

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.12.003

三亚市基于韧性理念的旅游城市供水策略研究

杨芳, 蒋艳灵, 田川, 安玉敏
(中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘要: 供水系统是城市的核心,在全球极端气候频发的大背景下,供水系统的脆弱性凸显。对于旅游城市而言,大规模流动人口的涌入对供水系统的冲击巨大,供水系统供需平衡矛盾突出。以三亚市为例,在充分分析城市供水特征的同时,引入流动当量人口概念,准确评价供水系统实际服务人口、旅游人口的生活用水水平,并提出针对实际服务人口、旅游高峰人口的韧性供水策略。在实际服务人口韧性供水方面,以实际服务人口为基数,通过构建多水源供水系统,提高供水水源系统的适应能力、恢复能力;通过增强供水设施能力,推进水厂互连互通,提高供水系统承受能力、适应能力,弹性应对用水需求。在旅游高峰人口韧性供水方面,通过适当扩大供水设施规模、预留供水设施用地、实施分质供水、精细化管理等措施,提高供水系统的恢复能力、适应能力、承受能力,缓解旅游高峰人口对供水系统的冲击。

关键词: 供水系统; 旅游城市; 韧性; 当量人口

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)12-0014-08

Water Supply Strategy of Tourist City Based on Resilience Concept in Sanya

YANG Fang, JIANG Yan-ling, TIAN Chuan, AN Yu-min

(China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China)

Abstract: Water supply system is the core of a city. Under the background of frequent global extreme climate, the vulnerability of water supply system is an emerging challenge. For tourist cities, the influx of large-scale floating population has great impact on water supply system, and the contradiction between supply and demand of a water supply system is prominent. The water supply characteristics of Sanya were fully analyzed. In addition, the concept of floating equivalent population was introduced to accurately evaluate the current domestic water consumption level of the actual service population and the tourist population served by the water supply system, and a resilient water supply strategy for the actual service population and the tourist peak population was proposed. In terms of resilient water supply for the actual population, the adaptability and resilience of water supply source system were improved by constructing multi-source water supply system based on the actual population. Water demand was flexibly met by enhancing the capacity of water supply facilities, promoting the interconnection of water plants and improving the capacity and adaptability of water supply system. In terms of resilient water supply for the tourist peak population, the resilience, adaptability and capacity of water supply system was improved to alleviate the impact of the peak tourist population on water supply system by the measures such as appropriately expanding the scale of water supply facilities, reserving land for water supply facilities,

基金项目: 住房和城乡建设部2021年科学技术计划项目(ZX-2021055)

通信作者: 蒋艳灵 E-mail: 50729872@qq.com

implementing water supply with different quality and refined management.

Key words: water supply system; tourist city; resilience; equivalent population

1 研究背景

“韧性”概念最早由生态学学者Holling提出,具体指当系统面对外界冲击时,能够维持主要功能运转,从而恢复稳态的能力。“韧性”概念引入到城市规划领域后,韧性联盟将“韧性城市”定义为:城市或城市系统能够消化并吸收外界干扰的同时,保持原有主要特征、结构和关键功能的能力^[1]。美国国家科学院国家研究委员会等机构联合出版的灾害韧性系列丛书提出城市韧性理念,将城市韧性内涵总结为三点^[2]:一是当重大灾害发生时,能够避免发生大的人员伤亡和经济损失,保障社会基本功能和经济运行;二是重大灾害发生后,城市基础设施能够迅速恢复;三是通过灾后重建,整个社会能够更加适应灾害环境。

“韧性供水系统”是从韧性城市理论中衍生出来的,国外学者Berkes提出^[2],供水系统关键用水节点的过度压力是导致功能失效的重要原因,韧性供水系统具有抵抗过度压力和失效的能力。国内俞孔坚等^[3]从城市水系统的角度提出,韧性供水系统是指当城市面临灾害时,具有抵抗灾害发生的能力、灾害发生后的恢复能力以及系统的自组织、学习和适应能力。李倩等^[4]提出,供水系统在遭遇灾害时的韧性主要体现在抵抗阶段、吸收阶段、恢复阶段这三个重要阶段,可通过供水系统的易损性、震害率、功能损失、经济损失、恢复时间、恢复程度、恢复路径等来评价韧性水平。杨静等^[5]提出,城市供水系统等生命线工程的韧性是指在灾害发生时,具有较强的抵抗能力,并且在被破坏后能够保持功能,并快速恢复。

