



# 城乡统筹供水管网水质控制优化调度研究

王艳<sup>1</sup> 王玉敏<sup>2</sup> 李乔<sup>1</sup> 李成林<sup>1</sup>

(1 丹华水利环境技术(上海)有限公司, 上海 200235; 2 东南大学, 南京 210096)

**摘要** 结合实验室数据校核得出适合研究区域内的城乡统筹供水管网水质模型, 基于水质模型建立并求解了余氯优化调度模型, 开发了在线水质模拟和优化调度管理平台。通过水质优化调度研究, 在保障管网中各节点余氯量满足国家规范要求下, 相比人工氯投加量下降了 20.5%; 最后从工程性措施提出了乡镇管网水质改善的建议。

**关键词** 城乡统筹 供水管网 水质模型 优化调度

**中图分类号:** TU992

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-8471(2020)02-0116-05

**DOI:** 10.13789/j.cnki.wwe1964.2020.02.023

## Research on optimal control of water quality in urban and rural integrated water supply system

Wang Yan<sup>1</sup>, Wang Yumin<sup>2</sup>, Li Qiao<sup>1</sup>, Li Chenglin<sup>1</sup>

(1. DHI China, Shanghai 200235, China; 2. Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract:** The urban and rural water quality models for pilot city, including residual chlorine and disinfection by-products, are built and calibrated combined with laboratory data, and the residual chlorine optimal control model is established based on water quality model, and the online water quality simulation and optimal control management platform is developed. Through this research, under the requirements of residual chlorine of national regulations, the amount of chlorine injection to network is reduced by 20.5% compared with original chlorine injection. Finally, the suggestions for improving water quality in rural water distribution system are proposed from the aspect of engineering measures.

**Keywords:** Urban-rural integration; Water distribution system; Water quality model; Optimal control

### 0 引言

供水管网是城市输配水系统的重要组成部分, 原水经处理达到国家现行《城市供水水质标准》(CJ/T 206-2005) 和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006), 但是由于城乡统筹供水管网中水龄过长, 细菌滋生, 导致管网水质无法保证。近年来, 各市的水质调

查结果不容乐观, 主要体现在管网中游离余氯、有机物、消毒副产物及微生物等方面的水质超标<sup>[1]</sup>。

由于供水管网系统庞大复杂, 无论采用人工采样还是在线监测的手段, 都难以覆盖所有的用水节点, 因此有必要建立供水管网水质模型, 模拟各种化学物质在供水管网中随时间、空间的分布。同时, 基于模拟管网中余氯、消毒副产物等指标的变化, 可在保障供水水质安全的基础上, 实现水质优化调度<sup>[2]</sup>。

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX07045-002)。



## 1 研究思路

结合实验室数据得出适应城乡统筹供水管网的余氯主体水及管壁反应系数、消毒副产物(包括但不限于三氯甲烷)反应系数,模拟供水管网中的水质变化。

水质优化调度需建立在水力及水质模型基础上,在保证管网水力模型准确度及确定准确的水质反应系数的基础上,才可对水质优化调度开展研究。首先,水力水质模型采用 MIKE URBAN 软件进行建模、校核及率定。然后,根据城乡统筹供水管网的特点,消毒副产物与余氯含量有着直接关系,余氯浓度较高时会诱发消毒副产物的增生,余氯浓度较低时因消毒副产物的产生原料不足而受到抑制。因此制定水质优化调度为余氯优化调度,在满足节点余氯要求的前提下各水厂加氯量的优化组合,使得整个管网的余氯浓度更趋于均匀化,减少管网总的过剩余氯量。最后,将研究成果应用于实际的城乡统筹供水管网中,提高管网水质保障率。

## 2 研究方法

研究区域为江苏省盐城市城区及 2 个乡镇(楼王镇和步凤镇)。首先构建盐城管网水力及水质模型,然后采用遗传算法进行水质优化调度,并结合 BS 端定制开发决策支持系统,对实际生产进行指导。

### 2.1 模型概况

将管网拓扑数据、生产运行数据及水量数据导入到建模软件中,建立 2017 年 8 月高峰日供水模型,如图 1 所示。此供水系统由 2 座水厂(城东水厂及盐龙湖水厂)联合供水,日供水量分别为 23.8 万  $\text{m}^3$  和 14.8 万  $\text{m}^3$ ,出水余氯浓度均值分别为 0.8 mg/L 和 0.88 mg/L。所建模型包含 17 462 个节点和 17 920 根管段,校核压力测点 10 个。

