

一次性基施控释掺混肥对水稻产量和倒伏性状的影响

廖萍* 刘若彤 孟轶 翁文安 都晗萌 李骏 高辉 张洪程

(扬州大学/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/江苏省优质粳稻产业工程研究中心/水稻产业工程技术研究院, 江苏 扬州 225009; *通信联系人, email: p.liao@yzu.edu.cn)

Effects of One-time Basal Application of Controlled-release Blended Fertilizer on Rice Yield and Lodging-related Traits

LIAO Ping*, LIU Ruotong, MENG Yi, WENG Wenan, DU Hanmeng, LI Jun, GAO Hui, ZHANG Hongcheng

(Yangzhou University/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/Jiangsu Industrial Engineering Research Center of High Quality Japonica Rice/Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou 225009, China; *Corresponding author, email: p.liao@yzu.edu.cn)

Abstract: 【Objective】 Lodging is a critical constraint on achieving high and stable rice yields, and optimizing fertilization strategies to improve stem strength represents a key approach for reducing lodging risk in rice production. This study aims to elucidate the effects of different fertilizer types on rice yield and lodging-related traits. **【Method】** We conducted a field experiment including two *japonica* rice varieties (Huaidao 5 and Nanjing 9108) and two fertilizer types [conventional fertilizer (CF) and controlled-release blended fertilizer (CRBF)] in a rice-wheat rotation system in Jiangsu Province.

【Results】 Compared to CF, CRBF significantly increased rice yield (+3.7%), with Huaidao 5 and Nanjing 9108 exhibiting yield increases of 3.3% and 4.1%, respectively. The yield improvement was primarily attributed to the increased effective panicles and total spikelets. Regarding lodging traits, CRBF reduced the lodging index (LI) of the first (−5.3%) and second (−4.2%) basal internodes, while its impact on the third internode was not significant. The reduction of LI was attributed to a greater increase in breaking resistance than in bending moment. In addition, CRBF reduced internode length while increasing internode diameter and stem wall thickness at the first and second basal internodes, thereby enhancing stem strength. **【Conclusion】** CRBF synergistically improves rice yield and lodging resistance, and provides a scientific basis for high-quality rice production in the rice-wheat rotation system.

Keywords: controlled-release blended fertilizer; rice yield; lodging index; breaking resistance; stem strength

摘要: 【目的】 倒伏是水稻丰产的关键限制因素, 优化施肥策略以提升茎秆强度是降低水稻倒伏的重要途径之一。本研究旨在阐明不同类型肥料对水稻产量和倒伏性状的影响。【方法】利用 2 个常规粳稻品种(淮稻 5 号和南粳 9108)和 2 种肥料类型(常规肥料和控释掺混肥), 在江苏稻麦轮作区开展大田试验。【结果】与常规肥料相比, 控释掺混肥显著提高了水稻产量(+3.7%), 其中, 淮稻 5 号和南粳 9108 的产量分别增加了 3.3%和 4.1%; 水稻增产主要得益于有效穗数和总颖花量的提升。在倒伏性状方面, 控释掺混肥显著降低了茎秆基部第 1(−5.3%)和第 2(−4.2%)节间的倒伏指数, 对第 3 节间影响不显著。水稻倒伏指数下降的原因是控释掺混肥对茎秆抗折力的促进效应大于其对弯曲力矩的促进效应。控释掺混肥显著降低了茎秆基部第 1 和第 2 节间长度, 而增加了节间粗度和茎壁厚度, 进而提高了茎秆强度。【结论】一次性基施控释掺混肥可协同提升水稻产量与抗倒伏能力, 为稻麦轮作区水稻高质量发展提供科学依据。

关键词: 控释掺混肥; 水稻产量; 倒伏指数; 抗折力; 茎秆强度

稻米是全世界过半数人口的主食, 全球水稻产量需每年增加 200 万 t 来满足人口增长对粮食的需求^[1]。中国作为世界上最大的稻米生产国, 近十年

来稻谷年产量稳定在 2.1 亿 t, 人均年供应量约 140 kg^[2]。水稻的高产稳产高度依赖化肥投入, 尤其是通过合理施用氮肥保障植株养分供应、促进水稻健

收稿日期: 2025-06-16; 修改稿收到日期: 2025-07-10。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(32401969); 国家重点研发计划资助项目(2023YFD2301300); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

康生长。2000–2021 年, 全球农业氮肥施用量增加了 73 kg/hm², 而中国的氮肥消耗量占全球总量的 25%^[3]。不合理的氮肥施用已引发了一系列生态环境和农业生产问题。首先, 我国农田氮素损失量从 1980 年的 20 Tg 激增至 2015 年的 54 Tg, 造成了严重的环境污染^[4]。其次, 长期定位试验表明, 稻田氮肥施用量每增加 100 kg/hm², 土壤 pH 值降低 0.65 个单位^[5–6]。此外, 当前我国稻田氮肥施用量比水稻高产所需的最适施用量高出 51%^[7], 导致氮肥利用效率仅为 29%^[8]。更为关键的是, 常规氮肥大量施用会显著增加水稻倒伏的风险, 综合分析结果表明, 氮肥施用使水稻茎秆基部第 2 节间和第 3 节间的倒伏指数分别提高了 31% 和 23%, 并随着施氮量的增加, 倒伏指数显著提升^[1]。

