

不同施肥对双季稻田径流氮磷流失特征的影响

姜利红, 谭力彰, 田昌, 刘强, 张玉平, 杨兰, 谢桂先

(湖南农业大学资源环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室,
农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室, 植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 长沙 410128)

摘要: 通过定位试验, 研究了不施氮肥(WN)、单施化肥(HF)、猪粪替代20%氮肥(ZF)、沼渣沼液替代20%氮肥(ZYF)、堆肥替代20%氮肥(DF)、早稻绿肥、晚稻稻草代替20%氮肥(LDF)6种不同施肥处理下双季稻径流氮磷含量和累积流失负荷的影响。结果表明, 水稻基肥和追肥后, 径流水中全氮、硝态氮、铵态氮、全磷和水溶性磷含量逐渐下降。HF处理双季稻季径流水中全氮、铵态氮、硝态氮平均含量最高, 分别为5.91, 3.65, 0.82 mg/L。相比HF处理, 有机物料替代20%氮肥处理能够降低径流水中全氮、铵态氮、硝态氮的平均含量, 其中以DF处理下降幅度最大, 分别下降1.18, 0.71, 0.14 mg/L; 除DF处理外, 有机物料替代20%氮肥能够增加径流水中全磷和水溶性磷的平均含量。相比HF处理, 有机物料替代20%氮肥能够减少氮素径流流失负荷, 以DF处理总氮、铵态氮和硝态氮累积流失负荷最小, 分别为10.25, 6.17, 1.71 kg/hm²; DF处理磷素流失负荷与单施化肥处理持平。综上, DF处理能够降低径流水中氮磷流失负荷, 对于保护环境和控制面源污染具有重要意义。

关键词: 不同施肥; 双季稻; 有机无机肥配施; 氮磷含量; 累积流失负荷

中图分类号:S143.6; S511; S153.6 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2017)06-0033-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.006

Effects of Fertilizer Applications on Runoff Nitrogen and Phosphorus Loss in Double Cropping Paddy Field

JIANG Lihong, TAN Lizhang, TIAN Chang, LIU Qiang, ZHANG Yuping, YANG Lan, XIE Guixian

(National Engineering Laboratory of Resource Efficient Utilization on Soil and Fertilizer, Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resource Use, Hunan Provincial Key Laboratory of Plant Nutrition in Common University of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: In order to provide scientific basis for rational fertilization, a field experiment was conducted to evaluate the effects of different fertilization methods on runoff nitrogen (N) and phosphorus (P) loss in double cropping paddy field. Six treatments were designed: without N (WN), chemical fertilizer (HF), pig manure alternative 20% N fertilizer (ZF), biogas slurry and biogas residue alternative 20% N fertilizer (ZYF), compost alternative 20% N fertilizer (DF), and green manure in early rice and straw in late rice alternative 20% N fertilizer (LDF). The results showed that total N, NO₃⁻, NH₄⁺, total P and water soluble P in runoff water were decreased after base fertilizer and topdressing application. In double cropping rice field, total N, NH₄⁺ and NO₃⁻ contents in runoff water under HF reached 5.91 mg/L, 3.65 mg/L and 0.82 mg/L respectively, which were higher than other treatments. Compared with HF, total N, NH₄⁺ and NO₃⁻ contents in runoff water were significantly decreased when chemical fertilizers were partially replaced with organic materials, and the reduction of DF reached up to 1.18 mg/L, 0.71 mg/L and 0.14 mg/L respectively. Moreover, the treatments with organic materials alternative 20% N fertilizer significantly increased total P and soluble P content in the runoff water with the exception of DF. Compared to HF, other organic-inorganic fertilizers treatments decreased runoff N loss. In addition, total N, NH₄⁺ and NO₃⁻ loss of DF was 10.25 kg/hm², 6.17 kg/hm² and 1.71 kg/hm² respectively, which were nearly equal to those of HF. In conclusion, DF could

收稿日期: 2017-07-05

资助项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFD0201200); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD15B04, 2014BAC09B01); 湖南省重点研发计划项目(2016JC2032)

第一作者: 姜利红(1982—), 女, 实验师, 在读博士, 主要从事植物营养生态研究。E-mail: 63511982@qq.com

通信作者: 谢桂先(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事植物营养生理生态研究。E-mail: xieguixian@126.com

significantly decreased runoff N and P loss, and was of great importance in protecting environment and controlling non-point pollution.

