

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.017

分流制系统雨水管网混接雨天溢流污染特征研究

陈黄隽¹, 李一平¹, 周玉璇¹, 潘泓哲¹, 赵思索¹, 王海英²,
蒋海砖²

(1. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 南宁市勘测设计院集团有限公司, 广西
南宁 530022)

摘要: 分流制雨污混接系统雨天溢流污水是导致城市水体黑臭的重要原因。选择南宁市老城区存在雨污混接的雨水排口的溢流污水进行采样监测,分析溢流污水水质变化和颗粒物粒径分布情况,探讨降雨强度、降雨历时、前期干旱时间等对溢流污水颗粒物粒径分布的影响。结果表明,溢流污水COD、NH₃-N和TN浓度分别超过地表水Ⅴ类水质标准4.7、4.1和6.4倍,浓度在降雨强度最大值后10 min内达到峰值。溢流污水中10~125 μm的颗粒物最多,占总颗粒的60%。降雨径流和管道沉积物对溢流污水皆有较大贡献,降雨径流中4~63 μm的颗粒物占总颗粒的30%,主要贡献溢流污水中的小颗粒物;管道沉积物中主要是粒径>250 μm的颗粒物,是溢流污水中大颗粒物的贡献者。降雨强度会影响溢流污水中颗粒物粒径分布,其中63~125 μm颗粒物体积分数与降雨强度呈显著负相关($P<0.05$)。

关键词: 分流制系统; 雨污混接; 溢流污水; 污染特征; 粒径分布; 影响因素

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0116-09

Characteristics of Rainy-weather Overflow Pollution from Separate System in Illicit Connection

CHEN Huang-jun¹, LI Yi-ping¹, ZHOU Yu-xuan¹, PAN Hong-zhe¹, ZHAO Si-suo¹,
WANG Hai-ying², JIANG Hai-zhuan²

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanning Exploration
& Survey Institute, Nanning 530022, China)

Abstract: The sewer overflow of the separate system with mixing of the rainwater and sewage is an important source of black odor in urban water. In this study, sewer overflow from rainwater drains with mixed rain-sewage connection in the old urban area of Nanning City was sampled and monitored to explain the water quality changes of sewer overflow and particle size distribution, and to explore the influence of rainfall intensity, rainfall duration and previous dry time on particle size distribution of sewer overflow. The results showed that the concentrations of COD, NH₃-N and TN in the overflow sewage were 4.7 times, 4.1 times and 6.4 times higher than the surface water quality standard V class, and the pollutants concentration reached the peak within 10 minutes after the maximum rainfall intensity. The

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52039003)

通信作者: 李一平 E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

particulate matter of 10–125 μm was the most in overflow sewage, accounting for 60% of the total particles. Both rainfall runoff and pipe sediment contributed significantly to the sewer overflow, and the particulate matter of 4–63 μm in rainfall runoff accounts for 30% of the total particles, mainly contributing to the small particulate matter in overflow sewage. Particulate matter greater than 250 μm was mainly found in the pipeline sediments, mainly contributing to the large particulate matter in sewer overflow. Rainfall intensity could affect the particle size distribution in overflow sewage, and the particle volume fraction in the particle size range of 63–125 μm had a significant negative correlation with rainfall intensity ($P<0.05$).

Key words: separate system; illicit connection between storm and sewage sewers; sewer overflow; pollution characteristics; particle size distribution; influencing factor

《室外排水设计规范》中建议新城区采用雨污分流制,与合流制系统相比,可增加环境效益,提升环境质量。但雨污分流制系统错混接问题普遍,雨水管网混接雨天溢流排放是造成水体黑臭的重要因素^[1]。目前国内外主要是针对合流制溢流污水进行研究,包括溢流污水水质特征^[2-3]、溢流污染影响因素^[4-5]、基于数值模拟^[6]和初期雨水调蓄池^[7]的溢流污染控制。颗粒物具有孔隙和良好的吸附性能^[8],是溢流污水中的主要污染物,粒径作为表征颗粒物性质的重要参数,影响颗粒物的迁移能力与污染物的性质和组成^[9],对说明污水的水质特性、评估处理技术和预期的处理效果具有重要意义^[10]。目前对溢流污水中颗粒物粒径分布、污染物在颗粒物中的赋存形态有了一些研究成果^[11-12],但是对于分流制排水系统雨水管网混接雨天溢流污水中颗粒物粒径分布影响因素的研究相对较少,对颗粒物粒径和承载污染物迁移转化特性的研究主要集中在降雨径流^[9]和管道沉积物^[13]。

南宁市老城区排水系统老旧,雨污分流改造不彻底,管道雨污混接现象严重,采用末端截流的方式减少雨天管网排放对周围环境水体的危害。雨天大量径流雨水汇入管道,超出截流设施最大截流量,雨污混合水溢流至受纳水体,老城区河道在雨天经常返黑。老城区的用地类型和污染源较为复杂,对水环境质量的要求较高,因此选择南宁市老城区为研究对象,考察了老城区中溢流污水的颗粒物粒径分布及其过程变化特征,重点分析了溢流污水中颗粒物重要来源——降雨径流和管道沉积物的粒径分布特征,并探讨了降雨量、降雨强度、前期干旱时间等因素对溢流污水颗粒物粒径分布的影

