

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.008

基于覆盖水量的水质监测点选址模型改进及应用

黄善钦¹, 王 圃¹, 王峰青², 王良超², 周志强¹, 王 颖³, 万巧玲²

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400044; 2. 重庆水务集团股份有限公司, 重庆 400000;
3. 重庆大学建筑规划设计研究总院有限公司, 重庆 400045)

摘 要: 研究了给水管网水质监测点优化选址问题,分析了覆盖水量法存在的缺陷,提出了一种基于覆盖权重水量的优化选址方法,即在覆盖水量选址模型中引入节点水质权重。覆盖权重水量法同时考虑了节点水量与水质在空间上的分布,以及周围管道属性对节点代表性的影响,提高了监测点选址的代表性。将覆盖权重水量法应用于重庆市某区给水管网进行水质监测点优化选址,并与覆盖水量法进行对比。结果表明,在同一监测点水平,覆盖权重水量法求得的监测点选址更具有代表性和实用性,可为同类城市给水管网水质监测点选址提供参考。

关键词: 给水管网; 水质监测点; 选址模型; 水质权重

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0046-06

Modification and Application of Water Quality Monitoring Points Location Model Based on Demand Coverage

HUANG Shan-qin¹, WANG Pu¹, WANG Feng-qing², WANG Liang-chao²,
ZHOU Zhi-qiang¹, WANG Ying³, WAN Qiao-ling²

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Water Group Co. Ltd., Chongqing 400000, China; 3. General Architectural Planning and Design Research Institute of Chongqing University Co. Ltd., Chongqing 400045, China)

Abstract: The optimal location of water quality monitoring points in water supply network was explored, and defects of the demand coverage were analyzed. An optimized location method based on the coverage weight water quantity was proposed, which was to introduce the node water quality weight into the demand coverage location model. The weight demand coverage method considered the spatial distribution of water quantity and quality of the nodes, and the influence of the surrounding pipeline properties on the node representativeness, which improved the representativeness of location of the monitoring points. The weight demand coverage method was applied to a water supply network in a district of Chongqing to optimize the location of water quality monitoring points, and the results were compared with the demand coverage method. At the same monitoring level, the monitoring points chosen by weight demand coverage method had better representativeness and practicability, which could provide reference for the location of water quality monitoring points of similar municipal water supply network.

Key words: water supply network; water quality monitoring point; location model; weight of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404706-1); 中央高校基本科研业务费资助项目(2019CDCGHJ326)
通信作者: 王圃 E-mail: wpu2120@sina.com

water quality

经过水厂净化后出厂水水质能满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),但出厂水在管网中流动时由于与管壁或者水中其他物质发生反应,其水质会缓慢变差。为保证管网水质安全,国家标准规定了在城市给水管网中每20 000供水人口设置1个水质监测点,并布置在具有代表性的节点处,然而怎样的节点具有代表性是值得进一步研究的。

根据监测目标的不同,给水管网中水质监测点选址分为两类。其中,为监控管网日常运行情况下的监测点布置称为第一类选址问题^[1],常用的方法为覆盖水量法(DC),由Lee等^[2]在1992年最早提出,其核心观点是假设管网水质状况沿水流路径不断变差,在此假设前提下,管网“下游”节点水质必然在一定程度上反映了“上游”节点的水质状况。通过设定一个覆盖标准,即可建立管网中上、下游节点间的水质联系,从而达到监控少数节点便能监控大部分管网的目的。在求解监测点优化选址方法上Lee等采用了整数规划方法求解。在此基础上Pool^[3]、张土乔^[4-5]、Rathi^[6]等人也尝试了各种类型的优化算法对模型进行求解,均得到了较好的效果。

在应用于常规水质监测点优化选址问题时,采用节点水量表征水质存在单一性与局限性。虽有研究人员对覆盖水量法进行改进,考虑了节点的余氯或者停留时间的影响^[7-8],但未对节点各水质指标进行综合考虑,也未提及节点周围管道属性(如管材、管龄、管径)对节点水质的影响,从而不可避免地弱化了节点水质与节点周围管道属性对节点代表性的影响,因此所求解出的监测点位的代表性有待提高。

