

# 太湖地区黄泥土氮肥对水稻产量、叶片碳氮同化及不同土层氮的影响\*

郭汝礼<sup>1</sup> 沈明星<sup>2</sup> 卢萍<sup>1</sup> 殷士学<sup>3</sup> 杨林章<sup>1†</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 苏州农业科学研究所, 江苏苏州 215001)

(3 扬州大学资源与环境学院, 江苏扬州 225124)

**摘 要** 在长期定位试验的基础上研究了太湖地区黄泥土不同施氮水平对水稻产量、碳氮同化及不同土层氮的影响。结果表明, 长期施氮量(N)在  $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$  处理和高于该施氮量处理的产量之间没有显著差异。拔节期、孕穗期和灌浆期施氮量在  $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$  处理和高于该施氮量处理的碳氮同化水平之间几乎没有差异, 但都高于施氮量在  $57.5 \text{ kg hm}^{-2}$  处理的。不同土层氮分布结果表明, 长期施氮量在  $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$  和高于该施氮量各处理中, 长期施入有机肥配施 NPK 肥处理残留最深, 其次是长期施入化肥 N 的处理, 长期秸秆还田配施 N 肥处理较浅。

**关键词** 长期施肥; 碳氮同化; 还原糖; 全氮

中图分类号 S153.6 文献标识码 A

前人研究表明, 我国许多地区的氮肥用量与地下水中硝酸盐含量密切相关, 并且其流失对水体富营养化的贡献率呈增加态势<sup>[1-3]</sup>。太湖地区是我国重要的农业高产区, 自 20 世纪 80 年代以来氮肥投入量一直呈上升趋势<sup>[4-6]</sup><sup>(1)</sup>, 但是产量增加不明显<sup>[6,7]</sup>。与此相关的是, 近 20 a 来太湖水体富营养化程度不断增加<sup>[8]</sup>, 湖水中无机氮浓度达到  $1.14 \text{ mg L}^{-1}$ , 已经超过水体富营养化浓度下限; 附近河水、井水  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度超过世界卫生组织(WHO)所规定生活饮用水上限的 50%<sup>[9]</sup>。太湖地区稻季降雨量充沛, 占本地区年降雨量的 54%~74%, 并且降水和地下水位之间呈显著正相关, 氮肥随地表径流及淋洗进入水体的风险较高<sup>[10,11]</sup>。因此, 合理施氮对该地区极为重要。针对太湖地区经济比较发达、环境污染比较突出的现状, 施氮量应从作物产量和环境风险两个方面加以衡量。笔者根据长期定位试验点观察的数据, 从水稻产量、水稻叶片碳氮同化及氮在土壤中的残留深度方面来考察适合黄泥土(太湖地区面积最大的耕种土壤)的合理施氮量。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地情况

供试土壤为壤质黄泥土, 该土壤占太湖地区耕地面积的 86%<sup>[12]</sup>。试验前土壤 pH 6.7, 容重  $1.26 \text{ g cm}^{-3}$ , 0~15 cm 土层有机质含量为  $24.2 \text{ g kg}^{-1}$ , 全氮  $1.43 \text{ g kg}^{-1}$ , 全磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )  $0.98 \text{ g kg}^{-1}$ , 速效磷(P)  $8.4 \text{ mg kg}^{-1}$ , 速效钾和缓效钾分别为  $127 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $237 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

长期定位试验始于 1980 年在江苏太湖地区农业科学研究所试验田进行, 本试验是 2004 年的结果。试验共设 8 个处理(见表 1), 3 重复, 顺序排列, 小区面积为  $20 \text{ m}^2$ , 区间用花岗岩板材与水泥作永久性田埂分隔, 中间有灌渠通各小区。肥料分配: 氮肥(尿素)  $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$  约 50% 作基肥, 20% 作蘖肥, 30% 作穗肥; 磷肥(过磷酸钙)  $425 \text{ kg hm}^{-2}$ , 全部作基肥; 钾肥(氯化钾)  $123 \text{ kg hm}^{-2}$ , 50% 作基肥, 50% 作穗肥; 有机肥, 菜饼。作物种植: 除 1993 年夏熟为油

