

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.006

# 基于水力模型的城市供水主干管网联通工程研究

高泽晨

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 以南方某城市供水主干管网互联互通保障工程为例,采用WaterCAD软件开展不同工况下供水管网水力模拟等工作,分析现状供水系统的供需风险,并基于模拟结果在全市集约化供水格局的背景下提出主干管网联通设计方案。结果表明,联通管设计充分发挥了集约化水厂群的规模效应,能有效解决未来社会发展造成的用水矛盾,提高供水安全保障能力,实现“多源并举、一网调度”。

**关键词:** 供水管网; 互联互通; WaterCAD; 管网平差; 安全韧性

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0035-07

## Drinking Water Distribution Main Network Interconnection Project Based on Hydraulic Model

GAO Ze-chen

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** WaterCAD software was used to carry out hydraulic simulation of a drinking water distribution network interconnection project in a southern city under different working conditions. In addition, the supply and demand risks of the current water supply system were analyzed, and the design scheme of the water distribution main network interconnection project was proposed based on the simulation results and the background of urban intensive water supply pattern. The design of the pipe interconnection fulfilled the scale effect of the intensive water plant group, which effectively solved the water contradiction caused by social development in the future, improved the capacity of water supply security, and realized “multi-source simultaneous operation and one-network distributing”.

**Key words:** drinking water distribution network; interconnection; WaterCAD; hydraulic adjustment of pipe network; safety and resilience

为了提高城市供水系统安全韧性和供水集约化水平,南方某城市(以下简称“Z市”)下发了全市“供水一盘棋”的工作部署,该工作部署指出全市将逐步形成以XL水厂、QL水厂、DF水厂为核心的三大水

厂群集约供水布局。为充分发挥上述三大水厂群的规模效应和冗余互备能力,亟待加强全市供水主干管网互联互通工程。工程设计应坚持因地制宜的原则,从实际情况出发,考虑全市用水需求及现状管网

**基金项目:** 上海市青年科技启明星培育(扬帆专项)项目(22YF1444500); 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司科研项目(K2022J028A)

**通信作者:** 高泽晨 E-mail: 654500951@qq.com

联通情况,以保障全域生活生产用水需求为目标,制订技术上可行、经济上合理的管网联通建设方案,提高供水安全保障能力<sup>[1-2]</sup>。

WaterCAD 供水管网模型软件是具有国际领先技术的供水行业专业软件,包括供水系统基础数据管理、拓扑模型建立、模拟计算、优化设计等功能,可作为供水系统设计的技术支撑工具<sup>[3]</sup>。笔者在对 Z 市供水主干管网进行互联互通设计过程中,采用 WaterCAD 软件进行模拟,对比该城市供水系统建设互联互通工程前后水力特性的变化,并基于模拟计算成果进行分析,旨在为全市供水系统联通道空间布局、建设时序的决策提供科学依据。

1 Z市现状供水系统评价

1.1 供水系统布局

Z 市供水系统分为三大片区,分别为中部片区、北部片区和南部片区,全市主力水厂有 14 座,合计现状最高供水规模为 258.50×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,服务人口约为 410 万人,各片区水厂组成及供水规模见表 1。

表 1 Z市主力水厂供水规模

Tab.1 Water supply scales of waterworks in Z city		10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>		
项 目		现状设计规模	2025 年规划规模	2035 年规划规模
中部片区	QL 水厂	40.00	60.00	75.00
	DF 水厂	40.00	60.00	80.00
	XCK 水厂	12.00	30.00	45.00
	CJ 水厂	20.00	20.00	20.00
北部片区	GZ 水厂	12.00	12.00	0
	XL 水厂	39.50	39.50	50.00
	DFE 水厂	13.00	20.00	40.00
	NT 水厂	8.00	0	0
	HP 水厂	8.00	0	0
	DS 水厂	14.00	0	0
南部片区	RY 水厂	14.00	18.00	18.00
	NZ 水厂	13.00	13.00	13.00
	TZ 水厂	15.00	18.00	18.00
总计		258.50	300.50	371.00

