

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23784

直播稻一次性侧深施用无机包裹缓控释肥的可行性研究

郝祝霞^{1, 2, 3}, 余 淋⁴, 丰智松⁵, 李月帅⁶, 侯翠红⁷, 陈国庆⁸, 束维正⁸,
王 坤⁸, 宋轶辉⁹, 祝松蔚⁹, 林丽花⁹, 张卫峰^{1, 2, 3, 5*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230036; 3. 安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心, 安徽 合肥 230036; 4. 西南大学资源与环境学院, 重庆 400000; 5. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 6. 中国农业大学烟台研究院, 山东 烟台 264670; 7. 郑州大学化工学院, 河南 郑州 450001; 8. 中盐安徽红四方肥业股份有限公司, 安徽 合肥 231602; 9. 上海市崇明区庙镇农业综合技术推广服务中心, 上海 202150)

摘 要: 探讨适用于上海市崇明区单季直播稻南粳46的最适施氮量和施肥方式, 以期为崇明区水稻轻简化生产和养分资源高效利用提供技术方案。于2022年6—11月在上海市崇明区进行大田试验, 设置不施氮、农户常规施肥、一次性施肥、分蘖期追施一次、分蘖期+穗期追施两次, 共计5个处理; 分析不同施氮量和运筹方式对水稻生长动态、产量、氮素吸收利用、稻米品质及经济效益的影响。针对上海崇明地区主栽水稻品种(南粳46)采用一次性侧深施肥技术, 在施用专用缓释肥并保持纯氮养分投入量为225 kg/hm²的氮肥运筹模式能够获得最佳的产量和稻米品质, 相对当地农户常规施肥处理减氮27.2%, 同时减少水稻后期2~3次施肥, 可降低14.0%的成本, 产投比达到1.94。这种施肥方式的氮肥利用率最高, 为47.5%, 相较于农户常规施肥处理提升了51.0%。一次性侧深施肥技术搭配新型肥料施用可以在纯氮投入量为225 kg/hm²的情况下实现最佳的水稻产量、稻米品质和经济效益。

关键词: 水稻; 新型肥料; 侧深施肥; 产量; 氮素利用率; 经济效益

过量的氮肥施用以及不科学的施肥方式不但增加了生产成本, 还造成稻田氮肥利用率急剧降低、稻米品质显著下降、土壤养分失衡, 并由此引发了温室气体排放增多、地下水污染等一系列的环境问题^[1]。因此, 如何提高稻田氮肥增产效果和氮肥利用率、减少稻田氮素损失以减轻其对环境造成的压力, 保证水稻生产的高产、高效和绿色可持续发展, 成为现阶段我国水稻生产的严峻挑战。这一问题在我国长江中下游稻区尤为突出, 部分地区水稻单季施氮量已超过350 kg/hm²。崇明区是著名的鱼米之乡, 现有水稻种植面积17333 hm², 其大米产量占上海市大米总产量的22%^[2]。2020年, 通过

对全岛300个水稻种植户的调研发现, 崇明区水稻氮肥用量超过400 kg/hm², 远高于国家环保部门制定的生态岛化肥用量标准(N 250 kg/hm²), 这与崇明生态岛建设目标严重不符^[3], 化肥施用量偏高、施肥方式不科学、肥料用量比例不协调等问题依然存在。

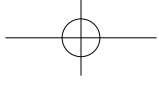
崇明水稻生产过程中施肥环节一直沿用人工撒施的方式, 既加大了人工投入, 也造成了肥料浪费^[4]。普通复合肥养分释放快, 氮素在土壤中容易通过各种途径损失, 难以保证水稻全生育期的养分需求, 水稻生产中通常通过分次施肥的方式提高氮肥的利用率^[5-6]。随着水稻规模化生产的推进和农业劳动力成本的提高, 轻简化施肥技术成为水稻生产的现实需求^[7]。侧深施肥是一个有效解决农业生产中多次施肥的方式, 特别是一次性侧深施肥。侧深施肥技术可以同时实现施肥与机插秧或稻种直播一体化, 并将养分直接定量输送至根区, 实现肥料的精准深施。在江苏和上海等地的研究发现, 侧深施肥可以促进水稻对氮素的吸收^[8-9], 提高水稻产

收稿日期: 2023-12-21; 录用日期: 2024-04-28

基金项目: 崇明区农业科创研究项目(2021CNKC-05-03); 中盐红四方绿色智能复合肥产业研究院与巢湖面源污染关键技术研究项目(FYGS-JS-202111)。

作者简介: 郝祝霞(1997-), 在读硕士研究生, 主要从事植物营养与高效施肥研究。E-mail: hao17358076829@163.com。

通讯作者: 张卫峰, E-mail: wfzhang@cau.edu.cn。



量 6% ~ 12%^[10-11]。应用侧深施肥技术可使肥料减施 5% 以上^[12]。但是这些研究大多采用传统肥料, 并且多次使用, 没有解决省工节本的问题, 导致侧深施肥发展缓慢。采用缓控施肥是保障一次施用的关键, 缓控释肥料可以通过对肥料和土壤中养分的控制及氮素的转化过程来达到提高肥料利用率、调节作物生长机制和改善土壤理化性质的目的^[13-15]。Xia 等^[16] 基于文献整合分析的方法对中国水稻主产区水稻试验的结果进行汇总分析, 结果表明与常规分次施肥相比, 缓释肥一次性施肥水稻的产量和氮肥利用率分别提高了 9.3% 和 36.6%。侧深施肥技术搭配缓释肥一次性施用, 可有效满足农民轻简化施肥的需求, 降低劳动成本^[17], 但这些区域现有技术仍然需要追肥, 尤其对于目前主流的长生育期的直播稻, 一次性侧深施肥是否可行仍不确定, 选用什么样的肥料产品也是一个亟待回答的问题。

