



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201912031

中图分类号 X552

文献标识码 A

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.

HAI Yonglong, DIAN Liu, YU Dawei, et al. Effect of rainfall on the pollution characteristics of combined sewer overflows[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3082-3091.

降雨特征对合流制管网溢流污染的影响

海永龙^{1,2,3}, 佃柳⁴, 郁达伟^{1,2,*}, 魏源送^{1,2,3}, 柳蒙蒙^{1,2,3}

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. 中国人民大学环境学院, 北京 100872

第一作者: 海永龙(1993—), 男, 硕士研究生。研究方向: 合流制溢流污染及其控制。E-mail: ylhst@rcees.ac.cn

*通信作者: 郁达伟(1982—), 男, 博士, 助理研究员。研究方向: 污水处理等。E-mail: dwyu@rcees.ac.cn

摘要 为明确北运河流域合流制管网溢流污染特性的影响因素, 选取上游城乡结合部的合流制溢流口为对象, 基于现场连续监测和采样调查结果, 采用条件回归树方法分析了合流制管网溢流污染的水质水量等参数与降雨特征之间的响应关系, 并通过分析典型强降雨形成的溢流污染过程, 验证了条件回归树预测的阈值。结果表明: 沙河库区合流制管网溢流的污水流量与降雨特征密切相关, 次降雨量在 15~19 mm 时发生溢流, 溢流事件和溢流量高峰滞后于降雨强度高峰 15~60 min, 初期溢流污染物浓度高峰在持续 (45±5) min 后达到稳定水平; 次降雨量显著影响溢流的流量和浊度 ($P<0.001$), 次降雨量 ($P=0.029$)、平均降雨强度 ($P<0.001$) 均显著影响溢流 COD。研究结果可为北运河消减合流制管网溢流污染提供参考。

关键词 合流制管网溢流; 条件回归树; 降雨特征; COD; 浊度

合流制管网溢流 (combined sewer overflows, CSOs) 污染是地表水体突出的瞬时污染源, 由于合流制管网部分位于城市河段的亲水景观区域, 因此, 对亲水空间的水环境质量影响较大, CSOs 事件的发生往往会引发突出的环境问题和公共安全风险^[1-3]。CSOs 污水水质、水量动态过程的特征较为复杂^[4-8], 受到降水径流、生活污水、管道沉积物等诸多因素的影响, 因此, 其与降雨强度、降雨历时及晴天累计数等密切相关^[6,9-10]。

目前, 有研究者^[11-13]采用决策树、聚类分析、回归模型等统计分析方法对溢流事件进行了预测, 包括溢流次数和溢流持续时间, 但这些研究均没有给出具体的 CSOs 污染物浓度和污染物的排放量。还有一些研究者^[10,14]通过 PCA (主成分分析)、相关性分析和回归模型等统计学方法探究了 CSOs 污染特征的动态变化, 发现 CSOs 污染特征与降雨特征 (如旱天天数、累积降雨量、最大降雨强度等因素) 有一定的相关性, 但对主要影响因素说明相对模糊。

与其他统计分析方法相比, 条件回归树具有以下优势^[15]: 不需要对变量进行任何特定的约束假设; 能找到非线性关系并计算出变量的阈值; 能挑选出对高维数据的目标变量影响最大的变量及其组合变量来解释并预测目标变量。

收稿日期: 2019-12-04; 录用日期: 2020-02-28

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

本研究针对北运河流域合流制管网溢流污染现状及其控制需求, 选择北运河(北京段)流域沙河水库为研究对象, 通过对典型溢流事件的连续监测, 考察合流制管网溢流污染的水质、水量特征, 并采用条件回归树分析方法, 明确沙河流域 CSOs 污染特性的主要降雨影响因素, 为北运河流域合流制管网溢流污染控制提供参考。

1 研究区域、数据与方法

1.1 研究区域

沙河水库位于北运河上游昌平区, 库容为 $2.045 \times 10^7 \text{ m}^3$, 库区面积为 1.8 km^2 , 流域面积为 $1\,125 \text{ km}^2$, 有东沙河、北沙河和南沙河汇入^[16], 流域面积依次为 265、597 和 263 km^2 ^[17]。目前, 沙河水库及入库河道主要的排水来源分别为污水处理厂退水、合流制管网溢流污水、道路边沟、排干的退水和其他少量分散点源排放等。

