

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.008

基于风险评估的供水管网水质监测点优化模型研究

吉瑞博¹, 王志红¹, 龙志宏², 张增炜¹, 周中健¹, 屠宇¹, 李斌¹

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510600)

摘要: 供水管网内源污染和外源污染协同监测下的水质监测点优化选址一直是供水领域的研究难点。为进一步提升监测点选址的科学合理性,采用模糊数学集法分析管网区域污染物、管道完整度以及管网低负压情况,量化确定管网的风险评估指数。将基于风险评估的节点监测用时期望值纳入监测点优化选址模型,结合监测失效率、水量覆盖度和监测点占比这 3 个优化目标,完善选址优化体系并建立多目标优化选址模型。使用 MATLAB 软件搭载基于参考向量的非支配排序多目标遗传算法(NSGA-III)成功求解该多目标优化模型,得到帕累托(Pareto)前沿解集。最后,基于 Modena 算例管网进行研究,与传统复合监测目标优化模型选取的选址方案进行对比发现,基于风险评估的供水管网优化选址模型选取的方案能有效降低监测用时,提高了监测效率。

关键词: 供水管网; 水质监测点; NSGA-III; 风险评估

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0052-08

Water Quality Monitoring Points Optimization Model for Water Supply Network Based on Risk Assessment

JI Rui-bo¹, WANG Zhi-hong¹, LONG Zhi-hong², ZHANG Zeng-wei¹,
ZHOU Zhong-jian¹, TU Yu¹, LI Bin¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangzhou Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: The optimization of water quality monitoring point selection under coordinated monitoring of internal and external pollution in water supply networks has always been a difficult problem in the field of water supply. In order to further improve the scientific rationality of the site selection, pollutants distribution in the pipeline network, integrity of the pipeline and low negative pressure of the pipeline network were analyzed by using fuzzy mathematics method, and risk assessment index of the pipeline network was quantified. Expectation value of node monitoring time based on risk assessment was incorporated into the monitoring point optimization location model. Combined with three optimization objectives of monitoring failure rate, water coverage and monitoring point ratio, the site optimization system was improved and a multi-objective optimization location model was established. Using MATLAB software to carry on the non-dominated sorting multi-objective genetic algorithm based on reference vector (NSGA-III), the multi-objective optimization model was successfully solved to obtain the Pareto frontier

solution set. Finally, comparison with the site scheme selected by the traditional compound monitoring target optimization model and based on the Modena example pipeline network research, it was found that the scheme selected by the water supply network optimization location model based on risk assessment could effectively reduce the monitoring time and improve the monitoring efficiency.

Key words: water supply network; water quality monitoring point; NSGA-III; risk assessment

随着城市化进程的不断加快,供水水质安全逐渐演变成为了关系城镇稳定发展和居民正常生活的核心问题。通常,危害水质安全的因素分为内源污染和外源污染两个方面,在供水管网中合理布置水质监测点是保障水质安全的常用举措。内源污染是水在供水管网传输过程中自身以及管壁发生物理、化学、生物变化而使水质恶化的情况,一般采用覆盖水量法或覆盖水龄法选取监测点对内源污染进行监测^[1]。外源污染是由于供水管网的开放性和易侵入性,因为管道破损、管道混接、人为投毒等原因导致污染物进入供水管道中,致使水质发生恶化的情况,一般采用监测时效法选取监测点对外源污染进行监测^[2]。相比较而言,外源污染的危害程度高于内源污染,对于监测的时效性非常看重。水质监测点的优化布局如何兼顾内源和外源污染,已经成为近年来的研究热点问题。

目前,关于供水管网水质监测点的选址研究,一般是建立供水管网水力模型,默认管网各个节点的入侵风险均等,利用优化算法进行选址计算。张鹏等^[3]提出了一种在基于覆盖集法的突发污染水质监测点优化选址模型中引入报警域,同时考虑节点发生污染事件的概率的监测点选址方法,该方法考虑到节点供水量对节点发生污染入侵概率的影响,极大地降低了反映管网节点入侵风险的信息熵。Amin等^[4]从用水需求分布、管网系统脆弱性和人口敏感性3个方面进行入侵风险评估,并依此选取水质监测点,采用故障树分析方法和模糊数学集法分析确定管网各个区域的入侵风险指数,具有良好的可信度,但是缺乏对管网节点的细致风险评估。基于此,笔者提出一种在对管网入侵进行细致风险评估的基础上,综合多种优化目标选取能有效进行内源和外源污染协同监测的水质监测点的方法。