基于此,笔者首次提出了一种给水管网节点水质风险评价模型,并利用该模型提出了基于覆盖权重水量的优化选址方法。覆盖权重水量法充分考虑了节点水质条件与周围管道属性对节点代表性的影响,并成功应用于重庆某区给水管网水质监测点优化选址中,选出了更具代表性的监测点。

1 节点水质风险评价

表征供水管网节点水质优劣的指标有多种,其中余氯浓度的高低对管网节点水质安全起着重要的警示作用,并且其在管网中遵循一定的反应规律进行着衰减^[9]。节点水龄指出厂水流到该节点需要

的时间,需要的时间越长,节点水质变差的可能性就越大。管网节点周围连接着管道,在实际管网中,由于水流的冲刷和管道内生长环、管壁生物膜的影响^[9-10],节点周围管道会对节点水质造成影响。其中不同管材由于自身的化学性质,表面条件在耐腐蚀性能上表现不同,金属管材相较于非金属管材更易受腐蚀;管龄越长,管道受腐蚀程度就越深,生长环体积就越大,微生物附着就越多,对节点水质的影响就越严重^[10];管径越小,管壁生物膜、生长环与水的接触率更大,水质越差^[11]。

综上所述,考虑到水力、水质模拟软件的功能以及各指标对水质的影响,选取了节点余氯,水龄以及节点周围管道的管材、管龄、管径作为节点水质风险评价的指标。根据上述内容,建立节点水质风险评价模型,见图1。构建双层评价模型,其中第1层指标为管道属性和水质条件。管道属性下的次级指标有管材、管龄、管径,其中节点的管材与管龄指标由节点上游管段决定,若节点处于环状管网且有多段管道相连,则将与节点相连管道中最差的管材、管龄属性赋予该节点;管径指标是与节点相连管道的平均管径。水质条件下的次级指标为余氯和水龄。

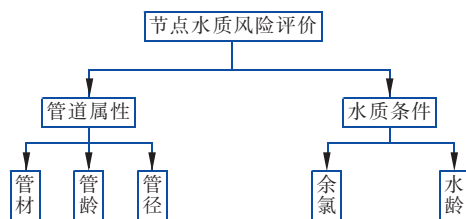


图1 节点水质风险评价模型

Fig. 1 Water quality risk assessment model for pipe nodes

不同水质指标对管道节点水质风险评价的影响存在差异,还有可量化指标与不可量化指标(如管材)之分,而且水质风险与管材、水龄、余氯等都是相关的。为避免重复加权及指标数量带来的偏差,需对每个指标赋予合理的权重,最终使所有指标的总权重之和为1。本研究采用模糊层次分析法(FAHP)计算各指标权重,得到影响节点水质风险评价各指标权重矩阵: $W = (\text{管材}, \text{管龄}, \text{管径}, \text{余氯}, \text{水龄})^T = (0.174, 0.164, 0.137, 0.276, 0.249)^T$ 。

2 常规水质监测点选址模型的改进

传统的覆盖水量模型虽然保证了水量最大覆

盖,但是并没有考虑实际管网中水质在空间分布上的变化。根据这一缺陷,提出了一个改进的优化选址模型,该模型是在传统覆盖水量法的基础上,考虑管网中节点水质因素与周围管道属性,运用前述节点水质风险评价模型,在选址模型中引入节点水质权重。将监测点的覆盖水量与其对应覆盖节点水质权重乘积之和定义为覆盖权重水量(WDC),因此原模型中的目标函数由总覆盖水量最大变为了总覆盖权重水量最大。模型表达式见式(1),约束条件见式(2)、(3)。

$$Y = \max \sum_{i=1}^n a_i d_i y_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} x_j - y_i \geq 0 \quad (3)$$

式中: Y 为监测点总覆盖权重水量, L/s ; a_i 为节点 i ($i=1,2,\dots,n$)处的水质权重; y_i 为覆盖节点,覆盖时取1,未覆盖时取0; x_i 为设置的监测点,设置时取1,未设置时取0; d_i 为节点水量, L/s ; N 为监测点水平; n 为节点数; c_{ij} 为覆盖矩阵中的元素。

