

# 不同施氮量对旱稻 297 产量构成因子影响的研究( I )

## ——产量构成、干物质生产与氮素吸收

魏凤桐 陶洪斌\* 王璞

(中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193)

**摘要** 本试验研究了不同施氮量下旱稻 297 产量形成的特点,以期探明施氮量达到一定水平后,限制产量进一步提高的原因。结果表明:旱稻 297 在 0、75 和 150 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量下,2 年平均产量分别是 2.8、3.5 和 3.5 t/hm<sup>2</sup>。其中,75 和 150 kg/hm<sup>2</sup> 施氮处理产量显著高于不施氮处理,75 和 150 kg/hm<sup>2</sup> 处理间差异不显著。施氮可以显著提高有效穗数和穗粒数,千粒重和收获指数在氮素处理间差异不显著,但是施氮后结实率呈降低趋势,尤其是 150 kg/hm<sup>2</sup> 处理的结实率显著低于不施氮处理,同时 150 kg/hm<sup>2</sup> 处理的分蘖成穗率较低。干物质积累在灌浆中期达到最大,开花后干物质生产能力较低,施氮对花后干物质累积没有显著影响。分蘖盛期的吸氮量与最高分蘖数和穗粒数的相关分析表明,分蘖盛期适宜的氮累积能够促进分蘖的增加和穗形成时期单株穗粒数的增加。因此,在现有的施氮措施下,75 和 150 kg/hm<sup>2</sup> 处理间产量差异不显著;与 75 kg/hm<sup>2</sup> 处理相比,150 kg/hm<sup>2</sup> 处理的分蘖成穗率和结实率降低导致单位面积的实粒数差异不显著,同时,花后干物质生产能力较差是限制旱稻 297 在 150 kg/hm<sup>2</sup> 处理下产量提高的原因。

**关键词** 旱稻; 氮; 有效穗; 结实率; 籽粒产量

中图分类号 S 143.1; S 511.6

文章编号 1007-4333(2011)01-0030-06

文献标志码 A

# Effect of nitrogen on yield components of aerobic rice, HD297( I ):

## Yield components, dry matter production and N uptake

WEI Feng-tong, TAO Hong-bin\*, WANG Pu

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** A two-year field experiment was conducted to study the effect of nitrogen on grain yield and yield components of aerobic rice, HD297. The objective was to clarify the constraints for improving grain yield when amount of applied nitrogen reached a certain level. The grain yield was 2.8, 3.5 and 3.5 t/hm<sup>2</sup> respectively over two years under 0, 75 and 150 kg/hm<sup>2</sup> (N) treatments. Compared with 0 kg/hm<sup>2</sup> (N), N input increased the grain yield significantly, but there was no difference between 75 and 150 kg/hm<sup>2</sup> (N). With N input, the productive tillers and grains per panicle increased significantly and there was no difference of thousand grain weight and harvest index among the nitrogen treatments, while the percentage of filled grains decreased and the ratio of non-productive tillers increased especially under N150 treatment. The dry matter accumulation reached maximum at the middle stage of grain filling followed by a poor dry matter production after anthesis. Moreover, nitrogen input had little effect on the dry matter production after anthesis. The N uptake at maximum tiller stage could improve tiller numbers and promote spikelet formation at panicle initiation. Therefore, there was no difference of the grain yield between N75 and N150 treatment; compared with N75 treatment, the lower ratio of productive tiller, lower percentage of filled grains and poor dry matter production after anthesis were three major factors for improving the grain yield of HD 297 under 150 kg/hm<sup>2</sup> (N) treatment.

