

城市区域降雨径流季节性初期冲刷效应研究

王宝山¹, 赵峰德¹, 温成成¹, 黄廷林²

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 探究降雨径流的季节性初期冲刷现象对城市水环境治理和水污染防治具有重要意义。以无量纲化后的雨水径流污染物输送量与有效降雨量为基础,通过建立径流污染物的季节性初期冲刷效应定量评价模型,对建筑屋顶和校园区域雨水径流季节性初期冲刷现象进行了研究。结果表明:建筑屋顶和校园区域年雨水径流水质具有相似的变化规律,径流污染物浓度总体上呈现出雨季始末两期高于中期的现象;研究区域中呈现了不同的冲刷性质,SS和TN显示出较强的季节性初期冲刷效应,以春季控制为主,而COD和TP的季节性初期冲刷效应较弱,以春季和深秋双季控制为主。

关键词: 季节性初期冲刷; 降雨径流; 面源污染; 海绵城市

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0001-05

Study on seasonal first flush effect of rainfall runoff in Urban Regions

WANG Baoshan¹, ZHAO Fengde¹, WEN Chengcheng¹, HUANG Tinglin²

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: It is of great significance to explore the seasonal first flush phenomenon of rainfall runoff for urban water environment management and water pollution control. Based on the dimensionless handled rainwater runoff pollutants and effective rainfall, the mathematical model for quantitative evaluation the seasonal first flush effect of rainwater runoff pollutants was established. The established mathematical model was applied to investigate the seasonal first flush effect on building roof and on campus. Results showed that the relationship between the average concentration of runoff pollutants and effective rainfall is similar in the building roof and on campus. The concentration of runoff pollutants in the early and late stages of rainy season was higher than that in the middle stages of rainy season. The strength of seasonal first flush was different in the study area, and the seasonal first flush phenomenon was found significantly for SS and TN while the strength of seasonal first flush (SFF) was relatively lower for COD and TP. SS and TN are mainly controlled in spring while COD and TP are mainly controlled in spring and late autumn.

Key words: seasonal first flush; rainwater runoff; non-point source pollution; sponge city

1 研究背景

城市雨水径流污染主要在雨季形成,在降雨冲刷作用下,以径流排放的方式对城市水环境构成一定威胁^[1]。城市降雨径流是世界许多城市化地区水质污染的主要原因之一^[2],因此雨水径流引起的面源污染问题日益受到人们的重视^[3]。城市径流是城市地表累积污染物输出、传送和扩散的主要驱动力^[4],在雨季前期的径流阶段,径流中携带了较

雨季中后期更多污染物的现象,称之为季节性初期冲刷效应^[5]。基于季节性初期冲刷规律,对雨季初期径流进行终端处理,则可有效地控制雨水径流造成的面源污染^[6-9]。季节性初期冲刷现象的存在导致雨水径流污染的控制存在重点时期,因此可对径流污染物在最佳有效控制期采取相应地控制方式,以减小对城市生态环境的污染程度^[10]。

国内外对降雨径流季节性初期冲刷效应的研究,主要集中在污染物类型、形态和不同土地利用类型等

收稿日期:2018-08-11; 修回日期:2018-11-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51368029); 甘肃省重点研发计划项目(17YF1FA114)

作者简介:王宝山(1979-),男,山东临朐人,博士研究生,副教授,硕士生导师,主要从事环境污染防控与治理方面的研究工作。

对季节性初期冲刷效应的影响方面。Lee 等^[5]研究表明,汇水面性质对径流水质有重要的影响,季节性初期冲刷强度与集水区的土地利用类型及特征有关。Soller 等^[11]研究表明,季节性初期冲刷现象具有普遍性和不确定性,汇水区域下垫面的性质和降雨特性的耦合作用导致了污染物不同的季节性初期冲刷强度;溶解性重金属的季节性初期冲刷现象比颗粒态更为明显。国内外学者对径流污染季节性初期冲刷的定量评价研究较少,从而导致了区域径流污染的高负荷季节及特征难以获得,进而难以采取科学合理的径流污染管理措施,以减少径流面源污染对水环境的影响。鉴于此,本文以西安市为研究区域,建立雨水径流季节性初期冲刷定量评价模型,对雨水径流污染物的季节性初期冲刷效应定量特征进行研究,以期为我国海绵城市建设中雨水径流污染控制提供一定的理论基础和技术支撑。

