

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.011

基于因子分析的供水管网健康状态评价指标遴选

丁相毅¹, 石小林², 凌敏华², 黄 泽³, 安 琪², 刘思然¹

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 2. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130012)

摘要:为筛选出代表性强、敏感度高的指标用于供水管网健康状态评价,对 11 个供水管网健康状态评价指标进行层次划分,并基于因子分析进行贡献度计算和敏感性分析。层次划分结果表明,评价体系包括外部环境对管道静态结构影响因素、管道内部静态结构影响因素、水质影响因素、水力影响因素;贡献度和敏感度分析结果表明,内外衬层、管径、节点流量与总流量比值、余氯、节点压力与服务最低压力比值、覆土厚度、管材、管龄 8 个指标应该作为基础的必选指标,并且应尽量提高内外衬层、管径、节点流量与总流量比值、余氯、覆土厚度、管龄数据的精度。

关键词:供水管网;健康状态评价指标;敏感度;贡献度;因子分析

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0067-07

Selection of evaluation indicators for water supply network health status based on factor analysis//DING Xiangyi¹, SHI Xiaolin², LING Minhua², HUANG Ze³, AN Qi², LIU Siran¹ (1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Water Conservancy and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to select highly representative and sensitive indicators for water supply network health status evaluation, 11 water supply network health status evaluation indicators were analyzed by hierarchy process, and the contribution calculation and sensitivity analysis were carried out based on factor analysis method. The results of analytic hierarchy process show that the evaluation system includes external environment influencing factors on the static structure of the pipeline, internal static structure influencing factors of the pipeline, water quality influencing factors and hydraulic influencing factors. The results of contribution and sensitivity analysis show that the eight indicators of inner and outer lining, pipe diameter, ratio of node flow to total flow, residual chlorine, ratio of node pressure to minimum service pressure, soil cover thickness, pipe material and pipe age should be taken as the basic required indicators, and the data accuracy of inner and outer lining, pipe diameter, ratio of node flow to total flow, residual chlorine, soil cover thickness and pipe age should be improved as much as possible.

Key words: water supply network; health status evaluation indicator; sensitivity; contribution degree; factor analysis

供水管网健康状态评价结果是城市供水管网维护更新的重要理论依据,而评价指标的确定和指标数据的收集是评价过程中的关键,对于提高评价结果的科学性和准确性起到了重要作用。城市供水管网系统是一个构件繁多、结构复杂、工况时刻都在变化且充满不确定性的庞大系统,用一两个指标难以科学全面地评价其健康状态,但如果指标选择过于复杂,又会使得数据处理变得混乱与困难^[1]。在供

水管网健康评价指标的研究当中,国际水协会(IWA)和美国自来水厂协会(AWWA)推荐用供水设施漏失指数(infrastructure leakage index, ILI)作为最合适和最实用的性能指标来表征真实漏失量(物理漏失量)^[2];Pelletier等^[3]研究了供水管道 10 年来的破损记录,将每年水管破裂的数量作为管网结构状态的指标;张现国等^[4]通过比较国际水协、世界银行、澳大利亚、葡萄牙以及我国现行的漏损水

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400605)

作者简介:丁相毅(1984—),男,正高级工程师,博士,主要从事城市水文、水循环模拟与调控等研究。E-mail: dingxy@iwhr.com

通信作者:石小林(1997—),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: 2503027842@qq.com

量评价指标,分析供水管网漏损影响因素,探讨了漏损评价指标的筛选;余鹏钧^[5]通过对南方某市的管道健康影响因素的分析,开展了南方某市供水管网健康评价指标体系的构建研究;代焕芳^[6]建立了用于评价供水管网漏失水平的指标——背景漏失指数(background losses index, BLI)并对其实用性进行了验证;王旭冕等^[7]利用统计学知识,建立了由方差分析、综合评价指标分析和极大不相关分析组成的三步筛选法筛选参与聚类分析的指标,剔除了对聚类分析产生干扰的重复、多余或片面指标。总体来说,目前对供水管网健康状态评价指标的代表性和敏感性研究较少,因此本文对供水管网健康状态评价指标进行贡献度分析及敏感度分析,遴选出代表性强、敏感度较高的指标,以期供水管网健康状态评价指标体系的建立和指标数据收集等基础工作提供借鉴和参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