其中节点水质权重 a_i 的计算需收集节点处的余氯值、水龄、管材、管径、管龄。为避免不同量纲带来的误差,将各指标进行归一化处理,其中余氯、管径指标按式(4)进行处理;水龄、管龄按式(5)进行处理;管材由定性指标转换为定量指标后按式(5)处理。处理后得到节点各水质指标组成的数值评价矩阵,再与前述各节点水质指标权重矩阵相乘即可得到每个节点的水质权重 a_i 。而节点权重水量越高,说明越倾向于监测到此节点。

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

式中: x_i 为原始数值; x_i^* 为处理后的数值; x_{\min} 为该项数据的最小值; x_{\max} 为该项数据的最大值。

3 工程实例应用

重庆某城区地处嘉陵江边,面积约704 hm²,服务人口约18万人,城区内地形高程范围为200~235 m。城区现状给水系统中有水厂以及高位水池1座。水厂最高日供水量可达 3.0×10^4 m³/d,高位水池容积约为3 000 m³,整个城市最高日24 h内用水量变化如图2所示。

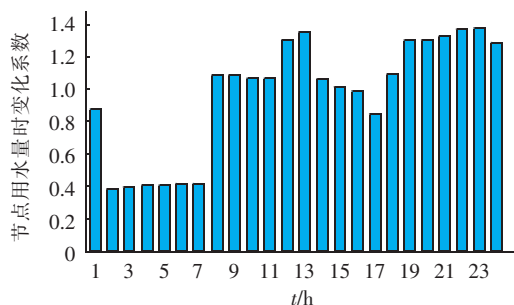


图2 节点用水量时变化系数

Fig. 2 Change coefficient of node water consumption

该片区城市给水管网(管网A)内现状水质监测点共有9个,其选址为水质监测人员通过经验确定,通过校验后其水量覆盖率仅为49.97%,缺乏代表性。为优化此区水质监测点选址,将覆盖权重水量法运用到此区给水管网中,求解最优的8~12个监测点位,并与覆盖水量法的计算结果进行比较。

对于管网A的水质监测点的求解过程可概括如下:收集管网实测资料,建立水力、水质模型,应用专业软件对管网进行动态的水力、水质模拟,获取最高日最高时覆盖水量矩阵后,确定监测点数量,然后采用遗传算法^[12]寻求最优监测点选址方案。

管网A中共有管道118段,其中管道材料主要为球墨铸铁(球铁)与钢制卷管(钢管),管龄分布范围为3~19年,管径范围为DN200~600;出厂水余氯值为0.81 mg/L,为方便研究,将余氯在管网中的衰减模拟为与水体、管壁的简单一级反应;水龄初始值为零,可模拟为在管网中进行零级增长的物质。稳定运行72 h后,将最后24 h的节点平均余氯、水龄值作为计算数据。由于节点数量过多,限于篇幅,表1仅列出部分节点管道属性及水质条件。

表1 节点管道属性及水质条件

Tab. 1 Pipeline properties and water quality of pipe nodes

项 目	管材	管龄/ 年	管径/ mm	余氯/ (mg · L ⁻¹)	水龄/h
节点1	球铁	16	200	0.04	0.36
节点2	球铁	16	200	0.03	0.40
节点3	球铁	16	200	0.04	0.34
节点4	球铁	16	200	0.05	0.32
...					
节点104	球铁	19	400	0.51	0.23

在进行数据处理之前,先将管材这一定性指标转化成定量的指标。管网A中的管材为钢管与球铁管。钢管较球铁管更易受到腐蚀,根据两种管材

的腐蚀速率以及最大使用年限^[13],将两种管材的水质评价价值转为:球墨铸铁管=1,钢管=2。之后将104个节点水质数据全部进行归一化处理,可得到节点各个水质指标组成的数值矩阵(部分),见表2。

表2 归一化处理后的节点水质数值

Tab.2 Normalized water quality of pipe nodes

项 目	节点 管材	节点管 龄	节点管 径	节点水 龄	节点余氯
节点1	0	0.813	1.000	0.989	0.870
节点2	0	0.813	1.000	1.000	0.958
节点3	0	0.813	1.000	0.984	0.811
节点4	0	0.813	1.000	0.981	0.774
...					
节点104	0	1.000	0.505	0.383	0.544

