

海岸带决策的生态系统健康评价研究

黄春秀¹, 张珞平¹, 方秦华¹, Paolo Ricci^{1, 2}

(1. 厦门大学环境科学研究中心, 福建 厦门 361005; 2. Environmental Health Sciences, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA)

摘要: 生态系统健康作为重要决策依据, 能减少决策失误导致生态破坏和生态风险。但由于存在评价指标筛选难、权重难确定, 评价基准操作复杂或不科学, 现有综合评价方法不合理等问题, 海岸带较高层次决策中系统有效的生态系统健康评价技术路线较少。本文提出基于多维决策(MDDM)的生态系统健康评价技术路线能有效解决以上问题, 其主要步骤包括应用所有数据评价生态系统生物成分和功能要素, 专家参与生态系统健康评价以及生态与决策方案之间[影响、置信度、关系]评分, 以支持决策。最后将该技术路线应用于厦门湾海岸带地区主体功能区划案例研究中。研究结果表明: 厦门湾海岸带地区生态系统整体健康状况中等, 从生态维度来看, 更支持旅游作为厦门湾海岸带地区主体功能。

关键词: 生态系统健康评价; 多维决策; 主体功能区划; 厦门湾海岸带

中图分类号: X21 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2013)02-0201-06

Ecosystem health assessment in decision making process of coastal zone

HUANG Chun-xiu¹, ZHANG Luo-ping¹, FANG Qin-hua¹, RICCI Paolo^{1, 2}

(1. Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Environmental Health Sciences, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA)

Abstract: The assessment of ecosystem health is important for decision-making process to avoid ecological damage and risk. There are few systematic and effective approaches of applying Ecosystem Health Assessment(EHA) into high-level decision making process because of the difficulties including indicators selecting and weighting, the complexity of establishing the reference, and lacking of integrative assessing methods. To fill this gap, a new approach of EHA based on Multi-Dimensions Decision Making(MDDM) model was developed to support high-level decision making process in coastal zone. The MDDM-based EHA approach is as follows: all collected data of ecosystem were collected to assess biological elements and ecological functions; expert judgment method was applied to assess entire ecosystem health status and to grade [Impact, Confidence; Relationship] which links ecological dimension and the alternatives of decision-making. The approach was applied in the principal function zoning in Xiamen coastal area. The results showed that the current ecosystem health status in Xiamen coastal area is mediate, and tourism should be the principal function rather than harbor transportation from the perspective of ecosystem health.

Key words: ecosystem health assessment; multi-dimensions decision making(MDDM); principal function zoning; Xiamen coastal area

决策是一种战略性的、根本性的、指导性的,也是带有风险性的行为,决策失误常常导致巨额的经济损失及深刻的社会生态后果^[1]。生态系统健康作为重要决策依据,能减少决策失误导致的生态破坏和生态风险。

现有的海岸带生态系统健康评价主要有指示物种法

和指标体系法,指标体系法包括考虑人类活动的压力-状态-响应(PSR)模型以及仅考虑自然生态系统的评价^[2-7]。指示物种法存在指示种筛选标准不明确,较难选择监测参数等问题^[2-3]。指标体系法的缺点包括指标数量偏多,数据采集困难,部分指标有效性较差等^[8]。

收稿日期: 2012-02-01, 修订日期: 2012-04-11

基金项目: 国家海洋公益性科研专项课题(200905005); 2011年度“厦门大学基础创新科研基金”(中央高校基本科研业务费专项资金)项目(2011121008)

作者简介: 黄春秀(1987-),女,福建宁德人,硕士研究生,主要从事环境规划、管理和生态评价研究, E-mail: chunxiuhuang2001@163.com

