

秸秆还田下氮肥用量对水稻产量及养分吸收的影响^①

汪 军^{1,2}, 王德建^{1*}, 张 刚¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

Effects of Different Nitrogen Fertilizer Rate with Straw Incorporated on Rice Yield and Nutrient Uptake

WANG Jun^{1,2}, WANG De-jian¹, ZHANG Gang¹

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘 要: 通过田间试验研究了秸秆全部还田条件下不同N肥用量对水稻产量和养分吸收的影响。结果表明, 在秸秆还田条件下, 施用N肥可以明显提高产量, 但并不是越多越好, 当N肥用量超过 240 kg/hm²时, 水稻产量不再随N肥用量而增加; 随着N肥用量的增加, 秸秆和籽粒中的N、P含量均与对照处理不同, 籽粒中N、P含量分别是秸秆的 1.7~2.6 倍和 1.6~3.5 倍, 这一比例随N肥用量的增加而减小。秸秆还田下, 太湖地区高产水稻田的最佳N肥用量控制在 180~240 kg/hm², 可以获得较高的产量和N肥利用率。

关键词: 秸秆还田; 氮肥用量; 水稻产量; 养分吸收

中图分类号: S314

氮(N)肥是作物生长发育的必需营养元素, 多数土壤的含N量较低, 施用N肥为作物补充N素是保证作物高产的重要措施, 但过高的肥料施用量不能带来相对等的产量增加值, 除了被植株吸收的那一部分外, 多余的部分都通过淋溶、固定、挥发等途径损失掉^[1-4], 且过高的养分供应还会导致作物徒长、易倒伏以及虫害增强, 同时造成作物对肥料的奢侈吸收而不能有效地转化到籽粒中^[5-6], 导致籽粒充实度降低。我国秸秆资源丰富, 据统计全国每年共产秸秆 6.2 亿 t, 约占世界的 20%~30%^[7], 秸秆还田作为秸秆利用的一种重要方式, 既可以避免资源浪费和环境污染^[7-9], 而且可以提高土壤的养分水平, 改善土壤结构和理化性状, 优化农田生态环境, 维持作物高产^[7,9-15]。秸秆还田条件下配合N肥使用, 会改善土壤和作物体内N素之间的转化, 提高N肥利用率^[16]。

关于N肥用量对水稻产量及其构成要素的影响已有大量研究, 同时关于秸秆还田对土壤质量的影响也有较多的报道, 但将秸秆还田和N肥用量结合起来研究其对水稻产量及构成要素的影响还少见报道。本研究正是探讨秸秆还田条件下, 不同N肥用量对水稻生长状况的影响。通过对水稻产量及其构成要素和水稻养分累积状况与施N水平关系的分析, 明确秸秆还田条件下N肥用量对水稻生长及产量的影响, 为农田N肥管理提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验设计

试验位于太湖地区常熟市辛庄镇中国科学院常熟农业生态实验站(31°32.93'N, 120°41.88'E), 该站位于长江三角洲腹地, 处于亚热带北部湿润季风气候区, 年

①基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KSCX2-YW-N-038和KZCX2-YW-440)和江苏省太湖专项(BK2007750)资助。

* 通讯作者(djwang@issas.ac.cn)

作者简介: 汪军(1983—), 男, 安徽舒城人, 博士研究生, 主要从事农田生态环境方面的研究。E-mail: jwang@issas.ac.cn

平均气温 16.6℃, 最高气温 37.7℃, 最低气温 -6.1℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的有效积温 4933.7℃, 年降雨量 1316 mm, 年日照 1745 h, 年平均太阳总辐射量 $4.94 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$, 无霜

期 231 天^[6]。站区海拔 3.2 m, 地下水埋深 80 cm 左右。试验区土壤类型为竖头乌栅土(系统分类名: 普通筒育水耕人为土), 其耕层土壤的基本理化性状见表 1。

