

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0111

基于TFAHP-CRITIC-GT的海洋垃圾分布重点岸段 评价方法研究

黄 颖

(福建省固体废物及化学品环境管理技术中心, 福建 福州 350003)

摘 要: 针对福建省海洋垃圾分布重点岸段的评价管理需求, 本研究建立了涵盖人类活动和生态保护两个维度的评价指标体系, 涵盖海水养殖集中区、居民生活区、港口集中区、工业集中区及旅游自然保护区 5 类评价指标, 在此基础上开发了一个用于海洋垃圾分布重点岸段评价的 TFAHP-CRITIC-GT 综合模型。用此模型对福建省全省岸段进行分级, 获得海洋垃圾易堆积的岸段 (岸段等级 A 级和 B 级) 760 条, 占全省岸段长度的 51.8%, 并通过无人机技术与海洋垃圾密度指标, 发现 A 级岸段垃圾密度最高, 平均密度为 $653.5 \text{ m}^2/\text{km}$, 而 E 级岸段垃圾密度最低, 平均密度为 $44.4 \text{ m}^2/\text{km}$ 。可见, 本研究提出的评价模型能够为沿海区域的海洋垃圾清理和管理提供科学依据, 提升相关单位在海洋资源管理中的决策效率。

关键词: 海洋垃圾重点岸段分类; TFAHP-CRITIC-GT 模型; 垃圾密度; 海岸带管理

中图分类号: X84

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2026)02-0284-11

Research on the evaluation method of key coastal segments for marine litter distribution based on TFAHP-CRITIC-GT

Huang Ying

(Fujian Province Waste Management and Environmental of Chemicals Technology Center, Fuzhou 350003, China)

Abstract: In response to the evaluation and management requirements for key coastal segments with marine debris distribution in Fujian province, this study established an evaluation index system encompassing both human activities and ecological protection dimensions. The system integrates five assessment indicators: concentrated mariculture zones, residential clusters, concentrated port zones, concentrated industrial zones, and natural tourism conservation areas. A comprehensive TFAHP-CRITIC-GT(triangular fuzzy analytic hierarchy process - criteria importance though intercriteria correlation - grey theory) evaluation model was developed for assessing key coastal segments prone to marine debris accumulation. The model was applied to grade the entire coastal segments of Fujian province, identifying 760 high-risk segments (Grades A and B) for debris accumulation, accounting for 51.8% of the total coastal length. Field validation using UAV surveys and marine debris density measurements confirmed that Grade A segments exhibited the highest debris density (averaging $653.5 \text{ m}^2/\text{km}$), while Grade E segments showed the lowest (averaging $44.4 \text{ m}^2/\text{km}$). These results demonstrate that the proposed evaluation model can provide scientific support for marine debris cleanup and coastal management, effectively enhancing decision-making efficiency in marine resource management for relevant authorities.

收稿日期: 2025-07-11, 修订日期: 2025-09-24

基金项目: 福建省环保科技计划项目(2024R024); 生态环境部近岸海域生态环境重点实验室科技项目(20240107JD)

作者简介: 黄 颖 (1982-), 女, 福建福州人, 高级工程师, 研究生, 主要从事环境管理和污染防治技术研究, E-mail:

21493721@qq.com

Key words: classification of key coastal segments for marine debris; TFAHP-CRITIC-GT model; litter density; coastal zone management

海洋蕴藏丰富资源与潜力,为推动高质量发展提供了强劲“蓝色动能”。作为我国东南沿海重要省份,福建海岸线长、海洋资源丰富,具有发展海洋经济的天然优势^[1]。用海,更要养海。沿海海岸的整洁对于海洋生态保护和修复、海洋绿色产业发展、海洋文化具有重要意义^[2],然而随着沿海工业、农业的发展与海岸带人口的激增,大量持久性的、人造的或经加工的固体废弃物^[3]通过多种途径进入海洋循环系统,成为海洋垃圾后堆积在海岸滩涂,部分随海水洋流作用沉积在附近海岸带上,破坏海湾生态环境^[4-6]。邓炜华等^[7]以 2023 年广东省的 11 处海域(岸滩)垃圾的采样调查结果为基础,分析了海洋垃圾密度、分布和来源,并利用海滩质量指数评估了海洋垃圾风险。张长炜等^[8]对威海市 6 条海滩的垃圾来源及时空变化进行研究,发现垃圾主要来源于娱乐休闲等人类陆地活动与海上渔业养殖等生产活动。Ben-Haddad 等^[9]利用包含 18 个物理参数和 8 个人类影响因素的海岸风景评估系统(CSES),对摩洛哥阿加迪尔海岸的 40 个沿海地点进行景观评估,研究发现,52.5%的地点被归类为受人类活动严重影响的退化自然区域,而没有任何地点保持原始未受干扰的自然状态。

目前,关于受海洋垃圾影响的重点岸段分级研究鲜有开展,研究影响海洋垃圾产生、聚集的关键因素,分析海洋垃圾重点岸段的空间分布,并据此提出具体的防治策略,可以为近岸海域的海洋垃圾治理提供新的研究方向。基于此,本研究以福建省近岸海域岸段为研究对象,构建了融合专家经验的海洋垃圾重点岸段评价指标体系,创新性地采用三角模糊层次分析法(triangular fuzzy analytic hierarchy process, TFAHP)(主观赋权法)与 CRITIC(criteria importance though intercriteria correlation)法(客观赋权法)协同建模,结合博弈论(game theory, GT)实现主客观权重的动态融合,有效弥补了单一赋权方法的不足,显著提升了权重分配的科学性与合理性。研

究从海水养殖集中区、居民生活区、港口集中区、工业集中区和旅游自然保护区 5 类典型人类活动区域出发,基于组合权重模型,将研究区重点岸段等级分为 A、B、C、D、E 共 5 类,并结合无人机航拍图像分析,精确量化海漂垃圾分布密度,证实构建模型对海漂垃圾分布特征的刻画能力。本研究提出的 TFAHP-CRITIC-GT 模型验证了福建省近岸海域治理的有效性,分级结果可直接指导治理资源的优先级配置,推动“有人管”向“管得住、管得好”的治理范式转变,为政策制定者提供量化决策依据,且技术路径具有跨区域可复制性,可为浙江、广东等沿海省份提供海漂垃圾治理的标准化评估框架,助力构建“监测-预警-治理-评估”一体化的海洋生态环境管理体系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建地处中国东南部、东海之滨,海岸线总长度约 3752 km,长度居全国第二,涉及全省六市一区,位于 117°12'26"E 至 120°26'16"E, 23°35'40"N 至 27°17'26"N。如图 1 所示,全省岸线曲折,港湾众多,重要港湾有福州港、厦门港、罗源湾、三沙湾等。

