

基于 BWM-CRITIC-TOPSIS 的幸福河湖综合评价模型

朱 洁¹,冯建刚²,高玉琴¹,郭子琛³,郑 航¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学农业科学与工程学院,江苏 南京 210098;
3. 江苏苏邑设计集团有限公司,江苏 南京 210012)

摘要:在界定幸福河湖概念及内涵的基础上,构建了包括安全河湖、健康河湖、富民河湖、文化河湖 4 个方面共 17 项指标的幸福河湖综合评价指标体系。运用最优最劣法(BWM 法)确定指标主观权重,运用 CRITIC 法确定指标客观权重,并通过最小鉴别信息原理得到组合权重。基于 TOPSIS 法建立幸福河湖综合评价模型,并通过评价浙江省某市 2015—2019 年幸福河湖建设水平对模型进行了验证。结果表明:BWM-CRITIC-TOPSIS 模型可有效评价幸福河湖建设水平,评价结果与实际情况相符;湿地占地比例、水资源开发利用效率等指标限制了该市幸福河湖等级的提升。提出了促进人水和谐、合理利用水资源、提高水资源利用效率等建议。

关键词:幸福河湖评价;最优最劣法;CRITIC;TOPSIS

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)06-0008-07

Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS//ZHU Jie¹, FENG Jiangang², GAO Yuqin¹, GUO Zichen³, ZHENG Hang¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Su Yi Design Group Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract: Based on the definition of the concept and connotation for happy rivers and lakes, a comprehensive evaluation index system of happy rivers and lakes was constructed including 17 indicators in the four aspects of safe rivers and lakes, healthy rivers and lakes, prosperous rivers and lakes, and cultural rivers and lakes. The BWM method and CRITIC method were used to determine the subjective and objective weights of the index, respectively, and the combined weight was obtained through the principle of minimum identification information. A comprehensive evaluation model of happy rivers and lakes was established based on the TOPSIS method to evaluate its construction level in a city of Zhejiang Province from 2015 to 2019. The results show that BWM-CRITIC-TOPSIS model can effectively evaluate the construction level of happy rivers and lakes, and the evaluation results are consistent with the actual situation. Indicators such as wetland land occupation ratio, water resources development and utilization rate restrict the improvement of happy rivers and lakes grade in the city. Suggestions to promote the harmony between human and water, make rational use of water resources, and improve the utilization efficiency of water resources were put forward.

Key words: happy rivers and lakes evaluation;BWM;CRITIC;TOPSIS

2019 年,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上,发出了让黄河成为造福人民的幸福河的伟大号召,为新时期河湖治理保护指明了方向^[1]。许多学者对幸福河湖的概念、内涵等基础问题进行了研究与探索,并开展了幸福河湖评价等方面的研究。左其亭等^[2]认为幸福河就是造福人民的河流。胡玮^[3]认为幸福河湖是让人赏心悦目、心情愉悦,能满足国民经济高质量发展、人民高端需求的健康河湖,其实质是人与自然和谐,实现治水新格局,关键在于河流湖泊保护与治理。陈茂山等^[4]认为要从人的角度、河流的角度、人与河流的关系 3 方面把握幸福河内涵。幸福河研究课题组^[5]将幸福河定义为能够维持河流自身健康,支撑流域和区域经济社会高质量发展,体现人水和谐,让流域内人民具有高度安全感、获得感与满意度的河流。韩宇平等^[6]从流域自然属性、社会经济属性、人水和谐关系 3 方面出发,选取 26 项指标构建幸福河评价指标体系,并基于需求层次论对黄河流域进行评

价;左其亨等^[7]以安全运行、持续供给、生态健康、和谐发展4大判断准则为框架构建幸福河评价指标体系,采用“单指标量化-多指标综合-多准则集成”方法,定量计算黄河流域幸福河指数;程常高等^[8]以河流状态、河流压力、河流管理、经济服务4个方面作为准则层,选取20项指标构建幸福河湖评价指标体系,并将其应用于太湖流域;贡力等^[9]针对幸福河湖建设目标,建立了包含23个核心指标和27个备选指标的指标体系,并基于ERG需求模型对幸福河湖进行综合评价;陈隆吉等^[10]构建河流健康性和宜居性两方面协调发展的幸福河建设评价模型,并利用该模型评估了飞云江幸福河建设状况。现阶段幸福河湖研究主要从概念、内涵方面进行理论探索,关于建立符合研究区河湖与区域社会经济环境协调发展特点的评价指标体系及评价方法仍欠缺。

TOPSIS模型是根据评价对象与理想方案的相对接近程度对评价对象整体排序,以确定相对优劣的评价方法,其具有对原始数据利用充分、计算简单易行、评价结果较为可靠的优点,被广泛应用于河长制绩效^[11]、水资源承载力^[12]、城市防洪体系^[13]和河流健康^[14]等生态文明建设领域的效益评价,幸福河湖作为新时代河湖治理的新目标,是生态文明建设理念的重要体现。本文以幸福河湖概念及内涵为基础,从安全河湖、健康河湖、富民河湖及文化河湖4个方面构建幸福河湖综合评价指标体系,构建BWM-CRITIC-TOPSIS评价模型,并应用于浙江省某市幸福河湖综合评价,以期为幸福河湖评价与建设提供技术支撑。

