

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.006

基于河道纳污能力的北运河城市副中心段 合流制溢流污染控制研究

于磊¹,黄瑞晶^{1,2},李容^{1,2},周星¹,张书函¹,邸苏闯¹

(1.北京市水科学技术研究院防灾减灾所,北京 100048;2.河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:针对北运河北京城市副中心段合流制溢流污染问题,采用监测和模拟手段,以出口断面受纳水体水质不恶化为管理目标,计算了场次溢流事件河道纳污能力,提出了将超标频次作为合流制溢流控制指标,并与以溢流频次作为合流制溢流控制指标进行了对比。结果表明,2013—2017 年各排口年均溢流频次为 7~9 次,平均场次溢流量 14.27 万 m³;2017 年降雨 19 场,溢流 10 次,均超过河道纳污能力;分别以超标频次和溢流频次为控制指标,投入产出比最佳的频次为 3 次,实现该目标所需的调蓄规模分别为 18 116 m³、13 899 m³,年溢流体积控制率可达 52% 和 44%,溢流污染负荷控制率可达 59% 和 51%;以超标频次为合流制溢流控制指标,兼具水量和水质控制意义,可利用受纳水体自净能力,降低工程规模。

关键词:合流制溢流;纳污能力;超标频次;溢流频次;SWMM;北京城市副中心

中图分类号:TU992;X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)05-0041-08

Research on pollution control of combined sewer overflow in Beijing Municipal Administrative Center section of North Canal based on the ability to decontamination of the river

YU Lei¹, HUANG Ruijing^{1,2}, LI Rong^{1,2}, ZHOU Xing¹, ZHANG Shuhan¹, DI Suchuang¹

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the serious problem of confluence overflow pollution in Beijing sub-center section of the North Canal, this paper calculated the river pollution carrying capacity of the overflow event by means of monitoring and simulation and selected the non-deterioration of the water quality of the receiving water body in the outlet cross section as the management goal. The frequency of exceeding standard was taken as the CSO control index and the results were compared with those taking the overflow frequency as the CSO control index. The results show that the average annual overflow frequency of each outlet from 2013 to 2017 is 7 to 9, and the average overflow volume is 0.1427 million m³. There were 19 rains, of which 10 overflowed in 2017. All overflow events exceeded the receiving capacity of the river water body. Taking the overflow frequency and exceeding standard frequency as CSO control indexes, the input-output ratio was the best when the valued of frequency was set as 3 times. The corresponding regulation and storage volumes were 18 116 m³ and 13 899 m³ respectively, the control rate of annual overflow volume can reach 52% and 44%, and the load control rate of overflow pollution can reach 59% and 51%. Using the exceeding standard frequency as the control index can make full use of the water environment capacity, reduce the scale of CSO treatment project, and enrich the engineering measures.

Key words: combined sewer overflow; ability to decontamination; exceeding standard frequency; overflow frequency; SWMM; Beijing Municipal Administrative Center

截流式合流制是我国城市排水体制的重要组成部分^[1]。在降雨条件下,当进入合流制管道的雨水过多,流量超过管道截流能力时,雨污混合水会发生溢流,称为合流制溢流(CSO)。由于溢流水体未经处理,生

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX103-002,007)

作者简介:于磊(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事城市雨洪控制与利用研究。E-mail:yl@bwsti.com

引用本文:于磊,黄瑞晶,李容,等.基于河道纳污能力的北运河城市副中心段合流制溢流污染控制研究[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):41-48.

YU Lei, HUANG Ruijing, LI Rong, et al. Research on pollution control of combined sewer overflow in Beijing Municipal Administrative Center section of North Canal based on the ability to decontamination of the river[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 41-48.

活污水、管道淤泥和地表径流冲刷污染物等伴随雨水进入河道,引发了河道水体问题,破坏了水环境生态平衡。随着海绵城市及黑臭水体治理工作的推进,CSO 相关研究成为热点^[2-5]。目前国家层面尚未形成 CSO 污染控制的法规政策,仅在部分标准中对相关要求有所提及^[6]。实践中,从便于监管角度考虑,溢流频次、溢流体积控制率、污染物总量削减率是最为常用的控制指标,但该类指标对应的标准是从 CSO 自身控制效果出发,与受纳水体水质标准衔接程度不足^[7-8],实施控制措施后河道水质的改善效果模糊。从溢流污染控制措施入手,发现“合改分”并非最优解,大部分城市不具备改造条件,一些发达国家城市也同样保留和沿用了合流制排水系统^[9]。对于截流式合流制,实际截流能力直接影响排水管网运行和污水厂污水处理效率,通过末端截流改造以提高截流倍数是减少污水溢流的重要手段,但截流倍数要与末端污水厂污水处理能力相匹配^[10-11]。从过程控制的角度考虑,建设调蓄池以减少雨水进入合流制排水管网,不仅能减轻管网和污水处理设施的运行压力,还能削减 CSO 污染,但该类设施受场地空间影响较大。