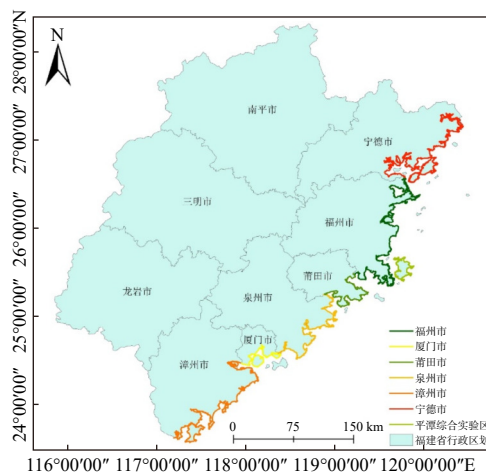


图1 研究区域

Fig. 1 Location of the study area

1.2 评价指标体系构建

1.2.1 影响因素分析

为准确评估海岸海洋垃圾分布重点岸段的指标,本研究建立综合的海洋垃圾分布重点岸段评价指标体系,构建融合主观和客观方法的TFAHP-CRITIC-GT综合赋权模型,科学确定各指标的影响权重。

福建省拥有丰富的海岸资源,由于人类活动的多样性,其海洋垃圾来源呈现明显的特征性分布。一方面,以生产经营为主导功能的岸段如大量码头、渔港、渔村、海水养殖区和主要排污泄洪口水域,是海洋垃圾的主要产生源区。这些区域中,不同类型的生产经营活动对海岸的影响各有差异,具体表现为:海水养殖包括海上养殖、滩涂及陆地养殖类型,在养殖期间使用的塑料网箱、传统渔网、浮漂、饲料袋等耗材,若未适当回收处理便容易成为海洋垃圾^[10];沿海居民区、码头等产生的生活垃圾、建筑垃圾则与人口密度和居民环保意识密切相关,易通过风力、雨水冲刷进入近岸海域^[11];工业港口区的原料运输和产品装卸活动会产生工业废渣、纤维材料和建筑废料;渔业港口区的渔船作业易残留塑料制品和报废渔具^[12]。另一方面,以生态保育为核心功能的岸段,如风景名胜区、湿地保护区、生态保护红线及饮用水源地等区域涵盖的岸段呈现截然不同的垃圾动态特征。此类区域虽不涉及高强度生产活动导致垃圾内生性问题,但其海洋垃圾分布受制于两大驱动机制:其一,基于生态系统服务功能的保护需求,管理机构会实施周期性专业清理,使该类岸段短期内维持较低垃圾存量;其二,由于近岸环流、潮汐等海域流体动力作用,邻近生产、生活型岸段产生的漂浮垃圾未被有效拦截逐渐向此类水域汇集,形成被动性垃圾辐聚效应^[13]。综上所述,本研究将上述生产活动频繁与生态保护型区域视为影响海洋垃圾分布的关键区域,分析其对海岸带环境的影响。

1.2.2 评价指标体系建立

构建一个科学、系统且可操作的综合评价指标体系对于准确评估受多重因素影响和制约的海洋垃圾分布重点岸段等级至关重要。通过分析相关资料及专家咨询,并结合海洋垃圾来源及

特点,本研究设置海岸岸段等级为目标层,并初步确定 2 个准则层,分别为人类活动准则层、生态保护准则层。其中人类活动准则层包括居民生活区、工业集中区、港口集中区、海水养殖集中区 4 个指标层,生态保护准则层包括生态保护红线区、风景名胜区、湿地保护区、饮用水源地 4 个指标层,最终建立海洋垃圾分布重点岸段评价指标体系,具体列于表 1。

表 1 海洋垃圾分布重点岸段评价指标体系
Tab.1 Evaluation indicator system for critical coastal segments of marine debris distribution

目标层	准则层	指标层	数据来源
海岸岸段	人类活动	居民生活区	国土变更调查数据
		工业集中区	国土变更调查数据
		港口集中区	国土变更调查数据
		海水养殖集中区	遥感解译数据
	生态保护	生态保护红线区	国土变更调查数据
		风景名胜区	国土变更调查数据
		湿地保护区	国土变更调查数据
		饮用水源地	国土变更调查数据

其中,国土变更调查数据中的矢量图层经预处理后统一转换为栅格格式,以支持各海岸岸段的空间分析与指标提取;遥感解译数据则首先进行影像正射校正,随后解译空间分布范围,并依据其分布密度和覆盖面积转化为栅格格式,用于后续各海岸岸段的空间叠加分析与特征提取。

1.3 TFAHP-CRITIC-GT 综合赋权模型

1.3.1 TFAHP 主观赋权法

三角模糊层次分析法^[14-15]结合了传统层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)^[16]的结构化框架和三角模糊数^[17]的模糊逻辑处理能力。针对研究问题的复杂性及领域特征,选取 2~5 名具有不同专业背景的专家参与评估,以兼顾专业判断的权威性与视角的多样性。为有效刻画专家在评价过程中经验与主观判断的模糊性,采用三角模糊数构成的区间判断代替 AHP 中的精确数值判断。每位专家独立构建模糊判断矩阵,最终通过几何平均法对多位专家的判断矩阵进行集成,形成三角模糊判断矩阵,从而提升权重计算的科学与结果的可靠性,步骤

如下。

(1) 构建三角模糊一致判断矩阵

三角模糊数是一种利用三角形隶属函数来描述某个特征值 x 对模糊集合 N 的隶属程度, 对于任意三角模糊数 $A = (l, m, u)$, 其隶属函数如下:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x < m \\ \frac{x-u}{m-u}, & m \leq x < u \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: l 、 u 分别代表模糊数的下限和上限; m 代表模糊数的中值; x 表示三角模糊数隶属函数论域中的一个具体取值。

隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 描述了该值隶属于某一模糊概念的程度, 定义了“模糊性”的数学规则, 而三角模糊数 $A = (l, m, u)$ 则是在该规则下的具体表达形式, 用于量化专家的语言判断。以 AHP 标度为基础, 结合三角模糊函数, 运用三角模糊层次分析法判断标度对各级指标进行两两间比

较、赋值, 构造三角模糊决策矩阵 $\tilde{A}^k$ (公式 2)。

$$\tilde{A}^k = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11}^k & \tilde{a}_{12}^k & \cdots & \tilde{a}_{1n}^k \\ \tilde{a}_{21}^k & \tilde{a}_{22}^k & \cdots & \tilde{a}_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1}^k & \tilde{a}_{n2}^k & \cdots & \tilde{a}_{nn}^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\tilde{A}^k$ 为第 k 个专家的评价结果; $\tilde{a}_{11}^k = \tilde{a}_{22}^k = \cdots = \tilde{a}_{nn}^k = (1, 1, 1)$ 。

(2) 检验矩阵一致性

对于多个专家的评估结果, 通过几何平均值法确定平均矩阵 $\tilde{A}$, 并计算平均矩阵的中值矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$, 分别通过公式 (3) 和公式 (4) 计算一致性指标 CI 、一致性比例 CR , 其中随机一致性指标 RI 数值列于表 2。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

当 $CR < 0.1$ 时, 认为中值矩阵具有满意的一致性, 通过一致性检验; 否则重新构建三角模糊一致判断矩阵, 对 $\tilde{a}_{ij}$ 进行调整。

表 2 RI 指标数值与矩阵阶数 n 对应表

Tab.2 Random index (RI) reference values corresponding to matrix dimension (n)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(3) 求解综合评价指数

通过计算指标 i 的综合评价指数 $\tilde{S}_i$ 来衡量其重要性, 计算公式如下:

$$\tilde{S}_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^n l_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right) \quad (5)$$

(4) 确定可能度矩阵

基于三角模糊数成对比较的规则, 通过范围分析法对 $\tilde{S}_i$ 进行成对比较^[18]。对于三角模糊数 $\tilde{M}_i = (l_i, m_i, u_i)$ 、 $\tilde{M}_j = (l_j, m_j, u_j)$, 两个矢量成对比较的可能度 D 表达式如下:

$$D(\tilde{M}_i \geq \tilde{M}_j) = \begin{cases} 1 & , m_i \geq m_j \\ 0 & , \text{其他} \\ \frac{l_j - u_i}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)} & , m_j > m_i, u_i \geq l_j \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i, j = 1, \dots, n; i \neq j$ 。

(5) 构建主观权重集

取可能度矩阵中每个指标的最小值作为该指标的相对权重, 具体计算公式如下:

$$w_i = \min(\tilde{M}_i \geq \tilde{M}_j) (i \neq j) \quad (7)$$

将各个评价指标主观权重组合, 构建评价体系的主观权重集 W , 具体公式如下:

$$W = \left(\frac{w_1}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{w_2}{\sum_{i=1}^n w_i}, \dots, \frac{w_n}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

1.3.2 CRITIC 客观赋权法

客观赋权主要通过分析客观数据来确定指标的重要性, 目前广泛使用的方法包括熵权法、极差法等, CRITIC 法对传统熵权法进行了完善^[19-20], 通过指标间的分布离散程度和潜在冲突反映其在决策中的重要性。因此, 本文采用 CRITIC 法来计算客观权重, 具体步骤如下。

(1) 指标正向化

为确保不同量纲的评价指标不影响评价结果,本研究采用正向化或逆向化方法对指标进行标准化处理。结合评价指标体系,指标数值越大越好,因此根据公式(9)将指标矩阵 X 进行正向化无量纲处理,获得标准化矩阵 X' 。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (9)$$

式中: x_{ij} 代表第 i 个评价对象第 j 个评价指标的数值; x'_{ij} 代表标准化后指标数值。

本研究中 x_{ij} 由 ArcGIS 提取栅格值并赋值得到,反映了指标的空间分析结果。

(2) 求解指标变异性

变异性高的指标意味着在该指标上数据点之间的差异较大,相应地,权重就较高。本研究采用公式(10)计算第 j 个指标的标准差 S_j , 用来衡量各指标数值的变异情况。

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (10)$$

式中: n 代表评价指标的数量; $\bar{x}_j$ 代表第 j 个评价指标的数据平均值。

(3) 求解指标冲突性

指标冲突性低(指标间相关性低)表明各指标间独立性较高,每个指标提供的信息相对独特,有利于增加决策分析的维度。相反,若指标之间的相关性过高,则会降低模型在整体评估中的信息效率。本研究采用公式(11)计算第 i 个指标与第 j 个指标的相关系数 h_{ij} , 用来衡量各指标数值的冲突情况 R_j 。

$$h_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (11)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - h_{ij}) \quad (12)$$

式中: x_{ki} 代表第 k 个样本在第 i 个评价指标的数值。

(4) 构建客观权重集

依据公式(13),计算得出的第 i 个指标的信息量 C_j ,其数值的大小直接反映了该指标含有的信息丰度。信息量越大,表明该指标在整体评价体系中的重要性越高,即权重越大。客观权重

w'_j 计算方法如下:

$$C_j = S_j * R_j \quad (13)$$

$$w'_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (14)$$

将各个评价指标客观权重组合,构建评价体系的客观权重集 W' ,具体如下:

$$W' = \left(\frac{C_1}{\sum_{j=1}^n C_j}, \frac{C_2}{\sum_{j=1}^n C_j}, \dots, \frac{C_n}{\sum_{j=1}^n C_j} \right) (i=1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

1.3.3 博弈论综合赋权法

博弈论^[21]提供了一个理论框架,用于分析和预测个体或群体在有冲突或者有合作可能性的情况下的行为和决策,从而帮助研究者识别不同策略的效果,优化组合赋权方法中的决策过程,因此在数学、经济等领域被广泛应用^[22-23]。

