

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.05.019

合流制溢流污染调蓄池设计容积数值模拟

邹安平

(中工武大设计集团有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518054)

摘要: 按照现有规范计算雨水调蓄池的容积,无法对调蓄后的截污效果进行有效评估。以SWMM为计算工具,通过数值模拟,可以针对具体的流域分析降雨强度、调蓄池容积对污染物的截留效果。以深圳市龙岗区某流域为研究对象,设定不同强度的初期降雨深度,模拟不同初雨径流流量过程和污染物冲刷过程,并对6种污染物(COD、SS、TN、TP、BOD₅、NH₃-N)累积收集量和调蓄池容积的关系进行数值模拟。结果表明,初雨雨量的差异性对污染物冲刷峰值和总量不具有倍数关系;初期冲刷效应按照递减排序为TN>COD>BOD₅>NH₃-N>SS,TP没有明显的初期冲刷效应;调蓄容积不低于浓度峰值对应的容积,综合考虑多个污染物的控制效果后可以适当放大;本案例中,调蓄池污染物浓度在峰值之后呈现先快后慢的下降趋势,当调蓄容积不超过10 000 m³时,收集效率仍然较高。调蓄池的主要控制对象和目标值不同时,需要综合考虑后确定调蓄容积。

关键词: 合流制溢流; 初期降雨; 调蓄池; SWMM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)05-0116-06

Numerical Simulation of Design Volume of Combined Sewer Overflow Storage Tank

ZOU An-ping

(Shenzhen Branch, Camce Whu Design Group Co. Ltd., Shenzhen 518054, China)

Abstract: It is impossible to evaluate the sewage interception performance accurately after storage if the volume of the storage tank is calculated according to the existing design codes. The effect of rainfall intensity and storage tank volume on pollutant interception in a specific watershed was analyzed through numerical simulation of SWMM. Initial rainfall depth with different intensities was set, and the flow process and pollutant flush process of different initial rainfall runoff in a watershed of Longgang District, Shenzhen were simulated. In addition, the relationship between the accumulated collection amount of six pollutants (COD, SS, TN, TP, BOD₅ and NH₃-N) and the storage tank volume was calculated through numerical simulation. The difference of initial rainfall had no multiple relationships between the peak value and the total amount of pollutants. The flush effect of initial rainfall in descending order was TN, COD, BOD₅, NH₃-N and SS, and the initial rainfall had no obvious flush effect on TP. The storage capacity should not be less than the volume corresponding to the peak concentration, and it could be appropriately amplified after considering the control efficiency of multiple pollutants. In this case, the concentration of pollutants in the storage tank decreased rapidly at first and then slowed down after the peak value. When the storage capacity was less than 10 000 m³, relatively high collection efficiency was still obtained. When the main control object and target value of the storage tank are different, the storage volume should be determined after a comprehensive consideration.

Key words: combined sewer overflow (CSO); initial rainfall; storage tank; SWMM

初期降雨径流挟带的污染物较多,如果管网的输送能力或污水厂的净化能力有限,无法应接入初雨的合流污水,那么对初雨径流和污水合流产生的溢流污水需要收集调蓄,再送入污水厂处理。由于系统的复杂性、污染物传输及溢流过程的随机性,加上降雨的随机性,确定调蓄池的容积是关键,因此研究初雨径流的流量和水质变化过程,对高效利用调蓄容积削减径流污染十分重要。

