

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.018

# 融合进水调度控制的雨水调蓄设施多目标优化设计

李俊德<sup>1,2</sup>, 范功端<sup>1</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 哈尔滨工业大学 环境学院,  
黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 针对目前雨水调蓄设施设计中缺乏与该设施实际运行时进水调度的整合分析,导致雨水调蓄设施的作用在设计方案的模拟中无法被充分体现的问题,以内涝溢流总量、造价与性价比作为优化目标,以雨水调蓄设施的设计参数与调度参数作为决策变量,应用多目标优化算法驱动雨洪管理模型(SWMM)进行寻优。结合实际案例采用awGA(自适应权重遗传算法)、NSGA-II(第二代非支配排序遗传算法)与NSGA-III(第三代非支配排序遗传算法)分别进行了测试,分析了各种算法对雨水调蓄设施多目标优化问题的适应性。对比测试表明,融合进水调度控制的多目标优化方法能够充分体现大中型雨水调蓄设施通过灵活调度缓解区域内涝的潜力。另外,所采用的性价比函数能够迅速识别出效益突出的方案。

**关键词:** 雨水调蓄设施; 多目标优化设计; SWMM; 进水调度; 内涝控制

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0111-07

## Multi-objective Optimization Design of Rainwater Storage Facilities Integrating Inflow Regulation

LI Jun-de<sup>1,2</sup>, FAN Gong-duan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** At present, the design of rainwater storage facilities lacks integrated analysis of inflow regulation during actual operation, leading to the role of rainwater storage facilities cannot be fully reflected in the simulation of the design scheme. The total overflow, cost and cost performance were selected as the optimization objectives, the design parameters and scheduling parameters of rainwater storage facilities were regarded as the decision variables, and the multi-objective optimization algorithm was applied to drive the SWMM model to determine the best design scheme. Combined with actual cases, awGA (adaptive weight genetic algorithm), NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm II) and NSGA-III (non-dominated sorting genetic algorithm III) were tested respectively, and the adaptability of each algorithm for multi-objective optimization of rainwater storage facilities was analyzed. The comparison test showed that the multi-objective optimization method integrating inflow regulation could fully reflect the potential of large and medium-sized rainwater storage facilities to alleviate regional

基金项目: 福建省住房和城乡建设系统科学技术项目(2016-K-42、2019-K-50); 福建省自然科学基金资助项目(2019Y3003)

通信作者: 范功端 E-mail: fgdfz@fzu.edu.cn

waterlogging situation through flexible regulation. In addition, the established cost performance function could quickly identify the scheme with outstanding benefits.

**Key words:** rainwater storage facility; multi-objective optimization design; SWMM; inflow regulation; waterlogging control

雨水调蓄设施对径流总量控制起着重要的作用,目前正被越来越多地应用于海绵城市建设中。对具有调蓄能力的低影响开发设施进行合理的设计布局将能够带来较优的径流错峰效果,大大缓解城市内涝情况<sup>[1-4]</sup>。为在方案比选中充分体现配套管网、地形对调蓄设施设计方案的影响,相关的模型被广泛应用到设计规划过程中。王兆亮<sup>[5]</sup>通过对比国外雨水调蓄设施设计计算方法,结合雨洪管理模型(SWMM)进行设计计算分析,探讨了雨水调蓄池的运行影响因素,并对雨水调蓄设施与管网设计方案的经济性进行了分析。近年来,为了在优化设计方案对内涝总体控制能力的同时兼顾方案的经济性,多目标优化算法被越来越多地应用到雨水调蓄设施的优化设计中。李飞<sup>[6]</sup>利用改进粒子群算法结合SWMM,以内涝节点数与造价作为目标函数,以雨水调蓄设施的设计尺寸作为变量进行设计方案的寻优,相比传统设计方法,基于改进粒子群算法获得的设计方案更加合理。刘瑞丰<sup>[7]</sup>以雨水调蓄设施的设置位置、进水管道的偏移与调蓄设施设计尺寸作为决策变量,利用NSGA-II(第二代非支配排序遗传算法)最小化区域内涝溢流流量、内涝溢流节点总数与工程设计造价。Wang等<sup>[8]</sup>基于SWMM构建了应用于雨水调蓄池布局优化的两步优化框架,并在我国CZ市的实践中体现了较快的寻优速度。

