

降雨量对城市内河径流污染控制的影响

张楠

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要:针对由地表径流造成城市内河污染的问题,直接有效的控制手段以改善城市内河水质的状况是当前的难点。该研究试图通过降雨量找到突破口,根据气象部门的降雨量来提前做出控制,减少径流污染对河道水质造成的污染。利用 MIKE 11 构建河网模型,通过分析全年天气条件,得出了不同水质参数 COD、NH₃-N、TP 在河道空间的降解状况,以及对超 V 类水情况下的降雨量进行了量化。城市两条内河分析结果表明:通过雨污分流整治,城市内河在晴天时均可达到 V 类水;雨天时,COD 与 NH₃-N 超 V 类的降雨量在气象部门降雨等级里在中到大雨区间;TP 在中雨、中到大雨两个区间。下一步为决策者在雨季河道控污方面提供理论依据和技术支持。

关键词:城市水文模型;降雨径流;数值模拟;MIKE 11;污染负荷

中图分类号: N34

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)12-0143-04

0 引言

城市面源污染造成了城市内河的污染,庞立军^[1]以城市区域的不同下垫面为研究对象,分析了降雨过程、地表径流过程和污染过程之间的关系,计算了不同下垫面径流污染排放量。王军霞^[2]的研究侧重按照水文效应和面源污染的特性,选取不同下垫面,得出比如屋面的污染物排放负荷贡献率最大,交通干道的初始冲刷效应明显的结论。初期雨水污染研究中,张士官^[3]表明降雨初期冲刷效应明显,随降雨历时的延长,径流污染物浓度逐渐降低并趋于稳定。朱一松^[4]利用 SWMM 构建降雨径流污染模型,模拟了不同降雨条件下,截流井对雨水污染的截流效果。赵磊^[5]通过模拟手段,定出水质模拟中的敏感参数为不透水率、污染物最大累积量、污染物累积速率,得出受降雨强度影响波动较大的参数是冲刷系数和冲刷指数。

而本研究则采用城市水文模型方法对降雨径流的污染物进行时空特性分析,通过量化手段,针对不同污染负荷提出了雨量限值,试图在降雨径流污染的预防及应用方面向前迈进,同时可为城市其它内河水质模型提供借鉴。

1 研究区概况

该区为雨污分流系统,降雨径流冲刷带来的污

染负荷为河道主要污染源。研究对象为城市两条内河,东西走向的 River1 与南北走向的 River2。水从 River1 流到 River2,通过箱涵相连。River1 河长 4 550 m, River2 河长 2 055 m。河两岸分布着居民楼、城区道路、学校等,城市化严重。两条河相对独立,河道起端无入流,下游仅受一条河道顶托作用。River1 的汇水面积为 302 hm², River2 的汇水面积为 120.6 hm²。

2 研究方法

2.1 方法介绍

研究利用 MIKE 11 一维河网水动力软件建模,利用其内置的城市水文模型和水质模块研究降雨径流污染的时空特性。数值模拟包含水流模拟、对流扩散及水质模拟,它们之间既相对独立又相互关联。水质模拟是在水动力模拟的基础上进行物质的对流扩散模拟以及生化反应过程。水质模拟指标包括:化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)和总磷(TP)。

模型方法有几点优势:(1)可将问题量化;(2)系统分析;(3)可同时加载多个不同边界,多维度多角度分析。河道水文计算常采用单位线法、霍顿法等方式,但本次研究的对象是典型的城市内河,城市化密集复杂,所以研究尝试了应用城市水文模型计算。

2.2 模型构建

梳理模型基础资料。研究区含两个汇水分区, River1 河道断面 135 个,管网排口 44 个; River2 河道断面 50 个,管网排口 9 个。平均 50 m 设置一个河道断面数据,相对密集,足够满足建模需求。

收稿日期: 2022-05-17

基金项目: 上海市科委《城区河道近自然生态修复关键技术研发与示范》(21DZ1202505)

作者简介: 张楠(1980—),女,博士,工程师,从事城市雨洪、污水系统、海绵城市等研究工作。

设置模型边界条件。河网的汇水范围为闭边界;水流交互的位置在 River2 下游末端处,此开边界处设置了支流的水位。鉴于下游支流也是城区内河,汇水范围小,且根据常年的观察发现变化不大,因此下游水位边界设置了常水位 5.3 m。降雨边界是 2017 年全年实测日降雨,见图 1。

