

长期施肥与土壤性质对水稻土磷吸附的影响

洪欠欠, 颜 晓, 魏宗强*, 吴建富*

(江西农业大学国土资源与环境学院, 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要: 基于长期定位试验 (始于 1981 年), 采用磷等温吸附试验方法, 研究了不同施肥措施 (包括无肥、单施化肥、稻草还田、沼肥) 及相关土壤性质对耕层水稻土 (0~15 cm) 磷吸附特性的影响。结果表明, 等温吸附试验中, 不同施肥处理的水稻土, 随着磷浓度的增加, 磷的吸附量逐渐增大。对磷等温吸附曲线, 用 Langmuir 方程拟合效果比 Freundlich 和 Temkin 方程好, 各处理拟合优势度均在 0.99 以上。基于 Langmuir 方程计算, 土壤磷最大吸附量 (X_m) 大小顺序为沼肥 > 稻草 > 单施化肥 > 无肥, 且沼肥处理显著高于其余 3 个处理 ($P < 0.05$); 同时, 沼肥处理的磷吸附饱和度亦显著高于其它处理, 但处理间土壤磷吸附常数与磷最大缓冲容量无显著差异。 X_m 值与土壤草酸浸提态磷 (P-ox)、无定型铁 (Fe-ox)、无定型铝、交换态钙、镁的含量有较高的相关性, 其中与 P-ox、Fe-ox 的相关性最显著, 相关系数分别为 0.95 ($P < 0.01$)、0.64 ($P < 0.05$); 主成分分析表明, 无定型铁、铝与交换态钙、镁是引起不同施肥处理磷吸附差异的主要因素。与无肥及单施化肥相比, 长期施用沼肥显著提高了土壤无定型铁、铝的含量 ($P < 0.05$), 从而增强了土壤磷吸附能力。

关键词: 磷; 水稻土; 磷吸附; 沼肥

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2018) 03-0061-07

磷是土壤肥力的重要组成因子, 是作物生长发育不可缺少的大量营养元素, 同时也是引发水体富营养化的一个关键因素。在我国, 大约有 4 600 万 hm^2 农田种植水稻, 水稻产量约占世界总产量的 30%^[1]。在一些水稻产区, 不合理的施用磷肥, 特别是基于作物氮素需求施用有机肥易引起磷在水稻土中显著富集, 成为周边水体环境安全的隐患。例如, 太湖流域水稻土中过量的磷富集被证明是引起太湖水体富营养化的重要因素^[2]。

土壤磷的流失风险受土壤性质、磷水平、水文等多种因素的影响^[3]。综合考虑这些因素, 研究土壤磷吸附性能与磷吸附饱和度 (degree of phosphorus saturation, DPS) 可能比单独研究土壤性质与磷水平更有助于评价土壤磷累积的环境风险。土壤磷的吸附性能可通过土壤磷等温吸附试

验进行表征 (如采用 Langmuir 与 Freundlich 方程计算); DPS 是指土壤浸提磷占最大吸磷量的百分比, 由于土壤磷等温吸附试验操作较繁琐, 因此 DPS 的计算也经常被简化为酸性草酸铵或 Mehlich 3 (M3) 浸提磷与相应浸提液中铁、铝含量之和的比值, 即 $P-ox / (Fe-ox + Al-ox)$ 或 $P-M3 / (Fe-M3 + Al-M3)$ 。一般来讲, 土壤磷吸附性能越弱, DPS 越大, 土壤磷流失的风险越大^[4]。土壤磷吸附特性受土壤 pH 值、无定型铁铝、有机质、粘粒等因素影响^[5-6]。与单施化肥相比, 长期施用有机物料不仅直接影响土壤各组分磷的含量, 还会引起土壤磷吸附相关土壤性质的变化^[7-8]。因此, 有必要研究长期不同施肥措施及相关土壤性质对稻田土壤磷吸附特性的影响, 以便更好地管控稻田富集磷的环境风险。

