

低施磷水平下不同施肥对太湖地区黄泥土磷迁移性的影响

潘根兴¹, 焦少俊¹, 李恋卿¹, 徐向东², 邱多生², 徐晓波², 储秋华², 赵洪祥² (1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095, Email: gxpan@njau.edu.cn; 2. 江苏省苏州市吴江市农业生态办公室, 苏州 222300)

摘要:对太湖地区水稻土上长达 13 年的长期不同施肥处理的某试验田进行了土壤全磷、树脂磷和水溶性磷的测定分析。不同处理的年施磷量为 $0 \sim 53 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 土壤全磷为 $0.3 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据土壤磷素的质量平衡, 计算表明该水稻土存在的磷素流失量为 $2 \sim 8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 单施化肥下的流失量最大, 为配施有机肥处理的 $2 \sim 4$ 倍; 水溶性磷的比率在 $0.2\% \sim 0.4\%$ 间, 且不同施肥实践对其的影响不明显, 但单施化肥有使亚表层树脂磷和水溶性磷含量提高的倾向。长期施用化肥配施大量鲜猪粪使树脂磷含量提高 $20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但与长期施用化肥配施秸秆的处理一样没有发生在有机质增加下的磷活化而提高磷流失。这些说明本地区长期单施化肥的水稻土中可能存在强烈的磷流失, 且水稻土磷流失并不以水溶解发生。为了防止水稻土磷的强烈水流失而加剧农业非点源污染, 要避免长期单施化肥, 而应坚持和推广配施适量有机肥。

关键词: 水稻土; 磷迁移性; 磷流失; 农业非点源污染; 长期施肥试验

中图分类号: X531 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)03-05-0091

Effect of Longterm Fertilization Practices on Mobility of Phosphorus in a Huangnitu Paddy Soil Receiving Low P Input in the Taihu Lake Region, Jiangsu Province

Pan Genxing¹, Jiao Shaojun¹, Li Lianqing¹, Xu Xiangdong², Qiu Duosheng², Xu Xiaobo², Chu Qihua², Zhao Hongxiang² (1. Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China Email: gxpan@njau.edu.cn; 2. Bureau of Agricultural Ecology, Wujiang Municipality, Suzhou City, Jiangsu 222300, China)

Abstract: Analysis of mobile forms of phosphorus of a Huangnitu, a typical paddy soil in the Taihu Lake region, Jiangsu was conducted. The soil has been put into a scheme of longterm fertilization treatments for 13 years. Total P content varied in arrange of $0.3 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ under a range of total P fertilizer input of $0 \sim 53 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. As estimated from the total P pool values by mass balance principle, the soil had been subjected to water loss of P $2 \sim 8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, with that under chemical fertilizers only being the biggest. The ratio of soluble P to the total was in a range of $0.2\% \sim 0.4\%$, without significant influence by the different fertilization schemes. While chemical fertilizer plus pig slurry manure applications had remarkably enhanced the resin-P pool by $20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, P mobilization was not observed due to combined application of chemical fertilizers and straw amendments despite of the increase of the SOM. Therefore, P water loss in paddy soils might have active under continuous chemical fertilization alone in agriculture of this region and could not be accounted for by dissolution in water and subsequent runoff migration. For reducing the present prominent non point source pollution of N and P in the region, it is suggested that chemical fertilizers are applied in combination with an appropriate amount of manure or straw return for reducing soil P loss and, in turn, the non-point source pollution loading.

Key words: paddy soil; mobile phosphorus; longterm field trial; fertilization

当前, 水体富营养化是全球性的环境污染问题, 而农田 N、P 的非点源污染与富营养化的发生发展有十分密切的关系^[1,2]。据估计, 太湖地区农业非点源污染占湖泊富营养化总负荷的

