

太湖地区水稻产量、根圈土壤矿质态氮及氮素径流损失对氮肥的响应

乔俊¹, 汤芳², 朱励军², 颜廷梅^{1*}, 赵冬¹, 王如海¹, 杨林章³

(1.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2.江苏省金坛市国土资源局, 江苏 金坛 213200; 3.江苏省农业科学院, 南京 210014)

摘要:通过氮肥梯度小区试验,研究了施氮对水稻根圈土壤及土壤溶液矿质态氮、叶片 SPAD 值、氮素累积量、水稻产量和氮素径流损失的影响。结果表明:基肥显著增加了苗期水稻根圈土壤矿质态氮,追肥对水稻根圈土壤及土壤溶液矿质态氮含量影响较小;施氮对水稻顶三叶 SPAD 值影响较为显著,而不同氮肥梯度下 SPAD 值无显著差异。分蘖期后,施氮量和植株氮素累积量存在显著正相关关系;收获期秸秆氮累积随着施氮量的增加而增加,但籽粒氮累积受施氮量影响较小。施氮量的增加对水稻增产效果并不显著,却显著提高了总氮径流损失,降低了氮肥农学效率,综合考虑产量、农学效率和总氮径流损失,该地区施氮量需低于理论最高产量施氮量(243 kg·hm⁻²);该季 135 kg N·hm⁻² 施氮量处理产量虽有所下降(差异不显著),但其农学效率最高且总氮径流损失最低。针对污染严重区域,在保证产量的基础上采用低氮肥投入而极大地降低施氮对环境的潜在污染是可行的。

关键词: SPAD 值; 土壤矿质态氮; 土壤溶液; 水稻; 产量; 总氮径流损失

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)11-2140-06 doi:10.11654/jaes.2015.11.015

Responses of Rice Yield, Rhizospheric Soil Mineral N and N Runoff Loss to Fertilizer N in the Tai Lake Region

QIAO Jun¹, TANG Fang², ZHU Li-jun², YAN Ting-mei^{1*}, ZHAO Dong¹, WANG Ru-hai¹, YANG Lin-zhang³

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Ministry of Land and Resources of Jintan, Jintan 213200, China; 3. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In this study, mineral N in rhizospheric soil and its solution, SPAD, plant N accumulation, grain yield and N runoff loss were determined under rice grown in six fertilizer N treatments. Results showed that basal N fertilizer significantly increased rhizospheric soil mineral N, but two top dressings had little impacts on mineral N in both soil and soil solution. The SPAD responded well to N fertilizer, but no significant difference in SPAD was found among N treatments. A positive linear relationship existed between N accumulation and fertilizer N rate after tillering stages. Increasing N rates significantly increased nitrogen accumulation in straw at the harvest, but had little impacts on grain N. Rice yield did not always increase with increasing N fertilizer. No significant differences in grain yields were found among N treatments. However, elevated N fertilizer increased total N losses through runoff and decreased the agronomical efficiency of fertilizer N. Considering rice yield, agronomical efficiency and N runoff loss, the recommended maximum N rate should be 243 kg·hm⁻². At 135 kg N·hm⁻², a comparable yield, the highest agronomical efficiency and the lowest N runoff loss could be obtained. Thus, it is feasible to lower N inputs to avoid high N losses from the paddy field in extremely N polluted area.

Keywords: SPAD; soil mineral N; soil solution; rice yield; N runoff loss

我国农业生产中因粮食增产需求而过量施用氮肥的现象较为常见,太湖稻田单季氮肥用量可达 300

kg N·hm⁻²,其氮肥农学效率仅为 3%^[1-2],然而研究^[3-4]发现太湖地区稻季氮投入量可降至 200 kg N·hm⁻²,过量施肥不仅会导致氮肥利用率和产量下降,而且会对环境产生负面影响。未被作物利用的氮素,通过径流、氨挥发、渗漏等方式进入环境,从而污染水体和大气^[5]。