新型肥料可以通过对肥料和土壤中养分的控制及氮素的转化过程来达到提高肥料利用率、调节作物生长机制和改善土壤理化性质的目的^[15-17]。目前市面上的缓释肥料多是含有包膜尿素的掺混肥料, 现有树脂包膜尿素仍存在降解不完全的问题, 不符合崇明生态岛的发展定位。无机包裹型复合肥是郑州大学独创的一种缓释肥料, 具有良好的缓释性能, 而且具有无残留的特点, 但这款肥料是否可用于长生育期的直播稻却鲜有研究, 尤其是其养分释放规律能否满足水稻高产、优质的目标尚未报道。为此, 本文针对崇明区水稻施肥存在的氮肥调控不合理的问题, 初步在无机包裹型复合肥的基础上设计了适用于崇明区水稻品种南粳 46 的施肥配方, 筛选出适用于一次性施用新型肥料产品的合适用量, 并进行田间试验, 探究侧深施肥技术一次性施用该方案的效果, 以期为区域水稻养分管理和资源高效利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

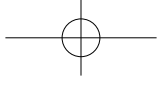
试验地点位于上海市崇明区绿华镇绿园村, 属亚热带季风气候, 年平均气温 15.3℃, 年均降水量 1004 mm, 年均日照 2104 h, 全年无霜期 229 d。试验地耕层土壤 (0 ~ 20 cm) 理化性质: pH 7.68、有机质 14.40 g/kg、碱解氮 139.90 mg/kg、有效磷 27.64 mg/kg、速效钾 87.77 mg/kg, 土壤地力分布均匀。试验水稻品种为南粳 46 (江苏省农业科学院),

属中熟晚粳稻品种, 在江苏南部、上海等地广泛种植。种植制度为单季晚稻。前茬作物为水稻, 稻秆留茬约 20 cm, 其余全部移出。

1.2 试验设计

根据氮肥总量控制、磷钾衡量监控的原理, 结合崇明区当地土壤基础地力、直播稻养分需求规律和目标产量 (9.0 ~ 9.75 t/hm²), 设计出适合崇明区直播稻品种南粳 46 的肥料养分投入量 (N-P₂O₅-K₂O 配比为 30-6-12)。其中, 氮肥总量的确定用斯坦福差值法计算: 施氮总量 (kg/hm²) = [目标产量需氮量 (kg/hm²) - 土壤供氮量 (kg/hm²)] / 氮肥的当季利用率 (%)。上海崇明区处于长江下游单双季稻区, 南粳 46 生育期较长, 从播种到收获一般在 160 d 以上, 应将氮肥向穗粒肥再转移一部分, 根据前期研究发现其全生育期氮素需求分配为基肥: 分蘖肥: 穗粒肥 = 4: 4: 2。新型肥料肥包肥中含有尿素等速效氮肥, 满足了水稻发芽期间的需求, 而稳定性脲铵氮肥养分释放期为 20 ~ 30 d, 满足分蘖期的需要, 通过室内养分释放试验得到肥包肥的肥芯中氮素释放高峰约在 70 d, 正好处于拔节和破口抽穗的关键时期, 两种新型肥料搭配正好满足水稻全生育期内各个时期的养分需求。

供试肥料有肥包肥 46% (21-11-14)、稳定性脲铵氮肥 (31-0-0)、氯化钾 (0-0-60)。肥包肥是郑州大学独创的一种缓释肥料技术产品, 是采用以肥料包裹肥料的工艺思路, 通过改变不同肥料的空间结构及化学组成而形成的一种具有缓释功能的缓释复合肥料。肥包肥以微溶性肥料为包裹层, 采用反应性粘结剂, 形成致密包裹层, 肥料的缓释化与复合肥同步完成, 全部原料来源均为肥料, 不含石蜡、塑料、树脂等, 对环境友好。针对崇明水稻需求, 中国农业大学、安徽农业大学提出肥料农艺配方, 郑州大学通过工艺配方升级, 创制出以肥料包裹肥料的无机包裹型缓释复合肥料肥包肥 46% (21-11-14)。稳定性脲铵氮肥是安徽红四方绿色智能复合肥研究院重磅推出的一款功能性智能肥料, 这款产品含氮量为 31%, 同时添加了具有延缓养分释放、抑制尿素水解的脲酶抑制剂正丁基硫代磷酰三胺, 可以降低氨挥发损失。产品中含有尿素态氮 19%, 铵态氮 12%, 充分发挥铵态氮肥效快、稳定性尿素态氮释放慢的特点, 可将肥效延长到 20 d 以上, 满足水稻氮素需求规律。铵态氮来自于工业副产品氯化铵, 推动了肥料产



品的绿色发展,是一种高效、节能、环保的绿色肥料。

试验于2022年6—11月在上海市崇明区绿华镇进行,共设有5个处理,其中处理 N_0 是不施氮处理,为对照组,FFP为当地农户习惯施肥处理, N_{225} 处理是一次性侧深施用基肥,纯氮投入量为 225 kg/hm^2 , N_{270} 是在 N_{225} 基础上追施分蘖肥,纯氮投入量总计为 270 kg/hm^2 , N_{315} 是在 N_{270} 的基础上追施穗肥,纯氮投入量共计为 315 kg/hm^2 ,除FFP

