ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第33卷 第8期
2012年8月15日

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,袁骐,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,郅军(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_2O_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*Chlorella pyrenoidosa*-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_3O_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,肖举强,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 …… 苏馈足,邓绣坤,郑丽,王畅,金旺红,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)
广西茶山锑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)
臭氧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 …… 洪鎏,陈德珍,王渡,黄愫(2901)
H_2S选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状 …… 郝郑平,窦广玉,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)

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
(华东师范大学资源与环境科学学院,地理信息科学教育部重点实验室,上海 200062)

摘要: 监测了温州 2 个采样区 5 场较为典型的降雨过程,测定了不同下垫面径流 pH 值以及总磷(TP)、溶解态磷(DP)、颗粒态磷(PP)、总无机碳(TIC)、总有机碳(TOC)、总悬浮颗粒(TSS)、BOD_5、COD 的含量. 结果表明,温州城市降雨径流中 TP、DP 以及 PP 含量分别介于 0.01 ~ 4.32 mg·L^{-1}、ND ~ 0.88 mg·L^{-1}以及 ND ~ 4.31 mg·L^{-1}之间,径流初期阶段 PP 占绝对主导地位,而在整个径流过程的中后期,大部分降雨径流中 DP 占 TP 的比重呈现出一个上升的趋势,屋面径流和汇流口径流这一情况尤其明显. 从 TP 和 DP 的 EMC 值来判断,有些城市降雨径流会对下级受纳水体造成环境压力. 同时,不同城市降雨径流中 TP 以及 DP 含量之间的差异显著,而不同的降雨条件也会影响降雨径流中磷的含量. 根据 M(V)累积曲线判断,TP 初期冲刷效应在城市降雨径流中是较为普遍的; 与 TP 相比,城市降雨径流中的 DP 比较难发生初始冲刷的情况. 城市降雨径流中总磷的含量不但受下垫面类型的影响,而且与径流各种理化指标之间呈现出显著的相关关系. 所有结果皆指出针对不同下垫面径流磷污染的治理工作应采用不同的最佳管理方案(BMPs),而降低径流 TSS 含量是削减其磷负荷的有效途径之一.

关键词:磷; 降雨径流; 场次降雨污染物平均浓度; 初期冲刷效应; 温州
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)08-2634-10

Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City

ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan
(Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, School of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Five typical rainfalls were monitored in two different research areas of Wenzhou municipality. The pH and concentrations of total phosphorus (TP), dissolved phosphorus (DP), particulate phosphorus (PP), total inorganic carbon (TIC), total organic carbon (TOC), total suspended substances (TSS), BOD_5 and COD in six different kinds of urban runoff were measured. The results showed that, the concentrations of TP, DP and PP in different kinds of urban runoff of Wenzhou ranged from 0.01 to 4.32 mg·L^{-1}, ND to 0.88 mg·L^{-1} and ND to 4.31 mg·L^{-1}, respectively. In the early stages of runoff process PP was dominated, while in the later, the proportion of DP in most of the runoff samples would show a rising trend, especially in roof and outlet runoff. Judged by the event mean concentration (EMC) of TP and DP in these five rainfalls, some kinds of urban runoff could cause environmental pressure to the next level receiving water bodies. Meanwhile, the differences among the TP and DP content (maximum, minimum and mean content) in various urban runoffs were significant, and so were the differences among various rainfall events. According to the M (V) curve, the first flush effect of TP in most kinds of urban runoff was common; while the first flush effect of DP was more difficult to occur comparing with TP. Not only the underlying surface types but also many physico-chemical properties of runoff could affect the concentration of TP in urban runoff. All the results also suggested that different best management plans (BMPs) should be selected for various urban runoff types for the treatment of phosphorus pollution, and reducing the concentration of TSS is considered as one of the effective ways to decrease the pollution load of phosphorus in urban runoff.

Key words: phosphorus; runoff; EMC; first flush; Wenzhou City

非点源污染(non-point source pollution)又称面源污染,是指溶解的或固体污染物从非特定的地点,在降水和径流的冲刷作用下通过径流过程汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)而引起的水体污染[1,2]. 城市非点源污染问题是伴随城市快速发展而出现的新问题[3],长期以来,农业非点源污染已经引起了广泛的重视,但是对城市非点源污染的研究相对较少[4]. 近年来,随着环保工作力度的不断加大,城市点源污染基本上已经得到了较好控制,非点源污染就成为了城市水质恶化的主要原因之一[5]. 在美国,非点源污染已经成为环境污染的第一因素,60% 的水环境污染起源于非点源污染[6],而在多种非点源污染类型中,城市降雨径流是仅次于农业的非点源污染的第二大污染源[7],而狭义的城市非点源污染就是指城市不同下垫面(交通干道、屋面、停车场等)降雨径流污染,它是

收稿日期: 2011-10-31; **修订日期**: 2012-02-18
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07317 - 006);国家自然科学基金项目(40971259);上海市优秀学科带头人计划项目(10XD1401600)
作者简介: 周栋(1983 ~),男,博士研究生,主要研究方向为城市水环境与水资源,E-mail:damonzhou@163.com
* 通讯联系人,E-mail:zlchen@geo.ecnu.edu.cn

城市非点源污染的主要形式之一. 1990 年美国 EPA 公布的不同污染物对河流污染的贡献比中,城市雨水占到了 9%[8], 1993 年美国 EPA 已经把城市地表径流列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源[9]. 我国同样面临着城市降雨径流污染问题,相关学者的研究表明,作为城市中 3 种主要下垫面形式的屋面、路面以及绿地径流污染情况较为普遍,主要污染物类型分布广泛,涵盖了重金属、氮、磷、盐分、有机污染物以及细菌等多个类别,其平均含量均超过地表水环境质量Ⅴ类标准,如果未经处理直接排放,则会对下级受纳水体造成较大的环境压力[10~13],据估计我国非点源负荷通常能够达到总负荷的 35% ~55%,甚至更高达 65% ~75%以上[14~16].

