

秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响

李录久¹, 王家嘉¹, 吴萍萍¹, 黄厚宽², 蒋荫锡¹

(1 安徽省农科院土壤肥料研究所, 安徽合肥 230031; 2 肥西县土肥站, 安徽肥西 231200)

摘要: 【目的】研究小麦秸秆直接还田条件下不同氮肥基追比例运筹方式对白土稻田水稻产量和氮素吸收利用的影响, 为华中低产白土稻田水稻合理施肥提供科学依据。【方法】设置 2 种小麦秸秆还田量(0 和 3000 kg/hm²) 及 3 种氮肥基肥-分蘖肥-穗肥施用比例(80-0-20、60-20-20 和 40-30-30) 和不施氮的对照, 共 7 个处理, 分别为 N₈₀₋₀₋₂₀、N₆₀₋₂₀₋₂₀、N₄₀₋₃₀₋₃₀、N₈₀₋₀₋₂₀+S、N₆₀₋₂₀₋₂₀+S、N₄₀₋₃₀₋₃₀+S 和 CK。水稻收获期采集代表性样品考察水稻产量结构性状, 同时测定水稻籽粒和秸秆产量, 分析籽粒和秸秆氮素含量, 计算水稻氮素吸收量和氮肥利用效率。【结果】基肥-分蘖肥-穗肥施用比例 60-20-20 的处理水稻籽粒产量最高, 两年试验较不施分蘖肥的对照分别增产 9.4%~12.9% 和 7.4%~8.9%。实施小麦秸秆直接还田后, 水稻籽粒产量较不施秸秆的对照分别提高 10.2%~23.4% 和 0.8%~5.5%。不施秸秆条件下, 基-蘖-穗肥施用比例 60-20-20 的处理水稻籽粒含氮量最高, 较不施氮的对照提高 11.3%, 而秸秆含 N 量随中后期追肥比例的加大而提高。秸秆还田条件下, 氮肥后移能明显提高水稻籽粒和秸秆含氮量。水稻籽粒氮素吸收量, 基-蘖-穗肥比例 60-20-20 处理最多, 2011 年较对照 N₈₀₋₀₋₂₀ 分别增加 13.7% 和 24.8%, 2012 年提高 14.5% 和 9.2%; 秸秆氮素积累量则随中后期追肥用量的增加而增多, 基-蘖-穗肥比例 40-30-30 处理最多。不施秸秆条件下, 基-蘖-穗肥比例 60-20-20 的处理氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率、氮收获指数均最高, 百公斤籽粒吸氮量最低。秸秆还田条件下, 氮素干物质生产效率和氮素稻谷生产效率均随中后期追肥量的增加而下降, 而百公斤籽粒吸氮量则最高。氮素农学效率、氮肥回收利用率 and 偏生产力也是 60-20-20 比例的处理最高, 较对照 N₈₀₋₀₋₂₀ 农学效率分别提高 4.90 和 2.44 kg 籽粒/kg N, 氮肥利用率提高 7.82 和 21.29 个百分点, 偏生产力提高 4.90 和 2.44 个百分点。【结论】综合水稻产量、氮素吸收量以及氮肥利用效率, 安徽省江淮丘陵低产白土地区, 小麦秸秆直接还田条件下, 单季中稻氮肥的基肥-分蘖肥-穗肥施用比例, 以 60-20-20 运筹方式较为适宜。

关键词: 氮肥运筹; 水稻产量; 氮素吸收利用效率; 秸秆还田; 白土

中图分类号: S141.4; S511.062 **文献类型:** A **文章编号:** 1008-505X(2016)01-0254-09

Effect of different nitrogen application on rice yield and N uptake of white soil under wheat straw turnover

LI Lu-jiu¹, WANG Jia-jia¹, WU Ping-ping¹, HUANG Hou-kuan², JIANG Yin-xi¹

(1 Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China;

2 The Extension Center of Agricultural Technology at Feixi County, Feixi, Anhui 231200, China)

Abstract: 【Objectives】Effects of different nitrogen (N) ratios of basal and topdressing application on rice growth and N uptake in the condition of wheat straw direct turnover were studied to provide a scientific base for rice applying N rationally in low-yield white paddy soil of middle region of China. 【Methods】Two levels of wheat straw turnover (0 and 3000 kg/hm²) and three N application ratios of basal and topdressing (80-0-20, 60-20-20, and 40-30-30), and N omitted treatment were designed, which were reordered as N₈₀₋₀₋₂₀, N₆₀₋₂₀₋₂₀, N₄₀₋₃₀₋₃₀, N₈₀₋₀₋₂₀+S, N₆₀₋₂₀₋₂₀+S, N₄₀₋₃₀₋₃₀+S and CK, respectively. The representative samples were collected to investigate rice yield components at the harvest period, and the yields and N concentrations in grain and straw were

收稿日期: 2014-04-01

接受日期: 2014-10-31

网络出版日期: 2015-12-08

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAD05B02); 公益性行业(农业)科研专项(201003016); 国际植物营养研究所(IPNI)项目资助。

作者简介: 李录久(1962—), 男, 安徽长丰人, 博士, 研究员, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: lilujiu@yahoo.com.cn

