

土壤背景氮供应对水稻产量和氮肥利用率的影响

刘立军 徐伟 唐成 王志琴 杨建昌

(扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; E-mail:ljliu@yzu.edu.cn)

Effect of Indigenous Nitrogen Supply of Soil on the Grain Yield and Fertilizer-N Use Efficiency in Rice

LIU Li-jun, XU Wei, TANG Cheng, WANG Zhi-qin, YANG Jian-chang

(Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; E-mail:ljliu@yzu.edu.cn)

Abstract: The effect of applying N-fertilizer or not in wheat on soil fertility and grain yield and fertilizer-N use efficiency (FNUE) of rice in the wheat-rice cropping system were studied. N-fertilizer application in wheat significantly increased total N, ammonium-N and nitrate-N contents in paddy field, resulting in high indigenous N supply of soil (INS). Compared with low INS, the effect of N rate on the grain yield of rice was reduced significantly, and FNUE was also decreased to different extent under high INS. These results indicated that high INS was one of the main reasons for low FNUE in rice. Under high INS, rice grain quality tended to be worse.

Key words: indigenous N supply of soil; rice; yield; fertilizer-N use efficiency; grain quality

摘要: 通过对前茬作物小麦设置施用氮肥与不施用氮肥处理研究它对土壤肥力及后茬作物水稻产量和氮肥利用率的影响。结果表明, 麦季氮肥的施用明显提高了稻季土壤全氮、铵态氮和硝态氮的含量, 造成土壤背景氮偏高。与低土壤背景氮相比, 在高土壤背景氮下水稻产量对氮肥的反应明显降低, 氮肥利用率的各个指标均有不同程度下降。这些结果表明土壤背景氮过高是水稻氮肥利用率低的重要原因之一。在高土壤背景氮下, 施用氮肥有使稻米品质变劣的趋势。

关键词: 土壤背景氮; 水稻; 产量; 氮肥利用率; 稻米品质

中图分类号: Q945.1; S147.5; S511.062

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2005)04-0343-07

已有研究表明, 在较好的管理条件下, 水稻的氮肥吸收利用率可达 50% 以上, 甚至 80%^[1]。热带稻田的氮肥吸收利用率一般为 30% ~ 50%^[2]。氮肥的农学利用率应大于或等于 20 kg 稻谷/kg N^[3]。在我国, 稻田氮肥吸收利用率大多在 30% ~ 35%^[4-6], 部分高产稻区则更低, 氮肥的农学利用率已由 1958 ~ 1963 年的 15 ~ 20 kg 稻谷/kg N 下降至 1981 ~ 1983 年的 9.1 kg 稻谷/kg N^[7], 而且随着稻田氮肥用量的增加, 氮肥吸收利用率和氮肥的农学利用率可能仍在继续下降。氮肥利用率指标多以施氮区水稻产量或吸氮量与氮空白区水稻产量或吸氮量的差值与施氮量的比值来进行衡量, 因此, 氮空白区水稻的产量和吸氮量直接影响氮肥利用率的高低。

长期以来, 我国农田施肥管理主要是以培肥土壤, 提高土壤生产力为宗旨, 这一模式对提高我国土壤生产力起了积极作用。已有许多资料表明, 我国稻田土壤无氮区水稻的产量通常能达到 5 ~ 6 t/

hm²^[8-10], 高的甚至超过 8 t/hm²^[11], 我们于 2003 ~ 2004 年在江苏省无锡市两村各 10 户稻田也观察到, 氮空白区的水稻产量 2 年平均为 6.5 t/hm², 江都的则高达 6.8 ~ 7.2 t/hm²^[12]。而其他产稻国的无氮区水稻产量通常只有 3 ~ 4 t/hm²^[13]。这些结果均表明我国稻田土壤背景氮供应 (Indigenous N supply of soil) 偏高。然而前茬作物的氮肥管理是如何影响稻田土壤背景氮的, 以及土壤背景氮对水稻产量和氮肥利用率有何影响等均不明确。本试验拟在前茬作物小麦设置施氮与不施氮两种处理, 观察麦季氮肥管理对稻田背景氮供应、水稻产量和氮肥利用率的影响, 以期对土壤肥力管理和提高水稻产量及氮肥利用率提供理论依据。

收稿日期: 2004-12-21; 修改稿收到日期: 2005-02-10。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30390080); 农业部“948”资助项目 (2003-Z53); 国际水稻研究所合作项目。

