

上海市中心城区雨天溢流事件初期效应探究

谢恬颖, 胡晓昕

(上海市排水管理事务中心, 上海市 200001)

摘要: 选取上海市中心城区4个典型排水系统为研究对象(分流制、合流制各2个), 采用分钟级水质在线监测数据为支撑, 以COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为主要水质指标, 探究各典型排水系统在不同雨型情况下的溢流污染水质特征及初期效应。结果表明: COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 两项水质指标的初期雨水效应均在分流制系统内表现更明显; 并且, COD指标的初期效应在分流制系统内小雨工况以及合流制系统内大雨工况下表现更明显; $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标的初期效应在分流制系统内中雨和大雨工况以及合流制系统内均表现明显。

关键词: 雨天溢流; 初期效应; 水质特征

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0137-04

Preliminary Study on the Effects of Rainwater Overflow in the Central Urban Area of Shanghai

XIE Tianying, HU Xiaoxin

(Shanghai Drainage Management Affairs Center, Shanghai 200001, China)

Abstract: The research object was chosen to be four typical drainage systems in the central urban area of Shanghai (two separate and two combined systems). Minute level water quality online monitoring data was used as the support, to examine the features and first flush effect of overflow pollution on water quality in various drainage systems under diverse rainfall conditions, using COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ as the main indicators. The results showed that the first flush effect of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ water quality indicators were more pronounced in the diversion system; Moreover, the first flush effect of COD indicators was more pronounced under light rain conditions in separate flow systems and heavy rain conditions in combined flow systems; Both moderate and heavy rain conditions in separate and combined flow systems exhibited the first flush effect of $\text{NH}_3\text{-N}$ indicators.

Keywords: rainy overflow; first flush effect; water quality characteristic

0 引言

近年来, 排水系统溢流污染导致河道水体黑臭的现象已经引起社会各界的广泛关注; 上海城区水体污染控制经多年治理已有显著成效, 但仍有部分水体水质有待进一步改善。究其原因, 一方面, 雨水径流的形成过程会携带空气和地表的污染物; 流经雨水管道时, 水体的冲刷作用会使管道沉积物融入水体, 以上都会造成短时间水体污染负荷升高; 另一方面, 雨水、污水管道混接, 排水管网老化, 管网调蓄能力不足等原因会进一步加剧排水系统溢流污染的程度, 进而影响河道水质和公众健康。

针对溢流事件的初期效应研究可以为排水部门

提供更有效的放江管控策略。目前, 研究方向大多集中于系统内是否存在初期效应, 如李贺等^[1]针对上海中心城区某合流制系统JXB雨天溢流事件水质COD、 BOD_5 、SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等水质指标进行研究, 发现前3项均存在显著初期雨水效应。谭琼等^[2]选取上海市苏州河沿岸5个典型排水系统进行初期效应现象的探讨, 结果表明: 以50/50的标准评判, 合流制系统具备微弱初期效应, 分流制系统总体上无初期效应。刘磊^[3]以上海市中心城区4个典型分流制排水系统为研究对象, 探讨了不同雨型情况下系统的初期效应现象, 结果表明在较严苛的 b 值评判标准下, 无论雨型都存在微弱的正、负初期效应现象。

但是, 不同排水系统所在地域不同, 气候和地面沉降等基础条件也存在很大差异, 所以初期效应的存在与否没有定论。本文利用分钟级水质在线监测数据探究溢流事件中不同类型系统溢流污染物浓度

收稿日期: 2024-09-14

作者简介: 谢恬颖(1993—), 女, 硕士, 工程师, 从事排水调度管理工作。

变化情况,采用无因次累积负荷体积分数曲线($M(v)$ 曲线)和 b 参数法,首先探讨上海市中心城区代表性排水系统雨天溢流事件的初期效应存在与否的问题,其次分析不同排水系统类型初期效应的规律,最后研究不同雨型对排水系统雨天溢流事件的初期效应影响关系,进一步揭示排水系统雨天溢流事件水质规律,为排水系统雨天放江管控策略提供支撑。

1 材料与方 法

1.1 排水区域的选择

选取上海市中心城区具有代表性的2个分流制排水系统和2个合流制排水系统作为研究对象,排水区域的具体情况详见表1。

表1 代表性排水区域情况

序号	泵站名称	泵站类型	汇水面积/km ²
1	梅陇泵站	分流	2.09
2	桃浦泵站	分流	3.85
3	大光复泵站	合流	2.32
4	丹东泵站	合流	1.09

