

施磷对稻田土壤及田面水磷浓度影响的模拟^{*}

周全来^{1,2} 赵牧秋^{1,2} 鲁彩艳^{1,2} 史奕¹ 陈欣^{1**}

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

【摘要】 通过施用不同剂量磷肥稻田土壤淹水培养试验,研究了施磷对稻田土壤及田面水磷浓度的影响。结果表明,土壤速效磷(Olsen-P)浓度在施磷后迅速下降,60 d后趋于稳定。随施磷量的增加,土壤速效磷和缓效磷库量均递增,Olsen-P与施磷量呈正相关关系($y = 21.49 + 0.086x$),表明该土壤有很高的固磷潜力。施磷后田面水中全磷浓度呈先迅速上升后又缓慢下降趋势,施磷120 d后,田面水中全磷浓度与施磷量呈指数相关关系($y = 0.372e^{0.0022x}$),施磷量在400 ~ 800 kg·hm⁻²之间田面水全磷浓度加速增长,如果施磷量达到或超过800 kg·hm⁻²,则磷容易进入田面水并导致流失,低于该施磷量时,则磷进入田面水中的量较少。利用分段回归模型模拟土壤 Olsen-P 与水面全磷关系,预测出导致田面水中磷激增的土壤 Olsen-P 浓度“突变点”为82.7 mg·kg⁻¹,即施磷量为712 kg·hm⁻²。因此,土壤 Olsen-P 浓度可作为预测田面水中磷损失程度的指标。

关键词 施磷 稻田土壤 Olsen-P 田面水

文章编号 1001-9332(2006)10-1845-04 **中图分类号** S143.2 **文献标识码** A

Effects of P application on P concentrations in paddy soil and its surface water: A simulation test. ZHOU Quanlai^{1,2}, ZHAO Muqiu^{1,2}, LU Caiyan^{1,2}, SHI Yi¹, CHEN Xin¹ (¹Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(10): 1845 ~ 1848.

An anaerobic incubation test was conducted to study the effects of different P application rate on the P concentrations in paddy soil and its surface water. The results showed that soil available P (Olsen-P) decreased rapidly at the beginning, but approached to stable after 60 days of P application. Both Olsen-P and residual P increased with increasing P application rate, and Olsen-P had a positive correlation with P application rate, suggesting that the test soil had a strong P adsorption capacity. After P application, the total P (TP) in soil surface water increased rapidly, and then decreased slowly, showing that there was a P exchange between soil and its surface water. After 120 days of P application, there was an exponential relationship between soil surface water TP and P application. The TP in soil surface water increased rapidly when the P application rate was 400 ~ 800 kg·hm⁻², and easy to be lost when the P application rate was higher than 800 kg·hm⁻². The simulation with split line model on the relationship between soil Olsen-P and soil surface water TP showed that the change point of soil Olsen-P, which induced a sharp increase of soil surface water TP concentration, was 82.7 mg·kg⁻¹, corresponding to a P application rate being about 712 kg·hm⁻². Soil Olsen-P could be a good indicator in forecasting the P loss from soil surface water.

Key words P application, Paddy soil, Olsen-P, Soil surface water.

1 引言

磷是动植物生长所必需的营养元素之一。长期以来,磷素的投入一直被认为是维持动植物产品产量,满足全球食品需求的重要手段^[15]。为了协调土壤中营养元素的平衡,增加粮食产量,人们不断增施磷肥,但由于土壤和磷素之间的强烈反应,施入土壤中的磷肥很大一部分被土壤所固定^[4],多数磷转为对植物有效性很弱的缓效磷^[7,8],但其可在植物需磷时转化为有效磷供植物利用^[14,16,17]。我国是水稻生产大国,稻田面积占世界稻田面积的22%^[1]。由于水田长期处于还原性环境中,对磷的固定能力往往小于旱田^[5],且水田施入磷肥时,会有一些磷肥

直接进入田面水中^[13],而土壤对磷有很强的吸附固定作用,因此,施肥一定时间后田面水中的磷量会逐渐减少^[18]。

有研究者认为,向土壤中施用磷肥达到一定量后,土壤中用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 浸提的磷溶于水的量会增加,易于随水流失^[10],其成分主要是水溶性无机磷。Hesketh 等^[2,3] 提出发生土壤磷素淋溶的“突变点”(change-point)理论,以 Split line 模型预测发生土壤磷素淋溶时土壤有效磷的“突变点”。McDowell 等^[12] 认为土壤渗出水全磷中水溶性无机磷