供水系统是城市生命线工程最为重要的系统之一,城市的粮食安全、城乡居住、能源生产、工业发展、经济增长、自然生态等都高度依赖供水系统。当其被破坏并丧失供水功能时,不仅影响城市的正常供水需求,而且也会对社会生产产生巨大的负面影响^[6],因为供水中断造成的间接经济损失往往是供水系统破坏造成直接经济损失的几十倍^[7]。在全球气候变化、快速城市化及人口集聚的背景下,气候灾害对城市的影响被放大,极端气候事件和自然

灾害等环境类风险已成为当前全球最大风险^[8]。随着全球变暖接近1.5℃,极端气候也将愈加频发,城市将面临严重干旱造成的水资源短缺。中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区之一,在未来气候持续变暖背景下,旱涝灾害将更加频繁,水资源时空分配不均会愈发严重,水资源短缺风险也会显著增加^[9]。而城市供水系统在应对自然灾害时,往往表现出极大的脆弱性,如在极端高温、干旱等自然灾害条件下,由于降水减少、持续高温导致水源供水能力不足、生活用水需求变大、水体富营养化等水环境污染风险加大^[10],从而影响供水系统的稳定性运行,成为制约城市高质量发展的瓶颈问题^[11]。

对于旅游城市来说,旅游资源对人口的吸引力显著,旅游季节的人口集聚现象明显,但同时也给城市供水等基础设施带来巨大压力。由于旅游人口、候鸟人口等流动人口的季节性、集中性、暂住性特点,给城市供水系统带来严重冲击,导致旅游热点地区出现供水压力不足,甚至停水等现象,影响城市正常供水需求。由于这些流动人口在时间、空间上都具有巨大的不确定性,如果依据峰值人口规模的需求扩大供水设施规模,在峰谷期间会造成设施的严重浪费。因此,如何在兼顾旅游城市人口流动特点的同时,提高城市供水系统的韧性,是对旅游城市供水安全保障的一项挑战。

综上可知,提高城市供水系统的安全韧性十分必要,而目前学术界对于韧性供水系统的研究多停留在韧性评估阶段,针对性的优化策略还较为匮乏。

鉴于此,基于韧性理念,以三亚市为例,在充分分析全球极端气候变化背景下旅游城市的供水现状及特点的基础上,通过加强供水系统的承受能力、恢复能力、适应能力,对构建韧性供水系统进行了探索,提出全球极端气候变化背景下,针对旅游城市的供水策略。

2 城市概况

三亚市位于海南岛最南端,地处北回归线以南的热带地区,是国内唯一的滨海热带城市,同时也

是国内外著名的旅游城市。2018年全市GDP为595.51亿元,三次产业结构比为11.5:19.8:68.7,常住人口77.39万人^[12]。其宜居的环境及独特的热带滨海风光吸引了大量的旅游人口、候鸟移民。根据《2018年三亚市国民经济和社会发展统计公报》,2018年全市接待游客总人数2 242.57万人次,集中在10月一次年3月,呈现明显的季节性特征。再加上旅游人口和春节假期探亲人口涌入,三亚市流动人口总量与常住人口形成倒挂^[13]。这意味着三亚市城市实际服务人口远高于常住人口,如果按照常规的常住人口进行需水量预测、供水设施配置,将不能满足城市需求。但由于流动人口具有季节性,若按人口峰值期进行需水量预测及供水设施配置,在人口低谷期将不能对供水设施进行有效利用,会造成占地、资金投入等的严重浪费。随着三亚市国际旅游岛、自贸区和自贸港等建设的不断推进,未来人口迁移流动规模将不断扩大,这种供需矛盾也将更加突出。那么如何兼顾流动人口的供水需求,进行合理的供水设施配置是供水系统配置的一个问题。

此外,三亚市河流水系均为降水补给河流,径流量受降雨影响年际变化大。全市最大径流量是1990年的1 275.4 mm,最小径流量是1977年的275.5 mm。最大年径流量是最小年径流量的4.6倍。全市多年平均径流量为685.5 mm,最小年径流量仅为多年平均降水量的40%。在全球极端气候变化频发的背景下,三亚市径流量年际变化对供水系统的威胁将更加突出。因此,在进行供水系统规划时,应对此予以充分考虑。

