

不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究^①

田玉华^{1,2}, 贺发云¹, 尹 斌^{1*}, 朱兆良¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (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: 稻田田面水中 N、P 浓度是决定稻田 N、P 径流流失, N 素的氨挥发与硝化-反硝化等各种损失途径的关键因子。采用田间试验方法研究了不同 N、P 配合下田面水中 N、P 动态变化。结果表明, 田面水总 N (TN)、总 P (TP) 和溶解态无机 P (DIP) 的浓度在施肥后很快达到峰值, 之后迅速下降, 其变化均可以用指数方程 ($Y = C_0 \times e^{-kt}$) 来描述。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在施 N 后 2~4 天达到峰值, 之后逐渐下降, 6~7 天后降至稳定。基肥施用后的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度上升比分蘖肥和孕穗肥施用后慢, 同时 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降也慢。相同施 N 水平下, 高 P 处理田面水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度较优化处理高; 相同施 P 水平下, 高 N 和低 N 处理田面水的 TP 和 DIP 浓度也较优化处理高, 这表明: 当 N、P 其中之一超过或低于适合用量时, 会促进另一养分的流失。施肥后田面水中 TN、TP 和 DIP 可作为稻田 N、P 流失的主要指标, 应着重控制基肥施用后 N、P 的径流流失, 以及追肥施用后尿素的水解速度。

关键词: 氮磷配合; 田面水; 氮; 磷; 动态变化

中图分类号: S143.1; S143.2

经济和农业发达的太湖流域, 近 20 年来, N、P 肥施用量逐年增加, 很多稻田的单季 N 肥施用量已超过了 $\text{N } 300 \text{ kg/hm}^2$, P 肥也有增加的趋势, 已有的研究表明: 该地区的 N、P 普遍出现了盈余现象^[1-2]。用差减法测定的结果表明: N 肥当季利用率平均只有 30%~41%, 水稻田 N 肥通过氨挥发、径流、淋溶以及硝化-反硝化等损失可达 30%~70%^[3]。P 肥的利用率更低, 通常情况下, 当季作物只利用 5%~15%, 大部分 P 滞留在表层土壤中, 增加了向水体流失的风险^[4]。由农田 N、P 流失引起的环境水体富营养化、地下水硝酸盐污染等问题已受到广泛关注^[5-7]。多数研究表明, 水体富营养化, P 是主要控制因子^[8]; 进入水体的 N 素在水体中的转化十分活跃, 可参加硝化-反硝化过程, 并产生一些中间产物, 如 N_2O , 产生二次污染^[9]。稻田表层水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是决定稻田氨挥发的最重要因素之一^[10], 田面水中的 N、P 是稻田 N、P 径流流失的直接来源。已有的研究大多是将 N、P 单独研究^[11-14], 而将 N、P 不同水平结合起来, 进行 N、P 流失风险的研究还不多见。

本试验是在太湖流域典型土地利用方式—稻麦轮作体系下, 研究不同 N、P 水平配合对稻田田面水中 N、P 动态变化的影响, 为稻田养分流失研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于太湖流域, 中国科学院常熟农业生态试验站 ($31^\circ 32' 45''\text{N}$, $120^\circ 41' 57''\text{E}$)。试验区属亚热带中部湿润季风气候, 年均气温 15.5°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温 4933.7°C , 年降水量 1038 mm 左右, 无霜期 201 天, 年日照 2203 h, 年平均太阳总辐射量 $4.94 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$, 站区地形属阳澄湖低洼湖荡平原, 海拔 1.3 m。供试土壤为湖积物上发育的潜育型水稻土 (乌栅土), 0~20 cm 土壤基本性状见表 1。

1.2 试验设计及处理

试验于 2003 年稻季开始。共设置 5 个处理: CK (无肥区)、LN (低 N)、OPT (优化)、HP (高 P) 和 HN (高 N), 对应施肥量见表 2。各处理 3

①基金项目: 国家自然科学基金 (40571077) 和中国科学院知识创新工程项目 (KZCX-413) 资助。

* 通讯作者 (byin@issas.ac.cn)

