

氮肥运筹对水稻农学效应和氮素利用的影响

张秀芝^{1,2}, 易琼², 朱平¹, 何萍^{2*}, 杨利³, 范先鹏³, 熊桂云³

(1 吉林省农业科学院农业环境与资源研究中心, 吉林长春 130033; 2 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 湖北武汉 430064)

摘要: 通过田间试验, 以不同氮肥量级为参照, 结合关键生育期叶片叶绿素含量 (SPAD 值) 指导氮肥施用, 以探明潜江地区水稻关键生育期的氮肥适宜用量。结果表明, 在施 N 90 ~ 180 kg/hm² 之间水稻产量差异不显著, 当超过 N 180 kg/hm², 产量降低。根据水稻产量 (y) 和施氮量 (x) 拟合得出一元二次关系式: $y = -0.0728x^2 + 22.335x + 6811.5$, $R^2 = 0.9442$ 。结合当年水稻价格, 肥料投入费用等计算出水稻的经济效益 (y) 和施氮量 (x) 之间的函数式: $y = -0.134x^2 + 37.097x + 12533 - M$, $R^2 = 0.9331$; 由此得出经济效益最大时水稻的施氮量是 N 138 kg/hm²。该施氮量下水稻的氮肥表观利用率、农学利用率和氮肥偏生产力可保持在 40.9%、11.5 kg/kg 和 63.2 kg/kg, 与完全依据 SPAD 值指导关键生育期的氮肥施用量相近似 (N 140 kg/hm²), 保证了水稻最大的经济效益, 同时也保持了较高的氮肥利用率, 降低氮素表观损失。

关键词: 氮肥量级; SPAD 值; 氮肥利用率; 氮平衡

中图分类号: S511.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)04-0782-07

Agronomic responses to nitrogen application and nitrogen utilization in rice fields

ZHANG Xiu-zhi^{1,2}, YI Qiong², ZHU Ping¹, HE Ping^{2*}, YANG Li³, FAN Xian-peng³, XIONG Gui-yun³

(1 Agricultural Environment and Resources Center, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China;

2 Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture/

Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3 Institution of Plant Protection and Soil Fertilization, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: Field experiments were conducted to explore the optimum N application rate based on agronomic responses to different N application rates, and the leaf SPAD values at the critical growth stages were measured for guiding the N management practices in the Qianjiang region. The results indicate that there are no significant differences in grain yield when N application rates range from 90 to 180 kg/ha, while grain yield is decreased when N rate is over 180 kg/ha. The equation between grain yield of rice and N application rate is established: $y = -0.0728x^2 + 22.335x + 6811.5$, $R^2 = 0.9442$. Then the economic optimum nitrogen rate (EONR), 138 kg/ha, is evaluated in the study area by the equation between economic benefit of rice and N application rate ($y = -0.134x^2 + 37.097x + 12533 - M$, $R^2 = 0.9331$) based on the input of N fertilizer and output of grain yield, and the N recovery efficiency, agronomic efficiency and N partial factor productivity are 40.9%, 11.5 kg/kg and 63.2 kg/kg, respectively. The produced N application rate (140 kg/ha) guided by SPAD values at the critical growth stages is matched perfectly with EONR under the maximum economic benefit, higher nitrogen use efficiency and low nitrogen apparent loss.

Key words: nitrogen application level; SPAD value; N fertilizer use efficiency; N balance

收稿日期: 2010-12-12

接受日期: 2011-03-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题 (2007CB109306); 国家科技支撑计划课题 (2006BAD02A14) 资助。

作者简介: 张秀芝 (1981—), 女, 吉林省桦甸市人, 硕士研究生, 主要从事土壤培肥研究。

Tel: 0431-87063170, E-mail: zhangxiuzhi5cl332004@yahoo.com.cn. * 通讯作者 Tel: 010-82108000, E-mail: phe@caas.ac.cn

