

程慧, 钟金香, 周圆, 等. 基于主客观赋权法的近海海砂开采适宜性评价[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(6): 53-61.

CHENG Hui, ZHONG Jinxiang, ZHOU Yuan, et al. Suitability evaluation of offshore sea sand mining based on subjective and objective weighting method[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(6): 53-61.

基于主客观赋权法的近海海砂开采适宜性评价

程慧¹, 钟金香², 周圆², 艾波^{1*}, 冯文君³

(1 山东科技大学测绘与空间信息学院, 青岛 266590; 2 广东省海洋发展规划研究中心, 广州 510000;

3 青岛阅海信息服务有限公司, 青岛 266590)

摘要:随着中国经济高速发展, 砂石资源的需求量逐年攀升, 在种类诸多的砂石资源中海砂以其储量丰富、用途广泛的特点在建筑业、化工工业等领域被广为使用。然而近年来, 海砂行业发展中存在诸多粗放式的问题, 不合理的开采不仅导致国有资源的大量流失, 更是引发一系列环境问题。因而, 在探明海砂资源后, 开展海砂开采适宜性评价十分必要。本文将污染影响、社会因素、开发难度、海岸影响、海底斜坡稳定性作为评价指标, 采用主观赋权法(层次分析法)与客观赋权法(结构熵权法)分别计算指标权重, 通过博弈理论将二者结合, 得到指标的组合同权重; 然后采用自然断点法对赋权后的各因子图层进行叠加分析, 得到海砂开采适宜性分区图, 并对广东省近海海域进行实例分析。

关键词:海砂开采; 适宜性评价; 层次分析法; 结构熵权法; 博弈理论

中图分类号: P744.2; P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.216

0 引言

近年来, 伴随全球砂石原料供需矛盾激化和环境保护压力的增大, 规模巨大的海砂受到更多关注。目前, 国内海砂资源勘查工作正持续推进^[1-2], 山东、广东、海南和福建等沿海海域均有较为可观的发现^[3-5]。海砂是主要形成于第四纪的海底松散沉积物, 广泛分布于海岸带地区, 是一种重要的资源环境要素^[6-8], 据 2017 年海砂资源潜力调查, 中国沿海省份重点区域海砂资源量约 3 434.3 亿 m³。然而, 海砂开采会对环境产生诸多影响, 盲目开采将会造成海岸线侵蚀、沙滩盐碱化等不良后果。因此, 在海砂开采规划阶段, 当勘探工程确定某处存在海砂资源后, 该处是否适宜进行海砂资源开采, 开采的

适宜性分析则不可或缺, 合理合法的海砂开采选址应符合海洋功能区划^[9-10]。

国内外学者针对海砂开采已开展诸多研究, 但研究多集中在海砂开采技术、海砂开采管理制度等方面。王秀卫等^[11]就中国海砂开采制度提出诸多切实可行的监管方案; 张琴等^[12]探讨了湛江湾海砂开采对水域环境的影响; KANG 等^[13]研究了海砂开采对小型底栖生物群落组成和停止采矿活动后重新定居率的影响; 谭茂刚等^[14]以琼州海峡东口为例, 初步探索了小范围内海砂资源开发情况。目前, 针对大范围内海砂开采区域规划方面的研究鲜有开展, 研究海砂资源的分布规律和控制因素, 对合理、可持续地开发利用海砂资源具有重要意义^[15]。

本研究以近海海域为研究对象, 建立海砂开采适宜性评价集, 采用层次分析法(主观赋权法)与结构熵权法(客观赋权法)分别计算评价集各指标的权重, 并采用博弈理论将两者有机结合起来确定指标的组合同权重。将赋权后的各指标图层进行因子叠加, 利用自然断点法将研究区海砂开采适宜性分为适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜、不适宜 5 类, 并结合广东省近海进行实例分析。

收稿日期: 2023-08-31

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(62071279); 山东科技大学科研创新团队支持计划(2019TDJH103)

第一作者: 程慧(1998—), 男, 在读硕士, 主要从事海砂开采方面的研究工作。E-mail: 1282390735@qq.com

* 通讯作者: 艾波(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋 GIS 方面的研究工作。E-mail: aibogis@163.com

1 海砂开采适宜性评价集

1.1 评价指标

本文遵循指标选取的主导性和综合性原则、针对性和对比性原则、应用性和可行性原则^[16-18],综合海砂开采领域专家的意见,并参考相关研究文献,从开发难度、污染影响、海岸影响、海底斜坡稳定性、社会因素、海域使用、生态保护等 7 个角度展开海砂开采适宜性评价。

开发难度 海砂开发难度主要受开采海域自然条件影响^[19-21]。目前主要采砂方法为射流采砂船吸取海砂^[22],采砂船作业受外海风浪和水深条件影响大,因此选取水深、小时平均风速、海浪平均高度 3 个因子来评价开发难度对海砂开采的影响。

污染影响 目前,海砂资源开发环境保护是制约海砂开采最关键的指标。部分海砂资源潜藏在海洋底部泥质盖层下,进行采砂作业时,高压射流扰动底质中的砂和淤泥,以及溢流作业产生的悬浮泥沙将会对海洋环境的造成影响^[23-24],因此本文采用海底底质类型作为评价指标。

