



氮肥缓速配施对机插杂交稻氮素利用特征的影响

吕腾飞^{1,2}, 谌洁¹, 马鹏¹, 代邹², 杨志远¹, 徐徽¹, 郑传刚², 马均¹✉

四川农业大学水稻研究所/作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 成都 611130; ²西昌学院农业科学技术学院, 四川西昌 615000

摘要:【目的】探索在西南稻区, 钵苗机插和氮肥缓速配施能否发挥杂交水稻的大穗优势获得高产, 以及钵苗机插杂交稻在氮肥缓速配施下的氮素吸收利用特征, 为我国杂交水稻育秧节肥丰产技术的应用提供理论和实践依据。【方法】本试验采用二因素裂区设计, 主区为钵苗机插和毯苗机插 2 种机插方式, 分别记为 M₁ 和 M₂; 副区为 4 种氮肥管理模式, 分别是 N₁ (100% 缓释肥一次基施), N₂ (70% 缓释肥+30% 尿素一次基施 (缓速基施)) 和 N₃ (70% 缓释肥做基肥+30% 尿素做穗肥 (缓基速追)), 其中, 施肥处理的总施氮量均为 150 kg·hm⁻², 另设一个不施氮肥的处理作为对照, 记为 N₀; 以 F 优 498 为试验材料, 以毯苗机插和缓释肥一次基施为参照, 研究钵苗机插和氮肥缓速配施下的杂交水稻氮素吸收利用特征。【结果】与毯苗机插相比, 钵苗机插杂交水稻拔节至抽穗阶段的氮素吸收速率显著加快了 0.49—1.33 kg·hm⁻²·d⁻¹, 抽穗至成熟阶段的茎叶氮素转运量、转运率以及氮素转运对穗部的贡献率均显著提高, 抽穗期和成熟期植株的氮素吸收量分别显著提高了 12.63% 和 5.20%; 干物质、稻谷生产效率和氮素收获指数分别提高了 8.19—11.39、0.66—5.72 和 5.41—6.42 个百分点; 氮肥农学利用率、生理利用率和偏生产力平均分别提高了 12.62%、11.94% 和 8.69%, 有效穗数和每穗粒数也显著提高, 2016 年和 2017 年的平均产量分别提高了 1 042.4 kg·hm⁻² 和 722.3 kg·hm⁻² (增产幅度分别达到 10.30% 和 7.2%)。在钵苗机插下, 与缓释肥一次性基施相比, 缓速基施降低了抽穗期和成熟期的氮素积累量, 加快了播种至拔节阶段的氮素吸收速率和积累量, 但拔节至抽穗阶段显著降低, 造成氮肥回收利用率和生理利用率明显降低, 此外, 它还降低了每穗粒数和单位面积颖花数, 导致 2 年的平均产量下降了 3.66%; 而缓基速追在抽穗期和成熟期氮素积累量分别提高了 2.34% 和 1.80%, 拔节至抽穗阶段氮素吸收速率和吸收量分别提高了 0.60 kg·hm⁻²·d⁻¹ 和 18.01 kg·hm⁻², 氮肥回收利用率提高了 2.84 个百分点, 农学利用率、生理利用率和偏生产力分别提高了 12.54%、7.91% 和 52.55%, 其每穗粒数和单位面积颖花数也得到了显著提高, 最终产量显著提高了 4.61%。【结论】钵苗机插杂交水稻在氮素利用效率方面比毯苗具有明显优势, 而且采用“缓基速追”的施肥方式, 能进一步提升钵苗机插杂交水稻氮素的吸收与转运能力, 进而提高了产量。

关键词: 杂交水稻; 钵苗机插; 缓速配施; 氮素利用

Effects of Combined Application of Slow Release Nitrogen Fertilizer and Urea on the Nitrogen Utilization Characteristics in Machine-Transplanted Hybrid Rice

LÜ TengFei^{1,2}, SHEN Jie¹, MA Peng¹, DAI Zou², YANG ZhiYuan¹, XU Hui¹, ZHENG ChuanGang², MA Jun¹✉

¹Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130; ²College of Agricultural Science and Technology, Xichang University, Xichang 615000, Sichuan

Abstract: 【Objective】The aim of this study was to investigate using the big panicle advantage of indica hybrid rice to obtain a high-yield under the potted machine-transplanted and combined application of slow release nitrogen (N) fertilizer and urea, and to

收稿日期: 2020-07-06; 接受日期: 2020-11-23

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0301701, 2017YFD0301706, 2018YFD0301202)

联系方式: 吕腾飞, E-mail: 1018914967@qq.com. 通信作者马均, E-mail: majunp2002@163.com

explore N utilization characteristics of the potted-seedling machine-transplanted hybrid indica rice in the Southwest rice region, so as to provide the theoretical and practical basis for the technology of saving-fertilizer and high-yield of machine-transplanted hybrid rice seedling in China. 【Method】 A 2-year split-plot experiment (2016-2017) was conducted in Meishan, Sichuan province, China. In the experiment, two machine-transplanted methods was set, including potted-seedling (M_1) and blanket-seedling (M_2), and four N treatments were set, including 150 kg·hm⁻² slow release N fertilizer (SRNF) as a base (N_1), 105 kg·hm⁻²SRNF + 45 kg·hm⁻² urea as a base (N_2 , SBUB), 105 kg·hm⁻²SRNF as a base + 45 kg·hm⁻² urea at the panicle initiation stage (N_3 , SBUP), and another treatment without N fertilizer as a control (N_0). F-you 498 was the experimental variety, and the blanket-seedling machine-transplanted method and 100% slow-release N fertilizer as base were the reference. The N utilization characteristics of hybrid indica rice under the potted-seedling machine-transplanted and slow and rapid N fertilizer combined application were studied.【Result】Compared with the blanket-seedling rice, the potted-seedling significantly accelerated the N absorption rate by 0.49-1.33 kg·hm⁻²·d⁻¹ from elongation stage to heading stage; The potted-seedling improved N transportation and N transportation efficiency of stems and leaves, and the contribution rate of N transportation from heading to maturity; The potted-seedling increased the N accumulation at heading and maturity by 12.63% and 5.20%, respectively; The potted-seedling increased N use efficiency for biomass production and grain yield, and N harvest index by 8.19-11.39, 0.66-5.72 and 5.41-6.42 percentage points, respectively; The potted-seedling improved N agronomic efficiency, N physiological efficiency, and partial factor productivity by 12.62%, 11.94% and 8.69%, respectively; The potted-seedling improved the effective panicles and spikelets per panicle, and improved the yield on 1 042.4 kg·hm⁻² and 722.3 kg·hm⁻², and increased by 10.3% and 7.2%, in 2016 and 2017, respectively. Under the potted-seedling, compared with 100% SRNF as base, SBUB decreased the N accumulation at heading stage and maturity stage, accelerated the N absorption rate and N accumulation from sowing stage to elongation stage, but decreased them from elongation to heading; N recovery efficiency, N physiological efficiency, the spikelets per panicle and spikelets per unit area under SBUB were significantly decreased, then the mean yield of 2 years decreased by 3.66%. Conversely, compared with 100% SRNF as base, SBUP increased the N accumulation at heading and maturity by 2.34% and 1.80%, respectively; SBUP improved the N absorption rate by 0.60 kg·hm⁻²·d⁻¹ and N accumulation by 18.01 kg·hm⁻² from elongation to heading; N recovery efficiency under SBUP were improved by 2.84 percentage points, and N agronomic efficiency, N physiological efficiency, and partial factor productivity by 12.54%, 7.91% and 52.55%, respectively; SBUP improved the spikelets per panicle and spikelets per unit area, then the yield improved by 4.61%. 【Conclusion】 Compared with the blanket-seedling, the potted-seedling had obvious advantages on N utilization efficiency, and SBUP could further enhance its N absorption and transfer capacity, then improved indica hybrid rice yield.