控释掺混肥是一种新型肥料, 由速效肥和控释肥按一定比例混合而成, 能够根据水稻不同生育阶段的需肥规律精准调控氮素供应, 从而提高氮肥利用率^[9–10]。大量研究表明, 当速效氮与控释氮的掺混比例为 1:1 时, 控释掺混肥对水稻产量和氮肥利用率的促进效应最大^[10–12]。此外, 控释掺混肥相比缓/控释肥生产成本更低, 且在当前农村青壮年劳动力紧缺的背景下, 一次性基施控释掺混肥更易被农民接受, 在生产上应用也较广泛^[13–14]。目前关于控释掺混肥的研究主要集中在水稻产量、稻米品质、氮素利用率和稻田氧化亚氮排放等方面, 其对茎秆倒伏性状的影响仍不甚清楚^[11, 15]。控释掺混肥施用可能通过两种途径影响水稻抗倒伏能力: 一方面, 控释掺混肥促进水稻增产的同时可能增加重心高度, 从而提高倒伏的风险^[1]; 另一方面, 控释掺混肥可能通过优化根系发育和增强茎秆机械强度(如促进钾和硅的吸收, 提高基部节间的抗折力)来提高水稻抗倒伏能力^[16–17]。为此, 本研究在江苏省盐城市大中农场开展为期 2 年的大田试验, 以当地大面积种植的南粳 9108 和淮稻 5 号 2 个常规粳稻品种为材料, 比较分析常规肥料与控释掺混肥对水稻倒伏特性的影响差异, 旨在为我国稻麦轮作区水稻丰产抗逆栽培提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2022 年和 2023 年, 笔者在江苏省盐城市大丰区大中农场试验基地(33°08'N, 120°39'E)开展大田试验。该基地的种植制度为水稻(6 月中旬移栽, 11 月初收获)-小麦(11 月上中旬直播, 翌年 6 月初收获)

轮作, 土壤质地为砂壤土。试验前耕层 0~20 cm 的基础土壤性状为全氮 1.1 g/kg, 有机质 21.5 g/kg, 碱解氮 64 mg/kg, 有效磷 15.2 mg/kg, pH 值(土水比为 1:2.5) 7.5。试验基地的年平均气温和降雨量分别为 14.6 °C 和 1040 mm。

1.2 试验设计

本研究采用裂区设计, 以肥料类型(常规肥料和控释掺混肥)为主区, 水稻品种(南粳 9108 和淮稻 5 号)为副区, 共形成 4 个处理: 1) 南粳 9108 施用常规肥料; 2) 淮稻 5 号施用常规肥料; 3) 南粳 9108 施用控释掺混肥; 4) 淮稻 5 号施用控释掺混肥。各处理重复 3 次, 小区面积为 30 m²。常规肥料由尿素(纯 N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和氯化钾(K₂O 60%)组成, 氮肥运筹为 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{分蘖肥}}:m_{\text{穗肥}}=4:3:3$, 磷肥和钾肥作基肥一次性施用。控释掺混肥中氮、磷、钾按 N:P₂O₅:K₂O=30:8:13 混合, 其中控释 N 和常规 N 的掺混比例为 1:1, 控释 N 的释放周期为 90 d, 包膜材料为可降解聚氨酯树脂。控释掺混肥作基肥一次性基施, 该肥料由安徽省茂施农业科技有限公司提供。各处理肥料施用量相同, 纯 N、P₂O₅ 和 K₂O 的用量分别为 270 kg/hm²、72 kg/hm² 和 117 kg/hm²。两年水稻均在 5 月 25 日进行毯苗育秧, 6 月 14 日手工移栽。水稻移栽时行株距设置为 30 cm×12 cm, 每穴 3 苗。田间水分管理模式为移栽后保持 3~4 cm 水层, 分蘖盛期排水晒田以减少无效分蘖, 在幼穗分化期复水后保持干湿交替灌溉, 直至水稻收获前 7 d 左右断水。田间病虫害防控参照当地农场高产栽培要求进行。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 产量及其构成

在成熟期, 各小区按对角线调查 50 蔸水稻计算有效穗数, 用平均数法随机选取 5 蔸, 手工脱粒后采用水漂法考察每穗粒数、结实率和千粒重^[18]。每个小区割方 6 m², 机械脱粒后取 1 kg 稻谷置于 70 °C 烘箱内烘干, 计算稻谷含水量, 再根据 14.5% 的安全存储含水量折算实际产量。