also measured to determine N uptake and nitrogen use efficiency. **【Results】** The treatment of $N_{60-20-20}$ obtains the highest rice grain yields which are increased by 9.4%–12.9% in 2011 and 7.4%–8.9% in 2012, respectively, compared with the control $N_{80-0-20}$. In the condition of wheat straw direct turnover, rice grain yields are increased by 10.2%–23.4% and 0.8%–5.5%, respectively, compared with the no straw turnover treatments. The N content in rice grains of the $N_{60-20-20}$ treatment reaches the highest, which is 11.3% higher than that in the CK treatment, while the N contents in straw are increased with the increase of N topdressing application ratio at the mid-late period. Increasing N application rate of topdressing can promote the N contents in grains and straw in the condition of wheat straw turnover. The total N uptakes in rice grains reach the highest for the $N_{60-20-20}$ treatment, and are significantly increased by 13.7% and 24.8% in 2011 and 14.5% and 9.2% in 2012, respectively, compared with the $N_{80-0-20}$ treatment. The N uptakes in rice straw are increased with the increase of N topdressing application in mid-late period, and the uptake of the treatment $N_{40-30-30}$ reaches the highest. The dry matter production efficiency, grain production efficiency and harvest index of nitrogen reach their peaks in the $N_{60-20-20}$ treatment with no wheat straw turnover, in which the amount of N absorption per 100 kg grains drops to the lowest, while a contrary result shows when wheat straw turnover. The agronomy efficiency, apparent recovery efficiency and partial productivity of nitrogen are also significantly promoted in the $N_{60-20-20}$ treatment by 4.90 and 2.44 kg grain per kg N, and 7.82 and 21.29, and 4.90 and 2.44 percentage points, respectively, compared with the $N_{80-0-20}$ treatment. **【Conclusions】** Considering rice grain yield, N uptake and nitrogen use efficiency, the 60–20–20 N application ratio of base-jointing-panicle development stages is suitable for single-season rice in Jianghuai hilly land region with low-yield white soils, Anhui province under the condition of wheat straw direct turnover.

Key words: nitrogen application; rice yield; N uptake and use efficiency; wheat straw direct turnover; white paddy soil

水稻是我国主要粮食作物, 1949~2009年水稻年播种面积平均为 $3.0937 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占粮食播种面积的 27%; 总产平均为 $1.3329 \times 10^8 \text{ t}$, 占粮食总产的 42%, 居粮食作物首位^[1]。2012年种植面积 $3.0137 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 总产达 $2.0424 \times 10^8 \text{ t}$ 。安徽是我国水稻重要生产省份, 2012年种植面积高达 $2.215 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 总产 $1.393 \times 10^7 \text{ t}$, 播种面积和总产量分别占全国的 7.35% 和 6.82%, 仅次于湖南、江西、黑龙江和江苏等省, 分别居全国第 5、第 7 位^[2-3], 水稻生产在安徽占有重要地位。

安徽省水稻种植面积虽然较大, 但单位面积产量较低, 2012年平均为 6.291 t/hm^2 , 低于全国平均产量 6.777 t/hm^2 , 排在全国 20 位以后, 与江苏等高产省有较大差距^[2], 除气候条件和栽培技术外, 主要原因是施肥不合理, 没有实行科学的氮肥运筹。调查表明^[4], 农民习惯施肥氮肥基肥比例过大, 导致前期水稻旺长, 无效分蘖多, 后期脱肥早衰, 最终影响了籽粒产量。氮肥运筹包括基肥和追肥比例对水稻产量^[5-10]和氮素吸收量^[11-16]影响的研究已有一些报道。这些研究表明, 合理的氮肥运筹能有效提高水稻产量, 提高肥料利用率。研究结果对推动水稻科学施肥发挥了重要作用。但是, 这

些研究大多是在较高基础肥力土壤和高产栽培条件下进行的, 低产土壤较少, 低产白土鲜见报道, 特别是秸秆还田条件下。白土属于水稻土类潜育型水稻土亚类, 主要分布于安徽、江苏等省的江淮丘陵地区, 粉砂含量高, 养分贫乏, 保肥供肥能力差, 是我国南方 5 大低产水稻土类型之一^[17]。秸秆还田能提高土壤养分含量, 促进水稻生长发育^[18]。为此, 开展了秸秆还田与氮肥运筹相结合试验, 以期华中低产白土稻田水稻合理施肥、提高水稻产量和氮肥利用效率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2011 和 2012 年分别在安徽省长丰县罗塘乡(简称 CF)和肥西县严店乡(简称 FX)进行, 供试土壤为下蜀黄土发育而成的低产白土型水稻土。试验前两试点 0—20 cm 耕层土壤养分状况: pH 为 5.48 和 5.57, 有机质含量 20.9 和 25.6 g/kg, 全氮含量 1.49、1.07 g/kg, 全磷含量 1.06、1.02 g/kg, 有效磷为 5.0、5.1 mg/kg, 速效钾为 42.2 和 62.6 mg/kg。

2 年两地试验处理内容完全一致, 在施化学氮

肥(N)180 kg/hm²基础上进行,采用裂区设计,试验主处理是小麦秸秆还田 3000 kg/hm²(简称 S),以不施秸秆为对照;副处理为水稻氮肥运筹方式,设置基肥-分蘖肥-穗肥施用百分比例分别为 80-0-20、60-20-20 和 40-30-30 共 3 种,以 N₈₀₋₀₋₂₀、N₆₀₋₂₀₋₂₀ 和 N₄₀₋₃₀₋₃₀ 表示,以不施氮肥为对照 CK,构成 7 个处理: 1) CK; 2) N₈₀₋₀₋₂₀; 3) N₆₀₋₂₀₋₂₀; 4) N₄₀₋₃₀₋₃₀; 5) N₈₀₋₀₋₂₀ + S; 6) N₆₀₋₂₀₋₂₀ + S; 7) N₄₀₋₃₀₋₃₀ + S。所有处理均施用磷(P₂O₅) 90 kg/hm² 和钾(K₂O)120 kg/hm² 等量磷钾肥。供试肥料: 氮肥为尿素(含 N 46%), 磷肥为磷酸二铵(含 N 18%, P₂O₅ 46%, 对照 CK 处理用 P₂O₅ 含量 12% 的普通过磷酸钙), 钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%)。所有磷、钾肥作基肥,与小麦秸秆一起在水稻移栽前一次性施入。小区面积 4 m × 5 m 计 20.0 m², 四次重复, 区组裂区内随机排列。小区间以田埂分隔,并用塑料薄膜包埋,单灌单排。供试水稻品种为当地主栽的丰良优 6 号,栽插密度 24 cm × 15 cm 约 2.8 × 10⁵ hole/hm²。每年 4 月下旬水稻育秧,6 月初移栽,9 月底按小区单独收获计实产。其他栽培管理措施如病虫害防治同当地一般大田水稻。

