

减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响

杜加银, 茹美, 倪吾钟*

(浙江大学环境与资源学院, 浙江省亚热带土壤与植物营养学重点实验室, 浙江杭州 310058)

摘要: 氮、磷用量偏大, 钾肥用量不足不仅影响水稻的正常生长发育, 而且导致养分利用率偏低。本文通过田间试验, 研究减量施用氮、磷肥, 稳定钾肥投入对水稻产量、养分积累量和肥料利用率的影响。试验设 14 个处理, 每个处理重复 2 次。结果表明, 氮钾、磷钾、氮磷钾配施处理的水稻秸秆生物量和籽粒产量均显著高于不施肥处理 ($P < 0.05$); 减氮控磷稳钾处理 ($N\ 225\ kg/hm^2$ 、 $P_2O_5\ 60\ kg/hm^2$ 、 $K_2O\ 90\ kg/hm^2$) 与常规施肥处理相比 ($N\ 300\ kg/hm^2$ 、 $P_2O_5\ 150\ kg/hm^2$ 、 $K_2O\ 60\ kg/hm^2$) 能显著增加水稻秸秆生物量 ($P < 0.05$), 明显提高千粒重和籽粒产量; 试验还得出, 减氮控磷稳钾处理分蘖期地上部氮、钾含量和秸秆氮、钾含量显著高于常规施肥处理 ($P < 0.05$); 收获期地上部氮、钾的积累量和氮、磷的表现利用率显著大于常规施肥处理 ($P < 0.05$)。适当减少氮、磷用量, 增加钾肥用量能改善氮、钾营养状况, 促进地上部干物质的积累, 提高籽粒产量和氮、磷表现利用率。N 196.2 kg/hm^2 、 $P_2O_5\ 46.5\ kg/hm^2$ 、 $K_2O\ 90\ kg/hm^2$ 的配施方案具有实际推广应用价值。

关键词: 氮; 磷; 钾; 水稻; 产量; 养分表现利用率

中图分类号: S511.062.01

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2013)03-0523-11

Effects of fertilization with reducing nitrogen, controlling phosphorus and stabilizing potassium on rice yield and nutrient accumulation

DU Jia-yin, RU Mei, NI Wu-zhong*

(College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil Science and Plant Nutrition, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Excessive application of nitrogen and phosphorus and lower potassium supply not only limit rice growth, but also reduce nutrient use efficiency. In this paper, a field experiment was conducted to study the effects of reducing nitrogen and phosphorus dosages and stabilizing potassium supply on rice yield, nutrient accumulation and fertilizer use efficiency. There were fourteen treatments with two replications. The results indicate that the straw biomass and grain yields of the treatments with integrated N-K, P-K, or N-P-K applications are significantly ($P < 0.05$) higher than those of the no fertilizer treatment. The straw biomass of the treatment with less nitrogen and phosphorus and more potassium application (T11, modified treatment, N 225 kg/ha, P_2O_5 60 kg/ha and K_2O 90 kg/ha) is significantly ($P < 0.05$) higher than that of the conventional fertilization treatment (CFA, N 300 kg/ha, P_2O_5 150 kg/ha, K_2O 60 kg/ha) and the differences of kernel weight and grain yield between the two treatments are obvious. The nitrogen and potassium contents in shoots at the tillering stage and in straw at the harvest stage, the accumulated nitrogen and potassium amounts in above ground organs at the harvest stage, as well as apparent nitrogen and phosphorus use efficiencies of the modified treatment are significantly ($P < 0.05$) higher than those of CFA. These results imply that properly reducing nitrogen and phosphorus dosages, and increasing potassium dosages could catch nitrogen and potassium need of rice plants, increase dry matter accumulation and grain yield, and improve apparent nitrogen and phosphorus use efficiencies. The fertilization scheme of N 196.2 kg/ha, P_2O_5 46.5 kg/ha and K_2O 90 kg/ha should be recommended for practical rice production under local

收稿日期: 2012-11-01

接受日期: 2013-02-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB127400); 国家科技重大专项(2008ZX07101-006)资助。

作者简介: 杜加银(1987—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料研发方面的工作。

Tel: 0571-88982055, E-mail: dudu0990@163.com. * 通信作者 Tel: 0571-88982055, E-mail: wzni@zju.edu.cn

conditions.

Key words: nitrogen; phosphorus; potassium; rice (*Oriza sativa* L.); yield; apparent nutrient use efficiency

随着全球人口的增长,粮食需求不断扩大。业已证明,施肥在粮食生产中具有不可替代的作用,据联合国粮农组织(FAO)的统计,世界粮食产量的增加约有 50% 归功于化学肥料的施用,其中又以化学氮肥的贡献最为显著^[1]。水稻是我国最主要的粮食作物,稻谷产量占全国谷物总产的 40% 以上^[2],水稻增产对满足我国粮食需求有重要意义。刘振兴等^[3]研究表明,肥料对水稻增产的贡献率为 35.4%。据调查,我国水稻的施肥量变化很大,其中氮肥(N)为 46 ~ 276 kg/hm²、磷肥(P₂O₅)为 25 ~ 235 kg/hm²、钾肥(K₂O)为 19 ~ 155 kg/hm²,但农民习惯施肥的氮、磷用量偏高,施钾量较低^[4]。易琼等^[5]研究表明,在施用 P₂O₅ 75 kg/hm² 和 K₂O 120 kg/hm² 条件下,最佳施氮量为 N 168 kg/hm²,相应的水稻产量为 8348 kg/hm²;杨梢娜等^[6]研究得出,在施 P₂O₅ 75.6 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm² 条件下,杭嘉湖平原地区水稻最佳施氮量为 N 217.3 ~ 240.1 kg/hm²,相应的生态适宜产量为 9119.8 ~ 9801.9 kg/hm²。Qiao 等^[7]在太湖地区施用等量 P₂O₅、K₂O(81 kg/hm²) 条件下获得水稻最大产量的施氮量为 N 232 ~ 257 kg/hm²。2010 年,我国化肥用量占世界总量的 33%,为世界第一大肥料消费国^[8-9],但我国的氮肥利用率只有 10.8% ~ 40.5%,平均为 27.5%;磷肥利用率为 7.3% ~ 20.1%,平均 11.6%;钾肥利用率为 21.2% ~ 35.9%,平均 31.3%,低于世界平均水平^[4,10]。目前,我国广泛研究和应用的测土配方施肥技术采用“3414”方案,(即,氮、磷、钾 3 个因素,4 个水平,14 个处理),各因素只有 4 个水平,在拟合肥料效应曲线二次函数方程和估算适宜施肥量时容易造成较大的偏差。另一方面,我国钾肥资源十分有限,且大部分依赖进口,施肥成本也较高,过量施用钾肥的可能性不大。而过量施用氮、磷肥不仅造成资源的浪费,而且会带来严重的环境污染问题。根据中国国家环保局在太湖、巢湖、滇池、三峡库区等流域的调查,生活污水和农田的氮、磷流失是水体富营养化的主要原因^[11-12];农田氮、磷养分的渗漏还可能对地下水造成潜在的威胁^[13]。本文以测土配方施肥技术“3414”方案的思路和稳定钾肥用量为基础,提出“2614”的初步设计方案,即:氮、磷 2 个因素,6 个水平,14 个处理,通过田间试验,研究不同施肥管