1.3.2 茎秆形态和力学指标

在水稻齐穗后 10 d, 各小区随机取具有代表性的 10 蔸, 每蔸选择 2 个主茎, 共 20 个主茎作为一个样本。参照前人的测定方法^[19–20], 利用植物茎秆强度仪(型号 TP-YYD-1, 浙江托普云农科技股份有限公司)测定基部 3 个节间的抗折力。同时, 用直尺、游标卡尺或电子天平测定株高、重心高度和茎秆基部 3 个节间的长度、节间粗度、茎壁厚度以及节间基部至穗顶的长度与鲜质量。

弯曲力矩($\text{cm}\cdot\text{g}$)=节间基部至穗顶鲜质量(g) $\times$ 该节间基部至穗顶长度(cm); 1)
倒伏指数($\text{cm g}\cdot\text{N}^{-1}$)=弯曲力矩($\text{cm}\cdot\text{g}$)/抗折力(N); 2)

1.4 数据处理

利用 SPSS 22.0 软件(IBM 公司, 美国)对水稻产量及其构成、抗折力、弯曲力矩、倒伏指数、节间长度、节间粗度、茎壁厚度、株高和重心高度进行了年份(Y)、品种(V)及肥料类型(Ft)三因素方差分析, 分析结果用主效应及互作效应表示, 在 $P\leq 0.05$ 水平下进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 产量和产量构成

与常规肥料相比, 一次性基施控释掺混肥显著提高了水稻产量(+3.7%), 其中淮稻 5 号增产 3.3%, 南粳 9108 增产 4.1%(表 1)。综合年份和肥料类型, 南粳 9108 较淮稻 5 号产量显著增加了 2.4%。从产量构成来看, 控释掺混肥显著提高了有效穗数和总颖花量, 但降低了每穗粒数和千粒重, 对结实率影响不显著。与淮稻 5 号相比, 南粳 9108 的每穗粒数和总颖花量显著提升, 但其有效穗数、结实率和千粒重均下降。品种和肥料类型对水稻产量及其构成无显著性互作效应。

表 1 一次性基施控释掺混肥对水稻产量及其构成的影响

Table 1. Effects of one-time basal application of controlled-release blended fertilizer on rice yield and its components

年份 Year (Y)	品种 Variety (V)	肥料类型 Fertilizer type (Ft)	有效穗数 Effective panicles per 1 m ²	每穗粒数 Spikelets per panicle	总颖花量 Total spikelets per 1 m ²	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (t/hm ²)
2022	淮稻 5 号	常规肥料 CF	318	113	36008	95.9	27.7	9.12
	Huaidao 5	控释掺混肥 CRBF	345	111	38220	95.2	27.1	9.49
	南粳 9108	常规肥料 CF	297	146	43379	93.6	24.1	9.35
	Nanjing 9108	控释掺混肥 CRBF	319	143	45646	94.0	23.2	9.86
2023	淮稻 5 号	常规肥料 CF	291	135	39218	91.7	26.0	9.02
	Huaidao 5	控释掺混肥 CRBF	320	127	40580	91.5	25.2	9.26
	南粳 9108	常规肥料 CF	278	159	44164	90.1	24.2	9.16
	Nanjing 9108	控释掺混肥 CRBF	313	146	45791	90.6	23.4	9.41
F 值 F-value								
肥料类型 Ft			144.7***	58.2***	60.2***	ns	52.3***	68.0***
品种 V			51.3***	1045.3***	672.6***	47.6***	635.9***	29.9***
年份 Y			68.3***	256.1***	45.6***	302.2***	55.8***	34.6***
品种 $\times$ 年份 V $\times$ Y			8.0*	40.4***	23.3***	ns	74.1***	ns
肥料类型 $\times$ 年份 Ft $\times$ Y			ns	21.7***	ns	ns	ns	5.5*

肥料类型与品种两因素互作 (Ft $\times$ V) 及肥料类型、品种与年份三因素互作 (Ft $\times$ V $\times$ Y) 对水稻产量及其构成的影响均不显著。*, **和***分别表示在 $0.01 < P \leq 0.05$, $0.001 < P \leq 0.01$ 和 $P \leq 0.001$ 水平上主效应及互作效应差异显著。ns 表示互作效应不显著。

No significant Ft $\times$ V or Ft $\times$ V $\times$ Y interactive effects on rice yield or its components were observed. The symbols *, **, and *** denote significance at the $P < 0.05$, $P < 0.01$, and $P < 0.001$, respectively. CF, Conventional fertilizer; CRBF, Controlled-release blended fertilizer. ns, No significant interactive effect.

