

利用叶绿素计(SPAD-502)诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展

李刚华¹, 丁艳锋^{1*}, 薛利红², 王绍华¹

(1 南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室, 江苏南京 210095;

2 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008)

摘要: 叶绿素计(SPAD-502)在监测水稻氮素营养水平和及时提供追肥所需的信息方面有快速、简便、无损的特点, 但其精度常受多种因素的影响。本文分析了影响利用 SPAD-502 叶绿素计诊断水稻氮素营养和推荐追肥精度的水稻品种、生育时期、测定叶位、测定叶片的位点、生态环境等因素。并综述了通过量化 SPAD 读数与氮的关系, 提高诊断水稻氮素营养精度; 通过量化 SPAD 读数与追肥关系, 提高 SPAD-502 叶绿素计诊断法推荐施肥精度的研究现状; 提出进一步提高利用 SPAD-502 叶绿素计诊断水稻氮素营养状况与推荐追肥精度尚需解决的几个问题。

关键词: SPAD; 水稻氮素营养; 氮肥推荐

中图分类号: S511.06

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2005)03-0412-05

Research progress on diagnosis of nitrogen nutrition and fertilization recommendation for rice by use chlorophyll meter

LI Gang-hua¹, DING Yan-feng^{1*}, XUE Li-hong², WANG Shao-hua¹

(1 Key Lab. of Crop Growth Regulation, MOA, Nanjing Agric. Univ., Nanjing, Jiangsu 210095, China;

2 Inst. of Soil Sci., CAS, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract: SPAD-502 meter provides a simple, fast and nondestructive method to monitor rice nitrogen status and predict the need for fertilizer-N topdressing on time, but the precision was influenced by many factors. Because SPAD-502 meter diagnoses the nutrient status indirectly by means of leave color (value of SPAD), it is important to understand factors that affect SPAD readings in order to improve its application purpose. In this paper, factors influenced SPAD readings, such as rice variety, development stage, the leaf position, the point on the leaf and environment were studied. The research progress on improving the precision of rice nitrogen diagnosis by quantifying the relationship of SPAD reading to nitrogen content, as well as nitrogen recommendation by quantifying the relationship of SPAD reading to topdressing were also reviewed. For a purpose of further improving the precision of nitrogen status diagnosed by SPAD-502 meter and fertilizer recommendation, few questions need to be settled was put forward.

Key words: SPAD meter; rice nitrogen status; fertilizer-N recommendation

氮素是对水稻生长、产量和品质影响最为明显的营养元素^[1-2]。水田土壤氮含量较低, 需要补充氮素以提高水稻产量与品质^[2-5]。为获得更高产量, 农民常施用过量的氮肥^[6], 致使稻田氮肥利用率降低, 造成氮肥的大量损失, 污染环境。此外, 氮肥水平过高还可能加重水稻病虫害, 这是当前水稻生产面临的一个大问题^[7-9]。因此, 如何协调作物和

土壤两者之间的供需平衡, 按需施肥, 是提高水田系统中氮肥利用效率的有效途径和关键所在^[10]。而这最终依赖于对土壤或作物氮素状况的快速、精确诊断和评价^[11]。

叶绿素计能快速、简便、较精确、非破坏性地监测植物氮素营养水平并能及时提供追肥所需的信息^[12]。叶绿素计种类较多^[13], 在应用上基本相似,

收稿日期: 2004-04-26 修改稿收到日期: 2004-07-06

基金项目: 苏南稻区高产优质生产技术集成与示范(2004BA520A03, BE2004387); 江苏省主要农作物优质高产精确施肥技术项目资助。

作者简介: 李刚华(1974—), 男, 江西新余人, 硕士, 主要从事水稻精确施肥研究。* 通讯作者

而其中以 SPAD-502 叶绿素计应用最广。张金恒等^[14]阐述了 SPAD-502 叶绿素计的工作原理和特点,并对 SPAD-502 叶绿素计诊断水稻氮素状况和氮素需求状况利弊进行了综述。由于 SPAD-502 叶绿素计是通过叶色(SPAD 值的大小)来间接反映植株的氮素营养状况,因此,克服各种外界因素对 SPAD 读数的影响,以提高诊断精度是需要研究的问题。本文对利用(SPAD-502)叶绿素计诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展作了综述,并对提高诊断精度需解决的问题提出了建议。