处理外各处理磷肥、钾肥纯养分投入量相同。

各处理折纯养分投入量见表1。每个处理设置3次重复,共15个小区,每个小区长8 m、宽7 m,试验地于5月中旬开田,6月初进行耕整地、稻种催芽、拌种(用种量 150 kg/hm^2), N_{225} 、 N_{270} 、 N_{315} 处理中基肥均于6月18日采用斯塔尔水稻直播机搭载湖北永祥气吹式侧深施肥机进行机直播同步侧深施肥,其余基肥、蘖肥与穗肥都为人工撒施,于11月12日进行测产。

表1 总养分折纯投入量

处理	基肥施氮量 (N kg/hm^2)	分蘖肥施氮量 (N kg/hm^2)	穗肥施氮量 (N kg/hm^2)	总施氮量 (N kg/hm^2)	总施磷量 ($\text{P}_2\text{O}_5\text{ kg/hm}^2$)	总施钾量 ($\text{K}_2\text{O kg/hm}^2$)
N_0	0	0	0	0	45	90
FFP	135	138	36	309	42	45
N_{225}	225	0	0	225	45	90
N_{270}	225	45	0	270	45	90
N_{315}	225	45	45	315	45	90

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 各时期生长动态

总茎蘖数:自播种后35~56 d内每小区定点选取有代表性的植株12穴,每隔3 d调查1次茎蘖数。

生物量积累:在水稻分蘖期、拔节期和穗期取样,每个时期每个处理随机取样9株,将植物样品剪去根系后按叶片、茎鞘和穗分别洗净后置于烘箱中, 105°C 杀青30 min后,再调至 70°C 烘干至恒重,干燥冷却至室温后称取样品干物重。

1.3.2 产量及构成因子

于11月12日进行测产,每个小区随机框选3个 1 m^2 长势均匀的样方,根据样方中有效穗数、穗粒数和千粒重计算理论产量^[18]。

1.3.3 加工品质和营养品质

每个小区随机取2 kg稻谷去壳碾米,精米率、垩白度参照《米质测定方法》(NY/T 83—2017)^[19]测定,直链淀粉含量参照《稻米直链淀粉的测定分光光度法》(NY/T 2639—2014)^[20]测定,胶稠度参照《粮油检验大米胶稠度的测定》(GB/T 22294—2008)^[21]中的方法测定。

1.3.4 测定指标及计算方法

植物样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消解,分别采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度法^[22]测定氮、

磷和钾含量。

氮肥偏生产力=施氮区籽粒产量/施氮量

氮素农学效率=(施氮区籽粒产量-无氮区籽粒产量)/施氮量

氮肥利用率=(成熟期施氮区地上部氮素积累量-成熟期无氮区地上部氮素积累量)/施氮量 $\times 100\%$

经济产投比=收入/成本

成本包括肥料成本、施肥成本以及其他成本,本试验所涉及的其他成本主要包括机械整地、除草、灌排水、机械收割等管理试验田块的费用,各处理之间产生的其他成本相同。

1.4 统计分析

应用Excel 2022、SPSS 26.0进行数据统计与处理,应用Origin 2021绘制相关图表;应用SPSS 26.0对数据进行方差和相关性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻茎蘖动态的影响

如图1所示,各处理茎蘖动态差异明显。 N_0 处理各时期分蘖数一直处于最低水平,由于没有氮素供应, N_0 处理在生育期第53 d茎蘖数到达峰值后下降,其他处理在分蘖期茎蘖数呈现递增趋势。FFP处理由

于基肥时期氮素投入量比其他处理减少 40%，总茎蘖数在分蘖前期比其他新型肥料处理少，新型肥料多次施肥处理 N_{270} 和 N_{315} 相较于一次性施肥处理 N_{225} 在分蘖期均增加了氮肥投入量，但分蘖动态基本无差异。

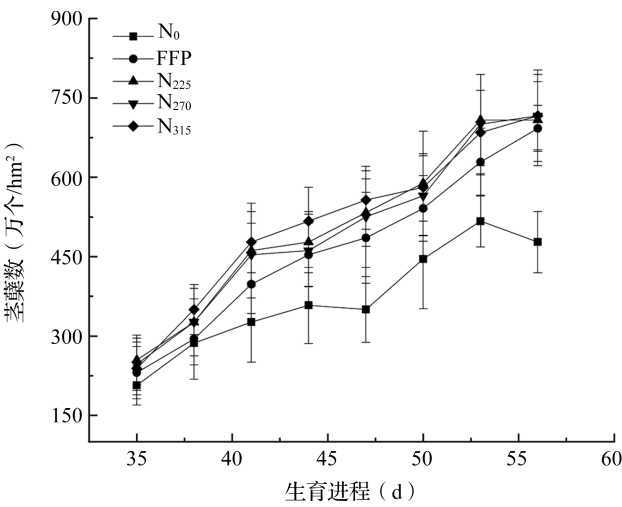


图 1 不同施肥处理下的水稻茎蘖动态

2.2 不同施肥处理对各时期生物量积累的影响

如图 2 所示，随水稻生育进程推进，植株地上部生物量在不断积累。 N_0 处理由于没有氮肥投入，拔节期和灌浆期的地上部生物量均显著低于其他处理。水稻分蘖期，由于 FFP 处理基肥的氮肥投入量较少，其地上部生物量显著低于其他施氮处理，但 3 个施氮侧深施肥处理之间没有显著差异。4 个侧深施肥处理之间在拔节期未开始表现出差异，在灌浆期各个处理表现明显差异， N_{315} 的生物量显著低于 N_{225} 和 N_{270} 处理 5.9% 和 5.6%。