目前已有不少采用实测数据和数值模型进行调蓄容积的研究。利用排水管网水力模型,可以分析不同截流倍数与调蓄规模下溢流控制设施的长期运行效果。例如,张勤等^[1]以实测数据为基础,建立了截流倍数与外排量的函数关系,作为调蓄池容积计算的基础。对于采用调蓄池解决内涝问题,杨伟伟等^[2]发现基于数学模型的调蓄容积远大于传统方法确定的调蓄容积,原因是传统方法只考虑了短历时暴雨峰值流量对调蓄容积的影响。邵泽岩等^[3]对类似问题做了不同重现期下的比较,却发现不同重现期下两种计算方法的大小关系可能会不一样。对同一问题的研究结论不一致,进一步反映了问题的复杂性。另外,张勤等^[4]应用SWMM对LID措施与雨水调蓄池联合运行下的污染物削减情况进行模拟研究,而传统的经验法是无法满足构筑物联合运行情况模拟的。熊子鹰等^[5]以芝加哥雨型作为设计降雨,通过模拟典型降雨工况时调蓄池的工作过程,结合排放目标确定调蓄池容积,并用于工程设计。多方研究表明,数值模型的优势是可考虑一些复杂多变的情况,如降雨过程、下垫面的空间变异性、管网的差异性等,模型法比传统经验法更为可信,而且可以用于不同工况条件下的模拟。

为了有效削减初期降雨径流污染,同时控制调蓄池的规模,笔者针对研究案例,通过设定不同降雨工况,模拟不同初雨径流的流量和污染物的冲刷量,为合理确定调蓄池容积提供依据。主要研究目标有:①分析全流域整体上有无明显的初期冲刷现象。虽然初期径流污染一般在较小的流域范围内显得比较明显,但是目前对较小流域并无一个明确的界限。②分析不同初雨条件下溢流污水的流量和不同污染物的浓度变化过程,为最佳设计容积

的确定提供依据。③比较不同污染物在初雨冲刷过程中变化的差异性。

1 建立模型

1.1 研究区域概况

研究区域位于深圳市龙岗区,总汇水面积为1 086.72 hm²。现有的排水系统为合流制,溢流井上游是一条部分修整的天然沟渠(断面尺寸为6 m×4 m)充当合流干管。无降雨时,本区域收集到的污水量为4×10⁴ m³/d,全部通过截流干管(DN1 500)进入污水厂;有降雨时,污水和雨水径流的混合污水在超出截流干管输送能力(0.6 m³/s)时,多出的部分溢流进入调蓄池,雨后再将池中的混合污水抽排至污水处理厂。本研究利用SWMM作为模型计算工具,研究区划分为81块子汇水区域,各子汇水区域的面积为1.3~194 hm²,共设置41个管道节点,管段有40根。图1为研究区域SWMM模型平面示意。

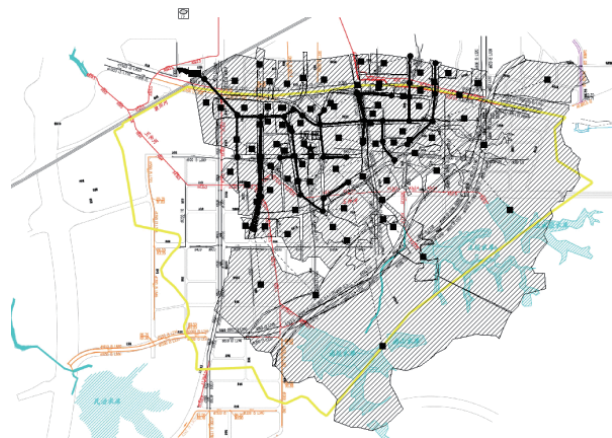


图1 研究区域SWMM模型平面示意

Fig.1 Schematic diagram of SWMM model of study area

居民区、绿地、商业区、工业区、道路、水库下垫面的面积分别为271.61、467.71、76.03、100.57、119.97、50.83 hm²,合计1 086.72 hm²。模型中水文参数:N-Imperv为0.015,N-Perv为0.15,Dstore-Perv为6.35 mm,Dstore-Imperv为2 mm,Max Infil. rate为3 mm/h,Min Infil. rate为0.43 mm/h,Decay constant为4 h⁻¹,Initial Buildup为Yes。

1.2 污染物冲刷模型

污染物随降雨径流被冲刷的过程用SWMM中的指数冲刷函数模拟。污染指标包括:COD、SS、

TN、TP、BOD₅、NH₃-N,土地类型分为居民区、工业区、商业区、道路、绿地等5种,参数选取依据SWMM模型用户手册和深圳市对地表径流调查研究的成果。选取的指数冲刷模型见式(1)。

$$W = C_1 q^{C_2} B \quad (1)$$

式中: W 为污染物冲刷量, kg/h; C_1 为冲刷系数; C_2 为冲刷指数; q 为单位面积上的径流, mm/h; B 为污染物累积量, 按照单位面积最大污染负荷与面积的乘积计算, kg。

