

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.05.018

基于SWMM模型的分流制污水泵站多目标优化

林华星¹, 管向伟², 董进波³, 解清杰¹, 赵文青¹, 王超¹

(1. 江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 中国昆仑工程有限公司, 北京 100037; 3. 江苏满江春城市规划设计研究有限责任公司, 江苏 镇江 212008)

摘要: 城市排水系统是维持水环境质量的关键基础设施之一。然而,城市老城区分流制排水系统存在的错接、漏接问题导致难以完全实现“雨污分流”,从而致使污水溢流、河道“返黑返臭”、污水处理厂进水COD浓度偏低、泵站高位运行等问题。基于此,以镇江市某排水区域为研究对象,结合SWMM模型和NSGA-II算法提出了一种城市污水泵站调度技术。通过将子汇水区接入污水管网并控制不渗透比例,模拟降雨对生活污水的渗透作用。在连续降雨场景下,通过算法寻优获得泵站最佳启动深度策略。经过优化后,在实现污水厂进水COD浓度提升至250 mg/L的基础上,节点积水累计时间减少26.2%,泵站能耗下降20.0%,提高了排水系统的运行性能。

关键词: 提质增效; 城市排水系统; SWMM; 污水泵站调度; NSGA-II

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)05-0130-07

Multi-objective Optimization of Separate Sewer Pumping Station Utilizing SWMM Model

LIN Hua-xing¹, GUAN Xiang-wei², DONG Jin-bo³, XIE Qing-jie¹, ZHAO Wen-qing¹, WANG Chao¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. China Kunlun Contracting & Engineering Corporation, Beijing 100037, China; 3. Jiangsu Manjiangchun Urban Planning and Design Research Co. Ltd., Zhenjiang 212008, China)

Abstract: The urban drainage system constitutes a critical infrastructure for sustaining water environmental quality. However, the misconnection and leakage issues within the separate sewer drainage system in the old urban area hinder the full realization of effective rainwater and sewage diversion. This results in several challenges, including sewage overflow, black and odorous river water, reduced COD entering wastewater treatment plants, and increased operational demands on pumping stations. In this study, a municipal sewage pumping station scheduling technology for a drainage area in Zhenjiang City was developed by integrating SWMM with NSGA-II algorithm. The impact of rainfall infiltration on domestic sewage was simulated by integrating sub-catchment areas into the sewage network and regulating the proportion of impermeable surfaces. Under continuous rainfall scenarios, the optimal starting depth strategy for the pumping station was determined through algorithmic optimization. Following optimization,

基金项目: 镇江市科技计划项目(社会发展)(SH2021012)

通信作者: 解清杰 E-mail: xieqingjie73@163.com

the influent COD of the wastewater treatment plant was increased to 250 mg/L. This resulted in 26.2% reduction in the accumulation time of node water, 20.0% decrease in the energy consumption of the pumping station, and an improvement in the operational performance of the drainage system.

Key words: quality and efficiency improvement; urban drainage system; SWMM; sewage pumping station scheduling; NSGA-II

随着城市化进程的不断加速和人口的快速增长,水环境问题日益突出,特别是在城市老旧区域,水体污染问题成为制约城市可持续发展的重要因素。因此,各地方政府越来越重视城市水环境的治理并持续不断地进行环境整治,使整体水环境质量得到了一定的改善,但仍有部分水体水质不稳定,有时还会“返黑返臭”,尤其是老城区域河段。上述现象的主要根源是污水处理厂收集率低、污水下河等。导致污水下河的原因既有污水收集不足、污水输送能力不强的问题,也有管网乱接、错接以及收集系统运行调度不科学、监管力度有待加强等问题。

“黑臭问题在水里,根源在岸上,关键是排口,核心是管网”。因此想要解决上述问题,就必须从城市排水系统开始研究。城市排水系统是由排水管网、污水处理厂、泵站及城市河湖等串联组成的一个复杂的一体化开放系统,系统内的各类设施之间存在着连接连通、互相影响、相互联动的内在特性和规律^[1]。笔者针对镇江某区域水体环境恶化和维护问题,基于在不改变当前设施的情况下仅进行调控策略优化,旨在通过技术手段实现调度决策最优化,以最大化拦截污染物,提升污水处理厂进水COD浓度,改变污水泵站长期处于高位运行的现象,确保城市老旧河水环境的改善和保持。

