

# 太湖地区主要土壤上水稻氮素吸收利用的研究<sup>①</sup>

赵洪涛, 周健民, 范晓晖\*, 刘崇群  
(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘 要:** 通过在太湖地区两种主要水稻土(黄泥土和乌栅土)上的田间小区试验,研究了水稻在不同 N 水平下对 N 吸收变化规律、N 素表观利用率以及 N 肥的增产效果和经济效益。研究结果表明:水稻在两种土壤上的吸 N 速率均在分蘖结束后到开始孕穗即孕穗期最快,施 N 处理的吸 N 速率大约在 N 2.2~4.2 kg/(hm<sup>2</sup>·d)。两种土壤不同施肥处理下化肥 N 利用率的变化范围在 31.6%~46.2% 之间,平均为 37.6%。N 肥最佳施用量黄泥土为 N 227 kg/hm<sup>2</sup>,乌栅土为 N 255 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 水稻土; 氮素利用率; 经济效益

**中图分类号:** S143

我国农田土壤普遍缺 N,增加 N 肥投入是发展农业生产的关键性措施之一。但是,N 肥的利用率低、损失大的问题较为突出,增产效果没有得到充分发挥,而且还引起了一些环境问题。减少农田中 N 肥的损失,提高作物对 N 肥的利用率一直是土壤肥料工作者面临的一项重要任务<sup>[1]</sup>。

随着乡镇企业的发展和农村城市化进程的加快,我国太湖地区大面积高肥力稻田长期坚持的“草塘泥+化肥”有机无机配合施肥制度已在生产上消失。取而代之的是施用大量化学肥料,尤其是 N 素化肥的施用量急剧增加,形成“无机化高氮化”施肥格局<sup>[2]</sup>。并且施 N 量逐年增加,20 世纪 90 年代太湖地区部分地区施 N 量已达到了 N 520 kg/hm<sup>2</sup>,是该地区 1982 年的 1.3 倍,1978 年的 2.1 倍<sup>[3-4]</sup>。在“无机化高氮化”施肥条件下,水稻单产和经济效益并没有显著提高,相反,给农村的生态环境带来了污染。N 肥用量过度,无论是无机 N 肥或有机肥都会在土壤中积累<sup>[5]</sup>,这就为造成地下水污染带来了潜在危险;并且由于 N 肥的利用率低,也带来大气、水污

染,造成了不必要的经济损失,影响了人体健康<sup>[6-7]</sup>。

太湖地区的主要土壤为黄泥土和乌栅土,通过田间试验确定这两种土壤的适宜施 N 量对减少 N 肥损失、提高 N 肥利用率具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验处理

试验于 2003 年在江苏省常熟市的辛庄镇农技站试验地和王庄镇北新桥农场进行。土壤分别为乌栅土和黄泥土。0~20 cm 土壤的理化性质见表 1。两种土壤前作均为小麦,于 2003 年 6 月 20 日移植水稻,水稻品种均为苏香粳,10 月 25 日收获。分别在乌栅土和黄泥土上设 5 个处理:①CK,为无 N 对照区,不施任何 N 肥;②U1,为施尿素 N 100 kg/hm<sup>2</sup>;③U2,施尿素 N 200 kg/hm<sup>2</sup>;④U3,施尿素 N 300 kg/hm<sup>2</sup>;⑤U4,施尿素 N 350 kg/hm<sup>2</sup>。

试验小区面积为 30 m<sup>2</sup> (6 m×5 m),各小区之间筑 20 cm 高的埂,水稻种植密度与当地习惯一致。每个处理重复 4 次,采用随机排列。每个处理 P 肥

表 1 供试土壤的理化性状  
Table 1 Some basic physico-chemical properties of tested soils

土壤	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	有效 P (mg/kg)	有效 K (mg/kg)	pH (水:土 =2.5:1)
乌栅土	39.3	2.52	0.823	20.4	16.6	100.0	6.98
黄泥土	24.6	1.64	0.508	16.4	5.35	76.5	5.39

①基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413-3)、国家自然科学基金重大项目(30390080)资助。

