

金文博, 殷长青, 王 毅, 等. 畜牧粪便堆沤过程中磷素转化与流失风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 2037–2044.

JIN Wen-bo, YIN Chang-qing, WANG Yi, et al. Phosphorus transformation and loss risk during heap retting with livestock manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 2037–2044.

畜牧粪便堆沤过程中磷素转化与流失风险分析

金文博^{1,2,3}, 殷长青⁴, 王 毅^{1*}, 左双苗^{5*}, 肖润林^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 湖南省邵阳市洞口县农业局, 湖南 洞口 422300; 5. 湖南省水利厅水土保持处, 长沙 410007)

摘 要: 循环利用畜禽养殖粪便中的磷素是解决农业资源短缺和环境污染的重要途径。为了探寻亚热带农业区常规方式下养殖粪便中磷含量变化规律和环境流失风险, 本研究模拟传统农户的固体堆沤方式, 对猪粪和牛粪混合秸秆进行为期两个月的自然堆沤发酵试验, 测定全磷、无机磷、有机磷、水溶性磷、柠檬酸提取态磷、Olsen-P 指标。研究结果表明: (1) 不同物料发酵磷素在化学形态上存在明显差异, 猪粪发酵磷组分含量: 水溶性磷>Olsen-P≈柠檬酸提取态磷, 牛粪发酵: 柠檬酸提取态磷>水溶性磷>Olsen-P, 且猪粪堆体中各形态磷含量高于牛粪; (2) 猪粪堆沤过程中存在明显无机磷向有机磷转化过程, 提高了堆体有机磷和全磷含量, 但是这种现象在牛粪堆沤过程中不明显; (3) 猪粪在堆沤过程中由于微生物发酵引发的有机质的快速分解和损失, 会“浓缩”堆体中磷素含量, 从而加剧堆沤过程中全磷的降雨径流流失风险, 因此在降雨频繁的地区和传统农户固体自然堆沤方式下, 虽然猪粪堆沤发酵能更好地提高养殖废弃物中磷素有效性, 但也应当注意堆沤过程中的潜在径流流失环境风险。

关键词: 堆沤; 全磷; 有效磷; 有机磷; 流失风险

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)09-2037-08 doi:10.11654/jaes.2017-1567

Phosphorus transformation and loss risk during heap retting with livestock manure

JIN Wen-bo^{1,2,3}, YIN Chang-qing⁴, WANG Yi^{1*}, ZUO Shuang-miao^{5*}, XIAO Run-lin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Agricultural Bureau of Dongkou County, Hunan Province, Dongkou 422300, China; 5. Soil and Water Conservation Office, Water Resources Department of Hunan Province, Changsha, 410007, China)

Abstract: Recycling the phosphorus in livestock manure is an important way to solve the shortage of agricultural resources and to decrease environmental pollution risks. The present study compared the heap retting processes of pig manure and cow manure to determine phosphorus transformation, and to estimate the environmental losses risked in subtropical agricultural areas. Therefore, the total phosphorus, inorganic phosphorus, organic phosphorus, water-soluble phosphorus, citric acid extracted phosphorus, and Olsen-P indexes were determined during the two months of heap retting experiment. The results suggested the following: (1) the chemical composition of phosphorus differed between the heap retting processes of pig and cow manure in view of the phosphorus levels, which were: water-soluble phosphorus > Olsen-

收稿日期: 2017-11-14 录用日期: 2018-02-13

作者简介: 金文博(1993—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 从事农业流域环境研究。E-mail: 2435414314@qq.com

*通信作者: 王 毅 E-mail: wangyi@isa.ac.cn; 左双苗 E-mail: 553466318@qq.com

基金项目: 湖南省水利科技项目(湘水科计(2016)-SB-01); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800100)

Project supported: The Science-Technology Project for Hunan Water Conservancy of Hunan Province, China((2016)-SB-01); The National Key Research Program of China(2017YFD0800100)

P $\approx$ citric acid extracted phosphorus in pig manure, and citric acid extracted phosphorus > water soluble phosphorus > Olsen-P in cow manure. All forms of phosphorus content in pig manure were higher than those in cow manure. (2) Large quantities of inorganic phosphorus were transformed into organic phosphorus and hence, increased the organic phosphorus and the total phosphorus content of pig manure; however, this phenomenon was not obvious for the cow manure. (3) The rapid excretion and loss of organic matter due to microbial fermentation, concentrated the phosphorus contents of pig manure, increased the loss risk of total phosphorus through over-land runoffs during the heap retting process. Therefore, in areas with frequent rainfall, although the heap retting treatment can improve the phosphorus availability in pig manure, additional attention should be paid to the potential environmental risk of runoff-losses during the heap retting process.

