

宜兴梅林小流域磷素的迁移规律

盛海峰¹, 闫明宇², 王兴平¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河北省水利水电第二勘测设计研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要 采用野外采样和室内实验分析相结合的方法, 在自然降水条件下对环太湖丘陵区梅林小流域进行农田磷素随径流迁移输出特征的实验研究。结果表明, 磷素主要以无机磷输出, 总磷和可溶性正磷酸盐浓度随径流量变化, 径流前期其浓度快速上升, 后期趋于稳定, 悬浮态磷和可溶性磷占总磷的百分比与下垫面和植被等因素有关, 出口主要以可溶性磷输出, 磷素淋溶主要是可溶性磷, 且峰值滞后于降雨。此外, 根据实验结果结合国内外理论与实践提出一些建议措施。

关键词 梅林流域; 非点源污染; 磷; 径流; 迁移规律

中图分类号: X712 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2010)02-0032-04

Law of phosphorus transportation in Meilin watershed in Yixing

SHENG Hai-feng¹, YAN Ming-yu², WANG Xing-ping¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hebei Second Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Using indoor laboratory analysis combined with field sampling, a study was conducted in the Meilin watershed in the hilly area around Taihu Lake to evaluate the characteristics of agricultural phosphorus losses with runoff under natural rainfall conditions. The results indicated that phosphorus loss was mainly in the form of inorganic phosphorus. Total phosphorus and soluble phosphate concentrations varied with runoff, increasing rapidly at the beginning of runoff and tending to be stable later on. The percentages of suspended phosphorus and soluble phosphorus in the total phosphorus were affected by the underlying surface, vegetation, and other factors. Soluble phosphorus was the main output form from outlet. Leached phosphorus was mainly in the form of soluble phosphorus, and the peak of concentration lagged behind that of runoff. In addition, some measures were proposed according to experimental results combining theory and practice from China and elsewhere.

Key words: Meilin watershed; non-point source pollution; phosphorus; runoff; transportation law

太湖流域是中国经济最发达的地区之一, 在太湖流域经济高速发展的同时, 太湖水质却不断恶化、富营养化程度逐年加剧。2007 年太湖蓝藻暴发导致无锡市饮用水被污染, 给人民生活带来极大不便, 造成严重的经济损失。

1998 年太湖“零点达标”行动以来, 点源污染已经被一定程度地控制, 非点源污染已成为太湖水环境污染的主要来源。其中, 农业化肥的大量施用, 残留在土壤中的氮、磷随径流流入湖体是造成氮、磷等超标的一个重要原因。磷作为太湖富营养化的限制

性因子, 加剧了太湖的富营养化程度。据统计, 太湖流域来自于农田面源、农村畜禽养殖业、城乡接合部城区面源 3 大来源的总磷分别为 20%、32% 和 23%^[1], 可见农田面源是太湖磷素的一个重要来源, 因此对太湖流域农田磷素流失特征的研究显得非常重要。

笔者通过对宜兴梅林小流域在自然降水条件下流量和水质的同步监测, 分析农田非点源污染物磷随径流的迁移输出特征, 为有效控制太湖流域丘陵地区非点源污染提供依据。

1 研究区概况

梅林小流域位于宜兴市东南约 5 km,距离太湖约 9 km,属典型的环太湖丘陵小流域,面积 122 hm²,流域边界清晰,可进一步分为头坳和二坳 2 个子流域,其中头坳子流域面积为 73.7 hm²,实验点就分布在头坳内。该地区海拔最高处达 60 m,最低处约 3 m。流域地形及实验点分布见图 1。

