

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.18.002

辅助设计CSO调蓄池的动态模拟工具

张磊¹, 杨卫国², 王浩正¹, 刘龙志¹, 刘智晓³, 刘绪为¹,
黄荣¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 烟台市城市排水服务中心, 山东 烟台 264001; 3. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044)

摘要: 基于非线性水库模型和霍顿入渗模型,对合流制系统进行有限差分演算,实现合流制溢流的动态模拟。采用模块化原则进行有限差分算法设计,通过输入模块预设合流制汇水区水文属性、调蓄池设计参数、气象数据等,利用模拟综合模块模拟汇水区产汇流、调蓄池入流和排空、截流系统溢流,使用统计模块划分降雨场次,统计场次溢流事件和溢流量。利用优化模块对不同调蓄规模的合流制系统进行动态模拟,绘制成本效益曲线,得出拐点规模,结合控制目标,优化调蓄池规模,从而为合流制溢流污染削减方案提供辅助设计方法和工具。

关键词: 合流制溢流; 调蓄池; 非线性水库模型; 霍顿入渗模型; 辅助设计; 成本效益

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2022)18-0006-07

A Dynamic Simulation Tool for Aided Design of CSO Storage Tanks

ZHANG Lei¹, YANG Wei-guo², WANG Hao-zheng¹, LIU Long-zhi¹, LIU Zhi-xiao³,
LIU Xu-wei¹, HUANG Rong¹

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Yantai Urban Drainage Service Center, Yantai 264001, China; 3. Beijing Capital Eco-Pro Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the nonlinear reservoir model and Horton infiltration model, the combined sewer overflow was simulated dynamically by using finite-difference algorithm for the combined system. The modular principle was adopted to design the finite-difference algorithm. Through the input module, the parameters were preset, including the catchment hydrological attributes, the design parameters of storage tank, meteorological data, etc. The integrated module was used to simulate the runoff of the catchment, the inflow and emptying of the storage tank, and the overflow of the intercepting system. The statistical module was used to divide the rainfall events and obtain the overflow events and overflows. By using the optimization module, the combined system with different storage volume was simulated dynamically. The cost-benefit curves were drawn. The volume at the inflection point was obtained, and the storage volume was optimized combined with the control objectives. Thus, it can provide an aided

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(2019-K_174); 中国建设科技集团科技创新基金资助项目(Z2019J02); 中国市政工程华北设计研究总院科研课题(ZHY-2020-44-ZHSW)

通信作者: 张磊 E-mail: mumu.zhang@outlook.com

design method and tool for developing the reduction scheme of pollution resulted from the combined sewer overflow.

Key words: combined sewer overflow; storage tank; nonlinear reservoir model; Horton infiltration model; aided design; cost-benefit

合流制溢流(CSO)是城市水环境质量恶化的重要原因之一,为了控制CSO污染,各国探索了不同的治理方法。调蓄池是其中常见的工程措施,通过提高系统截流能力,减少合流制溢流量,同时结合沉淀、撇渣等功能,可有效削减CSO污染。国内外调蓄池容积的计算方法通常有两类:经验公式法和基于数学模型的模拟方法^[1-4],前者以调蓄时间、脱过系数或面积负荷为设计目标^[5],进行调蓄容积的经验公式计算,后者通过建立合流制系统水文、水力模型,利用场次或连续降雨模拟CSO,确定满足设计目标的调蓄容积。但是经验公式法无法进行调蓄过程的动态模拟,而模型法通常需要大量的基础数据,导致很多项目无法满足条件,因此需要一种具有过程计算、简化模拟功能的调蓄池辅助设计工具。

1 调蓄池辅助设计工具基本原理

基于非线性水库模型和霍顿入渗模型,利用场次或连续降雨进行水文径流模拟,通过设置调蓄池容积和排空规则,动态模拟调蓄池入流、排空过程,统计设计调蓄容积下场次溢流事件和溢流量,作为调蓄池规模确定的依据。