水稻种植面积及总产在世界粮食生产中占据重大比例,我国水稻生产占世界水稻总产量的 32%~35%^[1]。为获得水稻高产,投入氮肥成为必要途径。然而,在我国的水稻生产中,氮肥的使用存在着很大程度的盲目性和不合理性。氮肥不合理施用导致产量、品质、肥效下降,造成土壤质量退化、环境污染等问题^[2-5]。合理施用氮肥,既能提高氮肥利用率,又能降低生产成本,保护生态环境,促进农业的可持续发展。研制新型氮肥、脲酶抑制剂以及硝化抑制剂^[6-10],同时筛选能高效利用营养元素的作物品种^[11]以及提高作物优质高产施肥诊断和施用技术,快速、准确的诊断养分状况,进而提出合理的施肥指标^[12],都是解决这一问题的有效途径。

叶绿素仪能够无损伤地测定作物氮素状况,其读数数和叶片氮素浓度之间具有很好的线性相关性。因此,可以通过叶片叶绿素测定值间接地掌握作物叶片氮素状况,确定氮肥追施量^[13-16]。吴良欢^[17]等研究表明,水稻不同生育时期 SPAD 值与叶绿素含量的相关系数达 0.64~0.97,达到极显著水平。贺帆^[18]等研究指出,施氮量与 SPAD 预设阈值呈指数相关关系,其预设阈值直接影响氮肥施用量和氮肥利用率。因此,叶绿素仪指导施肥具有科学性 & 实用性。本研究以不同氮肥量级试验为评价基准,验证利用 SPAD 值指导水稻关键生育期氮肥运筹的可行性,以期合理施用氮肥提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2008 年 6~10 月在湖北省潜江市浩口镇柳州村 4 组(30°22'54.5" N,112°37'21.5" E)低肥力水稻土上进行。试验田地处江汉平原腹地,地势平坦,属于亚热带季风性湿润气候,海拔为 27.5 m,年均降水量 1150 mm,年平均气温 16℃。供试土壤为潮土,质地砂壤。前茬为小麦。土壤基础养分状况: pH 7.2、有机质 21.4 g/kg、全氮 1.74 g/kg、速效磷 19.42 mg/kg、速效钾 130 mg/kg。水稻移栽前 0—20、20—40、40—60、60—80 和 80—100 cm 土层 NO₃⁻-N 含量分别为 30.97、12.21、12.44、8.82 和 6.87 mg/kg, NH₄⁺-N 含量分别为 5.21、3.86、2.96、4.16 和 3.60 mg/kg。

试验设 9 个处理,其中处理 1~7 为氮肥不同量级; S1 和 S2 处理为 SPAD 值指导施肥的验证处理。S1 施氮总量同 N180 处理,基肥用量相同,分蘖期的施肥量根据 SPAD 值确定 (SPAD > 37, 则施氮量确定为 54-20 kg; 35 < SPAD < 37, 则施氮量确定

为 54 kg; SPAD < 35, 则施氮量确定为 54 + 20 kg), 剩余的氮肥在孕穗期施用; S2 处理基肥施氮量同 N180 处理,分蘖期和孕穗期的施氮量完全根据 SPAD 值确定,方法同 S1 (表 1)。各处理均施 P₂O₅ 75 kg/hm², K₂O 120 kg/hm², 磷肥全部作基肥于播种前施入,钾肥 50% 作基肥施用,50% 作分蘖肥施用。所用肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾。小区面积 30 m², 3 次重复,随机区组排列。小区之间用田埂隔开,区组间设置排灌沟,保证各小区能单独排灌。供试水稻品种为当地主推品种“培两优 3076”。5 月 7 日播种,6 月 16 日移栽。6 月 30 日施分蘖肥,7 月 31 日施孕穗肥,其他管理按常规。

表 1 田间试验处理设计
Table 1 Design of experiment in the field

处理 Treat.	施氮量 N input (kg/hm ²)			
	总氮量 Total N	移栽前 Pre-planting	分蘖期 Tillering	孕穗期 Booting
N0	0	0	0	0
N45	45	18	13.5	13.5
N90	90	36	27.0	27.0
N135	135	54	40.5	40.5
N180	180	72	54.0	54.0
N225	225	90	67.5	67.5
N270	270	108	81.0	81.0
S1	180	72	34.0	74.0
S2	140	72	34.0	34.0

注 (Note): S2 处理氮肥总用量及 S1、S2 分蘖、孕穗时期追肥用量为根据移栽后的第 11 及第 40 d 的 SPAD 值测定计算得出 The total N input of S2, the topdressing N of S1 and S2 at tillering and booting stages are calculated using the SPAD values at 11 and 40 days after transplanting.