本研究通过分析研究区域供水特征,依据以供需、系统谋划、节水优先原则,提出基于实际服务人口、高峰人口的韧性供水策略,提高城市供水安全保障性。

3 研究区域供水特征分析

3.1 时间上

时间上:旅游人口的集中涌入,给城市供水系统带来冲击。

基于旅游城市对人口的吸引作用,三亚市用水结构(见图1)有别于其他城市,城镇生活用水(包括三产)占比较大。根据《三亚市2018年水资源公报》中的数据统计,三亚市2018年用水总量 3.11×10^8

m³,其中生活用水量占比56.3%。城镇生活用水中又以第三产业用水为主要用水类型,占比为31.5%,远超居民生活用水。并且从用水变化趋势(见图2)来看,城镇生活用水(包括三产)比重还在不断增加。

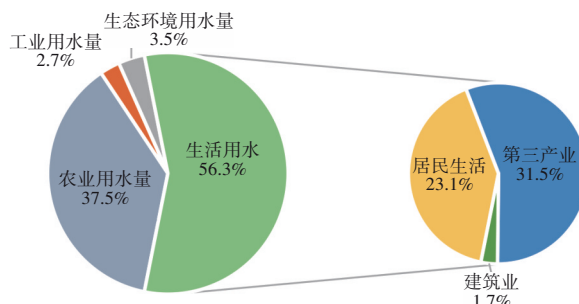


图1 三亚市2018年用水结构

Fig.1 Composition of water consumption in Sanya in 2018

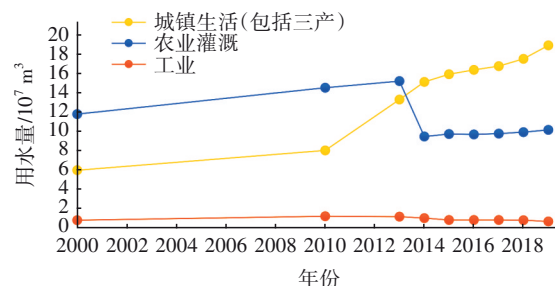


图2 三亚市近年各类用水变化趋势

Fig.2 Trends of various types of water use in Sanya in recent years

三产用水在很大程度上影响了三亚市供水系统稳定性。2015年—2018年旅游人口和水厂供水量的月度分布情况分别见图3、4。

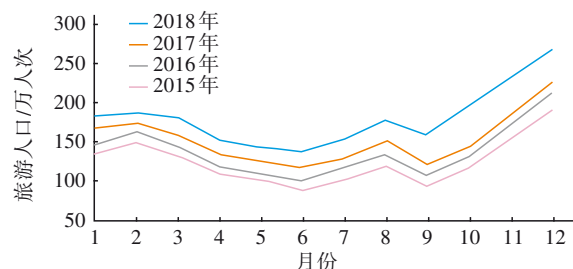


图3 三亚市近年旅游人口分布情况

Fig.3 Distribution of tourist population in Sanya in recent years

由图3、4可以看出,旅游人口的时间分布情况与水厂供水量呈现明显的相关性。旅游人口集中的时间(10月一次年3月),水厂供水量也在攀升。并且出现过因冬季游客数量激增,居民商户断水的情况^[14]。

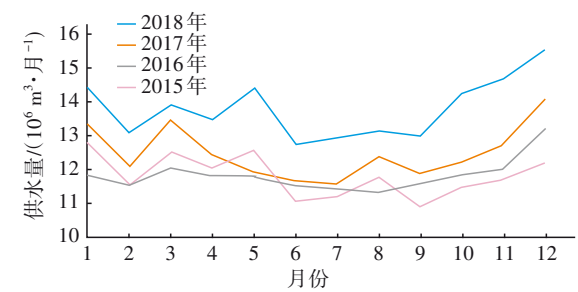


图4 三亚市近年水厂供水量情况

Fig.4 Water supply volume of water plants in Sanya in recent years

3.2 空间上

空间上:用水集中,水源分散,水资源利用依赖蓄水工程及区内调水。

三亚市水资源较丰富,但空间分布不均衡。2018年人均水资源量2 095 m³,多年平均年降水量为1 566 mm。有11条独流入海河流,均发源于三亚市北部山区及保亭县。受地形地貌影响,自北向南注入南海,自然形成了东、中、西部三个相对独立的水系(见图5)。其中,东部、西部的河流径流量约占全市径流量的81%,中部河流径流量仅占全市径流总量的19%。呈现东部(海棠湾)和西部(崖州湾)水资源量相对充沛、中部(中心城区)匮乏的特点^[15]。