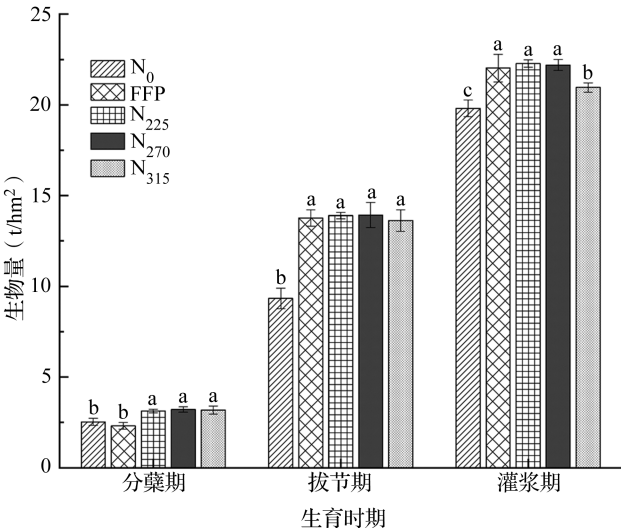


图 2 不同时期水稻植株地上部干物质量

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.3 不同施肥处理对产量及产量构成的影响

如表 2 所示，通过对水稻产量及有效穗数、穗粒数、结实率、千粒重等产量构成因子分析发现， N_0 处理的产量及有效穗数、穗粒数均显著低于其他施氮处理， N_{225} 处理的结实率相较于 N_0 和 N_{315} 处理显著提高了 2.5% 和 2.0%，而其他 3 个新型肥料施肥处理间有效穗数、穗粒数、结实率、千粒重和产量指标无显著差异，一次性施用新型肥料处理 N_{225} 由于合理调控氮素投入，每穗粒数在各个处理中最高，为 119.3 粒，相对于多次施肥处理有所提升，说明一次性施用新型肥包肥和脲铵氮肥可以满足全生育期的需求，在分蘖期和穗期追施氮肥没有带来更大的产量收益。

表 2 各处理产量及构成因子

处理	有效穗 ($\times 10^4$ 个 / hm^2)	穗粒数 (粒 / 穗)	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm^2)
N_0	$270.0 \pm 18.0\text{b}$	$98.7 \pm 7.1\text{b}$	$85.4 \pm 0.2\text{b}$	$29.6 \pm 0.7\text{b}$	$6727.7 \pm 404.5\text{b}$
FFP	$309.0 \pm 14.0\text{a}$	$115.7 \pm 8.5\text{a}$	$89.3 \pm 1.6\text{a}$	$31.1 \pm 0.9\text{ab}$	$9909.4 \pm 970.1\text{a}$
N_{225}	$306.3 \pm 7.1\text{a}$	$119.3 \pm 2.9\text{a}$	$87.5 \pm 1.6\text{ab}$	$31.6 \pm 0.8\text{ab}$	$10115.1 \pm 656.3\text{a}$
N_{270}	$313.0 \pm 10.4\text{a}$	$117.3 \pm 3.1\text{a}$	$88.0 \pm 2.2\text{ab}$	$31.6 \pm 0.5\text{ab}$	$10226.9 \pm 468.3\text{a}$
N_{315}	$302.7 \pm 19.7\text{a}$	$118.3 \pm 10.3\text{a}$	$85.8 \pm 0.4\text{b}$	$31.8 \pm 1.9\text{a}$	$9743.9 \pm 975.2\text{a}$

注：表中数字为平均值 $\pm$ 标准差，不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.4 纯氮投入量与水稻产量的相关性分析

采用线性加平台模型，对不同供氮水平下水稻的籽粒产量进行拟合。由图 3 可知，产量与施氮量

模拟的可信度达到了极显著水平 ($P<0.001$)。一般认为，首次达到平台值即为试验的最佳施氮量，本试验中最佳氮用量为 $229.07 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

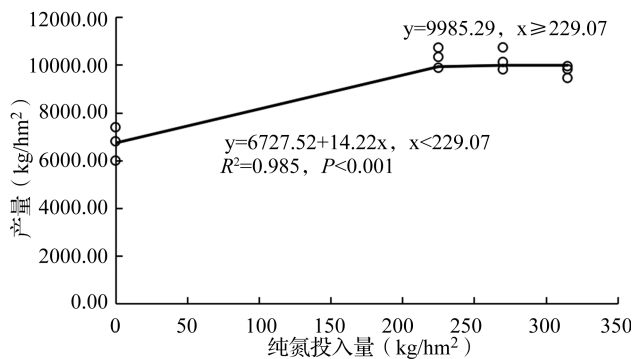


图3 不同供氮水平下水稻产量线性加平台分析

2.5 不同施肥处理对稻米品质的影响

不同施肥处理对稻米品质的影响如表3所示。

表3 不同处理对稻米品质的影响

处理	糙米率（%）	精米率（%）	垩白度（%）	垩白粒率（%）	透明度（%）	直链淀粉（%）	胶稠度（mm）
N ₀	78.3 ± 1.0b	57.1 ± 0.4a	4.1 ± 0.4ab	11.8 ± 1.1a	95.9 ± 0.4ab	9.4 ± 0.8ab	78.3 ± 2.3a
FFP	79.8 ± 0.5a	58.2 ± 1.3a	4.1 ± 0.2ab	11.9 ± 0.5a	95.8 ± 0.4ab	9.9 ± 0.3ab	79.3 ± 3.5a
N ₂₂₅	80.1 ± 1.0a	59.7 ± 2.2a	3.8 ± 0.3b	11.5 ± 0.3a	95.6 ± 0.2b	9.2 ± 0.5b	80.3 ± 3.2a
N ₂₇₀	78.4 ± 0.3ab	58.7 ± 1.8a	3.9 ± 0.2ab	11.7 ± 0.8a	96.1 ± 0.2ab	10.3 ± 0.5ab	80.3 ± 3.8a
N ₃₁₅	79.4 ± 1.0ab	57.8 ± 1.9a	4.3 ± 0.2a	13.0 ± 0.8a	96.2 ± 0.3a	10.4 ± 0.5a	80.3 ± 3.2a