以SS为例, 累积和冲刷参数见表1。

表1 SS的累积和冲刷参数

Tab.1 Buildup and flush parameters of SS

项目	单位面积最大污染负荷 $M/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	冲刷系数 C_1	冲刷指数 C_2
居民区	13.83	0.045	0.95
工业区	31.81	0.025	1.20
商业区	29.78	0.506	0.50
道路	30.18	0.057	1.01
绿地	16.27	0.004	1.20

1.3 降雨过程对冲刷的影响

如果具有多年详细的降雨资料, 可以利用排水管网水力模型分析调蓄池对合流制排水系统溢流污染的年削减率^[6]。但是在很多工程实践中, 详细的降雨资料难以获取。因此, 作为替代方法, 可选取不同强度的代表性降雨过程进行模拟计算。

在降雨总量和平均降雨强度不变的前提下, 各时段雨量分配(降雨过程)对污染物冲刷总量会有一定影响, 影响程度需通过模拟计算来评估。由于雨型是针对暴雨而言, 而非中小降雨, 因此需要对各种雨强下的均匀降雨和假设的随机降雨与真实降雨的冲刷效果进行对比。

本研究选取了7场实测降雨资料, 雨强涵盖了小雨到暴雨, 在每场降雨总量和持续时间不变的情况下, 选取道路为单一的代表性下垫面, 利用SWMM对真实降雨过程、假设的均匀降雨过程和5种假设的随机降雨过程分别进行模拟计算, 然后以真实降雨过程对SS的冲刷量为基准, 计算假设的几种降雨过程产生的误差, 结果见表2。可以看出, 无论是均匀降雨还是随机降雨, 对SS冲刷量计算的最大误差为-5.71%, 误差整体都比较小。对其他污染指标的试算也表明, 不同降雨过程下的相对误差都不大, 因此可以近似认为降雨总量不变, 降雨过程

不同时, 污染物冲刷量的差别不大。

表2 SS冲刷量误差

Tab.2 Errors of SS flush

项目	历时/min	总降雨量/mm	最大误差/%	平均误差/%
小雨1	140	2.5	-3.25	-2.68
中雨1	195	9.5	-1.16	-1.11
中雨2	345	10.5	-2.26	-2.10
大雨1	590	20.5	-2.94	-2.88
大雨2	100	17.5	-5.71	-5.34
暴雨1	195	45.0	-1.40	-1.31
暴雨2	390	50.5	-0.87	-0.78

1.4 模型计算初始条件

污水量: 合流管渠中的平均日污水量为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 最高日最高时污水流量为 636 L/s。

污水水质: 参照该区域污水厂实测的进水污染物平均浓度作为污水管渠系统的入流水质, 具体水质: SS 为 189 mg/L, COD 为 307 mg/L, BOD₅ 为 176 mg/L, TP 为 4.76 mg/L, NH₃-N 为 28.38 mg/L, TN 为 33.56 mg/L。

降雨深度: 从《室外排水设计规范》规定的初期 4~8 mm 降雨适当扩展到 10 mm 降雨都进行模拟试算。降雨量分为 4 种工况, 即 4、6、8、10 mm/1.5 h。

降雨时间及雨型: 一般地, 按照降雨时间确定的初雨, 在工程应用中通常不超过 1 h。但是为了在更长时间范围内分析问题, 同时也为了保证研究区域的全部汇流最终都能到达调蓄池, 因此设定的初雨深度为 4~10 mm, 这部分降雨持续时间为 1.5 h。考虑径流的滞后性, 模型分析的时间范围为 4 h。根据深圳河流域 24 h 设计暴雨雨型, 取其起始 4 h 各个时段的降雨所占比例作为初期降雨雨型, 初期降雨过程线如图 2 所示(步长为 5 min)。

