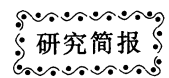


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2012.00174



不同氮肥水平下早熟晚粳氮和磷的吸收利用特性及相互关系

杨 雄 马 群 张洪程* 魏海燕 李国业 李 敏 戴其根
霍中洋 许 轲 张 庆 郭保卫 葛梦婕

江苏省作物遗传生理重点实验室 / 扬州大学农业部长江流域稻作技术创新中心, 江苏扬州 225009

摘 要: 采用大田试验, 以长江中下游地区具有代表性的 50 个早熟晚粳品种为材料, 研究 7 个氮肥水平(0、150.0、187.5、225.0、262.5、300.0、337.5 kg hm⁻² 纯氮)下水稻氮和磷积累量、吸收速率、利用效率的差异及其相互关系。结果表明: (1)在 0~337.5 kg hm⁻² 纯氮范围内, 随着氮肥水平的增加, 早熟晚粳的植株含氮率和氮积累量在拔节、抽穗和成熟期均显著增加; 植株含磷率和磷积累量在拔节和抽穗期显著增加, 成熟期呈先增后减变化。(2)播种至拔节阶段氮和磷吸收速率随施氮量的增加而提高, 差异极显著; 拔节至抽穗阶段氮和磷吸收速率随施氮量的增加呈现先增加后降低的变化趋势; 抽穗至成熟阶段的氮和磷吸收速率规律不明显。(3)在 0~337.5 kg hm⁻² 纯氮范围内, 随着施氮量的增加氮素籽粒生产效率和磷素籽粒生产效率均显著降低(300.0~337.5 kg hm⁻² 间磷素籽粒生产效率差异不显著), 随着施氮量的增加基因型之间的差异减小; 随着施氮量的增加氮和磷收获指数都呈现抛物线关系, 在施氮量为 262.0 kg hm⁻² 纯氮时出现最大值。(4)早熟晚粳对氮和磷的吸收利用具有显著的协同效应, 但随生育进程的推进这种效应减弱。水稻在播种至拔节、拔节至抽穗和抽穗至成熟 3 个生育阶段的氮和磷吸收速率都呈二次曲线关系($r=0.892^{**}$, $r=0.736^{**}$, $r=0.512^{**}$)。 (5)相关分析表明, 产量与拔节期、抽穗期和成熟期的吸氮量和吸磷量以及播种至拔节期和拔节至成熟期的吸氮速率和吸磷速率呈极显著正相关关系。增施氮肥有利于水稻氮和磷吸收利用的提高, 但氮肥过高时氮和磷吸收利用不再增加, 甚至有所降低。

关键词: 早熟晚粳; 施氮量; 氮吸收速率; 磷吸收速率; 籽粒生产效率

Characteristics and Correlation Analysis of N and P Uptake and Utilization of Early Maturing Late *Japonica* under Different N Fertilizer Levels

YANG Xiong, MA Qun, ZHANG Hong-Cheng*, WEI Hai-Yan, LI Guo-Ye, LI Min, DAI Qi-Gen, HUO Zhong-Yang, XU Ke, ZHANG Qin, GUO Bao-Wei, and GE Meng-Jie

Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province / Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze River Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

Abstract: A field experiment was carried out with 50 early-maturing late *japonica* rice varieties adopted in the region of Yangtze River under seven nitrogen application levels (0, 150.0, 187.5, 225.0, 262.5, 300.0, and 337.5 kg ha⁻¹) to investigate N and P accumulation, N and P uptake rate, N and P use efficiency and correlations between them. The main results were as follows. (1) In the range of 0–337.5 kg ha⁻¹, N concentration and accumulation amount were significantly increased with the increase of N fertilizer under three growth stages. P concentration and accumulation amount were significantly improved with the increase of N fertilizer at elongation and heading of rice, but P accumulation was significantly decreased at maturing when N fertilizer was too high. (2) N and P uptake rates were significantly increased with the increase of N fertilizer during sowing to elongation. During elongation to heading, N and P uptake rates were increased at first and then decreased with the increase of N fertilizer. There were no regular patterns of N and P uptake rate under different N fertilizer levels, and the maximum of N and P uptake rate was at 225.0

本研究由国家自然科学基金项目(30971732), 国家粮食丰产科技工程(2011BAD16B03), 江苏粮食丰产科技工程(BE2009425)和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 张洪程, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn, Tel: 0514-87979220

第一作者联系方式: E-mail: yth@126.com

Received(收稿日期): 2011-04-21; Accepted(接受日期): 2011-07-25; Published online(网络出版日期): 2011-11-07.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20111107.1047.008.html>

kg ha⁻¹ N fertilizer during heading to maturing of rice. (3) N and P use efficiencies of grain yield production (NUEg and PUEg) were significantly decreased with the increase of N fertilizer (except PUEg at 337.5 kg ha⁻¹). There was a parabola regular pattern of N and P harvest index in the range of 0–337.5 kg ha⁻¹ N fertilizer, and the maximum was at 262.5 kg ha⁻¹ N fertilizer. (4) The relationship of nitrogen and phosphorus uptake and utilization was significantly synergic during the rice growth stage. Rice yield was significantly correlated with N/P accumulation and N/P uptake rate before heading. Increasing N fertilizer may help to increase nitrogen and phosphorus uptake and utilization. But it may not increase or even decrease when N fertilizer is too high.

