

上海中心城区合流制排水系统调蓄池环境效应研究

程江^{1,2}, 吕永鹏², 黄小芳², 郭晟²

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海市城市化生态过程和生态恢复重点实验室, 上海 200062)

摘要:于 2006~2008 年同步监测了上海中心城区成都路合流制排水系统 20 余次的降雨、径流和径流水质过程, 研究了国内首座投入使用的城市大型排水系统调蓄池的环境效应. 结果表明, 调蓄池有效提高了排水系统排水能力, 系统截流倍数可从 3.87 倍提高到 6.90~9.92 倍. 对暴雨溢流和旱流试车溢流的年际平均削减量分别为 $9.10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $8.37 \times 10^4 \text{ m}^3$, 削减率分别达 9.00% 和 100%. 对暴雨溢流 COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N 和 TP 的年际平均削减率分别为 13.76%、19.69%、15.29%、18.24% 和 15.10%, 相应削减量分别为 41.21、12.37、50.10、2.12 和 0.29 t·a⁻¹. 调蓄池可 100% 削减旱流试车溢流污染, 相应污染物的削减量分别为 20.75、4.87、14.90、4.49 和 0.30 t·a⁻¹. 分析显示调蓄池设计标准、运行模式和降雨条件是影响调蓄池环境效应发挥的重要因素.

关键词:调蓄池; 环境效应; 合流制排水系统溢流; 城市化; 苏州河

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2234-07

Environmental Effects of Combined Sewage Detention Tank in Central Shanghai

CHENG Jiang^{1,2}, LÜ Yong-peng², HUANG Xiao-fang², GUO Sheng²

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, School of Resources and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Through measuring the processes of precipitation, discharge and pollutant concentration over 20 times from 2006 to 2008 in Chendulu combined sewerage system (CSS) along Suzhou Creek in central Shanghai, the environmental effects of Chendulu combined sewage detention tank (CSDT), the first running CSDT in China, were studied. The results show that CSDT could improve CSS discharge capacity effectively with promoted interception ratio from 3.87 to 6.90-9.92. The mean annual combined sewer overflow (CSO) reduction and reduction rate are $9.10 \times 10^4 \text{ m}^3$ and 9.00%, respectively, and those of sanitary waste discharged directly to Suzhou Creek in non-rain-weather are $8.37 \times 10^4 \text{ m}^3$ and 100%, respectively. The mean annual pollutants decrease rate of COD, BOD₅, SS, NH₄⁺-N and TP of CSO are 13.76%, 19.69%, 15.29%, 18.24% and 15.10%, respectively, and those CSO pollutants decrease 41.21 t, 12.37 t, 50.10 t, 2.12 t and 0.29 t annually, respectively. The CSDT also could decrease sanitary waste discharged to Suzhou Creek totally, and those decreased pollutants are 20.75 t, 4.87 t, 14.90 t, 4.49 t and 0.30 t annually, respectively. The analysis shows that the CSDT design standard, running models and rainfall characteristics are the important influencing factors to realize the environmental effects of CSDT.

Key words: detention tank; environmental effect; combined sewer overflow (CSO); urbanization; Suzhou Creek

暴雨期间超出合流制排水系统 (combined sewerage system, CSS) 排水能力的降雨径流所形成的溢流 (combined sewer overflow, CSO), 是目前城市河流与湖泊等受纳水体的主要污染源^[1-3]. 20 世纪 60~70 年代起至今, 削减 CSS 初期雨水污染物、减轻水体污染逐步成为各国专家重点关注的研究课题之一, 欧美等国对 CSO 的长期规划、控制方法、排放标准及计算模拟和监控等进行了大量研究, 并制定出一系列的指导措施^[1,4-7]. 例如, 1989 年美国环保局颁布了《国家合流污水控制策略》, 1992 年德国修订了 1977 年颁布的《ATV128 合流污水系统暴雨削减装置设置指南》, 2002 年日本颁布了《合流制下水道改善对策指针和解说》^[8]. 其中, 合流污水调蓄池 (combined sewage detention tank, CSDT) 是控制 CSO

的一项关键技术, 近 20 年来已在德国、丹麦、日本等国家广泛运用^[9-13]. 我国相关研究开始于 20 世纪 80 年代^[2,3], 上海于 20 世纪 90 年代起对 CSO 开展控制^[14], 并在 2003~2005 年实施的苏州河环境综合整治二期工程中新建了 5 座大型 CSDT. 目前, 我国 CSDT 环境效应的研究主要集中于工程设计之初的经验匡算^[14]和数学模型模拟计算方面^[15], 还缺乏实际运行数据的验证. 本研究以国内首座运行的成都路 CSDT 为对象, 通过对成都路 CSS 降雨、径流和径流水质过程的多次同步监测, 定量探讨了 CSDT 暴