* 国家自然科学基金项目(30470336)和中国科学院陆地生态过程重点实验室资助项目(C16ADLDSTSJJ0403)。

** 通讯联系人。E-mail: chenxin@iae.ac.cn

2005-11-11 收稿,2006-08-14 接受。

可占 50%~72%,具有与 CaCl_2 浸提磷相同的特性,因此,可利用该理论预测稻田田面水中全磷可能发生损失时土壤速效磷(Olsen-P)阈值。

本研究试图通过模拟培养试验,研究磷肥施入土壤后土壤 Olsen-P 和土面水全磷的动态变化规律,并利用 Split line 模型,确定稻田田面水发生磷损失时的土壤 Olsen-P 阈值,以便为合理施肥提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 供试土壤

供试土壤采自中国科学院沈阳生态实验站($41^{\circ}31'N$, $123^{\circ}24'E$)水稻土,其主要理化性质为:总碳 $10.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $13.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $28.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 6.7。

2.2 试验设计

试验共设 6 个处理,即 P_0 :对照,不施磷; P_{100} :施磷量为 $100 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$; P_{200} :施磷量为 $200 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$; P_{400} :施磷量为 $400 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$; P_{800} :施磷量为 $800 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$; P_{1600} :施磷量为 $1600 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

取稻田耕层 0~20 cm 土壤,过 2 mm 筛,测定土壤含水率,按不同处理施入不同剂量的磷肥,分别称取不同处理施磷土壤 100 g,置于 250 ml 滴流瓶中,徐徐注入 200 ml 无离子水,使土面以上形成约 5 cm 深土层。用 PARAFILM "M" 封口膜封口防止水分蒸散,置于室温下培养,分别于培养第 1、3、10、30、60、120 天取样,每次 18 个培养瓶,6 个处理,共培养 108 瓶。测定土壤 Olsen-P 和土面水全磷(TP)浓度。

2.3 分析方法

土壤全氮采用凯氏法;土壤全磷采用酸溶-钼锑抗比色法;全钾(K)采用 NaOH 熔融,火焰光度法;土壤 Olsen-P 采用碳酸氢钠法;土壤 CaCl_2 -P 用异丁醇萃取-钼蓝比色法;水样全磷(TP)用硫酸-高氯酸氧化-钼蓝比色法^[6]。

方差分析与多重比较采用 SPSS 统计分析软件包,通过 One-way ANOVA 在 95% 的置信度水平上,用 Duncan 显著性检验方法比较不同处理间的差异性。

3 结果与分析

3.1 淹水培养土壤 Olsen-P 的动态变化

不施磷处理(对照)淹水培养期间 Olsen-P 浓度一直在低水平波动,平均为 $23.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。各施磷处理淹水培养后,土壤 Olsen-P 浓度总体上均呈下降趋势(图 1)。处理 P_{100} 、 P_{200} 和 P_{400} 在施磷肥后土壤 Olsen-P 浓度分别为 51.7、78.1 和 $112 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,之后迅速下降;至培养第 10 天,其浓度分别降为 38.4、48.7 和 $87.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其后下降速率趋缓,培养 60 d 后,其浓度分别为 29.8、35.8 和 $57.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;培养 120 d 后,浓度分别为 29.0、33.8 和 $57.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,60 d 与 120 d 之间浓度差异不显著。而处理 P_{800} 和 P_{1600} 由于施磷量大,其土壤 Olsen-P 初始浓度分别达到 242.5 和 $500.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;培养 10 d 后降至 159.5 和 $312.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其后下降趋势减小,培养 60 d 后其浓度分别为 102.8 和 $158.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;培养 120 d 后其浓度分别为 94.5 和 $157 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,60 d 与 120 d 之间浓度差异不显著。表明磷肥施入土壤后,其 Olsen-P 浓度变化主要发生在施磷后的 60 d 内,而前 10 d 又是 Olsen-P 浓度变化最快的时期。由此可见,在该土壤条件下,施磷可导致土壤中 Olsen-P 迅速增加并在很短时间内(10 d)其大部分被土壤吸附固定。施磷 120 d 后,处理 P_{100} 至 P_{1600} 施入的磷进入缓效磷库的量分别为 89.8、180.8、338.4、664.0 和 $1299.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,呈不断上升趋势,说明该土壤有很高的磷固定潜力。

