



# 老城区降雨径流污染特征分析 ——以北京东城区某排水分区为例

史秀芳<sup>1,2</sup>, 王丽晶<sup>1</sup>, 潘兴瑶<sup>3</sup>, 卢亚静<sup>1</sup>, 王岩<sup>4</sup>

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 秦皇岛市海港区河长制服务中心, 河北 秦皇岛 066000;  
3. 北京市水务局, 北京 100048; 4. 大兴区水务局, 北京 102600)

**摘要** 选取北京市东城区北护城河某雨水排水口进行水质水量联合监测, 分别识别了老城区在小雨、中雨、大雨3种不同雨型下的降雨径流污染特征, 分析了初期冲刷效应和影响径流污染的敏感性指标及其阈值, 制定了老城区源头和末端污染物管控方案。研究表明, 降雨初期(小雨前20 min、中雨前30 min、大雨前10 min)污染物浓度较高, 存在初期冲刷效应。小雨对SS、TP和TN指标的敏感性高于中雨和大雨, 中雨对COD和NH<sub>3</sub>-N指标的敏感性高于小雨和大雨, 中雨和小雨的EMC浓度值比大雨高。对于SS、NH<sub>3</sub>-N、TP指标, 污染物浓度变化范围最大的分别为大雨、中雨、小雨。径流污染削减率为30%时, 小雨、中雨和大雨需控制的降雨初期径流体积分别为25 m<sup>3</sup>、35 m<sup>3</sup>、150 m<sup>3</sup>, 或控制降雨初期的降雨量为4 mm、9 mm、24 mm。

**关键词** 北京市; 老城区; 降雨径流; 污染特征; 初期冲刷

**中图分类号**: X52 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbr.2024-03-002

## The characteristics of rainfall runoff pollution in the old urban area: A case study of a drainage district in Dongcheng District, Beijing

SHI Xiufang<sup>1,2</sup>, WANG Lijing<sup>1</sup>, PAN Xingyao<sup>3</sup>, LU Yajing<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>4</sup>

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

2. Qinhuangdao Haigang District River System Service Center, Qinhuangdao 066000, China;

3. Beijing Water Authority, Beijing 100048, China; 4. Daxing Water Authority, Beijing 102600, China)

**Abstract** A rainwater outlet in the north moat of Dongcheng District of Beijing was selected for joint monitoring of water quality and quantity, and the characteristics of rainfall runoff pollution in the old city under light rain, moderate rain and heavy rain were identified respectively. The initial scour effect and sensitivity indexes affecting runoff pollution and their thresholds were analyzed, and the control scheme of source and end pollutants in the old city was formulated. The results showed that the pollutant concentration was higher in the early period of rainfall (20 min before light rain, 30 min before moderate rain, 10 min before heavy rain), and there was an early scour effect. The sensitivity of light rain to SS, TP and TN is higher than that of moderate

收稿日期: 2023-10-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002, 2017ZX07103-007)

第一作者: 史秀芳, 女, 从事海绵城市与合流溢流污染研究, shixiufang0811@163.com。

通信作者: 王丽晶, 女, 高级工程师, 从事城市内涝与合流溢流污染研究, wanglijing8903@163.com。

rain and heavy rain, the sensitivity of moderate rain to COD and  $\text{NH}_3\text{-N}$  is higher than that of light rain and heavy rain, and the EMC concentration value of moderate rain and light rain is higher than that of heavy rain. For SS,  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TP indexes, heavy rain, moderate rain and light rain had the largest variation range of pollutant concentration. When the runoff pollution reduction rate is 30%, the runoff volume of light rain, moderate rain and heavy rain should be controlled to be  $25\text{ m}^3$ ,  $35\text{ m}^3$  and  $150\text{ m}^3$ , or the rainfall in the early rainfall should be controlled to be 4 mm, 9 mm and 24 mm respectively.

**Keywords** Beijing; the old city; rainfall runoff; pollution characteristics; first flush

随着城市化进程加快,下垫面不透水面积比例逐渐增大,城市下垫面不透水区域通常占总面积的 60% ~ 100%<sup>[1]</sup>,包括屋顶、沥青道路和混凝土等,不透水区域只允许少量的雨水渗透,导致雨水径流量加大,并通过管网排入河道<sup>[2]</sup>。加之气候变化影响,雨水径流污染日渐加重,目前已成为城市区域重要的环境问题,而造成雨水径流污染的原因包括大气沉降和交通浮尘等因素<sup>[3-5]</sup>。城市面源污染长期以来被广泛关注,20 世纪 70 年代初,美国率先开展相关研究,其发展历程主要包括“工程措施-工程措施和非工程措施结合-建章立制-绿色措施”几个阶段,欧洲、日本等也根据当地雨水径流污染特征采取了针对性措施<sup>[6]</sup>,20 世纪 80 年代末,城市雨水污染被列为德国 90 年代水污染控制的三大目标之一<sup>[7]</sup>。日本开展了对城市雨水利用与管理的研究,以防渗和推行下水道普及为主要目标,积极建设能够同时收集雨水和污水的合流制排水系统,同时制定了相应政策<sup>[8]</sup>。我国面源污染研究始于北京市<sup>[7,9]</sup>,随后在深圳<sup>[10]</sup>、重庆<sup>[11]</sup>、上海<sup>[12]</sup>等城市相继开展。大量研究表明,降雨径流冲刷下垫面,夹杂氮、磷等无机物排入河道,造成河道水质恶化,导致水体富营养化<sup>[13]</sup>,且降雨径流污染物浓度与降雨量、平均降雨强度、降雨历时和雨前干燥期存在一定的相关关系<sup>[14]</sup>。

北京市东城区用地功能相对单一且高度城市化,下垫面不透水面积比例约为 65.42%。由于东城区是老城区,排水体制为合流制,其中雨水排口未设截流设施,汛期雨水经排水管道直接排入河道,严重影响河湖水环境、水生态。本研究在 2019—2021 年每年 6—9 月对北护城河某雨水排口进行水质水量联合监测,分析了降雨事件基本特征、降雨径流污染物浓度变化规律,识别了径流污染敏感性指标和阈值,提出了老城区降雨径流污染管控方案,研究结果可为老城区城市面源污染治理与水质水量联合调度提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

选取位于北京市东城区北护城河河段(见图 1)的某雨水排口为实验监测点,其上游排水分区管道排水体制为雨污分流制,面积  $8.38\text{ hm}^2$ ,下垫面类型主要为绿地、建筑和道路,比例分别为 34.58%、27.74% 和 37.68%。绿地包括小区绿地、道路绿化带,建筑包括居住建筑、公共建筑,道路包括小区道路、市政道路等。降雨期间,雨水冲刷下垫面,汇集后经管道入北护城河,排入北护城河水体水质标准需高于《地表水环境质量标准》IV 类水标准。