1 幸福河湖的概念及内涵

幸福河湖的研究对象是河流湖泊系统,主体是河流湖泊,客体是河湖载体及其相关事物。在新时代的江河治理需求下,幸福河湖已经不是纯粹的包含河湖生态环境保护的范畴,而是更加具有主观性、区域性与动态性,需要综合安全、环境、生态、文化、经济等多方面协调发展的新概念^[7]。结合心理学中幸福的概念,幸福河湖应是能够让居民获得幸福感的河湖。在心理基础需求和发展需求两方面,一方面通过人水关系提供群众心理满意度,另一方面需要通过人类的主观能动性,尤其是先进的河湖治理措施,保证河湖服务功能持续提供的能力^[15]。

本文认为幸福河湖是指能够防御灾害、提供稳定安全供水、水环境优美、人水关系和谐,让人民具有高度安全感与满意感的安全河湖、健康河湖、富民河湖和文化河湖的集合与统称。幸福河湖是基于可持续发展框架进行的,其内涵主要包括以下4个方面:

a. 幸福河湖是安全河湖。河流湖泊在调蓄洪水、供给水源等方面为人类社会提供安全稳定的发展条件。幸福河湖既需要维持洪涝灾害影响可控,又能够为人类提供安全的水资源。

b. 幸福河湖是健康河湖。河流湖泊生态系统不仅能够净化污染物,又能够为附近居民提供良好宜居的生活环境,而保证河湖健康、生态系统良性循环是持续提供服务功能的前提。

c. 幸福河湖是富民河湖。河流湖泊提供丰富的水资源支撑经济社会发展,但对河湖开发利用应有一定限度,做到人与河湖和谐发展,托底经济健康长效发展。

d. 幸福河湖是文化河湖。河流湖泊有其独特的自然景观与河湖文化,幸福河湖的水文化能够使公众获得满足感,同时积极推进水文化建设,以增强人们保护河湖的意识,传承水文化。

综上,幸福河湖内涵可表述为:保障河湖安全及水资源供需平衡、维持河湖生态系统健康稳定、持续满足人类社会需求、承载丰富河湖文化,实现人与河湖和谐相处。

2 幸福河湖综合评价指标体系

幸福河湖评价是评估幸福河湖建设成果的标尺,其指标体系科学与否直接影响到综合评价的结论。本文依据幸福河湖概念及内涵,遵循完整性与简洁性并重、科学性与可操作性并重、通用性与针对性并重的原则,以安全河湖、健康河湖、富民河湖、文化河湖4方面内涵作为准则层,构建包括目标层、准则层和指标层的3层评价指标体系。综合运用文献阅读法和理论分析法初选指标,采用专家咨询法进行指标优选,最终确定17项指标,构建幸福河湖综合评价指标体系,如图1所示。

3 幸福河湖评价模型

3.1 确定评价指标集

依据评价指标体系(图1),分层次建立评价指标集,包括目标层、准则层、指标层。

3.2 确定评价标准集

参考国内外评价标准,结合有关河长制、河湖健康以及幸福河湖相关文献,将幸福河湖评价标准划分为5个等级:I级(优)、II级(良)、III级(中)、IV级(差)和V级(极差)。具体分级标准如表1所示。

3.3 确定指标权重

3.3.1 最优最劣法确定主观权重

最优最劣法(BWM)是荷兰学者 Rezaei^[16]提出的一种确定指标主观权重的方法,其通过从一系列

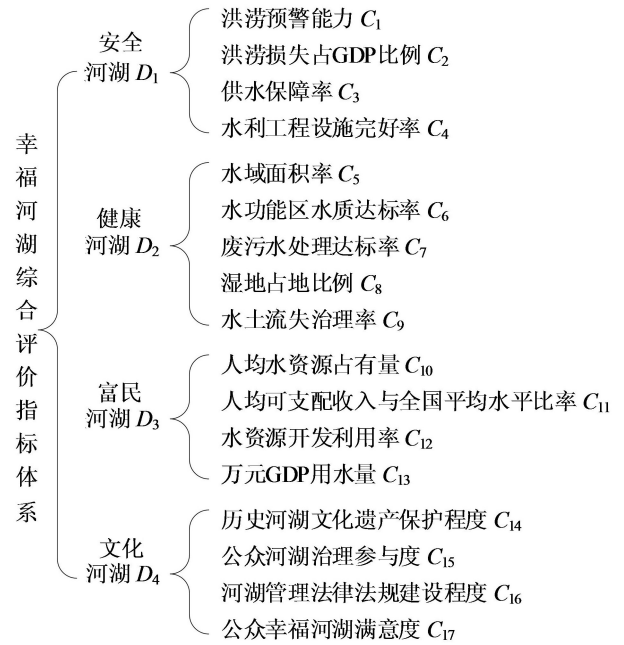


图1 幸福河湖综合评价指标体系

指标中选出最优和最劣两种指标,分别与其余指标进行比较,能够简化烦琐过程,减少数据量,降低由于数据过多而导致的失误,更易通过一致性检验,提高可靠性^[17-18]。具体步骤如下:

步骤1 在准则层中根据专家组意见选取最优(最重要)指标 D_B 和最差(最不重要)指标 D_W 。

步骤2 采用1~9分制确定最优指标相对于其他指标的重要性。通过最优指标和其他指标相对重要度的两两比较,分别得到对应的标度,表示为比较向量 $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$ 。 a_{Bj} 表示最优指标 D_B 相对于指标 D_j 的重要性,1表示两者同等重要,9表示最优指标相对后者极端重要,显然 $a_{BB} = 1$ 。

步骤3 采用1~9分制确定其他指标相对于最差指标的重要性。通过其他指标和最差指标相对重要度的两两比较,分别得到对应的标度,表示为比较向量 $A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T$ 。 a_{jW} 表示指标 D_j 相对于最差指标 D_W 的重要性,1表示两者同等重要,9表示前者相对最差指标极端重要,显然 $a_{WW} = 1$ 。

步骤4 采用线性 BWM 模型,得出最优指标权重:

$$\min \max \{ |w'_B - a_{Bj}w'_j|, |w'_j - a_{jW}w'_W| \} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^n w'_j = 1 \\ w'_j \geq 0 \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: w'_B 为最优指标主观权重; w'_W 为最差指标主观权重; w'_j 为指标 j 的主观权重。模型可转化为

$$\begin{aligned} & \min \xi \\ & \text{s. t. } \begin{cases} |w'_B - a_{Bj}w'_j| \leq \xi & (j = 1, 2, \dots, n) \\ |w'_j - a_{jW}w'_W| \leq \xi & (j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n w'_j = 1 \\ w'_j \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 ξ 为求解权重结果的指示值。 ξ 值越接近 0,表明所求解的权重结果误差越小,也说明越可信。求解式(4),可以得到各评估准则层指标的最优主观权重 ($w'_{D_1}, w'_{D_2}, w'_{D_3}, w'_{D_4}$) 和 ξ 。

步骤5 求解指标集 C 的最优主观权重。对于不同的准则层评价指标,分别重复步骤1~4,求出最优主观权重 ($w'_{C_1}, w'_{C_2}, \dots, w'_{C_{17}}$) 和 ξ ,并根据 ξ 值判断是否可信。最后可求得评价指标集 C 的最优主观权重 w'_j ,公式为

$$w'_j = \begin{cases} w'_{C_j}w'_{D_1} & 1 \leq j \leq 4 \\ w'_{C_j}w'_{D_2} & 5 \leq j \leq 9 \\ w'_{C_j}w'_{D_3} & 10 \leq j \leq 13 \\ w'_{C_j}w'_{D_4} & 14 \leq j \leq 17 \end{cases} \quad (5)$$

3.3.2 CRITIC 法确定客观权重

CRITIC 法是由 Diakoulaki 等^[19]提出的一种客观权重赋值法。该方法基于评价指标的对比强度与指标之间的冲突性反映指标信息量,对比强度与冲突性越大则反映信息量越多,相应指标权重越

表1 评价指标分级标准

等级	C_1	$C_2/\%$	$C_3/\%$	$C_4/\%$	$C_5/\%$	$C_6/\%$	$C_7/\%$	$C_8/\%$	$C_9/\%$
I 级	1.0	[0,1]	[95,100]	[98,100]	>10	[95,100]	[95,100]	>5	[95,100]
II 级	0.8	(1,2.5]	[80,95)	[85,98)	[6,10)	[80,95)	[90,95)	(3,5]	[80,95)
III 级	0.6	(2.5,4]	[65,80)	[75,85)	[4,6)	[60,80)	[85,90)	(2,3]	[60,80)
IV 级	0.4	(4,5.5]	[50,65)	[60,75)	[2,4)	[40,60)	[70,85)	(1,2]	[40,60)
V 级	0.2	>5.5	<50	<60	[0,2)	<40	<70	[0,1]	<40

等级	C_{10}/m^3	$C_{11}/\%$	$C_{12}/\%$	C_{13}/m^3	$C_{14}/\%$	$C_{15}/\%$	$C_{16}/\%$	$C_{17}/\%$
I 级	>2200	>120	[25,30]	[0,24)	>20	>10	[90,100]	[95,100]
II 级	[1700,2200)	[100,120)	[20,25)或(30,40]	[24,60)	[15,20)	[5,10)	[70,90)	[80,95)
III 级	[1000,1700)	[80,100)	[10,20)或(40,50]	[60,140)	[10,15)	[2,5)	[40,70)	[60,80)
IV 级	[500,1000)	[60,80)	[5,10)或(50,60]	[140,220)	[5,10)	[1,2)	[20,40)	[30,60)
V 级	[0,500)	[0,60)	<5 或>60	>220	[0,5)	[0,1)	<20	<30

