

丹江库区典型土壤磷的淋溶模拟研究

王 静^{1,2}, 丁树文¹, 李朝霞¹, 郭熙盛², 汪永涛³, 蔡崇法¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070; 2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 安徽 合肥 230031; 3. 湖北省丹江口市水土保持局, 湖北 丹江口 442700)

摘 要: 通过室内土柱模拟试验对湖北省丹江库区典型土壤磷的淋溶特征进行了研究。结果表明, 淋溶液中的钼酸盐反应磷(MRP)的累计淋溶量和浓度都随着施肥量的增加而增加。在连续淋溶 3~4 次后, 淋溶液中钼酸盐反应磷(MRP)的浓度达到峰值, 然后随着淋溶的持续进行, 其浓度逐渐下降, 最后变化趋势趋于平稳。磷的淋溶受土壤粘粒含量的影响较大, 尤其当土壤的粘粒很高时, 它的影响程度表现更明显。湖北省丹江库区的 3 种主要土壤: 黄棕壤、紫色土和石灰土, 相同条件下, 淋溶液中钼酸盐反应磷的淋溶量和浓度大小顺序依次为: 石灰土 > 紫色土 > 黄棕壤, 因此, 石灰土中磷发生淋溶损失的程度比较大, 而黄棕壤则比较小。

关键词: 磷肥; 土柱模拟; 淋溶; 钼酸盐反应磷

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)02-0692-06

Simulated Study on Phosphorus Leaching of Typical Soils in Danjiang Reservoir Area

WANG Jing^{1,2}, DING Shu-wen¹, LI Zhao-xia¹, GUO Xi-sheng², WANG Yong-tao³, CAI Chong-fa¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agriculture Science, Hefei 230031, China; 3. Bureau of Soil and Water Conservation, Danjiangkou City, Hubei Province, Danjiangkou 442700, China)

Abstract: Phosphorus (P) is an essential element for plant growth and a key element for eutrophication of water bodies as well. The P loss from agricultural soils not only leads to a decrease in the efficiency of fertilizers, but also gives rise to the eutrophication of surface water. In this paper, simulated test with soil columns in laboratory was conducted to study the leaching characteristic of P fertilizer in typical soils from Danjiang reservoir area in Hubei province. The results revealed that P fertilizer application had significant influences on phosphorus in leachate. Both accumulative leaching amount and concentration of MRP (Molybdate reactive phosphorus) in leachate increased with P fertilizer applied. The peak concentration of MRP in leachate was obtained after 3 or 4 times of leaching, and the MRP concentration declined gradually and became stable at last as the leaching continued. The clay content in soil also influenced the concentration of MRP, especially in soil with higher clay content. This test also indicated that the accumulative amount of MRP in leachate was in the sequence: limestone soil > purple soil > yellow brown soil, which implied that the limestone soil had high potential of P leaching while low potential for the yellow brown soil.

Keywords: phosphorus fertilizer; simulative soil column; leaching; molybdate reactive phosphorus

随着对水体点源污染的有效控制, 水体负荷结构发生了明显的变化。目前在许多地区非点源污染已经成为影响水环境恶化和湖泊富营养化的主要因素, 其

中农业非点源污染占有相当大的比例。丹江水库作为南水北调中线工程的水源地, 其总体水质良好, 满足调水的要求, 但研究发现其上游的一些支流存在着严重的水质污染现象, 这些河流的污染除少数点源污染外, 绝大部分是由农业非点源污染引起的。因此研究丹江库区的农业非点源污染, 对于保护丹江水库的水质有着重要的意义。

磷是一切动植物生产不可缺少、不可替代的最重要的营养元素之一, 然而, 磷也是引起水体富营养化

收稿日期: 2007-06-05

基金项目: 国家攻关计划“南水北调中线工程水源区可持续发展农业”(2003BAJD0002); 湖北省水利厅“丹江口库区农业面源预测及调控技术的研究与示范”

作者简介: 王 静(1982—), 女, 安徽萧县人, 硕士, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: wangjing0553@sina.com