Keywords: heap retting; total phosphorus; available phosphorus; organic phosphorus; loss risk

磷(P)是作物生长的必需营养元素之一,参与作物能量转化、光合作用、糖分和淀粉分解等多种生命活动。我国74%的耕地土壤存在不同程度上的缺磷现象,因此农业生产中往往需要施用大量磷肥以提高产量,且以化学磷肥为主。化学磷肥的生产原料主要是磷矿粉。我国磷矿资源占全世界的1.1%,但按目前的磷矿开采速度,磷矿资源仅够延用25年^[1]。为保证农业生产的可持续性,寻找可持续的磷素利用途径已经成为我国当今农业生产的一大难题。

有机物废弃物(如养殖粪便)作为土壤磷素补充来源在国内外得到广泛使用,这是因为有机废弃物中含大量磷素,循环利用其中的磷不仅可减少磷矿资源的开采,还可以有效处理有机废弃物、减少不当处理所引起的环境污染。养殖废弃物循环利用技术常用于处理规模化畜禽养殖产生的废弃物,在实现废弃物无害化和减量化的同时,其生产的有机肥可代替部分化学肥料,废弃物循环利用技术已成为解决农业资源与环境问题的重要技术途径之一^[2-4]。有研究表明在废弃物堆沤处理下有机物料中磷素的生物有效性和向水环境的移动性不仅与土壤、气候等条件有关,还受有机物料中磷含量及形态的影响。Sharpley等^[5]证实土壤渗漏液中的磷含量与有机物料中的水溶性磷密切相关,王涛^[6]也发现地表径流中的磷浓度与有机物料中的水溶性磷呈显著或极显著正相关。研究堆体有机物料中磷的形态有助于正确评价其中磷素的生物有效性,预测其流失风险,是合理选取和施用有机物料的重要理论基础^[7]。尽管已有学者对鸭粪^[8]、猪粪和污泥^[9]及猪牛粪发酵^[10]过程中磷的形态进行了研究,但受有机物料来源、处理方式等因素的影响,不同物料中磷的形态差异较大,现有的关于有机物料中磷的形态及有效性研究不足以为各地有机物料的科学利用提供有效依据^[5,11-12]。

我国亚热带地区猪、牛等小规模农户家庭养殖较多,受制于生产力水平和科技知识的限制,养殖农户

对猪牛粪便的处理方式常常采用传统的固体自然堆沤发酵方式^[13]。传统的固体自然堆沤发酵方式与现代高效厌氧/好氧发酵方式不同,其堆料磷素的转化释放过程也不清楚。同时由于亚热带农区动物粪便堆沤方式随意,降雨-产流过程频繁,堆料在堆沤过程中可能存在巨大的磷素流失风险^[14-17]。因此,本研究选取湖南省长沙市常见的有机物料(猪粪和牛粪)自然堆沤,采用H₂O、NaHCO₃、柠檬酸连续抽提法,分析猪粪和牛粪在固体自然堆沤发酵方式下的磷形态和含量的变化,明确不同动物粪便有机物料磷形态转化特征,定量分析传统堆沤方式下堆体磷素流失风险,为亚热带区域有机物料的磷素循环利用和农村环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验开展于湖南省长沙县金井镇的中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站,仿照当地农户固体自然堆沤方式,堆场为露天开放式设计。整个堆场共设置6个堆沤处理小区(1.5 m $\times$ 1.5 m),为防止降雨过程中堆体养分通过地表径流溢流流失,小区四周修建0.15 m高水泥埂;小区下垫面做水泥硬化处理,防止堆体渗漏液淋失。小区下方安装翻斗仪(南京司摩特农业科技有限公司,南京),堆沤期间降雨过程中,小区内产生的地表径流通过导流管道顺利排入翻斗仪,测定地表流失量。每次降雨结束后,下载翻斗仪中径流流量数据,同时充分搅匀翻斗仪水样采集器中收集的径流水样,量取500 mL送实验室检测。

堆沤试验时间是2016年7月至9月,共持续60 d,设置猪粪和牛粪两个处理,每个处理三个重复。堆沤过程中全程不做翻堆处理,堆体自然裸露通风。处理分别以含水量为70%的猪粪、含水量为80%的牛粪和含水量为4.3%的秸秆为原料,按干物质质量比

$m(\text{猪粪/牛粪}):m(\text{秸秆})=4:1$ 混配堆料。堆沤原料(按干质量计算)为400 kg猪粪/牛粪和100 kg秸秆,其中秸秆长度粉碎至5 cm以下。堆体为圆锥形,底边为1.5 m×1.5 m,堆高0.6~1 m。堆沤牛粪来源于当地养牛场,猪粪来源于当地农户猪圈,秸秆来源于当地稻田。堆沤材料基本性状见表1。

表1 堆体原料成分					
Table 1 Ingredients of the pig and cattle manure					
材料	有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	C/N
牛粪	453.7	13.82	6.00	2.46	32.8
猪粪	376.6	24.52	25.18	9.88	15.3
秸秆	423.2	3.11	1.25	0.83	136

1.2 样品采集及测定

采用四分法取样,分别采集堆沤处理后第1、2、3、4、5、6、7、8、9、11、13、15、18、21、24、27、30、37、44、51、58 d的堆沤样品(共21次)。每次采集堆体固体样,采用烘干法测定含水量;同时自然风干500 g固体样,后经研磨机粉碎过100目筛子,干样测定全磷、有机磷、无机磷、柠檬酸提取态磷、Olsen-P、水溶性磷指标。试验期间共发生4次较强降雨,分别在试验开始后的第2、14、20、58 d采集4次地表径流水样,每次降雨后立即用PE塑料瓶收集水样,24 h完成水样分析,分析指标包括速效磷与全磷。试验后,对残余堆体称重,同时利用烘干法测定堆料含水量,折算残余堆体的干物质质量。