1.1.1 供水管网健康状态评价指标选取

根据供水管网健康概念和内涵,综合考虑管网健康状态的影响因素^[8],对比分析国内外大量的相关文献^[3-8],并结合我国供水管网运行实际情况,根据选取指标的代表性、完备性、相对独立性和可操作性的原则,初步筛选了20个指标构成初选评价指标体系,其中管网静态结构指标12个、水力指标5个、水质指标3个。然后根据供水管网维修情况概率统计并结合专家主观判断,最终确定11个供水管网健康状态评价指标,其中供水管网静态结构影响因素7个,供水管网水力和水质影响因素分别有2个,具体见图1。

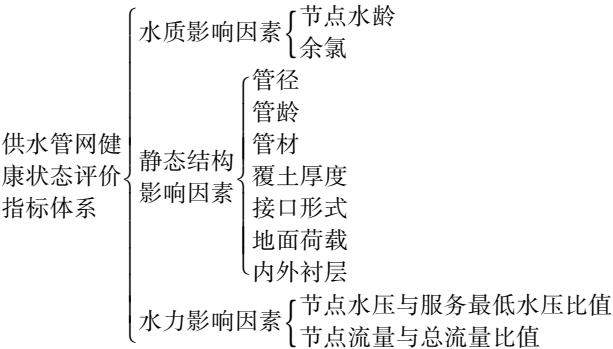


图1 供水管网健康状态评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of health status of water supply network

1.1.2 供水管网静态结构指标数据来源

本文以浙江省云和县供水管网为研究实例,数据源于云和县水利局和云和县供排水公司提供的

2017年云和县供水管网基本属性情况统计资料、2010—2017年云和县供水管网维修情况统计资料、2017年云和县部分供水管道水力、水质监测数据资料、2017年云和县供水管网CAD图等。其中,部分供水管网静态结构影响指标数据需依据相关资料运用专家打分的方法获得^[9-10],共邀请8位专家对管材、接口形式、地面荷载、内外衬层这4个指标按供水管网健康程度进行评分,设定其评分最高值为1,即供水管网健康状态最优;最低评分为0,即供水管网健康状态最差。专家评分汇总情况见表1。

表1 专家评分汇总

Table 1 Summary of expert scores

评价指标	评价项目	专家评价总分	平均得分
管材*	钢管、玻璃钢管	7.2	0.9
	球墨铸铁管	5.4	0.7
	PE管	3.2	0.4
	预应力混凝土管、灰口铸铁管	0.8	0.1
接口形式*	胶圈	7.2	0.9
	法兰接口	4.8	0.6
	铅口	3.2	0.4
	石墨水泥、焊接	1.6	0.2
地面荷载*	草地	7.2	0.9
	人行道、内街	4.8	0.6
	慢车道	3.2	0.4
	快车道	1.6	0.2
内外衬层*	衬膜衬层完好	7.2	0.9
	衬膜部分完好	4.8	0.6
	衬层部分完好	3.2	0.4
	无防护层或破损	0.8	0.1

注:*表示该指标为正向指标。

1.1.3 供水管网水力、水质指标数据来源

真实的供水管网是一个非常复杂且庞大的系统,管网水力、水质数据的采集具有极大的困难性。本文根据云和县供水管网基本属性情况统计资料、2017年云和县部分供水管道水力、水质监测数据资料和云和县供水管网CAD图等基础资料,按照一定的概化原则,对云和县供水管网进行管段概化、节点合并等处理,省略了对水力、水质条件影响较小的管线,保留DN100以上的主要干管,最后运用EPANET软件建立供水管网微观模型,建立供水管网拓扑结构(图2),模拟得到供水管网水力、水质数据。云和县供水管网水力、水质数据指标样本数为108,概况见表2。

1.2 基于因子分析确定贡献度的方法

因子分析可将具有错综复杂关系的变量综合为数量较少的几个因子,用以展现原始变量与因子之间的相互关系^[11]。然后将相关性较强的几个变量归在同一个类中,每一类赋予新的名称成为一个因子,用于反映事物的一个方面或者一个维度^[12]。本文使用因子分析原理中因子对原资料信息的解释性

