

太湖地区黄泥土水稻适宜施氮量研究

长期定位试验

郭汝礼¹, 杨林章^{1*}, 沈明星², 殷士学³, 张志勇¹

(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, 研究了黄泥土(太湖地区主要土壤类型)不同肥料配施土壤 N 供应、植株 N 吸收及产量之间的关系。结果表明, 土壤 N 供应和植株 N 吸收、植株 N 吸收和产量之间呈显著正相关关系。在本试验条件下, 稻季 N 施入 161.00~241.00 kg/hm², 产量达 7285~8172 kg/hm², 与该地区大面积产量基本一致; 长期不施肥, 能维持一定的产量; 长期仅施入有机肥, 不能满足水稻对 N 的需要, 产量较低; 长期不施入 P、K, 对产量影响不大。

关键词: 铵态氮; 植株氮吸收; 产量; 黄泥土

中图分类号: S158; S153.6^{†1}

足够的养分投入可保持土壤肥力, 提高作物产量。但养分投入过多, 不仅导致经济效益下降, 资源浪费, 而且增加了环境风险^[1-3]。太湖地区是我国重要的农业高产区, 肥料投入量一直呈上升趋势^[4-6], 自 20 世纪 80 年代以来土壤 N 一直处于盈余状态^[7]。关于该地区水稻 N 肥的适宜用量问题前人已经进行了大量的研究^[8-10], 但多数以短期试验为依据, 基于长期定位试验的研究较少。本文基于长期定位试验点数据, 提出黄泥土(占据太湖地区耕地面积 86%^[11])水稻的适宜施 N 量。

1 材料与方法

1.1 试验地情况

供试土壤为壤质黄泥土, pH 6.7, 体积质量(容重) 1.26 g/cm³, 0~15 cm 土层有机质含量为 24.2 g/kg, 全 N 1.43 g/kg, 全 P (P₂O₅) 0.98 g/kg, 速效 P (P₂O₅) 8.4 mg/kg, 速效 K 和缓效 K 分别为 127 mg/kg 和 237 mg/kg。

1.2 试验设计

长期试验于 1980 年开始在江苏太湖地区农科所试验田进行, 本文是 2004 年试验的结果。试验共设 14 个处理: C0 (不施肥)、CN (C, 代表化肥,

以下同)、CNP、CNK、CNPk、CPK、CRN (R 代表秸秆还田, 以下同)、MRN (M 代表有机肥, 以下同)、M0、MPK、MN、MNP、MNK、MNPk, 3 个重复, 顺序排列, 小区面积为 20 m², 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。肥料运筹: N 肥(尿素) 161 kg/hm² (以 N 计), 约 50% 作基肥, 20% 作蘖肥, 30% 作穗肥; P 肥(过磷酸钙) 425 kg/hm², 全部作基肥; K 肥(氯化钾) 123 kg/hm², 50% 作基肥, 50% 作穗肥; 有机肥, 菜饼 1250 kg/hm²; 秸秆还田 2250 kg/hm²。作物种植: 除 1993 年夏熟为油菜, 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)。

1.3 样品采集与测定方法

在水稻生长季节选择具有代表性的水稻植株 5 株进行考苗测定 N 素, 每隔 20 天一次; 收获时采 5 穴进行考种; 产量全区收获进行记产; 植株样品总 N 用凯氏法测定^[12]; NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用荷兰产流动分析仪测定。

2 结果与分析

2.1 不同施肥方式土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 变化特点

①基金项目: 科技部 973 项目(2005CB121108)和中科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, 河南鹿邑人, 博士研究生, 主要从事土壤生态学研究。

在水稻生长发育期间, 定期测定的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是该期土壤有机 N 矿化、植株吸收及其他转化过程的综合结果, 同时也是该期以后的各个生育时期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 供应量。从表 1 可以看出, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 2004 年 8 月 10 日以前较高, 以后下降。从各处理的结果来看, 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度在孕穗期 (8 月 30 日) 以前表现为 4 个层次: 个别较高的有机肥和化肥 N 配施的处理如 7 月 20 日的 MRN, 8 月 10 日至 8 月 30 日的 MNP 等; 其次是其他配施化肥 N 的处理; 然后是 M0、MPK; 最低是 C0、CPK 处理。孕穗期

