

模拟暴雨条件下农田磷素迁移特征*

庾 刚^{1,2}, 李恒鹏^{1**}, 金 洋³, 李 燕¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 上海市苏州河环境综合整治领导小组办公室, 上海 200011)

摘 要: 开展三次重复人工暴雨试验, 研究太湖流域平原河网区农田磷素在暴雨径流过程中的迁移输出特征. 结果表明, 地表径流是暴雨径流过程农田磷素迁移的主要途径, 地表径流水相和侵蚀相磷素迁移量分别占总磷输出量的 58.50% 和 34.69%; 随壤中水流输移的磷素仅占总磷输出量的 6.81%. 磷素迁移以颗粒态为主, 约占总磷输出量的 60.73%, 溶解态磷素以无机磷酸盐输出为主, 溶解态磷素更易于在土壤中运动. 地表径流与壤中流磷素输出特征对比分析显示, 土壤对磷素具有较强的滤减作用, 尤其对总颗粒态附着磷浓度的消减效果明显, 可达 80% 以上. 尽管暴雨径流过程中磷素迁移以地表径流为主, 然而在降雨丰富的太湖地区, 一般降雨条件下壤中流是产流的主要形式, 同时壤中流溶解态磷流失占有较大的比例, 对区域水环境恶化具有重要贡献, 因此加强壤中流溶解态磷素输移和控制研究具有重要意义.

关键词: 模拟暴雨; 磷素迁移; 地表径流; 壤中流; 太湖流域

Characteristics of phosphorus transfer in farmland under artificial rainfall conditions

TUO Gang^{1,2}, LI Hengpeng¹, JIN Yang³ & LI Yan¹

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(3: *Shanghai Suzhou Creek Rehabilitation Office of the Leading Group, Shanghai 200011, P.R.China*)

Abstract: River network plain in Taihu Basin was selected as an experiment place, and triple duplication experiments had been carried out under artificial rainfall conditions to study the characteristics of phosphorus transfer from runoff of farmland. The results indicated that surface runoff was the main way of phosphorus losing from the agricultural field during artificial rainfall. The amount of losing phosphorus caused by surface flow and soil erosion of total phosphorus output accounted for 58.50% and 34.69% respectively, while that by interflow of total phosphorus output was only 6.81%. Particulate phosphorus was the primary pattern of phosphorus transfer which accounted for 60.73% of the total phosphorus losing. Inorganic phosphate was the primary pattern of dissolved phosphorus transfer. Compared with the particulate phosphorus, dissolved phosphorus can move more easily in the soil. Analysis of the characteristics of phosphorus transfer in surface runoff and interflow showed that soil could reduce the concentration of phosphorus when flows passed through it, in particular have obvious effect on reducing the concentration of TPP, up more than 80%. In addition, despite surface runoff was the primary way of phosphorus transfer in rainstorm-runoff process, in such a basin as Taihu, which has abundant rainfall, interflow is the main pattern at normal rainfall conditions, dissolved phosphorus transfer from interflow account for a large percentage of phosphorus loss, which has an important contribution to water environmental degradation of the region. Therefore it is of great significance to strengthen the research of dissolved phosphorus transfer for environment conservation.

Keywords: Artificial rainfall; phosphorus transfer; surface runoff; interflow; Taihu Basin

* 中国科学院知识创新工程重大项目课题(KZCX1-YW-08-01)和国家自然科学基金项目(40871238)联合资助. 2008-07-17 收稿; 2008-09-27 收修改稿. 庾刚, 男, 1980 年生, 硕士研究生; E-mail: gtuo@163.com.

** 通讯作者; E-mail: hpli@niglas.ac.cn.

磷素过量输入是水体富营养化的直接原因之一^[1]. 农业生产中, 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^[2], 成为流域非点源污染的重点控制目标. 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. 鉴于颗粒态磷和侵蚀物在磷素传输过程中的重要作用, 在流域研究及实际监测项目中, 以溶解态磷素传输为主的壤中流传输过程通常被忽视^[3]. 一般认为土壤中磷素在壤中流中的传输比例不大, 地表径流和土壤侵蚀是磷素迁移的主要途径^[4-6]. 长期以来, 国内外对磷素迁移传输及其污染控制研究多集中于地表径流过程^[2]; 然而, 20 世纪 90 年代以后, 许多试验研究发现壤中流对磷素迁移有重要作用^[7], 如在英国洛桑试验站长期土壤肥料试验地(1843 年开始), Heckrath 和 Brookes 等对 65cm 下排水管中排出水分析发现, 水中磷素浓度很高, 占排水中总磷含量的 66%–86%, 且以可溶的反应性无机磷(MRP)为主要成分^[8]. 研究证实, 随壤中水流输入的磷素是导致湖泊和河流富营养化的重要营养物质来源之一^[9-11], 特别是在地表水流处于低流动性的条件下, 壤中流在磷素输移过程中的重要性将增加^[3]. 在农业高度集约化的太湖平原河网地区, 雨量丰富, 土壤含水量高, 壤中流在整个径流成分中占有较大的比重, 在本地区进行磷素产出研究, 有必要考虑壤中水流磷素的迁移过程. 本文通过人工暴雨试验, 从地表径流与壤中水流两个方面来探究农田磷素的产出迁移规律, 为太湖地区农田磷素流失的合理估算及有效控制提供科学依据.

