

引用格式:

袁帅, 苏雨婷, 李海容, 郭宋源, 陈平平, 易镇邪. 氮肥运筹与化学调控对双季稻产量及其抗倒伏特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 1-11.

YUAN S, SU Y T, LI H R, GUO S Y, CHEN P P, YI Z X. Effects of nitrogen fertilizer operation and chemical regulation on yield and lodging resistance of double cropping rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(2): 1-11.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



氮肥运筹与化学调控对双季稻产量及其抗倒伏特性的影响

袁帅, 苏雨婷, 李海容, 郭宋源, 陈平平, 易镇邪*

(湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 以早稻品种陆两优 996、株两优 819 及晚稻品种 H 优 518、盛泰优 018 为材料, 于 2020 年开展大田试验, 设计 3 种氮肥运筹方式 N1、N2、N3(分蘖肥、穗肥、粒肥用量比分别为 7:2:1、6:3:1、5:4:1)与 2 种化学调控剂多效唑(C1)、壳寡糖(C2)双因素试验, 研究氮肥运筹方式和化学调控对水稻产量及抗倒伏能力的影响。结果表明: 氮肥运筹和化学调控对水稻产量影响显著, 早、晚稻各品种产量均以 N2C2 处理的最高, 主要通过提高植株有效穗数而增产; 与 N1 相比, N2 和 N3 降低了茎秆高度、节间长度和重心高度, 增加了茎粗、茎壁厚度和节间充实度, 茎秆抗倒伏能力增强, 且 N2 优于 N3 处理; 与对照处理(C3, 喷施清水)相比, C1 和 C2 均降低了水稻茎秆高度、重心高度和节间长度, 增加了茎粗、茎壁厚度和节间充实度, 从而提高了水稻抗倒伏能力; 从互作效应来看, N2C1、N2C2 和 N3C1 处理的茎粗和茎壁厚度较大, 倒 3 与倒 4 节节间长度较短, 节间充实度和抗折力较高, 倒伏指数较低。综合考虑各品种倒伏指数和产量性状, N2C2 处理, 即分蘖肥、穗肥、粒肥施用比例为 6:3:1 条件下, 于拔节初期喷施壳寡糖, 可在提高双季稻抗倒伏能力的同时获得最高产量。

关键词: 双季稻; 氮肥运筹; 多效唑; 壳寡糖; 化学调控; 产量; 抗倒伏

中图分类号: S511.06

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)02-0001-11

Effects of nitrogen fertilizer operation and chemical regulation on yield and lodging resistance of double cropping rice

YUAN Shuai, SU Yuting, LI Hairong, GUO Songyuan, CHEN Pingping, YI Zhenxie*

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: In order to systematically study the effects of nitrogen fertilizer operation and chemical regulators on the yield and lodging resistance of double-cropping rice, this study used early rice varieties Luliangyou 996 and Zhuliangyou 819, and late rice varieties Hyou 518 and Shengtaiyou 018 as materials, field experiments were carried out with different nitrogen fertilizer operation methods(amount ratios of tillering fertilizer, ear fertilizer and grain fertilizer, N1, N2 and N3 were 7:2:1, 6:3:1, 5:4:1 respectively) and chemical regulators(C1 and C2 were paclobutrazol and chitosan oligosaccharides). The results showed that nitrogen fertilizer operation and chemical regulation had a significant impact on rice yield, and the yield of early and late rice varieties was the highest under N2C2 treatment, mainly through increasing the effective panicle number of plants. Compared with N1 treatment, N2 and N3 treatments decreased stem height, internode length and center of gravity height, increased stem thickness, stem wall thickness and internode fullness, enhanced stem lodging resistance, and N2 was better than N3 treatment. Compared with C3, both C1 and C2 reduced rice stem height, center of gravity height and internode length, and increased stem thickness, stem wall thickness and internode fullness, thereby improving rice lodging resistance. In the view of interacting effects, the N2C1, N2C2 and

收稿日期: 2023-08-08

修回日期: 2024-04-03

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFD0301501、2018YFD0301005)

作者简介: 袁帅(1997—), 男, 湖南岳阳人, 博士研究生, 主要从事作物高产生理与资源高效利用研究, 1395396254@qq.com; *通信作者, 易镇邪, 博士, 教授, 主要从事作物高产生理与资源高效利用研究, yizhenxie@126.com

N3C1 treatments had larger stem diameter and stem wall thickness, shorter internodes between inverted 3 and inverted 4, higher internode fullness and bending resistance, and lower lodging index. Considering the lodging index and yield traits of each variety comprehensively, N2C2 treatment, which used spraying chitosan oligosaccharides at the early jointing stage under the condition of 6 : 3 : 1 ratio of tillering fertilizer, ear fertilizer, and grain fertilizer, could improve the lodging resistance of double-cropping rice and obtain the highest yield at the same time.

Keywords: double cropping rice; nitrogen fertilizer operation; paclobutrazol; chitosan oligosaccharides; chemical regulation; yield; lodging resistance

倒伏是影响水稻稳产、高产的因素之一。倒伏后的水稻植株呈叠压状态, 稻株之间空间减小, 密不透风, 湿度增加^[1]; 茎秆折断后严重影响营养物质运输, 加速叶片及根系的衰老, 从而导致叶片光合作用减弱^[2], 极大地制约了水稻高产、稳产和机械化收割。

前人^[3-6]通过选育新品种、调控栽培措施等方式, 增强水稻植株抗倒伏能力, 降低水稻倒伏风险。一般来说, 施氮水平越高、基部节间长度越长、基部茎秆壁厚越小、茎秆充实度和机械强度越低, 作物越易倒伏^[7-9]。研究^[10-12]表明, 合理的氮肥配比有助于水稻生长、养分吸收, 优化水稻节间配置, 增强水稻茎秆抗折力, 从而提高水稻的抗倒伏能力。金正勋等^[13]认为, 在同等施氮量条件下, 前期增施氮肥, 基部第1和第2节间长度增加, 茎秆抗折力降低, 而氮肥施用适当后移能缩短基部节间长度, 减小扁平率和空腔面积, 提高茎秆的纤维素和木质素含量, 从而提高水稻抗倒伏能力。施用化学调控剂也是提高水稻抗倒伏能力的有效措施。多效唑、烯效唑、矮壮素、助壮素等植物生长调节剂可以通过改善植株株高、重心高度、基部节间长度、茎粗、茎壁厚度、节间充实度等茎秆形态性状以及水稻光合作用、干物质积累等生理功能来提高水稻的抗倒性能^[14-16]。