图5 三亚市河流水系分布

Fig.5 Sanya river system map

水资源利用依赖蓄水工程,水源主要集中在东、西部地区。三亚市河流具有海岛水系坡陡、河短、流急的特点,降雨会迅速被河流汇入大海。由于境内没有较大的过境河流,水资源利用比较依赖蓄水工程。现状蓄水工程的供水能力与河流水系的分布情况一致,主要集中于东、西部地区。现有7座大中型水库,其中东、西部水库占全市城镇供水

能力约86.7%,为全市的主要供水水源。三亚市水源地供水能力分布情况见图6。

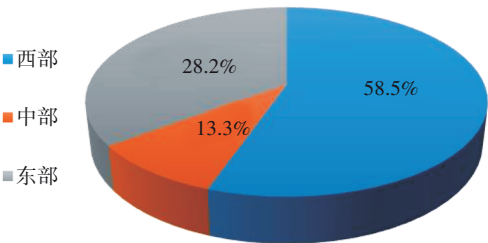


图6 三亚水源地城镇供水能力分布

Fig.6 Distribution of urban water supply capacity in Sanya water source areas

供用水区分离,依赖区内调水。供水方面,三亚市现有供水厂6座(见表1)。受限于水库供水能力,中部地区水厂供水规模较小,约占14%。东、西部地区水厂为全市主要供水厂,供水能力约占82%,北部水厂主要服务于北部山区,供水能力约占4%。用水方面,中部地区为主要用水区,约占66.6%(见图7),存在用水需求与供水分布不一致的矛盾。

表1 三亚市现状供水情况

Tab.1 Current water supply situation in Sanya

10⁴ m³·d⁻¹

| 项 目 | 现状规模 | 最高日供水量 | 供水范围 | 水源 | 备注 |
|-------|------|--------|---------|---------|-------|
| 东部A水厂 | 7.5 | 6.2 | 东部 | 东部A水库 | |
| 东部B水厂 | 22.5 | 18.46 | 中部 | 东部A水库 | |
| 中部A水厂 | 4.5 | 5.8 | 中部 | 中部A、B水库 | 超负荷运行 |
| 中部B水厂 | 4 | 4.4 | 中部 | 中部B水库 | 超负荷运行 |
| 西部A水厂 | 20 | 17 | 西部+部分中部 | 西部A水库 | |
| 北部A水厂 | 2.2 | | 北部山区 | 北部A水坝 | |
| 合计 | 60.7 | | | | |

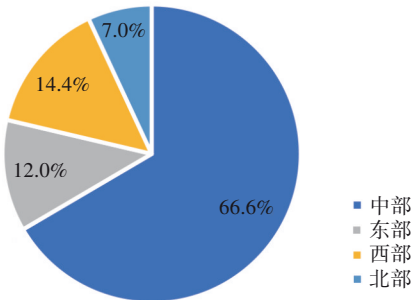


图7 三亚用水量分布

Fig.7 Water consumption distribution in Sanya

为均衡东、中、西部用水需求,现通过东部B水厂、西部A水厂向中部地区供水,以解决中部地区供需矛盾。但随着城市快速发展,东、西部供水也逐渐紧张。因此,三亚市又相继开展了区内东水中调引水工程(已建)、西水中调(在建)工程以提高各区供水保障。