\* 国家科技部 973 项目(2005CB121108)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413)资助

† 通讯作者

作者简介: 郭汝礼(1971~), 男, 汉族, 河南鹿邑人, 博士研究生, 主要从事土壤生态学研究

(1) 周小平. 河网区稻田流失氮磷的植物生态拦截技术研究. 中国科学院博士学位论文, 2004. 28

收稿日期: 2005-07-18; 收到修改稿日期: 2006-03-30

菜, 2000 年为蚕豆, 1982 年为三熟制(早稻—晚稻—小麦)外, 其余均为二熟制(晚稻—小麦)。

表 1 不同处理 2004 年施肥情况

Table 1 Different treatments of fertilizer application in 2004

处理代码 Treatment code	施肥处理 Treatment	N (kg hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O (kg hm <sup>-2</sup> )
CK	不施肥	0	0	0
M	有机肥	57.5	31.0	17.8
N	氮	161.0	0	0
NPK	氮+磷+钾	161.0	119.0	135.3
RN	稻草+氮	183.5	1.2	39.6
MN	有机肥+氮	218.5	31.0	17.8
MNPK	有机肥+氮+磷+钾	218.5	150.0	153.2
MRN	有机肥+稻草+氮	241.0	32.2	57.4

### 1.3 样品采集与测定方法

2004 年在水稻拔节期对不同处理植株第一完全展开叶片(大小差异较小)进行标记, 然后分别在叶片完全展开(0 d)、展开 7 d、14 d、28 d 取样, 每次 100 片; 倒二叶(孕穗期~灌浆期)取样方法和拔节期相同, 取样时间分别是叶片刚展开(0 d), 依次是展开 7 d、14 d、21 d、28 d, 每次 100 片。收获时每区采 5 穴进行考种; 产量全区收获进行计产。土壤样品是在 2003 年小麦播种后 40 d 采集, 每处理用外径 19 mm 的土钻取 5 个点。土层 30 cm 以上取 0~15 cm, 15~30 cm 两层; 30 cm 以下, 每隔 5 cm 一层, 直至 100 cm。

样品测定: 叶片中还原糖用斐林试剂法测定<sup>[13]</sup>, 叶片、土壤样品总氮用凯氏法测定<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理产量的比较

由表 2 可见, 土壤在一定施氮(N)范围内(0~161.0 kg hm<sup>-2</sup>), 随着长期施入土壤中的氮量增加, 产量逐步提高。施氮量达 161.0 kg hm<sup>-2</sup>时, 继续增加氮量产量不再增加。由于产量是由成穗数和穗粒

重(穗粒数×粒重)所构成, 随着施氮量的增加成穗数随之上升, 而穗粒重增加到一定程度之后却呈逐步下降趋势, 最终导致高施氮量处理的产量并未显著提高。长期不施氮肥的处理尽管穗粒重较高, 但由于成穗数较少, 导致产量较低。长期施入化肥 NPK 的处理产量和长期仅施化肥氮处理的差异不显著, 这说明, 黄泥土具有较强的磷、钾供应能力, 影响水稻产量的关键因素是氮素。

### 2.2 叶片含氮量的变化特点

从图 1 可以看出, 不同处理在拔节期叶片含氮量变化规律。叶片完全展开时(0 d)不同处理叶片氮含量差异不明显, 但随叶片生长, 在叶片展开 28 d 不同处理叶片氮含量有较大差异。长期施氮在 161.0 kg hm<sup>-2</sup>及以上各处理(N、NPK、RN、MN、MNPK、MRN)之间含氮量差异不明显, 但均大于 M、CK 处理。并且, 不同处理在叶片展开后 14~28 d 之间叶片氮含量下降幅度不同。施氮在 161.0 kg hm<sup>-2</sup>及以上各处理下降幅度小, CK、M 处理下降幅度较大。这可能是长期施入土壤中的氮较少使叶片在趋向衰老时及时把氮素转移到上部功能叶片及正在发育的器官中, 导致下部叶片氮含量迅速减少, 下降幅度较大。同时说明施用氮肥可缓冲作物叶片氮