1 模型的构建

1.1 研究区域概况与模型建立

研究区域位于镇江市东部,北临长江,面积为61 km²,其排水系统属于分流制。研究区域内设有1座污水处理厂及4座污水泵站。目前该污水处理厂进水COD在雨季的平均浓度为218.6 mg/L,不满足《江苏省城镇污水处理提质增效精准攻坚“333”行动方案》中污水厂进水COD浓度不低于250 mg/L的要求。

鉴于SWMM模型易操作、开源等特点,采用其对排水系统进行模拟。经过对现有数据的处理与

转化后,构建了研究区域排水管网SWMM模型,如图1所示。研究区域现状管网节点共计989个,管段988条,泵站4座,蓄水池4座,总污水出水口1个。为了方便区分,将4座泵站分别命名为1#、2#、3#和4#,每个泵站均配备一个蓄水池。各泵站和蓄水池的启动深度以及蓄水池容积和深度见表1。



图1 研究区域的排水管网模型

Fig.1 Drainage network model of study area

表1 污水泵站概况

Tab.1 Overview of sewage pumping station

污水 泵站	受水面积/ hm ²	启动深 度/m	泵数 量/个	蓄水池容 积/m ³	蓄水池深 度/h
1#	1 960	3.5~6.5	4	665	6.3
2#	2 560	5.0~7.5	5	1 004	10.0
3#	690	3.0~5.5	3	578	8.7
4#	890	2.3~4.0	3	149	6.3

1.2 污水事件设置

在污水处理厂污水来源中,生活污水约占总水

量的94%,企业排放的污水约占总水量的4%;由于企业污水数据收集困难,且每个企业因生产工艺的不同导致污水排放的时变化曲线也不同,故本研究不考虑企业排放数据。根据第七次全国人口普查数据,该污水厂服务范围内的人口约为22万人,因此在输入居民生活污水时,选取镇江市典型小区的24 h时变化排放曲线(见图2),再根据该小区的人口数据即可得到人均排放曲线。将服务区按照社区分成多个污水子服务区,根据人口密度得到每个污水子服务区内具体的人口数,再将人均排放曲线按照每个污水子服务区的人口数进行放大即可得到具体的污水排放曲线。分析结果表明,居民在一天中污水排放的高峰为07:00—09:00以及20:00—21:00,符合大多数城市居民生活用水规律。

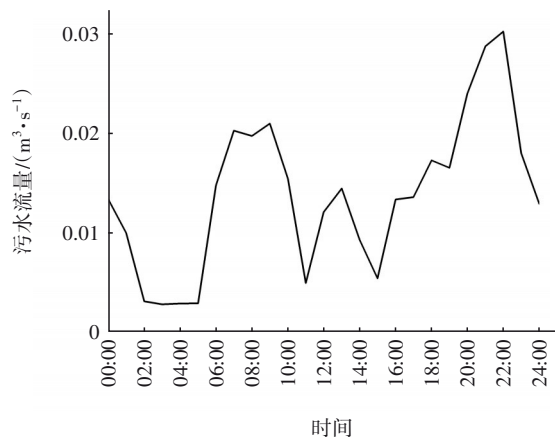


图2 镇江市典型小区24 h时变化排放曲线

Fig.2 24-hour time-varying emission curve of a typical community in Zhenjiang City

为了准确输入污水COD数据,将以上4座泵站的源头平均进水COD浓度作为各自受水区域内节点进流的COD浓度。经查阅资料,4座泵站的源头进水COD浓度依次为259、222、354、293 mg/L。雨水COD平均浓度为40 mg/L,衰减系数设定为0.27;并设置了基于每小时变化的系数因子作为时间模式乘子用于模拟污水COD浓度的波动性^[2],如图3所示。对于污水的逐日、逐月变化情况,由于该污水厂长期高水位运行,因此处于超负荷状态,即使雨季也未能表现出明显的水质波动,因此在本研究中暂不考虑。以上曲线数据通过SWMM中的旱季进流量模块进行设置。

由于污水水质涉及到整体的降解过程,需要对各个地块进行土地利用类型数据的输入,按照可能

存在污染物冲刷和积累的情况将土地利用类型分为3种:一般硬化地面、道路、屋顶,并在各个子汇水区域中按照实际情况设定比例。在常用(General)部分中,间隔按经验设为1,将可利用性设置为0.1,即表示有10%的土地被清扫;在积累部分(Buildup)与冲刷部分(Washoff)的函数类型设置中,选择常用的EXP指数增长型,其中最大增长 C_1 、速率常数 C_2 、冲刷系数与冲刷指数由于难以获取,则均从推荐值中确定,合理即可,不同土地利用类型的具体设置参数见表2。

