

# 有机肥施用对水田土壤溶液氮磷动态变化及环境的潜在影响<sup>①</sup>

孙瑞娟<sup>1,2</sup>, 王德建<sup>1\*</sup>, 林静慧<sup>1</sup>, 杨林章<sup>1</sup>

(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 100049)

**摘要:** 通过原状土柱模拟试验, 开展了稻麦轮作条件下, 有机肥施用对水稻田面水及渗漏水中N、P变化规律影响的研究。结果表明, 水稻施肥后的一定时期内田面水中可溶性总N (DTN)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与N肥施用量呈正相关, 伴随着3次施肥呈现出3个峰值, 田面水中DTN以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主。80 cm深处渗漏水的DTN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均是施肥处理高于对照, 但各处理间没有显示与施肥量的相关性。田面水中溶解性总P (DTP)在整个生育期内与猪粪用量呈显著正相关, 当猪粪用量超过鲜重40 t/hm<sup>2</sup>时, 渗漏水中DTP含量显著高于其他处理, 说明过量有机肥施入土壤后, P素不能被作物立即吸收, 也不易被土壤固定, 随渗漏水进入地下水, 成为水体富营养化的诱因。

**关键词:** 原状土柱; 有机肥; 土壤溶液; 氮磷渗漏

**中图分类号:** S142; S153.6; S154.1

近年来, 对太湖地区水质的调查显示,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量超标的在27%~38%之间, 此外, 地表水中N素富集, 水体的富营养化严重, 藻华频发<sup>[1-2]</sup>。其中来自农业投入的N、P流失, 特别是P的流失又往往成为水体富营养化的重要诱导因素<sup>[3-6]</sup>。通常N素流失量与N肥用量、降雨量呈正相关<sup>[7]</sup>, 农田N的淋失以 $\text{NO}_3^-$ 为主<sup>[8]</sup>, 许多研究都表明化肥使用与浅层地下水 $\text{NO}_3^-$ 浓度升高有关<sup>[9-12]</sup>。有机肥的当季利用率很低, 不过0.1%~0.2%<sup>[13]</sup>, 如果施用的畜禽粪便中含有的N、P等养分超过作物所需时, 未被利用的有机肥在相当长的时间内可存留在土壤中, 成为土壤有机N的一部分, 在土壤中逐步矿化分解, 释放出的无机N如不能及时为作物吸收利用, 多余的N、P等

便有可能转化成 $\text{NO}_3^-$ 和磷化物随淋洗进入地下水, 或随表面径流进入地表水中, 造成水质污染。

本研究采用原状模拟土柱, 定期采集水样, 研究不同有机-无机肥施用条件下, 稻田土壤N、P的径流与淋溶迁移规律, 为制定合理的农田管理措施, 减少N、P流失提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验在中国科学院常熟农业生态试验站稻田中进行, 供试土壤为乌栅土(系统分类名称: 普通筒育水耕人为土), 其基本性如表1。

表1 试验用乌栅土的基本性质

Table 1 Basic properties of experimental soil--Wu shan tu

剖面深度 (cm)	pH (2.5:1)	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
0~10	7.28	38.8	2.102	0.731	17.56	7.26	111
10~20	7.80	33.75	1.724	0.628	17.31	4.31	98
20~40	7.83	19.50	0.668	0.521	19.62	2.63	109
40~60	7.74	14.64	0.562	0.520	20.35	2.28	99
60~100	7.68	11.53	0.491	0.347	22.65	2.01	169

①基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAJ10B06)和南京土壤研究所所长基金项目(ISSASIP0725)资助。

\* 通讯作者(djwang@issas.ac.cn)

作者简介: 孙瑞娟(1975—), 女, 山西大同人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事农田生态系统养分循环与环境保护等方面的研究。E-mail: rjsun@issas.ac.cn

试验在田间原状模拟土柱中进行。模拟土柱制作:将高 80 cm, 内径 37 cm 的 PVC 塑料管压入农田, 取出后在底部封上 PVC 板, 形成一个原状土柱。在垂直于桶壁的 20、40、60、80 cm 开孔插入渗漏水采集管, 采集管顶部 5 cm 上方开有接水槽, 槽内装有尼龙网石英砂袋以阻隔土壤过滤水样, 接水槽伸至土柱中央, 以减少边际效应的影响。

