



城市复合区域合流制溢流量对降雨特征的响应： 基于截污工程的分析

李庆^{1,2,✉}, 蔡然^{1,3}, 王文亮², 胡建美^{1,3}, 李小静², 张功良^{1,4}

1. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044; 2. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 3. 北京水星环境有限公司, 北京 100160; 4. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300354

摘要 厘清降雨驱动下的合流制溢流 (CSO) 特征有助于提出科学合理的水环境管控策略, 但截污工程对溢流排放的控制使降雨特征与 CSO 之间的常规关系被截断。为了明确截污工程中 CSO 与降雨特征之间的响应关系, 以福州仓山区龙津阳岐水系的截污工程为例, 基于现场调研以及对降雨量、进水流量和溢流量的连续监测, 借助主成分分析等统计方法分析了降雨特征、进水特征、溢流特征之间的对应关系, 并对比了该对应关系在 3 个不同汇水区域特征的截流调蓄系统之间的差异。结果表明: 系统内截流井瞬时进水流量峰值滞后于降雨峰值的时间 (下称“峰值滞后时间”) 主要受降雨历时、场降雨量及降雨峰值程度的影响; 降雨历时越长、场降雨量越大、雨型越“矮胖”的降雨事件中, 峰值滞后时间越长, 其中小雨时的平均峰值滞后时间约为 44.0 min, 中雨时的平均峰值滞后时间约为 93.6 min。场降雨量越大、降雨历时越长的场降雨事件中, 截流井进水总量越大、溢流量越大; 同场次降雨事件中不同截流井峰值滞后时间基本一致, 但由于上游汇水区域、调蓄设施规模和管网特征不同, 其进水总量和溢流量相差较大。不同截流井溢流前累积进水量存在明显差异, 阳岐 15#、吴山 7#、跃进 36#截流井的单井系统累积进水量分别为 491.21、90.31、14.77 m³, 而吴山河、阳岐河 3、跃进河 1 截流调蓄系统的系统可承受累积进水量分别为 2 181.40、1 585.27、1 189.54 m³, 这种差异主要由调蓄池调蓄量主导。总体上, 截流井进水特征与降雨特征、下垫面属性紧密相关, 溢流特征由截流井排放闸门的启闭策略决定, 在人工管控的影响下, 当截流井排放闸门开启后, 溢流量受降雨特征影响明显, 且与进水量有较好的一致性。该研究结果可为城市复合区域截污工程中 CSO 管控提供理论支持和经验参考。

关键词 城市复合区域; 合流制溢流特征; 降雨特征; 截污工程; 人工控制; 水量响应关系; 主成分分析

合流制溢流 (combined sewer overflows, CSO) 已经成为城市地表水体的主要污染源之一。雨天溢流的排放使未经处理的污水进入河道、湖泊, 严重阻碍了城市地表水体功能的恢复, 所以控制城市排水系统 CSO 一直是改善城市水环境的重点关注内容。然而作为城市建设发展过程中的排水管网建设模式之一, 雨污混流使合流制排水系统具有明显的混合性和复杂性。因此 CSO 相关问题也是公认需要长期攻坚的难题和挑战^[1]。

合流制管网系统中的溢流动态特征十分复杂, 溢流特征常受到降雨条件^[2]、下垫面属性^[3]、管网建设、管道沉积情况^[4]等多种因素的影响。其中, 降雨特征与溢流特征的相关性尤其突出^[4-5], 通常场降雨量越大时, 平均溢流量越大^[6-7], 平均降雨强度、降雨历时以及雨前干期等也在不同程度上影响溢流特征^[8-9]。已有研究会根据降雨类型采用优化分类树模型, 对是否发生溢流进行定性预测^[10], 或借助模型讨论不同降雨数据的获取对溢流频次的影响^[2,11], 以及通过降雨强度的累积分布函数量化溢流频次^[12], 也有研究通过开发数据驱动的水文模型, 实现 CSO 流量的模拟^[13]。目前大量研究集中于预测 CSO 风险, 而对于溢流量的预测较少研究^[14], 尤其是定量研究, 同时也十分缺乏对预测之前导致 CSO 的关键因素的全面了解^[15]。为了减少 CSO 对城市地表水体水质的直接冲击, 合流制排水系统常采用截流调蓄等工程手段有控制的释放管网溢流进入地表水体, 以缓冲溢流污水对地表水体的影响, 提升城市管网系统建设的应用效果。截流调蓄工程中通常采用堰式溢流或智能控制溢流井, 但考虑到实际管理需求, 智能控制系统往往也存在人为控制的情况。雨污混流在通常情况下会通过管道进入截流井, 在达到溢流条件时进行溢流, 这期间降雨、进水与溢流之间有极好的相

收稿日期: 2024-11-22 录用日期: 2025-01-22

第一作者: 李庆 (1989—), 女, 博士, 研究方向为水环境治理, lq0601forever@163.com ✉通信作者

关性。但在人工控制的参与下,进水与溢流之间的相关性被阻断,而其中人工控制溢流的原则大多情况下并不明确,更多的是依据现场需求及历史操作经验。截污工程中这种人工控制的参与导致原本降雨特征与溢流之间的常规关系被打破,在这种被打破的情况下,溢流与降雨特征之间的响应关系尚不清楚。但对于此类问题,尤其对人工控制下降雨特征与溢流特征之间联系的探讨十分欠缺。

为治理内河水质问题,福州仓山区截污工程的截流调蓄系统采用智能控制集成溢流井控制 CSO 污染进入河道。为防止上游汇水区域因截流井的增加而发生内涝,该工程中的溢流存在人工控制的情况。不同于传统的溢流堰,这种人工控制下的溢流井,即使达到溢流条件,也会出现延迟溢流或者不溢流的情况。以往研究多集中于直接分析降雨特征与溢流之间的关系,未考虑人工控制影响下 CSO 的输出特征,且多定性探讨降雨特征与溢流之间的关系,较少定量分析溢流对降雨特征的响应。本研究以福州仓山区截污工程中 3 个不同下垫面类型的截流调蓄系统为研究对象,通过对典型溢流事件中降雨及水量的连续监测,分析不同类型下垫面系统溢流特征的异同,通过主成分分析定性识别影响溢流量的关键降雨特征因素,综合考虑典型溢流事件中管网及调蓄池的边界值,定量确定溢流量关键影响因素的阈值。本研究有助于深入理解降雨与 CSO 之间的关系,填补人工控制影响降雨特征与溢流特征之间关系的研究欠缺,以期为城市水环境管理提供理论依据,也为同类型河道水环境治理工程提供理论支持和案例参考。

