a	68.5a
2021—2022	F ₂₀₀	63.3a	804.0a	67.3b
	N ₁	61.9a	791.3b	58.4c
	N ₂	62.0a	798.0ab	68.5ab
	N ₃	63.5a	809.0a	70.1a
2022—2023	F ₂₀₀	64.0a	801.7a	68.5a
	N ₁	61.3b	788.0b	65.0b
	N ₂	63.7ab	797.8a	67.0ab
	N ₃	64.7a	804.3a	68.5a
3 年平均 3-year average	F ₂₀₀	64.2a	803.7ab	68.1a
	N ₁	61.9b	790.9c	61.1b
	N ₂	63.4ab	798.9b	67.4ab
	N ₃	64.9a	807.8a	69.0a

2.5 氮肥减量后移下小麦二次加工品质

氮肥处理显著影响小麦二次加工品质(表 6)。面团形成时间在 2021—2022、2022—2023 年度及 3 年平均均以 F_{200} 、 N_2 和 N_3 处理表现较好,其中 2022—2023 年度三者均显著高于 N_1 处理,增幅分别为 6.4%、5.8%、6.6%;2021—2022 年度及 3 年平均, N_2 和 N_3 处理显著高于 N_1 处理,增

幅分别为 12.39%、12.3% 和 7.9%、8.9%。面团稳定时间、吸水率、湿面筋含量和沉降值在 2020—2021 和 2021—2022 年度均以 N_2 和 N_3 处理较佳,2022—2023 年度以 F_{200} 、 N_2 和 N_3 处理较佳,3 年平均则 N_2 和 N_3 处理显著高于 F_{200} 和 N_1 处理,增幅分别为 2.9%~3.85%、3.8%~5.7%、7.9%~9.2%、4.9%~6.0%。

表 6 不同处理对小麦二次加工品质的影响

Table 6 Effects of different treatments on the quality of wheat during secondary processing of wheat

年度 Year	处理 Treatment	形成时间 Development time/min	稳定时间 Stability time/min	吸水率 Water absorption/%	湿面筋 Wet gluten/%	沉降值 Sedimentation/mL
2020—2021	F_{200}	5.03a	24.3b	57.4b	32.7b	44.4b
	N_1	4.92a	24.1b	57.1b	34.3b	46.6ab
	N_2	5.17a	24.5ab	59.6a	37.0a	48.5a
	N_3	5.32a	24.8a	60.3a	37.6a	48.8a
2021—2022	F_{200}	5.20ab	24.3b	58.3b	30.3a	46.2c
	N_1	4.87b	24.3b	58.9b	31.3a	46.8bc
	N_2	5.50a	25.3a	61.0a	31.9a	48.8a
	N_3	5.47a	24.9a	60.7a	31.1a	48.6ab
2022—2023	F_{200}	5.29a	23.8ab	59.3b	32.5ab	48.5ab
	N_1	4.97b	23.5b	57.1c	29.3b	46.4b
	N_2	5.26a	24.5ab	61.0ab	34.7a	50.4a
	N_3	5.30a	24.7a	62.2a	34.2a	49.5ab
3 年平均 3-year average	F_{200}	5.17ab	24.1b	58.3b	31.8b	46.4b
	N_1	4.92b	23.9b	57.7b	31.6b	46.6b
	N_2	5.31a	24.8a	60.5a	34.5a	49.2a
	N_3	5.36a	24.8a	61.0a	34.3a	48.9a

3 讨论

3.1 氮肥减量后移对小麦产量及构成要素的影响

科学的氮肥管理是实现小麦高产稳产的重要保障^[11]。氮肥后移可改善产量构成要素,促进小麦增产稳产^[12]。刘永环等^[13]研究表明,增加氮肥后移量有利于优化产量构成要素,进而提高小麦产量;在施氮量相同条件下,基追比(基肥与拔节肥)3:7 较 5:5 使得济麦 20、烟农 17 和藁麦 8901 籽粒产量分别提高 8.1%、5.5% 和 7.1%。石玉等^[14]研究发现,在施氮量 168 和 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下,拔节期追施 2/3 氮可有效均衡全生育期小麦对氮素的需求,较基追比 1:1 处理籽粒产量显著提高(3.1%~3.8%)。赵凯男等^[10]研究认为,无论灌溉与否,与传统施氮量 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相比,氮肥用量减少 25% 后小麦籽粒产量无显著降低,经济效益显著提高。本研究中,与

