

动物粪液中可溶性磷在土壤中的吸附和迁移特性研究

章明奎, 郑顺安, 王丽平

(浙江大学环境与资源学院资源科学系, 浙江杭州 310029)

摘要: 农田土壤施用动物粪肥引入了大量的可溶性有机物、有机磷和无机磷, 了解这些可溶性物质在土壤中的相对移动性及它们之间的相互作用有助于指导农田养分管理。本研究从粪液中分离获得含水溶性无机磷、有机磷和有机物(碳)的溶液, 选择了具不同质地和有机质含量的4个土壤(含高量有机质的黄筋泥、含低量有机质的黄筋泥、淡涂泥和清水沙), 应用等温吸附和土柱模拟淋洗方法研究了可溶性有机碳、无机磷和有机磷共存条件下, 粪液中可溶性有机态磷和无机态磷在土壤中的吸附和迁移特性。吸附试验表明, 可溶性有机物(碳)的存在大大降低了土壤对有机态磷和无机态磷的吸附, 表明施用液态有机肥比施用化肥具有更大的磷流失风险。供试土壤对无机态磷的吸附强度高于有机态磷, 但对二者的吸附量大小为: 黄筋泥 > 淡涂泥 > 清水沙; 并与粘粒含量、氧化铁含量呈正相关。有机质较高的土壤对有机磷的吸附明显低于有机质低的土壤。淋洗试验表明, 在供试土壤中, 这3种可溶性物质在土壤中吸持(包括生物吸持)的顺序为: 可溶性无机磷 > 可溶性有机碳 > 可溶性有机磷, 有机态磷比无机态磷更易在土壤中迁移。

关键词: 动物粪液; 可溶性有机质; 可溶性无机磷; 可溶性有机磷; 吸附; 迁移

中图分类号: S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2008)01-0099-07

Adsorption and transport characteristics of liquid animal manure-derived dissolved phosphorus in four soils

ZHANG Ming-kui, ZHENG Shun-an, WANG Li-ping

(Department of Natural Resource Science, College of Natural Resource and Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: High concentrations of dissolved organic matter (OM), dissolved organic phosphorus (P) and inorganic P can be input into agricultural soils in the form of applied animal manure. Understanding the relative mobility and interactions of those dissolved matter in the soils is necessary to manage P in agricultural system. In this study, solution containing dissolved OM, dissolved organic P and inorganic P was separated from an liquid animal manure, four soils (two samples of quaternary red clay, one sample of desalted muddy polder soil, and one sample of fluvio-sand ridge soil) with different texture and OM were collected. The isotherm adsorption and leaching experiments were carried out to study the adsorption and transport characteristics of the liquid animal manure-derived dissolved inorganic and organic P in the soils under the co-existence of dissolved OM, dissolved organic P and inorganic P. The adsorption experiment showed that the existence of dissolved OM in high concentration decreased the soil capacity to adsorb inorganic and organic P, suggesting that application of liquid animal manure posed a greater risk of P losses from the soils than application of chemical fertilizers. The adsorption capacity of the soils to adsorb inorganic P was larger than that to organic P. However, the adsorption capacities of the soils to adsorb either inorganic P or organic P decreased in the order of quaternary red clay > desalted muddy polder soil > fluvio-sand ridge soil, and were related to contents of clay and iron oxides. The soil with a high content of OM had lower capacity to adsorb organic P than the soil with low content of OM. Leaching experiment showed that preferential adsorption sequence of the three dissolved matter in the soils was dissolved inorganic P > dissolved organic carbon > dissolved organic P, organic P had higher mobility than inorganic P in the soils.