选取不同降雨条件小雨、中雨、大雨等所对应溢流事件共计30场;水质取样点设置于市政排水泵站的泵站前池内,雨量数据采用该泵站所关联的最近的雨量站数据。

1.2 采样方法说明

水质采样:水质数据依托于“上海防汛泵站汛期放江在线监测项目”配套实验结果,取样时间间隔为5 min。

降雨数据:由自动雨量计每5 min采集1次降雨数据,降雨量精确至0.1 mm。

1.3 水质指标

在线监测系统主要对水质监测化学需氧量(COD)和氨氮(NH₃-N)两项指标,其中,化学需氧量(COD)使用AQUAS化学需氧量(COD)光谱法分析仪,氨氮(NH₃-N)采用AQUAS固态电极在线氨氮分析仪。

1.4 溢流事件规律统计方法

1.4.1 事件平均浓度(EMC)计算公式

加权平均浓度(Event Mean Concentration, C_{EMC})能够更好地表征溢流过程中的总体污染特征,其具体计算公式如下:

$$C_{EMC} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i \Delta t}{\sum_{i=1}^n Q_i \Delta t}$$

式中: n 为整个泵站放江事件的采样次数,无量纲; C_i 为第 i 次采样浓度,mg/L; Q_i 为第 i 次采样径流流量,L/s; Δt 为采样时间间隔,s。

1.4.2 初期雨水效应分析

初期雨水效应是指一场降雨事件中,初期雨(污)水会携带本场降雨所产生的绝大部分污染负荷,因此是衡量城市环境污染状况的一个重要指标,在制定有效的污染控制和治理策略中起着至关重要的作用。

本文研究采用Saget和Bertrand^[4]提出的无量纲 $M(v)$ (Mass Loading Method)曲线法来定量地判断初期效应,横坐标代表累积排放体积占总体积的分数,纵坐标代表累积排放污染物质量占总排放量的分数。此 $M(v)$ 曲线可以近似用幂函数来拟合:

$$F(X)=X^b$$

式中: b 参数的大小反映此次实验初期雨水效应的强烈程度, R^2 的大小反映了此次拟合的可信度。以50/50标准为例,该标准阐述了50%的雨水携带了50%以上的污染负荷,此时认为发生了初期雨水效应,反应在图表中为 $M(v)$ 曲线位于角平分线上方,且离角平分线越远则初期效应越强,除此之外的分类标准还有20/80、25/50以及30/80等^[5]。

3 $M(v)$ 曲线、初期雨水效应等分析

3.1 $M(v)$ 曲线结果分析

根据无量纲 $M(v)$ 曲线法对本研究所得数据进行处理,分别绘制了分流制和合流制排水系统的COD和NH₃-N两项曲线图,结果如图1至图4所示。对数据进行幂函数拟合之后的曲线与角平分线的对比可以直观看出此次降雨放江溢流事件内是否存在初期效应。