**Key words** aerobic rice; nitrogen; productive tillers; percentage of filled grain; grain yield

收稿日期: 2010-05-04

基金项目: 国际合作项目(中国农业大学-IRRI)“亚洲旱稻可持续性发展研究”的部分研究内容

第一作者: 魏凤桐, 博士研究生, E-mail: weifengtong\_12345@yahoo. cn

通讯作者: 陶洪斌, 副教授, 主要从事作物高产栽培与生理研究, E-mail: hongbintao@cau. edu. cn

早稻栽培是近年来发展的一种新的节水稻作生产体系<sup>[1]</sup>,用水量是水稻的1/5或更少<sup>[2-3]</sup>。然而,根据在中国和菲律宾等地的研究结果,早稻产量在1.6~6.1 t/hm<sup>2</sup><sup>[4-6]</sup>的范围内浮动,与水稻的产量差距相当大。产量构成因子是最终衡量产量高低的直接指标,通径分析研究结果表明,水稻穗粒数对产量的贡献率最大,单位面积穗数次之,千粒重再次之,空秕率最小<sup>[7]</sup>;早稻产量构成因子对产量的直接作用大小依次是:结实率、穗粒数、穗数、千粒重<sup>[8]</sup>。与水稻相比,早稻产量构成因素中以结实率和穗数对产量贡献率较大,且二者通过与其他产量构成因子之间的相互作用,对产量有很大的间接效应。

早稻297是2000年审定的早稻品种,目前应用范围较广。在华北地区,针对早稻297的研究主要集中在水分管理,播种密度,旱作与水作条件下的产量构成特点等<sup>[5,9-10]</sup>,而针对早稻氮素管理和生长效应的研究报道较少。因此,本研究探讨了不同施氮量下,早稻297产量构成因子的特点及吸氮量与产量构成因子的关系,旨在进一步揭示氮素吸收对早稻产量提高的作用,为早稻高产栽培提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2006和2007年中国农业大学上庄试验站进行(39°54'N,116°24'E)。早稻生长季节的降雨量分别是417和432 mm,大于10℃的积温分别是3662和3735℃。试验地土壤质地为砂质壤土,0~30 cm土层全氮含量为0.74 g/kg,有机质含量为11.7 g/kg,速效磷含量为39 mg/kg,速效钾含量为60 mg/kg,土壤pH为7.8,土壤容重为1.31 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

本试验设定3个氮肥处理:不施氮(N0)、施75(N1)和150 kg/hm<sup>2</sup>(N2)氮,其中施氮比例为:基肥、分蘖肥和穗肥的质量比为3:4:3,采用完全随机区组设计,4次重复,小区面积为20 m<sup>2</sup>。试验品种为早稻297,播种量为67.5 kg/hm<sup>2</sup>,行距30 cm,5月11日播种,10月份收获。基施氮肥的同时,分别施入ZnSO<sub>4</sub> 15 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 56 kg/hm<sup>2</sup>、FeSO<sub>4</sub> 22.5 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 56 kg/hm<sup>2</sup>。播种前,早稻297用早稻专用种衣剂包衣,出苗前用早稻专用除草剂封闭除草(均由中国农业大学作物遗传育种系提供)。同时,全生育期间进行人工除草。全生育期土壤15~20 cm深度的张力计读数保持在-20 kPa。

## 1.3 取样方法与测定项目

### 1.3.1 植物样的采集与测定

1)植物样的采集。分别于苗期、分蘖期、穗分化期、开花期、灌浆期和成熟期取样,采样面积0.3 m<sup>2</sup>。成熟期测产面积为4 m<sup>2</sup>,

2)植株性状的考察。苗期,分别在每个调查小区选取代表性2行样段,每行长1 m,以竹竿做标记,定期调查分蘖。早稻生育期间取回的样品分别测定株高,叶面积(长宽法)。成熟期样品测定穗粒数,空瘪粒数和千粒质量。每个时期都测定植株的鲜质量和干质量。

