

苏嘉颖,余淋,侯建霞,等. 减氮和控释肥替代对巢湖流域直播稻产量和环境效益的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(21):251-257.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.21.031

减氮和控释肥替代对巢湖流域直播稻产量和环境效益的影响

苏嘉颖¹,余淋²,侯建霞²,陈勇³,陈骏³,李慧敏³,熊启中⁴,李增源¹

(1. 中国农业大学国家农业绿色发展研究院/资源与环境学院营养素利用与管理国家重点实验室,北京 100083;
2. 西南大学资源环境学院,重庆 400716; 3. 中盐安徽红四方股份有限公司绿色智能复合肥研究院,安徽合肥 230001;
4. 农田生态保育与养分资源高效利用安徽省重点实验室/安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心/
自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院,安徽合肥 230036)

摘要:为探究巢湖流域保护区内减氮增效潜力,在安徽巢湖中埠设置对照(CK,不施氮)、农户常规(N100,水稻配方肥,氮肥用量 263 kg/hm²)、农户常规减氮 25%(N75,水稻配方肥,氮肥用量 210 kg/hm²)、农户常规减氮 50%(N50,水稻配方肥,氮肥用量 156 kg/hm²)、农户常规减氮 50%施用控释肥(K50,增效控释肥,氮肥用量 156 kg/hm²)共 5 个处理开展田间试验,研究减氮+产品的综合技术组合模式对直播稻产量、氮素利用率和环境成本的影响。结果表明,控释肥对巢湖流域直播稻减氮增效有显著积极影响,与 N100 处理相比,N75 处理及 N50 处理可以实现稳产,且环境成本分别降低 30.67% 和 32.67%,但依靠减氮+产品的技术组合方案 K50 处理则在保持稳产和较高氮素利用率的情况下,可大幅降低施肥带来的环境成本 40.80%。综上,为实现巢湖地区水稻绿色减排,宜推广应用减氮 50%施用控释肥的减氮+产品的综合技术组合模式 K50 处理。

关键词:直播稻;控释肥;氮肥减量;干物质积累量;氮素利用效率;环境成本

中图分类号:S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)21-0251-07

氮素是影响水稻生长发育及产量形成的主要因素,其管理策略直接关系到农业生产的可持续性与环境健康^[1-2]。但在实际生产中,农户为追求高产而大量施肥的现象屡见不鲜,不仅造成养分供应

失衡和利用率低,还给流域环境带来污染^[3]。巢湖流域作为我国重要的五大淡水湖之一,长期受到环境污染的影响,其中农业氮素污染占流域污染的比例高达 52.5%^[4]。王雪蕾等通过 DPERS 模型情景分析发现,如果巢湖流域农田施肥量减少 30%,总氮和总磷产生量能分别减少 43% 和 30%^[5]。因此,安徽省合肥市于 2023 年颁布了巢湖流域化肥减量政策,在保证粮食不减产的情况下,一级保护区内的所有耕地氮肥用量需控制在 210 kg/hm² 以下,该政策给巢湖流域水稻减肥增效带来了经济和环境

收稿日期:2024-10-29

基金项目:绿色智能复合肥研究院人员培训服务与巢湖养分管理政策研究项目。

作者简介:苏嘉颖(2000—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要从事新型肥料研究。E-mail:sujiayingzz@outlook.com。

通信作者:李增源,博士研究生,主要从事养分资源管理及绿色智能肥料产品研究。E-mail:514851596@qq.com。

进展[J]. 玉米科学,2021,29(3):111-122.

[28] 甘元炜,冯小杰,李永华,等. 施用微生物肥料对我国玉米产量影响的 Meta 分析[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(12):2247-2257.

[29] 彭估松,郑志仁,刘涤,等. 淀粉的生物合成及其关键酶[J]. 植物生理学通讯,1997,33(4):297-303.

[30] 黄承刚,李津源,徐任园,等. 直链淀粉含量对淀粉-脂肪酸复合物形成及理化特性的影响[J]. 食品工业科技,2022,43(13):49-55.

[31] 王艳平,李萍,吴文强,等. 生物有机肥和微生物菌剂对北京山区连作茶菊生长及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料,

2023(12):107-113.

[32] 吴子牛,何丽梅,熊莹,等. 氮素穗肥对杂交水稻籽粒灌浆影响及其与淀粉合成关键酶活性间关系[J]. 中国水稻科学,2024,38(1):48-56.