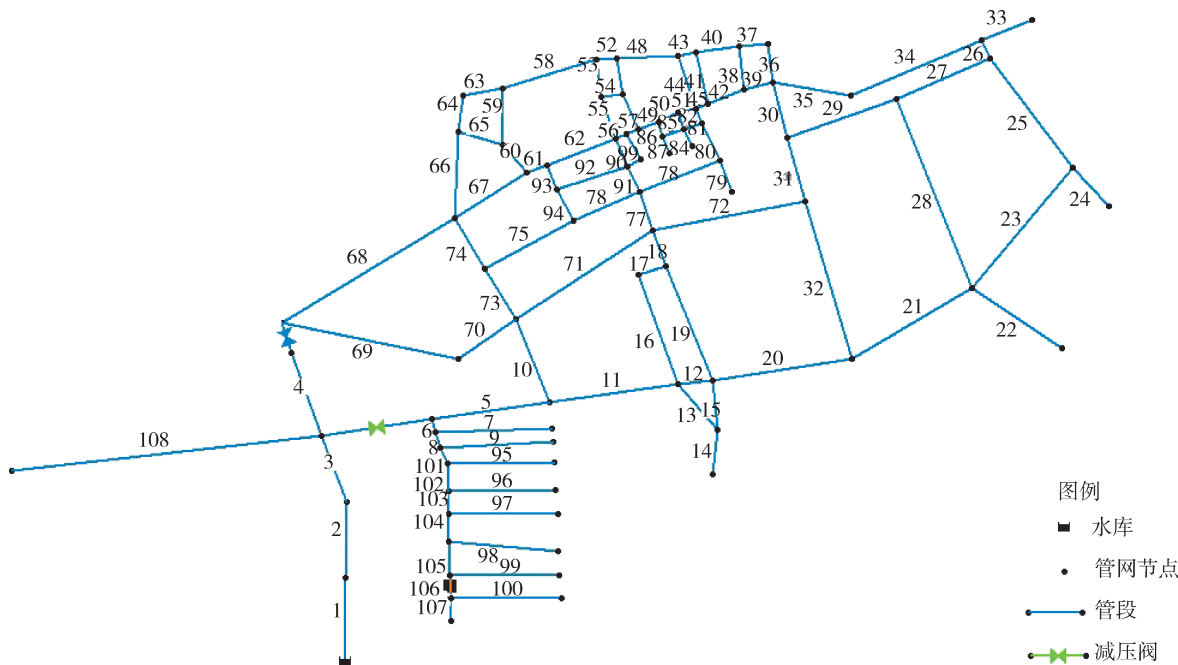


图2 云和县供水管网拓扑结构

Fig.2 Topology of water supply network in Yunhe County

表2 云和县供水管网水力、水质指标概况

Table 2 Overview of hydraulic and water quality indicators of water supply network in Yunhe County

评价指标	余氯 [*]	管龄 [#]	节点压力与服务 最低压力比值 [#]	节点流量与 总流量比值 [#]
最大值	0.421	20.000	16.535	0.035
最小值	0.120	6.000	0.501	0.000
平均值	0.239	9.806	1.426	0.013
标准方差	0.049	2.989	1.945	0.008

注: * 表示该指标为正向指标, # 表示该指标为逆向指标。

的含义,即,因子方差越大,该因子对整个样本的贡献度越大、解释力度越强,通过计算因子得分和因子方差贡献率确定各评价指标对供水管网健康状态的贡献度大小。该方法的步骤为

步骤1 将逆向指标数据添加负号进行正向化处理^[13],在此基础上建立原始数据矩阵。设有 n 根管道作为样本,每根管道有 p 个指标,这样就构成了一个 $n \times p$ 阶的矩阵 $X_{n \times p}$ 。

步骤2 数据标准化。由于不同的评价指标常常具有不同的单位,为了消除量纲和数量级的影响,需要对原始指标进行标准化处理^[14],得到标准化后的各指标数据矩阵 X' ,计算公式为

$$X'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为原始数据矩阵中的元素; $\bar{x}_j$ 为第 j 个评价指标原始数据的平均值; s_j 为第 j 个评价指标原始数据的标准差。