表 2 不同处理产量比较<sup>1)</sup>

Table 2 Yield comparison among different treatments

处理代码 Treatment code	施氮量 Applied N (kg hm <sup>-2</sup> )	成穗数 Ear number (×10 <sup>4</sup> hm <sup>-2</sup> )	穗重 Ear weight (g 穗 <sup>-1</sup> )	产量 Yield (kg hm <sup>-2</sup> )
CK	0	180.0	2.86	5.475c
M	57.5	228.0	2.78	6.666b
N	161.0	241.0	2.86	8.063a
NPK	161.0	240.0	2.91	7.911a
RN	183.5	246.0	3.07	8.172a
MN	218.5	250.0	2.28	7.500a
MNPK	218.5	285.0	2.55	7.727a
MRN	241.0	310.0	2.36	8.027a

1) 同一列不同字母间差异达 5% 显著水平 The different letters following the data in the same mean significant difference at 5% level

素的下降幅度。在孕穗期~灌浆期倒二叶的叶片含氮量中(见图2),处理N等与施氮大于或者等于 $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$ 处理相比,叶片含氮量差异均不明显。该期与拔节期叶片相比,各处理叶片中氮含量变化

幅度均减小,且CK、M处理减小较为明显。其原因可能是植株根系向深处生长<sup>[15]</sup>,在后期使氮来源增多,供应能力增强,加上下层衰老叶片的转移,使功能叶氮含量增加。

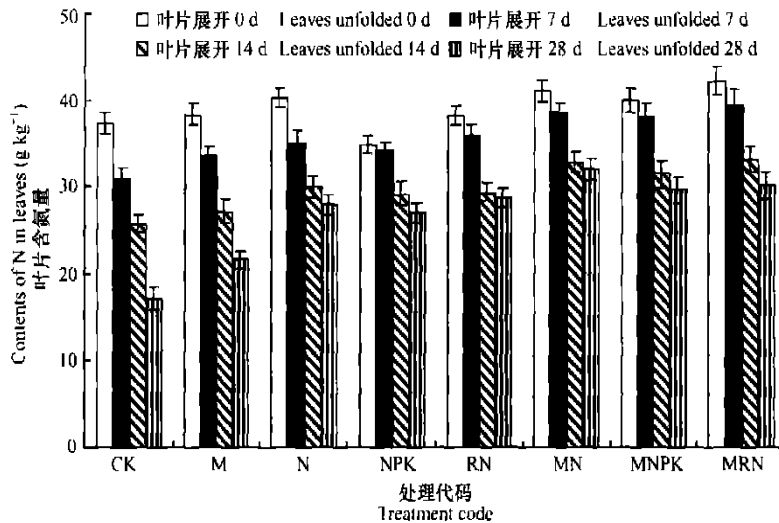


图1 不同处理拔节期叶片含氮量变化

Fig. 1 Changes in nitrogen content of leaves in different treatments at the jointing stage

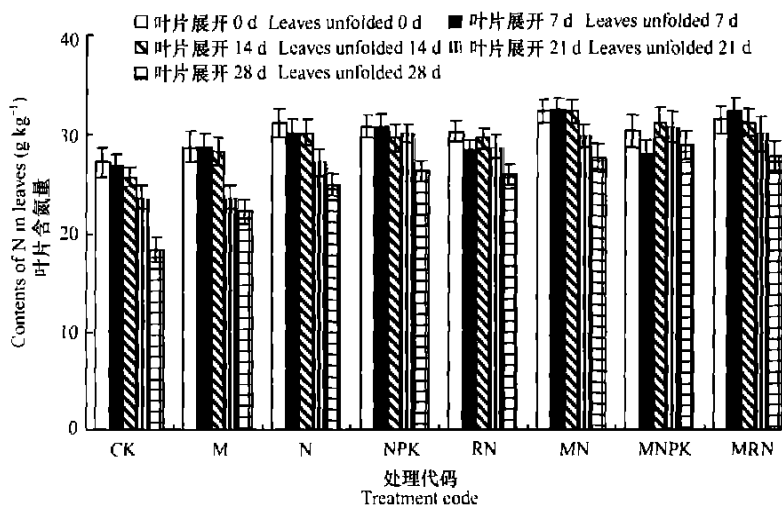


图2 不同处理孕穗期至灌浆期叶片含氮量变化

Fig. 2 Changes in nitrogen content of leaves in different treatments at the booting-filling stages