1 研究区域、数据和方法

1.1 研究区概况

龙津阳岐水系位于福州市仓山区中部,共包括 13 条河,流域面积约 25.49 km²。其所属区域北部以老城区为主,南部以城乡结合部为主,部分区域有工业区集中,整体属于包含建成区、城乡结合部以及工业区的城市复合区域,其排水系统以合流制为主。2017 年福州市全面开展了内河治理,通过建设福州仓山区截污工程减少污染物入河,实现河道水质提升,目前该工程处于运营阶段。

根据实地调研情况,吴山河系统、阳岐河 3 系统、跃进河 1 系统均为截流调蓄系统,所处区域主要服务对象分别为工业厂房、城市居民区域和城乡共建区域。其中,吴山河系统共包含 1 座调蓄池 ($V=2\ 000\text{ m}^3$) 和 6 座截流井,阳岐河 3 系统共包含 1 座调蓄池 ($V=3\ 000\text{ m}^3$) 和 13 座截流井,跃进河 1 系统共包含 1 座调蓄池 ($V=2\ 000\text{ m}^3$) 和 5 座截流井。各系统内调蓄池和截流井由截流管道连接,截流管道沿河道两侧敷设,各截流井中设置溢流控制装置。在旱季工况下,截流井内溢流方向的排放闸门常闭,截流干管方向电动闸门常开。雨季工况下,以截流井前池液位为控制信号,当前池液位高于后池,且持续 1 min 以上,则打开排放闸门进行溢流;当调蓄池充满,关闭电动闸门,此时排放闸门保持打开继续溢流;降雨停止后,且河道水位降低至常水位以下时,关闭排放闸门停止溢流,此时开启电动闸门,恢复为旱季运行工况。本研究将截流井打开排放闸门进行溢流视为发生了溢流事件,且将一场降雨事件中发生的溢流视为一次溢流事件。统计各截流井在降雨事件中的溢流情况,吴山 7#、阳岐 15# 和跃进 26# 截流井分别在其河道所有截流井中的溢流频次最高,为同河道中对降雨溢流最敏感截流井。因此本研究选择吴山 7#、阳岐 15# 和跃进 26# 3 座典型截流井分别表征吴山河系统、阳岐河 3 系统、跃进河 1 系统(图 1)。3 座典型截流井及其汇水区域特征性如表 1 所示。为了区分说明,下文中将截流井及其汇水区域称为截流井单井系统,将包含调蓄池及所有截流井的系统称为截流调蓄系统。

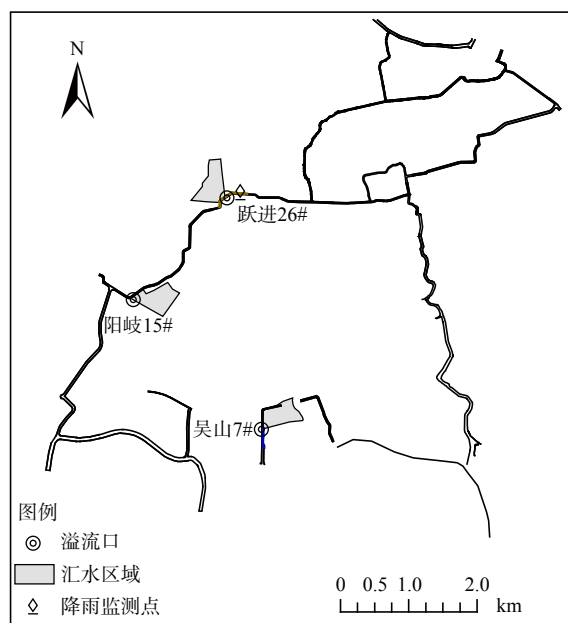


图1 典型截流井分布及降雨监测点位置

Fig. 1 Typical interception well distribution and rainfall monitoring point locations

表1 典型截流井属性表

Table 1 Typical interception well attribute table

典型截流井 编号	所属截流 调蓄系统	进水管径 /mm	截流管径/ mm	汇水面积/ hm ²	汇水区域最远端与 截流井距离/m	服务片区下 垫面属性
吴山7#	吴山河系统	1 000	800	15.41	621.04	工业厂房
阳岐15#	阳岐河3系统	2 000	1 000	17.37	663.34	城市建成区
跃进26#	跃进河1系统	800	500	17	585.25	城乡共建区

1.2 数据的获取

1) 降雨数据监测。福州地处亚热带季风气候区，降水季节分配不均，有较明显雨季和旱季，每年3—9月为雨季。本次研究中降雨连续监测时间为2023年4月4日至2023年6月24日，数据频次为1次·min⁻¹，降雨监测设备设置点位如图1所示。

2) 水量数据监测。本研究主要关注降雨特征与溢流量之间的关系，同时考虑这种关系在人工控制下的变化情况，因此水量监测指标为瞬时进水量和瞬时溢流量。瞬时进水量监测点位分别为吴山7#、跃进26#和阳岐15#截流井进水管处，瞬时溢流量监测点位分别为吴山7#、跃进26#和阳岐15#截流井排放闸门处。三座截流井连续水量监测时间分别为2023年4月18日至6月24日、2023年4月18日至5月10日、2023年5月19日至6月24日，流量监测频次均为1 min·次⁻¹。

3) 截流调蓄系统管理数据。本研究中关于截流井排放闸门启闭及调蓄池液位数据均来自福州仓山区截污工程智能控制系统平台，调蓄池容量根据调蓄池液位计算获得。

1.3 研究方法

1) 降雨特征计算。降雨过程具有一定的随机性，单一指标难以客观描述降雨特征。除了降雨历时、降雨量、降雨强度等典型降雨特征，降雨集中程度和降雨峰值程度等指标也能很好的描述雨型^[16,17]。降雨集中程度表征的是一场降雨中降雨量分布的时间重心，其值越高，表明降雨主要集中在场次降雨后期；降雨峰值程度表征的是一场降雨中雨型的高矮程度，其值越大，表明场次降雨中的峰值越高。两个指标的计算公式如式(1)和式(2)所示。

