

太湖流域典型圩区农田磷素随地表径流迁移特征

徐爱兰^{1,2}, 王 鹏¹

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南通市环境监测中心站, 江苏 南通 226006)

摘 要:太湖流域农业非点源污染问题日趋严峻,流域内圩区面积占较大比重,圩区水流及污染物迁移的特殊规律决定了圩区非点源污染规律的特殊性,而目前国内外相关研究较少,因此研究太湖流域典型圩区营养盐迁移转化特征具有重要的意义。在太湖流域平原河网地区选择典型圩区开展野外原位试验,通过野外观测和室内分析相结合的方法,研究了圩区磷素在自然降雨-径流驱动下的迁移特征,建立了稻季农田磷素的迁移通量与径流量、施肥量及降雨距施肥时间间隔三者之间的定量化关系。结果表明:①径流量是影响磷素流失通量的关键因素;②施磷肥后径流中磷素浓度达最高值,后呈下降趋势,磷素径流损失与施磷量呈显著正相关;③施肥与径流发生的时间间隔是决定径流磷损失的重要因素。

关键词:太湖流域;圩区;农业非点源污染;降雨径流;磷素

中图分类号:X522 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-1106-06

Phosphorus Losses with Surface Runoff from Farm Lands in Polder Area Around Taihu Basin

XU Ai-lan^{1,2}, WANG Peng¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nantong Environmental Monitoring Centre, Nantong 226006, China)

Abstract: As to Taihu basin, including many polders, the non-point source pollution is becoming serious gradually. It has about 14 541 km² polders, which takes up 51% of the land area in its land plain. These polders play a role in protecting the safety of people's lives and properties and promote the economic development and social stabilization. However, due to the accumulation of fertilizer and pesticide in soil and the eluviations of salinity, water quality of these polders changed to be worse, the environment was influenced, and water environment here was threatened severely. Its unique hydrology and specific transference of contaminants determined the characteristic of the non-point pollution of polder. Since little studies have been done on this, it is essential to carry out some research on this field. A typical agricultural watershed and runoff plots in polder areas around Taihu Lake were selected and experiment in situ was conducted. The transportation characteristics of various forms phosphorus driven by natural rainfall-runoff were studied by field observations and laboratory testing. Regression relationships between transportation fluxes with runoff fluxes and fertilization were set up. It suggested that: (1) Runoff fluxes was the key factor of the transference fluxes; (2) The phosphorus concentration in the runoff after fertilization arrived at the highest level, then descended, and was positively correlated with fertilization; (3) The time between runoff and fertilization was also the important factor influencing the transportation fluxes.

Keywords: Taihu Lake basin; polder; agricultural non-point source pollution; rainfall-runoff; phosphorus

太湖流域现有圩区总面积约 14 541 km²,占流域平原陆域面积的 51%^[1]。由于圩区土壤中肥料、农药、盐分的淋溶而不断积聚,引起圩区水质变化,给区域

生态环境带来影响,对流域水环境构成严重威胁,对于圩区非点源污染特征的研究就显得十分重要。由于圩区与外界水流交换的特殊性,其营养盐产生、迁移及转化规律具有其独特性和复杂性。一方面,由于圩区处于平原河网地区,河道纵横交错,地势低平,加上径流和潮汐双重作用以及人为活动的强烈干预,导致水流流向不定,水文和水动力特征十分复杂。另一方面,由于圩区稻田面积占耕地面积的比例较高,是主

收稿日期:2007-07-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50239030)

作者简介:徐爱兰(1982—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事非点源污染治理、水环境影响评价方面的研究。

