

丁永刚, 乔玉强, 刘茗, 等. 缓释肥与尿素配施对小麦产量和品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(4): 676-682.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.04.006

缓释肥与尿素配施对小麦产量和品质的影响

丁永刚^{1,2}, 乔玉强¹, 刘茗², 贾倍倍², 曹承富¹, 陈欢¹, 王冠军², 杜世州¹
(1.安徽省农业科学院作物研究所, 安徽 合肥 230001; 2.颖上县农业绿色发展推进中心, 安徽 颖上 236200)

摘要: 为了探明缓释肥和尿素配施对小麦产量、氮利用效率和面粉品质的影响及其减氮潜力。本研究设置不施氮对照(CK0), 施氮量为 240 kg/hm² (其中 60% 的施氮量采用复合肥基肥, 40% 的施氮量采用尿素作为拔节肥追施) 对照(CK), 以及 5 个缓释肥一次性基施或与尿素配施处理(分别以 M1、M2、M3、M4、M5 表示), 共计 7 个处理, 分析不同处理间小麦产量及其构成、氮肥利用效率、籽粒品质和面团流变学特性的差异。结果表明, 与 CK 相比, M2、M4 处理在减氮 12.5% 的前提下, 籽粒产量分别增加了 687 kg/hm² 和 681 kg/hm², 花前氮素积累量增加 16.30% 和 25.93%。M4 处理氮肥表观利用率和氮肥吸收效率均显著高于其他处理; 籽粒中醇溶蛋白含量、谷蛋白含量、总淀粉含量、直链淀粉含量、支链淀粉含量与 CK 相比显著增加; 面团形成时间、拉伸面积、拉伸阻力和最大拉伸阻力均显著高于其他处理。M5 处理施氮量高于 M4 处理, 小麦产量和籽粒总蛋白含量与 M4 处理相比增幅不显著, 氮肥表观利用率、氮肥吸收效率、面团拉伸特性显著低于 M4 处理。综上, 选择施氮量为 210 kg/hm², 60% 的施氮量采用缓释肥基施, 40% 的施氮量采用尿素作为拔节肥追施可以实现小麦产量、氮利用效率、籽粒品质和面团流变学特性协同提升。

关键词: 缓释肥; 尿素; 小麦; 氮利用效率; 产量; 品质

中图分类号: S512.1; S147.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2025)04-0676-07

Effects of combined application of slow-release fertilizer and urea on yield and quality of wheat

DING Yonggang^{1,2}, QIAO Yuqiang¹, LIU Ming², JIA Beibei², CAO Chengfu¹, CHEN Huan¹,
WANG Guanjun², DU Shizhou¹

(1. Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China; 2. Yingshang Agricultural Green Development Promotion Center, Yingshang 236200, China)

Abstract: To clarify the effects of combined application of slow-release fertilizer and urea on wheat yield, nitrogen use efficiency, and flour quality, as well as their nitrogen reduction potential, this study established seven treatments, including a nitrogen-free control (CK0), a conventional nitrogen application control (CK) with a nitrogen application rate of 240 kg/hm² (60% as compound fertilizer basal dressing + 40% as urea topdressing at jointing stage), and five treatments (M1, M2, M3, M4 and M5) with slow-release fertilizer applied as a single basal dressing or in combination with urea. And the differences in wheat yield and its components, nitrogen fertilizer use efficiency, grain quality, and dough rheological properties among different treatments were analyzed. The results showed that compared with CK, the grain yield of M2 and

收稿日期: 2024-04-12

基金项目: 安徽省农业科学院青年英才计划项目(QNYC-201908、QNYC-202217); 国家自然科学基金项目(32301447); 国家重点研究计划项目(2023YFD1900204); 安徽省农业科学院农业科技创新人才体系建设项目(XXBS-202302); 安徽省稻茬小麦绿色高产协作攻关组项目; 国家社会科学基金项目(23BJY150)

作者简介: 丁永刚(1993-), 男, 安徽合肥人, 博士, 助理研究员, 主要从事小麦产量、品质形成理论及其应用研究。(E-mail) dygwheat@163.com

通讯作者: 杜世州, (E-mail) dsz315@sina.com

including a nitrogen-free control (CK0), a conventional nitrogen application control (CK) with a nitrogen application rate of 240 kg/hm² (60% as compound fertilizer basal dressing + 40% as urea topdressing at jointing stage), and five treatments (M1, M2, M3, M4 and M5) with slow-release fertilizer applied as a single basal dressing or in combination with urea. And the differences in wheat yield and its components, nitrogen fertilizer use efficiency, grain quality, and dough rheological properties among different treatments were analyzed. The results showed that compared with CK, the grain yield of M2 and