如图 1(a) 所示, 根据 2017 年和 2018 年的调查结果, 沙河水库周边的溢流口从 2017 年的 40 个减少到了 20 个, 分别为北沙河沿岸 9 个和南沙河沿岸 11 个溢流口, 合流制溢流管网管径为 300~1 200 mm, 最小坡度为 3‰。根据前期多次现场调研的情况, 本研究选择典型溢流口为污染监测对象, 其合流制溢流管网主要服务巩华城区域居民, 点位 P($116^\circ 20' 14.79'' \text{ N}$, $40^\circ 00' 26.82'' \text{ E}$) 是东沙河和北沙河入库口最近的溢流口, 便于在线监测。北沙河南岸总共有 3 个溢流口, 北沙河北岸有 6 个溢流口, 监测点位于北沙河南岸, 其服务面积为 0.77 km^2 左右, 研究区域道路均为沥青路面。如图 1(b) 所示, 现场监测点合流制管道的管径为 300 mm, 管道坡度为 3‰, 溢流管的管径为 1 000 mm, 截流井为固定堰截流井。



图 1 研究区域及监测点位
Fig. 1 Investigated region and monitoring point

1.2 研究数据

北运河流域沙河水库地处北京市昌平区, 根据国家气象数据中心所提供的北京昌平站点 (ID 54499) 的降雨量数据, 昌平站点降水主要集中在6—9月, 平均占年降雨量的80.9%, 高峰期出现在7月上旬到8月下旬, 因此, 本研究数据为该时段连续在线监测的实际数据。次降雨量为一场降雨的总降雨量, 降雨历时为从降雨开始至降雨结束所经历的时间, 平均降雨强度为次降雨量与降雨历时之比。在本研究中, 将降雨强度 $\geq 0.1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 且在其后2 h内降雨不为0作为一次降雨事件, 同时, 剔除次降雨量小于1 mm的样本^[18]。按次降雨量定义划分, 本研究5场降雨均为一段时间内的连续降雨, 监测的5场降雨事件的次降雨特征见表1。

表1 2018—2019年的5场降雨特征
Table 1 Five rainfall characteristics from 2018 to 2019

编号	采样日期	次降雨量/mm	降雨历时/h	最大降雨强度/ ($\text{mm}\cdot(10 \text{ min})^{-1}$)	平均降雨强度/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	干旱时间/d	降雨类型 (以24 h计) ^[19]
A	2018-07-03	16.6	8.2	2.3	2.0	2	中雨
B	2018-07-16	21.8	5.5	5.4	4.0	5	中雨
C	2018-08-08	75.2	5.3	13.4	14.2	9	暴雨
D	2019-04-24	21.4	15	0.5	1.4	5	中雨
E	2019-07-22	53.4	6.5	7.2	8.2	23	暴雨

CSOs 污染特性主要包括水质和水量特征。由于溢流过程是一个变化过程, 因此, 本研究将瞬时溢流量、瞬时溢流 COD 和瞬时溢流浊度作为3个考察目标, 用于表征 CSOs 污染特性。选择 COD 作为 CSOs 污水水质指标的代表, 是因为 COD 是全球城市污水水质评估的指标^[15]。而选择浊度的原因是: GROMAIRE 等^[20]的研究发现, 悬浮固体 (SS) 是 CSOs 污染的重要载体, 但 SS 测定的过程复杂、耗时; 还有研究^[21]发现, 浊度和 SS 之间有非常好的相关性, 而浊度的测定非常方便快捷, 所以将浊度选作 CSOs 污水水质的考察目标。

本研究连续监测和计算的参数包括溢流量、瞬时溢流浊度、瞬时溢流 COD。降雨特征是影响 CSOs 污水水质和水量的主要因素^[22], 本研究考察的影响因子包括次降雨量, 最大降雨强度, 平均降雨强度, 瞬时降雨强度。

1.3 研究方法

本研究监测了 A、B、C、D、E 5 场监测点位 P 溢流事件的降雨过程和溢流水质水量过程。降雨信息通过现场安装的雨量计 (型号: QS-3 000) 监测, 雨量统计频率为 $10 \text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$ 。

降雨时, 采用自动采样器 (型号: ZY-WLG-II) 在溢流口和管道端口采集样品, 并将样品保存于 500 mL 的聚乙烯瓶中。采样时间间隔为: 降雨前期 (降雨前期 1 h 径流), 水质采样频次为 $5 \text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$; 降雨中期 (降雨 1~2 h 径流), 水质采样频次为 $10 \text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$; 降雨后期 (降雨 2 h 以后至 5 h 径流), 水质采样频次为 $30 \text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$; 降雨末期 (降雨 5 h 以后径流), 水质采样频次为 $2 \text{ h}\cdot\text{次}^{-1}$, 具体采样时间依据实际降雨历时情况确定。

