

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.09.019

## 分流制雨水管网滞留污染物的估算研究

孟涛<sup>1</sup>, 崔慧萍<sup>1</sup>, 郭士涛<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350)

**摘要:** 为了定量研究降雨时分流制雨水管网滞留污染物占总污染物的比例,对某研究区域雨水管网中的滞留污染物定期取样检测,并根据研究区域的基础数据建立 SWMM 模型。同时,提出了一种雨水管网滞留污染物的计算方法,即以检测到的雨水管网污染物浓度及充满度计算滞留污染物质量。将滞留污染物数据输入 SWMM 模型中,分析对比有无滞留污染物的管网排放口污染物浓度的变化情况。模拟结果表明,在 1 年一遇的降雨条件下,雨水系统内的滞留污染物对 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 总污染负荷的贡献率分别为 43.30%、92.75%、58.83%,雨水管网滞留污染物占雨水管网总污染物的比例较大。

**关键词:** 雨水管网; 滞留污染物; SWMM; 充满度

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)09-0105-05

## Estimation of Retained Pollutants in Separate Rainwater Pipeline Network

MENG Tao<sup>1</sup>, CUI Hui-ping<sup>1</sup>, GUO Shi-tao<sup>2</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** In order to quantitatively calculate the proportion of retained pollutants in a separate rainwater pipeline network to the total pollutants during rainfall conditions, the retained pollutants in the rainwater pipeline network of a research area were sampled and detected periodically, and the SWMM model was established based on the basic data of the research area. In addition, a method for calculating the amount of retained pollutants in the rainwater pipeline network was proposed, which was to calculate the amount of retained pollutants based on the detected pollutant concentration and depth ratio of the rainwater pipeline network. The data of retained pollutants were inputted into the established SWMM model, and the change of pollutant concentration at the outlet of the pipeline network with and without retained pollutants were analyzed and compared. The simulation results showed that the contribution rates of retained pollutants in the rainwater system to COD, NH<sub>3</sub>-N and TP pollutant loads were 43.30%, 92.75% and 58.83%, respectively. It could be concluded that the proportion of retained pollutants in the total pollutants of rainwater pipeline network was large.

**Key words:** rainwater pipeline network; retained pollutant; SWMM; depth ratio

因建设条件约束,部分老城区的排水系统存在合流制、截流制与分流制多种体制并存的状况<sup>[1]</sup>,

故在非雨季时,雨水系统中也会存在一定量的污染物。分流制雨水系统中的污染物一般有地表径流、

雨污混接等多种来源。分流制雨水系统一般设置雨水泵站,降雨径流汇入雨水系统后,经泵站排放至河道。在非雨季或者降雨量较小时,为防止高负荷污染物对下游水体的冲击,雨水泵站往往处于停运状态,故在非雨季时,雨水系统中的滞留污染物以高水位、高负荷的状态存在。据发达国家统计,暴雨事件中水体高达80%的污染负荷是由管网沉积物造成的<sup>[2]</sup>。目前国内外的相关研究多集中于对雨水管网沉积物中典型污染物指标浓度变化规律的定性分析,对污染物负荷的定量分析较少<sup>[3-4]</sup>。鉴于此,笔者在对某研究区域雨水管网定期水质监测的基础上,构建了雨水管网水质模型,并引入对管网滞留污染物的模拟,提出了一种雨水滞留污染物负荷的计算方法,以期为入河污染物控制与水环境治理提供参考。该研究区域采用分流制排水系统,降雨径流汇入雨水系统后,经雨水泵站排放至环园区河道。研究区域面积为3.95 km<sup>2</sup>,泵站的排水能力为9.21 m<sup>3</sup>/s,北部以住宅用地为主,南部以工业用地为主,中部以科研教育用地为主,不透水面所占比例较大,绿化程度相对较低。

## 1 雨水管网滞留污染物计算方法

本研究基于SWMM建立研究区域的雨水管网水质模型,结合雨水管网水质监测数据,在SWMM模型中引入对滞留污染物的模拟,得到雨水系统污染物负荷变化情况。现以图1所示的铰点1及与其相连接的4条管段为例阐述管网滞留污染物的计算方法。首先根据水质监测数据得到铰点1的污染物浓度,假设COD浓度为 $x$  mg/L;然后调查雨水管网中各管段旱季时雨水的充满度,假设管段G1、G2、G3、G4的充满度分别为 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 。

