



一次性基施控混肥对苏北黄河故道直播粳稻产量形成的影响

李卫红, 蒋伟勤, 董青君, 谢昶琰, 董玉兵, 陈 川, 章安康*

(江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安 223001)

摘 要:为解决苏北黄河故道地区沙性潮土漏水漏肥、氮肥投入量大等问题,优化该地区直播稻一次性施肥技术,探究氮素高效利用、一次性施肥实现稳产增产的机理特征,以苏秀 867 为试验材料,进行了为期两年的田间试验和一年的盆栽试验,分析了农民习惯施肥 ($N\ 300\ \text{kg}/\text{hm}^2$, CK)、控混肥梯度减量一次性基施 ($N\ 300$ 、270、240、210 kg/hm^2 , N1、N2、N3、N4) 5 个施肥处理对土壤-作物系统中水稻产量形成、氮素积累与利用、稻米品质特征、土壤中氮盈余和无机氮含量变化的影响。结果表明,田间条件下 N1、N2 处理较 CK 增产 3.75% ~ 10.14%,盆栽条件下则为 22.88% ~ 27.59%,增产原因是每穗粒数和群体颖花量的显著增加,其中以 N2 处理增产效果更优。田间和盆栽试验中的 N3、N4 处理均与 CK 产量相当或略有下降,但差异不显著。相较于 CK, N1 和 N2 处理在各主要生育阶段的干物质和氮素积累量均增加,增幅分别为 4.32% ~ 25.08% 和 5.65% ~ 32.26%,结合其在水稻整个生育阶段的供氮特征,表明这 2 个处理的氮素供应与水稻生长匹配度更高。氮肥利用效率方面,相较于 CK,田间条件下控混肥处理的氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥表观利用率分别提高了 6.86% ~ 48.17%、5.08% ~ 38.91% 和 8.53% ~ 50.81%,土壤氮盈余减少了 16.89% ~ 51.14%;盆栽条件下各指标趋势与田间条件下基本一致。此外,控混肥处理还较 CK 提高了稻米食用品质,表现为籽粒蛋白质含量减少、直链淀粉含量增加。综上所述,在黄河故道地区,以减少 10% 氮肥施用量的基础上一次性基施控混肥综合效果最佳,该结果可为该地区直播稻一次性施肥提供理论指导。

关键词: 控释肥; 粳稻; 产量; 氮肥利用; 土壤无机氮含量

水稻是我国 60% 以上人口的主食,其主要种植方式是移栽插秧^[1]。但随着我国经济的不断发展和城镇化的深入推进,农村优质劳动力发生了大量转移,这使得轻简化水稻栽培模式越来越受农户们的青睐。相较传统的移栽稻,直播种植更加简单,用工少且机械化方便^[2],同时田间杂草管理技术的不断改进也进一步促进了直播水稻面积的扩大^[3-4]。

氮肥是水稻正常生长发育和产量形成的保障。目前,我国农业生产系统中氮肥的施用量严重过剩(约每年 305 kg/hm^2 ,为世界平均施氮量的 4 倍),且利用率极低(30% ~ 35%)^[5-7]。目前,直播稻

生产上以多次施肥方式为主,但由于农村劳动力缺乏,对多次追肥的施肥量及施肥时间把控参差不齐,导致肥料施用效果不佳。控释氮肥是通过聚合物包膜等形式实现氮肥缓慢释放的一类新型肥料,具备养分释放与作物需求同步率高和肥料利用率高的优点,可实现一次性施肥满足水稻全生育期的需求,解决水稻追肥(施用量和人工难)难题^[8-9]。近年来,缓控释肥的研究主要集中于移栽水稻上,对直播稻的研究相对较少。

江苏北部的黄河故道带全长 496 km,涉及滩地面积 41.2 万 hm^2 ,其中中低产田 20 余万 hm^2 ,但却是江苏省重要的粮食产区。该地区由黄河南侵夺淮冲积而成,主要为碱性沙土,耕层浅薄,粘结力小,保水保肥能力差,氮、磷、钾和有机质等养分含量低,极易造成水稻生长过程中的养分缺乏,影响水稻产量和稻米品质^[10]。江苏省 2020 年耕地质量报告显示,苏北黄河故道地区(淮安和盐城地区)水稻生育期内化学氮肥施用量高达 330.75 ~ 394.95 kg/hm^2 ,明显高于其他地区的正常施用量,这就造

收稿日期: 2023-12-19; 录用日期: 2024-01-30

基金项目: 淮安市自然科学研究计划(HAB202169); 淮安市农业科学研究院科研基金发展项目(HNY202015); 淮安市农业科学研究院高层次人才科研启动发展基金(0162023012B); 江苏现代农业水稻产业技术体系建设项目(JATS [2023] 209-1)。

作者简介: 李卫红(1990-),助理研究员,博士,主要从事植物营养学和土壤肥料方面的研究。E-mail: whli2014203047@163.com。

通讯作者: 章安康, E-mail: 13905239366@139.com。



成了氮肥资源的大量浪费和农业生态环境的严重污染。因此,针对该地区水稻进行科学施肥的研究对苏北黄河故道地区农业的可持续发展有重要意义。目前,关于该地区直播稻适用的控混肥研究还很少,特别是不同释放周期控释肥掺混后最适氮肥施用量确定及其施用后对水稻全生育期土壤无机氮含量的影响还未见报道。

本研究针对黄河故道地区沙性潮土质地偏砂、漏水漏肥等结构性障碍因素,通过混合不同控释周期的包膜氮肥,设置不同氮肥梯度,结合黄河故道地区水稻季气候特点和土壤的供肥特征,研究控混肥施用对水稻生长发育、产量、稻米品质和氮肥利用的影响,以期控混肥在苏北黄河故道中低产田氮素管理制度中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2021—2022年在江苏省淮安市淮阴区三树镇新村进行(33° 65' N、118° 88' E)。该地区属于暖温带季风气候,年均温14.2℃,年降水量961.7 mm,全年日照总时数约2280 h。试验土壤质地为砂壤土。土壤基础肥力(0~20 cm土层):土壤有机质17.04 g/kg、pH 8.67、全氮1.86 g/kg、有效磷26.64 mg/kg、速效钾69.24 mg/kg。