由表 1 可以看出,至 2035 年,全市整体供水规模由现状的 258.50×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 逐步增加至 371.00×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。然而,为了改善片区内水厂老旧、规模零散的局面,北部片区初步规划 2025 年关停 3 座水厂(NT、HP 和 DS 水厂)、2035 年关停 1 座水厂(GZ 水厂),以促进片区内的集约化供水格局。但是,这也

导致北部片区 2025 年总供水规模低于现状,2035 年可基本恢复至与现状供水规模齐平。因此,从区域发展角度分析,北部片区至 2025 年、2035 年可能存在一定程度的供水缺口,需从供水富余的片区调水以补齐北部片区供水短板。下面将结合各片区需水量进一步分析 Z 市供水系统供需平衡关系。

1.2 供需平衡分析

从 Z 市管网 GIS 系统的数据库中提取、整合了各片区 2021 年现状最高日用水量,同时结合上位规划得到了 2025 年和 2035 年 Z 市各片区最高日预测需水量,具体见表 2。可以看出,中部片区、北部片区和南部片区用水量均呈现稳定增长的趋势,这一变化规律符合区域发展方向。结合 1.1 节可知,中部片区和南部片区用水量的变化与水厂规划规模一致,而北部片区供水规模与预测用水量之间并非单一的相关关系,接下来将具体分析供水系统的供需平衡。

表 2 Z市各片区用水量情况

Tab.2 Water consumption of different areas in Z city				10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	
项 目	2021 年现状需水量	2025 年预测需水量	2035 年预测需水量		
中部片区	107.32	149.89	189.50		
北部片区	96.71	99.80	102.70		
南部片区	29.56	31.70	37.80		
合计	233.59	281.39	330.00		

1.2.1 2021 年现状供需平衡

Z 市整体供水规模(258.50×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d)可满足全市现状总用水量需求(233.59×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d)。基于此背景继续分析 14 座主力水厂实际供水情况,结果如图 1 所示。

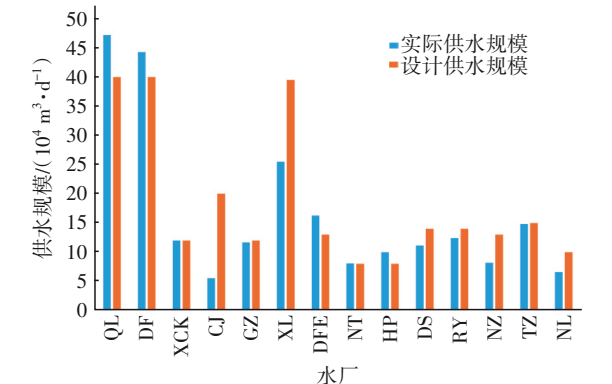


图 1 2021 年现状水厂供水情况

Fig.1 Water supply scales of waterworks in 2021

从图1可以看出,中部片区(QL、DF)和北部片区(DFE、NT、HP)存在部分水厂超产运行现象。同时,部分水厂则存在较大富余(CJ、XL、DS、RY、NZ和NL等)。

### 1.2.2 2025年预测供需平衡

至2025年,根据预测需水量和规划水厂设计规模,Z市整体的供水规模( $300.50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )亦可满足全市现状总用水量需求( $281.39 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )。另外,WaterCAD软件已被广泛应用于给水工程规划设计中<sup>[4-5]</sup>,本研究利用该软件对Z市现状水厂和管网进行模型搭建,并在现状供水系统数据基础上进行模拟计算,得到2025年14座主力水厂各自模拟的供水情况,见图2。根据模拟结果,中部片区经区域内水厂协同运行后实际需水量均可控制在设计规模内,无需超负荷运行,且有一定的富余水量;南部片区3座水厂部分扩建后仍可满足该区域的用水需求,且有一定富余;但是,北部片区由于初步考虑关停NT、HP和DS等3座水厂,导致NT和DS水厂供水范围内将无水可用(单一水厂供水),同时RY水厂还需超产运行约36%,无法保障片区供水安全。

