

多水源管网供水压力调整对供水交界面水龄的影响

郭 维¹, 颜合想¹, 潘瑞军², 廖子元¹, 信昆仑¹

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 湖州市水务集团有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 在城乡一体化供水发展进程中,新建水厂和原有水厂服务范围会存在供水交界区域,通常位于多个水厂的供水末端区域,管道流速慢、水龄大、水质相对较差。进行了HZ地区供水交界面水质保障研究,通过调整供水厂的压力调度,使得供水交界区域小幅移动,对供水交界面内的管网节点水龄进行了对比。结果表明,该措施能小幅降低供水交界面区域内的水龄,用水量大的用户水龄降低相对更为明显,水龄分布更加均匀,有利于保障供水交界面区域的水质安全。

关键词: 供水交界面; 节点水龄; 压力调整; 水质保障

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)01-0047-05

Influence of Water Supply Pressure Adjustment on Water Age at Water Supply Area Boundaries in a Multi-source Water Supply Network

GUO Wei¹, YAN He-xiang¹, PAN Rui-jun², LIAO Zi-yuan¹, XIN Kun-lun¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Huzhou Water Group Co. Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: In the integration of urban-rural water supply systems, there are water supply area boundaries between the new and existing water treatment plants. A boundary area is the water supply end area of multiple water treatment plants, which has slow water velocity, long water age, and low water quality. Water quality guarantee of the water supply area boundaries in HZ area was studied, the discharge pressure of a newly built large water treatment plant was adjusted to slightly shift the water supply area boundaries, to provide comparison of water age at nodes in the water supply area boundaries. The results showed reduction in water age in the water supply area boundaries. Particularly, large users showed larger water age reduction. The distribution of water age was uniform, which was helpful to protect the water quality safety in the water supply area boundaries.

Key words: water supply area boundary; water age of node; pressure adjustment; water quality guarantee

城乡一体化供水就是将城镇供水系统和城区供水系统连接起来。通常是在城镇乡村的原有供水基础上改造而成^[1],在实行一体化供水系统前,城镇

供水系统多为独立小水厂供水系统,一种典型做法就是在靠近乡镇地区新建大型水厂,供给城区乡镇地区,将原来乡镇水厂改造为配水站,通过该大型水

厂与城区原有水厂连接,实行城乡一体化供水模式。在这种供水模式下,新建的大型水厂与原有城区供水系统虽然整合连接,但必然是存在一个供水交界区域,在该区域有来自双方的供水在此汇合,因此该地区也属于双方供水范围的末梢区域,水流到该区域时间长即水龄大,且停留时间长、流动性差。众多研究表明^[2],随着水龄增大,管网中的余氯水平会减少^[3]。因此,在供水交界面区域水质相对较差,用水安全得不到保障。

在城乡一体化供水进程中,如何保障供水交界面区域的供水水质安全,是一项重要的研究内容。常规的供水交界面区域水质安全,可以通过管段清洗、末梢设置泄水点排水等物理手段进行安全保障。笔者以 HZ 地区供水交界面供水水质为例进行分析,旨在通过较小幅度调控其水源的压力措施,降低供水交界面区域的水龄情况,使得管网整体水龄分布更加均匀,从而保障供水交界面区域水质安全。

1 节点水龄与水质

1.1 节点水龄与水量权重水龄

节点水龄指的是从水源流到该节点的时间,是各管径水龄的汇聚和重新分布^[4],实际中,每个节点往往有来自多个水源路径的水量到达该节点,所以常用水龄计算方法是伍悦滨等^[5]提出的计算方法,设置水源处水龄为零,则任一节点的水龄便是在该节点来源于不同的供水路径的水量流经时间在该节点的水量加权值,表达式为:

$$T_i = \frac{\sum_{n=1}^N q_{0i}^{(n)} T_{0i}^{(n)}}{\sum_{n=1}^N q_{0i}^{(n)}} \quad (1)$$