本文针对北运河北京城市副中心存在的 CSO 问题,借助监测和模型模拟等手段,量化了 CSO 现状,以场次河道纳污能力为约束条件,提出将超标频次作为控制指标,比较了同样控制标准下,以超标频次和溢流频次作为控制指标情景下调蓄规模的差异。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

北京城市副中心位于通州区,地处北京市东南部,总面积达 155 km²,区域内地势平坦低洼,水系发达,北运河河道将副中心分割为河东和河西两大片区。由于建设年代较早,副中心部分区域为合流制排水体制,虽经过截流改造,但因截流倍数仅为 1,溢流事件时有发生,影响河道水质^[12]。选择北运河城区段为研究区,起点自北关闸,终点为通运桥,全长约 4.2 km,河道平均宽度约 185 m,为相对封闭河道,无其他支流汇入。据调查,研究区内共有 4 处合流制排口,其中北运河河东 2 处,河西 2 处(图 1)。除 2 处雨水排口外,无其他外源输入。

1.2 数据来源

研究采用的数据包括降雨数据、管网数据、下垫面数据、高程数据、人口数据、河道水质及流量数据、排口水位及水质数据。其中河道水质数据为北运河研究范围内入流断面北关闸监测数据。降雨数据来自气象部门,时间间隔为 5 min。排口水位数据来自于布设在排口 1 溢流堰前的水位计,水质数据是同点位人工取样,样品送至实验室检测,检测指标为化学需氧量(COD)。水位数据监测分辨率为 5 min,水质取样频次为 10 min/30 min,即溢流发生后前半小时每 10 min 取样 1 次,之后每 30 min 取样 1 次。各类数据见表 1。

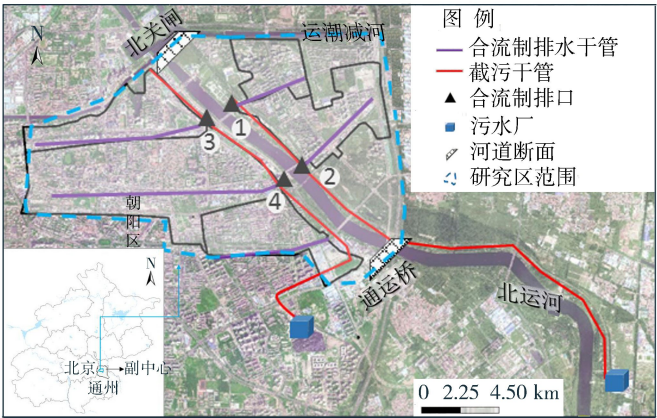


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of the study area

表 1 研究数据汇总

Table 1 Aggregation of research data

编号	数据名称	数据来源	说明
1	降雨数据	气象部门	数据间隔为 5 min
2	管网数据	实测数据	包括检查井地面高程、井底高程;管网尺寸、上下游高程
3	下垫面数据	通过遥感卫片解译	2019 年高分卫星影像解译结果
4	高程数据	实测数据	1 : 2000 地形图
5	人口数据	2019 年通州区统计年鉴	单位建筑用地面积人口数,依据街道人口统计数据和建筑用地面积计算获得
6	河道水质	监测数据	2019 年 1—10 月,其中 4—10 月采样频次为 4 次/月,1—3 月采样频次为 1 次/月
7	排口水位	自动水位监测设备	2019 年 2 场降雨监测数据,监测频次 5 min
8	合流污水水质	人工取样,实验室检测	2019 年 2 场降雨监测数据,取样频次 10 min/30 min

1.3 模型构建与参数率定

选用 EPA SWMM 5.1 软件,构建研究区数值模型,包含水量模型和水质模型。首先,基于管网数据、地形数据和路网数据,梳理300mm以上管径的排水管道及其检查井进行保留,概化包含截流井、截流堰、截流

管等构筑物的区域管网系统,并划分排水分区;然后,基于 ArcGIS 软件采用泰森多边形法划分子汇水区,并将其连接到临近检查井;最后,基于地形数据及土地利用数据,提取子汇水区面积、特征宽度、平均坡度、土地利用类型和不透水比例等参数,并在模型中赋值。其中,土地利用类型来源于 2019 年高分辨率遥感影像解译结果,具体划分为建筑用地、道路、绿地、未利用地和水域五大类,对应不透水率设置为 70%、80%、20%、40% 和 0,再通过加权计算得到各子汇水区的不透水率。水量模型中产流过程采用 Horton 下渗模型,地表汇流过程采用非线性水库模型,管道水流传输采用动力波法演算;水质模型中城市地表污染物累积和径流冲刷过程均采用指数函数模型模拟,根据不同土地利用类型设置水质指标(本文仅模拟 COD)累积和冲刷参数,考虑街道对污染物的去除效果,添加街道清扫参数。研究区内采用点降雨,不考虑降雨空间分布差异。模型初始参数依据研究区同类文献^[13]及使用手册设置。