目前在雨水调蓄设施的多目标研究中,多数研究仅采用雨水调蓄设施的设计尺寸与相关硬件设施的设计参数作为决策变量,缺乏对雨水调蓄设施实际运行过程中进水调度的关注。而在国内外大中型雨水调蓄设施与调蓄工程的实际运行过程中,均不同程度地采用了自动控制策略进行调度优化<sup>[9-10]</sup>,我国的《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)中也做出了相应的规定。由于优化后的调蓄设施所能起到的内涝控制作用与未优化前相差巨大,未考虑调度优化的设计方案模拟将不可避免地导致设计工况与实际工况的差异,使得模

拟寻优得到的方案可靠性降低。

针对上述问题,笔者结合雨水调蓄设施的进水调度控制,进行雨水调蓄设施多目标优化研究。以雨水调蓄设施的设计调蓄容积(占地底面积×高)与调蓄设施的进水时间作为决策变量。在寻优目标方面,除了以往研究中所采用的内涝评价指标与造价指标,本研究中提出了性价比函数,便于设计人员在Pareto前沿中进行优势方案的识别。在研究案例中,测试分析了3种算法即awGA(自适应权重遗传算法)<sup>[11]</sup>、NSGA-II(第二代非支配排序遗传算法)<sup>[12]</sup>与NSGA-III(第三代非支配排序遗传算法)<sup>[13-14]</sup>对该问题的求解性能,同时,通过对比测试结果说明雨水调蓄设施进水调度决策变量在雨水调蓄设施多目标优化中的作用。此外,在对比过程中,本研究提出的性价比指标能够充分反映大中型调蓄设施的调蓄潜力,帮助用户迅速识别调蓄调度优化潜力较强的方案。

## 1 多目标优化算法原理简介

awGA、NSGA-II与NSGA-III三种算法都是基于遗传算法的多目标优化,均采用遗传算子基于种群进行Pareto前沿的搜索,主要步骤均为“编码—交叉—变异—选择”。遗传算子在多目标优化算法中的作用在于组织种群在决策空间内进行最优解的搜索。三种算法采用的具体遗传算子实现方法如表1所示。

表1 三种多目标优化算法的遗传算子与选择方法

Tab.1 Genetic operators of three multi-objective optimization algorithms

项 目	交叉算子	变异算子	选择方法
awGA	均匀交叉	均匀变异	自适应移动线的筛选+锦标赛算法
NSGA-II	二进制交叉	多项式变异	非支配排序+拥挤度排名
NSGA-III	二进制交叉	多项式变异	非支配排序+基于参考点的筛选

在本研究中,编码均采用实数编码;对于接入节点的决策变量,则根据变量特征使其取值在整数范围内。对于三种多目标优化算法,起决定性作用

的不同之处在于选择步骤的具体操作。其中,awGA算法通过自适应移动线对种群进行划分,在种群的正向进化部分利用锦标赛算法选择个体进入下一代中;NSGA-II算法基于个体在种群中的非支配等级与个体在判据空间中的拥挤度排名进行个体的选择;NSGA-III算法基于个体在种群中的非支配等级与个体相对参考点和参考向量的位置进行个体的选择。

对于NSGA-II与NSGA-III,种群正向进化的压力来源为对种群的非支配排序操作,而NSGA-II的拥挤度排名与NSGA-III基于参考点和参考向量的种群操作的目的则在于使得个体在判据空间内尽可能分散,防止种群多样性恶化及其导致的早熟现象。对于awGA而言,并没有防止种群多样性恶化的措施,仅能保证种群的正向进化,其正向进化压力来自于选择操作中,种群仅从自适应移动线划分得到的正向进化种群中选取个体。

## 2 雨水调蓄设施多目标优化决策分析

### 2.1 决策变量

#### ① 调蓄设施连接节点

雨水调蓄设施的位置会极大地影响其在雨水系统中所能发挥的作用,因此,本研究采用雨水调蓄设施接入管网的节点作为决策变量之一。采用孔口管段(orifices)作为雨水调蓄设施的入流控制管段,其在实际工程中所起到的作用相当于进水阀门,用于控制雨水调蓄设施的进水。本研究中,通过控制雨水调蓄设施对应孔口管段的入流点(inlet node),实现对雨水调蓄设施连接节点的设置,对应孔口管段的出流点(outlet node)设置为对应的雨水调蓄设施。