4 基于韧性理念的旅游城市供水规划策略

全球极端气候变化背景下,城市水资源短缺风险加大,如何提高城市供水保障率是规划的重点。对于旅游城市而言,供水设施建多了不能充分发挥作用,建少了不能满足用水需求,存在停水等风险,如何平衡两者关系也是规划的要点。在进行旅游城市韧性供水规划时,可以从提高供水系统承受能力、恢复能力、适应能力的角度,构建韧性供水系统。一方面可以通过准确评价供水系统实际服务人口、旅游人口用水水平,并在此基础上进行需水量预测及供水设施配置,以满足实际服务人口供水需求,提高供水系统的承受能力。另一方面,通过建立多源互济、互连互通的供水系统,调节区域间用水不平衡,缓解极端气候及旅游人口对供水系统的冲击,提高供水系统的恢复能力、适应能力。

此外,还可以通过智慧水务等智能系统,精细化管理供水设施,释放设施的潜能,提高供水设施恢复能力、承受能力。通过智慧水务等系统进行智能调控,提前识别用水高峰地区及时段并做好应对,提高供水系统的适应能力,主动应对人口潮汐式变化给供水系统带来的挑战。

4.1 准确评价现状生活用水水平

引入流动当量人口概念,准确评价现状生活用水水平。

常住人口是指全年经常在家或在家居住6个月以上的城市人口,通常以常住人口决定市政基础设施配置规模。流动当量人口是指将常住人口以外的短期、连续到访人口,换算成当量人口,可以用来评价市政基础设施的实际服务情况。

三亚的人口结构十分特殊,分为常住人口、旅游人口、季节性流动候鸟人口、长居候鸟人口。2018年常住人口77.39万人,旅游及候鸟等流动当量人口约80万人,合计城市总服务人口约157.39万人。由于流动当量人口具有周期性,因此直接采用以常住人口为基数的城镇居民生活用水量指标

进行需水量预测,其结果将偏大。为了更好地反映三亚用水水平,分别对现状旅游人口及城镇居民综合生活用水量进行评估。

① 现状人均综合生活用水水平评价

参考《三亚市2018年水资源公报》中的现状生活用水量及供水系统实际服务人口(常住人口、当量人口)数据,计算现状人均综合生活用水量水平。2018年城市供水系统实际服务人口157.39万人,生活用水量(居民生活、第三产业、建筑业) $1.75 \times 10^8 \text{ m}^3$,则现状人均综合生活用水量为 $304 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 。

② 现状旅游高峰期旅游人口用水水平评估

旅游人口用水量通常高于当地居民^[16]。本研究通过分析水厂供水量与旅游人口的关系,进行三亚市旅游高峰期旅游人口用水水平评估。三亚市2018年旅游人口与用水量关系见图8。将6月份(旅游淡季)用水量认定为常住人口用水量,将12月份(旅游旺季)用水量认定为常住人口及12月旅游人口用水量。其中,12月用水量为 $1\,555.87 \times 10^4 \text{ m}^3$,旅游人口266.8万人次。6月用水量为 $1\,274.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,旅游人口137.55万人次。按照旅游人口停留4 d、供水量产销差0.75计算,现状旅游高峰期人口用水量为 $408 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$,其人均用水量是居民人口用水量的1.3倍。

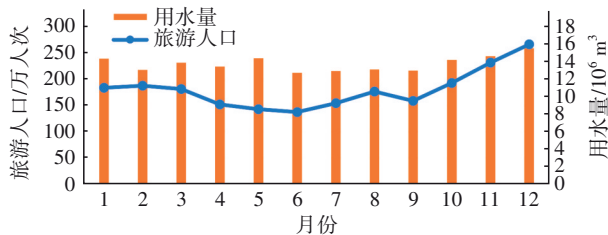


图8 2018年旅游人口与用水量的关系

Fig.8 Relationship between tourist population and water consumption in 2018

4.2 构建弹性可靠、多源互济的供水系统

以实际服务人口为基数,构建弹性可靠、多源互济的供水系统。

① 需水量预测

未来随着三亚市国际旅游城市、海南自贸区的建设及人口的发展,同时考虑城市节水措施的推进,参考《海南省用水定额》(DB 46/T 449—2021),规划城镇居民人均生活用水量取 $220 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$,人均综合生活用水量取 $350 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 。根据人口规划情况,最高日用水量约 $120 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。海南省居民

