

## 模拟水田环境下畜禽粪便对氮磷释放的影响

雷蕾<sup>1,2</sup>, 梁勤爽<sup>2,3</sup>, 陈玉成<sup>1,2\*</sup>, 杨志敏<sup>2,3</sup>

(1.三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2.西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 3.重庆市农业资源环境重点实验室, 重庆 400716)

**摘 要:** 采用持续淹水模拟试验, 研究了施用畜禽粪便(猪粪、牛粪和鸡粪)过程中 N、P 面源污染物的释放特征。结果表明: 施用量越大, 上覆水和下渗水的 N、P 释放量越大, 且下渗水释放量高于上覆水; 上覆水中, 牛粪低肥处理的 N、P 释放能力最强, N、P 的单位释放量分别为 0.307、0.012 mg/g, 下渗水中, 鸡粪低肥处理的 N 释放能力及牛粪低肥处理的 P 释放能力最强, N、P 单位释放量分别为 0.946、0.156 mg/g, 畜禽粪便单位释放量排序呈低肥处理的高于高肥处理; 总氮(TN)的释放率从大到小依次为猪粪、牛粪、鸡粪, 而总磷(TP)的释放率从大到小依次为牛粪、猪粪、鸡粪, 且 3 种畜禽粪便均呈现施用量低, N、P 释放率高的特征。

**关 键 词:** 畜禽粪便; 氮; 磷; 释放; 持续淹水

中图分类号: S141.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2011)05-0546-05

## Characteristics of nitrogen and phosphorus release from animal manure in simulated paddy field

LEI Lei<sup>1,2</sup>, LIANG Qin-shuang<sup>2,3</sup>, CHEN Yu-cheng<sup>1,2\*</sup>, YANG Zhi-min<sup>2,3</sup>

(1.Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China; 2.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 3.Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment in Chongqing, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** The simulation test was conducted to investigate nitrogen and phosphorus release status of non-point source pollution with the continuous application of animal manure. The results showed that the greater the application of animal manure the larger the release amount of N and P both in seepage and overlying water. The release of TN and TP in seepage water was always higher than in overlying water. In overlying water, the largest TN, TP emission was caused by soil processed with lower dairy manure, with the release amount per unit weight manure being 0.307 mg/g and 0.012 mg/g respectively. In seepage water, the largest TN emission was caused by soil sample processed with lower chicken manure, with the release amount per unit weight manure being 0.946 mg/g, and the largest TP emission was caused by soil sample processed with lower dairy manure, with the release amount per unit weight manure being 0.156 mg/g. The release amount of N, P per unit was bigger from the sample applied small amount of animal manure. The highest release rate of N appeared in pig manure followed by dairy and chicken manure. The dairy manure showed the highest release rate of P, while chicken manure showed the lowest. The three manure had the same feature that the lower application the stronger the capacity to release N and P.

**Key words:** animal manure; nitrogen; phosphorus; release; permanent flooding conditions

随着规模化养殖业的迅猛发展和畜禽粪便的集中排放, 畜禽粪便已成为重要的农业面源污染

收稿日期: 2011-03-29

基金项目: 国家“十一·五”科技支撑计划项目(2007BAD87B10-5; 2006BAD17B09)

作者简介: 雷蕾(1988—), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事水污染控制方面研究, leileinh@126.com; \*通信作者, chenycheng@swu.edu.cn

物。目前,直接还田是处理畜禽粪便的主要方式,但其中氮、磷元素在丰富土壤养分的同时,也面临着超出农田消纳容量,造成水体和土壤污染,引发严重的次生环境问题的危险<sup>[1]</sup>。有研究<sup>[2]</sup>表明,畜禽粪便在消纳养殖场废物,提供植物养分同时可能导致地表水和地下水的污染。笔者通过持续淹水模拟试验,研究了猪粪、牛粪和鸡粪等不同畜禽粪便直接还田过程中N、P面源污染的释放特征,并对其原因和影响因素进行分析,旨在为合理利用畜禽粪便、减少农业面源污染、保护水环境提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试土壤为重庆市北碚区西南大学校园紫色土,经晾干、去杂、磨细,过孔径为1 cm筛。供试畜禽粪便为养殖场的新鲜猪粪、牛粪和鸡粪。供试材料的理化性质见表1。