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times i)}{P_{\text{sum}} \times n} \quad (1)$$

$$P_{\text{up}} = \frac{P_{\text{sum2}}}{P_{\text{sum}}} \quad (2)$$

式中： P_t 为降雨集中程度； P_i 为第*i*个小时降雨量，mm； P_{sum} 为场次降雨量，mm； P_{up} 为降雨峰值程度； P_{sum2} 为场次降雨中小时雨量大于场次平均降雨强度的雨量总和，mm，按照降雨量的峰值程度，可将降雨过程分为低峰型（(0,1/3)）、中峰型（[1/3,2/3]）、高峰型（[2/3,1]）。

2) 累积流量统计。瞬时流量表征的是当下时刻的流量大小，累积流量可以反映一定时间段内的总量，考虑了时间滞后效应。因此本研究除了对瞬时流量进行分析之外，还统计分析降雨事件中不同时间节点的累积流量，累积流量公式如式(3)所示。

$$V = \int_0^t Q_t dt = \sum_{j=1}^n Q_j \quad (3)$$

式中： V 为累积流量，m³； Q_t 为*t*时刻的瞬时流量，m³·s⁻¹； Q_j 为一次降雨事件中第*j*分钟的瞬时流量，m³·s⁻¹。

3) 主成分分析。主成分分析（principal component analysis, PCA）是一种多元统计分析方法，常被用于提取多元事物的主要因素，能够很好的表现出样本之间的差异性和不同要素之间的相关性。本研究采用PCA方法判断不同系统样本间是否存在差异，并分析表征降雨特征的要素与表征进水量特征的要素之间的相关性，以识别出影响进水流量的主要降雨特征。PCA结果以相关性系数*r*与显著性水平*p*进行表征。

2 结果与讨论

2.1 典型降雨事件中的进水流量及溢流特征分析

1) 监测期间研究区的降雨特征。根据福州 2022 年 7 月到 2023 年 6 月的历史小时降雨数据,以变异系数 CV 值 ≈ 1 为标准^[18],确定本研究中福州最小降雨间隔时间为 3 h ($CV=0.98$)。基于此,本研究将降雨强度 $\geq 0.2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,且其后 3 h 内降雨不为 0 作为一次降雨事件。考虑实际发生溢流的历史降雨事件,选择场降雨量达到 1 mm 的降雨场次。在水量监测数据时间范围内共有降雨事件共有 26 场,涉及小雨 (38.5%)、中雨 (42.3%)、大雨 (15.4%)、暴雨 (3.8%)^[19]。根据降雨期间的截流井排放闸门的启闭统计情况,共有 16 场降雨事件未发生溢流,10 场降雨事件发生溢流,发生溢流的降雨事件特征如表 2 所示。

表 2 监测期间 10 场发生溢流的降雨事件特征
Table 2 Characteristics of 10 overflowing rainfall events during the monitoring period

降雨事件 编号	开始时间	结束时间	降雨 历时/h	雨前 干期/h	降雨集中 程度	降雨峰值 程度	最大小时降雨 强度/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	场次平均降雨 强度/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	场降雨量/ mm	降雨 类型
3	2023-04-19 17:16:29	2023-04-20 00:10:31	6.90	7.10	0.71	0.88	1.00	4.20	29.00	大雨
4	2023-04-20 20:01:40	2023-04-20 20:18:40	0.28	16.74	0.41	0	1.00	3.57	1.00	小雨
8	2023-04-29 15:04:15	2023-04-29 19:18:16	4.23	78.79	0.22	2.47	5.60	1.80	7.60	中雨
10	2023-05-05 16:01:20	2023-05-05 16:24:20	0.38	131.55	0.57	0	8.60	22.63	8.60	中雨
11	2023-05-06 00:41:22	2023-05-06 06:47:23	6.10	8.28	0.52	0.65	2.40	2.98	18.20	大雨
12	2023-05-06 17:11:32	2023-05-06 18:58:32	1.78	10.40	0.53	0.67	23.00	19.33	34.40	暴雨
21	2023-06-05 20:20:16	2023-06-09 11:57:16	87.62	75.75	0.63	0.65	5.40	2.44	213.40	大雨
22	2023-06-14 12:01:16	2023-06-14 14:44:16	2.72	120.07	0.28	0.77	7.40	3.53	9.60	中雨
23	2023-06-16 05:17:16	2023-06-16 17:49:16	12.53	38.55	0.32	0.61	2.60	1.12	14.00	中雨
26	2023-06-21 15:53:16	2023-06-22 15:24:16	23.52	60.33	0.47	0.69	1.40	0.76	17.80	中雨

2) 各截流井单井系统在不同场次降雨事件中的进水流量和溢流量特征。3 个单井系统在各降雨事件中的进水和溢流情况统计结果(表 3)表明,不同系统均会发生溢流,整个截流调蓄系统在小雨、中雨、大雨和暴雨事件中均会发生溢流。吴山河 7#、阳岐河 15#、跃进河 26#的进水总量平均值分别为 214.88、317.17、40.59 m^3 ,溢流总量平均值分别为 88.11、153.82、13.51 m^3 。可以看出,进水总量平均值较高的系统,其溢流总量平均值也较高。但各单井系统之间的进水总量和溢流总量差异较大,相对来说,阳岐 15#最高,吴山 7#次之,跃进 26#最低。以降雨类型区分,仅有一次的小雨事件中,各系统进水和溢流总量平均值分别为 19.44 和 0.40 m^3 ;中雨事件中,进水和溢流总量平均值分别为 87.06 和 23.79 m^3 ;大雨事件中,进水和溢流总量平均值分别为 123、38.36 m^3 ;暴雨以上的降雨事件中,进水和溢流总量平均值分别为 380.64、195.88 m^3 。总体上,降雨量越大,进水总量和溢流总量越大。此外根据峰值统计结果(表 3),各降雨事件的进水量峰值和溢流量峰值最大值与总量最大值并不完全一致。

