

磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷渗漏影响研究

张作新, 刘建玲, 廖文华, 郝小雨

(河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000)

摘要:采用土柱培养的模拟试验方法研究了在不同磷水平土壤上大量施用磷肥和有机肥对土壤测试磷、土壤磷渗漏的影响及影响机理。结果表明,不同磷水平土壤施用磷肥或有机肥土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Olsen-P 和土壤渗液中可溶性磷均显著增加;单位量磷肥或有机肥所增加土壤各形态磷量随土壤磷水平的增加而增大;随着磷肥或有机肥用量的增加,单位量磷肥或有机肥所增加各形态磷量也逐渐增大,差异均达到显著和极显著水平。在施用磷肥的基础上增施有机肥可以提高土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Olsen-P 含量和土壤渗液中可溶性磷的增长幅度。土壤磷的渗漏量与土壤测试磷呈显著正相关;单位量磷肥或有机肥所增加的土壤渗漏磷量随着磷肥或有机肥用量以及土壤磷水平的增加而增加。Olsen-P 含量与土壤磷吸持指数(PSI)呈显著负相关关系,与土壤磷的吸附饱和度(DPS)呈显著正相关关系。

关键词:磷肥;有机肥;渗漏;土壤磷水平

中图分类号:S152.7 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)04-0729-07

The Effect of Phosphate Fertilizer and Manure on Phosphorus Leaching in Different Phosphorus Levels Soil

ZHANG Zuo-xin, LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua, HAO Xiao-yu

(College of Resource and Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: The effect of phosphate fertilizer and manure on soil test phosphorus and phosphorus leaching in different phosphorus levels soil was studied by soil column experiment. The results showed that the content of soil $\text{CaCl}_2\text{-P}$, Olsen-P and soluble P in leakage water were all increased significantly after applying phosphate fertilizer or manure in soils with different phosphorus levels. The increase range of the various forms of soil phosphorus by the same amount of P addition was increased with soil P levels. In comparison of synthetic phosphate fertilizer treatment, the application of synthetic P fertilizer and manure increased the soil $\text{CaCl}_2\text{-P}$, soil Olsen-P and soluble P in leakage water. There was high correlation between the rate of leached phosphorus from the soil and soil test phosphorus. The soil test phosphorus could be increased by increasing phosphate fertilizer or manure and soil phosphorus levels. The degree of phosphorus sorption saturation could be increased by improving soil phosphorus levels. The main conclusions were that the degree of phosphorus sorption saturation and the rate of leached phosphorus from the soil were increased with the increase of the rate phosphate fertilizer and manure in soils of different phosphorus levels, however, the phosphorus sorption index was decreased.

Keywords: phosphate fertilizer; organic manure; phosphorus leaching; soil phosphorus levels

近年来,随着农田土壤磷素的不断积累,农田非点源磷环境风险逐渐凸显^[1-2]。已有研究表明,在近20年间,中国土壤全磷含量平均增长了 $210 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Olsen-P 增加了 $6 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 年均增长 11% ^[3]。由于磷肥用量远远超出作物生长对磷素的需要量,结果

导致土壤磷素的大量积累^[4],农田磷素通过地表径流和渗漏方式向地表和地下水体迁移,从而增加了农田土壤磷的环境风险^[5-7]。土壤磷素渗漏作为农田磷素流失的一个重要途径,直接关系到地下水的优劣。同时农田磷的渗漏势也是估算农田地表径流流失磷的重要参数。因此,研究农田磷的渗漏及影响因素具有重要意义。

农田土壤磷水平是影响农田磷渗漏的主要因素。洛桑试验站长期肥料定位试验结果表明,土壤 Olsen-P 大于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤磷的渗漏量显著增加(此 Olsen-P 称谓“Change Point”)^[8-9];我国北方石灰性菜地

