

鸭粪和猪粪中易溶性磷含量特征研究

罗春燕, 冀宏杰, 张维理, 徐爱国

(中国农科院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养学重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 有机肥易溶性磷与施入有机肥土壤的水溶性磷流失有很好的相关性, 是评价施入有机肥土壤磷素流失潜力的一个重要指标。本文以鸭粪和猪粪为研究对象, 根据有机肥磷在 H_2O 和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 溶液中的相对溶解性来研究有机肥中易溶性磷的形态及其分布特征。采用两种提取方法: (1) 独立提取, 风干过筛的有机肥分别用 H_2O 和 NaHCO_3 溶液提取。(2) 连续提取, 有机肥逐级连续用 H_2O 和 NaHCO_3 溶液提取。研究表明, 16 个有机肥全磷含量的变化范围是 $4.06 \sim 35.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在独立提取步骤中, 水提取溶液中, 鸭粪溶解性总磷(P_i) ($0.64 \sim 3.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 占有机肥总磷(TP)的 5%~19%, 平均为 13%, 猪粪 P_i ($2.60 \sim 5.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 占 TP 的 8%~24%, 平均为 19%; NaHCO_3 提取出的溶液中, 鸭粪 P_i ($1.14 \sim 4.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 占 TP 的 8%~32%, 平均为 20%, 猪粪 P_i ($4.71 \sim 14.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 占 TP 的 21%~71%, 平均为 44%。连续提取中, H_2O 和 NaHCO_3 分别提取鸭粪总磷的 5%~19% 和 3%~23%; 分别提取猪粪总磷的 8%~24% 和 11%~37%。在提取过程中, 猪粪中提取出的无机磷和总磷含量均显著高于鸭粪。无论鸭粪还是猪粪, 在各提取溶液的磷素均以无机磷为主, 占溶解性总磷的 77%~99% 左右。连续提取条件下测得的易溶性磷含量与独立提取条件下测得结果有很好的相关性 ($P < 0.01$)。

关键词: 鸭粪; 猪粪; 易溶性磷

中图分类号: X501 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)04-1320-06

Readily Soluble Phosphorus Characterization in Duck and Swine Manures

LUO Chun-yan, JI Hong-jie, ZHANG Wei-li, XU Ai-guo

(Agricultural Resource and regional Planning Institute, CAAS; Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, MON, Beijing 100081, China)

Abstract: There are good correlations between readily soluble phosphorus in applied manure and dissolved P in runoff. Therefore, readily soluble phosphorus can be seen as a key indicator of the potential for applied manure to supply dissolved P to runoff. In this study, the readily soluble phosphorus of duck and swine manure were analyzed according to their relatively dissolvability in distilled water and $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$. Two extraction procedures were tested: (1) independent, with dried, ground samples being extracted and P measured for each extraction; and (2) sequential, with each sample being repeatedly extracted by H_2O , NaHCO_3 , in that order. Results showed that among the 16 manures, total P varied between 4.06 and $35.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. For the independent procedure, in the H_2O fraction, dissolved total P (P_i) accounting for 5% to 19% of duck manure total P ($0.64 \sim 3.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and 8% to 24% of swine manure total P ($2.60 \sim 5.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). In the NaHCO_3 fraction, P_i accounting for 8% to 32% of duck manure total P ($1.14 \sim 4.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and 21% to 71% of swine manure total P ($4.71 \sim 14.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Sequentially, H_2O , NaHCO_3 extracted 5%~19% and 3%~23% of the total P in duck sample, respectively, while 8%~24% and 11%~37% of the total P in swine sample, respectively. For each extractant, P_i and P_i in swine manure were higher than that of duck significantly and P_i was the major form (77%~99% of P_i) in extractant. Duck and swine manure readily soluble P in sequential extraction was significantly related with that in independent extraction ($P < 0.01$).