E-mail: xuailan-1982@163.com

要的土地利用方式,其水分和营养盐的运移和转化特征不同于旱地,与水肥等农事管理活动密切相关。鉴于圩区与外界水流交换的特殊性,其营养盐产生、迁移及转化规律具有其独特性和复杂性,以往对于圩区的研究大都局限于圩区设计、圩区建设、圩区排涝、圩区产流机制^[2]等等这些层面之上,目前国内外对于圩区农业非点源污染的相关研究较少^[2-4]。因此,需要结合圩区水流运动和污染物迁移的特点,采用野外试验、室内分析和模型研究等多种手段,对圩区非点源污染的产生、迁移和转化规律进行系统研究,分析其在时间和空间上的分配特征,提出平原河网区典型圩区特点的营养盐迁移特征。

营养盐迁移通量估算的关键在于径流量。由于降雨径流是农田非点源磷素流失的主要载体,因此径流量是磷素流失量的主要影响因素。同时,非点源污染更多地受农田施肥等相关因素的影响。在单次降雨-径流过程中,各种形态磷素浓度在降雨产流初期较高,随降雨持续时间延长而略有下降。水相磷素按是否溶解于水可分为溶解态和悬浮态两种形式。磷作为太湖富营养化的限制性因子^[5],加剧了太湖的富营养化程度,太湖流域平原河网地区作为太湖农田磷素的重要来源,对该类地区农田磷素流失特征的研究显得非常必要。目前关于该地区农田磷素随径流迁移特征的研究多采用人工降雨法^[6],而有关自然降雨条件下磷输出形态特征的研究较少。因此,研究不同施肥过后的不同降雨径流事件导致的营养盐迁移通量的差异具有较重要的实用价值。

本文在分析总结国内外相关文献的基础上,选择太湖流域平原河网区——典型圩区荻泽联圩作为研究区域,收集并整理该圩区的基础资料,分析圩区非点源污染现状及存在的问题,在稻季开展圩区非点源污染产生以及迁移转化规律的野外原位试验,建立圩区稻季降雨径流各营养盐迁移通量及径流量、施肥量以及降雨距施肥日期间隔天数三因素的响应关系。

1 材料与方法

1.1 流域概况

荻泽联圩,隶属无锡市锡山区鹅湖镇鹅湖村(120°32'14"E,北纬 31°29'57"N),距离无锡市区 25 km,西南临太湖,东南处为漕湖,临近望虞河。地势平坦、地面高程在 2.1~3.6 m 之间,水网密布,河堤平坦,水面比降小,一般河道都有小型闸坝控制,流速缓慢。圩区总面积 70.43 hm²,人口 2 100 人,2001 年建

圩,圩堤长度 1.96 km。圩区内的主要土地利用类型有稻田、居民区、菜地、香樟林地、水面、道路,其中稻田面积占整个圩区面积的 46%。圩区主要通过两个排涝站排涝:郭家里排涝站以及吴埂上排涝站,与外界无其他直接的流通。其中郭家里排涝站排涝流量为 1 m³·s⁻¹,吴埂上排涝站排涝流量为 0.534 m³·s⁻¹。

1.2 采样及分析方法

圩区排涝一般在降雨的次日进行,试验控制排涝时间为降雨产流发生 24 h 后。在圩区两个排涝站出口位置前有蓄水河道(或水库)定期测定水位。记录每场降雨前的水位,降雨产流事件发生 24 h 后,记录此时水位,同时开始排涝,蓄水河道(或水库)水位恢复到降雨产流前水位时停止排涝。

在 2006 年 7 月 12 日到 2006 年 10 月 30 日这段时间里,共收集了郭家里排涝站的 8 场降雨径流后的排涝事件的出流样本,吴埂上排涝站的 7 场降雨径流后的排涝事件的出流样本。对于每次径流过程,同步监测其出口前断面水位并采集水样。吴埂上排涝站的排涝时间相对郭家里排涝站稍长,因此,对于吴埂上排涝站的每次出流,采样 5 次,排涝前 1 次,排涝后 1 次,排涝过程中 3 次;对于郭家里的每次出流,采样 4 次,排涝前 1 次,排涝后 1 次,排涝过程中 2 次,采样时间间隔均匀。

