

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.021

基于Mike Urban的山地城市管网水质模型构建与率定

张宏宇¹, 李莉¹, 赵志伟¹, 赵正刚², 温夫山¹, 王文婧²,
王维忠², 崔福义¹

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 重庆市豪洋水务建设管理有限公司,
重庆 400020)

摘要: 山地城市在空间环境上较为独特,与平原城市相比,其管网模型有较大不同。针对山地城市特点,以重庆市李家沱污水厂服务片区为例,运用Mike Urban建立管网水力模型,结合不同降雨事件全过程的水质实测数据,构建水力水质耦合模型。采用正交试验法率定,研究各因素对模型质量的影响,并得到较优参数组合。率定后模型对COD、总氮、氨氮、总磷模拟结果的纳什效率系数(NSE)分别达到0.728 8、0.627 1、0.660 1和0.695 9,模型质量显著提高,证明了该率定方法的可行性,对试验区域的污水厂运营有建设性的意义。

关键词: 水质模型; Mike Urban; 合流制污水管网; 山地城市; 率定

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0131-08

Construction and Calibration of Water Quality Model of Mountainous City Pipe Network Based on Mike Urban

ZHANG Hong-yu¹, LI Li¹, ZHAO Zhi-wei¹, ZHAO Zheng-gang², WEN Fu-shan¹,
WANG Wen-jing², WANG Wei-zhong², CUI Fu-yi¹

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Haoyang Water Service and Construction Management Co. Ltd., Chongqing
400020, China)

Abstract: The spatial environment of mountainous cities is unique, and its pipe network model is quite different from that of plain cities. Based on the characteristics of mountainous cities, a pipe network hydraulic model of the service area of Lijiatuo Wastewater Treatment Plant in Chongqing was established by using Mike Urban, and a coupled hydraulic and water quality model was constructed by combining the measured water quality data in the whole process of different rainfall events. The influence of each factor on the quality of the model was investigated by calibration of orthogonal test method, and the optimal parameter combination was obtained. After calibration, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficients (NSE) of COD, total nitrogen, ammonia nitrogen and total phosphorus reached 0.728 8, 0.627 1, 0.660 1 and 0.695 9, respectively, which significantly improved the quality of the model. This paper proves the feasibility of the calibration method, and provides constructive significance for the operation of wastewater treatment plants in the test area.

Key words: water quality model; Mike Urban; combined sewage pipe network; mountainous

city; calibration

2015年,国务院颁布了《水污染防治行动计划》,黑臭水体治理、溢流污染控制等水环境问题被提上日程。控源截污是水环境问题的核心所在,而城市的排水体制对其有很大的影响。我国各地老城区排水体制仍以合流制为主,在分流制系统的建设和改造过程中问题频出,雨污混接现象普遍存在,这导致城市排水管网中的水质水量会受到降雨事件影响而产生较大波动^[1],从而影响污水处理系统的稳定性。为了解决合流制排水系统的问题,除了源头控制和减少污染物排放,还需要精确的数值模型,以确保污水传输系统和储存/处理设施处于最佳运行状态^[2-3]。

山地城市有别于一般的平原城市,在水力水质模型建立的过程中,平原城市一般性模型很难为山地城市模型提供技术参考,而国内关于山地城市管网模型的研究还较少,相关工作开展困难。因此,对山地城市水力水质模型进行研究有极大的实际意义和参考价值。

自2015年国务院颁布关于推进海绵城市建设的指导意见以来,我国学者先后对雨洪模型进行了研究,探究建模过程中各因素对模型质量的影响,并利用模型进行泛洪模拟和内涝分析,研究雨水利用设施对城市洪峰削减的效果^[4-5]。水质模拟方面主要进行了模型机理、污染物生成与降解方面的研究,包括排水管道沉淀物迁移、重力流等模型的构建,以及通过生化试验模拟污水中主要污染物的降解过程^[6-7]。目前,水质模拟研究的验证过程大多在实验室进行,没有与实际水力模型进行耦合,模型率定方法也较为简单,模拟结果的准确性难以得到保证。鉴于此,笔者提出了一种水力水质耦合模型及率定方法,以重庆市李家沱污水厂服务片区为例,建立水力水质模型,研究模型主要参数对模型质量的影响以及山地城市模型特征,并采用正交试验法进行率定,验证模型的准确性。