M4 increased by 687 kg/hm² and 681 kg/hm², respectively, and the nitrogen accumulation before anthesis increased by 16.30% and 25.93%, respectively, under the premise of nitrogen reduction of 12.5%. The nitrogen fertilizer apparent utilization rate and nitrogen fertilizer absorption efficiency of the M4 treatment were significantly higher than those of the other treatments. Compared with CK, the contents of prolamin, glutenin, total starch, amylose, and amylopectin in the grains were significantly increased. The dough formation time, extension area, extension resistance, and maximum extension resistance of M4 treatment were also significantly higher than those of the other treatments. Although the nitrogen application rate of M5 treatment was higher than that of M4 treatment, the increase of wheat yield and grain total protein content was not significant compared with that of M4 treatment, and the apparent utilization rate of nitrogen fertilizer, nitrogen absorption efficiency and dough tensile properties were significantly lower than those of M4 treatment. In summary, a nitrogen application rate of 210 kg/hm², with 60% applied as slow-release fertilizer (basal dressing) and 40% as urea top-dressing at the jointing stage, can achieve synergistic improvement of wheat yield, nitrogen use efficiency, grain quality and dough rheological properties.

Key words: slow-release fertilizer; urea; wheat; nitrogen use efficiency; yield; quality

2014年以来中国小麦总产平均以每年 1.05×10^6 t的速度增长,其增量约占全国粮食增量的20%,是保证中国粮食供给的重要组成部分^[1]。氮作为小麦营养生长和生殖生长必需的大量元素,适量增施氮肥可显著增强植株光合作用,增加小麦产量^[2],但过量施氮不仅小麦增产效果有限,而且会增加倒伏、病虫害、资源竞争等风险,减产压力增大^[3-4]。前人通过氮高效利用、多次施肥、水肥协调、氮肥后移等策略已在高产稳产基础上减少了氮肥投入^[4-6]。缓/控释肥能够减缓养分释放速率,延长养分供给时间,满足作物各阶段营养需求,减少因淋溶、下渗等引起的养分损失,降低环境污染和生产成本^[7]。

合理施用缓/控释肥可优化土壤微生物群落结构,增加土壤中氮的有效性和有机质含量,提高氮肥利用率,促进根系构型合理化和养分吸收高效化,最终实现作物高产和高效^[8-9];较长的氮肥释放时间有利于花后氮素积累,提高氮素对籽粒的贡献率,增加籽粒中蛋白质含量^[10]。由于缓/控释肥的肥效释放速率受材料、温度、水分等因素影响,前人对缓/控释肥的施用方式存在争议,有研究者认为缓/控释肥一次性基施即可获得高产^[11-12],也有研究者认为采用缓/控释肥基施和施返青肥,与速效肥混施或不同释放周期缓释肥混施等可取得显著增产效果^[8-10,13-14]。前人研究大多集中在缓/控释肥对小麦群体构建、养分吸收和利用、碳同化和转运的影响,缓/控释肥对籽粒品质方面的研究较少。本研究通过设置多个减氮梯度的缓释肥一次性基施及其与尿素配施方式,分析不同处理对小麦产量、氮肥利用效率以及蛋白质和淀粉及其组分含量、面团流变学特性的影响,为小麦轻

简化施肥和绿色丰产优质生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试材料

本试验于2022-2023年在安徽省颍上县垂岗乡黄洼村(32°30'E;116°18'N)进行,前茬为水稻,秸秆全量还田,土壤类型为砂姜黑土。播前0~20 cm土层土壤总氮含量为1.14 g/kg、有机质含量为18.10 g/kg、碱解氮含量为90.85 mg/kg、速效磷含量为39.47 mg/kg、速效钾含量为92.65 mg/kg。

供试小麦品种为安农大1216,肥料为聚谷氨酸缓释肥(N含量:P₂O₅含量:K₂O含量=26:10:9,安徽辉隆集团产品),释放周期约为120 d。复合肥(N含量:P₂O₅含量:K₂O含量=15:15:15)、尿素(N含量≥46.3%)、磷肥(P₂O₅含量≥12%)、钾肥(K₂O含量≥60%)为当地市场销售产品。