收稿日期:2008-06-25

基金项目:河北省自然科学基金[2009年],河北省农业开发办公室,河北农业大学专项基金

作者简介:张作新(1982—),男,河北唐山人,硕士研究生,主要从事植物营养、施肥与环境方面的研究。

通讯作者:刘建玲 E-mail:jliliu@hebau.edu.cn

土壤磷渗漏明显增加的拐点 Olsen-P 为 $55.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1[10]}$; 太湖流域酸性土壤 Bray-P 大于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 土壤磷的渗漏量也明显增加^[11]。Mc Dowell 对土壤 Olsen-P $30 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 Mehlich III-P $10 \sim 763 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的中性和酸性土壤的试验结果表明, 土壤水溶性磷(或 $\text{CaCl}_2\text{-P}$)和 Olsen-P、Mehlich III-P 等土壤有效磷的相关关系呈两条直线, 明显“拐点”时的土壤 Olsen-P 为 $33 \sim 36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Mehlich III-P 为 $185 \sim 190 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过拐点后直线的斜率明显增加^[12]。Sharpley 等的结果为: 土壤 Mehlich III-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的相关方程“拐点”以下为: $\text{CaCl}_2\text{-P} = m_1(\text{Mehlich III-P}) + c$; “拐点”以上为: $\text{CaCl}_2\text{-P} = m_1(\text{STP}) + m_2(\text{Mehlich III-P} - \text{change point in Mehlich III-P}) + c$ ^[13]。Griffin 的结果也说明: 施用 KH_2PO_4 、牛粪、家禽粪和猪粪等有机肥, P 用量为 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 能反映土壤磷的吸附饱和度, 从而反映土壤磷的渗漏状况^[14]。

综上所述, 已有资料中关于不同土壤磷素水平上施用磷肥和有机肥对农田磷渗漏的影响、作用机理及不同磷水平土壤上反映土壤磷渗漏状况的指标表达等尚缺乏系统研究。本文采用模拟试验研究不同磷水平土壤上施用磷肥和有机肥时土壤测试磷对土壤磷渗漏影响和机理, 旨在为科学评价农田土壤磷渗漏提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自河北省藁城市的蔬菜日光温室(极高磷和高磷土壤)及相邻粮田(低磷土壤), 土壤类型为潮褐土, 基本理化性性状列于表 1。土壤经风干、过 2 mm 筛后备用。

1.2 试验设计

1.2.1 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷渗漏的影响

试验处理: 土壤为低磷(S_1)、高磷(S_2)和极高磷(S_3)3 种土壤。P 为 3 个水平, 即 P_0 、 P_1 、 P_2 , 分别代表 P 用量 0、360、1 080 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。有机肥(腐熟)为 3 个水

平, 即 M_0 、 M_1 、 M_2 , 代表有机肥用量为 0、150、300 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。每个处理重复 3 次。

试验装置: 用内径 7 cm、长度为 30 cm 的 PVC 管(模拟土柱), 管内壁均匀涂抹凡士林, 用尼龙绳将透性良好的棉布固定于柱底封住柱口, 土柱最底层装入 100 g 石英砂(约厚 2 cm), 砂上放置一层 300 目的纱网, 纱网以上按田间实际土壤容重装入 1 000 g 供试土壤(相当于田间 20 cm 土层厚度土壤), 土壤分为两层, 每层 500 g 土, 中间有尼龙网隔开, 上层土壤按试验处理的要求施入磷肥或有机肥, 下层土壤不施肥。将装好的土柱架于白瓷缸上以便收集渗漏液。

试验在恒温培养室中进行, 室内的温度为 25°C 。用质量法控制灌水量(土壤饱和持水量), 首次灌水 550 mL 后, 称量灌水后土柱及其对应的收集渗漏液的瓷缸质量, 以后每次灌水达到这一质量为止。装柱后每周灌水一次, 同时收集渗漏液于白瓷缸中, 当天测定渗漏液体积和可溶性磷含量。培养时间为一个月。培养结束后, 分别取施肥层和不施肥层土壤, 风干、过筛后用于分析测定。

1.2.2 不同腐熟度的有机肥对土壤磷渗漏的影响

试验处理: 上述低磷(S_1)和高磷(S_2)2 种土壤。P 为 2 个水平, 即 P_0 、 P_1 , P 用量为 0、1 080 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。有机肥分为腐熟(M)和半腐熟有机肥(M_s), 即 M_0 、 M_1 (M_s), 用量分别为 0、300 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

每种土壤的试验处理为 P_0M_0 、 P_0M_1 、 P_0M_{1s} 、 PM_0 、 PM_1 和 PM_{1s} , 每个处理 4 个重复。

试验装置同上。

1.3 测试项目

土壤 Olsen-P、土壤水溶性磷、土壤渗漏液中可溶性磷、土壤最大吸磷量、土壤磷的吸附饱和度和磷吸持指数等。

常规项目均采用常规农化分析方法。其他项目测定如下:

土壤水溶性磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$): 称土样 5.00 g, 加 50 mL $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ (即土液比 1:10), 振荡 1 h, 钼