现有的决策一般采用多准则或多指标决策法 (multi-criteria decision-making, MCDM)。MCDM 根据构建的问题、设定的目标或目的, 筛选有代表性的有限准则 (criteria)、属性 (attribute) 或指标, 通过一定的方式对预先提出的一组备选方案进行排序或择优^[9]。该方法存在问题: ① 指标选取问题: 生态系统极其复杂, 较难筛选合适的有限个数的指标来评价其健康^[2], 且如果预设目标不科学, 可能导致筛选的指标不合理; ② 指标权重难以确定: 指标指示生态系统健康状况的有效性存在差异, 不同方法和群体确定的权重可能存在较大差异, 且不同区域和决策类型下选用的指标种类数量存在差异^[10]; ③ 生态系统健康评价参考基准的方法可操作性较差^[11]; ④ 将各要素评价结果综合成生态系统整体健康状况的综合有效评价方法很缺乏^[12], 均值法具有主观性^[13]; 最差定论法缺乏考虑生物时空差异性^[10]; 决策树或流程图法^[13-44]的实质为专家评判法。Hoey 等认为目前的生态系统健康评价简单结论难以作为决策者和公众提供足够信息^[13]。

由于存在以上种种问题, 生态系统健康评价在海岸带低层次决策中 (例如项目决策) 有所应用^[15-16], 但在高层次决策中应用较少。目前缺乏系统有效支持海岸带决策的生态系统健康评价技术路线和方法。本文提出基于多维决策 (MDDM) 的生态系统健康评价技术路线, 并应用于厦门湾海岸带地区主体功能区划案例研究, 以支持海岸带高层次决策。

1 基于 MDDM 的生态系统健康评价

海洋主体功能区划是海洋空间规划在我国的实践, 其目的是解决人类活动之间以及人类活动与海洋生态环境保护之间的矛盾^[17], 属于海岸带较高层次的决策。主体功能区划必须遵循基于生态系统管理、生态系统完整性和维护生态系统健康等原则^[17-18]。但目前的主体功能区划中生态系统健康评价仅限于理论探讨或提供简单生态信息, 缺乏系统的有效的评价方法。

为了有效地开展海岸带决策, 本课题组开发了一种全新的决策方法——多维决策法 (multi-dimension decision-making, MDDM), 根据 MDDM 的思路和技术路线开展生态系统健康评价, 以解决生态系统健康评价难以支持决策的问题, 真正成为决策的辅助支持工具。

1.1 评价技术路线和方法

1.1.1 技术路线和方法

基于 MDDM 的生态系统健康评价技术路线主要包括以下几个步骤。

(1) 确定研究区域。基于生态系统管理 (ecosystem-based management, EBM) 的原则, 根据生态系统特征 (如汇水特征、水深、潮流等海洋水文特征、生态系统特殊性等) 确定研究区生态系统边界。

(2) 确定海岸带决策类型、决策相关维度和备选决策方案等。

(3) 生态要素评价。根据能搜集到的与生态相关的历史和现状的所有数据, 从生态系统成分和功能角度, 采用传统方法评价所有要素的各指标。根据我国《海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查》和《海洋调查规范第 9 部分: 海洋生态调查指南》^[19-20], 海岸带区域可以搜集到生态系统生物成分 (底栖生物、浮游生物、环境微生物、鱼卵和仔稚鱼及游泳生物等) 和功能要素 (初级生产力、海洋质量状况等) 相关数据。此外, 通过保护区、渔业或环保管理部门等可以获得敏感及保护生物、陆域生物等生物成分, 以及水产养殖和捕捞、渔场和产卵场、赤潮和生物入侵等功能要素相关数据。评价要素和指标见表 1。

采用趋势性分析法、区域比较法、标准法等得到各要素中各指标的评价结果。其中, 趋势性法将不同时期指标值进行比较, 说明其变化趋势。若指标仅有现状数据, 则可通过与生态系统类型及人类活动压力相似的相邻生态系统、或相同研究区内不同区域之间进行比较, 说明生态指标状况, 即区域比较法。对于存在标准 (国标或文献中提供) 的指标可采用达标率、超标倍数等进行定量评价, 即标准法。

(4) 生态系统健康专家评价。基于要素中各指标的评价结果, 采用专家评判法评价生态系统各层次健康状况。专家根据各要素及其指标的评价结果, 对生态系统各层次的健康状况, 包括要素、生态成分功能和生态系统整体水平给出专家评分。评分结果分三级 (好 = 3, 中 = 2, 差 = 1), 只取整数, 不取小数点。

