

# 不同施氮水平下缓释氮肥配施对机插稻氮素利用特征及产量的影响

王海月<sup>1</sup> 李玥<sup>1</sup> 孙永健<sup>1,\*</sup> 李应洪<sup>1</sup> 蒋明金<sup>1</sup> 王春雨<sup>1</sup> 赵建红<sup>1</sup> 孙园园<sup>2</sup> 徐徽<sup>1</sup>  
严奉君<sup>1</sup> 马均<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> 四川农业大学 水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130; <sup>2</sup> 中国气象局 成都高原气象研究所, 成都 610072; \* 通讯联系人, E-mail: yongjians1980@163.com)

## Effects of Slow-release Urea on Nitrogen Utilization and Yield in Mechanically-transplanted Rice under Different Nitrogen Application Rates

WANG Haiyue<sup>1</sup>, LI Yue<sup>1</sup>, SUN Yongjian<sup>1,\*</sup>, LI Yinghong<sup>1</sup>, JIANG Mingjin<sup>1</sup>, WANG Chunyu<sup>1</sup>, ZHAO Jianhong<sup>1</sup>, SUN Yuanyuan<sup>2</sup>, XU Hui<sup>1</sup>, YAN Fengjun<sup>1</sup>, MA Jun<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest China, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China; <sup>2</sup> Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China; \* Corresponding author, E-mail: yongjians1980@163.com)

**Abstract:** 【Objective】Effects of different nitrogen (N) application rates (150 kg/hm<sup>2</sup> and 180 kg/hm<sup>2</sup>) and slow-release urea on N utilization and grain yield and its physiological characteristics in mechanical transplanted rice were studied to lay a scientific base for high-efficient N utilization in mechanical transplanted rice. 【Method】Hybrid rice Chuan-guyou 7329 was used to investigate the effects of nitrogen (N) application rates and various slow-release urea ratios to conventional urea, (10 : 0, 7 : 3, 5 : 5, 3 : 7 and 0 : 10, respectively) on N utilization efficiency (NUE), grain yield and its physiological characteristics of mechanical-transplanted rice, as well as the correlation between N utilization, grain yield and physiological characteristics. 【Result】The results showed that N application rates and slow-release urea combined with conventional urea had significant effects on NUE and grain yield. The N utilization at jointing, heading, and filling stage, and the N translation amount of stem-sheath during filling stage had a significant positive correlation with dry matter weight, N accumulation, N apparent use efficiency, spikelet number per panicle and grain yield. Compared with conventional urea, slow-release urea or slow-release urea combined with conventional urea could significantly increase dry matter accumulation, N accumulation, photosynthetic potential, leaf area index (LAI), N apparent use efficiency, and N increment of panicle in mechanical-transplanted rice. 【Conclusion】According to grain yield and NUE, the higher grain yield and NUE were obtained at the N application rate of 180 kg/hm<sup>2</sup>, especially at the ratio of slow-release urea to conventional urea 7 : 3, 0.84%–26.59% and 0.28%–47.02% higher than that of other treatments, respectively. This treatment could also enhance the NUE and grain yield, which was the optimum N management in this experiment. Moreover, LAI, photosynthetic potential and dry matter accumulation decreased with the decline of the proportion of slow-release urea, and these indexes were the lowest in the treatment of whole conventional urea, which were not conducive to NUE and grain yield of mechanical-transplanted rice.

**Key words:** slow-release N fertilizer; mechanical-transplanted rice; N utilization; yield

**摘要:** 【目的】在高施氮水平和常规施氮水平下,研究缓释氮肥配施对机插稻氮素利用和产量的影响及其生理机制,为机插稻的氮肥高效利用提供依据。【方法】以中迟熟杂交籼稻川谷优 7329 为材料,采用二因素裂区设计,设置不同的施氮水平及 5 种缓释氮肥与常规氮肥(尿素)配施处理,并设置不施氮处理,分析不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素利用和产量的影响及其生理机制,并探讨氮素利用和产量与生理响应之间的关系。【结果】结果表明,施氮水平、缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素利用特征及产量均存在显著或极显著的影响,机插稻拔节、抽穗及结实期对氮素的吸收利用以及结实期茎鞘的氮素转运量与干物质质量、氮素积累量、氮肥表观利用率、每穗实粒数及最终产量显著或极显著正相关( $r = 0.38 \sim 0.69^{**}$ )。与常规氮肥运筹相比,缓释氮肥与常规氮肥配施、全缓释氮肥施用处理的机插稻成熟期干物质积累量、氮

收稿日期: 2016-05-02; 修改稿收到日期: 2016-07-28。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD07B13); 四川省教育厅重点项目(16ZA0044); 四川省科技支撑计划资助项目(2014NZ0040, 2014NZ0041, 2014NZ0047)。

素积累总量、光合势、叶面积指数、氮肥表观利用率及穗部氮素增加量均显著提高,进而促进增产。【结论】据产量及氮素利用效率表现,机插稻产量在 180 kg/hm<sup>2</sup> 施氮水平下较高,且在缓释氮肥与常规氮肥配施比例为 7:3 一次性施用时产量最高,较其他氮肥运筹产量高 0.84%~26.59%,氮肥表观利用率高 0.28%~47.02%,为最优氮肥运筹模式。但不同施氮水平下,随着缓释氮肥配施比例的降低,群体叶面积指数、光合势及物质积累等指标也降低,且在施氮处理为全常规氮肥时最低,均不利于机插稻氮肥利用效率及最终产量的提高。

**关键词：**缓释氮肥；机插稻；氮素利用；产量

**中图分类号：**S143.1；S511.062

**文献标识码：**A

**文章编号：**1001-7216(2017)01-0050-15

水稻是世界上单产最高、总产最多的粮食作物。随着人口增长和经济发展,据估计,到 2030 年世界水稻总产须较目前增加 60% 才能满足需求,我国则须在现有水平上提高 20%<sup>[1]</sup>。此外,面对农村劳动力转移的现状,急需水稻轻简化栽培技术。近几年,水稻机械化种植技术水平明显提高<sup>[2]</sup>,机插秧技术<sup>[3,4]</sup>是推动水稻机械化发展的关键技术之一,而与之配套的肥料施用、栽插密度、水分管理等配套栽培技术<sup>[5,6]</sup>是发展机械化生产的重要环节。

对于肥料的施用,尤其是氮肥的施用成为提高水稻产量的关键因素之一。为了实现高产,肥料的施用量大幅提高,但氮肥的利用率却降低,目前世界平均氮肥利用率约为 46%,而我国氮肥利用率仅为 30%~35%<sup>[7]</sup>。为此,众多学者在氮肥运筹<sup>[8]</sup>、测土配方施肥<sup>[9]</sup>、叶色诊断<sup>[10,11]</sup>等方面探索提高氮肥利用率的方法。随着研究的深入,缓释氮肥养分释放与调控,能满足作物整个生育期对氮肥的需求,以及省肥省工等特点,已成为增加粮食产量、节约氮肥的另一有效途径<sup>[12,13]</sup>,但对缓控释氮肥的种类<sup>[15]</sup>、配套施用技术<sup>[15,16]</sup>的研究以及水稻品种对缓控释氮肥的响应<sup>[17]</sup>也存在一定争议。邢晓鸣等<sup>[7]</sup>、李贵勇等<sup>[14]</sup>、彭玉等<sup>[15]</sup>研究表明,缓释氮肥“一道清”释放速率基本能与水稻生长发育的需肥规律同步,提高了氮素利用效率,并达到了增产的效果;也有研究表明杂交稻后期物质生产量大,需肥量也大,单靠缓释氮肥配施“一道清”的施肥方法无法满足其所需<sup>[16]</sup>。缓控释肥制作工艺复杂、价格高,某些缓控释肥前期释放速率慢,难以满足水稻前期对养分的需求;且目前针对缓释氮肥的研究主要集中于手插稻,对机插稻的研究及报道较少;缓释氮肥能否进一步提高机插稻产量及氮肥利用效率、常规氮肥能否以适宜比例替代缓释氮肥降低生产成本,以及缓释氮肥养分的释放是否符合机插稻的生长发育特性仍有待进一步研究。

为此,本研究在我们前期研究的基础上,进一步在机插秧条件下,明确施氮水平和缓释氮肥与常规

氮肥配施对机插稻光合生产、氮素利用特征和产量的影响及其生理机制,探索机插稻缓控释氮肥配施的最优管理模式,从而达到节约劳动力、减少生产成本,提高产量和氮肥利用效率的目的,为杂交稻机械化育、插秧配套技术的应用提供理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

在 2014 年研究<sup>[17]</sup>的基础上,于 2015 年在成都市温江区四川农业大学水稻研究所试验农场(30° 70'N,103° 83'E)进行完善和深入。试验田土壤质地为砂壤土,0—20 cm 土层有机质含量为 23.65 g/kg,全氮 1.62 g/kg,碱解氮 105.75 mg/kg,速效磷 62.54 mg/kg,速效钾 95.58 mg/kg。供试品种为中迟熟杂交籼稻川谷优 7329(生育期 156~165 d)。3 月 29 日播种,以钵体毯状秧盘(中国水稻研究所研制)早育秧,每盘播量 75.0 g,5 月 8 日,秧龄 4 叶 1 心,用久保田 SPU-48C 插秧机进行机插,行距×株距为 30 cm×16.5 cm。二因素裂区设计,施氮水平为主区:设 150 kg/hm<sup>2</sup> 和 180 kg/hm<sup>2</sup> 2 个水平,分别记为 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>;缓释氮肥(金正大树脂包膜缓释氮肥,含氮 44%)与常规氮肥(尿素)配施处理为副区:设 5 个配施比例,分别为 10:0、7:3、5:5、3:7、0:10,分别记为 R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>、R<sub>4</sub>、R<sub>5</sub>,并设不施氮(R<sub>0</sub>)处理。R<sub>1</sub>~R<sub>4</sub>处理氮肥运筹均作底肥一次性施入,R<sub>5</sub>按  $m_{\text{底肥}}:m_{\text{穗肥}}$  为 7:3 分次施用,穗肥于机插后 7 d 施用。磷肥(过磷酸钙)施用量(折合 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 75 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(氯化钾)施用量(折合 K<sub>2</sub>O) 150 kg/hm<sup>2</sup>,磷钾肥均作底肥一次性施入。田间小区计产面积 45.5 m<sup>2</sup>,重复 3 次,不同肥料处理小区间筑埂(宽 40 cm,高 30 cm)并用塑料薄膜包裹,以防肥水互渗,其他田间管理按当地大面积生产田进行。

