

城市供水全过程
监管技术专栏

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.07.020

基于AHP与加权秩和比法的二次供水监管技术评价

邢雯雯¹, 杨利伟², 高峰¹, 于辉², 王天怡², 张婧媛¹,
张家豪¹, 张钧奕³

(1. 中国建筑设计研究院有限公司, 北京 100044; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西
西安 710061; 3. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 二次供水系统评价是体现城市供水从源头到龙头“最后一公里”达标情况的核心依据,而监管技术评价是对二次供水系统整体建设水平与管理能力的综合评价,涉及因素众多,目前缺乏深入研究。依据国内18个代表性城市的175个建筑与小区二次供水系统调研基础,结合现有研究,构建了包含基础水平、供水可靠性水平、管理体制与信息化水平、水质保障水平、巡检及维护水平、监督与考核水平6项核心指标,以及系统建设年限、供水方式、管理模式等25项子指标的监管技术标准评价体系。采用层次分析法(AHP)集结专家群决策计算指标权重,建立基于改进加权秩和比法的综合评价模型,对北京、上海、深圳、天津、兰州、珠海6个城市的样本进行整体和分项评价,得出回归方程并通过检验。结果显示,评价具有统计学意义,评价方法有效可行,能够应用于我国建筑与小区二次供水系统管理技术评价,为管理者提供技术借鉴与理论参考。

关键词: 二次供水; 监管技术; 评价体系; 层次分析法; 加权秩和比法; 综合评价

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)07-0126-06

Evaluation of Secondary Water Supply Supervision Technology Based on AHP and Weighted Rank Sum Ratio Method

XING Wen-wen¹, YANG Li-wei², GAO Feng¹, YU Hui², WANG Tian-yi²,
ZHANG Jing-yuan¹, ZHANG Jia-hao¹, ZHANG Jun-yi³

(1. China Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. School
of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. School of Electrical
Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Evaluation of secondary water supply system is the key basis to reflect the “last mile” of urban water supply from the source to the tap. The evaluation of supervision technology is a comprehensive evaluation of the overall construction level and management ability of the secondary water supply system, which involves many factors and hitherto lacks in-depth research. Based on the research of secondary water supply system for 175 buildings and communities in 18 representative cities in China and combined with existing research, the evaluation system of supervision technical standard was constructed, which included six core indexes, such as basic level, water supply reliability level, management system

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07502001)

通信作者: 高峰 E-mail: gaof@cadg.cn

and informatization level, water quality security level, inspection and maintenance level, supervision and assessment level, and 25 sub-indexes, such as system construction period, water supply mode, management mode and so on. The analytic hierarchy process (AHP) was employed to gather expert group decision to calculate the index weight, and a comprehensive evaluation model based on the modified weighted rank sum ratio method was established. The model was applied for overall and itemized evaluation of samples from Beijing, Shanghai, Shenzhen, Tianjin, Lanzhou and Zhuhai, and the regression equation was obtained and passed the test. The evaluation had statistical significance, and the evaluation method was effective and feasible, which could be applied to the management technology evaluation of secondary water supply system of buildings and residential areas in China, and provide technical reference and theoretical reference for managers.

Key words: secondary water supply; supervision technology; evaluation system; analytic hierarchy process; weighted rank sum ratio method; comprehensive evaluation

城市供水系统作为基础设施的重要组成部分,是衡量城市韧性的一把标尺。二次供水系统作为城市供水系统的“最后一公里”,是供水过程至关重要的环节,其水质、水量和供水压力的保障涉及千家万户。我国经历了若干年的探索,至今尚未形成可广泛适用于二次供水系统的监管技术评价指标体系和方法^[1]。目前,国内建筑与小区二次供水系统存在水质二次污染、水压波动大、管网漏损严重、设备能耗高、管理责任不明等问题^[2],程度因地而异。由于缺乏监管技术评价体系,不能客观直接地显示出各建筑二次供水系统的实际监管水平,对后期的提升改造与精细化管理带来困难^[3-4]。因此,亟需建立一套科学合理的二次供水系统监管技术评价方法,为未来二次供水系统的发展奠定基础。笔者在实地调研的基础上,通过层次分析法(AHP)与