### 2.2 水力模型校核

高峰离线水力模型压力校核采用的数据是 2017 年 8 月 1 日的 SCADA 实测数据。校验结果

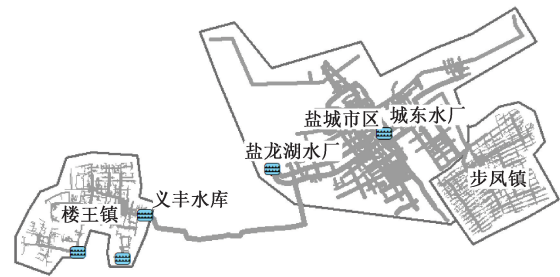


图 1 盐城城区及乡镇管网模型

精度满足上海市地方标准《城镇供水管网模型建设导则》(DB31/T800—2014)<sup>[3]</sup>。图 2 列举了盐龙湖水厂出厂压力和水岸名都监测点的压力校验曲线。

### 2.3 水质模型反应系数的确定

#### 2.3.1 余氯反应系数的确定

余氯反应系数包括主体水反应系数和管壁反应系数。主体水反应系数可以通过实验室烧杯试验来拟合估计。管壁反应系数不能够直接测试,必须来自现场研究的数据收集,根据校验数据反复拟合得到<sup>[5,6]</sup>。实验组以楼王镇一段南北主干管线作为研究对象,在 2018 年冬季(1 月)及夏季(6 月)分别在其沿线 9 个点处进行采样,针对冬季和夏季实验室测得的余氯数据分析余氯反应系数。

(1)冬季(1 月)余氯反应系数的确定。首先,通过实验室烧杯试验获得,主体水衰减系数为  $-0.102 \text{ d}^{-1}$ 。然后,将主体水衰减系数输入模型,依据模拟数据尽量和试验数据吻合,采取试算的方法,分别在模型中输入管壁全局反应系数为  $-0.03 \text{ m/d}$ ,  $-0.05 \text{ m/d}$ ,  $-0.1 \text{ m/d}$ ,模拟结果如表 1 所示。通过模型校验得出,管壁全局反应系数为  $-0.1 \text{ m/d}$  时,除了 #3 和 #9 以外,其他所有测点误差精度(模拟

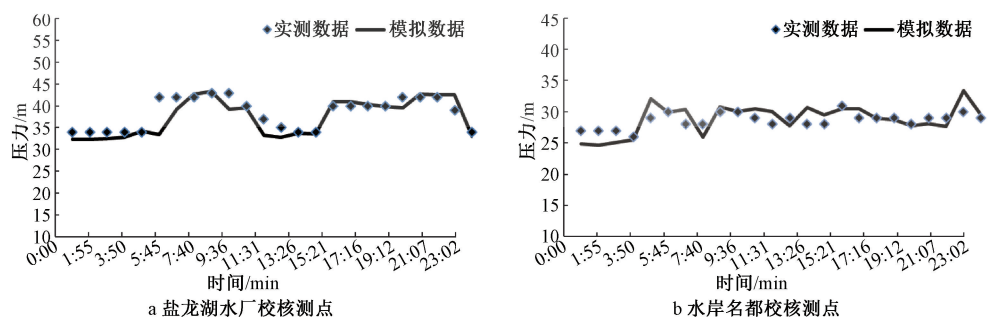


图 2 盐龙湖水厂和水岸名都监测点的压力校核

Fig. 2 Example of pressure calibration plots for Yanlong Lake water plant and Shui'anmingdu



表 1 不同管壁反应系数校验结果

Tab. 1 The calibration result of pipe wall reaction for different reaction

采样编号	模型 ID	实验数据 /mg/L	管壁反应系数= -0.03 m/d		管壁反应系数= -0.05 m/d		管壁反应系数= -0.1 m/d		管壁反应系数= -0.1 m/d 修正后	
			模拟数据 /mg/L	误差/%	模拟数据 /mg/L	误差/%	模拟数据 /mg/L	误差/%	模拟数据 /mg/L	误差/%
#1 红星增压站	wNode_7676	0.5	0.51	2%	0.51	2%	0.51	2%	0.51	2%
#2 总表	wNode_6853	0.59	0.48	19%	0.46	22%	0.45	24%	0.55	7%
#3	wNode_5849	0.79	0.4	49%	0.35	56%	0.28	65%	0.28	65%
#4	wNode_6080	0.32	0.38	19%	0.3	6%	0.23	28%	0.29	9%
#5	wNode_6141	0.14	0.32	129%	0.23	64%	0.14	0%	0.14	0%
#6	wNode_6170	0.09	0.3	233%	0.19	111%	0.11	22%	0.09	0%
#7	wNode_6205	0.08	0.26	225%	0.15	88%	0.08	0%	0.08	0%
#8	wNode_7383	0.06	0.19	217%	0.08	33%	0.05	17%	0.06	0%
#9 末梢	wNode_7353	0.07	0.11	57%	0.03	57%	0.01	86%	0.01	86%

