

都市农业区域暴雨径流磷素输出特征研究

——以上海市新场镇果园村为例

张旭^{1,3}, 郝庆菊¹, 高扬^{2,4}, 黄红艳^{2,3},
毛亮^{1,3}, 曹杰君^{1,3}, 黄海波^{1,3}, 周培^{2,3}

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 上海交通大学 农业与生物学院, 上海 200240; 3. 农业部 都市农业(南方)重点开放实验室, 上海 200240; 4. 上海交通大学 环境与工程学院, 上海 200240)

摘要: 为了进一步阐明果园区小流域典型降雨磷素随径流的输出规律, 并为果园区域化肥减量化提供一定的科学依据。于 2009 年 7—8 月对上海市南汇区新场镇具有代表性的都市农业区降雨径流过程进行连续监测, 同步监测径流过程中总磷、磷酸盐和颗粒态磷的非点源输出过程与负荷。研究表明: 3 次暴雨过程的降雨量和径流量变化趋势大致相同。总磷(TP)和颗粒态磷(PP)浓度的变化趋势表现出随流量变化的特征, 总磷和颗粒态磷浓度随降雨径流上升趋势极为显著, 随后趋于稳定, 磷输出峰值均发生在径流峰值之前。3 次暴雨事件中, 颗粒态磷输出的平均值分别为 6.38 mg/L、7.65 mg/L 和 4.12 mg/L, 其对应的 TP 平均值分别为 7.88 mg/L、8.92 mg/L 和 5.36 mg/L, PP 输出占 TP 的比例是 76.9%~85.5%, 颗粒态磷流失量显著高于溶解态磷素。降雨强度对磷素的流失负荷影响显著, 当降雨量为 149.5 mm 的最强降雨时 TP 的输出负荷为 108 kg/hm², 占总输出负荷的 65.69%。

关键词: 都市农业; 降雨径流量; 输出负荷; 地表径流; 磷素

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)04-0038-05

Characteristics of Non-point Source Phosphorus Transport in Urban Agricultural Area Under Rainstorm — A Case Study of Xinchang Town, Shanghai

ZHANG Xu^{1,3}, HAO Qing-ju¹, GAO Yang^{2,4}, HUANG Hong-yan^{2,3},
MAO Liang^{1,3}, CAO Jie-jun^{1,3}, HUANG Hai-bo^{1,3}, ZHOU Pei^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Key Laboratory of Urban Agriculture (South) of Ministry of Agriculture, Shanghai 200240, China; 4. Department of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: For detailed elucidation of the typical mechanism of phosphorus with runoff in a small watershed of orchard when rainfall occurs, and supplying enough scientific foundations to decrease the application rates of fertilizers, this study was carried out from July to August in 2009 for consecutive investigation of runoff processes, and simultaneously monitoring the non-point output process and loads of total phosphorus (TP), phosphate and particle-phosphorus (PP), in Xinchang Town, where was a typical municipal farming zone of Nanhui District in Shanghai. The results indicated that the change trends of runoffs and rainfalls were approximately consistent in three storming processes. Meanwhile the concentrations of TP and PP changed with the varieties of runoff, and especially an increasing trend was observed significantly when runoff increased, after that, it stabilized without varieties. The greatest values of phosphorus losses all appeared before the occurrence of runoff peak values. In the three storming events, the average values of PP losses were 6.38 mg/L, 7.65 mg/L, 4.12 mg/L, respectively, with the average values of TP were 7.88 mg/L, 8.92

收稿日期: 2010-02-09

资助项目: 国家高科技研究发展计划(863 计划)项目(2007AA10Z441); 上海市科委项目(07JC14025, 07DZ12055); 农业部南方都市农业重点实验室开放基金(09UA003)

作者简介: 张旭(1984—), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 从事水污染研究。E-mail: clooney079@126.com

通信作者: 郝庆菊(1976—), 女, 山东肥城人, 博士, 副教授, 研究方向: 污染生态学。E-mail: haoqingju@126.com

mg/L and 5.36 mg/L, respectively, which accounted for 76.9%~85.5% of TP losses, thus the amount of PP losses was higher than dissolved phosphorus losses. In addition, the effect of rainfall intensity (RI) on phosphorus losses load was significant, which showed the TP loss load was 10^8 kg/hm² accounting for 65.69% of TP losses, when RI was the greatest (149.5 mm).