海岸影响 近岸的海砂开采将会对海岸线造成侵蚀,对海岸生态产生一定影响^[25-29],因而选取离岸距离作为评价指标。

海底斜坡稳定性 若采砂区海底斜坡稳定性较差,将影响采砂船工作时间和效率,且采集后地形变化较大,可能会对海砂开发产生不利影响,评价

时应予以考虑^[30-34]。

社会因素 周边城市经济发展情况与砂石需求量会对海砂的开采产生影响^[35-36],因此选取 2022 年广东省沿海城市 GDP 与 2022 年广东省各城市砂石需求量作为评价指标。

本文将实际研究区域分为开采区与禁采区,上述评价指标为开采区评价指标。海砂开采受到海域使用的影响,如海洋保护区禁止开采海砂^[22-24];同时,在海砂开采时要充分考虑人工活动海域与生态保护海域。对人工活动海域应尽量保持其原有用途,如航道、锚地、海上风电、海底管线、海洋牧场等排他性用海区;从生态保护角度出发,对生态保护海域禁止海洋开发活动,不进行海砂开采。因此本文将已有的人工活动海域、生态保护海域划为海砂开采的禁采区,不进行采砂活动。综合上述指标,本文海砂开采适宜性分析的层次结构如图 1 所示。

1.2 基于主客观赋权法的评价及权重综合计算

主观赋权法由原始数据之间的关系通过数学方法确定权重,评价结果受人为影响因素较大;客观赋权法由于不依赖于人的主观判断,标定的权重会与指标的实际重要程度存在差距^[37-38]。因此,本文采用层次分析法与结构熵权法分别确定主、客观权重,再通过博弈理论,将两者有机结合起来确定指标的组合权重。

1.2.1 基于层次分析法的主观权重赋值

层次分析法在标度理论下构造判断矩阵,使问题归结为因素层相对于目标层的相对重要权值的

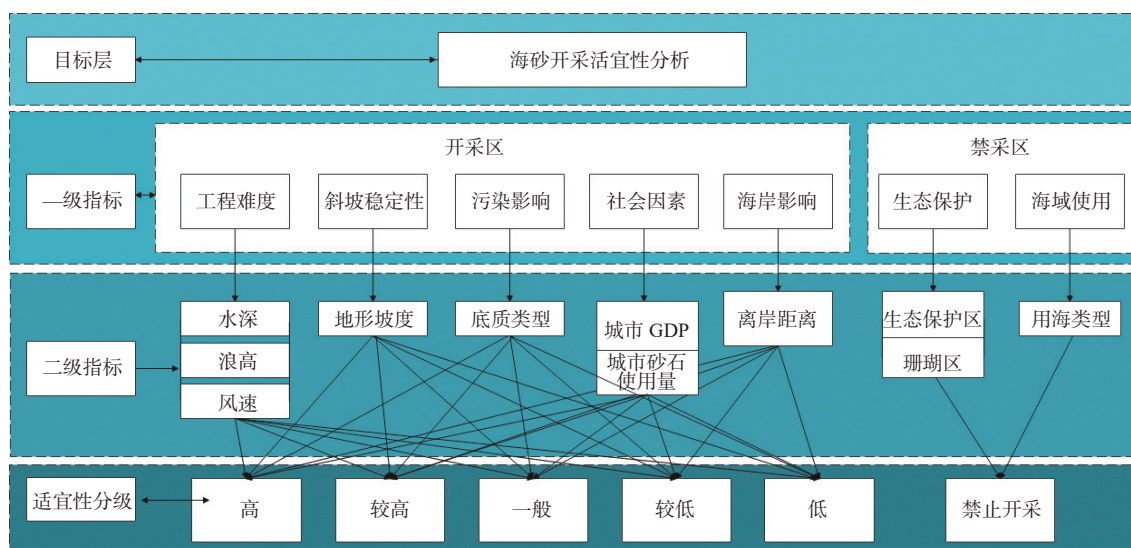


图 1 层次结构图

Fig.1 Hierarchical chart

确定或相对优劣次序的排定^[39-41],并采用 9 分标度值法进行量化得到判断矩阵。

根据判断矩阵,求解出各矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及其所对应的特征向量如公式(1),并在归一化后求出各个元素的权重值。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(\mathbf{AW})_i}{nW_i} \quad (1)$$

式中: $(\mathbf{AW})_i$ 为向量 $\mathbf{AW}$ 的第 i 个分量。

上述计算结束后,需要对判断矩阵进行一致性检验,先计算 $\mathbf{CI}$ (一致性指标),再计算 $\mathbf{CR}$ 。

$$\mathbf{CI} = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (2)$$

$$\mathbf{CR} = \frac{\mathbf{CI}}{\mathbf{RI}} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为最大特征根;

n 为判断矩阵阶数;

$\mathbf{RI}$ 为平均随机一致性指标;

$\mathbf{CR}$ 为随机一致性比例,当 $\mathbf{CR} < 0.1$ 时,即认为判断矩阵具有满意的一致性,说明权值分配合理。

1.2.2 基于结构熵权法的客观权重赋值

结构熵权法是一种较为客观的评价指标赋权方法,对主观评估的不确定性定量分析,计算熵值并进行盲度分析,从而得出各指标的权重^[42]。根据评价集体系,对 5 项一级指标进行意见调查^[43],得到采集的“典型排序”统计结果。