关于氮素对水稻抗倒伏能力的影响研究大多着眼于施氮量, 而对水稻各生育时期氮肥分配比例的研究较少。近年来湘南地区双季稻产量徘徊不前, 生产上时有倒伏现象发生。高产与抗倒是机械化生产对水稻提出的基本要求, 亟待开展双季稻氮肥运筹与化学调控对其产量构成与抗倒伏特性影响的系统研究。本试验中, 以抗倒伏与倒伏敏感品种为材料, 在3种不同氮肥运筹模式下利用多效唑和壳寡糖调控水稻生长发育, 测定水稻形态性状、倒伏性状和产量性状, 分析氮肥运筹和化学调控对

水稻产量构成和抗倒能力的影响, 探讨实现抗倒与产量协同提高的机理, 以期为双季稻抗倒高产栽培调控提供依据。

1 试验地概况

于2020年在湖南省衡阳市衡阳县西渡镇梅花村开展大田试验, 早、晚稻连续在同一田块进行。试验田土壤基本理化性状: pH 6.22; 有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为25.20、1.50、0.64、19.30 g/kg; 碱解氮、有效磷、有效钾含量分别为162.30、9.60、102.43 mg/kg。

2 材料与方法

2.1 试验材料

早稻品种为陆两优996和株两优819, 晚稻品种为H优518和盛泰优018。供试化学调控剂: 质量分数为15%的多效唑粉剂, 由四川国光农化股份有限公司生产; 壳寡糖, 以虾壳、蟹壳为原料经过脱钙、脱蛋白、脱乙酰基和酶生物技术降解等工序加工而成, 由湖南得译生物科技有限公司提供。

2.2 试验设计

对早、晚稻均开展化学调控与氮肥运筹双因素试验, 裂区设计, 主区为氮肥运筹方式, 设分蘖肥、穗肥、粒肥施用比例7 : 2 : 1(N1)、6 : 3 : 1(N2)、5 : 4 : 1(N3)3个处理; 副区为化学调控方式, 设拔节初期喷施多效唑(C1)、喷施壳寡糖(C2)2个处理, 以喷施清水为对照(C3)。各处理尿素、过磷酸钙、氯化钾总量分别为150、75、120 kg/hm², 其氮、磷、钾的质量分数分别为46%、12%、60%。磷肥和钾肥作分蘖肥全施, 分蘖肥在返青后施用; 穗肥在插秧后35 d施用; 粒肥在齐穗期施用。多效唑和壳寡糖在拔节初期施用, 多效唑用量为900 g/hm², 壳寡糖用量为60 g/hm²。

早、晚稻各品种均设置 3 种氮肥运筹和 3 种化学调控方式, 共 9 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 54 个小区, 其中晚稻各小区处理位置与早稻一致。每小区 20 m², 各小区之间筑埂(宽 40 cm、高 30 cm), 并用白色塑料薄膜包埂, 单独排灌。早稻于 3 月 20 日左右播种, 4 月 20 日左右移栽, 7 月 17 日收割; 晚稻 6 月 21 日播种, 7 月 25 日移栽, 10 月 12 日收割。早、晚稻均采用人工插秧栽培, 每穴插 2~3 本。种植密度为早稻 20.0 cm×16.5 cm, 晚稻 20 cm×20 cm。其他管理按当地高产栽培管理措施进行。

2.3 测定项目与方法

2.3.1 产量及产量构成因素

水稻成熟后每小区选取 100 茺水稻有效穗, 按有效穗平均值每个小区取 5 茺, 带回室内考种, 考察每穗总粒数、每穗实粒数、千粒质量, 计算结实率和理论产量。

水稻成熟后每个小区割 150 茺, 采用烘干法测含水率, 折算含水量为 13.5% 的实际产量。

2.3.2 抗倒伏性状

齐穗后 25 d, 根据单穴有效穗数, 每小区选取水稻 5 穴, 在各穴中选取中等茎 2 个, 共计 10 个单茎, 参考黄玉珍等^[17]的方法测定茎高、茎粗、节间长度、茎壁厚度、重心高度、节间充实度和单茎鲜质量等指标。

测量所取茎穗颈节以下第 3、4 节间(倒 3、倒 4)的抗折力及节间基部至穗顶端的长度和鲜质量。按照王英豪等^[18]的方法, 测量茎秆抗折力(单位为 N), 计算弯曲力矩和倒伏指数, 将弯曲力矩的单位

换算成 N cm, 将倒伏指数的单位换算成 N cm/N。

2.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据统计和处理; 采用 SPSS 23.0 进行显著性比较和相关性分析。

3 结果与分析

3.1 氮肥运筹与化学调控对双季稻产量及产量构成因素的影响

从表 1 可知, 氮肥运筹对早稻 2 个品种的产量影响显著, 且 N2、N3、N1 的产量依次降低, 其中 N2 显著高于 N1。株两优 819 N2 处理的实际产量分别比 N1、N3 的高 10.3%、6.7%, 陆两优 996 N2 处理的分别比 N1、N3 的高 11.1%、5.3%。化学调控对早稻 2 个品种的产量也有显著影响, C2、C1、C3 的产量依次降低。株两优 819 的 C1 和 C2 的实际产量较 C3 的分别高 9.1% 和 20.0%, 陆两优 996 C1 和 C2 的产量分别较 C3 的高 14.0% 和 28.0%。氮肥运筹方式与化学调控有明显交互效应, 2 个品种均以 N2C2 的产量最高, 显著高于除 N3C2 之外的其他处理, N1C3 的产量最低。

从产量构成因素来看, 氮肥运筹对早稻 2 个品种的有效穗数影响显著, 以 N2 的最高, N1 的最低, 但氮肥运筹对每穗总粒数、结实率和千粒质量无显著影响。化学调控显著提高了 2 个品种的有效穗数, C2、C1、C3 的有效穗数依次降低, 化学调控对陆两优 996 的每穗总粒数、结实率与千粒质量无显著影响, 对株两优 819 的每穗总粒数与千粒质量有显著影响, 结实率和每穗总粒数以 C2 的最高。

表 1 不同处理早稻的产量和产量构成

品种	处理	有效穗数/($\times 10^4$ hm ⁻²)	每穗总粒数	千粒质量/g	结实率/%	理论产量/(t hm ⁻²)	实际产量/(t hm ⁻²)
株两优 819	N1C1	322.2d	86.2	27.5b	77.8ab	6.0cd	5.8c
	N1C2	334.6cd	91.6	24.8d	85.5a	6.5bc	6.2bc
	N1C3	294.3e	83.9	27.3bc	80.1ab	5.4d	5.3d
	N2C1	377.7ab	81.5	28.4a	74.8b	6.6bc	6.3bc
	N2C2	398.6a	89.9	25.0d	81.0ab	7.4a	7.0a
	N2C3	354.3bc	82.4	27.9ab	77.3b	6.2cd	5.9c
	N3C1	352.3bc	86.2	27.2bc	75.9b	6.3cd	6.0bc
	N3C2	374.1ab	87.1	26.9c	80.6ab	7.0ab	6.7ab
	N3C3	316.6de	82.3	27.9ab	79.0ab	5.8d	5.4d
	N1	317.0c	87.2	26.5	81.1	6.0b	5.8b