稻米中的蛋白质、直链淀粉含量直接关系到其口感，一般认为蛋白质和直链淀粉含量低的稻米食味更好，胶稠度越大，则米饭越柔软，品质越好。

2.6 不同施肥处理间经济效益的对比

各处理的成本、收益如表4所示。根据当季肥料售价计算肥料成本，基肥均为侧深施肥，作业成本为750.00元/hm²，分蘖期和穗期每次追肥为人工撒施，按当地价格为225.00元/hm²。由于N₀处理仅为一次性侧深施肥，且不施氮肥，其成

N₂₂₅处理的糙米率显著高于N₀处理，提高了2.3%；N₂₂₅处理的垩白度为3.8%，相比N₀、N₂₇₀、N₃₁₅处理显著降低7.3%、2.6%、11.6%。透明度和直链淀粉含量是评价大米蒸煮品质的重要指标，N₂₂₅处理的稻米透明度和直链淀粉含量只与N₃₁₅处理有显著差异，与其他两个处理无显著差异。N₂₂₅处理的稻米透明度显著低于N₃₁₅处理0.6%。通常来说直链淀粉含量越低，大米的食味值越高，N₂₂₅处理直链淀粉含量最低，为9.2%，相比N₃₁₅处理显著降低11.5%。综上所述，N₂₂₅处理在糙米率、垩白度、透明度和直链淀粉这些品质指标上均有明显优势。

本最低，为8400.00元/hm²。其他处理成本随肥料施用量和后期追肥次数增加而增加。N₂₂₅处理相对FFP、N₂₇₀和N₃₁₅处理成本减少1.6%、8.7%和14.0%，稻米收益按照当年稻米收购价3元/kg的标准进行计算，N₂₂₅处理经济产投比为1.94，分别比N₀、FFP、N₂₇₀和N₃₁₅处理增加了38.6%、5.4%、12.8%和34.7%。一次性施用新型肥料处理N₂₂₅在节时省工省肥料的同时可以带来更好的经济效益。

表4 不同处理下的经济效益

处理	肥料成本 (元/hm ²)	施肥成本 (元/hm ²)	总成本 (元/hm ²)	稻米收益 (元/hm ²)	纯收益 (元/hm ²)	经济产 投比
N ₀	1350.00	750.00	8400.00	20183.08	11783.08	1.40
FFP	2970.00	1200.00	10470.00	29728.14	19258.14	1.84
N ₂₂₅	3529.50	750.00	10305.94	30345.37	20039.43	1.94
N ₂₇₀	4008.00	975.00	11283.00	30678.42	19395.42	1.72
N ₃₁₅	4486.50	1200.00	11986.50	29231.66	17245.16	1.44

注：稻米收益 = 产量 × 当年稻米收购价，纯收益 = 稻米收益 - 肥料成本 - 施肥成本 - 其他成本，其他成本包括稻种、整地、除草剂、收割等费用，为6300元/hm²。

2.7 不同施肥处理对肥料吸收利用的影响

2.7.1 不同施肥处理对氮肥偏生产力的影响

不同施肥处理对氮肥偏生产力影响如图 4 所示,随着施氮量的增加,处理间氮肥偏生产力逐渐下降。由于 N_{225} 处理的施氮量相对 FFP、 N_{270} 和 N_{315} 处理分别减少了 27.2%、16.7% 和 28.6%,但产量和其他 3 个处理无显著差异,氮肥偏生产力为各处理中最高,相对 FFP、 N_{270} 和 N_{315} 处理显著增加了 40.18%、18.7% 和 45.3%。

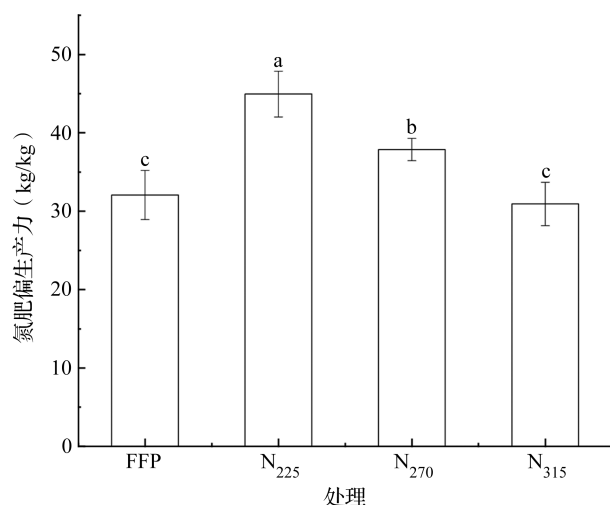


图 4 不同处理的氮肥偏生产力

2.7.2 不同施肥处理对氮素农学效率的影响

不同施肥处理对氮素农学效率影响如图 5 所示, N_{225} 处理的氮素农学效率最高, 为 15.1 kg/kg。随着施氮量的增加, 氮素农学效率逐渐下降, N_{315} 处理的氮素农学效率显著低于 N_{225} 处理, 相比 N_{225} 处理降低了 57.3%。

