

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.021

城市供水规划决策支持系统研究与应用

刘广奇^{1,2}, 雷木穗子²

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400044; 2. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037)

摘要: 城市供水系统规划涉及多方案的比选与多目标的优化,传统的供水规划编制缺乏量化支撑。为此,基于对管网建模软件的二次开发,构建了供水规划决策支持系统。通过在案例城市的应用,对比分析了规划实施年(2009年)和现状水平年(2018年)城市供水系统的变化,发现决策支持系统能较为充分、全面地体现城市供水系统发展的变化情况,并能较好地反映供水规划方案的优势与不足,可为城市供水规划提供可视化、可量化、多层次的评价结果,也可为城市重大供水设施建设提供决策支持。

关键词: 供水规划; 决策支持; 实施评价

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0124-06

Research and Application of Decision Support System for Urban Water Supply Planning

LIU Guang-qi^{1,2}, LEI Mu-suizi²

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China)

Abstract: Urban water supply system planning involves comparison and selection of multiple schemes and optimization of multiple objectives. However, traditional water supply planning lacks quantitative support. A decision support system for water supply planning was built through secondary development of the network modeling software. Through the application in the case city, the changes of urban water supply system in 2009 and 2018 were compared and analyzed. The decision support system could fully and comprehensively indicate the change of urban water supply system development, and reflect the advantages and disadvantages of water supply planning. It could provide visualization, quantification conclusions for multi-level evaluation, and also provide decision support for the construction of urban major water supply facilities.

Key words: water supply planning; decision support; implementation evaluation

随着城镇化的快速推进,我国城市供水的规模也在迅速扩张,全国供水管网长度、水源类型、服务范围等都有了大幅度的增加,城市供水系统日益复杂化。城市供水规划是供水设施建设与管理的顶层设计,涉及到一系列方案比选与优化,面对日益复杂

的用户需求与系统环境,传统决策方式缺乏技术分析与数据支撑,论证模糊。在复杂供水系统的管理中,仅凭人工经验已无法准确预测问题。供水系统的信息化管理是我国供水科技进步的重要任务之一,是城市供水技术进步的重要组成部分。国内多

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07501001)

位学者基于优化运行理论进行过供水决策支持系统的研究,为供水企业的优化调度和智慧管理提供了支撑^[1-3]。

近年来,系统模拟被越来越广泛地应用在城市供水规划中^[4-5]。通过建立管网模型进行实时动态模拟计算,可以深入了解和掌握系统实时运行状态,克服由管网设施的隐蔽性而带来的管理盲目性。通过对不同工况的设计,能较好地识别压力过高造成的供水管网能量浪费和管道漏失乃至引起爆管的现象。系统模拟的量化输出结果也可为供水方案的比选提供数据支撑。目前,国际上的给水排水系统评价指标多为直接获得的指标(如人均水资源量),这些指标往往只能衡量某单一的维度,并不能全面地反映系统的表现。而系统模拟计算得到的各项指标,如管网压力和水龄的分布、系统的整体能耗等,则可以作为系统表现综合评价的有力依据。

1 规划决策支持系统构建

1.1 决策支持系统功能框架

城市供水规划决策支持系统(UWPDS)侧重于对城市供水规划方案的比选、供水系统运行状况的评价、城市重要供水设施建设的依据等。本次城市供水规划决策支持系统的研究是基于C#语言对WaterGEMS软件和AutoCAD软件进行二次开发。UWPDS系统设置模型切换构建、工况切换、管网信息管理、水量压力分析、水质分析与规划决策支持共六大功能模块。

1.2 决策支持系统指标体系构建

UWPDS内嵌三级四类的城市供水规划评价指标体系,包括技术性、经济性、安全性、可持续性这4个目标层与11个一级指标、28个二级指标,相比莫翟等人^[6]构建的指标体系,进行了完善与优化。其中,技术性、经济性的大部分指标及安全性的部分指标为系统模拟计算的二次分析成果,其余部分指标则主要来源于统计数据。技术性强调的是供水系统向用户提供基础服务的水平,指能连续可靠地向城市绝大部分居民提供充足、合格的用水;经济性从水力性能、水质性能、供水效率这3方面进行评价,系统模拟的大部分成果将在技术性目标层中体现;而安全性则强调供水管网维持系统稳定运行的能力以及在事故状态下系统快速响应的能力,主要是从供给安全即水源端、管网保障即管网端、综合管理这3方面进行评价。在二级指标中,“备用水源”与“调