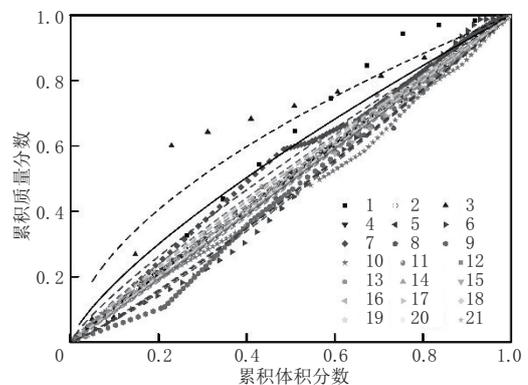


图1 分流制系统COD $M(v)$ 曲线图

由图可知,分流制系统COD和合流制系统NH₃-N的 $M(v)$ 曲线(分别见图1和图4)存在较多偏离角平分线上方的放江事件,说明此工况下存在初期效应,

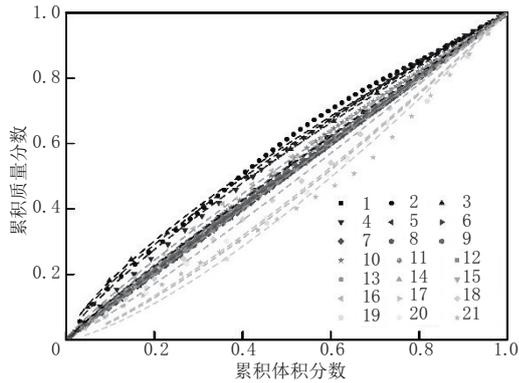


图2 分流制系统NH₃-N M(v)曲线图

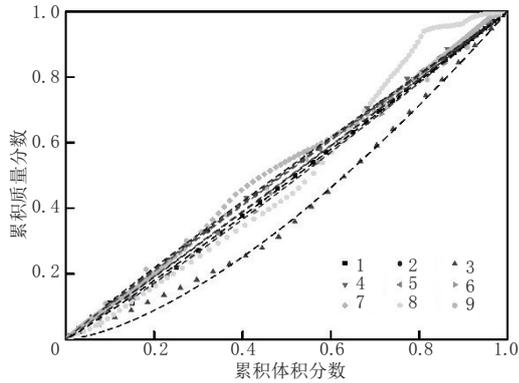


图3 合流制系统COD M(v)曲线图

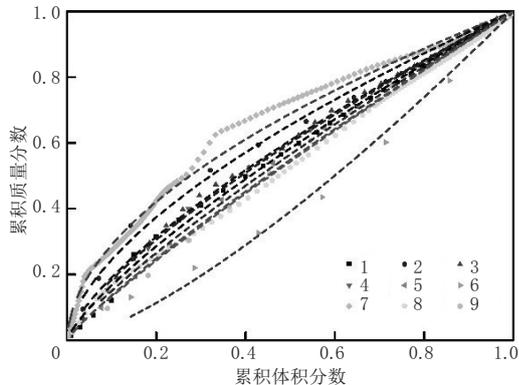


图4 合流制系统NH₃-N M(v)曲线图

且偏离角平分线上方越远初期效应越强。其余工况下, M(v)曲线大都分布在角平分线左右, 则此时初期效应不明显。(图例数字为采样次数)

3.2 b值分析

对上一部分所得 M(v) 曲线图进一步处理, 经幂函数拟合可得出相应的 b 值和相关性系数 R², 结果如表 2 所列。R² 的范围大多在 0.9 以上, 说明此次幂函数的拟合数据相关性良好。

对比不同系统类型和不同雨型可得出以下结论。

(1) 对于分流制系统来说, 不同雨型对两项水质指标 COD 和 NH₃-N 的初期效应均有一定影响, 小雨时 b 值变化范围较大 (0.5~1.1), 且最小 b 值为 0.561, 此时数据多分布在角平分线以上区域, 初期效应更

表2 b 值和相关系数 R² 范围

系统类型	雨型	项目	COD		NH ₃ -N	
			b 值	R ²	b 值	R ²
分流制	小雨	最大值	1.141	1.000	1.368	1.000
		最小值	0.561	0.903	0.744	0.988
		平均值	0.904	0.982	1.006	0.996
	中雨	最大值	1.154	1.000	1.250	1.000
		最小值	0.834	0.990	0.801	0.997
		平均值	0.989	0.996	1.003	0.999
大雨	最大值	1.178	1.000	0.994	1.000	
	最小值	0.979	0.993	0.880	0.999	
	平均值	1.039	0.998	0.946	1.000	
合流制	小雨	最大值	1.097	1.000	1.353	0.999
		最小值	0.946	0.998	0.736	0.987
		平均值	1.026	0.999	0.971	0.995
	中雨	最大值	1.507	1.000	0.778	0.998
		最小值	0.980	0.997	0.611	0.991
		平均值	1.185	0.999	0.703	0.995
大雨	最大值	1.026	0.999	0.880	0.997	
	最小值	0.962	0.004	0.538	0.995	
	平均值	0.988	0.660	0.762	0.996	

明显; 中雨和大雨情况下, 两项指标的 b 值变化范围大致为 0.8~1.2, 此时数据多分布在角平分线附近, 存在微弱初期效应。

(2) 对于合流制系统来说, 不同雨型对 COD 和 NH₃-N 的初期效应影响存在一定差异, 小雨工况下 COD 的 b 值变化范围较小, 且在角平分线附近震荡, 只存在微弱初期效应; 而 NH₃-N 的 b 值变化范围为 0.7~1.3, 存在较大振荡空间, 中雨和大雨时 b 值均小于 0.9, 此时数据点多分布在角平分线以上区域, 因此显示出更为明显的初期效应。

(3) 不同雨型下, 不同排水系统也反映出不同的 b 值规律。小雨时, COD 指标在分流制系统内变化更大, 数值介于 0.5~1.1, 说明此时初期效应更明显; NH₃-N 指标 b 值变化范围受排水系统类型影响不大。中雨和大雨工况下, COD 指标的 b 值范围变化差别不大; NH₃-N 指标的 b 值范围在合流制系统内数值较小, 说明此时初期效应更为明显。