表 1 供试土壤的基本性状

pH	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	碱解 N (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)	CEC (cmol/kg)
7.46	40.28	2.24	0.74	18.7	161	8.43	123	21.1

试验设麦秸(M) 全量还田下N肥用量 0、120、180、240、300 kg/hm² (分别以N0、N120、N180、N240、N300 表示) 5 个水平, 每个处理 3 次重复, 随机区组排列, 小区的面积为 30.3 m²。N肥(尿素)按照基肥: 分蘖肥: 拔节肥为 4:2:4 的比例施入, P、K肥均作基肥一次施入, 其用量分别为 15 kg/hm² 与 60 kg/hm² (N、P、K肥的用量均以元素态计, 下同)。

1.2 调查内容与样品采集

试验自 2007 年 6 月 20 日水稻移栽开始到 2007 年 10 月 23 日水稻收获, 在水稻生长期里, 观测记录水稻生长、分蘖与成穗状况。每个小区各选取 3 个点, 每个点选取 5 穴稻株, 自 7 月 9 日起每 7 天观测 1 次水稻分蘖与生长状况。试验的田间管理措施按照当地习惯方式进行。

水稻成熟后, 各个小区随机选取 5 穴水稻连根挖起去根, 随机选取 25 株, 测定其地上部生物量、株高、穗长、空瘪粒数、籽粒重等参数, 以确定水稻生长状况; 同时测定水稻秸秆和籽粒中的 N、P、K 养分含量。水稻秸秆和籽粒用湿灰化法(H₂O₂-H₂SO₄) 消煮, 分别用开氏法、钼蓝比色法、火焰光度法测定 N、P、K 养分含量^[17]。

1.3 产量测定及数据分析

水稻收获时各试验小区单独收获计产, 按 14% 的含水量折算产量^[13]。试验数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPASS15.0 进行分析。

2 结果与讨论

2.1 氮肥用量对水稻分蘖及地上部生长的影响

田间试验结果表明(图 1), N肥用量的增加, 分蘖数随之增加, 但当N肥用量超过N240 时, 再增加N肥用量水稻分蘖数反而下降。水稻分蘖倍数随着N肥用量的增加呈逐步增加的趋势, 但水稻的成穗率反而随N肥用量增加有所下降(表 2), 这可能是由于在秸秆还田初期, 秸秆分解过程与水稻生长过程之间的争N作用

所引起的^[18-19]。增加N肥用量可以降低这种抑制作用, 随着这种抑制作用的减弱, N肥出现相对过剩, 则导致水稻高峰苗降低, 这可能因为N肥过多, 导致水稻烧苗以及病虫害加剧所引起的, 具体原因还需进一步研究。田智慧等^[20]认为增施N肥能够有效提高有效穗数和每穗粒数, 但随着N肥用量的增加, 形成分蘖过多, 总分蘖数过多, 过早出现高峰苗, 形成早衰, 导致成穗率下降。