生活用水定额见表2。

表2 海南省居民生活用水定额
Tab.2 Domestic water quota of Hainan Province
 $L \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

| 城市规模划分 | 定额值 | 备注 |
|----------|------|----------------------|
| 大城市 II 型 | 220 | 100 万人<城区常住人口<300 万人 |
| 中等城市 | 200 | 50 万人<城区常住人口<100 万人 |
| 小城市 | I 型 | 20 万人<城区常住人口<50 万人 |
| | II 型 | 城区常住人口<20 万人 |

② 韧性供水策略

统筹协调区内外水资源调配,构建多水源供水系统。一方面,连通中、东、西部供水分区,加强水源间输水管线建设。构建“东部 A 水库-东水中调工程”互相调节的东部双水源供给体系,“中部 A 水库、西部 A 水库”互相连通的中部多水源供给体系,“西部 A 水库、西部 B 水库”互相连通的西部双水源供给体系,从而实现各区清水应急调度,提高供水系统突发事件情况下的适应能力,增强供水安全保障。另一方面,推进乐亚水资源配置工程(区外调水),增强城市供水系统抵御极端事件的适应能力、恢复能力。综上,通过水源互连互通、区外调水等措施,构建城市应急备用供水保障系统,在水源保障方面,提高供水系统的适应能力、恢复能力。

提升供水设施能力,优化现状供水格局。一方面,根据预测用水需求,合理配置供水设施,提高供水系统的承受能力。至 2035 年,水厂供水规模提升至 $125 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。另一方面,完善供水管网及设施,在现状西部、东部向中部供水的基础上,加强中、东部供水管网互连互通,实现对置供水,提高西部供水保证率,强化供水系统适应能力。综上,通过增强供水设施能力,推进水厂互连互通,提高供水系统承受能力、适应能力,弹性应对用水需求。实际服务人口供水应对措施见表3。

表3 实际服务人口供水应对措施
Tab.3 Countermeasures for water supply of actual service population

| 措 施 | 特 征 |
|--------------------------|-----------------|
| 连通中、东、西部供水分区,加强水源间输水管线建设 | 提高供水系统适应能力 |
| 推进乐亚水资源配置工程(区外调水) | 提高供水系统适应能力、恢复能力 |
| 合理配置供水设施 | 提高供水系统承受能力 |
| 加强供水管网互连互通 | 提高供水系统适应能力 |

4.3 适度提升供水设施能力,实行精细化管理

适度提升供水设施能力、精细化管理供水系统,以缓解高峰人口对供水系统的冲击。

① 需水量预测

根据旅游高峰期人口规划情况,预测高峰期旅游人口用水需求。旅游人口人均用水量以现状评价水平为基础,考虑公共机构、酒店等节水载体创建以及节水器具推广,人均用水量在现状基础上下降,取 $380 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 。至 2035 年,旅游高峰期人口最高日用水量约 $49 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

② 韧性供水策略

旅游高峰人口的集中性及周期性特点给供水系统带来巨大冲击,但过度的供水设施建设也将造成浪费。因此,在进行高峰人口的供水策略规划时,如何解决在满足基本用水需求的同时,避免因需水量预测过大产生浪费是关键问题。本研究通过供水设施的适度提升、分质供水以及城市供水系统精细化管理来实现高峰期人口供水需求的应对。

a. 适当扩大供水设施规模,并预留用地,提高供水系统的承受能力、适应能力。在前面预测的全市用水需求 $120 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的基础上,适当扩大水厂规模至 $125 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,并预留 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 水厂用地,根据旅游发展情况,择机启动建设,弹性应对旅游人口用水。

b. 实施分质供水,以再生水作为应对高峰期人口用水的重要补充途径,提高供水系统的适应能力。三亚市现状再生水厂总规模 $19.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,规划再生水规模约 $73 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,再生水潜力巨大。2018 年生态环境用水量 $1\ 102 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,三产用水量 $9\ 813 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,若将此部分用水置换为再生水,实施酒店等公共场所的分质供水,则可减少供水系统用水 $10\ 915 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,折合约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

c. 结合智慧水务,精细化管理供水设施,提高供水系统的恢复能力、承受能力。一方面,通过智慧水务系统,动态监测供水设施并充分挖掘数据意义,提前识别用水高峰地区及时段,为高效运行提供技术支撑,提高供水系统的恢复能力。另一方面,结合智慧水务,对漏损隐患供水管网进行更新改造,提高供水系统承受能力。若城市公共供水管网漏损率由现状约 12% 提升至 8%,按照现状年生活用水量 $1.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 计算,则可挖掘供水管网潜力约 $700 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,折合 $1.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。此外,结合智慧