本研究以双季稻产区长期定位试验 (始于 1981 年) 为基础, 借助常用的几种等温吸附方程式, 即 Langmuir、Freundlich 及 Temkin 方程, 研究了不同施肥处理下水稻土磷的吸附特征以及影响水稻土磷吸附能力相关土壤性质的变化。研究结果可为水稻土磷素的科学管理, 优化红壤稻田施肥模式及环境风险控制等方面提供科学依据。

收稿日期: 2017-08-17; 最后修订日期: 2017-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41401234, 31660596); 江西省自然科学基金项目 (20151BAB214007, 20161BAB213080); 国家重点研发计划 (2017YFD0301601)。

作者简介: 洪欠欠 (1993-), 女, 安徽阜阳人, 在读研究生, 主要研究方向为植物营养与现代施肥技术。E-mail: yhq12369@163.com。

通讯作者: 魏宗强, E-mail: zqw85@163.com; 吴建富, E-mail: wjf6711@126.com。

1 材料与amp;方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自江西农业大学农业科技园的长期定位试验, 该长期定位试验始于 1981 年, 土壤类型为第四纪红色粘土发育的潯育型水稻土。土壤肥

力中上, 质地为重壤土。试验起始时, 土壤 pH 值 6.5, 有机质含量 $33.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量 $1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $90.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $20.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $87.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1[9]}$ 。至 2014 年, 各处理土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 各处理 0~15 cm 土壤的基本性质

处理	pH 值	粘粒	有机质	P-ox	Fe-ox	Al-ox	Mg-M3	Ca-M3
		(g · kg ⁻¹)						
无肥	4.84 ± 0.02c	18.35 ± 4.60a	32.22 ± 6.24a	202 ± 35c	5 520 ± 250ab	1 289 ± 30a	31.87 ± 0.85b	465 ± 26b
单施化肥	5.15 ± 0.02a	14.83 ± 5.78a	32.94 ± 1.91a	350 ± 23b	4 413 ± 220b	1 059 ± 28b	52.50 ± 0.96a	615 ± 17a
稻草	4.99 ± 0.05b	15.29 ± 0.17a	37.02 ± 0.90a	413 ± 27b	5 093 ± 543ab	1 348 ± 108a	47.47 ± 4.76a	560 ± 50ab
沼肥	5.00 ± 0.15b	10.69 ± 5.16a	32.98 ± 0.96a	567 ± 110a	6 200 ± 827a	1 288 ± 72a	49.73 ± 14.77a	620 ± 102a

注: P-ox、Fe-ox、Al-ox 表示酸性草酸铵浸提态磷、铁、铝; Mg-M3、Ca-M3 表示 Mehlich 3 浸提态镁、钙。同一列数字后面的不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

1.2 试验设计

土样采集涉及 4 个试验处理: (1) 无肥; (2) 单施化肥; (3) 稻草 (早稻以紫云英作基肥, 晚稻以稻草作基肥); (4) 沼肥 (早稻以紫云英和沼液作基肥, 晚稻以沼液作基肥), 试验为完全随机设计, 每处理 3 个重复。除无肥处理, 其余 3 个处理按等养分输入 ($\text{N} - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{K}_2\text{O} = 270 - 135 - 270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$), 其中早、晚稻肥料各占一半。稻草处理和沼肥处理具体养分施入量按每次的实际测定结果计算, 磷、钾养分不足的部分用化肥补足。化肥材料为尿素、钙镁磷肥、氯化钾。其中紫云英鲜草及稻草切碎后施用, 紫云英每公顷约施 22 500~30 000 kg, 稻草 (折合干草) 每公顷约施 3 000 kg, 沼液每公顷约施 15 000 kg。早、晚稻磷肥均用作基肥; 氮、钾肥均分基肥、分蘖肥、穗粒肥 3 次施用, 各期施用比例为 5:2:3。水稻生长期间的田间管理同当地常规措施。试验为微区试验, 小区间用水泥埂隔离, 各小区面积为 1.0 m^2 。

1.3 样品采集与测试

1.3.1 土壤采集与基本理化性质分析

于 2014 年晚稻收获后在各小区分别采集 0~15 cm 的耕层土壤样品, 每小区取 3 钻 (直径 5 cm) 组成一个混合样。待土壤样品自然风干后磨碎, 分别过 2 和 0.15 mm 筛, 用于测定土壤各项理化性质。

