

---

# 突发水源地及管网污染事故——应急水质调度研究

东南大学能源与环境学院，DHI 中国供水组，盐城市自来水有限公司

## 目 录

【内容摘要】 .....	1
【关键词】 .....	1
1、问题的提出.....	1
2、研究目标.....	2
3、研究思路.....	3
3.1 管网水力水质模型.....	3
3.2 事故应急处置系统.....	3
4、研究内容与方法.....	4
4.1 事故应急处置系统.....	4
4.1.1 突发事件模拟.....	4
4.1.2 事故应急处置.....	6
4.2 水源污染应急调度预案.....	9
4.2.1 城东水厂突发污染调度策略.....	9
4.2.2 盐龙湖水厂突发污染调度策略.....	10
5、研究结果与讨论.....	12
6、存在的问题与后续的研究.....	13
【参考文献】 .....	14

## 【内容摘要】

在水源地突发污染事故情况下，针对事故区域供水现状和事故类型，调用水质模型计算内核引擎，进行管网水质污染趋势分析研究，显示污染影响范围，制定可行的应急预案（如清水池提前蓄水并减压供水、启用应急水源供水、管网联合调度、关闭部分阀门等），预评估应急预案的应用效果，在 WebGIS 系统平台上发布污染事故的报警信息，实现污染事故的实时报警，有效减少污染事故的影响范围。

## 【关键词】

供水管网 污染 水力模型 应急调度

### 1、问题的提出

随着经济发展和人民生活水平的提高，城市供水系统覆盖的范围逐年扩大，供水量逐年提高，供水企业面临的挑战也越来越大，除了满足对饮用水的压力和水量需求，水司还需要关注如何进一步改善水质以及保障水质的安全。城市供水系统是用户获得饮用水的主要来源，供水系统安全与否直接影响用户能否饮用到符合水质安全标准的水。国内外突发性水质污染事故时有发生，对居民的正常用水造成了严重影响。美国威斯康辛州 Milwaukee 发生过大规模的水源性疾病，约 40.3 万居民受到影响，造成上千人入院和几例死亡，经济损失达 9620 万美元（P. Corso, et al. 2003）。2014 年美国维吉尼亚州西部，供水管网因受到原油 MCHM 污染导致 30 万居民用水困难（W. J. Cooper et al. 2014）。近年来我国水污染事故频发，监察部统计显示我国每年水污染事故发生 1700 起以上。最新公布的《2012 中国环境状况公报》显示 2012 年全国共发生 542 起突发环境事件，环境保护部直接处理突发事件 33 起，其中水污染事故 30 起，包括 4 起海洋污染，其他 26 起均不同程度影响到饮用水水源地（项宁银，2013）。2005 年吉林松花江因受硝基苯污染，造成哈尔滨市停水 4 天，2009 年江苏盐城市供水水源受酚类化合物污染，造成两家水厂关闭，20 万居民停水 66h。2014 年兰州市因原油管道泄漏，造成严重的水污染事故，居民停水 24h 以上。

影响供水水质的因素主要包括三个方面：水厂处理不足，管网中水质恶化和突发污染事故（NRC 2003）。一般情况下，经过水厂处理过的出水都能达到国家所要求的饮用水水质标准，但出厂水往往要经过复杂庞大的管网系统才能输送到用户，期间可能发生复杂的物理、生化反应导致水质发生变化，任何能使水回流进管网的水流出口（如消火栓、家用水龙头等）以及停水施工、水锤造成负压、管网局部损坏等都有可能引起局部管网污染（项宁银，2013）。突发污染物可以从水池、水塔、泵站、管道连接处、主干管和漏损处进入管网中（NRC 2003; Sadiq et al. 2004），由于污染物瞬时或短时间内被排放，且排放途径和时间不确定，在跟踪定位、灾情评估和处理上均有一定难度。而且管网当中水质监测点相对较少，发生水质事故后对居民的影响也往往更为严重。目前国内外供水行业针对突发污染事故的预防及应急均集中在水源地及水厂处理工艺环节，而针对供水管网中突发污染的分析、发生污染后的事故评估以及应急响应技术尚比较缺乏（项宁银 2013; Nilufar Islam 2015）。

江苏省地处太湖和淮河两大流域下游，是我国经济社会高度发达的地区之一，城镇化、工业化水平高，人口密度大。随着经济社会的快速发展和生活水平的提高，城乡居民对饮用水水质要求越来越高，近年来突发性水污染事故屡有发生，如无锡太湖蓝藻事件，已成为饮用水安全的重大隐患。面对新形势下城乡统筹区域供水面临的问题和挑战，开展江苏省城乡统筹供水技术集成与综合示范研究，在示范应用基础上，及时有效的指导城乡统筹区域供水设施建设，构建“备用水源、深度处理、严密检测、预警应急”的供水安全保障体系，为国家提供省级示范案例。

