

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.04.011

# 基于水力模型的多因子水质监测点优化布置方法研究

陈炳瑞<sup>1</sup>, 张震<sup>2a</sup>, 付浩<sup>2b,2c,4</sup>, 涂杰<sup>2b,2c</sup>, 王彤<sup>2a,2b,2c</sup>,  
赵明<sup>3</sup>, 丁祥<sup>2b,2c</sup>, 吴芬芬<sup>2b,2c</sup>, 刘文睿<sup>2b,2c</sup>

(1.沧州市供水排水集团有限公司,河北沧州 061000;2.长安大学 a.建筑工程学院;b.环境科学与工程学院;  
c.旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,陕西西安 710054;3.天津三博水科技有限公司,天津 300070;  
4.中化二建集团有限公司,太原 030021)

**摘要:**随着城市快速的发展,城市供水管网的规模也在不断的扩大,其拓扑结构也越来越复杂,增加了供水安全的难度。其中供水水质安全最为迫切,因此需要在供水管网中设置一定数量的水质监测点对供水水质进行监测。在前人研究的基础上,针对供水管网水质监测点优化布置的问题,在单一的节点水龄法的基础上综合考虑其他影响因素对管网水质的影响,利用北方某市供水管网水力模型进行水质监测点的优化布置方案设计,通过水力模拟软件,优化节点水龄法,设计出了基于多因子优化法的水质监测点优化布置程序。并对北方某市供水管网进行计算,结果表明,基于水力模型的多因子水质监测点优化布置方法计算出的水质监测点位置与实际位置有 43.75% 的重合度,不仅覆盖了在常规管网运行中水厂及加压泵站等重点水质监测位置,也在供水分界线、管网中以及管网末梢增加了部分监测点,同时对污染事故的预警时间也比优化前短,效果明显。因此,在人工经验的基础上,以多因子法为补充加强,理论与实际相结合,使布置方法更有科学依据,考虑因素更加全面,布点更加合理。利用该方法分析供水管网工况,可为水质监测点优化布置工作提供较好的实施方案。

**关键词:**供水管网;水力模型;水质监测点;多因子优化法

**中图分类号:** TU991

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2019)04-092-09

## Research on optimal arrangement of multi-factor water quality monitoring points based on the hydraulic model

CHEN Bingrui<sup>1</sup>, ZHANG Zhen<sup>2a</sup>, FU Hao<sup>2b,2c,4</sup>, TU Jie<sup>2b,2c</sup>, WANG Tong<sup>2a,2b,2c</sup>,  
ZHAO Ming<sup>3</sup>, DING Xiang<sup>2b,2c</sup>, WU Fenfen<sup>2b,2c</sup>, LIU Wenrui<sup>2b,2c</sup>

(1. Cangzhou Water Supply and Drainage Group Co. Ltd, Cangzhou 061000, Hebei, P. R. China;  
2a. School of Architectural Engineering; 2b. School of Environment Science and  
Engineering; 2c. Key Laboratory of Hydrological and Ecological Effects of Groundwater in  
Dry Areas, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, P. R. China;  
3. Tianjin Sambo Water Technology Co. Ltd, Tianjin 300070, P. R. China;  
4. China Chemical Engineering Second Construction Corporation, Taiyuan 030021, P. R. China)

**Abstract:** With the rapid development of the city, the scale of urban water supply pipe network is also expanding, and its topological structure is becoming more and more complex, which adds difficulties to

**收稿日期:** 2018-11-01

**基金项目:** 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07406-003)。

Supported by National Water Pollution Control and Control Technology Major Projects(2014ZX07406-003).