传统农户处理(F_{200})相比, N_1 和 N_3 处理主要通过提高小麦穗数和千粒重增加籽粒产量, N_2 处理则穗数、穗粒数和千粒重均提高,三者协同提高籽粒产量,说明增加氮肥后移量对小麦增产均具有促进效应。这与李永飞^[15]等报道的“孕穗至灌浆期追施氮量提高至 50%,籽粒产量较追氮 40% 处理提高 6.2%~18.9%”的试验结论相近。也有研究提出,小麦季施氮量为 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,基追比(基肥与拔节肥)6:4 更有利于促进光合产物同化及其向籽粒中的转运^[16]。这可能是由于品种、栽培管理措施、气候条件以及土壤质地等因素不同所致,最终造成相近氮肥用量条件下籽粒产量表现存在差异。本试验条件下, N_2 处理较 F_{200} 和 N_1 氮肥用量降低了 60 和 40 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但其返青期 60 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥用量能够满足小麦分蘖成穗的养分需求^[12],同时抽穗期氮肥用量的增加(80 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),促进了小麦穗部发育,使得穗

粒数和千粒重均得到改善,最终实现籽粒产量显著提高(20.5%和13.5%)。综上,本研究中 N_2 处理下小麦增产的主要原因:第一,本试验连续3年小麦播前0~30 cm土层土壤硝态氮残留量均高于 $80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表1),这与前人研究得出的“小麦播前0~30 cm土层土壤硝态氮残留量高于 $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 即可满足播种至拔节阶段的氮素需求”结论一致^[17],因此 N_2 处理播种时不施氮肥对小麦生育前期并无不利影响;第二,中国小麦氮肥用量通常保持在 $150\sim 225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围^[18],而本试验中小麦季施氮量与传统生产中施氮量的最低水平相近,且 N_2 处理下小麦返青和抽穗期追肥与氮素需求高峰期高度切合,此时追肥(返青期 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和抽穗期 $80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)很大程度上提高了小麦需肥关键期的氮肥供应能力,实现了生育期内养分均衡,促进了分蘖成穗和穗部分化,因此 N_2 处理尽管减少氮肥用量,但也能实现籽粒产量的显著提升;第三,小麦生育期对氮肥的需求量在一定范围内呈现线性关系,当用量超过阈值后籽粒产量和群体质量并不会继续提高,反而出现倒伏、晚熟、土壤氮素高量残留等问题,甚至会抑制磷、钾、硫等高、中量元素的吸收,最终不利于作物增产,这也是本研究中 N_2 处理的产量高于 N_3 处理的重要原因。此外,本试验土壤养分含量较高(见表1),使得 N_2 处理下连续3年均具有较高的籽粒产量。然而,本研究中氮肥用量与常规生产仍存在差异,因此未来研究中应继续进行多年多点田间试验,并增加群体光合生理特性、土壤理化性质等指标的测定与分析,为科学施用氮肥提供理论依据和技术支持。

3.2 氮肥减量后移对小麦氮素积累特性的影响

科学的氮肥调控可以优化小麦氮素吸收能力,改善植株氮素积累特性,增加氮素向籽粒的转运强度,对提高籽粒氮素积累量提供了重要保障^[19]。代新俊等^[16]研究发现,与氮肥100%基肥相比,氮肥追施更有利于地上部氮素的积累,在基肥60%+拔节肥40%条件下增幅可达到99.8%~135.6%。姚春生等^[20]研究表明,基肥30%+拔节70%和基肥50%+拔节50%两种处理下,小麦植株氮素积累量均显著高于基肥70%+拔节30%处理。本研究中,尽管 N_2 处理氮肥用量为 $140\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,但通过增加氮肥后移量提高了施肥时间与植株需氮高峰期的匹配度,提高了小麦对氮素的吸收能力,削弱了氮肥减量造成的