1.2 测定项目与方法

移栽前和收获后采取 0—100 cm 土壤样品,每 20 cm 为一层,测定 0—20 cm 土层的土壤理化性状及各土层 Nmin 含量。每小区随机取 4 点,混匀后称取 10 g 土样,1 mol/L KCl 溶液浸提 (水土比为 5:1),震荡 45 min 过滤,用 FOSS5000 型流动注射分析仪测定铵态氮、硝态氮含量^[19]和土壤含水量。

分别于移栽期、返青期、分蘖期、孕穗期和灌浆期,测定最上完全展开叶 SPAD 值 (每个处理 30 株)。其中,在分蘖期追肥前 3~4 d、在孕穗期 (通常第二次追肥前 3~4 d) 测定最上完全展开叶 SPAD 值。测定 SPAD 值后,采集所测的叶片,烘干称重,并测定全氮含量,以确定 SPAD 值与全氮含量的相关关系;并结合产量,得出分蘖期和孕穗期指

导追肥的 SPAD 阈值。

于移栽期、返青期、分蘖期、孕穗期、灌浆期和成熟期 6 个时期,取样考苗,70℃烘干,称重,计算干物质积累量及植株吸氮量;小区样方测产。

1.3 有关参数的计算^[20-22]

氮肥表观利用率($RE_N, \%$) = (施氮区植株总吸氮量 - 空白区植株总吸氮量)/施氮量 $\times 100$;

氮素收获指数($NHI, \%$) = 子粒吸氮量/植株总吸氮量 $\times 100$;

氮肥农学利用率($AE_N, \text{kg}_{\text{grain}}/\text{kg}_N$) = (施氮区作物产量 - 不施氮区作物产量)/施氮量;

氮肥偏生产力($PPF_N, \text{kg}_{\text{grain}}/\text{kg}_N$) = 单位面积作物产量/单位面积施氮量;

土壤氮素的表观净矿化量 = 不施氮小区作物吸氮量 + 不施氮小区土壤残留 N_{min} - 不施氮小区土壤起始 N_{min} ;

氮素表观损失 = 施氮量 + 土壤起始 N_{min} + 土壤氮素净矿化量 - 作物收获带走量 - 收获后土壤残留 N_{min} 。

试验数据用 SAS 软件进行分析,采用 LSD 法进行差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 水稻生长发育及养分吸收动态

2.1.1 水稻生育期植株地上部生物量及氮素积累量的动态 在整个生育期内,水稻地上部干物质积累前期比较缓慢,孕穗期(移栽后 40 d)后干物质积累快速增加(图 1A)。成熟期 S2 处理的干物质积累量显著高于 N225、N270 处理。

水稻氮素积累量,各处理的趋势基本相同(图 1B)。移栽至返青期,氮素积累较低,返青、分蘖至孕穗期,氮素的积累近似匀速增加,孕穗期后氮素积累进入快速增长阶段,灌浆期后又进入平稳阶段。随着施氮量的增加氮素积累量增加,分蘖期后,施氮量 $> N 45 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的处理氮素积累量显著高于不施氮处理。成熟期 S1 处理植株氮素的积累量最高, S2 处理与 N180 处理植株氮素积累量相近。

