

紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究

李学平¹, 石孝均^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 国家土壤肥力与肥料效益监测基地网, 重庆 400716)

摘要:采用单排单灌的田间试验, 研究了施用化学磷肥和有机肥对水稻生长期稻田径流水和田面水中磷素动态变化的影响, 并对其可能产生的环境风险进行了分析. 结果表明, 随着施磷水平的提高田面水磷含量升高, 施肥 24 h 后各处理田面水磷素含量最高, 总磷(TP)含量在 0.928 ~ 3.824 mg/L 之间; 前 30 d 田面水磷含量波动大, TP 平均含量在 0.259 ~ 1.433 mg/L 之间, 超过水体富营养化的临界值, 在此期间应避免排水和中耕等田间管理; 40 d 之后田面水磷含量缓慢下降, 60 d 后趋于稳定, 且含量较低. 径流水各形态磷的含量和流失负荷随着降雨强度和磷肥用量的增加而增加, 径流水中溶解磷(DP)占 TP 的 50% 以上, 稻田土壤磷素淋失以 DP 为主, 磷素流失负荷在 0.358 ~ 2.579 kg/hm² 之间. 稻田磷素流失也受施肥方式的影响, 施用牛粪比施用秸秆更容易导致磷素的流失, 施用牛粪处理磷素流失负荷比施用秸秆处理高 40%, 化学磷肥与秸秆配施稻田磷素流失负荷和表观流失率显著降低, 秸秆与磷肥配合施用是减少稻田磷素流失的较好措施.

关键词:紫色土; 水稻田; 磷素; 动态特征; 环境影响

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)02-0434-06

Dynamic Characteristics of Phosphorus in Purple Paddy Soil and Its Environmental Impact

LI Xue-ping¹, SHI Xiao-jun^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. National Soil Fertility and Fertilizer Efficiency Long-term Monitoring Network, Chongqing 400716, China)

Abstract: The dynamic characteristics of phosphorus (P) in the surface water and runoff of paddy field with different P fertilizing treatments were investigated using the field experiment under the independent irrigation system as well as its environmental impact. The results showed that the concentration of total phosphorus (TP) in the surface water increased as the fertilizing amounts enhanced and reached the peak values after 24 h for all treatments in range of 0.928 ~ 3.824 mg/L. And the fluctuation of TP concentration in surface water was drastic during the first 30 days with the average contents of 0.259 ~ 1.433 mg/L which exceeded the critic values of eutrophication. Therefore, the field managements such as inter-tillage and drainage should be avoided during the time. After 40 days, the TP concentration declined slowly and then came to stabilization with low values after 60 days. The contents of different P forms in the runoff water increased with the improved amounts of precipitation and fertilizing and above 50% was dissolved phosphorus (DP). The DP was the dominant one in the P loss of the purple paddy soil and the loss load changed between 0.358 and 2.579 kg/hm². Additionally, the P loss more easily occurred for the treatment of utilizing the cattle manure than that of straw, approximately 40% of loss load higher. Both the loss load and apparent P loss ratio evidently declined with the treatment of fertilizer combined with straw, suggesting that it was the better measure for reducing the P loss in the paddy field.

Key words: purple soil; paddy field; phosphorus; dynamic characteristics; environmental impact

农业土壤磷的大量输出是引起农业面源污染的主要原因, 要防治农业面源污染最关键的问题是对磷的来源加以控制^[1,2]. 磷肥的施用是农田土壤磷的最主要来源, 当降雨径流发生时, 土壤磷以水溶态和颗粒态形式随径流向水体迁移, 成为水体中磷的重要补给源. 研究发现, 水稻田在施肥初期排水导致磷素流失会对周围的水体环境产生不良影响^[3,4]. 因此, 研究稻田磷素的动态变化特征对控制和减少磷的流失, 减轻对受纳水体的影响具有重要意义.