1.2 试验设计

本试验采用单因素随机区组设计,设置不施氮对照(CK0)和施氮量240 kg/hm²(其中基肥是复合肥,拔节肥是尿素)对照(CK);缓释肥一次性基施3个处理,施氮量分别为180 kg/hm²(M1)、210 kg/hm²(M2)、240 kg/hm²(M3);缓释肥基施+尿素追施2个处理,施氮量分别为210 kg/hm²(其中基肥是缓释肥,拔节肥是尿素)(M4),240 kg/hm²(其中基肥是缓释肥,拔节肥是尿素)(M5),共计7个处理(表1)。磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)施用量均为120 kg/hm²,各处理在扣除聚谷氨酸缓释肥中的磷、钾含量后,其余磷、钾肥采用过磷酸钙和氯化钾补足,人工基施。于2022年10月23日采用本区域大面积推广的三轴防缠绕

旋耕施肥精量种机种肥一体化作业,小麦播种量为 225 kg/hm²,小区面积为 30 m²,于小麦倒三叶期人工施用拔节肥。CK0 处理用来计算氮肥利用效率,每个处理重复 3 次。其余栽培措施同当地高产田。

表 1 本试验设计的施氮量和施氮方式

Table 1 The nitrogen application rate and nitrogen application method designed in this experiment

处理	施氮量 (kg/hm ²)	基肥施氮量占比 (%)	拔节肥施氮量 占比(%)
CK0	0	0	0
CK	240	60(复合肥)	40(尿素)
M1	180	100(缓释肥)	-
M2	210	100(缓释肥)	-
M3	240	100(缓释肥)	-
M4	210	60(缓释肥)	40(尿素)
M5	240	60(缓释肥)	40(尿素)

-表示此期不施氮肥。

1.3 测定项目

1.3.1 产量及其构成因素 于小麦乳熟期连续割取长势均匀且具有代表性的 50 个麦穗,记录穗粒数;小麦成熟期在未取样且长势均匀的区域调查 1 m²穗数,人工收割,自然晾干后脱粒,称重;在收获的籽粒样品中数 1 000 粒,称重;采用 Infratec 1241 改进型近红外谷物品质分析仪(丹麦福斯集团公司产品)测定籽粒含水率,按 13% 含水率计算籽粒产量和千粒重,重复 3 次。

1.3.2 氮素积累量 于小麦开花期和成熟期选择长势均匀的 20 株植株,按器官分开,于 105 ℃ 杀青 1 h,80 ℃ 烘干至恒重,称重。粉碎后称取 0.25 g,采用凯氏定氮法测定样品含氮率,计算植株氮素积累量。

1.3.3 籽粒蛋白质及其组分含量 蛋白质含量=籽粒含氮率×5.7;根据石玉等^[15]的方法,分别测定面粉中清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白含量,计算谷醇比,谷醇比=谷蛋白含量/醇溶蛋白含量^[16]。

1.3.4 籽粒直链淀粉含量和支链淀粉含量 采用紫外分光光度计双波长法测定小麦籽粒中直链淀粉含量和支链淀粉含量^[17],直链淀粉含量测定的波长为 631 nm 和 480 nm,支链淀粉含量测定的波长为 554 nm 和 754 nm。总淀粉含量=直链淀粉含量+支链淀粉含量,直支比=直链淀粉含量/支链淀粉含量。

1.3.5 面团流变学特性 采用 Farinograph-E 电子

型粉质仪,参照 GB/T 14614-2019 标准测定面团流变学特性。采用 Extensograph-E 电子型拉伸仪,参照 GB/T 14615-2019 标准测定面团拉伸面积、拉伸阻力、延展度和最大拉伸阻力。

1.4 相关计算公式

氮肥利用效率、氮素积累和转运相关公式^[18-19]如下:

氮肥表观利用率=(施氮处理植株氮素积累量-不施氮处理植株氮素积累量)/施氮量×100%

氮肥生理利用效率(kg/kg)=(施氮处理籽粒产量-不施氮处理籽粒产量)/(施氮处理植株氮素积累量-不施氮处理植株氮素积累量)