Key words: urban agriculture; rainfall runoff; output load; runoff; phosphorus

农业生产中,磷肥的投入是实现粮食增长的最有效措施之一,大量磷肥的施用改变了土壤磷素的固有状态,导致磷的流失,成为流域非点源污染的重点控制目标^[1]。磷素的产出和迁移过程与流域水文过程密切相关,主要通过地表径流、壤中流两种途径进入地表和地下水。农业面源污染对水环境的恶化有着十分显著的贡献,富营养化现象的发生与农田土壤中磷的流失有密切的关系^[2-4]。因此,对农田土壤磷素流失进入水体的过程、机理以及控制措施的研究,已日益受到国内外学者的广泛关注^[4-5]。在自然降雨径流条件下,农田土壤侵蚀不仅导致磷素等养分流失和土壤生产力的下降,而且磷素等养分随地表径流流出农田汇入各种水体,引起水体的富营养化和污染,成为水体富营养化的限制因子。磷素作为非点源污染物产生的过程十分复杂,它受降雨过程(降雨类型、强度及持续时间)和下垫面因素(地形、地貌、土壤的化学和物理状况、植被或作物特征,以及农业实践措施等)的综合影响^[5-9]。

目前关于磷素面源污染的报道多集中于紫色土丘陵地区^[8-10],都市农业为主体区域的磷素非点源污染的相关研究较少。都市农业区域面源污染将导致城市饮用水出现隐患,同时引起下游水体富营养化。基于此以上海市南汇区新场镇果园村为研究对象,探讨雨季7-8月该农业区域磷素在降雨过程中的分布及输出特征,为控制上海市农业非点源磷输出对水体的污染以及化肥减量化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于上海市南汇新场镇果园村,地处黄浦江东岸(31°03'N,121°39'E)。境内地势平坦,均为冲积平原。年平均降雨量约为1 000 mm,平均降雨日约为130 d,雨量年际变化较大,多雨年份降雨量可达1 300 mm,少雨年份只有600 mm。新场镇境域降水量为夏季多、冬季少。初夏季节,由于北上的南方暖湿气流和南下的大陆冷气流在长江中下游地区相对峙,形成“梅雨”,自6月中旬至7月上旬,持续约20 d,雨量大增。7-8月间为台风季节,台风雨、干旱与暴雨交替出现。该镇属黄浦江水系,境内河流纵横密布,淡水资源丰富;主要干流有惠新港、大治河、奉新港等。地下水赋

存条件属松散岩类孔隙水,补给来源较充沛。该区域农副业生产发达,土地总面积33.33 hm²,主要的土地利用类型为桃园,面积大于50%。主要土壤类型为黄泥土。表层土壤有机质含量20.40 g/kg,全氮含量1.06 g/kg,速效氮含量77.01 mg/kg^[11]。

1.2 样品采集

实验于2009年7-8月雨季期选择南汇区果园村具有代表性的农田生态系统以及周边典型居民生活区进行实地监测。由于果园刚施过磷肥,为了更好的监测果园小区域土壤磷素输出情况选取果园径流小区域的入口作为监测点(见图1)。由于在本研究区域,灌溉用水同时也用于水产养殖,在灌溉沟渠中围网养鱼是最常见的种养模式,监测点恰巧是桃园内的排水沟道,承接降雨过程的桃园地表径流。在降雨开始后,同步监测每场次降雨过程的径流量和磷污染物输出浓度。当降雨后产生流时(流域产流滞后于降雨)进行采样,样品的采集频率视降雨强度而定,若强度很大雨强超过64 mm时,则加密采样(一般5~10 min采集一次),低雨强时适当延长采样时间间隔,采样持续至降雨结束后若干时间。采集的水样装入200 ml聚乙烯采样瓶内,立即冷冻保存,待测。