1 供水管网节点风险评估指数的确定

在供水管网水质污染中,内源污染是由管道内生物环的生长或者管道材料的溶解导致的管网水质

的恶化,具有难预测性和难分析性;外源污染在去除人为投毒情况后,发生管网入侵主要是由3方面因素决定:区域污染物、管道完整性、管道低负压^[5]。基于此,为方便计算,将管道的风险归咎于连接节点上,本研究采用层次分析法建立了如图1所示的层次分析图^[6]来分析确定供水管网节点的入侵风险;并在此图的基础上,采用模糊数学集法^[7]计算得到管网节点的风险评估指数。

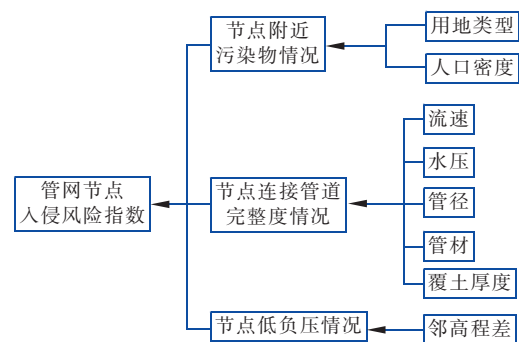


图1 管网节点入侵风险指数层次分析

Fig. 1 Analytic hierarchy of intrusion risk index of pipe network node

1.1 模糊化风险

在处理复杂决策问题中,当决策因素的边界不清且不易定量时,采用模糊数学集法能对多项决策做出合理评价。其原理就是把待考察的模糊对象和反映模糊对象的模糊概念作为模糊集合,建立相应的隶属函数,通过模糊集合论的有关变换与运算,对模糊对象进行定量分析^[8]。为了将决策因素的语言判断和模糊数学集相联系,需建立评价集,本研究引入高危、中危、低危、亚安全、安全这5个语言变量,作为各项决策因素的评判等级,记为评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 。常用的模糊数学隶属度函数有:三角模糊数、梯形模糊数和区间模糊数。

1.1.1 节点附近污染物情况

据报道,2008年广州钟落潭因低位水池受亚硝酸盐污染后回流入供水管道,造成41人中毒;2011

年临海市某铸造厂工业废水进入供水管网造成食物中毒事件。由此可见,供水管网突发污染很多是由于工业活动导致的,管段所处用地类型是影响管网污染物入侵的关键因素。此外,下水道污染物入侵供水管网的事故也屡见不鲜,而管道附近的人口密度与污染事故触发频率呈正相关^[9],因此人口密度也是影响管网污染物入侵的重要因素。根据城镇用地类型和人口密度,划分了14种城市用地类型,并隶属到相应的危险等级,具体如下:公园、绿地和农作物用地,安全;高密度住宅用地,中危;中密度住宅用地,低危;低密度住宅用地,亚安全;核心商业用地,高危;普通商业用地,中危;大型医院、学校等特殊用地,高危;中型医院、学校等特殊用地,中危;小型医院、学校等特殊用地,低危;交通道路、广场用地,亚安全;高污染工业用地,高危;低污染工业用地,低危;仓储用地,安全;博物馆、体育馆等公共场所用地,亚安全。

1.1.2 节点连接管道完整度情况

供水管网管道产生不完整点是由多种因素造成的,排除外界非可控因素,本研究主要考虑管网运行中的管道老化因素。管道老化因素^[10]可分为静态因素和动态因素两类,对于初建供水管网来说,静态分析因素主要分为管材、管径和管道覆土厚度3个方面,动态分析因素主要包括管道流速和水压2个方面。陈志铎^[11]在研究供水管网健康度中指出,管段内水体流速是影响管网健康运行的重要因素,流速与管网产生不完整点的几率呈正相关。此外,在供水管网中,水锤的产生是管道完整度发生恶化的主要因素,水锤的最大和最小压力变化与管网运行压力有关,管网运行压力对管道的破坏随着压力的增大而增加^[12]。对于同一材质的管道,随着管径的增加,管道壁越厚,抵抗水力破坏和侵蚀的能力就越强。为方便计算,将管道因完整度造成的外源污染入侵风险归纳于管网节点上,具体计算方法如下:

$$RI_{i,p} = \max_j RI_{j,p} \quad (1)$$

式中: $RI_{i,p}$ 为节点 i 关于指标 p 的模糊风险指数; $RI_{j,p}$ 为与节点 i 相连的管段 j 关于指标 p 的模糊风险指数。

1.1.3 节点低负压情况

在供水管网的正常运行中,管网压力均大于 H_{\min} (管网最小服务水头),较高的管网正压对于外源污染物的侵入具有良好的防护性^[13]。正压管网

发生低负压事件通常是由于水力条件突变造成的,管网停泵和管道阀门的开闭是影响水力条件变化的重要因素。在管网发生停泵、关阀等状况时,部分管网缺失上游节点的持续供水,会逐步变成静态水压,此时在这部分管段中,管网隆起处容易产生低压现象,情况严重时会产生断流弥合区域形成负压现象^[14],从而吸入外源污染物危害管网水质。如图2所示,供水节点与邻近节点的最大高程正差越大,产生低负压现象的几率就越大,外源污染物侵入的风险就越高。

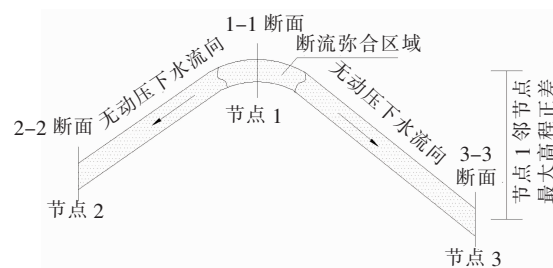


图2 节点低负压产生过程示意

Fig.2 Schematic diagram of low negative pressure generation process of nodes

1.2 聚合和去模糊化

聚合是将管网中每个节点关于每个评价因素的语言评判情况整合为一个模糊集合的过程^[15]。通过计算每一层评价因素权重和节点在该层模糊评价集合的矩阵乘积即可确定上一层评价因素的聚合模糊集。将语言评价等级转化为具有清晰代表数值的过程叫做去模糊化,一般采用加权法来进行去模糊化,具体计算方法如下:

$$CVRI = \sum_{i=1}^5 a_i \cdot \mu_i \quad (2)$$

式中: $CVRI$ 为评价结果清晰值; a_i 为评价等级 v_i 的权重; μ_i 为评价结果对评价等级 v_i 的隶属度。

2 供水管网水质监测点选址模型的建立

Lee 等人^[16]于1991年最先基于覆盖水量法建立了水质监测点优化选址模型,并且采用整数规划的方法进行求解得到监测点布置的位置。Kumar 等人^[17]提出“ t 时间服务水平”水质监测点优化选址方法,当管网中任一个节点突发污染事故时,至少有1个监测站点在设定 t 时间服务水平内发出警报。本研究在现有监测点优化选址的基础上,考虑管网节点外源污染入侵风险评估指数,采用4个优化目标来构建供水管网内源污染和外源污染协同监测的

水质监测点选址模型,优化目标分别为最小化“监测点占比 f_1 ”“监测失效率 f_2 ”“基于风险评估的监测时间期望值 f_3 ”以及最大化“水量覆盖率 f_4 ”,各个优化目标的计算方法及计算公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f_1 = \frac{\text{Mamount}}{\text{Jamount}} \\ \min f_2 = \frac{\sum_{t_i}^S \sum_{M_j}^M \text{Count}(t_i, M_j)}{\sum_{t_i}^S \text{Emount}} \\ \min f_3 = \frac{\sum_{i=1}^{\text{Jamount}} \text{CVRI}_i \cdot T_i}{\sum_{i=1}^{\text{Jamount}} \text{CVRI}_i} \\ \max f_4 = \frac{\sum_{t_i}^S \sum_{M_j}^M \sum_{J_k}^C q(t_i, J_k)}{\sum_{t_i}^S \sum_{J_l}^J q(t_i, J_l)} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: Mamount 为水质监测点的数目; Jamount 为管网节点的数目; t_i 为第 i 个时刻 t , 包含于水力模型模拟时长输出时刻的集合 S ; M_j 为第 j 个监测点位置, 包含于布置监测点的集合 M ; $\text{Count}(t_i, M_j)$ 为监测点 M_j 在 t_i 时刻监测覆盖的突发污染事件数目; Emount 为在 t_i 时刻可能发生突发污染事件的集合; CVRI_i 为节点 i 的风险评估指数; T_i 为节点 i 水流至监测点的最短时间; J_k 为监测点 M_j 监测覆盖的节点, 包含于监测覆盖集合 C ; $q(t_i, J_k)$ 为节点 J_k 在 t_i 时刻的节点流量; J_l 为供水管网第 l 个节点, 包含于节点集合 J 。