[33] Xiao N, Ma H Z, Wang W X, et al. Overexpression of ZmSUS1 increased drought resistance of maize (*Zea mays* L.) by regulating sucrose metabolism and soluble sugar content[J]. *Planta*,2024,259(2):43.

[34] Cutulle M A, Armel G R, Kopsell D A, et al. Several pesticides influence the nutritional content of sweet corn[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2018,66(12):3086-3092.

的双重挑战^[6]。

已有研究表明,氮肥合理减施不会对水稻产量造成显著影响^[7-8]。李录久等在巢湖流域开展定位试验发现,在施氮 180 kg/hm² 的基础上减施 20% 和 40% 作物产量没有显著减少^[9]。以往的研究大多关注减施氮肥所造成的产量效益差异,因此有学者提出质疑,认为通过减少肥料投入总量来达到控制污染的潜力有限,难以保证环境和经济效益相平衡^[10],但未提出明确的措施来实现高产高效和绿色减排目标协同。随着肥料技术的发展以及施肥水平的提高,作物养分平衡 + 新型肥料的思路似乎能够为巢湖地区的难题提出新的建议^[11]。怀燕等对多种新型肥料减氮施肥在水稻上的效应进行评估发现,减量 12.8% 施肥对产量没有显著影响^[12]。王文青等设置了不同施肥梯度下施用新型缓释肥料,发现减氮 16% 施用新型缓释肥不会显著减少产量,但减氮 24% 施用新型肥料则显著减少产量 10.84%^[13]。新型肥料通过在物理、化学或生物作用下使其营养功能得到增强,因此其不仅能增加作物对营养物质的吸收,还能减少养分流入环境,对于提高肥料利用率和减少环境污染有很大的帮助^[14-15]。红四方增效控释肥通过添加遇水能形成分子网络的控失剂,减少化肥养分流动性,在提高水稻产量和农学利用效率方面潜力巨大^[16-17]。杨晓庆等在全国 24 个省份三大作物上的肥效试验结果表明,红四方增效控释肥对水稻、玉米和小麦的平均增产率为 8.34%、8.36% 和 4.78%^[18]。在环境减排方面,控释肥平均能使地表径流氮损失减少 45% 左右,渗漏流失减少 50% 左右,土壤 NH₃ 挥发减少 17% ~ 32%^[19]。

综上,为使巢湖流域在减氮施肥的同时达到经济效益与环境成本的平衡,并减少面源污染,本研究在巢湖流域一级保护区内的水稻主栽区开展减氮施肥和减氮 + 产品多种处理试验,明确常规减氮施肥和减氮施用新型肥料对水稻产量构成、干物质积累量、氮素利用率和环境成本的影响差异,探索通过减氮 + 新型肥料实现该地区水稻绿色减排和高产高效协同的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2022 年 5—11 月在安徽省巢湖市中埠镇三圩村(117°88'E,31°61'N)进行。试验地为亚热

带季风气候,四季分明,光热充足,夏季高温多雨,无霜期长,属典型的亚热带季风气候,当地年平均气温和降水量分别为 16.5 °C 和 1 100 mm,无霜期约为 250 d。

1.2 供试材料

供试土壤:0 ~ 20 cm 耕层土壤 pH 值为 6.16,有机质含量 35.16 g/kg,全氮含量 3.67 g/kg,碱解氮含量 166.86 mg/kg,有效磷含量 15.97 mg/kg,速效钾含量 198.95 mg/kg。

供试肥料:施用的复合肥分别为水稻专用配方肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 18%、10%、18%)和增效控释肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 23%、8%、15%),施肥处理中氮肥、磷肥和钾肥不足部分用尿素(N 含量 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%)和氯化钾(K₂O 含量 60%)补充。所有肥料均由中盐安徽红四方肥业股份有限公司提供。

供试作物:水稻品种乔两优 17 号。

1.3 试验设计

田间试验采用完全随机区组设计,共设置 5 个处理:(1)对照(N0,不施氮);(2)农户常规(N100,水稻配方肥,氮肥用量 N 263 kg/hm²);(3)农户常规减氮 25% (N75,水稻配方肥,氮肥用量 N 210 kg/hm²);(4)农户常规减氮 50% (N50,水稻配方肥,氮肥用量 N 156 kg/hm²);(5)农户常规减氮 50% 施用控释肥(K75,增效控释肥,氮肥用量 N 156 kg/hm²)。除不施氮处理外,各施肥处理磷钾肥用量均一致,分别为 P₂O₅ 45 kg/hm² 和 K₂O 105 kg/hm²,且与农户常规的施肥习惯保持一致,即氮肥总量的 40% 和全部磷钾肥作为基肥人工撒施,40% 和 20% 的氮肥分别于水稻分蘖期和抽穗期通过人工撒施尿素补充。