#### ② 调蓄设施的设计尺寸

在SWMM中,调蓄设施对应的对象为蓄水池节点(storage)。在设计中主要需要对蓄水池节点中与蓄水池几何尺寸相关的参数进行率定,其中,蓄水池的高度用最大深度(maxdepth)参数进行设置,对于雨水调蓄池的横截面几何面积,SWMM采用如下方法确定:

$$A = a \times D^b + c \quad (1)$$

式中: $A$ 为雨水蓄水池在不同蓄水高度下的水平横截面积, $m^2$ ;  $a$ 为与深度相关的乘子参数; $D$ 为雨水蓄水池的深度, $m$ ;  $b$ 为与雨水蓄水池深度相关的

指数项参数; $c$ 为常数项参数。

本研究中假定雨水调蓄设施内的调蓄空间为不同高度下水平横截面积处处相等的柱体,在参数取定时 $a$ 、 $b$ 两个参数均设置为0。此时,参数 $c$ 即为雨水调蓄设施有效蓄水空间的底面积。

#### ③ 调蓄池的进水时间

在面向内涝控制的雨水调蓄设施实时调度中,合理的进水调度能够优化调蓄设施的调蓄效果。以往的研究往往忽视了在设计寻优过程中结合进水调度进行方案模拟。本研究模拟延时进水调度模式,将调蓄池进水时间作为决策变量进行控制寻优。调蓄设施的进水时间设置通过SWMM中的控制语句实现。

### 2.2 约束条件

决策变量的相关约束条件如式(2)~(6)所示。

$$A_{\min} \leq A_i \leq A_{\max} \quad (2)$$

$$D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \quad (3)$$

$$\text{node\_index}_{\min} \leq \text{node\_index}_i \leq \text{node\_index}_{\max} \quad (4)$$

$$0 \leq h_i \leq D_{\max} - h_s \quad (5)$$

$$t_{\min,i} \leq t_i \leq t_{\max,i} \quad (6)$$

式中: $A_{\min}$ 为雨水调蓄设施的最小面积, $m^2$ ;  $A_i$ 为第 $i$ 个雨水调蓄设施的面积, $m^2$ ;  $A_{\max}$ 为雨水调蓄设施的最大面积, $m^2$ ;  $D_{\min}$ 为雨水调蓄设施的最小深度, $m$ ;  $D_i$ 为第 $i$ 个雨水调蓄设施的深度, $m$ ;  $D_{\max}$ 为雨水调蓄设施的最大深度, $m$ ;  $\text{node\_index}_{\min}$ 为雨水调蓄设施接入的最小节点序号;  $\text{node\_index}_i$ 为第 $i$ 个雨水调蓄设施接入的节点序号;  $\text{node\_index}_{\max}$ 为雨水调蓄设施接入的最大节点序号;  $h_i$ 为第 $i$ 个雨水调蓄设施的蓄水水位, $m$ ;  $h_s$ 为雨水调蓄设施的安全超高(非蓄水高度), $m$ ;  $t_{\min,i}$ 为第 $i$ 个雨水调蓄设施的最小进水时间, $h$ ;  $t_i$ 为第 $i$ 个雨水调蓄设施的进水时间, $h$ ;  $t_{\max,i}$ 为第 $i$ 个雨水调蓄设施的最大进水时间,一般根据降雨历时确定, $h$ 。

其中式(5)用于保证模拟过程中对蓄水池节点调度控制的合理性,防止蓄水池节点发生溢流。控制过程通过写入控制语句实现。

### 2.3 目标函数

在雨水调蓄设施的决策目标函数方面,本研究采用较具代表性的雨水调蓄设施总造价与内涝溢流总量作为最小化目标函数。

结合国内相关情况,雨水调蓄设施总造价采用



如下方法进行计算<sup>[6]</sup>:

$$f_1 = \sum_{i=1}^n (2000V_i^{0.69} + 500A_i + e) \quad (7)$$

式中: $f_1$ 为雨水调蓄设施总造价,元; $V_i$ 为第*i*个雨水调蓄设施的体积, $\text{m}^3$ ;  $e$ 为每个雨水调蓄设施的施工附加费用,本研究中取50 000元。