理对水稻产量、养分积累量及肥料利用率的影响,探讨减量施用氮、磷肥料的可行性,为水稻生产的持续发展和进一步提高养分利用率提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验设计

田间试验在太湖流域南部的浙江省余杭区进行,供试土壤为青紫泥田,其基本理化性质为:有机碳含量 22.2 g/kg、全氮 1.37 g/kg、全磷 0.71 g/kg、全钾 4.47 g/kg、碱解氮 94.0 mg/kg、有效磷 23.1 mg/kg、速效钾 115.3 mg/kg、缓效钾 204.0 mg/kg。供试水稻品种为秀水 134,采用直播的种植方式。试验设置 14 个处理,具体处理及肥料用量见表 1,其中,在等磷、钾用量基础上氮设 0、112.5、168.75、225、281.25、337.5 kg/hm² 6 个水平(T4 ~ T9);在等氮、钾基础上磷设 0、60、90、120、

表 1 试验处理及肥料用量(kg/hm²)

Table 1 Experimental treatments and nutrient dosages

处理号 Treat. No.	处理 Treatment	养分施用量 Nutrient rate		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T1	NOPOK0	0	0	0
T2	NOPOKc	0	0	90
T3	CFA	300	150	60
T4	N0P3Kc	0	120	90
T5	N1P3Kc	112.5	120	90
T6	N2P3Kc	168.75	120	90
T7	N3P3Kc	225	120	90
T8	N4P3Kc	281.25	120	90
T9	N5P3Kc	337.5	120	90
T10	N3P0Kc	225	0	90
T11	N3P1Kc	225	60	90
T12	N3P2Kc	225	90	90
T13	N3P4Kc	225	150	90
T14	N3P5Kc	225	180	90

注(Note): CFA 代表常规施肥量 Means conventional fertilizer application; Kc 表示钾肥常规用量 Means conventional K fertilizer rate.

150、180 kg/hm² 6 个水平(T7、T10 ~ T14); 当地常规施肥量为 N 300 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm²、K₂O 60 kg/hm², 相关试验研究的报道中钾肥的基础施用量在 60 ~ 120 kg/hm² 之间^[5-7,14], 因此, 本试验中钾肥基础用量设为 90 kg/hm², 每个处理重复 2 次, 小区面积为 16.6 m², 随机排列。小区的田埂用塑料薄膜围住, 以防养分串流。氮、磷、钾肥料分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。尿素在苗期(2010 年 7 月 3 日)、分蘖期(7 月 23 日)、幼穗分化期(8 月 17 日)分三次施用, 比例为 0.4:0.3:0.3, 过磷酸钙作基肥一次施用, 钾肥在分蘖期和幼穗分化期分两次施用, 平均分配。

1.2 样品采集与分析方法

试验前采集土壤样品, 分蘖期每个小区内采集 3 ~ 5 株地上部样品, 收获期每个小区分别采集水稻籽粒、秸秆样品, 每个小区单独计产, 测定含水量并计算烘干重。土壤样品经过风干、磨碎后分别过 1 mm 和 0.25 mm 尼龙网。饱粒样品分为糙米和稻壳两部分。分蘖期植株、成熟期秸秆、糙米、稻壳和瘪粒在 60℃ 条件下烘至恒重并用不锈钢磨样机磨碎。土壤和植株样品贮存于密闭的聚乙烯瓶中。

土壤基本理化性质采用常规方法测定; 植物样品采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 待测液中氮、磷、钾分别采用靛酚蓝比色法、钒钼黄比色法和火焰光度法测定^[15]。

肥料的表观利用率和农学利用率按照以下公式计算:

氮肥表观利用率 = (施氮区作物吸氮总量 - 无氮区作物吸氮总量) / 氮肥投入量 × 100%

氮肥农学利用率 = (施氮肥后所获的作物产量 - 不施氮肥条件下作物的产量) / 氮肥投入量

试验数据用 EXCEL 2003 和 SPSS 13.0 软件进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻生物量和稻谷产量的影响

不同施肥处理的水稻生物量、稻谷产量及千粒重数据见表 2。结果表明, 氮磷钾配合施用处理(T5 ~ T4, T3 除外)与不施肥处理(T1)秸秆生物量(烘干重)的差异达到显著水平($P < 0.05$); 施 N 225、K₂O 90、P₂O₅ ≤ 120 kg/hm² 的 4 个处理(T7、T10 ~