水样静置 3 h 后抽取上层清液测定水相营养盐含量,测定项目包括 TP 和 PO₄-P,其中 PO₄-P 作为无机磷浓度,TP 与无机磷相减得到有机磷浓度。水样经过硫酸钾消煮后采用钼-锑-抗分光光度法测定 TP; PO₄-P 直接采用钼-锑-抗分光光度法。上层清液经 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤后采用钼-锑-抗分光光度法测定可溶性 TP 及 PO₄³⁻的浓度。水样分析方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》。

将各泵站的一次降雨及次日发生的排涝事件统称为一次降雨排涝事件。将郭家里排涝泵站的降雨排涝事件按发生时间先后依次编号为 G1~G8,吴埂上为 W1~W7。考虑郭家里排涝站和吴埂上排涝站的总排涝情况,共计 9 次排涝事件,按日期分别记录为 7-12、7-18、7-21、7-22、8-15、8-22、8-25、9-2、9-15,共 9 个样本。

1.3 营养盐迁移通量和出流量

研究表明圩区营养盐流失量与径流量存在相关性^[7]。本文在研究两者的相关性前首先对这两个变量进行时间和空间的单位化处理,引入营养盐迁移通量和径流量的概念。其中营养盐迁移通量指单位时间

圩区单位面积的营养盐迁移量;径流量指单位时间圩区单位面积的径流量。

圩区一般选择在降雨的次日进行排涝,规定两个参数的计算时间为降雨产流开始到圩区开始排涝为止,控制该时间间隔为 24 h,排涝时通过水位控制使圩区水量恢复到降雨产流前。因此,可以认为圩区该次降雨事件后的次日排涝量即为圩区产生的径流量。泵站排涝过程中所取水样的水质基本反映了径流样本的水质情况。该圩区有两个排涝站,根据营养盐迁移通量和径流通量的定义,按式(1.3-1)和式(1.3-2)分别计算营养盐迁移通量和径流量。

$$\varnothing=\left[\sum_{i=1}^{N_G-1}\left(\frac{C_{Gi}+C_{G(i+1)}}{2}\right)\cdot Q_G\cdot t_{Gi}+\sum_{i=1}^{N_W-1}\left(\frac{C_{Wi}+C_{W(i+1)}}{2}\right)\cdot Q_W\cdot t_{Wi}\right]/(A\cdot T)$$

(1.3-1)

$$r=(P_G+P_W)/(A\cdot T)$$

(1.3-2)

式中: C_{Gi} 、 $C_{G(i+1)}$ 为经郭家里排涝站(及吴埂上排涝站)径流中营养盐的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; A 为圩区面积, hm^2 ; T 为降雨产流至圩区开始排涝的时间, h ; r 为径流量, $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; N 为郭家里(吴埂上)排涝站样品数量; P 为郭家里(吴埂上)排涝站该次降雨排涝事件的排涝量, m^3 ; A 为圩区面积, hm^2 ; t 为郭家里(吴埂上)排涝站第 i 次排涝时间, h ; P 为郭家里(吴埂上)排涝站的排涝流量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.4 次降雨径流平均浓度 EMC

在任意一场排涝事件中,由于河道演进以及水力的随机性变化,会导致出流中营养盐的浓度随时间呈现较大的波动。所以往往采用“次出流平均浓度 EMC(Event Mean Concentration, EMC)”来反映次降雨事件中营养盐的平均浓度水平,定义为一次排涝引起的某

种营养盐的迁移量除以该次排涝的出流量,实质上代表了一次出流的瞬时污染物浓度的流量加权平均值^[8]。根据定义,EMC 等于营养盐迁移通量除以出流通量,如式(1.4-1)所示:

$$\overline{C}=\varnothing/r$$

(1.4-1)

式中: $\varnothing$ 为营养盐迁移通量, $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; r 为径流量, $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 溶解态和悬浮态磷素迁移特征

