

南方某城市雨水调蓄湿地工程设计与优化运行

骆春会, 黄 荣

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074)

摘 要: 为了消除区域内涝、改善溢流污染情况, 南方某城市开展了雨水调蓄湿地工程项目的设计, 为提高设计结果的合理可靠性, 通过充分调研和收集研究区域的地形、用地、管网等资料, 采用公式法和数学模型法相结合的方法进行了该区域雨水调蓄湿地规模和雨水泵站规模的设计, 并通过合理设计设施的运行规则, 使研究区域满足30a一遇内涝防治要求, 并达到溢流污染控制的目标。可为同类工程设计提供有价值的参考。

关键词: 雨水调蓄湿地; 雨水泵站; 公式法; 数学模型法; 排水防涝

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0172-05

Engineering Design and Optimizing Operation of Rainwater Storage Wetland in a Southern City

LUO Chunhui, HUANG Rong

(North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: In order to eliminate the regional waterlogging and improve the overflow pollution, the design of rainwater storage wetland project is carried out in a southern city. To enhance the reasonable reliability of the design result, and by fully investigating, surveying and collecting the terrain, land use, pipeline network and other data in the study area, a combination of formula method and mathematical model method is used to design the scale of the rainwater storage wetland and the scale of the rainwater pumping station in the area. And by rationally designing the operation rules of the facilities, the study area can meet the requirements of waterlogging prevention and control once every 30 years and achieve the goal of overflow pollution control, which can provide the valuable reference for the design of similar projects.

Keywords: rainwater storage wetland; rainwater pumping station; formula method; mathematical modeling method; drainage and waterlogging prevention

0 引 言

目前我国部分城市排水系统由于建设标准较低、管理不到位等原因存在较严重的溢流污染、内涝积水等问题^[1-3], 基于此, 相关地区逐渐开展城市排水防涝、水环境治理等项目。为了消除内涝和黑臭水体, 提升和长效保持末端水体水质, 南方某城市即开展了水系统综合治理工程, 致力于实现水系统优化与提质增效以及水环境改善的目标。本研究区域雨水调蓄湿地工程属于水系统综合治理工程的一部分, 通过雨污分流改造以及雨水调蓄湿地和雨水泵站工程的建设, 且通过合理设计设施的运行规则, 提高设施利用率, 从而对区域径流雨水及合流制溢流

进行有效收集、调蓄和净化, 达到消除内涝和黑臭水体的目标。该雨水调蓄湿地工程项目对于改善水环境、保障水安全以及提升居民生活幸福感方面都具有重要意义。近年来, 国内外学者对雨水调蓄设施的水力特性与生态效益进行了深入研究^[4-6, 16], 同时海绵城市建设理念的推广为城市雨水管理提供了新思路^[7-8, 17]。

1 研究区域概况

研究区域的总面积约104 hm², 现状为雨污合流制, 旱天污水截流至污水泵站, 雨天超量合流污水溢流入明渠, 最终排入下游水体。由于明渠下游排水不畅, 导致雨天明渠黑臭且区域低洼点会产生大量积水。为解决现状问题, 拟在有条件的片区实施雨污分流改造, 同时将区域低点原有鱼塘进行改造, 因地制宜建设雨水调蓄湿地, 并将其分为溢流控制塘

收稿日期: 2025-04-16

作者简介: 骆春会(1994—), 女, 硕士, 工程师, 从事市政给排水设计工作。

(以下简称“小塘”)和雨水调蓄塘(以下简称“大塘”),湿地内安装曝气装置和水质净化装置,维持和保护湿地内水生态系统,保障出水达标排放。

规划后研究区域分为A、B、C三个子片区,见图1,其中A、C片区为分流制,B片区仍为合流制,大塘承接A片区来水,小塘承接B片区来水。两个塘之间通过溢流堰和连通管连接,雨水调蓄湿地下游管道承接C片区来水,末端水体常水位高于管道底部高程,下游管道一直处于淹没状态,为了防止该片区出现内涝情况,保障居民安全,在管网改造的基础上,还需合理设计雨水调蓄湿地和雨水泵站规模,以及设施的运行规则。