通讯作者: 丁树文 E-mail: dingshuwen@mail.hzau.edu.cn

的主要元素之一,而且是关键元素^[1-4]。在一般情况下,由于土壤对磷强大的吸附固持能力,使得土壤中的磷向下淋溶损失量很少。但是,如果磷肥的施用量超过一定的数量,如当土壤有效磷质量分数超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,磷的淋失则有呈线性增加的趋势^[2]。目前国内对于磷向下淋溶流失的研究多集中在磷素淋溶的形态、影响因素、可能机理等方面^[1,2,5-11],关于不同土壤中磷的淋溶特征的研究鲜见报道。本研究通过室内土柱实验对丹江库区典型土壤磷的淋溶进行了模拟研究,以便了解磷肥在不同土壤中的淋溶特征,减少磷从农田生态系统的输出,为有效防治丹江水库农业非点源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤全部采自湖北省丹江库区内的典型土壤,采样深度 0~20 cm,土地利用方式均为旱地。根据土壤分类,供试土壤可划分为 3 个土类:黄棕壤、石灰土和紫色土,其基本理化性质如表 1~2 所示。

表 1 供试土壤采样点、母质和类型

Table 1 Sampling sites, parent materials and types of the tested soils

编号	采样点	母质	土壤亚类
1	丹江口浪河	片麻岩	黄棕壤
2	随西五农渠	砂质页岩	黄棕壤性土
3	竹山县双台乡界岭村	砂质页岩	山地黄棕壤
4	习家店青塘河	石灰岩	棕色石灰土
5	随县大堰	钙质砾岩	棕色石灰土
6	习家店镇	紫色砂质页岩	灰紫色土

表 2 供试土壤的基本理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of the tested soils

编号	有机质 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH 值 (1:2.5)	全氮 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Olsen 磷 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
1	23.0	5.09	0.54	0.44	4.54
2	12.8	8.04	0.31	0.75	3.89
3	16.1	6.02	0.32	0.88	1.87
4	18.3	8.20	0.25	0.64	5.19
5	18.6	8.28	0.41	0.66	9.89
6	12.1	8.11	0.29	0.44	3.05

1.2 研究方法

间歇淋溶法:首先用 200 目滤布封住 PVC 管(高度为 30 cm,内径为 5 cm)的底口,在内径滤布上垫有少量砂子(30 g),按 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的容重先装入 264 g 风干土(过 2 mm 筛)和肥料的混合物,土柱上再以少

表 3 供试土壤的颗粒组成/%

Table 3 Particle compositions of the tested soils/%

编号	>2mm	1~2 mm	0.02~1 mm	0.002~0.02 mm	<0.002
1	2.76	2.8	48.22	4.14	44.83
2	10.01	0.94	56.62	14.56	27.90
3	12.06	7.35	14.67	18.33	59.64
4	3.50	1.10	23.36	11.79	63.91
5	10.12	2.43	39.92	5.89	51.74
6	3.03	0.38	73.62	1.54	24.38

量砂子覆盖以防加水时扰乱土层,用这样的装置来模拟耕层。把土柱固定在架子上进行淋溶^[12],试验装置如图 1 所示。

1.3 试验设计

试验设 3 个处理,以不施肥料的土柱作对照,处理 1 加 0.5 g 磷酸二氢钙和处理 2 加 1.0 g 磷酸二氢钙。每个处理重复 3 次,首先将风干土壤过 2 mm 筛,然后称取 264 g 土壤与肥料混匀后装入土柱。第 1 次先加 150 mL 水使土壤水分接近饱和,再加水 200 mL,同时收集淋溶液,室温下培养 6 d 后,用 200 mL 水进行第 2 次淋溶,以后各次按同样操作进行,即培养 6 d,淋溶 1 次,总共淋溶 6 次,淋溶液用 250 mL 塑料瓶收集,为防止样品中有机磷水解,在其中加入一定量的浓硫酸,使得淋溶液的 $\text{pH} < 2$,收集到的滤液于每次收集时间完毕后当日分析或于 4°C 贮存。

1.4 测定方法

取一定量用 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后的滤液,用钼锑抗直接显色分析样品磷含量,所得结果为钼酸盐反应磷(MRP)(Molybdate reactive phosphorus),一般多为无机磷,有时又称反应性无机磷,是水溶性磷的主要部分。