大^[20]。该方法结合了相关性权数和信息权数,具有显著的优越性。

步骤 1 假设有 m 个待评价样本, n 项评价指标,建立幸福河湖综合评价的原始数据矩阵为 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤 2 为消除各指标量纲不同、数量级不同等因素对数据分析的影响,对数据进行标准化处理,得到标准化矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。对于指标取值越大越优的正向指标和指标取值越小越优的逆向指标,标准化处理公式分别为

$$x_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{jmin}}{a_{jmax} - a_{jmin}} \tag{6}$$

$$x_{ij} = \frac{a_{jmax} - a_{ij}}{a_{jmax} - a_{jmin}} \tag{7}$$

对于双向指标,指标取值在某一范围 $[a, b]$ 时最佳:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{a - a_{ij}}{\max\{a - a_{jmin}, a_{jmax} - b\}} & a_{ij} < a \\ 1 & a \leq a_{ij} \leq b \\ 1 - \frac{a_{ij} - b}{\max\{a - a_{jmin}, a_{jmax} - b\}} & a_{ij} > b \end{cases} \tag{8}$$

式中: a_{ij} 为指标原始数据值; a_{jmax} 为指标 j 的最大值; a_{jmin} 为指标 j 的最小值。

步骤 3 计算指标变异性 S_j 。指标变异性以标准差的形式来表现:

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{m - 1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \tag{9}$$

其中 $\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}$

式中 $\bar{x}_j$ 为第 j 个指标的平均值。

步骤 4 计算指标冲突性 R_j :

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \tag{10}$$

式中 r_{ij} 为指标 i 和指标 j 之间的相关系数。

步骤 5 计算信息量 G_j :

$$G_j = S_j R_j \tag{11}$$

步骤 6 计算客观权重 w_j' :

$$w_j'' = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^n G_j} \tag{12}$$

3.3.3 组合权重

设 w_j 为指标 j 的组合权重, w_j' 为基于 BWM 法计算的主观权重, w_j'' 为基于 CRITIC 法计算的客观权重,为使组合权重 w_j 与主观权重 w_j' 、客观权重 w_j'' 尽可能接近,依据最小鉴别信息原理^[21],建立如下目标函数:

$$\min F = \sum_{j=1}^n w_j \left(\ln \frac{w_j}{w_j'} \right) + \sum_{j=1}^n w_j \left(\ln \frac{w_j}{w_j''} \right) \tag{13}$$

通过拉格朗日乘子法,得到组合权重为

$$w_j = \frac{(w_j' w_j'')^{0.5}}{\sum_{j=1}^n (w_j' w_j'')^{0.5}} \tag{14}$$

3.4 TOPSIS 法综合评价

TOPSIS 法又称优劣解距离法,通过计算评价对象与最优解、最劣解之间的欧氏距离,获得评价对象与理想解的贴近度,对评价对象进行相对优劣评价^[11],其评价结果可靠,常用于生态文明建设领域等效益评价。计算步骤如下:

步骤 1 计算加权决策矩阵 Z 。将组合权重值 w_j 与标准化矩阵 X 相乘,计算得到加权标准化矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$,其中 $z_{ij} = w_j x_{ij}$ 。

步骤 2 确定正理想解和负理想解:

$$Z^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j = 1, 2, \dots, n \} = \{ z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+ \} \tag{15}$$

$$Z^- = \{ \min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j = 1, 2, \dots, n \} = \{ z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^- \} \tag{16}$$

步骤 3 计算各年份中评价指标的向量值到正、负理想解之间的欧氏距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_j^+ - z_{ij})^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \tag{17}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \tag{18}$$

步骤 4 计算相对贴近度:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \tag{19}$$

贴近度表示各年份幸福河湖建设综合评价水平与最佳水平的靠近程度,取值区间为 $[0, 1]$, C_i 越大,幸福河湖综合评价水平越高; C_i 越小,幸福河湖综合评价水平越低。

为更加科学地分析评价结果,参考幸福河湖综合评价相关资料文献^[7,9,22],将幸福河湖综合评价水平划分为 5 个等级,具体分级标准如表 2 所示。

3.5 障碍度模型

在幸福河湖评价基础上,引入障碍度模型,用于诊断影响幸福河湖评价水平的主要障碍因子,有利于发现制约幸福河湖建设的关键因素,提出改善措施,进而完善幸福河湖建设。具体计算公式为

$$O_j = \frac{I_j w_j}{\sum_{j=1}^n I_j w_j} \tag{20}$$

表 2 幸福河湖评价等级标准

评价等级	等级说明	贴近度
I 级(优)	幸福河湖建设程度高,区域河湖安全及健康状态好,河湖能满足社会经济的可持续发展与生态系统的良好运转,河湖环境优良,居民生活幸福满足程度高,河湖文化与发扬能力完善	(0.8,1.0]
II 级(良)	幸福河湖建设程度较高,区域河湖安全及健康状态较好,河湖基本能够满足社会经济可持续发展以及生态系统的正常运作,居民生活幸福满足程度较高	(0.6,0.8]
III 级(中)	幸福河湖建设程度处于临界状态,区域河湖安全及健康状态一般,社会经济勉强可持续发展,居民生活幸福满足程度一般	(0.4,0.6]
IV 级(差)	幸福河湖建设程度较差,区域河湖安全及健康状态较差,河湖生态环境与经济社会发展不协调,居民生活幸福满足程度较低	(0.2,0.4]
V 级(极差)	幸福河湖建设程度差,区域河湖安全及健康状态极差,河湖生态环境与经济社会发展极不协调,居民生活幸福满足程度低	[0,0.2]