1.1 非线性水库模型

非线性水库模型作为雨水管理模型(SWMM)中采用的水文算法,将汇水区概化为具有较浅水深的矩形地表,该地表具有统一的坡度、宽度和径流出口。降雨*i*扣除损失(蒸发*e*和入渗*f*)后,剩余的超量降雨可增加地表水深*d*,其中超过洼蓄*d_s*的部分形成该汇水区的径流*q*,如图1所示。

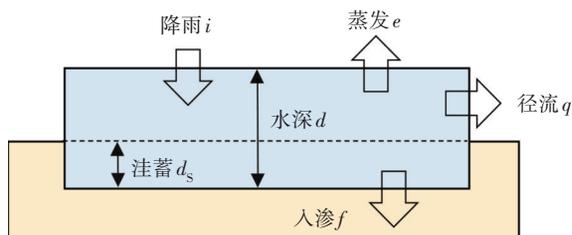


图1 非线性水库模型结构示意图

Fig.1 Structure diagram of nonlinear reservoir model

地表水深*d*随时间*t*的变化净值是汇水区输入通量(降雨*i*)与输出通量(蒸发*e*、入渗*f*和径流*q*)的差值,计算公式如下:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (1)$$

径流量*q*可利用地表径流曼宁公式得出:

$$q = \frac{WS^{1/2}}{An} (d - d_s)^{5/3} \quad (2)$$

式中:*A*为汇水区面积,m²; *n*为汇水区曼宁系数; *W*为汇水区特征宽度,m; *S*为汇水区坡度。

1.2 霍顿入渗模型

霍顿入渗模型基于常见的地表入渗模拟机理,由一组经验方程组成,用于预测地表入渗能力和累积入渗能力随时间的变化。

当有降雨形成地表入渗时,计算公式如下:

$$f = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty})e^{-k_d t} \quad (3)$$

$$F = f_{\infty} t + \frac{f_0 - f_{\infty}}{k_d} (1 - e^{-k_d t}) \quad (4)$$

式中:*F*为*t*时刻的累积入渗能力,m; *f_∞*为最小入渗能力,m/s; *f₀*为最大入渗能力,m/s; *t*为入渗时间,s; *k_d*为入渗衰减系数,s⁻¹。

当无降雨形成地表入渗时,土壤处于干燥过程,计算公式如下:

$$f = f_0 - (f_0 - f_{\infty})e^{-k_r(t-t_w)} \quad (5)$$

式中:*t_w*为假设在降雨结束后的入渗能力恢复曲线中*f*为*f_∞*时的时间,s; *k_r*为入渗恢复系数,s⁻¹。

1.3 CSO调蓄池设计计算原理

假定合流制系统满足非线性水库模型应用条件,汇水区的透水地表和不透水地表同一时刻接收相同的输入降雨强度和潜在蒸发强度。两类地表不同之处在于透水地表存在地表入渗,需利用霍顿入渗模型确定其入渗速率。在明确蒸发强度和入渗速率后,从降雨强度中扣除二者,即得超量降雨。如超量降雨不足以填满地表洼蓄,则无法形成地表径流,否则可利用龙格库塔四阶算法求解非线性水库方程和地表曼宁公式的联立方程,以得到地表径流量。在明确两类地表的径流量后,乘以各自面积

的权重因子,以计算汇水区的总径流量。该总径流量扣除截污管道剩余能力后,即为调蓄池入流量。调蓄池在接收入流后,池内液位不断上升,达到最高液位后,调蓄池入口关闭,合流制系统发生溢流。调蓄池排空泵可设置开启规则(随时开启或降雨间隔期内开启),满足开启条件时,排空泵将池内水体泵送至下游截污管道,而后进入污水厂或CSO处理设施。

2 辅助设计工具

2.1 工具结构

辅助设计CSO调蓄池的动态模拟工具采用Python程序设计语言实现算法,在设计算法逻辑时,此辅助设计工具主要分为输入模块、计算模块、调蓄池模拟综合模块和输出与统计模块,具体见图2。