7 次排涝事件对应的降雨径流中溶解态和悬浮态磷素浓度值见表 1。对比太湖流域典型圩区——荻泽联圩在各场降雨径流事件下,溶解态和悬浮态总磷及磷酸盐浓度的差异。

由表 1 可以看出,水相溶解态总磷平均浓度为 $0.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水相悬浮态总磷的平均浓度为 $0.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;水相溶解态磷酸盐平均浓度为 $0.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水相悬浮态磷酸盐的平均浓度为 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,荻泽联圩溶解态总磷和磷酸盐的 EMC 值高于悬浮态,分别占水相总磷和磷酸盐浓度的 63%~76%和 57%~76%。

该结果与单保庆^[9]在其他小流域在人工降雨条件下的磷素迁移特征以及陈欣^[10]对丘陵地带自然降雨条件下的磷素迁移特征存在差异。主要与试验场地的空间尺度、地形特征和土地利用分布特征有关,一方面文献中的试验多在丘陵坡地上建立的径流小区中进行,面积在数百平方米以内,而本次试验所选择的典型圩区面积为 70.43 hm^2 。其次,试验场地的地形特征有所不同,为了便于收集径流,径流小区一般建立在丘陵坡地上,而荻泽联圩属于太湖流域平原河网地区的典型圩区,这种地形特征有利于被降雨径流侵蚀

表 1 降雨径流中溶解态和悬浮态磷素浓度对比($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 1 Concentration variations of dissolved and suspended phosphorus($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

排涝事件	总磷		磷酸盐	
	溶解态	悬浮态	溶解态	悬浮态
7-12	0.19	0.11	0.1	0.08
7-18	0.2	0.09	0.12	0.04
7-21	0.19	0.06	0.12	0.05
7-22	0.16	0.09	0.1	0.06
8-15	0.15	0.08	0.1	0.04
8-22	0.12	0.09	0.12	0.06
8-25	0.13	0.08	0.08	0.03
9-2	0.14	0.05	0.11	0.05
9-15	0.12	0.07	0.1	0.04
样本标准差 S	0.029	0.017	0.013	0.014

的泥沙在迁移的过程中又逐渐沉积下来。最后,由于圩区的土地利用主要为稻田,形成了一道拦截侵蚀泥沙的天然屏障,有利于减少悬浮态磷素的浓度,造成大部分降雨事件的溶解态磷素浓度高于悬浮态。

2.2 水相各形态磷素迁移通量与降雨径流深的影响关系

通过绘制荻泽联圩圩区水相磷素迁移通量与径流通量的散点图,可以从总体上把握该圩区各种形态磷的迁移特征。分析 7-12、7-18、7-21、7-22、8-15、8-22、8-25、9-2、9-15 共计 9 个样本的水相总磷、磷酸盐的迁移通量与径流通量的相关关系,见图 1 及图 2。利用直线对图中的散点进行线性拟合,得到各场降雨事件各形态磷素迁移通量与径流通量的回归方程及其相关系数。

由图 1、2 可见,各场次水相总磷及磷酸盐的迁移通量总体上随径流通量的增加而增加,流失量与径流通量回归方程的相关系数均达到 0.80,说明磷素流失量受水体中磷浓度、施肥方式及次降雨时间等其他因素的影响相对较小,与径流通量表现出显著相关性。

为更直观地表现各形态磷素迁移通量与径流深的关系,绘制了不同径流深下各场降雨径流事件中各形态磷素迁移通量对比图,见图 3。

由图 3 可见,由于各次降雨排涝事件中磷素迁移通量相差不大,而 7-22、9-15 径流深较大,直观的表现

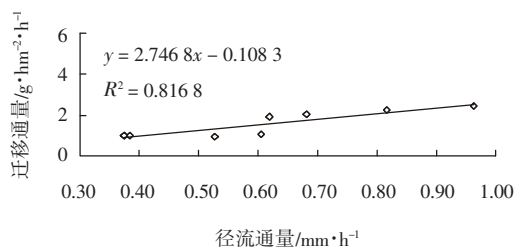


图 1 水相总磷流失通量与径流通量关系

Figure 1 Relationship between transportation fluxes of hydrofacies total phosphorus and runoff fluxes