### 1.2 测定项目和方法

#### 1.2.1 分蘖动态

各小区定点 20 穴稻株,自返青后至齐穗期每隔 7 d 调查分蘖数。

### 1.2.2 植株氮含量

于拔节期、齐穗及成熟期,按各小区平均茎蘖数取代表性植株5穴,分茎鞘、叶片、穗3部分烘至恒重并粉碎(过80目筛),用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 消煮,FOSS-8400凯氏定氮仪测定各器官氮含量。

茎鞘(叶片)氮素转运量(kg)=齐穗期茎鞘(叶片)氮积累量-成熟期(茎鞘)叶片氮积累量;

茎鞘(叶片)氮素转运率(%)=[茎鞘(叶片)氮转运量/齐穗期茎鞘(叶片)氮积累量] $\times 100\%$ ;

茎鞘(叶片)氮素贡献率(%)=[茎鞘(叶片)氮转运量/成熟期穗氮积累量] $\times 100\%$ ;

氮素收获指数(%)=(穗粒氮积累量/地上部分氮积累量) $\times 100\%$ ;

氮素干物质生产效率(kg/kg)=成熟期单位面积植株干物质/地上部分氮积累量;

氮素稻谷生产效率(kg/kg)=实际产量/地上部分氮积累量;

氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区实际产量/施氮量;

氮肥表观利用率(%)=[(施氮区地上部氮积累量-空白区地上部氮积累量)/施氮量] $\times 100\%$ ;

氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮区产量-空白区产量)/施氮量。

### 1.2.3 叶面积

将1.2.2中叶片用美国生产的CID-203叶面积仪测定绿叶面积,计算叶面积指数,其中高效叶面积为有效茎蘖上3叶总叶面积。

### 1.2.4 群体生长率及光合势

依据1.2.3的数据,按照李杰等<sup>[18]</sup>方法,计算拔节至齐穗期群体生长率及光合势。

### 1.2.5 光合特性

于齐穗后0 d、15 d和30 d,用美国生产的Li-6400便携式光合仪,测定剑叶净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ );并根据Fisher等<sup>[19]</sup>方法,计算表观叶肉导度(AMC)。控制条件如下: $\text{CO}_2$ 浓度 $400\text{ }\mu\text{mol/mol}$ ,温度 $30^\circ\text{C}$ ,光照 $1200\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。各小区测定5片具代表性的主茎剑叶的中部,每叶重复测定3次。

### 1.2.6 考种与计产

收获时各处理调查具代表性稻株60穴,计数有效穗数并计算平均值。再分别取代表性稻株5穴,考查实粒数、结实率和千粒重等性状。其中,千粒重测定方法如下:每穴稻穗脱粒阴干后,用我国生产的

小型种子风选机(CFY-11)除去杂质和秕谷,用微电脑自动数粒仪计数籽粒(SLY-A),然后再用日本生产的谷物水分测量仪(PM-8188 New)测定各处理稻谷含水量,折算成 $13.5\%$ 标准含水量)。各小区按实收株数计产。

## 1.3 数据分析

用Microsoft Excel、Origin 9.0及DPS 6.5处理系统分析数据及绘图。本研究就2015年数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻产量及其构成的影响

由表1可见,施氮水平和氮肥配施对机插稻产量的影响均达极显著水平,交互效应也达到显著水平。不同施氮水平下,施氮量为 $180\text{ kg}/\text{hm}^2$ 水稻产量显著高于 $150\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。同一施氮水平下,水稻产量均表现为缓释氮肥与常规氮肥配比为 $7:3$ ( $R_2$ ) $>10:0$ ( $R_1$ ) $>5:5$ ( $R_3$ ) $>3:7$ ( $R_4$ ) $>0:10$ ( $R_5$ ) $>$ 不施氮肥( $R_0$ ),且 $R_1$ 、 $R_2$ 显著高于其他处理。表明在施氮水平为 $180\text{ kg}/\text{hm}^2$ 下,缓释氮肥配施比例为 $7:3$ 有利于提高水稻产量,并可以替换 $30\%$ 的缓控氮肥达到节本高效目的。

由表1还可看出,除施氮水平对结实率以及氮肥配施对千粒重影响不显著外,施氮水平和氮肥配施对机插稻产量构成因素的影响均达显著或极显著水平。缓释氮肥与常规氮肥配施处理对有效穗数、每穗实粒数和结实率的影响显著高于施氮水平,而千粒重表现相反。整体来看,不同施氮水平下, $R_2$ 处理有较高的有效穗数、每穗实粒数,同时具有较好的结实率,最终获得较高产量。进一步优化计算,缓释氮肥与常规氮肥配施与产量呈极显著开口向下的二次线性关系(图1),不同施氮水平下,缓释氮肥配施与产量之间存在适宜值。在 $N_1$ 、 $N_2$ 处理下,产量达到最高时缓释氮肥比例分别为 $81.65\%$ 与 $80.65\%$ 。

### 2.2 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻分蘖动态的影响

由图2可见, $N_1$ 施氮水平下,分蘖盛期出现在返青后25 d,施氮水平为 $N_2$ 时,分蘖盛期出现在返青后35 d, $N_1$ 和 $N_2$ 处理间茎蘖数差异不显著。从缓释氮肥与常规氮肥配施来看,在拔节期间(返青后30~40 d)茎蘖数表现为缓释氮肥与常规氮肥配施

表 1 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻产量及其构成因素的影响

Table 1. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on yield and its components in mechanically-transplanted rice under different N application rates.

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number /(×10 <sup>4</sup> hm <sup>-2</sup> )	每穗实粒数 Filled spikelet number per panicle	结实率 Seed setting rate /%	千粒重 1000-grain weight /g	实际产量 Actual grain yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )
N <sub>1</sub>					
R <sub>0</sub>	226.3±0.5 d	116.2±0.6 d	90.98±0.78 a	36.13±0.18 a	9 491.2±168.6 d
R <sub>1</sub>	238.6±2.0 b	133.8±1.6 a	86.86±0.83 b	36.64±1.05 a	11 661.3±110.9 a
R <sub>2</sub>	254.5±5.6 a	130.2±1.4 b	86.57±0.59 b	36.45±0.40 a	11 808.6±66.2 a
R <sub>3</sub>	227.8±4.1 cd	135.9±1.8 a	84.83±1.14 c	37.01±1.03 a	11 424.7±355.2 b
R <sub>4</sub>	255.4±1.5 a	122.8±2.0 c	85.75±0.96 bc	36.44±0.83 a	11 408.2±192.8 b
R <sub>5</sub>	230.2±1.9 c	127.7±0.7 b	83.07±0.24 d	36.64±0.80 a	10 706.9±179.1 c
平均 Average	238.8±0.2	127.8±0.4	86.34±0.58	36.55±0.23	11 083.5±44.3
N <sub>2</sub>					
R <sub>0</sub>	226.3±0.5 d	116.2±0.6 d	90.98±0.78 a	36.13±0.18 a	9 491.2±168.6 d
R <sub>1</sub>	258.4±3.9 a	136.9±0.7 b	85.35±1.18 c	34.03±0.61 c	11 914.9±99.9 ab
R <sub>2</sub>	255.3±1.2 ab	142.4±1.5 c	87.39±0.86 b	34.49±0.26 c	12 015.4±26.2 a
R <sub>3</sub>	236.0±6.0 c	140.6±6.3 a	87.64±1.24 b	35.41±0.43 ab	11 704.6±22.9 b
R <sub>4</sub>	251.9±1.2 b	129.8±1.1 a	87.22±1.82 b	35.84±1.05 ab	11 696.9±32.8 b
R <sub>5</sub>	226.4±1.6 d	139.9±0.7 a	83.96±0.48 d	34.76±0.09 bc	10 999.2±78.6 c
平均 Average	242.4±1.7	134.3±0.9	87.09±0.20	35.11±0.16	11 303.7±30.3
F 值 F value					
N	14.43 *	75.51 *	2.95	436.12 **	125.34 **
R	107.37 **	83.02 **	36.75 **	1.75	184.32 **
N×R	12.68 **	7.30 **	3.28 *	2.82 *	2.79 *

N<sub>1</sub>—施氮量为 150 kg/hm<sup>2</sup>；N<sub>2</sub>—施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup>；R<sub>0</sub>—不施氮肥；R<sub>1</sub>—全量缓释氮肥；R<sub>2</sub>—缓释氮肥与常规肥配比为 7：3；R<sub>3</sub>—缓释氮肥与常规氮肥 5：5；R<sub>4</sub>—缓释氮肥与常规肥 3：7；R<sub>5</sub>—全尿素分次施用；N—施氮量；R—缓释氮肥与常规肥配施；N×R—施氮量与缓释氮肥常规肥配施交互。同列数据(平均数±标准差)后不同小写字母表示同一施肥水平下各处理数据在 5%水平上差异显著(n=3,最小显著差法)。\*, \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。

N<sub>1</sub>, 150 (N) kg/hm<sup>2</sup>；N<sub>2</sub>, 180 (N) kg/hm<sup>2</sup>；R<sub>0</sub>, 0(N)kg/hm<sup>2</sup>；R<sub>1</sub>, Slow-release N fertilizer；R<sub>2</sub>, Ratio of slow-release N and conventional N was 7：3；R<sub>3</sub>, Ratio of slow-release N and conventional N was 5：5；R<sub>4</sub>, Ratio of slow-release N and conventional N was 3：7；R<sub>5</sub>, Conventional N. N, N application level；R, Treatments of slow-release N and conventional N；N×R, Interaction of N application and treatments of release N and conventional N. The values (mean±SD) within a column followed by different lowercase letters are significantly different at P<0.05 (n=3, LSD). \* Significant at P<0.05；\*\* Significant at P<0.01. The same as in tables below.

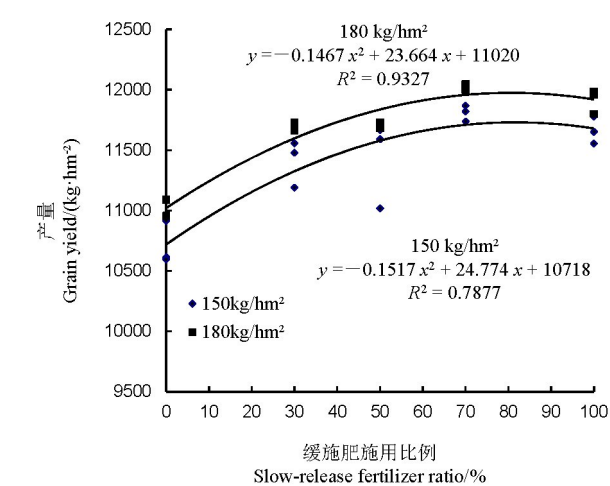


图 1 不同施氮水平下缓释肥与常规氮肥配施比例对机插稻产量的影响

Fig.1. Effects of ratios of slow-release urea to conventional urea on yield in mechanically-transplanted rice under different N application rates.