2 研究区域与方法

2.1 研究区域

研究区域位于陕西省西安市,西安市具有雨季、旱季分明,雨量适中等气候特点,是典型的具有西北寒旱地区降雨特征的代表城市,具体降雨量分配见图 1。

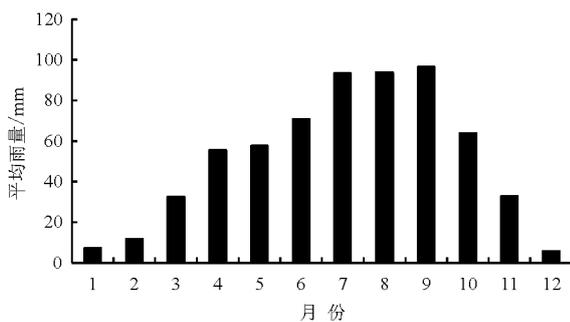


图 1 西安市多年平均降雨量月平均分配量图

据图 1 中西安市多年平均降雨量的分布状况知,西安市每年的 4-10 月为主要降雨期,11-3 月为旱期,故试验研究选择时间段为雨期 4-10 月份,具体实验研究以西安市区某校园区域和建筑屋顶为研究对象。校园区域位于南郊,该区域毗邻西安市城市交通主干道,径流水质受到城市车辆运输的影响,区域内土地利用类型以建筑屋顶和道路为主,绿化率约 20%,汇水面积为 1.64 hm²,雨水管道长度 270 m,区内排水为雨污完全分流制,雨水通过雨水管道收集后排放;建筑屋顶位于某居民住宅小区,远离工业区,屋面径流水质主要受区域自然气候因素

的影响,人为因素影响甚微(在具体研究过程中可以忽略不计),屋顶为平顶屋面,汇水区域面积约为 300 m²,雨期屋面雨水经集雨水管收集后进行排放。

2.2 测试指标和方法

在建筑屋顶雨水落水管处和校园区域雨水汇流终点雨水管处分别进行连续取样,屋顶雨水利用雨水管收集后进行流量测定,校内区域径流量通过汇流终点管道内的流量直接获得。水样测定指标具体方法参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版),主要测定污染指标有:SS(重量法)、COD(重铬酸钾法)、TN(碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法)、TP(钼酸铵分光光度法)。

2.3 季节性初期冲刷效应定量评价模型

根据雨水径流污染输送过程与有效降雨量的相关性^[12],对季节性初期冲刷效应进行量化分析,可实现季节变化对径流污染冲刷规律的定量评估。以下为雨期季节性初期冲刷规律量化评价模型的具体建立过程。

对一年内雨季雨水径流污染物输送量进行无量纲化处理可得:

$$L = \sum_{i=1}^k m_i(t) / \sum_{i=1}^k M_i = \sum_{i=1}^k \int_0^t C_i(t) Q_i(t) dt / \sum_{i=1}^k \int_0^T C_i(t) Q_i(t) dt \quad (1)$$

式中: L 为无量纲化后的雨水径流污染物输送量; $m_i(t)$ 为第*i*场降雨*t*时刻的雨水径流污染物输送量,mg; M_i 为第*i*场降雨冲刷的污染物总量,mg; $C_i(t)$ 为第*i*场降雨*t*时刻的污染物质量浓度,mg/L; $Q_i(t)$ 为第*i*场降雨*t*时刻的雨水径流量,L/min; T 为第*i*场降雨径流计算时间,min; k 为年降雨场次。

根据有效降雨量的表征含义,令 $v_i(t)/A = h_i(t)$, $V_i/A = H_i$,则一年内无量纲化后的有效降雨量可表达为:

$$F = \sum_{i=1}^k h_i(t) / \sum_{i=1}^k H_i = \sum_{i=1}^k v_i(t) / \sum_{i=1}^k V_i = \sum_{i=1}^k \int_0^t Q_i(t) dt / \sum_{i=1}^k \int_0^T Q_i(t) dt \quad (2)$$

式中: F 为无量纲化后的有效降雨量; $v_i(t)$ 为第*i*场降雨*t*时刻的雨水径流输送量,L; V_i 为第*i*场降雨的雨水径流总输送量,L; $h_i(t)$ 为第*i*场降雨*t*时刻的有效降雨量,mm; H_i 为第*i*场降雨的有效降雨量,mm; A 为汇流区域面积,m²。