1 影响因素的确定

1.1 品种

同一生长条件下不同品种间 SPAD 值存在较大差异,因此在确定 SPAD 临界值时,不同类型品种存在差异。一般情况下,在相同的生态条件和管理水平下,粳稻品种的 SPAD 临界值比籼稻品种要高,常规稻的 SPAD 临界值比杂交稻高^[15]。如抽穗期武育粳 3 号 SPAD 值为 43.56,准稻 6 号为 41.53,而汕优 63 为 39.53^[16]。不同米质类型的品种 SPAD 临界值也不一样。精米率较高的品种需肥量越大,SPAD 临界值也会越高,这种差异在抽穗后更加明显^[17-18]。不同株型的品种类型 SPAD 值也有差异,叶片角度越大,SPAD 临界值越低。因此,诊断不同品种的氮素状况,需要建立不同的 SPAD 临界值。

1.2 生育时期

水稻叶片氮浓度本身及叶片结构厚度等随生育期而发生变化,因而造成同一品种在不同生育期的 SPAD 读数差异较大^[19]。此外,由于不同类型品种对氮的吸收特性不同^[20],如双季早、晚稻只有一个吸氮高峰,早稻出现在移栽后 2 周,晚稻出现在移栽后 2~3 周;单季晚稻分别在分蘖盛期和孕穗期出现两个吸氮高峰。杂交稻表现更高的吸氮水平,并出现两个吸氮高峰,前中期所占比例较大。高产粳稻品种氮素吸收能力较强,尤其是齐穗后有较强的植株吸氮能力^[21]。这些是造成同一生育时期水稻吸收氮的不一致性,使 SPAD 读数不同。

1.3 测定叶位

在以 SPAD 值作为叶色诊断指标时,研究者所测定 SPAD 值时所选叶位并不统一,多以顶 1 全展叶或顶 2 全展叶这一固定叶位做为测定目标,从而根据不同品种在不同生态条件下的表现建立相应的 SPAD 临界值,用来诊断水稻氮素营养状况并指导施肥。这种方法在试验研究上取得了很好的效果,但

在水稻类型多样、品种混杂及生态条件复杂的水稻生产上的推广应用必然会受到限制。水稻不同叶位叶片 SPAD 值差异较大,这种差异主要来自氮素供应的差异^[22]。氮素在水稻体内的移动性很大,而以叶片中氮素的再移动能力最强。氮素在叶片间由下而上转运,并总是优先供应新生叶片^[23-25]。氮素供应等因素的影响导致叶片氮素贮存量的变化,从而也影响 SPAD 读数及其变化。

1.4 测定叶片的位点

同一叶片不同位置测定的 SPAD 值不相同。玉米在叶片中部距基部 55% 的位置测定结果偏差最小,而在 40%~60% 区域内测定值变异系数较低^[26]。小麦从叶基部到叶尖不同位置叶绿仪测定结果符合二次曲线变化,从叶基部开始 40%~60% 的区域测定值变异最小,而叶基部和叶尖测定值较小,叶片中部测定结果很相近的叶片,在叶片其它部位的测定结果也可能会有较大的差异^[27]。一般认为,水稻距离叶基部 1/2 处的 SPAD 测定值较大且比较稳定,是合适的测试位点^[12],但也有研究者以距离叶基 2/3 处为测定位点。因此,田间进行测定时一定要注意测定叶片位点的选择。

