

基于健康与宜居协调发展的飞云江“幸福河”建设评价

陈隆吉¹,董增川²,周月娇²,任杰²,王诗韵²,王文卓²

(1.温州市水文管理中心,浙江温州 325000; 2.河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:从河流健康与宜居两方面,选取11个指标,构建了基于主客观赋权法的隶属度加权评价模型和协调发展度模型,采用该模型评估了2016—2019年飞云江干流“幸福河”建设状况。结果表明:飞云江干流“幸福河”建设水平总体偏向于Ⅱ级(幸福)水平,处于中等协调发展阶段,存在向良好型协调发展状态转变的趋势;水资源开发利用效率、流域城乡居民经济水平、生态用水满足程度、流量过程变异程度与河流连通性等指标,限制了飞云江干流幸福等级的提升。提出减少河道整治人为干扰、修复水生态保障需水量、合理规划水资源配置和深化河流社会服务功能等改进措施。

关键词:“幸福河”建设;健康宜居;主客观赋权法;飞云江

中图分类号:TV213.4,X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)03-0051-06

Evaluation of Happy River construction for Feiyun River based on coordinated development of health and livability//CHEN Longji¹, DONG Zengchuan², ZHOU Yuejiao², REN Jie², WANG Shiyun², WANG Wenzhuo²
(1. Wenzhou Hydrology Management Center, Wenzhou 325000, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: From the two aspects of river health and livability, 11 indicators were selected to construct the membership degree weighted evaluation model based on subjective and objective weighting method, and the coordinated development degree model was constructed. The above models were used to evaluate the construction status of Happy River in the main stream of the Feiyun River from 2016 to 2019. Improvement suggestions were proposed, including reducing human interference in river regulation, restoring ecological water demand, rational planning of water resources and deepening river social service functions. The results show that the overall Happy River construction is inclined to the second level of happiness, and the coordinated development status is in the medium coordinated development stage, indicating the development tendency to well-coordinated development stage. Indexes such as water resources development and utilization efficiency, economic level of urban and rural residents, ecological water satisfaction degree, discharge process variation degree and river connectivity restrict the happiness level promotion for the Feiyun River.

Key words: Happy River construction; health and livability; subjective and objective weighting method; Feiyun River

近年来,河流生态系统功能退化、结构混乱、水质恶化等问题突出,人民群众对水资源、水生态、水环境的需求和水利行业的监管能力之间的矛盾成为我国主要的治水矛盾。2019年9月,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会中强调“要将黄河建设成为造福人民的幸福河”,这对河流保护和治理工作提出了新要求。在“幸福河”理念的解读上,不同学者发表了自己的观点,左其亭等^[1]认为“幸福河”需具有功能稳定、系统健康以及与人类社会和谐发展的特点;唐克旺^[2]将“幸福河”界定为与人水关系中获得幸福感的河流;谷树忠^[3]采用“安澜”“民生”“美丽”“和谐”等术语表述对

“幸福河”的认知。综上可知,“幸福河”概念的提出是在要求河流自身保持生态健康的同时,考量人类对幸福的追求,旨在建立人与河流和谐发展的关系,其研究对象不只是河流生态系统,也包括人类社会,更重要的是人水关系^[4]。

目前在河流评价角度上,国内外学者大多以水安全、水生境、水管护、社会服务^[5-7]为切入点,关注的重点在河流的结构与功能上;而忽略了对人类社会与河流状态相互作用、协调发展状况的分析。本文在关注河流生态系统自身状况的基础上,把人的因素考虑进来,将“幸福河”建设所强调的人水和谐的原则,细化为河流的健康性和宜居性。从健康与

宜居两方面构建基于主客观赋权法的隶属度加权评价模型以及协调发展度模型,进行“幸福河”建设状况的评价^[8],并采用障碍度模型,对阻碍幸福等级提升的关键指标进行识别,据此提出改进措施。通过该思路,引导人们树立人水和谐、人与河流协调整合的河流治理价值取向,促使决策者与管理者将河流治理的眼界变宽,推动相关部门深化协调发展理念,为今后制定河流治理方针与措施提供决策依据。