供试水稻品种为苏秀867,由浙江嘉兴农业科学院选育,达国家《优质稻米》2级标准,属于中熟中梗优质粳稻品种。

氮肥分为大颗粒尿素(N含量46%)和树脂包膜尿素(N含量43%),其中树脂包膜尿素由山东金正大生态工程集团股份有限公司生产,释放期60、90和120 d。磷肥和钾肥分别为过磷酸钙(P_2O_5 12%)和氯化钾(K_2O 60%)。

1.2 试验设计

试验田块耕作模式为稻-麦轮作。试验采用单因素试验设计,共设5种氮肥运筹模式,分别为农户常规分次施肥处理(CK,普通尿素,基肥、分蘖肥、穗肥按4:3:3分配)、控混肥(N1)、控混肥减氮10%(N2)、控混肥减氮20%(N3)、控混肥减氮30%(N4);控混肥处理一次性基肥。CK和N1处理施氮量为300 kg/hm²,N2、N3、N4处理的施氮量分别为270、240、210 kg/hm²,控混肥处理的氮肥为普通尿素与树脂包膜尿素按照1:1比例掺混,所有处理的磷肥和钾肥施用量均为90

(P_2O_5)和180(K_2O) kg/hm²。以不施氮处理作空白处理。每组处理设置3个重复,共计18个小区,小区面积20 m²,小区之间打埂覆膜。

试验田旋耕后筑埂分小区,田埂宽50 cm左右,两个小区之间留排水沟用于灌排水,沟宽20 cm。撒施基肥后人工再次耙地,使肥料均匀混入耕层土壤。2021年6月12日和2022年6月8日人工撒播,播种量折合干种150 kg/hm²,调查基本苗并定苗至300×10⁴株/hm²。田间管理、杂草和病虫害防治参照当地农户惯例。

盆栽试验采用常规盆栽方法,用塑料桶(8 L容量,高度大于23 cm),每盆装土5 kg,每盆留水稻9株,每处理重复5次,共30盆,播种日期及处理方法同田间试验一致。试验所用土壤从田间试验区采集,混匀过筛后装入塑料桶中待用。播种前3~5 d灌水整平,沉实备用。

1.3 样品采集和测定方法

1.3.1 土壤铵态氮、硝态氮含量的测定

采用5点取样法,于施肥后的第2、5、8、13、20 d以及之后的每两周采集0~20 cm土层样品。采集的土壤样品直接测定或放置-20℃冰箱保存。采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮含量,采用双波长紫外分光光度计法测定土壤硝态氮含量。

1.3.2 植株干物质和氮素积累量的测定

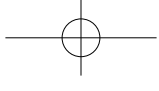
田间样品于拔节期、齐穗期和成熟期分别在每小区选取长势一致且无病害的水稻3个点,每点取样0.25 m²;盆栽样品于成熟期按盆收取。置于烘箱105℃杀青30 min,之后70℃烘干至恒重,称取干物质质量,粉碎、过筛,采用H₂SO₄-H₂O₂法提取、流动分析仪(德国,Seal, Auto Analyzer 3)测定样品全氮含量。

1.3.3 叶片SPAD值测定

于水稻齐穗期每小区选择长势一致的植株,采用便携式叶绿素分析仪(SPAD-502 Plus)测定剑叶叶片相对叶绿素含量,测定时分别在剑叶上、中、下处测定3次,取平均值作为此叶的SPAD值,每个小区测定10叶,取平均值作为此小区SPAD值。盆栽试验的叶片SPAD值测定方法与田间相同。

1.3.4 水稻产量及构成因素统计

水稻成熟期每小区取2 m²收获,脱粒晒干后称重,除杂质后用谷物水分仪测定籽粒含水量,以14.5%标准含水量折算得到实产。获得单位面积产量后进行理论产量换算。每小区选取具有代表性的



10 穗水稻测定每穗粒数、结实率和千粒重等。盆栽试验以每盆为单位收获水稻并测产，每处理选取具有代表性的 15 穗水稻进行穗粒数、结实率和千粒重等统计。

1.3.5 稻米品质测定

收获的稻谷自然晒干至水分含量约 14.5% 后，保存 3 个月以上使籽粒理化性状稳定，使用精米机去壳，之后采用 JSWL 大米食味计（北京东孚久恒仪器技术有限公司），通过近红外透过方式测定直链淀粉含量、蛋白质含量和食味值，每个样品重复 3 次，取平均值。

1.4 数据计算与统计分析

氮素积累总量 (kg/hm^2) = 单位面积地上（茎、叶、穗）氮素积累量之和

氮肥农学利用率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量

氮肥表观利用率 (%) = (施氮区植株总吸氮量 - 不施氮区总吸氮量) / 施氮量 $\times 100$

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮区产量 / 施氮量
土壤氮素盈余 = 施氮量 - 作物收获氮量

采用 Excel 16 进行数据处理；SPSS 20.0 进行单因素方差分析；Origin 2021 制图。

2 结果与分析

2.1 控混肥一次性基肥对粳稻产量及其构成因素的影响

由表 1 可知，在两年田间试验中，与农户常规分次施肥（CK）相比，N1 和 N2 处理的水稻籽粒产量均呈增加趋势，增幅分别为 3.75% ~ 6.92%、10.08% ~ 10.14%，N3 和 N4 处理的籽粒产量略微降低，但与 CK 无显著差异。盆栽试验的产量结果趋势与田间结果基本一致，与 CK 相比，N1 和 N2 处理的籽粒产量增幅分别为 27.59% 和 22.88%；但 N3 处理较 CK 产量略有增加，N4 处理较其略有减少，且均无显著差异（表 2）。