国内外对农田土壤磷向水体迁移已有较多地报道^[5-10], 但由于耕作制度的差异, 国外主要对旱地和草地研究较多; 而国内对水田土壤磷素流失进行了较多研究, 多数采用模拟的方法对水田磷素的流失

特征进行研究^[11-14], 在自然降雨情况下也进行了一些探索性研究^[15-19], 这些研究主要集中在太湖地区, 而在紫色土丘陵地区的紫色水稻土上鲜见报道. 前人研究表明, 不同类型土壤-水系统中磷的迁移过程存在明显的差异^[20,21], 而施用磷肥的种类对土壤磷素流失的数量及其发生特征表现不同^[17,18,22], 不同有机肥对土壤磷的活化作用也不相同^[23], 但目前关于不同有机肥品种对稻田土壤磷素流失的影响未

收稿日期: 2007-03-26; 修订日期: 2007-06-25

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD05B09); 国家土壤肥力监测网络和农业部“948”项目(2006-Z53)

作者简介: 李学平(1978~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为施肥与环境质量, E-mail: lixueping2008@163.com

* 通讯联系人, E-mail: shixj@swu.edu.cn

进行研究.因此本试验选择紫色水稻田为对象,在水稻生长季节研究施用磷肥和不同有机肥品种对水体磷含量的影响,以及田面水磷素的动态变化规律和降雨-径流导致的土壤磷素流失特征,以期对稻田水肥的优化管理和减少紫色土区磷素流失提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 大田试验设计

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic agrochemical properties of experimental soil										
土壤质地	粘粒 /g•kg ⁻¹	pH	有机质 /g•kg ⁻¹	速效磷 /mg•kg ⁻¹	全磷 /g•kg ⁻¹	CEC /cmol•kg ⁻¹	钙 /cmol•kg ⁻¹	镁 /cmol•kg ⁻¹	铁 /mg•kg ⁻¹	锰 /mg•kg ⁻¹
重壤	506.7	6.8	22.5	29	0.78	23.46	1.26	0.27	7.79	11.19

大田试验设 6 个不同磷处理:①P0:对照(不施磷肥);②P60:单施化学磷肥(P₂O₅)60 kg/hm²(相当于当地磷肥用量);③P120:单施化学磷肥(P₂O₅)120 kg/hm²;④P240:单施化学磷肥 240 kg/hm²;⑤P120(m):秸秆和化肥磷配施(P₂O₅)120 kg/hm²,秸秆磷占 50%,秸秆腐熟.各处理氮肥和钾肥用量相同,钾肥用硫酸钾(含 K₂O 50%);氮肥用尿素,含氮量 46%,磷肥用过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),作基肥施用,用木耙平整土壤,使肥料均匀且充分的与土壤混合.试验 3 次重复,随机区组排列.

1.2 水样采集和测定方法

田面水的采集:田间试验于 2006-05-15 稻田施肥开始到 2006-08-14 水稻收割为止.在水稻生长期间进行定期采集水样,采样时间为在水稻移栽后的第 1~7 d,每天取样 1 次,此后每 3、4、10 d 各取样 1 次,2006-06-13 以后每隔 1 周取样 1 次,在水稻生长期如果遇到降雨-径流的情况则降雨当天取样,用 100 mL 医用注射器,不扰动土层小心抽取 5 处田面水,注入塑料瓶中.

径流水采集方法:在每次降雨产生径流后,在排水出口处打开 1 个小口,待水流稳定 2 min,用 200 mL 小塑料瓶接径流水,每间隔 5 min 接 1 次径流水,直到不产生径流为止,收集于塑料桶中,降雨产流情况见表 2.我国气象部门规定的降雨强度^[24],日降雨量达到 50 mm 的降雨定为暴雨临界值,日降雨量在 50~100 mm 之间的降雨为暴雨,日降雨量 > 200 mm 的降雨为特大暴雨.

水样全磷(TP)用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮-钼锑抗比色法,溶解性磷(DP)用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后再

试验地点设在“国家紫色土肥料与肥力效益监测基地”的微区试验地.小区面积 2 m×3 m,各小区之间用 40 cm 高的水泥板隔开,互不渗漏,且能独立排灌,水泥板高出田面 20 cm(即小区田埂).为了便于收集径流水和过量雨水的自动排出,在每个小区留一排水口,排水口比小区田埂低 5 cm.稻田灌水深度 10 cm.试验田外围设非试验保护区.供试土壤为紫色母岩发育的紫色土性水稻土,其基本理化性质如表 1.