采用直播形式栽种,6 月 13 号播种,种植密度为 75 kg/hm²,11 月 10 日收获。各处理重复 3 次,所有处理除肥料种类和氮肥用量差异外,其他田间农事操作均保持一致,且同当地农户丰产田一致。

1.4 样品采集与分析

1.4.1 水稻样品采集及测定 样品采集:各小区分别于水稻分蘖期和成熟期避开边行随机选取 0.5 m² 内所有水稻植株样品,用自来水和蒸馏水分别快速冲洗后,装入牛皮纸袋。

测定指标及方法:采集的整株样品,置于预先升温至 105 °C 烘箱中杀青 30 min 后,75 °C 烘箱烘干至恒重,计算地上部干物质积累量。其中,成熟期

表 1 试验处理及肥料投入量

处理	处理名称	肥料种类	肥料(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)投入量(kg/hm ²)	说明
N0	不施氮	单质肥料	0-45-105	全基肥施入
N100	农户常规	水稻配方肥(N 18% : P ₂ O ₅ 10% : K ₂ O 18%)	263-45-105	一基两追(N 40% : P ₂ O ₅ 40% : K ₂ O 20%)
N75	农户常规减氮 25%		210-45-105	
N50	农户常规减氮 50%		156-45-105	
K50	农户常规减氮 50% 施用控释肥	增效控释肥(N 23% : P ₂ O ₅ 18% : K ₂ O 5%)	156-45-105	

植株收获穗部并进行考种,测定千粒重、每穗粒数、秸秆和籽粒产量。水稻生殖生长阶段秸秆干物质积累量为成熟期水稻秸秆干物质积累量与分蘖期干物质积累量的差值,计算干物质分配比例:

干物质分配比例 = 干物质积累量/干物质质量累计总量 × 100%。

产量测定:每小区采集 3 个 1 m² 水稻穗部用于测产,测定单位面积有效穗数和籽粒产量。

氮素利用指标测定:经烘干粉碎后的植物样品用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮,连续流动分析仪测定样液氮浓度,计算干物质氮肥累计效率、氮素累计总量、氮素收获指数和氮肥偏生产力,计算方法如下:

干物质氮肥累计效率 = 成熟期地上部干物质累计总量/氮肥施氮量;

氮素累计总量 = 成熟期地上部干物质积累量 × 植株含氮量;

氮肥偏生产力(kg/kg) = 施肥区实际产量/氮肥施用量;

氮肥利用率 = (施肥区氮素累计总量 - 不施肥区氮素累计总量)/施氮量。

1.4.2 水稻季化肥单位环境成本估算 肥料单位环境成本估算采用能值分析理论和伤残调整生命年核算方法^[20-21]。流转系数通过综合巢湖流域水稻化肥养分运移转化方面的研究成果^[22-24]而来,其中大气中 NH₃、N₂O、N₂ 分别为 6.19%、0.60%、0.30%;土壤淋溶残留硝态氮约为 6.02%,铵态氮约为 0.02%;地面径流率中硝态氮约为 0.86%,铵态氮约为 0.23%。单位数量宏观经济价值的能值载荷(C_g)为一个国家或地区在单位时间内施用的能值与 GDP 比。2022 年国内生产总值为 121.02 亿元,全年能源消费总量为 54.01 亿 t 标准煤,根据李双成的研究方法,当年的 C_g 为 1.76 × 10⁷ J/元^[25]。环境成本相关计算公式如下:

$$\text{能值成本}(U) = Cd_i \times M \times C_{ei} \times W_c / W_f \times C_m;$$

$$\text{环境成本}(\text{Emdollar}) = U / C_g。$$

式中: Cd_i 表示单位污染物剂量引致的生命损害年数,kg/年; M 表示氮肥的施用折纯量,t; C_{ei} 表示营养元素的流转系数; W_c 表示所产生污染物的分子量; W_f 为 N 原子量; C_m 表示单位劳动力的年能值消费量,此处取 1.77 × 10¹⁰ J; C_g 为单位数量宏观经济价值的能值载荷,J/元; Emdollar 为施用每单位氮肥所产生的环境成本,元/kg。