**作者简介:** 陈炳瑞(1978—),男,高级工程师,研究方向为水利工程与给水工程管理,(E-mail)2530689237@qq.com。

**通讯作者:** 付浩,男,长安大学硕士研究生,研究方向为供水管网优化,(E-mail)554851693@qq.com。

water supply security. Among them, the safety of water quality is most urgent. Therefore, a certain number of water quality monitoring points need to be set up in the water supply pipe network. Aiming at optimizing the layout of water quality monitoring sites for water distribution networks, the model was built based on the single node water age method with the effects of other influencing factors on the water quality of the pipeline network taken into consideration and the water supply pipe network of a city in the north as experimental object. By the hydraulic simulation software, the node water age method was optimized, and the optimized layout procedure of water quality monitoring points based on the multi-factor optimization method was designed. The results showed that the location of the water quality monitoring points calculated by the multi-factor water quality monitoring point optimization method based on the hydraulic model is 43.75% coincident with their actual location, not only covering the key water quality monitoring sites of the conventional pipe network in operational water plants and pressurized pump stations but also adding some monitoring points to the water supply demarcation line, pipe network, and pipe network terminal. And the early-warning time for pollution accidents was shorter than that before optimization. In conclusion, using this method to analyze the conditions of the water supply pipe network can provide a better implementation plan for optimizing the layout of the water quality monitoring points.

**Keywords:** water supply network; hydraulic model; water quality monitoring point; multi-factor optimization method

在过去的研究当中,管网供水安全基本是从水力学特性角度而言,即保证供水管网供水连续性、用户端有足够的水量及水压<sup>[1]</sup>,对供水水质的评价仅取决于水厂出厂水质监测。饮用水在进入管网初期水质较好,但当水经过连续漫长的管网系统到达管网末端时,水在管网中滞留的时间过长,水质已经发生了很大的变化。如果把供水管网视为一个大型的“反应器”,最后到达用户的水质已不能满足用水要求。一般可以将供水管网水质污染类型概括为两种情况:1)由于水与供水管网管道接触,在一系列物理,化学以及生物反应下,导致水质不再符合用户的使用标准;2)由于管道漏损以及管网压力波动大,导致污染物直接从管网外部进入到管网中,导致水质受到污染。随着经济高速发展和居民生活水平提高,人们对供水水质的要求也越来越高,因此合理设置一定数量的有效水质监测点是十分必要的。针对不同污染情况,各国设置了一系列不同类型的水质监测点,如常规监测点,预警监测点,污染监测点等<sup>[2]</sup>。随着大数据时代的到来,城市供水管网的发展又迎来了新的发展契机,对于供水管网的水质监测研究,长期以来都是一个比较复杂的课题。

在国外,最早在1992年, Lee等<sup>[3-4]</sup>提出了覆盖水量的概念,并将其应用在监测点优化布置上;1999年 Harment等<sup>[5]</sup>针对遗传算法的目标函数进行了进一步的扩充,增加了如节点间水量、管径、水龄等具体的水质因素;2003年, Laird等和 Kumar等<sup>[6-7]</sup>利用非线性规划法求解稀疏监测网络中的污染源定位问题,非线性规划为污染源反向追踪问题提供了一个解决框架,可利用一组时滞代数约束的偏微分管道表达式来表示反向追踪模型; Watson等和 Grayman等<sup>[8-9]</sup>对多种不同目标函数问题如监测点监测时间,被污染水体体积,未监测污染事件数量等,进行了算法优化布置。在国内,2004年周书葵等<sup>[10]</sup>利用管网水力模型和拓扑结构,提出基于节点水龄的水质监测点优化布置方法;2005年,王阳<sup>[11]</sup>基于相关实验数据,利用多元统计回归法和神经网络建立污染源反向追踪模型,并利用支持向量机算法和地理信息系统(GIS)编制了管网水质信息系统;2006年,郭姣等<sup>[12]</sup>对国内外现有的优化布置方法进行了分析对比,得出各方法的优缺点;2007年,张土乔等<sup>[13]</sup>利用粒子群算法解决复杂管网的水质监测点优化布置问题;2009年,吕谋等<sup>[14]</sup>利用供水管网模拟系统模拟污染物扩散的方法进行了试验分析,利用 Lagrange 时间驱动法改良了模拟—优化反追踪模型;2013年,信昆仑等<sup>[15]</sup>利用 EPANET 作为嵌入式水质模拟计算引擎,利用差分步长法求解梯度向量,采用负梯度法求解目标函数最优解。

