

苏南典型水稻丰产方施肥与 地表水浓度动态变化 ——以苏州市旺山村为例

宋静 骆永明 乔显亮 吴龙华 赵其国 阙惠庭 陈水男 徐红艳 张维官 许根海

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

(江苏省苏州市吴中区农业局)

摘 要 本研究选取苏南太湖流域苏州市吴中区(原吴县市)横泾镇旺山村水稻丰产方为试验点,研究不同施 N 水平下田面水、排水渠、灌水渠、毗邻农田的河水等地表水体中 N、P 浓度随时间的变化规律及 N 肥用量对稻谷产量的影响。研究表明,田面水及邻近地表水体 N、P 的浓度变化特征与基肥施用方式有关。水稻施肥期间,农田是周边水体的 N、P 污染源,是监控稻田 N、P 流失的关键时期。在当地常规施 N 量的基础上再增加 N 肥用量边际产量开始下降,不但不能增加收益而且还导致稻田周围水体 N、P 污染的加剧。

关键词 N 肥; 地表水; 农业面源污染; 太湖流域

苏南太湖流域是我国重要的商品粮生产基地,长期以来水稻 N 肥用量一直保持在较高水平,水稻平均 N 肥用量已达 300 kg/hm^2 ,有的地区甚至达到 350 kg/hm^2 ^[1]。大量研究表明 N 肥的当季利用率仅为 20~35%,过量施用 N 肥不但导致肥料利用率下降,增产不增收甚至减产,肥料的流失还会加剧农田周围水体的富营养化^[2~4]。

本研究以苏州市吴中区(原吴县市)横泾镇旺山村—典型“省、市、县”农业生态村水稻丰产方为试验点,旨在摸清不同施 N 水平和施肥模式下田面水、排水渠、灌水渠、毗邻农田的河水等地表水体中 N、P 浓度随时间的变化规律及 N 肥用量对水稻产量的影响,为下一步定量研究不同施肥水平下 N、P 的流失量、确定当地最适的 N 肥施用量及减少农业面源污染提供科学依据。

1 实验设计与方法

1.1 试验小区

试验小区位于苏州市吴中区横泾镇旺山村排灌站东侧的 3 hm^2 丰产方内,土壤类型为湖积母质上发育的潴育型粘质黄泥土。为更接近自然与农业生产实际状态,尽量避免小区试验中人为因素的强烈干扰,同时参照国外类似工作,试验区选择由相邻的面积大且相近的 5 块自然田块组成,自西向东依次标记为 3#、4#、5#、6#、7#,田块由田埂隔开,面积分别为 0.12 hm^2 , 0.134 hm^2 , 0.133 hm^2 , 0.126 hm^2 和 0.127 hm^2 。试验区内沟渠配套,灌溉水通过泵站取自毗邻稻田的小河,稻田排水经由排水渠从排水口直接排入小河。虽然本试验没有设置重复,但是大面积的自然试验区及地表水连续系统多点取样研究使本试验具有特色。

1.2 N 肥处理

试验设不施肥的对照(CK)及 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 5 个处理。其中, N_3 为当地常规施

肥量， N_1 、 N_2 和 N_4 分别为按常规施肥量的 60%、80% 和 120% 施肥。耕层旋耕后于 2000 年 6 月 12 日上水、人工耙平并撒施基肥，其中高浓度复混肥 N P K=15 15 15。6 月 19 日施第 1 次追肥（尿素）和除草剂，6 月 26 日施第 2 次追肥（尿素）。各处理施肥量见表 1。

1.3 水样采集

于基肥和两次追肥施用前后及重要的生育期按统一的常用方法采集田面水、灌溉渠、排水渠、排水口及河道等水体的多点混合水样，测定 pH、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 及 $PO_4^{3-}-P$ 。

1.4 苗情考察

在分蘖期（6/26（指 6 月 26 日，以下相同）7/15）拔节期（8/5），抽穗期（9/8），灌浆期（10/8）及成熟期（10/25）每块田沿“蛇形”路线选取 60 株水稻，测量株高、分蘖数、穗长、穗数等。

1.5 测定方法

水样中 N、P 的测定参照《水环境要素观测与分析》^[5]， NH_4^+-N 测定采用钠氏比色法， NO_3^--N 采用紫外分光光度法， $PO_4^{3-}-P$ 采用钼蓝比色法。