(1) 构建基础权重集

为确定最优组合权重,本研究基于博弈论法综合权重赋权,将 TFAHP 确定的主客观权重集 W 和 CRITIC 确定的客观权重集 W' 进行组合,构建权重向量 $w_k = (w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}) (k=1, 2, \dots, K)$ 。其中, K 为确定权重方法个数, n 为评价指标个数。本研究中权重向量 k 取值为 2, n 取值为 5。则该向量的线性组合 ω 计算公式如下:

$$\omega = \sum_{k=1}^K \lambda_k w_k^T, \left(\lambda_k > 0, \sum_{k=1}^K \lambda_k = 1 \right) \quad (16)$$

式中: λ_k 为线性组合系数。

(2) 博弈论优化权重

基于博弈论思想,优化 K 个线性组合系数 λ_k ,通过公式(17)最小化权重向量 ω 和独立权重 w_k 之间的距离,再根据公式(18)计算线性组合的最优解 λ_k^* ,代入公式(19)后求得博弈论组合向量解 w_k^* (组合权重值),从而实现最优权重分配策略。

$$\min \left\| \sum_{k=1}^K \lambda_k w_k^T - w_k \right\|_2, k=1, 2, \dots, K \quad (17)$$

$$\lambda_k^* = \frac{|\lambda_k|}{\sum_{k=1}^K |\lambda_k|} \quad (18)$$

$$w_k^* = \sum_{k=1}^K \lambda_k^* w_k^T \quad (19)$$

2 结果与讨论

2.1 权重计算及对比分析

由于风景名胜区、湿地保护区、生态保护红线以及饮用水源地可以有效减少海洋垃圾的积聚,即在这些区域内海洋垃圾的分布会有所减少。因此,本研究将上述区域统一归类为旅游自

然保护区,并将其与海水养殖集中区、居民生活区、港口集中区以及工业集中区一并作为评估海洋垃圾重点岸段的指标。根据专家评价结果,通过几何平均值法构建 5 类评价指标的三角模糊判断矩阵 $\bar{A}$ (表 3),分别采用 TFAHP 法和 CRITIC 法计算指标的主观权重和客观权重(图 2)。

表 3 海岸海洋垃圾分布重点岸段指标体系三角模糊判断矩阵 $\bar{A}$

Tab.3 Judgment matrix for the evaluation indicator system of key coastal segments of marine litter distribution

	旅游自然保护区	居民生活区	工业集中区	海水养殖集中区	港口集中区
旅游自然保护区	(1,1,1)	(0.13,0.14,0.17)	(0.28,0.33,0.46)	(0.10,0.11,0.11)	(0.17,0.20,0.22)
居民生活区	(6,7,7.5)	(1,1,1)	(2.4,3,4.2)	(0.21,0.33,0.4)	(3.0,4,4.1)
工业集中区	(2.2,3,3.6)	(0.24,0.33,0.42)	(1,1,1)	(0.19,0.33,0.39)	(0.26,0.33,0.37)
海水养殖集中区	(8.2,9,9.4)	(2.5,3,4.3)	(2.6,3,5.2)	(1,1,1)	(3.7,5,5.9)
港口集中区	(4.5,5,5.8)	(0.24,0.25,0.33)	(2.7,3,3.8)	(0.17,0.20,0.27)	(1,1,1)

注:判断矩阵 $CR=0.09<0.1$,符合一致性要求

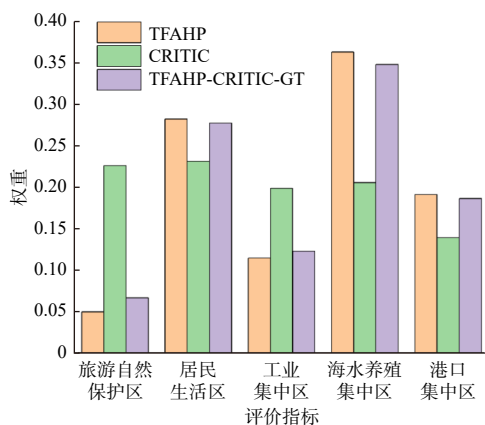


图 2 不同方法权重对比

Fig. 2 Comparative analysis of weights derived from different methods

权重对比如图 2 所示。在主观权重中,海水养殖集中区和居民生活区权重较大,分别为 0.36、0.28,其次依次为港口集中区、工业集中区、旅游自然保护区,权重分别为 0.19、0.12、0.05。其中,海水养殖集中区权重最高,反映出专家在评估过程中对其环境影响的高度关注。福建省作为我国海洋经济强省,海水养殖业在地方经济和就业中占据重要地位^[24],但其发展也伴随着显著的生态环境压力。养殖过程中广泛使用的塑料网箱、浮球、渔网及饲料包装等易流失材料,若管理不当,极易转化为海洋垃圾,对红树

林、海草床、珊瑚礁等近岸生态系统构成直接威胁。近年来,福建省持续推进“海洋生态红线”制度,强化对养殖活动的环境监管,进一步凸显了该指标在海洋环境保护及海岸评价中的敏感性与优先级。在客观权重方面,通过充分挖掘定量指标数据信息,海水养殖集中区、居民生活区、港口集中区、工业集中区和旅游自然保护区的权重分别为 0.21、0.23、0.14、0.20 和 0.22。该结果主要反映各指标在空间分布密度、数据变异程度及与其他指标间冲突性等方面的综合信息量,具有较强的客观性和数据支撑性,未体现人为偏好或政策导向。基于博弈论法综合主观、客观权重,形成基于 TFAHP-CRITIC-GT 评价模型的综合权重,海水养殖集中区、居民生活区、港口集中区、工业集中区和旅游自然保护区的综合权重分别为 0.35、0.28、0.18、0.12 和 0.07。

2.2 基于 TFAHP-CRITIC-GT 的岸段评价

基于 2024 年全国国土变更调查的居民区、工业区、港口区、旅游风景区、自然保护区等地类图斑以及福建省全省海水养殖矢量数据,本研究运用核密度法来衡量不同评价指标的规模和距离对附近岸段的影响程度(图 3),应用自然断点法对不同指标的数值进行分级,每类指标分为 5 级,以此确定指标得分。此外,根据用地类