## 2、研究目标

本课题为江苏省城乡统筹供水技术集成与综合示范研究下的子课题，本文为江苏省城乡统筹供水一体化项目的研究成果。针对水源地或管网中的突发污染事故，采用 WebGIS、在线监测、数值模拟等技术，在管网水力水质模型平台基础上搭建突发水质污染事故的决策支持系统，及时发布水源地和管网的污染事故报警信息，并对管网突发污染事故进行污染物扩散分析，评估应急调度方案的可行性，形成一

套基于 web 端污染事故分析及应急处置的工作流程。

在水源地突发污染事故、水厂不能正常供水情况下，针对事故区域供水现状和事故类型，提出不同应急预案（清水池提前蓄水并减压供水、启用应急水源供水、管网联合调度等）的应用条件和实施方案，通过管网实时在线水力水质模型对管网进行应急调度模拟，调整应急调度方案，预评估应用效果，甄选适宜的管网应急调度方案。

### 3、研究思路

#### 3.1 管网水力水质模型

给水管网水力模型运行水力分析计算理论将管网抽象化，可以分析计算管网水力运行状态，用于分析、评价管网规划设计的合理性，运行情况的稳定和经济性等。给水管网水质模型通过模型来预测和跟踪管网水质变化情况，能更好的评估管网水质的状况（王旭冕，2006）。给水管网的水质变化在很大程度上决定于系统的水力工况，针对管网水受到二次污染的情况，基于水力瞬变模型求解水质模型，通过适当调整水力及水质时段，求解水力瞬变模型和水质模型，数值模拟管网中的水质变化过程，更加全面准确地反映给水管网的水质状况。

本次研究采用供水模拟软件 MIKE URBAN 对管网中的水力状况进行模拟，对于管网中的突发污染事故，由于不同污染物的物理化学性质不同，且不属于常见水质指标，研究中关注更多的是污染物质在管网中随水流的混合扩散过程，而忽略污染物质在管网中的反应过程。在应急处置模块中仍然采用 MIKE URBAN 的水质模块进行模拟。

管网水力水质具体建模内容见相关研究报告《供水管网水力事故应急调度研究报告》、《供水管网水质控制优化调度研究报告》。

#### 3.2 事故应急处置系统

管网建模之后，针对突发水源污染事件，管网的优化调度便成为一项重要任务。供水管网优化调度的研究始于 20 世纪 60 年代，国内外学者对供水系统的优化运行

进行了大量研究 (Boccelli et al. 1998; 马力辉, 2007)。对于多水源供水应急情况下的优化问题, 由于可能涉及一个或多个水厂的关闭, 此种情况发生概率很小, 故可参考资料较少。国内外对供水管网在非正常工况下的优化调度研究较少, 特别是对水源突发污染事故下的多水源供水调度几乎为空白。

日常运行中时常可能碰到管网污染物入侵的事件, 此时可以运行在线模型模拟事故点所带来的影响和受影响区域的范围, 将实时数据例如蓄水池水位、泵站运行状态、实际流量、污染物质的扩散范围, 阀门关闭及各水厂产量能力、出水厂压力进行快速规划及调度, 可以利用模型快速做多种水厂泵站调度方案, 选择最优化可行的调度方案以确保在管网修复之前最小化影响区域。对于突发污染事件, 用户可在第一时间判断管网中需要关闭的阀门, 以及评估关阀后对周边区域的影响, 以警示受影响的区域供水所和居民、商业及工业用户, 以便采取相应缓解措施。

#### 4、研究内容与方法

本课题研究内容为江苏省盐城市供水管网突发污染事故的应急模拟和水质调度。利用管网水力水质模型, 反演突发污染事故后管网中污染物的扩散过程, 帮助水司管理人员快速了解污染事故的影响范围, 科学地制定事故下的调度方案和发布相关的事故信息。

##### 4.1 事故应急处置系统

本研究基于 WebGIS 技术, 结合管网水力水质模型开发了突发污染事故的应急处置决策系统。当发生突发污染事故, 能够对污染事故进行污染物扩散模拟, 制定应急处置方案如关阀等, 并对各水厂应急水力调度方案进行评估, 以降低事故的影响。