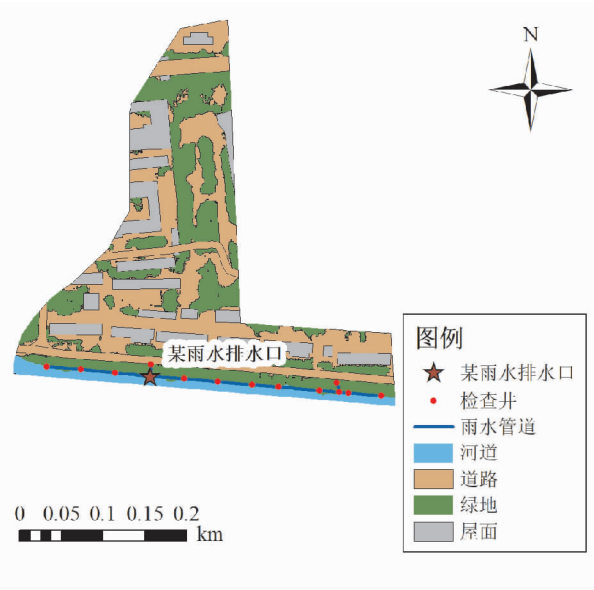


图 1 北护城河某雨水排水口位置  
Fig. 1 Location of a storm water outlet in north moat

### 1.2 监测数据

2019—2021 年在某雨水排水口进行水质水量联合监测,并在排水口附近安装雨量计,同步监测研究区降雨量。为了与水质监测时段对应,根据国家气象部门对降水等级的划分标准,本研究

将场次降雨量数据进行统计和降雨事件划分,分别选取了降雨时间连续且水质监测样本与降雨时间对应的 9 场降雨。流量监测采用堰槽法在线监测,将薄壁计量堰、水位传感器和远传式明渠流量计箱等监测设备安装于某排水口上游检查井内。水质采样采用前密后疏的方法,第 1 h 每 10 min 采集 1 次样品,第 2 h 每 15 min 采集 1 次样品,第

3 h 每 20 min 采集 1 次样品,第 4 h 每 30 min 采集 1 次样品,第 4 h 后每 1 h 采集 1 次样品,一次降雨径流过程最多可连续采集 24 瓶样品。水质分析指标共 5 项:悬浮颗粒物(SS)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、总氮(TN)。本研究获取的数据情况如表 1 所示。

表 1 水质样本数据  
Tab. 1 Water quality sample data

| 小雨         |      | 中雨         |      | 大雨         |      |
|------------|------|------------|------|------------|------|
| 降雨场次       | 样品个数 | 降雨场次       | 样品个数 | 降雨场次       | 样品个数 |
| 2019-07-19 | 7    | 2021-06-25 | 14   | 2021-07-01 | 13   |
| 2021-06-23 | 7    | 2021-07-29 | 1    | 2021-07-03 | 16   |
| 2021-07-22 | 13   | 2021-08-16 | 8    | 2021-07-05 | 16   |

1.3 研究方法

1.3.1 次降雨平均浓度和污染负荷计算

在降雨产流过程中,降雨强度存在随机性和极大的不确定性,降雨径流污染物浓度受降雨时间和降雨强度影响波动较大,因此采用平均浓度(event mean concentration, EMC, mg · L<sup>-1</sup>, 式中简记 C<sub>EMC</sub>)表征场次降雨径流事件的地表径流污染物浓度<sup>[15]</sup>。

$$C_{\text{EMC}} = \bar{C} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C(t) Q(t) dt}{\int_0^T Q(t) dt} \tag{1}$$

式中:M 为某场降雨径流所排放的某污染物总量,g;V 为某场降雨地表径流总量,m<sup>3</sup>;C(t) 为某污染物在 t 时的瞬时浓度,mg/L;Q(t) 为 t 时刻的地表径流量,m;T 为某场降雨的总历时,s;则污染负荷是由一场降雨所引起的地表径流排放的某污染物总量,可用该污染物的 EMC 与总降雨径流量的乘积表示<sup>[16]</sup>。

1.3.2 初期效应判别方法

采用无量纲累积曲线 M(V) 方法分析,该曲线横坐标为场次降雨累积径流量与径流总量之比,纵坐标为污染物累积负荷与污染物负荷总量之比<sup>[17]</sup>,当曲线 M(V) 的斜率大于 1 时,即曲线在 45° 对角线上方时,表示污染物的累积速率大于径流量的累积速率,这时表明存在初期冲刷,反之则不存在初期冲刷效应。

$$M(V) = \frac{M(t)}{V(t)} = \frac{\int_0^t Q(t) \rho(t) dt / \int_0^T Q(t) \rho(t) dt}{\int_0^t Q(t) dt / \int_0^T Q(t) dt} \approx$$

$$\frac{\sum_{i=0}^k \bar{Q}(t_i) \bar{\rho}(t_i) \Delta t / \sum_{i=0}^n \bar{Q}(t_i) \bar{\rho}(t_i) \Delta t}{\sum_{i=0}^k \bar{Q}(t_i) \Delta t / \sum_{i=0}^n \bar{Q}(t_i) \Delta t} \tag{2}$$

式中:M(t) 为某场降雨径流 t 时刻排放的污染物负荷量,mg;V(t) 为某场降雨地表径流 t 时刻排放的径流量,L · min<sup>-1</sup>;Q(t) 为 t 时刻的地表径流量,L · min<sup>-1</sup>; $\rho(t)$  为 t 时刻的瞬时污染物浓度,mg · L<sup>-1</sup>;T 为从降雨产生径流到结束持续时间,min; $\bar{Q}(t_i)$  为 t<sub>i</sub> 时刻 Δt 计算时间段内径流量平均值,L · min<sup>-1</sup>。

污染物初期冲刷率(MFF<sub>30</sub>) 是在 Geiger 的 M(V) 曲线上提出来的,可以定量描述初期冲刷现象<sup>[18]</sup>,并将 MFF<sub>30</sub>(式中简记 F<sub>30</sub>) 分为 5 级<sup>[19]</sup>,衡量初期冲刷效应的强弱。分类标准如表 2 所示,其中,FF<sub>30</sub> 表示前 30% 的地表径流携带的累积污染负荷比例。

$$F_{30} = \frac{\int_0^t C_t Q_t dt / M}{\int_0^t Q_t dt / V}$$

式中:M 为某场降雨径流所排放的某污染物总量,g;V 为某场降雨地表径流总量,m<sup>3</sup>;t 为径流量达到 n% 的时刻;C<sub>t</sub> 为 t 时刻污染物浓度;Q<sub>t</sub> 为 t 时刻地表径流量,L · min<sup>-1</sup>。

表 2 MFF<sub>30</sub> 的 5 级分类标准  
Tab. 2 Five-level classification criteria of MMF<sub>30</sub>

| MFF <sub>30</sub> 范围              | 含义                           | 初期冲刷效应等级 |
|-----------------------------------|------------------------------|----------|
| MFF <sub>30</sub> < 1. 00         | FF <sub>30</sub> < 30%       | 无        |
| 1. 00 ≤ MFF <sub>30</sub> < 1. 50 | 30% ≤ FF <sub>30</sub> < 45% | 弱        |
| 1. 50 ≤ MFF <sub>30</sub> < 2. 00 | 45% ≤ FF <sub>30</sub> < 60% | 中等       |
| 2. 00 ≤ MFF <sub>30</sub> < 2. 50 | 60% ≤ FF <sub>30</sub> < 75% | 强        |
| MFF <sub>30</sub> ≥ 2. 50         | FF <sub>30</sub> ≥ 75%       | 很强       |

2 结果与讨论

2.1 小雨条件下径流污染特征分析

按照气象部门降雨等级划分标准,将 2019 至 2021 年监测的 9 场有效降雨(降雨量大于 2 mm)划分为小雨(24 h 降雨量 < 10 mm)、中雨(24 h