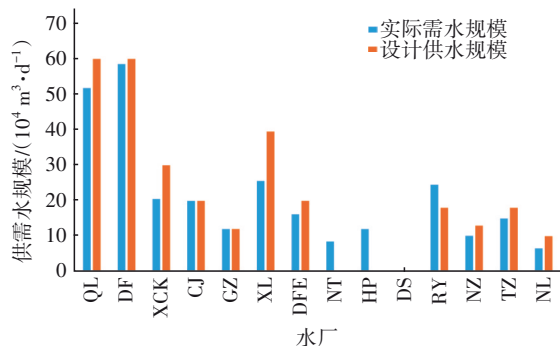


图2 2025年预测水厂供需水规模

Fig.2 Predicted water supply and demand scales of waterworks in 2025

### 1.2.3 2025年预测供需平衡

至2025年,根据预测需水量和规划水厂设计规模,Z市整体供水规模( $371.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )仍然可满足全市现状总用水量需求( $330.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),且从供水规模角度分析,Z市供水系统将具备较强的韧性。图3展示了基于WaterCAD软件得到的2025年14座主力水厂各自的模拟供水情况。其中,南部片区的水厂供水量存在少量富余,中部片区在满足自身区域需水量的同时,富余水量继续增加,而北部片区供需矛盾则进一步深化,主要表现为RY水厂

超产率持续上升,GZ水厂供水范围内也将停水,但由于管网尚未联通,XL水厂和DFE水厂存在的大量供水富余却无法供给以上缺水区域。

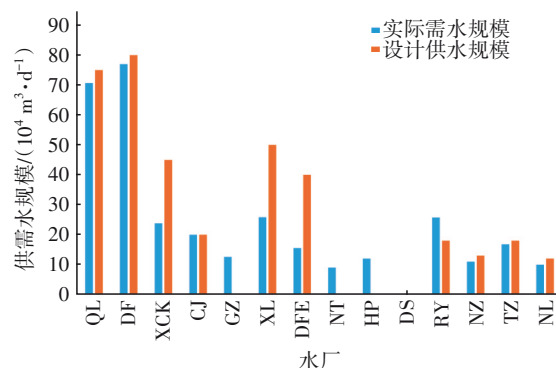


图3 2025年预测水厂供水规模

Fig.3 Predicted water supply and demand scales of waterworks in 2025

综合上述分析,在现状供水系统布局下,至2025年,中部片区和南部片区水厂供水均可满足区域用水需求。但是,北部片区将面临多个区域停水和水厂产能无法充分发挥等问题。因此,迫切需要一方面完善北部片区内部供水主干网联通,另一方面将距离较近且供水量充足的中部片区管网与北部片区联通,这样既能充分利用水厂设计供水规模,又可解决北部片区供水缺口问题。

### 1.3 现状管网分析

目前,Z市中部片区、北部片区和南部片区内供水管网建设基本完善,整体供水主干管网水压基本满足要求,各片区水厂供水范围内主干管也已形成环状格局。但是,各片区基本还是主要依靠各自的水厂负责供水,而片区之间的供水管网基本没有联通,在此背景下针对Z市可能出现的水源污染、停电或其他突发事件,造成水厂停产,则会出现整个供水区域无水可用的局面。因此,尚需对现状管网进行日常工况和事故工况管网平差,以确定供水管网的薄弱环节。

本研究基于现状管网和Z市各区域用水量情况,首先利用WaterCAD软件搭建的全市供水系统模型开展了现状管网水力模拟分析,图4展示了最高日最高时用水量工况下的2021年现状管网运行服务水压情况。可以看出,Z市现状整体服务水压维持在24 m以上(Z市规定全市供水节点压力需满足24 m),呈现中心城区相对较高、周边镇区相对较低的水压分布,可以满足城市基本用水需求。但

