

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0069

王逸可,方国华,张钰,等.基于改进模糊综合评价的河流型水源地风险评估[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):670-681. WANG Y,FANG G H,ZHANG Y,et al.Risk assessment of river-type water source areas based on an improved fuzzy comprehensive evaluation[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(4):670-681.(in Chinese)

基于改进模糊综合评价的河流型水源地风险评估

王逸可,方国华,张钰,黄显峰

(河海大学水利水电学院,南京 210098)

摘要:为科学评估河流型水源地风险水平,有效保障河流型水源地安全,在识别河流型水源地保护区潜在风险源的基础上,借助压力-状态-响应模型,从水质污染、水量短缺、生态环境、管理保护等 4 个方面构建包含 22 个指标的河流型水源地风险评价指标体系,并分析确定相应指标风险度阈值,采用熵权-层次分析法对指标组合赋权,基于有效度原则和加权平均原则对传统的模糊评价方法加以改进,并建立改进的模糊综合评价模型进行水源地风险评估。以南京市长江子汇洲水源地为例进行研究,结果表明,长江子汇洲水源地风险度评估结果为 0.216 7,处于较低风险水平,与实际情况相符合,验证了模型的适用性。

关键词:河流型水源地;风险评价指标体系;Delphi-AHP 法;熵值法;改进模糊综合评价;风险评估

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



饮水安全是一项关系国计民生的重要工作,如何全面识别水源地面临的各种风险源,并通过有效的风险评估手段,量化分析水源地风险并加以防控,实现水源地健康运行与功能永续利用,是全社会共同关注的热点问题^[1]。在我国,河流型水源地供水量最大,同时由于流域时空跨度大、污染物成分复杂、污染源分布广泛、污染事故突发性较强而受到重点关注。河流长期受到工业污水、农业面源污染和居民生活废水等常规污染,通航河段上可能还会面临船舶化学品和石油泄漏、暴雨径流污染和工业事故排放等突发性水污染风险^[2]。因此,开展河流型水源地风险综合评估研究,进而提高水源地风险管理水平,对保障饮水安全具有重要的现实意义^[3]。

国内外关于水源地风险的研究与实践始于 20 世纪末至 21 世纪初。2005 年以来,用于水源地风

险评估的水环境质量评价方法主要有单因子评价法、模糊综合评价法、灰色关联分析法、人工神经网络法等。衷平等^[4]采用主成分分析法和改进灰色关联度法对石羊河流域水资源短缺风险指标进行定量筛选,为进一步的风险评价奠定了基础;祝慧娜等^[5]从河流水环境脆弱性和危害性的角度出发,采用模糊综合评价法求得湘江 14 个断面的水环境污染风险水平;毛飞剑等^[6]采用单因子水质标识指数法分析评价东江河源段的水质并确定其污染风险;Li 等^[7]提出一个基于 k 均质聚类分析和集对分析的综合模型来评估水源地丹江口十堰地区的水污染风险;Cordão 等^[8]提出一种结合多准则决策分析(MCDA)和地理信息系统(GIS)的方法来评估巴西 Campina Grande 城市水资源短缺风险的水平。可以看出,目前的水源地风险评估研究大多集中在水环境风险,而河流型水源地存在多种风险类型^[9],针

收稿日期:2021-12-28 修回日期:2022-03-25 网络出版时间:2022-04-11

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220409.1830.004.html

基金项目:江苏水利科技项目(2018033)

作者简介:王逸可(1998—),女,湖南常德人,主要从事水资源规划及利用、水资源管理与保护等方面的研究。E-mail:1103055103@qq.com

通信作者:方国华(1964—),女,安徽定远人,教授,博士生导师,主要从事水资源规划及利用、水资源管理与保护等方面的研究。E-mail:hhufgh@163.com

对河流型水源地开展的综合风险评估及实例分析还比较少。

河流型水源地涉及的风险因素众多,具有较强的不确定性和随机性,各个指标的风险度划分、评价等级确定都具有一定的模糊性。模糊综合评价法以模糊推理为基础,能同时应用于主、客观指标的分析评价,能对评价问题中的模糊性特征进行很好的描述,适用性较强,可应用于水源地的多要素、多层次风险评估中。但传统模糊综合评价方法中采用的最大隶属度原则忽略了最大隶属度外其他指标的综合作用,与多指标综合评价的全面性原则背离,评价过程存在信息的丢失,导致评价结果不够合理。为此,本文以河流型水源地为研究对象,引入风险评估理论,识别潜在的污染源,构建层次分明、逻辑清晰的3层递阶结构风险评价指标体系,并在传统模糊综合评价模型的基础上,引入有效度原则和加权平均原则,提出改进的模糊综合评价方法对河流型水源地风险进行评估。以南京市长江子汇洲水源地为例进行研究,研究结果可为河流型水源地的饮水安全保障提供科学支撑。

1 河流型水源地风险评价指标体系及评价标准

1.1 评价指标体系

风险评估是选取切实的评价指标和准则、制定相关评估体系的过程,并系统地对环境潜在的风险与危害进行定性或定量的评估。开展水源地风险评估能够量化水源地及周边区域的风险,可定量管理水源地风险,实现风险分级,对风险管理进行优先性排序^[10]。评价指标体系的构建从水源地风险评估基本内容出发,对水源地的风险影响机制、风险源分布和风险可能产生的后果进行梳理,考虑水源地结构和功能特性,使评价指标体系能全面合理地体现水源地风险综合情况^[11]。

河流型水源地系统是由资源、环境、经济、社会等因素相互制约、相互联系、相互支持的有机开放系统。2011年,水利部印发水资源〔2011〕329号文件,指出全国重要饮用水水源地达标建设的总体目标是:水量保证,水质合格,监控完备,制度健全。结合水源地本身的自然属性、社会属性及其对应的功能特性,本文从水质污染、水量短缺、生态环境与管理保护等4个方面分析河流型水源地风险,依据综合性、科学性、系统性、可操作性、定