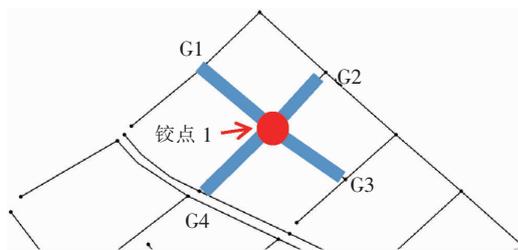


图1 管网示例

Fig. 1 Example of pipeline network

### ① 铰点滞留污染物计算

铰点1处的检查井直径为 $d$  mm,水深为 $h$  m,则该铰点处的COD质量 $M_{\text{COD}}$ 的计算公式为:

$$M_{\text{COD}} = \pi \left( \frac{d \times 10^{-3}}{2} \right)^2 \times h \times x \times 10^{-3} \quad (1)$$

### ② 管道滞留污染物计算

铰点1连接管道的污染物浓度按铰点1处的污染物浓度计算,设G1管道的长度为 $l_1$  m、直径为 $d_1$  mm,则管段G1的过水断面面积 $A_1$ 为:

$$A_1 = \alpha_1 \times d_1^2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: $\alpha_1$ 是充满度为 $R_1$ 时的过水断面系数,根据《给水排水设计手册》得到。

则G1管道的COD质量 $m_{\text{COD}1}$ 为:

$$m_{\text{COD}1} = A_1 \times l_1 \times x \times 10^{-3} \quad (3)$$

同理可得G2、G3、G4管道的COD质量 $m_{\text{COD}2}$ 、 $m_{\text{COD}3}$ 、 $m_{\text{COD}4}$ 。

### ③ 污染物输入SWMM模型

SWMM模型中能够在铰点直接输入雨水系统的污染物负荷,为了便于对非雨季滞留污染物进行计算,本研究将管道滞留污染物均分到该管道上下游铰点,最终在铰点输入铰点和相关管道两部分的污染物,则铰点1需要输入的COD质量 $M_{\text{COD输}}$ 为:

$$M_{\text{COD输}} = M_{\text{COD}} + \frac{1}{2} (m_{\text{COD}1} + m_{\text{COD}2} + m_{\text{COD}3} + m_{\text{COD}4}) \quad (4)$$

同理可得 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和TP在铰点1处的输入量。用上述方法同样可以计算出研究区域中其他铰点的污染物输入量。需要说明的是,对于没有设立监测点的铰点,铰点处的污染物质量采用插值法求得。

## 2 SWMM模拟与分析

### 2.1 滞留污染物监测情况

为了全面掌握研究区域不同时期雨水系统内的水质污染状况,分析各项污染指标的迁移转化规律,对研究区域进行了定期水质监测。由于旱季和雨季雨水系统内存水的主要来源不同并且水质差异较大,分别在2016年1月、4月、6月、7月、8月、9月和11月对研究区域雨水管网采样点进行定期监测,监测指标包括COD、氨氮、总磷,监测方法参照相关国家标准。COD、氨氮、总磷浓度分别采用重铬酸盐法、纳氏试剂分光光度法、钼酸铵分光光度法测定。

为了全面掌握研究区域雨水系统的水质状况,并考虑到雨水系统监测点应具有代表性、科学性、经济性等因素,在研究区域内布置了20个监测点。由于雨水系统内的水经由雨水泵站排放到河道,因此采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V

类水质标准作为参考对排水系统水质进行分析。图2为监测点位COD、氨氮、总磷的全年平均浓度分布情况,其中,低于地表水V类标准限值的监测点用绿色标注,超出地表水V类标准限值的监测点用红色标注,并且用红色点的面积大小和颜色深浅表示污染的严重程度。从图2可以看出,研究区域的水质总体污染较为严重,部分点位的污染物浓度相比V类水体标准超标较多。

