

毛竹林地磷素流失特征研究

梁颖颖¹, 王京文², 张奇春^{1*}, 楼莉萍¹, 王光火¹

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029; 2. 杭州市植保土肥总站, 杭州 310004)

摘要:通过在四岭水库流域代表性毛竹林地设置定位径流小区, 研究不同施肥条件下毛竹林地磷素流失状况。该定位试验设有对照(CK, 不施肥), 农民常规高产栽培(FFP)与适地养分科学管理(SSNM)3个处理。结果表明, 在2009年6月~2010年2月这9个月的监测期内, 各次自然降雨条件下毛竹林地表径流中总磷(TP)平均浓度为0.59 mg/L, 生物有效磷(BAP)平均浓度为0.22 mg/L, 其中95%的TP浓度>0.10 mg/L。与FFP处理相比, 整个监测期内SSNM处理可溶性磷(DP)流失总量减少了16.7%, 生物有效磷(BAP)流失总量减少11.0%。磷素流失量与降雨量、径流量均呈极显著的正相关关系, 毛竹林地磷素的流失集中发生在降雨量大的6~8月, 各处理中PP流失量与泥沙流失量呈显著的正相关关系, 其 R^2 值在0.73~0.88之间。

关键词:毛竹林地; 磷素; 磷素流失; 降雨量; 径流; 泥沙流失量

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)06-1591-05

Research on Characteristics of Phosphorus Loss in Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) Forest

LIANG Ying-ying¹, WANG Jing-wen², ZHANG Qi-chun¹, LOU Li-ping¹, WANG Guang-huo¹

(1. College of Environment and Resource, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. Soil and Fertilizer Plant Protection Station of Hangzhou, Hangzhou 310004, China)

Abstract: The effect of different fertilization treatments on phosphorus loss under field conditions was investigated through setting runoff plots in bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests. The results showed that, the average total phosphorus (TP) concentration of the runoff was 0.59 mg/L, and the average bioavailable phosphorus (BAP) concentration was 0.22 mg/L during the study period. The total phosphorus (TP) concentration of the 95% observed runoff samples exceeded 0.10 mg/L. Compared with FFP, the SSNM treatment reduced total dissolved phosphorus (DP) loss by 16.7%, reduced total bioavailable phosphorus (BAP) loss by 11.0%. Phosphorus was highly correlated with both rainfall and runoff. The largest phosphorus losses occurred in June, July and August, which had the largest rainfall. Significant correlations also existed between particulate phosphorus (PP) and sediment (R^2 0.73-0.88).

Key words: bamboo forest; forms of phosphorus; phosphorus loss; rainfall; runoff; sediment

目前,我国五大湖泊中太湖、巢湖已进入富营养化状态,水体总氮、磷指标等级已达劣五类。面源污染即将成为我国流域污染的主要因素,而农业面源污染占面源污染总量的60%~80%^[1~3]。毛竹(*Phyllostachys pubescens*)种植是余杭区的特色产业,由于毛竹林地一般坡度较大,容易受到流水的侵蚀^[4],养分流失严重,引起下游水体富营养化,因而成为余杭四岭水库流域农业面源污染的重要来源。磷是水体产生富营养化的限制因素,减少磷随径流流失是减少水体富营养化的主要途径^[5,6]。因而,对毛竹林地的磷素流失状况进行研究,具有深远的生态学 and 经济学意义。

近年来,对磷流失的研究主要集中在通过建立径流小区定位监测或模拟降雨^[7,8]的方法,研究降雨量、降雨强度等自然因素对磷流失的影响^[9,10],并且关于不同种植类型^[11~14]、不同施肥方式^[15~21]等人为因素对磷流失影响的研究也开始受到关注。本

