

红壤基质组分对磷吸持指数的影响*

王艳玲^{1,2} 章永辉² 何园球³

(1 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044)

(2 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

(3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 在红壤旱地肥料长期定位试验(始于1988年)中,选取了无机肥试验区的NPK、NP、NK、PK,有机无机配施试验区的CK、CK+猪厩肥(BM)及CK+花生秸秆(SR)等7个施肥处理土壤,测定了土壤磷吸持指数(Phosphate sorption index, PSI),分析了PSI与红壤最大吸磷量(X_m)的相关关系,讨论了土壤pH、有机质、黏粒、铁铝氧化物及无机磷酸盐等基质组分对PSI的影响。结果表明:长期施磷或配施有机肥均可显著降低红壤PSI值,随着土壤pH的升高、有机质及铁结合态磷酸盐(Fe-P)含量的增加,红壤PSI显著降低;土壤游离铁铝氧化物及黏粒含量越高,PSI也越大。PSI与 X_m 呈显著线性相关关系($X_m = 0.5PSI + 412.8, n = 15, r = 0.967^{**}, p < 0.01$),因此,可以用PSI替代 X_m 来表征土壤固磷能力,亦可由PSI的大小来推断土壤磷的供磷能力。

关键词 红壤;磷吸持指数;有机质;pH;铁铝氧化物;磷酸盐组成

中图分类号 S158.5 **文献标识码** A

磷是所有生命体形成的基本元素,在土壤-植物-动物系统中近75%~90%的磷累积在土壤中,土壤磷素的丰缺、磷环境的优劣,将直接反映环境与生态系统的好坏,土壤的吸磷容量决定着土磷在固液相间的平衡,影响着植物对液相磷的吸收与有效利用^[1-2]。土壤固磷能力是了解土壤磷素肥力特性及其环境行为的重要参数^[3-6],通常是由Langmuir或Freundlich方程对一组磷的吸附值进行拟合计算得出的土壤最大吸磷量(X_m)来表征^[7-8],此种方法对于大量土壤样本的研究来说,不仅复杂且耗时、费用高。为了克服这些缺点,Bache和Williams根据土壤磷吸附动力学原理,采用高磷浓度(P 150 mg 100 g⁻¹)的稀电解质液与土壤长时间(18 h)平衡作用后,计算得出土壤吸磷量,并将其定义为“Phosphate Sorption Index (PSI)”,即土壤磷吸持指数^[9],用以表征土壤固相磷向液相释放的可能性大小,且有研究发现,土壤磷吸持指数(PSI)与土壤最大吸磷量(X_m)呈显著线性正相关关系^[10-11]。因此,本文将长期施肥下的旱地红壤为研究材料,探讨土壤

磷吸持指数(PSI)对红壤最大吸磷量(X_m)的替代表征作用,以及红壤基质组分与土壤磷吸持指数(PSI)之间的相关关系,旨在为红壤固磷能力的有效速测及磷肥合理施用体系的建立提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 长期试验地概况

长期肥料定位试验于1988年建在江西省鹰潭农田生态系统国家野外研究站内(N 28°04'~28°37', E 116°41'~117°09')。供试土壤为第四纪红黏土发育的典型红壤。有机无机肥配施试验区设:CK(1/2NPK)、CK+猪厩肥(BM)、CK+绿肥、CK+稻秆和CK+花生秸秆本田还田(SR),共5个处理;无机肥试验区设:NPKCaS、NPKCa、NPK、NP、PK和NK,共6个处理(Ca代表施用石膏,S代表施用微量元素)。试验小区面积为33 m²,每个处理重复3次,随机排列。1995年以前进行花生和油菜轮作,后改

* 国家自然科学基金项目(No. 40901146)、江苏省高校自然科学基金项目(No. 10KJB210003)、江苏省高校“青蓝工程”资助及江苏高校优势学科建设工程项目资助

作者简介:王艳玲(1976—),女,吉林省舒兰市人,博士,副教授,主要从事土壤磷素的环境行为模拟与控制。E-mail: ylwang@nuist.edu.cn; wangyl2117@hotmail.com