· kg^{-1} ;培养 120 d 后,浓度分别为 29.0、33.8 和 $57.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,60 d 与 120 d 之间浓度差异不显著。而处理 P_{800} 和 P_{1600} 由于施磷量大,其土壤 Olsen-P 初始浓度分别达到 242.5 和 $500.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;培养 10 d 后降至 159.5 和 $312.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其后下降趋势减小,培养 60 d 后其浓度分别为 102.8 和 $158.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;培养 120 d 后其浓度分别为 94.5 和 $157 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,60 d 与 120 d 之间浓度差异不显著。表明磷肥施入土壤后,其 Olsen-P 浓度变化主要发生在施磷后的 60 d 内,而前 10 d 又是 Olsen-P 浓度变化最快的时期。由此可见,在该土壤条件下,施磷可导致土壤中 Olsen-P 迅速增加并在很短时间内(10 d)其大部分被土壤吸附固定。施磷 120 d 后,处理 P_{100} 至 P_{1600} 施入的磷进入缓效磷库的量分别为 89.8、180.8、338.4、664.0 和 $1299.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,呈不断上升趋势,说明该土壤有很高的磷固定潜力。

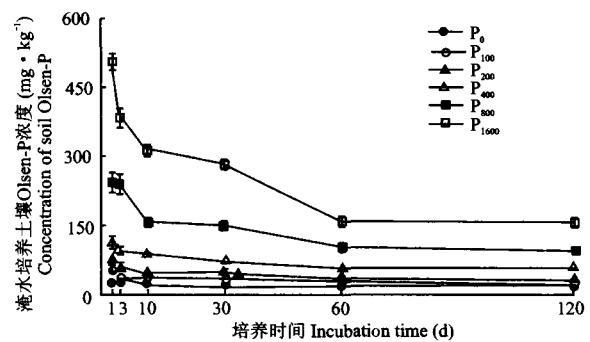


图 1 不同施磷处理土壤 Olsen-P 的变化
Fig. 1 Changes of Olsen-P in different P application soils.

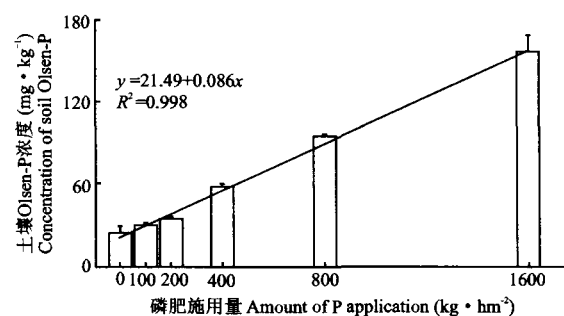


图 2 培养 120 d 土壤 Olsen-P 浓度与磷肥施用量的关系
Fig. 2 Relationship between Olsen-P and the amount of P application after 120 days incubation.

培养 120 d 后,对不同处理间土壤 Olsen-P 浓度进行方差分析及多重比较,结果表明,除 P_0 、 P_{100} 和 P_{200} 处理间土壤 Olsen-P 浓度差异不显著外,其余各处理间差异都显著(表 1)。此时,随施磷量的增加,土壤 Olsen-P 浓度不断增加,两者呈明显的正相关关系(图 2)。说明土壤 Olsen-P 浓度随施磷量的增加而增加,在该土壤条件下,每施入 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的磷

表 1 培养 120 d 各施磷处理土壤 Olsen-P 浓度比较
Table 1 Comparison of soil Olsen-P concentration in different P application soils after 120 days incubation

处理 Treatment	P ₁₆₀₀	P ₈₀₀	P ₄₀₀	P ₂₀₀	P ₁₀₀	P ₀
平均值 Means	157.0a*	94.5b	57.4c	33.8d	29.0d	23.4d

* $P < 0.05$.