1 研究方法

1.1 水力模型的选择

本研究选用Mike Urban 2020 update 1,依据巴南区管网普查、控制性规划、实地勘测等数据,建立了李家沱污水厂服务片区的排水管网水力模型。

其中径流采用时间-面积(T-A)模型,管流模型采用圣维南方程组求解。

1.2 管网水质数据监测与分析

1.2.1 降雨事件统计

2021年3月于巴南区李家沱污水厂设置翻斗式雨量计,24 h监测研究区域的降雨数据,包括降雨量、降雨历时、降雨间隔等,监测间隔为5 min。截至2021年10月,记录降雨事件101次,如图1所示。

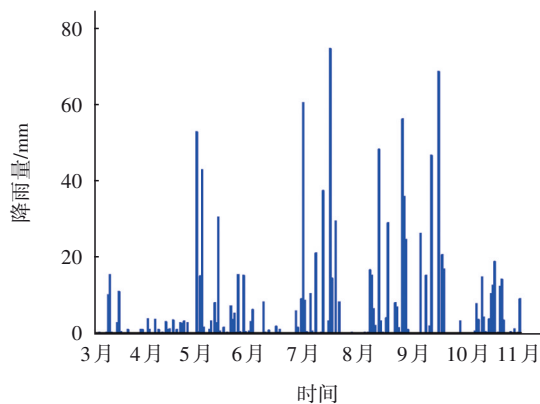


图1 巴南区3月—10月降雨统计

Fig.1 Rainfall statistics from March to October in Banan District

1.2.2 水样采集

依据《降水量等级》(GB/T 28592—2012)对降雨进行等级划分,降雨事件分为小雨、中雨、大到暴雨。在上述101次降雨事件中选取以上3个等级的降雨事件,以及两次24 h降雨量为0的旱季事件,以降雨历时为参照,对污水厂进水进行采样,采样时间间隔为2 h。表1为5次降雨事件,为方便叙述,后文均采用此编号进行描述。

表1 降雨事件

Tab.1 Rainfall events

编号	日期	降雨历时 T/h	降雨量 p/mm	降雨强度 $I/(mm \cdot h^{-1})$	降雨间隔 T_d/d
①	7月5日	0	0	0	0.5
②	3月12日	0	0	0	5
③	4月24日	4	3	2	4
④	5月25日	10	16.2	4.8	1
⑤	7月16日	11	31.2	29.6	0.5

1.2.3 分析方法

水质检测指标为COD、总氮、氨氮、总磷,均采用国标方法测定。

2 研究区域建模

2.1 排水系统概化

李家沱污水厂位于重庆市巴南区李家沱街道西流沱,服务区域为道角以北的长江岸边地区,服务面积约为11.4 km²,共有管道8 000余条,总长约150 km,排水体制为不彻底的分流制排水系统。地形最大高差为23 m,整体呈现城区高、沿江低的特点,管段坡度最大可达4%。经调查,研究区域内有大量雨污混接点,遍布管网的干管、支管,研究区域概化见图2。

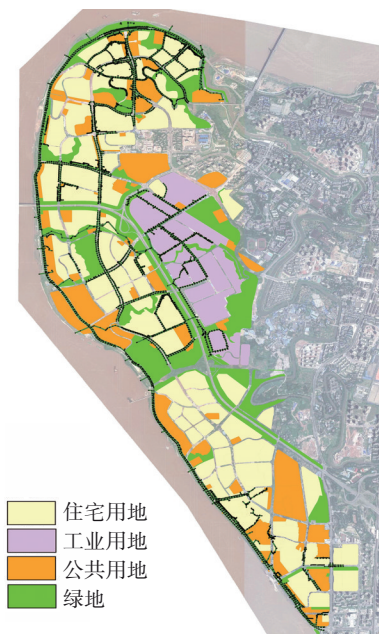


图2 研究区域概化

Fig.2 Generalization of research area

2.2 径流模型

径流模型包括地表产流模型和地表汇流模型。产流入渗模型需根据区域的主要土壤类型进行选择,由于研究区域以紫色土和水稻土为主,因此适宜选用霍顿模型模拟产流入渗过程^[8]。由于山地城市受地形坡度的影响较大,每个子汇水区的划分需要以高程分界点、地形脊线、道路等因素作为依据,汇流方向由坡度决定,其面积、不渗透百分比通过卫星影像图和现状用地图确定^[9]。

