

# 稻田土壤养分的迁移规律及其环境风险\*

颜廷梅<sup>1</sup> 杨林章<sup>1</sup> 单艳红<sup>2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 国家环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

## MOVEMENT OF SOIL NUTRIENTS IN PADDY FIELD AND ITS ENVIRONMENTAL RISK

Yan Tingmei<sup>1</sup> Yang Linzhang<sup>1</sup> Shan Yanhong<sup>2</sup>

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

(2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

关键词 稻田; 养分迁移; 环境风险

中图分类号 S154.1 文献标识码 A

我国几乎所有大的湖泊均面临富营养化问题, 究其原因主要是由于氮、磷的过量输入, 而 P 又是内陆水体富营养化的限制因素<sup>[1-4]</sup>。有关资料表明<sup>[5]</sup>, 在排除工业点源污染后, 太湖流域各种面源污染中每年从农田进入水体的磷素相对贡献率不足 10%, 而生活污水、人畜排泄物及淡水养殖业等的磷素相对贡献率达 90% 左右。稻田土壤是水网地区一种特定的土地利用方式, 农田管理方式直接影响着周围水体的环境状况, 因此有关稻田土壤的农田排水和径流损失方面也一直是环境学家关注的热点问题。目前有关稻田土壤磷素损失机制, 磷素在稻田土壤中向下迁移的可能性及渗漏通量还没有比较明确的定论。本试验通过模拟高强度集中供磷状况下, 稻田土壤氮、磷的迁移规律, 探讨随着施磷量的增加, 稻田土壤养分径流和渗漏流失趋势, 预测农业生产活动加剧所带来的环境风险。

## 1 材料与方法

供试土壤为采自中国科学院常熟农业生态实验站的乌栅土, 耕层土壤全磷含量为  $0.69 \text{ g kg}^{-1}$ , 速效磷含量为  $6.56 \text{ mg kg}^{-1}$ , 碱解氮含量为  $171 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

模拟试验<sup>[6]</sup>参照实验站已有的大田试验肥料最适用量(水稻氮、磷、钾的最适用量分别为 270、20、135  $\text{kg hm}^{-2}$ , 麦季氮、磷、钾的最适用量分别为 225、40、90  $\text{kg hm}^{-2}$ ), 设计 5 种施肥方式, 4 次重复。不同处理肥料的用量见表 1。磷、钾肥均作基肥施用, 其中磷肥两季的用量全施在稻季, 氮肥稻麦两季基、追肥的比例均为 5:2:3。

表 1 模拟试验稻(麦)两季的施肥量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ )

处理代号	处理	氮肥	磷肥	钾肥
CK	对照	0	0	0
$\text{N}_1\text{P}_1\text{K}$	适氮、适磷	270(225)	60(0)	120(90)
$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}$	高氮、适磷	315(270)	60(0)	120(90)
$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$	高氮、3倍适磷	315(270)	180(0)	120(90)
$\text{N}_2\text{P}_3\text{K}$	高氮、5倍适磷	315(270)	300(0)	120(90)

注: 括号内数据为麦季的施肥量

原状土柱设计如图 1 所示。试验所用的塑料桶由 PVC 材料制成, 桶外径 40 cm, 壁厚 0.7 cm, 高 80 cm, 采集 70 cm 深的原装土柱后, 用 PVC 板(厚 1 cm)焊接封底。然后在不同层次的采水口插入不锈钢管, 不锈钢管的中间位置开有接水槽, 内置石英砂袋以过滤水样。