研究综合考虑自然和人为因素的影响,在自然降雨条件下,通过在毛竹林地建立径流小区,探讨了不同施肥措施下,毛竹林地表径流中磷素的流失规律,以期为四岭水库流域面源污染的估算提供重要参数,同时为防治水体富营养化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区设置在浙江省杭州市余杭区四岭水库流域的毛竹林地,四岭水库位于浙江省东北部,杭嘉湖平原南端,钱塘江以北,属亚热带季风气候区。年平均降雨量1550 mm,降雨量分布极不均匀,主要集中在5

收稿日期:2010-07-15;修订日期:2010-09-25

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-006-6);中央高校基本科研业务费专项;浙江省科技厅公益类项目(2010C32102)

作者简介:梁颖颖(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤化学与环境, E-mail:yingying666333@163.com

* 通讯联系人, E-mail:qc Zhang@zju.edu.cn

~8 月,其中 6~12 月降雨量为1 333 mm,年平均气温 15.3~16.2℃. 四岭水库流域为典型的山村农业生态环境小流域,属太湖流域东苕溪水系北苕溪支流太平溪,该小流域土壤类型为第四纪红色黏土发育的地带性红壤,该地地处低山丘陵,全流域自然植被覆盖率达 95% 以上,竹林覆盖率达到 70 % 以上,竹林面积达 5 000 hm². 供试土壤基本性质为 pH 值 5.9,有机质 45.33 g/kg,全氮 3.36 g/kg,速效磷 2.57 m g/kg,速效钾 46.73 mg/kg,竹子平均胸径 10 cm,立竹数为 3 368 株/hm²,坡向东北,坡度 25°~35°.

1.2 试验设计与方法

2009 年 5 月在四岭水库流域典型的毛竹林地设置径流场定位试验,并在附近建立简易气象站. 试验采用随机区组设计,设对照(CK)、农民常规高产栽培(FFP)、适地养分科学管理(SSNM)3 个处理,3

次重复,共 9 个小区. 径流小区主要由集流区、拦水边墙、输水管和集水池等部分组成,小区面积为 300 m². 各处理施肥措施如下:CK 不施肥;FFP 施 N 465 kg/hm²,P₂O₅112 kg/hm²,K₂O 112 kg/hm²,分别在 2、5、9 月全区均匀撒施;SSNM 施 N 207 kg/hm²,P₂O₅105 kg/hm²,K₂O 95 kg/hm²,分别在 2、9 月水平沟施,沟宽 20 cm、深 20~30 cm.

1.3 取样和数据分析

2009 年 6 月~2010 年 2 月,共有 33 次产生径流的自然降雨,集流区产生的径流流入各小区下方集水池中,每场降雨径流发生后记录池中水深,将池中水搅拌均匀,用 500 mL 塑料瓶采集水样 3 瓶,每次取样结束后将水池清理干净,以供下次收集径流用. 定时从气象站读取气象数据. 33 次降雨的基本特征如表 1.

表 1 降雨特征
Table 1 Rainfall characteristics

降雨场次	日期	降雨量 /mm	降雨强度 /mm·h ⁻¹	降雨场次	日期	降雨量 /mm	降雨强度 /mm·h ⁻¹	降雨场次	日期	降雨量 /mm	降雨强度 /mm·h ⁻¹
1	2009-06-03	14.5	1.8	12	2009-07-23	19.9	3.3	23	2009-09-23	14.7	0.9
2	2009-06-09	14.5	2.4	13	2009-07-25	75.6	5.2	24	2009-10-01	45.9	1.7
3	2009-06-20	31.2	5.2	14	2009-07-30	73.4	2.3	25	2009-11-13	129.7	2.6
4	2009-06-22	23.1	3.9	15	2009-07-31	21.0	4.2	26	2009-11-18	50.9	1.4
5	2009-06-23	31.0	8.9	16	2009-08-02	21.1	4.2	27	2009-11-21	10.8	0.7
6	2009-06-27	11.0	3.1	17	2009-08-06	73.3	12.2	28	2009-12-11	17.6	0.7
7	2009-06-28	4.0	4.0	18	2009-08-13	298.3	5.3	29	2009-12-16	42.8	1.4
8	2009-07-01	71.1	4.9	19	2009-08-15	19.6	2.3	30	2010-01-22	5.1	0.2
9	2009-07-03	23.8	23.8	20	2009-08-23	31.8	7.1	31	2010-02-08	8.9	0.1
10	2009-07-07	29.8	5.0	21	2009-08-28	19.5	5.6	32	2010-02-22	6.3	0.1
11	2009-07-12	1.1	0.6	22	2009-09-19	112.1	3.0	33	2010-02-28	1.8	0.2