2.3 管流水力模型

研究区域为山地城市,管道整体坡度较平原城市大,而大坡度管段占比较低,主要集中在汇入主干管的支管位置。90%以上的管段坡度小于2%,采用圣维南方程组求解的误差在可接受范围内。

依据管网普查图和实地勘察,在模型概化的基础上建立network模型,即动态城市管网水力模型,并将降雨径流模型和污水负载模型与城市管网水力模型相连接。

2.4 水质模型

水质模型描述了管网中污染物的产生与传输过程。管道中污染物主要有两个来源:径流和城市污水。径流中的污染物来源、污染物传输到管网中的过程分别通过地表累积模型和冲刷模型描述;城市污水的污染物来源通过污水负载模型描述,随后直接与管网水力模型相连。本研究选择污水的典型水质指标COD、总氮、氨氮、总磷进行模拟。

2.4.1 地表累积模型

地表污染物的累积与用地类型、绿化、交通、土地裸露程度以及干燥时长、降雨强度、降雨历时等直接相关, Mike Urban中提供的污染物累积模型有3种:幂函数形式、指数函数形式与饱和浸润方程。指数累积模型适用于降水较多、累积时间较短的地区,符合研究区域特征,因此本研究采用此模型。本研究区一方面由于降雨频繁以及地势坡度大,累积量与一般平原城市相比较小;另一方面研究区属于典型山地老城区,下垫面中未城市化区域较大,污染物累积浓度相对较高,因此累积污染物比例的设置需综合考虑实际情况。

2.4.2 冲刷模型

Mike Urban提供的污染冲刷过程有指数冲刷模型、时间平均浓度冲刷模型和性能曲线冲刷模型。相较于另外两种模型,指数冲刷模型同时考虑了污染物累积量和降雨径流量对冲刷的影响,适用于考虑地表污染物累积的情况,故本研究选择指数冲刷模型,如下所示:

$$W = Sq^{E_w} B \quad (1)$$

式中: W 为污染物冲刷量; S 为冲刷系数; E_w 为冲刷指数; q 为单位面积径流量; B 为污染物增长量。平原城市整体冲刷指数一般为1.2~1.7,而山地城市地形高差大、坡度较陡、整体冲刷过程快,其冲刷系数与冲刷指数要大于一般经验值。

2.4.3 污水负载模型

城市污水分为生活污水和工业废水,它们的水质、水量由污水负载模型描述。各污水负载概化为负载点后,以其作为载体将区域内产生的污水水量

及水质信息分配到污水管网中。

2.5 边界条件

2.5.1 集水区负荷

集水区负荷即在区域内影响产汇流的条件负荷,包括降雨边界、集水区流量边界、气温边界以及蒸发边界。降雨边界是为了计算产流,需输入模拟时间内的降雨序列;流量边界是为了计算汇流;气温与蒸发边界相关,蒸发量序列一般采用常数。

2.5.2 管网负荷

研究区域主要包括住宅用地、工业用地、公共用地、绿地等4种主要类型,每种分别对应一个污水负载类型。不同的边界条件对应不同的水质参数设置,包括管道污染物初始值、污染物日变化曲线、边界条件连接类型等^[10]。山地城市可用土地少,建筑密集且比较局促,边界条件连接点位多且复杂。

2.5.3 用水模式

污水负载点的水量日变化需要由其对应负载

类型的用水曲线确定。住宅用地用水特点为一日双峰且白天高于夜晚;工业用地特点为全天平均;公共用地特点为夜间无用水,白天与居民区用水相似;绿地特点为定时均匀出水^[11]。

3 模型率定与验证

模型率定需要实际运行数据的支撑,通过研究5次降雨事件的水质变化过程,分析进厂污水水质特点,以及各因素对进水水质的影响,以此为依据设定因素水平范围,采用正交试验研究各因素对模型的影响,由数值计算结果的极差分析初步获得各因素的较优取值范围,将对模型质量影响最大的因素设置为最佳水平值,再次进行精简因素的正交试验,进一步确定优选水平值,实现模型的率定。