水分管理采用自来水灌溉并记录灌水量, 水稻

\* 国家自然科学基金项目(40371073)、江苏省自然科学基金项目(BK2005169)和国家科技支撑计划项目(2006BAD17B06)资助

作者简介: 颜廷梅, 女, 博士, 副研究员, 主要从事土壤生态系统的研究。E-mail: tmyan@issas.ac.cn

收稿日期: 2007-01-10; 收到修改稿日期: 2007-08-16

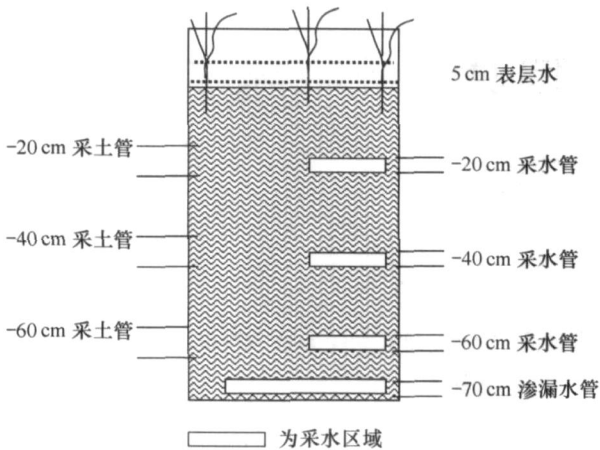
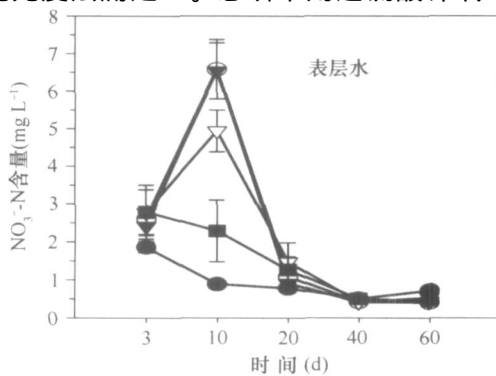


图 1 模拟试验原状土柱示意图

生育期间除烤田外,均保持 5 cm 的田面水,渗漏水按每天 3~5 mm 的渗漏量控制<sup>[7]</sup>,由 70 cm 深处排出。第一季水稻分别于施肥后的第 1、3、5、10、15 天,以后每隔 15 d 采集表层水样和 70 cm 深处的渗漏水样;第二、三稻季则分别于施肥后的第 1、3、5、7、10 天,以后每隔 10 d 采集表层水样和不同土壤深度的渗漏水样(20 cm、40 cm、60 cm、70 cm)。

水样  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  采用流动分析仪测定, $\text{NO}_3^-\text{-N}$  采用紫外分光光度法测定<sup>[8]</sup>。总磷采用过硫酸钾氧



化 钼蓝比色法测定<sup>[9]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 施肥后土壤溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化

不同时期稻田表层水和渗漏水(70 cm)的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量变化显示(图 2),表层水的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在施肥后的第 3 天和第 10 天含量较高,第 10 天达到高峰,其他时间内  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量均不超过  $2.0 \text{ mg L}^{-1}$ 。而渗漏水(70 cm)中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量远高于同期表层水的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量,尤其在施肥后的 10 d 内,施肥处理  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量均在  $10 \text{ mg L}^{-1}$  以上,高于美国规定的地下水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量为  $10 \text{ mg L}^{-1}$  的标准<sup>[5]</sup>。高氮适磷( $\text{N}_2\text{P}_1\text{K}$ )处理的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量高达  $35 \text{ mg L}^{-1}$ 。不同施肥处理渗透水的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量并非施氮越多、含量越高,而是以高氮适磷( $\text{N}_2\text{P}_1\text{K}$ )处理的最高,说明不同的氮、磷肥料配比可能影响  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的渗漏速度,进而影响下层水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  污染程度。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的渗漏将是稻田土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的主要损失途径之一,尤其施肥后的 10 d 左右是  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  流失的高风险期。有关的研究表明化肥使用与浅层地下水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度升高有关<sup>[10~12]</sup>。

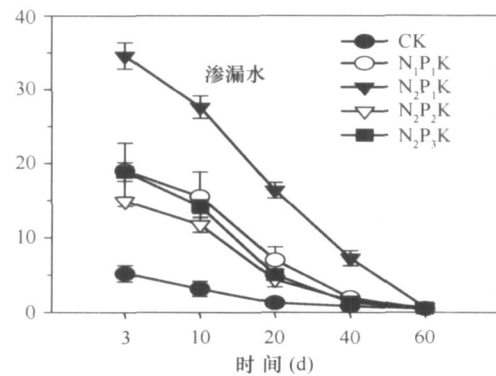


图 2 表层水和渗漏水(70 cm)中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量的变化

### 2.2 施肥后土壤溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化

施肥后稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的变化规律如图 3 所示,表层水的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在施肥后的 10 d 内含量较高,最高达  $35 \text{ mg L}^{-1}$ ,同期渗漏水(70 cm)的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量很低,均不超过  $0.25 \text{ mg L}^{-1}$ ,因此  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  淋洗迁移的可能性较小, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的损失以径流流失为主,尤其在施肥后的 10 d 内遭遇强降雨和排水均可引起  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的大量流失。