型和县级行政区划边界,福建省海湾共划分为 1487 条岸段,每条岸段长度不大于 3 km。

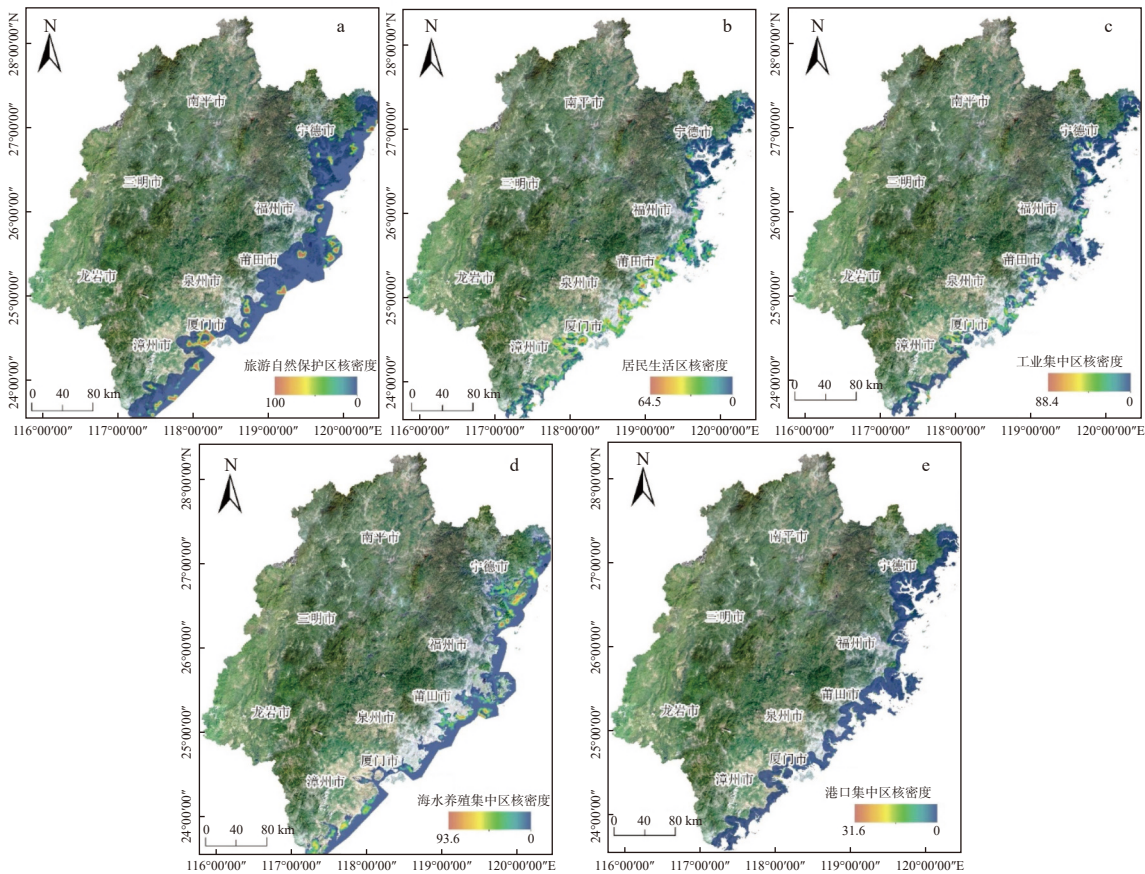


图 3 评价指标分布

Fig. 3 Spatial distribution of evaluation indicators

2.3 岸段评价结果

结合 TFAHP-CRITIC-GT 的综合权重及评价指标分值,确定全省岸段的综合模型分值,通过公式(20)和公式(21)计算岸段归一化评价得分 F_{norm} ,利用自然断点法确定岸段分级,岸段等级划分及描述列于表 4,岸段分布如图 4 所示。

$$F = \frac{\sum_i^n (F_i * W_i)}{\sum_i^n W_i} \quad (20)$$

$$F_{\text{norm}} = \frac{F - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (21)$$

式中: F_i 、 W_i 分别表示各评价指标的得分和权重。

如图 4 所示,全省 1487 条岸段中,福州市岸段长度 859.5 km,长度占比 22.3%;厦门市岸段长度 204.5 km,长度占比 5.6%;莆田市岸段长度 264.5 km,长度占比 6.8%;泉州市岸段长度

452.4 km,长度占比 12.2%;漳州市岸段长度 784.1 km,长度占比 20.7%;宁德市岸段长度 1018 km,长度占比 26.9%;平潭综合实验区岸段长度 211.6 km,长度占比 5.6%。就本次评价结果而言,全省 A 级岸段 323 条,岸段长度 838.74 km,长度占比 22.10%;B 级岸段 437 条,岸段长度 1125.70 km,长度占比 29.67%;C 级岸段

表 4 岸段等级划分及描述

Tab.4 Grading criteria and descriptions for coastal segment classification

岸段等级	取值范围	描述
A	[0, 0.348)	一级岸段,容易分布海洋垃圾岸段
B	[0.348, 0.527)	二级岸段,较容易分布海洋垃圾岸段
C	[0.527, 0.674)	三级岸段,一般容易分布海洋垃圾岸段
D	[0.674, 0.813)	四级岸段,海洋垃圾较少岸段
E	[0.813, 1]	五级岸段,较难分布海洋垃圾岸段