专家的选择应遵循以下原则: ① 对研究区比较了解; ② 有从事一定年限的海洋生物生态研究经历, 在该领域具有一定权威性的专家; ③ 专家数大于 5 人。

(5) 支持决策的专家综合评价。专家基于生态系统健康评价结果对生态维度与决策方案间的相互作用 [I, C; R] (分别代表“影响”, “置信度”和“相关关系”) 进行评分, 为决策提供直接支持, 以最终确定决策方案。

1.1.2 MDDM 方法 (有关 MDDM 方法的详细内容另文发表)

MDDM 法为本课题组研发的一种新的决策方法, 包括以下步骤: ① 识别与决策目标或决策问题相关的所有维度; ② 收集各维度中可获得的所有指标 (变量、因子) 及其数据, 采用成熟的、经典的评价方法进行评价, 得出维度中各种指标的评价结论; ③ 基于所有维度的评价结论, 根据某一 (或某些) 原则拟定某些可选决策方案; ④ 采用专家评判法对各维度各种指标的评价结论进行综合评价, 得出各维度各级别包括整体的评判结果; ⑤ 采用专家评判法确定各维与各决策可选方案的 [I, C; R], 由评判结果进行决策方案确定。在多数区域决策中生态是决策相关的重要维度, 基于 MDDM 的生态系统健康评价技术路线是多维决策模型中第 2、4、5 等步骤的重要组成部分。以生态为例, I、C、R 内涵和取值范围如下, 其他维度类似。

I (impact) 为“影响”,包括正面的影响(支持程度)以及负面的影响(限制或有害)。若表达生态对决策方案的影响,则指生态对决策方案的支持程度(正面的影响)或限制作用(负面影响);若表达决策方案今后对生态的影响,则指决策方案今后对生态的正面影响(有利影响)或负面的影响(有害影响)。 I 的取值范围为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,分别表达负面影响的“大”、“中”、“小”、“没有影响”、以及正面影响的“小”、“中”、“大”。只取整数,不取小数点。 I 是实际存在的作用,与区域特征有关。

C (confidence) 为“置信度”,表示评判专家对所评判的“影响”数值的置信程度,取值范围 $(0, 1]$ 。取值结果必须 >0 ,取值越大置信度越高,数值“1”为绝对肯定。

R (relationship) 为“关系”,表征生态与决策方案之间的因果关系强弱。取值范围 $\{0, 1, 2, 3\}$,只取整数,不取小数点;分别表征生态对某决策方案(反之为某决策方案对生态)的关系为“没有关系”、“弱”、“中”、“强”。 R 只

表达两者之间关系的强弱,与区域无关。

其中“生态 \rightarrow 决策方案 $[I, C, R]$ ”基于现状和回顾评价,表示生态对各决策方案的影响(I)、置信度(C)和相关关系(R)。“决策方案 \rightarrow 生态 $[I, C, R]$ ”基于未来预测,表示各决策方案实施后对生态维度的影响(I)、置信度(C)和相关关系(R)。

采用各维度 I, C, R 值乘积然后加和的方法对多位专家的评分结果进行整合。将包括生态在内的所有维度评分结果通过排序与择优,得到支持决策的多维度综合分值以确定决策方案。

1.2 评价指标

海岸带决策中生态系统健康评价中各要素主要应用以下指标进行评价。其中湿地为水深小于6 m的水域。初级生产力可根据叶绿素 a 的测值和历史同化系数等进行计算。

表1 海岸带决策中生态系统健康评价要素及指标

Tab. 1 Ecosystem health assessment elements and indicators in coastal decision making process

大类	评价要素	评价指标	
生态系统生物成分评价	海洋微生物	粪大肠菌群站位均值、超标率、最大超标倍数	
	浮游植物	种类数、叶绿素 a 含量、多样性指数、均匀度指数、丰富度指数、优势度指数	
	浮游动物	种类数、生物量、总丰度、多样性指数、均匀度指数、丰富度指数、优势度指数	
	底栖生物	种类数、生物量、栖息密度、棘皮动物生物量占比、多样性指数、均匀度指数、丰富度指数、优势度指数	
	游泳生物	种类数、资源量	
	鱼卵及仔稚鱼	种类数、数量	
	敏感及保护生物	类群分布、种群大小、群落结构	
	海岸生物与生境	植被、动物、土地利用类型、水土流失等定性描述	
	生态系统功能评价	渔业生产	渔场及产卵场状况、水产养殖与捕捞状况
		生物控制	每年赤潮发生次数、生物入侵种类和面积
初级生产		初级生产力	
栖息地		海洋质量状况、湿地面积	