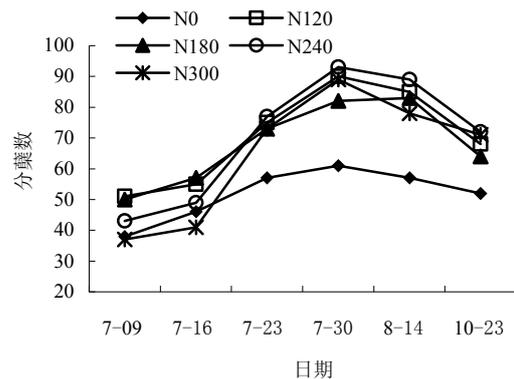


图 1 N 肥用量对水稻分蘖的影响

N肥用量对水稻地上部分生物量影响也较大。从表 2 可以看出, 随着N肥用量的增加, 地上部分的生物量逐渐增加, 当N肥用量超过N180 处理时, 随着N肥用量的增加, 地上部分生物量逐渐降低; 与地上部分生物量变化一样, 籽粒产量也是先增加再降低, 各处理间无显著差异。而谷秆比则随着N肥用量的增加而减小, 各处理间的谷秆比有显著差异, N0 处理最大, N300 处理最小。这是因为过高的N素供应会导致水稻徒长, 易倒伏以及病虫害的增强, 同时造成了水稻对养分的奢侈吸收而不能有效地转化到籽粒中^[4], 且过高的N肥施用还使得养分器官转运率明显降低, 水稻贪青晚熟^[21], 水稻的谷秆比降低, 从而导致结实率随着N肥用量增加而降低。

表 2 N 肥用量对水稻分蘖与地上部分生物量的影响

处理	分蘖倍数	成穗率 (%)	地上部生物量 (g)	籽粒重 (g)	秸秆重 (g)	谷杆比
N0	1.61 b	85.2 a	333.3 a	181.0 a	156.2 b	1.19 a
N120	1.76 b	75.2 a	394.5 a	204.4 a	190.1 ab	1.10 ab
N180	1.64 b	78.0 a	415.7 a	203.0 a	212.7 a	0.97 cd
N240	2.16 ab	77.4 a	410.9 a	204.2 a	206.7 a	1.01 b
N300	2.41 a	79.8 a	403.9 a	189.8 a	214.1 a	0.90 d

注：水稻分蘖与地上部分生物量以 5 穴水稻计算；同列不同小写字母表示处理间差异显著（LSD, $p < 0.05$ ），下同。

2.2 氮肥用量对水稻产量及构成因素的影响

水稻产量主要构成因素为每亩穗数、每穗粒数、粒重。水稻各产量构成要素及产量随N肥用量的变化如表 3 所示。结果表明，随着N肥用量的增加，各处理水稻每穗粒数和千粒重基本一致，但水稻的结实率却随着N肥用量的增加而逐渐减少，N300 处理的结实率仅为 66.3%，而N0、N120 处理的结实率分别为 71.4%、78.9%。这可能是N肥用量过高，导致水稻倒伏，使得

水稻灌浆受阻，引起瘪粒数增加造成的。已有的研究也表明，N肥用量过高，导致水稻贪青晚熟，降低了营养器官养分运转率与水稻籽粒充实度和千粒重^[21]。方差分析表明，N肥用量对水稻株高有显著的影响，但对水稻穗长没有明显影响；随着N肥用量的增加，单位面积水稻穗数存在显著差异，N300、N240 处理有效穗数显著高于N180、N120、N0 处理，其中N0 处理有效穗数最少，N240 处理最多。

表 3 N 肥用量对水稻产量构成因素的影响

处理	株高 (cm)	穗数 (万/hm ²)	每穗粒数	结实率 (%)	千粒重 (g)	理论产量 (kg/hm ²)	实际产量 (kg/hm ²)
N0	86.4 a	170.6 a	160	92.8	27.5	6966	7155 a
N120	91.7 b	224.4 b	161	84.0	29.6	8987	7840 b
N180	92.7 bc	226.4 b	161	76.8	29.1	8154	8276 c
N240	92.3 bc	248.0 c	160	78.9	28.8	9028	8543 d
N300	94.5 c	244.6 c	166	66.3	28.1	7571	8007 b

注：株高为 25 株平均值。

根据水稻产量构成因素算得水稻理论产量如表 3，随着N肥用量的增加水稻的理论产量也是逐渐增加。实际产量与理论产量之间的差距随N肥用量的增加逐渐增加，说明当N肥用量超过一定范围后，过多地施用N肥增长效果越来越小，有时可能会导致减产。因为在适宜施N量附近，随着N肥用量的增加，水稻产量变化减缓，继续增施N肥水稻产量会下降^[22]。随着N肥用量增加，水稻实际产量呈先增加后减少的趋势，对其产量与N肥用量之间的关系进行拟合，其拟合方程为 $y = -0.024x^2 + 10.719x + 7098.3$ ， $R^2 = 0.8823$ （图 2），当 $x = 223$ 时， y 有极大值 8295，即当施N量为 223 kg/hm²，水稻最高产量为 8295 kg/hm²。因此其最佳N肥用量为 223 kg/hm²。这比当地农户的N肥用量要少 140 kg/hm² 左右，若按每千克N肥 4.8 元人民币计算，每公顷大约可以节约 672 元人民币，如果算上过量N肥造成减产损