Keywords: fertilizer application; double cropping rice; organic-inorganic fertilizers application; N and P content; loss loading

水稻作为主要的粮食作物,在长江以南拥有着广泛的种植面积。我国是世界上最大的化肥使用国,年均用量约为世界总使用量的 1/3^[1]。为追求高产,农田系统普遍存在化肥过量施用的现象,部分地区高达 350 kg/hm²^[2],导致我国肥料利用效率低下。有研究表明,农田系统中氮肥利用效率约为 30%~35%^[3],磷肥利用效率约为 10%~20%^[4],这意味着超过 50% 以上的氮素和磷素通过水体径流、大气挥发、硝化—反硝化、渗漏流失等途径损失^[5],造成水体富营养化、地下水硝酸盐超标等环境问题,严重威胁人类健康。目前,农田生态系统中氮、磷等营养元素的流失所造成的农业面源污染问题已成为了国内外研究者关注的热点^[6-7]。研究资料表明,湖泊污染负荷的 50% 来自于流域内非点源污染,城郊湖泊污染负荷的 50% 以上来自于农村非点源污染^[8]。有机肥对于作物增产和控制面源污染具有重要作用^[9-10],我国有机肥资源丰富^[11],但有机肥废弃物资源化利用程度不高,大量有机废弃物随意堆放造成严重的环境污染,因而合理利用有机肥资源是当前急需解决的问题。为了减少农业面源污染,保护农田生态环境,本研究基于长期定位试验,研究不同有机物料替代 20% 氮肥处理对双季稻径流水中氮磷含量和累积流失负荷的影响,以期为合理施肥、水稻增产和控制面源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2014 年在湖南省浏阳市沿溪镇进行。供试土壤为河流冲积物发育而成的潮沙泥,其初始基本农化性状为:土壤 pH 5.70,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 13.97,1.60,0.52,13.51 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 46.29,12.79,150.14 mg/kg。供试早、晚稻品种分别为中早 39、桃香优占。供试氮肥为普通尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),猪粪、沼渣沼液和稻草从当地农户收集,绿肥为试验冬闲季种植的紫云英,猪粪堆肥自制。供试有机肥源养分含量见表 1。

1.2 试验设计

采用田间试验(2014 年为试验的第 2 年),小区面积 20 m²(5 m×4 m),各小区间用水泥田埂隔开。试验设 6 个处理:(1)不施氮肥(WN);(2)单施化肥(HF);(3)猪粪代替 20% 总氮(ZF);(4)沼渣沼液代

替 20% 总氮(ZYF);(5)猪粪堆肥代替 20% 总氮(DF);(6)早稻绿肥、晚稻稻草代替 20% 总氮(LDF)。重复 3 次,随机区组排列。早稻 CK 处理不施氮肥,其他处理氮肥用量(按纯 N 计)均为 120 kg/hm²,各处理 P₂O₅、K₂O 用量相同,分别为 72,90 kg/hm²。晚稻 CK 处理不施氮肥,其他处理氮肥用量(按纯 N 计)均为 135 kg/hm²,各处理 P₂O₅、K₂O 用量相同,分别为 60,105 kg/hm²。有机肥和磷肥做基肥一次性施入,氮、钾肥 60% 做基肥,40% 做分蘖肥(移栽后第 10 天追肥),磷钾肥则根据各有机肥磷钾含量折算。早、晚稻水稻种植密度株行距分别为 16.7 cm×20.0 cm,20.0 cm×20.0 cm,每穴 2 苗。

表 1 供试有机肥料的养分质量分数

有机肥	单位: %		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
猪粪	0.51	0.23	0.29
沼渣沼液	0.23	0.04	0.18
稻草	0.92	0.15	1.26
紫云英	0.38	0.05	0.28
猪粪堆肥	1.83	2.02	1.47

早稻于 2014 年 4 月 18 日施基肥移栽,4 月 27 日追肥,7 月 21 日收获;晚稻于 7 月 28 日施基肥移栽,8 月 8 日追肥,10 月 25 日收获。整个生育期内的灌溉、排水晒田、病虫草害防治及其他管理与当地田间常规管理一致。