1.3 基于MDDM的生态系统健康评价优点

1.3.1 生态要素评价

基于MCDM的决策方法往往由于选择有限的指标(准则或属性)而片面地描述、甚至可能歪曲事实真相,从而做出错误的决策。基于MDDM法的生态系统健康评价并不是利用某一领域有限的几个指标去分析评价备选方案,而是基于能搜集到的所有数据评价生态系统所有要素的各指标(特别是能更好表征区域生态特点的独特生态系统指标,如珍稀濒危生物或自然保护区等),能避免人为筛选要素和指标的片面性和主观性,能充分体现与决策相关的所有信息和属性,并以此为基础通过专家评判进行决策,避免决策的片面性,减小失误的可能性。其次,采用回顾性评价、区域比较等传统评价方法,能有效解决缺乏参考基准的难题。

1.3.2 支持决策的生态系统健康专家综合评价

MCDM需要通过一定方式如聚合模型或基于决策者的偏好作最终决策,而对同一决策问题,不同方法或决策者可能会产生不同的决策结果,这将带来较大的人为性

和随意性,无法直接有效支持决策。而MDDM基于决策相关的所有生态数据进行生态要素评价,然后采用专家评判法得到生态系统健康以及生态维度与决策方案之间的 $[I, C, R]$ 专家综合评分结论,该结论结合其他维度评价结果能直接有效支持最终决策;多位专家参与评价能避免决策的人为性和随意性,提高决策的科学性。

2 MDDM在厦门湾海岸带主体功能区划中的应用

2.1 研究区及决策概况

厦门湾海岸带地区地处中国东南沿海一福建省东南部、台湾海峡西岸、九龙江入海处,背靠漳州、泉州平原,面对金门诸岛,与台湾岛隔海相望^[17]。根据EBM原则,本研究范围确定为厦门湾海岸带地区,含厦门湾及毗邻海域(见图1),行政区分属泉州、厦门、漳州市管辖。

在基于多维决策的海湾主体功能区划研究中,根据以往的经验以及专家评判,我们选择“社会、经济、区位、资源、环境、生态、风险”等七个与主体功能区划决策相关

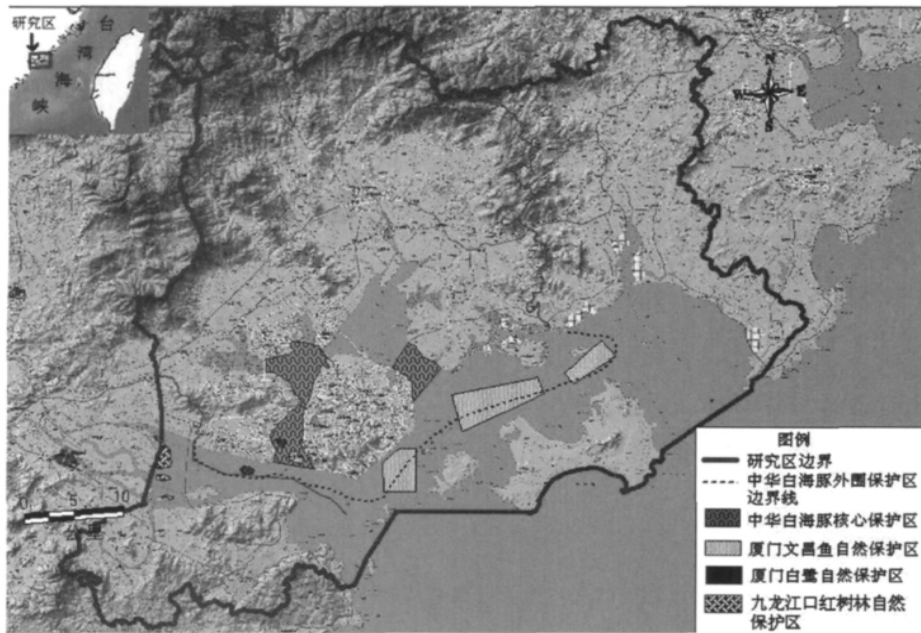


图1 厦门湾海岸带地区(研究区)范围及海洋保护区分布

Fig. 1 Boundaries of Xiamen coastal area (study area) and Marine Protected Area distribution