2 结果与讨论

2.1 田面水 N、P 浓度动态

田面水 NH_4^+-N 浓度与施肥时间及施肥水平之间有很好的响应关系（表 2），3 次施肥（1 次基肥和 2 次追肥）后次日田面水 NH_4^+-N 浓度都急剧上升。尤其是基肥施用后次日 N_4 处理田面水 NH_4^+-N 浓度高达 76 mg/L。基肥施用后田面水 N 浓度

表 1 各田块施肥水平 (kg/hm ²)						
田块 编号	处理	基肥		追肥		折合 纯N
		秸秆	高浓度 复混肥	第1次	第2次	
3#	N_4	3000	540	270	180	309
4#	N_3	3000	450	225	150	261
5#	N_2	3000	360	180	120	212
6#	N_1	3000	270	135	90	164
7#	CK	3000	0	0	0	18

注：秸秆含 N 量按 0.6% 计

表 2 施肥期间各处理田面水 NH_4^+-N 浓度变化动态(mg/L)						
处理	施基肥前后		第1次追肥前后		第2次追肥前后	
	6月12日	6月13日	6月19日	6月20日	6月26日	6月27日
CK	0.36	0.78	0.85	0.71	1.89	1.55
N_1	0.35	21.62	1.34	14.10	4.85	16.08
N_2	0.14	38.01	1.73	21.31	5.89	38.96
N_3	0.37	51.07	1.58	19.29	4.06	30.49
N_4	0.46	76.07	1.69	18.27	6.96	43.42

急剧上升与基肥施用方法有关。吴敬民等（1999）研究表明基肥耙面施用施入 N 量的 70~80% 存在与田面水层中，被土壤颗粒吸附的 NH_4^+-N 很少，极易通过侧渗径流等途径随田面水进入稻田周围水体。而基肥深施和全层湿润施各有约 15~30% 和 30~50% 施入的 N 被土壤颗粒所吸附，进入田面水层的比例较小^[6]。由于本试验的基肥是按当地传统习惯方式进行灌水后撒施，因此田面水 NH_4^+-N 浓度较高。

由于基肥耙面施用后田面水 NH_4^+-N 浓度很高，若此时出现田面漏水或暴雨径流就会有大量的 N 随田面水流入排水沟甚至毗邻的水体。以 N_4 处理为例，若施基肥后次日漏掉 2cm 田面水，则随田面水带走的 NH_4^+-N 约有 1.85 kg，占基肥 N 施入量的 19%。

施肥后 1 周内田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度迅速下降。进入 8 月（基肥施用后 1 个半月）以后，各处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度都处于较低的水平（0.41~0.87 mg/L）。

由于基肥和追肥中均不含有硝酸盐，而且淹水稻田土壤处于嫌气状态，硝化作用微弱，因此施肥后次日均未检测到 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的高峰（表 3）。此外，各处理田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度与施肥量之间也没有明显的对应关系。进入 8 月份以后，各处理田

表 3 施肥期间各处理田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化动态(mg/L)

处理	施基肥前后		第1次追肥前后		第2次追肥前后	
	6月12日	6月13日	6月19日	6月20日	6月26日	6月27日
CK	0.88	0.48	0.35	0.19	1.02	1.32
N ₁	1.03	0.49	0.37	0.35	1.49	1.22
N ₂	0.99	0.52	0.75	0.09	1.23	1.76
N ₃	0.82	0.68	0.69	0.18	1.55	1.19
N ₄	0.76	0.37	0.70	0.33	1.08	0.85

面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度介于 0.73mg/L 和 1.50 mg/L 之间，略高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。

由于追肥中不含有 P 肥，因此 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度仅在基肥（复混肥）使用后次日出现 1 次高峰（表 4）。同样，施肥后的约 1 周内田面水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度也迅速下降。进入 8 月以后，各处理田面水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度介于 0.015~0.102 mg/L 之间。

表 4 施肥期间各处理田面水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化动态 (mg/L)

处理	施P量 kg/hm ²	施基肥前后		第1次追施N肥前后		第2次追施N肥前后	
		6月12日	6月13日	6月19日	6月20日	6月26日	6月27日
CK	0	0.008	0.037	0.073	0.043	0.022	0.024
N ₁	40.5	0.027	3.701	0.077	0.106	0.054	0.022
N ₂	54.0	0.024	8.886	0.080	0.080	0.064	0.034
N ₃	67.5	0.033	11.700	0.077	0.069	0.076	0.038
N ₄	81.0	0.045	19.301	0.136	0.186	0.080	0.154