降雨量为 10 ~ 24.9 mm)、大雨(24h 降雨量为 25 ~ 49.9 mm),分别选取小雨、中雨、大雨各 3 场降雨,分析降雨期间雨水排口径流污染特征。统计降雨事件降雨历时、最大雨强、总降雨量和雨前干燥期等降雨特征(见表 3),其中,降雨量为 3.40 ~ 48.8 mm,10 min 最大降雨强度为 1.0 ~ 14.80 mm,降雨历时为 1 ~ 10.33 h,雨前干燥期为 1 ~ 6 d。

表 3 降雨事件基本特征和类型  
Tab. 3 Basic characteristics and classification of rainfall events

| 降雨类型 | 降雨场次       | 降雨历时/h | 10 min 最大雨强/mm | 降雨量/mm | 雨前干燥期/d |
|------|------------|--------|----------------|--------|---------|
| 小雨   | 2019-07-19 | 1.00   | 1.60           | 3.40   | 1       |
|      | 2021-06-23 | 2.83   | 1.00           | 7.20   | 6       |
|      | 2021-07-22 | 1.40   | 1.80           | 4.80   | 3       |
| 中雨   | 2021-06-25 | 6.67   | 2.40           | 20.60  | 2       |
|      | 2021-07-29 | 10.33  | 1.40           | 17.40  | 2       |
|      | 2021-08-16 | 2.67   | 4.20           | 14.00  | 4       |
| 大雨   | 2021-07-01 | 1.50   | 14.80          | 47.00  | 6       |
|      | 2021-07-03 | 5.17   | 10.20          | 48.80  | 2       |
|      | 2021-07-05 | 5.67   | 6.80           | 38.40  | 2       |

当累积降雨量达到 3.6 mm 左右时,排水口开始溢流,溢流时间为 1 h 左右,开始溢流时间晚于降雨时间约 1 h,溢流量在 40 ~ 110 m<sup>3</sup> 之间。3 场小雨的径流污染物瞬时浓度变化如图 2 所示,总体而言,降雨初期污染物浓度较高,随着降雨的进行,污染物浓度逐渐降低,并趋于稳定。从污染指标浓度最大值来看,前 3 个水质样品污染物浓度值较高,所有污染指标在 0 ~ 30 min 内达到最大值。从时间角度来看,6 月份之前污染物累积

时间长、降雨频率小,下垫面污染物负荷高,所以 6 月份降雨径流污染物浓度高于 7 月份,溢流期间污染物浓度值均低于Ⅳ类水标准。7 月份降雨,SS、NH<sub>3</sub>-N、TP 指标在降雨中后期达到Ⅳ类水标准,而 TN 指标远低于Ⅳ类水标准,污染程度较高。当两场降雨的降雨量和最大雨强量级相近时(2019-07-19、2021-07-22),雨前干燥期越长,降雨径流污染物浓度越高。

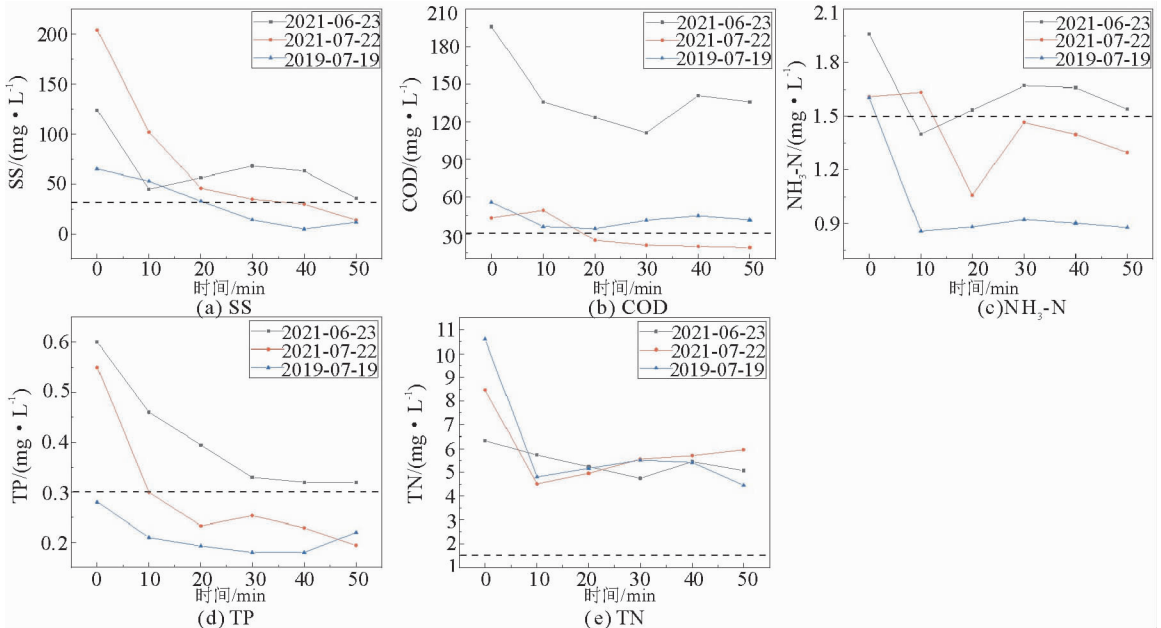


图 2 小雨降雨径流污染物瞬时浓度变化  
Fig. 2 Changes of instantaneous concentration of pollutants in light rainfall runoff

绘制无量纲累积曲线  $M(V)$  (见图3),计算污染物初期冲刷率  $MMF_{30}$  (见表4),参照5级标准,分析小雨初期冲刷效应。场次小雨初期冲刷效应普遍较弱,其中,2019-07-19 由于雨前干燥期短,下垫面污染物累积少,除 COD 指标外的其他

指标不存在初期冲刷效应。但小雨事件的  $MMF_{30}$  值均超 0.8,表明 5 种指标容易发生强初期冲刷效应。对比场次小雨 5 种污染指标  $MMF_{30}$  平均值,初期冲刷效应强度依次为  $SS > COD > TP > TN > NH_3-N$ 。