第一作者简介: 刘立军 (1973 -), 男, 在读博士研究生, 讲师。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2001~2003 年和 2002~2004 年分别在江苏省江都市高徐镇农户麦-稻两季的典型田块和扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室试验农场上进行,试验设置作物和氮肥两因素。作物分为前茬小麦(W)和后茬水稻(R),小麦和水稻品种分别为扬麦 158 和汕优 63,小麦播种期为 10 月 25 日~10 月 30 日,基本苗为 180 万株/hm²,行距为 25 cm。水稻于次年的 5 月 8 日~10 日播种,6 月 8 日~10 日移栽,株行距为 20 cm × 20 cm,单本栽插。氮肥设置不施氮肥(0)和施氮(N)两个水平。施氮处理为麦季施用尿素 600 kg/hm²(折合纯氮 276 kg/hm²),为一般小麦高产栽培的施氮量,按基肥、苗肥、返青肥和拔节孕穗肥分别占总施氮量的 60%、15%、5%和 20%进行施用。水稻施氮量 2002 年为 276 kg/hm²,按基肥、分蘖肥、保花肥和粒肥分别占 60%、10%、15%和 15%进行施用,2003 和 2004 年水稻施氮量均改为 170 kg/hm²(按基肥、分蘖肥、保花肥和粒肥分别为 43.5%、14.1%、21.2%和 21.2%进行施用)。两因素共计 4 个处理组合(以下统称处理),即 W₀R₀(麦、稻两季均不施用氮肥)、W₀R_N(麦季不施而稻季施用氮肥)、W_NR₀(麦季施用而稻季不施氮肥)和 W_NR_N(麦、稻两季均施氮肥),具体见表 1。每处理重复 4 次,小区面积均为 30 m²。麦-稻两季均以基肥形式施用过磷酸钙(含 P₂O₅ 13.5%) 300 kg/hm²、氯化钾(含 K₂O 52%) 200 kg/hm²,水稻另外施用锌肥(ZnSO₄·7H₂O,含 Zn 23%) 20 kg/hm²,水稻各小区均用田埂分隔,并用塑料薄膜包埋,自移栽至收割前 2 周,保持水层灌溉,中期不搁田。收割前 2 周开始断水,其余田间管理同麦-稻高产栽培管理。

1.2 取样与测定

1.2.1 土壤养分

在每季作物种前及收后,每小区取表层(0~20

cm)土壤样品测定土壤全氮、速效磷和速效钾以及有机质的含量。另外,还在分蘖中期、穗分化期和抽穗期对水稻无氮区取土样分别用凯氏定氮法^[14]和紫外分光光度法^[15]测定土壤中铵态氮和硝态氮的含量。

1.2.2 考种与计产

在小麦和水稻成熟前 2 d 分别取样 0.5 m²和 12 穴进行考种,测定干物质质量并保留样品用于氮素含量的测定。各小区实收 5 m²计产。

1.2.3 水稻叶片和植株含氮率

于分蘖中期、穗分化始期、抽穗期及成熟期取样,用凯氏定氮法^[14]测定水稻叶片的含氮率。成熟期同时测定籽粒及稻草的氮素含量。

1.2.4 稻米品质

用瑞典 FOSS TECATOR 公司生产的近红外谷物分析仪(Infratec 1241 grain analyzer)测定精米的直链淀粉含量和蛋白质含量,其余稻米品质按农业部 NY/T-593-2002 标准进行测定。

2 结果与分析

2.1 麦季氮肥管理对土壤养分状况的影响

对小麦及水稻种前和收后土壤养分的测定结果表明(图 1),若小麦当季不施氮肥(W₀R₀、W₀R_N两处理),其收获土壤的全氮含量略有下降,若施用氮肥(W_NR₀、W_NR_N两处理)则使得土壤全氮含量增加。而对于水稻,无论施用氮肥与否,在其收获后土壤全氮的含量均有所下降,4 处理(W₀R₀、W₀R_N、W_NR₀和 W_NR_N)在水稻收获后小麦播种前,土壤全氮的含量均基本恢复至同一水平。表明小麦施用氮肥后,可增加稻田土壤背景氮的含量。

扬州点 2 年结果与江都点的趋势基本一致,但扬州点的土壤全氮含量明显低于江都点。

小麦和水稻种前及收后的土壤速效磷和速效钾的含量虽有所变化,但由于在每季作物种前均补充了充足的磷、钾肥,因此,磷、钾不会成为小麦和水稻生长的限制因子。土壤有机质的含量未见明显变化

表 1 处理设置及施氮量

Table 1. Treatments and N fertilization.