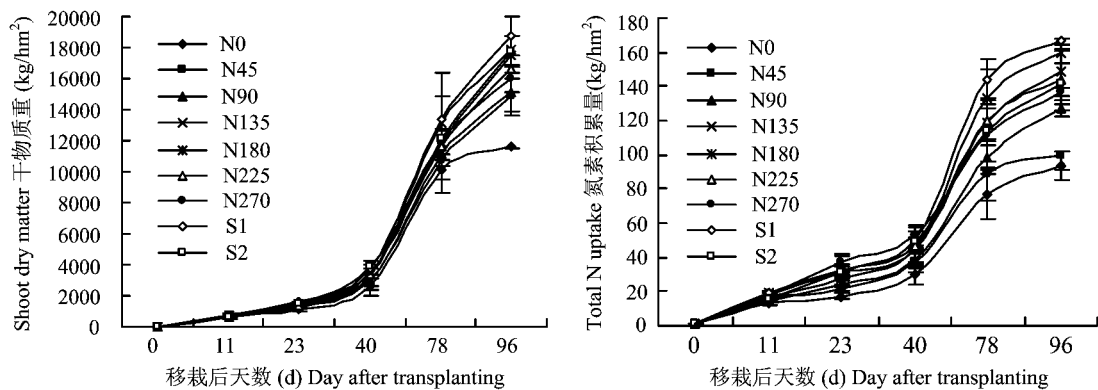


图 1 水稻生育期植株地上部生物量和氮素积累量的动态变化

Fig. 1 Dynamics of plant biomass and N uptake at the rice growth stages

2.1.2 水稻生育期叶片 SPAD 值的动态变化 水稻在整个生育过程中,最上部完全展开叶叶绿素含量在进入分蘖期时达到最高点;随着生育进程的推进,叶绿素含量逐渐降低(图 2)。N0 处理在整个生育期 SPAD 值均最低,这与水稻地上部氮素的积累规律相似。水稻叶片 SPAD 值随施氮量的增加而变大,但施用量超过 $N 135 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,SPAD 的变化幅度很小。灌浆期,施 $N \geq 135 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 处理的 SPAD 值依然较高,变化范围为 $40.9 \sim 41.9$; S1 处理的 SPAD 值为 41.4, S2 处理的 SPAD 值仅为 38.4。

2.2 水稻产量与氮肥利用率

施氮对水稻增产效果显著,但施氮量超过 $N 180$

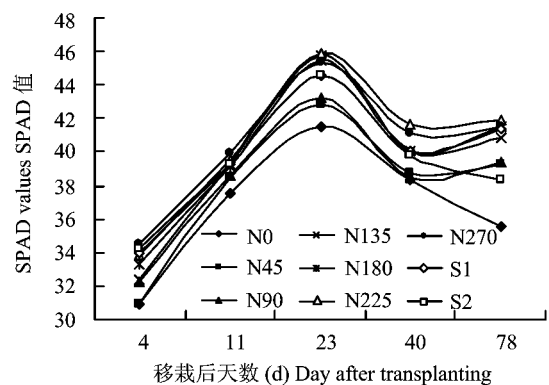


图 2 水稻生育期 SPAD 值的动态变化

Fig. 2 The dynamics of SPAD values of the topmost fully expanded leaves

kg/hm² 时,增施氮肥的增产效果与 N45 处理相比差异并不显著。与对产量的影响相似,施氮量对成熟期水稻的氮素积累量影响非常显著,随着施氮量的增加氮素积累量也呈增加的趋势;当施氮量超过 N180 kg/hm² 时,植株吸氮能力则下降。水稻氮收获指数随施氮量的增加也逐渐下降(表 2)。表明增加施氮量提高了氮素在稻草中的比例,促进了水稻植株的“奢侈”耗氮现象的发生。

表 2 还表明,氮肥的农学利用率随着施氮量的增加迅速下降,N270 处理的平均氮肥农学利用率最低,仅有 2.5 kg/kg。随着施氮量的增加,氮肥的偏生产

力显著下降,当施氮量从 45 增加到 270 kg/hm²,水稻平均氮肥偏生产力从 168.1 下降到 28.0 kg/kg。

总施肥量相同、氮肥运筹不同的 N180 与 S1 处理相比,产量、氮收获指数及吸氮量未发生显著变化,但 S1 处理的氮肥表观利用率显著高于 N180 处理,表明合理的氮素运筹可以提高氮肥表观利用率。基施氮量相同、分蘖期及孕穗期完全依据 SPAD 值追肥的 S2 处理与 N180、S1 处理相比,以 S2 处理的产量最高,且与 S1 处理的差异达到显著水平,其氮肥的农学利用率及氮肥的偏生产力均显著高于 N180、S1 处理。