根据作物高产养分需求规律以及土壤供肥特征等进行肥料优化管理是实现源头控制面源污染最小

收稿日期: 2015-05-22

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD15B03); 国家自然科学基金(41171236)

作者简介: 乔俊(1984—),男,江苏丹阳人,博士,助理研究员,从事稻田系统可持续性和区域农业与生态环境建设研究。

E-mail: jqiao@issas.ac.cn

* 通信作者: 颜廷梅 E-mail: tmyan@issas.ac.cn

化的主要途径^[6],针对集约化稻田高产目标的氮肥运筹方式已有较多研究,然而对水稻关键生育期的植株氮素吸收和土壤养分供应的研究较少^[2,7-8]。因此,寻求作物养分需求和土壤供应之间的氮素平衡具有重要意义,并可为农田合理施氮提供理论依据。稻田总氮供应可反映水稻生长情况,叶片氮含量作为一项表征氮素供应的指标是不可或缺的,而 SPAD 值对叶片氮含量有较好的响应^[9],选择合适的 SPAD 临界值来指导适时追肥,可明显降低氮肥用量,提高稻田氮肥利用效率,同时其产量水平也能达到其他氮肥管理方式的产量水平^[10]。根圈土壤矿质态氮含量显著影响作物形态学特征,并进一步影响作物产量^[11]。本研究通过设置不同氮肥梯度试验,研究不同施氮量下水稻生理响应、土壤氮素供应和总氮径流损失,以期对该地区施氮提供合理建议。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省宜兴市滨临太湖的大浦镇渭渎村(31°16'17.29"N,119°55'23.92"E)。该地区属于北亚热带湿润气候区,年均气温为 16℃,年均降雨量为 1100~1400 mm。土壤属于潜育性水稻土,2010 年耕层土壤(0~15 cm)理化性质如下:pH5.81,有机质 27.63 g·kg⁻¹、全氮 1.47 g·kg⁻¹、全磷(P₂O₅) 0.60 g·kg⁻¹、全钾(K₂O) 13.68 g·kg⁻¹、速效氮 84.91 mg·kg⁻¹、速效磷 22.74 mg·kg⁻¹、速效钾 51.25 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验为始于 2008 年的连续大田试验,本文数据为 2010 年试验结果。试验共设计有 6 个处理,分别为 N₀,不施氮;N₁,施氮肥 135 kg N·hm⁻²,50%常规氮肥用量;N₂,施氮肥 189 kg N·hm⁻²,70%常规氮肥用量;N₃,施氮肥 216 kg N·hm⁻²,80%常规氮肥用量;N₄,施氮肥 243 kg N·hm⁻²,90%常规氮肥用量;N₅,施氮肥 270 kg N·hm⁻²,常规氮肥用量。

每个处理 3 个重复,共 18 个小区,小区面积为 30.8 m²,小区之间由田埂外包塑料薄膜隔开,防止渗漏和串水。稻季分 3 次施肥,基肥、分蘖肥和穗肥的比例为 3:3:4,所有处理施用量均等于当地农户稻季 P、K 用量。试验中以硫基复合肥(N:P:K=15:15:15)为基肥,若处理 P、K 不足,则以普钙(含磷 12%)和氯化钾(含钾 60%)补足,以保证 P、K 施用量均达到 81 kg·hm⁻²。分蘖肥和穗肥均以尿素(含 N 46%)形式施入。各处理实施方案见表 1。

表 1 稻麦轮作不同施氮处理试验设计及实施方法(2010 年)
Table 1 Schemes and implementation methods of different N rates in 2010

处理	常规氮肥用量(稻季)	施 N 总量/ kg·hm ⁻²	基肥/ kg·hm ⁻²	分蘖肥/ kg·hm ⁻²	穗肥/ kg·hm ⁻²
N ₀	0%N	0	0	0	0
N ₁	50%N	135	40.5	40.5	54.0
N ₂	70%N	189	56.7	56.7	75.6
N ₃	80%N	216	64.8	64.8	86.4
N ₄	90%N	243	72.9	72.9	97.2
N ₅	100%N	270	81.0	81.0	108