表 1 供试土壤和畜禽粪便的氮、磷含量

Table 1 The N and P content in experimental soil and animal manure

供试材料	TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	AN/(g·kg <sup>-1</sup> )	TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	AP/(g·kg <sup>-1</sup> )
土壤	0.71	0.04	0.51	12.56
猪粪	2.74	0.69	0.79	13.58
牛粪	4.93	0.18	0.71	12.34
鸡粪	7.06	2.38	1.12	18.47

AN为速效氮;AP为速效磷。

### 1.2 试验装置

采用持续淹水装置模拟水田环境。试验装置为下底直径 20 cm、上底直径 25 cm、高 30 cm 的塑料桶。桶底钻有内径为 1.5 cm 的小孔,用橡皮塞堵住,用于取水样时使用。桶自下而上依次铺有尼龙布、石英砂(1 cm 厚)、混有畜禽粪便的土壤(20 cm 厚、4 kg)、纯净干土(3 cm 厚),最后在上面铺上石英砂和尼龙布,塑料桶底部通过漏斗衔接到下渗水桶。

### 1.3 试验设计

采用完全试验设计(表 2),猪粪、牛粪、鸡粪的施用量均设 3 个水平,分别为 6.67、13.33、26.67 g/kg,相当于每 667 m<sup>2</sup> 水田施用各类粪便 1、2、4 t,对照(CK)不加粪便。

在装好土样的试验桶中加入 3 L 水,静置 3 d

后,分别采集上覆水和下渗水 500 mL,测定水中 TN、TP 质量浓度;再补水 1 L,每 3 d 测定 1 次,连续测 8 次。

表 2 试验设计代号

Table 2 Experimental treatment and code

粪便	处理代号		
	6.67 g/kg	13.33 g/kg	26.67 g/kg
猪粪	ZF1	ZF2	ZF3
牛粪	NF1	NF2	NF3
鸡粪	JF1	JF2	JF3

### 1.4 项目测定与方法

TN、TP 分别采用半微量凯氏法和氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法<sup>[3]</sup>测定。

### 1.5 数据处理

TN、TP 释放总量  $M_0 = \sum(C \cdot V)$ ; 单位粪便释放量(每克土壤所释放的元素量,单位 mg/g)  $= M_0 / M$ ; 释放率  $= (M_0 / M') \times 100\%$ 。式中:  $M_0$  为淹水条件下的释放总量;  $C$  为每次采集水样中元素的质量浓度(mg/L);  $V$  为采集水样体积(L);  $M$  为土壤样品中粪便的施用总量;  $M'$  为土壤样品粪便中元素的总含量。试验数据均已扣除空白值。

## 2 结果与分析

### 2.1 上覆水和下渗水中氮的释放动态

由图 1 可知,上覆水中 TN 质量浓度变化的总体趋势有明显升高后再回落的过程。这是由于淹水初期,畜禽粪便中的各种物质还未溶解扩散到上覆水中,所以上覆水中 TN 浓度一直都处于较低水平,甚至 ZF3 和 NF3 处理还低于检出限。但在第 9 天后,整个上覆水中 TN 的浓度都出现了急剧上升,可能是由于土壤中畜禽粪便扩散进入到水体,而初期水体中含有少量溶解氧(DO),可溶性含氮有机物在好氧细菌下氨化为  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,继而被硝化菌、亚硝化菌硝化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  或  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,使得上覆水体中的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  等无机氮迅速增多,导致相应上覆水中 TN 浓度迅速升高。当水体中的氧气消耗后,水体逐渐变成缺氧甚至厌氧环境,此时占优势地位的反硝化细菌通过反硝化作用

将  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  转化为  $\text{N}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  以气态形式挥发,所以在 15~18 d 后,上覆水中 TN 浓度又呈现下降趋势,最终浓度变化较平稳,整个上覆水系统达到动态平衡状态。