2.2 降雨特征对进水流量的影响分析

1) 相同场次降雨事件中不同截流井单井系统的进水流量特征。瞬时进水量与降雨量之间有滞后效应,因此仅讨论某一时刻的进水量与降雨特征之间的关系并不完全合理。总量能够在一定程度上减少时间滞后效应带来的差异,因此此处采用瞬时进水量峰值滞后于降雨量峰值的时间(下称“峰值滞后时间”)与进水总量两个指标共同表征降雨影响下的进水流量。统计 3 个单井系统在所有降雨事件中的峰值滞后时间(图 2(a)),对比相同降雨事件中,不同系统的峰值滞后时间的差异性。结合章节 1.2 内容,由于水量监测数据范围的差异性,吴山 7#数据覆盖全部降雨事件,跃进 26#数据集中在监测前半程,阳岐 15#集中在监测后半程,因此此处主要用吴山 7#数据分别与另两个单井系统数据进行对比。吴山 7#与跃进 26#的对比结果显示

表 3 不同截流井单井系统进水特征和溢流特征

Table 3 Characteristics of inflow and overflow for different interception wells

典型截流井 编号	降雨事件 编码	进水 总量/m ³	进水流量平均值/ (m ³ ·s ⁻¹)	瞬时进水量峰值/ (m ³ ·s ⁻¹)	溢流 历时/h	溢流 总量/m ³	溢流量平均值/ (m ³ ·s ⁻¹)	溢流量峰值/ (m ³ ·s ⁻¹)
吴山7#	3	93.43	0.16	0.98	1.27	50.35	0.65	1.28
	8	66.82	0.10	0.57	1.48	22.73	0.25	0.56
	10	42.64	0.08	1.03	0.15	4.67	0.47	1.01
	12	273.99	0.34	1.49	0.85	22.43	0.43	0.71
	21	643.96	0.05	1.32	13.40	441.03	0.55	1.58
	22	203.62	0.08	0.97	0.62	28.89	0.76	0.86
	23	88.82	0.07	0.56	6.07	66.94	0.18	0.71
	26	305.79	0.10	1.18	5.48	67.87	0.21	0.67
阳岐15#	21	540.11	0.04	0.65	10.30	298.53	0.04	1.40
	22	94.22	0.04	0.82	0.50	9.10	0.29	0.55
跃进26#	3	49.85	0.08	0.27	1.75	32.39	0.31	0.44
	4	19.44	0.02	0.11	0.28	0.40	0.02	0.03
	8	26.23	0.04	0.11	3.50	10.39	0.05	0.10
	11	42.94	0.04	0.23	0.68	2.84	0.07	0.17
	12	64.50	0.08	0.22	1.52	21.51	0.23	0.43

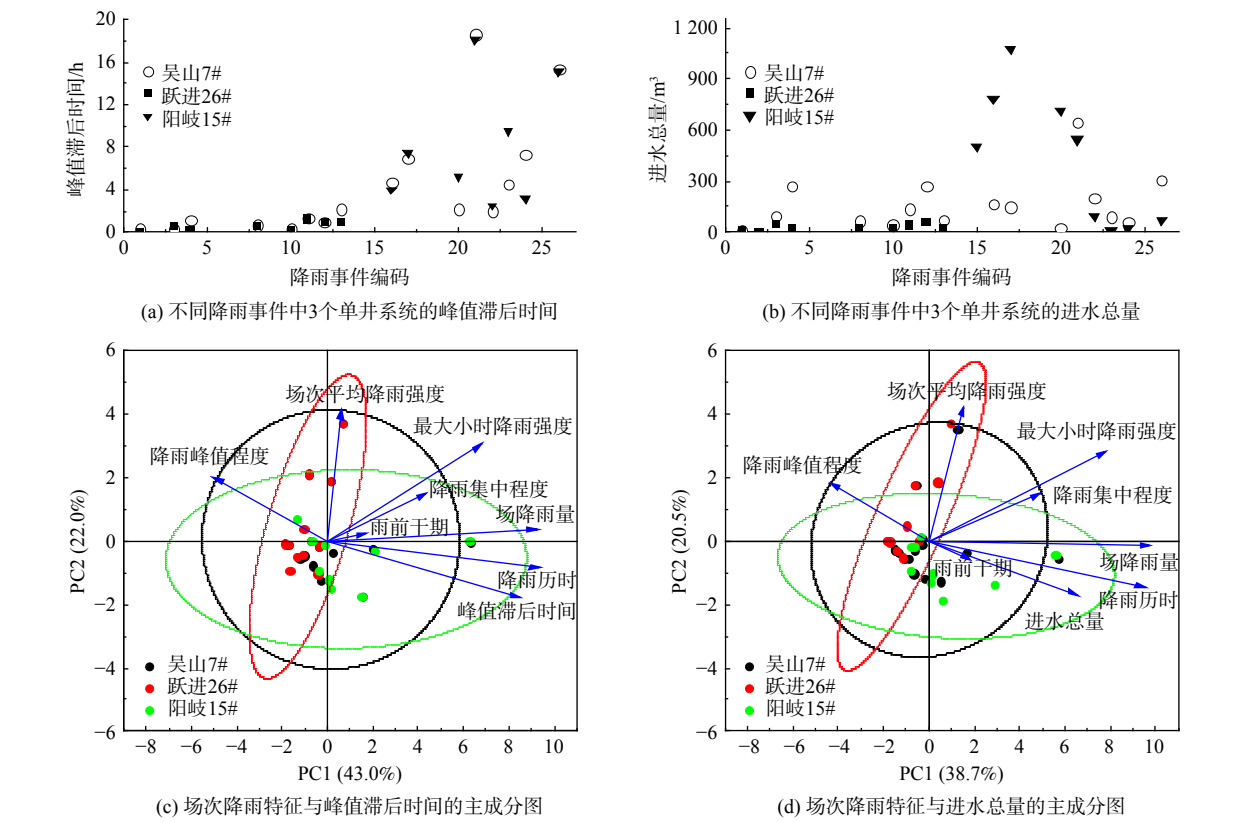


图 2 截流井进水特征与降雨特征的相关性

Fig. 2 Relationship between interception well inflow and rainfall characteristics

