

戴雷杰. 上海原水系统运行健康关键指标判别方法[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 72-78.

DAI L J. Identification method of key indicators for operation health of raw water system in Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 72-78.

上海原水系统运行健康关键指标判别方法

戴雷杰*

(上海市供水调度监测中心, 上海 200080)

摘要 【目的】针对城市原水系统全流程健康评估体系缺失及指标权重科学性不足的问题, 此研究以上海市四大水源地原水系统为对象, 构建多维度运行健康评价体系, 识别关键指标并优化权重分配, 以提升原水系统精细化管理和风险防控能力。【方法】基于专家权重评分与层次分析(AHP)法, 将评价体系划分为原水水质、原水调配、设施设备、应急处置及运行管控5大类共44项指标, 邀请跨领域专家进行权重评分。通过赋分、构建判断矩阵及一致性检验确定权重, 并结合2022年咸潮事件验证体系实用性。【结果】(1)设施设备与应急处置类指标权重较高;(2)专家认知差异显著, 高校专家对运行管控类评分离散度高, 原水企业专家更关注设施安全;(3)咸潮期间长江水源系统健康指数降幅显著, 验证了指标体系的有效性。【结论】文章构建了涵盖核心指标(如“水库应急时间”“调度指令执行率”)的原水系统运行健康评价框架, 通过融合专家经验与量化分析, 降低主观偏差, 为上海市多水源协同调度与智慧化管理提供科学工具, 对同类城市具有重要参考价值。

关键词 原水系统 权重评分 运行健康 指标体系 关键指标

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0072-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.009

Identification Method of Key Indicators for Operation Health of Raw Water System in Shanghai

DAI Leijie*

(Shanghai Municipal Monitor Center of Water Supply, Shanghai 200080, China)

Abstract [Objective] To address the lack of a full-process health assessment system for urban raw water systems and insufficient scientific rigor in indicator weighting, this study focuses on Shanghai's four major raw water sources. It aims to construct a multi-dimensional operational health evaluation system, identify critical indices, and optimize weight allocation to enhance refined management and risk prevention capabilities. [Methods] Based on the expert-weighted scoring and the analytic hierarchy process (AHP), the evaluation system was categorized into five dimensions, including raw water quality, allocation, facility equipment, emergency response, and operational management, comprising 44 indices. Cross-disciplinary experts were invited to assign weights through scoring, followed by constructing judgment matrices and consistency validation. The system's practicality was tested using the 2022 saltwater intrusion event. [Results] (1) The weights of the indices in the facilities and equipment category and the emergency response category were the highest. (2) There were significant differences in the cognition of experts: experts from universities had a high dispersion in the scores of the operation management and control category, and experts from raw water enterprises paid more attention to facility safety. (3) The health indicator of the Yangtze River water source system during the saltwater intrusion period decreased significantly, which verified the effectiveness of the indicator system. [Conclusion] This paper constructs an operation health evaluation framework for raw water systems covering core indices such as "reservoir emergency time" and "execution rate of dispatching instructions". By integrating expert experience and quantitative analysis, the subjective bias is reduced, providing scientific tools for the coordinated dispatching and intelligent management of multiple water sources in Shanghai, which has important reference value for similar cities.

Keywords raw water system weight score operation health indicator system key indicator

[收稿日期] 2025-04-09

[通信作者] 戴雷杰, 男, 高级工程师, 研究方向为供水管理和调度技术, E-mail: daileijie@163.com。

原水系统是满足城市居民用水需求的基础设施。为适应城市建设的可持续发展需求,上海市共规划建设了四大水源地原水系统,即黄浦江上游金泽水源地、长江口青草沙水源地、长江口陈行水源地和长江口东风西沙水源地,总供水规模达 1 350 万 m^3/d 。然而,随着城市经济的高速发展和人口压力的增加,提高供水安全保障能力的重要性日益突出。《上海市城市总体规划(2016—2040 年)》明确提出了“提高长江流域和太湖流域原水供应保障能力”的要求,同时建设“水安全保障更可靠、水资源供给更优质、水环境治理更生态、水管理服务更智慧”的现代水务保障体系^[1]。面对复杂化、精细化的大型城市原水系统,运行和维护高效、稳定的原水是城市供水正常运行的有力保障。如何通过“原水评价”提高原水运行管理水平和企业运营效率,以确保居民的安全用水需求,是原水系统安全保障面临的重要问题。