Keywords: Early maturing late japonica; N fertilizer levels; N uptake rate; P uptake rate; Production efficiency of yield

氮和磷是水稻必须的营养元素, 我国的耕地普遍缺少这两种营养元素, 增加氮肥和磷肥的施用量以及提高作物对氮和磷的吸收和利用是获得高产的重要基础。水稻对氮和磷的吸收利用一直是研究热点, 不同肥料水平对氮素和磷素营养的研究国内外已有不少报道^[1-6]。前人对稻麦轮作、旱作等不同种植制度或方式的研究发现高的施肥水平有利于营养元素的吸收^[3-4], 对不同施肥模式以及肥料配比的研究表明氮磷钾肥配施有利于营养元素的吸收利用^[7]。纵观以往的研究发现, 虽然有关肥料对水稻氮素和磷素吸收利用影响的研究已有很多, 但大多是肥料配施或施氮水平较低, 关于单一氮肥水平增加对各种营养元素吸收利用的影响鲜有报道。本研究设置 7 个氮肥水平, 比较研究了氮和磷吸收利用的特性及相互关系。明确不同氮肥水平下氮和磷吸收利用的特性, 揭示氮和磷吸收利用的相互关系, 以期水稻平衡施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

选用长江中下游地区常年种植的有代表性的生育期基本一致的 50 个早熟晚粳为供试品种, 即武粳 15、武香粳 14、扬粳 4038、镇稻 41、粳 3 号、泰粳 394、粳 1 号、武 45、扬粳 027、常粳 09-5、常粳 09-6、常粳 09-7、常粳 09-8、常粳 09-10、南粳 44、镇稻 10 号、镇稻 661、粳 19、农粳 4 号、农粳 5 号、武粳 13、南粳 5055、银玉 2084、晚粳 97、通粳 981、武 28106、苏粳 8 号、镇稻 210、武运粳 7 号、武 2817、武 28181、武 28105、T711、T712、粳 42、粳 46、香粳 2 号、T1-56、香粳 9 号、香粳 1 号、镇稻 158、M1148、香粳 T31、香粳 20-18、甬优 8 号、常优 1 号、常优 2 号、常优 3 号、常优 5 号和苏粳优 3 号。

1.2 试验设计

试验于 2009—2010 年在扬州大学农学院实验农场进行。土质为沙壤土, 地力较好、平衡, 前茬小麦。土壤全氮含量为 0.13%, 碱解氮含量为 90.5 mg kg⁻¹, 速效磷含量为 35.6 mg kg⁻¹, 速效钾含量为 87.9 mg kg⁻¹。

两年试验相同, 采用裂区设计, 以施氮(纯氮)为主区, 设 0、150.0、187.5、225.0、262.5、300.0、337.5 kg hm⁻² (分别用 N1、N2、N3、N4、N5、N6 和 N7 表示) 7 种水平, 以品种为裂区, 裂区面积为 6 m², 重复 3 次。主区间做埂隔离, 并用塑料薄膜覆盖埂体, 保证各主区单独排灌。采用机插软盘育秧, 于 5 月 23 日播种, 6 月 6 日移栽, 栽插密度为 28.5 万穴 hm⁻² (11.7 cm×30.0 cm), 杂交稻双本栽插, 常规稻三本

栽插。基肥: 穗肥=6:4, 穗肥分别于倒四、倒二叶各施 50%; P、K 肥同常规栽培, 每公顷施 P₂O₅ 和 K₂O 各 150.0 kg, 全部用作基肥。其他管理措施统一按照常规栽培要求实施。

1.3 测定内容与方法

分别于拔节期、抽穗期、成熟期, 按每小区茎蘖数的平均数取代表性植株 5 穴, 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 下烘干至恒重, 测定干物质重, 并采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化, 以半微量凯氏定氮法测定氮素, 钒钼黄比色法测定磷素。

氮(磷)素累积量(kg hm⁻²)=该时期地上部干物重×含氮(磷)率

氮(磷)素总吸收量(kg hm⁻²)=收获期地上部干物重×含氮(磷)率

氮(磷)素阶段吸收量(kg hm⁻²)=后一时期的氮(磷)素累积量-前一时期的氮(磷)素累积量

氮(磷)素阶段吸收速率(kg hm⁻² d⁻¹)=(后一时期的氮(磷)素累积量-前一时期的氮(磷)素累积量)/两时期的间隔天数

氮(磷)素籽粒生产效率=籽粒产量/氮(磷)素吸收量

氮(磷)收获指数=籽粒中的氮(磷)累积量/成熟期全株的氮(磷)累积量

1.4 数据处理

以 Microsoft Excel 和 SPSS 软件处理数据。

2 结果与分析

2.1 氮肥处理对水稻植株氮磷吸收利用的影响

2.1.1 氮肥处理对水稻植株含氮率和含磷率的影响

如图 1 所示, 在 0~337.5 kg hm⁻² 范围内, 50 个早熟晚粳在拔节、抽穗和成熟期的平均含氮率均随着氮肥水平的增加显著增加; 含磷率在拔节和抽穗期显著增加, 成熟期呈先增后减变化。当施氮量很大时(300.0 kg hm⁻² 纯氮和 337.5 kg hm⁻² 纯氮), 成熟期的含磷率有所减低。施氮水平由低到高, 早熟晚粳的植株含氮率和含磷率随之增加, 在拔节期依次增加 16.80%、5.91%、3.93%、10.49%、4.94%、6.92%和 5.16%、2.02%、7.26%、2.02%、1.44%、1.32%; 抽穗期依次增加 25.52%、10.79%、2.97%、5.91%、2.46%、3.98%和 7.56%、10.92%、18.09%、6.25%、6.83%、6.00%; 成熟期依次增加 27.93%、6.15%、2.11%、3.13%、2.94%、4.14%和 2.01%、3.11%、4.03%、0.51%、-3.43%、-1.05%。