按照先水量后水质的原则,选取 2019 年 7 月 22 日和 7 月 28 日两场典型场次降雨进行模型参数率定。其中水量和水质模型分别采用水深、COD 质量浓度作为分析指标。采用纳什系数(NSE)和平均相对偏差(BIAS)作为水量模型模拟精度的评价指标,采用 BIAS 作为水质模型模拟精度的评价指标。经分析(如图 2 所示),水量模型 NSE 分别为 0.81 和 0.91, BIAS 分别为 0.08、0.05;水质模型 BIAS 分别为 0.19 和 0.23,水量模型和水质模型模拟精度较好,满足研究需求。率定后模型的主要参数取值见表 2。

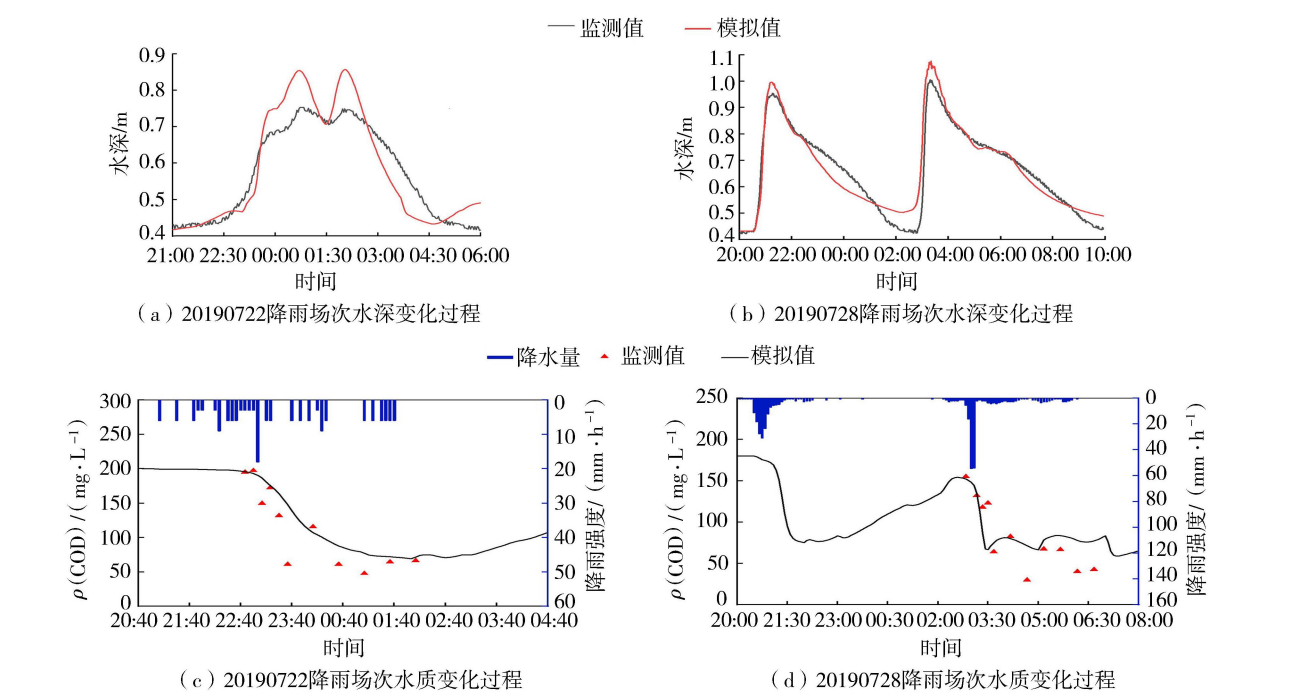


图 2 模型率定结果

Fig.2 Model calibration and verification results

表 2 模型参数取值

Table 2 Parameter values of model			
参数名称	参数取值	参数名称	参数取值
不透水区域糙率系数	0.025	干燥时间	7 d
透水区域糙率系数	0.120	清扫间隔	0.5
不透水区域注蓄量	4 mm	清扫效率	70%
透水区域注蓄量	10 mm	污染物最大累积量	绿地 50 kg/hm ² 、建筑 180 kg/hm ² 、道路 170 kg/hm ² 、未利用地 70 kg/hm ²
管道糙率系数	0.0168	污染物饱和累积期	绿地 10 d、建筑 4 d、道路 4 d、未利用地 10 d
最大入渗率	75 mm/h	冲刷系数	绿地 0.003 5、建筑 0.012、道路 0.004、未利用地 0.003 5
最小入渗率	8 mm/h	冲刷指数	绿地 1.2、建筑 1.8、道路 1.5、未利用地 1.2
渗透衰减系数	5		

1.4 河道纳污能力计算方法

河道纳污能力即河道水环境容量,表征河道在某一条件下允许排入的最大污染负荷^[14],包括差值容量

和自净容量。差值容量表征河道水质管理目标与现状值的差异,自净容量表征河道在某一时段内的自我净化能力。水质评价方法包括单因子评价法、水质综合指数评价法、模糊综合评价法、人工神经网络法等^[15-17]。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,采用单因子评价法判定水质类别。假定溢流污水进入水体后污染物均匀混合,按照一维水质 S-P 模型计算河道纳污能力,计算公式如下:

$$W_L = W_1 + W_2$$

(1)