依据监测断面尺寸, 建立水位-流量数学模型^[23], 点位 P 的流量数据由远传式明渠流量监测系统实时获取 (北京泽源伟业环保科技有限公司), 水量监测频率为 $15 \text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$ 。合流制管网流量模型^[23]如式 (1)~式 (3) 所示。

$$Q = C_D \frac{2}{3} \sqrt{2gb} h_e^{3/2} \quad (1)$$

$$C_D = 0.602 + 0.083 \frac{h}{p} \quad (2)$$

$$h_e = h + 0.0012 \quad (3)$$

式中: Q 为管网流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; h 为等宽堰口水位, m ; b 为矩形堰口宽, m ; p 为堰定高, m ; C_D 为流量系数; h_e 为有效水头, m 。

水样采集、保存和监测方法依据文献中的方法^[24]实施, 浊度采用便携式浊度计 (Turb 550, WTW, Germany) 测定, COD 采用哈希试剂管及 DR2 800 分光光度计 (HACH, USA) 测定。

溢流过程污染物浓度的平均值为污染物质量浓度的流量加权平均值, 即 EMC^[6], 其计算方法如式 (4) 所示。

$$C = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t C_{ij} Q_{ij} dt}{\int_0^t Q_{ij} dt} = \frac{\sum_{j=1}^n Q_{ij} C_{ij}}{\sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad (4)$$

式中: C 为次累积降雨的污染物的平均浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为溢流总量, m^3 ; M 为溢流过程中污染物总负荷, kg ; t 为溢流时间, min ; Q_{ij} 为第 j 次取样的溢流流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; C_{ij} 为第 j 次取样的污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; n 为取样次数。

本研究采用 R 语言对数据进行条件回归树^[15]分析。条件回归树适用于因变量或者目标变量的值是连续的, 由于具有强大的功能和实用性, 可以结合降雨特性和水质水量进行综合分析。条件回归树是一种基于树的分类算法, 通过对数据空间进行递归分区, 并在每个分区内拟合一个简单的规则来获得模型。在每个分区内, 进行相关性检验, 对得到的较低 P 值的节点放在次分区第一的位置, 相关性相对低的节点放在其后位置, 对于 $P > 0.05$ 节点在回归树中不显示。该统计方法使用一组无假设的解释变量来解释每个变量。

2 结果与讨论

2.1 CSOs 污染特性

如表 2 所示, 5 场降雨的溢流总量从大到小依次分别为 $B > E > C > D > A$, 平均溢流量为 $46 \sim 198.9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 溢流总量最高为 $6\,828.6 \text{ m}^3$, COD 平均值依次为 $D > E > C > B > A$, 平均浓度为 $46.4 \sim 371.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。COD 溢流负荷从大到小分别为 B、E、C、D、A, 平均负荷为 $3.2 \sim 612.1 \text{ kg}$, 平均浊度大小为 $D > E > C > B > A$, 平均浊度为 $56.9 \sim 117.3 \text{ NTU}$ 。这些结果表明, COD 和浊度的均值大小变化趋势相一致, 而 COD 溢流负荷主要与溢流总量相关。

表 2 5 场降雨事件的溢流污染特征

Table 2 Pollution characteristics of CSOs during 5 rainfall events

编号	溢流历时/ min	溢流量平均值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	溢流总量/ m^3	溢流量峰值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	COD 均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD 峰值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD 溢流 总负荷/kg	浊度均值/ NTU	浊度峰值/ NTU
A	90	46	69.0	79.4	46.4	83	3.2	60	221
B	2 910	140.8	6 828.6	376	89.6	445	612.1	62	150
C	1 020	121.5	2 066.3	351	112.7	420	232.9	71	336
D	410	142.2	971.7	280	371.8	1 120	361.3	117.3	448
E	1 040	198.9	3 448.7	1 011	173.1	1 718	597.0	56.9	984

注: B 组溢流事件由 3 次降雨引起, 第 1 次降雨量为 21.8 mm , 第 2 次降雨量为 6.2 mm , 第 3 次降雨量为 9.2 mm ; 3 次降雨间隔时间为 690 min 和 760 min 。

2.2 CSOs 污染特性的影响因素

如图2所示,条件回归树得出了2个瞬时溢流量的影响因素 ($P<0.05$),分别是次降雨量 (x),并有2个阈值 (37.8 mm 和 19.6 mm);第2个因素是瞬时降雨强度 (y),只有1个阈值 ($0.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$)。如图2所示,终端节点3表示 $x \leq 19.6 \text{ mm}$ 的次数有17次,占总数的16%,此时溢流量(均值)最低为 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;终端节点5表示 $x > 19.6 \text{ mm}$ 且 $y < 0.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 的次数有67次,占总数的62%,此时溢流量(均值)为 $213 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;终端节点6表示 $x > 19.6 \text{ mm}$ 且 y 大于 $0.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 的次数有16次,占总数的15%,此时溢流量(均值)为 $197 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;终端节点7表示 $x > 37.8 \text{ mm}$ 的次数有14次,占总数的7%,此时溢流量(均值)最大,达到为 $290 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。总体上,溢流量与次降雨量成正相关关系 ($P<0.001$)。当次降雨量越大时,溢流量(均值)则越大,这与 SANDOVAL 等^[25]的研究结果一致。据此,可以根据次降雨量推算出瞬时溢流量的结果。在研究中,当所研究的区域在一次降雨过程中的次降雨量为 35 mm 时,该次降雨所引发的瞬时溢流量可能约为 $230 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