2.2 茎秆抗折力、弯曲力矩和倒伏指数

与常规肥料相比, 控释掺混肥显著降低了水稻基部第 1(-5.3%)和第 2(-4.2%)节间的倒伏指数, 对第 3 节间的倒伏指数影响不显著(表 2)。南粳 9108 第 1(+10.3%)和第 3(+9.2%)节间的倒伏指数显著高于淮稻 5 号, 品种间第 2 节间的倒伏指数差异不显著。控释掺混肥较常规肥料显著增加了水稻基部第 1、第 2 和第 3 节间的抗折力及弯曲力矩。与淮稻 5 号相比, 南粳 9108 基部第 1 和第 2 节间的抗折力及第 1、第 2 和第 3 节间的弯曲力矩均显著提高。

2.3 节间长度、节间粗度和茎壁厚度

控释掺混肥较常规肥料显著降低了水稻基部第 1 和第 2 节间长度, 但增加了第 1 和第 2 节间粗度和茎壁厚度, 对第 3 节间长度、粗度和茎壁厚度的影响均不显著(表 3)。与淮稻 5 号相比, 南粳 9108 基部各节间长度和节间粗度都更大, 但其第 2 节间的茎壁厚度显著下降。

2.4 株高和重心高度

与常规肥料相比, 控释掺混肥显著提高了水稻重心高度, 对株高无显著性影响(图 1)。南粳 9108 较淮稻 5 号的株高及重心高度均显著增加。

2.5 相关性分析

相关性分析表明, 茎秆倒伏指数与节间长度显

表 2 一次性基施控释掺混肥对水稻茎秆抗折力、弯曲力矩和倒伏指数的影响

Table 2. Effects of one-time basal application of controlled-release blended fertilizer on breaking resistance, bending moment, and lodging index

年份 Year (Y)	品种 Variety (V)	肥料类型 Fertilizer type (Ft)	抗折力			弯曲力矩			倒伏指数		
			Breaking resistance (N)			Bending moment (cm·g)			Lodging index (cm g·N ⁻¹)		
			I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
2022	淮稻 5 号	常规肥料 CF	26.0	21.2	18.9	667	583	489	25.7	27.5	25.9
	Huaidao 5	控释掺混肥 CRBF	30.0	24.3	19.8	728	635	516	24.3	26.1	26.1
	南粳 9108	常规肥料 CF	26.4	22.5	18.9	808	695	559	30.6	31.0	29.5
	Nanjing 9108	控释掺混肥 CRBF	30.7	25.6	19.9	864	747	589	28.2	29.1	29.7
2023	淮稻 5 号	常规肥料 CF	25.3	16.5	12.7	650	612	495	25.7	37.1	38.9
	Huaidao 5	控释掺混肥 CRBF	28.1	18.8	13.1	701	665	521	24.9	35.3	39.9
	南粳 9108	常规肥料 CF	29.5	19.3	13.8	784	640	568	26.6	33.2	41.3
	Nanjing 9108	控释掺混肥 CRBF	33.0	21.7	14.8	839	710	623	25.4	32.7	42.4
F 值 F-values											
	肥料类型 Ft		132.8***	53.2***	4.8*	102.5***	85.4***	47.4***	35.8***	8.3*	ns
	品种 V		63.9***	29.4***	ns	622.5***	145.2***	248.7***	113.6***	ns	10.3**
	年份 Y		5.4*	131.8***	248.2***	17.7***	ns	7.0*	41.2***	171.6***	186.9***
	品种×年份 V×Y		39.2***	ns	ns	ns	37.1***	ns	59.1***	46.7***	ns

肥料类型与品种两因素互作 (Ft×V), 肥料类型与年份两因素互作 (Ft×Y) 及肥料类型、品种与年份三因素互作 (Ft×V×Y) 对水稻抗折力、弯曲力矩和倒伏指数的影响均不显著。*, **和***分别表示在 0.01<P≤0.05, 0.001<P≤0.01 和 P≤0.001 水平上主效应及互作效应差异显著。I1, I2 和 I3 分别表示水稻基部第 1, 第 2 和第 3 节间。

No significant Ft×V, Ft×Y, or Ft×V×Y interaction effects on breaking resistance, bending moment, or lodging index were observed. The symbols *, **, and *** denote significant main effects and interactive effects at the 0.01<P≤0.05, 0.001<P≤0.01, and P≤0.001, respectively. I1, I2, and I3 indicate the first, second, and third internodes of the rice stem base, respectively. CF means conventional fertilizer, CRBF means controlled-release blended fertilizer.

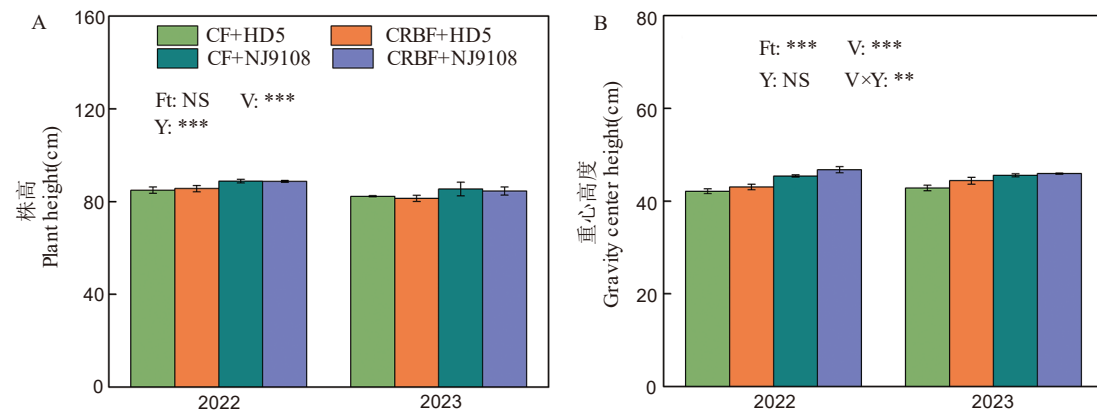
表 3 一次性基施控释掺混肥对水稻基部节间长度、节间粗度和茎壁厚度的影响

Table 3. Effects of one-time basal application of controlled-release blended fertilizer on internode length and coarseness and stem wall thickness

