

太湖地区黄泥土壤水稻氮素利用与 经济生态适宜施氮量

黄进宝^{1,2}, 范晓晖^{1,*}, 张绍林¹, 葛高飞³, 孙永红³, 冯 霞³

(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 100039; 3. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

摘要 通过田间试验对不同施肥水平下太湖地区黄泥土壤水稻的氮肥吸收规律和氮肥利用效率进行了研究,并应用¹⁵N 微区试验测定不同氮肥水平下氮肥损失数量。在此研究数据基础上,引入数学的微积分原理和环境经济学的 Coase 原理,对该地区水稻田氮肥施用的经济效益和环境效益进行评价,求得 219 ~ 255 kg hm⁻² 为太湖地区黄泥土上目前生产条件下,兼顾生产、生态和经济三效益比较合理的水稻施肥量,相应的经济、生态适宜产量为 8601 ~ 8662 kg hm⁻²。

关键词 氮肥吸收利用, ¹⁵N 示踪技术, 经济生态施氮量

文章编号: 1000-0933 (2007) 02-0588-08 中图分类号: S174.2, S181 文献标识码: A

Investigation on the economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer applied in rice production in Fe-leaching-Stagnic Anthrosols of the Taihu Lake region

HUANG Jin-Bao^{1,2}, FAN Xiao-Hui^{1,*}, ZHANG Shao-Lin¹, GE Gao-Fei³, SUN Yong-Hong³, FENG Xia³

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

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 Department of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (2) 0588 ~ 0595.

Abstract : The roles of nitrogen absorption and nitrogen utilization efficiency under different fertilizer rates were studied in a field experiment involving Taihu Lake region Fe-leaching-Stagnic Anthrosols. The ¹⁵N tracer technique was also employed to reliably calculate the amount of nitrogen loss. We measured rice yields, nitrogen utilization efficiencies, and the amounts of nitrogen loss under different levels of application of nitrogen fertilizer in the paddy field. The economic benefit and environmental benefit were evaluated with the data obtained from the experiment. In accordance with the calculus theory of mathematics and the Coase Theorem of Environmental Economics, the results showed that the ecologically and economically appropriate amount of nitrogen fertilizer for producing rice in this area was in the range: 219 — 255 kg hm⁻², and the corresponding economic and ecological yield was in the range: 8600 — 8661 kg hm⁻² using current agricultural production

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目 (KZCX2-413-3); 国家自然科学基金重大资助项目 (30390080); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2005CB121108)

收稿日期: 2006-01-11; 修订日期: 2006-06-27

作者简介: 黄进宝 (1980 ~) 男, 山东沂水人, 硕士生, 主要从事土壤与植物营养研究. E-mail: huangjibao@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhfan@issas.ac.cn

Foundation item : The project was financially supported by the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-413-3), the National Natural Science Foundation of China (No. 30390080), the Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (No. 2005CB121108)

Received date 2006-01-011; **Accepted date** 2006-06-27

Biography : HUANG Jin-Bao, Master candidate, mainly engaged in soil and plant ecology. E-mail: huangjibao@163.com

technology.

Key Words : Nitrogen absorption and utilization ; ^{15}N tracer technique ; Economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer applied , Coase Theorem

氮素肥料的过多施用对生态环境造成的严重破坏已经令举世忧虑。许多学者研究提出 ,地下水的硝酸盐污染、湖泊富营养化、温室效应、臭氧层破坏都被认为与氮素肥料的过量施用有关^[1,2]。目前太湖地区农村经济发达地区稻田氮肥施用方式是无机化、高氮量施肥 ,水稻平均氮肥用量已达 300kg hm^{-2} ,有的农田甚至达到 350kg hm^{-2} ,肥料的增产作用已微乎其微 ,如果仍一味地增加化肥用量 ,则会更加降低肥料利用率 ,加重对环境的污染^[2~4]。

为了系统的探索高肥力地区稻田氮肥的合理施用问题 ,本试验在前人的工作基础上开展了太湖区域黄泥土壤不同氮肥用量处理对水稻氮素吸收、氮素平衡和水稻产量影响的研究 ,同时引入环境经济学的 Coase 原理^[5]和数学微积分原理 ,试图求得水稻兼顾生产、生态和经济三效益比较合理的施氮肥量 ,以求对当前太湖地区黄泥土土壤的水稻生产和环境保护具有指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地与土壤