1.3 测定项目与方法

水样采集:每次降雨产流后,通过集流池内水位刻度的变化,用体积法求得径流量。每次产流测径流量后再进行取样,取样前用专用工具将长、宽、高依次为 2,1,0.5 m 的集流池内水充分搅拌均匀,搅拌后,用 500 mL 的取样瓶取水样,用于测定径流中的全氮、铵态氮和硝态氮含量。水样采集完成后,将集流池清洗干净,关闭放水阀门待下次降雨。为保证测试结果的准确度,水样采集后冷藏(4 ℃ 以下)保存,从样品采集到测定完成不超过 2 天。

全氮含量采用碱性过硫酸钾—紫外分光光度法测定(GB 11894—89),紫外分光光度计型号为 A560;铵态氮、硝态氮含量采用 0.45 μm 滤膜过滤—流动分析仪测定,连续流动分析仪型号为 AA3;全磷含量采用过硫酸钾消煮—钼酸铵分光光度法测定(GB 11893—89),分光光度计型号为 V—1000;水溶性磷采用 0.45 μm 滤膜抽滤—过硫酸钾消煮—钼酸铵分光光度法测定。

1.4 双季稻生长期间降雨及径流情况

试验期间形成径流的降雨8次(表2)。早稻季5次,分别发生在基肥后第8天,追肥后第8,28,53,69天;晚稻季3次,分别发生在基肥后第9天,追肥后第

10天和第24天。根据气象部门规定的降雨强度标准(按12 h计,小雨 $\leqslant 5\text{ mm}$,中雨 $5\sim 14.9\text{ mm}$,大雨 $15\sim 29.9\text{ mm}$,暴雨 $\geqslant 30\text{ mm}$),8次降雨中有4次暴雨、4次大雨。

表2 双季稻期间降雨及径流情况

径流 次序	稻季	降雨时间 (历时/h)	距施肥 时间	降雨量/ mm	雨型 (12 h计)	径流量/L (n=18)
1		4月25—26日(22)	基肥后8 d	32.9	大雨	479.0 ± 18.6
2		5月05—06日(31)	追肥后8 d	70.3	大雨	736.8 ± 34.8
3	早稻	5月25—26日(17)	追肥后28 d	100.2	暴雨	858.8 ± 28.0
4		6月19—20日(30)	追肥后53 d	114.4	暴雨	1116.4 ± 56.8
5		7月04—05日(32)	追肥后69 d	95.5	暴雨	1285.8 ± 55.8
6		8月06日(10)	基肥后9 d	33.7	暴雨	356.4 ± 23.0
7	晚稻	8月18—19日(28)	追肥后10 d	58.2	大雨	484.2 ± 27.8
8		9月01—02日(20)	追肥后24 d	37.9	大雨	275.8 ± 35.0