年份 Year (Y)	品种 Variety (V)	肥料类型 Fertilizer type (Ft)	节间长度			节间粗度			茎壁厚度		
			Internode length (cm)			Internode coarseness (mm)			Stem wall thickness (mm)		
			I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
2022	淮稻 5 号	常规肥料 CF	4.95	7.90	11.5	4.56	4.16	3.76	0.84	0.72	0.62
	Huaidao 5	控释掺混肥 CRBF	4.71	7.41	11.2	4.74	4.40	3.91	0.92	0.76	0.62
	南粳 9108	常规肥料 CF	5.67	9.15	14.2	4.79	4.34	3.91	0.82	0.71	0.62
	Nanjing 9108	控释掺混肥 CRBF	5.12	8.58	14.1	4.99	4.43	3.96	0.92	0.75	0.61
2023	淮稻 5 号	常规肥料 CF	5.23	9.95	13.7	4.59	4.23	3.88	0.97	0.73	0.65
	Huaidao 5	控释掺混肥 CRBF	4.93	9.06	12.9	4.91	4.42	3.97	1.00	0.77	0.68
	南粳 9108	常规肥料 CF	5.72	10.33	14.5	5.02	4.31	4.04	0.90	0.70	0.60
	Nanjing 9108	控释掺混肥 CRBF	5.36	9.57	14.6	5.21	4.47	4.08	0.97	0.74	0.67
F 值 F-values											
	肥料类型 Ft		51.3***	44.6***	ns	100.5***	31.2***	ns	17.6***	27.3***	ns
	品种 V		100.0***	66.9***	67.1***	189.1***	7.6*	8.0*	ns	9.4**	ns
	年份 Y		14.7***	209.7**	21.9***	51.3***	ns	5.9*	22.6***	ns	7.4*
	品种×年份 V×Y		ns	14.2**	9.6**	8.3*	ns	ns	ns	ns	ns

肥料类型与品种两因素互作 (Ft×V), 肥料类型与年份两因素互作 (Ft×Y) 及肥料类型、品种与年份三因素互作 (Ft×V×Y) 对水稻抗折力、弯曲力矩和倒伏指数的影响均不显著。*, **和***分别表示在 0.01<P≤0.05, 0.001<P≤0.01 和 P≤0.001 水平上主效应及互作效应差异显著。I1, I2 和 I3 分别表示水稻基部第 1、第 2 和第 3 节间。

No significant Ft×V, Ft×Y, or Ft×V×Y interaction effects on breaking resistance, bending moment, or lodging index were observed. The symbols *, **, and *** denote significant main effects and interactive effects at the 0.01<P≤0.05, 0.001<P≤0.01, and P≤0.001, respectively. I1, I2, and I3 indicate the first, second, and third internodes of the rice stem base, respectively. CF means conventional fertilizer, CRBF means controlled-release blended fertilizer.