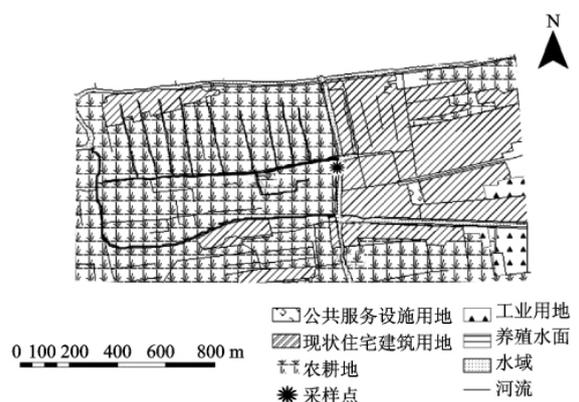


图1 监测点及研究区概况

1.3 研究方法

降雨后采集的径流过程样,静置充分摇匀后过滤,去除粗砂颗粒,之后进行总磷、可溶性磷和磷酸盐的测定。各磷素指标均用国标法测定(GB11893-89)。径流水样的总磷(TP)采用K₂SO₄氧化,钼锑抗还原光度法测定;水样经水样经0.45 μm滤膜过滤后再用K₂SO₄氧化法测定可溶性磷(DP),磷酸盐

(PO_4^{3-})和颗粒态磷(PP)也直接用钼锑抗比色测定,颗粒吸附态磷(PP): $\text{PP}=\text{TP}-\text{DP}$ 。

2 结果与分析

2.1 暴雨径流过程中不同形态磷素输出特征及浓度变化

为进一步了解不同降雨强度条件下磷素随降雨径流的浓度变化,实验 2009 年 7—8 月取 3 场不同条件下的降雨为例进行研究。3 场降雨中,7 月 22 日为久旱后第一场降雨,降雨量为 90.2 mm,7 月 30 日为所监测 3 场降雨中雨强最大的一次,降雨量为 149.5 mm,8 月 2 日降雨量为 68 mm。

3 次降雨过程营养物浓度变化与径流量过程相似,磷浓度峰值均出现在径流量峰值之前。输出径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量很低且变化幅度不是很明显。TP 和 PP 浓度变化明显响应径流量过程曲线,均在径流初期迅速达到峰值,之后陡然下降并逐渐趋于稳定。7 月 22 日降雨事件中(图 2a),从降雨径流量图可以看出流量开始上升缓慢在逐渐达到峰值后亦缓慢下降趋势。随降雨过程总磷(TP)和颗粒态磷(PP)浓度呈逐渐上升趋势,在降雨量达到峰值后,总磷和颗粒态磷浓度逐渐达到峰值后减小并逐渐趋于稳定。在当日降雨过程中,磷酸盐浓度随降雨量的变化不是十分显著。7 月 30 日降雨事件中(图 2b),暴雨初期总磷(TP)和颗粒态磷(PP)浓度在产流后很短的时间内浓度先下降后迅速达到了峰值,但随着流量的上升总磷浓度呈下降趋势,在径流量达到峰值后总磷浓度又出现了一个小峰值。在降雨强度逐渐减弱后,径流量逐渐变小,径流中总磷的浓度又回出现一个小峰值。当日磷酸盐浓度在暴雨初期迅速达到峰值后缓慢下降,在降雨中期达到最低点后又平缓上升,但变化幅度不是十分显著。8 月 2 日降雨事件中(图 2c),降雨强度同前两场降雨相比明显较弱,总磷和颗粒态磷的浓度均出现了多峰的趋势,主要是受降雨强度的影响,磷酸盐在一开始浓度上升后,逐渐呈渐近变化趋势。