表 1 田间条件下不同施肥处理对水稻产量构成因子的影响

年份	处理	有效穗数 ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	每穗粒数	结实率 (%)	千粒重 (g)	群体颖花量 ($\times 10^6/\text{hm}^2$)	产量 (t/hm^2)
2021	CK	365.50 $\pm$ 8.50a	100.66 $\pm$ 5.22b	96.52 $\pm$ 0.32a	27.65 $\pm$ 0.09a	363.37 $\pm$ 8.42bc	9.32 $\pm$ 0.10bc
	N1	335.83 $\pm$ 4.55b	120.61 $\pm$ 4.63a	94.27 $\pm$ 0.77b	26.61 $\pm$ 0.08b	405.84 $\pm$ 5.51a	9.96 $\pm$ 0.15ab
	N2	330.50 $\pm$ 4.74bc	122.77 $\pm$ 5.13a	96.02 $\pm$ 0.58ab	26.26 $\pm$ 0.01b	408.81 $\pm$ 6.28a	10.26 $\pm$ 0.24a
	N3	322.83 $\pm$ 4.21bc	113.79 $\pm$ 4.21ab	96.24 $\pm$ 0.35ab	26.43 $\pm$ 0.32b	368.48 $\pm$ 5.34b	9.20 $\pm$ 0.16c
	N4	310.33 $\pm$ 5.35c	112.48 $\pm$ 4.89ab	95.31 $\pm$ 0.53ab	26.05 $\pm$ 0.13b	346.07 $\pm$ 5.90c	9.06 $\pm$ 0.03c
2022	CK	353.83 $\pm$ 5.74a	103.43 $\pm$ 1.96c	95.39 $\pm$ 0.53ab	26.03 $\pm$ 0.35a	365.98 $\pm$ 5.93bc	8.98 $\pm$ 0.07bc
	N1	333.00 $\pm$ 5.19b	118.33 $\pm$ 2.26a	94.17 $\pm$ 0.50b	26.94 $\pm$ 0.24a	394.05 $\pm$ 8.55a	9.32 $\pm$ 0.21b
	N2	321.67 $\pm$ 4.26bc	120.60 $\pm$ 2.23a	96.44 $\pm$ 0.29a	27.01 $\pm$ 0.23a	383.11 $\pm$ 4.84ab	9.89 $\pm$ 0.29a
	N3	317.67 $\pm$ 4.01c	110.20 $\pm$ 1.82b	95.85 $\pm$ 0.34a	26.77 $\pm$ 0.34a	354.48 $\pm$ 6.63c	8.82 $\pm$ 0.10bc
	N4	315.83 $\pm$ 3.81c	105.27 $\pm$ 2.95c	92.15 $\pm$ 0.40c	25.94 $\pm$ 0.27a	332.47 $\pm$ 4.01d	8.56 $\pm$ 0.14c

注：同一年份不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。表 6、8 同。

表 2 盆栽条件下不同施肥处理对水稻产量及其构成因子的影响

处理	有效穗数 (个/株)	每穗粒数	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (g/盆)
CK	2.07 $\pm$ 0.15a	97.52 $\pm$ 4.37b	95.38 $\pm$ 0.69a	25.35 $\pm$ 0.31a	25.01 $\pm$ 0.60ab
N1	1.64 $\pm$ 0.04b	114.13 $\pm$ 3.67a	95.15 $\pm$ 0.66a	25.42 $\pm$ 0.37a	31.91 $\pm$ 1.87a
N2	1.72 $\pm$ 0.12b	112.67 $\pm$ 2.92a	95.21 $\pm$ 0.60a	25.57 $\pm$ 0.32a	31.36 $\pm$ 3.13a
N3	1.46 $\pm$ 0.04b	114.47 $\pm$ 4.33a	93.63 $\pm$ 0.85a	25.27 $\pm$ 0.33a	27.50 $\pm$ 1.41ab
N4	1.51 $\pm$ 0.08b	107.33 $\pm$ 4.94a	94.19 $\pm$ 0.76a	25.52 $\pm$ 0.29a	24.66 $\pm$ 1.08b

注：不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。表 3、4、5、7 同。

水稻产量构成结果（表1）显示不同施肥处理的年际间表现大体一致：控混肥处理的有效穗数较CK显著降低，其中N4处理的有效穗数最低；两年控混肥处理的每穗粒数均高于CK，N1~N4处理的增幅分别为14.41%~19.82%、16.60%~21.97%、6.54%~13.05%、1.77%~11.75%；2021年N1处理的结实率较其他处理降低，但仅与CK差异显著，2022年表现为CK、N2、N3>N1>N4；2021年控混肥处理的千粒重均显著低于CK，2022年各处理之间无显著差异；群体颖花量的大体趋势为N1、N2>CK、N3>N4。盆栽试验结果（表2）显示，与CK相比，控混肥的有效穗数显著降低，但每穗粒数显著提高，其中每穗粒数分别提高了17.04%、15.53%、17.38%、10.06%，结实率和千粒重无明显差异。总体来看，田间条件下N1、N2处理高产的主要因素为每穗粒数和群体颖花量的增加。

2.2 控混肥一次性基施对粳稻干物质积累的影响

表3的结果表明施用控混肥能够显著影响粳稻不同生育阶段的干物质积累及其比例。播种至拔节阶段，与CK相比，N1、N2处理的干物质积累增加，增幅分别为12.06%和6.52%，N3、N4处理较CK积累减少，其中N1、N4处理与之差异显著；控混肥处理条件下，该阶段干物质积累量随施氮量的减少呈下降趋势，N1、N2处理显著高于N3、N4处理，但N2处理的积累比例相较其他处理显著降低。拔节至齐穗阶段，N1、N2处理的干物质积累量高于CK，其中N2处理与之差异显著，增幅达5.88%，N3、N4处理略低于CK处理，差异均不显著，而干物质积累比例以N4处理最高，CK和N3处理次之。齐穗至成熟阶段，N1、N2处理干物质积累量最多，相较CK增加了16.58%和25.08%，差异显著；N3、N4处理积累量较CK下降，其中N4处理降幅显著，而积累比例无显著差。控混肥条件下，拔节至齐穗、齐穗至成熟阶段，N1、N2处理的干物质积累量均显著高于N3、N4处理。