2 结果与分析

2.1 土壤磷素淋溶的总体变化特征

需要说明的是,对照处理的淋溶液中一直没有 MRP 的淋出,主要是由于土壤中有效磷的浓度比较低,而土壤对磷又有强大的吸附固定能力,从而使得磷难以以水溶态的形式淋出。表 4 是淋溶液中 MRP 淋溶量的情况,可以看出,每种土壤在处理 2 的条件下,淋溶液中 MRP 的淋溶量总是高于处理 1,其中 1 号的黄棕壤土和 6 号的紫色土 MRP 的累计淋溶量两者相差分别达到 7.21 mg 和 8.24 mg。这说明在同样的条件下,施肥量越高,淋溶液中 MRP 的淋溶损失量越大。

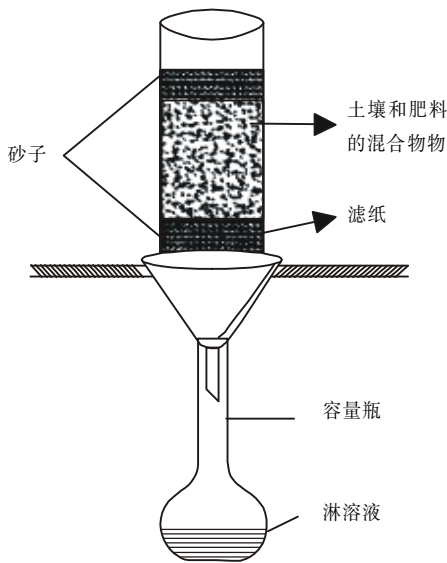


图 1 淋溶试验装置
Figure 1 The apparatus for leaching test

图 2 和图 3 反映的是淋溶液中钼酸盐反应磷的浓度变化趋势折线图。可以看出,无论是低施肥水平下的处理 1,还是高施肥水平下的处理 2,6 种土壤的淋溶液中 MRP 质量浓度的变化趋势基本一致,即在连续淋溶 3~4 次后,淋溶液中 MRP 质量浓度达到峰值,然后随着淋溶的持续进行,淋溶液中 MRP 的浓度逐渐下降,最后变化趋势趋于平稳。这主要是因为可溶性磷在向下运移的过程中,被土壤吸附固定,而只有当与所接触的土壤吸附固定 P 达到饱和后,多余的磷才会以可溶态的形式继续向下运动^[13],前几次淋溶下移的磷大多数被土壤所吸附,直到淋溶 3~4 次后,

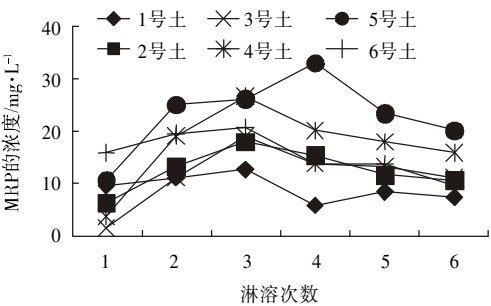


图 2 低肥水平下的淋溶液中 MRP 的浓度变化
Figure 2 The variation of MRP concentration at low fertilizer level

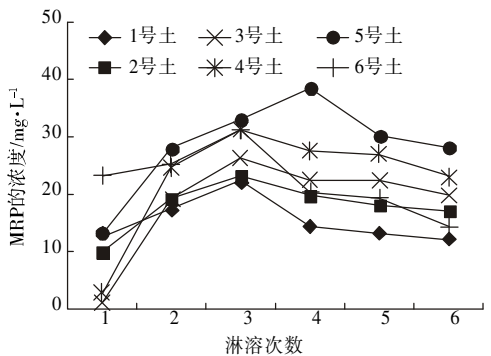


图 3 高肥水平的淋溶液中 MRP 的浓度变化
Figure 3 The variation of MRP concentration at high fertilizer level

土壤所吸附的磷逐渐达到饱和,然后由于随着时间的推移,越来越多的磷被土壤吸附或固定而不能形成水溶性磷,以至于淋溶液中 MRP 的浓度逐渐降低。另外,研究发现,处理 1 中的 MRP 的浓度总是低于处理 2 中的浓度,这可能是由于施肥量较低时,磷吸附