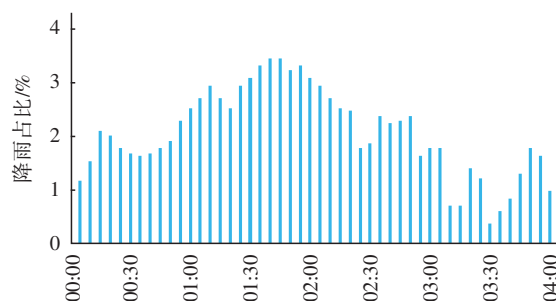


图2 初期降雨过程线

Fig.2 Initial rainfall hydrograph

就 1.5 h 内产生 4~10 mm 初期降雨来看, 设定的降雨基本属于中雨量级, 但是也不排除这部分初

期降雨是暴雨的一部分。根据1.3节的分析,降雨过程的变化对污染物冲刷的影响很小,因此无论初期降雨是否属于暴雨的一部分,都采用4 h初期降雨过程线。

1.5 调蓄池容积确定的原则与标准

确定调蓄池最佳有效容积并无统一标准。一般地,需要综合考虑截留的污染物总量和相应的容积,同时考虑最佳性价比(截留污染物浓度最高)。依靠增加容积来截留更多的污染物,从经济性和通常的用地条件来看,并不可取。一场降雨的雨强通常整体上先上升后下降,因此雨水径流和混合污水浓度也基本呈现先升后降的过程。

确定调蓄池容积的原则应该是:①保证调蓄池中的污染物浓度尽可能高;②污染物浓度在下降过程中已趋于缓慢,此时扩大调蓄量对增加接纳污染物的效应较弱。因此,调蓄池入流过程不仅要涵盖浓度的峰值时刻,而且要在浓度下降时段适时停止接纳混合污水。

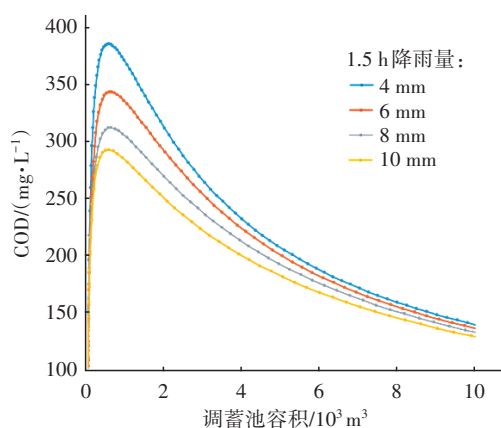
由于不同污染物的原始积累量和冲刷函数不同,即使在同一场降雨过程中,不同污染物浓度出现峰值的时间和变化的快慢也不一样,在确定调蓄容积时,要根据不同污染物情况综合作出选择。