作者简介: 田玉华 (1980—), 女, 河南夏邑人, 博士研究生, 主要从事氮素植物营养和环境研究。E-mail: yhtian@issas.ac.cn

表 1 土壤基本性状

Table 1 Some basic propertie of the soils used in field experiment

土壤	pH (H ₂ O)	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	Olsen P (mg/kg)	交换性 K (mg/kg)	CEC (cmol/kg)
乌栅土	7.36	37.9	1.89	0.71	17.33	6.7	121.3	17.7

次重复, 随机区组排列, 小区面积为 $6.8 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$, 试验区周围为宽约 1.5 m 的保护行。各小区均设有单独的排水口和进水口, 灌溉用水为附近河水。水稻移栽后, 除水稻分蘖后期烤田一周, 以及收获前 $10 \sim 14$ 天小区不进水, 其余时间保持田面水层 $4 \sim 5 \text{ cm}$, 当田面水低于 2 cm 时, 小区灌水, 在傍晚进行。若遇大雨田面水高于 7 cm 时通过排水口排出, 认为是径流。

表 2 处理及施肥量

Table 2 Treatments and fertilization rates

处理	N (kg/hm ²)	P ₂ O ₅ (kg/hm ²)	K ₂ O (kg/hm ²)
CK	0	0	0
LN	180	90	90
OPT	255	90	90
HP	255	180	90
HN	330	90	90

所用 N 肥为尿素 (含 N 460 g/kg), P 肥为过磷酸钙 (P_2O_5 140 g/kg)。N 肥施用分配为: 2003 年稻季基肥:分蘖肥:孕穗肥 = $0.45:0.3:0.25$, 2004 年稻季比例为 $0.4:0.3:0.3$ 。P、K 肥作基肥一次施入, 田间灌水泡田 $3 \sim 5$ 天后, 基肥施入田面, 随即用田耙与表土人工拌匀, 然后插秧。追肥为表施, 小区其他管理与周围大田一致。2003 年稻季基肥、分蘖肥和孕穗肥的施用时间分别是 6 月 24 日、7 月 28 日和 8 月 18 日, 2004 年稻季相应施肥时间为 6 月 18 日、6 月 29 日和 8 月 5 日。

1.3 采样以及测定

傍晚施肥后, 第 2 天起每天早晨 7:00 左右定时采集田面水样品, 各小区取至少 5 个点混合样 100 ml 左右, 取样持续到田面水中 N、P 浓度降至稳定。样品取回后带回实验室, 无 P 滤纸过滤, TN (全 N) 采用过硫酸钾 (进口) 氧化-紫外分光光度法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用连续流动分析仪测定, TP (全 P) 采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定, DIP (溶解态无机 P) 采用钼锑抗比色法测定。

2 结果与讨论

2.1 N、P 水平对田面水中 N 浓度的影响

施 N 量是影响田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度的主要因子, TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随施 N 量的增加而增加 (图 1、2); 基肥施用后田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较分蘖肥施用后低, 而且变化平缓 (图 1), 可能与此温度较分蘖肥时低 (图 3) 以及施肥方式 (与表层土混施) 有关, 此时尿素水解速度较慢而且更多 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被土壤固定。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在每次施肥后有一个先升后降的过程, 而 TN 则不同, 施基肥后各施肥处理浓度立即可达 $100 \sim 170 \text{ mg/L}$ (图 2)。

在相同施 N 水平 (255 kg/hm^2) 下, HP 处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度始终高于 OPT 处理 (图 1), 这种趋势可能会影响到稻田氨挥发损失, 产生这种现象的原因有待于进一步研究, 可能与土壤和田面水中脲酶、微生物以及藻类活动有关。研究表明土壤脲酶活性与土壤 P 含量呈显著正相关关系^[15]。

为保证水稻分蘖数, 通常稻田基肥之间间隔时间较短, 而这两次施肥量占全生育期 70% 的施 N 量以及全部的 P、K 量, 但秧苗吸收养分较少, 此时田面水中的 N 浓度很高, 若遇大雨则通过径流流失的风险很大。如 2004 年 6 月 28 日遇到一次大暴雨, 产生径流, 田面水中 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度骤然下降, 因此稻季应及时关注天气情况, 尽量避免大雨前 1 周内施肥。而且, 存在于土水系统中的大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和其他形态 (如 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 很容易通过氨挥发、硝化-反硝化损失掉^[16-18]。因此, 降低施肥后田面水中 N 浓度是减少 N 素损失的有效途径之一, 如采用控释 N 肥等^[19]。同时, 过量的 P 对田面水中 N 的这种影响在 P 已经出现盈余的太湖流域也不能不考虑。