收稿日期: 2006-12-20

接受日期: 2007-03-28

基金项目: 浙江省科技计划项目(2004C33061)资助。

作者简介: 章明奎(1964—)男, 博士, 教授, 从事土壤与环境方面的研究。Tel: 0571-86946076, E-mail: mkzhang@zju.edu.cn

Key words : liquid animal manure ; dissolved organic matter ; dissolved inorganic phosphorus ; dissolved organic phosphorus ; adsorption ; transport

农田养分流失使地表水体中氮、磷浓度增加,促进水体富营养化已引起人们广泛的关注^[1-2]。从地表流失的可溶性磷除无机态磷外,还有有机态磷,它们的相对比例可因土壤类型、施肥方式和管理措施等的不同有较大的变化^[3-6]。长期施用有机肥或灌溉粪液的土壤流失的磷中有较高比例的有机态磷^[7]。有机肥或粪液中同时包含大量的无机态磷、有机态磷和可溶性有机碳,它们主要以阴离子形式存在;当有机肥或粪液施入土壤后,土壤对这些阴离子的吸附可发生竞争作用。由于阴离子在土壤中的可溶性和移动性与它们同土壤的作用程度有关,因此,土壤对不同阴离子吸附作用的差异会直接影响它们在土壤中的迁移行为^[8-9]。长期以来,人们对无机磷与土壤之间的作用已进行了较为深入的研究。近年来,有关土壤对有机磷的吸附、无机磷与有机磷及可溶性有机碳之间的竞争吸附也引起了关注^[10-14]。研究发现,小分子量有机酸、可溶性有机质和有机磷的存在可影响土壤无机磷的吸附,但影响程度因有机酸种类、浓度和土壤条件的不同有较大的变化^[10,12,14]。有机酸对土壤磷吸附的影响因有机酸类型不同有较大的差异,对土壤磷吸附量表现为三元酸 > 二元酸 > 一元酸^[14]。有机磷与无机磷的竞争吸附因有机磷种类不同有较大的差异,土壤对正磷酸的吸附作用高于脱氧核糖核酸(DNA)^[13],但低于三磷酸腺苷(ATP)和六磷酸肌醇等有机磷^[15]。

目前对有机物与磷之间或无机磷与有机磷之间在土壤中的竞争吸附研究主要选用了单一的纯化合物(有机酸或有机磷)作为研究材料,但这些物质在

土壤中不少浓度很低或不存在。而粪肥是农业土壤中可溶性有机物的主要来源,当土壤施用有机肥或粪液时,土壤中局部区域的可溶性有机物浓度可以达到较高的水平。由施用粪肥/粪液引入土壤中的可溶性有机碳与磷之间的浓度常可相差 2~3 个数量级,并且土壤中磷和有机的浓度具有同步变化的特性(即当粪液中磷浓度较高时,可溶性有机物的浓度也常较高),这与一般的研究条件有所不同。进入土壤中的磷既可被土壤吸附而固定,也可从土壤中淋溶损失,二者之间存在着密切关系。土壤对磷的固定作用越强,磷从土壤中淋溶损失的可能性越小;反之,磷不易被土壤固定,容易发生迁移,从土壤中淋失。本研究从粪液中分离含水溶性无机磷、有机磷和有机的溶液,选择了含高有机质的黄筋泥、含低有机质的黄筋泥、淡涂泥和清水沙 4 个代表性土壤,应用等温吸附和土柱模拟淋洗方法研究了在可溶性无机磷、有机磷和有机碳共存条件下,有机态磷和无机态磷在土壤中的吸附和迁移特性。以期对农田养分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤共 4 个,均为耕层土样,土壤类型包括黄筋泥、淡涂泥和清水沙等 3 个土属。不同土壤类型之间粘粒含量、氧化铁含量和有机质含量有较大的差异;而黄筋泥 1 与黄筋泥 2 的主要区别是前者有机质含量明显低于后者,其它性质相似。供试土壤基本性质见表 1。

表 1 供试土壤及基本性质

Table 1 Basic properties of the tested soils

土号 Soil No.	土壤 Soil		采样地点 Location	pH	粘粒 Clay (< 0.002 mm)	有机质 OM (g/kg)	游离铁 Free Fe	全磷 Total P	Olsen-P (mg/kg)
	亚类 Sub-group	土属 Soil genus							
S1	红壤	黄筋泥 1	衢州	5.5	393	8.3	28.2	0.43	4.4
	Red soil	Quaternary red clay 1	Quzhou						
S2	红壤	黄筋泥 2	衢州	5.6	381	23.4	29.6	0.46	7.3
	Red soil	Quaternary red clay 2	Quzhou						
S3	灰潮土	淡涂泥	杭州	7.3	137	17.3	15.8	0.53	11.4
	Fluvio-aquic soil	Desalted muddy polder soil	Hangzhou						
S4	灰潮土	清水沙	富阳	6.3	46	11.7	7.4	0.23	6.8
	Fluvio-aquic soil	Fluvio-sand ridge soil	Fuyang						