表3 2022年不同处理粳稻地上部干物质积累量及全生育期占比差异

处理	播种至拔节		拔节至齐穗		齐穗至成熟	
	积累量 (t/hm ²)	占比 (%)	积累量 (t/hm ²)	占比 (%)	积累量 (t/hm ²)	占比 (%)
CK	4.14 ± 0.08bc	22.64 ± 0.44ab	6.83 ± 0.04bc	37.34 ± 0.22b	7.32 ± 0.05b	40.02 ± 0.25abc
N1	4.64 ± 0.12a	22.86 ± 0.57a	7.12 ± 0.16ab	35.10 ± 0.78c	8.53 ± 0.14a	42.03 ± 0.50ab
N2	4.41 ± 0.02ab	21.21 ± 0.08b	7.23 ± 0.11a	34.77 ± 0.53c	9.15 ± 0.37a	44.02 ± 1.26a
N3	4.05 ± 0.13cd	23.24 ± 0.75a	6.70 ± 0.09c	38.45 ± 0.52b	6.67 ± 0.21bc	38.30 ± 0.85c
N4	3.84 ± 0.04d	23.32 ± 0.26a	6.60 ± 0.05c	40.06 ± 0.28a	6.03 ± 0.37c	36.62 ± 1.61c

2.3 控混肥一次性基施对粳稻氮素积累的影响

表4的结果表明，各施肥处理的氮素总积累量随粳稻的生长发育逐渐增加。播种至拔节阶段，与CK相比，N1和N2处理的氮素积累量增加，但仅N1处理差异显著，增幅为14.99%，N3处理积累比例处于最低水平，且与CK差异显著；控混肥条件下，各处理的氮素积累量随施氮量的减少而减少，表现为N1>N2>N3>N4。拔节至齐穗阶段，以N1、N2处理的

氮素积累量最高，N3处理次之，且均与CK差异显著，整体表现为N1、N2>N3>CK、N4，而积累比例则以N3处理最高，CK最低，且差异显著。齐穗至成熟阶段，氮素积累量表现为N1、N2>CK>N3、N4，其中N1、N2处理的氮素积累量较CK处理分别增加了12.65%和11.23%。盆栽试验的氮素积累趋势（表5）与田间结果基本一致：籽粒氮素积累量和地上部氮积累总量大体表现为N1、N2>CK、N3>N4。

表4 2022年不同处理粳稻地上部氮素积累量及全生育期占比差异

处理	播种至拔节		拔节至齐穗		齐穗至成熟	
	积累量 (kg/hm ²)	占比 (%)	积累量 (kg/hm ²)	占比 (%)	积累量 (kg/hm ²)	占比 (%)
CK	66.20 ± 1.67b	39.44 ± 0.99a	52.34 ± 0.91c	31.20 ± 1.70b	49.30 ± 0.33ab	29.37 ± 1.03a
N1	76.12 ± 0.76a	37.89 ± 0.38ab	69.33 ± 1.77a	34.47 ± 0.93ab	55.54 ± 2.39a	27.64 ± 1.64a
N2	69.94 ± 1.00b	36.55 ± 0.52ab	66.59 ± 1.86a	34.80 ± 0.48ab	54.83 ± 3.49a	28.65 ± 0.47a
N3	57.90 ± 0.95c	35.88 ± 0.59b	59.48 ± 0.72b	36.86 ± 0.47a	44.00 ± 2.16b	27.26 ± 1.46a
N4	52.40 ± 2.10d	36.03 ± 1.44ab	50.62 ± 1.49c	34.80 ± 1.02ab	42.43 ± 1.41b	29.17 ± 1.56a

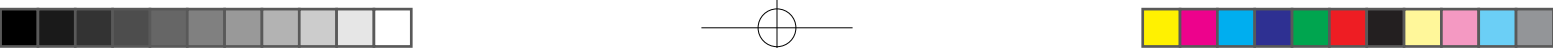


表 5 盆栽条件下不同施肥处理对成熟期
梗稻氮素积累量的影响 (mg/盆)

处理	籽粒氮素	秸秆氮素	地上部氮素
CK	197.47 ± 4.50ab	120.28 ± 2.63ab	317.75 ± 6.56bc
N1	237.51 ± 13.66ab	138.82 ± 2.92a	376.33 ± 14.77ab
N2	253.63 ± 19.29a	139.52 ± 5.82a	393.15 ± 20.25a
N3	206.90 ± 11.03ab	132.99 ± 2.35ab	339.89 ± 12.44abc
N4	187.90 ± 7.84b	115.04 ± 5.08b	304.92 ± 12.96c

2.4 控混肥一次性基肥对氮肥利用率的影响

氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥表观利用率是评价农田氮肥利用效率和增产效果的三大主要指标。由表 6 的结果可知,田间条件下 CK 的氮肥农学利用率为 12.78、16.26 kg/kg,控混肥处理的氮肥农学效率为 14.93 ~ 23.77 kg/kg,均高于 CK,其中 N2 处理的氮肥农学效率最高,大体表现为 N2>N3、N4>N1>CK。氮肥偏生产力两年整体表现为 N4>N2、N3>CK、N1、N2、N3、N4 处理分别较 CK 增加了 22.31% ~ 30.24%、23.39% ~ 24.51%、32.12% ~ 38.91%。氮肥表

观利用率年际间表现略有差异但大体相同,整体来看控混肥处理的氮肥表观利用率均高于 CK,其中,N1、N2 和 N3 处理较 CK 差异两年均达显著水平,分别增加了 34.42% ~ 35.43%、39.09% ~ 50.81%、16.32% ~ 39.72%。盆栽结果与田间结果趋势基本一致,氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥表观利用率均表现为控混肥处理高于 CK。