性与定量结合等原则,识别河流型水源地风险源,系统分析对水源地风险状态产生影响的各个因素,基于压力-状态-响应概念模型(Pressure-State-Response),建立水质污染-水量短缺-生态环境-管理保护复合系统,见图1,查询相关资料并通过专家咨询的方法,去除难以获取、可操作性低的定量指标和无法构成数据序列的冗余指标,建立由目标层、准则层、指标层组成的河流型水源地风险评价指标体系,见表1。

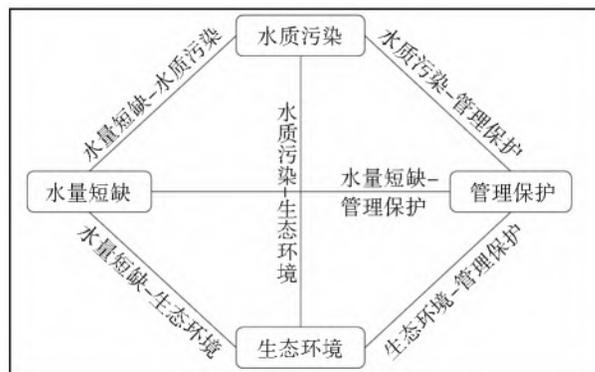


图1 水质污染-水量短缺-生态环境-管理保护复合系统

Fig. 1 Water quality pollution-water shortage-ecological environment-management and protection composite system

1.2 评价等级与标准

参考国内外划分标准和水源地实际情况,结合水源地风险内涵与特性,将指标划分为5个等级,分别用低、较低、一般、较高、高风险度来描述,用I、II、III、IV、V表示^[12]。I说明水源地受到风险因子的影响非常小,带来的影响可以忽略不计;III说明水源地受到风险因子的影响一般,通过一定的风险控制措施可将风险水平降低在可接受范围内;V说明水源地受到风险因子的影响极大,一旦风险发生,会对社会、经济、环境产生严重影响;II和IV分别表示介于低和一般、一般和高之间。另外,为便于定量描述指标,引入风险度值来表示指标等级标准,具体分级界限为: $0 < I \leq 0.2$, $0.2 < II \leq 0.4$, $0.4 < III \leq 0.6$, $0.6 < IV \leq 0.8$, $0.8 < V \leq 1.0$ 。

针对河流型水源地,参考国内外已有的评价标准,如:国际、国家、行业和地方规定的标准;背景和本底标准;类比标准;科学研究中被广泛使用,得到公认的标准;通过专家咨询方法获得的其他标准;等等。确定河流型水源地风险评价指标体系对应不同等级(低风险度、较低风险度、一般风险度、较高风险度及高风险度)的划分标准,见表2。

表 1 河流型水源地风险评价指标体系

Tab. 1 Risk evaluation index system for river-type water source areas

目标层	准则层	指标层	指标含义
水质污染风险 X_1		一般污染物指数 A_1	水质综合指数 I_{WQ}
		有毒污染物指数 A_2	水质单项指数最大值
		突发污染事故发生概率 A_3	发生突发性事件导致水体受到污染的概率
		排污口分布情况 A_4	保护区外排污口的分布位置及污染物的排放量级
		取水口水质达标率 A_5	取水口水质监测合格次数与水质监测总次数之比
		水源地水质监测频率 A_6	每年水源地的水质基本项检测次数
水量短缺风险 X_2		人口自然增长率 B_1	一年内人口自然增加数与平均总人口数之比
		水量供需比 B_2	水源地供水量与所供地区需水量之比
		易损性 B_3	平均缺水量与平均需水量之比
		水资源开发率 B_4	流域或区域用水量与多年平均水资源总量之比
		年度引水量保证率 B_5	引水量在多年引水中能得到充分满足的年数出现的概率
		工程供水能力 B_6	饮用水源地现状供水量与设计供水量之比
生态环境风险 X_3		农药化肥使用强度 C_1	供水区域农药化肥施用总量与农田耕地总面积之比
		植被覆盖率 C_2	植被覆盖面积与区域土地总面积之比
		水土流失率 C_3	水土流失面积与土地总面积之比
		水环境自净能力 C_4	以水源地保护区陆面范围内年产水模数作为该指标特征量
管理保护风险 X_4		水源地所在工程供水规模 D_1	工程规模等级和供水人口数量大小
		管理人员技术水平 D_2	管理人员是否受过高等教育,是否能够熟练操作仪器
		水源地管理保护机构 D_3	管护机构、制度是否完善和各部门职能是否明确
		法律法规体系建设与执行力度 D_4	是否贯彻执行国家有关法规条例和制定配套管理保护条例
		应急水源地建设 D_5	应急水源地的启动速度、供水保证率、日常保护措施的情况
		应急监测系统建设 D_6	监测断面布设情况、监测方式和是否有应急专家队伍

表 2 河流型水源地风险评价指标标准值

Tab. 2 Standard value of risk assessment index for river-type water source areas

指标	指标类型	低风险度	较低风险度	一般风险度	较高风险度	高风险度
A_1	逆向	[0,1)	[1,2)	[2,3)	[3,4)	[4,5)
A_2	逆向	[0,1)	[1,2)	[2,3)	[3,4)	[4,5)
$A_5/\%$	正向	(98,100]	(95,98]	(90,95]	(85,90]	[0,85]
$A_6/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$	正向	[24,36]	[18,24)	[12,18)	[6,12)	[0,6)
$B_1/\%$	逆向	$(-\infty, 0)$	[0,1)	[1,5)	[5,10)	[10,15]
B_2	正向	[2, $+\infty$)	[1.5,2)	[1,1.5)	[0.5,1)	(0,0.5)
$B_3/\%$	逆向	[0,3)	(3,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]
$B_4/\%$	逆向	[0,10)	[10,30)	[30,40)	[40,50)	[50,100)
$B_5/\%$	正向	[100,60)	[60,50)	[50,40)	[40,30)	[30,20)
$B_6/\%$	逆向	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100)
$C_1/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	逆向	[0,450)	[450,650)	[650,750)	[750,850)	[850,1500)
$C_2/\%$	正向	[60,100]	[45,60)	[30,45)	[10,30)	[0,10)
$C_3/\%$	逆向	[0,8)	[8,10)	[10,30)	[30,40)	[40,500)
C_4	正向	[7, $+\infty$)	[5,7)	[3,5)	[2,3)	[0,2)
A_3	逆向					
A_4	逆向					
D_1	逆向					
D_2	逆向					
D_3	逆向	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1)
D_4	逆向					
D_5	逆向					
D_6	逆向					