###### 4.1.1 突发事故模拟

突发污染发生后, 首先应及时了解事故所造成的供水系统破坏状况, 并进行状态评估, 以便为应急措施提供科学依据。评估对象主要包括水源与取水构筑物、管

网设施及附件、应急设施等，评估内容包括受损原因、影响范围、受损程度及修复时间等。对于污染物在管网的扩散范围和影响评估，借助于管网中的在线水质监测、应急水质采样检测等手段，同时结合管网水力水质模拟进行。根据评估结果，对不同的污染区域采用相应的措施进行污染控制。

供水管网水力水质模型是对管网水质管理的一种高效手段，可以有效的模拟计算水中物质在时间和空间上的变化，比如某一水源流入的水量，水在管网中的流动过程，消毒剂随水流的扩散和衰减过程等。本项目在水质监测和水力水质模型基础上，对突发污染事故进行在线模拟，了解污染物质在管网中的扩散过程，评估污染事故的风险。

#### (1) 管网水力水质模型

以盐城市供水管网为研究对象，采用供水水力水质模型，模拟盐城市供水水源和管网发生突发污染事故后的管网水质变化情况。模型能模拟突发污染物在管道中随着水流扩散迁移的过程。以城东水厂发生污染事故为例，下图 4-1 为污染物在管道当中随时间的扩散过程，不同颜色表示不同的污染物浓度，红色代表浓度较高，蓝色代表浓度较低。

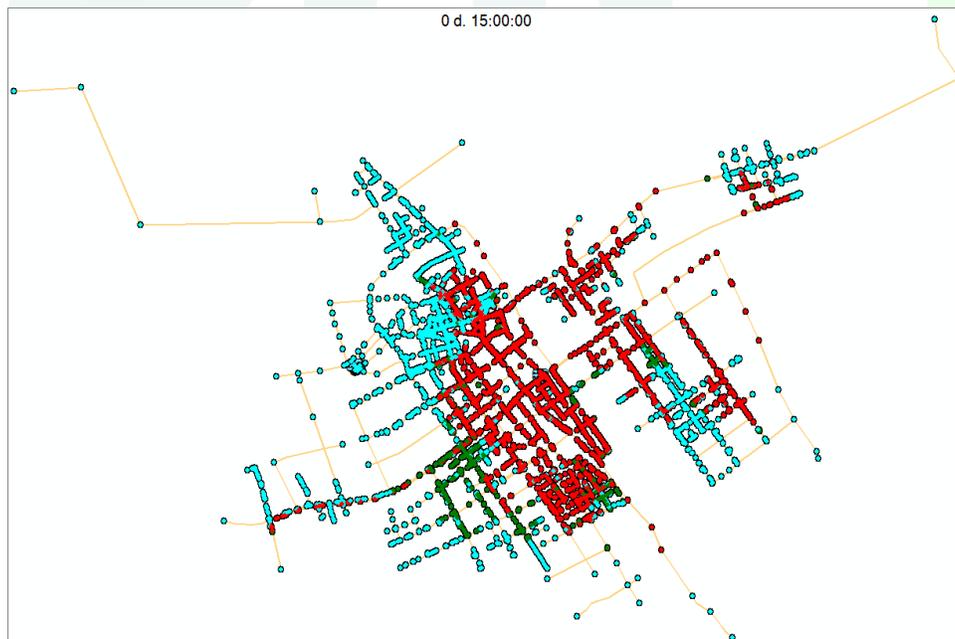


图 4-1 模型中污染物在管网中扩散示意图

## (2) 系统平台模拟

基于 WebGIS 系统，当发生突发污染事故，用户能快速在系统界面上创建污染事故，编辑事故发生位置和浓度等信息，利用水质模型快速模拟污染物扩散过程。下图 4-2 为管网某处发生污染事故后污染物随时间在管网内的扩散过程。以颜色图例对污染物浓度进行展示，红色表示污染物浓度较高，紫色为原始管网，污染物浓度为 0。从图上可以直观的查看不同时刻任意管段上的污染物浓度。界面上同时以曲线图形式对管网最不利点的水安全指标进行展示，水安全指标包括压力和余氯浓度两项。



图 4-2 在系统中模拟污染物随时间的扩散过程

### 4.1.2 事故应急处置

当发生突发污染事故时，首先应考虑隔离污染源以阻止污染物继续向下游用户扩散，可以通过关闭管网中的阀门进行操作。对于污染源发生在水源附近的严重污染事故，还可以考虑停水或降压供水。

由于供水管网为有压系统，大口径管道上的阀门操作往往需要较多的人力和时间，且会对系统正常供水产生较大影响，因此针对污染物扩散的阀门隔离，首先应借助于管网水质模型对污染物的已扩散范围进行模拟。随着污染事故发生时间的长短，污染物质在管网中的扩散范围不一，隔离污染物质需要关闭的阀门也不一样。