用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮-钼锑抗比色法,颗粒磷(PP)采用差减法,PP=TP-DP^[25].

表 2 水稻田降雨产流情况

Table 2 Characteristic of rainfall and runoff in paddy field				
产流次数	降雨时间	降雨量 /mm	径流量 /L	雨强类型
1	2006-05-19	50.8	306	暴雨
2	2006-05-21	76.3	456	暴雨
3	2006-06-12	45.2	270	大雨
4	2006-06-26	33.7	204	大雨

2 结果与分析

2.1 水稻生长季田面水磷含量的动态变化

无论是施用化学磷肥还是有机肥,整个水稻生长季田面水总磷(TP)含量变化趋势一致(图 1),前 10 d 田面水总磷含量高,平均含量为 0.869 mg/L,远远高于水体富营养化发生的临界浓度 0.02 mg/L^[26];前 30 d 田面水含磷波动大,各处理 TP 平均含量在 0.259~1.433 mg/L 之间,出现较大波动的主要原因是在此期间降雨导致了水体中土壤悬浮颗粒磷的增加;而以第 1 d(即施肥后 24 h)TP 含量最高,TP 含量在 0.928~3.824 mg/L 之间,之后急剧下降,第 1 d 含量最高主要有 2 个方面的原因:一是因为施用的水溶性磷肥几乎未被土壤吸附固定,大部分还停留在田面水中,田面水磷的含量主要以溶解磷(DP)为主(图 2),含量在 0.491~3.029 mg/L 之间,颗粒磷(PP)含量较低在 0.208~1.003 mg/L 之间(图 3);二是因为施肥后平整田面导致水中 < 0.1 mm 粒径的土壤悬浮颗粒增加^[22].在 40 d 之后田面水磷含量趋于缓慢下降,60 d 之后趋于稳定,且含量低,这期间水稻生

长对磷的吸收和土壤对磷的吸附固定是磷含量降低的主要原因.DP 和 PP 也表现出和 TP 相似的趋势.

水稻生长的 60 d 内,田面水磷浓度随着施磷水平的提高而增加,但 60 d 以后不同施磷水平田面水磷含量基本一致,80 d 以后各施肥处理磷含量接近不施肥处理.各处理田面水磷含量前 30 d 差别较大,施磷处理比不施磷处理 TP、DP 和 PP 平均分别高 3.38、3.74 和 2.70 倍.处理 P120(m)和 P120(s)田面水磷含量低于处理 P120,且处理 P120(s)低于处理 P120(m),说明施用有机肥能降低前期磷向水体的释放,提高了磷的固定.

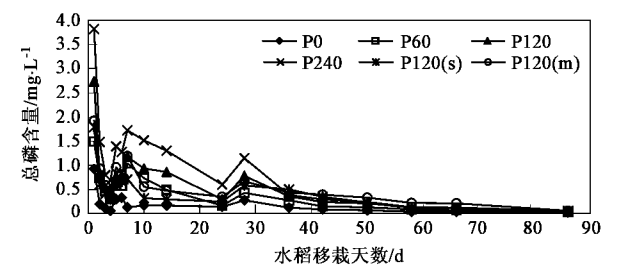


图 1 稻田田面水总磷含量的动态变化

Fig.1 Dynamic change of TP concentration in surface water of paddy field

2.2 降雨径流中磷含量和磷组分的变化特征

径流水中磷含量随降雨强度的增加而增加(图 4),4 次降雨和产流的时间分别为水稻移栽的第 5、7、28 和 42 d.第 2 次(2006-05-22)降雨强度最大,径流水中总磷含量最高,含量在 0.135 ~ 1.725 mg/L 之间;第 4 次(2006-06-27)降雨强度最小,径流中 TP 含量低于前 3 次,含量在 0.038 ~ 0.396 mg/L 之间.径流磷含量也随着施磷水平的提高而增加,前 3 次径流水中磷素含量以 P240 处理最高,其次为 P120(m),