为消除不同专家对同一指标的排序存在差异,需要对典型排序表进行盲度分析,运用信息论中的熵权法来计算每个指标的熵值,以修正专家典型排序的不确定性^[44],使评判结果更加趋于真实。

由信息论中有关熵的定义可知,将排序时由认知产生的不确定性称为“认识盲度”^[45],其定义为:

$$Q_j = \max(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{ij}) \quad (4)$$

则 i 位专家对指标 u_{ij} 的整体认识度为:

$$x_j = (1 - b_j)(1 - Q_j) \quad (5)$$

式中, Q_j 为认识盲度,评价集 $U = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5\}$ 改进后的结构熵权值为 $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$,对得到的 X 进行归一化处理,评价集 μ_i 中第 i 个指标的权重值 W_i 通过式(6)求得:

$$W_j = \frac{x_j}{\sum_{j=1}^5 x_j} \quad (6)$$

1.2.3 基于博弈理论的权值综合评判

博弈论又叫做对策论,是运筹学的一个重要学

科,也是现代数学的一个新分支^[46]。利用博弈论综合主、客观赋权的优点,对指标进行组合赋权^[47],步骤如下:

(1) 采用 M 种线性组合,构建基础权重向量集,将这 M 种权重向量的线性组合定义为:

$$u = \sum_{k=1}^M \alpha_k u_k^T, \alpha_k > 0, \sum_{k=1}^M \alpha_k = 1 \quad (7)$$

式中: u 为权重计算的一种可能结果;

α_k 为线性组合系数。

(2) 运用博弈论思想,对 M 个线性组合系数 α_k 进行优化,使得 u 与 u_k 的离散值最小,上述思想通过式(8)实现:

$$\min \left| \sum_{j=1}^M a_j u_j^T - u_j \right|_2, i = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

(3) 为计算 α_k 的最优解,将式(8)的最优化一阶导数条件转换为:

$$\begin{bmatrix} u_1 u_1^T & u_1 u_2^T & \cdots & u_1 u_M^T \\ u_2 u_1^T & u_2 u_2^T & \cdots & u_2 u_M^T \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_L u_1^T & u_L u_2^T & \cdots & u_L u_M^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 u_1^T \\ u_2 u_2^T \\ \vdots \\ u_M u_M^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

(4) 根据式(9)求得线性组合系数 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_M)$ 的最优解向量集,并按下式进行归一化处理

$$\alpha_k^* = \frac{|\alpha_k|}{\sum_{k=1}^M |\alpha_k|} \quad (10)$$

通过式(10)计算得出线性组合系数 α_k 的最优解,代入式(11)求得博弈论组合向量解,即为所求组合权重值。

$$u^* = \sum_{k=1}^M \alpha_k^* u_k^T \quad (11)$$

2 实例分析

本文以广东省近海海域作为研究区,对所建立的海砂开采适宜性评价体系与权重计算方法进行实例分析。

2.1 研究区概况

实例分析研究区为广东省近海海域(19°22'N—23°04'N、109°24'—117°05'E),广东省面向南海,是

距离南海最近的经济发达地区,地理条件优越,“三面环山,三江汇聚”,具有漫长海岸线、良好港口群及广阔海域面,海洋地形相对起伏程度较小,存在大量优质天然海砂,适合海砂资源的开发使用。

2.2 评价集数据预处理

广东省近海水深、小时平均风速、浪高、底质类型数据均为实测点位数据,对这些数据插值分析,并进行图像平滑,得到水深、风力、浪高、底质类型数据的平面分布特征;坡度数据通过对水深数据进行坡度计算,得到研究区坡度平面分布图;根据各地级市实际位置建立点位,对点位赋值 2022 年广东省各地级市 GDP 数值与 2022 年广东省各地级市砂石需求量数值,并对点位进行核密度分析,得到广东省地级市经济辐射图与广东省地级市砂石需求影响图;对广东省海岸线进行缓冲区分析,建立距离不等的缓冲区,得到研究区离岸距离平面分布图;用海类型数据为广东省政府统计的截至 2022 年 5 月广东海域使用情况,用海类型数据包括工业用海、排污用海、旅游娱乐用海、海上航道用海、海底管线用海、渔业用海、特殊用海(含海洋生态保护区)、造地工程用海与其他用海,以该数据为准绘制出研究区用海类型分布图,如图 2—10 所示。