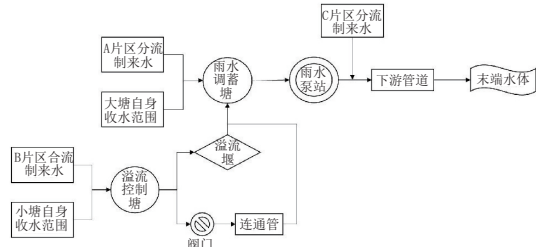


图1 规划后研究区域排水设施连接关系

2 技术路线

研究区域工程建设目标主要为新建雨水调蓄湿地和雨水泵站,使泵站排水能力和调蓄湿地规模能有效应对该城市30 a一遇降雨,以防止服务片区内发生内涝灾害。本研究技术路线(见图2),通过进行资料调研,充分收集研究区域现状信息,拟采用公式法和数学模型法相结合的方法设计雨水调蓄湿地和雨水泵站规模。公式法即根据《城镇雨水调蓄工程技术规范(GB 51174—2017)》^[9](以下简称“规范”)计算调蓄湿地容积;数学模型法即构建该区域排水管网、泵站、下垫面等耦合模型,并进行模型率定,然后模拟分析不同泵站规模所需的雨水调蓄湿地容积。通过对比分析公式法与数学模型法的计算结果,并根据现场情况确定调蓄湿地容积以及雨水泵站规模,最后合理设计调蓄湿地和泵站的运行规则,使其满足排水防涝要求。

3 降雨条件

根据规范,设计降雨历时应符合下列规定:

- (1)宜采用3~24 h较长降雨历时进行试算复核,并应采用适合当地的设计雨型;
- (2)当缺乏当地雨型数据时,可采用附近地区的资料,也可采用当地具有代表性的一场暴雨的降雨

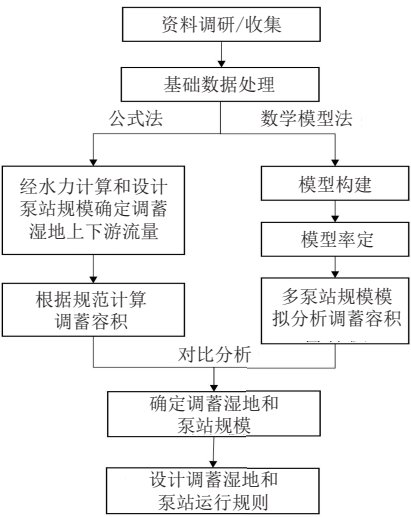


图2 研究技术路线

历程。

基于此规定以及研究区域的内涝防治目标,本次采用30 a一遇24 h长历时降雨雨型进行雨水调蓄湿地和雨水泵站的设计。

根据该市气象局对降雨量的推求结果,30 a一遇最大日降水量为224.30 mm,本次设计即采用此降雨量。采用当地暴雨雨型作为长历时降雨雨型,最终30 a一遇24 h降雨雨型见图3。

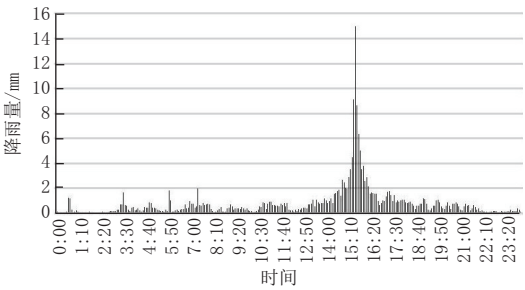


图3 30 a一遇24 h长历时降雨雨型

4 公式法

雨水调蓄湿地主要用于削减峰值流量和控制服务范围内初期雨水径流污染,考虑到初期雨水收集与峰值雨水收集完全处在不同时间段,因此调蓄湿地的有效容积分为两部分进行计算。

(1)用于径流污染控制所需调蓄容积

根据规范,计算用于控制面源污染的初期雨水调蓄池规模,按下式计算:

$$V = 10 D F \psi \beta$$

式中: V 为调蓄有效容积, m^3 ; D 为单位面积调蓄深度, mm ,本项目取8 mm; F 为汇水面积, hm^2 ,本项目约为74 hm^2 ; ψ 为综合径流系数,本项目取0.65; β 为安全系数,本项目取1.5。

