

福建罗源湾海湾生态系统脆弱性评价

钟慧琪¹, 鲍姍姍¹, 韩 宇^{1,2}, 杨 璐^{1,3}, 陈明茹¹, 杨圣云¹, 肖佳媚¹

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361102; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020;

3. 厦门市海洋与渔业局, 福建 厦门 361105)

摘要:本研究以“暴露程度-敏感性-适应能力”为框架, 构建了罗源湾海湾生态系统脆弱性评价指标体系, 并运用模糊综合评价法对罗源湾海湾生态系统在1986~1990、2004~2006、2010~2012年三个阶段的脆弱性状况开展了定量评价, 结果显示, 罗源湾海湾生态系统在三个阶段均处于“中度脆弱”水平, 综合评价得分逐年上升, 呈现渐脆弱趋势. 三个子系统的模糊评价结果表明, 罗源湾海湾生态系统面临的暴露程度不断增大, 其主要人为胁迫因子为滩涂围垦面积、临港工业发展和海水养殖密度; 其次, 罗源湾海湾生态系统的敏感性也越来越强, 主要的敏感因子有海洋生物质量综合指数、浮游动物和潮间带底栖生物多样性指数和鱼卵仔稚鱼种类与密度; 与此同时, 适应能力则呈较好态势. 研究结果可为相似区域海湾生态系统脆弱性评价提供参考.

关键词:海洋环境科学; 海湾生态系统; 生态系统脆弱性评价; 模糊综合评价; 罗源湾

DOI:10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2017. 01. 003

中图分类号:P76

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2017)01-0016-08

海湾生态系统作为典型的海洋生态系统^[1]之一, 为人类的生产和生活提供了多种服务^[2]. 随着人类对海湾开发活动的加大, 海湾生态系统抵抗外界干扰的能力开始下降, 其脆弱化特征愈发明显. 因此, 科学评价海湾生态系统脆弱性, 对有效推进海湾生态系统的保护和恢复具有重大意义.

生态系统脆弱性的研究始于20世纪70年代, Timmerman(1981)首次提出了脆弱性的概念^[3]. 随后在第七届(1988年)环境问题科学委员会(SCOPE)上, 生态过渡带(E-cotone)的概念^[4]被确认, 生态脆弱性(ecological vulnerability)的研究也越来越活跃. 牛文元(1989)首次将E-cotone概念引入中国^[5], 国内学者先后在高原土地^[6]、流域^[7]、湿地^[8]和草原生态系统^[9]、社会生态系统^[10]等领域开展了脆弱性研究.

由于海洋生态系统具有复杂性、多样性和综合性的特点, 生态系统脆弱性评价开展难度大, 相关研究较少. 相对而言, 国外对海岸带生态系统的脆弱性评价较多, 其研究范畴多偏向于全球气候变化情况下的海岸带地区脆弱性研究^[11-12]. 在海

湾生态系统脆弱性方面, Perez等(1996)^[13]、Ford等(2006)^[14]和David等(2014)^[15]也从气候变化的影响角度开展了一系列研究. 国内对海湾生态系统脆弱性的研究相对滞后, 仅有针对乐清湾^[16]、珠江口^[17]、钦州湾^[18]等海湾生态系统脆弱性的零星研究. 此类研究多侧重于定性描述海湾的脆弱性, 定量研究较少. 本研究通过分析生态系统脆弱性的组成要素, 建立海湾生态系统脆弱性评价指标体系, 为定量评估海湾生态系统状况提供了科学方法, 具有重要的理论意义.

罗源湾是福建东北翼的重要工业基地之一, 也是科技兴海基地之一. 在工业高速发展的大背景下, 罗源湾周边的人类开发活动不断加大, 使得海湾面积缩减、天然湿地丧失、生物多样性下降等生态环境问题日益突出. 利用模糊综合评价法对罗源湾生态系统脆弱性进行定量评价, 讨论海湾生态系统中主要胁迫因子、主要敏感因子和最佳响应措施, 可为政府管理部门提供科学的决策依据, 对实现海湾周边社会经济和生态的可持续发展具有重要意义.