Key words: hybrid indica rice; potted-seedling machine-transplanted; slow and rapid nitrogen fertilizer combined application; nitrogen utilization

0 引言

【研究意义】钵苗机插是一种新兴的机插秧技术, 具有秧龄弹性大、秧苗素质高, 可以实现带土带蘖轻植伤精确栽插, 提高稻谷产量等诸多优势^[1-5], 因此探索钵苗机插杂交稻在西南稻区的高产氮素利用特征, 对钵苗机插的研究和推广具有重要意义, 同时也为我国杂交水稻育插秧节肥丰产技术的应用提供理论和实践依据。【前人研究进展】近年来, 随着农村劳动力大量向第二、三产业转移和老龄化现象的加剧, 我国水稻种植向机械化发展成为必然趋势。水稻机械化种植具有节本、省工、省力等优点, 这对于保障我国粮食安全具有重要意义。毯苗机插省工高效, 是目前生产上大面积应用的机插方式, 但存在秧龄弹性小、秧苗素质差、移栽植伤重、返青期长, 全生育期缩短等缺点^[6-8], 严重制约了水稻生产潜力的发挥和对温光资

源的利用。钵苗机插是一种采用机械将钵育壮秧按一定的株行距轻植伤移植到大田的新型机插秧技术, 相比毯苗机插, 具有秧龄弹性大、秧苗素质高, 栽后缓苗期短, 分蘖早生快发等优势^[1-5], 在日本和我国东北、江苏、安徽等水稻主产区的多年生产实践已初步证明了其增产优势^[9-11]。氮肥的施用是实现现代农业增产最有效的措施, 合理的氮肥运筹是水稻生长发育、群体构建和产量形成的有力保障。目前, 我国平均稻田单季水稻氮肥用量达到 180 kg·hm⁻², 高出世界平均水平 75%, 但氮肥利用率仅为 30%—35%, 部分地区甚至不足 20%^[12], 远低于发达国家的 50%—60%^[13]。大量的氮素损失不仅造成了资源的浪费, 还导致了严重的环境污染并影响了人类的身体健康^[14]。优化氮肥管理和开发高效氮肥是当前提高氮素利用效率, 确保水稻高产稳产最主要的两条途径。缓释肥作为一种新型高效氮肥, 具有养分有效供应期长、环保和省工省肥

等优点^[15], DENG 等^[16]研究表明施用缓释肥能减少氮素投入, 促进水稻需氮量、供氮量之间的平衡, 提高氮素利用率。但陈贤友等^[17]研究发现缓释肥存在肥效缓慢的问题, 易造成作物前期缺氮, 产量效果不佳^[18]。

【本研究切入点】西南稻区是我国重要的稻米产区之一, 而且是典型的多熟制区域, 水稻与多种作物的茬口很难衔接, 导致水稻移栽秧龄偏大, 而毯苗育秧存在秧龄弹性小、秧苗素质差的缺点, 加上西南稻区丘陵山区多、地块小的地形地势特点, 使得该区域水稻种植机械化的发展十分缓慢, 此外, 由于四川盆地湿度大、日照少、温差小的独特生态特点, 该区域水稻种植面积 95% 以上为杂交籼稻品种。那么在西南稻区, 钵苗机插是否能够发挥其秧龄弹性大、秧苗素质高的优势, 以及杂交籼稻在钵苗机插下是否依然能够发挥大穗优势, 还鲜有报道。张敬昇等^[19]和孙克刚等^[20]研究表明在缓释肥中掺混 20%—40% 尿素一次基施, 有利于进一步提高人工移栽稻的产量和氮素利用效率, 那么在钵苗机插下, 缓释氮肥的氮素释放是否符合杂交籼稻的生长需求? 氮肥缓、速配施是否更为有效? 这都是当前亟待解决的关键问题。【拟解决的关

键问题】本研究以在西南稻区取得高产且大面积推广的大穗型杂交稻品种 F 优 498 为试验材料, 以不同机插方式和氮肥缓速配施方式为研究手段, 并结合 ¹⁵N 示踪技术, 旨在探索在西南稻区, 钵苗机插和氮肥缓速配施能否发挥杂交籼稻的大穗优势获得高产, 以及钵苗机插杂交稻在氮肥缓速配施下的氮素吸收利用特征, 为西南稻区水稻机械化种植和氮肥高效利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验地点

本试验供试品种为中籼迟熟杂交稻组合 F 优 498, 由四川农业大学水稻研究所选育。本研究于 2016 年和 2017 年在四川省眉山市东坡区悦兴镇金光村 (30° 12' N, 103° 83' E) 进行, 插秧机和育秧作业机由当地合作社提供, 水稻全生育期气象数据由四川省气象局提供 (图 1)。前茬为青菜, 故水稻季土壤基础肥力较高, 土壤质地为砂壤土, 试验田块耕层土壤养分含量见表 1, 水稻主要生育时期记载见表 2。

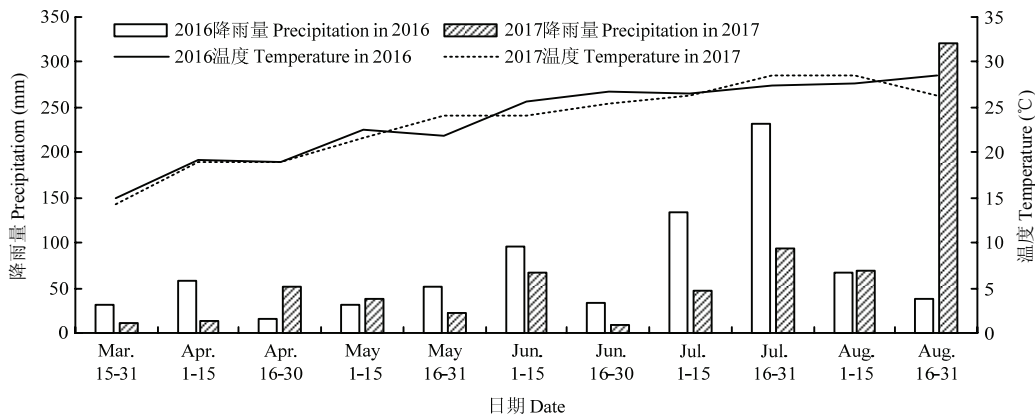


图 1 生长期间气象资料

Fig. 1 Weather data during crop growing period

表 1 试验田土壤基础肥力特性

Table 1 Soil properties of the experimental field

年份 Year	pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
2016	6.98	36.93	2.30	0.98	3.36	124.16	22.89	106.97
2017	6.70	27.87	2.08	1.03	3.08	100.36	31.93	96.81

表 2 不同机插方式下杂交稻主要生育时期
Table 2 Main growth stages in different machine-transplanted method (M-D)

年份 Year	育秧方式 Seedling-raising method	播种期 Seeding time	移栽期 Transplanting time	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage
2016	钵苗 Potted	03-20	04-17	06-06	07-04	08-22
	毯苗 Blanket			06-07	07-08	08-24
2017	钵苗 Potted	03-25	04-23	06-02	07-08	08-18
	毯苗 Blanket			06-04	07-10	08-20

1.2 试验设计

本试验采用两因素裂区设计，主区为钵苗机插和毯苗机插 2 种机插方式，分别记为 M₁ 和 M₂；副区为 3 种氮肥管理模式，分别是 N₁（100%缓释肥一次基施），N₂（70%缓释肥+30%尿素一次基施（缓速基施））和 N₃（70%缓释肥做基肥+30%尿素做穗肥（缓基速追）），其中，施肥处理的总施氮量均为 150 kg·hm⁻²，另设一个不施氮肥的处理作为对照，记为 N₀；随机排列，重复 3 次，共 24 个小区。小区长度为 6 m，宽度以插秧机行距而定，小区间以田埂分隔，并用塑料薄膜包埋，单区单灌，以防肥水串灌。所用的缓释氮肥为树脂包膜缓释肥，由山东金正大公司提供，100%包膜，含氮率为 46.0%。

育秧方式为早育水管育秧。播种密度：钵苗机插 35—40 g/盘，毯苗机插 70—75 g/盘。机插秧栽插密度：钵苗机插 33 cm×14.5 cm，毯苗机插 30 cm×16 cm。试验中氮肥基肥在移栽当天撒施；穗肥在第 1 苞分化期施用（倒 4 叶）。磷肥（P₂O₅）75 kg·hm⁻² 和钾肥（K₂O）150 kg·hm⁻² 作为基肥一次性施入。试验所用氮、磷、钾肥分别为尿素（含 N 46%）、过磷酸钙（含 P₂O₅ 12%）和氯化钾（含 K₂O 60%）。试验期间进行合理的田间管理，整个生育期没有明显的涝害、旱害和病虫草害。

1.3 样品的采集与处理

于水稻拔节期、抽穗期和成熟期，每个小区按平均茎蘖数选取长势均匀且无病害的植株 3 株，分为茎、叶和穗 3 部分，置于烘箱中。在 105℃ 条件下杀青 30 min，然后在 80℃ 下烘至恒重称重，粉碎后过 60 目筛，然后用全自动凯氏定氮仪（FOSS-8400，FOSS Analytical A/S，Denmark）测定各器官的全氮含量。

1.4 数据计算

各器官氮素积累量（N accumulation，kg·hm⁻²）= 各时期单位面积各器官（叶片、茎鞘、穗）干物重×各器官（叶片、茎鞘、穗）含氮量；

茎鞘（或叶片）氮素转运量（Amount of N

transportation，kg·hm⁻²）=抽穗期某器官氮积累量-成熟时该器官氮积累量；

茎鞘（或叶片）氮素转运率（N transportation efficiency，%）=茎鞘（或叶片）氮转运量/抽穗期茎鞘（或叶片）氮积累量×100；

茎鞘（或叶片）氮素转运贡献率（Contribution rate of N transportation，%）=茎鞘（或叶片）氮素转运量/成熟期穗部氮素积累总量×100；

氮素干物质生产效率（N use efficiency for biomass production，kg·kg⁻¹）=成熟期单位面积全株地上部干物重/地上部氮素积累总量；