收稿日期: 2008-10-11; 修订日期: 2008-12-12

基金项目: 上海市科委项目 (072312043)

作者简介: 程江 (1977~), 男, 博士后, 主要研究方向为城市水资源与水环境, E-mail: jcheng@sklec.ecnu.edu.cn

雨削峰、溢流减排、溢流降污等环境效应,以期为城市 CSO 非点源污染控制研究及 CSDT 设计、运行和管理提供有意义的借鉴。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

上海平均海拔高度 4 m,属北亚热带季风气候,年均气温 15.5℃,年均降水总量 1 149.8 mm,降水日数 132 d.降水具有明显的季节性变化,全年 70%左右的雨量集中在 4~9 月的汛期.中心城区苏州河沿岸现有的 37 座市政泵站中合流制泵站达到 34 座,近年来直排进入苏州河的 CSO 达到 $1\ 000 \times 10^4 \sim 3\ 500 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$.为基本消除中心城区 CSO 直排河道现象,促进苏州河的水体功能恢复,在苏州河环境综合整治二期工程中,新建了 5 座大型 CSDT,有效调蓄能力达到 $7.52 \times 10^4 \text{ m}^3$.其中,成都路 CSDT 于 2006 年投入试运行,2007 年起正式运行.成都路调蓄池

位于苏州河沿岸成都路 CSS 内,集水面积 3.06 km^2 ,污水配泵流量 $3.300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,单台流量 $1.100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,晴天早流污水 $5.85 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,合 $0.677 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,配泵截流倍数 $n = (3.300 - 0.677) / 0.677 = 3.87$ 倍.调蓄池有效容积 $7\ 400 \text{ m}^3$,雨水配泵流量 $4.090 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,单台流量 $2.045 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

1.2 调蓄池设计

CSDT 工作原理如图 1 所示.调蓄池在暴雨期间收集超过系统截流能力的初期合流污水,待暴雨结束后再将收集的污水输送至截流总管,最终进入城市污水处理厂.目前,德国、美国和日本等国家已有各自成熟的调蓄池容积设计方法,其中,德国和日本调蓄池的设计目标都设定为:CSS 排放的污染物负荷量与分流制排水系统排放的污染物负荷量达到相同水平^[14],在此基础上计算设计系统所需调蓄池的容积大小.而我国尚无相关计算规范.

成都路 CSDT 容积计算由上海市政工程设计研

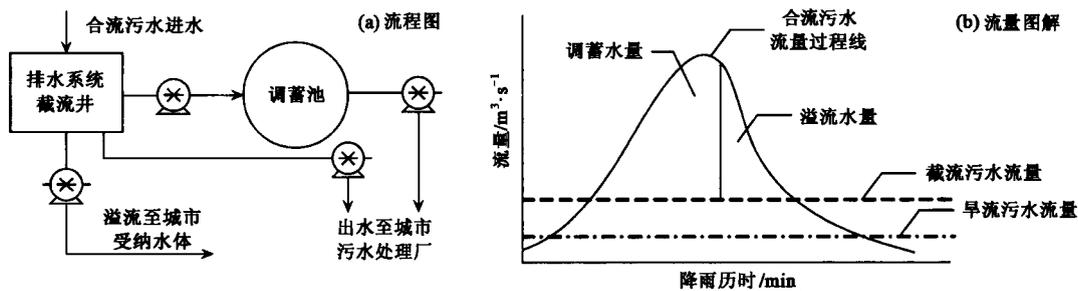


图 1 合流制排水系统调蓄池流程图与流量图解

Fig.1 Flow chart and graph of combined sewage detention tank

究院参考德国废水协会“ATV Arbeitsblatt A 128 1992”标准,即德国《ATV128 合流污水系统暴雨削减装置设置指南》,按照下式计算^[16].

$$V = 1.5 \times V_{\text{SR}} \times A_{\text{U}} \quad (1)$$

式中, V 为调蓄池容积,单位 m^3 ; V_{SR} 为每公顷面积需调蓄的雨水量,单位 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $12 \leq V_{\text{SR}} \leq 40$,成都路调蓄池取 20; A_{U} 为非渗透面积, $A_{\text{U}} = \text{系统面积} \times \text{径流系数}$,单位 hm^2 .成都路排水系统面积 306 hm^2 ,设计径流系数 0.8,代入式(1)计算出的容积为: $V_{\text{成都路}} = 1.5 \times 20 \times 306 \times 0.8 = 7\ 344 \text{ m}^3$,工程建设实际取 $V_{\text{成都路}} = 7\ 400 \text{ m}^3$.

1.3 调蓄池设运行模式

CSDT 所有设备均由成都路泵站 PLC 控制,运行方式分为:晴天模式、进水模式、满池模式、放空模式和搅拌模式(表 1)^[16].