3)植株全氮的测定。样品取回后在105℃下杀青30 min,然后在80℃下烘干至恒重。烘干样品利用元素分析仪测定全氮含量(EA 1108,意大利)。

### 1.3.2 土样的采集和测定

1)土样的采集。在采样区取完植株样品后,随机选取3点(行上)采样,每一层土样混合后装入自封袋中,用冰盒带回实验室待测。

2)土样的测定。用烘干称重法测定土壤质量、含水量,同时,用0.01 mol/L的CaCl<sub>2</sub>溶液浸提土壤样品中的硝态氮和铵态氮。用连续流动分析仪(TRACCS-2000,德国)测定浸提溶液中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的含量。

## 1.4 数据处理

数据处理采用Excel 2007,统计分析用SAS软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 产量及产量构成因子

2年的试验结果表明,早稻297的产量平均在2.5~3.8 t/hm<sup>2</sup>之间。与不施氮肥相比,施氮显著提高了早稻297的产量,平均增产25%左右,但是2个施氮处理间差异不显著(表1)。由于2年产量趋

表1 不同氮肥处理下早稻297的产量表现

Table 1 Grain yield of HD297 under different

处理	nitrogen treatment		t/hm <sup>2</sup>
	2006年	2007年	
N0	3.1 b	2.5 b	2.8
N1	3.8 a	3.1 a	3.5
N2	3.8 a	3.2 a	3.5

注:同列字母不同表示氮素处理之间差异显著,显著水平 $\alpha=0.05\%$ ,下同。

势一致,以下结果主要分析2006年早稻297在不同施氮量下产量构成因子的特点。

与N0处理相比,施氮显著增加了穗粒数及单位面积穗数、总粒数和实粒数,收获指数有增加的趋势。

但是显著降低了N2处理的结实率,千粒重有降低趋势。N2与N1处理相比,结实率与千粒重有降低趋势,穗粒数及单位面积穗数、总粒数和实粒数有增加的趋势,收获指数没有变化(表2)。

表2 不同氮肥处理下早稻297的产量构成因子

Table 2 Yield components of HD297 under different nitrogen treatment

处理	穗数/m <sup>2</sup>	穗粒数	千粒重/g	结实率/%	单位面积总粒数/m <sup>2</sup>	单位面积实粒数/m <sup>2</sup>	收获指数
N0	192 b	57 b	27.3 a	82.1 a	10 953 b	8 955 b	0.38 a
N1	223 a	69 a	27.3 a	80.0 ab	15 580 a	12 591 a	0.43 a
N2	225 a	73 a	26.5 a	78.2 b	16 570 a	13 015 a	0.43 a

在不施氮肥的处理下,早稻297分蘖能力较差,单株最大分蘖平均为0.8个。施氮肥后,N1处理的分蘖数比N0略有增加,N2处理的分蘖数显著增

加。N1处理显著提高了分蘖成穗率,继续提高氮肥用量后分蘖成穗率则大幅度降低,N2处理的无效穗比例显著增加(表3)。

表3 不同施氮量下早稻297单株分蘖的发生和单株成穗数

Table 3 Tiller numbers and productive tiller numbers of HD297 under different nitrogen treatments

处理	基本苗/m <sup>2</sup>	最高茎蘖数/m <sup>2</sup>	有效穗/m <sup>2</sup>	单株最大分蘖数	分蘖成穗率/%
N0	180 a	322 b	192 b	0.8 b	7.5 b
N1	177 a	330 b	223 a	0.9 b	30.0 a
N2	179 a	445 a	225 a	1.5 a	17.4 ab

注:分蘖成穗率=(穗数-基本苗)/(最高分蘖-基本苗)。

与N0处理相比,施氮显著增加了早稻297的产量,主要原因是穗数和穗粒数显著增加,从而提高了单位面积的实粒数,而千粒重在氮素处理之间差异不显著,因此产量显著提高。N2和N1处理相比,N2处理的穗数和穗粒数的增加对产量的正效应和结实率显著降低的负效应相互抵消,导致单位面积的实粒数与N1处理差异不显著,因此N2处理的产量并没有显著提高。总之,施氮后单位面积的总粒数显著增加,提高了单位面积结实粒数,从而产量提高。而收获指数在施氮后有增加的趋势,这表明穗粒数的增加促进了干物质的运转,但是N2处理的分蘖成穗率较低,造成前期营养的浪费(表1~表3)。