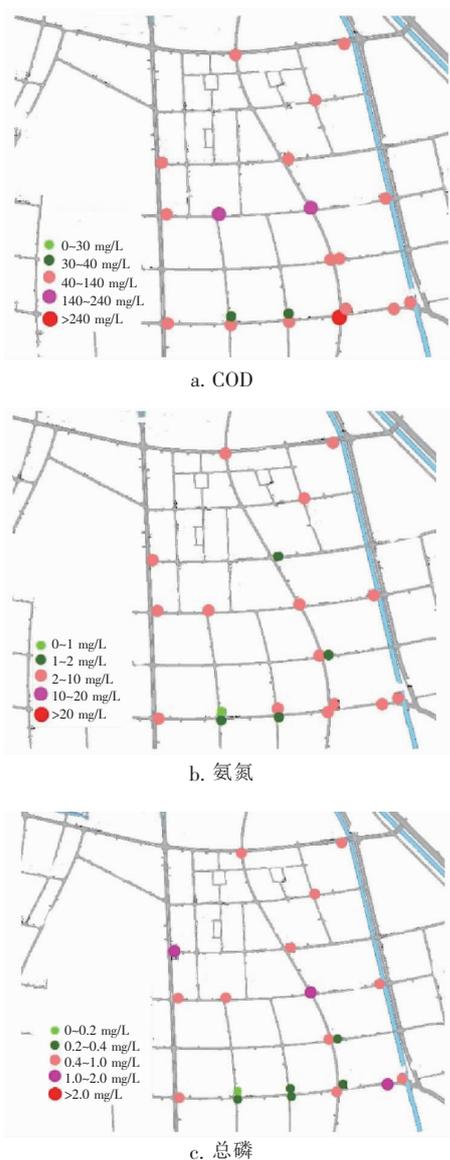


图2 2016年雨水系统污染物平均浓度的分布情况

Fig.2 Distribution of pollutants concentration in rainwater system in 2016

## 2.2 SWMM 模型的建立

首先设置降雨情景,根据该研究区域海绵城市建设技术导则中的降雨资料,选取0.25年一遇、1

年一遇、3年一遇重现期,降雨历时设置为120 min,降雨强度公式如下:

$$q = \frac{2141(1+0.756 \lg P)}{(t+9.6093)^{0.6893}} \quad (5)$$

式中: $q$ 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ;  $t$ 为降雨历时, $\text{min}$ ;  $P$ 为设计重现期,年。

其次是划分子汇水区域,根据研究区域的地形特点和道路分布,将研究区域划分为26个子汇水区。进而将管网概化为57条管段,管道的粗糙系数取0.013。入渗模型选用Horton模型。根据实际勘测情况,在SWMM模型中设定研究区域的土地利用类型为屋面、路面和绿地。污染物积累和冲刷函数都采用指数函数形式,污染物积累函数输入参数包括最大积累值和积累常数,冲刷指数函数输入参数包括冲刷系数和冲刷指数;对于街道清扫选项,仅道路设置,屋面和绿地不进行设置,道路街道清扫间隔为每天1次,每次清扫去除70%的污染物。

## 2.3 SWMM 模拟结果分析

### ① 不同降雨情景下的径流污染模拟分析

在构建雨水系统水力、水质模型的基础上,对不同重现期降雨情景下研究区域雨水排放口每分钟的污染物质量进行统计分析,不同重现期下,单位时间污染物质量的变化趋势相同,但重现期越大,降雨强度越大,峰值越高,峰现时间越早。当重现期为0.25、1、3年时,研究区域雨水排放口的COD峰值分别为24.91、75.15、89.05 kg/min,峰现时间分别为95、60、55 min;氨氮峰值分别为0.26、1.61、2.16 kg/min,峰现时间分别为85、80、80 min;TP峰值分别为0.17、0.48、0.54 kg/min,峰现时间分别为95、55、50 min。

### ② 引入滞留污染物后的模拟分析

首先依据水质监测与管网的充满度,按照前面的方法计算滞留污染物质量,然后输入到模型中进行模拟。在模拟过程中发现,当重现期为1年时,入渗量已基本达到饱和。因此在对比有无滞留污染物时以1年一遇重现期为例进行论证,选取1年一遇120 min降雨情景为代表,分析加入滞留污染前后排放口污染物质量的变化过程,模拟时间为360 min,结果如图3所示。可以看出,加入滞留污染前后排放口每分钟的COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP质量变化趋势基本相似,在降雨初期单位时间质量都迅速升高达到峰值,然后缓慢回落最终趋于稳定。加入滞留污染后,