内涝溢流总量采用如下方法进行计算:

$$f_2 = \sum_{i=1}^{\text{node}} \text{flood}_i \quad (8)$$

式中: $f_2$ 为内涝溢流总量, $\text{m}^3$ ;  $\text{flood}_i$ 为第*i*个节点在降雨过程中的内涝溢流量, $\text{m}^3$ 。

为了便于设计人员迅速识别求解所得的 Pareto 前沿中的优势方案,本研究构建了结合经济因素与技术因素的复合评价函数。基于内涝溢流总量与雨水调蓄设施总造价定义的性价比函数如式(9)所示,其含义是单位成本(元)下所能够减缓的内涝溢流量。

$$f_3 = \frac{f_2 - f_0}{f_1} \quad (9)$$

式中: $f_3$ 为性价比函数, $\text{m}^3/\text{元}$ ;  $f_0$ 为研究区域内未设雨水调蓄设施时的内涝溢流总量, $\text{m}^3$ 。

此外,在算法寻优过程中,为了排除模拟结果异常个体与模拟计算中连续性误差异常个体,引入了惩罚机制,当模型计算过程中出现连续性误差异常或计算结果明显偏离正常情况时,对造价函数与内涝函数赋予极高的虚拟惩罚值,使个体被自动淘汰。

### 3 案例概况

研究案例选取福建省某镇的近期规划管网,其共含有45个节点(包括1个排水口)、43个管段,管网拓扑结构如图1所示。

基于规划背景资料进行SWMM建模:基于管网模型利用泰森多边形法进行子汇水区域的划分;基于规划用地资料进行下垫面的处理,利用数字高程模型(DEM)进行子汇水区域内的坡度计算;部分水文参数采用邻近地区的校核研究结果<sup>[15]</sup>。利用当地的暴雨强度公式结合芝加哥雨型进行模型降雨事件的构建,降雨历时为3 h。完成初步建模后,利用径流系数法在管网设计重现期下进行模型的评估检验,考虑到研究区域属于建筑较为密集的城镇,一般径流系数在0.45~0.60(参见2016年版《室外排水设计规范》),所得模型的区域综合径流系数

为0.529,符合设计规范要求。完成建模后,模型在未添加雨水调蓄设施时,利用重现期为5 a的降雨事件进行模拟。结果显示,有26个节点发生了内涝溢流,溢流总量为6 762  $\text{m}^3$ 。

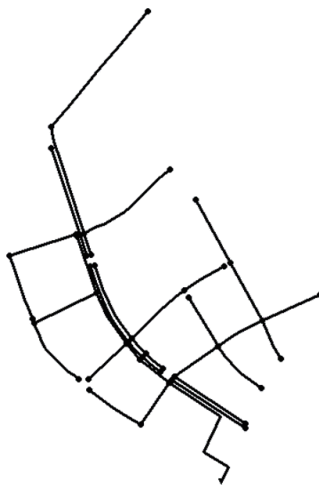


图1 研究案例的雨水管网拓扑结构

Fig.1 Topological structure of rainwater drainage network in research case

### 4 测试结果与分析

在试算确定算法的收敛性后,研究测试中,所有算法的求解种群数量均设置为200,求解进化代数设置为200代,测试结果如图2和图3所示。从图2和图3可以看出,在两种决策变量的选取情况中,相同的求解代数下,awGA算法由于缺乏限制种群多样性恶化的选择条件,发生了明显的早熟现象,最终求解所得的 Pareto 前沿中,个体分布极不均匀,种群个体集中在雨水调蓄设施容积较小的情况,而且该算法求解所得的 Pareto 前沿明显劣于其他两种算法。NSGA-Ⅱ算法与NSGA-Ⅲ算法由于有相应的防止种群多样性恶化的措施,求解所得的 Pareto 前沿较为均匀,两种算法求解所得的 Pareto 前沿较为相似。另外可以看出,NSGA-Ⅱ算法求解所得的 Pareto 前沿连续性较好,略优于NSGA-Ⅲ算法。在图3中,NSGA-Ⅱ算法求解所得的 Pareto 前沿中造价为 $2 \times 10^6$ 元左右的解对溢流总量的控制明显优于NSGA-Ⅲ算法求解所得的 Pareto 前沿中相应的个体。可以看出,针对本问题基于非支配排序方法进行寻优时,基于非支配排序与拥挤距离进行排名选择的方法更具有竞争力。

