

龙颖, 宋兰, 郑春苗. 基于 AHP 的深圳市水源地与供水系统运营管理风险评价[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 60–69.

LONG Y, SONG L, ZHENG C M. Risk assessment of operation and management for water sources and water supply system in Shenzhen City based on AHP[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 60–69.

基于 AHP 的深圳市水源地与供水系统运营管理风险评价

龙颖^{1,2}, 宋兰^{1,2,*}, 郑春苗^{1,2}

(1. 南方科技大学环境科学与工程学院, 广东深圳 518055; 2. 南方科技大学深圳可持续发展研究院, 广东深圳 518055)

摘要 【目的】 研究旨在通过层次分析法(AHP)对深圳市水源地及供水系统的运营管理风险进行系统性评估, 识别主要风险因素, 并提出相应的风险预防与应对措施, 以保障城市供水安全。【方法】 研究结合专家经验数据, 采用 AHP 对深圳市水源地风险、水厂工艺风险、设备管理风险、人员管理风险和自然灾害风险进行定性和定量分析, 构建风险评价层次结构模型, 并通过一致性检验确保评估结果的可靠性。【结果】 结果表明, 深圳市水源地风险权重为 0.279, 是影响供水安全的主要因素。水源地水体污染(0.117)、水源供应能力不足(0.081)、单渠道供水风险(0.081)、设备老化或故障(0.055)以及台风(0.053)对供水系统的影响较大。环境灾害风险如火灾(0.033)和地震(0.022)的影响相对较小。【结论】 研究提出了针对水源地、设备管理、人员管理等方面的风险控制对策, 建议通过建立应急水源、完善水质监测体系、加强设备维护、优化人员管理等措施, 提升深圳市供水系统的抗风险能力。研究为深圳市供水系统的风险评估与应急管理提供了理论依据和实践指导。

关键词 层次分析法(AHP) 水源地与供水系统 供水安全 风险评估 应急管理

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)03-0060-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.008

Risk Assessment of Operation and Management for Water Sources and Water Supply System in Shenzhen City Based on AHP

LONG Ying^{1,2}, SONG Lan^{1,2,*}, ZHENG Chunmiao^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Institute of Sustainable Development, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract [Objective] This study aims to systematically assess the operational and management risks of water sources and water supply systems in Shenzhen City using the analytic hierarchy process (AHP), identify key risk factors, and propose corresponding risk prevention and response measures to ensure urban water supply safety. [Methods] Combining expert empirical data, the study employed the AHP to qualitatively and quantitatively analyze risks related to water sources, water treatment plant processes, equipment management, personnel management, and environmental disasters. A hierarchical risk assessment model was constructed, and consistency checks were conducted to ensure the reliability of the assessment result. [Results] The findings indicated that the risk weight of water sources in Shenzhen City is 0.279, making it the primary factor affecting water supply safety. Water pollution at water sources (0.117), insufficient water supply capacity (0.081), single-channel water supply risk (0.081), equipment aging or failure (0.055), and typhoons (0.053) had significant impacts on the water supply system. Environmental disaster risks such as fires (0.033) and earthquakes (0.022) had relatively minor impacts. [Conclusion] The study proposes risk control measures targeting water sources, equipment management, and personnel management. Recommendations include establishing emergency water sources, improving water quality monitoring systems, enhancing equipment maintenance, and optimizing personnel management to strengthen the resilience of Shenzhen's water supply system. This research provides a theoretical foundation and practical guidance for risk assessment and emergency management of Shenzhen's water supply system.

[收稿日期] 2023-03-22

[基金项目] 深圳市可持续发展专项(专 2021N039)

[作者简介] 龙颖(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态文明和城市可持续发展、污水处理等, E-mail: Ying.Long.260195@gmail.com。

[通信作者] 宋兰(1987—), 女, 博士研究生, 副研究员, 研究方向为生态文明和城市可持续发展、环境毒理学等, E-mail: songl@sustech.edu.cn。

Keywords analytic hierarchy process (AHP) water source and water supply system water supply safety risk assessment emergency management

饮用水水源地水质和供水系统的运营管理直接关系到供水片区的用水安全和居民健康。城市供水系统在流程上通常可以划分为水源、水厂、输配水管网以及用户 4 个部分,是一个开放且多元化的体系,其特点是流程长、时空覆盖面广、结构复杂、影响因素多等^[1]。同时,水源水质的影响、供水设施老化、突发污染事件、人员违规操作以及城市洪涝和干旱灾害频繁发生等因素给城市供水安全带来了极大的挑战。国内外研究学者提出了专家打分法、蒙特卡罗模拟法、决策树法等一系列先进的风险管理理论和方法,不同方法各有其特点和优势,主要的适用场景也各不相同。选择合适的风险评价方法,可以为风险应对提供参考和依据,进而促进城市的可持续发展。

唐克旺等^[2]对我国城市饮用水水源地的现状进行了分析,并系统性地论述了饮用水水源地与供水安全相关的全过程风险体系,主要内容有:如何在城市饮用水水源地开展风险评估和管理、风险降低与预防、风险监测和信息发布以及事故应对等。蒋咏等^[3]利用水量水质模型,对长江下游地区突发性水污染事件对饮用水水源地的影响进行了系统的评估,并提出了解决方案。刘云霞等^[4]将层次分析法(AHP)应用于给水工程中,对取水工程进行了较为详尽的风险评价。付朝晖等^[5]采用矩阵分析法综合评价了珠江口岸某沿海城市供水系统风险等级并提出相应的应对措施。师红花等^[6]提出了一种基于不确定测度的城市供水安全风险评估方法,能较好地评估城市突发事件对供水系统的风险。李永林等^[7]详细分析了风险管理的含义,对风险评价从定性到半定量再到定量 3 个方面进行了阐述,并对国内外有关部门和组织所制订的风险管理规范进行了梳理,指出了当前存在的问题和不足。世界卫生组织于 2004 年提出了水安全计划(water safety plan, WSP),利用当地系统知识和风险管理战略来不断改善饮用水质量^[8]。Lane 等^[9]通过开发 RAWA 程序以确定水处理系统中的风险,并结合半定量风险矩阵法计算风险评分确定其优先次序。Sutadian 等^[10]首次采用 AHP 方法来确定水质指数(WQI)模型的参数权重值,称为 West-Java WQI 模型。此后,