2 河流型水源地风险评估模型

河流型水源地风险评估属于典型的多因素评价问题,通过熵权-层次分析法对各指标进行组合赋权,充分考虑指标隶属度间的差距,对常规的模糊综合评价方法进行改进,并运用改进的模糊综合评价方法评估水源地风险等级。

2.1 熵权-层次分析法组合赋权

目前用于确定权重的方法主要有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法与决策专家具备的专业素质和知识经验息息相关,可能因主观人为因素导致评估结果具有波动性;客观赋权法能修正主观赋值法计算的偏差,但无法表现出指标之间的重要性程度^[13-14]。

为兼顾主观偏好和客观存在属性^[15],使评估结果更具可靠性,采用主客观组合权重。主客观组合权重指融合专家或者决策者的知识、经验及偏好主观信息,同时结合评价指标原始数据等客观信息计算得到的相对重要性程度,能较全面地反映决策偏好与评价指标历史数据等主客观信息。采用 Delphi-AHP 法计算主观权重,采用熵值法计算客观权重,继而得到水源地风险评价指标组合权重。

Delphi 建立在专家组给定的指标权重基础上,经过互相之间的反馈和对权重的修改确定符合实际的结果。AHP 是一种实用的多准则决策方法,将复杂问题分解成各个组成因素,又将这些因素按照支配关系分组,组成具有层次性的递阶结构,通过两两比较的方式确定各层次中各因素的相对重要性,避免了赋权过程中的任意性^[16]。Delphi-AHP 法计算主观权重 w_i 的步骤包括^[17]:构建递阶层次结构;构建比较判断矩阵;根据判断矩阵确定权重;层次单排序及一致性检验;层次总排序及一致性检验。

熵值法通过计算熵值来对事件的无序程度与随机性产生判断,权重计算结果可信程度高。计算客观权重 v_i 的步骤^[18]包括指标标准化处理、计算第 j 个指标的熵值和熵权。

最后,综合主客观权重可得到组合权重^[19],即先采用 AHP 法计算评价指标体系中二级指标的主观权重 w_i ,再采用熵值法计算二级指标的客观权重 v_i 。指标体系中一级指标权重采用 AHP 法计算,二级指标权重采用组合赋权法计算,得到组合权重 a ,计算公式为

$$a = w_i v_i \quad (1)$$

对权重归一化处理为

$$a = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^m a_i} = \frac{w_i v_i}{\sum_{i=1}^m w_i v_i} \quad (2)$$

2.2 改进的模糊综合评价模型构建

2.2.1 传统模糊综合评价模型

在河流型水源地风险评估的过程中,应急水源地建设情况、应急监测系统建设情况等定性指标难以准确量化,无法做到精准地进行定量考核,而模糊综合评价理论能将定性评价转为定量评价,并根据模糊因素的评判得到评估结果。因此,本文采用模糊综合评价对水源地存在的风险展开评估。

模糊综合评价模型构建与计算步骤如下^[20-21]:

步骤 1. 确定评判因素集: u 在文中为河流型水源地综合风险, $u_i (i=1, 2, \dots, 22)$ 为影响事物评判值的第 i 个因素,即指标体系中的 22 项指标。

步骤 2. 确定评语集:根据水源地的风险特征将水源地风险评估标准分为 5 个等级,为方便量化,引入风险度来对应风险等级评语集:

$$V = \{ \text{低风险, 较低风险, 一般风险, 较高风险, 高风险} \} = \\ \{ [0, 0.2), [0.2, 0.4), [0.4, 0.6), [0.6, 0.8), [0.8, 1.0) \}$$

步骤 3. 确定隶属度,进而确定模糊判断矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

模糊综合判断矩阵 R 中 r_{mm} 是依据各评价指标的实际值对照其各自的分级标准,通过各评价指标对应于各等级的隶属函数推求而得的。定性指标依据专家打分表计算得各评价因素的隶属度向量。定量指标则是根据降半梯形公式建立隶属函数,将模糊评价指标转变成直观的评价指标。假设 v_j 和 v_{j+1} 为相邻两级标准值, $v_{j+1} > v_j$, x_i 为指标实测值,并将评价指标分为正向指标和逆向指标来计算隶属度。

正向指标,即指标实际值越大、综合评判程度越好的指标。计算公式为

$$r_j = \begin{cases} 1 - r_{j-1}, & v_{j-1} < x_i \leq v_j \\ \frac{x_i - v_j}{v_{j+1} - v_j}, & v_j < x_i \leq v_{j+1} \\ 0, & x_i \leq v_{j-1} \text{ 或 } x_i \geq v_{j+1} \end{cases} \quad (4)$$

逆向指标,即指标实际值越小、综合评判程度越好的指标。计算公式为

$$r_j = \begin{cases} 1 - r_{j-1}, v_{j-1} < x_i \leq v_j \\ \frac{v_{j+1} - x_i}{v_{j+1} - v_j}, v_j < x_i < v_{j+1} \\ 0, x_i \leq v_{j-1} \text{ 或 } x_i \geq v_{j+1} \end{cases} \quad (5)$$

步骤 4. 确定指标的权向量。

评价指标的权向量为 $\mathbf{A}_i = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。其中, a_i 是因素 u_i 对模糊子集的隶属度,且需归一化, $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。根据前述,本文采用组合赋权法来确定权重,将 AHP 法与熵值法结合。

步骤 5. 模糊综合评价。

合成各子集的权向量 \mathbf{A}_i 与模糊综合矩阵 \mathbf{R}_i , 得到每一类风险的模糊综合评价结果向量 \mathbf{B}_i :

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{R}_i = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = \{b_1, b_2, \dots, b_m\} \quad (6)$$

根据最大隶属度原则对评估结果进行判定, $b_k = \max\{b_1, b_2, \dots, b_m\}$, $k = 1, 2, \dots, m$, b_k 所对应的评估等级就是每一类风险的最终评估结论。