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 径流样品采集与测定

标准化小区,保持各小区田埂和田面高度一致,小区排水口设置流量计,记录各次降雨小区流出液总读数。降雨前预估降雨强度和降雨量,在可能产生径流的降雨前后,在每个小区随机选取 3 个点采集混合水样。水样采集后立即带回实验室,用直径 7 cm 定量滤纸(上海双圈)过滤后保存于 0℃冰箱中,待化学分析和测定。滤液通过德国汉堡 Bran & Luebbe 公司流动分析仪(Traacs 800)测定总氮含量。

1.3.2 植株样品采集与测定

分别于基肥、分蘖肥、穗肥施入后 10 d 和收获期采集水稻样品。每次采样时,各小区随机选取 6 穴水稻样品。水稻样品采集后立即清洗植株根系,分离水稻地上部和地下部,在收获期,分离地上部秸秆和籽粒,并测产。植株样品在 105℃下杀青 30 min 后,在 80℃烘干至恒重并粉碎过筛(0.5 mm),之后用硫酸-过氧化氢消化,凯氏定氮法测定全氮含量。另外,每个小区定点选取有代表性的水稻植株 3 穴,于施肥(基追肥)前 1 d 和施肥后 7 d,测定其中 3 株主茎植株顶三叶完全展开叶(叶尖、叶中和叶基)SPAD 值并取其平均值,以描述 SPAD 随施氮的变化情况。

1.3.3 土壤样品采集与测定

在植株样品采集的同时,采用抖落法^[12]采集水稻根圈土壤样品,每个小区采样 5~6 穴。样品采集后用 TDL-50B 低速台式离心机离心 30 min(5000 r·min⁻¹),待悬浊液澄清后,沥取上清液并测定铵态氮和硝态氮(Traacs 800, Bran & Luebbe, Hamburg),其铵态氮和硝态氮的累加值定义为土壤溶液矿质态氮。将离心后的土壤样品混匀,随机选取部分土样,加入 2 mol·L⁻¹KCl 溶液(土水比为 1:5),在 20℃下振荡 1 h 后静置,滤纸(双圈 11 cm 慢速)过滤后测定铵态氮和硝态氮含

量,以二者的累加值为土壤矿质态氮。选取部分土壤样品测定土壤含水率。在作物种植前和收获后,在小区内随机选取3点取样,测定其土壤矿质态氮含量。

1.4 计算公式和数据处理

1.4.1 总氮径流损失估算

$$\text{第 } n \text{ 次产流时小区径流液体积 } V_n(\text{m}^3) = \frac{R_n - R_{n-1}}{M}$$

式中: R_n 和 R_{n-1} 分别表示第 n 次和第 $n-1$ 次径流排放后流量计读数, m^3 ; M 表示所有小区数量(共 18 个)。

$$\text{总氮径流损失量 } TNL(\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}) = \frac{\sum_{n=1}^n \frac{C_{nb} - C_{na}}{2} \times V_n}{S}$$

式中: C_{nb} 和 C_{na} 分别表示第 n 次径流排放前、后田面水总氮浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; S 为小区面积(本文中为 30.8 m^2)。

1.4.2 农学效率计算公式

$$\text{氮肥农学效率 } AE_N = (Y_N - Y_0) / F_N$$

式中: AE_N 为 N 处理的农学效率, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Y_N 为 N 处理水稻产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; Y_0 为不施氮处理水稻产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; F_N 为 N 处理施氮量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.4.3 数据处理