水务,挖掘现状供水厂潜力,可提升水厂供水能力 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ [17] 以上,从而提高供水系统的承受能力。

综上,通过扩大供水设施规模、实施分质供水、精细化管理供水设施等措施,可满足高峰期旅游人口用水 $49 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的需求。高峰期旅游人口供水应对措施见表4。

表4 高峰期旅游人口供水应对措施

Tab.4 Countermeasures for water supply of tourist population during peak period

$10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

| 项 目 | 规模 | 特征 |
|-------------|------|-----------------|
| 适当扩大水厂规模 | 5 | 提高供水系统承受能力 |
| 预留水厂用地 | 10 | 提高供水系统适应能力 |
| 智慧水务、水厂挖潜 | 2.4 | 提高供水系统承受能力、恢复能力 |
| 智慧水务、管网漏损治理 | 1.9 | 提高供水系统承受能力、恢复能力 |
| 分质供水 | 30 | 提高供水系统适应能力 |
| 总计 | 49.3 | |

5 结论

三亚是国际旅游城市,同时也是海南自贸区和自贸港示范区,供水系统的重要性不言而喻,旅游城市大规模的流动人口给供水系统带来较大冲击,也对城市供水系统提出了更高的要求。本规划以三亚市为案例,在充分分析全球极端气候变化背景下城市的供水现状及特点的基础上,提出三亚市韧性供水策略。主要结论如下:

① 三亚市供水存在时空不匹配的难题,对供水系统韧性要求更高。时间上,由于三亚旅游资源对人口的吸引作用,旅游人口、候鸟人口集中涌入,供水峰值需求大。空间上,用水集中,水源分散,水资源利用依赖蓄水工程及区内调水。因此,三亚城市供水系统韧性要求更高。

② 在进行旅游城市需水量预测时,不能简单以常住人口为基数,进行城镇居民需水量预测及供水设施配置,宜分别计算实际服务人口、旅游高峰人口用水需求,进行需水量预测及供水设施配置。

③ 构建韧性供水系统,以弹性高效的水资源利用保障城市高质量发展,缓解高峰人口及极端气候事件对供水系统的冲击。一方面,通过区内水资源优化配置、区外调水、提升供水设施能力以及优

化现状供水格局,提高基于城市实际服务人口的供水系统的适应能力、恢复能力、承受能力。另一方面,通过适当扩大供水设施规模、预留用地、实施分质供水以及精细化管理供水设施,提高基于旅游高峰人口的供水系统承受能力、适应能力、恢复能力。

参考文献:

- [1] 胡岳. 韧性城市视角下城市水系统规划应用与研究[EB/OL]. [2022-03-10]. <http://www.doc88.com/p-61847165447775.html>.
HU Yue. Application and research of urban water system planning from the perspective of resilient city[EB/OL]. [2022-03-10]. <http://www.doc88.com/p-61847165447775.html>(in Chinese).
- [2] 李倩. 供水系统地震韧性评价框架体系研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2020.
LI Qian. Study on Evaluation of Seismic Resilience of Water Supply System [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2020(in Chinese).
- [3] 俞孔坚,许涛,李迪华,等. 城市水系统弹性研究进展[J]. 城市规划学刊,2015(1):75-83.
YU Kongjian, XU Tao, LI Dihua, et al. A review: urban water resilience[J]. Urban Planning Forum, 2015(1): 75-83(in Chinese).
- [4] 李倩,郭恩栋,李玉芹,等. 供水系统地震韧性评价关键问题分析[J]. 灾害学,2019,34(2):83-88.
LI Qian, GUO Endong, LI Yuqin, et al. Key problems of seismic resilience evaluation of water supply system[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 83-88 (in Chinese).
- [5] 杨静,李大鹏,翟长海,等. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题[J]. 中国科学基金,2019,33(5):525-532.
YANG Jing, LI Dapeng, ZHAI Changhai, et al. Key scientific issues in the urban earthquake resilience[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(5): 525-532(in Chinese).
- [6] 李天华. 供水管网脆弱性评价及承灾能力优化研究[D]. 大连:大连理工大学,2020.
LI Tianhua. Research on Vulnerability Assessment and Disaster-bearing Capacity Optimization of Water Supply Networks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020(in Chinese).
- [7] 于天洋. 区域和城市供水系统地震灾害风险评估方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,

