

贺平, 陈玮峰, 蔡健, 等. 普通尿素与控释尿素配比一次性施肥对稻麦产量及氮素利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(2): 276-285.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.02.008

普通尿素与控释尿素配比一次性施肥对稻麦产量及氮素利用率的影响

贺平¹, 陈玮峰¹, 蔡健¹, 郁洁², 张丽², 陈雅玲², 李云龙¹, 左文刚¹, 单玉华¹, 柏彦超¹

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.江苏省耕地质量与农业环境保护站, 江苏 南京 210000)

摘要: 本试验旨在研究普通尿素与控释尿素配比一次性施肥对稻麦产量及氮素利用率的影响, 为江苏里下河地区稻麦科学施肥提供依据。以宁麦 13、南粳 9108 为材料, 在江苏省高邮市进行为期 3 年的稻麦轮作大田试验, 以不施氮肥为空白对照(CK), 设置 W0 处理(100%普通尿素, 50%基肥+50%追肥)与控释尿素按不同比例替代普通尿素一次性基施处理(W3 处理, 70%普通尿素+30%控释尿素; W5 处理, 50%普通尿素+50%控释尿素; W7 处理, 30%普通尿素+70%控释尿素; W10 处理, 100%控释尿素)。同时, 基于 W7 处理设置减氮 20%处理(WJ7)。结果表明, 与普通尿素施肥处理相比, 普通尿素与不同配比的控释尿素一次性施肥处理能够显著提高稻麦产量、氮素利用率, 其中稻、麦产量最高分别可达 8.26 t/hm²、6.09 t/hm², 分别较常规施肥处理(W0)提高 18.3%、34.4%。此外, W10 处理的小麦 3 年平均氮素利用率最高, 为 47.5%, W7 处理的水稻 3 年平均氮素利用率最高, 为 45.6%。在普通尿素与控释尿素简化配施条件下, 减氮 20%整体上对稻麦产量、氮素利用率无显著影响, 但会降低水稻植株的氮素积累量。与普通尿素施肥处理相比, 普通尿素与不同配比控释尿素一次性施肥处理提高了土壤全氮含量、有机质含量, 并且在 3 年试验期内, 全氮含量、有机质含量整体呈增加趋势。基于本研究结果得出, 在江苏里下河地区稻麦轮作条件下, 水稻适宜的控释尿素配施比例为 70%, 小麦适宜的控释尿素配施比例为 70%~100%。

关键词: 稻麦; 控释尿素; 简化配施; 产量; 氮素利用率

中图分类号: S365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)02-0276-10

Effects of one-off fertilization with common urea and controlled release urea at a certain ratio on yield and nitrogen use efficiency of rice and wheat

HE Ping¹, CHEN Weifeng¹, CAI Jian¹, YU Jie², ZHANG Li², CHEN Yaling², LI Yunlong¹, ZUO Wengang¹, SHAN Yuhua¹, BAI Yanchao¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Jiangsu Farmland Quality and Agricultural Environmental Protection Station, Nanjing 210000, China)

Abstract: To provide a basis for the scientific application of fertilizers in the rice-wheat rotation system of the Lixiahe area in Jiangsu province, a study was conducted on the effects of one-off fertilization with common urea and controlled-release

收稿日期: 2024-03-19

基金项目: 江苏现代农业(水稻、蔬菜)产业技术体系项目[JATS (2023)318, JATS(2023)317]

作者简介: 贺平(1997-), 女, 河南巩义人, 硕士研究生, 主要从事稻麦养分高效利用方面的研究。(E-mail) hp18252730791@163.com

通讯作者: 柏彦超, (E-mail) ycbai@yzu.edu.cn

urea at a certain ratio on the yield and nitrogen use efficiency of rice and wheat. The study utilized the varieties Ningmai 13 and Nanjing 9108 in a three-year field trial of rice-wheat rotation in Gaoyou City, Jiangsu province. A control treatment without nitrogen fertilizer (CK) was established, along with a W0 treatment (100% common urea, with 50% as the basal dressing and 50% as the top dressing). Treatments with con-

trolled-release urea substituting for common urea at different ratios in a single basal application were set up (W3 treatment, 70% common urea + 30% controlled-release urea; W5 treatment, 50% common urea + 50% controlled-release urea; W7 treatment, 30% common urea + 70% controlled-release urea; W10 treatment, 100% controlled-release urea). Additionally, a 20% nitrogen reduction treatment (WJ7) was set up based on the W7 treatment. The results indicated that the combined application of common urea and controlled-release urea significantly enhanced both the yield and nitrogen use efficiency of rice and wheat. The highest yields of rice and wheat were 8.26 t/hm² and 6.09 t/hm², respectively, which were 18.3% and 34.4% higher than those of conventional fertilization treatment (W0). In addition, the average nitrogen use efficiency of wheat treated with W10 was the highest in three years, which was 47.5%. The average nitrogen use efficiency of rice treated with W7 was the highest in three years, which was 45.6%. Under the simplified co-application of common urea and controlled-release urea, reducing nitrogen by 20% did not significantly affect the yield and nitrogen use efficiency of rice and wheat, but it did decrease the nitrogen accumulation in the plants. The combined application of common urea and controlled-release urea increased the total nitrogen content and organic matter content in the soil, and the total nitrogen content and organic matter content showed an overall increasing trend over the three-year experimental period. Based on these findings, for the rice-wheat rotation system in the Lixiahe area of Jiangsu province, a suitable ratio of controlled-release urea is suggested to be 70% for rice and between 70% and 100% for wheat.

Key words: rice and wheat; controlled release urea; simplified application; yield; nitrogen use efficiency

水稻、小麦是中国重要的粮食作物,稻麦轮作是最主要的轮作方式,水稻和小麦的生产对于保障国家粮食安全具有重要意义^[1]。氮肥在保障作物质量、提高作物产量方面发挥着重要作用,但是由于氮肥的不合理施用,导致盈余氮素从土壤中流失,降低了氮素利用率,给环境带来了严重的负面影响,如引起温室气体排放量增加、水污染和土壤酸化等^[2]。研究发现,中国氮肥利用率较低,仅有 33%,远低于欧盟国家的35%~45%^[3]。控释肥料是提高作物氮素利用率的一种高效肥,其具有减缓和控制养分释放速率的功能,能满足养分释放与作物吸收相一致的要求,最终达到提高稻麦产量与氮素利用率的目的^[4-7]。然而,控释氮肥早期释放速率缓慢,而稻麦在分蘖期、拔节期对氮素的需求较高,控释氮肥不能完全满足稻麦早期对养分的需求,导致稻麦在分蘖期难以吸收充足的氮素^[8],即使在中后期能提供长效的肥力,仍难以弥补作物初期的养分亏损,导致作物的产量下降。因此,将普通尿素与控释尿素进行配比后一次性施肥,其氮素释放规律与稻麦生育期的氮素需求更吻合,更有利于稻麦作物的生长发育。相关研究发现,将普通尿素与控释尿素进行配比后一次性施用能调节冬小麦分蘖生长,促进冬前有效分蘖,增加有效穗数^[9-10];此外,能在生育前期促进水稻生理生长,在生育后期满足水稻生殖生长对养分的需求,提高水稻对氮素的吸收利用率,从而积累足够的干物质,促进作物高产^[11-12]。由于地区、土壤类型及气候条件的不同,普通尿素与控释氮肥的