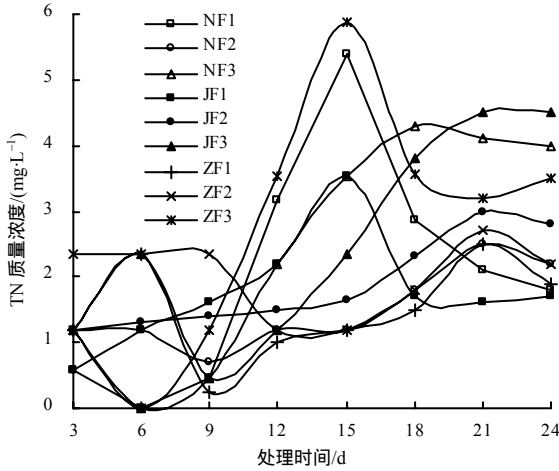


图 1 上覆水中 TN 的质量浓度

Fig.1 Dynamic of TN concentration in overlying water

通过对下渗水中 TN 的测定,发现试验初期高肥处理的 TN 浓度逐渐下降,低肥处理呈上升趋势(图 2),可能是由于低肥处理的土壤孔隙度大于高肥处理,而此环境下氮素流失主要是通过土壤孔隙产生的壤中流造成的,大孔隙容易出现 N 的快速淋洗,因此低肥处理 TN 浓度逐渐上升。

把每次淋洗的 TN 释放量进行累计,可以得出上覆水释放总量最大的前 3 位处理依次为 ZF3(11.01 mg)、JF3(10.17 mg)、NF3(9.89 mg),加权平均释放质量浓度分别为 2.75、2.54 和 2.47 mg/L。相应地,下渗水释放量最大的前 3 位处理依次为 JF3(47.87 mg)、NF3(39.51 mg)、ZF3(33.42 mg),

加权平均释放质量浓度分别为 11.97、9.88 和 8.36 mg/L。以上数据表明,下渗水中 TN 释放量是上覆水中的 1.8~4.0 倍。这是因为土壤水分运动是土壤溶质运移的主要制约因素,活跃的土壤水分运动始终是土壤氮素淋溶运移的媒介和驱动力。氮素淋溶损失是在土壤中以硝态氮为主的易溶性氮素含量较高和水分运移状况良好的条件下发生的。淋溶的平均浓度均超过水体富营养化氮素浓度临界值 10 倍以上,最高的甚至达 60 倍。这种淋溶状况,可以说对农业水环境是极大的风险隐患。

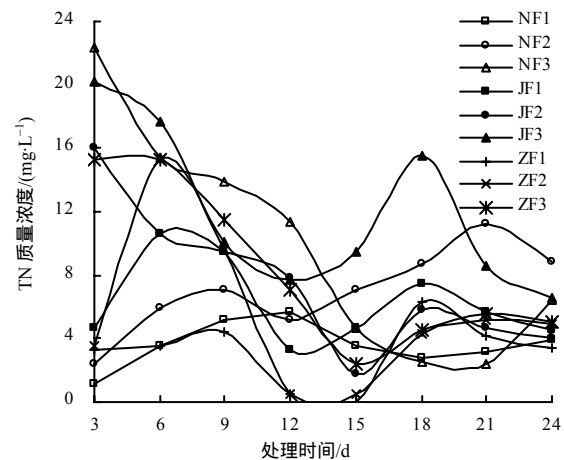


图 2 下渗水中 TN 的质量浓度

Fig.2 Dynamic of TN concentration in infiltrating water

由各处理的单位畜禽粪便 TN 释放量(表 3)可以看出,低施用量处理单位畜禽粪便释放量较大高于高施用量处理,这是因为前者畜禽粪便分解率要大于后者。由此可见,畜禽粪便的总释放量与施用量呈正比,而单位粪便释放量与施用量呈反比。

表 3 水样中单位粪便 TN 释放量

Table 3 Release amount of TN per unit weight of manure in water sample

水样	单位粪便 TN 释放量								
	ZF1	ZF2	ZF3	NF1	NF2	NF3	JF1	JF2	JF3
上覆水	0.222	0.151	0.103	0.307	0.112	0.093	0.264	0.142	0.095
下渗水	0.482	0.410	0.313	0.541	0.529	0.370	0.946	0.563	0.449

2.2 上覆水和下渗水中磷的释放动态

淹水初期,上覆水中 TP 质量浓度从峰值向下降(图 3),可能是由于采样分析时部分上覆水消耗后又补水使 TP 质量浓度下降,或者上覆水中含有少量溶解氧,使水中的  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化为  $\text{Fe}^{3+}$ ,溶解性较

大的  $\text{Fe}^{2+} - \text{P}$  变成了溶解性小的  $\text{Fe}^{3+} - \text{P}$ ,导致上覆水中 TP 质量浓度逐渐降低。而试验中期,水中 TP 质量浓度又开始升高,原因是上覆水中的溶解氧被消耗完全后,水中 Eh 下降,上覆水处于还原状态,重新把  $\text{Fe}^{3+}$  还原成  $\text{Fe}^{2+}$ ,使沉淀于土壤表层的磷又