改进的加权秩和比法(WRSR)建立符合我国实际的建筑与小区二次供水系统监管技术评价模型,以期管理者提供科学、高效的决策依据与理论支撑。

1 二次供水系统监管技术评价体系构建

通过前期对北京、上海、深圳、天津、兰州等18个典型城市的175个建筑与小区二次供水系统的现状调研^[5],收集并分析了各调研对象的属性、供水方式、泵房情况、设备功效、管理模式、水质情况等信息,综合考虑现有的二次供水管理水平相关研究^[6-9],共提取出能够反映整体管理水平的6项核心一级指标和25项二级子指标。其中,一级指标包括基础水平、供水可靠性水平、管理体制与信息化水平、水质保障水平、巡检及维护水平、监督与考核水平。二级子指标包括系统建设年限、供水方式、泵房设备可靠性、管道材质、漏损及防控能力、产权与运维责任、管理模式、远程监控系统建设、人员与资料管理、设施清洗消毒频率、清洗消毒部位、清洗消毒方式、水质检测周期、水质在线监测系统、巡检频次、巡检方式、运行维护周期、安保与应急管理、事故发生情况、投诉监督方式、投诉处理及时率、绩效考核制度。评价指标体系见图1。

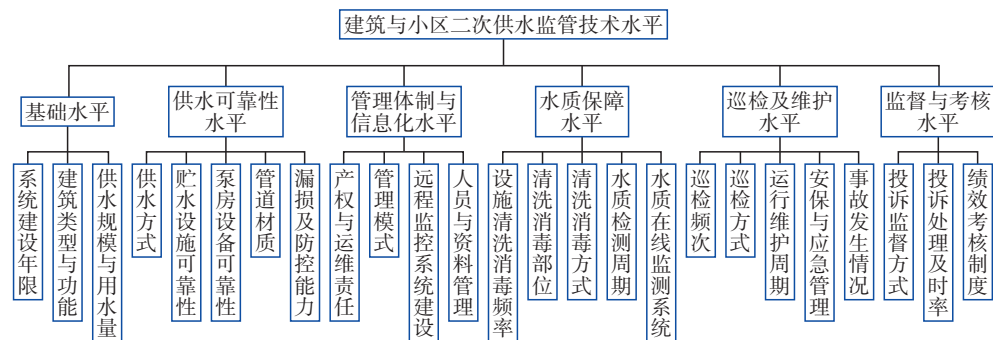


图1 建筑与小区二次供水监管技术水平评价体系

Fig.1 Evaluation system of secondary water supply supervision technical level in buildings and communities

2 AHP指标权重计算

根据上述评价体系,建立AHP层次结构模型,分别构建目标层、准则层和因素层指标。邀请20位

来自科研院所、设计院及管理单位等领域的权威专家,对每个因素下所含指标的重要性进行两两比较,建立判断矩阵并加权计算权重。各指标权重计

算结果如表1所示,权重排序如图2所示。

表1 建筑与小区二次供水监管技术水平评价指标权重

Tab.1 Weight of secondary water supply supervision technical level evaluation indexes in buildings and communities