表 2 水稻产量及氮素利用率
Table 2 Grain yield and N use efficiency of rice

处理 Treatments	子粒产量 Grain yield		氮收获指数 NHI	总吸氮量 N uptake	氮肥利用率 RE _N	氮肥农学利用率 AE _N	氮肥偏生产力 PFP _N
	(kg/hm ²)	(± %)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/kg)	(kg/kg)
N0	6898 e		72.3 bcd	93.2 ef			
N45	7563 de	9.6	78.8 a	99.2 e	13.4 e	14.8 ab	168.1 a
N90	8147 bcd	18.1	75.5 ab	127.5 d	38.1 bc	13.9 ab	90.5 b
N135	8505 abc	23.3	74.9 ab	159.2 ab	48.9 a	11.9 bc	63.0 c
N180	8736 ab	26.7	70.8 bcd	148.4 bc	30.6 cd	10.2 bc	48.5 d
N225	7961 cd	15.4	69.6 cd	143.6 c	22.4 d	4.7 d	35.4 e
N270	7560 de	9.6	68.3 cd	137.0 cd	16.2 de	2.5 d	28.0 f
S1	8089 bcd	17.3	73.5 b	166.4 a	40.6 ab	6.6 cd	44.9 d
S2	9125 a	32.3	73.0 bc	141.6 c	34.5 c	15.9 a	65.2 c

注(Note): NHI—Harvest index of N; RE_N—Recovery efficiency of N; AE_N—Agronomic efficiency of N; PFP_N— Partial factor productivity of N
同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significant at the 5% level.

2.3 水稻的经济最佳施氮量

根据上述试验结果拟合出了水稻产量(y)和施氮量(x)之间的一元二次关系式:

$$y = -0.0728x^2 + 22.335x + 6811.5, R^2 = 0.9442$$

按照当年的市场价格水稻 1.81 元/kg, 纯氮 4.0 元/kg, 作物生产中其他投入为固定值 M, 计算得出水稻的经济效益(y)和施氮量(x)之间的函数式是:

$$y = -0.134x^2 + 37.097x + 12533 - M, R^2 = 0.9331$$

当经济效益最大时,水稻的施氮量是 N 138 kg/hm²。根据施氮量与上述各种氮肥利用率拟合函数可得出水稻经济最佳施氮量时的氮肥利用率、农学利用率及偏生产力分别是 40.9%, 11.5 kg/kg, 63.2 kg/kg。N135 及 S2 处理的各项指标与之相近。

2.4 叶片 SPAD 值与叶片含氮量及植株全氮之间的相关性

通过对不同生育期水稻叶片含氮量、植株全氮含量和 SPAD 值的测定,结果表明,水稻叶片 SPAD 值与叶片含氮量及植株全氮含量之间均达显著和极显著的正相关。返青期、分蘖期、孕穗期、灌浆期叶片 SPAD 与叶片含氮量的相关系数(r)分别为 0.87**、0.87**、0.89**、0.90**; 叶片 SPAD 与植株含氮量的相关系数(r)分别为 0.76*、0.91**、0.83**、0.91** (* 表示显著, ** 表示极显著)。表明水稻叶片 SPAD 值可以很好地指示生育期植株氮素营养状况,可作为关键生育期氮素管理的一个生理指标。大量研究证明,叶片含氮量高于 2.5% (干重)时新叶才能伸长,稻苗含氮量在 2.5% 以下,

分蘖生长停止;水稻抽穗后,叶片含氮量不应低于 2.5%^[23]。根据水稻分蘖期、孕穗期 SPAD 值与叶片叶绿素含量拟合的回归方程得出,叶片含氮量为 2.5% 时的 SPAD 值分别为 39.3 和 40.5。

2.5 水稻生育期土壤氮素平衡

水稻前季轮作是小麦—棉花轮作,土壤中残留

大量的无机氮,本季是小麦—水稻轮作,小麦季收获后仍有大量的无机氮残留,所以水稻季起始土壤无机氮含量很高。随着施氮量的增加,水稻生育期土壤氮素的表观损失呈显著增加趋势。基施氮量相同(N180、S1 和 S2 处理),SPAD 指导施肥的处理,其表观损失降低,表现为 N180 > S1 > S2(表 3)。

表 3 水稻生育期土壤氮素的表观平衡(kg/hm²)