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Properties of tested soil

土壤 Soils	pH	全氮	全磷	有机质	碱解氮	Olsen-P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效钾 Avail K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	质地 Texture/%	
		Total N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Total P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Organic matter/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	NaOH-hydrolyzable N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			>0.01 mm	<0.01 mm
S_1	7.68	1.26	0.49	21.0	112.0	56.9	96.1	73.0	27.0
S_2	7.55	2.22	0.81	22.6	122.2	198.0	265.3	70.1	29.9
S_3	7.50	2.89	1.50	41.7	129.9	332.5	480.4	68.5	31.5

蓝比色法^[15]。

土壤渗滤液中可溶性磷:吸取经 0.45 μg 微孔滤膜过滤后的土壤渗滤液 25 mL 于硬质试管中,加入 4 mL 过硫酸钾,在压力为 $1.1 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$,相对温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下消煮 30 min,用钼蓝比色法测定消煮液中磷浓度(GB 11893—1989)。

土壤渗滤液中磷总量的计算:每次收集渗滤液的体积乘以对应渗滤液中可溶性磷含量所得值之和。

磷吸附等温线的测定:称取 2.5 g 土壤样品各 7 份于 50 mL 塑料瓶中,分别加入含磷量为 0、10、20、40、60、100 和 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液 25 mL,同时加入 2 滴甲苯以抑制微生物的活动, $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 下振荡 1 h,平衡 23 h,过滤后用钼蓝比色法测定平衡溶液中磷的浓度。以平衡溶液的磷浓度为横坐标,以土壤的吸磷量为纵坐标绘制等温吸附曲线。检验曲线与 Langmuir 方程 $(C/Q=1/kQ_m+C/Q_m)$ 的吻合性,式中: Q 是土壤吸附磷量, C 为平衡溶液中磷的浓度, k 为与吸附能常数, Q_m 是土壤最大吸磷量。根据试验结果及 Langmuir 方程确定土壤的最大吸磷量(Q_m)和磷吸附饱和度等^[16]。

土壤磷吸附饱和度(DPS%)= $\text{Olsen-P}/Q_m\times 100$ ^[15]。

磷吸持指数(PSI):在土液比为 1:10 的条件下,按每克土加 1.5 mg P(磷酸盐)的比例使二者充分混合,平衡后测得的土壤吸磷量 $X(\text{mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1})$ 与平衡溶液中磷浓度 $C(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ 的对数值之比即为 PSI,即 $\text{PSI}=X/\lg C$ ^[16]。

1.4 数据分析

数据处理采用 Microsoft Office Excel 2003、SPSS 统计软件。

2 结果与分析

2.1 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷渗漏的影响

磷肥和有机肥用量对施肥层土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Olsen-P 的影响如表 2 所示。结果表明,施用磷肥和有机肥显著增加施肥土层(0~10 cm)土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Olsen-P 含量。随着土壤磷水平的升高,施用相同量的磷肥各处理的土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Olsen-P 含量逐渐增加。与 P_0 处理相比, P_1 处理在 S_1 、 S_2 、 S_3 土壤上的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 分别增加 10.8、12.4、14.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Olsen-P 分别增长 87.4、96.8、108.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着磷肥用量增加(P_2)土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 增加量有相同的趋势,差异均达到显著和极显著水平。施用有机肥 M_1 后 S_1 土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 显著增加,但 S_2 、 S_3 无显著增加。

磷肥和有机肥对不同磷水平土壤下层 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Olsen-P 含量影响如表 3 所示。结果表明,随着磷肥和有机肥施用量的增加,3 种土壤 10~20 cm(下层)的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Olsen-P 含量均显著增加,说明 3 种土壤上施用磷肥和有机肥后土壤磷素均明显渗漏到不施肥的土层。与对照相比, P_1 处理在 S_1 、 S_2 、 S_3 土壤上的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 分别增加 1.7、3.7、5.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Olsen-P 分别增长 9.4、20.2、26.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施用 P_2 处理具有相同趋势。3 种土壤比较, S_2 、 S_3 的增加量明显高于 S_1 土壤,说明高磷和极高磷土壤上施用相同量的磷肥土壤磷的渗漏量明显高于低磷土壤。

M_1 处理在 S_1 、 S_2 、 S_3 土壤上的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 分别增加 0.5、0.9、1.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Olsen-P 分别增长 3.3、13.7、39.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施用 M_2 处理具有相同趋势。3 种土壤比较, S_2 、 S_3 的增加量明显高于 S_1 土壤,说明高磷和极高磷