由各子集的模糊综合矩阵 \mathbf{R}_i 建立模糊综合矩阵 \mathbf{R} 。设 u_1, u_2, \dots, u_k 的权向量为 $\boldsymbol{\omega}$, $\omega_i = (\omega_i, \omega_2, \dots, \omega_k)$, 且满足 $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$, 合成 u_1, u_2, \dots, u_k 的权向量 $\boldsymbol{\omega}$ 和模糊综合矩阵 \mathbf{R} , 得到多层次的模糊综合评价结果向量 \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \omega_1 \cdot \mathbf{R}_1 \\ \omega_2 \cdot \mathbf{R}_2 \\ \vdots \\ \omega_k \cdot \mathbf{R}_k \end{bmatrix} = \{c_1, c_2, \dots, c_m\} \quad (7)$$

同样根据最大隶属度原则对计算结果进行判定, 得到最终评估结果。

2.2.2 改进的模糊综合评价模型

最大隶属度原则适用于综合评价矩阵中各隶属度相差较大时的情况, 而综合评价矩阵中各隶属度相差较小时, 最大隶属度原则会因舍弃其他隶属度的客观存在而失效或低效, 难以反映真实的评价结果。因此, 为更加真实地反映评价结果等级, 定义最大隶属度原则的有效度 $\alpha^{[22]}$ 为

$$\alpha = \frac{n\beta - 1}{2\gamma(n-1)} \quad (8)$$

式中: n 为综合评价矩阵中的元素个数; β 为最大隶属度; γ 为第二大隶属度。

当 $\alpha \geq 0.5$ 时, 依据最大隶属度原则较可靠; 当 $\alpha < 0.5$ 时, 若仍依据最大隶属度原则易导致结果真实性下降, 因此可以采用加权平均原则, 既能强调最大隶属度的影响, 又能兼顾所有隶属度应有的作用。该原则是对加权平均算子计算出的基于隶属度和待定系数的综合数值进行加权运算, 从而确定风险等级, 能充分保留原始和过程数据, 避免评价信息的丢失, 并能将风险等级进行量化处理, 使评价结果更为直观^[23-24]。可表示为

$$E = \frac{\sum_{m=1}^n e_m \times b_m^{k'}}{\sum_{m=1}^n b_m^{k'}} \quad (9)$$

式中: E 为指标模糊综合评价结果; b_m 为隶属于第 m 等级的隶属度; e_m 为指标不同等级的具体分值, 5 个等级从低到高分别取风险区间边界值 0、0.2、0.4、0.6、0.8; k' 为待定系数, 取 $k' = 1$, 且由上式可看出当 k' 趋近于无穷大时, 上式转化为最大隶属度原则的计算公式。

3 实例研究

3.1 研究区概况

长江流域是我国重要的水源地、水电能源基地、黄金水道和生物宝库^[25]。长江南京段位于长江下游中段靠下部, 从安徽省东部贯入南京市境内, 长约 97 km。分布在长江南京段的六大河流型水源地, 其供水量占南京市城区及郊区集中式供水总量的 80%^[26]。同时, 长江是南水北调东线工程的引水来源, 其水质变差、突发污染事故等问题的产生会严重影响流域及更广范围的人民生活安全、社会经济发展和稳定。

南京市长江子汇洲水源地位于长江江宁铜井保留区, 该保留区位于铜井河口至江宁河口, 总长度 13 km。子汇洲水源地地理位置见图 2。在长江子汇洲水源地内有滨江水厂取水口, 处于新济州河段新生洲右汊南岸, 上承马鞍山河段, 下连南京河段。滨江水厂供水能力为 45 万 m^3/d , 与江宁水务集团有限公司的另外一座开发区水厂供水管网形成了互通, 供水范围为江宁区东部、南部(江宁街道、禄口街道、淳化街道、湖熟街道、横溪街道、谷里街道)和溧水区、镇江市部分区域。



图2 南京市长江子汇洲水源地地理位置

Fig. 2 Geographical location of Zihuizhou water source area of Yangtze River in Nanjing

3.2 风险评估范围、时段及指标数值

将水源地准保护区外 20 km 缓冲区内的陆域、水域作为风险评价范围,子汇洲水源地保护区范围见图 3,选取 2019 年作为水源地风险评价时段。据《南京市统计年鉴(2019)》《南京市水资源公报

(2019)》等相关资料,确定长江子汇洲水源地风险评价指标中的定量指标数据见表 3,定性指标数据是邀请 10 位经验丰富且具有权威性的专家根据评价等级并结合子汇洲水源地定性指标的实际情况打分评定后取的加权平均结果,见表 4。

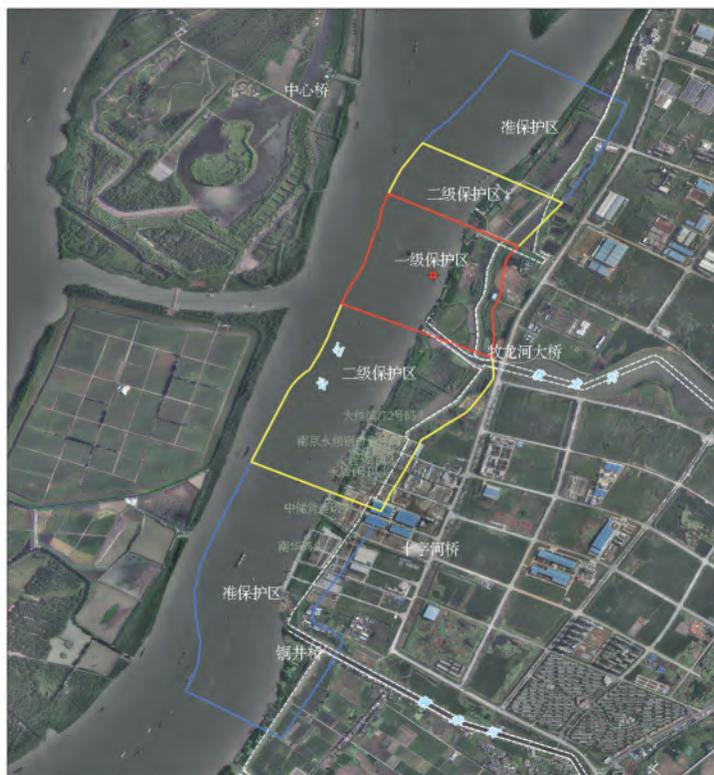


图3 南京市长江子汇洲水源地保护区范围

Fig. 3 Protected area of Zihuizhou water source area of Yangtze River in Nanjing

表 3 长江子汇洲水源地风险评价定量指标

Tab. 3 Numerical value of quantitative index for risk assessment of Zihuizhou water source area of Yangtze River