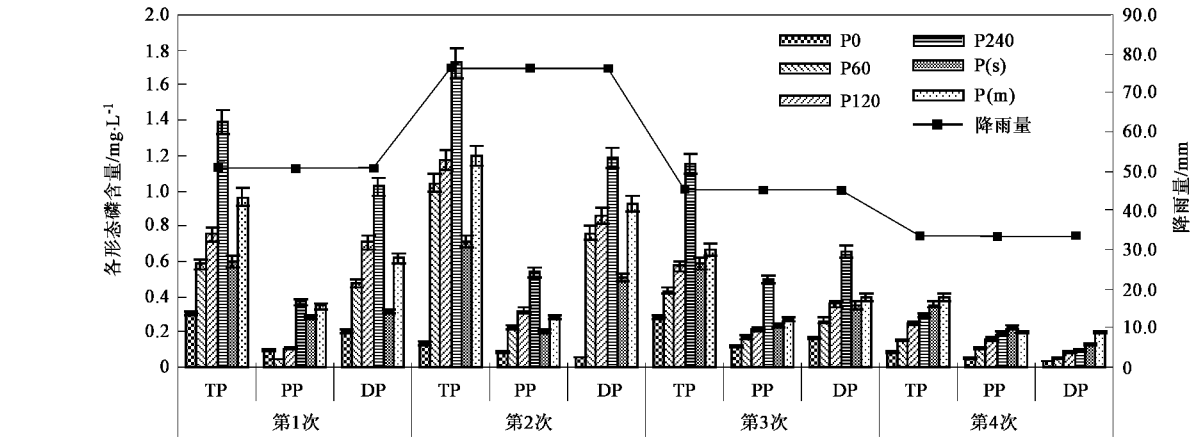


图 4 4 次径流水各形态磷含量随降雨量的变化特征

Fig.4 Variations of different form P concentrations in runoff water following rainfall within four times

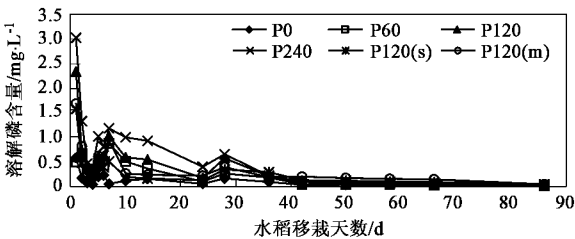


图 2 稻田田面水溶解磷含量的动态变化

Fig.2 Dynamic change of DP concentration in surface water of paddy field

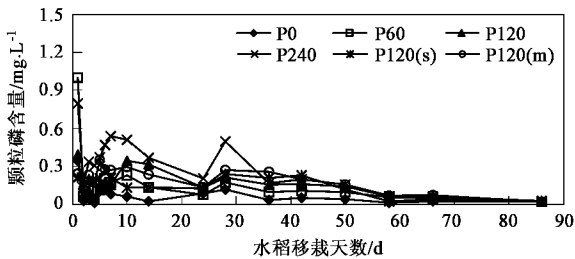


图 3 稻田田面水颗粒磷含量的动态变化

Fig.3 Dynamic change of PP concentration in surface water of paddy field

大小顺序为:P240 > P120(m) > P120(s),而第 4 次径流处理 P120(m)最高,大小为:P120(m) > P120(s) > P240,可以看出有机无机肥配施的处理稻田土壤磷素向水体释放磷持续的时间更长,而施用牛粪比施用秸秆更容易导致磷素的流失.

水田径流的发生主要是降雨和排水造成的,在田面水较多的情况下,由于物理冲刷作用引起的颗粒磷流失较少,进入水体的磷主要是溶解性磷,因此前 3 次流失的磷素形态以 DP 为主(表 3),DP/TP 比

值都高于 50%。最后 1 次降雨虽然强度不大,但是由于降雨前的田面水很少(人为的排水晒田),物理冲刷作用增强,导致水体中颗粒磷含量增加,径流中

磷以 PP 为主。4 次径流与土壤结合的颗粒态磷的比重呈逐渐的增加趋势,从第 1 次径流的 16% ~ 47%,增加到第 4 次的 50% ~ 67%。

表 3 DP/TP 含量比值随降雨量的变化特征

Table 3 Variations of DP/TP ratio following rainfall

时间	DP/TP						降雨量 /mm
	P0	P60	P120	P240	P120(s)	P120(m)	
2006-05-20	0.67	0.82	0.84	0.73	0.53	0.64	50.8
2006-05-22	0.55	0.73	0.73	0.69	0.71	0.77	76.3
2006-06-13	0.58	0.61	0.62	0.57	0.59	0.59	45.2
2006-06-27	0.43	0.33	0.36	0.34	0.36	0.50	33.7