响,以期为城市水环境治理及非点源污染控制提供数据支撑和理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

南宁市地处亚热带,属于亚热带季风气候,炎热潮湿,年平均降雨量可达1 304 mm,降雨主要分布在5月—8月,年平均气温在21.2℃左右。

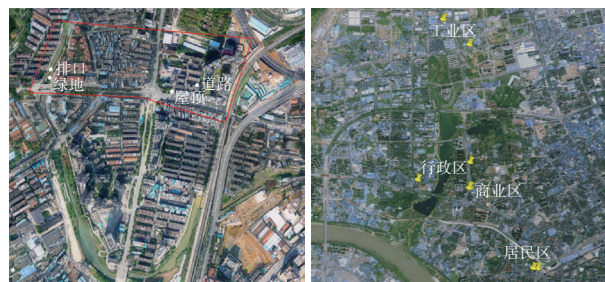
研究所选取的区域位于南宁市西乡塘区,是南宁市面积最大、人口最多的区域,用地类型主要为居民区、行政区和商业区,也包含少部分工业区,对于研究南宁市溢流污染具有一定的代表性,区域面积为1 298 km²,人口为220~250人/hm²。

1.2 样品采集

1.2.1 采样点布置

溢流污水采样点选择西乡塘区城市河道——二坑溪的一个存在雨污混接的雨水排口。排口采样点上游集水区面积为14.6 hm²,用地类型以居民生活区为主,少量为商业用地。排口采样点上游集水区为雨污分流制,但排口采样点位于老城区,排水设施建设不完善,存在一定程度的雨污错混接。同时在溢流发生时对排口集水区域内3种典型的下垫面即道路、屋顶和绿地的4个采样点进行了径流采样。选择西乡塘区4种功能区——居民区、商业区、行政区和工业区污水管道的出水检查井,共8个采样点进行了污水和管道沉积物的采样(见图1)。其中,居民区和商业区的污水和管道沉积物采样点在排口集水区范围内,行政区和工业区中管道沉积物不在排口集水区范围内,但选择的行政区和工业区管道沉积物采样点与采样排口同处于一个泵站收水区域,管道材质、建设年代和管径等因素与排

口集水区范围内的一致。



a. 溢流和径流采样点 b. 沉积物采样点

图1 研究区域及采样点示意

Fig.1 Study area and sampling sites location

1.2.2 样品采集方法

在道路雨算子处、屋顶雨落管和绿地低洼处理设采样瓶,在径流产生后和径流结束时各采样一次。溢流的采样使用“先密后疏”的方式,溢流发生前30 min内10~15 min采样一次,之后间隔30 min采样一次直至溢流结束。管道沉积物的采样根据管径大小和沉积物厚度,利用抓泥斗进入检查井水面以下将沉积物装入采样容器内,每个采样点沉积物的质量不少于200 g。

1.3 样品分析及数据处理

1.3.1 样品分析

水样收集后立即进行室内分析,未进行分析的样品放入冰箱中4℃暗处冷藏,并在24 h内分析完毕。水质监测的指标包括:总COD(TCOD)、TN、NH₃-N、SS、溶解态COD(SCOD)以及固体悬浮物粒径分布等。TCOD采用快速消解法测定,SCOD采用0.45 μm微滤膜抽滤后用快速消解法测定,颗粒态COD(PCOD)为TCOD与SCOD的差值。固体悬浮物的粒径采用LISST-200X激光粒度仪分析。其余水质指标均按照国家标准方法^[14]进行分析。

1.3.2 数据处理

采用SPSS分析降雨条件与溢流污水中颗粒物粒径分布之间的Pearson相关系数;作图软件采用Origin 2021。主成分分析(PCA)横纵坐标括号内的百分数之和代表了两个主成分可以描述总数据方差的百分比;一个向量代表一个变量,向量长度与相应变量方差成比例;两个向量之间的夹角表示两者之间的相关程度,锐角表示相关性较好。

1.4 监测降雨特征

在2021年5月—9月对监测点的降雨径流进行收集,共获得5次完整的降雨径流和溢流污水样品。

本次研究的降雨都发生在雨季,多为短历时强降雨,因此采用短历时降雨特征划分^[15],即共有大雨2场、中雨2场、小雨1场。5次有效降雨事件所对应的降雨特征见表1。

表1 降雨时间特征参数值

Tab.1 Rainfall time characteristic parameters

日期	降雨量/ mm	降雨历时/ min	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	前期干旱 时间/h
2021-07-21	15.0	100	9.0	183.5
2021-08-13	2.4	20	8.4	19.0
2021-08-15	8.6	26	19.8	24.0
2021-09-07	21.0	97	13.0	112.0
2021-09-14	11.0	271	2.5	32.5