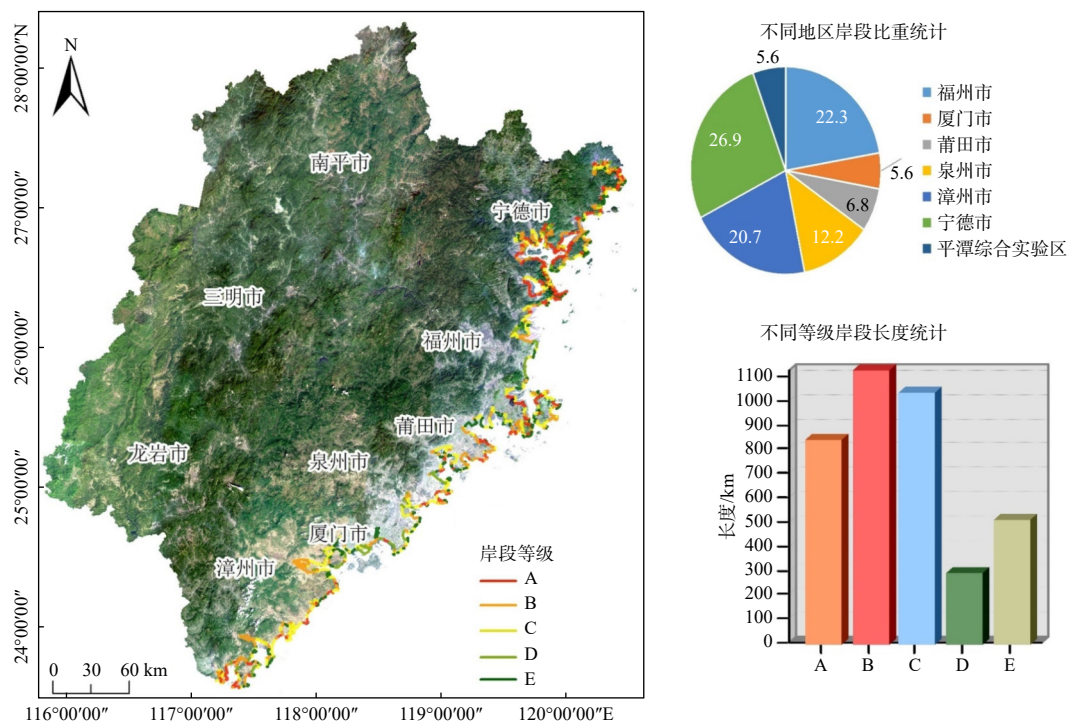


图4 基于 TFAHP-CRITIC-GT 的岸段分级结果及统计

Fig. 4 Grading results and statistical graphs of coastal segments based on TFAHP-CRITIC-GT

412 条, 岸段长度 1033.02 km, 长度占比 27.22%; D 级岸段 114 条, 岸段长度 285.16 km, 长度占比 7.51%; E 级岸段 201 条, 岸段长度 512.03 km, 长度占比 13.49%。在 A 级岸段中, 福州市岸段 88 条, 岸段长度 229.64 km, 长度占比 27.4%; 厦门市岸段 2 条, 岸段长度 5.49 km, 长度占比 0.7%; 莆田市岸段 16 条, 岸段长度 42.29 km, 长度占比 5.0%; 泉州市岸段长度 55.79 km, 长度占比 6.7%; 漳州市岸段长度 114.33 km, 长度占比 13.6%; 宁德市岸段长度 349.15 km, 长度占比 41.6%; 平潭综合实验区岸段长度 42.05 km, 长度占比 5.0%。

2.4 结果验证

针对全省重点岸段, 本研究在 2024 年度, 采用无人机航拍与内业解译方式, 在全省范围内抽查 A 级至 E 级共计 48 条岸段海洋垃圾分布情况, 岸段垃圾密度计算公式如下:

$$D = \frac{m}{L} \quad (22)$$

式中: D 为岸段分布垃圾密度 (m^2/km); m 为海洋垃圾分布面积 (m^2); L 为监测区岸段长度 (km)。

无人机抽查不同等级岸段垃圾密度分布情况如图 5a 所示。颜色的变化直观地展示了不同等级岸段的垃圾密度差异, 容易分布海洋垃圾的 A 级岸段垃圾密度最高, 平均密度为 $653.5 \text{ m}^2/\text{km}$, 而不容易分布海洋垃圾的 E 级岸段垃圾密度最低, 平均密度为 $44.4 \text{ m}^2/\text{km}$ 。为了检验不同岸段等级之间垃圾密度是否存在显著差异, 本研究零假设为不同等级岸段的垃圾密度分布相同, 利用 Kruskal-Wallis^[25] 独立样本检验进行分析。结果表明, 计算出的渐进显著性小于 0.05, 即有足够的统计依据拒绝零假设。结合箱体图 (图 5b) 可以看出, A 级岸段到 E 级岸段的垃圾密度逐步降低, 呈现递减趋势。在垃圾密度较高的 A 级岸段中, 福州市的鉴江半岛-黄岐半岛东部海域湾区在 2024 年 8 月的现场调查结果 (图 6) 显示, 该岸段有较多废弃渔网渔具、废弃篷布、废弃渔排、塑料垃圾及泡沫浮球聚集, 海洋垃圾密度为 $884.9 \text{ m}^2/\text{km}$; 宁德市的三沙湾湾区在 2024 年 3 月的现场调查结果 (图 7) 显示, 海岸沿线有较多废弃撑架、泡沫浮球、废弃鱼排及其他渔业垃圾聚集, 海洋垃圾密度为 $726.1 \text{ m}^2/\text{km}$ 。

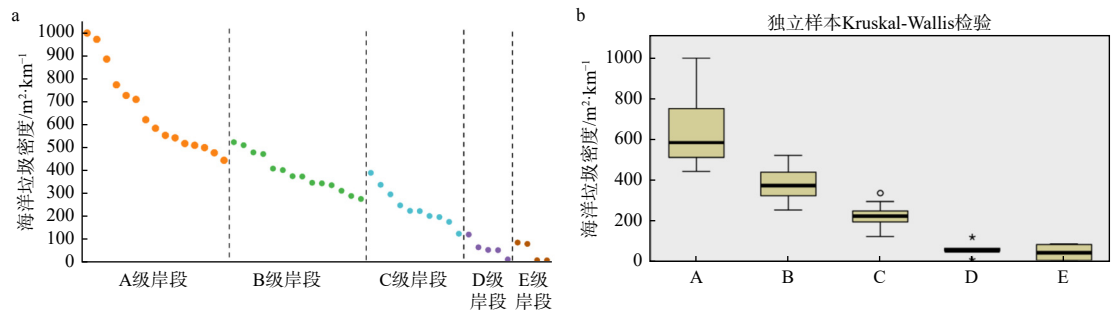


图 5 无人机航拍抽查岸段海洋垃圾分布及 Kruskal-Wallis 检验

Fig. 5 Statistical mapping and Kruskal-Wallis Test of marine litter distribution from UAV aerial surveys in sampled coastal segments