1.2 测定项目和分析方法

水稻收获期每小区选 100 穴水稻调查有效穗数,采集代表性植株 5 穴,调查水稻穗长、穗粒数、饱满籽粒数、空瘪粒数、千粒重,考察产量结构,计算理论产量,保留样品供养分测定。收获的同时测定地上部秸秆重量。土壤基本性状采用常规法分析,参照《土壤农化分析》^[19] 进行;植株全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,开氏半微量定氮法测定。

1.3 氮素吸收与利用效率的计算

参考有关资料^[4,8,9,15-17] 计算氮素吸收量和氮利用效率:

氮素积累总量 (total nitrogen accumulation, NTA, kg/hm²) = 成熟期单位面积全株地上部秸秆和籽粒氮素吸收量之和,即秸秆干物重(W) × 秸秆含氮量 + 籽粒干重 × 籽粒含氮量。

氮素干物质生产效率 (nitrogen dry matter production efficiency, NDMPE, kg/kg N) = 单位面积水稻植株干物质重(W)/单位面积植株氮素积累总量。

氮素稻谷生产效率 (nitrogen grain production efficiency, NGPE, kg/kg N) = 单位面积水稻籽粒产量/单位面积植株 N 积累量。

氮素收获指数 (N harvest index, NHI, %) = 成熟期植株穗部氮积累量/植株氮素积累总量 × 100。

氮素农学效率 (agronomy efficiency of nitrogen applied, NAE, kg/kg N) = (施氮肥处理稻谷产量 - 不施氮肥处理稻谷产量)/总施氮量。

氮肥利用率 (nitrogen apparent recovery efficiency, NARE, %) = (施氮处理植株氮素积累量 - 不施氮处理植株氮素积累量)/施氮量 × 100。

生产百公斤水稻子粒需氮量 (the amount of absorbing nitrogen per 100 kg grains, 100 kg - AAN, N kg/100 kg) = 氮素积累总量/稻谷产量 × 100。

氮肥偏生产力 (partial factor productivity of nitrogen, NFPF, %) = 单位面积稻谷产量/单位面积施氮量。

氮肥生理利用率 (physiological efficiency of nitrogen, NPE, kg/kg) = (施氮肥处理稻谷产量 - 不施氮肥处理稻谷产量)/(施氮处理总吸氮量 - 不施氮肥处理总吸氮量)。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 软件和 DPS7.05 软件进行统计分析,并用 LSD (Least significant difference test) 法进行样本平均数的差异显著性比较。统计分析时,先按二因素裂区设计(2 个秸秆还田, 3 个氮肥配比)进行方差分析,再将 3 个氮肥配比和对照 CK 在 2 个秸秆还田下的平均值当成一个单因素试验进行方差检验和多重比较。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田下不同氮肥运筹方式对水稻产量及其构成因素的影响

水稻产量方差分析结果,2011 年试验,裂区主处理即施与不施秸秆间存在极显著差异,副处理即不同氮肥基追比例间存在显著差异,而秸秆还田与氮肥基追比例间的交互作用则不显著。2012 年试验,主处理间差异不显著,副处理间存在显著差异,两者间的交互作用也不显著。

水稻籽粒产量由收获期单位面积有效穗数、每穗粒数和千粒重决定,而穗粒数受总粒数和结实率影响。表 1 表明,氮肥及其运筹方式即氮肥基追比例对低产白土田水稻籽粒产量及其构成因素有明显影响。增施氮肥并实行合理运筹,水稻分蘖数和成熟穗数增加,每穗粒数明显增多,结实率提高,千粒重有所增长,最终提高了籽粒产量。其中 2011 年长丰试验,不施秸秆和实行小麦秸秆还田条件下,

表 1 氮肥运筹方式对水稻产量及其构成因素的影响
Table 1 Effect of different proportion of nitrogen application on rice yield and its components

试验年份 地点 Year/Site	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicles ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	穗粒数 Grains per panicle (No.)	结实率 Seed setting (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (t/hm^2)	实收产量 Harvested yield (t/hm^2)
2011	CK	261.3 b	150.4 c	62.9 b	20.7 ab	5.12 d	4.82 eD
长丰	$N_{80-0-20}$	297.0 a	172.4 b	69.2 ab	19.7 b	6.98 c	6.82 dC
Changfeng	$N_{60-20-20}$	305.9 a	171.6 b	72.1 a	19.2 b	7.27 bc	7.70 cB
	$N_{40-30-30}$	298.8 a	170.8 b	72.8 a	20.5 ab	7.62 b	7.46 cBC
	$N_{80-0-20} + S$	292.5 a	179.3 ab	72.2 a	22.2 a	8.41 a	8.42 abA
	$N_{60-20-20} + S$	303.6 a	192.8 a	74.8 a	20.5 ab	8.98 a	8.86 aA
	$N_{40-30-30} + S$	285.0 ab	181.3 ab	73.1 a	20.7 ab	7.82 b	8.22 bAB
2012	CK	241.8 b	161.5 b	63.6 b	24.9 b	6.18 c	5.77 cB
肥西	$N_{80-0-20}$	277.5 a	171.8 ab	70.5 ab	26.2 ab	8.81 b	8.37 bA
Feixi	$N_{60-20-20}$	285.0 a	186.2 a	71.3 a	25.2 ab	9.53 a	9.11 aA
	$N_{40-30-30}$	279.0 a	182.9 a	71.8 a	25.7 ab	9.42 ab	8.98 abA
	$N_{80-0-20} + S$	252.5 ab	181.7 a	72.0 a	27.6 a	9.12 a	8.83 abA
	$N_{60-20-20} + S$	255.3 ab	183.1 a	72.8 a	27.9 a	9.49 a	9.24 aA
	$N_{40-30-30} + S$	251.3 ab	186.1 a	72.5 a	27.6 a	9.36 a	9.05 aA

注 (Note): 数值后不同小、大写字母表示处理间差异分别达 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different small and capital letters mean significant at the 5% and 1% levels among treatments, respectively.