处理(R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>和 R<sub>4</sub>)>缓释氮肥单施(R<sub>1</sub>)>常规氮肥处理(R<sub>5</sub>)>R<sub>0</sub>,其中,在 N<sub>1</sub>处理下 R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>和 R<sub>4</sub>较 R<sub>5</sub>处理分别增加了 10.91%、4.09%、6.36%,在 N<sub>2</sub>处理下较 R<sub>5</sub>分别增加了 17.79%、9.14%、15.86%；R<sub>1</sub>与 R<sub>5</sub>差异不显著。从图 2 还可看出,R<sub>5</sub>处理于返青后 30 d 左右茎蘖数达到最高;缓释氮肥与常规氮肥配施及缓释氮肥单施于返青后 40 d 左右达到高峰,之后降幅较 R<sub>5</sub>处理大。

2.3 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻光合特性的影响

施氮水平、缓释氮肥配施,以及它们间的互作效应对机插稻剑叶光合特性的影响整体达到显著或极显著水平(表 2),尤其缓释氮肥配施对光合特性各指标的影响均达显著水平。在不同施氮水平下,剑叶净光合速率(P<sub>n</sub>)、气孔导度(G<sub>s</sub>)、表观叶肉导度(AMC)均在齐穗后随生育进程呈减小趋势,胞间

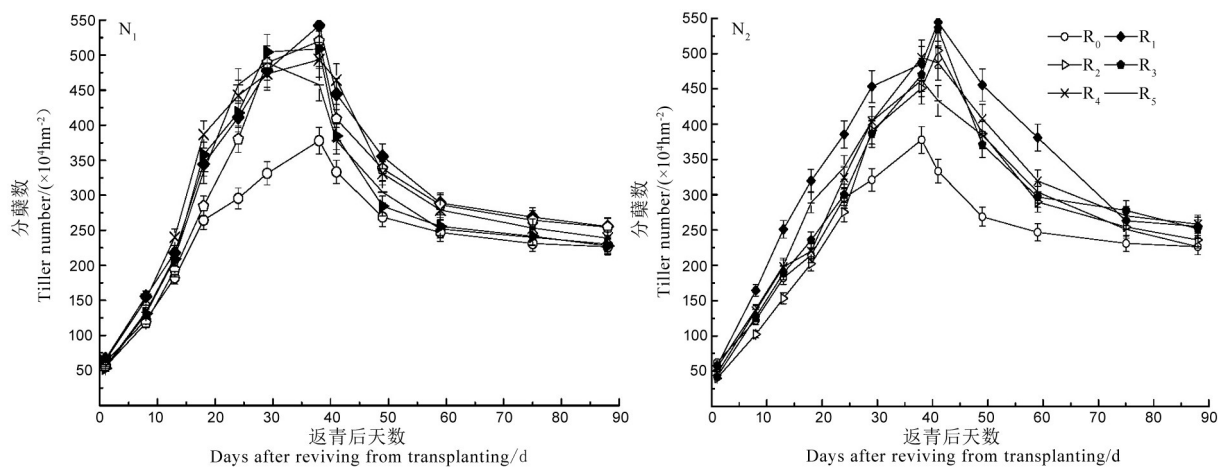


图 2 不同施氮量下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻分蘖动态的影响  
Fig. 2. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on the dynamic changes of stem and tiller numbers in mechanically-transplanted rice under different N application rates.

CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )整体变化与之相反。从相同施氮水平下不同缓释氮肥配施来看, $N_1$  处理下,剑叶  $P_n$ 、 $G_s$  和 AMC 整体上均表现为  $R_2 > R_1 > R_4 > R_3 > R_5 > R_0$ , 而  $C_i$  则在  $R_0$  处理下最高, $R_2$  处理下最低;在  $N_2$  施氮水平下, $P_n$  整体上和  $N_1$  施氮水平下一致; $G_s$  则在不同缓释氮肥配施下表现差异较大, $C_i$  在齐穗期和齐穗后 15 d 均表现为  $R_0 > R_3 > R_4 > R_2 > R_1 > R_5$ , 而在齐穗后 30 d,  $C_i$  分别在  $R_0$  和  $R_2$  时最高和最低。

2.4 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻光合生产的影响

由表 3 可见,施氮水平对齐穗期叶面积指数(LAI)、高效叶面积率和拔节到齐穗光合势的影响达显著水平,施氮水平与缓释氮肥配施互作效应对拔节期与齐穗期的 LAI、高效 LAI、齐穗期高效叶面积率、光合势和群体生长率的影响均达显著或极显著水平。从施氮水平来看,拔节期与齐穗期 LAI、齐穗期高效 LAI 和光合势均在  $N_2$  水平下相对较好,而齐穗期高效叶面积率和拔节-齐穗期群体生长率则在  $N_1$  水平下相对较优。从相同施氮水平下缓释氮肥配施来看, $N_1$  施氮水平下齐穗期 LAI 与高效 LAI、拔节-齐穗期光合势和群体生长率均在  $R_2$  下相对较优,在  $R_5$  下相对较差,拔节期 LAI 则在  $R_3$  下最优; $N_2$  施氮水平下拔节期 LAI、齐穗期与齐穗期高效 LAI,以及拔节-齐穗期光合势与  $N_1$  水平下表现相似。

2.5 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻干物质积累的影响

由表 4 可见,施氮水平对拔节期各器官干物质积累量、成熟期穗重及干物质积累总量的影响均达显著水平,缓释氮肥配施对不同生育期各器官干物质积累量均达显著或极显著水平,施氮水平与缓释氮肥配施的互作仅对齐穗期茎鞘干物质积累量、成熟期穗重以及齐穗期稻株干物质积累量的影响达显著水平。从不同施氮水平来看,除齐穗期穗重在  $N_1$  下略高外,不同生育时期各器官干物质积累量均表现为  $N_2 > N_1$ 。同一施氮水平下,缓释氮肥与常规氮肥配施对水稻不同生育期各器官的干物质积累量也有显著影响。当施氮水平为  $N_1$  时,拔节期茎鞘、叶片、植株总干物质积累量均在  $R_5$  下最低,显著低于  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$ ,齐穗期茎鞘、叶片、植株总干物质积累量和成熟期茎鞘干物质积累量在  $R_2$  和  $R_1$  处理下相对较高, $R_5$  和  $R_0$  下最低,差异达到显著水平。施氮水平为  $N_2$  时,拔节期叶片与植株总干物质积累量和齐穗期叶片、穗及植株干物质积累量均在  $R_1$  时最大,成熟期叶片、穗及植株干物质积累总量均在  $R_2$  时最大。

2.6 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素积累、转运与分配的影响

施氮水平、缓释氮肥配施以及它们之间的互作对机插稻拔节期、齐穗期的茎鞘与成熟期穗、植株的氮素积累量达到显著或极显著水平(表 5)。从不同

表 2 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻光合特性的影响

Table 2. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on photosynthetic characteristics in mechanically-transplanted rice under different N application rates.

处理 Treatment	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$			气孔导度 $G_s/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$		
	齐穗期	齐穗后 15 d	齐穗后 30 d	齐穗期	齐穗后 15 d	齐穗后 30 d
	FHS	15 d after FHS	30 d after FHS	FHS	15 d after FHS	30 d after FHS
N <sub>1</sub>						
R <sub>0</sub>	18.31±0.30 e	15.34±0.25 d	11.38±0.06 c	0.73±0.01 e	0.45±0.00 c	0.22±0.01 d
R <sub>1</sub>	22.74±0.16 b	19.43±0.46 a	15.26±0.24 a	1.04±0.04 b	0.84±0.02 a	0.56±0.04 a
R <sub>2</sub>	23.89±0.39 a	19.47±0.33 a	15.28±0.21 a	1.15±0.01 a	0.88±0.03 a	0.49±0.01 b
R <sub>3</sub>	21.21±0.67 c	18.48±0.42 ab	15.08±0.17 a	0.96±0.06 c	0.67±0.08 b	0.49±0.02 b
R <sub>4</sub>	21.47±0.35 c	18.53±0.10 ab	15.20±0.13 a	0.98±0.14 bc	0.68±0.04 b	0.51±0.01 b
R <sub>5</sub>	20.35±0.32 d	17.24±0.38 c	13.64±0.31 b	0.84±0.02 d	0.60±0.02 b	0.35±0.01 c
平均 Average	21.33±0.12	18.08±0.08	14.31±0.08	0.95±0.03	0.69±0.02	0.44±0.01
N <sub>2</sub>						
R <sub>0</sub>	18.31±0.30 e	15.34±0.25 e	11.38±0.06 d	0.73±0.01 e	0.45±0.00 d	0.22±0.01 e
R <sub>1</sub>	23.77±0.96 ab	18.43±1.25 ab	17.15±1.03 a	0.93±0.03 d	0.81±0.16 ab	0.55±0.00 a
R <sub>2</sub>	24.46±0.17 a	18.73±0.95 a	17.34±0.72 a	1.11±0.01 ab	0.51±0.01 cd	0.47±0.02 c
R <sub>3</sub>	21.67±0.73 d	17.48±1.63 bc	12.37±0.71 c	1.03±0.01 bc	0.84±0.15 a	0.51±0.00 b
R <sub>4</sub>	23.65±0.73 b	17.16±0.09 c	14.94±0.36 b	1.13±0.10 a	0.71±0.08 b	0.48±0.02 bc
R <sub>5</sub>	22.77±0.13 c	16.25±0.08 d	12.69±1.52 c	1.00±0.07 cd	0.59±0.03 c	0.42±0.00 d
平均 Average	22.44±0.15	17.23±0.31	14.31±0.48	0.99±0.00	0.65±0.01	0.44±0.00
F 值 F value						
N	572.79 <sup>**</sup>	18.17 <sup>*</sup>	0.00	5.89	33.33 <sup>*</sup>	0.79
R	86.96 <sup>**</sup>	22.75 <sup>**</sup>	65.24 <sup>**</sup>	28.38 <sup>**</sup>	16.68 <sup>**</sup>	225.38 <sup>**</sup>
N×R	5.08 <sup>**</sup>	0.61	14.30 <sup>**</sup>	4.58 <sup>**</sup>	7.38 <sup>**</sup>	5.43 <sup>**</sup>