1.4.3 施肥综合经济效益计算 稻谷和肥料价格均按当地市场同期价计: 稻谷 2.8 元/kg, 尿素 3.1 元/kg, 磷肥 0.8 元/kg, 钾肥 2.5 元/kg, 增效控释肥 3.7 元/kg, 水稻配方肥 3.8 元/kg。根据当年种植实际投入, 农药价格为 2 100 元/hm², 种子为 35.5 元/kg。农机作业费按照当地雇工价, 旋耕为 1 200 元/hm², 收割为 1 500 元/hm²。综合效益计算以稻谷产值扣除栽种成本(农业、种子和农机管理)、肥料成本和环境成本计算, 公式如下: 综合经济效益 = 稻谷产值 - 栽种成本 - 肥料成本 - 环境成本。试验所用种子、农药以及田间管理均由农户统一管理。

1.5 数据统计

采用 Excel 2016 进行试验数据的录入和处理, 采用 SPSS 26.0 软件进行相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 减氮施肥对直播稻产量及其构成因素的影响

施氮显著增加直播稻产量,且在农户常规施氮量基础上适当减施不会显著减少直播稻产量(表 2)。与 N0 处理相比,施氮处理中 N100、N75 和 K50 产量增加 34.78% ~ 37.27%,而 N50 处理产量没有达到显著变化。分析水稻产量构成要素方差结果可知,施氮通过影响直播稻有效穗数、千粒重和结实率来影响产量。与 N0 处理相比,N75 处理显著

增加有效穗数 35.29% ; N50 处理分别显著增加水稻结实率和千粒重 5.68% 和 11.87% , 但显著减少穗粒数 14.33% 。同时, 与 N75 处理相比, N50 处理

和 K50 处理均分别显著减少穗粒数 14.56% 和 9.30% , 但其他产量构成之间没有显著差异。

表 2 减氮施肥对直播稻产量及产量构成因子的影响

处理	有效穗数	穗粒数	结实率 (%)	千粒重 (g)	实际产量 (kg/hm ²)	增产率 (%)
N0	175.67 ± 1.20b	182.55 ± 4.55ab	88 ± 2b	23.84 ± 0.03b	7 056.19 ± 225.68b	—
N100	208.00 ± 18.34ab	180.39 ± 4.62ab	91 ± 1ab	26.13 ± 0.31a	9 692.76 ± 320.88a	37.27
N75	237.67 ± 12.57a	186.89 ± 5.14a	92 ± 1ab	26.11 ± 0.21a	9 633.23 ± 385.37a	36.52
N50	234.00 ± 6.66ab	159.67 ± 6.17c	93 ± 0a	26.67 ± 0.58a	8 429.88 ± 395.74ab	19.47
K50	201.00 ± 22.55ab	169.50 ± 2.33bc	91 ± 1ab	26.90 ± 0.46a	9 510.27 ± 819.27a	34.78

注: 各列数字后小写字母有相同者, 表示处理间差异不显著, 下同。

2.2 减氮施肥对直播稻地上部干物质积累量和效率的影响

减氮施肥显著影响直播稻营养和生殖生长阶段的氮累积和分配效率, 并增加干物质氮肥积累效率(表 3)。与 N100 处理相比, N75 处理、N50 处理和 K50 处理显著增加干物质积累效率分别可达 26.29%、55.14% 和 77.86% , 且同样减氮 50% 施肥的 K50 处理干物质氮肥积累效率比 N50 处理更高。在直播稻营养生长阶段, N75 处理干物质积累量最高, N0 处理最低, 其他处理之间没有显著差异。各处理对生殖生长阶段中秸秆和籽粒干物质积累量

表现不同, 与 N100 处理相比, N75 处理显著减少秸秆干物质积累量 55.53% , 显著增加籽粒干物质积累量 20.95% 。干物质分配比例中营养生长所占比例最高的为 N75 处理, 最低的为 N0 处理, 而到了生殖生长中, 秸秆和籽粒干物质分配比例最高的分别是 N0 处理和 N75 处理。与 N100 处理相比, N75 处理显著增加了分蘖期和籽粒干物质分配比例, 降低了秸秆干物质分配比例; 而 N50 处理与 K50 处理分蘖期和秸秆干物质分配比例没有显著变化, 籽粒干物质分配比例显著平均增加近 5.5% 。