表 1(续)

品种	处理	有效穗数/($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗总粒数	千粒质量/g	结实率/%	理论产量/(t hm^{-2})	实际产量/(t hm^{-2})
	N2	376.9a	84.6	27.1	77.7	6.7a	6.4a
	N3	347.7b	85.2	27.3	78.5	6.4ab	6.0ab
	C1	350.7a	84.6b	27.7a	76.2	6.3b	6.0b
	C2	369.1a	89.5a	25.6b	82.4	7.0a	6.6a
	C3	321.7b	82.9b	27.7a	78.8	5.8b	5.5c
陆两优 996	N1C1	328.1bc	86.7a	25.8d	76.9	5.7c	5.5c
	N1C2	342.6b	85.5a	27.1c	78.3	6.3bc	5.9bc
	N1C3	292.6d	80.0ab	26.7c	78.6	4.9d	4.7d
	N2C1	348.0b	80.8ab	27.9bc	80.7	6.4b	6.1b
	N2C2	378.2a	86.3a	27.3c	80.0	7.2a	6.8a
	N2C3	305.9cd	80.4ab	28.5b	76.9	5.4cd	5.2cd
	N3C1	336.9b	75.9b	29.3ab	78.3	5.9c	5.6c
	N3C2	359.1ab	76.9b	30.2a	81.1	6.8ab	6.6a
	N3C3	298.1d	74.3b	30.1a	77.6	5.2cd	5.0cd
	N1	321.1b	84.1	26.5	77.9	5.6b	5.4b
	N2	344.0a	82.5	27.9	79.2	6.3a	6.0a
	N3	331.4ab	75.7	29.9	79.0	6.0ab	5.7ab
	C1	337.7a	81.1	27.7	78.6	6.0b	5.7b
	C2	360.0a	82.9	28.2	79.8	6.8a	6.4a
	C3	298.9b	78.2	28.4	77.7	5.2c	5.0c

同列数据不同字母示同一品种、同一因素(N、C 或 NC 互作)处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

从表 2 可知,氮肥运筹对晚稻 2 个品种的产量影响显著,2 个品种 N2 的产量显著高于 N1 的,其中盛泰优 018 的 N2 处理的实际产量比 N1 的高 9.0%,H 优 518 N2 处理的比 N1 的高 9.8%。化学调控方式对 2 个品种的实际产量影响显著,C2、C1、C3 的产量依次降低,且 C2 处理的实际产量显著高于 C3 的,其中盛泰优 018 的 C2 的实际产量较 C3 的高 5.9%,H 优 518 C2 的实际产量较 C3 的高 4.8%。互作效应中,2 个品种的产量均以 N2C2 的最高,N1C3 的最低,且 2 个处理间存在显著差异。分析

产量构成因素可知,氮肥运筹方式和化学调控方式均对 2 个品种的有效穗数影响显著,但对每穗总粒数和结实率均无显著影响。2 个品种 N2、N3、N1 的有效穗数依次降低,且 N2 的显著高于 N1 的;2 个品种 C2、C1、C3 的有效穗数均表现为依次降低,且 C2 的显著高于 C3 的。

结合早、晚稻数据,氮肥运筹和化学调控处理对水稻产量及部分产量构成有显著影响,4 个品种均以 N2C2 处理的产量最高,增产的原因主要是提高了水稻的有效穗数。

表 2 不同处理晚稻的产量和产量构成

Table 2 Yield and yield components of late rice under different treatments

品种	处理	有效穗数/($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗总粒数	千粒质量/g	结实率/%	理论产量/(t hm^{-2})	实际产量/(t hm^{-2})
盛泰优 018	N1C1	342.1ab	100.8b	28.7a	67.4ab	6.7b	6.7b
	N1C2	360.2a	120.2ab	26.2cd	67.2ab	7.5ab	7.0ab
	N1C3	302.6d	113.3ab	29.1a	66.0ab	6.6b	6.3c
	N2C1	351.7ab	117.7ab	29.1a	61.5b	7.4ab	7.2a
	N2C2	360.8a	126.2a	27.3abc	68.4ab	8.5a	7.4a
	N2C3	330.1bc	110.3ab	28.7ab	71.4a	7.4ab	7.2a
	N3C1	349.2ab	133.7a	24.9d	65.3ab	7.4ab	7.2a
	N3C2	356.5a	129.4a	26.4bcd	63.0b	7.7ab	7.3a
	N3C3	309.2cd	112.1ab	28.1abc	72.7a	7.1ab	6.8b
	N1	335.0b	111.6	28.0	66.9	6.9b	6.7b

表 2(续)

品种	处理	有效穗数/($\times 10^4$ hm $^{-2}$)	每穗总粒数	千粒质量/g	结实率/%	理论产量/(t hm $^{-2}$)	实际产量/(t hm $^{-2}$)
	N2	347.5a	118.1	28.4	67.1	7.8a	7.3a
	N3	338.3ab	125.1	26.5	67.0	7.4b	7.1ab
	C1	347.7a	117.4	27.6	64.7	7.2	7.0ab
	C2	359.2a	125.5	26.6	66.2	7.9	7.2a
	C3	314.0b	111.9	28.6	70.0	7.0	6.8b
H 优 518	N1C1	316.9bc	103.0ab	29.6a	72.5	7.0ab	6.1ab
	N1C2	326.9abc	97.5b	28.7a	70.0	6.2ab	6.3ab
	N1C3	307.7c	115.2ab	24.6cd	68.1	6.0b	5.8b
	N2C1	323.4abc	116.5ab	27.1abc	69.6	7.1ab	6.6a
	N2C2	342.3a	109.6ab	28.0ab	68.0	7.4a	6.8a
	N2C3	336.9ab	122.4ab	23.9d	70.7	6.9ab	6.6a
	N3C1	321.5abc	123.2a	26.4abcd	72.4	7.1ab	6.4ab
	N3C2	331.4ab	108.1ab	27.9ab	67.4	6.9ab	6.4ab
	N3C3	323.0abc	120.6ab	24.9bcd	66.4	6.4ab	6.3ab
	N1	317.2b	105.2	27.6	70.2	6.4b	6.1b
	N2	334.2a	116.2	26.3	69.4	7.1a	6.7a
	N3	325.3ab	117.3	26.4	68.7	6.8a	6.4ab
	C1	320.6b	114.2	27.7a	71.5	7.1a	6.4ab
	C2	333.5a	105.1	28.2a	68.5	6.8a	6.5a
	C3	322.5b	119.4	24.5b	68.4	6.4b	6.2b