式中: T_i 为节点 i 的水龄; $T_{0i}^{(n)}$ 为沿节点 i 的第 n 条供水路径水从水源流到节点 i 所经历的时间; $q_{0i}^{(n)}$ 为来自第 n 条供水路径的供水量; $N \in L_i$, L_i 为节点 i 所有上游水源供水路径的集合。

通常管网末梢区域节点水龄较大,但仅仅用节点水龄来代表对水质的影响,有时是不充分的,末梢区域往往用水量少,因此也可以用节点水龄和此处用水量的乘积即水量权重水龄来表达水龄在该处的影响量。

$$M_i = Q_i T_i \quad (2)$$

式中: M_i 表示在节点 i 的水量权重水龄; Q_i 表示节点 i 的用水量。

1.2 水质评价

节点水龄能用来代表该节点的水质状况,节点

水龄大,代表水流到此处的时间长、水在管道中停留时间久、输水距离远、与管壁接触时间长、余氯含量降低、水质下降,因此一个节点的水龄便能表达该处用户的用水水质情况。供水水质改善技术通常也以降低节点水龄为目标,但通常情况下,在供水管网水质改善措施中,常常都是对整个管网或特定区域进行水质评价,单一节点的水龄有时不能反映整个管网的水质情况,因此对区域管网水质的评价可以采用平均水龄和区域加权水龄来评价整个区域内水质情况^[6]。

$$\text{Avg}T = \frac{\sum_i^N T_i}{K} \quad (3)$$

$$\text{Wgh}T = \frac{\sum_i^N T_i Q_i}{\sum_i^N Q_i} \quad (4)$$

式中: $\text{Avg}T$ 表示该区域内的平均水龄; K 表示该区域内节点个数; $N \in Z_i$, Z_i 表示该区域内节点集合; $\text{Wgh}T$ 表示该区域的加权水龄。

在管网整体调控中,有些区域其水龄较大,但可能用水量偏少,在管网整体调控中若强行考虑可能造成资源分配的浪费。实际情况中,显然水龄较大的节点若其用水量大,则对水质安全整体保障的影响比重就大,若其用水量少,则对水质安全整体保障的影响比重就小,因此对整个管网或区域内的水质评价,使用平均水龄和加权水龄综合考虑能更好地反映水质情况。

2 供水交界面

在多水源供水管网系统中,供水交界区域可能是线状,也可能是面状,李黎武等^[7]提出了一种基于拓扑在管网水力计算基础上逐级搜寻水源供水区域的方法。阎立华等^[8]通过图论法,在邻接矩阵的基础上搜索水源点供水情况,形成判断出水源的供水分界点矩阵,从而划定供水区域。在实际管网运行中,供水交界面通常不是一个确定的一条线,而是一个面区域,尤其对于城乡一体化供水改造后形成的多水源供水分界区域,通常是带状区域,其供水交界区域的确定需要一定的标准。

HZ 地区在 2016 年完成城乡一体化供水改造后,现有 A、B、C、D 共 4 个水厂,其中 D 水厂是 2016 年新投入使用,主要供给地区是乡镇地区和部分城区,占总供水量的 40% 左右,而 A、B 和 C 水厂位于城区内部,主要供水区域是城区,约占总供水量的 60%,其中 A 水厂供水约占总供水量的 36%,该地

区城区和 D 水厂供水之间存在供水交界面,本研究假定当节点用水量有 90% 以上来自某水源时,则认为该节点属于该水源供水范围,通过管网水质追踪模拟计算,可分析出 4 个水厂的供水比例分布范围,然后以 90% 供水量为标准综合确定供水交界面,HZ 地区城区 3 个水厂和 D 水厂供水的主要交界面如图 1 所示。