处理 Treatment	2001~2002		2002~2003		2003~2004	
	小麦 Wheat	水稻 Rice	小麦 Wheat	水稻 Rice	小麦 Wheat	水稻 Rice
W ₀ R ₀	0	0	0	0	0	0
W ₀ R _N	0	276	0	170	0	170
W _N R ₀	276	0	276	0	276	0
W _N R _N	276	276	276	170	276	170

kg/hm²

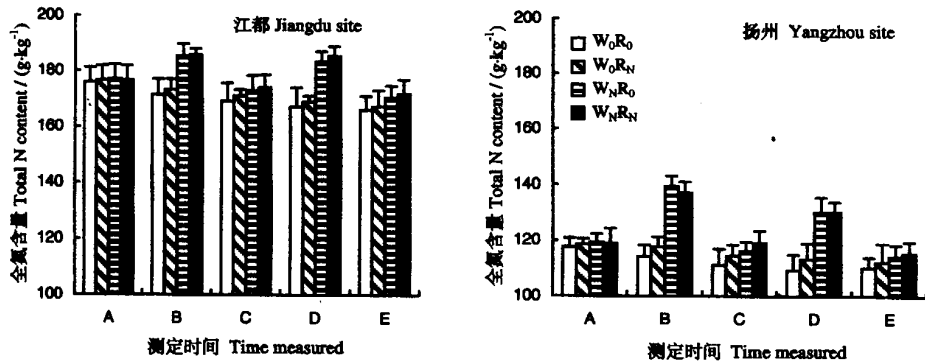


图1 土壤全氮含量的变化

Fig.1. Changes of total N content in soil at various stages.

A - 2001 年江都点或 2002 年扬州点小麦播种前; B - 2002 年江都点或 2003 年扬州点小麦收后, 水稻移栽前; C - 2002 年江都点或 2003 年扬州点水稻收后, 小麦播种前; D - 2003 年江都点或 2004 年扬州点小麦收后, 水稻移栽前; E - 2003 年江都点或 2004 年扬州点水稻收后。

A, Before wheat sowing in Jiangdu site in 2001 or in Yangzhou site in 2002; B, After wheat harvest in Jiangdu site in 2002 or in Yangzhou site in 2003 and before rice transplanting; C, After rice harvest in Jiangdu site in 2002 or in Yangzhou site in 2003 and before wheat sowing; D, After wheat harvest in Jiangdu site in 2003 or in Yangzhou site in 2004 and before rice transplanting; E, After rice harvest in Jiangdu site in 2003 or in Yangzhou site in 2004.

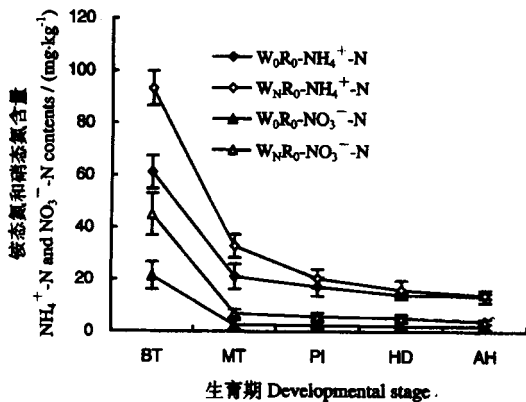


图2 水稻生长季土壤中铵态氮和硝态氮含量的变化(扬州点, 2004)

Fig. 2. Dynamic changes of NH_4^+ -N and NO_3^- -N contents in soil during rice developmental stage (Yangzhou site, 2004).

BT - 移栽前; MT - 分蘖中期; PI - 穗分化始期; HD - 抽穗期; AH - 收获后。

BT, Before transplanting; MT, Mid-tillering; PI, Panicle initiation; HD, Heading; AH, After harvesting.

(资料未列出)。

自移栽至分蘖中期, $\text{W}_\text{N}\text{R}_0$ 处理(麦季施氮, 稻季不施氮) 稻田土壤铵态氮的含量明显高于 W_0R_0 处理(麦-稻两季均不施氮), 自穗分化至收获后, 两处理的土壤铵态氮含量已无明显差异。硝态氮含量的变化与铵态氮相似, 但其含量明显低于铵态氮(图 2)。

2.2 麦季施用氮肥对后茬水稻叶片含氮率的影响

由图 3 可以看出, 水稻叶片的含氮率从分蘖中

期至成熟期呈逐渐下降趋势。处理间比较可以发现, 除成熟期外, $\text{W}_\text{N}\text{R}_0$ 处理的叶片含氮率均高于 W_0R_0 处理, 而 $\text{W}_\text{N}\text{R}_\text{N}$ (麦-稻两季均施氮) 处理叶片的含氮率在各个时期均高于 $\text{W}_0\text{R}_\text{N}$ (麦季不施氮, 稻季施氮) 处理。