2.2 暴雨径流过程中果园磷素流失负荷

3 场暴雨降雨产生的径流量和磷素输出负荷见表 1。如表 1 所示,7 月 22 日降雨事件,降雨强度小,降雨历时长,降雨量 90.2 mm,降雨持续大约 100 min 后径流量达到峰值,峰值流量为 $0.76 \text{ m}^3/\text{s}$,累积流量 $5\ 876.2 \text{ m}^3$,总磷流失负荷 $47.69 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。7 月 30 日降雨强度大,降雨历时长,降雨量 149.5 mm,流量在降雨发生后大约 80 min 后达到峰值,流量呈双峰态,流量峰值分别为 $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.73 \text{ m}^3/\text{s}$,累积流量 $13\ 863.1 \text{ m}^3$,总磷流失负荷 $108.66 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。8 月 2 日

降雨强度大,降雨历时短,降雨量为 68 mm,降雨持续大约 150 min 后流量达到峰值,流量峰值为 $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$,累积流量 $1\ 550.9 \text{ m}^3$,总磷流失负荷 $9.04 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

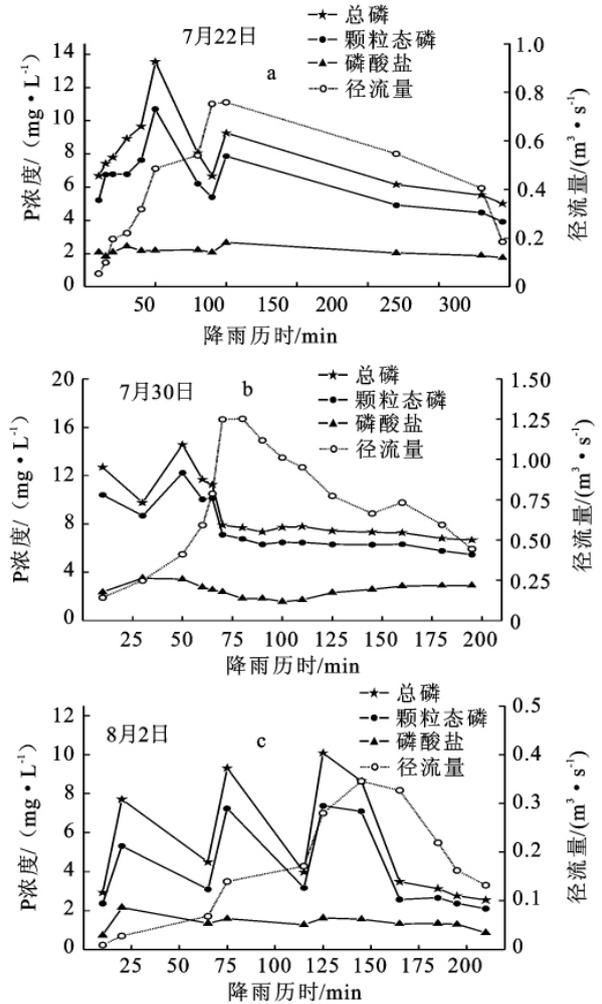


图 2 3 次暴雨径流过程及磷素浓度变化

3 场暴雨的径流量分别是 $5\ 876.2 \text{ L}$ 、 $13\ 863.1 \text{ L}$ 、 $1\ 550.9 \text{ L}$ 。 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 负荷分别是 $13.67 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $31.44 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $2.27 \text{ kg}/\text{hm}^2$,TP 负荷分别是 $47.69 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $108.66 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $9.04 \text{ kg}/\text{hm}^2$,PP 负荷分别是 $39.42 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $93.40 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $7.03 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。文献报道二者呈指数相关关系^[12-13],可见非点源污染与研究区的土地利用类型、土壤理化性质和流域农田管理措施等多种因素有关。对 3 次暴雨径流过程中瞬时径流量和污染物排放负荷进行指数相关分析。各形态磷迁移负荷与径流量之间存在极显著的相关关系,其统计方程结果列于表 2。