### 2.3 施肥后土壤溶液总磷的变化

稻田施肥后,表层水总磷的变化类似于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的变化(图 4),也出现施肥初期(10 d 内)表层水溶液总磷含量过高的现象,最高达  $130 \text{ mg L}^{-1}$ ,而且施磷量越高,表层水的总磷含量越高,磷素的径流淋失风险也越大。这也验证了已有的大田试验和室内试验结论,即磷肥用量和径流磷损失呈直线关系<sup>[13]</sup>。由于允许直接进入湖、库的河流

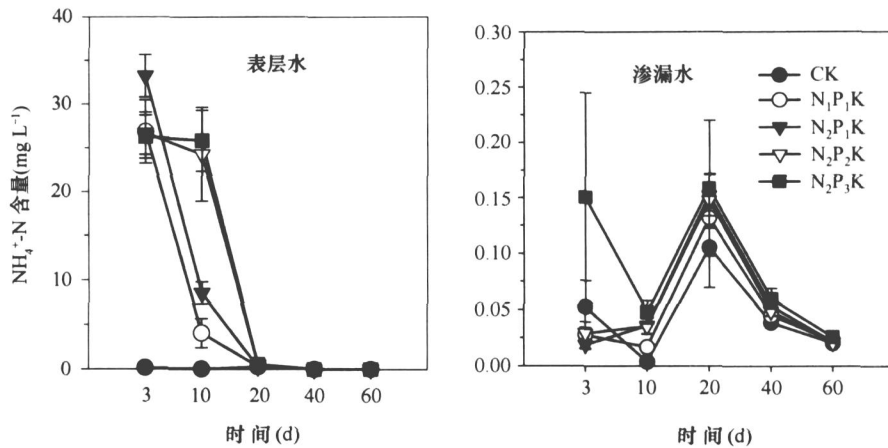
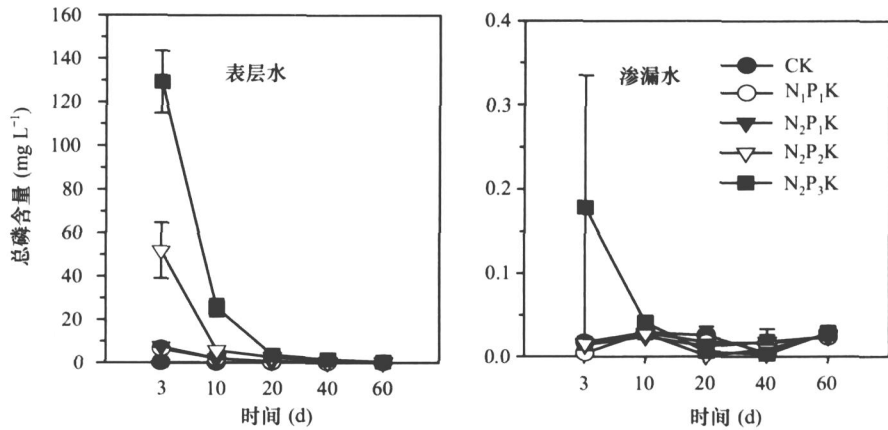
图3 表层水和渗漏水(70 cm)中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量的变化

图4 表层水和渗漏水(70 cm)中总磷含量的变化

中总磷含量临界值仅为  $0.05 \text{ mg L}^{-1}$ <sup>[14]</sup>,因此施肥初期稻田土壤的磷素风险非常高。与表层水的总磷含量相比,同期 70 cm 深处的渗漏水总磷含量相对较低,但土壤不同深度渗漏导致的磷素环境风险依然值得研究。

高量施磷 ( $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$ ,  $\text{N}_2\text{P}_3\text{K}$ ) 条件下,土壤不同深度水溶液总磷的变化显示(图 5),施肥后早期表层水中总磷的浓度较高,其中 3 倍磷肥的处理在施肥后的 50 d 内,表层水总磷的浓度均高于  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$ ,施肥后第 20 天测定的总磷浓度高达  $3.0 \text{ mg L}^{-1}$ ; 5 倍磷肥的处理表层水总磷的浓度变化规律与 3 倍磷肥的处理类似,但 5 倍磷肥的处理表层水总磷浓度高于  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$  的时间要持续至 70 d 左右,且施肥后第 20 天时测得的表层水浓度仍达 3 倍磷肥处理的 2 倍,高达  $6.5 \text{ mg L}^{-1}$ 。因此稻田土壤表层水溶液磷素的危险期可持续至施肥后的 70 d