收稿日期:2016-05-09

基金项目:农业部2014年物种资源保护(渔业)资助项目

作者简介:钟慧琪(1989~), 女, 硕士; E-mail:1016912529@qq.com

通讯作者:肖佳媚, 硕士, 工程师; E-mail:natarsa@xmu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

罗源湾位于福建省东北部沿海,是福建省的主要海湾之一,为典型半封闭性海湾.罗源湾地理位置处于 26°18′~26°30′N,119°33′~119°50′E 之间,口小腹大,形似葫芦,水深港宽,长年不淤不冻,避风条件良好,航道深槽稳定,为强潮型海湾,最大潮差达 8.14 m,20 世纪 60 年代,罗源湾海域面积约为 226.7 km²^[19].随着大规模围填海工程的实施,截止 2012 年罗源湾海湾面积约为 199.19 km²,实际纳潮海域面积约为 154.49 km²,30 d 平均水交换率仅为 65%^[20];未来淡头港区、狮岐港区和牛坑湾等港区建成后,罗源湾海湾面积可能缩小至 176.69 km²,自然岸线可能损失约 69.9 km^[21].罗源湾水体含沙量小,滩涂资源丰富,是传统养殖区,目前,开发活动已从浅海和滩涂海水养殖为主转向临海工业发展为主,主要包括港口码头、冶金工业、能源发展以及石化产业的规划等开发为主.

1.2 资料与数据来源

本研究将评价 1986~1990、2004~2006、2010~2012 年三个阶段罗源湾海湾生态系统的脆弱性.1986~1990 年的资料与数据大部分来自 1989 年出版的《厦门大学学报》增刊中有关罗源湾系列研究的学术文献以及 1994 年海洋出版社出版的《中国海湾志》第七分册(福建北部海湾)^[19];2004~2006 年的资料与数据大部分来自 2010 年海洋出版社出版的《福建省海湾数模与环境研究:罗源湾》^[22],以及福建罗源火电厂工程环境影响评价的相关调查资料(2005);2010~2012 年的资料与数据主要来自福建神华罗源湾电厂工程环境影响评价的相关调查资料(2013).其他数据资料还包括政府部门的相关统计年鉴、公报及学术刊物的文献等.

1.3 海湾生态系统脆弱性评价方法构建

1.3.1 海湾生态系统脆弱性组成要素 海湾生态系统脆弱性是指暴露在某些特定自然环境和社会环境下的海湾生态系统针对外界的干扰所表现出的不稳定性.脆弱性是系统与施加在系统之上的扰动或胁迫之间相互作用而表现出的一种结果,并随着系统暴露条件的变化而变化.生态系统脆弱性主要包括暴露(exposure)、敏感性(sensitivity)和适应能力(adaptive capacity)三个要素.(1)暴露(exposure):系统所处的暴露条件是引发系统敏感因素表现出脆弱状态的必要条件,海湾生态系统所处的暴露条件不仅包括自然灾害层面的胁迫因子,如气候灾害

(台风、极端低温事件等)、海洋灾害(风暴潮、海啸等)和生态灾害(赤潮等)等,也包括人类开发活动影响,如过度捕捞、陆源污染物排放、滨海旅游业和临港工业的快速发展、高密度海水养殖和大规模围填海工程项目等.自然胁迫因子和人为胁迫因子构成了暴露的主要组分,胁迫因子的强度和频率影响暴露程度的大小.(2)敏感性(sensitivity):敏感性是系统自身存在的固有属性.当海湾生态系统受到外部扰动时,其结构与功能会随之发生改变,可能将引发系统从稳定状态转变到脆弱状态.系统中非生物环境会随着受到的污染而发生变化,生物环境中也会出现生物多样性降低、生境丧失、珍稀物种种类数下降等.(3)适应能力(adaptive capacity):目前适应能力与调整能力、应对能力和响应能力之间的概念关系还存在争议^[23-26].本研究认为,适应能力涵盖了扰动下系统出现的应对能力和响应能力.响应能力与系统的弹性和自恢复力有关,比较难评估;而系统的应对能力主要是通过人类适应性策略的选择而做出改善和修复生态系统的努力来体现.