要素层	权重	指标层	权重
基础水平 U_1	0.049 5	系统建设年限 U_{11}	0.590 9
		建筑类型与功能 U_{12}	0.168 6
		供水规模与用水量 U_{13}	0.240 5
供水可靠性水平 U_2	0.354 8	供水方式 U_{21}	0.104 7
		贮水设施可靠性 U_{22}	0.309 4
		泵房设备可靠性 U_{23}	0.333 1
		管道材质 U_{24}	0.145 3
		漏损及防控能力 U_{25}	0.107 5
管理体制与信息化水平 U_3	0.163 6	产权与运维责任 U_{31}	0.316 9
		管理模式 U_{32}	0.340 3
		远程监控系统建设 U_{33}	0.233 4
		人员与资料管理 U_{34}	0.109 3
水质保障水平 U_4	0.261 5	设施清洗消毒频率 U_{41}	0.326 6
		清洗消毒部位 U_{42}	0.159 0
		清洗消毒方式 U_{43}	0.108 4
		水质检测周期 U_{44}	0.252 9
		水质在线监测系统 U_{45}	0.153 0
巡检及维护水平 U_5	0.113 5	巡检频次 U_{51}	0.281 9
		巡检方式 U_{52}	0.191 5
		运行维护周期 U_{53}	0.208 1
		安保与应急管理 U_{54}	0.185 9
		事故发生情况 U_{55}	0.132 7
监督与考核水平 U_6	0.057 0	投诉监督方式 U_{61}	0.277 5
		投诉处理及时率 U_{62}	0.428 5
		绩效考核制度 U_{63}	0.294 1

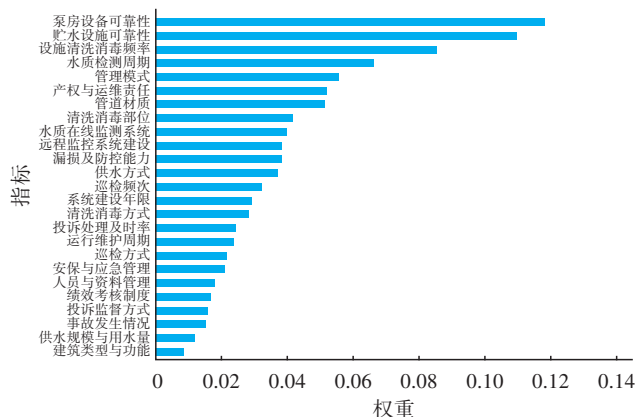


图2 建筑与小区二次供水监管技术水平评价指标权重排序

Fig.2 Weight ranking of evaluation indexes for secondary water supply supervision technical level in buildings and communities

3 基于改进加权秩和比法的综合评价

本研究选用改进的加权秩和比法(WRSR)对指标体系进行综合评价。并应用SPSS和Matlab 2018a软件进行统计分析。

3.1 评价过程

秩和比法(RSR)是集古典参数统计与近代非参数统计优点于一体的统计分析方法,被广泛应用于多指标综合评价。本研究选用的非整秩次WRSR法是对传统方法的优化改进,融合各指标权重因素的同时,克服了传统秩次化对原始信息不精确量化的缺点,使所得秩次能更好地表征原始数据中包含的信息^[11],增加了秩次排序的客观可信度,计算方法如下:

① 编秩方法:

对于高优秩指标:

$$R = 1 + (N - 1) \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

对于低优秩指标:

$$R = 1 + (N - 1) \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: R 为秩次; N 为样本数量; X 为指标的原始数据。

② 结合各指标权重,计算加权秩和比(RSR_w):

$$RSR_{wi} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m (W_i \times R_{ij}) \quad (3)$$

式中: i 为样本对象; j 为指标数; R_{ij} 为样本指标秩次值。

③ 将所得 RSR_w 排序,依次计算频数 f 、累计频数 Σf 、秩次范围、平均秩次 \hat{R} 、 RSR_w 值所对应的向下累计频率 $p = \frac{1}{n} \times \hat{R} \times 100\%$ 。

④ 以SPSS软件分析得出 RSR_w 值与Probit值的回归方程。

⑤ 按合理分档和最佳分档原则进行分档。

3.2 评价指标权重确定

根据前文层次分析法的计算结果,得到要素层指标的权向量为: $W_U = (0.049\ 5, 0.354\ 8, 0.163\ 6, 0.261\ 5, 0.113\ 5, 0.057\ 0)$ 。各二级指标层的权向量分别为: $W_{U_1} = (0.590\ 9, 0.168\ 6, 0.240\ 5)$; $W_{U_2} = (0.104\ 7, 0.309\ 4, 0.333\ 1, 0.145\ 3, 0.107\ 5)$; $W_{U_3} = (0.316\ 9, 0.340\ 3, 0.233\ 4, 0.109\ 3)$; $W_{U_4} = (0.322\ 6,$