1 研究区与研究方法

1.1 试验点自然条件

试验区位于太湖北部平原河网区的鸿声镇(31°31'N, 120°30'E), 高程为 4.3m, 距太湖岸线约 11km, 地下水埋深 65cm 左右. 该区属亚热带北部湿润季风气候区, 年平均降水量 1100–1200mm, 雨期(5–9 月)降水占年降水的 60%左右. 本区为稻麦轮作区, 其沟壑密布, 地表径流与壤中流流程较短, 水流能快速汇入沟渠并进入河湖水体. 试验选择太湖地区分布面积较广的黄泥土作为供试土壤^[12], 整个土壤剖面均为壤质粘土, 其基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤理化性质

Tab.1 Physical and Chemical properties of tested soil

土层	土层厚度 (cm)	土壤结构性质	有机质 (g/kg)	容重 (g/cm ³)	pH	速效磷 (g/kg)
耕作层	0–14	屑粒状结构, 空隙多, 有大量根系分布	37.83	1.23	6.12	107.4
犁底层	14–28	块状结构, 结构较为紧实	29.83	1.34	7.00	12.67
犁底层以下	28 以下	棱块状结构, 较为湿润, 有少量结核	10.30	1.47	7.30	3.13

1.2 试验设计

试验采用原状土模拟方法, 采样时间为小麦收割后水稻尚未种植期, 农田地表尚未蓄水. 试验土体为长 1m × 宽 1m × 高 0.65m 的单元土体(试验装置简图如图 1 所示), 取土样时先挖 0.5m × 0.5m × 0.65m 的土体, 尽量保持土壤的原有结构, 4 个土块拼入试验槽中, 用泥弥合槽壁和土块之间的缝隙, 并适当压紧, 试验槽数目为 3 个, 土块移入试验槽后, 在自然状态放置 1 个月使土体恢复自然特征. 分别在距试验槽表层土壤 0–5cm、20cm 及 60cm 处设置导流管和导流槽, 收集地表径流及不同土层的侧渗壤中流, 同时在试验槽底部每 20cm² 开一个孔径为 2cm 的孔, 以收集下渗的壤中流.

人工模拟降雨试验采用中国科学院水土保持研究所研制的 BX-1 型野外便携式人工降雨器, 降雨高度为 2.4m, 有效降雨面积为 2m × 5m, 降雨均匀系数在 80%以上. 根据当地降雨历史资料中大暴雨的雨量水平, 设计试验雨强为 1.5mm/min. 为缩短每次试验时间, 试验前将土体充分湿润但未产流, 人工降雨时长为 80–100min/次. 记录初始产流时间, 根据产流的大小设定采样频率分别为: 地表径流 6min/次、20cm 处侧渗壤中流 20min/次、60cm 处侧渗壤中流产流极少, 和下渗流合并, 10min 采样 1 次. 试验重复 3 次, 为减小试验随机误差, 取 3 次试验结果的平均值作为结果分析数据.