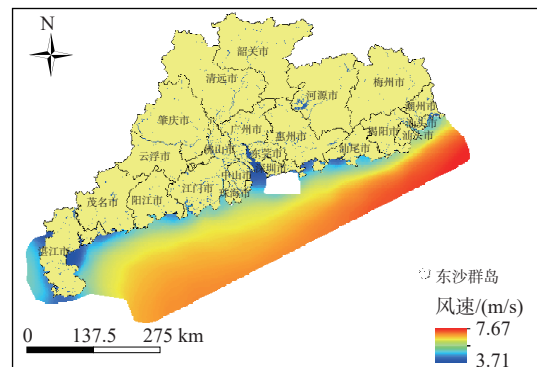


图 4 研究区风速分布

Fig.4 Wind speed distribution in the study area

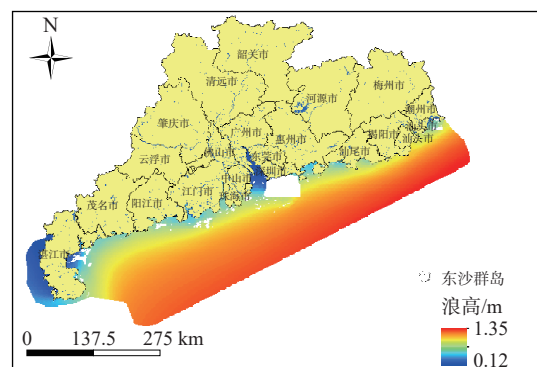


图 5 研究区海浪高度分布

Fig.5 The wave height distribution of the study area

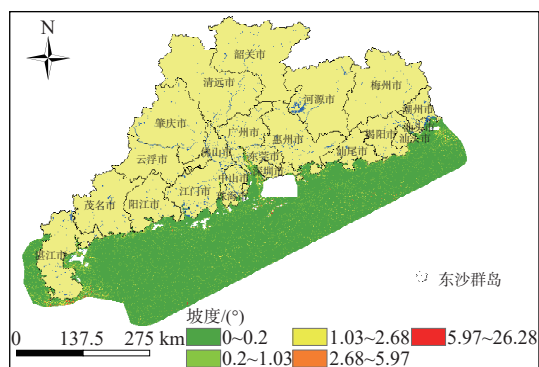


图 2 研究区地形坡度分布

Fig.2 Terrain slope distribution of the study area

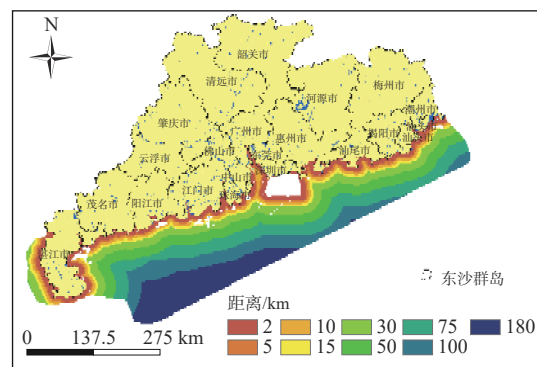


图 6 研究区离岸距离分布

Fig.6 The offshore distance distribution of the study area

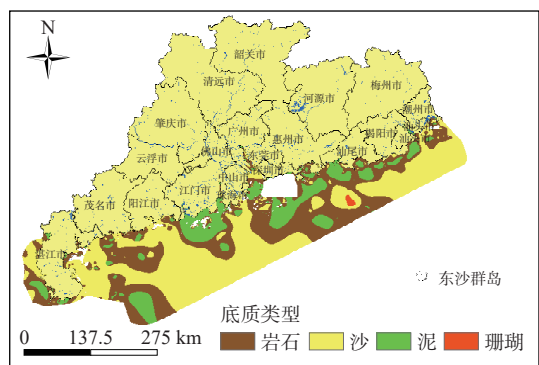


图 3 研究区底质类型分布

Fig.3 Distribution of sediment type in the study area

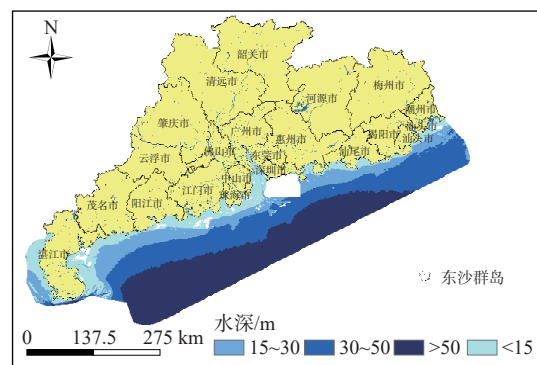


图 7 研究区海洋水深分布

Fig.7 The distribution of ocean depth in the study area

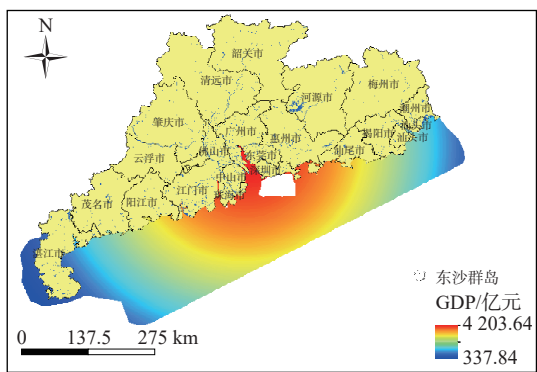


图 8 研究区经济辐射分布

Fig.8 Economic radiation distribution of the study area

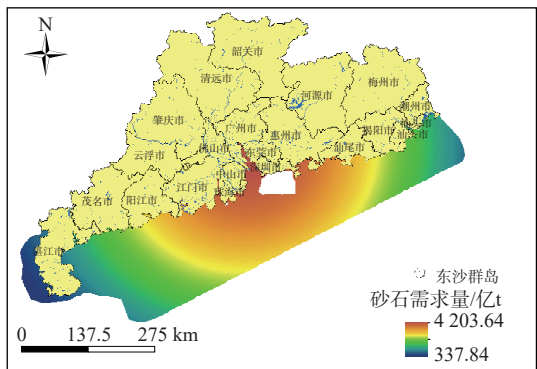


图 9 研究区砂石需求影响图

Fig.9 The influence of sand and gravel demand in the study area

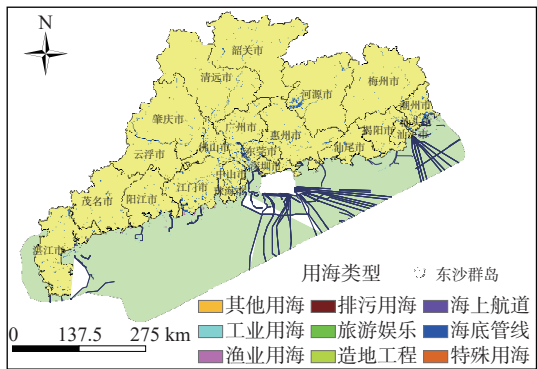


图 10 研究区海域使用分布

Fig.10 Sea type distribution of the study area

2.3 基于主客观赋权法的权重计算结果

基于 1.2.1 节所述, 采用主观赋权法层次分析法进行权重计算, 得到随机一致性比例 **CR** 为

表 3 博弈理论组合权重表

Table 3 Game theory combination weight table

指标名称	B1开发难度	B2污染影响	B3社会因素	B4海岸影响	B5海底斜坡稳定性
$W_{\text{层}}$	0.290 5	0.101 4	0.233 1	0.223 8	0.151 2
$W_{\text{熵}}$	0.311 5	0.124 4	0.155 3	0.235 9	0.114 7
$W_{\text{组}}$	0.303 6	0.115 3	0.202 4	0.224 4	0.154 3

$0.083 < 0.1$, 通过一致性检验, 具体权重矩阵分配如表 1 所示, 由层次分析法计算得到的权重值以 $W_{\text{层}}$ 表示。

表 1 评价集判断矩阵与权重计算

Table 1 Evaluation set judgment matrix and weight calculation