1 计算方法与模型

1.1 原始数据规则化

假设评价项目中存在 m 个评价指标,并对应 k 个评价等级, n 个样本。为消除由于指标量纲不同给评价造成的不便,对评价指标分级矩阵 $S = (s_{ij})_{m \times k}$ 和样本数据矩阵 $C = (c_{ij})_{m \times n}$ 进行转换。采用式(1)将 S 转化为 $E = (e_{ih})_{m \times k}$ 。

$$e_{ih} = \frac{s_{ik} - s_{ih}}{s_{ik} - s_{i1}} \tag{1}$$

对于数值越小“幸福河”建设状况越优的逆向指标,采用式(2)将 C 转化为 $F = (f_{ij})_{m \times n}$;反之,采用式(3)进行转化。

$$f_{ij} = \begin{cases} 1 & c_{ij} \leq s_{i1} \\ \frac{s_{ik} - c_{ij}}{s_{ik} - s_{i1}} & s_{i1} < c_{ij} < s_{ik} \\ 0 & c_{ij} \geq s_{ik} \end{cases} \tag{2}$$

$$f_{ij} = \begin{cases} 1 & c_{ij} \geq s_{i1} \\ \frac{s_{ik} - c_{ij}}{s_{ik} - s_{i1}} & s_{ik} < c_{ij} < s_{i1} \\ 0 & c_{ij} \leq s_{ik} \end{cases} \tag{3}$$

1.2 主客观赋权法

“幸福河”建设评价涉及多种影响因素,各影响因素在评估过程中的贡献度会直接影响最终的结果。以主客观赋权方法相结合的方式,避免了单一赋权方法仅考虑主观偏好或仅依赖数据的问题。该方法在参考主观经验的同时,结合因素的客观属性,得到影响因素对整体的权重系数^[9]。

本文采用 G1 赋权法^[10]和变异系数法进行赋权计算,G1 赋权法采用确定序关系法代替判断矩阵的构建与一致性检验,其计算步骤如下:①将指标 $c_1, c_2, \dots, c_m$ 依据已有研究成果或专家经验等进行重要性排序,即 $c_1^*, c_2^*, \dots, c_m^*$,其中 $c_1^* > c_2^* > \dots > c_m^*$ 。②获取相邻指标 c_{i-1}^* 与 c_i^* 间的相对重要程度 $r_i, r_i = \frac{w_{i-1}^*}{w_i^*}$ 。若指标 c_{i-1}^* 与 c_i^* 分别同样、稍微、明显、强烈、极端重要, r_i 取值依次为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8^[11-12]。③从

重要性最小的 c_m^* 开始进行迭代计算其对应的权重 w_m^* ,如式(4)所示。为方便后续计算,将计算得到各指标 c_i^* 的权重系数 w_i^* 转换为原顺序中对应指标 c_j 的 w_i (由 w_i 组成的权重矩阵为 W)。

$$w_m^* = (1 + \sum_{i=2}^m \prod_{l=i}^m r_l)^{-1} \tag{4}$$

变异系数法则直接通过各项指标数据计算得到权重值。通过计算各指标的均值 $\bar{x}_i$ 、标准差 σ_i ,得到变异系数 $P_i = \bar{x}_i / \sigma_i$,再对其归一化,得到第 i 个指标的权重 w'_i ,由 w'_i 组成的权重矩阵为 W' 。