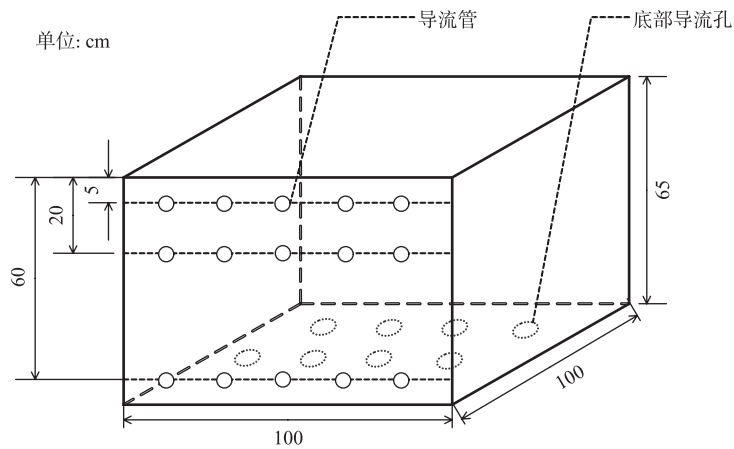


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment

1.3 水样分析与测试

所采地表径流水样静置 3h, 取上层清液测定地表径流水相磷素含量(包含溶解态磷和悬浮颗粒态磷), 同时收集水样沉积物, 用于测定径流侵蚀相磷素含量; 壤中流的侵蚀物极少, 仅测定水相磷素含量. 将径流水相样品分为两部分, 其一用于直接测定总磷(TP), 剩下部分经 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜过滤处理后用于溶解态磷(TDP: 又分为无机磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)和溶解性有机磷(DOP)测定. 测量方法为 TP 和 TDP 采用过硫酸钾氧化, 紫外分光光度法测定, TPP 可用差减法算出; 地表径流侵蚀物相进行风干、称重后, 用凯氏法测定总磷含量, 并用中国标准中心提供的标样进行质量控制.

2 结果与讨论

农田磷素迁移主要以水流迁移作为动力, 通过地表径流与壤中水流两种传输方式实现的, 其具体作用方式主要有地表径流水相的迁移和侵蚀相搬运、壤中流淋溶迁移作用 3 种. 结合人工暴雨径流试验数据, 从磷素迁移过程来分析其产出规律.

2.1 地表径流中磷素迁移特征

农田表层磷素通过溶于水相和以颗粒附着态被水流携带而随地表径流运动, 即地表径流水相磷素迁移; 同时由于降水的溅蚀及地表径流的冲刷侵蚀作用, 表层土壤被剥蚀、搬运, 被侵蚀土壤中的磷素随地表径流搬运的侵蚀物(中粗颗粒态)而迁移, 即地表径流侵蚀物相磷素迁移.

2.1.1 地表径流水相磷素迁移特征 地表径流水相磷素以溶解态和颗粒态随水流迁移. 根据 3 次试验平均序列, 作人工暴雨地表径流及 TP、TPP、TDP、DOP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 输出历时曲线, 如图 2 所示. 试验结果显示, 暴雨径流过程中, 降雨初期由于土壤尚未达到饱和, 降雨首先需要满足土壤蓄水, 入渗量大, 地表产流量较小, 随着土壤含水量达到饱和, 开始产生壤中流, 加上降雨对地表土壤的击实结皮作用, 水分下渗率降低并趋于饱和土壤的稳定下渗率, 因而, 地表径流的径流-时间曲线呈现出暴雨初期地表径流量逐渐增大, 随后逐渐趋于稳定的特征^[13]; 而地表径流中磷素的迁移特征则与地表径流产出特征相异, 地表径流中总磷的输出浓度随着时间延续而减小, 并逐渐趋于稳定, 其原因在于径流早期, 土壤表层磷素相对富集, 随着径流的搬运, 表层土壤中磷素的含量降低, 随着径流与土壤的磷素的交换作用逐渐趋于平衡, 径流中磷素浓度逐渐稳定, 因而地表径流中磷素的流失特征表现出初期随时间增长, 地表径流量增加而磷素输出浓度反而降低, 以后二者的输出均渐趋平稳.

