

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.06.024

考虑 THM 的管网水质服务水平多目标优化

虞介泽, 李 聪, 张土乔, 毛欣炜

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要:针对供水管网中余氯及氯仿 (THM) 服务水平优化问题, 提出了一种衡量 THM 服务水平的表达式, 推导了 THM-I/O 模型, 建立了以管网余氯服务水平最大化、THM 服务水平最大化以及加氯费用最小化的多目标优化模型。考虑了主体水余氯衰减系数、基于余氯消耗的 THM 生成比例系数、出厂水 THM 浓度、加氯点数量 4 个影响因素对优化结果 Pareto 前沿面的影响。结合一管网算例, 采用 EPANET_MSX 模拟余氯衰减和 THM 生成, 利用实数编码的非支配排序遗传算法-II (NSGA-II) 进行优化, 可得到各种情况下的 Pareto 前沿面。计算结果表明, 随着主体水余氯衰减系数减小, 加氯费用减少, THM 服务水平增加。基于余氯消耗的 THM 生成比例系数和出厂水 THM 浓度的减小均能提高 THM 服务水平, 但对加氯费用没有影响。增加加氯点虽然能减少余氯投加, 但加氯站建设费用加大了总加氯费用。降低主体水余氯衰减系数是提高管网水质服务水平最经济有效的方法。

关键词:供水管网; 服务水平; 多目标优化

中图分类号: TU991.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)06-0145-07

Multi-objective Optimization of Water Quality Performance Considering THM in Water Distribution Systems

YU Jieze, LI Cong, ZHANG Tuqiao, MAO Xinwei

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

Abstract: As for optimizing performance of chlorine and trihalomethane (THM) in water distribution systems, an expression measuring THM performance and a derivation of THM-I/O model were proposed. And a multi-objective optimization model considering maximizing level of chlorine performance, maximum level of THM performance and minimizing cost of chlorination was also established. Four factors, including bulk chlorine decay coefficient, coefficient of proportionality between THM and chlorine consumption, initial THM concentration in treated water and number of boosters, were evaluated to study their effects on Pareto front of the multi-objective optimization model. Chlorine decay and THM generation were simulated using EPANET_MSX. An improved non-dominated sorted genetic algorithm-II with integer code was proposed to optimize the model, and Pareto fronts could be obtained under different conditions. Results show that with the decrease of bulk chlorine decay coefficient, cost of chlorination can be reduced and level of THM performance will be improved. Diminishing coefficient of proportionality between THM and

收稿日期: 2012-02-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07424-004)

作者简介: 虞介泽 (1985-), 男, 博士生, 主要从事管网水质研究, (E-mail) jzyu2005@126.com。

李聪 (通信作者), 女, 博士, (E-mail) congil@zju.edu.cn。

chlorine consumption and initial THM concentration out of reservoir can both improve the level of THM performance, but can not affect the cost of chlorination. Increasing number of boosters can reduce dosage of chlorine, but booster station construction will increase total cost of chlorination. Therefore, reducing the bulk chlorine decay coefficient is the most economical and effective method.

Key words: water distribution systems; performance; multi-objective optimization

供水管网采用二次加氯能提高余氯的均匀性和稳定性,并能减少氯的消耗^[1]。为评价不同余氯浓度的消毒能力和嗅味影响, Tamminen 等^[2]将 Coelho提出的服务水平概念运用到二次加氯评价中,建立了余氯服务水平评价函数。此评价函数量化了余氯在管网中的消毒和减少嗅味的能力,帮助决策者得到管网较优的余氯服务水平。以往的研究表明,加氯消毒会产生消毒副产物(DBPs),加大致癌风险^[3]。单独提高余氯的服务水平会增加消毒副产物的浓度。学者们对消毒副产物进行了广泛的研究,并提出了多种生成模型^[3]。Carrico 等^[4]采用基于余氯消耗的 THM 线性生成模型对二次加氯下的 THM 生成进行了模拟,得到了不同方案下的 THM 浓度。为同时优化余氯和 THM 服务水平,参照 Tamminen 等的余氯服务水平评价函数,以典型消毒副产物 THM 为研究对象,提出 THM 服务水平评价函数,并建立了以管网余氯服务水平最大化、THM 服务水平最大化及加氯费用最小化的多目标优化模型。通过 EPANET_MSX 模拟余氯衰减和 THM 生成,利用实数编码的非支配排序遗传算法-Ⅱ(NSGA-Ⅱ)得到最优 Pareto 前沿面。考虑主体水余氯衰减系数、基于余氯消耗的 THM 生成比例系数、出厂水 THM 浓度、加氯点数量 4 个影响因素对优化结果 Pareto 前沿面的影响,为二次加氯提供决策支持。

