

刘红江, 肖敏, 张丽萍, 等. 前氮后移对水稻氮素吸收和利用效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(3): 550-554.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2017.03.010

前氮后移对水稻氮素吸收和利用效率的影响

刘红江, 肖敏, 张丽萍, 陈留根, 张岳芳, 郭智, 郑建初
(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 本研究通过调整水稻基肥蘖肥穗肥施用氮肥比例的方法, 来减轻水稻生育前期大量氮素流失的面源污染风险。2015年在苏州市相城区御亭现代农业产业园, 开展田间小区试验, 以常规粳稻品种武运粳29号为供试材料, 采用基肥机械深施, 在施氮量 300 kg/hm^2 水平下, 设计5个氮肥运筹处理, 基肥: 分蘖肥: 穗肥的比例分别为5:2:3(N1, 氮肥前置); 4:2:4(N2, 常规氮肥运筹); 3:2:5(N3, 前氮后移); 2:2:6(N4, 前氮后移), 以及不施氮肥处理(N0, 空白对照), 研究前氮后移对水稻氮素吸收利用效率的影响。结果表明: 除N0处理外, 不同处理间水稻氮素籽粒生产效率差异不显著。与N2处理相比较, N4处理水稻氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力均有所下降, 但处理间的差异未达到显著水平。与常规氮肥运筹相比, 将20%作为水稻基肥的氮肥后移至穗肥施用, 对水稻产量、氮素累积量和氮素籽粒生产效率的影响不大。

关键词: 氮肥后移; 水稻; 产量; 氮肥利用效率

中图分类号: S511.2⁺20.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2017)03-0550-05

Nitrogen uptake and use efficiency of rice in response to postponed nitrogen application

LIU Hong-jiang, XIAO Min, ZHANG Li-ping, CHEN Liu-gen, ZHANG Yue-fang, GUO Zhi, ZHENG Jian-chu

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of postponing nitrogen(N) application on nitrogen uptake and use efficiency of rice in Suzhou, 2015. Nitrogen level of 300 kg/hm^2 was applied to conventional japonica rice Wuyunjing 29, and the proportions of basal fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer were set as 5:2:3(N1), 4:2:4(N2), 3:2:5(N3), and 2:2:6(N4). N3 and N4 were postponed nitrogen applications, and no nitrogen fertilizer was blank control(N0). No significant differences in nitrogen use efficiency for grain yield was showed in four different treatments. Compared with N2 treatment which was conventional nitrogen application, N4 treatment presented insignificantly-decreased nitrogen use efficiency, nitrogen absorption rate, and nitrogen partial factor productivity, suggesting that there was no significant influence of postponing 20% base nitrogen fertilizer for panicle fertilizer on rice yield, nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency for grain production.

Key words: postponed nitrogen application; rice; yield; nitrogen use efficiency

收稿日期: 2016-09-28

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B12)、公益性行业(农业)科研专项(201503122)

作者简介: 刘红江(1979-), 男, 江苏建湖人, 博士, 副研究员, 主要从事农业生态和水稻栽培生理生态研究。(E-mail) Liuhongjiang2004@sohu.com

通讯作者: 郑建初, (E-mail) zjc@jaas.ac.cn

中国是水稻种植和稻米消费大国, 常年水稻种植面积在 $3.0\times 10^7\text{ hm}^2$ 左右, 总产量为 $2.04\times 10^8\text{ t}$ 左右^[1]。为了提高水稻单产, 中国稻田氮肥的投入量也在逐年增加, 有关报道显示, 中国稻田单季氮肥平

