

改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响

胡雅杰, 朱大伟, 邢志鹏, 龚金龙, 张洪程*, 戴其根, 霍中洋,
许轲, 魏海燕, 郭保卫

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

摘要:【目的】秸秆还田不仅可改良土壤和增加土壤有机质,还能提高作物产量和品质。但秸秆还田后,土壤有机酸积累和微生物固氮,抑制水稻前期生长。在长江流域稻麦两熟地区,当地农户往往通过增加施氮量来解决秸秆还田的负效应,造成肥料浪费和氮污染。因此,探索研究秸秆还田条件下水稻优化的氮肥运筹措施,阐明水稻产量形成和氮素吸收与利用对氮素响应特征,对于提高水稻产量和氮素利用效率具有重要意义。【方法】2012~2013年,以超级梗稻武运梗24号和宁梗3号为材料,在江苏省兴化市进行大田试验,在秸秆全量还田条件下,设置常规施氮300 kg/hm²(N1)、增加施氮量345 kg/hm²(N2)和常规施氮运筹(CFP,基肥:分蘖肥:穗肥=3:3:4)、改进施氮运筹(MFP,基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3),以无氮处理为对照,研究施氮量和氮肥运筹措施对水稻产量及其产量构成、干物质积累、氮素积累、氮素吸收速率和氮肥利用效率的影响。【结果】随着氮肥水平提高,水稻穗数显著增加,每穗粒数、结实率和千粒重下降,最终增产不显著。与常规施氮运筹比较,改进氮肥运筹显著增加穗数,显著提高群体颖花量并增产,在N1水平下,改进施氮运筹增产幅度为5.18%~7.10%,高于N2水平的2.70%~4.29%。随着施氮量增加,水稻分蘖中期、拔节期、移栽期至分蘖中期、分蘖中期至拔节期干物质积累量、氮素积累量显著增加,最终成熟期干物质积累量和氮素积累量有所增加,但差异不显著,而氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥生理利用率显著下降。与常规氮运筹处理相比,改进氮运筹显著增加水稻移栽期至分蘖中期干物质积累量、氮素积累量和氮素吸收速率,增加成熟期干物质积累量和氮素积累量,提高氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥生理利用率和氮肥偏生产力,在N1水平下成熟期干物质积累量和氮素积累量分别增加6.52%和5.55%,氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥生理利用率和氮肥偏生产力分别提高13.36%、8.55%、4.44%和5.29%,差异均达显著水平。【结论】秸秆全量还田条件下,增加氮肥用量水稻增产不显著,且氮肥利用效率低。不增加氮肥用量,通过适当提高基肥比例(基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3),可实现提高水稻产量、干物质积累量、氮素积累量和氮肥利用效率。

关键词: 氮肥运筹; 超级梗稻; 产量; 氮素吸收; 氮肥利用率

中图分类号: S511.2⁺2.06

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)01-0012-11

Modifying nitrogen fertilization ratio to increase the yield and nitrogen uptake of super japonica rice

HU Ya-jie, ZHU Da-wei, XING Zhi-peng, GONG Jin-long, ZHANG Hong-cheng*, DAI Qi-gen, HUO Zhong-yang,
XU Ke, WEI Hai-yan, GUO Bao-wei

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

Abstract: [Objectives] Crop straw incorporation can increase soil organic matter and improve soil fertility, enhance crop yield and quality. However, it sometime inhibits rice growth in the vegetative stage due to accumulation of organic acids and N immobilization. Farmers usually deal with this phenomena through increasing the amount of nitrogen fertilizer in rice-wheat cropping system in the Yangtze Catchments. Excessive nitrogen input

收稿日期: 2014-01-06

接受日期: 2014-09-15

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划重大项目(2011BAD16B03); 超级稻配套栽培技术开发与集成(农业部专项); 江苏省农业科技自主创新基金项目(CX[12]1003.9); 江苏省科技支撑计划(BE2012301); 江苏省高校优势学科建设工程资助。

作者简介: 胡雅杰(1988—),男,江苏泗阳人,博士研究生,主要从事水稻栽培研究。E-mail: yajiehu@163.com

* 通信作者 Tel: 0514-87979220; E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn

results in low nitrogen use efficiency and water and air pollution. Therefore, the optimization of nitrogen fertilization is important for the improvement of yield and nitrogen use efficiency of rice. **【Methods】** Local popular *japonica* rice cultivars, Wuyunjing 24 and Ningjing 3, were selected as material, field experiments were conducted in Xinghua County, Jiangsu Province, China in 2012 and 2013. Two nitrogen rates (N1: 300 kg/ha and N2: 345 kg/ha) and two nitrogen application methods [conventional fertilizer-nitrogen practice (CFP, basal : tillering : earring = 3 : 3 : 4) and modified fertilizer-nitrogen practice (MFP, basal : tillering : earring = 4 : 3 : 3)] were designed. The yield, yield components, dry matter accumulation, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency were investigated. **【Results】** With the increase of the nitrogen fertilizer rate, the unit area panicles of rice are increased significantly, but the spikelet per panicle, filled-grain percentage and 1000-grain weight are decreased, finally, the grain yield increase is not significant. The grain yield is higher using MFP than CFP, owing to the more panicles per unit area and the significant enhanced population spikelet as a result. The range of yield increase with the MFP in N1 is 5.18%–7.10%, higher than that in N2 (2.70%–4.29%). With the increase of nitrogen rate, the dry matter accumulation and nitrogen uptake at the middle tiller stage and the jointing stage, from transplanting stage to the middle tiller stage, and from the middle tiller stage to the jointing stage are significantly improved, but the dry matter accumulation and nitrogen uptake increases at the maturity are not significant, the nitrogen agronomic efficiency, nitrogen recovery efficiency and nitrogen partial factor productivity are consequently decreased significantly. In comparison with CFP, the dry matter accumulation and nitrogen uptake amount and rate from the transplanting stage to the middle tiller stage are improved significantly under MFP. The dry matter accumulation and nitrogen uptake at the maturity and nitrogen agronomic efficiency, nitrogen recovery efficiency, nitrogen physiological efficiency and nitrogen partial factor productivity of MFP are higher than those of CFP and the differences of those are significant in N1, and the dry matter accumulation and nitrogen uptake at the maturity, nitrogen agronomic efficiency, nitrogen recovery efficiency, nitrogen physiological efficiency and nitrogen partial factor productivity are increased by 6.52%, 5.55%, 13.36%, 8.55%, 4.44% and 5.29%, respectively. **【Conclusions】** Under the straw completely incorporation, increasing the nitrogen fertilizer rate will not increase the rice yield, but decrease the N use efficiency. Keeping the normal nitrogen fertilizer input, modifying the ratio of nitrogen fertilizer input of basal : tillering : earring from 3 : 3 : 4 to 4 : 3 : 3 will be capable of significant increase of yield, dry matter accumulation, N uptake and N use efficiency in mechanical transplanted super *japonica* rice with wheat straw return.