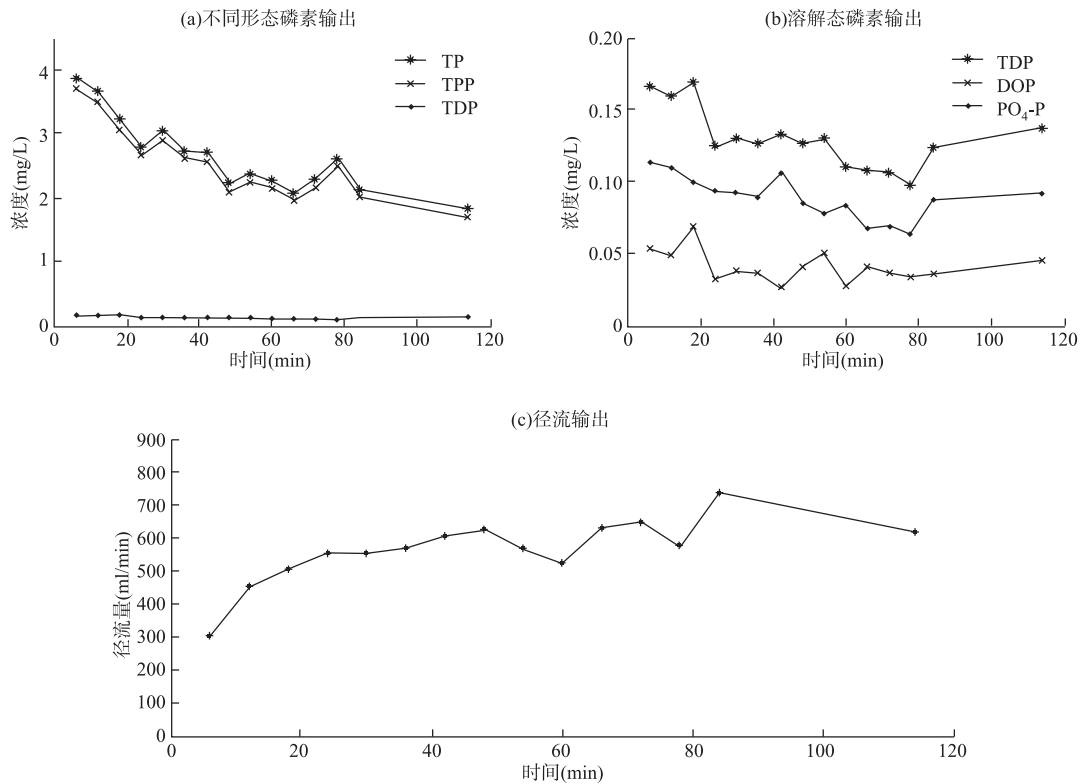


图2 地表径流水相磷素迁移特征

Fig.2 The characteristics of phosphorus migration in surface flow

从磷素输出形式上看, 颗粒态附着磷在地表径流水相磷素迁移量中占有绝对比重. 在磷素迁移过程中, 颗粒态磷素输出浓度占地表径流水相总磷输出浓度的比例基本稳定在 92.5%–96.3%之间, 是该水相磷素输出的主导类型. 从各类型磷素输出趋势上看, 颗粒态附着磷在磷素输出过程中, 其浓度变化近乎与总磷同步; 而地表径流水相中溶解态磷的产出量一直较少, 并且其浓度变化在整个地表径流产出过程中均较为平稳, 其中无机磷酸盐为可溶态磷素输出的主要形态, 其输出浓度约为溶解态磷输出浓度的 60%–80%. 试验显示, 在模拟暴雨径流过程中, 地表径流水相磷素输出以颗粒态附着磷为主, TP 输出浓度为 2.65mg/L, 其中 TPP 平均输出浓度为 2.52mg/L, 占地表径流水相 TP 输出量的 94.61%; 同时, 无机磷酸盐是可溶态磷素输出的主要形式.

2.1.2 地表径流侵蚀物相磷素迁移特征 地表径流侵蚀相磷素的迁移主要是在降雨溅蚀及地表径流冲刷作用下, 表层土壤侵蚀颗粒物被水流搬运, 同时附着在这些侵蚀物上的磷素因此被迁移, 造成磷素的流失. 由图3不难发现, 磷素输出浓度曲线(TP)与地表径流侵蚀物(SS)产出浓度曲线几乎同比变化, SS和TP的产出浓度分别从径流开始6min时的2.33g/L、2.92mg/L逐渐递减, 35min以后逐渐稳定, 稳定后SS和TP的平均输出浓度分别为1.37g/L和1.46mg/L, 只有在试验末期由于降雨的变化和径流的减小, 二者输出浓度同趋势下降, 产流开始84min以后SS和TP的平均浓度分别降至0.94g/L、1.05mg/L. 试验结果显示, 伴随土壤侵蚀物迁移而流失的磷素与侵蚀输沙量之间的高度正向相关性; 同时侵蚀相磷素输出浓度在时间上表现出产出初期随时间增加而减小, 以后逐渐趋于稳定的总体特征, 其原因在于侵蚀相磷素输出与地表径流的产出同步, 产流前裸土表面存在着较多粒径较小的松散堆积物, 产流开始后, 这些松散颗粒成为地表径流携带泥沙的物源, 并随着时间的增加而这些堆积物因被流水搬运而减少, 同时由于降

雨的击实土壤表皮, 也造成土壤抗蚀性增强, 故地表径流搬运侵蚀物 SS 的量随时间变化而减小, 并逐渐趋于稳定. 地表径流侵蚀相磷素输出历来被认为是磷素迁移的关键途径之一, 在本实验暴雨径流过程中, 地表径流侵蚀相磷素的输出量仅次于地表径流颗粒态磷素输出量, 占据了总磷输出量的 34.69%, 是农田磷素输出的第二大流失源. 结果表明加强水土流失防治对由磷素迁移而产生的非点源污染具有较好的控制作用.