步骤3 计算 $(X'_j)_{n \times p}$ 的相关系数矩阵 R 。

步骤4 用雅克比方法求相关系数矩阵 R 的特征值 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)$ 和相应的特征向量 $\alpha_i = (\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ip})$, 其中 $i = 1, 2, \dots, p$ 。

步骤5 计算因子方差贡献率。因子方差贡献率的计算公式为

$$e_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \quad (i = 1, 2, \dots, m; m < p) \quad (2)$$

因子累计方差贡献率的计算公式为

$$E = \sum_{i=1}^m e_i \quad (i = 1, 2, \dots, m; m < p) \quad (3)$$

式中 m 为 p 个指标经过降维后的因子个数。

步骤6 计算旋转后的因子荷载矩阵。当初因子在原变量上的载荷值都相差不大,各因子的典型代表变量不突出时,容易使因子的意义含糊不清,不利于对因子进行解释^[15]。为了便于对实际问题进行分析,需要进行旋转使因子荷载矩阵中载荷的绝对值向 0 和 1 两个方向分化,从而更清楚地解释因子的含义。因子旋转一般采用方差最大化正交旋转^[16-17]。

步骤7 计算因子得分。计算公式为

$$F_j = \beta_{j1}X'_1 + \beta_{j2}X'_2 + \beta_{j1}X'_2 + \dots + \beta_{jp}X'_p \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中: F_j 为各因子得分; β 为各因子得分系数矩阵。

步骤8 计算各指标贡献度和综合得分。由因子得分系数的含义可知,因子得分系数是样本中各个指标对因子的贡献,而方差贡献率是因子对所有样本方差的代表。因此,因子得分系数与相应方差

贡献率的乘积即为各指标在样本中的贡献^[18],然后再对其进行归一化处理。计算公式为

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^m |\beta_{ji}| e_j}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m |\beta_{ji}| e_j} \tag{5}$$

式中 w_i 为第 i 个指标的贡献度。

根据因子得分和因子方差贡献率计算综合得分:

$$|Z| = |F| \times |e| \tag{6}$$

式中: $|Z|$ 为样本综合得分矩阵; $|F|$ 为因子得分矩阵; $|e|$ 为因子方差贡献率矩阵。

1.3 敏感性分析方法

敏感性分析亦称敏感度分析^[19],研究如何将模型结果的不确定性分配到不同的模型输入参数中,从而筛选出引起模型结果不确定性的主要影响因素,识别和选择关键控制参数,该方法一般用于投资项目评价时分析不确定性因素对项目经济效益指标的影响程度和敏感性程度。分析影响程度的大小称为该属性的敏感性系数^[20],敏感性系数绝对值越大,说明该属性对模型输出的影响越大^[21]。目前,分析敏感性的方法有局部分析法、全局分析法、定性方法和定量方法^[22]。本文利用非参数统计方法计算敏感性系数(敏感度),公式为

$$S_{RCi} = \frac{b_i \sigma_i}{\sigma_y} \tag{7}$$

式中: S_{RCi} 为第 i 个指标评价敏感度; σ_i 和 σ_y 分别为第 i 个指标因子和样本综合得分的标准方差; b_i 则为 y 关于 x 的回归系数。

2 结果与分析

2.1 因子分析结果

在进行因子分析前,首先要检验指标变量因子是否适合做因子分析^[23]。本文利用 SPSS26.0 软件对 11 个供水管网健康评价指标进行 KMO 检验和 Bartlett 球形检验,检验结果表明,抽样适度的 KMO 测定值为 0.659, Bartlett 球形检验显著性为 0.000。根据 Kaiser 常用度量标准,当 KMO 值高于 0.6 时,

整个样本就可以做因子分析,同时 Bartlett 检验的 Sig 即 p 值接近于 0,远小于显著水平 0.05,因此拒绝 Bartlett 球形检验的 0 假设,该样本数据适合做因子分析^[24]。

利用 SPSS 软件计算样本数据旋转后的特征值与因子累计方差贡献率,结果见表 3,可见,提取的 4 个因子旋转后的特征值均大于 1,累计方差贡献率达到了 76.226%,说明提取出来的 4 个因子可以反映 11 个指标当中 76.226% 的信息量,虽然没有大于 80% 的传统经验值,但超过了 75%,总体上因子分析的结果还是可以接受的。