蓄水量比率”指标呼应现阶段城市供水多水源供水格局与调蓄水量比例不断增加的情形;“输配水管网爆管概率”是通过对各管段的管材、管龄以及管网承压情况推算出爆管的可能性;“节点流量事故率”则是通过事故工况下各节点流量的损耗率计算得到;“输配水管线备用比例”是通过输水干管的备用情况与配水管网成环的比例加权得到。为响应国际上对于市政基础设施可持续性定义的不断拓展,可持续性主要衡量的是城市供水系统对生态环境的影响程度,包括能耗利用、资源利用与系统生态这3方面。在经济性目标中,分别计算基建费用与运行费用。

模型的总体评价通过从二级指标、一级指标、目标层梯级向上评价加权计算而得到。针对各个二级指标,将根据实际情况与行业标准设定服务性能曲线,对应得到从0到4的五级服务性能,分别对应没有服务、不可接受、可接受、充分、优化五等级的服务性能。

2 济南应用案例

2.1 规划方案

济南作为闻名世界的“泉城”,随着城市供水需求的增长,迫切需要协调“保泉”与“合理利用地下水资源”的问题。济南是典型的多水源供水城市,随着南水北调东线及配套工程的建成,南水北调水成为城市水源之一,面临着如何优化配置多种水源的问题;另外,随着新一轮城市总体规划的实施,旧城功能将提升,新区建设将向东西两翼展开,城市供水面临着统筹区域、优化系统布局和完善设施建设的新挑战和新任务。

本次《济南市城市供水专项规划(2018年—2020年)》针对“保泉”的需要,提出限制开采主城区地下水、适度开发济西地下水、远景预留巴漏河地下水的原则。全市水资源配置上以黄河水为主要水源,以南水北调水和山区水库水为辅助水源,以再生水为补充水源,以地下水作为应急备用水源。在协调和优化城市供水设施的空间布局上体现优水优用、就近供给,地下水主要供给生活片区,置换现状工业自备井用水;东部生产片区用水主要由地表水提供;再生水用于绿化浇洒用水(河道景观)、大型工业低质用水、新建大型公建杂用水等。

规划提出了多水源分区的环网供水模式。结合济南市东西狭长的特点分为东、中、西三大片区,片

区内环状管网统一供水,片区之间通过干管连接;每个大片区内又有小的分区,大片区内部实现片区环网以及片区间干管相连的供水形式(见图1)。通过供水规划决策支持系统进行方案比选后,优化分区和片区设置,优化水厂布局和管网路由。

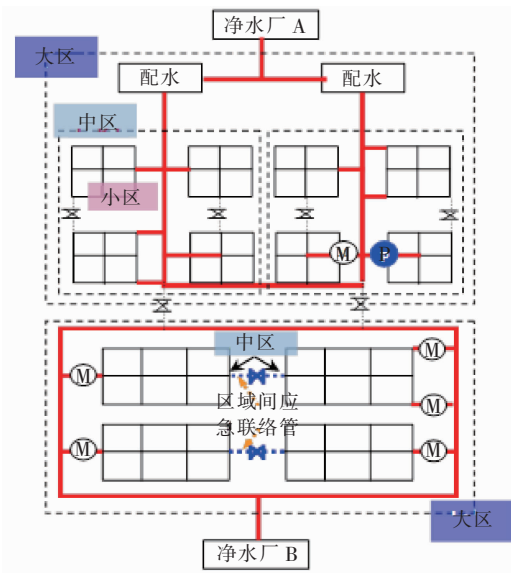


图1 城市分区供水模式示意

Fig.1 Schematic diagram of urban water supply mode

2.2 模型搭建

济南市作为华东地区的省会城市,随着城市规模的不断扩大和供水安全保障的需求,城市供水水源类型也从过去的以地下水为主,转变为黄河水、山区水库水、南水北调水、地下水等多水源供水的格局。本研究利用济南市2009年和2018年的管网、水厂、流量信息等数据,搭建济南市2009年与2018

年供水系统模型,同时,分别选取2009年和2018年某日的实际监测数据对模型数据进行校核,并对节点流量分配进行反复测算,最终得到基本满足精度要求的校核结果。节点压力计算结果与监测结果差值均小于50 kPa,模拟计算的流量校核结果基本都在10%以内。校核结果如图2和图3所示。