1 服务水平评价函数

根据 Tamminen 等^[2]对服务水平的描述,对于任意水质监测项目(如余氯浓度、THM 等),服务水平可分为 5 个等级,依次为^[2]:100%为最优的服务水平、75%为能满足需求的服务水平、50%为仅能接受的服务水平、25%为不能接受的服务水平、0%为没有服务的水平。根据水质规范规定的最大浓度或最小浓度,以及嗅味浊度等物理指标,采用线性函数来定义服务水平评价函数。

对于余氯, Tamminen 等^[2]采用如下线性函数定义服务水平:

$$p_c = \begin{cases} 0, c_c \leq 0.05 \\ \frac{(c_c - 0.05)}{0.15} \times 100\%, 0.05 < c_c \leq 0.2 \\ 100\%, 0.2 < c_c \leq 0.5 \\ [2.5(0.8 - c_c) + 0.25] \times 100\%, 0.5 < c_c \leq 0.8 \\ 25\%, c_c > 0.8 \end{cases} \quad (1)$$

式中 c_c 为余氯浓度, mg/L。

对于 THM,若浓度高于规范规定的 70 $\mu\text{g/L}$, 则其致癌能力很强,服务水平为 0%。King 等^[5]调查了加拿大安大略湖地区膀胱癌发病率和 THM 间的关系,认为 THM 浓度在 0~24 $\mu\text{g/L}$ 时持续接触 THM 30 a 以上与膀胱癌的发病无相关性。Do 等^[6]在 THMs 对胰腺癌的影响的调查上也得到了上述趋势,即在很低浓度时 THM 的致癌性可忽略,超过一定浓度后致癌性随之增强。故作者参考 King 等^[5]的统计数据,认为当 THM 浓度在 0~24 $\mu\text{g/L}$ 时其服务水平为 100%,当 THM 浓度在 24~70 $\mu\text{g/L}$ 之间时服务水平呈线性递减。

基于以上分析,得到以下 THM 服务水平评价函数:

$$p_{\text{THM}} = \begin{cases} 100\%, 0 \leq c_T < 24 \\ \frac{(70 - c_T)}{46} \times 100\%, 24 \leq c_T < 70 \\ 0\%, 70 \leq c_T \end{cases} \quad (2)$$

式中 c_T 为 THM 浓度, $\mu\text{g/L}$ 。

2 优化模型

由于经济、技术等方面因素的制约,二次加氯下供水管网水质服务水平需考虑以下 3 个目标:一是最大化余氯服务水平(f_c),提高余氯消毒能力且不带来嗅味问题;二是最大化 THM 服务水平(f_{THM}),减小由 THM 带来的致癌性;三是最小化加氯费用(W),使得二次加氯经济性得到体现。其中 f_c 和 f_{THM} 之间、 f_c 和 W 之间相互矛盾,3 个目标函数可组成多目标模型进行求解,多目标模型归纳如下:

$$f_c = \frac{\sum_{j=1}^M \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_m} p_{cij} Q_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_m} Q_{ij}} \right)}{M} \quad (3)$$

$$f_{THM} = \frac{\sum_{j=1}^M \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_m} p_{THMij} Q_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_m} Q_{ij}} \right)}{M} \quad (4)$$

$$W = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} E_q}{t} + M_1 + M_2 \quad (5)$$

$$M_1 = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_s} \left\{ \frac{C_{ik, in} Q_{ik, in}}{1 \ 000} \cdot \frac{T_d}{n_s} \cdot 3.6 (U_s E_s + U_e E_e) \right\} \quad (6)$$

$$M_2 = \frac{p_q}{100t} \sum_{i=1}^{n_b} E_q \quad (7)$$

$$\text{s. t. } f_c \geq 50\%; f_{THM} \geq 50\%; W \leq W_{\max} \quad (8)$$

式中: p_{cij} 和 p_{THMij} 分别代表监测点 i 在 j 时刻的余氯服务水平和 THM 服务水平; Q_{ij} 为监测点 i 在 j 时刻的节点流量; M 为周期内监测次数; M_1 为设备折旧大修理费; M_2 为材料及动力费; E_q 为设备建造费; t 为投资偿还期; $C_{ik, in}$ 为加氯点 i 在时段 k 的加氯浓度; $Q_{ik, in}$ 代表加氯方式为 FPB 下加氯点 i 在时段 k 时流向节点 i 的所有管段流量总和; U_s 为每生产 1 kg 次氯酸钠耗盐量; E_s 为氯化钠价格; U_e 为每生产 1 kg 次氯酸钠耗电量; E_e 为电价; p_q 为每年扣除的折旧和大修费, 以设备建造费的百分比计。