T12)的饱粒产量(烘干重)分别为 8469.8、8245.6、9050.0 和 8381.5 kg/hm², 显著高于不施肥处理(T1)($P < 0.05$), 也明显高于常规施肥处理(T3), 增产幅度依次为 6.1%、3.3%、13.4% 和 5.0%, 尤其是 T11 增产幅度超过了 10%, 说明减氮控磷稳钾施肥不仅可以减少氮、磷及总养分(N + P₂O₅ + K₂O)的投入量, 而且能有效地提高水稻的籽粒产量。从表 2 还可以看出, 不同处理稻壳生物量、瘪粒生物量及地上部总生物量的差异与秸秆相似, 不同处理糙米生物量的差异与饱粒相似。试验结果还表明, 在等磷(P₂O₅ 120 kg/hm²)、钾(K₂O 90 kg/hm²)用量的条件下, 当施氮量 N ≤ 225 kg/hm² 时, 水稻籽粒产量随施氮量的增加而增加, 超过 N 225 kg/hm² 时, 籽粒产量降低; 在等氮(N 225 kg/hm²)、钾(K₂O 90 kg/hm²)用量的条件下, 当施磷量(P₂O₅)为 60 kg/hm² 时(T11), 水稻籽粒产量达到最高, 施磷量(P₂O₅)为 150 kg/hm² 和 180 kg/hm² 时(T13 和 T14), 水稻籽粒产量低于不施磷处理(T10), 由此可见, 过量施用氮或磷时均可导致水稻籽粒产量降低。另外, 施氮量为(N) 168.75 kg/hm² 或 225 kg/hm²、施磷量(P₂O₅)为 90 kg/hm² 或 120 kg/hm²、施钾量(K₂O)为 90 kg/hm² 的 3 个处理(T6、T7、T12)的千粒重显著大于不施肥处理(T1), 说明适宜的氮磷钾用量有利于水稻籽粒的灌浆结实, 使籽粒更为饱满。

根据水稻产量及氮、磷施用量, 通过回归分析建立一元二次肥料效应方程, 可知, 水稻产量与氮肥用量的回归方程为 $y = -0.0438x^2 + 18.799x + 5957.0$, $r = 0.928^{**}$; 水稻产量与磷肥用量的回归方程为 $y = -0.0905x^2 + 10.906x + 8355.1$, $r = 0.867^*$, 由方程可知, 最大产量施氮、磷量分别为 N 214.6 kg/hm²、P₂O₅ 60.3 kg/hm², 最大产量分别为 7974.1 kg/hm²、8683.7 kg/hm²。2012 年水稻销售市场平均价格为 2.50 Yuan/kg, 按风干稻谷到烘干稻谷含水量为 12%, 可得烘干稻谷价格为 2.84 Yuan/kg, 尿素(按 N 计)价格为 4.57 Yuan/kg, 过磷酸钙(按 P₂O₅ 计)为 7.08 Yuan/kg, 由此计算的水稻最佳氮、磷施用量分别为 N 196.2 kg/hm²、P₂O₅ 46.5 kg/hm², 最佳产量分别为 7959.3 kg/hm²、8666.5 kg/hm², 氮、磷最佳产量施用量比最大产量施用量分别减少 8.6%、22.9%, 生产上应使用最佳产量施肥量, 可明显降低生产成本, 增加经济效益。

表 2 不同施肥处理对水稻生物量、饱粒产量及千粒重的影响

Table 2 Biomass, grain yield and kernel weight of rice under different fertilization treatments

处理号 Treatment No.	秸秆 Straw (kg/hm ²)	糙米 Brown rice (kg/hm ²)	稻壳 Rice husk (kg/hm ²)	瘪粒 Unfilled grain (kg/hm ²)	饱粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	总生物量 Total (kg/hm ²)	千粒重(g) 1000-grain weight
T1	6462.2 e	4907.1 b	1172.8 de	395.9 e	6079.9 b	12938.0 e	29.01 c
T2	7115.6 de	4946.4 b	1182.2 cde	243.9 e	6128.6 b	13488.1 de	29.64 bc
T3	7394.4 cde	6443.1 a	1539.9 ab	1487.3 abc	7983.0 a	16864.8 bed	29.67 bc
T4	9076.1 bede	4820.5 b	1152.1 e	711.0 de	5972.7 b	15759.8 cde	29.96 bc
T5	10562.2 ab	6067.5 ab	1450.2 abcd	1067.3 cd	7517.6 ab	19147.2 abc	31.02 abc
T6	10793.9 ab	6162.8 ab	1472.9 abc	1192.8 bc	7635.7 ab	19622.5 ab	32.15 ab
T7	10275.6 ab	6836.0 a	1633.8 ab	1405.2 abc	8469.8 a	20150.5 ab	33.13 a
T8	10019.4 abc	5988.0 ab	1431.2 bede	1232.6 abc	7419.1 ab	18671.2 abc	31.06 abc
T9	10798.3 ab	5972.1 ab	1427.4 bede	1357.9 abc	7399.4 ab	19555.7 ab	30.60 abc
T10	9832.2 abcd	6655.0 a	1590.6 ab	1705.3 a	8245.6 a	19783.1 ab	31.04 abc
T11	11046.7 ab	7304.2 a	1745.7 a	1660.3 ab	9050.0 a	21756.9 a	31.77 abc
T12	10275.6 ab	6764.7 a	1616.8 ab	1218.1 bc	8381.5 a	19875.2 ab	32.11 ab
T13	10163.9 abc	6126.9 ab	1464.4 abcd	1299.1 abc	7591.3 ab	19054.2 abc	31.23 abc
T14	12020.0 a	6136.0 ab	1466.5 abcd	1196.0 bc	7602.5 ab	20818.5 a	30.84 abc

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

2.2 不同施肥处理对水稻氮含量、积累量及利用率的影响

表 3 结果显示,施氮处理(T3、T5 ~ T14)分蘖期水稻地上部、收获期秸秆及瘪粒的含氮量均显著高于不施肥处理(T1)($P < 0.05$),施氮量 $N \geq 168.75 \text{ kg/hm}^2$ 处理(T3、T6 ~ T14)糙米和稻壳的含氮量也显著高于不施肥处理(T1)($P < 0.05$);当施氮量 $N \leq 168.75 \text{ kg/hm}^2$ 时(T4 ~ T6),分蘖期水稻地上部的含氮量显著低于常规施肥处理(T3),减磷增钾基础上施氮量为 $N 281.25 \text{ kg/hm}^2$ 的处理(T8)分蘖期水稻地上部的含氮量显著高于常规施肥处理(T3),减磷增钾基础上施氮量为 $N 225 \text{ kg/hm}^2$ 、 281.25 kg/hm^2 的处理(T11、T8)收获期水稻秸秆的含氮量也显著高于常规施肥处理(T3),说明配施适量磷、钾肥基础上适度减少施氮量不仅没有降低水稻植株的含氮量,而且能有效地提高分蘖期和收获期水稻植株的氮素营养水平。

