

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.04.004

厦门市市政道路雨水径流污染研究

林卫红

(厦门市城市规划设计研究院有限公司, 福建 厦门 361012)

摘要: 以厦门市不同行政区、功能区、道路等级和特征的市政道路为研究对象,通过采样与试验,采用径流污染物出流过程采样与降雨量同步观测、MV曲线等方法进行数据分析,明确了厦门市典型市政道路的雨水径流水质参数特征、时空变化规律和初期雨水径流冲刷效应,提出厦门市市政道路污染物设计浓度参考值和道路初期雨水控制径流深度两个基础参数,以及重点防控的道路类型、初期雨水控制径流深度与年径流总量控制率的对应关系,可为厦门市道路面源污染控制和海绵城市建设提供科学依据。

关键词: 道路雨水径流; 初期雨水冲刷效应; 初期雨水径流深度; 年径流总量控制率
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)04-0019-06

Research on Pollution of Municipal Road Rainwater Runoff in Xiamen

LIN Wei-hong

(Xiamen Urban Planning & Design Institute Co. Ltd., Xiamen 361012, China)

Abstract: This study focuses on municipal roads in Xiamen, considering their diverse administrative districts, functional areas, road classes, and characteristics. The research involves data analysis through sampling and testing methods, including runoff pollutant effluent process sampling, rainfall synchronous observation, and the MV curve method. The characteristics of rainwater runoff water quality parameters, spatial and temporal change patterns and initial rainwater runoff flush effect of typical municipal roads in Xiamen were clarified. The two basic parameters including the reference value of pollutant design concentration on municipal roads and the depth of initial stormwater runoff in Xiamen were proposed. Furthermore, the corresponding relationship between the annual runoff total control rate and the depth of initial stormwater runoff control and the type of roads with key prevention and control were discussed, which can provide a scientific reference for the control of road non-point pollution and sponge city construction in Xiamen.

Key words: road stormwater runoff; initial rainwater runoff flush effect; depth of initial rainwater runoff; annual runoff total control rate

近年来,厦门市海绵城市建设工作已从试点转向全域推进,而市政道路的雨水径流控制与面源污染削减是其中的重要一环。由于绿化空间狭小、海绵建设效果较差,加之基础研究缺乏,道路海绵城市建设的必要性受到质疑。为科学化、规范化指导市政道路建设有序落实海绵理念,研究市政道路的

雨水径流污染特性十分必要。

1 试验和方法

1.1 区域概况

厦门市位于台湾海峡西岸中部、闽南金三角的中心,背山面海,属亚热带海洋性季风性气候。多年平均降水量1 530 mm,由西北向东南递减,3月—

9 月为春夏多雨湿润季节,每月雨量一般为 100~200 mm;10 月—次年 2 月为秋冬少雨干燥季节,每月雨量一般为 30~80 mm。厦门市有思明、湖里、海沧、集美、同安、翔安等 6 个行政区,路网呈现以厦门岛为中心的放射式布局形态,快速路、主干道、次干道、支路的等级结构为 1:3.8:3.0:6.7,主干道比例偏高,次干道比例偏低。

1.2 采样点选取

根据厦门市行政区分布、用地功能、建筑特征、道路等级、道路特征(路面材料、道路坡度、汇水面积)、交通量等 6 项要素,结合试验要求综合选取采样点。全市共布设 30 个具有典型位置和污染特征代表性的采样点(见图 1),分布于 6 个行政区,涵盖交通区、居住区、商业区、工业物流区、公共服务与商务区、绿地休闲区 6 个功能区,包括快速路、高架桥、主干道、次干道、支路 5 种道路等级类型,兼顾不