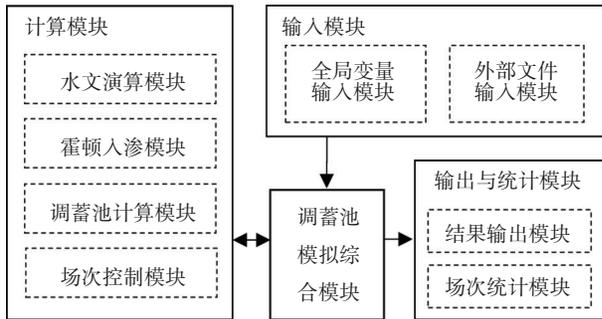


图2 CSO调蓄池辅助设计工具各模块结构示意图

Fig.2 Structure diagram of the modules in aided design tool of CSO storage tank

① 输入模块:负责用户指定的设计参数全局变量和外部时间序列文件的输入。

② 计算模块:包括水文演算模块、霍顿入渗模块、调蓄池计算模块和场次控制模块,各子模块的功能分别为汇水区水文演算、透水区入渗速率计算、调蓄池各流量分配以及降雨场次划分和调蓄池控制规则设置。

③ 调蓄池模拟综合模块:负责整合输入模块和计算模块,并将计算结果传递至输出与统计模块。

④ 输出与统计模块:负责输出模拟结果时间序列和统计各流量与场次CSO。

2.2 算法逻辑

在调用调蓄池模拟综合模块前,需调用输入模块对CSO调蓄池模拟所需全局变量进行预设。

① 合流制汇水区参数:面积(area)、宽度(width)、坡度(slope)、不透水比例(imperv)、透水区曼宁系数(nperv)、不透水区曼宁系数(nimperv)、透水区注蓄(ds perv)、不透水区注蓄(ds imperv)。

② 入渗参数:最大入渗速率(f_0)、最小入渗速率(f_{in})、入渗衰减系数(k_d)、干燥天数($ddry$)、最大入渗量(F_{max})。

③ 气象数据:月均潜在日蒸发强度($evap_{jan}$ 、 $evap_{feb}$ 、 $evap_{mar}$ 、 $evap_{apr}$ 、 $evap_{may}$ 、 $evap_{jun}$ 、 $evap_{jul}$ 、 $evap_{aug}$ 、 $evap_{sep}$ 、 $evap_{oct}$ 、 $evap_{nov}$ 、 $evap_{dec}$)、降雨时间序列($dict_{prec}$)。

④ 截污管道参数:剩余截污能力($pot_{intercept}$)。

⑤ 调蓄池设计参数:设计容积(volume)、排空时间($evac_{time}$)、控制规则($ctrl_{rule}$,若为1,则在降雨间隔期内排空;若为0,则随时排空)。

⑥ 降雨场次划分参数:场次间隔期($event_{interval}$)、场次降雨扣除量($event_{min}$)。

⑦ 差分计算参数:时间步长(dt)。

在调用计算模块时,需定义局部变量,进行局部参数的保存与更新。部分模块逻辑流程如下:

① 水文演算模块:超量降雨(ix)、地表水深(d)、地表径流(q)、动态时间步长(dtx)、地表注蓄(ds)。模块逻辑流程见图3。

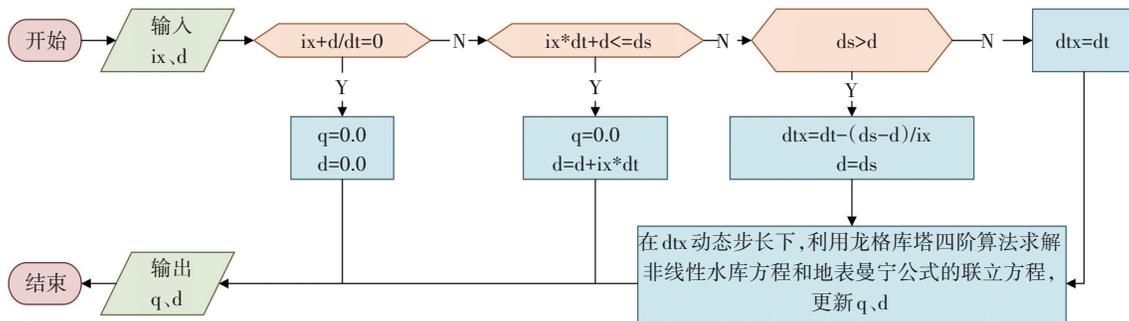


图3 水文演算模块算法逻辑流程

Fig.3 Logical flow chart of hydrological routing module algorithm

② 霍顿入渗模块:地表可利用水量(avail_moist)、入渗等效时间(tp)、入渗恢复系数(kr)、入渗时间(t)、入渗速率(f)、tp对应的累积入渗能力

(Fp)、下一步长入渗时间(t1)、t1对应的累积入渗能力(F1)、入渗能力(fp)。模块算法逻辑流程图见图4。

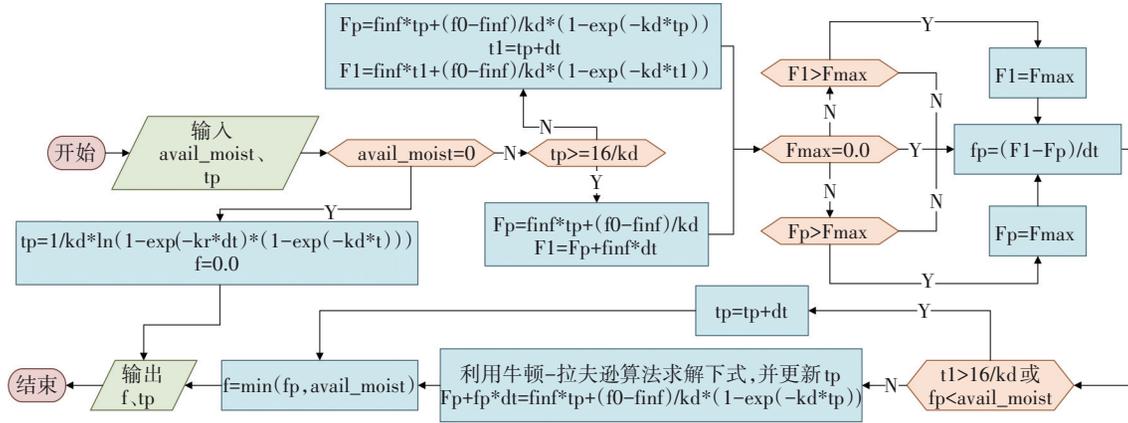


图4 霍顿入渗模块算法逻辑流程

Fig.4 Logical flow chart of Horton infiltration module algorithm

③ 调蓄池模拟综合模块:汇水区降雨强度数组(catchment_prec[]),汇水区入渗速率数组(catchment_infil[]),汇水区蒸发强度数组(catchment_evap[]),汇水区径流量数组(catchment_runoff[]),截流量数组(intercept[]),调蓄池入流量数组(inflow[]),调蓄池排空流量数组(pump_flow[]),合流制溢流量数

组(overflow[]),不透水区水深(dimperv)、透水区水深(dperv)、降雨强度(perc)、透水区蒸发强度(evap_perv)、不透水区蒸发强度(evap_imperv)、透水区入渗速率(infil_perv)、透水区径流量(runoff_perv)、不透水区径流量(runoff_imperv)。模块算法逻辑流程图见图5。