Keyword: duck manure; swine manure; readily soluble phosphorus

收稿日期: 2008-01-18

基金项目: 国家科技部 973 资助项目 2002CB410800; 国家“863”计划 (2006AA10Z270); 国家科技支撑计划 2006BAD05B03; 公益性科研院所基本科研业务费专项; 科研院所社会公益研究专项 (2004DIB3J093)

作者简介: 罗春燕 (1980—), 女, 四川南充人, 博士研究生, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: ley407@tom.com

通讯作者: 冀宏杰 E-mail: hjji@caas.ac.cn

畜禽有机肥一直是作物生产的重要磷肥来源之一,然而普遍存在的有机肥表施和用量过多会造成非点源污染,加剧地表水体富营养化^[1]。有机肥中不同的磷形态,具有不同的溶解性。当遇到降水,一些形态的磷更容易溶解和提取。因此,了解有机肥磷形态特征是更好理解有机肥磷动态非常重要的一步,有利于提高我们对有机肥的管理能力,从而减少水污染^[2]。

近年来,有许多研究者采用 Hedly^[3]用来测定土壤磷形态的连续提取法来研究有机肥的磷形态,并对提取步骤进行了改进^[2,4-6]。这种方法,将有机肥磷分为水溶态磷或树脂态磷、NaHCO₃ 提取态磷、NaOH 提取态磷、HCl 提取态磷、H₂SO₄ 提取态磷和残渣态磷。其中水溶态和 NaHCO₃ 提取态磷是易溶态磷^[2],为有机肥磷的主要形态^[2,5],同时说明有机肥磷的结合能较弱,当遇到降雨径流时,易流失进入地表水体。有机肥易溶性磷与施入有机肥土壤的水溶性磷流失有很好的相关性,是评价施用有机肥土壤磷素流失潜力的一个重要指标^[7]。

我国对有机肥磷素的研究通常是从农业生产的角度,测有机肥的总磷含量或生物有效磷含量,而很少从环境的角度,来研究有机肥中易流失的磷形态。因此本研究参考 Dou^[2]的有机肥磷形态测定步骤中的前两步,即 H₂O 和 NaHCO₃ 提取磷,在提取方法上分为独立提取和连续提取,对鸭粪和猪粪的易溶性磷形态进行了研究,为建立施入有机肥的土壤易溶性磷流失模型提供必要的参数。

1 材料与方法

1.1 供试有机肥

2006 年 3 月,在嘉兴收集 16 个有机肥样品,其基本性质见表 1。鸭粪 8 个,其中 4、5 号两个样取自农户散养的露天养鸭处,样品中含有泥,由于鸭场中的鸭粪和泥混在一起,所取鸭粪不是当天鸭所排泄的,故将这种鸭粪称为半鲜样,色为褐色。7 号样取自规模养殖场,是从鸭舍地面铺的稻草中取得,也称为半鲜样,色为褐色。其他鸭粪是取自规模养殖场的鸭舍中,从稻草的表面取得的鸭当天排泄的粪便,色为浅黄色。猪粪 8 个,其中 9、16 号样取自农户家中,其他 6 个猪粪均取自双桥村的两个规模化养猪场。有机肥样品室内自然风干,过 0.5 mm 筛,备用。

1.2 试验方法

有机肥磷形态测定的步骤参考 Dou Z^[2]方法。由于水提取态磷和碳酸氢钠提取态磷是有机肥磷素的主要形态,同时也是有机肥中最易流失的易溶解态磷,故本研究只进行了 Dou Z^[2]磷形态测定步骤中的前两步,即 H₂O 和 NaHCO₃ 提取磷。在提取步骤上也分为独立提取和连续提取。

连续提取:称取 0.3 g 有机肥,用 30 mL 蒸馏水、30 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 逐级连续提取。

独立提取:称取 0.3 g 有机肥两份,分别用 30 mL 蒸馏水、30 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 提取。