Table 3 Nitrogen apparent balance during the growing stage of rice

处理 Treatments	氮输入 N input			氮输出 N output		表观损失 Apparent loss
	施氮量 N rate	起始无机氮 Initial Nmin	净矿化氮 Net N mineralization	吸氮量 N uptake	残留无机氮 Residual Nmin	
N0	0	281	-76.6	93.2 ef	111.2 bc	
N45	45	281	-76.6	99.2 e	101.8 c	48.4 e
N90	90	281	-76.6	127.5 cd	115.5 bc	51.4 e
N135	135	281	-76.6	159.2 ab	101.2 c	79.0 d
N180	180	281	-76.6	148.4 abc	122.3 ab	113.7 c
N225	225	281	-76.6	143.6 de	115.2 bc	170.6 b
N270	270	281	-76.6	137.0 ab	121.3 ab	216.1 a
S1	180	281	-76.6	166.4 a	114.6 bc	103.4 c
S2	140	281	-76.6	141.6 bc	128.3 a	74.5 d

注(Notes): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significant at the 5% level.

3 讨论

肥料用量和施肥时期是施肥技术的核心,也是影响氮肥利用率的首要因素。随着施氮量的增加,作物产量增加,但当施氮量达一定值,作物产量增加不显著^[24-25],甚至出现产量降低的现象。本试验中,水稻在施氮量 N 90~180 kg/hm² 间的产量差异不显著;但当施氮量超过 N 180 kg/hm² 后产量显著下降,且随着施氮量的增加,氮收获指数降低。适量增施氮肥能增加水稻的单位面积穗数、穗粒数以及成粒数,从而增加水稻产量。但施氮量不宜超过 150 kg/hm²^[3]。过量施氮只会造成作物对氮素的奢侈吸收、作物子粒灌浆不充分、产量降低^[26]。而且,氮肥过量施用是导致肥料利用率下降的重要原因之一。本试验中,随着氮肥量级的增加,其相应的农学利用率和氮肥偏生产力均显著下降。

申建波等^[27]指出,北方稻区 SPAD 临界值一般在 36~40,南方稻区 SPAD 临界值一般在 35~38;也有研究将 SPAD 值 35 作为大多数现代热带籼稻品种的施氮阈值^[28],但因其品种间氮营养状况的基

因型差异较大^[29-31],本试验设定的 SPAD 阈值为 35~37,但在实际测定中,关键生育期各处理的 SPAD 均高于 37。根据 SPAD 值追肥的 S2 处理,分蘖期、孕穗期的 SPAD 值分别为 39.2、39.8。通过水稻分蘖期、孕穗期 SPAD 值与叶片叶绿素含量拟合的回归方程得出,叶片含氮量为 2.5% 时的 SPAD 值分别为 39.3 和 40.5。因此确定该地区水稻的 SPAD 阈值为 39~41。

本研究得出,该地区的水稻最大经济效益时的氮肥用量为 N 138 kg/hm²,且该用量能够保持较高的氮肥利用率(40.9%)。9 个施肥处理中,SPAD 值指导施肥的 S2 处理的总施氮量为 N 140 kg/hm²,产量最高,与水稻经济最佳施氮量时的氮肥回收利用率、农学利用率及偏生产力相匹配,且其处理下的氮素表观损失也较低(74.5 kg/hm²)。水稻关键生育期叶片 SPAD 值与叶片含氮量及植株全氮之间具有极显著的相关性,表明可以将 SPAD 值作为水稻关键生育期氮素管理的一个生理指标^[13, 17-18, 23]。依据 SPAD 值设计关键生育期氮肥运筹可以提高产量、氮肥的农学利用率和偏生产力及经济效益。

参考文献:

- [1] Maclean J L, Dawe D C, Hardy B, Hettel G P. Rice almanac [M]. Los Baños (Philippines): IRRI, Bouaké (Côte d'Ivoire): West Africa Rice Devel. Assoc., Cali (Colombia): Inter. Center for Trop. Agric., Rome (Italy): FAO. 253, 2002. 1-10.
- [2] 张国荣,李菊梅,徐明岗,等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 543-551.
Zhang G R, Li J M, Xu M G *et al.* Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(2): 543-551.
- [3] 孙伟晶,王伯伦,陈丛斌. 不同施氮水平对水稻产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(20): 9411-9413.
Sun W J, Wang B L, Chen C B. Effects of different nitrogen levels on the yield and quality of rice[J]. Anhui Agric. Sci., 2009, 37(20): 9411-9413.
- [4] 万靛军,张洪程,霍中洋,等. 不同氮肥施用比例对两优培九产量及品质的影响[J]. 扬州大学学报, 2005, 26(1): 69-72.
Wan L J, Zhang H C, Huo Z Y *et al.* The effect of different proportion of nitrogen application on yield and quality of rice Liangyoupei9[J]. J. Yangzhou Univ., 2005, 26(1): 69-72.
- [5] 晏娟,尹斌,张绍林,等. 太湖地区稻麦轮作系统中氮肥效应的研究[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(1): 61-66.
Yan J, Yin B, Zhang S L *et al.* Studies on the nitrogen fertilizer application of rice-wheat rotation system in Taihu Lake Region [J]. J. Nanjing Agric. Univ., 2009, 32(1): 61-66.
- [6] 任祖淦,唐福钦. 缓效氮肥的增产效应研究[J]. 土壤通报, 1997, 28(1): 22-24.
Ren Z G, Tang F Q. Study on the effect of Slow release nitrogen fertilizer on yield increasing[J]. Chin. J. Soil Sci., 1997, 28(1): 22-24.
- [7] 张春伦,米兴明,胡思农. 缓释尿素的肥效及氮素利用率研究[J]. 土壤肥料, 1998, (6): 17-20.
Zhang C L, Mi X M, Hu S N. Studies on slow-release urea fertilizer and nitrogen use efficiency[J]. Soil Fert., 1998, (6): 17-20.
- [8] 吴平霄,廖宗文,毛小云. 改性碳酸氢铵的肥效及淋溶特性研究初探[J]. 华南农业大学学报, 2000, 21(3): 94.
Wu P X, Liao Z W, Mao X Y. Research to the fertilizer efficiency of modified ammonium bicarbonate and its eluviations characteristics (Preliminary report) [J]. J. South China Agric. Univ., 2000, 21(3): 94.
- [9] 吴平霄,廖宗文,毛小云. 改性尿素的肥效及淋溶特性研究初探[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 75-76.
Wu P X, Liao Z W, Mao X Y. Preliminary report on the fertilizer efficiency of modified urea and its eluviations characteristics[J]. Soil. Environ. Sci., 2000, 9(1): 75-76.
- [10] 曾思坚,林翠兰,李小玲. 几种水稻涂层专用肥一次性施用的肥效试验[J]. 土壤与环境, 2000, 9(2): 168-170.
Zeng S J, Lin C L, Li X L. Efficiency trial of one-off application of several specific coated-fertilizers for rice[J]. Soil. Environ. Sci., 2000, 9(2): 168-170.
- [11] 张俊国,张三元,杨春刚,等. 水稻氮高效品种资源筛选的初步研究. I. 不同施氮水平下水稻产量和干物质生产的品种间差异[J]. 吉林农业科学, 2008, 33(6): 7-10.
Zhang J G, Zhang S Y, Yang C G *et al.* Preliminary studies on selection of high nitrogen utilization rice variety resources I. Differences of yield and dried mass production among rice varieties under different nitrogen application Rate [J]. Jilin Agric. Sci., 2008, 33(6): 7-10.
- [12] 焦爱娟,闵庆文,林焜,等. 植物氮素营养诊断的进展与展望[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 351-355.
Jiao W J, Min Q W, Lin K *et al.* Progress and perspective on nutrition diagnosis of plant nitrogen [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2006, 22(12): 351-355.
- [13] 李志宏,刘宏斌,张云贵. 叶绿素仪在氮肥推荐中的应用研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 125-132.
Li Z H, Liu H B, Zhang Y G. A review on chlorophyll meter application on nitrogen fertilizer recommendation [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(1): 125-132.
- [14] 王康,沈荣开,唐友生. 用叶绿素测定 (SPAD) 评估夏玉米氮素状况的实验研究[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4): 1-3.
Wang K, Shen R K, Tang Y S. Evaluating nitrogen status with chlorophyll meter in summer corn [J]. Irrig. Drain., 2002, 21(4): 1-3, 14.
- [15] 黄勤楼,黄秀声,钟珍梅,等. SPAD 值与杂交狼尾草施氮水平和农艺性状的关系[J]. 热带作物学报, 2008, 29(2): 159-163.
