

海水淡化取水口空间选划适宜性 评价方法与应用

黄 沛^{1,2,3}, 孙永根^{1,2*}, 陈 勇¹, 王子闯⁴, 王恩康^{1,2}, 马东森⁴, 于信波⁴

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

4. 华能威海发电有限责任公司, 山东 威海 264205)

摘 要: 海水淡化取水口空间选划受自然地理、生态环境和社会经济等多种要素的影响, 对取水口工程建设经济性、稳定性和安全性具有重要意义。在海水淡化取水口空间选划影响因素分析的基础上, 针对浅海取水方式, 从基础地理条件、水体环境条件、灾害条件和产业发展条件四方面筛选代表性评价指标, 构建海水淡化取水口空间选划适宜性评价模型。以山东省荣成市近岸海域为研究区, 基于 GIS 平台的多因素空间叠置分析实现初步的适宜性空间分区, 然后叠加约束条件生成最终的海水淡水取水口选划适宜性空间分区结果, 形成具有科学化、定量化和空间化特征的海水淡化取水口选划适宜性评价体系。本研究在理论方法和技术层面上完善了现有的海水淡化取水口空间位置选划方法, 评价结果可为海水淡化取水口空间选划提供科学依据。

关键词: 海水淡化; 取水口; 空间选划; 适宜性评价; GIS

中图分类号: P746

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)03-0523-13

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20210630001

引用格式: 黄沛, 孙永根, 陈勇, 等. 海水淡化取水口空间选划适宜性评价方法与应用[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 523-535. HUANG P, SUN Y G, CHEN Y, et al. Suitability evaluation method and application for seawater desalination intake site selection[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 523-535.

海水淡化是解决沿海地区水资源供需矛盾、优化水资源结构和保障供水安全的重要战略选择^[1-4]。海水取水系统是海水淡化厂的重要组成部分, 其任务是为海水淡化厂提供充足的、持续的、适合的原水, 取水口空间位置的选择及取水工程建设对整个海水淡化厂的投资、制水成本、系统稳定运行及周边海洋生态环境都有重要影响^[5-8], 因此海水淡化取水口空间位置选划至关重要。海水淡化的取水方式包括间接取水(海滩井及海床过滤取水)、浅海取水(岸边直接取水及自流明渠引水等)和深海取水, 其中浅海取水具有建设投资少、适用范围广的特点, 因此被广泛使用^[9-10]。

当前, 国内外在海水淡化工程选划方面已有相关研究, 但针对海水淡化取水口空间选划的研究较少^[11-12]。Tsiourtis^[13]设计了海水淡化厂选址的标准和程序, 选择环境、技术、社会和经济上可接受的选址以减少项目设计、施工、运行和维护中涉及的风险, 并降低海水淡化成本。Dawoud 等^[14]采用基于 GIS 的多准则分析(Multi-Criteria Analysis, MCA)方法来规划和管理巴勒斯坦加沙地带现有和拟建的海水淡化厂。Shahabi 等^[15]通过考虑环境、不同的土地利用和经济政策, 构建了一个关于取水类型、分期和基础设施位置选择的最佳海水淡化规划框架。黄鹏飞等^[16]建立了基于自然—生态环境—社会经济框架的海水淡化用海适宜性指标体系。杨志宏等^[17]从区位适宜性和资源环境适宜性建立了海水淡化工程选划适宜性评价指标体系。在海

收稿日期: 2021-06-30

资助项目: 国家重点研发计划项目——海水淡化取水口优化布局与预处理技术研究(2018YFC0408001)

作者简介: 黄 沛(1982—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋空间适宜性评价与规划方面研究. E-mail: hp@fio.org.cn

* 通信作者: 孙永根(1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海域使用管理技术及应用方面研究. E-mail: syg@fio.org.cn

(王佳实 编辑)

水淡化水源地选划方面,朱琴等^[18-20]分析了海水淡化取水注意事项,认为海水淡化水源地选划的评价指标可分为水量、水质和经济性三个方面,并设计了海水淡化水源地选划的流程,最终给出了适宜性评价结果。

因海水淡化取水口空间选划涉及的影响因素较多,现有的评价指标体系不够完善,有些指标难以量化,评价流程过于复杂,实际应用时可操作性不强,在实现大区域空间化的适宜性评价上存在不足,无法为海水淡化取水口空间位置选划提供可行的定量化和空间化支撑。基于此,本研究拟在多要素分析基础上选取代表性评价指标构建海水淡化取水口选划适宜性评价模型,实现海水淡化取水口的适宜性空间分区结果,形成具有科学化、定量化和空间化特征的海水淡化取水口选划适宜性评价体系,为海水淡化取水口空间位置选划提供研究思路和技术支撑。将该评价方法应用于淡水资源匮乏、海水淡化需求紧迫的山东省荣成市近岸海域,将形成荣成市近岸海域的适宜性空间分区,为荣成市未来的海水淡化取水口空间选划提供科学的参考依据。

1 海水淡化取水口空间选划影响要素

基于海水淡化取水口工程建设的稳定性、安全性和经济性、海洋生态环境影响最小化等需求,本文从基础地理条件、水体环境条件、灾害条件、产业发展条件及约束条件五个方面开展海水淡化取水口选划的影响要素分析。

从基础地理条件方面,海水淡化取水口的离岸距离直接影响海水淡化项目建设的资金投入,取水口离岸距离越近,经济性越好。取水口必须满足一定的取水深度才能保证取水水量,一般来说最低潮时水深大于2 m 的海域适合建设各种规模的海水淡化项目^[18]。基岩海岸工程地质承载力大,水下地形稳定,有较为优良的取水构筑物建设条件,砂质海岸取水工程条件一般,淤泥质海岸较不利于取水构筑物的建设^[21]。底质类型会影响水体中的泥沙含量,是进行海水淡化取水口选划的关键因素^[10]。

从水体环境条件方面,海水水质是影响海水淡化成本的重要因素之一,水质越好,预处理越简单,经济性越好^[18]。根据《海水淡化水源地保护区划分技术规范》(HY/T 220—2017)^[22],海水淡化水源地一级、二级保护区范围内水质各项指标应满足《海水水质标准》(GB 3097—1997)^[23]中第二类、第三类水质标准的要求。悬沙含量是影响海水淡化取水的主要指标,悬沙含量越高,处理成本越高。取水会产生夹带和席卷效应,从而导致局部海域的鱼卵仔鱼和浮游生物等数量减少,为减少取水操作中对海洋生物的影响,取水口应设置在海洋生物量和生物密度较低的位置^[16]。