失，每公顷大约可以节约 1072 ~ 1472 元人民币。这表明过量施用N肥不仅不能促进水稻生长和提高产量，而且增加了农民成本。

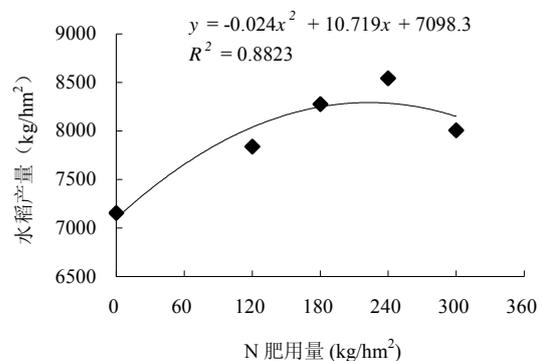


图 2 不同 N 肥用量对水稻产量的影响

2.3 氮肥用量对水稻养分吸收的影响

2.3.1 N肥用量对水稻籽粒养分含量的影响 秸秆还田条件下N肥用量对水稻籽粒养分含量的影响表明(图3、4、5), N肥能够显著增加水稻籽粒中N、K养分含量, 而对P的影响不明显。方差分析表明, 籽粒中N含量N0与N120处理之间没有显著差异, 但显著低于N180、N240、N300处理, 而N240与N300处理之间没有显著差异。这表明N肥用量超过240 kg/hm²时, 随着N肥用量的增加, N素向籽粒运转的