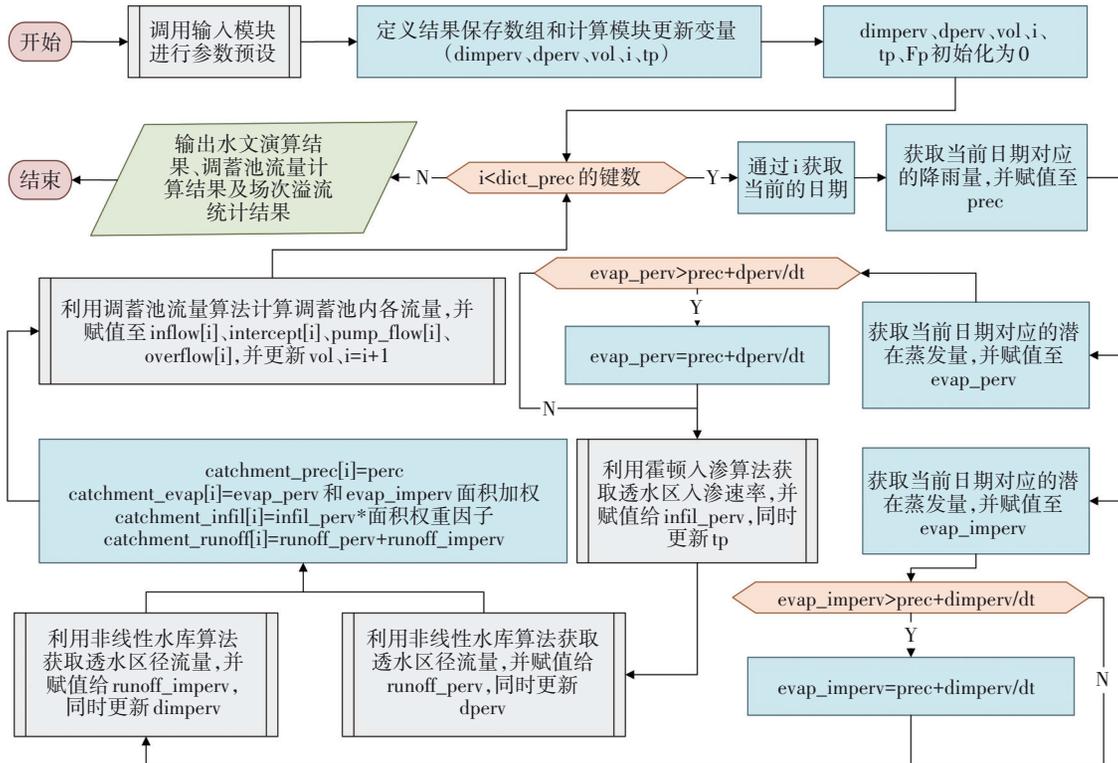


图5 调蓄池模拟综合模块算法逻辑流程

Fig.5 Logical flow chart of storage tank integrated simulating module algorithm

④ 调蓄池计算模块: 汇水区径流量(runoff)、调蓄池水量(vol)、入流量(inflow)、截流量(intercept)、排空流量(pump_flow)、排空能力(pot_pump)、溢流量(overflow)。模块算法逻辑流程见图 6。

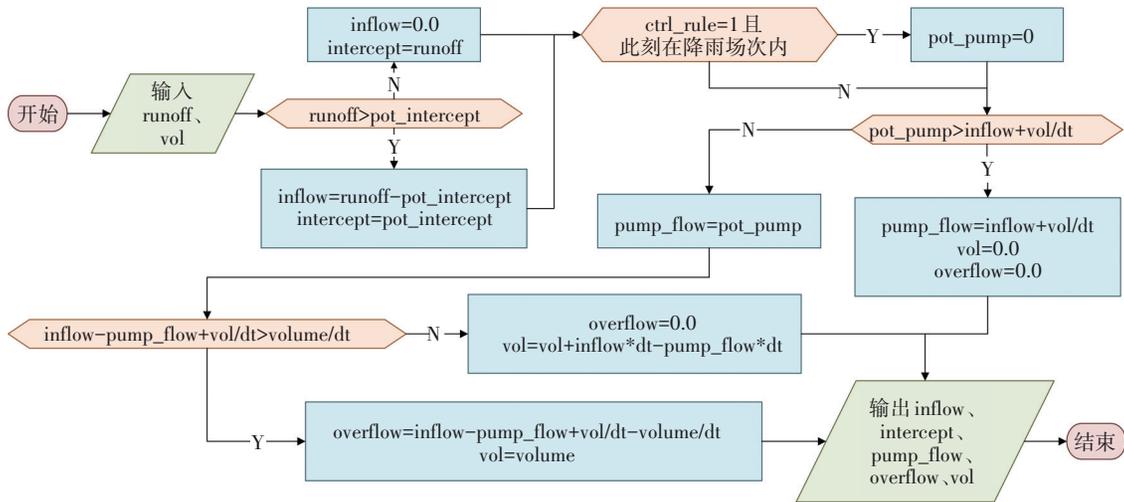


图 6 调蓄池计算模块算法逻辑流程

Fig.6 Logical flow chart of storage tank calculation module algorithm

上述变量的单位均为基本单位,实际录入时可根据惯例预设,计算时进行单位转化。

3 计算示例

3.1 示例概述

以某地太阳桥箱涵合流制系统(汇水面积总计 4.1 km²)为例。该系统内合流污水通过道路现状合流管道向中间汇集并排入太阳桥箱涵,最终通过截流井接入末端截污干管,超过截污能力后溢流至下游明渠。

