植物营养与肥料学报 2014,20(4):811-820
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0403

稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量及其氮素吸收利用的影响

何 虎[1],吴建富[1],曾研华[1,2],胡 凯[1],黄 山[1],曾勇军[1],潘晓华[1*],石庆华[1*]
(1 江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室,江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室,江西南昌 330045;2 中国水稻研究所,水稻生物学国家重点实验室,浙江杭州 310006)

摘要:【目的】稻草还田和合理的氮肥运筹不仅可以改良土壤和培肥地力,提高农作物产量和品质,还可以减少因过量施用氮肥带来的环境污染。随着水稻机械化收割的快速发展,稻草全量原位还田面积迅速扩大。因此,研究稻草全量还田后合理施用氮肥十分必要。本文通过早稻机收稻草切碎全量还田后晚稻氮肥运筹试验,探索该条件下晚稻氮肥的合理施用技术。**【方法】**以超级晚稻品种淦鑫688为试验材料,设计4个施氮(N)水平(0、120、180、240 kg/hm^2)基蘖穗肥比例为5∶2∶3,并在180 kg/hm^{2}水平下增设稻草不还田对照处理和稻草全量还田下基蘖穗肥不同施氮比例处理(5∶0∶5、5∶1∶4、5∶2∶3、5∶3∶2、5∶4∶1、5∶5∶0)。旨在分析不同处理间水稻产量、产量构成和氮素吸收利用的差异。**【结果】**稻草全量还田下,施氮量在180 kg/hm^{2}以下时产量随施氮量的增加而增加,之后则下降,处理间差异极显著。随施氮量的增加,有效穗数显著增加,而结实率则显著下降,施氮处理每穗粒数和千粒重显著高于不施氮处理。在相同施氮水平下,因为有效穗数、结实率和千粒重显著提高,所以稻草全量还田产量极显著高于不还田处理,增幅8.83%。稻草全量还田同一施氮水平下,施氮比例为5∶2∶3处理产量极显著高于其他处理,其每穗粒数和千粒重均为最高,有效穗数随分蘖肥比例的增加而减少,处理间结实率差异不显著。稻草全量还田后,随着施氮量增加,其氮素总积累量、氮肥表观利用率、氮素的吸收率和百公斤籽粒的需氮量也显著提高,且与施氮量呈极显著正相关。但氮素收获指数和氮肥生理利用率均随施氮量的增加而降低。同一施氮水平下,全量还田处理水稻氮肥农学利用率和生理利用率均显著高于不还田处理。相关分析表明,氮素总积累量与产量呈二次抛物线极显著正相关,氮肥表观利用率、氮素吸收率与产量呈极显著正相关。稻草全量还田相同施氮水平下,随着穗肥施氮比例降低,其氮素总积累量、中期的积累量和比率下降,其氮肥的表观利用率、收获指数和氮素的吸收率也随之降低,但前期的氮素积累量和比率则升高。氮素的农学利用率和生理利用率均表现为随着穗肥比例的减少呈先增加后降低趋势,均以施氮比例为5∶2∶3处理处理最高,不施穗肥处理最低。各施氮比例处理中,穗肥的施氮量与氮素的总积累量、中期积累量、氮肥的表观利用率、收获指数和氮素吸收率呈极显著正相关,氮肥的农学利用率和生理利用率与产量显著正相关。**【结论】**稻草全量还田后配施适量的氮肥可以提高晚稻产量,本试验以配施N 180 kg/hm^{2}产量最高;在施纯N 240 kg/hm^{2}以内,施氮越多,氮素积累量越多,相应的氮肥表观利用率、氮素的吸收率和百公斤籽粒的需氮量也越大。总施氮量相同条件下,以基肥∶分蘖肥∶穗肥为5∶2∶3的施氮比例水稻产量,氮肥农学、生理利用率均为最高,此结果可作为双季稻区稻草全量还田后的推荐施氮比例。

关键词: 稻草全量还田;双季晚稻;氮肥运筹;产量;氮肥利用
中图分类号: S147.21$^+$2;S511.3$^+$3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)04-0811-10

Effects of nitrogen management on yield and nitrogen utilization of double cropping late rice under total rice straw incorporation

HE Hu[1], WU Jian-fu[1], ZENG Yan-hua[1,2], HU Kai[1], HUANG Shan[1], ZENG Yong-jun[1], PAN Xiao-hua[1*], SHI Qing-hua[1*]
(*1 Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding of Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;*
2 State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China)

收稿日期: 2013-07-05 **接受日期:** 2014-03-24
基金项目: 国家"十二五"科技支撑计划项目(2011BAD16B04);国家科技支撑计划项目(2012BAD14B14);江西省科技支撑计划重点项目(2009BNA03800)资助。
作者简介: 何虎(1986—),男,甘肃张掖人,博士研究生,主要从事水稻高产理论与技术研究。Tel:15870010328,E-mail:hehude2008@163.com
* 通信作者 Tel:0791-83813877,E-mail:xhuapan@163.com;qinghua.shi@163.com