1.5 生态环境等其它因素的影响

不同季节的水稻,其 SPAD 临界值有所不同。在菲律宾,移栽矮秆籼稻在雨季的 SPAD 临界值为 37,在旱季为 35~37^[17,28-29]。这主要是光辐射照度对叶绿素计的读数有影响^[30]。随着光辐射照度的增加,SPAD 读数下降。对于同一天不同时间段的测定值,有人认为差异不大,仅有 1%~2%^[31],但不少研究者认为,在阴天或辐射较弱的气候条件下测得的 SPAD 读数较为稳定。另外,植株密度、环境条件、土壤或稻株的营养状态、导致植株枯黄的各种生物非生物胁迫及其他养分亏缺或毒性(主要是 P、Fe、Mn、Zn)等^[30-33]对 SPAD 的读数都会产生影响,如水稻缺磷会导致 SPAD 读数偏高。

2 校正因素影响,提高诊断精度

2.1 量化 SPAD 读数与氮的关系

SPAD 值取决于叶片叶绿素对特定波段光线的吸收,而叶绿素对光的吸收受叶片厚度的影响。因此,如何消除叶片厚度对 SPAD 值的影响,将是建立一个适用于全生育期通用方程的关键。Peng 等^[34]用比叶重(Specific leaf weight, SLW)对 SPAD 值进行矫正,发现 SPAD 值与 SLW 的比值与叶片氮浓度呈显著线性相关,其关系不受生育时期的影响,且预测

精度明显提高($r^2 = 0.93$)。可是,这种改进后的方法需要破坏性取样并需室内实验室分析,因此削弱了 SPAD 计诊断施肥的快速、简便、非破坏的特点。吴良欢等^[15]提出按品种分别建立 SPAD 值与稻株含氮率的回归方程;日本学者^[35]则认为应根据具体土壤、水稻品种及生育阶段分别建立 SPAD 值与稻株含氮率的关系。Zhou 等^[36]研究表明,水稻下部叶片的蛋白氮、非蛋白氮和淀粉含量随土壤肥力变化比上位叶明显,因此,在诊断水稻氮素状况时,下位叶比上位叶更适合作为监测的样本,从而冲破了传统的用上位叶来监测水稻氮素状况的束缚。王绍华^[37]研究发现,可以利用上下部叶片 SPAD 读数比值来诊断水稻氮素营养状况;其研究还表明,抽穗后,在土壤供氮量高于水稻库需氮量时,植株上部 4 个叶片含氮量都增加,相反则降低。Peng 等^[34]认为,顶 4 叶的氮代谢对植株缺氮的反应比上位叶敏感。当植株吸收的氮素不能满足同期稻穗需求时,不同叶位叶片向穗部提供氮素表现上有一定的顺序,首先是老叶输出,然后依次进行。在植株吸氮量刚好满足稻穗需求时,表现上顶 4 叶含氮量保持平衡。顶 4 叶可以作为水稻氮素供需平衡的指示叶,用顶 4 叶与顶 3 叶的 SPAD 读数的比值来诊断水稻氮素营养不受品种、生育阶段和生态环境的影响,并提出它们的比值等于 1 时可能是高产水稻含氮量适宜的表现。因此,应用顶 4 叶与顶 3 叶 SPAD 读数比值的方法不失为一种简便实用的田间诊断技术。王绍华^[37]还提出,在同一稻株上计算顶 4 叶与顶 3 叶的相对叶色差(RSPAD),便可弱化水稻品种和同一品种不同生育时期及不同土壤等对叶色诊断技术的影响,并提出所有品种植株叶片含氮率(N)与植株含氮率(Y)的叶色诊断能被划归为: $N = 2.5158e^{-0.0567RSPAD}$ 与 $Y = 1.8317e^{-0.0613RSPAD}$ (籼稻)和 $N = 2.7223e^{-0.0669RSPAD}$ 与 $Y = 1.9042e^{-0.0723RSPAD}$ (粳稻)两类仅与水稻亚种有关的回归方程。