3.2 模拟参数设置

① 合流制系统汇水区: 面积为 4.1 km²; 特征宽度为 41 000 m; 坡度为 0.3%; 不透水比例为 55%; 透水地表曼宁系数为 0.5; 不透水地表曼宁系数为 0.2; 透水地表注蓄为 5.0 mm; 不透水地表注蓄为 2.5 mm。

② 霍顿入渗参数: 最大入渗速率为 25.4 mm/h; 最小入渗速率为 5.0 mm/h; 入渗衰减系数为 4.0 h⁻¹; 干燥天数为 7.0 d; 不限制最大入渗量。

③ 气象数据: 潜在日蒸发强度为 3.96 mm/d (也可按月输入)。

④ 截污管道参数: 截污管道的剩余能力为 0.6 m³/s。

⑤ 调蓄池: 容积为 18 000 m³; 排空时间为 24 h; 控制规则为降雨间隔期排空。

⑥ 降雨场次划分: 降雨间隔期为 2.0 h; 场次

降雨扣除量为 2.0 mm。

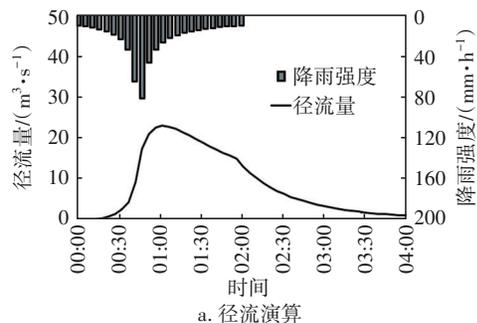
⑦ 降雨参数: 场次降雨采用 1 年一遇 2 h 降雨历时的芝加哥雨型, 场次降雨模拟结束时间延迟至降雨结束后 2 h; 连续降雨采用当地 2014 年平水年 5 min 间隔降雨数据。

⑧ 差分计算参数: 有限差分计算时间步长为 5 min。设置的时间步长需满足柯朗-弗里德里希斯-列维(CFL)条件, 以增加运算稳定性^[6], 也就是时间步长须小于波的传播时间, 即小于汇水区的集水时间。根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定, 城镇地面集水时间一般采用 5~15 min。建议在应用此辅助设计工具时, 时间步长最大设置为 5 min, 以收敛计算结果。

3.3 模拟结果

3.3.1 场次降雨模拟结果

场次降雨情况下汇水区径流演算及溢流计算流量过程线见图 7。



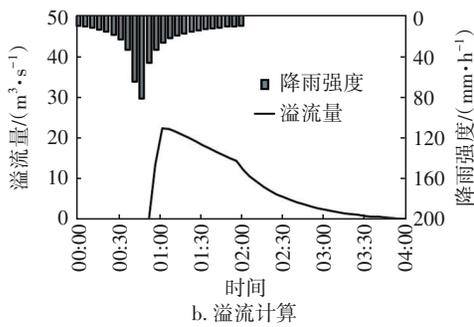


图7 场次降雨情景下径流演算及溢流计算流量过程线
Fig.7 Flow hydrograph of runoff routing of catchment and overflow calculation during individual rainfall

① 汇水区水文演算结果:降雨量为 $19.55 \times 10^4 \text{ m}^3$, 蒸发量为 $0.28 \times 10^4 \text{ m}^3$, 入渗量为 $4.47 \times 10^4 \text{ m}^3$, 径流量为 $12.51 \times 10^4 \text{ m}^3$, 地表最终蓄水量为 $2.32 \times 10^4 \text{ m}^3$, 连续性误差为 -0.16% 。

② 调蓄池流量计算结果:截流量为 $0.82 \times 10^4 \text{ m}^3$, 入流量为 $11.69 \times 10^4 \text{ m}^3$, 排空量为 $0.16 \times 10^4 \text{ m}^3$, 调蓄池最终蓄水量为 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, 合流制溢流量为 $9.73 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3.3.2 连续降雨模拟结果