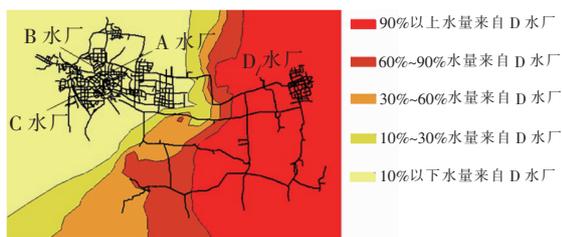


图 1 HZ 地区供水交界面

Fig. 1 Water supply area boundary in HZ area

图 1 中红色区域为 90% 以上的供水来源于 D 水厂,浅黄色区域为 10% 以下的供水来源于 D 水厂(即 90% 以上的供水来源于城区 A、B、C 水厂),中间区域为供水交界区域,有来自多个水源的供水量。从供水交界区域可以看出,交界区域大致位于双方供水中间地带和部分末梢区域。水量到达供水交界面时,经历时间长,相对周边区域水龄普遍较大,并且该供水交界面内还存在大水量用户,因此其水质安全需要相关措施保障。

3 水厂供水压力调整对管网水质影响

3.1 水厂供水压力调整

为保障该地区的水质安全,尤其重点保障交界面区域水质安全,可采取水力调控、管道清洗、泄水点定期排水等多项措施,本研究通过水厂压力调度进而调整交界面水龄的方式分析对管网水质的影响。

城区 3 个水厂供水规模稳定,已经运行较长时

间,城市管道使用年限久,若提高出水压力可能导致大规模老旧管网爆管等风险,而降低压力也会导致城区部分供水压力不足,而 D 水厂新投入使用,供水水质安全保障好,供水范围大,供水距离相对更远,末梢用水点压力需求也较低。综合考虑,首先提升 D 水厂的供水压力以实现供水调度方案的调整。

通过压力调整,将 D 水厂出厂压力提高 10%,增加其供水能力,分析其对管网水质变化的影响情况。D 水厂压力调整后供水交界面变化情况如图 2 所示。可以看出,供水交界面向城区较小幅度移动,来自城区的水龄和 D 水厂的水龄都将有所变化,同样交界面区域水质将发生变化。

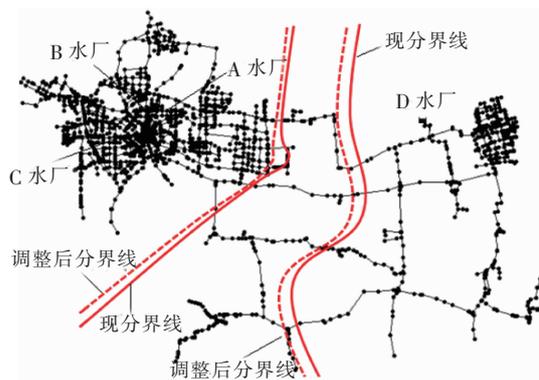


图 2 D 水厂压力调整后供水交界面变迁

Fig. 2 Transition of water supply area boundary after pressure adjustment of D water treatment plant

3.2 供水交界面水质变化

水厂压力调整后,供水交界面区域移动,区域水质分析通常要考虑一致性,因此取压力调整前后的供水交界面并集作为分析评价区域,重点通过水龄分析区域内 3 个大用户节点、162 个普通节点的水质。该交界面区域前 95% 用水量的节点水龄变化情况见表 1。

表 1 占交界面区域 95% 水量的水龄变化

Tab. 1 Water age change of 95% water in water supply area boundary

节点 ID	需水量/ ($L \cdot s^{-1}$)	总水头/ m	压力/m	水龄/h	M_i	调整后 水龄/h	M_i'
100785127	954.59	24.39	19.39	10.22	9 756.0	10.22	9 823.0
100906594	149.72	26.13	21.13	20.41	3 056.0	18.56	2 779.0
100798534	116.05	30.52	25.52	32.91	3 819.0	31.76	3 686.0
100663298	7.64	31.79	26.79	19.00	145.0	16.90	129.0
100884436	5.35	30.80	25.80	25.67	137.0	24.10	128.7
100872846	5.04	30.73	25.73	28.19	142.0	29.30	147.6
100884712	4.68	32.22	27.22	18.23	85.3	15.50	72.4
100798961	4.43	30.74	25.74	32.97	146.0	29.80	131.8