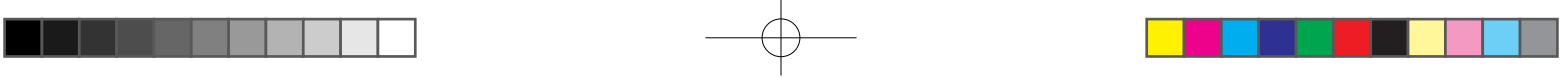
农田耕作系统中,氮盈余指氮肥施用量与收获物中的氮素平衡,是衡量氮素使用情况的关键指标之一。田间和盆栽试验的氮肥盈余结果(表 6 和表 7)表明相同施氮量条件下,控混肥处理(N1)的土壤氮盈余显著低于 CK;控混肥条件下,土壤氮盈余随施氮量的减少呈递减趋势。田间条件下,与 CK 相比,N1、N2、N3、N4 处理的氮盈余分别减少了 16.89% ~ 25.02%、36.53% ~ 40.48%、40.51% ~ 43.77%、49.33% ~ 51.14%(表 6);盆栽条件下,N1、N2、N3、N4 处理的氮盈余较 CK 分别减少了 8.59%、25.71%、32.56%、42.09%(表 7)。

表 6 田间条件下不同施肥处理对氮肥利用率的影响

年份	处理	氮肥农学利用率 (kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥表观利用率 (%)	土壤氮盈余 (kg/hm ²)
2021	CK	12.78 ± 0.32c	31.05 ± 0.32c	25.83 ± 0.43c	157.92 ± 1.28a
	N1	14.93 ± 0.51bc	33.20 ± 0.51c	34.72 ± 1.34ab	131.25 ± 4.03b
	N2	17.68 ± 1.08a	37.98 ± 1.08b	38.95 ± 3.01a	100.23 ± 6.62c
	N3	15.48 ± 0.66ab	38.32 ± 1.43b	36.09 ± 1.67ab	88.80 ± 4.45cd
	N4	17.04 ± 0.14ab	43.14 ± 0.14a	31.14 ± 1.88bc	80.03 ± 3.96d
2022	CK	16.26 ± 0.08c	29.81 ± 0.08c	31.10 ± 0.58c	132.13 ± 1.74a
	N1	18.04 ± 0.94bc	31.59 ± 0.94c	42.12 ± 0.55a	99.08 ± 1.65b
	N2	23.77 ± 0.94a	38.83 ± 0.94ab	43.26 ± 0.78a	78.64 ± 2.11c
	N3	20.17 ± 0.61b	37.12 ± 0.61b	36.17 ± 0.98b	78.61 ± 2.35c
	N4	20.02 ± 0.41b	39.39 ± 0.41a	33.75 ± 1.09b	64.55 ± 2.28d

表 7 盆栽条件下不同施肥处理对氮肥利用率的影响

处理	氮肥农学利用率 (kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥表观利用率 (%)	土壤氮盈余 (g/盆)
CK	12.63 ± 0.60b	25.01 ± 0.60b	18.81 ± 0.48b	0.68 ± 0.01a
N1	19.53 ± 1.87a	31.91 ± 1.87a	24.65 ± 1.48ab	0.62 ± 0.01b
N2	21.09 ± 3.48a	34.15 ± 1.86a	29.27 ± 2.25a	0.51 ± 0.02c
N3	18.90 ± 1.76a	34.37 ± 1.76a	26.27 ± 1.56a	0.46 ± 0.01cd
N4	17.54 ± 1.55a	35.22 ± 1.55a	25.03 ± 1.85ab	0.40 ± 0.01d



2.5 控混肥一次性基施对生殖生长期叶片 SPAD 的影响
SPAD 能够反映叶绿素的相对含量, 水稻扬花期和灌浆期叶片 SPAD 与水稻产量、籽粒品质和叶片氮素特征密切相关^[11-12]。图 1 结果显示

田间条件下, 齐穗期不同处理叶片的 SPAD 结果大体表现为 N1、N3>N2、N4>CK, 灌浆期表现为 N1>N2>CK>N3>N4; 盆栽条件下, 各施肥处理齐穗期叶片 SPAD 无差异, 灌浆期 N1>N2>N3>CK>N4。

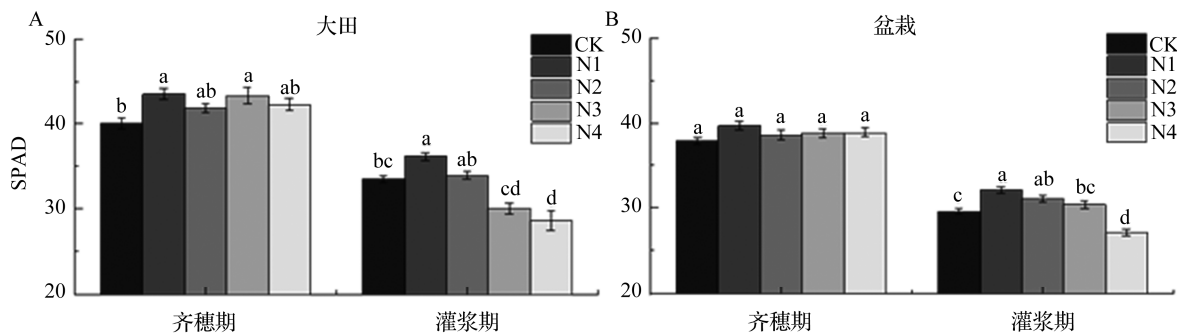


图 1 不同施肥处理对梗稻叶片 SPAD 的影响
注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.6 控混肥一次性基施对稻米食味品质的影响
直链淀粉含量和蛋白质含量是稻米食味品质的重要指标。由表 8 可知, 两年的田间结果基本一致, 控混肥处理的食味值和直链淀粉含量均高于 CK, 且表现出随施氮量的减少呈逐渐递增趋势; 与之相反, 控混肥处理的蛋白质含量均低于 CK, 表现出随施氮量的减少而增加的趋势; 但统计分析结果显示仅有 N4 处理与 CK 有显著差异, 其他处理与 CK 的差异均未达显著水平。