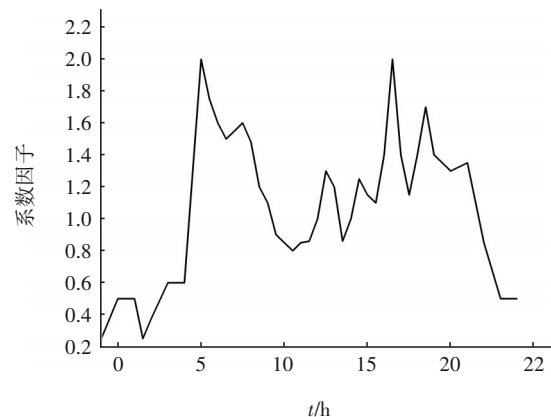


图3 生活污水时变化系数因子

Fig.3 Time variation coefficient factor of domestic sewage

表2 土地利用类型参数

Tab.2 Parameters of land use type

土地利用类型	常用(General)			积累(Buildup)			冲刷(Washoff)		
	间隔	可利用性	最后清扫	类型	最大增长 C_1	速率常数 C_2	类型	冲刷系数	冲刷指数
地面	1	0.1	0	EXP	30	0.5	EXP	0.05	1.5
道路	1	0.1	0	EXP	30	0.5	EXP	0.05	2.0
屋顶	1	0.1	0	EXP	25	0.5	EXP	0.08	1.8

1.3 雨水事件的设置

SWMM模拟降雨过程时需要将研究区域划分成若干子汇水区,目前主流的子汇水区划分方法是用ArcGIS中的泰森多边形法进行划分,之后再结合地形和管网布置进行局部人工调整,最终划分子汇水区共计824个。泰森多边形划分子汇水区具有操作快捷、分化效率高等优点,适用于研究面积较大的平原城市地带^[2]。同时为了研究降雨积累与冲刷对污水水质的影响,选用镇江市2022年4月10日—7月10日的1 min间隔观测降雨数据作为连续降雨输入SWMM模型,如图4所示。

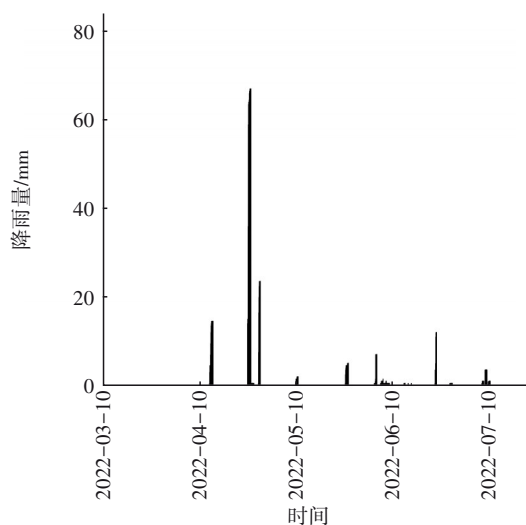
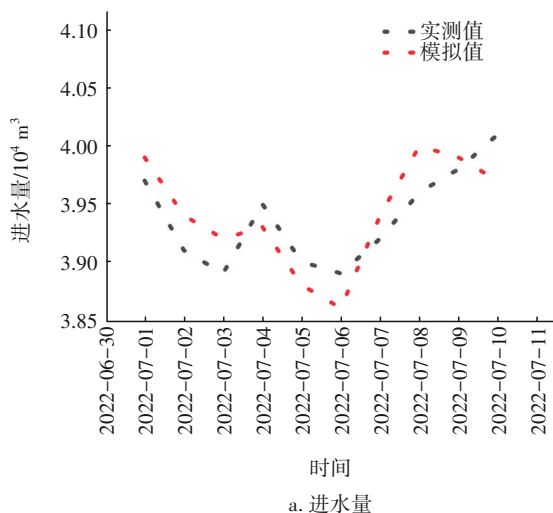


