

## 长期施肥对南方黄泥田土壤磷吸附与解吸的影响

林 诚, 王 飞, 林新坚, 李清华, 何春梅, 李 显

(福建省农科院土壤肥料研究所/红壤肥力与生态环境福州试验站, 福建 福州 350013)

**摘要:** 在连续施肥 26 年南方黄泥田上进行土壤磷的吸附—解吸特征试验。结果表明, 不同施肥处理土壤磷的等温吸附曲线与 Langmuir 方程拟合性较好 ( $P<0.01$ )。与单施化肥相比, 化肥与牛粪或化肥与秸秆长期配施能降低土壤磷吸附亲合力常数 (K)、吸附缓冲容量 (MBC), 提高土壤磷吸附饱和度 (DPS); 但土壤 P 最大吸附量 ( $X_m$ ) 二者表现相反的趋势。化肥与牛粪配施土壤吸附的磷在低浓度时更容易解吸, 而随着浓度的升高有降低趋势。有机无机肥配施在低磷条件下 ( $<20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 土壤磷主要表现出“源”功能, 而在高浓度条件下土壤磷主要表现“汇”的功能。

**关键词:** 长期施肥; 黄泥田; 磷; 吸附; 解吸

中图分类号: S 153.6<sup>+</sup>1

文献标识码: A

### The Effect of Phosphorus Adsorption and Desorption of Long-term Fertilization on South Yellow Clayey Soil

LIN Cheng, WANG Fei, LIN Xin-jian, LI Qing-hua, HE Chun-mei, LI Yu

(Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou Experimental Station of Red Soil Fertility and Ecological Environment in Fujian, Fuzhou, Fujian 350013, China)

**Abstract:** The characterization of adsorption and desorption of soil phosphorus is investigated in the 26th year of long-term fertilization south yellow soil. The result indicated that there is good fitness between the adsorbed curves of the Langmuir equation phosphorus and the Langmuir equation ( $P<0.01$ ). Compared with single fertilization, long-term applying of both fertilizer and dairy manure or straw can decrease K、MBC and crease DPS. However, there is a crosscurrent between  $X_m$ . P which will be desorbed more easily under the combined application of fertilizer and dairy manure when its concentration is low, and that will be opposite as the concentration ascends. Under the combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer, P acts as a " headstream" with a low concentration while it acts as a " sea" with a high concentration.

**Key words:** long-term fertilization; yellow clayey soil; phosphorus; adsorption; desorption

目前, 我国磷肥产量与施用量均居世界首位<sup>[1]</sup>, 但通常磷肥当季植物利用率一般不超过 20%<sup>[2]</sup>。据估算, 中国自 20 世纪 50 年代施用化学磷肥以来, 储存累积在土壤中的难溶态磷高达 6 000 万 t<sup>[3]</sup>, 形成了一个巨大的潜在磷库, 在造成磷肥巨大浪费的同时, 并带来了环境风险。磷酸盐在土壤中的吸附与解吸是影响磷素迁移及其环境效应的主要机制之一<sup>[4]</sup>, 大量研究表明<sup>[5-7]</sup>, 增施有机肥和秸秆还田能够显著降低土壤对磷的吸附强度, 促进磷的解吸。而土壤对磷酸盐的吸附和解吸

特性, 可以利用 Langmuir 等温吸附特征值很好的表征出来<sup>[8]</sup>。

黄泥田是福建等南方省份广泛分布的一种渗育型水稻土, 仅福建省面积就达 32.5 万 hm<sup>2</sup>, 占全省水稻土面积的 30.4%<sup>[9]</sup>。多分布在低山丘陵缓坡地, 以心土层呈灰黄色, 锈斑不甚明显为主要特征。通常因水分不足, 缺乏 P、K 而低产, 在水稻田中属中低产田<sup>[10]</sup>。目前, 长期施肥措施对水稻产量及土壤肥力的影响研究较多<sup>[11-12]</sup>, 而长期施肥对土壤磷吸附—解吸相关方面尚少见报道。为