3.1 管网水质评价

对降雨量和降雨间隔不同的5次事件中全过程的COD、TN、氨氮、TP四项污染物指标分别取样检测,变化情况见图3。

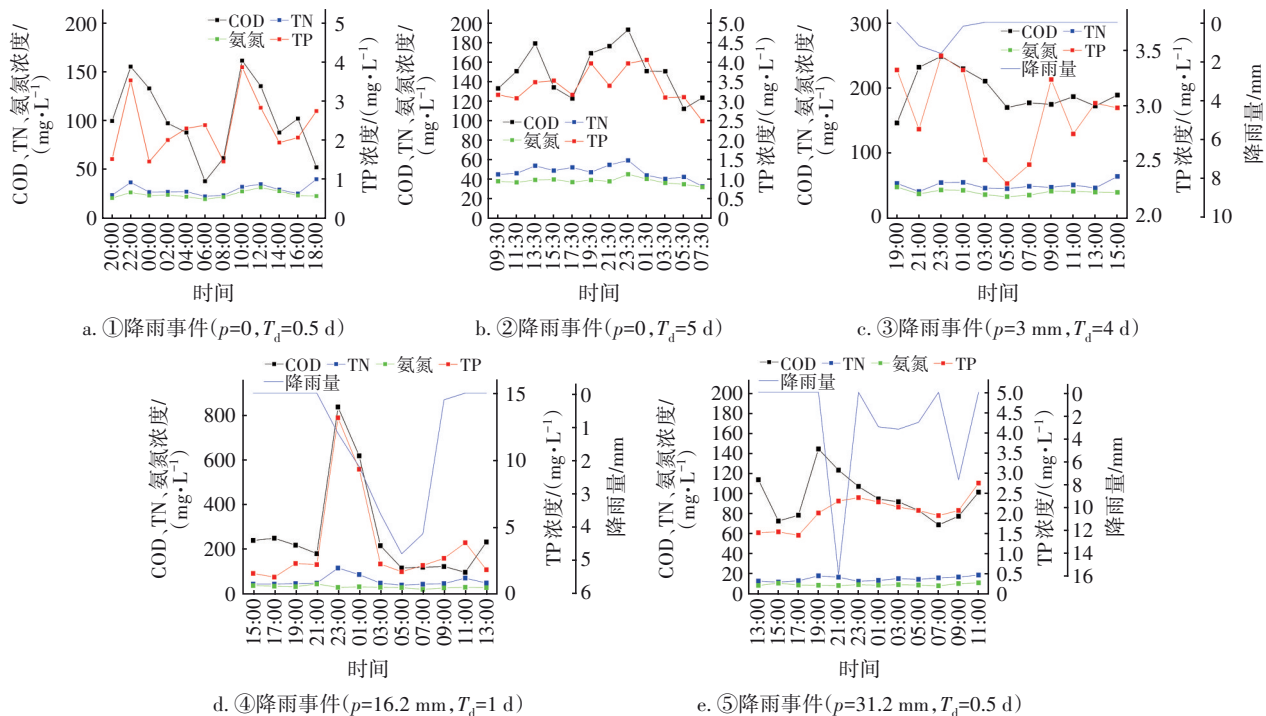


图3 各降雨事件管网水质随时间的变化

Fig.3 Change in water quality of the pipeline network with time for various rainfall events

降雨初期产生的径流污染物与水文模块的初始损失、冲刷指数相关。与旱季污水厂进水相比,降雨时水质有明显的变化。对比②、④降雨事件,就COD而言,其在降雨初期急剧升高,达到800 mg/L以上,这是由于降雨初期产生的径流携带大量地

表累积污染物进入管网。之后随着降雨进行,在2~4 h内回归稳定,其稳定值略小于旱季时COD平均水平,这是由于降雨产生的稀释作用。当降雨间隔较长、降雨量较小时,稀释作用并不明显,COD波动不大;若降雨间隔短,降雨历时长,COD会长时间处

于较低水平,影响生物降解的效果,甚至会导致污水处理系统严重受损、瘫痪。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中指出,初期污染发生在开始降雨至降雨量达到4~8 mm的过程中。考虑管流和冲刷因素,初雨污染物,以COD为例,其峰值应在降雨后45~60 min抵达污水厂,但③、④、⑤降雨事件污染物浓度波峰均提前,这可能是由于山地城市地形高差大,径流冲刷程度较平原城市更猛烈,因此冲刷模型的参数更符合山地城市的特点。