续表1 (Continued)

节点 ID	需水量/ (L·s ⁻¹)	总水头/ m	压力/m	水龄/ h	M_i	调整后 水龄/h	M_i'
100671446	4.41	31.44	26.44	19.56	86.3	18.00	79.6
100797799	3.95	30.86	25.86	24.34	96.2	22.80	90.0
100670756	3.62	30.95	25.95	24.36	88.1	23.20	83.8
100808436	3.21	30.94	25.94	27.03	86.9	28.00	90.0
100670568	2.97	30.89	25.89	24.28	72.1	21.80	64.7
100793587	2.88	32.36	27.36	17.89	51.5	14.70	42.4
100671153	2.86	31.17	26.17	21.10	60.3	19.70	56.3
100792284	2.84	31.27	26.27	20.55	58.4	18.90	53.6
100793544	2.82	30.62	25.62	29.78	84.0	29.80	84.1
100767455	2.70	30.96	25.96	22.88	61.8	20.90	56.4
100670946	2.66	30.68	25.68	29.20	77.6	29.10	77.3
100671414	2.51	30.94	25.94	28.71	72.0	28.10	75.3
100671082	2.40	29.14	24.14	20.23	48.5	18.40	44.0
100676872	2.33	30.94	25.94	25.47	59.4	25.00	58.3
100797811	2.33	30.86	25.86	24.35	56.8	22.80	53.1

此外,该交界面区域内有3个大用户(ID分别为100785127、100906594、100798534),且其用水量相对固定,节点水量分别为954.59、149.72、116.05 L/s,通常大用户因用水量大,水质安全更加值得关注。调整后该地区3个用水量大的水龄降低率分别为0.9.06%、3.49%。

该地区3个大用户用水量总和为1 220.36 L/s,约占该区域总用水量的80%,水厂压力调整后大用户水龄降低幅度最大可达9.06%,水质情况有较大改善。

对于整个交界面区域内对大用户水龄、大部分用水点(即占95%用水量的用户)、全部交界面区域节点水龄3个层次改善情况进行汇总,结果如表2所示。可以看出,通过压力调整后,供水交界面区域水龄整体降低,大用户水龄降低幅度相比整体供水交界面区域更大,对大用户水龄降低更为明显,加权水龄整体降低幅度小于平均水龄降低幅度,说明用水量和水龄乘积即水量权重水龄更能反映整体水质变化情况。

表2 供水交界面区域水龄变化

Tab.2 Change of water age in water supply area boundary

项目	平均水龄			加权水龄		
	调前水龄/h	调后水龄/h	降低率/%	调前水龄/h	调后水龄/h	降低率/%
交界面内大用户	21.18	20.18	4.72	13.63	13.35	2.07
95%用水量用户	23.80	22.50	5.46	14.20	13.86	2.39
交界面区域用户	36.87	36.20	1.84	16.03	15.47	3.50

3.3 供水管网系统水质变化

由3.2节可知,水厂压力调整后对供水交界面区域内的水质有所改善。除交界面区域外,计算得到调整前后整个管网系统的平均水龄分别为18.12 h和18.27 h,增加了0.83%;水量加权水龄分别为14.012 h和14.013 h,可认为基本不变。因此,通过水源的压力调整,供水交界面区域水龄下降,而整体水龄变化幅度很小,说明水龄分布相对更加均匀,整个供水管网系统水质安全保障性提高。

针对供水交界面区域的水质保障,要减小节点水龄,一般需要减小来水流动时间较长的方向的供水量,增大来水流动时间较短的方向的供水量。本案例中通过调节D水厂压力,使得供水交界面小幅度西移,使得交界面区域的水质安全保障得到了提升,同时管网整体水龄分布更加均匀。