最适配施比例存在较大差异。何杰等^[13]发现,40%控释氮肥+60%普通尿素一次性施用处理的小麦产量最优;王义凡等^[14]的研究结果表明,50%缓控释肥+50%尿素一次性基施处理的小麦产量最优。本研究拟设置控释尿素与普通尿素的不同配施比例,通过3年连续定位试验,探究普通尿素与控释尿素进行配比后一次性施用对稻麦产量、氮素利用率及土壤肥力的影响,以期筛选出适宜里下河地区稻麦高产高效生产的施肥方案。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2020-2022年在江苏省高邮市送桥镇毛港村江苏现代农业(水稻)产业技术体系推广示范基地(32°47'N, 119°25'E)进行。试验区属亚热带湿润气候,年平均气温 15℃,年平均降雨量 1 030 mm,当地主要种植模式为稻麦轮作。试验区土壤为水稻土,土壤质地为黏土,试验前耕层土壤(0~20 cm)养分含量如下:全氮含量 0.85 g/kg,有机质含量 18.4 g/kg,碱解氮含量 120.4 mg/kg,有效磷含量 45.3 mg/kg,全磷含量 0.81 g/kg。

1.2 试验材料

供试小麦品种为宁麦 13,水稻品种为南粳 9108。供试控释尿素为树脂包膜尿素,含氮量为 42%,释放周期为 90 d,购自河南心连心化肥有限公司。供试尿素(含氮量 46%)、过磷酸钙(P₂O₅含量 12%)、氯化钾(K₂O 含量 60%)分别购自山西晋丰

煤化工有限责任公司、江苏新科肥业有限公司、绥芬河市龙胜经贸有限责任公司。3 年试验期间均使用相同作物品种和肥料类型。

1.3 试验设计

在控制水稻、小麦总施氮量的条件下,共设 1 个对照(CK)和 6 个处理:(1)CK,不施氮肥;(2)W0 处理,100%普通尿素(50%基肥+50%追肥);(3)W3 处理,70%普通尿素+30%控释尿素;(4)W5 处理,50%普通尿素+50%控释尿素;(5)W7 处理,30%普通尿素+70%控释尿素;(6)W10 处理,100%控释尿素;(7)WJ7 处理,30%普通尿素+70%控释尿素(减氮 20%)。水稻季氮肥(N)、过磷酸钙(P_2O_5)、氯化钾(K_2O)的施用量分别为 300 kg/hm²、75 kg/hm²、150 kg/hm²;小麦季过磷酸钙、氮肥、氯化钾的施用量分别为 75 kg/hm²、240 kg/hm²、90 kg/hm²。其中,W0 处理的氮肥分 2 次施用,基肥与追肥的占比分别为 50%和 50%,其余各处理氮肥均作为基肥一次性施用,过磷酸钙、氯化钾全部作基肥一次性施用。各试验小区采取随机区组设计,设 3 次重复,试验小区面积均为 20.6 m²。试验小区间筑埂并覆盖塑料薄膜进行隔离,单排单灌。小麦于每年 11 月上旬播种,次年 6 月上旬收获;水稻于每年 6 月中下旬移栽,当年 11 月上旬收获。其中,小麦进行人工条播,行距为 30 cm,水稻插秧统一采用沃得晓龙高速乘坐式插秧机,行距、间距分别为 16 cm、30 cm。各试验区的田间管理与当地水稻、小麦生产习惯保持一致。

1.4 样品采集与测定方法

每年 6 月上旬、11 月上旬分别进行小麦、水稻的田间测产,同时在各试验小区割方(2 m²)进行水稻、小麦地上部植株样的采集,用于作物地上部生物量及田间穗数的分析,并且各试验小区随机采集 20 株小麦、水稻的籽粒样,用于作物穗粒数分析。小麦、水稻收获后按多点取样法进行耕层(0~20 cm)土壤样品的采集。

将小麦、水稻地上部割方样品放置于通风干燥箱中,于 105 ℃杀青 15 min,再于 80 ℃烘干至恒重,去除籽粒后称重,获得小麦、水稻地上部生物量。随机取部分风干后的地上部茎秆、籽粒,磨碎后过筛,分别用于籽粒、茎秆中氮、磷养分含量的测定。耕层土壤样品经自然风干磨碎后,分别过 2.000 mm、0.149 mm 筛,分别用于土壤有机质含量、全磷含量、全氮含量、碱解氮含量、有效磷含量的测定。其中,土壤有机质

含量采用重铬酸钾氧化-容量法进行测定,土壤全氮含量、碱解氮含量分别采用半微量凯氏法、碱解扩散法进行测定,土壤全磷、有效磷含量分别用硫酸-高氯酸消解法、碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法进行测定^[15]。

1.5 数据处理与分析

氮素利用率、氮素累积量的计算公式如下^[16]:

氮肥利用率(NUE)=(施氮区作物地上部吸氮量-无氮区作物地上部吸氮量)/施氮量×100%;

氮素累积量=籽粒干重×籽粒含氮量+秸秆干重×秸秆含氮量。

分析数据均采用各处理重复的平均值。数据用 Excel 2019、SPSS 19.0 软件进行统计分析,主要指标的显著性采用最小显著性差异法(LSD)在 0.05 水平进行检验,用 Origin 2022 软件进行作图,相关性分析采用 RStudio mantel test 进行。