式(5)和(7)中需要计算加氯点设备费用总和, 故模型中需要考虑加氯站的数量和选址。在加氯点选址模型中, 根据 p_c 的定义, 当余氯浓度为 0.125 mg/L 时, $p_c = 50\%$ 即仅能接受的服务水平。令余氯浓度大于等于 0.125 mg/L 为被节点 i 覆盖, 小于 0.125 mg/L 为不被节点 i 覆盖。当余氯浓度为 0.7 mg/L 时 p_c 为 50% 即仅能接受的服务水平, 以此令加氯点的加氯量为 0.7 mg/L。故采用基于余氯服务水平的加氯点选址模型:

$$p_b = \frac{\sum_{m=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_m} d_{mj} y_{mj}}{\sum_{k=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_m} d_{mj}} \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N x_i \leq n_b \quad (10)$$

$$y_{mj} = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^N x_i \sum_{k=1}^{n_u} \alpha_{ijk} \geq \frac{0.125}{0.7} = 0.178 \ 6 \\ 0, & \sum_{i=1}^N x_i \sum_{k=1}^{n_u} \alpha_{ijk} < \frac{0.125}{0.7} = 0.178 \ 6 \end{cases} \quad (11)$$

$$k = 1, 2, \dots, n_u \quad j = 1, 2, \dots, n_m \quad m = 1, 2, \dots, n_s$$

3 模型求解

3.1 THM-I/O 模型推导

为提高 THM 浓度的计算效率, 希望同余氯 I/O 模型一样得到 THM-I/O 模型, 这就要求 THM 生成模型也具有形式上的线性特性。基于余氯消耗的 THM 线性生成模型使用方便, 表达式简单, 近年来在试验拟合及数值模拟方面越来越受到重视^[7-9]。模型表达式如下:

$$C_{THM} - C_{THM_0} = p(C_{c0} - C_c) \quad (11)$$

将式(11)对时间求导可得:

$$\frac{dC_{THM}}{dt} = -p \frac{dC_c}{dt} = -p(-k_c C_c) = pk_c C_c = aC_c \quad (12)$$

式(12)只针对静止水中的 THM 变化情况, 对于管网中任意管段内, 需要考虑流动水体对 THM 的输送作用。设任意管段 s , 其两个端节点编号为 i 、 j , 水从节点 i 流向节点 j 。参考 Boccelli 等^[6]提出的余氯传输方程, 推导 THM 传输偏微分方程如下:

$$\frac{\partial C_{s, THM}}{\partial t} = -\frac{4q_s}{\pi D_s^2} \cdot \frac{\partial C_{s, THM}}{\partial x} + aC_{s, c} \quad (13)$$

$$C_{s, THM}(x=0, t) = C_{i, THM}^*(t) \quad (14)$$

$$C_{s, THM}(x, t=0) = C_{s, THM}^0(x) \quad (15)$$

同时需考虑余氯传输偏微分方程^[6]:

$$\frac{\partial C_{s, c}}{\partial t} = -\frac{4q_s}{\pi D_s^2} \cdot \frac{\partial C_{s, THM}}{\partial x} - k_c C_{s, c} \quad (16)$$

$$C_{s, c}(x=0, t) = C_{i, c}^*(t) \quad (17)$$

$$C_{s, c}(x, t=0) = C_{s, c}^0(x) \quad (18)$$

$C_{s, THM}$ 和 $C_{s, c}$ 分别为 THM 和余氯在管段 s 中的浓度, q_s 为管段 s 的流量, D_s 为管段 s 的直径, $C_{s, THM}^0(x)$ 和 $C_{s, c}^0(x)$ 分别为管段各处初始 THM 和余氯浓度, $C_{i, THM}^*(t)$ 和 $C_{i, c}^*(t)$ 分别为管段上游节点 i 任意时刻的 THM 和余氯浓度。将式(16)代入式(13)可得:

$$\frac{\partial C_{s, THM}}{\partial t} = -\frac{4q_s}{\pi D_s^2} \cdot \frac{\partial C_{s, THM}}{\partial x} - p \left(\frac{\partial C_{s, c}}{\partial t} + \frac{4q_s}{\pi D_s^2} \cdot \frac{\partial C_{s, c}}{\partial x} \right), s = 1, \dots, P \quad (19)$$