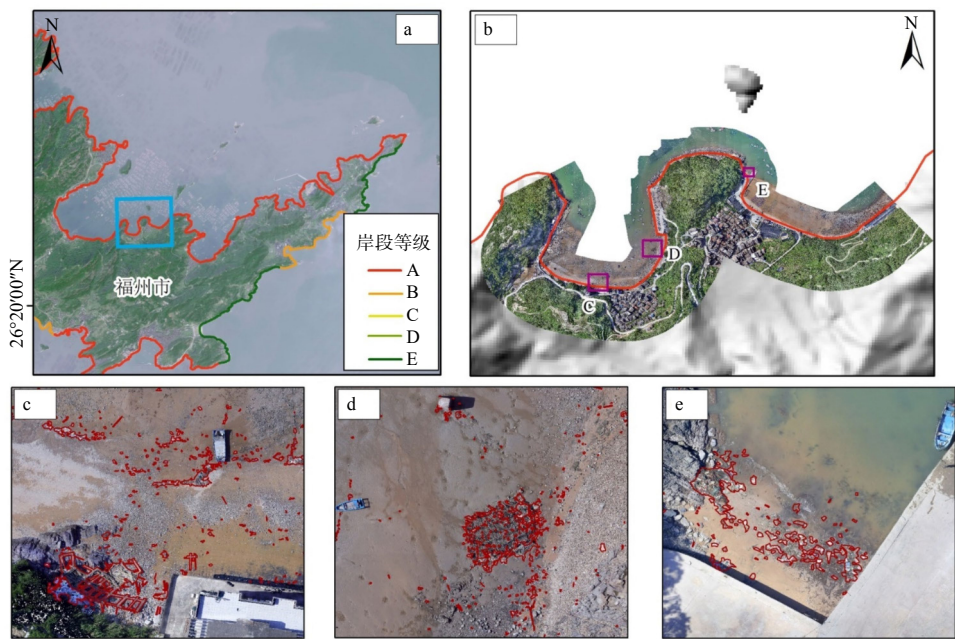


图 6 鉴江半岛-黄岐半岛东部海域湾区无人机航拍调查情况

Fig. 6 UAV aerial survey in the coastal bay area of Jianjiang peninsula–Huangqi peninsula eastern waters

从全省范围来看, 宁德市三沙湾湾区作为福建省 A 级岸段的核心分布区, 其生态特征与产业布局存在显著关联性。该区域依托三沙湾优越的自然条件, 已发展成为以黄花鱼、海带为代表的规模化海水养殖基地, 其生产体系深度依赖泡沫网箱与浮球等设施。这种集约化养殖模式在提升产量的同时, 也衍生出特有的环境风险。随着养殖设施的老化, 产生的泡沫浮球、塑料组件以及破损渔网在潮汐动力的作用下容易沿岸线扩散, 导致海洋垃圾污染呈现空间累积效应, 进而形成环境压力。此类污染通过底栖沉积物的

迁移对近岸生物栖息地造成持续性的扰动, 部分污染物亦可通过生物富集作用沿食物链逐级放大, 最终威胁到海洋生态系统的稳定性^[26]。因此, 为改善重点海岸海洋垃圾聚集问题, 对于海水养殖集中区, 建议地方管理机构制定并执行更为严格的废弃物处理规定, 落实《福建省海水养殖转型升级行动方案》, 确保养殖过程中产生的废弃物被妥善处理, 并加强推广使用以可降解材料为原料的塑胶渔排等设施替代传统的以非降解材料为原料的塑料网箱。此外也需加强对养殖户的环保教育和培训, 提升其环保的意识和责

任感。对于海岸周边居民生活区、港口集中区和工业集中区,建议完善对废弃物的管理措施,并加强对环保法规的执行力度,以减少垃圾在海岸线的堆积。同时,建立并强化海上环卫队伍,

负责监督和管理海岸线的清洁工作,并定期组织社区居民参与岸段的环卫保洁活动,增强社区居民的环保意识和参与度。

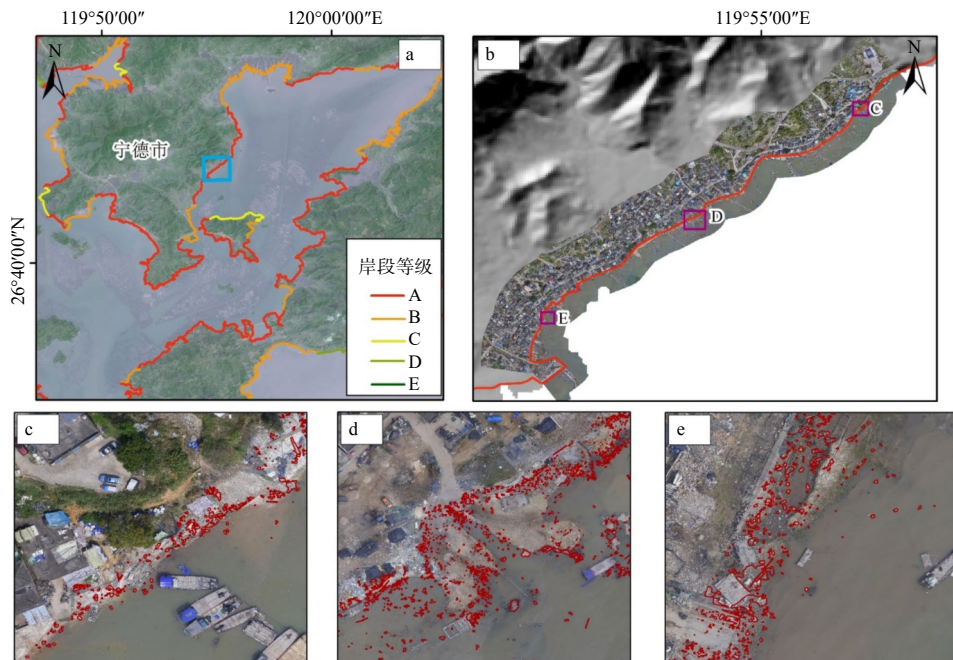


图7 三沙湾无人机航拍调查情况

Fig. 7 UAV aerial survey in Sansha bay

3 结论

(1)基于海岸海洋垃圾的分布和特点,本研究结合专家经验,从人类活动和生态保护角度建立评价指标体系,综合主观权重与客观权重优势,构建了TFAHP-CRITIC-GT综合模型,并对海洋垃圾重点岸段进行了分类分级,其中海水养殖集中区、居民生活区、港口集中区、工业集中区和旅游自然保护区5类评价指标的综合权重分别为0.35、0.28、0.18、0.12和0.07。分级结果揭示全省易堆积垃圾岸段(岸段等级A级和B级)共760条,岸线长度占全省岸段的51.8%,不易堆积垃圾岸段(岸段等级D级和E级)共315条,占全省岸段的21%。