0.159 0,0.108 4,0.252 9,0.153 0); $W_{U_5}=(0.281\ 9,$
0.191 5,0.208 1,0.185 9,0.132 7); $W_{U_6}=(0.277\ 5,$
0.428 5,0.294 1)。

3.3 评价体系及分级赋值

对于已建立的评价指标体系,根据实地调研数据和研究文献,结合专家咨询结果,参照已有文献及规范规程^[12-13],将6项一级指标分成25项子指标,子指标涉及系统建设年限、供水方式、贮水设施可靠性、泵房设备可靠性、管道材质、漏损及防控能力、远程监控系统建设、设施清洗消毒频率、巡检频

次、投诉监督方式等内容。子指标分3~5个赋值等级,分值范围为0~1.0分。

4 典型城市二次供水监管技术综合评价

对北京、上海、深圳、天津、兰州、珠海6个城市的18个样本进行抽样评价,包含高层或超高层住宅、学校、综合楼等。将评测样本的450个二级指标原始数据进行标准化,以不同秩次表示数据的大小。通过非整次加权计算,分别得到25项二级评价指标的 RSR_w 值与对应的概率单位Probit值,结果见表2和表3。

表2 评测样本在基础水平(U_i)指标下的 RSR_w 值

Tab.2 RSR_w value of evaluation samples under basic level index

样本编号	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{21}	U_{22}	U_{23}	U_{24}	U_{25}	U_{31}	U_{32}	U_{33}	U_{34}	U_{41}	...	RSR_w	排序
A ₁	15.6	12.3	18.0	7.8	1.0	18.0	4.4	9.5	6.7	18.0	1.0	18.0	12.3	...	0.450	14
A ₂	15.6	9.5	8.3	11.2	18.0	13.7	7.8	1.0	6.7	18.0	18.0	12.3	1.0	...	0.493	11
A ₃	15.6	12.3	8.3	18.0	15.2	9.5	1.0	1.0	6.7	18.0	1.0	1.0	6.7	...	0.393	17
B ₁	10.7	15.2	1.0	11.2	9.5	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	1.1	12.3	15.2	...	0.800	1
B ₂	1.0	15.2	10.7	11.2	18.0	6.5	14.6	9.5	18.0	18.0	1.1	12.3	15.2	...	0.748	2
B ₃	5.9	1.0	5.9	18.0	15.2	9.5	18.0	18.0	18.0	18.0	1.1	12.3	12.3	...	0.698	4
C ₁	15.6	6.7	3.4	4.4	18.0	9.5	7.8	12.3	1.0	1.0	1.1	18.0	12.3	...	0.621	5
C ₂	18.0	6.7	5.9	14.6	12.3	13.7	1.0	9.5	1.0	1.0	1.1	6.7	15.2	...	0.607	6
C ₃	15.6	9.5	5.9	7.8	12.3	18.0	4.4	9.5	1.0	1.0	1.1	12.3	18.0	...	0.711	3
D ₁	5.9	18.0	3.4	1.0	6.7	1.0	4.4	6.7	6.7	9.5	1.0	12.3	9.5	...	0.290	18
D ₂	8.3	18.0	5.9	4.4	15.2	1.0	1.0	9.5	6.7	9.5	1.0	6.7	6.7	...	0.410	16
D ₃	5.9	3.8	1.0	14.6	15.2	5.3	4.4	9.5	6.7	9.5	1.0	1.0	9.5	...	0.482	12
E ₁	5.9	9.5	8.3	14.6	6.7	13.7	1.0	12.3	1.0	18.0	1.0	6.7	12.3	...	0.457	13
E ₂	3.4	12.3	8.3	11.2	9.5	9.5	7.8	12.3	1.0	18.0	1.0	12.3	15.2	...	0.503	10
E ₃	5.9	18.0	8.3	18.0	18.0	9.5	7.8	9.5	1.0	18.0	1.0	12.3	15.2	...	0.595	7
F ₁	5.9	15.2	8.3	14.6	18.0	18.0	7.8	12.3	6.7	5.3	1.1	6.7	6.7	...	0.535	9
F ₂	8.3	12.3	8.3	14.6	12.3	1.0	7.8	9.5	6.7	5.3	1.0	1.0	12.3	...	0.432	15
F ₃	15.6	3.8	1.0	7.8	18.0	13.7	11.2	15.2	6.7	5.3	1.1	1.0	9.5	...	0.582	8