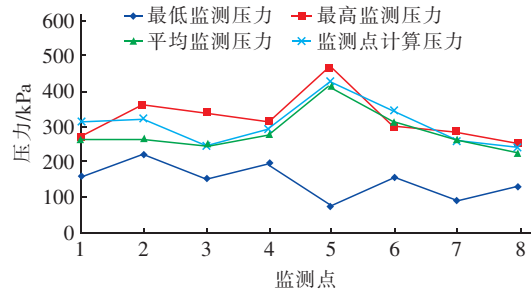


图2 供水系统监测点压力校核

Fig.2 Pressure check of monitoring points in water supply system

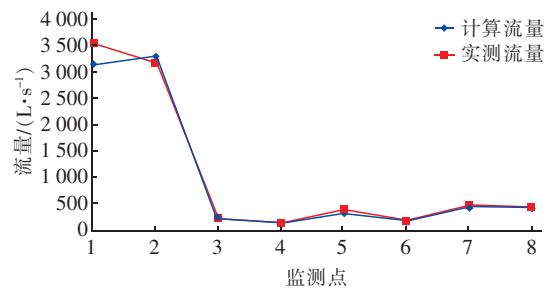


图3 供水系统出厂流量校核

Fig.3 Check of delivery flow in water supply system

济南市2009年和2018年供水系统模型的部分参数如表1所示,部分指标通过模型计算获得,部分指标采用了统计数据。

表1 2009年与2018年供水模拟部分指标列表

Tab.1 Index list of water supply simulation in 2009 and 2018

项 目	模拟计算指标					统计数据指标				
	节点压力合格率/%	节点水龄/h	管网爆管概率/%	节点流量事故率/%	电耗/(kW·h·m ⁻³)	管网漏损率/%	供水覆盖率/%	输配水管线备用比例/%	再生水利用率/%	地下水开采系数
2009年	29.62	3.5	14.5	21.3	0.33	13.2	99.82	55	14.9	0.57
2018年	67.03	1.0	7.2	11.2	0.28	11.5	100	80	35.8	0.73

2.3 规划实施评价

济南市2009年与2018年供水系统模型的模拟结果如图4所示。在此评价框架下,2009年供水系统模型的总体得分为2.59,总体服务性能属于“可接受”,其中,经济性的得分为3.03,服务性能为“充分”;安全性、技术性与可持续性的得分分别为2.27、2.72、2.50,服务性能均为“可接受”。2018年

供水系统模型的总体得分为3.04分,总体服务性能为“充分”,其中,技术性、安全性和可持续性的得分分别为3.07、3.11、3.14,服务性能均为“充分”;经济性的得分为2.67,服务性能为“可接受”。

模型的具体指标值如表2所示。2018年供水系统模型的技术性、安全性与可持续性的表现均优于2009年。其中,安全性目标得到了最大程度的改

善,从水源的供给到管网的保障各项指标均得到了明显的提升。2018 年供水系统模型中技术性指标的
提升主要来源于管段压力平均值与合格率、管网漏损率的提高。而经济性方面,2009 年供水系统模

型的两项指标均优于 2018 年。可持续目标层中,2018 年供水系统模型的环保低碳指标略低于 2009 年,而资源利用、系统生态两类指标则明显优于 2009 年。



图 4 2009 年和 2018 年济南市供水系统评价

Fig. 4 Water supply system evaluation of Jinan City in 2009 and 2018

表 2 城市供水规划指标体系与评价结果

Tab. 2 Index list of water supply simulation in 2009 and 2018

目标层	权重	得分		一级指标	权重	得分		二级指标	权重	得分	
		2009 年	2018 年			2009 年	2018 年			2009 年	2018 年
技术性	0.30	2.72	3.07	水力性能	0.12	1.95	2.33	节点压力平均值	0.02	1.55	2.90
								节点压力合格率	0.04	1.95	2.59
								节点压力水头标准平方差	0.03	1.43	1.89
								管段流速	0.03	2.80	2.00
				水质性能	0.09	3.29	3.51	管网水质合格率	0.04	3.40	3.90
								安全加氯量	0.04	3.00	3.60
								节点水龄	0.02	3.67	2.53
				供水效率	0.09	3.16	3.62	管网漏损率	0.05	2.40	3.25
经济性	0.15	3.03	2.67	运行费用	0.09	3.00	2.50	用水普及率	0.05	3.91	4.00
								基建费用	0.06	3.07	2.93
								运行费用	0.09	3.00	2.50