土壤 pH 值采用电位法测定 (土水比 1:2.5), 有机质通过重铬酸钾氧化法测定, 机械组成采用微吸管法测定。土壤无定型铁、铝及其结合态磷采用

酸性草酸铵 (pH 值 3.0) 浸提 (土液比 1:40 w/v); 交换态钙、镁采用 M3 浸提剂按 1:10 土液比浸提。酸性草酸铵与 M3 浸提液经离心、过滤后采用 ICP-OES 测定相应元素的含量^[10]。

1.3.2 土壤磷等温吸附试验

称取风干土样 ($< 2 \text{ mm}$) 1.00 g 置于 50 mL 的聚乙烯塑料离心管内, 每个土样称 9 份, 分别加入含不同磷浓度的 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液 20 mL (加 KH_2PO_4 配制), 磷浓度依次为 0、1、2、4、10、20、30、40、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时加入 3 滴氯仿以抑制微生物的活动, 加塞于 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温振荡 24 h , 之后用离心机以 $5 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min , 然后立刻用慢速滤纸过滤, 吸取适量滤液进行磷的测定, 根据其浓度变化计算土壤的吸磷量。固体表面磷吸附量可通过计算吸附试验前后溶液磷浓度之差求得。

采用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 3 种等温吸附方程拟合土壤磷等温吸附曲线, 并计算相关参数值。其中,

Langmuir 等温吸附方程:

$$C/X = C/X_m + 1/(K_1 X_m)$$

式中的 C 为平衡液磷浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), X 为磷吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), X_m 为最大吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), K_1 为吸附常数 ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$), 本研究中 X 是等温吸附试验固体表面磷吸附量与原始吸附磷 (P-ox) 之和^[11]。采用 Langmuir 方程进一步计算土壤最大缓冲容量 (MBC) 与磷吸附饱和度 (DPS)。其中, $\text{MBC} = K_1 \times X_m$, 是判断土壤

供磷特性的一项综合指标^[12-14], 该值越大, 说明土壤贮存磷的能力越强, 供磷特性越大; $DPS = (P - ox/X_m) \times 100\%$, 是评判农田土壤磷素流失风险的重要指标, 一般认为, DPS 越高, 土壤磷流失风险越大^[15]。

Freundlich 等温吸附方程:

$$\lg X = n \lg C + \lg K_2$$

式中 X 同上, C 同上, K_2 为磷吸附常数 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), n 为强度常数 ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

Temkin 等温吸附方程:

$$X = a + K_3 \ln C$$

式中 X 同上, C 同上, K_3 为磷吸附常数 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), a 为强度常数^[16]。

1.4 数据处理

试验结果经 Excel 2003 处理后, 用 SPSS 10.0 软件进行数据统计、方差分析、相关分析及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 土壤磷吸附特性

在试验所添加磷浓度范围内, 各处理土壤磷吸附量均随磷浓度的增加逐渐增大 (图 1)。其中, 在 $0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 各处理土壤吸磷量增速最大, 而后各处理土壤磷吸附趋势有所放缓。即在低磷浓度时, 曲线上升快而陡, 随着加入磷浓度的

增大, 曲线趋于平缓。说明在低浓度时, 加入的磷极易被土壤吸附, 达到一定浓度时土壤吸磷量可能基本达到饱和状态。在 4 个处理中, 沼肥处理土壤磷吸附量明显高于其余 3 个处理, 而稻草与单施化肥处理的土壤磷吸附量比较接近 (图 1)。