从灾害条件方面,海水淡化取水口工程应建设在地质构造稳定、承载力大的地基上,不宜设在断层、冲积层、滑坡及风化严重地段^[19]。海水淡化取水口工程的建设还要考虑到海岸侵蚀、赤潮、绿潮、风暴潮和台风等灾害对取水设施可能引起的影响^[10]。

从产业发展条件方面,海水淡化取水口选划应符合区域经济社会发展状况,并与相关规划相协调。沿海的热电厂、核电厂及产业园区等是海水淡化的需求产业,取水口离该类工业岸线的距离越近,经济效益越好。但另一方面,取水口的选划应远离养殖场、污水排污口、造船厂和码头等易造成海水污染的场所^[24-25]。根据《海水淡化生活饮用水集中式供水单位卫生管理规范》(DB 37/T 3683—2019)^[26],海水淡化取水口周围半径1 000 m 的海域不得排入工业废水和生活污水。在海域规划符合性方面,根据中国已建海水淡化工程情况,已建的海水淡化取水口主要位于工业用海和港口用海区域中,少部分位于渔业用海和旅游娱乐用海区域中^[9,12]。

从约束条件方面,对于不适宜进行海水淡化取水口工程建设的否决条件,可直接认定为约束条件,分为生态约束和现状约束两种类型。为避免海水淡化取水口工程建设对重要生态功能区的影响,直接认定海洋生态红线区和领海基点保护范围等特殊目标保护区为生态约束区。评价范围内的海岛陆域、围填海区域直接认定为现状约束区,不能进行海水淡化取水口工程的建设。

2 海水淡化取水口空间选划适宜性评价方法构建理论

海水淡化取水口空间选划适宜性是指特定海域范围内外部条件对海水淡化取水口建设的适宜程度。根

据海水淡化取水口空间选划影响要素分析选取代表性评价指标构建海水淡化取水口选划适宜性评价指标体系, 并确定评价指标的定量分级标准, 采用层次分析法结合专家打分法计算评价指标的权重, 利用多因素综合评价模型获得初步的评价结果^[27-29], 叠加约束条件后形成最终的海水淡化取水口空间选划适宜性评价结果。评价指标和评价结果都分为适宜、基本适宜和不适宜三级, 技术路线如图 1 所示。

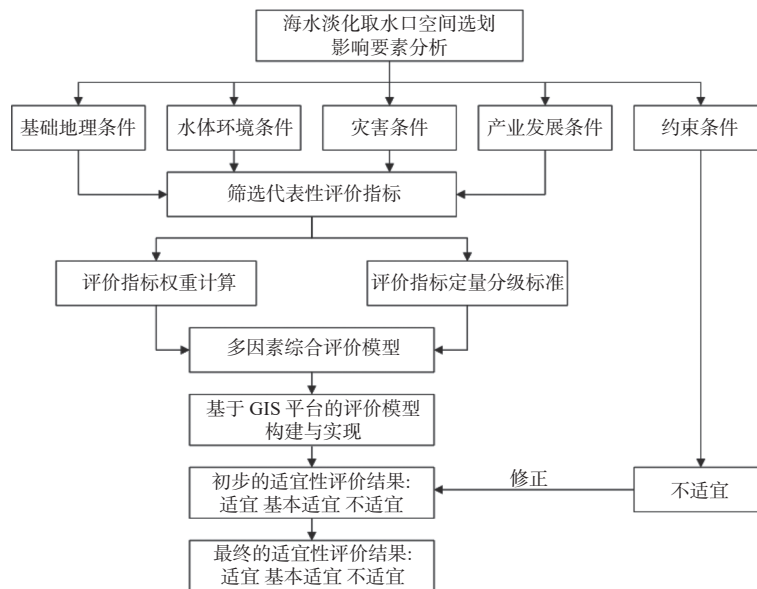


图 1 适宜性评价技术路线

Fig. 1 Technical route of suitability evaluation

2.1 评价指标体系

为使评价指标体系结构清晰, 按照评价需求将其划分为目标层、要素层和指标层三个层次。其中目标层为海水淡化取水口空间选划适宜性评价综合指数; 要素层为主要影响要素包括基础地理条件、水体环境条件、灾害条件和产业发展条件; 指标层为从属于要素层的多个评价指标。评价指标选取要具有科学性、代表性和空间差异性。依据影响要素间的层次关系和评价指标选取的需求, 建立了海水淡化取水口空间选划适宜性评价指标体系, 其架构图如图 2 所示。

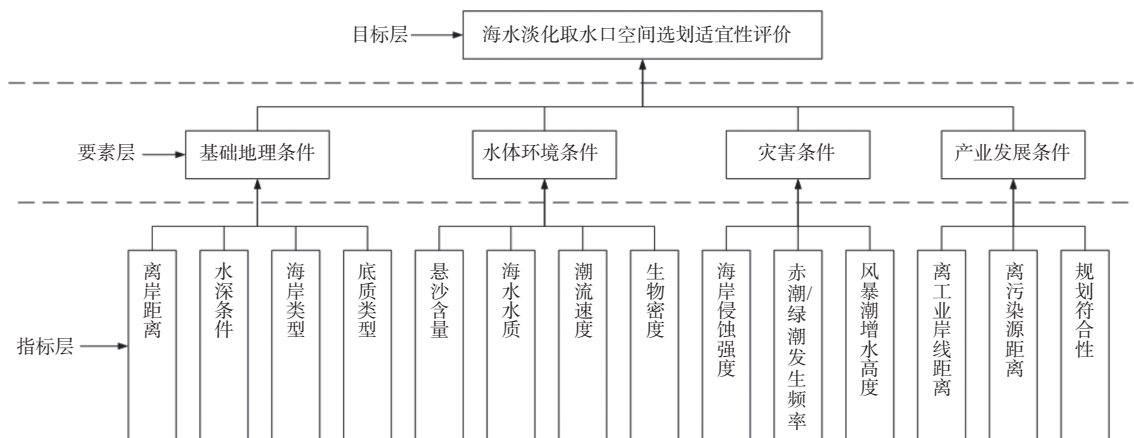


图 2 适宜性评价指标体系架构图

Fig. 2 Framework of suitability evaluation index system

2.2 评价指标定量分级标准

由于评价指标体系中各项评价指标的量纲不统一，各指标之间缺乏可比性，根据相关标准、规范和研究基础将各指标进行标准化处理，将各评价指标分为适宜、基本适宜和不适宜三级，适宜性分值分别用2、1、0表示，由此建立评价指标定量分级标准，如表1所示。