尿素是稻田施用的主要 N 肥种类, 施入稻田要经过脲酶水解成为无机态 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 其水解速度受温度, pH, 土壤有机质, 微生物, N、P、K 含量等影响^[20], $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TN}$ 可反映 N 素转化与流失及氨挥发损失潜力的相对水平。试验结果发现 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TN}$ 变化也是先升后降的过程, 一周后几乎为零。不同施肥时期变化趋势有明显差异: 基肥施用后 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TN}$ 较后两次施 N 后上升和下降得都较慢, 主要与当时温度较低, 氨挥发较低 (氨挥发数据没有列

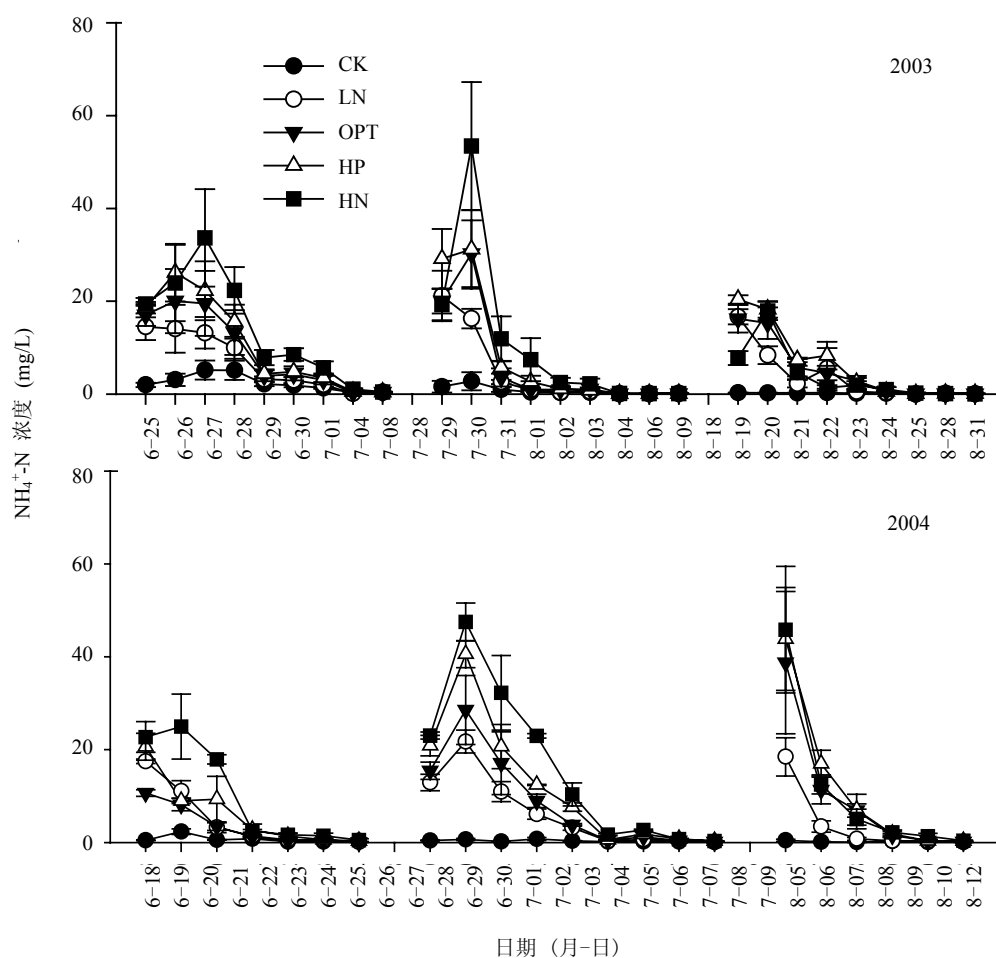


图1 2003年和2004年稻季N、P水平对3次施N后田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化的影响