3 讨论

3.1 暴雨径流中磷素输出特征

国内外在人工和自然降雨条件下的农田磷素输出形态的研究已经证明磷素从农田土壤向地表水体

的迁移大部分以颗粒态形式流失^[14]。3 次降雨过程中磷酸盐含量很低且变化幅度都不是很明显,3 次降雨颗粒态磷(PP)输出的平均值分别为 6.38 mg/L、7.65 mg/L 和 4.12 mg/L,其对应的 TP 平均值为 7.88 mg/L、8.92 mg/L 和 5.36 mg/L,PP 占 TP 的比例是 76.9%~85.5%,由此可见,降雨引起的流域磷素输出波动主要由随泥沙迁移的颗粒态磷(PP)的变化引起的。与梁涛等^[15]在太湖流域西苕溪进行的

表 1 降雨径流量与磷流失负荷

降雨事件	累积降雨量/mm	累积径流量/m ³	负荷/(kg·hm ⁻²)			PP/ TP(%)
			TP	PP	PO ₄ ³⁻ -P	
2009-07-22	90.2	5876.2	47.69	39.42	13.67	82.66
2009-07-30	149.5	13863.1	108.66	93.40	31.44	85.96
2009-08-02	68.0	1550.9	9.04	7.03	2.27	77.77
总量	246.5	21290.2	165.39	139.85	47.38	—
平均值	82.2	7096.7	55.13	46.62	15.79	82.12

表 2 径流量与各形式 P 迁移负荷的指数回归方程

污染物指数	指数回归方程	R ²
PO ₄ ³⁻	$y=10.65e^{0.004x}$	0.908
TP	$y=1.620e^{0.001x}$	0.945
PP	$y=8.322e^{0.003x}$	0.909

注: x ——时间; y ——间隔时间 x 的污染物浓度。

降雨径流中污染物浓度的变化不仅与径流量有关,同时还取决于降雨量、降雨强度和降雨前施肥等多种因素,因此降雨条件对氮磷流失影响显著^[17]。土壤磷素进入水体的途径一般是通过径流进入地表水,地表径流主要能量来自于降水尤其是降雨,降雨冲击地表引起土壤扰动,产生悬浮土壤颗粒并随径流流失,同时径流又冲刷地表土壤产生水土流失,这是农田磷素流失的最主要途径。降雨初期大量污染物随降雨径流进入水体,浓度增大出现峰值,后期由于土壤中污染物含量的下降和流量的持续增大,流域水体的稀释作用开始占主导地位,从而导致污染物浓度降低。可见 TP 和 PP 浓度受控于降雨对地表的冲刷。此外,土壤本身含有的磷素和施入土壤的磷肥是土壤磷素流失的来源,施肥可以显著影响进入地表径流中磷的含量。根据南汇区 1981 年农田土壤普查,土壤有机质平均含量 20.8 mg/kg,有效磷平均含量 16.21 mg/kg。经过 20 多年的耕作,土壤肥力水平有所提高,土壤氮、磷、钾养分大多集中在 3 级水平以上,特别是磷素养分含量较高,是 80 年代的 4 倍之多。这一方面提高了土壤磷的供应能力,另一方面也使农田磷素对环境的威胁大大增加。研究的主要污染来自果园农田生态系统,经调查得知,果农每年向果园内施肥 4~5 次,每年桃树发芽前(1 月中旬)、开花后(3 月中旬)、果实形成时、果实膨大(5 月底)及秋季(11 月)均施用肥料。肥料种类为复合肥与有机肥

磷素迁移特征研究结果相吻合,说明悬浮颗粒态磷是地表径流水相磷流失的最主要形态。这可能是因为暴雨初期,降雨—径流的土壤侵蚀能力较弱,而泥沙对磷有吸附富集作用,土壤中解吸出来的磷素随初期的雨水输出。随着降雨和流量的增大,侵蚀力增强,径流中泥沙含量增加,悬浮态磷素逐渐占据主导地位,降雨—径流侵蚀作用成为磷素输出的主要动因,造成最终悬浮态磷素浓度高于溶解态^[16]。