表 1 海水淡化取水口空间选划适宜性评价指标体系及定量分级标准

Table 1 Suitability evaluation index system and quantitative grading standards

评价要素	评价指标	分类条件	分类依据	适宜性等级
基础地理条件	离岸距离/m	<1 000	文献 [18]	适宜
		1 000~2 000		基本适宜
		>2 000		不适宜
	水深条件/m	>2	文献 [19]	适宜
		0~2		基本适宜
海岸类型	基岩海岸 砂质海岸 淤泥质海岸	文献 [2]	适宜 基本适宜 不适宜	
底质类型	砾石 砂 黏土	文献 [10]	适宜 基本适宜 不适宜	
水体环境条件	悬沙含量/(mg·L ⁻¹)	<25	文献 [20]	适宜
		25~50		基本适宜
		>50		不适宜
	海水水质	一类及二类水质 三类水质 四类及以下水质	文献 [22] 和 [23]	适宜 基本适宜 不适宜
	潮流流速/(m·s ⁻¹)	<0.3 0.3~0.5 >0.5	文献 [30]	适宜 基本适宜 不适宜
生物密度/(个·L ⁻¹)	<148 148~702 >702	文献 [31]	适宜 基本适宜 不适宜	
灾害条件	海岸侵蚀强度	稳定 微侵蚀 侵蚀	海岸侵蚀监测与灾害损失评估技术规范 ^①	适宜 基本适宜 不适宜
	赤潮/绿潮发生频率	未发生 较少发生 易发生	文献 [10]	适宜 基本适宜 不适宜
	风暴潮增水高度/m	<1 1~2 >2	文献 [32]	适宜 基本适宜 不适宜
产业发展条件	离工业岸线距离/m	<1 000	文献 [18]	适宜
		1 000~2 000		基本适宜
		>2 000		不适宜
	离污染源距离/m	>2 000 1 000~2 000 <1 000	文献 [26]	适宜 基本适宜 不适宜
规划符合性	符合：工业用海、交通运输用海 兼容：渔业用海、旅游娱乐用海 排他：特殊用海、排污倾倒用海	文献 [9] 和 [12]	适宜 基本适宜 不适宜	

① 全国海洋标准化技术委员会. 海岸侵蚀监测与灾害损失评估技术规范 [S/OL]. (2021-01-13)[2021-06-30]. <https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=E116673ED724A3B7E05397BE0A0AC6BF>.

2.3 评价指标权重的计算方法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 在评价指标权重计算方面应用广泛且效果显著^[33-36], 本研究采用层次分析法结合专家打分法作为海水淡化取水口空间选划适宜性评价指标权重的计算方法。

1) 计算方法

对各层指标相对上层指标的重要性进行两两比较判断, 构建比较判断矩阵 A , 应用方根法求解比较判断矩阵 A 的最大特征根 λ_{max} 及所对应的特征向量 W , W 的分量 W_i 就是对应指标相对上层相应指标的权重值。计算各评价指标的权重后, 还需要对判断矩阵 A 进行一致性检验, 通过一致性检验的权重值才满足要求。评价指标权重的计算过程和一致性检验过程的具体计算方法请参阅参考文献 [37] 和 [38]。

2) 各评价指标相对目标层的权重值计算

对要素层和目标层及指标层和要素层之间分别计算权重值, 并通过一致性检验后, 进而可计算指标层各评价指标相对目标层的权重值:

$$W_i = W_j \times W_{ij}, \quad (1)$$

式中: W_i 为指标层第 i 个指标对目标层的权重值; W_j 为要素层 j 对目标层的权重值; W_{ij} 为第 i 个指标对要素层 j 的权重值。

2.4 适宜性评价模型

采用多因素综合评价模型评价海水淡化取水口空间选划的综合适宜性, 评价模型如下:

$$S = \sum_{i=1}^n B_i W_i, \quad (2)$$

式中: S 为海水淡化取水口选划适宜性评价综合指数; B_i 为第 i 个评价指标的适宜性得分; n 为参加评价的指标数量。

海水淡化取水口空间选划适宜性评价等级划分为适宜、基本适宜和不适宜三级, 通过对适宜性评价综合指数 S 分类获得。评价结果为“适宜”指海水淡化取水口建设的经济性好或难度小; “基本适宜”指取水口建设的经济性一般或难度中等; “不适宜”指因约束条件不适宜建设海水淡化取水口, 或取水口建设的经济性差或难度大。

3 评价方法应用与分析

3.1 研究区概况

以荣成市近岸海域为研究区开展海水淡化取水口空间选划的适宜性评价。荣成市位于山东半岛最东部, 北、东、南三面濒临黄海, 属暖温带大陆性季风型湿润气候。荣成市由于三面环海特殊的地理位置, 外来淡水源汇入有限, 淡水相当匮乏, 近年来随着荣成优势产业的不断发展, 工业园区和经济技术开发区初具规模, 对淡水资源的依赖也日趋紧迫, 通过海水淡化缓解淡水资源匮乏的问题十分迫切。

3.2 评价范围

荣成市近岸海域评价范围向陆一侧以 2019 年遥感影像提取的海岸线为界, 向海一侧以主体海岸向外扩约 5 km 为界, 两侧以国务院批准的荣成市海域行政区域界线为界, 北起与威海市环翠区泊于镇交界的茅子草口, 南至与文登交界的蔡官河口, 海岸线长度 493.2 km, 评价海域面积 1 049.7 km², 如图 3 所示。