\* 通讯作者

作者简介:赵洪涛(1978—),男,山东平原人,硕士研究生,主要从事土壤与肥料的研究。E-mail: htzhao@163.com

和 K 肥用量一致, P 肥 (过磷酸钙)  $P_2O_5$  60 kg/hm<sup>2</sup>, K 肥 (氯化钾)  $K_2O$  120 kg/hm<sup>2</sup>。N 肥的分配比例为基肥:分蘖肥:孕穗肥 = 5:2:3; 施肥方式为有水层混施或撒施, P、K 也同时施入。

## 1.2 测定项目与方法

采样: 在水稻分蘖期和孕穗期分别随机采集植株样品, 测定植株的生物量和植株的全 N 含量。收获后, 测定籽粒和秸秆产量及全 N 含量。

植株全 N: 凯氏法测定。

表观 N 素利用率: 用差值法测得 N 肥利用率, 一般是在试验中设置施 N 区和不施 N 区两个基本处理, 分别测出作物体内 N 素的吸收量, 按下式计算<sup>[2]</sup>:

$$N \text{ 肥利用率 } (\%) = \frac{\text{施 N 区作物吸 N 量} - \text{无 N 区作物吸 N 量}}{\text{所施 N 肥的总 N 量}} \times 100\%$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 水稻对 N 素的吸收规律

在不施 N 条件下作物吸收的 N 量是土壤供 N 特性的一个指标。由表 2 和表 3 可见, 无 N 区 (CK) 水稻从黄泥土和乌栅土中带走的 N 分别是 N 134 kg/hm<sup>2</sup> 和 149 kg/hm<sup>2</sup>。从农田生态系统养分平衡的角度看, 必须通过施肥来补充由于水稻收获后带走的养分, 保持整个系统的 N 素养分收支平衡状态, 可以说无 N 区 N 素吸收量是制定施 N 计划的重要参数。

表 2 黄泥土水稻吸 N 量

Table 2 N uptake by rice in Huangni soil (kg/hm<sup>2</sup>)

处理	分蘖期	孕穗期	成熟期			籽粒/地上部 (%)
			籽粒	茎秆	地上部	
CK	24.0b	106c	96.6c	37.7d	134	71.9
U1	41.5a	107c	124b	59.6c	183	67.5
U2	42.2a	119bc	145a	82.4b	227	63.7
U3	38.3a	164a	156a	106ab	262	59.4
U4	41.3a	145ab	148a	100a	248	59.6

注: 不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

表 3 乌栅土水稻吸 N 量

Table 3 N uptake by rice in Wushan soil (kg/hm<sup>2</sup>)

处理	分蘖期	孕穗期	成熟期			籽粒/地上部 (%)
			籽粒	茎秆	地上部	
CK	39.4b	101c	110d	39.8c	149	73.4
U1	39.0b	128b	139c	52.4c	191	72.7
U2	49.5ab	144ab	152b	80.3b	232	65.4
U3	48.7ab	156a	171ab	97.8a	269	63.6
U4	58.4a	149a	180a	102a	282	63.7

不同施肥处理下, 养分吸收总量的趋势是随着施 N 水平的提高而增加, 当然由于施 N 量过高引起水稻倒伏减产的情况除外。在两种土壤上, 籽粒中占据着绝大部分 N 素养分, 施肥能够显著增加籽粒含 N 量, 籽粒含 N 量占整个地上部含 N 量的 59.4% ~ 73.4%; 但当施肥量超过 U1 时, 籽粒含 N 量占整个地上部含 N 量逐渐降低。由于黄泥土和乌栅土的理化性质存在差异, 水稻吸收 N 素籽粒/地上部的比

值乌栅土各个处理均比黄泥土高。

由图 1 可看出, 在乌栅土和黄泥土上水稻不同生育期 N 素吸收速率在从分蘖结束后至开始孕穗即孕穗期的吸收速率最快, 即大于分蘖期和成熟期的吸收速率, 并且施 N 处理的 N 素吸收速率大约在 N 2.2 ~ 4.2 kg/(hm<sup>2</sup>·d), 这与前人报道的研究结果 N 3.64 kg/(hm<sup>2</sup>·d) 基本一致<sup>[7]</sup>。因此, 在水稻前期生长旺盛, 吸肥速度很高, 在此时期施肥意义重大。