以后各个处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度差异逐渐缩小, 成熟前差异不显著。这可能是刚施入的有机肥容易矿化, 因而使化肥 N+ 有机肥的处理, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较高, 而长期不施入 N 肥的处理仅依赖土壤原有的有机质矿化供给, 因而含量低。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 供应足的处理, 植株生长旺盛, N 吸收的也多; 而 N 供应少的, 植株长势弱, 相应 N 吸收就少, 结果成熟前土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 供应差异不显著。对于水田中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化明显不同于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化 (表 2)。总体变化是拔节期较高 (7 月 20 日), 而后下降, 收获前又上

表 1 不同施肥方式土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化 (mg/kg)

Table 1 Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in different treatments

	7 月 20 日	8 月 10 日	8 月 30 日	9 月 20 日	10 月 11 日
C0	8.02Bd	8.73De	4.02De	1.24BCc	0.85a
CPK	8.40Bcd	9.19Dde	6.40BCDede	1.32BCc	0.82a
CN	11.85Bbcd	11.83BCDede	4.70CDde	2.07ABCabc	0.98a
CNP	13.07Bbcd	11.07BCDede	5.60CDede	0.94Cc	0.82a
CNK	10.96Bbcd	14.52ABCabc	6.44BCDede	2.10ABCabc	0.91a
CNPK	8.42Bcd	12.91ABCDBcd	5.69CDede	1.56ABCbc	0.74a
CRN	9.50Bbcd	10.47CDde	5.99CDede	2.53ABCabc	1.02a
MRN	22.69Aa	11.64BCDede	6.44BCDede	3.21ABCab	1.19a
M0	9.28Bbcd	9.34Dde	7.39BCDede	1.43ABCc	0.83a
MPK	8.78Bcd	9.55CDde	6.05CDede	2.07ABCabc	0.97a
MN	15.4ABb	15.66ABab	8.84BCbc	3.30ABCa	0.76a
MNP	14.96ABbc	11.82BCDede	10.86ABab	2.56ABCabc	0.83a
MNK	13.50Bbcd	12.20ABCDBcd	7.55BCDBcd	2.69ABCabc	1.04a
MNPK	14.32Bbcd	16.84Aa	13.87Aa	3.68Aa	0.93a

注: 同一列无相同字母间差异达显著水平 (大写为 $P < 0.01$; 小写 $P < 0.05$), 下同。

表 2 不同施肥方式土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化 (mg/kg)

Table 2 Soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in different treatments

	7 月 20 日	8 月 10 日	8 月 30 日	9 月 20 日	10 月 11 日
C0	0.61Bb	0.29Aa	0.34Bbc	0.37Aa	1.37Bc
CPK	0.61Bb	0.47Aa	0.48Bbc	0.36Aa	1.42Bb
CN	1.91ABab	0.41Aa	0.61Bbc	0.61Aa	1.77ABab
CNP	0.84Bab	0.44Aa	0.69Bbc	0.38Aa	1.71ABab
CNK	2.47ABa	0.33Aa	0.60Bbc	0.41Aa	1.54Bb
CNPK	1.02Bab	0.36Aa	0.63Bbc	0.43Aa	1.59Bb
CRN	1.02Bab	0.42Aa	1.05ABab	0.30Aa	1.65ABab
MRN	2.29ABa	0.39Aa	0.75Bbc	0.37Aa	2.29Aa
M0	1.08Bab	0.44Aa	0.46Bbc	0.28Aa	1.16Bbc
MPK	0.72Bb	0.39Aa	0.57Bbc	0.29Aa	1.38Bbc
MN	2.75Aa	0.37Aa	0.93Bbc	0.51Aa	1.24Bbc
MNP	2.90Aa	0.43Aa	0.89Bbc	0.34Aa	2.36Aa
MNK	2.76Aa	0.37Aa	1.03ABab	0.31Aa	1.23Bc
MNPK	0.89Bab	0.42Aa	1.75Aa	0.47Aa	1.94ABab