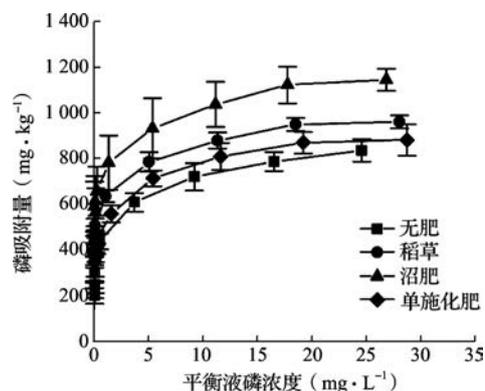


图 1 不同处理土壤磷的等温吸附曲线

分别采用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 等温吸附方程, 对各处理土壤磷的等温吸附曲线进行了拟合, 结果如表 2 所示。3 种方程均能较好地描述土壤吸磷量随平衡液磷浓度的变化趋势, 拟合均达到显著水平 ($P < 0.05$)。但是, Langmuir 方程的拟合优势度 R^2 值均大于 0.99, 较 Freundlich 方程和 Temkin 方程高, 拟合效果更好, 所以本试验进一步用 Langmuir 方程来描述各处理磷的吸附特性。

表 2 不同处理土壤磷的等温吸附方程及参数

处理	Langmuir 等温吸附式 $C/X = C/X_m + 1/K_1 X_m$			Freundlich 等温吸附式 $\lg X = n \lg C + \lg K_2$			Temkin 等温吸附式 $X = a + K_3 \ln C$		
	X_m	K_1	R^2	$\lg K_2$	n	R^2	a	K_3	R^2
无肥	828 ± 44c	2.10 ± 0.36a	0.996	2.66 ± 0.05c	0.20 ± 0.02a	0.961	519 ± 50c	90.91 ± 5.02a	0.975
单施化肥	885 ± 58bc	2.08 ± 0.30a	0.997	2.74 ± 0.03b	0.15 ± 0.01b	0.966	586 ± 43b	85.59 ± 7.16ab	0.960
稻草	962 ± 28b	2.74 ± 1.30a	0.998	2.80 ± 0.02b	0.13 ± 0.0bc	0.939	667 ± 28b	84.17 ± 4.14b	0.945
沼肥	1 143 ± 57a	2.66 ± 1.09a	0.995	2.89 ± 0.06a	0.12 ± 0.02c	0.965	810 ± 98a	94.44 ± 5.96a	0.954

如表 3 所示, 不同施肥处理土壤磷最大吸附量 (X_m) 依次为: 沼肥 > 稻草 > 单施化肥 > 无肥, 且沼肥与稻草处理显著高于无肥处理 ($P < 0.05$), 说明相对不施肥而言, 长期施用有机物料提高了土壤对磷的吸附潜能。各处理吸附常数 (K_1) 大小顺序为稻草 > 沼肥 > 无肥 > 单施化肥, 但处理间无显著差异 (表 3)。沼肥与稻草处理的 MBC 值较高, 主要是由于它们具有较高的 X_m 值和 K_1 值。这两个

处理的土壤贮存磷的能力强, 供磷特性大, 能向土壤提供更多的有效磷。各处理土壤 DPS 大小依次为沼肥 > 稻草 > 单施化肥 > 无肥, 且处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。沼肥、稻草和单施化肥的 DPS 值均显著高于无肥处理 ($P < 0.05$), 说明施肥提高了土壤 DPS 值。其中沼肥的 DPS 值显著高于单施化肥, 说明长期施用沼肥更易提高土壤 DPS 值, 土壤磷流失风险比较大, 易引发一系列环境问题。

表3 不同处理土壤磷的吸附参数

处理	土壤最大吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	吸附常数 ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)	土壤最大缓冲容量 ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	磷素吸附饱和度 (%)
无肥	828 ± 44c	2.10 ± 0.36a	1 750 ± 385a	24.29 ± 2.97c
单施化肥	885 ± 58bc	2.08 ± 0.30a	1 839 ± 276a	39.58 ± 0.40b
稻草	962 ± 28b	2.74 ± 1.30a	2 629 ± 1 247a	42.85 ± 1.77ab
沼肥	1 143 ± 57a	2.66 ± 1.09a	3 082 ± 1 358a	49.34 ± 7.22a