表 2 磷肥和有机肥对不同磷水平施肥层土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 The effect of phosphate fertilizer and manure on $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and Olsen-P in different P levels soil of above layer($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments		CaCl ₂ -P				Olsen-P			
		S ₁	S ₂	S ₃	LSD _{0.05 (0.01)}	S ₁	S ₂	S ₃	LSD _{0.05 (0.01)}
PF ^{re}	P ₀	3.8	10.7	19.5	1.0(1.5)	56.9	197.8	332.5	21.8(33.0)
	P ₁	14.6	23.1	34.2	7.1(10.8)	144.3	294.6	440.7	28.6(43.3)
	P ₂	50.7	59.6	70.2	1.8(2.8)	335.9	485.9	604.8	5.1(7.7)
	LSD _{0.05(0.01)}	1.7(2.6)	2.7(4.0)	6.7(10.2)	—	19.9(30.1)	11.0(16.6)	28.3(42.9)	—
OM	M ₀	3.8	10.7	19.5	1.0(1.5)	56.9	197.8	332.5	21.8(33.0)
	M ₁	4.4	9.9	19.2	2.0(3.0)	62.3	200.6	353.3	26.3(39.8)
	M ₂	5.5	11.5	22.0	4.2(6.3)	71.0	203.8	366.4	26.2(39.6)
	LSD _{0.05(0.01)}	0.5(0.8)	1.3(1.9)	4.5(6.7)	—	8.7(13.2)	19.7(29.8)	37.2(56.4)	—

注:*PF 表示磷肥处理,OM 表示有机肥处理,下同。

Note:*PF was phosphate fertilizer,OM was manure,the same as below.

表 3 磷肥和有机肥对不同磷水平不施肥层土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 The effect of phosphate fertilizer and manure on $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and Olsen-P in different P levels soil of below layer($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments		$\text{CaCl}_2\text{-P}$				Olsen-P			
		S_1	S_2	S_3	$\text{LSD}_{0.05(0.01)}$	S_1	S_2	S_3	$\text{LSD}_{0.05(0.01)}$
PF	P_0	3.2	9.5	20.2	0.4(0.6)	64.5	213.7	344.5	3.0(4.6)
	P_1	4.9	13.2	25.5	0.9(1.3)	74.0	233.9	370.8	6.6(9.9)
	P_2	9.2	20.1	35.2	0.8(1.2)	92.1	267.3	439.7	11.5(17.5)
	$\text{LSD}_{0.05(0.01)}$	0.6(1.0)	0.9(1.4)	0.5(0.8)	—	2.7(4.1)	8.8(13.3)	10.0(15.2)	—
OM	M_0	3.2	9.5	20.2	0.4(0.6)	64.5	213.7	344.5	3.0(4.6)
	M_1	3.7	10.4	21.8	0.6(0.9)	67.8	227.4	383.9	7.3(11.1)
	M_2	4.0	10.7	22.7	0.6(1.0)	74.0	245.9	404.7	7.9(12.0)
	$\text{LSD}_{0.05(0.01)}$	0.3(0.4)	0.6(0.9)	0.7(1.1)	—	1.7(2.6)	5.2(7.9)	9.8(14.8)	—

土壤上施用相同量的有机肥土壤磷的渗漏量明显高于低磷土壤。

2.2 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤渗漏液中可溶性磷的影响

磷肥和有机肥对不同磷水平土壤渗漏液中可溶性磷的影响如表 4 所示。结果表明,大量施用磷肥,土壤渗漏液中可溶性磷均显著增加。与 P_0 处理比较, P_1 处理在 S_1 、 S_2 、 S_3 土壤上的土壤渗漏液中可溶性磷分别增加 0.57、0.96、2.49 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这也表明,随着土壤磷水平的增加,土壤渗漏液中的可溶磷浓度逐渐增加,这与上述不施肥土层 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 增加的趋势是吻合的。 P_2 处理具有相同趋势。

表 4 磷肥和有机肥对土壤渗漏液中可溶性磷的影响($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 4 The effect of phosphate fertilizer and manure on soluble phosphorus in leaching water of soil($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

处理 Treatments		S_1	S_2	S_3
PF	P_0	0.46	0.93	1.71
	P_1	1.03	1.88	4.20
	P_2	2.79	3.36	4.78
	$\text{LSD}_{0.05(0.01)}$	0.10(0.18)	0.06(0.11)	0.53(0.98)
OM	M_0	0.46	0.93	1.71
	M_1	0.59	1.12	2.88
	M_2	1.08	1.96	3.47
	$\text{LSD}_{0.05(0.01)}$	0.05(0.09)	0.15(0.28)	0.52(0.95)