基金项目: 教育部骨干教师研究计划与江苏省科技厅农业科技成果开发计划项目

作者简介: 潘根兴(1958~), 男, 教授, 主要从事土壤与环境研究。

收稿日期: 2002-12-11; 修订日期: 2003-01-03

50 %左右^[3].由于磷素是水体富营养化的限制性因子,近年来关于农田磷素的形态、土-水释放以及流失风险的研究报道甚多^[4~6].张志剑等研究了西太湖地区水稻土磷素的分布与水运移,认为植稻期溶解磷是容易导致水体富营养化的重要因素^[7~9];刘远金等对菜地磷素积累的研究认为,菜地富磷化程度高,溶解性磷负荷大,是农业非点源污染控制的优先对象^[10];刘芳等报道了对不同作物利用下黄壤坡地径磷与土壤磷库的关系^[11],陈欣等研究了持续磷肥施用下土壤磷库的变化,以及不同利用方式对红壤坡地土壤磷素流失的影响^[12].上述的研究与国外的研究都表明,土壤各种浸提磷含量与水体迁移磷有很好的相关性^[13,14].树脂可交换磷与 CaCl_2 浸提磷都被认为易被交换释放而易于水迁移,前者还可认为是(水体)生物有效的磷,它们是评价农业非点源污染引起的水体富营养化的环境风险的重要指标^[15],可以用作土壤磷素迁移潜能分析依据.因此,本文选择了太湖平原一种水稻土的长期肥料定位试验地,分析不

同肥料长期施用下土壤磷素的形态分布变化,讨论农业施肥措施对农田 N、P 非点源污染控制的意义.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

实验用土壤采自江苏省苏州市属的吴江市金家坝镇一个长期肥料定位试验站,当地属亚热带季风气候区,年降雨量约 1100 mm.供试土壤为黄泥土,是太湖地区广泛分布的潴育性水稻土^[16].自 1987 年以来的长期施肥试验共分 4 个处理,分别为无肥区(NF),粪肥化肥区(CM,简称常规区),化肥-秸秆施肥区(CS,简称秸秆区)和纯化肥施肥区(CF,简称化肥区).除无肥区外的各小区的化肥施用量 $[\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$ 为: $\text{N } 427.5$, $\text{P}_2\text{O}_5 45$ 和 $\text{K}_2\text{O } 54$.秸秆区每年加施 4500kg(鲜重)的秸秆,秸秆还田为每季作物各占 50 %,在作物收获后打碎翻入土壤.常规区加施 16800kg(鲜重)的猪粪,猪粪肥在秋季水稻收割后表施.各处理水稻季均不施磷肥.各小区的基本特性见表 1.

表 1 试验前土壤的基本性质(1987 年测定)

Table 1 Properties of the studied soil collected and measured in 1987							
土层 /cm	pH (H_2O)	有机碳 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Olsen P / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	粘粒($<1\mu\text{m}$) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	CEC / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$
0~5	5.6	16.4	1.72	0.49	6.6	249.3	20.2
5~15	6.0	16.0	1.68			279.7	20.9

表 2 供试各小区土壤耕层(0~15cm)的养分性质(2001 年采样分析)

Table 2 Status of soil nutrients in surface layer of the treated plots collected and measured in 2001				
处理区	有机碳 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH
NF	16.54	1.65	82	6.13
CM	17.75	1.91	98	5.74
CS	16.79	1.87	88	5.88
CF	16.85	1.87	105	5.93

1.2 土样处理

土样在 2002 年 4 月(油菜收割后采集),自然风干,磨碎,分别过 20 目、60 目和 100 目筛,保存备用.

1.3 分析测定方法

全磷:采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消煮制备待测

液^[17];树脂磷:1.0 g 土与 1.0g 717 型阴离子树脂混合,震荡 16h,过滤,滤液置于 10 % NaCl 溶液,于蒸汽浴 1h,分离树脂后用 10 % NaCl 溶液定容^[16];水溶性磷:用 0.01 mol/L CaCl_2 浸提,水土比为 2.5:1^[17].

上述待测液磷素测定均采用钼蓝比色法.