2 结果与分析

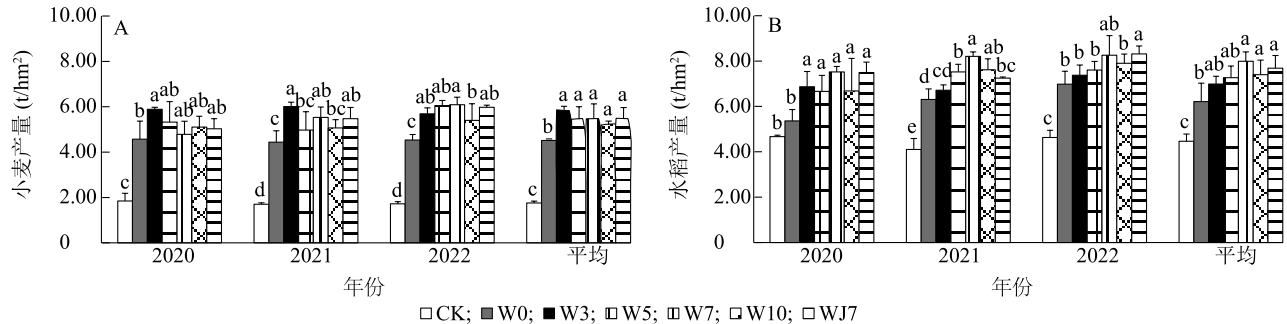
2.1 稻麦产量及产量构成

普通尿素与控释尿素配比一次性施肥对小麦产量及产量构成的影响分别见图 1A 和表 1。施用氮肥各处理小麦产量均显著高于未施用氮肥的对照(CK)($P<0.05$)。2020 年、2021 年、2022 年常规施氮处理(W0 处理)的小麦产量分别为 4.57 t/hm²、4.44 t/hm²、4.53 t/hm²;各控释尿素替代普通尿素处理(W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理)的小麦产量均高于 W0 处理,部分差异显著。在 2020 年、2021 年,W3 处理的小麦产量最高,分别达 5.89 t/hm²、6.01 t/hm²;在 2022 年,W7 处理的小麦产量最高,达到 6.09 t/hm²;2020 年、2021 年、2022 年最高小麦产量分别较 W0 处理提高 28.9%、35.4%、34.4%,且处理间存在显著差异($P<0.05$)。在减氮 20%的条件下,WJ7 处理的小麦产量与 W7 处理间无显著差异。由表 1 可以看出,在 2020 年、2021 年,普通尿素与控释尿素配比一次性施肥处理(W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理、WJ7 处理)小麦的穗粒数、千粒重整体上与 W0 处理无显著差异,但穗数整体上显著高于 W0 处理。

图 1B 显示,在 2020 年、2021 年,普通尿素与控释尿素配施处理(W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理)的水稻产量整体上均高于常规施氮处理(W0 处理),且 3 年试验期间 W7 处理的水稻产量均较高,分别为 7.52 t/hm²、8.21 t/hm²、8.26 t/hm²,分

别较 W0 处理提高 40.3%、30.2%、18.3%,处理间产量差异在 2020 年、2021 年达显著水平 ($P < 0.05$)。在减氮 20% 条件下, WJ7 处理的水稻产量在 2020 年、2022 年与 W7 处理间无显著差异。由表 2 可知,在 2020 年、2021 年,普通尿素与控释尿素配

比一次性施肥处理(W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理、WJ7 处理)的水稻穗数、穗粒数、结实率、千粒重与 W0 处理无显著差异;在 2022 年, W7 处理的水稻穗数、结实率显著高于 W0 处理, W10 处理的结实率显著高于 W0 处理。



不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。CK: 对照, 不施氮肥; W0 处理: 100% 普通尿素 (50% 基肥+50% 追肥); W3 处理: 70% 普通尿素+30% 控释尿素一次性施用; W5 处理: 50% 普通尿素+50% 控释尿素一次性施用; W7 处理: 30% 普通尿素+70% 控释尿素一次性施用; W10: 100% 控释尿素一次性施用; WJ7: 30% 普通尿素+70% 控释尿素一次性施用 (减氮 20%)。

图 1 2020–2022 年不同配比施肥处理对小麦 (A) 和水稻 (B) 产量的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on the yield of wheat (A) and rice (B) from 2020 to 2022

表 1 2020–2022 年不同配比施肥处理对小麦产量构成的影响

Table 1 Effects of different fertilization treatments on wheat yield components from 2020 to 2022

| 年份 | 产量结构 | CK | W0 处理 | W3 处理 | W5 处理 | W7 处理 | W10 处理 | WJ7 处理 |
|------|--|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| 2020 | 穗数 ($\times 10^4$ 穗, 1 hm^2) | 171.0 \pm 11.0d | 306.0 \pm 17.0c | 391.0 \pm 34.0a | 363.0 \pm 35.0ab | 354.0 \pm 8.0ab | 381.0 \pm 41.0ab | 349.0 \pm 7.0ab |
| | 穗粒数 (粒) | 22.3 \pm 1.2b | 36.7 \pm 3.2a | 39.3 \pm 0.6a | 39.0 \pm 2.0a | 37.3 \pm 2.1a | 38.3 \pm 0.6a | 38.0 \pm 1.0a |
| | 千粒重 (g) | 37.1 \pm 0.4c | 39.8 \pm 0.2b | 40.5 \pm 0.6a | 39.7 \pm 0.4b | 39.7 \pm 0.1b | 39.1 \pm 0.6b | 39.5 \pm 0.1b |
| 2021 | 穗数 ($\times 10^4$ 穗, 1 hm^2) | 211.0 \pm 37.0c | 298.0 \pm 45.0b | 399.0 \pm 25.0a | 334.0 \pm 52.0ab | 396.0 \pm 31.0a | 354.0 \pm 40.0ab | 370.0 \pm 11.0a |
| | 穗粒数 (粒) | 21.7 \pm 1.5b | 36.7 \pm 1.5a | 36.7 \pm 0.6a | 37.0 \pm 1.0a | 35.3 \pm 0.6a | 35.5 \pm 2.1a | 37.0 \pm 2.0a |
| | 千粒重 (g) | 37.3 \pm 0.2b | 40.8 \pm 0.5a | 41.1 \pm 1.2a | 40.2 \pm 0.9a | 39.6 \pm 1.0a | 40.5 \pm 0.9a | 39.9 \pm 1.7a |
| 2022 | 穗数 ($\times 10^4$ 穗, 1 hm^2) | 203.0 \pm 6.0c | 258.0 \pm 26.0bc | 287.0 \pm 37.0b | 316.0 \pm 42.0b | 373.0 \pm 21.0a | 350.0 \pm 32.0b | 384.0 \pm 45.0a |
| | 穗粒数 (粒) | 32.7 \pm 2.9d | 49.0 \pm 0.5b | 53.2 \pm 0.3ab | 57.7 \pm 1.9a | 57.5 \pm 2.8a | 53.2 \pm 2.0ab | 57.0 \pm 3.9a |
| | 千粒重 (g) | 37.6 \pm 0.7e | 40.7 \pm 0.6d | 41.8 \pm 0.1c | 43.0 \pm 0.3b | 44.1 \pm 0.6a | 43.2 \pm 0.6b | 44.1 \pm 0.3a |

同行数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。CK、W0 处理、W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理、WJ7 处理见图 1 注。

2.2 稻麦氮素积累量

由图 2 可以看出,与普通尿素处理相比,普通尿素与控释尿素配比一次性施肥处理提高了稻麦氮素积累量。在 3 年试验期内,控释尿素替代普通尿素处理(W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理)小麦的平均氮素积累量分别较 W0 处理提高 29.9%、28.6%、34.8%、34.4%,水稻的平均氮素积累量分别较 W0 处理提高 22.6%、26.7%、47.8%、34.4%。在 3 年试验期间, W7 处理水稻的氮素积累量整体最高。在减氮 20% 的条件下,水稻、小麦对氮素的积累量整体呈降低趋势,其中 2020 年、2021 年、2022