处理 Treatment	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 $C_i/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$			表观叶肉导度 $\text{AMC}/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$		
	齐穗期	齐穗后 15 d	齐穗后 30 d	齐穗期	齐穗后 15 d	齐穗后 30 d
	FHS	15 d after FHS	30 d after FHS	FHS	15 d after FHS	30 d after FHS
N <sub>1</sub>						
R <sub>0</sub>	320.3±0.0 a	336.9±4.9 a	347.5±9.8 a	57.17±0.92 e	45.52±0.09 d	32.77±0.77 e
R <sub>1</sub>	312.4±1.0 c	315.7±0.6 c	313.1±2.1 c	72.81±0.74 b	61.53±1.56 a	46.27±1.48 c
R <sub>2</sub>	310.8±0.4 c	311.8±2.0 c	306.8±4.3 c	76.89±1.36 a	62.46±1.32 a	49.81±0.76 a
R <sub>3</sub>	315.5±1.4 b	324.7±2.1 b	327.8±2.7 b	67.22±1.86 c	56.92±1.58 b	48.17±0.85 b
R <sub>4</sub>	312.5±1.6 c	324.2±3.5 b	330.0±5.5 b	68.71±1.32 c	57.15±0.33 b	46.37±0.13 c
R <sub>5</sub>	315.6±0.6 b	330.6±1.2 a	339.7±1.9 a	64.50±1.12 d	52.13±1.35 c	40.15±1.06 d
平均 Average	314.5±0.3	324.0±0.4	327.5±0.4	67.88±0.39	55.95±0.26	43.93±0.27
N <sub>2</sub>						
R <sub>0</sub>	320.3±0.0 a	336.9±4.9 a	347.5±9.8 a	57.17±0.92 d	45.52±0.09 c	32.77±0.77 c
R <sub>1</sub>	297.1±1.3 d	293.3±0.5 d	312.7±3.5 bc	80.01±2.90 ab	62.82±4.15 a	54.82±2.69 a
R <sub>2</sub>	299.2±0.5 d	296.4±1.4 cd	304.7±13.0 c	81.73±0.72 a	63.20±3.48 a	57.04±4.79 a
R <sub>3</sub>	306.0±2.9 b	314.3±2.3 b	313.3±3.9 bc	70.82±3.05 c	55.58±4.79 b	39.50±2.77 c
R <sub>4</sub>	302.9±0.2 c	298.5±5.3 c	310.6±12.2 bc	78.09±2.38 b	57.50±0.72 b	48.16±3.06 b
R <sub>5</sub>	293.4±6.7 e	292.4±9.0 d	320.4±5.5 b	77.61±1.35 b	55.61±1.94 b	39.65±5.42 c
平均 Average	303.2±1.9	305.3±0.8	318.2±2.5	74.24±0.81	56.70±1.10	45.32±1.65
F 值 F value						
N	79.99 <sup>*</sup>	7350.34 <sup>**</sup>	61.05 <sup>*</sup>	186.73 <sup>**</sup>	1.19	1.73
R	57.47 <sup>**</sup>	49.79 <sup>**</sup>	21.53 <sup>**</sup>	114.34 <sup>**</sup>	41.82 <sup>**</sup>	51.76 <sup>**</sup>
N×R	20.44 <sup>**</sup>	14.41 <sup>**</sup>	2.26	10.11 <sup>**</sup>	0.67	8.79 <sup>**</sup>

FHS, Full heading stage;  $P_n$ , Net photosynthetic rate;  $G_s$ , Stomatal conductance;  $C_i$ , Inter-cellular CO<sub>2</sub> concentration; AMC, Apparent leaf mesophyll conductance.



表 3 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻光合物质生产的影响  
Table 3. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on photosynthetic production in mechanically-transplanted rice under different N application rates.

处理 Treatment	叶面积指数 LAI		齐穗期高效 叶面积指数 High effective	齐穗期高效 叶面积率 High effective	拔节-齐穗 光合势 Photosynthetic	拔节-齐穗 群体生长率 Crop growth
	拔节期 Jointing stage	齐穗期 Full heading stage	LAI at full heading stage	leaf area rate at full heading stage / %	potential at jointing-full heading	rate at jointing-full heading
					$/(\times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{hm}^{-2})$	$/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$
N <sub>1</sub>						
R <sub>0</sub>	2.37±0.45 b	3.21±0.13 d	2.04±0.08 e	63.52±0.14 f	94.76±8.01 c	20.89±0.38 b
R <sub>1</sub>	3.83±0.63 a	4.49±0.45 bc	3.38±0.34 bc	75.30±0.06 b	141.51±10.89 b	24.64±0.91 a
R <sub>2</sub>	4.10±0.59 a	6.13±0.64 a	4.64±0.48 a	75.83±0.04 a	173.89±20.91 a	25.64±0.44 a
R <sub>3</sub>	4.40±0.37 a	4.98±0.87 b	3.67±0.64 b	73.60±0.06 c	159.53±20.63 a	22.09±0.49 b
R <sub>4</sub>	4.06±0.34 a	4.22±0.43 bc	2.90±0.29 cd	68.71±0.07 d	140.74±12.93 b	22.37±0.18 b
R <sub>5</sub>	3.90±0.53 a	4.14±0.29 c	2.82±0.20 d	68.09±0.14 e	136.71±12.77 b	20.84±0.62 b
平均 Average	3.78±0.18	4.53±0.28	3.24±0.20	70.84±0.03	141.19±7.63	22.75±0.34
N <sub>2</sub>						
R <sub>0</sub>	2.37±0.45 c	3.21±0.13 c	2.04±0.08 c	63.52±0.14 d	94.76±8.01 c	20.89±0.38 bc
R <sub>1</sub>	4.25±0.56 ab	7.69±1.31 a	4.90±0.84 a	63.72±0.04 c	203.03±16.94 a	23.43±6.68 ab
R <sub>2</sub>	4.32±0.49 ab	7.87±0.69 a	5.02±0.44 a	63.79±0.03 c	207.16±18.34 a	24.26±2.75 a
R <sub>3</sub>	4.68±0.49 a	5.11±0.71 b	3.63±0.51 b	70.92±0.02 a	166.46±7.39 b	21.28±4.12 bc
R <sub>4</sub>	4.19±0.40 ab	5.09±0.09 b	3.61±0.06 b	70.83±0.09 a	157.91±5.58 b	20.08±4.39 c
R <sub>5</sub>	4.06±0.27 b	5.13±0.67 b	3.48±0.45 b	67.71±0.12 b	156.25±15.52 b	19.68±2.35 c
平均 Average	3.98±0.38	5.68±0.17	3.78±0.12	66.75±0.06	164.26±3.52	21.60±3.25
F 值 F value						
N	2.99	21.73 *	9.15	9683.17 **	57.24 *	0.32
R	21.53 **	24.62 **	28.45 **	7356.86 **	32.51 **	3.56 *
N×R	0.19	5.04 **	2.60	8108.31 **	3.70 *	3.37 *

LAI, Leaf area index.

施氮水平看,除齐穗期穗部氮素积累量表现为 N<sub>1</sub>>N<sub>2</sub>外,其余各器官在不同生育期氮素积累量均表现为 N<sub>2</sub>>N<sub>1</sub>。就缓释氮肥配施而言,当施氮水平为 N<sub>1</sub>时,拔节期茎鞘和叶片氮素积累量,以及该时期植株总氮素积累量均表现为 R<sub>1</sub>>R<sub>4</sub>>R<sub>2</sub>>R<sub>3</sub>>R<sub>5</sub>>R<sub>0</sub>;齐穗和成熟期各器官氮素积累量和相应时期植株总氮素积累量整体上表现为 R<sub>2</sub>>R<sub>1</sub>>R<sub>4</sub>>R<sub>3</sub>>R<sub>5</sub>>R<sub>0</sub>。当施氮水平为 N<sub>2</sub>时,除成熟期茎鞘、穗和植株氮素积累量分别在 R<sub>2</sub>时最高外,机插稻在不同生育时期各器官氮素积累量均以 R<sub>1</sub>最高,R<sub>5</sub>和 R<sub>0</sub>处理相对较低。

由表 6 可见,施氮水平仅对穗部氮素增加量的影响达到极显著水平,缓释氮肥配施及其与施氮水平的互作效应除对叶片氮素转运量、转运率与氮素贡献率的影响未达显著水平外,对其余氮素转运与氮素分配指标的影响均达到显著水平。从施氮水平看,叶片的氮素转运率和贡献率均在 N<sub>2</sub>时较低,且

氮素转运率显著低于 N<sub>1</sub>,而茎鞘氮素转运量、氮素转运率、氮素贡献率和穗部氮素增加量表现与之相反,在 N<sub>2</sub>时则增加,较 N<sub>1</sub>各指标分别增加 35.62%、12.79%、13.37%和 26.05%。

从缓释氮肥与常规氮肥配施来看,当施氮水平为 N<sub>1</sub>时,叶片氮素转运率在 R<sub>0</sub>时最大,R<sub>5</sub>时最小,叶片氮素贡献率在各配施比例下差异不显著,茎鞘和叶片及其他氮素转运与分配指标均在 R<sub>2</sub>配施比例下表现较好。当施氮水平为 N<sub>2</sub>时,茎鞘氮素转运量、转运率及贡献率均在 R<sub>1</sub>配施比例下最大,叶片氮素转运率及贡献率则在 R<sub>0</sub>配施比例下最大,而穗部氮素增加量则以缓释氮肥与常规氮肥配比为 7:3 处理最优。

**2.7 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素利用的影响**

除氮素收获指数和氮肥农学利用率外,施氮水平对机插稻氮素利用的影响均达显著或极显著水

表 4 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻干物质积累的影响

Table 4. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on biomass accumulation in mechanically-transplanted rice under different N application rates.