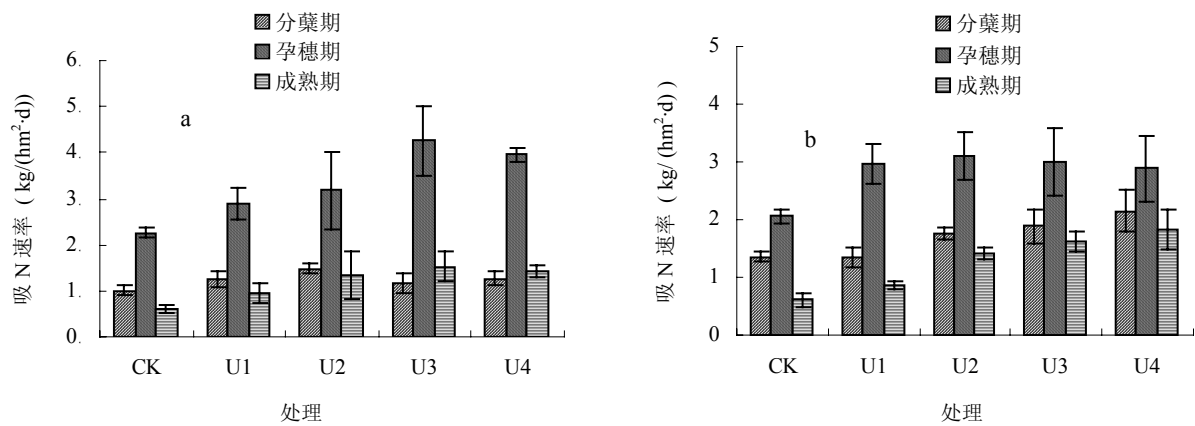


图 1 水稻不同生育期吸 N 速率变化 (a. 黄泥土 b. 乌栅土)

Fig. 1 Variation of N absorption rate by rice with the growth period

## 2.2 不同 N 素水平下水稻对 N 素的表观利用率

由表 4 可以看出, 每 100 kg 稻谷消耗的 N 素随着施 N 量的增加而增加。随着施肥量的增加, N 的“奢侈”吸收导致单位 N 肥产粮数量下降<sup>[8]</sup>。黄泥土每个施 N 水平上每 100 kg 稻谷消耗的 N 素比乌栅土要高, 并且黄泥土上施 N 量超过 U2 后或乌栅土上施 N 量超过 U3 后, 单位产量消耗的 N 素基本上达到一个稳定状态。这与宋勇生等<sup>[9]</sup>在该地区水稻

上的研究结果基本上一致。结合 N 肥表观利用率的高低, 基本上可以确定在太湖地区的乌栅土和黄泥土上 U2 处理的效果较好。

两种土壤不同施肥处理下化肥 N 利用率的变化范围在 31.6%~46.2%之间, 平均为 37.6%, 与宋勇生等<sup>[9]</sup>报道的 25.7%, 徐明刚等<sup>[10]</sup>和杨得海等<sup>[11]</sup>报道的 27% 都有所偏高, 可能与各试验供试土壤性质不同有关。

表 4 不同施肥处理下水稻对 N 肥的利用

Table 4 Effect of N fertilizer on N utilization rate by rice in Huangni soil and Wushan soil

处理	黄泥土		乌栅土	
	耗 N 量 (kg/100kg)	N 素表观利用率 (%)	耗 N 量 (kg/100kg)	N 素表观利用率 (%)
CK	1.55	—	1.41	—
U1	1.69	30.9	1.52	37.8
U2	1.83	45.9	1.63	46.2
U3	1.88	37.8	1.74	36.0
U4	2.02	31.6	1.79	35.0