升。在 8 月 10 日和 9 月 20 日取样测定中各处理间差异不显著，即使变化有差异的时期中，较高的处理多出现在有机肥 + 化肥 N 的处理中，如 7 月 20 日的 MRN、MNP 等，8 月 30 日的 MNPK 和 10 月 11 日的 MRN、MNP。可见有机肥 + 化肥 N 配施的处理在水稻生长发育期间具有较高的 N 供应。

2.2 长期不同施肥处理水稻植株 N 含量变化特点

土壤供 N 量是以不施 N 肥和有机肥料区作物成熟时所吸收 N 量与土壤残留的速效 N 之和来计算的^[13]。相应地，水稻不同生育期植株含 N 量变化也反映出该期以前的土壤 N 供应情况。从表 3 可知，不同处理水稻植株 N 素吸收趋势变化相同，却又有明

显的差异。在拔节期（7 月 20 日），以长期施入有机物料（猪粪、秸秆）+ 化肥 N 的处理明显较高，其次是施入有化肥 N 的处理（M0 和它们差异不明显，但后期明显低于该处理组），MPK 随后，明显较低的是 C0、CPK。在其他各个生育时期测定结果表现出类似的规律，所不同的是仅个别处理出现了变化，如 8 月 10 日 MN 处理较低。植株中全 N 的变化与土壤中 NH₄⁺-N 的变化相同（表 1），可见土壤中易被植株吸收的 N 素越多，植株吸收与合成 N 的能力越强。而 N 素是 C 同化各种酶的主要成分^[14]，植株体内 N 素吸收多，C 同化能力就强，相应植株生长量就大，这为产量的形成奠定了基础。

表 3 不同处理水稻植株含 N 量的变化 (g/kg)

Table 3 Plant N in different treatments

	7 月 20 日	8 月 10 日	8 月 30 日	9 月 20 日	10 月 11 日
C0	19.51DEgh	12.52D	9.55Dd	8.54Gf	7.52DEef
CPK	17.63Eh	8.25D	10.07Dd	8.75Gf	5.42Ef
CN	24.84BCdef	22.03ABC	15.74Cc	12.56CDEFcd	10.96ABCbcd
CNP	23.79BCDdef	22.90ABC	16.98ABCbc	14.09ABCdbcd	10.59ABCdbcd
CNK	24.60BCDdef	21.46BC	15.79Cc	12.18DEFde	10.24BCDcd
CNPK	22.58CDEefg	21.76ABC	16.65BCbc	12.88CDEcd	10.16BCDcd
CRN	26.13ABCcode	21.73ABC	16.87ABCbc	14.40ABCdabc	10.98ABCbcd
MRN	30.98Aa	25.44AB	18.63ABCab	15.37ABCab	12.60ABabc
M0	24.63BCDdef	17.26CD	11.94Dd	9.99FGf	9.12CDde
MPK	21.94CDEfgc	20.15BC	12.05Dd	10.36FGef	8.65CDde
MN	28.97ABabc	20.05BC	20.18ABa	16.22Aa	12.89ABab
MNP	30.97Aa	27.48A	20.34Aa	15.07ABCab	13.61Aa
MNK	30.22Aab	24.17AB	18.27ABCabc	15.47ABab	11.83ABCabc
MNPK	26.89ABCbcd	25.08AB	19.97Aa	15.34ABCab	11.62ABCabc

2.3 长期不同施肥处理对水稻产量影响

长期施肥后，不同肥料配施产量结果有明显的差异（表 4）。大致可以分为 3 个层次：长期施入化肥 N 的处理显著高于 M0、C0、CPK 处理，而 C0、CPK 明显最低。长期不施化肥 N 的 4 个处理（MPK、M0、CPK、C0）中，MPK 产量最高，该处理不但与 MNPK、MNP、MN、CNP、CNK 差异不显著，且与 M0 差异也不显著；M0 显著高于 C0，但与 CPK 差异不显著；C0、CPK 之间差异不显著。可见在本试验条件下，N 肥是影响产量的主要因子；长期仅施入有机肥的土壤中，NH₄⁺-N 供应较少，不能满足水稻对 N 的需要（表 1）。另外，MPK 与 MN 相比，NH₄⁺-N 供应为后者显著高于前者；从植株 N

表 4 不同处理产量比较 (kg/hm²)