不同处理收获期水稻地上部氮积累量见表 4。从表 4 可以看出,施氮处理(T3、T5 ~ T14)收获期水稻秸秆、糙米(T5 除外)、稻壳、瘪粒中氮素积累

量及地上部氮素积累总量均显著高于不施肥处理(T1)($P < 0.05$);减磷增钾基础上施氮量 $N \geq 225 \text{ kg/hm}^2$ 处理(T7 ~ T12)水稻秸秆中氮素积累量均大于常规施肥处理(T3),其中 T7 ~ T11 及 T14 等处理达到显著水平($P < 0.05$),施氮量 $N \geq 168.75 \text{ kg/hm}^2$ 处理(T6 ~ T12)糙米、稻壳和瘪粒中氮素积累量与常规处理的差异不显著;水稻施氮量为 $N 225 \text{ kg/hm}^2$ 、施磷量(P_2O_5)为 60 kg/hm^2 、施钾量(K_2O)为 90 kg/hm^2 处理(T11)水稻地上部氮素总积累量显著大于常规施肥处理(T3),说明配施适量磷、钾肥基础上适度减少施氮量可促进水稻对氮的吸收和积累。

以不施氮(T4)处理为对照,根据施氮量、籽粒产量和地上部氮素积累量计算得出各施氮处理的氮肥表观利用率和氮素农学利用率(表 5)。结果表明,减磷增钾基础上施氮量为 $N 168.75 \text{ kg/hm}^2$ 或 225 kg/hm^2 、施磷量(P_2O_5)为 0、60 或 120 kg/hm^2 、施钾量(K_2O)为 90 kg/hm^2 的 4 个处理(T6、T7、T10、T11)的氮肥表观利用率显著高于常规施肥处理(T3)($P < 0.05$),其它处理的氮肥表观利用率也

表 3 不同施肥处理水稻植株各部位含氮量 (mg/g)

Table 3 Nitrogen contents in organs of rice plants under different fertilization treatments

处理号 Treatment No.	分蘖期地上部 Shoots at tillering stage	秸秆 Straw	糙米 Brown rice	稻壳 Rice husk	瘪粒 Unfilled grain
T1	24.4 ef	3.4 e	12.0 b	3.0 f	8.4 g
T2	22.2 f	3.7 de	11.5 b	3.4 de	9.2 f
T3	30.9 c	7.0 b	14.0 a	3.8 ab	10.1 de
T4	26.2 de	4.3 de	11.9 b	3.2 ef	9.6 ef
T5	26.2 de	4.4 d	12.3 b	3.3 def	10.9 bc
T6	28.3 d	6.1 c	13.7 a	3.5 bcd	11.1 bc
T7	33.3 bc	7.2 b	14.2 a	3.7 abc	11.1 bc
T8	34.9 ab	8.3 a	14.3 a	3.8 abc	11.5 ab
T9	36.4 a	8.2 a	14.3 a	3.8 abc	11.3 abc
T10	31.5 c	7.1 b	14.0 a	3.9 a	11.8 a
T11	30.9 c	8.2 a	14.2 a	3.8 abc	10.8 bc
T12	31.2 c	6.4 bc	14.2 a	3.7 abc	10.9 bc
T13	33.7 abc	6.4 bc	13.8 a	3.5 cd	10.8 bc
T14	31.7 c	6.3 bc	14.0 a	3.7 abc	10.7 cd

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

表 4 不同施肥处理水稻植株的氮积累量 (kg/hm²)

Table 4 Nitrogen accumulation in rice plants under different fertilization treatments

处理号 Treatment No.	秸秆 Straw	糙米 Brown rice	稻壳 Rice husk	瘪粒 Unfilled grain	总量 Total
T1	22.5 h	58.7 c	3.5 e	3.3 e	88.1 d
T2	26.1 gh	57.0 c	4.0 de	2.2 e	89.3 d
T3	51.9 ef	90.4 ab	5.9 ab	15.0 abc	163.3 bc
T4	38.8 fg	57.6 c	3.7 de	6.8 de	106.8 d
T5	47.1 f	74.5 bc	4.7 cd	11.6 cd	138.0 c
T6	65.2 de	84.2 ab	5.2 bc	13.3 bc	167.9 b
T7	73.4 bcd	97.2 a	6.1 ab	15.7 abc	192.4 ab
T8	82.7 abc	85.2 ab	5.4 bc	14.2 bc	187.6 b
T9	88.0 ab	85.1 ab	5.4 bc	15.3 abc	193.8 ab
T10	69.6 cd	92.9 ab	6.3 ab	20.1 a	188.9 ab
T11	90.1 a	103.4 a	6.7 a	17.9 ab	218.1 a
T12	65.5 de	96.2 a	6.0 ab	13.3 bc	180.9 b
T13	64.6 de	84.5 ab	5.2 bc	14.1 bc	168.4 b
T14	76.1 abcd	85.7 ab	5.4 bc	12.8 bc	179.9 b

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

表 5 氮肥表观利用率和农学利用率
Table 5 Apparent nitrogen use efficiency and agronomic efficiency

处理号 Treatment No.	氮肥表观利用率 AUE _N (%)	氮农学利用率 AE _N (kg/kg)
T3	18.8 c	6.7 ab
T4	—	—
T5	27.7 bc	13.7 a
T6	36.2 ab	9.9 ab
T7	38.0 ab	11.1 ab
T8	28.7 bc	5.1 ab
T9	25.8 bc	4.2 b
T10	36.5 ab	10.1 ab
T11	49.4 a	13.7 a
T12	32.9 bc	10.7 ab
T13	27.4 bc	7.2 ab
T14	32.5 bc	7.2 ab

注 (Note): AUE_N— Apparent nitrogen use efficiency; AE_N— Nitrogen agronomic efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

高于常规施肥处理,但差异不显著。从表 5 还可以看出,减磷增钾基础上施氮量 $N \leq 225 \text{ kg/hm}^2$ 处理 (T5 ~ T7、T10 ~ T12) 的氮素农学利用率在 9.9 ~ 13.7 kg/kg 之间,高于常规施肥处理 (T3); 施氮量为 $N 337.5 \text{ kg/hm}^2$ 处理 (T9) 的氮素农学利用率显著小于常规施肥处理 ($P < 0.05$),说明配施适量磷、钾肥基础上适度减少施氮量能有效地提高氮肥表观利用率和氮素农学利用率。