氮肥吸收效率=施氮处理植株氮素积累量/施氮量×100%

花后氮素积累量(kg/hm²)=成熟期植株氮素积累量-开花期植株氮素积累量

花前氮素转运量(kg/hm²)=开花期营养器官氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量

1.5 数据处理

本试验采用 SPSS 19.0 软件进行数据分析,用 LSD 法检验 0.05 水平上差异显著性。用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 缓释肥及其与尿素配施对小麦产量及产量构成因素的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,除 M1 处理籽粒产量未有显著提高外,其余处理籽粒产量均显著提高,增量达 681~804 kg/hm²。从产量构成要素方面看,与 CK 相比,M3 处理有效穗数显著增加;各处理间穗粒数和千粒重无显著差异。由此可见,M2 处理和 M4 处理与 CK 相比减氮量达 12.5%,采用缓释肥全部基施(M2 处理)或缓释肥与尿素配施(M4 处理)籽粒产量明显高于 CK;M3 处理和 M5 处理与 CK 相比减氮量为 0,采用缓释肥全部基施(M3 处理)或缓释肥与尿素配施(M5 处理)籽粒产量虽然显著高于 CK,但是与 M2 处理和 M4 处理相比产量未有显著提升。

2.2 缓释肥及其与尿素配施对小麦氮素积累量和利用效率的影响

由表 3 可知,与 CK 相比,施用缓释肥显著提高小麦花前氮素积累量,较 CK 增加 14~53 kg/hm²,其

中 M5 处理增量最高,且显著高于其他处理;花后氮素积累量仅 M4 处理和 M5 处理显著高于 CK。M4 处理氮肥表观利用率显著高于其他处理,其次为 M5 处理。CK、M1 处理、M2 处理间氮肥生理利用效率差异不显著,且显著高于 M3~M5 处理。M4 处理氮肥吸收效率显著高于其他处理。由此可知,与 CK 相比减氮条件下(M2 处理、M4 处理)施用缓释肥可以提高花前氮素积累量、氮肥表观利用率和氮肥吸收效率;其中 M4 处理可同时显著增加花前和花后氮素积累,并且氮肥表观利用率和氮肥吸收效率最高,氮肥生理利用效率显著降低。M5 处理虽然植株花前氮素积累量显著高于 M4 处理,但氮肥表观利

用率、氮肥吸收效率与 M4 处理相比显著下降。

表 2 不同处理的产量及其构成因素

Table 2 Yield and its components under different treatments

处理	籽粒产量 (kg/hm ²)	有效穗数 (×10 ⁴ , 1 hm ²)	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)
CK	8 468±270b	562±22.04b	34.81±0.99a	45.81±1.31a
M1	8 876±282ab	578±13.99ab	35.23±2.03a	46.60±0.66a
M2	9 155±290a	595±22.96ab	36.12±2.62a	45.91±1.31a
M3	9 238±292a	612±19.22a	36.22±1.56a	46.11±1.32a
M4	9 149±181a	598±18.82ab	35.41±1.01a	46.81±1.34a
M5	9 272±294a	606±21.15ab	36.61±1.05a	45.31±1.29a

CK、M1、M2、M3、M4、M5 见表 1。同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

表 3 不同处理的小麦氮素积累和利用效率特征

Table 3 Characteristics of nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency of wheat under different treatments

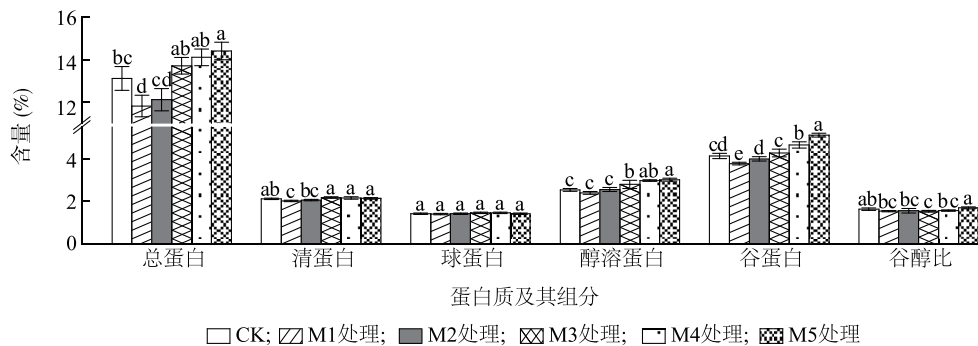
处理	氮素积累量(kg/hm ²)		氮肥表观利用率 (%)	氮肥生理利用效率 (kg/kg)	氮肥吸收效率 (%)
	花前	花后			
CK	135.00±6.96e	43.15±3.01bc	29.40±1.86d	46.70±1.12a	74.58±1.65d
M1	149.00±4.02d	34.24±0.64c	39.92±1.59c	49.56±4.58a	101.96±2.58b
M2	157.00±3.14cd	39.33±1.22bc	40.38±1.04c	45.19±1.28a	93.56±2.08c
M3	172.00±6.37b	44.47±5.49b	44.04±1.03bc	37.00±1.00b	90.61±2.14c
M4	170.00±5.25bc	58.79±6.16a	54.97±0.97a	32.48±0.56bc	108.15±2.22a
M5	188.00±5.45a	54.34±1.81a	48.51±1.43b	30.25±2.29c	89.87±2.69c