其中 $I_j = 1 - \alpha_j$
式中: α_j 为障碍度,即各指标对幸福河湖综合评价水平的影响程度; I_j 为指标偏离度,即各指标标准值 α_j 与幸福河湖最佳目标之间的差距。

4 实例验证

4.1 研究区概况

某市位于浙江省中部,市域内江河分属 3 大水系,集雨面积在 50 km² 以上的江溪有 76 条。“十三五”以来,该市始终坚持“绿水青山就是金山银山”的发展战略,推进全市生态文明建设,不断深化以河长制为抓手的环境综合治理工作机制,持续推动该市水生态环境改善。截至 2020 年 8 月,该市已创建省、市美丽河湖 18 条(个),成为全国首批黑臭水体消除比例 100% 的地市之一,治水工作走在前列。

4.2 数据来源

选取 17 个代表性指标对 2015—2019 年该市幸福河湖状况进行综合评价。研究指标数据来源于《浙江省自然资源与环境统计年鉴》《浙江省水资源公报》、市水资源公报及水利局、统计局等相关单位官网公开的信息,文化河湖层指标数据采用问卷调查法获得。对以上资料信息进行计算整理得到评价指标原始数据,即可得到原始数据矩阵 $A = (\alpha_{ij})_{5 \times 17}$ 。

4.3 权重确定

根据 BWM 法分别确定准则层和指标层的权重从而得到主观权重,根据 CRITIC 法运算公式计算得到客观权重,最后根据式(14)将主客观权重耦合得到组合权重。指标权重计算结果如表 3 所示。

4.4 TOPSIS 评价

首先根据标准化矩阵及各指标的组合权重得到加权决策矩阵 Z ,再根据式(15)(16)确定各指标的正理想解和负理想解,然后采用式(17)(18)计算出各年份中评价指标值到正、负理想解之间的欧氏距离,最后计算各年份幸福河湖评价指标值与理想解的贴近

度(表 4)。将贴近度定义为幸福河湖综合评价水平。

表 3 指标权重计算结果

准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	主观权重	客观权重	组合权重
D_1	0.4	C_1	0.2353	0.0941	0.0500	0.0768
		C_2	0.4118	0.1647	0.0469	0.0984
		C_3	0.2353	0.0941	0.0362	0.0654
		C_4	0.1176	0.0471	0.0375	0.0470
D_2	0.2	C_5	0.2727	0.0545	0.0566	0.0622
		C_6	0.3273	0.0655	0.0478	0.0626
		C_7	0.1636	0.0327	0.1021	0.0647
		C_8	0.0727	0.0145	0.1544	0.0531
		C_9	0.1636	0.0327	0.0337	0.0372
D_3	0.2	C_{10}	0.0952	0.0190	0.1247	0.0546
		C_{11}	0.4286	0.0857	0.0578	0.0788
		C_{12}	0.2381	0.0476	0.0684	0.0639
		C_{13}	0.2381	0.0476	0.0353	0.0459
D_4	0.2	C_{14}	0.2258	0.0452	0.0371	0.0458
		C_{15}	0.2258	0.0452	0.0350	0.0445
		C_{16}	0.1290	0.0258	0.0365	0.0344
		C_{17}	0.4194	0.0839	0.0398	0.0646

表 4 幸福河湖综合评价贴近度

年份	正理想解 欧氏距离	负理想解 欧氏距离	相对贴近度	评价等级
2015	0.2129	0.0948	0.3080	IV 级
2016	0.1516	0.1480	0.4940	III 级
2017	0.1212	0.1668	0.5792	III 级
2018	0.1026	0.2109	0.6726	II 级
2019	0.0814	0.2226	0.7323	II 级

为了深入分析某市 2015—2019 年的幸福河湖变化特点及原因,进一步计算安全河湖、健康河湖、富民河湖、文化河湖 4 个子系统的相对贴近度,据此分析该市幸福河湖及各子系统的变化特征,幸福河湖及各子系统相对贴近度见图 2。

由表 4 和图 2 可知,该市幸福河湖建设水平持续上升,近几年河湖治理工作取得明显成效。近年来,该市投入专项资金高标准推进河湖长制建设、美丽河湖建设、农村水系激活工程等,以“河长制”为抓手,探索“四化”管理模式,以“安全、美丽”为标准,推进美丽河湖建设,以“幸福城”为目标,打造绿色生态廊道等,这些措施对河湖安全、环境、区域经

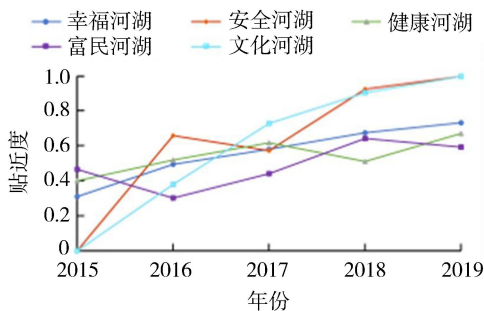


图2 2015—2019年某市幸福河湖及各子系统综合评价

济发展以及人民群众幸福河湖满意度均有所贡献,提高了幸福河湖综合水平。

安全河湖子系统评价价值总体呈上升趋势。2015年安全河湖状况最差,为V级,地区河湖安全形势较严峻。2016年,因洪涝预警能力提高、洪涝损失占GDP比例较上年明显下降,河湖安全状况有所改善,达到Ⅱ级。2017年供水保障率与水利设施完好率虽继续提升,但由于洪涝损失占GDP比例相对2016年增长20.63%,安全河湖水平下降为Ⅲ级。2017—2019年安全河湖各项指标均向好发展,其贴适度在2018年、2019年保持在0.9以上,达到Ⅰ级。这说明近年来该市注重防御自然灾害、保障供水安全,安全河湖水平得以提升。