Abstract:【Objectives】 Rice straw incorporation and appropriate nitrogen (N) management can not only improve soil fertility and crop yield, but also reduce environmental pollution. With the rapid development of mechanized harvest, the area of in situ total incorporation of rice straw is expanded rapidly. Thus, it is important to determine reasonable N fertilization regimes under the total incorporation of rice straw. The objective of this study is to investigate the proper management for late rice under total incorporation of chopped early rice straw by a combine harvester. **【Methods】** Using a late rice variety (Ganxin 688) as materials the experiment included four N rates (0, 120, 180 and 240 kg/hm^2) with a ratio of 5∶2∶3 for basal, tillering, and panicle initiation, respectively. At the same time, under the N rate of 180 kg/hm^2, a control treatment without straw return and different N application ratios (5∶0∶5, 5∶1∶4, 5∶2∶3, 5∶3∶2, 5∶4∶1, 5∶5∶0 for basal, tillering, and panicle initiation, respectively) under total incorporation of rice straw were arranged. Rice yield, yield components, N absorption and utilization in different treatments were investigated. **【Results】** The yield increased with increasing N application rates, and was highest at the N rate of 180 kg/hm^2 under total incorporation of rice straw. The number of effective panicles increased with increasing application rates, while the percentage of filled grains showed the opposite trend. In comparison with no straw retention, the higher yield under straw retention mainly attributed to the higher number of effective panicles, percentage of filled grains and 1000-grain weights, with an increase of 8.83% in yield. Under the same N rate, the yield, number of grains per panicle, and 1000-grain weight were the highest at the N ratio of 5∶2∶3. The number of effective panicles decreased with increasing N proportions at the tillering stage, while the percentage of filled grains showed no significant differences among treatments. Under straw incorporation, the N accumulation, N recovery efficiency (NRE), N uptake rate (NUR) and N requirement for producing 100-kg grain increased with increasing N application rates. However, N harvest index (NHI) and nitrogen physiological efficiency (NPE) decreased with increasing N application rates. Under the same N rate, the nitrogen agronomic efficiency (NAE) and NPE under total incorporation of rice straw were significantly higher than those under no straw incorporation. The correlation between yield and N accumulation was quadratic. NRE and NUR were significantly positively correlated with yield. Under the same nitrogen rate with total incorporation of rice straw, total N accumulation (TNA), N accumulation ratio in middle stage, NRE, NHI, and NUR were decreased with decreasing N proportions at panicle initiation, whereas N accumulation and ratio in early stage were increased. Both NAE and NPE were increased at first, but then decreased with decreasing N proportions at panicle initiation with the highest at the ratio of 5∶2∶3. The N application rate at panicle initiation was significantly positively correlated with TNA, N accumulation in middle stage, NRE, NHI and NUR, while NAE and NPE were positively correlated with yield. **【Conclusion】** The highest yield achieved when the N application rate is 180 kg/hm^2. The N accumulation, NRE, NUR and N requirement for producing 100-kg grain increased with increasing N application rates from 0 to 240 kg/hm^2. Under the same N application rate, the highest yield, the highest NAE and NPE can be achieved with the N application ratio of 5∶2∶3 for basal, tillering, and panicle initiation, respectively.

Key words: total rice straw incorporation; double cropping late rice; nitrogen management; yield; N utilization

中国作为一个农业大国,作物秸秆非常丰富,其中稻草秸秆约占总秸秆的1/3,而在双季稻区,稻草资源更加丰富[1]。稻草含有大量氮、磷、钾等矿质营养元素,稻草还田对提高土壤有机质含量,改良土壤、培肥地力,尤其是对缓解氮、磷、钾比例失调,提高农作物产量和品质,降低农业生产成本有重要作用[2,3]。在水稻生产中,合理的氮肥运筹,不仅可以提高水稻的产量、品质和氮肥利用率,还可以减少因过量施用氮肥带来的环境污染[4]。研究表明,稻草还田后配施氮肥,有利于保持和提高土壤氮素的有效性,显著提高水稻氮素吸收转化功能,提高氮肥利用效率,增加N、P、K的收获指数[5]。因此,研究稻草还田以及稻草还田后配施氮肥的增产效应和作用机理十分必要。国内关于稻草还田下的氮肥运筹已有不少研究[6-8],稻草大多以部分还田和非切碎还田为主。在双季稻区,随着机收比例不断增加(平原地区已达80%以上),稻草全量原位还田面积迅速扩大,然而早稻稻草还田后短时间内并不能迅

速分解,且有可能出现晚稻生育前期稻草分解导致微生物与晚稻“争氮”,影响晚稻的生长。因此,本试验通过研究早稻机收后稻草全量切碎还田下,不同施氮量及不同的施氮比例对晚稻产量和氮素吸收利用的影响,旨在为稻草全量还田下水稻合理施用氮肥提供理论依据和实践指导。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于2009～2010年在江西省进贤县温圳镇杨溪村(海拔26 m,北纬28° 20′ 12.18″,东经116° 05′30.69″)进行。供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土,试前土壤基本理化性质为有机质14.21 g/kg、全氮2.09 g/kg、碱解氮194.38 mg/kg、有效磷22.28 mg/kg、速效钾89.71mg/kg、pH值5.91。晚稻品种为淦鑫688。

试验设4个施氮(N)水平,分别为0、120、180、240 kg/hm^2,分别用N_0、N_1、N_2、N_3表示;在N_2水平下增设稻草不还田对照(CK)。氮肥按基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶2∶3施用。在N_2水平下设置不同施氮比例处理,即,基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶0∶5、5∶1∶4、5∶2∶3、5∶3∶2、5∶4∶1、5∶5∶0,分别用NP_1、NP_2、NP_3、NP_4、NP_5和NP_6表示。采用随机区组设计,小区面积17.75m^2,4次重复,小区间做埂,并用薄膜包埂,单灌单排。氮肥用尿素;磷肥用钙镁磷肥(600 kg/hm^2),全作基肥;钾肥用氯化钾(K_2O 180 kg/hm^2),按基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶2∶3施用。本试验设计总施氮量和各施氮比例中氮素仅指化学氮肥中氮素,不包含还田稻草所含氮素。

1.2　田间管理

采用日产久保田牌半喂入式收割机收割早稻,留茬高度5—10 cm,收割同时将稻草机械化切碎至5—15 cm(试验所设对照区稻草不切碎并将其全部移走)。试验田前茬为早稻,按照谷草比1∶1计算,稻草还田量2009、2010年分别为6750 kg/hm^{2}和7150 kg/hm^2。收割之后,将稻草撒匀,灌水旋耕。两年均采用湿润育秧,移栽密度为13.3 cm × 26.4 cm,每蔸2苗。基肥于移栽前2 d施用,分蘖肥在移栽后7 d施用,穗肥于叶龄余数2左右施用,其他管理措施与一般高产田相同。

1.3　测定项目与计算方法

1.3.1 氮素积累和产量　在取样区组,分别于移栽期、分蘖期、幼穗分化期(一次枝梗原基分化期)、齐穗期和成熟期按平均茎蘖数取样5蔸,去除地下部分,分装后在105℃下杀青15 min,然后80℃烘至恒重。将上述样品粉碎、过80目筛后用Foss-2300全自动定氮仪测定样品含氮量。