根据上述参数,计算得出径流污染控制所需调蓄容积为5 772.00 m³。

(2)用于削减峰值流量所需调蓄容积

根据规范,当调蓄设施用于削减峰值流量时,调蓄量的确定有条件按流量过程线,条件所限按脱过系数法。

应根据设计要求,通过比较雨水调蓄工程上下游的流量过程线,按下式计算:

$$V=\int_0^T[Q_i(t)-Q_o(t)]dt$$

式中:V为调蓄有效容积,m³;Q_i为调蓄设施上游设计流量,m³/s;Q_o为调蓄设施下游设计流量,m³/s;T为降雨历时,min。

当缺乏上下游流量过程线资料时,可采用脱过系数法,按下式计算:

$$V=\left[-\left(\frac{0.65}{n^{1.2}}+\frac{b}{t}\frac{0.5}{n+0.2}+1.10\right)\cdot\log(\alpha+0.3)+\frac{0.215}{n^{0.15}}\right]\cdot Q_i t$$

式中:V为调蓄有效容积,m³;B为暴雨强度公式参数,本项目为7.3;n为暴雨强度公式参数,本项目为0.598;α为脱过系数,取值为调蓄设施下游和上游设计流量之比;t为降雨历时,min,不计延缓系数。

内涝防治重现期P=30 a,经雨水管渠水力计算,雨水调蓄设施上游最大来水流量约为17.24 m³/s。假设调蓄设施下游设计流量为3、5、7 m³/s,经过计算,30 a一遇降雨重现期下削减峰值流量所需的调蓄容积分别为45 616.35、35 409.05、27 039.96 m³,见表1。

表1 不同泵站规模对应调蓄容积

方案	脱过系数a	上游最大来水流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	泵站流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	调蓄容积/ m ³
1	0.17	17.24	3	45 616.35
2	0.29	17.24	5	35 409.05
3	0.41	17.24	7	27 039.96

(3)结论

在30 a一遇降雨重现期下,泵站规模为3、5、7 m³/s时,所需总调蓄容积分别为51 388.35、41 181.05、32 811.96 m³。

5 数学模型法

5.1 模型构建

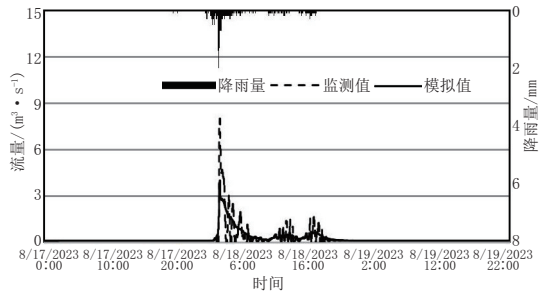
利用测绘资料录入现状管网和下垫面属性数据,并根据收集整理的雨水调蓄湿地上游排水管网

设计数据完善排水管网模型,并作合理而必要的简化,如删除雨水篦子,提高模型软件运算效率,降低流量演算误差。研究显示,SWMM模型在复杂管网模拟中具有显著优势^[10,18-19],其参数率定方法已被广泛验证^[11,20]。因此本研究应用PCSWMM软件构建模型,结果见图4。

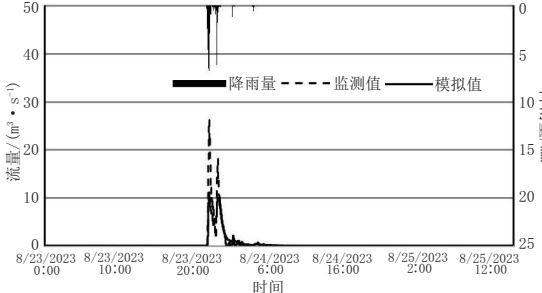


图4 模型构建结果

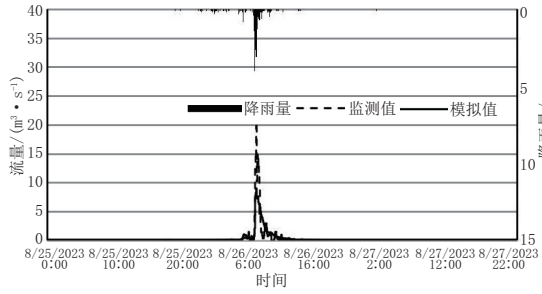
模型已根据多场降雨监测数据进行率定,纳什效率系数分别为0.68、0.78、0.73(见图5),均大于0.5,率定结果满足《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程(T/CECS 647—2019)》^[12]中的规定。