健康河湖与富民河湖子系统评价价值总体呈上升趋势,但较为波动,这说明保持河湖生态环境健康与促进经济社会可持续发展的困难性。湿地占地比例2015—2016年下降较大,此后基本保持稳定,水土流失治理率稳步提升,万元GDP用水量持续降低,说明该市注重河湖生态系统的良好运转与经济社会可持续发展。

文化河湖子系统评价价值2015—2019年持续提升,自V级提升至Ⅰ级。历史河湖文化遗产保护程度、公众河湖治理参与度、河湖法律法规建设程度、公众幸福河湖满意度呈稳步增长态势。

4.5 障碍度因子诊断

采用式(20)计算2015—2019年某市幸福河湖综合评价17项指标的障碍度,结果见图3。统计出各年障碍度排序前5名的指标如表5所示。

从图3和表5可以看出,总体而言,不同年份影响该市幸福河湖综合评价水平的障碍因子有差异,可以发现前期障碍指标数量较多且在4个准则层均有分布,后期障碍指标数量减少至5个,集中在健康河湖与富民河湖准则层上,尤其在2019年,水资源开发利用率(C_{12})与湿地占地比例(C_8)的障碍度之和超过了70%。究其原因是该市湿地资源本身相对匮乏,且2019年湿地占地比例与2015年相比下降了14.74%,今后需采取多种措施保护与恢复湿

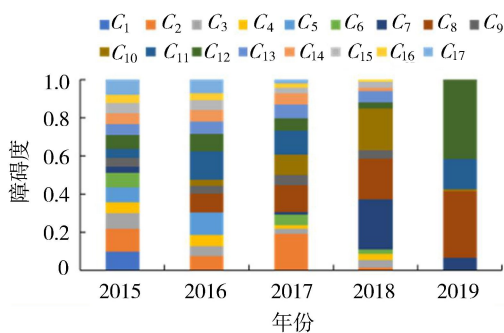


图3 2015—2019年某市幸福河湖障碍度

地,改善河湖生态环境。水资源开发利用率低会

表5 2015—2019年某市幸福河湖主要障碍因子排序

排序	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
1	C_2	C_{11}	C_2	C_7	C_{12}
2	C_1	C_5	C_8	C_{10}	C_8
3	C_3	C_8	C_{11}	C_8	C_{11}
4	C_{17}	C_{12}	C_{10}	C_{13}	C_7
5	C_6	C_2	C_{13}	C_9	C_{10}

阻碍经济社会发展,过高则会导致水资源短缺等问题,不利于经济社会可持续发展,2019年该市水资源开发利用率低阻碍了富民河湖水平的提升。为进一步提高幸福河湖水平,力求在保护河湖生态环境的同时合理开发利用河湖水资源,协调好健康河湖与富民河湖的关系。

综上所述,某市幸福河湖状况持续向好,但仍有较大提升空间,在健康河湖和富民河湖准则层上有所欠缺,水资源、经济发展、生态环境保护三者之间存在矛盾。今后应更加注重人水和谐,合理利用水资源,提高水资源利用效率,促进河湖系统与社会系统、经济系统协调发展,支撑区域经济社会高质量发展;进一步提高河湖管理与现代化建设水平以保障河湖安全,提升河湖保护宣传与公众参与度来推进先进水文化建设,积极促进安全河湖、健康河湖、富民河湖、文化河湖四位一体建设,打造幸福河湖。

5 结 论

a. 以幸福河湖概念及内涵为基础,建立幸福河湖建设评价指标体系,构建BWM-CRITIC-TOPSIS模型并应用于2015—2019年浙江省某市幸福河湖评价。评价结果表明该市幸福河湖建设水平持续上升,自Ⅳ级提升至Ⅱ级。

b. BWM-CRITIC-TOPSIS模型适用于幸福河湖综合评价,通过评价浙江省某市2015—2019年幸福河湖建设水平对模型进行了验证。

c. 湿地占地比例、水资源开发利用率等指标制约某市幸福河湖等级的提升,提出了合理利用水资源,促进河湖系统与社会系统、经济系统协调发展,

参考文献：

[1] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 中国水利, 2019 (20): 1-3. (XI Jinping. Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin [J]. China Water Resources, 2019 (20): 1-3. (in Chinese))

[2] 左其亭, 郝明辉, 马军霞, 等. 幸福河的概念、内涵及判断准则[J]. 人民黄河, 2020, 42 (1): 1-5. (ZUO Qiting, HAO Minghui, MA Junxia, et al. Happy river: the concept, connotation and judgement criteria [J]. Yellow River, 2020, 42 (1): 1-5. (in Chinese))