## 2.2 干物质生产与产量关系的分析

从苗期到分蘖初期,氮素处理间的干物质积累无显著差异,分蘖中期到成熟期,施氮后干物质显著增加,N1和N2之间差异不显著。干物质积累在灌

浆中期达到最大,成熟时由于叶片衰老造成损失,生物量略有降低(图1)。

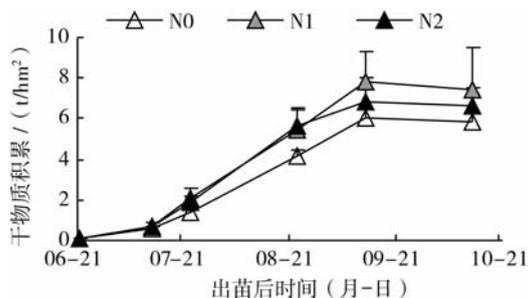


图1 早稻297干物质积累动态(2006年)

Fig. 1 Dynamic of dry matter accumulation

产量与开花期积累的干物质的关系表明开花前积累的干物质与产量之间存在着既统一又矛盾的关系,即在开花期干物质积累过大可能限制产量的进一步提高(图2(a))。可见,开花前适量的氮素吸收

能够避免干物质的过度积累,防止因前期营养生长过旺而造成的产量下降。本试验中 N0 处理开花期干物质积累不足,而 N1 和 N2 处理干物质积累相对较为合理。产量与收获期总的生物量呈线性关系,相关系数为 0.75\*\*,表明提高开花后光合生产能力

可以明显提高产量。因此,适量提高植株花后氮素吸收是提高产量的途径之一(图 2(b))。总体上来说,施氮提高了开花前单位面积干物质的积累,最终提高了产量。但是,施氮对早稻 297 花后光合生产积累的干物质的影响较小,因此限制了产量的提高。

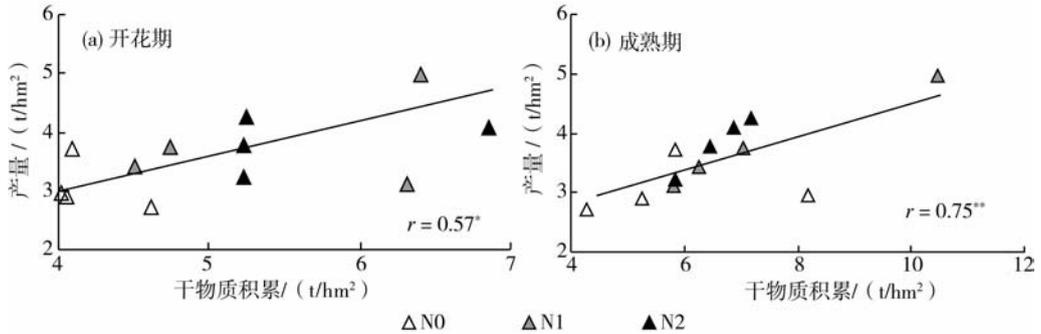


图 2 早稻 297 产量与开花期和成熟期干物质累积的关系 (2006 年)

Fig. 2 Relationship between grain yield and dry matter accumulation at anthesis and maturity

### 2.3 氮素吸收以及与产量构成因子的关系

随着施氮量的增加,在不同生育时期,植株体内的含氮量均有增加的趋势。其中,分蘖盛期 N2 处理含氮量显著高于 N0 处理,而 N1 处理与 N0 和 N2 处理之间差异不显著;开花期 3 个氮素处理之间秸秆的含氮量差异显著;收获期 N2 处理秸秆的含氮量显著高于 N0 和 N1 处理,N0 与 N1 处理之间差异不显著,籽粒的含氮量与分蘖盛期秸秆的含氮量具有相同的规律;随着生育进程的进行,秸秆的含