将式(19)进行对 x 的有限差分, 可得到式(20)。

$$\begin{aligned} \frac{dC_{s,THM,l}}{dt} + \frac{4q_s}{\Delta x_s \pi D_s^2} \cdot (C_{s,THM,l} - C_{s,THM,l-1}) = \\ -p \left[\frac{dC_{s,c}}{dt} + \frac{4q_s}{\Delta x_s \pi D_s^2} \cdot (C_{s,c,l} - C_{s,c,l-1}) \right], \\ l = 1, \dots, N_s \end{aligned} \quad (20)$$

初始条件和边界条件同上,其中 Δx_s 为有限差分点之间的距离, N_s 为差分点数量。

THM 和余氯在管网节点处采用均匀混合模型。考虑二次加氯点,余氯在 i 处的节点混合模型为^[6]:

$$C_{i,c}^*(t) = \frac{\sum_{s \in IN_i} q_s C_{s,c,n_s}(t) + u_{i,c}(t)}{\sum_{s \in IN_i} q_s} \quad (21)$$

其中 $u_{i,c}(t)$ 为二次加氯点的投加量。 IN_s 为所有与节点 i 连接的管段集合, n_s 表示流入节点 i 的管段。推导 THM 在 i 处的节点混合模型为:

$$C_{i,THM}^*(t) = \frac{\sum_{s \in IN_i} q_s C_{s,THM,n_s}(t)}{\sum_{s \in IN_i} q_s} \quad (22)$$

在清水池及水塔中,设余氯衰减和 THM 生成仍符合管段中的规律,则余氯和 THM 流出清水池或出入水塔的表达式均可写成式(23)、(24)。

$$\frac{dC_{r_k,THM}}{dt} = \frac{q_p}{v_k} [C_{s,n_s,THM}(t) - C_{r_k,THM}] + aC_{r_k,c} \quad (23)$$

$$\frac{dC_{r_k,c}}{dt} = \frac{q_s}{v_k} [C_{s,n_s,c}(t) - C_{r_k,c}] - k_c C_{r_k,c} \quad (24)$$

根据以上分析可见,余氯和 THM 在管段、节点、清水池或水塔中的变化均符合线性规律。则对于所有管段所有差分点和首末节点处在 k 时段内的 THM 和余氯浓度组成的浓度向量 $C_{k,THM}$ 、 $C_{k,c}$ 将(20)、(21)、(23)和(24)式矩阵化后满足式(25)。

$$\begin{aligned} \frac{dC_{k,THM}(t)}{dt} + A_k C_{k,THM}(t) = \\ -p \left[\frac{dC_{k,c}(t)}{dt} + A_k C_{k,c}(t) + B_k u_k(t) \right] \end{aligned} \quad (25)$$

$$C_{k,THM}(0) = C_{k-1,THM}(\Delta t_h)$$

$$C_{k,c}(0) = C_{k-1,c}(\Delta t_h)$$

式中 A_k 、 B_k 由管道流量、管网节点分布及管网拓扑结果确定。

将式(25)拉普拉斯变换处理可得^[6]:

$$\begin{aligned} C_{k+1,THM}(0) + \beta_k C_{k,THM}(0) = \\ -p [C_{k+1,c}(0) + \beta_k C_{k,c}(0) + \Sigma_j] \end{aligned} \quad (27)$$

其中:

$$\beta_k = e^{A_k \Delta t_h} \quad (28)$$

$$\Sigma_j = \int_0^{\Delta t_h} e^{A_k (\Delta t_h - \tau)} B_k u_k(\tau) d\tau \quad (29)$$

对周期内所有时段 $k = 0, 1, \dots, J$ 的式(27)采用 β_k 进行加权后相加,可得最终表达式:

$$\begin{aligned} -p [C_{J,c}(0) + (-1)^J \Omega(J, 0) C_{0,c} + \\ \sum_{k=0}^{J-1} \Omega(J, k+1) \Sigma_k] = C_{J,THM}(0) + (-1)^J \cdot \\ \Omega(J, 0) C_{0,THM} \end{aligned} \quad (30)$$