同的行车类型和车流量。道路纵坡有坡度 $\leq 1.5\%$ 和坡度 $>1.5\%$ 两种,路面材料包括沥青和混凝土两种。部分典型采样点特征见表 2。

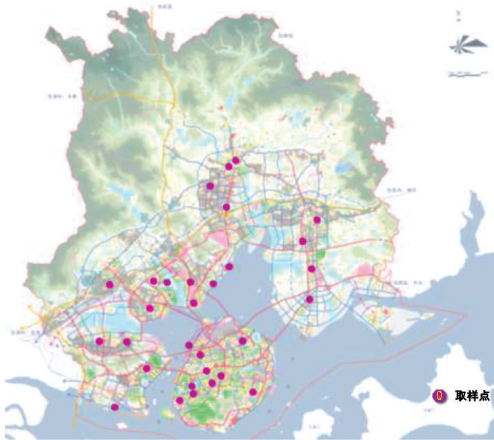


图 1 采样点分布
Fig.1 Sampling points distribution

表 1 典型采样点特征

Tab.1 Typical sampling points characteristics

编号	采样点位置	功能区	道路等级	红线宽度/m	坡度/%	路面材质	车流量/(PCU·12 h ⁻¹)	汇水面积/m ²	场地特征	片区特征
1	仙岳高架下(莲岳路口)	交通区	快速路	24	4.70	沥青	30 000	447	高架桥	本岛交通干线
2	同集北路(建材广场立交桥下)	交通区	快速路	60	0.01	沥青	53 800	187	加油站、高架桥	同安交通干线
3	厦禾路(眼科中心天桥楼梯口)	居住区	主干道	47	0.50	沥青	21 000	284	眼科中心	本岛繁华地段
4	港南路 376 号 (海虹码头高架 150 m 前)	工业物流区	次干道	25	0.60	沥青	25 200	437	化工码头、集装箱堆场	海沧港区
5	石鼓路与集岑路交叉口 (炸鸡店前)	商业区	支路	16	0.20	沥青	3 200	87	商业街、学校	集美老城区
6	立功路与立德路交叉口	公共服务与商务区	支路	21	0.005	沥青	1 440	469	商务楼	集美新城区
7	滨海浪漫线(美峰公园广场前)	绿地休闲区	支路	15	0.003	透水混凝土	0	181	绿地、广场	同安滨海观光步道

注: PCU 为标准车当量数。

1.3 取样与试验方法

采用 500 mL 的聚乙烯采样瓶进行采样,从路面产生径流的时刻开始采样,采样时间分别为 0、5、10、15、25、35、45、60、90 min,每个采样点采集 7~9 个水样,采集好的水样送入实验室并保存在 4℃的恒温箱中,于 24 h 内进行测定。每个采样点采集 3~5 场降雨,共采样 111 次,完成 9 647 个水质指标的检测。同时利用 8 个自计雨量计记录分钟降雨量,降雨数据与采样同步观测。

水质检测指标为 COD、SS、总氮、总磷、氨氮、重金属(Cu、Zn、Pb、Cr、Cd),采用国家标准检测方法测定。

2 结果与分析

2.1 代表性降雨事件选取

2021 年 4 月 15 日—8 月 18 日共采集 111 次降雨径流事件,据此分析雨水径流水质参数特征值和空间变化规律,并从中选取 22 场具有代表性的降雨径流事件,分析降雨径流污染物平均浓度(EMC 值)和时间变化规律。代表性降雨主要特征如下:①覆盖小雨、中雨、大雨和暴雨 4 个降雨等级。②场降雨量最小 7 mm,最大 65.4 mm,反映不同强度的降雨状况。③雨前干期在 0.5~12.8 d 之间变化,能反映不同的降雨间隔时间下地面污染物的积累情况。

2.2 水质特征参数和空间变化规律

2.2.1 雨水径流水质特征

对采样点的径流污染物水质指标进行数据统计分析,结果见表2、3。

表2 典型采样点的水质指标平均值

Tab.2 Average values of water quality indexes of typical sampling points $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

水质指标	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
SS	83	550	170	104	583	120	12
COD	87	153	296	304	151	131	60
TN	5.60	7.52	6.37	6.55	6.40	6.17	3.32
TP	0.13	0.11	0.58	0.58	0.19	0.07	0.07
$\text{NH}_3\text{-N}$	1.09	2.34	3.94	4.62	2.04	1.23	1.81
Cu	0.044	0.013	0.062	0.042	0.045	0.034	0.028
Zn	0.046	0.036	0.121	0.124	0.022	0.044	0.025
Pb	0.003	0.013	0.015	0.01	0.051	0.004	0.008
Cr	0.010	0.004	0.011	0.009	0.006	0.004	0.002
Cd	0.001	0.006	0.006	0.005	0.007	0.011	0.001

表3 30个采样点的主要水质指标平均值

Tab.3 Average values of main water quality indexes of 30 sampling points $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

水质指标	最小平均值	最大平均值	总体平均值
SS	42	600	212
COD	51	353	243
TN	1.59	17.05	9.03
TP	0.03	1.09	0.52
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.79	4.74	4.21