试验于 2004 年 6 ~ 10 月在江苏省常熟市王庄镇家鑫村的稻田中进行 ,土壤为黄泥土。土壤基本农化性状见表 1。有机质采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化测定 ,全氮采用开氏消煮法 ,全磷采用酸溶-钼锑抗比色法 ,全钾采用高氟酸-高氯酸消煮法 ,有效磷用 Olsen 法 ($0.5\text{ mol L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$)提取 ,速效钾采用 $1\text{mol L}^{-1}\text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提 ,pH 用 2.5:1 的水土比搅拌静置测上清液。

表 1 供试土壤基本农化性状
Table 1 The agro-chemical properties of soil tested

pH	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	全氮 Total N (g kg^{-1})	全磷 Total P (g kg^{-1})	全钾 Total K (g kg^{-1})	有效磷 Olsen-P (mg kg^{-1})	速效钾 Available K (mg kg^{-1})
5.39	24.6	1.64	0.51	16.4	5.35	76.5

1.2 试验设计

试验在 2004 年 6 ~ 10 月进行 ,共设 7 个施氮处理 ,即分别在水稻生育期施尿素态氮 0 ,100 ,150 ,200 ,250 , 300kg hm^{-2} 和 350kg hm^{-2} ,代号分为 N0、N1、N2、N3、N4、N5 和 N6 ;所有处理 P、K 肥用量相同 ,P 肥为 P_2O_5 60 kg hm^{-2} ,K 肥为 K_2O 120 kg hm^{-2} 。P、K 肥是基肥一次性施入 ,氮肥分基肥 (40%)、分蘖肥 (20%)和孕穗肥 (40%) 3 次施入。小区面积为 30m^2 ,随机区组排列 ,重复 4 次共 28 个小区。

微区试验用高 60cm ,半径为 20cm 两端开口的 PVC 筒打入对应处理的每个小区里 ,打入各小区土中约 45cm ,高出田面约 15cm ,筒距田埂 1.5m ,施肥量与所在的小区相同^[6]。肥料为国产尿素 , ^{15}N 肥料是丰度为 5.046% 的标记尿素肥料。基肥为无水层混施随即灌水 ,追肥则为表面撒施 ,水稻品种为武育 5021。

1.3 测定方法与评价指标

1.3.1 植株土壤全氮测定采用开氏消煮法

^{15}N 微区试验样品使用同位素质谱仪 MAT251 测 ^{15}N 丰度以计算植株各部分吸收的和土壤残留的 ^{15}N 的量 ,并以此计算氮素损失量^[7,8]。

1.3.2 氮素吸收与利用效率评价指标^[6,9,10]

氮素积累总量 (total nitrogen accumulation , TNA) :成熟期单位面积植株 (茎叶和穗)氮素积累量的总和。
氮素干物质生产效率 (nitrogen dry matter production efficiency , NDMPE) :单位面积植株干物质积累量与单位面积植株氮素积累量 (TNA) 的比值。

氮素稻谷生产效率 (nitrogen grain production efficiency , NGPE) :单位面积籽粒产量与单位面积植株氮素积累量之比。

氮素收获指数 (nitrogen harvest index , NHI) :成熟期单位面积植株穗部氮素积累量与植株氮素积累量之比。

氮素农艺指数 (nitrogen agronomy efficiency index , NAE) :施氮区与不施氮区产量之差与施氮水平之比。

氮素回收效率 (nitrogen recovery efficiency , NRE) :施氮肥区与不施氮肥区植株氮素积累量之差占施氮量的百分比。

2 结果与分析

2.1 氮肥用量与水稻对氮素养分的吸收

2.1.1 不同氮肥用量下水稻氮素吸收的动态变化

本试验按照水稻插秧后不同的时间段来取样 ,以此探求水稻的吸氮量与施肥量和时间的关系 ,建立该地区黄泥土水稻养分需求与施肥量和时间关系的规律模型 ,更好的指导农民施肥。

由图 1 可以看出 ,各施肥处理插秧移栽后植株的吸氮量随着时间的变化 ,先是缓慢增加 ,然后迅速增加 ,后来又趋于缓慢 ;呈一个单 “S” 型。插秧后的第 1 个 15d ,吸氮量为 12 ~ 22kgN hm⁻² ,第 2 个 15d 则为 20 ~ 36kgN hm⁻² ,到了第 3、4 个 15d 则分别为 48 ~ 93 kgN hm⁻² 和 69 ~ 145 kgN hm⁻² ,然而到了第 6 个 15d 即插秧后 3 个月后 ,水稻植株的吸氮量很少 ,甚至为趋近于 0 (如图 1)。