氮量逐渐降低,部分转移到籽粒中。同时,在不同生育时期,随着施氮量的增加,植株总的吸氮量也出现递增的规律。其中,分蘖盛期氮素处理之间差异不显著;开花期 N1 和 N2 处理的吸氮量显著高于 N0 处理,而 N1 与 N2 处理之间差异不显著;成熟期秸秆中残留的总吸氮量在氮素处理之间差异不显著,而籽粒吸氮量与含氮量规律一致;土壤速效氮残留则随着施氮量的增加而提高(表 4)。

表 4 不同生育时期早稻 297 植株体内氮素浓度、氮素吸收及 0~60 cm 土层的速效氮残留(2006 年)

Table 4 N concentration and uptake in rice shoot and soil Nmin (0-60 cm) at different growth stage

处 理	植株氮质量比/(g/kg)				植株吸氮量/(kg/hm <sup>2</sup> )				土壤速效氮/(kg/hm <sup>2</sup> )		
	分蘖盛期		开花期		成熟期		成熟期		分蘖盛期	开花期	成熟期
	秸秆	秸秆	秸秆	籽粒	秸秆	秸秆	秸秆	籽粒			
N0	26 b	12 c	8 b	13 b	15 a	50 b	25 a	33 b	14	5	3
N1	29 ab	15 b	9 b	14 ab	19 a	85 a	38 a	46 ab	21	13	10
N2	33 a	20 a	12 a	15 a	23 a	111 a	38 a	50 a	37	37	15

随着吸氮量的增加,最高分蘖数目增加(图 3 (a))。但是,分蘖盛期吸氮量与分蘖呈抛物线关系( $r=0.78^{**}$ ),表明此时期施氮可以增加分蘖,但是随着吸氮量的增加,不再促进分蘖的增加。本试验中,N0 处理在分蘖盛期分蘖不足,N1 次之,N2 分蘖数最高。分蘖盛期吸氮量与单株穗粒数呈抛物线关系,相关系数为 0.72\*\*,表明在此时期适宜的氮

素吸收促进穗形成时期单株穗粒数的增加。因此,N0 处理在分蘖盛期氮素吸收不足限制了穗数和穗粒数的形成,而 N1 处理与 N2 处理较合理(图 3 (b))。

总之,施氮促进植株氮素的吸收和转移。氮素吸收在开花期达到最大,在成熟期,由于向籽粒的转移,秸秆中残留的氮素逐渐减少,转移量随着施氮量

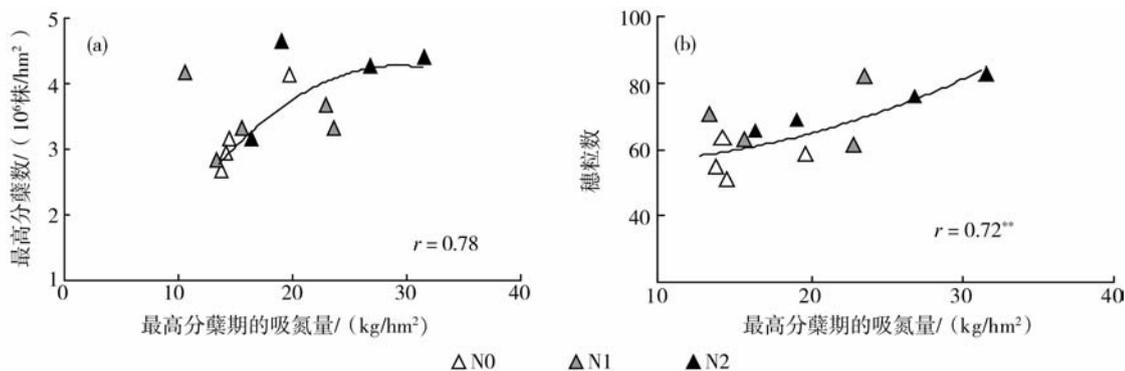


图3 早稻297分蘖盛期的吸氮量与最高分蘖数和穗粒数的关系(2006年)