均施用量为 180.0 kg/hm^2 , 比世界平均水平高出约 75%, 太湖地区的部分高产稻田氮肥施用量甚至达到 360.0 kg/hm^2 [2-3]。加大氮肥投入量, 虽然能够显著提高水稻产量 [4], 但是也降低了氮素利用效率。据报道, 中国水稻氮肥的利用效率平均只有 30% 左右 [5]。水稻氮肥利用效率主要受水稻品种耐肥性 [6-7]、土壤供肥能力 [8]、水分管理 [9-10]、施肥量 [11-12] 和氮肥运筹 [13-15] 等因素有关。已有研究结果表明, 通过合理氮肥运筹, 在最适时期精确定量施用氮肥, 能够使水稻氮素利用效率提高到 45% [16]。此外, 通过改进氮肥运筹方式, 将水稻氮肥后移, 能够促进水稻生长发育, 提高群体质量, 进而提高水稻产量 [17-19]。目前为止, 关于氮肥后移对太湖地区高产农田水稻氮素利用效率影响的报道较少。为此, 本研究通过设计基肥: 分蘖肥: 穗肥的比例分别为 5:2:3 (N1, 氮肥前置); 4:2:4 (N2, 常规氮肥运筹); 3:2:5 (N3, 前氮后移); 2:2:6 (N4, 前氮后移), 以及不施氮肥 (N0, 空白对照), 共 5 个处理, 研究氮肥运筹对水稻氮素吸收利用效率的影响, 以期为中国稻田合理氮肥运筹, 及保障国家粮食安全和农业生态环境健康提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验于 2015 年 6 月-2015 年 11 月在江苏省苏州市相城区御亭现代农业产业园试验田 ($31^{\circ}27'N$, $120^{\circ}25'E$) 进行, 该地区属于北亚热带季风气候, 年降水量 $1\ 100 \text{ mm}$ 左右, 年平均温度约 15.7°C , 年日照时间 $\geq 2\ 000 \text{ h}$, 年无霜期 $\geq 230 \text{ d}$, 轮作制度为冬小麦-水稻轮作。试验田土壤为黄泥土, 基本理化性状为: 全氮 1.76 g/kg , 总磷 0.41 g/kg , 速效氮 44.37 mg/kg , 速效磷 16.23 mg/kg , 速效钾 169.06 mg/kg , 有机质 24.38 g/kg , 容重 1.24 g/cm^3 , pH 值 6.9。

1.2 供试材料

在上一季小麦收获时, 将秸秆机械切碎后耕翻还田。试验采用随机区组设计, 以不施氮肥处理 (N0) 作为空白对照。参考当地种植大户和农户施肥量, 采用太湖地区常规施肥量, 即施纯氮 300.0 kg/hm^2 , P_2O_5 67.5 kg/hm^2 , K_2O 135.0 kg/hm^2 。氮肥施用设基肥: 分蘖肥: 穗肥的比例分别为 5:2:3 (N1, 氮肥前置); 4:2:4 (N2, 常规氮肥运筹);

3:2:5 (N3, 前氮后移); 2:2:6 (N4, 前氮后移) 等 4 个肥料运筹, 其中, 穗肥分别于水稻倒 4 叶期和倒 2 叶期分 2 次施用, 施用量各占 50%, 磷肥全部作为基肥施用, 钾肥按照基肥和穗肥各施用 50%, 基肥采用机械深施。试验肥料品种: 施用 15-15-15 的复合肥 (含氮 15%, P_2O_5 15%, K_2O 15%), 氮、磷、钾肥不足部分依次用尿素 (含氮 46%)、过磷酸钙 (含 P_2O_5 12%) 和氯化钾 (含 K_2O 60%) 补充。试验重复 3 次, 小区面积为 $10 \text{ m} \times 12 \text{ m}$, 小区间田埂宽约 50 cm , 高约 20 cm , 田埂用地膜包覆。各小区地势平整、地力均衡。

供试水稻品种为: 武运粳 29 号。机插秧, 2015 年 6 月 20 日插秧, 移栽密度行距为 30 cm , 株距为 13.3 cm , 每穴 3 苗, 11 月 5 日收获。水分管理为 6 月 20 日-7 月 22 日采用浅水湿润灌溉 (约 5 cm), 7 月 23 日-8 月 10 日进行 2 次脱水烤田, 8 月 11 日到收割前 14 日进行间隙灌溉。其他田间管理措施均按照水稻高产要求进行操作。