2.3 磷素流失负荷和磷肥表观流失率

随着施磷水平的提高各形态磷流失的负荷也明显增加(表 4),处理 P240 磷素流失负荷显著高于其他处理,其 TP、DP 和 PP 流失负荷分别是 P0 的 7.2、4.57 和 7.1 倍,处理 P60 和 P120 的磷素流失负荷差异不显著,但处理 P60 的磷素表观流失率高于其他施肥处理。配施牛粪的处理土壤磷素流失负荷远高于配施秸秆的流失负荷,其中 TP 流失负荷差异显著;配施牛粪的处理 TP 和 PP 流失负荷也高于施用等量化学磷肥的处理;而配施秸秆的处理 TP 和 DP 流失负荷则显著低于施用等量化学磷肥的处理,配

施秸秆的处理磷素流失负荷甚至低于处理 P60。可见施用牛粪提高了土壤磷素的迁移能力,而施用秸秆则抑制磷的释放,其原因可能是牛粪腐殖化系数较高,能够屏蔽土壤磷素吸附位点,进而提高了土壤磷素的迁移能力,而秸秆的 C/N 高于牛粪,在分解过程中微生物会固定土壤的磷,减少了磷的释放。对各形态磷的表观流失率[=(施肥处理的负荷-未施肥处理)/施肥量×100]分析表明,配施秸秆也显著降低了 TP 和 DP 的表观流失率,并且明显低于 P60 处理,更进一步说明秸秆能抑制水田土壤磷的释放。从 DP/TP 负荷比来看,磷素流失主要以 DP 为主。可

表 4 磷素流失负荷总量和磷肥表观流失率¹⁾

Table 4 Total loading amounts of P loss and apparent P fertilizer loss ratio

施肥处理	TP		PP		DP		DP/TP 负荷比/%
	负荷 /kg·hm ⁻²	表观 流失率/%	负荷 /kg·hm ⁻²	表观 流失率/%	负荷 /kg·hm ⁻²	表观 流失率/%	
P0	0.358e	—	0.182c	—	0.246d	—	68.72
P60	1.335cd	1.537a	0.330bc	0.247a	1.005bc	1.291a	75.28
P120	1.623bc	1.008b	0.454bc	0.227a	1.255b	0.854b	77.33
P240	2.579a	0.902bc	0.832a	0.271a	1.747a	0.632bc	67.74
P120(s)	1.227d	0.678c	0.471b	0.240a	0.756c	0.437c	61.61
P120(m)	1.714b	1.084b	0.577ab	0.329a	1.137bc	0.756bc	66.34

1)同一列中不同字母表示差异达到 $p < 0.05$ 显著水平

见,稻田磷素流失负荷不仅与施用磷肥的量有关,而且与施用磷肥的种类有关,配施秸秆能减少土壤磷的流失。

3 讨论

上述研究表明,在水稻整个生长期前 30d 田面水磷浓度波动较大(图 1),无论是在径流情况下取样还是在非降雨的情况下取样,磷含量远远超过水体富营养化的临界值,如果在这期间人为扰动或进行田间排水,都会增加田面水磷的含量或对周围的水体环境造成一定的污染,因此在此期间应避免排水和中耕等田间管理。

对太湖地区磷素流失研究表明^[27],在常规施磷处理水平下爽水型水稻土地表径流磷(TP)流失量为 1.149 kg/hm²,囊水型水稻土为 1.350 kg/hm²。本研究表明,在常规磷肥用量上磷肥的流失量为 1.335 kg/hm²,占常规施肥量的 2.23%,与太湖地区囊水型水稻土的流失量接近。当囊水型水稻土表层土壤 Olsen-P 值 26.2 mg/kg 为土壤磷素流失的“环境警戒值”,此时 TP 流失量在 0.953 kg/hm² 左右,因此可以认为当磷素流失量大于此值时磷素流失会对周围的水体环境造成污染。紫色水稻土的基础 Olsen-P 值为 29 mg/kg,可以推断在常规施肥量的情况下,紫色水稻土磷素的流失也会存在对周围的水体造成污

染的风险. Sharpley 等^[28]研究认为尽管当季磷肥的流失量通常不超过 5%, 但对水体富营养化具有关键性的作用. 因此, 控制水体富营养化的有效措施是控制磷素的流失.