重新释放到水当中；另一个原因是淹水条件下有机质厌氧分解产生的有机酸对 Fe、Al、Ca、Mg 的螯合作用减少了对磷的固定。所以 TP 和 AP 急剧上升。最后，当磷的沉淀溶解达到平衡时，水中 TP 的质量浓度便达到稳定，并保持在一个较低水平，这也与国外学者的研究<sup>[5-8]</sup>是一致的。

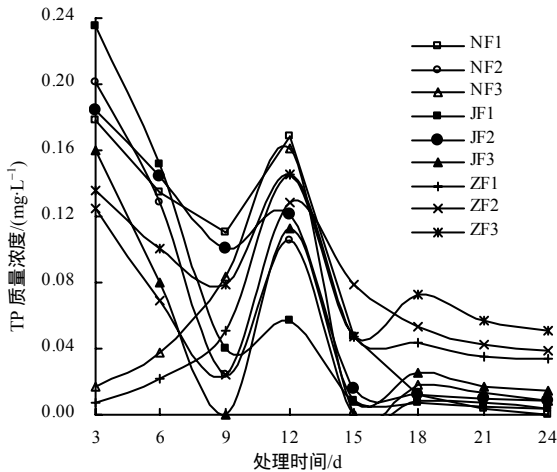


图 3 上覆水中 TP 的质量浓度

Fig.3 Dynamic of TP concentration in overlying water

同时可观察到，试验初期，上覆水中 TP 的释放速率较快。到第 12 天时，速率突然变慢，甚至有些处理几乎未增长，如 NF1、NF2、JF1、JF2。把再次淋洗的 TP 进行累计可以得出释放量最大的前 3 位处理分别为 ZF3(0.344 mg)、NF1(0.327 mg)、JF2(0.299 mg) 加权平均释放质量浓度分别为 0.086、0.082 和 0.075 mg/L。TP 的释放量从数值上看不大，但超过了水体富营养化磷素的浓度临界值 0.02 mg/L，说明对水体存在较大风险。出现这种情况的原因，是与磷素本身的性质紧密相关。在淹水情况下，水中颗粒或土壤对磷的吸附量增加，从而使得 TP 浓度下降。

由图 4 可知，下渗水中 TP 的质量浓度呈先上升后下降的趋势。试验初期，下渗水中 TP 质量浓度上升主要是由初期通过土壤裂隙的优势流把含磷物质带入下渗水之中，造成磷素的流失；由于微生物对钙离子的吸收，改变了微溶性磷酸钙的质量作用平衡，带走了许多钙，因而使磷酸盐离子进入溶液，磷素流失的主要原因变成靠磷素溶解而造成

的流失。随后由于土壤间的孔隙产生的优势流已不明显。试验后期，土壤对磷的吸附与解吸过程达到动态平衡，土壤下渗水中的溶解磷和 TP 释放浓度基本保持平稳。

下渗水中 TP 质量浓度比上覆水中的大一个数量级，这与张志剑等<sup>[9]</sup>模拟水田的土壤磷素溶解特征及其流失机制研究中得出的结论相符。下渗水与上覆水磷素释放水平的差异说明，淹水土壤磷素的溶解能力得到增强，是因为在厌氧条件下能降低土壤对磷的固定能力。

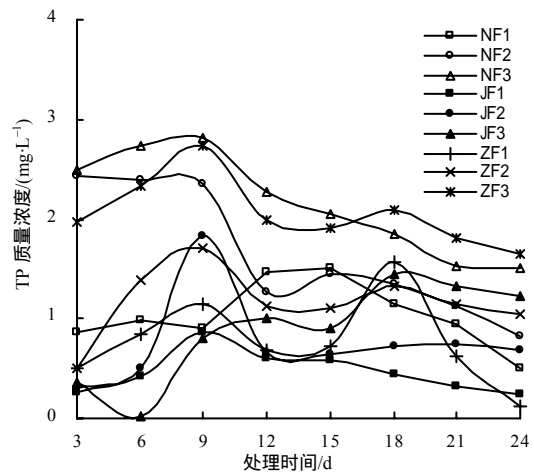


图 4 下渗水中 TP 的质量浓度

Fig.4 Dynamic of TP concentration in infiltrating water

下渗水中 TP 质量的释放速率变化不大，没有出现突跃现象。TP 淋失量较大的 3 个处理分别为 NF3(8.621 mg)、ZF3(8.250 mg)、NF2(6.585 mg)，加权平均质量浓度分别为 2.16、2.06 和 1.65 mg/L。下渗水中 TP 的释放量同样要比上覆水中 TP 的释放量大一个数量级，说明下渗水的磷素流失量要远大于上覆水。