2.1.2 氮肥处理对水稻各个生育期植株氮、磷累积量的影响

由图 2 可知, 在 0~337.5 kg hm⁻² 范围内, 50 个早熟晚粳在拔节、抽穗和成熟期的平均氮累积量均随着氮肥水平的增加显著增加; 磷累积量在拔节和抽穗期呈显著增加,

在成熟期呈先增后减变化。其中,拔节期、抽穗期和成熟期氮积累量分别为 65.47 kg hm^{-2} ($37.17\sim 102.64 \text{ kg hm}^{-2}$)、 $113.26 \text{ kg hm}^{-2}$ ($66.06\sim 179.32 \text{ kg hm}^{-2}$)和 $119.60 \text{ kg hm}^{-2}$ ($79.57\sim 199.17 \text{ kg hm}^{-2}$); 磷积累量分别为 17.56 kg hm^{-2} ($16.18\sim 33.74 \text{ kg hm}^{-2}$)、 46.33 kg hm^{-2} ($31.01\sim 77.34 \text{ kg hm}^{-2}$)和 46.94 kg hm^{-2} ($48.95\sim 95.89 \text{ kg hm}^{-2}$), 均以成熟期的变幅最大。施氮水平由低到高, 早熟晚粳的氮积累量和磷积累量随之增加, 在拔节期依次增加 14.96 、 8.37 、 7.74 、 11.70 、 9.57 、 13.13 kg hm^{-2} 和 4.21 、 2.37 、 3.73 、 2.20 、 2.38 、 2.67 kg hm^{-2} ; 在抽穗期依次增加 39.14 、 23.58 、 10.35 、 19.43 、 9.51 、 11.26 kg hm^{-2} 和 13.19 、 8.49 、 7.81 、 11.71 、 3.70 、 1.43 kg hm^{-2} ; 在成熟期依次增加 49.95 、 22.41 、 15.16 、 14.49 、 11.81 、 5.77 kg hm^{-2} 和 19.25 、 10.81 、 7.51 、 6.99 、 2.38 、 -4.39 kg hm^{-2} 。

2.1.3 氮肥处理对植株氮、磷吸收速率的影响

如图 3 所示, 播种至拔节阶段氮、磷吸收速率在肥料处理之间差异极显著, 且随施氮量的增加而提高。拔节至抽穗阶段氮吸收速率随施氮量的增加呈先增后减变化, 在 187.5 kg hm^{-2} 和 225.0 kg hm^{-2} 两种氮肥水平之间没有显著差异; 磷吸收速率随施氮量的增加也呈现先增后减变化趋势, 在 262.5 kg hm^{-2} 纯氮和 300 kg hm^{-2} 纯氮之间无显著差异, 到 337.5 kg hm^{-2} 纯氮时显著降低。抽穗至成熟阶段的氮、磷吸收速率规律不明显, 但最大值均出现在 225.0 kg hm^{-2} 纯氮水平, 分别为 $0.51 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $0.49 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。

2.1.4 氮肥处理对植株氮磷籽粒生产效率和氮磷收获指数的影响 水稻产量随氮肥施用量的增加呈先增加后减少变化趋势。表 1 表明, 随着施氮量的增加, N 素籽粒生产效率逐渐减低; 磷素籽粒生产效率也随施氮量逐渐减低。从不同处理的变异系数可知, 同一类型水稻产量亦存在基因型差异, 同时随施氮量的增加基因型之间的差异减小。随施氮量的增加 N 和 P 的收获指数均先升后降, 都在 262.5 kg hm^{-2} 纯氮水平出现最大值。

2.2 不同氮肥处理下水稻氮、磷营养元素吸收利用的相关性

2.2.1 氮肥处理下水稻植株氮和磷总吸收利用的相关性

从氮、磷总吸收量的相关回归分析(如图 4)可以得出, 整个生育期氮、磷的吸收量呈二次曲线关系, 吸磷量随吸氮量的增加而增加, 但吸磷量的增加幅度逐渐降低。从水稻植株氮、磷的阶段吸收量的相关分析(图 5)可以看出, 播种至拔节、拔节至抽穗和抽穗至成熟 3 个阶段的氮、磷吸收量都具有极显著相关性, 其中播种至拔节阶段的相关最密切($r=0.892$, $n=350$), 拔节至抽穗居中($r=0.736$, $n=350$), 抽穗至成熟最小($r=0.512$, $n=350$)。且 3 个阶段的氮、磷吸收速率都呈二次曲线关系, 随着氮吸收量的增加, 磷吸收量增加幅度逐渐降低。