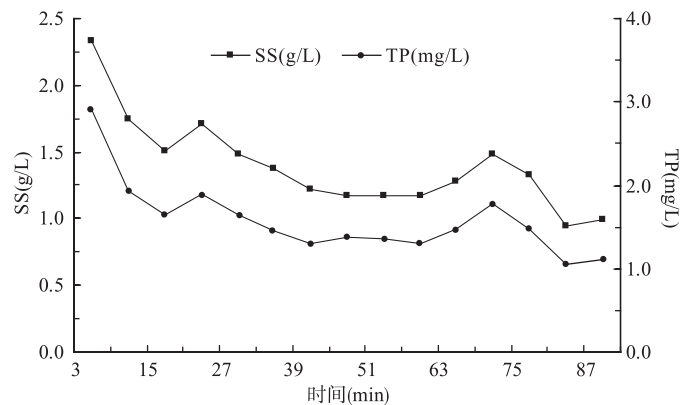


图 3 地表径流侵蚀物相磷素迁移特征

Fig.3 The characteristics of phosphorus migration from soil erosion

2.2 壤中流水相磷素迁移特征

壤中水流在土壤体系内的运动十分复杂, 受土壤内部结构和组分分布的影响, 土层结构和土壤元素分布的不均匀性强烈影响着土壤中磷素的迁移转化特性^[14]. 磷素在壤中的迁移形式多样, 主要以溶解态和胶体结合态两种形态随壤中水流而运动^[15]. 分析试验土体壤中流流量及磷素输出特征曲线(图 4)可知, 5-20cm 及 20-60cm 土层, 其单位土层厚度壤中水流平均径流量分别为 6.67ml/(min·cm)和 5.70ml/(min·cm), 尽管 5-20cm 土层仅收集了该层的侧渗壤中流, 其单位土层厚度输出的径流平均量仍较 20-60cm 土层大, 说明结构相对疏松的上层土壤较结构致密的下层土壤更利于壤中水流的运动和输出; 同时, 由于磷素在壤中的迁移依赖于水流, 与壤中水流类似, 在暴雨径流过程中 5-20cm 土层与 20-60cm 土层平均磷素输出浓度分别为 0.71mg/(L·cm)和 0.51mg/(L·cm), 上层土壤的磷素输出浓度大于下层.

从试验中各土层不同形态磷素迁移的特征上来看, 在 5-20cm 土层和 20-60cm 土层中, 溶解态磷素输出均以可溶性磷酸盐($PO_4\text{-P}$)为主, 占溶解态磷素输出量的 65%-92%左右, 显示出土壤对溶解态有机磷(DOP)的吸持固定作用强于无机磷酸盐, 后者更易进入深层土壤. 此外, 试验结果显示, 上下两层土壤中磷素迁移均以颗粒态附着磷迁移为主, 且颗粒态磷素输出仍占较大的比例, 约为壤中流磷素输出浓度的 70%以上, 这可能与试验土层受到扰动、内部存在裂隙有关, 使得颗粒态磷素沿孔隙随优势水流迁移, 今后需要加强原位试验的研究工作. 从壤中径流量与磷素产出关系可以看出, 尽管 20-60cm 土层中侧渗及下渗壤中流量高于 5-20cm 土层侧渗壤中流 1 倍以上, 然而其产出的磷素浓度却较其上层土层低, 浓度较上层土壤降低 30%左右, 显然, 土壤内部结构对磷素的吸持滤减效应明显.

2.3 地表径流与壤中流磷素迁移特征比较分析

不同形态磷素在地表与壤中的迁移特征不同, 对比其在不同传输路径中的迁移差异, 有利于发现农田磷素迁移规律. 图 5 是地表径流与壤中流水相 TP、TPP、TDP 迁移特征图.