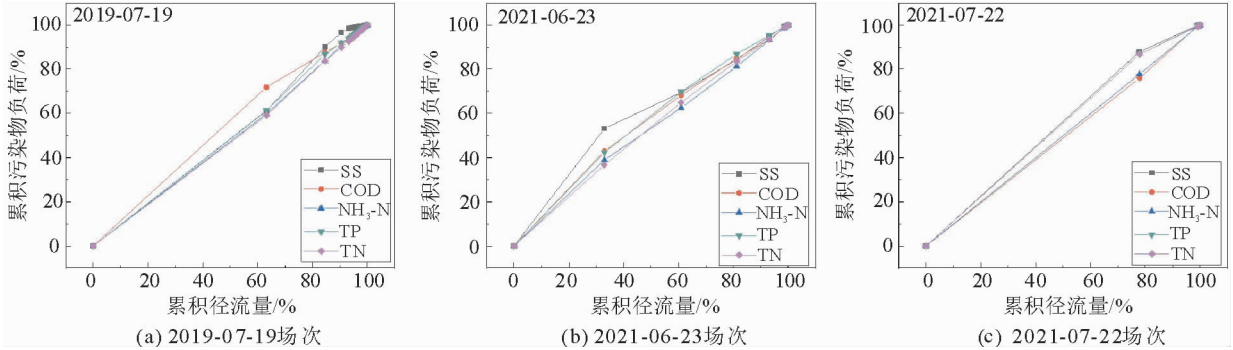


图3 小雨  $M(V)$  曲线图  
Fig.3  $M(V)$  curve of light rain

表4 小雨  $MMF_{30}$  值  
Tab.4  $MMF_{30}$  value of light rain

| 降雨场次       | $MMF_{30}$ |         |          |         |         |
|------------|------------|---------|----------|---------|---------|
|            | SS         | COD     | $NH_3-N$ | TP      | TN      |
| 2019-07-19 | 0.97(无)    | 1.14(弱) | 0.95(无)  | 0.97(无) | 0.93(无) |
| 2021-06-23 | 1.63(中等)   | 1.31(弱) | 1.19(弱)  | 1.30(弱) | 1.12(弱) |
| 2021-07-22 | 1.13(弱)    | 0.98(无) | 1.00(弱)  | 1.11(弱) | 1.11(弱) |
| 平均值        | 1.243      | 1.143   | 1.047    | 1.127   | 1.053   |

2.2 中雨条件下径流污染特征分析

当累积降雨量达到 4 mm 左右时,排水口开始溢流,溢流时间在 1.5 ~ 6 h 之间,开始溢流时间晚于降雨时间约 40 min,溢流量在 5 ~ 200 m<sup>3</sup> 之间。3 场中雨的径流污染物瞬时浓度变化如图 4 所示,降雨初期污染物浓度变化趋势与小雨相似,均呈逐渐降低趋势,但中雨污染物浓度出现上下波动,这与降雨过程相关,降雨期间降雨强度增强,对下垫面或管道内沉积物的冲刷作用增强导致了污染物浓度上下波动。从污染指标浓度最大值来看,前 4 个水质样品污染物浓度值较高,所有污染指标在 0 ~ 40 min 内达到最大值。从时间角度来看,除 TP 指标外,6 月份降雨径流污染物浓度高于 7、8 月份,溢流期间污染物浓度值均低于Ⅳ类水标准。7、8 月份降雨,SS、COD、 $NH_3-N$  指标在溢流 40 min 左右达到或接近Ⅳ类水标准,TP 指标在溢流 1 min 左右达到Ⅳ类水标准,TN 指标远低于Ⅳ类水标准,污染程度较高。

中雨的无量纲累积曲线  $M(V)$  如图 5 所示,

污染物初期冲刷率  $MMF_{30}$  如表 5 所示,场次中雨初期冲刷效应普遍较弱,其中,2021-07-29 由于雨前干燥期短,下垫面污染物累积少,且雨强较小,对下垫面的冲刷作用较弱,除 SS 和 COD 指标外的其他指标不存在初期冲刷效应。对比场次中雨 5 种污染指标  $MMF_{30}$  平均值,初期冲刷效应强度依次为  $TN > SS > COD > TP > NH_3-N$ 。

2.3 大雨条件下径流污染特征分析

当累积降雨量达到 4 mm 左右时,排水口开始溢流,溢流时间在 3.5 ~ 7 h 之间,开始溢流时间晚于降雨时间约 30 min,溢流量在 40 ~ 750 m<sup>3</sup> 之间。3 场大雨的径流污染物瞬时浓度变化如图 6 所示,降雨初期污染物浓度 SS 与 COD 指标呈逐渐降低趋势, $NH_3-N$ 、TP、TN 浓度在中后期出现陡升与陡降趋势,主要受降雨过程影响,中后期出现降雨强度突然增强,径流量增加,对管道冲刷作用增强,导致污染物浓度增加,由此可见,大雨事件前期对管道冲刷不完全。从污染指标浓度最大值来看,污染指标普遍前 3 个水质样品污染物浓

度值较高,所有污染指标在 0 ~ 30 min 内达到最大值,而对于雨前干燥期较长的大雨事件,TP、TN 指标在降雨中后期出现浓度最大值,受最大雨强影响较大。从时间角度来看,7 月份降雨,SS、COD、NH<sub>3</sub>-N 指标在溢流 20 min 左右达到或接近

Ⅳ类水标准,TP 指标污染程度较低,对于雨前干燥期较长的大雨事件,在降雨中后期出现浓度超标情况,TN 指标远低于Ⅳ类水标准,污染程度较高。从降雨特征来看,降雨量量级相差不大时,雨前干燥期越长,污染指标浓度越高。

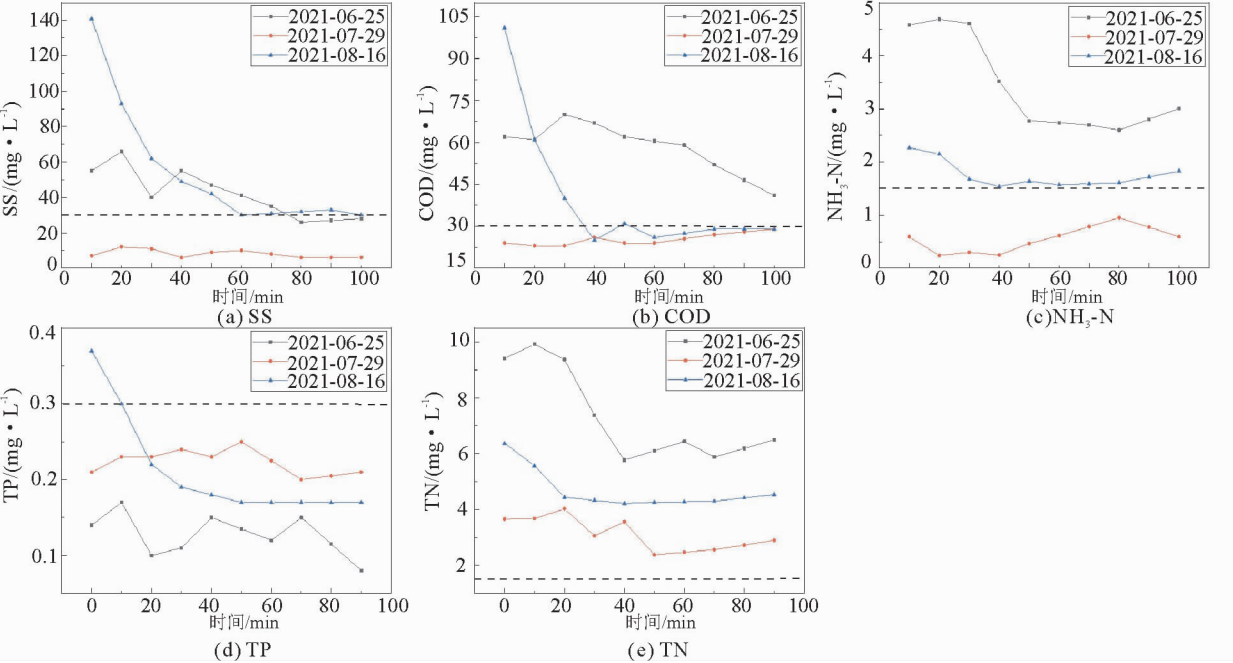


图 4 中雨降雨径流污染物瞬时浓度变化

Fig.4 Changes of instantaneous concentration of pollutants in moderate rainfall runoff