表 8 田间条件下不同施肥处理对梗稻稻米品质的影响				
年份	处理	食味值	蛋白质 (%)	直链淀粉 (%)
2021	CK	79.60 ± 0.24b	9.04 ± 0.13a	16.64 ± 0.22b
	N1	81.00 ± 0.58ab	8.67 ± 0.15ab	16.90 ± 0.15ab
	N2	81.50 ± 1.22ab	8.67 ± 0.12ab	17.20 ± 0.10ab
	N3	82.00 ± 0.58ab	8.63 ± 0.09ab	17.33 ± 0.28ab
	N4	82.33 ± 0.33a	8.20 ± 0.08b	17.40 ± 0.21a
2022	CK	78.00 ± 0.89b	9.87 ± 0.14a	16.26 ± 0.22b
	N1	79.33 ± 0.67ab	9.46 ± 0.15a	16.60 ± 0.04ab
	N2	80.67 ± 0.33ab	9.27 ± 0.27ab	16.60 ± 0.06ab
	N3	81.00 ± 0.58a	8.63 ± 0.19ab	16.77 ± 0.27ab
	N4	81.33 ± 1.20a	8.40 ± 0.23b	17.30 ± 0.35a

2.7 控混肥一次性基施对水稻全生育期土壤铵态氮与硝态氮含量的影响
田间结果显示 (图 2), 施肥后 0 ~ 20 cm 土层的铵态氮与硝态氮含量均迅速上升, 3 ~ 5 d 之内为高峰阶段, 最高可达 60 ~ 80 mg/kg, 随着田

间的淹水处理, 土壤铵态氮含量逐步降低到 1 ~ 20 mg/kg, 硝态氮含量逐步降低到 1 ~ 10 mg/kg。

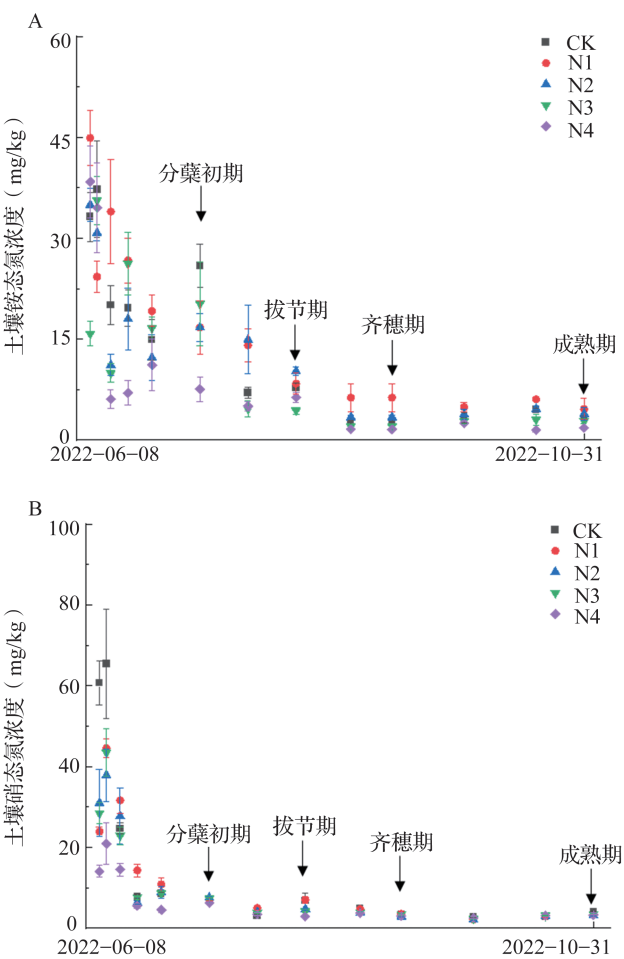


图 2 2022 年水稻季施肥后 0 ~ 20 cm 土壤铵态氮和硝态氮含量变化



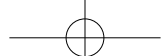
控混肥处理 N1、N2 和 N3 处理的 0 ~ 20 cm 土层铵态氮在拔节期和齐穗期要明显高于 CK。水稻生长中后期, 土壤中各施肥处理条件下的硝态氮含量均处于较低状态且无明显差异。本研究使用的控释尿素在水稻生长发育过程中基本处于平稳释放状态, 整个生育期耕层土壤基本都有不同浓度的无机氮积累, 基本符合水稻生育期的需求规律。

3 讨论

控释肥和速效氮肥掺混后一次性基施可基本实现肥料养分供应与作物需求相同步, 从而稳定或增加作物产量、提高养分利用效率^[13-15]。前人研究发现, 相较于单独施用控释尿素或者常规氮肥分次使用, 在机插条件下树脂包膜尿素与普通尿素的掺混比例为 4:6 或 5:5 能够使水稻增产 8.0% ~ 34.2%^[16-17]。本研究探讨苏北黄河故道中低产砂质土地上直播稻应用一次性控混肥基施技术的效果, 结果表明控释尿素与普通尿素的掺混比例为 1:1, 施氮量 300 kg/hm² (N1) 或 270 kg/hm² (N2, 减氮 10%) 时可实现较农民常规施肥方式 (CK) 显著增产, 其中田间条件下以 N2 处理产量最高, 而盆栽条件下则为 N1 处理, 这表明在该地区和该类型土壤中, 水稻一次性基施控混肥具有实现水稻减氮增产的潜力, 这与前人的研究结果一致, 即适当减量施用控释肥依旧能够保证水稻产量^[18-19]。通过分析增产的原因, 我们发现相较于 CK, N1 和 N2 处理虽每穗粒数显著增加、有效穗数减少, 但群体颖花量显著增加, 这和氮素供给特点密切相关。生长前期合理的氮素供应可保证水稻群体适宜的分蘖发生, 并提高光合物质生产能力, 协调增加干物质和氮素积累^[20]。本研究中, CK 于分蘖始期 (4 叶期) 追施分蘖肥, 此后短期内土壤氮素供应相对充足, 故分蘖发生早且较快发生, 但因土壤为砂性质地, 保水保肥能力较差, 随时间流逝土壤无机氮含量快速下降, 造成分蘖生长中后期养分供应不足 (图 2), 分蘖生长较慢, 且个体偏瘦小。而控混肥在直播稻上作为基肥一次性施用, 其分蘖发生初期距施肥已 20 余天, 故速效氮肥在分蘖发生期所起作用较弱。控释氮肥持续的养分供应贯穿于分蘖前中后期, 且供应相对平稳充足, 从土壤氮素含量较高且未见较大起伏可见得。因此我们认为正是因这种养分供应特点, N1 和 N2 处理的分蘖得以平稳发生, 且植株健壮, 故播种至拔节阶段干物质和氮素积累显著