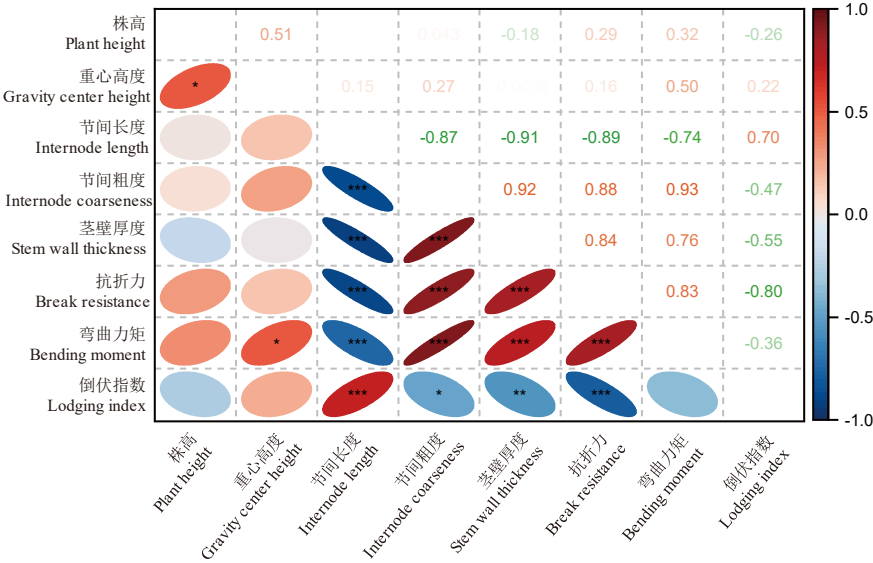


肥料类型 (Ft)、品种 (V) 和年份 (Y) 间的两因素及三因素互作对水稻株高的影响均不显著。肥料类型与品种两因素互作 (Ft×V)，肥料类型与年份两因素互作 (Ft×Y) 以及肥料类型、品种与年份三因素互作 (Ft×V×Y) 对水稻重心高度的影响均不显著。**和***分别表示在 $0.001 < P \leq 0.01$ 和 $P \leq 0.001$ 水平上主效应及互作效应差异显著。CF+HD5 表示种植淮稻 5 号施用常规肥料，CF+NJ9108 表示种植南粳 9108 施用常规肥料，CRBF+HD5 表示种植淮稻 5 号一次性基施控释掺混肥，CRBF+NJ9108 表示种植南粳 9108 一次性基施控释掺混肥。

There were no significant two- or three-way interactions for plant height. No significant Ft × V, Ft × Y, or Ft × V × Y interactive effects on gravity center height were observed. The symbols ** and *** denote significant main effects and interactive effects at the $0.001 < P \leq 0.01$ and $P \leq 0.001$, respectively. CF+HD5 indicates Huaidao 5 combined with conventional fertilization, CF+NJ9108 indicates Nanjing 9108 combined with conventional fertilization, CRBF+HD5 indicates Huaidao 5 combined with one-time basal application of controlled-release blended fertilizer, CRBF+NJ9108 indicates Nanjing 9108 combined with one-time basal application of controlled-release blended fertilizer.

图 1 一次性基施控释掺混肥对水稻株高 (A) 和重心高度 (B) 的影响

Fig. 1. Effects of one-time basal application of controlled-release blended fertilizer on plant height (A) and gravity center height (B)



*, **和***分别表示在 $P < 0.05$, $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平上显著性相关。

The symbols *, **, and *** represent significant correlation at the $P < 0.05$, $P < 0.01$, and $P < 0.001$, respectively.

图 2 水稻茎秆倒伏指标相关性分析

Fig. 2. Correlation analysis of the relationship between lodging index and influencing factors

著正相关，而与节间粗度、茎壁厚度和抗折力均显著负相关(图 2)。

3 讨论

3.1 一次性基施控释掺混肥对水稻产量的影响

本研究表明，一次性基施控释掺混肥显著提高

了水稻产量，这与前人的研究结果相似^[10-11]。其原因主要是，其一、江苏稻麦轮作区周年秸秆还田量大，水稻季小麦秸秆直接还田会提高微生物对氮素的固持作用，从而抑制水稻根系对氮素的吸收^[18]。而控释掺混肥可依据水稻需肥规律，提供持续稳定的氮素等矿质养分，使得土壤活性氮(尤其是铵态氮)维持在较高水平，有效提升水稻分蘖能力^[15-16]。本

研究表明与常规肥料相比,控释掺混肥显著提高了水稻有效穗数(表 1)。其二,控释掺混肥可以降低稻田氮素通过氨挥发及氧化亚氮排放等途径的损失,提高水稻氮素利用率^[11, 15]。为此,控释掺混肥处理下水稻氮素积累量增加将促进穗部颖花的分化,降低颖花退化率,最终表现为群体总颖花量显著提升,本研究也得到了类似的结果(表 1)。其三,控释掺混肥提高了水稻灌浆结实期茎秆基部节间的机械强度,明显降低倒伏风险,这有利于高产群体建成,提升抗逆性^[17]。前人研究表明,抗倒伏能力增强不仅能降低作物机械化收割难度,还能减少冠层功能叶片相互层叠遮蔽,有效提高群体光能截获率^[1, 21-22]。群体光能截获率提升将提高冠层叶片光合效率,有利于干物质积累和产量增加^[16]。

需要注意的是,虽然控释掺混肥较常规肥料显著提高了水稻产量,但其使得千粒重有所下降(表 1)。这一结果可能与 90 d 释放周期的控释掺混肥在水稻生育后期供肥能力不足有关,后续研究可在水稻灌浆期前补充适量氮素,以进一步挖掘稻麦轮作区水稻高产潜力。