越来越多研究人员使用这种方法来评估水质^[11-13]。Choi 等^[14]使用 AHP 模型开发了管道网络系统的风险评估方法,以评估故障概率和故障对管道的影响。Feng 等^[15]在海南省海甸岛建立了可视化分析分层方法(V-AHP)对管道网络泄漏进行了定性和定量分析和预警,为识别配水网络中的泄漏区域提供了一种简单、高效和实用的方法。

深圳市是全国超大型城市,常住人口多达 1 768.16 万,人均水资源拥有量仅为 500 m³,约为全国的 1/3 和广东省的 1/4。2020 年,深圳市(未含深汕)原水供应量和海水利用量分别达到 20.22 亿 m³ 和 115.37 亿 m³。截至 2020 年底,深圳市(未含深汕)共有蓄水工程 149 座,总控制集雨面积为 615.82 m²;供水企业 20 家,街道级以上水厂 45 座,设计供水能力为 711.4 万 m³/d。考虑到深圳市水资源匮乏、台风暴雨频发、河流污染严重等基本水情特点,对深圳市水源地与供水系统进行合理高效的运营与管理至关重要。

研究选取了深圳市南山区与坪山区的 2 个水库与相关水厂为代表,进行了实地走访与座谈调研。通过系统、科学的风险评估方法,结合深圳市水厂工艺特点、面临的环境问题、应急处理措施等实际情况,识别与评估水源地与供水系统存在的风险因素,从而减少或控制风险,保障深圳市的供水安全。

1 材料与方法

1.1 AHP

AHP 是一种常见的多标准决策方法,是最常用的风险评价方法之一,最初是由美国国家工程院院士 Satty^[16]提出的,该方法先将与决策相关的元素拆分解构,在此基础上进行定性和定量分析,旨在解决涉及定性因素的多目标决策的复杂问题,其核心是将影响因素层次化和数据化。这是一种针对复杂情况的决策方法,在确定解决方案的优先级和选择时会考虑根据几个要素或标准将问题进行拆分,易于对复杂的问题进行直观的判断。AHP 结合了定量和定性元素,极大地提高了评价结果的可靠性,将其分类为层次结构,具有很强的逻辑性,已在能源系统分析、城市规划、经济管理等各个领域广泛运用^[17-20]。AHP 综合考虑多种潜在因素建立结构模

型和评语集,以独立元素层次结构的形式进行两两评比,并展开层次优先排序。相关专家根据特定的判断标准进行分析打分,确定风险影响的相对权重^[21]。AHP 方法的主要步骤如图 1 所示。

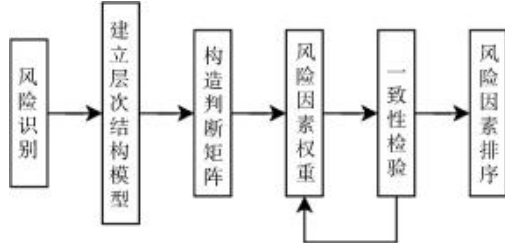


图 1 模糊层次分析法步骤

Fig. 1 Steps of Fuzzy AHP

1.2 风险源识别与层次结构模型构建

基于以往相关的研究和调研,研究提出了从水源地风险、水厂工艺风险、设备管理风险、人员管理风险及环境灾害风险 5 个方面建立深圳市水厂运营和管理风险评价层次结构模型,对这些方面风险进一步划分,可以得到若干二级风险因素,风险因素具体分级方式如图 2 所示。

(1) 水源地风险。在大多数供水系统风险评价体系中,水源地风险都被视为一个重要的考虑因素^[22-23]。它不仅可以有效地识别水源地的污染状况,而且还可以在在一定程度上预测和控制水源地可能出现的污染。首先是水源地水体污染风险,主要

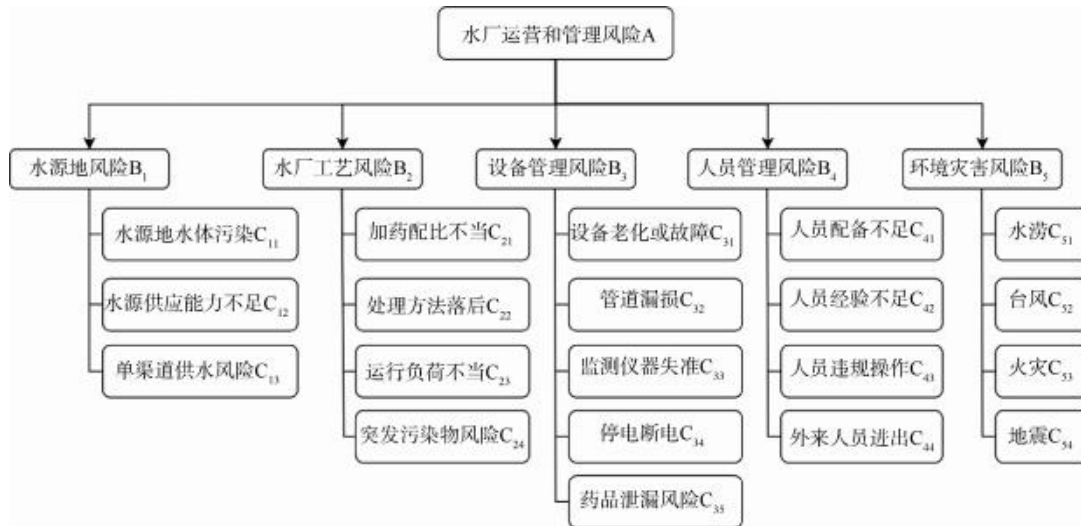


图 2 深圳市水厂运营和管理风险评价层次结构模型

Fig. 2 Hierarchy Structure Model of Operation and Management Risk Evaluation of WTPs in Shenzhen