采用SPSS软件进行回归分析,发现 RSR_w 值与Probit值线性相关,线性回归方程为 $RSR_w=0.134\times$
 $Probit-0.142$, R^2 值为0.974;并且模型通过了F检验($p=0.000\ 1<0.05$),说明回归方程具有统计意义。

根据 RSR_w 值,将评价结果分为Ⅰ(不合格)、Ⅱ(合格)、Ⅲ(中)、Ⅳ(良)和Ⅴ(优)五档,并进行回归分析,结果显示,F检验 $p<0.001$,t检验 $p<0.001$,分档具有显著性。分档排序结果见表4。

为了更好地显示各样本分项水平的评价情况,分别评测6项一级指标的 RSR_w 值,评分结果如图3所示。

评价结果表明,所有样本的二次供水监管水平普遍处于中等偏上,无不合格。其中A市3个样本

均为中等;B市中B₁、B₂为优秀,B₃为良好;C市中C₁为优秀,C₂、C₃为良好;D市中D₁为合格,D₂、D₃为中等;E市中E₁、E₂为中等,E₃为良好;F市中F₁、F₃为良好,F₂为中等。6个城市的整体监管水平评估结果由高到低排序为B市、C市、E市、A市、D市。就分项指标而言,6个城市的供水可靠性水平与水质保障水平较好,主要是因为近几年各地逐步开展并落实了二次供水设施提标改造政策,针对老旧建筑与小区内的水泵房、水箱间等供水设施已进行更新改造,消除不合规现象,改善了二次供水系统的水量、水压与水质情况,提升了系统的安全性管理水平。对于管理体制与信息化水平,6个城市的评分结果差异较大,两极分化明显,一方面是因为各地的管

理模式与产权责任不同,导致管理效果层次不齐;另一方面是智慧化监管平台建设的普及程度不同,使得不同城市的管理技术水平有所差异。

表 3 评测样本的 RSR_w 值分布

Tab.3 RSR_w value distribution of evaluation samples

RSR _w 分布值	频数 <i>f</i>	累计频数 Σf	平均秩次 \hat{R}	向下累计频率 <i>p</i>	Probit 值
0.289 8	1	1	1	5.6	3.407
0.393 0	1	2	2	11.1	3.779
0.410 2	1	3	3	16.7	4.033
0.431 6	1	4	4	22.2	4.235
0.450 4	1	5	5	27.8	4.411
0.456 9	1	6	6	33.3	4.569
0.482 0	1	7	7	38.9	4.718
0.492 7	1	8	8	44.4	4.860
0.502 6	1	9	9	50.0	5.000
0.535 0	1	10	10	55.6	5.140
0.582 0	1	11	11	61.1	5.282
0.595 5	1	12	12	66.7	5.431
0.607 0	1	13	13	72.2	5.589
0.620 5	1	14	14	77.8	5.765
0.620 8	1	15	15	83.3	5.967
0.745 2	1	16	16	88.9	6.221
0.748 1	1	17	17	94.4	6.593
0.800 3	1	18	18	98.6*	7.200