收稿日期:2011-07-14;收到修改稿日期:2011-12-08

为一季花生,冬季休田。

1.2 土壤样品采集

土壤样品采自于 NPK、NP、NK、PK 及 CK、CK + 厩肥(BM)、CK + 花生秸秆(SR)共 7 个小区的耕层

(0 ~ 15 cm) 土壤,每个小区肥料用量见表 1。2004 年秋季(花生收获一个月后)在每个小区内按“S”形采集 15 点样品,混匀后,用四分法取约 2.5 kg 土壤带回室内,风干,磨细后过筛备用。

表 1 供试试验小区肥料用量

Table 1 Fertilizer application rate of each trial plot per year

试验小区 Tested plot	肥料处理 Fertilizer treatment	肥料用量 Application rate of fertilizers (kg hm ⁻² a ⁻¹)				
		N	P	K	鲜猪粪 Fresh pig manure	风干花生秸秆 Dry peanut straw
单施无机肥 Inorganic fertilizer application	NPK	120	39.3	117.7		
	NP	120	39.3			
	NK	120		117.7		
	PK		39.3	117.7		
有机无机配施 Combined application of organic-chemical fertilizers	CK	60.0	19.65	58.85		
	BM	60.0	19.65	58.85	30 000	1 260
	SR	60.0	19.65	58.85		

1.3 土壤磷吸持指数(P_{SI})的测定^[9]

称取 1.00 g 过 2 mm 筛的风干土,置于 50 ml 离心管中,加入 20 ml 磷浓度为 75 mg L⁻¹ 的稀电解质溶液(磷的加入量相当于 1.5 g kg⁻¹ soil),并加入两滴氯仿防止微生物活动。将离心管加盖后,于 25 ± 2℃ 的室温下,用往复振荡机振荡 18 h 后,离心、过滤,用钼蓝比色法测定滤液中磷的量。P_{SI} 的计算公式如下:

$$P_{SI} (\text{mg kg}^{-1} \text{ 或 } \text{L kg}^{-1}) = \frac{X}{\log_{10} C}$$

式中, X 为土壤磷吸附量(P mg kg⁻¹ soil); C 为溶液中磷浓度(P mg L⁻¹)。

1.4 土壤基质组分和相关指标测定

有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定;pH 采用电位法测定,液土比为 2.5:1;无机磷分级采用张守敬和 Jackson 提出的方法将土壤无机磷分为 Al-P(铝结合的磷酸盐)、Fe-P(铁结合的磷酸盐)、Oc-P(闭蓄态磷酸盐)、Ca-P(钙结合的磷酸盐);游离铁铝氧化物采用 DCB 法浸提,用 ICP 测定溶液中的铁、铝的量;非晶质氧化物采用酸性草酸铵法,浸提液为 0.2 mol L⁻¹ (NH₄)₂C₂O₄ (pH = 3.0 ~ 3.2),液土比为 50:1,在 25℃ 闭光条件下恒温振荡 2 h,离心后将浸提液稀释 10 倍,用 ICP 法测定溶液中的铁、铝。上述分析项目具体操作步骤详见文献[12]。

颗粒组成分析^[13]:称取过 10 目筛的风干土样

0.1 g 左右于 50 ml 烧杯中,加少量蒸馏水使样品湿润,加入适量过氧化氢去除有机质,静置过夜,用加热法将过量的过氧化氢排除,然后加入 1.5 ml 0.5 mol L⁻¹ 的氢氧化钠分散剂分散并静置过夜,用 KQ-400DB 数控超声波仪器在室温 22℃ 的环境下超声 10 min,用 Coulter LS230 激光粒度分析仪测定。采用美国制将土粒细分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.05 mm)、砂粒(0.05 ~ 2 mm)3 个粒级。

1.5 统计分析

数据统计分析采用 SPSS13.0 软件,并用 DPS12.0 进行逐步回归分析;绘图采用 ORIGIN8.5 软件。

2 结果与讨论

2.1 磷吸持指数对红壤固磷能力的表征作用

红壤长期施磷或配施有机肥均可显著降低土壤磷吸持指数(P_{SI}) (表 2),无机肥区的 NK 处理由于长期没有外源磷输入,土壤磷的吸附点位相对较多,其 P_{SI} 值也最高。与 NK 处理相比,长期施磷使 NPK、NP 和 PK 等处理的 P_{SI} 值降低了 59.1% ~ 61.8%。在施用化学磷肥的基础上配施猪厩肥可使红壤 P_{SI} 降低 48.8%,而花生秸秆还田处理的 P_{SI} 只降低了 4.9%。在前面的研究中^[4] 我们通过测定磷的等温吸附曲线,已由 Langmuir 方程对磷的吸附实