由公式(1)和(2)可确定函数关系,具体如下:

$$L = f(F) \quad (3)$$

为了量化评估季节性初期冲刷效应的强度,引入间隙函数 Y 用以表示 L 与 F 之间距:

$$Y = L - F = f(F) - F, \quad 0 \leq F \leq 1 \quad (4)$$

利用间隙函数与 X 轴的面积表示雨水径流污染物的季节性初期冲刷强度(SFF):

$$SFF = \int_0^1 [f(F) - F] dF \quad (5)$$

公式(5)为季节性初期冲刷效应定量评价函数,定量值为 SFF 。污染物全部在雨季初期输送时, $SFF \rightarrow 0.5$; 当污染物全部趋向雨季后期输送时, $SFF \rightarrow -0.5$, 因此 $-0.5 \leq SFF \leq 0.5$ 。季节性初期冲刷现象发生的临界值 $SFF = 0$, 若 $SFF < 0$ 则不发生季节性初期冲刷效应。 SFF 越大, 则季节性初期冲刷强度越强。

3 结果与讨论

3.1 径流污染物浓度季节性变化

对2008年的雨季雨水径流主要污染物进行监测, 统计分析建筑屋顶和校园区域雨水径流水质, 具体结果见图2、3。

通过图2、3可知, 建筑屋顶和校园区域的年内雨水径流水质随有效降雨量的变化规律具有相似性。降雨初期, 径流污染物浓度普遍较高, 随着有效降雨量的逐渐增加, 径流污染物浓度虽然因场次降雨特征的不同导致在较小范围内出现一定的波动, 但由于雨水的强冲刷作用导致了径流污染物呈现出明显的稀释效应, 从而径流污染物浓度总体上呈现下降趋势。分析对比图2、3可见, 建筑屋顶雨季初期径流污染物SS、COD、TN和TP浓度分别为中期的2.2、1.3、3.5和1.2倍; 校园区域雨季初期SS、COD、TN和TP浓度分别为中期的2.6、1.8、8.5和2.1倍。校园区域较建筑屋顶污染物质量浓度下降趋势更显著, 主要在于校园区域较高的清扫频率导致了污染物不能持续性累积, 在雨季高频率的降雨冲刷下, 径流污染负荷整体上呈现出更大的下降幅度。随着雨季结束, 径流污染物浓度又逐渐升高, COD和TP浓度均回升至雨季初期的径流污染水平, 建筑屋顶雨季末期径流污染物COD和TP浓度分别升高至中期的1.5、2.2倍, 而校园区域COD和TP浓度分别升高至中期的2.5、2.2倍。建筑屋顶雨季末期径流污染物COD和TP浓度相较于校园区域增幅更小, 主要由于COD和TP的径流污染水平受降雨特征的影响较小, 而受下垫面污染物积累量的影响较大, 建筑屋顶卫生清理频率很小, COD和

TP持续性累积, 在雨水冲刷下不断释放而转移到径流中, 造成整个雨季径流污染水平变化幅度较小, 因此在雨季后期建筑屋顶COD和TP径流污染水平增幅较小; 此外, 由于校园区域有一定的绿化面积, 在雨水的不断冲刷下, 绿化区土壤侵蚀、化肥和农药的冲刷以及枯萎植物的腐化致使COD和TP输出, 导致雨季后期COD和TP增幅较大。SS和TN浓度在雨季后期也有一定程度的升高, 但由于研究区域雨季初期降雨对TN的强冲刷作用, 导致可冲刷TN污染物的急剧衰减, 同时由于以颗粒态形式迁移于地表水的TN沉积过程主要发生在雨前的早期, 因此在雨季中后期TN累积时间的短暂导致积累量较少, 从而引起雨季后期TN浓度升高幅度较小。校园区域因人员活动和邻近城市主干道车辆的行驶增加了SS的积累量, 导致SS浓度升高趋势较建筑屋顶更为明显。

雨季初期雨水径流水质深受雨前干旱期长度的影响, 早期污染物长期的积累导致了雨季初期径流污染物平均浓度普遍较高^[13-15]。随着雨季的到来, 降雨频率增加, 地表沉积物的积累量下降明显, 于是雨水径流污染物浓度降低显著。通常当雨水径流下垫面的不透水性良好、汇水面积较小、降雨强度较大时, 雨季中期径流污染负荷的降低程度更为显著^[5]。随着雨季的结束, 降雨时间间隔变长, 降雨量减少, 导致地表沉积物含量开始升高, 从而增加了雨水径流污染水平。同时降雨后期正值植物落叶时节, 植物残体的腐化, 雨水径流将部分腐殖质冲刷至径流水体中, 引起径流污染物TP和有机物浓度的显著增加。