收稿日期: 2011-07-25 初稿; 2011-12-07 修改稿

作者简介: 林诚 (1981-), 男, 助理研究员, 研究方向: 植物营养与肥料

通讯作者: 王飞 (1976-), 男, 副研究员, 主要从事土壤资源评价与持续利用

基金项目: 福建省科技计划项目——省属公益类科研院所基本科研专项 (2010R1024-4); 福建省自然科学基金项目 (2009J01204); 福

建省农业科学院青年人才创新基金 (2009QA-7)

此, 本研究在福建黄泥田 26 年水稻肥料定位试验的基础上, 研究不同施肥模式对黄泥田土壤磷素吸附和解吸特性的影响, 旨在为优化黄泥田施肥模式, 提高土壤磷素利用率、降低环境污染风险提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验设在福建省农业科学院野外观测站红壤肥力与生态环境福州站长期监测试验田(闽侯县白沙镇, 东经 $119^{\circ}04'10''$ , 北纬 $26^{\circ}13'31''$ ), 成土母质为低丘红壤坡积物, 海拔高度 15.4 m, 土壤类型为黄泥田。试验区年平均温度 19.5 ℃, 年均降雨量 1 350.9 mm, 年日照时数 1 812.5 h, 无霜期 311 d,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的活动积温 6 422 ℃。试验前(1983 年)耕层土壤 pH 4.90, 有机质  $21.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $141 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷  $24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾  $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验设 4 个处理: (1) 不施肥(CK); (2) 单施化肥(NPK); (3) 化肥+牛粪(NPKM); (4) 化肥+全部稻草回田(NPKS)。每处理设 3 次重复, 小区面积  $12 \text{ m}^2$ 。每季施用化肥量为 N  $103.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 27 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O} 135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。牛粪养分含量为有机质  $394.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、N  $15.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 8.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{O} 11.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 每茬施用量  $3 750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 稻草养分含量为有机质  $647.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、N  $11.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 3.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{O} 20.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 施用量为上茬稻草全部回田。化肥 N、K 的一半作基肥, 一半作分蘖追肥, P 肥全部作基肥施肥。供试化肥分别用尿素、过磷酸钙、氯化钾。试验地 1983~2004 年均种植双季稻, 2005 年始种植单季稻。2008 年水稻品种为“宜香优 2292”。当年 6 月 26 日插秧, 10 月 10 日收割。各处理除施肥外, 其他管理措施一致。

### 1.2 土壤磷吸附特性测定

1.2.1 土壤采集与制备 于 2008 年水稻收获后在各小区分别用梅花形采样法采集 0~20 cm 的土壤样品, 充分混合后用四分法取土。土样经自然风干后碾碎过 2 mm 筛备用。各处理土壤理化性状如文献[13]。

1.2.2 土壤磷的吸附 称取过 0.25 mm 筛风干土壤 1.00 g 置于 50 mL 聚乙烯塑料离心管中, 每个处理 9 份, 2 次重复, 分别加入含  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  的磷工作液 20 mL [用  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  配制, 浓度依次为 0、5、10、20、30、40、50、

$60$ 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ], 加 3~5 滴甲苯抑制微生物生长, 加塞于  $25^{\circ}\text{C}$  恒温振荡 24 h, 离心机  $7 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 5 min。采用钼锑抗比色法测定滤液磷浓度, 原液与平衡液磷的浓度差即为吸附量。以平衡溶液的 P 浓度为横坐标, 以土壤所吸附固定的 P 量为纵坐标, 绘制等温吸附曲线, 并检验曲线与常规 Langmuir 方程  $C/X = 1/KX_m + C/X_m$  的拟合性。式中: X 为土壤吸 P 量, C 为平衡溶液中 P 浓度, K 为吸附亲合力常数,  $X_m$  为土壤对 P 的最大吸附量。土壤 P 的最大缓冲容量(MBC) 和 P 的吸附饱和度(DPS), 其公式如下<sup>[14]</sup>:  $\text{MBC} = K \times X_m$ ;  $\text{DPS} = \text{土壤速效 P (Olsen-P)} / X_m \times 100\%$ 。

1.2.3 土壤磷的解吸 弃去平衡溶液的土样先用  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  溶液洗 2 遍, 再加入 20 mL  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  溶液, 同上  $25^{\circ}\text{C}$  恒温振荡 2 4 h 后离心, 测定磷的解吸量。