城市下垫面沉积环境受人为活动影响较大,人类日常的生产、生活活动有意或无意地向环境中排放了大量的有毒有害物质,造成城市降雨径流中污染物的种类繁多,来源广泛,几乎涵盖了现今水质监测污染物的所有方面,据悉 129 种重点污染物中约有 50%在城市径流中被检出[17]. 目前,城市水体面临的主要问题为富营养化,其生态景观与调蓄作用大大降低,因此城市降雨径流中对水体影响最大、效果最为直观的为氮、磷类化合物. 氮、磷是生态系统中主要的两种营养盐元素,在其含量较低时会成为植物生长的限制性因素,但是一旦水体中氮、磷含量超过了一定的安全阈值,就会引起藻类及其他浮游生物的大量繁殖,降低水体的溶氧含量,造成鱼类或其他水生生物的大量死亡、水质进一步恶化[18]. 因此,氮和磷被认为是造成水体富营养化的主要物质,而根据利贝格最小值定律可知磷是其主要限制因素[19]. 城市降雨径流中的 TP 主要由 DP 和 PP 组成[20],以往的研究大部分只局限于径流中 TP 的含量[21~27],而没有具体分析城市降雨径流中 DP 和 PP 各自的含量变化情况,同时也缺乏相关影响因素的研究,因此无法为选择经济高效的最佳管理措施(BMPs)提供必要的理论依据. 本研究选取了温州这个较为典型的南方河道密集型城市作为调查区域,在探讨径流中 TP 污染负荷及其潜在影响因素的同时,着重分析了径流中 DP、PP 含量随径流历时的变化情况,旨在为我国南方城市降雨径流水质净化工作提供必要的理论支持.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

温州位于中亚热带季风气候区,常年平均雨日 175 d,年降水量1 225 ~2 061 mm,多年平均年降水 1 706 mm,降雨主要集中在 6 ~9 月,占全年降雨量的 2/3 以上,而 8、9 两个月由于受台风的影响,温州降雨频繁且强度大、雨量足,导致雨水对地表污染物的冲刷、携带能力增强,这对城市排污及污水处理能力都是一个重大的考验,因此选取 8 ~9 月作为温州降雨径流中磷污染状况的主要监测期,具有一定代表性的同时也具有一定的实际意义. 在遥感解译与实地考察相结合的基础上,以典型性与代表性为原则,在温州市鹿城区内选定了 2 个平行采样区,分别位于山下河两岸(SX,下同)和九山外河两岸(JS,下同). 其中,山下河汇流区位于 120°41′10″E ~120°42′00″E、27°59′50″N ~28°0′30″N 之间,总面积约为 0. 40 km^2; 九山外河汇流区位于 120°38′00″E ~120°39′00″E、28°0′30″N ~28°1′20″N 之间,总面积约为 0. 33 km^2. 监测的下垫面涵盖了交通干道(J)、停车场(T)、小区路面(L)、小区屋面(W)、径流汇流口(O)以及绿地(C)等 6 种城市中最为常见的土地利用类型(图 1).

1.2　样品采集

2010 年 8 ~9 月在上述 2 个采样区共监测了 5 场较为典型的降雨事件,由于城市降雨径流的污染物存在一定的初期冲刷情况[28,29],即前期径流中污染物含量较高且变化较大,后期污染物含量较低且稳定,因此特采用“前密后疏”的非均匀间隔采样方式,具体采样序列为:产流后的前 30 min 内按照 5 min 的时间间隔进行样品采集,共收集样品 6 个; 然后按照 10 min 的时间间隔采集样品 3 个,共计 30 min; 从第 10 号样品开始采样间隔拉大到 20 min,同样收集样品 3 个,共耗时 60 min; 而后的样品统一按照 30 min 的时间间隔进行收集直至径流过程结束. 样品统一用 1 L 塑料样品瓶盛放,采样过程中同时测定每个时间间隔内的径流量,超出 1 L 的部分量取体积后舍弃,样品采集后立即转入室内进行分析测定.

1.3　室内分析与整理

径流样品分析指标包括 TP、DP、PP、pH 值、DO、BOD_5、COD、TIC、TOC 以及 TSS 含量等. 分别取未经处理的径流样品和经 0. 45 μm 滤膜过滤的径流样品各 25 mL 利用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)进行 TP 以及 DP 含量的测定; 径流样品中 PP 的含量为 TP 与 DP 含量之差; pH 值利用 pHS-3C 型精密酸度计测定,测量精度为 0. 01; DO 浓度直接用 HACH LDOTM 便携式溶氧仪

