

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 白举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征

于兴修¹, 李振炜^{1,2}, 刘前进¹, 井光花^{1,2}

(1. 临沂大学水土保持与环境保育研究所, 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂 276005; 2. 山东师范大学人口资源与环境学院, 济南 250014)

摘要: 以沂蒙山区孟良崮小流域为研究对象, 通过监测 2010 年自然降雨条件下流域出口污染物的流失状况, 选取降雨量 > 2 mm 的 10 场降雨, 分析降雨径流特征对磷素流失的影响。结果表明, 次降雨径流中总磷 (TP)、颗粒态全磷 (PP)、水溶性全磷 (DP)、水溶性无机磷 (DIP) 浓度变化与流量变化过程不一致, 浓度峰值均出现于流量峰值之前, 而磷素通量与流量变化过程较为一致, 且两者呈较好的线性关系; 次降雨径流 TP、PP、DP、DIP 的浓度最大值及平均浓度 (EMCs) 差异均较大, 其主要受降雨量、最大雨强和平均雨强影响, 与降雨历时无显著相关关系, 而浓度最小值差异较小; TP 以 PP 流失为主, DP 以 DIP 流失为主, DIP/DP 的动态变化与降雨历时、降雨量、最大雨强和平均雨强均无显著相关关系, 而 PP/TP 的动态变化与最大雨强显著相关。DIP、DP、TP 的输出受地表径流 (DR) 和基流 (BF) 的影响较大, DIP/DP 的动态变化及 DIP、DP、TP 的 EMCs 与 DR/TR (地表径流/总径流量) 存在多项式关系, 而 PP/TP 的动态变化和 PP 的 EMCs 受 DR/TR 影响较小。

关键词: 降雨径流; 磷; 非点源污染; 地表径流; 沂蒙山区

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2644-08

Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area

YU Xing-xiu¹, LI Zhen-wei^{1,2}, LIU Qian-jin¹, JING Guang-hua^{1,2}

(1. Institute of Soil & Water Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Environmental Protection of Shandong Province, Linyi 276005, China; 2. College of Population, Resource and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Relationships between phosphorus pollutant concentrations and precipitation-runoff were analyzed by monitoring pollutant losses at outlets of the Menglianggu watershed in 2010. A typical small watershed was selected to examine the runoff and quality parameters such as total phosphorus (TP), particle phosphorus (PP), dissolve phosphorus (DP) and dissolve inorganic phosphorus (DIP) in rainfall-runoff of 10 rainfall events. Precipitation was above 2 mm for all the 10 rainfall events. The results showed that the peak of phosphorus concentrations occurred before the peak of water flows, whereas change processes of the phosphorus fluxes were consistent with that of the water flows and the phosphorus flux also have a strong linear relationship with the water flows. The minimums of the phosphorus concentrations in every 10 natural rainfall events have small differences with each other, but the maximum and EMCs of the phosphorus concentrations have significant differences with each rainfall event. This was mainly influenced by the precipitation, maximum rainfall intensity and mean rainfall intensity (EMCs) and was less influenced by rainfall duration. DP and TP were mainly composed of DIP and PP, respectively. There were no significant correlations between DIP/DP dynamic changes and rainfall characteristics, whereas significant correlations between PP/TP dynamic changes and maximum rainfall intensity were detected. The production of DIP, DP, AND TP were mainly influenced by the direct runoff (DR) and base flow (BF). The EMCs of DIP, DP, TP and the variations of DIP/DP were all found to have significant polynomial relationships with DR/TR, but the dynamic changes of PP/TP and the EMCs of PP were less influenced by the DR/TR.

Key words: rainfall runoff; phosphorus; non-point source pollution; direct runoff; Yimeng Mountainous Area

磷作为水生生物的主要营养物质,是影响水体富营养化的关键因素^[1~3],从来源上看,超过 50% 淡水接纳水体中的磷负荷来自农业流域的非点源污染输出^[4],诊断磷在流域内的来源、迁移转化规律成为非点源污染过程认识与控制的焦点^[5]. 随着对农业非点源污染发生机制及控制等科学问题的重视,国内外许多学者在磷素流失特征及影响条件等方面做了许多研究,大多集中在不同降雨径流特征^[6,7]、单一和不同土地利用方式^[8~10]、土壤物理

性状^[11,12]、地形^[13,14]、管理方式^[15,16]以及耕作方式^[17,18]对磷素输出的影响. 其中降雨径流特征是影响小流域磷素输出的重要因素之一,关于降雨径流

收稿日期: 2011-10-15; 修订日期: 2011-12-23

基金项目: 山东省科技攻关项目 (2009GG10006015); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-08-0877); 水利部淮委科技项目 (SBJ2010003); 临沂市重大科技创新项目 (201011019)

作者简介: 于兴修 (1967~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为资源利用与环境效应、流域非点源污染控制技术, E-mail: yuxingxiu@lyu.edu.cn

中雨强^[19~21]、降雨量^[22]、降雨历时^[23]、径流量^[24]等单因子对磷素输出的研究已取得了丰富的成果,但关于各降雨特征因子对流域磷素输出的系统研究,特别是地表径流和基流对不同形态磷的流失动态及迁移规律影响的研究较少,难以深入探讨降雨条件下地表径流和基流对流域水环境的影响。