2.3.1 地表径流与壤中流总磷输出特征对比分析 分析地表径流与壤中流径流量及磷素输出特征关系(图 5)可知, 在暴雨径流过程中, 地表径流在总径流中所占比重较大, 约为 66.73%, 壤中水流约占总径流量的 33.27%; 由于磷素迁移随水流而运动, 不同来源的总磷输出特征差异明显, 地表径流的总磷输出表现为初期较高, 以后逐渐降低并趋于稳定, 壤中流磷素输出浓度则一直相对稳定; 地表径流中总磷输出浓度较壤中

流高, 其平均浓度为 2.65mg/L; 壤中 5-20cm 及 20-60cm 土层磷素平均输出浓度分别为 0.71mg/L、0.51mg/L,

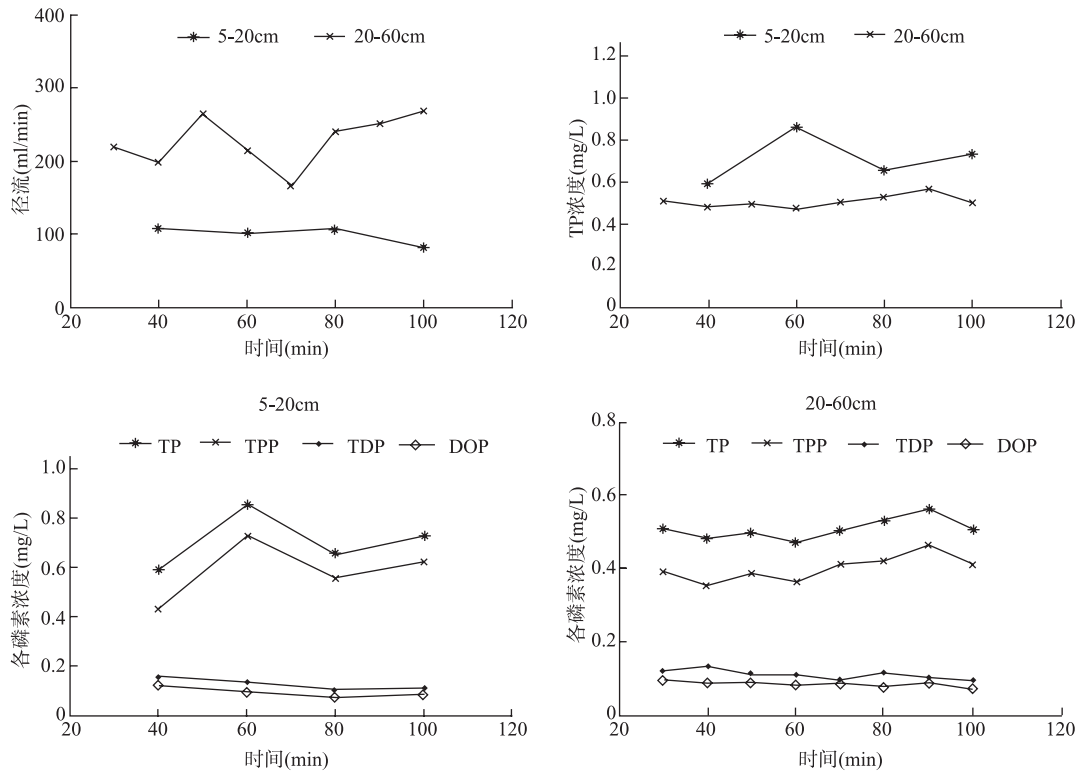


图 4 壤中流磷素产出特征

Fig.4 The characteristics of phosphorus migration from interflow

土层垂向磷素输出浓度依次递减, 分别降低了 54.13%和 28.70%, 显示出土壤对磷素吸附作用明显. 从磷素输出量来看, 地表径流是磷素输出的主要途径, 占总磷输出量的 93.19%, 其中地表径流水相和侵蚀相磷素输出量分别占总磷输出量的 58.50%和 34.69%; 壤中磷素输出量相对较少, 5-20cm 及 20-60cm 土层磷素输出量分别占磷素输出总量的 2.56%、4.25%.

2.3.2 地表径流与壤中流不同形态磷素迁移特征对比分析 不同存在形态的磷素, 其理化性质的差异决定了其迁移规律各异. 在整个暴雨径流过程中, 91.13%的颗粒态磷素通过地表径流输移, 且其在地表径流与壤中流中的输移浓度变化明显, 颗粒态磷在地表径流及壤中流的平均输出浓度分别为 2.52mg/L、0.50mg/L; 具体原因在于地表径流和壤中流的水动力条件差异较大, 地表径流流量大, 流速快, 具有较大的动能, 能够携带大量的颗粒态的磷, 而壤中流速缓慢, 特别是土壤对颗粒态磷素的吸持固定作用, 极大消减了颗粒态磷素的输出浓度, 降幅约为 80.18%. 溶解态磷迁移与颗粒态磷迁移呈现出完全不同的特征, 地表径流、5-20cm 土层、20-60cm 土层输出的溶解态磷素的平均浓度依次为 0.130mg/L、0.124mg/L、0.109mg/L, 溶解态磷素浓度在土层中的浓度变化并不显著, 显示出溶解态更易于在土壤中输移. 试验中, 通过地表径流与壤中流迁移的溶解态磷素占其总迁移量的比重分别为 68.57%和 31.43%; 尽管在暴雨径流过程中溶解态磷素迁移仍以地表径流为主, 然而在降水丰富、地下水埋深较浅的太湖河网地区, 产流模式以蓄满产流为主, 一般降雨条件下壤中流占有较大的比例, 溶解态磷素随壤中水流迁移现象更为普遍, 因此, 在该地区进行磷素迁移特征研究应该考虑磷素随壤中水流的迁移过程. 同时, 由于溶解态磷素更易于被水生生物所利用, 可能导致藻类过度生长等生态环境问题, 从这个意义上讲, 研究壤中流中磷素的迁移机理, 对控制溶解态磷素的传播更具有现实意义.