式中 $\Omega(k, l) = \beta_{k-1} \beta_{k-2} \dots \beta_l, k > l$, 且 $\Omega(k, k) = I$ 。由于周期时间长,初始余氯和 THM 浓度对监测点影响很小, $\Omega(J, 0) C_{0,THM}$ 及 $\Omega(J, 0) C_{0,c}$ 可忽略不计,又 $C_{j,c}(0)$ 仅由加氯点线性确定^[6],故可知管网所有节点的 THM 浓度只由加氯点线性确定。故可得 THM 浓度可像余氯浓度计算一样采用 I/O 模型进行计算。

3.2 模型算法

对多目标模型采用多目标遗传算法(NSGA-II)求解,具体步骤为:

第1步,根据余氯 I/O 模型和 THM-I/O 模型采用 EPANET_MSX 工具包得到余氯响应矩阵和 THM 响应矩阵,保存于内存中。运行过程中管网水力持续时间为 30 d,目的是使得水质条件达到稳定。

第2步,采用多目标遗传算法(NSGA-II)求解模型,其中种群规模取 100,计算代数取 500 代,染色体编码采用实数编码,选择算子为联赛选择,采用精英保留策略。

4 算例分析

为分析多目标模型求解结果及考察主体水余氯衰减系数、THM 比例系数、出厂水 THM 浓度及加氯点数量对求解结果的影响,采用如图 1 所示的管网进行分析。此管网为 EPANET2.0 自带算例 Net3,共 91 个用户节点、2 个水源及 3 座水塔,部分节点编号示于图中。此管网湖水源在 13:00 到次日 4:00 开启,其余时间关闭。水源条件的切换导致水力条件改变,管网中编号为 203 和 15 的节点用水量较其他节点高出 10 倍以上,对加氯点选址及多目标模型计算影响很大。故在采用节点用水量加权计算 f_c 和 f_{THM} 时将此 2 节点用水量减小至 500 GPM,既减小了两者的影响,又保持了大流量的特点。单位加氯点设备费为 2 万元, U_s 为 4.1 kg, E_s 为 1.6 元/kg, U_e 为 4.4 kW, E_e 为 0.85 元/kW, W_{max} 为 300 元。

图 2 显示了 $n_b = 5, k_b = -6 d^{-1}, k_w = -3 m/d$, $THM_0 = 35 \mu g/L, p = 35$ 时多目标模型计算结果。其中 $THM_0 = 35 \mu g/L$ 指 2 水源出厂水均为

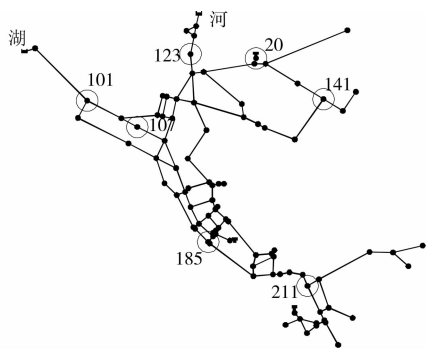


图 1 Net3 算例

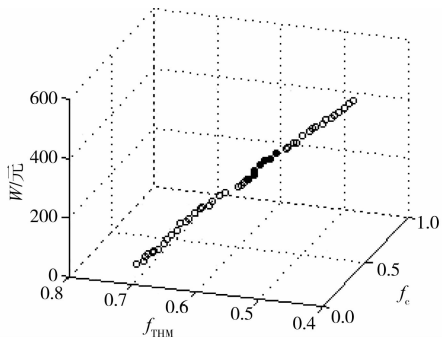


图 2 设计目标的 Pareto 前沿面

35 $\mu\text{g/L}$ 。原因是在不加氯情况下当管网水质运行稳定后的 THM 服务水平达到稳定,故无论 2 水源出厂水 THM₀ 是否相同,对考察出厂水 THM₀ 对多目标模型求解结果的影响是没有区别的。由图可见计算程序能够得到 Pareto 前沿面,并且得到了 f_c 从 0 到较优水平的范围。多目标模型的 Pareto 前沿面接近曲线,可见 W 和 f_{THM} 存在较弱的矛盾关系,原因是 W 中的 M_1 代表了余氯的投加,无论管网末梢余氯浓度为多少 M_1 仍然以加氯点的投加量计算,而 f_{THM} 是以余氯的实际消耗量计算的,即由加氯点的余氯投加浓度和管网末梢的余氯浓度两者决定的,故结果出现 Pareto 前沿面并非严格曲线的结果。

