

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.019

# 北运河上游降雨演变特征对合流制溢流的影响

海永龙<sup>1,2,3</sup>, 郁达伟<sup>1,2</sup>, 魏源送<sup>1,2,3</sup>, 徐长贵<sup>4</sup>, 吴晋峰<sup>5</sup>,  
柳蒙蒙<sup>1,2,3</sup>, 郑嘉熹<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院生态环境研究中心 水污染控制实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 昌平区沙河闸管理处, 北京 102206; 5. 昌平区南沙河管理处, 北京 102206)

**摘要:** 为明确气候变化背景下降雨特征对合流制管网溢流的影响,分析了1975年—2018年北京市北运河上游降雨演变特征,并考察了2018年8月两次典型降雨对合流制管网溢流的影响。结果表明,北运河上游80%的降雨量集中在汛期6月—9月,降雨事件主要分布在21:00左右,大部分降雨间隔小于10~15 d;近年来年降雨量呈下降趋势,平均降雨强度降低,这表明合流制溢流污染主要发生在夏季夜晚,主汛期“七下八上”极端降雨峰值强度增大;年均1.7次的双峰型强降雨冲刷了管道底泥,使合流制管网溢流成为北运河上游突出的瞬时污染源。冗余分析结果表明,合流制管网溢流量主要受累积降雨量和降雨历时的影响。综上,降雨特征对北运河上游的合流制溢流污染控制尤为重要,应重点关注主汛期管道底泥控制、汛期溢流总量控制,因此天气预报对合流制溢流污染管控具有特别重要的指导意义。

**关键词:** 北运河; 降雨特性; 时间分布; 合流制管网溢流

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0123-07

## Effect of Rainfall Evolution Characteristics on Combined Sewer Overflows in the Upstream of North Canal

HAI Yong-long<sup>1,2,3</sup>, YU Da-wei<sup>1,2</sup>, WEI Yuan-song<sup>1,2,3</sup>, XU Chang-gui<sup>4</sup>,  
WU Jin-feng<sup>5</sup>, LIU Meng-meng<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Jia-xi<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Laboratory of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Management Office of Shahe Dam of Changping District, Beijing 102206, China; 5. Management Office of Nansha River of Changping District, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This paper analyzed the evolution characteristics of rainfall in the upstream of North

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102-002)

通信作者: 郁达伟 E-mail: dwyu@rcees.ac.cn

Canal in Beijing from 1975 to 2018, and investigated the effect of two typical rainfall on the combined sewer overflows in August 2018, so as to clarify the influence of rainfall characteristics on combined sewer overflows under the background of climate change. 80% of the rainfall in the upstream of North Canal was in the flood season from June to September. The rainfall events mainly distributed around 21:00, and most of the rainfall intervals were less than 10 days to 15 days. In recent years, the annual rainfall showed a downward trend, and the average rainfall intensity decreased, indicating that the combined sewer overflows mainly occurred in summer nights. The peak intensity of extreme rainfall from July 16 to August 15 in the main flood season increased, and the double peak heavy rainfall with annual occurrence of 1.7 times scoured the sediments in the pipeline, making the combined sewer overflows became the prominent instantaneous pollution source in the upstream of the North Canal. The redundancy analysis results showed that the overflows were mainly affected by the cumulative rainfall and rainfall duration. To sum up, the rainfall characteristics were particularly important for the control of combined sewer overflows in the upstream of North Canal, and the control of sediment in the pipeline and total overflows in the main flood season should be paid more attention to. Therefore, weather forecasting has a particularly important guiding significance for the control of combined sewer overflows.