从表 2 可以看出拔节、抽穗和成熟期的氮和磷吸收量之间具有极显著正相关, 相关系数分别为 0.888 、 0.883

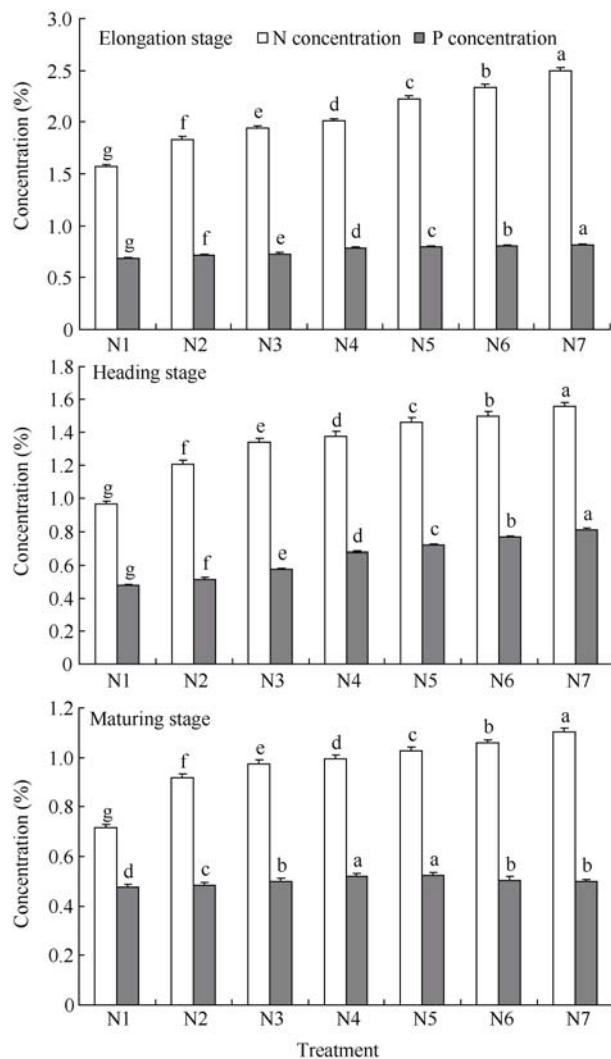


图 1 各种肥料处理下植株拔节、抽穗和成熟时期的含氮率和含磷率

Fig. 1 N and P concentrations at elongation, heading and maturing of rice under different N treatments

N1: 不施氮肥; N2: 150 kg hm^{-2} 纯氮; N3: 187.5 kg hm^{-2} 纯氮; N4: 225.0 kg hm^{-2} 纯氮; N5: 262.5 kg hm^{-2} 纯氮; N6: 300.0 kg hm^{-2} 纯氮; N7: 337.5 kg hm^{-2} 纯氮。图中的竖线表示标准误。不同大、小写字母分别表示差异达 1% 和 5% 显著水平。

N1: no N applied; N2: 150 kg hm^{-2} N applied; N3: 187.5 kg hm^{-2} N applied; N4: 225.0 kg hm^{-2} N applied; N5: 262.5 kg hm^{-2} N applied; N6: 300.0 kg hm^{-2} N applied; N7: 337.5 kg hm^{-2} N applied. Super-script bars represent standard errors. Bars superscribed by different letters are significantly at 1% (capital letters) and 5% (small letter) probability levels, respectively.

和 0.826 ($n=350$); 播种至拔节、拔节至抽穗和抽穗至成熟期的氮和磷吸收速率之间呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.887 、 0.764 和 0.341 ($n=350$); 氮和磷籽粒生产效率之间也是极显著正相关($r=0.461$, $n=350$)。除抽穗至成熟期的吸氮速率和吸磷速率外, 绝大部分氮、磷吸收利用的相关性状之间均呈显著或极显著相关。由此可以看出, 早熟晚粳对氮和磷的吸收利用具有显著的协同效应, 但随生育进程的推进这种效应减弱。

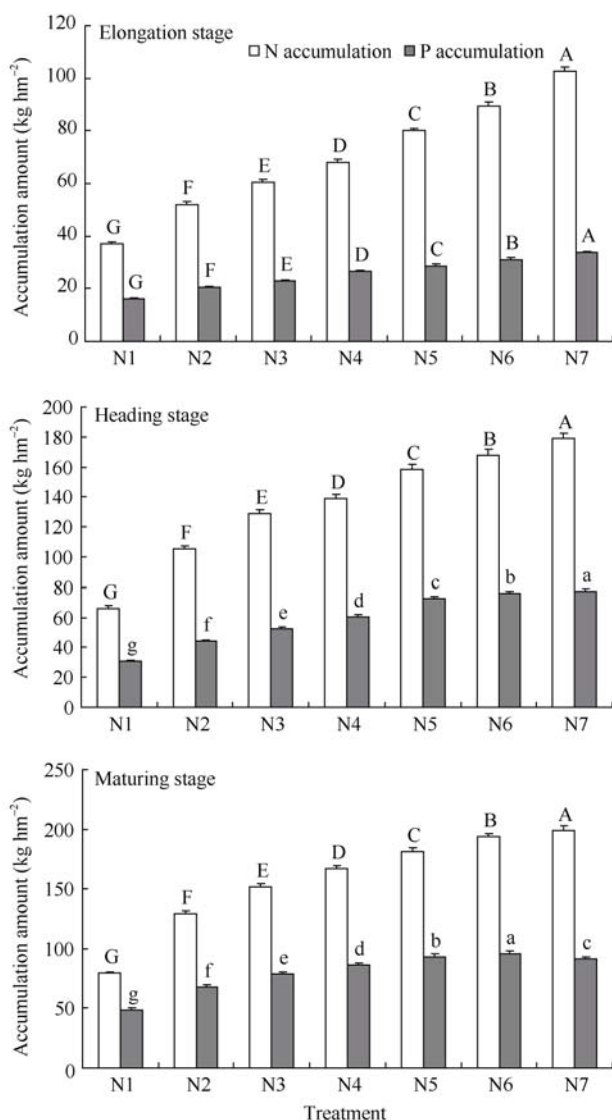


图 2 各种肥料处理下水稻拔节、抽穗和成熟期群体的氮、磷积累量

Fig. 2 N and P accumulation amount at elongation, heading and maturing of rice under different N treatments

2.2.2 产量与氮磷吸收利用相关性状的的相关性 如表 2 所示, 拔节期、抽穗期和成熟期的吸氮量和吸磷量与产量呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.636、0.784、0.816 和 0.641、0.782、0.793 ($n=350$), 以成熟期的氮和磷吸收量和产量相关最密切, 这与人研究的结果一致^[8]; 播种至拔节期和拔节至成熟期的吸氮速率和吸磷速率也与产量呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.637、0.604 和 0.642、0.698 ($n=350$)。氮素籽粒生产效率与产量呈极显著负相关关系($r=-0.385$, $n=350$), 抽穗至成熟期的吸氮速率和吸磷速率以及磷素籽粒生产效率与产量相关不显著。