各施肥处理的吸氮量在前期差异很小 ,但是随着时间的推移 ,到了后期 ,特别是插秧后的第 3 个 15d ,即一个半月以后差异逐渐表现出来 (如图 1)。统计结果表明 ,N0 处理 (即无氮区)水稻吸氮量与所有的氮肥处理 ,N1、N2、N3 施肥处理与 N5、N6 差异极显著 ($P < 0.01$) ;高氮施肥处理 N4、N5、N6 之间 ,N4 与 N5、N6 处理间差异显著 ($P < 0.05$) ,而 N5、N6 处理间差异不显著。这充分说明虽然水稻植株吸氮量会随着施肥量的增加而增加 ,但是如果施肥量高到一定的程度植株的吸氮量就不再增加 ,多施的肥料就会损失掉 ,这样将增加农田生态环境中活性氮 ,加重环境的负担 ,同时降低农民的经济效益 ,得不偿失。这就要求从事农业科技和环境科学的科研工作者 ,加大这一方面的科研和科技推广力度 ,以减轻环境污染 ,提高农民的经济效益。

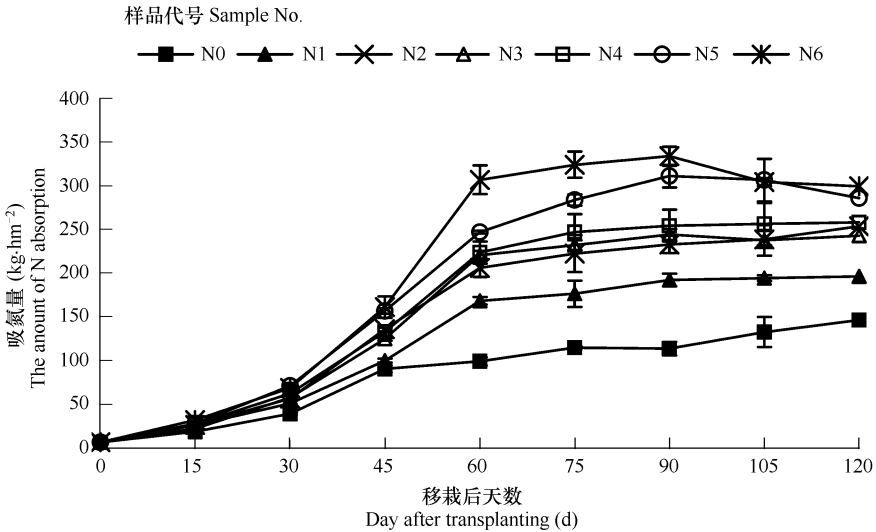


图 1 移栽后水稻吸收氮素的动态变化

Fig. 1 The dynamic change of nitrogen absorption by rice after transplanting

回归分析得到以施氮量和插秧后天数为自变量 ,以吸氮量为因变量的二元一次模型曲线方程 ,即

$$y = 0.325x + 2.262t - 45.435 \quad R = 0.912^{**}$$

模型曲线方程中 y 代表吸氮量 (kg hm⁻²) , x 代表肥料氮用量 (kg hm⁻²) ,而 t 代表插秧后天数 (d)。

2.1.2 不同氮肥用量下水稻的氮素利用率

到目前为止,氮肥利用率 (fertilizer N use efficiency ,FNUE)的定义在国内仍然没有形成统一的标准。国外通用的氮肥利用率的定量指标有氮肥吸收利用率 (recovery efficiency ,或 uptake efficiency ,RE),氮肥生理利用率 (physiological efficiency ,PE),氮肥农学利用率 (agronomic efficiency ,AE)和氮肥偏生产力 (partial factor productivity of applied N ,PFP) ,这些指标从不同的侧面描述了作物对氮素或氮肥的利用率^[11,12]。氮肥吸收利用率 (RE)是指施肥区作物氮素积累量与空白区氮素积累量的差占施用氮肥总氮量的百分数。氮肥生理利用率 (PE)反映了作物对所吸收的肥料氮素在作物体内的利用率 ,其定义为作物因施用氮肥而增加的产量与相应的氮素积累量的增加量的比值。氮肥农学利用率 (AE)则是作物氮肥吸收利用率与生理利用率的乘积 ,指作物施用氮肥后增加的产量与施用的氮肥量之比值。氮肥偏生产力 (PFP)则反映了作物吸收肥料氮和土壤氮后所产生的边际效应 ,定义为作物施肥后的产量与氮肥施用量的比值^[13]。