CK、M1、M2、M3、M4、M5 见表 1。同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

2.3 缓释肥及其与尿素配施对小麦籽粒蛋白质及其组分含量的影响

由图 1 可知, M5 处理籽粒总蛋白质含量为 14.4%, 显著高于 CK、M1 处理和 M2 处理, M1 处理显著低于 CK, M2~M4 处理与 CK 差异不显著。从蛋白质组分来看, M1 处理清蛋白含量显著低于 CK, 其余处理清蛋白含量与 CK 差异不显著; 球蛋白含量各处

理间无显著差异; 与 CK 相比, M3 处理、M4 处理、M5 处理醇溶蛋白含量显著提高; M1 处理谷蛋白含量显著低于 CK, M4 处理和 M5 处理谷蛋白含量显著高于 CK; M3 处理谷醇比显著低于 CK, 其余处理谷醇比与 CK 间差异不显著。因此, 保持与 CK 相同施氮量(M3 处理和 M5 处理)的情况下, 采用缓释肥与尿素配施(M5 处理)可显著提高小麦籽粒总蛋白质含量。



同一指标图柱上不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

图 1 不同处理的小麦总蛋白及其组分含量

Fig.1 The contents of total protein and its components in wheat under different treatments

2.4 缓释肥及其与尿素配施对小麦籽粒直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量的影响

从表 4 可知,与 CK 相比,施用缓释肥可显著提高籽粒淀粉含量,增幅在 3.57%~9.62%,其中缓释肥一次性基施(M1 处理、M2 处理、M3 处理)总淀粉含量相近,缓释肥和速效肥配施(M4 处理和 M5 处理)总淀粉含量显著高于其他处理,且 M4 处理和 M5 处理之间差异不显著。M1 处理、M2 处理和 M4 处理小麦籽粒直链淀粉含量显著高于 CK;M3 处理、M4 处理和 M5 处理小麦籽粒支链淀粉含量显著高于 CK。M1 处理直支比显著高于 CK,其他处理直支比与 CK 相比差异不显著。因此,与 CK 相比,采用缓释肥一次性基施或与尿素配施均可显著增加籽粒总淀粉含量,其中 M4、M5 处理小麦籽粒总淀粉含量显著高于 CK 及 M1~M3 处理。

表 4 不同处理的小麦籽粒总淀粉含量及其组分含量

Table 4 The contents of total starch and its components in wheat grains under different treatments

处理	总淀粉含量 (%)	直链淀粉 (%)	支链淀粉 (%)	直支比
CK	55.93±1.18c	10.49±0.61b	45.44±1.39d	0.23±0.02b
M1	59.50±1.55b	12.56±0.20a	46.94±0.56cd	0.27±0.01a
M2	61.53±3.27b	12.23±0.99a	49.30±2.15bcd	0.25±0.02ab
M3	60.50±1.85b	11.80±0.30ab	49.71±1.54bc	0.22±0.01b
M4	65.44±3.07a	12.81±0.31a	52.63±2.13ab	0.24±0.01ab
M5	65.55±1.38a	11.53±0.94ab	54.02±2.00a	0.21±0.01b

CK、M1、M2、M3、M4、M5 见表 1。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 缓释肥及其与尿素配施对小麦面粉粉质的影响

由表 5 可知,M2、M3、M4、M5 处理面团形成时间和面团稳定时间均显著高于 CK,M4 处理面团形成时间显著高于其他处理。CK 面粉弱化度显著高于 M1~M5 处理。与 CK 相比,缓释肥处理下小麦面粉粉质质量指数显著提升,M4 处理和 M5 处理粉质质量指数还显著高于 M1~M3 处理。综上,M4 处理可显著改善面粉粉质特性,M5 处理施氮量虽然高于 M4 处理,但是面团形成时间和稳定时间显著低于 M4 处理。