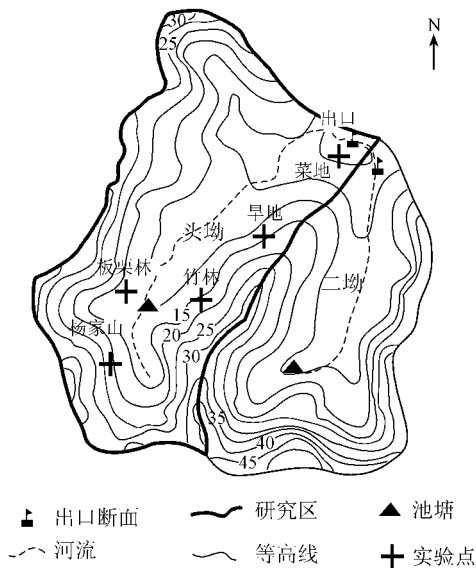


图 1 梅林小流域地形及实验点分布

该区域为典型的农业区,流域内土地利用类型多样,除了海拔较高的山坡被大片的松林和竹林覆盖外,其他以耕地为主(约占 75%),主要有水稻田、旱地、茶园、竹园、板栗园、菜地和梨园等。竹林和板栗林主要分布于丘陵坡地,坡度较大,最大达 7.5°,而旱地和菜地地势相对平坦,介于 2.5~5.0°之间。旱地主要种植玉米、油菜和花生,菜地种植大豆、丝瓜等。流域内主要土壤类型为红黄壤(旱地)和水稻土。流域内只有几户承包果园的农户,基本无工业和生活污水排放。

2 研究方法

径流小区保持原有耕作方式,实验期间记录每次施肥的种类、数量及时间。

在流域出口断面处设置 2 m 宽的薄壁矩形堰,并在堰上安装水位自动监测仪,通过记录出口断面处水位过程来推求流量过程。水样采集一般是在降雨开始后 5~15 min,每场暴雨采集 24 个水样。前 8 个水样间隔时间为 15 min,中间 8 个水样间隔时间为 30 min,最后 8 个水样间隔时间为 60 min。水样取得后采用低温保存,并在一周内完成水质分析。每次分析时先将水样静置 3 h,抽取上清液测定磷的质量浓度,包括滤前总磷(TP)、可溶性总磷(DTP)和可

溶性正磷酸盐($PO_4\text{-P}$)的质量浓度。其中 $PO_4\text{-P}$ 质量浓度作为无机磷质量浓度,DTP 质量浓度与 $PO_4\text{-P}$ 质量浓度相减可得有机磷质量浓度,滤前 TP 质量浓度与 DTP 质量浓度相减可得悬浮态磷质量浓度。滤前水样和滤后水样用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定 TP、DTP,滤后水样直接采用钼蓝比色法测定 $PO_4\text{-P}$ [21]。

3 实验结果

3.1 降雨径流对磷素输出过程的影响

选取 2005 年 5 月 14 日和 7 月 9~10 日两场降雨来分析磷素随降雨径流输出的特征,两场降雨的降雨量分别为 2.46 mm 和 3.46 mm。

图 2、图 3 显示:在产流初期,TP 与 $PO_4\text{-P}$ 质量浓度快速上升,后期径流逐渐稳定而其质量浓度呈缓慢下降的特点。结合其他场次降雨径流量和浓度变化特点,可以得出如下结论:① $PO_4\text{-P}$ 的流失量占 TP 流失量的大部分;②TP 和 $PO_4\text{-P}$ 质量浓度的变化趋势表现出随径流量变化的特征,并在径流后期随径流量逐渐趋于稳定。