1.5 数据统计

数据采用DPS 7.05和Office 2010软件进行处理分析,处理间差异显著性分析采用LSD检验法进行。

2 结果与分析

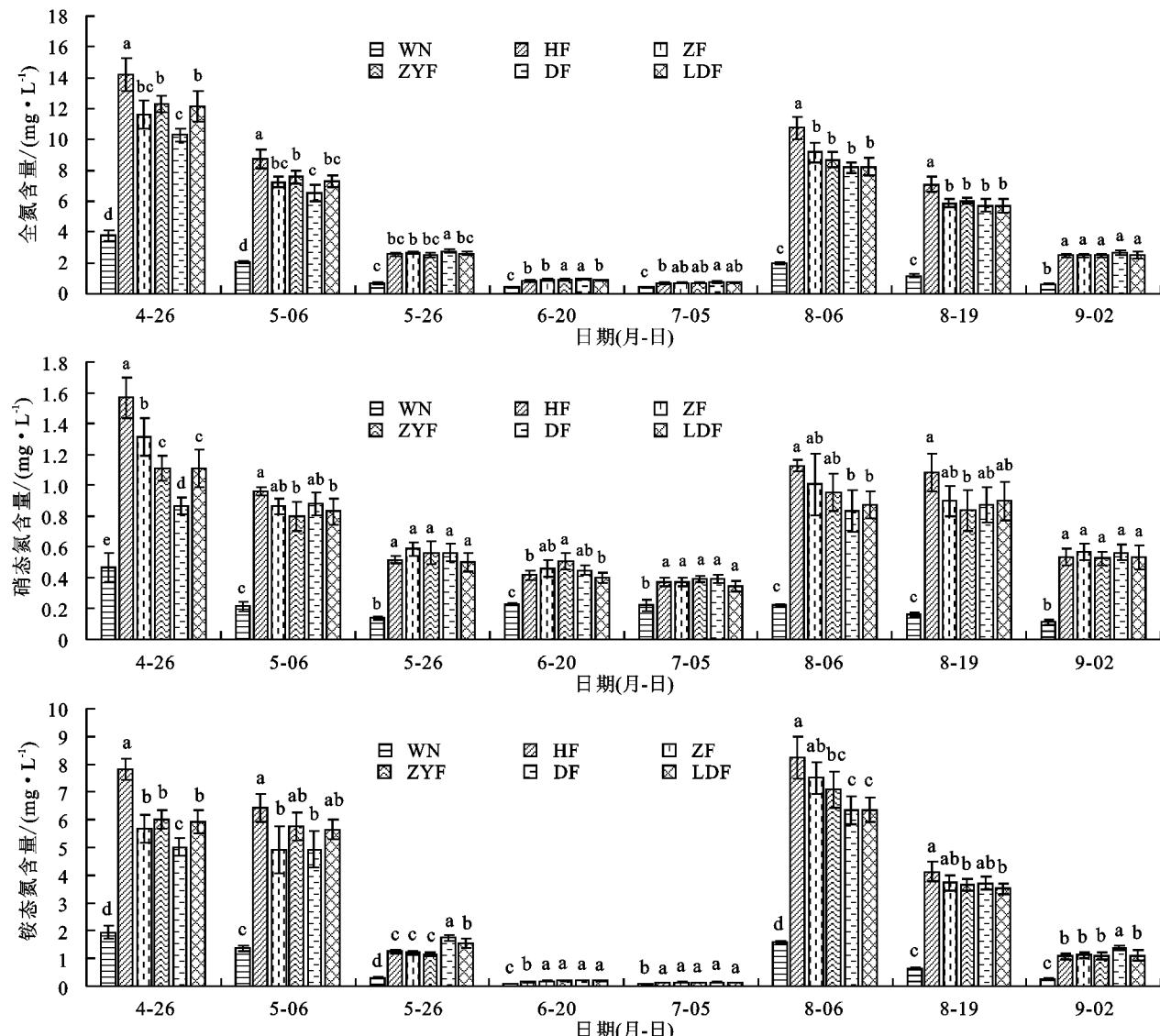
2.1 不同施肥处理径流水中氮含量的动态变化

水稻基肥和追肥后,各处理径流水中全氮、硝态氮和铵态氮含量呈现下降趋势(图1)。各施氮肥处理径流水中全氮、硝态氮和铵态氮含量均显著高于不施氮肥处理(WN)。在早、晚稻生育前期的2次产流事件中,单施化肥处理(HF)径流水中全氮、硝态氮和铵态氮含量均高于各有机无机肥配施处理,在早稻后3次产流事件和晚稻第3次产流事件中,HF处理径流水中全氮、硝态氮和铵态氮含量均处于较低水平,其原因可能是尿素态氮在稻田水解速度快,有机肥料中氮素在稻田中降解速度慢,且无机有机肥配合施用能改善土壤结构、提高土壤团聚体对养分的吸持能力,降低农田生态系统总氮的迁移,从而导致HF处理水稻生育前期农田水体中不同形态氮素浓度较高,稻田氮素流失风险加大。在早稻季,基肥施入后的第8天和追肥施入后的第8天, HF处理径流水中全氮含量分别比有机无机肥配施处理提高15.30%~22.12%和15.17%~33.21%,硝态氮含量分别提高19.85%~81.45%和9.09%~20.50%,铵态氮含量分别提高30.33%~56.19%和11.70%~30.96%。在晚稻季,基肥施入后的第9天和追肥施入后的第10天, HF处理径流水中全氮含量分别比有机无机肥配施处理提高17.42%~31.38%和17.77%~24.10%,硝态氮含量分别提高12.25%~35.60%和20.44%~29.08%,铵态氮含量分别提高9.77%~29.70%和11.02%~17.55%。在早稻前2次产流事件和晚稻第1次产流事件中,DF处理径流