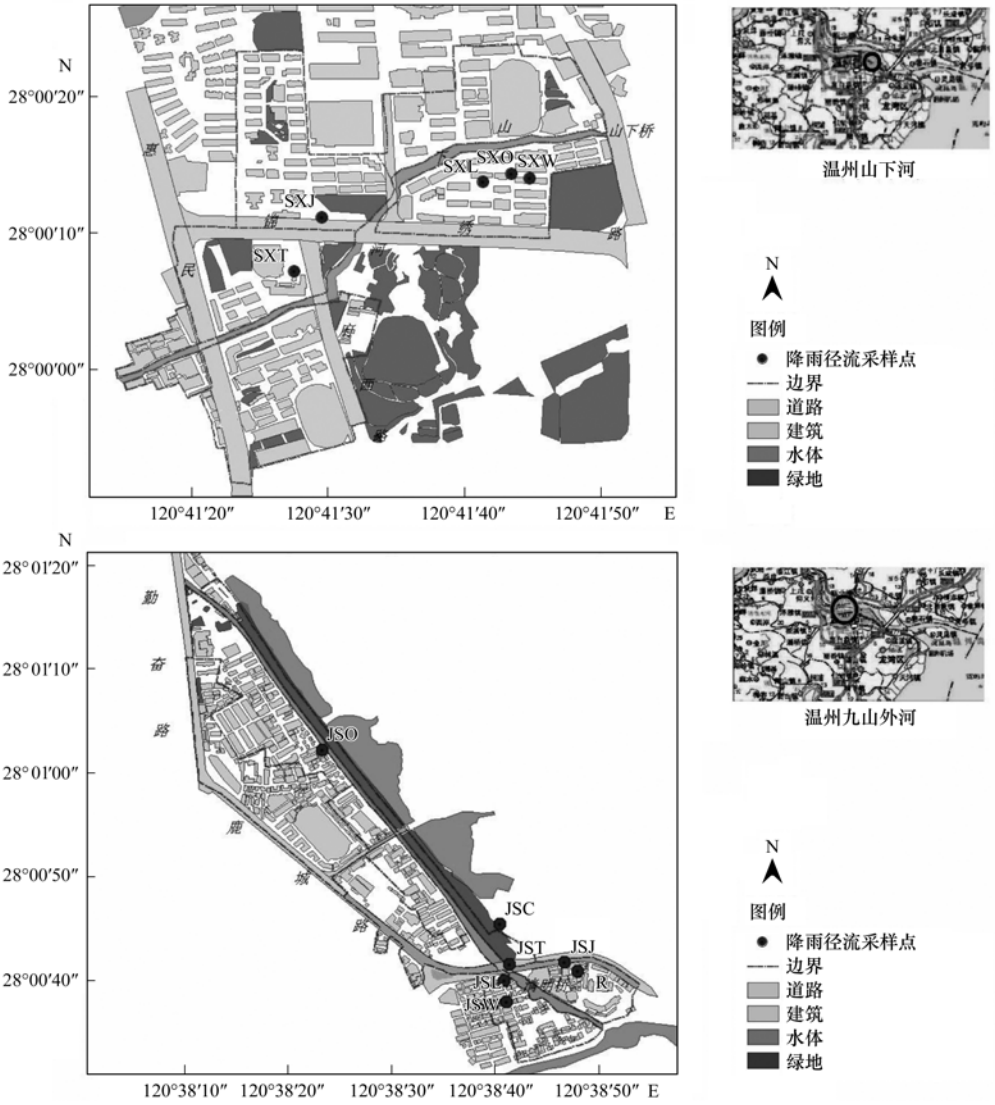

图 1 研究区及采样点示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

(HQ30d53,HACH,美国)进行测定; 水体 BOD_5 的含量用五日接种稀释法(HJ 505-2009)进行测定; 化学需氧量 COD 的含量用 HJ/T 399-2007 快速消解分光光度法进行测定; 水中 TIC 和 TOC 含量则利用 TOC/TNb 分析仪(Liqui TOC Ⅱ, Elementar, 德国)进行测定; 取一定体积样品经 0.45 μm 滤膜过滤,滤膜经冷冻干燥、称重测定径流样品中 TSS 的含量. 样品分析过程中同时进行回收率与重复率的测定,二者皆能满足实验分析要求.

2 结果与讨论

2.1 径流中不同形态磷含量随径流历时变化情况

综合比较 5 次降雨事件的监测结果可知,温州城区降雨径流中 TP、DP 以及 PP 的含量分别介于 0.01 ~ 4.32 $mg\cdot L^{-1}$、ND ~ 0.88 $mg\cdot L^{-1}$以及 ND ~ 4.31 $mg\cdot L^{-1}$之间. 为了更好地探讨不同下垫面降雨径流中 DP 和 PP 含量的变化情况,计算了历次降雨事件中同种下垫面径流、相同径流历时 DP 和 PP 含量的算术平均值,以此来研究各下垫面径流中不同形态磷含量随径流历时的变化情况(图 2). 从图 2 可以看出,温州大部分城市径流中 TP 是以 PP 占主导地位的,尤其是初期径流阶段,此时一般降雨强度较大,水量较为丰富,因此径流可以冲刷、携带较多的颗粒态物质,决定了这期间 TP 以 PP 为主的同时也造成了其含量较径流后期要高. 在各种类型下垫面径流中,SXW、JSW 以及 JSO 径流较为特殊,虽然在径流的初始阶段它们所含的 TP 同样是以 PP 为主,但是随着径流历时的推移,径流中 PP 和 DP 含

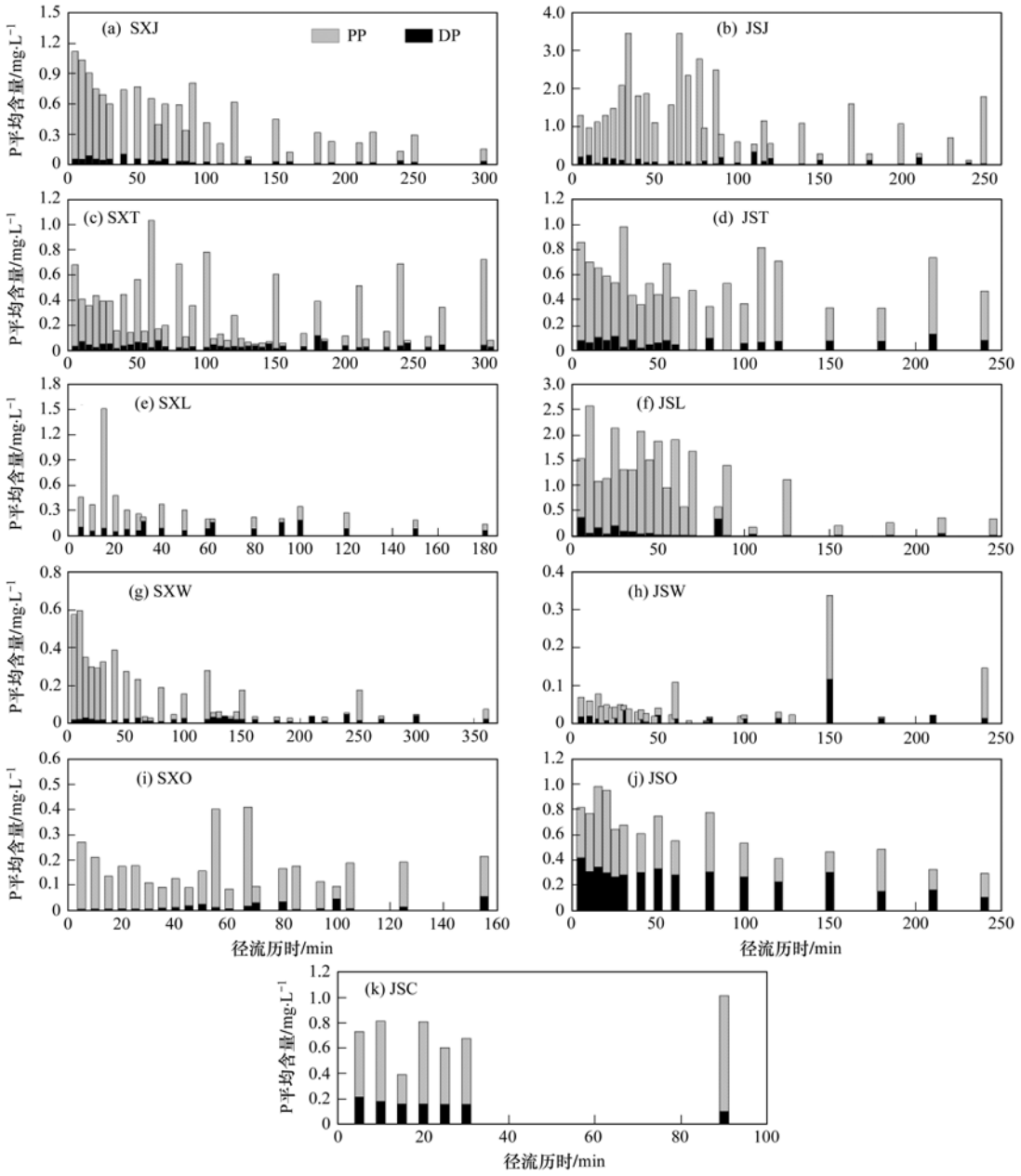

图 2　温州不同下垫面降雨径流中各形态 P 平均含量变化

Fig. 2　Average concentration of different forms of P in different urban runoffs of Wenzhou

量之比不断减小,甚至出现 DP 取代 PP 占据主导地位的情况,这在 SXW 序列中最为明显,这是其余 8 个监测径流中没有出现的情况,因为 SXW 为球山花园住宅楼屋顶径流样品,该小区建成时间较晚,楼体普遍较高,不利于颗粒物的富集,仅在雨水口等角落处会有少量颗粒物的沉积,所以造成径流后期 PP 含量明显下降,DP 占据主导地位的情况出现.