样品在振荡速度为 250 r·min⁻¹ 条件下浸提 1 h,

表 1 16 个有机肥的基本性质

Table 1 Selected properties of the sixteen manures used in the experiments

序号 ID	种类 Type	处理 Treatment	规模 Scale	来源 source and description	TP/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	TN/TP
1	鸭粪	鲜样	集约化	养鸭场取得,肉鸭	19.09	23.37	1.22
2	鸭粪	鲜样	集约化	养鸭场取得,开产蛋鸭	26.08	40.06	1.54
3	鸭粪	鲜样	集约化	养鸭场取得,未开产蛋鸭	35.08	35.13	1.00
4	鸭粪	半鲜样	散养	农户散养的露天养鸭处取得,含有泥	4.06	10.52	2.59
5	鸭粪	半鲜样	散养	农户散养的露天养鸭处取得,含有泥	7.48	19.37	2.59
6	鸭粪	鲜样	集约化	养鸭场取得,蛋鸭	15.58	29.17	1.87
7	鸭粪	半鲜样	集约化	养鸭场取得,蛋鸭+可能有稻草	18.90	26.34	1.39
8	鸭粪	鲜样	集约化	养鸭场取得,开产蛋鸭	17.39	30.63	1.76
9	猪粪	鲜样	集约化	从农户猪舍中取得的鲜猪粪	18.85	25.33	1.34
10	猪粪	鲜样	集约化	双桥农场 2 猪舍内取得,黑种猪	21.27	27.43	1.29
11	猪粪	鲜样	集约化	双桥农场 2 猪舍内取得,精肉种猪	23.11	28.74	1.24
12	猪粪	腐熟	集约化	双桥农场 2 猪粪干湿分离池腐熟猪粪,表层	22.74	25.18	1.11
13	猪粪	腐熟	集约化	双桥农场 2 猪粪干湿分离池腐熟猪粪,亚表层	24.19	34.26	1.42
14	猪粪	鲜样	集约化	双桥农场 1 猪舍内取得,肉猪	22.46	41.15	1.83
15	猪粪	腐熟	集约化	双桥农场 1 粪池中,亚表层,流质厩肥	33.76	38.54	1.14
16	猪粪	半鲜样	散养	农户猪场的猪粪	17.34	17.99	1.04

然后离心(转速 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 3 min, 用孔径为 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜过滤。采用钼蓝比色法直接测定滤液中的无机磷(P_i), 用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定滤液中的总磷(P_t)。每个样 3 次重复。有机肥的全磷(TP)采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-钼蓝比色法测定, 全氮(TN)采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ -靛酚蓝比色法测定。以上所测数据均以风干条件下的干物质重为基准表达。

数据均采用 SAS 软件和 Excel 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 有机肥总磷、总氮含量

16 个供试有机肥基本性质差异较大(表 1), 全磷含量的变化范围是 $4.06\sim 35.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $20.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 标准差 $7.92\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 鸭粪全磷含量的变化范围是 $4.06\sim 35.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $17.96\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 标准差 $9.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 猪粪全磷含量的变化范围是 $17.34\sim 33.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $22.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 标准差 $4.93\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。鸭粪的变化范围和标准差均大于猪粪, 这与取两个农户散养鸭粪含泥, 养分含量相对较低有关。猪粪的全磷含量高于鸭粪, 但差异不显著。

16 个有机肥全氮含量的变化范围是 $10.52\sim 41.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $28.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 标准差 $8.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 鸭粪全氮含量的变化范围是 $10.52\sim 40.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $26.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 标准差 $9.24\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 猪粪全氮含量的变化范围是 $17.99\sim 41.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $29.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 标准差 $7.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。鸭粪的变化范围和标准差均大于猪粪。猪粪的全氮含量高于鸭粪, 但差异不显著。