2.3 不同施肥处理对水稻磷含量、积累量及利用率的影响

不同处理分蘖期水稻地上部含磷量在 3.8 ~ 4.1 mg/g 之间,收获期糙米含磷量在 3.6 ~ 4.4 mg/g 之间,差异均不显著 (表 6); 施磷处理 (T4 ~ T9、T11 ~ T14, T6 除外) 秸秆的含磷量显著高于不施肥处理 (T1) ($P < 0.05$),但施磷处理间秸秆含磷量的差异不显著; 增钾基础上,施氮量为 $N \geq 225 \text{ kg/hm}^2$ 处理 (T7 ~ T14) 的稻壳含磷量大多高于常规施肥处理 (T3),甚至达到显著水平 ($P < 0.05$); 施磷处理间 (T4 除外) 瘪粒含磷量的差异不显著。

表 6 不同施肥处理水稻含磷量 (mg/g)

Table 6 Phosphorus contents in rice plants under different fertilization treatments

处理号 Treatment No.	分蘖期地上部 Shoots at tillering stage	秸秆 Straw	糙米 Brown rice	稻壳 Rice husk	瘪粒 Unfilled grain
T1	3.56 a	1.54 d	4.44 a	0.42 e	3.07 ab
T2	3.58 a	1.93 cd	4.44 a	0.49 cde	3.31 ab
T3	4.00 a	2.54 ab	4.44 a	0.43 de	3.33 ab
T4	3.88 a	2.06 bc	4.03 a	0.40 e	2.87 b
T5	4.05 a	2.14 abc	4.04 a	0.41 e	3.15 ab
T6	3.99 a	2.02 bcd	3.89 a	0.35 e	3.24 ab
T7	4.06 a	2.34 abc	4.01 a	0.42 e	3.39 ab
T8	4.07 a	2.39 abc	4.11 a	0.48 cde	3.28 ab
T9	4.06 a	2.34 abc	4.04 a	0.65 bc	3.12 ab
T10	3.79 a	2.17 abc	3.76 a	0.62 bcd	3.16 ab
T11	3.91 a	2.15 abc	3.60 a	0.63 bcd	3.18 ab
T12	3.90 a	2.49 ab	3.95 a	0.67 abc	3.53 a
T13	4.08 a	2.62 a	4.01 a	0.86 a	3.53 a
T14	4.00 a	2.34 abc	3.93 a	0.76 ab	3.09 ab

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

表 7 结果表明,施肥处理秸秆(T2 除外)、瘪粒(T2、T4 除外)磷素积累量和地上部(T2 除外)磷素总积累量显著大于不施肥处理(T1)($P < 0.05$);增钾基础上,施氮量减至 $N\ 225\ kg/hm^2$ 的处理(T10 ~ T14,T7 除外)稻壳中磷素积累量显著大于常规施肥处理(T3)($P < 0.05$);增钾($K_2O\ 90\ kg/hm^2$)减氮($N\ 225\ kg/hm^2$)基础上施磷量(P_2O_5)为 $150\ kg/hm^2$ 和 $180\ kg/hm^2$ 两个处理(T13 和 T14)的秸秆中磷素积累量显著大于常规施肥处理(T3)($P <$

0.05),而减磷处理(T7、T10 ~ T12)秸秆中磷素积累量与常规施肥处理差异不显著;除不施肥(T1)、单施钾(T2)和不施氮(T4)处理外,其它处理间瘪粒中磷素积累量差异不显著,除不施氮(T4)处理外,其它处理糙米中磷素积累量差异也不显著;除单施钾(T2)和不施氮(T4)处理外,其它施肥处理水稻地上部磷素总积累量均显著大于不施肥处理(T1),这些结果说明,适量减氮增钾有利于水稻对磷的吸收和积累,并可减少施磷量。

表 7 不同施肥处理水稻磷积累量 (kg/hm^2)
Table 7 Phosphorus accumulation in rice plants under different fertilization treatments

处理号 Treatment No.	秸秆 Straw	糙米 Brown rice	稻壳 Rice husk	瘪粒 Unfilled grain	总量 Total
T1	10.0 e	21.9 ab	0.47 de	1.21 d	33.5 d
T2	13.8 de	22.0 ab	0.58 cde	0.80 d	37.1 cd
T3	18.8 bcd	28.6 a	0.67 cd	4.96 ab	53.0 ab
T4	18.6 cd	19.4 b	0.46 e	2.04 cd	40.5 c
T5	22.7 abc	24.5 ab	0.60 cde	3.37 bc	51.2 b
T6	21.8 abc	24.0 ab	0.51 cde	3.86 ab	50.2 b
T7	24.0 abc	27.4 a	0.68 c	4.77 ab	56.9 a
T8	24.0 abc	24.4 ab	0.68 c	4.07 ab	53.2 ab
T9	24.9 abc	23.8 ab	0.92 b	4.23 ab	53.9 ab
T10	21.3 abc	25.0 ab	0.99 b	5.37 a	52.7 ab
T11	23.7 abc	26.2 a	1.10 ab	5.21 ab	56.3 a
T12	25.5 ab	26.7 a	1.08 ab	4.30 ab	57.6 a
T13	26.1 a	24.4 ab	1.25 a	4.58 ab	56.3 a
T14	28.0 a	24.0 ab	1.12 ab	3.81 ab	56.9 a

注(Notes): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

以 T10 为对照,计算磷肥的表观利用率和农学利用率,结果(表 8)表明,增钾($K_2O\ 90\ kg/hm^2$)减氮($N\ 225\ kg/hm^2$)条件下施磷量(P_2O_5)为 $60\ kg/hm^2$ 和 $90\ kg/hm^2$ 两个处理(T11、T12)的磷肥表观利用率显著高于常规施肥处理(T3)($P < 0.05$),农学利用率也高于常规施肥处理(T3),但差异不显著。另外,当施氮量 $N \leq 168.75\ kg/hm^2$ (T4 ~ T6)或施氮量 $N \geq 281.25\ kg/hm^2$ (T8、T9)时,磷肥的表观利用率降低,农学利用率出现负值,这主要是由于氮肥施用不合理引起减产导致的;增钾($K_2O\ 90$

kg/hm^2)减氮($N\ 225\ kg/hm^2$)条件下施磷量(P_2O_5)为 $150\ kg/hm^2$ 和 $180\ kg/hm^2$ 两个处理(T13、T14),其磷肥的表观利用率降低,农学利用率出现负值的原因主要是由于土壤有效磷含量较高,且磷肥具有累积后效,在单季作物中不能完全体现出肥料施用效果。因此,生产上应在控制磷肥的同时,合理配施氮肥和钾肥才能进一步提高磷肥的表观利用率和农学利用率。