沂蒙山区是北方土石山区的典型代表,土壤表层疏松,夹杂石砾,人口密度大,土壤侵蚀面积达50%。目前,沂蒙山区非点源污染的研究大多集中在模拟降雨下不同耕作方式^[25]、土壤理化性质^[26]对氮磷输出的影响,缺乏自然降雨条件下流域氮磷输出特征。本研究以沂蒙山区沂河上游的孟良崮小流域为例,对2010年的自然降雨及径流进行了实地过程观测,利用10场自然降雨的过程观测资料,分析小流域磷素流失过程及输出特征,评估地表径流和基流对降雨过程中不同形态磷素输出的影响,揭示小流域的磷素流失规律,以期为沂蒙山区非点源污染的防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

孟良崮小流域位于沂河上游的蒙阴县垛庄镇(108°6'E, 35°20'N),地势东北高西南低,海拔高度174~485 m(如图1),属暖温带大陆性季风气候,年平均气温13.7℃,多年平均降水量733.4 mm,降水主要集中在7~9月。土壤以棕壤为主,土层浅薄,土质松散,极易被雨水冲刷和淋溶。运用RTK实测小流域总面积102.86 hm²,其中林地57.34 hm²,耕地21.11 hm²,果园10.96 hm²,荒山荒坡9.49 hm²,居民用地3.45 hm²,草地0.21 hm²(如图2)。

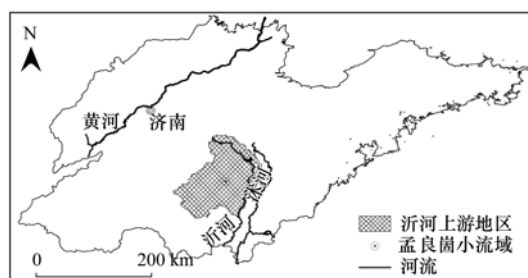


图1 孟良崮小流域位置示意

Fig. 1 Locations of Menglianggu watershed area

1.2 实验设计与样品采集

所选流域内无任何工业污染源,居住人口少,非点源磷素来源主要是当季施用的化肥和向径流中任意排放的生活污水,所有地表径流汇集后从位于流

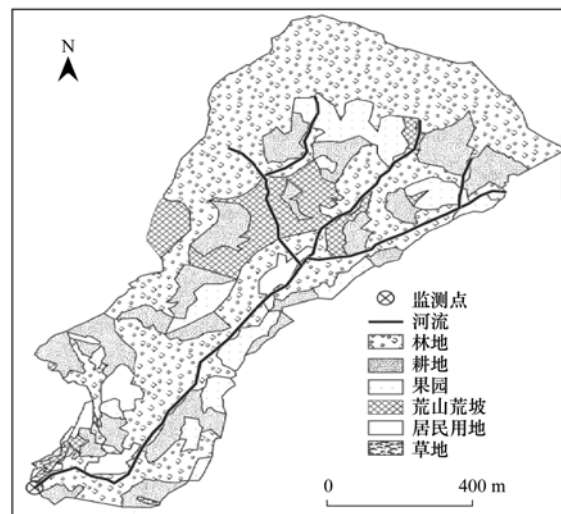


图2 孟良崮小流域土地利用类型分布示意

Fig. 2 Land use of the Menglianggu watershed area

域西南部地势最低的出口流出,流域出口处的水质状况可以代表该流域的非点源污染状况,因此采样点选择为该流域出口。降雨量的测定采用虹吸式雨量记录仪,仪器安装在孟良崮农户房顶,位置较高且周围无干扰物。流量的测定通过在流域出口处设有规则的三角堰与宽口堰,堰的底面和侧面平整、光滑,减少了对水流的影响。

流域调查与降雨径流监测于2010年7月17日到2010年10月31日的整个雨季,该流域此期间降雨量531.5 mm,占全年降水量的71.82%,共监测降雨13场,均进行监测与采样,其中本研究选取了降雨量>2 mm的10场降雨进行分析。流域出口三角堰水位开始变化后即开始人工采样,用500 mL聚乙烯塑料瓶收集径流样品,每5 min采样一次,雨量小时加密采样,降雨结束后每30 min采样一次,直至径流趋于稳定。对于历时较长的降雨,降雨过程中雨强较小或三角堰水位变化缓慢时,每30 min采样一次,人工轮流采样。分析项目包括溶解态无机磷(DIP)、溶解态总磷(DP)、颗粒态总磷(PP)、总磷(TP)等。总磷用过硫酸钾氧化法测定,将水样经0.45 μm的滤膜过滤后再用过硫酸钾氧化测出DP, DIP采用钼蓝比色法测定。径流中不同形态的磷的测定均采用分光光度法测定。其中PP的测定用差减法: PP = TP - DP 获得。

1.3 数据处理与计算方法

流量的测定通过在流域出口处设有规则的三角堰与宽口堰,根据测得水位,利用“水位-流量”经验计算公式获得。

三角堰计算公式: $Q = 1.4H^{2.5}$ (1)

宽口堰计算公式: $Q = 21.44H_a^{1.6}$ (2)

式中, Q 为流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), H 为三角堰水位(m), H_a 为宽口堰水位(m). 三角堰计算公式用于测定水位较低时($H < 0.33 \text{ m}$) 的流量, 宽口堰计算公式用于测定水位较高时($H > 0.33 \text{ m}$) 的流量.

降雨径流中的污染物平均浓度 (EMCs) 常用来评价降雨径流的污染状况^[27,28]. 其值用污染物负荷同径流总量的比值来确定: $\text{EMCs} = M/W$.

$$M = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \cdot \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i$$
$$W = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i \quad (3)$$

式中, M 为污染物总负荷(g), W 为径流总量(m^3), c_i 为污染物在样本 i 监测时的质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Q_i 为样本 i 在监测时的流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), Δt_i 是样本 i 和 $i + 1$ 的时间间隔(s).