海砂开采	开发难度	社会因素	污染影响	海岸影响	海底斜坡稳定性	$W_{\text{层}}$
开发难度	1	1/3	3	1/4	1/3	0.290 5
社会因素	3	1	2	1/6	1/4	0.233 1
污染影响	1/2	1/3	1	1/4	1/2	0.101 4
海岸影响	4	6	5	1	2	0.223 8
海底斜坡稳定性	3	4	4	1/2	1	0.151 2
一致性: 0.083 0						

基于 1.2.2 节所述, 得到客观赋权法结构熵权法权重计算结果如表 2 所示, 权重计算结果以 $W_{\text{熵}}$ 表示。

表 2 结构熵权法计算结果表

Table 2 Structure entropy weight method calculation results table

指标名称	B1开发难度	B2污染影响	B3社会因素	B4海岸影响	B5海底斜坡稳定性
专家1	4	3	1	4	2
专家2	3	5	3	3	3
专家3	4	4	2	4	2
专家4	2	5	4	5	1
专家5	3	3	1	4	4
专家6	4	4	3	4	1
专家7	5	3	5	4	3
专家8	3	2	1	5	5
$W_{\text{熵}}$	0.311 5	0.124 4	0.155 3	0.295 9	0.114 7

将主客观赋权法计算结果结合, 通过博弈理论求得层次分析法、结构熵权法的组合权重值, 博弈理论组合权重计算结果如表 3 所示。

2.4 广东省近海海域海砂开采适宜性分区图

本文采用自然断点法, 并参考相关研究^[48-50], 对研究区内部不同区域进行划分, 将海砂开采适宜

性等级分为: 适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜、不适宜 5 个等级。将通过博弈理论求得的各评价指标的组合权重值赋予对应的栅格图层, 再根据式(12)对各评价指标进行叠加, 适宜性分值如表 4 所示。

$$B_i = \sum_{i=1}^n A_i$$

(12)

式中: B_i 为第 i 个评价单元的区域稳定性评价总分值;

A_i 为第 i 个评价指标的权重值(即为 W 的值)。

表 4 适宜性分值表

Table 4 Game theory chart	
海砂开采适宜度级别	适宜性指数区间
I - 适宜	11.73~16.54
II - 较适宜	9.27~11.73
III - 一般适宜	7.51~9.27
IV - 欠适宜	5.91~7.51
V - 不适宜	3.18~5.91

本文遵循海岸线保护原则, 将距海岸 5 km 范围内划定海砂开采不适宜区, 并对已有的用海类型进行保护, 不进行海砂资源开发, 通过上述方法最终确立广东省近海海域海砂开采适宜性分区, 如图 11 所示。

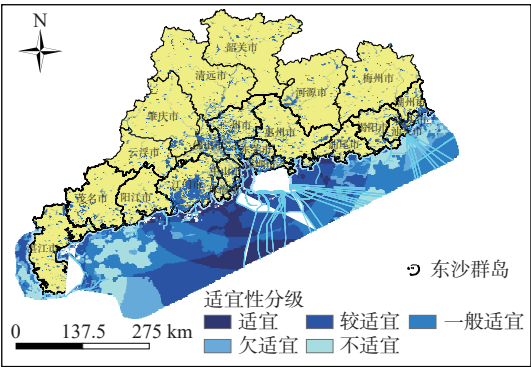


图 11 研究区适宜性分区图

Fig.11 Study area suitability zoning map

2.5 广东省近海海域海砂开采适宜性分析

为便于分析, 对研究区按照适宜性分布情况进行编号(图 12)。研究区中海砂开采适宜性较高的区域主要分布在 1、3、6、7、8 和 11 号区域。

海砂开采难度的主要影响因素为采砂区的水深条件, 不同的水深区域所使用的采砂方式不同, 开采难度与成本也不相同。研究区西侧的 1、3 号区域分布有小面积开采适宜性较高的区域, 该分区