氮素稻谷生产效率（N use efficiency for grain production，kg·kg⁻¹）=籽粒产量/地上部氮素积累总量；

氮素收获指数（N harvest index，%）=成熟期籽粒氮积累量/全株地上部分氮积累总量×100；

氮肥偏生产力（Partial factor productivity，kg·kg⁻¹）=稻谷产量/施氮量；

氮素回收利用率（N recovery efficiency，%）=（植株吸氮量-空白区植株吸氮量）/施氮量×100；

氮素生理利用率（N physiological efficiency，kg·kg⁻¹）=（施氮区籽粒产量-空白区籽粒产量）/（施氮区植株吸氮量-空白区植株吸氮量）；

氮素农学利用率（N agronomic efficiency，kg·kg⁻¹）=（施氮区水稻产量-氮空白区水稻产量）/施氮量。

1.5 数据处理

运用 DPS7.05 系统软件进行数据统计分析，Microsoft Excel 2013 进行图表绘制。使用最小显著差异法（Least significant difference，LSD）进行样本平均数的多重比较。

2 结果

2.1 不同机插和氮肥缓速配施方式对杂交稻主要生育时期氮素积累的影响

相比毯苗机插，钵苗机插在抽穗期和成熟期氮素

积累量均显著提高,2年平均提升幅度分别为3.65%—21.98%和2.12%—8.84%(表3)。就施肥处理而言,2种机插方式下杂交稻的氮素积累量,在拔节期表现为 $N_2>N_1>N_3$,且相互间差异显著;在抽穗期和成熟期则表现为 N_2 处理显著低于 N_1 和 N_3 处理,而且与 N_1 处理相比, N_3 处理2年平均在钵苗下分别提高了2.34%和1.80%,在毯苗下分别提高了14.76%和5.39%。由此可见,钵苗机插和缓基速追有利于杂交稻抽穗期和成熟期地上部的氮素积累。

2.2 不同机插和氮肥缓速配施方式对杂交稻不同生育阶段氮素积累速率与比例的影响

机插杂交稻吸收氮素最快的时期是拔节至抽穗期,同时比较2种机插方式可以发现,氮素积累速

率和比例,在拔节—抽穗阶段钵苗分别比毯苗高出了0.49—1.33 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和1.13—17.76个百分点;而在抽穗—成熟阶段钵苗则分别比毯苗降低了0.08—0.48 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和1.44—10.44个百分点;而钵苗在播种—拔节阶段的氮素积累比例相比毯苗也有所降低(表4)。就施肥处理对各生育阶段氮素积累速率而言,播种—拔节和抽穗—成熟阶段均以 N_2 最高,拔节—抽穗阶段则是 N_2 处理最低、 N_1 处理次之、 N_3 处理最高,且相互间的差异均达到显著水平,因此造成了在同一机插水平下, N_2 处理拔节前的氮素积累量接近甚至远高于拔节至抽穗阶段的氮素积累量,这也是 N_2 处理与另2个施肥处理对机插杂交稻氮素吸收的最大差异之处。

表3 氮肥缓速配施对2种机插杂交稻氮素积累量的影响
Table 3 Effect of different machine-transplanted methods and N treatments on N accumulation ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

年份 Year	处理 Treatment	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage
2016	M_1N_0	27.20±0.53d	93.07±1.33d	138.24±1.25d
	M_1N_1	87.08±2.15b	220.60±0.81b	234.28±1.62b
	M_1N_2	93.50±1.37a	188.59±0.78c	215.34±0.83c
	M_1N_3	70.60±2.14c	229.21±3.46a	240.34±0.49a
	M_2N_0	40.71±0.64d	79.77±1.83d	130.67±1.49d
	M_2N_1	84.97±0.86b	191.60±3.37b	220.27±1.42b
	M_2N_2	90.35±0.71a	161.51±1.05c	209.40±2.16c
	M_2N_3	76.95±0.77c	221.13±5.70a	235.36±4.20a
	M	20.50*	134.29**	225.03**
	N	787.38**	346.68**	908.66**
	M×N	17.72**	9.42**	1.71ns
2017	M_1N_0	27.30±0.11d	87.08±2.29c	144.60±3.16c
	M_1N_1	92.64±1.55b	216.92±1.92a	246.55±1.97a
	M_1N_2	102.02±2.36a	174.79±4.52b	216.91±1.99b
	M_1N_3	83.41±2.45c	218.62±4.53a	249.01±3.08a
	M_2N_0	31.39±1.00c	71.90±1.06d	132.85±2.29d
	M_2N_1	91.24±1.36a	177.83±2.73b	227.15±0.75b
	M_2N_2	94.93±3.01a	162.98±2.69c	210.06±4.96c
	M_2N_3	84.62±0.82b	202.21±3.34a	236.07±2.30a
	M	0.60ns	215.94**	654.57**
	N	662.11**	904.02**	551.82**
	M×N	3.74*	10.11**	1.61ns

M_1 : 钵苗机插; M_2 : 毯苗机插; N_0 : 不施氮肥; N_1 : 缓释肥, 全做基肥; N_2 : 70%缓释肥+30%尿素一次基施; N_3 : 70%缓释肥做基肥+30%尿素做穗肥; M: 机插方式; N: 氮肥运筹; M×N 机插方式和氮肥运筹二者之间的互作效应。数据是平均值±标准误。小写字母表示同一年同一机插方式下不同氮肥处理之间差异达到0.05显著水平。*和**分别代表 F 值达到0.05和0.01显著水平, ns表示 F 值差异不显著。下同
 M_1 : The potted machine-transplanted; M_2 : The blanket machine-transplanted; N_0 : Zero nitrogen control; N_1 : Slow release nitrogen fertilizer (SRNF) 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ as base; N_2 : SRNF 105 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ + Urea 45 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ as base; N_3 : SRNF 105 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ as base + Urea 45 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ at jointing stage; M×N show the interaction of machine-transplanted methods and nitrogen treatments. The data is Mean±SE. Values within a column which was under the different nitrogen treatment in the same machine-transplanted method and year followed by different lowercase letters show statistically significant difference at 0.05 probability level. Single asterisk (*) and double asterisks (**) indicate that the F value is significant at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, ns indicates that the F value is no significant. The same as below

表 4 氮肥缓速配施对 2 种机插杂交稻不同生育阶段氮素积累速率与比例的影响
Table 4 Effects of different machine-transplanted and N treatments on N accumulation rate and ratio in different growth periods

年份 Year	处理 Treatment	氮素积累速率 N accumulation rate (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)			氮素积累比例 N accumulation ratio (%)		
		播种—拔节 Sowing to elongation	拔节—抽穗 Elongation to heading	抽穗—成熟 Heading to maturity	播种—拔节 Sowing to elongation	拔节—抽穗 Elongation to heading	抽穗—成熟 Heading to maturity
2016	M ₁ N ₀	0.35±0.01d	2.35±0.03d	0.92±0.03a	19.68±0.30d	47.66±0.87c	32.67±1.06a
	M ₁ N ₁	1.12±0.03b	4.77±0.10b	0.28±0.04c	37.16±0.67b	57.01±1.51b	5.83±0.85c
	M ₁ N ₂	1.20±0.02a	3.40±0.05c	0.55±0.03b	43.42±0.71a	44.16±0.75d	12.42±0.70b
	M ₁ N ₃	0.91±0.03c	5.66±0.08a	0.23±0.07c	29.37±0.86c	66.00±1.04a	4.63±1.48c
	M ₂ N ₀	0.52±0.01d	1.26±0.06d	1.08±0.06a	31.17±0.82c	29.90±1.55d	38.93±1.76a
	M ₂ N ₁	1.08±0.01b	3.44±0.11b	0.61±0.04b	38.58±0.44b	48.39±1.17b	13.03±0.97c
	M ₂ N ₂	1.14±0.01a	2.30±0.05c	1.02±0.03a	43.16±0.75a	33.97±0.37c	22.86±0.43b
	M ₂ N ₃	0.97±0.01c	4.65±0.20a	0.30±0.03c	32.73±0.87c	61.20±1.63a	6.07±0.76d
	M	9.21ns	196.32**	86.12*	190.45**	125.75**	96.84*
	N	771.49**	506.80**	160.60**	204.77**	255.15**	508.37**
	M×N	18.15**	1.11ns	11.28**	22.80**	13.20**	9.67**
2017	M ₁ N ₀	0.40±0.01d	1.66±0.06d	1.40±0.02a	18.90±0.44d	41.31±0.71c	39.79±0.28a
	M ₁ N ₁	1.34±0.02b	3.45±0.09b	0.72±0.09c	37.57±0.34b	50.43±1.69b	12.00±1.41c
	M ₁ N ₂	1.48±0.03a	2.02±0.07c	1.03±0.07b	47.02±0.67a	33.54±1.02d	19.44±1.39b
	M ₁ N ₃	1.21±0.04c	3.76±0.06a	0.74±0.08c	33.49±0.69c	54.31±0.83a	12.21±1.37c
	M ₂ N ₀	0.44±0.01c	1.13±0.01d	1.49±0.03a	23.62±0.55d	30.50±0.41c	45.87±0.32a
	M ₂ N ₁	1.29±0.02a	2.41±0.10b	1.20±0.08b	40.16±0.48b	38.13±1.78b	21.71±1.44b
	M ₂ N ₂	1.34±0.04a	1.89±0.06c	1.15±0.06b	45.21±1.31a	32.41±0.87c	22.38±0.75b
	M ₂ N ₃	1.19±0.01b	3.27±0.07a	0.83±0.04c	35.85±0.14c	49.80±0.64a	14.35±0.71c
	M	7.91ns	113.62**	27.63*	28.89*	61.40*	41.16*
	N	653.02**	432.46**	40.13**	546.40**	157.13**	358.70**
	M×N	4.99*	17.03**	4.75*	9.36**	14.64**	6.01**