肥,土壤速效磷约增加 $0.086 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3.2 淹水培养土面水全磷的动态变化

处理 P₀、P₁₀₀ 和 P₂₀₀ 在 120 d 培养过程中土面水中的总磷浓度具有类似的波动趋势(图 3),均不超过 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $0.31 \sim 0.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且 3 个处理间差异都不显著($P = 0.306, \alpha = 0.05$). 处理 P₄₀₀ 在淹水初期土面水中全磷浓度有明显的增高趋势,但在 60 d 后其浓度迅速降到 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 处理 P₈₀₀ 和 P₁₆₀₀ 的土面水中全磷浓度淹水后都呈上升趋势,说明磷由土壤向田面水中运移^[21],前 3 d 上升最快,30 d 时达到最大值,这种高磷浓度状态可以持续很长时间,下降幅度缓慢,处理 P₈₀₀ 和 P₁₆₀₀ 由于施 P 量相差 1 倍,虽然土面水中全磷浓度变化趋势相似,但浓度明显不同,两处理培养 30 d 和 120 d 的磷浓度分别为 $4.7、2.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $18.5、14.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

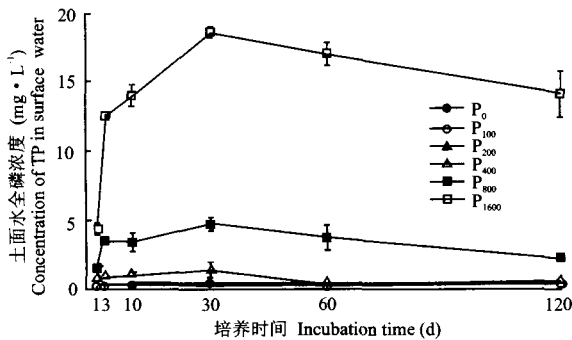


图 3 不同施磷处理土面水全磷浓度变化

Fig. 3 Changes of TP concentration in surface water of different P application treatments.

淹水培养 120 d,土面水全磷浓度与施磷量之间呈指数相关关系(图 4),当施磷量为 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,水面全磷浓度为 $0.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而在施磷量为 $800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,其水面全磷浓度迅速上升至 $2.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且在施磷量 $400 \sim 800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间明显增加.因此,供试稻田土壤施磷量如果超过 $800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,土面水全磷浓度将迅速增加,容易发生磷随田面水流失.

由于水田所处的位置一般地势低平,几乎没有土壤侵蚀现象,而磷随水向下垂直渗漏量很少,甚至可以忽略不计^[9],所以稻田磷流失主要是由于田面

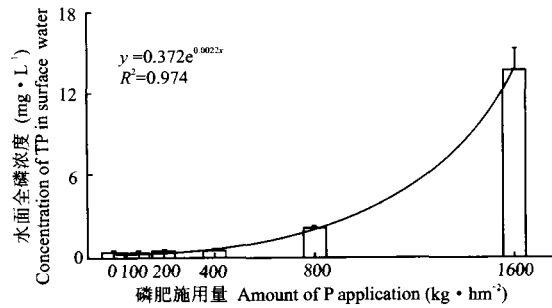


图 4 培养 120 d 水面全磷浓度与磷肥施用量的关系

Fig. 4 Relationship between TP in surface water and the amount of P application after 120 days incubation.

水中磷随降雨溢出水田或由人工放水而损失到环境中^[18, 19].以田面水深度为 5 cm 估算,当施磷 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,即使田面水全部损失,水田进入环境中的磷量也仅为 $0.05 \sim 0.415 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占所施磷量的 $0.05\% \sim 0.1\%$;施磷 800 和 $1600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,其可能损失的磷量为 1.56 和 $6.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,损失量与施入量的比率为 0.2% 和 0.4% .由于稻田施磷量很少超过 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此,一般农业生产中所施磷量不易引起磷随田面水的径流损失,对环境水体的富营养化贡献不大.