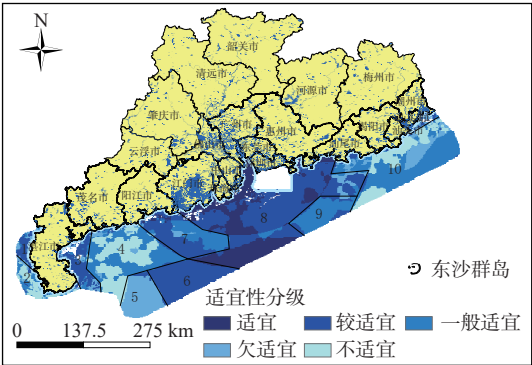


图 12 适宜区位置编号图

Fig.12 Location number diagram of suitable area

平均水深 < 50 m, 海砂开采便捷。同时, 1、3 号区域地处雷州半岛左右侧海域, 半岛地形对海面风浪有较强的削弱作用, 一定程度上降低了采砂难度。另外, 1、3 号区域离岸距离介于 10~30 km, 在此距离区间进行开采, 既能降低对海岸影响, 又不会因远距离作业而带来额外成本。

研究区中部 6—8 号区域底质类型主要为砂, 分布面积大, 空间连续性强, 但由于大面积的砂质底质, 利用高压射流扰动的采砂方式, 底质中的砂和淤泥将产生大量的悬浮泥沙, 从而对海洋环境造成影响。因此, 此处进行开发时应加强环境保护, 严格控制单日采砂量。

其中, 8 号区域的整体适宜性最高, 该处位于珠江入海口, 海岸线深入内陆, 对海上风浪抵抗性较强, 海面平均风速 < 5.5 m/s, 海浪平均高度 < 0.7 m。平稳的海面环境降低了开采作业的难度与成本。根据研究区地形来看, 广东省近海海底地形呈阶梯型分布, 中部区域海底地形坡度变化较小, 地质体较为稳定, 因而由采砂带来的地形改变较小, 采砂后可实现自然恢复。此外, 8 号区域海岸对应珠江三角洲城市群, 是广东省经济发展的核心地带, 城市发展与工业建设等领域对海砂需求量巨大。

本文中所划定的不适宜开采的区域有 2 类, 其一是由各因素叠加所得适宜性较低区域, 另一类为出于海岸保护与用海保护所建立的禁采区。大面积的低适宜区主要分布在研究区 2、4、5、9、10 号区域。

虽然 2、4 号区域海浪平均高度和海面风速较低, 水深条件优良, 但此区域海砂开采适宜性却较低, 主要受到底质类型限制, 该分区底质类型种类多, 开采的技术条件复杂。泥、石类底质可进行海砂开采, 但开采工艺和后续处理方式将使成本升高。5、9 号区域海面风浪大, 水深 > 50 m, 进一步加大

了开发难度,因此整体适宜性较低。

研究区东部 10 号区域海面条件复杂,平均风速 $>6\text{ m/s}$,平均浪高 $>1\text{ m}$,且该区域海底地形坡度变化大,采砂后将在地形产生较大影响。此外,10 号区域平均水深 $>50\text{ m}$,采砂难度进一步加大,综合各方因素其整体采砂适宜性较低。

除上述自然因素外,本文根据海岸保护原则,将沿岸 5 km 范围海域划定为海砂开采的禁采区。近岸区域的海砂开采会导致海岸线上移、沙滩盐碱化等后果,破坏海岸生态环境,因此近岸区域应禁止海砂开采;本文按照保持有海域用途原则,采砂时应对原有的用海类型进行保护,例如在交通运输用海进行采砂,易导致航道阻塞,因此应保持海域原有用途。本文按照生态保护原则,严格保护海洋生态区与珊瑚区,海砂开采将导致冲淤环境的改变,可能对鱼类、底栖生物、浮游生物的生存造成不利影响,短期内诸多海洋生物难以适应,危害其生存。研究区中禁采区主要集中在海岸附近,与海岸保护范围基本重合,应着重加强对离岸较远的生态保护区与珊瑚区的保护,不开展采砂工程项目,严格监控海砂盗采、偷采行为。

3 结论

(1)基于海洋环境开发实际情况,结合海砂资源特点和开发利用方式,建立了以开发难度、污染影响、海岸影响、海底斜坡稳定性和社会因素为主的适宜性评价体系,并选取水深、海面风速、海面浪高作为开发难度评价指标,选取底质类型作为污染影响评价指标,选取离岸距离作为海岸影响评价指标,选取地形坡度作为海底斜坡稳定性评价指标,选取城市 GDP、城市砂石需求量作为社会因素评价指标,建立海砂开采的适宜性评价体系,并以用海类型数据为基准建立海砂禁采区。

(2)为提高适宜性评价精度,采用层次分析法与结构熵权法相结合的主客观赋权法进行权重计算,并使用博弈理论进行组合权重分配。在权重分配后,基于 GIS 叠加分析最终确定海砂开采的适宜性分区,并以广东省近海为对象进行了实例分析。本文所建立的评价体系为解决海砂开采区域适宜性问题提供了一种简洁高效的方式,为海砂资源的开采提供了参考。