试验设 6 个处理, 3 次重复。分别为无肥 (CK)、猪粪 (PM)、化肥 (NPK)、NPK + 10 t/hm<sup>2</sup>猪粪 (NPK+LPM)、NPK + 20 t/hm<sup>2</sup>猪粪 (NPK+MPM)、NPK + 40 t/hm<sup>2</sup>猪粪 (NPK+HPM)。试验的NPK用量

相同, N肥(尿素)按基肥:分蘖肥:穗肥 = 3:3:4 施用, 有机肥、P肥(过磷酸钙)与K肥(氯化钾)均作为基肥一次性施用。所用猪粪(干基)的N、P、K含量分别为: 7.52、6.06 和 4.11 g/kg。试验的耕作方式为稻-麦轮作。试验中各处理肥料用量及有机肥折纯后肥料用量见表 2。

## 1.2 水样采集与测定

水样采集: 水稻整个生育期除烤田时期外皆保持 5 cm 田面水层。采样时, 先将各层管中积水放掉, 将水样接入储样瓶中, 渗漏水按 3 ~ 5 mm/d, 由土柱 80 cm 深处放出, 水样用硫酸酸化至 pH 2 ~ 4 后备测。

表 2 试验中的施肥量 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 2 Fertilizer doses of the experiment

处理	施肥量				折纯量		
	N	P	K	猪粪	N	P	K
CK	0	0	0	0	0	0	0
PM	0	0	0	20	150	121	82
NPK	180	15	90	0	180	15	90
NPK+LPM	180	15	90	10	255	76	131
NPK+MPM	180	15	90	20	330	136	172
NPK+HPM	180	15	90	40	480	257	254

分析方法: 水样经定量滤纸过滤后, 水溶性总N (DTN) 用过硫酸钾高压氧化处理, 紫外分光光度法测定; DTP用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用AA3 流动分析仪测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量动态变化

数据采集时间为 2005 年稻季, 田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量动态变化如图 1 所示, 在施肥后第 1 天, 就出现了

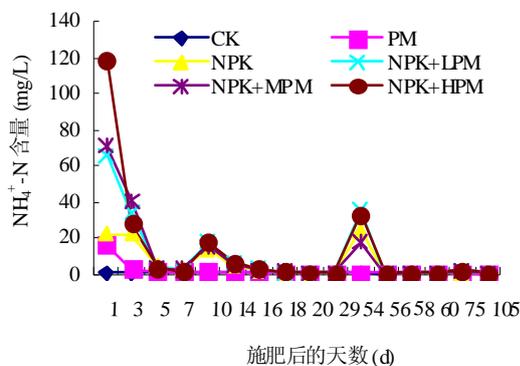


图 1 稻季田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量的动态变化

Fig. 1 Change of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in the flood water of paddy field

最高峰值, 且NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量与施N量呈正相关, 田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量占DTN 73% ~ 98%, 直至施肥后 30 天左右, 才没有显著差异, 施用穗肥后, 施N处理田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N又出现显著的峰值。施用有机肥处理的PM、NPK+LPM、NPK+MPM、NPK+HPM, 田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量分别占DTN的 83%、94%、95%、99%, 而CK和NPK处理田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量分别占DTN的 33%、91%, 这表明施用有机肥会增加N素氨挥发损失的风险。

田面水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量变化如图 2 所示, 施肥后第 3 天出现最高峰, 这说明基肥施入的N以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为主, 经过 2 天的硝化作用, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N才逐渐增加出现最高峰值, 且其含量与施N量呈正比。施用分蘖肥后, 田面水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量没有出现明显的峰值, 由于分蘖肥的施用时间在 7 月中旬, 气温非常高, 且水稻正处于分蘖期, 生长旺盛, 施入的化肥还没有来得及转化为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N就通过氨挥发和作物吸收等途径消耗殆尽。施用穗肥后, 田面水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量出现明显的高峰, 且处理之间有显著差异, 施用有机肥的处理, 其田面水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量显著高于CK和NPK处理, 这可能是由于此时有机肥施用