试验数据采用 Excel 和 DPS 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期施肥对土壤磷吸附等温吸附曲线的影响

磷吸附特征是反映磷“汇”的问题, 结果如图 1 所示, 各处理间 P 的等温吸附曲线趋势一致, 土壤对 P 的吸附量均随着平衡液浓度的增加而增加。在低磷浓度时(平衡液 P 浓度约  $< 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 曲线上升快而陡, 表明土壤对 P 的吸附强度很大, 此时为土壤中无定形 Fe、Al 对 P 的化学吸附及黏粒上盐基离子对 P 的共价吸附<sup>[15]</sup>, 是土壤对 P 的快速吸附阶段, 各处理间土壤吸附 P 量无差别; 而在高浓度区(平衡液 P 浓度约  $> 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )曲线变化平缓, 此时为土壤对 P 的物理化学吸附和物理吸附, 是土壤的慢速吸附阶段<sup>[16]</sup>, 且随着平衡液中 P 浓度的增加土壤对 P 吸附量的差异逐渐增大。从中也可看出, NPKS 处理的 P 吸附量明显小于其余处理, 而 CK、NPK、NPKM 处理间的 P 吸附量没有明显差别。

### 2.2 长期施肥对土壤中磷吸附参数的影响

试验结果表明(表 1), 长期施肥下土壤对 P 的等温吸附特性, 采用 Langmuir 曲线方程均能够较好地拟合, 且拟合度均达极显著水平。

2.2.1 土壤 P 最大吸附量<sup>[17]</sup> 土壤 P 最大吸附量( $X_m$ ) 是反映土壤胶体吸附 P 的点位和数量, 是土壤 P 吸附的容量指标。从表 1 可以看出, 经过 26 年试验后, NPK 与 NPBM 的  $X_m$  值较 CK 提高了

2.90%、7.78%，但 NPKS 的  $X_m$  值较 CK 降低了 10.07%，说明相对不施肥与单施化肥而言，化肥配施秸秆还田较其他处理能降低土壤胶体吸附 P 的点位和数量，而化肥与牛粪长期配施则提高了土壤胶体吸附 P 的点位和数量。从中可看出化肥与不同有机肥种类配施表现规律不一。

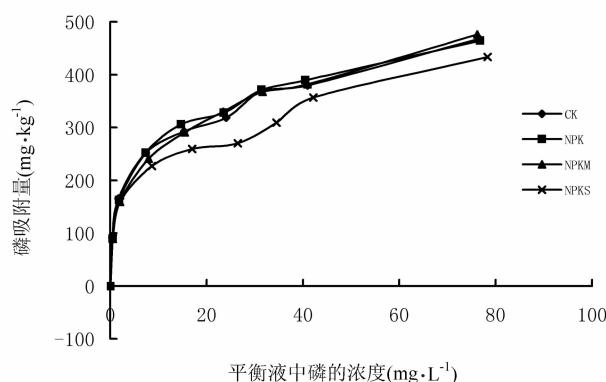


图 1 不同施肥处理对土壤磷的等温吸附曲线

Fig. 1 Phosphate adsorption isotherm curves in different treatments

2.2.2 土壤 P 吸附亲合力常数 吸附亲合力常数 ( $K$ ) 一般表示土壤胶体与磷酸根离子亲合力的高低，是土壤 P 吸附的强度因素，在一定程度上反映了土壤吸附 P 的能级。 $K$  值越大，说明土壤对 P 的吸附能力越强，土壤供 P 能力则越弱<sup>[17]</sup>。由表 2 可见，不施肥处理吸附亲和常数最大，施肥可降低土壤对磷的亲合力常数，尤其是化肥与牛粪配施。这可能是对照处理长期低 P 胁迫，对外界相同浓度的 P 表现出更强的吸附性。

表 1 不同处理土壤磷 Langmuir 拟合方程与吸附特性参数  
Table 1 Langmuir equations and parameters of P adsorption characteristics in different treatments