3 种磷水平土壤上,磷肥用量与土壤渗漏液中磷浓度的相关方程为:

$$\begin{aligned} S_1: y &= 0.002\ 2x + 0.366\ 5(r=0.995\ 2^{**}) \\ S_2: y &= 0.002\ 2x + 0.989\ 5(r=0.997\ 7^{**}) \\ S_3: y &= 0.002\ 6x + 2.336\ 2(r=0.861\ 5^{**}) \end{aligned}$$

式中: x 为 Olsen-P, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; y 为土壤渗漏液中磷浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

由方程可以看出,在 3 种磷水平土壤上磷肥的施用量与土壤渗漏液中磷浓度均呈现极显著正相关关系。在低磷、高磷和极高磷土壤上相关方程的一次项系数(斜率)逐渐增大,这也表明随着土壤磷水平的增加,土壤磷素渗漏风险增大。

随有机肥用量的增加,3 种土壤上土壤渗漏液中可溶性磷含量均呈增加的趋势。与 M_0 相比, M_1 处理在 S_1 、 S_2 、 S_3 的土壤渗漏液中可溶性磷分别增加 0.14、0.19、1.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 M_2 处理具有相同趋势。结果说明高磷土壤上施用有机肥后土壤磷渗漏增加。

有机肥用量与土壤渗漏液中磷浓度的相关方程为:

$$\begin{aligned} S_1: y &= 0.002\ 1x + 0.397\ 8(r=0.951\ 6^{**}) \\ S_2: y &= 0.003\ 4x + 0.819\ 5(r=0.940\ 4^{**}) \\ S_3: y &= 0.005\ 9x + 1.806\ 6(r=0.982\ 3^{**}) \end{aligned}$$

式中: x 为 Olsen-P, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; y 为土壤渗漏液中磷浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

由方程可以看出,在 3 种磷水平土壤上施用有机肥,土壤渗漏液中磷浓度均呈现极显著正相关关系,在低磷、高磷和极高磷 3 种磷水平土壤上相关方程的一次项系数(斜率)也逐渐增大。

2.3 不同腐熟度有机肥对土壤渗漏液中磷总量的影响

不同腐熟度有机肥对土壤渗漏液中磷总量的影响如表 5 所示。结果表明,与不施肥处理比较,低磷土壤上施用腐熟或半腐熟有机肥土壤渗漏液中磷总量无显著差异;高磷土壤上施用半腐熟有机肥土壤渗漏液中磷总量显著降低。在施用磷肥的基础上增施腐熟有机肥的处理比单施磷肥处理的土壤渗漏液中磷总量有所提高,而在施用磷肥的基础上增施半腐熟有机肥的处理比只施磷肥处理的土壤渗漏液中磷总量有所降低。在高磷土壤上磷肥和有机肥对不同磷水平土壤渗漏液中磷总量的影响与低磷土壤相一致。这一结

表 5 磷肥和有机肥对土壤渗漏液中可溶性磷总量^{*}的影响(μg)Table 5 The effect of phosphate fertilizer and manure on the amount of soluble phosphorus in leaching water of soil(μg)

处理 Treatments	培养周数(Weeks)									
	S ₁					S ₂				
	1	2	3	4	总量	1	2	3	4	总量
P ₀ M ₀	72.0	132.4	135.3	160.0	499.6	476.1	291.3	204.2	138.7	1 110.3
P ₀ M ₁	16.2	167.8	207.8	212.3	604.3	147.7	419.3	356.5	202.4	1 126.0
P ₀ M ₁ S	10.3	105.2	175.3	191.3	482.2	19.0	235.2	227.6	126.2	608.1
PM ₀	338.5	472.3	612.9	612.1	2 035.8	993.5	1 020.0	557.0	370.5	2 940.9
PM ₁	143.0	744.4	986.4	1 072.1	2 946.0	755.1	1 087.4	751.0	449.5	3 042.9
PM ₁ S	18.8	234.3	282.3	718.7	1 254.1	141.3	712.5	443.7	232.9	1 530.4
LSD _{0.05(0.01)}	150.4(206.0)					123.8(169.4)				

注:^{*}表示渗漏液体积(mL)×渗漏液中磷浓度($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)。

果表明,施用磷肥的基础上增施半腐熟有机肥可降低土壤渗漏液中磷总量。

2.4 不同磷水平土壤上施用磷肥和有机肥对土壤磷吸附特性的影响

磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附特性的影响如表 6 所示。结果表明,与 P₀ 处理比较,P₁ 和 P₂ 处理的最大吸磷量和土壤磷吸附指数逐渐减小、土壤磷的吸附饱和度显著增加。其中,S₁ 土壤最大吸磷量分别降低了 34.5 和 86.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,S₂ 和 S₃ 土壤上具有