Key words: nitrogen application; super *japonica* rice; grain yield; nitrogen uptake; nitrogen use efficiency

中国是水稻生产和稻米消费大国,也是世界上最大的氮肥生产和消费国^[1-3]。为追求水稻高产,农民往往增加施氮量。过量施氮不仅造成水稻徒长,贪青晚熟,易倒伏,籽粒充实度降低,病虫害增多^[4],还降低氮肥利用率,对生态环境造成不良影响^[5]。据报道,太湖地区单季稻区氮肥用量达 300~360 kg/hm²,氮肥利用率仅为 20%~35%,低于世界平均水平^[6]。前人关于施氮量及氮肥运筹对水稻产量^[7-11]和氮素吸收利用^[12-14]做了大量研究,如王秀斌等^[10]研究双季稻低、中和高产田的适宜施氮量分别为 120、180 和 240 kg/hm²。王允青等^[11]研究认为,杂交中籼稻氮肥运筹以基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3 为宜。而在秸秆还田后,C/N 比值较高,微生物与水稻争氮,造成水稻前期氮素供应

不足,使得分蘖减少,影响水稻群体穗数形成。朱从海等^[15]研究认为秸秆腐烂需消耗氮素,增施氮肥利于提高水稻产量。王建明等^[16]研究认为,秸秆还田明显减少穗数,提高基肥比例能增加穗数。而在秸秆还田条件下,机插超级粳稻品种如何合理施氮及氮肥运筹鲜见报道。因此,本试验以当前生产中面积较大的 2 个超级稻品种武运粳 24 号和宁粳 3 号为材料,设置常规施氮量(N1)、增加施氮量(N2)和常规施氮运筹(Conventional fertilizer-nitrogen practice, CFP)、改进施氮运筹(Modified fertilizer-nitrogen practice, MFP),探讨秸秆还田条件下氮肥对水稻产量和氮素吸收利用的影响,以期为秸秆还田下水稻高产高效栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试地点与材料

2012~2013 年在扬州大学农学院校外试验基地江苏省兴化市钓鱼镇(33°05'N, 119°58'E)进行试验。该区位于江苏里下河腹部, 属北亚热带湿润气候区, 年平均温度 15℃ 左右, 年降水量 1024 mm 左右, 全年日照时数 2305 h 左右, 无霜期 227 d 左右。试验地前茬为小麦(产量约 6.7 t/hm²), 土壤类型黏土, 质地黏性。2012 和 2013 年试验地(土层 0—20 cm) 分别含有机质 25.37 g/kg 和 25.86 g/kg、全氮 1.63 g/kg 和 1.68 g/kg、速效磷 13.1 mg/kg 和 12.5 mg/kg、速效钾 146.2 mg/kg 和 135.24 mg/kg。

供试材料为超级稻品种武运粳 24 号和宁粳 3 号。

1.2 试验设计

两年试验设计相同, 采用“4 + X”试验, 随机区组设计, 重复 3 次, 小区面积为 20 m²。设置 2 个氮肥水平, 分别为常规施氮量 300 kg/hm² (N1)、增施 15% 量 345 kg/hm² (N2), 每个氮肥水平下设置 2 个氮肥分配比例: 常规施氮运筹(CFP)基肥: 分蘖肥: 穗肥 = 3:3:4 和改进施氮运筹(MFP)基肥: 分蘖肥: 穗肥 = 4:3:3, 以无氮肥为对照(CK)。基肥水稻移栽前 2 天施用, 分蘖肥栽后 7 天施用, 穗肥分倒 4 叶和倒 2 叶等量均施。磷肥一次基施 120 kg/hm², 钾肥施用 240 kg/hm², 分基肥和穗肥(倒 4 叶)施用。供试氮肥为尿素(46.2%), 磷肥为过磷酸钙(12%), 钾肥为氯化钾(60%)。

前茬麦秆机械粉碎全量还田(秸秆还田量为 6200 kg/hm²), 翻耕后灌水泡田 2 天, 再次翻耕, 小区间作埂包膜, 保证水浆独立排灌, 小区作埂后施基肥, 并进行人工翻耕整平。2012 年和 2013 年 5 月 26 日和 5 月 28 日采用塑料软盘播种, 播种量(干种质量)为 110 g/盘, 6 月 13 日和 6 月 15 日人工模拟机插, 栽插行株距为 30 cm × 13.3 cm, 每穴 3 苗。机插时寸水移栽活棵, 分蘖期稳定的浅水层灌溉; 在有效分蘖临界叶龄的前一个叶龄(N - n - 1), 茎蘖数达到预期穗数的 80% 时, 开始排水搁田, 轻搁、多搁; 拔节至成熟期实行湿润灌溉, 干干湿湿; 收获前 5~7 d 断水。病虫害防治按当地大面积生产统一实施。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 干物质测定 分别于分蘖中期(栽后 20 天)、

拔节期、抽穗期和成熟期, 按小区茎蘖数的平均数取代表性植株 3 穴, 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 下烘干至恒重, 测定各器官干物质重。

1.3.2 植株全氮的测定 将分蘖中期、拔节期、抽穗期、成熟期各器官(茎鞘、叶片和穗)烘干后粉碎, 采用浓 H₂SO₄ 碳化, H₂O₂ 高温消煮, 以半微量凯氏定氮法测定各器官含氮量, 并计算植株全氮量。