(a) 8月17日降雨率定



(b) 8月23日降雨率定



(c) 8月26日降雨率定

图5 模拟数据与监测数据率定结果

5.2 调蓄湿地规模设计

假设下游泵站规模为 3、5、7 m³/s,模拟 30 a 一遇 24 h 降雨重现期下所需的调蓄湿地容积,模拟结果见表 2,泵站规模为 3、5、7 m³/s 时,所需调蓄容积分别为 45 412.91、34 677.05、27 826.28 m³。

表 2 不同泵站规模模拟结果

泵站规模/ (m ³ ·s ⁻¹)	调蓄容积			峰值流量	
	大塘/m ³	小塘/m ³	合计/m ³	大塘/ (m ³ ·s ⁻¹)	小塘/ (m ³ ·s ⁻¹)
3	32 438.67	12 974.24	45 412.91	15.73	2.37
5	24 736.04	9 941.01	34 677.05	15.73	2.37
7	18 960.95	8 865.33	27 826.28	15.73	2.37

由于公式法计算用于径流污染控制所需调蓄容积时未考虑下游泵站出流的影响,因此公式法计算所需的调蓄容积相比于模型法略大。

经过公式计算和模型分析可知,减小雨水泵站规模,需要增加调蓄湿地容积,同时城市内涝风险增加;增大雨水泵站规模可以提高排水能力,降低城市内涝风险,但泵站规模越大,建设费用和运行成本也会越高,不利于节能降耗。因此最终确定泵站规模为 5 m³/s 较为合适。

根据现场情况进一步设计雨水调蓄湿地的高程和面积,设计时尽量维持现状坑塘大小,并考虑景观效果、植物生态需水量以及塘体的水力情况,合理设计大塘和小塘的高程和面积,设计结果见表 3。雨水调蓄湿地底部标高 24.00 m,末端水体汛期高水位为 27.50 m,因此调蓄湿地顶部高程设计为 27.50 m,设计调蓄湿地常水位为 25.00 m。将以上设计参数作为边界条件再次输入至模型中模拟,分析结果显示湿地的最大调蓄容积为 44 834.75 m³,满足区域内涝防治要求。

表 3 雨水调蓄湿地高程-面积对应关系

大塘高程/m	大塘面积/m ²	小塘高程/m	小塘面积/m ²
24.0	5 936.0	24.0	1 738.0
24.5	8 202.0	24.5	2 156.0
25.0	9 996.0	25.0	2 795.0
25.5	11 888.0	25.5	3 290.0
26.0	13 368.0	26.0	3 845.0
26.5	14 667.0	26.5	4 382.0
27.0	15 690.0	27.0	4 914.0
27.5	16 945.0	27.5	5 515.0

5.3 设施优化运行

泵站规模是基于 30 a 一遇降雨重现期最不利情况下进行设计,但日常降雨中 5 m³/s 的泵站利用率较低,易造成资源浪费。为了节约能源,结合该市不同

等级降雨出现频次及研究区域产汇流特点,拟设 4 台泵站,单台规模为 1.25 m³/s,且各泵的启动液位和关闭液位单独设定。

此外因小塘承接部分合流制片区来水,为了控制水体留存时间,待小塘内水位上涨至 26.00 m 时,连通管阀门开启,小塘内水流向大塘,小塘内水位降至 25.00 m 时阀门关闭,连通管转输能力不足时超量雨水经溢流堰流入大塘。