注: “*”按 $\left(1 - \frac{1}{4n}\right) \times 100\%$ 进行估计。

表 4 评测样本的总体评价分档排序结果

Tab.4 Ranking results of overall evaluation of samples

样品编号	RSR _w 值	RSR _w 排名	RSR _w 拟合值	分档等级
A ₁	0.450	14	0.447	Ⅲ
A ₂	0.493	11	0.507	Ⅲ
A ₃	0.393	17	0.363	Ⅲ
B ₁	0.800	1	0.820	V
B ₂	0.748	2	0.739	V
B ₃	0.745	3	0.655	Ⅳ
C ₁	0.621	5	0.628	Ⅳ
C ₂	0.607	6	0.605	Ⅳ
C ₃	0.621	4	0.689	V
D ₁	0.290	18	0.313	Ⅱ
D ₂	0.410	16	0.397	Ⅲ
D ₃	0.482	12	0.488	Ⅲ
E ₁	0.457	13	0.469	Ⅲ
E ₂	0.503	10	0.526	Ⅲ
E ₃	0.595	7	0.584	Ⅳ
F ₁	0.535	9	0.545	Ⅳ
F ₂	0.432	15	0.424	Ⅲ
F ₃	0.582	8	0.564	Ⅳ

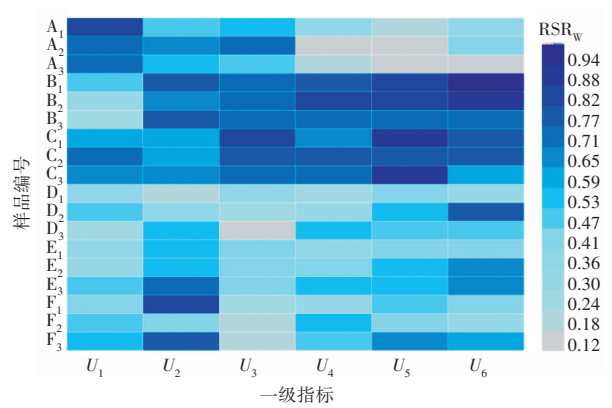


图 3 评测样本一级指标评价结果分级

Fig.3 Grading diagram of primary index evaluation results of samples

5 结论

① 在实地调研的基础上,构建建筑与小区二次供水系统监管技术评价指标体系,采用 AHP 法并集合专家群意见,确定指标权重与排序,得出 6 项一级指标即基础水平、供水可靠性水平、管理体制与信息化水平、水质保障水平、巡检及维护水平、监督与考核水平的权重分别为 0.049 5、0.354 8、0.163 6、0.261 5、0.113 5、0.057 0;25 项二级指标中权重排序前 6 项分别为泵房设备可靠性、贮水设施可靠性、设施清洗消毒频率、水质检测周期、管理模式、产权与运维责任。

② 采用改进 WRSR 法建立综合评价模型,评测北京、上海、深圳、天津、兰州、珠海 6 个城市的 18 个样本,得到评价回归方程并通过了检验。此评价模式可应用于城市间的抽样评测,也可用于同一城市不同建筑对象间的评测,评价结果能够为管理部门制定监管政策与设施改造措施提供参考。

参考文献:

- [1] 杨晓芳,徐强,王东升.我国城市供水管网漏损控制技术发展与展望——基于水平衡分析与分区管理的管网漏损评价、监测与控制技术[J].给水排水,2017,43(5):1-3,120.
- YANG Xiaofang, XU Qiang, WANG Dongsheng, et al. Development and prospect of leakage control technology for urban water supply network in China — leakage evaluation, monitoring and control technology based on water balance analysis and regional management [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(5): 1-3, 120 (in Chinese).