营养盐迁移通量指单位时间内产生的营养盐迁移量; 径流通量指单位时间内产生的流量^[24]. 计算公式如下:

$$F = \sum Q_i \times c_i \quad (4)$$

式中, F 为所需计算时段内不同形态磷素的输出通

量($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$); Q_i 为第 $i \text{ min}$ 内的流量($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$); c_i 为污染物在第 $i \text{ min}$ 内的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

地表径流 (DR) 和基流 (BF) 构成了次降雨的总径流量 (TR), 基流的确定是通过在径流曲线中开始出现地表径流的点作一条水平线, 其水平线以下为基流. 用 DR/TR 的值评估地表径流和基流对降雨过程不同形态磷素输出的影响^[29,30]. 计算公式如 (5) 所示:

$$\text{DR/TR} = \sum \text{DR}_i \Delta t_i / \sum Q_i \Delta t_i \quad (5)$$

采用 K-S 方法检验数据的正态分布性, 以满足 Pearson 相关分析的数据统计假设, 数据统计分析采用 SPSS 17.0 进行.

2 结果与讨论

2.1 降雨径流特征

10 场降雨的降雨径流特征如表 1 所示, 降雨特征为: 降雨量 $4.8 \sim 105.5 \text{ mm}$, 降雨历时 $2.5 \sim 48.0 \text{ h}$, 最大雨强 $0.07 \sim 1.44 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 平均雨强 $0.01 \sim 0.43 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. 径流特征为: 最大流量 $1.23 \sim 1\,200.05 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小流量 $0.45 \sim 47.33 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, 流量的变异系数 $0.19 \sim 0.97$. DR/TR 值为 $0.30 \sim 0.95$.

表 1 10 场观测降雨的降雨径流特征¹⁾

Table 1 Rainfall runoff characteristics for 10 observed rainfalls

降雨编号	发生时间 (年-月-日)	降雨量 /mm	降雨特征			径流特征			DR/TR
			降雨历时 /h	最大雨强 /mm·min ⁻¹	平均雨强 /mm·min ⁻¹	最大流量 /L·s ⁻¹	最小流量 /L·s ⁻¹	变异系数	
0717	2010-07-17	105.5	11	0.98	0.16	339.88	3.40	0.97	0.95
0719	2010-07-19	22.9	4.6	1.44	0.08	114.52	35.52	0.38	0.53
0804	2010-08-04	4.8	6.0	0.18	0.01	1.23	0.45	0.42	0.42
0807	2010-08-07	22.3	3.2	0.76	0.12	39.51	3.59	0.70	0.68
0812	2010-08-12	83.5	3.3	1.96	0.43	1 200.05	28.63	0.95	0.84
0824	2010-08-24	16.5	12	0.10	0.02	16.68	8.53	0.23	0.31
0826	2010-08-26	52.1	34.5	0.14	0.03	54.02	14.79	0.36	0.63
0906	2010-09-06	57.9	48.0	0.36	0.02	87.58	4.43	0.91	0.80
0910	2010-09-10	17.7	10.5	0.10	0.03	87.58	47.33	0.19	0.33
1015	2010-10-15	6.7	2.5	0.07	0.04	3.22	1.82	0.24	0.30

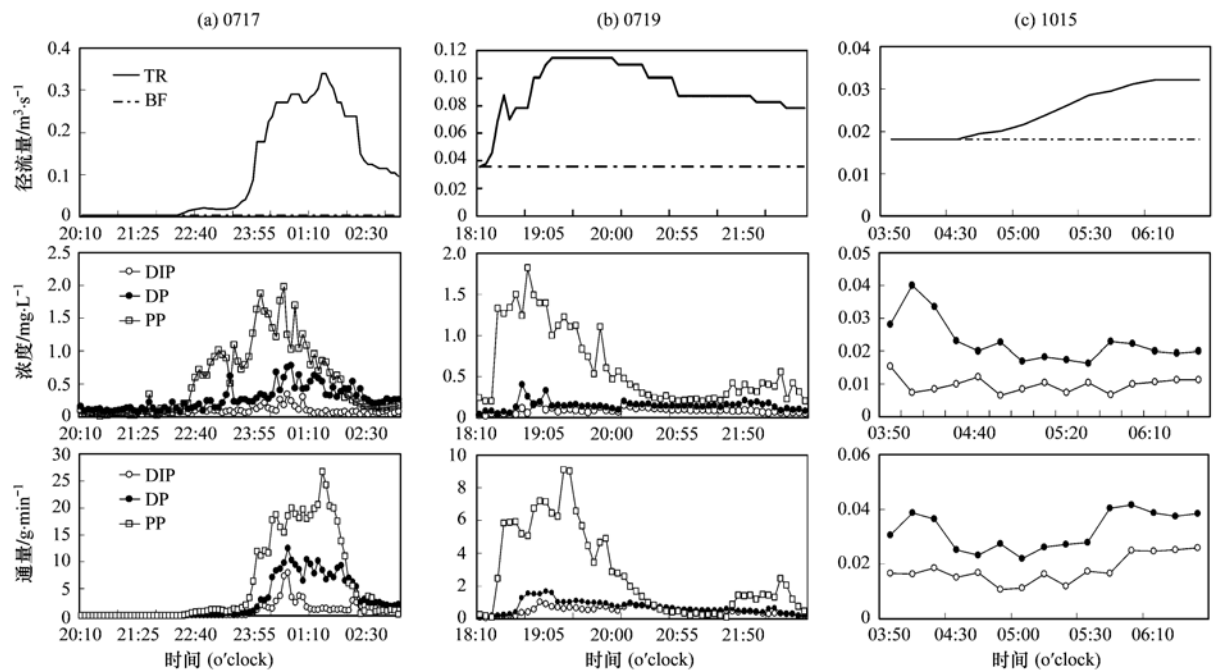
1) DR/TR 表示地表径流/总径流量

2.2 不同形态磷素的输出过程

为评估地表径流和基流对小流域输出的影响, 选取 10 场降雨中 DR/TR 最大值 0.95 (降雨编号: 0717)、中位值 0.53 (降雨编号: 0719) 和最小值 0.30 (降雨编号: 1015) 的 3 次典型降雨, 分析其浓度及通量的变化过程, 如图 3 所示.