从田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化特征可以看出，田面水 N、P 浓度与施肥密切相关。施肥后田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度很快出现高峰后，可能由于土壤吸附、植物吸收和径流、侧渗、挥发损失等原因，数天后田面水 N、P 浓度就会大幅下降，因此施肥后的数日内是监控和防止田面水 N、P 流失的关键时期。若施肥后数日内出现田面水渗漏和径流就会造成 N、P 的大量损失。

2.2 其它地表水 N、P 浓度

对排水渠、排水渠侧壁采集的农田渗漏水及排水口水样的分析表明，排水渠中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度对施肥响应也十分灵敏。以 N₂ 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为例，第 2 次追肥（6 月 19 日）前田面水、渗漏水、排水渠及排水口水样中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 1.73、0.90、2.19 和 5.80 mg/L，施肥后次日田面水、渗漏水、排水渠及排水口水样中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别增至 21.31、23.63、18.86 和 6.12 mg/L。这表明排水渠侧壁存在较为严重的渗漏现象，施肥后高浓度的田面水可能部分直接流入排水渠并于来自农田的侧渗水一起通过排水管直接排入毗邻农田的水体中，在目前的农田水利设施条件下，这很可能是丰产方 N、P 流失的一条重要途径。

农田 N、P 的流失不仅造成肥料的浪费还使与农田毗邻的水体受到污染。对河水和用河水作为灌溉水的测定表明，两者 N、P 浓度较为接近，且与施肥时间的响应存在滞后现

象(表 5)。河水和灌溉水的 N、P 浓度都是在基肥施用 1 周后才出现高峰,且施肥期间变幅较小。在施肥期间,河水和灌溉水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别为浓度河水中超过引起水体富营养化的 N、P 浓度(分别为 0.2 mg/L 和 0.02 mg/L)的数倍至 20~30 倍。进入 7 月以后,河水中的 N、

P 浓度也开始下降,浓度与田面水相当或略高于田面水。换言之,施肥期间农田是水体 N、P 的污染源,而施肥后稻田又可成为削减水体 N、P 负荷的“人工湿地”。

以毗邻农田并作为农田排水受体的河水为灌溉水是农田土壤 N、P 不可忽视的来源,是农田生态系统中 N、P 循环的一个环节,在该系统 N、P 循环模型建立和去向预测时应引起注意。

6 月份河水和灌溉水 pH 呈近中性(6.9~7.3),而 7~10 月间河水和灌溉水 pH 均高于 7.5。7 月 15 号测定的河水和灌溉水 pH 分别达到 8.7 和 9.2,水面浮萍、水葫芦等水草泛滥,呈现富营养水体的典型症状。这种富营养水体的形成与农田 N、P 的渗漏排放相联系。

2.3 苗情及产量

表 6 考苗结果

处理	株高 cm					
	分蘖前期	分蘖后期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
CK	32.6 ± 3.1 Aa	46.2 ± 3.2 Aa	69.7 ± 2.8 Aa	104.7 ± 4.0 Aa	102.2 ± 6.0 a	102.5 ± 5.3 Aa
N ₁	33.7 ± 3.3 Aab	49.8 ± 3.3 Bb	74.5 ± 3.0 Bb	111.1 ± 4.7 Bb	102.2 ± 5.9 a	108.9 ± 5.1 BCbc
N ₂	33.5 ± 3.0 Ab	55.7 ± 2.4 Cc	76.4 ± 4.0 BCc	115.0 ± 4.0 Cc	106.8 ± 3.0 b	107.9 ± 5.0 Bb
N ₃	35.1 ± 3.1 Ab	54.4 ± 2.8 Cc	77.2 ± 3.8 Cc	114.2 ± 4.0 BCbc	107.8 ± 5.1 b	112.6 ± 5.6 Dd
N ₄	39.3 ± 3.7 Bc	58.3 ± 2.7 Dd	77.6 ± 2.9 Cc	115.5 ± 4.1 Cc	108.1 ± 4.9 b	110.8 ± 5.3 CDcd

表 6 考苗结果(续)