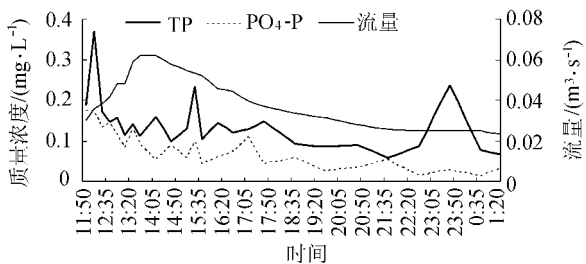


图 2 2005 年 5 月 14 日流量和磷素流失过程

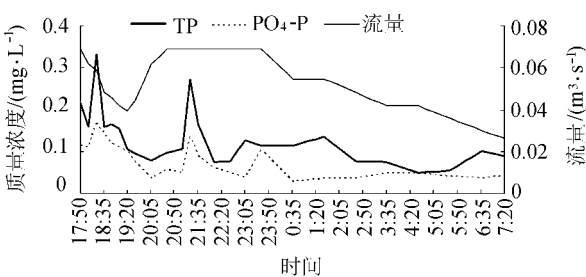


图 3 2005 年 7 月 9~10 日流量和磷素流失过程

5 月 14 日降雨事件中,TP 在 23:35 左右有一突涨点,分析其他场降雨没有发现类似情况。

进一步将径流量和磷素流失量进行相关关系分析,发现相关关系较好。径流量与 TP 的相关系数为 0.95,与 $PO_4\text{-P}$ 的相关系数为 0.9537。这说明,在小流域出口处磷素的迁移主要和径流有关。

3.2 有机磷与无机磷的迁移特征

以 2005 年 4 月 30 日降雨径流事件来分析有机磷与无机磷($PO_4\text{-P}$)的迁移特征。降雨量和前期的施肥状况如下:

降雨量为 3.72mm 降雨历时为 13.75h 前期施肥 P 折纯量为 1.2 kg/hm² 前期施肥经历天数为 89 d。

根据图 4 结合其他场降雨的分析发现 :磷的质量浓度与前期施肥量直接相关 ,磷主要以 PO₄-P 的形态随降雨径流输出 ,有机磷的输出量明显比 PO₄-P 小 ,与 PO₄-P 相比有机磷质量浓度随径流的波动更为剧烈。此外 ,观察多场降雨数据发现 PO₄-P 在产流开始时其质量浓度的变化趋势与 TP 质量浓度变化有很好的相似性。