2.2　径流中不同形态磷 EMC 分布情况

区域大环境、降雨条件以及不同下垫面性质等影响因素常常导致同一地区同种下垫面在不同降雨场次中或同一地区不同下垫面在同一降雨场次中各项污染物的浓度变化很大,因此单一的浓度变化情况无法全面反映一场降雨中下垫面径流各项污染物的负荷情况,为此美国环保署提出了“场次降雨污染物平均浓度”(EMC)的概念[30],用以表示在一场降雨事件中某种下垫面径流全过程排放的某污染物的平均浓度. EMC 实质上是一场降雨径流全过程顺势污染浓度的流量加权平均值,即总污染量与总径流量之比,计算公式如下:

$$\mathrm{EMC} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t c_t Q_t dt}{\int_0^t Q_t dt} \cong \frac{\sum c_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \qquad (1)$$

式中,EMC 表示场次降雨污染物平均浓度,mg·L^{-1}; M 表示整个降雨过程中污染物总含量,mg; V 表示整个降雨过程中总径流量,L; t 表示时间,min; c_t 表示 t 时刻径流所含某种污染物的浓度,mg·L^{-1}; Q_t 表示 t 时刻径流流量,L·min^{-1}; Δt 表示采样间隔时间,min.

作为监测区主要受纳水体的温州山下河与九山外河水质以Ⅴ类、劣Ⅴ类为主,因此特选取《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中Ⅴ类水标准来评价温州降雨径流中磷的负荷情况,表 1 显示了历次降雨事件中温州 2 个采样区不同下垫面径流中 TP 和 DP 的 EMC 分布情况. 多场降雨中各下垫面径流 TP 的 EMC 值在 0.02 ~ 2.50 mg·L^{-1} 之间变化. 在九山外河研究区,历次降雨事件中交通干道、停车场和小区路面径流中 TP 的 EMC 值普遍较高,均超过了地表水环境Ⅴ类水标准,其中在雨前干期稍长而最大雨强较小的 2010-09-26 降雨中,交通干道径流中 TP 的 EMC 值甚至达到了地表水环境Ⅴ类水标准的 6 倍多,而与其间隔 2 d 的 2010-09-28 降雨中,交通干道和小区路面径流中 TP 的 EMC 值同样达到了地表水环境Ⅴ类水标准的 5 倍左右. 在山下河区域,历次降雨事件中径流中 TP 的 EMC 值也有超标的情况出现,但是超标的下垫面类型不尽相同. 尽管如此,在相应场次的降雨中,山下河汇流口径流中 TP 的 EMC 值较低,都低于地表水环境Ⅴ类水标准,说明各下垫面径流经过管道汇聚、混合、稀释和沉降等过程后,径流中的 TP 含量可大量降低. 从下垫面径流类型来看,草坪虽然比不透水地面较难产生地表径流,但是一旦降雨情况满足产流条件,那么草地径流中 TP 的污染较为严重,任玉芬等[10]在研究中也发现类似现象. 此外,本研究与常静等[11]对上海市区降雨径流中磷污染空间分布的研究结果相一致,车流量较大的交通干道和停车场径流中 TP 的 EMC 含量明显偏高,而居民区的屋顶径流情况较为良好. 温州市山下河区域地表径流中 TP 的含量与珠海市地表径流中 TP 含量相当(0.41 ~ 0.83 mg·L^{-1})[31],而 2 个采样区地表径流中 TP 含量皆低于 Lee 等[32]监测的韩国城市住宅区与工业区降雨径流中的 TP 的含量(0.1 ~ 22.4 mg·L^{-1}).

表 1 温州历次降雨各下垫面径流中 TP、DP 的 EMC 值[1)]/mg·L^{-1}

Table 1 EMC of TP and DP in different urban runoffs of Wenzhou/mg·L^{-1}

样点编号	2010-08-18		2010-08-30		2010-09-01		2010-09-26		2010-09-28	
	TP	DP	TP	DP	TP	DP	TP	DP	TP	DP
SXJ	0.21	0.03	0.72	0.03	0.20	0.03	0.57	0.02	1.28	0.02
SXT	0.09	0.04	0.65	0.05	0.28	0.03	0.18	0.08	0.81	0.02
SXL	0.21	0.16	ND	ND	0.28	0.05	0.58	0.19	0.31	0.05
SXW	0.05	0.04	0.09	0.02	0.04	0.01	0.04	0.00	1.06	0.02
SXO	ND	ND	0.21	0.01	0.13	0.01	0.18	0.02	0.23	0.00
JSJ	0.65	0.27	0.68	0.04	0.18	0.03	2.50	0.07	2.19	0.01
JST	0.48	0.09	0.46	0.17	0.46	0.05	ND	ND	0.63	0.03
JSL	ND	ND	1.23	0.16	0.15	0.03	ND	ND	1.96	0.02
JSW	0.08	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01	ND	ND	0.03	0.00
JSO	0.92	0.48	0.60	0.18	0.44	0.15	0.27	0.16	0.69	0.16
JSC	ND	ND	ND	ND	0.64	0.17	ND	ND	ND	ND
地表水Ⅴ类标准	0.4	—	0.4	—	0.4	—	0.4	—	0.4	—

1)ND 表示该降雨场次中未收集到该下垫面径流样品,"—"表示该标准未列出相应阈值

与 TP 相比,各下垫面径流中 DP 的 EMC 值均较低,多场降雨径流中 DP 的 EMC 值在 0 ~ 0.48 mg·L^{-1}之间变化,仅有 2010-08-18 降雨事件中 JSO 径流中 DP 含量超过了地表水Ⅴ类标准的阈值,这主要与磷较强的被吸附性有关,一般地表径流中很难有较多的 DP 存在. 此外,不同下垫面径流之间 DP 的 EMC 值差异也不如 TP 明显,只是 JSC 和 JSO 径流中 DP 的 EMC 值相对较高,可能与施肥和倾倒生活废水等人为活动干扰有关. 降雨条件对径流中 DP EMC 值的影响也不甚明显,说明不同下垫面径流对 DP 的输出较为平稳.

2.3 径流中不同形态磷初期冲刷效应评价

如果场次降雨事件中初期径流携带了整个径流过程中产生的大部分污染负荷,那么就称此现象为初期冲刷效应(first flush effect,FFS),其最直观的表现就是某一污染物的累积速率超过了径流量的累积速率[33~37]. 准确判断出某降雨事件中某污染物是否发生了初期冲刷效应对径流最佳管理方案的制定与选取至关重要,目前关于 FFS 的评价方法也很多,其中以 Geiger[38]定义的 M(V)累积曲线法最为经

典，被很多学者引用，本研究同样采用 M(V)曲线法对温州下垫面径流中不同形态磷是否发生初期冲刷效应做出评判(图 3、图 4).