16 个有机肥 TN/TP 比值变化在 $1.00\sim 2.59$ 之间, 平均 1.52 , 标准差 0.49 。鸭粪和猪粪 TN/TP 比平均值分别为 1.75 和 1.30 , 猪粪高于鸭粪, 但差异不显著。植物吸收养分的氮磷比为 $6:1$, 如果有机肥施用量按照植物需氮量来计算, 则会造成磷素过量, 土壤磷素累积, 磷流失的风险增大。

16 个有机肥 TN 和 TP 含量以及 TN/TP 比值差异和变化范围均较大, 而且就在同一有机肥类型中, 这些参数的差异和变化范围也较大。这是多种因素作用的结果, 如饲料配方、畜禽种类和品种、养殖场规模、有机肥的存储时间和条件、垫料使用等都会对有机肥的氮磷水平产生影响。Sharpley^[5]对经两年收集来的 24 个母鸡粪和 24 个猪粪的研究表明, 鸡粪的 TP 含量在 $19.5\sim 36.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均 $27.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 标准差 $4.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 猪粪的 TP 含量在 $23.0\sim 39.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之

间, 平均 $32.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 标准差 $1.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其鸡粪和猪粪 TP 平均含量分别高于本研究的鸭粪和猪粪的含量, 这可能与饲料氮磷含量有关。而标准差小于本研究的结果, 原因可能是 Sharpley 的样本取自一个养殖场, 减少了饲养措施导致的差异。

2.2 有机肥易溶性磷形态分布特征

连续提取条件下鸭粪和猪粪的磷释放特征如表 2 所示。鸭粪有机肥水溶性、水提取残渣 NaHCO_3 提取、 NaHCO_3 独立提取液中, P_i 含量范围分别是 $0.61\sim 3.36$ 、 $0.46\sim 2.05$ 、 $1.03\sim 4.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 1.88 、 1.31 、 $2.89\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; P_i 平均值分别为 2.05 、 1.44 、 $3.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别占鸭粪 TP 的 13% 、 10% 、 20% 。猪粪有机肥水溶性、水提取残渣 NaHCO_3 提取、 NaHCO_3 独立提取的 P_i 含量范围分别是 $2.56\sim 5.28$ 、 $2.52\sim 8.50$ 、 $4.71\sim 14.84\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均分别为 4.04 、 5.77 、 $9.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 P_i 平均值分别为 4.17 、 5.89 、 $9.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别占猪粪 TP 的 19% 、 26% 、 44% 。猪粪和鸭粪在各提取液中的无机磷均是溶解性总磷的主要形态, P_i 占 P_t 的 $77\%\sim 99\%$ 。

2.3 猪粪和鸭粪易溶性磷形态分布特征的差异

猪粪和鸭粪间易溶性磷含量的差异如表 2 所示。猪粪在各种提取步骤的提取溶液中无机磷含量均显著高于鸭粪($P<0.01$)。猪粪水提取态无机磷、水提取残渣 NaHCO_3 提取态无机磷、 NaHCO_3 独立提取态无机磷分别是鸭粪的 2.1 倍、 4.4 倍、 3.1 倍。猪粪和鸭粪水提取态有机磷和水提取残渣 NaHCO_3 提取液中有有机磷含量差异不显著, 而 NaHCO_3 独立提取液中, 二者有机磷含量差异显著($P<0.01$), 猪粪是鸭粪的 2.6 倍。猪粪在各种提取步骤中的提取溶液中总磷含量均显著高于鸭粪($P<0.01$)。猪粪在水提取、水提取残渣 NaHCO_3 提取、 NaHCO_3 独立提取液的总磷含量分别是鸭粪的 2.1 倍、 3.1 倍、 4.1 倍。

从表 2 还可看出, 猪粪的水提取和水提取残渣 NaHCO_3 提取溶液中的 P_i/P_t 显著高于鸭粪 ($P<0.05$), 均是鸭粪的 1.1 倍。猪粪和鸭粪在 NaHCO_3 独立提取溶液中的有机磷含量差异不显著。猪粪在水提取、水提取残渣 NaHCO_3 提取、 NaHCO_3 直接提取溶液中总磷与有机肥总磷比值(P_t/TP)均显著高于鸭粪($P<0.05$), 分别是鸭粪的 1.5 倍、 2.5 倍、 2.2 倍。