**Key words:** North Canal; rainfall characteristics; temporal distribution; combined sewer overflows

目前,合流制管网冲刷不断增强,加之排水管网基本数据不清、面源污染凸显导致管道沉积物富集,合流制管网溢流(CSOs)携带的污染物不断增加。因此,未来溢流污染问题将进一步凸显,成为城市水环境突出的瞬时污染源和河流生态走廊构建的短板。

溢流污染具有与面源类似的初期冲刷效应,但二者在发生时间、形成条件和主要污染物来源等方面都有显著不同。城市面源污染包含了许多污染物,随着城市降雨事件的发生,面源污染物通过径流冲刷方式部分汇集到管网<sup>[1]</sup>,初期合流污水污染物浓度明显高于后期。随着累积降雨量的增加,当降雨径流超过合流制管网的截污能力时,从排口溢出形成合流制溢流污染。径流对管道底泥也有初期冲刷效应,但其污染物释放特征尚不清楚。从合流制管网溢流污染的污染负荷来源看,管道沉积物是主要污染源<sup>[2-3]</sup>。李思远<sup>[4]</sup>分析了常州市老城区的CSOs,认为管道沉积物是CSOs中最主要的污染物来源,对COD、TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、SS的贡献率分别约为53%~68%、43%~56%、42%~62%、23%~46%和57%~67%;径流雨水次之,贡献率分别为17%~36%、8%~33%、10%~26%、11%~30%、18%~36%;生活污水相对较小,贡献率分别为9%~24%、18%~

35%、19%~47%、27%~52%、5%~25%。Aukidy等<sup>[5]</sup>对比了科马基奥市辖区污染物的来源,发现所有的CSOs排出口微生物负荷占全部来源的90%以上。Becouze-Lareure等<sup>[6]</sup>对法国里昂市近郊河流的不同隔室(底栖和低渗带)进行了溢流污水和颗粒测试,发现样品中颗粒部分具有明显的毒性。与面源污染相比,溢流污染负荷的时间变化不仅受地表径流的影响,还受到合流制管网系统的控制。其中,地表径流和管道溢流量主要受降雨强度、降雨历时和降雨间隔等因素的影响<sup>[7]</sup>。Yu<sup>[8]</sup>发现,1960年—2000年北京市降雨量逐年降低,减少率为1.197 mm/10 a。李建等<sup>[9]</sup>发现,1961年—2004年北京市夏季的降雨量和频次有两个峰值,分别为午后到傍晚阶段以及清晨。尤焕苓等<sup>[10]</sup>发现,1981年—2010年北京市极端天气降雨量占总降雨量的30%~37%。干旱期时间影响到地表积累的污染物,一般情况下随着早期时间的增加而增多,饱和后不再变化,降雨强度越大,冲刷作用越强,携带的污染物越多。近年来,很多学者利用降雨数据(降雨强度、降雨量和最大降雨强度)、溢流结构模型对CSOs的发生进行研究<sup>[11-12]</sup>,结果表明在气候变化特别是极端天气频发的大背景下,降雨条件与溢流污染事件息息相关,但降雨特征对溢流污染的影响缺乏分析,需要

进一步针对溢流污染控制进行定量分析。

笔者选取北运河上游的昌平沙河地区,分析了该地区1975年—2018年降雨时间的分布特征,以及降雨量、降雨强度、降雨历时与合流制溢流管网溢流量之间的关系,旨在为合流制溢流管网底泥管理提供参考,同时有助于了解该地区的降雨分布特征。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

本研究以昌平沙河水库流域为研究对象,沙河水库是北运河上游的重要节点,同时也是多源污染的重要聚集处,沙河水库的综合治理对下游的水质改善和水生态修复至关重要。沙河水库汇水主要来源于东沙河、北沙河和南沙河,流域面积为1 125 km<sup>2</sup>,其中东沙河、南沙河、北沙河的流域面积分别为265、263、597 km<sup>2</sup>,山区面积约占75%。沙河水库总面积约为1.8 km<sup>2</sup>,总库容为2 045×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

根据2017年和2018年的调查结果,沙河水库周边溢流口从40个减少到20个,北沙河沿岸有9个溢流口,南沙河沿岸有11个。合流制溢流管网的管径在300~1 200 mm之间,最小坡度为0.3%。根据前期多次现场调研,选择降雨和汇水范围清晰、主要服务于巩华城区域居民的典型合流制管网溢流口作为污染监测对象,该溢流口是东沙河和北沙河入库口最近的规范溢流口,便于在线监测。