2 结果与分析

2.1 供试土壤的磷素状况

从表 3 可看出,土壤中全磷的含量为 0.12 ~ 0.90g/kg,一般都在 0.3g/kg 以上.这比文献^[7]所报道的临近地区的水稻土的结果低,该地区上世纪 80 年代以来每 hm^2 施用过磷酸钙达 750kg,并配施农家有机肥.不过,供试土壤树脂磷含量为 10 ~ 126 mg/kg,总体趋势比嘉

兴水稻土高.而 CaCl_2 浸提的水溶性磷为 $0.36 \sim 1.43 \text{ mg/kg}$, 大大高于嘉兴水稻土.与刘远金等(2002)报道的城郊菜地磷分布状况对比,虽然全磷甚低,但水溶性磷含量明显偏高.这是水稻土在水耕过程下磷素有效性升高的缘故.按文献[7]的树脂磷与 Olsen-P 的关系计算,供试土壤中速效磷含量应当基本上达到土壤富磷化的水平(Olsen-P 15 mg/kg , 相当于 35 mg/kg 的树脂磷).因而,仅从含量上看,这些土壤可归入环境富磷状态.刘方等(2002)对黄壤旱地的研究显示,因不同的作物种植利用实践,土壤磷素在不断升高的同时,易迁移性磷如速效磷、水溶性磷随全磷增加呈指数提高.这里的全磷与 2 种易迁移性磷间未见互为消长关系,说明不同的长期肥料处理移动使这些小区间土壤磷素的形态分配发生了分异.

这里的资料还说明,土壤耕层磷素的可迁移性在同一处理的不同深度间也发生了变化.最表层 5 cm 深度的全磷和树脂磷比下部高,而水溶性磷有下部高于上部的趋势.

表 3 供试土壤的几种磷形态的含量

土壤深度 /cm	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		树脂磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		水溶性磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
0~5	0.425	0.197	42.39	19.83	0.750	0.191
5~15	0.368	0.117	38.48	18.46	0.944	0.358

2.2 不同施肥结构下水稻土磷素平衡

连续 13 年 TP 处理后各小区的土壤总磷库(全磷含量)差异显著(图 1).常规有机无机配施的施肥处理下,表层土壤 TP 达到无肥区的 3 倍左右,亚表层为 2 倍左右.而秸秆配施化肥与单施化肥的 2 处理差异不显著.无肥区表层土壤 TP 显著低于各施肥处理.笔者对各小区近 8 年来的水稻和油菜产量进行了监测(图 2),可见水稻产量常规区和秸秆-化肥区(9 t/hm^2)显著高于纯施化肥区(平均 7.59 t/hm^2),后者又高于无肥区(平均近 5 t/hm^2).而油菜产量在各施肥区间无显著差异(约 29 t/hm^2),只是无肥区显著较低(0.5 t/hm^2 左右).另外,从产量的年际变化看,除无肥区产量持续下降外,化肥区

水稻产量波动性十分突出,说明单施化肥土壤肥力与作物生产力极不稳定.相反,施用化肥结合猪粪或秸秆还田的施肥结构有利于作物的稳产高产.这些产量的资料说明土壤总磷库并不决定作物的产量水平,这种土壤的总磷库在 0.3 g/kg 以上已能满足作物高产需要.

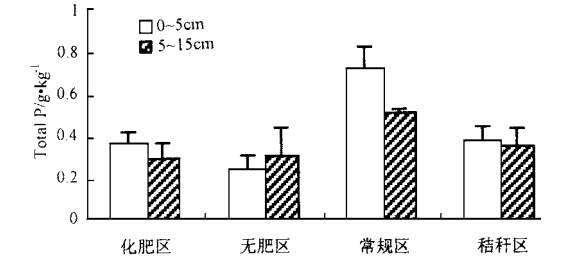


图 1 供试各小区的全磷的分布

Fig.1 Distribution of total P of the studied soil

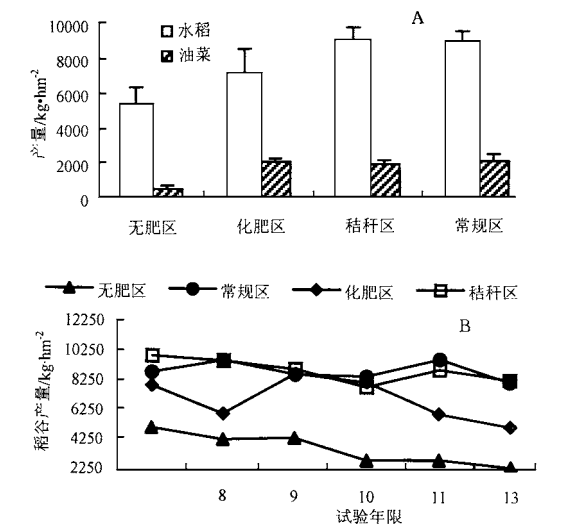


图 2 供试各小区的平均稻谷产量(A)及其年际变异性(B)