各指标的权重矩阵 $W=(0.174,0.164,0.137,0.276,0.249)^T$,最终得到节点水质权重 $a=(a_1,a_2,a_3,a_4,\cdots,a_{104})^T=(0.760,0.785,0.744,0.734,\cdots,0.474)^T$ 。

在计算最优的8~12个监测点位置时,运用遗传算法进行求解,遗传算法参数取值如下:初始群体数为250,交叉率为0.8,变异率为0.1,终止进化代数为100,计算过程中覆盖标准取值为50%。表3列出了应用覆盖水量法和覆盖权重水量法求解的8~12个监测点的最优解。图3为两种方法在各监测水平下的覆盖率。

表3 覆盖水量法与覆盖权重水量法的比较

Tab.3 Comparison between DC and WDC

监测 水平	覆盖水量法		覆盖权重水量法	
	监测点优化结果	覆盖 率/%	监测点优化结果	覆盖 率/%
8	2、11、23、32、35、 46、64、85	72.62	2、11、22、32、35、 46、65、85	71.45
9	2、11、23、30、32、 35、46、64、85	79.55	2、11、23、30、32、 35、46、60、83	77.98
10	2、11、23、30、35、 46、58、64、73、85	82.94	2、11、23、30、32、35、 46、60、64、85	82.27
11	2、11、23、30、32、35、 46、60、64、74、85	85.11	2、11、23、30、32、35、 46、58、64、73、85	84.68
12	2、11、23、26、30、32、 35、46、60、64、74、85	92.59	2、11、23、26、30、35、 46、52、60、64、73、85	92.38

从表3可以看出,在相同监测点水平下,覆盖权重水量法得出的覆盖率略低于覆盖水量法,因为与只考虑水量覆盖率最大的覆盖水量法相比,覆盖权重水量法的监测点选址还考虑了节点水质及周围管

道属性对监测点代表性的影响。因此一些水量不大,但是水质权重高的节点被认为是需要被监测点覆盖到的。例如当监测点水平均为9个时,覆盖水量法优化的监测点位置为2、11、23、30、32、35、46、64、85;覆盖权重水量法的监测点位置为2、11、23、30、32、35、46、60、83。

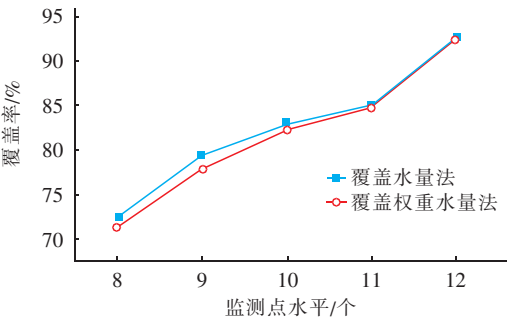


图3 覆盖率对比

Fig.3 Coverage comparison

两种方法选出的监测点有重合也有不同,各自独有监测点的总覆盖水量与总覆盖权重水量对比见表4。以9个监测点水平为例,传统覆盖水量法优化选址得到的独有监测点为64、85,其总覆盖水量比覆盖权重水量法得到的独有监测点60、83多5.96 L/s,然而总覆盖权重水量却少0.42 L/s,这是因为覆盖权重水量法考虑了节点水质权重的因素,在相同监测点水平下,监测点选址更倾向于覆盖权重水量较高的节点,因此,覆盖权重水量法得到的监测点选址方案更具代表性。

表4 独有监测点的比较

Tab.4 Comparison of unique monitoring nodes

项 目	独有 监测点	总覆盖水量/ (L·s ⁻¹)	总覆盖权重水量/ (L·s ⁻¹)
传统覆盖水量法	64、85	47.72	17.67
覆盖权重水量法	60、83	41.76	18.09

此外,和原有的水质监测点选址相比,覆盖权重水量法得到的监测点选址将覆盖率由49.97%提升至77.98%,优化效果显著。优化后监测点空间分布如图4所示。可以看出,监测点的选址符合国家标准的要求,处于管网末梢(点2、11、35、46、60)或居民常用水点如医院(点23)、住宅集中区域(点30)、汽车枢纽站(点32)等。在水厂周围未设置水质监测点,因为离水厂越近,节点余氯越高,水龄越短,水质不合格的可能性越低。