2 结果与讨论

2.1 溢流污水水质特征分析

本次研究仅在7月21日、9月7日和9月14日三场降雨量较大的降雨场次采集到了排口溢流的水样,分别对应编号CSO1、CSO2和CSO3,表2给出了这三场降雨溢流口水质监测的EMC值和相对标准偏差。从表2可以发现,3场降雨的污染物浓度均值差异较大,但均远高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中V类水水质标准,其中CSO1中COD、NH₃-N和TN的EMC值分别超过V类水标准4.7、4.1和6.4倍,分流制雨污混接系统发生溢流,污水直接进入水体将造成严重的环境危害。

表2 监测溢流口污染物浓度EMC值和相对标准偏差

Tab.2 EMC value and relative standard deviation of pollutants concentration at overflow outlet

项目	monitored mg·L ⁻¹			
	COD	NH ₃ -N	TN	SS
CSO1	226.30±0.72	10.38±0.26	14.81±0.52	110.08±0.81
CSO2	149.50±0.67	11.19±0.10	16.43±0.02	167.40±0.66
CSO3	132.90±0.60	22.22±0.16	28.19±0.07	96.00±0.52
平均值	169.57±0.66	14.60±0.17	19.81±0.20	124.73±0.66

对排口溢流污水水质的相对标准偏差(RSD)进行分析能更好地了解溢流污水的水质变化情况。从表2可以看出,大多数指标的RSD值超过了0.01,有50%以上指标的RSD值超过0.05,说明一场降雨事件中,溢流污水的水质变化范围大^[16]。降雨径流进入雨水管,和混接进入雨水管的污水混合增加了管道内流速,冲刷管道沉积物使其进入溢流污水,径流雨水携带的污染物也进入管道,同时大

量的雨水对污水中污染物有一定的稀释作用,雨水的持续汇入会影响溢流污水的水质变化。

图2为7月21日溢流污水污染物浓度随降雨时间和降雨量的变化。降雨开始后40 min降雨强度达到最大值,降雨强度达到最大值后10 min内溢流污水的污染物浓度最高。随着降雨的持续,降雨强度达到最大值后至降雨结束,溢流污水的污染物浓度逐渐降低,降雨结束一段时间后,污染物浓度趋于稳定,维持在相对较低的水平。这次降雨的前期干旱时间较长,地面与管道中累积的污染物多,雨水的冲刷作用增加了溢流污水中污染物的浓度,污水在管道中的输移使得污染物浓度和降雨强度峰值出现的时间存在一定的滞后性。降雨一段时间后,径流雨水的稀释作用大于冲刷作用,溢流污水中污染物浓度降低,随着降雨的停止,污水的输移趋于稳定,溢流污水中污染物的浓度也随之维持在相对较低的水平。

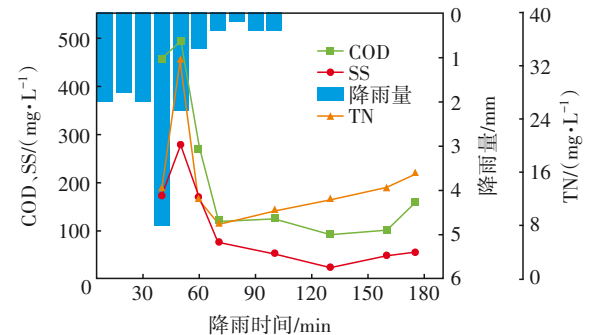


图2 溢流污水水质随降雨的变化

Fig.2 Variation of overflow sewage quality with rainfall

从图2还可发现,溢流污水中COD和SS浓度随降雨的变化趋势较为一致,秦雅琪^[15]、周美成等^[17]在研究中也发现SS可能是COD的主要载体,为COD主要以颗粒态存在提供了依据。颗粒物是污染物的重要载体,研究颗粒态污染物,可明确污染物的赋存形态、组成、分布及其主要去除方式^[18]。

2.2 溢流污水颗粒物粒径分布特征

研究区域溢流污水中的颗粒物粒径主要集中在10~125 μm,占到了颗粒物总量的60%以上(见图3)。李思远^[12]研究发现常州市某合流制溢流污水中的颗粒物粒径主要集中在10~72 μm之间,Zhang等^[11]研究了上海市不同降雨事件下合流制溢流污水的颗粒物粒径分布,中值粒径在52.1~82.3 μm之间波动。不同城市的溢流污染有明显的地域特征,