2.4 连续提取和独立提取两种方法的比较

将连续提取法步骤中水提取液和水提取残渣 NaHCO_3 提取液中的无机磷、有机磷、总磷之和分别称为连续提取法的溶解无机磷、溶解有机磷和溶解总磷含量。连续提取法和 NaHCO_3 独立提取法所测得的

表 2 连续提取和独立提取条件下鸭粪和猪粪的磷释放特征

Table 2 P release through sequential extraction and independent extraction procedures of duck and swine manure

提取剂/参数 Extractant/Parameter	$P_i / g \cdot kg^{-1}$		$P_i / g \cdot kg^{-1}$		P_i / P_t		P_i / TP	
	鸭粪	猪粪	鸭粪	猪粪	鸭粪	猪粪	鸭粪	猪粪
水提取								
平均值	1.88a	4.04b	2.05a	4.17b	0.9a	0.97b	0.13a	0.19b
标准差	1.11	1.07	1.11	1.1	0.08	0.02	0.04	0.06
最小值	0.61	2.56	0.64	2.6	0.77	0.95	0.05	0.08
最大值	3.36	5.28	3.51	5.35	0.98	0.99	0.19	0.24
水提取残渣 $NaHCO_3$ 提取								
平均值	1.31a	5.77b	1.44a	5.89b	0.89a	0.98b	0.10a	0.26b
标准差	0.58	2.20	0.46	2.52	0.07	0.01	0.07	0.09
最小值	0.46	2.52	2.05	8.50	0.79	0.95	0.03	0.11
最大值	2.05	8.5	0.57	2.23	0.96	0.99	0.23	0.37
$NaHCO_3$ 独立提取								
平均值	2.89a	9.01b	3.15a	9.71b	0.91a	0.93a	0.20a	0.44b
标准差	1.32	2.90	1.39	3.13	0.03	0.04	0.08	0.15
最小值	1.03	4.71	1.14	4.94	0.87	0.83	0.08	0.21
最大值	4.75	14.84	4.99	15.86	0.95	0.98	0.32	0.71

注(Notes): 同行不同字母表示差异达 5% 显著水平。Different letters means significant at 5% level in the same line.

有机肥溶解无机磷和溶解总磷均有很好的相关关系 ($P < 0.01$), 如图 1 所示。连续提取法测得的有机肥溶解无机磷和溶解总磷含量略高于独立提取法测得的结果, 前者均是后者的 1.1 倍, 但差异不显著。这可能与两种方法的振荡时间和水肥比不同有关。连续提取法, 振荡提取包括了两部分, 一部分水提取, 另一部分是 $NaHCO_3$ 提取, 振荡的总时间为 2 h, 水肥比可视为 200:1。已有研究表明^[2,8], 随振荡时间和水肥比的增加, 提取的有机肥磷含量增加。独立提取法所测得有机肥有机磷含量略高于连续提取法所测的结果。

与独立提取法相比, 连续提取法能够提供有机磷

形态更加详细的信息。通过连续提取, 可以知道有机肥溶于水的磷含量和溶于 $NaHCO_3$ 而不溶于水的磷含量。如果只需要知道有机肥易溶态磷的含量, 用 $NaHCO_3$ 溶液独立提取测定就可以满足要求, 并能减少测定步骤和时间。

2.5 不同提取液中溶解性磷与总磷的相关关系

将 16 个有机肥在不同提取溶液中提取的溶解性无机磷和溶解性总磷与有机肥总磷进行相关分析, 结果表明, 均无显著的相关关系。又对猪粪和鸭粪分别进行分析, 发现猪粪在不同提取溶液中提取的溶解性无机磷和溶解性总磷与有机肥总磷的相关性也不明显,