Table 4 Grain yield in different treatments

处理	产量
C0	5475Ef
CPK	6279DEef
CN	8063ABab
CNP	7691ABCabc
CNK	7716ABCabc
CNPK	7911ABab
CRN	8172Aa
MRN	8027ABab
M0	6666DEde
MPK	6947BCdcd
MN	7500ABCabc
MNP	7286ABCdbcd
MNK	7967ABab
MNPK	7727ABCabc

素吸收量来看, MNP 显著高于 MPK, 但产量相比, MPK 与 MNP、MN 差异不显著, 可见 N 素供应超过一定范围, 产量并不能得到提高。

2.4 不同处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化与产量之间的关系

土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 供应与产量水平之间有正相关关系, 但未达显著水平 (表 5), 不过与水稻植株 N 吸收在 9 月 20 日前有显著正相关关系 (表 6), 其后, 相关性不显著, 这可能是在水稻植株的根系

趋向衰老时, 对 N 素吸收减少, 甚至不吸收的缘故。水稻植株 N 素吸收与产量呈明显正相关 (表 7)。可见, 土壤 N 素的供应通过影响水稻植株的生长发育, 进而影响产量的变化。

综合上述分析可知, 土壤中有利于植株吸收的 N 素供应水平高低直接影响了水稻植株的生长发育, 促进了植株对 N 素的吸收, 从而有利于水稻进行 C 同化, 进而搭好了丰产的架子, 但 N 素供应过多, 水稻生长旺盛, 既浪费了资源又不能得到高产。

表 5 土壤速效 N 供应与产量之间的关系

Table 5 Relationship between $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ and grain yield

时间	7 月 20 日	8 月 10 日	8 月 30 日	9 月 20 日	10 月 11 日
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.480	0.560	0.167	0.509	0.411
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.450	0.108	0.407	0.308	0.388

表 6 土壤速效 N 供应与植株 N 吸收之间的关系

Table 6 Relationship between $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ and plant N absorption

时间	7 月 20 日	8 月 10 日	8 月 30 日	9 月 20 日	10 月 11 日
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.797**	0.535**	0.603**	0.741**	0.246
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.798**	0.023	0.640*	0.242	0.528

注: **和*分别代表 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 显著水平, 下同。

表 7 水稻植株 N 吸收和产量之间的关系

Table 7 Relationship between plant N absorption and grain yield

时间	7 月 20 日	8 月 10 日	8 月 30 日	9 月 20 日	10 月 11 日
相关系数	0.636*	0.790**	0.776**	0.797**	0.720**

3 讨论

作为水稻高产区的太湖平原追求产量使近年来化肥 N 施用量普遍偏高, 这使该区的水污染日益严重^[15], 因而该区的农田适宜施 N 量就成了科研工作者们关注的重要问题。张绍林等^[9]在本区的研究结果表明, 单季晚稻 N 施入 165 ~ 285 kg/hm^2 较为适宜, 产量为 13230 kg/hm^2 ; 崔玉亭等^[16]认为, 稻田 N 在 221.5 ~ 261.4 kg/hm^2 是兼顾生产、生态和经济三效益比较合理的施肥量, 相应的产量范围是 7379.6 ~ 7548.6 kg/hm^2 ; 王德建等^[10]研究表明, 稻季 N 施入 225 ~ 270 kg/hm^2 较为适宜, 产量分布在 7000 ~ 9000 kg/hm^2 之间。本文通过在占太湖平原 86% 耕地面积的黄泥土^[11]上进行研究, 结果发现在稻季 N 施入 161.00 ~ 241.00 kg/hm^2 , 就可以使产量达 7285 ~ 8172 kg/hm^2 之间。从本区大面积田块施肥来看, 1978 年苏州地区 N 素的平均投入量达 311

kg/hm^2 ^[5], 1982 年太湖地区平均施 N 达 395 kg/hm^2 ^[6], 进入 20 世纪 90 年代, 耕地每年施入 N 达 520 kg/hm^2 ^[5], 相应江苏省 1979 年水稻产量达 4815 kg/hm^2 , 此后的 1982 年、2000 年、2002 年、2003 年产量分别是 8175、8627、7630 kg/hm^2 ^[17-20], 从以上结果可以看出, 随时代的变化, 产量没有变化, 但研究出的适宜水稻生产的 N 投入却呈逐渐增加, 大田生产上更多。与此相比, 长期定位试验从 20 世纪 80 年代开始一直到现在, 肥料投入变化不大, 但产量与别的大田试验差异不显著。可见, 在本区如果能长期持续施入 N 161.00 ~ 198.50 kg/hm^2 , 然后根据品种及土壤肥料变化配以其他肥料, 水稻也能够获得较高的产量。