3.2 一次性基施控释掺混肥对水稻倒伏性状的影响

与常规肥料相比,一次性基施控释掺混肥显著降低了水稻茎秆基部节间的倒伏指数,这主要归功于茎秆抗折力的显著提高。首先,尽管控释掺混肥提高了水稻产量,使其重心高度显著增加,但茎秆基部节间粗度和茎壁厚度增加有利于提高茎秆机械强度,抵消重心高度带来的负面效应^[1, 19-20]。其次,常规肥料处理在水稻拔节前已施用 70% 的氮肥,导致基部节间徒长且非结构性碳水化合物积累不足;而控释掺混肥显著降低了基部第 1 和第 2 节间长度,有效降低倒伏风险^[23]。相关性分析结果亦可支撑上述论点:茎秆倒伏指数与节间长度显著正相关,与节间粗度、茎壁厚度和抗折力均显著负相关(图 2)。有研究表明,控释掺混肥通过促进水稻根系生长发育,增强对土壤有效硅和速效钾的吸收能力,使茎秆硅和钾离子的含量增加,直接提高了茎秆的抗折力^[17]。最后,通过促进水稻根系生长发育,控释掺混肥增加了深层根系数量及比例,提高根深指数,从而降低水稻根部倒伏风险,提升抗倒能力^[21, 24-25]。

4 结论

控释掺混肥显著增加了水稻有效穗数和总颖花量,进而提高产量。尽管控释掺混肥导致水稻重

心高度和弯曲力矩增加,但其降低基部节间长度、增加节间粗度和茎壁厚度,有利于提升茎秆抗折力,最终降低了水稻倒伏指数。据此,一次性基施控释掺混肥能提高水稻产量并降低倒伏风险,为优化稻麦轮作区水稻丰产抗逆栽培提供了技术支撑和理论依据。

参考文献:

- [1] Liao P, Bell S M, Chen L, Huang S, Wang H Y, Miao J H, Qi Y M, Sun Y N, Liao B, Zeng Y J, Wei H Y, Gao H, Dai Q G, Zhang H C. Improving rice grain yield and reducing lodging risk simultaneously: A meta-analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 143: 126709.
- [2] 廖萍, 翁文安, 高辉, 张洪程. 我国直播稻栽培技术应用现状与发展建议[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(24): 4854-4870.
Liao P, Weng W A, Gao H, Zhang H C. Application status and development suggestion of direct-seeding rice cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(24): 4854-4870. (in Chinese with English abstract)
- [3] FAOSTAT. World Food and Agriculture-Statistical Yearbook. Rome, 2022. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- [4] Luo Z B, Liang X, Lam S K, Mosier A R, Hu S Y, Chen D L. Hotspots of reactive nitrogen loss in China: Production, consumption, spatiotemporal trend and reduction responsibility[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 284: 117126.
- [5] 周晓阳, 周世伟, 徐明岗, Colinet G. 中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4811-4817.
Zhou X Y, Zhou S W, Xu M G, Colinet G. Evolution characteristics and influence factors of acidification in paddy soil of southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4811-4817. (in Chinese with English abstract)
- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- [7] Zhang J T, Tian H Q, Shi H, Zhang J F, Wang X K, Pan S F, Yang J. Increased greenhouse gas emissions intensity of major croplands in China: Implications for food security and climate change mitigation[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(11): 6116-6133.
- [8] Gu J F, Yang J C. Nitrogen (N) transformation in paddy rice field: Its effect on N uptake and relation to improved N management[J]. *Crop and Environment*, 2022, 1(1): 7-14.
- [9] Xiao Z L, Zhang Y, Wang C R, Wen Y, Wang W L, Zhu K Y, Zhang W Y, Gu J F, Liu L J, Zhang J H, Yang J C, Zhang H. Optimized controlled-release nitrogen strategy achieves high yield and nitrogen use efficiency of wheat following rice in the lower reaches of Yangtze River of China[J]. *Field Crops Research*, 2024, 317: 109567.
- [10] Liu S J, Zhang Y R, Zhao D H, Liao Y C, Zhang G X, Li