从图 3 中可以看出，10 组交通干道径流样品中有 9 组出现了 TP 的初期冲刷情况，只有九山外河研究区 2010-09-26 降雨中没有出现 TP 的初期冲刷效应，之所以出现这种大规模的初期冲刷情况有可能是因为交通干道汇流面积较大且不透水性强，同时因为路面平坦，填洼水量较少，所以容易在短时间内积聚较大的径流量，造成从降雨到产流的时间间隔短且径流冲刷力强，因而更加容易出现初期冲刷效应. 停车场径流中 TP 的初期冲刷情况同样较为普遍，只是其初期冲刷强度不及交通干道径流. 收集到的 7 组小区路面径流则全部出现了 TP 的初期冲刷情况，只不过程度各有不同，其中 2010-09-01 降雨中在山下河研究区收集的径流中 TP 的初期冲刷效应最为明显，因为该场降雨初期阶段强度较大，达到了大雨级别，较大的降雨强度使得径流有足够的能

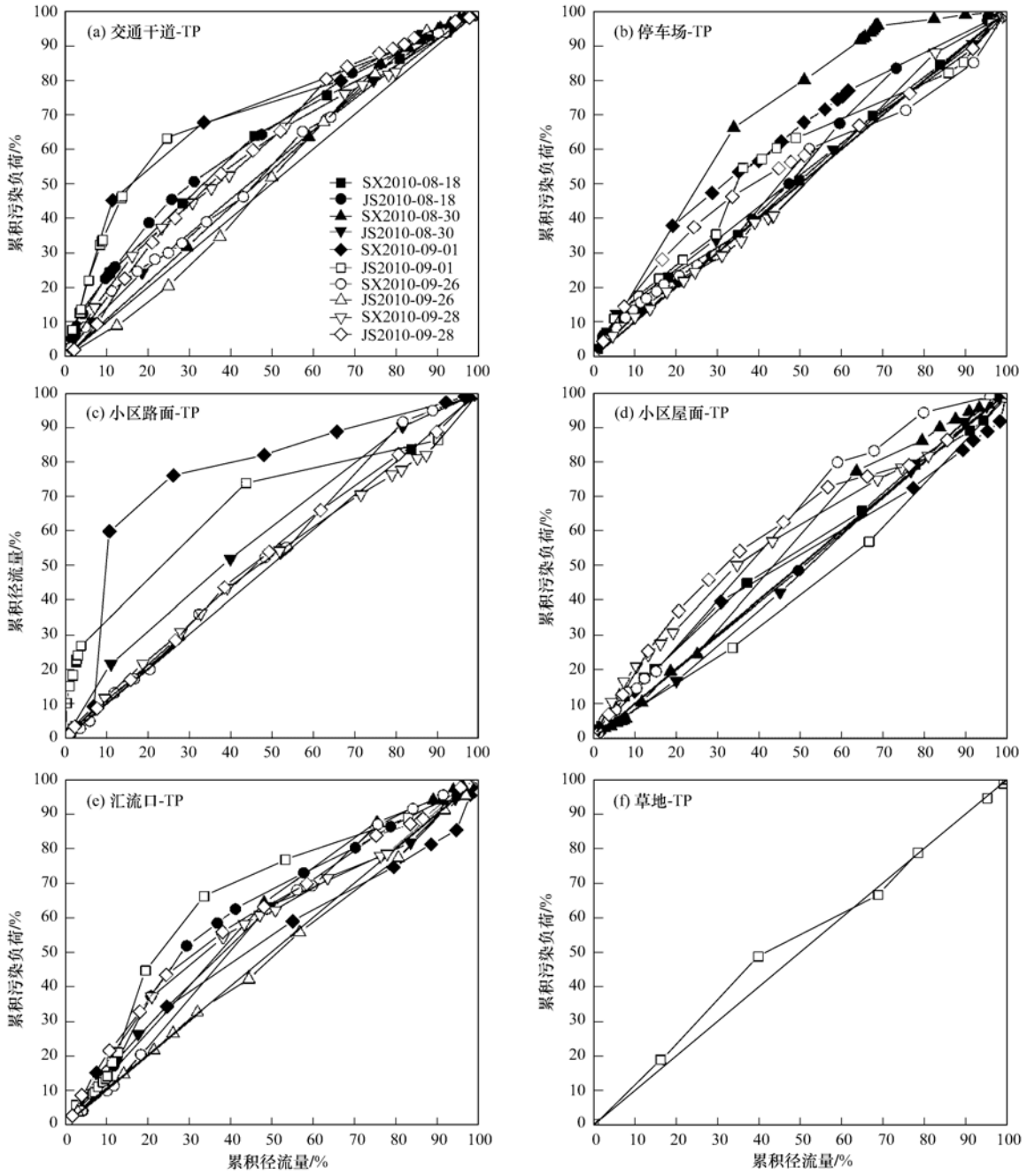

图 3　温州历次降雨不同下垫面径流中 TP 含量 M(V)曲线图

Fig. 3　M (V) curve of TP content in different urban runoffs of Wenzhou

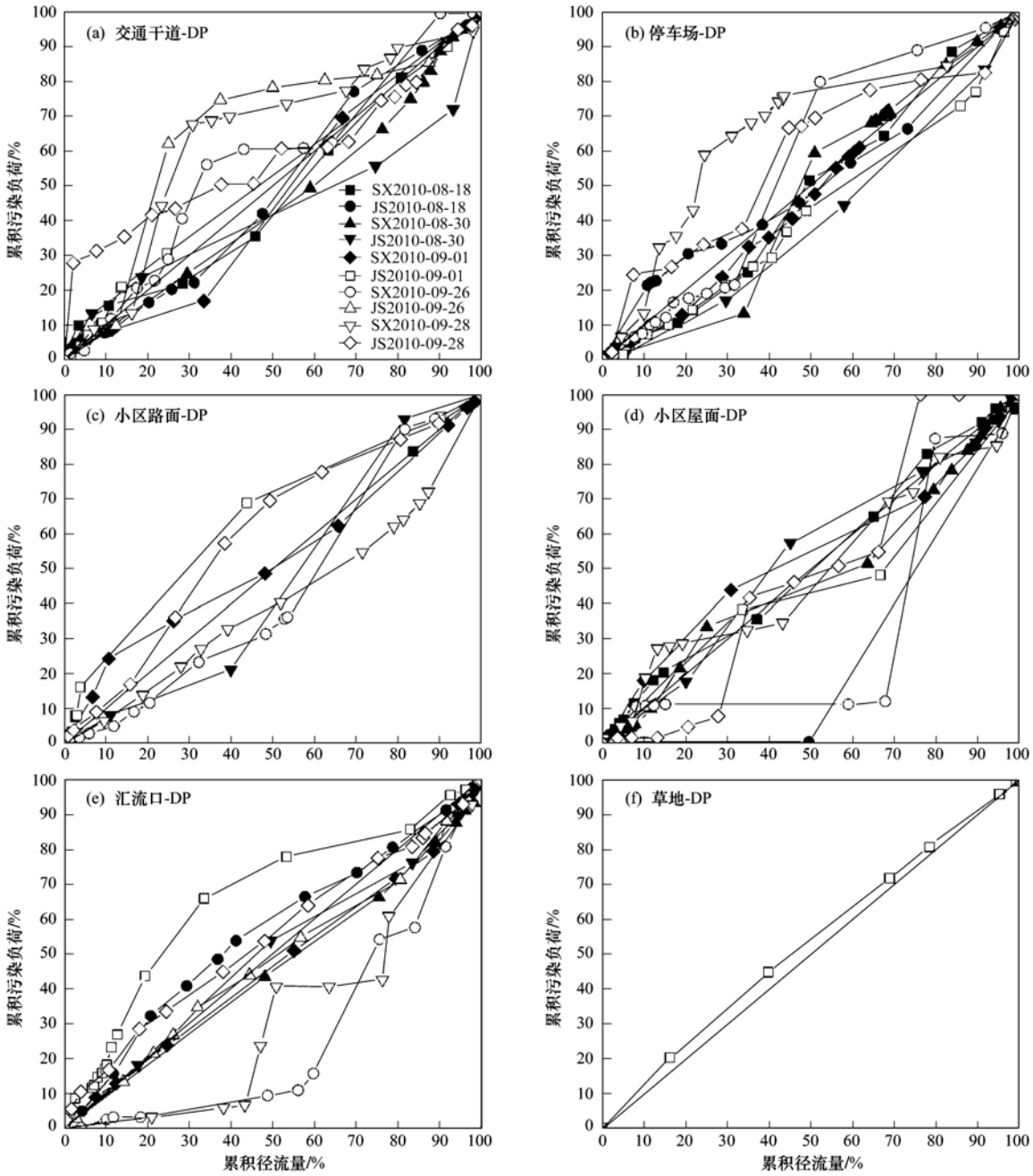

图 4 温州历次降雨不同下垫面径流中 DP 含量 M(*V*)曲线图

Fig. 4 M (*V*) curve of DP content in different urban runoffs of Wenzhou

力冲刷并携带粒径更大、数量更多的固体颗粒,因而造成该场降雨中 TP 初期冲刷最为明显. 全部 9 组小区屋面径流样品中有 3 组没有出现 TP 初期冲刷情况,是全部下垫面径流类型中比例较高的,说明与其他下垫面径流相比,小区屋面径流更难发生 TP 的初期冲刷效应. 汇流口径流则出现了难以界定是否发生 TP 初期冲刷效应的情况,有 2 个序列初期阶段样品中污染物累积速率与径流量累计速率几乎持平,而其他 7 组汇流口径流样品都不同程度地出现了 TP 的初期冲刷情况. 整个监测过程中,只有 2010-09-01 降雨事件中收集到了草地径流样品,虽然样品个数较少,但是仍然出现了低强度的 TP 初期冲刷情况.

与 TP 相比 DP 比较难以发生初期冲刷效应(图 4),大部分下垫面径流都是只有 50% 左右的样品序列出现 DP 的初期冲刷效应. 并且往往同一径流序列中不会同时出现 TP 与 DP 的初期冲刷效应,例如 2010-09-26 降雨事件中山下河采样区的交通干道径