验值进行拟合,并计算得出了土壤最大吸磷量(X_m)。通过相关分析发现 PSI 与 X_m 之间呈显著线性正相关关系($X_m = 0.5 \text{ PSI} + 412.8$, $r = 0.967^{**}$)。土壤磷最大缓冲能力(Maximum buffer capacity, MBC)及标准需磷量(Standard P requirement, SPR)分别是用来表征土壤供磷能力及土壤磷素的容量因子,由图 1 可

以看出,红壤磷吸持指数(PSI)与二者之间均呈显著线性相关关系($r = 0.997^{**}$)。由此可见,可以用土壤磷吸持指数(PSI)替代土壤最大固磷量(X_m)来表征红壤的固磷能力,并可由 PSI 的大小推测土壤供磷能力,此种方法操作简单、省时,结果可靠,适于大量样本的分析。

表 2 长期施肥对红壤磷吸持指数(PSI)的影响

Table 2 Effect of long-term fertilizer application on PSI in red soil

试验小区 Test plot	肥料处理 Fertilizer treatment	土壤磷吸持指数 ¹⁾ PSI (mg kg^{-1})	降低量 Decrease	降低百分数 Decrease in percentage (%)
无机肥 Chemical fertilizer application	NK	1 619.8 ± 30.0 a		
	NPK	618.8 ± 13.0 b	-1 001.1	-61.8
	NP	645.8 ± 22.0 b	-974.0	-60.1
	PK	662.4 ± 22.6 b	-957.4	-59.1
有机无机配施 Combined application of organic-chemical fertilizers	CK	597.3 ± 7.9 a [‡]		
	BM	305.9 ± 18.0 c	-291.4	-48.8
	SR	568.0 ± 16.1 b	-29.3	-4.9

1) 相同试验区内字母不同的处理表示在 0.05 水平上差异显著 The difference between values followed by same letters in the same column is not significant at $p < 0.05$

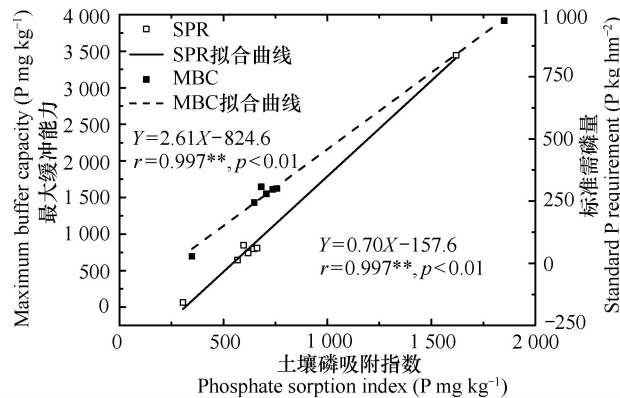


图 1 红壤磷吸持指数(PSI)与最大缓冲能力(MBC)及标准需磷量(SPR)的相关关系

Fig. 1 Correlation between maximum buffer capacity, standard P requirement and PSI in red soil

2.2 红壤基质组分对磷吸持指数影响

土壤是一个非均质体,外源磷一旦与土壤接触,就会被土壤颗粒迅速吸附在表面,并且随着与土壤作用时间的延长,会发生各种缓慢吸附作用使部分外源磷沉积在土壤颗粒内部。土壤的固磷能力是受土壤基质组成影响的一个复杂函数^[14-15],下面将讨论红壤 PSI 对土壤 pH、有机质、铁铝氧化物、黏粒含量及无机磷酸盐等基质组分变化的响应规律。

2.2.1 土壤 pH pH 是影响土壤磷吸附能力的重要环境因子之一,土壤 pH 主要影响着溶液中磷酸根离子的解离,对可变电荷土壤而言,pH 的变化意味着土壤电荷的改变^[16]。土壤 pH 是土壤形成与熟化过程中的一个重要指标,对土壤的理化性质、养分元素的存在形态和有效性、微生物活动以及植物生长发育都有很大的影响。长期施磷或配施有机肥均可以有效改善红壤的酸性环境(表 3),PK 处理与配施猪厩肥处理土壤 pH 每年可增加 0.09 个单位,提高速度最快,其次是 NP 和花生秸秆还田处理,NPK 处理的增加速度相对最小。磷肥的长期缺失可以加速红壤酸化,NK 处理土壤 pH 以每年 0.01 个单位下降,导致土壤自然供磷能力低下,作物生长受阻^[17]。