## 2.3 N 肥施用与作物产量

表 5 为黄泥土和乌栅土不同施 N 水平下的水稻产量。结果表明, 作物产量并不随着施 N 量的增加而增加, 而是有一个适度的范围。从表 5 可以看出, 黄泥土上施 N 量在 U3 时, 水稻产量达到了最大值, 但与 U2 处理并不存在显著性差异。当施 N 量达到 U4 时, 由于施 N 量过大, 水稻产生了倒伏反而产量下降, 并且与处理 U3、U2 达到了显著性差异。乌栅土上施 N 量在 U2 就达到了最大产量, 在施 N 量超过 U2 的 U3、U4 处理中水稻产量并未增加。

两种土壤中乌栅土肥力较黄泥土高, 因此在较

低的施 N 水平 (U2) 上就达到了最高产量, 而黄泥土则需较高的施 N 水平 (U3)。从两种水稻土的产量结果可以看出, 两种水稻土的最佳施 N 量不宜超过 U2 水平。当超过 U2 水平时, 施加尿素肥料出现微效或无效的现象; 而且黄泥土在 U4 水平时, 水稻的产量显著下降, 与 U1 水平的产量相当, 这主要是水稻在高肥力的条件下产生了倒伏造成的。因此在容易使作物产生倒伏的土壤上更应该注意适宜的 N 肥用量。

另外, 由于所选地点的乌栅土肥力较黄泥土高, 所以在施 N 水平条件下乌栅土上的水稻产量较相应水平下的黄泥土上的水稻产量高, 并且存在显著差异。

表 5 黄泥土和乌栅土上 N 肥施用量对水稻产量的影响

Table 5 Effect of N fertilizer on yield of the rice in Huangni soil and Wushan soil

处理	黄泥土			乌栅土		
	水稻产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	N 素增产率 (%)*	5%显著性水平	水稻产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	N 素增产率 (%)	5%显著性水平
CK	6242	—	c	7781	—	c
U1	6911	6.69	b	9150	8.67	b
U2	8174	9.66	a	10100	8.96	a
U3	8272	6.77	a	9838	5.10	a
U4	7323	3.09	b	10031	4.92	a

\* N 素增产率 = (各个处理水稻产量 - 对照水稻产量) / 相应的施 N 水平 × 100%。

## 2.4 经济效益分析

大田 N 肥用量试验是确定 N 肥用量最基本的途径, 因为它是直接通过作物生长来确定的。根据田间试验结果 (表 5) 进行方差分析, 各处理在两种土壤上分别达到了极显著的水平。将产量结果进行二次多项式回归方程拟合, 得出 N 肥施用量 (X) 与水稻产量 (Y) 之间的效应方程:

$$\text{黄泥土: } Y = -0.0344X^2 + 16.502X + 6055.2 \quad R^2 = 0.833^*$$

$$\text{乌栅土: } Y = -0.0319X^2 + 17.194X + 7785.4 \quad R^2 = 0.974^{**}$$

由上式分析表明, 黄泥土 N 肥施用量在 N 0 ~ 240 kg/hm<sup>2</sup> 时, 水稻产量随着 N 肥施用量的增加而提高, 当 N 肥施用量高于该用量以后, 水稻产量则随着 N 肥施用的增加而减产, 符合报酬递减规律。由此明确了当地最高产量的 N 肥施用量为 N 240 kg/hm<sup>2</sup>, 该用量下可获得最高产量 8036 kg/hm<sup>2</sup>。根据该回归方程的函数变化率: 在当地尿素的销售价格为 1.2 元/kg, 水稻价格为 1.05 元/kg 的条件下, N 肥最佳施用量为 N 227 kg/hm<sup>2</sup>, N 肥最佳施用量时水稻产量 8029 kg/hm<sup>2</sup>, 经济效益最佳, 投入产出比 1:30.9。