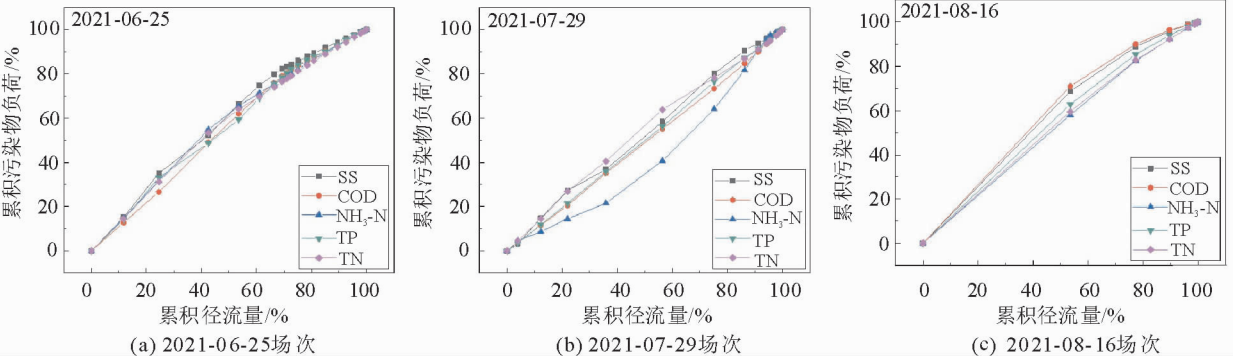


图 5 中雨  $M(V)$  曲线图

Fig.5  $M(V)$  curve of moderate rain

表 5 中雨  $MMF_{30}$  值

Tab.5  $MMF_{30}$  values of moderate rain

| 降雨场次       | MMF <sub>30</sub> |         |                    |         |         |
|------------|-------------------|---------|--------------------|---------|---------|
|            | SS                | COD     | NH <sub>3</sub> -N | TP      | TN      |
| 2021-06-25 | 1.36(弱)           | 1.11(弱) | 1.26(弱)            | 1.20(弱) | 1.26(弱) |
| 2021-07-29 | 1.11(弱)           | 0.97(无) | 0.64(无)            | 0.82(无) | 1.40(弱) |
| 2021-08-16 | 1.28(弱)           | 1.32(弱) | 1.08(弱)            | 1.17(弱) | 1.11(弱) |
| 平均值        | 1.250             | 1.133   | 0.993              | 1.063   | 1.257   |

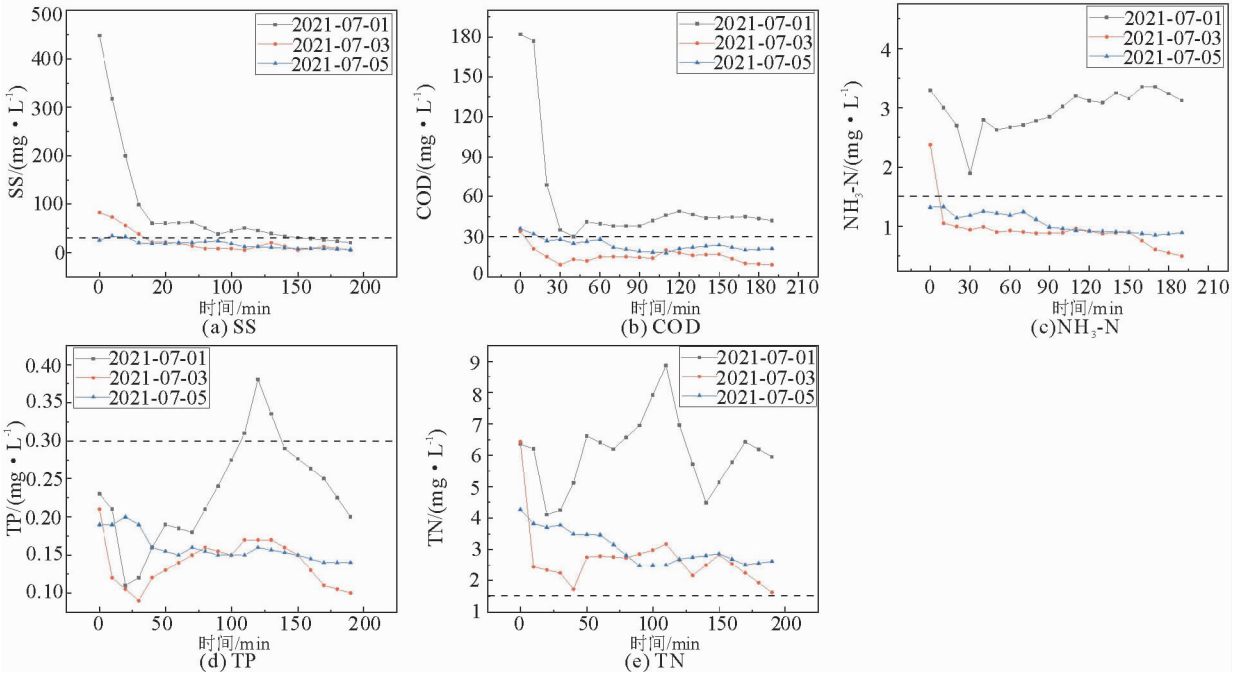


图 6 大雨降雨径流污染物瞬时浓度变化

Fig. 6 Changes of instantaneous concentration of pollutants in heavy rainfall runoff

大雨的无量纲累积曲线  $M(V)$  如图 7 所示, 污染物初期冲刷率  $MMF_{30}$  如表 6 所示, 场次大雨初期冲刷效应处于中等和偏弱水平。比较场次大雨的  $MMF_{30}$  值可知, 同一月份连续 3 场雨前干燥期相差不大的降雨, 其初期冲刷效应逐渐减弱 ( $2021-07-01 > 2021-07-03 > 2021-07-05$ ), 由于降

雨频繁、雨前干燥期短, 下垫面污染物累积少, 因此时间序列偏后的降雨场次初期冲刷效应相对较弱。对比场次大雨 5 种污染指标  $MMF_{30}$  平均值, 初期冲刷效应强度依次为  $COD > SS > TN > NH_3-N > TP$ 。