除了个别降雨事件之外, 75% 降雨事件中的峰值滞后时间基本重合, 吴山 7#和阳岐 15#也有 62.5% 的重合率。因此, 在同场次降雨中不同单井系统峰值滞后时间差异并不大, 所以峰值滞后时间与汇水区域特征无明显关系。同场次降雨中, 不同截流井单井系统进水总量相差较大, 阳岐 15#进水总量最大, 吴山 7#次之, 跃进 26#最小(图 2(b))。考虑到不同单井系统汇水区域特征(表 1), 进水总量的差异性可能与汇水区域特征关系紧密。阳岐 15#的管网长度、设计管径等均为 3 个系统中最大, 吴山 7#次之, 跃进 26#最小, 同时跃进 26#服务的区域属于城乡共建区域, 部分管网经过改造之后未接入本截污系统, 导致该单井系统进水总量相对较少。此处虽然阳岐 15#服务区域主要为新建小区, 部分雨水被新建分流管网收集, 但由于该地区属于易涝地区, 未被收集的雨水全部汇集此处, 且进水管径较大($D=2\ 000\text{ mm}$), 因此进水总量较大。总体上, 同一降雨事件中截流井单井系统的进水总量与其对应汇水区域属性及管网特征密切相关, 而且服务片区内的实际排水体制也极大的影响了进水量。

2) 影响进水流量的关键降雨特征因素。以场次降雨中的降雨历时、雨前干期、降雨集中程度、降雨峰值程度、最大小时降雨强度、场次平均降雨强度和场降雨量等指标表征降雨特征, 以峰值滞后时间表征进水量在时间上的变化特征, 以进水总量表征进水在总量上的变化特征, 分别分析降雨特征对进水量在时间上和总量上的影响。PCA 结果结合相关性分析结果显示峰值滞后时间与降雨历时($r=0.83, p\leq 0.05$)和场降雨量($r=0.71, p\leq 0.05$)显著正相关, 而与降雨峰值程度显著负相关($r=0.62, p\leq 0.05$)(图 2(c))。这些结果说明降雨历时、场降雨量以及雨型都是影响瞬时峰值滞后时间的关键影响因素, 在降雨历时越长的降雨事件中, 场降雨量越大的降雨事件中, 越“矮胖”的雨型中, 峰值滞后时间均越长。对于进水总量, PCA 结果(图 2(d))显示进水总量与降雨历时($r=0.56, p\leq 0.05$)和场降雨量($r=0.46, p\leq 0.05$)显著正相关。这些结果说明不同降雨事件中, 降雨历时和场降雨量仍是主要影响进水总量的降雨特征, 不过结合前文分析结果, 进水总量除了受降雨历时和场降雨量的降雨特征的影响之外, 还与汇水区域属性及管网特征有一定关系。

3) 关键降雨特征对峰值滞后时间的影响。单一降雨特征并不能决定峰值滞后时间, 为了进一步探究降雨特征对峰值滞后时间的影响, 此处分别对不同降雨量等级的降雨事件的峰值滞后时间进行分析, 以明确降雨特征对峰值滞后时间的定量影响。由于同场次降雨事件中不同单井系统峰值滞后时间差异不大(图 2(a)), 因此合并分析 3 个系统的峰值滞后时间数据。不同降雨等级中降雨历时与降雨峰值程度影响下的峰值滞后时间分布情况(图 3)显示, 小雨和中雨等级中, 雨型越“矮胖”且降雨历时越长的降雨事件中, 峰值滞后时间越长。其中, 小雨(1~5 mm)情况下, 高峰型降雨($P_{up}\geq 0.67$)居多(占小雨场次的 87.5%), 其降雨历时大多在 3 h 内, 其平均峰值滞后时间约为 44.0 min(图 3(a)); 中雨(5~15 mm)情况下, 高峰型降雨($P_{up}\geq 0.67$)仍然居多(占到中雨场次的 66.7%), 其降雨历时大多在 7 h 内, 其平均峰值滞后时间约为 93.6 min(图 3(b)); 大雨(15~30 mm)情况下, 中峰型降雨($0.33\leq P_{up}<0.67$)居多, 但接近高峰型降雨, 而暴雨($\geq 30\text{ mm}$)情况下, 均为高峰型降雨, 大雨和暴雨的峰值滞后时间分别为其降雨历时的 30.1% 和 26.5%(图 3(c) 和 (d))。

2.3 进水量特征对溢流流量的影响分析

1) 累积溢流量对累积进水量响应。根据进水累积量和溢流累积量之间的相关关系, 可以看出研究区内截流井排放闸门在实际实施中存在及时开启(如图 4(b))、提前开启(如图 4(f))以及滞后开启(如图 4(a)) 3 种情况。根据实地踏勘及现场问询结果, 部分截流井位于易涝点区域。为了最大程度的降低城市内涝风险, 系统运营工作人员会根据经验有选择的开启关闭截流井排放闸门。当截流井排放闸门滞后开启时, 滞后开启时间最大值理论上由该单井系统可承受累积雨污进水量决定。吴山 7#在第 3(图 4(a))、12(图 4(d))、21(图 4(e))和 23(图 4(g))场降雨事件中均为滞后开启, 截流井排放闸门开启时, 累积进水量分别为 21.97、6.15、44.51、35.81 m^3 。同时统计未溢流降雨事件中, 吴山 7#的累积进水量范围为 0~90.31 m^3 (图 5(a))。跃进 26#在第 3(图 4(k))和 11(图 4(n))场降雨事件中滞后开启, 其在排放闸门开启时, 截流井累积进水量分别为 5.32、14.77 m^3 , 在未溢流降雨事件中, 跃进 26#累积进水量范围为 0.89~12.16 m^3 。阳岐 15#在第 21(图 4(i))和 22(图 4(j))场降雨事件中滞后开启, 其在排放闸门开启时的累积进水量为 308、0.06 m^3 , 阳岐 15#在未溢流降雨事件中的累积进水量范围为 0.89~491.21 m^3 。阳岐 15#、吴山 7#、跃进 36#截流井的单井系统累积进水量分别为 491.21、90.31、14.77 m^3 。可以看出, 不同降雨事件中同一截流井排水闸门开启时的累积进水量差异较大。一般在人工建设的截流调蓄系统中, 调蓄池存