### 1.2 可用降雨数据序列及其处理方法

降雨数据序列来源于中国气象局昌平沙河站(站点号:54499)1975年、1980年、1985年、1990年、1995年、2000年、2005年、2010年和2015年—2018年总共12年的逐时降雨数据。针对降雨对合流制管网溢流的影响,重点分析4月—11月的降雨情况。降雨场次的划分标准为:从某时刻降雨强度≥0.1 mm/h且其后2 h内降雨不为0算起,作为一次有效降雨。场次降雨强度为一场降雨的降雨量与降雨历时之比,为了能够展现降雨的持续性和表征性,剔除掉一场降雨量小于1 mm的样本<sup>[13]</sup>。

### 1.3 合流制管网和溢流的流量分析

合流制管网流量监测点位于北沙河南岸,数据采用远传式明渠流量计系统自动采集,采用薄壁矩形堰监测合流制管网流量,采用薄壁三角堰监测溢流量,根据堰口尺寸,建立水位-流量数学模型。系统包括2个监测断面,断面1为溢流量在线监控,断

面2为合流制管网流量在线监控,参考《堰槽测流规范》(SL 24—91)进行流量监测,频率为15 min一次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降雨时间分布特征

按照每月逐时降雨划分,1975年—2018年(4月—11月)平均逐时降雨量有显著差异(见图1)。从日降雨分布特征看,4月降雨主要分布在20:00—23:00;5月分布在00:00—02:00和15:00—21:00;6月降雨逐渐增加,主要集中在05:00—10:00和15:00—22:00;7月降雨最强,主要集中在两个阶段,分别为09:00—11:00、13:00—21:00,最大降雨量分布在21:00左右;8月降雨逐渐减弱,降雨量和7月的相似;9月降雨主要集中在18:00—01:00;10月降雨主要集中在04:00—05:00;11月降雨最弱,主要集中在10:00—16:00。同时发现,降雨主要集中在6月—9月的20:00—22:00,其也是合流制管网溢流易发生时期。因此,在主汛期(6月—9月),当次降雨间隔较长时,夜间应加强对合流制管网的维护。例如,在白天降雨之前应完成合流制管网的冲洗和溢流口垃圾的清理,使管网沉积物和溢流口污染物在夜间降雨之前被清理掉,从而有效削减溢流污染;雨后应及时清理排口周围溢流污染物,避免进一步影响地表水环境。

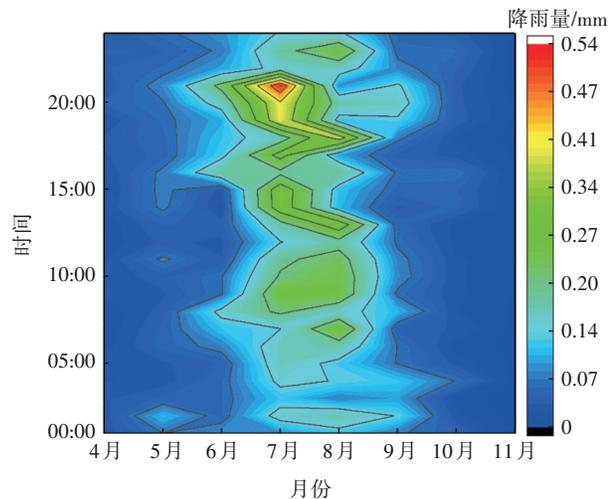


图1 1975年—2018年(4月—11月)平均逐时降雨量  
Fig.1 Averaged hourly rainfall from April to November in 1975-2018

从降雨的月际分布来看,7月降雨量最多,平均逐时降雨量达到0.54 mm,而4月—5月和10月—11月的降雨较少。1975年—2018年(4月—11月)降雨量、降雨强度和降雨历时的月际变化见图2。可