Fig. 3 Relationship between N uptake and maximum tiller numbers and grain number per panicle at stage of maximum tiller

的增加而提高。秸秆和土壤中的氮素残留随着施氮的增加而提高。分蘖盛期适宜的氮素吸收是形成足够穗数和穗粒数的保障。

### 3 结论与讨论

已有研究表明,早稻产量随着施氮量的增加而提高,但是施氮量增加到一定水平后增产效应不明显<sup>[10]</sup>。本研究同样发现,施氮显著提高了早稻297的产量,但是N1与N2处理之间差异不显著。其中,N2处理分蘖成穗率低是限制产量提高的一个主要原因(表3)。在水稻研究中发现,主茎和第一个分蘖成穗率高,第二或第三分蘖对产量的贡献不大<sup>[11]</sup>。而针对早稻297的研究则发现,在第4或第5节间,或者第10或11个节发出的分蘖成穗率最高<sup>[12]</sup>。所以,在今后的研究中,要根据早稻297的分蘖规律,确定分蘖肥的适宜追肥时间,通过提高N50处理下的分蘖成穗率来提高产量。

结实率显著降低是限制N2处理产量的提高的又一原因。途径分析研究表明,结实率对产量的直接贡献最大<sup>[8]</sup>,而本试验相关分析的结果表明,早稻297的产量与结实率也呈显著正相关( $r=0.55^*$ ),因此,在N2处理下如何提高结实率是提高产量的途径之一。在水稻研究中发现,与基施氮肥或追施分蘖肥相比较,水稻抽穗期追施氮肥可以使叶片保持较高的光合速率,从而提高籽粒的灌浆速率和灌浆时间,最终提高结实率<sup>[13]</sup>。因此,今后应该侧重施氮时期与施氮量相结合的研究,从而确定早稻297最适宜的施氮措施。

开花前后干物质的生产能力决定了产量水平的高低。早稻297的产量与开花期和成熟期积累的干

物质之间的关系(图2)表明开花前积累的干物质要有一定的限度,否则会限制产量的发挥,而提高花后光合生产能力是增加产量的主要途径,这与在水稻上的研究结果一致<sup>[14]</sup>。研究发现,早稻297在无水分限制的条件下,花后干物质对产量的贡献率为57%~89%<sup>[15]</sup>,但是在本试验的施氮条件下,早稻297的干物质积累在灌浆中期达到最大,灌浆后期干物质积累还有下降趋势(图2(b)),这表明早稻297在花后光合生产能力较低,因此如何提高早稻297花后的光合生产能力是以后育种和栽培研究的重点。

植株体内的含氮量是检测植株是否缺氮的标准,而氮素的盈缺决定能否实现产量潜力。在水稻研究中,植株的含氮量从分蘖到成熟呈现逐步下降的趋势,总体上由分蘖期的3%左右逐渐降低到成熟期的1%左右<sup>[16]</sup>,这与笔者的研究结果一致(表4)。随着产量潜力的提高,水稻在抽穗期和成熟期植株体内的含氮量有增加的趋势<sup>[14]</sup>。根据水稻体内植株含氮量的判断标准,本试验不施氮处理的植株全生育期均处于缺氮状态,N1处理在成熟期秸秆含氮量偏低,表明开花后N1处理的氮素供应略有不足。在N2处理下,开花期和成熟期秸秆的含氮量适宜,分别为20和12 g/kg,表明氮素累积没有限制产量的提高,而总吸氮量在不同生育时期的分配可能是影响早稻297生长发育的主要因素之一。本研究中发现的最大分蘖期的吸氮量与分蘖数和单株穗粒数的关系均表明(图3),这个时期氮素供应适宜是早稻297形成足够穗粒数的保障。总之,确定早稻297生育期内植株体的含氮量和土壤的供氮情况,是决定追氮时期和用量的依据。测土