2.2 影响磷吸附的土壤性质

2.2.1 土壤性质与磷吸附参数之间的关系

由表4可以看出,草酸浸提态磷(P-ox)、无定型铁、铝(Fe-ox、Al-ox)及交换性钙、镁(Ca-M3、Mg-M3)对土壤的吸磷能力有重要的影响。其中,P-ox和Fe-ox分别与土壤 X_m 呈极显著($P < 0.01$)和显著($P < 0.05$)正相关,相关系数分别达到0.95和0.64。说明P-ox和Fe-ox是影响

土壤磷最大吸附量的重要因素,其含量越高,土壤对磷的吸附能力越强。土壤中的P-ox与DPS存在极显著的正相关关系($P < 0.01$),Ca-M3与Mg-M3也影响了DPS值,与DPS存在极显著的正相关关系($P < 0.01$)。土壤pH值、有机质和粘粒含量对土壤磷吸附参数影响相对较小,相关性不显著。土壤磷吸附亲和力常数(K_1)与土壤基本性质间无显著相关性。

表4 土壤性质与磷吸附参数之间的相关系数

吸附参数	pH值	有机质	P-ox	Fe-ox	Al-ox	Ca-M3	Mg-M3	粘粒
X_m	0.17	0.05	0.95**	0.64*	0.35	0.54	0.44	-0.4
K_1	-0.17	0.17	0.46	0.23	0.52	-0.03	0	-0.02
MBC	-0.09	0.12	0.70*	0.43	0.54	0.16	0.14	-0.15
DPS	0.52	0.11	0.97**	0.29	0.11	0.75**	0.73**	-0.50

注:*表示显著相关($P < 0.05$),**表示极显著相关($P < 0.01$)。下同。

如表5所示,影响磷吸附的土壤性质之间也存在相互关系。土壤pH值与交换性钙、镁之间存在极显著的相关关系($P < 0.01$),与无定型铝呈显著负相关($P < 0.05$),与无定型铁相关关系不显著。无定型铁、铝之间存在显著的正相关关系($r = 0.64$,

$P < 0.05$),交换性钙、镁之间存在极显著的正相关关系($r = 0.97$, $P < 0.01$)。值得注意的是,P-ox与交换性钙、镁之间存在显著的正相关关系($P < 0.05$),相关系数分别为0.69和0.63。

表5 影响磷吸附土壤性质之间的相关系数

	pH值	有机质	P-ox	Fe-ox	Al-ox	Mg-M3	Ca-M3	粘粒
pH值	1							
有机质	0.10	1						
P-ox	0.38	0.07	1					
Fe-ox	-0.30	-0.06	0.50	1				
Al-ox	-0.59*	0.26	0.24	0.64*	1			
Mg-M3	0.92**	0.13	0.63*	0	-0.3	1		
Ca-M3	0.88**	-0.01	0.69*	0.11	-0.34	0.97**	1	
粘粒	-0.50	-0.07	-0.50	-0.21	0.08	-0.62*	-0.67*	1

2.2.2 影响磷吸附参数的主要土壤性质

对12个样点的土壤理化性质及最大吸磷量进行了主成分分析,结果如表6所示,特征值大于1的3个主成分累计贡献率为87.6%,因此,本次分

析提取了3个主成分。第一主成分主要与土壤交换性钙、镁含量有关,对数据变异的贡献率为47.0%;第二主成分对数据变异的贡献率为28.5%,主要与土壤无定型铁、铝含量有关;第三主成分对数据变

异的贡献率为 12.1%，主要与有机质含量有关。综上，交换态钙、镁与无定型铁、铝对第一、二主成分贡献率最大，说明这些因素是引起长期不同施肥措施土壤磷吸附差异的主要因素（图 2）。

表 6 旋转因子载荷矩阵

参数	主成分		
	1	2	3
pH 值	0.38	-0.36	-0.10
有机质	0.04	0.06	-0.94
Mg - M3	0.45	-0.16	-0.09
Ca - M3	0.47	-0.12	0.07
Fe - ox	0.12	0.53	0.18
P - ox	0.40	0.28	0.05
Al - ox	-0.08	0.56	-0.23
粘粒	-0.36	-0.00	0.02
X_m	0.34	0.39	0.09
载荷值	4.23	2.57	1.09
贡献率 (%)	47.0	28.5	12.1
累计贡献率 (%)	47.0	75.5	87.6