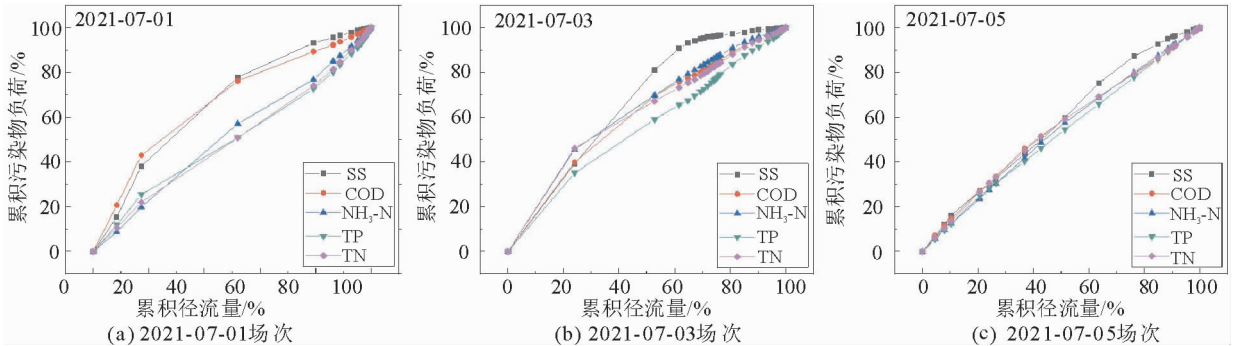


图 7 大雨  $M(V)$  曲线图

Fig. 7  $M(V)$  curve of heavy rain

表 6 大雨  $MMF_{30}$  值

Tab. 6  $MMF_{30}$  value of heavy rain

| 降雨场次       | $MMF_{30}$ |          |          |         |          |
|------------|------------|----------|----------|---------|----------|
|            | SS         | COD      | $NH_3-N$ | TP      | TN       |
| 2021-07-01 | 1.76(中等)   | 1.84(中等) | 1.12(弱)  | 1.16(弱) | 1.08(弱)  |
| 2021-07-03 | 1.51(中等)   | 1.53(中等) | 1.72(中等) | 1.37(弱) | 1.74(中等) |
| 2021-07-05 | 1.21(弱)    | 1.23(弱)  | 1.13(弱)  | 1.13(弱) | 1.22(弱)  |
| 平均值        | 1.493      | 1.533    | 1.323    | 1.220   | 1.347    |

2.4 影响径流污染的敏感性指标及其阈值

统计场次小雨污染物指标监测浓度范围,计算 EMC 浓度及超标倍数(见表 7)。降雨径流监测污染物浓度范围(最小值~最大值)SS 为 5.00~204.00 mg·L<sup>-1</sup>、COD 为 19.00~196.0 mg·L<sup>-1</sup>、NH<sub>3</sub>-N 为 0.86~1.96 mg·L<sup>-1</sup>、TP 为 0.18~0.60 mg·L<sup>-1</sup>、TN 为 4.45~10.60 mg·L<sup>-1</sup>。Ⅳ类水标准 COD 为 30 mg·L<sup>-1</sup>、NH<sub>3</sub>-N 为 1.5 mg·L<sup>-1</sup>、TP

为 0.3 mg·L<sup>-1</sup>、TN 为 1.5 mg·L<sup>-1</sup>。3 场降雨 SS 指标 EMC 浓度值均超出《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)城镇污水处理厂二级排放标准(30 mg·L<sup>-1</sup>),说明就 SS 指标而言,小雨雨水径流污染程度超出一般的点源污染事件。COD、NH<sub>3</sub>-N、TP、TN 指标均超出Ⅳ类水质标准,其中,TN 超标倍数相对较高。由此可见,在小雨径流污染中,SS 和 TN 为主要污染物。

表 7 小雨监测浓度范围及 EMC 浓度值及超标倍数

Tab. 7 Light rain monitoring concentration range, EMC concentration value and exceedance multiple

| 降雨场次       | EMC/(mg·L <sup>-1</sup> ) |                  |                    |                |                |
|------------|---------------------------|------------------|--------------------|----------------|----------------|
|            | SS                        | COD              | NH <sub>3</sub> -N | TP             | TN             |
| 2019-07-19 | 47.94<br>(-)              | 48.92<br>(1.63)  | 3.85<br>(2.57)     | 0.24<br>(0.79) | 8.75<br>(5.83) |
| 2021-06-23 | 76.94<br>(-)              | 150.55<br>(5.02) | 1.66<br>(1.11)     | 0.47<br>(1.56) | 5.70<br>(3.80) |
| 2021-07-22 | 180.77<br>(-)             | 44.07<br>(1.47)  | 1.61<br>(1.07)     | 0.49<br>(1.65) | 7.60<br>(5.07) |

注:“( )”内为相较于Ⅳ类水的污染倍数。

统计场次中雨污染物指标监测浓度范围,计算 EMC 浓度及超标倍数(见表 8)。降雨径流监测污染物浓度范围 SS 为 6.00~141.0 mg·L<sup>-1</sup>、COD 为 23.0~101.00 mg·L<sup>-1</sup>、NH<sub>3</sub>-N 为 0.24~4.69 mg·L<sup>-1</sup>、TP 为 0.08~0.37 mg·L<sup>-1</sup>、TN 为 2.38~9.92 mg·L<sup>-1</sup>。2021-07-29 由于雨前干燥期较短,且 2021 年 7 月份降雨频率高,且多发持

续性降雨,下垫面污染物累积较少,因此除 TN 外其他污染物指标均为超过Ⅳ类水质标准。2021-06-25 和 2021-08-16 降雨,SS 指标 EMC 浓度值均超出城镇污水处理厂二级排放标准,COD、NH<sub>3</sub>-N、TP、TN 指标均超出Ⅳ类水质标准,其中,TN 超标倍数相对较高。由此可见,在中雨径流污染中,SS 和 TN 为主要污染物。

表 8 中雨监测浓度范围及 EMC 浓度值及超标倍数

Tab. 8 Moderate rain monitoring concentration range, EMC concentration value and exceedance multiple

| 降雨场次       | EMC/(mg·L <sup>-1</sup> ) |                 |                    |                |                |
|------------|---------------------------|-----------------|--------------------|----------------|----------------|
|            | SS                        | COD             | NH <sub>3</sub> -N | TP             | TN             |
| 2021-06-25 | 42.48<br>(-)              | 56.66<br>(1.89) | 3.60<br>(2.40)     | 0.12<br>(0.38) | 7.61<br>(5.08) |
| 2021-07-29 | 8.61<br>(-)               | 24.78<br>(0.83) | 0.49<br>(0.33)     | 0.23<br>(0.7)  | 3.13<br>(2.09) |
| 2021-08-16 | 109.92<br>(-)             | 76.26<br>(2.54) | 2.10<br>(1.40)     | 0.32<br>(1.05) | 5.73<br>(3.82) |

注:“( )”内为相较于Ⅳ类水的污染倍数。

统计场次大雨污染物指标监测浓度范围,计算 EMC 浓度及超标倍数(见表 9)。降雨径流监测污染物浓度范围 SS 为 5.0~448.0 mg·L<sup>-1</sup>,COD 为 9.00~182.00 mg·L<sup>-1</sup>,NH<sub>3</sub>-N 为 0.50~

4.42 mg·L<sup>-1</sup>,TP 为 0.09~0.38 mg·L<sup>-1</sup>,TN 为 1.62~8.87 mg·L<sup>-1</sup>。场次大雨随着雨前干燥期的减少,污染物指标的 EMC 浓度逐渐降低,3 场降雨中只有 TN 指标超过Ⅳ类水质标准,其他污

染指标只有雨前干燥期较长的 2021-07-01 场降雨超过Ⅳ类水质标准。2021-07-01 和 2021-07-03 降雨,SS 指标 EMC 浓度值均超出城镇污水处理厂二级排放标准,2021-07-03 由于在前 2 场降雨