1.3.3 产量的测定 成熟期采用五点法每小区普查 50 穴, 计算有效穗数, 并根据平均成穗数取 5 穴调查每穗粒数、结实率, 测定千粒重, 计算理论产量, 并实收核产。

1.3.4 数据计算和统计分析 氮素吸收量(kg/hm²) = 该时期地上部干物重 × 氮含量^[17]

氮素阶段吸收量(kg/hm²) = 后一时期氮素吸收量 - 前一时期氮素吸收量^[17]

氮肥农学利用率(kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 氮空白区籽粒产量)/施氮量^[5]

氮肥吸收利用率(%) = (施氮区水稻吸氮量 - 氮空白区水稻吸氮量)/施氮量 × 100^[5]。

氮肥生理利用率(kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 氮空白区籽粒产量)/(施氮区水稻吸氮量 - 空白区水稻吸氮量)^[18]

氮肥偏生产力(kg/kg) = 水稻产量/施氮量^[5]

氮素阶段积累比例(%) = 氮素阶段积累量/成熟期氮素积累量 × 100^[18]

氮素阶段吸收速率[kg/(hm² · d)] = 氮素阶段吸收量/前后两时期间隔天数^[17]

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据的录入和计算, 运用 SPSS 16.0 软件进行统计分析, 对同年同品种处理间 LSD 多重比较。两年试验结果趋势一致, 本文主要以 2013 年数据作分析。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成

对两年两品种不同施氮量和氮肥运筹的产量及其构成因素方差分析(表 1)表明, 不同氮肥运筹产量差异显著, 穗数在施氮量间和氮肥运筹间差异显著, 每穗粒数在品种间差异显著, 在年度、品种、施氮量和氮肥运筹间存在互作效应, 结实率在品种和年度互作间差异极显著。2012~2013 年, 2 个超级粳稻品种 N1 和 N2 水平产量平均值显著高于 CK, 但 N1 与 N2 水平产量平均值相当, 差异不显著(表 2)。与 CFP 相比, N1 水平下 MFP 增产 5.18%~7.10%, 差异达显著水平, 而 N2 水平下 MFP 增产

表 1 产量及其构成因素在年度间、品种间、施氮量间及氮肥运筹间的方差分析

Table 1 Analysis of variance of the grain yield and its components among years, cultivars, nitrogen rates and nitrogen application practices

变异来源 Source of variation	自由度 df	产量 Yield	穗数 Panicle	每穗粒数 Grains per panicle	群体颖花量 Population spikelet	结实率 Filled-grain percentage	千粒重 1000-grain weight
年度 Y	1	0. 69	10. 61	42. 61	0. 35	0. 42	0. 11
品种 C	1	2. 46	116. 79	300. 532 *	11. 97	0. 19	0. 03
施氮量 NR	1	151. 13	252. 24 *	11. 23	493. 45 *	13. 16	36. 00
氮肥运筹 NA	1	972. 67 *	154. 86 *	119. 87	381. 78 *	1. 88	0. 14
品种 × 施氮量 C × NR	1	3. 32	3. 74	0. 03	0. 84	0. 00	2. 67
施氮量 × 氮肥运筹 NR × NA	1	16. 48	0. 07	4. 59	1. 74	0. 34	0. 01
品种 × 氮肥运筹 C × NA	1	0. 03	5. 46	0. 32	2. 65	3. 55	2. 85
品种 × 年度 C × Y	1	3. 43	3. 60	1. 01	0. 24	115. 48 * *	2. 49
施氮量 × 年度 NR × Y	1	0. 16	0. 14	4. 03	0. 07	6. 35	0. 31
氮肥运筹 × 年度 NA × Y	1	0. 21	0. 54	0. 95	0. 42	5. 86	2. 60
品种 × 施氮量 × 氮肥运筹 C × NR × NA	1	0. 08	0. 25	301. 50 *	0. 04	0. 30	2. 67
施氮量 × 氮肥运筹 × 年度 NR × NA × Y	1	0. 70	1. 54	119. 67	0. 48	0. 45	0. 96
品种 × 施氮量 × 年度 C × NR × Y	1	32. 15	0. 92	1057. 30 *	0. 89	0. 31	1. 24
品种 × 氮肥运筹 × 年度 C × NA × Y	1	19. 12	0. 35	1298. 30 *	3. 92	4. 38	0. 89
品种 × 施氮量 × 氮肥运筹 × 年度 C × NR × NA × Y	1	6. 54	5. 82	1. 09	1. 66	0. 36	0. 63

注 (Note): * 和 * * 分别表示在 5% 和 1% 水平上差异显著 Indicate significant differences at 5% and 1% levels, respectively; Y—年度 Year; C—品种 Cultivar; NR—施氮量 Nitrogen rate; NA—氮肥运筹 Nitrogen application practice.

2. 70%~4. 29%, 差异不显著。从群体颖花量来看, N1 水平和 N2 水平群体颖花量平均值显著高于 CK, N1 与 N2 水平间差异不显著。与 CFP 相比, N1 和 N2 水平下 MFP 显著提高群体颖花量。再从产量构成因素来看, 与 CK 相比, 2 个超级粳稻品种 N1 和 N2 水平穗数和每穗粒数显著增加, 结实率显著减少, 千粒重相当。随着氮肥用量增加, 超级粳稻穗数显著增加, 每穗粒数和千粒重相当, 2012 年, 武运粳 24 号 N2 水平结实率显著低于 N1 水平, 其他品种两者差异不显著。与 CFP 相比, N1 和 N2 水平下 MFP 穗数显著增加, 每穗粒数有所增加, 差异不显著, 结实率和千粒重变化不一。这说明秸秆还田条件下, 较常规施氮运筹, 改进施氮运筹显著增加穗数, 提高群体颖花量而增产, 而增加施氮量增产效果不显著。

2.2 干物质积累

由表 3 可知, 秸秆还田条件下, 2 个超级粳稻品种关键生育期干物质积累受氮肥影响较大。N1 和 N2 水平分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期干物质积累量平均值显著高于 CK。与 N1 水平相比, N2 水平分蘖中期和拔节期干物质积累量平均值显著提高, 而抽穗期和成熟期干物质积累量有所增加, 但差异不显著。由表 3 还可以看出, 分蘖中期, N1 水平和 N2 水平下 MFP 干物质积累量显著高于 CFP, 分别高出 9. 05%~12. 06% 和 9. 55%~9. 88%; 拔节期, N2 水平下 MFP 干物质积累量显著增加; 抽穗期和成熟期, N1 水平下 MFP 干物质积累量较 CFP 显著提高, 分别提高 6. 16%~6. 32% 和 6. 52%~6. 53%, 而 N2 水平下 MFP 干物质积累量增加不显著。说明秸秆还田条件下改进氮肥运筹利于提高水稻干物质积累量。