		茎鞘 Stem and sheath			叶片 Leaf		
处理							
Treatment		拔节期	齐穗期	成熟期	拔节期	齐穗期	成熟期
		JS	FHS	MS	JS	FHS	MS
N <sub>1</sub>							
	R <sub>0</sub>	1.61±0.04 b	6.59±0.14 d	4.60±0.21 b	1.12±0.05 c	1.85±0.04 b	1.46±0.08 b
	R <sub>1</sub>	2.21±0.09 a	8.07±0.06 ab	5.20±0.03 a	1.89±0.05 a	2.53±0.04 a	2.48±0.04 a
	R <sub>2</sub>	2.21±0.01 a	8.49±0.03 a	5.23±0.03 a	1.89±0.09 a	2.66±0.15 a	2.47±0.03 a
	R <sub>3</sub>	2.23±0.02 a	7.54±0.17 c	5.09±0.02 a	1.91±0.01 a	2.46±0.01 a	2.33±0.12 a
	R <sub>4</sub>	2.28±0.08 a	7.57±0.11 bc	5.17±0.03 a	1.97±0.07 a	2.48±0.03 a	2.37±0.16 a
	R <sub>5</sub>	1.76±0.03 b	6.75±0.23 d	4.88±0.04 ab	1.51±0.04 b	2.05±0.05 b	2.45±0.07 a
	平均 Average	2.05±0.01	7.50±0.36	5.03±0.03	1.71±0.03	2.34±0.03	2.26±0.03
N <sub>2</sub>							
	R <sub>0</sub>	1.61±0.04 d	6.59±0.14 d	4.60±0.21 b	1.12±0.05 c	1.85±0.04 c	1.46±0.08 c
	R <sub>1</sub>	2.55±0.54 ab	8.05±1.30 ab	5.37±0.31 a	2.34±0.58 a	3.12±1.18 a	3.28±0.08 a
	R <sub>2</sub>	2.35±0.30 bc	7.75±0.68 ab	5.43±0.55 a	2.17±0.35 ab	2.66±0.64 ab	3.46±1.09 a
	R <sub>3</sub>	2.73±0.29 a	7.56±0.21 bc	5.43±0.18 a	2.17±0.32 ab	2.66±0.73 ab	2.99±0.46 ab
	R <sub>4</sub>	2.55±0.35 ab	7.14±0.07 c	5.75±0.19 a	2.07±0.36 ab	2.47±0.84 b	2.98±0.34 ab
	R <sub>5</sub>	2.12±0.18 c	8.33±0.48 a	5.21±1.04 a	1.94±0.15 b	2.37±1.21 b	2.65±0.62 b
	平均 Average	2.32±0.08	7.57±0.04	5.30±0.13	1.97±0.11	2.52±0.76	2.80±0.29
F 值 F value							
	N	24.84 *	0.11	16.06	20.28 *	0.17	9.16
	R	11.59 * *	10.32 * *	3.74 *	13.44 * *	6.86 * *	12.31 * *
	N×R	0.77	5.28 * *	0.39	0.75	0.81	1.43

		穗 Panicle		植株 Plant		
处理						
Treatment		齐穗期	成熟期	拔节期	齐穗期	成熟期
		FHS	MS	JS	FHS	MS
N <sub>1</sub>						
	R <sub>0</sub>	1.39±0.05 d	8.91±0.05 c	2.73±0.08 b	9.83±0.14 c	14.96±0.34 b
	R <sub>1</sub>	1.89±0.21 a	9.69±0.06 a	4.10±0.14 a	12.48±0.17 ab	17.37±0.08 a
	R <sub>2</sub>	1.82±0.03 ab	9.74±0.05 a	4.10±0.08 a	12.97±0.21 a	17.44±0.06 a
	R <sub>3</sub>	1.65±0.04 c	9.64±0.04 a	4.14±0.02 a	11.65±0.16 b	17.06±0.06 a
	R <sub>4</sub>	1.66±0.04 bc	9.62±0.03 a	4.26±0.07 a	11.71±0.14 b	17.16±0.19 a
	R <sub>5</sub>	1.55±0.04 cd	9.30±0.02 b	3.27±0.06 b	10.36±0.25 c	16.62±0.10 a
	平均 Average	1.66±0.04	9.48±0.02	3.77±0.03	11.50±0.10	16.77±0.04
N <sub>2</sub>						
	R <sub>0</sub>	1.39±0.05 b	8.91±0.05 c	2.73±0.08 c	9.83±0.14 d	14.96±0.34 d
	R <sub>1</sub>	1.69±0.40 a	9.77±0.31 b	4.90±1.11 a	12.86±2.83 a	18.41±0.69 bc
	R <sub>2</sub>	1.54±0.12 ab	10.93±0.44 a	4.53±0.65 ab	11.96±1.38 abc	19.82±1.81 a
	R <sub>3</sub>	1.50±0.07 ab	10.72±0.21 a	4.89±0.60 a	11.72±0.89 bc	19.14±0.61 ab
	R <sub>4</sub>	1.50±0.06 ab	10.90±0.09 a	4.62±0.71 ab	11.12±0.79 c	19.63±0.52 a
	R <sub>5</sub>	1.62±0.05 a	9.97±0.60 b	4.07±0.30 b	12.32±1.15 ab	17.83±1.35 c
	平均 Average	1.54±0.08	10.20±0.14	4.29±0.19	11.63±1.13	18.30±0.41
F 值 F value						
	N	3.89	62.49 *	22.67 *	0.04	49.32 *
	R	5.24 * *	30.02 * *	12.53 * *	12.08 * *	19.75 * *
	N×R	1.27	8.15 * *	0.63	3.10 *	2.49

JS, Jointing stage; FHS, Full heading stage; MS, Maturity stage. The same as in tables below.



表 5 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素积累的影响

Table 5. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on N accumulation in mechanically-transplanted rice under different N application rates.

kg/hm <sup>2</sup>						
处理 Treatment	茎鞘 Stem and sheath			叶片 Leaf		
	拔节期	齐穗期	成熟期	拔节期	齐穗期	成熟期
	JS	FHS	MS	JS	FHS	MS
N <sub>1</sub>						
R <sub>0</sub>	14.82±0.62 d	30.69±0.63 d	18.94±0.85 d	31.68±1.36 c	31.88±0.59 c	9.91±0.57 c
R <sub>1</sub>	27.62±1.14 a	49.42±0.35 a	28.10±0.14 ab	58.29±1.43 a	51.26±0.72 ab	23.17±0.38 ab
R <sub>2</sub>	24.78±0.19 ab	53.76±0.22 a	29.22±0.16 a	57.17±2.81 a	58.80±3.27 a	24.51±0.30 a
R <sub>3</sub>	22.30±0.21 bc	40.51±0.88 b	25.17±0.10 c	53.99±0.04 ab	47.30±0.24 b	20.90±1.06 ab
R <sub>4</sub>	25.05±0.91 ab	40.68±0.59 b	26.23±0.14 c	58.24±1.99 a	49.25±0.67 ab	21.43±1.47 ab
R <sub>5</sub>	20.08±0.46 c	35.19±1.19 c	21.19±0.18 d	47.03±1.27 ab	37.14±0.91 c	19.43±0.50 b
平均 Average	22.44±0.14	41.71±0.21	24.81±0.12	51.07±0.70	45.94±0.53	19.89±0.29
N <sub>2</sub>						
R <sub>0</sub>	14.82±0.62 d	30.69±0.63 d	18.94±0.85 d	31.68±1.36 c	31.88±0.59 c	9.91±0.57 d
R <sub>1</sub>	37.27±7.84 a	70.68±11.42 a	29.19±1.66 ab	78.59±19.35 a	71.96±27.13 a	34.73±0.85 a
R <sub>2</sub>	28.44±3.66 b	52.99±4.66 b	29.76±3.02 a	68.09±11.20 ab	54.42±13.12 b	31.94±10.08 b
R <sub>3</sub>	31.51±3.44 b	49.92±1.42 b	24.37±0.78 c	65.21±9.47 b	57.41±15.70 b	29.50±4.58 b
R <sub>4</sub>	27.76±3.75 b	43.96±0.44 c	26.91±0.91 ab	58.31±10.08 b	50.98±17.41 b	30.77±3.50 b
R <sub>5</sub>	19.26±1.95 c	44.91±2.57 c	26.45±5.27 bc	60.12±4.68 b	49.75±25.35 b	18.28±4.27 c
平均 Average	26.51±1.26	48.86±2.83	25.94±0.60	60.33±3.88	52.73±16.31	25.85±2.78
F 值 F value						
N	28.15 *	18.93 *	13.49	23.78 *	0.49	11.97
R	23.70 **	54.94 **	21.75 **	15.29 **	12.83 **	28.62 **
N×R	3.06 *	8.76 **	1.67	1.47	2.52	3.71 *

处理 Treatment	穗 Panicle		植株 Plant		
	齐穗期	成熟期	拔节期	齐穗期	成熟期
	FHS	MS	JS	FHS	MS
N <sub>1</sub>					
R <sub>0</sub>	21.89±0.79 d	73.96±0.44 e	46.50±1.76 c	84.46±1.24 c	102.81±1.85 d
R <sub>1</sub>	31.89±3.42 a	115.27±0.68 b	85.91±2.55 a	132.56±3.24 a	166.55±0.84 a
R <sub>2</sub>	28.78±0.51 ab	119.80±0.63 a	81.95±2.68 a	141.34±3.99 a	173.53±0.57 a
R <sub>3</sub>	25.88±0.71 bc	100.27±0.37 c	76.29±0.17 ab	113.70±0.95 b	146.34±0.60 b
R <sub>4</sub>	26.34±0.58 bc	100.07±0.31 c	83.29±1.55 a	116.27±1.30 b	147.74±1.58 b
R <sub>5</sub>	24.02±0.55 cd	85.53±0.15 d	67.11±1.45 b	96.35±1.65 c	126.14±0.60 c
平均 Average	26.47±0.58	99.15±0.22	73.51±0.73	114.11±1.26	143.85±0.13
N <sub>2</sub>					
R <sub>0</sub>	21.89±0.79 c	73.96±0.44 e	46.50±1.76 d	84.46±1.24 c	102.81±1.85 e
R <sub>1</sub>	29.89±7.20 a	134.08±2.29 ab	115.86±27.19 a	172.53±45.07 a	198.01±4.78 a
R <sub>2</sub>	25.60±2.08 b	136.58±5.48 a	96.53±14.78 b	133.01±18.98 b	198.28±16.39 a
R <sub>3</sub>	25.49±1.08 b	130.80±2.54 b	96.72±12.86 b	132.82±16.81 b	184.66±5.60 b
R <sub>4</sub>	25.09±0.95 b	119.88±0.98 c	86.08±13.82 bc	120.03±17.07 b	177.56±4.48 c
R <sub>5</sub>	26.36±0.75 ab	108.66±6.56 d	79.39±6.27c	121.03±24.13 b	153.39±7.47 d
平均 Average	25.72±1.34	117.33±1.36	86.84±5.13	127.31±19.95	169.12±3.46
F 值 F value					
N	0.49	430.47 **	25.09 *	1.17	139.47 **
R	8.57 **	320.26 **	17.30 **	27.93 **	146.04 **
N×R	0.89	20.27 **	1.53	4.08 *	6.57 **

平,缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素利用的影响整体均达极显著水平(表 7)。从施氮水平看,氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率均随施氮量的增加而降低,氮素收获指数和氮肥表观利用率却与之相反。从缓释氮肥与常规氮肥配施看,施氮水平 N<sub>1</sub> 处理下,氮素

干物质生产效率、氮素稻谷生产效率均表现 R<sub>0</sub>>R<sub>5</sub>>R<sub>3</sub>>R<sub>4</sub>>R<sub>1</sub>>R<sub>2</sub>,且 R<sub>3</sub> 与 R<sub>4</sub>、R<sub>1</sub> 与 R<sub>2</sub> 差异不显著,氮肥偏生产力、氮肥农学及表观利用率均表现为缓释氮肥与常规氮肥配比为 7 : 3 处理最优,尤其在氮肥表观利用率方面 R<sub>2</sub> 较 R<sub>5</sub> 处理高 67.42%;当施氮量为 N<sub>2</sub> 时,氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产

表 6 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素转运的影响

Table 6. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on N translocation in mechanically-transplanted rice under different N application rates.