在上述公式中, 监测点占比 f_1 作为经济性指标, 是影响管网造价的重要因素, 取值越低, 构建该监测系统的成本就越低; 监测失效率 f_2 是在设定的监测时间阈值 T 内, 已布设的监测点无法发现的污染事件占总随机污染事件总数的占比, 是衡量监测系统效率的重要指标; 节点的监测时间期望值 f_3 是以供水管网风险评估指数为基础, 结合水力流通时间矩阵, 采用加权平均法确定监测时间的期望值, 旨在引导模型在选取监测对象时, 加大对风险评估指数高的节点的监测, 从而提升对高风险节点的外源污染物入侵的监测效率; 水量覆盖率 f_4 是基于当上游节点综合水龄值与下游节点水龄值占比高于 C 时可被下游节点水质所反映的理论, 结合水龄覆盖矩阵, 求解得到监测点所能覆盖代表的节点数目占总节点数目的占比, 是衡量监测覆盖率的重要指标。

基于上述描述的 4 个优化目标, 建立选址优化体系, 以此为核心构建供水管网监测点优化选址模型。首先使用 MATLAB 软件搭载 EPANET 动态链接库进行管网水力模拟, 获取管网的动态数据和静态数据。然后结合管网所在城镇的规划信息, 采用模糊数学集法, 量化确定管网的节点风险评估指数。同时, 以管网的动态数据为基础, 采用覆盖水量法和“ t 时间服务水平”法求解得到管网节点的水龄覆盖矩阵和监测时间覆盖矩阵。最后, 在水龄覆盖标准值 C 和监测时间阈值 T 下, 以选址优化体系为选取标准, 找出能够有效进行管网的内源和外源污染监测的节点组合作为水质监测点优化布置方案。

3 算例分析

按照上述方法, 本研究选用意大利 Modena 城镇供水管网^[18]作为算例。Modena 城镇供水管网拓扑结构如图 3 所示, 该管网有 268 个供水节点、4 个水源节点, 共 272 个节点, 供水管段共有 317 根, 总管长约为 71 km, 供水量约为 $3.52 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 属于中型城镇管网。本研究采用一般中型城镇需水量模式构建准稳态管网, 在 EPANET 平台上, 对管网在模拟周期内的管道流速和节点压力进行统计分析, 得到模拟周期内的管道平均流速和节点平均水压。

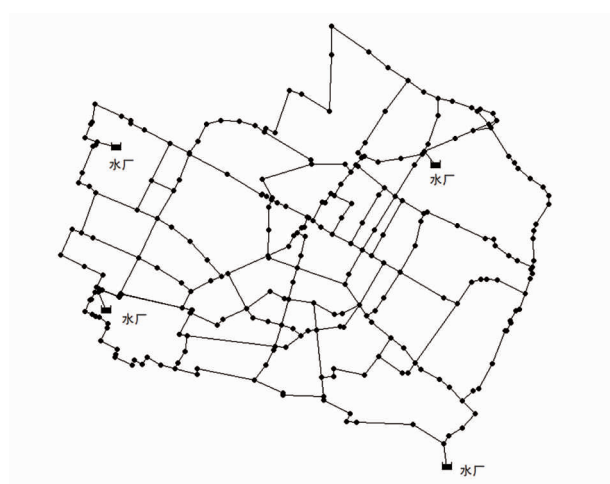


图3 Modena 城镇供水管网拓扑结构

Fig.3 Water supply pipe network topology diagram of Modena

3.1 求解管网节点风险评估指数

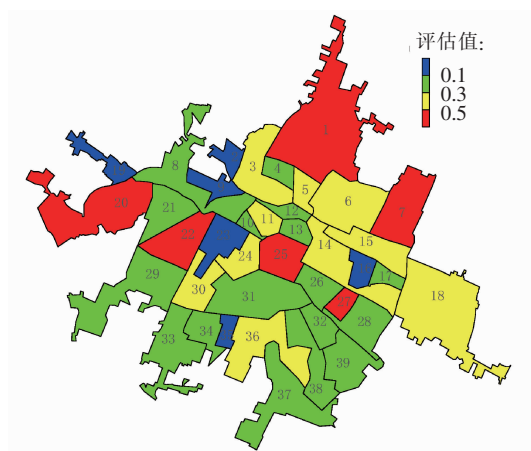
针对第 1 节提出的节点风险评估指数的确定方法, 进行了管网节点的风险指数计算。为说明计算过程, 表 1 随机选取了管网中的 14 个节点, 计算其评判因素指数和综合风险指数。