本文采用了国内普遍使用的氮素积累总量、氮素回收效率、氮素干物质生产效率等 (如表 2)评价指标。

表 2 不同施氮水平下水稻氮素吸收与利用效率

Table 2 Nitrogen uptake and utilization efficiency by rice under different nitrogen fertilizer rate

样品代号 Sample No. code	施氮量 N rate (kg hm ⁻²)	氮素积累总量 TNA (kg hm ⁻²)	氮素回收率 NRE (%)	氮素干物质生产 效率 NDMPE (kg kg ⁻¹)	氮素稻谷生产 效率 NGPE (kg kg ⁻¹)	氮素收获指数 NHI	氮素农艺效率 NAE (kg kg ⁻¹)
N0	0	150.8	—	92.1	44.5	0.74	—
N1	100	196.0	45.2	80.91	40.6	0.69	12.6
N2	150	246.0	63.4	73.2	35.6	0.66	13.6
N3	200	230.6	39.9	78.3	37.1	0.65	9.1
N4	250	258.0	42.9	71.7	34.8	0.65	9.0
N5	300	285.6	44.9	62.4	30.6	0.63	6.8
N6	350	274.4	35.3	68.2	31.9	0.61	5.8

在无肥条件下作物吸收养分量是土壤供肥特性的一个指标 ,由表 2 可以看出 ,无肥区 (N0)从土壤中带走氮素 150.8kg hm⁻² ,从农田生态系统养分平衡的角度看 ,必须通过补充由于水稻收获带走的养分 ,以保持整个系统的养分收支处于平衡状态 ,可以说无肥区养分吸收量是制定施肥计划的重要参数^[14,15]。

表 2 表明 ,随着施氮量的增加 ,不同氮肥处理的氮素积累总量 (TNA) (即地上部的吸氮量)有增加的趋势 ,但是低氮处理之间差异明显一些 ,而高氮处理之间较不明显 ,甚至出现逆转现象 ,这可能是由于田间取样误差造成的 ,同时也充分说明了随着施氮量的增加 ,水稻氮素积累总量增加趋于缓慢 ,当氮肥用量高到一定程度后 ,氮素积累总量将不再增加或者几乎不增加 ,甚至会因过量施用氮肥造成水稻倒伏或者其他不利水稻生长的因素 ,使得水稻吸氮量降低。

随着肥料氮用量的增加 ,氮素回收率 (NRE)有降低的趋势 ,由最高的 63.4% 降到 35.3%。与此同时 ,氮素干物质生产效率 (NDMPE)也降低 ,由 92.1kg kg⁻¹ 降到 68.2 kg kg⁻¹ ,降低了 25.9% ,而氮素干物质生产效率表示作物吸收单位氮素所生产的干物质的千克数 ,氮素干物质生产效率降低则表明作物将吸收的氮素转化为干物质的能力降低 ,即出现了氮素的“奢侈吸收”。氮素农艺效率 (NAE)也随着施氮量的增加趋于降低 ,由最高的 13.6 kg kg⁻¹ 降低到 5.8 kg kg⁻¹ ,降低了 57.4%。也就是说 ,随着氮肥用量的增加 ,氮肥的利用率在降低 ,氮素的生理利用率在降低 ,氮肥的偏生产力也在降低。

随着施氮量增加 ,氮素稻谷生产效率 (NGPE)和收获指数 (NHI)都有降低的趋势 ;NGPE 由 44.5kg kg⁻¹ 降低到 30.6kg kg⁻¹ ,NHI 由 0.74 降低到 0.61。这表明 ,虽然施氮肥能增加植株籽粒的含氮量 ,但籽粒含氮量占整个地上部含氮量逐渐降低 ,并且吸收单位氮素所生产的稻谷的千克数也在降低 ,说明高氮水平下水稻吸收的氮素主要被茎秆截留 ,致使营养生长过旺。在水稻成熟期间 ,在田间同时可以看到 ,氮肥用量大的处理 ,水稻容易贪青 ,成熟晚 ,而且容易倒伏 ,稻谷空秕率增加。

综合以上评价指标看出 ,随着氮肥用量的增加 ,不论是水稻氮素表观利用率还是生理利用率都是降低的 ,

氮素损失会带来财力的损失和环境的污染。并且氮肥用量增加 ,水稻稻谷生产率和收获指数也在降低 ,水稻空秕率增加 ,导致品质降低。因此要找出综合考虑各方面因素找出最佳结合点 ,即能提高经济效益增加农民的收入 ,又不使环境受到太大的污染。