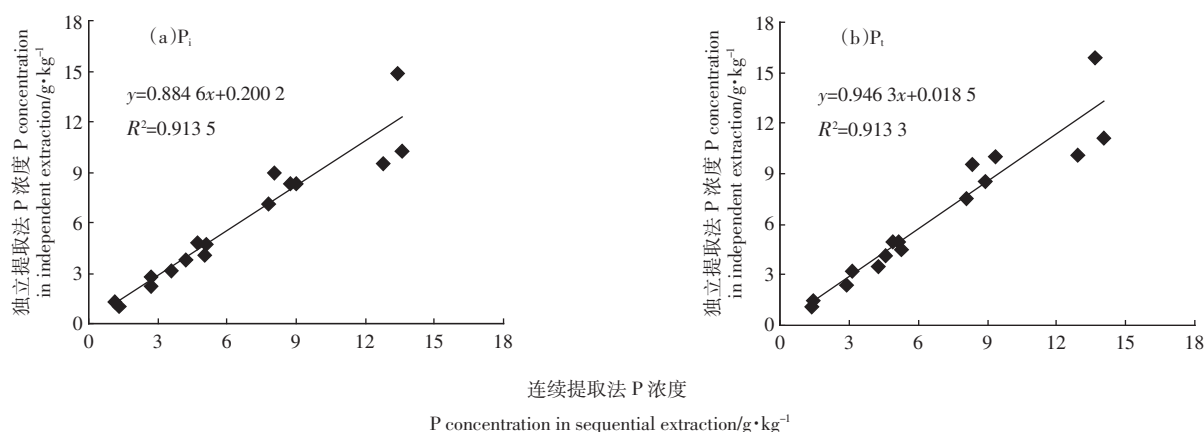
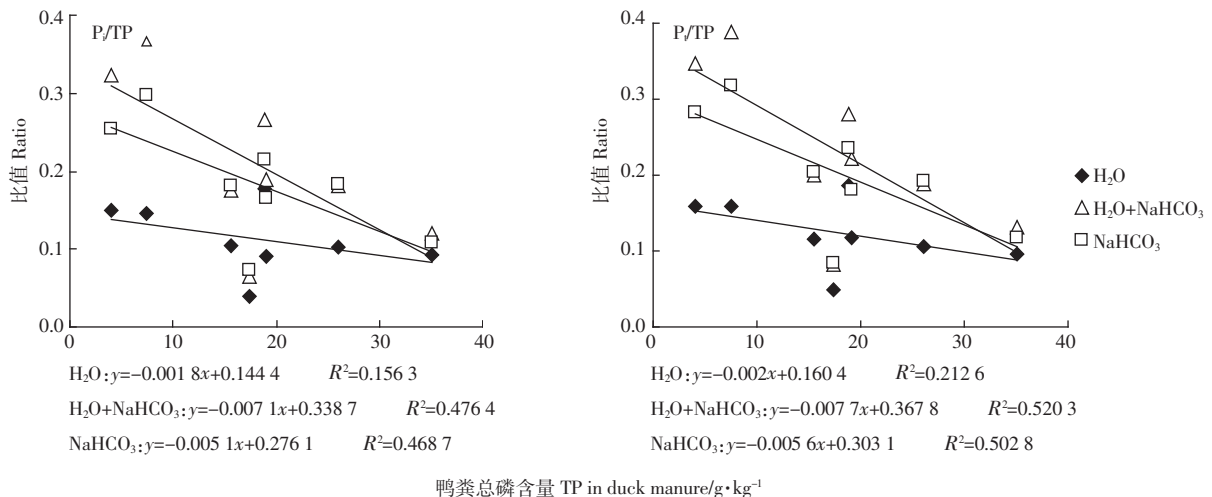
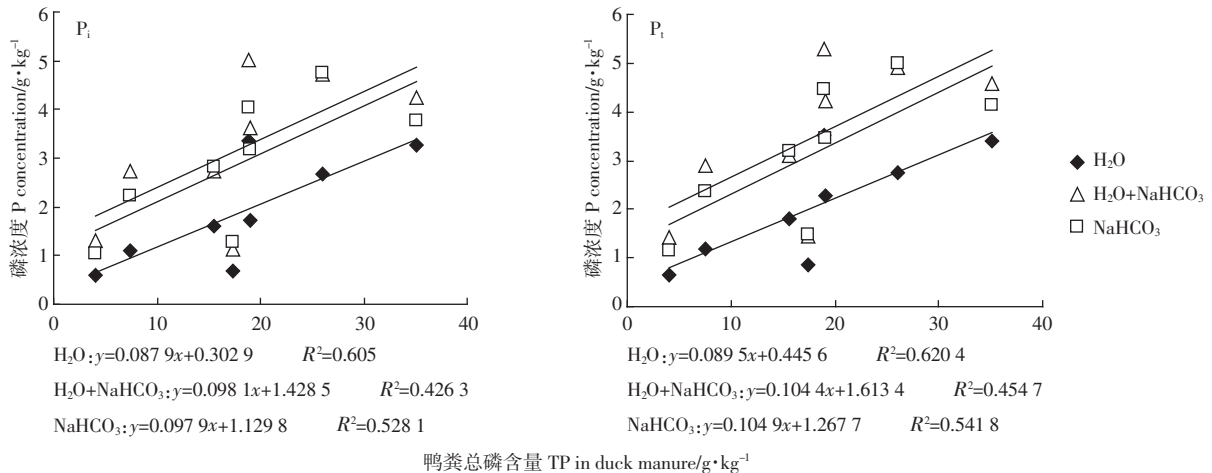