中全氮含量最低,晚稻第2次产流事件中,DF处理径流水中全氮含量处于较低水平。综上,有机物料替代20%氮肥能降低双季稻田氮素流失风险,其中以DF处理效果最好。

2.2 不同施肥处理径流水中磷含量的动态变化

2.2.1 全磷含量变化 水稻基肥和追肥后,不同施肥处理径流水中全磷含量呈现下降趋势(图2)。在早、晚稻所有产流事件中,WN处理径流水中全磷含量均高于HF处理,其原因可能是由于WN处理没有施用氮肥,水稻生长受到抑制,水稻磷素养分吸收量降低,从而导致稻田水体中磷含量较高,磷素流失风险加大。在所有施氮处理中,ZYF处理径流水中全磷含量始终处于最高值,其次是ZF和WN处理。除DF处理外,其他有机无机肥配施处理径流水中全磷含量均高于HF处理。早稻基肥施入后的第8天,各处理径流水中全磷含量达到最大值,ZF、ZYF、LDF处理径流水中全磷含量分别比HF处理提高37.50%、61.11%和6.94%,DF处理径流水中全磷含量比HF处理降低4.17%,ZF、ZYF处理径流水中全磷含量与HF处理之间的差异达显著水平,LDF和DF处理与HF处理之间差异不显著。晚稻基肥施入后的第9天,各处理径流水中全磷含量达到最大值,ZF、ZYF、LDF处理径流水中全磷含量分别比HF处理提高35.90%、63.25%和17.09%,DF处理径流水中全磷含量比HF处理降低15.38%,ZF、ZYF处理径流水中全磷含量与HF处理之间的差异达显著水平,LDF和DF处理与HF处理之间差异不显著。综上,在等养分施用条件下,化肥配施猪粪、沼肥、绿肥和稻草,径流水中全磷的含量增加,稻田磷素流失风险加大。



注:同一日期柱状图上的不同小写字母表示处理之间差异达到显著水平($P<0.05$)。下同。

图 1 不同处理径流水中全氮、硝态氮和铵态氮含量的变化

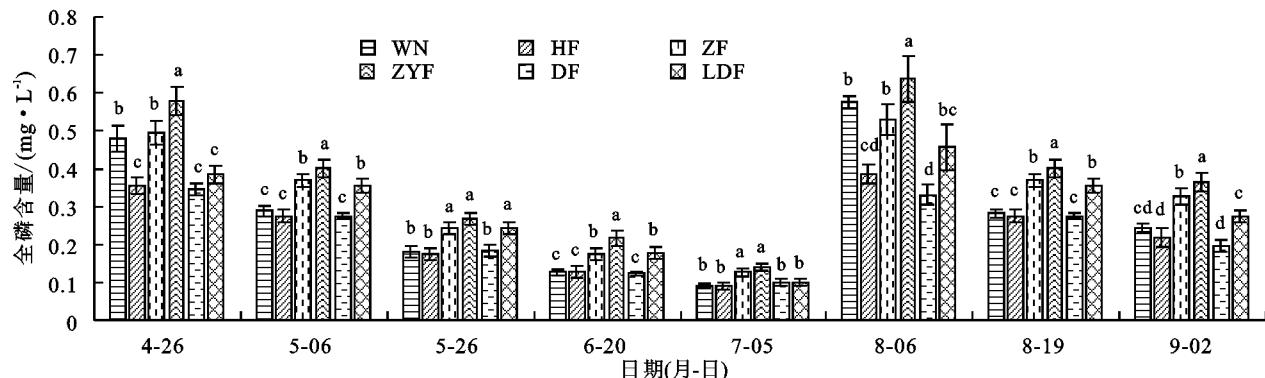


图 2 不同处理径流水中全磷含量的变化

2.2.2 水溶性磷含量变化 不同处理径流水中水溶性磷含量随时间变化见图 3。除 DF 处理外,其他有机无机肥配施处理径流水中水溶性磷含量均高于 HF 处理,其中 ZYF 处理水溶性磷含量最高。早稻径流水中水溶性磷含量在追肥施入第 8 天达到最大值,晚稻径流水中水溶性磷含量在基肥施入第 9 天达到最大值,这可能是由于早稻水温较低,磷素养分溶