堆料固体样品化学分析参照《土壤农业化学分析方法》^[17]和《有机肥料加工与施用》^[18]。全磷含量采用硫酸和硝酸消煮,与偏钒酸和钼酸形成黄色三元杂酸,用分光光度计测定;有机磷含量采用灼烧法测定;无机磷含量通过总磷差减有机磷所得;柠檬酸提取态磷(Citric-P)含量采用柠檬酸浸提-钼钒黄比色法测定;Olsen-P含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;水溶性磷($\text{H}_2\text{O-P}$)含量采用去离子水浸提-钼锑抗比色法测定。地表径流水样速效磷采用柠檬酸浸提-钼钒黄比色法测定,全磷浓度采用硫酸-硝酸消煮钼钒黄比色法测定。

1.3 堆体磷流失计算

降雨-产流期间堆体的磷素流失量计算公式为:

$$m=c\times V\times N/1000 \quad (1)$$

式中: m 为磷含量,g; c 为测出的水样浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为翻斗仪体积,L; N 为翻斗仪次数。

1.4 数据分析

数据差异分析采用SPSS 20.0中的 t 检验,作图采用Origin 8.0。

2 结果与分析

2.1 堆体含水量温度动态

对堆体的称量结果表明猪粪和牛粪堆料在堆沤期间发生了明显的发酵现象(表2),试验开始前猪粪和牛粪堆体干质量均为500 kg,试验结束后,牛粪堆体干质量为 $(280\pm 19)\text{kg}$,平均损失率44%;猪粪堆体干质量为 $(260\pm 25)\text{kg}$,平均损失率48%。整个堆沤过程中外界环境温度保持在20~30℃,但猪粪和牛粪温度基本在30℃以上,且猪粪堆体温度始终显著高于牛粪堆体温度($P<0.01$)。试验开始时猪粪牛粪堆料含水量基本一致,随着堆沤试验的进行,两种堆体含水量出现显著差异($P<0.01$)。整个堆沤试验期间共发生4次较强降雨,且主要集中在第12 d以后,累计降雨量134.6 mm。从降雨事件开始,尽管猪粪堆体含水量均值 $(54.1\%\pm 13.1\%)$ 低于牛粪 $(64.6\%\pm 11.7\%)$,但是猪粪堆体含水量变化幅度比牛粪堆体大,说明猪粪堆体保水性低于牛粪(图1)。

2.2 堆体总磷含量动态

堆沤试验期间两种堆料中全磷含量动态变化趋势明显不同(图2)。堆沤开始时,猪粪堆料中全磷含量 $(22.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1})$ 远高于牛粪 $(5.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1})$,且随堆沤时间延长逐步上升,在堆沤过程的第15 d上升趋势大幅增加,到堆沤试验结束为止,猪粪堆体中全磷含量增加明显。而牛粪全磷含量在整个试验过程中上升趋势不明显,基本保持平稳,至试验结束,牛粪堆体中全磷含量仅有微小的增加。

2.3 堆体有机磷动态变化

堆沤发酵期间,猪粪有机磷平均含量和变化幅度明显高于牛粪 $(5.7\pm 4.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.7\pm 0.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1})$ (图3)。在堆沤过程中猪粪堆体有机磷含量随时间逐步上升,而牛粪有机磷含量相对稳定(图4)。在整个堆沤期间,猪粪有机磷含量平均占总磷的25.5%,牛粪

表2 堆沤质量变化(干质量,kg)						
Table 2 Dynamics of weight in the heap retting process(dry,kg)						
堆体	猪粪			牛粪		
	堆体1	堆体2	堆体3	堆体4	堆体5	堆体6
堆沤前	500	500	500	500	500	500
堆沤后	241	285	254	268	273	299

有机磷含量平均占总磷的40.4%。

2.4 堆体有效磷动态变化

在整个堆沤期间,两种物料中有效磷(水溶性磷、柠檬酸提取态磷、Olsen-P)的含量及动态变化具有显著差异($P<0.01$)(表3)。猪粪堆体中三种有效磷平均含量较相近,为 $5.2\sim 11.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在堆沤前期猪粪有效磷含量从高到低依次为水溶性磷>柠檬酸提取态磷>Olsen-P,分别占全磷的33.2%、27.1%和25.9%,后期含量高低顺序转变为水溶性磷>Olsen-P>柠檬酸提取态磷(图5);且三种有效磷在整个堆沤过程中变幅较小,在堆沤前20 d,除整体出现一次最低值外(在堆沤第10 d左右)猪粪堆体中三种有效磷含量并无明显变化规律,但在堆沤的第20~55 d, Olsen-P 含量显著上升并超过柠檬酸提取态磷,且在第40 d出现峰值,而水溶性磷和柠檬酸磷含量基本趋于平稳。

相对猪粪堆沤发酵而言,牛粪堆沤过程中水溶性磷、柠檬酸提取态磷、Olsen-P 含量及动态变化趋势明显,且三种有效磷在整个堆沤过程中变化趋势相近。

牛粪堆沤物料中三种有效磷的含量在 $0.4\sim 4.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,差距较大,且含量高低始终是柠檬酸提取态磷>水溶性磷>Olsen-P,分别占全磷的54.0%、32.7%和12.5%。三种有效磷含量变化趋势较明显,在堆沤第3 d左右均呈现下降趋势,随后又快速上升,在堆沤第5~10 d左右均又大幅降低,随后又缓慢上升,在堆沤45 d后趋于稳定。但水溶性磷、柠檬酸提取态磷、Olsen-P 含量峰值时间表现不一致,柠檬酸提取态磷含量峰值在第9 d,而水溶性磷与 Olsen-P 含量峰值在第4 d。