2.6 缓释肥及其与尿素配施对面团拉伸特性的影响

由表 6 可知,施肥方式影响面团拉伸特性。与 CK 相比,M4、M5 处理面团拉伸面积显著增加,M1~

M3 处理面团拉伸面积均显著减小。拉伸阻力和最大拉伸阻力均以 M4 处理最高,且显著高于其他处理。与 CK 相比,缓释肥一次性基施(M1~M3 处理)未显著影响延伸度,但缓释肥与尿素配施(M4、M5 处理)面团延伸度显著降低。综上,与 CK 相比,缓释肥一次性基施降低了面团拉伸面积;M4 处理可以显著改善面团拉伸特性,虽然 M5 处理在 M4 处理的基础上增施氮肥,但是面团拉伸特性却显著低于 M4 处理。

表 5 不同处理的面粉粉质特性

Table 5 Characteristics of flour quality under different treatments

处理	面团形成时间 (min)	面团稳定时间 (min)	弱化度 (FU)	粉质质量指数
CK	4.80±0.21c	3.50±0.15c	60.03±2.58a	84.04±3.62c
M1	5.30±0.15c	4.00±0.17c	51.02±2.20b	110.05±4.74b
M2	6.00±0.31b	7.80±0.36ab	47.01±1.34bc	111.02±3.17b
M3	6.20±0.18b	7.80±0.22ab	48.01±1.37bc	108.05±4.65b
M4	6.80±0.29a	8.00±0.37a	49.01±1.4bc	121.02±3.46a
M5	6.00±0.22b	7.30±0.31b	46.02±1.98c	128.03±3.66a

CK、M1、M2、M3、M4、M5 见表 1。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 6 不同处理的面团拉伸特性参数

Table 6 The dough extensibility parameters under different treatments

处理	拉伸面积 (cm ²)	拉伸阻力 (EU)	延伸度 (mm)	最大拉伸阻力 (EU)
CK	53.0±1.5c	218.0±9.4c	144.0±6.2a	238.1±10.2cd
M1	34.0±1.0e	170.0±4.8d	137.0±3.9a	180.0±5.1e
M2	30.0±1.3e	211.1±9.1c	132.0±2.6a	220.1±12.0d
M3	45.0±1.9d	227.1±6.5c	147.0±4.2a	249.0±7.1c
M4	70.0±2.0a	560.1±7.9a	121.0±3.4b	575.1±8.1a
M5	61.0±2.6b	430.2±12.3b	99.0±3.4c	478.2±13.6b

CK、M1、M2、M3、M4、M5 见表 1。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 缓释肥施用方式对小麦产量及其构成的影响

因地制宜、因苗制宜科学施用缓释肥,可以促进小麦丰产稳产。Wang 等^[20]研究认为,中国关中西部冬小麦施用缓释氮肥加尿素(尿素:缓释氮肥=1:3),较单独施用尿素单位面积产量增产达 10.45%~61.35%。周华敏等^[21]研究结果表明,中国黄淮海麦区冬小麦施用脲醛缓释掺混肥(脲醛氮

占总氮40%~50%),小麦穗数和穗粒数较施用普通尿素明显提升,单位面积增产幅度达11.36%~13.67%。陈立等^[22]的研究结果表明,长江中下游稻茬麦区采用缓释肥两次施用实现了穗数和千粒重协同增加,最终单位面积产量较施用普通尿素增产7.01%。本研究中与CK相比,M2处理和M4处理减氮12.5%,采用缓释肥一次性基施(M2处理)或与尿素配施(M4处理)均实现了增产,M3处理和M5处理施氮量比M2处理和M4处理高,但是小麦籽粒产量未有显著提升。

3.2 缓释肥施用方式对小麦氮肥利用效率的影响

前人研究结果表明,与常规肥料相比,施用缓释肥可增强小麦植株对氮素的吸收能力,总的氮素积累量增加6%~10%;氮肥利用效率提高,其中缓释肥与尿素混施模式氮肥利用效率最高^[21,23]。陈立等^[22]认为不同释放周期缓释肥配施可以显著提高花前氮素转运量、花后氮素积累量和氮肥表观利用率。不过,邓先亮等^[11]的研究结果显示,一次性基施缓释肥也可以获得较高的氮肥利用效率。本研究结果表明,与CK相比,适当减氮施用缓释肥可以显著提高植株花前氮素积累量、氮肥表观利用率和氮肥吸收效率。其中减氮12.5%,采用缓释肥与尿素配施植株氮肥表观利用率和氮肥吸收效率均显著高于其他处理,氮素积累量显著高于CK,氮肥生理利用效率显著低于CK。综上,采用缓释肥和尿素科学配施可以提高植株氮素积累量,而过多的氮素投入虽然能增加植株氮素吸收量,但并未全部参与物质生产形成产量。