次降雨径流中不同形态磷素浓度峰值均出现于流量峰值之前. 其中 0717 降雨径流中不同形态磷素

前期浓度缓慢增加, 至峰值后又缓慢降低, 后期趋于平稳, 均具有多峰值; 0719 降雨 PP 和 DP 迅速达到峰值又缓慢降低而趋于平稳, 具有单峰值, DIP 变化趋势平缓无明显峰值; 1015 降雨初始浓度较高而后逐渐降低趋于稳定. 而这与杨丽霞等^[19] 在不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地上各形态磷素初始阶段浓度最大且下降速度快, 而后下降速度减缓, 直到最后趋于稳定的研究结果有所差异. 3 次降雨各磷素初



1015 降雨所测 PP 浓度始终接近于 0,故只列出 DIP、DP 变化过程

图 3 降雨径流中不同形态磷素浓度及通量变化过程

Fig. 3 Process of phosphorus concentration and fluxes in rainfall runoff

始浓度都较低,随着降雨的进行浓度出现不同程度的增加,说明该小流域基流状态下磷素浓度较小,由降雨对施肥地表的冲刷引起的磷素流失在小流域磷素流失中占主导地位. 3 次降雨中 DR/TR 值越大,不同形态磷素浓度的变幅越大,而 DR/TR 值越小,不同形态磷素浓度变化越平缓,由此可以看出 DR/TR 值与不同形态磷素浓度可能存在一定的相关关系.

次降雨径流中不同形态磷素的通量变化与流量变化过程较为一致,特别是不同形态磷素通量峰值同流量峰值在同一时刻出现,其同步性高于浓度同流量的变化过程. 0717 降雨不同形态磷素通量到峰值及趋于平稳的过程相当缓慢,均具有单峰值;

0719 降雨 PP 通量到其峰值过程迅速,趋于稳定过程缓慢,DP 到其峰值迅速但在峰值状态停留时间较长,而后趋于稳定, DIP 变化平缓有一较小峰值但不明显;而 1015 降雨不同形态磷素通量初始阶段呈波浪状起伏,随后到达峰值趋于稳定. DR/TR 值对不同形态磷素通量的影响同对浓度的影响基本是一致的,DR/TR 值越大,不同形态磷素通量的变幅越大.

2.3 不同形态磷素的输出特征

2.3.1 浓度输出特征

表 2 给出了 10 次降雨中不同形态磷素浓度最小值、最大值及 EMCs. 不同形态磷素浓度的最小值

表 2 10 场降雨不同形态磷素浓度¹⁾/mg·L⁻¹

Table 2 Phosphorus concentrations of 10 rainfall events/mg·L⁻¹

降雨编号	DIP			DP			PP			TP		
	最小值	最大值	EMCs	最小值	最大值	EMCs	最小值	最大值	EMCs	最小值	最大值	EMCs
0717	0.01	0.60	0.27	0.07	0.84	0.42	0.02	1.98	0.80	0.10	2.19	1.22
0719	0.02	0.18	0.08	0.04	0.92	0.12	0.01	1.68	0.43	0.13	1.82	0.55
0804	0.01	0.14	0.02	0.02	0.11	0.04	—	—	—	0.02	0.11	0.04
0807	0.03	0.36	0.19	0.04	0.37	0.21	0.01	0.51	0.33	0.06	0.74	0.54
0812	0.01	0.50	0.22	0.02	0.61	0.26	0.02	1.66	0.74	0.07	1.98	0.99
0824	0.01	0.06	0.03	0.02	0.34	0.05	0.01	0.17	0.02	0.04	0.46	0.07
0826	0.01	0.15	0.05	0.03	0.24	0.07	0.01	0.09	0.04	0.03	0.28	0.11
0906	0.01	0.26	0.10	0.02	0.30	0.11	0.01	0.20	0.06	0.02	0.4	0.17
0910	0.01	0.08	0.03	0.02	0.15	0.06	—	—	—	0.02	0.15	0.06
1015	0.01	0.03	0.01	0.01	0.04	0.02	—	—	—	0.01	0.04	0.02

1) “—”表示所测 PP 含量极低,接近于 0

在 0.01 ~ 0.13 mg·L⁻¹ 之间波动, 差异较小; DIP、DP、PP 和 TP 最大值在 0.03 ~ 0.6、0.04 ~ 0.92、0.09 ~ 1.98 和 0.04 ~ 2.19 mg·L⁻¹ 之间波动, 差异较大; EMCs 值的变化范围为 0.01 ~ 0.27、0.02 ~ 0.42、0.02 ~ 0.80 和 0.02 ~ 1.22 mg·L⁻¹, 差异居中. 由此可得, 次降雨不同形态磷素浓度最小值较少受外界条件的影响, 而不同形态磷素浓度最大值和 EMCs 可能受降雨特征等外界条件的影响较大.