## (1) 关阀方案

利用污染物扩散时间和水质模拟结果，可以快速查看污染物的扩散范围，并利用 GIS 空间分析，得到关闭阀门的清单。如下图 4-3 所示，根据事故发生时间和具体位置，自动求出需要关闭的管段列表，用户根据列表可以快速组织人员到现场进行关阀操作。

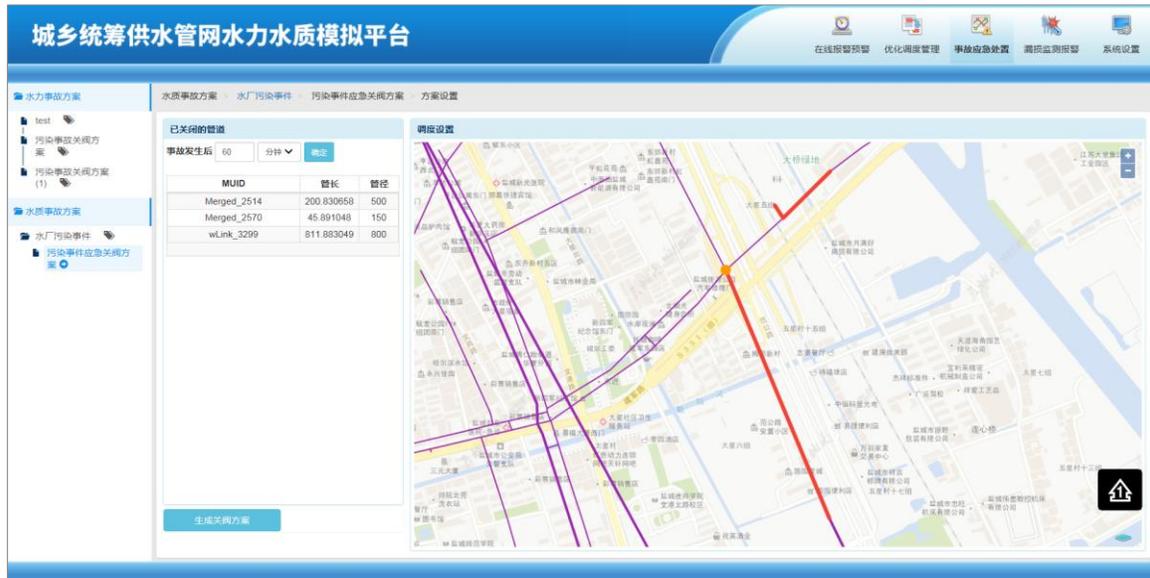


图 4-3 根据污染物扩散模拟结果自动识别应该关闭的阀门

根据事故发生位置和已扩散时间，系统可以计算出污染物扩散范围，自动生成关阀方案。关阀方案可以与水力调度模块进行关联，以模拟关阀后的管网运行状况，并对调度方案进行分析。

## (2) 水力调度

在发生污染事故后，关阀或停水等系统操作会对管网的正常供水造成比较大的影响，通过与水力调度模块的关联，可以模拟关阀后事故区域的供水现状，制定相应的应急调度方案，并对应急水力调度方案的应用效果进行评估和优选，尽量降低事故影响，保证用户的正常用水。应急处置系统提供水力调度方案的编辑、模拟及结果展示等功能。

以上图中显示的污染事故（范公路建军东路）为例，关闭阀门后管网压力分布情况如下图 4-4 所示，可以看出盐城市东北区域供水压力略有不足。



图 4-4 关阀后模拟供水压力分布

通常情况下，为满足区域供水需求，水司会对各水厂水泵进行联合调度，如增开水泵，或启用备用水厂等措施。对于盐城市供水系统而言，主要采取增开水泵的方案。生成关阀水力方案后，用户可以新建应急调度方案，在关阀方案基础上对各水泵运行参数进行调整，评估调度方案是否能与事故发生前一样满足用户用水需求。下图 4-5 和 4-6 为关阀后的水泵调度方案设置和水力模拟结果。



图 4-5 关阀后的水泵调度方案设置



图 4-6 关阀后的水泵调度方案压力结果

## 4.2 水源污染应急调度预案

突发性水污染事故中水源污染占绝大多数，当发现水源污染时，城市水厂应尽快采取措施控制污染物扩散，结合近年来突发污染事故的处理案例，总结出水源污染的应急处置办法。由于水源地污染对供水系统影响巨大，需要提前对污染事故加以模拟和分析，拟定应急调度预案，以保证事故状态下的正常供水。盐城市目前由城东水厂和盐龙湖水厂联合供水，本项目分别对两个水厂发生突发污染事故停水的情况进行模拟，以评估盐城市供水安全性，并制定水源污染应急调度策略。