### 2.3 叶片还原糖的变化特点

叶片中还原糖的变化反映了碳同化能力的强弱<sup>[16]</sup>。拔节期,在 $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$ 或以上各处理中,在叶片展开0 d及展开7 d时MNP处理最高,在叶片展开14 d、28 d时NPK处理明显较高,长期施入氮最高的MRN处理始终不高(见表3)。在孕穗期至灌浆期,长期施氮较多的MRN处理( $241.0$

$\text{kg hm}^{-2}$ )、MNP处理( $218.0 \text{ kg hm}^{-2}$ )叶片碳同化能力在叶片展开0 d时不是最高,随后在叶片展开7 d及以后时间内与施氮在 $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$ 及其以上各处理的差异逐渐缩小。在叶片展开后21 d,各个处理之间均没有差异(见表4)。上述原因可能是,拔节期氮施入在 $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$ 或以上各处理,由于有充足的光照和氮供应,光合能力较强,叶片碳同化

能力相应较强<sup>[17]</sup>, 因而在叶片展开 0 d 及展开 7 d 后, 碳同化能力高于施氮量相对低的处理 M, 随着上部展开叶片的增多及群体的增大, 下部叶得光逐渐减少, 碳同化能力减弱; 施氮较高的处理如 MRN 处理可能因有较多的分蘖, 致使其把较多的氮用于分蘖生长, 结果高氮处理, 叶片碳同化能力不高。在孕

穗期至灌浆期, 氮施入在  $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$  或以上各处理中, 相对施入氮较低的处理如 N、NPK 等处理因叶片中氮含量能充分满足叶片的需要, 相应的碳同化能力增强, 致使相对低量施氮处理和高氮施肥处理没有显著差异; 而 M 处理因氮施入较少, 不能满足叶片碳同化的需要, 结果始终较低。

表 3 拔节期不同处理叶片还原糖变化<sup>1)</sup>Table 3 Changes in reducing sugar of leaves in different treatments at the jointing stages ( $\text{mg leaf}^{-1}$ )

处理代码 Treatment code	叶片展开 0 d Leaves unfolded 0 d	叶片展开 7 d Leaves unfolded 7 d	叶片展开 14 d Leaves unfolded 14 d	叶片展开 28 d Leaves unfolded 28 d
CK	0.97c	3.02c	2.20bc	1.28b
M	1.02c	3.16c	2.35bc	1.81ab
N	1.42b	4.33b	2.01bc	1.13b
NPK	1.95ab	4.85ab	3.74a	2.63a
RN	1.90ab	4.65ab	2.67bc	1.53b
MN	1.62ab	4.49ab	2.46bc	1.21b
MNPK	2.70a	5.52a	3.30ab	1.51b
MRN	1.31b	4.15b	2.46bc	1.12b

1) 同一列不同字母间差异达 5% 显著水平 The different letters following the data in the same mean significant difference at 5% level

表 4 孕穗期至灌浆期不同处理叶片还原糖变化<sup>1)</sup>Table 4 Changes in reducing sugar of leaves in different treatments at the booting-filling stages ( $\text{mg leaf}^{-1}$ )

处理代码 Treatment code	叶片展开 0 d Leaves unfolded 0 d	叶片展开 7 d Leaves unfolded 7 d	叶片展开 14 d Leaves unfolded 14 d	叶片展开 21 d Leaves unfolded 21 d	叶片展开 28 d Leaves unfolded 28 d
CK	2.87d	2.34d	1.30b	1.17a	0.58b
M	4.17c	3.60c	1.12b	1.10a	0.99ab
N	5.60ab	4.98ab	2.86a	1.46a	1.28ab
NPK	6.79a	5.75a	2.55a	1.74a	1.58a
RN	5.97ab	4.67b	2.78a	1.52a	1.49a
MN	6.03ab	4.99ab	2.97a	2.08a	1.60a
MNPK	5.04b	4.42bc	2.83a	1.41a	1.49a
MRN	5.06b	4.89ab	3.45a	2.08a	1.25ab