径流泥沙含量采用滤纸过滤烘干称重法;可溶性磷(DP)采用水样过 0.45 μm 滤膜后,过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)测定;总磷(TP),泥水样用 0.1 mol/L NaOH 浸提 16 h 后,酸性条件下过硫酸铵消解,钼酸铵分光光度法测定;生物有效磷(BAP),泥水样用 0.1 mol/L NaOH 浸提 16 h 后,直接用钼酸铵分光光度法测定;颗粒态磷(PP)根据总磷与可溶性总磷的差值求得.

2 结果与分析

2.1 毛竹林地磷素流失浓度分析

在以管理为目的的水体评价中,通常利用总磷(TP)来估计水体富营养化的风险性,水体中总磷含量超过 0.10 mg/L 时,视为能够引起水体富营养化^[22]. 毛竹林地的磷素随降雨产生的地表径流而流

失,由表 2 可以看出,整个观察期,地表径流中 TP 浓度在 0.06~3.36 mg/L 之间,平均浓度为 0.59 mg/L,有 95 % 的水样 TP 浓度超过 0.10 mg/L,可见毛竹林地中绝大多数地表径流流入水体均会产生水体富营养化威胁. 以月为单位来看磷的流失浓度,仅在 2010 年 2 月出现水样磷浓度低于 0.10 mg/L 的情况,其比例为 55.6 %. 由表 1 可以看出,2010 年 2 月的降雨呈现降雨量小、降雨强度小的特点,说明 TP 的流失浓度与降雨量和降雨强度具有一定的相关性.

由于总磷的含量要远高于浮游生物和微生物可利用的磷含量,因此应该考虑采用更为符合实际的指标来评价水体富营养化的风险性. 生物有效磷(BAP)是藻类植物可利用的磷,它的含量与水体富营养化程度密切相关. 利用 BAP 来对湖泊和径流的

表 2 毛竹林地表径流中磷素的浓度分布

时间	TP			BAP			n
	均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	范围/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	标准差	均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	范围/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	标准差	
2009 年 6 月	1.20	0.45 ~ 3.36	0.65	0.40	0.07 ~ 1.38	0.32	21
2009 年 7 月	0.44	0.18 ~ 0.67	0.13	0.24	0.07 ~ 0.43	0.09	24
2009 年 8 月	0.49	0.31 ~ 0.71	0.14	0.24	0.17 ~ 0.31	0.04	18
2009 年 9 月	0.82	0.48 ~ 1.00	0.20	0.11	0.06 ~ 0.17	0.05	6
2009 年 10 月	0.61	0.55 ~ 0.68	0.07	0.02	0.00 ~ 0.04	0.02	3
2009 年 11 月	0.29	0.21 ~ 0.42	0.07	0.14	0.09 ~ 0.23	0.05	9
2009 年 12 月	0.40	0.31 ~ 0.54	0.10	0.06	0.03 ~ 0.10	0.02	6
2010 年 1 月	0.20	0.14 ~ 0.29	0.08	0.18	0.15 ~ 0.21	0.03	3
2010 年 2 月	0.14	0.06 ~ 0.34	0.10	0.08	0.01 ~ 0.23	0.08	9
整个观测期	0.59	0.06 ~ 3.36	0.47	0.22	0.00 ~ 1.38	0.19	99

水体质量进行评价比 TP 更为准确^[23,24]. 如表 2 所示,毛竹林地表径流中 BAP 含量在 0 ~ 1.38 mg/L 之间,平均含量为 0.22 mg/L,有 90 % 的径流水样的 BAP 浓度在 0.02 ~ 0.54 mg/L 之间.