包括人类活动产生的污废水、工业生产过程排放的有毒有害物质以及农业土壤中使用化肥或农药的渗入;因暴雨或洪水冲刷而产生的悬浮颗粒物及溶解性有机质等污染物;工业生产、农业生产和生活等各种原因而产生的有毒、危险废物的排放,使水源水质无法满足集中供水的基本要求。其次是水源供应能力不足的风险,主要原因可能包括水源枯竭或过度开采造成的地下水位下降;持续干旱导致的水源减少;快速的城镇化造成了水资源供给需求的增长,进而造成严重的水资源短缺。此外,一些区域还存在着单渠道供水的情况,如果管道发生故障或中断,将会对城市的供水安全造成很大的威胁。深圳市水源水质情况良好,2022 年第一季度监测的 12 座主要集中式生活饮用水水源水质全部达标。其中,Ⅰ、Ⅱ

类水质分别有 5 座和 7 座,没有Ⅲ类水质。2023 年第一季度有 3 座水库水质达到Ⅰ类水质标准,8 座为Ⅱ类水质,1 座Ⅲ类水质,同比去年水质有所降低。

(2) 水厂工艺风险。由于药剂的选择和配比不当而导致的出水水质差或水质污染是在水处理的生产过程中常见的问题,例如:加氯消毒是饮用水处理过程中一种常见的消毒方式,能有效地控制传染病的传播,但是,在这一过程中容易产生一些致癌和致突变的消毒副产物。因此,在实际应用中需要对其投加量进行严格的计算和控制^[24]。还有,一旦水厂的处理工艺、设备等无法满足最新的水处理标准要求,或者水厂超负荷运行等,也会导致出水水质不能满足国家或地方标准,影响当地供水安全^[25]。此

外,水厂处理工艺能否对其他可能存在的突发污染物进行处理,也是保障供水安全不可忽视的一项风险因素。

(3) 设备管理风险。随着时间的推移,管线的老化、腐蚀、渗漏等现象越来越明显,在管线中会产生“浑水”“黄水”“红水”,从而影响到出水的质量。截至 2022 年,深圳市供水管网总长度达 2.08 万 km,全市供水总量为 18.43 亿 m^3 ,而漏损率达 8%^[26]。管道漏水处会发生严重的腐蚀,甚至引发爆管风险^[27]。在给水调度和自动控制机器等方面,存在着仪器失控、失准和损坏等问题。包括机械装置如有机泵、阀门、管道等故障;在线监测仪表故障导致的水质监测数据失准等问题。还有就是断电、停电等情况导致仪器不能正常运行,以及水厂常备药品可能存在的泄漏风险。

(4) 人员管理风险。人员管理风险在传统的风险评估体系中通常体现在原水、制水、输配水和二次供水等各个环节的员工培训一项^[22],研究将其单独划分为人员管理风险。主要包括在发生紧急事件时,人员的调配是否能够确保水厂的正常运转,以及是否能够在规定的时间内完成设备的维修和保养。工作人员是否具有足够的工作经验,是否按照规定和标准来操作仪表设备,即在操作过程中,可能会出现违规操作,机器设备不能及时升级等风险。另外还包括外来人员进出可能带来的风险。

(5) 其他环境灾害风险。环境风险特指供水水源地或水厂存在的客观自然环境,这些自然环境因素,有些会对供水水源地或水厂运营和管理产生诸多不利的影响。如在水厂运营期间遇到水涝、台风、火灾和地震等灾害。深圳市受地理位置影响,台风暴雨频繁,市区受洪涝灾害的威胁较大^[28]。大部分环境风险是无法完全避免的,只能尽可能地采取措施降低其危害。深圳已建成 1 套相对成熟的防洪工程体系,并出台多项政策以高标准推动水安全“韧性城市”建设。水旱灾害防御应急体系已初步建立,预警预报机制和现代化的水务防汛指挥决策系统逐步完善。

1.3 确定指标权重的标度

研究假定各风险因素对水厂运营和管理产生的影响程度一致,可以通过各因素权重来评估其对应的风险。根据 AHP 的各指标权重判断标准,要对指标间的两两指标的相对权重进行相对重要性的对

比,从而构建判断矩阵 A_{nn} ,矩阵中 a_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 表示相对重要性[式(1)]。

$$A_{nn} = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

对矩阵中各指标的相对权重进行定量化处理,矩阵中 a_{ij} 表示因素 i 对因素 j 的相对重要性,采用 1~5 及其倒数作为模型中各指标重要性的度量,具体评比法则如表 1 所示。分值为 1~5 分别表示专家认为两比较风险因素对供水系统风险影响从同等重要到明显重要;同样,分值的倒数(分值为 1~1/5),则认为风险因素对供水系统的风险影响重要程度逐渐递减。