由表2、3可知,道路径流SS、COD、总氮、总磷、氨氮等浓度较高,重金属污染物浓度满足地表水Ⅳ类标准。污染程度为:COD>SS>TN> $\text{NH}_3\text{-N}$ >TP>重金属,30个采样点SS、COD、TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均值分别是一级A标准的21.2、4.9、0.6、1.0、0.8倍;除SS外,COD、TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均值分别是地表水Ⅳ类标准的8.1、6.0、1.7、2.8倍;SS、COD、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别是厦门市一级标准的10.6、4.9、1.0、0.8倍。

统计发现,污染物总量较大的市政道路主要是居住区中饮食店、农贸市场、医院附近的各级道路,商业区中菜市场、车站附近的主干道与次干道,交通区中快速路与主干道以及工业物流区的次干道。以车流量大为特征的市政道路其显著污染物为SS,附近有饮食店或人流量大的市政道路,其显著污染物为COD与营养盐。

2.2.2 不同功能区径流水质特征

111场降雨径流事件的数据分析表明,SS平均值从高到低分别为:工业物流区(341 mg/L)>交通区(312 mg/L)>商业区(262 mg/L)>居住区(213 mg/L)>公共服务与商务区(117 mg/L)>绿地休闲区(88 mg/L)。COD平均值从高到低分别为:商业区(250 mg/L)>居住区(245 mg/L)>公共服务与商务区(178 mg/L)>交通区(138 mg/L)>绿地休闲区(105 mg/L)>工业物流区(104 mg/L)。营养盐总量平均值从高到低分别为:居住区(8.20 mg/L)>商业区(7.94 mg/L)>公共服务与商务区(7.45 mg/L)>工业物流区(7.31 mg/L)>交通区(5.78 mg/L)>绿地休闲区(4.47 mg/L)。重金属总量平均值从高到低分别为:商业区(0.154 mg/L)>居住区(0.153 mg/L)>工业物流区(0.120 mg/L)>交通区(0.119 mg/L)>公共服务与商务区(0.103 mg/L)>绿地休闲区(0.100 mg/L)。

可见,工业物流区和交通区的SS污染程度最严重,居住区和商业区的SS污染程度较严重,公共服务与商务区和绿地休闲区的SS污染程度最低。虽然商业区和居住区的SS污染程度并非最大,但这两种功能区的COD和营养盐污染最严重,重金属总量浓度平均值也最大。

2.2.3 不同道路等级径流水质特征

111场降雨径流事件的数据分析表明,SS平均值从高到低分别为:快速路(357 mg/L)>主干道(292 mg/L)>次干道(275 mg/L)>支路(123 mg/L)。COD平均值从高到低分别为:次干道(214 mg/L)>支路(163 mg/L)>主干道(162 mg/L)>快速路(161 mg/L)。营养盐总量平均值从高到低分别为:次干道(7.79 mg/L)>快速路(6.93 mg/L)>主干道(6.79 mg/L)>支路(6.14 mg/L)。重金属总量最大值由高到低为:次干道(0.148 mg/L)>快速路(0.127 mg/L)>主干道(0.122 mg/L)>支路(0.118 mg/L)。

可见,快速路和主干道的径流SS污染程度最严重,SS的产生主要与车辆活动运输、路面磨损等因素有关,车流量越大,落在道路上的SS污染物也相应增多。次干道的径流COD、营养盐和重金属污染最严重,其原因可能是次干道中商业区和居住区占比较大,人类活动较频繁,故污染物浓度较高。

2.3 道路径流平均浓度和设计浓度

2.3.1 道路次降雨径流平均浓度EMC分析

在任意一场降雨引起的地表径流过程中,由于

降雨强度的随机性变化,使得径流中污染物的浓度随时间变化较大,所以目前通常采用次降雨径流的平均浓度来表示一场降雨的地表径流全过程排放的某污染物的平均浓度^[1],又称次降雨径流平均浓度(EMC值)。

在111次降雨径流事件中,根据雨量计记录的降雨过程线与道路径流污染物出流过程线的匹配情况,遴选出具有代表性的22次降雨径流事件,分析计算道路径流污染物平均浓度EMC值。经计算后得出不同降雨等级下径流污染物EMC变化范围和平均值,结果如表4所示。与其他城市^[2-3]相比,厦门市市政道路雨水径流水质比国内大多数城市污染轻,但比国外的污染严重。