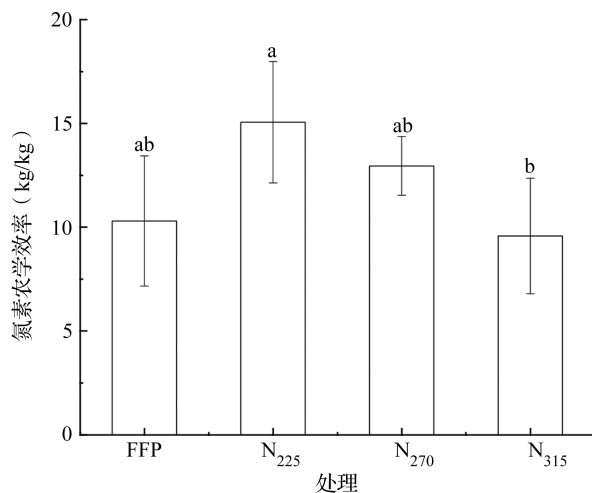


图 5 不同处理的氮素农学效率

2.7.3 不同施肥处理对氮肥利用率的影响

不同施肥处理对氮肥利用率影响如图 6 所示,随着施氮量的增加,不同处理氮肥利用率逐渐下降, N_{225} 处理的氮肥利用率显著高于其他处理,为 47.5%,相较于 FFP、 N_{270} 和 N_{315} 处理分别显著提高了 51.0%、23.7% 和 37.3%。

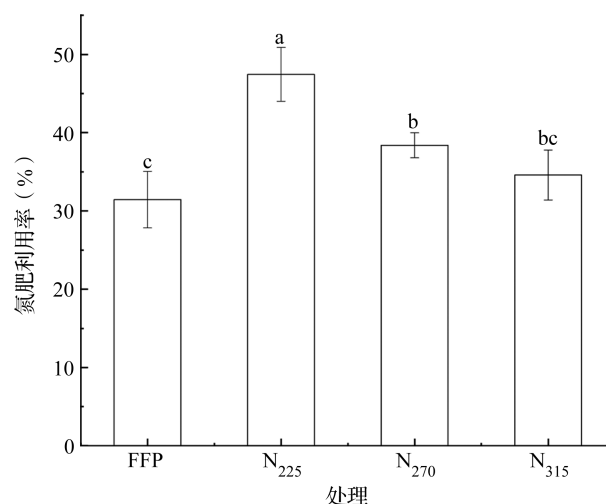
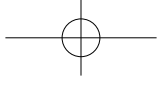


图 6 不同处理的氮肥利用率

3 讨论

3.1 新型肥料一次性侧深施用对水稻生长动态的影响

相较常规施肥处理,缓控释肥通过缓慢释放的养分增加水稻深层土壤中的根系数量,扩大根系养分摄取范围^[23],促进合理群体结构的形成。本试验中肥包肥和稳定性脲铵氮肥一次施用能够满足一季直播粳稻中高产水平的生长发育,在于肥包肥中含有尿素等速效氮肥,满足了发芽期间的需求,而稳定性脲铵氮肥养分释放期为 20 ~ 30 d,满足分蘖期的需要,肥包肥的肥芯中尿素的释放高峰约在 70 d,正好处于拔节和破口抽穗的关键时期。本试验中新型肥料多次施肥处理 N_{270} 和 N_{315} 相较于一次性施肥处理 N_{225} 在分蘖期和穗期增加了氮肥投入量,但分蘖动态基本无差异。一次性侧深施用新型肥料 N_{225} 处理相对农户习惯施肥 FFP 处理氮投入量减少了 27.2%,但在水稻灌浆期 N_{225} 处理的地上部生物量相对 FFP 处理仍有所提高。前人研究得到有效穗数随施氮量的增加而不断增加,但到达一定水平时会减缓增加的数量,同时成穗率会下降。本试验中 N_{315} 处理在穗期进一步补充氮肥, N_{315} 处理



的地上部生物量显著低于 N_{225} 和 N_{270} 处理 5.9% 和 5.6%，水稻有效穗数和产量也均有下降，这与冯洋等^[24]、陈露等^[25]的研究结果一致。

3.2 新型肥料一次性侧深施用对水稻产量及其构成因素的影响

不同施氮量和氮肥运筹显著影响水稻有效穗数、穗实粒数、千粒重和理论产量。选择合适的肥料和施肥技术是提高水稻产量和氮肥利用效率的前提^[26]。新型氮肥具有比常规肥料更高效和更稳定的氮素供应能力，可通过提高产量构成因素来达到水稻增产的效果^[27-28]。过多施用穗肥易导致成穗率下降，最终均不利于水稻高产优质^[29]。研究发现，在穗期和粒期追施氮肥并没有带来显著的增产作用，反而会降低品质并增加成本。本试验中一次性施用新型肥料处理 N_{225} 由于合理调控氮素投入，每穗粒数在各个处理中最高，为 119.3 粒，相对与多次施肥处理有所提升，达到的最大产量水平 (10226.9 kg/hm^2)，这与当地研究的高产水平相差 274 kg/hm^2 ，与当地农户产量水平相比提高 3.2%，但本研究确定的纯氮养分用量 225 kg/hm^2 显著低于高产研究的用量，也显著低于当地 309 kg/hm^2 的用量。本研究还发现，分蘖肥和穗肥分次施用对作物产量及其构成因子无显著影响，多次施氮肥甚至会造成减产，这与白洁瑞等^[30]的研究结果类似。本研究中，一次性侧深施肥技术搭配新型肥料并控制纯氮投入量为 225 kg/hm^2 即可以实现较高的产量。