表 1 判断尺度表

Tab. 1 Table of Judgment Scales

分值 r_{ij}	定义
1	元素 i 与元素 j 同等重要
3	元素 i 与元素 j 稍微重要
5	元素 i 与元素 j 明显重要
2,4	元素 i 与元素 j 比较结果处于上结果的中间
倒数	元素 i 与元素 j 的比较结果是元素 j 与元素 i 比较结果的倒数

1.4 一致性检验

一致性指标用 C_1 计算, C_1 越大则一致性越小,引起的判断误差越大,具体计算方式如式(2)~式(4)。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$\lambda_{\max} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} W_j}{W_i} \quad (3)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (4)$$

其中: n ——矩阵阶数;

$\lambda_{\max}$ ——最大特征值;

R_1 ——随机生成的一致性指标,如表 2 所示;

C_R ——一致性比例,当 $C_R < 0.10$ 时,认为判断矩阵的一致性时可以接受的,否则就不满足一致性指标,应对判断矩阵进行修正。

表 2 一致性指标的 R_1 值^[16]
Tab. 2 R_1 Values of Consistency Metrics^[16]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_1	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2 结果与分析

2.1 数据分析与一致性检验

此次研究寻找了 99 名相关领域的工作人员对各层次因素的比较重要性进行两两比较,选取 99 名工作人员评分的平均数作为最终的评分结果。将各

位专家打分输入 SPSSAU 软件,计算各层相对权重值和一致性检验结果,结果显示,各矩阵的一致性系数 $C_R < 0.1$,具体结果见各矩阵表中,所以各矩阵均满足一致性要求,最终各层次获得评价矩阵如表 3~表 8 所示。

表 3 水厂运营和管理风险比较矩阵
Tab. 3 Comparison Matrixs of WTP Operation and Management Risks

水厂运营和管理风险	水源地风险	水厂工艺风险	设备管理风险	人员管理风险	环境灾害风险	一致性检验
水源地风险	1	1.743 7	1.429 5	1.432 1	1.638 5	$C_1 = 0.005$ $R_1 = 1.11$ $C_R = 0.004$
水厂工艺风险	0.573 5	1	0.993 6	1.135 9	1.141 8	
设备管理风险	0.699 5	1.006 4	1	1.402 9	1.466 8	
人员管理风险	0.698 3	0.880 4	0.712 8	1	1.108 1	
环境灾害风险	0.610 3	0.875 8	0.681 8	0.902 5	1	

表 4 水源地风险比较矩阵
Tab. 4 Comparison Matrixs of Water Sources Risks

水源地风险	水源地水体污染	水源供应能力不足	单渠道供水风险	一致性检验
水源地水体污染	1	1.548 5	1.371 7	$C_1 = 0.002$
水源供应能力不足	0.645 8	1	1.056 0	$R_1 = 0.525$
单渠道供水风险	0.729 0	0.947 0	1	$C_R = 0.003$

表 5 水厂工艺风险比较矩阵
Tab. 5 Comparison Matrixs of Process Risks in WTP

水厂工艺风险	加药配比不当	处理方法落后	运行负荷不当	突发污染物风险	一致性检验
加药配比不当	1	1.029 6	1.032 2	0.924 9	$C_1 = 0.001$ $R_1 = 0.882$ $C_R = 0.001$
处理方法落后	0.971 3	1	1.076 2	1.020 5	
运行负荷不当	0.968 8	0.929 2	1	1.008 6	
突发污染物风险	1.081 1	0.979 9	0.991 5	1	

表 6 设备管理风险比较矩阵
Tab. 6 Comparison Matrix of Equipments Management Risks

设备管理风险	设备老化或故障	管道漏损	监测仪器失准	停电断电	药品泄漏风险	一致性检验
设备老化或故障	1	1.413 8	1.301 9	1.494 6	1.631 9	$C_1 = 0.007$ $R_1 = 1.11$ $C_R = 0.006$
管道漏损	0.707 3	1	1.196 6	1.471 8	1.535 2	
监测仪器失准	0.768 1	0.835 7	1	1.634 3	1.640 3	
停电断电	0.669 1	0.679 4	0.611 9	1	1.267 3	
药品泄漏风险	0.612 8	0.651 4	0.609 6	0.789 1	1	

2.2 根据风险权重的层次全排序

表 9 表示通过 AHP 得出的各指标相对上一层

次的权重,从以上结果明显看出,影响深圳市供水安全风险最大的二级指标是水源地风险(0.279),

表 7 人员管理风险比较矩阵
Tab. 7 Comparison Matrix of Personnel Management Risks

人员管理风险	人员配备不足	人员经验不足	人员违规操作	外来人员进出	一致性检验
人员配备不足	1	1. 322 0	1. 235 3	1. 136 0	$C_1=0.006$ $R_1=0.882$ $C_R=0.007$
人员经验不足	0. 765 4	1	1. 242 7	1. 177 9	
人员违规操作	0. 809 6	0. 8047	1	1. 188 1	
外来人员进出	0. 880 3	0. 849 0	0. 841 7	1	

表 8 环境灾害风险比较矩阵
Tab. 8 Comparison Matrix of Environmental Disaster Risks

环境灾害风险	水涝	台风	火灾	地震	一致性检验
水涝	1	1. 100 5	1. 412 1	1. 840 7	$C_1=0.014$ $R_1=0.882$ $C_R=0.016$
台风	0. 908 7	1	2. 061 3	2. 336 6	
火灾	0. 708 2	0. 485 1	1	1. 823 0	
地震	0. 543 3	0. 438 0	0. 548 5	1	