2.2 毛竹林地各形态磷流失量分析

磷流失量等于各次降雨径流中磷浓度与单位面积径流水体积的乘积. 计算公式如下:

$$P_i = c_i \times V_i$$

式中, P_i 为磷流失量 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$); c_i 为第 i 次降雨径流中磷浓度; V_i 为第 i 次降雨单位面积径流水的体积 ($V_i = V_{\text{池}}/S$, $V_{\text{池}}$ 为第 i 次降雨池中水的体积, S 为小区面积), 磷流失总量为整个监测期内各次降雨的磷流失量之和.

2.2.1 监测期内各形态磷的流失总量分析

本研究分析了 2009 年 6 月 ~ 2010 年 2 月期间所发生的 33 次自然降雨下磷的流失量,并对这 9 个月的磷流失总量进行了统计(表 3). 由表 3 可以看出,在 3 种不同处理方式 CK、SSNM 和 FFP 中,颗粒态磷(PP)占总磷流失总量的质量分数分别为 93%、93% 和 92%,可见磷的流失、迁移以颗粒态磷为主. 各形态磷的流失总量一致表现为 $\text{FFP} > \text{SSNM} > \text{CK}$. 与 FFP 相比,SSNM 处理中可溶性磷(DP)流失总量减少 16.7%,生物有效磷(BAP)流失总量减少 11.0%. 与 FFP 相比,SSNM 中的颗粒态磷(PP)流失量虽有减少,但是差异不显著. 可见,SSNM 处理主要减少了可溶性磷的流失量,从而减少地表径流总磷的流失. 施肥对可溶性磷的影响比较大,这与晏维金等^[25]的研究结果相符.

2.2.2 总磷(TP)与生物有效磷(BAP)流失量之间的关系

从图 1 可以看出,在本试验中,毛竹林地 BAP 与 TP 流失量呈显著相关,拟合其关系的方程为 $y =$

$0.0313x^2 + 0.292x + 0.0163$, $R^2 = 0.98$. BAP 流失量与 TP 流失量之间的内在关系,还有待更多的试验论证.

表 3 毛竹林地表径流中各形态磷的流失总量

(2009-06 ~ 2010-02, $n = 33$)/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$

Table 3 Total amount of P forms losses in surface runoff of bamboo forest(2009-06-2010-02, $n = 33$)/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$				
处理	DP	BAP	TP	PP
CK	0.81b	5.08b	12.19c	11.38b
SSNM	0.85b	5.32b	12.88b	12.02a
FFP	1.02a	5.98a	13.13a	12.11a

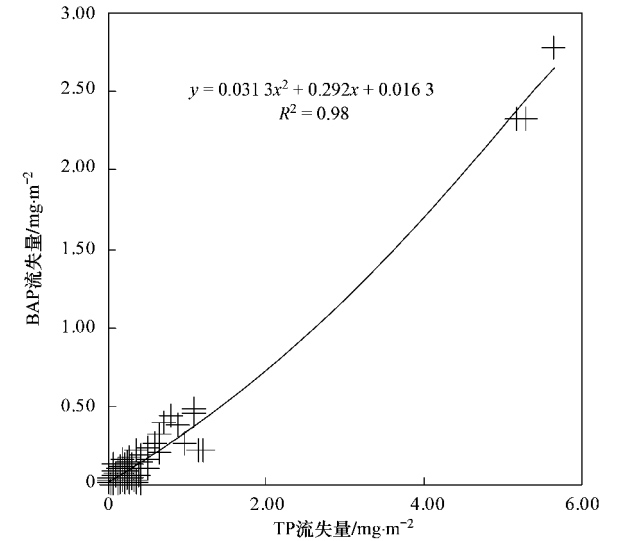


图 1 BAP 流失量与 TP 流失量的关系($n = 99$)