数据整理以及统计分析采用 Sigmaplot 10.0 和 SPSS 16.0 软件进行。

2 结果与讨论

2.1 施肥对根圈土壤和土壤溶液矿质态氮的影响

基肥施用可显著影响水稻苗期根圈土壤矿质态

氮含量,相对而言,分蘖期和抽穗期追肥对根圈土壤矿质态氮含量影响较小,且处理间差异不显著。稻田追肥均以尿素形式撒施于水层中,高温条件下尿素快速水解,田面水浓度在 2~3 d 内迅速降低至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下^[13],造成氨挥发量较大^[14];小部分氮素进入土壤中,导致土壤矿质态氮含量没有明显变化。苗期根圈土壤矿质态氮均值为 $16.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分蘖期及抽穗期显著下降,分别为 8.87 、 $9.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;在水稻收获后,根圈土壤矿质态氮含量显著升高,并与施氮量间存在显著线性关系: $y = 0.032x + 12.22$ ($P < 0.05$)。稻田土壤矿质态氮主要形态为铵态氮,分别占苗期、分蘖期、抽穗期和收获期矿质态氮含量比例为 97.5%、92.9%、94.8%和 57.4%(表 2)。

根圈土壤溶液矿质态氮含量是表征土壤中游离态水可被作物直接利用的一部分矿质态氮含量。其最高值出现在苗期,期间施氮处理和不施氮处理间存在显著差异,而施氮处理间差异较小,分蘖期后,施氮量对土壤溶液矿质态氮含量影响较小。与根圈土壤矿质态氮一致,土壤溶液矿质态氮主要存在形式为铵态氮,在整个生育期铵态氮所占比例均为 100%(表 2)。有研究表明,肥力水平对根表土壤铵态氮含量无显著影响^[15],本试验为连续进行的氮肥梯度试验的第三年,土壤肥力在一定程度上存有差异,苗期和收获期则表现为随施氮量的增加有一定增加的现象,而稻田土壤根圈土壤矿质态氮在追肥 10 d 后差异并不大

表 2 2010 年不同生育期水稻根圈土壤和土壤溶液矿质态氮含量

Table 2 Mineral N in rhizospheric soil and its solution at different growing stages of rice in 2010

项目	处理	苗期	分蘖期	抽穗期	收获期
土壤矿质态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	N_0	10.25±1.83c(96.4%)	8.39±1.54a(92.2%)	8.35±1.41a(95.8%)	11.81±3.96b(77.6%)
	N_1	14.37±1.08bc(98.7%)	7.82±0.87a(94.1%)	8.88±0.52a(94.3%)	18.03±1.86ab(64.8%)
	N_2	18.68±2.91ab(97.9%)	9.99±2.45a(92.2%)	10.38±0.60a(93.7%)	18.10±1.97b(50.5%)
	N_3	18.60±4.01ab(97.3%)	9.26±0.53a(93.2%)	8.91±0.65a(94.3%)	18.57±2.57ab(50.0%)
	N_4	18.19±2.23a(97.4%)	8.55±1.19a(93.3%)	8.43±0.91a(95.3%)	18.43±1.87ab(50.8%)
	N_5	20.07±2.35a(97.1%)	9.25±0.38a(92.1%)	9.37±0.48a(95.2%)	22.16±2.18a(50.6%)
	平均值	16.70	8.87	9.05	17.85
土壤溶液矿质态氮 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	N_0	0.60±0.29b(100%)	0.14±0.22a(100%)	1.06±0.09a(100%)	
	N_1	1.24±0.34a(100%)	0.33±0.02a(100%)	1.25±0.17a(100%)	
	N_2	1.93±1.08a(100%)	0.25±0.18a(100%)	1.40±0.07a(100%)	
	N_3	2.09±0.85a(100%)	0.24±0.11a(100%)	1.43±0.08a(100%)	
	N_4	2.66±0.37a(100%)	0.16±0.03a(100%)	1.33±0.06a(100%)	
	N_5	1.73±0.44a(100%)	0.10±0.05a(100%)	1.42±0.18a(100%)	
	平均值	1.57	0.21	1.31	

注:表中百分比为铵态氮占矿质态氮(包括铵态氮和硝态氮)的比值;字母利用 Duncan 新复极差法表征数据之间显著差异($P < 0.05$)。

Note: Values in parentheses were percentages of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in total mineral N. Means followed by different letters are significantly different at 0.05 level according to Duncan's New Multiple Range Test.