其中 $W_1 = Q_0(C_g - C_0) 10^{-3} T$ $W_2 = Q_0(C_0 - C) 10^{-3} T$ $C = C_0 e^{-K \frac{L}{86400u}}$ $u = Q_0/A$
式中: W_L 为水环境容量, kg; W_1 为差值容量, kg; W_2 为自净容量, kg; Q_0 为入流断面流量, m^3/s ; C_g 为管理目标质量浓度, mg/L; C_0 为入流断面本底质量浓度, mg/L; T 为计算时间, 本文为溢流时长, s; u 为水流流速, m/s; A 为断面面积, m^2 ; K 为衰减系数, d^{-1} ; L 为河段长度, m。

1.5 降雨场次与溢流场次划分方法

目前对于降雨场次的划分方法并未统一^[18-19],但降雨场次影响溢流场次,本文结合研究区正在开展的合流制管网调蓄工程调度规则(即雨后 24 h 内将调蓄水量处理完毕),将降雨场次划分标准确定为 24 h 内累积降水量小于 2 mm,即最小降雨时间间隔 24 h。对 1 场降雨过程内的多次溢流事件记为 1 次溢流^[20]。

2 分析与讨论

2.1 现状分析与评价

2019 年汛期河道水质监测结果表明,研究区河道入流断面 COD 质量浓度平均值为 27.82 mg/L,在汛期非降雨时段 COD 质量浓度平均值在 30.24 mg/L 左右,略微超出地表水水质Ⅳ类标准。从各个月份来看,7 月和 8 月平均质量浓度在 30 mg/L 以下,6 月和 9 月平均质量浓度大于 30 mg/L。

采用 2013—2017 年连续 5 a 实测降雨数据开展模拟,以年为单位划分溢流场次,统计各场次排口溢流频次及溢流量,如表 3 所示。结果表明,研究区年平均降水量为 683 mm,最大 842 mm,最小 574 mm;年降雨场次最高 31 场,最低 19 场,平均 27 场。各个排口溢流次数最多为 11 次,最低 6 次,年均溢流频次在 7~9 之间。排口 4 溢流频次最高,其次是排口 3,排口 2 溢流频次最低。相对而言,北运河西岸排口溢流频次(8.5 次)要高于河东(7.8 次)。

表 3 各排口溢流情况
Table 3 Summary of overflow at each outlet

年份	降水量/mm	降雨 场次/次	平均场次 降水量/mm	总溢流量/ m ³	各排口溢流频次/次			
					排口 1	排口 2	排口 3	排口 4
2013	574	31	19	37 931	8	6	9	9
2014	643	30	21	152 759	7	7	8	7
2015	650	27	24	88 950	7	6	6	6
2016	842	30	28	226 673	11	10	11	11
2017	706	19	37	207 415	8	8	8	10
平均值	683	27	25	142 746	8.2	7.4	8.4	8.6

通过对比分析可知,2017 年降雨场次最少,但降水总量为 706 mm,平均场次降水量 37 mm,远大于其他年份。考虑到场次降水量大的降雨会带来更多的溢流污染负荷,故选择 2017 年降雨作为最不利情景,开展后续 CSO 治理研究。

2.2 场次河道纳污能力计算

以溢流期间河道水质不恶化为管理目标,即出流水质浓度不高于入流,则 $W_1 = 0$, $W_L = W_2$ 。参考北运河 COD 降解速率模拟研究成果^[21],考虑到溢流事件多发生于汛期,河道水流速度较大,最终确定 COD 衰减系数取 $0.1 d^{-1}$ 。采用北关闸闸下流量及水位监测数据,计算 Q_0 及 u , L 采用各排口距出流断面距离的平均值,为 2.44 km。基于模型模拟结果,统计各排口溢流量、溢流负荷和溢流时间,对溢流量及溢流负荷进行汇总求和,以各排口中溢流时间最长的作为 T ,根据式(1)(2)计算确定不同场次河道纳污能力,并计算超标负荷,计算结果见表 4,溢流量和溢流污染负荷相关关系曲线见图 3。

由表 4 可知,2017 年降雨 19 场,其中 10 场发生溢流事件,5 场发生在 8 月,2 场发生在 7 月,5 月、6 月和

表 4 场次溢流情况及纳污能力计算结果

Table 4 Statistics of overflow volume and ability to decontamination of the river

序号	日期	降水量/mm	溢流量/m ³	溢流污染负荷/kg	溢流时长/h	纳污能力/kg	超标负荷/kg
1	2017-05-22	17.9	1 890	416	2.0	200	216
2	2017-06-23	53.0	60 686	6 041	17.0	1 874	4 167
3	2017-07-06	25.2	11 765	2 078	6.0	533	1 545
4	2017-07-21	8.2	7 726	1 210	4.0	368	842
5	2017-08-02	19.4	47 237	5 016	5.0	453	4 563
6	2017-08-08	35.5	11 918	1 541	3.0	274	1 267
7	2017-08-11	17.7	45 028	4 207	5.2	466	3 741
8	2017-08-16	3.7	1 096	291	2.0	245	46
9	2017-08-23	21.2	1 966	433	1.0	110	323
10	2017-10-09	69.8	18 116	3 016	6.3	702	2 314
平均值		27.2	20 743	2 425	5.2	520	1 905