1.2 粪液中可溶性物质的分离

粪液样取自某一规模化养殖场,样品带回实验室冷藏(1~4℃)备用。可溶性物质的分离方法如下:取适量的粪液样在大容量离心机中离心进行固液分离,上清液先用定量滤纸过滤,然后过 0.45 μm 的滤膜,滤出液在 4℃ 下低温保存。经测定,备用液中可溶性有机碳(DOC)浓度为 1467 mg/L,可溶性有机磷(DOP)浓度为 15.8 mg/L,无机磷(DIP)浓度为 43.5 mg/L,电导率为 1.43 mS/cm;溶液中金属阳离子主要为 Ca 和 Na,Ca:Na 比例约为 1:2.5,无机阴离子主要为 Cl。而未经离心和过滤的原始粪液样中总磷含量为 736 mg/L,说明粪液中磷主要以颗粒态存在。

吸附试验前,用与以上分离获得的粪液样相同电导率(1.43 mS/cm)的 CaCl₂-NaCl 混合溶液(CaCl₂和 NaCl 分子比为 1:2.5)稀释以上分离液,配制成可溶性有机碳(DOC)浓度分别为 0、146.7、293.4、366.8、490.0 和 1467 mg/L,有机磷(DOP)浓度分别为 0、1.58、3.16、3.95、5.27、10.53 和 15.80 mg/L,和无机磷(DIP)浓度分别为 0、4.35、8.70、10.88、14.50、29.00 和 43.50 mg/L 的 7 个不同浓度梯度的系列溶液。

1.3 等温吸附试验

磷等温吸附试验分为二组,第一组的磷源为以上由粪液配制的系列溶液;第二组的磷源为用 KH₂PO₄ 配置的溶液。吸附试验方法如下:

第一组试验:每类土壤各称取 5 g 共 7 份于 100 mL 的离心管中,分别加入以上 7 个含 DOC、DOP 和 DIP 不同浓度梯度的溶液 50 mL,同时加入 3 滴氯仿,以抑制微生物的活动。在 25℃ 下间歇振荡 48 h,过滤后分别测定平衡溶液中 DOP 和 DIP 的浓度,并分别根据试验前后 DOP 和 DIP 浓度的变化,计算土壤对 DOP 和 DIP 的吸附量。

第二组试验:每类土壤各称取 5 g 共 7 份于 100 mL 的离心管中,分别加入含 P 量各为 0、5、10、15、30、60 和 100 mg/L 的 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液(P 用 KH₂PO₄ 配制)50 mL,同时加入 3 滴氯仿,以抑制微生物的活动。在 25℃ 下间歇振荡 48 h,过滤后用钼兰比色法测定平衡溶液中磷的浓度,根据试验前后磷浓度的变化,计算土壤对 P 的吸附量。

1.4 淋洗试验

淋洗试验在直径为 5 cm,高为 15 cm 的玻璃淋洗管中进行。每一淋洗管装入 10 cm 高的土壤,容重为 1.30 g/cm³(接近田间状况),每一淋洗管中装

土量约 255 g,2 次重复。采用分离的粪液用去离子水(pH 7)稀释 5 倍后配制的溶液进行模拟连续淋洗(淋洗液中 DOC、DOP 和 DIP 浓度分别为 293.4、3.16 和 8.70 mg/L)。为了防止微生物的影响,淋洗液中含 10 mmol/L NaN₃。淋洗试验开始时,把淋洗管下端浸于一盛去离子水的培养皿上,使水分通过毛细管进入土壤并接近饱和,然后悬放在室温下培养 2 d。采用连续淋洗的方法,持续淋洗液由一加液器自动从淋洗管上端加入,加入速度控制在 0.5 mL/min 左右;每一土柱淋洗液总用量约 750 mL,时间约为 24 h。淋洗时淋洗管放置 500 mL 高型烧杯,收集淋出液,每 50 mL 取样一次,每个土柱各收集 15 个(次)样品。淋出液过 0.45 μm 的滤膜后,分别测定 DOC、DOP 和 DIP 浓度。