以避免频繁启闭泵站及节约能源为原则,设置了三组泵站的启闭液位,如下表所示。利用模型模拟不同降雨情景下泵站各启闭液位是否满足调蓄要求,结果表明,第一组泵站启闭规则能够在不同降雨工况下使调蓄湿地的最高液位控制在 27.50 m 以下且不产生冒溢量,因此最终确定泵站的启动液位分别为 25.40、25.60、25.60、25.60 m,4 台泵的关闭液位均为 25.00 m,见表 4。

表 4 泵站启闭液位

规模/ (m ³ ·s ⁻¹)	启动液 位 1/m	关闭液 位 1/m	启动液 位 2/m	关闭液 位 2/m	启动液 位 3/m	关闭液 位 3/m
1.25	25.40	25.00	25.40	25.00	25.40	25.00
1.25	25.60	25.00	25.60	25.40	25.60	25.00
1.25	25.60	25.00	25.80	25.60	25.80	25.00
1.25	25.60	25.00	26.00	25.80	26.00	25.00

在上述泵站启闭规则下,不同降雨等级下调蓄湿地模拟结果见图 6。小雨、中雨和大雨降雨情景中,调蓄湿地大塘的最高液位均达到 25.40 m,仅需开启第一台泵便可使液位降低且保持在 25.00 m 左右;小塘液位随降雨逐渐上涨,最高至 25.38 m,未达到与大塘之间连通管阀门开启条件,合流制来水可在此进行充分处理。暴雨、大暴雨以及特大暴雨工况下,一台泵开启后,大塘液位仍持续上升,最高达 26.94 m,四台泵全开后,液位逐渐降至 25.00 m 左右。大暴雨及特大暴雨工况下,小塘液位超过 26.00 m 后与大塘之间连通管阀门开启,小塘中的水流向大塘,两个调蓄塘液位变化一致,最终小塘液位维持在 26.00 m 以下。