3 种氮肥运筹方式处理较不施氮的对照水稻籽粒产量分别提高 41.7% ~ 60.0% 和 70.7% ~ 83.9%, 平均增产 52.2% 和 76.5%, 达 1% 极显著水平。同时不同氮肥运筹方式处理水稻籽粒产量存在显著差异, 3 种运筹方式中, 无小麦秸秆还田时, 基-蘖-穗肥比例 60-20-20 的 $N_{60-20-20}$ 处理效果最好、水稻籽粒产量最高, 其次是氮肥后移的 $N_{40-30-30}$ 处理, 较不施拔节肥的对照 $N_{80-0-20}$ 分别增产 12.9% 和 9.4%, 达 5% 显著水平, 表明合理的氮肥运筹方式即适当减少前期氮肥基肥的用量增加中后期分蘖肥和穗肥用量, 可以有效提高水稻籽粒产量。但是, 秸秆还田下 $N_{60-20-20}$ 较 $N_{80-0-20}$ 仅增产 5.2%, 增产效应不显著, 而 $N_{40-30-30}$ 不增产还减产 2.3%, 表明氮肥基肥用量也不宜过少, 特别是秸秆还田条件下, 否则前期氮肥供给不足会影响移栽稻田水稻缓苗和分蘖, 导致有效分蘖不足, 成穗率低, 从而影响水稻籽粒产量的提高 (表 1)。2012 年肥西试验结果与此略有差异, 无论是否实施小麦秸秆还田, 追施拔节肥等氮肥后移的运筹方式均能在一定程度上提高水稻籽粒产量, 增产率分别为 7.4% ~ 8.9% 和 2.5% ~ 4.6%, 平均增产 8.2% 和 3.5%, 增产幅度

低于 2011 年, 仅 $N_{60-20-20}$ 处理达 5% 显著水平, 同时 $N_{40-30-30}$ 的增产作用也略低于 $N_{60-20-20}$ 处理, 其原因可能是 2012 年度中期肥西当地干旱, 后期追施拔节肥推迟影响了水稻生长发育, 导致产量差异缩小。

秸秆还田对白土稻田水稻产量及其构成也有明显影响 (表 1)。2011 年长丰试验, 3 种氮肥运筹方式下, 实施小麦秸秆直接还田后, 水稻籽粒产量较不施秸秆的对照分别提高 23.4%、15.0% 和 10.2%, 增产效应达显著或极显著水平, 前期施氮量即基肥用量较多的 $N_{80-0-20}$ 处理增产幅度最大, 其次是中等基肥用量的 $N_{60-20-20}$ 处理, 基肥用量最少的 $N_{40-30-30}$ 处理增产率最低。2012 年肥西试验结果与此相似, 3 种氮肥运筹方式下秸秆还田的增产率分别为 5.5%、1.4% 和 0.8%, 除 $N_{80-0-20}$ 外产量基本持平, 其原因可能是本年度当地干旱导致小麦秸秆腐解缓慢, 释放有效养分较少。这一结果也说明, 实施小麦秸秆直接还田条件下, 制定水稻氮肥运筹方案时, 必须保证一定比例的氮肥基肥用量, 才可能使秸秆及时腐解释放出有效养分供水稻生长发育, 特别是干旱条件下。

本试验水稻结实率较低,其原因可能与当年的天气状况有关。2011年8、9月份,安徽水稻产区遭受低温冷害,水稻灌浆受阻,结实率降低,农民水稻田块结实率下降更严重,部分稻穗甚至没有正常发育结实。2012年夏季,安徽省江淮水稻产区又遭受50年一遇的高温干旱,水稻扬花灌浆又受影响,结实率也低于往年。表1可见,实施秸秆还田,3种氮肥运筹方式下,水稻结实率均有所提高,增幅为0.3~3.0和0.7~1.5个百分点,只是差异没有达显著水平。另外,2011年夏季的低温冷害导致追施氮肥的水稻贪青晚熟,不施秸秆条件下水稻千粒重均有所下降,低于无氮肥的CK, $N_{60-20-20}$ 处理水稻中后期长势最好、晚熟现象更为严重,故千粒重降低也较多,但各处理间差异均不显著;实施秸秆还田后,水稻千粒重有所增加与CK基本持平。2012年试验,秸秆还田水稻千粒重相应也有所提高,并且均高于不施氮肥的对照CK,表明秸秆还田后养分的持续均衡供应对水稻在低温冷害或高温干旱等逆境下维持较高的结实率和千粒重有一定的促进作用(表1)。

2.2 秸秆还田下不同氮肥运筹方式对水稻植株含氮量及氮素吸收量的影响

2.2.1 对水稻植株含氮量的影响 从表2可看出,不同氮肥运筹方式对水稻植株含氮量有明显影响。增施氮肥后,水稻籽粒和秸秆含氮量总体上较不施氮的对照均明显提高,差异达显著水平。其中2011年长丰试验,不施秸秆条件下,3种氮肥运筹方式

中,中等基追肥用量的 $N_{60-20-20}$ 处理水稻籽粒含氮量最高,较不施氮的对照提高11.3%,同时秸秆氮含量降至最低,降幅达15.8%,差异达显著水平。但是,继续减少基肥量而加大追肥量,则会降低籽粒氮素含量而增加秸秆含氮量,高量穗肥的 $N_{40-30-30}$ 处理,籽粒含氮量较 $N_{80-0-20}$ 处理显著下降13.6%,而秸秆氮素含量则显著升高10.6%。秸秆还田条件下,水稻籽粒含氮量也是 $N_{60-20-20} + S$ 处理最高,并且 $N_{40-30-30} + S$ 处理也明显高于对照CK和 $N_{80-0-20} + S$ 处理,而秸秆氮素含量则随后期氮肥用量的增加而提高。2012年肥西试验结果与此相似,无论是否实施小麦秸秆还田,水稻籽粒含氮量均是氮肥基/追比例相近的60-20-20处理水稻籽粒含氮量最高,而秸秆含氮量均随中后期追肥比例的加大而提高。这一结果说明后期氮肥用量过大可能导致秸秆含氮量过高,造成水稻贪青晚熟;适宜的氮肥运筹能有效提高水稻籽粒含氮量,降低秸秆氮素含量,促进氮向籽粒转移。