2014年连续降雨情景下径流演算及溢流计算流量过程线见图8。

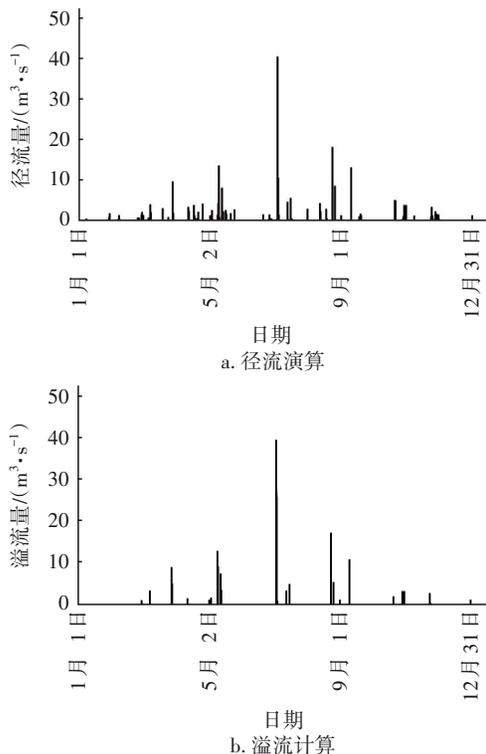


图8 连续降雨情景下径流演算及溢流计算流量过程线
Fig.8 Flow hydrograph of runoff routing of catchment and overflow calculation during continuous rainfall

① 汇水区水文演算结果:降雨量为 $567.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, 蒸发量为 $97.92 \times 10^4 \text{ m}^3$, 入渗量为 $231.05 \times 10^4 \text{ m}^3$, 径流量为 $238.82 \times 10^4 \text{ m}^3$, 地表最终蓄水量为 0.00 m^3 , 连续性误差为 -0.03% 。

② 调蓄池流量计算结果:截流量为 $104.42 \times 10^4 \text{ m}^3$, 入流量为 $134.40 \times 10^4 \text{ m}^3$, 排空量为 $50.23 \times 10^4 \text{ m}^3$, 调蓄池最终蓄水量为 0.00 m^3 , 合流制溢流量为 $84.17 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

③ CSO频次统计结果:溢流场次为19场,溢流总量为 $84.17 \times 10^4 \text{ m}^3$, 场次区间划分统计误差为 0.00% 。

3.4 CSO调蓄池成本效益分析

调蓄池对CSO的削减量随其容积的增加而增大,但其边际效益会逐渐减小,超过一定阈值后,为实现溢流量或溢流频次的进一步削减则需更大规模的投资。因此,在预算有限的情况下,尽量选取成本效益曲线拐点处的调蓄容积作为设计规模,若尚未满足CSO削减目标或水环境质量要求,则考虑新增其他能实现控制目标且成本较低的辅助方案。

针对上述计算示例,在模拟算法中配置不同规模的调蓄池容积 $[(0 \sim 20) \times 10^4 \text{ m}^3]$, 模拟得出不同容积下此合流制系统溢流量、溢流削减率和溢流频次,结果如图9所示。

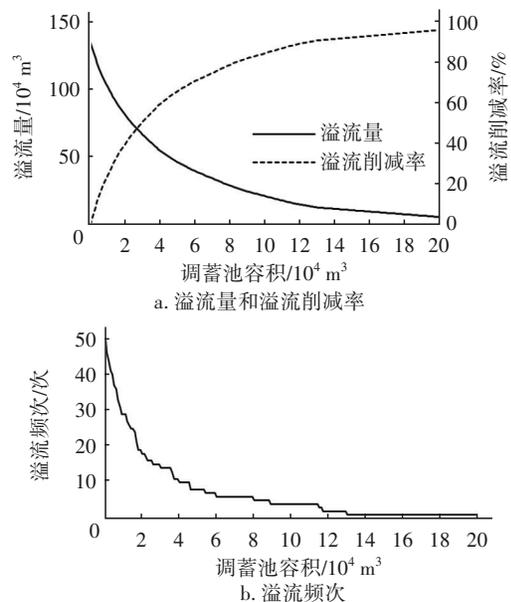


图9 CSO调蓄池成本效益曲线
Fig.9 Cost-benefit curve of CSO storage tank

当调蓄池容积为 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右时,三条成本效益曲线(溢流量、溢流削减率和溢流频次)从近似