Fig.2 Grain yield and its inter-annual variability of the treated plots

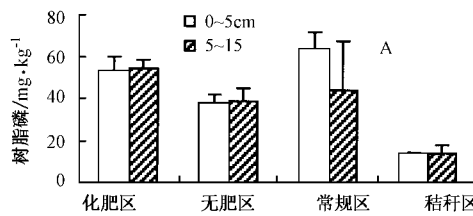
根据质量平衡原理,可以对定位试验 13 年来各处理的磷素平衡进行估算.据历年对各小区产出的分析,水稻各小区子粒磷含量差异微小,多年平均为 0.30% ;油菜子粒磷含量在各施肥区为 0.24% ,而无肥区为 0.16% .2 种作物的秸秆磷含量十分接近,在施肥区为 0.12% ,而无肥区为 0.08% .猪粪的磷含量年际有变动,取平均值 0.2% (占湿重).当地河流灌溉水的磷含量平均为 0.06 mg/L ,降雨的磷含量甚低,该 2 项对土壤的磷输入忽略不计.表

4 结果表明,该水稻土中年磷流失量为 $2 \sim 8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其中纯施化肥区流失最高,为有机肥配施处理的 $2 \sim 4$ 倍.而从磷库来看,仅化肥猪粪处理增加了土壤总磷库,该处理的施磷量超过 $50 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$.说明水稻土磷素流失是一种客观过程.但化肥区流失磷占施入磷的 40% ,而有机肥配施下流失磷仅占施入磷的 10% 以下.郭红岩等(2002)^{*},对临近的太湖白土($\text{pH}6.4$,总磷 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机碳为 $11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的磷流失量测定为 $1.7 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,这与笔者得到的磷流失量结果处于同一数量级.

表 4 各试验小区耕层土壤磷库的平衡/ $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$

Table 4 Balance budget of soil P in different treatment plots/ $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$					
处理	当前总磷 ¹⁾ $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	施入磷	土壤供磷	作物带出磷	流失磷
无肥区	0.29	0.0	27.2	20.3	7.2
纯化肥区	0.32	19.7	23.1	34.9	8.2
化肥-秸秆区	0.36	27.3	17.7	43.2	2.1
化肥-粪肥区	0.53	53.3	-6.81	42.5	4.3

1) 为全耕层深度加权平均值,土壤实测容重为 $1.18 \text{ g}/\text{cm}^3$.



2.3 不同肥料长期处理下土壤磷的可迁移性

不同肥料处理下各小区的土壤树脂磷和水溶性磷的分布示于图 3.这 2 种磷的分布有所不同.无论是树脂磷还是水溶性磷,有机无机配施的化肥-粪肥区均有高于其他处理的现象.当然,这种差异没有全磷的差异大.不过,除常规区外,纯化肥区的树脂磷显著高于无肥区,而后者又高于秸秆区.水溶性磷在施肥处理中有向下积聚的迹象,可能与最表层磷更易被生物吸收利用有关.通常认为,在长江下游沿岸,有机质含量较高有助于磷的活化^[18],而本试验中,秸秆区无论是树脂磷还是水溶性磷均低于纯化肥区,仅是长期施猪粪的处理 2 种迁移性磷均最高.但若以这些迁移性磷含量与全磷的比值(表 5)来衡量,供试水稻土的水溶性磷的比率在各处理间基本无差异,而树脂磷比率以纯化肥区和无肥区中较高.图 4 进一步示明,土壤树脂磷的相对含量与土壤磷流失量间存在较好的相关关系.作为一种易移动的磷形态,树脂磷的