秸秆还田对水稻植株氮素含量也有明显影响(表2)。2011年长丰试验,与不施秸秆的对照相比,实施秸秆还田的3个处理,水稻籽粒含氮量分别提高-6.6%、10.0%和16.4%,秸秆含氮量升高-4.0%、21.1%和10.1%,表明秸秆还田条件下氮肥后移即增加分蘖肥和穗肥用量更能提高水稻籽粒含氮量,同时增加秸秆氮素含量。2012年肥西试验与此有所不同,水稻籽粒含氮量基本持平并略有下降,秸秆氮素含量明显降低,特别是 $N_{60-20-20} + S$ 处

表2 氮肥不同施用比例对水稻含氮量和氮素吸收量的影响

Table 2 Effect of different proportion of nitrogen application on content and absorption of nitrogen in rice

处理 Treatment	含氮量 N concentration (g/kg)				氮素吸收量 Total N uptake (kg/hm ²)					
	2011		2012		2011			2012		
	长丰 Changfeng		肥西 Feixi		长丰 Changfeng			肥西 Feixi		
	籽粒 Seed	秸秆 Straw	籽粒 Seed	秸秆 Straw	籽粒 Seed	秸秆 Straw	全株 Total	籽粒 Seed	秸秆 Straw	全株 Total
CK	13.76 c	8.73 b	13.54 b	6.92 c	66.3 d	42.0 e	108.3 e	78.1 c	39.9 e	118.0 d
$N_{80-0-20}$	15.21 b	8.90 b	15.49 a	7.48 c	103.8 c	56.5 d	160.3 d	129.7 b	58.3 d	187.9 c
$N_{60-20-20}$	15.32 ab	7.35 c	16.29 a	9.03 ab	118.0 b	56.3 d	174.3 cd	148.5 a	81.9 ab	230.3 a
$N_{40-30-30}$	13.14 c	9.84 a	15.86 a	9.89 a	98.0 c	71.0 c	169.1 d	142.5 a	86.0 a	228.5 ab
$N_{80-0-20} + S$	14.21 bc	8.54 b	15.09 ab	7.23 c	119.6 b	69.5 c	189.2 c	133.3 ab	61.8 d	195.0 c
$N_{60-20-20} + S$	16.85 a	8.90 b	15.76 a	7.46 c	149.3 a	78.2 b	227.5 a	145.6 a	68.4 c	214.0 b
$N_{40-30-30} + S$	15.30 b	10.83 a	15.63 a	9.09 b	125.8 b	86.5 a	212.3 b	141.5 a	79.9 b	221.4 ab

注 (Note): 数值后不同小字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters mean significant at the 5% level among treatments, respectively.

理,其原因可能与气候有关。2012 年当地遭遇干旱,稻田中期缺水,可能影响了小麦秸秆腐烂降解,导致秸秆中的氮素等养分不能及时释放出来供水稻吸收利用,后期水稻有所脱肥。

2.2.2 对水稻植株氮素吸收量的影响 秸秆还田下不同氮肥运筹方式对水稻植株氮素吸收量也有较大的影响(表2)。增施氮肥后,水稻籽粒、秸秆和全株氮素吸收量均大幅度增加,两年两地试验,水稻籽粒吸氮量分别增加 56.6%~125.2% 和 66.1%~90.1%, 秸秆氮素吸收量增多 34.5%~106.0% 和 46.1%~115.9%, 全株氮积累量提高 48.0%~110.1% 和 59.2%~95.3%, 平均增加 79.6% 和 80.0%、65.9% 和 82.3%、74.2% 和 80.8%, 达显著水平。3 种氮肥运筹方式中, 无论是否实施秸秆还田, 水稻籽粒氮素吸收量均是基-蘖-穗肥比例 60-20-20 处理最多, 2011 年较对照 80-0-20 处理分别增加 13.7% 和 24.8%, 2012 年提高 14.5% 和 9.2%, 达显著水平; 其次是 40-30-30 比例处理, 相应增加 5.6% 和 6.2%、4.9% 和 9.9%, 差异不显著。秸秆氮素积累量则随中后期追肥用量的增加而增多, 基-蘖-穗肥比例 40-30-30 处理最多, 两年试验较无分蘖肥的 80-0-20 处理分别增长 14.5% 和 17.0%、41.0% 和 29.3%, 同样达显著水准。全株氮素积累量, 2011 年试验以基-蘖-穗肥比例 60-20-20 处理最多, 其次是 40-30-30 比例处理, 较 80-0-20 处理分别增加 8.7% 和 5.5%、20.2% 和 12.2%, 实施秸秆还田时差异达显著水平; 2012 年试验无秸秆还田时也是 60-20-20 比例最多, 秸秆还田时则是 40-30-30 比例最多, 分别增长 22.6% 和 9.7%、21.6% 和 13.5%, 差异显著。这一结果说明, 适当增加中后期氮肥追施量, 可以有效提高水稻籽粒氮素积累量, 但比例不宜过大, 否则氮素会较多地向秸秆转移并积累。

秸秆还田对水稻植株氮素吸收量也有所影响(表2)。2011 年长丰试验, 增施秸秆的 3 个处理较不施秸秆的对照, 籽粒、秸秆和全株氮素吸收量分别增加 15.2%~28.4%、23.0%~38.9% 和 18.0%~30.5%, 平均增多 23.4%、27.9% 和 24.7%, 表明实施小麦秸秆还田能有效促进后季水稻对氮的吸收, 提高氮素积累量。2012 年肥西试验有所不同, 除 80-0-20 外, 另 2 种氮肥运筹方式下, 施秸秆处理籽粒、秸秆和全株氮素吸收量较不施秸秆的对照均有所减少, 其中籽粒差异不明显, 秸秆下降较多, 全株也有所减少, 尤其是 $N_{60-20-20}$