3.3 新型肥料一次性侧深施用对水稻稻米品质的影响

居静等^[31]研究表明，与常规施氮相比，施用控释氮肥并没有明显提高糙米率和精米率。本试验中农户常规施肥处理 FFP 和新型肥料处理 N_{225} 、 N_{270} 和 N_{315} 相比，糙米率和精米率均无显著差异，与上述研究结果相似，说明施用含有包膜尿素的缓释掺混肥和无机包裹型复合肥对稻米加工品质无明显影响。李宏亮^[32]研究发现，与常规分次施肥相比，一次性施用缓控释肥能够降低垩白度和垩白率，显著改善稻米外观品质。本试验中， N_{270} 和 N_{315} 处理在分蘖期和穗期追施氮肥，并没有对于稻米的垩白度带来显著的提升作用，与上述研究结果相似。随着施肥次数增加，稻米直链淀粉含量增加， N_{315} 处理的直链淀粉含量相对 N_{225} 处理显著提高了 13%，严重影响稻米品质。由于稻米的品质主要受遗传和环境因素影响，在氮肥的施用中，应结

合水稻品种，综合考虑土壤、水分、温度等因素，采取合理的氮肥用量及施氮措施，才能达到水稻的高产优质。

3.4 新型肥料一次性侧深施用对水稻氮肥吸收利用及经济效益的影响

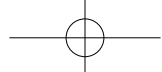
Shen 等^[33]研究发现，局部施肥有利于刺激根系偏向性生长，缓释氮施用能提高氮素吸收和氮肥利用率。在农业生产中合理使用新型肥料是提高肥料效率的重要手段^[34-35]，虽然本研究没有测定养分损失，但结合侧深施肥和缓释肥料，既减少养分损失，又能进一步调控水稻根系生长，提高肥料利用率， N_{225} 处理氮肥利用率达到了 47.5%，相较于农户常规施肥处理提升了 51.0%， 225 kg/hm^2 的氮素投入正好与每公顷 9750 kg 产量需求一致。我国每年因肥料利用率低都会造成高达几百亿元的经济损失，这不仅是巨大的资源浪费，而且增加了农业生产成本^[36]。本研究实现了一次施肥， N_{225} 处理相对当地农户常规施氮用量处理 FFP 减少氮肥投 27.2% 的氮肥投入量，产量提高了 2.1%，减少 2 ~ 3 次追肥，减少 2% 的肥料成本，减少人工施肥成本 60.0%， N_{225} 处理经济产投比为 1.94，比 FFP 处理增加了 5.5%。因此，结合产量效益、经济效益和肥料吸收利用等相关指标进行综合评判，一次性侧深施肥技术搭配新型肥料施肥模式值得推广。

4 结论

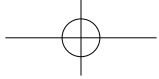
在直播稻种植区域内采用一次性侧深施肥技术搭配无机包裹缓控释肥料的施肥模式，可以满足在控制施氮量为 225 kg/hm^2 的条件下有效提高水稻产量、稻米品质、氮肥利用率和经济效益。这种轻减化施肥模式表现出显著的提质增产、养分高效和节本增收的优势，有助于水稻绿色可持续生产。

参考文献：

- [1] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (1): 1-6.
- [2] 高益, 黄卫峰, 冯加根, 等. 上海市崇明区水稻绿色生产关键技术 [J]. 上海农业科技, 2021 (6): 42-43.
- [3] 施俭, 沈寅寅, 包士忠, 等. 高效缓释肥在直播水稻上的使用技术研究 [J]. 上海农业学报, 2012, 28 (1): 142-145.
- [4] 白雪, 郑桂萍, 王宏宇, 等. 寒地水稻侧深施肥效果的研究 [J]. 黑龙江农业科学, 2014 (6): 40-43.
- [5] 金丹丹, 杨继芬, 张文忠, 等. 轻简施肥条件下依叶龄运筹