为使各指标更好地解释因子,使得各因子的典型代表指标更加突出显示,利用 SPSS 软件中方差最大化法对因子荷载矩阵进行旋转并按照从大到小的顺序进行排序,结果见表 4。查找相关系数显著性检验表,可以看出在 0.01 显著性水平上,相关系数绝对值大于 0.25,就可以认为此相关系数在 0.01 水平上显著。为科学起见,本文以荷载度 0.5 以上为提取依据,对 4 个因子当中原始指标进行归纳分析,发现因子 1 包括覆土厚度、接口形式和管径 3 个指标,其中覆土厚度对因子 1 的相关度最大且达到了 0.932,相对而言,其他两个指标对因子 1 的相关度就比较小,由荷载矩阵含义可知,该指标与因子 1 越密切,对因子 1 的代表性越高,所以因子 1 可以命名为外部环境对管道静态结构的影响;因子 2 包括管龄、内外衬层、地面荷载和管材,整体而言,管龄、内外衬层和管材都是反映管道内部静态结构的情况,所以因子 2 可以命名为管道内部静态结构影响因素;因子 3 包括节点水龄、余氯、节点压力与服务最低压力比值,整体而言,节点水龄和余氯反映的是管道内水质的情况,所以因子 3 可以命名为水质影响因素;因子 4 包括节点流量与总流量比值,该指标反映的是管道内水压的情况,所以因子 4 可以命名为水力影响因素。

2.2 贡献度计算结果

根据式(4)和式(5),计算各个指标对于整个样本的贡献度并进行排序,具体结果见表 5。由贡献度的含义可知,贡献度越大,该指标对于整个样本评

表 3 SPSS 软件计算结果
Table 3 SPSS software calculation results

因子	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	3.769	34.267	34.267	3.769	34.267	34.267	2.803	25.483	25.483
2	2.387	21.704	55.970	2.387	21.704	55.970	2.395	21.770	47.253
3	1.283	11.665	67.635	1.283	11.665	67.635	1.952	17.744	64.997
4	0.945	8.591	76.226	0.945	8.591	76.226	1.235	11.229	76.226

表4 旋转后的因子荷载矩阵

Table 4 Factor load matrix after rotation

指标	因子1	因子2	因子3	因子4
覆土厚度	0.932	0.169	0.135	-0.119
管径	0.808	-0.169	0.152	0.124
接口形式	-0.708	-0.296	-0.197	0.265
管龄	0.134	0.849	-0.150	0.018
内外衬层	-0.182	0.813	0.130	0.018
地面荷载	0.359	0.693	-0.027	-0.245
管材	0.168	0.552	-0.273	-0.473
节点水龄	0.280	-0.034	0.861	-0.058
余氯	0.472	0.214	0.751	0.067
节点压力与服务最低压力比值	0.048	0.182	-0.625	0.184
节点流量与总流量比值	-0.054	-0.059	-0.249	0.899

表5 贡献度计算结果

Table 5 Contribution calculation results

评价指标	贡献度	累积贡献度	排名
节点水龄	0.08	0.88	9
余氯	0.09	0.46	4
管径	0.12	0.26	2
管龄	0.08	0.80	8
管材	0.08	0.72	7
覆土厚度	0.09	0.64	6
接口形式	0.07	0.94	10
地面荷载	0.06	1.00	11
内外衬层	0.15	0.15	1
节点压力与服务最低压力比值	0.09	0.55	5
节点流量与总流量比值	0.10	0.37	3

价时就越重要,当累积贡献度越大,则说明选取的系列评价指标对于提高样本综合评价结果的全面性和合理性就越好。由表5可见,内外衬层和管径贡献度排名靠前,说明这两个指标对供水管网健康状态的评价非常重要;还发现内外衬层、管径、节点流量与总流量比值、余氯、节点压力与服务最低压力比值、覆土厚度、管材、管龄累计贡献度达到0.80,反映出这8个指标能比较全面和合理地解释供水管网的健康状态,所以在管网健康状态评价时这8个指标属于必选的评价指标,然后再根据实际情况在这8个指标的基础之上增加其他合适的指标,使累积贡献度尽可能接近1。从因子命名角度分析,上述8个指标在4个因子当中均有体现,而且在建立的供水管网健康状态评价指标体系的三大影响因素里均有所表征,说明这8个指标能够对供水管网健康状况做一个基础且相对全面的解释,因此将上述8个指标作为基础必选的评价指标是科学合理的。同时,也反映出单从供水管网静态结构影响因素、管网水力影响因素或管网水质影响因素出发建立供水管网健康状态评价指标体系,并不能很好地诠释供水管网的实际健康状况,而应该同时考虑供水管网静态结构影响因素、管网水力影响因素和管网水质影