2.3 不同机插和氮肥缓速配施方式对杂交稻不同生育阶段氮素积累与转运的影响

与钵苗机插相比，钵苗机插在拔节—抽穗阶段茎、叶和穗部氮素积累量，2 年平均分别提高了 54.35%、18.98%和 7.34%，抽穗—成熟阶段茎、叶氮素转运量及穗部氮素增加量分别提高了 156.97%、19.44%和 16.11%（表 5）。就施氮处理而言，拔节—抽穗阶段，2 种机插方式茎、叶的氮素积累量呈现出 N₃>N₁>N₂ 的趋势，且相互间差异显著（钵苗机插茎鞘除外）。抽穗—成熟阶段，2 种机插方式下穗部氮素积累量均以 N₂ 处理最低，但施肥方式对茎、叶氮素转运量的影响却表现不同。茎鞘氮素转运量，钵苗以 N₁ 处理最高，且显著高于另外 2 个施氮处理，钵苗则表现为 N₃>N₁>N₂，且相互间差异显著；叶片氮素转运量，2 种机

插方式均表现为 N₃>N₁>N₂ 的趋势，钵苗下相互间差异显著，钵苗下只有 N₂ 与 N₃ 处理之间的差异达到显著水平。由此可见，钵苗机插和缓基速追有利于杂交稻拔节—抽穗阶段茎叶对氮素的吸收与积累以及抽穗—成熟阶段茎叶氮素向穗部的转运。

2.4 不同机插和氮肥缓速配施方式对杂交稻氮素转运特性的影响

不管是茎、叶氮素转运率和氮素转运对穗部的贡献率，还是干物质和稻谷生产效率，甚至包括氮素收获指数，都表现为钵苗显著高于钵苗，他们的提高幅度平均分别达到了 20.77—23.71、6.40—9.71、12.54—14.57、8.19—11.39、0.66—5.72 和 5.41—6.42 个百分点（表 6）。比较不同施肥方式可知，单就稻谷生产效率而言，2 种机插方式下，N₂ 处理均高于 N₁ 和

表 5 氮肥缓速配施对 2 种机插杂交稻不同生育阶段氮素积累与转运的影响
Table 5 Effects of different machine-transplanted methods and N treatments on N accumulation and transportation (kg·hm⁻²)

年份 Year	处理 Treatment	拔节—抽穗 Elongation to heading			抽穗—成熟 Heading to maturity		
		氮素积累量 N accumulation			氮素转运量 N transportation	氮素积累量 N accumulation	
		茎鞘 Stem-sheath	叶片 Leaf	穗部 Panicle	茎鞘 Stem-sheath	叶片 Leaf	穗部 Panicle
2016	M ₁ N ₀	22.54±0.52c	24.07±1.06d	20.69±0.15a	9.00±0.31c	27.78±1.20d	81.95±1.61c
	M ₁ N ₁	51.24±0.79a	50.89±3.17b	14.23±0.10d	39.96±1.17a	75.96±1.85b	129.60±1.44a
	M ₁ N ₂	33.49±1.03b	31.17±0.66c	16.14±0.26c	29.25±1.03b	63.61±0.73c	119.61±1.31b
	M ₁ N ₃	51.40±0.27a	66.45±2.30a	17.78±0.44b	30.84±0.56b	85.55±2.93a	127.52±1.60a
	M ₂ N ₀	11.65±0.16d	9.06±1.47d	22.99±0.20a	3.49±0.69c	18.50±0.82c	72.90±2.54b
	M ₂ N ₁	27.73±0.34b	46.45±2.75b	16.94±0.28bc	13.20±1.65b	66.41±1.05a	108.28±1.15a
	M ₂ N ₂	18.01±1.14c	25.39±1.93c	17.19±0.49b	4.78±0.94c	52.79±1.25b	105.46±1.07a
	M ₂ N ₃	48.89±3.84a	58.97±2.52a	16.45±0.47c	26.44±3.49a	66.73±0.90a	107.39±2.68a
	M	126.11**	13.21ns	7.37ns	154.23**	82.64*	959.23**
	N	177.24**	280.36**	268.34**	85.59**	789.54**	197.52**
	M×N	15.98**	3.68*	28.96**	29.18**	7.07**	4.15*
2017	M ₁ N ₀	23.32±1.00c	17.91±1.13c	21.29±0.46a	8.38±1.07d	19.09±0.52d	84.99±2.46c
	M ₁ N ₀	53.20±1.35a	40.81±1.35b	13.95±0.21c	47.37±0.80a	64.16±1.41b	141.16±1.78a
	M ₁ N ₁	22.08±2.14c	21.12±2.46c	16.91±0.18b	21.15±1.95c	58.39±1.35c	121.66±0.28b
	M ₁ N ₂	44.22±1.98b	56.59±2.95a	15.74±0.79d	27.28±1.31b	81.93±3.16a	139.59±0.02a
	M ₁ N ₃	15.26±0.91c	7.62±1.11d	24.52±0.71a	0.99±0.67d	12.18±0.47c	74.12±1.63c
	M ₂ N ₀	21.46±1.07b	35.49±2.91b	16.66±0.59b	9.55±1.60b	58.88±0.97b	117.76±1.49a
	M ₂ N ₁	16.73±0.52c	25.97±1.61c	15.56±0.11b	5.04±0.35c	58.42±1.74b	110.54±4.05b
	M ₂ N ₂	35.59±1.22a	50.77±0.62a	15.44±0.30b	19.48±1.67a	65.02±1.00a	118.36±2.45a
	M	270.63**	15.81ns	8.48ns	268.98**	1262.75**	367.75**
	N	117.31**	177.93**	117.03**	134.05**	603.87**	215.16**
	M×N	35.41**	5.76*	11.29**	60.49**	11.85**	4.24*

N₃ 处理；干物质生产效率在钵苗机插条件下的表现与稻谷生产效率一致，但只有 N₂ 和 N₃ 处理在 2 年都有显著差异，而其在毯苗机插下则表现为 N₁ 处理显著低于 N₂ 和 N₃ 处理；就茎鞘氮素转运率而言，钵苗以 N₃ 处理最低，毯苗则是 N₃ 处理最高、N₁ 处理次之，N₂ 处理最低；而叶片氮素转运率，钵苗是 N₃ 处理显著高于 N₁ 和 N₂ 处理，毯苗则表现为 N₃ 处理最低，且显著低于 N₂ 处理；氮素转运对穗部的贡献率，在钵苗下是 N₂ 处理显著低于 N₁ 和 N₃ 处理，在毯苗条件下是 N₃ 处理显著高于 N₁ 和 N₂ 处理。由此可见，与毯苗机插相比，钵苗机插极大地提升了杂交稻氮素转运能力，而缓基速追有利于杂交稻叶片氮素向穗部运输。

2.5 不同机插和氮肥缓速配施方式对杂交稻氮素利用特征的影响

相比毯苗机插，钵苗的氮肥农学利用率、生理利用率和偏生产力平均分别提高了 12.62%、11.94%和 8.69%（表 7）。与 N₁ 处理相比，N₂ 处理钵苗和毯苗的氮素生理利用率分别提升了 20.05%和 9.11%，偏生产力分别提升了 58.15%和 54.98%，氮素回收利用率则分别下降了 16.19 和 9.32 个百分点，氮素农学利用率分别下降了 10.65%和 8.46%；而 N₃ 处理钵苗和毯苗的氮素回收利用率、农学利用率、生理利用率和偏生产力平均提升的幅度是 2.84 和 8.00 个百分点、12.54%和 13.44%、8.01%和 0.34%以及 52.55%和

50.71%。由此可见，钵苗机插和缓基速追有利于提高杂交稻对氮肥的吸收利用效率。

2.6 氮肥缓速配施对 2 种机插杂交稻产量及其构成的影响

2016—2017 年钵苗机插产量平均分别比毯苗机插高出 1 042.40 kg·hm⁻² 和 722.30 kg·hm⁻², 提高幅度分别达到了 10.30%(8.2%—11.3%)和 7.20%(6.3%—8.3%), 这是因为相比毯苗机插, 钵苗机插 2 年的有效穗数分别提高了 4.16%和 5.34%, 每穗粒数分别提高了 4.12%和 3.02%, 因此单位面积颖花数分别增加了 8.46%和 9.03%, 而且在 2016 年其结实率和千粒重也显著提高, 因此其单穗重也显著提高(表 8)。与 N₁ 处理相比, N₂ 处理在钵苗和毯苗下的每