3 讨论

3.1 关于不同氮肥水平对水稻氮和磷吸收利用特性的影响 氮肥的施用是调节水稻生长的重要栽培措施之一。水稻

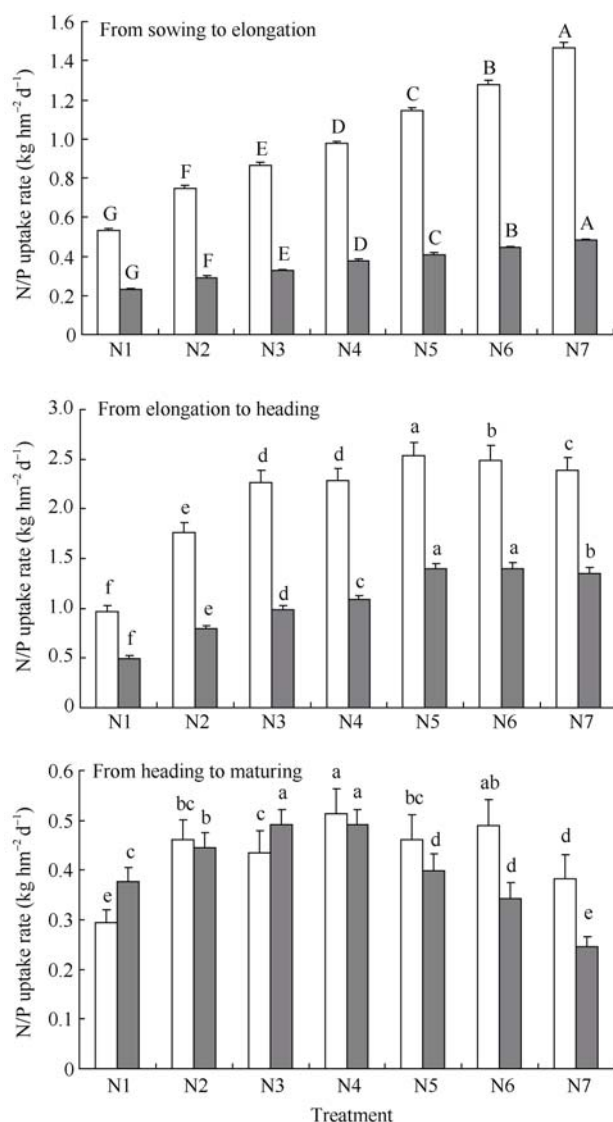


图 3 不同氮肥处理下植株氮、磷阶段吸收速率的差异

Fig. 3 Difference of N uptake rate and P uptake rate under nitrogen treatments

各器官的含氮量和含磷量随氮素水平的提高而增加^[9-10]。Dordas^[11]研究认为, 在开花期和成熟期, 氮肥和磷肥对硬粒小麦整个植株水平的含氮率均有影响, 磷肥和氮磷肥都会增加植株含磷率。当氮肥水平较低时, 含氮率随施氮量的增加而提高, 这也适用于其他作物, 如冬小麦、大麦和玉米^[12-14]。齐田峰等^[15]研究表明, 不同施氮量的植株含磷率、植株阶段吸磷量和植株相对吸磷量, 在孕穗开花前均随施氮量的增加而提高, 开花后亩施氮超过 15 kg 后, 植株含磷率随施氮量增加而下降。孙永健等^[16]研究表明, 植株磷积累量在各生育期均随施氮量的提高而增加; 随施氮量的增加各营养器官磷素转移量增加, 转运率降低, 但过高施氮处理的叶片、茎鞘中磷转移量及穗部磷增加量无显著提高, 甚至有所降低。本研究结果与前人研究结果较为一致, 在 0~337.5 kg hm⁻² 范围内, 50 个粳稻品种在拔节和抽穗期的含氮率、含磷率、氮积累量和磷积累量均随

表 1 肥料处理对氮、磷利用效率的影响
Table 1 Effect of fertilizer on N and P use efficiency

处理 Treatment	项目 Item	产量 Yield (kg hm ⁻²)	籽粒生产效率 UEg (kg kg ⁻¹)		收获指数 HI	
			氮 Nitrogen	磷 Phosphoru	氮 Nitrogen	磷 Phosphorus
N1	Mean±SD	5.37±0.43 F	59.21±7.00 Aa	114.46±17.88 Aa	0.49±0.05 e	0.50±0.08 c
	Range	1.85	31.53	83.93	0.20	0.30
	CV (%)	8.09	11.82	15.62	10.57	16.52
N2	Mean±SD	8.62±0.62 E	58.50±6.72 Ab	112.42±16.00 Ab	0.52±0.07 cd	0.53±0.07 b
	Range	2.97	28.40	71.77	0.25	0.29
	CV (%)	7.23	11.49	14.24	13.28	13.37
N3	Mean±SD	9.28±0.66 D	53.42±4.42 Bc	104.13±14.72 Bc	0.53±0.06 bc	0.54±0.10 b
	Range	3.03	16.51	73.39	0.29	0.29
	CV (%)	7.06	8.27	14.13	11.96	19.22
N4	Mean±SD	9.65±0.69 C	50.63±5.34 Cd	98.70±13.03 Cd	0.54±0.08 b	0.55±0.09 ab
	Range	3.14	21.95	53.73	0.32	0.30
	CV (%)	7.12	10.54	13.20	14.25	15.98
N5	Mean±SD	9.83±0.75 A	47.52±5.11 De	93.12±12.91 De	0.55±0.07 a	0.56±0.08 a
	Range	3.43	23.87	61.72	0.28	0.32
	CV (%)	7.61	10.75	13.87	14.03	14.46
N6	Mean±SD	9.76±0.83 B	44.30±4.57 Ef	89.80±10.52 Ef	0.51±0.07 d	0.55±0.07 b
	Range	4.01	19.77	48.71	0.27	0.32
	CV (%)	8.47	10.31	11.71	13.83	13.43
N7	Mean±SD	9.29±0.78 D	40.97±4.34 Fg	89.48±10.91 Ef	0.48±0.06 f	0.51±0.06 c
	Range	3.71	17.77	46.68	0.25	0.27
	CV (%)	8.42	10.60	12.20	12.10	12.22