表4 不同降雨等级下径流污染物EMC变化范围和平均值
Tab.4 Variation range and average value of runoff pollutant EMC under different rainfall levels

不同降雨等级	中小雨 EMC		大雨及暴雨 EMC		EMC 总体平均值
	范围	平均值	范围	平均值	
SS	4~882	257	57~482	259	258
COD	21~231	71	147~389	139	99
NH ₃ -N	0.162~3.14	1.15	0.673~5.94	2.36	1.64
TN	0.448~8.98	3.35	2.427~12.6	5.87	4.38
TP	0.01~0.33	0.13	0.037~1.18	0.32	0.21

2.3.2 道路雨水径流污染物设计浓度参考值

由EMC值分析表明,在不同降雨条件下,大雨及暴雨的各项指标EMC平均值均大于中、小雨,表明降雨强度越大,雨水径流中的污染物浓度越高。考虑无论何种等级的降雨都会流入海绵设施,以涵盖各种降雨等级的EMC总体平均值为设计依据,参照总体平均值结果,厦门市市政道路雨水径流污染指标设计浓度参考值定为SS为260 mg/L, COD为100 mg/L, TP为0.25 mg/L, TN为4.40 mg/L, NH₃-N为1.70 mg/L。

该设计浓度参考值是基于厦门各类功能区与道路等级的平均污染程度而提出的,反映了厦门市市政道路总体平均污染情况。对于不同功能区和不同道路等级的浓度设计值,可参照不同功能区和不同道路等级的浓度算术平均值与总体算术平均值的比值,对总体设计浓度参考值进行缩放,推荐SS设计浓度参考值如表5所示,可作为污染控制设计参考依据。

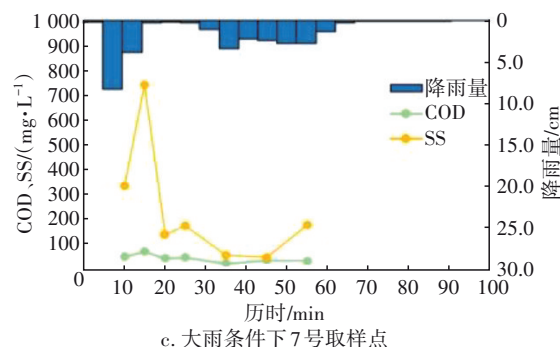
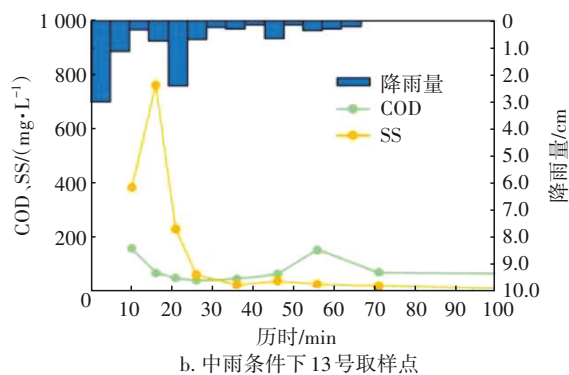
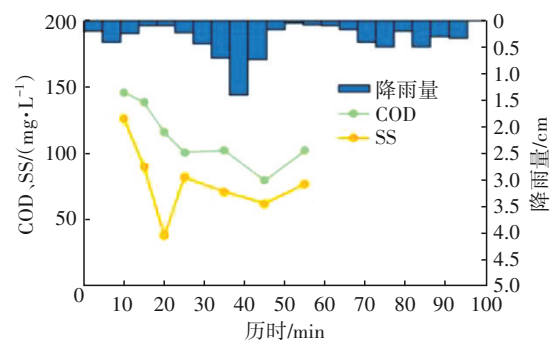
表5 厦门市市政道路雨水径流SS设计浓度参考值

Tab.5 Reference value of design SS concentration of municipal road runoff in Xiamen $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

功能区	居住区	商业区	交通区	工业物流区	公共服务区	绿地休闲区
快速路径流SS	314	384	458	498	170	129
主干道径流SS	256	314	374	407	139	106
次干道径流SS	241	295	351	383	130	99
支路径流SS	108	132	158	172	59	45

2.4 时间变化规律和初期冲刷效应

研究选取具有代表性的22场降雨径流事件,按小雨、中雨、大雨、暴雨4个等级,分别绘制降雨过程线与径流污染物浓度随时间变化过程线的对应关系,以推求不同降雨等级条件下道路径流污染时间变化规律,结果见图2。