2.3 麦季施用氮肥对后茬水稻产量的影响

2002 年江都点的试验结果表明(表 2), 与 W_0R_0 处理相比, $\text{W}_0\text{R}_\text{N}$ 处理显著提高了水稻的产量, 增加了 1541.1 kg/hm^2 , 位于各处理之首。产量的提高主要是由于单位面积穗数和每穗粒数增加所致。与 $\text{W}_\text{N}\text{R}_0$ 处理相比, $\text{W}_\text{N}\text{R}_\text{N}$ 处理除单位面积穗数增加外, 其余产量构成因素(每穗粒数、粒重及结实率)均明显下降, 最终产量虽略有增加(仅为 242.6 kg/hm^2), 但未达显著水平。

江都点 2003 年水稻产量与 2002 年结果趋势相一致, 且 4 个处理间产量差异达显著水平。麦季不施氮的两处理, 水稻产量对氮肥的反应是 1922.3 kg/hm^2 ; 而麦季施氮的两处理, 水稻产量对氮肥的反应仅为 534.5 kg/hm^2 。

扬州点 2 年(2003 年和 2004 年) 水稻产量的变化与江都点相类似, 2003 年 $\text{W}_0\text{R}_\text{N}$ 和 $\text{W}_\text{N}\text{R}_\text{N}$ 两处理对氮肥的反应分别为 2553.0 和 1824.3 kg/hm^2 , 2004 年分别为 3662.4 和 3047.3 kg/hm^2 。

稻季不施氮的两处理 (W_0R_0 、 $\text{W}_\text{N}\text{R}_0$) 相比, $\text{W}_\text{N}\text{R}_0$ 处理的产量均显著高于 W_0R_0 处理, 其产量的提高主要是由于穗数以及每穗粒数增加所致, 这

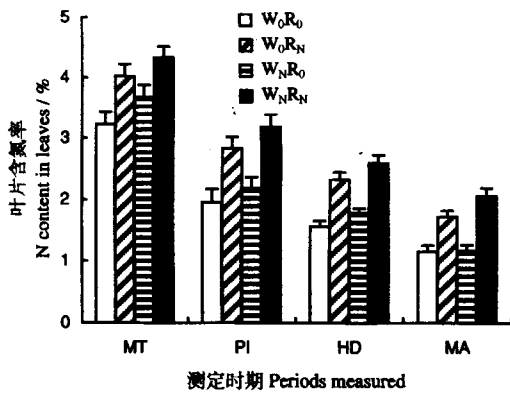


图 3 水稻叶片含氮率的变化(扬州点, 2004)
Fig. 3. Changes of N content in rice leaves. (Yangzhou site, 2004)

MT - 分蘖中期; PI - 穗分化初期; HD - 抽穗期; MA - 成熟期。

MT, Mid-tillering; PI, Panicle initiation; HD, Heading; MA, Maturity.

可能与移栽前 W_NR₀ 土壤全氮含量以及穗分化前土壤的铵态氮和硝态氮含量高有关, 这些结果也进一步表明麦季氮肥施用对土壤肥力以及后茬水稻的生长有着明显的影响。

与扬州点相比, 江都点第 2 季 (2003 年) W_NR_N 处理的水稻产量较 W₀R_N 处理明显降低。产量降低主要是由于 W_NR_N 处理生长后期发生倒伏, 使得粒重和结实率降低所致。这可能与江都点土壤氮素含

量较高有关。

与 2002 年和 2004 年结果相比, 2003 年水稻产量偏低, 这主要有两方面原因: 一是 2003 年水稻生长前期雨水过多, 小区均作埂以防氮素流失, 不便排水, 从而抑制了水稻分蘖的发生, 最终使得穗数有所减少。二是 2003 年水稻结实期温度偏低, 导致结实率和粒重下降, 从而使得水稻产量降低。

2.4 麦季氮肥施用对水稻氮素吸收利用的影响

2.4.1 对氮素吸收和分配的影响

水稻吸氮量均表现为 W_NR_N > W₀R_N > W_NR₀ > W₀R₀, 而氮收获指数表现则相反, 地点间及年度间结果趋势表现一致 (表 3), 表明前茬小麦施氮对后茬水稻吸氮及氮素在植株体内的分布均有明显的影响。

2.4.2 对氮肥利用率的影响

与麦季不施氮肥的处理 (W₀R_N) 相比, 麦季施氮的处理 (W_NR_N) 水稻氮肥利用率的各个指标 (农学利用率、吸收利用率、生理利用率和氮肥偏生产力均有不同程度下降 (表 4)。这种情况在水稻施氮量高的情况下表现尤为明显, 如江都点 2002 年水稻施氮量为 276 kg/hm², W_NR_N 处理的氮肥农学利用率、吸收利用率和生理利用率分别为 0.9 kg 稻谷/kg N、35.9% 和 2.4 kg 稻谷/kg N, 这些指标值都明显偏低, 仅为 W₀R_N 处理的 15.8%、84.7% 和

表 2 麦季氮肥施用对水稻产量及其构成因素的影响

Table 2. Effects of N fertilizer application in wheat on rice yield and its components.