知,降雨强度和降雨量的月际变化较大,降雨强度由高到低依次为8月、7月、6月、9月、5月,月均降雨强度最大达到2.98 mm/h,月均降雨量由高到低依次为7月、8月、6月、9月、5月,月均降雨量最大达到159.17 mm,主汛期“七下八上”的1.7次降雨强度和累积降雨量都较为突出。在整个变化过程中,降雨强度和降雨量变化趋势大致相同,故研究区域累积降雨量的大小主要取决于降雨强度,而受降雨历时影响较小,这与刘伟东等<sup>[14]</sup>的研究结果一致。因此,合流制管网溢流污染控制应重点关注主汛期降雨强度较大的场次。

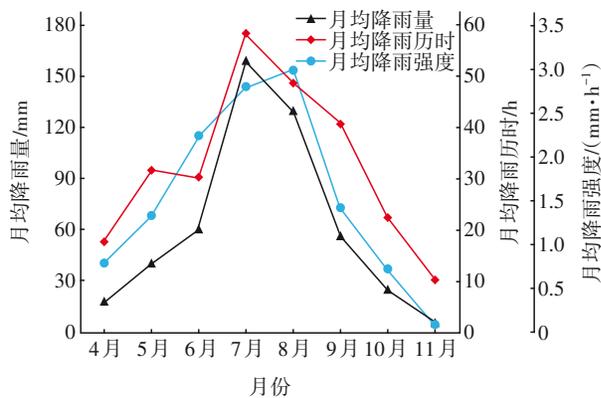


图2 1975年—2018年(4月—11月)降雨量、降雨强度和降雨历时的月际变化

Fig.2 Monthly variations of rainfall, rainfall intensity and duration from April to November in 1975 to 2018

从降雨量和降雨强度分布可以看出,降雨主要集中在6月—9月,约占年降雨量的80%,这是防汛工作的主要时期,也是合流制管网溢流易发生时期。对于合流制管网溢流污染,由于6月—9月的降雨间隔较短、降雨强度较大,而北京非汛期较长,干旱期合流制管网流量较低,管道沉积物的总量较大,在汛期初次降雨冲刷作用下管道沉积物随着溢流而被释放,但在间隔时间较短、强度接近的多次降雨中很难再次被冲刷释放,因此,汛期初次溢流污染控制非常重要。与美国环境保护署(EPA)流域溢流污染控制目标主要针对溢流频次(不超过6次/年)相比,北运河上游的合流制管网溢流污染频次相对较低,但溢流污染负荷集中、环境影响大,不仅需要提高合流制管网的截留率以控制溢流频次,而且针对重点降雨场次的事前事后管控也非常关键。

1975年—2018年的年均降雨量为544.3 mm,年度降雨量之间差异较大,如图3所示。可知,1994

年的降雨量最大(约为813 mm),1999年最低(约为266.9 mm)。近20年的年均降雨量低于1975年—1995年之间的年均降雨量。降雨主要集中在汛期,随着年均降雨量的减小,次降雨间隔可能增加或者降雨主要集中在某几场雨上,但合流制管网溢流污染受非汛期长度的影响,次降雨间隔越长,管网沉积物越多,降雨后释放的溢流污染物越多,因此近20年溢流污染问题可能更严重。年降雨减小也限制了雨洪利用措施的经济性,为城市管理和海绵城市建设增加了限制条件。