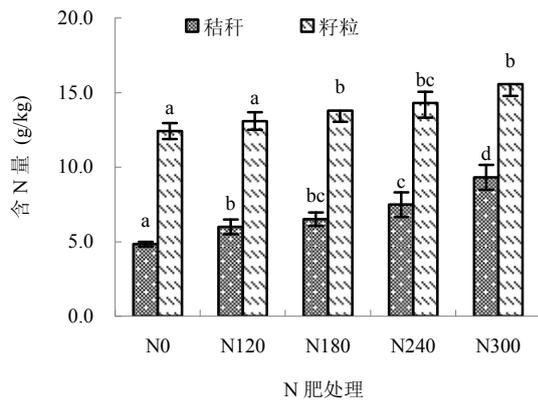


图3 不同N肥用量秸秆与籽粒中N含量

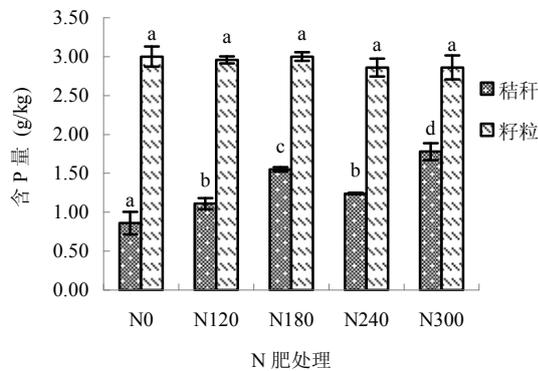


图4 不同N肥用量秸秆与籽粒中P含量

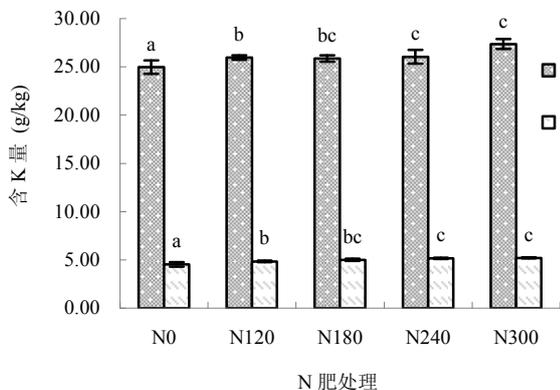


图5 不同N肥用量秸秆和籽粒中K含量

能力逐渐降低。这可能与水稻土壤对N素的吸收

收, 使得N素不能有效地向籽粒中运转^[4]。籽粒中K素含量N0处理与其余处理之间存在显著差异, N120处理显著低于N240、N300处理, N180~N300处理之间无显著差异。不同N肥处理之间籽粒中P素含量没有显著差异, 可能是因为各处理P、K用量相同的原因。

从试验结果看, 随着N肥用量的增加, 各处理籽粒中N、P、K养分含量呈增加的趋势(图3、4、5), 其含量分别为12.4~15.7、2.86~3.00和4.50~5.20 g/kg。各施N处理籽粒中N的含量分别比N0处理增加5.4%~25.3%, 籽粒中K的含量分别比N0处理增加6.8%~14.8%, 这可能是由于随着N肥用量的增加, 增强了水稻根系活力, 从而促进了水稻对K的吸收, 也可能是秸秆还田使得土壤中K的含量增加引起的^[22]; 籽粒中P的含量随N肥用量增加基本不变。

2.3.2 N肥用量对水稻秸秆中养分含量的影响 N肥用量对水稻秸秆中养分含量的影响表明(图3、4、5), 不同N肥处理对水稻秸秆中N、P的影响较大, 对秸秆中K的影响不大。方差分析显示, 秸秆中N含量随着N肥用量的增加而增加, 不同处理之间差异显著; 秸秆中P的含量除N240处理外, 均随N肥用量的增加而增加, 不同处理间有显著差异, 这可能是由于秸秆还田增加了土壤中P的含量^[21], 使得水稻秸秆中P的含量增加; 不同N肥处理秸秆中K的含量N0处理最低、N300处理最高, 并且与其余处理之间有显著差异。

随着N肥用量的增加, 秸秆中N的含量由N0处理的4.80 g/kg增加到N300处理的9.30 g/kg, N120、N300处理比N0处理分别增加24.0%和93.0%; 秸秆中P的含量由N0处理的约0.90 g/kg增加到N300处理的1.80 g/kg, 增加了107%; 秸秆K的含量在25.00~27.40 g/kg之间, K的最大增幅仅9.66%, 远小于秸秆中N、P的变化。总体上, N肥用量的增加, 秸秆各养分含量均呈增加的趋势, 其中N、P的增加明显, 籽粒N的含量是秸秆的1.7~2.6倍, 籽粒P的含量是秸秆的1.6~3.5倍, 这个比例随着N肥用量的增加而减小; 秸秆K的含量明显高于籽粒(图3、4、5)。闫德智等^[24]认为随着N肥用量的增加, 植株含N量的增幅变小, 稻谷含N量约是茎秆含N量的1.6~2.2倍, 该比值随着N肥用量的增加而降低, 这与本研究结果基本一致。

3 结论

(1) 秸秆还田下N肥用量对水稻产量及养分吸收均有显著影响。过高N肥用量可以增加水稻分蘖, 但导致水稻早衰, 降低水稻成穗率; 水稻谷杆比、结实率与千粒重均随着N肥用量的增加而显著下降; 供试土壤

水稻的适宜N肥用量应该控制在 180~223 kg/hm²之间,可以获得较高的N肥利用率和经济效益。

(2) 秸秆还田条件下,水稻籽粒和秸秆中 N 含量随施 N 量增加而显著增加;籽粒中 P 的含量随施 N 量增加而明显减少,秸秆中 P 的含量随施 N 量增加而增加;施 N 量对植株中 K 素含量无明显影响。