图4 连续降雨观测数据

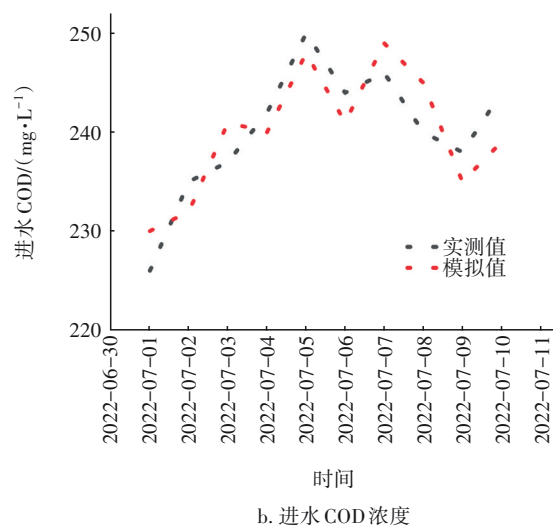
Fig.4 Continuous rainfall observation data

1.4 模型的率定

基于上述构建的SWMM模型,选取2022年7月1日—12日的污水处理厂进水监测数据与模拟数据进行模型可靠性分析。为了验证模型是否准确,采用纳什效率系数(NES)进行验证,该系数可以反映模型与现实系统的拟合程度。本研究主要是对污水处理厂进水量与COD浓度进行率定,选取了2022年7月1日—10日污水厂的进水量与进水COD浓度数据进行率定,率定结果如图5所示。经过计算,污水厂进水量的纳什效率系数为0.52,进水COD浓度的纳什效率系数为0.91,纳什效率系数大于0.55说明模型具有较好的可靠性,能够为后续研究提供模型支持。



a. 进水量



b. 进水COD浓度

图5 污水厂进水量和进水COD浓度的模拟值与实测值

Fig.5 Simulated and measured values of influent flow rate and COD concentration of sewage treatment plant

1.5 不渗透比例的确定

子汇水区的参数是能否模拟分流制管网情况的重点。通常将SWMM用于污水管网的模拟时要考虑如何处理污水管网与雨水管网的关系,对于合流制管网来说只需要将两种管网一起模拟即可;而对于分流制排水系统,由于SWMM模型属于完全分流模拟,难以模拟现实中雨水、地下水等外水侵入污水管网的真实情况。为了解决上述问题,将子汇水区的雨水直接接入污水节点,并通过控制子汇水区的不渗透比例和洼地积蓄量等参数控制雨水侵入污水系统的比例^[3]。在确定子汇水区的不渗透比例之前,需要将不透水表面的洼地积蓄量设置为0,而透水表面的洼地积蓄量设置为1 000 mm,可确保不透水表面的雨水径流全部流入污水管网,而透水表面的雨水径流则不会进入污水管网,因此这些区域设定的不透水面积的百分比,即可表示为进入污水管道降雨径流的比例。

查阅资料得到该污水厂2022年雨季平均进水量为39 694 m³/d,其中雨季入侵外水量约为2 205~3 987 m³,约占总水量的6%~10%。因此进入污水管网的雨水量也应该占总进水量的6%~10%左右,具体比例由降雨强度决定。在确定了降雨强度以后,利用这一部分雨水量并通过SWMM进行反推,即可以确定在当前降雨强度下子汇水区的不渗透比例。这需要不断调节不渗透比例,直到SWMM中Status Report显示的雨水量与在当前降雨强度下污水厂进

水的雨水量相匹配,即可确定当前的不渗透比例。当然,这个方法可能会稍显麻烦并存在一定的不足,例如无法像公式一样精确得到不渗透比例,希望在后续研究中加以改进。通过以上方法不断测试后,得到在连续降雨条件下不渗透比例为11.5%,符合该污水厂的实际情况。

2 联合调度解决方案

2.1 非支配排序遗传算法 NSGA-II

非支配排序遗传算法 NSGA^[4]是在基本遗传算法的基础上,对选择再生方法进行改进。将每个个体按照它们的支配与非支配关系进行分层,再进行选择操作,从而使得该算法在多目标优化方面得到非常满意的结果。作为 NSGA 算法的二代版本^[4], NSGA-II 在筛选最优解的过程中引入了精英策略,即在筛选过程中将父代与子代个体混合后进行非支配排序,最大化避免精英个体的流失。与此同时 NSGA-II 算法在进行非支配排序时,对于处于同支配层级的不同个体引入拥挤度概念,在取得最终的 Pareto 最优解时选取支配层级高且拥挤度低的个体作为最优解个体。