同列数据不同字母示同一品种、同一因素(N、C 或 NC 互作)处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

3.2 氮肥运筹与化学调控对双季稻抗倒伏能力的影响

3.2.1 对水稻茎秆抗倒伏能力的影响

由表 3 可知,氮肥运筹对早稻 2 个品种倒 3 节间的抗折力、弯曲力矩、倒伏指数均无显著影响。2 个品种倒 4 节间的抗折力以 N2 处理的最高,显著高于其他 2 个处理的;2 个品种倒 3、倒 4 节的弯曲力矩和倒伏指数均以 N2 的最低。不同化学调

控处理下,2 个品种倒 3 和倒 4 节间的抗折力均表现为 C1、C2、C3 依次降低,而弯曲力矩和倒伏指数表现规律相反,其中 C1 与 C3 处理间的差异达显著水平。互作协同下,2 个品种倒 3 和倒 4 节间抗折力均以 N2C1 的最高,倒伏指数均以 N2C1 的最低;弯曲力矩,陆两优 996 以 N2C1 的最低,株两优 819 倒 3 节的以 N2C2 的最低,倒 4 节的以 N2C1 的最低。

表 3 不同处理早稻的茎秆抗倒伏能力

Table 3 Lodging resistance of rice stems of early rice under different treatments

品种	处理	抗折力/N		弯曲力矩/(N cm)		倒伏指数/(N cm N $^{-1}$)	
		倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节
株两优 819	N1C1	10.21ab	10.89ab	4.45	5.32ab	43.58b	48.85c
	N1C2	10.32ab	9.99b	5.31	6.26a	51.45ab	62.66a
	N1C3	9.21b	9.36c	5.38	6.34a	58.41a	67.75a
	N2C1	10.75a	12.13a	4.41	5.18b	41.02b	42.70c
	N2C2	9.53ab	11.49ab	4.22	5.26b	44.28ab	45.78c
	N2C3	9.58ab	9.30c	4.51	5.46ab	47.08ab	58.71ab
	N3C1	10.73a	11.48ab	4.56	5.31b	42.40b	46.25c
	N3C2	9.78ab	10.91ab	4.74	5.88a	48.47ab	53.90ab
	N3C3	9.39ab	7.84d	5.24	5.99ab	55.80a	76.40a
	N1	9.91	10.08b	5.05	5.98a	51.96	59.33a

表 3(续)

品种	处理	抗折力/N		弯曲力矩/(N cm)		倒伏指数/(N cm N ⁻¹)	
		倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节
陆两优 996	N2	9.95	10.97a	4.38	5.30b	44.02	48.31b
	N3	9.97	10.08b	4.85	5.73ab	48.65	56.85a
	C1	10.56a	11.50a	4.47b	5.27b	42.33b	45.83b
	C2	9.88ab	10.80b	4.76ab	5.80a	48.18a	53.70b
	C3	9.39b	8.83c	5.04b	5.93a	53.67a	67.16a
	N1C1	9.67ab	10.92b	4.76abc	5.70ab	49.22c	52.20d
	N1C2	9.99a	10.53b	5.16abc	5.87ab	51.65bc	55.75d
	N1C3	7.88c	8.87d	5.57a	6.71a	70.69a	75.65b
	N2C1	10.01a	12.02a	4.34c	5.33b	43.36c	44.34e
	N2C2	9.42ab	10.09c	5.01abc	6.64ab	53.18bc	65.81c
	N2C3	8.81bc	9.42cd	5.40a	5.97ab	61.29ab	63.38c
	N3C1	9.61ab	10.92b	4.56bc	5.59ab	47.45c	51.19d
	N3C2	9.52ab	9.69cd	4.82abc	5.88ab	50.63bc	60.68c
	N3C3	8.53c	7.13e	5.48a	6.65ab	64.24ab	93.27a
	N1	9.18	10.11b	5.16	6.09	56.21	60.24a
	N2	9.41	10.51a	4.92	5.98	52.28	56.90b
	N3	9.22	9.25b	4.96	6.04	53.80	65.30a
	C1	9.76a	11.29a	4.55b	5.54b	46.62b	49.07c
C2	9.64a	10.10b	5.00ab	6.13ab	51.87b	60.69b	
C3	8.41b	8.47c	5.48a	6.44a	65.16a	76.03a	

同列数据不同字母示同一品种、同一因素(N、C或NC互作)处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

由表 4 可知, 氮肥运筹模式下, 2 个晚稻品种倒 3 和倒 4 节的抗折力表现为 N1、N2 的显著高于 N3 的, 而倒 4 节的弯曲力矩和倒伏指数均以 N2 的最小。化学调控模式下, 2 个品种倒 3 和倒 4 节抗折力均表现为 C1、C2、C3 依次降低, 其中 C1、C2 的显著高于 C3 的; 弯曲力矩则表现为 C3、C2、C1 依次降低, 其中 C2、C3 的显著高于 C1 的; 倒伏指数表现为 C3、C2、C1 依次降低。互作处理下, 盛泰优 018 倒 3 节的抗折力以 N2C1 处理的最高,

倒 4 节的以 N1C2 处理的最高; 而 H 优 518 倒 3 和倒 4 节均以 N1C1 处理的最高; 2 个品种弯曲力矩和倒伏指数则均以 N2C1 处理的最低。

综合早、晚稻结果, 在总施氮量相同的条件下, 氮肥施用适当后移, 增加穗肥比例, 能提高水稻抗折力, 减少弯曲力矩和倒伏指数, 以 N2 处理的效果最好; 与空白处理相比, 2 种化学调控方式均能提高水稻抗折力, 减少弯曲力矩和倒伏指数, 而多效唑处理(C1)效果更好。