由表 4 可以看出，基本上低施用量处理 TP 释放量要高于高施用量处理，前者的畜禽粪便的分解率也高于后者。上覆水中 TP 浓度由施用量的大小引起的差异大，而由畜禽粪便的种类引起的差异较小。从释放量看，猪粪处理释放总量较高于牛粪和鸡粪处理。同样地，畜禽粪便的 TP 释放量与施用量呈正相关，单位粪便释放量与施用量呈负相关。

表4 水样中单位粪便 TP 释放量

水样	单位粪便 TP 释放量								
	ZF1	ZF2	ZF3	NF1	NF2	NF3	JF1	JF2	JF3
上覆水	0.007	0.005	0.003	0.012	0.004	0.002	0.009	0.006	0.002
下渗水	0.117	0.087	0.077	0.156	0.123	0.081	0.070	0.057	0.033

### 2.3 持续淹水条件下畜禽粪便对氮磷的释放率

通过持续淹水条件下 N、P 总释放量与施入畜禽粪便中 N、P 总含量的比值得到畜禽粪便对 N、P 的释放率(表 5)。3 种畜禽粪便对 N、P 的释放率均有施入量低, N、P 的释放率高的规律, 但考虑到

畜禽粪便对 N、P 释放的绝对值量, 还是有施入量高的处理 N、P 释放绝对值高的特点。

对 TN 的释放率为猪粪最高, 牛粪次之, 鸡粪最低; 而对 TP 的释放率为牛粪最高, 猪粪次之, 鸡粪最低。

表5 畜禽粪便对 N、P 的释放率

	猪粪释放率			牛粪释放率			鸡粪释放率		
	ZF1	ZF2	ZF3	NF1	NF2	NF3	JF1	JF2	JF3
TN	25.74	20.55	15.23	17.21	13.01	9.40	17.14	9.99	7.71
TP	15.70	11.65	10.13	23.66	17.89	11.69	7.05	5.63	3.13

## 3 结 论

在模拟淹水试验中, 上覆水和下渗水均有施用量越大, 释 N 能力越强的特点, 总释放量与施用量呈正相关, 且下渗水释放量高于上覆水。总的来说, 猪粪 TN 的释放率最大, 其次是牛粪, 鸡粪的最小, 而 TP 的释放率从大到小依次为牛粪、猪粪、鸡粪。3 种畜禽粪便均呈现施用量低, N、P 释放率高的特征。说明过高的畜禽粪便用量, 并不能有效释放粪便中的氮、磷元素, 也不能被作物充分吸收利用, 反而会增大农业面源污染的潜在风险。

### 参考文献:

- [1] 王新谋. 家畜粪便学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1997.
- [2] 冯国禄, 杨仁斌, 丁孟. 模拟人工蓄水条件下拔节孕穗期稻田的氮磷动态特征及其降污潜力[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2010, 36(6): 710-714.
- [3] 皮广洁, 唐书源. 农业环境检测原理与应用[M]. 成都:

成都科技大学出版社, 1998: 4.

- [4] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 83-89.
- [5] Willett I R. Causes and prediction of changes in extractable P during flooding[J]. Australian Journal of Soil Research, 1989, 27: 45-54.
- [6] Sanyal S K, Dedatta S K, Chan P Y. Chemistry of phosphorus transformation in soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4): 937-945.
- [7] Tstusuki K. Behavior of anaerobic decomposition products in submerged soil[J]. Science and plant Nutrition, 1987, 33(1): 13-33.
- [8] 谢学俭, 冉炜, 沈其荣. 淹水条件下水稻田中磷的淋溶研究[J]. 土壤, 2003, 35(6): 506-509, 517.
- [9] 张志剑, 王光火, 王珂, 等. 模拟水田的土壤磷素溶解特征及其流失机制[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 139-143.

责任编辑: 刘目前