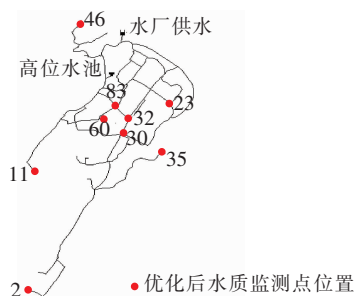


图4 优化后监测点位置分布

Fig.4 Location of monitoring points after optimization

以9个监测点为例,和传统覆盖水量法相比,覆盖权重水量法得出的监测点布置方案虽然水量覆盖率下降了1.57%,但其覆盖到节点的权重水量更高,即在水量覆盖率相近的情况下,覆盖权重水量法选出的监测点还考虑了节点水质的空间分布特征与节点周围管道属性的影响,监测点选址更具代表性。和管网内原有水质监测点相比,覆盖权重水量法选出的监测点覆盖率提升显著。因此,通过覆盖权重水量法优化得到的监测点更具代表性和实用性。

4 结论

① 综合考虑了节点处水质条件及周围管道属性对节点水质风险的影响,由节点水质风险评价模型得出的计算结果能很好地代表节点的水质权重。

② 覆盖权重水量法综合考虑了节点处水量和水质空间分布特征及节点周围管道属性对监测点代表性的影响,相比覆盖水量法,在同一监测水平下,覆盖权重水量法得到的监测点的覆盖率略低于传统覆盖水量法,但监测到权重水量更高,从而提高了管网常规水质监测点优化选址的代表性和可信性。

③ 覆盖权重水量法优化选址模型成功应用于重庆某区城市给水管网水质监测点优化选址中,可为类似城市给水管网水质监测点选址提供参考。

参考文献:

- [1] 刘书明,刘文君,陈晋端. 给水管网水质监测点优化选址研究进展[J]. 中国给水排水,2009,25(22): 20-24.
Liu Shuming, Liu Wenjun, Chen Jinduan. Research progress in optimal location of water quality monitoring sites in water distribution system[J]. China Water & Wastewater,2009,25(22):20-24(in Chinese).
- [2] Lee B H,Deininger R A. Optimal locations of monitoring

stations in water distribution system[J]. J Environ Eng, 1991,118(1):4-16.

- [3] Pool S. Optimal Operation and Location of Chlorine Boosters[D]. Tucson;University of Arizona,2002.
- [4] 张士乔,黄亚东,吴小刚. 供水管网水质监测点优化选址研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(1): 1-5.
Zhang Tuqiao, Huang Yadong, Wu Xiaogang. Optimal locations of water quality monitoring stations in water distribution systems[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2007,41(1):1-5(in Chinese).
- [5] 张士乔,黄亚东,吴小刚. 供水管网水质监测点选址风险研究[J]. 自然灾害学报,2006,15(1):149-154.
Zhang Tuqiao, Huang Yadong, Wu Xiaogang. Risk of location of water quality monitoring stations in water distribution systems[J]. Journal of Natural Disasters, 2006,15(1):149-154(in Chinese).
- [6] Rathi S, Gupta R. Monitoring stations in water distribution systems to detect contamination events[J]. Ish Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 20(2): 142-150.
- [7] 许仕荣,周书葵. 基于节点水龄的供水管网水质监测点的优化布置[J]. 南华大学学报:理工版,2003,17(3):13-16.
Xu Shirong, Zhou Shukui. Optimal locating of quality monitoring stations in water distribution systems based on current age of the nodes [J]. Journal of Nanhua University: Science & Engineering Edition, 2003, 17(3):13-16(in Chinese).
- [8] 陈炳瑞,张震,付浩,等. 基于水力模型的多因子水质监测点优化布置方法研究[J]. 重庆大学学报,2019,42(4):92-100.
Chen Bingrui, Zhang Zhen, Fu Hao, et al. Research on optimal arrangement of multi-factor water quality monitoring points based on the hydraulic model [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(4):92-100 (in Chinese).
- [9] 赵志领,赵洪宾,何文杰,等. 生长环作用下的给水管网水质特征[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2008,24(5):532-534,538.
Zhao Zhiling, Zhao Hongbin, He Wenjie, et al. Research on water quality characteristic effected by growing ring in water network [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Science Edition, 2008, 24(5):532-534,538(in Chinese).

(下转第56页)