左右。这与有关的研究结果近似<sup>[15, 16]</sup>。高量施磷 ( $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$ ,  $\text{N}_2\text{P}_3\text{K}$ ) 处理,下层土壤 (20 cm、40 cm、60 cm、70 cm) 渗漏水的总磷含量差异不大,总磷含量均较低。因此稻田土壤磷素的渗漏损失极少。相关的室内模拟试验和下辽河平原的稻田试验均表明,磷的垂直渗漏很少,可忽略不计<sup>[17-19]</sup>。然而,荷兰的有关研究资料显示<sup>[20]</sup>,磷饱和的土壤会引起大量磷素淋溶至地下水,其淋失量的多少取决于土壤的磷饱和度、施磷量和地下水深度。本试验的供试土壤采自保护行,土壤磷素含量较低,对磷素的固持能力较强,即使在大量施磷情况下,前三季水稻磷素的渗漏损失也很少。

因此,磷肥施用后 10 d 是磷素地表径流流失的高风险期,而高量施用磷肥,磷素的流失风险期延长,可持续至 50 ~ 70 d,所以这个时期的降雨和地表排水会将大量的磷素带入水环境。

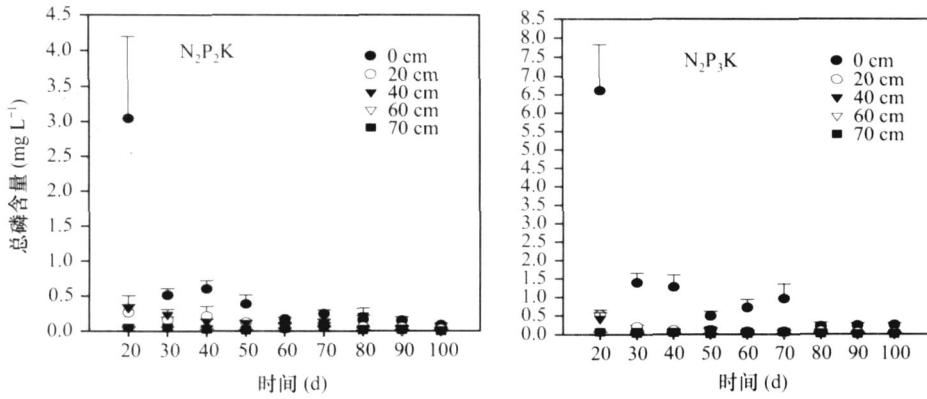


图 5 高量施磷条件下土壤不同深度总磷含量的变化

## 2.4 稻田磷素渗漏流失通量

同一处理不同稻季土壤磷素渗漏量在第一、二、三季稻相对较低,第四、五季稻磷素渗漏量逐渐增多(表 2),除第五季稻以外,不同施磷处理磷素渗漏量相差不大。施磷处理第四、五季稻的渗漏量在  $0.45 \sim 1.82 \text{ kg hm}^{-2}$  之间,高于 van der Molen 等确定的环境可接受的 (Environmentally acceptable) 磷素流失量  $0.44 \text{ kg hm}^{-2}$  [20, 21],张大弟等 [22] 在上海市郊非点源污染调查中得出的稻田磷素渗漏量为  $0.965 \text{ kg hm}^{-2}$ ,本模拟试验前三季稻的磷素渗漏量均低于  $0.44 \text{ kg hm}^{-2}$  的磷素环境风险临界值,适磷处理五季稻的磷素渗漏通量均未超出张大弟等人得出的结论,但第五季稻高磷处理的磷素渗漏通量远超过  $0.965 \text{ kg hm}^{-2}$ ,磷肥长期的累积效应不容忽视。长期施磷,即使在磷肥用量适宜的情况下,磷素的渗漏风险也会逐渐加大,因此稻田不宜长期施用磷肥。前三季稻之所以磷素的渗漏通量较低,可能是由于供试土壤磷素含量较低,早期施入的磷肥大部分被土壤固定,随着磷素的累积和土壤固磷能力的降低,磷素的环境风险才逐渐显现出来。

表 2 不同稻季土壤磷素的渗漏通量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ )

处理代号	第一季	第二季	第三季	第四季	第五季
CK	0.10a	0.13a	0.03a	0.10b	0.45d
$\text{N}_1\text{P}_1\text{K}$	0.10a	0.06a	0.03a	0.57a	0.77c
$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}$	0.11a	0.06a	0.04a	0.47ab	0.79c
$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}$	0.11a	0.09a	0.03a	0.87a	1.30b
$\text{N}_2\text{P}_3\text{K}$	0.10a	0.06a	0.03a	0.45ab	1.82a