相关分析表明(表 3),红壤 PSI 与 pH 之间呈显著负相关关系($r = -0.856^*$, $p < 0.05$),即土壤酸性越强,红壤的固磷能力也越强,这就意味着改善红壤的酸性环境,可能增大磷在土壤溶液中的浓度,进而提高土壤的供磷能力。但也有研究发现^[18],在高度风化的酸性土壤中,土壤 pH 升高后土壤磷的固定量并没有降低,甚至随着 pH 的上升,溶液磷反而减少了。有人认为^[19]这种现象的发生是由于在酸性土壤上施用了石灰,当 pH 达到 5.0 ~

5.5, 代换性铝被沉淀为带正电荷的聚合态铝, 覆盖在土壤胶体上, 从而减少了土壤的净负电荷。这种

聚合物本身, 或者它们的有机络合物具有 Al-OH 的表面, 进而增加了土壤对磷的吸附面。

表 3 长期施肥对红壤 pH 的影响 (1988-2004 年)

Table 3 Effect of long-term fertilization on pH in red soil (1988-2004)

试验小区 Test plot	肥料处理 Fertilizer treatment	pH	变化量 Variation	年变化率 Annual variation rate	pH 与 PSI 相关性 Correlation between pH and PSI
无机肥 Chemical fertilizer application	试验前 Pre-experiment	4.60			$Y_{PSI} = -585.6X_{pH} + 3\ 914.2$ $r = -0.856^*$ $p < 0.05$ $n = 7$
	NPK	5.30	0.70	0.04	
	NP	5.39	0.79	0.05	
	PK	6.08	1.48	0.09	
	NK	4.38	-0.22	-0.01	
有机无机配施 Combined application of organic-chemical fertilizers	试验前 Pre-experiment	4.65			
	CK	5.30	0.65	0.04	
	BM	6.24	1.59	0.09	
	SR	5.53	0.88	0.05	

2.2.2 有机质与黏粒 土壤有机质对土壤的吸磷能力的影响较为复杂, 一方面有机质可提供与磷酸根竞争吸附点位的阴离子, 使吸附量下降; 另一方面, 有机质释放出的 H^+ 可以使矿物表面基团质子化而利于磷的吸附, 所以, 有机质既可以增加、减少或者不影响土壤对磷的吸附能力^[11,15]。在本研究中发现, 随着有机质含量的增加, 红壤的 PSI 呈下降趋势, 二者之间呈显著线性负相关关系 ($r = 0.896^{**}$, $p < 0.01$) (表 4)。纯的有机质是带有负电荷的, 对磷酸盐没有吸附作用。但是, 当纯的有

机物质进入土壤后与铁铝氧化物等基质结合后就会影响到土壤对磷的吸附能力^[20]。有学者认为^[21], 土壤中天然存在的有机酸阴离子和磷酸根之间存在着竞争吸附, 它们与土壤表面的反应也是一种配位交换。在土壤胶体表面, 磷的吸附位和有机酸根的吸附位是不一样的, 但也存在着既能吸附磷又能吸附有机酸阴离子的吸附位。土壤有机质既可以“封闭”氧化铁铝表面磷吸附点位、减少磷的吸附, 又可以形成稳定的“Al-有机质-P 络合物”及“Fe-有机质”络合物, 增加土壤吸附磷的能力^[22-23]。

表 4 红壤有机质及黏粒组成与土壤磷吸持指数的相关关系

Table 4 Relationships of phosphate sorption index with organic matter and clay contents in red soils

试验小区 Test plot	肥料处理 Fertilizer treatment	有机质 OM ($g\ kg^{-1}$)	有机质与 PSI 相关性 Relationship between OM and PSI	黏粒体积含量 Clay volume content (%)	黏粒体积含量与 PSI 相关性 Relationship between clay volume content and PSI
无机肥 Chemical fertilizer application	NPK	12.75	$PSI = -0.14OM + 2.68$	23.2	$PSI = 0.12\ Clay - 2.14$
	NP	15.30	$r = -0.896^{**}$ $p < 0.01$ $n = 7$	25.7	$r = 0.770^*$ $p < 0.05$ $n = 7$
	PK	14.60		23.6	
	NK	8.77		27.2	
有机无机配施 Combined application of organic-chemical fertilizers	CK	12.57		22.3	
	BM	16.83		18.9	
	SR	14.43		24.5	