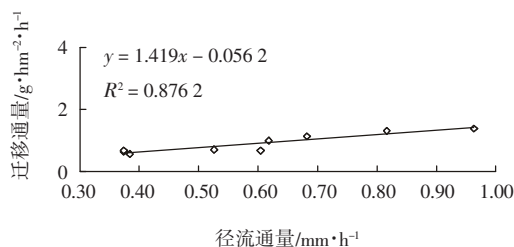


图 2 水相磷酸盐流失通量与径流通量关系

Figure 2 Relationship between transportation fluxes of hydrofacies total phosphate and runoff fluxes

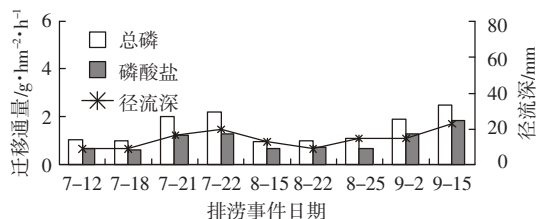


图 3 不同径流深下各场降雨排涝事件后各形态磷迁移通量对比

Figure 3 Variation of phosphorus transportation fluxes at different runoff depths

现为 7-22、9-15 这两次降雨排涝事件的磷素迁移通量大于其他降雨径流排涝事件。

2.3 水相各形态磷素迁移通量与施肥等因素的影响关系

不同土壤条件、土地利用类型、耕作制度和管理水平下的模拟和野外原位实验结果都表明径流中各种形态营养盐含量与土壤施肥量呈显著相关关系^[11-14],可见,化肥施用量的增加将导致农业非点源污染呈不断上升态势。

由于农田施肥对于农业非点源污染的影响,研究一次施肥后某次降雨事件的磷素径流的总迁移通量与施肥量、降雨距施肥日时隔天数以及径流通量的关系。研究期间圩区稻田磷肥施用情况及 4 次施肥之后磷素径流通量与各影响因素见表 2。

由表 2 的结果,利用 spss13.0 非线性回归分析得出相关关系,见公式 (2.3-1)。从公式中可以看出,对于同一次施肥事件,径流中总磷的迁移通量与径流通量、施肥量呈正相关关系,与施肥时间 t 呈指数递减关系,相关系数 R^2 为 0.998。

$$\theta_{TP} = [1.826 + 0.078 \times F_p \times \exp(-0.055t)] RO^{0.907}$$

公式 (2.3-1)

式中, t 为最近一次施肥日期至产流当日的历时, d; RO 为径流通量, $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; θ_{TP} 为径流中总磷的迁移通量, $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; F_p 为最近一次施加肥料中的纯磷量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

圩区径流总磷迁移通量计算值与实测值对比见图 4,横坐标是次降雨径流水相总磷迁移通量的实测值,纵坐标是采用方程 (2.3-1) 所计算的次降雨径流水相总磷迁移通量的模拟值,两者之间比较的趋势是斜率为 1、角度为 45° 的直线,由图中可以看出,总磷的决定系数较高,达 0.998,表明采用方程 (2.3-1) 计算次降雨径流水相总磷迁移通量基本可靠。

由上述拟合公式,可以得出如下结论:①施肥与

表 2 圩区稻田 4 次施肥后总磷径流量及各影响因素

Table 2 Total phosphorus runoff fluxes and other indexes of after four times fertilization in paddy field of polders

