

# 苏州古城各功能区路面降雨径流分析

王旭婷, 吴 玮\*, 李 淮

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215000)

**摘要:**通过对苏州市古城区内商业区、现代住宅区、老旧住宅区、交通区、园林旅游区这 5 种具有代表性的功能区路面降雨径流中 SS、COD、TN、 $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ 、TP 水质指标的分析,探讨了不同功能区降雨径流中污染物浓度差别,不同污染物之间的相关性关系和初期冲刷效应。结果表明,路面降雨径流中污染物浓度存在空间分布差异,商业区和交通区路面径流污染最为严重,其中交通区 SS 的  $E_{\text{EMC}}$  值超出污水综合排放二级标准 16.79 倍, COD 的  $E_{\text{EMC}}$  值超出地表水环境质量 V 类标准 6.88 倍;降雨径流中 SS 与 TP、TN、COD 之间存在良好的相关性,交通区路面降雨径流中各污染物之间呈现极显著性相关;不同功能区路面降雨径流中污染物大多存在初期冲刷现象,交通区与园林旅游区出现初期冲刷频率高,商业区和老旧住宅区初期冲刷强度大,相比其他污染物,SS 最易出现初期冲刷现象,降雨特征参数对初期冲刷效应有一定影响。

**关键词:**路面降雨径流; 空间分异; 相关性; 初期冲刷效应; 苏州古城区

中图分类号:X52

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2019)07-0009-06

## Analysis of pavement rainfall runoff in various functional areas of Suzhou Ancient City

WANG Xuting, WU Wei\*, LI Huai

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology,  
Suzhou 215009, Jiangsu)

**Abstract:** The differences of pollutant concentration, the correlation between different pollutants and the first flush effect in rainfall runoff of different functional areas were discussed, through analysis the water quality indexes such as SS, COD, TN,  $\text{NH}_3 - \text{N}$  and TP in the five representative functional areas, including commercial areas, modern residential district, old residential district, transportation area and landscape tourist areas in Suzhou Ancient City. The results showed that there was a spatial distribution difference of concentration of pollutants in runoff, and the pollution in commercial and traffic area were more serious than other areas. There was a good correlation between SS and TP, TN and COD in rainfall runoff, and there was a very significant correlation between the pollutants in the runoff of transportation area. During the rain flush, most pollutants had first flush effect. The traffic area and the landscape tourist area had high first flush frequency, and the first flush intensity of commercial areas and old residential areas was large. Compared with other pollutants, SS was most prone to initial scouring. The rainfall characteristic parameters had a certain influence on the first flush effect.

**Key words:** pavement rainfall runoff; spatial distribution difference; correlation; first flush effect; Suzhou Ancient City

收稿日期:2019-05-30

基金项目:江苏省水利科技项目(2017015)

作者简介:王旭婷(1994—),女,硕士,研究方向为水污染控制与理论。

通讯作者:吴玮(1979—),女,博士,副教授,研究方向为河道水污染控制与水环境修复。

近年来,城市污水集中处理的力度不断加大,点源污染逐步得到全面控制,城市降雨径流带来的非点源污染逐步成为城市水环境恶化的主要因素<sup>[1]</sup>。

国外自 20 世纪 70 年代起致力于城市降雨径流污染及其控制的研究,在降雨径流污染物空间分异、初期冲刷效应(FFE)等方面有了长足的发展<sup>[2-5]</sup>。我国对于城市降雨径流污染的研究开始于 20 世纪 80 年代,先后目前已在北京、上海、天津、深圳、合肥等城市开展了降雨径流水文水质特征研究<sup>[6-10]</sup>。本研究选择苏州市老城区为研究对象,分析了老城区中不同功能区降雨径流污染的主要特征和差异,为苏州区域水质提升与水生态安全保障技术的研究及处理措施建设提供数据和理论支持,同时对苏州市海绵城市建设,黑臭河道整治均具有积极、重要的现实意义。