配合。一般 1 月施用的复合肥为 750 kg/hm² (15% N, 15% P, 15% K),有机肥 15 t/hm²;5 月底施用复合肥量为 600 kg/hm² (20% N, 6% P, 13% K),不再使用有机肥。施肥方式为直接在土地表面撒肥料,再翻耕。1 月份的翻耕深一些,但不超过 30 cm;5 月底为保证桃树快速吸收养分,翻耕较浅。为克服生理落果,在果实生长发育期(谢花后、幼果期、硬核期)部分果农用 0.4% 尿素液或 0.3% 磷酸二氢钾液喷树冠,补充桃树营养的不足。农业流域内,污水灌溉、农田施加过量的磷肥或者养殖场养殖过量猪、牛、羊等畜禽,均会促使磷素的地下渗滤^[18]。降雨时,地表浅层大量的磷素就会随径流迁移到河道中,农业活动中施用的肥料成为水体磷素污染的主要来源,果园区域沟道水受地表径流影响非常大。

3.2 暴雨径流事件磷素的流失负荷及流失风险

研究区域地处生产集约化程度比较高、施肥量大的都市农业区域,土地利用强度比较大的土壤,地表径流磷素浓度与流失负荷相对较高。土壤磷素流失的形态主要有溶解态磷(DP)和固相态磷(TP)两大部分,水分运动是土壤磷素流失的动力和媒介。在没有可控的排灌设施的农业土壤上,降雨作用引起的地表径流是磷素流失的主要途径。林超文的研究^[19]认为雨强对磷的总流失量影响较大,雨强越大,随径流损失的磷越多。由表 2 可知,7 月 30 日的暴雨事件,在整个降雨过程产生的累积径流量是 13 863.1 L,总磷负荷 108.66 kg,累积径流量分别是 8 月 2 日和 7 月 22 日降雨的 9 倍和 2 倍,总磷(TP)负荷分别是 8 月 2 日和 7 月 22 日降雨的 12 倍和 2 倍。3 场不同条件的降雨,磷流失负荷变幅很大,降雨径流污染负荷量与降雨径流量密切相关。因为磷在地表及地下径流中

的绝对浓度差异不大,其流失量的多少主要受径流总量的影响,雨强越大,径流量越大,磷流失越多。3场降雨的颗粒态磷(PP)负荷分别占总磷(TP)负荷的82.66%,85.96%和77.77%,说明3场降雨径流中均以PP为主,与蒋锐^[17]的研究结果相似。研究区域为果园旱地,旱地径流磷的地下输出很小,所以磷素在旱地径流的主要以地表输出为主。要通过地表径流解吸溶解等作用来实现。在地表径流中,绝大部分磷是通过侵蚀泥沙从土壤中流失。磷流失量主要决定于径流量、土壤侵蚀量以及径流和侵蚀土壤中的磷含量。暴雨的强冲击负荷和冲刷效应将带走大量泥沙。近年来,一些学者研究认为,98%的养分由泥沙流失引起^[20],所以泥沙的流失势必携带大量氮磷物质随暴雨径流进入水体,增加地表水发生富营养化的风险。如果在施用磷肥或有机肥的季节,几次暴雨造成的地表径流导致的磷素流失总量可能达到全年土壤磷素流失总量的1/2以上^[21]。

4 结论

(1)三次降雨事件中,磷酸盐含量很低且变化幅度都不是很明显。降雨引起的流域磷素输出波动主要由随泥沙迁移的颗粒态磷(PP)的变化引起的。

(2)地表径流中的磷素迁移表现出随降雨强度呈显著性差异的特征。降雨事件中地表径流磷素输出浓度整体表现为降雨初期径流中营养物质浓度高于后期径流中营养物质浓度,初期径流输出负荷高,具有明显的冲刷效应,符合暴雨径流磷素迁移过程的基本特征。