目前国内城市供水绩效评估相应框架和技术体系较为成熟,但是从水源地取水至水厂进水的全范围、全过程的原水系统运行健康评估领域尚未涉及,而原水系统运行的评价框架、指标和权重的研究和实践也较少。在此背景下,建立一套完整的原水系统运行健康指标体系是必要的,这有助于制定合理的原水供给保障措施,促进原水系统健康发展、稳定运行。由于原水系统的系统化和复杂化,评价时需要考虑多方面的因素,综合考虑知识结构、职业背景及经验不同的专家信息,以得出合理的评价结果^[2]。同时,实际评价过程中,在知识经验、个人偏好等主观因素的影响下,专家作出的判断也会有所差异。因此,为保证评价结果的科学性、合理性,采用基于专家权重评价的方法,通过征询专家对指标权重的评价开展调查,结合层次分析(AHP)法进行指标权重分析,进而判别出原水系统运行健康关键指标,构建城市原水系统运行健康指标体系。这可以全面了解影响原水系统运行安全的因素和潜在风险,更加直观和全面地掌控原水系统的运行安全,有效提升全市原水系统安全运行水平和突发事件应急处置能力,大大提高供水行业智慧化和精细化管理水平,对上海市的原水监管量化管理、供水行业持续健康发展有重要的理论及现实意义,为国内其他城市原水系统安全评估提供了技术支持和借鉴。

1 数据来源与方法

权重征询调查表中,将原水系统运行健康指数分为 5 大类:原水水质、原水调配、设施设备、应急处置及运行管控,每一大类含 7~10 个指标要素,共计 44 个指标要素。每个指标要素对应 1~5 级的权重等级(从 1~5 级对应重要性由高到低)。专家根据对每个指标重要性的认知程度,对指标的权重等级进行划分。为保证每个权重等级内指标要素数量分布的公平性、合理性,要求每一大类都有 1、2、3、4、5 级权重的指标。通过收集专家对各个指标评价等级的划定结果,进行指标评价的权重分析。共收集征询调查表 45 份。

1.1 专家组成及占比

选取上海原水与供水领域的专家作为调查对象,涵盖高校、设计院、供水行业管理部门、原水企业及自来水企业等多个领域。调查对象均长期从事供水行业研究、设计、管理及运营工作,对上海原水和供水情况具有深入了解。专家构成比例:高校专家占比为 11%;设计院专家占比为 13%,供水行业管理部门专家占比为 22%,原水企业及各水司专家占比为 54%,如图 1 所示。这一分布比例充分考虑了不同领域专家的知识结构、行业背景及对供水行业的认知深度。专家专业背景多元,包括给排水、环境工程、城市规划、水利工程、水生态、海洋科学、自动化等学科。基于调查对象的广泛代表性和专业权威性,此研究结果具有较高的可信度和参考价值。

■ 高校专家 ■ 设计院专家 ■ 供水行业专家 ■ 原水及各水司专家

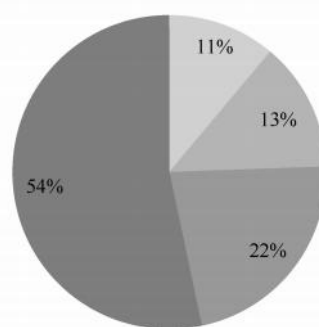


图 1 调查对象组成

Fig. 1 Composition of Survey Respondents

1.2 数据处理方法

调查数据采用 AHP 法进行权重分析。AHP 法是一种解决多目标的复杂问题的定性与定量相结合的决策分析方法,通过专家打分去描述相对重要性,进而计算得到权重。数据处理方法步骤如下。