土壤黏粒是土壤显示表面活性的主要固相部分, 它的无机组成部分主要由层状硅酸盐和铁、锰、铝的氧化物, 以及组分不确定的凝胶类硅酸盐, 土

壤黏粒表面带有电荷, 能与土壤中的各种粒子相互作用, 影响土壤中的物理、化学、生物过程和性质。同时土壤黏粒矿物表面具有配体官能团, 它的络合

反应影响土壤氧化物对磷的吸附^[19]。由表 4 可知,随着土壤黏粒含量的增加,红壤磷吸持指数增大,即固磷能力增强($r = 0.770^*$, $p < 0.05$)。

2.2.3 铁铝氧化物 铁、铝氧化物是酸性红壤中最常见和含量较高的氧化物,也是土壤结构体的重要胶结物质,影响磷在土壤中的浓度、形态、化学行为及其生物有效性^[24-25]。从表 5 可以看出,不同的施肥措施对红壤中游离氧化物的影响较大,在有机无机配施区,配施猪厩肥和花生秸秆还田处理的土

壤中游离氧化铁、铝的含量显著低于对照处理,两种有机肥的施用对土壤中无定形氧化铁的影响不显著,而对无定形氧化铝的影响差异显著,有机肥可显著降低其含量。无机肥区,只有长期不施磷肥的 NK 处理的土壤中游离氧化物的量最大,其次为 NP 和 PK,而 NPK 中最小,后三者之间的差异不显著。而无定形铁铝氧化物的变化趋势是: NK 最小, PK 最大。

表 5 长期施肥条件下旱地红壤铁铝氧化物含量及其与 PSI 的相关系数

Table 5 Iron-Aluminum Oxides content in upland red soil under long-term fertilizer application and its correlation coefficient with PSI

试验小区 Test plot	肥料处理 Fertilizer treatment	无定形氧化铝	无定形氧化铁	无定形铁铝 氧化物总量	游离氧化铝	游离氧化铁	游离铁铝氧 化物总量
		Amorphous aluminum oxides	Amorphous iron oxides	Total amount of amorphous oxides	Free aluminum oxides	Free iron oxides	Total amount of free iron oxides
(g kg ⁻¹)							
有机无机配施 Combined application of organic-chemical fertilizers 无机肥 Chemical fertilizer application	CK	4.04a ¹⁾	2.55a	6.58a	8.12a	26.67a	34.79a
	BM	3.21c	2.58a	5.79c	5.48c	20.66c	26.14c
	SR	3.47b	2.76a	6.24ab	6.28b	24.95b	31.24b
	NK	4.61a	3.20c	7.81c	10.54a	29.96a	40.50a
	NPK	4.37b	3.65bc	8.02bc	8.98b	24.24b	33.21b
	NP	4.49ab	4.02b	8.51b	8.31bc	26.88ab	35.20ab
	PK	4.44ab	4.85a	9.29a	7.89c	27.42ab	35.31ab
与 PSI 的相关系数 Coefficient of correlation with PSI		0.626	0.096	0.330	0.828*	0.805*	0.852*

1) 字母不同的表示相同试验小区内不同施肥处理的影响差异显著 ($p < 0.05$) The difference between values followed by same letters in the same column is not significant at $p < 0.05$; 2) * 在 0.05 水平上显著相关 Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

铁铝氧化物是影响红壤固磷能力的关键因素,尤其是游离铁铝氧化物,从表 5 可以看出,红壤中游离铁铝氧化物与 PSI 之间呈显著正相关关系,游离氧化铝的影响略大于游离氧化铁。在酸性土壤中,铁铝化合物主要是通过以下两个过程吸附固定磷酸盐:(1) 由于离子对的形成及与表面羟基发生配位体交换,导致了无定形铁铝氧化物表面吸附作用的发生^[25]; (2) 难溶解的磷酸铁与磷酸铝的形成^[26]。