Fig. 1 Effect of N combination with P on changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in surface water after each fertilization in the rice seasons of 2003 and 2004

出), 以及水稻吸收较少有关。所以, 控制追肥施用后尿素水解速度对减少 N 肥挥发损失有重要意义。

田面水 TN 浓度变化可用指数降低模型 ($Y = C_0 \times e^{-kt}$) 表示, 2003 年稻季 3 次施肥 TN 拟合结果见表 3, 拟合均达到显著 ($P < 0.01$) 或极显著 ($P < 0.001$) 水平。反应常数 C_0 随施肥量增加而增加, 而在同一施 N 水平上 3 次施肥之间 C_0 差异不太明显, HP 处理的 C_0 稍高于 OPT 处理。然而, TN 浓度降低系数 k 在基肥施用后明显低于分蘖肥和穗肥施用后, 处理间 HP 和 HN 稍高于 LN 和 OPT, 表示基肥施用后 TN 浓度比追肥施用后降低得慢, 追肥的施用方法是表施, 会导致追肥的损失 (主要是氨挥发) 的增加。

对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 整体变化过程没有找到合适的模型来描述, 是一个先升后降的趋势, 有人把上升过程

和下降过程分开用指数模型表述, 效果比较理想^[11]。

2.2 N、P 水平对田面水中 P 动态变化的影响

2004 年稻季观测了田面水中 TP 和 DIP 浓度变化。与 N 相似, P 水平是影响田面水 TP 和 DIP 浓度的主要因子。水溶性 P 肥作为基肥施入土壤后, 当天田面水中 TP 和 DIP 浓度就达到峰值, 4~5 天内迅速降至稳定, 低于 1 mg/L。其变化趋势也可用指数降低模型 ($Y = C_0 \times e^{-kt}$) 来拟合, 拟合结果见表 4。P 在土水界面中不易挥发, 大多数 P 被土壤固定或被植物、微生物以及藻类吸收固定。之后整个稻季生长期, 田面水 TP 浓度都在 1.5 mg/L 以下。不难理解, 若在施 P 后的 5 天内遇到暴雨产生径流, P 的流失会很严重, 稻田 P 的流失管理重点应放在施肥后的几天, 其余时间风险相对较小, 与最近提出的稻田 P 素的“机会径流”的说法一致^[21]。