由于存在约束条件,Pareto 前沿面分成 2 类点。图中空心点为不满足约束条件的结果,实心点为满足约束条件的结果。增加 THM 服务水平的约束条件比只考虑余氯服务水平和加氯费用进一步减少多目标求解结果选择范围,可更加接近实际情况。

为考察不同 k_b 下 Pareto 前沿面变化趋势,采用 $n_b=5$, $\text{THM}_0=35 \mu\text{g/L}$, $p=35$ 不变, $k_b=-6, -4, -3 \text{ d}^{-1}$ 3 种情况进行比较,为更好的观察变化趋势,将计算结果的 Pareto 前沿面投影到 $f_{\text{THM}}-f_c$ 面和 $W-f_c$ 面上组成如图 3 的投影组合面(下同),图中实心点表示 $f_{\text{THM}}-f_c$ 面的投影结果,空心点表示 $W-f_c$ 面的投影结果(下同)。由图可见在相同 f_c

情况下,随着 k_b 的增加, W 随之减速增加,而 f_{THM} 随着 k_b 的增加减速减小。此结果表明,随着余氯主体水衰减系数的增加,余氯衰减加快,使得达到相同 f_c 所需的加氯量增加,且余氯消耗加大,又由于 THM 增加量与余氯消耗呈线性关系,故 f_{THM} 减小。

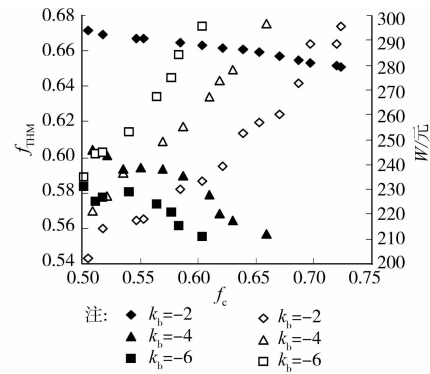


图 3 不同 k_b 下 Pareto 前沿面变化趋势

由于生成 THM 的前驱物在各季节可能发生改变,以及溴离子和氨氮对 THM 生成量的影响,需考虑 p 值的变化。为考察比例系数 p 对 Pareto 前沿面的影响,采用 $n_b=5$, $\text{THM}_0=35 \mu\text{g/L}$, $k_b=-6 \text{ d}^{-1}$ 不变, $p=10, 20, 30$ 的 3 种情况进行比较。由图 4 可见,随着 p 值的减小,相同 f_c 情况下 f_{THM} 增大,但是 W 值基本不变,原因是 p 值改变只影响了 THM 的生成,对余氯衰减没有影响,余氯消耗没有变化。

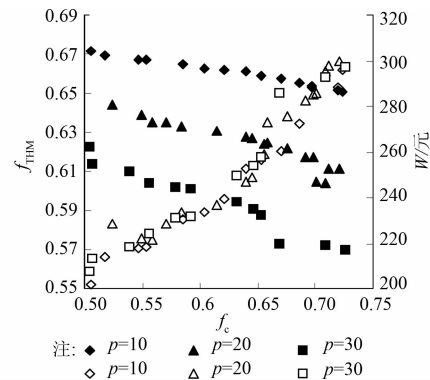


图 4 不同 p 值下 Pareto 前沿面变化趋势

水厂消毒工艺需在清水池上加氯消毒,保证出厂水余氯浓度达到国家标准。在传统工艺下难免使得出厂水中含有一定浓度的 THM,故出厂水 THM 浓度的大小直接决定了管网 f_{THM} 的最大值,即在没有加氯时的 THM 服务水平,可见需要考虑出厂水 THM 浓度对计算结果的影响。采用 $n_b=5$, $p=30$, $k_b=-2 \text{ d}^{-1}$ 不变, $\text{THM}_0=30, 32.5, 35 \mu\text{g/L}$ 3 种情况进行比较,得到如图 5 所示结果。由图可见随着