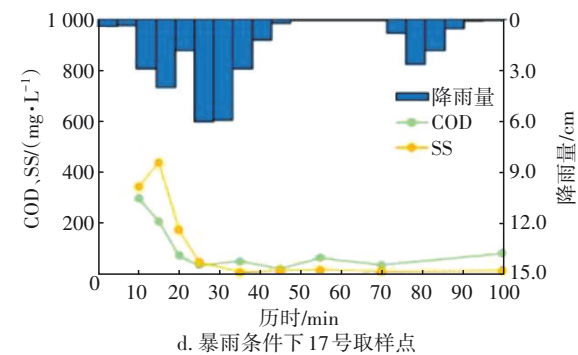


图2 降雨以及径流SS、COD浓度随时间变化过程线
Fig.2 Process line of rainfall and SS、COD concentration changing with time

分析表明,不同降雨等级的降雨均存在明显的初期冲刷效应。雨水径流的SS与COD随着降雨过程的延续逐渐减小,并在径流产生15~25 min后基本趋向稳定,即初期冲刷效应出现在径流产生后的10~25 min左右。但不同强度的降雨在相同时间内的径流量和冲刷特性差异较大,以时间来界定初期雨水误差较大。

2.5 道路初期雨水控制径流深度

初期雨水污染程度和量值受降雨强度、集雨范围下垫面特征、环境特点、卫生状况等因素影响,具有地域性^[4]。采用MV曲线法,即采用占据整场降雨径流事件污染物总量70%的初期雨水径流量,推求初期雨水控制径流深度。选取每场降雨径流事件中的典型污染物COD、SS这两个关键水质指标进行分析,典型取样点MV曲线见图3。

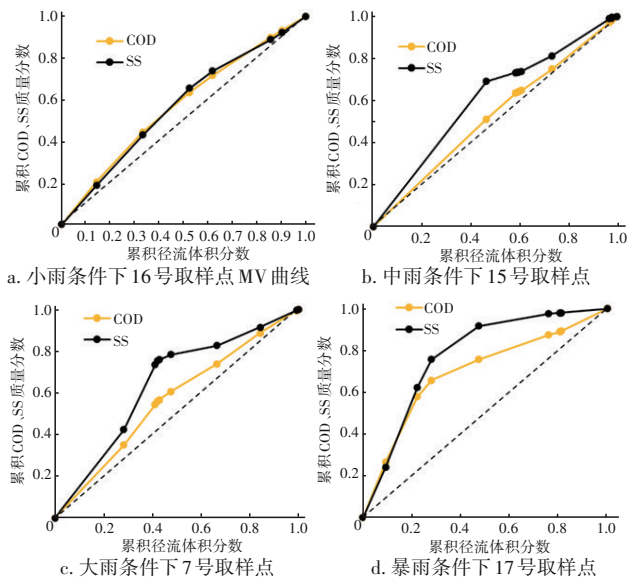


图3 典型取样点MV曲线
Fig.3 MV curve of typical sampling points

由图3可见,降雨等级越大,MV曲线发散度越大,初始冲刷现象越明显。对场降雨量数据进行统计整理及分析得出小到中雨的初期雨水控制径流深度为3.0~9.4 mm,大到暴雨的初期雨水控制径流深度为4.4~13.6 mm。厦门市海绵城市建设的设计降雨量一般取26.8 mm(年径流总量控制率为70%),属于中小雨,为了方便对数据进行取整,确定厦门市市政道路初期雨水控制径流深度为9 mm。

2.6 初期雨水控制径流深度的应用

厦门市海绵工程采用年径流总量控制率作为控制指标,通常取年径流总量控制率为70%,相应计算得出的海绵城市设计降雨量为26.8 mm。由于年径流总量控制率针对的是水量削减,而初期雨水控制径流深度针对的是污染物削减,两者概念不同。为此,通过径流系数将径流深度概化换算成降雨深度,并与年径流总量控制率进行比对,以便于海绵城市工程的设计和管控。

海绵型道路综合径流系数为0.56~0.65。根据径流控制深度与降雨深度换算关系($\alpha=R/P$, α 为径流系数, R 为径流深度, P 为降雨深度),9 mm径流深度在不同等级标准道路对应的降雨深度为14.3~16.1 mm,折算年径流总量控制率约为50%~55%。