2.2 量化 SPAD 读数与追肥关系

由于稻田土壤氮素状况随环境及时空的变化较大,因此确定稻田土壤供氮能力十分困难^[38]。而植株生长所需氮素主要来源于土壤,因此,适时监测植株氮素状况,即可推定土壤氮素供应丰缺状况,从而用于指导氮素追肥管理。Peng 等^[13]首先成功运用 SPAD 临界值对水稻追肥进行研究,当选用 35 作为水稻品种 IR72 的 SPAD 临界值指导氮肥追肥时,水稻产量能达到最高产量的 93%~100%,同时氮肥的农学利用效率显著提高,而以 37 作为 SPAD

临界值来指导追肥,氮肥农学利用效率则显著降低。许多研究表明,选择合适的 SPAD 临界值来指导适时追肥与其它方式的氮肥管理方案相比,可以明显降低氮肥用量,稻田氮肥利用效率得到显著提高,同时其产量水平也能达到或超过其它氮肥管理方式的产量水平^[39-40]。但运用临界值法没有解决品种、生态环境的影响,给 SPAD 临界值的选取和实际应用带来困难。Hussain^[41]设想用 SPAD 的充足指数 SI (Sufficient Index,定义为充足施肥水稻叶片 SPAD 读数的 90%)来消除品种、生育期和地点的差异,即当水稻叶片 SPAD 值低于 SI 时追肥;并提出在菲律宾,当水稻叶片 SPAD 值低于 SI 时,雨季和旱季分别追施 N 30 和 45 kg/hm²可以明显提高氮肥农学效率,并不降低产量。这种方法可以减少因品种、生育期等对 SPAD 读数影响产生的诊断误差,但缺点是必须有一个充足施肥水稻田作为参照,因此在实际推广应用中也存在着一定的局限性^[28]。用顶 4 叶与顶 3 叶的 SPAD 读数的比值来诊断水稻氮素营养不受品种、生育阶段和生态环境的影响,因此可以用它们的相对差值(RSPAD 值)的大小来确定植株氮素的状况。王绍华^[37]提出,RSPAD = 0 时可能是抽穗后高产水稻含氮量适宜的表现,低于 0 时就说明水稻叶片氮素营养不足,需追肥。

3 有待研究的问题

3.1 选用方法的探讨

通过比叶重修正或建立不同品种的 SPAD 值与氮素营养的函数关系能够提高利用 SPAD-502 叶绿素计诊断特定品种氮素水平的精度,但在品种多样、混杂的生产条件下,其应用受到一定限制。基于不同叶位 SPAD 值的比值法利用了氮素在水稻体内的转运原理,突破了原来 SPAD 诊断法仅测量叶片绝对含氮率来进行比较的局限,因此更能反映水稻的氮素丰缺状况。但是,如何有效利用 SPAD-502 叶绿素计来理顺水稻氮素含量水平与氮素丰缺指标间的关系,从而消除品种、生育阶段及生态环境影响,有待于进一步研究。

3.2 测定位点的选择

对测定叶片位点的选择是必须的。在精确诊断水稻氮素营养状况时,选择测定的位点必须满足两个基本原则,一是测定数据的稳定性。从叶片形态分析,越靠近基部,叶脉越大,常影响 SPAD 测定的稳定性;从氮素转运的影响分析,顶 1 全展叶的持续期是从心叶伸出到全展,时间较长,由于氮素转运

的不一致性,对上位叶叶尖及下位叶 SPAD 值的重现性有较大影响,如何减少这种影响值得研究。二是测定数据的代表性,不同位点所测 SPAD 值有较大差异,什么部位所测 SPAD 值与氮素或叶绿素含量的关系最紧密,以及两者间关系的稳定数学表达式,也有待进一步研究。