Huang Q L, Huang X S, Zhong Z M *et al.* Relation of SPAD reading with traits and protein content of Pennisetum Hybrid applied with various levels of nitrogen [J]. Chin. J. Trop. Crops, 2008, 29(2): 159-163.
- [16] 王娟,韩登武,任岗,等. SPAD 值与棉花叶绿素和含氮量关系的研究[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(3): 167-170.
Wang J, Han D W, Ren G *et al.* A study of relation between SPAD value, chlorophyll and nitrogen content in cotton [J]. Xinjiang Agric. Sci., 2006, 43(3): 167-170.
- [17] 吴良欢,陶勤南. 水稻叶绿素计诊断追氮法研究[J]. 浙江农业大学学报, 1999, 25(2): 135-138.
Wu L H, Tao Q N. Nitrogen fertilizer application based on the diagnosis of nitrogen nutrition of rice plants using chlorophyll meter [J]. J. Zhejiang Agric. Univ., 1999, 25(2): 135-138.
- [18] 贺帆,黄见良,崔克辉,等. 实时实地氮肥管理对不同杂交水稻氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 470-479.
He F, Huang J L, Cui K H *et al.* Effect of real-time and site-specific nitrogen management on various hybrid rice [J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(2): 470-479.
- [19] Havlin J L, Beaton J D, Tisdale S L *et al.* Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management (7th ed.) [M]. Carolina: Prentice Hall, 2006. 333-338.
- [20] 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.
- [21] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2002, 35(11): 1361–1368.
- [22] Liu X J, Zhao Z J, Ju X T *et al.* Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat. fertilizer N recovery and N balance[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2002, 33(7): 1122–1128.
- [23] 范立春, 彭显龙, 刘元英, 等. 寒地水稻实地氮肥管理的研究与应用[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(9): 1761–1766.
Fan L C, Peng X L, Liu Y Y *et al.* Study on the site-specific nitrogen management of rice in cold area of Northeastern China[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2005, 38(9): 1761–1766.
- [24] Jing Q, Bouman B A M, Hengsdijk H *et al.* Exploring options to combine high yields with high nitrogen use efficiencies in irrigated rice in China[J]. *Eur. J. Agron.*, 2007, 26: 166–177.
- [25] Ju X T, Liu X J, Pan J R *et al.* Fate of ^{15}N -labeled urea under a winter-summer maize rotation on the north China plain[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 52–61.
- [26] 李伟波, 吴留松, 廖海秋. 太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究[J]. *土壤学报*, 1997, 34(1): 67–73.
Li W B, Wu L S, Liao H Q. Application and crop recovery of N-fertilizer in high-yielding paddy fields of Taihu Region[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 1997, 34(1): 67–73.
- [27] 申建波, 张福锁. 水稻养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
Shen J B, Zhang F S. Rice nutrients resources integrated management theory and practice[M]. Beijing: China Agricultural University Press. 2006.
- [28] Peng S B, Garcia F V, Laza R C *et al.* Increased N-use efficiency using a chlometer on high yielding irrigated rice[J]. *Field Crops Res.*, 1996, 47: 243–252.
- [29] Balasubramanian A C. Adaptation of the chlorophyll meter (SPAD) technology for real-time N management in rice: a review[J]. *Inter. Rice Res. Notes*, 2000, 25(1): 4–8.
- [30] 王绍华, 曹卫星, 王强盛, 等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1461–1466.
Wang S H, Cao W X, Wang Q S *et al.* Positional distribution of leaf color and diagnosis of nitrogen nutrition in rice plant [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2002, 35(12): 1461–1466.
- [31] 李刚华, 薛利红, 尤娟, 等. 水稻氮素和叶绿素 SPAD 叶位分布特点及氮素诊断的叶位选择[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(6): 1127–1134.
Li G H, Xue L H, You J *et al.* Spatial distribution of leaf N content and SPAD value and determination of the suitable leaf for N diagnosis in rice[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2007, 40(6): 1127–1134.