2.5 堆体磷素降雨径流流失

降雨期间地表径流中猪粪堆体流失的有效磷和全磷浓度均高于牛粪(表4)。如果不考虑堆沤试验开始第2 d的降雨事件(微生物发酵过程尚未完全进行),猪粪和牛粪堆体径流中有效磷浓度与降雨量和堆沤时间似乎不存在关联,而径流中全磷浓度随堆沤时间进行逐渐升高,尤其是在猪粪堆体中。整个堆沤处理过程中猪粪中有效磷和全磷总流失量也大于牛

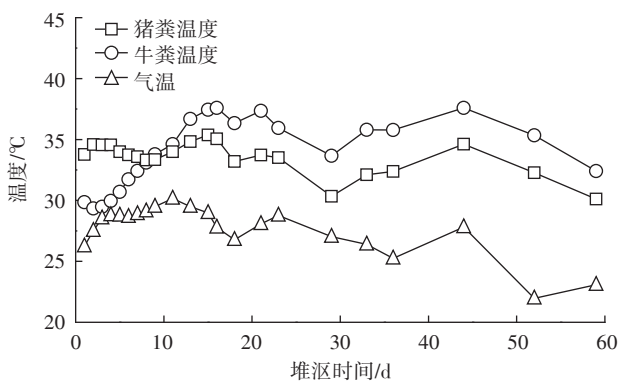


图1 温度、含水量和降雨变化

Figure 1 Dynamics of temperature, moisture content and rainfall

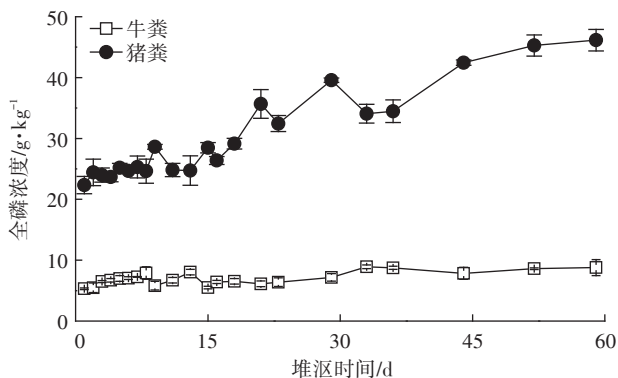


图2 猪粪和牛粪堆沤中全磷含量变化

Figure 2 Dynamics of total phosphorus concentrations during the heap retting process in the pig and cattle manure

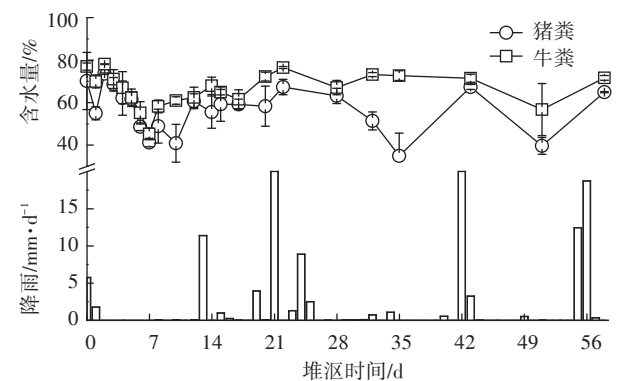


图3 猪粪和牛粪堆沤中有机磷含量变化

Figure 3 Dynamics of organic phosphorus concentrations during the heap retting process in the pig and cattle manure