3.3 RSPAD 的验证和取值的选择

至今对 SPAD 诊断水稻氮素营养的研究主要集中在如何提高水稻产量或是提高氮肥的利用率^[24-25],从而建立相应的氮肥高产高效运筹模式。今后这仍将是 SPAD 计诊断水稻氮肥运筹一个重要的研究发展方向。依据水稻氮素转移原理,利用顶 4 叶与顶 3 叶的叶色差诊断水稻氮素营养状况是一种简便的田间诊断方法^[42],通过测定两叶的 SPAD 值算出 RSPAD,是两叶叶色差的量化。其值的大小反映了水稻氮素营养的盈亏状况,不受品种、生育阶段及生态环境影响。通过试验研究表明,RSPAD 为 0 是抽穗后高产水稻的特征,但不同生育时期其值的大小有待进一步验证。

3.4 在品质诊断中的应用

氮肥施用对水稻子粒品质影响很大^[4,43],但利用 SPAD 计指导品质栽培的研究至今鲜有报道。金军等^[2]认为可以将 SPAD 值叶片含氮率、叶绿素含量和叶面积指数作为水稻主要品质改善的诊断指标,并认为 SPAD 值与精米中粗蛋白含量之间存在极显著曲线关系,但曲线类型因品种而异。这表明 SPAD 计也能运用于对水稻品质施肥的诊断中。因此,RSPAD 方法如何应用于用 SPAD-502 叶绿素计的品质诊断,以及建立适应不同品质指标需要的取值,是一系列很有价值、也是更为复杂的研究课题。

参考文献:

- [1] Kropff M J, Caseman K G, Van Laar H H *et al.* Nitrogen and yield potential of irrigated rice[J]. *Plant Soil*, 1993, 155-156: 391-394.
- [2] 刘立军,王志琴,桑大志. 氮肥运筹对水稻产量及稻米品质影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2002, 23(3): 46-50.
Liu L J, Wang Z Q, Sang D Z. Effect of nitrogen management on rice yield and grain quality[J]. *J. of Yangzhou Univ. (Agric. and Life Sci. Ed.)*, 2002, 23(3): 46-50.
- [3] 湖南省优质稻米生产体系及其应用理论协作组. 施肥对稻米品质和产量影响的研究[J]. *湖南农学院学报*, 1989, 15(3): 1-5.
Hunan Provincial Cooperative Groups of Production System and Application Theory of High Quality Rice. Influences of fertilization on rice grain yield and quality[J]. *J. of Hunan Agric. College*, 1989, 15(3): 1-5.
- [4] 阙金华,张洪程,戴其根. 氮肥对稻米品质影响的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2002(6): 14-16.
Que J H, Zhang H C, Dai Q G *et al.* Research progress of effects of nitrogen on rice grain quality[J]. *Jiangsu Agric. Sci.*, 2002(6): 14-16.
- [5] 江立庚,曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J]. *中国水稻科学*, 2002, 16(3): 261-264.
Jiang L G, Cao W X. Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice[J]. *Chinese J. Rice Sci.*, 2002, 16(3): 261-264.
- [6] 彭少兵,黄见良,钟旭华. 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. Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigate rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [7] Fasgola O O, Hayashi K, Wakatsuki T. Effect of water management and polyolefin-coated urea on growth and nitrogen uptake of indica rice[J]. *J. Plant Nutr.*, 2002, 25(10): 2173-2190.
- [8] Raun W R, Solie J B, Johnson G V *et al.* Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application[J]. *Agron. J.*, 2002, 94 (7-8): 815-820.
- [9] Ladha J K, Kundu D K, van Coppenolle M G A. Legume productivity and soil nitrogen dynamics in lowland rice-based cropping systems[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60 : 183-192.
- [10] Cassman K G, Kropff M J. Nitrogen use efficiency of rice reconsidered: What are the key constraints? [J]. *Plant Soil*. 1993, 155: 359-362.
- [11] Carlos C, Lianne M D, Pierre D. Inter-relationships of applied nitrogen, SPAD, and yield of leafy and non-leafy maize genotypes[J]. *J. Plant Nutr.*, 2001, 24(8): 1173-1194.
- [12] 贾良良,陈新平,张福锁. 作物氮营养诊断的无损测试技术[J]. *世界农业*, 2001(6): 36-37.
Jia L L, Chen X P, Zhang F S. Non-destructive detection of nitrogen nutrition status in plant[J]. *World Agriculture*, 2001 (6): 36-37.
- [13] Huang J L, Peng S B. Comparison and standardization among chlorophyll meters in their readings on rice leaves[J]. *Plant Prod. Sci.*, 2004, 7(1): 97-100.
- [14] 张金恒,王珂,王人潮. 叶绿素计 SPAD-502 在水稻氮素营养诊断中的应用[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(2): 177-180.
Zhang J H, Wang K, Wang R C. Application of chlorophyll meter SPAD-502 in diagnosis of nitrogen status and nitrogenous fertilizer in rice[J]. *J. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed)*, 2003, 31(2): 177-180.
- [15] 吴良欢,陶勤南. 水稻叶绿素计诊断追氮法研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 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. of Zhejiang Agric. Univ. (Agriculture & Life Sciences)*, 1999, 25(2): 135-138.
- [16] 金军,徐大勇,胡曙云. 叶绿素仪穗肥诊断及在水稻优质栽培