(3)海砂开采项目综合性强,除本文所提及的因素外,沉积物土力学性质、含泥量、含水率、夹

石(泥层)厚度等工程地质条件都是影响海砂开采的重要因素。日前,日本方面不顾海洋安全与中方警告,大肆向海洋中倾倒核废水,为海洋环境带来灾难性破坏,未来进行海砂开采时,砂石的放射性根据实际情况也应考虑在海砂开采的适宜性评价中。

参考文献:

- [1] 陈坚,胡毅.我国海砂资源的开发与对策[J].海洋地质动态,2005,19(7):4-8,39.
- [2] 孙岩,韩昌甫.我国滨海砂矿资源的分布及开发[J].海洋地质与第四纪地质,1999,19(1):123-127.
- [3] 全长亮,王华强,张匡华,等.海洋测绘在西南浅滩海砂资源探测中的应用[J].海洋测绘,2022,42(3):38-42.
- [4] 史瑾瑾.我国海砂资源开发管理问题探析及建议[J].中国国土资源经济,2020,33(12):80-83.
- [5] 广东省自然资源厅.广东省制定海砂开采三年行动计划加大海砂资源供应[J].广东建材,2020,36(6):1.
- [6] 刘洪树.我国滨海砂矿在第四系中的富集规律[J].海洋地质与第四纪地质,1989,10(2):41-49.
- [7] 彭钰琳,马超,陈云英,等.福建海砂开采现状及建议[J].海洋环境科学,2014,33(6):954-957.
- [8] 尹飞龙,欧阳东,温喜廉,等.海砂与河砂、尾砂作为建筑用砂的比较研究[J].混凝土,2011(12):73-75,78.
- [9] 李珊,张翠萍,陈鹏.论海砂开采存在问题及加强使用管理的建议[J].海洋湖沼通报,2018(5):158-162.
- [10] HASHIMOTO E, NAGAO M, TAKASUGI Y. Measurement of floating sand particle concentration and estimate of the flux in sea sand mining area[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2004, (769):35-42.
- [11] 王秀卫.论中国海砂开采管理制度的完善[J].中国人口·资源与环境,2012,22(S1):139-142.
- [12] 张琴,余科平,陈命男.湛江湾海砂开采对周边泥沙冲淤及波浪场的影响[J].人民长江,2017,48(S2):17-21.
- [13] KANG T, MIN W, HONG J S, et al. Effect of Sand Extraction on Meiobenthic Community of Jangbong-do in the Eastern Yellow Sea of Korea[J]. Korean Journal of Environmental Biology, 2014,32(2):138-152.
- [14] 覃茂刚,杨朝云,黄仕锐,等.建筑用海砂资源开发利用适宜性评价初探:以琼州海峡东口为例[J].地质科技通报,2022,41(4):249-258.
- [15] WANG P, LIN X, YU Y. Research on regularities of distribution and controlling factor of sea sand resources in Bohai Sea[C]//Education and Management Innovation(EMI2017). China Scientific Research Publishing, 2017:270-276.
- [16] 曹雪晴,张勇,何拥军,等.中国近海建筑用海砂勘查回顾与面临的问题[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(3):121-125.
- [17] 吕一河,傅微,李婷,等.区域资源环境综合承载力研究进展与展望[J].地理科学进展,2018,37(1):130-138.