乌栅土 N 肥施用量在 N 0 ~ 270 kg/hm<sup>2</sup> 范围内, 水稻产量随 N 肥施用量的增加而提高, 当 N 肥施用量高于该用量以后, 水稻产量则随着 N 肥施用的增加而减产, 符合报酬递减规律。由此明确了当地最高产量的 N 肥施用量为 270 kg/hm<sup>2</sup>, 该用量下可获得最高产量 10102 kg/hm<sup>2</sup>。根据该回归方程的函数变化率又反映出: 在当地尿素的销售价格为 1.2 元/kg, 水稻价格为 N 1.05 元/kg 的条件下, N 肥最佳施用量为 N 256 kg/hm<sup>2</sup>, N 肥最佳施用量时水稻产量 9919 kg/hm<sup>2</sup>, 经济效益最佳, 投入产出比 1:33.9。

这与王德建等<sup>[12]</sup>在该地区黄泥土和乌栅土上的水稻适宜施 N 量 N 225 ~ 270 kg/hm<sup>2</sup> 的结果相吻合。

## 3 结论

(1) 水稻 N 素吸收总量的趋势是随着施 N 水平的提高而增加, 不同生育期 N 素吸收速度在从分蘖结束后至开始孕穗即孕穗期的吸收速度最快。

(2) 每 100 kg 稻谷消耗的 N 素随着施 N 量的增加而增加。随着施肥量的增加, N 的“奢侈”吸收导致单位 N 肥产粮数量下降。

(3) N 肥最佳施用量黄泥土为 N 227 kg/hm<sup>2</sup>, 乌栅土为 N 255 kg/hm<sup>2</sup>。

## 参考文献:

- [1] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南昌: 江西科学技术出版社, 1997
- [2] 鲁如坤等著. 土壤-植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社: 1998, 394-394
- [3] 徐心慰. 太仓市化肥投入使用的几个问题. 上海农业科技, 1994 (4): 29
- [4] 蔡贵信, 朱兆良. 太湖地区水稻土的氮素供应和氮肥的合理施用. 土壤, 1983, 15 (6): 203-204
- [5] 曹志洪. 施肥与水体环境质量—论施肥对环境的影响 (2). 土壤, 2003, 35 (5): 353-363
- [6] 闫德智, 王德建. 土壤供氮能力研究方法进展. 土壤, 2005, 37 (1): 20-24
- [7] Fan XH, Song YS, Lin DX, Yang LZ, Zhou JM. Ammonia volatilization loss from urea applied to wheat on a paddy soil in Taihu region, China. Pedosphere, 2005, 15 (1): 59-65
- [8] 李伟波, 吴留松, 廖海秋. 太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究. 土壤学报, 1997, 34 (1): 67-73

- [9] 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
- [10] 徐明岗, 邹长明, 秦道珠, 八木一行, 宝川靖和. 有机无机配合下的稻田氮素转化与利用. 土壤学报, 2002, 39 (增刊): 147-156
- [11] 杨得海, 屠启桐. 有机肥与化肥配施对水稻养分平衡的研究. 土壤通报, 1990, 21 (4): 155-157
- [12] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 夏立忠, 连刚. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响. 土壤学报, 2003, 40 (3): 426-432

## Nitrogen Uptake and Utilization by Rice in Main Paddy Soils in Taihu Area

ZHAO Hong-tao, ZHOU Jian-min, FAN Xiao-hui, LIU Chong-qun

( *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China* )

**Abstract:** A field experiment was carried out in two main paddy soils (Wushan soil, Huangni soil) in Taihu Area to study nitrogen uptake and utilization by rice, effect of nitrogen fertilizer on rice yield, and economic efficiency of N fertilization. The results indicated that the nitrogen uptake rate of rice was the highest at the booting stage, being around  $N\ 2.2 \sim 4.2\ \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ , and the nitrogen apparent utilization rate of rice was about 31.62% ~ 46.15%, and 37.64% on average. The recommended optimal N application rate was about  $N\ 227\ \text{kg}/\text{hm}^2$  in Huangni soil and  $255\ \text{kg}/\text{hm}^2$  in Wushan soil for rice production.

**Key words:** Paddy soil, Nitrogen utilization rate, Economic efficiency of nitrogen