成熟期调查有效穗并平均取样5蔸,分别考查其各产量构成因素。所有小区实收测定稻谷产量,脱粒后晒干扬净,称重,换算标准含水率并计算实际产量。

1.3.2 计算公式　氮肥利用率的计算,按叶全宝等[9]方法:

氮肥表观利用率(%)=[(施氮区地上部总吸氮量-空白区地上部总吸氮量)/施氮量]×100;

氮素收获指数=籽粒吸氮量/成熟期植株地上部氮素积累量;

氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮区产量-空白区产量)/施氮量;

氮肥生理利用率(kg/kg)=(施氮区产量-空白区产量)/(施氮区植株地上部氮素积累量-空白区植株地上部氮素积累量);

氮素吸收率(%)=[施肥区植株地上部氮素积累量/(施肥区植株地上部氮素积累量+空白区植株地上部氮素积累量)]×100;

生产100 kg籽粒需氮量(kg)=(氮素积累量/稻谷产量)×100。

1.4　数据处理

数据采用Excel和DPS软件处理。表1、表2为产量、产量构成因素、氮素吸收和氮素利用率进行的年度间方差分析,结果文中大多指标年度间差异不显著,所以本文结果中图表内数据均采用两年数值平均数±标准差。

2　结果与分析

2.1　氮肥运筹对产量及其构成因素的影响

2.1.1 施氮量对产量及其构成因素的影响　表3可知,在稻草全量还田下,晚稻产量随施氮量的增加而增加,但当施氮量超过180 kg/hm^{2}时,产量下降,且处理间差异极显著。在同一施氮(180 kg/hm^2)水平下,稻草全量还田较不还田处理增产0.71 t/hm^2,增幅为8.83%,差异极显著。表明稻草全量还田配施适量的氮肥有利于提高水稻产量。

产量构成因素中,稻草全量还田下单位面积有效穗数随施氮量的增加而增加,而结实率则相反,处理间差异达显著或极显著水平;每穗粒数施氮处理间差异不明显,但极显著高于不施氮处理;千粒重各施氮处理均显著高于不施氮处理。在同一施氮水平

表1 产量及其构成因素的年度间差异(F值)

Table 1 Variance analysis of yield and its composition between 2009 and 2010 F value

变量 Factor	有效穗数 Effective panicle ($\times10^4$/hm^2)	穗粒数 Spikelet per panicle	结实率 Filled grain (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t/hm^2)	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
施氮量 N rate	6.93**	2.36	1.64	10.37**	1.82	2.38	3.39
N分配比例 N application ratio	13.57**	3.23*	1.12	8.63**	1.61	2.33	3.28

注(Note): *与**分别表示达到5%和1%的显著水平 Indicate significance at 5% and 1% levels, respectively.

表2 氮素吸收及其利用率的年度间差异(F值)

Table 2 Variance analysis of N application and N utilization efficiency between 2009 and 2010 $F_{0.05}$

变量 Factor	NUE (%)	NHI (%)	NAE (kg/kg)	NPE (kg/kg)	NUR (%)	100 kg GNR (kg)	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
施氮量 N rate	19.49**	5.24*	1.02	11.24**	8.19*	0.94	5.12	10.56
N分配比例 N application ratio	2.53	17.81**	1.43	0.19	1.88	0.53	4.84	9.65

注(Note): NUE—氮肥表观利用率 N use efficiency; NHI—氮素收获指数 N harvest index; NAE—氮肥农学利用率 N agronomic efficiency; NPE—氮肥生理利用率 N physiological use efficiency; NUR—氮素吸收率 N use rate; 100 kg GNR—100 kg籽粒需N量 N-requirement for 100 kg grain; *与**分别表示达到5%和1% 的显著水平 Indicate significance at 5% and 1% levels, respectively.

表3 施氮量对产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of Nitrogen application rate on grain yield and its components of late rice

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle ($\times10^4$/hm^2)	穗粒数 Spikelet per panicle	结实率 Filled grain (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t/hm^2)
N_0	204.44 ±4.94 eD	144.84 ±3.09 cC	82.16 ±1.90 aA	24.53 ±0.24 cB	5.87 ±0.34 dD
N_1	269.67 ±2.72 dC	159.47 ±6.65 bB	76.59 ±3.70 bB	25.41 ±0.29 aA	7.56 ±0.43 cC
N_2	303.55 ±5.90 bB	159.57 ±3.92 bB	74.20 ±1.14 bcBC	25.49 ±0.36 aA	8.75 ±0.19 aA
N_3	315.97 ±14.54 aA	157.32 ±3.90 bB	71.68 ±2.28 cCD	25.13 ±0.14 bA	8.19 ±0.31 bB
CK	293.87 ±6.20 cB	168.85 ±2.88 aA	68.83 ±2.80 dD	24.77 ±0.16 cB	8.04 ±0.28 bBC

注(Note): 上表中施氮比例均为基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶2∶3 N application ratio of basal, tillering and panicle initation is 5∶2∶3; 同列数据后不同小、大写字母分别表示在5%和1%水平差异显著 Data within columns followed by different small and capital letters indicate significant difference at 5% and 1% levels.