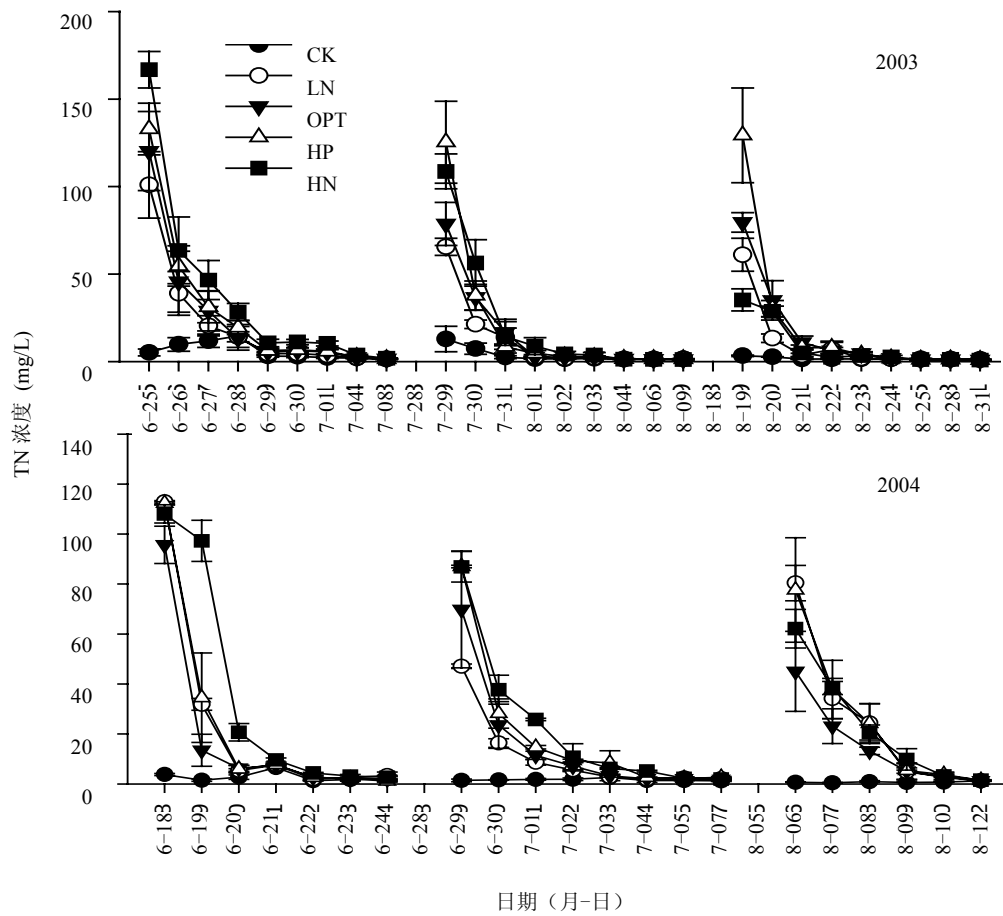


图 2 2003 年和 2004 年稻季 N、P 水平对施肥后田面水 TN 浓度变化的影响

Fig. 2 Effect of N combination with P on changes of TN concentration in surface water after each fertilization in rice seasons of 2003 and 2004

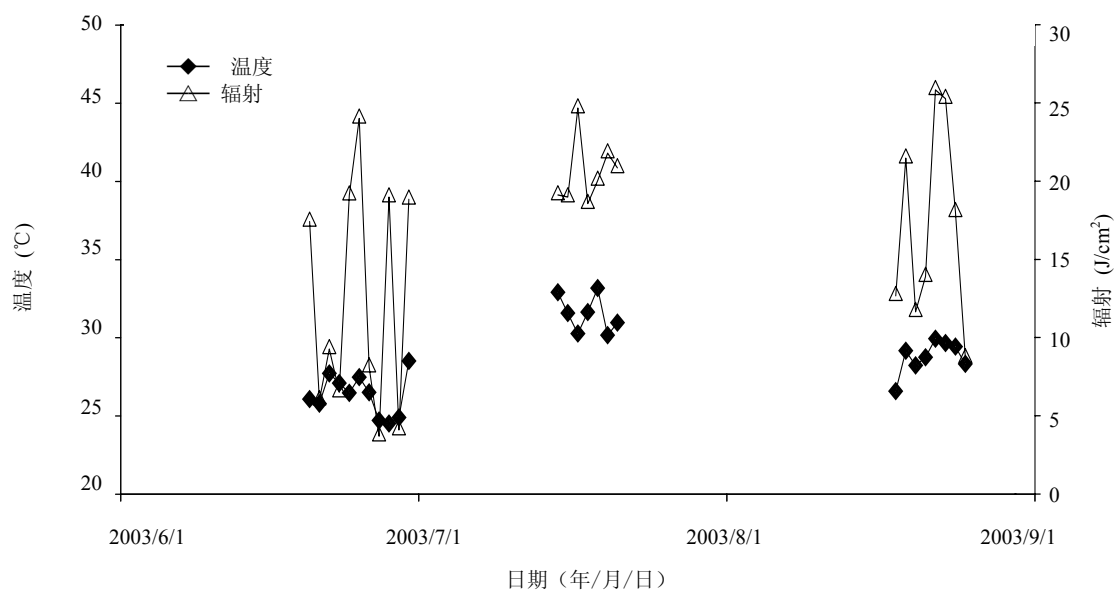


图 3 2003 年稻季施肥后日平均气温和太阳辐射强度(2004 年稻季与 2003 年规律相似, 数据未列出)

Fig. 3 Daily mean air temperature and sun radiation intensity after fertilization in the rice season of 2003

表 3 2003 年稻季施肥后 TN 浓度变化拟合结果

Table 3 Simulation of the decrease of TN concentration in surface water and its regressive parameters