- Y J, Han J. Optimizing the ratio of controlled release urea relative to normal urea to improve the crop yield and N recovery efficiency: A global meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2025, 328: 109924.
- [11] Cheng S, Xing Z P, Tian C, Li S P, Tian J Y, Liu Q Y, Hu Y J, Guo B W, Hu Q, Wei H Y, Gao H, Zhang H C. Effects of controlled release urea formula and conventional urea ratio on grain yield and nitrogen use efficiency of direct-seeded rice[J]. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1230.
- [12] Cheng S, Xing Z P, Tian C, Weng W A, Hu Q, Zhang H C. Optimization of one-time fertilization scheme achieved the balance of yield, quality and economic benefits of direct-seeded rice[J]. *Plants*, 2023, 12(10): 2047.
- [13] 翁文安, 邢志鹏, 胡群, 魏海燕, 廖萍, 朱海滨, 瞿济伟, 李秀丽, 刘桂云, 高辉, 张洪程. 无人化旱直播水稻产量形成特征及其能量与经济效益研究[J]. *作物学报*, 2025, 51(5): 1363-1377.
- Weng W A, Xing Z P, Hu Q, Wei H Y, Liao P, Zhu H B, Qu J W, Li X L, Liu G Y, Gao H, Zhang H C. Study on yield formation characteristics, energy and economic benefits of unmanned dry direct-seeding rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(5): 1363-1377. (in Chinese with English abstract)
- [14] 程爽, 车阳, 田晋钰, 周磊, 刘秋员, 邢志鹏, 胡雅杰, 郭保卫, 魏海燕, 张洪程. 水稻缓控释氮肥应用研究现状与展望[J]. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2020, 41(2): 1-8.
- Cheng S, Che Y, Tian J Y, Zhou L, Liu Q Y, Xing Z P, Hu Y J, Guo B W, Wei H Y, Zhang H C. Research advances and prospects of slow-controlled release nitrogen fertilizer in rice[J]. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2020, 41(2): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [15] Zhang Y J, Ren W C, Zhu K Y, Fu J Y, Wang W L, Wang Z Q, Gu J F, Yang J C. Substituting readily available nitrogen fertilizer with controlled-release nitrogen fertilizer improves crop yield and nitrogen uptake while mitigating environmental risks: A global meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109221.
- [16] Zhou T Y, Cui R L, Shu C C, Zhu K Y, Zhang W Y, Zhang H, Liu L J, Wang Z Q, Gu J F, Yang J C. Combining urea and controlled release nitrogen fertilizer to enhance lodging resistance of rice (*Oryza sativa* L.) by altering accumulation of silicon and cell wall polymers at high yielding levels[J]. *Field Crops Research*, 2024, 315: 109459.
- [17] Zhang S G, Yang Y C, Zhai W W, Tong Z H, Shen T L, Li Y C, Zhang M, Sigua G C, Chen J Q, Ding F J. Controlled-release nitrogen fertilizer improved lodging resistance and potassium and silicon uptake of direct-seeded rice[J]. *Crop Science*, 2019, 59(6): 2733-2740.
- [18] 易艳红, 王文霞, 曾勇军, 谭雪明, 吴自明, 陈雄飞, 潘晓华, 石庆华, 曾研华. 人工模拟机械开沟穴直播提高早籼稻茎秆抗倒伏能力及产量[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(15): 2729-2742.
- Yi Y H, Wang W X, Zeng Y J, Tan X M, Wu Z M, Chen X F, Pan X H, Shi Q H, Zeng Y H. Artificial simulation of hill-drop drilling mechanical technology to improve yield and lodging resistance of early season *indica* rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(15): 2729-2742. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王文霞, 周燕芝, 曾勇军, 吴自明, 谭雪明, 潘晓华, 石庆华, 曾研华. 不同机直播方式对南方优质晚籼稻产量及抗倒伏特性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2020, 34(1): 46-56.
- Wang W X, Zhou Y Z, Zeng Y J, Wu Z M, Tan X M, Pan X H, Shi Q H, Zeng Y H. Effects of different mechanical direct seeding patterns on yield and lodging resistance of high-quality late *indica* rice in south China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(1): 46-56. (in Chinese with English abstract)
- [20] Liao P, Liu L, Chen J, Sun Y N, Huang S, Zeng Y J, van Groenigen K J. Liming reduces nitrogen uptake from chemical fertilizer but increases that from straw in a double rice cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 235: 105873.
- [21] Niu Y N, Chen T X, Zhao C C, Zhou M X. Lodging prevention in cereals: Morphological, biochemical, anatomical traits and their molecular mechanisms, management and breeding strategies[J]. *Field Crops Research*, 2022, 289: 108733.
- [22] 罗肖郎, 郑兴飞, 彭宣国, 余启芝, 董华林, 殷得所, 王红波, 胡建林, 薛莲, 胡鹏, 徐得泽. 水稻抗倒伏研究: 现状、挑战与未来方向. *中国水稻科学*, 2026, 40(2): 181-195.
- Luo X Y, Zheng X F, Peng X G, Yu Q Z, Dong H L, Yin D S, Wang H B, Hu J L, Xue L, Hu P, Xu D Z. Research on rice lodging resistance: current status, challenges, and future directions. *Chinese Journal of Rice Science*, 2026, 40(2): 181-195. (in Chinese with English abstract)
- [23] Zhang W J, Wu L M, Wu X R, Ding Y F, Li G H, Li J Y, Weng F, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Wang S H. Lodging resistance of *japonica* rice (*Oryza sativa* L.): Morphological and anatomical traits due to top-dressing nitrogen application rates[J]. *Rice*, 2016, 9: 1-11.
- [24] 唐拴虎, 徐培智, 张发宝, 陈建生, 谢春生. 一次性全层施用控释肥对水稻根系形态发育及抗倒伏能力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 63-69.
- Tang S H, Xu P Z, Zhang F B, Chen J S, Xie C S. Influence of single basal application controlled release fertilizer on morphologic development of root system and lodging resistance of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 63-69. (in Chinese with English abstract)
- [25] 沈智达, 马世浩, 黄思远, 张洋洋, 廖世鹏, 李小坤. 种植方式和施肥对水稻根系形态、抗倒伏特性与产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2026, 40(2): 253-263.
- Shen Z D, Ma S H, Huang S Y, Zhang Y Y, Liao S P, Li X K. Responses of rice root growth and distribution to planting methods and fertilization[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2026, 40(2): 253-263. (in Chinese with English abstract)