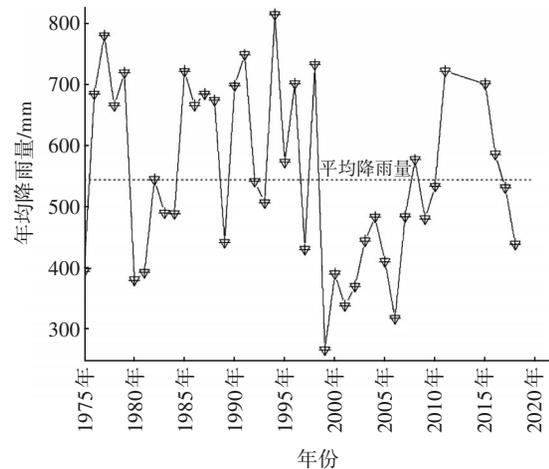


图3 1975年—2018年降雨量的变化

Fig.3 Change of rainfall from 1975 to 2018

## 2.2 降雨过程中合流制管网的干管流量和溢流量

1975年—2018年次降雨的间隔天数分布见图4。可知,降雨间隔10 d之内出现的降雨场次较多,降雨间隔5 d之内的次降雨量最大值为144.1 mm(2005年7月24日),降雨间隔6~10 d的次降雨量最大值为190.2 mm(2016年7月21日),而降雨间隔在11 d以上的降雨场次相对较少,但很多场次的次降雨量也较高,如11~15 d、次降雨量>30 mm的有4次,其中次降雨量最大值达到了42.1 mm(1980年6月29日)。次降雨历时与次降雨量分布趋势一样,在降雨间隔10 d之内,次降雨历时相对较长,如降雨间隔为0~5 d、降雨历时在10 h以上的次降雨很多,其中次降雨历时最大值高达43 h(2010年9月18日);降雨间隔为6~10 d的次降雨历时最大值达到53 h(2016年7月21日);降雨间隔在11 d以上的次降雨历时较少,但次降雨历时最大值也达到了29 h(2016年11月20日)。次降雨强度最大值随着降雨间隔的增大而减小,次降雨强度最大值为41.3 mm/

h(1975年8月11日),因此降雨间隔短时的降雨月

份是合流制管网溢流的高发期,也是防汛主要时期。

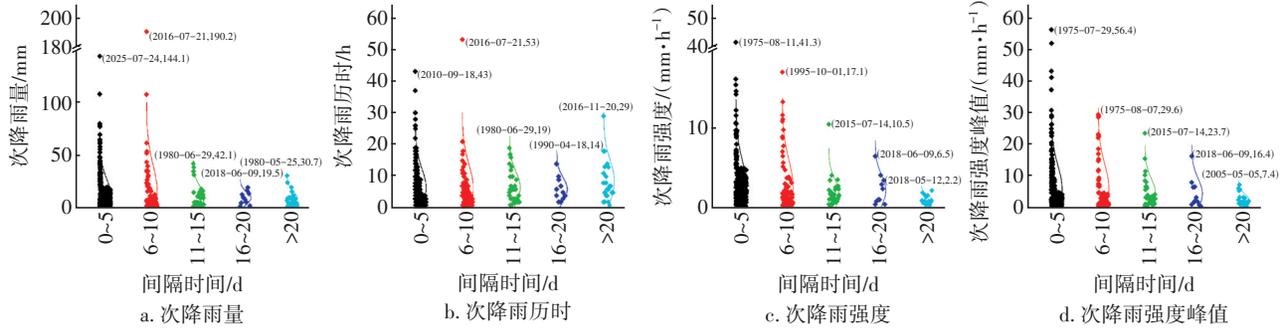


图4 1975年—2018年次降雨的间隔天数分布

Fig.4 Distribution of interval days between rainfalls from 1975 to 2018

从图4还可以发现,汛期6月—9月的降雨频率较大,降雨间隔较小,降雨间隔主要分布在0~5和6~10 d,而降雨间隔分布在11 d以上的相对较少。累积降雨量、降雨历时、降雨强度和降雨强度峰值在每个降雨间隔内相对集中,但是次降雨量、降雨历时和降雨强度的峰值都在降雨间隔10 d之内,因此,这些降雨间隔时间内的降雨对地面和管网的冲刷就相对频繁,地面和管网在较高的冲刷频率下,释放的污染负荷相对较少;随着降雨间隔的时间增加,地表径流污染负荷和管网沉积量提高<sup>[15]</sup>,再次降雨就会导致地面径流和管道溢流污染负荷增大,但汛期存在极端降雨事件,可能对管网沉积物的冲刷更强,溢流产生的污染更严重。因此,对于降雨间隔天数长的大降雨量事件,特别是非汛期后和极端降雨前,有必要对管道进行冲洗,从而减少降雨对溢流污染的影响。