表 9 各风险指标对整体的重要性
Tab. 9 Overall Importance of Each Risk Indicator

C 层	B 层及权重					C 层因素 总排序权重
	水源地风险	水厂工艺风险	设备管理风险	人员管理风险	环境灾害风险	
	0. 279	0. 184	0. 211	0. 169	0. 157	
水源地水体污染(C ₁)	0. 421	/	/	/	/	0. 117
水源供应能力不足(C ₂)	0. 289	/	/	/	/	0. 081
单渠道供水风险(C ₃)	0. 290	/	/	/	/	0. 081
加药配比不当(C ₄)	/	0. 249	/	/	/	0. 046
处理方法落后(C ₅)	/	0. 254	/	/	/	0. 047
运行负荷不当(C ₆)	/	0. 244	/	/	/	0. 045
突发污染物风险(C ₇)	/	0. 253	/	/	/	0. 047
设备老化或故障(C ₈)	/	/	0. 263	/	/	0. 055
管道漏损(C ₉)	/	/	0. 222	/	/	0. 047
监测仪器失准(C ₁₀)	/	/	0. 217	/	/	0. 046
停电断电(C ₁₁)	/	/	0. 158	/	/	0. 033
药品泄漏风险(C ₁₂)	/	/	0. 140	/	/	0. 030
人员配备不足(C ₁₃)	/	/	/	0. 289	/	0. 049
人员经验不足(C ₁₄)	/	/	/	0. 256	/	0. 043
人员违规操作(C ₁₅)	/	/	/	0. 233	/	0. 039
外来人员进出(C ₁₆)	/	/	/	0. 222	/	0. 038
水涝(C ₁₇)	/	/	/	/	0. 308	0. 048
台风(C ₁₈)	/	/	/	/	0. 340	0. 053
火灾(C ₁₉)	/	/	/	/	0. 210	0. 033
地震(C ₂₀)	/	/	/	/	0. 142	0. 022

其次是设备管理风险(0. 211)、水厂工艺风险(0. 184)和人员管理风险(0. 169),影响最小的是环
境灾害风险(0. 157)。进一步对 20 个主要风险因素分析发现,深圳市水源地及供水系统运营与管理

风险因子排序依次为 $C_1 > C_2 = C_3 > C_8 > C_{18} > C_{13} > C_{17} > C_5 = C_7 = C_9 > C_4 = C_{10} > C_6 > C_{14} > C_{15} > C_{16} > C_{11} = C_{19} > C_{12} > C_{20}$, 其中前 5 项影响较大的风险因素权重分别为: 水源地水体污染 (0.117)、水源供应能力不足 (0.081)、单渠道供水风险 (0.081)、设备老化或故障 (0.055) 以及台风 (0.053)。潜在风险较小的分别是地震 (0.022)、药品泄漏风险 (0.030)、停电断电 (0.033)、火灾 (0.033) 和外来人员进出 (0.038)。根据风险在整体风险中所占的权重, 可以对每一种风险出现的可能性进行评估, 从而为每一种风险应对策略的制定提供理论依据。

3 讨论

3.1 深圳市水源地及供水系统的运营管理风险

为了提高城市供水质量, 需要从源头到用户的全过程进行风险评价, 以保证深圳市城市供水安全、稳定和可持续发展。与许多传统的从原水系统、制水系统、输配水系统以及二次供水系统等环节去设定指标体系划分不同, 研究聚焦在水源地、水厂工艺、设备与人员管理以及环境灾害等几个维度, 降低了各风险指标之间的重复性, 通过定性描述和定量评价相结合, 客观地给出了深圳市水源地与供水系统的风险程度, 结果显示, 水源地风险的发生概率最高, 尤其是水源地水体污染。其次, 存在着供水量不足和单一管道供水的风险, 造成这一现象的原因, 主要是水污染的发生具有突发性, 处理难、持续时间长、影响范围广、影响恶劣等特点。此外, 考虑到深圳市的地理位置特点, 深圳市供水安全受台风的影响明显高于火灾、地震等其他环境灾害风险。

对比国内同类型研究, 本研究结果跟韩丽等^[29]的研究表明, 引起北京城市供水突发事件风险最大的是水质污染风险是相似的。不同的是北京市水务局构建了“五水联调”的战略保障格局^[28], 增强了水源供应不足的风险承受能力, 而深圳市的水源供应能力不足风险仅次于水源地污染。作为全国严重缺水城市之一, 2021 年深圳由于持续干旱绿化浇灌用水增加、全面复工复产等诸多原因使得用水总量大大增加, 遭遇了建市以来最严重旱情, 对此采取了多项举措解决缺水问题, 包括加大节水力度与管理、分压供水减少漏损、再生水回用等^[30]。

侶庆民等^[31]分析供水系统的风险因素主要涉及水质安全、给水系统运营与管理、自然灾害和政治

风险 4 个方面。研究结果显示, 某市城市给水系统应急响应机制风险权重最高 (0.148 9), 其次是水源保护与管理和水处理技术 (0.134 3)。这与本研究得出了深圳市水源地及供水系统运营管理风险评估结果相似。此外, 侶庆民等^[31]还涵盖了战争和恐怖袭击等政治风险, 考虑到其极低的发生概率, 本研究没有将其纳入风险因素指标。

与之相反的是黄凯宁等^[32]考虑了单路电源、码头航运等因素的影响, 评估了长江中下游某城市的供水系统风险, 结果显示, 二次供水系统的员工培训制度权重最大 (0.625), 其次是输配水系统的管网老化和设备老化、腐蚀, 而水源地污染的风险权重明显处于较低水平 (0.033 1), 所占权重仅为二次供水系统的员工培训制度的 1/20。