将两种赋值方法得到的权重 w_i 及 w'_i 进行加权组合,得到组合权重 W_i 。基于博弈论的思想,组合权重的确定原则即寻求两种赋权结果的平衡点^[13],以降低两种方法所求权重的差异^[14]。基于此,结合矩阵的微分性质构建线性方程组,见式(5)。随后对式中的系数进行归一化处理,得到最终的组合权重。

$$\begin{bmatrix} WW^T & WW'^T \\ W'W^T & W'W'^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} WW^T \\ W'W'^T \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中: W, W' 分别为 G1 赋权法与变异系数法求得的权重矩阵; a_1, a_2 分别为赋权法与变异系数法对应的组合权重系数。

1.3 评价等级的确定

构建 $(s_{ih})_{m \times k}$ 与 $(c_{ij})_{m \times n}$ 的隶属函数为 $U = (u_{ih})_{m \times k}$,并满足 $\sum_{h=1}^k u_{ih} = 1$ 。根据待评价样本与各等级标准之间的广义加权距离最小及熵最大确定最优模糊矩阵,采用加权平均原则得到整体评价等级 B :

$$B = \sum_{h=1}^k u_{ih} h \tag{6}$$

$$u_{ih} = \frac{\exp \left[-B \sum_{i=1}^m W_i |e_{ih} - f_i| \right]}{\sum_{h=1}^k \exp \left[-B \sum_{i=1}^m W_i |e_{ih} - f_i| \right]}$$

式中: B 为正参数,一般取 $10^{[15-16]}$; e_{ih} 为标准化后的等级值; h 为等级值^[17]。

1.4 协调发展度模型

协调是指各部分在组织、结构以及变化上呈现出的和谐关系;各部分之间相互促进,以达到提高系统综合状况的目的^[18]。根据上述等级评价确定方法,分别得到健康与宜居的评价指数 f, g ,并构建健康与宜居两者间的协调度 R :

$$R = \left[\frac{4fg}{(f+g)^2} \right]^t \tag{7}$$

式中 t 为调节系数,一般取 $2^{[18-19]}$ 。 $R \in [0, 1]$, R 越接近 1,各部分协调关系越好。

采用 R 表示各部分之间的和谐程度,可能存在

各部分评价值都较低而 R 值却较高的情况,因此参考整体的发展状态^[20],定义协调发展度 $D = \sqrt{RB}$ 。由于 $R \in [0,1]$ 、 $B \in [0,4]$,故 $D \in [0,2]$,并以 0.5 为间隔进行等级划分^[21]。当 D 分别在 $[0,0.5]$ 、 $(0.5,1]$ 、 $(1,1.5]$ 、 $(1.5,2]$ 区间内,“幸福河”建设依次处于优质、良好、中等、初级协调发展状态。

1.5 障碍度模型

在对“幸福河”建设整体状况与内部各要素间的协调发展情况进行评价后,引入障碍度模型识别障碍因子。采用式(8)计算各指标与理想目标之间的偏离度 Y_{ij} ,结合各指标的组合权重 W_i ,采用式(9)得到障碍度 V_{ij} 。

$$Y_{ij} = 1 - f_{ij} \tag{8}$$
$$V_{ij} = \frac{W_i Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m W_i Y_{ij}} \times 100\% \tag{9}$$

2 飞云江“幸福河”建设评价

2.1 研究区概况

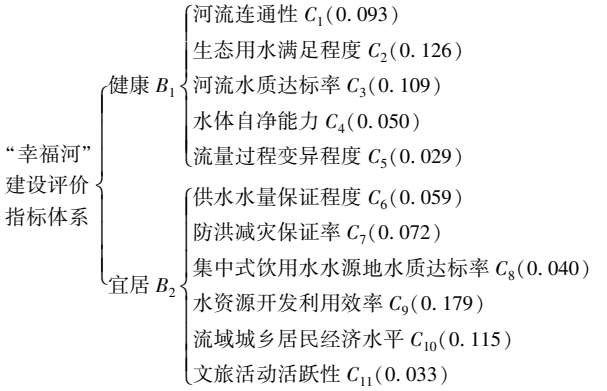
飞云江位于浙江省东南部,是温州地区的第二大河,全长 193 km,流域面积 3 719 km²,其河道上的珊溪水利枢纽、赵山渡饮水工程,是温州市最重要的供水水源,兼具发电、灌溉、防洪等作用;沿岸的泰顺廊桥、百丈飞瀑、石胜林海等水文化景点承担着提升温州市人民生活水平的重要职责。本文以飞云江干流作为研究对象,从“幸福河”建设的角度对这条事关温州地区生态环境、防洪供水安全、人民生活水平的河流进行评估。