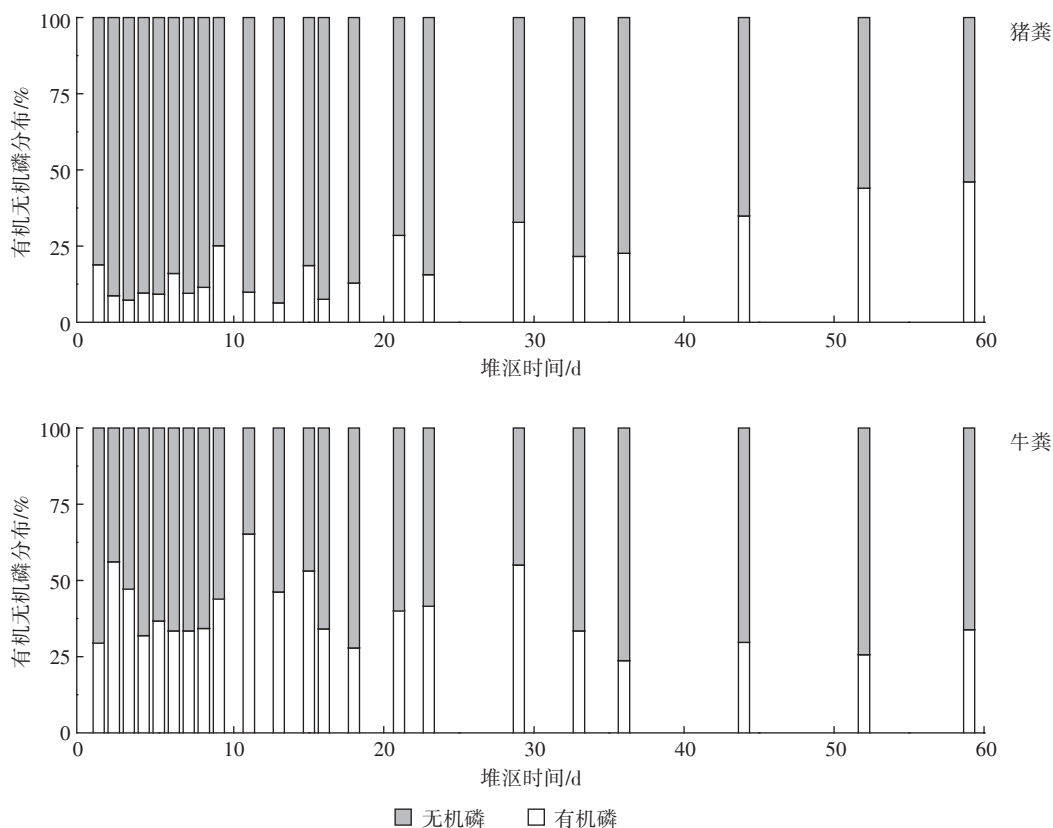


图4 牛粪和猪粪堆沤过程中无机/有机磷比例变化

Figure 4 Changes of inorganic/organic phosphorus proportions during the heap retting process in the pig and cattle manure

表3 堆沤过程中猪粪和牛粪有效磷变化动态显著性差异分析

Table 3 Significant difference analysis of available phosphorus during the heap retting process in the pig and cattle manure

磷素种类	猪粪和牛粪组间	
	离差平方和	P
水溶性磷	593.8	<0.001
Olsen-P	497.9	<0.001
柠檬酸提取态磷	176.0	<0.001

注:置信区间是0.05。

粪总流失量,但是猪粪堆体有效磷和全磷流失率略小于牛粪流失率。

3 讨论

牲畜饲料中磷含量及组成在一定程度上影响有机物料(粪便)中磷含量。通常情况下,猪以玉米、大麦等为主要饲料,其中难以被猪等非反刍动物利用的肌醇六磷酸磷含量高,而牛以牧草为饲料,其中的磷及肌醇六磷酸磷含量低^[11],因此堆沤开始前猪粪中磷含量的本底值就明显高于牛粪(猪粪全磷是牛粪的4.2倍,有效磷是4.0倍)(表1)。堆沤过程中堆体减重

明显(表2),堆体内部温度始终高于外界环境温度(图1),说明两种堆料在堆沤过程中都发生明显的微生物发酵过程。由于猪粪堆料磷素含量本底值高,保水性低,通气性较高,微生物活性较强,加速了微生物对堆料磷素转化过程^[12],因此堆沤发酵结束后猪粪堆体全磷、无机磷、有机磷、水溶性磷、Olsen-P、柠檬酸提取态磷均高于牛粪(图2、图3和图5)。

猪粪牛粪在自然堆沤方式下全磷含量变化趋势明显不同(图2)。猪粪堆料中全磷含量随堆沤时间延长明显上升。这是因为堆沤过程中猪粪堆体良好的通气性引起有机质的快速分解和损失,造成堆体中磷素被“浓缩”^[14],造成全磷含量逐步上升。相关研究也证明堆体全磷含量与有机质分解强度有密切关系^[20]。Christel等^[3]在研究猪粪堆肥时发现,猪粪全磷含量随着发酵时间显著上升。相比较而言,牛粪全磷含量在发酵过程中变化不大。牛粪堆体保水性较强,使牛粪堆体长期处于一个相对厌氧的环境。堆体在厌氧环境中有机质分解速率不及好氧环境^[12,15],这在一定程度上减缓了磷的“浓缩”效应。这与付广青等^[21]的研究结果相似,其在研究中发现牛粪在厌氧发

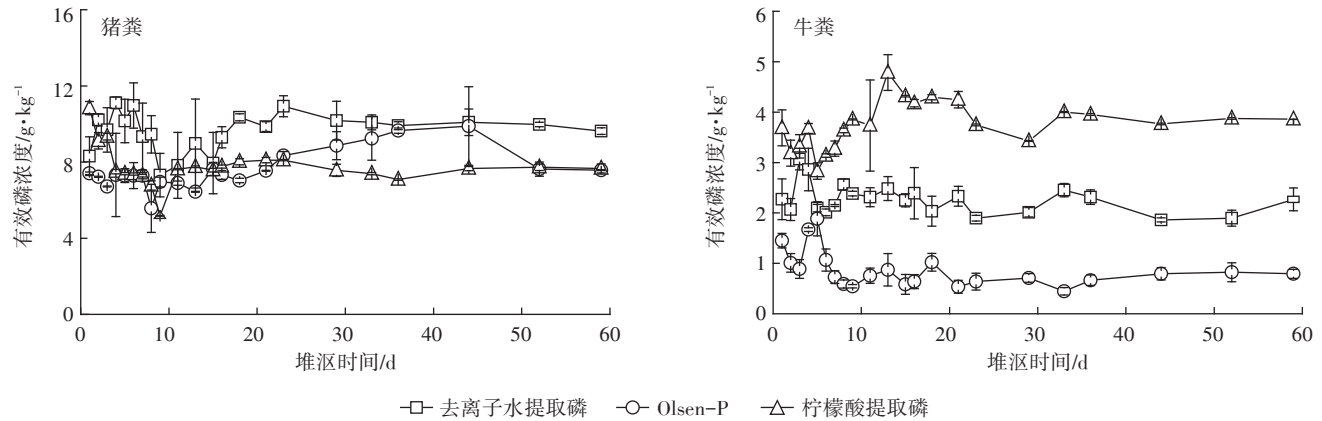


图5 猪粪和牛粪堆沤中有效磷含量变化

Figure 5 Dynamics of available phosphorus concentrations during the heap retting process in the pig and cattle manure