3.2 雨水径流季节性初期冲刷效应

按公式(4)计算建筑屋顶和校园区域季节性初期冲刷效应, 结果见图4、5。

由图4、5可见, 建筑屋顶和校园区域季节性初期冲刷间隙函数(Y)的变化规律具有相似性, SS和TN总体呈现单峰曲线变化, 峰值为正值, 而COD和TP呈现为类正弦曲线的双峰曲线变化, 分别为正峰值和负峰值。

由于在 Y 峰值区域, 雨水径流污染物输送量与有效降雨量间相差最大, 此时有效降雨量对应的降雨时期为径流污染物污染负荷高峰期, 因此在 Y 峰值区域可对雨水径流污染物进行高效控制^[16]。建筑屋顶和校园区域的径流污染物SS和TN分别在无量纲化后的有效降雨量 F 为0.3和0.2时, 函数 Y 达到峰值(最大值), 此时全年前30%的有效降雨量

形成的径流携带了全年近一半的 SS 和 TN,故研究区域在 F 为 0.3 前(即每年 6 月前)可对 SS 和 TN 进行重点控制。COD 和 TP 呈现为双峰过程, F 在 0.2 和 0.7 时,即为每年的 5 月底和 9 月中旬, Y 分

别达到正负峰值,此时全年前 50% 的有效降雨量形成的径流携带了全年近 70% 的 COD 和 TP,故研究区域 COD 和 TP 控制的重点时期可以化分为每年 5 月前和 9 月中旬以后的两段时期。