根据国家卫生健康委员会《生活饮用水卫生规范(2006)》<sup>[16]</sup>的要求,应在水源、出厂水和居民经常用水

点进行采样,但并没有给出水质监测点布置的定量计算方法。而在实际工程中,在考虑布置水质监测点时,一般仅仅依据人工经验,大多布置在水厂出水口、大管径大流量管段、大用户节点和水质易恶化管段。然而依据人工经验法布置的水质监测点存在许多不合理之处。首先是监测点的数目存在不确定性,如果监测装置过少,就不能详细获取供水管网的水质变化状况,影响实际的监测效果;布置过多,则对物力财力的投入有一定要求。其次,仅仅凭借人工经验法布置的水质监测设备,其位置有时并不能反映出管网中的水质变化情况。相关文献研究表明,若水质监测点未布置于关键节点,其监测供水管网的水质状况就很不全面详细。因此,笔者在前人研究的基础上并结合实际工程,提出一种新的水质监测点优化布置方法,使水质监测点的布置更加合理经济。

## 1 技术原理

### 1.1 水力模型

供水管网水力模型可以对城市供水管网实际运行工况进行模拟,包括了管网中的各种参数。水力模型完整的反映了整个供水管网的拓扑结构和各管段的连接情况以及相对位置,模型上各个节点的都具有其用户详细信息,比如位置高程、节点水量、水压、大用户的用水量特性曲线等。通过在线远传监测设备对管网变化情况进行实时监测跟踪,评估整个供水管网的水量、水压、水质分布状况<sup>[10]</sup>。根据模拟结果分析,可确定水质优劣区域,为供水管网系统的运行管理提供技术决策方案。另外,通过供水管网水力模型计算,也可以确定供水分界线、大用户等信息,为水质监测点的布置提供决策依据。

### 1.2 节点水龄法基本原理

常用的表征节点代表性的方法为覆盖水量法。该方法由 Lee 等<sup>[3-4]</sup>最早提出,覆盖水量指的是监测点能够监测到的管网中的水量。通过覆盖标准(coverage criteria)的比例大小来衡量上下游节点的水质影响状况,假设供水管网中的水质状况从水源处开始,随着时间和路径水质不断下降,则上游节点的水质定优于下游节点的水质。因此,在一定程度上反应了上下游节点的水质互相影响的情况,并建立供水管网的“水质拓扑结构”,通过少数的水质监测点来获取整个管网的水质状况。

而节点水龄法是对覆盖水量法的改良<sup>[7,9,13]</sup>。在正常工况下,节点水龄法认为水从水源节点出发流向各管网节点,水质参数随时间延长而不断下降,也即上游节点的水质必优于下游节点,这样两节点间的水质只与其水流传输时间有关。因此,用节点水龄可以度量余氯值、浊度值等水质参数,判断水质状况,根据供水管网水龄分布确定在线水质监测仪布置地址,达到监测整个管网供水水质的目的<sup>[8-11,17]</sup>。

节点水龄法确定水质监测点的具体方法为:以正常工况下的管网数据为依据,输入计算机软件,建立水质模型,将各个节点的水龄值按升序排列,把水龄值占整个管网水龄值最多的数值作为整个管网的平均水龄值。该软件把平均水龄处节点设置为水质在线监测点,该处代表了整个管网的水质。

### 1.3 多因子法基本原理

节点水龄法计算步骤简化、运算速度快,利用建模软件,可用于常规水质监测点布置,得出的结果准确,软件成熟,应用广泛,对于环状管网同样适用。但该方法仅考虑供水管网水龄这一种参数,对于余氯质量浓度和最不利点、供水分界线、大用户等对水质要求敏感的因素没有进行考虑。因此,在节点水龄法的基础上,考虑多因子对水质的影响,进行常规水质监测点的布置方法研究。