表4 降雨产流过程中的磷素流失

Table 4 Phosphorus losses during the rainfall-overland flow events

时间/d	降雨量/ mm	有效磷浓度/mg·L ⁻¹		有效磷流失量/g		全磷浓度/mg·L ⁻¹		全磷流失量/g		有效磷流失率/%		全磷流失率/%	
		猪粪	牛粪	猪粪	牛粪	猪粪	牛粪	猪粪	牛粪	猪粪	牛粪	猪粪	牛粪
2	7.53	50.37	45.17	1.02	0.92	59.88	58.71	1.22	1.19	0.03	0.09	0.01	0.03
14	11.40	43.37	29.20	1.33	0.90	45.85	35.20	1.41	1.08	0.03	0.08	0.01	0.03
20	32.75	31.48	31.11	2.44	2.41	118.54	35.96	9.20	2.79	0.06	0.23	0.07	0.08
58	32.56	53.61	19.05	3.16	1.02	230.39	74.96	13.59	4.42	0.08	0.10	0.11	0.13
总计	—	—	—	7.97	5.36	—	—	25.43	9.49	0.20	0.50	0.20	0.27

醇环境中有机质分解缓慢且全磷含量变幅较小。加之,在堆沤试验过程中,牛粪堆体全磷的降雨径流流失率(0.27%)要大于猪粪堆体(0.20%),从而导致在堆沤过程中牛粪堆体全磷含量变化不明显。

猪粪堆体中有机磷含量和有机磷占全磷的比例随堆沤时间逐步上升(图3和图4),这是因为猪粪堆体周期性的好养和厌氧环境促进微生物将大量无机磷转化成有机磷,提升了堆体中有机磷含量和有机磷占全磷的比例。与堆沤前堆料磷素本底值相比较,堆沤结束后猪粪堆料全磷、无机磷、有机磷、水溶性磷、Olsen-P、柠檬酸提取态磷分别提高了2.06、1.37、5.05、1.16、1.02倍和0.68倍,而牛粪堆体提高了1.32、1.23、1.52、1.19、0.54倍和1.01倍。这说明,在扣除堆料本底值因素外,猪粪堆体在堆沤发酵过程中无机态磷转化为有机磷的微生物过程也同时提高了堆体全磷的含量。牛粪堆体中的有机磷含量相对趋于平稳,可能因为相对厌氧的环境致使牛粪发酵速率缓慢^[12],有机磷上升不明显^[10],再加上降雨引起的有机磷部分流失,最终导致有机磷含量在堆沤过程中变化不大。单德鑫等^[1]在对牛粪难溶性磷研究中指出,不

经过任何处理的牛粪发酵过程中,难溶性磷转化较少,有机磷增加不超过15%,这可解释说明本研究中牛粪堆体中有机磷含量最终趋于平稳。

猪粪中各组分有效磷高于牛粪,且其各形态的比例分布存在较大差异(图5)。堆沤过程中猪粪有效磷组分含量中水溶性磷>Olsen-P≈柠檬酸提取态磷,而牛粪中为柠檬酸提取态磷>水溶性磷>Olsen-P。猪粪有效磷中的水溶性磷含量最高(占全磷的33.2%),高于Sharpley等^[5]测定结果(占全磷比例为23.0%);牛粪中柠檬酸磷占全磷比例为32.7%,高于其他研究^[12]结果(32.3%)。产生这种差异性结果的原因除了堆料本底浓度的差异外,还与本实验采用固体自然堆沤的处理方式有关。猪粪堆体三种有效磷在堆沤初期没有明显的变化规律,在发酵后均有不同程度的降低,这是因为发生了水溶态磷向难溶态磷和无机磷向有机磷的转化^[10],在堆沤第20 d后,原本低于柠檬酸提取态磷的Olsen-P含量显著上升并高过柠檬酸提取态磷,最终又趋于一致,这可能是由于堆料有机无机物在微生物作用下的发酵、分解、合成物质过程逐渐趋于稳定所造成^[14]。堆沤后期猪粪堆体中三种有

效磷在堆沤后期浓度比其他相关研究中浓度高,可能与本底浓度太高有关^[21-22]。牛粪中三种有效磷含量差别较大,试验过程中变化规律较为明显,这是因为在堆沤初期,牛粪中有机酸含量较少,只有有限的溶解磷的能力,且微生物的大量繁殖消耗掉牛粪中原有的有效磷,致使三种有效磷均有下降趋势^[23],随着发酵的进行,微生物死亡释放吸收的磷,有效磷含量又在降雨的影响下降低,最终在微生物数量较为稳定的情况下,分解有机物质,释放有机酸类物质,促进无机磷的转化,使得三种有效磷的含量趋于稳定^[2]。