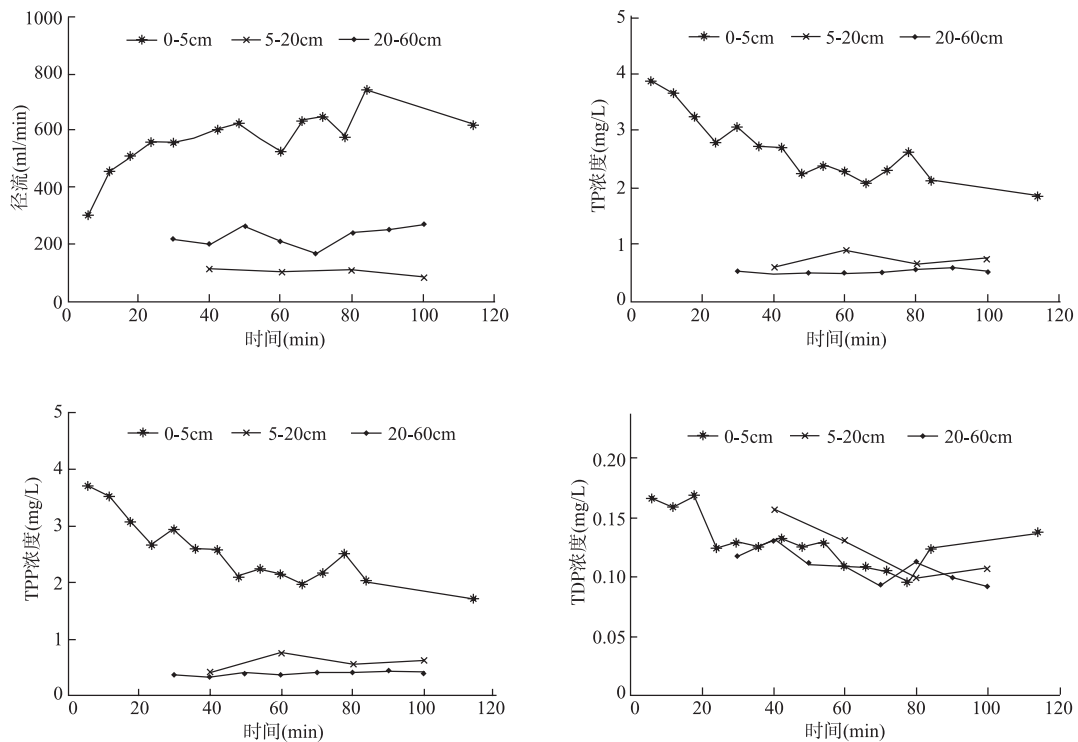


图 5 地表径流与壤中流水相 TP、TPP、TDP 迁移特征对比
Fig.5 Comparison of Phosphorus migration from surface flow and interflow

3 结论

(1)暴雨径流过程中, 地表径流与壤中流中磷素迁移特征差异显著, 地表径流磷素输出浓度表现为降雨初期较高而后逐渐趋于稳定的特征; 壤中流磷素浓度在整个径流过程中保持相对稳定.

(2)土壤对磷素的吸持滤减效应明显. 在暴雨径流过程中, 土壤对总磷的吸持固定作用能降低其浓度近 70%, 尤其对颗粒态附着磷滤减作用显著, 降低其浓度比例达 80.18%.

(3)磷素输出形态分析表明, 磷素迁移以颗粒态为主, 约占总磷输出量的 60.73%; 溶解态磷素迁移以无机磷酸盐为主, 无论在地表径流还是在壤中流中, $PO_4\text{-P}$ 的输出浓度均占 TDP 输出的 60%以上; 与颗粒态磷素相比, 溶解态磷素更易于在土壤中运动.