对于供水管网,大用户是对于水质要求较敏感的区域,在布置水质监测点时,应当是需要重点考虑的位置<sup>[17,18-21]</sup>。

城市管网中一般含有多个供水水源,故在管网中存在一些称为“供水分界线”的区域,这些区域的供水由多个水源供水,因此水质容易受到管网工况影响。

而对于一般供水节点,计算节点需水量、水龄和余氯时,考虑到任一节点的水流来自不同的水源和不同的路径,以及进入该节点的流量也各不相同,那么,任一节点的水龄和余氯质量浓度就等于水在该节点不同的水源供水路径所经历的不同时间的加权平均值。由于节点需水量、水龄和余氯质量浓度三者的单位不同,

不能直接放在一个评价体系之下,故将三个因素进行标准化,用标准化之后的权重参数来进行表示,其数学表达式为:

$$K_{i1} = \frac{\sum_{n=1}^N q_{0i}^{(n)} T_{0i}^{(n)} C_{0i}^{(n)}}{\sum_{n=1}^N q_{\text{avg}} T_{\text{avg}} C_{\text{avg}}} \quad N \in U', \quad (1)$$

式中: $T_{0i}^{(n)}$ 为沿节点*i*的第*n*条供水路径,水从水源流到节点*i*所流经的时间,h; $C_{0i}^{(n)}$ 为沿节点*i*的第*n*条供水路径,水从水源流到节点*i*所流经的余氯质量浓度,mg/L; $q_{0i}^{(n)}$ 为流经第*n*条供水路径的需水量, $\text{m}^3/\text{h}$ ; $T_{\text{avg}}$ 为供水管网平均水龄,h; $C_{\text{avg}}$ 为供水管网平均余氯质量浓度,mg/L; $q_{\text{avg}}$ 为供水管网平均需水量, $\text{m}^3/\text{h}$ ; $U'$ 为节点*i*所有上游水源供水路径的集合。

根据以上分析,可以用权重系数 $K_{i1}$ 度量供水管网中一般用水节点水质权重。

对于大用户,按照一个周期内平均需水量大小进行排序然后进行0~1标准化,依次来确定节点水质权重,用 $K_{i2}$ 来表示大用户的权重。

$$K_{i2} = \frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}}, \quad (2)$$

式中: $Q_i$ 为大用户节点*i*的需水量, $Q_{\min}$ 为大用户节点最小需水量, $Q_{\max}$ 为大用户节点最大需水量。对于供水分界线处的节点,由于有多个供水源,故管道的水流方向是变化的,采用EPANET计算引擎,利用水力模型对管网进行计算,可以确定管网各节点的水流变化方向。统计24h水流变化方向次数,同样对统计数据进行0~1标准化,具体计算过程同式(2),在此略去。用 $K_{i3}$ 来度量供水分界线处节点的水质权重。

因此,多因子水质监测点布置应按照式(3)选取:

$$K_i = a K_{i1} + b K_{i2} + c K_{i3}, \quad (3)$$

式中: $K_i$ 为节点作为水质监测点的权重; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为各权重系数; $K_{i1}$ 为一般节点水质权重; $K_{i2}$ 为大用户权重; $K_{i3}$ 供水分界线处权重。

$a$ 、 $b$ 、 $c$ 分别为一般节点、大用户、供水分界线,三者的权重系数,三者之和为1,对于大用户和一般节点的系数以两者的水量比例来进行取值,再利用供水分界线在其中做以调节;根据每个城市管网的各自的运行工况,每个城市都有各自的 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 的取值,具体以实际操作时为准。

## 2 程序实现

EPANET及其程序员工具箱是一个开源的供水管网仿真软件,目前应用已经十分成熟和广泛。EPANET能够延时模拟有压管网的水力和水质特性。管网包含节点(管道连接节点)、管道、水泵、阀门、贮水池或者水箱等相关部件。EPANET跟踪反馈管网中的各种物理参数,比如管道流量、节点压力、水池水位等等,以及多时段模拟过程中整个管网的化学成分浓度。除此之外,还可以模拟水龄和源头跟踪等<sup>[18-20]</sup>。