1) 同一列不同字母间差异达 5% 显著水平 The different letters following the data in the same mean significant difference at 5% level

## 2.4 不同处理土壤分层氮变化特点

由表 5 可以看出, 长期不同施肥处理土壤不同土层氮主要差异表现在两个方面: 一是耕层中总氮含量的差异, 二是不同施肥处理氮素在土壤中的分布深度不同。从不同处理耕层中土壤氮素含量来看, 呈现出随施入土壤中氮素总量的增多, 其耕层中氮素含量就多的趋势。如 MN、MRN 等处理含量较高, 对照含量最低。从不同施肥处理氮素在土壤中的迁移情况来看, 与 CK 相比, MNPK 处理迁移最深, 出现在 100 cm 以下; 其次是 N、NPK、MN、MRN 处理;

最后是 RN、M 处理迁移较浅。产生上述现象的原因可能是: 一是施氮量的差异。与长期不施氮肥处理 CK 耕层氮含量及不同土层深度变化一致的是 M 处理, 该处理施氮最少。而 MN、MRN 等处理在土壤中迁移相对较深。由此可以推测, 长期施氮量多, 植株没有来得及利用, 在水稻收获后剩余的氮在土壤中随水分的下移而不断进入土壤深层, 甚至进入地下水中。二是不同肥料配施的差异。MNPK 处理施入氮次于 MRN 处理, 而氮累积深度比后者要深出 15 cm 或者更多; RN 处理氮在土壤中的迁移深度变化和长

期不施肥 CK 处理变化一致。可见,不同肥料配施对土壤中氮迁移变化影响较大。三是受根系的影响。对于水稻来说根系主要分布在 60 cm 以上<sup>[18]</sup>,而长期

不施肥的处理氮明显降低的深度恰好与该深度大体一致,因而可以推测,长期不施肥 CK 处理残留在土壤中的氮,可能是残留根带来的。

表 5 不同处理土层氮比较<sup>1)</sup>

Table 5 Comparison of soil nitrogen among different treatments ( $\text{g kg}^{-1}$ )

土层 Soil layer(cm)	CK	M	N	NPK	RN	MN	MNPK	MRN
0~ 15	1.48e	1.63de	1.60de	1.70bcd	1.67cd	1.96a	1.83ab	1.87ab
15~ 30	1.01a	1.06	1.10a	1.07a	1.08a	1.09a	1.09a	1.10a
30~ 35	1.01a	1.04a	0.98a	1.09a	1.01a	1.02a	1.06a	1.06a
35~ 40	0.82b	0.95a	0.89ab	0.96a	0.95a	0.95a	0.95a	0.80b
40~ 45	0.69b	0.64b	0.74ab	0.78ab	0.76ab	0.77ab	0.89a	0.75ab
45~ 50	0.66b	1.03a	0.72b	0.70b	0.70b	0.67b	0.68b	0.70b
50~ 55	0.63a	0.73a	0.76a	0.67a	0.67a	0.63a	0.65a	0.65a
55~ 60	0.70ab	0.65b	0.81a	0.78a	0.79a	0.73ab	0.84a	0.73ab
60~ 65	0.58a	0.59a	0.73a	0.63a	0.67a	0.62a	0.64a	0.62a
65~ 70	0.58a	0.63a	0.62a	0.59a	0.64a	0.56a	0.51a	0.59a
70~ 75	0.51a	0.52a	0.58a	0.56a	0.50a	0.52a	0.53a	0.56a
75~ 80	0.67ab	0.52b	0.78a	0.66ab	0.62ab	0.69a	0.63ab	0.65ab
80~ 85	0.47b	0.49ab	0.55a	0.53a	0.47b	0.58a	0.54a	0.57a
85~ 90	0.44b	0.45b	0.49ab	0.46b	0.45b	0.47b	0.56a	0.45b
90~ 95	0.38b	0.44b	0.49a	0.44b	0.45b	0.46b	0.56a	0.47b
95~ 100	0.39b	0.45b	0.47b	0.44b	0.43b	0.41b	0.52a	0.45b