表 4 淋溶液中 MRP 的淋溶量
Table 4 The amount of MRP in the leachate

编号	处理	钼酸盐反应磷的淋溶量/mg						总淋溶量
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	
1	1	2.64	2.31	2.20	1.96	1.45	1.31	11.87
	2	3.19	3.43	3.26	3.35	2.95	2.90	19.08
2	1	1.33	1.97	3.01	1.82	2.51	1.62	12.26
	2	1.67	2.60	3.13	2.25	2.66	2.15	14.46
3	1	0.28	1.54	2.38	1.43	2.14	2.08	9.85
	2	0.31	2.70	4.41	2.68	3.34	3.03	16.47
4	1	0.50	3.30	3.92	1.95	2.67	2.46	14.80
	2	0.60	4.01	5.08	4.01	4.23	3.92	21.85
5	1	0.63	3.80	4.50	3.47	3.17	2.96	18.53
	2	1.75	4.75	5.31	4.60	5.25	3.86	25.52
6	1	3.58	2.06	2.94	2.03	1.96	1.36	13.93
	2	3.83	4.02	3.21	3.03	3.85	3.23	22.17

较牢固,解吸能力低,达到平衡时溶液浓度也低;而在高浓度时,磷吸附较松弛,易发生解吸,平衡溶液磷浓度高。

2.2 不同土壤磷的淋溶特征分析

2.2.1 黄棕壤磷的淋溶特征分析

从土类上来划分,1 号、2 号和 3 号土,都属于黄棕壤,从整体上看,黄棕壤的淋溶液中 MRP 的累计淋溶量比较低(如表 4 所示),浓度比较低(如图 4、图 5 和图 6 所示)。然而,由于土壤理化性质的不同,它们又表现出各自的差异性。

1 号土(图 4)是由泥质岩发育的黄棕壤土,淋溶液中 MRP 的浓度在第 3 次淋溶时达到了峰值,处理 1 和处理 2 的峰值分别为 $12.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $22.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在第 4 次淋溶时,MRP 的浓度值急剧下降,此时,处理 1 的浓度为 $5.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,处理 2 为 $13.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,然后趋于平缓。另外,在第 1 次淋溶时,相对于另外 2 种黄棕壤土来说,其浓度值较高,同时淋溶量也较高。分析其原因可能是 1 号土的有机质含量比较高,为 $23.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,如表 2 所示。有机物影响磷淋失的一个原因可能是其占据了磷的吸附位点,导致磷固持能力下降,所以在第 1 次淋溶时,淋溶液中 MRP 的浓度值很高,淋溶量也比较大。

2 号土(图 5)是发育于砂页岩的黄棕壤性土,淋溶液中 MRP 的浓度变化特征与 1 号土相似。处理 1 和处理 2 在第 3 次淋溶时,淋溶液中 MRP 的浓度达到了各自的峰值 $18.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $22.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,同时淋溶量也达到了峰值,分别是 3.01 mg 和 3.13 mg 。与 1 号土最明显的区别就是,在第 4 次淋溶时,MRP 的浓度是缓慢下降,而 1 号土却是急剧下降。

3 号土(图 6)是由砂质页岩发育的山地黄棕壤,与其它黄棕壤土相比,最明显的特征就是,处理 1 和处理 2 在第 1 次淋溶时,淋溶液中钼酸盐反应磷的浓度非常低,分别为 $1.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。分析其原因

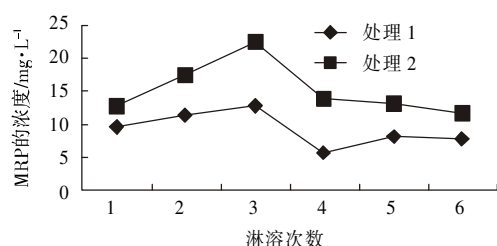


图 4 1 号泥质岩黄棕壤土

Figure 4 The concentration of MRP in leachate of yellow brown soil developed from pelite

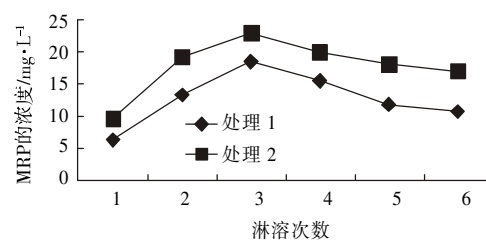


图 5 2 号砂质页岩黄棕壤性土

Figure 5 The concentration of MRP in leachate of yellow brown lateritic soil developed from arenaceous shale

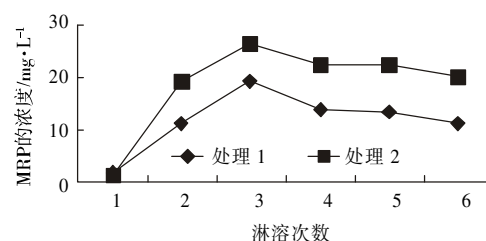


图 6 3 号砂质页岩山地黄棕壤土

Figure 6 The concentration of MRP in leachate of mountain yellow-brown earth developed from arenaceous shale