2 模型计算

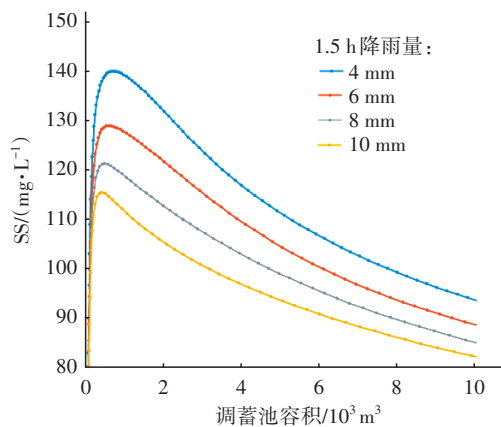
2.1 模拟结果分析

利用SWMM对4种不同降雨工况下的产流和汇流以及调蓄池的污染物浓度和累积量进行模拟,如果只考虑起始1.5 h降雨产生的影响,且将关注的时间段适当延长到2 h,根据降雨量的不同,所需的调蓄池容积大约为8 500~36 300 m³。从调蓄池内污染物浓度的变化情况看,当调蓄容积≤10 000 m³时,多数污染物(TP除外)浓度都已经出现明显下降,如图3所示。本研究中调蓄池容积按照不超过10 000 m³考虑。从图3可知,初雨雨量对污染物冲刷的峰值和总量都有一定影响,但是差异并不具有倍数关系。除TP外,其余各项污染指标都有一定的初期冲刷效应,按照递减排序为TN>COD>BOD₅>NH₃-N>SS。调蓄池中各种污染物浓度(TP除外)的峰值都出现在1 000 m³之前,峰值之后浓度下降先快后慢。当调蓄池有效容积低于10 000 m³时,整体收集效率(污染物浓度)相对较高,超过10 000 m³之后收集效率明显较低且变化缓慢。调蓄池中TP浓度在降雨

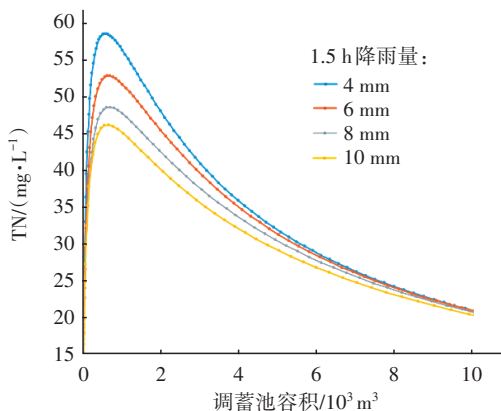
初期出现峰值,雨强对TP浓度峰值的影响不大;峰值之后快速下降,接着又开始缓慢上升,出现第二个峰值。快速出现第一个峰值的主要原因是混合污水中初期污水比例高、雨水径流比例小,污水中的TP对溢流污水浓度起决定性作用,因此数值较高。TP出现第二个峰值是径流冲刷和污水混合作用的结果。如果将入流污水TP浓度在模型中设为0,则第一个峰值消失。