地点和年份 Site and year	处理 Treatment	穗数 Panicle number per 1 m ²	每穗粒数 Grain number per panicle	千粒重 1000-grain weight /g	结实率 Seed setting rate / %	产量 ¹⁾ Yield ¹⁾ /(kg · hm ⁻²)	
江都 Jiangdu 2002	W ₀ R ₀	177.8	144.1	31.7	85.0	6896.5 c	
	W ₀ R _N	240.7	150.1	30.8	75.9	8437.6 a	
	W _N R ₀	205.9	153.5	31.0	82.2	8050.0 b	
	W _N R _N	266.4	141.0	30.6	72.3	8292.6 ab	
	2003	W ₀ R ₀	139.2	164.7	28.6	81.6	5355.0 d
		W ₀ R _N	198.1	180.1	28.1	72.6	7277.3 a
		W _N R ₀	164.1	175.3	28.5	73.3	6004.4 c
		W _N R _N	196.9	179.7	27.6	67.0	6538.9 b
扬州 Yangzhou 2003	W ₀ R ₀	128.2	179.3	28.6	82.1	5394.3 c	
	W ₀ R _N	178.6	182.4	29.9	81.7	7947.3 a	
	W _N R ₀	136.9	183.8	29.3	80.2	5919.8 b	
	W _N R _N	194.6	178.0	29.4	76.3	7762.1 a	
	2004	W ₀ R ₀	141.6	159.7	30.1	86.3	5874.7 c
		W ₀ R _N	224.6	176.6	28.9	83.2	9537.1 a
		W _N R ₀	156.6	163.6	29.6	84.6	6415.8 b
		W _N R _N	240.9	171.2	28.5	80.5	9463.1 a

¹⁾ 同一栏数据后带相同字母者表示在 0.05 水平上差异不显著 (同一地点相同年份比较)。

¹⁾ Within a column, data followed by the same lowercase letters represented no significance at 0.05 level, by comparison of different treatments in the same site and the same year.

表 3 麦季氮肥施用对水稻吸氮及氮素分布的影响

Table 3. Effect of N fertilizer application in wheat on N uptake and distribution in rice.

地点和年份 Site and year	处理 Treatment	籽粒吸氮量 N uptake by grains / (kg · hm ⁻²)	稻草吸氮量 N uptake by rice straw / (kg · hm ⁻²)	总吸氮量 Total N uptake / (kg · hm ⁻²)	氮收获指数 ¹⁾ Nitrogen harvest index ¹⁾	
江都 Jiangdu 2002	W ₀ R ₀	63.3	20.8	84.1 c	0.75 a	
	W ₀ R _N	127.1	74.0	201.1 a	0.63 b	
	W _N R ₀	81.9	31.2	113.1 b	0.72 a	
	W _N R _N	123.1	89.2	212.3 a	0.58 c	
	2003	W ₀ R ₀	64.2	19.3	83.5 c	0.77 a
		W ₀ R _N	105.8	64.9	170.7 a	0.62 b
		W _N R ₀	71.8	26.6	98.4 b	0.73 a
		W _N R _N	97.1	78.2	175.3 a	0.55 c
扬州 Yangzhou 2003	W ₀ R ₀	62.2	21.1	83.3 c	0.75 a	
	W ₀ R _N	104.7	60.4	165.1 a	0.63 b	
	W _N R ₀	67.7	27.7	95.4 b	0.71 a	
	W _N R _N	101.8	68.5	170.3 a	0.60 b	
	2004	W ₀ R ₀	61.1	18.6	79.7 c	0.77 a
		W ₀ R _N	112.4	60.5	172.9 a	0.65 b
		W _N R ₀	70.7	26.1	96.8 b	0.73 a
		W _N R _N	104.9	70.0	174.9 a	0.60 c

同一栏数据后带不同字母者表示在 0.05 水平差异显著(同一地点相同年份比较)。

¹⁾ 氮收获指数 = 籽粒吸氮量/水稻植株总吸氮量。

Within a column, data followed by different lowercase letters represent significance at 0.05 level, by comparison of different treatments in the same site and the same year.

¹⁾ Nitrogen harvest index = N uptake by grains/ Total N uptake by rice plant.

表 4 麦季氮肥施用对水稻氮肥利用率的影响

Table 4. Effect of N fertilizer application in wheat on fertilizer-N use efficiency in rice.