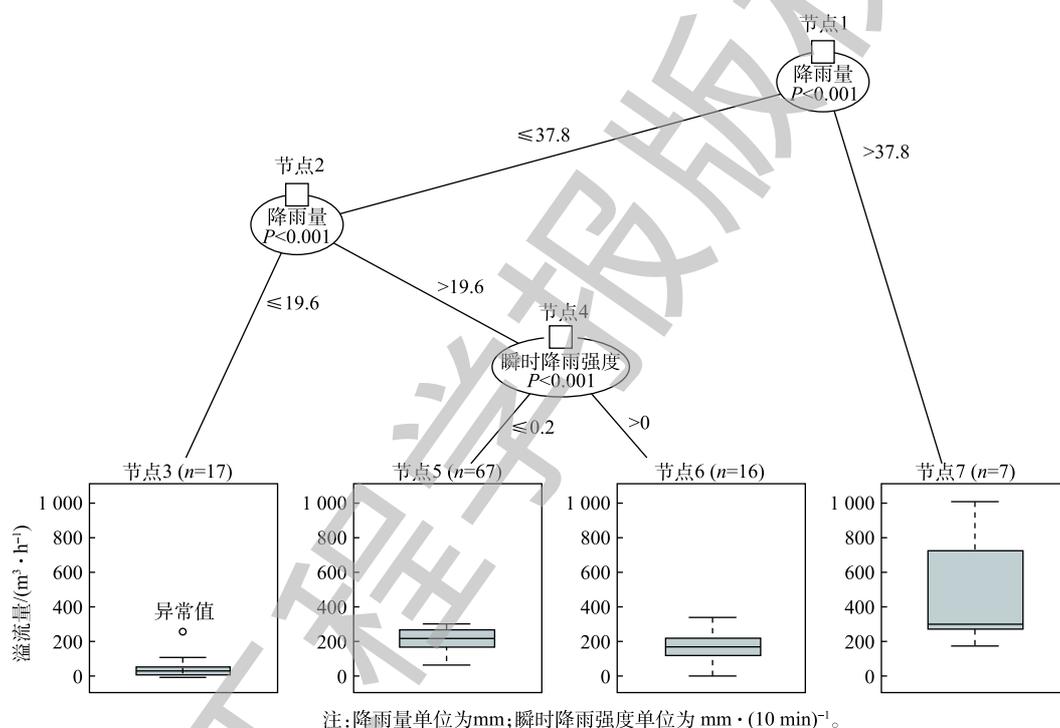


图2 瞬时溢流量的条件回归树分析 ($n=107$)

Fig. 2 Conditional regression tree analysis of instantaneous CSOs ($n=107$)

如图3所示,瞬时溢流 COD 的主要影响因子分别是次降雨量 (x) 和平均降雨强度 (z) ($P<0.05$)。当 $x < 19 \text{ mm}$ 时,瞬时溢流 COD 均值为 $476 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (占比为 15%);当 $x > 19 \text{ mm}$ 且 $z > 2.56 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,瞬时溢流 COD 均值为 $206 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (占比为 28%);当 $z < 2.565 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 且 $x \leq 22 \text{ mm}$ 时,瞬时 COD 均值为 $21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (占比 18%);当 $x > 22 \text{ mm}$ 且 $z \leq 0.989 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,瞬时溢流 COD 均值为 $28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (占比 18%);当 $x > 22 \text{ mm}$, $z > 0.989 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,瞬时溢流 COD 均值为 $31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (占比 21%)。瞬时溢流 COD 主要受到次降雨量的影响。当次降雨量大于 19 mm 时,由于稀释占主导作用,次降雨量越大,瞬时溢流 COD 浓度越小。而平均降雨强度 ($> 2.565 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 也会对管网和不透水地面的冲刷能力产生影响^[15],平均降雨强度越大时,冲刷作用越强,将更多的污染物带入 CSOs 污水中。

如图4所示,瞬时溢流浊度的影响因子有4个,分别是次降雨量、瞬时降雨强度、瞬时溢流量和最大降雨强度。当次降雨量小于 19 mm,瞬时溢流浊度浓度均值为 208 NTU (占比为 15%);当