是,根据上述分析,Z市各区域间的供水主干管网互联互通相对薄弱,一旦主力水厂遭遇突发性水源污染事故或极端台风天气失电事故停止供水,将影响供水片区内用水。下面分别以XL、QL和DF三大水厂为例,具体分析水厂事故停止供水时对现状供水管网水压的影响情况。

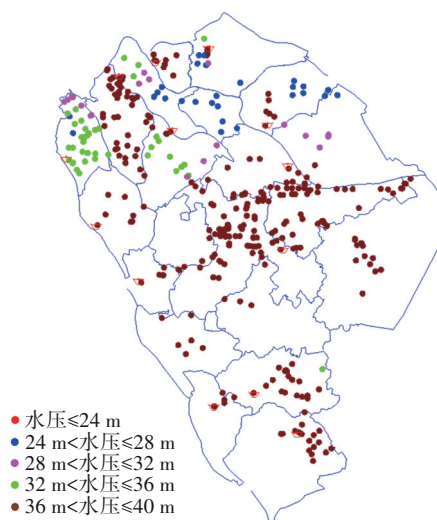


图4 Z市2021年现状节点服务水压分布模拟示意

Fig.4 Schematic diagram of hydraulic layout simulation in Z city in 2021

在现状最高日最高时用水工况下,当XL水厂发生事故停止供水时,Z市节点服务水压模拟变化情况如图5所示。在该事故工况下,主要是XL水厂供水范围内水压受影响,其中水压下降区域占全市供水范围的11.68%,而服务水压降至24 m以下的达到11.41%。因此,在现状供水管网背景下,一旦发生XL水厂停止供水的工况,将对全市11.41%的区域用水产生严重影响。同样地,QL水厂事故停止供水后,其供水范围内的服务水压显著下降(占全市供水范围的24.73%),全市约15.22%的区域服务水压降至24 m以下,影响正常用水需求。而DF水厂发生事故停止供水时将对全市供水系统造成更大的影响,其中全市约38.04%区域服务水压显著下降,服务水压降至24 m以下的占比为20.38%。综上,即使现状Z市水厂总供水量可满足全市用水量需求,但由于缺乏联通管,主力水厂发生事故时现状管网无法保证Z市的供水安全。因此,开展互联互通工程建设是十分必要的。此外,全市14座主力水厂取水水源来自同一水系,原水水质整体比较接近,且水厂净水工艺均采用常规处理工艺,各水

厂出水水质差异较小,可避免由于水质差异大导致联通后在应急大流量工况下发生管道污染事件(如大面积黄水)。

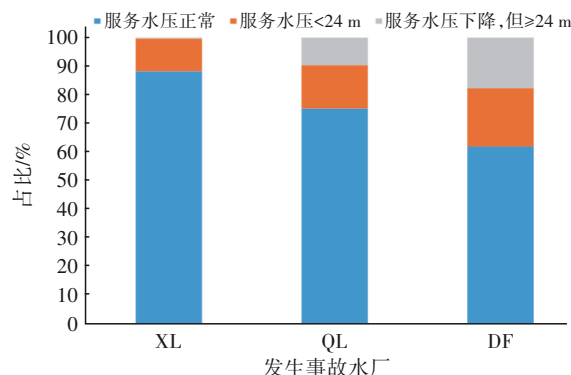


图5 Z市水厂事故工况下现状管网服务水压变化情况

Fig.5 Variation of hydraulic layout under the condition of waterworks accident in Z city