表 4 不同处理晚稻的茎秆抗倒伏能力

Table 4 Lodging resistance of rice stems of late rice under different treatments

品种	处理	抗折力/N		弯曲力矩/(N cm)		倒伏指数/(N cm N ⁻¹)	
		倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节
盛泰优 018	N1C1	11.13ab	12.03bc	5.38bc	6.37c	48.34cd	52.95e
	N1C2	11.33ab	14.28a	7.83a	9.15a	69.11b	64.08c
	N1C3	9.06c	10.87cde	6.08bc	7.24bc	67.11b	66.61bc
	N2C1	11.76a	12.79ab	5.17c	6.26c	43.96d	48.94e
	N2C2	11.66a	11.75bcd	6.14abc	7.20bc	52.66bcd	61.28d
	N2C3	10.35bc	12.41bc	7.10ab	7.40bc	68.60b	59.63d
	N3C1	10.11bc	11.06cde	6.20abc	6.57c	61.33bc	59.40d
	N3C2	10.06bc	10.27de	6.22abc	7.16bc	61.83bc	69.72b
	N3C3	7.12d	9.75e	6.48abc	8.10ab	91.01a	83.08a
	N1	10.51a	12.39a	6.43	7.59	61.18ab	61.26b
	N2	11.26a	12.32a	6.13	6.95	54.44b	56.41c
	N3	9.10b	10.36b	6.30	7.28	69.23a	70.27a
	C1	11.00a	11.96a	5.58b	6.40b	50.73c	53.51c

表 4(续)

品种	处理	抗折力/N		弯曲力矩/(N cm)		倒伏指数/(N cm N ⁻¹)	
		倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节
H 优 518	C2	11.02a	12.10a	6.73a	7.84a	61.07b	64.79b
	C3	8.84b	11.01b	6.55a	7.58a	74.10a	68.85a
	N1C1	11.06a	14.91a	6.22b	7.41b	56.24d	49.70d
	N1C2	10.15abc	14.39ab	8.38a	9.66a	82.56ab	67.13bc
	N1C3	9.50cd	13.83ab	8.39a	10.03a	88.32a	72.52ab
	N2C1	10.95a	14.79a	5.94b	7.07b	54.25d	47.80d
	N2C2	10.64ab	14.67a	8.23a	9.48a	77.35b	64.62c
	N2C3	9.30cd	13.81ab	7.86a	8.97ab	84.52ab	64.95c
	N3C1	9.75bcd	13.42ab	6.21b	7.30b	63.69c	54.40d
	N3C2	10.04abc	13.11ab	7.89a	9.95a	78.59b	75.90a
	N3C3	8.88d	12.37b	7.90a	9.39a	88.96a	75.91a
	N1	10.24a	14.38a	7.66	9.03	74.80	62.80b
	N2	10.30a	14.42a	7.34	8.50	71.26	58.95b
N3	9.56b	12.97b	7.33	8.88	76.67	68.47a	
C1	10.59a	14.37a	6.12b	7.26b	57.79c	50.52b	
C2	10.28a	14.06a	8.17a	9.70a	79.47b	68.99a	
C3	9.23b	13.34b	8.05a	9.46a	87.22a	70.91a	

同列数据不同字母示同一品种、同一因素(N、C 或 NC 互作)处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

3.2.2 对双季稻茎秆物理性状的影响

由表 5 可知, 氮肥运筹和化学调控对水稻茎秆各物理性状均有一定影响, 其中化学调控模式对水稻茎秆物理性状的影响程度更大。

不同氮肥运筹, 2 个品种的茎高、重心高度、单茎鲜质量及节间长度大致表现为 N1、N2、N3 依次降低, 其中, 陆两优 996 N1 和 N2 的重心高度显著高于 N3 的, 株两优 819 的 N1 的节间长度显著高于 N3 的, 而陆两优 996 的节间长度处理间无显著差异; 2 个品种的茎壁厚度及节间充实度大致表现为 N2、N3、N1 依次降低, 其中 2 个品种 N2 的节间充实度显著高于 N1 处理的, 株两优 819 的 N2 茎粗和茎壁厚度显著高于其他 2 个处理, 而陆两优

996 的茎粗和茎壁厚度处理间差异不显著。

不同化学调控, 2 个品种的茎高、重心高度、单茎鲜质量及节间长度均表现为 C3、C2、C1 依次降低; 而 2 个品种的茎粗、茎壁厚度及节间充实度规律表现相反, 表现为 C1、C2、C3 依次降低, 2 个品种的茎粗和茎壁厚度处理间无显著差异, C1 和 C2 的节间充实度显著高于 C3 的。

互作处理中, 株两优 819 的茎高、重心高度、单茎鲜质量及节间长度均以 N1C3 的最高, 茎粗、茎壁厚度及节间充实度均以 N2C1 的最高。陆两优 996 在互作处理下不同指标表现出不同规律, N1C3 处理的茎高、重心高度、单茎鲜质量及节间长度较高, N2C1 处理的茎粗、茎壁厚度及节间充实度较高。

表 5 不同处理早稻茎秆的物理性状

Table 5 Physical properties of early rice stems under different treatments

品种	处理	茎高/cm	重心高度/cm	单茎鲜质量/g	茎粗/mm	茎壁厚度/mm	节间长度/cm		节间充实度/(g cm ⁻¹)	
							倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节
株两优 819	N1C1	72.81c	37.91bcd	8.37ab	5.45abc	1.16bc	7.56ab	3.86ab	28.95ab	30.29bcd
	N1C2	84.31a	41.01a	8.48ab	5.33abc	1.08cd	8.45a	4.42ab	25.07bc	28.56cd
	N1C3	84.55a	41.10a	9.03a	5.24bc	1.02de	8.85a	4.46a	23.36c	26.17d
	N2C1	71.75c	36.98d	7.76b	5.85a	1.31a	7.11b	3.36b	30.63a	37.56a
	N2C2	83.88a	38.97abcd	7.83b	5.63ab	1.25ab	8.09ab	4.30ab	28.49ab	35.84ab
	N2C3	83.53a	40.73abc	8.97ab	5.55ab	1.16bc	8.57a	4.43ab	25.45bc	33.01abcd
	N3C1	71.31c	37.47cd	6.81b	5.52abc	1.26ab	7.03b	3.63ab	29.61ab	37.29ab
	N3C2	78.93b	40.51abc	8.75ab	5.28abc	1.22ab	7.22b	4.28ab	27.94abc	35.22abc
	N3C3	82.14ab	40.92ab	8.50ab	4.89c	0.98e	7.94ab	4.30ab	26.16abc	33.20abcd
	N1	80.56	40.01	8.63	5.34b	1.09c	8.29a	4.25a	25.79b	28.34b
	N2	79.72	38.89	8.19	5.68a	1.24a	7.92ab	4.03b	28.19a	35.47a

表 5(续)