下,稻草全量还田较稻草不还田能显著提高单位面积有效穗数、结实率和千粒重,从而有利于产量的提高。

2.1.2 不同穗肥比例对产量及其构成因素的影响

表4表明,稻草全量还田下,以NP_3处理产量最高,达8.75 t/hm^2,极显著高于其他处理,较产量最低的NP_6处理增产12.47%;单位面积的有效穗数随分蘖肥比例的增加而逐渐减少,其中NP_1、NP_2处理显著高于其他处理;每穗粒数和千粒重均以NP_3处理最大;结实率以NP_2处理最大,NP_4处理最小,处理间差异不显著。说明稻草全量还田下,以基蘖穗肥施氮比例为5∶2∶3时增产效果最好。

表 4　稻草还田下不同施氮比例对产量及其构成因素的影响

Table 4　Effects of different basal∶tiller∶panicle ratios of N use on the grain yield and its components of late rice

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle ($\times10^4$/hm^2)	穗粒数 Spikelet per panicle	结实率 Filled grain (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t/hm^2)
NP_1	322.03 ±7.38 aA	155.51 ±4.10 abA	71.23 ±1.21 aA	25.22 ±0.16 aAB	8.25 ±0.34 bB
NP_2	312.96 ±4.62 abAB	149.23 ±3.02 bA	74.30 ±1.81 aA	25.39 ±0.20 aAB	8.45 ±0.29 bB
NP_3	303.55 ±6.52 bcABC	159.57 ±4.25 aA	74.20 ±2.21 aA	25.49 ±0.12 aA	8.75 ±0.19 aA
NP_4	303.31 ±6.70 bcABC	157.57 ±4.46 abA	71.05 ±1.91 aA	25.03 ±0.19 abAB	8.45 ±0.28 bB
NP_5	301.24 ±5.64 bcBC	156.08 ±4.64 abA	72.34 ±1.61 aA	24.53 ±0.34 bB	8.16 ±0.34 bBC
NP_6	293.17 ±4.36 cC	152.09 ±5.30 abA	74.22 ±1.86 aA	25.07 ±0.25 abAB	7.78 ±0.15 cC

注(Note): 上表中处理施氮量均为纯 N180 kg/hm^2 N application rate in each treatment is 180 kg/ha; 同列数据后不同小、大写字母分别表示在 5% 和 1% 水平差异显著 Values within columns followed by different small and capital letters are significantly different at 5% and 1% levels.

2.2　施氮量对氮素吸收利用的影响

2.2.1 施氮量对氮素吸收的影响　从表 5 可以看出, 稻草还田后,氮素积累量随施氮量增加而增加,处理间差异均达极显著水平;除 N_3 处理外,各处理水稻不同生育阶段氮素积累量占总积累量的比率均表现为前期 > 中期 > 后期;水稻不同生育阶段氮素积累均随施氮量的增加而增加;除中期所占比率随施氮量增加而增加外,前期和后期所占比率均随施氮量增加而降低。同一施氮水平下,稻草全量还田与不还田处理(CK)相比,吸氮量差异不显著,但表现为前期吸氮比率高于 CK,中、后期吸氮比例略低于 CK。

表 5　施氮量对晚稻氮素积累的影响

Table 5　Effects of N application rate on N accumulation of rice

处理 Treatment	氮素积累量 N accumulation (kg/hm^2)	前期 Early stage TS—PDS		中期 Middle stage PDS—FHS		后期 Late stage FHS—MS	
		(kg/hm^2)	(%)	(kg/hm^2)	(%)	(kg/hm^2)	(%)
N_0	61.46 ±1.96 dD	26.86	43.70	22.55	36.70	12.04	19.60
N_1	111.55 ±2.32 cC	52.83	47.36	40.78	36.55	17.94	16.09
N_2	154.72 ±2.50 bB	70.22	45.39	64.73	41.84	19.77	12.78
N_3	199.17 ±5.08 aA	79.88	40.11	94.20	47.29	25.09	12.60
CK	145.51 ±4.50 bB	64.61	44.41	62.25	42.78	18.65	12.82

注(Note): 氮肥施用比例为基肥∶分蘖肥∶穗肥 = 5∶2∶3 N application ratio of basal, tillering and panicle initation is 5∶2∶3; TS—移栽期 Transplanting stage; PDS—幼穗分化期 Panicle differentiation stage; FHS—齐穗期 Full heading stage; MS—成熟期 Mature stage.

相关分析表明,施氮量与氮素积累量及各生育阶段的氮素积累量均呈极显著正相关(表 6)。产量和氮素总积累呈二次抛物线极显著正相关,与前、中和后期的氮素积累量均呈正相关但不显著(图 1)。有效穗与氮素总积累、后期积累量均达到极显著正相关,与中期积累量为显著相关;结实率与各生育阶段氮素积累量均呈显著或极显著负相关(表 6)。

2.2.2 施氮量对氮肥利用的影响　表 7 可以看出,稻草还田后,氮肥表现利用率随施氮量增加而增加,且处理间差异极显著,N_3 处理比 N_1 处理高 15.37 个百分点;氮素收获指数随施氮量的增加而降低,N_3 处理仅为 49.53%,与不施氮处理差异极显著;N_2 处理的氮肥农学利用率最高,N_3 处理的最低,二者差异极显著;氮肥生理利用率随施氮量的增加而降低,N_3 处理与 N_1、N_2 处理差异极显著;氮素的吸收率随施氮量增加而增加,N_3 处理比 N_0 处理高 25.89 个百分点,处理间差异极显著;生产 100 kg 籽粒的需氮量随施氮量的增加而增加,N_3 处理最高,

处理间差异极显著。

同一施氮水平下(N_2),稻草还田处理的氮肥表现利用率和吸收率分别比 CK 高 5.12 个百分点和 1.26 个百分点,氮素收获指数比 CK 低 5.68 个百分点;氮肥农学利用率和生理利用率分别比 CK 高 3.53 kg/kg 和 4.24 kg/kg,差异显著;生产 100 kg 籽粒的需氮量略低于 CK。

表 6 氮素积累与施氮量、产量及其构成的相关性

Table 6 The correlation among N accumulation, N application rate, yield and yield components of late rice

N 素积累量 N accumulation (kg/hm^2)	施氮量 N rate (kg/hm^2)	有效穗数 Effective panicle ($\times10^4/hm^2$)	穗粒数 Spikelet per panicle	结实率 Filled grain (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t/hm^2)
总积累 Total	0.9870**	0.9795**	0.7101	−0.9824**	0.5823	0.9843**
TS—PDS	0.9969**	0.8986	0.8141	−0.9959**	0.7135	0.8630
PDS—FHS	0.9596**	0.9439*	0.6111	−0.9498*	0.4687	0.8409
FHS—MS	0.9849**	0.9727**	0.7376	−0.9826**	0.5934	0.8749

注(Note):TS—移栽期 Transplanting stage;PDS—幼穗分化期 Panicle differentiation stage;FHS—齐穗期 Full heading stage;MS—成熟期 Mature stage. * 与 ** 分别表示达到 5% 和 1% 的显著水平 Indicate significance at 5% and 1% levels, respectively.