1) 同一列不同字母间差异达 5% 显著水平 The different letters following the data in the same mean significant difference at 5% level

综上所述对不同处理的产量、碳氮同化及不同土层累积氮的分析可知:施氮水平在  $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$  处理叶片氮含量均与高于该施氮水平处理的差异不明显,致使它们之间的叶片碳同化没有明显差异,从而使施氮水平大于等于  $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$  的各处理间产量没有显著差异。而各处理在土壤中的氮累积结果揭示, MNPK 处理迁移最深,其次是 N、NPK、MN、MRN 处理;最后是 RN、M 处理。结合产量和土壤氮累积结果来看,长期秸秆还田+ N(RN) 处理产量较高,且氮在土壤中的迁移较浅。从施入氮量来看,氮施入  $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$  的 N 处理迁移较深,而长期施入氮为  $183.5 \text{ kg hm}^{-2}$  的 RN 处理较浅。由此来看,长期施肥的效应不仅仅与施入氮量的多少有关,而且不同肥料配施同样重要。从上述分析可见,氮施入  $161.0 \text{ kg hm}^{-2}$  即能达到当前的产量水平,而长期秸秆还田配施 N(RN) 的处理施肥方式较佳。

### 3 讨论

合理使用氮肥实现作物高产高效与环境的协调是可持续发展的前提。在我国太湖地区随着目标产

量的增高,肥料投入也相应增加。在该地区水稻季节,1978 年<sup>[4]</sup>太湖地区氮平均投入量  $311 \text{ kg hm}^{-2}$ ,1982 年<sup>[5]</sup>平均施氮达  $395 \text{ kg hm}^{-2}$ ,而水稻产量在 20 世纪 70 年代末、80 年代初达  $7500 \text{ kg hm}^{-2}$ <sup>[7]</sup>;1995 年<sup>[6]</sup>水稻季氮投入量在  $262\sim 412 \text{ kg hm}^{-2}$ ,产量达  $8651\sim 9293 \text{ kg hm}^{-2}$ ;2003 年<sup>[1]</sup>水稻季氮平均投入是  $331 \text{ kg hm}^{-2}$ ,水稻产量为  $6000\sim 8250 \text{ kg hm}^{-2}$ 。由此可以看出,在初始增施氮的确效果较好,但随着氮肥的施入增多,水稻并未增收,与施氮相对应的是地下水 and 地表水却被威胁<sup>[19]</sup>。从本试验来看,最低施氮水平(处理 M  $57.5 \text{ kg hm}^{-2}$ )产量明显较低( $6666 \text{ kg hm}^{-2}$ ),施氮水平提高到  $161 \text{ kg hm}^{-2}$ ,产量明显得以提高,进一步增加氮肥施入,产量增加不明显。从上述可以看出,在氮施入  $161 \text{ kg hm}^{-2}$  时,总体来说得到的产量( $8062 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $7900 \text{ kg hm}^{-2}$ )与本地近几十年产量差异不显著,而施氮水平却明显较低。从本试验的结果来看,在氮施入  $161 \text{ kg hm}^{-2}$  的处理在前期(拔节期)虽然氮同化水平低于比其高的施氮量处理,但在后期差异较小;碳同化也是如此。这可能是氮施入  $161 \text{ kg hm}^{-2}$  的处理前期氮含量少,限制了群体旺长,后期由于植株根系吸收能力增强以及下部叶片氮