品种	处理	茎高/cm	重心高度/cm	单茎鲜质量/g	茎粗/mm	茎壁厚度/mm	节间长度/cm		节间充实度/(g cm ⁻¹)	
							倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节
陆两优 996	N3	77.46	39.63	8.02	5.23b	1.15b	7.40b	4.07b	27.90ab	35.24a
	C1	71.96b	37.45b	7.65b	5.61	1.24	7.23b	3.62b	29.73a	35.05a
	C2	82.37a	40.16a	8.35a	5.41	1.18	7.92a	4.33a	27.17a	33.21a
	C3	83.41a	40.92a	8.83a	5.23	1.05	8.45a	4.40a	24.99b	30.79b
	N1C1	73.09b	36.93b	7.8ab	5.65a	1.27a	7.62cd	4.49	27.31abc	34.08ab
	N1C2	84.01a	39.23a	9.03ab	5.64a	1.25a	8.93abcd	4.32	23.16cd	31.65bc
	N1C3	85.91a	39.30a	9.42a	5.07b	1.12b	10.15ab	4.88	19.77d	28.55c
	N2C1	67.92c	37.85ab	7.40b	5.79a	1.28a	7.92cd	4.13	30.43ab	37.23a
	N2C2	84.48a	38.30a	8.84ab	5.64ab	1.30a	8.40bcd	4.36	31.69a	34.45ab
	N2C3	85.49a	39.32a	9.33a	5.52ab	1.24a	10.34a	4.74	24.33bcd	31.13bc
	N3C1	69.60c	35.90b	7.65ab	5.86a	1.24ab	7.41d	4.41	26.02abcd	36.71a
	N3C2	84.94a	38.58a	8.60ab	5.71a	1.20ab	8.97abcd	4.43	25.40abcd	34.89ab
	N3C3	84.89a	38.66a	9.32a	5.81a	1.21ab	9.43abcd	4.41	22.42cd	32.71abc
	N1	81.00	38.49a	8.75	5.45	1.21	8.90	4.56	23.41b	31.43b
	N2	79.30	38.49a	8.52	5.65	1.27	8.89	4.41	28.82a	34.27a
	N3	79.81	37.71b	8.52	5.79	1.22	8.60	4.42	24.61b	34.77a
	C1	70.20b	36.89b	7.62b	5.77	1.26	7.65c	4.34b	27.92a	36.01a
	C2	84.48a	38.70a	8.82ab	5.66	1.25	8.77b	4.37a	26.75a	33.66a
C3	85.43a	39.09a	9.36a	5.47	1.19	9.97a	4.68a	22.17b	30.80b	

同列数据不同字母示同一品种、同一因素(N、C 或 NC 互作)处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

由表 6 可知,氮肥运筹处理间,2 个品种的茎高、重心高度、单茎鲜质量及节间长度大致表现为 N1、N2、N3 依次降低,其中盛泰优 018 的 N1 茎高和单茎鲜质量显著高于 N3 的,重心高度和节间长度处理间无显著差异;2 个品种的茎粗、茎壁厚度及节间充实度均表现为 N2、N3、N1 依次降低,其中 2 个品种的茎粗和茎壁厚度处理间无显著差异,N2 的节间充实度显著高于 N1 的。

不同化学调控,2 个品种的茎高、重心高度及节间长度均表现为 C3、C2、C1 依次降低,且 C2 和 C3 的均显著高于 C1 的;2 个品种的单茎鲜质量均表现为 C2、C3、C1 依次降低,且 C2 与 C1 间存在显著差异;与早稻一致,2 个品种的茎粗、茎壁

厚度及节间充实度大致表现为 C1、C2、C3 依次降低,各品种茎粗和茎壁厚度处理间无差异,C1 的节间充实度显著高于 C3 的。互作处理中,2 个品种的茎高、重心高度及节间长度均以 N1C3 的最高,单茎鲜质量以 N1C2 的最高,茎粗、茎壁厚度及节间充实度均以 N2C1 的最高。

综合早、晚稻结果分析,与 N1 处理相比,N2、N3 处理增加了茎粗、茎壁厚度和节间充实度,降低了茎高、重心高度和节间长度,且 N2 能显著提高节间充实度。与 C3 相比,C1、C2 均能增加茎粗、茎壁厚度、节间充实度,且 C1 能显著降低茎高、重心高度和节间长度,显著增加节间充实度;可见 C1 提高水稻抗倒伏的能力优于 C2。

表 6 不同处理晚稻茎秆的物理性状

Table 6 Physical properties of late rice stems under different treatments

品种	处理	茎高/cm	重心高度/cm	单茎鲜质量/g	茎粗/mm	茎壁厚度/mm	节间长度/cm		节间充实度/(g cm ⁻¹)	
							倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节
盛泰优 018	N1C1	80.36d	43.65ab	8.94b	6.30	1.28	7.19ab	3.59	26.74ab	35.51bc
	N1C2	90.19a	45.11a	11.28a	6.29	1.27	8.25ab	3.52	26.77ab	33.10bc
	N1C3	92.10a	45.50a	9.67ab	6.32	1.24	8.72a	3.86	21.77b	31.58c
	N2C1	79.20d	42.39ab	8.43b	6.78	1.39	7.17ab	3.48	31.03a	42.68a
	N2C2	88.16abc	45.20a	10.01ab	6.64	1.31	7.53ab	3.72	30.45a	38.03ab
	N2C3	89.00ab	45.46a	10.38ab	6.67	1.35	8.44a	3.84	26.44ab	37.08abc
	N3C1	79.51d	40.04b	8.69b	6.58	1.30	6.44b	3.51	28.47a	35.75bc

表 6(续)