2.2 评价指标体系构建

在对以往“清洁河流”“生态河流”“健康河流”“美丽河流”评价指标进行分析以及对“幸福河”内涵深入挖掘的基础上,本文从河流生态系统结构与功能出发,结合经济、社会发展需求,从健康、宜居两方面构建河流幸福评价准则层。健康旨在强调河流

生态系统的发展;宜居突出河流带给其流域居民生活、生产、精神上的价值。

依据内在性、外在性和导向性原则,选取 11 个指标从河道形态、水量、水质角度描述河流自身特点,从防洪供水能力、水资源利用、流域经济水平、水文化服务角度表现河流与人的相互作用。各指标相互独立,可对“幸福河”的建设状况全面评价,并采用主客观赋权法得到各指标权重,见图 1。



根据 SL/T 793—2020《河湖健康评估技术导则》,以及国内相关研究成果^[22-23],将各评价指标分为Ⅰ级(高度幸福)、Ⅱ级(幸福)、Ⅲ级(中度幸福)、Ⅳ级(低度幸福)等 4 个等级。各指标分级标准见表 1。

2.3 数据来源及评价结果

以 2016—2019 年为研究年份,对该时期内温州市水利局、生态环境局、文化广电旅游局发布的各类公告进行整理,确定各评价指标数值,见表 2。

a. 利用隶属度加权评价模型进行评价。根据上述隶属度确立和等级评价的计算方法,计算出飞云江不同年份“幸福河”建设评价等级的隶属度,见表 3。

由表 3 可知,4 年来飞云江“幸福河”建设偏向Ⅱ级(幸福)水平,2019 年“幸福河”建设有向Ⅰ级(高度幸福)变化的趋势。幸福等级变化的主要原因是河流连通性、流量过程变异程度以及文旅活动

表 1 “幸福河”建设评价指标分级标准

等级	C_1	$C_2/\%$	$C_3/\%$	$C_4/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$C_5/\%$	$C_6/\%$	$C_7/\%$	$C_8/\%$	$C_9/\%$	$C_{10}/\%$	$C_{11}/\text{次}$
Ⅰ	$[0,0.2]$	≥ 50	$[90,100]$	≥ 7.5	≤ 0.05	$[95,100]$	$[90,100]$	$[90,100]$	≥ 100	$[90,100]$	≥ 3
Ⅱ	$(0.2,0.4]$	$[40,50)$	$[75,90)$	$[6,7.5)$	$(0.05,0.3]$	$[85,95)$	$[75,90)$	$[75,90)$	$[75,100)$	$[75,90)$	$[2,3)$
Ⅲ	$(0.4,0.6]$	$[10,40)$	$[60,75)$	$[3,6)$	$(0.3,1.5]$	$[60,85)$	$[60,75)$	$[60,75)$	$[50,75)$	$[60,75)$	$[1,2)$
Ⅳ	>0.6	<10	$[0,60)$	$[0,3)$	>1.5	$[0,60)$	$[0,60)$	$[0,60)$	$[0,50)$	$[0,60)$	<1