表 3 减氮施肥对直播稻氮素计和养分效率的影响

处理	干物质积累量 (g/m ²)			干物质分配比例 (%)			干物质氮肥积累效率
	分蘖期	收获期		营养生长	秸秆	籽粒	
		秸秆	籽粒				
N0	273.48 ± 13.29c	554.24 ± 43.13a	816.27 ± 68.24b	17c	34a	50ab	—
N100	450.48 ± 8.87b	571.28 ± 79.25a	819.47 ± 25.63b	24b	31a	45b	7.00 ± 0.23d
N75	610.71 ± 22.79a	254.02 ± 89.77b	991.17 ± 65.67a	33a	13b	53a	8.84 ± 0.61c
N50	469.49 ± 7.09b	370.00 ± 79.33ab	853.90 ± 20.68ab	28b	22ab	51ab	10.86 ± 0.51b
K50	458.19 ± 19.71b	508.05 ± 98.05ab	975.90 ± 50.04ab	24b	26a	50ab	12.45 ± 0.25a

2.3 减氮施肥对直播稻氮素利用率的影响

氮肥用量对水稻氮肥偏生产力、氮肥利用率有显著影响(表 4)。与 N100 处理相比, N75 处理显著增加氮肥利用率 22.51% , 而继续减施氮肥的 N50 处理则显著减少氮肥利用率 23.44% ; 与此同时, K50 处理不仅显著提高氮肥利用率 24.44% , 还显著增加氮肥偏生产力 50.61% 。对比不同部位氮含量和氮素累计总量发现, 与 N100 处理相比, N75 处理在秸秆氮含量和氮素累计总量上没有差异, 且显著增加籽粒氮含量 10.31% ; 而 N50 和 K50 显著减少秸秆、籽粒氮含量和氮素积累总量。相比于 N50

处理, K50 处理秸秆氮含量和氮素累计总量显著增加 19.73% 和 19.24% 。

2.4 不同施氮处理下的单位肥料环境成本

对不同处理肥料施用后营养物质的流向以及污染产生物的影响剂量进行分析(表 5)可知, 减氮施肥能不同程度降低能值成本和环境成本, 但常规施肥模式减氮施用降低环境成本潜力有限。与 N100 处理相比, 减氮施肥平均减少能值成本和环境成本分别为 30.79% 和 34.60% , 其中以 K50 处理能值成本和环境成本最低。与 N75 处理相比, N50 处理增加了能值成本和环境成本, 而同样的减氮 50%

表 4 减氮施肥对直播稻氮素利用率的影响

处理	秸秆氮含量 (mg/kg)	籽粒氮含量 (mg/kg)	氮素累计总量 (kg/hm ²)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥利用率 (%)
N0	3.27 ± 0.10c	7.47 ± 0.22c	113.60 ± 4.17d	—	—
N100	5.70 ± 0.22a	8.44 ± 0.21b	223.58 ± 4.65a	38.83 ± 3.07b	41.90 ± 1.77b
N75	5.32 ± 0.15a	9.31 ± 0.18a	221.39 ± 7.81a	43.49 ± 3.36ab	51.33 ± 2.72a
N50	3.70 ± 0.03c	8.42 ± 0.13b	164.14 ± 2.02c	53.52 ± 3.77ab	32.08 ± 1.28c
K50	4.43 ± 0.23b	8.59 ± 0.27b	195.72 ± 6.87b	58.48 ± 2.20a	52.14 ± 4.36a

表 5 不同施氮处理下的单位肥料环境成本

处理	类别	大气影响			土壤影响		水体影响		总计
		氨气	氧化亚氮	氮气	硝态氮	铵态氮	硝态氮	铵态氮	
计算 系数	流转系数(%)	6.19	0.60	0.30	6.02	0.02	0.86	0.23	—
	W_c/W_f	1.21	3.14	1.00	4.43	1.29	2.71	1.14	—
N100	能值成本[J/(hm ² ·年)]	1.03 × 10 ⁸	1.85 × 10 ⁶	1.10 × 10 ⁷	1.20 × 10 ⁸	2.86 × 10 ⁵	1.69 × 10 ⁷	1.10 × 10 ⁶	2.36 × 10 ⁸
	环境成本(元/hm ²)	58.8	1.05	6.25	68.43	0.17	11.98	3.33	150.00
N75	能值成本[J/(hm ² ·年)]	6.98 × 10 ⁷	1.25 × 10 ⁶	7.42 × 10 ⁶	8.12 × 10 ⁷	2.00 × 10 ⁵	1.42 × 10 ⁷	3.95 × 10 ⁶	1.50 × 10 ⁸
	环境成本(元/hm ²)	39.66	7.10	4.21	46.16	0.11	8.08	2.25	101.19
N50	能值成本[J/(hm ² ·年)]	7.20 × 10 ⁷	1.29 × 10 ⁶	7.65 × 10 ⁶	8.37 × 10 ⁷	2.06 × 10 ⁵	1.47 × 10 ⁷	4.08 × 10 ⁶	1.84 × 10 ⁸
	环境成本(元/hm ²)	40.89	0.73	4.34	47.59	0.12	8.33	0.23	104.32
K50	能值成本[J/(hm ² ·年)]	6.13 × 10 ⁷	1.10 × 10 ⁶	6.51 × 10 ⁶	7.13 × 10 ⁷	1.75 × 10 ⁵	1.25 × 10 ⁷	3.47 × 10 ⁶	1.56 × 10 ⁸
	环境成本(元/hm ²)	34.81	0.62	3.70	40.51	0.10	7.09	1.97	88.80