选取2018年8月8日、11日的降雨进行实际观测和过程分析,发现合流制管网发生溢流时对应的累积降雨量为20~22 mm,表明北运河上游合流制管网能够控制20~22 mm的降雨。按照《降水量等级》(GB/T 28592—2012)24 h标准划分,8月8日、11日的降雨分别为暴雨和大雨(见表1和图5)。

表1 2018年典型降雨特征

Tab.1 Typical rainfall characteristics in 2018

降雨时间	时段	累积降雨量/mm	降雨历时/min	降雨强度/(mm·min <sup>-1</sup> )	雨峰强度/(mm·5 min <sup>-1</sup> )	降雨类型
8月8日	03:00—10:00	75.2	320	0.235	13.4	暴雨
8月11日	02:00—05:00	9.2	180	0.051	3.8	大雨
	16:00—17:00	22.4	60	0.373	9.4	

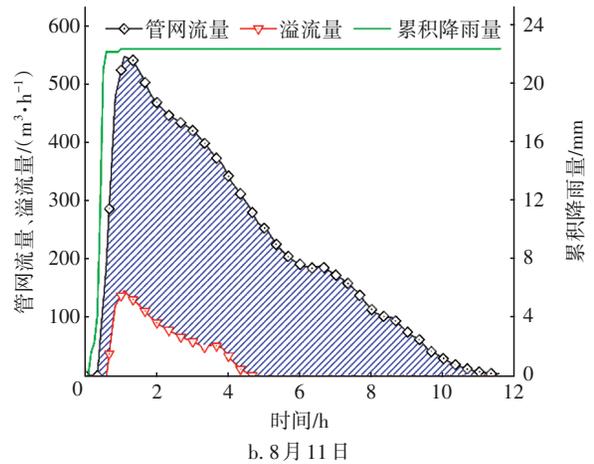
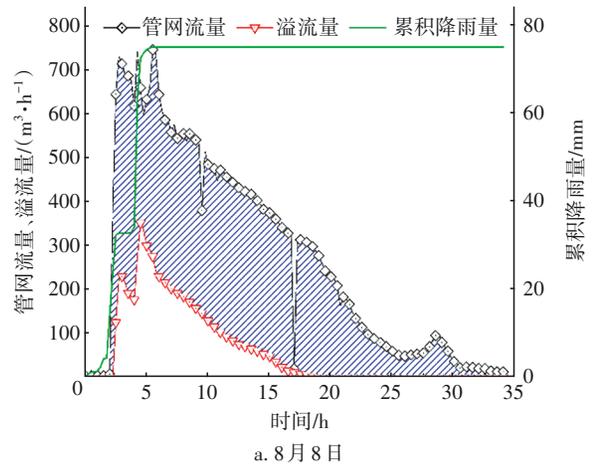


图5 2018年两次降雨过程的流量和降雨量的变化

Fig.5 Change of discharge and rainfall during two rainfall events in 2018

其中8月11日按照降雨间隔2 h划分为两次降雨,第一次降雨无溢流发生,因此未做分析,主要对第二次降雨进行分析。8月8日降雨强度大、历时长;8月11日第一次降雨强度小、历时长,第二次降雨强度大、历时短。

8月8日降雨量达到约22 mm时开始溢流,从降

雨开始到溢流发生历时约2.3 h。8月11日降雨量达到22.4 mm时开始溢流,从降雨开始到溢流发生历时约1 h。因此,溢流前降雨强度影响从降雨开始至溢流开始所需要的时间,溢流前降雨强度越大,所需时间越短;反之,溢流前降雨强度越小,所需时间越长。合流制管网的流量变化与溢流变化相同,但从降雨开始到管网流量开始增加所需时间都大于30 min。管道沉积物是CSOs污染的主要来源,是由于早期时合流制管道内水量少、流速小,管道充