1) 指标赋分

根据专家对各项指标的权重等级划定结果,按照其重要性大小进行1~5分的赋值,分值大小表示相对重要性的大小,即指标权重等级1级赋5分(最重要),2级赋4分,3级赋3分,4级赋2分,5级赋1分。

2) 计算平均值

统计所有专家对各项指标的赋分结果,对各项指标要素的得分进行累计加和,并计算平均值。

3) 构建判断矩阵

比较平均值得到数据的相对重要性大小,进而构建出权重分析计算所需要的判断矩阵。判断矩阵中进行平均值大小的两两比较,表格中数值以两者平均值作商的结果表示。

4) 权重计算

构建判断矩阵后,将其输入SPSS 18.0软件中进行层次分析,最终得到各项指标的权重分值。计算过程中,同时得到最大特征根值(CI),用于一致性检验使用。

5) 一致性检验

构建判断矩阵时,有可能会出现逻辑性错误,因此需要使用一致性检验是否出现问题,一致性检验使用一致性比率(CR)值进行分析,CR值小于0.1则说明通过一致性检验,反之则说明没有通过一致性检验。判断矩阵满足一致性检验,则可以继续进一步分析。

2 结果与讨论

2.1 原水系统运行特点及关键指标分析

2.1.1 原水系统运行特点

上海市水源地已形成“两江并举、多源互补”的总体布局^[1],四大水源地及现有较为完善的原水输配系统的基本格局,保障着城市供水的水量高需求和水质高要求。如今原水系统不仅仅要满足基本的水量、水质要求,还需要满足水源、设备、水质等安全需求,保证水源地的互联互通、多水源互联互通,以预防各类突发风险的发生^[3]。在原水运行管理过程中,往往存在着种种问题,影响城市原水系统的正常运行,具体因素有很多,包括原水水质、原水调配、设施设备、应急处置和运行管控因素等。

2.1.2 关键指标分析

结合以上对城市原水系统运行特点的分析,通

过与行业专家研究讨论后,将我国城市原水系统运行健康评价指标体系评价目标层划分为5大类,即原水水质、原水调配、设施设备、应急处置和运行管控。合格的原水水质是满足供水要求的首要标准,随着我国生态文明建设的持续推进和长江大保护战略的深入实施,长江水源水质持续改善,高锰酸盐指数、氨氮、总磷等关键指标呈现稳定向好的趋势。在此背景下,原水水质不仅关系到城市供水长远规划的制定,更是直接影响原水系统安全运行的核心要素。原水调配是供水过程中的重要环节,原水系统的互联互通可有效应对突发风险,保障应急情况下的供水需求。原水系统的设施设备是运行管控的核心对象,涉及原水系统的每一个环节。应急处置功能可以快速了解突发事件现场情况,正确判断事态发展,科学利用社会应急资源,对城市公共安全有重要意义。运行管控是原水系统的重要组成部分,其决定了企业的运维管理水平和效率,切实保障原水系统运行的规范化管理。综合分析,以上5个方面与原水系统运行健康息息相关,因此将其纳入评价指标体系(图2)。

2.2 不同行业专家对原水系统运行健康关键的认知差异

不同类别的调查对象在对原水水质、原水调配、设施设备、应急处置及运行管控5大类指标的权重分析中存在一定的客观差异,如图3所示。综合来看,应急处置类的指标权重重叠度较高,表明专家在该方面意见一致性较高,但在其他4类中则存在不同程度的认知偏差。在原水水质、原水调配及设施设备方面,各类专家意见相差较大,尤其是指标5、6、7、15、17、18、26的权重分值呈现显著的阶梯状差异,这可能是专家不同的职业背景,造成了对该类指标的认知偏好差异。运行管控方面,高校专家与其余3类专家形成明显不同的评价差异,分析原因有二:一是相比其他专家,高校专家对原水的运行管控缺乏一定的实践经验,二是由于高校专家样本少,离散程度大,且评分过程中部分指标权重等级缺失造成数据的不合理。