处理	Langmuir 曲线方程	相关系数 $R^2$	最大吸附磷量 $X_m$ (mg · kg⁻¹)	吸附亲合力常数 $K$	最大缓冲容量 MBC(mg · kg⁻¹)	吸附饱和度 DPS(%)
CK	$C/X = 0.0024X + 0.0097$	0.9376 **	420.53	0.2439	102.57	0.97
NPK	$C/X = 0.0023X + 0.0104$	0.9579 **	432.73	0.2232	96.59	1.21
NP KM	$C/X = 0.0022X + 0.0139$	0.9525 **	453.19	0.1586	71.88	2.69
NPKS	$C/X = 0.0026X + 0.0124$	0.9017 **	378.19	0.2136	80.78	1.55

### 2.3 长期施肥对土壤磷解吸的影响

土壤 P 的解吸是 P 吸附的逆过程，是反映磷“源”的问题，它可能是一个比吸附更为重要的过程，因为它涉及到被吸附 P 的再利用，提高土壤中 P 的有效性及环境等问题<sup>[18]</sup>。从土壤磷的解吸曲线可看出（图 2），吸附的磷在一定程度上均能

部分被解吸下来，随吸附磷量的增加，解吸量有增加的趋势。在磷浓度较低时土壤对磷以高能吸附为主而吸附较牢固，因此解吸量较低，曲线斜率较小；而随磷浓度增加高能吸附位被饱和，磷的吸附转向低能态为主<sup>[19]</sup>，磷的解吸量增加，曲线斜率增大。

2.2.3 土壤 P 吸附缓冲容量 吸附缓冲容量 (MBC) 是综合反映土壤吸 P 强度因素和容量因素的参数，是判断土壤供 P 特性的一项综合指标<sup>[17]</sup>。MBC 值趋势与 K 值相同，NPK、NP KM、NPKS 较 CK 分别降低了 5.98、30.69、21.79 mg · kg⁻¹；而 MBC 值大的土壤，要维持相同供 P 强度所需磷肥量大，土壤有效 P 贮量也要大<sup>[14]</sup>。说明长期不施肥的土壤磷素亏缺严重，施肥尤其是有机无机肥配施能使土壤磷库保持一定水平。

2.2.4 土壤 P 吸附饱和度 土壤 P 吸附饱和度 (DPS) 能够综合反映土壤 P 素含量水平和土壤 P 吸附特征，是评判农田土壤 P 素流失风险的指标。一般认为，DPS 越高，土壤对 P 的吸附能力减少，因为它含有更高的溶解态 P<sup>[14]</sup>。表 2 表明，施肥均提高了 DPS 值，而 NP KM 与 NPKS 的 DPS 值又高于单施化肥，二者分别较化肥提高 1.48% 和 0.34%。说明长期有机无机配施能有效提高土壤溶解态 P，有助于作物对磷素的吸收利用。

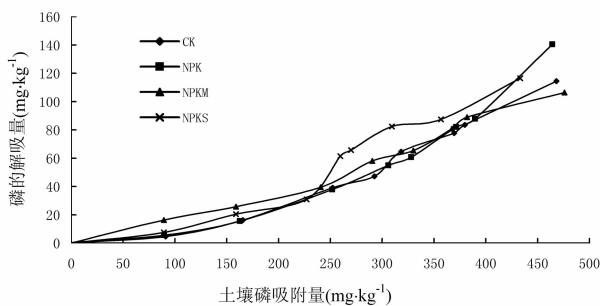


图 2 土壤吸附磷的等温解吸曲线

Fig. 2 Curve of soil-phosphate isothermal desorption

土壤磷解吸率为解吸磷量占解吸前吸附磷量的百分数, 可以指示土壤的供P能力, 解吸率越小, 土壤解吸的P越少, 对于植物来说可利用的P越少<sup>[20]</sup>。从吸附磷的解吸结果来看(表2), 在加入磷浓度<20 mg·L<sup>-1</sup>时, 有机无机肥配施尤其是NPKM的解吸率均高于CK、NPK处理。而高磷

浓度时, NPKM处理的P解吸率有下降趋势, 从而缓解P的流失, 而对照与单施化肥处理仍呈上升趋势, 说明化肥配施牛粪在低P浓度下土壤具有较高的解吸率和高磷浓度下土壤具有较低的解吸率, 表现出化肥配施牛粪在调节土壤磷的保持和供应具有重要作用。