年水稻的氮素积累量与同比比例常规施肥处理 (W7 处理) 相比分别降低了 13.8%、17.7%、6.0%。

2.3 稻麦氮素利用率

普通尿素与控释尿素配比一次性施肥提高了稻麦氮素利用率 (图 3)。在 3 年 (2020–2022 年) 试验期间, W0 处理的小麦氮素利用率分别为 29.9%、29.5%、29.7%, W3 处理的小麦氮素利用率分别为 41.2%、45.8%、41.6%, W5 处理的小麦氮素利用率分别为 38.5%、35.7%、52.6%, W7 处理的小麦氮素利用率分别为 34.1%、45.8%、55.1%, W10 处理的小麦氮素利用率分别为 46.0%、41.9%、54.7%。与

表 2 2020–2022 年不同配比施肥处理对水稻产量构成的影响

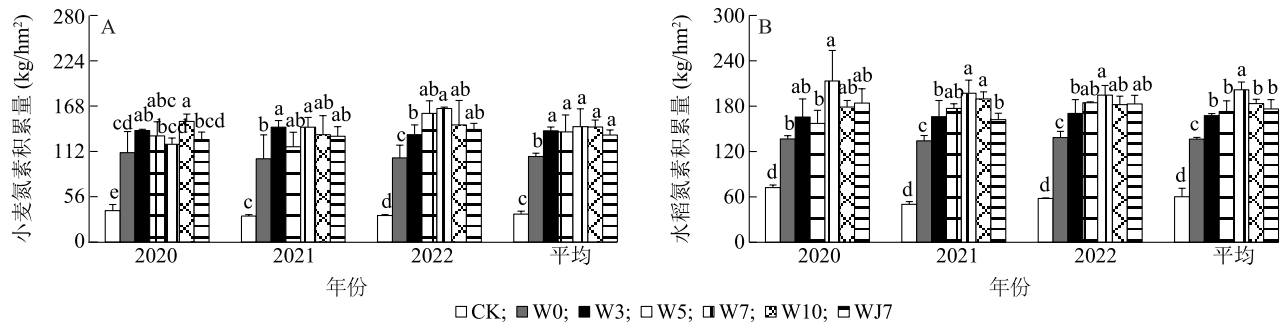
Table 2 Effects of different fertilization treatments on rice yield components from 2020 to 2022

| 年份 | 产量结构 | CK | W0 处理 | W3 处理 | W5 处理 | W7 处理 | W10 处理 | WJ7 处理 |
|------|--|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 2020 | 穗数($\times 10^4$ 穗, 1 hm ²) | 231.0 \pm 29.0b | 283.0 \pm 26.0ab | 330.0 \pm 11.0a | 286.0 \pm 57.0ab | 336.0 \pm 20.0a | 297.0 \pm 8.0ab | 326.0 \pm 37.0a |
| | 穗粒数(粒) | 94.7 \pm 1.4a | 96.3 \pm 3.1a | 96.5 \pm 3.4a | 98.7 \pm 3.3a | 99.7 \pm 4.5a | 97.3 \pm 2.1a | 93.5 \pm 2.8a |
| | 结实率(%) | 91.1 \pm 5.4b | 94.1 \pm 1.7ab | 96.7 \pm 2.3a | 96.0 \pm 1.4a | 95.8 \pm 1.0a | 96.1 \pm 2.5a | 96.1 \pm 1.3a |
| | 千粒重(g) | 23.7 \pm 1.4b | 26.7 \pm 1.5a | 24.9 \pm 0.2ab | 25.0 \pm 0.7ab | 25.9 \pm 1.4a | 26.4 \pm 0.6a | 26.4 \pm 1.4a |
| 2021 | 穗数($\times 10^4$ 穗, 1 hm ²) | 178.0 \pm 36.0b | 203.0 \pm 35.0ab | 211.0 \pm 32.0ab | 222.0 \pm 25.0ab | 260.0 \pm 53.0a | 254.0 \pm 46.0a | 247.0 \pm 34.0a |
| | 穗粒数(粒) | 94.2 \pm 10.9b | 142.4 \pm 13.8a | 140.2 \pm 6.3a | 143.7 \pm 17.5a | 144.7 \pm 17.6a | 143.1 \pm 8.2a | 141.3 \pm 7.4a |
| | 结实率(%) | 95.6 \pm 0.4a | 94.9 \pm 0.4a | 95.6 \pm 1.4a | 94.9 \pm 0.5a | 95.9 \pm 1.0a | 95.6 \pm 0.5a | 95.4 \pm 0.6a |
| | 千粒重(g) | 26.4 \pm 0.2a | 26.9 \pm 1.5a | 27.1 \pm 0.4a | 27.0 \pm 0.7a | 27.5 \pm 0.7a | 27.3 \pm 1.1a | 28.1 \pm 1.5a |
| 2022 | 穗数($\times 10^4$ 穗, 1 hm ²) | 224.0 \pm 11.0c | 260.0 \pm 12.0bc | 288.0 \pm 14.0abc | 274.0 \pm 13.0bc | 356.0 \pm 17.0a | 311.0 \pm 15.0ab | 311.0 \pm 30.0ab |
| | 穗粒数(粒) | 84.1 \pm 16.9b | 112.4 \pm 11.4a | 114.8 \pm 11.0a | 127.9 \pm 6.7a | 126.7 \pm 13.5a | 135.0 \pm 14.4a | 121.0 \pm 5.3a |
| | 结实率(%) | 92.2 \pm 0.2c | 94.2 \pm 0.3bc | 96.2 \pm 0.3ab | 96.0 \pm 0.1ab | 98.5 \pm 0.1a | 98.0 \pm 0.1a | 96.7 \pm 0.7ab |
| | 千粒重(g) | 25.1 \pm 1.1a | 25.7 \pm 0.3a | 25.9 \pm 1.0a | 25.9 \pm 0.5a | 26.5 \pm 0.5a | 26.4 \pm 0.4a | 28.1 \pm 0.2a |

同行数据后标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。CK、W0 处理、W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理、WJ7 处理见图 1 注。

W0 处理相比,2020 年 W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理的小麦氮素利用率分别提高了 37.8%、28.8%、14.0%、53.8%,2021 年 W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理的小麦氮素利用率分别提高了