降雨事件的降雨间隔与系统干燥时间决定了降雨发生时系统的干燥程度,影响径流的产生和地表冲刷的过程。在①和②两次降雨事件的时间范围内,均无有效降雨量,其降雨间隔分别为0.5和5 d,且①号事件取样前12 h曾进行过历时为2 h、降雨量为40 mm的强降雨。相比之下,①降雨事件各项指标为②降雨事件的85%左右,这主要是由于①号事件干旱时间较短,系统未完全干燥,土壤渗水和残留雨水对管网中污染物产生稀释效应。④与⑤两次降雨事件均观测到初期雨水污染的现象,但由于前者的降雨间隔长,系统干燥程度更高,雨水容易被污染物附着,因此在降雨初期产生了较大污染,会严重冲击生化系统。相比之下,降雨间隔较短的⑤降雨事件初期只出现了COD小幅上升,并没有造成严重的初雨污染。

城市污水污染物浓度由污水负载模型中用户的污水负荷决定。在旱季时,污水厂进水各项水质指标变化趋势基本一致:①全天有两个高峰点,分别在11:00—13:00和23:00—次日00:00;②夜间各项指标均要低于白天的水平。以此为依据设定污水负载模型的双峰用水曲线,COD为130~195 mg/L、TN为35~63 mg/L、氨氮为34~42 mg/L、TP为2.5~4 mg/L,氨氮与TN的比值在80%左右。

径流污染需要确定地表冲刷物所携带的各污染物比例。在③、④、⑤三次降雨事件中,TN、TP和COD在初雨时均有明显上升,这说明在初雨径流污染中TN、TP与COD具备相关关系。但是氨氮的数值不升反降,说明初期污染包含的总氮中氨氮较少,多为有机氮和硝态氮,地表冲刷物携带氨氮的比例远小于其他污染物^[12]。

3.2 率定与验证

3.2.1 率定参数与方案的确定

模型率定本质上是调整模型的各项参数值,使

得模型的模拟过程和结果与实际情况相符^[13]。影响模型参数的因素有很多,其影响程度各不相同。因此对模型进行正交试验,分析各个参数对模型质量的影响,同时得到模型的最佳参数组合。

水质模型通过水文模块和污染物模块来模拟管网污染物的情况,根据管网水质评价结果,确定需要研究的参数及取值范围。水文模块的主要参数包括:系统干燥时间 T_g ,表示系统完全干燥所需的降雨间隔,取值范围为3~14 d;初始损失 P_1 ,表示降雨初期的径流损失,取值范围为0.002~0.01;冲刷指数 E_w ,表示冲刷模型指数的参数设置,取值范围为1~10。污染物模块的参数主要为模型的边界条件,包括:累积污染物比例 K ,表示地表累积模型中地表冲刷物携带的各污染物比例,取值范围为0~100%;污水负荷 L ,表示在污水负载模型中各污染物的初始负荷。为明确COD、氨氮、TN、TP等4种污染物各自的负荷,因此定义参数污水负荷系数 L_{pk} ,表示实际数值与各污染物默认参数的比例系数,取值范围为0~2。依据我国典型生活污水水质,设定各污染物初始默认浓度:COD、TN、氨氮、TP分别为350、50、43、5 mg/L。

在各污染物单独的水质模拟过程中,共用了水文模块中径流、累积、冲刷模型,因此在各污染物模型的率定结果中,水文模块参数的最优水平应当一致。但污染物模块的两个参数描述的是污染物的具体性质,即边界条件,因此对模型中4种污染物, K 和 L_{pk} 的取值也对应应有4组。模型质量通常采用纳什效率系数(NSE)进行验证,一般而言, $NSE > 0.6$ 则表明模型可信度高,可进行实际应用。

选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行五因素四水平的正交试验(见表2,其中A、B、C、D、E分别为 T_g 、 P_1 、 E_w 、 K 、 L_{pk} 的编码值),以④降雨事件作为边界条件、水质变化曲线作为结果进行模型质量分析。

表2 第一次正交因素水平

Tab.2 Level of the first orthogonal test factors

水平	因素				
	系统干燥时间 T_g (A)/d	初始损失 P_1 (B)	冲刷指数 E_w (C)	累积污染物比例 K (D)/%	污水负荷系数 L_{pk} (E)
1	2	0	0.5	0	0.4
2	6	0.004	3.5	30	0.8
3	10	0.008	6.5	60	1.2
4	14	0.012	9.5	90	1.6