SD: standard deviation; CV: coefficient of variance; UEg: use efficiency of grain yield production; HI: harvest index.

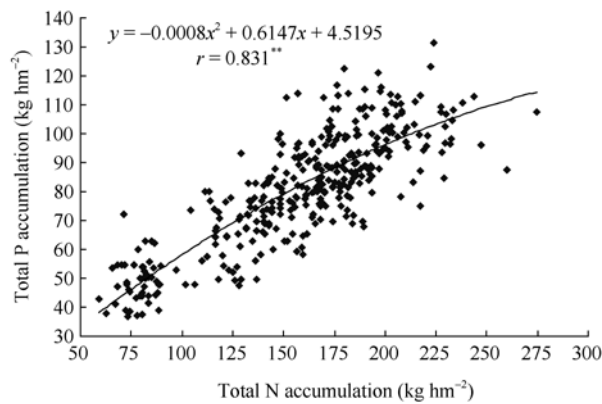


图 4 植株总吸氮量与总吸磷量的关系
Fig. 4 Relationship between total N accumulation and total P accumulation

施氮量的增加而提高，成熟期的含磷率和磷积累量则表现为先增后减的变化趋势，这说明过量的氮肥不利于粳稻品种磷的吸收。施氮量过高而导致植株含磷率下降，可能是由于施氮使群体过大，冠层内光照条件不足，影响光合作用，有机营养供给不足^[15]，也有研究认为氮肥过多致使氮磷钾比例失调，影响养分平衡吸收和干物质积累，最后导致植株和稻谷的氮磷钾含量下降^[10]。与此相反，也有研究表明^[16-17]，随着施氮量的增加水稻植株体内氮、磷、钾养分含量均无明显差异，养分积累量随施氮量增加

而提高是稻株总生物量增加造成的。

本试验还发现，氮和磷吸收速率在水稻生育前期(播种至拔节阶段)随施氮量的增加而显著提高；在水稻生育中期(拔节至抽穗阶段)随施氮量的增加呈先增后降变化趋势；在水稻生育后期(抽穗至成熟阶段)没有规律，最大值均出现在 225 kg hm⁻² 纯氮水平。这可能与水稻氮和磷吸收特性有关，邹长明等^[18]研究表明晚稻在分蘖期和孕穗-抽穗期出现两个吸氮高峰，分别占总吸氮量的 40%和 24%左右，而晚稻吸磷高峰期为分蘖期，占总吸磷量的 58%，中后期吸磷量很少。水稻对磷的吸收速率随着苗龄的增长而减慢，水稻生长前期吸收的磷占全吸收量的 60%~70%，后期主要靠磷在植株体内的转运再利用^[19]。敖和军等^[17]研究结果表明，不同氮肥水平下，随着产量升高，氮、磷和钾的收获指数呈上升趋势，但生产单位稻谷所需养分呈下降趋势。本研究部分结果与敖和军等^[17]相同，随着施氮量的增加氮素籽粒生产效率显著降低，磷素籽粒生产效率也显著降低(除 337.5 kg hm⁻² 纯氮外)，但氮和磷收获指数不是单纯的呈上升趋势，而是随着施氮量的增加呈现抛物线关系，并在施氮量为 262.5 kg hm⁻² 纯氮时出现最大值。

3.2 关于不同氮肥水平下水稻氮吸收利用和磷吸收利用的关系

植物对营养元素的吸收具有协同作用^[20]。韩宝文等^[21]

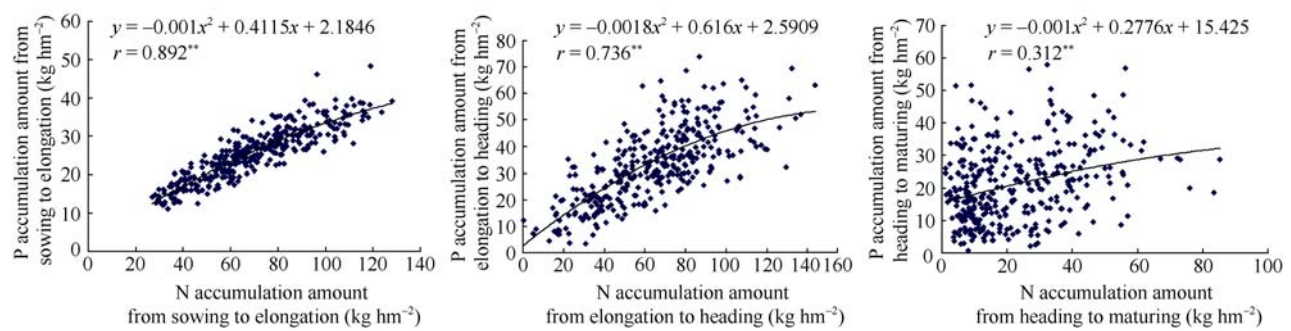


图 5 水稻 3 个阶段的氮和磷吸收量的关系
Fig. 5 Relationship between N and P uptake amount at three growth stages of rice