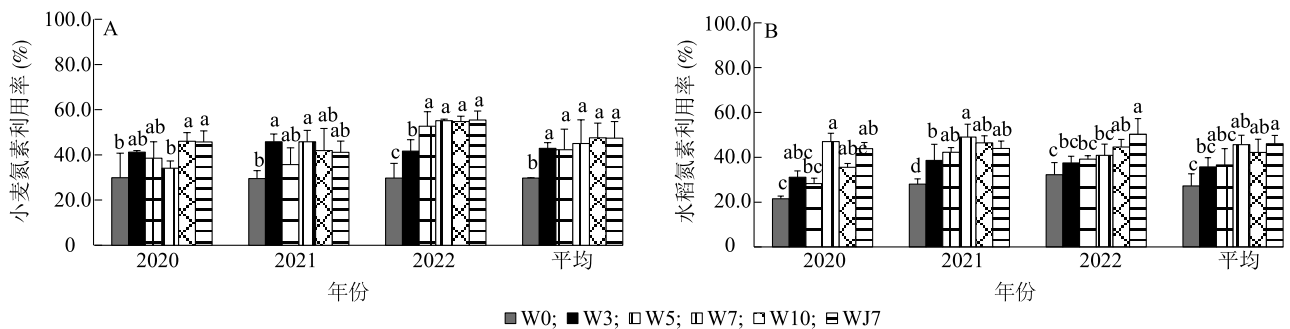
55.3%、21.0%、55.3%、42.0%,2022 年 W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理的小麦氮素利用率分别提高了 40.1%、77.1%、85.4%、84.1%,其中 W10 处理小麦 3 年平均氮素利用率最高(47.5%)(图 3A)。



柱上标有不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。CK、W0 处理、W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理、WJ7 处理见图 1 注。

图 2 2020–2022 年不同配比施肥处理对小麦 (A) 和水稻 (B) 氮素积累量的影响

Fig.2 Effects of different fertilization treatments on nitrogen accumulation in wheat (A) and rice (B) from 2020 to 2022



柱上标有不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。CK、W0 处理、W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理、WJ7 处理见图 1 注。

图 3 2020–2022 年不同配比施肥处理对小麦 (A) 和水稻 (B) 氮素利用率的影响

Fig.3 Effects of different fertilization treatments on nitrogen use efficiency of wheat (A) and rice (B) from 2020 to 2022

在3年(2020–2022年)试验期间,W0处理的水稻氮素利用率分别为21.5%、28.0%、32.2%,W3处理的水稻氮素利用率分别为31.1%、38.6%、37.5%,W5处理的水稻氮素利用率分别为28.3%、42.3%、39.1%,W7处理的水稻氮素利用率分别为47.0%、49.0%、40.9%,W10处理的水稻氮素利用率分别为35.6%、46.5%、44.6%。与W0处理相比,2020年W3处理、W5处理、W7处理、W10处理的水稻氮素利用率分别提高了44.7%、31.7%、118.9%、65.5%,2021年W3处理、W5处理、W7处理、W10处理的水稻氮素利用率分别提高了37.9%、50.9%、74.9%、66.0%,2022年W3处理、W5处理、W7处理、W10处理的水稻氮素利用率分别提高了16.3%、21.4%、26.8%、38.2%。其中,W7处理3年的水稻平均氮素利用率最高(45.6%)(图3B)。在减氮20%的条件下,水稻、小麦对氮素的利用率与W7处理相比,无明显变化。

2.4 土壤肥力性状

由表3可以看出,与单纯施用普通尿素相比,

2022年普通尿素与控释尿素配比一次性施肥处理整体上显著增加了水稻收获期土壤的有机质含量。在3年(2020–2022年)试验期间,普通尿素与控释尿素配比一次性施肥处理(W3处理、W5处理、W7处理、W10处理)小麦季土壤有机质平均含量分别较W0处理提高6.0%、4.5%、11.8%、20.3%,水稻季土壤有机质平均含量分别较W0处理提高6.2%、9.4%、15.5%、20.2%。此外,与普通尿素施肥处理相比,普通尿素与控释尿素配施处理能够显著提高2022年水稻土壤全氮含量。在3年试验期间,普通尿素与控释尿素配比一次性施肥处理(W3处理、W5处理、W7处理、W10处理)的小麦季土壤全氮平均含量分别较W0处理提高5.9%、8.3%、9.2%、4.5%,水稻季土壤平均全氮含量分别较W0处理提高4.1%、9.1%、10.3%、10.0%。在3年试验期间,普通尿素与控释尿素配施处理的土壤有效磷含量整体高于W0处理。与同比例常规施肥(W7)相比,减氮20%(WJ7)处理均可降低土壤有机质含量,但未达显著水平;氮、磷养分含量整体上也无明显变化。

表3 2020–2022年不同简化配施处理对小麦和水稻土壤肥力的影响

Table 3 Effects of different simplified combined application treatments on soil fertility of wheat and rice from 2020 to 2022

| 年份 | 作物 | 处理 | 有机质含量 (g/kg) | 全氮含量 (g/kg) | 全磷含量 (g/kg) | 碱解氮含量 (mg/kg) | 有效磷含量 (mg/kg) |
|------|----|-----|-----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| 2020 | 小麦 | CK | 13.95±0.43b | 0.74±0.08c | 0.65±0.14b | 61.85±1.87d | 61.37±6.02c |
| | | W0 | 13.09±1.15b | 1.01±0.08ab | 0.78±0.06a | 88.54±5.66b | 72.01±5.17b |
| | | W3 | 13.94±0.73b | 1.02±0.08ab | 0.82±0.04a | 94.79±4.30a | 86.27±9.56a |
| | | W5 | 12.55±1.78b | 1.06±0.08a | 0.84±0.10a | 89.02±6.82b | 85.56±4.14a |
| | | W7 | 14.08±1.02b | 1.02±0.01ab | 0.79±0.05a | 87.44±4.98b | 80.14±4.22a |
| | | W10 | 16.87±2.12a | 0.95±0.02b | 0.78±0.10a | 77.52±4.12c | 71.47±7.72b |
| | | WJ7 | 12.75±0.80b | 0.97±0.07b | 0.86±0.10a | 81.72±4.41c | 79.97±4.28a |
| | 水稻 | CK | 16.74±0.71e | 1.07±0.12b | 0.59±0.05bc | 81.56±5.01c | 73.72±1.05d |
| | | W0 | 18.04±1.33de | 1.16±0.12ab | 0.73±0.03a | 129.12±12.61b | 104.25±2.13c |
| | | W3 | 18.20±0.50de | 1.16±0.12ab | 0.64±0.07bc | 132.42±9.73b | 119.21±1.84a |
| | | W5 | 19.04±0.95cd | 1.20±0.16ab | 0.67±0.05ab | 133.56±18.20b | 117.90±4.16ab |
| | | W7 | 21.08±0.89b | 1.23±0.05a | 0.67±0.05ab | 135.60±13.78ab | 104.42±2.23c |
| | | W10 | 21.82±1.49a | 1.22±0.08ab | 0.66±0.07ab | 149.28±4.09a | 112.37±10.45b |
| | | WJ7 | 20.28±2.04abc | 1.24±0.15a | 0.66±0.04ab | 134.60±12.82b | 102.45±50.00c |
| 2021 | 小麦 | CK | 14.28±1.25c | 0.90±0.07b | 0.64±0.07b | 82.81±11.36b | 60.17±2.05d |
| | | W0 | 14.49±1.14bc | 0.95±0.04ab | 0.82±0.07a | 88.21±9.47b | 75.67±2.35c |
| | | W3 | 14.66±1.09bc | 1.05±0.12a | 0.72±0.07ab | 96.52±15.91ab | 81.87±9.01bc |
| | | W5 | 14.82±1.72bc | 1.01±0.09ab | 0.75±0.09ab | 108.72±13.14a | 93.86±9.26a |
| | | W7 | 15.96±1.12ab | 1.03±0.18ab | 0.77±0.12ab | 108.26±5.31a | 88.98±8.87ab |
| | | W10 | 17.12±0.98a | 1.07±0.06a | 0.76±0.08ab | 105.70±0.72a | 77.05±7.36c |
| | | WJ7 | 15.25±0.68bc | 1.07±0.14a | 0.74±0.18ab | 96.89±19.04ab | 87.66±9.45ab |