- 2021.
- YU Tianyang. Research on Earthquake Disaster Risk Assessment Method of Regional and Urban Water Supply Systems [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2021 (in Chinese).
- [8] 吴绍洪, 高江波, 韦炳干, 等. 自然灾害韧性社会的理论范式[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1136-1147.
- WU Shaohong, GAO Jiangbo, WEI Binggan, *et al.* Theoretical paradigm for natural disaster-resilient society [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1136-1147 (in Chinese).
- [9] 中国气象局. 气候变化与水资源安全[EB/OL]. (2020-03-18) [2022-03-10]. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2020zt/20200323/2020032307/202003/t20200318_549083.html.
- China Meteorological Administration. Climate change and water security [EB/OL]. (2020-03-18) [2022-03-10]. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2020zt/20200323/2020032307/202003/t20200318_549083.html (in Chinese).
- [10] 刘晴靓, 王如菲, 马军. 碳中和愿景下城市供水面临的挑战、安全保障对策与技术研究进展[J]. 给水排水, 2022, 48(1): 1-12.
- LIU Qingliang, WANG Rufe, MA Jun. Challenges of urban water supply and discussions on the strategic solution with related technology developments of urban water quality under the vision of carbon neutrality [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(1): 1-12 (in Chinese).
- [11] 王俊佳, 崔东亮. 韧性城市视角下的城市供水系统评价体系研究[J]. 城镇供水, 2021(2): 100-106, 124.
- WANG Junjia, CUI Dongliang. Research on evaluation method of urban water supply system from the perspective of resilient city [J]. *City and Town Water Supply*, 2021(2): 100-106, 124 (in Chinese).
- [12] 三亚市统计局. 三亚统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- Sanya Municipal Bureau of Statistics. *Sanya Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018 (in Chinese).
- [13] 王郅强, 赵昊骏. “候鸟式”养老群体的公共服务供需矛盾分析——以三亚市为例[J]. 行政论坛, 2019, 26(2): 103-109.
- WANG Zhiqiang, ZHAO Haojun. Analysis on the supply-demand contradictions of public services for the “migrant” elders: a case study of Sanya City [J]. *Administrative Tribune*, 2019, 26(2): 103-109 (in Chinese).
- [14] 利声富. 入冬后三亚旅客量激增 市区用水量攀升供水压力大 [EB/OL]. (2014-12-18) [2022-03-10]. <http://hainan.sina.com.cn/sanya/syyw/2014-12-18/749.html>.
- LI Shengfu. The number of passengers in Sanya surging after winter, and the water consumption in the urban area rising, and the water supply pressure surging [EB/OL]. (2014-12-18) [2022-03-10]. <http://hainan.sina.com.cn/sanya/syyw/2014-12-18/749.html> (in Chinese).
- [15] 中国水利水电科学研究院. 三亚市水资源综合规划[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012.
- China Institute of Water Resources and Hydropower Research. *Comprehensive Planning of Water Resources in Sanya* [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012 (in Chinese).
- [16] 罗艳菊, 黄宇, 毕华, 等. 海南省各市县旅游用水影响分析[J]. 热带地理, 2010, 30(2): 200-204.
- LUO Yanju, HUANG Yu, BI Hua, *et al.* Analysis on the impact of tourism water use in cities of Hainan Province [J]. *Tropical Geography*, 2010, 30(2): 200-204 (in Chinese).
- [17] 中国水利水电科学研究院. 三亚市主要河流生态暨供水原水调度[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- China Institute of Water Resources and Hydropower Research. *Main River Ecology and Raw Water Supply Regulation in Sanya* [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018 (in Chinese).

作者简介: 杨芳(1990-), 女, 北京人, 本科, 工程师, 主要研究方向为城镇水务、市政基础设施、城市节水。

E-mail: fangyangll@126.com

收稿日期: 2022-04-29

修回日期: 2022-05-07

(编辑: 孔红春)