### 4.2.1 城东水厂突发污染调度策略

城东水厂夏季日供水量约为 24 万吨，约占盐城市供水管网系统中总供水量的 62%，是盐城市主要净水厂，主要供水区域包括市区大部分和周边乡镇。当城东水厂附近突发污染事故，部分停水后，供水管网系统的压力分布如下图 4-7 所示。

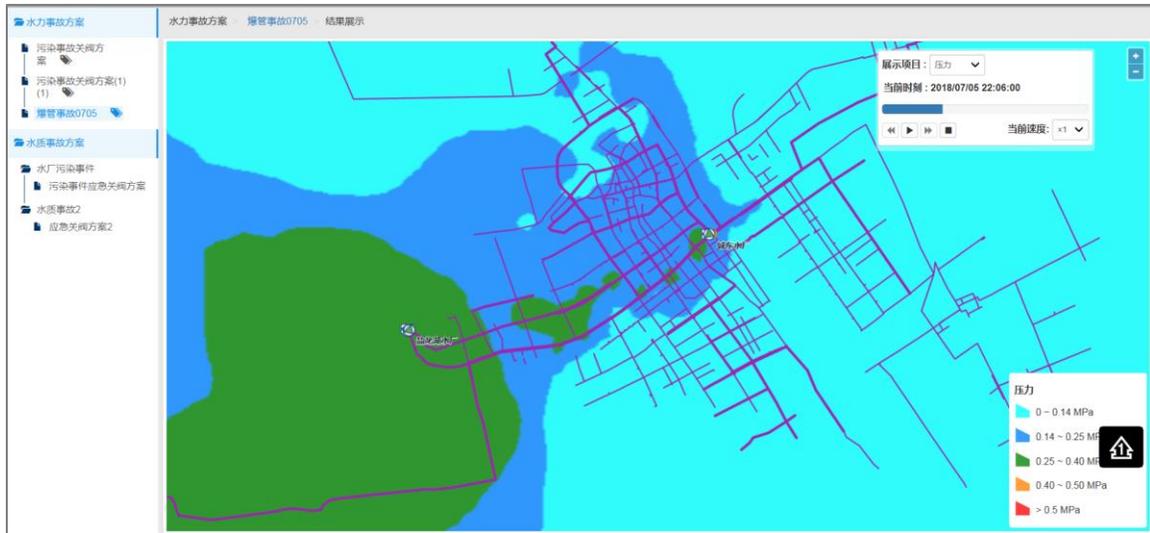


图 4-7 城东水厂受到污染关阀后的压力分布

由模型模拟结果可以看出，城东水厂部分水泵停止供水之后，城南、城东都有大片的低压区，为提高供水管网压力，尽可能满足用户用水需求，调整盐龙湖水厂的供水调度策略。

在新的水泵运行策略下，供水管网系统的压力会有较大改善，市区的管网压力基本能满足要求，如下图 4-8 所示。但城东方向的部分乡镇仍然存在低压情况，需要开启二次加压站的水泵，以满足东边乡镇的供水压力。