对下垫面冲刷比较完全,污染物累积较少,SS 指标 EMC 浓度较低。由此可见,在大雨径流污染中,SS 和 TN 为主要污染物。

表 9 大雨监测浓度范围及 EMC 浓度值及超标倍数

Tab.9 Heavy rain monitoring concentration range, EMC concentration value and exceedance multiple

| 降雨场次       | EMC/(mg·L <sup>-1</sup> ) |                 |                    |                |                |
|------------|---------------------------|-----------------|--------------------|----------------|----------------|
|            | SS                        | COD             | NH <sub>3</sub> -N | TP             | TN             |
| 2021-07-01 | 174.33<br>(-)             | 72.19<br>(2.41) | 2.61<br>(1.74)     | 0.15<br>(0.50) | 4.95<br>(3.30) |
| 2021-07-03 | 50.22<br>(-)              | 20.45<br>(0.68) | 1.25<br>(0.83)     | 0.14<br>(0.48) | 3.35<br>(2.23) |
| 2021-07-05 | 18.97<br>(-)              | 23.17<br>(0.77) | 1.08<br>(0.72)     | 0.16<br>(0.53) | 3.03<br>(2.02) |

注:“( )”内为相较于Ⅳ类水的污染倍数。

比较小雨、中雨、大雨场次降雨径流平均浓度 (EMC),明确不同雨型降雨径流污染特征,监测周期内所有场次 EMC 分析结果如图 8,对于 SS 指标,敏感性为小雨>大雨>中雨,对于 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 指标,敏感性为中雨>小雨>大雨,对于 TP 和 TN 指标,敏感性为小雨>中雨>大雨。整

体来看,小雨和中雨的 EMC 浓度值比大雨高,主要是由于大雨降雨量大,降雨量超过一定值后对下垫面污染物的稀释、冲刷和溶解等作用增强,造成源头耗竭及污染物稀释效应,导致污染物浓度偏低<sup>[20]</sup>。

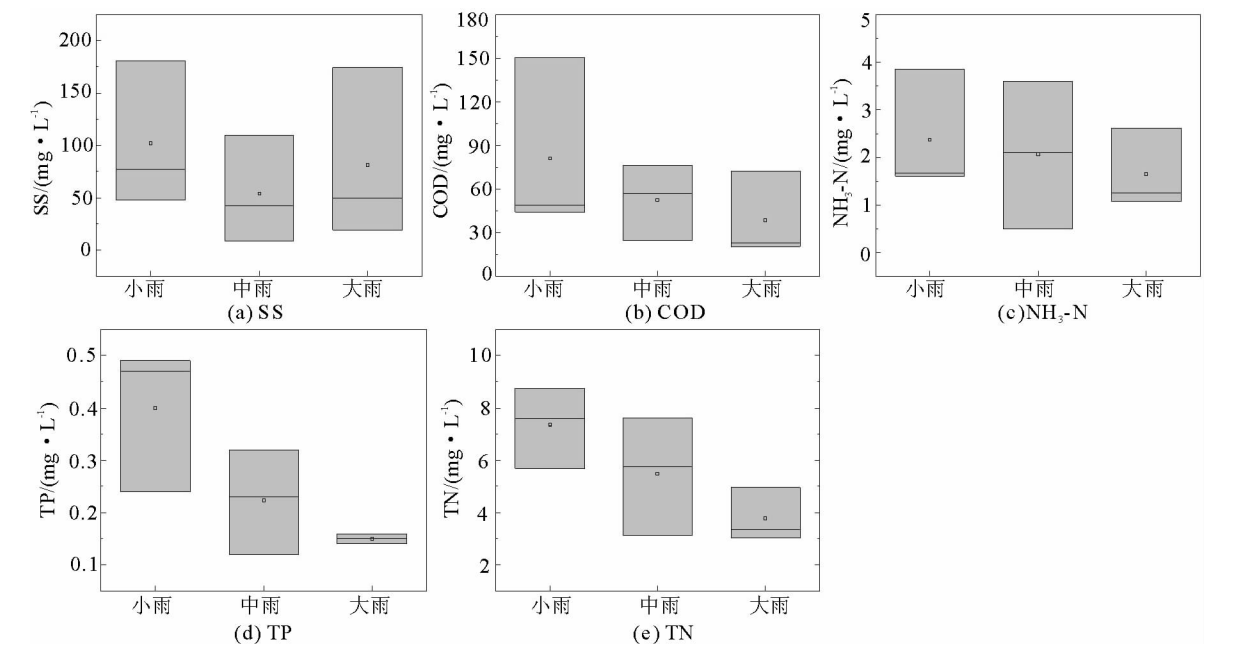


图 8 不同降雨类型的 EMC 浓度

Fig.8 EMC concentrations of different rainfall types

2.5 老城区径流污染管控方案

参考《北京市东城区海绵城市专项规划》,以北京市东城区海绵城市专项规划中年径流污染削减率 3% 为标准,计算降雨场次的径流累积量、累

积降雨量,以及污染削减率达标时,需控制的径流体积(见表 10)。当径流污染物负荷累积值达到 3% 时,小雨和中雨的径流量累积量为总径流量的 3% 左右,大雨为 25% 左右,小雨和中雨需截留的

径流量比例高于大雨。

表 10 30% 累积污染物浓度负荷对应的流量累积值  
Tab. 10 Flow cumulative value corresponding to 30% cumulative pollutant concentration load

| 雨型 | 降雨场次       | SS/%          | COD/%         | NH <sub>3</sub> -N/% | TP/%          | TN/%          | 总溢流量<br>/m <sup>3</sup> | 截流体积<br>/m <sup>3</sup> | 累积降雨量<br>/mm  |
|----|------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|---------------|
| 小雨 | 2019-07-19 | 31. 02        | 26. 38        | 31. 69               | 30. 93        | 32. 09        | 72. 75                  | 23. 35                  | 3. 2          |
|    | 2021-06-23 | 18. 43        | 22. 82        | 25. 16               | 23. 17        | 26. 69        | 30. 14                  | 8. 04                   | 6. 8          |
|    | 2021-07-22 | 26. 58        | 30. 75        | 30. 05               | 26. 95        | 26. 94        | 113. 89                 | 35. 02                  | 4. 4          |
|    | 平均值        | <b>25. 35</b> | <b>26. 65</b> | <b>28. 97</b>        | <b>27. 01</b> | <b>28. 57</b> | <b>72. 26</b>           | <b>22. 14</b>           | <b>4. 80</b>  |
| 中雨 | 2021-06-25 | 19. 69        | 27. 27        | 23. 12               | 20. 46        | 23. 20        | 178. 95                 | 48. 80                  | 8. 6          |
|    | 2021-07-29 | 25. 99        | 30. 97        | 44. 91               | 30. 25        | 25. 16        | 48. 12                  | 21. 61                  | 5. 8          |
|    | 2021-08-16 | 23. 39        | 22. 65        | 27. 70               | 25. 60        | 26. 97        | 115. 43                 | 31. 98                  | 9. 4          |
|    | 平均值        | <b>23. 02</b> | <b>26. 96</b> | <b>31. 91</b>        | <b>25. 44</b> | <b>25. 11</b> | <b>114. 17</b>          | <b>34. 13</b>           | <b>7. 93</b>  |
| 大雨 | 2021-07-01 | 17. 52        | 12. 13        | 26. 74               | 23. 55        | 26. 97        | 505. 49                 | 136. 33                 | 31. 4         |
|    | 2021-07-03 | 18. 37        | 18. 05        | 15. 78               | 20. 55        | 15. 58        | 759. 47                 | 156. 08                 | 16. 4         |
|    | 2021-07-05 | 23. 90        | 23. 94        | 26. 07               | 23. 92        | 23. 98        | 406. 38                 | 105. 94                 | 21            |
|    | 平均值        | <b>19. 93</b> | <b>18. 04</b> | <b>22. 86</b>        | <b>22. 67</b> | <b>22. 18</b> | <b>557. 11</b>          | <b>132. 78</b>          | <b>22. 93</b> |