(3)径流量与磷排放负荷之间呈指数关系。60%~80%的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP和PP负荷分布于径流初期,表明其径流初期冲刷效应突出。

(4)都市农业区大量磷肥的施用导致土壤中磷素随地表径流大量流失。降雨强度对磷素的流失负荷影响较显著。3次降雨中,7月30日大暴雨TP的输出负荷为 108 kg/hm^2 ,占总输出负荷的65.69%。

参考文献:

[1] 李娜,单宝庆,尹澄清,等.六叉河小流域农田土壤磷下渗迁移过程研究[J].农业环境科学学报,2005,24(6):1132-1138.

[2] Neyde F, Balarezo G, Alvaro P S, et al. Contribution of natural soil compaction on hard setting behavior [J]. Geoderma, 2003, 113 (1/2): 95-108.

[3] Flowers M D, Lal R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a molic ochraqualfin northwest Ohio [J]. Soil & Tillage Research, 1998, 48 (1/2): 21-35.

[4] Akker J J H, Canarache A. Two European concerted actions on subsoil compaction [J]. Land Use and Development, 2001, 42(1): 15-22.

[5] Gao Yang, Zhang Jinzhong, Zhu Bo, et al. Phosphorus transport with runoff of simulated rainfall from purple-soil cropland of different surface conditions [J]. Journal of Chongqing University: English Edition, 2008, 7(2): 85-92.

[6] 高扬,朱波,汪涛,等.人工模拟降雨条件下紫色土地生物可利用磷的输出[J].中国环境科学,2008,28(6): 542-547.

[7] 高扬,朱波,周培,等.紫色土地氮素和磷素非点源输出模拟研究[J].农业环境科学学报,2008,28(7): 1371-1376.

[8] 高扬,朱波,王玉宽,等.自然降雨和人工降雨条件下紫色土地磷素迁移比较[J].水土保持学报,2006,20(5): 34-37.

[9] 陈克亮,朱晓东,朱波,等.川中紫色土区旱坡地非点源氮输出特征与污染负荷[J].水土保持学报,2006,20(2): 54-58.

[10] 徐泰平,朱波,汪涛,等.紫色土坡耕地磷素渗漏迁移初探[C]//首届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 2005: 329-332.

[11] 胡志平,郑祥民,黄宗楚,等.上海地区不同施肥方式氮磷随地表径流流失研究[J].土壤通报,2007,38(2): 310-313.

[12] 高扬.紫色土典型小流域非点源磷输出及其模型运算[D].重庆:西南大学,2007.

[13] 杨金玲,张甘霖.皖南低山丘陵区流域氮磷径流输出特征[J].农村生态环境,2005,21(3): 34-37.

[14] 单保庆,尹澄清,白颖,等.小流域磷污染物非点源输出的人工降雨模拟研究[J].环境科学学报,2000,20(1): 33-37.

[15] 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.

[16] 王鹏,高超,姚琪,等.环太湖丘陵地区农田磷素随地表径流输出特征[J].农业环境科学学报,2006,25(1): 165-169.

[17] 蒋锐,朱波,唐家良,等.紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J].农业环境科学学报,2008,27(4): 1353-1358.

[18] Phillips I R. Phosphorus sorption and nitrogen transformation in two soils treated with piggery waste water [J]. Aust J. Soil Res., 2002, 40: 335-349.

[19] 林超文,陈一兵,黄晶晶,等.不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J].中国农业科学,2007,40(10): 2241-2249.

[20] 白红英,唐克丽,陈文亮,等.坡地土壤侵蚀与养分流失过程的研究[J].水土保持通报,1991,11(3): 14-19.

[21] Nash D M, Hannah M, Halliwell D. Factors affecting phosphorus export from a pasture-based grazing system [J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 1160-1166.