采用 NSGA-II^[5]算法进行耦合可以得到改善老城区水体环境的科学调度方法。如何将 SWMM 模型与 NSGA-II 算法耦合是一个难题,目前主流的方法是依托 Python 或者 Matlab 平台调用 SWMM 相关组件进行模拟,读取结果文件,并采用代码的形式对 NSGA-II 算法进行复现,将模型中与优化目标有关的参数作为变量参与到算法的迭代运算中,通过不断将每一次迭代结果返回 SWMM 模型中进行模拟,判断模拟结果是否达到优化预期,从而得到最优调度方案。

2.2 决策变量、目标函数与约束变量

由于该污水厂范围内的可控设备主要是泵站,因此应着重分析泵站对于排水系统提高的作用。在日常调度过程中,启动水深决定了泵站的运行频率与能耗,且在降雨有可能稀释管道中污水 COD 浓度之前,污水泵站通过合理的启动频率也能提高进水 COD 浓度。因此将泵站的启动深度与停止深度作为决策变量参与算法的迭代运算。

NSGA-II 作为解决多目标优化问题的一种算法,需要设置一系列目标函数和约束条件。而在本研究中,上述操作的实现需要用 Python 调用 SWMM

模块中 inp(输入文件)、rpt(报告文件)和 out(结果文件)的具体参数执行目标函数和约束条件的运算,再结合 NSGA-II 代码执行运算,具体如图 6 所示。

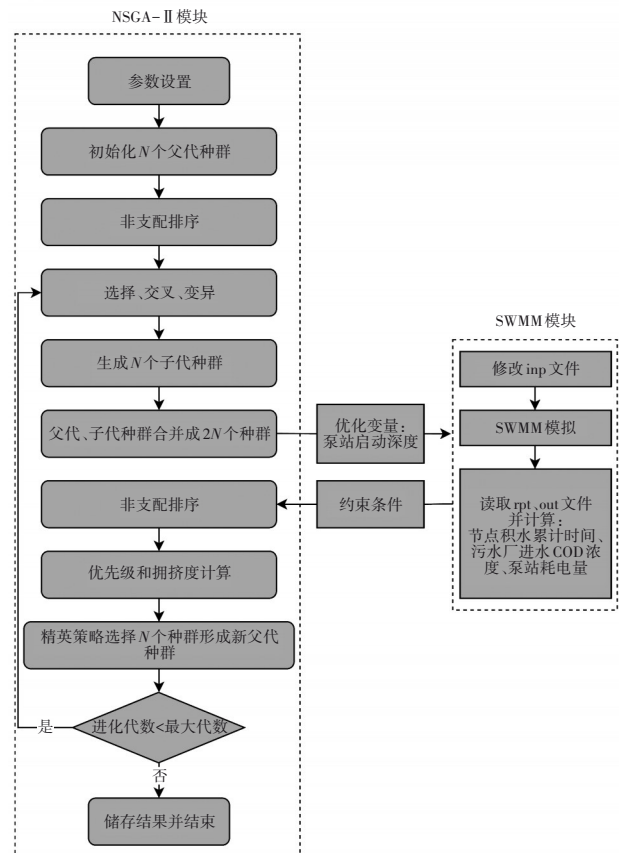


图6 NSGA-II 算法与 SWMM 模型耦合的多目标优化流程

Fig.6 Multi-objective optimization flow chart of NSGA-II algorithm coupled with SWMM model

目前一般将目标函数分为 3 种类型,分别是水质方面、水量方面和能耗方面(经济方面),常见的目标函数包括 COD 和 BOD 等污染物指标,各设施的流量、水量和深度,以及建造成本和能耗等。在本研究中对应为污水厂进水 COD 浓度、节点积水累计时间与泵站耗电量 3 个目标作为目标函数。

① 目标函数 1(污水厂进水 COD 浓度最大)

该目标函数可以在算法中指定为总排放节点的 COD 浓度,而并不是以传统函数形式进行运算。

② 目标函数 2(节点积水累计时间最小)

该目标函数对应为水量方面,旨在减少节点溢流的时间,同时因为 SWMM 无法模拟积水,因此该目标函数也间接表征了溢流程度。该目标函数可以通过调用 rpt 文件中的 Hour_Surcharged 模块读取所有节点的超载时间,并通过 DataFrame 结构进行

求和,见式(1)^[6]。

$$\text{Time} = \min \sum_{n=1}^N T_n \quad (1)$$

式中:Time为节点积水累计时间,h;N为溢流节点总数量,个; T_n 为各节点的积水时间,h。

③ 目标函数3(泵站耗电量最小)