序号	施肥事件	降雨排涝事件	t/d	$F/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	$RO/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$\phi_{\text{TP}}/\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
1	F1	G1	27	50.50	0.375	1.13
2	F2	G2 \ W1	6	12.62	0.384	1.06
3		G3 \ W2	9	12.62	0.682	1.71
4		G4 \ W3	10	12.62	0.816	2.00
5	F3	G5 \ W4	4	/	0.526	1.15
6	F4	G6	5	/	0.375	0.79
7		W5	8	/	0.605	1.24
8		G7 \ W6	17	/	0.618	1.19
9		G8 \ W7	29	/	0.963	1.79

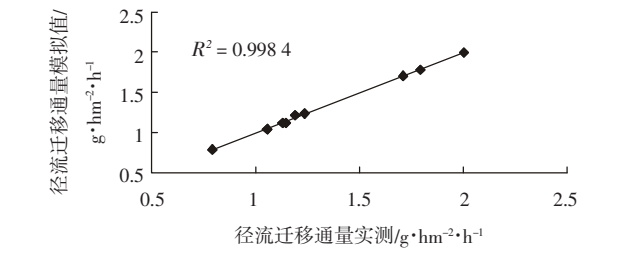


图 4 径流水相总磷迁移通量模拟值与实测值对比图

Figure 4 Comparisons on simulated and measured transportation fluxes of total phosphorus in the runoff

径流发生的时间间隔是决定径流磷素损失的关键因素;②施肥后总磷浓度显著升高,随后呈下降趋势,磷径流损失与施肥量呈显著正相关;③径流量仍是影响磷素流失通量的重要因素。

该拟合公式的缺陷在于:1)未考虑某次施肥前期施肥的残余效应;2)未考虑某次降雨前的已发生的降雨-径流的冲刷效应。

2.4 水相磷素迁移通量两种相关关系与实测通量的对比

鉴于 2.2 节的研究结果,磷素营养盐迁移通量主

要由径流量决定,采用线性函数关系对迁移通量与径流量进行拟合,如式(2.4-1)所示。

$$q_l=a\times R_d+b$$

公式(2.4-1)

式中: q_l 为污染物迁移通量; R_d 为圩区径流量; a 、 b 为回归方程的系数,可以在具体的试验小区对该系数进行调整。

另一方面,磷素营养盐迁移通量在很大程度上与施肥等因素密切相关,采用非线性函数关系对迁移通量与施肥量、降雨距施肥时隔天数以及径流量进行了拟合,如式(2.4-2)。

$$q_l=[a+b\times F_p\times\exp(-ct)]R_d^d$$

公式 (2.4-2)

式中: q_l 为污染物迁移通量; F_p 为施肥量; t 为降雨距施肥时隔天数; R_d 为圩区径流量; a 、 b 、 c 、 d 为回归方程的系数,可以在具体的试验小区对该系数进行调整。

图 5 给出了考虑施肥因素的总磷迁移通量的指数拟合方式以及仅考虑径流量的直线拟合方式,两种拟合方式下圩区各场降雨径流平均浓度与实测值的对比图。由图可以发现,考虑施肥因素的总磷迁移通量的指数拟合结果相对于仅考虑径流量的直线