直线段拐向坡度较缓的曲线段,可认为此处为“拐点”。

3.5 其他应用场景

此辅助设计工具采用模块化设计原则,以功能块为单元进行模块设计,设计好各模块的输入和输出的处理过程,可以使程序的调试和维护更为简单,便于模块的增加和修改,且可进行模块的重新排列组合,满足不同的综合功能需求。因此,此工具算法不限于上述计算示例,通过功能模块的拓展或调整,可实现如下应用场景:

① 最佳管理措施或低影响开发设施的模拟:包括干塘、湿塘、雨水罐、人工湿地、渗塘等。

② 水质净化设施的模拟:在增加水质模块后,可实现具有净化功能的设施(如湿地、调蓄池、滤池、水力旋流器等)对污染物的削减模拟。

③ 雨水回用设施的模拟:预测蓄水量及概化雨水收集系统,模拟优化系统所需回用设施规模。

4 结论

① 基于非线性水库模型和霍顿入渗模型,构建算法模块,利用场次或连续降雨输入数据,进行合流制系统有限差分演算,以实现CSO动态模拟。

② 通过预设合流制系统模拟参数(合流汇水区水文属性、调蓄池设计参数、气象数据、截污管道剩余能力、场次划分参数、有限差分步长等),结合算法模块,模拟汇水区降雨-蒸发-入渗-径流过程和调蓄池入流、排空过程以及截流系统CSO,利用场次分析结果统计场次溢流事件和溢流量。

③ 对不同CSO调蓄池规模的合流制系统进行动态模拟,得出调蓄池容积与溢流量、溢流削减率及溢流频次的关系曲线,分析边际效益,得出拐点规模,结合控制指标和成本效益,优化CSO削减方案,为CSO调蓄池的设计提供辅助方法和工具。

④ 此辅助设计工具支持长期连续降雨模拟,也支持单场次降雨事件模拟,建议尽量采用典型年或多年连续降雨进行辅助设计。

⑤ 除调蓄池外,本工具对所有具有调蓄功能

的设施如湿地、滞留塘等,均可用于辅助设计,后续还可增加水质模块和用水量分析模块,用于具有在线或离线调蓄和净化功能的设施、雨水回用设施的动态模拟及辅助设计。

参考文献:

- [1] MANTEGAZZA S A, GALLINA A, MAMBRETTI S, *et al.* Designing CSO storage tanks in Italy: a comparison between normative criteria and dynamic modelling methods [J]. *Urban Water Journal*, 2010, 7 (3): 211-216.
- [2] STIRRUP M, MARCHANT D. Simulation of a combined sewer overflow storage tank [J]. *Journal of Water Management Modeling*, 2002. DOI: 10.14796/JWMM.R208-17.
- [3] AYUSO A, HEINEMAN M C. Long-term continuous SWMM modeling of combined sewers [J]. *Journal of Water Management Modeling*, 1998. DOI: 10.14796/JWMM.R200-05.
- [4] FIELD R, O'CONNOR T P. Optimization of CSO storage and treatment systems [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(3): 269-274.
- [5] 张善发. 城镇排水系统溢流与排放污染控制策略与技术导则[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(18): 31-35. ZHANG Shanfa. Strategy and technical guidelines for urban sewer overflow and discharge pollution control [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(18): 31-35 (in Chinese).
- [6] CAMPISANO A, GULLOTTA A, MODICA C. Using EPA-SWMM to simulate intermittent water distribution systems [J]. *Urban Water Journal*, 2018, 15 (10): 925-933.

作者简介:张磊(1989-),男,安徽滁州人,硕士,工程师,主要从事城市水环境及治理方案综合模拟工作。

E-mail:mumu.zhang@outlook.com

收稿日期:2020-07-09

修回日期:2020-08-13

(编辑:丁彩娟)