2.2.4 无机磷酸盐组成 磷酸盐在土壤中的存在形态与有效性主要受土壤 pH 的影响,研究表明,当土壤 pH < 6.5 时,因磷酸铁、磷酸铝的出现而降低其有效性;当土壤 pH > 7.0 时,则因为形成磷酸钙,植物难以利用;当土壤 pH 介于 6.5 ~ 7.0 时,土壤对磷的固定少,其对植物的有效性最大^[27]。土壤

pH 的提高可以改变磷酸盐的存在形态和吸附表面的静电电位^[21],当 pH 升高时,土壤中二价磷酸盐 (HPO_4^{2-}) 的比例增大,其被吸附的量也增大。因此,土壤中各种磷酸盐的含量也影响着红壤的固磷能力,相关分析表明(表 6),PSI 与红壤中的铝结合态磷酸盐 (Al-P)、铁结合态磷酸盐 (Fe-P)、闭蓄态磷酸盐 (Oc-P) 及钙结合态磷酸盐 (Ca-P) 均存在线性负相关关系,但只与铁结合态磷酸盐 (Fe-P) 呈显著负相关关系 ($r = -0.828^*$, $p < 0.05$)。这与红壤的特定环境有关,在红壤的具体条件下,铁结合态磷酸盐是最稳定^[28],而且随着时间的延续,土壤中铝结合态磷酸盐 (Al-P) 也会部分转化为铁结合态磷酸盐的 (Fe-P),所以铁结合态磷酸盐 (Fe-P) 对红壤的固磷能力影响相对较大。随着时间推移,磷酸盐离子会从土壤颗粒表面扩散到土壤基质中去,降

低了土壤吸附远距离磷的能力,确保未来磷施用更加有效^[29]。郭胜利等^[30]在对黑垆土吸磷特性演变的研究中也发现土壤的最大吸磷量(X_m)与无机磷组成间存在显著的负相关关系。土壤磷酸盐组成的改变促进了吸附反应的发生,但 pH 升高的同时土壤吸附表面的静电电位变得更负,也就是说负电

荷增多反而降低了磷的吸附。这两个相互竞争的过程,在不同的土壤中所起的主导作用不同,表现出的效应就不同。在红壤中磷酸铁盐、闭蓄态磷酸盐及磷酸钙盐与土壤 pH 呈显著正相关关系(表 6),即 pH 升高促进了磷酸盐的变化,降低了红壤的固磷能力。

表 6 土壤 pH、无机磷酸盐组分与红壤磷吸持指数 (PSI) 间的相关系数

Table 6 Correlation of PSI with soil pH and inorganic phosphate in red soil

	pH	无机磷酸盐 Inorganic phosphate				磷吸持指数 PSI
		Al-P	Fe-P	Oc-P	Ca-P	
pH	1	0.688	0.867 *	0.790 *	0.805 *	-0.856 *
无机磷酸盐	Al-P	1	0.879 **	0.921 **	0.919 **	-0.580
Inorganic	Fe-P		1	0.916 **	0.973 **	-0.828 *
phosphate	Oc-P			1	0.936 **	-0.741
	Ca-P				1	-0.711
磷吸持指数 PSI						1

* 在 0.05 水平上显著相关 Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); ** 在 0.01 水平上显著相关 Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

2.3 红壤基质组分与土壤磷吸持指数的回归分析

在相关分析的基础上,运用 Dpss 软件对红壤基质组分与土壤磷吸持指数间进行逐步回归分析,进一步明确红壤各基质组分对磷吸持指数的影响程度。除 pH 和土壤游离态铁铝氧化物总量不能引入方程外,其余 5 个因子均可引入,可得出回归方程:

$$PSI = -1428.3 - 61.2X_2 + 32.9X_3 + 43.1X_4 + 74.0X_6 - 1.0X_7 \quad (\text{复相关系数 } R = 0.9967, \text{调整相关系数 } R_{\text{adj}} = 0.9800, F = 29.9, \text{显著水平 } p = 0.1379)$$

式中:PSI,磷吸持指数; X_2 ,有机质; X_3 ,游离氧化铝; X_4 ,游离氧化铁; X_6 ,黏粒; X_7 ,磷酸铁。

从方程(1)可以看出黏粒及游离铁铝氧化物对 PSI 起着正作用,而有机质与磷酸铁却起着负作用。但游离氧化铝及磷酸铁盐对 PSI 的作用相对较小,因此,进一步剔除因子 X_3 、 X_7 ,得出回归方程:

$$PSI = -133.1 - 99.6X_2 + 64.9X_4 + 69.0X_6 \quad (R = 0.9937, R_{\text{adj}} = 0.9873, F = 78.3, p = 0.0024)$$