不利影响,提高了氮肥利用效率。尽管4种施氮模式间氮收获指数差异不显著,但 N_2 处理下成熟期植株氮素积累量和籽粒氮素积累量均高于 F_{200} 、 N_1 和 N_3 处理,尤其是籽粒氮素积累量显著提高(5.8%~16.4%),说明 N_2 处理对籽粒氮素积累的促进效应优于其他处理,推测 N_2 处理在保证较高氮素收获指数的条件下,通过提高植株氮素积累量增加籽粒氮素积累量。因此,接下来的研究可以以此为基础逐步探索改善氮素收获指数的具体施氮措施,为进一步提高籽粒中氮素积累提供新路径。

3.3 氮肥减量后移对总蛋白质及其组分的影响

氮肥管理是调控小麦籽粒蛋白质及其组分含量的重要措施。代新俊等^[16]研究表明,氮肥后移有利于提高小麦籽粒总蛋白质、醇溶蛋白和谷蛋白含量,优化谷醇比和淀粉直/支比,有利于改善籽粒品质。刘哲文等^[21]研究发现,与仅拔节期追氮 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,拔节和挑旗期分别追氮30和 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,小麦籽粒总蛋白含量显著提高(7.5%~10.1%)。而郭丹丹等^[22]研究认为,在相同施氮量条件,氮肥底施与拔节期追肥间小麦籽粒蛋白质含量无显著差异。可见,增加氮肥用量可提高小麦籽粒蛋白质含量,但关于氮肥后移对蛋白质及组分的影响结论不统一。本研究中,相较于 F_{200} 处理, N_1 处理氮肥用量降低,导致小麦籽粒总蛋白质含量、醇溶蛋白和谷蛋白含量均有所下降,说明施氮总量对小麦籽粒总蛋白质及其组分含量的效应较大,这是由于小麦开花后氮素向籽粒中转运占总量的70%以上^[23], N_1 处理在返青期进行追肥无法满足植株生育后期对养分需求,导致上述指标均降低。 N_2 和 N_3 处理的施氮量较 F_{200} 分别降低了10%和30%,但小麦抽穗期氮肥施用量增加,使得籽粒需氮高峰期的氮素供应充分,促进了氮素向籽粒的转运,最终表现为总蛋白质及其组分含量与 F_{200} 处理无显著差异。 N_2 处理较传统农户处理籽粒总蛋白质和组分含量没有显著差异,但提高了籽粒产量,这为进一步突破籽粒产量和蛋白质含量的协同提升提供了研究方向。

3.4 氮肥减量后移对小麦加工品质的影响

籽粒加工品质是决定小麦用途的重要前提,优化氮肥管理可改善籽粒加工品质^[1]。路佳慧等^[24]研究发现,与施氮量 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 相比,减氮至 $80\sim 160\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时小麦籽粒含水量、蛋

白质含量、吸水率、湿面筋含量和籽粒产量均有不同程度提高,有利于实现产量和品质协同提升。王银福等^[25]研究表明,与氮肥全部基施相比,氮肥后移使小麦湿面筋含量、吸水率分别提高 0.8% 和 1.9%。也有研究认为,氮肥后移会显著降低小麦稳定时间(10.8%~34.5%)和湿面筋含量(3.5%~7.7%),对籽粒容重、吸水率的影响较小^[9]。可见关于氮肥后移对小麦加工品质的影响还有待深入探讨。本研究结果显示,相较于 F₂₀₀ 处理,相同施(追)氮时期下减少氮肥用量(N₁ 处理)会不同程度降低籽粒硬度、容重、出粉率和面团形成时间,但对面团稳定时间、吸水率、湿面筋含量和沉降值无显著影响,说明 N₁ 处理对小麦一次加工品质的影响更大。继续增加氮肥后移量,即使总氮肥量降低(N₂ 和 N₃ 处理),籽粒硬度、容重、出粉率、面团形成时间均未显著降低,面团稳定时间、吸水率、湿面筋含量和沉降值显著提高。说明氮肥后移能够弥补氮肥减量造成的不利影响,通过适当增加抽穗期氮肥用量能够改善籽粒加工品质,可实现籽粒产量和加工品质的协同提升。这与杨扎根等^[26]“提高追氮比例和追氮量能够增加小麦蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值等品质指标”的研究结果相似。由此说明通过优化施氮制度可改善小麦籽粒加工品质。