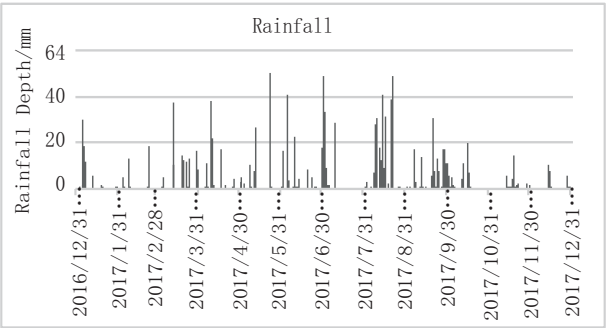


图 1 模型降雨边界
气象部门的降雨等级见表 1。

表 1 气象部门降雨等级表				单位:mm
雨量等级	24 h 降雨量	雨量等级	24 h 降雨量	
小雨	0.1 ~ 9.9	暴雨	50.0 ~ 99.9	
小到中雨	5.0 ~ 16.9	暴到大暴雨	75.0 ~ 174.9	
中雨	10.0 ~ 24.9	大暴雨	100.0 ~ 250.0	
中到大雨	17.0 ~ 37.9	大暴到特大暴	175.0 ~ 300.0	
大雨	25.0 ~ 49.9	特大暴雨	>250.0	
大到暴雨	38.0 ~ 74.9			

设置模型的主要参数。模拟时间步长取 60 min,河道断面粗糙度用的曼宁系数取 0.033。

模型初始值。因模型构建的主体是河网模型,岸上污染物(例如地表面源污染、管道沉积污染等)进入河道水体的过程概化处理,通过设定河道内污染物指标的初始值来定。本研究主要有三个指标,化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)。假定河道本底是 V 类水,根据地表水环境质量的限值,V 类水 COD 为 40 mg/L,NH₃-N 为 2 mg/L,TP 为 0.4 mg/L。因此,河道内各指标的初始浓度就设定为该限值。

模型率定参数主要为降解系数。模型最终使用的降解系数 COD 与 TP 取 0.1/d,NH₃-N 取 0.15/d。

2.3 城市水文模型

本研究采用的城市水文模型为时间面积模型,它是一种相对简单的地表径流模型,可以做到总量控制(产流)和汇流控制(汇流)。时间面积模型中产流过程采用径流系数法。通过设置不透水面积比(%),初损(mm),水文衰减系数来进行总量控制,产流过程中考虑各种损失,比如低洼蓄水,植被拦截,以及下渗等造成的水量损失;汇流过程采用时间面

积方法,通过集水时间 Tc(min)和时间面积曲线模拟汇流过程。时间面积曲线描述了城市流域形状与出口点的关系。城市流域形状概化为正三角形、倒三角形和矩形,用这三种时间面积曲线代表了不同的汇流过程。

2.4 水质模型原理

以对流扩散模型为基础,模型考虑污染物的对流扩散与线性降解作用,基本方程为式(1):

∂AC/∂t + ∂QC/∂x - ∂/∂x [AD ∂C/∂x] = -AKC + C₂q (1)

式中:C 为污染物浓度,mg/L;D 为污染物弥散系数;A 为断面过水面积,m²;Q 为流量,m³;K 为降解系数;C₂ 为污染物的点源浓度,mg/L;q 为污染物的点源流量,m³;x 为空间步长;t 为时间步长。

定解条件为浓度的初值与边界值。

浓度初始条件:t=0,C(x,t)=C(x,0);

边界条件:当 x=0 时,C(x,t)=C(0,t),当 x=L 时,C(x,t)=C(L,t)。

对流扩散方程求解采用隐式有限差分格式。

3 水质模拟分析

3.1 空间尺度分析

通过对长序列全年日降雨模拟,分别得到了三个污染负荷的平均值,空间分布见图 2~图 4。通过线条粗细与不同颜色显示了水质参数在空间分布的情况。线条越粗代表数值越大,红色代表超过 V 类水限值。图 2 中 River1 最上游处 COD 浓度偏高,土黄色阶显示值在 30~40 mg/L。上游段在 20~30 mg/L,中游水质较好,浅绿色段在 15~20 mg/L,蓝色段在 0.1~15 mg/L。下游段也较好,浅绿色段 15~20 mg/L。River2 整体水质均较好,在 30 mg/L 以内。空间分布上,河道水系 COD 浓度均在 40 mg/L 以内,达到 V 类水标准。