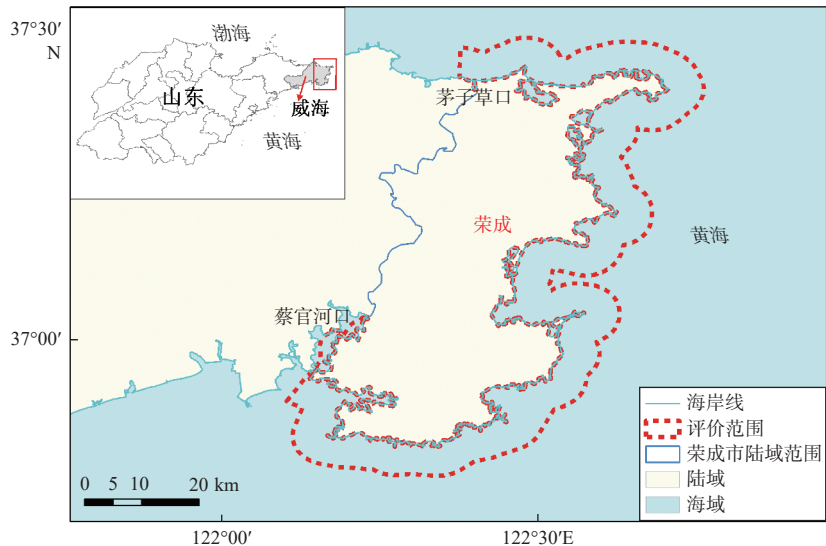


图 3 评价范围
Fig. 3 Evaluation scope

3.3 数据来源

因荣成市近岸海域较不易受灾害条件的影响，本研究从基础地理条件、水体环境条件和产业发展条件 3 项评价要素选取 10 项评价指标建立了荣成市海水淡化取水口选划适宜性评价体系，各评价指标数据来源和数据处理方法如表 2 所示。另外，收集荣成市海洋生态红线区、重要生境区、领海基点保护区和已围填海区域等空间数据作为约束条件。

表 2 荣成市评价指标的数据来源、处理方法及权重计算结果
Table 2 Data sources, processing methods and weight calculation results for the evaluation indexes

评价要素	要素层权重	评价指标	数据来源	数据处理方法	指标层权重
基础地理条件	0.297 0	离岸距离	2019 年山东省大陆海岸线实测矢量数据(荣成市范围)	采用欧几里得距离算法计算评价单元的离岸距离，并根据分类条件进行评价指标空间分区	0.048 6
		水深条件	威海港至石岛港电子海图(C1412110) ^②	提取评价范围内的水深矢量数据，并根据分类条件进行评价指标空间分区	0.088 2
		海岸类型/底质类型	2010 年山东省海岸带调查实测矢量数据	提取评价范围内的海岸带分类和海底沉积物分类矢量数据，进行数据合成，并根据分类条件进行评价指标空间分区	0.160 2
水体环境条件	0.539 6	悬沙含量	2010 年山东省海岸带调查实测矢量数据	利用悬浮体浓度调查数据生成评价区域内悬沙含量的等值线，并根据等值线的空间位置和分类条件进行评价指标空间分区	0.125 8
		海水水质	《2017 年威海市海洋环境状况公报》 ^[39]	将荣成市近岸海域海水水质分布图在 ArcGIS 中配准并矢量化，并根据分类条件进行评价指标空间分区	0.074 1
		潮流流速	2018 年荣成市近岸海域水文观测数据	利用实测数据开展评价范围内潮流场潮流预测模拟，生成平均潮流流速的等值线，并根据等值线的空间位置和分类条件进行评价指标空间分区	0.045 2
		生物密度	2016 年荣成市近岸海域生态调查数据	提取荣成市各调查区域的边界，计算浮游动物丰度平均值，并根据分类条件进行评价指标空间分区	0.294 5

② 中国人民解放军海军司令部航海保证部. 威海港至石岛港电子海图 (C1412110)[CM/OL]. (2010-09-25) [2021-06-30].

续表					
评价要素	要素层权重	评价指标	数据来源	数据处理方法	指标层权重
产业发展条件	0.163 4	离工业岸线距离	2019 年山东省大陆海岸线实测矢量数据(荣成市范围)	确定数据源中工业岸线的位置, 采用欧几里得距离算法计算评价单元的离工业岸线距离, 并根据分类条件进行评价指标空间分区	0.026 7
		离污染源距离	《2017 年威海市海洋环境状况公报》 ^[39]	确定荣成市入海排污口的空间位置, 采用欧几里得距离算法计算评价单元的离污染源距离, 并根据分类条件进行评价指标空间分区	0.048 5
		规划符合性	《荣成市海域使用规划(2013—2020 年)》 ^[40]	提取评价范围内的海域使用规划的空间分区矢量数据, 并根据分类条件进行评价指标空间分区	0.088 2