3.3 淹水培养土壤 Olsen-P 与田面水中全磷的关系

利用分段回归模型(split line model)对土壤 Olsen-P 与田面水全磷浓度进行模拟(图 5),两条直线交点处土壤 Olsen-P 的浓度是 $82.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,此值可看作是稻田土壤易发生田面水磷损失的“突变点”,即田面水全磷迅速增加的阈值.当 Olsen-P 处于低浓度范围时,水面全磷也处于低浓度;当 Olsen-P 浓度大于 $82.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水面全磷浓度将迅速增加.根据图 2,由 Olsen-P 与施磷量的关系计算出该 Olsen-P 浓度值对应的施磷量为 $712 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此,该土壤施磷量高于 $712 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,将会发生磷流失.但不同土壤类型水面全磷迅速增加时施磷量会有所不同,高含磷量土壤则有更多高能吸收位点被占据^[11],其在较低的施磷量时便可能达到有效磷的“突变点”;由于土壤有机质对土壤磷素有活化作用^[20],施用有机肥或有机质过多的土壤在较低施磷量下也可能达到“突变点”.但是生产上稻田平均施磷量一般不超过 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此,稻田田面水在一般施磷量下磷浓度猛增的可能性不大,磷流失的可能性小.

处理 P₀、P₁₀₀ 和 P₂₀₀ 土壤 Olsen-P 浓度都低于该土壤磷损失阈值.处理 P₄₀₀ 在施磷 10 d 后,Olsen-P 浓度降至阈值以下,其水面全磷也都处于低浓度水

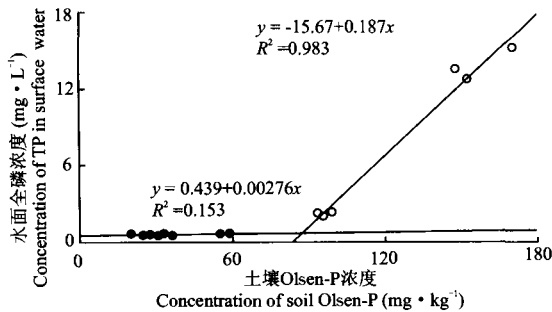


图5 土壤 Olsen-P 与水面全磷之间的关系

Fig. 5 Relationship between soil Olsen-P and TP in surface water.

平,这是由于土壤对磷素的强烈固定作用,且土壤的高能吸附位点尚未饱和,磷素不易大量进入水体,田面水中全磷浓度增加不多.处理 P_{800} 和 P_{1600} 的土壤 Olsen-P 浓度均高于该土壤磷损失阈值,两处理土壤 Olsen-P 浓度在施磷之初浓度更高,且田面水全磷浓度也都处于高水平,这是由于土壤高能吸附位点大部分被施入的大量磷肥所占据,降低了土壤对磷的固定强度,使土壤进一步吸持磷的能力降低^[11],导致土壤中富余的磷肥向水中运移.因此,田间施磷超过 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后应尽量避免放水或产生径流.随时间延续,施入土壤的磷素会逐渐转化为缓效磷态,土壤 Olsen-P 浓度也会逐渐降低,水体中磷向土壤运移,水面全磷浓度将不断下降,最终处于低浓度水平.

4 结 论

4.1 在 $0 \sim 1600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施磷范围内,随施磷量增加,土壤速效磷库呈递增趋势,与施磷量呈正相关关系,表明该土壤有很高的固磷潜力.

4.2 磷肥施入土壤 120 d 后,田面水全磷浓度与施磷量呈指数相关关系.

4.3 易导致田面水中磷随水流失的供试土壤 Olsen-P 浓度“突变点”是 $82.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 Olsen-P 可作为预测田面水磷损失程度的指示指标.