EPANETH工具箱利用ANSI标准C语言书写,对于输入过程、水力分析、水质分析、稀疏矩阵/线性方程分析和报告生成,具有单独的代码模块。分析管网的数据流程图见图1。

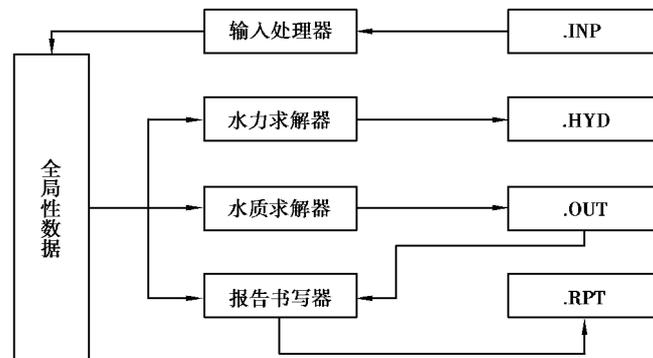


图1 EPANETH水力模拟引擎数据流程

Fig. 1 The data flow of hydraulic simulation engine for EPANETH

### 3 程序应用案例

#### 3.1 管网现状

基于人工经验法的管网实际水质监测点布置位置及相关信息如表 1 所示。从表 1 中可以看出利用人工经验法布置的水质监测点的位置主要考虑了水厂、二级加压泵站、大用户这几种参数,管网水质随水流和时间的变化在管网中的情况复杂多变,仅仅依靠这几种影响因素获取的水质监测点在很大程度上很难全面的反映整个管网的水质情况。并且人工经验法并没有考虑供水分界线、水龄、余氯质量浓度、节点需水量这些对管网水质有很大影响的实质性的因素,就目前对于管网水质要求不断提高的需求来说,这种布置方式是不够全面和合理的。

表 1 管网实际水质监测点

Table 1 Actual water quality monitoring points

编号	ID	X	Y	采集类型	监测类型
1	127924	65 673.28	50 384.10	在线监测	大学
2	37432	55 734.73	51 435.78	在线监测	加压站
3	20847	51 836.75	47 386.31	在线监测	加压站
4	37433	59 167.32	49 450.46	在线监测	加压站
5	20808	45 960.17	47 680.45	在线监测	加压站
6	8036	54 417.16	48 628.90	在线监测	加压站
7	8043	48 951.58	41 837.45	在线监测	加压站
8	8044	49 564.88	46 705.60	在线监测	加压站
9	37943	55 202.46	49 727.05	在线监测	加压站
10	20800	52 463.98	53 739.10	在线监测	加压站
11	18761	45 969.40	51 867.75	在线监测	加压站
12	20390	48 747.83	45 625.58	在线监测	加压站
13	20833	43 766.85	43 637.79	在线监测	加压站
14	20845	46 399.88	43 720.66	在线监测	加压站
15	43558	53 281.48	46 747.92	在线监测	加压站
16	90874	43 699.36	49 448.29	在线监测	加压站
17	123725	46 332.27	45 849.20	在线监测	加压站
18	137659	52 461.13	49 862.34	在线监测	加压站
19	11691	50 304.69	44 639.93	在线监测	居民小区
20	15178	46 394.61	48 056.19	在线监测	居民小区
21	19969	47 923.19	52 317.99	在线监测	居民小区
22	23652	59 717.69	52 331.50	在线监测	居民小区
23	29343	55 788.00	51 142.07	在线监测	居民小区
24	11543	49 991.81	49 349.14	在线监测	商场
25	20377	47 779.64	53 131.23	在线监测	商场
26	22620	60 571.46	50 120.77	在线监测	商场
27	41875	44 530.81	51 634.45	在线监测	商场
28	8045	42 936.74	53 453.18	在线监测	水厂
29	90876	38 315.03	47 314.52	在线监测	水厂
30	134925	62 668.97	58 202.19	在线监测	水厂
31	135746	56 026.84	54 686.77	在线监测	水厂
32	137559	48 273.19	40 258.67	在线监测	水厂