COD 峰现时间基本不变,  $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 峰值时间提前, 3 种污染物的峰值明显增大。具体如下: 不加滞留污染时, COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 峰值分别为 75.156、1.614、0.484  $\text{kg}/\text{min}$ , 峰现时间分别为 60、80、55 min; 加入滞留污染后, 三者峰值分别为 124.985、11.794、2.178  $\text{kg}/\text{min}$ , 峰现时间分别为 60、50、45 min。

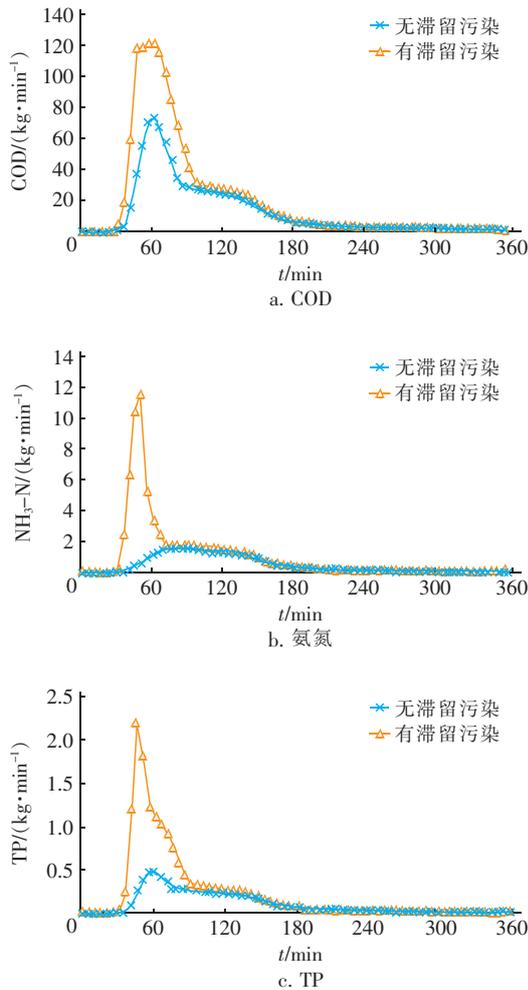


图3 1年一遇降雨情景下加入管网滞留污染前后排放口的污染物质量对比

Fig.3 Comparison of pollutants quantity before and after pipeline network retention pollution under 1-year rainfall return period

为了更直观地了解滞留污染对污染物总量的贡献, 计算了不同重现期下滞留污染物占总污染物的比例。结果表明, 当重现期为 0.25、1、3 年时, COD 滞留量占 COD 总量的比例分别为 62.65%、43.30%、38.42%, 氨氮滞留量占氨氮总量的比例分别为 97.79%、92.75%、88.27%, TP 滞留量占 TP 总

量的比例分别为 72.01%、58.83%、51.41%, 可以看出, 3 种污染物滞留量所占比例均较大, 其中, 在 3 个重现期下氨氮平均占比达到了 90% 左右。

### ③ SWMM 模拟结果验证

为验证该模型的模拟结果, 选取 2016 年 7 月 25 日降雨事件(降雨量为 54 mm)中的监测数据进行模型验证。当天降雨 45 min 后在雨水泵站出口处进行采样和水质监测, COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 浓度分别为 94.00、6.57、1.09  $\text{mg}/\text{L}$ 。污染物模拟值与监测值的对比如图 4 所示。