参考文献

- Jiang C-S (江长胜), Wang Y-S (王跃思), Zheng X-H (郑循华), et al. 2004. Advances in the research on methane emission from paddy fields and its affecting factors. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), **35**(5): 663 ~ 669 (in Chinese)
- Liu L-H (刘丽花), Yang S-Y (杨淑英), Lü J-L (吕家珑). 2003. Studies on “threshold value” of phosphorus leaching in long-term different fertilization soils. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For* (Nat Sci) (西北农林科技大学学报·自然科学版), **31**(3): 123 ~ 126 (in Chinese)
- Lü J-L (吕家珑). 2003. Phosphorus leaching from agricultural soils and its prediction. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **23**(12): 2689 ~ 2701 (in Chinese)
- Lu R-K (鲁如坤), 1980. Soil phosphorus (I). *Chin J Soil Sci* (土壤通报), **11**(1): 43 ~ 47 (in Chinese)
- Lu R-K (鲁如坤). 1993. Phosphorus chemistry of paddy soil and reasonable P fertilizer application. *Phosphate Compound Fertil* (磷肥与复肥), **8**(1): 84 ~ 86, 81 (in Chinese)
- Lu R-K (鲁如坤). 1999. Analysis Methods of Soil Agro-Chemistry. Beijing: China Agriculture Technology Press. 166 ~ 185 (in Chinese)
- Lu R-K (鲁如坤), Shi Z-Y (时正元), Gu Y-C (顾益初). 1995. Soil Accumulated phosphorus II. Apparent availability ratio of phosphorus fertilizer. *Soils* (土壤), **27**(6): 286 ~ 289 (in Chinese)
- Lu R-K (鲁如坤), Shi Z-Y (时正元), Qian C-L (钱承梁). 2000. Decline of phosphorus availability with time in soils. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), **37**(3): 323 ~ 329 (in Chinese)
- Luo L-G (罗良国), Wen D-Z (闻大中), Shen S-M (沈善敏). 2000. Study on the percolating regularity of nutrient in rice field ecosystem of Northern China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), **33**(2): 68 ~ 74 (in Chinese)
- McDowell RW, Mahieu N, Brookes PC, et al. 2003. Mechanisms of phosphorus solubilisation in a limed soil as a function of pH. *Chemosphere*, **51**: 685 ~ 692
- McDowell RW, Sharpley AN. 2001. Phosphorus losses in subsurface flow before and after manure application to intensively farmed land. *Sci Total Environ*, **278**: 113 ~ 125
- McDowell RW, Sharpley AN. 2004. Variation of phosphorus leached from Pennsylvania soils amended with manures, composts or inorganic fertilizer. *Agric Ecosyst Environ*, **102**: 17 ~ 27
- Mulqueen J, Rodgers M, Scally P. 2004. Phosphorus transfer from soil to surface waters. *Agric Water Manage*, **68**: 91 ~ 105
- Pheav S, Bell RW, White PF, et al. 2003. Fate of applied fertilizer phosphorus in a highly weathered sandy soil under lowland rice cropping and its residual effect. *Field Crops Res*, **81**: 1 ~ 16
- Shen S-M (沈善敏). 1985. On development and strategy of phosphorus fertilizer of China. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), **16**(3): 97 ~ 103 (in Chinese)
- Shen S-M (沈善敏), Yin X-Y (殷秀岩), Zhang L (张璐). 1992. Residual effect of phosphorus fertilizer and phosphorus recycling in a farming system I. Phosphorus uptake by crops, residual effect of phosphorus fertilizer and change of soil available phosphorus. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **3**(2): 138 ~ 143 (in Chinese)
- Shi Z-Y (时正元), Lu R-K (鲁如坤), Gu Y-C (顾益初). 1995. Soil Accumulated phosphorus I. Yield response of once large phosphorus fertilizer application. *Soils* (土壤), **27**(2): 57 ~ 59, 89 (in Chinese)
- Wang K, Zhang ZJ, Zhu YM, et al. 2001. Surface water phosphorus dynamics in rice fields receiving fertilizer and manure phosphorus. *Chemosphere*, **42**: 209 ~ 214
- Xie X-J (谢学俭), Ran W (冉炜), Shen Q-R (沈其荣), et al. 2003. P loss through vertical leaching from paddy field under submerge conditions. *Soils* (土壤), **35**(6): 506 ~ 509, 517 (in Chinese)
- Xu Y-C (徐阳春), Shen Q-R (沈其荣), Mao Z-S (茆泽圣). 2003. Influences of long-term fertilization on the contents and distributions of forms of organic P in soil and soil particle sizes. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), **40**(4): 593 ~ 598 (in Chinese)
- Zhang Z-J (张志剑), Zhu Y-M (朱荫涓), Wang K (王珂), et al. 2001. Phosphorus behavior in soil-water system of paddy field and its environmental impact. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **12**(2): 229 ~ 232 (in Chinese)

作者简介 周全来,男,1974年生,硕士.主要从事农田土壤磷素循环过程研究. E-mail: zhouquanlai@126.com

责任编辑 张凤丽