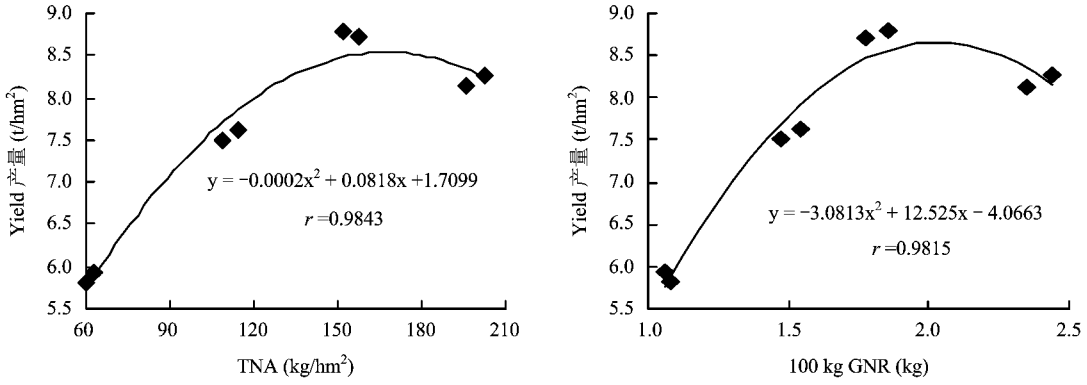

图 1 氮素积累、百公斤籽粒需氮量与产量的关系

Fig. 1 Relationships between total N accumulation, N-requirement for 100 kg grain and yield

[注(Note):TNA—氮素总积累量 Total N accumulation;100 kg GNR—100 kg 籽粒需 N 量 N-requirement for 100 kg grain.]

表 7 施氮量对氮肥利用率的影响

Table 7 Effects of N application rate on N utilization efficiency of rice

处理 Treatment	NUE (%)	NHI (%)	NAE (kg/kg)	NPE (kg/kg)	NUR (%)	100 kg GNR (kg)
N_0		60.92 ± 2.07 aA			50.00 ± 0.85 dD	1.09 ± 0.08 dD
N_1	42.27 ± 2.73 dD	60.37 ± 3.68 aA	14.05 ± 2.19 abAB	33.25 ± 2.41 aA	64.04 ± 2.17 cC	1.51 ± 0.09 cC
N_2	52.16 ± 1.22 bB	53.19 ± 1.73 bAB	15.70 ± 1.04 aA	30.11 ± 1.67 aAB	71.05 ± 1.19 bB	1.81 ± 0.13 bB
N_3	57.64 ± 1.29 aA	49.53 ± 0.91 bB	10.65 ± 0.77 cB	18.47 ± 0.47 cC	75.89 ± 2.31 aA	2.39 ± 0.08 aA
CK	47.04 ± 1.01 cC	58.87 ± 4.24 aA	12.17 ± 2.02 bcAB	25.87 ± 1.71 bB	69.79 ± 1.40 bB	1.84 ± 0.08 bB

注(Note):氮肥施用比例为基肥∶分蘖肥∶穗肥 = 5∶2∶3 N application ratio of basal, tillering and panicle initation is 5∶2∶3; NUE—氮肥表观利用率 Nitrogen use efficiency; NHI—氮素收获指数 Nitrogen harvest index; NAE—氮素农学利用率 Nitrogen agronomic efficiency; NPE—氮素生理利用率 Nitrogen physiological efficiency; NUR—氮素吸收率 Nitrogen uptake rate; 100 kg GNR—100 kg 籽粒需 N 量 N-requirement for 100 kg grain. 同列数据后不同小、大写字母分别表示在 5% 和 1% 水平差异显著 Values within columns followed by different small and capital letters are significantly different at 5% and 1% levels, respectively.

相关分析(表 8),施氮量与氮肥表观利用率、氮素吸收率、生产 100 kg 籽粒需氮量均呈极显著正相关,与收获指数呈显著负相关。产量与氮肥表观利用率、氮素吸收率呈极显著正相关,与氮肥农学利用率呈显著正相关。有效穗与氮肥表观利用率和氮素吸收率呈极显著正相关,与生产 100 kg 籽粒需氮量呈显著正相关,与收获指数呈显著负相关。每穗粒数与氮肥的农学利用率呈极显著正相关,与氮肥表观利用率和生理利用率均为显著正相关。结实率与表观利用率、氮素吸收率和 100 kg 籽粒需氮量呈极显著负相关,与氮肥收获指数呈显著正相关。千粒重与氮肥的农学利用率和生理利用率呈极显著正相关。按图 1 中抛物线方程计算,生产 100 kg 籽粒需氮量为 2.03 kg 时,产量最高为 8.66 t/hm^2。

表 8　氮素利用率和施氮量、产量及其构成的相关性

Table 8　The relative among N utilization efficiency, N application rate, yield and yield components of rice

项目 Item	施氮量 N application rate (kg/hm^2)	有效穗数 Effective panicle ($\times10^4$/hm^2)	穗粒数 Spikelet per panicle	结实率 Filled grain percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t/hm^2)
NUE	0.9667**	0.9775**	0.9326*	−0.9745**	0.8532	0.9739**
NHI	−0.8969*	−0.8839*	−0.4950	0.8811*	−0.3770	−0.8041
NAE	0.7443	0.7799	0.9862**	−0.7638	0.9975**	0.8860*
NPE	0.6043	0.6428	0.9569*	−0.6299	0.9845**	0.7610
NUR	0.9975**	0.9999**	0.8423	−0.9984**	0.7413	0.9652**
100 kg GNR	0.9676**	0.9509*	0.6445	−0.9603**	0.4940	0.8393

注(Note): NUE—氮肥表观利用率 Nitrogen use efficiency; NHI—氮素收获指数 Nitrogen harvest index; NAE—氮素农学利用率 Nitrogen agronomic efficiency; NPE—氮素生理利用率 Nitrogen physiological efficiency; NUR—氮素吸收率 Nitrogen uptake rate; 100 kg GNR—100 kg 籽粒需 N 量 N-requirement for 100 kg grain. *与**分别表示达到 5% 和 1% 的显著水平 Indicate significance at 5% and 1% levels, respectively.