3.3 初期雨水效应分析

本研究选取的 30 场不同降雨事件, 由排水系统类型不同分别统计了相应 M(v) 曲线和 b 值分布, 具体结果如表 2 和表 3 所列。总体来看, b 值没有一次小于 0.185, 因此, 采取更宽泛的 50/50 初期雨水效应强烈程度标准评判, b 值的取值范围分为 3 类: 0 < b ≤ 0.862 (1 区); 0.862 < b ≤ 1 (2 区) 以及 b > 1 (3 区)。

对比表 3 和表 4 可以得出以下结论。

表3 分流制系统 $M(v)$ 曲线的分布

指标	雨型	$0 < b \leq 0.862$	$0.862 < b \leq 1$	$b > 1$
COD	小雨	25%	50%	25%
	中雨	11%	44%	44%
	大雨	0%	50%	50%
NH ₃ -N	小雨	25%	38%	38%
	中雨	11%	56%	33%
	大雨	0%	100%	0%

表4 合流制系统 $M(v)$ 曲线的分布

指标	雨型	$0 < b \leq 0.862$	$0.862 < b \leq 1$	$b > 1$
COD	小雨	0%	33%	67%
	中雨	0%	33%	67%
	大雨	0%	67%	33%
NH ₃ -N	小雨	67%	0%	33%
	中雨	100%	0%	0%
	大雨	33%	67%	0%

(1)分流制系统COD的 $M(v)$ 曲线在贴近角平分上方的2区占比较大,小雨和中雨都大于50%,存在微弱初期雨水效应;NH₃-N的 $M(v)$ 曲线在贴近角平分上方的2区占比较大,所有雨型都大于60%,存在初期雨水效应;NH₃-N的 $M(v)$ 曲线在3区的概率小于COD,因此本研究中,分流制系统NH₃-N的初期雨水效应强于COD。

(2)合流制系统COD的 $M(v)$ 曲线除大雨外,都在贴近角平分线下方3区,大雨时分布在角平分线上方3区,总体来有微弱初期雨水效应;NH₃-N的 $M(v)$ 曲线无论雨型,出现在1、2区的概率均大于60%,且小雨和大雨两类雨型下,在1区出现的概率较大,存在较明显的初期雨水效应;综上,合流制系统NH₃-N的初期雨水效应强于COD。

(3)COD和NH₃-N两项水质指标的初期雨水效应均在分流制系统内表现更明显。

存在以上情况的可能原因有以下几点。

其一,经雨污混接改造之后,分流制系统内管道沉积物相较于合流制系统较少,对溢流污染贡献较大的部分转为降雨径流过程污染,根据李贺等^[1]研究在前锋雨的雨型下,会导致污染物的高峰浓度出现较早,进而产生相应较为明显的初期效应。

其二,对于分流制系统而言,雨量较小时,雨水的冲刷作用表现更为明显,而随雨量增大,水量的稀释作用占主导,因此,COD在小雨工况下具有更明显的初期效应。

其三,对于合流制系统,根据李思远^[6]的研究,管道沉积物对除NH₃-N(23%~46%)外其他污染物的贡献平均比例均超过50%。此时,除降雨径流产生的冲刷作用外,较大雨量冲刷造成管道沉积物重新溶解入水体,造成更高的污染负荷,因此,合流制系统内大雨工况下污染物的初期效应均更为明显。

4 结 语

本文利用分钟级水质在线监测数据探究溢流事件中不同类型系统溢流污染物浓度变化情况,采用无因次累积负荷体积分数曲线($M(v)$ 曲线)和 b 参数法,探讨上海市中心城区代表性排水系统雨天溢流事件的初期效应相关问题。

(1)COD和NH₃-N两项水质指标的初期雨水效应均在分流制系统内表现更明显;

(2)对于分流制系统来说,COD的初期效应在小雨工况下更明显;NH₃-N的初期效应在中雨和大雨工况下更明显;

对于合流制系统来说,COD的初期效应在大雨工况下更明显;NH₃-N的初期效应在所有雨型下都比较明显。

参考文献:

- [1] 李贺,李田.上海中心城区合流制排水系统雨天溢流水质研究[J].中国给水排水,2009,25(3):80-84.
- [2] 谭琼,李田,高秋霞.上海市排水系统雨天出流的初期效应分析[J].中国给水排水,2005,21(11):26-30.
- [3] 刘磊.分流制系统泵站放江污染特征研究[J].城市道桥与防洪,2023(2):126-129.
- [4] Agnès Saget, Chebbo G, Bertrand-Krajewski J L. The first flush in sewer systems[J].Water Science & Technology, 1996,33(9):101-108.
- [5] Bertrand-Krajewski J L, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon[J].Water Research, 1998, 32(8):2341-2356.
- [6] 李思远.合流制管网污水溢流污染特征及其控制技术研究[D].北京:清华大学,2015.