处理	分蘖数			穗数	穗长 cm
	分蘖前期	分蘖后期	拔节期	抽穗期	灌浆期
CK	1.7 ± 0.7 Aa	7.7 ± 1.8 Aa	8.1 ± 1.0 Aa	7.1 ± 1.5 Aa	17.8 ± 1.0 Aa
N ₁	2.2 ± 0.6 Aa	9.1 ± 1.1 Bb	9.7 ± 1.2 Bb	9.6 ± 1.7 Bb	16.3 ± 1.8 Aa
N ₂	1.9 ± 1.0 Aa	9.2 ± 1.4 Bb	10.2 ± 1.1 Bb	9.8 ± 1.7 Bb	16.9 ± 1.5 Aa
N ₃	2.3 ± 1.0 Aa	11.3 ± 1.6 Cc	12.4 ± 2.2 Cc	10.6 ± 1.4 Bb	16.8 ± 2.0 Aa
N ₄	2.2 ± 0.8 Aa	10.8 ± 1.5 Cc	12.8 ± 1.7 Cc	10.4 ± 1.3 Bb	16.9 ± 2.0 Aa

(1) 株高:CK 处理的株高始终低于 N₂、N₃ 和 N₄ 处理。按常规 120%施肥的 N₄ 处理在分蘖期结束之前株高显著高于其它施肥处理,但进入拔节期后,常规施肥的 N₃ 处理株高与 N₄ 处理已无显著性差异。

(2) 分蘖数:在分蘖后期至拔节期,CK 处理分蘖数显著低于各施肥处理。而 N₄、N₃ 处理分蘖数无显著性差异,但高于同样无显著性差异的 N₂ 和 N₁ 处理。

(3) 穗数与穗长：在抽穗期间（9月8号），除CK处理分蘖穗数显著低于各施肥处理外，各施肥处理之间并无显著性差异。对在灌浆期（10月8号）采集的水稻样品的测定表明各施肥处理之间穗长并无显著性差异。

(4) 产量：10月底收获水稻，对各处理田块进行单打单收，各处理稻谷产量见表7。

尽管与不施化肥的CK相比，随施肥量的增加稻谷的产量在不断增加，但单位N肥用量的稻谷产量（平均产量）却随化肥用量的增加而下降，增加单位N肥用量所能增加的稻谷产量（边际产量）在达到常规用量后出现下滑。崔玉亭等从环境经济学和农业经济学角度求得苏南太湖流域目

表7 各施肥处理稻谷产量

处理	折合纯N	产量	平均产量	边际产量
	Kg/hm ²	kg/hm ²	Kg/kg N	Kg/kg N
N ₄	309	9015	29.17	9.12
N ₃	261	8610	32.99	9.26
N ₂	212	7845	37.00	7.65
N ₁	164	6915	42.16	3.80
CK	18	6360	-	-

前生产条件下兼顾生产生态和经济效益的N肥施用量为221.5~261.4 kg/hm²，相应的产量范围为7379.6~7548.6 kg/hm² [7]。我们的田间试验结果也表明相近的范围。综合生态环境、经济效益和水稻产量等因素，我们初步认为当地的水稻施肥量可考虑常规施肥量的80%~90%。但需要进一步试验并结合环境经济学和农业经济学分析后得出科学合理地施肥量。

3 结 论

田面水及邻近地表水体N、P的浓度变化特征与基肥施用方式有关。在目前的农田设施及田间水肥管理条件下，水稻施肥期间，农田成为周边水体的N、P污染源，这一阶段也是监控稻田N、P流失的关键时期。改变基肥施用方式和防止施肥后田面水的渗漏和径流损失是减少N、P流失的重要途径。

在当地常规施N量的基础上再增加N肥用量边际产量已开始下降，不但不能增加收益而且还导致稻田周围水体N、P污染的加剧。建议当地施N量可以在原有基础上减少10~20%。

参 考 文 献

- 1 李伟波.太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究. 土壤学报, 1997, 34(1): 67~72
- 2 马立珊, 汪祖强, 张水铭等.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
- 3 马立珊. 苏南太湖水系农业非点源污染及其控制对策研究. 应用生态学报, 1992, 3(4): 346~354
- 4 吕耀. 农业生态系统中氮素造成的非点源污染. 农业环境保护, 1998, 17(1): 35~39
- 5 谢贤群, 王立军主编.《水环境要素观测与分析》. 北京: 中国标准出版社, 1998, 218~258
- 6 吴敬民, 许学前, 姚月明.基肥不同施用方法对水稻生长及稻田周围水体污染的影响. 土壤通报, 1999, 30(5): 232~234
- 7 崔玉亭, 程序, 韩纯儒等.苏南太湖流域水稻氮肥利用率及氮肥淋洗量研究. 中国农业大学学报, 1998, 3(5): 51~54