续表3 Continued3

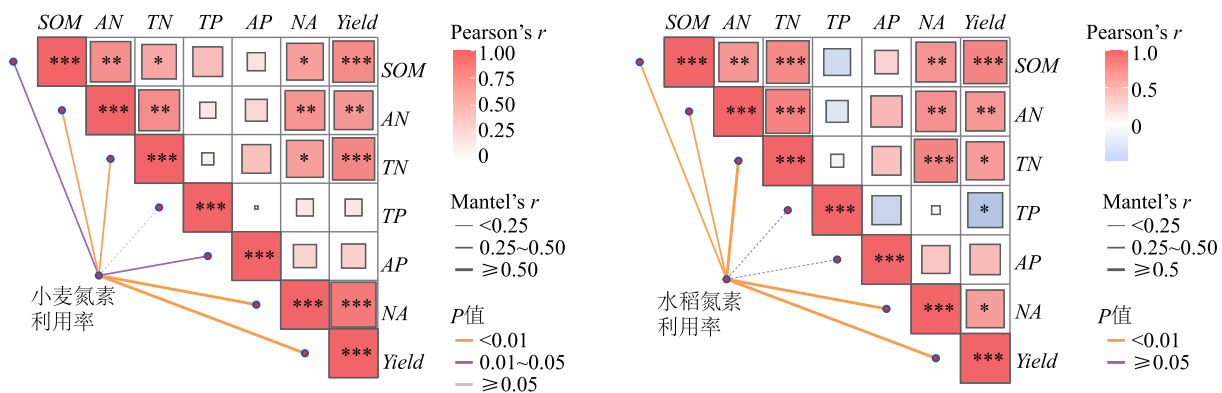
| 年份 | 作物 | 处理 | 有机质含量 (g/kg) | 全氮含量 (g/kg) | 全磷含量 (g/kg) | 碱解氮含量 (mg/kg) | 有效磷含量 (mg/kg) |
|------|----|-----|-----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| 2022 | 水稻 | CK | 15.83±1.12c | 0.78±0.09b | 0.53±0.04b | 78.26±7.20d | 81.23±3.17d |
| | | W0 | 17.30±0.43b | 1.10±0.05a | 0.81±0.03a | 99.90±4.59c | 105.12±3.41c |
| | | W3 | 17.71±0.25b | 1.12±0.01a | 0.82±0.04a | 110.19±12.53bc | 118.53±3.47a |
| | | W5 | 18.19±1.83b | 1.15±0.15a | 0.84±0.10a | 120.76±9.61ab | 117.23±6.29a |
| | | W7 | 18.53±0.62b | 1.15±0.04a | 0.86±0.06a | 120.86±17.09ab | 104.42±1.65c |
| | | W10 | 20.74±0.76a | 1.19±0.06a | 0.90±0.10a | 130.40±7.14a | 113.05±9.57ab |
| | | WJ7 | 18.02±0.82b | 1.14±0.02a | 0.86±0.10a | 101.39±15.55c | 108.55±2.64bc |
| | 小麦 | CK | 14.59±0.65c | 0.85±0.07d | 0.65±0.01a | 86.74±9.81d | 56.05±4.90b |
| | | W0 | 15.91±0.69bc | 1.15±0.01c | 0.71±0.05a | 97.14±4.91cd | 74.77±22.99ab |
| | | W3 | 17.51±1.32ab | 1.22±0.01c | 0.70±0.15a | 106.69±6.13bc | 83.51±12.74a |
| | | W5 | 18.08±1.15ab | 1.33±0.02b | 0.76±0.01a | 124.90±12.27abc | 78.43±4.47a |
| | | W7 | 18.59±2.14a | 1.36±0.0ab | 0.74±0.08a | 131.84±3.47a | 89.27±10.04a |
| | | W10 | 18.34±0.53ab | 1.23±0.04c | 0.79±0.07a | 128.37±4.91abc | 72.94±4.11ab |
| | | WJ7 | 18.30±1.52ab | 1.41±0.01a | 0.72±0.09a | 129.53±16.02ab | 88.17±8.11a |
| | 水稻 | CK | 15.82±0.24c | 1.05±0.07d | 0.61±0.05b | 71.74±1.64d | 67.03±2.40d |
| | | W0 | 18.85±0.50bc | 1.14±0.04c | 0.71±0.06a | 91.72±2.13c | 99.52±3.06bc |
| | | W3 | 21.72±1.14ab | 1.26±0.01b | 0.74±0.07a | 105.95±10.13b | 96.90±3.07c |
| | | W5 | 22.17±4.76ab | 1.36±0.02a | 0.73±0.03a | 109.04±4.65b | 103.75±1.55b |
| | | W7 | 23.08±1.25a | 1.37±0.05a | 0.71±0.07a | 123.06±6.79a | 99.34±0.88bc |
| | | W10 | 22.60±7.91ab | 1.33±0.07ab | 0.68±0.05ab | 122.67±2.07a | 109.67±6.08a |
| | | WJ7 | 23.03±8.31a | 1.34±0.05ab | 0.71±0.07a | 115.01±5.72ab | 111.79±6.83a |

同列数据后标有不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。CK、W0 处理、W3 处理、W5 处理、W7 处理、W10 处理、WJ7 处理见图 1 注。

2.5 稻麦氮素利用率影响因素

图 4 的相关性分析结果表明,在普通尿素与控释尿素配比条件下,小麦对氮素的利用率与土壤有机质含量、有效磷含量呈显著正相关,与碱解氮含

量、全氮含量、小麦产量、氮素积累量呈极显著正相关($P<0.05$),水稻对氮素的利用率与土壤全氮含量、碱解氮含量、有机质含量、产量、氮素积累量呈极显著正相关($P<0.01$)。