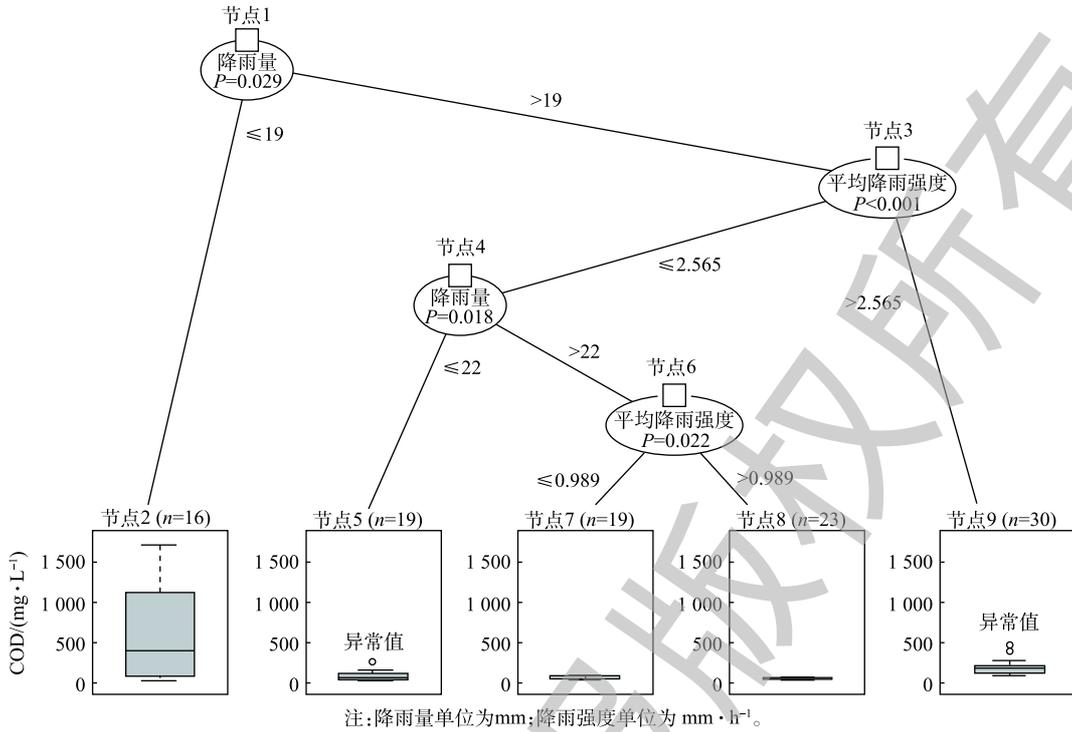


图 3 瞬时溢流 COD 的条件回归树分析 (n=107)

Fig. 3 Conditional regression tree analysis of instantaneous CSOs COD (n=107)

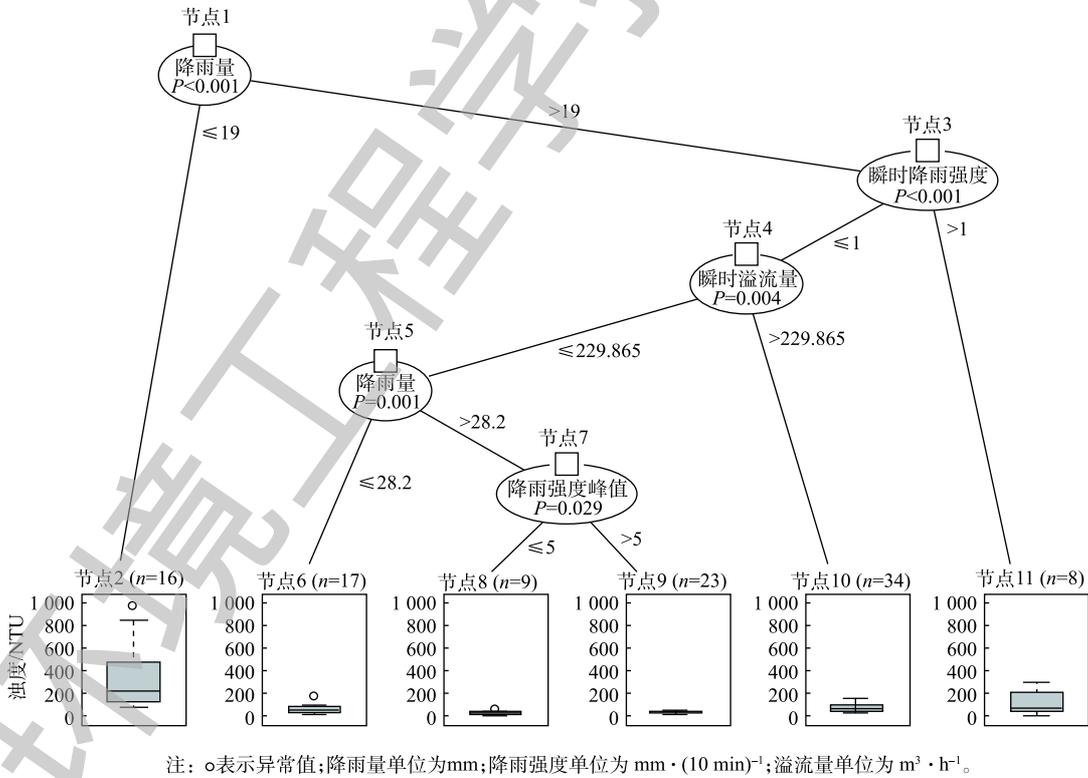


图 4 瞬时溢流浊度的条件回归树分析 (n=107)