值与实测值差值的绝对值与实测值的比值)都在 50%以内,增加部分管线的局部反应系数修正后,误差精度可以满足《城镇供水管网模型建设技术导则》(DB31/T800-2014)<sup>[3]</sup>。究其#3和#9的原因:①#3需排除由于采集或实验原因造成的数据偏差;②#9在末梢,几乎不用水,而且距离#8号点只有 500 m,而模型按比流量法在此处分配了水量,导致误差偏大。

(2)夏季(6月)反应系数的确定。首先,通过实验室烧杯试验获得,主体水衰减系数为-0.130 d<sup>-1</sup>。然后,采用与冬季(1月)相同的研究方法获得,管壁反应系数为-0.16 m/d。

### 2.3.2 消毒副产物系数的确定

本次研究的消毒副产物主要是三卤甲烷 THMs。实验组同时获取了冬季(1月)和夏季(6月)楼王镇主干管线上的 9 个测点的 THMs 实验数据。

(1)冬季(1月)THMs 反应系数的确定。消毒副产物 THMs 遵从限制一级增生方程,见式(1)<sup>[6]</sup>:

$$\frac{dC}{dt} = k(C_L - C) \quad (1)$$

式中  $k$ ——总的消毒副产物增生系数, d<sup>-1</sup>;

$C$ ——消毒副产物浓度,  $\mu\text{g/L}$ ;

$C_L$ ——消毒副产物最大浓度,  $\mu\text{g/L}$ 。

由式(1)积分推导可得式(2):

$$\frac{C_L - C_0}{C_L - C} = e^{kt} \quad (2)$$

式中  $C_L$ —— THMs 最大浓度, 45  $\mu\text{g/L}$ ;

$C_0$ —— THMs 初始浓度, 43  $\mu\text{g/L}$ 。

通过  $(C_L - C_0)/(C_L - C)$  和时间  $T$  的拟合曲线, 得出冬季(1月)THMs 的反应系数  $k = 0.01678 \text{ h}^{-1} = 0.40272 \text{ d}^{-1}$ 。

将  $k$  带入水质模型模拟, 得到校验结果如表 2 所示。除末梢 2 个采样点不满足校验标准外, 其他采样点都在 50% 校验标准范围内<sup>[4]</sup>。由于末梢点长期无用水量, 余氯浓度与有机物浓度均较低, 三卤甲烷形成速率远低于已形成的三卤甲烷由于管壁吸附与自身还原脱卤作用产生的消耗速率, 且由于末梢点水力停留时间最长, 三卤甲烷挥发现象也更持久, 所以末梢点三卤甲烷浓度降低幅度较大。

表 2 冬季(1月)消毒副产物 THMs 校验结果

Tab. 2 The calibration result of winter (January)

disinfection by-product THMs

采样编号	模型 ID	试验数据 / $\mu\text{g/L}$	模拟数据 / $\mu\text{g/L}$	误差
#1 红星增压站	wNode_7676	43	43	0%
#2 总表	wNode_6853	42	39	7%
#3	wNode_5849	45	34	24%
#4	wNode_6080	43	31	28%
#5	wNode_6141	36	26	28%
#6	wNode_6170	35	26	26%
#7	wNode_6205	28	21	25%
#8	wNode_7383	2	17	750%
#9 末梢	wNode_7353	2	6.5	225%

(2)夏季(6月)THMs 反应系数的确定。与冬季研究方法类似, 通过  $(C_L - C_0)/(C_L - C)$  和  $T$  的拟合曲线得出夏季(6月)THMs 的反应系数  $k = 0.26568 \text{ d}^{-1}$ , 将  $k$  值带入水质模型模拟, 得到的校验结果与冬季类似, 除末梢采样点不满足校验标准外, 其他采样点都在 50% 校验标准范围内。