## 1 研究区与分析方法

### 1.1 研究区概况

苏州市地势平坦,是典型的平原河网城市,四季分明,气候湿润温和,雨量充沛,年平均降雨量约 1200 mm,年平均降雨日约 130 d,降雨多分布于 4~9 月,约占全年降水量的 52.7%。研究选取的城市降雨径流监测区域为护城河以内的苏州市老城区,是苏州最繁华、人口最为集中的区域之一。分别于老城区内商业区、现代住宅区、老旧住宅区、交通区和园林旅游区 5 处不同的功能区取点采样,进行降雨径流分析。商业区选择观前街作为监测点,观前街是苏州市最繁华的商业区,路面为大理石;现代住宅区选择狮林苑作为监测点,狮林苑是高档园林式别墅区,路面为透水混凝土;老旧住宅区选择桃花坞大街作为监测点,桃花坞大街房屋建设年代久远,布局密集、凌乱,路面为方格砖石和细小碎石;交通区选择临顿路作为监测点,临顿路是苏州市古城中部的一条南北向重要道路,路面为沥青;园林旅游区选择朴园作为监测点,朴园是古典私家园林,路面为方格砖。

### 1.2 样品采集

于 2015 年 4~7 月,在 5 个采样点径流汇集处采集水样,共获得 5 次完整的场次降雨样品。当径流产生时开始计时,分别在 0,5,10,15,20,25,30,40,50,60,80,100,120 min 时,及之后每隔 30 min,直至降雨结束,采用自制取样器放入检查井中,用 1L 聚乙烯瓶进行取样。自制取样器内设有体积刻

度尺,收集样品的同时用秒表计时,用容积法监测径流量,在监测点附近安装 JDZ01-1 型翻斗式雨量计,同步记录降雨参数,降雨特征参数见表 1。

### 1.3 样品分析及水质评价标准

样品采集后立刻送入实验室进行分析,水质检测指标包括:悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ )。指标均按照文献中的标准方法进行测定<sup>[11]</sup>。

本研究采用《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)和《污水综合排放标准》(GB8978-1996)作为评价本次降雨径流水质的标准。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降雨径流污染物空间分布差异

受不同功能区现状特征、下垫面性质和污染物类型等因素的影响,路面降雨径流中各项污染物浓度差异较大。根据 5 次降雨检测结果,对 5 种不同功能区路面降雨径流中 SS、COD、TP、TN 和  $\text{NH}_3^+ - \text{N}$  5 个指标浓度变化进行分析,得到降雨径流事件中各污染物的 EMC 区间图(图 1)。由图 1 可知:

(1)不同功能区现状特征对降雨径流中 SS 和 COD 浓度有直接影响。交通区路面径流中 SS 和 COD 的  $E_{\text{EMC}}$  值最高,其中 SS 的  $E_{\text{EMC}}$  值(503.58 mg/L)超出污水综合排放二级标准 16.79 倍,COD 的  $E_{\text{EMC}}$  值(275.05 mg/L)超出地表水环境质量 V 类标准 6.88 倍,污染状况十分严重。这主要与交通区沥青路面的老化分解、轮胎磨损、汽车尾气排放以及行人活动的影响有关。

(2)从 TN 浓度来看,老旧住宅区的  $E_{\text{EMC}}$  值(4.65 mg/L)高于其他 4 个功能区,这是由于路面径流中 N 的主要来源是人类的生活动,老旧住宅区采样点选择的桃花坞大街人口密集,布局混乱,居民的卫生环境意识较差,会使地表径流中的 N 含量增多。

(3)降雨径流中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的污染程度并不是很高,且空间分异也不是十分显著,一方面可能是其受降雨径流的稀释作用影响较大,另一方面则是在降雨径流过程中,N 的形态随着降雨历时而发生了改变,这都导致  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的浓度变低。但当降雨强度较大时,与土壤或者绿地直接接触的路面中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  则可能会受到土壤中污染物溶出的影响而出现增大现象,这与黄金良<sup>[12]</sup>等的研究结果相符。

(4)与其他功能区相比较,商业区路面径流中

表 1 所监测的场次降雨特征

降雨日期/ 年-月-日	降雨量 /mm	降雨历时 /h	平均雨强 /mm·h <sup>-1</sup>	最大雨强 /mm·h <sup>-1</sup>	前期晴天数 <sup>1)</sup> /d	降雨 等级 <sup>2)</sup>	样品数 /个
2015-04-07	12.2	1.8	6.8	14.2	7	中雨	56
2015-05-08	16.7	2.6	6.4	15.6	9	大雨	69
2015-05-28	12.6	2.4	5.3	13.4	6	中雨	71
2015-06-15	30.2	3.1	9.4	22.7	12	暴雨	72
2015-07-11	18.2	4.4	4.1	10.1	1	中雨	72