(表2)。根圈土壤矿质态氮会随水稻生育期呈现U字型变化,其原因可能是基肥对土壤矿质态氮提高具有明显的作用^[16];而分蘖期和抽穗期根圈土壤矿质态氮含量显著降低,则是因为该时期水稻对养分需求量大,根系的发育完全使水稻吸收能力提高,致使根圈土壤矿质态氮降低和作物氮素累积量显著增加;另外,有研究表明田面水浓度超过 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 情况下,会促使土壤矿质态氮部分释放,增加土壤溶液中矿质态氮含量^[22]。薛峰等^[13]和赵冬等^[17]研究表明,随着氮肥施用量的增加,稻田田面水总氮浓度和持续时间随之增加。水稻追肥后4 d内田面水浓度可达到 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,在该期间内根圈土壤矿质态氮释放使土壤溶液中有效态氮增加,主要表现为抽穗期根圈土壤溶液矿质态氮含量增加,高氮肥投入使稻田的水稻可潜在利用土壤矿质态氮量提高,从而影响水稻氮素累积量(图1)。而后期土壤矿质态氮含量增加可能是稻田生物固氮(浮萍还田等)所造成。

2.2 施肥对水稻叶片 SPAD 值及氮素累积量的影响

一般认为,水稻距离叶基部1/2处的SPAD测定值较大且较稳定,是合适的测试位点^[10],但也有研究者以距离叶基2/3处为测定位点,然而本研究通过测定上述指标所获取的数据与施氮量并没有理想的响应曲线。因此,本文对SPAD值进行平均(表3),总体而言,水稻叶片SPAD值随施氮量的增加呈一定上升趋势,各施氮处理间($N_1\sim N_5$)SPAD值差异不显著,但均显著高于不施氮处理 N_0 。水稻移栽后10 d,施氮对SPAD值的影响较小,可见水稻返青期间氮肥对叶片氮素影响较小,换言之水稻苗期提高氮肥用量并不能显著促进水稻生长,但田面水中高氮含量可增加氮素

表3 施肥对水稻顶三叶 SPAD 值的影响(2010年)

Table 3 Effects of N top dressing on SPAD readings of rice upper three leaves after different days of transplanting in 2010

处理	移栽后 10 d	栽后 29 d	栽后 53 d	栽后 60 d
N_0	45.3±1.0a	46.2±1.5b	38.2±0.3b	42.6±2.1b
N_1	45.7±0.4a	47.8±1.5ab	42.4±3.4a	45.5±1.1a
N_2	46.5±0.8a	48.7±1.6a	42.9±1.2a	46.2±2.4a
N_3	45.8±0.5a	50.0±0.9a	43.4±0.4a	47.1±1.8a
N_4	46.0±1.2a	49.4±0.5a	43.4±1.4a	48.0±0.3a
N_5	46.0±1.7a	49.4±0.9a	42.7±1.0a	48.4±0.1a
平均值	45.9	48.5	42.1	46.3

注:表中平均值和方差通过9组数据得出,同列不同字母表示各处理数据之间具有显著差异($P<0.05$)。

Note: Data are shown in mean±standard deviation of 9 replicates. Different letters within a column denote significant ($P<0.05$) differences between N rate treatments.