加上对颗粒物粒径的检测方法和使用仪器不同,造成了不同研究中溢流污水颗粒物粒径分布的差异,降雨量、降雨强度和初始径流的污染物浓度对溢流污水颗粒物粒径分布也有影响。

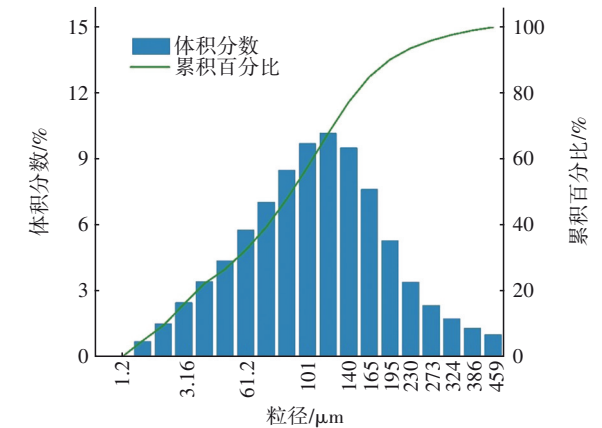


图3 溢流污水颗粒物粒径分布

Fig.3 Particles size distribution of overflow sewage

与污染物的来源相同,降雨径流、污水和管道沉积物是溢流污水颗粒物的主要来源,因此将三者颗粒物的粒径分布与溢流污水中颗粒物粒径进行比较,结果如表3和图4所示。

表3 不同来源颗粒物粒径分布比较

Tab.3 Comparison of particle size distribution of different pollution sources

项目		μm		
径流	道路	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
	屋顶	13.25	62.77	145.10
	绿地	9.90	43.90	101.00
污水	居民区	19.20	85.20	284.00
	行政区	17.50	78.70	185.00
	商业区	7.97	62.05	152.50
	工业区	9.07	56.55	142.00
沉积物	居民区	10.31	66.70	174.50
	行政区	13.10	221.50	403.50
	商业区	26.90	259.50	410.00
	工业区	18.30	234.00	372.50
溢流污水		7.21	133.00	386.00
		19.97	82.99	183.22

根据表3和图4综合分析可知,溢流污水颗粒物粒径分布有两个明显的峰值,第一个波峰与降雨径流相似,都在50 μm左右,第二个波峰更贴近管道沉积物,为>300 μm的大粒径,说明降雨径流和管道沉积物对溢流污水皆有较大贡献,这与李思远^[12]对常州市合流制溢流污水粒径分布的研究结论相同。降雨径流中主要是粒径<250 μm的颗粒物,颗粒粒

径的分布范围小于污水、溢流污水和管道沉积物,说明大粒径的颗粒物难以被冲刷或在管道中容易发生沉降。管道沉积物中颗粒的粒径分布范围和中值粒径 D_{50} 明显大于降雨径流、污水和溢流污水中颗粒物的。这主要是因为管道沉积物聚集大量颗粒物,不仅有污水和降雨径流沉降的小粒径颗粒物,大粒径的砂砾、石块也会通过各种途径进入管道,而很难发生生化作用降解成小粒径的颗粒物。降雨径流冲刷的多为小粒径颗粒物,可以推测管道沉积物是溢流污水中大颗粒物的主要来源。

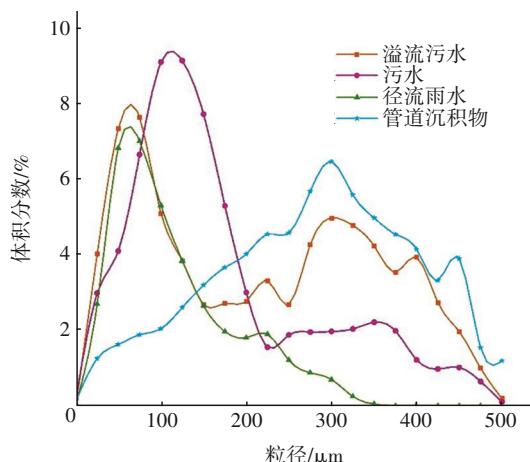


图4 不同来源颗粒物粒径分布曲线

Fig.4 Particle size distribution curves of different pollution sources

溢流污水和不同功能区污水中颗粒物的粒径分布十分相似,但是溢流污水的中值粒径 D_{50} 比日常污水要高,并且溢流污水中粒径 $>250\mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数要高于不同功能区污水。不同功能区污水中的颗粒物主要来自自身携带和冲刷管道沉积物后的释放,污水的分布范围和波峰位置都和溢流污水比较相似,说明溢流污水和污水有部分相同的颗粒物源,即管道沉积物颗粒物的冲刷释放,但是日常污水流速较降雨后更小,对管道沉积物的冲刷有限,大粒径的颗粒物很难被冲刷进入污水中,且污水中大粒径的颗粒物在流速较小时也更容易发生沉降,所以污水的中值粒径小于溢流污水。