为定量说明不同形态磷素浓度的最大值及

EMCs 受降雨历时、降雨量、平均雨强和最大雨强的影响程度, 运用 Pearson 法计算其相关系数, 如表 3 所示. 次降雨径流中 DIP 和 TP 的最大值与降雨量、最大雨强和平均雨强均呈显著相关关系, 而 DP 和 PP 最大值只与最大雨强显著相关, 由此可见最大雨强对不同形态磷素浓度最大值的出现均有影响, 出现这种现象的原因可能是最大雨强时对地表冲击作用较大, 土粒易分散飞溅, 泥沙携带 PP 以及冲刷产生的 DP 进入径流产生浓度高峰.

表 3 不同形态磷素浓度与降雨特征的相关分析¹⁾

Table 3 Correlation between phosphorus concentrations and rainfall characteristics

指标	DIP(<i>n</i> = 10)		DP(<i>n</i> = 10)		PP(<i>n</i> = 7)		TP(<i>n</i> = 10)	
	最大值	EMCs	最大值	EMCs	最大值	EMCs	最大值	EMCs
降雨历时	-0.06(0.87)	-0.12(0.74)	-0.18(0.62)	-0.15(0.69)	-0.61(0.15)	-0.62(0.14)	-0.28(0.43)	-0.28(0.44)
降雨量	0.86**(0.00)	0.81*(0.04)	0.59(0.07)	0.87**(0.01)	0.54(0.21)	0.65(0.12)	0.71*(0.02)	0.80**(0.01)
最大雨强	0.71*(0.02)	0.72*(0.02)	0.804*(0.05)	0.64*(0.05)	0.85*(0.02)	0.84*(0.02)	0.90*(0.00)	0.55(0.10)
平均雨强	0.73*(0.02)	0.73*(0.02)	0.50(0.14)	0.64*(0.05)	0.64(0.13)	0.78*(0.02)	0.72*(0.02)	0.62(0.06)

1) * 表示在 *P* = 0.05 水平上显著, **表示在 *P* = 0.01 水平上显著; 括号内为对应 *P* 值, 下同

DIP 和 DP 的 EMCs 与降雨量、最大雨强和平均雨强均呈显著相关关系, 随降雨量、最大雨强和平均雨强增大而增大, 出现这种现象的原因可能是降雨量以及雨强的变大, 更多的 DIP、DP 进入径流, 径流携带 DIP、DP 的输出量变大, 其输出量增大对 EMCs 的影响要大于因流量变大发生稀释产生的影响; PP 的 EMCs 与平均雨强和最大雨强显著相关, TP 只与降雨量显著相关, 而在四川盆地^[9] TP 的 EMCs 随着降雨量的增加而减小, 其较小的原因是由于流量的变大发生稀释和污染物的源耗竭效

应^[31].

2.3.2 不同形态磷素迁移通量输出特征

由 3 次典型降雨的磷素输出过程分析可知不同形态磷素输出通量同流量具有良好的共变趋势, 其同步性高于浓度同流量的变化趋势. 通过对 10 次降雨流量与不同形态磷素浓度及通量 Pearson 相关分析(表 4)也可以看出, 不同形态磷素通量与流量均显著相关, 其 DIP、DP、PP 和 TP 通量与流量相关系数分别高达 0.919、0.918、0.924 和 0.926, 相关关系远优于浓度同流量的关系.

表 4 流量与不同形态磷素浓度及通量的相关分析

Table 4 Correlation between flow and phosphorus concentrations, fluxes

指标	DIP(<i>n</i> = 444)	DP(<i>n</i> = 444)	PP(<i>n</i> = 386)	TP(<i>n</i> = 444)
流量与浓度	0.446(0.11)	0.468(0.07)	0.485(0.06)	0.526*(0.03)
流量与通量	0.919**(0.00)	0.918**(0.00)	0.924**(0.00)	0.926**(0.00)

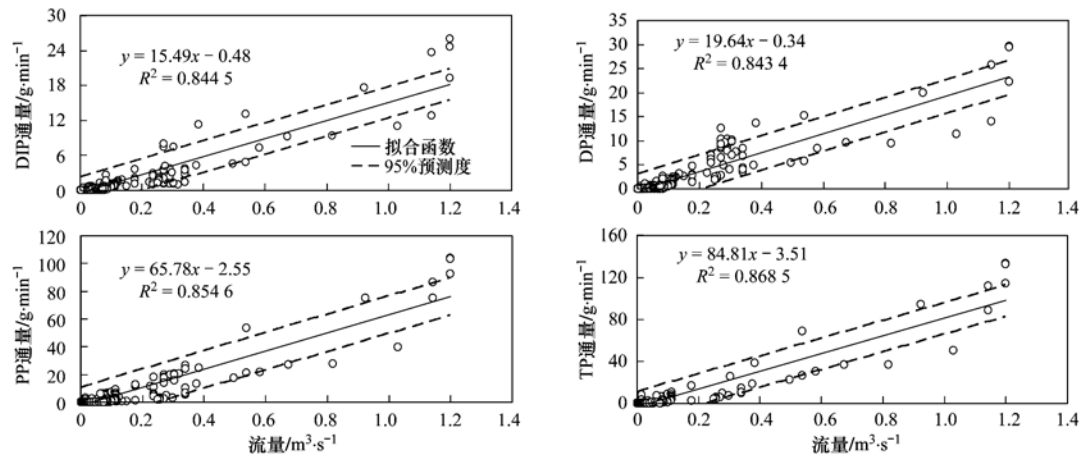
为确定不同形态磷素通量与流量的定量关系, 对 10 次降雨的不同形态磷素通量同流量进行回归分析, 如图 4 所示. DIP、DP、PP 和 TP 通量与流量均呈良好的线性关系(*R*² > 0.80), 拟合度较好, 这与张恒^[24]、郭胜^[32]等就 TP 通量同流量的研究具有一致性.