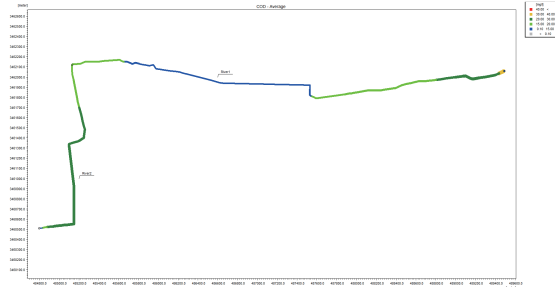


图 2 COD 平均浓度在河道的空间分布

图 3 中 River1 中游的 NH₃-N 指标在 0.15~0.5 mg/L,蓝色段所示。整个河道水系分布上,NH₃-N 均较好,浓度在 1.5 mg/L 以内,已达到 IV 类水标准。

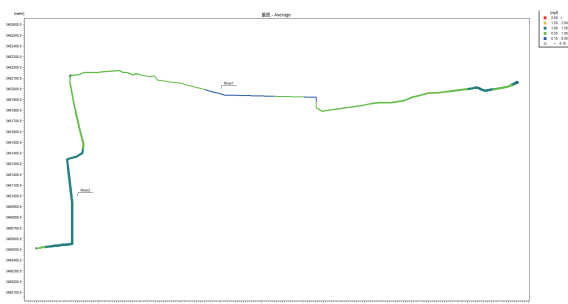


图3 氨氮平均浓度在河道的空间分布

图4中TP指标,River1优于River2。River1中TP均控制在0.3 mg/L以内,River2中游土黄色段为0.3~0.4 mg/L,TP浓度均在0.4 mg/L以内,达到V类水标准。

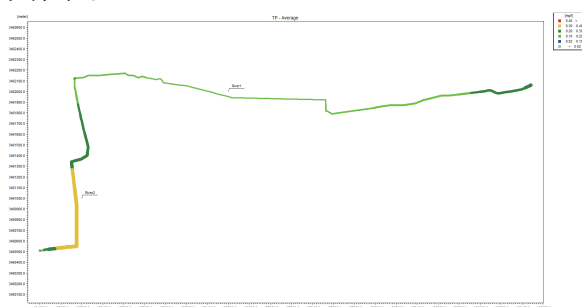


图4 TP平均浓度在河道的空间分布

以上分析得出,两条河道三个水质参数的浓度均值都在V类水范围内,从图2~图4亦可看出未出现红色河段。

3.2 时间尺度分析

3.2.1 降雨量对河道超标影响分析

全年尺度分析两条河不同河道里程断面不同污染负荷情况下,降雨量对其河道超标的影响。

(1) River1 河道

图5展示River1不同河道断面上COD随时间变化的曲线。图5上半部为全年日降雨,下半部为COD浓度变化曲线。River1较长,因此选取了多处重要河道里程断面(100 m、550 m、1 000 m、1 500 m、2 100 m、3 100 m、3 600 m、4 000 m、4 555 m)处的COD情况。结合全年降雨,除个别情况外,日降雨超过25 mm时COD有超标V类水的现象,反之晴天与小于25 mm日降雨时段,河道COD可达到V类水标准(虚线为V类水40 mg/L线)。

图6展示River1不同河道断面上NH₃-N随时间的变化曲线。河道里程选取与COD相同。从全年降雨看,日降雨超过21 mm时,NH₃-N指标有超过V类水。其余晴天时段、小于21 mm日降雨时段,NH₃-N可达到V类水标准(虚线为V类水2 mg/L线)。