2.3 溢流污水不同来源颗粒物粒径分布分析

2.3.1 不同下垫面降雨径流颗粒物粒径分布对比

降雨径流污染负荷占溢流污染负荷总量的10%~40%^[19],是溢流污染物的主要来源之一。道路、屋顶和绿地是径流污染研究中三类典型的下垫

面,采用海洋沉积物温德华粒径分类标准进行分类,图5为不同下垫面降雨径流中颗粒物粒径分布情况。

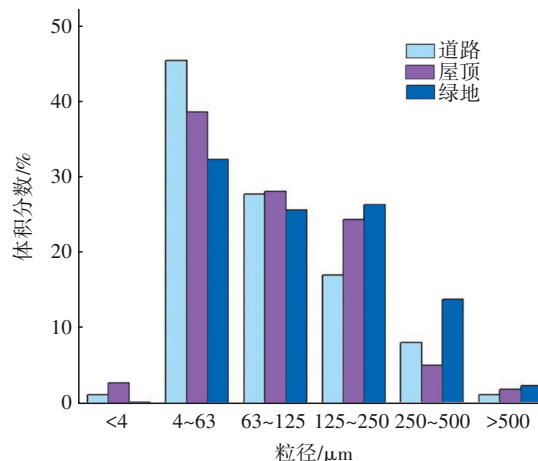


图5 降雨径流颗粒物粒径分布对比

Fig.5 Comparison of particle size distribution in rainfall runoff

道路径流中粒径 $<63\mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数明显高于屋顶和绿地,这与陈豪等^[20]和左晓俊等^[21]关于道路径流颗粒物粒径的研究结果一致。道路径流中细小颗粒物主要来自通行汽车排放的尾气、轮胎磨损、轮轴摩擦以及老化的沥青路面材料,此外车辆的碾压也会使一些较大颗粒物变成细小的颗粒物。有研究表明街道清扫能有效清除粒径 $>250\mu\text{m}$ 的颗粒物^[22],但本研究区域道路径流中粒径 $>250\mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数仍然较大,这与研究区域的城市管理水平和街道的清扫方式及清扫频率有关,说明在降雨过程中径流雨水的大粒径颗粒物带来的污染仍不可忽视。

屋顶径流中颗粒物主要分布在4~125 μm 区间,与武俊良等^[23]屋面径流的颗粒物粒径主要集中在10~100 μm 的结论一致,屋顶径流中的颗粒物主要来自大气沉降和屋顶材料老化。研究区域大气污染程度和屋面材料的老化情况是影响屋面径流中颗粒物粒径分布的重要因素。研究区域的绿地植被覆盖率较小,裸露的土壤易发生侵蚀作用,大粒径的泥土颗粒和植物残渣颗粒容易被冲刷进入径流雨水中,绿地中粒径 $>250\mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数较大。

总的来看,不同下垫面径流雨水中颗粒物的粒径分布略有不同,但径流雨水中大部分粒径 <250

μm ,在4~63 μm 区间的体积分数最大,这与朱伟、田小松等^[24-25]的研究结果相吻合。

2.3.2 不同功能区管道沉积物粒径分布对比

降雨后管道沉积物会随径流雨水冲刷释放大 量污染物,已有研究表明管道沉积物对溢流污染的 贡献高达60%~80%^[26]。排水区域特征和排水管道 性质影响管道沉积物的性质,含水率反映了颗粒物 间相互作用的强弱,会影响颗粒物的冲刷、沉积和 运输过程^[27]。

经测定,居民区、行政区、商业区、工业区管道 (类型分别为污水、污水、合流、雨水)沉积物的含水 率分别为42.96%、47.54%、28.99%、37.46%,即行 政区>居民区>工业区>商业区,这与各功能区采样 点的汇水面积、管道的结构和坡度有关。沉积物的 有机质含量(分别为45.89、48.20、22.49、24.56 g/kg)大小关系和含水率一致,这与潘伟亮、杨云安 等^[13,28]关于城区不同功能区管道沉积物的研究结 论一致,说明有机质大多与水结合赋存在管道沉积 物中。行政区和居民区中有机质含量高,主要是来 自人体排泄物的有机残渣和餐厨垃圾的有机固体 物质,商业区和工业区中有机质多为径流雨水携带 的颗粒污染物。不同功能区管道沉积物的颗粒粒 径有明显的空间差异性,其大小关系为行政区>商 业区>居民区>工业区。

图6为不同功能区管道沉积物颗粒物粒径分布 对比。

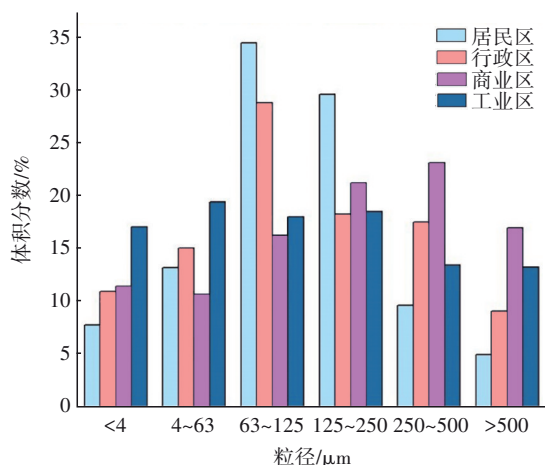


图6 管道沉积物颗粒物粒径分布对比

Fig.6 Comparison of particle size distribution in sewer sediments

居民区管道沉积物主要是粒径<250 μm 的颗 粒物,因为生活污水中的颗粒物主要为人体排泄物中

的小粒径残渣,且生活污水的流速较小,当污水的 流速<0.6 m/s时颗粒物的沉积作用大于冲刷作 用^[29]。商业区管道沉积物中粒径>125 μm 的颗粒物 体积分数较大,是因为商业区多酒店和商业广场, 餐饮废水居多,大粒径的食物残渣容易沉积在管道 中。工业区内厂房在污水接入市政管网前多设置 预处理装置,对不同粒径的颗粒物有一定的去除作 用,加之工业区位于城市边缘,人流量和车流量较 小,街道清扫能有效去除大粒径颗粒物,使得工业 区管道沉积物中不同粒径颗粒物体积分数相差较 小。管道沉积物粒径分布不仅受到道路交通和街 道清扫频率的影响,还与降雨量、降雨强度和前期 干旱时间等因素有关。