10 月各发生一场。从水量分析,溢流量最大的为 6 月 23 日溢流事件,为 60 686 m³,最小的是 8 月 16 日溢流事件,为 1 096 m³,平均场次溢流量为 20 743 m³。从溢流时长来看,最长溢流时间为 17 h,最短为 1 h,平均值为 5.2 h。从溢流水量与水质的关系来看,二者之间存在极强的正相关关系(图 3)。所有场次溢流污染负荷均超过纳污能力,最大为 8 月 2 日溢流事件,超标量为 4 563 kg,最小为 8 月 16 日,超标量为 46 kg,平均超标负荷 1 903 kg。与 8 月 2 日溢流事件相比,6 月 23 日的溢流量和溢流污染负荷大,但超标负荷低,原因是 6 月 23 日溢流时长为 17 h,远大于 8 月 2 日的 5 h。由此可知,除场次溢流量和溢流污染负荷外,溢流时长是影响超标负荷的重要因素。可采用相应措施,延长溢流时间,降低溢流强度,利用河道水体的自净能力,增加溢流污染物在河段内运移过程中的自然降解量,以降低 CSO 治理工程的规模。

2.3 控制方案研究

类比溢流频次的概念,提出将超标频次作为 CSO 控制指标。超标频次是指所有发生的溢流事件中超出受纳水体纳污能力的次数,与溢流频次、溢流体系控制率等常用指标一样,通常以年计。CSO 控制的根本目的在于改善降雨期间河道水质,减少其超标的次数,但若要控制所有合流制排口不溢流或溢流事件发生时河道水质全达标是不经济也是不现实的,因此国内外各地区 CSO 的治理都会确定相应的标准。需要明确的是,由于本文采用的计算方法基于研究区段内河道纳污能力,控制目标为下游断面水质相较上游入流水质不恶化,故溢流水质达标认定为溢流事件发生时段内研究区河道出口断面水质达标。

在入河前建设调蓄设施实现 CSO 的控制是最为常用的工程措施^[22]。根据调蓄池的位置不同工程措施分为:①在截流井之后建设调蓄池。降雨发生后,合流制污水首先经截流设施截流,待超出截流能力后,将溢流污水收集至调蓄池进行存蓄,雨后再抽排至污水厂进行处理;②在截流设施之前建设调蓄设施,在降雨发生后先将管道内的合流制污水收集至调蓄池存蓄,待调蓄池满后再利用截流设施进行截流,超出截流能力则发生溢流。控制标准越高,所需要的调蓄规模越大。按照场次溢流量由大到小进行排序,若要实现溢流 n 次的控制标准,则排序第 $n+1$ 次溢流事件对应的溢流量即为所需调蓄规模。同理,以各场次溢流超标负荷为约束条件,除以各场次溢流事件的平均质量浓度得出的溢流量,由大到小进行排序,若要实现超标 n 次的控制标准,则排序 $n+1$ 次溢流事件下超标负荷对应的溢流量即为调蓄规模,见图 4。

通过图 4 可以获取不同控制标准下所需的调蓄规模。随着控制标准的降低(即频次增加),所需的调蓄规模呈非线性下降趋势。频次低于 3 时,调蓄规模都在 4 万 m³ 以上,而频次放宽至 3 时,调蓄规模大幅降低至 2 万 m³ 以下。一般认为调蓄工程建设规模与投

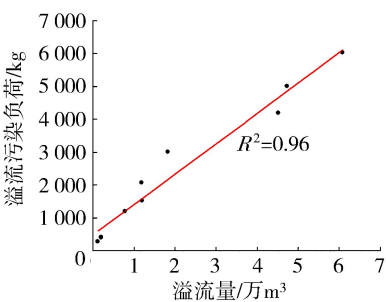


图 3 溢流量与溢流负荷之间相关关系

Fig. 3 Relationship between overflow volume and overflow pollution

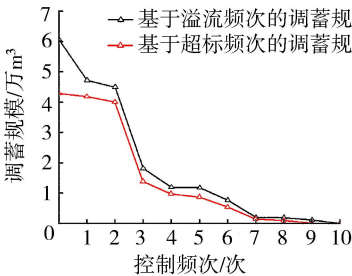


图 4 不同控制标准下对应的调蓄规模

Fig. 4 Regulation and storage volumes of reservoir under different control standards

资成正比,随着调蓄工程建设规模的增加,建设成本呈直线上升趋势。除建设成本外,还需考虑运行维护成本和新增污水处理费用等^[23-24],因此从投入产出比来说,将控制标准定为3次最佳。该标准下,以溢流频次和超标频次为控制指标,所需的调蓄规模分别为18 116 m³和13 899 m³,前者比后者偏大30%,即4 217 m³。比较可知,当频次低于7次时,调蓄规模(即纵向上两个点的距离)存在明显的差异,这个差值来自于溢流事件发生时段内河道的纳污能力。