的维度。生态作为重要维度之一,其评分结果直接为决策提供依据。

根据资源定位原则及厦门湾海岸带地区公众参与结果,旅游和港口作为厦门湾海岸带地区可选主体功能,即决策方案。

2.2 生态要素评价

根据《海水水质标准》^[21],厦门湾多种功能混合,执行较高二类水质标准,要求粪大肠菌群小于2000个/L。1990年厦门湾粪大肠菌群监测站位数104个,测值范围<30~15000个/L,平均值1508个/L,超标百分率26%,最大超标倍数6.5倍^[22];2009~2010年监测数79个,测值范围<20~16000个/L,平均值697个/L,超标百分率6.30%,最大超标倍数7倍。可见粪大肠菌群平均值和超标百分率(现<10%)均下降,最大超标倍数增大。

根据1980年^[23]、1990年^[22]、2004年^[24]和2009~2010年(福建省海洋渔业厅提供数据)相关调查数据,采用趋势性法评价得到浅海底栖生物种类数呈明显下降趋势(图2),生物量和密度略有增加,多样性指数略微下降;浮游植物和浮游动物种类数与1980年和1990年比较有所下降(图2),叶绿素a上升趋势明显(图3),浮游动物总密度略微增加。

从敏感和保护生物来看,①厦门市辖区内93%以上天然红树林消失,且群落结构稀疏化、灌木化,1985年发现的新种老鼠簕在1995年调查中未被发现;但九龙江口红树林保护良好^[24-25]。②厦门湾中华白海豚种群较小(小于100头)分布比较集中;与上世纪60年代相比下降明显,但从90年代开始各项种群指标略有提高,且群体年龄结构合理,属于增长型种群,具备繁殖能力^[24-25]。③现有鹭鸟数量与1996年相比存在一定差距,现状鹭鸟

群落相对稳定;但应对突发事件和极端事件(如台风)能力不强^[25]。④文昌鱼资源衰退明显,表现为1970年以后刘五店文昌鱼渔场消失^[24];前埔-黄厝海区文昌鱼密度和生物量有所下降,1987~1988年密度和生物量分别为150.7尾/m²和8.4g/m²^[24]。2007年以来两项指标略有回升趋势,但均低于80尾/m²和5g/m²^[26];南线-十八线海区分布范围狭小,小嶝-角屿海区连续四年未采集到文昌鱼^[26]。⑤历史上厦门湾是中国鲎产地,现已难觅踪迹^[24]。

从陆域生态来看,厦门湾海岸带地区陆域区域森林覆盖率呈增长势头,但总体质量不高^[27];建成区绿化覆盖率和人均公共绿地均呈增长趋势,2009年末达39.8%和18.42m²^[27,30]。动物组成以水生动物为主,陆地野生动物种类贫乏,数量较少;鸟类是重要的一类动物类群,1970~1980年代鸟类生存环境质量下降,1990年代以后有所恢复^[27]。厦门市现有水土流失强度高(占土地总面积12.5%),生态较脆弱,以水力侵蚀类型为主,建设用地水土流失呈上升趋势^[27]。

从渔业生产来看,厦门湾渔场和产卵场恶化趋势明显,历史上多个渔场或产卵场现整体处在消失殆尽的情势;其中零星分布的现存渔场包括大担-青屿渔场、胡里山-南太武渔场、鸡屿渔场、五通-刘五店渔场、宝珠屿渔场^[24]。此外,2004年和2006年西海域同安湾分别退出养殖功能,而南部海域和东部海域较少养殖,现在厦门湾养殖主要分布在大嶝海域、围头湾和河口湾少数区域。厦门湾捕捞业明显衰退^[24]。