2.4 不同施肥处理对水稻钾含量及积累量的影响
不同施肥处理水稻的含钾量见表 9。结果表

表 8 磷肥表观利用率和农学利用率
Table 8 Apparent phosphorus use efficiency and agronomic efficiency

处理号 Treatment No.	磷肥表观利用率 AUE _p (%)	磷农学利用率 AE _p (kg/kg)
T3	0.2 cd	-1.8 abc
T4	-10.1 e	-18.9 c
T5	-1.2 d	-6.1 bc
T6	-2.0 d	-5.1 bc
T7	3.5 abc	1.9 ab
T8	0.4 cd	-6.9 bc
T9	1.0 bcd	-7.1 bc
T10	—	—
T11	6.1 a	13.4 a
T12	5.5 ab	1.5 ab
T13	2.5 abcd	-4.4 abc
T14	2.4 abcd	-3.6 abc

注 (Note): AUE_p—Apparent phosphorus use efficiency; AE_p—Phosphorus agronomic efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

明,施用钾肥的处理(T2 除外)分蘖期水稻地上部、收获期秸秆的含钾量显著高于不施肥处理(T1) ($P < 0.05$),施氮(N 225 kg/hm²)基础上增施钾肥(T10 ~ T14, T7 除外)分蘖期水稻地上部含钾量显著高于常规施肥处理(T3) ($P < 0.05$),秸秆含钾量也高于常规施肥处理(T3),其中 T11 和 T13 处理与 T3 处理间的差异也达到显著水平($P < 0.05$);增施钾肥处理糙米、稻壳和瘪粒的含钾量与常规施肥处理的差异不显著。

从表 10 可以看出,施用钾肥处理(T2 除外)秸秆中钾素积累量和地上部钾素总积累量显著高于不施肥处理(T1) ($P < 0.05$),施用钾肥处理糙米、稻壳、瘪粒(T2 除外)中钾素积累量也高于不施肥处理(T1),有些处理的差异可达显著水平($P < 0.05$);施氮(N 225 kg/hm²)基础上增施钾肥处理(T7 除外)秸秆中钾素积累量和地上部钾素总积累量(T7、T10 除外)显著高于常规施肥处理(T3) ($P < 0.05$);施用钾肥处理(T2 除外)间糙米、稻壳及瘪粒中钾素积累量的差异不显著。

3 讨论

3.1 减氮控磷施肥对水稻的增产作用

习惯施肥的氮、磷用量偏高,施钾量偏低,限制

表 9 不同施肥处理水稻含钾量 (mg/g)

Table 9 Potassium contents in rice plants under different fertilization treatments

处理号 Treatment No.	分蘖期地上部 Shoots at tillering stage	秸秆 Straw	糙米 Brown rice	稻壳 Rice husk	瘪粒 Unfilled grain
T1	21.2 f	13.1 e	1.32 e	3.87 d	6.13 bc
T2	24.5 ef	15.1 e	1.49 cde	4.05 cd	5.52 c
T3	25.1 de	21.3 cd	1.54 abcd	4.30 abcd	7.15 a
T4	26.2 cde	19.8 d	1.59 abcd	4.46 abcd	7.07 a
T5	28.4 bcde	22.9 abcd	1.55 abcd	4.42 abcd	7.16 a
T6	26.4 cde	21.6 cd	1.45 de	4.10 bcd	7.10 a
T7	26.4 cde	20.6 cd	1.41 de	4.61 abc	7.29 a
T8	31.3 ab	22.0 bcd	1.72 a	4.82 a	7.32 a
T9	29.1 bcd	19.8 d	1.60 abcd	4.70 ab	7.57 a
T10	27.1 cde	20.8 cd	1.50 bcde	4.37 abcd	6.97 ab
T11	29.6 bc	25.2 ab	1.48 cde	4.58 abc	7.43 a
T12	31.2 ab	22.3 abcd	1.67 abc	4.15 bcd	7.00 ab
T13	34.3 a	25.8 a	1.73 a	4.67 abc	7.47 a
T14	30.2 bc	23.5 abc	1.71 ab	4.24 abcd	7.50 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

表 10 不同施肥处理水稻钾积累量 (kg/hm²)
Table 10 Potassium accumulation in rice plants under different fertilization treatments

处理号 Treatment No.	秸秆 Straw	糙米 Brown rice	稻壳 Rice husk	瘪粒 Unfilled grain	总量 Total
T1	84.5 f	6.49 d	4.57 c	2.40 d	98.0 e
T2	106.5 f	7.38 cd	4.78 bc	1.36 d	120.0 e
T3	159.3 e	9.84 abc	6.59 abc	10.60 ab	186.3 d
T4	178.5 de	7.66 bed	5.14 bc	5.00 cd	196.3 cd
T5	240.6 abc	9.35 abcd	6.40 abc	7.64 bc	264.0 ab
T6	232.4 abcd	8.95 abcd	6.04 abc	8.49 abc	255.8 ab
T7	211.2 bcde	9.63 abc	7.50 a	10.25 ab	238.6 bed
T8	220.0 bed	10.45 abc	6.96 ab	9.08 abc	246.5 bc
T9	212.3 bcde	9.62 abc	6.74 abc	10.25 ab	238.9 bed
T10	204.9 cde	10.01 abc	6.95 ab	11.89 ab	232.7 bed
T11	279.2 a	10.78 ab	8.01 a	12.42 a	310.4 a
T12	229.1 abcd	11.30 a	6.69 abc	8.51 abc	255.6 ab
T13	259.6 ab	10.68 ab	6.86 ab	9.73 ab	286.9 ab
T14	281.5 a	10.47 abc	6.20 abc	8.95 abc	307.2 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