[3] 胡玮. 幸福河湖建设中的河长制湖长制作用[J]. 中国水利, 2020 (8): 9-11. (HU Wei. Role of river-lake chief system in the initiative of Happy Rivers and Lakes [J]. China Water Resources, 2020 (8): 9-11. (in Chinese))

[4] 陈茂山, 王建平, 乔根平. 关于“幸福河”内涵及评价指标体系的认识与思考[J]. 水利发展研究, 2020, 20 (1): 3-5. (CHEN Maoshan, WANG Jianping, QIAO Genping. Understanding and thinking on the connotation and evaluation index system of “Happiness River” [J]. Water Resources Development Research, 2020, 20 (1): 3-5. (in Chinese))

[5] 幸福河研究课题组. 幸福河内涵要义及指标体系探析[J]. 中国水利, 2020 (23): 1-4. (Research Group of the Happy River. Analysis of the connotation and index system for the Happy River [J]. China Water Resources, 2020 (23): 1-4. (in Chinese))

[6] 韩宇平, 夏帆. 基于需求层次论的幸福河评价[J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2020, 18 (4): 1-7. (HAN Yuping, XIA Fan. Evaluation of Xingfu river based on demand level theory [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18 (4): 1-7. (in Chinese))

[7] 左其亭, 郝明辉, 姜龙, 等. 幸福河评价体系及其应用[J]. 水科学进展, 2021, 32 (1): 45-58. (ZUO Qiting, HAO Minghui, JIANG Long, et al. Happy River evaluation system and its application [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (1): 45-58. (in Chinese))

[8] 程常高, 马骏, 唐德善. 基于变权视角的幸福河湖模糊综合评价体系研究: 以太湖流域为例[C] // 2020 (第八届) 中国水生态大会论文集. 郑州: 北京沃特咨询有限公司, 2020: 433-446.

[9] 贡力, 田洁, 靳春玲, 等. 基于 ERG 需求模型的幸福河综合评价[J]. 水资源保护, 2022, 38 (3): 25-33. (GONG Li, TIAN Jie, JIN Chunling, et al. Comprehensive evaluation of Happy River based on ERG demand model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (3): 25-33. (in Chinese))

[10] 陈隆吉, 董增川, 周月娇, 等. 基于健康与宜居协调发展的飞云江“幸福河”建设评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (3): 51-56. (CHEN Longji, DONG Zengchuan, ZHOU Yuejiao, et al. Evaluation of Happy River construction for Feiyun River based on coordinated development of health and livability [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (3): 51-56. (in Chinese))

[11] 章运超, 王家生, 朱孔贤, 等. 基于 TOPSIS 模型的河长制绩效评价研究: 以江苏省为例[J]. 人民长江, 2020, 51 (1): 237-242. (ZHANG Yunchao, WANG Jiasheng, ZHU Kongxian, et al. Study on performance evaluation of river chief system based on TOPSIS: case of Jiangsu Province [J]. Yangtze River, 2020, 51 (1): 237-242. (in Chinese))

[12] 田培, 张志好, 许新宜, 等. 基于变权 TOPSIS 模型的长江经济带水资源承载力综合评价[J]. 华中师范大学学报 (自然科学版), 2019, 53 (5): 755-764. (TIAN Pei, ZHANG Zhihao, XU Xinyi, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on variable weight TOPSIS model [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2019, 53 (5): 755-764. (in Chinese))

[13] 苏超, 方崇, 麻荣永. TOPSIS 模型在城市防洪体系综合评价中的应用[J]. 人民长江, 2011, 42 (21): 7-10. (SU Chao, FANG Chong, MA Rongyong. Application of TOPSIS model in comprehensive evaluation of urban flood control system [J]. Yangtze River, 2011, 42 (21): 7-10. (in Chinese))

[14] 李晓峰, 刘宗鑫, 彭清娥. TOPSIS 模型的改进算法及其在河流健康评价中的应用[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2011, 43 (2): 14-21. (LI Xiaofeng, LIU Zongxin, PENG Qing'e. Improved algorithm of TOPSIS model and its application in river health assessment [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43 (2): 14-21. (in Chinese))

[15] 唐克旺. 对“幸福河”概念及评价方法的思考[J]. 中国水利, 2020 (6): 15-16. (TANG Kewang. Studies on concept and evaluation methods of “happy river” [J]. China Water Resources, 2020 (6): 15-16. (in Chinese))

[16] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method: some properties and a linear model [J]. Omega, 2016, 64: 126-130.

[17] 艾欣, 秦珺晗, 胡寰宇, 等. 基于最优最劣法-熵权-逼近理想解排序法的电网安全与效益综合评价[J]. 现代电力, 2021, 38 (1): 60-68. (AI Xin, QIN Junhan, HU Huanyu, et al. Comprehensive evaluation of power grid security and benefit based on BWM entropy weight TOPSIS method [J]. Modern Electric Power, 2021, 38 (1): 60-68. (in Chinese))

(下转第 20 页)

站的调度规则,该规则既可以充分保证水电的效益不受损失,又可以显著提高光伏的利用率,水光互补之后澜沧江上游西藏段梯级水电站可以使光伏消纳率提高 20%,在互补的同时梯级水电站的发电效益也没有受到损失,水光合计发电效益也提高了 6%。该调度规则为水电和光伏的互补调度提供了新思路,为提高多种清洁能源的利用率提供了新方法。