相同的趋势。

对于相同磷肥用量下不同磷水平的土壤,随土壤磷水平的提高,土壤吸附饱和度逐渐增加,土壤磷吸附指数逐渐减小。与 S₁ 土壤不施肥处理相比,S₂、S₃ 土壤的土壤磷吸附饱和度分别增加 58.5%、76.4%,土壤磷吸附指数分别降低 0.8、1.0,说明具有较高磷水平的土壤磷的吸附饱和度较高,磷易达到饱和。

随着有机肥施用量的增加,土壤最大吸磷量逐渐减少,土壤磷的吸附饱和度逐渐增加。与 M₀ 处理相比,M₁ 处理在 S₁、S₂、S₃ 土壤上的土壤磷的吸附饱和度分别增加 9.2%、12.1%、37.2%。M₂ 处理具有相同趋势。可见,施用等量的磷肥或有机肥所增加的土壤磷的吸附饱和度随着土壤磷水平的增加而增加。

土壤 Olsen-P 与土壤吸附饱和度(DPS)的相关方程为:

$$y=0.36x-4.64(r=0.983\ 9^{**})$$

式中: x 为 Olsen-P, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; y 为土壤吸附饱和度,%。

这一相关方程表明,土壤吸附饱和度随土壤 Olsen-P 含量的增加而显著增大,二者表现出极显著的正相关关系。随土壤吸附饱和度的逐渐增大,土壤磷素的渗漏风险加大。

土壤 Olsen-P 含量与土壤磷吸附指数(PSI)呈显著负相关关系,差异达到极显著水平。其相关方程为:

$$y=-0.002\ 8x+7.16(r=0.818\ 3^{**})$$

式中: x 为 Olsen-P, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; y 为土壤磷吸附指数(无量纲,单位为 1)。

3 讨论

大量研究认为土壤测试磷能够很好地反映农田磷的渗漏淋失风险^[17-18]。Sim 等提出可以用土壤 Mehlich-3-P 作为一个磷渗漏风险的评价指标,用

表 6 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤吸附解吸特性的影响

Table 6 The effect of phosphate fertilizer and manure on P sorption parameters in different P levels soil

处理 Treatments			吸附饱和度 DPS Degree of P sorption saturation/%	磷吸附指数 PSI P sorption index
S ₁	PF	P ₀	16.7±1.1	7.7
		P ₁	56.6±2.7	6.6
		P ₂	214.4±6.2	5.9
	OM	M ₀	16.7±1.1	7.7
		M ₁	25.9±1.4	7.0
		M ₂	29.4±2.5	6.6
S ₂	PF	P ₀	75.2±1.6	6.9
		P ₁	212.6±6.4	5.3
		P ₂	243.2±9.0	5.1
	OM	M ₀	75.2±1.6	6.9
		M ₁	87.3±3.3	6.4
		M ₂	96.6±5.5	6.2
S ₃	PF	P ₀	93.1±1.8	6.7
		P ₁	183.4±4.5	5.7
		P ₂	263.3±11.0	5.5
	OM	M ₀	93.1±1.8	6.7
		M ₁	130.3±6.2	5.6
		M ₂	160.3±8.6	5.1

Mehlich-3-P 的饱和度($DPS_{MB}=PM3/[Al+Fe]_{MB}$)反映了土壤磷素的渗漏风险^[19-20]。由于土壤水溶性磷与土壤速效磷呈正相关关系,Kleinman 等把土壤水溶性磷作为反映农田土壤磷素流失的重要监测指标^[21-22]。从本试验的结果看,与不施肥的对照处理比较,施用磷肥和有机肥时,施肥层和不施肥土层土壤的 Olsen-P 和 $CaCl_2$ -P 含量均显著增加,这也说明土壤的 Olsen-P 和 $CaCl_2$ -P 均可作为评价土壤磷素渗漏风险的一个重要参考指标。此外,单位量磷肥或有机肥所增加的土壤 Olsen-P 和 $CaCl_2$ -P 含量或土壤渗漏液中磷素的浓度随磷用量和土壤磷水平的增加而增大,说明了随着土壤磷水平和磷用量的增加,土壤磷渗漏会增大。这也验证了已有资料中关于土壤有效磷与土壤水溶磷的关系存在两条直线相关关系。