表5为不同控制标准下,两类控制指标的溢流体积控制率和污染负荷控制率。以3次作为控制标准,以溢流频次为控制指标的情况下,溢流体积控制率为52%,能够满足GB/T 51345—2018《海绵城市建设评价标准》提出的年溢流体积控制率不低于50%的要求,此时溢流污染负荷控制率能够达到59%。而以超标频次作为控制指标,年溢流体积控制率则低于标准要求,若要实现要求,超标频次应定为2次,对应年溢流体积控制率为84%,溢流污染负荷控制率达86%。与3次控制标准相比,控制率大幅上升。

表5 不同控制指标所需调蓄规模及控制效果

Table 5 Statistics of regulation and storage volume, and effect for different control index						
控制频次	以溢流频次为控制指标			以超标频次为控制指标		
	调蓄规模/m ³	溢流体积控制率/%	溢流污染负荷控制率/%	调蓄规模/m ³	溢流体积控制率/%	溢流污染负荷控制率/%
0	60 686	100	100	42 974	88	90
1	47 237	94	94	41 856	87	89
2	45 028	91	93	40 042	84	86
3	18 116	52	59	13 899	44	51
4	11 918	41	48	9 801	34	41
5	11 765	40	47	8 748	31	38
6	7 726	28	34	5 376	21	25
7	1 966	9	12	1 466	7	9
8	1 890	9	12	980	5	7
9	1 096	5	7	174	1	1
10 *	0	0	0	0	0	0

注:频次10次表示不采用任何控制措施,维持现状。

综上,与常规以溢流频次作为控制指标相比,以超标频次作为控制指标,考虑了河道自净能力,因此调蓄规模有所降低,降低的程度随着控制标准的提高而增加。此外,溢流频次是一种水量控制指标,通常只能是通过建设调蓄设施来实现控制目标;而超标频次不仅是一种水量控制指标,也是一种水质控制指标,除了通过调蓄设施实现目标之外,还可以通过建设水质快速处理设施(如旋流分离器、沉淀池等,建设生态岸线和人工湿地也被证实是有效改善河道水质的生态修复措施^[25-26])直接削减入河污染负荷,从而实现控制目标^[23,27],因此以超标频次作为控制指标拓展了指标的内涵,更有利于工程措施的选择。

以超标频次3次为控制目标确定总调蓄规模后,需要将调蓄规模分配到每个排口上。按照公平分摊原则,以各排口溢流量在总溢流量中的贡献率为比例系数,分解调蓄规模。最终排口2溢流占比最高(49.3%),调蓄规模按同比例计算为8 929 m³,排口1、3、4调蓄规模分别为5 911 m³、402 m³和2 873 m³,4个排口的调蓄规模差异较大。从减少建设投资的角度考虑,可以按统筹原则,将排口3的调蓄规模分摊到其他排口,进而减少调蓄设施建设数量,降低建设及运行维护成本,本文将其分配至排口4。最终两类分配方案的结果见表6。

表6 各排口溢流量占比及调蓄规模

Table 6 Proportion of overflow flow of each outlet and volume of regulation and storage				
位置	溢流量/m ³	溢流量占总溢流量的比例/%	按公平分摊原则确定的调蓄规模/m ³	统筹后的调蓄规模/m ³
排口1	67 686	32.6	5 911	5 911
排口2	102 240	49.3	8 929	8 929
排口3	4 604	2.2	402	0
排口4	32 897	15.9	2 873	3 275

3 结 论

a. 北运河北京城市副中心研究区段COD本底质量浓度平均值为27.82 mg/L,达到地表水水质Ⅳ类标

准,汛期无雨时略微超标,6 月和 9 月平均质量浓度大于 30 mg/L。2013—2017 年平均年降雨场次 27 场,排口年均溢流频次 7~9 次,排口 4 溢流频次最高,排口 2 最低。2017 年平均场次降水量最大,溢流场次平均污染负荷较高,作为最不利情景进行分析。

b. 2017 年降雨 19 场,其中 10 场发生溢流,主要发生在 8 月,平均场次溢流量为 20 743 m³,平均溢流时间为 5.2 h,最大溢流场次发生于 6 月 23 日,溢流量达 60 686 m³。溢流量与溢流污染负荷正相关。所有场次溢流污染负荷均超过河道纳污能力,最大超标量为 4 563 kg。除溢流量和溢流负荷外,溢流时长也是影响超标负荷的因素。

c. 从投入产出比分析,CSO 控制频次定为 3 最佳。该控制标准下,以溢流频次和超标频次作为控制指标,所需的调蓄容积分别为 18 116 m³和 13 899 m³,年溢流体积控制率分别为 52% 和 44%,溢流污染负荷控制率分别为 59% 和 51%。若要满足《海绵城市建设评价标准》中提出的 CSO 年溢流体积控制率不低于 50% 的控制标准,溢流频次应不超过 3 次,超标频次则应不超过 2 次。

c. 等比例分摊总调蓄规模至各排口,各排口调蓄规模差异较大,最大为 8 929 m³,最小为 402 m³。可将最小的排口 3 的调蓄规模分摊至其他排口,以减少调蓄设施建设数量,降低建设及运行维护成本。

e. 超标频次不仅是一种水量控制指标,还是一种水质控制指标。与溢流频次相比,以超标频次作为 CSO 控制指标,实现同样控制标准所需的调蓄容积更小,可以采用的手段更为丰富。