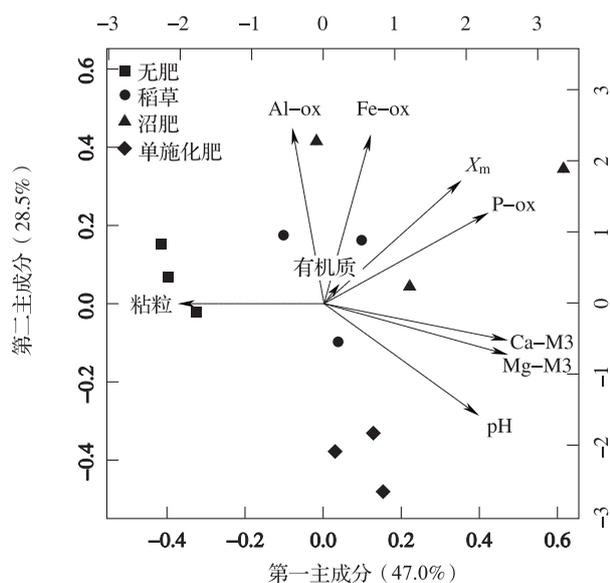


图 2 各处理土壤磷吸附与相关土壤性质在第一主成分与第二主成分上的分布

注：括号中数字表示相应主成分的贡献率。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对水稻土壤磷吸附特性的影响

本研究采用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 方程拟合不同施肥处理水稻土壤磷的吸附曲线，发现 Langmuir 方程拟合效果最优，拟合优势度大于 0.99，这与有关学者^[14]在南方酸性水稻土及北方石灰性旱地土壤上试验所得结果基本一致。有研

究^[17]指出，在施用磷肥的基础上添加有机肥，土壤最大吸磷量随着有机肥用量的增加明显降低。杨芳等^[18]也认为长期厩肥与化肥配施可降低红壤磷最大吸附量。本研究中，沼肥处理表现出较高的磷吸附能力，最大吸磷量显著高于其它处理（表 3），这与前人的研究结论不太一致，主要是因为 X_m 计算方法不同，本研究中 X_m 的计算加上了土壤初始吸磷量（P - ox），而上述相关研究并未计算土壤初始吸磷量。沼肥处理 P - ox（即土壤初始吸磷量）显著高于其它处理（表 1），从而导致其具有较高的 X_m 值。

3.2 土壤相关性质对水稻土壤磷吸附特性的影响

土壤对磷的吸附能力与土壤理化性质有关，同一土壤在长期不同施肥方式下性质发生变化，对磷的吸附能力也会发生相应变化。一般来讲，铁、铝氧化物是酸性土壤主要的固磷介质^[5]。不同施肥处理 Fe - ox 与 X_m 呈显著的正相关关系（表 4），说明无定型铁对该水稻土的磷吸附有重要贡献。有研究指出，土壤吸磷能力还与晶质氧化铁、铝有关^[19]，本研究未测定晶质氧化铁、铝含量，主要是因为相比无定型铁、铝，晶质铁、铝氧化物对磷的吸附能力相对较低^[5]。另外，铁铝氧化物可能会与有机质形成有机 - 无机复合物，其中的铁、铝为无定型，从而增加对磷的吸附^[7, 11]。有机物料处理的 Fe - ox、Al - ox 含量较高（表 1），说明施用有机物料可以促进有机 - 无机复合物的形成，从而提高了土壤对磷的吸附能力（沼肥与稻草处理的 X_m 较高）。钙离子也是影响土壤磷吸附的重要因素，特别是在中性与碱性土壤中，钙结合磷是土壤磷的主要形态，但是在酸性土壤中仍然存在钙结合磷^[20-21]。本研究发现交换态钙、镁与 P - ox 及 X_m 存在较高的相关性，说明在此酸性水稻土中，交换态钙、镁对磷的吸附仍有影响。沼肥等有机肥盐基离子较丰富，呈弱碱性，长期施用可能会增加土壤钙、镁含量^[22]，从而进一步影响土壤对磷的吸附。以往研究发现，有机质在土壤磷吸附中的作用非常复杂，一方面有机质可以与铁、铝氧化物形成有机 - 无机复合物，增加对磷的吸附位点而有利于磷的吸附^[11]。另一方面，有机质产生的有机阴离子又与磷竞争吸附点位，降低磷的吸附量^[18]。本研究中，有机质与土壤磷吸附参数并没有表现出明显的相关性。这与夏瑶等^[14]、宋春丽等^[23]研究结果一致。