可溶性有机碳(DOC)用可溶性碳分析仪(Shimadzu TOC Analyzer)测定;DIP 用钼兰比色法直接测定,溶液样经过硫酸钾消化后用钼兰比色法测定总磷,总磷与 DIP 的差值为 DOP^[12]。土壤 pH 值、有机质、粘粒、氧化铁含量、全磷和速效磷用常规方法测定^[16]。

2 结果与讨论

2.1 土壤对磷的吸附

图 1 表明,用化学试剂为磷源的传统方法获得的土壤对磷的等温吸附曲线中,土壤对磷的吸附量随平衡溶液中磷浓度的增加而持续增加。当平衡溶液中磷浓度较低时,土壤对磷的吸附随平衡溶液磷浓度的提高呈明显的增加;但当平衡溶液中磷浓度较高时,土壤对磷的吸附量随平衡溶液中磷浓度增加的变化幅度相对较小,吸附趋向平缓。用粪液作为磷源时,无机磷(DIP)或有机磷(DOP)的吸附量随平衡液中无机磷(或有机磷)浓度的变化与用纯化学试剂为磷源的磷吸附曲线不同。当平衡溶液中磷浓度较低时,无机磷(DIP)或有机磷(DOP)的吸附量均随平衡浓度中无机磷(或有机磷)浓度的增加而增加;当进一步增加平衡溶液中无机磷(或有机磷)浓度时,吸附量却下降。图 1 还看出,在平衡溶液磷浓度相同的条件下,用粪液作为磷源时,无机磷(DIP)和有机磷(DOP)的吸附量都明显低于用化学试剂作为磷源时土壤对磷的吸附量。这可能是以粪液作为磷源时,DOP 和 DIP 共存,二者发生了竞争吸附,因而被土壤吸附的磷量都有所降低;而且溶液中存在大量的 DOC,争夺了土壤中磷的吸附位,削弱了土壤对 DIP 和 DOP 的吸附。

从吸附曲线的变化趋势来看,当平衡液中磷浓度较低时,土壤对 DIP 和 DOP 的吸附量均随平衡溶液中磷浓度的增加而增加;但当平衡液中磷浓度较高时,无论是 DIP 还是 DOP,土壤对它们的吸附量都呈下降的

趋势,明显不同于 CP 曲线。这可能是由于当平衡溶液中 DOP 和 DIP 浓度较高时,溶液中也包含了高浓度的 DOC,抑制了土壤对 DIP 和 DOP 的吸附。