2.2 氮肥用量与水稻产量

2.2.1 不同等级氮肥用量与水稻产量

在一定范围内 ,随着施氮量的增加产量增加 ,到 N4 处理时达最大值 ,N5 处理时已经表现为产量下降 (图 2)。但总体看 ,处理间产量增加缓慢 ,统计分析表明 , N4 处理与 N1 和 N5 处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$) ,另外 N4 与 N1 间达到极显著水平 ($P < 0.01$) ,其它施肥间的产量差异不显著 ,施肥增产的幅度在 14.8% ~33.6% 之间。究其原因 ,可能是因为在太湖地区 ,土壤基础肥力较高并且加上当地多年来大量施用氮肥 ,造成土壤中的氮肥积累 ,过量的外施氮肥增产效果不显著 ,而且施入的氮肥还会通过各种氮素损失途径如氨挥发、淋洗或硝化-反硝化等进入环境 ,在高氮条件下损失更为严重 ,这样不但造成了大量的经济损失 ,而且还给当地的环境带来巨大负担。

随着氮肥用量的增加 ,在产量增加的同时 ,平均产量和边际产量都在降低 (如表 3) ,到 N4 时 ,边际产量已为负值 ,致使产量下降。这主要因为高氮施用下的氮肥 “奢侈”吸收 ,进一步引起植株营养生长过旺 ,限制生殖生长 ,空秕粒增加 ,而且营养生长过旺植株整个生长环境郁闭 ,容易滋生病虫害 ,易倒伏 ,因此作物产量在高氮条件下产量反而会降低。

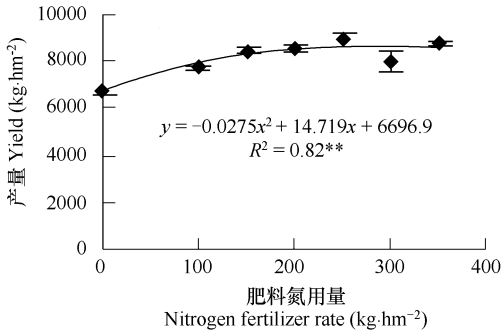


图2 水稻施肥量与产量关系

Fig. 2 The relationship between rice yields and the amount of N applied

表3 不同氮肥用量下水稻产量结果

Table 3 Rice yields under different nitrogen fertilizer rate					
处理号 Treatment code	氮肥用量 Nitrogen fertilizer rate (kg·hm ⁻²)	产量均值 The average amount of the yield (kg·hm ⁻²)	平均产量 Average yield (kg·kg ⁻¹)	边际产量 Marginal yield (kg·kg ⁻¹)	生产弹性系数 Elasticity of productivity
N0	0	6717 ^{dC}			
N1	100	7710 ^{cBC}	9.9	9.9	1.00
N2	150	8447 ^{abcAB}	11.5	14.7	1.28
N3	200	8580 ^{abAB}	9.3	8.6	0.93
N4	250	8976 ^{aA}	9.0	7.9	0.88
N5	300	8750 ^{bcAB}	5.8	-2.3	-0.39
N6	350	8011 ^{abAB}	4.3	-19.3	-4.48

平均产量为单位氮肥用量平均所能产生的粮食的数量 Average yield is the amount of grain produced by one u-nit of nitrogen fertilizer using on rice ,边际产量为增加单位氮肥用量所能增加的粮食数量 Marginal yield is the amount of increased grain produced by one increased unit of fertilizer using on rice ,生产弹性系数 elasticity of productivity ;EP ,为边际产量与平均产量之比 EP is the ratio of marginal yield to average yield

按照当地 2004 年市场价水稻稻谷为 1.70 元/kg ,尿素氮肥 (纯氮)按 4.57 元/kg 计算 ,令 Y 为净经济收入 ,M (常数)为农民每公顷稻田出肥料以外的投入 ,结合图 2 中施氮量-产量曲线方程可得到 :

Y = -0.04675x² + 20.454x + 11384.56 - M (1)

方程两边对 dx 求导得 :

dY/dx = -0.0935x + 20.454 (2)

根据微积分原理得知 ,当 dY/dx = 0 时 ,Y 得到最大值 ,也就是净经济收入最大 ,解方程 (2)可得 x = 219 ,即当施肥量为 219kg hm⁻²时 ,经济效益最佳 ,此时的产量为 8601 kg hm⁻²。