处理 P60 和 P120 的磷素流失负荷差异不显著, 配施秸秆的处理 TP 和 DP 的流失负荷和表观流失率都低于处理 P60, 因此在紫色水稻土上在当地磷用量的基础上再增施秸秆, 既能改善土壤的物理性质, 也能减少磷素的流失, 减轻对水体污染的风险, 但施用的总磷量不能超过 120 kg/hm^2 . 相关研究表明, 部分种类有机肥能够屏蔽土壤磷素吸附位点, 进而提高土壤磷素的迁移能力^[29]. 本研究发现, 施用牛粪提高了土壤磷素的迁移能力, 而施用秸秆则抑制磷的释放; 并且无论是从磷含量或磷组分还是磷素流失负荷来看, 配施秸秆都比单施化学磷肥以及牛粪和化学磷肥配施的效果好, 因此可以认为, 秸秆和化学磷肥配施能成为减少土壤磷素流失的较好措施^[30], 可见秸秆和化学磷肥对比对降低土壤磷素流失的机理值得进一步研究.

旱地磷素的流失主要发生在暴雨导致的径流流失^[29], 针对此研究者提出了避开暴雨期进行施磷或者减少磷肥施用的措施^[31]. 而水稻田施肥时期也是暴雨多发期, 虽然稻田田间排水具有可控性, 但也应防止降雨引起的田面水外溢, 施肥前灌 1~2 cm 浅水, 在常规施肥的基础上再配合秸秆施用, 能大大减少磷的流失.

4 结论

(1) 田面水磷含量随着施磷水平的提高而提高, 施肥 24h 后各处理田面水磷素含量最高, TP 含量在 $0.928 \sim 3.824 \text{ mg/L}$ 之间. 前 10d 田面水总磷含量高, 平均含量为 0.869 mg/L , 前 30 d 田面水含磷波动大, 各处理 TP 平均含量在 $0.258 \sim 1.433 \text{ mg/L}$ 之间, 这期间的田间排水会对周围的水体环境造成污染; 在 40 d 之后田面水磷含量趋于缓慢下降, 60 d 之后趋于稳定, 且含量低.

(2) 径流水各形态磷的含量随着降雨强度和磷肥用量的增加而增加, 有机无机肥配施的处理稻田土壤磷素向水体释放磷持续的时间更长, 而施用牛粪比施用秸秆更容易导致磷素的流失.

(3) 磷素流失总负荷随着磷肥用量的增加而增加, 降雨期间溢出的磷量最低和最高分别为 0.358 kg/hm^2 和 2.579 kg/hm^2 . 稻田磷素流失负荷不仅与施用磷肥的量有关, 而且与有机肥的种类有关, 配施秸

秆能减少土壤磷的流失. 磷肥与秸秆的配施, 无论是各形态磷流失负荷还是表观流失率, 其值甚至低于施肥量只有其一半的处理. 因此, 秸秆和磷肥的配施是减少稻田土壤磷素流失的较好措施. 从降雨径流的 DP/TP 总负荷比来看, 稻田土壤磷素流失以 DP 流失为主.