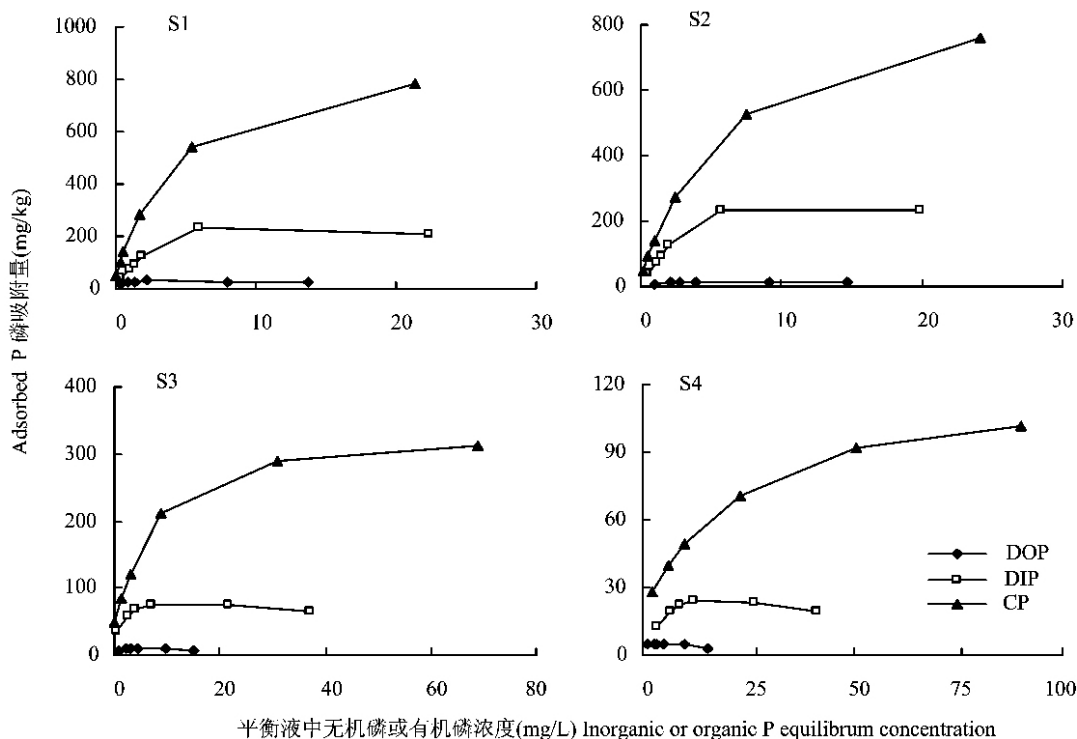


图 1 不同磷源对土壤吸附无机态磷和有机态磷的影响

Fig.1 Effects of P source on the adsorption of inorganic and organic P by the soils

(CP—以化学试剂 KH_2O_4 为磷源 Application of KH_2O_4 as P source; DOP 和 DIP 分别代表以粪液为磷源时的可溶性有机磷和无机磷 Liquid animal manure-derived dissolved organic phosphorus and inorganic phosphorus. S1, S2, S3, S4 分别为低有机质含量黄筋泥 Quaternary red clay with low OM, 高有机质含量黄筋泥 Quaternary red clay with high OM, 淡涂泥 Desalted muddy polder soil, 清水沙 Fluvio-sand ridge soil)

在相同的平衡浓度下 4 种土壤对 DOP 的吸附量均明显低于对 DIP 的吸附量(图 1)。同时,吸附平衡溶液中 DIP 与 DOP 的浓度比(DIP/DOP)也显示出土壤对 DIP 具有优先吸附(表 2)。吸附试验中,当粪液配制的磷溶液的初始 DIP/DOP 比值为 2.75,它们与土壤作用后,溶液中的 DIP/DOP 比值均呈下降趋势。平衡液中 DIP/DOP 比越低,说明土壤对 DIP 的优先吸附越明显。其中,黄筋泥对 DIP 的优先吸附比淡涂泥和清水沙明显,而淡涂泥又比清水沙明显。这一结果表明,对磷吸附能力越强的土壤对 DIP 的优先吸附也越明显。而有机质含量高的黄筋泥 2 比有机质含量低的黄筋泥 1 对 DIP 的优先吸附明显,可能与黄筋泥 2 本身包含较高的可溶性有机物质从而抑制了有机态磷的吸附有关。无论是无机磷还是有机磷,土壤对磷的吸附量都是黄筋泥 >

淡涂泥 > 清水沙,这与土壤中粘粒含量和氧化铁含量的变化一致。

表 2 等温吸附平衡液中 DIP/DOP 的比值

Table 2 Ratio of DIP/DOP in isotherm adsorption equilibrium solution

初始 DIP Initial DIP (mg/L)	初始 DOP Initial DOP (mg/L)	DIP/DOP 的比值 Ratio of DIP/DOP			
		S1	S2	S3	S4
4.35	1.58	1.18	0.43	0.67	2.75
8.70	3.16	1.18	0.52	1.23	2.54
10.88	3.95	1.03	0.52	1.34	2.52
14.50	5.27	0.84	0.51	1.59	2.54
29.00	10.53	0.73	0.62	2.23	2.65
43.50	15.80	1.63	1.37	2.46	2.67