表 2 2016—2019 年飞云江“幸福河”建设评价指标值

年份	C_1	$C_2/\%$	$C_3/\%$	$C_4/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	C_5	$C_6/\%$	$C_7/\%$	$C_8/\%$	$C_9/\%$	$C_{10}/\%$	$C_{11}/\text{次}$
2016	0.33	20.9	95.0	8.71	1.29	95.0	80.0	100	12.7	39.4	4
2017	0.53	28.6	90.3	7.97	1.33	95.2	90.9	100	23.4	44.5	2
2018	0.56	29.5	97.2	7.73	1.34	96.8	90.9	100	19.0	49.9	5
2019	0.38	27.8	98.9	8.11	1.36	97.2	90.9	100	17.8	57.2	3

表 3 2016—2019 年飞云江“幸福河”建设评价等级隶属度

年份	隶属度				加权 隶属度
	I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	
2016	0.234	0.444	0.291	0.031	2.119
2017	0.206	0.484	0.292	0.019	2.124
2018	0.242	0.457	0.282	0.019	2.077
2019	0.273	0.488	0.225	0.013	1.979

活跃性评价等级的下降。在各项指标中,河流连通性与流量过程变异程度均针对河流空间状态、水文过程连续性进行描述,两指标的变动表明在后续建设“幸福河”建设过程中,应尽量减少人为因素对河流形态和水文过程的干扰,维持河流自然状态。

b. 利用协调发展度模型开展评价。从健康与宜居两方面进行评估,得到表 4,可知两者相互配合协调度很高,协调度在 0.980 左右;但由于两者等级状况均较低,使得整体处于中级协调发展阶段。因此,飞云江“幸福河”建设存在着向良好型协调发展状态转变的趋势。

表 4 2016—2019 年飞云江健康与宜居协调发展状况

年份	健康评价 指数	宜居评价 指数	加权 隶属度	协调度	协调 发展度
2016	1.991	2.458	2.119	0.978	1.440
2017	2.015	2.386	2.124	0.986	1.447
2018	2.022	2.331	2.077	0.990	1.434
2019	1.916	2.314	1.979	0.982	1.395

c. 通过障碍度模型分析障碍因子。基于评价结果构建了障碍度模型,计算各指标对飞云江“幸福河”建设的影响程度,见表 5。据此分析影响“幸福河”建设的障碍因子,并提出改进意见。

表 5 2016—2019 年飞云江“幸福河”建设指标障碍度

指标	障碍度/%				演变趋势
	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	
C_1	4.38	11.58	12.83	6.83	趋于下降
C_2	20.86	16.14	15.92	18.50	趋于上升
C_3	0	0	0	0	趋于平稳
C_4	0	0	0	0	趋于平稳
C_5	8.24	8.70	8.92	9.61	趋于上升
C_6	0	0	0	0	趋于平稳
C_7	2.27	0	0	0	趋于平稳
C_8	0	0	0	0	趋于平稳
C_9	44.42	41.14	44.61	48.76	波动上升
C_{10}	19.83	19.14	17.72	16.30	趋于下降
C_{11}	0	3.30	0	0	趋于平稳

由表 5 可知,各指标障碍度基本处于趋于稳定和趋于上升的状态,仅河流连通性与流域城乡居民经济水平指标趋于下降状况。这表明河道形态、河道治理力度不断加强,流域居民经济生活具有高质量发展趋势,但在河流开发利用、生态建设方面仍存在不足。此外,在河流自身健康方面,主要障碍因子为生态用水满足程度、流量过程变异程度、河流连通

性;在流域宜居性方面,主要障碍因子是水资源开发利用效率与流域城乡居民经济水平(占比 50% 以上)。由此可见,流域宜居性成为限制飞云江幸福等级提升的重要因素,在关注河流生态系统建设的同时,需提升居民幸福感的获得,注重流域社会与河流之间的相互作用。在所有指标中最大障碍因子为水资源开发利用效率。高效的水资源开发利用效率不仅是河流生态系统维持正常结构与功能的保障,还是流域社会经济高质量低成本发展的基础。