评价指标	指标数值	标准化指标数值	评价指标	指标数值	标准化指标数值
A_1	0.89	0.178	$B_4/\%$	8.65	0.173
A_2	1.22	0.244	$B_5/\%$	98	0.19
$A_5/\%$	100	0	$B_6/\%$	40.9	0.409
$A_6/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$	24	0.2	$C_1/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	226.23	0.101
$B_1/\%$	6.3	0.652	$C_2/\%$	43.4	0.421
B_2	2.36	0.2	$C_3/\%$	8.09	0.209
$B_3/\%$	0	0	C_4	4.28	0.572

表 4 长江子汇洲水源地风险评价定性指标数值

Tab. 4 Numerical value of qualitative index for risk assessment of Zihuizhou water source area of Yangtze River

评价指标	标准化指标数值	评价指标	标准化指标数值
A_3	0.50	D_3	0.06
A_4	0.31	D_4	0.16
D_1	0.07	D_5	0.07
D_2	0.08	D_6	0.22

3.3 指标权重计算

借助 MATLAB 编程软件,采用 AHP 法确定一级指标的主观权重,采用 AHP 法和熵值法分别

确定二级指标的主观和客观权重,并利用式(1)、式(2)对应的组合赋权方法确定二级指标的综合权重,计算结果见表 5 和图 4。

表 5 长江子汇洲水源地风险评价体系中各指标权重

Tab. 5 Weight of each index in risk assessment system for Zihuizhou water source area of Yangtze River

目标层	权重	准则层	一级权重	指标层	二级权重
长江子汇洲水源地风险评估(O)	1.0	水质污染风险 X_1	0.472 8	一般污染物指数 A_1	0.118 0
				有毒污染物指数 A_2	0.134 2
				突发污染事故发生概率 A_3	0.055 7
				排污口分布情况 A_4	0.035 5
				取水口水质达标率 A_5	0.099 5
				水源地水质监测频率 A_6	0.029 9
		水量短缺风险 X_2	0.169 9	人口自然增长率 B_1	0.006 4
				水量供需比 B_2	0.056 4
				易损率 B_3	0.047 2
				水资源开发率 B_4	0.012 1
				年度引水量保证率 B_5	0.020 3
				工程供水能力 B_6	0.027 5
		生态环境风险 X_3	0.284 4	农药化肥使用强度 C_1	0.077 5
				植被覆盖率 C_2	0.030 8
				水土流失率 C_3	0.047 2
				水环境自净能力 C_4	0.128 9
		管理保护风险 X_4	0.072 9	水源地所在工程规模 D_1	0.003 1
				管理人员专业水平 D_2	0.006 9
				水源地管理与保护机构 D_3	0.006 5
				法律法规体系建设与执行力度 D_4	0.013 1
				应急水源地建设 D_5	0.021 8
				应急监测系统建设 D_6	0.021 5

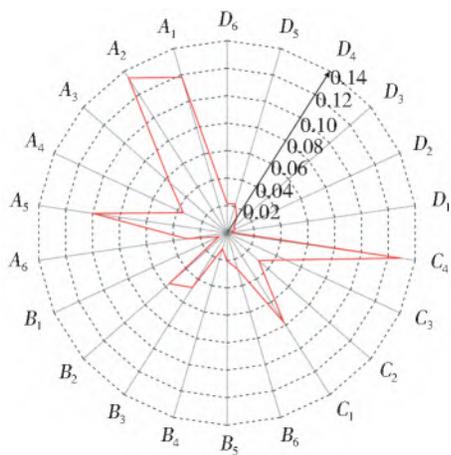


图4 长江子汇洲水源地风险评价体系指标权重

Fig.4 Index weight of risk assessment system for Zihuizhou water source area of Yangtze River

3.4 评价指标模糊综合隶属度矩阵计算

根据长江子汇洲水源地风险评价指标体系中各评价指标的实际值对照其各自的分级标准,依据2.2中的公式确定模糊综合隶属度矩阵 R , 计算结果见表6。

3.5 评价结果及分析

根据改进模糊综合评价模型公式计算长江子汇洲水源地风险等级,结果见表7。

从总体上看,长江子汇洲水源地风险度综合评估结果为0.2167,属于较低风险。长江子汇洲水源地建设完善、管理到位,计算结果与实际情况符合,有较高可信度。

表6 长江子汇洲水源地风险指标模糊综合隶属度矩阵 R

Tab.6 Fuzzy comprehensive membership degree matrix R of risk index of Zihuizhou water source area of Yangtze River

风险指标	风险等级	模糊综合隶属度矩阵					
		V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	
水质污染 风险 X_1	一般污染物指数 A_1	低	0.11	0.89	0	0	0
	有毒污染物指数 A_2	较低	0	0.78	0.22	0	0
	突发污染事故发生概率 A_3	一般	0	0	0.5	0.5	0
	排污口分布情况 A_4	较低	0	0.5	0.5	0	0
	取水口水质达标率 A_5	低	1	0	0	0	0
	水源地水质监测频率 A_6	较低	0	1	0	0	0
水量短缺 风险 X_2	人口自然增长率 B_1	较高	0	0	0	0.74	0.26
	水量供需比 B_2	较低	1	0	0	0	0
	易损率 B_3	低	1	0	0	0	0
	水资源开发率 B_4	低	0.135	0.865	0	0	0
	年度引水量保证率 B_5	低	0.95	0.05	0	0	0
	工程供水能力 B_6	一般	0	0	0.955	0.045	0
生态环境 风险 X_3	农药化肥使用强度 C_1	低	0.497	0.503	0	0	0
	植被覆盖率 C_2	一般	0	0	0.873	0.127	0
	水土流失率 C_3	较低	0	0.955	0.045	0	0
	水环境自净能力 C_4	一般	0	0	0.64	0.36	0
管理保护 风险 X_4	水源地所在工程规模 D_1	低	0.65	0.35	0	0	0
	管理人员专业水平 D_2	低	0.6	0.4	0	0	0
	水源地管理与保护机构 D_3	低	0.7	0.3	0	0	0
	法律法规体系建设与执行力度 D_4	低	0.2	0.7	0.1	0	0
	应急水源地建设 D_5	低	0.8	0.2	0	0	0
	应急监测系统建设 D_6	较低	0	0.9	0.1	0	0