增加。水稻拔节到抽穗阶段是高产群体构建的关键阶段, 此期处于幼穗分化发育期, 充足的氮素供应有利于巩固茎蘖成穗, 形成较多的穗粒数和颖花量^[21-22]。本研究结果表明 N1 和 N2 处理在该阶段氮素积累量显著高于 CK, 且此阶段土壤氮素含量变化与之相符, 说明这 2 个处理在此阶段氮素供应相对充足。有研究发现水稻于幼穗分化至抽穗期吸氮量越高, 其抽穗期和成熟期的碳水化合物积累越多, 产量也就越高^[23], 这也与本研究的結果一致。齐穗至成熟阶段, N1、N2 处理氮素供应相对适宜 (图 2), 同时灌浆期叶片叶绿素含量仍处于较高水平 (图 1), 表明该处理的氮素供应有利于保持群体花后的高光合生产能力, 促进干物质生产, 进而促进产量增加, 这与殷春渊等^[24]研究结果一致。

无机氮是水稻直接吸收利用的重要氮源, 土壤中主要以铵态氮和硝态氮的形式存在。水稻生长季 (长时间处于淹水或湿润状态) 土壤无机氮主要以铵态氮形式存在。普通尿素施入稻田后短时间内会形成大量的铵态氮, 植株吸收和进入土壤氮库的氮素量有限, 大量氮素通过径流、NH₃ 挥发等方式流失, 这是普通尿素在水稻上氮素利用率偏低的原因, 而大量研究表明一次性施用控释尿素, 其养分持续缓慢释放, 能够减少氮素流失提高氮素利用率^[25-26]。本研究中, 相同施氮量条件下, 与 CK 相比, 田间控混肥处理 (N1) 的氮肥农学利用率、氮肥偏生产力、氮肥表观利用率平均提高 6.86% ~ 16.81%、5.98% ~ 6.92%、34.42% ~ 35.43%, 盆栽条件平均提高了 54.64%、27.59%、31.15%。施用普通尿素时, 氮肥利用效率通常随施氮量的增加而减少^[27-28], 但施用包膜尿素时, 氮肥利用效率并不与施氮量呈严格的正向关^[29]。本研究得到的结果与此类似: 氮肥利用效率大体随施氮量的增加呈减少趋势, 但最高氮肥利用率和最高产量均发生在 N2 处理 (即施氮量 270 kg/hm², 表 6 和表 7)。土壤-作物系统中, 相同施氮量条件下, 植株吸收的氮素越多, 氮肥的损失或盈余就越少^[30]。本研究中, 与 CK 相比, 控混肥处理显著降低了土壤氮盈余, 且随施氮量的减少土壤氮盈余呈递减趋势。因此, 本研究结果表明, 施用控混肥不仅在减少肥料施用的基础上提高作物产量, 还能提高肥料利用率, 减少土壤氮盈余, 其中以减少传统施氮量的 10% 为最优。同时, 与水稻



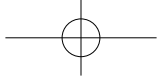
季传统的 3 ~ 5 次施肥相比, 一次性施用控混肥可显著节省人工、时间和能源, 降低了农业生态环境污染风险。

4 结论

研究结果表明, 在黄河故道沙土地地区, 减少 10% 的氮肥施用量的基础上一次性基施控混肥为最优氮肥运筹方案, 它的养分释放与实际粳稻生长的养分需求同步性更高, 能够促进水稻干物质和氮素积累量, 增加水稻每穗粒数和群体颖花量, 从而提高水稻产量, 同时还能提高氮肥利用效率, 减少土壤氮盈余, 节约人工、时间和能源成本。但从直播水稻的整个生育期来看, 控混肥处理前期速效氮肥投入过多, 可适当优化肥料配比, 使肥料的释放高峰进一步与粳稻需求相同步, 从而改变黄河故道地区水稻肥料一季多施模式, 为黄河故道地区粳稻减氮保产的轻简化一次施肥技术提供理论依据。

参考文献:

- [1] Liu H, Hussain S, Zheng M, et al. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35: 285-294.
- [2] 罗锡文, 王在满, 曾山, 等. 水稻机械化直播技术研究进展 [J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40 (5): 1-13.
- [3] Tian J, Li S, Xing Z, et al. Differences in rice yield and biomass accumulation dynamics for different direct seeding methods after wheat straw return [J]. *Food and Energy Security*, 2022, 11: e425.
- [4] Zhang C, Hu R. Adoption of direct seeding, yield and fertilizer use in rice production: empirical evidence from China [J]. *Agriculture*, 2022, 12: 1439.
- [5] 李志国, 张润花, 陈防, 等. 控失尿素对水旱轮作下水稻产量和氮素利用效率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (1): 23-27.
- [6] Cui Z, Zhang H, Chen X, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers [J]. *Nature*, 2018, 555: 363-366.
- [7] Zhang X, Davidson E, Mauzerall D, et al. Managing nitrogen for sustainable development [J]. *Nature*, 2015, 528: 51-59.
- [8] 张迪, 吕思琪, 徐文越, 等. 侧深施控释肥下寒地粳稻产量形成及氮素利用特性 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (2): 213-220.
- [9] 周乾顺, 朱建强, 邹宇傲, 等. 树脂包膜尿素配施普通尿素对直播稻田氮挥发、氮素径流和渗漏损失及产量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42 (9): 2016-2026.
- [10] 张义丰. 黄河故道的环境特征与整体开发 [J]. *地理研究*, 1998, 17 (3): 289-296.
- [11] 王志东, 陈宜波, 龚蓉, 等. 优质籼稻剑叶 SPAD 值与稻米品质相关性研究 [J]. *中国水稻科学*, 2021, 35 (1): 89-97.
- [12] Xiong D, Chen J, Yu T, et al. SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13389.
- [13] 高捷, 李思宇, 成大宇, 等. 缓控释肥对水稻产量与品质影响的研究进展 [J]. *作物杂志*, 2022 (3): 20-26.
- [14] 陶玥玥, 孙灵湘, 张建栋, 等. 适宜缓释肥用量优化油菜产量形成与氮素利用 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (7): 1-7.
- [15] Tang C, Han M, Yang X, et al. Gene expression, enzyme activity, nitrogen use efficiency, and yield of rice affected by controlled-release nitrogen [J]. *ACS Omega*, 2023, 8 (26): 23772-23781.
- [16] 蒋伟勤, 胡群, 俞航, 等. 优质食味粳稻控混肥一次性基施效应 [J]. *中国农业科学*, 2021, 54 (7): 1382-1396.
- [17] Zheng Y, Han X, Li Y, et al. Effects of mixed controlled release nitrogen fertilizer with rice straw biochar on rice yield and nitrogen balance in northeast China [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 9452.
- [18] 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.
- [19] 胡香玉, 钟旭华, 彭碧琳, 等. 减氮条件下高产水稻品种的产量形成和氮素利用特征 [J]. *核农学报*, 2019, 33 (12): 2460-2471.
- [20] 柯健. 氮肥种类和施肥方式对水稻产量及氮素去向的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [21] Ke J, Sun J, Chen T, et al. Effects of mixed fertilizers formed by the compounding of two targeted controlled-release nitrogen fertilizers on yield, nitrogen use efficiency, and ammonia volatilization in double-cropping rice [J]. *The Crop Journal*, 2023, 11: 628-637.
- [22] Zhang Z, Chu G, Liu L, et al. Mid-season nitrogen application strategies for rice varieties differing in panicle size [J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 9-18.
- [23] 戴林, 杨欢, 李廷轩, 等. 氮高效利用基因型水稻干物质生产和氮素积累特性 [J]. *草业学报*, 2014, 23 (6): 327-335.
- [24] 殷春渊, 孙建权, 王书玉, 等. 直播种植模式下水稻剑叶光合、强弱势籽粒灌浆特性及产量的氮素调控 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36 (9): 1-8.
- [25] 曹兵, 丁紫娟, 侯俊, 等. 控释掺混肥结合增密对水稻氮肥利用效率和氨挥发的影响 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38 (13): 56-63.
- [26] 魏翠兰, 曹秉帅, 韩卉, 等. 施肥模式对中国稻田氮素径流损失和产量影响的 Meta 分析 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (7): 190-196.
- [27] Zheng W, Sui C, Liu Z, et al. Long-term effects of controlled-release urea on crop yields and soil fertility under wheat-corn double cropping systems [J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108:



- 1703–1716.
- [28] Yuan M, Sun Y, Wu G, et al. The optimum economic nitrogen rate of blended controlled-release nitrogen fertilizer for rice in the Chanoyu watershed in the Yangtze River Delta, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1144461.
- [29] 侯红乾, 黄永兰, 冀建华, 等. 缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2016, 30 (4): 389–396.
- [30] 孙婷, 马宏卫, 王孟兰, 等. 华东地区小麦缓控释配方肥技术研究 [J]. *土壤*, 2019, 51 (6): 1065–1069.

Effects of one-time basal application of controlled release fertilizer mixed with normal urea on yield formation of japonica rice directly seeded along the typical ancient region of Yellow River in northern Jiangsu province

LI Wei-hong, JIANG Wei-qin, DONG Qing-jun, XIE Chang-yan, DONG Yu-bing, CHEN Chuan, ZHANG An-kang*
(Huaiyin Institute of Agricultural Sciences of Xuhuai Region in Jiangsu, Huai'an Jiangsu 223001)

Abstract: The aims of this study were to solve the problems of sandy fluvo-aquic soil leakage and large nitrogen fertilizer input, optimize the one-time fertilization technique and explore its mechanism characteristics to achieve stable yield or increased yield and efficient nitrogen use of direct seeding rice along the typical ancient region of Yellow River in northern Jiangsu province. In this study, the japonica rice cultivar “Suxiu 867” was used as the experimental material, and the field and pot experiments were carried out for two years and one year, respectively. Five fertilization treatments were set up in the experiment: farmers’ customary fertilization (CK, N 300 kg/hm²), controlled release blend fertilizer gradient reduction one-time base application of N1, N2, N3 and N4 (N 300, 270, 240, 210 kg/hm²), and their effects on rice yield formation, nitrogen accumulation and utilization, rice quality characteristics, soil nitrogen surplus and inorganic nitrogen content changes in soil-crop system were studied. The results showed that the yield increase of N1 and N2 treatments was 3.75%–10.14%, compared with CK, under field conditions, and 22.88%–27.59% under potted conditions. The reason for the yield increase was that the number of grains per panicle and total spikelet number increased significantly, and N2 treatment had the better effect. The yield of N3 and N4 treatments in both field and pot experiments was similar or slightly decreased with that of CK, but the difference was not significant. Compared with CK, the accumulation of dry matter and nitrogen in N1 (same nitrogen application amount) and N2 (10% nitrogen reduction) treatments increased by 4.32%–25.08% and 5.65%–32.26%, respectively. Combined with the nitrogen supply characteristics in the whole growth stage of rice, the nitrogen supply of these two treatments was better matched to rice growth. In terms of fertilizer use efficiency, compared with CK, the nitrogen agronomy efficiency, nitrogen partial factor productivity and apparent nitrogen utilization rate of controlled release mixed fertilizer treatment in field were increased by 6.86%–48.17%, 5.08%–38.91% and 8.53%–50.81%, respectively, and the soil nitrogen surplus was reduced by 16.89%–51.14%. The trend of each index under potted conditions was basically the same as that under field conditions. In addition, the controlled release blend fertilizer treatment also improved the edible quality of rice, compared with CK, which showed that the grain protein content decreased and amylose content increased. In conclusion, the comprehensive effect of reducing nitrogen fertilizer application by 10% and applying controlled-release blended fertilizer at a single base was the best in the sandy soil region along the ancient Yellow River region.

Key words: controlled release fertilizer; japonica rice; yield; nitrogen fertilizer use efficiency; soil inorganic nitrogen content