1.4 数据采集与水样分析

2006 年 6 月~2008 年 9 月对成都路 CSS 进行了 20 余次降雨-排水系统合流污水水量、水质的全过程监测.雨量数据与泵站流量数据由泵站自动化采集系统获得,降雨数据采集间隔为 5 min,系统自动记录泵站各类型水泵的启、闭时间,根据各台水泵的铭牌流量和运行时间计算得到流量.水样采集点位于该系统泵站集水井,人工手动采样.按雨前、雨中和雨后 3 个时段连续采样,其中雨前和雨后时段的采样间隔均为 10 min,雨中视现场水质水量变化情况设定 3 min 或 5 min 的采样间隔.

水样保存于 1 L 的棕色玻璃水样瓶中,未及时分析的水样放入 4℃ 的冰柜中保存.水质分析指标包括: pH、SS、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP 以及重金属 Cu、Cd、Pb、Zn、Cr,其中 pH 分析使用美国 Hach 公司生产的 SENSion156 便携式多参数测量仪现场测定,其余指标采用文献[17]的标准方法分析.

表 1 成都路合流制排水系统调蓄池运行模式

Table 1 Running models of Chendulu combined sewage detention tank

运行模式	集水井水位/m	调蓄池水位/m	雨水泵	进水蝶阀	出水蝶阀	重力放空	放空泵	潜水搅拌机
晴天模式	—	—	关	关	关	关	关	关
进水模式	- 5.50	—	开 1 台	开	关	关	关	关
	- 5.00	—	开 2 台	开	关	关	关	关
满池模式	—	0.60	关	关	关	关	关	关
放空模式	—	- 3.90 ~ 0.60	关	关	开	开	关	关
	—	- 7.90 ~ - 3.90	关	关	开	关	开	关
	—	- 3.40 ~ 0.60	关	关	开	开	关	开 5 台
搅拌模式	—	- 5.90 ~ - 3.40	关	关	开	关	开	开 2 台
	—	- 5.90 以下	关	关	开	关	开	关

2 结果与讨论

2.1 暴雨径流污染浓度

对于 CSS 而言,任意一场降雨的合流污水污染物的浓度过程线随时间存在起伏,虽然接纳水体水质的变化并非同样敏感,但为评价合流污水对接纳水体的污染强度,可用事件平均浓度(event mean concentration, EMC)来对一场降雨的合流污水的污

染负荷做出总体评价^[18].EMC 按式(2)计算^[18]:

$$EMC = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i c_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (2)$$

式中, n 指 t 时间段内径流取样次数; Q_i 指 i 次取样时的径流量,单位 $m^3 \cdot s^{-1}$; c_i 指 i 次取样时的污染物浓度,单位 $mg \cdot L^{-1}$.用式(2)计算的旱流污水、暴雨初期合流污水和暴雨溢流污水的 EMC 见表 2.

表 2 成都路合流制排水系统各类污水事件平均浓度

Table 2 Events mean concentration of different waste water in Chendulu combined sewerage system

污水类别	pH	COD /mg·L ⁻¹	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	SS /mg·L ⁻¹	Cu /mg·L ⁻¹	Zn /mg·L ⁻¹	Cr /mg·L ⁻¹	Cd /μg·L ⁻¹	Pb /μg·L ⁻¹
本研究旱流污水	7.10	247.7	58.1	53.6	3.54	177.9	0.06	0.26	0.07	0.74	13.15
本研究暴雨初期合流污水 ¹⁾	7.33	452.9	135.9	23.3	3.19	550.6	0.08	1.05	0.05	0.87	45.25
本研究 CSO	7.35	342.6	59.7	12.5	2.16	367.3	0.05	0.73	0.03	0.55	39.41
美国 CSS 旱流污水 ^[19]	—	—	281	13.8	5.45	284	0.07	0.16	0.04	1.58	10.7
武汉汉阳区 CSS 合流污水 ^[20]	—	142 ~ 614	16.5 ~ 208.5	12.3 ~ 29.8 ²⁾	0.88	140 ~ 684	—	—	—	—	—
昆明城区 CSS 合流污水 ^[21]	—	87.8 ~ 302.1	41.7 ~ 119.1	14.2 ~ 42.1 ²⁾	0.95 ~ 3.90	96.7 ~ 477.6	—	—	—	—	—
上海杨浦区 CSO ^[22]	—	614.0	208.5	17.6	3.0	684	—	—	—	—	—
美国城市 CSO ^[19]	—	—	24.2	0.83	0.82	86.8	0.03	0.10	0.02	2.40	43.1
苏州河市区段 ^[23]	7.46	23.4	6.5	6.3	0.62	—	0.02	—	—	0.10	—
V 类地表水	6 ~ 9	40	10	2.0	0.40	—	1.0	2.0	0.1	10	100