1) 前期晴天数是指与上次降雨雨量超过 5mm 降雨事件的间隔时间

2) 降雨等级根据 24h 降雨标准划分

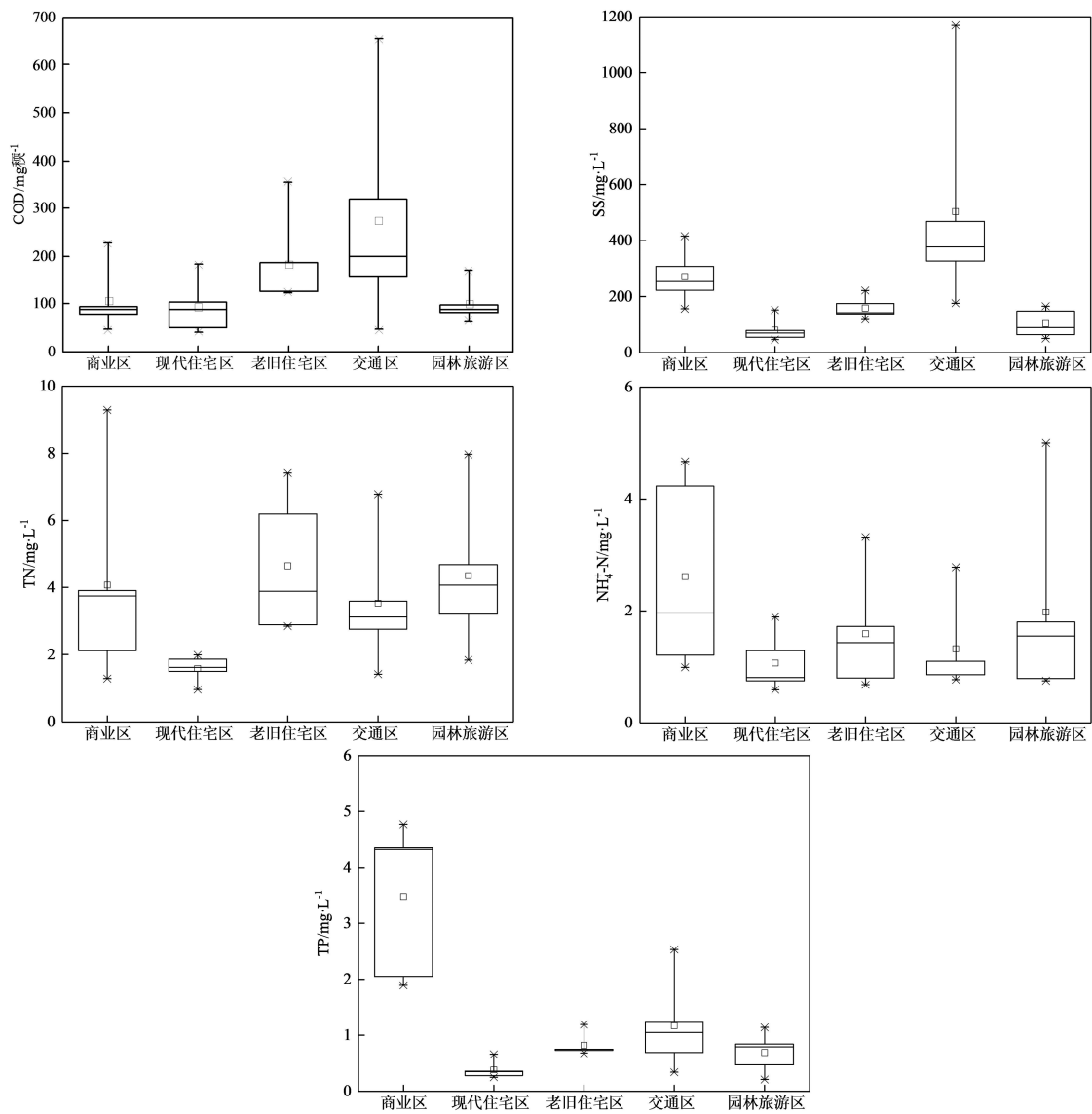


图 1 苏州市老城区降雨径流中污染物的 EMC 区间图

TP 的污染程度要远远大于其他功能区路面。这主要是因为路面径流中 TP 以颗粒态为主,商业区选取的观测点观前街是古城区人流量最大的商圈,各类商铺、餐饮店、路边摊点较多,虽然清扫频次较