穗粒数 2 年平均分别下降了 3.03%和 3.51%, 单位面积颖花数分别下降了 6.37%和 5.64%, 单穗重分别下降了 3.37%和 2.10%, 进而导致产量分别下降了 418.40 kg·hm⁻² 和 298.10 kg·hm⁻², 下降幅度分别达到了 3.67%和 2.84%; 而 N₃ 处理在钵苗和毯苗下的每穗粒数 2 年平均分别提高了 4.07%和 3.25%, 单位面积颖花数分别增加了 4.22%和 4.86%, 单穗重分别提高了 3.05%和 2.47%, 进而产量分别提高了 512.76 kg·hm⁻² 和 513.99 kg·hm⁻², 提升幅度分别为 4.32%和 4.75%。这说明钵苗机插和缓基速追有利于有效穗数和每穗粒数提高, 进而提高了单位面积颖花数、单穗重和稻谷产量。此外, 钵苗机插还能显著提高杂交水稻的收获指数。

表 6 氮肥缓速配施对 2 种机插杂交稻氮素转运特性的影响
Table 6 Effects of different machine-transplanted methods and N treatments on N transport characteristics

年份	处理	氮素转运率		氮素转运对穗部的贡献率	干物质生产效率	稻谷生产效率	氮素收获指数
Year	Treatment	N transportation efficiency (%)		Contribution rate of N transportation (%)	N use efficiency for biomass production (kg·kg ⁻¹)	N use efficiency for grain yield (kg·kg ⁻¹)	N harvest index (%)
		茎鞘	叶片				
		Stem-sheath	Leaf				
2016	M ₁ N ₀	27.98±0.75c	66.64±1.04c	44.91±1.30c	139.03±1.01b	55.33±1.55a	73.21±0.39a
	M ₁ N ₁	50.08±0.81a	69.39±0.71b	89.47±1.50a	132.92±0.26c	51.46±0.51c	68.72±0.40c
	M ₁ N ₂	44.89±1.08ab	68.38±0.58b	77.65±1.10b	145.64±0.71a	54.18±0.98ab	69.68±0.11bc
	M ₁ N ₃	42.00±0.51b	74.34±1.24a	91.29±2.72a	130.10±0.60c	52.46±0.80bc	70.02±0.37b
	M ₂ N ₀	13.36±2.71c	52.54±0.46d	30.26±1.32d	129.50±2.29a	54.07±0.52a	69.81±1.19a
	M ₂ N ₁	23.01±2.74b	65.23±0.68a	73.50±1.97b	122.54±2.90b	49.17±1.28b	63.89±0.17b
	M ₂ N ₂	9.69±1.74c	62.29±0.73b	54.60±0.82c	126.96±0.23a	50.15±0.57b	63.62±0.44b
	M ₂ N ₃	35.79±3.16a	59.85±0.77c	86.67±1.76a	127.23±0.25a	48.49±0.23b	61.06±0.04c
	M	441.98**	262.13**	171.53**	202.50**	58.86*	629.25**
	N	30.67**	41.48**	599.12**	14.82**	11.31**	53.50**
M×N	17.87**	22.91**	16.72**	8.85**	1.24ns	10.18**	
2017	M ₁ N ₀	25.57±2.70c	53.20±0.98d	32.27±0.90c	146.40±4.18a	50.73±0.11a	71.58±0.51a
	M ₁ N ₁	56.20±0.47a	62.66±1.12c	79.06±2.38a	145.45±0.19a	47.20±0.45c	69.53±0.10b
	M ₁ N ₂	36.46±1.85b	66.76±0.54b	65.39±2.13b	149.30±1.70a	51.58±0.75a	69.73±0.29b
	M ₁ N ₃	38.16±1.14b	72.64±0.65a	78.23±2.44a	132.69±0.70b	48.92±1.01b	69.88±0.33b
	M ₂ N ₀	3.92±2.55d	41.78±1.23d	17.77±0.09c	128.86±4.39ab	51.85±0.29a	69.05±0.74a
	M ₂ N ₁	18.14±2.70b	61.41±0.06b	58.17±2.38b	124.22±0.51b	47.52±0.45b	64.89±0.44b
	M ₂ N ₂	10.36±0.70c	65.68±0.92a	57.46±0.98b	127.83±2.49ab	50.14±0.65a	64.66±0.68b
	M ₂ N ₃	30.34±1.91a	60.79±0.42b	71.38±1.26a	134.26±1.16a	47.62±0.33b	63.36±0.53c
	M	146.60**	391.46**	72.26*	37.02*	0.35ns	224.07**
	N	55.92**	212.10**	392.87**	1.94ns	23.48**	19.23**
M×N	20.93**	23.94**	8.37**	10.32**	2.49ns	4.66*	

表 7 氮肥缓速配施对 2 种机插杂交稻氮素利用特征的影响
Table 7 Effect of different machine-transplanted methods and N treatments on N use efficiency

年份 Year	处理 Treatment	回收利用率 N recovery efficiency (%)	农学利用率 N agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹)	生理利用率 N physiological efficiency (kg·kg ⁻¹)	偏生产力 Partial factor productivity (kg·kg ⁻¹)
2016	M ₁ N ₁	64.03±1.91a	29.40±0.78ab	45.95±0.83b	50.98±1.28b
	M ₁ N ₂	51.40±1.38b	26.79±1.03b	52.30±1.43a	80.38±1.17a
	M ₁ N ₃	68.07±0.99a	33.08±1.78a	48.58±1.44ab	77.77±1.22a
	M ₂ N ₁	59.73±1.79b	25.09±2.17ab	41.93±2.89a	47.11±0.83b
	M ₂ N ₂	52.48±1.56c	22.90±0.24b	43.71±1.39a	72.20±1.82a
	M ₂ N ₃	69.79±3.69a	28.96±1.83a	41.46±0.57a	70.01±1.06a
	M	0.69ns	13.29ns	11.63ns	341.82**
	N	67.78**	10.27**	1.66ns	373.78**
	M×N	2.54ns	0.01ns	0.51ns	2.32ns
2017	M ₁ N ₁	67.97±3.33a	28.67±2.03ab	42.12±1.29c	48.91±1.13b
	M ₁ N ₂	48.21±2.08b	25.70±1.96b	53.19±1.96a	77.58±1.18a
	M ₁ N ₃	69.61±1.38a	32.28±1.03a	46.45±2.25b	74.61±1.71a
	M ₂ N ₁	62.87±1.12a	26.04±0.72ab	41.43±1.20b	45.93±0.97b
	M ₂ N ₂	51.47±4.61b	24.26±2.27b	47.22±2.12a	71.97±0.75a
	M ₂ N ₃	68.81±1.91a	29.02±0.83a	42.18±0.30ab	70.19±1.32a
	M	0.05ns	4.38ns	9.62ns	110.61**
	N	56.32**	7.76*	14.82**	216.19**
	M×N	2.34ns	0.20ns	1.44ns	0.41ns

2.7 不同机插和氮肥缓速配施方式下杂交稻氮素吸收与产量的相关系数

分析 2 年不同机插方式和氮肥缓速配施方式下氮素吸收与产量间的相关性（表 9），发现拔节期、抽穗期和成熟期的氮积累量，播种—拔节和拔节—抽穗阶段的氮积累速率，以及拔节—抽穗阶段茎叶氮积累量和抽穗—成熟阶段氮转运量，与有效穗数、穗粒数、单穗重和产量都有显著或极显著正相关关系，而与结实率和千粒重则有一定的负相关关系；抽穗—成熟阶段的氮积累速率与结实率呈极显著正相关，但与有效穗数、穗粒数、单穗重和产量均呈显著或极显著的负相关。

3 讨论

3.1 钵苗机插杂交籼稻氮素吸收利用特征

水稻高产群体构建，高效合理的物质生产只是外在的表现，氮素吸收与积累才是水稻产量形成的内在推动力。籽粒氮素来自两个方面：一是抽穗前贮藏于植株内的氮素转运，二是穗后的氮素吸收。水稻氮素

吸收和积累，主要受自身遗传调控，但种植方式^[21-22]、栽插密度^[23]和氮肥运筹^[24-25]等栽培技术措施对其也有显著影响。胡雅杰等^[22]通过研究 6 个不同穗型粳稻品种得出与毯苗机插相比，钵苗机插水稻抽穗期和成熟期吸氮量显著提高，拔节至抽穗阶段和抽穗至成熟阶段的氮素积累量和氮素吸收速率较高。本研究结果也表明，与毯苗机插相比，钵苗机插杂交籼稻抽穗期和成熟期吸氮量平均分别提高了 12.63%和 5.20%，拔节至抽穗阶段氮素积累量和氮素吸收速率平均分别提高了 25.38%和 0.84 kg·hm⁻²·d⁻¹，这与胡雅杰等^[22]研究粳稻的结果是一致的，但与毯苗机插相比，钵苗机插杂交籼稻抽穗至成熟阶段氮素积累量和氮素吸收速率分别降低了 29.85%和 0.26 kg·hm⁻²·d⁻¹，这可能是因为钵苗机插杂交籼稻花前氮素吸收量大，后期籽粒氮素主要依靠花前的氮素转运，故而花后植株氮素吸收慢而少，而毯苗机插花前氮素积累量不足，难以满足后期籽粒氮素的需求，故而仍需较多地从土壤中吸收氮素。以上两点，是钵苗机插杂交籼稻氮素吸收积累区别于毯苗机插的重要特征，这可能是受环境条件影响，也