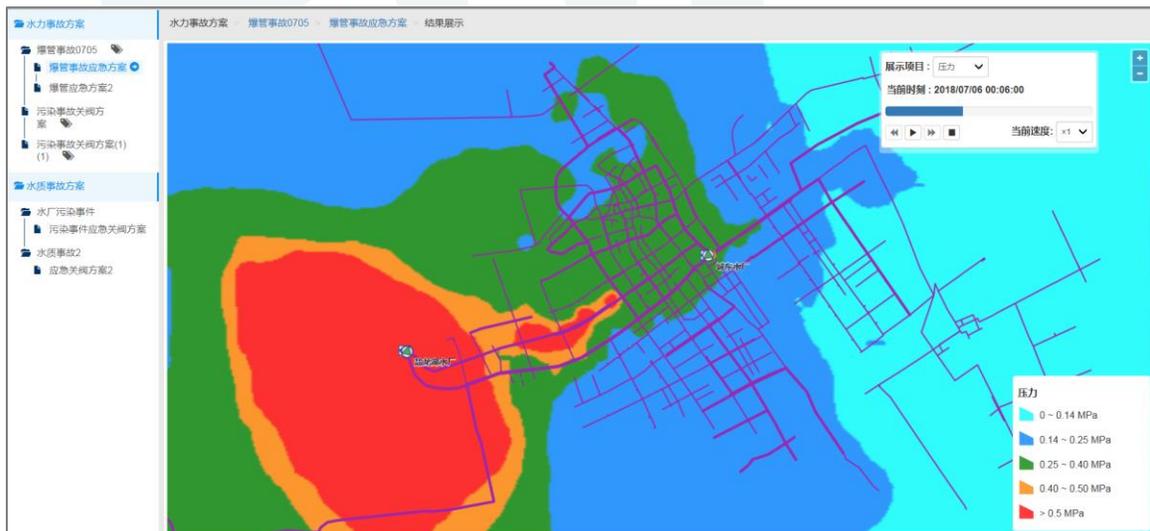


图 4-8 盐龙湖水厂调整运行后的管网压力分布

#### 4.2.2 盐龙湖水厂突发污染调度策略

盐龙湖水厂夏季日供水量约为 14.8 万吨，约占盐城市供水管网系统中总供水量的 38%，主要供水区域包括城西和周边乡镇。当盐龙湖水厂附近突发污染事故，其中一根出厂管线停水后（图 4-9），供水管网系统的压力分布如图 4-10 所示。