3.2 风险预防与应对措施

通过深圳市水源地与供水系统风险评估, 系统分析了各个风险源, 为增强深圳市供水系统的风险应对能力, 本研究提出如下风险控制对策。

(1) 建立应急水源, 增设双输水总管, 增强供水安全。优化城市供水服务, 建设完备的应急供水体系, 使城镇供水系统在突发事件发生时能够迅速恢复运行, 保障城市供水安全。深圳靠近西江, 可以在没有污染的情况下, 考虑开辟新的水源, 或者增加库容^[33]。一旦水库发生污染, 可以从应急水源地供水。双水源模式能够有效提高供水系统的抗风险能力, 大大增强供水安全和可靠性。在管道易发生破损或损坏后难抢修地段设置阀门井, 便于分段检修。增设输水总管, 确保任意管线的输水能力达到额定出水量的 70% 以上, 将管道风险降低到最小, 以保障用水安全。其次是加强供水系统联网建设, 建立互联互通的供水水源系统调度体系, 当局部发生水污染事件或其他事故时, 保证灵活可靠的水源调配来保障供水安全。

(2) 完善水质监测体系, 定期检查出厂水水质情况。根据实际水源水质采取适当的处理工艺, 确保处理后的水质达到饮用水水质要求。按照《城市供水水质管理规定》、《生活饮用水卫生监督管理办法》、《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 和深圳市《生活饮用水水质标准》(DB4403T/60—2020) 等法律法规, 严格执行水质检测系统标准。对不能达到要求的处理工艺方法进行升级改造, 增强水厂对波动水质的处理与处置韧性, 确保处理方法能应

对紧急突发污染事件。运行过程中的药剂投加量和运行负荷应进行严格准确的计算,或采取更安全可靠的投加技术等方式,避免消毒副产物超标带来的水质影响^[24,34-35]。

(3)加强对设备设施的维护及保养,延长设备设施的使用寿命^[26]。根据管网的使用寿命有计划地进行管网改造,采用优质的新型管材,更换老化的管道,对于部分不便更换的管道,应采取更多措施加强维护,以减少管道爆裂、泄漏及二次破坏。定期检查各监测仪器运行情况,一旦发生故障及时更换,或采用其他备用监测方法。建立停电应急处置预案以保障意外情况下电力系统的正常供应,配备备用电源,定期进行维护和养护。

(4)科学地做好人员与岗位匹配工作,强化岗位意识和人才素质。设置相应的规章制度进行指导和约束,明确各岗位的工作职责和岗位规范,完善顶层设计的相关标准和制度,切实增强供水管理的责任意识。在设备维护和检修的过程中需要安排有经验、有技术的人员,这样就能够及时发现设备出现的问题,减少损失。对于新技术、工艺或仪器的操作和使用,需对相关人员进行培训并考核,提高相应的技能水平,使其具有熟练使用的能力,要求持证上岗,全面提高工作人员的综合素质和技术能力。外来人员进出水源地或水厂需实行严格的登记制度。

(5)在水厂运营过程中应部署专职人员对可能发生的环境灾害进行实时关注,以应对潜在的自然灾害和特殊情况,如暴雨、台风及火灾等,同时可根据实际情况建设一些相应的防护措施。这样一方面即使不能从根本上防止其发生也能够及时发现,并在灾害发生时迅速响应,采取有效应对措施;另一方面,通过建设防御设施,可以在灾害发生时减少损失,并在一定程度上降低某些灾害发生的概率。

(6)构建全流程的搭建数据展示平台,建立风险预警体系,开展隐患排查。首先是要搭建水源地及供水系统动态监测系统,充分利用信息化技术,强化各单位与部门之间的信息共享与联动,在风险发生时互相协调配合,及时采取有效措施,避免风险影响范围扩大。其次,风险防范也是应急管理过程中不可忽视的一环。在数据平台嵌入水源地及供水系统的风险预警系统,系统推进隐患排查,加强风险预判,能够对潜在风险因素提前进行预防,避免风险发生时因准备不足而错过最佳风险控制时间,实现供

水规范化管理。

(7)制定和完善应急管理计划,形成一套行之有效的应急预案。应急预案能对可能发生的供水安全事故提供指导和参考依据,并迅速开展供水事故救援工作,可以有效避免和降低事故损失,保障人民的生命财产安全。在这方面,深圳市水务局针对本地水资源供给不足,大部分原水需从其他水域引入;台风暴雨频发,易受洪涝灾害影响;河流污染严重,远超环境负荷等基本水情特点,制定了一系列防洪减灾和水污染治理的相关实施方案与政策规范。2020年深圳市水务局经市政府同意,编制印发《深圳市水务局水旱灾害防御工作规则(试行)》《深圳市水务局水旱灾害防御应急预案(试行)》和《深圳市水务局极端天气灾害防御应急预案(试行)》,提高城市水旱灾害防御能力。

4 结论

研究针对深圳市水源地与供水系统可能存在的风险因素,提出了5类主要风险,分别是水源地风险、水厂工艺风险、设备管理风险、人员管理风险及环境灾害风险。在确定风险指标体系后,运用风险评价的相关理论和层次分析法,对各风险因素进行了分析评价,发现水源地风险(风险权重为0.279),尤其是水源地水体污染(风险权重为0.117)对深圳市水源地与供水系统的影响程度较高,设备老化故障(风险权重为0.055)和台风(风险权重为0.053)的影响程度一般,火灾(风险权重为0.033)和地震(风险权重为0.022)等环境灾害风险影响程度较低。建议深圳市从以上几个风险种类入手,有针对性地采取预防或应对措施,同时,完善突发事件的应急处理和管理办法。本研究客观地给出了城市水源地与供水系统各个风险因素的发生概率,并提出了相应的风险控制对策,能有效提高城市的供水安全保障和供水系统的抗风险能力,可为深圳市供水系统风险评估与应急管理的发展和应用提供借鉴。