满度低,污水里的污染物易沉积到管道底部。降雨时,由于冲刷作用,部分沉积物会重新进入流动的污水中,使合流制污水的污染负荷变高。因此,降雨前可根据天气预报对管网进行沉积物清除,使管道沉积物在发生溢流前就得到有效控制,不仅能削减溢流污染,而且可提高合流制管网的截留能力。

### 2.3 降雨强度与管网流量及溢流量的关系

管网流量和溢流量随着累积降雨量的增大而增加,如图6所示。

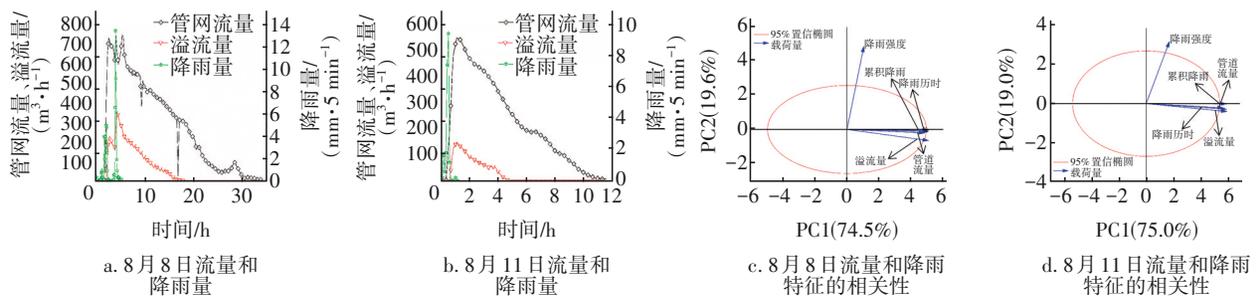


图6 2018年典型降雨与流量之间的关系

Fig.6 Relationship between typical rainfall and discharge in 2018

当降雨量达到峰值时,管网流量和溢流量也达到峰值,而降雨类型影响管网流量和溢流量的变化趋势。8月8日为双峰型降雨,第一个溢流量的峰值滞后于第一个降雨强度的峰值约45 min,第二个溢流量的峰值滞后于第二个降雨强度的峰值约20 min。8月11日为单峰型降雨,溢流量的峰值滞后于降雨强度的峰值约30 min。双峰型降雨的第二个降雨强度峰值使得管网流量和溢流量的峰值变化更加敏感,而第一个管网流量和溢流量峰值的出现主要受流量峰值前的降雨强度峰值和降雨历时的影响。这些结果说明,双峰型降雨的雨型分布影响了管网流量和溢流量曲线的趋势,往往也会出现双峰型流量曲线趋势。从图6还发现,管道流量和溢流量与降雨条件存在不同的相关性。虽然降雨强度跟流量之间存在着一定的相关性,其中管网流量和溢流量与累积降雨量、降雨历时的相关关系最为显著,表明累积降雨量和降雨历时是管网流量和溢流量变化的主要影响因素。

### 3 结论

① 北运河上游沙河流域的降雨主要集中在前半夜21:00左右。从时间上看,主要集中在汛期6月—9月,占全年降雨量的80%,且大部分降雨间隔小于10~15 d,降雨频次高,对管网底泥的冲刷频次相对较高。近20年平均降雨量比1975年—1995年

的小,导致汛期对管网的冲刷强度降低。可见,降雨导致的溢流污染主要发生在夏季的夜晚,管网底泥可能在主汛期“七下八上”极端降雨下冲刷溢流出来,成为北运河瞬时污染源,加剧溢流污染问题。

② 2018年8月两次降雨监测与溢流污染的研究结果表明,当累积降雨量达到20~22 mm时发生溢流,且发生溢流所需时间随着溢流前降雨强度的增大而减小,管网流量和溢流量的峰值主要受流量峰值前降雨强度和降雨历时的影响,而降雨类型和发生溢流所需时间可以指导管网冲洗方式。因此,可以根据天气预报等信息对降雨前的合流制管网进行冲洗,尤其是易导致溢流的长降雨间隔事件进行管道预冲洗,以减少降雨造成的污染,从而保护城市自然水体。

### 参考文献:

- [1] SORIANO L, RUBIÓ J. Impacts of combined sewer overflows on surface water bodies. The case study of the Ebro River in Zaragoza City [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 1-5.
- [2] SHI X, SANG L T, WANG X C, *et al.* Pollutant exchange between sewage and sediment in urban sewer systems [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 351: 240-247.