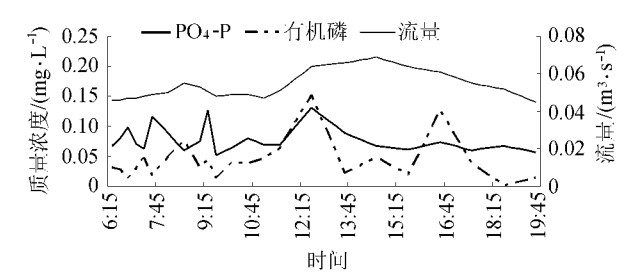


图 4 2005 年 4 月 30 日有机磷与 PO₄-P 随径流流失过程

3.3 DTP 与悬浮态磷流失规律

图 5 反映 2007 年 7 月 10 日降雨过程中杨家山、菜地及出口水样的 DTP 和悬浮态磷占 TP 百分率情

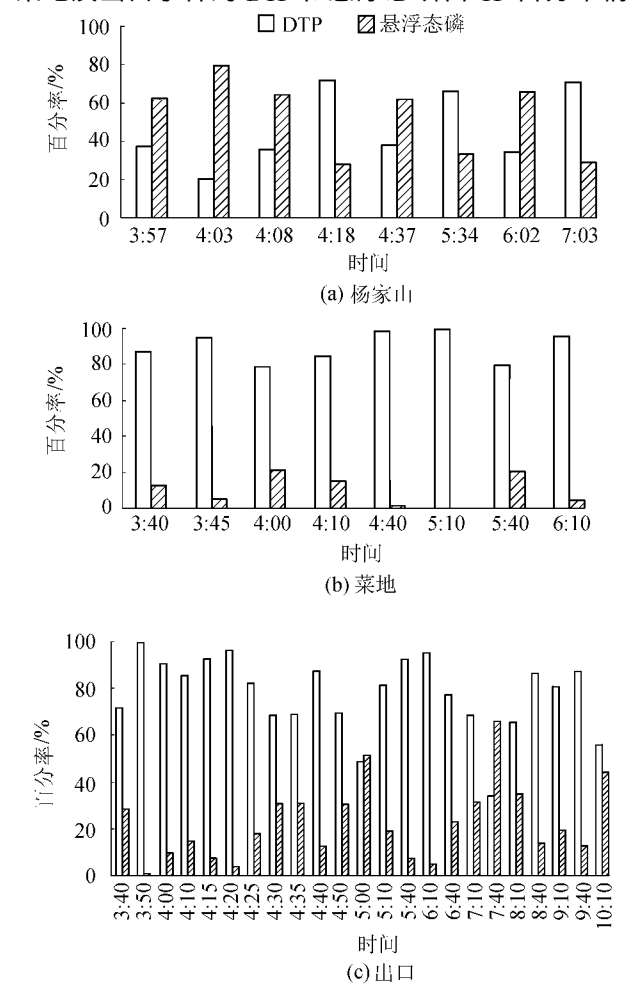


图 5 2007 年 7 月 10 日研究区 DTP 和悬浮态磷占 TP 百分率比较

况。对出口的分析可以了解整个流域磷素迁移的规律 ,而杨家山和菜地是流域中两个典型的点 ,杨家山坡度大 ,菜地受人类活动影响大 ,因此可以得出不同下垫面和人类活动条件下的迁移特点。

图 5 (a)显示杨家山地面产流水样磷主要以悬浮态磷为主。杨家山径流小区坡度很大 ,有一定的动力条件 ,且近地面植物较稀疏 ,贴地生长 ,因此有利于降雨侵蚀地面带走泥沙 ,所以悬浮态磷浓度较高。

图 5 (b)显示菜地地面产流水样磷主要以 DTP 为主。菜地受人类活动影响最大 ,经常翻耕和施肥 ,表层磷含量高 ,但地形平坦 ,因此产流带走泥沙较少 ,所以 DTP 质量浓度较高。

图 5 (c)显示出口磷主要以 DTP 为主。由于菜地离出口最近 ,因此产流初期 DTP 占绝大部分 ;产流后期悬浮态磷质量浓度有所增加 ,是由于产生悬浮态磷的坡地离出口较远 ,汇流的时间长 ,降雨径流产生的泥沙在迁移过程中又逐渐沉积下来 ,最后由于靠近出口断面的土地类型为水稻田 ,形成了一道拦截泥沙的天然屏障 ,有利于减少悬浮态磷的浓度 ,致使出现图 5 (c)中的情况。DTP 大于悬浮态磷这种情况与其他研究人员在小流域自然或人工降雨条件下的磷素迁移特征研究结果存在差异^[3-4] ,这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 ,一方面其他学者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小流域面积为 73.7 hm²。另一方面 ,设置试验场地时为了便于收集径流 ,径流小区一般建立在丘陵坡地上 ,其地形特征相对比较简单 ,而梅林小流域的地形特征则复杂得多 ,海拔较高的坡地分布在远离出口断面的流域上游 ,靠近出口断面的地势则相对平坦 ,这种地形特征有利于将被降雨径流侵蚀的泥沙在靠近出口处的水稻田湿地中沉积下来 ,使得径流中悬浮态磷的浓度有所降低。

3.4 磷素的淋溶迁移特征

磷素的淋溶迁移是磷进入地下水的唯一途径。影响农田土壤磷素淋溶的因素很多 ,如降雨量、降雨强度、降水历程、土壤结构、质地、导水率、容重、坡度等。本实验选择菜地径流小区为实验点 ,该小区位于出口处 ,坡度较小 ,相对其他小区径流损失较小 ,也就是说从影响因素坡度讲该小区容易发生淋溶迁移。2007 年 10~12 月间 10 场降雨的降雨量统计结果见表 1。

图 6 显示淋溶迁移磷素主要是 DTP ,悬浮态磷素只占小部分 ,其中 DTP 占 TP 的 62% ,而 PO₄-P 占 DTP 的 69%。淋溶迁移主要是磷素借助于水流向

表 1 2007 年 10 ~ 12 月间的 10 场降雨降雨量统计			
日期	降雨量/mm	日期	降雨量/mm
11 月 15 日	14.6	12 月 12 日	5.2
11 月 16 日	4.8	12 月 15 日	3.1
12 月 2 日	1.5	12 月 17 日	14.6
12 月 10 日	2.5	12 月 21 日	6.3
12 月 11 日	5.1	12 月 22 日	15.6