带入的有机态的N素矿化分解，产生NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N，而作物后期水稻需N量减少的缘故。

田面水 DTN 含量变化如图 3 所示，在基肥施用后第 1 天出现最高峰，施肥后 7 天内田面水DTN与N肥施用量呈显著正相关，与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的变化规律相似，这是因为田面水中N素形态是以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为主。整个生育期随基肥、分蘖肥、穗肥的施用，田面水DTN浓度出现 3 个峰值。基肥施用后 29 天，各处理田面水浓度才基本没有差异，降至 1.0 mg/L以下，施肥处理最

低为 0.46 mg/L，仍高于水体富营养化临界值 0.2 mg/L<sup>[14]</sup>。施用穗肥后，田面水DTN浓度除CK和PM处理外，其他处理均有所提高，但各施肥处理间无显著差异。

### 2.2 渗漏水中 N 素的动态变化

土层 80 cm处渗漏水DTN浓度施肥处理均高于CK处理（表 3），但各处理间没有显示与施肥量的相关性，NPK+HPM处理在第 5 天出现 7.12 mg/L的最高峰。

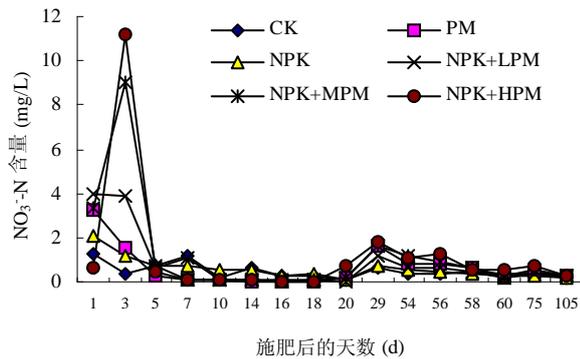


图 2 稻季田面水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量的的动态变化

Fig. 2 Change of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content in the flood water of paddy field

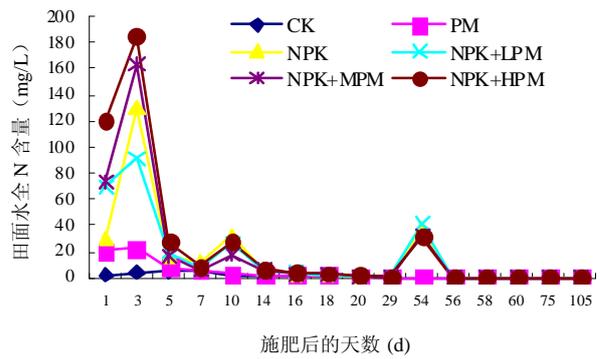


图 3 稻季田面水 DTN 含量的动态变化

Fig. 3 Change of DTN content in the flood water of paddy field

表 3 不同处理稻季渗漏水中 DTN 含量变化 (mg/L)

Table 3 Change of DTN content in leachate at 80 cm depth during rice-growing season in 2005

处理	施肥后的天数 (天)					
	1	5	10	20	30	60
CK	0.689 a	1.275 a	0.973 a	1.050 a	0.626 a	0.170 a
PM	1.103 a	2.750 b	0.573 a	1.290 a	0.436 a	0.069 a
NPK	0.917 a	3.887 b	1.167 b	1.017 a	1.268 a	0.025 a
NPK+LPM	4.160 c	2.683 b	0.837 a	1.253 a	0.530 a	0.100 a
NPK+MPM	1.168 b	1.900 b	0.517 a	1.387 a	1.602 a	0.086 a
NPK+HPM	3.320 c	7.115 c	1.343 b	1.933 b	0.997 a	0.048 a

注：同一列中小写字母不同表示有显著性差异 (p≤0.05)，下同。

渗漏水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度除CK处理最低外，其他处理间均没有显著差异，也未出现与施肥量的相关性。土层 80 cm深处渗漏水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 峰值在施肥后第 4 天左右出现，范围 0.4 ~ 0.7 mg/L；而NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度较高，峰值出现在施肥后第 6 天左右，范围 2.2 ~ 4.6 mg/L，渗漏水中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度均未超过WHO规定 10 mg/L的饮用水标准，但考虑到其累积效应，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋洗还是会对地下水造成潜在污染。