Fig. 4 Conditional regression tree analysis of instantaneous CSOs turbidity (n=107)

次降雨量大于 19 mm 时, 终端节点的瞬时溢流浊度均值为 30~87 NTU(占比为 85%)。瞬时溢流浊度主要受次降雨量的影响。当次降雨量大于 19 mm 时, 稀释作用占主要因素; 当次降雨量小于 19 mm 时, 由于对下垫面和管道沉积物的初期冲刷作用, 溢流浊度相对较高。

2.3 合流制管网溢流污水对降雨特征的响应

图 5 反映了 C 和 E 组的连续在线监测结果, CSOs 事件的发生时间与溢流前的平均降雨强度有关, 瞬时降雨强度大小影响溢流量峰值的滞后时间。图 5(a) 反映了 2018 年 8 月 8 日的监测结果, 降雨历时约为 320 min, 当累积降雨量达到 19 mm 时, 降雨历时 145 min 发生了溢流, 第 1 个溢流量峰值滞后于瞬时降雨量峰值 60 min, 第 2 个溢流量峰值滞后于瞬时降雨强度峰值 30 min。图 5(b) 反映了 2019 年 7 月 22 日的监测结果, 本次降雨历时 460 min, 当累积降雨量达到 15 mm, 降雨历时 55 min 发生溢流事件, 溢流量峰滞后临近瞬时降雨量峰值 60 min。7 月 22 日溢流前的平均降雨强度大于 8 月 8 日溢流前的平均降雨强度, 平均降雨强度越大, 雨水下渗时间越短, 径流产生量相对较大^[26]。因此, 7 月 22 日降雨, 监测点位 P 发生溢流事件所需的降雨时间更短、累积降雨量更小。总体而言, CSOs 污水的水量对降雨特征的响应非常明显, 溢流水量高峰滞后于降雨强度的高峰。因此, 降雨特征是影响 CSOs 污水水量的重要因素。