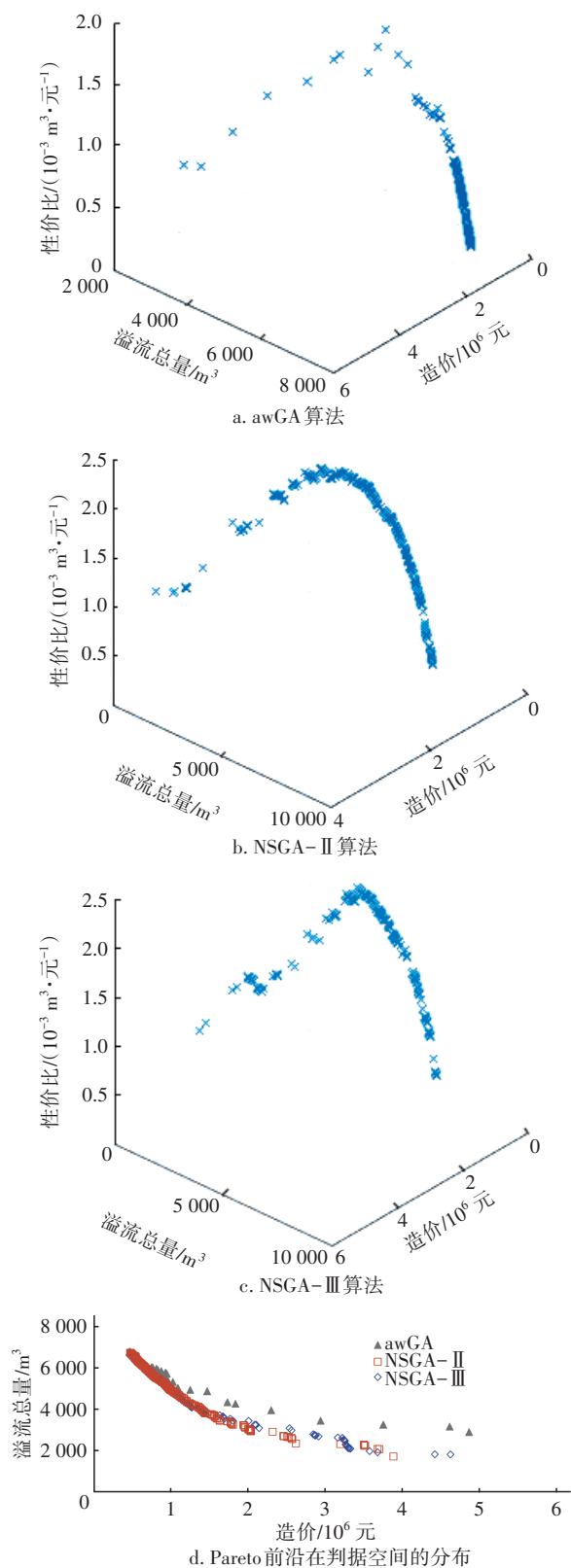


图2 不考虑进水调度时不同算法求解所得的 Pareto 前沿  
Fig.2 Pareto frontier obtained by different algorithms without merging inflow control optimization