2.4 溢流污水颗粒物粒径分布影响因素分析

溢流污水的水质变化是多因素作用的结果,包 括汇水面、降雨强度、降雨量、降雨历时、降雨径流 的初始浓度、前期干旱时间以及城市环境污染状 况、季节与气温等。颗粒物是其他污染物的载体, 这些因素可能对溢流污水中颗粒物粒径分布产生 影响。为此,选择总降雨量(RFT)、降雨历时(RD)、 平均降雨强度(ARI)和前期干旱时间(EDT)作为影 响因子,研究其对溢流污水中颗粒物粒径分布的影 响情况。

图7为溢流污水颗粒物粒径分布变量主成分分 析,黑色表示不同粒径颗粒物的体积分数,棕色表 示影响溢流污水粒径分布的因子成分。溢流污水 颗粒物粒径分布与影响因素的相关性见表4。综合 可知,63~125 μm 的颗粒物体积分数与降雨强度呈 现显著负相关($P<0.05$),即该粒径段的颗粒物体 积分数随着降雨强度的增大而减小。降雨强度影响 着对地表污染物的冲刷能力,同时降雨强度的变化 也会造成管道内流速的变化,影响对管道沉积物的 冲刷力度,对溢流污水中颗粒物粒径分布有重要影 响。降雨强度增加,使得管道内流速增大,对颗粒 物的剪切作用增强,大粒径的颗粒物发生再悬浮, 更多大粒径的颗粒物进入污水中,使得溢流污水中 粒径>125 μm 的颗粒物体积分数增大,而粒径为 63~125 μm 的颗粒物体积分数减小。

已有研究多关注降雨强度对溢流污水水质的 影响,房金秀^[30]在对合流制面源污染的研究中发现 雨强较大的降雨可以增强管道沉积物的再悬浮能 力,危害城市接纳水体的水质健康;李思远^[12]分析

得到了不同雨强条件下溢流污水的水质变化。因颗粒物粒径分析仪器的限制加上雨天溢流污水采样的困难,现有对降雨强度和溢流污水颗粒物分布相关性的研究较少。李思远等^[16]认为前期干旱时间会对溢流水质产生一定影响,长干旱期的降雨事件溢流污水浓度较高;李海燕等^[31]的研究认为溢流污水水质浓度与前期干旱时间紧密相关。相关性结果表明前期干旱时间对溢流污水颗粒物粒径分布影响不大,是因为管道沉积物对溢流污水中颗粒物贡献较大,而所研究几场降雨的前期干旱时间较短,管道沉积物很难发生较大的变化。

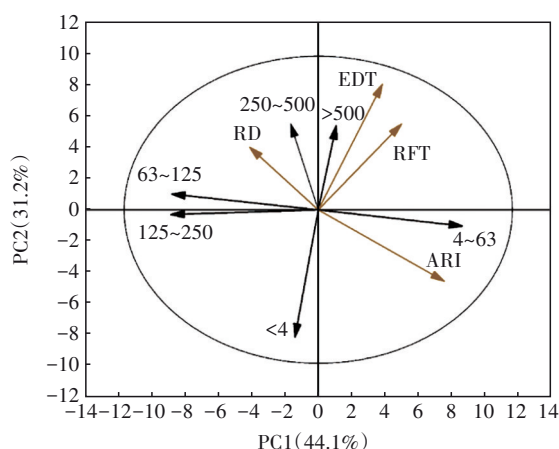


图7 溢流污水颗粒物粒径分布的主成分分析

Fig.7 PCA of particle size distribution in overflow sewage

表4 溢流污水颗粒物粒径分布与溢流影响因子的相关系数

Tab.4 Correlation coefficients between particle size distribution of overflow sewage and the overflow influence factor

粒径/ μm	RFT	RD	ARI	EDT
<4	-0.861	-0.578	0.863	-0.794
4~63	0.559	-0.338	0.849	0.278
63~125	-0.442	0.501	-0.902*	-0.325
125~250	-0.542	0.424	-0.832	-0.450
250~500	-0.150	-0.181	-0.329	0.582
>500	-0.302	-0.224	-0.061	0.669

注: *表示在0.05级别(双尾)相关性显著。

3 结论

① 溢流污水污染物浓度较高,COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN浓度分别超过地表水环境质量V类标准4.7、4.1和6.4倍;溢流污水污染物浓度和降雨的响应存在一定的滞后,滞后时间约为10 min。

② 溢流污水中10~125 μm 颗粒物占总颗粒物

的60%,降雨径流和管道沉积物对溢流污水皆有较大贡献,溢流污水和污水有部分相同的颗粒物源。

③ 降雨径流中4~63 μm 颗粒物体积分数最大,是溢流污水中小颗粒物的主要来源;管道沉积物中主要是粒径>250 μm 的颗粒物,是溢流污水中大颗粒物的主要来源。