该目标函数可以通过读取out文件中各个泵站在每个时间步长内的数据代入式(2)进行计算^[6]。

$$\text{Power} = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n 10^{-3} \cdot K \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta H_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot \eta^{-1} \cdot \left(\frac{\Delta t_i}{3600} \right) \quad (2)$$

式中:Power为泵站总电量,kW·h;K为水泵的安全系数,取1.2; ρ 为水的密度,1000 kg/m³;g为重力加速度,9.8 m/s²; ΔH_{ij} 为第i步长下第j个水泵的进出口水头差,m; Q_{ij} 为第i步长下第j个水泵的流量,m³/s; η 为水泵的效率; Δt_i 为时间步长,s。

另需设置相应的约束条件,由于各泵站的启动深度范围在算法初始化阶段已经规定,因此本研究选择常见的管道流速约束和蓄水池体积约束。

约束条件1(管道流速约束):

$$V_{n,\min} \leq V_n \leq V_{n,\max} \quad (3)$$

式中: V_n 为第n个排水管的流速; $V_{n,\min}$ 和 $V_{n,\max}$ 分别为实际管网的最小流速和最大流速,考虑到在降雨过程中出现流速变小的情况,根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006),将最小值取为0.01 m/s,最大流速取设计的最大流速5 m/s。

约束条件2(蓄水池体积约束):

$$\sum_{i=1}^n L_i = Z \quad (4)$$

式中:n为区域内蓄水池的总数量,个; L_i 为第i个蓄水池的体积,m³;Z为蓄水池的总体积,m³。

2.3 算法优化结果

输入上述关键参数后,以算法默认参数迭代200次,在连续降雨的情况下进行寻优计算,得到节点积水累计时间、污水厂进水COD浓度、泵站耗电量的Pareto最优前沿解,如图7所示。可知,3个目标函数经过200次的迭代运算后,都收敛到了相对较小的范围,其中污水厂进水COD解的范围为160~270 mg/L,节点积水累计时间解的范围为20~70 h,泵站耗电量解的范围为50~200 kW·h。另外发现,越往上的个体,节点积水累计时间越小,污水厂进

水COD浓度越高,相应的泵站耗电量也随之增加;反之,越往下的个体,污水厂进水COD浓度和节点积水累计时间的优化效果都表现为较低水平。从计算结果可以看出,迭代结果符合城市排水系统泵站的运行规律,计算结果合理。

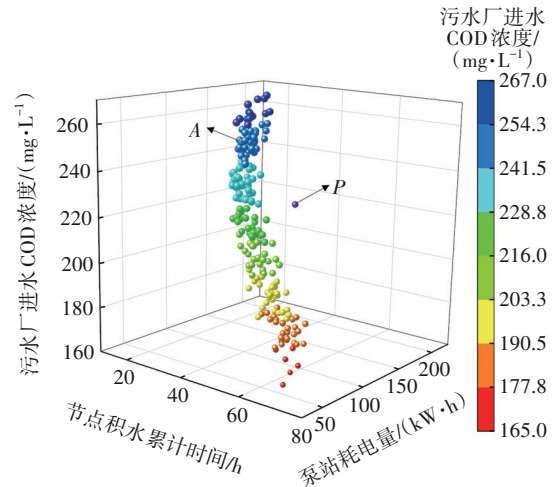


图7 3个目标函数的Pareto最优前沿解

Fig.7 Pareto optimal frontier solutions of three objective functions

通过将结果导出后可得解的具体数值,即4座泵站的启动深度,见表3。可知,1#和2#泵站因为受水面积大、水量多,调度得比较激进;而3#、4#则较为保守;4座泵站的启动深度均保持在设定范围内。

表3 污水泵站启动深度

Tab.3 Starting depth of sewage pumping stations m

泵站	常规启动深度	优化后启动深度				
		1台	2台	3台	4台	5台
1#	3.5	4.1	4.3	4.7	5.1	—
2#	5.0	5.5	5.8	6.3	6.8	7.2
3#	3.0	3.2	3.3	3.5	—	—
4#	2.3	2.6	2.9	3.1	—	—