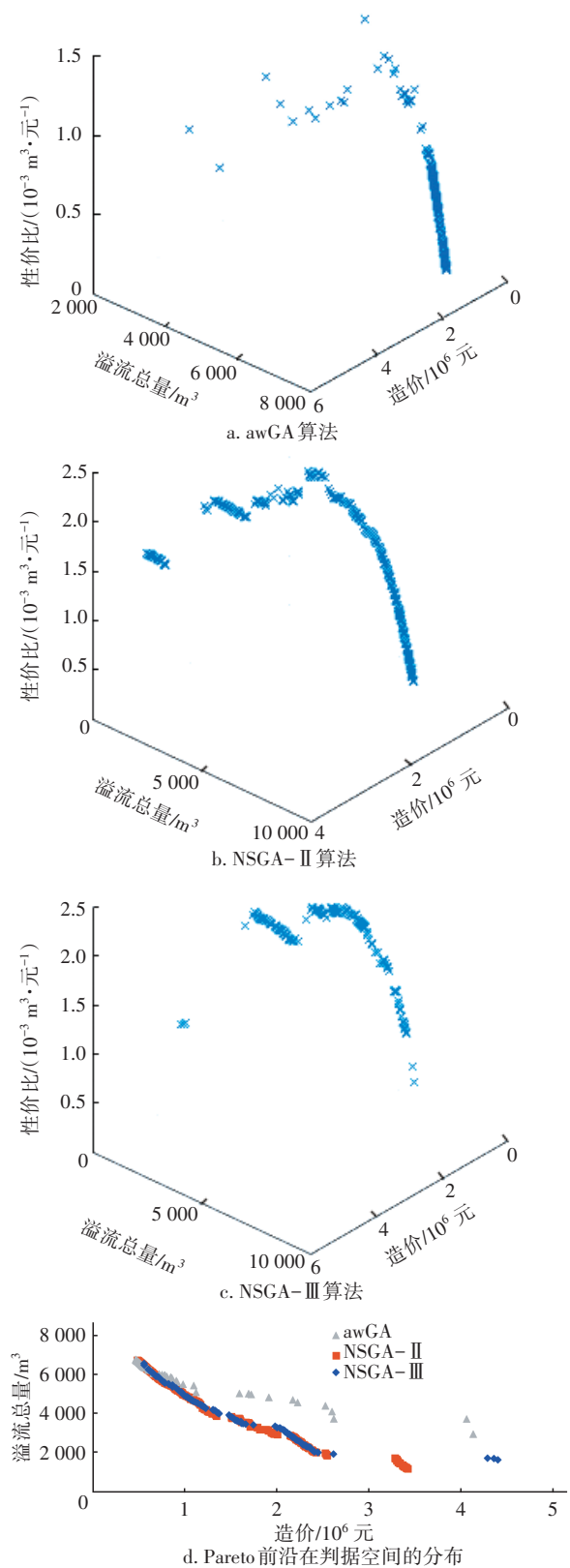


图3 融合进水调度优化时不同算法求解所得的 Pareto 前沿  
Fig.3 Pareto frontier obtained by different algorithms with merging inflow control optimization

将两种不同决策变量设置下求解所得的 Pareto 前沿进行对比,如图4所示。可以看出,未考虑雨水调蓄设施进水调度控制所得的 Pareto 前沿中,性价比函数在判据空间中的分布为单峰分布,在造价较低的小型调蓄设施上体现了较优的性价比;而在考虑了雨水调蓄设施进水调度控制所得的 Pareto 前沿中,性价比函数在判据空间中则呈现出了明显的多峰分布,部分大中型调蓄设施由于添加了控制规则,大中型调蓄设施的调度优势得到了充分体现,额外的调蓄容积能够在峰值径流与溢流控制调蓄过程中得到充分利用,达到更好的溢流总量控制效果。而对于小型调蓄设施,由于其调蓄容积有限,对内涝溢流的控制作用也相对有限,进水调度优化所能起到的作用较小。

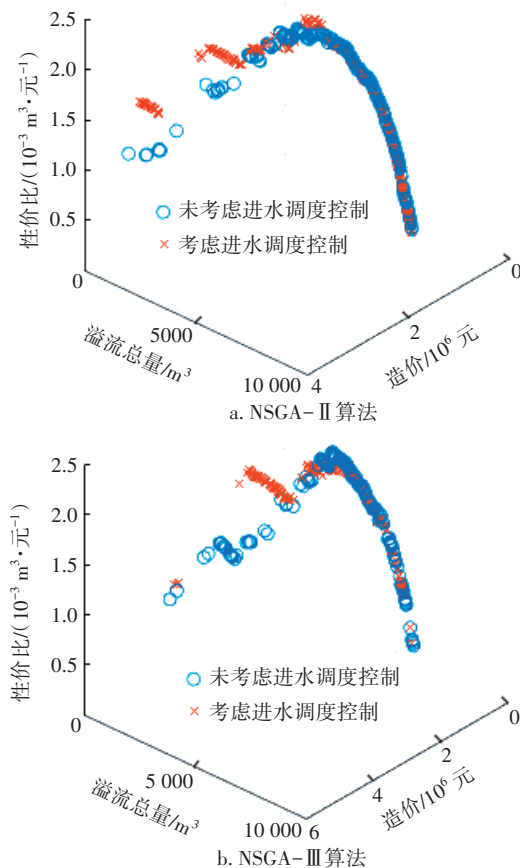


图4 不同决策变量设置下求解所得的 Pareto 前沿对比  
Fig.4 Comparison of Pareto frontier obtained by solving different decision variable settings