## 2 供水主干管网互联互通方案

根据Z市现状供水情况和上位规划要求,为提高全市的供水安全性,打通镇街间末端瓶颈,强化主力水厂间的供水主干联通,现提出各镇区的管网互联互通方案,如图6所示。

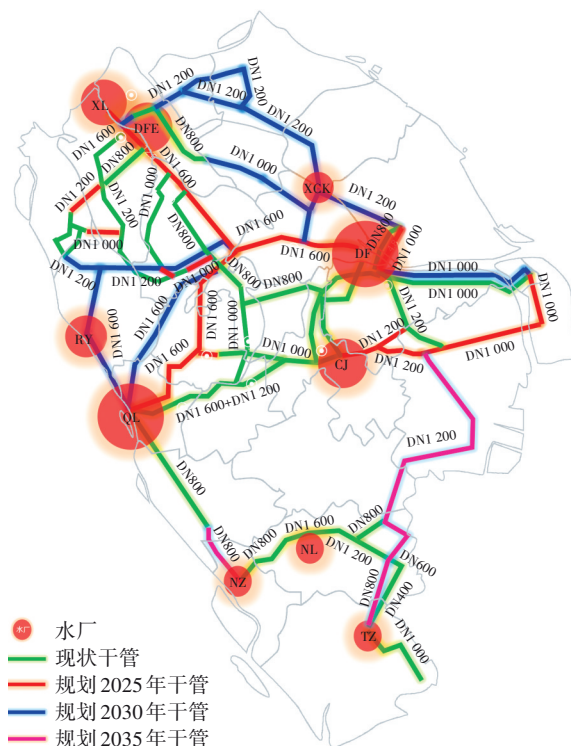


图6 Z市供水主干管网互联互通方案

Fig.6 Scheme of drinking water distribution network interconnection of Z city

本联通方案考虑打造“多源并举、一网调度”的



供水格局,联动保障实现各片区用水安全,由Y型主联通管和副联通管组成,常备结合,下面将对联通管的设计展开介绍。

### 2.1 Y型主联通管设计

考虑到Z市将打造以XL水厂、QL水厂、DF水厂为核心的三大水厂群供水保障布局,为充分联动上述水厂群,设计Y型联通管以实现供水主干网联通。Y型主联通管主要承担以下4种工况下的输水功能:①由XL水厂群向南部方向供水;②由XL、QL和DF水厂群向中心区域共同供水;③当北部片区发生水源事故时,由QL和DF水厂群向北部输送应急保障用水;④当中部主力水厂发生事故时,由XL水厂群向中部片区输送应急保障用水。其中,最不利工况为北部片区出现水源地事故时,由中部片区向北部片区输送应急保障供水,应急水量约为 $23.10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,根据管道水力计算,考虑技术经济合理性,推荐Y型主联通管采用DN1 600管径。

### 2.2 副联通管设计

在构建三大水厂群联通体系的同时,还应重视水厂间、镇区间的互备能力。目前,水厂、镇区之间供水管网有一定的联通,但保障程度还很低。因此,本方案通过副联通管建设加强支状管线的环状联通是非常必要的。副联通管的设计中一方面考虑到远期部分水厂可能关停,届时关停水厂供水区域将主要由就近水厂协同供水,需要先行联通这类水厂间的供水主干管网;另一方面,部分镇区间管网联通程度低,为了提高供水的安全性,需确保镇区间相互形成环网布置。

通过建设上述主副联通管,分三阶段逐步完善Z市供水一张网规划,最终将形成全市供水管网自内而外的网格化供水格局,充分发挥三大水厂群规模效应及互备潜能,且各水厂出水水质差异较小,管网联通后可避免水质风险,有效保障多源并举、一网调度,提高全市的用水安全保障能力,真正做到让百姓喝上安心水。

### 2.3 工程投资

基于上述工程设计内容,Z市供水主干网互联互通工程管道总长度共计约为246.09 km(考虑分阶段实施,2025年底、2030年底和2035年底前分别实施86.45、106.58、53.06 km),总投资约51亿元,其中2025年前新建管道投资约20亿元,2025年—2030年新建管道投资约20.6亿元,2030年—