由此可见过量施用氮肥 ,不但产量会降低 ,经济效益也会下降 ,而且经济效益最大点往往出现在产量最大点之前。因此 ,农民过量施用氮肥是得不偿失的。太湖地区是我国经济较发达的地区 ,同时也是我国水稻主产区之一 ,当地稻田过量施用氮肥的现象非常普遍 ,这不但导致当地农民的经济效益显著降低 ,而且还给当地环境带来了很大的负面影响 ,地下水硝酸盐含量超标 ,河流湖泊富营养化严重等等。因此 ,急需建立一个兼顾产量、经济效益和环境效益的施肥方式和施肥量来指导当地稻田的氮肥施用。

2.2.2 生产、环境效益兼顾的施氮量

随着施氮量的增加 ,氮肥的边际产量迅速降低 ,而氮肥的边际损失量却迅速上升 ,到高肥阶段更是如此。根据环境经济学 Coase 原理 ,两线交点 ,即是兼顾生产、生态两个效益比较合理的施肥点 (如图 3)。此施肥量所对应的产量 Y^* 应为合理的产量 ,其他施肥量和产量则会产生消极的后果 ,若要求 $Y > Y^*$,则导致施肥量的增加 (在现有的生产条件和技术条件下) ,环境污染程度加重 ,若要求 $Y < Y^*$,虽然对环境影响较小 ,但不能发挥肥料的增产潜力 ,浪费肥料资源 ,而且在中国现有的国情条件下 ,也是不可能被人们接受的。

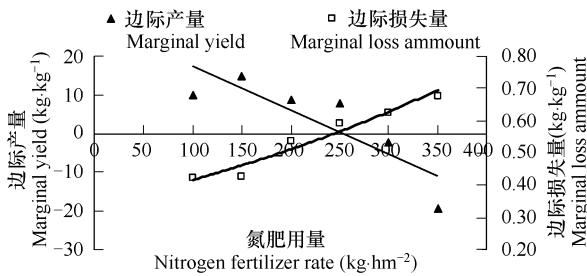


图3 水稻生产的生态适宜施氮量

Fig. 3 The ecological satisfactory amount of N fertilizer applied in rice

对试验数据进行计算机模拟 ,可得出产量、边际产量、损失量、边际损失量等生产函数方程 :

$$y = -0.0275x^2 + 14.72x + 6696.8 \tag{3}$$

$$dy/dx = -0.055x + 14.72 \tag{4}$$

$$y = 26.92e^{0.0059x} \tag{5}$$

$$dy/dx = 0.1588e^{0.0059x} \tag{6}$$

将 (4)、(6)联立方程组 ,可得 $x = 255$,即施肥量为 $255\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是目前生产条件下 ,太湖地区黄泥土水稻兼顾生产和环境效益比较适宜的施肥量 ,相应的产量为 $8662\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 4 ^{15}N 微区试验不同施氮量下肥料氮损失量

Table 4 The amount of ^{15}N fertilizer loss under different N rate in micro-plot experiments				
处理号 Treatment code	氮肥用量 (kg hm ⁻²) N fertilizer rate	^{15}N 损失百分率 (%) The percentage of ^{15}N loss %	计算肥料损失量 (kg hm ⁻²) Calculated fertilizer loss amount	边际氮损失量 (kg kg ⁻¹) Marginal N loss amount
N1	100	42.25	42.26	0.42
N2	150	42.45	63.68	0.43
N3	200	53.73	107.45	0.54
N4	250	49.09	122.74	0.59
N5	300	51.33	153.98	0.62
N6	350	53.66	187.82	0.68

注 边际损失量为增加单位氮肥用量所增加的氮素损失的量 Marginal N loss amount is the increased amount of N loss produced by one increased unit of fertilizer using on rice

所以 ,本试验可以得出 $219 \sim 255\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为目前生产条件下 ,太湖地区黄泥土兼顾生产、生态和经济三效益 ,比较合理的氮肥用量 ,相应的生态经济适宜产量范围为 $8601 \sim 8662\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。如果考虑到施肥间产量差异的不显著性 ,可选择 $219 \sim 255\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的下限为目前水稻生产、生态和经济效益兼顾的适宜氮肥用量。这和一些学者的研究结果相似 [3,4,9]。当然 ,三效益兼顾的适宜施肥量也不是固定的 ,它会随着生产条件和技术条件的改变而发生变化 ,或受市场价格的影响 ,即随着化肥价格的升高 ,水稻价格的下降 ,两线交点将向左移 ,即施肥量减少 ;否则 ,交点将向右移 ,即施肥量增加。