Fig. 1 Relationship of BAP and TP ($n = 99$)

2.2.3 可溶性磷(DP)和颗粒态磷(PP)的时间变异分析

按形态 TP 可划分为 DP 和 PP. DP 是溶解于土壤溶液或径流中的无机或有机态磷,属于生物有效

磷. PP 是泥沙结合态磷,有一部分是生物可利用的,它吸附在沉积物或有机物质上,随径流流失. 由于监测降雨场次较多,笔者将各场次降雨的磷流失量进行累加,以月为单位来分析磷流失量的时间变异. 如图 2 所示,从 2009 年 6 月~2010 年 2 月 9 个月时间里,DP 流失量主要集中在 6~8 月,并在 8 月达到高峰,与降雨量的变化规律基本一致. 整体来讲,DP 流失量 $SSNM < FFP$,在降雨量大的月份更为明显. 与 FFP 相比,8 月 SSNM 的 DP 流失量减少了 14.3%. SSNM 采用开沟施肥和减少磷肥用量的方式减少表层土壤中磷的含量,从而减少因地表径流而引起磷素流失. 图 3 所示为 PP 流失量的时间变异,与降雨量的变化规律也基本一致. 这 9 个月监测期内 PP 流失总量 SSNM 为 12.02 mg/m^2 ,FFP 为 12.11 mg/m^2 (见表 3). 与 FFP 相比,SSNM 的 PP 流失量有所减少,但图 3 以月为单位来看 PP 流失量规律不明显.

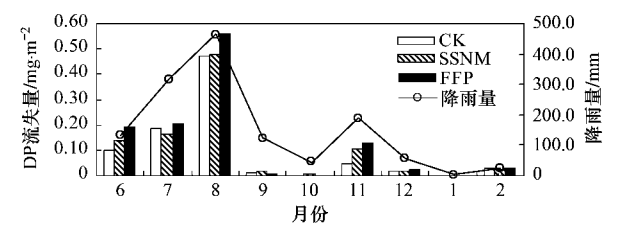


图 2 不同管理方式下 DP 流失量的时间变异
Fig.2 Dynamic change of DP loss under different management practices

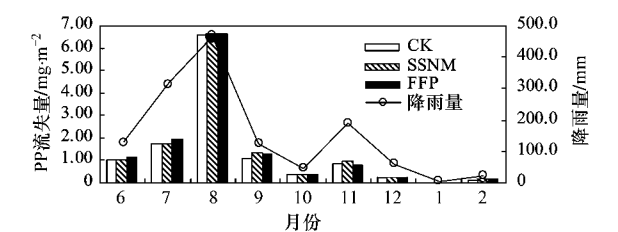


图 3 不同管理方式下 PP 流失量的时间变异
Fig.3 Dynamic change of PP loss under different management practices

2.3 毛竹林各形态磷流失量与径流泥沙流失量关系分析

从 2009 年 6 月~2010 年 2 月共发生了 33 次可以产生地表径流的自然降雨,笔者分析了各次降雨中相应的径流量和泥沙流失量,及其与各形态磷流失量之间关系. 如图 4 所示,TP、BAP、DP、PP 流失量与径流量均呈极显著的线性相关关系 (R^2 分别为 0.97、0.97、0.94 和 0.96). 可见,降雨所引起的地

表径流量,对毛竹林地的磷流失量起决定性作用,因此,可以采取相关措施减少地表径流量,从而减少磷素的流失.