解与有机肥矿化速率慢,从而导致径流水中水溶性磷含量峰值延后。早稻追肥施入第 8 天,ZF、ZYF、LDF 处理径流水中水溶性磷含量分别比 HF 处理提高 31.82%、45.45% 和 27.27%,DF 处理径流水中水溶性磷含量比 HF 处理降低 4.55%,ZF、ZYF 处理径流水中水溶性磷含量与 HF 处理之间的差异达显著水平,LDF 和 DF 处理与 HF 处理之间差异不显

著。晚稻基肥施入第9天,ZF、ZYF、LDF处理径流水中水溶性磷含量分别比HF处理提高33.33%,57.14%和22.22%,DF处理径流水中水溶性磷含量

比HF处理降低19.05%,ZF、ZYF和LDF处理径流水中水溶性磷含量与HF处理之间的差异达显著水平,DF处理与HF处理之间差异不显著。

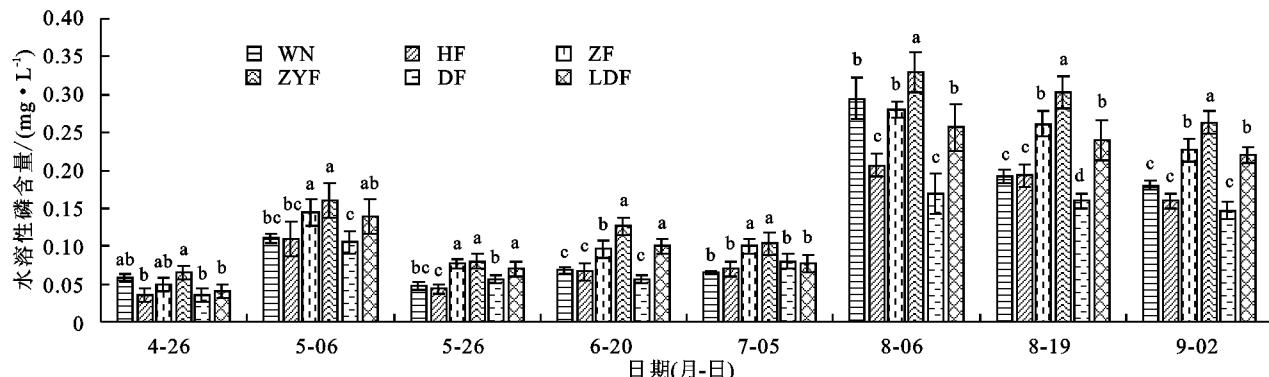


图3 不同处理径流水中水溶性磷含量的变化

2.3 不同施肥处理径流水中氮磷的平均含量

不同施肥处理径流水中氮磷的平均含量见表3。相比WN处理,其他处理均显著增加了径流水中全氮、铵态氮和硝态氮的平均含量,其中HF处理径流水中全氮、铵态氮和硝态氮平均含量最高。有机物料替代20%氮肥能够降低径流水中全氮、铵态氮和硝态氮的平均含量,其中以DF处理下降最为明显,相比HF处理,DF处理径流水中全氮、铵态氮和硝态氮平均含量分别下降19.97%,19.45%和17.07%。相比HF处理,ZF和ZYF处理均能显著增加径流水中全磷和水溶性磷平均含量,全磷平均含量分别增加37.50%和58.33%,水溶性磷平均含量分别增加36.36%,63.63%,DF处理径流水中全磷和水溶性磷平均含量较HF处理略有下降。

表3 不同施肥下径流水中氮磷平均含量

单位:mg/L

处理	全氮 含量	铵态氮 含量	硝态氮 含量	全磷 含量	水溶性 磷含量
WN	1.39b	0.79b	0.22b	0.28bc	0.13ab
HF	5.91a	3.65a	0.82a	0.24c	0.11b
ZF	5.08a	3.06a	0.76a	0.33ab	0.15a
ZYF	5.15a	3.13a	0.71a	0.38a	0.18a
DF	4.73a	2.94a	0.68a	0.23c	0.10b
LDF	5.01a	3.06a	0.69a	0.29bc	0.14ab