肥料的增产效应,甚至导致水稻减产。本研究得出,与常规施肥比较,在增施钾肥(由常规施肥的 60 kg/hm²增至 90 kg/hm²)的基础上,减氮 25% (由常规施肥的 300 kg/hm²减至 225 kg/hm²),并控制施磷量 P₂O₅ ≤ 120 kg/hm² 能明显增加水稻籽粒产量(表 2),相关的研究表明,以习惯施肥为基础,减量施用氮、磷肥能保持水稻产量或略有增产^[16-18],适量施用氮、磷肥对水稻具有明显的增产作用。王伟妮等研究表明,增施氮肥对湖北省早稻、中稻和晚稻的增产率分别为 37.6%、27.5% 和 35.0%,增施磷肥的增产率为 5.5%^[19-20]。本试验结果表明,在相同磷、钾水平下施氮量 N 225 kg/hm² 时水稻籽粒产量最高,增产率达到 41.8%,在相同氮、钾水平下施磷量 P₂O₅ 60 kg/hm² 时水稻籽粒产量最高,增产率为 9.8%,本试验中优化的氮磷钾配施处理的增产作用更为明显。杨梢娜等^[6]研究表明,在施用 P₂O₅ 75.6 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm² 条件下,杭嘉湖平原地区水稻最佳施氮量为 N 217.3 ~ 240.1 kg/hm²,相应的生态适宜产量为 9119.8 ~ 9801.9 kg/hm²。本试验结果表明,在施用 N 196.2 kg/hm²、P₂O₅ 46.5 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²

的条件下,水稻经济最佳产量在 7959.3 ~ 8666.5 kg/hm² (烘干重),按风干稻谷到烘干稻谷含水量为 12% 计,风干稻谷产量在 9044.7 ~ 9848.3 kg/hm²。可见,在相同钾肥投入量的条件下,本试验可以保证在产量基本不变的同时,降低氮、磷肥的用量,提高经济效益。

3.2 不同施肥处理对水稻营养状况的影响

分蘖期是决定水稻群体规模和有效穗数量的关键时期,需要充足的营养,水稻正常分蘖要求植株含氮量为 N 30 ~ 35 mg/g^[21],含磷量为 P 3.0 ~ 4.0 mg/g^[22],含钾量为 K 5 ~ 15 mg/g^[23]。分蘖期采样分析结果表明,施氮量 N ≥ 225 kg/hm² 时水稻地上部含氮量可达到 30.9 ~ 36.4 mg/g (表 3),说明施氮量由常规施肥量的 N 300 kg/hm² 减至 225 kg/hm² 仍能满足水稻正常生长对氮营养的需求;不同施肥处理水稻地上部含磷量均超过了 3.0 mg/g (表 6),处于充足的磷营养状况,施用磷肥对水稻分蘖期地上部的含磷量影响不大,这可能与供试土壤有效磷含量较高有关;增施钾肥能显著提高水稻分蘖期地上部的含钾量,施钾处理(T2 除外)的含钾量超过了 15 mg/g (表 9),处于充足的钾营养状况。水

稻高产要求收获期秸秆含钾量达到 $23.3 \text{ mg/g}^{[22]}$, 常规施肥秸秆含钾量为 21.3 mg/g , 低于高产的要求, 增施钾肥的部分处理(T11、T13、T14)的秸秆含钾量达到了高产要求, 生产上应使施钾量(K_2O)保持在 90 kg/hm^2 以上, 并通过秸秆还田等措施增加钾的投入, 保证水稻的持续高产。

3.3 不同施肥处理对肥料利用率的影响

张福锁等^[4]总结全国粮食生产区的 1333 个田间试验得出, 水稻的氮肥农学利用率和表观利用率的平均值分别为 10.4 kg/kg 、 28.3% ; Lin 等^[24]报道太湖地区氮肥表观利用率为 45.9% ; 本试验中, 在施用 P_2O_5 60 kg/hm^2 、 K_2O 90 kg/hm^2 基础上, 施氮量由常规施肥的 N 300 kg/hm^2 减至 225 kg/hm^2 (T11) 水稻的氮肥农学利用率和表观利用率分别达到 13.7 kg/kg 和 49.4% , 明显高于全国平均水平, 也略高于 Lin 等的报道, 接近于国际上水稻的氮肥利用率^[25-26]; 试验结果还表明, 水稻的氮肥利用率随施氮量的增加先增加后减小, 国内也有相似的报道^[5], 这可能是因为随着施氮量的增加, 分配到茎和叶中氮素的比例增加所致^[27]。水稻的磷肥农学利用率和表观利用率全国的平均值分别为 9.0 kg/kg 、 13.1% ^[4]; 王伟妮等^[14]研究表明, 在有效磷含量为 15.8 mg/kg 的土壤上施磷 P_2O_5 67.5 kg/hm^2 时磷肥农学利用率和表观利用率分别为 11.1 kg/kg 、 4.9% ; 本试验中, 在施用 N 225 kg/hm^2 、 K_2O 90 kg/hm^2 基础上, 施磷量(P_2O_5)由常规施肥的 150 kg/hm^2 减至 60 kg/hm^2 (T11) 水稻的磷肥农学利用率和表观利用率分别为 13.41 kg/kg 、 6.07% , 农学利用率明显高于全国的平均水平, 但磷肥表观利用率则低于全国平均水平, 这可能与种植前供试土壤有效磷含量较高有关。一般浙江地区水稻土有效磷适宜范围为 $10 \sim 20 \text{ mg/kg}$, 超过 25 mg/kg 时会出现负面效应^[28], 如无效分蘖增加, 体内锌、硅、钼等元素含量降低、代谢紊乱等, 土壤有效磷含量较高时, 应减少磷肥的施用。

4 结论

1) 氮磷钾的合理配施能促进水稻的生长, 在常规施肥基础上, 适当减少氮、磷肥, 增加钾肥用量能显著增加水稻秸秆生物量($P < 0.05$), 明显提高千粒重和籽粒产量。

2) 减氮控磷增钾(N 225 kg/hm^2 、 P_2O_5 60 kg/hm^2 、 K_2O 90 kg/hm^2) 处理水稻分蘖期地上部和收获期秸秆氮、钾含量显著高于常规施肥处理($P <$

0.05), 收获期地上部氮、钾的积累量和氮、磷的表观利用率也显著大于常规施肥处理($P < 0.05$), 减氮控磷增钾不仅能满足水稻正常分蘖对氮、磷、钾的要求和高产对钾营养的要求, 而且可明显提高氮肥的利用率。