流未发生 TP 初期冲刷效应,但是出现了 DP 的初期冲刷效应,因为大部分径流中(尤其是交通干道径流)TP 是以 PP 的形式存在的,所以当 TP 发生初期冲刷效应的时候,DP 势必不会出现初期冲刷效应.

2.4　城市降雨径流中磷含量的影响因素分析

城市下垫面沉积环境受人为因素影响较深,不同下垫面之间性质迥异,因而造成不同类型下垫面径流中污染物种类、负荷等差异显著,下面将重点探讨温州不同下垫面类型以及径流本身理化性质对其 TP 和 DP 含量的影响.

2.4.1　不同下垫面类型对径流中磷含量的影响

历次降雨事件径流中 TP 和 DP 含量在不同下垫面之间的差异见表 2. 单因子方差分析结果显示,无论哪个采样区,或者降雨条件如何,径流中 TP 和 DP 含量在不同下垫面之间普遍存在着显著的差异性,说明下垫面自身的性质对降雨径流中磷含量的影响较大. 图 5 则列出了温州不同下垫面降雨径流中 TP 和 DP 含量的对比情况,就 TP 含量的变化情况而言,2 种路面径流(交通干道和小区路面)的情况相类似,其平均含量和变化范围皆较其他类型径流要大,其原因可能是这 2 种下垫面的汇流面积广泛,且作为道路这 2 种下垫面的交通流量要远远高于其他下垫面类型,因此在大气沉降和人为污染的双重作用下,这 2 种下垫面很容易积累大量的磷,那么在降雨发生时,其径流中TP含量普遍较高,这也与杨德敏[39]、杨钟凯等[40]对城市降雨径流污染的研究结果相类似; 另一方面,小区屋面径流中的 TP 则具有最小的平均含量和变化范围,其原因可能是屋面离地较高、风速较大且多为斜顶,不利于颗粒物的富集,因此造成径流中 TP 含量较低. 反观各种下垫面径流中 DP 含量的变化情况,虽然交通干道和小区路面径流中 DP 同样具有较高的平均含量和变化范围,但是 DP 的最大平均含量和变化范围则出现在汇流口径流中,说明径流经过管道输移过程中的沉淀、解吸以及再悬浮作用后,其 DP 含量要远高于其他类型径流.

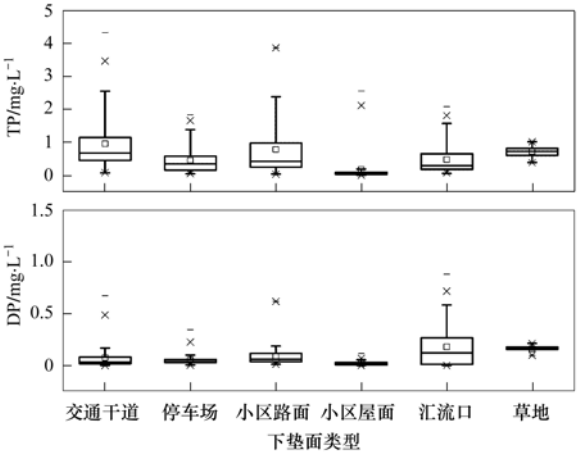

图 5　温州不同下垫面径流中 P 含量箱式图

Fig. 5　Box chart of TP content in different runoffs of Wenzhou

表 2　温州不同下垫面径流中 TP 和 DP 含量单因子方差分析结果

Table 2　One-way ANOVA analysis of concentrations of TP and DP of different urban runoff types of Wenzhou