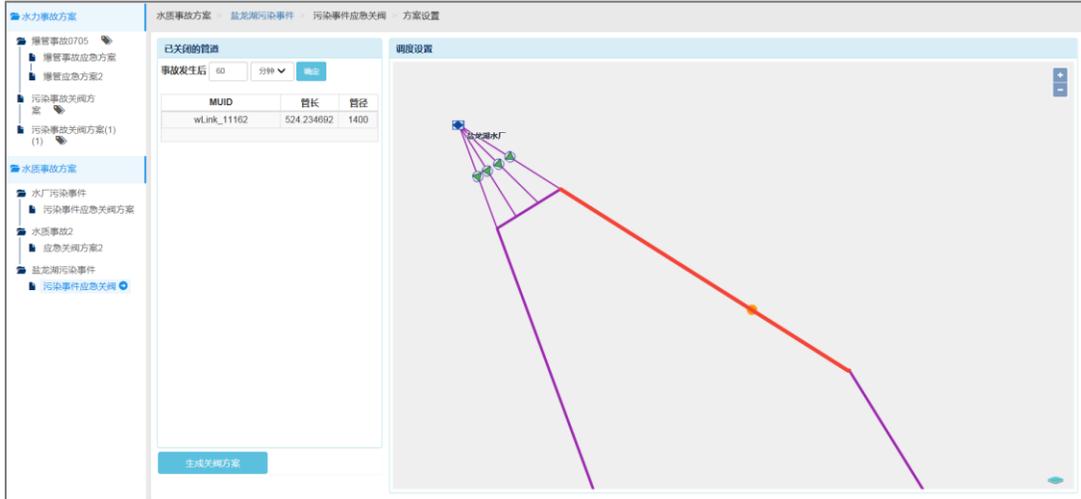


图 4-9 盐龙湖水厂受到污染后关阀

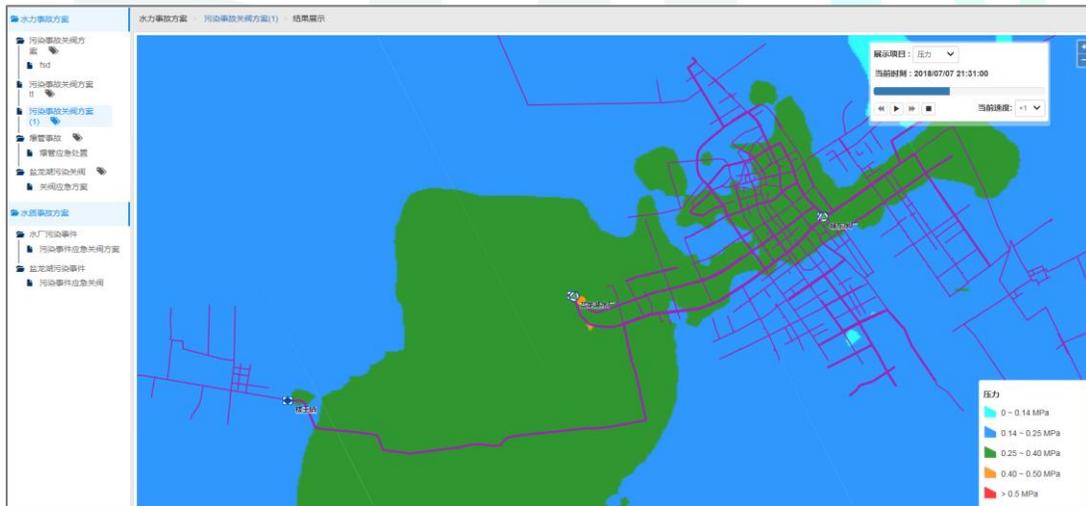


图 4-10 盐龙湖水厂关阀后的压力分布

事故发生后，应调整城东水厂的调度策略，以尽可能满足用水需求。调整城东水厂的水泵为全开（图 4-11）。

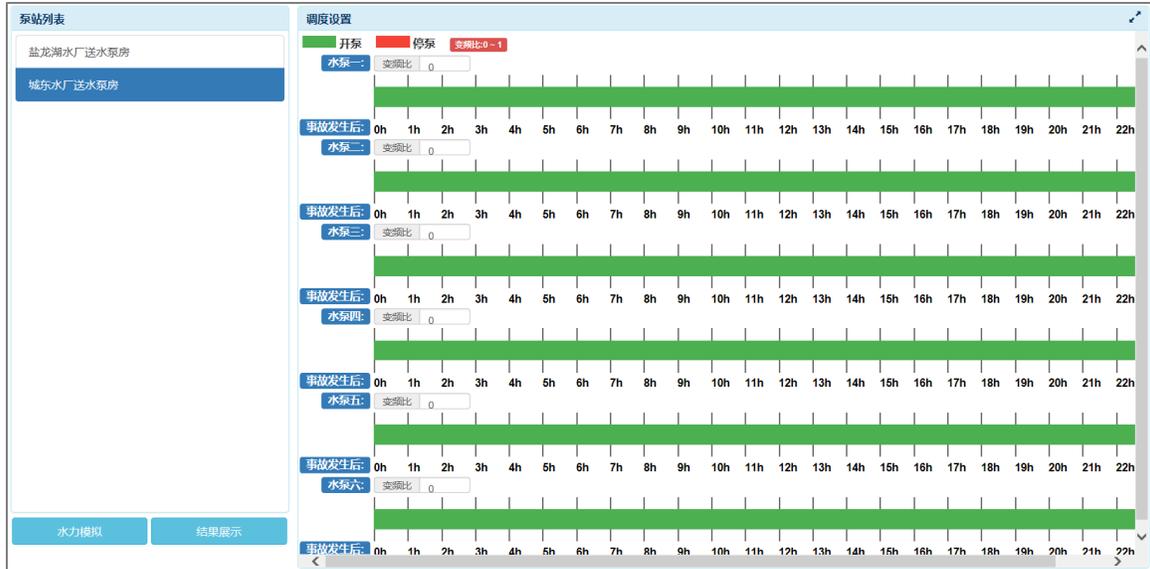


图 4-11 城东水厂水泵全开

调整城东水厂水泵运行情况后，供水管网系统的整体压力会有提升，但市区西侧乡镇的管网不在本次项目的考虑范围内，故西侧乡镇的实际压力还需要根据实际情况来定，后期项目中可以加上部分乡镇的管网。整体来讲城东水厂加开水泵后，市区管网压力基本满足要求，如下图 4-12 所示。