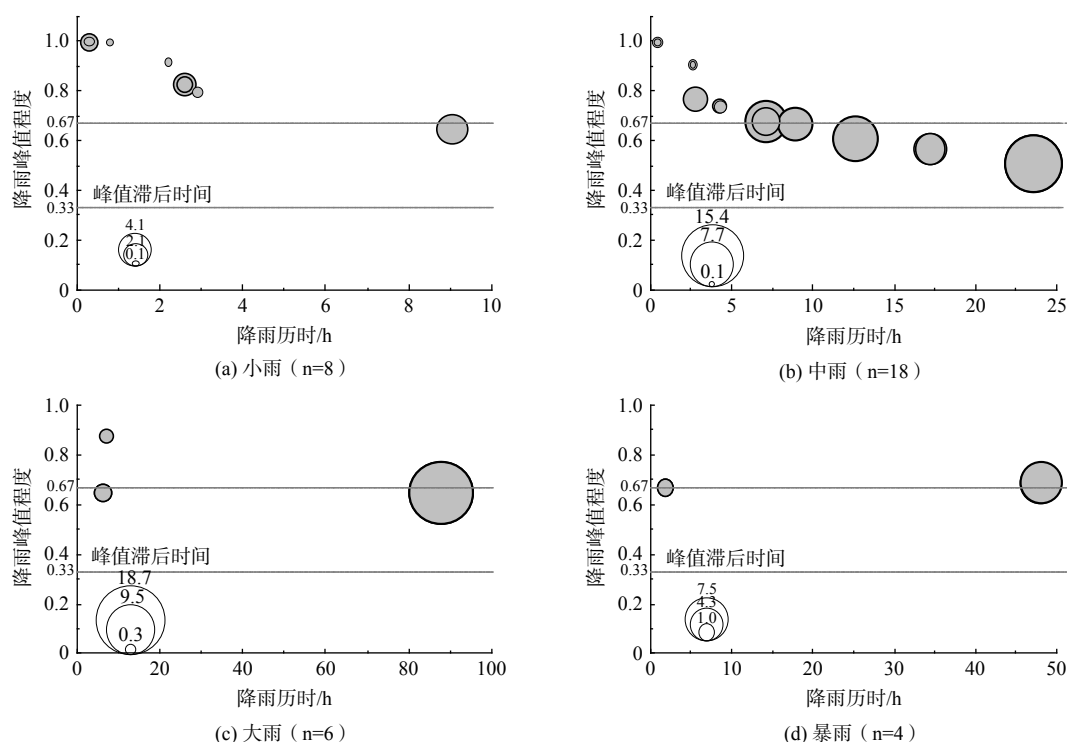


图3 不同降雨等级中降雨历时与降雨峰值程度影响下的峰值滞后时间分布图

Fig. 3 Distribution of peak lag time under the influence of rainfall duration and peak rainfall intensity across different rainfall levels

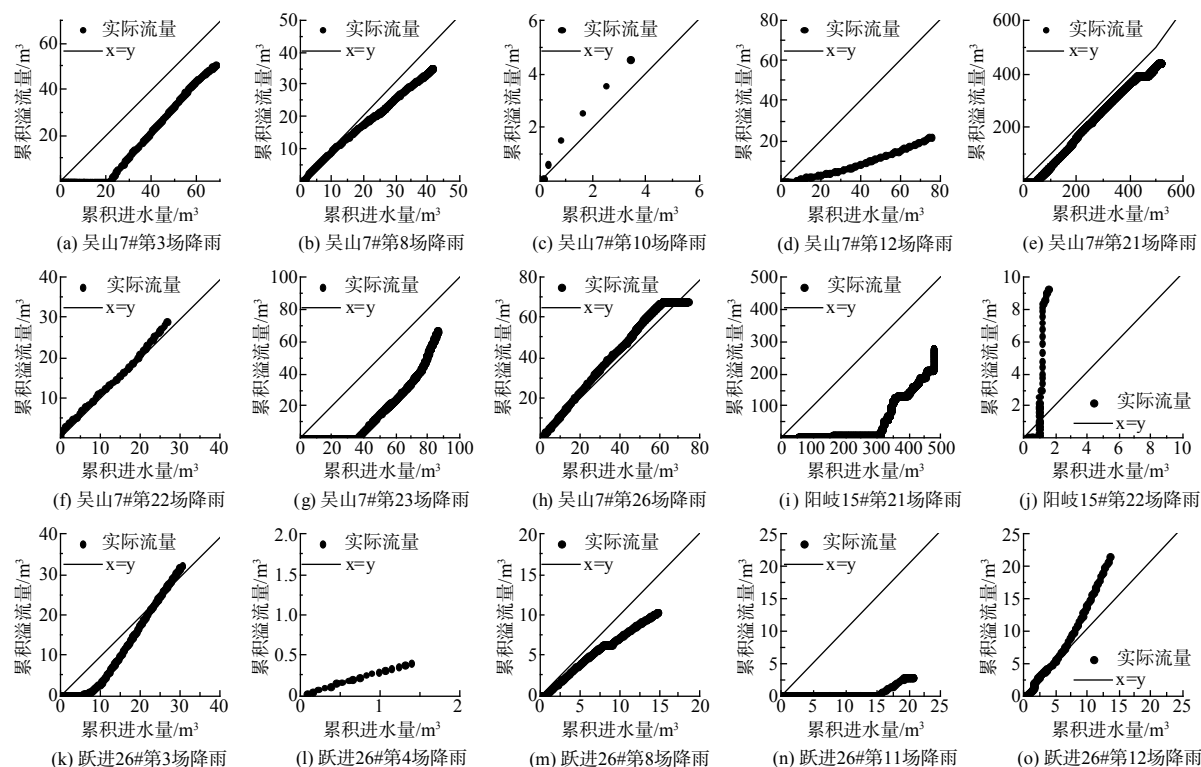


图4 不同单井系统典型降雨场次中累积进水量和累积溢流量相关性

Fig. 4 Correlation between cumulative inflow and overflow volumes in typical rainfall events for different single-well systems