厦门湾每年赤潮发生次数呈先上升后下降趋势(图3),西海域和同安湾为赤潮主要发生海区^[24]。2008年以来西海域赤潮发生次数减少,同安湾略有增加^[26]。

厦门湾海岸带地区海域外来物种约 26 种,陆域有水花生等 38 种,在特定区域有所影响^[28]。互花米草在东屿滩涂有 12 片(约 350 m²),安海湾 100 m²,大嶝海域少量分布;沙筛贝 1993 年以来在马銮湾大量出现,排挤牡蛎和贻贝,近年来在筲筴湖外湖岸壁大量生长^[28]。猫爪藤和五爪金龙等对鼓浪屿植被破坏大,危害最严重,近年来得到较有效控制;入侵种凤眼莲在杏林湾水库、九天湖流域,同安东西溪、官浔溪、海沧北溪引水干渠灌溉渠道等区域有一定分布^[29]。

厦门湾初级生产力(以 C 计)呈明显上升趋势,1990 年^[22]、2004 年^[24]和 2008 年分别达到 167 mg/(m³·h)、220 mg/(m³·h)和 350 mg/(m³·h)。

栖息地评价结果显示,厦门湾海岸带地区环境质量整体较好;海水无机氮、活性磷酸盐等营养盐浓度超标严重,无机氮浓度近年来呈下降趋势,而活性磷酸盐浓度一直较高;沉积物质量良好^[24-27]。陆域水环境质量一般;大气扩散条件好,空气质量优良^[30]。

厦门湾现有湿地面积 618 km²,约占厦门湾海域面积的 63%。湿地面积变化受围填海活动一定影响,厦门湾历史上填海造地活动较为强烈,其中 1950~1980 年、1980~1999 年、2000 年之后分别填海 107.99 km²、10.56 km²和 7.18 km²^[24]。可见由于围填海,厦门湾湿地面积减少约 17%。

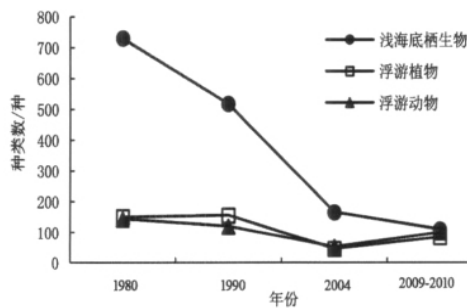


图 2 不同时期厦门湾部分群落种类数^[22-24]

Fig. 2 Species number of some communities in Xiamen Bay during different periods

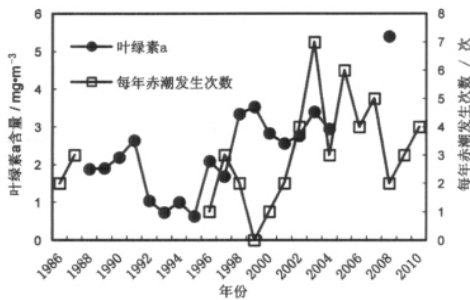


图 3 厦门湾赤潮发生和叶绿素 a 浓度变化趋势^[25-26]

Fig. 3 Trends of number of red tide happen and Chl a concentration change in Xiamen Bay

2.3 生态系统健康专家评价结果

在案例研究中,选择来自国家海洋局第三海洋研究所、厦门大学海洋与地球学院、环境与生态学院的 7 位专家进行专家评判。评判结果显示,厦门湾海岸带地区生态系统平均得分为 2,生态系统健康状况中等,且各位专家评分结果一致。生物成分和功能平均得分也均为 2,各位专家评分结果一致,可见生态系统成分和功能的健康状况均为中等水平。

从生物要素来看,生态系统各成分均处于或接近中等水平,海洋微生物和海岸生物处于中等略偏上水平,得分分别为 2.29 和 2.14;浮游植物和浮游动物处于中等水平,得分均为 2;浅海底栖生物和敏感保护生物处于中等略偏下水平,得分均为 1.86。各个要素各专家评分结果较为一致,最多仅一位专家评分与其他专家不同,但分值均为临近分值。