参数	基肥 (N、P、K)				分蘖肥 (N)				孕穗肥 (N)			
	LN	OPT	HP	HN	LN	OPT	HP	HN	LN	OPT	HP	HN
$C_0(\text{mg/L})$	106.597	130.282	163.055	215.185	80.496	110.825	132.866	183.324	67.032	136.327	171.6951	51.60
$K(1/\text{d})$	0.501	0.505	0.527	0.507	0.65	0.672	0.701	0.709	0.678	0.723	0.785	0.577
R^2	0.953	0.949	0.963	0.963	0.885	0.876	0.901	0.967	0.844	0.972	0.928	0.801
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.01	0.001	0.002	0.01

表 4 P 肥施用后田面水 TP 和 DIP 浓度变化指数模拟结果

Table 4 Simulation of the decrease of TP and DIP concentration in surface water and their regressive parameters

参数	TP 拟合				DIP 拟合			
	LN	OPT	HP	HN	LN	OPT	HP	HN
$C_0(\text{mg/L})$	44.139	25.789	47.366	53.937	78.829	18.821	48.744	44.173
$K(1/\text{d})$	1.023	1.093	1.014	1.029	1.184	1.047	1.263	1.03
R^2	0.995	0.837	0.734	0.932	0.975	0.943	0.946	0.927
P	0.003	0.05	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.003

在相同施 P 水平 (P_2O_5 90 kg/hm^2) 下, N 水平影响田面水中 P 的浓度, 具体表现为: HN 处理田面水 TP 和 DIP 浓度显著高于 OPT 处理, LN 不太明显 (图 4、5), 施 N 量过高会促进稻田 P 的流失。从图 4、5 中还可以看出, 第 2 次施 N 后, 田面水中 TP 和 DIP 的浓度有升高的现象, TP 浓度可以超过 1 mg/L , 主要以无机 P 形式存在, 可以理解为是一种激发作用, 可能与田面水中的 P 的生物转化有关。所以对 P 流失评价时, 施 N 的这种影响也应考

虑。

从已有的研究来看, 在大多数情况下, N、P 水平之间的交互作用大多是正面的, 即有利于减少养分流失^[22]; 但也有的研究表明, 这种正面交互作用是有限度的^[23]。然而, 当其中 1 个组分超过一定限度时, 也就是说超过土壤和植物系统消纳限度时, 就要重新考虑 N、P 的相互影响, 这一点在施肥量逐步增加的地区, 如太湖流域, 应特别值得考虑。

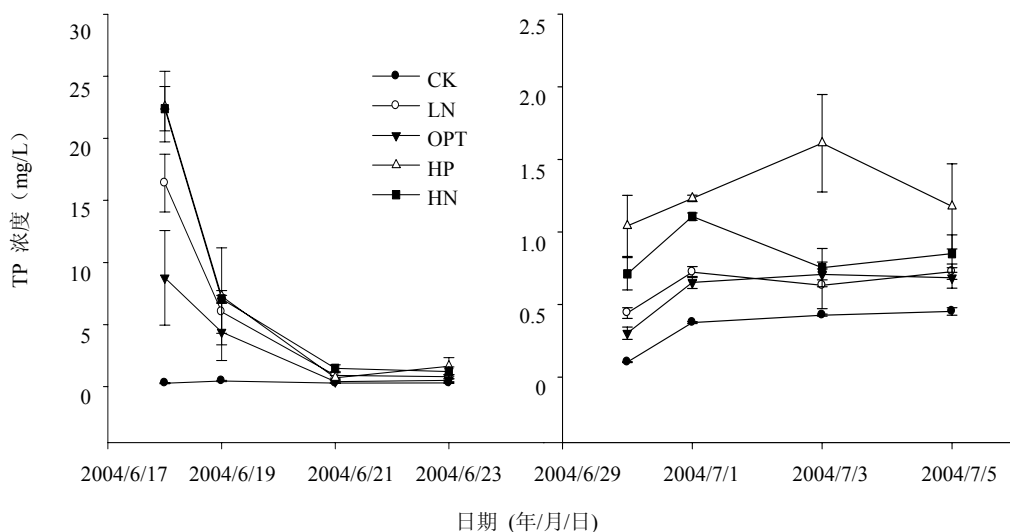


图 4 N、P 水平对施肥后田面水中 TP 浓度变化的影响

Fig. 4 Effect of N combination with P on changes of TP concentration in surface water