研究基于大量的文献阅读、走访与问卷调查,总结梳理了水厂与供水系统运营过程中已经发生过或可能存在的风险因素,考虑到真实环境的复杂性与运营过程的其他不可控因素,可能存在部分风险未被识别导致遗漏的情况,因此,后续的研究可以采用多种方法进行分析识别,逐步完善供水系统风险指标体系。其次,风险因素的指标权重越高,反映其风

险概率与影响越大。然而实际过程中的风险评价是一个动态的发展过程,因此,本研究仅能为供水系统的风险预防与降低风险损耗提供一定的理论指导。最后,风险权重评估方法较为单一,后续可以运用更多的方法进行尝试分析,以检验本次研究风险评价的准确性。

参考文献

- [1] 蔡倩, 安娜, 王锋, 等. 基于自来水直饮目标的城市供水系统风险评价与防范对策 [J]. 净水技术, 2021, 40(7): 29-34, 99.
CAI Q, AN N, WANG F, et al. Risk assessment and preventive countermeasures of urban water supply system based on high quality drinking water project [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(7): 29-34, 99.
- [2] 唐克旺, 吕铁峰. 关于城市饮用水水源地风险管理的思考 [J]. 水资源保护, 2015, 31(2): 95-98.
TANG K W, LÜ T F. Reflection on risk management of urban drinking water sources [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2): 95-98.
- [3] 蒋咏, 陈利群, 孙淑云. 长江下游江段饮用水水源地突发性水污染事件风险评估 [J]. 给水排水, 2011, 37(5): 115-119.
JIANG Y, CHEN L Q, SUN S Y. Evaluation on sudden water pollution incident risk in Yangtze downstream drinking water sources [J]. Water & Wastewater engineering, 2011, 37(5): 115-119.
- [4] 刘云霞, 杨宏伟, 杨少霞. 城市供水系统原水取水单元风险评估 [J]. 净水技术, 2012, 31(3): 16-19.
LIU Y X, YANG H W, YANG S X. Risk assessment for raw water intake unit in urban water supply system [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(3): 16-19.
- [5] 付朝晖, 沈玉珏, 刘羽. 城市供水系统风险评估与应对措施研究——以粤港澳大湾区某沿海城市为例 [J]. 给水排水, 2019, 45(10): 11-15.
FU Z H, SHEN Y J, LIU Y. Risk assessment and response measures research for urban water supply system: A case study of a coastal city in Guangdong-HongKong-Macao Greater Bay Area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(10): 11-15.
- [6] 师红花, 王小胜. 不确定环境下城市供水系统风险评估 [C]//第十三届中国不确定系统年会暨第九届中国智能计算大会论文集. 长春:中国运筹学会, 2015: 243-246.
SHI H H, WANG X S. Risk assessment of urban water supply system under uncertain environment [C]//Proceedings of the 13th China Annual Conference on Uncertain Systems and the 9th China Conference on Intelligent Computing. Changchun: Operations Research Society of China, 2015: 243-246.
- [7] 李永林, 叶春明, 蔡云龙. 国内外城市供水系统风险管理现状 [J]. 科技与管理, 2013, 15(6): 8-12, 22.
LI Y L, YE C M, CAI Y L. State-of-art of risk management of urban water supply system [J]. Science-Technology and Management, 2013, 15(6): 8-12, 22.
- [8] Guidelines for drinking-water quality [M]. 4rd ed. Geneva: World Health Organization, 2011.
- [9] LANE K, FULLER M, DYMENT T, et al. Co-development of a risk assessment tool for use in first nations water supply systems: A key step to water safety plan implementation [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2022, 240: 113916. DOI: 10.1016/j.ijheh.2021.113916.
- [10] SUTADIAN A D, MUTTIL N, YILMAZ A G, et al. Using the analytic hierarchy process to identify parameter weights for developing a water quality index [J]. Ecological Indicators, 2017, 75: 220-233. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.12.043.
- [11] KAVURMACI M, KARAKU C B. Evaluation of irrigation water quality by data envelopment analysis and analytic hierarchy process-based water quality indices: The case of Aksaray City, Turkey [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2020, 231(2): 55-55.
- [12] NCIBI K, HADJI R, HAMDI M, et al. Application of the analytic hierarchy process to weight the criteria used to determine the water quality index of groundwater in the northeastern basin of the sidi bouzid region, central tunisia [J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2020, 5(1): 19-19.
- [13] RAJKUMAR H, NAIK P K, RISHI M S. A comprehensive water quality index based on analytical hierarchy process [J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109582. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109582.
- [14] CHOI T, KOO J. A water supply risk assessment model for water distribution network [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 54(4/5): 1410-1420.
- [15] FENG Y X, ZHANG H, RAD S, et al. Visual analytic hierarchical process for in situ identification of leakage risk in urban water distribution network [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 75: 103297. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103297.
- [16] SAATY T L. What is the analytic hierarchy process? [C]. United States of America: University of Pittsburgh, 1988.
- [17] 姜东方, 张延涛, 岳斌彬, 等. 基于模糊层次分析法的城市燃气管道风险评估 [J]. 当代化工, 2011, 40(8): 873-875, 878.
JIANG D F, ZHANG Y T, YUE B B, et al. Risk evaluation of town gas pipelines based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(8): 873-875, 878.
- [18] PALCHAUDHURI M, BISWAS S. Application of AHP with GIS in drought risk assessment for Puruliya District, India [J].