1.3 测定内容与计算方法

1.3.1 水稻产量 水稻成熟期, 每个处理调查 100 穴水稻穗数, 计算平均穗数, 据此取有代表性的植株样 10 穴, 脱粒后用水漂法区分饱粒 (沉入水底者) 和空瘪粒, 测定穗粒数, 计算水稻产量。产量 (t/hm^2) = 每 1 m^2 穗数 \times 每穗粒数 (粒/穗) \times 结实率 (%) \times 千粒质量 (g) / $1\ 000 / 1\ 000 \times 10\ 000$

1.3.2 植株氮素含量 将成熟期水稻植株样品分为茎、绿叶、黄叶、穗等部分, 烘干, 称质量, 粉碎后, 用浓 H_2SO_4 - H_2O_2 消解, 再用半微量蒸馏法测定全氮含量 [18]。

1.3.3 氮素吸收利用率计算方法 [14, 21-22] 氮肥农学利用率 (kg) = (施氮区产量 - 空白产量) / 氮肥施用量; 氮肥吸收利用率 (%) = (施氮区地上部吸氮量 - 空白地上部含氮量) / 氮肥施用量 $\times 100\%$; 氮肥生理利用率 (kg) = (施氮区产量 - 空白产量) / (施氮区地上部吸氮量 - 空白地上部吸氮量); 水稻氮肥偏生产力 (kg) = 施氮区产量 / 氮肥施用量; 氮素收获指数 = 籽粒氮素吸收量 / 植株氮素累积量; 水稻氮素籽粒生产效率 (kg) = 水稻籽粒产量 / 成熟期氮素累积量, 是吸收单位质量氮生产的籽粒产量。

1.4 数据分析方法

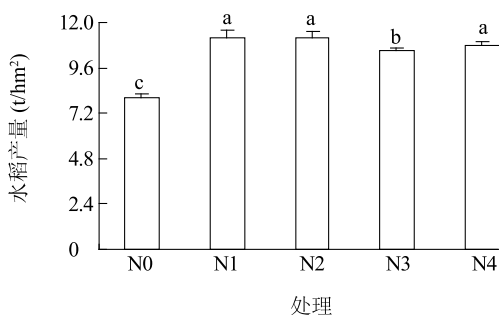
采用 Excel 软件作图。采用 SPSS 13.0 软件进行差异显著性统计检验, 各处理的比较采用最小显

著差数 (*LSD*) 法。

2 结果与分析

2.1 前氮后移对水稻产量的影响

前氮后移对水稻产量的影响如图 1 所示,由图 1 可知,不施氮肥的 N0 处理水稻产量最低,为 8.0 t/hm²。从 N1 到 N4 处理水稻产量分别比 N0 处理增加 39.3%、39.0%、30.6% 和 34.3%。氮肥前置的 N1 处理与常规氮肥运筹的 N2 处理水稻产量接近,两者略高于前氮后移的 N4 处理,显著高于前氮后移的 N3 处理。



N0 表示不施氮肥对照; N1、N2、N3、N4 分别表示氮肥作为基肥: 分蘖肥: 穗肥施用的比例为 5:2:3、4:2:4、3:2:5、2:2:6; 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 1 前氮后移对水稻产量的影响

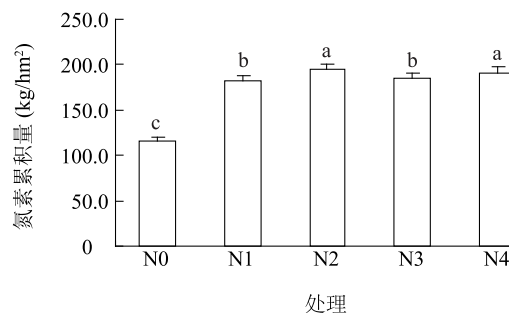
Fig.1 Effect of postponed nitrogen application on rice yield

2.2 前氮后移对水稻氮素累积量的影响

前氮后移对水稻氮素累积量的影响如图 2 所示,由图 2 可知,不施氮肥的 N0 处理水稻氮素累积量最低,为 115.9 kg/hm²。从 N1 到 N4 处理水稻氮素累积量分别比 N0 处理增加 56.8%、67.9%、59.6% 和 64.9%。前氮后移的 N4 处理与常规氮肥运筹的 N2 处理水稻氮素累积量接近,两者均大于氮肥前置的 N1 处理和前氮后移的 N3 处理。统计分析结果表明, N2 和 N4 处理的氮素累积量差异不显著,但两者均显著大于 N1 和 N3 处理。