针对目前飞云江干流的“幸福河”建设状态,提出以下改进措施:①减少河道整治人为干扰。疏浚、沟通河道,逐步恢复河流、湿地等各类水体的自然连通;加强飞云江干流岸线管控,依法划定岸线管理范围,减少过度的人类活动对于河流水文过程的影响。②修复水生态并保障需水量。开展水环境的综合整治工作,对污水进行集中、深度治理。持续进行生态修复工程,改善水生态环境,涵养水源;在保证防洪安全的基础上,储备水资源,保证生态需水量,维持河流自身结构与功能稳定。③合理规划水资源配置。加强科技创新能力,提高工业用水中水资源循环使用效率;加强节水政策推行力度以及资金投入,强化节水意识;推行废水资源化,加快建设河流沿岸城市污水处理厂、城镇雨污分流和污水收集管网。④深化河流社会服务功能。挖掘河流的历史文化、自然景观价值,以景观营造、人文展示、休闲娱乐为主体,打造河流沿岸的景观节点,持续关注河流两岸居民对于美好宜居生活的要求,做好河流水文化、水景观的宣传工作。

3 结 论

a. 飞云江干流在 2016—2019 年“幸福河”建设整体水平偏向于Ⅱ级幸福水平,2019 年“幸福河”建设有向Ⅰ级(高度幸福)变化的趋势。

b. 飞云江干流的河流健康与宜居建设两者相互作用,处于中等协调发展阶段,存在向良好型协调发展状态转变的趋势。

c. 水资源开发利用效率、流域城乡居民经济水平、生态用水满足程度、流量过程变异程度与河流连通性等指标,限制了飞云江干流幸福等级的提升。

d. 提出了减少河道整治人为干扰,修复水生态,保障需水量,合理规划水资源配置,深化河流社会服务功能等方面的改进措施。

参考文献:

[1] 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))
- [2] 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. Reflection on the concept of “Happy River” and its evaluation method[J]. China Water Resources, 2020(6): 15-16. (in Chinese))
- [3] 谷树忠. 关于建设幸福河湖的若干思考[J]. 中国水利, 2020(6): 13-14. (GU Shuzhong. Some thoughts on the construction of happy rivers and lakes[J]. China Water Resources, 2020(6): 13-14. (in Chinese))
- [4] HAN Y P, XIA F. Evaluation of Xingfu River based on demand level theory [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science&Technology, 2020, 18(4): 1-7.
- [5] 申祺, 魏杰, 武玮, 等. 大汶河水生态环境健康状况与土地利用的相关性[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 224-233. (SHEN Qi, WEI Jie, WU Wei, et al. Correlation between ecosystem health conditions and land use in Dawen River basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 224-233. (in Chinese))
- [6] 郑保, 罗文胜. 河流生态系统健康评价指标体系及权重的研究[J]. 水电与新能源, 2019, 33(8): 60-65. (ZHENG Bao, LUO Wensheng. On the health evaluation index system and weight of river ecosystem [J]. Hydropower and New Energy, 2019, 33(8): 60-65. (in Chinese))
- [7] 王鹏全, 吴元梅, 张丽娟, 等. 湟水干流西宁段河流健康评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 9-15. (WANG Pengquan, WU Yuanmei, ZHANG Lijuan, et al. River health assessment model for Xining section in main stream of Huangshui River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 9-15. (in Chinese))
- [8] WANG Xiaofang, ZONG Gang. Study on evaluation of grassland eco-system coordination based on environment-economy coordination degree model [J]. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(1): 46-49.
- [9] 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 Zhouliang, LIU Yanli, LIU Ji, 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))
- [10] 王素萍. 基于 G1 法-变异系数法的可拓学原理在围岩等级分析中的应用[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(2): 111-114. (WANG Suping. Application of extension theory based on G1 variation coefficient method in surrounding rock grade analysis [J]. Frozen Soil and Foundation, 2021, 43(2): 111-114. (in Chinese))
- [11] 曹华珍, 王天霖, 张黎明, 等. 基于组合赋权-TOPSIS 交直流配电网能效评估[J]. 南方电网技术, 2021, 15(3): 55-67. (CAO Huazhen, WANG Tianlin, ZHANG Liming, et al. Energy efficiency evaluation of AC/DC distribution network based on combined weighting TOPSIS [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(3): 55-67. (in Chinese))
- [12] 唐晓灵, 林敏, 刘雷磊. 基于博弈论组合赋权-TOPSIS 法的采矿方案优选模型及应用[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(5): 5-10. (TANG Xiaoling, LIN Min, LIU Leidong. Optimization model of mining scheme and its application based on combination weighting and TOPSIS method of game theory[J]. Mining R&D, 2021, 41(5): 5-10. (in Chinese))
- [13] 门业堃, 钱梦迪, 于钊, 等. 基于博弈论组合赋权的电力设备供应商模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 179-186. (MEN Yekun, QIAN Mengdi, YU Zhao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of power equipment suppliers based on game theory and combination weighting [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 179-186. (in Chinese))
- [14] 陈伟, 夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. 数学的实践与认识, 2007(1): 17-22. (CHEN Wei, XIA Jianhua. The optimal combination weighting method of synthesizing subjective and objective weight information[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007(1): 17-22. (in Chinese))
- [15] 张成科. 基于熵的水质模糊评价模型及应用[J]. 系统工程理论与实践, 1998(6): 81-86. (ZHANG Chengke. Model and application of the water quality fuzzy assessment based on entropy [J]. Systems Engineering, 1998(6): 81-86. (in Chinese))
- [16] 高清震. 基于最大熵原理的庄河市水资源承载力模糊评价[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(2): 197-200. (GAO Qingzhen. Fuzzy evaluation of water resources bearing capacity of Zhuanghe City based on maximum weight theory [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(2): 197-200. (in Chinese))
- [17] 陈耀辉, 孙春燕. 对最大隶属原则有效度的进一步研究[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 2002(1): 47-49. (CHEN Yaohui, SUN Chunyan. Further study of validity for the maximum subordination principle [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2002(1): 47-49. (in Chinese))
- [18] 陈兴雷, 李淑杰, 郭忠兴. 吉林省延边朝鲜族自治州土地利用与生态环境协调度分析[J]. 中国土地科学, 2009, 23(7): 66-70. (CHEN Xinglei, LI Shujie, GUO Zhongxing. Analysis on the harmonious degree between land use and ecological environment in Yanbian Korean Autonomous Prefecture, Jilin Province [J]. China Land Science, 2009, 23(7): 66-70. (in Chinese))
- [19] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体

- 系:以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理,1999 (2):76-82. (LIAO Zhongbin. Quantitative evaluation and classification system of coordinated development of environment and economy: a case study of Pearl River Delta Urban agglomeration[J]. Tropical geography, 1999 (2):76-82. (in Chinese))
- [20] 汤钊,李建平,余乐安,等. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010,30(4):594-602. (TANG Ling, LI Jianping, YU Lean, et al. Quantitative evaluation method of system coordination development based on distance coordination degree model[J]. Systems Engineering, 2010, 30(4): 594-602. (in Chinese))
- [21] 傅春,邓俊鹏,吴远卓. 基于BP神经网络和协调度的河流健康评价[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(6): 1422-1431. (FU Chun, DENG Junpeng, WU Yuanzhuo. River health assessment based on BP neural network and coordination degree[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(6): 1422-1431. (in Chinese))
- [22] 马克迪,董增川,金大伟,等. 基于改进的POME模糊综合评价模型的江苏省河流生态健康评价[J]. 水电能源科学,2021,39(1):67-70. (MA Kedi, DONG Zengchuan, JIN Dawei, et al. Evaluation of river ecological health in Jiangsu Province based on improved POME fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(1): 67-70. (in Chinese))
- [23] 程元庚,李福林,范明元,等. 基于组合赋权和改进物元可拓模型的泗河生态系统健康评估[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(3): 230-238. (CHENG Yuangeng, LI Fulin, FAN Mingyuan, et al. Ecosystem health assessment of the Sihe River based on combined weighting and improved matter element extension model[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2021, 35(3): 230-238. (in Chinese))