2.3.3 主要流失形态

根据表 2 计算次降雨不同形态磷素 EMCs 的 DIP/DP 和 PP/TP 值. DIP 占 DP 的质量分数均值为 64.30%, 其中最大值为 90.48%, 最小值为 50.00%, 标准差为 14.39%, 因此该小流域 DP 主要是 DIP 形式输出的, DIP 是生物可直接利用的无机

磷酸盐, 对地表水环境有着直接影响; PP 占 TP 的质量分数均值为 54.26%, 其中最大值为 78.18%, 最小值为 28.57%, 标准差为 20.44%, 因此该小流域 TP 主要是 PP 形式输出的, 这与前人在四川盆地^[33,34] 研究中, PP 随地表径流搬运迁移是磷的主要流失形态具有一致性.

次降雨中 DIP、DP、PP 和 TP 的 EMCs 值不同, 亦即在不同的降雨特征下不同形态磷素所占的比例不同, 从而 DIP/DP、PP/TP 值存在差异. 为分析在不同降雨特征对 DIP 占 DP 比例、PP 占 TP 比例变化的影响, 对不同形态磷素 EMCs 的 DIP/DP、PP/TP 同降雨历时、降雨量、平均雨强和最大雨强进行相



R^2 表示确定性系数,下同
图 4 不同形态磷素通量与流量的线性回归

Fig. 4 Linear regression between flow and pollutant fluxes

关分析,其结果如表 5 所示. DIP/DP 的值与降雨历时、降雨量、平均雨强和最大雨强均无显著相关关系,受降雨特征影响较小,DIP 在 DP 中的动态变化复杂性较高. 而 PP/TP 与最大雨强显著相关,与其它降雨特征无显著性相关,说明最大雨强越大,PP 在 TP 中所占的比例越大,而这也与前述 PP 的 EMCs 与最大雨强显著相关相对应.

表 5 DIP/DP 和 PP/TP 同降雨特征的相关分析

Table 5 Correlation between DIP/DP, PP/TP and rainfall characteristics		
指标	DIP/DP (n = 10)	PP/TP (n = 7)
降雨历时	0.39 (0.26)	-0.70 (0.08)
降雨量	0.47 (0.17)	0.28 (0.55)
最大雨强	0.48 (0.16)	0.93 ** (0.00)
平均雨强	0.44 (0.20)	0.67 (0.10)

2.4 地表径流和基流对磷素输出的影响

在影响小流域非点源污染输出以往的研究中多寻求 TR 同非点源污染输出的关系^[34,35],而 TR 是由 DR 和 BF 共同决定,DR 和 BF 分别对流域非点源污染的输出起作用,因此选取 DR/TR 的比值作为评估

DR 和 BF 对小流域非点源磷素输出的影响比单一的 TR 更具说服力,BF 和 TR 值如图 3 所示,DR/TR 值如表 1 所示.

DR/TR 值的变化主要受降雨径流特征、流域不透水地面积变化以及人为向河道中排放非雨水外的水分影响,而在本流域不透水地面积基本无变化且无人工干扰作用,因此 DR/TR 值的变化受降雨径流特征的影响较大. 对 10 次降雨的降雨径流特征与 DR/TR 进行 Pearson 相关分析和回归分析(如表 6),结果发现降雨历时、最大雨强、平均雨强、最大流量、最小流量与 DR/TR 值无显著相关关系,回归分析的函数拟合度也较差. 而降雨量与 DR/TR 值显著相关,进行回归分析所得线性关系和多项式关系均有良好的拟合度. 由于沂蒙山区土层浅薄土壤涵养水能力低,因而降雨易出现水位的陡涨陡落,降雨量越大,流量变化越大,DR/TR 值变化越明显. 流量的变异系数同 DR/TR 值也显著正相关,变异系数反映了流量的变异程度,变异程度越大,流量的变幅就越大,同时 DR/TR 值就越大,因而存在正相关.

表 6 降雨径流特征同 DR/TR 的相关回归分析

Table 6 Correlation and regression between rainfall, flow characteristics and DR/TR					
指标	相关系数	直线方程	多项式方程		
降雨历时(t)	0.30 (0.39)	$y = 19.51t + 2.26$	$(R^2 = 0.09)$	$y = -78.34t^2 + 113.11t - 21.67$	$(R^2 = 0.14)$
降雨量(p)	0.90 * (0.00)	$y = 129.57p - 36.04$	$(R^2 = 0.81)$	$y = 262.63p^2 - 184.18p + 16$	$(R^2 = 0.91)$
最大雨强($I_{\max}$)	0.61 (0.06)	$y = 1.71 I_{\max} - 0.38$	$(R^2 = 0.38)$	$y = -1.41 I_{\max}^2 + 3.39 I_{\max} - 0.81$	$(R^2 = 0.38)$
平均雨强(I_{mean})	0.59 (0.08)	$y = 0.31 I_{\text{mean}} - 0.09$	$(R^2 = 0.34)$	$y = 0.43 I_{\text{mean}}^2 - 0.20 I_{\text{mean}} + 0.05$	$(R^2 = 0.36)$
最大流量($Q_{\max}$)	0.55 (0.10)	$y = 846.53 Q_{\max} - 295.74$	$(R^2 = 0.30)$	$y = 1628 Q_{\max}^2 - 1098 Q_{\max} + 201.23$	$(R^2 = 0.34)$
最小流量($Q_{\min}$)	-0.16 (0.66)	$y = -10.98 Q_{\min} + 21.21$	$(R^2 = 0.02)$	$y = -52.99 Q_{\min}^2 + 52.48 Q_{\min} + 4.92$	$(R^2 = 0.04)$
变异系数(CV)	0.94 * (0.00)	$y = 1.25CV - 0.19$	$(R^2 = 0.89)$	$y = 0.89 CV^2 + 0.19CV + 0.09$	$(R^2 = 0.90)$