2.3 前氮后移对水稻氮素籽粒生产效率和收获指数的影响

前氮后移对水稻氮素籽粒生产效率的影响如图 3A 所示,由图 3A 可知,不施氮肥的 N0 处理水稻氮素籽粒生产效率最高,为 66.2 kg/kg。从 N0 到 N3 处理水稻氮素籽粒生产效率有逐渐下降的变化趋势, N4 处理水稻氮素籽粒生产效率又有所增加。



N0、N1、N2、N3、N4 见图 1 注; 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 2 前氮后移对水稻氮素累积量的影响

Fig.2 Effect of postponed nitrogen application on nitrogen accumulation of rice

N0 处理水稻氮素籽粒生产效率比 N1~N4 处理分别高 6.6%、9.4%、11.3% 和 7.5%, 达显著水平。

由图 3B 可知,不同处理水稻氮素收获指数,以不施氮肥的 N0 处理最高,前氮后移的 N3 处理最低。N3 处理水稻氮素收获指数显著低于其他处理。

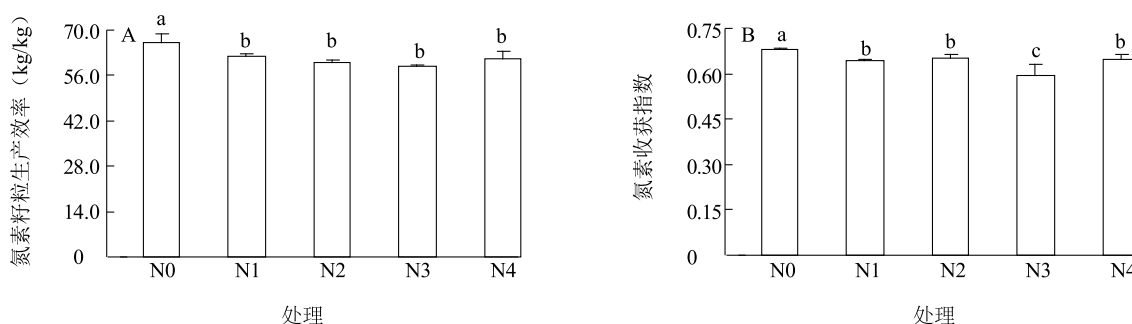
2.4 前氮后移对水稻氮素利用效率的影响

前氮后移对水稻氮素吸收利用效率的影响如表 1 所示,由表 1 可知,水稻氮肥农学利用率以氮肥前置的 N1 处理最高,常规氮肥运筹的 N2 处理其次,前氮后移的 N3 和 N4 处理分别比常规氮肥运筹的 N2 处理下降 27.4% 和 13.6%,其中,前氮后移的 N3 处理水稻氮肥农学利用率显著降低。

水稻氮肥吸收利用率以常规氮肥运筹的 N2 处理最高,氮肥前置的 N1 处理最低, N2 处理水稻氮肥吸收利用率分别比 N1、N3 和 N4 处理高 19.6%、13.8% 和 4.6%。N2 和 N4 处理差异不大,但两者均显著大于 N1 和 N3 处理。

水稻氮肥生理利用率以氮肥前置的 N1 处理最高,常规氮肥运筹的 N2 处理其次,前氮后移的 N3 和 N4 处理分别比常规氮肥运筹的 N2 处理下降 9.8% 和 8.1%。与常规氮肥运筹的 N2 处理比较,氮肥前置的 N1 处理使水稻氮肥生理利用率显著提高,前氮后移的 N3 和 N4 处理使水稻氮肥生理利用率显著降低。

水稻氮肥偏生产力以氮肥前置的 N1 处理最高,常规氮肥运筹的 N2 处理其次,前氮后移的 N3 和 N4 处理分别比常规氮肥运筹的 N2 处理下降 6.4% 和 3.5%。N3 处理的水稻氮肥偏生产力显著低于其他处理。