参考文献:

- [1] 李伟波, 吴留松, 廖海秋. 太湖地区高产稻田的氮肥施用与作物吸收利用研究. 土壤学报, 1997, 34 (1): 61-73
- [2] 刑光熹, 施书莲, 杜丽娟, 曹亚澄, 孙国庆, 沈光裕, 孙德玲. 苏州地区水体氮污染状况. 土壤学报, 2001, 38(4): 540-546
- [3] 吕耀. 氮素损失在农业生态系统中的非点源污染. 农业环境保护, 1998, 17(1): 35-39
- [4] 吴萍萍, 刘金剑, 周毅, 谢小立, 沈其荣, 郭世伟. 长期不同施肥制度对红壤稻田肥料利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 277-283
- [5] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland Buresh, Christian Witt. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. 中国农业科学, 2002, 35 (9): 1095-11031
- [6] 连纲, 王德建, 林静慧, 闫德智. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1879-1883
- [7] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农业生态系统和作物生长的影响. 土壤通报, 2001, 32(5): 209-213
- [8] 姚政, 王树红, 汪寅虎, 将小华. 上海郊区秸秆还田现状与对策初探. 农业科学与发展, 2001(3): 40-43
- [9] 王振忠, 李庆康, 吴敬民, 钱永根, 赵金元, 顾建东. 稻麦秸秆全量直接还田技术对土壤的培肥效应. 江苏农业科学, 2000(4): 47-49
- [10] 洪春来, 魏幼璋, 黄锦法, 王润屹, 杨肖娥. 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. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(6): 627-633
- [11] 孙星, 刘勤, 王德建, 张斌. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响. 土壤, 2007, 39 (5): 782-786
- [12] 王国忠, 杨佩珍. 麦秸还田及水稻氮肥配施技术研究. 土壤肥料, 2001(6): 34-37
- [13] Rautaray SK, Ghosh BC, Mittra BN. Effect of fly ash, organic wastes and chemical fertilizers on yield, nutrient uptake, heavy metal content and residual fertility in a rice-mustard cropping sequence under acid lateritic soils. Bioresource Technology, 2003, 90: 275-283
- [14] Rahmana MA, Chikushia J, Saifizzamanb M, Lauren JG. Rice straw mulching and nitrogen response of no-till wheat following rice in Bangladesh. Field Crops Research, 2005, 91: 71-81
- [15] 王宁, 闫洪奎, 王君, 李必富, 张永坤, 曹敏建. 不同量秸秆还田对玉米生长发育及产量影响的研究. 玉米科学, 2007, 15(5): 100-103
- [16] Kennedy C, Bell P, Caldwell D, Habetz B, Rabb J, Alison MA. Nitrogen application and critical shoot nitrogen concentration for optimum grain and seed protein yield of pearl millet. Crop Sci., 2002, 42: 1966-1973
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [18] 徐国伟, 吴长付, 刘辉, 王志琴, 张敏, 杨建昌. 麦秸还田及氮肥管理技术对水稻产量的影响. 作物学报, 2007, 33(2): 284-291
- [19] 王增春, 刘胜环, 黄少华. 麦草全量还田稻作氮肥运筹研究. 江苏农业科学, 2007(6): 44-49
- [20] 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. 江西农业大学学报, 2007, 29(6): 894-898
- [21] 徐国伟, 吴长付, 刘辉, 王志琴, 杨建昌. 秸秆还田与氮肥管理对水稻养分吸收的影响. 农业工程学报, 2007, 23(7): 191-195
- [22] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量方法刍议. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1-4
- [23] 徐伟, 杨京平, 汪华, 孙军华, 施宏鑫. 高肥力稻田不同施氮水平对稻田系统氮通量的影响分析. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, 33(4): 419-424
- [24] 闫德智, 王德建, 林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的影响. 土壤学报, 2005, 42(3): 440-446