下, 差异达显著水平(表2), 其原因可能是当年干旱时氮肥基施比例减少影响了秸秆腐解与养分释放, 减少了水稻对氮的吸收和在秸秆中的积累。

2.3 秸秆还田下不同氮肥运筹方式对水稻氮素利用效率的影响

2.3.1 对氮素干物质生产效率、稻谷生产效率、收获指数和百公斤籽粒吸氮量的影响 从表3可看出, 秸秆还田结合氮肥运筹方式对白土稻田水稻氮素干物质生产效率、稻谷生产效率、收获指数和百公斤籽粒吸氮量有明显的影响。2011 年试验, 不施秸秆条件下, 3 种氮肥运筹方式中, 基肥-分蘖肥-穗肥比例 60-20-20 的 $N_{60-20-20}$ 处理效果最好, 氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率、氮收获指数均最高, 较 $N_{80-0-20}$ 处理分别提高 5.96、1.62 和 2.95 个百分点; 其次是 $N_{40-30-30}$ 处理, 除 NHI 降低外, NDMPE 和 NGPE 相应提高 4.65 和 1.55 个百分点。百公斤籽粒吸氮量, $N_{60-20-20}$ 处理最低, $N_{40-30-30}$ 处理接近最低。这一结果也说明, 适当减少氮肥基施用量, 增加中后期分蘖肥和穗肥用量, 能有效提高水稻氮素干物质生产效率、稻谷生产效率和收获指数, 降低百公斤籽粒氮素吸收量。但是秸秆还田条件下, 结果有些不同, 除氮素收获指数 $N_{60-20-20} + S$ 处理最高外, 氮素干物质生产效率和氮素稻谷生产效率均随中后期追肥量的增加而下降, $N_{40-30-30} + S$ 处理最低, 差异显著; 而百公斤籽粒吸氮量则是其最高, 表明秸秆还田后, 减少氮肥基施用量影响了前期水稻生长发育, 减少了植株干物质的积累, 同时后期追施氮肥增加了秸秆氮素积累量, 导致稻谷生产效率下降、百公斤籽粒吸氮量升高。2012 年试验有所差异, 无秸秆还田时, NDMPE、NGPE 和 NHI 也像秸秆还田时一样, 均随后期追肥量的增加而下降, 而百公斤籽粒吸氮量则相应升高, 其原因也是如此。实施秸秆还田时, 其趋势与 2011 年基本一致(表3)。

2.3.2 对氮素农学效率、氮肥利用率、生理效率和偏生产力的影响 表3可看出, 秸秆还田下不同氮肥运筹方式对白土稻田水稻氮素农学效率、生理效率、偏生产力和氮肥利用率也有较大的影响。2011 年试验, 无论是否实施小麦秸秆还田, 3 种氮肥运筹方式中均是氮肥适当后移, 即基肥-分蘖肥-穗肥比例 60-20-20 的处理, 氮素农学效率、氮肥回收利用率和偏生产力 3 项指标达最高值, 较 80-0-20 比例处理农学效率分别提高籽粒 4.90 和 2.44 kg/kg N, 氮肥利用率提高 7.82 和 21.29 个百分点,

偏生产力提高 4.90 和 2.44 个百分点, 差异达显著水平; 其次是基肥-分蘖肥-穗肥比例 40-30-30 的处理, 除秸秆还田条件下氮农学效率较低外, 其他指标也明显高于 80-0-20 比例处理。氮素生理效率, 无秸秆还田条件下也是基-蘖-穗肥比例 60-20-20 的处理最高, 40-30-30 比例次之(表 3)。2012 年试验结果与此相似, NAE、NARE 和 NPFP 基本上也是 60-20-20 比例最高。

实施小麦秸秆直接还田也能有效提高水稻氮肥利用效率(表 3)。与无秸秆的对照相比, 实施秸秆还田后, 3 种氮肥运筹方式下, 2011 年水稻氮素农学效率分别增加籽粒 8.88、6.42 和 4.23 kg/kg N, 氮肥利用率提高 16.1、29.5 和 24.0 个百分点, 相对提高 55.6%、80.4% 和 71.0%, 基肥-分蘖肥-穗肥运筹比例 40-30-30 的处理氮肥利用率提高的幅度最大。

表 3 秸秆还田下氮肥运筹对水稻氮素利用效率的影响

Table 3 Effect of the split nitrogen application strategies on the nitrogen efficiency of rice