表 2 氮肥运筹对水稻产量及其构成因素的影响
Table 2 Effect of nitrogen regimes on yield and its components of rice

年份 Year	品种 Cultivar	处理 Treatment	穗数 Panicle ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	每穗粒数 Grains per panicle (No./panicle)	群体颖花量 Population spikelet ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	结实率 Filled-grain percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
2012	武运粳 24 号 Wuyunjing 24	N1 + CFP	331.25 c	131.17 a	43448.30 c	94.68 a	27.25 a	10899.15 b
		N1 + MFP	338.12 b	134.93 a	45622.18 ab	94.70 a	27.29 a	11463.45 a
		N2 + CFP	341.40 b	130.04 a	44395.66 bc	93.52 b	27.21 a	11044.20 ab
		N2 + MFP	348.60 a	133.52 a	46545.07 a	93.25 b	27.23 a	11517.60 a
		CK	232.05 C	114.45 B	26559.18 B	96.38 A	27.53 A	6543.15 B
		N1 均值 Mean	334.68 B	133.05 A	44528.78 A	94.69 B	27.27 A	11181.30 A
	宁粳 3 号 Ningjing 3	N2 均值 Mean	345.00 A	131.78 A	45464.10 A	93.39 C	27.22 A	11280.90 A
		N1 + CFP	356.22 c	121.20 a	43173.86 c	93.15 a	27.20 a	10602.49 b
		N1 + MFP	364.43 b	125.69 a	45804.30 ab	92.85 a	27.21 a	11175.15 a
		N2 + CFP	367.98 b	120.16 a	44217.21 bc	92.56 a	27.08 a	10913.70 ab
		N2 + MFP	382.80 a	121.42 a	46479.58 a	92.54 a	27.16 a	11304.60 a
		CK	240.82 C	108.30 B	26080.81 B	95.16 A	27.31 A	6450.18 B
		N1 均值 Mean	360.33 B	123.44 A	44479.87 A	93.00 B	27.21 A	10888.82 A
		N2 均值 Mean	375.39 A	120.79 A	45343.73 A	92.55 B	27.12 A	11109.15 A
2013	武运粳 24 号 Wuyunjing 24	N1 + CFP	337.25 c	128.17 a	43223.57 b	94.38 a	27.23 a	10774.35 c
		N1 + MFP	347.12 b	130.93 a	45448.06 a	94.02 a	27.21 a	11346.30 a
		N2 + CFP	348.90 b	126.04 a	43975.36 b	93.88 a	27.25 a	10943.55 bc
		N2 + MFP	356.10 a	127.52 a	45409.87 a	93.58 a	27.12 a	11238.90 ab
		CK	238.05 C	112.05 B	26674.58 B	95.06 A	27.47 A	6453.45 B
		N1 均值 N1 Mean	342.18 B	129.55 A	44328.99 A	94.20 B	27.22 A	11060.33 A
	宁粳 3 号 Ningjing 3	N2 均值 N2 Mean	352.50 A	126.78 A	44689.95 A	93.73 B	27.19 A	11091.23 A
		N1 + CFP	351.72 c	118.20 a	41573.30 c	95.01 a	27.50 a	10521.45 b
		N1 + MFP	372.44 b	121.19 a	45135.44 ab	94.45 ab	27.32 a	11259.15 a
		N2 + CFP	370.98 b	120.16 a	44577.70 b	94.58 a	27.13 a	11003.10 a
		N2 + MFP	381.45 a	121.42 a	46315.66 a	93.51 b	27.10 a	11322.30 a
		CK	243.22 C	106.30 B	25854.29 B	95.87 A	27.59 A	6574.35 B
		N1 均值 N1 Mean	362.08 B	119.69 A	43338.89 A	94.73 B	27.41 A	10890.30 A
		N2 均值 N2 Mean	376.22 A	120.79 A	45443.39 A	94.06 B	27.12 A	11162.70 A

注 (Note): 不同大写字母表示 CK、N1 均值和 N2 均值在 5% 水平上差异显著, 不同小写字母表示 N1 + CFP、N1 + MFP、N2 + CFP 和 N2 + MFP 处理在 5% 水平上差异显著 Capital letters mean significant differences at the 5% level under CK, mean of N1 and mean of N2, and lowercase letters mean significant differences at the 5% level under N1 + CFP, N1 + MFP, N2 + CFP and N2 + MFP.

表 3 氮肥运筹对水稻干物质积累的影响 (kg/hm²)

Table 3 Effect of nitrogen fertilizer practices on dry matter accumulation of rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	分蘖中期 Mid-tillering	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
武运粳 24 号 Wuyunjing 24	N1 + CFP	1658. 10 c	3890. 10 b	10998. 61 b	17920. 90 b
	N1 + MFP	1858. 05 ab	4062. 14 b	11676. 40 a	19089. 13 a
	N2 + CFP	1804. 80 b	4021. 80 b	11447. 10 ab	18664. 80 ab
	N2 + MFP	1983. 15 a	4341. 90 a	11984. 25 a	19530. 30 a
	CK	1057. 80 C	2586. 02 C	6752. 42 B	10854. 45 B
	N1 均值 N1 Mean	1758. 08 B	3976. 12 B	11337. 51 A	18505. 02 A
	N2 均值 N2 Mean	1893. 98 A	4181. 85 A	11715. 68 A	19097. 55 A
宁粳 3 号 Ningjing 3	N1 + CFP	1683. 15 c	3818. 38 b	10710. 44 b	17347. 14 b
	N1 + MFP	1835. 40 b	3989. 17 b	11387. 29 a	18479. 52 a
	N2 + CFP	1773. 60 b	3946. 80 b	11202. 60 ab	18274. 80 ab
	N2 + MFP	1942. 95 a	4274. 10 a	11678. 10 a	19038. 90 a
	CK	1053. 45 C	2533. 49 C	6677. 72 B	10740. 39 B
	N1 均值 N1 Mean	1759. 28 B	3903. 78 B	11048. 86 A	17913. 33 A
	N2 均值 N2 Mean	1858. 28 A	4110. 45 A	11440. 35 A	18656. 85 A

注(Note): 不同大写字母表示 CK、N1 均值和 N2 均值在 5% 水平上差异显著,不同小写字母表示在 N1 + CFP、N1 + MFP、N2 + CFP 和 N2 + MFP 处理在 5% 水平上差异显著 Capital letters mean significant differences at the 5% level under CK, mean of N1 and mean of N2, and lowercase letters mean significant differences at the 5% level under N1 + CFP, N1 + MFP, N2 + CFP and N2 + MFP.