图 1 连续提取法和独立提取法条件下有机肥溶解磷的浓度

Figure 1 Manure dissolve P concentration in sequential extraction and independent extraction



而鸭粪相关性较好,如图 2 所示。鸭粪独立浸提条件下的水溶性和 NaHCO₃ 提取的无机磷和水溶性总磷与鸭粪总磷均呈显著正相关($P<0.05$),而连续提取法测定的溶解性无机磷和溶解总磷与鸭粪总磷呈正相关关系,但未达显著水平。线形回归方程的斜率表示有机肥总磷含量每增加 1 个单位,有机肥水溶性无机磷和水溶性总磷分别增加 0.0879 和 0.0895 个单位,鸭粪易溶性磷含量随有机肥总磷含量的增加而增加。

鸭粪在水、水+NaHCO₃ 连续提取和 NaHCO₃ 独立提取的有机肥溶解磷与有机肥总磷的比值与总磷的关系如图 3 所示。在这 3 种提取条件下,有机肥溶解性无机磷或溶解性总磷与有机肥总磷的比值与总磷均呈线性负相关,表明这 8 个鸭粪总磷含量越低,总

磷中溶解磷的比重越大。

3 讨论

本研究结果表明,鸭粪和猪粪易溶性磷占有机肥总磷较高的比例,鸭粪水溶性总磷和 NaHCO₃ 溶解性总磷分别平均占有机肥总磷的 13% 和 20%,猪粪分别为 19% 和 44%。这部分易溶性磷如果遇到降水,易发生流失,因此施用畜禽有机肥时,在施用方法上,应混施,不应表施,避免降水对有机肥的直接冲刷并减少有机肥磷溶于水而流失的机会。周翠^[9]的研究结果表明,径流中磷浓度为表施粪肥处理>混施处理,控制地表径流磷流失的效果是粪肥与土混施优于表施。