- 培中的应用[J]. 耕作与栽培, 2003(2): 14-15, 22.
- Jin J, Xu D Y, Hu S Y. Fertilization diagnosis for panicle promoting with SPAD meter and its application on high-quality rice cultivation [J]. Farming and Planting, 2003(2): 14-15, 22.
- [17] Balasubramanian A C. Adaptation of the chlorophyll meter (SPAD) technology for real-time N management in rice: A review [J]. Int. Rice Res. Notes., 2000, 25(1): 4-8.
- [18] Thiagarajan T M. Assessing genotypic variation in N requirements of rice with a chlorophyll meter [J]. Int. Rice Res. Notes., 2000, 25(1): 23-24.
- [19] Peng S, Garcia F V, Laza E C *et al.* Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration [J]. Agron. J., 1993, 85(5): 987-990.
- [20] 何电源. 中国南方土壤肥力与栽培植物施肥 [J]. 北京: 中国科学出版社, 1994, 324-364.
- He D Y. Soil Fertility and plant fertilization in south of china [M]. Beijing: Science Press, 1994. 324-364.
- [21] 董明辉, 张洪程, 戴其根, 等. 不同粳稻品种氮素吸收利用特点的研究 [J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2002, 13(4): 43-65.
- Dong M H, Zhang H C, Dai Q G *et al.* Research on the nitrogen absorption and utilization of different rice varieties [J]. J. of Yangzhou Univ. (Agric. and Sci. Ed.), 2002, 13(4): 43-65.
- [22] Wang S H, Ji Z J, Liu S H *et al.* Relationships between balance of nitrogen supply-demand and nitrogen translocation and senescence of different position leaves on rice [J]. Agricu. Sci. in China. 2003, 2(7): 747-751.
- [23] Mae T, Makino A, Ohiro K. Changes in the amount of ribulose biphosphate carboxylase synthesized and degraded during the life span of rice leaf [J]. Plant Cell Physiol., 1983, 24(6): 1079-1086.
- [24] Mae T, Ohiro K. The remobilization of nitrogen related to leaf growth and senescence in rice plants [J]. Plant Cell Physiol., 1981, 22(6): 1067-1074.
- [25] 刘国栋. 水稻的氮素利用效率、光合作用和产量潜力 [J]. 世界农业, 2000, 3: 26.
- Liu G D. Nitrogen use efficiency, photosynthesis and yield potential of rice [J]. World Agriculture. 2000, 3: 26.
- [26] Chapman S C, Barreto H J. Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth [J]. J. Prod. Agric., 1994, 8(1): 56-60.
- [27] 李志宏, 刘宏斌, 张福锁. 应用叶绿素仪诊断冬小麦氮营养状况的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 401-405.
- Li Z H, Liu H B, Zhang F S. Research of nitrogen nutrition status for winter wheat based on chlorophyll meter [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(4): 401-405.
- [28] Thiagarajan T M. Assessing genotypic variation in N requirements of rice with a chlorophyll meter [J]. Int. Rice Res. Notes, 2000, 25(1): 23-24.
- [29] Babu M R. Optimizing chlorophyll meter threshold values for different seasons and varieties in irrigated lowland rice systems of the Cauvery Delta zone, Tamil Nadu, India [J]. Int. Rice Res. Notes, 2000, 25(2): 27.