3 讨论

在过去的 30a 来提高水稻氮肥利用率的研究重点主要锁定在如何最大限度地减少氮的挥发和反硝化作

用而降低氮素的损失。人们在研究新的施肥方法以及改变氮肥型态来降低氮素损失方面取得了重大进展。另一重要的研究领域是关于最适施肥时期和采用最佳施氮量的研究,研究目标是促进作物对氮肥的吸收利用。研究者们也试图通过育种的手段来提高作物的氮肥利用率,减少氮肥损失,不过这一方面所取得的进展还未见大面积应用的报道^[16]。

改进施肥方法大多采用氮肥深施,田面无水层混施然后灌水,“以水带氮”等措施^[17,18]。但是这些措施都需要投入很多劳力,在实践中推广有一定的难度。改进肥料剂型则主要是制成包膜肥料,在肥料中添加脲酶抑制剂、硝化抑制剂,或向田面水中撒施表面分子膜和杀藻剂等^[19~21]。但是,又由于材料昂贵或是添入材料后会带来污染等等原因,限制了在生产实践中的大面积推广。

然而确定适宜的施肥时期和最佳施肥量却是一种既安全又环保的措施,在实践中容易推广。而且这种措施也易于结合模型和 GIS 技术,把点上的试验结果推导到大面积的区域上应用,以此进行区域施肥的总量控制,达到减少氮肥污染的目的。因此这方面的研究工作应该在氮肥损失污染严重的区域加大力度,可以通过多年多点的研究数据建立某区域能兼顾生产、经济和环境三效益的氮肥施用模型,指导农民施肥。

4 结论

(1)水稻整个生育期氮素吸收利用的规律是先缓慢增加,然后迅速增加,后来又趋于缓慢,呈一个单“S”型,这充分说明了水稻生育前期追肥的重要性。水稻植株吸氮量在一定施肥量范围内会随着施肥量的增加而增加,但是如果施肥量高到一定的程度植株的吸氮量就不再增加,多施的肥料就会损失掉,增加环境中的活化氮,加重环境的负担。

(2)随着氮肥用量的增加,不论是水稻氮素表观利用率还是生理利用率都是降低的,氮素损失会带来财力的损失和环境的污染。

(3)分别根据数学上的微积分原理和环境经济学的 Coase 原理,计算出太湖地区黄泥土壤经济效益最佳和环境效益的施肥量分别为 219 kg hm⁻²和 255 kg hm⁻²,由此对应的产量分别为 8601kg hm⁻²和 8662kg hm⁻²。

References :

[1] Li R G ,Cui Y T ,Cheng X. The nitrogen fertilizer using on rice and the continuable development of the environment in Tai Lake Watershed. *Culture with Planting* ,1999 ,(4) 49 — 63.

[2] Chen R Y ,Li X T ,Li A X. The nitrogen fertilizer economical using in high rice yield fields in Suzhou. *Acta Pedologica Sinica* ,1983 ,20 (4) 373 — 385.

[3] Li W B ,Wu L S ,Liao H Q. The investigation of nitrogen fertilizer using and the crop adsorption in the high rice yield fields in Tai Lake Watershed. *Acta Pedologica Sinica* ,1997 ,34 (1) 67 — 72.

[4] Cui Y T ,Cheng X ,Han C R *et al.* The economic and ecological satisfacrory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake Watershed. *Acta Ecologica Sinica* ,2000 ,20 (4) 659 — 662.

[5] Cheng X ,Zeng X G eds. The discussion of the continuable agriculture. Beijing :Agricultural Press ,1997. 235 — 263.

[6] Wu P and Tao Q N. Genotypic response and selection pressure on nitrogen-use efficiency in rice under different nitrogen regimes. *Journal of Plant Nutrition* ,1995 ,18 (3) 487 — 500.

[7] Jiang S H. Measurement of total nitrogen of the plant. In :Lu R K ed. *analysis methods of the soil and agricultural chemistry*. Beijing :Chinese Agricultural & Scientific Press ,2000. 309 — 311.

[8] Cao Y C. Mass spectrum analysis methods of the nitrogen isotope. In :Lu R K ed. *analysis methods of the soil and agricultural chemistry*. Beijing :Chinese Agricultural & Scientific Press ,2000. 558 — 564.

[9] Jiang L G ,Cao W X ,Gan X Q ,*et al.* Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice. *Scientia Agricultura Sinica* 2004 ,37 (4) 490 — 496.

[10] Zhang S L ,Zhu Z L ,Xu Y H ,*et al.* Optimum nitrogen rate for rice-wheat system in Taihu Lake area. *Soils* ,1988 ,(1) 5 — 9.

[11] Novoa R ,Loomis R S. Nitrogen and plant production. *Plant Soil* ,1981 ,58 :177 — 204.