a. COD浓度-调蓄容积关系



b. SS浓度-调蓄容积关系



c. TN浓度-调蓄容积关系

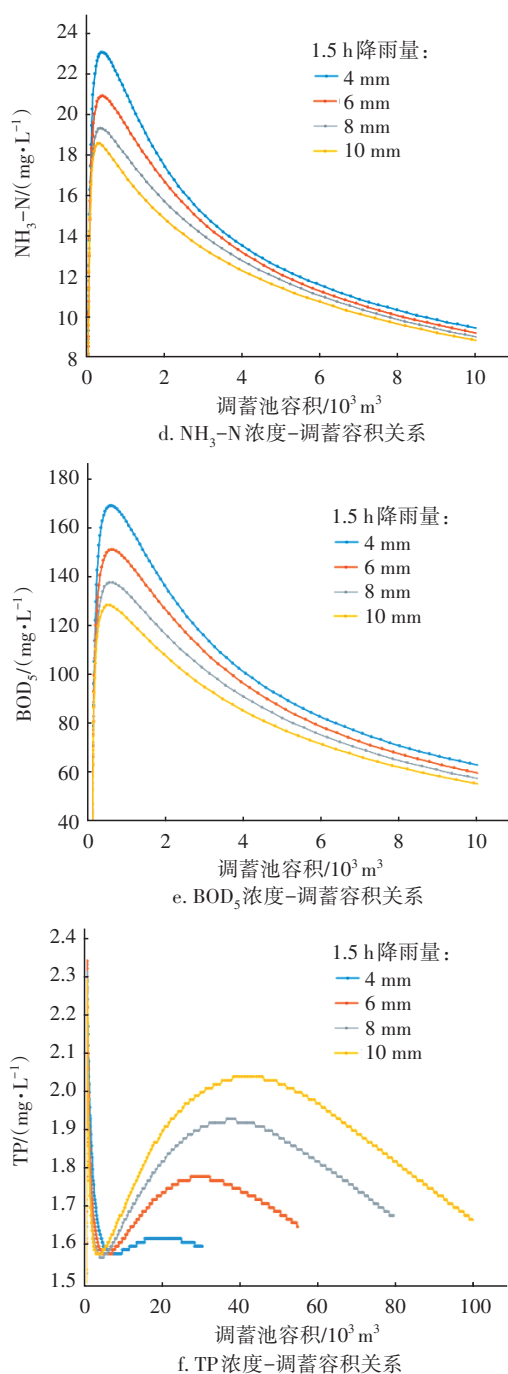


图3 污染物浓度-调蓄容积关系曲线

Fig.3 Relationship curves between pollutant concentration and storage volume

另外,TP第二个峰值的出现明显比其他污染指标晚一些,原因是TP与其他污染指标的冲刷函数取值差别较大。式(1)中,TP在居民区、工业区、商业区、道路对应的 C_1 和 C_2 分别取为0.02和1.7,绿地对应的 C_1 和 C_2 分别取为0.01和1.2。

进一步分析,TP的模拟结果与其他指标的变化

趋势差异较大,主要是因为TP冲刷函数中的冲刷系数 C_1 和冲刷指数 C_2 与其他污染物指标在这两个参数上相差很大。其中,以道路为例,TP的冲刷系数 $C_1=0.02$,其余指标的 C_1 都在2.1~5.2之间,二者相差2个数量级;TP的冲刷指数 $C_2=1.7$,其他指标 C_2 的数量级分布在0.001和0.1,二者也相差1~3个数量级。其实,类似于表1的表格有6个,即每种污染物指标都有一个这种表格,但是限于篇幅,没有全部列出,只列举了SS。TP的初期冲刷现象不明显,从机理上分析可能是磷多以难溶或溶解度较小的形态存在。

2.2 调蓄池容积的确定

为了避免不同降雨强度和降雨量对污染物冲刷的差异性,设定10 000 m^3 调蓄容积所接纳的污染物总量为1,比较不同容积下各种污染物的相对截污量,结果见表3。

表3 不同调蓄容积对应的相对截污量

Tab.3 Relative pollution interception ratio corresponding to different storage capacity

调蓄容积/ m^3	调蓄池相对截污量/%					
	COD	SS	TN	TP	BOD_5	$\text{NH}_3\text{-N}$
2 000	40.5 ~	26.9 ~	41.1 ~	20.4 ~	40.1 ~	35.0 ~
	45.3	28.3	46.3	22.7	43.0	37.1
4 000	61.9 ~	46.8 ~	62.8 ~	37.6 ~	61.1 ~	55.3 ~
	66.7	49.7	68.4	41.3	63.9	57.0
6 000	78.6 ~	66.8 ~	79.5 ~	58.1 ~	77.7 ~	72.4 ~
	80.0	67.2	81.7	59.1	77.8	73.3
8 000	91.0 ~	84.2 ~	92.0 ~	79.3 ~	89.8 ~	87.0 ~
	91.7	86.1	92.3	80.8	91.3	89.2

从表3可以看出,数据的区间范围很窄,因此初期雨量的差异性对相对截污量的影响不大;同一调蓄容积对不同污染物的截污量差异较大,因此在确定调蓄容积时需区分不同污染指标的重要性,即确定主要污染控制指标。如果评判调蓄池的标准是最优性价比(即截污浓度最高),那么针对不同的控制指标,调蓄容积对应于不同的浓度峰值。本案例中不同降雨量、不同污染物指标对应的具体容量不同,当以COD(截污量为13.7%~16.5%)、SS(截污量为5.8%~14.0%)、TN(截污量为15.7%~18.6%)、 BOD_5 (截污量为11.6%~14.7%)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (截污量为7.3%~10.2%)为主要控制指标时,对应的调蓄容积分别为600~660、350~700、600~750、420~580、300~

430 m³。峰值后的浓度尽管有所下降,但是在容积增长的一定范围内,污染物浓度依然较高,因此实际工程中可以在模型计算的基础上适当放大调蓄容积。由于TP的峰值出现在调蓄容积为25 000~50 000 m³之间,因此为了截留更多的磷而大幅增加调蓄容积,在性价比方面不一定合适,这需要通过其他措施截留、去除混合液或污水中的磷。