2.3 氮素积累

由表 4 可知, 秸秆还田下不同氮肥水平超级粳稻氮素积累量存在差异。随着氮肥用量增加, 2 个超级粳稻品种分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期氮素积累量平均值增加, N2 水平分蘖中期和拔节期氮素积累量较 N1 分别增加 7. 01% ~ 7. 27% 和 6. 10% ~ 6. 50%, 差异达显著水平。与 CFP 相比, MFP 提高超级粳稻分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期氮素积累量, N1 水平下 MFP 分蘖中期和成熟期显著提高。

2.4 氮素阶段积累

由表 5 可知, N1 水平和 N2 水平各生育阶段氮素积累量平均值显著高于 CK。随着氮肥水平提高, 移栽期至分蘖中期和分蘖中期至拔节期氮素积累量显著增加, 其氮素积累比例亦高。移栽期至分蘖中期, N1 和 N2 水平下 MFP 氮素积累量较 CFP 高出 11. 38% ~ 12. 86% 和 13. 02% ~ 13. 23%, 差异达显著水平, 其积累比例亦高于 CFP; 分蘖中期至拔节期, N1 水平 MFP 和 CFP 氮素积累量相当, 而 N2 水平下 MFP 显著高于 CFP; 拔节至抽穗期和抽穗至成

熟期, N1 和 N2 水平 MFP 和 CFP 氮素积累量相当, 差异不显著, 但拔节至抽穗期 MFP 氮素积累比例较低。

2.5 氮素阶段吸收速率

由表 6 可知, N1 和 N2 水平各生育阶段氮素吸收速率显著高于 CK。随着氮肥水平提高, 移栽期至分蘖中期和分蘖中期至拔节期氮素吸收速率显著增加; 而拔节至抽穗期和抽穗至成熟期氮素吸收速率 2 个氮肥水平相当。分析表 6 可知, 移栽至分蘖中期, MFP 氮素吸收速率显著高于 CFP; 分蘖中期至拔节期, N2 水平下 MFP 氮素吸收速率显著高于 CFP; 拔节至抽穗期和抽穗至成熟期, 2 个氮肥水平下 MFP 与 CFP 氮素吸收速率相当, 差异不显著。

2.6 氮肥利用率

由表 7 可知, 随着氮肥水平提高, 除宁粳 3 号氮生理利用率外, 2 个超级粳稻品种氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥生理利用率和氮偏肥生产力显著下降。与 CFP 相比较, MFP 提高了氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥生理利用率和氮偏肥生产力, 在 N1 水平下两者差异达显著水平。

表 4 氮肥运筹对水稻氮素积累量的影响 (kg/hm^2)
Table 4 Effect of nitrogen fertilizer practices on N accumulation of rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	分蘖中期 Mid-tillering	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
武运粳 24 号 Wuyunjing 24	N1 + CFP	38.47 c	87.14 c	164.98 b	195.34 b
	N1 + MFP	42.79 b	92.62 b	172.81 ab	206.16 a
	N2 + CFP	41.53 b	90.89 b	171.71 ab	203.45 ab
	N2 + MFP	46.88 a	99.86 a	177.37 a	210.93 a
	CK	14.39 C	30.77 C	61.45 B	68.38 B
	N1 均值 Mean	42.02 B	89.86 B	168.93 A	200.78 A
	N2 均值 Mean	45.08 A	95.35 A	174.56 A	207.21 A
宁粳 3 号 Ningjing 3	N1 + CFP	37.01 c	82.86 c	158.51 b	189.08 b
	N1 + MFP	41.70 b	87.76 b	166.25 ab	199.58 a
	N2 + CFP	39.93 bc	86.43 b	166.92 ab	197.37 ab
	N2 + MFP	45.15 a	95.31 a	171.67 a	203.72 a
	CK	13.50 C	29.14 C	59.43 B	66.59 B
	N1 均值 Mean	40.38 B	85.30 B	162.42 A	194.36 A
	N2 均值 Mean	43.20 A	90.84 A	169.32 A	200.56 A

注 (Note): 不同大写字母表示 CK、N1 均值和 N2 均值在 5% 水平上差异显著, 不同小写字母表示 N1 + CFP、N1 + MFP、N2 + CFP 和 N2 + MFP 处理在 5% 水平上差异显著 Capital letters mean significant differences at the 5% level under CK, mean of N1 and mean of N2, and lowercase letters mean significant differences at the 5% level under N1 + CFP, N1 + MFP, N2 + CFP and N2 + MFP.