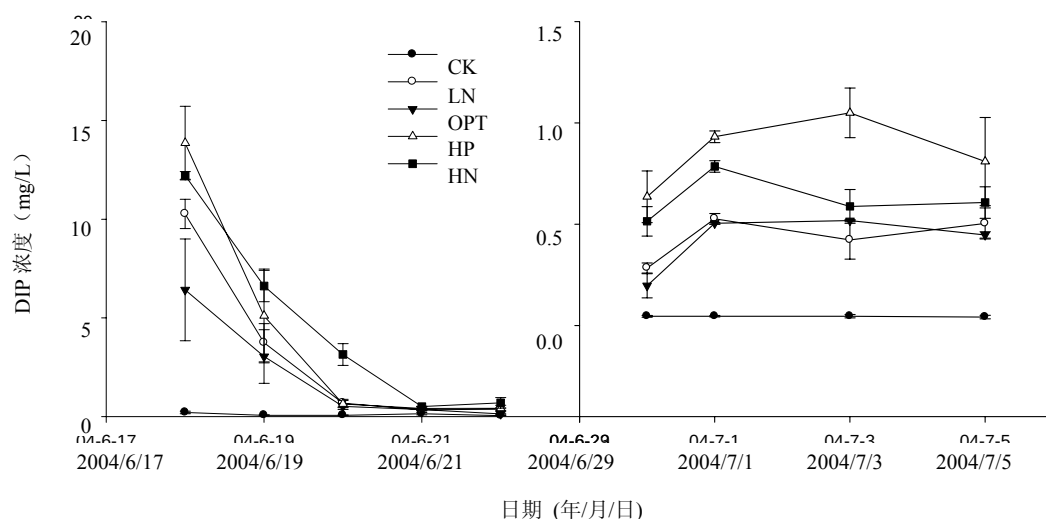


图 5 N、P 水平对施肥后面水中 DIP 浓度变化的影响

Fig. 5 Effect of N combination with P on changes of DIP concentration in surface water.

3 结论

(1) 田面水 TN、TP 和 DIP 浓度在施肥后即达到峰值, 其变化都可用指数降低模型 ($Y = C_0 \times e^{-kt}$) 来描述。NH₄⁺-N 以及 NH₄⁺-N/TN 在施肥后是先升后降的趋势, 2~4 天达到峰值, 6~8 天后含量很少, 并趋于稳定。

(2) NH₄⁺-N 浓度变化在不同施肥时期有明显区别, 基肥施用后其浓度上升比追肥施用后慢, 同时 TN 和 NH₄⁺-N 浓度下降也比追肥施用后慢, 所以应着重控制基肥施用后的径流流失, 以及追肥施用后尿素的水解速度, 以减少稻田 N 肥损失。施肥后 TN、TP 和 DIP 可作为稻田 N、P 流失的主要 N、P 指标, 施肥后 1 周时间是控制 N、P 损失的关键时期。

(3) N 水平是影响田面水中 TN 和 NH₄⁺-N 浓度的主要因子, P 水平是影响田面水中 P 浓度的主要因子。然而, 在相同施 N 水平下, HP 处理田面水中 NH₄⁺-N 浓度较 OPT 处理高; 类似, 相同 P 水平下, HN 和 LN 处理田面水 TP 和 DIP 浓度也高于 OPT 处理, 表明当 N、P 其中之一超过或低于适宜用量时, 会促进另一养分的损失。在 N、P 施肥量高并且出现盈余的地区, 如太湖流域, 考虑 N、P 的上述相互影响对于研究和控制稻田 N、P 流失有很重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 张志剑, 朱荫湄, 王珂, 王光火, 董亮, 郑洪福. 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
- [2] 高超, 张桃林. 太湖地区农田土壤磷素动态及流失风险分析. 农村生态环境, 2000, 16 (4): 24-27
- [3] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9 (1): 1-6
- [4] 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): 116-123
- [5] Mosier AR. Environmental challenges associated with needed increases in global nitrogen fixation. Nutrient Cycling in Agroecosystem, 2002, 63: 101-106
- [6] 邢光熹, 施书莲, 杜丽娟, 曹亚澄, 孙国庆, 沈光裕, 孙德玲. 苏州地区水体氮污染状况. 土壤学报, 2001, 38 (4): 540-546
- [7] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮磷的流失与水体富营养化. 土壤, 2000, 4: 188-193
- [8] 范成新. 太湖水体生态环境历史演变. 湖泊科学, 1996, 8 (4): 297-304
- [9] 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, 2001, 31 (2): 130-137
- [10] 朱兆良, 范晓晖, 孙永红, 王德建. 太湖地区水稻土上稻季氮素循环及其环境效应. 作物研究, 2004, 4: 187-191
- [11] 王小治, 朱建国, 宝川靖和, 封克. 施用尿素稻田表层水氮素的动态变化及模式表征. 农业环境科学学报, 2004, 23 (5): 852-856
- [12] Zhang HC, Cao FL, Fang SZ, Wang GP, Zhang HG, Cao ZH. Effects of agricultural production on phosphorus