### 2.4 余氯优化调度模型建立及求解

余氯优化调度模型建立在水力和水质模型基础之上,目的是使管网中各个节点余氯量满足国家规定饮用水消毒剂管网末梢最小质量浓度 0.05 mg/L 的前提下优化各水厂的加氯量组合,使得余氯浓度更趋于均匀化,减少水厂的加药量,式(3)<sup>[7,8]</sup>:

$$F = \min \sum_{j=1}^p 1\,000 \times Q_j C_j$$

$$C_{\min} \leq C_j \leq C_{\max}, C_n \geq C'_{\min} \quad (3)$$

式中  $F$ ——供水系统一天的加氯量,kg/d;

$j$ ——加氯点个数;

$p$ ——计算时间段,1~24 h;

$C_j$ ——管网中第  $j$  水厂的出厂水余氯质量浓度,mg/L;

$Q_j$ ——管网中第  $j$  水厂的供水量, $m^3/d$ ;

$C_n$ ——管网中第  $n$  个节点的余氯质量浓度,mg/L;

$C_{\min}$ ——国家规定的饮用水消毒剂出厂质量浓度最小值,0.3 mg/L;

$C_{\max}$ ——国家规定的饮用水消毒剂出厂质量浓度最大值,4 mg/L;

$C'_{\min}$ ——国家规定饮用水消毒剂管网末梢最小质量浓度,0.05 mg/L。

基于 MIKE URBAN 软件导出的管网属性 INP 文件,通过调用 EPANET 采用遗传算法对水厂出厂余氯浓度进行优化,制定水厂出厂余氯浓度调度方案。求解步骤如图 3 所示,优化计算到 20 代后趋于稳定,优化结果如图 4 所示。

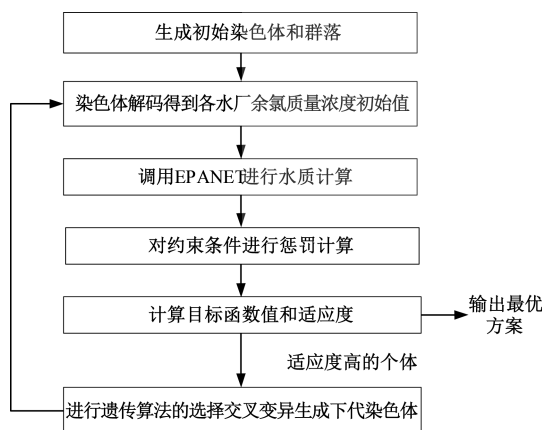


图 3 水质优化调度求解流程

Fig. 3 The solution process for water quality optimization scheduling

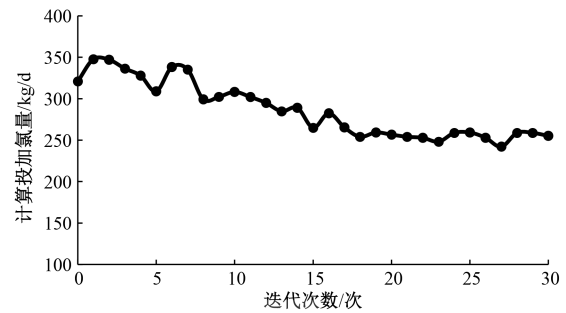


图 4 水质优化调度求解结果

Fig. 4 The results for water quality optimization scheduling

### 3 研究成果

#### 3.1 实时在线水质模拟

根据实时边界水质数据(出厂余氯)模拟全管网水质情况,包括:余氯和三卤甲烷模拟。方便管理者与运营者对全管网水质情况的了解,更好地进行水质安全把控。系统主要实现了以下功能:

(1)基于 WEBGIS 展示水质监测点余氯的实测值与模拟值,以及可以预测任意节点未来 24 h 的水质变化情况;可在界面中单独展示关键水质测点的实时监测数据以及模型预测数据(见图 5)。



图 5 实时在线水质模拟界面

Fig. 5 Layout of real-time on-line water quality simulation

(2)设置水质报警阈值,当实测值超出阈值,进行水质报警。

#### 3.2 水质优化调度管理

基于 2.3 的研究理论开发了水质优化调度管理系统,通过自动优化方式,可以给出水厂及中途加氯点的余氯投加参考值,也可以进行人工手动调整。

### 4 结论与建议

比较传统加氯和水质优化调度后的节点余氯保障率和日加氯量(如表 3 所示)可以得出结论,以盐城市 2016 年 7 月 1 日高峰供水日为例,通过水质优化调度计算水质保障率从 95.76% 提高到了 100%,一天的氯投加量为 255.11 kg/d,相比传统投氯方式,优化的余氯投加量可以下降 20.5%。