### 3.2 优化后节点分布

表2为基于多因子优化法的监测点的计算结果,经计算后在人工经验法位置的基础上,管网末梢和管网中也出现了部分的监测点,这说明在综合考虑水龄、余氯质量浓度、节点需水量以及供水分界线等多因素之后,得到了更加合理的管网水质监测点的布置位置。

表2 计算后水质监测点

Table 2 Water quality monitoring points by optimization

编号	ID	X	Y	采集类型	监测类型
1	127924	65 673.28	50 384.10	在线监测	大学
2	14413	48 775.70	44 249.98	在线监测	管网末梢
3	19120	45 227.60	53 335.00	在线监测	管网末梢
4	20141	50 468.91	45 124.34	在线监测	管网末梢
5	20531	50 093.51	43 916.05	在线监测	管网末梢
6	39492	44 274.72	48 561.10	在线监测	管网末梢
7	8602	52 818.22	47 758.85	在线监测	管网中
8	10919	51 393.68	47 420.57	在线监测	管网中
9	14851	41 900.94	49 348.49	在线监测	管网中
10	14941	43 720.6	51 826.95	在线监测	管网中
11	15152	43 502.24	49 047.29	在线监测	管网中
12	18797	45 515.76	53 131.50	在线监测	管网中
13	19476	46 555.89	54 483.70	在线监测	管网中
14	24960	50 406.56	52 413.59	在线监测	管网中
15	27586	55 224.03	50 352.53	在线监测	管网中
16	33627	39 097.99	44 802.64	在线监测	管网中
17	34971	49 916.81	41 577.93	在线监测	管网中
18	43548	46 119.35	48 722.31	在线监测	管网中
19	44229	41 547.46	48 595.09	在线监测	管网中
20	90874	43 699.36	49 448.29	在线监测	加压站
21	20847	51 836.75	47 386.31	在线监测	加压站
22	20833	43 766.85	43 637.79	在线监测	加压站
23	20808	45 960.17	47 680.45	在线监测	加压站
24	37432	55 734.73	51 435.78	在线监测	加压站
25	37433	59 167.32	49 450.46	在线监测	加压站
26	37943	55 202.46	49 727.05	在线监测	加压站
27	20800	52 463.98	53 739.10	在线监测	加压站
28	20845	46 399.88	43 720.66	在线监测	加压站
29	11691	50 304.69	44 639.93	在线监测	居民小区
30	23652	59 717.69	52 331.50	在线监测	居民小区
31	41875	44 530.81	51 634.45	在线监测	商场
32	90876	38 315.03	47 314.52	在线监测	水厂

### 3.3 结果对比及分析

如图 2 所示, 图为北方某市供水管网水质监测点分布, 图中蓝色节点表示管网实际监测点位置, 管网中的实际监测点位置由人工经验确定, 主要考虑了出厂、二级泵站、管网末梢、大用户等因素。图中红色节点为优化后的计算结果, 即运用多因子优化法得到的管网监测点位置。计算结果表 2 与实际管网水质监测点表 1 进行对比, 相同位置的监测点占比为 43.75%。