土壤磷的吸附和解吸特性也是影响农田磷素渗漏的重要因素。土壤对磷素的吸附能力是有限的,长期大量施用磷肥和有机肥,就会降低土壤对磷的吸附量,从而增加土壤的渗漏率^[19]。Jager 认为施用磷肥显著增加了土壤可溶性磷的解吸率^[23];Vadas 提出用土壤磷的最大吸附量(PSC)和土壤磷吸附和解吸率来反映施用磷肥后土壤可溶性磷和不溶性磷的动态变化^[17]。土壤磷的吸附饱和度受土壤质地、有机质及土壤中氧化铁(铝)、钙含量等因素的影响^[24]。随着土壤有机质的增加,土壤吸磷能力减小^[25-26]。近年来有资料提出:将一些表征土壤磷吸附解吸特性的指标作为农田磷素的环境风险评价的参考内容^[27],其中土壤磷吸附饱和度(DPS)和磷吸持指数(PSI)等就是表征农田磷素的环境风险重要指标^[15-16]。例如,欧洲一些国家利用土壤吸附饱和度作为判定土壤磷流失潜力临界值和推荐磷肥和有机肥用量的阈值^[27],美国一些地区也制定了以此类指标为依据限定施肥量的相关标准^[28]。Nair 等研究指出,当砂土土壤的土壤吸附饱和度高于 16%时,则土壤磷素渗漏量明显加强,美国 Atlantic 地区则将土壤吸附饱和度的环境阈值定为 25%~40%^[29]。从本试验的结果可看出,在土壤 Olsen-P 为 $56.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 S_1 土壤上施用磷肥 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤磷的吸附饱和度达到 56.6%,在土壤 Olsen-P 198.0 、 $332.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 S_2 和 S_3 土壤上不施磷肥土壤磷的吸附饱和度为 75.2%和 93.1%,已超出 25%~40%这一环境阈值。且随磷肥和有机肥用量的增大,土壤吸附饱和度不断提高,反应说明土壤磷素渗漏势增加,这一结果与 Maguire 结果是一致的^[19]。本试验结果还反映出一定磷水平土壤上土壤 $CaCl_2$ -P、Olsen-P 等土壤测

试磷指标与土壤磷的吸附饱和度(DPS)呈直线正相关关系,但当磷肥和有机肥的过量施用或土壤磷水平过高土壤上施用磷肥或有机肥时,土壤 $CaCl_2$ -P、Olsen-P 等土壤测试磷指标与土壤磷的吸附饱和度(DPS)量化关系尚需进一步探讨。从这点讲,土壤 $CaCl_2$ -P、Olsen-P 作为土壤磷素渗漏风险的评价指标似乎比用土壤磷吸附饱和度反映土壤磷的环境阈值更为客观。关于相同 $CaCl_2$ -P、Olsen-P 含量,土壤质地、有机质等对土壤磷渗漏的影响机理需进一步研究。

4 结论

(1)随磷肥和有机肥用量的增加,土壤 $CaCl_2$ -P、Olsen-P 显著增加。单位量磷肥或有机肥所增加的土壤 $CaCl_2$ -P、Olsen-P 的量随着土壤磷水平的增加而增加。

(2)土壤渗漏液中可溶性磷量与磷肥和有机肥用量及土壤磷水平呈显著正相关。

(3)与单施磷肥处理相比,在施用磷肥的基础上增施腐熟有机肥土壤渗漏液中磷总量有所提高,而在施用磷肥的基础上增施半腐熟有机肥的土壤渗漏液中磷总量有所降低。

(4)随磷肥和有机肥的用量及土壤磷水平的增加,土壤吸附饱和度逐渐增大,土壤吸附磷的能力逐渐下降。土壤 Olsen-P 与土壤吸附饱和度呈现显著正相关关系。

参考文献:

- [1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7):1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1008-1017.
- [2] Sharpley A N, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of 21st century[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29:176-181.
- [3] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1):4-8.
LU Ru-kun. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2003, 18(1):4-8.
- [4] 刘建玲,李仁岗,廖文华,等. 白菜-辣椒轮作中磷肥的产量效应及土壤磷积累研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8):1616-1620.
LIU Jian-ling, LI Ren-gang, LIAO Wen-hua, et al. The yield response of vegetable to phosphate fertilizer and soil phosphorus accumulation in