表2 不同处理解吸磷占吸附磷的百分数

Table 2 The percentage of absorption phosphate to sorption phosphate in different treatments

加入磷浓度 (mg·L <sup>-1</sup> )	CK		NPK		NPKM		NPKS	
	解吸量 (mg·kg <sup>-1</sup> )	解吸率 (%)						
0	0.19	0	0.39	0	0.02	0	0.02	0
5	4.64	5.10	5.61	6.25	16.25	18.18	7.54	8.44
10	16.25	9.81	15.47	9.51	25.73	16.18	20.50	12.90
20	39.07	15.49	37.91	15.05	39.46	16.40	30.95	13.63
30	47.20	16.14	54.93	17.95	58.03	19.97	61.51	23.70
40	64.60	20.29	60.74	18.51	65.38	19.81	65.76	24.36
50	77.76	21.05	82.01	22.08	80.85	22.00	82.40	26.63
60	83.56	22.00	87.81	22.54	88.97	23.30	87.43	24.51
100	114.51	24.46	140.43	30.25	106.38	22.36	116.44	26.88

### 3 讨论与结论

以往研究表明, 有机质对土壤磷的吸持特性有双重影响, 一方面, 有机质在分解过程中能将结晶态铁铝化合物溶解、络合、还原, 从而提高铁铝的活化度, 使无定形态铁铝化合物增多, 这样就可增强土壤对磷的吸附能力; 另一方面, 有机质在腐化过程中产生有机酸根离子, 可与磷酸根离子存在竞争吸附现象, 有机质增多, 从而减弱土壤对磷的吸附能力<sup>[21]</sup>。而这两种机制都可能存在土壤中, 只是哪一种机制占主导的问题。从本研究结果来看, 化肥配施牛粪处理的土壤对P的吸附可能是以前者为主导, 而化肥配施秸秆处理则以后者为主导。在施肥对土壤磷吸附亲合力常数、磷吸附缓冲容量和吸附饱和度影响方面, 赵庆雷等<sup>[22]</sup>发现在红壤上长期有机无机配施都可显著降低土壤磷吸附亲合力常数及吸附缓冲容量; 而吸附饱和度随着有机肥的增加而增加<sup>[23]</sup>, 这可能与有机肥中的可溶性组分影响土壤磷的解吸作用有关<sup>[24]</sup>, 本研究结果与之一致。

对土壤磷解吸而言, 有研究表明, 长期施用有机肥土壤磷的解吸率高于施用化肥土壤磷的解吸率<sup>[19,22,24]</sup>。一方面, 长期施用有机肥的土壤有机质

明显提高, 有机物质会占据土壤对磷的吸附位点, 或土壤粘粒被有机物覆盖减少了土壤矿物胶体对磷的吸附<sup>[25~26]</sup>, 减少土壤磷的吸附量和降低土壤磷的吸附结合能, 导致被土壤吸附的磷更易解吸; 另一方面是由于长期施用有机肥的土壤含磷量较高, 更多的磷在振荡过程中被释放出来, 因此本研究认为磷的解吸率高的主要原因是有效磷含量高引起的。但长期有机无机肥配施(包括牛粪与秸秆)磷解吸率高仅表现在溶液中磷为低浓度时(<20 mg·kg<sup>-1</sup>), 而在低浓度下土壤对磷的吸附固定能力较强, 土壤磷不易被解吸<sup>[20]</sup>, 易造成作物缺磷, 所以有机无机肥长期配施更适宜于作物对磷的吸收。磷高浓度条件下, 如果土壤磷解吸性能增强, 则容易引发环境风险<sup>[27]</sup>, 而本试验表明有机无机配施在磷高浓度条件下解吸率有降低的趋势, 从而有效缓解土壤磷的流失。说明有机无机肥配施在低磷条件下(<20 mg·kg<sup>-1</sup>)磷主要表现出“源”功能, 而在高浓度条件下磷主要表现“汇”的功能, 这在生产实践中具有的重要意义。