具体来看,水质污染风险处于较低风险度水平,指标层6个指标中突发污染事故发生概率 A_3 的风险等级为一般,其余指标均为低或较低风险。长江子汇洲水源地保护区附近存在功能多样的码头渡口和水源地取水口工厂企业,包括滨江码头、华能码

头、中储货运码头和南华码头等,且航线繁忙,货物吞吐量大。在交通布局方面,长江南京段需承担航运等任务,所以船运船舶等移动风险源也是不容忽视的潜在风险。目前园区内尚未发生造成重大污染的突发性事故。另外,水源地一、二级保护区内没有

任何排污口,但准保护区外存在码头、企业、排污口和可能对水体产生污染的建设设施,也会对水源地水质造成一定的污染。为加强水质风险管控,水源地水质监测在进行实验室水质取样抽检的同时,江

宁区水务局、环保局在滨江水厂取水口附近安装了水质自动监测系统,可实现 10 个参数 24 h 的连续动态监测,基本满足子汇洲水源地全方位的水质监控需求。

表 7 长江子汇洲水源地风险等级计算结果

Tab. 7 Calculation results of risk levels of Zihuizhou water source area of Yangtze River

风险类别	模糊综合评价矩阵	传统模糊综合评价风险等级	有效度	改进模糊综合评价结果	改进模糊综合评价风险等级
水质污染	[0.237 9 0.544 3 0.158 9 0.058 9 0]	较低	0.904 5	—	较低
水量短缺	[0.733 2 0.067 4 0.154 5 0.035 1 0.009 8]	低	2.157 4	—	低
生态环境	[0.135 4 0.295 7 0.392 0 0.176 9 0]	一般	0.405 8	0.322 1	较低
管理保护	[0.422 2 0.530 4 0.047 4 0 0]	较低	0.489 1	0.125 0	低
综合风险	[0.306 3 0.391 6 0.216 3 0.084 1 0.001 7]	较低	0.391 0	0.216 7	较低

水量短缺风险处于低风险水平,指标层 6 个指标中人口自然增长率 B_1 为较高风险,工程供水能力 B_6 为一般风险,其余指标均为低风险。随着现代社会经济高质量、跨越式发展,工农业发展和人民生活的需水量都日益增加,人口自然增长率较大也对水量供需平衡造成一定影响。同时,选取的 2019 年为 60 年一遇干旱年份,降水量大幅降低,而长江子汇洲水源地的供水规模依然能够满足城市居民生活用水需求,供水情况较稳定,并且长江水量丰富,在枯水年来临时也能确保水源地的年度引水量,未来应进一步考虑供水区域人口数量、经济体量持续增加而带来的潜在水资源短缺风险。

生态环境风险处于较低风险水平,指标层的植被覆盖率 C_2 和水环境自净能力 C_4 为一般风险,其余指标为低或较低风险。子汇洲水源地一级保护区内植被覆盖率达 90% 以上,水源地保护区外 20 km 缓冲区域的土地开发利用率高,导致植被覆盖率一定程度偏低,存在土壤侵蚀和水土流失现象,致使水源地附近生态环境承受一定程度破坏,进而对水源地安全造成负面影响,应继续做好水土流失治理工作,采取建设生态环境保障工程等措施。水环境自净能力受年度来水量影响,2019 年为枯水年,来水量较小导致其具有较大风险,丰水年的风险会相应降低。

管理保护风险处于低风险水平,指标层的 6 个指标均为低或较低风险,说明子汇洲水源地在水源地管理方面做得比较全面和完善,对应的风险度值为 4 个方面中最小。子汇洲水源地设置了专门的管护机构,同时实行行政首长负责制,各部门启动联动机制,针对子汇洲水源地出台了水源地安全评估制度和长效管护制度。关于应急能力方面,布局了夹江双闸水源和赵村水库备用水源地,能满足应急用

水需求,也制定了专门的应急预案,应急监测能力达到规范要求。

子汇洲水源地综合风险处于较低风险水平,水源地安全状况良好。目前生态环境风险度评价结果为 0.322 1,与水质污染、水量短缺、管理保护相比,问题较为明显,应不断增加环保投资力度,为水源地周边生态环境提供切实的保障。水源地管护机构滨江水厂应积极联合其他部门,针对具体现象实施相应风险控制措施,最大程度降低存在的水污染风险,同时强化水源地长效管护机制,不断提高原水水质应急与常规监控水平,定期实施应急演练,保障水源地安全。

对比传统与改进的模糊综合评价结果,生态环境风险、管理保护风险的传统模糊综合评价风险等级为一般和较低,改进模糊综合评价风险等级为较低和低,综合风险的传统与改进模糊综合评价风险等级相同,均为较低等级,改进后的综合风险度结果为 0.216 7,位于低和较低等级的过渡位置。结合子汇洲水源地风险现状可知,传统模糊综合评价会造成风险等级偏高,偏离实际数值,而改进的模糊综合评价结果更贴近实际情况。这是因为传统模糊综合评价法采用取大取小算子和最大隶属度原则,使最终的评价结果仅保留权重系数或隶属度,造成另一部分隶属度丢失,影响评价的准确性。改进的模糊综合评价方法采用相乘相加算子与加权平均原则,综合分析 with 处理权重矩阵和隶属矩阵,能避免隶属度丢失并可对评价风险等级进行量化,得到的评价结果更趋于实际,改进方法在评估水源地风险时更加科学、合理。