N0、N1、N2、N3、N4 见图 1 注;不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 3 前氮后移对水稻氮素籽粒生产效率和收获指数的影响

Fig.3 Effect of postponed nitrogen application on nitrogen use efficiency for grain yield and nitrogen harvest index of rice

表 1 前氮后移对水稻氮素利用率的影响

Table 1 Effect of postponed nitrogen application on nitrogen use efficiency of rice

处理	氮肥农学利用率 (kg/kg)	氮肥吸收利用率 (%)	氮肥生理利用率 (kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)
N1	10.5±0.6a	21.9±1.5b	48.7±1.8a	37.3±1.2a
N2	10.4±0.8a	26.2±1.7a	40.0±1.3b	37.3±1.1a
N3	8.2±0.6b	23.0±1.1b	36.5±1.7c	35.0±0.5b
N4	9.2±0.5ab	25.1±1.5a	37.1±1.0c	36.0±0.3ab

N0、N1、N2、N3、N4 见图 1 注;不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

3 讨论

氮肥运筹对水稻的生长发育和产量形成具有重要影响。长江中下游稻麦轮作系统农田,水稻季一般采用“重施基肥、早施分蘖肥”的氮肥运筹方法,通过促进水稻分蘖的早发快发,提高分蘖穗数,依靠增加单位面积穗数来提高籽粒产量^[23]。在水稻生育前期大量施用氮肥,虽然有利于获得水稻高产。但是长江中下游地区在水稻生育前期一般降雨量较大,在该时期大量施用氮肥,增加了稻田地表径流氮素流失的面源污染风险^[24],氮肥运筹试验结果表明,可以在降低水稻基肥分蘖肥施用比例的基础上,提高穗肥的施用比例,在保证水稻穗数的前提下,通过增加穗肥的施用量,从而形成大穗来提高水稻产量^[25]。李录久等^[26]的研究结果也表明,适当减少水稻前期氮肥基肥施用量,增加中后期分蘖肥和穗肥的施用量,可有效提高水稻籽粒产量。本研究结果表明,前氮后移的 N4 处理和常规氮肥运筹的 N2 处理水稻产量接近,保证了水稻高产,这与前人的研究结果基本一致^[25-26]。但是本研究水稻前氮后移,并没有表现出明显的增产效果,可能与本研究中太湖地区实际生产中,就保证水稻产量而言,常规氮肥运筹,基肥:穗肥为 6:4 处理的氮肥运筹方式相对合理^[25],前氮后移后水稻进一步增产的潜力较小

有关。也可能与太湖地区稻麦生产力水平高,本研究在大量麦秸秆还田的条件下,水稻生育前期秸秆的降解需要消耗大量的土壤速效氮素,前氮后移处理在水稻生长发育前期较低的土壤速效氮素养分含量影响了水稻前期的生长发育,最终影响了水稻产量有关^[27]。关于如何协调水稻生育前期植株生长以及还田秸秆降解的大量氮素养分需求,与水稻生育前期化学氮肥投入带来的大量氮素养分流失之间的矛盾,值得进一步深入研究。

水稻氮素吸收利用效率主要与水稻植株本身的氮素吸收能力有关^[28]。此外,水稻氮肥吸收利用效率受肥料类型、施肥量、施肥方法、土壤类型、耕作措施等因素的影响^[29-30]。本研究采用秸秆还田和基肥机械深施技术,不同氮肥运筹下的研究表明,前氮后移处理的 N4 处理水稻氮素吸收利用效率略有下降。这与严奉君等^[8]在不同土壤肥力条件下的研究结果,基肥:分蘖肥:穗肥为 3:3:4 处理水稻的氮素利用效率最高,过高或过低的基肥与穗肥比例,均不利于提高水稻氮素利用效率明显不同。这可能与两者研究所选用的水稻品种类型不同以及它们的氮素养分吸收特点不同有关。而张洪程等^[17]总结了十几年的研究结果表明,较之常规施肥模式,氮肥精确后移模式(基肥:穗肥=5:5)水稻氮素当季利用率、生理利用率、施氮增产力以及表