总体来说,根据不同降雨情况调整泵站以及连通管阀门的启闭,能够有效地将调蓄湿地液位控制在安全范围,防止区域发生内涝,同时可有效减少合流制溢流污染。

6 结 语

本文以南方某城市雨水调蓄湿地工程为例,采用公式法与数学模型法相结合的方式,对研究区域雨水调蓄湿地和雨水泵站规模进行了设计,通过合

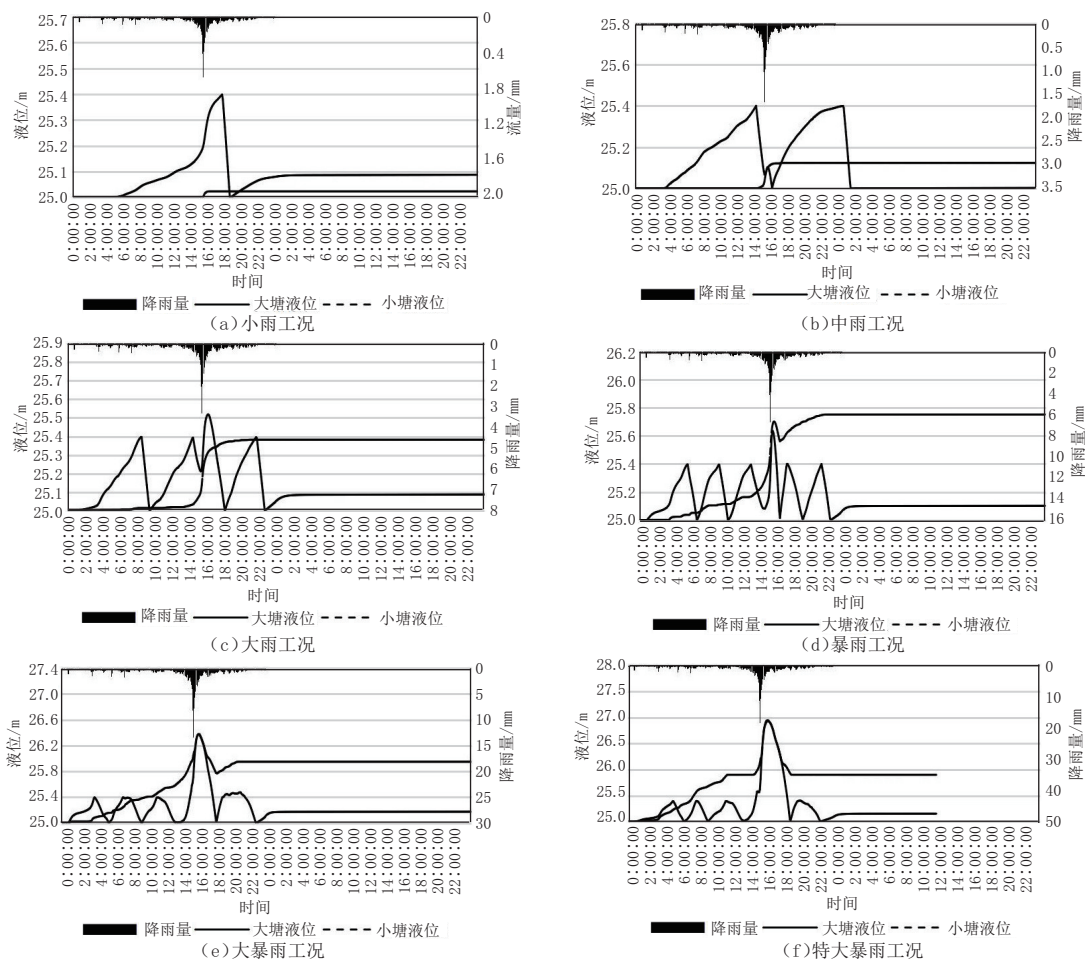


图6 不同降雨工况下调蓄湿地水位

理设计湿地和泵站的运行规则,实现调蓄湿地与泵站的动态协同,使其能在节约能源的前提下满足日常降雨排涝要求,并能应对30 a一遇24 h降雨,防止区域发生内涝灾害。

旱季运行模式:维持湿地生态水位,通过曝气装置和水生植物净化水质,保障下游水体达标排放。

降雨初期:优先启用小塘收集B片区溢流污水,通过水质净化装置预处理后进入大塘。

暴雨期:启动泵站强排模式,结合实时水位监测数据动态调节泵站启停阈值,确保调蓄湿地蓄水容积与排水能力匹配。

随着室外排水设计标准、城镇雨水调蓄工程技术规范等标准规范文件以及国家相应政策的不断更新和完善,公式法与数学模型法相结合的方法将成为未来排水设计的发展趋势,数学模型法可考虑到产汇流过程以及降雨时空分布的不均匀性,与公式法互补,增强设计结果的科学可靠性。此外工程建成后,切实保障设施的运行效率也非常重要,近几年,为了实现内涝防治、溢流污染控制等目标,排水系统实时控制技术逐步得到了应用并发挥了重要作

用^[13-15],因此后期可利用实时控制技术和物联网技术对排水管网、泵站、调蓄设施等进行联合调度,充分发挥排水设施的效能,形成稳定高效的排水体系。

参考文献:

- [1] 任国振.城市排水系统建设存在的问题及措施[J].冶金丛刊,2021,6(10):208-209.
- [2] 李焱.浅析城市排水系统建设存在的问题及优化改进措施[J].城市周刊,2019(1):2-11.
- [3] 赵丽娟,李旭峰,贾秀菊.浅析城市排水系统建设存在的问题及优化改进措施[J].河北建筑工程学院学报,2010(4):29-31.
- [4] 王东赢,王伟,张会,等.基于SWMM模型的雨水调蓄池调蓄量及数量优化[J].给水排水,2022,48(10):84-88.
- [5] EPA. Stormwater Management Handbook[M]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 2015.
- [6] 李川,马文浩,陈逸,等.人工湿地技术在城市水环境治理中的应用研究[J].施工技术,2020,49(18):26-29.
- [7] 国务院办公厅.海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [8] 黄伟翔.基于海绵城市理念的城市雨水系统优化设计研究[J].工程建设与设计,2019(9):137-139.
- [9] GB 51174—2017,城镇雨水调蓄工程技术规范[S].
- [10] Rossman L A.Storm Water Management Model User's Manual Version

(下转第185页)