2.3　不同穗肥比例对氮素吸收利用的影响

2.3.1 不同穗肥比例对氮肥吸收的影响　从表 9 可以看出,稻草全量还田下,氮素总积累量随穗肥比例下降而降低,不施分蘖肥处理 NP_1 比不施穗肥处理 NP_6 高 17.91 kg/hm^2。各处理氮素积累主要集中在前期(移栽-幼穗分化期)和中期(幼穗分化期—齐穗期)。前期的积累量和所占比率随穗肥比例的下降而增大;中期的氮素积累量和比率随穗肥比例的下降而减少,不施分蘖肥处理 NP_1 比不施穗肥处理 NP_6 分别高 43.72 kg/hm^2 和 23.22 个百分

表 9　稻草还田下不同穗肥比例对氮素积累的影响

Table 9　Effects of panicle nitrogen ratio on N accumulation of rice with straw-returning

处理 Treatment	氮素总积累 (kg/hm^2) Total N accumulation	TS—PDS		PDS—FHS		FHS—MS	
		(kg/hm^2)	(%)	(kg/hm^2)	(%)	(kg/hm^2)	(%)
NP_1	162.63 ± 6.04 aA	59.65	36.68	91.78	56.43	11.20	6.89
NP_2	160.98 ± 5.43 aAB	65.01	40.38	82.95	51.53	13.01	8.08
NP_3	154.72 ± 2.50 abAB	70.22	45.39	64.73	41.84	19.77	12.78
NP_4	146.17 ± 4.25 bAB	74.64	51.06	59.77	40.89	11.76	8.05
NP_5	145.95 ± 3.59 bAB	78.41	53.72	58.16	39.85	9.38	6.43
NP_6	144.72 ± 3.03 bB	81.75	56.49	48.06	33.21	14.91	10.30

注(Note): 各处理施氮量为 N 180 kg/hm^2 N application rate in each treatment is 180 kg/ha. TS—移栽期 Transplanting stage; PDS—幼穗分化期 Panicle differentiation stage; FHS—齐穗期 Full heading stage; MS—成熟期 Mature stage. 同列数据后不同小、大写字母分别表示在 5% 和 1% 水平差异显著 Values within columns followed by different small and capital letters are significantly different at 5% and 1% levels, respectively.

点;后期(齐穗期—成熟期)氮素积累和比率除不施穗肥处理外,其余均随着穗肥比例而表现为先增大后降低的抛物线趋势,均以 NP_3 处理最高。相关分析也表明,稻草还田后同一施氮水平下,穗肥的施氮量与氮素的总积累量、中期积累量呈极显著正相关(r 分别为 0.9523** 和 0.9653**),穗肥的施氮量与前期氮素积累量呈极显著负相关(r = −0.9956**)。

2.3.2 不同穗肥比例对氮肥利用效率的影响 由表10可以看出,稻草全量还田后同一施氮水平下,氮肥的表现利用率和收获指数均随穗肥施用量的减少而降低,不施分蘖肥处理 NP_1 比不施穗肥处理 NP_6 分别高 9.95 个百分点和 5.83 个百分点,且二者均呈极显著差异。氮素的农学利用率和生理利用率均表现为随着穗肥比例的减少呈先增加后降低趋势,均以 NP_3 处理最大,不施穗肥的处理 NP_6 最低。氮素的吸收率随着穗肥比例的减少而降低,但最大值和最小值间仅相差 2.37 个百分点。生产 100 kg 籽粒需氮量随着穗肥比例的减少呈先降低后增加趋势,NP_4 处理最低,仅为 1.79 kg。

表10 稻草还田下不同穗肥比例对氮肥利用的影响

Table 10 Effects of panicle nitrogen proportion on N efficiency of rice with straw-returning

处理 Treatment	NUE (%)	NHI (%)	NAE (kg/kg)	NPE (kg/kg)	NUR (%)	100 kg GNR (kg)
NP_1	56.56 ±1.42 aA	54.82 ±1.36 aA	12.86 ±0.77 bBC	22.73 ±1.15 cC	72.05 ±0.74 aA	2.02 ±0.09 aA
NP_2	55.64 ±1.83 aA	54.28 ±0.68 aA	13.47 ±0.91 bAB	24.21 ±0.72 cC	71.85 ±0.85 aA	1.97 ±0.08 aAB
NP_3	52.16 ±1.01 bB	53.19 ±0.99 abAB	15.70 ±0.96 aA	30.11 ±0.70 aA	71.05 ±0.98 abA	1.81 ±0.10 bAB
NP_4	47.41 ±0.51 cC	52.49 ±0.40 bcAB	13.58 ±0.79 bAB	28.69 ±1.03 abAB	69.89 ±0.84 bA	1.79 ±0.08 bB
NP_5	47.29 ±1.42 cC	51.37 ±0.81 cB	12.85 ±0.92 bBC	27.17 ±0.41 bB	69.86 ±0.87 bA	1.82 ±0.05 bAB
NP_6	46.61 ±0.81 cC	48.99 ±0.90 dC	10.58 ±1.08 cC	22.7 ±1.59 cC	69.68 ±0.92 bA	1.89 ±0.08 abAB

注(Note):各处理施氮量为 N 180 kg/hm² N application rate in each treatment is 180 kg/ha. NUE—氮肥表观利用率 Nitrogen use efficiency; NHI—氮素收获指数 Nitrogen harvest index; NAE—氮素农学利用率 Nitrogen agronomic efficiency; NPE—氮素生理利用率 Nitrogen physiological efficiency; NUR—氮素吸收率 Nitrogen uptake rate; 100 kg GNR—100 kg 籽粒需 N 量 N-requirement for 100 kg grain. 同列数据后不同小、大写字母分别表示在5%和1%水平差异显著 Values within columns followed by different small and capital letters are significantly different at 5% and 1% levels, respectively.