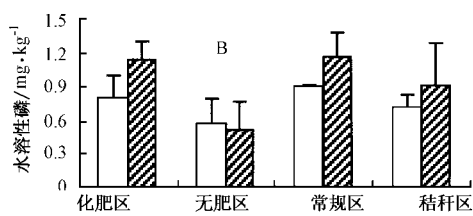


图 3 不同肥料长期处理下树脂磷(A)和水溶性磷(B)的分布

Fig. 3 Distribution of resin P (A) and soluble P (B) in different treatment plots

相对分配与水稻土中磷流失潜能密切有关.因此,施用粪肥和秸秆尽管积累了有机质,增加树脂磷的绝对含量,但由于占总磷的相对含量仍较低,不会使土壤磷活化而促进流失.

3 讨论与结论

3.1 水稻土磷素形态与流失潜力

尽管许多报告表明,土壤磷素测定值与水淋洗磷、水稻田面水磷具有高度相关性^[4,7,9~11].在本项研究中,土壤磷库的形态含量与土壤流失量间没有显著的相关关系.张志剑等(2001)的报道也说明嘉兴地区水稻土中田面水溶解性磷与土壤测试磷无统计相关性,且水迁移的磷 60% 以上为颗粒性磷^[9].郭红岩等(2002)对太湖地区武进市一个小流域的现场监测也揭示了土-水界面迁

移的磷主要以颗粒态为主,并且主要的磷负荷来自水稻田施肥后降雨的洗刷^{**}.本研究中配施有机肥的小区尽管土壤树脂磷和水溶性磷的绝对含量较高,但流失磷反而较少,反映出有机肥处理下保护了土壤而减缓雨水对土壤的冲击洗刷效应.因此,对于防止或减少水田土壤的农业非面源污染来说,有机肥配施不但没有发生磷素活化而促进流失^[18],而且有利于土壤磷的相对

* 郭红岩.地理信息系统支持下非点源污染的定量与指标化研究及其生态毒理效应.南京大学,2002,20~80.
** 郭红岩.地理信息系统支持下非点源污染的定量与指标化研究及其生态毒理效应.南京大学博士学位论文,2002,25~50.

保持^[18].单施化肥是导致明显磷的非点源污染的主要原因.

表 5 不同肥料处理小区中迁移性磷占全磷的量¹⁾/ %

Table 5 Ratio of mobile P to total P in different plots/ %

处理区	0 ~ 5 cm		5 ~ 15 cm	
	树脂磷	CaCl ₂ -磷	树脂磷	CaCl ₂ -磷
常规区	9.07 ± 2.53b	0.129 ± 0.021 b	8.88 ± 4.78b	0.232 ± 0.047a
化肥区	14.48 ± 0.68a	0.220 ± 0.061 a	18.87 ± 3.85a	0.399 ± 0.110a
秸秆区	4.17 ± 1.12c	0.204 ± 0.070a	4.32 ± 0.37c	0.261 ± 0.085a
无肥区	16.64 ± 2.27a	0.237 ± 0.080a	15.09 ± 4.15a	0.179 ± 0.085a

1)表中 a、b 和 c 代表差异显著性(P < 0.05)

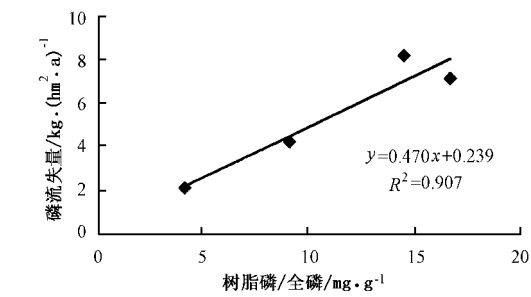


图 4 不同小区土壤磷流失量与树脂磷相对含量关系

Fig.4 Correlation of P loss with resin P content in the soils from different treatment plots