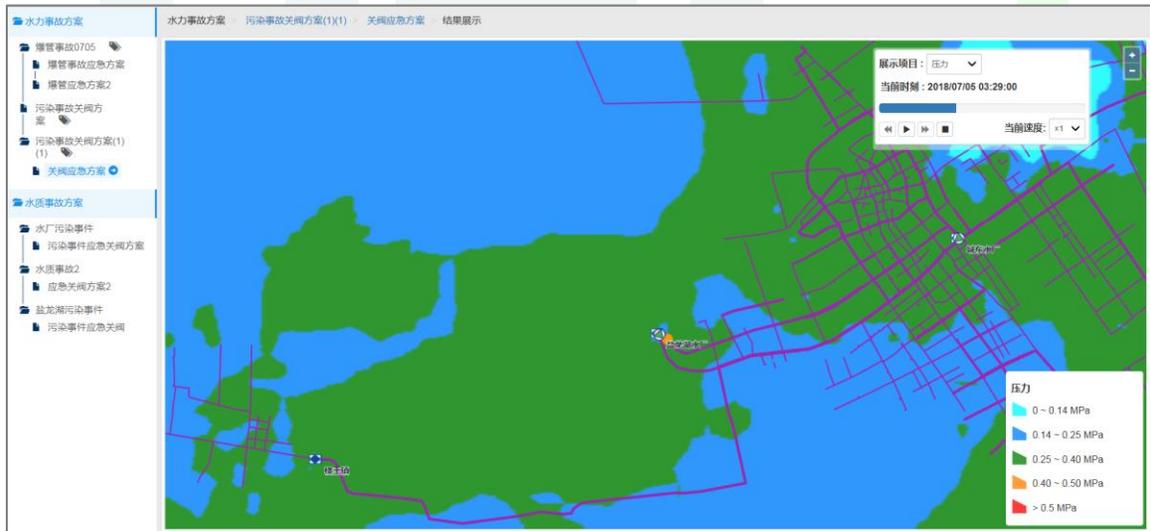


图 4-12 城东水厂调整运行后的管网压力分布

## 5、研究结果与讨论

针对我国现阶段供水管网突发污染事故应急响应技术体系尚不成熟完善的现状，

在保障供水水质安全的目标下，开发事故应急处置系统。应急处置系统利用供水管网水力水质模型对供水水源和管网中可能发生的突发事件进行模拟，预演事故发生后污染物在管网中的扩散和迁移过程，并利用管网 GIS 拓扑关系找到隔离污染事故需要关闭的阀门，自动生成关阀之后的供水管网情景方案。通过对关阀方案的模拟评估事故对管网正常供水产生的影响。针对管网中压力不足的情况制定应急调度方案，利用水力水质模型对调度方案的效果进行评价，帮助用户制定经济可行的污染事故应急调度方案。

此外本研究对水源污染事故进行了模拟，分别模拟了盐城市城东水厂和盐龙湖水厂发生污染事故需要停水的情况。经过事故下的管网水力模拟，城东水厂和盐龙湖水厂能够很好的进行应急调度上的互补。当城东水厂部分停水，增开盐龙湖水厂水泵能够对低压情况进行缓解，市区基本满足压力条件，但东边乡镇仍有压力不足情况；当盐龙湖水厂部分停水，增开城东水厂水泵也能满足市区压力条件，但西边乡镇可能仍受低压影响。

在模拟供水管网突发污染事故时，具体的应急响应与控制策略应从实际的实施手段出发，这样才能提高应急处置方案的可行性，有效保障居民的用水安全。对于水厂发生污染事故等特殊情况，可以预先将应急处置方案保存在系统中，一旦水厂发生污染事故，可以为水司管理人员快速的提供决策支持。

## 6、存在的问题与后续的研究

本研究中利用水力水质模型开发的决策支持模块，对管网中突发污染事故的应急处置提供了解决思路和模拟平台，但是仍有部分待研究的方向未涉及。此次开发的事故应急处置系统，前提条件是突发污染事故发生后，水司已知污染源发生的位置及已发生的时长，但在实际情况中，水司通常不能立即判断出污染源发生的位置和准确时间。后续可以在污染源溯源的方向上进行更深入的研究，同时结合实际加强管网中的水质在线监测系统，对突发污染事故进行及时的报警，并与本次研究的成果进行综合应用，为突发污染事故提供更有效的应急处置方案，保障供水安全。

## 【参考文献】

- [1] Nilufar Islam, Ashraf Farahat, Mohammad Abdullah M. Al-Zahrani, Manuel J. Rodriguez, Rehan Sadiq, Contaminant intrusion in water distribution networks: review and proposal of an integrated model for decision making, *Environmental Reviews*, 2015, 23 (3): 337-352.
- [2] P. Corso, M. Kramer, K. Blair, D. Addiss, J. Davis, A. Haddix, Cost of illness in the 1993 waterborne cryptosporidium outbreak, Milwaukee, Wisconsin, *Emerging Infectious Diseases* 9 (2003) 426 - 431.
- [3] W. J. Cooper, Responding to crisis: The west virginia chemical spill, *Environmental Science & Technology* 48 (2014) 3095 - 3095.
- [4] 项宁银, 信昆仑, 尹兆龙等. 供水管网突发污染事故的应急响应与控制策略. *WATER TECHNOLOGY*, 2013, 7 (6): 22-27.
- [5] Sadiq R, Kleiner Y, Rajani B. Aggregative risk analysis for water quality failure in distribution networks [J]. *Journal of Water Supply Research and Technology*, 2004, 53 (4): 241-261.
- [6] NRC. (2003). *Water quality in distribution systems*.
- [7] 王旭冕. 城市供水系统水质安全性与余氯控制的研究[D]. 西安: 市政工程, 西安建筑科技大学, 2006.
- [8] Boccelli D L, Tryby M E, Uber J G, et al. Optimal Scheduling of Booster Disinfection in Water Distribution Systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1998, 124 (2): 99-111.
- [9] 马力辉. 供水管网余氯优化控制决策支持系统研究 [D]. 上海: 市政工程, 同济大学, 2007.