④ 降雨强度是影响溢流污水中颗粒物粒径分布的重要因素,63~125 μm 的颗粒物体积分数与降雨强度呈现显著负相关($P<0.05$),该粒径段的颗粒物体积分数随降雨强度的增大而减小。降雨强度增大,对下垫面和管道沉积物的冲刷作用增强,降雨径流冲刷更多累积在下垫面的小粒径颗粒物(<63 μm)进入雨水管,管道水流冲刷携带管道沉积物中大粒径颗粒物(>250 μm),导致63~125 μm 的颗粒物体积分数相对减小。

参考文献:

- [1] 徐祖信,张辰,李怀正.我国城市河流黑臭问题分类与系统化治理实践[J].给水排水,2018,44(10):1-5.
XU Zuxin, ZHANG Chen, LI Huaizheng. Challenges and opportunities of black and odorous water body in the cities of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018,44(10):1-5(in Chinese).
- [2] 胡澄,何强,徐志恒,等.山地城市初期合流溢流污水冲刷效应研究[J].中国给水排水,2012,28(11):57-60.
HU Cheng, HE Qiang, XU Zhiheng, et al. Flush effect of initial overflows from combined sewer systems in mountainous cities [J]. China Water & Wastewater, 2012,28(11):57-60(in Chinese).
- [3] 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.
LI He, LI Tian. Characteristics of combined sewer overflow during rainfall in central area of Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25 (3) : 80-84 (in Chinese).
- [4] LI Y, ZHOU Y, WANG H, et al. Characterization and sources apportionment of overflow pollution in urban separate stormwater systems inappropriately connected with sewage [J]. Journal of Environmental Management, 2022,303:114231.
- [5] 徐连军,张善发.上海中心城区泵站放江溢流污染影响因素分析[J].中国给水排水,2010,26(18):

- 42-45.
- XU Lianjun, ZHANG Shanfa. Analysis on influence factors of river discharge overflow pollution from pumping station in downtown Shanghai[J]. *China Water & Wastewater*, 2010,26(18):42-45(in Chinese).
- [6] 谭志程,余健. 基于数值模拟的新型合流制溢流调蓄池优化研究[J]. *中国给水排水*, 2021,37(23):114-121.
- TAN Zhicheng, YU Jian. Optimization of a novel combined sewer overflow storage tank based on numerical simulation[J]. *China Water & Wastewater*, 2021,37(23):114-121(in Chinese).
- [7] 张青文,余健. 初雨调蓄池布置方式对管道沉积物污染控制研究[J]. *中国给水排水*, 2022,38(19):114-119.
- ZHANG Qingwen, YU Jian. Effect of initial rainwater storage tank layout on control of sewer sediment pollution[J]. *China Water & Wastewater*, 2022,38(19):114-119(in Chinese).
- [8] DAI D, YU T, LEI K, *et al.* Characteristics of non-point source pollution of Qinghe River in Beijing City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018,31(6):1068-1077.
- [9] 李淮,吴玮,田永静,等. 苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态[J]. *环境科学*, 2016,37(2):565-572.
- LI Huai, WU Wei, TIAN Yongjing, *et al.* Particle size distribution and pollutant speciation analyses of stormwater runoff in the ancient town of Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2016,37(2):565-572(in Chinese).
- [10] DULEKGURGEN E, DOGRUEL S, KARAHAN O, *et al.* Size distribution of wastewater COD fractions as an index for biodegradability[J]. *Water Research*, 2006,40(2):273-282.
- [11] ZHANG W, LI T. Particle size distributions in combined sewer overflows in a high-intensity urban catchment in Shanghai, China[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015,56(3):655-664.
- [12] 李思远. 合流制管网污水溢流污染特征及其控制技术[D]. 北京:清华大学, 2015.
- LI Siyuan. Research on the Pollution Property of Combined Sewer Overflows and Its Control Technology[D]. Beijing:Tsinghua University, 2015(in Chinese).
- [13] 潘伟亮,何强,李果,等. 重庆市主城区排水管道沉积物性质研究[J]. *中国环境科学*, 2014,34(6):1485-1490.
- PAN Weiliang, HE Qiang, LI Guo, *et al.* Study on characteristics of sewer sediments in a mountainous city[J]. *China Environmental Science*, 2014,34(6):1485-1490(in Chinese).
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- Administration State Environmental Protection. Water and Wastewater Monitoring Methods[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Press, 2002(in Chinese).
- [15] 秦雅琪. 南宁市城区雨水径流污染特征研究[D]. 南宁:广西大学, 2018.
- QIN Yaqi. Research on the Characters of Rainwater Runoff Pollution in Nanning City[D]. Nanning: Guangxi University, 2018(in Chinese).
- [16] 李思远,管运涛,陈俊,等. 苏南地区合流制管网溢流污水水质特征分析[J]. *给水排水*, 2015,41(S1):344-348.
- LI Siyuan, GUAN Yuntao, CHEN Jun, *et al.* Water quality characteristics of combined sewer overflows in southern region of China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015,41(S1):344-348(in Chinese).
- [17] 周美成,陈俊,董良飞,等. 苏南老城区合流制管网的溢流污染特征[J]. *环境工程学报*, 2015,9(7):3159-3164.
- ZHOU Meicheng, CHEN Jun, DONG Liangfei, *et al.* Pollutants determination and prevention of combined sewer overflow and urban road runoff[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015,9(7):3159-3164(in Chinese).
- [18] 程丰,王庆国,刘朝榕,等. 城市路面径流颗粒污染物研究现状分析[J]. *环境工程*, 2019,37(4):181-185.
- CHENG Feng, WANG Qingguo, LIU Chaorong, *et al.* Analysis on research status of particulate pollutants in urban road runoff[J]. *Environmental Engineering*, 2019,37(4):181-185(in Chinese).
- [19] 王怀黎. 基于ICM模型的重庆市渝中区合流制溢流与雨水径流污染预测研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2020.
- WANG Huaiyun. Prediction Research on Confluence of Overflow and Rainwater Runoff in Yuzhong District of Chongqing City Based on ICM Model[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020(in Chinese).
- [20] 陈莹,胡博,赵剑强. 西安市城市主干道路面径流颗粒物沉降性能及粒径分布研究[J]. *安全与环境学*