图 6 反映了 2018 年 8 月 8 日和 2019 年 7 月 22 日的连续在线监测结果, 图 6(a) 反映了 2018 年

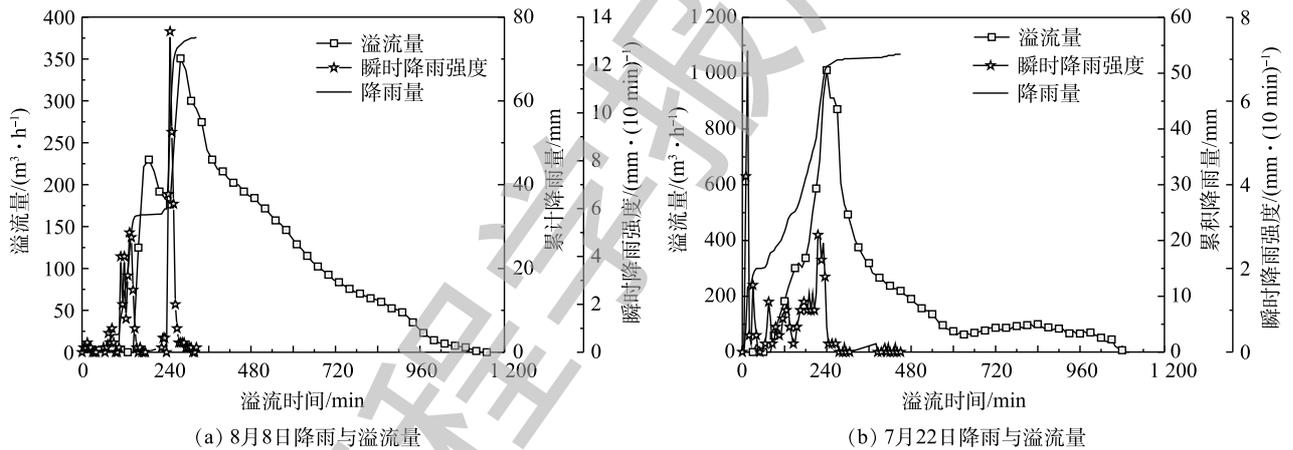


图 5 CSOs 污水水量对降雨特征的响应

Fig. 5 Response of sewage volume of CSOs to rainfall characteristics

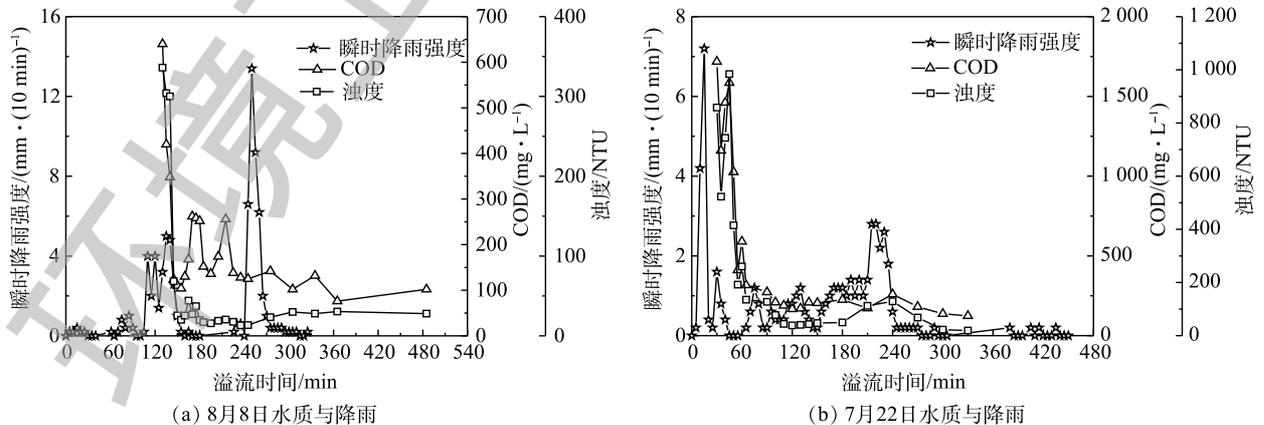


图 6 CSOs 污水水质对降雨特征的响应

Fig. 6 Response of CSOs sewage quality to rainfall characteristics

8月8日的监测结果, 图 6(b) 反映了 2019 年 7 月 22 日的监测结果。由于受到冲刷作用和稀释作用的影响, 溢流水质会随着降雨的进行不断变化。由图 6 可知, 不论是 8 月 8 日的降雨还是 7 月 22 日的降雨, 初期 CSOs 污水的水质最差, 随着降雨的进行, 稀释作用增强, 导致污染物浓度逐渐降低。8 月 8 日和 7 月 22 日的 CSOs 污水水质在溢流过程发生 (45±5) min 后, 达到了稳定水平, 因此, 根据溢流污染浓度特征, 建议该区域的 CSOs 污染控制措施可以采取截留初期污水, 主要截取溢流过程中前 (45±5) min 溢流出的废水。比较 2 次降雨过程中 CSOs 污水水质发现, 7 月 22 日的 CSOs 污水水质明显劣于 8 月 8 日的 CSOs 污水水质, 分析其原因为, 7 月 22 日以前近 23 d 未有较大强度的降雨, 管道内污染物质进行了近 23 d 的沉积。现有研究^[27-28]认为, 合流制管网沉积物是 CSOs 污染的重要来源, 污染贡献率约占 47%~80%。因此, CSOs 污水的水质不仅与降雨过程有关, 还与降雨前的管道沉积物累积量(旱天时间)有关。

3 结论

1) 溢流污染主要受降雨的稀释和冲刷作用的影响, 溢流量主要受次降雨量 ($P<0.001$) 的影响, 瞬时 COD 和浊度主要受次降雨量 ($P<0.05$) 和降雨强度 ($P<0.05$) 的影响。

2) 在 2 次典型溢流事件中, 平均降雨强度影响溢流事件发生所需时间, 平均降雨强度越大, 发生溢流事件所需时间越短; 溢流量高峰滞后于降雨强度高峰 30~60 min; 溢流污染水质初期最差, 以浊度和 COD 为主要污染物, 在溢流 (45±5) min 后达到稳定水平。