2.3 上海市原水系统运行关键指标权重分析

根据AHP法得到的权重分析结果如下。权重值为1.57%~2.96%,其中36个指标权重大于2%,仅8个指标要素权重值不足2%。结果显示,权重值高分多集中在设施设备类和应急处置类,说明专

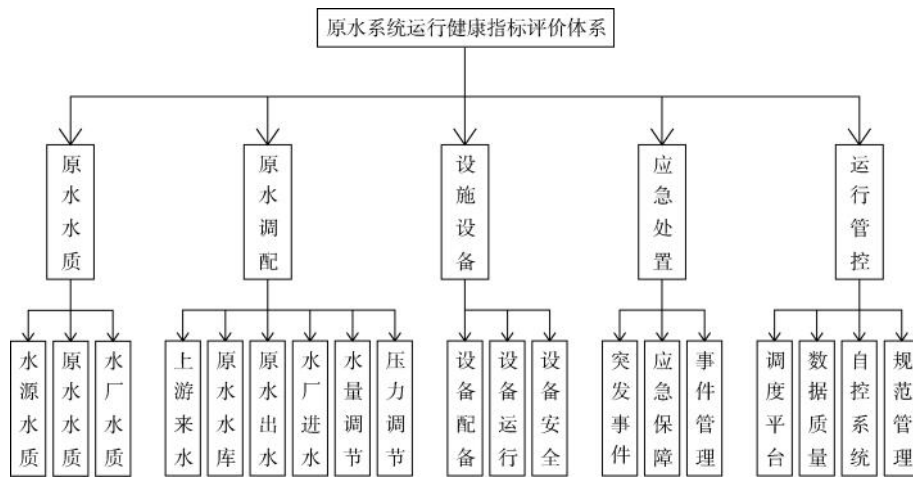


图 2 原水系统运行健康指标评价体系

Fig. 2 Evaluation System for Operation Health Indicators of Raw Water System

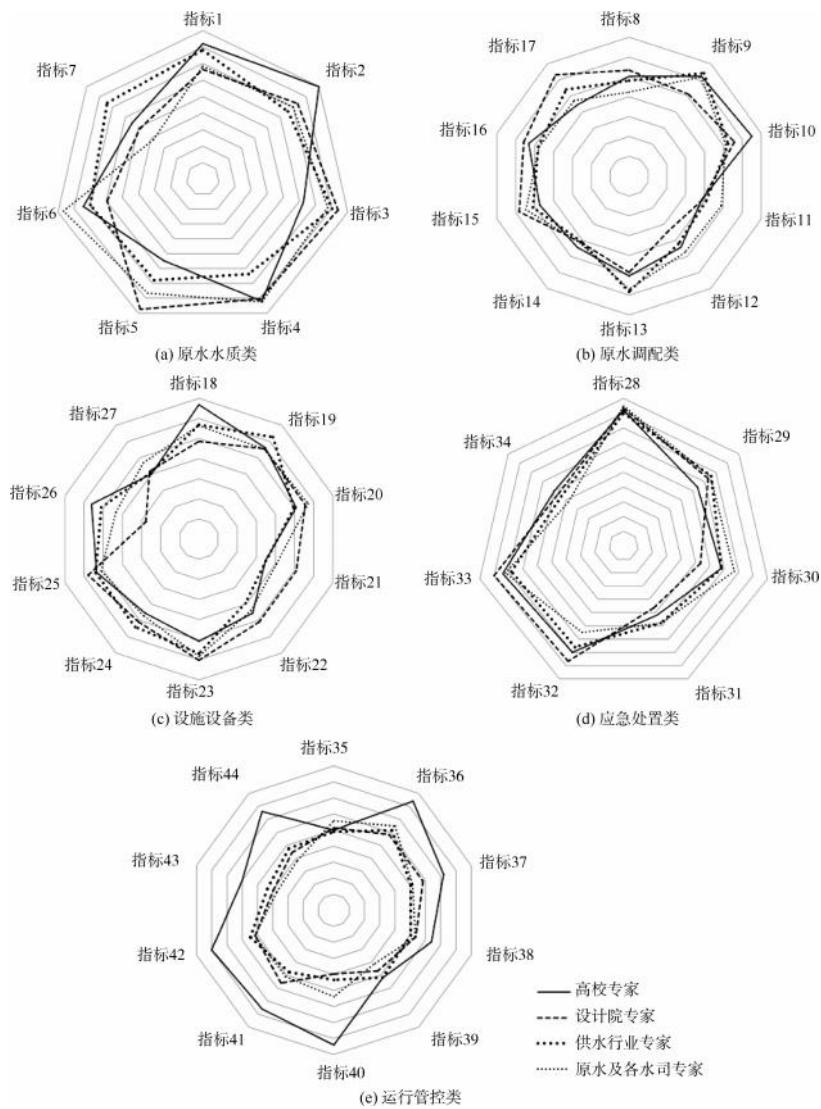


图 3 不同专家评价过程中的指标权重差异

Fig. 3 Differences of Indicator Weights in Different Experts Evaluation Processes

家普遍重视这 2 方面指标对原水系统安全运行的影响。权重值最低分为指标 7“水生态特征”,表明专家认为原水系统运行过程中可不予考虑水生态特征的影响。权重分析结果如表 1 所示。

表 1 指标权重分析结果
Tab. 1 Analysis Results of Indices Weights

大类	小类	编号	权重值
原水水质	上游来水水质监测	指标 1	2.29%
	原水进水水质评价	指标 2	2.29%
	原水进水在线水质指标	指标 3	2.46%
	原水出水水质评价指数	指标 4	2.49%