### 2.3 P 素的动态变化

#### 2.3.1 田面水中 DTP 含量动态变化

在 P 肥及猪

粪作基肥一次性施用的情况下，田面水中 DTP 在施用后第 1 天内即出现最高峰值，之后逐渐下降，第 5 天分别降到最低点，之后缓慢上升，在第 15 天时又出现第二个峰值，整个生育期内田面水 DTP 含量与猪粪施用量呈显著正相关（图 4）。出现两个峰值的原因可能是，开始是化肥与猪粪中的速效 P 溶解释放，第二个峰值的出现是猪粪中的 P 随着矿化缓慢释放造成的。

#### 2.3.2 渗漏水中 DTP 含量的动态变化

渗漏水中 DTP 的含量与施肥量之间没有显著的相关性（表 4），

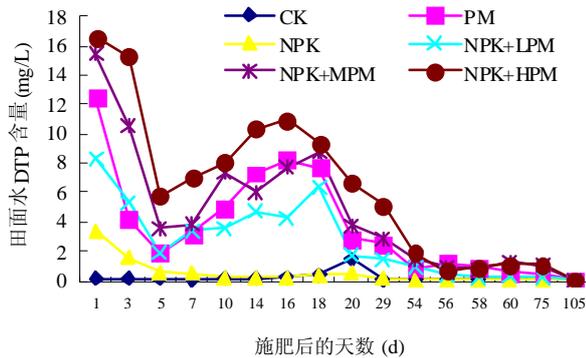


图 4 稻季田面水 DTP 含量动态变化

Fig. 4 Change of DTP content in the flood water

表 4 不同处理稻季渗漏水中 DTP 含量变化 (mg/L)

Table 4 Change of DTP content in leachate at 80 cm depth during rice-growing season in 2005

处理	施肥后的天数 (天)					
	1	5	10	20	30	60
CK	0.056 a	0.078 a	0.091 a	0.409 a	0.068 a	0.062 a
PM	0.087 a	0.096 a	0.054 a	0.409 a	0.093 a	0.030 a
NPK	0.092 a	0.111 a	0.040 a	0.463 a	0.041 a	0.034 a
NPK+LPM	0.134 a	0.077 a	0.052 a	0.339 a	0.050 a	0.023 a
NPK+MPM	0.184 a	0.062 a	0.191 a	0.360 a	0.076 a	0.036 a
NPK+HPM	0.337 b	0.149 b	0.519 b	0.466 a	0.278 b	0.079 a

### 3 结论

(1) 施肥后一定时期内田面水TDN与N肥施用量呈正相关, 施肥处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量占田面水TDN 83% ~ 99%, 特别是NPK+HPM处理, 氨挥发风险更高, 该时段正值当地气温较高时节, 因此, 田面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度过高, 势必造成高的氨挥发损失风险。因此该时期施用N肥, 应主要防止氨挥发和径流损失, 选在雨后或傍晚气温较低时施用。

(2) 在P肥及有机肥做基肥一次性施用的情况下, 在整个生育期内田面水DTP含量与有机肥施用量呈显著相关, 因此P的径流损失应当值得关注。当有机肥用量超过  $40 \text{ t/hm}^2$ 时, 渗漏水中全P含量与其他处理呈极显著差异, 说明过量的有机肥施入农田后, 养分不能被当季作物吸收, 过量的P素由于有机肥的存在也不易被土壤固定, 随渗漏水进入地下水成为水体富营养化的诱因。

尽管农田消纳是目前畜禽粪便资源化利用的一个重要途径, 且适当的施用有机肥可以改善土壤物理化学性状, 缓解土壤酸化程度, 提高作物品质。但有机

只有 NPK+HPM 处理与其他处理间达到了显著差异, 且在整个生育期均高于其他处理。当猪粪用量超过  $40 \text{ t/hm}^2$ 时, 过量的P素不能被作物当季吸收, 在有机酸的影响下也不易被土壤固定, 易随渗漏水进入地下水。直到施肥后第 60 天, 渗漏水中DTP含量依然高于诱发水体富营养化  $0.02 \text{ mg/L}$  的临界值<sup>[15-17]</sup>成为水体富营养化的诱因。