4 结论

不同施肥处理水稻土壤的磷素吸附等温线可以用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 3 种方程拟合, 而 Langmuir 方程对不同施肥处理水稻土壤的等温吸附数据拟合优势度高于 Freundlich 和 Temkin 方程, 是最优模型。基于 Langmuir 方程发现, 长期施用沼肥的土壤 X_m 和 DPS 显著高于无肥与单施化肥处理, 说明等磷施用情况下施用沼肥可更有效地提高土壤磷水平与贮磷能力。不同施肥措施引起土壤理化性质变化会进一步影响土壤对磷的吸附特性。土壤中的 Fe-ox 与 P-ox 均与 X_m 值存在显著或极显著正相关关系, P-ox 和交换态钙、镁含量会影响土壤 DPS , 交换态钙、镁和无定型铁、铝是引起长期不同施肥措施土壤磷吸附差异的主要因素。

参考文献:

- [1] Liu Q H, Shi X Z, Weindorf D C, et al. Soil organic carbon storage of paddy soils in China using the 1:1 000 000 soil database and their implications for C sequestration [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20: 836-839.
- [2] 金相灿, 叶春, 颜昌宙, 等. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究 [J]. *环境科学研究*, 1999, 12 (5): 1-5.
- [3] Cherry K A, Shepherd M, Withers P J A, et al. Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: A review of methods [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 406: 1-23.
- [4] Kleinman P J A, Sharpley A. Estimating soil phosphorus sorption saturation from Mehlich-3 data [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33: 1825-1839.
- [5] Havlin J L, Beaton J D, Nelson W L, et al. *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* 8th ed [M]. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2013.
- [6] Börling K, Otbong E, Barberis E. Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated swedish soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 59 (1): 39-46.
- [7] Yan X, Wei Z Q, Wang D J, et al. Phosphorus status and its sorption-associated soil properties in a paddy soil as affected by organic amendments [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15 (9): 1882-1888.
- [8] Pizzeghello D, Berti A, Nardi S, et al. Phosphorus-related properties in the profiles of three Italian soils after long-term mineral and manure applications [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 216-228.
- [9] 卢志红, 嵇素霞, 张美良, 等. 长期定位施肥对水稻土磷素形态的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (5): 1065-1071.
- [10] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] Yan X, Wang D, Zhang H, et al. Organic amendments affect phosphorus sorption characteristics in a paddy soil [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 175: 47-53.
- [12] 张迪, 魏自民, 李淑芹, 等. 生物有机肥对土壤中磷的吸附和解吸特性的影响 [J]. *东北农业大学学报*, 2005, 36 (5): 571-575.
- [13] 赵庆雷, 王凯荣, 谢小立. 长期有机物循环对红壤稻田土壤磷吸附和解吸特性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42 (1): 355-362.
- [14] 夏瑶, 娄运生, 杨超光, 等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35 (11): 1369-1374.
- [15] 夏海勇, 王凯荣. 有机质含量对石灰性黄潮土和砂姜黑土磷吸附-解吸特性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (6): 1303-1310.
- [16] 张亮. 长期施肥对栗褐土钾素、磷素吸附与解吸特性的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- [17] 李想, 刘艳霞, 刘益仁, 等. 有机无机肥配合对土壤磷素吸附、解吸和迁移特性的影响 [J]. *核农学报*, 2013, 27 (2): 253-259.
- [18] 杨芳, 何园球, 李成亮, 等. 不同施肥条件下旱地红壤磷素固定及影响因素的研究 [J]. *土壤学报*, 2006, 43 (2): 267-272.
- [19] 石孝洪. 三峡水库消落区土壤磷释放特征及环境风险 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.
- [20] 梁美英, 卜玉山, 张广峰, 等. 石灰性土壤吸磷差异及其与土壤性质的关系 [J]. *山西农业科学*, 2011, 39 (6): 564-571.
- [21] Yan X, Wei Z Q, Hong Q Q, et al. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources [J]. *Geoderma*, 2017, 295: 80-85.
- [22] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 2048-2057.
- [23] 宋春丽, 樊剑波, 何园球, 等. 不同母质发育的红壤性水稻土磷素吸附特性及其影响因素的研究 [J]. *土壤学报*, 2012, 49 (3): 607-611.