	原水出水在线水质指数	指标 5	2.34%
	水厂进水端水质	指标 6	2.49%
	水生态特征	指标 7	1.57%
原水调配	上游来水流量	指标 8	2.06%
	原水水库水位可应急时间	指标 9	2.73%
	原水水库水位稳定调蓄范围	指标 10	2.40%
	原水出厂瞬时流量负荷率	指标 11	2.00%
	原水水厂出厂日负荷	指标 12	1.98%
	原水进厂压力合格率	指标 13	2.49%
	原水进厂压力突变率	指标 14	1.87%
	原水进厂压力控制红线	指标 15	2.40%
	原水出厂压力控制	指标 16	2.21%
	调节池调压池水位	指标 17	2.26%
设施设备	取水设施	指标 18	2.57%
	水库堤坝安全	指标 19	2.59%
	机泵运行连续性	指标 20	2.47%
	单机机泵启停数	指标 21	1.81%
	多泵短时连续启停	指标 22	2.00%
	水厂、泵站供电进线冗余	指标 23	2.60%
	机泵备用率	指标 24	2.21%
	原水管渠风险评估	指标 25	2.40%
	原水管线漏损率	指标 26	2.01%
	机泵健康状况监测评估	指标 27	2.00%
应急处置	取水河道水质异常突发事件及处置	指标 28	2.96%
	取水口周围移动风险源	指标 29	2.34%
	集中式取水口备用	指标 30	2.24%
	应急排水设施	指标 31	1.77%
	原水系统互联互通	指标 32	2.29%
	应急预案管理	指标 33	2.61%
	管损发生率	指标 34	1.64%

(续表1)