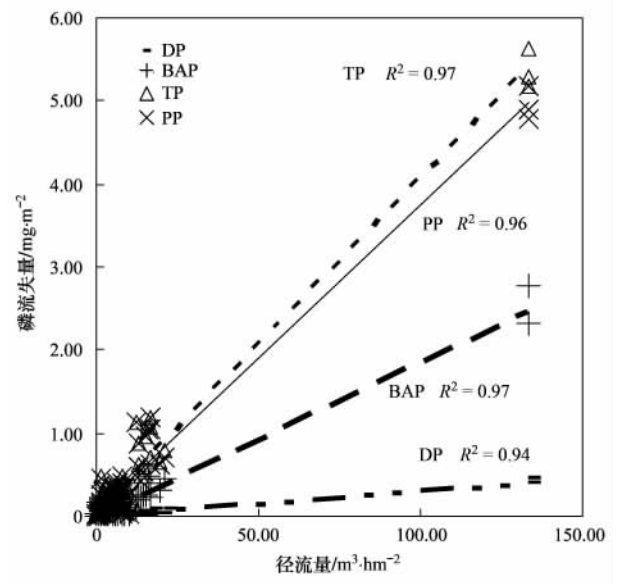


图 4 各形态磷流失量与径流量的关系 ($n=99$)
Fig.4 Relationship of phosphorus forms loss and runoff ($n=99$)

径流中颗粒态磷的含量与泥沙的流失量密切相关. 从表 4 可看出,不同施肥处理中 PP 的流失量与泥沙含量均呈显著线性关系,其 R^2 值在 0.73~0.88 之间,并且 $CK < SSNM < FFP$. 从拟合的直线可以看出,在泥沙量相同的情况下,PP 的流失量呈现 $CK < SSNM < FFP$ 的趋势,说明 FFP 处理中的泥沙中磷的含量要高于 SSNM 处理,少施肥料和挖沟施肥可以减少表层土壤中磷的含量,从而减少磷的流失.

表 4 不同处理 PP 流失量与泥沙流失量关系方程 ($n=33$)		
Table 4 Relationship of PP loss and sediment loss ($n=33$)		
处理	关系方程	R^2
CK	$y = 0.408x - 0.1141$	0.73
SSNM	$y = 0.4122x - 0.098$	0.78
FFP	$y = 0.4387x - 0.1261$	0.88

3 结论

(1) 各次自然降雨条件下毛竹林地表径流中的 TP 平均浓度为 0.59 mg/L , BAP 平均浓度为 0.22 mg/L ,有 95% 的径流样品中 TP 浓度超过 0.10 mg/L ,说明竹林地地表径流流入水体将会产生水体富营养化威胁. 2010 年 2 月降雨量小、降雨强度小,有 55.6% 的水样磷浓度低于 0.10 mg/L .

(2) 与 FFP 处理相比,SSNM 处理减少 DP 流失

量 16.7 % ,而 PP 流失总量减少不明显,说明施肥对可溶性磷的影响比较大. 在 CK、SSNM 和 FFP 中,颗粒态磷占总磷流失量的质量分数分别为 93 %、93 % 和 92 % ,可见磷的流失、迁移以颗粒态磷为主.

(3) 降雨量对磷的流失量影响显著. DP 和 PP 的流失量均在 8 月达到高峰,磷主要的流失时间集中在降雨量大的 6 ~ 8 月.

(4) BAP 与 TP 流失量呈显著相关 ($R^2 = 0.98$). TP、BAP、DP、PP 流失量均与径流量呈显著的正相关;各处理中 PP 流失量与泥沙的流失量正相关,其 R^2 值在 0.73 ~ 0.88 之间.

参考文献:

[1] 阎伍玖,鲍祥. 巢湖流域农业活动与面源污染的初步研究 [J]. 水土保持学报,2001,15(4) :129-132.

[2] 夏立忠,杨林章. 太湖流域面源污染研究与控制 [J]. 长江流域资源与环境,2003,12(1) :45-49.

[3] 孙皓,刘淑梅,方鸿国. 农业面源污染防治对策研究 [J]. 环境导报,2000,(6) :32-34.