多,路面油渍仍无法及时清除。边博<sup>[13]</sup>等在镇江的研究中也表明商业区路面径流中 TP 的含量高于其他功能区。

(5)现代住宅区各项污染物的  $E_{EMC}$  值均为最低,径流污染状况相对较好。这是因为现代住宅区规划合理,物业管理水平与道路清扫频次较高,且路面为透水性混凝土材料,内部卫生状况较好。园林旅游区路面径流中除 TP 和  $NH_4^+ - N$  外,其余污染物浓度大大超出地表水环境质量和污水综合排放标准,污染程度超出传统预期。

## 2.2 降雨径流污染物的相关性分析

为了进一步研究不同功能区路面径流中各污染物质量浓度之间的关系,简化样本污染指标的监测及污染控制对策,利用 Pearson 相关性分析分别对苏州市古城区不同功能区路面降雨径流中  $NH_4^+ - N$ 、TN、TP、COD、SS 两两之间进行相关性分析(表 2)。分析结果表明:

与 SS 的相关性较差,只在交通区路面径流中表现出较强的相关性。根据这一性质,可以通过去除 SS 来达到快速去除径流中污染物的目的<sup>[9]</sup>。

(2)TP 和  $NH_4^+ - N$  也具有较好的相关性,在商业区、现代住宅区和交通区路面径流中也呈极显著正相关。

(3)交通区路面径流中各项水质指标之间都表现出较好的相关性,均达到极显著水平。因此,在交通区加大保洁和清扫频率,可以最大效率的削减路面降雨径流污染。

## 2.3 降雨径流污染物的初期冲刷效应

初期冲刷效应是指在降雨初期较少的径流中携带的污染物负荷在整个降雨过程中处于最高水平,因而初期雨水中便包含了这场降雨事件中所产生的大部分污染负荷<sup>[14]</sup>。选取 2015-05-08 和 2015-07-11 2 场降雨来研究各功能区污染物初期冲刷效应,用 M(V) 曲线来初步判断各污染物是

表 2 不同功能区降雨径流污染物相关性分析

城市功能区	商业区	现代住宅区	老旧住宅区	交通区	园林旅游区
采样个数	58	56	55	58	59
$NH_4^+ - N$ /TN	0.323 *	—	—	0.710 * *	0.637 * *
$NH_4^+ - N$ /TP	0.507 * *	0.593 * *	—	0.848 * *	—
$NH_4^+ - N$ /COD	—	—	-0.295 *	0.859 * *	0.685 * *
$NH_4^+ - N$ /SS	—	—	—	0.674 * *	—
TN/TP	—	—	—	0.751 * *	0.372 * *
TN/COD	—	—	—	0.608 * *	0.623 * *
TN/SS	0.235 *	0.246 *	—	0.568 * *	—
TP/COD	0.284 *	—	—	0.905 * *	0.345 * *
TP/SS	0.366 * *	0.384 * *	0.364 * *	0.774 * *	0.524 * *
COD/SS	—	—	—	0.784 * *	0.537 * *

注: \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \* \* 在 0.01 水平(双侧)显著相关

(1)径流污染物中 SS 与其余污染物均存在一定的相关性,其中 TP 与 SS 在 5 种城市功能区路面径流都呈极显著正相关,这与 P 在悬浮颗粒物中的强吸附性有关<sup>[16]</sup>。除老旧住宅区和园林旅游区外, TN 与 SS 的相关性在其他功能区路面径流中也达到显著水平, COD 与 SS 在交通区和园林旅游区路面径流中相关性较为显著,呈极显著正相关,  $NH_4^+ - N$

否存在初期冲刷效应(图 3),并根据初期冲刷系数 b 值对苏州市古城区降雨径流初期冲刷效应进行定量化比较(图 2),以此来分析初期冲刷效应的显著程度(图 2)。

从不同功能区路面径流中污染物的初期冲刷频率来看,交通区路面径流中各污染物出现初期冲刷现象的频率最高,达到 80%。这与交通区大范围

区域编号	初期冲刷系数 $b$ 值	初期冲刷 效应判定
①	$0 < b \leq 0.185$	强
②	$0.185 < b \leq 0.862$	中
③	$0.862 < b \leq 1.000$	弱
④	$1.000 < b \leq 1.159$	
⑤	$1.159 < b \leq 5.395$	无
⑦	$5.395 < b$	