响因素,建立“三位一体”(管内-管道-管外)的供水管网健康状态评价指标体系。

2.3 敏感度计算结果

根据式(4)和式(6)计算管道综合得分,利用SPSS26.0软件确定综合得分关于各个指标的回归系数,最后根据式(7)计算各个指标的敏感度并按照从大到小的顺序进行排序,计算结果见表6。由表6可见,余氯和节点流量与总流量比值敏感度排名靠前,说明在这11个指标当中,余氯和节点流量与总流量比值对供水管网健康影响程度较大。为提高评价结果的准确性,应该提高这两个指标的数据精确度。分析两个指标数据来源可以发现,余氯属于水质影响因素,节点流量与总流量比值属于水力影响因素,而管网水力、水质指标数据均源于EPANET软件建模模拟所得,因此,尽量减小模型误差将是提高管网健康评价结果准确性的关键。

表6 敏感度计算结果

Table 6 Sensitivity calculation results

评价指标	敏感度	排名
节点水龄	0.208	5
余氯	0.341	1
管径	0.173	6
管龄	0.247	4
管材	-0.089	10
覆土厚度	0.170	7
接口形式	-0.135	9
地面荷载	0.143	8
内外衬层	0.252	3
节点压力与服务最低压力比值	-0.019	11
节点流量与总流量比值	0.324	2

2.4 敏感度和贡献度结果对比

由于贡献度和敏感度属于不同的领域范畴,不宜直接从计算结果的大小做对比分析。本文着眼于排名结果的变化情况,通过分析各个指标贡献度和敏感度排名的变化来研究各个指标对供水管网健康状态的代表性和敏感性。根据各个指标贡献度和敏感度排名结果(表5、表6),可见,有6个指标贡献度排名和敏感度排名均在前8位,分别是内外衬层、管径、节点流量与总流量比值、余氯、覆土厚度、管龄,除节点压力与服务最低压力比值排名差异大以外,其余评价指标排名差值均在4及以内,排名差异属于可接受范围,因此可以认为指标贡献度越大,其对应的敏感度一般也偏大。节点压力与服务最低压力比值贡献度排名虽较靠前,但是它的敏感度排名却处于最末,说明该指标在允许的范围内变化对供水管网健康状态评价结果影响程度较小,但是如果该指标过小,满足不了用户对于用水水压的需求,如果指标过大,则容易发生爆管,因此,该指标对于供水

3 结 论

本文运用统计学的方法,把 11 个供水管网健康状态评价指标划分为 4 层,即外部环境对管道静态结构影响因素、管道内部静态结构影响因素、水质影响因素、水力影响因素;分析了各个指标对于整个样本的贡献度大小,提取出了 8 个最为重要和基础的指标,分别是内外衬层、管径、节点流量与总流量比值、余氯、节点压力与服务最低压力比值、覆土厚度、管材、管龄;在此基础上分析了各个指标敏感度,筛选出了贡献度和敏感度排名均在前 8 位的 6 个指标,分别是内外衬层、管径、节点流量与总流量比值、余氯、覆土厚度、管龄。为提高评价结果的科学性和准确性,贡献度前 8 位的指标应该作为基础的必选指标,并且应尽量提升内外衬层、管径、节点流量与总流量比值、余氯、覆土厚度、管龄数据的精度。

参考文献:

[1] 郭玉章. 供水管网综合性能评价指标的研究[D]. 天津:天津大学,2014.