3.4 基于 GIS 的评价过程与结果

基于 GIS 平台构建海水淡化取水口空间选划适宜性评价模型的流程如图 4 所示。

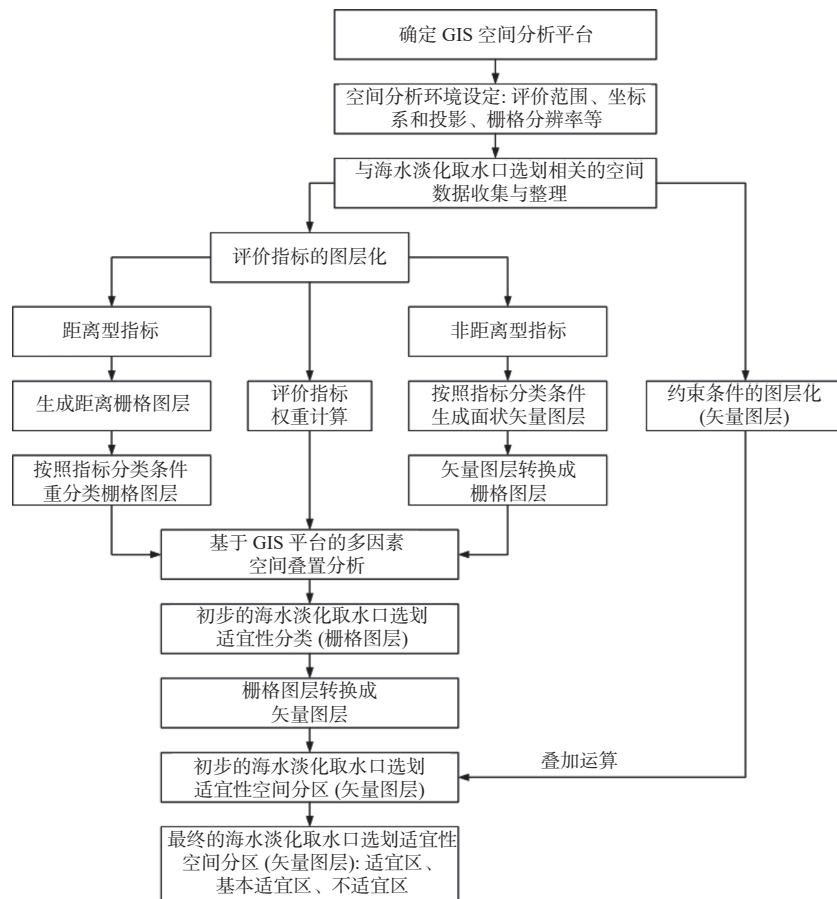


图 4 基于 GIS 的适宜性评价模型构建流程

Fig. 4 Flow chart of suitability evaluation model construction based on GIS data

本研究选取具备空间数据管理和空间分析功能的 ArcGIS 软件作为评价模型的构建平台。所有图层均采用 CGCS2000 坐标系、高斯-克吕格投影, 中央经线为 123°E, 栅格数据分辨率为 50 m。

3.4.1 初步的海水淡水取水口选划适宜性评价

1) 评价指标的图层化

根据收集的空间数据制作可表示各评价指标空间分布信息的 GIS 图层，最后统一转换成栅格图层，获得空间范围和栅格分辨率完全一致的评价指标栅格图层，各评价指标图层的适宜性等级如图 5 所示。

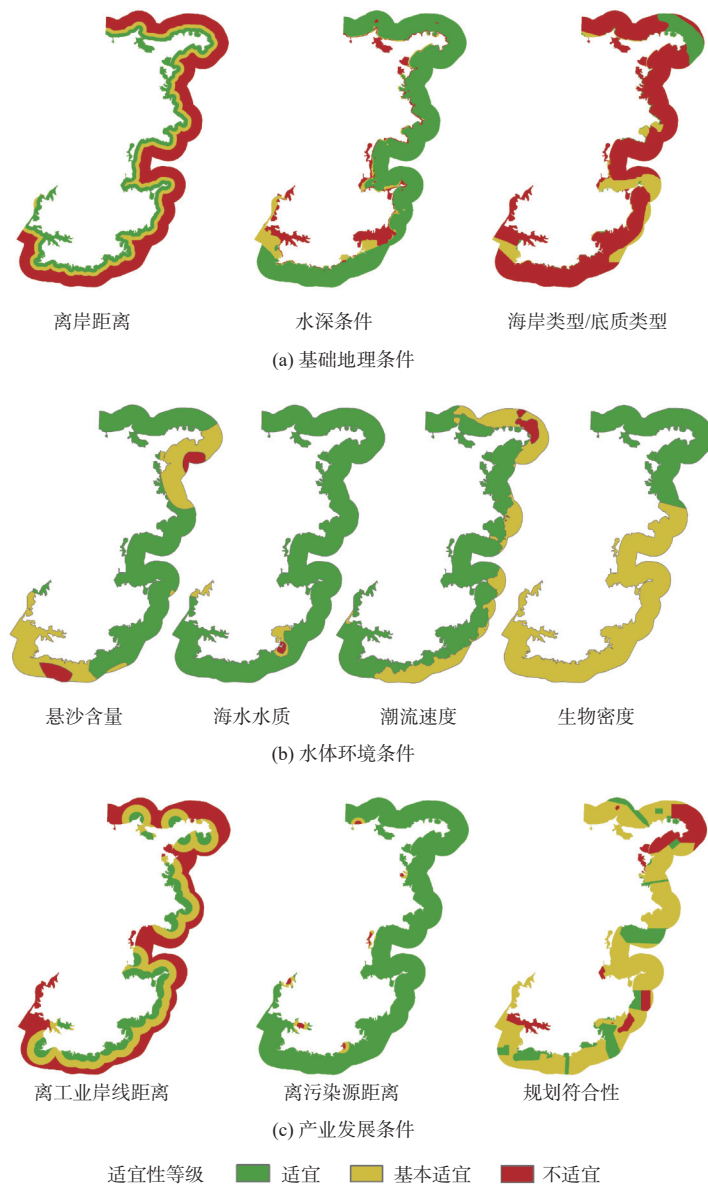


图 5 评价指标图层的适宜性等级

Fig. 5 The suitable level for each evaluation index layer

2) 评价指标权重的计算

针对荣成市近岸海域的自然环境条件和社会经济发展条件等特征，将海水淡化取水口空间选划适宜性评价指标体系中要素层及各指标层的相对重要性征求海水淡化、海洋环境科学、海洋环境工程和海域使用管理等相关领域的 25 位专家意见，综合大多数专家的建议，根据评价指标权重的计算方法，计算出荣成市近岸海域评价指标的权重，计算结果见表 2。

3)基于 ArcGIS 平台的多因素空间叠置分析

在 ArcGIS 平台上采用多因素空间叠置分析进行权重叠加运算,输入各评价指标栅格图层及对应的权重值,输出栅格图层的各像元为所有评价指标图层同像元权重叠加运算结果,得到 0~2 之间的单精度值。依据荣成市海岸带的开发利用现状,结合海洋生态保护红线、相关海洋规划等海域管理需求,采用 0~1 为不适宜、1~1.3 为基本适宜、1.3~2 为适宜的分类条件将该栅格图层重分类,并转换成矢量面状图层,获得初步的海水淡水取水口选划适宜性空间分区(图 6a)。

3.4.2 获取约束区域的矢量图层

荣成市评价范围内的生态约束区域主要包括大天鹅海洋自然保护区、成山头海洋生态系统自然保护区和桑沟湾自然保护区等海洋生态红线区,以及山东高角(1)、山东高角(2)、镆鵁岛(1)、镆鵁岛(2)和镆鵁岛(3)五个领海基点的保护范围,根据山东省人民政府《关于苏山岛等 8 个领海基点保护范围的批复》^[41](鲁政字〔2015〕272 号)获得。荣成市现状约束区域主要包括评价范围内的围海养殖、码头和鸡鸣岛、镆鵁岛、海驴岛等海岛陆域,根据遥感影像矢量化获得。将荣成市生态约束和现状约束区域合并成一个约束区域矢量图层(图 6b)。

3.4.3 获得最终的评价结果

将初步的评价结果叠加约束条件图层,形成最终的海水淡水取水口选划适宜性空间分区,分为适宜区、基本适宜区和不适宜区,此即为海水淡化取水口空间选划适宜性最终评价结果(图 6c)。