施用 K50 处理依旧能显著减少环境成本 12.24%。进一步对不同类别污染物能值成本进行分析,可以看出影响能值成本主要的因素为施肥引起的大气氨气挥发和土壤硝态氮淋溶,占到近能值成本 90% 左右,其后依次为大气氮气排放、水体硝态氮等。

2.5 不同施氮处理对直播稻综合经济效益的影响

为了能更加直观地了解到不同施氮处理下的

综合经济效益,通过对水稻整个种植体系的投入、环境成本和收益进行分析,给农户选择施肥技术模式提供合理参考。由表 6 可知,各施肥处理中 K50 处理经济效益最高,为 17 540.86 元/hm²;N50 处理综合效益最低,为 14 396.76 元/hm²。减氮施肥大幅减少施肥投入,相同施氮量下,增效控释肥比水稻配方肥能减少肥料成本 103.49 元/hm²。

表 6 不同施氮处理下的综合经济效益

处理	种子、农药投入 (元/hm ²)	农机操作费 (元/hm ²)	施肥投入 (元/hm ²)	环境成本 (元/hm ²)	产量收益 (元/hm ²)	综合经济效益 (元/hm ²)
N100	4 762.50	2 700.00	2 249.54	150.00	27 139.73	17 277.70
N75	4 762.50	2 700.00	1 989.81	101.19	26 973.04	17 419.54
N50	4 762.50	2 700.00	1 640.09	104.32	23 603.66	14 396.76
K50	4 762.50	2 700.00	1 536.60	88.80	26 628.76	17 540.86

3 讨论

3.1 减氮施肥对巢湖流域直播稻产量及其构成因子的影响

氮是作物生长发育不可或缺的营养元素,但过量施氮不仅不会增加产量,同时也会造成资源浪费,因此探究合理的施氮水平对减肥增效有重要意义^[26]。在本研究中,与不施氮相比,施氮平均增加

水稻产量 30.98%,而各施氮处理中减氮 25% 和减氮 50% 施肥处理没有显著减少直播稻产量,这与其他学者在巢湖流域开展的减氮试验结果^[27]类似。同时,相比于 N50 处理,K50 处理仍能提高并维持巢湖流域直播稻产量,达到既减肥又稳产的双重效果。说明减少氮投入量并不意味着减少水稻产量,合理的养分平衡和高效的氮肥运筹也发挥着至关重要的作用^[28]。对影响水稻产量的构成因子而言,

施氮处理较 N0 处理千粒重、结实率和有效穗数的变化趋势与产量变化相吻合,平均分别提高 9.61%、4.26% 和 25.33%,从而使产量维持在较高水平^[29]。因此,盲目减氮可能会导致减产,只有保证水稻整个生育期氮素充足,能促进籽粒的形成,才能维持产量^[30]。