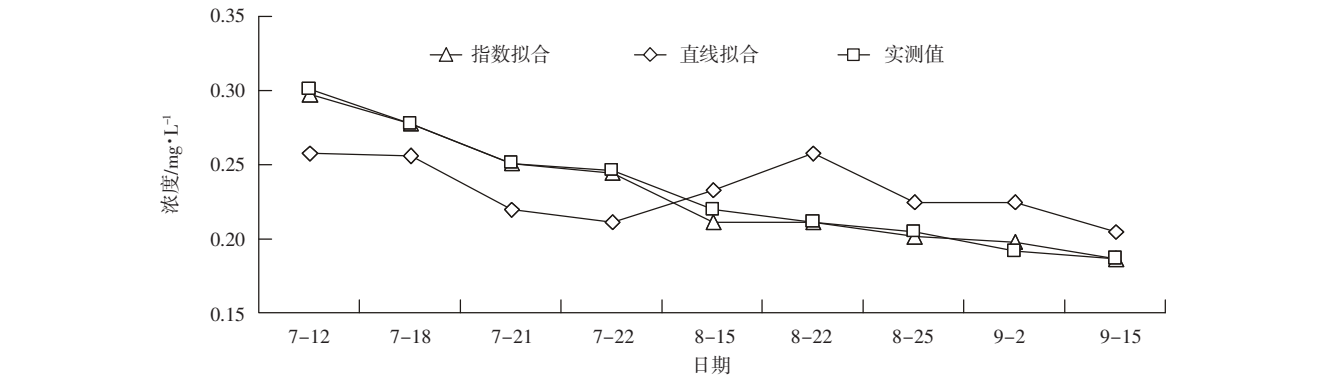


图 5 两种拟合方式下圩区各场降雨径流总磷平均浓度 EMC 对比图

Figure 5 Comparisons on EMC of total phosphorus in runoff after each rainfall using two fitting models

拟合结果,更符合实际情况。

图 2.4-1 体现了两次施肥事件 6 月 25 日及 7 月 12 日后圩区径流总磷 EMC 浓度的变化过程,指数拟合较好地体现了一次施肥后多次降雨过程的浓度递减过程。对比两种方法,指数拟合方式更符合农业非点源污染的一般规律,非点源污染对局部时段局部地区影响较大。

3 结论

本研究考虑降雨及施肥对污染物迁移通量的影响,建立了太湖流域典型圩区磷素迁移通量与施肥量、降雨径流距离施肥天数以及径流量 3 因素的定量化关系。得出如下规律:一次施肥后某次降雨径流产生的污染物迁移通量与时隔天数呈指数递减关系,与施肥量及径流量呈正比关系。对比磷素迁移通量的两种拟合关系,发现考虑施肥影响因素的指数拟合结果比仅考虑径流量的直线拟合与实测值更为吻合。

参考文献:

[1] 徐家贵,贾更华.太湖流域近期防洪战略——对《关于加强太湖流域 2001—2010 年防洪建设的若干意见》的几点认识[J].水利规划与设计,2002,02:48-51

[2] 王腊春,彭 鹏,周寅康,等.湿润地区平原圩区产流机制研究[J].南

京大学学报,1997,33 (1):156-160.

[3] 詹红丽.大型圩区水环境随机模拟模型及应用研究[D].南京:河海大学博士学位论文,2005 .

[4] 曾德付.基于 GIS 下太湖流域典型圩区农业非点源污染研究[D].南京:河海大学硕士学位论文,2005 .

[5] 黄漪平,范成新,濮培民,等.太湖水环境及其污染控制[M].北京:科学出版社,2001. 7.

[6] 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.

[7] 王 鹏.基于数字流域系统的平原河网区非点源污染模型及应用[D].南京:河海大学博士学位论文,2006 :1-150

[8] Shelley P E, Driscoll E D, Sartor J D. Probabilistic characterization of pollutant discharges from highway stormwater runoff [J]. *Sci of the Total Envir*, 1987, 59(3): 401-410.

[9] 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.

[10] 陈 欣,范兴海,李东.丘陵坡地地表径流中磷的形态及其影响因素[J].中国环境科学,2000,20(3):284-288.

[11] Olness A E, Smith S J, Rhoades E D, et al. Nutrient and sediment discharge from agricultural watersheds in Oklahoma [J]. *J Environ Qual*, 1975, 4(2): 331-336.

[12] Romkens M J, Nelson D W. Phosphorus relationships in runoff from fertilized soil[J]. *J Environ Qual*, 1974, 3(1): 10-13.

[13] Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24(5): 920-926.

[14] Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, et al. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff [J]. *J Environ Qual*, 1999, 28(1): 170-175.