参考文献:

- [1] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, **37**: 1008-1033.
- [2] Sharpley A N. Soil mixing to decrease surface stratification of phosphorus in manured soils[J]. J Environ Qual, 2003, **32**: 1375-1384.
- [3] 张志剑, 王珂, 朱荫涓, 等. 水稻田表水磷素的动态特征及其潜在环境效应的研究[J]. 中国水稻科学, 2000, **14**(1): 55-57.
- [4] Withers P J A, Davidson I A, Foy R H. Protects for controlling nonpoint source phosphorus loss to water: A U. K. perspective[J]. J Environ Qual, 2000, **29**: 167-175.
- [5] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus manage at the watershed: A modification of the phosphorus index[J]. J Environ Qual, 2000, **29**: 130-140.
- [6] Sharpley A N, Foy B, Withers P. Practical and innovative measure for the control of agricultural phosphorus losses to water: An overview[J]. J Environ Qual, 2000, **29**: 1-9.
- [7] Nash D, Hannah M, Clemow L, et al. A field study of phosphorus mobilization from commercial fertilizers[J]. Aust J Soil Res, 2004, **42**: 313-320.
- [8] Fleming N K, Cox J W. Carbon and phosphorus losses from dairy pasture in South Australia[J]. J Soil Res, 2001, **39**: 969-978.
- [9] Pierson S T, Cabrera M L, Evanylo G K, et al. Phosphorus and ammonium concentrations in surface runoff from grasslands fertilized with broiler litter[J]. J Environ Qual, 2001, **30**: 1784-1789.
- [10] 高超, 朱继业, 朱建国, 等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(11): 1543-1549.
- [11] 黄满湘, 周成虎, 章申, 等. 农田暴雨径流侵蚀泥沙流失及其对氮磷的富集[J]. 水土保持学报, 2002, **16**(4): 13-17.
- [12] 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[J]. 土壤学报, 2001, **38**(1): 139-143.
- [13] 梁涛, 王浩, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征[J]. 环境科学, 2003, **24**(2): 35-40.
- [14] 梁新强, 田光明, 李华. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(1): 59-63.
- [15] 李庆召, 王定勇, 朱波. 自然降雨条件下紫色土区磷素的非点源输出规律[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(6): 1050-1052.
- [16] 金洁, 杨京平, 施洪鑫, 等. 水稻田面水氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(2): 357-361.
- [17] 盛海君, 夏小燕, 杨丽琴, 等. 施磷对土壤速效磷含量及径流磷组成的影响[J]. 生态学报, 2004, **24**(12): 2837-2840.
- [18] 张志剑, 朱荫涓, 王珂, 等. 水稻田土-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.

[19] 曹志洪,林先贵,杨林章,等.论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I .稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J].土壤学报,2005,42(5):799-804.

[20] 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[J].环境科学,2001,22(1):97-101.

[21] 刘方,罗海波,舒英格,等.黄壤旱地-水系统中磷释放及影响因素的研究[J].中国农业科学,2006,39(1):118-124.

[22] He Z L, Wilson M D, Campbell C O, *et al.* Distribution of phosphorus in soil aggregate fractions and its significance with regard to phosphorus transport in agricultural runoff[J]. Water Air and Soil Pollution, 1995,83(1-2):69-84.

[23] 章永松,林咸永,罗安程,等.有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究 I.有机肥(物)对土壤不形态无机磷的活化作用[J].植物营养与肥料学报,1998,4(2):145-150.

[24] 范兴科,吴普特,冯浩.暴雨的判定方法和评价指标[J].中国水土保持科学,2003,1(3):72-75.

[25] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.

[26] Sharpley A N, Meyer M. Minimizing agricultural nonpoint-source overview[J]. J Environ Qual, 1994, 23:1-3.

[27] 张焕朝,张红爱,曹志洪.太湖地区水稻土磷素径流流失及其 Olsen 磷的”突变点”[J].南京林业大学学报(自然科学板),2004,28(5):6-10.

[28] Sharpley A N, Charpa S C, Wedepoh J R, *et al.* Managing agriculture phosphorus protection of surface waters: Issues and options[J]. J Environ Qual, 1994,23:437-451.

[29] Sims J T, Simard R R, Joem B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research[J]. J Environ Qual, 1998,27:277- 293.

[30] Kleinman P J A, Sharpley A N. Effect of broadcast manure on runoff phosphorus concentrations over successive rainfall events [J]. J Environ Qual, 2003, 32:1072-1081.

[31] Daniel T C, Sharpley D R, Edwards D R, *et al.* Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management[J]. J Soil Water Conservation, 1994, 49 (2):30-38.