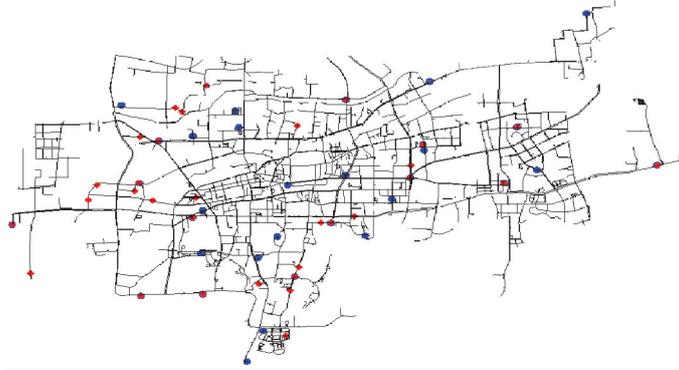


图 2 供水管网水质监测点分布

Fig. 2 Distribution of water quality monitoring points for water supply network

选取 6 个任意节点模拟管网中发生突发水质污染事故, 统计不同方案中各监测点最早监测到的时间, 分布如表 3 所示。

表 3 不同方案各监测点最早监测时间

Table 3 The earliest monitoring time for different monitoring points in different scenarios

模拟事故点	实际监测点 最早监测位置	实际监测点 最早监测时间/s	计算监测点 最早监测位置	计算监测点 最早监测时间/s
19291	90875	1 334.97	19120	282.99
15678	90874	940.41	15152	653.27
39026	1219	565.11	24960	1579.25
12836	90917	533.92	34971	405.52
9087	43558	1 077.96	8602	544.90
19034	11431	1 185.40	24960	1 117.22

由图 3 可知, 随机选取的 6 个污染事故点中, 基于多因子算法计算出的监测点预警时间最早的占据了 83.3%。主要是由于管网中的监测点位置在以人工经验法的考量范围之外管网中供水分界线处还分布着一部分水质监测点。而原供水管网的实际监测点近 68.75% 处于水厂和加压泵站出水口, 很难监测到供水管网中发生的污染事故。基于多因子算法计算出的水质监测点位置, 不仅覆盖了在常规管网运行中水厂及加压泵站等重点水质监测位置, 在以上人工经验的考量范围之外, 也在供水分界线、管网中以及管网末梢增加了部分监测点。这表明在综合考虑水龄、余氯质量浓度、节点需水量以及供水分界线等因素之后, 得到的计算结果对水质监测点的位置布置有了更完整, 更全面的优化实施方案。不论是从管网数据收集, 还是运营管理的角度来说, 都是合理经济的。

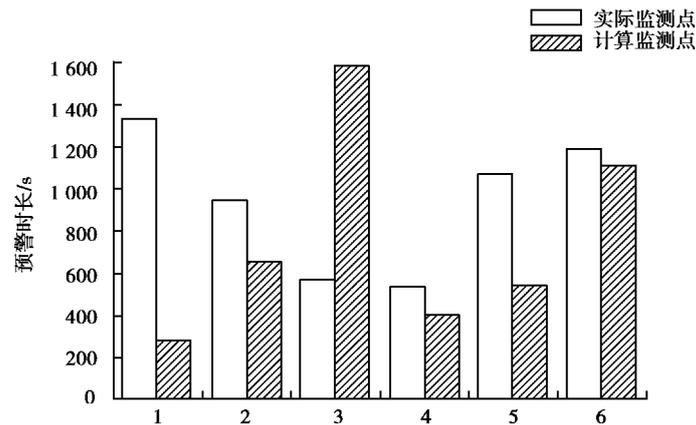


图3 不同方案各监测点最早监测时间

Fig. 3 The earliest monitoring time for different monitoring points in different scenarios

## 4 结 论

多因子优化布置方法基于供水管网水力模型实现水质监测点的优化布置,在人工经验布置方法的基础之上,结合多因子优化法计算结果,综合选定供水管网水质监测点位置,使得监测点位置的选取更加合理科学,并且对于管网整体水质监测更加适用。供水企业在水质监测点优化布置时,通过该方法可以快速选定优化布置区域,结合人工经验法能够较好的应用于实际管网水质监测点优化布置中,为供水管网的水质监测点优化布置提供了一个新的途径。