- [30] Hoel B O, Solhaug K A. Effect of irradiance on chlorophyll estimation with the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter [J]. Annals of Botany, 1998, 82(3): 389-392.
- [31] 陈防, 鲁剑巍. SPAD-502 叶绿素计在作物营养快速诊断上的应用初探 [J]. 湖北农业科学, 1996(2): 31-34.
- Chen F, Lu J W. Application of SPAD-502 chlorophyll meter on quickly diagnosing crop nutrition [J]. J. of Hubei Agric. Sci., 1996(2): 31-34.
- [32] Kundu D K, Lahda J K. Efficient management of soil and biologically fixed N₂ in intensively cultivated rice fields [J]. Soil Biol. Biochem. 1995(27): 431-439.
- [33] Balasubramanian V, Morales A C, Cruz R T *et al.* On-farm adaptation of knowledge intensive nitrogen management technologies for rice systems [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 1999, 53: 93-101.
- [34] Peng S, Laza R C, Garcia F V *et al.* Chlorophyll meter estimates leaf area-based nitrogen concentration of rice [J]. Commun. soil Sci. Plant Anal., 1995, 26(5-6): 927-935.
- [35] 赵镭洛, 鄂文顺, 肖免. 日本水稻氮营养诊断简介 [J]. 世界农业, 1992(11): 17.
- Zhao Y L, E W S, Xiao M. Brief introduction nitrogen nutrient in Japanese rice [J]. World Agriculture, 1992(11): 17.
- [36] Zhou Q F, Wang J H. Comparison of upper leaf and lower leaf of rice plants in response to supplemental nitrogen levels [J]. J. Plant Nutr., 2003, 26(3): 607-617.
- [37] 王绍华. 水稻氮素营养的生理指标及诊断技术 [D]. 南京农业大学, 博士学位论文, 2003.
- Wang S H. Physiological indices and diagnostic technologies of nitrogen nutrient in rice [D]. Nanjing Agric. Univ., PhD., 2003.
- [38] Cassman K G, Gines H C, Dizon Ma *et al.* Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: relative contributions of indigenous soil resources and applied nitrogen inputs [J]. Field Crops Res., 1996, 47: 1-12.
- [39] Peng S, Garcia F V, Laza R C *et al.* Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice [J]. Field Crops Res., 1996, 47: 243-252.
- [40] Bijay S, Yadvinder Singh, Jagdish K *et al.* Chlorophyll meter and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in northwestern India [J]. Agron. J., 2002, 94: 821-829.
- [41] Hussain F, Bronson K F, Yadvinder-Singh *et al.* Use of chlorophyll meter sufficiency indices for nitrogen management of irrigated rice in Asia [J]. Agron. J., 2000, 92: 875-879.
- [42] 凌启鸿, 张洪程, 苏祖芳. 稻作新理论—水稻叶龄模式 [M]. 北京: 科学出版社, 1994. 287-316.
- Ling Q H, Zhang H C, Su Z F. New theory of rice cultivation-rice leaf mode [M]. Beijing: Science Press, 1994. 287-316.
- [43] 赵长华. 氮素穗肥施用时期对稻米品质的影响及其生理机制研究 [D]. 南京农业大学, 硕士学位论文, 2002.
- Zhao C H. Effect of nitrogen of different application stage of panicle fertilizer on quality and its physiological mechanism in rice [D]. Nanjing Agric. Univ., M.S., 2002.