3.2 减氮施肥对巢湖流域直播稻干物质积累量和氮素利用率的影响

前人研究表明,随着施氮量的增加,水稻氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均呈下降趋势,且表现出密切的负相关性^[31-32]。本试验设置了不同施肥处理,N75 处理减少了氮素投入,相应的干物质积累量并没有显著降低,而 N50 处理和 K50 处理则导致分蘖期干物质积累量显著降低,但籽粒干物质积累量没有显著降低。其中,各处理氮素吸收量以 N100 处理和 N75 处理最高,而 N50 处理和 K50 处理减少了水稻氮素吸收量。说明减氮施用减少了水稻地上部氮素吸收量,这与蒋鹏等的结果类似,在基肥不施氮条件下追肥(减氮 20%~30%),直播稻产量并未显著下降,氮肥农学利用率和氮肥偏生产力分别增加 28.9%~50.8% 和 25.8%~50.2%,即适量减氮可通过调节水稻的生长和氮素吸收特性来实现产量稳定^[33]。与 N100 处理相比,N75 处理和 K50 处理分别显著增加氮肥利用率 22.51% 和 24.44%,而 N50 处理则显著减少氮肥利用率 23.44%,这可能与增效控释肥中的改性聚天门冬氨酸有关,它可以富集氮磷钾及微量元素并供给植物,使得在减少氮肥的情况下,也能保证作物能吸收足够的养分。同时,本试验各减施氮肥处理的氮肥偏生产力为 43.49~58.48 kg/kg,显著高于 N100 处理,且均处于较适宜水平^[34]。

3.3 减氮施肥对巢湖流域直播稻的环境成本和施肥综合经济效益分析

根据报酬递减规律可知,不断增加施肥量污染环境并不会一直产生高效益,反而增加了肥料流入环境中污染环境的风险,给环境污染治理带来更多的花费,而盲目减施氮肥也存在降低产量的风险,因此探究适宜的减氮施肥技术、找到产量和环境等综合效益的平衡点至关重要。本试验结果表明,减氮施肥能显著降低单位施肥环境成本,但相比于 N75 处理,N50 处理并未达到降低单位施肥成本的目的,反而导致相反的结果。这可能是因为过度的减氮施肥没有配合合理的综合技术措施,导致氮肥

利用率减少,使流入环境中的肥料总量增加,从而增加了单位施肥环境成本^[9]。说明单纯的减氮并不代表能降低施肥带来的环境成本,而 K50 处理则能继续显著减少 14.88% 的环境成本,这与增效控释肥减少肥料施用后挥发、径流和淋溶等损失有关,保证了肥料较高的利用率^[16]。不同减肥措施的综合经济效益中,单一的减氮施肥带来的综合经济效益呈现先增加后减少趋势,N75 处理在稳定产量的同时减少了施肥投入,而 N50 处理虽降低施肥投入和环境成本,也导致产量收益大幅减少,导致综合经济效益大幅减少。本研究设置的 K50 处理通过使用控释肥,不仅大幅降低施肥投入和环境成本,还能维持较高的产量。按照巢湖流域水稻种植面积 5.13 万 hm^2 计算,与农户常规施肥相比,减氮 50% 施用水稻配方肥可减少环境成本 234.49 万元,而减氮 50% 施用增效控释肥可减少环境成本 314.16 万元,综合经济效益增加 1 359.89 万元,因此氮肥减量合理搭配肥料品种在减少环境成本和提高经济效益方面潜力巨大^[35]。

4 结论

不同减氮和施用控释肥模式对巢湖流域水稻产量和构成因子影响相对较小。其中,减氮 50% 配施控释肥(K50)处理增产效果显著,且显著提高了水稻的千粒重、结实率和有效穗数。K50 处理与农户常规施肥(N100)处理在干物质积累量、氮肥利用率和氮肥偏生产力方面均有显著差异。

不同减氮和施用控释肥模式在降低环境成本和提高经济效益方面具有巨大潜力。其中,K50 处理综合经济效益最高,其次为农户常规减氮 25% (N75)处理,分别为 17 540.86、17 419.54 元/ hm^2 。此外,减氮施肥能大幅降低施肥造成的环境成本,但过量减氮会导致环境成本有所增加。

综合考虑巢湖流域水稻产量、氮素利用率、环境成本和综合经济效益,K50 处理可在巢湖流域直播稻高产高效和绿色减排中推广应用。

参考文献:

- [1] 陈小荣,黄磊,钟蕾,等. 氮素亏缺对超级杂交早稻生长发育、产量形成及氮肥利用的影响[J]. 核农学报,2015,29(7): 1427-1435.
- [2] Zhou W, Lyu T F, Zhang P P, et al. Regular nitrogen application increases nitrogen utilization efficiency and grain yield in indica hybrid rice[J]. Agronomy Journal,2016,108(5):1951-1961.