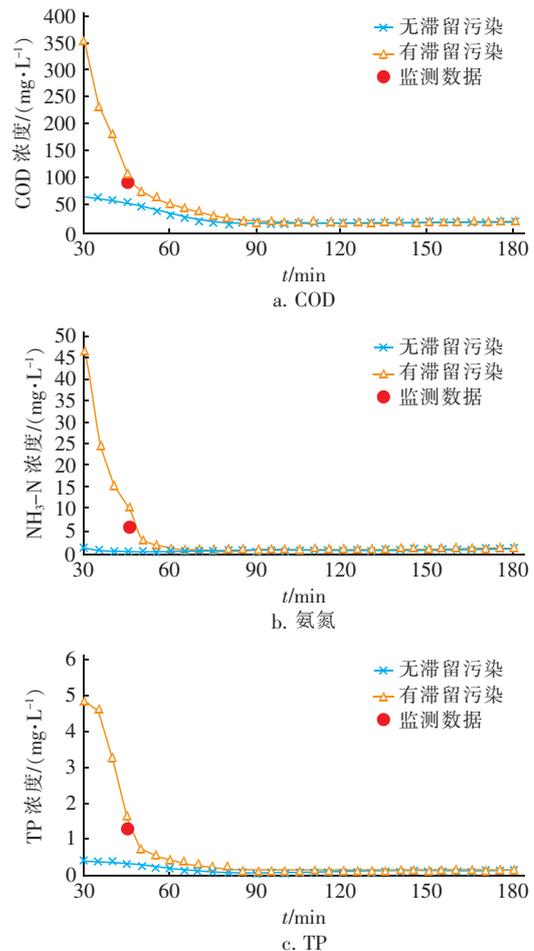


图4 模型模拟结果验证

Fig.4 Validation of simulation results by model

根据 SWMM 水质模型的模拟结果, 在加入滞留污染物的情况下, 降雨初期排放口的污染物浓度较大, 较未加入滞留污染物时有很大升高, 模拟结果与实际监测结果更为接近。随着降雨过程的进行, 径流污染逐渐替换雨水系统中原有的滞留污染, 各污染物浓度降低并趋于稳定。因此, 在 SWMM 模型中引入对滞留污染物的模拟, 能够更真实地反映雨水

系统中的水质变化情况。

### 3 结论与建议

① 提出了一种雨水管网滞留污染物的计算方法。以监测的数据及调研的充满度为基础,分别计算较点及管段的滞留污染物负荷,并将其输入到SWMM模型中进行模拟。

② 当降雨重现期为1年时,模拟结果表明,雨水系统内的滞留污染物对COD、NH<sub>3</sub>-N、TP总量的贡献率分别为43.30%、92.75%、58.83%,雨水管网滞留污染物占雨水管网总污染物的比例较大。

③ 由于监测数据有限,本研究未能对模型结果进行充分的验证,未来可以进行更为细致的水质监测,以了解雨水系统中各污染指标浓度的连续变化情况,以便进行进一步的模型验证。

④ 雨水管网中滞留的污染物,在降雨时随着新入管网的雨水一起流入水体中,会对水体产生较大的污染负荷,因此,雨水系统滞留污染物问题亟待解决。本研究建议采用的雨水管网滞留污染控制措施为:在雨水泵站处设立雨水调蓄池,截留降雨前期过程到达雨水泵站的初期雨水。

#### 参考文献:

- [1] 陶霞,管运涛,王慧,等. 典型老城区管网沿河排放状况调查与分析[J]. 中国给水排水,2010,26(16):78-82.  
Tao Xia, Guan Yuntao, Wang Hui, et al. Investigation and analysis on status of discharge along river from drainage network in typical old urban districts[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(16): 78-82 (in Chinese).
- [2] 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]. Environ

Sci Pollut Res Int, 2014, 21(8): 5311-5317.

- [3] 杨云安,管运涛,许光明,等. 老城区不同功能区排水管道沉积物性质研究[J]. 给水排水,2011,37(9):159-162.  
Yang Yun'an, Guan Yuntao, Xu Guangming, et al. Characteristics of sediment in drainage network in different functional districts in old downtown[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(9): 159-162 (in Chinese).
- [4] 徐尚玲. 城市排水管道沉积物径流冲刷污染效应的研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.  
Xu Shangling. Researching on Pollution Load of Overflow in Combined Drainage Channels in Runoff Scouring[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013 (in Chinese).



作者简介:孟涛(1981-),男,陕西商洛人,本科,高级工程师,注册公用设备(给水排水)工程师、注册环保工程师、注册咨询工程师,主要从事水环境污染治理、市政给排水设计等方面的工作。

E-mail: mengtao03@cemi.com.cn

收稿日期:2019-11-21

水利工程补短板,水利行业强监管