3 结论

1)降雨初期(小雨前 20 min、中雨前 30 min、大雨前 10 min)污染物浓度较高,存在初期冲刷效应,大雨的初期冲刷效应最强。场次小雨中应重点关注 SS、TP 和 TN 指标,场次中雨重点关注 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 指标,中雨和小雨的 EMC 浓度值比大雨高。

2)对于 SS 指标,大雨的污染物浓度变化范围最大,中雨最小;对于 COD 指标,小雨和大雨的污染物浓度变化范围相近,中雨最小;对于 NH<sub>3</sub>-N 指标,中雨的污染物浓度变化范围最大,小雨最小;对于 TP 指标,小雨的污染物浓度变化范围最大,中雨和大雨的污染物浓度变化范围相近;对于 TN 指标,小雨、中雨和大雨的污染物浓度变化范围相近。

3)对于高度城市化服务面积约为 10 hm<sup>2</sup>,下垫面中绿地、建筑、道路所占比例约为 35%、30%、35%,不透水面积比例约为 6% 的老城区,可根据不同的降雨类型制定源头和末端管控方案。源头控制根据东城区胡同、学校、公园等不同地区特点建造檐沟、集雨樽、下凹式绿地、透水铺装等海绵设施。对于小雨、中雨和大雨,源头控制设施分别需要控制 5 mm、8 mm、23 mm 的降雨

量。末端控制可考虑在雨水排口上游设置截流设施,修建调蓄池,针对小雨、中雨和大雨,分别截取降雨初期 25 m<sup>3</sup>、35 m<sup>3</sup>、150 m<sup>3</sup> 的径流量,将截取的初期雨水送至污水处理厂,经处理后再排放入接纳水体。另外,老城区可根据自身地理位置、气候条件、径流污染程度、不同雨型的降雨频次和经济情况等因素,综合选择源头和末端控制方案。

参考文献

[1] LU D S, WENG Q H. Use of impervious surface in urban land-use classification[J]. Remote Sensing of Environment,2006, 102(1/2): 146-160.

[2] 朱彤,赵杨,车伍,等. 杭州市雨水径流污染分析及控制对策[J]. 中国给水排水, 2015, 31(17): 119-123.

ZHU T, ZHAO Y, CHE W, et al. Analysis of stormwater runoff pollution in Hangzhou City and its control measures[J]. China Water & Wastewater, 2015,31(17):119-123.

[3] CHEBBO G, GROMAIRE M C, AHYERRE M, et al. Production and transport of urban wet weather pollution in combined sewer systems: The "Marais" experimental urban catchment in Paris[J]. Urban Water, 2001, 3(1/2): 3-15.

[4] DAVIS A P, BURNS M. Evaluation of lead concentration in runoff frompainted structures [J]. Water Research, 1999,33(13):2949-2958.

- [5] CAMPISANO A, CABOT PLE J, MUSCHALLA D, et al. Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems[J]. Urban Water Journal, 2013, 10(5): 300-311.
- [6] ELLIS J B, BUTLER D. Surface water sewer misconnections in England and Wales: Pollution sources and impacts[J]. Science of the Total Environment, 2015, 526: 98-109.
- [7] 夏青. 城市径流污染系统分析[J]. 环境科学学报, 1982, 2(4): 271-278.  
XIA Q. Study on pollution system of urban runoff[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1982, 2(4): 271-278.
- [8] 易莹, 葛乐乐, 周艳伟, 等. 日本合流制溢流污染防治的经验 and 思考[J]. 工业用水与废水, 2022, 53(2): 46-49, 60.  
YI Y, GE L L, ZHOU Y W, et al. Experience and thinking on the prevention and control of combined sewer overflow in Japan[J]. Industrial Water and Wastewater, 2022, 53(2): 46-49, 60.
- [9] 车武, 李俊奇. 21 世纪中国城镇雨水利用与雨水污染控制[C]//中国土木工程学会水工业分会第四届理事会第一次会议论文集. 宁波: 中国土木工程学会, 2002: 528-530.
- [10] 陈莹, 王昭, 吴亚刚, 等. 降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(7): 2828-2835.  
CHEN Y, WANG Z, WU Y G, et al. Impacts of rainfall characteristics and occurrence of pollutant on effluent characteristics of road runoff pollution[J]. Environmental Science, 2017, 38(7): 2828-2835.
- [11] 王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 等. 重庆市典型城镇区地表径流污染特征[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2809-2816.  
WANG L T, DUAN B Z, ZHAO J W, et al. Pollution characteristics of surface runoff of typical town in Chongqing City[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2809-2816.
- [12] 程江, 杨凯, 黄小芳, 等. 上海中心城区苏州河沿岸排水系统降雨径流水文水质特性研究[J]. 环境科学, 2009, 30(7): 1893-1900.  
CHENG J, YANG K, HUANG X F, et al. Hydrology and water quality of rainfall-runoff in combined sewerage system along Suzhou Creek in central Shanghai[J]. Environmental Science, 2009, 30(7): 1893-1900.
- [13] 兰千. 雨水径流污染对河道水质影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [14] 王婧, 荆红卫, 王浩正, 等. 北京市城区降雨径流污染特征监测与分析[J]. 给水排水, 2011, 47(S1): 135-139.
- [15] PAULE M A, MEMON S A, LEE B Y, et al. Stormwater runoff quality in correlation to land use and land cover development in Yongin, South Korea[J]. Water Science and Technology, 2014, 70(2): 218-225.
- [16] 李家科, 李亚娇, 李怀恩. 城市地表径流污染负荷计算方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(2): 5-13.  
LI J K, LI Y J, LI H E. Study on the calculation method for urban surface runoff pollution load[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(2): 5-13.
- [17] GUPTA K, SAUL A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows[J]. Water Research, 1996, 30(5): 1244-1252.
- [18] LUO H B, LUO L, HUANG G, et al. Total pollution effect of urban surface runoff[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(9): 1186-1193.
- [19] 李琪, 张娜, 罗英杰, 等. 基于 MFF<sub>30</sub> 方法的城市降雨径流初期冲刷效应[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(5): 650-662.  
LI Q, ZHANG N, LUO Y J, et al. The first flush effect of urban rainfall runoff based on MFF<sub>30</sub> method[J]. Journal of The Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(5): 650-662.
- [20] 李俊奇, 戚海军, 宫永伟, 等. 降雨特征和下垫面特征对径流污染的影响分析[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(9): 47-52.  
LI J Q, QI H J, GONG Y W, et al. Effect of rainfall and underlying surface characteristics of runoff pollution[J]. Environmental science and technology, 2015, 38(9): 47-52.
- [21] 李立青, 朱仁肖, 郭树刚, 等. 基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 2896-2904.  
LI L Q, ZHU R X, GUO S G, et al. Research on spatial differentiation of urban stormwater runoff quality by source area monitoring[J]. Environmental Science, 2010, 31(12): 2896-2904.

(编辑 李 静)