地点和年份 Site and year	处理 Treatment	农学利用率 Agronomic efficiency (grain yield/ N applied) / (kg · kg ⁻¹)	吸收利用率 Recovery efficiency / %	生理利用率 Physiological efficiency (grain yield/ N accumulation) / (kg · kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 Partial factor productivity (grain yield/ N applied) / (kg · kg ⁻¹)	
江都 Jiangdu 2002	W ₀ R ₀	-	-	-	-	
	W ₀ R _N	5.6 **	42.4 *	13.2 **	30.6	
	W _N R ₀	-	-	-	-	
	W _N R _N	0.9	35.9	2.4	30.0	
	2003	W ₀ R ₀	-	-	-	-
		W ₀ R _N	11.3 **	51.3 *	22.0 **	42.8
		W _N R ₀	-	-	-	-
		W _N R _N	3.1	45.2	7.0	38.5
扬州 Yangzhou 2003	W ₀ R ₀	-	-	-	-	
	W ₀ R _N	15.0 *	48.1	31.2 *	46.7	
	W _N R ₀	-	-	-	-	
	W _N R _N	10.8	44.1	24.6	45.7	
	2004	W ₀ R ₀	-	-	-	-
		W ₀ R _N	21.5 *	54.8 *	39.3	56.1
		W _N R ₀	-	-	-	-
		W _N R _N	17.9	45.9	39.0	55.7

农学利用率 = (施氮区产量 - 空白区产量) / 施氮量; 吸收利用率 = (施氮区地上部分含氮量 - 空白区地上部分含氮量) / 施氮量 × 100 %; 生理利用率 = (施氮区产量 - 空白区产量) / (施氮区地上部分含氮量 - 空白区地上部分含氮量); 氮肥偏生产力 = 施氮区产量 / 施氮量。

*, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著(同一地点相同年份进行比较)。

Agronomic efficiency = [Grain yield in the plot with N fertilizer application (G_N) - grain yield in the zero-N control (G₀)] / the amount of N fertilizer applied (F_N); Recovery efficiency (%) = [Total aboveground plant N accumulation in the plot with N fertilizer application (T_N) - Total aboveground plant N accumulation in the zero-N control (T₀)] / F_N; Physiological efficiency = (G_N - G₀) / (T_N - T₀); Partial factor productivity of fertilizer-N = G_N / F_N.

*, ** Significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively, compared with different treatments at the same site and the same year.

18.2%。另外,与 W_0R_N 处理相比, W_NR_N 处理氮肥吸收利用率的下降程度有随年度增加而变大的趋势。

扬州点 2 年水稻的试验结果与江都点的结果趋势基本一致(表 4)。

2.5 稻米品质主要指标的变化

与稻季不施用氮肥的两处理 (W_0R_0 、 W_NR_0) 相比,施用氮肥的两处理 (W_0R_N 、 W_NR_N) 的出糙率、精米率和整精米率均有所提高,尤其是整精米率提高明显。氮肥的施用还提高了稻米蛋白质的含量,降低了直链淀粉的含量。在本试验条件下,稻季施氮也使得垩白率和垩白度增大。与 W_0R_N (麦季不施氮而稻季施氮) 处理相比, W_NR_N (麦-稻两季均施氮) 处理的整精米率下降,而垩白率和垩白度有所上升。上述下降和上升的幅度有随年度的增加而逐渐变大的趋势(表 5)。

3 讨论

3.1 土壤背景氮对水稻产量及氮肥利用率的影响

背景氮 (Indigenous N supply) 是指除了来源于

肥料氮之外的一切氮源。对于水稻而言,背景氮来源主要有:土壤、灌溉、降雨及作物残留物(如秸秆还田、作物根系以及枯死的叶片等)^[16,17]。在本试验中,试验地前茬作物小麦秸秆未进行还田,同一地点各处理均用同一灌溉水源,雨水也相同,因此,各处理供氮能力的差异主要是由于土壤供氮能力不同所致。

本试验结果表明,通过麦季施用氮肥和不施用氮肥可造成两种不同的土壤背景氮状况,即高土壤背景氮与低土壤背景氮。不同土壤背景氮对后茬作物水稻的生长、产量形成以及氮素吸收利用等均有明显的影响。与低土壤背景氮相比,高土壤背景氮下水稻产量对施氮量的反应明显降低,水稻氮肥的农学利用率明显降低;氮肥的吸收利用率随着年度推进,其下降幅度有增大的趋势,表明高土壤背景氮还可能加剧氮肥的损失;在高背景氮下水稻氮肥的生理利用率以及氮收获指数也大多明显低于低背景氮下水稻的生理利用率和氮收获指数,表明在高背景氮下,氮素较多地积累在茎秆、叶片等非产量器官中,使得水稻“奢侈耗氮”现象比较严重。这些情况

表 5 麦季氮肥施用对稻米品质的影响

Table 5. Effect of N fertilizer application in wheat on grain quality in rice.