- a Chinese Cabbage-capsicum rotation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8):1616-1620.
- [5] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. 土壤学报, 2005, 42(5):799-804.
- CAO Zhi-hong, LIN Xian-gui, YANG Lin-zhang, et al. Ecological function of “paddy field ring” to urban and rural environment. characteristics of soil P losses from paddy fields to waterbodies with runoff[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005(42):799-804.
- [6] 单艳红, 杨林章, 王建国. 土壤磷素流失的途径、环境影响及对策[J]. 土壤, 2004, 36(6):602-608.
- SHAN Yan-hong, YANG Lin-zhang, WANG Jian-guo. Soil phosphorus loss to water: its pathways, environmental impact, and countermeasures[J]. *Soils*, 2004, 36(6):602-608.
- [7] Sharpley A N, Weld J L, Beegle D B, et al. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(3):137-149.
- [8] 吕家珑, Fortune S, Brookes P C. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷“突变点”研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2):142-146.
- LV Jia-long, Fortune S, Brookes P C. Research on phosphorus leaching from soil and its Olsen-P “shreshold volume”[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2):142-146.
- [9] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29:105-110.
- [10] 王新军, 廖文华, 刘建玲. 菜地土壤磷素淋失及其影响因素[J]. 华北农学报, 2006, 21(4):67-70.
- WANG Xin-jun, LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling. Phosphorus leaching from vegetable fields and impact factor[J]. *Acta Agricultural Borealisinica*. 2006, 21(4):67-70.
- [11] 王彩绒, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型地区菜地土壤磷淋失风险[J]. 环境科学学报, 2005, 25(1):76-80
- WANG Cai-rong, HU Zheng-yi, YANG Lin-zhang, et al. Risk of phosphate leaching loss from soil of vegetable plot in the typical region of Taihu Lake[J]. *Acta Scientiae Circumst*, 2005, 25(1):76-80.
- [12] McDowell R F, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30:508-520.
- [13] Sharpley A N, McDowell R W, Peter J A K. Amount, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6):2048-2057.
- [14] Griffin T S, Honeycutt C W, He Z. Changes in soil phosphorus from manure application[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67:645-653.
- [15] Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(2):160-166.
- [16] 高 超, 张桃林. 面向环境的土壤磷素测定与表征方法研究进展[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5):282-285.
- GAO Chao, ZHANG Tao-lin. Review on environment oriented soil phosphorus testing procedures and interpreting methods[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(5):282-285.
- [17] Vadas P A, Kleinman P J A, Sharpley A N, et al. Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff: a single extraction coefficient for water quality modeling[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34:572-580.
- [18] Torbert H A, Daniel T C, Lemunyon J L, et al. Relationship of soil test phosphorus and sampling depth to runoff phosphorus in calcareous and noncalcareous soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31:1380-1387.
- [19] Maguire R O, Sims J T. Soil testing to predict phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31:1601-1609.
- [20] Maguire R O, Sims J T. Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation and predicting phosphorus leaching with mehlich 3[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66:2033-2039.
- [21] Kleinman P J A, Sharpley A N, Wolf A M, et al. Measuring water-extractable phosphorus in manure as an indicator of phosphorus in runoff[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66:2009-2015.
- [22] Börling K, Otabbong E, Barberis E. Soil variables for predicting potential phosphorus release in swedish noncalcareous soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33:99-106.
- [23] Jager P C de, Claassens A S. Long-term phosphorus desorption kinetics of an acid sand clay soil from mpumalanga South Africa[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2005, 36:309-319.
- [24] 何振立, 朱祖祥, 袁可能. 土壤对磷的吸持特性及其与土壤供磷指标之间的关系[J]. 土壤学报, 1988, 25(4):397-404.
- HE Zhen-li, ZHU Zu-xiang, YUAN Ke-neng. The relationship between phosphorus sorption and desorption and availability of phosphorus[J]. *The Acta Pedologica Sinica*, 1988, 25(4):397-404.
- [25] 杨 芳, 何园球, 李成亮, 等. 不同施肥条件下旱地红壤磷固定及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(2):265-272.
- YANG Fang, HE Yuan-qiu, LI Cheng-liang, et al. Effect of fertilization on phosphorus fixation in upland red soil and its affecting factors[J]. *The Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2):265-272.
- [26] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷形态、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 Sheng-li, DANG Ting-hui, LIU Shou-zan, et al. Changes in characterization of phosphorus sorption in relation to its forms and soil organic carbon[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1):33-39.
- [27] Zhang H, Schroder J L, Fuhrman J K, et al. Path and multiple regression analyses of phosphorus sorption capacity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69:96-106.
- [28] Cox F A, Hendricks S E. Soil test phosphorus and clay content effects on runoff water quality[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29:1582-1586.
- [29] Nair V D, Portier K M, Graetz D A, et al. An environmental threshold for degree of phosphorus saturation in sandy soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33:107-113.