### 参考文献:

- [1] 马力辉.供水管网余氯优化控制决策支持系统研究[D].上海:同济大学,2007.  
MA Lihui. Study on decision support system of optimal control of chlorine residue in water distribution networks[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [2] Al-Zahrani M A, Moied K. Optimizing water quality monitoring stations using genetic algorithms[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2003, 28(1): 57-75.
- [3] Lee B H, Deininger R A, Clark R M. Locating monitoring stations in water distribution systems[J]. Journal-American Water Works Association, 1991, 83(7): 60-66.
- [4] 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.
- [5] Harmant P, Nace A, Kiene L, et al. Optimal supervision of drinking water distribution network[C]//29th Annual Water Resources Planning and Management Conference, June 6-9, 1999, Tempe, Arizona, USA. ASCE, 1999: 1-9.
- [6] Laird C D, Biegler L T, van Bloemen Waanders B G, et al. Contamination source determination for water networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2005, 131(2): 125-134.
- [7] Kumar A, Kansal M L, Arora G. Identification of monitoring stations in water distribution system [J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, 125(2): 202-204.
- [8] Watson J P, Greenberg H J, Hart W E. A multiple-objective analysis of sensor placement optimization in water networks[C]// World Water and Environmental Resources Congress 2004, June 27-July 1, 2004, Salt Lake City, Utah, USA. ASCE, 2004: 1-10.
- [9] Grayman W M, Ostfeld A, Salomons E. Locating monitors in water distribution systems: Red team-blue team exercise[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(4): 300-304.
- [10] 周书葵,许仕荣.城市供水管网水质监测点优化选址的研究[J].南华大学学报(自然科学版),2004,18(3):62-66.

- ZHOU Shukui, XU Shirong. An optimal locating of quality monitoring stations in urban water distribution systems[J]. Journal of Nanhua University(Science and Technology), 2004, 18(3): 62-66. (in Chinese)
- [11] 王阳.城市供水管网水质预测模型的研究与应用[D].天津:天津大学,2005.  
WANG Yang. Research and application of water quality prediction model in city water supply networks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.(in Chinese)
- [12] 郭姣,刘遂庆,信昆仑.供水管网水质监测点布置方法研究与应用[J].给水排水,2007,33(8):113-116.  
GUO Jiao, LIU Suiqing, XIN Kunlun. Research and application on layout of water quality examination points in municipal water distribution networks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(8): 113-116. (in Chinese)
- [13] 张土乔,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)
- [14] 吕谋,王梦琳,孙贤忠.供水管网突发污染试验模拟及污染源定位研究[J].青岛理工大学学报,2009,30(6):1-6,17.  
LYU Mou, WANG Menglin, SUN Xianzhong. Experimental simulation of contamination events and investigation of contamination source determination in water supply systems[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(6): 1-6,17. (in Chinese)
- [15] 信昆仑,盛希夫,陶涛,等.基于负梯度法的供水管网污染源识别[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(1):116-120.  
XIN Kunlun, SHENG Xifu, TAO Tao, et al. Contamination source identification in water distribution networks based on negative gradient method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(1): 116-120. (in Chinese)
- [16] 生活饮用水卫生标准:GB 5749—2006[S].北京:中国标准出版社,2007.  
Standards for drinking water quality: GB 5749-2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2007. (in Chinese)
- [17] 李常虹.沈阳市供水管网水质在线监测点优化布置与应用效能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.  
LI Changhong. Study of layout optimization and application performance for online water quality monitoring points in Shenyang water supply network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [18] 付浩.基于水力模型的供水管网水质监测预警系统的研究[D].西安:长安大学,2017.  
FU Hao. Water quality monitoring and early warning system of water supply network based on hydraulic model[D]. Xi'an: Changan University, 2017. (in Chinese)
- [19] Liu L, Ranjithan S R, Mahinthakumar G. Contamination source identification in water distribution systems using an adaptive dynamic optimization procedure[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137(2): 183-192.
- [20] Preis A, Ostfeld A. Contamination source identification in water systems: A hybrid model trees-linear programming scheme[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(4): 263-273.
- [21] Cristo C D, Leopardi A. Pollution source identification of accidental contamination in water distribution networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(2): 197-202.

(编辑 郑洁)