因可能是 3 号土的粘粒($<0.002 \text{ mm}$)的含量较高,达到 59.64% , (这与粘粒含量很高 (63.91%) 的 4 号土(图 7) 出现类似的情况,其相关性有待于进一步研究)。土壤中 $<0.002 \text{ mm}$ 的微团聚体和粘粒具有较大的比表面积,活性强,从而使得 3 号土的淋溶液中 MRP 的浓度变化特征不同于 1 号土和 2 号土。随着淋溶次数的增加,其浓度急剧上升,在第 3 次时达到了峰值,分别为 $19.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $26.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,然后,浓度稍有下降,但变化幅度不大。

2.2.2 石灰土中磷的淋溶特征

4 号土(图 7)是由石灰岩发育的石灰土,5 号土(图 8)是由砾岩发育的石灰土。总的来看,石灰土每次的淋溶液中钼酸盐反应磷的浓度明显的要比黄棕壤高,处理 1 中,5 号土的峰值达到 $26.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,6 号土则达到 $31.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,处理 2 中,5 号土的峰值达到 $31.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,6 号土则达到 $38.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远远高于相同处理水平的黄棕壤。

分析其原因,主要是因为石灰土矿质养分丰富,尤其是钙镁含量较高,并且土壤粘粒含量也高(4 号土为 63.91% ;5 号土 51.74%),使得石灰土固磷作用比较强,所以在初始淋溶时绝大多数的磷都被土壤吸附固定。Kissel 等(1985)将磷在石灰性土壤描述为连续的吸附形成无定形磷酸钙盐,然后逐渐形成结晶的磷酸盐化合物。随着淋溶次数的增加,土柱对磷的吸

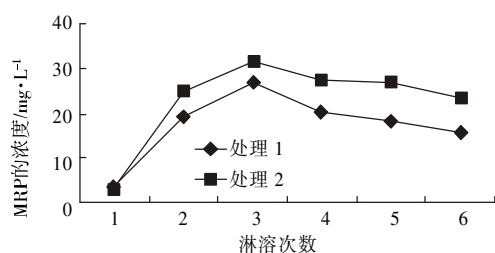


图 7 4 号石灰岩发育的石灰土

Figure 7 The concentration of MRP in leachate of limestone soil developed from limestone

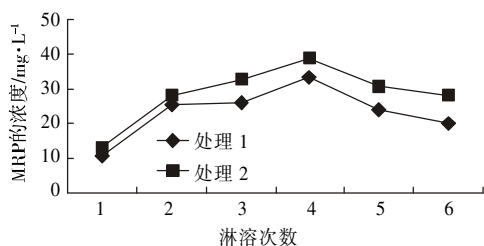


图 8 5 号砾岩发育的石灰土

Figure 8 The concentration of MRP in leachate of limestone soil developed from conglomerate

附和解吸逐渐饱和,所以达到平衡时,土壤溶液中磷浓度很高^[14]。可能是某些方面的原因,干扰了吸附解吸附过程的化学平衡,导致磷吸附能力减小,因而石灰土淋溶液中的 MRP 的浓度比较高。同为石灰土,4 号土与 5 号土,由于土壤本身理化性质的差异,又各自表现出不同的特性,比方说,第 1 次淋溶时,4 号土的淋溶液中 MRP 的质量浓度要比相同条件下 5 号土低的多,可能主要是土壤粘粒含量不同所引起的。

2.2.3 紫色土中磷的淋溶特征

6 号土(图 9)是由砂页岩发育的紫色土,淋溶液中 MRP 的浓度先是缓慢上升,在第 3 次淋溶时达到峰值,处理 1 和处理 2 峰值分别是 $20.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $31.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在第 4 次时迅速降低,最后趋于平缓。经对比分析发现,紫色土最明显的特征就是,在第 1 次淋溶时,淋溶液中的 MRP 无论是淋溶量还是浓度都高于相同的处理条件下其他土壤,这可能是因为紫色土成土时间比较短,母质疏松,土壤粘粒含量比较低,透水性比较好,加入的肥料还没有完全来的及被土壤吸附固定,就以水溶态的形式淋洗出来。另外,研究发现,就淋溶液中 MRP 累计淋溶量来看,紫色土略低于石灰土,而高于黄棕壤。