转移满足了植株生长对氮的需要,赶上高氮处理,同时避免了贪青,群体生长适宜,粒重较高,结果维持了较高的水稻产量,提高了经济效益。

土壤养分在土壤中的分布情况与根系在土壤中的吸收位点既是养分管理的重要内容,也应该是评价环境风险的一个方面。土壤中的养分如果超出根系的吸收范围,该养分对于植株来说就成为无效,造成施肥的浪费,因此了解植物根系生长与养分分布之间的关系及不同养分量在不同土壤中的移动规律就成为养分有效管理的关键所在。从本研究可以看出,长期施入氮量少,氮在土壤中的迁移就不深,施入氮量多,迁移就深。究其原因,首先是根系生长深度与土壤中氮几乎成反比。土壤耕层氮肥越多,根系就越浅,致使高量施氮处理使氮迁移的较深,这样根系不能利用深层的氮;其次,太湖地区雨水较多,地下水位时常上升到 100 cm 左右<sup>[20]</sup>,这样就使土壤中迁移较深的氮直接渗入地下水,不但使其成为无效养分,而且增加了环境风险。同时本研究还表明不同肥料配施对氮在土壤中的迁移深度有较大的影响,如 MN 处理与 MNPK 处理施入土壤中氮量相同,但后者处理氮在土壤中的迁移深度达 100 cm 或者以下,这样就会使多余的氮进入环境。其原因有待进一步研究。

从不同施肥处理的产量及长期施肥对土壤氮迁移深度结果来看,RN 处理产量较高,且氮素迁移较浅,因而是较佳的施肥方式,既能获得较高的产量,环境风险又小;其次是处理 NPK,施氮少,产量较高,对环境影响仅次于 RN 处理。

## 参考文献

- [ 1 ] 陈怀满. 环境土壤学. 北京: 科学出版社, 2005. 148. Chen H M. Sciences of Environment and Soils (In Chinese). Beijing: Science Press, 2005. 148
- [ 2 ] 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. Cao Z H. Effect of fertilization on water quality—Effect of fertilization on environment quality (2) (In Chinese). Soils, 2003, 35(5): 353~ 363
- [ 3 ] Minami K. N cycle, N flow trends in Japan and strategies for reducing N<sub>2</sub>O emission and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pollution. Pedosphere, 2005, 15(2): 164~ 172
- [ 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(16): 203~ 204. Cai G X, Zhu Z L. Nitrogen supplying and sound application in paddy soils in Taihu Lake region (In Chinese). Soils, 1983, 15(16): 203~ 204
- [ 5 ] 朱兆良, 张绍林, 徐银华. 平均适宜施氮量的含义. 土壤, 1986, 18(6): 316~ 317. Zhu Z L, Zhang S L, Xu Y H. Signification of average nitrogen (In Chinese). Soils, 1986, 18(6): 316~ 317
- [ 6 ] 李荣刚, 翟云忠. 江苏省武进市高产水稻田氮素渗漏损失研究. 农村生态环境, 2000, 16(3): 19~ 22. Li R G, Zhai Y Z. Nitrogen leaching from the high-yielding paddy field in Wujing City (In Chinese). Rural Eco-Environment, 2000, 16(3): 19~ 22
- [ 7 ] 汤玉庚, 张兆兰, 张美娟. 从江苏太湖地区水稻品种的演变论高产理想株型. 江苏农业科学, 1994(6): 1~ 5. Discussing high-yield plant shape based on evolvement of rice variety in Taihu Lake region in Jiangsu (In Chinese). Sciences of Jiangsu Agriculture, 1994(6): 1~ 5
- [ 8 ] 马蕊, 林英, 牛翠娟. 淡水水域富营养化及其治理. 生物学通报, 2003, 38(11): 5~ 9. Ma R, Lin Y, Niu C J. Eutrophication of fresh water area and control (In Chinese). Bulletin of Biology, 2003, 38(11): 5~ 9
- [ 9 ] 熊正琴, 邢光喜, 沈光裕, 等. 太湖地区湖、河和井水中氮污染状况的研究. 农村生态环境, 2002, 18(2): 29~ 33. Xiong Z Q, Xing G X, Shen G Y, et al. Non-point source N pollution of lakes, rivers and wells in the Taihu Lake region (In Chinese). Rural Eco-Environment, 2002, 18(2): 29~ 33
- [ 10 ] 陈新玉, 王传根, 殷鹏. 长江九江站水位变化与气象要素的关系. 气象, 2003, 29(5): 55~ 57. Chen X Y, Wang C G, Yin P. Relation of water level and meteorologic fator in Jiujiang station in Yangtze River (In Chinese). Weather, 2003, 29(5): 55~ 57
- [ 11 ] 李林, 沙国栋. 江苏省水稻气候生态研究. 江苏农业科学, 1984(4): 1~ 5. Li L, Sha G D. Study on rice climate ecology in Jiangsu Province (In Chinese). Sciences of Jiangsu Agriculture, 1984(4): 1~ 5
- [ 12 ] 喻长新, 李桂荣. 江苏土壤. 北京: 中国农业出版社, 1995. 266. Yu C X, Li G R. Jiangsu Soils (In Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Press, 1995. 266
- [ 13 ] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术. 北京: 中国农业出版社, 1999. 123~ 124. Li H S. Techniques and Principle of Plant Physiological Biochemical Experiment (In Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Press, 1999. 123~ 124
- [ 14 ] 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. 147. Lu R K. ed. Analytical Method of Soil Agrochemistry (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000. 147
- [ 15 ] 刁操全. 作物栽培学各论. 北京: 中国农业出版社, 1994. 28. Diao C Q. Parts of Crops (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1994. 28
- [ 16 ] 史宏志, 韩锦峰, 官春云, 等. 红光和蓝光对烟叶生长、碳氮代谢和品质的影响. 作物学报, 1999, 25(2): 215~ 220. Shi H Z, Han J F, Guan C Y, et al. Effects of red and blue light proportion on leaf growth, carbon nitrogen metabolism and quality in tobacco (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 1999, 25(2): 215~ 220
- [ 17 ] 高煜珠. 植物生理学. 北京: 农业出版社, 1989. 58~ 59. Gao Y Z. Chinese Plant Physiology (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1989. 58~ 59
- [ 18 ] 中国农业科学院编. 中国稻作学. 北京: 农业出版社, 1986. 191. Chinese Academy of Agricultural Sciences. ed. Chinese Rice Science (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986. 191