为分析 DR 和 BF 对小流域不同形态磷素浓度变化以及 DIP 占 DP 比例、PP 占 TP 比例动态变化规律的影响,对 DR/TR 与不同形态磷素的 EMCs 及 DIP/DP 和 PP/TP 进行 Pearson 相关分析(如表 7)。

就不同形态磷素 EMCs 变化而言,DR/TR 与 DIP、DP 和 TP 均显著相关,而与 PP 无显著相关关系,因此 DR/TR 越大,所释放的 DIP、DP 和 TP 的 EMCs 就越大。由于只有 7 场降雨有 PP 的变化,且其中的 0824、0826 和 0906 降雨事件降雨历时较长且雨强较小,对地表的冲刷作用较弱,因而其 PP 的

EMCs 都很小且基本无变化;但在 0717、0719、0807 和 0812 降雨事件中雨强较大,对地表冲刷作用较强烈,泥沙颗粒所携带的 PP 含量就变高,PP 的 EMCs 随着 DR/TR 的增大而增大,因此 PP 的 EMCs 在总的降雨事件中同 DR/TR 无显著相关关系。在 DIP 占 DP 比例、PP 占 TP 比例的动态变化方面,DR/TR 与 DIP/DP 显著相关,与 PP/TP 无显著相关关系,而前面研究中 DIP/DP 与降雨特征无显著相关关系,PP/TP 与最大雨强显著相关,因此分析 DIP 占 DP 比例、PP 占 TP 比例的动态变化规律方面,要综合考虑降雨特征和 DR/TR 对其的影响。

表 7 DR/TR 同不同形态磷素 EMCs 及 DIP/DP 和 PP/TP 的相关分析

Table 7 Correlation between phosphorus EMCs, DIP/DP, PP/TP and DR/TR

指标	DIP (n = 10)	DP (n = 10)	PP (n = 7)	TP (n = 10)	DIP/DP (n = 10)	PP/TP
DR/TR	0.88 ** (0.00)	0.83 ** (0.00)	0.65 (0.12)	0.79 ** (0.01)	0.72 * (0.02)	0.41 (0.36)

DR/TR 与 DIP、DP、TP 和 DIP/DP 均显著相关,回归分析可建立其定量关系(如图 5 所示)。DR/TR 与 DIP、DP、TP 和 DIP/DP 均成多项式关系,DR/TR 与 DIP、DP 的非线性关系较好($R^2 > 0.80$),与 TP($R^2 = 0.6979$)和 DIP/DP($R^2 = 0.6883$)的非线性关系相对较弱。DIP、DP 和 TP 随 DR/TR 值的变大而变大,但 DIP/DP 随 DR/TR 值的变大先变大后变小并趋于稳定。产生这种现象的原因可能是 DIP 和 DP 都随着 DR/TR 值的变大而变大,初始阶段 DIP 增幅大于 DP 增幅, DIP/DP 值变大,而到了

后期 DIP 增幅小于 DP 增幅, DIP/DP 值变小。而 Kato 等^[29]的研究表明 PP/TP 随着 DR/TR 的增加呈线性减少趋势。

通过分析可以看出 DR/TR 对磷素输出有重要影响,然而在降雨径流过程中,地下水含量对径流水位的变化有重要作用^[36], DR 不仅包括入渠地表径流还包括一部分地下水,是 DR 还是其组成部分对磷素输出起主导作用,以及如何在此基础上建立合理的水质模型减缓磷素输出,还有待进一步研究。