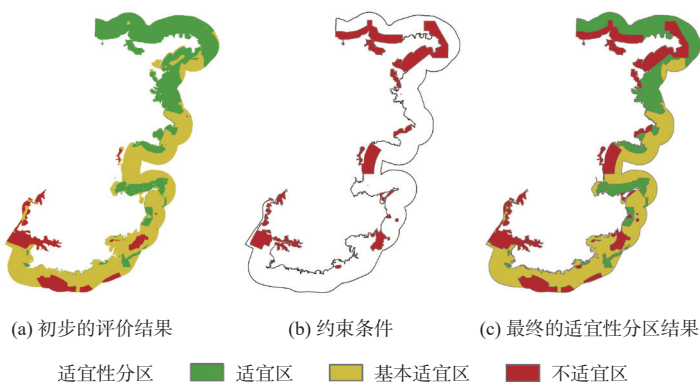


图 6 荣成近岸海域评价结果的空间分区

Fig. 6 The spatial zoning for the evaluation results of Rongcheng coastal area

3.4.4 评价结果分析

根据评价获得的海水淡水取水口选划适宜性空间分区,从适宜、基本适宜和不适宜三个等级分别统计占用的海域面积和海岸线长度,结果如图 7 所示。从占用的海域面积来看,适宜海域面积为 304.8 km²,所占比例为 29%,主要分布在荣成市北部离岸海域,以连续大块图斑为主,中部海域的适宜区域主要分布在近岸,图斑大小中等,南部海域的适宜区域主要分布在海岸线附近,图斑较小。基本适宜海域面积为 452.5 km²,所占比例为 43%,主要分布在荣成市中部和南部海域。不适宜海域面积为 292.4 km²,所占比例为 28%,主要分布在荣成市

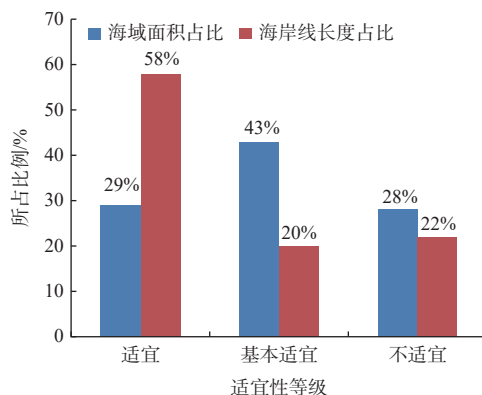


图 7 荣成近岸海域评价结果数据统计

Fig. 7 Statistics of evaluation results for the Rongcheng coastal area

北部近岸的海洋生态红线区和南部青龙河口附近的围海养殖区。

从占用的海岸线长度来看,适宜海岸线长度为 286.9 km²,所占比例为 58%,主要分布在荣成市中部和南部岸线。基本适宜海岸线长度为 96.8 km²,所占比例为 20%,主要分布在荣成市中部岸线。不适宜海岸线长度为 109.5 km²,所占比例为 22%,主要分布在荣成市的海洋生态红线区和围海养殖区所占岸线。

4 讨 论

荣成市因北、东、南三面环海,属不发达的沿海边缘水系,境内无较大河流且无外来客水水源,地表、地下水主要靠大气降水补给,且开挖地下水会引起海水倒灌,因此荣成市属于资源性缺水的城市。荣成市年均水资源总量 4.74 亿 m³,人均占有水资源量 627 m³,仅为中国人均占有量的 1/4^[42]。前几年曾因干旱缺水致使许多企业处于停产和半停产状态。为满足荣成市社会经济发展的用水需求,利用当地丰富的海水资源实施海水淡化工程,确保荣成市正常供水已经到了刻不容缓的地步^[43]。因此选择该地区进行海水淡化取水口空间选划适宜性评价具有重要的应用意义。

根据荣成市近岸海域海水淡水取水口空间选划适宜性评价结果,适宜海域面积为 304.8 km²和适宜海岸线长度为 286.9 km²,不适宜海域面积为 292.4 km²和不适宜海岸线长度为 109.5 km²,以上空间布局为荣成市未来的海水淡化取水口位置选择和限制区提供了科学的参考依据。结合荣成市开发利用和资源空间分布情况,南部海域以传统渔业养殖及配套的水产加工、造船、渔港码头建设等为主,主要以产业型占主导;北部以旅游开发利用为主,总体偏向于保护开发;东部兼有渔业、工业和旅游业的发展,处于保护与开发并存状态。总体而言,南部和东部对淡水的需求更为迫切,除青龙河口因大量围海养殖不适宜海水淡化取水口选址外,整体是适宜和基本适宜选址的;北部区域近岸以取水口不适宜区为主,与该区旅游业占主导的保护性开发较为匹配。荣成市已建的石岛海水淡化工程和“国和一号”核能海水淡化工程,位于适宜性评价结果的适宜区内,说明本研究所构建的海水淡化取水口空间选划适宜性评价方法具有可行性和实用性。

5 结 语

本研究从基础地理条件、水体环境条件、灾害条件、产业发展条件及约束条件五个方面开展海水淡化取水口空间选划的影响要素分析,选取离岸距离、水深条件、悬沙含量、海水水质及规划符合性等代表性评价指标,根据相关标准、规范和研究基础确定各评价指标的定量分级标准,基于 GIS 平台构建海水淡化取水口选划适宜性评价模型,利用多因素空间叠置分析运算和约束条件的修正生成海水淡水取水口空间选划适宜性空间分区结果。研究结果从理论方法和技术层面上完善了现有的海水淡化取水口空间位置选划方法,形成具有科学化、定量化和空间化特征的评价体系,可为海水淡化取水口空间位置选划提供研究思路和技术支撑。

本研究所构建的海水淡化取水口空间选划适宜性评价体系方法完善,评价指标全面,构建过程简单,运行高效,可操作性强,方法通用,在全国海水淡化取水口空间选划工作中可以推广应用。该评价方法已在山东省荣成市近岸海域进行了应用,评价结果符合荣成市自然和社会经济特征,满足荣成市海水淡化取水口空间选划的需求。同时,该评价方法也在华能威海发电厂的海水淡化取水口选划中进行了验证,结果表明,该评价方法具有较强的科学性、适用性和可操作性,可较好地满足实际应用需求。各沿海地区在应用该评价方法时根据当地自然环境特点和社会经济发展需求,结合空间数据的可获得性,可适当增减评价指标并调整评价指标的定量分级标准,评价指标的权重计算和评价结果的分级可根据地方的现状与需求进行设置,建立起满足地方需求的海水淡化取水口空间选划适宜性评价方法,并在应用过程中进一步完善和优化。