观生产力均显著提高,在大规模生产上应用表现显著增产增效。而本研究 N3 处理,基肥:穗肥 = 5:5,无论是水稻产量,还是水稻氮肥吸收利用率均表现为最低。可能与本研究总体施氮量偏高,水稻生育中后期秸秆释放的氮素养分以及大量后移的氮肥不能被作物吸收,土壤中的氮素盈余偏高,氮素会以各种形式流失到环境中,降低了后移氮肥的利用效率有关^[31]。因此前氮后移的 N4 处理也没有表现出较高的氮素吸收利用效率。

结合秸秆还田和基肥机械深施,水稻前氮后移,虽然可能减轻水稻生育前期地表径流大量氮素流失的潜在风险。但是,将 20% 作为水稻基肥的氮肥后移至穗肥施用,水稻产量下降了 3.7%,氮素累积量下降了 1.8%,处理间的差异均未达到显著水平。同时,前氮后移没有表现出水稻氮素吸收的经济学优势,水稻氮素籽粒生产效率与常规氮肥运筹差异不大。水稻的氮素吸收利用效率也呈现为下降的趋势。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [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.
- [3] 刘立军, 王康君, 卞金龙, 等. 水稻产量对氮肥响应的品种间差异及其与根系形态生理的关系[J]. 作物学报, 2014, 40(11): 1999-2007.
- [4] 张文香, 王成媛, 王伯伦, 等. 水稻氮肥施用量及增产效益研究[J]. 耕作与栽培, 2005(5): 23-24.
- [5] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [6] 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征[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(2): 197-204.
- [7] 宋桂云, 王云, 徐寿军, 等. 氮肥对西辽河平原灌区不同穗型水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(9): 1715-1721.
- [8] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 不同土壤肥料条件下麦秆还田与氮肥运筹对杂交稻氮素利用、产量及米质的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(1): 56-64.
- [9] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2221-2232.
- [10] 林洪鑫, 肖运萍, 刘方平, 等. 水分管理与氮肥运筹对超级早稻两优 287 产量和氮素吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(6): 34-40.
- [11] 王秀斌, 徐新明, 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.
- [12] 孙永健, 马均, 孙园园, 等. 施氮量和株距对机插杂交稻结实期养分运转和产量的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(8): 1510-1520.
- [13] 刘科, 何爱斌, 范胜利, 等. 氮肥后移对两系超级杂交稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(2): 70-73.
- [14] 胡雅杰, 朱大伟, 邢志鹏, 等. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 12-22.
- [15] 余庆福, 聂立孝. 麦-稻轮作系统中小麦施氮水平对后季直播水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(9): 1488-1494.
- [16] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确量施氮研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2457-2467.
- [17] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机制[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1837-1851.
- [18] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 西南地区氮肥后移对杂交中稻产量及构成因素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 29-36.
- [19] 潘圣刚, 黄胜奇, 翟晶, 等. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 23-29.
- [20] BREMNER J M, MULVANEY C S. Nitrogen-total. In: Page A L ed. Methods of soil analysis [M]. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, 1982: 595-624.
- [21] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实施实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1456-1461.
- [22] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836-845.
- [23] 林忠成, 李土明, 吴福观, 等. 基肥与穗肥氮比例对双季稻产量和碳氮比的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 269-275.
- [24] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 不同栽培技术对水稻产量及径流 NPK 流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1790-1796.
- [25] 李勇, 曹红娣, 储亚云, 等. 麦秆还田氮肥运筹对水稻产量及土壤氮素供应的影响[J]. 土壤, 2010, 42(4): 569-573.
- [26] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 254-262.
- [27] 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.
- [28] 董桂春, 陈琛, 袁秋梅, 等. 氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 642-651.
- [29] 刘立军, 徐伟, 桑大志, 等. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 987-994.
- [30] 何海兵, 杨茹, 廖江, 等. 水分和氮肥管理对灌浆水稻优质高产高效调控机制的研究进展[J]. 中国农业科学, 2016, 49(2): 305-318.
- [31] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科技出版社, 2000.

(责任编辑: 陈海霞)