2035年新建管道投资约10.4亿元。

## 3 供水管网联通效果分析

### 3.1 日常工况分析

由于联通管长期不使用容易引发水质恶化问题,为此设计的互联互通管道均考虑常备结合。分析2025年规划管网(含联通管)和2035年规划管网(含联通管)在最高日最高时用水量工况下的管网运行压力情况,模型平差计算结果如图7所示。可以看出,至2025年和2035年,按照本方案逐步实施全市互联互通工程后,最高日最高时工况下可维持供水管网服务水压在24 m以上,其中到2035年时受需水量增长影响,管网高服务水压区域( $36 \text{ m} < \text{服务水压} \leq 40 \text{ m}$ )比例减小,该区域服务水压主要下降至 $32 \sim 36 \text{ m}$ ,仍满足理想用水要求,且在一定程度上有利于管网漏损控制。此外,相比于现状管网,实施联通管后还可解决未来北部片区4座水厂关停时的供水问题。

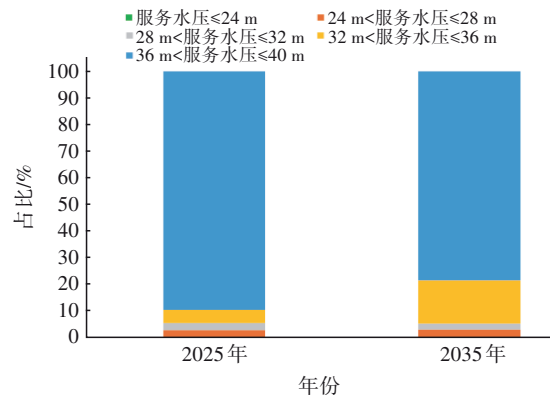
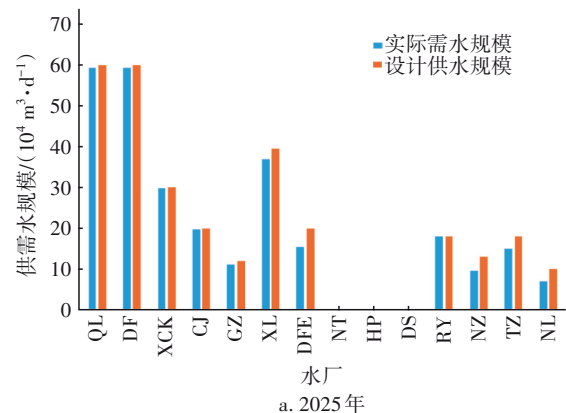


图7 日常工况下管网服务水压分布情况

Fig.7 Simulated results of hydraulic layout under the normal condition of waterworks

基于上述模型平差计算结果,提取出2025年和2035年规划最高日工况下各水厂的供水数据,结果如图8所示。



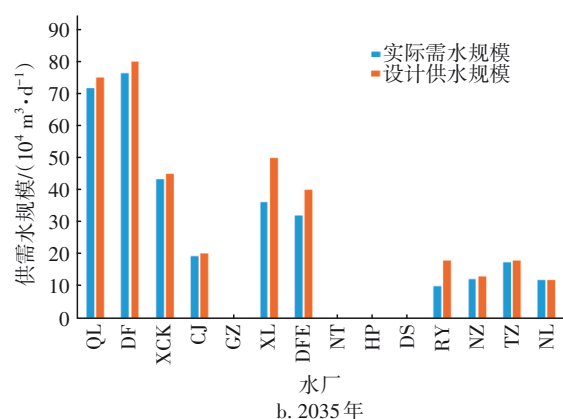


图8 2025年和2035年预测水厂供需水情况

Fig.8 Predicted results of water supply and demand scales of waterworks in 2025 and 2035

由图8可知,通过搭建联通管,充分挖掘了各水厂供水规模的潜能,相比于2021年现状水厂供水情况,避免了水厂超负荷运行工况的发生。这说明设计的联通管起到了保障供水安全的作用,实现了全市一张网络局下的主力水厂群协同运作。