流失风险^[11]。水稻移栽后53 d(穗肥期前)施氮可显著增加移栽60 d(穗肥后7 d)SPAD值。整个生育期内(四次采样期间), N_2 、 N_3 、 N_4 和 N_5 处理的SPAD值均呈现相同趋势且无显著差异。

本试验中苗期氮肥对水稻氮素累积量影响较小,但随水稻生育期的延后,氮肥施用可显著增加作物氮素累积量。在抽穗期,不同施氮处理间水稻氮素累积量均存在显著差异。不同生育期内施氮量(x)和氮素累积量(y)关系可以描述为:

$$\text{分蘖期: } y=0.136x+29.48 \quad (P<0.05)$$

$$\text{抽穗期: } y=0.462x+38.93 \quad (P<0.01)$$

$$\text{收获期: } y=0.429x+84.74 \quad (P<0.01)$$

在苗期,水稻作物氮吸收仅占整个生育期吸收量的7.6%;而在分蘖期和抽穗期,不同施氮量水平条件下水稻氮累积量分别平均增加了4.4倍和9.8倍,可见分蘖期至抽穗期是水稻氮素累积的关键时期,其中抽穗期氮素累积量占整个生育期的53%~89%。另外,通过计算可知,在 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 和 N_5 处理条件下,籽粒和秸秆氮吸收比分别为66%、73%、81%、94%、109%和103%(图1),表明提高施氮量不能显著提高籽粒氮素吸收,但可显著提高秸秆氮素吸收量。鉴于该地区秸秆利用程度不高,秸秆氮素累积量过高,不合理利用将会导致水体或大气的污染。

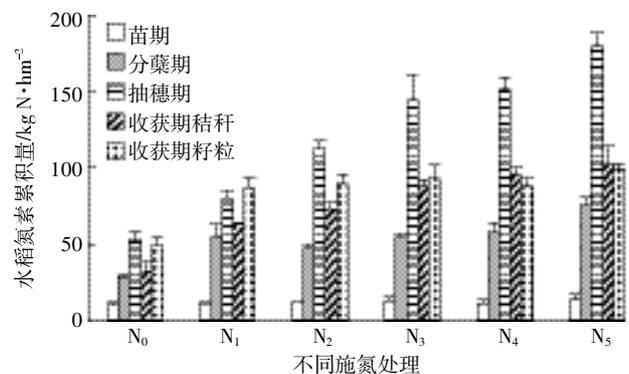


图1 不同施氮处理下关键生育期氮素累积量

Figure 1 Nitrogen uptake by rice plant at critical growing stages under different N treatments

2.3 不同施氮量下水稻产量、总氮径流损失及农学效率

不同施氮量下稻田总氮径流损失、农学效率及水稻产量如图2所示。当施氮量小于 $135\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,随着施氮量的增加,水稻产量显著增加,但当施氮量高于 $135\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水稻增产效果则不显著。这与供试土壤较高的速效氮含量有关^[18],两者之间呈抛物线关系变化,其拟合方程可以表示为:

$$Y=3\,999.9+21.884x-0.0451x^2 \quad (R^2=0.99, P<0.01)$$

式中: Y 为产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; x 为施氮量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

氮肥农学利用效率和总氮径流损失与施氮量密切相关。随着施氮量的增加,氮肥的农学效率显著下降,从 N_1 处理的 $14.7\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 N_5 处理的 $8.83\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而总氮径流损失则显著上升(图2)。氮肥农学效率和总氮径流损失与施氮量(x)呈二次曲线关系($P<0.01$),分别可以描述为:

$$AE_N=28.59-0.132\,6x+0.000\,2x^2 \quad (R^2=0.99^{**})$$

$$TNL=4.513+0.0512x+55.994\times 10^{-5}x^2 \quad (R^2=0.99^{**})$$

式中: AE_N 为氮肥农学效率, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; TNL 为总氮径流损失, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