注:同一列字母不同表示处理间差异达显著水平 ( $p < 0.05$ )

## 3 结 论

土壤氮素具有地表径流流失和渗漏流失的双

重环境风险,尤其是在施肥后的最初 10 d 内。其中径流流失以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为主,渗漏损失则主要为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,而高量施氮可加速  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的渗漏损失,并且不同的氮、磷肥料配比可能影响  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  向下迁移的速度,进而影响下层水中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  污染程度。

稻季磷肥作基肥情况下,常规施磷的地表径流流失风险存在于施肥后的 10 d 内,高量施用磷肥,磷素的径流流失风险持续时间较长,可达 50 ~ 70 d,这个时期的降雨和地表排水可将大量的磷素带入水环境,因此随着磷肥用量的增加,磷素的径流流失风险也在逐渐加剧。模拟试验前三季稻的磷素渗漏量均低于磷素环境风险临界值,但施磷处理的第四、五季稻的磷素渗漏通量均超出磷素环境风险临界值,磷肥长期的累积效应不容忽视。长期施磷,即使在磷肥用量适宜的情况下,磷素的渗漏风险也会逐渐加大,因此稻田不宜长期施用磷肥。

## 参 考 文 献

- [1] Lee G F. Role of phosphorus in eutrophication and diffuse source control. *Water Research*, 1973, 7: 111 ~ 128
- [2] Isemann K. Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western Europe against the background of their eutrophication. *Fert Res*, 1990, 26: 253 ~ 269
- [3] Shapley A N, Chapra S C, Wedepohl R, *et al*. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *Shapley A*, 1994, 23: 437 ~ 451
- [4] Correll D L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ Qual*, 1998, 27: 261 ~ 266
- [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] 单艳红, 杨林章, 颜廷梅, 等. 水田土壤溶液磷氮的动态变化及潜在的环境影响. *生态学报*, 2005, 25(1): 115 ~ 121
- [7] 徐琪, 杨林章, 董元华. 中国稻田生态系统. 北京: 中国农业出

- 版社,1998. 156
- [ 8 ] 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,1999
- [ 9 ] 中华人民共和国国家标准 GB11893-89 水质总磷的测定——钼酸铵分光光度法
- [ 10 ] Hallberg G R. From hoes to herbicides: Agriculture and ground-water quality. *J. SoilWater Conserv.*, 1986, 41(6): 357~364
- [ 11 ] Croll B T, Hayes C R. Nitrate and water supplies in the United Kingdom. *Environmental Pollution*, 1988, 50: 163~187
- [ 12 ] 马立珊, 钱敏仁. 太湖流域水环境硝态氮和亚硝态氮污染的研究. *环境科学*, 1987, 8(2): 60~65
- [ 13 ] Romkens J M, Nelson D W. Phosphorus relationships in runoff from fertilized soils. *J. Environ Qual*, 1974, 3: 10~13
- [ 14 ] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准 (GB3838-2002). 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [ 15 ] 张志剑, 朱荫湄, 王珂. 水稻田土 水系统中磷素行为及其环境影响研究. *应用生态学报*, 2001, 12(2): 229~232
- [ 16 ] 连刚, 王德建, 林静慧. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1 879~1 883
- [ 17 ] 罗良国, 闻大中, 沈善敏. 北方稻田生态系统养分渗漏规律研究. *中国农业科学*, 2000, 33(2): 68~74
- [ 18 ] 隋红建, 杨邦杰, 张家炳. 入渗条件下土壤中磷离子迁移的数值模拟. *环境科学学报*, 1996, 16(3): 302~307
- [ 19 ] 王超. 磷肥污染物在非饱和土壤种迁移特性研究. *南京大学学报(自然科学版)*, 1997, 33: 253~255
- [ 20 ] van der Molen D T, Breeuwma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives. *J. Environ Qual*, 1998, 27: 4~11
- [ 21 ] Del Campillo M C, van der zee S E A T M, Torrent J. Modelling long-term phosphorus leaching and changes in phosphorus fertility in excessively fertilized acid sandy soils. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50: 391~399
- [ 22 ] 张大弟, 张晓红, 章家骥, 等. 上海市郊区非点源污染综合调查评价. *上海农业学报*, 1997, 13(1): 31~36