品种	处理	茎高/cm	重心高度/cm	单茎鲜质量/g	茎粗/mm	茎壁厚度/mm	节间长度/cm		节间充实度/(g cm ⁻¹)	
							倒 3 节	倒 4 节	倒 3 节	倒 4 节
H 优 518	N3C2	84.92c	44.96ab	9.78ab	6.42	1.31	7.37ab	3.48	29.05a	34.13bc
	N3C3	86.17bc	45.07a	9.85ab	6.54	1.29	7.60ab	3.12	26.88ab	33.54bc
	N1	87.55a	44.75	9.96a	6.30	1.26	8.05	3.66	25.09b	33.40b
	N2	85.45ab	44.35	9.61ab	6.70	1.35	7.71	3.68	29.31a	39.26a
	N3	83.53b	43.36	9.44b	6.51	1.30	7.14	3.37	28.13ab	34.47b
	C1	79.69b	42.03b	8.69b	6.55	1.32	6.93b	3.53a	28.75a	37.98a
	C2	87.76a	45.09a	10.36a	6.45	1.30	7.72a	3.57ab	28.76a	35.09ab
	C3	89.09a	45.34a	9.97a	6.51	1.29	8.25a	3.61a	25.03b	34.07b
	N1C1	85.80b	48.09b	10.73ab	7.00ab	1.27abc	9.31b	3.94b	25.08ab	35.43abc
	N1C2	95.19a	53.69a	12.63a	6.81ab	1.24bc	11.62a	4.85ab	22.10ab	30.71bc
	N1C3	95.39a	53.80a	11.59ab	6.57ab	1.23bc	12.40a	5.17a	20.84b	29.98c
	N2C1	84.40b	47.39b	10.43b	7.31a	1.42a	9.21b	4.02b	27.11a	37.37a
	N2C2	93.22a	52.80a	12.46a	7.04ab	1.38ab	11.61a	4.77ab	24.12ab	35.78abc
	N2C3	94.96a	53.19a	11.51ab	7.03ab	1.36ab	12.30a	5.10a	21.63ab	32.69abc
	N3C1	82.64b	46.72b	11.01ab	7.26a	1.28abc	8.06b	4.07b	26.42ab	36.61ab
	N3C2	94.45a	52.27a	11.43ab	6.80ab	1.25bc	11.60a	4.70ab	23.55ab	33.68abc
	N3C3	93.86a	52.00a	11.10ab	6.43b	1.20c	12.12a	4.36ab	22.01ab	30.79bc
	N1	92.13	51.86	11.65	6.79	1.25	11.11	4.65	22.67b	32.04b
	N2	90.86	51.13	11.47	7.13	1.39	11.04	4.63	24.29a	35.28a
	N3	90.32	50.33	11.18	6.83	1.24	10.59	4.38	23.99ab	33.69ab
C1	84.28b	47.40b	10.72b	7.19	1.32	8.86b	4.01b	26.20a	36.47a	
C2	94.29a	52.92a	12.17a	6.88	1.29	11.61a	4.77a	23.26ab	33.39ab	
C3	94.74a	53.00a	11.40a	6.68	1.26	12.27a	4.88a	21.49b	31.15b	

同列数据不同字母示同一品种、同一因素(N、C 或 NC 互作)处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

3.2.3 相关性分析

相关性分析结果(表 7)表明,水稻节间的抗倒伏特性与茎秆物理性状关系密切。倒 3、倒 4 节间的抗折力与茎高、重心高度及节间长度呈显著或极显著负相关,与茎粗、茎壁厚度及节间充实度呈显著或极显著正相关;倒 3、倒 4 节间的弯曲力矩和倒伏指数与茎高、重心高度、单茎鲜质量、节间长度

呈显著或极显著正相关,与茎粗和节间充实度呈极显著负相关。可见,水稻茎秆的抗折力、弯曲力矩和倒伏指数受多种因素影响,且不同节间的性状对水稻抗倒伏能力影响一致,降低茎高、重心高度和节间长度,提高茎粗和节间充实度,能有效提高茎秆抗倒伏能力。

表 7 茎秆性状与茎秆抗折力、弯曲力矩及倒伏指数的相关系数

茎秆性状	相关系数						
	茎高	重心高度	单茎鲜质量	茎粗	茎壁厚度	节间长度	节间充实度
倒 3 节抗折力	-0.257**	-0.102*	-0.138*	0.404**	0.374**	-0.291**	0.170*
倒 3 节弯曲力矩	0.883**	0.632**	0.910**	-0.228**	-0.381**	0.591**	-0.230**
倒 3 节倒伏指数	0.357**	0.442**	0.119*	-0.287**	-0.076	0.438**	-0.301**
倒 4 节抗折力	-0.284**	-0.341**	-0.077	0.130*	0.146*	-0.163*	0.235**
倒 4 节弯曲力矩	0.804**	0.701**	0.879**	-0.331**	-0.169*	0.547**	-0.303**
倒 3 节倒伏指数	0.223**	0.516**	0.187*	-0.425**	-0.465**	0.121*	-0.202**

“*”“**”分别示在 0.05、0.01 水平显著。

4 结论与讨论

研究^[19-20]表明,氮肥施用适当后移能在获得足

够茎蘖数的前提下减少无效分蘖的发生,提高水稻成穗率,增加有效穗数,从而达到增产效果。本研究中,在相同施氮量条件下,不同的氮肥运筹方式

对早、晚稻各品种的产量影响趋势基本一致,其中N2的产量最高,N1的最低,且两者存在显著差异,N2处理产量高的原因在于保证穗粒数和结实率的同时提高了有效穗数。这可能是由于适当降低分蘖肥、增加穗肥能够提高水稻成穗率、优化群体结构,从而增加有效穗数,提高产量^[21-22]。化学调控可影响作物的内源激素系统平衡,促使植株的生长发育进程朝着所期望的方向变化^[23]。本试验结果表明,与对照相比,喷施多效唑与壳寡糖均能提高早、晚稻各品种产量,其中壳寡糖(C2)处理增产最显著,壳寡糖处理主要是通过提高有效穗数来实现增产,这与李永松等^[24]的研究结果不同,可能与喷施浓度和时期等有关。已有研究^[25]表明,在水稻拔节初期喷施壳寡糖能显著提高分蘖率和成穗率,从而增加有效穗数,最终获得高产。

本研究分析了水稻茎秆的力学指标,发现不同氮肥运筹下早、晚稻各品种倒3与倒4节间的抗折力基本上表现为N2、N1、N3依次降低,弯曲力矩表现为N1、N3、N2依次降低,主要是前期分蘖肥比例增大,水稻茎高增加,倒3、倒4节间长度增大,节间充实度降低。N2处理能提高水稻茎秆的抗折力,主要是保证适宜茎秆高度与节间长度的同时,增加了茎粗、茎壁厚度和节间充实度,优化了茎秆结构。不同化学调控下,与对照处理(C3)相比,C1和C2处理显著提高了早、晚稻各品种的抗折力,降低了弯曲力矩和倒伏指数。分析其原因可能是喷施化学调控剂降低了水稻茎秆高度、重心高度和节间长度,增加了茎粗、茎壁厚度和节间充实度,从而提高了水稻抗倒伏能力,其中C1比C2处理效果更好。水稻茎秆形态性状与水稻抗倒伏性关系密切。研究^[26-27]表明,水稻植株茎高、重心高度及节间长度与水稻抗倒性呈显著负效应关系。本研究相关分析表明,茎高、重心高度和节间长度与倒伏指数呈显著或极显著正相关关系,节间充实度与倒伏指数呈显著或极显著负相关关系,说明降低株高与重心高度、增加茎粗和节间充实度是提高茎秆抗倒伏能力的关键。

通过互作分析来看,产量方面,N2C2处理在保证水稻每穗总粒数和结实率的同时显著提高了有效穗数,从而增产效果最好。抗倒伏方面,N2C1、N2C2和N3C1处理下水稻的茎粗和茎壁厚度较大,