3 讨论

3.1 改进施氮运筹对水稻产量的影响

已有大量研究报道, 秸秆还田提高水稻产量 5%~10%^[19-21]。秸秆还田后水稻前期生长受抑制, 具有明显的减穗效应, 但抽穗后秸秆分解由吸氮转为释氮, 促进后期群体生长^[22]。没有秸秆还田, 凌启鸿等^[23]研究认为水稻中小苗移栽, 氮肥运筹基肥、穗肥以 6:4~5:5 利于获得高产。针对早熟晚粳水稻品种, 张洪程等^[24]阐明水稻氮肥后移机理, 提出氮肥后移 (基肥: 穗肥 = 5:5) 利于巩固穗数, 攻取大穗, 提高水稻产量。本研究结果表明秸秆还田条件下改进施氮运筹 (基肥: 穗肥 = 7:3) 提高机插超级粳稻产量, 主要是由于生育前期秸秆腐烂与水稻争氮, 抑制或推迟水稻分蘖, 增加水稻高位分蘖数量, 而适当提高前期氮肥供应量, 弥补水稻分蘖期氮素不足, 促进水稻低位优势分蘖发生, 利于协调形成足量壮秆大穗。秸秆还田条件下, 李勇等^[25]研

究认为氮肥优化运筹方案为基肥: 穗肥 = 6.5:3.5, 基肥: 分蘖肥 = 8:2。本试验条件下, 氮肥分配比例改为基肥: 分蘖肥: 穗肥 = 4:3:3, 显著增加穗数而提高机插超级粳稻产量, 与李勇等^[25]研究结果具有相似之处。说明秸秆还田下提高基肥比例利于增加水稻产量。由于本文氮肥运筹方式较少, 其他氮肥运筹优化方案是否增产有待深入研究。魏海燕等^[26]研究认为秸秆不还田下机插超级稻适宜的施氮量为 300 kg/hm^2 , 能协调穗粒结构, 增加群体颖花量而提高产量。本试验研究表明, 秸秆还田条件下机插超级粳稻高产高效适宜施氮量为 300 kg/hm^2 , 而提高氮肥水平, 机插超级粳稻穗数显著增加, 每穗粒数、结实率和千粒重减少, 增产效果不显著。

因此, 水稻秸秆还田后需要改进常规施氮运筹模式, 提高基肥施氮比例, 缓解水稻前期因秸秆分解微生物争氮造成氮素供应不足, 促进水稻分蘖, 提高水稻有效穗数。而增加施氮量同样提高穗数, 但

表 5 氮肥运筹对水稻氮素阶段积累量及其积累比例的影响
Table 5 Effect of nitrogen fertilizer practices on periodical N accumulation and their percentages in the total accumulation of rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	移栽期至分蘖中期 Transplanting-Mid-tillering			分蘖中期至拔节期 Mid-tillering-Jointing			拔节期至抽穗期 Jointing-Heading			抽穗期至成熟期 Heading-Maturity		
		积累量 Accumulation (kg/hm ²)	比例 Percentage (%)	比例 Percentage (%)	积累量 Accumulation (kg/hm ²)	比例 Percentage (%)	比例 Percentage (%)	积累量 Accumulation (kg/hm ²)	比例 Percentage (%)	比例 Percentage (%)	积累量 Accumulation (kg/hm ²)	比例 Percentage (%)	比例 Percentage (%)
武运粳 24 号 Wuyunjing 24	N1 + CFP	38.00 c	19.45		48.67 b	24.92		77.84 a	39.85		30.36 a	15.54	
	N1 + MFP	42.32 b	20.53		49.82 b	24.17		80.19 a	38.90		33.35 a	16.18	
	N2 + CFP	41.06 b	20.18		49.36 b	24.26		80.81 a	39.72		31.74 a	15.60	
	N2 + MFP	46.41 a	22.00		52.99 a	25.12		77.50 a	36.74		33.56 a	15.91	
	CK	13.92 C	20.36		16.38 C	23.96		30.67 B	44.86		6.94 B	10.14	
宁粳 3 号 Ningjing 3	N1 均值 N1 Mean	41.55 B	20.69		47.84 B	23.83		79.07 A	39.38		31.85 A	15.86	
	N2 均值 N2 Mean	44.61 A	21.53		50.27 A	24.26		79.22 A	38.23		32.64 A	15.75	
	N1 + CFP	36.51 c	19.31		45.85 b	24.25		75.66 a	40.01		30.57 a	16.17	
	N1 + MFP	41.21 b	20.65		46.06 b	23.08		78.49 a	39.33		33.32 a	16.70	
	N2 + CFP	39.43 b	19.98		46.51 b	23.56		80.48 a	40.78		30.45 a	15.43	
	N2 + MFP	44.65 a	21.92		50.17 a	24.63		76.36 a	37.48		32.05 a	15.73	
	CK	13.00 C	19.53		15.63 C	23.48		30.30 B	45.50		7.16 B	10.75	
	N1 均值 N1 Mean	39.88 B	20.52		44.92 B	23.11		77.12 A	39.68		31.94 A	16.43	
	N2 均值 N2 Mean	42.71 A	21.29		47.64 A	23.75		78.48 A	39.13		31.24 A	15.58	

注(Notes): 不同大写字母表示 CK、N1 均值和 N2 均值在 5% 水平上差异显著, 不同小写字母表示 N1 + CFP、N1 + MFP、N2 + CFP 和 N2 + MFP 处理在 5% 水平上差异显著 Capital letters mean significant differences at the 5% level under CK, mean of N1 and mean of N2, and lowercase letters mean significant differences at the 5% level under N1 + CFP, N1 + MFP, N2 + CFP and N2 + MFP.

表 6 氮肥运筹对水稻氮素阶段吸收速率影响[kg/(hm² · d)]
Table 6 Effect of nitrogen fertilizer practices on N uptake rates at different periods of rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	移栽期至分蘖中期 Transplanting to mid-tillering	分蘖中期至拔节期 Mid-tillering to jointing	拔节至抽穗期 Jointing to heading	抽穗至成熟期 Heading to maturity
武运粳 24 号 Wuyunjing 24	N1 + CFP	1.90 c	1.87 b	2.68 a	0.52 a
	N1 + MFP	2.12 b	1.92 b	2.77 a	0.58 a
	N2 + CFP	2.05 b	1.90 b	2.79 a	0.55 a
	N2 + MFP	2.32 a	2.04 a	2.67 a	0.58 a
	CK	0.70 C	0.66 C	1.14 B	0.12 B
	N1 均值 Mean	2.08 B	1.89 B	2.72 A	0.55 A
	N2 均值 Mean	2.23 A	1.97 A	2.73 A	0.56 A
宁粳 3 号 Ningjing 3	N1 + CFP	1.83 c	1.64 b	2.52 b	0.49 a
	N1 + MFP	2.06 b	1.64 b	2.62 ab	0.53 a
	N2 + CFP	1.97 b	1.66 b	2.68 a	0.48 a
	N2 + MFP	2.23 a	1.79 a	2.55 ab	0.51 a
	CK	0.65 C	0.58 C	1.04 B	0.12 B
	N1 均值 Mean	1.99 B	1.64 B	2.57 A	0.51 A
	N2 均值 Mean	2.14 A	1.73 A	2.61 A	0.50 A

注(Note): 不同大写字母表示 CK、N1 均值和 N2 均值在 5% 水平上差异显著, 不同小写字母表示 N1 + CFP、N1 + MFP、N2 + CFP 和 N2 + MFP 处理在 5% 水平上差异显著 Capital letters mean significant differences at the 5% level under CK, mean of N1 and mean of N2, and lowercase letters mean significant differences at the 5% level under N1 + CFP, N1 + MFP, N2 + CFP and N2 + MFP.