4 结 论

从水质污染、水量短缺、生态环境、管理保护等 4 个方面构建了河流型水源地风险评价指标体系。

基于模糊综合评价理论,依据有效度原则和加权平均原则,对传统模糊综合评价模型加以改进,建立河流型水源地风险模糊综合评价模型,充分考虑了所有指标隶属度的作用,减小了误差,提高了评价风险等级的科学性和客观性。

以改进模糊综合评价模型对长江子汇洲水源地进行实例研究,确定其风险评估结果等级处于较低风险水平,总体状况表现良好。从结果可知,现存隐患主要为子汇洲水源地的码头企业分布紧密、植被覆盖率较低等风险因子,在生态环境风险控制上有较大进步空间,可通过采取工业及生活污水处理工程建设、及时排查突发性水污染事故隐患、建设生态环境保护工程等风险管控措施降低子汇洲水源地的风险水平。

参考文献(References):

- [1] 朱党生,张建永,程红光,等. 城市饮用水水源地安全评价(I):评价指标和方法[J]. 水利学报,2010,41(7):778-785. (ZHU D S,ZHANG J Y,CHENG H G, et al. Security assessment of urban drinking water sources I: Indicator system and assessment method[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(7):778-785. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.07.011.
- [2] 杨晓晓. 突发性水污染事件应急管理研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020. (YANG X X. Study on emergency management of water pollution incident[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020. (in Chinese)) DOI:10.27493/d.cnki.gdzzy.2020.001265.
- [3] 朱党生,张建永,史晓新,等. 城市饮用水水源地安全评价(II):全国评价[J]. 水利学报,2010,41(8):914-920. (ZHU D S,ZHANG J Y,SHI X X, et al. Security assessment of urban drinking water sources II: Security assessment for cities in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(8):914-920. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.08.013.
- [4] 衷平,沈珍瑶,杨志峰,等. 石羊河流域水资源短缺风险敏感因子的确定[J]. 干旱区资源与环境,2005(2):81-86. (ZHONG P,SHEN Z Y,YANG Z F, et al. Determining the sensitive factors for water resource scarcity risk in Shiyang River basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2005(2):81-86. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1003-7578.2005.02.016.
- [5] 祝慧娜,袁兴中,梁婕,等. 河流水环境污染风险模糊综合评价模型[J]. 中国环境科学,2011,31(3):516-521. (ZHU H N,YUAN X Z,LIANG J, et al. An integrated model for assessing the risk of water environmental pollution based on fuzziness[J]. China Environmental Science,2011,31(3):516-521. (in Chinese))
- [6] 毛飞剑,何义亮,徐智敏,等. 基于单因子水质标识指数法的东江河源段水质评价[J]. 安全与环境学报,2014,14(5):327-331. (MAO F J,HE Y L,XU Z M, et al. Water quality evaluation of Heyuan reach of Dongjiang River based on the single factor water quality identification index[J]. Journal of Safety and Environment,2014,14(5):327-331. (in Chinese)) DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2014.05.071.
- [7] LI C H,SUN L,JIA J X, et al. Risk assessment of water pollution sources based on an integrated *k*-means clustering and set pair analysis method in the region of Shiyang,China. [J]. The Science of the Total Environment,2016,557:307-316. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.03.069.
- [8] CORDÃO M J D S,RUFINO I A A,ALVES P B R, et al. Water shortage risk mapping: a GIS-MCDA approach for a medium-sized city in the Brazilian semi-arid region[J]. Urban Water Journal,2020,17(7):642-655. DOI:10.1080/1573062X.2020.1804596.
- [9] 衣强. 集中式地表饮用水水源地安全评价方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2007. (YI Q. A method for security assessment of centralized surface source water area[D]. Beijing:China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2007. (in Chinese))
- [10] 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,LIU T F. Reflection on risk management of urban drinking water sources[J]. Water Resources Protection,2015,31(2):95-98. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.10046933.2015.02.019.
- [11] 孙滔滔,赵鑫,李再华,等. 水源地潜在风险源评估指标体系及其管理平台研发[J]. 中国农村水利水电,2019(11):94-97,109. (SUN T T,ZHAO X,LI Z H, et al. The development of potential risk source assessment index system and management platform for water source,2019(11):94-97,109. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2019.11.019.
- [12] 杨子桐,黄显峰,方国华,等. 基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J]. 水利水电科技进展,2021,41(4):60-66,80. (YANG Z T,HUANG X F,FANG G H, et al. Benefit evaluation of Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(4):60-66,80. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2021.04.010.
- [13] 李萌. 河流型饮用水水源地安全评价方法研究[D]. 武汉:湖北大学,2015. (LI M. Evaluation research of water safety on river drinking water resources[D].