大类	小类	编号	权重值
运行管控	操作单执行率	指标 35	2.46%
	调度指令执行率	指标 36	2.90%
	在线监测数据完整率	指标 37	2.41%
	在线监测数据完好率	指标 38	2.40%
	地理信息系统(GIS)属性数据完整率	指标 39	2.04%
	信息报送	指标 40	2.33%
	调度组织机构	指标 41	2.37%
	安全生产规章制度	指标 42	2.44%
	水厂、泵站自控系统完备水平	指标 43	1.83%
	智能化支撑系统[GIS、水力模型、数据 采集与监控系统(SCADA)]	指标 44	1.98%

1) 原水水质类

指标 4“原水出水水质评价指数”和指标 6“水厂进水端水质”权重值最高,为 2.49%;其次为指标 3“原水进水在线水质指标”、指标 5“原水出水在线水质指数”、指标 1“上游来水水质监测”和指标 2“原水进水水质评价”,指标 7“水生态特征”权重最低。

2) 原水调配类

指标 9“原水水库水位可应急时间”权重值最高,为 2.73%;其次,指标 13“原水进厂压力合格率”、指标 10“原水水库水位稳定调蓄范围”和指标 15“原水进厂压力控制红线”权重较高;指标 12“原水水厂出厂日负荷”和指标 14“原水进厂压力突变率”权重最低;其他指标处于中等水平。

3) 设施设备类

指标 23“水厂、泵站供电进线冗余”、指标 19“水库堤坝安全”和指标 18“取水设施”权重较高,相对重要性高;指标 26“原水管线漏损率”、指标 22“多泵短时连续启停”和指标 27“机泵健康状况监测评估”权重较低,指标 21“单机机泵启停数”权重最低,表明相对重要性低。

4) 应急处置类

该大类中各指标权重值间差异较为显著。指标 28“取水河道水质异常突发事件及处置”权重值最高,为 2.96%,指标 33“应急预案管理”权重水平较高;其次,指标 29“取水口周围移动风险源”、指标 30“集中式取水口备用”和指标 32“原水系统互联互通”权重值为 2.20%~2.40%;指标 31“应急排水设

施”和指标 34“管损发生率”重要性最低。

5) 运行管控类

指标 36“调度指令执行率”权重值最高,为 2.90%;指标 43“水厂、泵站自控系统完备水平”和

指标 44“智能化支撑系统(GIS、水力模型、SCADA)”权重较低,指标 39“GIS 系统属性数据完整率”权重也较低;其余 6 项指标权重则较为平均。

各指标权重分析比较如图 4 所示。

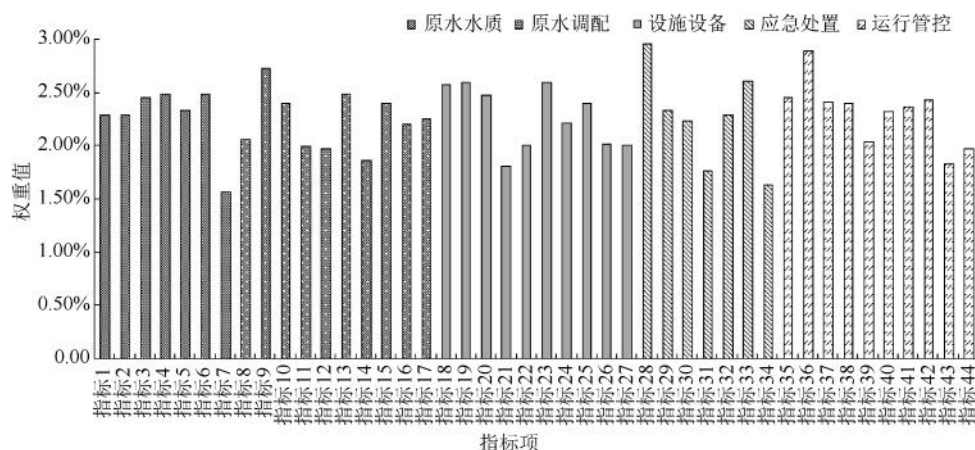


图 4 原水系统运行健康指标权重比较

Fig. 4 Comparison of Indices Weights for Raw Water System Operation Health

3 应用实践

在根据前述方法确定指标权重系数之后,通过对每个指标设计计算规则,搭建在线评估模型,研发展示平台,上海市原水系统运行健康指数的研究成果已应用到日常工作中。选取 2022 年极端咸潮期间原水系统运行健康指数来进行分析,指数变化曲线如图 5 所示。