上述对比过程能够充分体现不同的设计方案在雨水调蓄设施实际运行中的调蓄潜力。采用雨水调蓄设施进水调度作为决策变量,并结合性价比

函数进行分析,可以充分体现出设计方案结合进水过程控制在实际运行中的调度效果。性价比函数作为辅助用户从 Pareto 最优集中筛选出较优设计方案的指标,使得用户通过分析该指标可以迅速识别出调蓄设施建设中最具效益优势的方案,特别是调度优化潜力较强的中大型调蓄设施设计方案;同时,性价比函数也可以使设计人员在投入资金较少的情况下确定出最具调蓄潜力的设计方案。

## 5 结论

① 基于 awGA、NSGA-II 与 NSGA-III 三种算法耦合 SWMM,以造价、内涝溢流总量与性价比三者为目标,基于降雨进行雨水调蓄设施设计寻优。采用具有保证种群多样性选择机制的 NSGA-II 与 NSGA-III 两种算法比 awGA 算法的求解优化效果更好;NSGA-II 与 NSGA-III 两种算法求解所得的 Pareto 前沿相似,但是 NSGA-II 求解所得的 Pareto 前沿略优于 NSGA-III。

② 与传统的不进行进水调度控制的寻优结果相比,结合进水调度控制过程的优化设计寻优结果在实际运行中具有更优的调蓄效果,特别是大中型调蓄设施的调蓄调度潜力与调蓄效果在测试结果中得到了充分体现。

③ 结合性价比函数进行分析,可以迅速识别出 Pareto 前沿中具有较强竞争力的方案,在投入资金较少的情况下,能确定出最具调蓄潜力的设计方案。

## 参考文献:

- [1] XU T, JIA H, WANG Z, *et al.* SWMM-based methodology for block-scale LID-BMPs planning based on site-scale multi-objective optimization: a case study in Tianjin [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2017, 11: 48-59.
- [2] 刘兴哲. 城市下凹桥区内涝积水综合治理设计探讨 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 47-53.  
LIU Xingzhe. Comprehensive treatment design of waterlogging and water accumulation in urban concave bridge area [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 47-53 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 周传庭. 合肥市老城区全地下雨水调蓄池工程设计[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(14): 63–66.
- ZHOU Chuanting. Project design of the full underground stormwater detention tank for old urban area of Hefei City [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(14): 63–66 (in Chinese).
- [5] 王兆亮. 雨水调蓄池理论技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- WANG Zhaoliang. Study on Theory and Technology of the Rainwater Detention Tanks [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013 (in Chinese).
- [6] 李飞. 城市雨水系统调蓄池多目标优化设计[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- LI Fei. Multi-objective Optimization of Designing Detention Tanks in Urban Stormwater System [D]. Shanghai: Tongji University, 2014 (in Chinese).
- [7] 刘瑞丰. 基于水力模型的雨水蓄水池优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LIU Ruifeng. Research on Optimization of Rainwater Retention via Hydraulic Model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [8] WANG M, SUN Y, SWEETAPPLE C. Optimization of storage tank locations in an urban stormwater drainage system using a two-stage approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 204: 31–38.
- [9] PLEAU M, COLAS H, LAVALLEE P, *et al.* Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20(4): 401–413.
- [10] GAROFALO G, GIORDANO A, PIRO P, *et al.* A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, 78: 30–42.
- [11] GEN M, CHENG R. *Genetic Algorithms & Engineering Optimization* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000: 76–106.
- [12] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182–197.
- [13] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: solving problems with box constraints [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 577–601.
- [14] JAIN H, DEB K. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based nondominated sorting approach, Part II: handling constraints and extending to an adaptive approach [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 602–622.
- [15] 王伟. 基于GIS和SWMM模型的城市内涝模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- WANG Wei. Research on Simulation of Urban Waterlogging Based on GIS and SWMM Model [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017 (in Chinese).

作者简介: 李俊德(1998–), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 研究方向为给排水系统设计运行优化。

E-mail: lijunde980606@163.com

收稿日期: 2020-05-05

修回日期: 2020-07-31

(编辑: 刘贵春)

珍惜资源, 保护环境, 建设美丽中国