- [3] 彭浩. 巢湖流域肥料利用现状分析与对策[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(17): 71-74.
- [4] 周楠楠, 王京京, 王家嘉, 等. 巢湖流域种植模式改变对养分表观平衡及土壤化学性质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 772-781.
- [5] 王雪蕾, 王新新, 朱利, 等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5): 1511-1519.
- [6] 娄庭, 龙怀玉, 杨丽娟, 等. 在过量施氮农田中减氮和有机无机配施对土壤质量及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(2): 11-15, 34.
- [7] 周江明, 余华波, 毛建芬. 水稻减氮施肥综合效益研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9): 260-263.
- [8] 俞祥群, 姜振辉, 王江怀, 等. 减氮施肥对春玉米—晚稻生产系统碳足迹的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1397-1403.
- [9] 李录久, 王家嘉, 李东平, 等. 减氮施氮对水稻生长和肥料利用效率的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(1): 99-100, 103.
- [10] 薛峰, 颜廷梅, 乔俊, 等. 太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 26-31, 51.
- [11] 周丽平, 赵秋, 张新建, 等. 新型增效复合肥料对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(2): 112-120.
- [12] 怀燕, 陈照明, 杨梢娜, 等. 新型肥料在水稻轻简化施肥中的稳产效应评估[J]. 中国农学通报, 2022, 38(15): 1-6.
- [13] 王文青, 何玮恒, 陈培峰, 等. 新型缓释肥料对水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 江西农业学报, 2023, 35(1): 84-87.
- [14] 赵秉强, 杨相东, 李燕婷, 等. 我国新型肥料发展若干问题的探讨[J]. 磷肥与复肥, 2012, 27(3): 1-4.
- [15] 庄振东, 李絮花, 张健, 等. 冬小麦—夏玉米轮作制度下腐植酸氮肥去向与平衡[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 201-206.
- [16] 蔡冬清, 吴林, 倪小宇, 等. 纳米控释肥技术控制湖泊富营养化面源污染的研究[C]//第十三届世界湖泊大会论文集: 中卷. 武汉, 2009: 1233-1238.
- [17] 严海珍. 增效控释肥在粳杂甬优8号上的施肥效果研究[J]. 现代农业科技, 2015(13): 29, 32.
- [18] 杨晓庆, 郑兴来, 孙玉龙. 中盐安徽红四方增效控释肥在不同作物上的应用效果[J]. 中国盐业, 2020(18): 40-43.
- [19] 余立祥, 卞坡, 吴跃进, 等. 化肥“控失”对作物氮素农学利用率的影响[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(24): 25-26.
- [20] 白保勋, 徐婷婷, 陈东海, 等. 不同土地利用类型化肥施用环境成本核算[J]. 河南科学, 2018, 36(1): 77-81.
- [21] 王道中, 郭熙盛, 王文军. 沿巢湖流域坡岗地地区水稻高效施肥技术研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(35): 17416-17418.
- [22] 汪丽婷, 马友华, 储茵, 等. 巢湖流域不同施肥措施下稻田氮磷流失特征与产量研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 40-43.
- [23] 王道中, 张成军, 郭熙盛. 减量施肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 161-165.
- [24] 何斌, 郑华, 黄璜, 等. 中国不同耕地类型化肥施用环境成本估算: 以水田与旱地为例[J]. 作物研究, 2016, 30(3): 288-294.
- [25] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 297-304.
- [26] 张维理, 冀宏杰, Kolbe H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 II. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1018-1025.
- [27] 马丽, 张雪儿, 张如梦, 等. 不同施肥方式与新型肥料匹配对巢湖流域水稻品质、经济效益及氮肥利用率的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2024, 51(4): 669-676.
- [28] 许仙菊, 马洪波, 宁运旺, 等. 缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 307-316.
- [29] 刘奇华, 马惠, 赵庆雷, 等. 氮磷肥减量施用对直播稻籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(12): 102-108.
- [30] 夏宁. 不同时期供氮对水稻籽粒产量形成的影响[J]. 云南农业科技, 1998(2): 16-17.
- [31] 曹彦圣, 付子轼, 孙会峰, 等. 施氮水平对水稻氮肥利用率和径流负荷的影响[J]. 土壤, 2016, 48(5): 868-872.
- [32] 李艳, 唐良梁, 陈义, 等. 施氮量对水稻氮素吸收、利用及损失的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 392-397.
- [33] 蒋鹏, 熊洪, 张林, 等. 直播条件下氮素调控对超级稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(10): 2043-2053.
- [34] Dobermann A. Nitrogen use efficiency - state of the art[C]//IFA International Workshop on Enhanced - Efficiency Fertilizers. Frankfurt, 2005.
- [35] 汪峰, 湛江华, 陈若霞, 等. 减氮对甬优籼粳杂交稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(6): 984-992.