[下转第 84 页]

Assessment of red soil upland fertility in long-term fertilization based on fuzzy mathematics and principal component analysis

YANG Xu-chu, YE Hui-cai, LI Da-ming*, YU Xi-chu, LIU Kai-lou, HU Qiu-ping, HU Zhi-hua, GU Zi-han, HU Hui-wen, ZHOU Li-jun, HUANG Qing-hai, LIN Xiao-bing (Jiangxi Institute of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang Jiangxi 331717)

Abstract: In order to assess the red upland soil fertility under long-term different fertilization patterns, 5 indexes, including the soil pH, organic matter content, available phosphorus content, available potassium content and cation exchange capacity were selected to assess and compare the comprehensive soil fertility under different fertilization patterns after 30 years by fuzzy mathematics and principal component analysis in double-maize cropping system from 1986 in red upland soil. The results showed that the KMO of data sphericity test was 0.73, and the bartlett was 127.98, the principal component analysis could be carried out with these data. The soil nutrient index (SNI) of application of chemical fertilizer combined with pig manure was the highest (0.94), followed by single application of pig manure (0.92), and the single application of nitrogen fertilizer (0.42) was the lowest. Therefore, the application of organic manure or organic manure combined chemical fertilizer is wise measure to maintain and improve soil fertility in red dryland soil.

Key words: long-term fertilization; red soil upland; maize; fertility assessments

[上接第 66 页]

Effects of long-term fertilization on phosphorus sorption and soil properties in paddy soil

HONG Qian-qian, YAN Xiao, WEI Zong-qiang*, WU Jian-fu* (School of Environmental and Land Resource Management, Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resource and Ecology of Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045)

Abstract: The effects of long-term different fertilization practices (initiated in 1981) and resultant changes in soil properties on phosphorus (P) sorption characteristics were studied using P sorption isotherm experiment. We selected 12 soil samples at depth of 0 ~ 15 cm from a long-term field trial with four fertilization practices including no fertilizer (CK), only application of chemical fertilizer, straw retention, and biogas slurry incorporation. The results showed that the amount of sorbed P increased with initial added P concentration increasing. The Langmuir equation was more ideal than Freundlich and Temkin equations in fitting the P sorption isotherm, which had determination coefficients greater than 0.99 for all treatments. Biogas slurry incorporation had the greatest Langmuir P sorption maximum (X_m), which was significantly higher than the other three treatments ($P < 0.05$), followed by straw retention and chemical fertilization treatments, and the lowest in CK. In addition, biogas manure treatment had the highest value of degree of P saturation. However, there were no significant differences in the constant related to the bonding strength and maximum buffer capacity among the four treatments. Oxalate-extracted Fe, Al, and P (Fe-ox, Al-ox, and P-ox, respectively), and Mehlich 3-extracted Ca and Mg (Ca-M3 and Mg-M3) were positively correlated with X_m , especially for P-ox and Fe-ox, for which the correlation coefficient was 0.95 ($P < 0.01$) and 0.64 ($P < 0.05$), respectively. Principal component analysis showed that Fe-ox, Al-ox, Ca-M3 and Mg-M3 contributed mostly to the variation of P sorption characteristics among the four fertilization regimes. Compared with CK and chemical fertilizer application treatments, long-term incorporation of biogas manure increased the contents of amorphous Fe and Al minerals in paddy soil, and thus enhanced soil P sorption capacity.

Key words: phosphorus; paddy soil; phosphorus sorption; biogas manure