参 考 文 献

- [1] LYANDRES O, WELCH L. Reducing combined sewer overflows in the Great Lakes: Why investing in infrastructure is critical to improving water quality[Z]. Alliance for the Great Lakes, 2012.
- [2] FU X, HOPTON M E, WANG X, et al. A runoff trading system to meet watershed-level stormwater reduction goals with parcel-level green infrastructure installation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 1149-1159.
- [3] FU X, GODDARD H, WANG X, et al. Development of a scenario-based stormwater management planning support system for reducing combined sewer overflows (CSOs)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 236: 571-580.
- [4] SOONTHORNONDA P, CHRISTENSEN E R. Source apportionment of pollutants and flows of combined sewer wastewater[J]. *Water Research*, 2008, 42(8/9): 1989-1998.
- [5] SZTRUHÁR D, SOKÁČ M, HOLIENČIN A, et al. Comprehensive assessment of combined sewer overflows in Slovakia[J]. *Urban Water*, 2002, 4(3): 237-243.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] JALLIFFIER V I, LECONTE R, HUARINGA A U, et al. Modelling the impacts of global change on concentrations of *Escherichia coli* in an urban river[J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 108: 450-460.
- [9] LAWLER D M, PETTS G E, FOSTER I D L, et al. Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river

- system: The upper tame, West Midlands, UK[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 360(1/2/3): 109-126.
- [10] MÉTADIER M, BERTRAND K J L. The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes[J]. *Water Research*, 2012, 46(20): 6836-6856.
- [11] MAILHOT A, TALBOT G, LAVALLÉE B. Relationships between rainfall and combined sewer overflow (CSO) occurrences[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 602-609.
- [12] MONTSERRAT A, BOSCH L, KISER M A, et al. Using data from monitoring combined sewer overflows to assess, improve, and maintain combined sewer systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 1053-1061.
- [13] YU Y, KOJIMA K, AN K, et al. Cluster analysis for characterization of rainfalls and CSO behaviours in an urban drainage area of Tokyo[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 68(3): 544-551.
- [14] LACOUR C, JOANNIS C, GROMAIRE M C, et al. Potential of turbidity monitoring for real time control of pollutant discharge in sewers during rainfall events[J]. *Water Science and Technology*, 2009, 59(8): 1471-1478.
- [15] 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.
- [16] 张伟, 张洪, 单保庆. 北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 4284-4290.
- [17] 刘博, 徐宗学. 基于SWAT模型的北京沙河水库流域非点源污染模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5): 52-61.
- [18] 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.
- [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国家气象中心. 降水量等级: GB/T 28592-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [20] GROMAIRE M C, GARNAUD S, SAAD M, et al. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. *Water Research*, 2001, 35(2): 521-533.
- [21] 翟世奎, 张怀静, 范德江. 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(5): 693-699.
- [22] BERSINGER T, LÉHECHO 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*, 2015, 72(8): 1375-1382.
- [23] 水利部. 堰槽测流规范: SL 24-1991[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1991.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] SANDOVAL S, TORRES A, PAWLOWSKY R E, et al. The evaluation of rainfall influence on combined sewer overflows characteristics: The Berlin case study[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 68(12): 2683-2690.
- [26] 熊丽君, 黄飞, 徐祖信, 等. 基于 SWMM 模型的城市排水区域降雨及地表产流特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3659-

3666.

- [27] GASPERI J, GROMAIRE M C, KAFI M, et al. Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems[J]. *Water Research*, 2010, 44(20): 5875-5886.
- [28] HANNOUCHE A, CHEBBO G, JOANNIS C. Assessment of the contribution of sewer deposits to suspended solids loads in combined sewer systems during rain events[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(8): 5311-5317.

(本文编辑: 曲娜, 郑晓梅, 张利田)

Effect of rainfall on the pollution characteristics of combined sewer overflows

HAI Yonglong^{1,2,3}, DIAN Liu⁴, YU Dawei^{1,2,*}, WEI Yuansong^{1,2,3}, LIU Mengmeng^{1,2,3}

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. Department 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. School of the Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China

*Corresponding author, E-mail: dwyu@rcees.ac.cn

Abstract To determine the influence factors of pollution characteristics in combined sewer overflows in North Canal basin, one outlet of the combined sewer in the urban-rural junction area of the upstream was selected. The conditional regression tree method was implemented in this study to analyze the relationship between the pollution indicators such as water quality and overflow quantity and the rainfall characteristics, based on results of continuous monitoring and sampling surveys. Moreover, the predicted threshold of the conditional regression tree was verified by analyzing the typical process of the overflow pollution caused by heavy rainfall. Results showed that the overflow flux of the CSOs was significantly correlated with the rainfall in Shahe reservoir area. The overflows occurred at the overall rainfall of 15~19 mm per event. The overflows and its peak flux lagged behind the peaks of rainfall intensity for 15~60 min, the peak concentrations of pollutants in the initial CSOs reached stable after its lasting for (45±5) min. The cumulative rainfall per event significantly affected the quantity and turbidity of the CSOs ($P<0.001$). The cumulative rainfall per event ($P=0.029$) and average rainfall intensity ($P<0.001$) significantly affected the COD values of the CSOs. The research results can provide a reference for the North Canal to reduce the combined sewer overflows pollution.

Keywords combined sewer overflows; conditional regression tree; rainfall characteristics; COD; turbidity