地点和年份	品质指标	W_0R_0	W_0R_N	W_NR_0	W_NR_N	
Site and year	Quality index of rice grain					
江都 Jiangdu						
2002	出糙率 Brown rice rate	80.3 b	82.0 a	80.9 b	82.0 a	
	精米率 Milled rice rate	70.1 b	72.1 a	70.2 b	72.0 a	
	整精米率 Head rice rate	27.8 c	45.3 a	40.8 b	44.9 a	
	垩白米率 Chalky kernel rate	80.9 a	82.4 a	80.6 a	82.5 a	
	垩白度 Chalkiness	18.8 b	19.8 ab	19.2 ab	20.0 a	
	蛋白质含量 Protein content	7.6 c	11.2 a	9.0 b	11.2 a	
	直链淀粉含量 Amylose content	24.6 a	22.5 b	24.5 a	22.1 b	
	2003	出糙率 Brown rice rate	77.6 b	80.5 a	77.8 b	80.3 a
		精米率 Milled rice rate	64.9 b	69.0 a	64.6 b	68.8 a
		整精米率 Head rice rate	31.7 c	44.3 a	40.1 b	39.1 b
垩白米率 Chalky kernel rate		71.8 b	74.0 a	71.8 b	75.8 a	
垩白度 Chalkiness		15.7 b	16.7 b	16.1 b	18.8 a	
蛋白质含量 Protein content		7.3 c	11.5 a	8.2 b	11.9 a	
直链淀粉含量 Amylose content	20.1 a	15.5 b	19.3 a	14.6 b		
扬州 Yangzhou						
2003	出糙率 Brown rice rate	79.4 b	82.5 a	79.9 b	81.0 a	
	精米率 Milled rice rate	68.1 b	72.2 a	69.2 b	71.8 a	
	整精米率 Head rice rate	32.5 c	44.5 a	38.8 b	42.1 a	
	垩白米率 Chalky kernel rate	80.3 b	81.4 b	80.2 b	84.7 a	
	垩白度 Chalkiness	19.8 c	22.3 b	20.2 c	24.3 a	
	蛋白质含量 Protein content	7.5 c	11.1 a	9.2 b	12.0 a	
	直链淀粉含量 Amylose content	24.6 a	18.5 b	23.5 a	17.1 b	
	2004	出糙率 Brown rice rate	80.2 b	83.4 a	81.0 b	82.5 a
		精米率 Milled rice rate	70.3 b	73.1 a	71.0 b	72.4 a
		整精米率 Head rice rate	37.2 b	46.5 a	39.3 b	44.3 a
垩白米率 Chalky kernel rate		82.9 b	83.2 b	81.8 b	87.2 a	
垩白度 Chalkiness		23.2 b	25.3 b	23.9 b	27.8 a	
蛋白质含量 Protein content		7.7 b	10.8 a	8.6 b	11.3 a	
直链淀粉含量 Amylose content	23.2 a	17.6 b	22.4 a	17.0 b		

同一行数据后带相同字母者表示在 0.05 水平差异不显著。

Within a row, data followed by the same letters indicate no significant difference at 0.05 level.

在水稻施氮量高的情况下更加明显。

麦-稻轮作是我国长江中下游地区一种重要的作物种植方式,这对稳定该区的粮食作物产量起了积极作用。目前生产中小麦单季的施氮量已达 270 kg/hm² 以上,部分高产区施氮量甚至超过 300 kg/hm²,这种高氮投入一方面为提高小麦产量作出了积极贡献,另一方面也增加了氮素在土壤中的残留,提高了土壤背景氮,这从土壤培肥角度来说是有利的,但同时这也是造成后茬作物水稻氮肥利用率降低的重要原因。在本试验条件下,水稻收后土壤中的铵态氮和硝态氮等矿物质氮含量很低,这与 Dobermann 等^[18]的研究结果基本一致,而在前茬小麦收后,稻田土壤中的矿物质氮含量比较高,这种情况在小麦施氮量较高的情况下表现尤为明显,这也可能会导致稻田休耕期氮素损失加剧。由此,笔者推测,在不降低小麦产量的前提下,适当降低麦季作物的施氮量或调节施氮的时间或比例来提高小麦对氮素的吸收,减少氮素在土壤中的残留,适当降低稻田土壤背景氮,将有利于提高后茬作物水稻的产量和氮肥利用率。以往多点试验的研究结果也表明,在连续种植 4~6 年的水稻田中,土壤背景氮基本不会降低^[19,20]。笔者认为,在土壤背景氮较高的情况下,适当降低水稻氮肥用量,不仅不会减产,甚至还有可能增产。因此,根据土壤背景氮供应的不同来调整水稻施氮量及施用比例,也是提高水稻产量和氮肥利用率的一条有效途径。