猪粪在各提取步骤中提取出的无机磷和总磷含

量均显著高于鸭粪,因此猪粪的磷素流失风险高于鸭粪,在降雨频繁的南方,更要注意猪粪的施用方法。

国外的研究表明,有机肥易溶性磷与施入有机肥土壤的水溶性磷流失有很好的相关性,是评价施入有机肥土壤磷素流失潜力的一个重要指标。Sharpley^[5]对施入有机肥的土柱进行模拟降雨试验,研究表明磷的淋溶损失与有机肥的水溶性磷呈线性相关关系。我国对有机肥磷素的研究通常是从农业生产的角度,测有机肥的总磷含量或生物有效磷含量,而很少从环境的角度,来研究有机肥中易流失的磷形态。因此需开展不同畜禽有机肥磷的形态分布及含量,特别是易溶性磷含量研究。主要研究畜禽饲料因素(如饲料结构、饲料中磷的含量、饲料中的添加剂等)和畜禽有机肥的处理措施(如有机肥固液分离处理、垫料种类、添加硫酸铝等化学处理、发酵等生物处理等)对不同形态磷含量影响,此研究将有助于评价有机肥磷流失风险,还能为畜禽饲料结构的改善、有机肥磷的分类管理和施用提供指导。

有机肥的易溶性磷水平的高低只能反映其磷素的流失潜力,而施入有机肥的土壤磷素的流失不仅与有机肥磷素的溶解性有关,还与土壤类型、磷素水平、质地,降雨强度、历时、雨量,有机肥施入的方式和时间等因素有关,如果要建立有机肥的磷素流失模型,还需进一步深入研究这些影响因子与磷素流失的关系。

4 结 论

16 个有机肥全磷含量的变化范围是 4.06~35.08 g·kg⁻¹。猪粪和鸭粪易溶性磷占有机肥总磷较高比例。在独立提取步骤中,水提取溶液中,鸭粪和猪粪溶解性总磷(P_i)平均占有机肥总磷(TP)的 13%和 19%;NaHCO₃ 提取溶液中,鸭粪和猪粪 P_i 分别平均占 TP 的 20%和 44%。连续提取中,水和 NaHCO₃ 分别提取

鸭粪总磷的 13%、10%;提取猪粪总磷的 19%、26%。猪粪在各提取步骤中提取出的无机磷和总磷含量均显著高于鸭粪。无论鸭粪还是猪粪,在各提取溶液的磷素均以无机磷为主,占溶解总磷的 77%~99%左右。连续提取条件下测得的易溶性磷含量与独立提取条件下测得结果呈显著相关。

参考文献:

- [1] Gurpal S T, Stefan H, Peak J D. Advances in the characterization of phosphorus in organic wastes; environmental and agronomic applications[J]. *Advances in Agronomy*, 2006, 89: 1-72.
- [2] Dou Z, Toth J D, Galligan D T. Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus[J]. *Environ Qual*, 2000, 29: 508-514.
- [3] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fraction induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, 46: 970-976.
- [4] Leinweber P, Haumaier L, Zech W. Sequential extractions and ³¹P-NMR spectroscopy of phosphorus forms in animal manures, whole soils and particle-size separates from a densely populated livestock area in northwest Germany[J]. *Biol Fertil Soils*, 1997, 25: 89-94.
- [5] Sharpley A N, Moyer B. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall[J]. *Environ Qual*, 2000, 29: 1462-1469.
- [6] He Z, Honeycutt C W. Enzymatic characterization of organic phosphorus in animal manure[J]. *Environ Qual*, 2001, 30: 1685-1692.
- [7] Kleinman P J A, Sharpley B G, Wolf A M. Developing an environmental manure test for the phosphorus index[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37(15-20): 2137-2155.
- [8] Kleinman P J A, Sharpley A N, Wolf A M. Measuring water-extractable phosphorus in manure as indicator of phosphorus [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66: 2009-2015.
- [9] 周 翠, 章明奎, 方利平. 粪肥对不同磷水平土壤磷流失潜力的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 706-709.
ZHOU Cui, ZHANG Ming-kui, FANG Li-ping. Effects of organic manure application on P runoff from soils with different P levels[J]. *Soil Science*, 2006, 37(4): 706-709.