2022 年,受长江流域持续干旱和台风带来的东海咸潮叠加影响,上海市长江口陈行、青草沙、

东风西沙水库遭遇历史上最早最严重的咸潮入侵,9 月初长江口三大水源地先后遭遇咸潮入侵,比往年提早了 3 个月。从 9 月—10 月全市以及四大原水系统的运行健康指数的变化曲线上可知,受咸潮影响,长江水源三大原水系统的指数整体低于金泽原水系统,金泽原水系统在咸潮期间的运行健康状况明显优于另外三大原水系统。显然,长江水源三大原水系统的指数下降与咸潮的侵袭存在着紧密的联系。

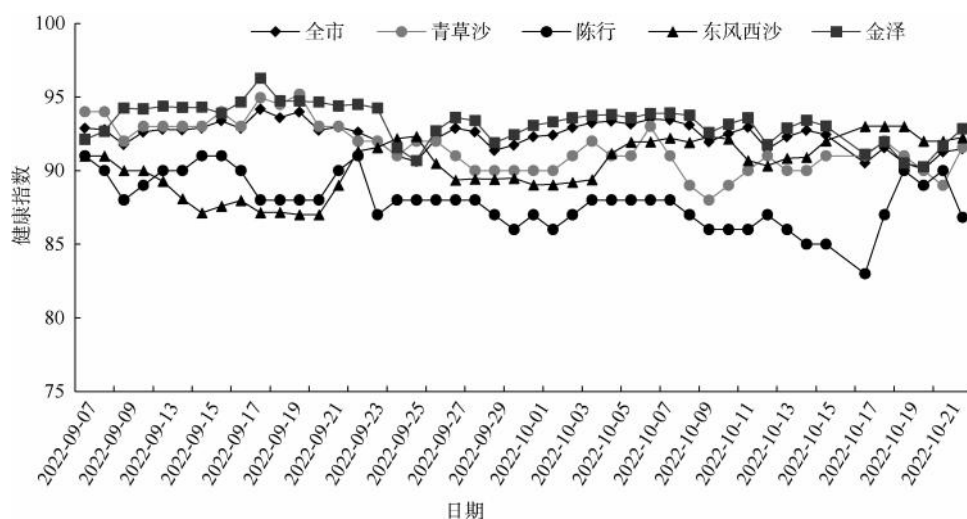


图 5 上海原水系统运行健康指数分析

Fig. 5 Analysis of Operation Health Indices of Raw Water System in Shanghai

黄浦江上游金泽水库易受上游流域新型污染物及异嗅物质影响。本文以 2023 年 4 月该水库取水口突发水质污染事件为例展开分析。4 月 10 日,取水口周边水体出现臭味异常。通过实施太浦河上游水量应急调度、粉炭应急投加、水源切换等综合措

施,事件对居民用水的影响得到有效控制。至 4 月 15 日,取水口主要污染物浓度已稳定低于检出限,水库恢复正常取水。事件期间,金泽原水系统运行健康指数呈现显著下降;应急处置结束后,指数明显回升。该时段指数变化趋势如图 6 所示。