表3为率定试验的16种配置方案,以NSE作为结果,分析各因素对模型质量的影响和规律。

表3 第一次正交试验设置与结果

Tab.3 First orthogonal test arrangements and results

试验序号	因素水平					NSE			
	A	B	C	D	E	COD	TN	氨氮	TP
1	1	1	1	1	1	0.490 9	0.456 2	0.434 8	0.490 9
2	1	2	2	2	2	0.563 6	0.515 6	0.489 3	0.563 6
3	1	3	3	3	3	0.461 6	0.432 2	0.412 8	0.461 6
4	1	4	4	4	4	0.073 6	0.114 7	0.121 8	0.073 6
5	2	1	2	3	4	0.611 8	0.555 1	0.575 5	0.611 8
6	2	2	1	4	3	0.637 3	0.576 0	0.511 3	0.637 3
7	2	3	4	1	2	0.484 4	0.487 3	0.546 7	0.528 9
8	2	4	3	2	1	0.427 3	0.404 2	0.437 2	0.427 3
9	3	1	3	4	2	0.372 4	0.359 3	0.320 5	0.372 4
10	3	2	4	3	1	0.507 1	0.469 5	0.355 3	0.507 1
11	3	3	1	2	4	0.429 3	0.405 8	0.449 8	0.429 3
12	3	4	2	1	3	0.338 4	0.349 6	0.396 0	0.360 7
13	4	1	4	2	3	0.154 9	0.181 3	0.266 2	0.154 9
14	4	2	3	1	4	0.281 8	0.305 1	0.329 7	0.306 2
15	4	3	2	4	1	0.251 6	0.278 5	0.222 0	0.273 8
16	4	4	1	3	2	0.352 2	0.359 1	0.312 5	0.372 2

3.2.2 结果分析与验证

极差反映因素水平变化对指标的影响,极差越大,说明该因素对指标的影响越大。经分析可知,COD、TN、TP模型的影响因素主次顺序为 T_g 、 P_1 、 E_w 、 K 、 L_{pk} ,氨氮模型的影响因素主次顺序为 T_g 、 K 、 E_w 、 P_1 、 L_{pk} 。COD、TN、TP的最优水平组合为 $A_2B_2C_1D_3E_2$,氨氮的最优水平组合为 $A_2B_2C_1D_1E_2$ 。

第一次正交试验得到的NSE均值波动大,极差较大,为进一步优化因素水平,在第一次正交试验结果的基础上设计进行第二次正交试验。第一次正交试验的模拟结果均表明, T_g 在5个因素中对模型率定结果的影响最大,而且 $T_g=6$ d为优水平,因此第二次正交率定试验将 T_g 设置为6 d。表4为选用 $L_9(3^4)$ 正交表设计的四因素三水平率定试验(F 、 G 、 H 、 I 分别为 P_1 、 E_w 、 K 、 L_{pk} 的编码值)。采用相同的数值计算方法得到正交试验计算结果,见表5。

由第二次正交试验分析结果可知,9组方案的模型NSE均值波动不大,极差较小,表明第二次正交试验的准确性有所提高,并可以得到4个因素对各污染物模型的影响主次,其中污染物模块的两个

参数对水质模型的影响更大。COD最优水平组合为 $F_2G_2H_3I_1$,TN、氨氮、TP的最优水平组合为 $F_2G_2H_2I_3$ (其中氨氮的累积污染物比例最优水平值与TN、TP不同)。

表4 第二次正交因素水平

Tab.4 Levels of the second orthogonal test factors

水平		因素			
		初始损失 $P_1(F)$	冲刷指数 $E_w(G)$	累积污染物比例 $K(H)/\%$	污水负荷系数 $L_{pk}(I)$
COD	1	0	0	40	0.6
	2	0.004	2	60	0.8
	3	0.008	4	80	1
总氮	1	0	0	40	0.6
	2	0.004	2	60	0.8
	3	0.008	4	80	1
氨氮	1	0	0	0	0.6
	2	0.004	2	10	0.8
	3	0.008	4	20	1
总磷	1	0	0	40	0.6
	2	0.004	2	60	0.8
	3	0.008	4	80	1