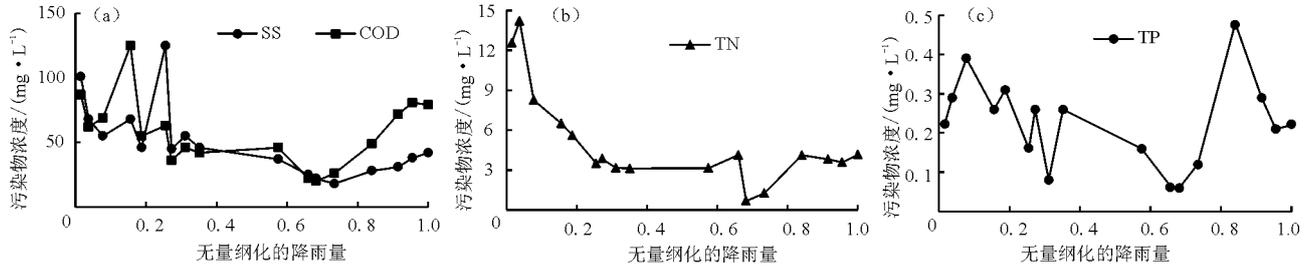


图2 建筑屋顶雨水径流污染物平均浓度与有效降雨量的关系

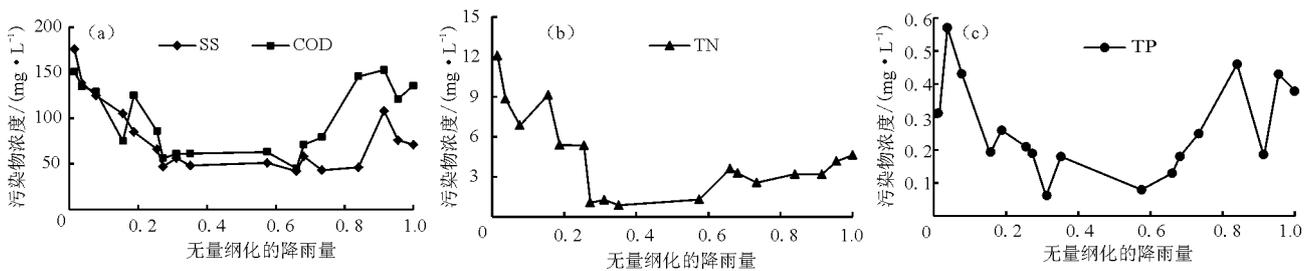


图3 校园区域雨水径流污染物平均浓度与有效降雨量的关系

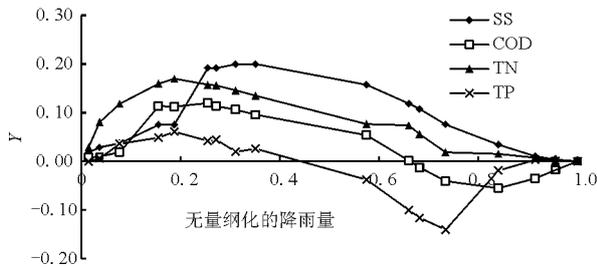


图4 建筑屋顶的季节性初期冲刷效应

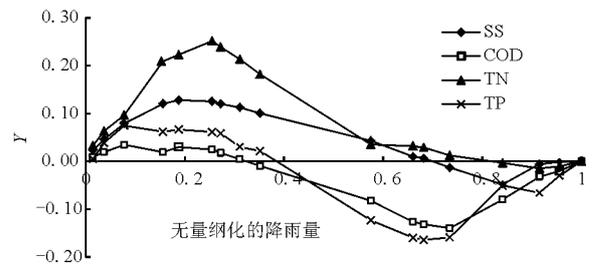


图5 校园区域的季节性初期冲刷效应

通过对图 4、5 结果的分析,不同径流污染物具有不同的降雨冲刷效应,但径流季节性初期冲刷效应具有普遍性,亦即径流污染物总有趋向雨季前期输送的现象,利用间隙函数 Y 可以确定雨水径流污染物输送量与有效降雨量(降雨时间)之间的变化关系,从而可对径流污染物在最佳控制时期进行控制。对雨水径流污染物 SS 和 TN,建筑屋顶和校园区域季节性初期冲刷间隙函数(Y)值基本上均为正值,且单峰值区域出现较早,表明整个降雨期内冲刷效应较稀释效应大,雨季初期雨水冲刷现象明显,说明了研究区域雨季初期径流携带了较多的 SS 和 TN,因此 SS 和 TN 应重视雨季初期径流污染的控制,而对 COD 和 TP,建筑屋顶和校园区域季节性初期冲刷间隙函数(Y)基本上均呈现出类正弦曲线的双峰变化趋势,说明了研究区域在雨季始末两期

径流中 COD 和 TP 的含量较高,因此 COD 和 TP 的控制应重视雨季初期和后期径流污染的控制。

3.3 雨水径流季节性冲刷强度 SFF

对建筑屋顶、校园区域季节性初期冲刷强度按照公式(5)进行计算,具体结果见图 6。

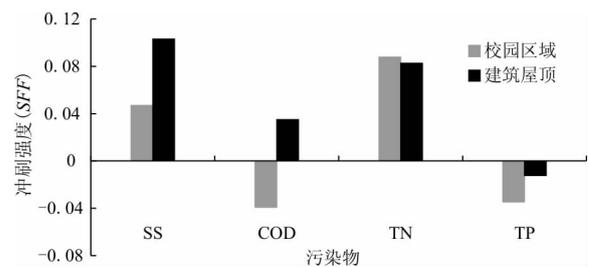


图6 季节性初期不同污染物冲刷强度

由图 6 可见,不同类型污染物的 SFF 具有一定的差异,SS 和 TN 的 SFF 为正值,显示了较强的季

节性初期冲刷效应,而TP的 SFF 为负值,即 $SFF \leq 0$,没有发生季节性初期冲刷效应;COD在不同研究地点表现出不同的冲刷性质,主要由于在不同的汇水区域,COD的积累情况出现差异性。此外,不同下垫面的径流系数不同,导致对雨水径流污染物COD的输送能力不同,最终表现出对有机污染物冲刷强度的不同。建筑屋顶不透水性良好,汇水面积较小,下垫面单一等是导致COD发生季节性初期冲刷的重要原因^[17-19]。同时,污染物形态也会影响到季节性初期冲刷强度,由于溶解性有机物较非溶解性有机物更易溶解、迁移至径流中,因此溶解性有机物的 SFF 通常大于非溶解有机污染物,呈现出更强的季节性初期冲刷效应^[14]。综上所述,研究区域(西安市)的地域特性决定了污染物的季节性初期冲刷性质,且不同污染物表现出不同冲刷强度。