4 结论

与传统农户处理相比,返青肥 60 kg · hm⁻² + 抽穗肥 80 kg · hm⁻² 施氮处理(N₂)通过优化小麦穗数、穗粒数和千粒重显著提高了籽粒产量,在保障较高氮素收获指数的前提下,提高了植株氮素积累量并显著增加籽粒氮素积累量;N₂ 处理与传统农户处理间蛋白质含量、籽粒硬度、容重、出粉率、面团形成时间无显著差异,但显著提高了面团稳定时间、吸水率、湿面筋含量和沉降值。研究结果可为丰富黄淮海平原小麦高产优质栽培技术提供理论和技术支撑。

参考文献:

- [1] 付帅,刘晓明,马阳,等. 氮素形态对强筋和中筋小麦产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(1):83.
FU S, LIU X M, MA Y, *et al.* Effects of nitrogen supply forms on the quality and yield of strong and medium gluten wheat cultivars [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(1): 83.
- [2] 黄明,吴金芝,李友军,等. 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J]. 中国农业科学,2021,54(24):5206.
HUANG M, WU J Z, LI Y J, *et al.* Effects of tillage practices and nitrogen fertilizer application rates on grain yield, protein content in winter wheat and soil nitrate residue in dryland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(24): 5206.
- [3] 蔡斌,王敏欣,丁传艳,等. 氮肥调控对强筋小麦籽粒产量和品质形成的影响[J]. 北方农业学报,2022,50(6):57.
CAI B, WANG M X, DING C Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer regulation on grain yield and quality formation of strong gluten wheat [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2022, 50(6): 57.
- [4] 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/Z) 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.
- [5] 吴东明,韩雅楠,马宏亮,等. 氮肥后移对中、弱筋小麦籽粒淀粉合成及其糊化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2023,41(5):186.
WU D M, HAN Y N, MA H L, *et al.* Effects of postponing nitrogen fertilizer application on starch formation of medium and weak gluten wheat grains and its impacts on gelatinization characteristics [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(5): 186.
- [6] 崔秀珍,吴国梁,黄中文. 不同追氮时期追氮量对强筋小麦产量及其性状的影响[J]. 河南职业技术学院学报,2004,32(3):4.
CUI X Z, WU G L, CUI X Z, *et al.* Effect of different nitrogen application and applying stage on the yield and characteristics of gluten wheat [J]. *Journal of Henan Vocation-Technical Teachers College*, 2004, 32(3): 4.
- [7] 董瑞. 叶面喷施氮肥对小麦生理特性、产量及品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015:189.
DONG R. Effects of spraying nitrogen on the growth characteristics, yield and quality of wheat [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015: 189.
- [8] 马瑞琦,常旭虹,刘阿康,等. 减量施氮协同提升强筋小麦产量和品质[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(1):172.
MA R Q, CHANG X H, LIU A K, *et al.* Coordinated improvement of yield and quality of strong gluten wheat by reducing exogenous nitrogen application [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(1): 172.
- [9] 李春游,张睿. 追肥对强筋小麦西农 509 产量及品质的效应[J]. 西安文理学院学报(自然科学版),2018,21(3):96.
LI C Y, ZHANG R. Effects of top-dressing on yield and quality of the wheat Xinong 509 with strong gluten [J]. *Journal of Xi'an University (Natural Science Edition)*, 2018, 21(3): 96.
- [10] 赵凯勇,吴金芝,黄明,等. 返青后补灌与氮肥用量对旱地小麦产量及水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2023,56