水量及全系统管网容量的总和是该截流调蓄系统的“系统调蓄量”，当发生溢流时，则表明进水超过系统调蓄量，此时进水量为系统可承受累积进水量。此处以 0.5 为管道充满度计算全系统管网容量，以实际调蓄量最大值（图 5(c)）为调蓄池存水量阈值，计算溢流时调蓄池存水量与全系统管网容量总和作为系统可承受累积进水量。根据目前的降雨溢流事件数据，吴山河系统、阳岐河 3 系统、跃进河 1 截流调蓄系统的系统可承受累积进水量分别为 2 181.40、1 585.27、1 189.54 m³。各系统调蓄池的贡献远大于管径调蓄，而且参考设计值，吴山河系统比其他两个截流调蓄系统的调蓄池容量更适用于实际工况。

除此之外，似乎在 3 个截流井中无溢流降雨事件中的单井系统累积进水量大于溢流事件（图 5(a)）。这是因为截流井排放闸门有人为控制的情景，大多降雨事件发生时，管理人员根据现场情况及历史经验选择是否开启排放闸门，不会等到其可承受临界值才打开排放闸门进行人工溢流。因此，此处单井系统累积进水量（图 5(a)）以及调蓄池调蓄量（图 5(c)）是现状经验值，而非设计值。

2) 降雨和进水特征对溢流量的影响。吴山 7# 发生的 8 场溢流事件中，均为中雨以上等级，相应的场降雨量均 ≥ 7.6 mm。阳岐 15# 的溢流事件均为中雨及以上。跃进 26# 在小雨时（图 4(l)）也会开启截流井，但溢流量很小，且该场降雨与上一场大雨间隔仅为 16.7 h，也有可能是上一场大雨存续流量。其余溢流事件均发生在中雨事件中，相应的场降雨量 ≥ 7.6 mm，说明目前 3 个截流调蓄系统大致能控制 7.6 mm 的降雨。但各截流井仍有场降雨量 ≥ 7.6 mm 的降雨事件未进行人工溢流。进一步统计各溢流事件中溢流时累积降雨量（图 5(b)），各截流井在不同场次降雨事件中人工溢流时的累积降雨量有很大差距，部分降雨事件中会提前开启溢流。根据实地调研，现场会根据天气预报以及雨前干期等实际情况选择提前开启溢流井的排放闸门。总体上，整个截流调蓄系统目前并没有明确且一致的截流井排放闸门管控标准和原则，多依靠现场内涝情况与历史操作经验。

吴山 7# 中有 75% 的场次降雨中进水流量与溢流量十分接近（图 4(a)~(h)），说明一旦开启溢流，溢流峰值滞后于降雨峰值的时间与进水流量峰值滞后于降雨峰值的时间一致。阳岐 15# 由于数据限制，仅对特大暴雨进行分析，当开始人工溢流后，进水量与溢流量也几乎一致，其规律与吴山 7# 类似。跃进 26# 中，小雨和中雨事件中的溢流量少于进水量，而在大雨和暴雨溢流量多于进水量。这是因为截流井内排水闸门高于进水管，跃进 26# 在小雨和中雨事件中进水量较小，未完全达到排放闸门高度，而在大雨或者暴雨中，汇水面积较小的跃进 26# 进水量相对较少，但是合流管仍然接受上游未开启排放闸门的截流井处的管网的进水，导致溢流量大于进水量。由此可以看出，研究区内溢流量特征与汇水区域特征和人工管控策略关系紧密，在截流井排放闸门开启后，受降雨特征明显影响。

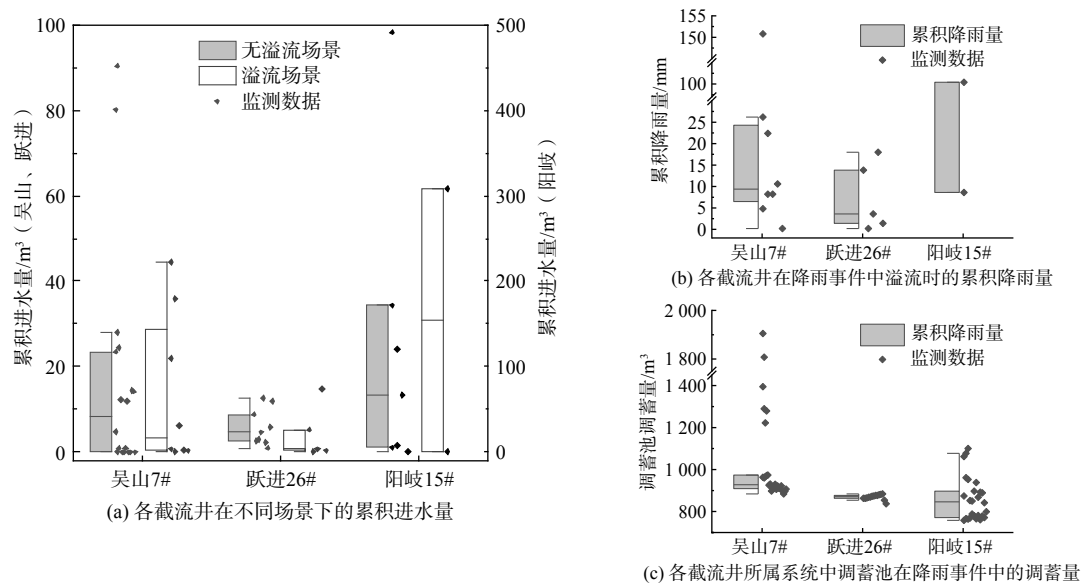


图5 各截流井的累积进水量、累积降雨量、调蓄池调蓄量

Fig. 5 Cumulative inflow volume for each interception well, the cumulative rainfall, and the storage capacity of the regulating pond

3 结论

- 1) 在人工控制影响下载流调蓄系统中溢流排放特征受降雨特征及截流井管控策略的影响。
- 2) 溢流峰值滞后时间主要受降雨特征影响，场降雨量越大、降雨历时越长、雨型越“矮胖”的场次降雨事件中，峰值滞后时间越长；溢流总量受限于截流井排放闸门的启闭策略，但与截流井进水量密切相关，进水量越大，其溢流量越大。
- 3) 同场次降雨事件中不同单井系统的瞬时进水峰值滞后于降雨峰值的时间基本一致，而进水量有明显差异，除了降雨特征之外，该差异主要与汇水区域属性、管网特征以及实际排水体制有关。