(收稿日期:2021-03-10 编辑:骆超)

(上接第44页)

- [5] LEHNER B, CZISCH G, VASSOLO S. The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis[J]. Energy Policy, 2005, 33(7): 839-855.
- [6] OLIVIER A C H, MEIJER L J J, RUUD J, et al. Systematic high-resolution assessment of global hydropower potential[J]. PLOS ONE, 2017, 12(2): 1-10.
- [7] CHANG X L, LIU X H, ZHOU W, et al. Hydropower in China at present and its further development[J]. Energy, 2010, 35(11): 4400-4406.
- [8] 陈云华,吴世勇,马光文. 中国水电发展形势与展望[J]. 水力发电学报,2013,32(6):1-4. (CHEN Yunhua, WU Shiyong, MA Guangwen. Trends and prospects of hydropower development in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 32(6): 1-4. (in Chinese))
- [9] 韩冬,方红卫,严秉忠,等. 2013年中国水电发展现状[J]. 水力发电学报,2014,33(5):1-5. (HAN Dong, FANG Hongwei, YAN Bingzhong, et al. China's hydropower status in 2013[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 33(5): 1-5. (in Chinese))
- [10] 周兴波,杜效鹄. 2018年全球水电发展现状与开发潜力分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):18-23. (ZHOU Xingbo, DU Xiaohu. Development status and potential analysis of global hydropower in 2018[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 18-23. (in Chinese))
- [11] 周建平,杜效鹄,周兴波. 新阶段中国水电开发新形势、新任务[J]. 水电与抽水蓄能,2021,7(4):1-6. (ZHOU Jianping, DU Xiaohu, ZHOU Xingbo. The new situation and tasks of hydropower development in China[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(4): 1-6. (in Chinese))
- [12] 周建平,杜效鹄,周兴波. "十四五"水电开发形势分析、预测与对策措施[J]. 水电与抽水蓄能,2021,7(1):1-5. (ZHOU Jianping, DU Xiaohu, ZHOU Xingbo. The analysis, forecasting and countermeasures for hydropower development situation in the 14th Five-Year Plan[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(1): 1-5. (in Chinese))
- [13] 周兴波,张梁,姚虞. 加拿大水电开发与大坝安全管理体系研究[J]. 水力发电,2020,46(4):89-96. (ZHOU Xingbo, ZHANG Liang, YAO Yu. Study on hydropower development and dam safety management system in Canada[J]. Water Power, 2020, 46(4): 89-96. (in Chinese))
- [14] 李锐,杜治洲,杨佳刚,何思源,张凌. 中国水电开发现状及前景展望[J]. 水科学与工程学报,2019(6):73-78. (LI Rui, DU Zhizhou, YANG Jiagang, et al. The current situation and prospect of hydropower development in China[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2019(6): 73-78. (in Chinese))
- [15] IHA. 2016 Hydropower Status Report[R]. London: International Hydropower Association, 2016.
- [16] IHA. 2017 Hydropower Status Report[R]. London: International Hydropower Association, 2017.
- [17] IHA. 2018 Hydropower Status Report[R]. London: International Hydropower Association, 2018.
- [18] IHA. 2019 Hydropower Status Report[R]. London: International Hydropower Association, 2019.
- [19] IHA. 2020 Hydropower Status Report[R]. London: International Hydropower Association, 2020.
- [20] IJHD. World Atlas & Industry Guide 2021[R]. Wallington, UK: International Journal of Hydropower and Dams, 2021.

(收稿日期:2021-09-06 编辑:刘晓艳)