表 3 传统加氯和优化加氯结果比较

Tab. 3 Comparison of traditional and optimal chlorine casting

加氯方式	节点余氯安全率 (节点余氯浓度 $\geq 0.05$ mg/L)	日加氯量/kg/d
传统加氯	95.76%	320.99
优化加氯	100%	255.11

除了以上非工程性措施来提高城乡水质外,同时也提出两点工程性措施来改善水质的建议:

(1)减小乡镇管网的水龄是改善水质的关键,由于乡镇管网结构布局不合理,在乡镇入口处的余氯浓度是满足的,然而进入乡镇后水龄过长,管网末梢部位存在不达标现象。那么减小水龄的途径就是合理规划改造管线布局,如关阀操作、管线改造等,尽量使水流介于经济流速范围内。

(2)由于乡镇人口流动性较大,导致人员外出务工时水质会变差,返乡时水质又会变好,针对此问题,临时性的工程措施是摸清乡镇居民的用水规模,定期打开水龙头进行放水,但从长远看,还是要着重从优化管线连接入手,例如将城乡管网连通成环,根据不同季节的用水变化规律进行联合调度,从而优化乡镇管网的运行条件。

#### 参考文献

- [1] 吴文燕, 赵洪宾, 解守志. 监测配水管网水质[J]. 中国给水排水, 1997, (1): 25-27.
- [2] 李宏佳. 沈阳市供水管网水质动态模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

(上接第 115 页)

本方法对水务集团进行城市供水管网 DMA 分区方案的选择具有参考作用。

#### 参考文献

- [1] M Farley. Leakage management and control: A best practice training manual[M]. WTO, 2001.
- [2] Perelman L S, Allen M, Preis A, et al. Automated sub-zoning of water distribution systems[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, (65): 1-14.
- [3] Di Nardo A, Di Natale M, Santonastaso G F, et al. Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(5): 620-629.
- [4] Di Nardo A, Di Natale M, Santonastaso G F, et al. An automated tool for smart water network partitioning[J]. Water Resources Management, 2013, 27(13): 4493-4508.
- [5] Karypis G, Kumar V. Parallel multilevel series k-way partitioning scheme for irregular graphs[J]. SIAM Review, 1999, 41(2): 278-300.
- [6] 曾翰, 陶涛. 供水管网多目标分区方法[J]. 净水技术, 2018, 37(5).

- [3] DB31/T 800-2014 城镇供水管网模型建设技术导则[S].
- [4] 舒诗湖, 赵明, 何文杰. 供水管网水力、水质模型校核标准探讨[J]. 中国给水排水, 2008, 24(18): 104-106.
- [5] Lewis A. Rossman. EPANET 2 USERS MANUAL[M]. EPA/600/R-00/057 September 2000.
- [6] 王鸿翔, 郭文献等. 供水管网水质模型校正研究与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [7] Seyoum AG, Tanyimboh TT, Siew C. Assessment of water quality modelling capabilities of EPANET multiple species and pressure-dependent extension models[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2013, 13(4): 1161-1166.
- [8] 王康乐, 郑飞飞, 刘遂庆. 多水源供水管网余氯浓度优化调度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(9): 1217-1220.



§ 作者简介: 王艳, 女, 生于 1981 年, 山东德州人, 硕士, 工程师, 主要从事供水系统管网建模及模型在辅助设计、运行调度等方面的应用。  
通讯处: 200235 上海市徐汇区古宜路 181 号 A 栋 4 楼  
电话: (021) 64172008  
E-mail: wya@dhigroup.com  
收稿日期: 2019-04-26

- [7] 武广号, 文毅, 乐美峰. 遗传算法及其应用[J]. 应用力学学报, 2000, 23(6): 9-10.
- [8] MacDonald Graham CDY. DMA design and implementation, a North American context[C]. IWA Specialized Conference, 2005.



§ 作者简介: 周立典, 女, 生于 1997 年, 四川籍, 硕士研究生在读, 主要研究方向为供水管网设计与运行优化。  
通讯作者: 信昆仑  
通讯处: 200092 上海市四平路 1239 号明净楼 214  
电话: (021) 65985869  
E-mail: Xkl@tongji.edu.cn  
收稿日期: 2019-08-08