4 结论与展望

通过将新建的大规模水厂的供水压力提升10%,供水交界面处的水质有较为明显的改善,且对原整体供水格局及交界面区域之外的管网水质影响较小,整体水龄分布相对更加均匀。可以由实际工程人员使用供水模拟软件进行水力和水质模拟,得出最适合的调度方案,可操作性高,可作为在实际工程中保障供水交界面区域水质安全工程措施的参考。

由于本研究只考虑了提高一个大水量供水厂的的压力情况,在具体实际工程中,如何改变多个水源的

供水压力来使得供水交界面的变化更合理从而保障供水交界面区域的水质安全是一个系统工程,需要考虑众多因素,可以设置考虑能耗、水质等多影响因素的优化目标函数和多种限制条件,进行综合优化考虑,找出最适合的压力调度方案。

参考文献:

- [1] 张正德,张珏靓,李树平,等. 城乡一体化供水特点与实践[J]. 给水排水,2018,44(12):17-20.
Zhang Zhengde, Zhang Jueliang, Li Shuping, *et al.* Characteristics and practice of integrated urban and rural water supply [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018,44(12):17-20(in Chinese).
- [2] 李璞,吕谋,董深,等. 多水源供水管网余氯与节点水龄关系研究[J]. 中国给水排水,2014,30(19):61-64.
Li Pu, Lü Mou, Dong Shen, *et al.* Relationship between residual chlorine and node age in multi-source water supply network[J]. *China Water & Wastewater*,2014,30(19):61-64(in Chinese).
- [3] 班福忱,吴丹,黑月明. 基于 WaterGEMS 的节点水龄与余氯变化规律分析[J]. 城镇供水,2017(6):48-52.
Ban Fuchen, Wu Dan, Hei Yueming. Analysis of the change of water age and residual chloride of nodes based on WaterGEMS[J]. *City and Town Water Supply*,2017(6):48-52(in Chinese).
- [4] 蒋承杰. 配水管网水龄分析与管网水质状况评价体系的探讨[D]. 杭州:浙江大学,2007.
Jiang Chengjie. The Age of Water Distribution Network's Analysis and the Appraisal System with Water Quality Condition's Discussion [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2007(in Chinese).
- [5] 伍悦滨,赵洪宾,张海龙. 用节点水龄量度给水管网的水质状况[J]. 给水排水,2002,28(5):36-38.
Wu Yuebin, Zhao Hongbin, Zhang Hailong. Water quality status measured by node age in distribution network[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2002,28(5):36-38(in Chinese).
- [6] 信昆仑,瞿玲芳,陶涛,等. 基于综合水龄指数评价的供水管网优化调度[J]. 同济大学学报:自然科学版,2016,44(10):1579-1584.
Xin Kunlun, Qu Lingfang, Tao Tao, *et al.* Optimal scheduling of water supply network based on node water age [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2016,44(10):1579-1584(in Chinese).
- [7] 李黎武,许仕荣,施周. 基于拓扑理论确定多水源管网供水区域及绘制等压线的方法研究[J]. 给水排水,2001,27(12):5-8.
Li Liwu, Xu Shirong, Shi Zhou. A topological-based method for determination of source-dervng districts and drawing pressure-coutour in multi-soiurce networks [J]. *Water & Wastewater Engineering*,2001,27(12):5-8(in Chinese).
- [8] 阎立华,刘丽英,马婷婷. 图论法研究多水源管网供水分区[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(1):113-116.
Yan Lihua, Liu Liying, Ma Tingting. Multi-source water supply network for subarea based on graphic theory [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2007,23(1):113-116(in Chinese).



作者简介:郭维(1994-),男,陕西安康人,硕士研究生,主要从事给水排水工程设计与运行最优化研究工作。

E-mail:ytclouding@foxmail.com

收稿日期:2019-04-12