参考文献

- [1] YANG Q B, SHEN C, LI Z H. Bibliometric analysis of global performance and trends of research on combined sewer overflows (CSOs) from 1990 to 2022[J]. *Water Science and Technology*, 2024, 89(6): 1554-1569.
- [2] JEAN M E, 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.
- [3] 曹勇锋, 刘柏佑, 仲崇军, 等. 合流制排水系统的位置和面积比对径流污染影响的研究[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(11): 1-10.
- [4] YU D W, DIAN L, HAI Y L, et al. Effect of rainfall characteristics on the sewer sediment, hydrograph, and pollutant discharge of combined sewer overflow[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 303: 114268.
- [5] 胡海洋, 陈国炜, 刘丽, 等. 降雨过程特征对雨水排水系统溢流的影响研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 47(9): 1281-1287.
- [6] 海永龙, 佃柳, 郁达伟, 等. 降雨特征对合流制管网溢流污染的影响[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(11): 3082-3091.
- [7] BERSINGER T, LE HÉCHO I, BAREILLE G, et al. Assessment of erosion and sedimentation dynamic in a combined sewer network using online turbidity monitoring. [J]. *Water Science and Technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2015, 72(8): 1375-1382.
- [8] MAILHOT A, TALBOT G, LAVALLÉE B. Relationships between rainfall and combined sewer overflow (CSO) occurrences[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 602-609.
- [9] BERSINGER T, BAREILLE G, PIGOT T, et al. Online monitoring and conditional regression tree test: Useful tools for a better understanding of combined sewer network behavior[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 336-343.
- [10] JALBERT J, RATTE-FORTIN C, BURNET J B, et al. Categorization of precipitation for predicting combined sewer overflows. Application to the City of Montréal[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 637: 131333.
- [11] YU Y, ZHANG S Z, AN A K, et al. Simple method for calculating hydraulic behavior of combined sewer overflow from rainfall event data[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2018, 144(10): 04018061.
- [12] LIU X P, JIA C C. Statistical analysis of rainfall intensity frequency considering rainfall time in the diurnal cycle[J]. *Water Resources Management*, 2024, 38(14): 5579-5596.
- [13] MONTOYA-CORONADO V A, TEDOLDI D, CASTEBRUNET H, et al. Data-driven methodological approach for modeling rainfall-induced infiltration effects on combined sewer overflow in urban catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130834.
- [14] MA S H, ZAYED T, XING J D, et al. A state-of-the-art review for the prediction of overflow in urban sewer systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139923.
- [15] MOHANDES S R, KINEBER A F, ABDELKHALEK S, et al. Evaluation of the critical factors causing sewer overflows through modeling of structural equations and system dynamics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 375: 134035.
- [16] 成丹, 陈正洪. 湖北宜昌市区暴雨雨型的演变特征[J]. *干旱气象*, 2017, 35(2): 225-231.
- [17] 于志慧, 刘鹏飞, 何玉秀, 等. 太湖平原高度城镇化下降雨特征时空变化研究[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(6): 2134-2143.
- [18] 王文亮, 王耀堂, 李俊奇. 雨水滞渗设施溢流风险分析[J]. *给水排水*, 2018, 54(7): 51-55.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 降水量等级: GB/T28592-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

(责任编辑: 陶雪)

Impact of rainfall characteristics on combined sewer overflow volume in an urban complex area: A pollution interception project study

LI Qing^{1,2,*}, CAI Ran^{1,3}, WANG Wenliang², HU Jianmei^{1,3}, LI Xiaojing², ZHANG Gongliang^{1,4}

1. Beijing Capital Eco-Environment Protection Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment (Ministry of Education), Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Mercury Environmental Co., Ltd. Beijing 100160, China; 4. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China

*Corresponding author, E-mail: lq0601forever@163.com

Abstract Understanding the characteristics of Combined Sewer Overflow (CSO) is crucial for developing scientifically sound strategies for managing and controlling water environments. However, pollution interception projects have altered the traditional relationship between rainfall characteristics and CSO behavior. This study investigated an interception project aimed at improving the water quality of the Longjin Yangqi water system in Fuzhou's Cangshan District. Through on-site investigations and continuous monitoring of rainfall, inflow, and overflow, this study analyzed the relationships between rainfall characteristics, influent flow, and overflow through statistical methods such as principal component analysis. Additionally, this study compared these relationships across three interception and storage systems with varying catchment characteristics. The results showed that the time lag of the peak instantaneous inflow rate at the interception well following the peak rainfall (referred to as “peak lag time”) was primarily influenced by the duration of rainfall, the total amount of rainfall, and the intensity of peak rainfall. Rainfall events with longer durations, greater total amounts, and a “low-peak, extended-duration” pattern exhibited longer peak lag times. During light rain, the average peak lag time was approximately 44.0 minutes, while during moderate rain, it was about 93.6 minutes. The total inflow was mainly affected by the duration and amount of rainfall. “Higher precipitation and longer durations led to increased inflows and overflow volumes. During the same rainfall event, peak lag times at different interception wells were largely consistent. However, variations in upstream catchment areas, storage facility sizes, and pipeline network characteristics led to significant differences in total inflow and overflow volumes. Significant differences existed in the accumulated inflow volume before overflow among different interception wells. The accumulated inflow volumes for the Wushan No.7, Yangqi No.15, and Yuejin No.36 interception wells were 90.31, 491.21 and 14.77 m³, respectively. Meanwhile, the tolerable accumulated inflow volumes for the Wushan River system, Yangqi River system 3, and Yuejin River system 1 were 2 181.40, 1 585.27 and 1 189.54 m³, respectively, due to the storage capacity of the ponds. Overall, the inflow characteristics of the interception wells were closely tied to rainfall patterns and underlying surface properties, with overflow governed by the operation strategies of the interception well’s discharge gates. Under manual control, the opened gates result in overflow volumes that reflected rainfall patterns and align with inflow. This study provides theoretical and empirical insights for managing CSO emissions in urban complex areas with sewage interception projects.

Keywords urban complex area; combined sewer overflow characteristics; rainfall characteristics; pollution interception project; manual control; water volume response relationship; principal component analysis