- Natural Hazards, 2016, 84(3): 1905–1920.
- [19] 陈旭东. 基于模糊层次(F-AHP)分析法的区域跨境收支风险识别及评价研究[J]. 区域金融研究, 2020(9): 20–26.
CHEN X D. Research on the identification and evaluation of regional cross-border revenue and expenditure risk based on fuzzy hierarchy (F-AHP) analysis[J]. Journal of Regional Finance Research, 2020(9): 20–26.
- [20] 胡述笠, 李海峰, 刘婉怡. 基于层次分析法-熵值法的轨道交通土建系统风险评价体系研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 74–79.
HU S X, LI H F, LIU W Y. Study on risk assessment system of rail transit civil infrastructure based on AHP-entropy method[J]. Urban Rail Transit Research, 2022, 25(7): 74–79.
- [21] 杨天宇, 余秀娟, 朱振华, 等. 层次分析法在密胺餐具安全风险评估中的应用[J]. 轻工科技, 2018, 34(3): 98–99.
YANG T Y, YU X J, ZHU Z H, et al. Application of analytic hierarchy method in melamine tableware safety risk assessment[J]. Light Industry Science and Technology, 2018, 34(3): 98–99.
- [22] 周雅珍, 蔡云龙, 刘茵, 等. 城市供水系统风险评估与安全管理研究[J]. 给水排水, 2013, 39(12): 13–16.
ZHOU Y Z, CAI Y L, LIU Y, et al. Research on risk assessment and safety management of urban water supply system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(12): 13–16.
- [23] 张露, 张金松, 张朝升, 等. 基于FAHP的城市供水系统风险评估[J]. 城镇供水, 2020(1): 86–92.
ZHANG L, ZHANG J S, ZHANG C S, et al. Risk assessment of urban water supply system based on fuzzy analytic hierarchy process FAHP[J]. Urban Water Supply, 2020(1): 86–92.
- [24] 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 等. 深圳市南山水厂氯消毒副产物控制技术研究[J]. 给水排水, 2018, 44(9): 15–18.
CAI G Q, LU X Y, LIU L J, et al. Research on chlorination disinfection by-products control technology in Nanshan water treatment plant in Shenzhen City[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(9): 15–18.
- [25] 黄孟斌, 邵志昌, 杨颂, 等. 深圳市某水厂臭味物质全流程控制技术应用[J]. 净水技术, 2020, 39(11): 159–163, 168.
HUANG M B, SHAO Z C, YANG S, et al. Application of full-flow control technology for odorous substance in a water treatment plant in Shenzhen City[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(11): 159–163, 168.
- [26] 陈欢, 丁晓欣, 高静思, 等. 供水企业供水安全管理体系研究——以深圳城市供水企业为例[J]. 企业改革与管理, 2022(11): 6–8.
CHEN H, DING X X, GAO J S, et al. Research on water supply safety management system of water supply enterprises: A case study of Shenzhen urban water supply enterprises[J]. Enterprise Reform and Management, 2022(11): 6–8.
- [27] 戴婕, 王雪峰, 张东, 等. 世博园区浦东片供水管网安全保障技术集成[J]. 给水排水, 2010, 36(11): 115–118.
DAI J, WANG X F, ZHANG D, et al. Water distribution network safety technology integration for Pudong EXPO[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(11): 115–118.
- [28] 马鑫标. 深圳市西北部片区原水供应问题及措施分析[J]. 技术与市场, 2019, 26(1): 139–140.
MA X B. Analysis of raw water supply problems and measures in northwest Shenzhen[J]. Technology and Market, 2019, 26(1): 139–140.
- [29] 韩丽, 来海亮, 杨淑慧, 等. 采用AHP模型的北京城市供水突发事件风险评估[J]. 北京水务, 2009(6): 36–38.
HAN L, LAI H L, YANG S H, et al. Risk assessment of urban water supply emergencies in Beijing using AHP model[J]. Beijing Water Affairs, 2009(6): 36–38.
- [30] 周合喜, 刘春楠, 安娜, 等. 深圳市水质净化厂出水再生利用水质评估[J]. 净水技术, 2022, 41(11): 85–93.
ZHOU H X, LIU C N, AN N, et al. Water quality assessment of effluent recycling in WWTPs in Shenzhen City[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11): 85–93.
- [31] 倡庆民, 许开立, 吴穹, 等. 城市供排水系统公共安全风险评估体系及应用效果[J]. 安全, 2014, 35(7): 36–39.
YU Q M, XU K L, WU Q, et al. Public safety risk assessment system and its application effect of urban water supply and drainage system[J]. Safety & Security, 2014, 35(7): 36–39.
- [32] 黄凯宁, 尚昭琪, 刘岳峰. 基于层次分析和风险矩阵法的城市供水系统风险评估[J]. 供水技术, 2012, 6(4): 34–38.
HUANG K N, SHANG Z Q, LIU Y F. Risk assessment of urban water supply system based on analytic hierarchy process and risk matrix[J]. Water Technology, 2012, 6(4): 34–38.
- [33] 陈汉宁. 深圳市城市应急供水系统建设策略及规模研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(8): 82–84.
CHEN H N. Research on construction strategy and scale of urban emergency water supply system in Shenzhen[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(8): 82–84.
- [34] 廖岚, 蔡广强, 卢小艳, 等. 深圳盐田港水厂二氧化氯消毒副产物控制技术示范[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 6–9, 14.
LIAO L, CAI G Q, LU X Y, et al. Demonstration project of chlorine dioxide disinfection by-product control technology in Yantiangang Waterworks in Shenzhen City[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 6–9, 14.
- [35] 卢小艳, 易娟, 宋庆, 等. 水厂二氧化氯预氧化工艺中副产物控制技术的工程应用[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 58–64, 124.
LU X Y, YI J, SONG Q, et al. Engineering application of byproducts control technology in process of chlorine dioxide preoxidation in WTP[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(10): 58–64, 124.