表 8 氮肥缓速配施对 2 种机插杂交稻产量及其构成的影响

Table 8 Effects of different machine-transplanted methods and N treatments on rice yield and its components

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 Panicle ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗粒数 No. of spikelet per panicle	结实率 Grain filling percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	单穗重 Panicle weight (g)	收获指数 Harvest index (%)
2016	M ₁ N ₀	164.80±3.20c	170.34±1.35d	92.68±0.18a	31.59±0.01a	7647.32±191.73c	4.99±0.04c	61.09a
	M ₁ N ₁	259.21±3.64a	190.43±2.04b	87.52±0.55c	30.83±0.17c	12057.53±175.03b	5.14±0.06b	58.72b
	M ₁ N ₂	250.16±0.24b	183.67±3.74c	89.33±0.46b	30.73±0.16c	11665.74±182.51b	5.04±0.10bc	57.59b
	M ₁ N ₃	263.95±4.42a	197.27±2.65a	87.88±0.36c	31.25±0.10b	12608.57±197.97a	5.42±0.06a	59.35ab
	M ₂ N ₀	173.75±1.50b	162.35±1.50c	89.34±0.04a	30.87±0.14a	7066.64±123.93c	4.48±0.04c	60.45a
	M ₂ N ₁	237.64±3.37a	186.55±2.03a	86.04±0.65b	30.60±0.09b	10830.51±272.57b	4.91±0.05ab	55.49b
	M ₂ N ₂	235.83±1.80a	179.36±1.84b	86.82±0.31b	30.53±0.20b	10501.40±159.28b	4.75±0.06b	54.82b
	M ₂ N ₃	240.56±0.92a	191.68±1.88a	86.02±0.19b	30.69±0.06ab	11410.96±151.36a	5.06±0.05a	55.09b
	M	110.55**	34.10*	78.34*	571.60**	272.61**	756.27**	104.74**
	N	334.08**	53.39**	84.00**	27.84**	267.08**	23.22**	11.89**
	M×N	11.86**	0.31ns	3.69*	6.00**	1.43ns	1.92ns	1.70ns
2017	M ₁ N ₀	160.79±2.87b	165.62±2.64c	96.26±0.67a	31.31±0.03a	7336.30±169.64d	4.99±0.10b	59.36a
	M ₁ N ₁	260.10±5.46a	175.54±2.09b	94.66±0.99ab	29.71±0.12bc	11636.94±176.42b	4.94±0.10bc	57.50bc
	M ₁ N ₂	252.80±5.63a	171.46±2.36b	91.87±3.56b	29.64±0.20c	11191.95±256.75c	4.73±0.21c	56.25c
	M ₁ N ₃	256.03±3.04a	183.52±1.67a	94.95±0.67ab	30.14±0.12b	12178.10±187.51a	5.25±0.10a	57.79ab
	M ₂ N ₀	164.35±0.93c	152.05±1.35c	97.08±0.43a	31.25±0.37a	6889.11±145.79c	4.62±0.04b	58.90a
	M ₂ N ₁	243.06±4.88ab	171.69±1.68b	93.85±1.01ab	29.78±0.29b	10794.88±111.85ab	4.82±0.05ab	55.25b
	M ₂ N ₂	234.95±0.23b	166.68±3.02b	95.78±0.28a	29.94±0.06b	10527.79±198.08b	4.78±0.11ab	55.14b
	M ₂ N ₃	247.44±2.61a	178.14±2.46a	91.78±1.51b	30.09±0.21b	11242.41±171.13a	4.91±0.06a	54.71b
	M	30.90*	7.62ns	0.04ns	1.02ns	52.26*	4.19ns	40.34*
	N	239.15**	42.39**	1.96ns	23.35**	233.49**	4.42*	11.55**
	M×N	3.14ns	2.49ns	1.99ns	0.35ns	0.61ns	2.11ns	1.65ns

表 9 杂交稻氮素吸收与产量的相关系数

Table 9 Correlation coefficient between nitrogen uptake and yield in hybrid rice (n=16)

项目 Item	氮积累量 N accumulation			氮积累速率 N accumulation rate			拔节—抽穗氮积累量 N accumulation from elongation to heading	抽穗—成熟氮转运量 N translocation from heading to maturity		
	拔节期 Elongation	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	播种—拔节 Sowing to elongation	拔节—抽穗 Elongation to heading	抽穗—成熟 Heading to maturity	茎鞘 Stem- sheath	叶片 Leaf	茎鞘 Stem- sheath	叶片 Leaf
产量 Yield	0.88**	0.99**	0.99**	0.83**	0.79**	-0.74**	0.72**	0.82**	0.73**	0.98**
有效穗数 Panicles	0.91**	0.98**	0.98**	0.90**	0.70**	-0.66**	0.64**	0.73**	0.70**	0.95**
穗粒数 No. of spikelets per panicle	0.65**	0.77**	0.77**	0.41	0.94**	-0.93**	0.78**	0.89**	0.66**	0.85**
结实率 Grain filling percentage	-0.45	-0.33	-0.39	-0.14	-0.56*	0.71**	-0.29	-0.43	-0.23	-0.41
千粒重 1000-grain weight	-0.57*	-0.57*	-0.60*	-0.88**	0.03	-0.05	-0.57*	-0.15	-0.25	-0.46
单穗重 Panicle weight	0.33	0.60*	0.53*	0.13	0.86**	-0.72**	0.60*	0.82**	0.65**	0.68**

可能是水稻品种类型的遗传特性本身就对花后氮素吸收特征存在差异。

邓飞等^[26]研究认为成熟期穗部的氮素主要依靠抽穗至成熟阶段茎鞘和叶片的氮素转运，许轲等^[27]进一步研究指出不同生育时期叶片氮素积累量与产量的相关系数高于同一时期茎鞘氮素积累量与产量的相关

系数,因此在保持茎鞘氮素积累量的基础上,提高叶片氮素积累,有利于进一步提高水稻产量^[28]。本研究结果表明,钵苗机插抽穗至成熟阶段的茎叶氮素转运量、转运率以及氮素转运对穗部的贡献率均显著高于毯苗机插,且2种机插下叶片的氮素转运量、转运率以及拔节至抽穗阶段氮素积累量和抽穗至成熟阶段氮素转运量与产量的相关系数都明显高于茎鞘。说明相比毯苗机插,钵苗机插杂交稻生育中后期茎叶氮素转运量大,叶片对籽粒氮素积累贡献率要高于茎鞘,这与水稻茎叶干物质转运是密不可分的。氮素干物质生产效率是评价氮素利用率的重要指标,同时也是连接物质生产和氮素吸收的直观指标^[29]。本研究结果显示,钵苗机插成熟期氮素干物质生产效率平均比毯苗机插高出9.79%,进一步说明了钵苗机插干物质生产和氮素吸收与转运能力优于毯苗机插。

水稻氮素利用效率的评价指标,除了干物质生产效率之外,还有氮素回收利用率、农学利用率、生理利用率、偏生产力、稻谷生产效率和收获指数等^[30]。胡雅杰等^[22]研究表明,钵苗机插杂交稻的氮肥偏生产力显著高于毯苗,氮素收获指数也略高于毯苗机插。本研究结果表明相比毯苗机插,钵苗的氮肥农学利用率、生理利用率和偏生产力平均分别提高了12.62%、11.94%和8.69%,氮素收获指数显著提高了5.41—6.42个百分点。这说明钵苗机插杂交稻比毯苗机插稻在氮素利用效率方面更具优势,这与钵苗机插杂交稻生育中后期具有较强的光合物质生产能力和氮素转运能力密不可分^[22]。

3.2 氮肥缓基速追下机插杂交籼稻氮素吸收利用特征

众多研究认为在水稻生产中,合理的氮肥运筹可以提高氮素积累量和氮肥利用效率^[31-32]。已有研究表明,缓释氮肥可以通过调节养分释放模式,实现水稻氮素养分的平衡状态,进而提高水稻氮素吸收利用,这是因为缓释氮肥养分释放周期长,减少了氨挥发、氮的径流淋溶和硝化-反硝化等途径的损失^[33]。但陈贤友等^[17]研究发现缓释氮肥存在肥效缓慢,易造成作物前期缺氮,黄旭等^[34]也发现,施用缓释肥料是通过改善水稻后期的生育性状,进而提高了产量和养分利用率。而付月君等^[33]研究认为一次性施用过多的缓释肥不仅会降低成熟期籽粒中氮素的积累量,还会导致水稻后期贪青晚熟,产量降低,而适当比例的缓释氮肥与尿素配施能够显著提高水稻籽粒中氮素的积累量^[25]。本研究结果表明,与缓释肥一次性基施相比,以30%的尿素取代缓释肥作为基肥施用(缓速基施),