综合径流系数对应产流影响和不同等级道路污染物浓度两方面,厦门市初期雨水控制降雨深度对应年径流总量控制率取值如表6所示,将此数据作为建设条件受限时道路海绵工程设计指标的下限值,以达到初期雨水径流污染控制的目标。

表6 初期雨水控制径流深9 mm对应海绵设计参数

Tab.6 Sponge design parameters corresponded to initial rainwater controlled runoff depth of 9 mm

道路等级	对应年径流总量控制率/%	对应设计降雨量/mm	标准段侧分带下沉深度/mm
快速路和主干道	55	16.5	快速路:80, 主干道:100
次干道和支路	50	14	次干道:100, 支路:70

注: 下沉深度指侧分带全断面下沉。

2.7 道路径流污染控制策略

① 重点防控的水质指标为SS、COD、营养盐(以氮污染物为主)。

② 重点防控的市政道路主要有如下3种类型:a. 以车流量大为特征的市政道路,其显著污染

物为SS,如交通枢纽区中的快速路与主干道,以及工业物流区的次干道。b. 人流量大或附近有饮食店的市政道路,其显著污染物为COD与营养盐,如居住区路边有饮食店或医院或车站的市政道路。c. 车流量与人流量均较大的市政道路,其SS、COD、营养盐污染程度均较严重,如商业区中位于农贸市场、车站附近的主干道与次干道。

③ 快速路和主干道、工业区的主次干道、物流仓储区和交通枢纽区的市政道路、公路市政化改造道路等面源污染较严重的道路海绵工程,机动车道雨水径流排入下沉式绿化带前应经沉砂池预处理,并采用污染削减效果较好的源头减排设施。

3 结论

① 厦门市政道路的主要污染物为SS、COD与氮营养盐。污染程度由重到轻的次序为:COD>SS>TN>NH₃-N>TP>重金属,重金属仅个别指标瞬时最大值超标。

② 工业物流区的径流SS污染程度最严重,其次为交通区;商业区的径流COD污染程度最严重,其次为居住区;居住区的径流营养盐污染程度最严重,其次为商业区。

③ 快速路和主干道的径流SS污染程度最严重,主要与车辆活动运输、车流量、路面磨损等因素有关。次干道的径流COD、营养盐污染最严重,主要与人类活动较频繁有关。

④ 厦门市市政道路雨水径流污染的设计浓度参考值:SS为260 mg/L, COD为100 mg/L, TP为0.25 mg/L, TN为4.40 mg/L, NH₃-N为1.70 mg/L。对于不同功能区和不同道路等级的浓度设计值,可通过算术平均值与总体算术平均值的比值缩放后参照。

⑤ 不同等级的降雨都存在初期冲刷效应,且均出现在径流产生后的10~25 min左右。

⑥ 厦门市市政道路初期雨水控制径流深度为9 mm。条件受限时,可以将初期雨水径流污染控制目标作为道路海绵工程中年径流总量控制率约

束指标的下限,快速路和主干道均取55%,次干道和支路均取50%,对应的设计降雨量分别为16.5、14 mm。

参考文献:

- [1] 张千千,王效科,郝丽岭,等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 76-82.
ZHANG Qianqian, WANG Xiaoke, HAO Liling, et al. Characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff in Chongqing [J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 76-82 (in Chinese).
- [2] 李俊奇,毛坤,向璐璐. 京承高速公路径流污染负荷及初期冲刷效应研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(18): 59-63, 87.
LI Junqi, MAO Kun, XIANG Lulu. Research on runoff pollution load and first flush effect of Jingcheng highway [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(18): 59-63, 87 (in Chinese).
- [3] 徐明,李贺,傅大放. 高速公路路面雨水径流污染物出流规律研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(7): 4178-4179, 4216.
XU Ming, LI He, FU Dafang. Study on the flow rules of highway rainwater runoff pollutants [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(7): 4178-4179, 4216 (in Chinese).
- [4] 车伍,张鹏,张伟,等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给排水, 2016, 32(6): 9-14.
CHE Wu, ZHANG Kun, ZHANG Wei, et al. Analysis of initial rainfall and total runoff volume control [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(6): 9-14 (in Chinese).

作者简介:林卫红(1972-),女,福建龙岩人,本科,高级工程师,注册公用设备工程师(给水排水),主要从事海绵城市、排水防涝等规划设计与研究工作。

E-mail:linwh1026@163.com

收稿日期:2023-12-06

修回日期:2023-12-19

(编辑:丁彩娟)