表1 Modena 城镇管网节点风险指数

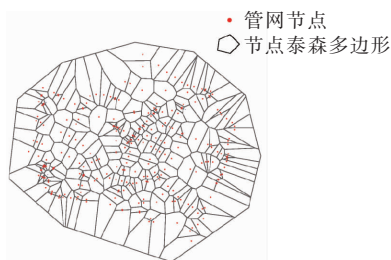
Tab.1 Pipe network node risk index of Modena

风险评判因素	节点编号													
	11	31	51	71	91	111	131	151	171	191	211	231	251	271
区域污染物	0.52	0.30	0.32	0.20	0.30	0.31	0.29	0.29	0.29	0.57	0.25	0.03	0.29	0.22
管道完整度	0.62	0.40	0.93	0.21	0.56	0.64	0.79	0.39	0.25	0.52	0.48	0.44	0.50	0.46
低负压	0.03	0.15	0.04	0.09	0.18	0.08	0.35	0.16	0.25	0.24	0.08	0.28	0.64	1.00
综合指数	0.39	0.28	0.43	0.17	0.34	0.34	0.48	0.28	0.26	0.44	0.27	0.25	0.48	0.56

根据 Modena 城镇的地形和区域情况,将城镇分为 39 个区域,结合每个区域中各种用地类型的占比,得到各个区域基于污染物风险的评估值,如图 4(a)所示。为合理确定供水管网各个节点的区域污染物的风险评估值,在建立伪多边形边界的基础上,建立供水节点泰森多边形,确定每个节点的受影响区域,如图 4(b)所示。结合两图,采用面积加权平均法确定供水管网节点的污染物风险评估值,见表 1 第 1 行数据。



a. 污染物风险评估值



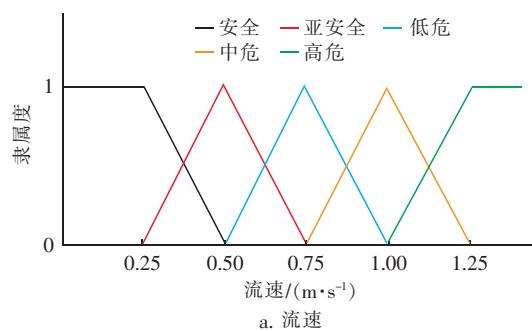
b. 管网节点泰森多边形

图4 Modena 城镇区域污染物风险评估值和管网节点泰森多边形

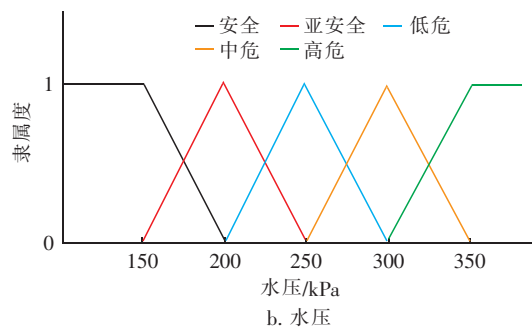
Fig.4 Pollutant risk assessment map and pipe network node Tyson polygon map of Modena

结合 Modena 城镇管网运行动态信息和静态信息,考虑管网基础信息的完整度,本研究选用流速、

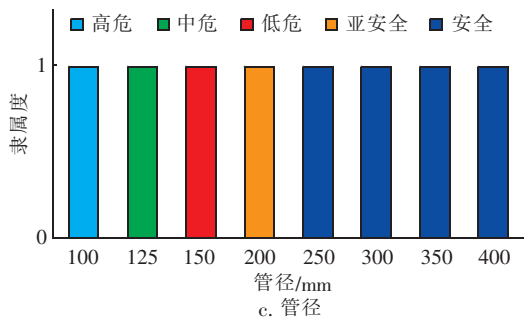
水压以及管径来分析确定节点连接管道完整度风险评估值。其中,管网节点流速及水压采用三角模糊数确定评估值,具体情况见图 5(a)和(b);管网管段管径采用区间模糊数确定评估值,具体见图 5(c)。综合这 3 个因素的评估值即可确定管道完整度对于连接节点的风险评估值,具体见表 1 第 2 行数据。分析处理 Modena 城镇管网节点的高程信息,得到各个节点的邻最大高程差,采用三角模糊数来确定这项指标的风险评估值,见图 5(d),部分节点低负压风险评价价值见表 1 第 3 行数据。