THM₀ 的增加相同 f_c 下的 f_{THM} 减小,而对 W 值没有影响,原因是 THM₀ 的影响和 p 值一样只影响了 THM 浓度而不改变余氯浓度。

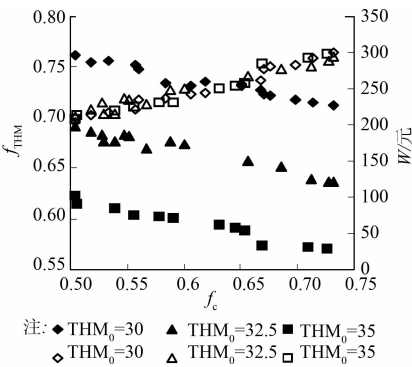


图 5 不同 THM₀ 下 Pareto 前沿面变化趋势

为研究加氯点数量对多目标模型 Pareto 前沿面的影响,考察 $p=30, k_b=-2 \text{ d}^{-1}, \text{THM}_0=35$ 不变, $n_b=3, 4, 5, 6, 7$ 共 5 种情况下 Pareto 前沿面的变化情况,各加氯点方案由式(9)、(10)确定,7 个加氯点位置示于图 1 中,加氯点编号示于表 1 中,由图可见加氯点选址模型能够得到水源节点及下游节点,与二次加氯要求的加氯点均匀分布要求吻合。

表 1 不同加氯点数量下加氯点方案

n_b	加氯点编号
3	101、20、123
4	101、20、123、211
5	101、20、123、211、141
6	101、20、123、211、141、185
7	101、20、123、211、141、185、107

图 6 为各加氯点方案下 Pareto 前沿面在 $f_c - W$ 面上的投影,实心点表示符合约束条件的加氯方案,空心点表示不符合约束条件的加氯方案。由图可见,当 f_c 为零,即不加氯时增加一个加氯站 W 相应的增加一个加氯站的建设费用,各方案的 W 差值最大,随着 f_c 的增加,各方案的 W 差值逐步缩小。原因是加氯站的增加能够使得余氯在管网内的分布更加均匀,并且减少余氯的投加。可见计算结果符合以往文献得出的规律。当 n_b 增加时, f_c 最大值相应增加,可见在不考虑约束条件的情况下增加 n_b 可提高最优 f_c 的值,但是由于约束条件的影响,要达到最优 f_c 必然需要更多的投入,并且 THM 的服务水平会相应的降低。由图可见实心点在较小范围内存在,并且随着 n_b 的增加 W 为先减后增,但是各方案的差别不大。

图 7 显示了各加氯点方案下 Pareto 前沿面在 $f_c - f_{THM}$ 面上的投影。由图可见在不考虑约束条件下增加 n_b 可提高在较大 f_c 情况下的 f_{THM} 值。但是由于约束条件的影响, f_{THM} 随着 n_b 的增加变化有限,并且在较大 n_b 情况下 f_{THM} 有所减小,原因是 THM 的生成是随着余氯的消耗而线性增加,故余氯越均匀在传输过程中余氯消耗的越多,相应的 THM 生成就增加。综上可见增加 n_b 对 Pareto 前沿面的影响较小,较多的 n_b 值反而会加大建设投入。