机插杂交稻拔节期氮素积累量显著提高,而抽穗期和成熟期氮素积累量,以及拔节至抽穗阶段的茎叶氮素积累量和抽穗至成熟阶段的茎叶氮素转运量均显著降低,进而显著降低了氮肥的回收利用率。这是因为水稻生长前期根量少,尿素作基肥施用在前期流失快,而相同当量的缓释肥损失更小,所以缓速基施的氮素回收利用率低,同时也说明施用缓释肥并不会导致机插杂交稻前期缺氮,这也可能与本试验前茬作物是青菜,土壤基础肥力过高有关。也有研究指出水稻对氮素的吸收主要集中在幼穗分化期,而一次性施用缓释肥很难满足水稻生育中后期对氮的需求^[35]。本研究结果表明,机插杂交稻氮素吸收最快的时期是拔节至抽穗期,且与缓释肥一次性基施相比,以30%的尿素取代缓释肥作为穗肥施用(缓基速追),使钵苗机插杂交稻拔节—抽穗阶段氮素吸收速率加快了 $0.60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,因此其拔节—抽穗阶段的氮素积累量显著提高,进而使抽穗期氮素积累量提高了2.34%,尽管抽穗—成熟阶段氮素吸收速率有所下降,但成熟期氮素积累量依然提高了1.79%,这与氮素转运对穗部的贡献率显著提高有一定关联,此外氮肥回收利用、农学利用率、生理利用率和偏生产力也均有不同程度的提升,而拔节期氮素积累量则显著降低。这些特征与戢林等^[36]总结的人工移栽水稻高产氮高效群体主要生育时期氮素积累特征非常吻合,即拔节前氮素积累量低,拔节—抽穗阶段氮素积累量迅速升高,而抽穗—成熟阶段仍保持较高的氮素积累能力。原因可能是缓基速追这种施肥方式下能弥补杂交稻幼穗分化期缓释肥营养供应不足的问题,且适当的无机氮供应可以增加土壤微生物数量,水稻能吸收更多的养分供植株生长和幼穗发育,从而促进了干物质和氮素积累,为水稻高产和氮肥高效利用打下了坚实的基础^[37]。

4 结论

与毯苗机插相比,钵苗机插杂交稻在氮素利用效率方面更具优势。钵苗机插杂交稻高产氮素高效利用特征可总结为拔节前氮素积累量不宜过高,拔节至抽穗阶段氮素积累应快而多,而抽穗—成熟阶段要保持较高的茎叶氮素转运能力和一定的氮素吸收能力。而且在钵苗机插下,采用70%缓释肥做基肥+30%尿素做穗肥的缓基速追的施肥方式,能适当降低拔节前氮素积累速率和积累量,进一步加快拔节至抽穗阶段氮素吸收速率,提高机插杂交稻抽穗期和成熟期氮素积累量,进而提高氮肥利用率。

参考文献 References

- [1] 杨松, 贾一磊, 王进友, 罗来君, 高雯雯. 钵苗机插杂交水稻的优势及其精确定量栽培技术研究. 大麦与谷类科学, 2019, 36(6): 16-21.
YANG S, JIA Y L, WANG J Y, LUO L J, GAO W W. Research on the advantages and precise quantitative cultivation technologies of the indica hybrid rice whose seedlings are potted and mechanically transplanted. Barley and Cereal Sciences, 2019, 36(6): 16-21. (in Chinese)
- [2] CHENG S H, ZHUANG J Y, FAN Y Y, DU J H, CAO L Y. Progress in research and development on hybrid rice: A super-domesticated in China. Annals of Botany, 2007, 100: 959-966.
- [3] 张洪程, 龚金龙. 中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1273-1289.
ZHANG H C, GONG J L. Research status and development discussion on high-yielding agronomy of mechanized planting rice in China. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(7): 1273-1289. (in Chinese)
- [4] 张洪程, 朱聪聪, 霍中洋, 许轲, 蒋晓鸿, 陈厚存, 高尚勤, 李德剑, 赵成美, 戴其根. 钵苗机插水稻产量形成优势及主要生理生态特点. 农业工程学报, 2013, 29(21): 50-59.
ZHANG H C, ZHU C C, HUO Z Y, XU K, JIANG X H, CHEN H C, GAO S Q, LI D J, ZHAO C M, DAI Q G. Advantages of yield formation and main characteristics of physiological and ecological in rice with nutrition bowl mechanical transplanting. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(21): 50-59. (in Chinese)
- [5] 李应洪, 王海月, 吕腾飞, 张绍文, 蒋明金, 何巧林, 孙永健, 马均. 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻光合生产及产量的影响. 中国农业科学, 2017, 31(3): 265-277.
LI Y H, WANG H Y, LÜ T F, ZHANG S W, JIANG M J, HE Q L, SUN Y J, MA J. Effects of mechanically-transplanted modes and density on photosynthetic production and yield in hybrid rice at different seedling-ages. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 31(3): 265-277. (in Chinese)
- [6] 张洪程, 赵品恒, 孙菊英, 吴桂成, 徐军, 端木银熙, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 机插杂交粳稻超高产形成群体特征. 农业工程学报, 2012, 28(2): 39-44.
ZHANG H C, ZHAO P H, SUN J Y, WU G C, XU J, DUANMU Y X, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, WEI H Y. Population characteristics of super high yield formation of mechanical transplanted japonica hybrid rice. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 39-44. (in Chinese)
- [7] 胡雅杰, 邢志鹏, 龚金龙, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 李德剑, 沙安勤, 周有炎, 刘国林, 陆秀军, 刘国涛, 朱嘉炜. 适宜机插株行距提高不同穗型粳稻产量. 农业工程学报, 2013, 29(14): 33-44.
HU Y J, XING Z P, GONG J L, ZHANG H C, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, WEI H Y, LI D J, SHA A Q, ZHOU Y Y, LIU G L, LU X J, LIU G T, ZHU J W. Suitable spacing in and between rows of plants by machinery improves yield of different panicle type japonica rices. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 33-44. (in Chinese)
- [8] 胡雅杰, 邢志鹏, 龚金龙, 刘国涛, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 沙安勤, 周有炎, 罗学超, 刘国林. 钵苗机插水稻群体动态特征及高产形成机制的探讨. 中国农业科学, 2014, 47(5): 865-879.
HU Y J, XING Z P, GONG J L, LIU G T, ZHANG H C, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, WEI H Y, GUO B W, SHA A Q, ZHOU Y Y, LUO X C, LIU G L. Study on population characteristics and formation mechanisms for high yield of pot-seedling mechanical transplanting rice. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(5): 865-879. (in Chinese)
- [9] 吴文萃, 张健美, 周永进, 陈刚, 许有尊, 李胜群, 严文学, 高尚勤. 江淮水稻钵苗机插生育特性与高产栽培关键技术研究. 中国稻米, 2015, 21(4): 118-124.
WU W G, ZHANG J M, ZHOU Y J, CHEN G, XU Y Z, LI S Q, YAN W X, GAO S Q. Study on growth and development characteristics and high-yielding cultivation techniques of rice with nutrition bowl mechanical transplanting in Jianghuai area. China Rice, 2015, 21(4): 118-124. (in Chinese)
- [10] 张军, 王兴龙, 石广跃, 米长生, 郭保卫, 李必忠, 方书亮, 陆海空, 刘忠红, 张永进, 庚跃东. 不同机栽方式下杂交稻产量及其形成特征比较. 农业工程学报, 2015, 31(10): 84-91.
ZHANG J, WANG X L, SHI G Y, MI C S, GUO B W, LI B Z, FANG S L, LU H K, LIU Z H, ZHANG Y J, GENG Y D. Yield and its formation of hybrid rice under different mechanical transplanted methods. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 84-91. (in Chinese)
- [11] 胡雅杰, 曹伟伟, 钱海军, 邢志鹏, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 高辉, 沙安勤, 周有炎, 刘国林. 钵苗机插密度对不同穗型水稻品种产量、株型和抗倒伏能力的影响. 作物学报, 2015, 41(5): 743-757.
HU Y J, CAO W W, QIAN H J, XING Z P, ZHANG H C, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, WEI H Y, GUO B W, GAO H, SHA A Q, ZHOU Y Y, LIU G L. Effect of planting density of mechanically transplanted pot seedlings on yield, plant type and lodging resistance in rice with different panicle types. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(5): 743-757.