施肥和测定叶片中的 SPAD 值是现在作物高产栽培中确定适宜施氮量和施氮时期的一项重要技术手段<sup>[17-18]</sup>,此项技术在水稻上的研究较多。但是早稻与水稻的生长环境不一样,同时对氮素的吸收形态要求不一样,水稻的氮素吸收规律对早稻只有一定的指导作用。因此在今后的研究中,确定适宜的施氮量和施氮时期,是提高早稻产量的有效途径。

### 参 考 文 献

- [1] Bouman B A M. Water-efficient management strategies in rice production[J]. Int Rice Research Notes, 2001, 16(2): 17-22
- [2] Bouman B A M, Peng S, Castaneda A R, et al. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems [J]. Water Management, 2005, 74: 87-105
- [3] Yang X G, Bouman B A M, Wang H Q, et al. Performance of temperate aerobic rice under different water regimes in North China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(2): 107-122
- [4] Peng S B, Bouman B A M, Romeo M, et al. Comparison between aerobic and flooded rice in the tropics: Agronomic performance in an eight-season experiment [J]. Field Crops Research, 2006, 96: 252-259
- [5] Tao H, Brueck H, Dittert K, et al. Growth and yield formation of rice (*Oryza sativa* L.) in the water-saving ground cover rice production system (GCRPS) [J]. Field Crops Research, 2006, 95: 1-12
- [6] Zhao D L, Bastiaans L, Atlin G N, et al. Interaction of genotype  $\times$  management on vegetative growth and weed suppression of aerobic rice [J]. Field Crops Research, 2007, 100: 327-340
- [7] 胡文河, 邓少华, 贾恩吉. 不同群体水稻产量及产量性状间的相互关系 [J]. 吉林农业大学学报, 2002, 24 (5): 9-12
- [8] 王萍, 黄洁, 李开绵, 等. 早稻主要农艺性状与产量相关及通径分析 [J]. 热带农业科学, 2006, 26(1): 18-20, 79
- [9] 余珺, 郭兴强, 谢光辉. 华北地区播种量不同时早稻产量的形成 [J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(6): 39-43
- [10] 何忠诚, 杨宗新, 赵永厚, 等. 不同施 N 量对高产早稻生长发育及产量的影响 [J]. 莱阳农学院学报, 2005, 22(3): 175-177
- [11] Hanada K. Tillers. In: Matsuo T, Hoshikawa K (Eds.), Science of the Rice Plant [M]. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1993(1): 222-258
- [12] Yan J, Yu J, Tao G C, et al. Yield formation and tillering dynamics of direct-seeded rice in flooded and nonflooded soils in the Huai River Basin of China [J]. Field Crops Research, 2010, 116: 252-259
- [13] 李志刚, 叶正钱, 杨肖娥, 等. 不同养分管理对杂交稻生育后期功能叶生理活性和籽粒灌浆的影响 [J]. 浙江大学学报, 2003, 29(3): 265-270
- [14] 凌启鸿. 作物群体质量 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 44-46, 166-167
- [15] Zhang L M, Lin S, Bouman B A M, et al. Response of aerobic rice growth and grain yield to N fertilizer at two contrasting sites near Beijing, China [J]. Field Crops Research, 2009, 114: 45-53
- [16] 浙江农业大学等. 实用水稻栽培学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981
- [17] Russell C A, Dunn B W, Batten G D, et al. Soil tests to predict optimum fertilizer nitrogen rate for rice [J]. Field Crops Research, 2006, 97: 286-301
- [18] Peng S B, Garcia F V, Laza R C, et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice [J]. Field Crops Research, 1996, 47: 243-252

(责任编辑: 王燕华)