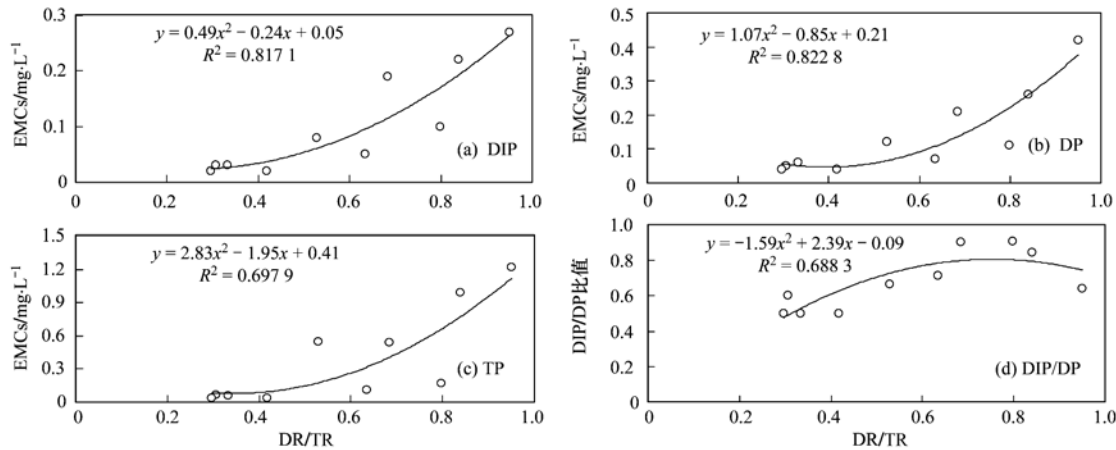


图 5 DIP、DP、TP 和 DIP/DP 同 DR/TR 的回归分析

Fig. 5 Polynomial regression between DIP, DP, TP, DIP/DP and DR/TR

3 结论

(1)次降雨径流中不同形态磷素浓度变化与流量变化过程不一致,浓度峰值均出现于流量峰值之前,而不同形态磷素通量与流量变化过程较为一致,

且两者呈较好的线性关系。

(2)不同形态磷素浓度最小值差异较小,最大值和 EMCs 值差异较大,其最大值和 EMCs 值受降雨特征影响较大。

(3)TP 以 PP 流失为主,DP 以 DIP 流失为主,

DIP/DP 的动态变化与降雨历时、降雨量、最大雨强和平均雨强均无显著相关关系,而 PP/TP 的动态变化只与最大雨强显著相关。

(4)降雨及径流特征中只有降雨量和流量变异系数与 DR/TR 显著相关,在地表径流和基流对磷素输出影响中,DR/TR 与 DIP、DP、TP 的 EMCs 以及 DIP/DP 的动态变化,呈显著的多项式关系。

参考文献:

- [1] Sharpley A N, Kleinman P J A, Heathwaite A L, *et al.* Phosphorus Loss from an agricultural watershed as a function of storm size[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(2): 362-368.
- [2] Lai D Y F, Lam K C. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff[J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(5): 735-743.
- [3] Jiao P J, Xu D, Wang S L, *et al.* Phosphorus loss by surface runoff from agricultural field plots with different cropping systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **90**(1): 23-32.
- [4] Oenema O, Roest C W J. Nitrogen and Phosphorus losses from agriculture into surface waters: the effects of policies and measures in the Netherlands[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(3): 19-30.
- [5] Brazier R E, Heathwaite A L, Liu S. Scaling issues relating to phosphorus transfer from land to water in agricultural catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **304**(1-4): 330-342.
- [6] 罗专溪,朱波,王振华,等. 川中丘陵区村镇降雨特征与径流污染物的相关关系[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(11): 1032-1036.
- [7] 罗专溪,朱波,汪涛,等. 紫色土丘陵区农村集镇降雨径流污染特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(9): 1823-1831.
- [8] 胡远安,程声通,贾海峰. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 108-112.
- [9] 陆海明,尹澄清,王夏晖,等. 于桥水库周边农业小流域地表径流和亚表层流的磷素流失浓度特征[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(10): 1702-1708.
- [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] 王辉,王全九,邵明安. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1571-1578.
- [12] 曹雪艳,李永梅,张怀志,等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(3): 13-17.
- [13] 孔刚,王全九,樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(3): 14-18.
- [14] 胡舒,张旭,张晓凤,等. 奥林匹克森林公园典型人工林地非点源污染输出特征分析[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(1): 61-68.
- [15] 袁东海,王兆骞,陈欣,等. 不同农作方式下红壤坡耕地土壤磷素流失特征[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(10): 1661-1664.
- [16] 梁颖颖,王京文,张奇春,等. 毛竹林地磷素流失特征研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1591-1595.
- [17] 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.
- [18] 田耀武,黄志霖,肖文发. 三峡库区黑沟小流域非点源污染物输出的动态变化[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 423-427.
- [19] 杨丽霞,杨桂山,苑韶峰,等. 不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1763-1769.
- [20] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等. 降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, **23**(4): 39-46.
- [21] 李瑞玲,张永春,刘庄,等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1220-1226.
- [22] 高扬,朱波,汪涛,等. 估算紫色土流域地下水非点源污染负荷的降雨量参数法[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(2): 352-356.
- [23] 孙三祥,马德娣,张国珍,等. 模拟降雨地表径流污染物输移规律试验研究[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(2): 44-47.
- [24] 张恒,曾凡棠,房怀阳,等. 连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(5): 927-934.
- [25] 于兴修,马骞,刘前进,等. 横坡与顺坡垄作径流氮磷输出及其富营养化风险对比研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 428-436.
- [26] 马骞,于兴修,刘前进,等. 沂蒙山区不同覆被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(7): 1526-1536.
- [27] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, **123**(2): 134-143.
- [28] GB-3838-2002, Environmental Quality Standard for Surface Water[P].
- [29] Kato T, Kuroda H, Nakasone H. Runoff characteristics of nutrients from an agricultural watershed with intensive livestock production[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **368**(1-4): 79-87.
- [30] 曹杰君,高扬,黄海波,等. 长三角典型村域次降雨条件下氮素非点源输出特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2587-2593.
- [31] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff [J]. *Water Research*, 2000, **34**(6): 1773-1780.
- [32] 郭胜,李崇明,郭劲松,等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1266-1272.
- [33] Yang J L, Zhang G L, Shi X Z, *et al.* Dynamic changes of nitrogen and phosphorus losses in ephemeral runoff processes by typical storm events in Sichuan Basin, Southwest China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, **105**(2): 292-299.
- [34] 蒋锐,朱波,唐家良,等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. *水利学报*, 2009, **40**(6): 659-666.
- [35] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(2): 326-331.
- [36] Sklash M G, Farvolden R N. The role of groundwater in storm runoff[J]. *Journal of Hydrology*, 1979, **43**(1): 45-65.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行