1) 暴雨初期合流污水是指合流制排水管网中旱流污水与初期降雨径流的合流污水,该污水进入 CSTD; 2) 为 TN 浓度

表 2 显示:①成都路 CSS 旱流污水、进调蓄池的初期合流污水、直排进入城市接纳水体的 CSO 的 pH 值分别为 7.10、7.33 和 7.35,均符合《国家地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 V 类水标准.②初期合流污水和 CSO 中 COD、BOD₅ 和 SS 的 EMC,均大于旱流污水,NH₄⁺-N 和 TP 的 EMC 低于旱流污水.CSS 中各类污染物主要来源的不同是这一现象的主要成因.③初期合流污水和溢流污水 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 TP 的 EMC 均超过 V 类水标准,亦大于苏州河市区段水体浓度.受初始冲刷效应和后期降雨径流冲刷、携带下垫面污染物减少的影响,初期合流污水污染程度最大,其 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 TP

的 EMC 分别达到 452.9、135.9、23.3 和 3.19 mg·L⁻¹,相应超过 V 类水标准 10.3、12.6、10.7 和 7.0 倍.与上海杨浦区 CSO 相比,本研究 CSO 中有机类、营养盐和悬浮物浓度相对较低,这是由于 CSTD 的应用,原先 CSO 中浓度较高的部分污水作为暴雨初期合流污水进行统计.与美国城市 CSO 相比^[19],本研究有机类污染物、NH₄⁺-N、TP 和 SS 明显较高,这一现象在武汉^[20]、昆明^[21]等城市亦有体现.④各类污水重金属 Zn 和 Pb 的 EMC 浓度相对于 Cu、Cr 和 Cd 较高,但均低于 V 类水标准.与美国同类污水相比,本研究的重金属污染水平相当.

2.2 调蓄池环境效应

2.2.1 溢流量削减

调蓄池开启 1 台雨水泵,成都路排水系统 1 h 内的截流倍数可从 3.87 倍增加至 6.90 倍,若同时开启 2 台雨水泵,0.5 h 内的截流倍数可从 3.87 倍增加至 9.92 倍.系统截流倍数的增加,可有效削减洪峰流量,减少合流污水直接排入城市受纳水体.调蓄池 2006~2008 年共有效运行 37 次,发挥了良好的削减暴雨溢流量的作用,总计削减暴雨溢流量 $22.1 \times 10^4 \text{ m}^3$.其中,2006 年试运行期间削减 $7.50 \times 10^4 \text{ m}^3$,2007 和 2008 年正式运行期间分别削减 5.77

$\times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $8.83 \times 10^4 \text{ m}^3$,相应暴雨溢流削减率分别为 11.68%、4.72% 和 7.62% (表 3).以 2000~2005 年统计暴雨溢流量数据为例,假设 80% 的暴雨溢流事件使用调蓄池,则可削减 4.39%~14.25% 的暴雨溢流量.2000~2008 年的年平均削减暴雨溢流量可达 $9.10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,削减率为 4.39%~14.25%,平均为 9.00%,与数学模型计算出的 8.70%~13.50% 削减率相当^[15].成都路调蓄池运行后,旱流试车污水不发生溢流,平均削减试车溢流量可达 $8.37 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,削减率为 100%.

表 3 成都路调蓄池削减溢流量统计¹⁾

Table 3 Overflow statistic in Chendulu combined sewerage system

年份	降雨量 /mm	暴雨溢流量 $\times 10^4/\text{m}^3$	雨天溢流 次数	调蓄池 使用次数	调蓄量 /m ³	暴雨溢流量 削减率/%	试车溢流量 $\times 10^4/\text{m}^3$	试车溢流量 削减率/%
2008	1 080.4	107.1	16	14	88 344	7.62	7.85	100
2007	1 225.8	116.4	15	10	57 670	4.72	7.90	100
2006	985.9	56.7	29	13	74 970	11.68	7.80	100
2005	1 064.3	175.4	13	10	76 960	4.39	4.80	100
2004	813.7	106.3	23	18	136 160	12.81	6.50	100
2003	730.8	51.8	11	9	65 120	12.57	4.20	100
2002	1 260.6	126.6	26	21	153 920	12.16	13.80	100
2001	1 163.0	131.8	19	15	112 480	8.53	13.00	100
2000	1 264.8	37.4	9	7	53 280	14.25	9.50	100
平均	1 063.6	101.1	17.9	13.0	90 989	9.00	8.37	100