近年来,随着我国亚热带区域农村养殖业的迅速发展,畜禽粪便已经成为农村和城郊地区主要污染源之一^[24]。孟岑等^[25]的研究表明在金井流域,畜禽粪便对流域地表水全磷的贡献率高达57.7%。农村养殖业畜禽粪便很多情况下还是以固体自然堆沤形式为主,尤其是许多畜禽散养型农户。本研究发现堆料中较高的磷素含量导致了降雨径流中高有效磷和全磷浓度(表4)。对比两种堆料,猪粪堆体径流中有效磷和全磷浓度均高于牛粪堆料径流,表明堆料磷含量直接影响了堆沤期间的磷流失过程,从而使得堆沤期间猪粪中全磷的总流失量(25.43 g)也大于牛粪(9.49 g)。堆体有效磷和全磷流失过程主要取决于堆料磷素浓度和降雨产流过程^[16-17,26]。考虑到本试验中堆体规模较小,农户传统的养殖粪便固体自然堆沤模式也是以小型化为主,在相同降雨条件下,降雨产流过程产流差异较小。由于猪粪和牛粪堆料中有效磷和全磷浓度相差2.06倍和4.27倍,说明堆料有效磷和全磷浓度是堆沤过程中径流磷素浓度相差较大的主要原因。表4中,除了微生物发酵过程尚未完全进行的第2 d降雨事件外,猪粪和牛粪堆体径流中有效磷浓度与降雨量以及堆沤时间不存在关联,这可能与堆体中柠檬酸提取态磷、水溶性磷、Olsen-P组分始终处于周期性的好养和厌氧发酵导致的不稳定浓度水平有关(图5)。猪粪和牛粪径流中全磷浓度随堆沤时间的延长逐渐升高,尤其是在猪粪堆体中,微生物发酵过程导致的全磷“浓缩”效应是加剧全磷流失风险的重要原因^[14,17]。

本研究中通过对猪粪和牛粪进行固体自然堆沤处理比较试验,发现畜禽粪便在堆沤期间微生物驱动的磷素转化过程是控制堆料磷素流失的主要原因;尤其是对猪粪堆料而言,采用固体自然堆沤模式存在潜在的磷素流失风险,这一方面降低了堆料的养分价值,另一方面也会加剧潜在的农村环境风险。本研究

探讨了畜禽粪便传统自然堆沤方式的磷素转化释放过程及其磷素流失风险,但是其与现代化的高温好氧堆肥和厌氧发酵后堆肥方式中磷素流失风险的差异不清楚^[17,26]。因此,深化研究农村畜禽粪便处理技术,对比传统固体自然堆沤、高温好氧堆肥和厌氧发酵后堆肥的磷形态转化过程及其流失风险的差异,对于畜禽粪便的污染控制技术和削减施用后的流失风险具有指导意义。

4 结论

(1)猪粪和牛粪在堆沤发酵过程中有效磷形态分布存在差异,猪粪堆料中有效磷浓度水溶性磷>Olsen-P≈柠檬酸提取态磷,牛粪堆料中柠檬酸提取态磷>水溶性磷>Olsen-P,且猪粪堆料中各形态有效磷含量均大于牛粪。

(2)猪粪堆沤过程中存在明显无机磷向有机磷转化过程,提高了堆体有机磷和全磷含量,但是这种现象在牛粪堆沤过程中不明显。

(3)猪粪在自然堆沤过程中由于微生物发酵引发的有机质快速分解和损失,会“浓缩”堆体中磷素含量,从而加剧堆沤过程中全磷的降雨径流流失风险。

参考文献:

- [1] 单德鑫,李淑芹,许景钢. 好氧堆肥对难溶性磷转化的影响[J]. 环境科学学报, 2009(1): 146-150.
SHAN De-xin, LI Shu-qin, XU Jing-gang. Effects of aerobic composting on transformation of rock phosphate[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009(1): 146-150.
- [2] Wei Y Q, Zhao Y, Xi B D, et al. Changes in phosphorus fractions during organic wastes composting from different sources[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 189: 349-356.
- [3] Christel W, Bruun S, Magid S, et al. Phosphorus availability from the solid fraction of pig slurry is altered by composting or thermal treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 169: 543-551.
- [4] Jiang J S, Huang Y M, Liu X L, et al. The effects of apple pomace, bentonite and calcium superphosphate on swine manure aerobic composting [J]. *Waste Management*, 2014, 34(9): 1595-1602.
- [5] Sharpley A, Moyer B. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(6): 1462-1469.
- [6] 王 涛. 滇池流域施用有机肥农田氮磷流失模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
WANG Tao. Study on nitrogen and phosphorus losses from field used manure in Dianchi watershed by simulated rainfall method[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [7] 罗春燕, 冀宏杰, 张认连, 等. 有机废弃物的磷素形态研究进展[J]. 土壤通报, 2009(3): 709-715.