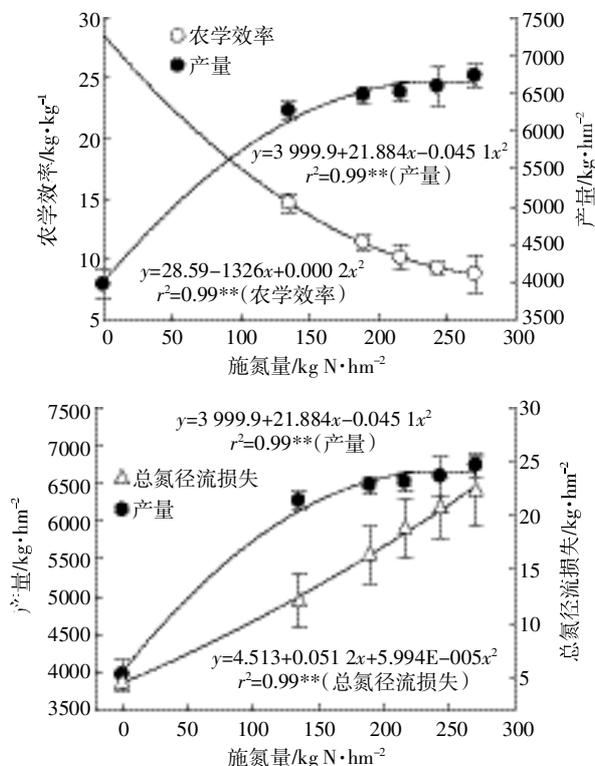


图2 不同施氮量下稻田总氮径流损失、农学效率及水稻产量
Figure 2 Nitrogen runoff losses, nitrogen use efficiency, and grain yield under different N treatments

数据表明,该季平均水稻氮肥农学效率为 $10.9\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对于 Qiao 等^[19]和赵冬等^[17]的结果分别高出 10% 和 39%。鉴于该区域土壤含有较高的速效氮 ($173\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),该季水稻氮肥农学效率的增加主要是因为水稻品种的改变^[18]。

水稻氮素积累、农学效率和总氮径流损失均与施氮量密切相关。施氮量加大可显著增加水稻氮素累积量,苗期后施氮量和氮素累积量均存在正相关关系($P<0.05$),收获期最高氮素累积量值出现于最高氮肥

施用量 N_5 ($270\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$) 处理。相对而言,施氮量主要影响秸秆的氮素积累,对籽粒氮素积累影响则较小。但是,氮素的过量累积会延长作物生育期,从而影响抽穗后期氮素转运,并最终导致减产^[20-21]。更重要的是,当施氮量超过 $135\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,产量增加并不明显,不同处理间产量差异亦不显著,但氮肥的农学效率不断下降,总氮径流损失也不断提高。因此,该地区氮肥用量需考虑氮肥利用率及氮素径流损失,否则盲目增加氮肥的施用量,不仅不会增加水稻产量,反而降低氮肥农学效率并提高氮肥总氮径流损失,给周边环境造成较大的压力。

3 结论

施氮可显著提高水稻顶三叶 SPAD 值,但提高施氮量对水稻顶三叶 SPAD 值影响较小;同样地,施氮对土壤溶液矿质态氮和土壤矿质态氮影响不大。低氮投入并未对产量造成显著下降,但可显著减少总氮径流损失。在综合考虑产量、农学效率和环境效益的基础上,结合先前的研究结果和建议^[17],本文推荐污染严重区域稻季可采用 $135\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 或更低的施氮量,在保证作物产量前提下,可减少稻田氮素流失对环境的影响。而更低施氮量的经济收益和环境效益如何,值得进一步试验进行探讨。

参考文献:

- [1] 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[J]. 生态学报, 2000, 20(7): 559-662.
CUI Yu-ting, CHENG Xu, HAN Chun-ru, et al. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(7): 559-662.
- [2] Zhang F S, Fan M S, Zhang W F. Principles dissemination and performance of fertilizer best management practices developed in China[C]// Krauss K I, Heffer P. Fertilizer best management practice, general principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. Paris: IFA, 2007: 193-201.
- [3] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [4] Deng M H, Shi X J, Tian Y H, et al. Optimizing nitrogen fertilizer application for rice production in the Taihu Lake region, China[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(1): 48-57.
- [5] 陆宏鑫,吕伟娅,严成银,等. 太湖流域农业面源污染防治研究现状与展望[J]. 西南给排水, 2013, 35(3): 42-47.
LU Hong-xin, LÜ Wei-ya, YAN Cheng-yin, et al. Review on the characteristic and control measurements of agricultural non-point source pol-