- 报, 2011, 11(1):139-144.
- CHEN Ying, HU Bo, ZHAO Jianqiang. Study on particle sedimentation property and size distribution of urban trunk road runoff in Xi'an City [J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11 (1) : 139-144 (in Chinese).
- [21] 左晓俊, 傅大放, 李贺. 不同类型降雨公路径流中颗粒粒径及污染物的分布特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(2):411-415.
- ZUO Xiaojun, FU Dafang, LI He. Distribution characteristics of particle size and pollutants in road runoff during different types of rainfall [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(2):411-415(in Chinese).
- [22] 谢尚宇, 邱春生, 张昱, 等. 天津某住宅区降雨径流颗粒粒径分布及污染物赋存形态[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2):566-573.
- XIE Shangyu, QIU Chunsheng, ZHANG Yu, *et al.* Particle size distribution and pollutant speciation analyses of rainfall runoff in the urban residential community of Tianjin [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2):566-573(in Chinese).
- [23] 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 等. 城市典型屋面径流的排污特征[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8):4351-4356.
- WU Junliang, REN Yufen, WANG Xuemei, *et al.* Pollution wash-off characterization in urban typical roof stormwater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(8):4351-4356(in Chinese).
- [24] 朱伟, 边博, 李磊. 镇江城市径流颗粒粒径分布及其与污染物的关系[J]. 环境科学学报, 2008, 28(4):764-771.
- ZHU Wei, BIAN Bo, LI Lei. Particle size distribution and associated pollutants in urban runoff in Zhenjiang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(4):764-771(in Chinese).
- [25] 田小松, 张洪, 张进忠. 重庆市典型降雨径流中颗粒物粒径与重金属污染输出特征研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(11):6-11.
- TIAN Xiaosong, ZHANG Hong, ZHANG Jinzhong. Relationship between particulate substances and heavy metals in urban rainfall runoff in Chongqing [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35(11):6-11(in Chinese).
- [26] BERTRAND-KRAJEWSKI J L, BARDIN J P, GIBELLO C. Long term monitoring of sewer sediment accumulation and flushing experiments in a man-entry sewer[J]. Water Science and Technology, 2006, 54(6/7):109-117.
- [27] 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 等. 苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征[J]. 环境科学, 2022, 43(1):277-284.
- YE Rong, SHENG Mingjun, JIANG Yongbo, *et al.* Distribution of typical pollutants from rainwater sewer sediments in Suzhou City [J]. Environmental Science, 2022, 43(1):277-284(in Chinese).
- [28] 杨云安, 管运涛, 许光明, 等. 老城区不同功能区排水管道沉积物性质研究[J]. 给水排水, 2011, 37(9):159-162.
- YANG Yun'an, GUAN Yuntao, XU Guangming, *et al.* Study on sediment properties of drainage pipes in different functional areas of old city [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37 (9) : 159-162 (in Chinese).
- [29] 桑浪涛, 石烜, 张彤, 等. 城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律[J]. 环境科学, 2017, 38(5):1965-1971.
- SANG Langtao, SHI Xuan, ZHANG Tong, *et al.* Law of pollutant erosion and deposition in urban sewage network [J]. Environmental Science, 2017, 38(5):1965-1971 (in Chinese).
- [30] 房金秀. 合流制面源污染全过程解析及其控制措施研究[D]. 青岛:青岛大学, 2019.
- FANG Jinxiu. Analysis of the Whole Process of Pollution from Point Source and Study on Control Measures [D]. Qingdao: Qingdao University, 2019 (in Chinese).
- [31] 李海燕, 徐尚玲, 黄延, 等. 合流制排水管道雨季出流污染负荷研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9):2522-2530.
- LI Haiyan, XU Shangling, HUANG Yan, *et al.* Pollution loading of overflow in combined drainage channels during rainy season [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(9):2522-2530(in Chinese).

作者简介:陈黄隽(1998-),女,湖北荆州人,硕士研究生,研究方向为水环境综合治理。

E-mail:157717296@qq.com

收稿日期:2022-12-23

修回日期:2023-02-01

(编辑:李德强)