从方程(2)可以看出,游离氧化铁与黏粒对红壤磷吸持指数起着直接而又主要的作用,且黏粒的作用大于游离氧化铁。有机质对红壤磷吸持指数所起的负作用最明显。因此,进一步剔除游离氧化铁的影响,得出有机质、黏粒与 PSI 的回归方程:

$$PSI = 1395.2 - 151.9X_2 + 55.4X_6 \quad (R = 0.9477, R_{\text{adj}} = 0.9205, F = 17.6, p = 0.0104)$$

方程(3)进一步明确了土壤有机质与黏粒两大主要影响因子与 PSI 的作用关系,可以看出红壤有机质是影响土壤磷吸持指数的关键基质组分,其次是黏粒。

3 结 论

1) 土壤的固磷能力是了解土壤磷素肥力特性及其环境行为的重要参数,土壤磷吸持指数 (PSI) 的提出与应用,简化了传统方法确定土壤固磷能力的繁琐实验步骤,方法操作简单、省时,结果可靠,便于大量样本的分析。

2) 土壤磷吸持指数 (PSI) 可以替代土壤最大固磷量 (X_m) 来表征土壤的固磷能力,亦可由 PSI 的大小来推断土壤磷的储供能力。

3) 改善红壤酸性环境,增加有机质及铁结合态磷酸盐 (Fe-P) 的含量,可显著降低红壤的 PSI,随着土壤中游离铁铝氧化物及黏粒含量的增加,红壤 PSI 也随之增大。

参 考 文 献

- [1] Barrow N J. The description of sorption curve. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59: 900—910
- [2] Burkitt L L, Sale P W G, Anourley C J P. Soil phosphorus buffering measures should not be adjusted for current phosphorus fertility. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46: 676—685