本试验也观察到,2003 年江都和 2004 年扬州水稻已是第 4 季没有施用氮肥,但其产量仍然高达 5.3~5.8 t/hm²,未见明显降低,这与国际水稻研究所连续 60 余年的水稻氮空白试验的结果相一致,一方面表明稻田土壤对氮素的自我调节能力比较强,另一方面这可能还与水稻生长季节的降雨和灌溉水提供的氮素有关,本研究未对降雨及灌溉水的含氮量进行测定,因此,雨水和灌溉水对土壤背景氮供应的影响,尚需深入研究。

本试验还观察到,在每季水稻收后,其土壤肥力基本恢复至同一水平,因此,稻季氮肥的施用不会对后茬作物小麦的生长产生影响,本试验中小麦产量及氮肥利用率的结果也证明了这一点(资料略)。

3.2 土壤背景氮对稻米品质的影响

本研究表明,与低土壤背景氮下相比,在高土壤背景氮下施用氮肥使得稻米垩白率和垩白度增加,

外观品质变劣;稻米的整精米率也有所降低,不利于稻米的加工。这些下降或上升的趋势均随试验年度的增加而逐渐加大,因此,适当降低土壤背景氮或是在高背景氮下适当降低水稻氮肥的用量还有利于改善稻米品质。

参考文献:

- 1 FLAR. Annual Report. Cali, Colombia: CIAT, 2001.
- 2 Datta S K, Buresh R J. Integrated nitrogen management in irrigated rice. *Adv Agron*, 1989, 10: 143 - 169.
- 3 Witt C, Dobermann A, Abdulrachman S, et al. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. *Field Crops Res*, 1999, 63: 113 - 138.
- 4 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1 - 6.
- 5 朱兆良. 我国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展. *土壤*, 1985, 17(1): 2 - 9.
- 6 李庆远. 中国农业可持续发展中的肥料问题. 南昌: 江西科学技术出版社, 1997.
- 7 林葆. 提高作物产量, 增加施肥效应. 见: 中国土壤学会编. 中国土壤科学的现状与前景. 南京: 江苏科学技术出版社, 1991. 29 - 36.
- 8 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 等. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究. *生态学报*, 2000, (4): 659 - 662.
- 9 李荣刚, 翟云忠. 江苏省武进市高产水稻田氮素渗漏研究. *农村生态环境*, 2000, 16(3): 19 - 22.
- 10 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 等. 苏南太湖流域水稻氮肥利用率及氮肥淋洗量研究. *中国农业大学学报*, 1998, 3(5): 51 - 54.
- 11 郑克武, 邹江石, 吕川根, 等. 氮肥和密度对两系亚种间杂交稻“两优培九”产量及产量结构的影响. *江苏农业学报*, 2001, 17(1): 19 - 23.
- 12 Liu L J, Sang D Z, Liu C L, et al. Effects of real-time and site-specific nitrogen management on rice yield and nitrogen use efficiency. *Agric Sci China*, 2004, 3(4): 262 - 268.
- 13 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 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 - 1103.
- 14 Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen-total. In: Page A L. *Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd edn. Agronomic Monograph 9.* Madison, WI: ASA and SSSA, 1982. 595 - 624.
- 15 Norman R J. Determination of nitrate in soil extracts by dual-wavelength ultraviolet spectrophotometry. *Soil Sci Soc Am J*, 1985, 49: 1182 - 1185.
- 16 Cassman K G, Peng S, Olk D C, et al. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Res*, 1998, 56: 7 - 39.
- 17 Cassman K G, Gnes G C, Dizon M A, et al. Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: contributions from indigenous and applied nitrogen. *Field Crops Res*, 1996, 47: 1 - 12.
- 18 Dobermann A, Gaunt J L, Neue H U, et al. Spatial and temporal variability of ammonium in flooded rice fields. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58: 1708 - 1717.
- 19 Ladha J K, Dawe D, Ventura T S, et al. Long-term effects of urea and green manure on rice yields and nitrogen balance. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64: 1993 - 2001.
- 20 Dobermann A, Witt C, Abdulrachman S, et al. Soil fertility and indigenous nutrient supply in irrigated rice domains of Asia. *Agron J*, 2003, 95: 913 - 923.