SOM:土壤有机质含量;TN:土壤总氮含量;TP:土壤总磷含量;AN:土壤碱解氮含量;AP:土壤有效磷含量;NA:氮素积累量。*、**、*** 分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平显著相关。Pearson's r (皮尔逊相关系数):用于衡量两个变量之间的线性相关程度,取值范围在-1 到 1 之间,1 表示完全正相关,-1 表示完全负相关,0 表示无线性相关。图中通过颜色深浅直观展示其数值大小,红色越深,Pearson's r 越接近 1,相关性越强。Mantel's r :用于检验两个矩阵之间的相关性。如果 Mantel's r 值越大, P 值越小,通常意味着相关因素对小麦氮素利用率和水稻氮素利用率影响较大。Mantel's r 数值大小通过线型粗细进行判断。

图 4 稻麦氮素利用率(NUE)与产量、氮素积累量和土壤肥力指标间的相关性

Fig.4 Correlation analysis between nitrogen use efficiency (NUE) and yield, nitrogen accumulation and soil fertility index of rice and wheat

3 讨论

3.1 普通尿素与控释尿素配比一次性施肥对稻麦产量及产量构成的影响

普通尿素与控释尿素配比一次性施肥可促进稻麦产量的增加。张敬昇等^[17]的试验结果表明,与常规尿素处理相比,添加 20%以上控释氮肥处理使小麦产量提高 6.0%~14.0%,使水稻产量提高 7%~11%。姬景红等^[18]研究发现,与施用普通尿素相比,在控释尿素与普通尿素配施处理下,水稻增产 7.3%~15.7%。在本研究中,普通尿素与控释尿素简化配施处理的稻麦产量分别较常规施肥处理提高,最高分别提高 35.4%、40.3%。稻麦产量提高的原因主要有:(1)控释尿素配施普通尿素能有效调控产量构成因素(穗数、结实率)和灌浆特征参数,优化作物籽粒灌浆进程,促进产量提高^[19];(2)控释尿素和普通尿素配施处理的氮素养分释放,能够增加土壤中全氮及碱解氮含量,提高土壤供氮能力,更加契合作物对养分的需求特征。袁漫漫等^[20]认为,在等氮或减氮条件下,控释氮肥与普通氮肥一次性基施处理均能提高水稻产量、氮素利用率及经济效益,其中以 70%控释氮肥+30%普通氮肥配施一次性基施的效果最佳。陈剑秋^[21]研究发现,供试水稻增产效果最好的处理为 70%控释氮肥与 30%普通氮肥配合施用。何杰等^[13]研究发现,冬小麦适宜的控释氮肥配施比例为 20%~40%。本研究发现,在 3 年试验期内,70%控释氮肥+30%普通氮肥配施处理的水稻产量整体上最高,30%控释氮肥+70%普通氮肥配施处理的小麦产量整体上最高。上述结果表明,适宜的配施比例既能有效提供作物生育前期的养分需求,又能延长氮素供应,适配作物中后期对养分的需求,以促进作物生长发育。顾文健等^[22]认为,缓释氮肥配施处理能够增加小麦产量,以 70%控释氮肥+30%普通氮肥配比的表现最优;李伟等^[23]研究发现,冬小麦增产增收的最优方案是 50%控释氮肥的处理。造成这一差异的可能原因是:(1)试验施氮量不同;(2)作物轮作方式不同;(3)试验地区和气候条件的差异。在本研究中,在普通尿素与控释尿素配比一次性施肥条件下,减氮 20%对稻麦产量无显著影响。Zheng 等^[24]同样发现,在控释尿素掺混普通尿素施用条件下,减氮 30%的处理未降低小麦产量。其原因可能是,与普通尿素处理相比,配施控释尿素更有利于协调氮肥供应与作物需求之间的

关系,因而使作物产量维持稳定。

3.2 普通尿素与控释尿素配比一次性施肥对稻麦氮素利用率的影响

普通尿素与控释尿素配比一次性施肥显著提高了稻麦氮素利用率。施用控释尿素可持续释放氮素,为作物生长提供养分,满足水稻、小麦轮作制度下作物对氮素的需求,从而避免盈余氮素流失而导致的氮素利用率的降低^[25-27]。马富亮等^[28]研究发现,相比于单施普通氮肥,施用控释氮肥处理的氮素利用率提高了 58.2%~101.2%。Fu 等^[29]同样发现,控释氮肥的施用能够使早稻的氮肥利用率提高 13.6%~86.4%,晚稻的氮肥利用率提高 100.0%~161.4%。在大田条件下,普通尿素的释放速度快,施入土壤后快速水解,从而促进作物早期生长发育。而控释尿素释放高峰后移,能够为作物后期生长发育提供必需的氮素,满足作物关键生育期对养分的需求,促进成熟期氮素向穗部转运^[21],进而促进稻麦氮素利用率的提升。此外,相关性分析结果发现,稻麦产量、氮素累积量和土壤肥力性状的提升均促进了稻麦氮素利用率的提升。在本研究中,当控释尿素配施比例分别为 70%、100%时,水稻、小麦对氮素的利用率最高。薛欣欣等^[30]同样发现,随着控释尿素配施比例的提高,水稻对氮素的利用率呈升高的趋势,其中 30%普通尿素+70%控释尿素处理的效果最佳。但梁靖越等^[31]认为,与常规尿素施肥相比,40%控释氮肥+60%普通氮肥处理下小麦对氮素的利用率最高。造成该差异的原因可能主要与试验区作物品种、土壤肥力、气候环境等因素有关。在本研究中普通尿素与控释尿素简化配施条件下,减氮 20%处理对稻麦的氮素利用率整体上均无显著影响,但会降低水稻的氮素积累量。Tian 等^[32]同样发现,在普通尿素与控释尿素配比一次性施肥条件下,减氮 20%处理对水稻氮素利用率无显著影响。

3.3 普通尿素与控释尿素配比一次性施肥对土壤肥力的影响

普通尿素与控释尿素配比一次性施肥提高了 2022 年水稻收获期后土壤有机质含量。高丽超等^[33]同样发现,控释氮素与普通氮素简化配施处理能够显著提高土壤的有机质含量。其原因可能是施用控释氮肥对提高作物的氮素积累量、增强作物的根系强度、增加作物生物量和植株残体有促进作用,并且控释尿素的施用能够提高土壤蓬松度、通透性,改善土

壤菌群的活性和丰度,增加土壤保肥力,促进土壤中有机残体的腐殖化过程,从而导致土壤有机碳的积累^[34-35]。在本研究中,普通尿素与控释尿素简化配施处理下,70%、100%控释尿素掺混处理对提升稻麦轮作土壤有机质含量的效果较好。王海月等^[36]研究发现,在 70%缓释氮肥+30%常规氮肥处理下,土壤的有机质含量最高。王雨桐^[37]的研究同样发现,施用控释氮肥能够促进土壤有机质含量的提高。此外,在本研究中,施用控释尿素增加了 2022 年水稻收获后土壤氮素含量。何杰等^[13]同样发现,与单施尿素相比,配施 20%以上控释氮肥能有效增加麦田土壤的氮素养分含量,其中土壤中碱解氮、全氮含量均显著增加。前人研究发现,随着控释尿素配施比例的升高,土壤氨挥发速率呈下降趋势^[38-39],并且控释尿素能有效抑制土壤硝化^[23],显著降低土壤中硝化螺菌数量^[40],进而减少土壤氮素损失,提高土壤氮素残留量。此外,本研究还发现,减少氮肥施用量不会显著降低土壤的养分含量。