a. 流速



b. 水压



c. 管径

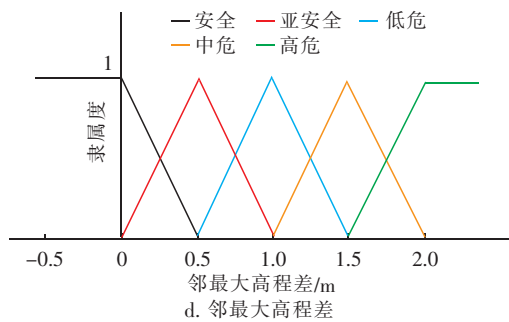


图5 Modena 城镇管网风险评估因素隶属函数

Fig. 5 Pipe network risk assessment factor membership function diagram of Modena

综合确定管网节点的各项评价指标,采用算术平均法得到节点的综合风险评估指数,见表1第4行数据,将此指标作为管网的节点入侵风险系数。管网中各个节点的风险评估指数如图6所示,较高风险指数的节点主要分布在东北城区的工厂附近以及中心城区附近,和初始模糊评价相吻合。

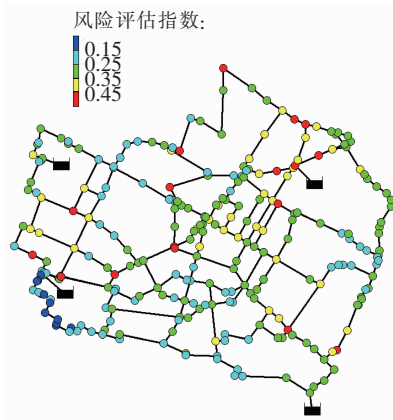


图6 Modena 城镇管网风险评估指数示意

Fig. 6 Pipe network risk assessment index of Modena

3.2 求解供水管网水质监测点选址模型

针对第2节提出的基于4项优化目标的水质监测点选址模型,采用第三代进化算法NSGA-III算法^[19]进行求解。相对于NSGA-II算法,新一代的NSGA-III算法采用关联参考向量的方式替代拥挤度排序法作为新的精英保留策略。这种新式子代选取方法是在非支配解集中,以正交单位刻度向量组为基准,在空间上采用解集隶属向量的方式,以参考向量所隶属的节点数目均衡为目标,选取下代种群个体。这种方法能使得进入下代循环的每代种群在高维度空间上更加具有多样性,从而在高维多目标优化模型的求解上展现优越性。

NSGA-III算法的参数设置如下:初始种群大小为120,循环代数5000,单个维度的刻度数为7,共有120个参考向量,其他参数默认配置。此外,本研究选用水龄覆盖标准值 C 为0.5,监测时间阈值 T 为1800s,水质监测点占比阈值为12.5%。使用MATLAB软件运行搭载NSGA-III算法求解水质监测点优化选址模型,得到Pareto最优解集。

4 结果分析

按照上述方法计算得到,供水管网水质监测点优化选址的Pareto最优解共120个,图7绘制了4个优化目标的适应度值。可以看出,解集在空间分布较为均匀,在每个维度的极值差异较大,表明NSGA-III算法在多目标求解上有较高的空间搜索度,能为决策者提供更多种类的优化方案。

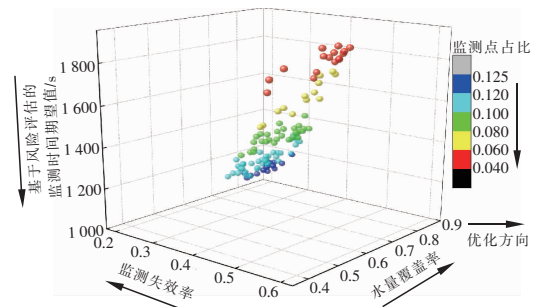


图7 基于风险评估的水质监测点优化选址模型的Pareto解集

Fig. 7 Pareto solution of water quality monitoring station optimization location model based on risk assessment

为了验证本研究监测点优化选址方案的科学性,采用传统复合监测目标选址方法进行对比分析。主要内容为:在不考虑风险评估指数的情况下,选用式(3)的 f_1 、 f_2 和 f_4 作为优化目标,控制其他变量,采用同样的方法进行求解,得到120个监测点优化选址的Pareto最优解和解集的3个优化目标的适应度值,剩余的“基于风险评估的监测时间期望值”属性值根据式(3)中的 f_3 计算得到,具体见图8。