### 3.2 事故工况分析

Z市供水主干管网互联互通保障工程的根本出发点是确保事故工况下全市区域不断水,为此通过WaterCAD软件模拟典型事故工况(三大水厂群分别发生事故)下全市管网水力特性的变化规律,以此复核上述联通管的科学性。以XL、QL和DF水厂发生事故为例,得到了2025年和2035年供水管网服务水压分布情况,如图9所示。

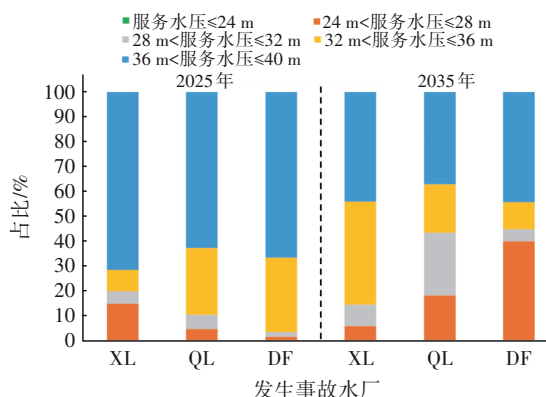


图9 典型事故工况下管网服务水压分布情况

Fig.9 Simulated results of hydraulic layout under the typical accident condition of waterworks

2025年,Z市预测总需水量为 $281.39 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水厂供水设计规模共计 $300.50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,当XL水厂发生事故停产时,水厂总设计规模将减至 $261.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,无法满足全市100%用水需求。考虑南部

3座水厂距离较远,不调配其富余水量用于北部应急供水,故中北部片区总供水规模共计 $220.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,南部片区按100%用水量满足( $31.70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),则全市水厂最多供水 $251.70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,占总需水量的89.45%。相比于正常供水工况,当XL水厂发生事故时,基于QL水厂群和DF水厂群的协同作用,大部分区域服务水压保持平稳不变,仅在XL水厂供水范围内部分区域出现水压下降情况,而降低后的服务水压仍大于24 m,可满足正常用水需求。另一方面,QL水厂是承担中部片区及北部片区部分区域供水任务的重要角色,2025年供水规模规划扩建至 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,一旦发生事故停产,全市设计总供水规模将削减至 $240.50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (占全市最高日预测需水量的85.47%),全市出现的 $40.89 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 供水缺口将主要通过压缩中部和北部区域用水量来补齐,这也导致QL水厂发生事故时服务水压波动。虽然水压受到影响,但全市供水水压均保持在24 m以上,不影响用户基本用水。而DF水厂至2025年也将扩建至 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,当DF水厂发生事故停产时,全市总供水规模情况同QL水厂事故发生时一致。此时,服务水压降低区域主要集中在DF水厂供水的Z市东部范围内,但全市供水水压维持在24 m以上,不影响正常用水。

2035年,Z市预测总需水量为 $330.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水厂供水设计规模共计 $371.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,当XL水厂发生事故停产时,水厂总设计规模将减至 $321.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,仍然无法满足全市100%用水需求。沿用2025年的方案,不考虑调配南部片区富余水量用于北部应急供水。故中北部总供水规模共计 $278.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,南部片区按100%用水量满足( $37.80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),则全市水厂最多可供水 $315.80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,占总需水量的95.70%。在服务水压方面,当XL水厂发生事故停止供水后,全市服务水压均保持在24 m以上。相比于正常供水工况,水压受影响区域主要集中在北部片区和中部片区南部,一方面由于2035年考虑关停GZ水厂,该水厂供水区域(位于Z市西北方向)将由互联互通系统应急供水,输水距离较远,造成服务水压下降;另一方面,中部片区南部服务水压降低则是由于该工况下中部片区整体供水由南向北调配造成的。2035年QL水厂供水规模将扩建至 $75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,发生事故停产时,全市设计总供水规模将减少至 $296.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (占全市最高日