[2] 刘波,汪紫薇,王文鹏,等. 我国城市用水效率关键指标时空格局分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 534-541. (LIU Bo, WANG Ziwei, WANG Wenpeng, et al. Spatiotemporal characteristics analysis of major indicators of urban water use efficiencies over mainland China[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(6): 534-541. (in Chinese))

[3] PELLETIER G, MAILHOT A, VILLENEUVE J P. Modeling water pipe breaks; three case studies[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(2): 115-123.

[4] 张现国,汪慧贞,王俊岭,等. 供水管网漏损评价指标筛选与计算实例[J]. 给水排水, 2011, 47(1): 158-161. (ZHANG Xianguo, WANG Huizhen, WANG Junling, et al. Screening and calculation examples of leakage evaluation indexes of water supply network[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(1): 158-161. (in Chinese))

[5] 余鹏钧. 南方某市供水管网健康评价指标体系及模型构建研究[D]. 广州:广东工业大学,2013.

[6] 代焕芳. 供水管网漏失评价指标研究[D]. 北京:清华大学,2017.

[7] 王旭晔,黄廷林,刘勇,等. 供水管网水质分区聚类分析中的指标三步筛选法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(5): 708-714. (WANG Xumian, HUANG Tinglin, LIU Yong, et al. The three-step screening method of indexes for cluster analysis in water supply system's subregion[J]. Journal of Xi'an University of

Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2009, 41(5): 708-714. (in Chinese))

[8] 刘思然. 供水管网健康状态动态评价方法研究及应用[D]. 大连:辽宁师范大学,2018.

[9] 孙乃聪. 专家评分法在方案技术分析中的应用[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2013, 16(1): 125-128. (SUN Naicong. Application of expert evaluation method in technical analysis[J]. Journal of Xi'an University of Arts and Science(Natural Science Edition), 2013, 16(1): 125-128. (in Chinese))

[10] 丁明江,吴长春. 专家评分法在油气管道风险分析中的应用[J]. 油气田地面工程, 2004(1): 10-15. (DING Mingjiang, WU Changchun. Application of expert evaluation method in risk analysis of oil and gas pipelines[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2004(1): 10-15. (in Chinese))

[11] 王成辉,江生忠. 我国保险业竞争力诊断指标体系及其应用[J]. 南开经济研究, 2006(5): 116-131. (WANG Chenghui, JIANG Shengzhong. An indexes system of Chinese insurance industry's competitiveness and its application[J]. Nankai Economic Studies, 2006(5): 116-131. (in Chinese))

[12] 徐姣姣,陈波,高庆宁. 信息分析方法:因子分析[J]. 科技创业月刊, 2012, 25(4): 21-22. (XU Jiaojiao, CHEN Bo, GAO Qingning. Information analysis method-factor analysis[J]. Pioneering with Science & Technology Monthly, 2012, 25(4): 21-22. (in Chinese))

[13] 刘新华. 因子分析中数据正向化处理的必要性及其软件实现[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2009, 23(9): 152-155. (LIU Xinhua. Necessity and software operation of positive management in factor analysis[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2009, 23(9): 152-155. (in Chinese))

[14] 叶明确,杨亚娟. 主成分综合评价法的误区识别及其改进[J]. 数量经济技术经济研究, 2016, 33(10): 142-153. (YE Mingque, YANG Yajuan. Erroneous zone identification and improvement of synthesis evaluation based on principal component analysis[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2016, 33(10): 142-153. (in Chinese))

[15] 南英子. 实证分析中运用主成分分析法应注意的几个问题[J]. 统计与决策, 2009(21): 155-156. (NAN Yingzi. Several problems that should be paid attention to in applying the principal component analysis method in empirical analysis[J]. Statistics & Decision, 2009(21): 155-156. (in Chinese))

[16] SALTELLI A, TARANTOLA S, CAMPOLONGO F, et al. Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models[M]. Chichester: John Wiley Sons Ltd. Publication, 2004.