处理 Treatment	氮素转运量		氮素转运率		氮素贡献率		穗部氮素增加量
	N translation amount		N translation		N contribution		N increment
	/(kg·hm <sup>-2</sup> )		efficiency/%		rate/%		
	茎鞘	叶片	茎鞘	叶片	茎鞘	叶片	in panicle
	Stem and sheath	Leaf	Stem and sheath	Leaf	Stem and sheath	Leaf	/(kg·hm <sup>-2</sup> )
N <sub>1</sub>							
R <sub>0</sub>	11.75±0.98 b	21.97±0.61 b	38.27±2.85 bc	68.93±1.61 a	15.89±1.40 bc	29.71±0.90 a	52.07±0.36 e
R <sub>1</sub>	21.31±0.26 a	28.09±0.67 ab	43.13±0.26 ab	54.79±0.77 bc	18.49±0.17 ab	24.36±0.44 ab	83.39±3.29 b
R <sub>2</sub>	24.54±0.07 a	34.29±3.05 a	45.64±0.07 a	58.25±2.02 ab	20.48±0.10 a	28.63±2.56 a	91.02±0.85 a
R <sub>3</sub>	15.34±0.95 b	26.40±0.97 ab	37.85±1.52 bc	55.82±2.14 bc	15.30±1.01 bc	26.33±0.88 ab	74.39±0.41 c
R <sub>4</sub>	14.45±0.45 b	27.82±1.78 ab	35.51±0.60 c	56.47±3.19 bc	14.44±0.46 c	27.80±1.80 a	73.73±0.80 c
R <sub>5</sub>	14.00±1.06 b	17.72±0.82 c	39.74±1.65 abc	47.69±1.38 c	16.36±1.22 bc	20.72±0.93 b	61.50±0.67 d
平均 Average	16.90±0.09	26.05±0.81	40.03±0.07	56.99±0.96	16.83±0.05	26.26±0.65	72.68±0.38
N <sub>2</sub>							
R <sub>0</sub>	11.75±0.98 d	21.97±0.61 bc	38.27±2.85 b	68.93±1.61 a	15.89±1.40 bc	29.71±0.90 a	52.07±0.36 e
R <sub>1</sub>	41.49±9.87 a	37.23±26.43 a	58.24±4.24 a	47.74±16.13 bc	30.86±6.80 a	27.58±19.13 ab	104.19±5.09 b
R <sub>2</sub>	23.23±2.80 b	22.48±19.47 bc	43.83±3.24 b	38.19±27.55 de	17.08±2.76 bc	16.86±15.03 c	110.98±6.69 a
R <sub>3</sub>	25.55±2.13 b	27.91±19.06 abc	51.13±2.85 a	45.45±18.55 cd	19.53±1.56 b	21.23±14.18 bd	105.30±1.93 a
R <sub>4</sub>	17.05±0.70 c	20.21±20.76 c	38.78±1.73 b	33.85±26.09 e	14.22±0.50 c	16.85±17.25 c	94.79±1.92 c
R <sub>5</sub>	18.47±7.45 c	31.47±26.51 ab	40.62±15.04 b	56.51±20.24 ab	16.89±6.53 bc	28.09±22.03 c	82.30±7.30 d
平均 Average	22.92±3.31	26.88±18.67	45.15±3.47	48.44±17.93	19.08±2.38	23.39±14.68	91.61±0.64
F 值 F value							
N	9.79	0.00	6.44	1.19	2.21	0.11	1096.16**
R	28.31**	1.75	7.14**	8.56**	10.01**	1.51	133.08**
N×R	9.28**	2.84	3.66*	1.94	6.31**	3.05*	10.94**

效率均在 R<sub>0</sub> 时最高, R<sub>1</sub> 时最低, R<sub>0</sub> 比 R<sub>1</sub> 分别高 56.61%、53.37%, 而氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮肥表观利用率均以缓释氮肥与常规氮肥配比为 7:3 最优, 且均表现为 R<sub>2</sub>>R<sub>1</sub>>R<sub>3</sub>>R<sub>4</sub>>R<sub>5</sub>。

2.8 氮素利用特征与物质积累、产量的关系

由表 8 可见, 不同生育时期稻株氮素积累量及结实期茎鞘氮素转运量与总干物质量、氮素积累量、氮肥表观利用率、每穗实粒数和产量均呈极显著正相关。结实期净光合速率、拔节-齐穗期光合势整体上与总干物质量、总氮素积累量、氮肥农学利用率、氮肥表观利用率、每穗实粒数及产量呈极显著正相关, 而拔节-齐穗期群体生长率与各指标均未达到显著水平。表明缓释氮肥与常规氮肥配施下利于提高机插稻氮素的利用及结实期的光合性能, 能促进物质向籽粒的转运, 增加每穗实粒数及物质积累量, 进而提高产量及氮肥利用效率。

3 讨论

3.1 施氮水平和缓释氮肥配施对机插稻产量形成的影响

水稻产量的形成与群体茎蘖动态、光合特性、物

质积累及转运能力和产量构成因素等密切相关。杨建昌等<sup>[20]</sup>指出超高产水稻生育前期茎蘖数较少, 但分蘖成穗率较高; 前期 LAI、干物质累积等表现为前期生长较慢, 抽穗期适中, 抽穗后显著增加。李刚华等<sup>[21]</sup>指出常规超级粳稻高产群体在抽穗期具有适宜 LAI 和较好株型, 抽穗后群体生长率高, 生育后期干物质量占籽粒产量 70%~80%。本研究表明, 随着施氮量的增加, 群体茎蘖数达到分蘖盛期时间提前, 而拔节期缓释氮肥与常规氮肥配施处理的有效茎蘖数明显大于全常规氮肥处理。这可能是因不同施肥水平下, 分蘖盛期缓释氮肥肥力释放速度慢, 优势不明显, 且前期过多的速效氮肥供应也不利于稻株的利用, 易渗漏流失, 导致不同施肥水平下前期茎蘖数差异不显著; 而拔节期前后缓释氮肥缓慢释放, 植株对氮素的吸收利用率高, 有效茎蘖数有所提高。本研究还表明, 植株光合特性、LAI 和干物质积累量等整体上均在高施氮水平下表现较优, 且缓释氮肥与常规氮肥配施优于全常规氮肥处理; 原因可能是随生育期的推移, 缓释氮肥与常规氮肥配施、氮肥的分解和释放与机插稻需肥关键期契合, 提高了氮素的利用效率, 有利于植株光合生产和干物质

表 7 不同施氮水平下缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素利用的影响

Table 7. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on N use efficiency in mechanically-transplanted rice under different N application rates.

处理 Treatment	氮素收获指数 NHI/%	氮素干物质 生产效率 NBPE /( kg · kg <sup>-1</sup> )	氮素稻谷 生产效率 NGPE /( kg · kg <sup>-1</sup> )	氮肥偏生产力 NPP /( kg · kg <sup>-1</sup> )	氮肥农学利用率 NAE /( kg · kg <sup>-1</sup> )	氮肥表观利用率 NAUE /%
N <sub>1</sub>						
R <sub>0</sub>	71.95±0.87 a	145.60±0.66 a	92.33±1.23 a	—	—	—
R <sub>1</sub>	69.21±0.25 ab	104.27±0.14 d	70.02±0.65 d	77.74±0.74 a	14.47±1.51 a	42.49±1.69 a
R <sub>2</sub>	69.04±0.23 ab	100.52±0.08 d	68.05±0.57 d	78.72±0.44 a	15.45±1.55 a	47.15±0.88 a
R <sub>3</sub>	68.52±0.52 b	116.62±0.04 c	78.07±2.60 c	76.17±2.37 b	12.89±3.37 b	29.02±1.17 b
R <sub>4</sub>	67.74±0.75 b	116.13±0.06 c	77.23±1.91 c	76.05±1.29 b	12.78±0.26 b	29.95±2.29 b
R <sub>5</sub>	67.80±0.39 b	125.44±1.55 b	84.88±1.30 b	71.38±1.20 c	8.11±0.71 c	15.56±1.18 c
平均 Average	69.05±0.17	118.10±0.36	78.43±0.31	76.01±0.33	12.74±1.25	32.83±1.41
N <sub>2</sub>						
R <sub>0</sub>	71.95±0.87 a	145.60±0.66 a	92.33±1.23 a	—	—	—
R <sub>1</sub>	67.72±0.50 b	92.97±1.37 c	60.20±1.57 e	66.20±0.56 ab	13.47±1.44 ab	52.89±2.98 a
R <sub>2</sub>	69.07±3.76 ab	104.45±8.84 b	60.87±4.86 de	66.75±0.14 a	14.02±0.92 a	53.04±8.08 a
R <sub>3</sub>	70.86±2.07 a	103.61±0.70 b	63.42±1.99 cd	65.03±0.13 b	12.29±0.99 b	45.48±2.11 b
R <sub>4</sub>	67.54±1.64 b	110.59±0.44 b	65.90±1.59 c	64.98±0.18 b	12.25±0.76 b	41.53±1.57 b
R <sub>5</sub>	70.94±5.10 a	107.03±16.90 b	71.84±4.01 b	61.11±0.44 c	8.38±0.65c	28.10±5.07 c
平均 Average	69.68±1.36	110.71±1.15	69.09±0.93	64.81±0.05	12.08±0.93	44.21±1.09
F 值 F value						
N	0.43	63.85 *	377.60 **	4528.56 **	8.80	53.69 *
R	3.09 *	49.29 **	103.00 **	32.23 **	32.12 **	51.05 **
N×R	1.12	3.00 *	6.47 **	0.51	0.51	1.26

NHI, N harvest index; NBPE, N use efficiency for biomass production; NGPE, N use efficiency for grain production; NPP, Partial factor productivity of applied N; NAE, N agronomy efficiency; NAUE, N apparent use efficiency.