注:同列数据后不同小写字母表示差异性达到显著水平($P < 0.05$)。下同。

2.4 不同施肥处理氮磷累积流失负荷

不同施肥处理对稻田氮磷累积流失负荷影响较大(表4)。相比WN处理,其他处理均显著增加了总氮、铵态氮和硝态氮累积流失负荷,其中以HF处理总氮、铵态氮和硝态氮累积流失负荷最大。有机物料替代20%氮肥显著降低了总氮、铵态氮和硝态氮累积流失负荷,其中以DF处理总氮、铵态氮和硝态氮累积流失负荷最小,分别为10.25,6.17,1.71 kg/hm²,总氮、

铵态氮和硝态氮累积流失负荷分别比HF处理降低18.78%,18.71%和12.76%。相比HF处理,ZF、ZYF和LDF处理总磷累积流失负荷分别增加0.22,0.33,0.15 kg/hm²,增幅分别为40.00%,60.00%,27.27%。ZF、ZYF和LDF处理水溶性磷累积流失负荷分别增加0.11,0.17,0.08 kg/hm²,增幅分别为44.00%,68.00%,32.00%。DF处理总磷和水溶性磷累积流失负荷与HF处理无显著差异。

表4 不同施肥下径流水中氯磷累积流失负荷

单位:kg/hm²

处理	全氮	铵态氮	硝态氮	全磷	水溶性磷
WN	3.18c	1.67c	0.61d	0.63d	0.28cd
HF	12.62a	7.59a	1.96a	0.55e	0.25d
ZF	10.96b	6.27b	1.86ab	0.77b	0.36b
ZYF	11.17b	6.56b	1.79bc	0.88a	0.42a
DF	10.25b	6.17b	1.71c	0.55e	0.24d
LDF	10.85b	6.50b	1.68c	0.70c	0.33bc

3 讨论

本研究中,基肥和追肥施入后,双季稻田径流水中全氮、铵态氮和硝态氮含量呈逐渐下降的变化趋势,这与汪华等和吴俊等^[12-13]研究结果一致。同时,本研究结果表明,施肥后10天内径流水中氮素含量高,氮素养分流失量大,是控制稻田氮素流失的关键时期,这与郑小龙等^[14]提出施肥后1周是控制氮素流失的关键时期基本吻合。本研究表明,相比HF处理,有机物料替代20%氮肥能够降低径流水中全氮、铵态氮和硝态氮含量,原因可能是有机物料中的氮素在被水稻吸收利用之前,需要微生物的降解过程,这一过程会使稻田田面水中氮素稳定在一个较低水平,这与前人^[15]的研究结果一致。堆肥中氮素绝大部分以有机态氮形态存在,堆肥化过程中有机物料在矿质化和腐殖化过程作用下形成相对稳定的腐殖质,相比于猪粪、沼渣沼液、绿肥和稻草等有机肥,堆肥在稻田

土壤中矿化速率慢,溶解在稻田水体中氮素养分减少,从而可以降低稻田氮素流失风险。本研究结果证实,与猪粪、沼渣沼液、绿肥和稻草等有机肥替代20%氮肥处理相比,堆肥替代20%氮肥更大幅度地降低了径流水中全氮、铵态氮和硝态氮含量。张翼等和李娟等^[1,16]研究表明,施用有机肥处理能够减少稻田氮素流失负荷,本研究中,相比单施化肥处理,有机物料替代20%氮肥处理能够减少稻田中氮素流失负荷,这与前人的研究结果相同,在4种有机无机肥配施处理中,堆肥替代20%氮肥处理稻田氮素流失负荷最低,总氮、铵态氮和硝态氮累积流失负荷分别比单施化肥处理降低18.78%,18.71%和12.76%。

纪雄辉等^[17]研究结果表明,在等养分条件下,施用有机肥能显著提高稻田磷素流失负荷,施用猪粪处理稻田总磷径流损失量比单施化肥处理提高70.9%。金熠等^[18]研究结果表明,稻田磷素流失负荷随有机肥施用量增大而增大。猪粪、沼渣沼液、绿肥和稻草等有机肥在稻田土壤中矿化速率较快,有机物矿化产生的水溶性磷导致稻田水体水溶性磷含量增加(图3),稻田磷素流失负荷也随之增大(表4),Vadas^[19]通过土柱试验证实,牛粪和猪粪施入土壤后,粪污中35%~60%的总磷和水溶性无机磷未被土壤吸附。堆肥中水溶性无机态磷易被土壤固定,堆肥中腐殖质在稻田土壤中矿化速率相对较慢,且有机物料经堆肥化处理后,堆肥中磷的有效性较高^[20],植物吸收利用能力强,从而导致稻田水体水溶性磷含量降低(图3),稻田磷素流失负荷也随之降低(表4)。