2.2 DOP 和 DIP 在土壤中的淋失

图 2 为 24 h 内粪液稀释液中 DOC、DIP 和 DOP 在 4 个土壤中的迁移淋失随淋洗时间的变化。由于淋洗试验前土壤经去离子水饱和和处理,因此淋洗试验初期获得的 4~5 次样(总体积约为 200~250 mL,相当于 1 个土柱的孔隙体积)主要来自被去离子水饱和的土壤溶液,其 DOC、DIP 和 DOP 浓度主要受供试土壤有机质和磷状况的影响,但它们的 DOC、DIP 和 DOP 的浓度均较低。第 5 个样品后,淋

出液中 DOC、DIP 和 DOP 均逐渐增加。从第 4 至第 7 个样品中 DOC、DIP 和 DOP 的浓度变化可知,DOP 的浓度增加幅度最快,而 DIP 的变化幅度相对较小,这说明供试土壤对 DIP 的吸持(包括土壤微生物的生物固持)强度大大超过了 DOP。但无论是 DOC、DOP,还是 DIP,它们的浓度均随时间增加而增加,表明了由于土壤中不断加入 DOC、DOP 和 DIP,使土柱中的土壤逐渐被 DOC、DOP 和 DIP 等饱和,吸附作用渐渐减弱。

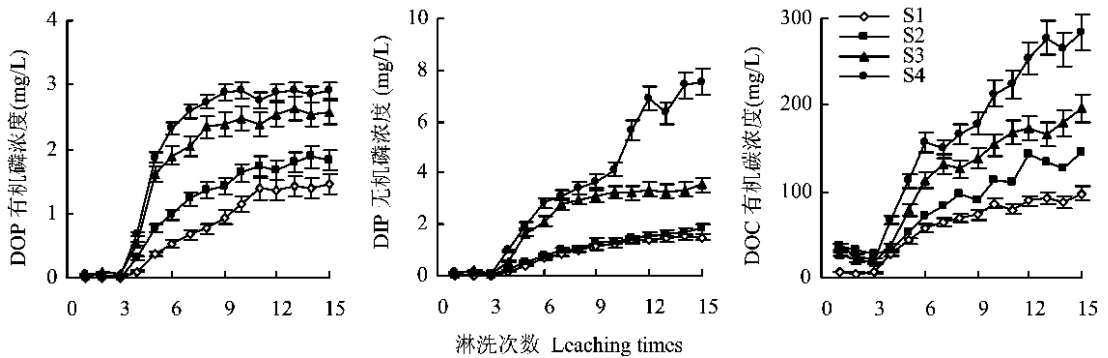


图 2 DOP、DIP 和 DOC 在不同土壤中的淋出浓度随时间的变化

Fig.2 Concentrations of DOP, DIP and DOC in leachates from different soils as a function of time

表 3 中第 4 至第 15 个淋出液样中 DIP/DOP 和 DOC/DOP 的比值均明显低于初始溶液中 DIP/DOP (2.75) 和 DOC/DOP (92.85) 的比值,说明土壤对 DIP 和 DOC 的相对吸持作用高于 DOP。但不同土壤对

DOC、DOP 和 DIP 的吸持能力有较大的差异,吸持能力为 $S1 > S2 > S3 > S4$ (图 2),其中,砂质土壤(清水沙)对 DIP、DOC 和 DOP 的吸持能力明显低于其它 3 个土壤。