预测用水量的89.70%),此供水缺口由中部和北部水厂协同补足,同时需要压缩中部和北部区域用水。由图9可知,当QL水厂发生事故时低服务水压区占比显著增加,这是由于至2035年随着用水量的快速增加,一旦QL水厂停产,需要从北部和东部调配大量水资源来保障应急需求,从而导致全市水压整体有所下降。但值得注意的是,通过互联互通系统的科学调配,可实现全市供水压力大于24 m,保障基本用水需求。而对于DF水厂,2035年供水规模将扩建至 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,此时当DF水厂发生事故时其他水厂设计总供水规模为 $291.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,占预测用水量的88.18%,可保证全市供水范围内的基本用水量,但压缩水量较大,从而导致服务水压受影响范围增大,低服务水压区比例较高。

上述结果表明,互联互通系统在XL、QL或DF水厂发生事故时具有重要作用,利用联通管调度三大水厂群可有效满足应急供水需求,供水系统一网调度为全市系统的不间断供水保驾护航功能效益显著。

#### 4 结论

通过分析Z市供水系统现状及供需平衡问题,开展了正常及事故工况下管网的模拟水力分析等工作,证明了该项联通工程是必要且紧迫的,可解决未来社会发展造成的用水矛盾,提高供水安全保障能力,实现“多源并举、一网调度”。同时,利用WaterCAD软件获得的数据可为Z市供水系统联通布局提供理论依据,设计方案中联通工程可划分为Y型主联通管工程和副联通管工程。其中,主联通管工程主要将三大水厂群连接起来,确保全市主要用水区域的应急供水;副联通管工程则将相对独立的水厂、管网相互连接,构成网格化布置方式,进一步提高供水安全保证率。在建设进度安排方面,上述联通管根据各镇区用水需求和现状管网等实际情况分阶段实施,先在联通用水集中和近期用水矛盾突出的新城区实施,再考虑建设供水安全风险低的水厂间、镇区间的互联互通工程。此外,在后续Z市供水主干管网运行管理中应重视信息化建设,利

用现代化技术(如独立计量分区技术等),通过建立统一、标准、高效的信息化系统平台,提高供水管网管理效率,并控制管网漏损率,为节能减排、绿色高效的供水行业升级转型做好准备。

#### 参考文献:

- [1] 张强,吴桂菊,李金印.西南丘陵地区某县城乡供水规划设计[J].净水技术,2020,39(S1):15-20.  
ZHANG Qiang, WU Guiju, LI Jinyin. Planning and design of urban and rural water supply in a hilly county of Southwest China [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(S1): 15-20 (in Chinese).
- [2] 陈宏景.福州市中心城区供水安全保障规划研究[J].中国给水排水,2019,35(2):6-10.  
CHEN Hongjing. Planning research on water supply safety security in the central district of Fuzhou City [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2): 6-10 (in Chinese).
- [3] 李兵. WaterCAD软件在供水系统管网平差中的应用[J].中国市政工程,2012(1):36-38.  
LI Bing. Study and application on WaterCAD in water supply pipeline network balancing calculation [J]. China Municipal Engineering, 2012(1): 36-38 (in Chinese).
- [4] 梅青. WaterCAD在多目标供水系统设计中的应用[J].市政技术,2020,38(5):212-216.  
MEI Qing. Application of WaterCAD in multi-target water supply system design [J]. Municipal Engineering Technology, 2020, 38(5): 212-216 (in Chinese).
- [5] 施凯顺. WaterCAD在供水规划中的应用[J].上海水务,2018,34(2):71-72.  
SHI Kaishun. Application of WaterCAD in water supply planning [J]. Shanghai Water, 2018, 34(2): 71-72 (in Chinese).

作者简介:高泽晨(1995-),男,江苏徐州人,博士,工程师,主要从事给水工程设计咨询与技术研发工作。

E-mail:654500951@qq.com

收稿日期:2023-03-07

修回日期:2023-03-30

(编辑:任莹莹)