[4] 陈志彪,朱鹤健. 不同水土流失治理模式下的土壤理化特征 [J]. 福建师范大学学报,2006,22(4) :5-9.

[5] Carpenter S R,Caraco N F,Correll D L, *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecological Applications,1998,8(3) :559-568.

[6] Boesch D F, Brinsfield R B, Magnien R E. Chesapeake Bay eutrophication :scientific understanding,ecosystem restoration,and challenges for agriculture [J]. Journal of Environmental Quality,2001,30:303-319.

[7] 庾刚,李恒鹏,金洋,等. 模拟暴雨条件下农田磷素迁移特征 [J]. 湖泊科学,2009,21(1) :45-52.

[8] 李裕元,邵明安. 模拟降雨条件下施肥方法对坡面磷素流失的影响 [J]. 应用生态学报,2002,13(11) :1421-1424.

[9] 张继宗,张维理,雷秋良,等. 太湖平原农田区域地表水特征及对氮磷流失的影响 [J]. 生态环境学报,2009,18(4) :1497-1503.

[10] 白文忠,王克勤. 抚仙湖典型小流域烤烟坡地产流产沙及氮磷流失特征 [J]. 中国水土保持科学,2009,7(3) :46-51.

[11] 焦平金,许迪,王少丽,等. 自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究 [J]. 农业环境科学学报,2010,29(3) :534-540.

[12] 陈志良,程炯,刘平,等. 暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响 [J]. 水土保持学报,2008,22(5) :30-33.

[13] 吴希媛,张丽萍,倪含斌,等. 青山湖流域不同地表覆盖降雨径流中氮磷流失过程研究 [J]. 水土保持学报,2008,22(1) :56-59.

[14] Meng Q H, Fu B J,Tang X P, *et al.* Effects of land use on phosphorus loss in the hilly area of the Loess Plateau,China [J]. Environmental Mointoring Assessment,2008,139:195-204.

[15] 杨皓宇,赵小蓉,曾祥忠,等. 不同农作制对四川紫色丘陵区地表径流氮、磷流失的影响 [J]. 生态环境学报,2009,18(6) :2344-2348.

[16] 王静,郭熙盛,王允青. 秸秆覆盖与平衡施肥对巢湖流域农田磷素流失的影响研究 [J]. 中国土壤与肥料,2009,(5) :53-56.

[17] 石艳平,段增强. 水肥综合管理对减少滇池北岸韭菜地氮磷流失的研究 [J]. 农业环境科学学报,2009,28(10) :2138-2144.

[18] 黄东风,王果,李卫华,等. 不同施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及菜地氮磷流失的影响 [J]. 水土保持学报,2008,22(5) :5-10.

[19] 潘根兴,焦少俊,李恋卿,等. 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 [J]. 环境科学,2003,24(3) :91-95.

[20] 黄东风,王果,李卫华,等. 不同施肥模式对小白菜生长、营养累积及菜地氮、磷流失的影响 [J]. 中国生态农业学报,2009,17(4) :619-624.

[21] Agvin-Birikorang S, O' Connor G A, Brinton S R. Evaluating phosphorus loss from a Florida Spodosol as affected by phosphorus-source application methods [J]. Journal of Environmental Quality,2008,37(3) :1180-1189.

[22] Sharpley A, Daniel T C, Sims J T, *et al.* Determining environmentally sound soil phosphorus levels [J]. Journal of Soil and Water Conservation,1996,51(2) :160-166.

[23] Butkus S R, Welch E B, Horner R R, *et al.* Lake response modeling using biologically available phosphorus [J]. Journal Water Pollution Control Federation,1988,60(9) :1663-1669.

[24] Gerdes P, Kunst S. Bioavailability of phosphorus as a tool for efficient P reduction schemes [J]. Water Science and Technology,1998,37(3) :241-247.

[25] 晏维金,亢宇,章申,等. 磷在土壤中的解吸动力学 [J]. 环境科学,2000,20(2) :97-101.