参考文献 (References):

- [1] ELSAID K, KAMIL M, SAYED E, et al. Environmental impact of desalination technologies: a review[J]. *Science of Total Environment*, 2020, 748: 141528.
- [2] EKE J, YUSUF A, GIWA A, et al. The global status of desalination: an assessment of current desalination technologies, plants and capacity[J]. *Desalination*, 2020, 495: 114633.
- [3] ELABBAR M M, ELMABROUK F A. Environmental impact assessment for desalination plants in Libya. Case study: Benghazi North and Tobrouk desalination plants[J]. *Desalination*, 2005, 185: 31-44.
- [4] MORTON A J, CALLISTER I K, WADE N M. Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes[J]. *Desalination*, 1996, 108: 1-10.
- [5] DARWISH M, ABDULRAHIM H, HASSAN A, et al. Reverse osmosis desalination system and algal blooms part II: seawater intake technologies[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016: 1-37.
- [6] GILLE D. Seawater intakes for desalination plants[J]. *Desalination*, 2003, 156: 249-256.
- [7] GLUECKSTERN P, PRIEL M. Potential cost reduction of seawater desalination[J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2003, 3(5-6): 39-47.
- [8] ZHANG Y, WANG R H, HUANG P F, et al. Risk evaluation of large-scale seawater desalination projects based on an integrated fuzzy comprehensive evaluation and analytic hierarchy process method[J]. *Desalination*, 2020, 478: 114286.
- [9] 张东铭, 史晓东, 王东, 等. 海水淡化厂取水排水方式选择及设计要点研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7(24): 31-33. ZHANG D M, SHI X D, WANG D, et al. Study of seawater intake and drainage methods selection and design features for seawater desalination plant[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2017, 7(24): 31-33.
- [10] 王生辉, 潘献辉, 赵河立, 等. 海水淡化的取水工程及设计要点[J]. 中国给水排水, 2009, 25(6): 98-101. WANG S H, PAN X H, ZHAO H L, et al. Main points in design of seawater desalination intake project[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(6): 98-101.
- [11] Afify A. Prioritizing desalination strategies using multicriteria decision analysis[J]. *Desalination*, 2010, 250(3): 928-935.
- [12] 张拂坤, 邹川玲, 李磊, 等. 美国海水取水政策及其对我国海水淡化取水的借鉴[J]. 水利经济, 2016, 34(2): 53-55, 85. ZHANG F K, ZOU C L, LI L, et al. Policies of seawater intaking in USA and their reference for seawater desalination in China[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2016, 34(2): 53-55, 85.
- [13] TSIOURTIS N. Criteria and procedure for selecting a site for a desalination plant[J]. *Desalination*, 2008, 221: 114-125.
- [14] DAWOUD O, AHMED T, ABDEL-LATIF M, et al. A spatial multi-criteria analysis approach for planning and management of community-scale desalination plants[J]. *Desalination*, 2020, 485: 114426.
- [15] SHAHABI M P, MCHUGH A, ANDA M, et al. A framework for planning sustainable seawater desalination water supply[J]. *Science of Total Environment*, 2017, 575: 826-835.
- [16] 黄鹏飞, 杨志宏, 王锐浩, 等. 海水淡化工程用海适宜性评价指标体系与模型构建研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(1): 180-183. HUANG P F, YANG Z H, WANG R H, et al. Suitability assessment of sea utilization for seawater desalination indexes system and model construction[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(1): 180-183.
- [17] 杨志宏, 黄鹏飞, 单科, 等. 基于GIS的海水淡化工程选划适宜性评价——以天津市海岸带为例[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2015, 7(4): 367-374. YANG Z H, HUANG P F, SHAN K, et al. Evaluation of site selection suitability for desalination based on GIS: an example of coastal zone in Tianjin[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2015, 7(4): 367-374.
- [18] 朱琴, 左丽明, 崔成, 等. 河北省海水淡化水源地选划评价指标和选划体系研究[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(6): 66-70. ZHU Q, ZUO L M, CUI C, et al. Evaluation index and selection system of seawater desalination site selection in Hebei Province[J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(6): 66-70.
- [19] 朱琴, 左丽明, 单科, 等. 京津冀沿海地区海水淡化取水适宜性分析[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(2): 70-75. ZHU Q, ZUO L M, SHAN K, et al. The suitability of desalinated water intake in coastal areas of Beijing, Tianjin & Hebei[J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(2): 70-75.
- [20] 朱琴, 左丽明, 彭锦添, 等. 河北省近岸海域海水淡化取水水质适宜性分析[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(7): 60-66. ZHU Q, ZUO L M, PENG J T, et al. Analysis on optimal water quality sources for seawater desalination in Hebei coastal waters[J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(7): 60-66.
- [21] 王印忠, 丁建波, 李雪, 等. 不同海岸类型中海水取水构筑物适用型式探讨[J]. 中国给水排水, 2015, 31(20): 30-34. WANG Y Z, DING J B, LI X, et al. Discussion on applicability of seawater intake structures in different coastal zones[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(20): 30-34.
- [22] 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283). 海水淡化水源地保护区划分技术规范: HY/T 220—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China. Technical specification for delineating source seawater protection areas for desalination: HY/T 220—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [23] 中华人民共和国生态环境部. 海水水质标准: GB 3097—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. Ministry of Ecology and Environment of the