3 结论

(1) 淋溶液中的磷与施肥量有很大关系。随着施肥量的增加,淋溶液中钼酸盐反应磷(MRP)的累计淋

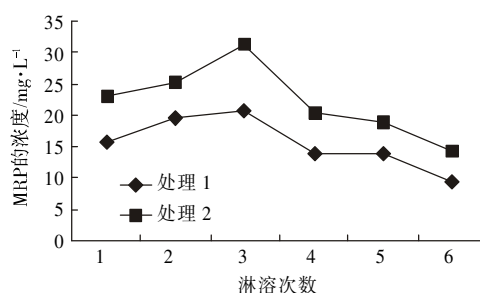


图 9 6 号砂质页岩发育的紫色土

Figure 9 The concentration of MRP in leachate of gray-purple soil developed from arenaceous shale

溶量和浓度也相应的增加。

(2) 在连续淋溶 3~4 次后,淋溶液中钼酸盐反应磷(MRP)的浓度达到峰值,然后随着淋溶的持续进行,其浓度逐渐下降,但下降趋势较平缓。

(3) 淋溶液中钼酸盐反应磷(MRP)的浓度受土壤粘粒的影响较大,尤其是土壤粘粒含量很高时,它的影响程度表现更明显。

(4) 总的来说,湖北省丹江库区三类主要土壤,在相同条件下,淋溶液中钼酸盐反应磷(MRP)的淋溶量及其浓度大小顺序为:石灰土>紫色土>黄棕壤,由此可知,石灰土中磷发生淋溶损失的程度比较大,而黄棕壤则比较小。

参考文献:

- [1] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24: 904-910.
- [2] Tunney H, Carton O T, Brookes P C, et al. Phosphorus loss from soil to water. CAB international, 1997. 253-271.
- [3] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 130-144.
- [4] 全为民,严力蛟. 农田面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. *生态学报*, 2002, 22 (3): 291-299.
QUAN W M, YAN L J. Effects of Agricultural Non-point Source Pollution on Eutrophication of Water Body and Its Control Measure [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (3): 291-299.
- [5] Turner B L, Hayarth P M. Phosphorus forms and concentrations in leachate under four grassland soil types[J]. *S S SA J*, 2000, 64: 1090-1099.
- [6] Zhao S, Gupta S C, Huggins D R, et al. Tillage and Nutrient source effects on surface and subsurface water quality at corn planting[J]. *J Environ Qual*, 2001, 30: 998-1008.
- [7] Addiscott T M, Thomas D. Tillage, mineralization and leaching: phosphate[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 53: 255-273.

- [8] Hesketh N, Brookes P C. Development of an Indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 105–110.
- [9] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32 (4): 188–193.
- SI Y B, WANG S Q, CHEN H M. Nitrogen and Phosphorus Loss from Farmland and Eutrophication of Water Body [J]. *Soils*, 2000, 32 (4): 188–193.
- [10] 张志剑, 朱荫湄, 王 珂. 水稻田-水系统中磷素行为及其环境影响研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12 (2): 229–232.
- ZHANG Z J, ZHU Y M, WANG K. Phosphorus behavior in soil-water system of paddy field and its environmental impact [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (2): 229–232.
- [11] 吕家珑, Fortune S, Brookes P C. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷“突变点”研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 142–146.
- LU J L, Fortune S, Brookes P C. Research on Phosphorus Leaching from Soil and Its Olsen -P "Shreshold Volume" [J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2003, 22(2): 142–146.
- [12] 员学锋, 等. 施加 PAM 条件土壤养分淋溶试验研究[J]. 水土保持通报, 2003, 23(2): 26–28.
- YUAN X F, et al. A Study on Effect of PAM on Eluviations of Soil Nutrient[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(2): 26–28.
- [13] Campillo M C, Vander S E, Torrent. Modeling long-term phosphorus leaching and changes in phosphorus fertility in excessively fertilized acid sandy soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50: 391–399.
- [14] Kissel D W, Sanders D H, Ellis R, Jr. Fertilizer plant interactions in alkaline soils: phosphorus [R]//Q Peng lestad (ed) Fertilizer technology and use 3rd ed SSSa, Madison WI. 1985. 153–196.