- Wuhan; Hubei University, 2015. (in Chinese))
- [14] 李宛谕, 黄显峰, 阎玮, 等. 基于组合权重云模型的调水工程洪水资源利用风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 57-65. (LI W Y, HUANG X F, YAN W, et al. Risk assessment of flood resources utilization in water transfer project based on combined weight and cloud model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2018, 16(5): 57-65. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0125.
- [15] 孙周亮, 刘艳丽, 刘冀, 等. 基于博弈论组合赋权法的澜沧江-湄公河水量分配[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 1-5. (SUN Z L, LIU Y L, LIU J, et al. Water allocation of Lancang-Mekong River based on game theory combination weighting method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(1): 1-5. (in Chinese))
- [16] 王媛, 刘佳豪, 郝泽嘉, 等. 基于 AHP-云模型的大型输水倒虹吸安全综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 79-84. (WANG Y, LIU J H, HAO Z J, et al. Comprehensive safety evaluation of large water conveyance inverted siphon based on AHP-cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 79-84. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2022. 02. 012.
- [17] 王富强, 马尚钰, 赵衡, 等. 基于 AHP 和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 67-74. (WANG F Q, MA S Y, ZHAO H, et al. A fuzzy comprehensive evaluation of water cycle health in Beijing-Tianjin-Hebei region based on combined weights of AHP and entropy method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2021, 19(1): 67-74. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2021. 0006.
- [18] 杨子桐, 黄显峰, 方国华, 等. 基于云模型的堤防工程风险评价方法与应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(7): 572-580. YANG Z T, HUANG X F, FANG G H, et al. Risk assessment method and application of embankment engineering based on cloud model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(7): 572-580. (in Chinese)) DOI: 10. 14188/j. 1671-8844. 2019-07-002.
- [19] 张德彬, 刘国东, 王亮, 等. 基于博弈论组合赋权的 TOPSIS 模型在地下水水质评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 46-50, 62. (ZHANG D B, LIU G D, WANG L, et al. Application of TOPSIS model based on game theory to groundwater quality evaluation, 2018, 35(7): 46-50, 62. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20161231.
- [20] 李晓英, 江崇秀, 张琛. 基于云模型的城市资源水价研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 215-221. (LI X Y, JIANG C X, ZHANG C. Study on city resource water price based on cloud model, 2020, 48(3): 215-221. (in Chinese)) DOI: 10. 3876/j. issn. 10001980. 2020. 03. 005.
- [21] 蒋光昱, 王忠静, 索滢. 西北典型节水灌溉技术综合性能的层次分析与模糊综合评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(12): 981-989. (JIANG G Y, WANG Z J, SUO Y. Hierarchical analysis and fuzzy evaluation of comprehensive performance of typical water-saving irrigation techniques in northwest China [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59(12): 981-989. (in Chinese)) DOI: 10. 16511/j. cnki. qhdxxb. 2019. 26. 015.
- [22] 朱小飞, 王永君, 李大军. 模糊评价中最大隶属度原则有效性检验[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(5): 135-137, 143. (ZHU X F, WANG Y J, LI D J. The effectiveness test of the maximum membership principle in fuzzy comprehensive evaluation, 2016, 39(5): 135-137, 143. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-5867. 2016. 05. 039.
- [23] 师博颖. 长江江苏段饮用水源地健康评价与风险管控[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018. (SHI B Y. Health assessment and risk management of drinking water sources in Jiangsu reach of the Yangtze River[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [24] 孙博, 肖汝诚. 基于层次分析-模糊综合评价法的桥梁火灾风险评估体系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1619-1625. (SUN B, XIAO R C. Bridge fire risk assessment system based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11): 1619-1625. (in Chinese)) DOI: 10. 11908/j. issn. 0253-374x. 2015. 11. 002.
- [25] 长江水利委员会. 长江流域综合规划(2012—2030年)[Z]. 武汉: 长江水利委员会. 2012. (Yangtze River Water Resources Commission. Comprehensive planning for the Yangtze River basin (2012-2030) [Z]. Wuhan: Yangtze River Water Resources Commission, 2012. (in Chinese))
- [26] 沈乐. 长江南京段六大饮用水水源地水质变化及原因[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 71-75. (SHEN L. Water quality variation and its causes in six drinking water source regions in Nanjing reach of Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 71-75. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2012. 01. 017.

Risk assessment of river-type water source areas based on an improved fuzzy comprehensive evaluation

WANG Yike, FANG Guohua, ZHANG Yu, HUANG Xianfeng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: River-type water source area is an important ecological environment foundation that can provide abundant and clean water sources for the normal work and operation of cities, which simultaneously is threatened by various risk sources with the advancement of urbanization and the continuous development of society. Therefore, all possible influencing factors should be considered when evaluating the risk of river-type water source areas.

A risk assessment index system of river-type water source areas was constructed including twenty-two indicators from the four aspects of water pollution, water shortage, ecological environment, and management protection with the aid of the Pressure-State-Response model based on principles of comprehensiveness, practicability, maneuverability, and identifying potential risk sources, understanding the connotation of risks of water source areas and risk identification methods to scientifically assess the risk level of river-type water source areas and effectively ensure the safety of river-type water source areas. Further, the corresponding index risk threshold was analyzed and determined to achieve quantitative or qualitative expression. The weight of indicators was assigned and calculated by the combination weighting method of entropy weight and the analytic hierarchy process. Based on the fuzzy comprehensive evaluation theory, the traditional fuzzy comprehensive evaluation model was improved according to the validity degree principle and weighted average principle, and an improved fuzzy comprehensive evaluation model of river-type water source areas was established, which fully considered the role of all index membership, reduced the error, and enhanced the scientificity and objectivity of evaluating risk levels.

Taking the Zihuizhou water source area of the Yangtze River in Nanjing as an example, the improved fuzzy comprehensive evaluation method was used to quantitatively evaluate the risk status of land and water area in the 20 km buffer zone outside the quasi-protection area of Zihuizhou water source area in 2019. The calculated results showed that the comprehensive risk assessment result of Zihuizhou water source area was 0.2167, which belonged to the lower risk level. Specifically, the risk of water pollution was at the lower risk level, the risk of water shortage was at the low-risk level, the risk of ecological environment was at the lower risk level, and the risk of management and protection was at the low-risk level. Among these four aspects, the risk to the ecological environment was the most obvious, and the investment in environmental protection should be continuously increased to provide a practical guarantee for the ecological environment around the water source area. Overall, the construction and management of the Zihuizhou water source area of the Yangtze River were good, and the calculated results were consistent with the actual situation, which had high reliability.

The risk assessment index system can comprehensively evaluate the risk of river-type water source areas from four aspects: water pollution, water shortage, ecological environment and management and protection. The validity degree principle and the weighted average principle were used to improve the traditional fuzzy comprehensive evaluation model for assessing the risk of river-type water source areas. The risk assessment results in Zihuizhou water source area of the Yangtze River were determined to be at the lower risk level, and the overall management was good. It can be concluded that the existing hidden dangers were mainly the risk factors such as the close distribution of dock enterprises and low vegetation coverage in Zihuizhou water source area, and there was a great space for progress in ecological environment risk control. The risk level of Zihuizhou water source can be descended through risk control measures such as the construction of industrial and domestic sewage treatment projects, timely investigation of sudden water pollution accidents, and construction of ecological environment protection projects.

Key words: river-type water source; risk evaluation index system; Delphi-AHP method; entropy method; improved fuzzy comprehensive evaluation; risk assessment