年度 Year	处理 Treatment	氮干物质 生产效率 NDMPE (kg/kg, N)	氮素稻谷 生产效率 NGPE (kg/kg, N)	氮素收获 指数 NHI (%)	氮素农学 效率 NAE (kg/kg, N)	氮肥 利用率 NARE (%)	氮素偏 生产力 NPFP (kg/kg, N)	氮素生理 效率 NPE (kg/kg)	百公斤籽粒 吸氮量 N uptake of 100 kg-grain (N kg/100 kg)
2011	CK	88.92 a	44.48 a	61.21 ab					2.25 b
	长丰 N ₈₀₋₀₋₂₀	82.18 ab	42.57 a	64.74 a	11.14 d	28.89 e	37.90 e	38.58 b	2.35 ab
Changfeng	N ₆₀₋₂₀₋₂₀	88.14 a	44.19 a	67.69 a	16.04 c	36.71 d	42.80 b	43.70 a	2.26 b
	N ₄₀₋₃₀₋₃₀	86.83 a	44.12 ab	57.98 b	14.69 c	33.78 d	41.44 bc	43.48 ab	2.27 ab
	N ₈₀₋₀₋₂₀ + S	87.55 a	44.50 a	63.24 ab	20.02 b	44.95 c	46.77 ab	44.53 a	2.25 b
	N ₆₀₋₂₀₋₂₀ + S	77.58 ab	38.94 b	65.61 a	22.46 a	66.24 a	49.21 a	33.90 bc	2.57 a
	N ₄₀₋₃₀₋₃₀ + S	76.35 b	38.73 b	59.26 ab	18.92 b	57.78 b	45.68 ab	32.75 c	2.58 a
2012	CK	97.73 a	48.89 a	66.20 ab					2.05 b
	肥西 N ₈₀₋₀₋₂₀	85.99 ab	44.54 a	68.99 a	14.46 c	38.86 c	46.50 b	37.20 ab	2.25 ab
Feixi	N ₆₀₋₂₀₋₂₀	78.93 b	39.57 ab	64.46 ab	18.59 ab	62.42 a	50.63 ab	29.78 c	2.53 a
	N ₄₀₋₃₀₋₃₀	77.38 b	39.32 b	62.36 b	17.87 ab	61.41 a	49.92 ab	29.10 c	2.54 a
	N ₈₀₋₀₋₂₀ + S	89.08 a	45.28 a	68.33 ab	17.02 b	42.81 c	49.06 ab	39.75 a	2.21 ab
	N ₆₀₋₂₀₋₂₀ + S	86.01 ab	43.17 ab	68.04 ab	19.29 a	53.38 b	51.34 a	36.15 b	2.32 a
	N ₄₀₋₃₀₋₃₀ + S	80.59 ab	40.89 ab	63.91 ab	18.26 ab	57.48 ab	50.30 ab	31.76 c	2.45 a

注 (Note): NDMPE—Nitrogen dry matter production efficiency; NGPE—Nitrogen grain production efficiency; NHI—N harvest index; NAE—Agronomy efficiency of nitrogen applied; NARE—Nitrogen apparent recovery efficiency; NPFP—Partial factor productivity of nitrogen; NPE—Physiological efficiency of nitrogen. 数值后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters mean significant at the 5% level among treatments, respectively.

3 讨论与结论

3.1 秸秆还田下氮肥基追比例对水稻产量的影响

江淮丘陵白土区是安徽省一季稻重要产区, 水稻灌浆成熟期易遇到连阴雨天气导致倒伏而减产, 并影响收割, 农民习惯施肥较多采用“重施基肥、早施分蘖肥”的氮肥运筹方式, 有的甚至不追肥, 这样水稻前期生长旺盛, 分蘖多, 依靠增加穗数来提高籽粒产量^[4]。但是这种重施基肥的传统氮素施肥模式也有很多缺陷: 水稻无效分蘖多, 后期易

脱肥早衰, 籽粒产量不高; 氮素流失多, 降低了肥料利用率, 增加了生产成本, 还加重了环境污染。现代稻作提倡氮肥后移, 适当减少基肥施用量, 增加后期追肥量, 在稳定适宜穗数的基础上, 增加穗粒数, 实现水稻高产^[8-18]。但是, 试验条件不同, 适宜的氮肥基追比例差异较大^[8-18], 特别是秸秆还田条件下。本研究表明, 基-蘖-穗肥比例 60-20-20 的处理最好、水稻结实率提高, 每穗粒数明显增多, 籽粒产量最高, 增产效应显著, 表明合理的氮肥运筹方式即适当减少前期氮肥基肥用量增加中后

期分蘖肥和穗肥用量,可有效提高水稻籽粒产量。但是氮肥基施用量也不宜过低,特别是秸秆还田条件下,氮肥后移的 $N_{40-30-30}$ 处理,增产不显著,秸秆还田下甚至减产,说明不宜盲目或过量进行氮肥后移,否则前期氮肥供给不足会影响秸秆腐烂分解、释放出有效养分供水稻生长发育以及养分的均衡供应,影响移栽稻田水稻缓苗与分蘖,导致有效分蘖不足,降低成穗率,从而影响水稻籽粒产量的提高,与万靓军、吴文革等在江苏、安徽的研究结果 59% 和 50:25:25 基施比例相似而与北方存在较大差异,可能北方水稻品种、生育期和土壤条件等与此差异较大有关^[4-5]。

3.2 秸秆还田下氮肥基追比例对水稻氮素吸收利用的影响

氮肥不同基追比例运筹方式对水稻含氮量和氮素吸收量也有明显影响。有关研究表明,氮肥后移增施穗肥,能为水稻整个生育期提供比较平衡的氮素供应,可促进水稻对氮的吸收,提高氮肥当季利用效率^[4,10]。潘圣刚等指出,相同氮素水平下氮肥后移采用基肥:分蘖肥:穗粒肥=30:20:50 的施肥比例,水稻成熟期氮素积累总量比 40:30:30 增加 15.4%^[11]。但是,氮肥后移比例过重会显著降低结实期叶片和茎鞘养分转运总量,氮肥后移量占总施氮量的 40%~60% 为宜^[13]。本研究结果,基-蘖-穗肥用量 60-20-20 的处理水稻籽粒含氮量最高,氮素吸收量最多,无秸秆还田时秸秆含氮量降至最低。但是,继续减少基肥量而加大追肥量,则会显著降低籽粒氮素含量而增加秸秆含氮量,秸秆和全株氮素积累量则随中后期追肥量的增加而增多。这一结果说明,氮肥后移比例不宜过大,否则氮素会较多地向秸秆转移并积累,导致秸秆含氮量过高,造成水稻贪青晚熟;适宜的氮肥运筹能有效提高水稻籽粒含氮量,降低秸秆氮素含量,促进氮向籽粒转移,与孙永健等研究结果一致^[13]。

3.3 秸秆还田下氮肥基追比例对水稻氮素利用效率的影响

肥料利用效率是评价施肥效应的重要指标,常用的是农学效率和回收利用率。吴文革等^[4]研究表明,增加穗肥比例提高了氮肥当季利用率、回收率和收获指数,早稻基:蘖:穗肥 50:25:25 的氮肥运筹模式最好,氮肥农艺效率也最高。张满利等^[9]指出,合理的氮肥运筹方式能够显著提高水稻氮肥吸收利用率。胡健锋等^[16]研究结果,同一施氮水平下提高穗肥比例,氮素运转效率、收获指数、农