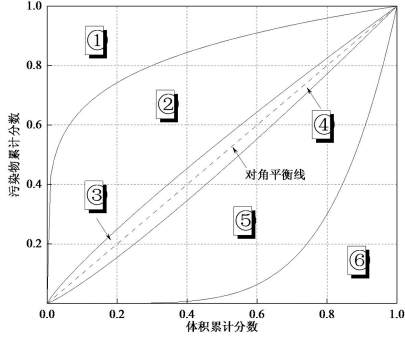


图 2 基于初期冲刷系数  $b$  的  $M(V)$  曲线分布图

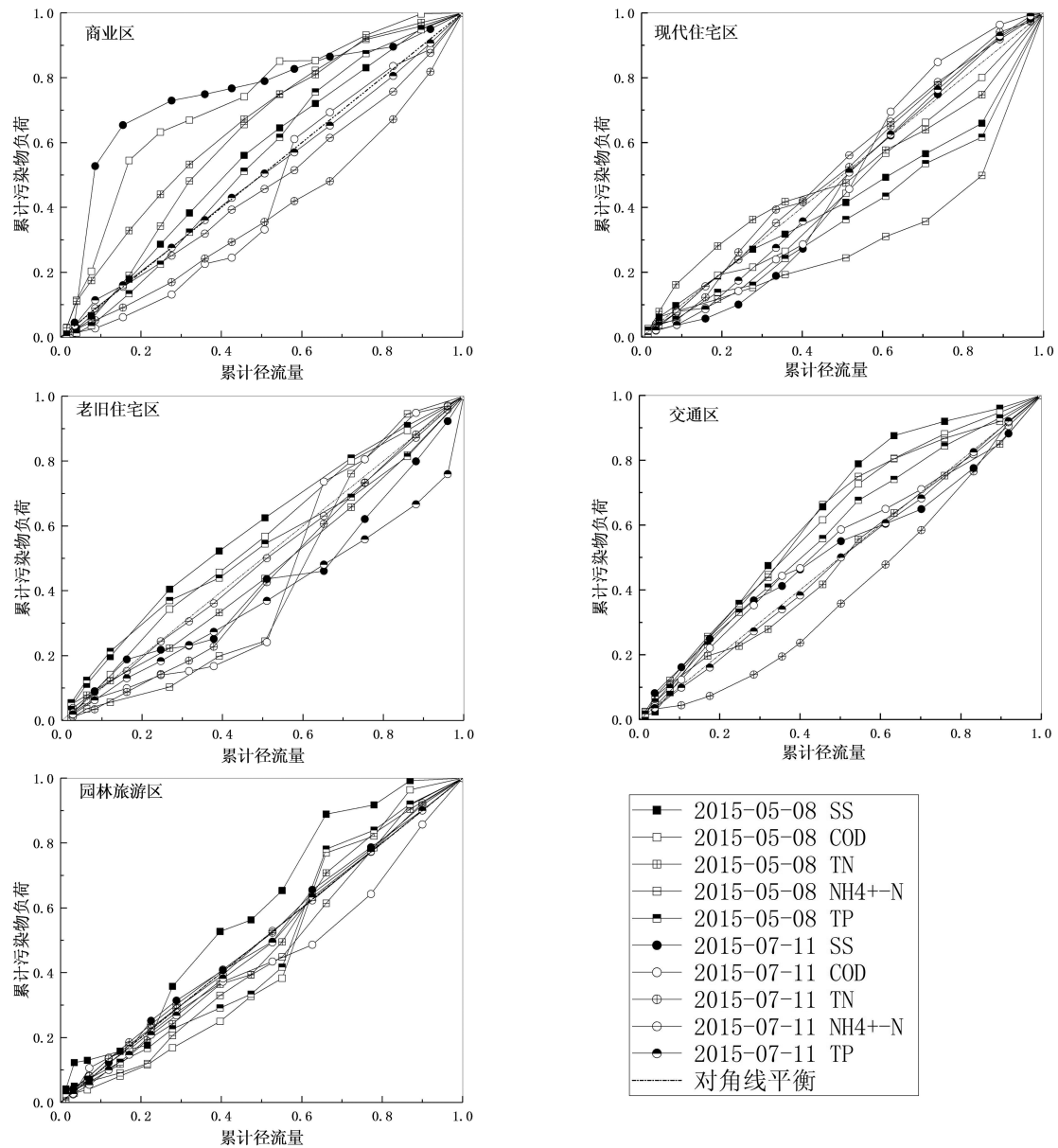


图 3 两场降雨径流污染物初期冲刷效应分析

的汇水面积,平坦的路面,透水性差的下垫面性质以及大量的车辆活动有关。10 次事件中,园林旅游区路面径流中各污染物共出现了 7 次初期冲刷现

象,其中 SS 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在 2 次降雨径流中都出现了初期冲刷,这可能与园林旅游区路边草地泥土被冲刷有关。商业区与老旧住宅区的初期冲刷效应

类似,虽然污染物发生初期冲刷的频率不高,但冲刷强度高于其他功能区,这是因为商业区和老旧住宅区人类活动较为集。2015 年 05 月 28 日的降雨事件中,现代住宅区各种污染物均发生初期冲刷,但在 7 月 11 日的降雨事件中,各污染物均未出现初期冲刷效应,出现这种现象可能是由于初期冲刷效应与降雨量、降雨强度、前期晴天数等降雨特征参数存在正相关性<sup>[15]</sup>。

### 3 结论

(1) 苏州市主城区内路面降雨径流污染情况严重,且各污染物  $E_{EMC}$  值在不同功能区内存在差异。其中路面径流中 SS 和 COD 的  $E_{EMC}$  值在交通区最高, TN 的  $E_{EMC}$  值在老旧住宅区最高, 商业区路面径流中 TP 的  $E_{EMC}$  值高于其他功能区,  $NH_4^+ - N$  在 5 种功能区径流中的浓度较为平均, 未出现较大差异。

(2) 路面降雨径流中 SS 与 TP、TN 和 COD 存在较好的相关性, 根据这一性质, 可以通过去除 SS 来达到快速去除径流中污染物的目的。交通区降雨径流中各项污染物之间的相关性均达到极显著水平, 增加交通区的保洁和清扫频率, 可以最大效率的削减降雨径流污染。

(3) 不同功能区性质、不同降雨场次的降雨径流中, 污染物的初期冲刷效应存在差异。交通区与园林旅游区污染物出现初期冲刷现象的频率较高, 商业区和老旧住宅区污染物初期冲刷强度较大。另外降雨强度、降雨历时、前期晴天数等降雨特征参数对污染物的初期冲刷效应也有一定影响。

### 参考文献:

- [1] 林积泉, 马俊杰, 王伯铎, 等. 城市非点源污染及其防治研究[J]. 环境科学与技术, 2004(S1):63-65.
- [2] Hathaway J M, Hunt W F. Evaluation of First Flush for Indicator Bacteria and Total Suspended Solids in Urban Stormwater Runoff[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, 217(1-4).