- (in Chinese)
- [12] ZHANG M, YAO Y L, TIAN Y H, CENG K, ZHAO M, ZHAO M, YIN B. Increasing yield and N use efficiency with organic fertilizer in Chinese intensive rice cropping systems. *Field Crops Research*, 2018, 227: 102-109.
- [13] 吴文革, 张四海, 赵决建, 吴桂成, 李泽福, 夏加发. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 757-764.
- WU W G, ZHANG S H, ZHAO J J, WU G C, LI Z F, XIA J F. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 757-764.
- (in Chinese)
- [14] AMINUDDIN B Y, SHARMA M L, WILLETT I R. Agricultural impacts on groundwater quality//*Proceedings of an International Workshop*. Kota Bharu, Kelantan, Malaysia, 1994.
- [15] 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 郭保卫, 胡雅杰, 崔培媛. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响. *作物学报*, 2017, 43(5): 730-740.
- WEI H Y, LI H L, CHENG J Q, ZHANG H C, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, GUO B W, HU Y J, CUI P Y. Effects of slow/controlled release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(5): 730-740. (in Chinese)
- [16] DENG F, WANG L, REN W J, MEI X F. Enhancing nitrogen utilization and soil nitrogen balance in paddy fields by optimizing nitrogen management and using polyaspartic acid urea. *Field Crops Research*, 2014, 169: 30-38.
- [17] 陈贤友, 吴良欢, 李金先, 应金耀. 新型控释肥对水稻产量与氮肥利用率的影响探讨. *土壤通报*, 2010, 41(1): 133-137.
- CHEN X Y, WU L H, LI J X, YING J Y. Effects of new controlled release fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 133-137. (in Chinese)
- [18] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 刘枫, 袁嫚嫚, 黄义德. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 808-815.
- LI M, GUO X S, YE S Y, LIU F, YUAN M M, HUANG Y D. Effects of sulfur- and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(4): 808-815. (in Chinese)
- [19] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 罗晶, 古珺, 龙思帆, 何杰, 向毫, 尹斌. 控释掺混尿素对稻麦产量及氮素利用率的影响. *中国水稻科学*, 2017, 31(3): 288-298.
- ZHANG J S, LI B, WANG C Q, LUO J, GU J, LONG S F, HE J, XIANG H, YIN B. Effects of controlled release blend bulk urea on the yield and nitrogen use efficiency of wheat and rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(3): 288-298. (in Chinese)
- [20] 孙克刚, 杜君, 孙克振, 和爱玲, 张运红. 控释尿素与化肥配施对水稻产量及氮素利用率的影响. *磷肥与复肥*, 2015, 30(10): 48-50.
- SUN K G, DU J, SUN K Z, HE A L, ZHANG Y H. Effect of combined application controlled release urea and chemical fertilizer on yield of rice and utilization rate of nitrogen. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2015, 30(10): 48-50. (in Chinese)
- [21] 王春雨, 余华清, 何艳, 郭长春, 张绍文, 杨志远, 马均. 播栽方式与施氮量对杂交籼稻氮肥利用特征及产量的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1792-1801.
- WANG C Y, YU H Q, HE Y, GUO C C, ZHANG S W, YANG Z Y, MA J. Characteristics of nitrogen accumulation and utilization in indica hybrid rice under different planting methods and nitrogen rates. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1792-1801. (in Chinese)
- [22] 胡雅杰, 吴培, 朱明, 邢志鹏, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 张洪程. 钵苗机插水稻氮素吸收与利用特征. *中国水稻科学*, 2018, 32(3): 257-264.
- HU Y J, WU P, ZHU M, XING Z P, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, WEI H Y, GUO B W, ZHANG H C. Characteristics of nitrogen uptake and utilization of mechanically-transplanted pot-tray-nursed rice seedlings. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(3): 257-264. (in Chinese)
- [23] 杨志长, 沈涛, 罗卓, 彭芝, 胡宇倩, 资涛, 熊廷浩, 宋海星. 低氮密植对机插双季稻产量形成和氮肥利用率的影响. *作物杂志*, 2020, (2): 71-81.
- YANG Z C, SHEN T, LUO Z, HU Y Q, ZI T, XIONG T H, SONG H X. Effects of low nitrogen rate combined with high planting density on yield formation and nitrogen use efficiency of machine transplanted double cropping rice. *Crops*, 2020, (2): 71-81. (in Chinese)
- [24] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 张木, 黄旭, 黄建凤, 李苹, 付弘婷. 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(6): 829-838.
- HUANG Q Y, TANG S H, ZHANG F B, ZHANG M, HUANG X, HUANG J F, LI P, FU H T. Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6): 829-838. (in Chinese)
- [25] 李玉浩, 何杰, 王昌全, 李冰, 梁靖越, 李新悦, 张敬昇, 尹斌. 控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响. *土壤*,

- 2018, 50(3): 469-475.
- LI Y H, HE J, WANG C Q, LI B, LIANG J Y, LI X Y, ZHANG J S, YIN B. Effects of controlled release nitrogen fertilizer combined with urea on soil inorganic nitrogen, microorganism and rice growth. *Soils*, 2018, 50(3): 469-475. (in Chinese)
- [26] 邓飞, 王丽, 任万军, 刘代银, 杨文钰. 不同生态条件下栽植方式对中籼迟熟杂交稻组合 II 优 498 氮素积累与分配的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(20): 4310-4325.
- DENG F, WANG L, REN W J, LIU D Y, YANG W Y. Effects of planting methods on nitrogen accumulation and distribution of mid-late indica hybrid rice combination II you 498 under different ecological conditions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20): 4310-4325. (in Chinese)
- [27] 许轲, 周兴涛, 曹利强, 张洪程, 郭保卫, 陈厚存, 吴中华, 朱聪聪, 杨岩. 不同类型钵苗及摆栽密度对粳型超级稻氮素吸收利用与转运特征的影响. *中国农业科学*, 2013, 46(23): 4876-4892.
- XU K, ZHOU X T, CAO L Q, ZHANG H C, GUO B W, CHEN H C, WU Z H, ZHU C C, YANG Y. Effects of different types of bowl seedlings and densities on characteristics of nitrogen uptake, utilization and translocation of bowl transplanted japonica super rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(23): 4876-4892. (in Chinese)
- [28] 霍中洋, 李杰, 张洪程, 戴其根, 许轲, 魏海燕, 龚金龙. 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性. *作物学报*, 2012, 38(10): 1908-1919.
- HUO Z Y, LI J, ZHANG H C, DAI Q G, XU K, WEI H Y, GONG J L. Characterization of nitrogen uptake and utilization in rice under different planting methods. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(10): 1908-1919. (in Chinese)
- [29] CASSMAN K G, PENG S, OLK D C, LADHA J K, REICHARDT W, DOBERMANN A, SINGH U. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Research*, 1998, 56(1): 7-39.
- [30] 李敏, 张洪程, 李国业, 魏海燕, 殷春渊, 马群, 杨雄. 水稻氮效率基因型差异及其机理研究进展. *核农学报*, 2011, 25(5): 1057-1063, 1056.
- LI M, ZHANG H C, LI G Y, WEI H Y, YIN C Y, MA Q, YANG X. Genotypic difference of nitrogen use efficiency in rice its morphological and physiological mechanisms. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(5): 1057-1063, 1056. (in Chinese)
- [31] REA R S, ISIAM M R, RAHMAN M M, MIX K. Study of nitrogen use efficiency and yield of rice influenced by deep placement of nitrogen fertilizers. *SAARC Journal of Agriculture*, 2019, 17(1): 93-103.
- [32] MOHARANA S, GULATI J, PRADHAN S. Nutrient uptake and nitrogen use efficiency of rice genotypes under LCC-based N application during summer. *Agricultural Science Digest-A Research Journal*, 2019, 39(1): 59-62.
- [33] 付月君, 王昌全, 李冰, 尹斌, 张敬昇. 控释氮肥与尿素配施对单季稻产量及氮肥利用率的影响. *土壤*, 2016, 48(4): 648-652.
- FU Y J, WANG C Q, LI B, YIN B, ZHANG J S. Effects of combined application of controlled-release nitrogen fertilizer and urea on rice (*Oryza sativa* L.) yield and nitrogen use efficiency. *Soils*, 2016, 48(4): 648-652. (in Chinese)
- [34] 黄旭, 唐拴虎, 徐培智, 黄巧义, 卢钰升, 蒋瑞萍, 李苹, 付弘婷. 不同种类缓/控释肥料对水稻产量及养分利用率的影响. *广东农业科学*, 2010, 37(8): 95-96, 105.
- HUANG X, TANG S H, XU P Z, HUANG Q Y, LU Y S, JIANG R P, LI P, FU H T. Effects of different slow/controlled release fertilizers on rice yield and nutrient utilization. *Journal of Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(8): 95-96, 105. (in Chinese)
- [35] 张晴雯, 杜春祥, 李晓伟, 李贵春, 王明. 控释肥条件下沿南四湖农田水稻吸氮特征. *环境科学*, 2011, 32(7): 1908-1915.
- ZHANG Q W, DU C X, LI X W, LI G C, WANG M. Nitrogen uptake rate and use efficiency by rice under different levels of the controlled-release N fertilizers (CRF) in the Nansi lake basin. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 1908-1915. (in Chinese)
- [36] 戢林, 杨欢, 李廷轩, 张锡洲, 余海英. 氮高效利用基因型水稻干物质生产和氮素积累特性. *草业学报*, 2014, 23(6): 327-335.
- JI L, YANG H, LI T X, ZHANG X Z, YU H Y. Dry matter production and nitrogen accumulation of rice genotypes with different nitrogen use efficiencies. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(6): 327-335. (in Chinese)
- [37] 王楷, 王克如, 王永宏, 赵健, 赵如浪, 王喜梅, 李健, 梁明晰, 李少昆. 密度对玉米产量(>15000kg hm⁻²)及其产量构成因子的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(16): 3437-3445.
- WANG K, WANG K R, WANG Y H, ZHAO J, ZHAO R L, WANG X M, LI J, LIANG M X, LI S K. Effects of density on maize yield and yield components. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(16): 3437-3445. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)