1) 2000~2005 年调蓄池使用次数和调蓄量数据为估算值

2.2.2 溢流污染物削减

依据成都路排水系统旱流污水、暴雨初期合流污水和暴雨溢流污水各污染物的 EMC (表 2),以及溢流削减量 (表 3),计算了 2000~2008 年调蓄池对溢流有机污染物、悬浮颗粒物和 N、P 营养污染物的削减率 (表 4) 和削减量 (图 2).由于重金属浓度不超标,因此未计算.2000~2008 年,受暴雨强度、暴雨雨型、年暴雨次数和调蓄池运行次数的影响,调蓄池削减暴雨溢流 COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N 和 TP 的比例分别为 13.76%、19.69%、15.29%、18.24% 和 15.10%,上述 5 类污染物的平均削减率达到 7.40%~24.22%.若考虑调蓄池对旱流试车溢流的削减,5 类污染物的平均削减率可达到 11.23%~43.67%,平均为 26.16%.已有研究显示,调蓄池对 COD 和 BOD₅ 削减率均为 5% 时,苏州河市区段 COD 和 BOD₅ 浓度平均分别可下降 $13.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[15].由调蓄池实际运行效果可见,平均 16.42% 的暴雨溢流污染削减率,将会显著改善暴雨期间的苏州河水质.2000~2008 年调蓄池对暴雨溢流 COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N 和 TP 的平均削减量分别为 41.21、12.37、50.10、2.12 和 0.29 t·a⁻¹.对旱流

试车溢流中上述污染物的平均削减量则分别是 20.75、4.87、14.90、4.49 和 0.30 t·a⁻¹ (图 2).

调蓄池在削减暴雨溢流污染物的同时,还可降低所调蓄污水的浓度,例如 SS 可降低 50%~70%,TP 和 TN 为 10%~20%,有机物为 20%~40%,重金属 Pb 和 Zn 分别为 75%~90%、30%~60%^[24].

2.3 调蓄池环境效应影响因素分析

2.3.1 调蓄池设计标准影响

成都路调蓄池容积设计参照了德国废水协会“ATV Arbeitsblatt A 128 1992”标准^[16],该标准通过先后计算污水厂处理雨水量、单位面积污水量、单位面积雨水处理量、平均雨水径流量、平均截流倍数、年降雨强度修正值、强污染物修正值、管道沉降物修正值、晴天污水 COD 浓度修正值、合流雨水 COD 浓度、允许排放率和单位面积调蓄量等 12 项参数,最终来确定调蓄池容积^[24].该计算流程可简化成为式 (1).按 $12 \leq V_{\text{SR}} \leq 40$ 的取值范围,式 (1) 计算出的调蓄池容积,在德国每年可截流超过 80% 的雨水和溢流污染物^[25].Calabró 等^[12] 在意大利的研究显示,当 V_{SR} 取值 5~35 时,服务面积 0.096 km² 的 CSTD 平均可削减 85.0%~93.0% 的暴雨溢流污水,另一服务

表 4 成都路调蓄池溢流污染削减率¹⁾

Table 4 Overflow pollutant Reduction rate by Chendulu combined sewage detention tank

年份	调蓄池暴雨溢流污染削减率/%						调蓄池总溢流污染削减率/%					
	COD	BOD ₅	SS	NH ₄ ⁺ -N	TP	平均	COD	BOD ₅	SS	NH ₄ ⁺ -N	TP	平均
2008	9.83	15.81	11.00	13.33	10.86	12.17	13.97	20.62	13.75	31.98	19.53	19.97
2007	6.15	10.14	6.91	8.45	6.82	7.69	10.28	15.17	9.68	27.71	15.57	15.68
2006	14.88	23.14	16.54	19.77	16.34	18.13	21.52	30.31	20.94	45.54	29.61	29.59
2005	5.98	9.46	6.73	8.23	6.63	7.40	7.86	11.69	7.97	17.92	10.73	11.23
2004	18.54	25.06	20.52	24.30	20.28	21.74	22.31	28.71	22.96	40.24	28.01	28.44
2003	18.17	24.66	20.11	23.84	19.87	21.33	23.10	29.46	23.33	43.74	29.85	29.89
2002	17.52	23.96	19.41	23.04	19.18	20.62	24.04	30.35	23.70	47.84	32.12	31.61
2001	11.97	17.52	13.36	16.09	13.19	14.43	18.17	24.09	17.48	41.24	25.76	25.35
2000	20.85	27.44	23.00	27.08	22.73	24.22	34.22	39.99	32.00	65.45	46.71	43.67
平均	13.76	19.69	15.29	18.24	15.10	16.42	19.50	25.60	19.09	40.18	26.43	26.16