表5 第二次正交试验设置与结果

Tab.5 Second orthogonal test arrangements and results

试验序号	因素水平				NSE			
	F	G	H	I	COD	TN	氨氮	TP
1	1	1	1	1	0.573 1	0.486 8	0.364 8	0.557 3
2	1	2	2	2	0.501 7	0.527 4	0.518 3	0.602 1
3	1	3	3	3	0.600 3	0.550 9	0.540 0	0.628 0
4	2	1	2	3	0.568 7	0.609 5	0.645 6	0.692 6
5	2	2	3	1	0.728 9	0.585 7	0.555 1	0.666 4
6	2	3	1	2	0.540 5	0.472 8	0.502 9	0.541 9
7	3	1	3	2	0.617 8	0.443 8	0.555 7	0.509 9
8	3	2	1	3	0.584 8	0.577 3	0.542 8	0.657 1
9	3	3	2	1	0.515 4	0.534 5	0.513 8	0.609 9

第二次正交试验对应的优选参数如表6所示。

表6 优选参数

Tab.6 Preferred parameters

项目	T_g/d	P_1	E_w	$K/\%$	L_{pk}	$L/(mg \cdot L^{-1})$
COD	6	0.004	2	80	0.6	210
TN				60	1	50
氨氮				10	1	43
TP				60	1	5

得到的优选参数与平原城市模型一般经验值相比,有以下两个特点:

① P_i 偏小(平原城市模型经验值为0.008~0.012), E_w 偏大(平原城市模型经验值为1.2~1.7)。这是由于山地城市地势坡度大,降雨冲刷更猛烈,冲刷模型中 E_w 较大;同时冲刷过程更迅速,导致 P_i 较小,径流产生更快。

② 研究区域为典型的山地城市老城区,未城市化比例较大,土壤以紫色土和水稻土为主,因此与一般经验值相比,优选参数中COD的 K 偏高,而氨氮的 K 则偏低。

根据以上各最优水平组合,重新确定降雨事件的边界条件并进行模拟,计算COD、TN、氨氮、TP模拟结果的NSE,结果见图4。4个指标模拟结果的NSE分别为0.728 8、0.627 1、0.660 1和0.695 9,表明模型对其模拟效果均接近实际情况。

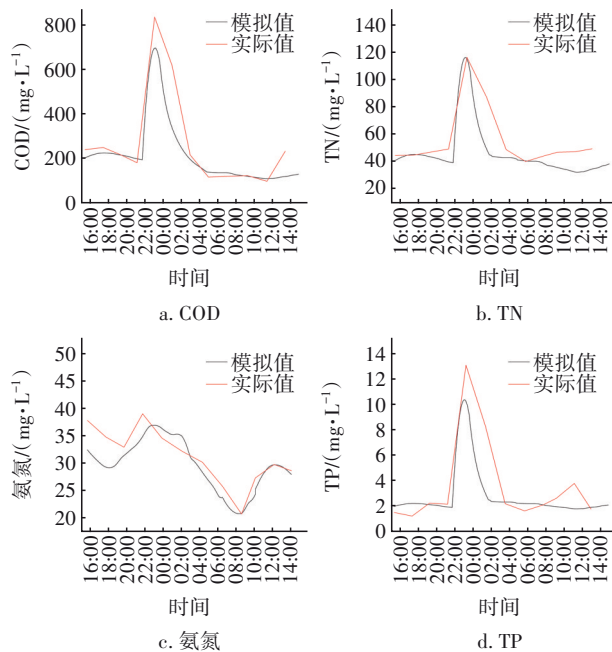


图4 各污染物的模拟结果与实际值

Fig.4 Simulation results and actual values of various pollutants

4 结论

① 以重庆市李家沱污水厂为例建立了污水管网水力模型,并以此为基础建立了包含地表累积模型、冲刷模型和污水负载模型组合而成的水质模块,形成系统的水力水质模型。通过研究多次降雨事件下污水厂进水的水质变化曲线,分析管网水质特征,确定影响水质的主要参数:水文模块中的系统干燥时间 T_g 、初始损失 P_i 和冲刷指数 E_w ,以及污染物模块中累积污染物比例 K 和污水负荷系数 L_{pk} ,

提高率定效率。

② 在水质模型率定中,提出一种以正交试验为基础的模型率定方法,通过同时改变5个模型参数来分析其对模型质量的影响,并得到较优的参数组合方案。其中, T_g 对模型质量影响最大。在剩余的4个参数里,污染物模块参数的影响大于水文模块参数。