倒3与倒4节间长度较短,充实度和抗折力较高,倒伏指数较低,抗倒伏能力较高。综合来看,在分蘖肥、穗肥、粒肥比例为6:3:1条件下,于拔节初期喷施壳寡糖处理可在提高水稻抗倒伏能力的同时获得最高产量,是适宜双季稻的栽培模式。

此外,本研究中4个品种的抗倒伏性状有一定差异。在氮肥运筹和化学调控双因素影响下,早稻品种整体上以株两优819抗倒伏能力较强,晚稻品种整体上以盛泰优018抗倒伏能力较强。究其原因,可能是早稻株两优819较陆两优996整体上单茎鲜质量较小,倒3和倒4节间长度较小,节间充实度较高;晚稻盛泰优018较H优518整体上茎高和重心高度较低,倒3和倒4节间长度较小,节间充实度较高。研究^[28-31]表明,株两优819和盛泰优018为倒伏敏感品种,陆两优996和H优518为抗倒伏品种,本研究结果与之不一致,这可能与本试验设计的处理因素有关。本研究中,氮肥运筹和化学调控无论是单施还是配施都对各品种抗倒伏特性有显著影响,且倒伏敏感品种的抗倒伏能力比抗倒伏品种更强,说明氮肥运筹和化学调控处理对倒伏敏感品种的影响更大,效果更佳。水稻抗倒伏能力影响因素较多,氮肥运筹方式和化学调控剂对水稻抗倒伏能力的影响还需从生理机制的角度进一步开展系统研究。

参考文献:

- [1] 史占忠,王晓明. 水稻倒伏原因及防御技术措施[J]. 北方水稻, 2014, 44(4): 56-58.
- [2] 苏仕华,王珏,孙成亮,等. 水稻倒伏对产量影响的调查与分析[J]. 北方水稻, 2008, 38(6): 41-43.
- [3] 王仁祥,周继勇,肖层林,等. “九二〇”对株两优02制种母本茎秆性状及倒伏指数的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2008, 34(5): 506-512.
- [4] 李国辉,钟旭华,田卡,等. 施氮对水稻茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1323-1334.
- [5] 万宜珍,马国辉. 超级杂交稻抗倒生理与形态机能研究 II. 培矮64S/E32与汕优63茎秆抗倒力学差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2003, 29(2): 92-94.
- [6] 吴晓然,张巫军,伍龙梅,等. 超级杂交籼稻抗倒能力比较及其对氮素的响应[J]. 中国农业科学, 2015, 48(14): 2705-2717.
- [7] 蒋明金,王海月,何艳,等. 氮肥管理对直播杂交水稻抗倒伏能力的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(1): 157-168.

- [8] 程慧煌, 易振波, 曾勇军, 等. 超级杂交稻抗倒伏能力及其对施肥量的响应[J]. 核农学报, 2018, 32(8): 1603-1610.
- [9] CHEN L, CAI L P, ZHOU B, et al. Effects of silicon at different concentrations on morphology and photosynthetic physiological mechanism of *Japonica* rice[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(9): 1877-1880.
- [10] 苏雨婷, 袁帅, 李永松, 等. 氮肥运筹对湘南双季杂交稻产量与抗倒伏特性的影响[J]. 作物杂志, 2022(3): 225-232.
- [11] 郭玉华, 朱四光, 张龙步, 等. 不同栽培条件对水稻茎秆材料学特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(1): 4-7.
- [12] 刘立军, 袁莉民, 王志琴, 等. 早种水稻倒伏生理原因分析与对策的初步研究[J]. 中国水稻科学, 2002, 16(3): 225-230.
- [13] 金正勋, 郑冠龙, 朱立楠, 等. 不同氮钾肥施用方法对水稻产量及抗倒伏性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(3): 9-14.
- [14] 姜龙, 曲金玲, 孙国宏, 等. 矮壮素、烯效唑和多效唑对水稻倒伏及产量的影响[J]. 中国林副特产, 2018(2): 10-13.
- [15] 孙朋, 孙妍. 植物生长调节剂水稻专用型矮壮丰应用效果初探[J]. 农业科技通讯, 2011(12): 67-68.
- [16] 何冲霄, 姚立生, 顾来顺, 等. 蛋氨酸和多效唑对杂交水稻抗倒性及产量的影响[J]. 杂交水稻, 2000, 15(5): 32-33.
- [17] 黄玉珍, 高凯歌, 吕茹洁, 等. 减氮配施牡蛎壳粉对优质晚籼稻抗倒性能的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(9): 1860-1868.
- [18] 王英豪, 汪源, 蒋岩, 等. 化学调控下穗肥施氮量对水稻产量及抗倒性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(11): 92-97.
- [19] 苏雨婷. 氮肥运筹与化学调控对湘南双季稻抗倒伏能力与产量形成特性的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [20] 袁帅. 氮肥运筹对湘南双季杂交稻产量、品质及氮利用效率的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [21] 陈平平, 张小平, 吴小京, 等. 氮肥运筹对‘陆两优 996’产量形成与氮利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(5): 238-242.
- [22] 夏泽静, 周红英, 潘华, 等. 氮肥运筹对超级稻丰两优香 1 号生长特性和产量的影响[J]. 杂交水稻, 2015, 30(6): 42-45.
- [23] 张晓明. 作物化学调控研究进展[J]. 现代农业科技, 2017(10): 135-136.
- [24] 李永松, 陈基旺, 袁帅, 等. 3 种化学调控剂对湘南双季超级稻源库关系的影响[J]. 杂交水稻, 2021, 36(1): 93-100.
- [25] 袁帅, 苏雨婷, 王晓玉, 等. 氮肥运筹与化学调控对湘南超级杂交早稻茎蘖利用特征和产量的影响[J]. 杂交水稻, 2021, 36(5): 79-88.
- [26] 杨艳华, 朱镇, 张亚东, 等. 不同水稻品种(系)抗倒伏能力与茎秆形态性状的关系[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(2): 231-235.
- [27] ZHANG W J, WU L M, WU X R, et al. Lodging resistance of *Japonica* rice (*Oryza Sativa* L.): morphological and anatomical traits due to top-dressing nitrogen application rates[J]. Rice, 2016, 9(1): 31.
- [28] 李梅华. 超级杂交早稻陆两优 996 的高产机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [29] 水稻新品种: 株两优 819[J]. 农民科技培训, 2011(4): 30.
- [30] 黄凤林, 杨冬奇, 彭国兴, 等. 超级晚稻 H 优 518 的特征特性及其机插高产栽培技术[J]. 湖南农业科学, 2017(10): 13-14.
- [31] 李虎, 蒋建为, 朱红卫, 等. 优质杂交水稻新组合盛泰优 018 的选育[J]. 作物研究, 2017, 31(6): 648-650.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正