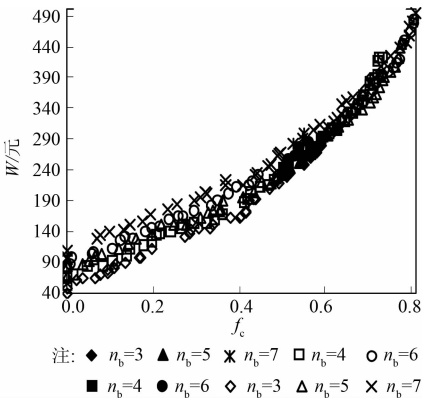


图 6 不同加氯点数量下 Pareto 前沿面变化趋势

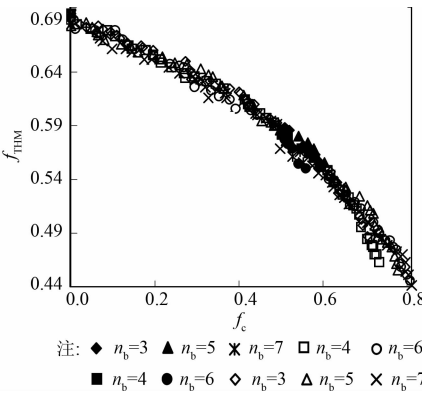


图 7 不同 THM₀ 下 Pareto 前沿面变化趋势

5 结 论

根据病理学的调查统计结果,提出了线性化的 THM 服务水平评价函数,与余氯服务水平评价函数一起组成了管网基本水质的服务水平评价方法。验证了 THM-I/O 模型,大大提高了算法的效率。考虑 THM 服务水平可减少多目标优化结果可选方案的数量,对主体水余氯衰减系数、基于余氯消耗的 THM 生成比例系数、出厂水 THM 浓度、加氯点数量 4 个影响因素对 Pareto 前沿面计算结果比较后发现,主体水余氯衰减系数的减小是提高余氯和 THM 服务水平及减小加氯费用最经济有效的方法,故在建设二次加氯站前建议在水厂处理工艺中

尽量提高水质,降低余氯衰减系数。

参考文献:

- [1] 张燕,张念卿. 基于部分覆盖理论的供水管网二次加氯点选址[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(4):695-707.
ZHANG Yan, ZHANG Nianqing. Optimization of locations of booster chlorination stations in water distribution system based on theory of partial coverage [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2011,45(4):695-707.
- [2] Tamminen S, Ramos H, Covas D. Water supply system performance for different pipe materials part I: water quality analysis [J]. Water Resources Management, 2008,22(11):1579-1607.
- [3] Chowdhury S, Champagne P, Mclellan P J. Models for predicting disinfection byproducts (DBP) formation in drinking waters; a chronological review [J]. Science of the Total Environment,2009,407(14):4189-4206.
- [4] Carrico B, Singer C. Impact of booster chlorination on chlorine decay and THM production:simulated analysis [J]. ASCE Journal of Environmental Engineering, 2009,135(10):928-935.
- [5] King W D, Marrett L D. Case-control study of bladder cancer and chlorination by-products in treated water (Ontario, Canada) [J]. Cancer Causes and Control, 1996,7(6):596-604.
- [6] Do M T, Birkett N J, Johnson K C, et al. Chlorination disinfection by-products and pancreatic cancer risk [J]. Environmental Health Perspectives, 2005,113(4):418-424.
- [7] Brown D, West J R, Curtis B J, et al. Modeling THMs in water treatment and distribution systems [J]. Proceeding of the Institution of Civil Engineers-Water Management,2010,163(4):165-174.
- [8] Curtis B J, West J R, Bridgeman J. Chlorine demand-based predictive modeling of THM formation in water distribution networks [J]. Urban Water Journal,2009,6(6):407-415.
- [9] Liu W, Qi S. Modeling and verifying chlorine decay and chloroacetic acid formation in drinking water chlorination [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2010,4(1):65-72.
- [10] Boccelli D L, Tryby M E, Uber J G, et al. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems [J]. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management,1998,124(2):99-111.
- [11] 黄鑫,高乃云,丁国际,等. 溴酸根在紫外和氯消毒联用工艺中的形成[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(6):132-136.
HUANG Xin, GAO Naiyun, DING Guoji, et al. Formation of Bromate in UV/Cl₂, UV/NH₂Cl and UV/ClO₂ combining processes [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2010,32(6):132-136.
- [12] 赵纯,邓慧萍,商冉. 改进紫外消毒工艺中去除水中土霉素[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(2):152-156.
ZHAO Chun, DENG Huiping, SHANG Ran. Removal of oxytetracycline in water by improved UV disinfection process [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering,2009,31(2):152-156.
- [13] 张土乔,王鸿翔,郭帅. 给水管网水质模型管壁余氯衰减系数校正[J]. 浙江大学学报:工学版,2008,42(11):1977-1982.
ZHANG Tuqiao, WANG Hongxiang, GUO Shuai. Chlorine wall decay coefficients calibration of water distribution quality model [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008,42(11):1977-1982.
- [14] 李寻,张土乔,翁凤永,等. 基于节点水龄的供水管网水质研究[J]. 中国给水排水,2009,25(19):103-105.
LI Xun, ZHANG Tuqiao, WEN Fengyong, et al. Study on water quality in water distribution system based on water age of nodes [J]. China Water and Wastewater, 2009,25(19):103-105.
- [15] Visalakshi S, Baskar S. Multiobjective decentralized congestion management using modified NSGA-II [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2011,36(5):827-840.
- [16] Shen H, Mcbean E. Pareto optimality for sensor placements in a water distribution system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011,137(3):243-248.

(编辑 胡英奎)