参考文献:

[1] 潘国庆,车伍. 国内外城镇排水体制的探讨[J]. 给水排水,2007(增刊 1):323-327. (PAN Guoqing,CHE Wu. Discussion on town drainage system at home and abroad[J]. Water & Wastewater Engineering,2007(Sup1):323-327. (in Chinese))

[2] HALL K J, MCCALLUM D W, LEE K, et al. Characterization and aquatic impacts of combined sewer overflows in greater vancouver British Columbia[J]. Water Science & Technology,1998,38(10):9-14.

[3] 徐祖信,王卫刚,李怀正,等. 合流制排水系统溢流污水处理技术[J]. 环境工程,2010,28(增刊 1):153-156. (XU Zuxin, WANG Weigang,LI Huaizheng,et al. Treatment technique of combined sewer overflows[J]. Environmental Enginerring,2010,28(Sup1):153-156. (in Chinese))

[4] 车伍,唐磊. 中国城市合流制改造及溢流污染控制策略研究[J]. 给水排水,2012,48(3):1-5. (CHE Wu,TANG Lei. Study on the transformation of urban combined flow system and the control strategy of overflow pollution in China [J]. Water & Wastewater Engineering,2012,48(3):1-5. (in Chinese))

[5] 赵越,姚瑞华,徐敏,等. 我国城市黑臭水体治理实践及思路探讨[J]. 环境保护,2015,43(13):27-29. (ZHAO Yue,YAO Ruihua,XU Min,et al. Study on the practice and route of combating urban black-and-malodorous water body[J]. Environmental Protection,2015,43(13):27-29. (in Chinese))

[6] 赵泽坤,车伍,赵杨,等. 中美合流制溢流污染控制概要比较[J]. 给水排水,2018,54(11):128-134. (ZHAO Zekun,CHE Wu,ZHAO Yang,et al. Summary comparison of combined sewer overflow control between China and the United States[J]. Water & Wastewater Engineering,2018,54(11):128-134. (in Chinese))

[7] 贾楠,王文亮,车伍,等. 美国合流制溢流控制标准分析及对我国的启示[J]. 中国给水排水,2019,35(7):121-127. (JIA Nan,WANG Wenliang,CHE Wu,et al. Analysis of combined sewer overflow control standards of the United States and its Enlightenment to China[J]. China Water & Wastewater,2019,35(7):121-127. (in Chinese))

[8] 李俊奇,周金成,杨正,等. 合流制溢流控制指标与标准制定研究[J]. 水资源保护,2021,37(1):124-131. (LI Junqi,ZHOU Jincheng,YANG Zheng,et al. Study on control indicators and standard formulation of combined sewer overflow [J]. Water Resources Protection,2021,37(1):124-131. (in Chinese))

[9] 杨正,赵杨,车伍,等. 典型发达国家合流制溢流控制的分析与比较[J]. 中国给水排水,2020,36(14):29-36. (YANG Zheng,ZHAO Yang,CHE Wu,et al. Analysis and comparison of combined sewer overflow (CSO) control in representative developed countries[J]. China Water & Wastewater,2020,36(14):29-36. (in Chinese))

[10] 杨新德,戴忱,曹万春. 合流制排水系统截流能力分析与溢流污染控制方案[J]. 给水排水,2021,57(增刊 1):196-200. (YANG Xinde,DAI Chen,CAO Wanchun. Intercepting capacity analysis and overflow pollutants control scheme of combined system[J]. Water & Wastewater Engineering,2021,57(Sup1):196-200. (in Chinese))

[11] 黄瑞晶,于磊,葛俊,等. 城市副中心合流制管网不同截流形式效果模拟研究[J]. 北京水务,2021(5):39-43. (HUANG Ruijing,YU Lei,GE Jun,et al. Research of effect simulation for different intercepting forms of the combined network in municipal administrative center[J]. Beijing Water,2021(5):39-43. (in Chinese))