相关分析表明,穗肥施用量与氮肥的表观利用率、收获指数和氮素吸收率均呈极显著正相关(r 分别为 0.9532**、0.9695**、0.9532**)。产量与氮肥的农学利用率呈极显著正相关(r = 0.9987**),与生理利用率达到显著正相关(r = 0.7725*)。产量构成中,有效穗数与氮肥的表观利用率、收获指数和氮素吸收率均呈极显著正相关(r 分别为 0.9014**、0.9190**、0.8984**)。

3 讨论与结论

3.1 稻草全量还田与水稻产量的问题

许多研究发现,稻草还田能提高下季水稻产量[4,6-7],且其增产效果与耕作方式、土壤类型、还田方式和年限等有关[10]。在氮、磷、钾养分用量相等的情况下,稻草全量还田可以增加有效穗数,两年四季的水稻平均产量增幅为 5.7%～7.3%[11]。但也有研究发现,稻草 80% 或者 100% 还田会造成减产[12]。本试验结果表明,与稻草不还田相比,双季稻区,早稻稻草全量还田后显著增加有效穗、结实率和千粒重,最终产量提高了 8.83%,增产极显著。说明早稻草全量还田配施一定量氮肥后,可以显著提高晚稻产量。

3.2 稻草全量还田下的氮肥分配

合理施用氮肥是水稻高产栽培的一个重要措施,在一定的范围内,水稻产量随着施氮量的增加而增加,超过一定范围后则产量和部分产量因素下降[13]。而稻草还田后,带入土壤大量的氮素,增加了土壤中可矿化氮含量,提高了土壤供氮能力,提高了对氮的利用率[6],为防止前期稻草分解与微生物争氮,生产上通常靠增加施氮量来缓解稻草还田对晚稻早期生长的负面影响[14],但氮肥配施量各有不同[14-15]。陈世正等[15]提出稻草还田 4500 ～ 6750 kg/hm²时,应该配施 N 45 ～ 60 kg/hm²;余冬立等[16]认为,在全年稻草还田量为 7500 kg/hm² 的红

壤稻田系统,全年适宜施 N 180 ~ 185 kg/hm^2。本研究表明, 稻草全量还田后,施氮量与产量呈二次抛物线关系,其中以施氮 180 kg/hm^2 时的产量最高。

水稻对不同生育期追施氮肥的吸收利用表现出较大差异,适当增加穗粒肥比率,可以提高氮肥的吸收利用率与生产效率[17]。洪春来等[18]认为在不增加氮肥总用量的前提下,秸秆全量还田前期适当增大氮肥的施用比例,有利于降低土壤碳氮比,促进秸秆的矿化分解,防止微生物争氮带来不利的影响。王国忠和杨佩珍[19]研究表明,实施秸秆全量还田后纯氮在全生育期前中后期配比以 6.5∶0.5∶3 为最佳。刘开强[20]认为,根据稻草养分释放的先快后慢的特点,可以适当降低基肥的比例,结合稻草养分释放在水稻分蘖期适时追肥。本试验研究表明, 稻草全量还田后,氮肥运筹以基肥∶分蘖肥∶穗肥 =5∶2∶3 产量最高,氮肥农学、生理利用率也最高,与前人研究结果一致[20-21],说明稻草全量还田适当地提高前期的施氮比例可以防止微生物与作物"争氮"的矛盾,有利于提高水稻产量。

3.3　稻草全量还田下的氮素吸收利用

稻草还田有利于保持和提高土壤氮素的有效性,减少矿质态氮在土壤中的累积和损失,从而间接地节省了部分化学氮肥的使用,适量稻草还田配施氮肥能显著提高水稻氮素吸收转化功能,提高氮肥利用效率,增加 N、P、K 的收获指数,提高 P、K 的干物质生产效率[5,18,20]。但也有研究认为,稻草还田配施氮、磷、钾肥会降低水稻对氮素的吸收[2]。本研究结果表明,稻草全量还田后,施氮越多,晚稻氮素的积累量、氮肥表现利用率、氮素的吸收率和生产 100 kg 籽粒的需氮量均随之提高,其中氮肥农学利用率以施氮 180 kg/hm^2 最高;等施氮量下,氮素积累量随穗肥施用比例下降而降低,氮素农学利用率和生理利用率以基肥∶分蘖肥∶穗肥 =5∶2∶3 处理的最高。配施适量氮肥后,稻草全量还田除收获指数低于稻草不还田对照外,其余氮素积累和氮肥利用率均高于对照,特别是氮肥的表观利用率极显著高于对照,而农学和生理利用率差异均达到显著水平。

综上所述,早稻稻草机械化全量还田下,配施适量的氮肥可以极显著提高晚稻产量,且主要是通过后期提高结实率和千粒重来增加产量的。从产量效应和氮肥的吸收利用率方面考虑,在双季稻区早稻草全量还田后,晚稻适宜的施氮量是180 kg/hm^2,最佳的氮肥运筹是基肥∶分蘖肥∶穗肥 =5∶2∶3。从生态环境方面和农业可持续发展方面考虑,应逐步减少氮肥的施入量,合理安排好氮肥的施用比例,加强稻草还田等有机肥的施入,以便保持土壤肥力,减少氮肥在环境中的残留和浪费,减少潜在的农田环境污染,提高氮肥的利用效率。

参 考 文 献:

[1] 刘巽浩,高旺盛, 朱文珊. 秸秆还田的机理与技术模式[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 55-61.
Liu X H, Gao W S, Zhu W S. The mechanism and technical pattern of straw return to field[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 55-61.

[2] Pathak H, Singh R, Bhatia A, Jain N. Recycling of rice straw to improve wheat yield and soil fertility and reduce atmospheric pollution[J]. Paddy and Water Environment, 2006, 4: 111-117.