- [2] 汪建新. 上海城区二次供水设施现状分析及优化运行措施研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 1-10.
WANG Jianxin. Status Analysis of Shanghai Urban Secondary Water Supply Facilities and Research on Measures of Optimal Operation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 1-10 (in Chinese).
- [3] 常田. 城市供水管网管线健康状态评估方法研究及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2016: 10-25.
CHANG Tian. Methodology and Application of Pipe Condition Assessment in Urban Water Distribution System [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016: 10-25 (in Chinese).
- [4] DIAO K, FARMANI R, FU G, *et al.* Clustering analysis of water distribution systems: identifying critical components and community impacts [J]. *Water Science & Technology*, 2014, 70(11): 1764-1773.
- [5] 刘梓晶, 赵珍仪, 高峰, 等. 建筑与小区二次供水设施运维情况调研与分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(1): 134-138.
LIU Zijing, ZHAO Zhenyi, GAO Feng, *et al.* Investigation and analysis of operation and maintenance of secondary water supply facilities in buildings and communities [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1): 134-138 (in Chinese).
- [6] 李汉超, 崔建国, 赵坤. 基于未确知测度理论的供水管网漏损评价研究[J]. *给水排水*, 2019, 45(5): 124-129.
LI Hanchao, CUI Jianguo, ZHAO Kun. Research on evaluation method of water supply pipeline leakage based on unascertained measure theory [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(5): 124-129 (in Chinese).
- [7] 潘俊杰, 张磊, 李辉, 等. 北京延庆地区供水系统安全性评价与风险评估[J]. *城镇供水*, 2019(2): 74-79.
PAN Junjie, ZHANG Lei, LI Hui, *et al.* Safety evaluation and risk assessment of water supply system in Yanqing District of Beijing [J]. *City and Town Water Supply*, 2019(2): 74-79 (in Chinese).
- [8] 康利民, 吴俊奇. 两种二次供水系统水质安全性对比分析[J]. *环境工程*, 2018, 36(8): 14-19.
KANG Limin, WU Junqi. Comparative analysis on water quality safety of two kinds of secondary water supply systems [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(8): 14-19 (in Chinese).
- [9] 吴瑶佳. 南京市建邺区二次供水在线监测系统的应用评价[D]. 南京: 东南大学, 2018: 10-27.
WU Yaojia. Application Evaluation of Secondary Water Supply Online Monitoring System in Nanjing Jianye District [D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 10-27 (in Chinese).
- [10] 王郡, 史俊, 邓慧萍. 二次供水系统的技术验证评价方法[J]. *净水技术*, 2020, 39(10): 65-73, 131.
WANG Jun, SHI Jun, DENG Huiping, *et al.* Technological verification and evaluation method for secondary water supply system [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(10): 65-73, 131 (in Chinese).
- [11] 王卉, 江文奇. 基于秩和比的两阶段多属性决策方法研究[J]. *数学的实践与认识*, 2015, 45(10): 199-203.
WANG Hui, JIANG Wenqi. Research on two-stage approach based on rank-sum ratio in multi-attribute decision condition [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2015, 45(10): 199-203 (in Chinese).
- [12] 赵锂. 建筑与小区二次加压与调蓄供水水质保障技术[J]. *给水排水*, 2020, 46(12): 1-5.
ZHAO Li. Water quality assurance technology of secondary pressurization and storage of buildings and sub-district [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(12): 1-5 (in Chinese).
- [13] 曾文, 李日鹏, 杨之江, 等. 顾及供需关系的供水管网管段脆弱性评价[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(2): 25-30.
ZENG Wen, LI Ripeng, YANG Zhijiang, *et al.* Pipe vulnerability assessment of water distribution networks considering supply-demand relationship [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(2): 25-30 (in Chinese).

作者简介: 邢雯雯(1994-), 女, 陕西咸阳人, 硕士, 主要研究方向为城市水系统评估与智慧化管理、雨洪控制与资源化利用。

E-mail: 243712520@qq.com

收稿日期: 2022-01-10

修回日期: 2022-03-04

(编辑: 刘贵春)