- [12] 周邦磊,赵白航,李军,等.以受纳水体水质为目标的基于 Mike Urban 的初期雨水调蓄池容积确定[J].给水排水,2021,57(增刊1):482-489. (ZHOU Banglei,ZHAO Baihang,LI Jun,et al. Determination of the initial rainwater storage tank volume using mike urban model based the receiving water quality[J]. Water & Wastewater Engineering,2021,57(Sup1):482-489. (in Chinese))
- [13] 于磊,马盼盼,潘兴瑶,等.海绵城市源头措施对合流制溢流的减控效果研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(4):476-480. (YU Lei,MA Panpan,PAN Xingyao,et al. Effect of sponge city source measures for combined sewer overflows reduction and control[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2019,55(4):476-480. (in Chinese))
- [14] 董飞,刘晓波,彭文启,等.地表水水环境容量计算方法回顾与展望[J].水科学进展,2014,25(3):451-463. (DONG Fei,LIU Xiaobo,PENG Wenqi,et al. Calculation methods of water environmental capacity of surface waters:review and prospect[J]. Advances in Water Science,2014,25(3):451-463. (in Chinese))
- [15] 郭劲松.基于人工神经网络(ANN)的水质评价与水质模拟研究[D].重庆:重庆大学,2002.
- [16] 薛巧英,刘建明.水污染综合指数评价方法与应用分析[J].环境工程,2004(1):64-66. (XUE Qiaoying,LIU Jianming. Methods and analyses of water pollution comprehensive index assessment[J]. Environmental Engineering,2004(1):64-66. (in Chinese))
- [17] 张小君,徐中民,宋晓谕,等.几种水环境质量评价方法在青海湖入湖河流中的应用[J].环境工程,2013,31(1):117-121. (ZHANG Xiaojun,XU Zhongmin,SONG Xiaoyu,et al. Application and study of several water quality evaluation method in rivers flowing into Qinghai Lake[J]. Environmental Engineering,2013,31(1):117-121. (in Chinese))
- [18] 杨默远,潘兴瑶,刘洪禄,等.考虑场次降雨年际变化特征的年径流总量控制率准确核算[J].水利学报,2019,50(12):1510-1517. (YANG Moyuan,PAN Xingyao,LIU Honglu,et al. Accurate calculation of the volume capture ratio of annural rainfall considering the field rainfall evolution[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(12):1510-1517. (in Chinese))
- [19] 皋云,李琼芳,周正模,等.镇江市降雨场次划分与暴雨特性分析[J].水资源保护,2021,37(3):43-49. (GAO Yun,LI Qiongfang,ZHOU Zhengmo,et al. Division of rainfall events and analysis of rainstorm characteristics in Zhenjiang City[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):43-49. (in Chinese))
- [20] 贾楠,王文亮,车伍,等.合流制排水系统溢流事件划分方法案例分析[J].中国给水排水,2019,35(13):117-121. (JIA Nan,WANG Wenliang,CHE Wu,et al. Case study on division method of combined sewer system overflow events[J]. China Water & Wastewater,2019,35(13):117-121. (in Chinese))
- [21] 张培培,吴艺帆,庞树江,等.再生水补给河流北运河 COD_{Cr}降解系数变化及影响因素[J].湖泊科学,2019,31(1):99-112. (ZHANG Peipei,WU Yifan,PANG Shuijiang,et al. COD_{Cr} degradation coefficient of urban river recharged with reclaimed water and its impactong factors[J]. Lake Science,2019,31(1):99-112. (in Chinese))
- [22] 史秀芳,卢亚静,潘兴瑶,等.合流制溢流污染控制技术、管理与政策研究进展[J].给水排水,2020,56(增刊1):740-747. (SHI Xiufang,LU Yajing,PAN Xingyao,et al. Research progress of technology,management and policy on combined sewer system overflow control[J]. Water & Wastewater Engineering,2020,56(Sup1):740-747. (in Chinese))
- [23] 马倩倩,蔡欣,丁怡斐.旋流分离器在合流制溢流污染控制中的应用进展[J].绿色科技,2016(2):68-70. (MA Qianqian,CAI Xin,DING Yifei. The application of cyclone separator in the control of overflow pollution in combined flow system is progressing[J]. Green Technology,2016(2):68-70. (in Chinese))
- [24] 宫永伟,刘伟勋,于磊,等.合流制溢流控制系统的多目标优化[J].环境工程,2020,38(4):128-133. (GONG Yongwei,LIU Weixun,YU Lei,et al. Multi-objective optimization of combined sewer overflow control system[J]. Environmental Engineering,2020,38(4):128-133. (in Chinese))
- [25] 杨荣金,王逸卓,李秀红,等.官厅水库水质评价及时空变化特征[J].水资源保护,2021,37(6):135-141. (YANG Rongjin,WANG Yizhuo,LI Xiuhong,et al. Water quality evaluation and spatiotemporal variation characteristics of Guanting Reservoir[J]. Water Resources Protection,2021,37(6):135-141. (in Chinese))
- [26] 汤茵琪,任心欣,孔露霆,等.城市河流系统治理策略在鹅颈水生态修复中的应用[J].水资源保护,2021,37(6):88-93. (TANG Yinqi,REN Xinxin,KONG Luting,et al. Application of integrated urban river management strategy in Ejingshui River ecological restoration[J]. Water Resources Protection,2021,37(6):88-93. (in Chinese))
- [27] 高郑娟,孙朝霞,贾海峰.旋流分离技术在雨水径流和合流制溢流污染控制中的应用进展[J].建设科技,2019(增刊1):96-100. (GAO Zhengjuan,SUN Zhaoxia,JIA Haifeng. Progress in application of cyclone separation technology in pollution control of runoff and combined overflows[J]. Building Science and Technology,2019(Sup1):96-100. (in Chinese))