采样区	降雨场次	下垫面类型	样本数	单因子方差分析结果			
				TP		DP	
山下河	2010-08-18	SXJ、SXT、SXL、SXW	57	$F=25.715$,	$P<0.01$	$F=16.907$,	$P<0.01$
	2010-08-30	SXJ、SXT、SXL、SXW、SXO	58	$F=6.011$,	$P<0.01$	$F=8.887$,	$P<0.01$
	2010-09-01	SXJ、SXT、SXL、SXW、SXO	75	$F=2.620$,	$P<0.05$	$F=10.668$,	$P<0.05$
	2010-09-26	SXJ、SXT、SXL、SXW、SXO	81	$F=34.180$,	$P<0.01$	$F=17.899$,	$P<0.01$
	2010-09-28	SXJ、SXT、SXL、SXW、SXO	55	$F=16.016$,	$P<0.01$	$F=6.991$,	$P<0.01$
九山外河	2010-08-18	JSJ、JST、JSW、JSO	57	$F=12.792$,	$P<0.01$	$F=27.369$,	$P<0.01$
	2010-08-30	JSJ、JST、JSL、JSW、JSO	66	$F=6.211$,	$P<0.01$	$F=14.445$,	$P<0.01$
	2010-09-01	JSJ、JST、JSL、JSW、JSC、JSO	87	$F=4.732$,	$P<0.01$	$F=11.263$,	$P<0.01$
	2010-09-26	JSJ、JSO	19	$F=96.524$,	$P<0.01$	$F=10.313$,	$P<0.05$
	2010-09-28	JSJ、JST、JSL、JSW、JSO	67	$F=30.057$,	$P<0.01$	$F=18.129$,	$P<0.01$

2.4.2　城市降雨径流理化指标与其磷含量的相关关系

很多研究表明,径流中磷的含量与其各种理化指标之间具有较好的相关关系[41~43],利用 SPSS 17.0 对本研究观测到的所有 670 组有效数据进行 Pearson 相关性分析发现,降雨径流中 TP 含量与其 DP、TSS、pH、DO、BOD_5、COD、TIC 以及 TOC 含量之间皆存在着显著的相关关系($P<0.01$),其中,径流中 TP 含量与 DP、TSS、pH、BOD_5、COD、TIC、TOC 含量之间呈现显著的正相关关系,而与 DO 含量之间呈现显著的负相关关系(表 3). 之所以出现这种情况是因为磷酸盐具有较强的可吸附性,极易与径流中的 Fe、Al 以及 Ca 的氧化物结合,因此,径流中 TP 含量会与其 TSS 含量呈现显著的正相关关

系,同时这种吸附关系又不是稳定的,有一部分被吸附的磷酸盐在外界条件发生变化的时候(例如 pH 值的变化)会再次被释放进入水体中[44,45],所以径流中 DP 的含量也同样与 TSS 含量呈现显著的正相关关系. 另一方面,BOD_5、COD、TIC、TOC 等都是径流中重要的碳源,并且也主要是以颗粒态形式存在的,同样可以作为磷酸盐的吸附剂,所以磷含量与这些指标之间也呈现出显著的正相关关系.

表 3 温州降雨径流中磷含量与理化指标的相关关系[1)]

Table 3 Correlation analysis of concentrations of phosphorus and characteristics of urban runoff of Wenzhou

	TP	DP	TSS	pH	Eh	DO	BOD_5	COD	TIC	TOC
TP	1	0.253**	0.568**	0.179**	−0.169**	−0.191**	0.467**	0.752**	0.559**	0.403**
DP		1	0.101**	0.078*	−0.073*	−0.122*	0.225**	0.223**	0.192**	0.278**
TSS			1	0.170**	−0.149**	−0.078	0.437**	0.624**	0.319**	0.395**
pH				1	−0.865**	−0.202**	0.093	0.072	0.389**	0.094*
Eh					1	0.191**	−0.088	−0.073	−0.358**	−0.084*
DO						1	−0.384**	−0.259**	−0.513**	−0.250**
BOD_5							1	0.672**	0.559**	0.560**
COD								1	0.635**	0.654**
TIC									1	0.445**
TOC										1

1) * 表示显著水平为 0.05(显著); * * 表示显著水平为 0.01(极显著)

3 结论

(1)温州城区降雨径流中 TP、DP 以及 PP 的含量分别介于 0.01 ~ 4.32 $mg\cdot L^{-1}$、ND ~ 0.88 $mg\cdot L^{-1}$以及 ND ~ 4.31 $mg\cdot L^{-1}$之间. 不同下垫面径流初期阶段 TP 皆以颗粒态为主,随着径流历时的推移,径流中 PP 与 DP 含量之比会有所下降,个别类型径流也在后期出现以 DP 为主的情况,但总体浓度偏低,不会对下级受纳水体造成压力.

(2)各下垫面径流中 TP 和 DP 的 EMC 主要受下垫面类型、降雨量和降雨强度的综合影响. 历次降雨事件中,交通干道、停车场和小区路面径流中 TP 的 EMC 值一般较高,大多超过了地表水环境Ⅴ类水标准. 而下垫面径流中 DP 的 EMC 值均较低,仅有一例超出地表水Ⅴ类标准的情况出现,因此,如果能够较大程度的去除径流中的颗粒态磷,那么径流中的磷含量就可以达到直排下一级受纳水体的要求.

(3)所监测的各种下垫面径流中 TP 初期冲刷效应较为普遍,但是由于降雨条件、雨前干期等条件的差异,不同降雨场次观测的 TP 初期冲刷强度差异显著; 另外,与 TP 相比 DP 比较难以发生初期冲刷效应,并且往往同一径流序列中不会同时出现 TP 与 DP 的初期冲刷效应,进一步证明城市降雨径流中 TP 主要以 PP 为主.

(4)不同下垫面径流中磷的负荷及变化情况不尽相同,同时,径流的各种理化性质与其磷含量之间也存在着显著的相关性($P<0.01$),因此,针对不同下垫面径流中磷污染的治理工作应采用不同的最佳管理方案,而降低其 TSS 含量则是削减磷污染负荷的有效途径之一.

参考文献:

[1] Novotny V, Olem H. Water quality: prevention, identification, and management of diffuse pollution[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993. 2.

[2] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, **19**(5): 87-91, 96.

[3] 郭青海, 马克明, 赵景柱, 等. 城市非点源污染控制的景观生态学途径[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(5): 977-981.

[4] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. 环境科学, 2004, **25**(6): 32-39.

[5] Brezonik L P, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. Water Research, 2002, **36**(7): 1743-1757.