[19] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, *et al.* Nitrate pollution of ground-water in northern China. *Nutr. Ecosyst. Environ.*, 1996, 59(2): 223~ 231

[20] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制. 北京: 科学出版社, 2001. 4. Huang Y P. *Water Environment and Control of Its Pollution* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2001. 4

## EFFECTS OF LONG-TERM NITROGEN APPLICATION ON YIELD, CARBON-NITROGEN ASSIMILATION IN LEAVES AND SOIL NITROGEN

Guo Ruli<sup>1</sup> Shen Mingxing<sup>2</sup> Lu Ping<sup>1</sup> Yin Shixue<sup>3</sup> Yang Linzhang<sup>1†</sup>

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

(2 *Institute of Agricultural Sciences in Suzhou City, Suzhou, Jiangsu 215001, China*)

(3 *College of Resources and Environment, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225124, China*)

**Abstract** Based on long term stationary experiment, effects of long-term nitrogen application on yield, carbon-nitrogen assimilation of leaves and soil nitrogen in permeable paddy soil in the Tai Lake region were studied. Results show that no significant difference was found between the treatment applied with N 161.0 kg hm<sup>-2</sup> and treatments applied with more nitrogen than N 161.0 kg hm<sup>-2</sup> in either yield or in carbon-nitrogen assimilation rate in leaves at the jointing, booting and filling stages. But all these treatments were higher than the treatments applied with N 57.5 kg hm<sup>-2</sup> in both indices. Analysis of nitrogen distribution in soil profiles reveals that soil N residue went down the deepest in the treatment applied with organic manure plus NPK, which was followed by treatments applied with N 161.0 kg hm<sup>-2</sup> or more in chemical fertilizer. And N residue was found the shallowest in the treatment of incorporation of crop stalks into the soil plus N application.

**Key words** Long-term fertilization; Carbon-nitrogen assimilation; Reducing sugar; Total nitrogen