(2)经无人机外业调查及内业解译,对模型评价后的48条岸段抽查发现,易分布海洋垃圾的A级岸段垃圾密度最高,平均密度为 $653.5 \text{ m}^2/\text{km}$,而不易分布海洋垃圾的E级岸段垃圾密度最低,平均密度为 $44.4 \text{ m}^2/\text{km}$ 。经Kruskal-Wallis

独立样本检验,从A级岸段到E级岸段,海洋垃圾的密度呈逐级递减趋势,验证了TFAHP-CRITIC-GT模型对重点岸段分级能力的合理性,进一步证实其实际应用价值。

(3)尽管TFAHP-CRITIC-GT模型为受海洋垃圾影响的重点岸段评价提供了理论支持和实践参考,但是该模型仍存在一定的局限性和不足之处。例如,该模型当前未考虑季节性洋流变化、居民区人口素质及海上环卫队伍的保洁能力等因素对海洋垃圾聚集的影响。未来研究将扩展评价指标体系,收集长期监测数据,以提高海洋垃圾分布重点岸段评估的全面性和准确性,进一步促进其在海洋垃圾管理及海洋生态保护中的应用。

致谢:在论文筹备与撰写过程中,得到陈哲锋、张鑫龙、高亮明、郭玉斌、林腾、王蓉、黄茂青等同仁在资料搜集、数据整理及文稿校对等方面的有益协助,在此谨致以诚挚谢意。

参考文献:

- [1] 翟青. “厦门实践”为我国海洋生态环境治理提供样板[J]. 中华环境, 2024(11): 26-27.
- [2] Suryawan I W K, Suhardono S, Lee C H. Boosting beach clean-up participation through community resilience hypothetical scenarios[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 207: 116853.
- [3] 许海超, 周灵青, 王杰, 等. 浙江省三门县海域海洋垃圾监测研究初探[J]. 环境生态学, 2024, 6(5): 50-56.
- [4] 高宇, 黄海萍, 吴侃侃, 等. 厦门海洋垃圾防治与管理实践及启示[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(11): 91-96.
- [5] 刘会欣, 贺翼飞, 郑帅鹏, 等. 秦皇岛典型海域海洋垃圾污染现状与防治对策[J]. 河北环境工程学院学报, 2023, 33(2): 79-85.
- [6] Narloch I, Gackowska A, Wejnerowska G. Microplastic in the Baltic Sea: a review of distribution processes, sources, analysis methods and regulatory policies[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 315: 120453.
- [7] 邓炜华, 唐俊逸, 罗育池, 等. 广东省海洋垃圾污染特征、来源及风险评价[J]. 海洋环境科学, 2024, 43(5): 696-706.
- [8] 张长炜, 徐艳东, 朱金龙, 等. 山东威海典型岸滩海滩垃圾分布特征与来源分析[J]. 海洋湖沼通报, 2024, 46(1): 159-166.
- [9] Ben-Haddad M, Abelouah M R, Hajji S, et al. Scenic degradation and visual pollution along the Agadir coastline (Morocco): analysis and management[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 205: 116629.
- [10] 彭小燕, 郭梅修, 庞敏倩, 等. 广西钦州湾茅尾海海水养殖污染影响及防治对策[J]. 环境保护与循环经济, 2022, 42(11): 57-60.
- [11] Chukwuone N A, Amaechina E C, Ifelunini I A. Determinants of household's waste disposal practices and willingness to participate in reducing the flow of plastics into the ocean: evidence from coastal city of Lagos Nigeria[J]. *PLoS One*, 2022, 17(4): e0267739.
- [12] Scotti G, Esposito V, D'alessandro M, et al. Seafloor litter along the Italian coastal zone: an integrated approach to identify sources of marine litter[J]. *Waste Management*, 2021, 124: 203-212.
- [13] 李陵云, 王词稼, 褚晓婷, 等. 我国海洋塑料垃圾治理体系与成效[J]. 海洋环境科学, 2024, 43(2): 161-166.
- [14] 陶洋, 张静, 周霞. 基于三角模糊数层次分析法与网络仿真的网络整体性能评价研究[J]. 计算机应用, 2005, 25(10): 2238-2240.
- [15] Mikhailov L, Tsvetinov P. Evaluation of services using a fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Applied Soft Computing*, 2004, 5(1): 23-33.
- [16] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. *International Journal of Services Sciences*, 2008, 1(1): 83-98.
- [17] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1978, 1(1): 3-28.
- [18] 宋锦焘, 孟庆耀, 刘云贺, 等. 复杂地质条件下沥青混凝土心墙坝风险识别方法[J]. 水力发电学报, 2024, 43(01): 70-83.
- [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] 张一豪, 崔欣超, 左晨, 等. 基于博弈论组合赋权-TOPSIS法的矿井通风系统可靠性评价[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2024, 40(6): 112-117.
- [21] Fang F, Liu S T, Basak A, et al. Introduction to game theory[M]//Kamhoua C A, Kiekintveld C D, Fang F, et al. *Game Theory and Machine Learning for Cyber Security*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2021: 21-46.
- [22] Pournabi N, Janatrostami S, Ashrafzadeh A, et al. Resolution of Internal conflicts for conservation of the Hour Al-Azim wetland using AHP-SWOT and game theory approach[J]. *Land Use Policy*, 2021, 107: 105495.
- [23] 赵俊茹, 吴青, 丁文婷. 基于EW-FAHP的山地管道安全评价方法研究[J]. 化工机械, 2024, 51(6): 932-937, 943.
- [24] 廖萌. 深化“海上福建”建设推进海洋经济高质量发展研究[J]. 发展研究, 2025, 42(6): 71-76.
- [25] Ostertagova E, Ostertag O, Kovác J. Methodology and application of the Kruskal-Wallis test[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 611: 115-120.
- [26] 张长炜. 山东半岛典型岸滩海洋垃圾和微塑料污染现状与应对研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.

(本文编辑: 胡莹莹)