如果建调蓄池是为了达到一定的截污量,可以按照10 000 m³调蓄容积所接纳的污染物总量为基准,参考表3确定调蓄容积;如果场地和经费较充足、截污目标更高,可以根据已经建立的模型对图3的系列曲线在调蓄容积方向延长,按照同样的方法进行分析。

3 结论

① 初雨雨量对污染物冲刷峰值和总量都有影响,但差异性并不具有倍数关系。

② 污染物的初期冲刷效应按照递减排序为TN>COD>BOD₅>NH₃-N>SS, TP没有明显的初期冲刷效应。本案例中调蓄池的TP浓度出现过两次峰值,第一个峰值主要来源于污水,第二个峰值是径流冲刷和污水混合作用的结果,出现得较晚。TP与其他污染物指标变化过程差别较大,主要原因是冲刷函数取值差别较大。

③ 调蓄池中各种污染物浓度(TP除外)峰值对应的调蓄容积有一定的差异,但是本案例中的峰值都出现在1 000 m³之前。如果确定调蓄容积的主要目标是性价比最优(截污浓度最高),那么对于不同的污染控制指标,调蓄池设计容积对应于浓度峰值附近。实际工程中,可以综合考虑多个指标,取各种峰值对应的最大容积,并在模型计算的基础上适当放大调蓄容积。

④ 本案例中调蓄容积在峰值之后,污染物浓度下降先快后慢,在调蓄容积≤10 000 m³时,收集效率仍较高,之后收集效率明显降低且变化缓慢。

⑤ 建设调蓄池的主要控制对象和目标值不同时,需要综合考虑后确定调蓄容积。

参考文献:

- [1] 张勤,李慧,刘阳,等. 合流制排水系统溢流调蓄池容积计算方法初探[J]. 中国给水排水, 2015, 31(23): 139-141.

ZHANG Qin, LI Hui, LIU Yang, *et al.* Research on volume calculation of rainwater storage tank in combined sewer system[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23): 139-141 (in Chinese).

- [2] 杨伟伟,刘绍根,李卫华,等. 基于数学模型的雨水调蓄计算[J]. 中国给水排水, 2016, 32(15): 136-138, 142.

YANG Weiwei, LIU Shaogen, LI Weihua, *et al.* Calculation of rainwater storage based on mathematical model[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(15): 136-138, 142 (in Chinese).

- [3] 邵泽岩,冯燕. 基于SWMM的雨水调蓄池容积研究[J]. 工业用水与废水, 2017, 48(4): 47-50.

SHAO Zeyan, FENG Yan. Study on volume of rainwater storage pool based on SWMM [J]. Industrial Water & Wastewater, 2017, 48(4): 47-50 (in Chinese).

- [4] 张勤,陈思飘,蔡松柏,等. LID措施与雨水调蓄池联合运行的模拟研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(9): 134-138.

ZHANG Qin, CHEN Siyao, CAI Songbai, *et al.* Simulation of LID measures combined with stormwater detention tank [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9): 134-138 (in Chinese).

- [5] 熊子鹰,肖存艳,蔡甜,等. 基于SWMM的初期雨水调蓄池容积确定及截污效能模拟[J]. 水电能源科学, 2019, 37(1): 36-39.

XIONG Ziyang, XIAO Cunyan, CAI Tian, *et al.* Study on volume determination and pollution effectiveness simulation of initial rainwater storage tank based on SWMM[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(1): 36-39 (in Chinese).

- [6] 陈贻龙. 调蓄池削减合流制溢流污染的水力模拟研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(17): 123-128.

CHEN Yilong. Hydraulic simulation of reducing combined sewer overflow pollution by storage tank [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(17): 123-128 (in Chinese).

作者简介:邹安平(1973—),男,湖南澧县人,硕士,给水排水高级工程师,主要研究方向为城市排水工程规划与设计。

E-mail:59813052@qq.com

收稿日期:2020-08-05

修回日期:2020-09-04

(编辑:任莹莹)