- [3] Li - Qing L, Ren - Xiao Z, Shu - Gang G, et al. [Research on spatial differentiation of urban stormwater runoff quality by source area monitoring]. [J]. Huanjing Kexue, 2011, 31(12).
- [4] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff [J]. Water Research, 1998, 32(8).
- [5] 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, 2004, 76(4).
- [6] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. 环境科学, 2012(01):71-75.
- [7] 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(06):994-1002.
- [8] 许伟, 常素云, 占强. 天津典型居民区不同下垫面雨水径流污染特征[J]. 水资源保护, 2017(05):159-163.
- [9] 孙昆鹏, 许萍, 张雅君, 等. 深圳市道路径流雨水典型污染物特征及其相关性分析[J]. 市政技术, 2014(03):125-128.
- [10] 谢继锋, 胡志新, 徐挺, 等. 合肥市不同下垫面降雨径流水质特征分析[J]. 中国环境科学, 2012(06):1018-1025.
- [11] 国家环境总局. 水和废水监测分析方法. (第四版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 黄金良, 涂振顺, 杜鹏飞, 等. 城市绿地降雨径流污染特征对比研究:以澳门与厦门为例[J]. 环境科学, 2009(12):3514-3521.
- [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(01):19-25.
- [14] 李治源, 吴玮, 黄天寅, 等. 苏州市主城区降雨径流中不同形态磷的动态污染特征及初期冲刷效应[J]. 水电能源科学, 2017(03):44-48.
- [15] 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(18):5952-5961.