表 2 水稻产量与不同生育时期氮、磷吸收利用相关性状的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between rice yield and traits associated with N and P uptake and use efficiency								
项目 Item	拔节期 吸氮量 Nel	抽穗期 吸氮量 Nhe	成熟期 吸氮量 Nma	播种至拔节期 吸氮速率 NSO-ELr	拔节至抽穗期 吸氮速率 NEL-HEr	抽穗至成熟期 吸氮速率 NHE-MAr	氮素籽粒 生产效率 NNUEg	产量 Yield
产量 Yield	0.636**	0.784**	0.816**	0.637**	0.604**	0.102	-0.385**	—
拔节期吸磷量 Pel	0.888**	0.742**	0.750**	0.888**	0.356**	0.059	-0.583**	0.641**
抽穗期吸磷量 Phe	0.810**	0.883**	0.851**	0.809**	0.606**	-0.038	-0.615**	0.782**
成熟期吸磷量 Pma	0.692**	0.783**	0.826**	0.692**	0.521**	0.146**	-0.572**	0.793**
播种至拔节期吸磷速率 PSO-ELr	0.887**	0.741**	0.750**	0.887**	0.355**	0.061	-0.582**	0.642**
拔节至抽穗期吸磷速率 PEL-HEr	0.568**	0.784**	0.694**	0.568**	0.764**	-0.214**	-0.460**	0.698**
抽穗至成熟期吸磷速率 PHE-MAr	-0.175**	-0.161**	-0.027	-0.174**	-0.172**	0.341**	0.059	0.029
磷素籽粒生产效率 PNUEg	-0.347**	-0.316**	-0.343**	-0.347**	-0.116*	-0.093	0.461**	-0.078

*表示差异达显著水平($P<0.05$); **表示差异达极显著水平($P<0.01$)。

*, ** indicate significant difference at $P=0.05$ and $P=0.01$, respectively. Nel/Pel: N/P accumulation amount at elongation; Nhe/Phe: N/P accumulation amount at heading; Nma/Pma: N/P accumulation amount at maturing; NSO-ELr/PSO-ELr: N/P uptake rate from sowing to elongation; NEL-Her/PEL-Her: N/P uptake rate from elongation to heading; NHE-Mar/PHE-Ma: N/P uptake rate from heading to maturing; NNUEg/PNUEg: N/P use efficiency of grain yield production.

研究中等肥力土壤小麦氮磷肥相互效应表明, 氮肥和钾肥的使用量对速效养分的释放有明显的互促进作用, 在 2~20 cm 耕层中, 当纯氮在 300~450 kg hm² 这一区间内时, 随着氮肥的增加, 土壤速效钾释放快速增强; 当钾肥(K₂O)用量在 150~225 kg hm⁻² 这一区间内时, 随着钾肥的增加, 对土壤硝态氮(NO₃⁻-N)释放的促进作用快速增强。也有很多报道^[22-23]表明, 钾肥有利于氮素和磷素的吸收利用。Miller^[24]认为, 充足的 N 供应能增加植物对磷素的吸收和利用, 这可能是由于氮增加了磷从共质体向木质部的转运^[25]。本研究结果表明, 早熟晚粳氮和磷吸收利用之间存在显著相关性, 从播种到成熟氮和磷吸收速率的相关系数逐渐减小。由此可见, 早熟晚粳对氮和磷的吸收利用具有显著的协同效应, 随着生育进程这种效应减弱。

4 结论

在 0~337.5 kg hm⁻² 范围内, 随着氮肥水平的增加, 50 个粳稻品种在拔节、抽穗和成熟期的含氮率和氮积累量均

显著增加; 拔节和抽穗期的含磷率和磷积累量呈显著增加, 成熟期的含磷率和磷积累量呈先增后减变化。在水稻生育前期(播种至拔节阶段)氮和磷吸收速率随施氮量的增加而显著提高; 在水稻生育中期(拔节至抽穗阶段)氮和磷吸收速率随施氮量的增加呈现先增加后降低的变化趋势; 在水稻生育后期(抽穗至成熟阶段)氮和磷吸收速率没有规律。早熟晚粳对氮和磷的吸收利用具有显著的协同效应, 但随生育进程的推进这种效应减弱。

References

[1] Yin C-Y(殷春渊), Wei H-Y(魏海燕), Zhang Q(张庆), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许钧), Zhang S-F(张胜飞), Hang J(杭杰), Ma Q(马群). Differences and correlations in grain yield, N uptake and utilization between medium-maturing *indica* and *japonica* rice under different N fertilizer levels. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(2): 348-355 (in Chinese with English abstract)