本研究中,在水稻生长后期,径流水中硝态氮含量占全氮比例逐渐增大。在早稻季,第1次径流事件中径流水中硝态氮含量占全氮比例仅为8.14%~13.83%,第5次径流事件中径流水中硝态氮含量占全氮比例达到了47.30%~55.09%,晚稻季也有相同的变化趋势。这可能与稻田排水晒田有关,在水稻分蘖后期,为减少无效分蘖和促进水稻生长,排水晒田是最为有效的措施,晒田后,存在稻田土壤及土壤水溶液中的氮在微生物作用下转化为硝态氮形态,从而导致径流水中硝态氮含量占全氮比例逐渐增大^[21]。在水稻生长后期,径流水中水溶性磷占总磷比例逐渐增大。在早稻季,第1次径流事件中径流水中水溶性磷占总磷比例仅为8.33%~13.52%,第5次径流事件中径流水中水溶性磷占总磷比例达到了70.00%~83.33%,晚稻季也有相同的变化趋势。在水稻生长前期,距土壤耕作时间短,土壤较为疏松,降雨易引起颗粒态磷的流失,而在水稻生长后期,因水稻冠层较为茂盛使雨滴的冲击力受到缓冲,且土壤已经较为坚实,因而颗粒态磷流失减少。

4 结论

(1)在双季稻田中,基肥和追肥施入后,径流水中全氮、硝态氮、铵态氮和全磷含量呈逐渐下降变化趋势。

(2)相比单施化肥处理,有机物料替代20%氮肥能够降低径流水中全氮、铵态氮、硝态氮含量,以DF处理下降幅度最大;除DF处理外,有机物料替代20%氮肥能够增加径流水中全磷和水溶性磷含量。

(3)相比单施化肥处理,有机物料替代20%氮肥能够减少径流水中氮素流失负荷,其中DF处理降低氮素流失负荷程度最大;除DF处理外,有机物料替代20%氮肥能增加磷素流失负荷。

(4)在水稻生长后期,径流水中硝态氮含量占全氮以及水溶性磷占总磷比例逐渐增大。

参考文献:

- [1] 张翼,岳玉波,赵峥,等.不同施肥方式下稻田氮磷流失特征[J].上海交通大学学报(农业科学版),2015,33(1):1-7.
- [2] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [3] 庄振东,李絮花,张健,等.冬小麦—夏玉米轮作制度下腐殖酸氮肥去向与平衡[J].水土保持学报,2016,30(6):201-206.
- [4] 李军,袁亮,赵秉强,等.磷肥中腐殖酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):641-648.
- [5] 周伟,吕腾飞,杨志平,等.氮肥种类及运筹技术调控土壤氮肥损失的研究进展[J].应用生态学报,2016,27(9):3051-3058.
- [6] Esteller M V, Martinez-Valdes H, Garrido S, et al. Nitrate and phosphate leaching in a Phaeozem soil treated with biosolids, composted biosolids and inorganic fertilizers[J]. Waste Management,2009,29(6):1936-1944.
- [7] 李晓娜,张国芳,武美军,等.不同植被过滤带对农田径流泥沙和氮磷拦截效果与途径[J].水土保持学报,2017,31(3):39-44.
- [8] 周文婷,邵瑞华,马千里,等.高州水库集水区污染源分布特征及污染负荷研究[J].水生态学杂志,2017,38(3):23-30.
- [9] 李荣斌,李娟,汪海珍,等.施肥措施及灌木缓冲带对雷竹林径流水不同形态氮流失的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):7-13.
- [10] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.
- [11] 全国农业技术推广服务中心.中国有机肥料资源[M].北京:中国农业出版社:1994.
- [12] 汪华,杨京平,金洁,等.不同氮素用量对高肥力稻田水稻—水体氮素变化及环境影响分析[J].水土保持学报,2010,20(1):50-54.