续表2 (Continued)

目标层	权重	得分		一级指标	权重	得分		二级指标	权重	得分	
		2009年	2018年			2009年	2018年			2009年	2018年
安全性	0.25	2.27	3.11	供给安全	0.125	2.42	2.98	枯水年水量保证率	0.03	2.00	3.50
								水源水质类别	0.03	2.00	2.00
								取水能力	0.03	2.50	3.10
								备用水源	0.03	3.00	3.00
								调蓄水量比率	0.03	2.60	3.30
				管网保障	0.10	1.90	3.24	输配水管网爆管概率	0.04	2.00	3.40
								输配水管线备用比例	0.03	1.75	3.00
								节点流量事故率	0.03	1.91	3.26
				综合管理	0.025	3.00	3.20	应急调度预案	0.03	3.00	3.20
可持续性	0.30	2.50	3.14	能耗利用	0.09	3.10	2.92	全生命周期能耗	0.05	3.00	2.85
								单水温室气体排放	0.05	3.20	3.00
				资源利用	0.15	2.11	3.22	再生水利用率	0.05	0.49	2.58
								雨水回收覆盖率	0.03	2.18	3.00
								原水供给效率	0.03	2.40	3.25
								万元工业增加值用水量	0.05	3.50	4.00
				系统生态	0.06	2.56	3.27	地表水开发利用率	0.03	1.80	3.42
								地下水开采系数	0.03	3.31	3.12

3 分析与讨论

在目前的评价框架下,从2009年到2018年,济南市的供水系统得到了较好的改善,水源布局更合理、管网系统更完善,有效支撑了济南市的可持续健康发展。

3.1 水源布局更合理

经过近10年的城市供水设施建设,济南市水源端的保障也得到了明显加强,目前,济南市的可供水量达到了 $18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,但实际供水需求自2011年起变化不大。随着南水北调水的引入,济南水源结构也得到明显改善,水质保证率大大增加。反映在模型评价上,水源结构的改善与更为充足的供水量也带来了水力性能指标与供给安全指标的显著提升,供给安全的得分由2.42提高到2.98。

3.2 管网系统更可靠

根据《济南市城市供水专项规划(2010年—2020年)》,2009年济南的供水系统存在着加压泵站布局不合理、管网连接错综复杂等问题,这直接导致供水水力条件比较差,管网水头损失比较高,因而在系统模拟结果中,技术性中的水力性能、水质性能与安全性中的管网保障表现结果均不理想。规划编制实施以来,全市供水设施建设与改造稳步推进,设施能力和服务水平不断提高,先后建成玉清湖水库、鹊山水库、东湖水库等骨干水源工程,完成田山灌区

与济平干渠连通工程、“五库连通”、卧虎山水库增容等工程建设,实现了黄河水、长江水、地表水、地下水多水源联合调度,优化了水资源配置。济南市供水管网总长度增至3500 km,老旧管网比例大幅降低,管网结构不断优化调整,分区(区块化)的环网供水模式的构想也在逐步实现。供水管网系统的提升有效降低了事故工况下节点流量的损耗率,更为均匀的承压情况也降低了管道爆管的概率。反映在模型评价上,2018年的管网保障指标得到了明显提升,由2009年的1.90提高到3.24。

3.3 城市供水的可持续发展能力增强

模型在可持续性指标上的增长主要来源于《济南市节约用水工作方案》和《济南市城市中水设施建设管理暂行办法》等一系列节水管理办法的落地,较好地体现了济南市在再生水利用、用水效率提升、管网漏损率控制等方面取得的成绩。济南市通过海绵城市试点,提高了非常规水资源利用,该项分值也由2.11提高到3.22;通过对地下水开采的有效控制,济南市“保泉”工作初见成效,对全市生态系统建设作出了积极的贡献,该项分值也由2.56提高到3.27。

3.4 技术性与经济性变化不明显

随着城市供水系统规模的增加,并没有带来技术性指标与经济性指标的显著提升。从两个水平年的对比来看,全市供水系统的供水压力、漏损和经济

流速呈现出一定的向好趋势,但是幅度不大。在供水系统运营的能耗方面,变化也不明显,供水系统环保能耗方面的指标甚至有变差的趋势,这与济南市政投资逐年增高相符合,也与济南供水南北向需要多级加压供水、东区仍需要从西区调水的现状相关。