1) 2000 ~ 2005 年调蓄池使用次数和调蓄量数据为估算值

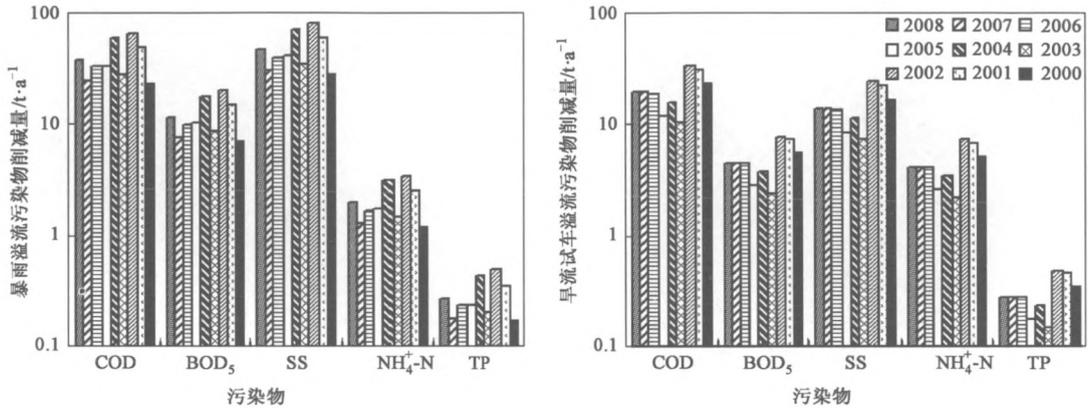


图 2 成都路调蓄池溢流污染物削减

Fig.2 Overflow pollutant reduction by Chendulu combined sewage detention tank

面积 0.40 km² 的 CSTD 对暴雨溢流的平均削减率达到 88.0% ~ 99.0% .Herrmann 等^[9]的研究亦证实,在德国按设计标准建造的家庭用雨水调蓄池,可削减 91.0% ~ 98.0% 的雨水.对于成都路 CSS,在 V_{SR} 取值为 20 的设计条件下,调蓄池的工程预期暴雨溢流的削减量和削减率分别为 46.0 × 10⁴ ~ 80.0 × 10⁴ m³ · a⁻¹ 和 37.0% ~ 64.0%^[14].实际运行效果显示,暴雨溢流削减量和削减率平均仅分别为 9.10 × 10⁴ m³ · a⁻¹ 和 9.00% (表 3).若要到达工程设计预定的溢流量削减率目标, V_{SR} 取值需远大于 20 (图 3).这主要是由于上海地区在 ATV128 中 12 项计算参数的取值,与德国相比,存在较大差异,例如:德国年均降雨量约为 700 mm,月均降雨量差别较小,且单场降雨历时较长,降雨曲线与美国 SCS I A 型降雨曲线接近,属平均型降雨;而上海地区年均降雨量接近 1 150 mm,70% 左右的雨量集中在 4 ~ 9 月的汛期,单场降雨历时较短,降雨曲线与 SCS II 型降雨曲线

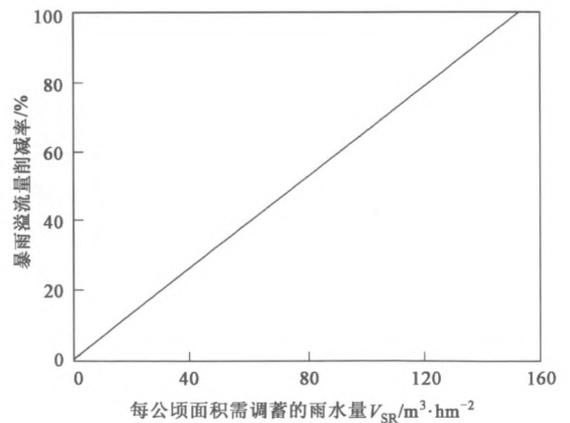


图 3 暴雨溢流量削减率与每公顷面积需调蓄的雨量关系

Fig.3 Relationship between stormwater overflow reduction rate and rainfall detention amount per hectare

接近,属于脉冲型降雨.综上,较低的 V_{SR} 取值和上海地区降雨特性是成都路调蓄池环境效应相对较低的主要原因,因此,对于上海地区乃至我国其他地区

而言,式(1)的适用性,尤其是 V_{SR} 的取值,还有待进一步探讨.