- [3] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4—7. Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of waterbody (In Chinese). Phosphate and Compound Fertilizer, 2003, 18(1): 4—7
- [4] 王艳玲, 何园球, 吴洪生, 等. 长期施肥下红壤磷素积累的环境分析. 土壤学报, 2010, 47(5): 880—887. Wang Y L, He Y Q, Wu H S, et al. Environmental risk analysis of accumulated phosphorus in red soil under long-term fertilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(5): 880—887
- [5] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险研究. 环境科学学报, 2001, 21(3): 344—348. Gao C, Zhang T L, Wu W D. Risk evaluation of agricultural soil phosphorus release to the water bodies (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(3): 344—348
- [6] Ulen B, Bechmann M, Folster J, et al. Agriculture as a phosphorus source for eutrophication in the north-west European countries, Norway, Sweden, United Kingdom and Ireland: A review. Soil Use and Management, 2007, 23: 5—15
- [7] Dou Z X, Ramberg C F, Toth J D, et al. Phosphorus speciation and sorption-desorption characteristics in heavily manured soils. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73: 93—101
- [8] Mozaffar M, Sims J T. A phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by antmanbased agriculture. Soil Science, 1994, 157: 97—107
- [9] Bache B W, Williams E G. A phosphate sorption index for soils. J Soil Science, 1971, 22(3): 288—301
- [10] Buczko U, Kuchenbuch R O. Phosphorus indices as risk-assessment tools in the USA and Europe—A review. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 170(4): 445—460
- [11] Simard R R, Cluis D, Gangbazo G, et al. Phosphorus sorption and desorption indices for soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1994, 25: 1 483—1 494
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [13] Swift D A. Coulter LS230 operating summary. <http://web.ges.gla.ac.uk/~dswift/ls230.htm>. 2006
- [14] Indiatl R, Sharpley A N. Soil phosphorus sorption and simulated runoff parameters as affected by fertilizer addition and soil properties. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1995, 26(15/16): 2 319—2 321
- [15] Zhang H L, Schroder J L, Fuhrman J K, et al. Path and multiple regression analyses of phosphorus sorption capacity. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69: 96—106
- [16] Barrow N J. Modelling the effects of pH on phosphate sorption by soils. Journal of Soil Science, 1984, 35: 283—297
- [17] 王艳玲, 何园球, 周晓冬. 两种培肥途径下红壤磷素储量及其供磷能力的动态变化. 土壤通报, 2010, 41(3): 639—643. Wang Y L, He Y Q, Zhou X D. Dynamics changes of phosphorus fertility supply and reserves in red soils under two fertilization approaches (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 639—643
- [18] Haynes R J, Ludeche T E. Effect of lime and phosphorus application on concentration of available nutrients and on P, Al and Mn uptake by two pasture legumes in an acid soil. Plant and Soil, 1981, 62: 117—128
- [19] Sparks D L. Sorption phenomena on soils//Environmental soil chemistry. San Diego, CA: Academic Press, 1995: 99—139
- [20] 于天仁. 土壤化学原理. 北京: 科学出版社, 1987: 483. Yu T R. Principle of soil chemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1987: 483
- [21] Barrow N J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. Advances in Agronomy, 1985, 38: 183—230
- [22] Moshi A O, Wild A, Greenland D J. Effect of organic matter on the charge and phosphate adsorption characteristics of Kikuyu red clay from Kenya. Geoderma, 1974, 11: 275—285
- [23] Sinha M K. Organo-metallic phosphates. I. Interaction of phosphorus compounds with humic substances. Plant and Soil, 1971, 35: 471—493
- [24] 陈家坊, 何群, 邵宗臣. 土壤中氧化铁的活化过程的探讨. 土壤学报, 1983, 20(4): 387—392. Chen J F, He Q, Shao Z C. Study on the activation process of iron oxides in soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1983, 20(4): 387—392
- [25] 刘凡, 介晓磊, 贺纪正, 等. 不同 pH 条件下针铁矿表面磷的配位形式及转化特点. 土壤学报, 1997, 34(4): 367—373. Liu F, Jie X L, He J Z, et al. Coordination forms and transformations of phosphate adsorbed by goethite surface on different pH (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(4): 367—373
- [26] McLaughlin J R, Ryden J C, Syers J K. Sorption of inorganic phosphate by iron and aluminum containing components. European Journal of Soil Science, 1981, 32: 365—377
- [27] Holford I C R, Patrick W H J. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. Soil Science Society of American Journal, 1979, 43: 292—297
- [28] 朱荫涓, 鲁如坤, 顾益初, 等. 磷肥在土壤中的形态转化. 土壤, 1981, 13(4): 130—133. Zhu Y M, Lu R K, Gu Y C, et al. Transformation of phosphate fertilizer in soils (In Chinese). Soils, 1981, 13(4): 130—133
- [29] Owusu-Bennoah E, Acquaye D K. Phosphate sorption characteristics of selected major Ghanaian soils. Soil Science, 1989, 148: 114—123
- [30] 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. 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 sorption in relation to its forms and soil organic carbon (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 33—39

EFFECT OF SOIL MATRIX COMPONENTS ON PHOSPHATE SORPTION INDEX IN RED SOIL

Wang Yanling^{1,2} Zhang Yonghui² He Yuanqiu³

(1 Jiangsu Key Lab of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

(2 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

(3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Soil samples were collected from the 7 treatments (NPK, NP, NK, PK, CK, CK + BM, and CK + SR) of a long-term upland fertilization field experiment, which started in 1988, for determination of phosphate sorption index (PSI) with soil maximum P sorption capacity (X_m), and hence discussions on effects of the soil matrix component, like soil pH, organic matter (OM), clay, iron-aluminum oxides and inorganic phosphates on PSI. Results show that long-term application of phosphorus fertilizer or combined application of organic and chemical fertilizer could significantly reduce PSI. With rising soil pH and organic matter and iron phosphate (Fe-P) content, PSI decreased markedly. But the higher the contents of free iron-aluminum oxides and clay in the red soil, the higher the soil PSI. Soil phosphate sorption index (PSI) showed a significant linear correlation with soil maximum P sorption capacity (X_m), ($X_m = 0.5\text{PSI} + 412.8$, $r = 0.967^{**}$, $p < 0.01$). Therefore, the former could be used to replace soil maximum P sorption capacity (X_m) to characterize soil phosphorus sorption capacity and soil phosphorus supply capacity as well.

Key words Red soil; Phosphate sorption index (PSI); Organic matter; pH; Iron-Aluminum oxides; Inorganic phosphate