为进一步选取水质监测点选址方案,将满足常规水质监测的水量覆盖率为80%和突发污染水质监测的监测失效率为30%作为进一步选择要求。图7的解集中有25个方案解集符合要求,达标解占比为20.8%;图8的解集中有14个方案解集符合要求,达标解占比为11.7%。通过对比可以发现,引入基于风险评估的监测时间期望值能够在有限的计算内发掘出更多的符合要求的解,即可以提升在

优异解附近的局部搜索性。

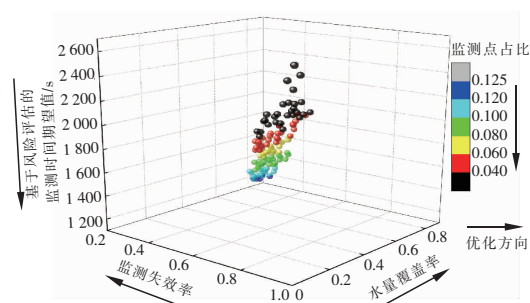


图8 传统复合监测水质监测点优化选址模型的 Pareto 解集

Fig. 8 Pareto solution of traditional composite monitoring water quality monitoring station optimization location model

从图7和图8可以看出,两种模型的达标解的监测点个数均在29~34之间,图9列出了基于这6种监测点个数,分别在两种模型的达标解中监测用时期望值的最低值。可以看出,基于风险评估的模型选取的达标解方案的最低监测用时期望值随着监测点个数的增加而降低,且降低幅度较大,具体表现为:当监测点个数从29提升至34时,监测时间期望值降低了16%;从传统模型的走势曲线中可以发现,当监测点个数在29~32之间时,最低监测时间期望值亦呈现出一定的降低趋势,但目标值均高于基于风险评估的模型,当监测点个数在32~34之间时,目标数值呈现一定的波动性,总体监测时间期望值的降低幅度低于基于风险评估的模型。综上所述,基于风险评估的供水管网监测点优化选址模型选取的方案,在保障水量覆盖率和监测失效率达标的基础上,能够有效降低管网的节点监测用时期望值,从而提升供水管网的整体监测效率。

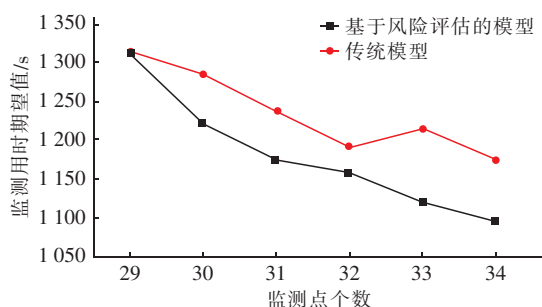


图9 两种模型选取的方案监测用时期望值对比

Fig. 9 Comparison of expected values of monitoring time of two models

5 结论

① 针对现有研究在选取内源污染和外源污染

协同监测的水质监测点选址方法上的不足,引入风险评估来区分供水管网节点外源污染物入侵情况。采用模糊数学集法分析管网区域污染物情况、管道完整度情况以及管网低负压情况,量化得到管网各节点的风险评估指数,在此基础上,进一步计算得到“节点监测用时期望值”。将这一目标纳入选址模型选址优化体系,能够发挥风险评估指数在水质监测点高效监测节点偏好上良好的指向作用,从而提升对高风险节点的外源污染物入侵的监测效率。

② 基于4大优化目标确定的选址优化体系,建立水质监测点优化选址模型。将供水管网算例代入研究,采用NSGA-III算法进行求解。得到的Pareto解集在多维目标空间中分布均匀,且在每个优化目标维度中均表现出良好的搜索性,证明了NSGA-III算法在求解高维多目标优化问题上的良好适用性。

③ 将基于风险评估的模型选址结果与传统模型求解结果进行对比,在保障水量覆盖率和监测失效率达标的基础上,前者能够有效地降低管网的节点监测用时期望值,从而提升供水管网的整体监测效率,证明了基于风险评估的优化模型获得的监测点选址方案更加科学合理。

参考文献:

- [1] 周广宇,莫耀,赵新华,等. 基于多组分水质模型的供水管网细菌风险研究[J]. 中国给水排水,2016,32(5):64-69,73.
ZHOU Guangyu, MO Li, ZHAO Xinhua, et al. Assessment of bacteria risk in water distribution system based on multi-species water quality model[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(5): 64-69, 73 (in Chinese).
- [2] 朱应云. 突发外源污染入侵的非稳态管网水质监测点优化选址研究[D]. 广州:广东工业大学,2015.
ZHU Yingyun. Study on Modeling Optimal Location of Water Quality Monitoring Sites in Dynamic Water Distribution Network with Exogenous Contamination[D]. Guangzhou:Guangdong University of Technology, 2015(in Chinese).
- [3] 张鹏,余健. 基于覆盖集的突发污染水质监测点优化选址模型改进[J]. 中国给水排水,2017,33(17):55-58.
ZHANG Peng, YU Jian. Modification of covering set based method for detecting accidental contaminations in

- municipal water networks [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(17): 55–58 (in Chinese).
- [4] AMIN A, MUHAMMAD A. Framework for water quality monitoring system in water distribution networks based on vulnerability and population sensitivity risks [J]. Water Supply, 2017, 17(3): 811–824.
- [5] HOOPER S M, MOE C L, UBER J G, *et al.* Assessment of microbiological water quality after low pressure events in a distribution system [C] // BUCHBERGER S G, CLARK R M, GRAYMAN W M, *et al.* Proceedings of 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. Cincinnati: Environmental and Water Resources Institute of ASCE, 2006: 157.
- [6] KILINC Y, OZDEMIR Ö Ö, ORHAN C, *et al.* Evaluation of technical performance of pipes in water distribution systems by analytic hierarchy process [J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 42: 13–21.
- [7] YANG S, YANG Q, MA H, *et al.* Health risk assessment of phreatic water based on triangular fuzzy theory in Yinchuan plain [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2018, 164(30): 732–738.
- [8] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 [J]. 环境科学, 2017, 38(3): 1018–1027.
- LI Chunfang, WANG Fei, CAO Wentao, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City [J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 1018–1027 (in Chinese).
- [9] MILLEDGE D G, GURJAR S K, BUNCE J T, *et al.* Population density controls on microbial pollution across the Ganga catchment [J]. Water Research, 2018, 128: 82–91.
- [10] 柯庆, 周超, 王林森, 等. 供水管网爆管风险评估模型研究 [J]. 给水排水, 2016, 42(7): 114–118.
- KE Qing, ZHOU Chao, WANG Linsen, *et al.* Burst risk assessment model for water supply network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(7): 114–118 (in Chinese).
- [11] 陈志铎. 基于 FAHP–RS 权重分析的供水管道健康度模糊评价模型研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- CHEN Zhiduo. The Study of a Fuzzy Evaluation Model of Water Supply Pipeline Health Based on FAHP-RS Weight Analysis [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [12] 陈梦奇. 城镇供水管网停泵水锤模型计算研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- CHEN Mengqi. Study on Calculation Model of Water Hammer in Urban Water Supply Pipe Network [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016 (in Chinese).
- [13] NARDO A D, NATALE M D. A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks [J]. Engineering Optimization, 2011, 43(2): 193–211.
- [14] ERICKSON J J, SMITH C D, GOODRIDGE A, *et al.* Water quality effects of intermittent water supply in Arraiján, Panama [J]. Water Research, 2017, 114: 338–350.
- [15] BAO C, LI J, WU D. A fuzzy mapping framework for risk aggregation based on risk matrices [J]. Journal of Risk Research, 2018, 21(5): 539–561.
- [16] LEE B H, DEININGER R A. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system [J]. Journal of Environmental Engineering, 1992, 118(1): 4–16.
- [17] KUMAR A, KANSAL M L, ARORA G. Discussion of detecting accidental contaminations in municipal water networks [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 125(5): 308–310.
- [18] BRAGALLI C, D'AMBROSIO C, LEE J, *et al.* An MINLP solution method for a water network problem [C] // AZAR Y, ERLEBACH T. Algorithms – ESA 2006. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 696–707.
- [19] YUAN Y, XU H, WANG B. An improved NSGA-III procedure for evolutionary many-objective optimization [C] // IGEL C, ARNOLD D V. Proceedings of the 2014 Conference on Genetic and Evolutionary Computation. Vancouver: Association for Computing Machinery, 2014: 661–668.

作者简介: 吉瑞博 (1995–), 男, 山西运城人, 硕士, 主要研究方向为供水管网优化理论及安全保障技术。

E-mail: 451252679@qq.com

收稿日期: 2019–11–19

修回日期: 2020–07–08

(编辑: 刘贵春)