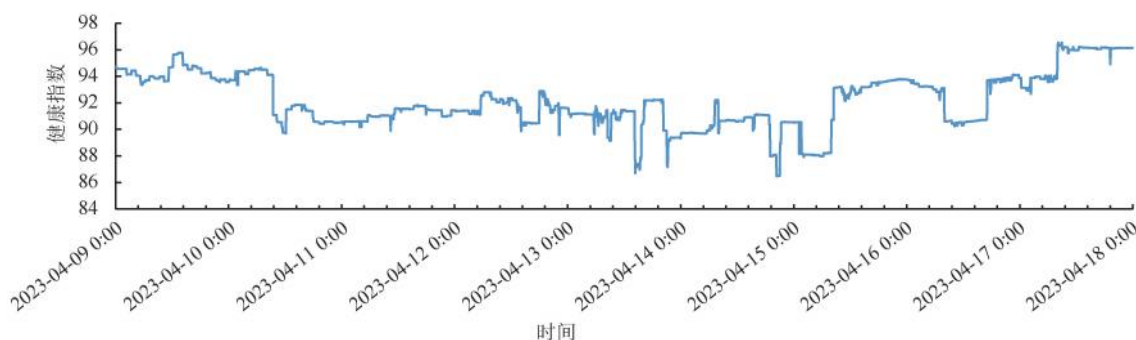


图 6 金泽原水系统运行健康指数变化曲线

Fig. 6 Variation Curve of Operation Health Index for Jinze Raw Water System

在评估体系的构建中,指标的选取及权重系数的确定至关重要,有效的指标和准确合理的权重使得整个评估体系更为科学、合理,从而能够及时有效地响应原水系统遭遇咸潮入侵及水污染等突发事件的影响。同时,突发事件期间指数的动态变化也充分验证了指标权重系数确定的合理性,进一步体现了评估体系的有效性和实用性。

4 结论

(1)结合城市原水系统运行特点,将我国城市原水系统运行评价指标体系评价目标层划分为 5 大类,即原水水质、原水调配、设施设备、应急处置和运行管控,并进行了关键指标分析,对提高供水行业的供水安全保障能力及精细化管理水平等起到积极推动作用。

(2)尽管专家权重打分法难免带有评价专家的主观不确定性,但通过精心选择来自不同领域的多位专家,并结合多个样本进行打分,这种主观不确定性可以得到有效降低。本文采用专家打分法与 AHP 相结合的方式来确定权重系数,不仅融合了主观的逻辑判断与分析,而且借助了客观的精确计算和推演,从而使指标权重的确定更为科学、合理。这一方法不仅充分发挥了专家的专业经验,还通过量化分析提高了结果的准确性,为相关领域的研究与实践提供了有力的支持。

(3)根据指标权重分析结果,指标 4、6、9、18、19、23、28、33、36 分别是各大类中权重较高的要素,表明这些要素对原水系统运行安全具有关键影响,应在日常管理与运行中予以重点关注。分析结果为原水系统运行安全管理提供了依据,明确了关键控制因素,有助于优化资源配置,增强原水运行安全保障能力。

参考文献

- [1] 王如琦. “链+环”或“链+网”——上海市未来供水水源地和原水系统战略规划布局的设想 [J]. 净水技术, 2017, 36(5): 1-5.
WANG R Q. "Chain + ring" or "chain + network": Strategic planning for future water supply sources and raw water system in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(5): 1-5.
- [2] 何群, 陈明, 徐力群, 等. 大坝综合评价指标专家主观权重的计算方法 [J]. 人民黄河, 2019, 41(s2): 67-68, 92.
HE Q, CHEN M, XU L Q, et al. A method for calculating the subjective weights of experts on comprehensive evaluation indicators of DAMS [J]. Yellow River, 2019, 41(s2): 67-68, 92.
- [3] 王如琦, 张新, 鲁宇闻. 上海城市多水源条件下原水调配关键技术研究 [J]. 给水排水, 2016, 52(12): 9-15.
WANG R Q, ZHANG X, LU Y W. Study on raw water scheduling with multiple water sources in Shanghai [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(12): 9-15.