本研究还证明, 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 直接影响了植株对 N 素的吸收, 而植株 N 含量和产量之间关系密切, 这样土壤中 N 素的供应间接影响了产量的形成。另外, 该试验中, 长期未施入 P、K 的

处理对产量影响不大, 具体原因有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] Senaratne R, Ratnasinghe DS. Nitrogen fixation and beneficial effects of some grain legumes and green-manure crops on rice. *Boil. Fertil. Soils*, 1995, 19: 49-54
- [2] 曹志红. 施肥与水体环境质量——论施肥对环境的影响(2). *土壤*, 2003, 35 (5): 53-363
- [3] Minami K, N cycle, N flow trends in Japan and strategies for reducing, N₂O emission and NO₃⁻ 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
- [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
- [6] 徐心蔚. 太仓市化肥投入使用状况的问题. *上海农业科技*. 1994, 4: 29
- [7] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 太湖地区农田养分动态极其启示. *地理科学*, 2001, 21 (5): 428-432
- [8] 潘遵谱, 许文元, 万传斌. 太湖地区氮素化肥合理施用技术研究. VII. 单季晚稻氮肥肥效和适宜用量. *江苏农业科学*, 1984, 12: 1-4
- [9] 张绍林, 朱兆良, 徐银华, 陈荣业, 李阿荣. 关于太湖地区稻麦氮肥的适宜用量. 1988, 20 (1): 5-9
- [10] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 夏立忠, 连纲. 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
- [11] 喻长新, 李桂荣. *江苏土壤*. 北京: 中国农业出版社, 1995: 266
- [12] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 147, 308
- [13] 朱兆良, 文启孝. *中国土壤氮素*. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 48
- [14] 宋建民, 田纪春, 赵世杰. 植物光合碳和氮代谢之间的关系及其调节. *植物生理学通讯*, 1998, 34 (3): 230-238
- [15] 熊正琴, 邢光喜, 沈光裕, 孙德玲. 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
- [16] 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 李荣刚. 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
- [17] 罗涵先. *中国农业年鉴 1981*. 北京: 中国农业出版社, 1982: 24
- [18] 何康. *中国农业年鉴 1982*. 北京: 中国农业出版社, 1983: 35
- [19] 中华人民共和国农业部. *中国农业统计资料*. 北京: 中国农业出版社, 2001: 66-67
- [20] 中华人民共和国农业部. *中国农业统计资料*. 北京: 中国农业出版社, 2004: 31

Economical Nitrogen Application in Permeable Paddy Soil in Taihu Region

——A long term fertilization experiment

GUO Ru-li¹, YANG Lin-zhang¹, SHEN Ming-xing², YIN Shi-xue³, ZHANG Zhi-yong¹,

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Institute of Agricultural Science in

Suzhou City, Suzhou, Jiangsu 215001, China; 3 College of Resources and Environment, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225124, China)

Abstract: Based on a long-term fertilization experiment in Huangnitu soil (a major soil type in the Taihu Lake Region), relationships of fertilizer combination with soil nitrogen supply, plant nitrogen absorption, and rice grain yield were studied. Results showed that soil nitrogen supply was positively related to rice nitrogen absorption, as well as rice nitrogen absorption to rice grain yield. When N was applied at a rate ranging from N 161.00 ~ 241.00 kg/hm², rice grain yield was in the range of 7285 ~ 8172 kg/hm², basically the same as the yield in the farmland. When the soil was not fertilized for a long time, rice grain yield remained at a certain level. When only organic manure was applied for a long time, soil N supply fell short to meet the need of rice for growth and thus rice grain yield decreased. A long term of withholding P and K would not affect much yield of the crop.

Key words: NH₄⁺-N, Plant nitrogen absorption, Grain yield, Permeable paddy soil