4 结论

① 城市供水规划决策支持系统充分利用模拟输出结果,构建决策支持评价体系,可为城市供水方案的研究提供直观的展示与分析平台,为供水规划方案的比选提供量化依据。本研究提出的没有服务、不可接受、可接受、充分和优化五级供水系统服务性能评价标准,能够较客观地反映城市供水系统的服务水平。

② 通过在济南市的应用,供水规划决策支持系统评价分析结果与济南市近10年来在城市供水方面的设施建设相一致,该系统能较为充分全面地体现城市供水系统的发展变化情况,并能科学地反映城市供水方案的优势与不足,可为城市供水系统规划编制提供技术支撑,也为城市重大供水设施建设提供决策支持。

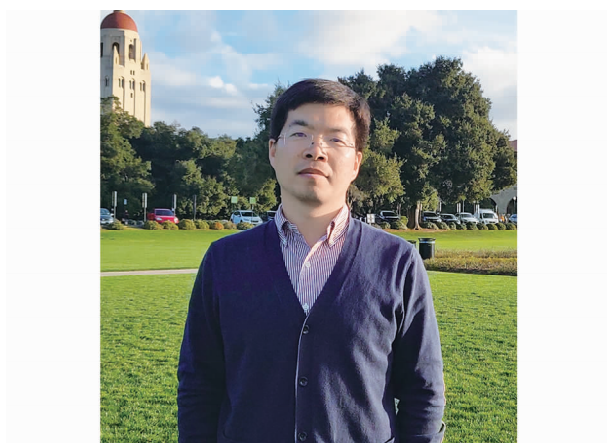
③ 从2018年的评价结果看,济南市供水系统为“充分”状态,离目标的“优化”状态还有差距。为进一步提升供水系统运行效率,保障用水安全,应结合多水源供水格局的建设,对管网的结构和运行能耗进一步优化,提升供水系统的硬实力。同时应加强应急预案机制建设,减少能源资源的利用,降低对生态环境的影响,提升供水系统的软实力。

参考文献:

- [1] 张宏伟,张永举,郭祎萍,等. 城市供水系统决策支持系统的开发与设计[J]. 中国给水排水,2006,22(4): 74-77.
Zhang Hongwei, Zhang Yongju, Guo Yiping, *et al.* Development and design for decision support system of urban water supply system [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(4): 74-77 (in Chinese).
- [2] Xu Z, Yao L, Chen X. Urban water supply system optimization and planning: Bi-objective optimization and system dynamics methods [J]. Comput Ind Eng, 2020, 142:106373.
- [3] 王俊良,郑成志,高金良. 多水源供水优化调度决策支持系统开发与实践[J]. 中国给水排水,2010,26(10):87-90.

Wang Junliang, Zheng Chengzhi, Gao Jinliang. Development and practice of optimal scheduling decision support system for water supply system with multi-sources [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(10): 87-90 (in Chinese).

- [4] 刘广奇,孔彦鸿,桂萍,等. 国家“水专项”研究项目示范课题——北川新县城水系统安全保障规划研究[J]. 建设科技,2010(9):30-33.
Liu Guangqi, Kong Yanhong, Gui Ping, *et al.* State “Water Project” research project demonstration topics Beichuan water system safety and security of the new planning [J]. Construction Science and Technology, 2010 (9): 30-33 (in Chinese).
- [5] 常魁. 城市供水专项规划中管网分区方法探讨——以哈尔滨市供水专项规划为例[J]. 净水技术,2019,38(6):46-50.
Chang Kui. Discussion on district meter area method in urban water supply special planning—Case study on harbin water supply special planning [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(6): 46-50 (in Chinese).
- [6] 莫罹,刘广奇,颜文涛,等. 城市供水系统规划调控技术研究示范[J]. 给水排水,2013,39(7):13-18.
Mo Li, Liu Guangqi, Yan Wentao, *et al.* Study and demonstration of the technologies for planning and adjusting of the city water supply system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(7): 13-18 (in Chinese).



作者简介:刘广奇(1980-),男,山东寿光人,博士研究生,教授级高工,现任中国城市规划设计研究院水务院副院长,主要从事城镇水务基础设施规划研究。

E-mail: liugq@nwqc.gov.cn

收稿日期:2020-04-20