3.1 Langmuir方程能较好地描述土壤对磷的吸附( $P < 0.01$ )。通过该方程得出: 长期有机无机配施不同程度降低土壤对磷的吸附亲合力常数及最大缓冲容量, 提高土壤磷的吸附饱和度。施用化肥或化

肥配施牛粪的磷最大吸附量提高,而秸秆还田的土壤对磷的理论最大吸附量明显降低。

3.2 长期化肥与牛粪配施,在土壤磷浓度较低时,有较高的解吸率,发挥“源”的功能,随着磷浓度的上升解吸率有降低的趋势,发挥出“汇”的功能,而长期施用化肥的土壤在低磷浓度时,解吸率较低,随着磷浓度的上升解吸率有上升趋势,表现出长期化肥配施牛粪对土壤磷的保持和供给、减少水环境污染风险具有重要作用。

#### 参考文献:

- [1] 李东坡,武志杰.化学肥料的土壤生态环境效应[J].应用生态学报,2008,19(5):1158—1165.
- [2] 李庆達,朱兆良,于天仁.中国农业持续发展中的肥料问题[M].南昌:江西科学技术出版社,1998:112—119.
- [3] 高静.长期施肥下我国典型农田土壤磷库与作物磷肥效率的演变特征[D].北京:中国农业科学院博士论文,2009.
- [4] 张新明,李华新,刘远金.磷酸盐在土壤中吸附与解吸研究进展[J].土壤与环境,2001,10(1):77—80.
- [5] 曾希柏,刘更另.化肥施用和秸秆还田对红壤磷吸附性能的影响研究[J].土壤与环境,1999,8(1):45—49.
- [6] 夏立忠,Roy A.长期施用牛粪条件下草原土壤磷的等温吸附与解吸动力学[J].土壤,2000,(3):160—164.
- [7] 王新民,侯彦林.有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响研究[J].环境科学学报,2004,24(3):440—443.
- [8] 黄东风,邱孝煊,李卫华,等.福州市郊菜地土壤磷素特征及流失潜能分析[J].水土保持学报,2009,23(1):84—87.
- [9] 福建省土壤普查办公室.福建土壤[M].福州:福建科学技术出版社,1991.178—186.
- [10] 林诚,王飞,李清华,等.不同施肥制度对黄泥田土壤酶活性及养分的影响[J].中国土壤与肥料,2009,(6):24—27.
- [11] 廖育林,郑圣先,鲁艳红,等.长期施钾对红壤水稻土水稻产量及土壤钾素状况的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(6):1372—1379.
- [12] 王凯荣,刘鑫,周卫军,等.稻田系统养分循环利用对土壤肥力和可持续生产力的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(6):1041—1045.
- [13] 王飞,林诚,李清华,等.长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒品质性状与土壤肥力因子的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(2):283—290.
- [14] 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.
- [15] 匡恩俊,刘峰,朱迟.不同改土物料对白浆土磷吸附解吸的影响[J].土壤,2009,41(5):772—776.
- [16] 熊毅主编.土壤胶体(第二册):土壤胶体研究法[M].北京:科学出版社,1985:245—260.
- [17] 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.
- [18] 郭晓东,张雪琴,杨玲.甘肃省主要农业区土壤对磷的吸附与解吸特性[J].西北农业学报,1997,6(2):7—12.
- [19] 夏文建,梁国庆,周卫,等.长期施肥条件下石灰性潮土磷的吸附解吸特性[J].植物营养与肥料学报,2008,14(3):431—438.
- [20] 曹志洪,李庆達.黄土性土壤对磷的吸附与解吸[J].土壤学报,1988,25(3):218—226.
- [21] 陈波浪,盛建东,文启凯,等.不同施肥制度对红壤耕层磷的吸持特性影响的研究[J].新疆农业大学学报,2005,28(1):22—26.
- [22] 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.
- [23] 刘建玲,廖文华,张作新,等.磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评价[J].中国农业科学,2007,40(5):959—965.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 王新民,侯彦林.有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响研究[J].环境科学学报,2004,24(3):440—443.
- [27] 赵小蓉,钟晓英,李贵桐,等.我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 II.淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系[J].生态学报,2006,26(9):3011—3017.

(责任编辑:柯文辉)