[2] Guo C-H(郭朝晖), Li H-S(李合松), Zhang Y-Z(张杨珠), Huang

- J-L(黄见良), Huang C-Y(黄昌勇). Effects of phosphorus levels on hybrid rice growth and characteristics of phosphorus transportation. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2002, 16(2): 151–156 (in Chinese with English abstract)
- [3] Timsina J, Singh U, Badaruddin M, Meisner C, Amin M R. Cultivar, nitrogen, and water effects on productivity, and nitrogen-use efficiency and balance for rice-wheat sequences of Bangladesh. *Field Crops Res*, 2001, 72: 143–161
- [4] Inthapanya P, Sipaseuth, Sihavong P, Sihathep V, Chanphengsay M, Fukai S, Basnayake J. Genotype differences in nutrient uptake and utilization for grain yield production of rainfed lowland rice under fertilised and non-fertilised conditions. *Field Crops Res*, 2000, 65: 57–68
- [5] Yi G-Y(易国英), Dai A-P(戴平安), Zheng S-X(郑圣先), Huang K-Y(黄科延), Liao Y-L(廖育林). Effects of N, P and K fertilizer levels on yield and fertilizer uptake and utilization of two-line hybrid rice. *Crop Res* (作物研究), 2006, (1): 40–43 (in Chinese)
- [6] Li B-Z(李宝珍), Wang S-W(王松伟), Feng H-M(冯慧敏), Xu G-H(徐国华). Effects of nitrogen forms on root morphology and phosphate uptake in rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2008, 22(5): 665–668 (in Chinese with English abstract)
- [7] Zhao Q-L(赵庆雷), Wang K-R(王凯荣), Ma J-Q(马加清), Yang L-Q(杨连群), Xie X-L(谢小立), Zhang S-Y(张士永), Yuan S-J(袁守江). Effects of long-term application of different fertilizer patterns on rice paddy soil phosphorus and rice phosphorus nutrition. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(8): 1539–1545 (in Chinese with English abstract)
- [8] Ling Q-H(凌启鸿). Quality of Crop Population (作物群体质量). Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000. pp 44–107 (in Chinese)
- [9] Chen X-H(陈新红), Liu K(刘凯), Xu G-W(徐国伟), Wang Z-Q(王志琴), Yang J-C(杨建昌). Effects of N and soil moisture on fertilizer uptake and quality of rice. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric & For* (Nat Sci Edn)(西北农林科技大学学报·自然科学版), 2004, 32(3): 15–19 (in Chinese with English abstract)
- [10] Chen X-B(陈晓波), Rao M-D(饶鸣镞), Xu X-M(许旭明). Effects of nitrogen application rate on yield formation of super rice: II. Youming 86 and absorption of N, P and K. *J Yichun Coll* (宜春学院学报), 2010, 32(8): 87–89 (in Chinese with English abstract)
- [11] Dordas C. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source-sink relations. *Eur J Agron*, 2009, 30: 129–139
- [12] Papakosta D K, Gagianas A A. Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses for Mediterranean wheat during grain filling. *Agron J*, 1991, 83: 864–870
- [13] Prystupa P, Savin R, Slafer G A. Grain number and its relationship with dry matter, N and P in the spikes at heading in response to N × P fertilization in barley. *Field Crops Res*, 2004, 90: 245–254
- [14] Dordas C A, Lithourgidis A S, Matsi T, Barbayiannis N. Application of liquid cattle manure and inorganic fertilizers affect dry matter, nitrogen accumulation, and partitioning in maize. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2008, 80: 283–296
- [15] Qi T-F(齐田锋), Wang L-J(王连建), Kang Y-G(康有果). The effect of N fertilizer on yield and characteristics of phosphorus uptake of winter wheat. *Crops* (作物杂志), 1995, (1): 27–28 (in Chinese)
- [16] Sun Y-J(孙永健), Sun Y-Y(孙园园), Li X-Y(李旭毅), Zhang R-P(张荣萍), Guo X(郭翔), Ma J(马均). Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2010, 36(4): 655–664 (in Chinese with English abstract)
- [17] Ao H-J(敖和军), Wang S-H(王淑红), Zou Y-F(邹应斌), Peng X-B(彭少兵), Chen Z-W(姚兆伟), Liu W(刘武), Tang Q-Y(唐启源). Characteristics of nutrient uptake and utilization of super hybrid rice under different fertilizer application rates. *Chin J Rice Sci* (中国农业科学), 2008, 41(10): 3123–3132 (in Chinese with English abstract)
- [18] Zou C-M(邹长明), Qin D-Z(秦道珠), Xu M-G(徐明刚), Shen H-P(申华平), Wang B-R(王伯仁). Nitrogen, phosphorous and potassium uptake characteristics of rice and its relationship with grain yield. *J Nanjing Agric Univ* (南京农业大学学报), 2002, 25(4): 6–10 (in Chinese with English abstract)
- [19] Zhang Y(张瑛). Effects of N Fertilizer Levels on P and K Uptake and Utilization of Different Rice Varieties. MS Dissertation of Yangzhou University, 2006 (in Chinese with English abstract)
- [20] Pan R-C(潘瑞炽). Plant Physiology (植物生理学). Beijing: Higher Education Press, 2008. pp 28–54 (in Chinese)
- [21] Hang B-W(韩宝文), Xing S-L(邢素丽), Liu M-C(刘孟朝). The effect relationship between nitrogen and potash fertilization for winter wheat in middle-high fertilizer loamy soil. *Acta Agric Boreali-Sin* (华北农学报), 2006, 21(suppl): 24–37 (in Chinese with English abstract)
- [22] Hu H(胡泓), Wang G-H(王光火). Influence of potassium fertilizer on nutrient accumulation and physiological efficiency of hybrid rice. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2003, 9(2): 184–189 (in Chinese with English abstract)
- [23] Wang Q-S(王强盛), Zhen R-H(甄若宏), Ding Y-F(丁艳锋), Zhu Y(朱艳), Wang S-H(王绍华), Cao W-X(曹卫星). Effect of potassium application rates on nitrogen absorption and utilization of different types of rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(4): 704–710 (in Chinese with English abstract)
- [24] Miller M H. Effects of nitrogen on phosphorous absorption by plants. In: Carson E W ed. The Plant Root and Its Environment. Charlottesville, VA: University Press of Virginia, 1974. pp 643–668
- [25] Cole C V, Grunes D L, Porter L K, Olsen S R. The effects of nitrogen on short term phosphorous absorption and translocation in corn (*Zea mays* L.). *Soil Sci Soc Am J*, 1963, 27: 671–674