3) 从增产效应, 提高氮、磷肥表观利用率和农学利用率的作用的角度来看, 在当地的条件下, 水稻的氮、磷、钾的经济最佳施肥量为 N 196.2 kg/hm^2 、 P_2O_5 46.5 kg/hm^2 和 K_2O 90 kg/hm^2 。

参考文献:

- [1] Roberts T L. Roles of fertilizer in growing world's food[J]. Better crops, 2009, 93(2): 12-15.
- [2] 王光火, 张奇春, 黄昌勇. 提高水稻氮肥利用率、控制氮肥污染的新途径—SSNM[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(1): 67-70.
Wang G H, Zhang Q C, Huang C Y. SSNM—A new approach to increasing fertilizer N efficiency and reducing N loss from rice fields[J]. J. Zhejiang Univ. (Agric. & Life Sci.), 2003, 29(1): 67-70.
- [3] 刘振兴, 杨振华, 邱孝煊, 等. 肥料增产贡献率及其对土壤有机质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1994, 1(1): 19-26.
Liu Z X, Yang Z H, Qiu X X et al. Contribution of fertilizers to yield increase and its effect on soil organic matter[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1994, 1(1): 19-26.
- [4] 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.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.
- [5] 易琼, 张秀芝, 何萍, 等. 氮肥减施对稻-麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1069-1077.
Yi Q, Zhang X Z, He P et al. Effects of reducing N application on crop N uptake, utilization, and soil N balance in rice-wheat rotation system[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(5): 1069-1077.
- [6] 杨梢娜. 杭嘉湖平原稻田不同施氮水平下氮素利用效率及环境效应研究[D]. 杭州: 浙江农林大学硕士学位论文, 2010.
Yang S N. Research on nitrogen use efficiency and environmental effects of rice field under different nitrogen application in Hangjiahu plain region[D]. Hangzhou: Ms thesis, Zhejiang A & F University, 2010.
- [7] Qiao J, Yang L Z, Yan T M et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2012, 146: 103-112.
- [8] Heffer P, Prud'homme M. Fertilizer outlook 2010-2014[A]. Proceedings of 78th IFA Annual Conference[C]. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010. 1-11.
- [9] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.

- National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook-2011[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011.
- [10] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1998. 38-51.
- Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer issues in the sustainable development of China agriculture[M]. Nanjing: Jiangxi Science and Technology Press, 1998. 38-51.
- [11] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
- Zhang W L, Wu S X, Ji H J, Kolbe H. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(7): 1008-1017.
- [12] 张维理, 徐爱国, 冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 III. 中国农业面源污染控制中存在问题分析[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1026-1033.
- Zhang W L, Xu A G, Ji H J, Kolbe H. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. III. A review of policies and practices for agricultural non-point source pollution control in China[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(7): 1026-1033.
- [13] Xu G H, Fan X R, Anthony J M. Plant nitrogen assimilation and use efficiency[J]. Annu. Rev. Plant Biol., 2012, 63: 153-182.
- [14] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 645-653.
- Wang W N, Lu J W, He Y Q *et al.* Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. Chin. J. Rice Sci., 2011, 25(6): 645-653.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Sci-tech Press, 2000.
- [16] 刘立军, 徐伟, 吴长付, 杨建昌. 实地氮肥管理下的水稻生长发育和养分吸收特性[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 167-173.
- Liu L J, Xu W, Wu C F, Yang J C. Characteristics of growth, development and nutrient uptake in rice under site-specific nitrogen management[J]. Chin. J. Rice Sci., 2007, 21(2): 167-173.
- [17] 韩宝吉, 曾祥明, 卓光毅, 等. 氮肥施用措施对湖北中稻产量、品质和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 842-850.
- Han B J, Zeng X M, Zhuo G Y *et al.* Effects of fertilization measures of nitrogen (N) on grain yield, grain quality and N-use efficiency of midseason rice in Hubei Province[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(4): 842-850.
- [18] 刘立军, 杨立年, 孙小淋, 等. 水稻实地氮肥管理的氮肥利用效率及其生理原因[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1672-1680.
- Liu L J, Yang L N, Sun X L *et al.* Fertilizer-nitrogen use efficiency and its physiological mechanism under sitespecific nitrogen management in rice[J]. Acta Agron. Sin., 2009, 35(9): 1672-1680.
- [19] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 545-553.
- Wang W N, Lu J W, Lu M X *et al.* Effect of nitrogen fertilizer application and nitrogen use efficiency of early, middle and late rice in Hubei Province[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(3): 545-553.
- [20] 王伟妮, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 氮磷钾配合施用对水稻养分吸收、积累与分配的影响[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(6): 710-714.
- Wang W N, Li X K, Lu J W *et al.* Effects of combined application of N,P,K on nutrient uptake and distribution of rice[J]. J. Huazhong Agric. Univ., 2010, 29(6): 710-714.
- [21] 刘芷宇, 唐永良, 罗质超, 等. 主要作物营养失调症状图谱[M]. 北京: 中国农业出版社, 1982. 62-67.
- Liu Z Y, Tang Y L, Luo Z C *et al.* Symptom of nutrition disorder in important crops[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1982. 62-67.
- [22] 孙羲. 植物营养原理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. 70-160.
- Sun X. Principle of plant nutrition[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997. 70-160.
- [23] 石伟勇. 植物营养诊断与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. 42-44.
- Shi W Y. Plant nutritional diagnosis and fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. 42-44.
- [24] Lin D X, Fan X H, Hu F *et al.* Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake region, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 639-645.
- [25] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J *et al.* Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects[J]. Adv. Agron., 2005, 87: 85-156.
- [26] Roberts T L. Improving nutrient use efficiency[J]. Turk J. Agric. For., 2008, 32: 177-182.
- [27] 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 韩涛. 施氮量对高产早稻氮素利用特征及产量形成的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1409-1416.
- Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, Han T. Effects of nitrogen application amount on characteristics of nitrogen utilization and yield formation in high yielding early hybrid rice[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(8): 1409-1416.
- [28] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 53-68.
- Xu J M, Zhang G L, Xie Z M *et al.* Indices and assessment of soil quality[M]. Beijing: Science Press, 2010. 53-68.