表 3 不同土柱淋出液中 DIP/DOP 和 DOC/DOP

Table 3 Ratios of DIP/DOP 和 DOC/DOP in the leachates from four soils

淋洗液 Leachate	DIP/DOP				DOC/DOP			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
1	11.82	16.52	2.13	2.46	6818.18	16521.74	586.96	521.74
2	30.00	11.93	2.39	3.02	6750.00	5614.04	214.29	581.40
3	6.96	12.33	1.16	2.86	2565.22	6279.07	268.66	583.33
4	1.73	0.72	1.05	1.44	250.00	102.80	67.42	98.21
5	1.14	0.73	1.01	1.05	116.22	67.95	48.77	59.89
6	1.28	0.82	1.12	1.22	105.56	72.45	59.63	67.81
7	1.28	0.83	1.36	1.20	95.59	68.29	64.61	57.53
8	1.34	0.75	1.27	1.25	90.79	70.07	53.62	60.58
9	1.20	0.93	1.31	1.27	77.66	62.68	57.74	61.59
10	1.06	0.82	1.31	1.42	75.44	68.71	62.10	73.20
11	0.99	0.83	1.35	2.06	57.25	63.79	70.29	81.16
12	1.04	0.93	1.33	2.39	64.96	85.12	68.38	88.19
13	1.02	0.93	1.24	2.17	65.03	75.42	62.88	94.88
14	1.10	0.91	1.32	2.61	63.31	68.09	70.20	92.98
15	1.03	1.00	1.37	2.59	67.12	79.78	75.97	97.25

由粪液引入的无机态磷和有机态磷既可通过一般的化学作用被土壤固定,也可通过生物作用被土壤微生物固定。另外,在淋洗过程中,有机态磷还可能发生部分水解,转变为无机态磷。但由于本试验淋洗时间较短,因水解而发生转变的有机态磷的比例不高。试验中淋出液磷的组成是以上过程综合作用的结果,这与田间实际情况较为相似。

3 讨论

土壤中磷素的化学行为不仅影响土壤中磷的生物有效性,也会影响磷素的地球化学循环,因此有关磷的吸附、固定及其与土壤组分、施肥和环境的关系研究一直深受人们的重视。由于不同形态的磷素的化学性质有很大的差别,因此不同形态的磷在土壤中的吸附、迁移特性也可有较大的差异。以往的研究已表明,低分子量有机酸的存在可影响土壤对磷的吸附与解吸特性^[14-20];有机酸降低土壤对磷吸附效应随着有机酸浓度和有机酸与磷浓度比的增加而增加^[21];长期施用磷肥导致土壤磷素积累可降低土壤对磷的吸附容量^[19];施用有机肥料可活化土壤中的磷素^[22]。本研究的结果表明,由于粪液中同时包含高浓度的有机碳、有机磷和无机磷,土壤对由粪液引入的无机磷和有机磷的吸附特性与一般吸附试验获得的结果不同。大量的可溶性有机碳存在明显降低了土壤对粪液中有机态磷和无机态磷的吸附,这在一定程度上增加了磷的流失风险。与无机化肥相比,投入有机肥将更有助于土壤磷由“汇”向“源”的转变,这一方面增加了土壤中的生物有效磷,另一方面也增加了土壤磷素的淋失风险。与以化学磷源作为土壤磷的吸附源相比,施用粪液处理土壤对磷素的吸附量明显减少,这可能与有机肥中可溶性有机物质包被土壤磷素的吸附点^[17-18],有机肥中的有机酸分子对无机磷的活化作用或者竞争吸附点以及阻止溶液中磷素沉淀等多种因素有关^[19-20]。本研究结果与某些文献^[15]报道的土壤对无机磷的吸附低于有机磷的结果不同,4个土壤对无机磷的吸附均明显高于有机态磷,这可能与粪液中实际存在的有机磷与纯化学有机磷不同及粪液中还存在大量可溶性有机物有关。

4 结论

粪液中可溶性有机物(碳)的存在可大大降低土壤对粪液中有机态磷和无机态磷的吸附,增加了粪肥中磷的流失风险。土壤对粪液中有机磷和无机磷

的吸附量与粘粒含量、氧化铁含量呈正相关,吸附量由大而小均为:黄筋泥>淡涂泥>清水沙。土壤对粪液中磷的吸附强度为无机态磷高于有机态磷,这在有机质高的土壤中尤为明显。供试土壤对粪液中可溶性物质的吸持优先次序为可溶性无机磷>可溶性有机碳>可溶性有机磷,有机态磷比无机态磷更易在土壤中迁移。

参考文献:

- [1] Edwards A C, Twist H, Codd G A. Assessing the impact of terrestrially derived phosphorus on flowing water systems[J]. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29: 117-124.
- [2] Van der Molen D T, Breeuwmsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives[J]. *J. Environ. Qual.*, 1998, 27: 4-11.
- [3] Zhang M K, Jiang H, Liu X M. Phosphorus concentration and forms in surface and subsurface drainage water from wetland rice fields in the Shaoxing plain[J]. *Pedosphere*, 2003, 13: 239-248.
- [4] He Z L, Zhang M K, Stoffella P J *et al.* Phosphorus concentrations and loads in runoff water under crop production[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, 70(5): 1807-1816.
- [5] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R *et al.* Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *J. Environ. Qual.*, 1995, 24: 904-910.
- [6] Hooda P S, Truesdale V W, Edwards A C *et al.* Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications[J]. *Adv. Environ. Res.*, 2001, 5: 13-21.
- [7] Tabbara H. Phosphorus loss to runoff water twenty-four hours after application of liquid swine manure or fertilizer[J]. *J. Environ. Qual.*, 2003, 32(3): 1044-1052.
- [8] Schoumans O F, Groenendijk P. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands[J]. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29: 111-116.
- [9] Juo A S R, Fox R L. Phosphate sorption isotherm for evaluating the phosphate requirement of soil[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1970, 34: 902-907.
- [10] Guppy C N, Menzies N M, Moody P W *et al.* Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review[J]. *Aust. J. Soil Res.*, 2005, 42(2): 189-202.
- [11] Guppy C N, Menzies N W, Blamey F P C *et al.* Do decomposing organic matter residues reduce phosphorus sorption in highly weathered soil[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2005, 69(5): 1405-1411.
- [12] Lilienfein J, Qualls R G, Uselman S M *et al.* Adsorption of dissolved organic and inorganic phosphorus in soils of a weathering chronosequence[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68(2): 620-628.
- [13] Anderson B H, Magdoff F R. Relative movement and soil fixation of soluble organic and inorganic phosphorus[J]. *J. Environ. Qual.*, 2005, 34(6): 2228-2233.
- [14] 胡红青,李妍,贺纪正.土壤有机酸与磷素相互作用的研究[J].*土壤通报*, 2004, 35(2): 222-229.

- Hu H Q, Li Y, He J Z. Interaction of organic acids and phosphorus in soils[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2004, 35(2): 222-229.
- [15] Berg A S, Joern B C. Sorption dynamics of organic and inorganic phosphorus compounds in soil[J]. *J. Environ. Qual.*, 2006, 35(5): 1855-1862.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
Institute of Soil Science, CAS. Soil physical and chemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [17] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响[J]. *土壤学报*, 1991, 28(1): 7-13.
Zhao X Q, Lu R K. Effect of organic manure on soil phosphorus adsorption[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 1991, 28(1): 7-13.
- [18] 章永松, 林咸永, 倪吾钟. 有机肥对土壤磷吸附-解吸的直接影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1996, 2(3): 200-205.
Zhang Y S, Lin X Y, Ni W Z. Direct influence of organic manure on phosphorus adsorption-desorption in the soils[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1996, 2(3): 200-205.
- [19] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 33-39.
- Guo S L, Dang T H, Liu S Z *et al.* Changes in characterization of phosphorus to its forms and soil organic sorption in relation carbon [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(1): 33-39.
- [20] 刘义新, 刘武定, 朱端卫, 等. 结晶有机肥对土壤磷吸附和解吸特性的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2000, 19(1): 22-24.
Liu Y X, Liu W D, Zhu D W *et al.* The effect of crystal organic fertilizer on adsorption-desorption properties of soil phosphorus[J]. *J. Huazhong Agric. Univ.*, 2000, 19(1): 22-24.
- [21] 李有田, 庞荣丽, 介晓磊, 等. 低分子量有机酸对石灰性潮土磷吸附与解吸的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2002, 36(2): 133-137.
Li Y T, Pang R L, Jie X L *et al.* Influence of low-molecular weight organic acids on phosphorus adsorption-desorption by calcareous Chao soi[J]. *J. Henan Agric. Univ.*, 2002, 36(2): 133-137.
- [22] 章永松, 林咸永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究 I. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 145-150.
Zhang Y S, Lin X Y, Luo A C *et al.* Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms I. Effect of organic manure(matter) on activation to different phosphate in soil[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(2): 145-150.