学效率、生理利用率和氮素当季利用率增加,稻谷生产效率降低。本研究发现,适当减少氮肥基施用量,增加中后期分蘖肥和穗肥用量,能有效提高水稻氮素干物质生产效率、稻谷生产效率、收获指数、氮素农学效率、氮肥回收利用率和偏生产力,降低百公斤籽粒氮素吸收量。但是,氮肥基肥比例不宜过低、氮后移比例不能过大,否则会降低氮素利用效率,与前人的研究结果一致。

以上分析说明,氮肥基追比例运筹对水稻产量和氮素吸收利用具有多方面的影响。综合考虑水稻产量、氮素吸收量和氮肥利用效率,安徽省江淮丘陵低产白土单季稻区,秸秆还田条件下,水稻基肥-分蘖肥-穗肥施用比例,以 60-20-20 运筹方式较为适宜,水稻籽粒产量高,籽粒含氮量升高、氮吸收量增多,氮肥利用效率提高。

参考文献:

- [1] 程勇翔,王秀珍,郭建平,等. 中国水稻生产的时空动态分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3473-3485.
Cheng Y X, Wang X Z, Guo J P, et al. The temporal-spatial dynamic analysis of China rice production [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45 (17): 3473-3485.
- [2] 国家统计局. 2010 年全国农作物生产统计调查资料[M]. 2013. National Bureau of Statistics of China. The statistical investigation data of agricultural crop production in 2010 of China[M]. 2013.
- [3] 安徽省统计局. 安徽农村统计调查资料[M]. 2013. Bureau of Statistics of Anhui Province. The statistical investigation data of countryside of Anhui province in 2013[M]. 2013.
- [4] 吴文革,张四海,赵决建,等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 757-764.
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J, et al. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 757-764.
- [5] 万靓军,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. Effect of different proportion of nitrogen application on yield and quality of rice Liangyoupeijiu [J]. Journal of Yangzhou University, 2005, 26 (1): 69-72.
- [6] 刘立军,王志琴,桑大志,等. 氮肥运筹对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 扬州大学学报, 2002, 23(3): 46-50.
Liu L J, Wang Z Q, Sang D Z, et al. Effect of nitrogen management on rice yield and grain quality [J]. Journal of Yangzhou University, 2002, 23(3): 46-50.
- [7] 田智慧,潘晓华. 氮肥运筹及密度对超高产水稻中优 752 的产量及产量构成因素的影响[J]. 江西农业大学学报, 2007,

- 29(6): 894–898.
- Tian Z H, Pan X H. Effects of nitrogen application and plant density on yield and its components of super high hybrid rice Zhongyou752 [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2007, 29(6): 894–898.
- [8] 王宇, 苏平, 付立东. 氮肥运筹对超级稻盐丰 47 产量及氮素利用率的影响[J]. *北方水稻*, 2007, (5): 40–43.
- Wang Y, Su P, Fu L D. Effect of N-management on the yield of Yanfeng 47, a super rice variety, and nitrogen use efficiency [J]. *North Rice*, 2007, (5): 40–43.
- [9] 张满利, 陈盈, 侯守贵, 等. 氮肥运筹对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *作物杂志*, 2010, (6): 46–50.
- Zhang M L, Chen Y, Hou S G, *et al.* Effect of nitrogen management on the yield and N use efficiency of rice [J]. *Crops*, 2010, (6): 46–50.
- [10] 林忠成, 李土明, 吴福观, 等. 基肥与穗肥氮比例对双季稻产量和碳氮比的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2): 269–275.
- Lin Z C, Li T M, Wu F G, *et al.* Effects of nitrogen application on yield and C/N of double-cropping rice [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 269–275.
- [11] 潘圣刚, 翟晶, 曹凑贵, 等. 氮肥运筹对水稻养分吸收特性及稻米品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 522–527.
- Pan S G, Zhai J, Cao C G, *et al.* Effects of nitrogen management practices on nutrition uptake and grain qualities of rice [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 522–527.
- [12] 林洪鑫, 肖运萍, 刘方平, 等. 水分管理与氮肥运筹对超级早稻两优 287 产量和氮素吸收的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012, (6): 34–40.
- Lin H X, Xiao Y P, Liu F P, *et al.* Effects of water management and nitrogen application strategies on yield and nitrogen absorption of super early rice “liangyou 287” [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012, (6): 34–40.
- [13] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(12): 2221–2232.
- Sun Y J, Sun Y Y, Liu S J, *et al.* Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12): 2221–2232.
- [14] 刘代银, 伍菊仙, 任万军, 等. 氮肥运筹对免耕高留茬抛秧稻氮素吸收、运转和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(3): 514–521.
- Liu D Y, Wu J X, Ren W J, *et al.* Effects of nitrogen strategies on nitrogen uptake, utilization and grain quality of broadcasted rice under no tillage with high standing stubbles [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 514–521.
- [15] 张秀芝, 易琼, 朱平, 等. 氮肥运筹对水稻农学效应和氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 782–788.
- Zhang X Z, Yi Q, Zhu P, *et al.* Agronomic responses to nitrogen application and nitrogen utilization in rice fields [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 782–788.
- [16] 胡剑锋, 张培培, 赵中操, 等. 麦茬长秧龄条件下氮肥对机插水稻氮素利用效率及产量影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 1318–1326.
- Hu J F, Zhang P P, Zhao Z C, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiency and yield of machine-transplanted long-age rice seedling [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1318–1326.
- [17] 徐琪. 长江中下游白土的地理分布规律及其形成过程的特点[J]. *土壤学报*, 1962, 10(1): 44–54.
- Xu Q. The geographical distribution law and forming process characteristic of white soil in the middle and lower reach of Yangtse River [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1962, 10(1): 44–54.
- [18] 李勇, 曹红娣, 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, Cao 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.
- [19] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- Nanjing Agricultural University. *Analysis methods of soil agricultural chemistry* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994.