[3] 张水清,钟旭华,黄农荣,吕国安. 稻草覆盖还田对华南双季晚稻物质生产和产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(3): 284-290.
Zhang S Q, Zhong X H, Huang N R, Lü G A. Effects of straw mulching on dry matter production and grain yield of double cropping late season rice (*Oryza sativa*) in south China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(3): 284-290.

[4] 吴建富, 潘晓华, 石庆华. 施氮量对免耕抛栽稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(6): 1031-1036.
Wu J F, Pan X H, Shi Q H. Effects of nitrogen application on yield of no-tillage and cast transplanted rice and its nitrogen absorption[J]. Acta Agriculturae Universitis Jiangxiensis, 2011, 33(6): 1031-1036.

[5] 余冬立, 谢小立, 王凯荣, 等. 基于稻草还田的稻田生态系统N素吸收特性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1): 88-91.
She D L, Xie X L, Wang K R *et al*. Nitrogen uptake by rice paddy ecosystem based on rice straw incorporation[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(1): 88-91.

[6] 彭英湘, 王凯荣, 谢小立, 等. 水肥条件和稻草还田对土壤供氮及水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (4): 40-43, 48.
Peng Y X, Wang K R, Xie X L *et al*. Effects of rice straw incorporation on soil nitrogen supply and rice yield under different irrigation and fertilizer regimes[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007, (4): 40-43, 48.

[7] 彭娜, 王凯荣, 王开峰, 等. 不同氮肥配施方法下稻草还田短期效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 4(7): 64-67.
Peng N, Wang K R, Wang K F *et al*. Effect of incorporating rice straw into the soil on rice growth, soil N and P nutrients under different N and P fertilization models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 4(7): 64-67.

[8] 余冬立, 王凯荣, 谢小立, 等. 稻草还田与施氮水平对土壤氮

素供应和水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 296-300.
She D L, Wang K R, Xie X L *et al*. Effects of rice straw incorporation and N rates on soil nitrogen supply and rice yield [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2): 296-300.

[9] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1422-1428.
Ye Q B, Zhang H C, Wei H Y *et al*. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(11): 1422-1428.

[10] 区惠平, 何佳, 宁伟军, 等. 稻草还田在水稻生产上的应用与研究进展[J]. 作物杂志, 2007, (6): 9-11.
Ou H P, He J, Ning W J *et al*. Review of application and research of rice straw returning on rice production[J]. Crops, 2007, (6): 9-11.

[11] 吴建富, 曾研华, 潘晓华, 等. 稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1572-1578.
Wu J F, Zeng Y H, Pan X H *et al*. Effects of rice straw returning mode on rice grain yield and soil carbon pool management index in double rice-cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1572-1578.

[12] 叶厚专, 药林桃, 周韧金, 等. 机插稻大田耕整质量与稻草还田技术研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(7): 35-37.
Ye H Z, Yao L T, Zhou R J *et al*. Study on field farming quality and rice-straw returning for mechanically—transplanted rice[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(7): 35-37.

[13] 周瑞庆, 萧光玉, 汪大明, 等. 施肥量对水稻产量及产量构成因素的影响[J]. 作物研究, 1991, 6(增刊): 21-26.
Zhou R Q, Xiao G Y, Wang D M *et al*. Effect of fertilizer amount on yield and yield components of rice [J]. Crop Research, 1991, 6(Supplement): 21-26.

[14] 叶文培,谢小立,王凯荣,等. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(1): 65-70.
Ye W P, Xie X L, Wang K R *et al*. Effects of rice straw incorporation in different periods on growth and yield of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(1): 65-70.

[15] 陈世正, 杨邦俊, 宋光煜, 等. 稻草还田对土壤肥力与作物产量的影响[J]. 土壤肥料, 1995, (4): 13-17, 43.
Cheng S Z, Yang B J, Song G Y *et al*. Effects of straw returning to field on the yield of crops and soil fertility [J]. Soil and Fertilizer, 1995, (4): 13-17, 43.

[16] 佘冬立, 王凯荣, 谢小立, 等. 施N模式与稻草还田对土壤供N量和水稻产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 16-20, 44.
She D L, Wang K R, Xie X L *et al*. Effects of application of N fertilizer and incorporation of rice straw on soil nitrogen supply and rice yield[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(2): 16-20, 44.

[17] 凌启鸿. 改革肥料运筹, 优化水稻群体质量[J]. 黄仲青. 水稻高产高效理论与技术—第五届全国水稻高效高产与技术研讨会论文集[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996, 124-135.
Ling Q H. Changing the fertilizer application, optimize the population quality of rice[J]. Huang Z Q. The high yield and high efficiency theory and technology of rice—The Symposium of the fifth session of the national rice high yield and technology seminar [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1996, 124-135.

[18] 洪春来, 魏幼璋, 黄锦法, 等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究[J]. 浙江大学学报, 2003, 29(6): 627-633.
Hong C L, Wei Y Z, Huang J F *et al*. Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment [J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2003, 29(6): 627-633.

[19] 王国忠, 杨佩珍. 麦秸还田及水稻氮肥配施技术研究[J]. 土壤肥料, 2001, (6): 34-37.
Wang G Z, Yang P Z. The techniques of wheat straw return to field and nitrogen fertilizer combined application for rice[J]. Soil and Fertilizer, 2001, (6): 34-37.

[20] 刘开强. 不同耕作方式下稻草分解与养分释放特点及对水稻氮素利用的影响[D]. 广西南宁: 广西大学硕士论文, 2008, 6.
Liu K Q. Decomposition and release characteristics of incorporated rice straw and influence on nitrogen use in rice under different tillage patterns[D]. Nanning, Guangxi: Ms thesis of Guangxi University, 2008, 6.

[21] 李勇, 曾红娣, 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.
Li Y, Zeng H D, Chu Y Y *et al*. Effects of wheat straw returning and nitrogen application model on rice yield and soil nitrogen supply[J]. Soils, 2010, 42(4): 569-573.