基肥施用后不同时期土柱中土壤溶液分析表明, 不同层次土壤溶液中的 N、P 含量未呈现稳定的变化规律, 不同处理土壤溶液中养分含量有从表层向下层递减的趋势, 这也证明 N、P 养分在垂直方向上有迁移。

肥的过量施用也会造成养分损失、环境污染等问题, 在集约化养殖发达地区, 有机肥农用的风险更加值得我们关注。

### 参考文献:

- [1] 邢光熹, 曹亚澄, 施书莲, 孙国庆, 杜丽娟, 朱建国. 太湖地区水体氮的污染源和反硝化. 中国科学 (B 辑) 2001, 31(2): 130-137
- [2] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 马杏法, 张桂英. 苏南太湖水系农业面源污染及控制对策研究, 环境科学学报, 1997, 17(1): 39-47
- [3] Wang DH, Liang CH. Transportation of agriculture phosphorus and control to reduce the phosphorus loss to water: A review. Soil and Environment, 2002, 11(2): 183-188
- [4] Jiang CL, Cui GB. Effectiveness of wetlands in removal non-point pollutants from agricultural source. Agro-environmental Protection, 2002, 21(5): 471-473, 476
- [5] Sharpley AN, Withers PJA. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus. Fertilizer Research, 1994, 39:133-146
- [6] Lv Y. A gricultural non-point sources and stratagem of stainable

- development of Taihu Lake watershed. *Development of Environment Science*, 1998, 2: 1-4
- [7] Bergstorm L, Brink N. Effects of differentiated applications of fertilizer N on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil. *Plant and Soil*, 1986, 93: 333-345
- [8] Zhang FZ, Xiong XZ, Dai TS. Study on leaching loss of nitrogen in soil-plant system with  $^{15}\text{N}$ . *Environmental Science*, 1984, 5(1): 2-24
- [9] Hallberg GR. From hoes to herbicides: agriculture and groundwater quality. *J. Soil Water Conserv.*, 1986, 41(6): 357-364
- [10] Croll BT, Hayes CR. Nitrate and water supplies in the United Kingdom. *Environmental Pollution*, 1988, 50: 163-187
- [11] Zhu JC, Tian YL. Nitrogen fertilizer and groundwater Contamination. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1986, 5: 38-41
- [12] Ma LS, Qian MR. Study on aquatic contamination of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NO}_2^-$  in Taihu watershed. *Environmental Science*, 1987, 8 (2): 60-65
- [13] 沈善敏. 氮肥在中国农业发展中的贡献和农业氮的损失. *土壤学报*, 2002, 6(增刊): 12-24
- [14] 王庆仁, 李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续发展. *环境科学进展*, 1999, 7 (2): 116-124
- [15] Wang QR, Li JY. Fertilizer application and sustainable development of soil and environment. *Advance of Environ. Sci.*, 1999, 7 (2) : 116-124
- [16] OECD. *Eutrophication of Water. Monitoring, Assessment and Control.* Paris, France: OECD 1982
- [17] Correl DL. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ. Qual.*, 1998, 27: 261-266

## Variation of N & P Contents in Paddy Soil Water and Its Potential Environmental Effect Under Pig Manure Application

SUN Rui-juan<sup>1,2</sup>, WANG De-jian<sup>1</sup>, LIN Jing-hui<sup>1</sup>, YANG Lin-zhang<sup>1</sup>

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

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** The experiment on waterlogged paddy soil (Wushan soil) installed with large-scale lysimeter was carried out to evaluate the potential effect of fertilization on environmental quality. The result indicated that there were significant positive correlation between fertilizer application rate and the concentrations of total dissolved nitrogen (TDN),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in surface water. When large amount of animal manure (e.g.  $40 \text{ t/hm}^2$ ) was applied to the field, the loss of phosphorus would be significant. The results revealed that excessive application of organic manure could cause runoff and leaching of N and P from soil to surface water and ground water, resulting in potential negative effect on the rural environment.

**Key words:** Monolithic lysimeter, Pig manure, Soil solution, Leaching of N & P