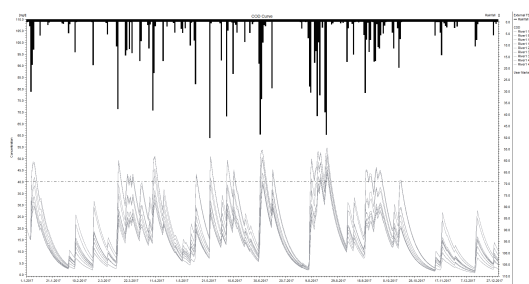


图5 COD在全年随时间与降雨量的变化曲线

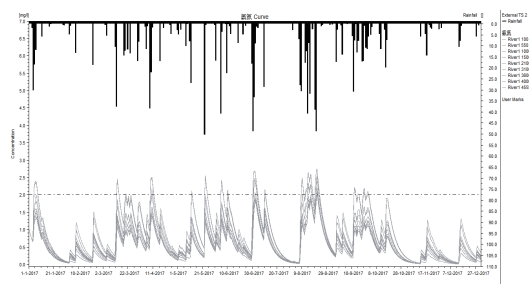


图6 氨氮在全年随时间与降雨量的变化曲线

图7展示River1不同河道断面上TP随时间的变化曲线。河道里程与其余指标相同。结合全年降雨,日降雨超过29 mm时,TP指标有超过V类水的现象。其余晴天时段、小于29 mm日降雨时段,河道TP均达到V类水标准(虚线为V类水0.4 mg/L线)。

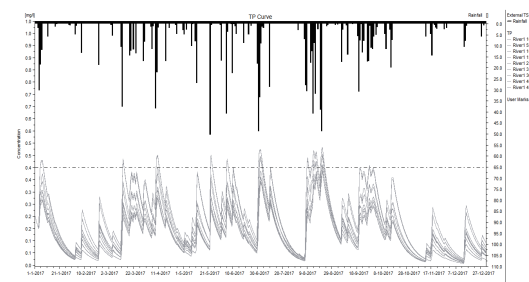


图7 TP在全年随时间与降雨量的变化曲线

(2) River2 河道

图8展示River2不同河道断面上COD随时间变化的曲线。选取了不同河道里程(50 m、1 000 m、2 000 m)断面COD情况。结合全年的降雨情况来看,日降雨超过19 mm时,COD有超过V类水的现象。其余晴天时段、小于19 mm日降雨时段,河道COD均达到V类水标准(虚线为V类水40 mg/L线)。

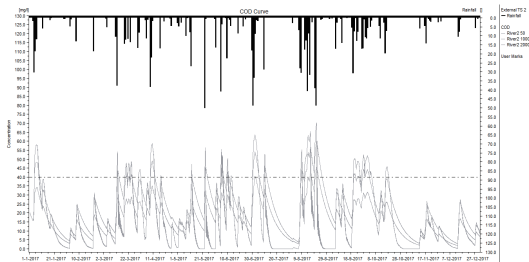


图8 COD在全年随时间与降雨量的变化曲线

图9展示River2不同河道断面上NH₃-N随时间变化的曲线。河道里程同COD。结合全年的降雨情

况,日降雨超过 19 mm 时,河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标有超过 V 类水的现象。其余晴天时段、小于 19 mm 日降雨时段,河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均达到 V 类水标准(虚线为 V 类水 2 mg/L 线)。

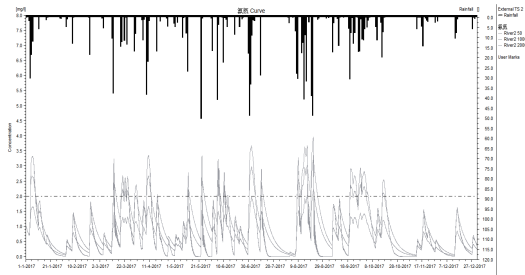


图9 氨氮在全年随时间与降雨量的变化曲线

图 10 展示 River2 不同河道断面上 TP 随时间变化的曲线。河道里程同以上指标相同。从全年的降雨情况看,日降雨超过 14 mm 时,TP 指标有超过 V 类水的现象。其余晴天时段、小于 14 mm 日降雨时段,河道 TP 均达到 V 类水标准(虚线为 V 类水 0.4 mg/L 线)。