- People's Republic of China. Sea water quality standard: GB 3097—1997 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [24] 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283). 反渗透海水淡化工程设计规范: HY/T 074—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China. Specification for design of reverse osmosis seawater desalination project: HY/T 074—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [25] 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283). 蒸馏法海水淡化工程设计规范: HY/T 115—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China. Seawater desalination engineering design for distillation: HY/T 115—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [26] 山东省卫生健康委员会. 海水淡化生活饮用水集中式供水单位卫生管理规范: DB 37/T 3683—2019[S]. 济南: 山东省市场监督管理局, 2019. Health Commission of Shandong Province. Health management standard of centralized water supply units for desalination of drinking water: DB 37/T 3683—2019 [S]. Jinan: Shandong Administration for Market Regulation, 2019.
- [27] 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283). 海水综合利用工程环境影响评价技术导则: GB/T 22413—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China. Technical guidelines for environmental impact assessment of seawater multi-purpose utilization engineering: GB/T 22413—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [28] 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283). 近岸海域海洋生物多样性评价技术指南: HY/T 215—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China. Guideline for marine biodiversity assessment in nearshore area: HY/T 215—2017[S]. Beijing: Standards Press of China 2017.
- [29] 张拂坤, 邹川玲, 刘淑静. 大型海水淡化工程风暴潮灾害风险评价体系研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 212-218. ZHANG F K, ZOU C L, LIU S J. Research on storm surge disaster risk evaluation system of large-scale seawater desalination project[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(4): 212-218.
- [30] AHMED F E, HASHAIKEH R, HILAL N. Hybrid technologies: the future of energy efficient desalination: a review[J]. *Desalination*, 2020, 495: 114659.
- [31] LIN S S, ZHAO H Y, ZHU L P, et al. Seawater desalination technology and engineering in China: a review[J]. *Desalination*, 2021, 498: 114728.
- [32] AHMAD N A, GOH P S, YOGARATHINAM L T, et al. Current advances in membrane technologies for produced water desalination[J]. *Desalination*, 2020, 493: 114643.
- [33] SAATY T. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. *International Services Sciences*, 2008, 1(1): 83-98.
- [34] TANG J H. Prioritizing user requirements based on analytic hierarchy process[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1861: 012021.
- [35] LIU F, PENG Y N, ZHANG W G, et al. On consistency in AHP and fuzzy AHP[J]. *Journal of Systems Science and Information*, 2017, 5(2): 128-147.
- [36] HUANG J J. Analytic hierarchy process with the correlation effect via WordNet[J]. *Mathematics*, 2021, 9: 872.
- [37] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2007(1): 153-156. CHANG J E, JIANG T L. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2007(1): 153-156.
- [38] 黄沛, 丰爱平, 吴桑云, 等. 基于GIS的港口功能适宜性评价模型构建研究[J]. 海洋开发与管理, 2010, 27(1): 31-35. HUANG P, FENG A P, WU S Y, et al. Research on constructing suitable evaluation model of the seaport function based on GIS[J]. *Ocean Development and Management*, 2010, 27(1): 31-35.
- [39] 威海市人民政府. 2017年威海市海洋环境状况公报[EB/OL]. (2018-04-19)[2021-06-30]. <https://sdwx.iqilu.com/share/YS0yMS00NjcxMTcw.html>. Weihai Municipal People's Government. 2017 Weihai municipal marine environment status bulletin[EB/OL]. (2018-04-19)[2021-06-30]. <https://sdwx.iqilu.com/share/YS0yMS00NjcxMTcw.html>.
- [40] 荣成市人民政府. 荣成市海域使用规划(2013—2020年)[EB/OL]. (2018-04-19)[2021-06-30]. http://www.rongcheng.gov.cn/art/2016/3/3/art_56384_2716218.html. Rongcheng Municipal People's Government. Rongcheng sea area use planning (2013—2020) [EB/OL]. (2018-04-19)[2021-06-30]. http://www.rongcheng.gov.cn/art/2016/3/3/art_56384_2716218.html.
- [41] 山东省人民政府. 关于苏山岛等8个领海基点保护范围的批复(鲁政字[2015]272号)[EB/OL]. (2015-12-18)[2021-06-30]. http://www.shandong.gov.cn/art/2015/12/23/art_2267_18116.html. Shandong Provincial People's Government. Reply on the protection scope of 8 base points of territorial sea including Sushan Island (LHY [2015] No. 125)[EB/OL]. (2015-12-18)[2021-06-30]. http://www.shandong.gov.cn/art/2015/12/23/art_2267_18116.html.
- [42] 百度百科. 荣成[EB/OL]. (2021-06-30)[2021-06-30]. <https://baike.baidu.com/item/%E8%8D%A3%E6%88%90/2875013?fr=aladdin>. Baidu. Encyclopedia. Rongcheng[EB/OL]. (2021-06-30)[2021-06-30]. <https://baike.baidu.com/item/%E8%8D%A3%E6%88%90/2875013?fr=aladdin>.
- [43] 淘豆网. 荣成万吨级反渗透海水淡化示范工程[EB/OL]. (2021-06-30)[2021-06-30]. <https://www.taodocs.com/p-674588261.html>. Taodocs.com. Rongcheng ten-thousand-class reverse osmosis seawater desalination demonstration project [EB/OL]. (2021-06-30)[2021-06-30]. <https://www.taodocs.com/p-674588261.html>.

Suitability Evaluation Method and Application for Seawater Desalination Intake Site Selection

HUANG Pei^{1,2,3}, SUN Yong-gen^{1,2}, CHEN Yong¹, WANG Zi-chuang⁴,
WANG En-kang^{1,2}, MA Dong-sen⁴, YU Xin-bo⁴

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, MNR, Qingdao 266061, China;*

3. *College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

4. *Huaneng Weihai Power Generation Co. Ltd, Weihai 264205, China*)

Abstract: The spatial selection of desalination water intake is affected by many factors such as natural geography, ecological environment, and social economy, which determines the economy, stability, and safety of desalination engineering construction. Based on the analysis of influencing factors of seawater desalination intake site selection for shallow water intake mode, the representative evaluation indexes of seawater desalination intake are selected by considering basic geographical conditions, seawater environment conditions, disaster conditions, and industrial development conditions. Then we constructed the suitability evaluation model of seawater desalination intake site selection. Taking the coastal waters of the Rongcheng City, Shandong Province as the study area, based on the multi-factor spatial overlay analysis and operation of GIS platform, this study built the preliminary suitability spatial zoning. This, combined with superimposing constraints, generated the final results of seawater desalination intake site selection suitability spatial zoning, and thereby formed a scientific, quantitative and spatial evaluation system of seawater desalination intake suitability. This study improves the existing method of seawater desalination intake site selection on the theoretical and technical level, and the evaluation results provide a scientific basis for seawater desalination intake site selection.

Key words: seawater desalination; water intake; site selection; suitability evaluation; GIS

Received: June 30, 2021