2.3.2 调蓄池运行模式影响

2006~2008 年的调蓄池运行情况显示:60 次暴雨溢流事件中,调蓄池共使用 37 次,尚有 23 次溢流事件调蓄池未及时使用;调蓄池每次平均蓄水量为 $5\,972\text{ m}^3$,与 $7\,400\text{ m}^3$ 的有效容积相比,容积使用率约 80.7%(表 3).造成调蓄池使用次数不足的主要原因是泵站集水井水位实时监控不完善,无法依据集水井实时水位信息指导调蓄池运行,导致调蓄池未及时启动运行.同时,随着旱流污水量的增长以及雨季长历时、强降雨事件的影响,连续降雨期间城市污水总管输送能力略显不足,受污水总管运行条件限制,存在调蓄池未及时放空现象,导致部分溢流事件中调蓄池无法使用.成都路 CSS 不透水型下垫面类型较高,公共建筑用地、城市住宅用地、工业用地和道路广场用地面积比例合计达到 82.7%,导致暴雨时期系统径流汇集速度快,集水井水位上升迅速,调蓄池有效运行时间受限制,出现调蓄池使用过程中发生溢流的现象,造成调蓄池有效容积使用不足.若 90% 的暴雨溢流事件能利用调蓄池,并充分使用其有效容积,据初步估算,调蓄池对暴雨溢流量和溢流污染的削减率可分别从目前 9.00% 和 16.42% 的水平,上升到 11.84% 和 22.29%.

2.3.3 降雨影响

降雨量和降雨强度是影响调蓄池环境效应发挥的重要因子.在年降雨量较小时,调蓄池对暴雨溢流量和溢流污染物的削减率均随着年降雨量的增加而减小.年降雨量较大时,在年降雨量大致相当情况下,全年降雨事件分布越分散,调蓄池所能发挥的效益越大,反之亦然(图 4).降雨强度对溢流事件的发生起着决定作用.按黄锡荃^[26] 的降雨强度分级方法,对 2000~2008 年成都路排水系统暴雨溢流事件的降雨强度统计显示,中雨及其以上降雨易导致溢流现象,当降雨达到大雨及其以上时,溢流事件发生率为 100%.同时,降雨强度也直接影响调蓄池环境

效应.图 5 显示,年际间的调蓄池的溢流量削减率和溢流污染物削减率与平均溢流事件降雨量之间,在 $p < 0.01$ 水平上具有良好的负相关性, R 分别达到 0.86 和 0.83.成都路调蓄池 $7\,400\text{ m}^3$ 的有效容积为苏州河环境综合整治二期工程中新建的 5 座调蓄池中最小,且单位面积调蓄量仅有 $2\,418\text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$,更易受到降雨量和降雨强度的影响.

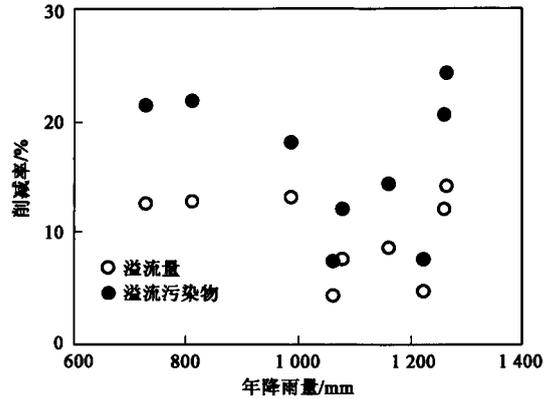


图 4 年降雨量对调蓄池环境效应的影响

Fig. 4 Detention tank's environmental impact of yearly precipitation

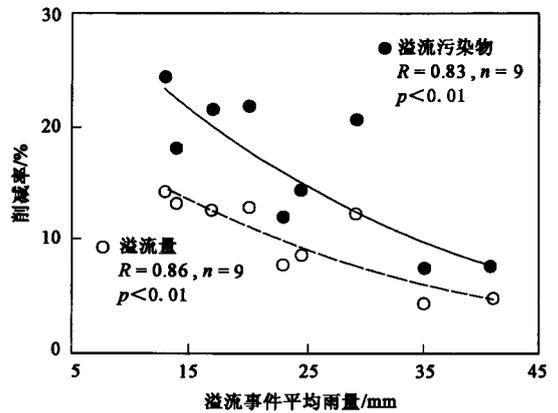


图 5 溢流事件平均降雨量对调蓄池环境效应的影响

Fig. 5 Detention tank's environmental impact of overflow events mean precipitation

参照上海地区的暴雨设计标准^[27],成都路调蓄池可发挥的环境效应与 0.5~100 a 一遇暴雨设计标准拟合结果如表 5 所示,暴雨溢流量削减率(X)和

表 5 暴雨设计重现期对调蓄池环境效应的影响/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 5 Detention tank's environmental impact of rainfall recurrence interval/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

削减率/%	上海地区暴雨设计重现期 P/a (对应 1 h 累积降雨量/mm)									
	0.5 (26.9)	1 (35.5)	2 (44.3)	3 (49.6)	5 (56.3)	10 (65.8)	20 (75.8)	30 (81.8)	50 (81.8)	100 (101.0)
溢流量	19.36	13.06	9.81	8.53	7.31	6.09	5.18	4.75	4.28	3.76
溢流污染物	28.47	20.03	15.38	13.51	11.68	9.81	8.40	7.73	6.99	6.16

溢流污染物削减率(Y)与设计暴雨重现期(P)之间存在负幂指数关系($X = 12.936P^{-0.2943}$, $Y = 19.821P^{-0.2764}$),即随着暴雨设计重现期的增加,次降雨事件的调蓄池环境效益呈下降趋势,相关系数 R 分别达到0.98和0.99,显著性水平均为 $p < 0.0001$.