- lution in Taihu Lake region[J]. *South West Water and Wastewater*, 2013, 35(3):42-47.
- [6] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1):1-8.
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):1-18.
- [7] 冯涛, 杨京平, 施宏鑫, 等. 高肥力稻田不同施氮水平下的氮肥效应和几种氮肥利用率的研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2006, 32(1):60-64.
FENG Tao, YANG Jing-ping, SHI Hong-xin, et al. Effect of N fertilizer and N use efficiency under different N levels of application in high-fertility paddy field[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Science)*, 2006, 32(1):60-64.
- [8] Zhang Y H, Zhang Y L, Huang Q W, et al. Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5):616-621.
- [9] Balasubramanian V, Moales A C, Cruz R T, et al. On-farm adaptation of knowledge-intensive nitrogen management technologies for rice systems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 53(1):59-69.
- [10] 李刚华, 丁艳锋, 薛利红, 等. 利用叶绿素计(SPAD-502)诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3):412-416.
LI Gang-hua, DING Yan-feng, XUE Li-hong, et al. Research progress on diagnosis of nitrogen nutrition and fertilization recommendation for rice by use chlorophyll meter[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3):412-416.
- [11] Wang B, Lai T, Huang Q W, et al. Effect of N fertilizers on root growth and endogenous hormones in strawberry[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(1):86-95.
- [12] Riley D, Barber S A. A Bicarbonate accumulation and pH changes at the soyben root-soil inter face[J]. *Proceedings of Soil Science Society of America*, 1969, 33:905-908.
- [13] 薛峰, 颜廷梅, 乔俊, 等. 太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(4):26-31.
XUE Feng, YAN Ting-mei, QIAO Jun, et al. Economic and environmental benefits of lower fertilizer application rate in paddy fields in Taihu area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4):26-31.
- [14] 宋男生, 范晓辉, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2):265-269.
SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui, LIN De-xi, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):265-269.
- [15] 李奕林, 王兴祥. 红壤区不同肥力水稻土根际硝化作用特征[J]. *土壤学报*, 2012, 49(5):962-970.
LI Yi-lin, WANG Xing-xiang. Nitrification in rhizosphere of rice in paddy soils different in fertility in red soil regions of subtropical China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5):962-970.
- [16] 郑永美, 丁艳锋, 王强盛, 等. 起身肥改善水稻根际土壤氮素分布与利用的研究[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(2):314-321.
ZHENG Yong-mei, DING Yan-feng, WANG Qiang-sheng, et al. Favorable effect of nitrogen before transplanting on nitrogen distribution and utilization efficiency in rice rhizosphere soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(2):314-321.
- [17] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4):743-749.
ZHAO Dong, YAN Ting-mei, QIAO Jun, et al. Change of different nitrogen forms in surface water of rice field and reduction of nitrogen fertilizer application in rice season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):743-749.
- [18] Richter J, Roelcke M. The N-cycle as determined by intensive agriculture—examples from central Europe and China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57:33-46.
- [19] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2012, 146:103-112.
- [20] Dobermann A. Nutrient use efficiency—measurement and management [C]//Krauss K I, Heffer P. Fertilizer best management practice, general principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. Paris: IFA, 2007:1-28.
- [21] Jiang L G, Jiang D T, Cao D, et al. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars [J]. *Field Crops Research*, 2004, 88(2):239-250.
- [22] Yoshida T, Padre B. Transformation of soil and fertilizer nitrogen in paddy soil and their availability to rice plant[J]. *Plant and Soil*, 1977, 47(1):113-123.