积累,增加了稻谷产量;这与前人研究<sup>[22]</sup>提出的以足量大穗形成高群体质量是实现水稻高产的基础是相似的,这也进一步证实了缓控释氮肥配施有利于机插稻高产的形成。前人研究认为增加穗数和每穗粒数或两者均提高水稻群体颖花量<sup>[23-24]</sup>;韦还和等<sup>[25]</sup>研究表明,杂交稻形成高产需要提高穗数和每穗粒数的协同作用来提高群体颖花量;张洪程等<sup>[26]</sup>研究指出,杂交粳稻超高产需要以足量的穗数与较大的穗型协调出较高的群体总颖花量。本研究表明,在不同施氮量和缓释氮肥与常规肥配施均为 7 : 3 下,机插稻产量相对于其他处理均显著增产,但实现高产的途径不同:在施氮量为 150 kg/hm<sup>2</sup> 缓释氮肥与常规氮肥配施比例为 7 : 3 时,主要是通过增加有效穗数和千粒重来平衡产量构成因素从而获得高产;而在施氮水平为 180 kg/hm<sup>2</sup> 缓释氮肥与常规氮肥配施比例为 7 : 3 时,每穗实粒数则成为保证产量的主要因素。虽然机插稻在施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup> 时的产量高于施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>,但是每穗实粒数和千粒重却有较大的差异,每穗实粒数在

180 kg/hm<sup>2</sup> 时更高,千粒重则相反,因此在保证足够库容的基础上,千粒重成为增产的主要限制因素,还应进一步保证缓控释氮肥配施对机插稻后期灌浆的营养供应。此外,本研究参考前期研究<sup>[15]</sup>,以及近年对研究区域 73 个县(市)水稻示范区、辐射区生产肥料用量的调查结果,高产平均施氮量均为 180 kg/hm<sup>2</sup>,而本研究设想通过缓控释肥的配施达到减氮增产的效果,但施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup> 下,减氮增产效果尚不明显,而通过本研究缓控释氮肥配施,达到了在平均施氮量下,进一步提高机插稻氮肥利用效率及产量的效果,可为中迟熟杂交稻机械化育插秧配套技术的优化集成提供理论和实践依据。而今后是否可通过提高机插密度和氮肥减量下缓控释氮肥配施,进一步提高产量的同时降低施氮量,还有待于进一步研究。同时,本研究将缓释氮肥处理运筹均是作底肥一次性施入,与目前常规施肥处理(R<sub>5</sub>)对比研究,结果也可以看出中迟熟品种在施氮量 180 kg/hm<sup>2</sup> 缓释氮肥与常规氮肥配施比例为 7 : 3 时,其结实率和千粒重相对其他处理较低,仍有提升的

表 8 氮素积累转运、光合生产与干物质量、氮素利用特征及产量的相关性

Table 8. Correlation coefficients between N accumulation translocation, photosynthetic production and N use efficiency, dry matter, and yield.

指标 Index	总干物质量 Dry matter amount	总氮素 积累量 N accumulation	氮肥农学 利用率 NAE	氮肥表观 利用率 NAUE	每穗实粒数 Spikelet number panicle	产量 Grain yield
氮素积累量 N accumulation amount						
拔节期 JS	0.70**	0.85**	0.39*	0.64**	0.70**	0.83**
齐穗期 FHS	0.56**	0.77**	0.40*	0.65**	0.60**	0.73**
成熟期 MS	0.90**	1.00**	0.50**	0.97**	0.78**	0.91**
结实期氮素转运量 N translocation amount						
茎鞘 Stem-sheath	0.42*	0.69**	0.38*	0.61**	0.54**	0.59**
叶片 Leaf	0.02	0.17	0.17	0.14	0.18	0.20
结实期净光合速率 P <sub>n</sub>						
齐穗期 FHS	0.77**	0.89**	0.48**	0.75**	0.72**	0.89**
齐穗后 15 d 15 d after FHS	0.42**	0.62**	0.72**	0.38*	0.49**	0.78**
齐穗后 30 d 30 d after FHS	0.58**	0.72**	0.56**	0.52**	0.50**	0.78**
拔节-齐穗光合势 Photosynthetic potential	0.71**	0.86**	0.36*	0.65**	0.78**	0.82**
拔节-齐穗群体生长率 Crop growth rate	0.01	0.15	0.10	0.10	0.16	0.19

NAE, N agronomy efficiency; NAUE, N apparent use efficiency.

可能,是否与缓释肥后期脱氮有关?在今后研究中,应进一步开展缓释氮肥与常规速效氮肥配施与分期施用,以及不同熟期品种需氮特征来进行配施比例的研究。

3.2 机插稻氮素利用特征与产量形成指标之间的关系

胡春华等<sup>[27]</sup>研究表明,在相同施氮量下,不同缓释材料研制的缓释氮肥对水稻增产效果和氮素利用率不同,这主要是由于施肥方法、肥料品种、土壤性状、气候条件等多种因素的影响。彭玉等<sup>[15]</sup>认为,施用缓控释氮肥能有效促进水稻对氮素的吸收与利用,提高花后根系活力及成穗率,使植株中的氮素转运畅通。本研究表明,在施氮水平为 180 kg/hm<sup>2</sup> 时中迟熟杂交稻氮素积累、茎鞘氮素转运和贡献及穗部氮素增加量较施氮水平为 150 kg/hm<sup>2</sup> 高,氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率、氮肥偏生产力及氮肥农学利用率均随施氮水平的升高而降低,这与前人研究结果一致<sup>[28]</sup>,而氮素收获指数和氮肥表观利用率则表现相反。这可能是由于成熟期植株氮素的吸收、转运、分配降低所致。在不同施氮水平和缓释氮肥与常规氮肥配施比例下,机插稻因环境和土壤所含微生物及养分不同对氮素的吸收、转运和分配利用也会有所差异。成熟期氮素积累量、穗部氮素增加量、氮肥偏生产力及氮肥农学利用率均在缓释氮肥与常规氮肥配施比例为 7:3 时表现最优;而叶片氮素转运率、贡献率均在不施氮肥

时表现最高,在全缓释氮肥最低。其原因可能是水稻的群体质量发生了变化、对温光的利用效率不同,促使叶片对氮素吸收利用率的变化,导致生育期植株的各器官氮素积累、分配、转运及生产效率的差异。

彭玉等<sup>[15]</sup>研究表明,在不同的灌水与缓控释氮肥管理模式下,人工栽插稻氮素吸收、转运及氮效率与干物质及产量密切相关。李玥等<sup>[17]</sup>研究也表明,在不同的机插稻品种与缓控释氮肥运筹模式下,机插稻氮素的吸收、转运及氮素的利用与干物质量、产量及构成因素关系密切。前人研究<sup>[29-31]</sup>表明,产量与结实期干物质积累量呈极显著正相关。本研究进一步证明,在不同的施氮水平和缓释氮肥与常规氮肥配施下机插杂交稻氮素吸收、转运与干物质量、氮肥利用率、产量及其构成因素紧密相关;但结实期群体生长率与氮素积累量、转运量与干物质量、氮肥表观利用率、每穗实粒数和产量均未达到显著水平,这可能与本研究以结实期作为一个整体时间段来计算,而结实期间群体生长速率不同阶段可能不太一致有关,后续研究应进一步细化明确结实期间不同阶段的群体生长特性,明确对产量影响显著的群体生长关键阶段。此外,霍中洋等<sup>[32]</sup>研究指出,在保持茎鞘氮素积累量的基础上,提高叶片和穗部氮素积累量,有利于获得高产。本研究相关分析还表明,缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素的吸收及转运均具有重要作用,而氮素的吸收、茎鞘氮素转运及

结实期光合速率、光合势又与氮肥表观利用率、每穗实粒数和产量极显著正相关,因此缓释氮肥与常规氮肥配施对提高水稻产量有很大潜力。施用全缓释氮肥,前期养分释放慢,导致分蘖不足或无效分蘖增多,影响干物质积累和产量的提高;施用全常规氮肥,营养生长前期氮素过多无效分蘖多,导致氮素在叶和茎鞘的无效固定和过度消耗,而后期氮肥严重缺乏,使植株的光合作用及氮素的吸收、运转和分配不协调,茎叶转运速率降低,大量的氮素滞留在营养器官致使氮素利用效率降低,对群体干物质质量和产量均造成不利影响。根据本研究结果,机插条件下,适宜比例缓释氮肥与常规氮肥配施优势可能的生理机制如下:前期适量的常规速效氮肥弥补了缓释氮肥的不足,促进了稻株的返青、分蘖及干物质的积累,拔节期、结实期缓释氮肥的释放进一步促进机插稻的光合作用,提高了群体光合速率和光合势,更利于氮素转运、再分配到籽粒中,在保证千粒重及结实率的基础上,显著提高了每穗实粒数,形成“源库流”协调的高产群体,因而提高稻谷生产效率、产量及氮肥利用率,是利用缓控释氮肥进一步提高机插杂交稻高产、氮高效利用的重要途径。

## 4 结论

施氮水平和缓释氮肥与常规氮肥配施对机插稻氮素利用特征、产量及生理特性的影响均达显著或极显著水平,且存在显著的互作效应。本研究中,以 $180\text{ kg/hm}^2$ 施氮量耦合缓释氮肥与常规氮肥配施比例为7:3一次性配施为最优氮肥运筹模式,能进一步提高机插稻的氮肥利用效率及最终产量,可实现机插稻产量和氮肥利用率的同步提高。机插杂交稻主要生育时期对氮素的吸收利用,以及结实期茎鞘的氮素转运量与机插稻干物质、氮素积累量、氮肥表观利用率、每穗实粒数及最终产量间存在显著或极显著正相关性;尤其结实期机插杂交稻更利于氮素转运、再分配到籽粒中,能显著提高每穗实粒数、提高稻谷生产效率及氮肥利用效率,是利用缓控释氮肥进一步提高机插杂交稻高产、氮高效利用的重要途径。

## 参考文献:

[1] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod Sci*, 2009, 12(1): 3-8.