注:“—”代表泵站台数超过了实际的台数,无结果。

同时优化的时效性问题^[7]也是需要关注的。由于采用了超长历时的降雨数据,模拟时间会增加,但是由于主要的污水数据只集中在1d内,保证了算法优化的时效性。在算法优化上,目前成熟的方法是面向对象的思想,通过Python对SWMM模块进行封装^[7],以便在求解过程中并行处理多个独立的模型,且不同模型之间的数据、参数等完全独立,可单独设置和单独运行计算,这样大大提高了并行运算的计算效率。通过以上操作后算法寻优

过程的总耗时约为6.6 h。然而受限于机理模型运行速度慢与模型复杂程度的影响,优化后的运行速度依旧较慢,只能依靠未来技术的更新迭代来解决这一痛点。

2.4 优化效果的评估

根据优化结果,若要满足污水厂进水COD浓度平均值在250 mg/L以上,同时兼顾较少的节点积水累计时间和泵站耗电量,应该选择图7中取值范围在250~267 mg/L的解集个体。为了分析优化效果的优越性,选择满足污水厂进水COD浓度大于250 mg/L的情况下其他两个参数表现得最好的A点与代表常规调度方案的P点进行比较。结果表明,A点和P点的污水厂进水COD浓度分别为250、222 mg/L,节点积水累计时间分别为31、42 h,泵站耗电量分别为124、155 kW·h。可见,经过A点的泵站启动深度优化后,与常规泵站调度策略P点相比,3个目标函数均得到优化,其中污水厂进水COD浓度提高了12.6%、节点积水累计时间降低了26.2%、泵站耗电量减少了20.0%。该结果表明,在连续降雨情况下,通过调整泵站的启动深度,合理启动排污泵,能够有效提高污水厂进水的COD浓度,优化整个系统的运行性能。

3 结论

① 为了解决研究区域污水厂服务区排水系统存在的问题,满足“提质增效”专项行动的需要,建立了研究区域污水厂服务区排水管网SWMM模型,输入了污水与降雨数据,通过将子汇水区出水口接入污水节点并控制外水入侵比例,模拟了分流制排水管网在现实中“雨污分流”不彻底的现状。

② 采用NSGA-II算法结合SWMM模型,以节点积水累计时间、污水厂进水COD浓度和泵站耗电量为目标函数对排水系统进行优化,得到了连续降雨条件下的Pareto解集。与优化前的常规策略相比,在保持污水厂进水COD浓度大于250 mg/L的情况下,节点积水累计时间减少了26.2%,泵站耗电量降低了20.0%,实现了排水系统的最佳优化。

参考文献:

- [1] 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).

- [2] 张天奇,田禹,李俐频,等.城市截流式排水系统建模方法及应用[J].给水排水,2020,46(S2):125-131.
ZHANG Tianqi, TIAN Yu, LI Lipin, et al. Modeling method and application of urban interception drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 46 (S2): 125-131 (in Chinese).
- [3] 黄棚兰,庞晶津,于连泽,等.利用SWMM模型模拟居住小区污水管网运行水力特征[J].科技创新与应用,2022,12(1):57-59.
HUANG Penglan, PANG Jingjin, YU Lianze, et al. Simulation of hydraulic characteristics of sewage pipeline network in residential areas using SWMM model [J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12 (1): 57-59 (in Chinese).
- [4] 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.
- [5] JAFARI F, MOUSAVI J, YAZDI J, et al. Real-time operation of pumping systems for urban flood mitigation: single-period vs. multi-period optimization [J]. Water Resources Management, 2018, 32(14): 4643-4660.
- [6] 陈学凯,刘晓波,董飞,等.基于SWMM与NSGA-II耦合的城区雨水泵站多目标优化调控[J].水利学报,2023,54(3):358-368.
CHEN Xuekai, LIU Xiaobo, DONG Fei, et al. Multi-objective optimal operation of urban storm water pump station based on SWMM and NSGA-II [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (3): 358-368 (in Chinese).
- [7] 彭周洋,金溪,桑稳姣.基于NSGA-III算法的合流管网末端截流调蓄设施优化设计[J].环境工程,2022,40(8):143-149.
PENG Zhouyang, JIN Xi, SANG Wenjiao. Optimization of design of terminal flow interception and storage facilities of combined drainage system based on NSGA-III algorithm [J]. Environmental Engineering, 2022, 40 (8): 143-149 (in Chinese).

作者简介:林华星(1999-),男,广西贵港人,硕士研究生,研究方向为城市排水系统联合调度。

E-mail: 1429493084@qq.com

收稿日期:2024-01-08

修回日期:2024-02-27

(编辑:任莹莹)