- LUO Chun-yan, JI Hong-jie, ZHANG Ren-lian, et al. Advance in the characterization of phosphorus in organic wastes[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009(3):709-715.
- [8] 吴崇书, 张 丽, 章明奎. 4种畜禽粪中磷的形态与有效性研究[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(1):71-72.
- WU Chong-shu, ZHANG Li, ZHANG Ming-kui. Chemical forms and availability of phosphorus in four animal manures[J]. *Journal of Anhui Agri*, 2015, 43(1):71-72.
- [9] 朱培颖, 李大鹏, 于胜楠. 灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(5):1957-1964.
- ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan. Effect of different adding means of ignited water purification sludge on phosphorus adsorption and forms[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(5):1957-1964.
- [10] 付广青, 靳红梅, 叶小梅, 等. 猪和奶牛粪污厌氧发酵中固相磷形态变化分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(2):239-245.
- FU Guang-qing, JIN Hong-mei, YE Xiao-mei, et al. Variation in forms of solid phase phosphorus in pig and dairy cow manures under anaerobic digestion[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(2):239-245.
- [11] 邓 佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 等. 不同有机物料中的磷形态特征研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(3):1098-1104.
- DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, et al. Characterization of phosphorus forms in different organic materials[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3):1098-1104.
- [12] 孙建松, 郑玉琪, 陈同斌. 好氧堆肥过程中氧气变化及检测[J]. *生态环境*, 2003, 12(2):232-236.
- SUN Jian-song, ZHENG Yu-qi, CHEN Tong-bin. Advances in research of oxygen in aerobic composting[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2):232-236.
- [13] 袁玉玲, 王立刚, 李 虎, 等. 猪粪固体自然堆放方式下含氮气体排放规律及其影响因素研究[J]. *农业环境科学学报* 2014, 33(7):1422-1428.
- YUAN Yu-ling, WANG Li-gang, LI Hu, et al. Nitrogenous gas emissions from solid swine manure under natural composting conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1422-1428.
- [14] 罗安程, 史彩芬, 孙晓华, 等. 猪粪堆肥发酵过程中磷组分的转化[J]. *浙江农业学报*, 2005, 17(5):296-299.
- LUO An-cheng, SHI Cai-fen, SUN Xiao-hua, et al. Transition of P componuts in swine manure during composting course[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 17(5):296-299.
- [15] Frederick C. Michel Jr, Reddy C A. Effect of oxygenation level on yard trimmings composting rate, odor production, and compost quality in bench-scale reactors[J]. *Compost Science & Utilization*, 1998, 6(4):6-14.
- [16] 王 薇. 模拟降雨对堆肥和土壤覆盖物中养分流失量的影响[J]. *水土保持科技情报*, 2005(1):18-19.
- WANG Wei. The effect of simulated rainfall on nutrient loss in compost and soil coverings[J]. *Scientific Information of Soil and Water Conversation*, 2005(1):18-19.
- [17] 彭 莉, 王莉玮, 杨志敏, 等. 降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(2):407-411.
- PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, et al. Effects of rainfall on nitrogen and phosphorus loss from courtyard compost and its risk of nonpoint source pollution[J]. *Environment Science*, 2012, 33(2):407-411.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 第一版. 北京:中国农业科技出版社, 2000:169-181, 313-314.
- LU Ru-kun. Soil agro-chemical analytical methods[M]. 1st Edition. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000:169-181, 313-314.
- [19] 贾小红. 有机肥料加工与施用[M]. 二版. 北京:化学工业出版社, 2010:207-210.
- JIA Xiao-hong. Organic fertilizer processing and application[M]. 2nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2010:207-210.
- [20] 赵素芬, 刘建新, 倪梅娣. 畜禽废弃物高温好氧堆肥过程中磷素的变化研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2):384-386.
- ZHAO Su-fen, LIU Jin-xin, NI Mei-di. Dynamic phosphorus contents during aerobic and rmophilic composting of livestock wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):384-386.
- [21] 付广青, 叶小梅, 靳红梅, 等. 厌氧发酵对猪与奶牛两种粪污固液相中磷含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1):179-184.
- FU Guang-qing, YE Xiao-mei, JIN Hong-mei, et al. Effect of anaerobic digestion on phosphorus transformation of both pig and dairy manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):179-184.
- [22] Li G H, Li H G, Leffelaar P A, et al. Characterization of phosphorus in animal manures collected from three (dairy, swine, and broiler) farms in China[J]. *Phosphorus Characterization in Animal Manure*, 2014, 9(7):e102698.
- [23] 魏自民, 王世平, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥对难溶性磷有效性的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(3):679-683.
- WEI Zi-min, WANG Shi-ping, XI Bei-dou, et al. Effect of municipal solid waste composting on availability of insoluble phosphate[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3):679-683.
- [24] Gerber P, Chilonda P, Franceschini G, et al. Geographical determinants and environmental implications of livestock production intensification in Asia[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(2):263-276.
- [25] 孟 岑, 李裕元, 许晓光, 等. 亚热带流域氮磷排放与养殖业环境承载力实例研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(2):635-643.
- MENG Cen, LI Yu-yuan, XU Xiao-guang, et al. A case study on non-point source pollution and environmental carrying capacity of animal raising industry in subtropical watershed[J]. *Environment Science*, 2013, 33(2):635-643.
- [26] 饶雄飞, 金怡平, 胡红青, 等. 动物粪便堆肥的养分淋溶特征模拟研究[J]. *环境化学*, 2007, 26(6):774-778.
- RAO Xiong-fei, JIN Yi-ping, HU Hong-qing, et al. Nutrients teaching from a soil column applied different amount of animal excrement compost[J]. *Environment Chemistry*, 2007, 26(6):774-778.