[2] 朱德峰, 陈惠哲. 水稻机插秧发展与粮食安全. 中国稻米, 2009(6): 4-7.  
Zhu D F, Chen H Z. The development and food security of mechanical-transplanted rice. *China Rice*, 2009(6): 4-7. (in Chinese with English abstract)

[3] 刘利, 雷小龙, 黄光忠, 刘代银, 任万军. 机械化播种对杂交稻氮素积累分配及碳氮比的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 831-844.  
Liu L, Lei X L, Huang G Z, Liu D Y, Ren W J. Influences of mechanical sowing and transplanting on nitrogen accumulation, distribution and C/N of hybrid rice cultivars. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20(4): 831-844. (in Chinese with English abstract)

[4] 雷小龙, 刘利, 刘波, 黄光忠, 郭翔, 马荣朝, 任万军. 机械化种植对杂交水稻F优498产量构成与株型特征的影响. 作物学报, 2014, 40(4): 719-730.  
Lei X L, Liu L, Liu B, Huang G Z, Guo X, Ma R Z, Ren W J. Effects of mechanized planting methods on yield components and plant type characteristics of indica hybrid rice F you 498. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(4): 719-730. (in Chinese with English abstract)

[5] 孙永健, 马均, 孙园园, 杨志远, 徐徽, 熊洪, 徐富贤. 施氮量和株距对机插杂交稻结实期养分转运和产量的影响. 核农学报, 2014, 28(8): 1510-1520.  
Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, Yang Z Y, Xu H, Xiong H, Xu F X. Effects of nitrogen application rates and plant spacing on nutrient translocation during filling stage and yield of mechanical-transplanted hybrid rice. *J Nucl Agric Sci*, 2014, 28(8): 1510-1520. (in Chinese with English abstract)

[6] 霍晓玲, 周虹, 袁勇, 胡剑锋, 任万军. 秧板处理及育秧方式对机插杂交稻秧苗生长、产量及育秧成本的影响. 杂交水稻, 2014, 29(2): 51-56.  
Huo X L, Zhou H, Yuan Y, Hu J F, Ren W J. Effects of Seedbed-preparing and seedling-raising methods on seedling growth, grain yield and seedling-raising cost in machine-transplanted hybrid rice. *Hybrid Rice*, 2014, 29(2): 51-56. (in Chinese with English abstract)

[7] 邢晓鸣, 李小春, 丁艳锋, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 丁承强, 李刚华, 魏广彬. 缓控释肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响. 中国农业科学, 2015, 48(24): 4892-4902.  
Xing X M, Li X C, Ding Y F, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Li G H, Wei G B. Effects of types of controlled released nitrogen and fertilization modes on yield and dry mass production. *Sci Agric Sin*, 2015, 48(24): 4892-4902. (in Chinese with English abstract)

[8] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 杨志远, 程洪彪, 贾现文, 马均. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响. 作物学报, 2011, 37(12): 2221-2232.  
Sun Y J, Sun Y Y, Liu S J, Yang Z Y, Cheng H B, Jia X W, Ma J. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in



- rice. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(12): 2221-2232. (in Chinese with English abstract)
- [9] 黎远文, 冯兴, 成美琴. 测土配方施肥对水稻产量及化肥利用率的影响. *南方农业*, 2014, 8(19): 25-27.  
Li Y W, Feng X, Cheng M Q. Effects of testing soil for formulated fertilization on rice grain yield and chemical fertilizer use efficiency. *South China Agric*, 2014, 8(19): 25-27. (in Chinese with English abstract)
- [10] Wang L J, Sun M Q, Niu D. Physiology and biochemistry changes of *Euphorbia pulcherrima* during leaf color transformation. *J Northeast Agric Univ: English Ed*, 2010, 17(2): 48-54.
- [11] 欧立军. 水稻叶色突变体的高光合特性. *作物学报*, 2011, 37(10): 1860-1867.  
Ou L J. High Photosynthetic efficiency of leaf colour mutant of rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron Sin*, 2011, 37(10): 1860-1867. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郑圣先, 聂军, 熊金英, 肖剑, 罗尊长, 易国英. 控释肥料提高氮素利用率的作用及对水稻效应研究. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1): 11-16.  
Zheng S X, Nie J, Xiong J Y, Xiao J, Luo Z C, Yi G Y. Study on role of controlled release fertilizer in increasing the efficiency of nitrogen utilization and rice yield. *Plant Nutr Fert Sci*, 2001, 7(1): 11-16. (in Chinese with English abstract)
- [13] 谢春生, 唐拴虎, 徐培智, 张发宝, 陈建生. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 2177-2182.  
Xie C S, Tang S H, Xu P Z, Zhang F B, Chen J S. Effects of single basal application of controlled-release fertilizers on growth and yield of rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2006, 12(2): 2177-2182. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李贵勇, 高森, 梁鸭红, 资月娥, 常小洋, 杨翠玲, 何兴林, 相罕章, 黄军, 夏琼梅, 龙瑞平, 朱海平, 杨从党. 控释肥用量对水稻干物质积累和产量的影响. *中国稻米*, 2015, 21(4): 88-90.  
Li G Y, Gao S, Luan Y H, Zi Y E, Chang X X, Yang C L, He X L, Xiang H Z, Huang J, Xia Q M, Long R P, Zhu H P, Yang C D. Effects of different controlled-release fertilizer amount on dry matter production and grain yield of rice. *China Rice*, 2015, 21(4): 88-90. (in Chinese with English abstract)
- [15] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 徐徽, 秦俭, 杨志远, 马均. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响. *作物学报*, 2014, 40(5): 859-870.  
Peng Y, Sun Y J, Jiang M J, Xu H, Qin J, Yang Z Y, Ma J. Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(5): 859-870. (in Chinese with English abstract)
- [16] 田小海, 马国辉, 杨令芝, 肖宇, 王晓玲, 徐凤英, 吴晨阳. 缓释氮肥对超级杂交稻后期生长与生理功能的影响. *杂交水稻*, 2010, 25(5): 64-69.  
Tian X H, Ma G H, Yang L Z, Xiao Y, Wang X L, Xu F Y, Wu C Y. Effects of slow release nitrogen fertilizer on growth and physiological functions in the late stage of super hybrid rice. *Hybrid Rice*, 2010, 25(5): 64-69. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李玥, 李应洪, 赵建红, 孙永健, 徐徽, 严奉君, 谢华英, 马均. 缓控释氮肥对机插稻氮素利用特征及产量的影响. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2015, 41(6): 673-684.  
Li Y, Li Y H, Zhao J H, Sun Y J, Xu H, Yan F J, Xie H Y, Ma J. Effects of slow-and controlled-release fertilizer on nitrogen utilization characteristics and yield of machine-transplanted rice. *J Zhejiang Univ*, 2015, 41(6): 673-684. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李杰, 张洪程, 常勇, 龚金龙, 郭振华, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究. *作物学报*, 2011, 37(7): 1235-1248.  
Li J, Zhang H C, Chang Y, Gong J L, Guo Z H, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(7): 1235-1248. (in Chinese with English abstract)
- [19] R A Fisher, D Rees, K D Sayre, Z M Lu, A G Condon, A Larque Saavedra. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Crop Sci*, 1998, 38(6): 1467-1475.
- [20] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1336-1345.  
Yang J C, Du Y, Wu Z F, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39(7): 1336-1345. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李刚华, 张国发, 陈功磊, 王绍华, 凌启鸿, 丁艳锋. 超高产常规粳稻宁梗1号和宁梗3号群体特征及对氮的响应. *作物学报*, 2009, 35(6): 1106-1114.  
Li G H, Zhang G F, Chen G L, Wang S H, Ling Q H, Ding Y F. Population characteristics of super japonica rice Ningjing 1 and Ningjing 3 and its responses to nitrogen. *Acta Agron Sin*, 2009, 35(6): 1106-1114. (in Chinese with English abstract)
- [22] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 彭少兵, 唐启源, 方远祥, 肖安民, 陈玉梅, 熊昌明. 超级杂交稻干物质生产特点与产量稳定性研究. *中国农业科学*, 2008, 41(7): 1927-1936.  
Ao H J, Wang S H, Zou Y B, Peng S B, Tang Q Y, Fang Y X, Xiao A M, Chen Y M, Xiong C M. Study on yield stability and dry matter characteristics of super hybrid rice. *Sci Agric Sin*, 2008, 41(7): 1927-1936. (in Chinese with English abstract)
- [23] Huang M, Zou Y, Jiang P, Xia B, Md I, Ao H J. Relationship between grain yield and yield components in super hybrid

- rice. *Agric Sci China*, 2011, 10(10): 1537-1544.
- [24] Zhang H, Chen T T, Liu L J, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. Performance in grain yield and physiological traits of rice in the Yangtze River Basin of China during the last 60 yr. *J Integr Agric*, 2013, 12(1): 57-66.
- [25] 韦还和, 姜元华, 赵珂, 许俊伟, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 甬优系列杂交水稻品种的超高产群体特征. 作物学报, 2013, 39(12): 2201-2210.
- Wei H H, Jiang Y H, Zhao K, Xu J W, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y. Characteristics of super-high yield population in Yongyou series of hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(12): 2201-2210. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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, Duan Mu 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. *Trans CSAE*, 2012, 28(2): 39-44. (in Chinese with English abstract)
- [27] 胡春花, 罗革彬, 曾建华, 潘孝忠. 不同类型缓释氮肥对水稻产量和氮肥利用率的影响. 中国农学通报, 2011, 27(15): 174-177.
- Hu C H, Luo G B, Ceng J H, Pan X Z. Influence of different types of slow-release nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen fertilizer use efficiency. *Chin Agric Sci Bull*, 2011, 27(15): 174-177. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李华, 徐长青, 李世峰, 钱宗华. 不同氮肥管理对机插水稻产量及氮肥利用的影响. 贵州农业科学, 2008, 36(5): 39-41.
- Li H, Xu Z Q, Li S F, Qian Z H. Effects of different nitrogen management on yield and nitrogen utilization of machine-transplanted rice. *Guizhou Agric Sci*, 2008, 36(5): 39-41. (in Chinese with English abstract)
- [29] 马均, 朱庆森, 马文波, 田彦华, 杨建昌, 周开达. 重穗型水稻光合作用、物质积累与运转的研究. 中国农业科学, 2003, 36(4): 375-381.
- Ma J, Zhu Q S, Ma W B, Tian Y H, Yang J C, Zhou K D. Studies on the photosynthetic characteristics and accumulation and transformation of assimilation product in heavy panicle type of rice. *Sci Agric Sin*, 2003, 36(4): 375-381. (in Chinese with English abstract)
- [30] 吴文革, 张洪程, 钱银飞, 陈烨, 徐军, 吴桂成, 翟超群, 霍中洋, 戴其根. 超级杂交中籼水稻物质生产特性分析. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 287-293.
- Wu W G, Zhang H C, Qian Y F, Chen Y, Xu J, Wu G C, Zhai C Q, Huo Z Y, Dai Q G. Analysis on dry matter production characteristics of middle-season indica super hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2007, 21(3): 287-293. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 水稻高产氮高效型品种的物质积累与转运特性. 作物学报, 2013, 39(1): 101-109.
- Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Characteristics of dry matter accumulation and translocation in rice cultivars with high yield and high nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(1): 101-109. (in Chinese with English abstract)
- [32] 霍中洋, 杨雄, 张洪程, 葛梦婕, 马群, 李敏, 戴其根, 许轲, 魏海燕, 李国业, 朱聪聪, 王亚江, 颜希亭. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种各器官的干物质和氮素的积累与转运. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1035-1045.
- Huo Z Y, Yang X, Zhang H C, Ge M J, Ma Q, Li M, Dai Q G, Xu K, Wei H Y, Li G Y, Zhu C C, Wang Y J, Yan X T. Accumulation and translocation of dry matter and nitrogen nutrition in organs of rice cultivars with different productivity levels. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18(5): 1035-1045. (in Chinese with English abstract)