表 7 氮肥运筹对水稻氮肥利用率的影响
Table 7 Effect of nitrogen fertilizer practices on N fertilizer use efficiency of rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	农学利用率(kg/kg) Agronomic efficiency	吸收利用率(%) Recovery efficiency	生理利用率(kg/kg) Physiological efficiency	偏生产力(kg/kg) Partial factor productivity
武运粳 24 号 Wuyunjing 24	N1 + CFP	14.52 b	42.32 b	34.31 b	36.33 b
	N1 + MFP	16.40 a	45.93 a	35.71 a	38.21 a
	N2 + CFP	13.05 c	39.15 c	33.32 c	32.01 c
	N2 + MFP	14.42 b	41.32 b	34.90 ab	33.38 c
	N1 均值 Mean	15.46 A	44.12 A	35.01 A	37.27 A
	N2 均值 Mean	13.73 B	40.23 B	34.11 B	32.70 B
宁粳 3 号 Ningjing 3	N1 + CFP	13.84 b	40.83 b	33.90 b	35.34 b
	N1 + MFP	15.75 a	44.33 a	35.53 a	37.25 a
	N2 + CFP	12.94 c	37.91 c	34.13 b	31.63 d
	N2 + MFP	14.07 b	39.75 b	35.40 a	32.77 c
	N1 均值 Mean	14.80 A	42.58 A	34.71 A	36.30 A
	N2 均值 Mean	13.50 B	38.83 B	34.77 A	32.20 B

注(Note): 不同大写字母表示 N1 均值和 N2 均值在 5% 水平上差异显著, 不同小写字母表示 N1 + CFP、N1 + MFP、N2 + CFP 和 N2 + MFP 处理在 5% 水平上差异显著 Capital letters mean significant differences at the 5% level under mean of N1 and mean of N2, and lowercase letters mean significant differences at the 5% level under N1 + CFP, N1 + MFP, N2 + CFP and N2 + MFP.

易造成群体过大,减少每穗粒数和结实率。

3.2 改进施氮运筹对水稻氮素吸收利用的影响

前人针对施氮量或氮肥运筹对水稻氮素吸收利用的影响报道较多,研究结果不一。秸秆不还田条件下,张耀鸿等^[27]研究认为随着施氮量增加,水稻总吸氮量和氮素利用率下降。本研究发现,秸秆还田下增加施氮量,机插超级粳稻各生育期吸氮量有所增加,氮肥利用率显著下降。万靓军等^[28]研究认为降低穗肥施氮比例,超级杂交稻氮肥利用效率呈先升后降,以基蘖肥、穗肥比例为6:4时,氮素利用率最高。而吴文革等^[14]研究指出,双季早稻基肥:蘖肥:穗肥=5:2.5:2.5,促进氮素吸收,提高氮肥利用效率。本研究条件下,秸秆还田后改进施氮运筹(基蘖肥、穗肥比例为7:3)提高水稻氮素利用率。王建明等^[16]也研究认为,秸秆还田条件下水稻的氮吸收量和氮肥利用率随基蘖肥:穗肥比例提高而提高。造成上述差异的原因主要是秸秆还田降低水稻前期土壤有效氮含量,减少水稻前期吸氮量,而提高水稻后期土壤养分含量,促进水稻抽穗后氮素吸收积累^[29]。因此,秸秆还田条件下适当增加水稻前期氮素供应量,利于协调水稻全生育期氮素吸收利用,提高氮素利用率。

本研究结果还表明,与常规施氮运筹相比,改进施氮运筹提高机插超级粳稻分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期吸氮量,显著增加移栽期至分蘖中期氮素积累量和氮素吸收速率。进一步相关分析表明,机插超级粳稻产量与分蘖中期吸氮量($r=0.841^{**}$)、抽穗期吸氮量($r=0.776^{*}$)和成熟期吸氮量($r=0.822^{*}$)呈显著或极显著正相关关系,与移栽期至分蘖中期氮积累量($r=0.841^{**}$)和氮素吸收速率($r=0.842^{**}$)、抽穗至成熟期氮积累量($r=0.809^{*}$)呈显著或极显著正相关关系。说明秸秆还田条件下,改进氮肥运筹,适当提高基蘖肥比例,显著增加移栽至分蘖中期氮素积累量和氮素吸收速率,协调生育中、后期物质生产与氮素积累,提高水稻产量和氮肥利用率。

参 考 文 献:

- [1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273.
- [2] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H *et al.* Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [3] 张卫峰,马林,黄高强,等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3161-3171.
Zhang W F, Ma L, Huang G Q, *et al.* The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(15): 3161-3171.
- [4] 杨梢娜,俞巧钢,叶静,等. 施氮水平对杂交晚粳浙优12产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1120-1125.
Yang S N, Yu Q G, Ye J *et al.* Effects of nitrogen fertilization on yield and nitrogen use efficiency of hybrid rice [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1120-1125.
- [5] Peng S B, Buresh R J, Huang J L *et al.* Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China [J]. Field Crops Research, 2006, 96: 37-47.
- [6] 汪军,王德建,张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 265-270.
Wang J, Wang D J, Zhang G. Effects of different N-fertilizer rates with straw incorporation on rice yield and economic benefit of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 265-270.
- [7] 张军,董啸波,葛梦婕,等. 不同地力水平下超级稻高产高效适宜施氮量及其机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 261-272.
Zhang J, Dong X B, Ge M J *et al.* Optimum nitrogen application and its mechanism of high yield and efficiency technique in super rice under different soil fertilities [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 261-272.
- [8] 张洪程,王秀芹,戴其根,等. 施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 800-806.
Zhang H C, Wang X J, Dai Q G *et al.* Effects of N application rate on yield, quality and characters of nitrogen uptake of hybrid rice variety Liangyoupei9 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(7): 800-806.
- [9] 钱银飞,张洪程,李杰,等. 施氮量对机插杂交粳稻徐优403产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 522-528.
Qian Y F, Zhang H Q, Li J *et al.* Effects of nitrogen application rate on yield and quality of mechanical-transplanted hybrid japonica rice Xuyou403 [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(3): 522-528.
- [10] 王秀斌,徐新朋,孙刚,等. 氮肥用量对双季稻产量和氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1279-1286.
Wang X B, Xu X P, Su G *et al.* Effects of nitrogen fertilization on grain yield and nitrogen use efficiency of double cropping rice [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(6): 1279-1286.
- [11] 王允青,郭熙盛,戴明伏. 氮肥运筹方式对杂交水稻干物质积累和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008, 2: 31-34.
Wang Y Q, Guo X S, Dai M F. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and yield of hybrid rice [J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2008, 2: 31-34.
- [12] Zeng X M, Han B J, Xu F S *et al.* Effects of modified fertilization technology on the grain yield and nitrogen use

- efficiency of midseason rice[J]. *Field Crops Research*, 2012, 137: 203–212.
- [13] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(4): 490–496.
- Jiang L G, Cao W X, Gan X Q *et al.* Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 490–496.
- [14] 吴文革, 张四海, 赵决建, 等. 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 757–764.
- Wu W G, Zhang S H, Zhao J J *et al.* Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 757–764.
- [15] 朱从海, 蔡爱琴, 严军 等. 小麦秸秆还田后施氮量对机插水稻产量的影响[J]. *中国稻米*, 2011, 17(4): 32–34.
- Zhu C H, Cai A Q, Yan J *et al.* Effects of nitrogen rate on yield of mechanical transplanted rice with wheat residue return[J]. *China Rice*, 2011, 17(4): 32–34.
- [16] 王建明, 杨建忠, 何晓艳, 等. 小麦秸秆还田条件下氮肥运筹对水稻产量、品质和氮素利用的影响[J]. *江苏农业科学*, 2010, 6: 124–126.
- Wang J M, Yang J Z, He X Y *et al.* Effects of nitrogen application on yield, quality and nitrogen use efficiency of rice under wheat residue return[J]. *Journal of Agriculture Science of Jiangsu*, 2010, 6: 124–126.
- [17] 殷春渊, 魏海燕, 张庆, 等. 不同氮肥水平下中熟籼稻和粳稻产量、氮素吸收利用差异及相互关系[J]. *作物学报*, 2009, 35(2): 348–355.
- Yin C Y, Wei H Y, Zhang Q *et al.* Differences and correlations in grain yield, N uptake and utilization between medium-maturing indica and japonica rice under different N fertilizer levels[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(2): 348–355.
- [18] 李敏, 张洪程, 马群, 等. 不同氮肥群体最高生产力类型粳稻品种的氮素吸收利用特性[J]. *中国水稻科学*, 2012, 26(2): 197–204.
- Li M, Zhang H C, Ma Q *et al.* Nitrogen absorption and utilization characteristics of japonica rice cultivars with different productivities at their optimum nitrogen levels[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(2): 197–204.
- [19] 袁玲, 张宣, 杨静, 等. 不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 350–359.
- Yuan L, Zhang X, Yang J *et al.* Effects of different cultivation methods and straw incorporation on grain yield and nutrition quality of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 350–359.
- [20] 叶文培, 谢小立, 王凯荣, 等. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(1): 65–70.
- Ye W P, Xie X L, Wang K R *et al.* Effects of rice straw manuring in different periods on growth and yield of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(1): 65–70.
- [21] Xu Y Z, Nie L X, Buresh R J *et al.* Agronomic performance of late-season rice under different tillage, straw, and nitrogen management[J]. *Field Crops Research*, 2010, 115: 79–84.
- [22] 陈新红, 韩正光, 叶玉秀, 等. 麦草全量机械还田对机插水稻产量和生长特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(8): 38–41.
- Chen X H, Han Z G, Ye Y X *et al.* Effects of wheat-residue application on grain yield and growth characteristics in mechanical transplanting rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(8): 38–41.
- [23] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2457–2467.
- Ling Q H, Zhang H C, Dai Q G *et al.* Study on precise and quantitative N application in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2457–2467.
- [24] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机理[J]. *作物学报*, 2011, 37(10): 1–15.
- Zhang H C, Wu H C, Dai Q G *et al.* Precise postponing nitrogen application and its mechanism in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(10): 1–15.
- [25] 李勇, 曹红娣, 邓九胜, 等. 小麦秸秆全量还田对土壤速效氮及水稻产量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(4): 46–51.
- Li Y, Cao H D, Deng J S *et al.* Effect of return of total wheat straw on soil mineral nitrogen dynamics and rice yield[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4): 46–51.
- [26] 魏海燕, 王亚江, 孟天瑶, 等. 机插超级粳稻产量、品质及氮肥利用率对氮肥的响应[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 488–496.
- Wei H Y, Wang Y J, Meng T Y *et al.* Response of yield, quality and nitrogen use efficiency to nitrogen fertilizer from mechanical transplanting super japonica rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 488–496.
- [27] 张耀鸿, 张亚丽, 黄启为, 等. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 616–621.
- Zhang Y H, Zhang Y L, Huang Q W *et al.* Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 616–621.
- [28] 万靚军, 张洪程, 霍中洋, 等. 氮肥运筹对超级杂交稻产量、品质及氮素利用率的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(2): 175–182.
- Wang L J, Zhang H C, Huo Z Y *et al.* Effects of nitrogen application regimes on yield, quality and nitrogen use efficiency of super japonica hybrid rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(2): 175–182.
- [29] 徐国伟, 吴长付, 刘辉, 等. 秸秆还田与氮肥管理对水稻养分吸收的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 191–195.
- Xu G W, Wu C F, Liu H *et al.* Effects of straw residue return and nitrogen management on nutrient absorption of rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 191–195.