3.3 缓释肥施用方式对小麦籽粒品质的影响

氮是籽粒合成蛋白质的基本元素^[24]。适当增施氮肥以及氮肥晚施或者分施均有利于籽粒蛋白质含量的提升,过高的施氮量反而会降低籽粒蛋白质含量^[23,25]。有研究表明,增加施氮量籽粒中清蛋白含量和球蛋白含量基本保持不变,醇溶蛋白含量和谷蛋白含量会显著提升,并且前者增幅大于后者,进而降低籽粒谷醇比^[26];增施氮肥并不能增加更多的醇溶蛋白^[27],上述结果可能是由于品种间籽粒氮素利用能力、蛋白质合成能力和环境等方面的差异所致。本研究结果表明,与CK相比,采用缓释肥与尿素配施小麦籽粒蛋白质含量的提升主要来自醇溶蛋白和谷蛋白含量的显著增加。

小麦籽粒淀粉组分为直链淀粉和支链淀粉^[28]。

胡宏等^[29]研究发现,施氮并且氮肥后移,小麦籽粒中总淀粉含量、支链淀粉含量均增加,过高的氮肥投入则会降低小麦籽粒中淀粉含量,不过李昆仑等^[30]的研究结果显示,施氮未引起淀粉含量及其成分的显著变化。本研究结果表明,与CK相比,采用缓释肥一次性基施或者缓释肥与尿素配施,小麦籽粒中总淀粉含量均显著提升,其中M4处理在减氮12.5%的情况下,小麦籽粒中总淀粉含量、直链淀粉含量和支链淀粉含量均显著提升。

3.4 缓释肥施用方式对小麦面团流变学特性的影响

有研究发现,随着施氮量或追肥的减少,面粉粉质质量和拉伸特性均降低,但与速效肥相比,施用缓释肥可显著提高面团稳定时间,降低弱化度^[24,31]。也有研究者认为,缓释肥两次施用较缓释肥一次性基施显著提高了面团形成时间、面团稳定时间和最大拉伸阻力^[10]。本研究结果表明,与CK相比,M2~M5处理面团形成时间、面团稳定时间和粉质质量指数显著提高,弱化度显著降低,面粉粉质质量得到改善;然而缓释肥一次基施(M1~M3处理)并未改善面团拉伸特性,甚至减小了拉伸面积;M4处理面团拉伸特性显著提升,M5处理面团拉伸特性与M4处理相比显著降低。这可能是缓释肥与尿素配施显著提高籽粒淀粉积累,适量减氮有利于提高B型(<10 μm)淀粉粒体积、表面积百分比,降低A型(>10 μm)淀粉粒体积、表面积百分比,淀粉与面筋蛋白质的交联作用加强,粉质质量和拉伸特性得以提升,而施氮量过高结果则相反,降低了面团流变学特性^[32-33]。

4 结论

本研究选择安农大1216小麦品种,设置多个减氮梯度的缓释肥一次性基施及其与尿素配施方式,分析不同处理对小麦产量、氮肥利用效率、小麦籽粒蛋白质含量、小麦籽粒淀粉含量和面团流变学的影响。结果表明,施氮量210 kg/hm²,60%的氮肥采用缓释肥基施,40%的氮肥采用尿素追施,可以实现小麦产量、氮肥表观利用率、氮肥吸收效率、籽粒品质和面团流变学品质协同提升。本研究结果可为小麦轻简化施肥和绿色丰产优质生产提供了理论依据。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴(2023)[EB/OL]. (2023-01-01)