- 藁、穗氮肥对水稻生长和产量特性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 950-957.
- [6] Chang Y, Xiu H, Guang C, et al. Effects of postponing topdressing-N on the yield of different types of japonica rice and its relationship with soil fertility [J]. *Agronomy*, 2019, 9(12): 868.
- [7] 谭德水, 刘兆辉. 一次性施肥技术实现三大粮食作物轻简化绿色生产[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3823-3826.
- [8] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use [J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 212-224.
- [9] Geng J B, Ma Q, Zhang M, et al. Synchronized relationships between nitrogen release of controlled releasenitrogen fertilizers and nitrogen requirements of cotton [J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 9-16.
- [10] 聂云鑫, 徐卫红, 陈序根, 等. 脲酶硝化双抑制剂缓释肥对土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 35(11): 65-71.
- [11] Chu G, Chen T T, Chen S, et al. Polymer-coated ureaapplication could produce more grain yield in "super" rice [J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(1): 246-259.
- [12] 杨成林, 王丽妍, 赵红玉. 侧深施肥对寒地水稻产量及肥料利用率的影响[J]. *广东农业学*, 2017, 44(8): 61-65.
- [13] Galloway J N, Townsend A R, Er Isman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent-trends, questions, and potential solutions [J]. *Science*, 2008, 320: 889-892.
- [14] Feng J F, Li F B, Deng A X, et al. Integrated assessment of the impact of enhanced efficiency nitrogen fertilizer on N₂O emission and crop yield [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 231: 218-228.
- [15] Chen X, Zhang F, Mheld R V, et al. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved Nmin method [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(2): 91-98.
- [16] Xia L L, Lan S K, Chen D L, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917-1925.
- [17] Ke J, Xing X M, Li G H, et al. Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatilization, nitrogen-use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice [J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 147-156.
- [18] 刘艳, 曲航, 邢月华, 等. 新型氮肥对水稻生长、氮肥利用率和经济效益的影响[J]. *作物杂志*, 2023(5): 110-116.
- [19] 米质测定方法, NY/T 83—2017 [S].
- [20] 稻米直链淀粉的测定分光光度法, NY/T 2639—2014 [S].
- [21] 粮油检验大米胶稠度的测定, GB/T 22294—2008 [S].
- [22] 王克孟. 土壤肥料技术的研究与推广 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [23] 彭玉, 马均, 蒋明金, 等. 缓/控释肥对杂交水稻根系形态、生理特性和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1048-1057.
- [24] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 等. 高、中、低产田水稻适宜施氮量和氮肥利用率的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 7-16.
- [25] 陈露, 张伟杨, 王志琴, 等. 施氮量对江苏不同年代中粳稻品种产量与群体质量的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(8): 1412-1423.
- [26] 金树权, 陈若霞, 汪峰, 等. 不同氮肥运筹模式对稻田田面水氮浓度和水稻产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 242-248.
- [27] 陈雪丽, 王玉峰, 张磊, 等. 生物型水稻专用肥在黑土上的应用效果[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(4): 147-151.
- [28] 郑磊, 张民, 杨超越, 等. 控释肥及疏膜对土壤性质和水稻生长发育的影响[J]. *水土保持报*, 2009, 23(2): 193-197.
- [29] 陈守勇, 刘学良, 陈卫明. 穗肥施用时期对水稻产量和群体质量的影响[J]. *土壤肥料*, 2001(1): 28-30.
- [30] 白洁瑞, 邱淑芬, 李勇, 等. 氮肥分期施用对机插稻产量构成及氮肥利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(5): 45-49.
- [31] 居静, 吴海波, 陈永林, 等. 日本产包膜控释氮肥对稻米品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(2): 67-70.
- [32] 李宏亮. 缓控释肥类型及其运筹对迟熟中粳水稻产量与品质形成的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- [33] Shen J B, Li C J, Mi G H, et al. Maximizing root/rhizosphere efficiency to improve crop productivity and nutrient use-efficiency in intensive agriculture of China [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(5): 1181-1192.
- [34] Hutchinson C M. Influence of a controlled release nitrogen fertilizer program on potato tuber yield and quality [J]. *Acta Horticulturae*, 2005, 684: 99-102.
- [35] Kang B K, Han S H. Production of seed potato under the recycling capillary culture system using controlled release fertilizers [J]. *Japanese Society for Horticultural Science*, 2005, 74(4): 295-299.
- [36] 丁武汉, 谢海宽, 徐驰, 等. 一次性施肥技术对水稻-油菜轮作系统氮素淋失特征及经济效益的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1097-1109.



Feasibility study on one-time side-depth application of inorganic wrapped controlled-release fertilizer for seeding rice

HAO Zhu-xia^{1, 2, 3}, YU Lin⁴, FENG Zhi-song⁵, LI Yue-shuai⁶, HOU Cui-hong⁷, CHEN Guo-qing⁸, SHU Wei-zheng⁸, WANG Kun⁸, SONG Yi-hui⁹, ZHU Song-wei⁹, LIN Li-hua⁹, ZHANG Wei-feng^{1, 2, 3, 5*} (1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention and Control, Hefei Anhui 230036; 3. Anhui Engineering Research Center for Intelligent Manufacturing and Efficient Utilization of Green Phosphate Fertilizer, Hefei Anhui 230036; 4. College of Resources and Environment, Xinan University, Chongqing 400000; 5. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193; 6. Yantai Research Institute, China Agricultural University, Yantai Shandong 264670; 7. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001; 8. CNSG Anhui Hong Sifang Fertilizer Industry Co. Ltd., Hefei Anhui 231602; 9. Agricultural Comprehensive Technical Extension Service Center, Miaotown, Chongming District, Shanghai 202150)

Abstract: The optimum nitrogen application rate and fertilizer application method applicable to single-season direct-seeded rice Nangeng 46 were explored, with a view to providing technical solutions for the light simplified production of rice and the efficient utilization of nutrient resources in Chongming district, Shanghai. A field experiment was conducted from June to November, 2022. Five treatments were conducted: no nitrogen application, farmer's conventional fertilization, one-time fertilization, one follow-up application at tillering stage, and two follow-up applications at tillering+spike stage. The impacts of different nitrogen applications and transport methods on the growth dynamics, yield, nitrogen uptake and utilization, rice quality, and economic benefits of rice were analyze. A side-depth single fertilization technique was adopted for the main rice variety (Nangeng 46) in Chongming, Shanghai. The nitrogen fertilization mode of applying special slow-release fertilizers and keeping the pure nitrogen nutrient input at 225 kg/hm² was able to obtain the best yield and rice quality, reducing nitrogen by 27.2%, compared with the conventional fertilization treatment by local farmers, and at the same time reducing the number of 2–3 times of fertilizer application at the late stage of the rice crop and lowering the cost by 14.0%, with a yield/input ratio of 1.94. This fertilization mode had the highest nitrogen utilization rate of 47.5%, which increased by 51.0%, compared with the conventional treatment of local farmers. The one-time side-depth fertilization technique with new fertilizer application could achieve optimal rice yield, rice quality and economic benefits at a pure N input of 225 kg/hm².

Key words: rice; new fertilizer; side depth application; yield; nutrient use efficiency; economic benefit