[6] US EPA. National water quality inventory. Report to Congress Executive Summary[R]. Washington DC: US EPA. 1995. 497.

[7] Deletic A B, Maksimovic C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, **124**(9): 869-879.

[8] US EPA. Meeting the environmental challenge[R]. Washington DC: US EPA, 1990. 46.

[9] 王和意, 刘敏, 刘巧梅, 等. 城市降雨径流非点源污染分析与研究进展[J]. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(6): 283-285.

[10] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报, 2005, **25**(12): 3225-3230.

[11] 常静, 刘敏, 许世远, 等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J]. 地理研究, 2006, **25**(6): 994-1002.

[12] 常静, 刘敏, 李先华, 等. 城市地表灰尘-降雨径流系统重金属生

物有效性研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2241-2247.
[13] 边博, 朱伟, 黄峰, 等. 镇江城市降雨径流营养盐污染特征研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 19-25.
[14] 陆雍森. 环境评价[M]. (第二版). 上海: 同济大学出版社, 1999.
[15] 程波, 张泽, 陈凌, 等. 太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(Z1): 118-124.
[16] 程红光, 岳勇, 杨胜天, 等. 黄河流域非点源污染负荷估算与分析[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(3): 384-391.
[17] 聂发辉. 上海城市景观绿地削减地表径流及其污染负荷的可行性研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
[18] Hsieh C H, Davis A P, Needelman B A. Bioretention Column studies of phosphorus removal from urban stormwater runoff[J]. Water Environment Research, 2007, **79**(2): 177-184.
[19] 张志超, 黄霞, 肖康, 等. 脱氮除磷膜-生物反应器的除磷效果及特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, **48**(9): 1472-1474, 1478.
[20] Scanlona T M, Kielya G, Xie Q S. A nested catchment approach for defining the hydrological controls on non-point phosphorus transport[J]. Journal of Hydrology, 2004, **291**(3-4): 218-231.
[21] Malone R F, Saidi H, Wegener K. Predictive accuracy determination applied to a linear model phosphorus loading resulting from urban runoff[J]. Applied Mathematical Modeling, 1984, **8**(2): 81-88.
[22] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 城市面源污染特征的分析[J]. 水资源保护, 2005, **21**(2): 1-4.
[23] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 沥青油毡屋面降雨径流污染物浓度历时变化研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(4): 601-606.
[24] Li L Q, Yin C Q, He Q C, *et al*. First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(3): 295-299.
[25] 赵磊, 杨逢乐, 王俊松, 等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(8): 1561-1570.
[26] 边博. 前期晴天时间对城市降雨径流污染水质的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3522-3526.
[27] Roberts A D, Prince S D, Jantz C A, *et al*. Effects of projected future urban land cover on nitrogen and phosphorus runoff to Chesapeake Bay[J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(12): 1758-1772.
[28] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1753-1759.
[29] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 607-612.
[30] Förster J. The influence of location and season on the concentrations of macroions and organic trace pollutants in roof runoff[J]. Water Science and Technology, 1998, **38**(10): 83-90.
[31] 卓慕宁, 吴志峰, 王继增, 等. 珠海城区降雨径流污染特征初步研究[J]. 土壤学报, 2003, **40**(5): 775-778.
[32] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. Water Research, 2000, **34**(6): 1773-1780.
[33] Gupta K, Saul A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows[J]. Water Research, 1996, **30**(5): 1244-1252.
[34] 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.
[35] Barrett M E, Irish L B Jr, Malina J F Jr, *et al*. Characterization of highway runoff in Austin, Texas, Area[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, **124**(2): 131-137.
[36] Drapper D, Tomlinson R, Williams P. Pollutant concentrations in road runoff: Southeast Queensland case study[J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, **126**(4): 313-320.
[37] Lee J H, Bang K W, Ketchum L H, *et al*. First flush analysis of urban storm runoff[J]. Science of the Total Environment, 2002, **293**(1-3): 163-175.
[38] Geiger W F. Flushing effects in combined sewer systems[A]. In: Yen B C, editor. Proceedings of the 4th international conference on urban storm drainage[C]. Lausanne, Switzerland, 1987. 40-46.
[39] 杨德敏, 曹文志, 陈能汪, 等. 厦门城市降雨径流氮、磷污染特征[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(6): 625-628.
[40] 杨钟凯, 蒋小欣. 苏州古城区降雨径流污染及其防治措施研究[J]. 江苏水利, 2008, (7): 43-45.
[41] 赵由才, 牛冬杰, 柴晓丽. 固体废物处理与资源化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 197-203.
[42] 夏宏生, 向欣. 城市道路降雨径流中悬浮颗粒特性及其全过程削减探讨[J]. 环境科学与管理, 2009, **34**(5): 34-37.
[43] Wu X, Yang X E, Rengel Z. Phytoremediation facilitates removal of nitrogen and phosphorus from eutrophicated water and release from sediment[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **157**(1-4): 277-285.
[44] Liikanen A, Puustinen M, Koskiaho J, *et al*. Phosphorus removal in a wetland constructed on former arable land[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(3): 1124-1132.
[45] 席北斗, 徐红灯, 翟丽华, 等. pH 对沟渠沉积物截留农田排水沟渠中氮、磷的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2007, **29**(7): 490-494.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 8

Aug. 15, 2012

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea ····· LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, *et al.* (2533)

Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei ····· SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, *et al.* (2538)

Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane ····· HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, *et al.* (2551)

Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors ····· YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, *et al.* (2558)

Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting ····· ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, *et al.* (2563)

Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water ····· XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2580)

Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake ····· CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2621)

Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of *Acorus calamus* in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir ····· LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, *et al.* (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, *et al.* (2644)

Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions ····· YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, *et al.* (2652)

Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS ····· BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, *et al.* (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, *et al.* (2674)

Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal ····· ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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 Lü-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, *et al.* (2715)

Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization ····· ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, *et al.* (2723)

Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H_2O_2 Process ····· LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, *et al.* (2728)

Optimization of *Chlorella pyrenoidosa*-15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment ····· WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, *et al.* (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, *et al.* (2741)

Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green ····· QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, *et al.* (2747)

Low-Temperature Preparation of TiO_2/PS/Fe_3O_4 and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery ····· WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, *et al.* (2752)

Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating ····· ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, *et al.* (2759)

Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge ····· GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, *et al.* (2766)

Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge ····· SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, *et al.* (2773)

Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment ····· YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, *et al.* (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-qiang, LI Hua, XIONG Ying, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2817)

Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs ····· ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, *et al.* (2825)

Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by *Lasiodiplodia theobromae* ····· ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, *et al.* (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, *et al.* (2840)

Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing ····· QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2868)

Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb^{2+} and Cu^{2+} on Nano-HAP Surfaces ····· HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2901)

Current Research Situation of H_2S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts ····· HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, *et al.* (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