- [2024-03-01]. <https://www.stats.gov.cn>.
- [2] 李欣欣,石祖梁,王久臣,等. 稻茬冬小麦氮肥吸收、残留和损失特性[J]. 应用生态学报,2020,31(11):3691-3699.
- [3] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
- [4] 李朝苏,吴晓丽,汤永禄,等. 小麦产量对中后期氮素胁迫的响应及品种间差异[J]. 作物学报,2019,45(8):1260-1269.
- [5] 李浩然,李雁鸣,李瑞奇. 灌溉和施氮对小麦产量形成及土壤肥力影响的研究进展[J]. 麦类作物学报,2022,42(2):196-210.
- [6] 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):289-294.
- [7] GARCIA P L, GONZÁLEZ-VILLALBA H A, SERMARINI R A, et al. Nitrogen use efficiency and nutrient partitioning in maize as affected by blends of controlled-release and conventional urea[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2018, 64(14):1944-1962.
- [8] LI R C, GAO Y X, CHEN Q, et al. Blended controlled-release nitrogen fertilizer with straw returning improved soil nitrogen availability, soil microbial community, and root morphology of wheat[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212:105045.
- [9] MA Q, WANG M Y, ZHENG G L, et al. Twice-split application of controlled-release nitrogen fertilizer met the nitrogen demand of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2021, 267:108163.
- [10] 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, 277:108405.
- [11] 邓先亮,屠晓,李军,等. 缓控释肥一次性基施对小麦产量及其形成的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(3):87-93.
- [12] 刘苹,李庆凯,林海涛,等. 不同缓控释肥对小麦产量、氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. 山东农业科学,2020,52(2):70-74.
- [13] 马泉,蒋文月,张新钵,等. 硫包膜缓释肥运筹方式对强筋小麦氮素积累转运、产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(8):148-157.
- [14] 刘虹丹,刘文成,顾颖慧,等. 缓释肥配比与密度互作对冬小麦产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(11):1374-1382.
- [15] 石玉,张永丽,于振文. 施氮量对不同品质类型小麦子粒蛋白质组分含量及加工品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(1):33-40.
- [16] 张秀,朱文美,代兴龙,等. 施氮量对强筋小麦产量、氮素利用率和品质的影响[J]. 麦类作物学报,2018,38(8):963-969.
- [17] 金玉红,张开利,张兴春,等. 双波长法测定小麦及小麦芽中直链、支链淀粉含量[J]. 中国粮油学报,2009,24(1):137-140.
- [18] 林忠成,叶世超,戴其根,等. 太湖流域施氮量对小麦-土壤系统氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报,2010,30(1):141-148.
- [19] 牟会荣,姜东,戴廷波,等. 遮光对小麦植株氮素转运及品质的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1718-1724.
- [20] WANG X, XIANG Y Z, GUO J J, et al. Coupling effect analysis of drip irrigation and mixed slow-release nitrogen fertilizer on yield and physiological characteristics of winter wheat in Guanzhong area[J]. Field Crops Research, 2023, 302:109103.
- [21] 周华敏,陈宝成,王晓琪,等. 脲缓释肥不同配比对小麦生长及土壤氮素养分的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1):179-185.
- [22] 陈立,钱晨诚,徐东忆,等. 不同释放期缓释尿素配合一次基施对稻茬冬小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 麦类作物学报,2022,42(10):1231-1239.
- [23] LIU Y D, MA C, LI G H, et al. Lower dose of controlled/slow-release fertilizer with higher rice yield and N utilization in paddies: Evidence from a meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2023, 294:108879.
- [24] TREVISAN S, SALIMI KHORSHIDI A, SCANLON M G. Relationship between nitrogen functionality and wheat flour dough rheology: extensional and shear approaches[J]. Food Research International, 2022, 162:112049.
- [25] 徐凤娇,赵广才,田奇卓,等. 施氮量对不同品质类型小麦产量和加工品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(2):300-306.
- [26] WIESER H, SEILMEIER W. The influence of nitrogen fertilisation on quantities and proportions of different protein types in wheat flour[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1998, 76(1):49-55.
- [27] CHOPE G A, WAN Y, PENSON S P, et al. Effects of genotype, season, and nitrogen nutrition on gene expression and protein accumulation in wheat grain[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(19):4399-4407.
- [28] 宋韵琳,蔡剑. 小麦籽粒淀粉理化特性与品质关系及其生理机制研究进展[J]. 麦类作物学报,2018,38(11):1338-1351.
- [29] 胡宏,盛婧,郭文善,等. 氮素对弱筋小麦宁麦9号淀粉形成的调节效应[J]. 麦类作物学报,2004,24(2):92-96.
- [30] 李昆仑,孔治有,沙云,等. 氮素和Wx基因缺失对小麦淀粉生物合成的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2017,32(4):577-581.
- [31] 张琨,秦毛毛,刘艳喜,等. 减量施氮对郑麦101产量及加工品质的影响[J]. 河南农业科学,2018,47(5):24-27.
- [32] 李文阳,卢继承,闫素辉,等. 施氮水平对小麦籽粒淀粉粒分布与加工品质的影响[J]. 麦类作物学报,2012,32(2):297-302.
- [33] 高欣,郭雷,单宝雪,等. 淀粉颗粒类型及其比例在小麦品质特性形成与改良中的作用[J]. 作物学报,2023,49(6):1447-1454.

(责任编辑:黄克玲)