- [ 3 ] SHAHSAVARI G, ARNAUD-FASSETTA G, CAMPISANO A. A field experiment to evaluate the cleaning performance of sewer flushing on non-uniform sediment deposits [J]. *Water Research*, 2017, 118: 59–69.
- [ 4 ] 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).
- [ 5 ] AUKIDY M A, VERLICCHI P. Contributions of combined sewer overflows and treated effluents to the bacterial load released into a coastal area[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 483–496.
- [ 6 ] BECOUZE-LAREURE C, THIEBAUD L, BAZIN C, *et al.* Dynamics of toxicity within different compartments of a peri-urban river subject to combined sewer overflow discharges [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 539: 503–514.
- [ 7 ] 陈伟伟, 申继先, 卞艳丽, 等. 城区雨水管网径流污染特征研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(5): 85–88.  
CHEN Weiwei, SHEN Jixian, BIAN Yanli, *et al.* Research on pollution characteristics of runoff of rain pipeline in urban [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014, 25(5): 85–88(in Chinese).
- [ 8 ] YU S Q. Interannual variation of annual precipitation and urban effect on precipitation in the Beijing region [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(9): 1042–1050.
- [ 9 ] 李建, 宇如聪, 王建捷. 北京市夏季降水的日变化特征[J]. *科学通报*, 2008, 53(7): 829–832.  
LI Jian, YU Rucong, WANG Jianjie. The diurnal variation characteristics of summer precipitation in Beijing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(7): 829–832(in Chinese).
- [ 10 ] 尤焕苓, 刘伟东, 任国玉. 1981~2010年北京地区极端降水变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2014, 19(1): 69–77.  
YOU Huanling, LIU Weidong, REN Guoyu. Variation characteristics of precipitation extremes in Beijing during 1981–2010 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(1): 69–77(in Chinese).
- [ 11 ] JEAN M È, DUCHESNE S, PELLETIER G, *et al.* Selection of rainfall information as input data for the design of combined sewer overflow solutions [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 565: 559–569.
- [ 12 ] MAILHOT A, TALBOT G, LAVALLÉE B. Relationships between rainfall and combined sewer overflow (CSO) occurrences [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 602–609.
- [ 13 ] 李林, 张子曰, 范雪波, 等. 基于短时强降水特征的北京暴雨蓝色预警指标研究[J]. *气候与环境研究*, 2018, 23(3): 268–274.  
LI Lin, ZHANG Ziyue, FAN Xuebo, *et al.* A study on the blue rainstorm warning index based on characteristics of short-period heavy rainfall in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2018, 23(3): 268–274(in Chinese).
- [ 14 ] 刘伟东, 尤焕苓, 任国玉, 等. 北京地区精细化的降水变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2014, 19(1): 61–68.  
LIU Weidong, YOU Huanling, REN Guoyu, *et al.* Subtle precipitation characteristics in Beijing area [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(1): 61–68(in Chinese).
- [ 15 ] 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): 64–67.  
HU Cheng, HE Qiang, XU Zhiheng, *et al.* Flush effect of initial overflows from combined sewer systems in mountainous cities [J]. *China Water & Wasterwater*, 2012, 28(11): 64–67(in Chinese).

作者简介:海永龙(1993–),男,宁夏固原人,硕士研究生,研究方向为合流制溢流污染控制。

E-mail: ylhai\_st@rcees.ac.cn

收稿日期:2019–10–17

修回日期:2020–01–20

(编辑:任莹莹)