从生态系统功能来看,渔业生产功能较差,得分为 1.14;生物控制和提供栖息地功能得分均为 1.86,处于中等略偏下水平;初级生产功能得分为 2.14,处于中等略偏上水平。各位专家评分结果较为一致,各要素评分中最多仅一位专家与其他专家评分不同,且为临近分值。

2.4 基于生态系统健康评价的主体功能区划专家综合评分结果

从生态系统健康对决策方案的影响来看,生态对旅游 [I, C; R] 专家评分结果平均为 [1.86, 0.74; 2],生态对港口评分结果平均为 [-1, 0.66; 0];其中生态对旅游影响 I 分值在 1~3 之间,生态对港口影响分值在 -2~0 之间,生态对港口影响置信度分值在 0.6~0.8 之间,其余各项评分较接近,最多有两种分值。从影响来看,厦门湾海岸带地区生态健康状况对旅游属于正面中等影响(得分 1.86),即比较支持发展旅游;而对港口属于负面较弱影响(得分 -1),即生态状况中等略微限制或不支持发展港口。专家对厦门湾海岸带地区生态对旅游的影响评分的置信度高于对港口影响评分。从关系 R 来分析,生态对旅游的因果关系较为紧密(得分 2),即生态的好坏对旅游功能是否实现有一定的决定作用;而生态对港口的关系为 0,即生态好坏对港口功能是否实现没有联系。

从决策方案对生态系统健康的影响来看,旅游对生态的 [I, C; R] 专家评分结果平均为 [-1, 0.71; 1.29],港口对生态的评分结果平均为 [-2.14, 0.71; 1.86],专家对两种决策方案对生态影响置信度评分分布在 0.6~0.8 之间;旅游对生态影响关系有两位专家与其他专家评分不同,其余各项评分最多有一位专家与其他专家评分不同,且为临近分值。从影响 I 来看,专家认为发展港口和旅游对生态均造成负面影响,但发展港口对生态的影响更大。专家对两种决策方案造成生态影响评分的置信度一致,均为 0.71。从关系 R 来看,发展旅游对生态系统的影响的因果关系较弱(得分 1.29),发展港口关系中等(得分 1.86),即说明港口或旅游开发强度的增大对生态造成影响的关联程度是不同的,港口对生态的影响的关联度更

大。

综上可见,生态对旅游[I、C、R]各项评分均高于对港口评分,而港口对生态负面影响和关系均大于旅游。可见,厦门湾海岸带地区生态更支持发展旅游,且发展旅游的生态影响较小;从生态维度评分结果来看,应将旅游作为厦门湾海岸带地区主体功能。

3 结论

生态系统健康作为重要决策依据,能减少决策失误导致生态破坏和生态风险。目前生态系统健康评价在海岸带高层次决策中应用较少,尚未见报道。本文总结分析现有生态系统健康评价方法难以有效支持区域决策的原因;提出基于MDDM的生态系统健康评价的技术路线和方法,并应用于厦门湾海岸带地区主体功能区划案例研究中。

基于MDDM的生态系统健康评价使用所有能搜集到的数据,通过趋势性分析、区域比较、权威专家的评判得出生态系统要素和整体健康状况完整、全面、可靠的评价结论;并以此为基础通过生态与决策方案之间[I、C、R]专家综合评判以支持最终决策。该方法能避免人为筛选要素和指标以及人为确定权重的片面性和主观性,有效解决缺乏参考基准的难题,获得更完整、准确的生态系统健康状况评价结果;专家综合评判结果能直接有效支持决策,多位专家参与评判使决策更为科学、准确。