- losses from paddy soils: A case study in the Taihu Lake Region of China. *Wetlands Ecology and Management*, 2005, 13 (1): 25–33
- [13] 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其控制对策研究. *环境科学学报*, 1997, 17 (1): 39–47
- [14] Guo HY, Zhu JG, Wang XR, Wu ZH, Zhang Z. Case study on nitrogen and phosphorus emissions from paddy field in Taihu region. *Environmental Geochemistry and Health*. 2004, 26: 209–219
- [15] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究. *土壤通报*, 2004, 35 (4): 523–525
- [16] 苏成国, 尹斌, 朱兆良. 稻田氮肥的氮挥发损失与稻季大气氮的湿沉降. *应用生态学报*, 2003, 14 (11): 1884–1888
- [17] 宋勇生, 范晓辉, 林德喜, 杨林章, 周健民. 太湖地区稻田氮挥发及影响因素的研究. *土壤学报*, 2004, 41 (2): 265–269
- [18] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 沈其荣. 农田氮素的气态损失与大气湿沉降及其环境效应. *土壤*, 2005, 37 (2): 113–120
- [19] Minami K. N cycle, N flow trends in Japan, and strategies for reducing N_2O emission and NO_3^- pollution. *Pedosphere*, 2005, 15 (2): 164–172
- [20] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 孙惠敏, 和文祥. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10 (3): 277–280
- [21] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 胡正义, 董元华, 尹睿. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征. *土壤学报*, 2005, 42 (5): 799–804
- [22] 郑剑英, 吴瑞俊, 翟连宁. 氮磷配施对坡地谷子吸 N, P 量及土壤养分流失的影响. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5 (5): 94–98
- [23] Schils R, Smijders P. The combined effect of fertilizer nitrogen and phosphorus on herbage yield and change in soil nutrients of a grass/clover and grass only sward. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 2004, 68: 165–179

Dynamic Changes of Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Surface Water of Paddy Field

TIAN Yu-hua^{1,2}, HE Fa-yun¹, YIN Bin¹, ZHU Zhao-liang¹

(¹ State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

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

Abstract: A field experiment was conducted to study dynamic changes of NH_4^+ -N, TN, TP and DIP concentrations in surface water of paddy fields applied with different combination of N and P fertilizers. Results showed that TN, TP and DIP reached their respective peak values in concentration quickly after urea and superphosphate applied, and then soon decreased which fits an exponential equation, ($Y = C_0 \times e^{-kt}$), while NH_4^+ -N peaked 2–4 days after urea applied, and decreased soon afterwards, and then leveled off after another 6–7 days. NH_4^+ -N concentration rose much slower after basal dressing than after side-dressings at the tillering and milking stages, and the decrease of NH_4^+ -N and TN concentrations was lower, too. With the same level of N fertilization, NH_4^+ -N and TN concentrations in the surface water were higher in Treatment HP than Treatment OPT, while with the same level of P fertilization, TP and DIP concentrations were higher in Treatments HN and LN than in Treatment OPT, indicating that either N or P being too high or too low in application rate may accelerate loss of the other one. TN, TP and DIP could be cited as key parameters for N and P runoff loss within 3 days after urea application. A week after fertilization was the critical period for controlling loss of N and P from paddy fields.

Key words: N combination with P, Surface water, Nitrogen, Phosphorus, Dynamic change