- [18] 迪力沙提·亚库甫, 严金明, 李强. 基于生态导向与自然条件约束的青海省国土空间开发适宜性评价研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(3): 94-98, 111.
- [19] 梅芹芹, 龚绪龙, 史雅栋, 等. 江苏沿海地区工程建设地质适宜性评价 [J]. 地质学刊, 2018, 42(2): 317-322.
- [20] WAWAN W, NOWO D M, WARNO S U, et al. Investigating impact of sea sand mining in Tunda Island waters, Indonesia based in Mike 21 modelling[J].Croatian Journal of Fisheries, 2023, 81(2): 73-81.
- [21] 许振强. 辽东湾东部海砂开采环境效应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 27-34.
- [22] 白凤龙, 何拥军, 李军. 中国海砂资源勘查、开采与可持续发展 [J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 771-772.
- [23] 胡泽松, 张裕书, 杨耀辉, 等. 海滨砂矿开发中应注意的问题及建议 [J]. 矿产综合利用, 2011(4): 3-6.
- [24] 陈志亮. 船舶监管系统在外海海砂开采监管工作中的应用 [J]. 福建建材, 2020(10): 107-108, 111.
- [25] KIM J H, YOO S H. Public perspective on the environmental impacts of sea sand mining: evidence from a choice experiment in South Korea [J]. Resources Policy, 2020, 69: 101811.
- [26] BOYD S E, LIMPENNY D S, REES H L. The effects of marine sand and gravel extraction on the macrobenthos at a commercial dredging site (results 6 years post-dredging) [J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(2): 145-162.
- [27] 胡幼奕. 砂石产业转型升级需考虑的若干问题及对策 [J]. 混凝土世界, 2015(1): 30-34.
- [28] 马媛, 魏巍, 陈静, 等. 汕头东部海域海砂开采区快速回淤成因分析 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(7): 78-82.
- [29] 金永福, 郑锡建, 李金铎. 崎头洋海砂开采对朱家尖沿岸沙滩的影响 [J]. 海洋环境科学, 2006, 25(3): 46-49.
- [30] 李婵娟. 海砂开采工程的环境影响分析 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(12): 73-75.
- [31] MASKUN, NUR S S, ACHMAD. Legal regulation on protecting marine environment from sea sand mining impact: a case study of spermonde archipelago[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 860: 012092.
- [32] 黄伟锋, 严玉梅, 黄禄萍, 等. 关于海砂体积变化及松散堆积密度的研究 [J]. 广东建材, 2022, 38(12): 43-44, 11.
- [33] 王玉莲, 王振兴. 海砂资源调查绿色勘查实践及成效 [J]. 中国水运, 2024(1): 63-65.
- [34] 王焰新, 甘义群, 邓娅敏, 等. 海岸带海陆交互作用过程及其生态环境效应研究进展 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 1-10.
- [35] 王琼, 杨伦庆. 广东海砂资源开发利用问题与对策 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(6): 73-76.
- [36] 李杏筠. 国内外海砂资源开采利用与权属管理探讨 [J]. 合作经济与科技, 2018(24): 49-51.
- [37] 刘宁波, 田荣燕, 王海波, 等. 基于 AHP-模糊综合评价方法的拉萨市周边溜砂坡稳定性评价 [J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 161-166, 171.
- [38] 王海涌, 张玮玥, 王小明, 等. 基于 ANP 和 VPRS 的高速列车舒适性综合评价指标权重分析 [J]. 铁道学报, 2014, 36(6): 15-20.
- [39] 龙星颖, 葛名欢. 基于层次分析法改进 ABC 分类法提升带量采购药品管理的实践 [J]. 中国医院药学杂志, 2023, 43(7): 799-803.
- [40] 马瑶, 赵江南, 廖时理. 模糊层次分析法在西南印度洋中脊 46°~52°E 多金属硫化物远景区预测中的应用 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(6): 75-82.
- [41] 王帆, 廉旭刚, 蔡音飞. 基于模糊层次分析法的采动地裂缝发育等级评价: 以沁水煤田为例 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 129-136.
- [42] 王力召, 蒋致远. 基于结构熵权法的 P2P 平台财务风险评价研究 [J]. 系统科学学报, 2020, 28(2): 95-99, 128.
- [43] 刘苏港, 黄羽, 倪庆国, 等. 农村黑臭水体治理效果评估指标体系 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40(12): 52-58.
- [44] 沮富豪, 赵秋红. 基于结构熵权法和 HFWGHM 算子的海上救援航空应急资源布局评价方法研究 [J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(19): 128-138.
- [45] 孙雅茹, 董增川, 周毅, 等. 基于结构熵权法的长江下游水资源承载力评价: 以南京市为例 [J]. 人民长江, 2018, 49(7): 47-51.
- [46] 祝连波, 王世笛, 林陵娜, 等. 基于博弈论组合赋权-物元可拓模型的地铁站抗涝韧性评估研究 [J]. 灾害学, 2023, 38(3): 1-6, 42.
- [47] 李红艳, 张翀, 崔建国, 等. 基于博弈论赋权耦合灰色关联分析的调蓄池优化选址 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 426-432.
- [48] 廖启鹏, 陈茹, 黄士真. 基于模糊综合评判与 GIS 方法的废弃矿区景观评价 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 241-250.
- [49] ANNAKA T, HANAYAMA S. Dynamic Water-Entry Pressure for Initially Dry Glass Beads and Sea Sand [J].Vadose Zone Journal, 2005, 4(1):127-133.
- [50] 黄泽鹏, 许江, 胡毅, 等. 泉州海域海砂资源开采区选划与管理 [J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(3): 9-13.

Suitability evaluation of offshore sea sand mining based on subjective and objective weighting method

CHENG Hui¹, ZHONG Jinxiang², ZHOU Yuan², AI Bo^{1*}, FENG Wenjun³

(1 College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2 Guangdong Provincial Marine Development Planning and Research Center, Guangzhou 510000, China; 3 Qingdao Yuehai Information Service Limited, Qingdao 266590, China)

Abstract: With the rapid development of China's economy, the demand for sand and gravel resources is increasing year by year. Among the many kinds of sand and gravel resources, sea sand is widely used in the construction industry, chemical industry and other fields because of its rich reserves and wide use. However, in recent years, there are many extensive problems in the development of the sea sand industry. Unreasonable mining not only leads to a large loss of state-owned resources, but also causes a series of environmental problems. After ascertaining the sea sand resources, in order to determine whether the sea sand is suitable for mining, this paper takes pollution impact, social factors, development difficulty, coastal impact and submarine slope stability as evaluation indexes, and uses subjective weighting method (analytic hierarchy process) and objective weighting method (structural entropy weight method) to calculate the index weight respectively. Through the game theory, the two are combined to obtain the combined weight of the index, and the natural breakpoint method is used for superposition analysis to obtain the sea sand mining suitability zoning map, and the offshore sea area of Guangdong Province is analyzed as an example, and the scientificity and rationality of the evaluation results are verified in combination with the actual sand mining project.

Key words: sea sand mining; evaluation of suitability; analytic hierarchy process; structural entropy weight method; game theory