(4)地表径流与壤中流磷素输出结果对比分析显示: 地表径流是暴雨径流过程农田磷素迁移的主要途径, 地表径流水相和侵蚀相磷素迁移量分别占总磷输出量的 58.50%和 34.69%, 随壤中水流输移的磷素仅占总磷输出量的 6.81%. 尽管在暴雨径流过程中磷素迁移以地表径流为主, 然而在降水丰富的太湖地区, 一般降雨条件下, 壤中流是产流的主要形式, 因此壤中水流在磷素迁移中的作用不容忽视.

4 参考文献

[1] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰等. 农业区非点源污染潜在危险性评价——以于桥水库流域磷流失为例. 第四纪研究, 2003, 23(3): 262-269.
[2] 李 娜, 单保庆, 尹澄清等. 六叉河小流域农田土壤中磷下渗迁移过程研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1132-1138.
[3] Jennings E, Mills P, Jordan P *et al.* Seasonal patterns & effects of phosphorus. Dublin, Environmental Protection Agency I, 2003:

- 17-19.
- [4] Correll DL. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2): 261-266.
- [5] Lu RK. Principle and methods of soil-plant nutrition science. Beijing: Chemical industry press, 1997: 433-436.
- [6] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳等. 磷在稻田土壤中的淋溶和迁移模拟研究. *土壤*, 2006, 38(6): 734-739.
- [7] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测. *生态学报*, 2003, 23(12): 2689-2701.
- [8] Heckrath G, Brookes PC, Poulton PR *et al.* Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 904-910.
- [9] Brock TD, Lee DR, Janes DJ *et al.* Groundwater seepage as a nutrient source to a drainage lake, Lake Mendota, Wisconsin. *Water Research*, 1982, 16: 1255-1263.
- [10] Drew D. Agriculturally induced environmental changes in the Burren karst, western Ireland. *Environmental Geology*, 1996, 28(3): 137-144.
- [11] Hagerthey SE, Kerfoot WC. Groundwater flow influences the biomass and nutrient ratios of epibenthic algae in a north temperate seepage lake. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(6): 1227-1242.
- [12] 连 纲, 王德建, 林静慧等. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1879-1883.
- [13] 李恒鹏, 金 洋, 李 燕. 模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 6-9.
- [14] 王全久. 土壤溶质迁移特性的研究. *水土保持学报*, 1993, 7(2): 10-15.
- [15] 章明奎, 王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 282-285.

《湖泊科学》编辑委员会和编辑部对以下专家在 2008 年的审稿付出表示诚挚的感谢和崇高的敬意!

安树青	曹哲明	陈楚群	陈发虎	陈建耀	陈江龙	陈敬安	陈开宁	陈世俭	陈水森
陈伟民	陈 喜	陈宇炜	陈源高	成水平	储昭升	崔广柏	丁 静	丁士明	丁永健
董雅文	董治宝	窦鸿身	杜克平	段洪涛	范成新	高 光	高俊峰	龚志军	谷孝鸿
韩博平	郝芳华	何园球	胡传林	胡春华	胡守云	华祖林	黄国如	黄清辉	黄文钰
江 涛	姜 彤	金章东	柯长青	孔繁翔	李炳元	李恒鹏	李建宏	李金城	李仁辉
李万春	李文朝	李 炎	李一平	李 勇	李钟杰	梁 威	林小云	刘恩峰	刘兴起
刘志学	陆长梅	鹿化煜	吕 恒	吕宪国	马金珠	马荣华	马 毅	毛江玉	闵 航
闵 騫	彭平安	钱 谊	秦伯强	沈 芳	施炜纲	苏布达	苏布达	唐军武	童金苟
万成炎	王根轩	王国祥	王洪道	王洪铸	王金秋	王士禄	王苏民	王晓蓉	王雨春
王子健	吴丰昌	吴谨瑜	吴敬禄	吴庆龙	吴瑞金	吴生桂	吴艳宏	夏 军	肖羽堂
谢文星	谢永宏	熊邦喜	徐福留	徐高洪	徐 军	徐祥德	徐小清	许木启	许朋柱
薛 滨	薛 娴	闫云君	颜昌宙	颜宇宙	羊向东	杨顶田	杨 浩	杨柳燕	杨铁笙
杨永平	姚书春	尹 宇	虞孝感	袁旭音	张丹蓉	张恩楼	张 干	张虎才	张 路
张 奇	张 强	张树清	张信宝	张渊智	张运林	张兆辉	赵书河	郑丙辉	郑绵平
郑 正	周长发	周士新	周万平	周易勇	朱广伟	朱建荣	朱荫涓	左其亭	