3 结论

(1)成都路合流制排水系统调蓄池运行后,可将排水系统截流倍数从3.87倍提高至1h内的6.90倍和0.5h内的9.92倍,有效提高了排水标准,削减了城市洪峰流量。

(2)调蓄池的暴雨溢流削减量和削减率年际平均分别为 $9.10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 和9.00%,对旱流试车溢流的年际平均削减量为 $8.37 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,削减率为100%。

(3)调蓄池年平均可削减16.95%的暴雨溢流污染,其中COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N和TP的年平均削减率分别为13.76%、19.69%、15.29%、18.24%和15.10%,削减量分别可达41.21、12.37、50.10、2.12和0.29 t·a⁻¹.对旱流试车溢流中上述5类污染物的削减量分别为20.75、4.87、14.90、4.49和0.30 t·a⁻¹.

致谢:降雨、泵站流量数据得到上海城市中运营有限公司陈华高级工程师、上海市合流污水管理所袁述时高级工程师、张立工程师和江洪助理工程师的大力帮助,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] US EPA. Results of the national urban runoff program [R]. US EPA, Washington DC: 1983.
- [2] 李立青,尹澄清,何庆慈,等.城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展[J].水科学进展,2006,17(2):288-294.
- [3] 郭青海,马克明,杨柳.城市非点源污染的主要来源及分类控制对策[J].环境科学,2006,27(11):2170-2175.
- [4] Amir T, Ronald L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater [J]. Sci Total Environ, 2004, 327:175-184.
- [5] Gromaire M C, Garnaud S, Gonzalez S, et al. Characterisation of urban runoff pollution in Paris [J]. Water Sci Technol, 1999, 39(2):1-8.
- [6] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff [J]. Water Res, 2000, 34(6):1773-1780.
- [7] Gilbert J K, Clausen J C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut [J]. Water Res, 2006, 40(4):826-832.
- [8] 李春光.合流污水系统调蓄池的设置及建议[J].上海建设科技,2004,4:19-20.
- [9] Herrmann T, Schmida U. Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects [J]. Urban Water, 1999, 1:307-316.
- [10] Dziopak J, Niemczynowicz J. Vacuum-driven CSO detention tanks [J]. Urban Water, 1999, 1:105-107.
- [11] Cembrano G, Quevedo J, Salamero M, et al. Optimal control of urban drainage systems. A case study [J]. Control Eng Pract, 2004, 12:1-9.
- [12] Calabró P S, Viviani G. Simulation of the operation of detention tanks [J]. Water Res, 2006, 40:83-90.
- [13] Chen J Y, Adams B J. Analysis of storage facilities for urban stormwater quantity control [J]. Adv Water Resour, 2003, 28:377-392.
- [14] 张辰.合流制排水系统溢流调蓄技术研究及应用实例分析[J].城市道桥与防洪,2006,5:1-4.
- [15] 徐贵泉,陈长太,张海燕.苏州河初期雨水调蓄池控制溢流污染影响研究[J].水科学进展,2006,17(5):705-708.
- [16] 上海市市政工程设计研究院.成都路调蓄池工程初步设计说明书及附图[R].上海:上海市市政工程设计研究院,2002.
- [17] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2006.
- [18] Butcher J B. Buildup, washoff, and event mean concentration [J]. J Am Water Assoc, 2003, 39(6):1521-1528.
- [19] Soonthornonda P, Christensen E R. Source apportionment of pollutants and flows of combined sewer wastewater [J]. Water Res, 2008, 42:1989-1998.
- [20] 李立青,尹澄清,何庆慈,等.武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J].环境科学学报,2006,26(7):1057-1061.
- [21] 赵磊,杨逢乐,王俊松,等.合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J].环境科学学报,2008,28(8):1561-1570.
- [22] 李贺,李田.上海高密度居民区合流制系统雨天溢流水质研究[J].环境科学,2006,27(8):1565-1569.
- [23] 上海市环保局.上海市环境质量报告书(2001~2005)[R].上海:上海市环保局,2006.
- [24] Urbonas B, Stahre P. Stormwater: Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage, and CSO Management [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993.
- [25] 上海市市政工程设计研究院.合流制排水系统溢流调蓄技术研究[R].上海:上海市市政工程设计研究院,2005.
- [26] 黄锡荃.水文学[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [27] 陈庆江,赵敏华.上海市城市区域除涝标准的探讨[J].上海水务,2000,1:1-5.