[12] Broadbent F E ,De Datta S K ,Laureles E V. Measurement of nitrogen utilization efficiency in rice genotypes. *Agronomy Journal* ,1987 ,(79) 786 — 791.

[13] Classman K G ,Pingali P L. Extrapolating trends from long-term experiments to farmers ' fields :the case of irrigated rice systems in Asia. In :V.

Barnett ed. Agricultural Sustainability in Economic , Environmental and Statistical Terms. London , UK : John Wiley and Sons , Ltd. ,1995. 63—68.

[14] Song Y S , Fan X H. Nitrogen uptake and its utilization by rice in paddy field of Taihu area. Chinese Journal of Applied Ecology ,2003 ,14 (1) : 2081—2083.

[15] Gao J H ,Huang D M ,Zhu P L. Discussion on the absorption and utilization organic and inorganic fertilizer nitrogen and soil nitrogen by rice. Acata Pedologica Sinica ,1983 ,20 (1) : 1—11.

[16] Peng S B , Huang J L , Zhong X H , *et al.* Research Strategy in Improving Fertilizer-nitrogen Use Efficiency of Irrigated Rice in China. Scientia Agricultura Sinica ,2002 ,35 (9) :1095—1013.

[17] Liu M C , Zeng C L , Wang X R , *et al.* Effects of Nitrogen Fertilizer in Winter wheat on Its Utilization Rate and Dynamic Distribution of NO₃⁻ -N in Soil Layers. Research of Agricultural Modernlization ,2000 ,21 (5) :309—312.

[18] Liu N S , Sun W Z , Xiao M. Effect of different ways of N-fertilizer on yield of rice. Hei Longjiang Agricultural Science ,1994 ,6 :5—8.

[19] Purakayastha T J , Katyal J C. Evaluation of compacted urea fertilizers prepared with acid and non acid producing chemical additives in three soil varying in pH and cation exchange capacity I. NH₃ volatilization. Nutr. Cycl. Agroecosyst. ,1998 ,51 :107—115.

[20] Nastri A , Toderi G , Bernti , *et al.* Ammonia volatilization and yield response from urea applied to wheat with urease (NBPT) and nitrification (DCD) inhibitors. Agrochimica ,2000 ,5 (6) :231—238.

[21] Yin B , Shen R F , Zhu Z L. Use of new water surface film-forming material to reduce ammonia loss from water solution. Pedosphere ,1996 ,6 (4) : 329—334.

参考文献：

[1] 李荣刚 ,崔玉亭 程序. 苏南太湖地区水稻氮肥施用与环境可持续发展. 耕作与栽培 ,1999 , (4) :49~63.

[2] 陈荣业 ,李秀廷 ,李阿秀. 苏州高产稻区氮肥的经济使用. 土壤学报 ,1983 ,20 (4) :373~385.

[3] 李伟波 ,吴留松 ,廖海秋. 太湖地区高产稻田氮肥使用与作物吸收利用的研究. 土壤学报 ,1997 ,34 (1) :67~72.

[4] 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 ,20 (4) :659~662.

[5] 程序 ,曾晓光主编. 可持续农业导论. 北京 :农业出版社 ,1997. 235~263.

[7] 蒋式洪. 植物全氮的测定. 见 :鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京 :中国农业科技出版社 ,2000. 309~311.

[8] 曹亚澄. 氮同位素质谱分析法. 见 :鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京 :中国农业科技出版社 ,2000. 558~564.

[9] 江立庚 ,曹卫星 ,甘秀芹 ,等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响. 中国农业科学 ,2004 ,37 (4) :490~496.

[10] 张绍林 ,朱兆良 ,徐银华 ,等. 关于太湖地区稻麦上氮肥的适宜用量. 土壤 ,1988 , (1) :5~9.

[14] 宋勇生 ,范晓晖. 太湖地区稻田氮肥吸收及其利用的研究. 应用生态学报 ,2003 ,14 (11) :2081~2083.

[15] 黄东迈 ,高家骅 ,朱培立. 水稻吸收利用有机无机肥料氮和土壤氮的讨论. 土壤学报 ,1983 ,20 (1) :1~11.

[16] 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.

[17] 刘敏超 ,曾长立 ,王兴仁 ,等. 氮肥施用对冬小麦氮肥利用率及土壤剖面硝态氮含量动态分布的影响. 农业现代化研究 ,2000 ,21 (5) :309~312.

[18] 刘乃生 ,孙维忠 ,肖免. 水稻不同施氮方式对产量的影响. 黑龙江农业科学 ,1994 ,6 :5~8.