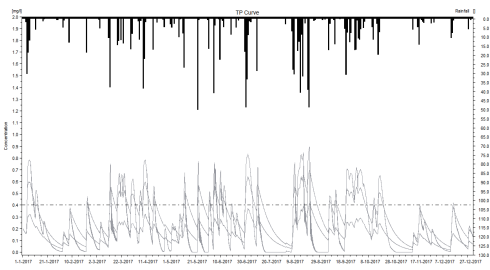


图 10 TP 在全年随时间与降雨量的变化曲线

3.2.2 降雨量对河道达标影响分析

选取夏季 6 月 14 日至 7 月 14 日范围的场次日降雨(含小、中、大雨等几个级别),River1 河道里程 1 500 处断面,以 COD 污染负荷为例,模拟结果见图 11。

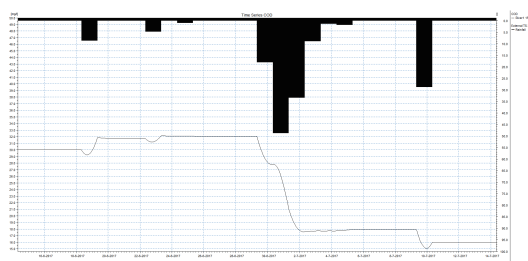


图 11 COD 与降雨量的变化曲线

图 11 展示小雨时河道 COD 浓度升高,随着雨停浓度维持,再降小雨时又略有升高,雨停再维持

(考虑平原河网,短期内降解速度可忽略)。图中雨量达到中到大雨时,COD 浓度明显下降,几天后,又降中雨,COD 浓度继续下降,河道水质进一步转好,雨停后短期内维持模拟结束。随着降雨量的变化可以看出 COD 浓度的变化情况,得出不同降雨量对其河道达标的正向影响。

4 结论与意义

研究得出了各指标的雨量限值。结论可用于推广到该市其余河道,可为该市水系控污治理起到指导作用。建议河道设置初雨截留设施,如遇到降雨超限值的雨天就采取先截留再排放方式控制。降雨径流污染物负荷时空分布特征研究对水系雨量限值的探讨对河道污染预测有重要意义和参考价值。后期研究会针对不同污染负荷在不同降雨场次(小雨、中雨、大雨)下,对河道正向影响出现的拐点的研究,并结合监测做进一步辅助校核。

参考文献:

- [1] 庞立军,程伍群,赵军庆,等.某大学校园及周边不同下垫面降雨径流污染过程研究[J].水电能源科学,2020(3):296.
- [2] 王军霞,罗彬,陈敏敏,等.城市面源污染特征及排放负荷研究——以内江市为例[J].生态环境学报,2014,23(1):151.
- [3] 张士官,焦春蛟,吕谋,等.青岛市李沧工业园区降雨径流污染特征研究[J].人民珠江,2020(3):103-108.
- [4] 朱一松.基于 SWMM 的城市初期雨水污染截流模拟[J].人民长江,2019(2):15-18.
- [5] 赵磊,杨逢乐,袁国林,等.昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟[J].生态学报,2015,35(6):1961-1972.
- [6] 蔡甜,詹健,肖存艳,等.基于 SWMM 模型的不同气象条件下城市雨水径流污染特性分析[J].中国农村水利水电,2017(11):63-67.
- [7] 何胜男,陈文学,廖定佳,等.城市市场降雨径流污染负荷快速估算方法[J].湖泊科学,2021,33(1):138-147.
- [8] 周峰,曹明明,柯凡,等.巢湖流域塘西河上游分流制系统降雨径流污染特征及初期冲刷效应[J].湖泊科学,2017,29(2):285-296.
- [9] 张冬冬,刘冬英,秦智伟,等.HEC-HMS 水文模型在大渡河流域的应用研究[J].人民长江,2018,49(22):108-111.
- [10] 蒋春博,李家科,马越,等.雨水花园对实际降雨径流的调控效果研究[J].水土保持学报,2018,32(4):122-127.
- [11] 陈伟伟,吴晓楷,李自明.城市屋面降雨冲刷污染物变化模型模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):48-51.
- [12] 谢继锋,徐挺,胡志新,等.合肥市校园区降雨径流污染特征研究[J].安徽农业科学,2011,39(11):6720-6721.