当前水光互补是出力平衡和水量平衡分开考虑的,梯级调度得到的是整个梯级电站总体的出力过程。在今后的研究中,要在此研究的基础上,将出力平衡和水量平衡同时考虑进来,并将梯级整体的出力过程具体分配到各个电站。

参考文献:

[1] 安源,方伟,黄强,等. 水-光互补协调运行的理论与方法初探[J]. 太阳能学报,2016,37(8):1985-1992. (AN Yuan, FANG Wei, HUANG Qiang, et al. Preliminary research of theory and method of hydro-solar complementary operation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2016,37(8):1985-1992. (in Chinese))

[2] 贾一飞,林梦然,董增川. 龙羊峡水电站水光互补优化调度研究[J]. 水电能源科学,2020,38(10):207-210. (JIA Yifei, LIN Mengran, DONG Zengchuan. Research on optimal of hydro photovoltaic complementarity in Longyangxia Hydropower Station [J]. Water Resources and Power,2020,38(10):207-210. (in Chinese))

[3] 朱燕梅,陈仕军,黄炜斌,等. 一定弃风光率下的水光风互补发电系统容量优化配置研究[J]. 水电能源科学,2018,36(7):215-218. (ZHU Yanmei, CHEN Shijun, HUANG Weibin, et al. Optimal capacity configuration of hydro-photovoltaic-wind complementary power generation system under wind and photovoltaic curtailment [J]. Water Resources and Power,2018,36(7):215-218. (in Chinese))

[4] MARGETA J, GLASNOVIC Z. Theoretical settings of photovoltaic-hydro energy system for sustainable energy

production[J]. Solar Energy,2012,86(3):972-982.

[5] 李蒙. 多年调节水库水-光互补调度研究[D]. 天津:天津大学,2018.

[6] 陈文伯,李灿,姚李孝. 梯级水电站与光伏电站的联合优化运行[J]. 电网与清洁能源,2017,33(8):113-117. (CHEN Wenbo, LI Can, YAO Lixiao. Joint optimal operation of cascaded hydropower station and photovoltaic power station [J]. Power System and Clean Energy,2017,33(8):113-117. (in Chinese))

[7] 田旭,张祥成,白左霞,等. 青海省水电与光伏互补特性分析与效果评价[J]. 电力建设,2015,36(10):67-72. (TIAN Xu, ZHANG Xiangcheng, BAI Zuoxia, et al. Characteristic analysis and effect evaluation of synergy between hydropower and photovoltaic power in Qinghai Province [J]. Electric Power Construction,2015,36(10):67-72. (in Chinese))

[8] PÉREZ CIRIA T, PUSPITARINI H D, CHIOGNA G, et al. Multi-temporal scale analysis of complementarity between hydro and solar power along an alpine transect [J]. Science of the Total Environment,2020,741:140179.

[9] 庞秀岚,张伟. 水光互补技术研究及应用[J]. 水力发电学报,2017,36(7):1-13. (PANG Xiulan, ZHANG Wei. Hydro-photovoltaic complementary technology research and application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(7):1-13. (in Chinese))

[10] 王政祥. 澜沧江流域近 15 年水资源及其利用状况分析[J]. 人民长江,2018,49(22):40-44. (WANG Zhengxiang. Analysis of water resources and utilization in Lancang River Basin in 2003-2017 [J]. Yangtze River,2018,49(22):40-44. (in Chinese))

[11] 黄显峰,格桑央拉,吴志远,等. 水光互补能源基地的多时间尺度优化调度[J]. 水力发电,2022,48(1):106-111. (HUANG Xianfeng, KELSANG Yarlha, WU Zhiyuan, et al. Multi-time scale optimization scheduling of hydro-photovoltaic complementary energy base [J]. Water Power,2022,48(1):106-111. (in Chinese))

(收稿日期:2022-04-27 编辑:刘晓艳)

(上接第 14 页)

[18] 尹星,权力. 基于 BWM 的反坦克分队打击目标模糊优选[J]. 指挥控制与仿真,2021,43(2):76-81. (YIN Xing, QUAN Li. Fuzzy optimization of antitank element attacking target based on Best-Worst Method [J]. Command Control & Simulation,2021,43(2):76-81. (in Chinese))

[19] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems;the critic method[J]. Computers & Operations Research,1995,22(7):763-770.

[20] 张玉,魏华波. 基于 CRITIC 的多属性决策组合赋权方法[J]. 统计与决策,2012,28(16):75-77. (ZHANG

Yu, WEI Huabo. Combined weighting method of multi-attribute decision making based on critical [J]. Statistics and Decision,2012,28(16):75-77. (in Chinese))

[21] 朱雪龙. 应用信息论基础[M]. 北京:清华大学出版社,2001.

[22] 王子悦,徐慧,黄丹姿,等. 基于熵权物元模型的长三角幸福河层次评价[J]. 水资源保护,2021,37(4):69-74. (WANG Ziyue, XU Hui, HUANG Danzi, et al. Hierarchy evaluation of Happy River in the Yangtze River Delta based on entropy weight and matter element model [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):69-74. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-30 编辑:俞云利)