下运动,在 11 月 15~16 日有两场较大的降雨,从图 6 中可以看出 3 种磷素的浓度并没有升高,而是在 11 月 27 日前后出现了浓度峰值,说明浓度峰值明显滞后于降雨。目前关于淋溶迁移的研究较少,要想控制磷素对地下水的影响就必须对各种土壤磷素淋溶的可能性、各种土壤的结构等进行研究^[5-6]。

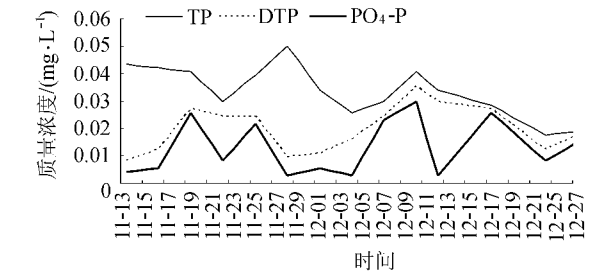


图 6 2007 年菜地地下水水样分析结果

4 结 语

4.1 结论

梅林小流域的实验结果表明环太湖丘陵区小流域的磷素输出具有如下特点。

a. TP 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的变化趋势表现出随径流量变化的特征,径流前期其浓度快速上升,径流后期其浓度随径流量逐渐趋于稳定。

b. 磷素主要以 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的形态随降雨径流输出,在产流开始时 $\text{PO}_4\text{-P}$ 质量浓度的变化趋势与 TP 有着很好的相似性;有机磷的输出量只占 TP 的一小部分,与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 相比有机磷浓度的波动较为剧烈。

c. 出口产流初期,磷素大部分是 DTP,后期悬浮态磷质量浓度有上升趋势;而对于各径流小区产流,悬浮态磷与 DTP 的质量浓度与小区的下垫面条件、植被、人类活动影响等因素有关。

d. 产流前期土壤中磷素的含量越高则随径流输出磷素的量越大。

e. 磷素淋溶迁移主要是 DTP,且浓度峰值滞后于降雨。影响磷素淋溶迁移的因素较多,有待进一步研究。

4.2 建议措施

为有效控制太湖流域丘陵区农业非点源污染,根据国内外理论与实践经验,结合实验结论提出以下建议。

a. 科学区划、合理利用土壤资源,宜林则林,宜

农则农,减少水土流失量,增加肥料的利用效率。

b. 政府应该尽量减少、禁止靠近河湖以及水源地的耕作,或者建立相应规模的终端水处理工厂,保证进河、湖水的水质。

c. 积极研究推广科学、合理、经济的耕作和施肥方式与适当时间^[1],尽量避免雨前施肥,严格控制肥料、农药的使用量。

d. 加强水管理,合理灌溉,避免大水漫灌,减少农田排水量。水分是磷素淋溶的介质,减少多余的水分向土壤下部及土体外的渗透,是减少磷素淋溶的根本举措,要大力推行节水灌溉。

e. 参考国内外流域生态补偿的成功案例^[7-8],探索太湖流域生态补偿机制,建立农村专项生态补偿基金,对农民因保护环境、减少非点源污染产生的损失进行补偿,保证其保护环境行为的积极性与长效性。

致谢:非常感谢河海大学水文水资源学院博士生刘宏伟在本实验过程中给予的帮助。

参考文献:

[1] 张维理,徐爱国, KOLBE H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策(Ⅲ):中国农业面源污染控制中存在问题分析[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7):1026-1033.

[2] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-249.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, 23(12):2689-2701.

[6] 陈子聪,张明清,吴启堂,等. 菜园土壤磷素解析模型与淋溶流失预测[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5):686-692.

[7] 李文华, IMURA H, MCNEELY J A, 等. 中国生态补偿机制与政策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 95-127.

[8] 王位中,郭日生,周海林,等. 生态补偿:国际经验与中国实践[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2007: 53-112.

(收稿日期 2009-03-26 编辑 徐 娟)