- (17):3383.
ZHAO K N, WU J Z, HUANG M, *et al.* Effects of supplemental irrigation after regreening and nitrogen fertilizer application rates on wheat yield, water and nitrogen use efficiency in dryland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(17):3383.
- [11]李俊志,常旭虹,王德梅,等.施氮水平对不同强筋小麦品种产量和品质的影响[J].作物杂志,2023(3):151.
LI J Z, CHANG X J, WANG D M, *et al.* Effects of nitrogen application levels on yield and quality of different strong gluten wheat varieties [J]. *Crops*, 2023(3):151.
- [12]赵凯男,丁豪,刘安康,等.氮肥减量后移改善植株光合特性提高麦-玉周年产量及经济效益[J].中国农业科学,2024,57(5):880.
ZHAO K N, DING H, LIU A K, *et al.* Nitrogen fertilizer reduction and postponing for improving plant photosynthetic physiological characteristics to increase wheat-maize and annual yield and economic return [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(5):880.
- [13]刘永环,贺明荣,王晓英,等.不同氮肥基追比例对高温胁迫下小麦籽粒产量和品质的影响[J].生态学报,2009,29(11):5930.
LIU Y H, HE M R, WANG X Y, *et al.* The effects of topdressing to basal nitrogen ratios on grain yield and quality of winter wheat under heat stresses during grain filling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11):5930.
- [14]石玉,于振文,王东,等.施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响[J].作物学报,2006,32(12):1860.
SHI Y, YU Z W, WANG D, *et al.* Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake, translocation of nitrogen and yield in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(12):1860.
- [15]李永飞,李战魁,张战胜,等.氮肥后移对高温胁迫下春小麦旗叶生理特性和产量的影响[J].中国农业科学,2024,57(8):1462.
LI Y F, LI Z K, ZHANG Z S, *et al.* Effects of postponing nitrogen fertilizer application on flag leaf physiological characteristics and yield of spring wheat under high temperature stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(8):1462.
- [16]代新俊,夏清,杨珍平,等.氮肥后移对强筋小麦氮素积累转运及籽粒产量与品质的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):289.
DAI X J, XIA Q, YANG Z P, *et al.* Effects of postponing nitrogen application on accumulation and transport of nitrogen and yield and quality of grain in strong-gluten wheat [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3):289.
- [17]巨晓棠,刘学军,张福锁.冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J].中国农业科学,2002,35(11):1361.
JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11):1361.
- [18]巨晓棠,谷保静.氮素管理的指标[J].土壤学报,2017,54(2):281.
JU X T, GU B J. Indexes of nitrogen management [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2):281.
- [19]吴光磊,郭立月,崔正勇,等.氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响[J].生态学报,2012,32(16):5128.
WU G L, GUO L Y, CUI Z Y, *et al.* Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16):5128.
- [20]姚春生,卢崇靖,孙婉,等.微喷灌下不同氮肥基追比对冬小麦产量和品质的影响[J].中国农业大学学报,2022,27(10):54.
YAO C S, LU C J, SUN W, *et al.* Effects of different basal and topdressing ratios of nitrogen fertilizer on yield and quality of winter wheat under micro-sprinkling irrigation [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(10):54.
- [21]刘哲文,郭丹丹,常旭虹,等.追氮对弱筋小麦干物质、氮素积累及产量的影响[J].麦类作物学报,2023,43(8):1032.
LIU Z W, GUO D D, CHANG X H, *et al.* Effect of nitrogen topdressing on dry matter, nitrogen accumulation and yield of weak gluten wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(8):1032.
- [22]郭丹丹,刘哲文,常旭虹,等.施氮处理对不同筋型小麦产量和品质的影响[J].作物杂志,2020(6):158.
GUO D D, LIU Z W, CHANG X H, *et al.* Effects of nitrogen application on yield and quality of wheat with different gluten types [J]. *Crops*, 2020(6):158.
- [23]ZHANG G X, LIU S J, DONG Y J, *et al.* A nitrogen fertilizer strategy for simultaneously increasing wheat grain yield and protein content: Mixed application of controlled-release urea and normal urea [J]. *Field Crops Research*, 2022, 27, 108405.
- [24]路佳慧,王爽,李云,等.减量施氮对春小麦不同器官氮肥利用及籽粒品质的影响[J].作物杂志,2024(5):220.
LU J F, WANG S, LI Y, *et al.* Effects of reduced nitrogen application on nitrogen utilization and grain quality in different organs of spring wheat [J]. *Crops*, 2024(5):220.
- [25]王银福,刘宗院,王录科,等.氮肥后移施肥技术对小麦产量品质的影响[J].陕西农业科学,2007(1):25.
WANG F Y, LIU Z Y, WANG L K, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer postponing fertilization technology on yield and quality of wheat [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2007(1):25.
- [26]杨扎根,王姣爱,裴雪霞,等.不同追氮时期对两种筋型小麦产量和品质的影响[J].中国土壤与肥料,2008(3):32.
YANG Z G, WANG J A, PEI X X, *et al.* The effect of N topdressing stage on the yield and quality of genotypes with different gluten content [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(3):32.