基于MDDM的生态系统健康评价在多种类型的高层次决策中具有良好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 牛文元. 理论地理学[M]. 上海: 商务印书馆, 1992: 100-105.
- [2] 祁帆, 李晴新, 朱琳. 海洋生态系统健康评价研究进展[J]. 海洋通报, 2007, 26(3): 97-104.
- [3] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 等. 生态系统健康评价: 方法与方向[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2106-2116.
- [4] 付会, 刘晓丹, 孙英兰. 大沽河口湿地生态系统健康评价[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(3): 329-332.
- [5] XU F L, LAM K C, ZHAO Z Y, et al. Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China[J]. Ecological Modeling, 2004, 173: 355-370.
- [6] 索安宁, 赵冬至, 张丰收, 等. 景观指标与滨海湿地生态系统健康评价[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(增刊2): 137-143.
- [7] 柯东胜, 彭晓娟, 吴玲玲, 等. 大亚湾典型生态系统状况调查与分析[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(4): 421-425.
- [8] 林琳. 海湾生态系统健康评价[D]. 上海: 上海水产大学, 2007.
- [9] LINKOV I, SATTERSTROM F K, KIKER G, et al. From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications[J]. Environment International, 2006, 32: 1072-1093.
- [10] SIMBOURA N, PANAYOTIDIS P, PAPATHANASSIOU E. A synthesis of the biological quality elements for the implementation of the European Water Framework Directive in the Mediter-

- ranean ecoregion: The case of Saronikos Gulf[J]. Ecological Indicators, 2005, 5: 253-266.
- [11] 韩彬, 王保栋. 河口和沿岸海域生态环境质量综合评价方法[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(2): 254-258.
- [12] BORJA A, BRICKER S, DAUER D, et al. Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56: 1519-1537.
- [13] HOEY G V, BORJA A, BIRCHENOUGH S, et al. The use of benthic indicators in Europe: From the Water Framework Directive to the Marine Strategy Framework Directive[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60: 2187-2196.
- [14] BORJA A, BALD J, FRANCO J, et al. Using multiple ecosystem components in assessing ecological status in Spanish (Basque Country) Atlantic marine waters[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 59: 54-64.
- [15] BURKHARD B, OPITZ S, LENHART H, et al. Ecosystem based modeling and indication of ecological integrity in the German North Sea—Case study offshore wind parks[J]. Ecological Indicators, 2011, 11(1): 168-174.
- [16] VARNELL L M, EVANS D A, BILKOVIC D M, et al. Estuarine surface water allocation: A case study on the interactive role of science in support of management[J]. Environmental Science & Policy, 2008, 11: 602-612.
- [17] 张冉. 海湾海岸带主体功能区划分技术对比研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2011.
- [18] 丘君, 赵景柱, 邓红兵, 等. 基于生态系统的海洋管理: 原则、实践和建议[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(1): 74-78.
- [19] GB/T 12763.6-2007. 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查[S].
- [20] GB/T 12763.9-2007. 海洋调查规范第9部分: 海洋生态调查指南[S].
- [21] GB 3097-1997. 中华人民共和国海水水质标准[S].
- [22] 厦门海岛资源综合调查试验开发领导小组办公室, 厦门市海洋管理处. 厦门市海岛资源综合调查研究报告[R]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [23] 中国海湾志编撰委员会. 中国海湾志第八分册(福建南部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 211-242.
- [24] 张珞平, 江毓武, 陈伟琪, 等. 福建省海湾数模与环境研究——厦门湾[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [25] 廖丹, 张珞平, 方秦华, 等. 厦门湾海岸带区域人类开发活动的生态效应评价[J]. 万里学院学报, 2010, 23(2): 48-53.
- [26] 厦门市海洋与渔业局. 厦门市海洋环境质量公报(2007-2010年)[EB/OL]. <http://www.hyj.xm.gov.cn/Ocean/NewsList.aspx>, 2012-01-28.
- [27] 厦门大学环境科学研究中心. 厦门市生态城市概念性规划专题2: 生态环境分析[R]. 厦门: 厦门大学, 2003.
- [28] 周时强, 曾少坚, 柯才焕. 厦门市海洋与水产科普丛书(三): 厦门市海洋环境与资源——165个问答[Z]. 厦门: 厦门市海洋与渔业局, 厦门市科学技术协会, 厦门市海洋与水产学组, 2009.
- [29] 欧健. 厦门外来物种入侵风险评估研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [30] 厦门市环境保护局. 2009年厦门市环境质量状况公报[EB/OL]. <http://www.xmepb.gov.cn/sj/ContentView.aspx?CmsList=102&CmsID=15>, 2012-04-11.