[17] 李彩霞,盖地. 上市公司非税成本的识别与计量:基于

- 因子分析法的非税成本指数构建[J]. 河北经贸大学学报, 2014, 35(4): 43-50. (LI Caixia, GAI Di. The non-tax costs' identification and measurement of the listed companies[J]. Journal of Hebei University of Economics and Business, 2014, 35(4): 43-50. (in Chinese))
- [18] 刘修英, 黄功学, 郑志宏, 等. 贾鲁河郑州段水质评价和污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 40-46. (LIU Xiuying, HUANG Gongxue, ZHENG Zhihong, et al. Water quality evaluation and pollution source apportionment to Zhengzhou section of Jialu River[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 40-46. (in Chinese))
- [19] 胥瑞晨, 逢勇, 胡祉冰, 等. 太湖水龄与水力停留时间关系及参数敏感性[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 34-39. (XU Ruichen, PANG Yong, HU Zhibing, et al. Relationship between water age and hydraulic residence time in Taihu Lake and parameter sensitivity[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 34-39. (in Chinese))
- [20] 李炎隆, 张敬华, 张再望, 等. 基于正交试验法的高模量区 E-B 模型参数敏感性分析[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(1): 34-38. (LI Yanlong, ZHANG Jinghua, ZHANG Zaiwang, et al. Sensitivity analysis of E-B model parameters in high modulus zone based on orthogonal test method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1): 34-38. (in Chinese))
- [21] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 9-16. (CAI Yi, XING Yan, HU Dan. On sensitivity analysis[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2008, 44(1): 9-16.)
- [22] 曾家俊, 麦叶鹏, 李志威, 等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 15-21. (ZENG Jiajun, MAI Yepeng, LI Zhiwei, et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 15-21. (in Chinese))
- [23] 周及, 关卫省, 付林涛. 基于多元统计的西安市河流水质评价及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 79-84. (ZHOU Ji, GUAN Weisheng, FU Lintao. Water quality assessment and pollution source analysis of Xi'an river based on multivariate statistics[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 79-84. (in Chinese))
- [24] 王娜, 王星洲. 基于 SPSS 因子分析和熵权分析的国有企业绩效评价指标体系研究: 来自湖北省国有企业的实证[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2015(6): 80-88. (WANG Na, WANG Xingzhou. Empirical research of state-owned enterprises performance evaluation system based on SPSS factor analysis and entropy analysis: from the state-owned enterprises in Hubei Province[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2015(6): 80-88. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-08-03 编辑: 王芳)

(上接第 53 页)

- [12] 张斌武, 康鸿博, 关秀翠. 基于虚拟水及营养学的水资源优化配置[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 30-35. (ZHANG Binwu, KANG Hongbo, GUAN Xiucui. Optimized allocation of water resources based on virtual water and nutrition[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(1): 30-35. (in Chinese))
- [13] REN Chongfeng, GUO Ping, TAN Qian, et al. A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 85-94.
- [14] LI Y F, LI Y P, HUANG G H, et al. Modeling for environmental economic management systems under uncertainty[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 192-198.
- [15] ZHOU M, CHEN Q, CAI Y L. Optimizing the industrial structure of a watershed in association with economic-environmental consideration: an inexact fuzzy multi-objective programming model[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 42: 116-131.
- [16] 贾凤, 索梅芹, 邱庆泰, 等. 区间多目标规划模型在邯郸市主城区水资源优化配置中的应用[J]. 人民珠江, 2017, 38(10): 1-6. (JIA Feng, SUO Meiqin, QIU Qingtai, et al. Application of interval multi-objective programming model on water resources allocation in the main urban area of Handan City[J]. Pearl River, 2017, 38(10): 1-6. (in Chinese))
- [17] 钟金鸣, 苏爱文, 武雪静, 等. 基于模糊多目标规划模型的水资源优化配置[J]. 人民珠江, 2018, 39(7): 27-33. (ZHONG Jinming, SU Aiwen, WU Xuejing, et al. Optimal allocation of water resources based on fuzzy multi-objective programming model[J]. Pearl River, 2018, 39(7): 27-33. (in Chinese))
- [18] 郭怀成. 环境规划方法与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [19] 成波, 李怀恩, 徐梅梅. 西安市农业灌溉水效益分摊系数及效益的时间变化研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 244-248. (CHENG Bo, LI Huaen, XU Meimei. Study on the temporal variations of benefit sharing coefficient and benefit of agricultural irrigation water in Xi'an[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(1): 244-248. (in Chinese))
- [20] 占毅. 基于可持续发展理念的浙江省水资源优化配置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

(收稿日期: 2020-09-28 编辑: 熊水斌)