西安市冬季供暖以燃煤型为主,冬季供暖期与干早期重合,供暖期燃煤排放源增加了早期的大气降尘,导致地表污染物积累量增加,引起地表污染负荷增大,由于地面污染物积累量与径流初始浓度呈正相关关系,因此雨季初期径流污染负荷很高,亦即冬季燃煤供暖增加了地表污染物含量,可能由于冬季燃煤供暖对SS和TN的积累影响较大,因此导致季节性初期冲刷强度 SFF 显示了差异。此外,雨季末期,植物残枝败叶的腐化导致了径流污染物浓度的升高,从一定程度上弱化了季节性初期冲刷强度,由于植物残体的腐化对COD和TP的积累影响大于SS和TN,从而在一定的程度上引起季节性初期冲刷强度 SFF 的差异性。 SFF 的不同,导致了对污染物的控制措施产生了差异,即SS和TN以春季控制为主,而COD和TP以春季和深秋双季控制为主。

4 结 论

通过对建筑屋顶和校园区域降雨径流季节性初期冲刷现象的研究,主要结论如下:

(1)建筑屋顶和校园区域年雨水径流污染物含量随无量纲化后有效降雨量的变化趋势具有相似性。研究区域径流污染物浓度总体上呈现出雨季始末两期高于中期的现象。

(2)SS和TN显示出较强的季节性初期冲刷效应,COD和TP的季节性初期冲刷效应较弱。SS和TN以春季控制为主,COD和TP以春季和深秋双季控制为主。研究区域季节性冲刷强度值 SFF 的差异性,主要是研究区域(西安市)的季节及降雨特性决定的。

参考文献:

- [1] 张千千. 重庆市渝北区暴雨径流污染特征及河流水质动态研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
- [2] 贺涛,管伟,杨乐亮,等. 快速城市化地区典型城市路面径流污染试验及特征分析[J]. 水电能源科学,2014,32(10):30-33.
- [3] 曹宏宇,黄申斌,李娟英,等. 上海临港新城初期地表径流污染特性与初期效应研究[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(6):66-71.
- [4] 李春林,刘森,胡远满,等. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应[J]. 生态学报,2013,33(18):5952-5961.
- [5] LEE H, LAU S L, KAYHANIAN M, et al. Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges[J]. Water Research, 2004, 38(19):4153-4163.
- [6] 何俊超,许萍,张雅君,等. 深圳市道路降雨径流初期冲刷效应及初期弃流量分析[J]. 市政技术,2015,33(4):81-86.
- [7] 何康茂. 城市化流域降雨径流污染冲刷特征及模拟研究[D]. 北京:北京大学,2014.
- [8] 朱彤,赵杨,车伍,等. 杭州市雨水径流污染分析及控制对策[J]. 中国给水排水,2015,31(17):119-123.
- [9] 张琼华,王倩,王晓昌,等. 典型城市道路雨水径流污染解析和利用标准探讨[J]. 环境工程学报,2016,10(7):3451-3456.
- [10] 王宝山. 城市雨水径流污染物输移规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
- [11] SOLLER J, STEPHENSON J, OLIVIERI K, et al. Evaluation of seasonal scale first flush pollutant loading and implications for urban runoff management[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76(4):309-318.
- [12] 高正,黄介生,曾文治,等. 基于SWAT模型的清江长阳段非点源污染及其控制方案研究[J]. 中国农村水利水电,2016(9):174-177.
- [13] 刘萍. 深圳湾红树林湿地地面源污染研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2011.
- [14] 刘勇华,高超,王登峰,等. 城市降雨径流污染初始冲刷效应对BMPs选择的启示[J]. 水资源保护,2009,25(6):29-32.
- [15] 汪楚乔,陈柔君,吴磊,等. 宜兴典型村落不同下垫面降雨径流污染物排放特征[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(4):632-638.
- [16] 张凡,董志龙,王宝山. 建筑屋顶雨水径流初期冲刷效应研究[J]. 环境污染与防治,2011,33(6):32-35.
- [17] 王书敏,郭树刚,何强,等. 城市流域降雨径流水质特性及初期冲刷现象[J]. 环境科学研究,2015,28(4):532-539.
- [18] 陆怡诚,纪桂霞,吕天恒,等. 城市屋面雨水初期径流污染特征与规律研究[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(4):85-88.
- [19] 马英. 城市降雨径流面源污染输移规律模拟及初始冲刷效应研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.