3.2 太湖地区水稻合理施用肥料与农业非点源污染控制

至上世纪 90 年代末,农业非点源污染负荷已占太湖入湖总负荷的 50 %左右^[3].环太湖地区江苏部分有 30 多万 h m² 水稻田(仅黄泥土第 2 次土壤普查的面积达 25.6 万 h m²)^[16],而现今太湖地区化肥单施面积已达 80 %以上.按本研究中纯化肥小区年流失量估计,农业非点源磷污染的年负荷将达 2000t.根据本研究中不同处理区的产量情况看,稻油两季每 h m² 施化肥磷 45kg 即可满足高产需要,同时每季配施 2250kg 鲜重的秸秆,可同时收到高产高效而控制非点源磷污染的效果.笔者在临近地区的乌栅土(速效磷 11 mg·kg⁻¹)的肥料试验提出每 h m² 施用氮肥 180kg、磷肥 90 ~ 120kg 的一次性施肥方案^[20].如果太湖地区农田推广一半面积的有机-无机配施,则可能减少一半的农田非点源磷负荷.因此,农业中化肥施用还有很大的调节空间,通过农业生产措施来控制农田向水体的 N、P 排放具有急迫的现实意义.

参考文献:

1 Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agri-

cultural drainage: historical perspectives and current research. J Environ. Qual., 1998, **27**: 277 ~ 293.

2 Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: issues and options. J Environ. Qual., 1994, **23**: 437 ~ 451.

3 金相灿主编.湖泊富营养化控制和管理技术.北京:化学工业出版社, 2001. 5 ~ 35.

4 Austin N R, Berbard P J, Collins M D P. Phosphorus losses in irrigation runoff from fertilized pasture. J Environ. Qual., 1996, **25**: 63 ~ 68.

5 Pote D H, Naniel T C, Nicholas D J et al. Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentrations in runoff. J. Environ. Qual., 1999, **28**: 170 ~ 175.

6 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价. 环境科学学报, 2001, **38**(1): 344 ~ 348.

7 张志剑, 王光火. 嘉兴地区水稻土磷素状况与环境效应评估. 科技通报, 1999, **5**: 377 ~ 381.

8 张志剑, 王光火, 王珂等. 模拟水田的土壤磷素溶解特征及其流失机制. 土壤学报, 2001, **38**(1): 139 ~ 143.

9 张志剑, 王珂, 朱荫湄等. 浙北水稻主产区田间土-水磷素流失潜能. 环境科学, 2001, **22**(1): 98 ~ 101.

10 刘远金, 卢瑛, 陈俊林等. 广州城郊菜地土壤磷素特征及流失风险分析. 土壤与环境, 2002, **11**(3): 237 ~ 240.

11 刘方, 何腾兵, 钱晓刚等. 不同利用方式下黄壤旱地磷素状况及环境影响分析. 土壤与环境, 2002, **11**(3): 232 ~ 236.

12 陈欣, 姜曙千, 张克中. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响. 生态学报, 2000, **20**(3): 374 ~ 378.

13 Gartley K L, Sims J T. Phosphorus Soil Testing: Environmental Uses and Implication, Comm. Soil Sci Plant Anal., 1994, **25**(9 & 10): 1565 ~ 1582.

14 McDowell R, Sharpley A N, Brooks P et al. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution. Soil Science, 2001, **166**(2): 137 ~ 149.

15 Wolf A M, Baker D E, Poince H B et al. Soil Tests for Estimating Labile, Soluble, and Algae Available Phosphorus in Agriculture Soil. Environ Quality, 1985, **14**(3): 341 ~ 348.

16 江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤. 北京: 中国农业出版社, 1995. 232 ~ 357.

17 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 147 ~ 211.

18 邵宗臣, 赵美芝. 土壤中积累态磷活化动力学研究: I 有机质的影响. 土壤学报, 2002, **39**(3): 318 ~ 325.

19 张恩平, 张淑红, 李太来等. 有机肥与无机肥配施对菜田土壤氮磷钾养分含量的影响. 黑龙江农业科学, 2001, **2**: 5 ~ 7.

20 潘根兴等. 太湖地区高产水稻土经济极点施肥. 环境科学, 2003, **24**(3): 96 ~ 100.