③ 率定后得到最优水平组合 $T_g=6$ d, $P_i=0.004$, $E_w=2$, $K_{\text{COD}}=80\%$ 、 $K_{\text{TN}}=60\%$ 、 $K_{\text{氨氮}}=10\%$ 、 $K_{\text{TP}}=60\%$, $L_{\text{COD}}=210$ mg/L、 $L_{\text{TN}}=50$ mg/L、 $L_{\text{氨氮}}=43$ mg/L、 $L_{\text{TP}}=5$ mg/L。相较于一般平原城市的水文模型参数,优选参数的初始损失较小、冲刷指数较大,符合山地城市径流特点。模型COD、TN、氨氮、TP模拟结果的纳什效率系数分别为0.728 8、0.627 1、0.660 1和0.695 9,模型质量显著提高。

参考文献:

- [1] 高学琰,彭海琴,蔡辉艺,等. 分散式截流排水系统的形式及应用探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(2): 6-10.
GAO Xuelong, PENG Haiqin, CAI Huiyi, et al. Discussion on type and application of distributed intercepting drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(2): 6-10(in Chinese).
- [2] 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.
- [3] 王浩正,冯宇,孙文超,等. 城市排水系统模型综述[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 1-10.
WANG Haozheng, FENG Yu, SUN Wenchao, et al. Review of urban drainage system models [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 1-10(in Chinese).
- [4] 言铭,魏忠庆,黄永捷,等. 汇水区划分对InfoWorks ICM水力模拟结果的影响[J]. 中国给水排水, 2019, 35(1): 111-117.
YAN Ming, WEI Zhongqing, HUANG Yongjie, et al. Impact of catchment division on InfoWorks ICM hydraulic simulation [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(1): 111-117(in Chinese).
- [5] 张俊竭. InfoWorks ICM雨洪模型在山地海绵城市建设的应用和实践[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
ZHANG Junjie. InfoWorks ICM Stormwater Models in

- the Application and Practice of Sponge City Construction in Mountainous Cities [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018(in Chinese).
- [6] ASHLEY R M, CRABTREE R W. Sediment origins, deposition and build-up in combined sewer systems [J]. Water Science and Technology, 1992, 25(8):1-12.
- [7] HVITVED-JACOBSEN T, VOLLERTSEN J, NIELSEN P H. A process and model concept for microbial wastewater transformations in gravity sewers [J]. Water Science and Technology, 1995, 31(1):233-241.
- [8] 李天阳,何丙辉,田家乐,等. 重庆璧山5种典型农林混作模式土壤理化性质及水分入渗特性[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 103-108.
- LI Tianyang, HE Binghui, TIAN Jiale, *et al.* Soil physical and chemical properties and soil infiltration characteristics of five agroforestry intercropping types in Bishan, Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 103-108(in Chinese).
- [9] 李昂泽. 基于MIKE FLOOD模型的内涝风险评估及泵站规划方案优选[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
- LI Angze. Waterlogging Risk Assessment and Application of the Pump Station Planning Optimization Based on MIKE FLOOD Model [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).
- [10] 王英. 基于MIKE FLOOD的城区雨洪模拟与内涝风险评估[D]. 邯郸:河北工程大学, 2018.
- WANG Ying. Urban Stormwater Simulation and Waterlogging Risk Assessment Based on MIKE FLOOD [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018 (in Chinese).
- [11] 潘文祥. 城市家庭生活用水特征与过程精细化模拟研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2018.
- PAN Wenxiang. The Study on the Characteristics and Detailed Modelling of Household Water Use in Urban Residential Community [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2018(in Chinese).
- [12] 李曼,曲直,刘佩勇,等. 基于人工降雨的北方城市道路径流污染特征研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(21): 110-114.
- LI Man, QU Zhi, LIU Peiyong, *et al.* Characteristics of urban road runoff pollution in northern city based on artificial rainfall test [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(21): 110-114(in Chinese).
- [13] 袁绍春,李迪,陈垚,等. 基于BP神经网络算法的SWMM参数自动率定方法[J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 125-130.
- YUAN Shaochun, LI Di, CHEN Yao, *et al.* Automatic calibration procedure of storm water management model parameters based on back propagation neural network algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 125-130(in Chinese).

作者简介:张宏宇(1995-),男,河南新乡人,硕士研究生,主要研究方向为城市排水管网模拟。

E-mail:912776713@qq.com

收稿日期:2022-01-11

修回日期:2022-02-18

(编辑:沈靖怡)

加强湖泊管理保护
改善湖泊生态环境
维护湖泊健康生命