4 结 论

本研究结果表明,与普通尿素施肥处理相比,普通尿素与控释尿素配比一次性施肥处理能够显著提高稻麦产量,在 3 年试验期内,水稻、小麦的最高产量分别达 8.26 t/hm²、6.09 t/hm²,且均以 W7 处理最高。其中水稻、小麦产量的提高均归因于产量构成因素中穗数的提高。在 3 年试验期间,普通尿素与控释尿素配比一次性施肥处理能够显著促进稻麦氮素积累量的增加和氮素利用率的提高,其中 W7 处理的水稻和 W10 处理的小麦对氮素的利用率最高,平均分别达到 45.6%、47.5%。稻麦氮素利用率的提高主要归因于稻麦产量、氮素积累量和土壤肥力指标的提高,特别是土壤有机质、全氮含量、有效磷含量的增加。综上,在江苏里下河地区稻麦轮作条件下,水稻适宜的控释尿素配施比例为 70%,小麦适宜的控释尿素配施比例为 70%~100%。

参考文献:

- [1] ZHANG H M, XU M G, SHI X J, et al. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in Southern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88(3): 341-349.
- [2] FAN M S, SHEN J B, YUAN L X, et al. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(1): 13-24.
- [3] 巨晓棠,张福锁. 氮肥利用率的意义及其提高的技术措施[J]. *科技导报*, 2003, 21(4): 51-54.
- [4] 武志杰,周键民. 我国缓释、控释肥料发展现状、趋势及对策[J]. *中国农业科技导报*, 2001, 3(1): 73-76.
- [5] 于立芝,李东坡,俞守能,等. 缓/控释肥料研究进展[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1559-1563.
- [6] 樊小林,刘芳,廖照源,等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 463-473.
- [7] 张夫道,王玉军. 我国缓/控释肥料的现状和发展方向[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(4): 1-4.
- [8] 李敏,李广涛,叶舒娅,等. 连续施用控释氮肥对超级水稻产量、氮肥利用率及土壤养分变化的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(33): 130-134.
- [9] 杨金宇,李援农,王凯瑜,等. 控释氮肥与普通尿素配施比例和方法对冬小麦灌浆特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 442-452.
- [10] 常凤,王海标,陶静静,等. 减氮配施控释尿素对冬小麦产量及氮肥效率的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(25): 1-6.
- [11] 侯红乾,冀建华,刘益仁,等. 缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 43-50.
- [12] 王寅,冯国忠,张天山,等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(3): 518-528.
- [13] 何杰,张敬昇,王昌全,等. 包膜控释氮肥配施尿素对冬小麦产量与氮素积累及利用的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 34-42.
- [14] 王义凡,任宁,董向阳,等. 控释尿素与普通尿素配施对小麦产量、氮素吸收及经济效益的影响[J]. *作物杂志*, 2023, 39(5): 117-123.
- [15] 马国辉,龙继锐,戴清明,等. 超级杂交中稻 Y 两优 1 号最佳缓释氮肥用量与密度配置研究[J]. *杂交水稻*, 2008, 23(6): 73-77.
- [16] WEI H Y, HU L, ZHU Y, et al. Different characteristics of nutrient absorption and utilization between inbred japonica super rice and inter-sub-specific hybrid super rice[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 88-96.
- [17] 张敬昇,李冰,王昌全,等. 控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 110-118.
- [18] 姬景红,李玉影,刘双全,等. 黑龙江省不同区域水稻简化施肥效果研究[J]. *黑龙江农业科学*, 2010(7): 44-47.
- [19] 冯朋博,康建宏,梁熠,等. 普通尿素与控释尿素配施比例和方法对土壤氮素供应和春玉米产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(4): 692-704.
- [20] 袁媛媛,叶舒娅,刘枫,等. 树脂包膜尿素对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(增刊 1): 83-87.
- [21] 陈剑秋. 几种新型缓控释肥工艺及养分释放特征研究[D]. 泰安:山东农业大学,2012.

- [22] 顾文健,高正宝. 缓释氮肥配比及减施对小麦产量和效益的影响[J]. 安徽农学通报,2023,29(12):16-20.
- [23] 李伟,李絮花,董静,等. 冬小麦控释尿素与普通尿素的最佳配比研究[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(3):629-635.
- [24] ZHENG W K, LIU Z G, ZHANG M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research,2017,205:106-115.
- [25] 樊小林,刘芳,廖照源,等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2):463-473.
- [26] 任翠莲,马银丽,董娴娴,等. 控释尿素对夏玉米产量、氮肥利用效率及土壤硝态氮的影响[J]. 河北农业大学学报,2012,35(2):6.
- [27] 韩晓日. 新型缓/控释肥料研究现状与展望[J]. 沈阳农业大学学报,2006,37(1):3-8.
- [28] 马富亮,宋付朋,高杨,等. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(1):67-72.
- [29] FU J, ZHU Y, JIANG L. Use of controlled release fertilizer for increasing n efficiency of direct seeding rice[J]. Pedosphere, 2001, 11(4): 333-339.
- [30] 薛欣欣,吴小平,王文斌,等. 控失尿素与普通尿素配施对水稻产量及氮肥利用效率的影响[J]. 热带作物学报,2018,39(11):2132-2139.
- [31] 梁靖越,张敬昇,王昌全,等. 控释尿素对小麦籽粒产量和氮素利用率的影响[J]. 核农学报,2018,32(1):157-164.
- [32] TIAN C, SUN M X, ZHOU X, et al. Increase in yield and nitrogen use efficiency of double rice with long-term application of controlled-release urea[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(7):2106-2118.
- [33] 高丽超,郑文魁,程运龙,等. 长期施用控释掺混尿素对麦田土壤酶活性及养分的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(2):343-350.
- [34] 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.
- [35] 孙凤霞,张伟华,徐明岗,等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2792-2798.
- [36] 王海月,杨志远,马均. 氮肥减量配施和株距对机插杂交籼稻氮素利用特征及产量的影响[J]. 中国水稻科学,2018,32(4):374-386.
- [37] 王雨桐. 缓释氮肥与速效氮肥配施减量对水稻生长的影响机制[D]. 扬州:扬州大学,2020.
- [38] LI P F, LU J W, WANG Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 251: 78-87.
- [39] 郑圣先,刘德林,聂军,等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(2):137-142.
- [40] 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.

(责任编辑:徐艳)