1.3.2 评价指标体系的构建 根据生态系统脆弱性的内涵三要素“暴露程度-敏感性-适应能力”,构建生态系统脆弱性定量评价指标体系.评价指标体系分为 4 个层次,即目标层、准则层、因素层和指标层.4 个层次相互递进,其中目标层以罗源湾海湾生态系统脆弱性评价为目标;准则层即指出生态系统脆弱性从哪些方面去衡量;因素层即指出脆弱性的各基本判定指标受哪些因素影响;指标层即每一个准则层上的要素用哪些具体指标来表达,根据因素层各组成要素的特征和意义来筛选.根据罗源湾生态系统特点,本研究共筛选了 19 个指标,形成罗源湾海湾生态系统脆弱性评价体系.

1.3.3 指标的计算 为使评价指标具有可比性和可度量性,需对各评价指标的原始数据进行标准化处理,按正向指标和负向指标将原始数据进行无量纲化.采用隶属度打分法对指标原始数据进行标准化处理^[27].

本研究采用层次分析法(AHP)来确定指标权重^[28].在评价过程中,应用 yaahp0.5.2 层次分析软件进行权重分析.

1.3.4 模糊综合评价法 本研究中海湾生态系统脆弱性评价指标体系分为 3 个层次,可采用二级模糊综合评价方法,脆弱性模糊综合评价模型的构建步骤如下:

(1)确定评价对象的因子论域 X,由海湾生态系统脆弱性评价指标体系构成,根据已建立的指标

体系,确定因子论域 $X = \{x_{\text{暴露程度}}, x_{\text{敏感性}}, x_{\text{适应力}}\}$, 下一级的因子论域为 $x_{\text{暴露程度}} = \{u_{\text{自然胁迫}}, u_{\text{人为胁迫}}\}$, 其他因子集亦然.

(2)建立评价等级论域 $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_m\}$, 本文评价等级论域为 5 级, 即 $V = \{\text{微度脆弱}, \text{轻度脆弱}, \text{中度脆弱}, \text{重度脆弱}, \text{极度脆弱}\}$.

(3)建立模糊关系矩阵 R .

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & \cdots & r_{m1} \\ r_{12} & r_{22} & \cdots & r_{m2} \\ \cdots & \cdots & r_{ij} & \cdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}_{n \times m}$$

(1)

式(1)中: m 表示评价等级论域级别数量(本研究 $m = 5$), n 表示某个因子论域所包含的指标个数; r_{ij} 表示因子论域 x 中第 j 个指标对应于评价等级论域 V 中第 i 个等级的隶属度, $m = 1, 2, \cdots, i(i \leq 5)$, $n = 1, 2, \cdots, j$.

指标的隶属度计算方法为:确立 5 个评价等级, 即 $V = \{\text{微度脆弱}, \text{轻度脆弱}, \text{中度脆弱}, \text{重度脆弱}, \text{极度脆弱}\}$, 其取值区间为 $\{0 \sim 0.2, 0.2 \sim 0.4, 0.4 \sim 0.6, 0.6 \sim 0.8, 0.8 \sim 1.0\}$, 采用“降半梯形分布法”计算隶属度, 计算公式如下:

第 1 级别 v_1 的隶属度:

$$\mu(x)_{n1} = \begin{cases} 1 & x_n \leq s_{n1} \\ \frac{s_{n2} - x_n}{s_{n2} - s_{n1}} & s_{n1} < x_n < s_{n2} \\ 0 & x_n \geq s_{n2} \end{cases} \quad (2)$$

第 2 至第 4 级别的隶属度:

$$\mu(x)_{nm} = \begin{cases} 0 & x_n \leq s_{nm-1} \\ \frac{x_n - s_{nm-1}}{s_{nm} - s_{nm-1}} & s_{nm-1} < x_n < s_{nm} \\ 1 & x_n = s_{nm} \\ \frac{s_{nm+1} - x_n}{s_{nm+1} - s_{nm}} & s_{nm} < x_n < s_{nm+1} \\ 0 & x_n \geq s_{nm+1} \end{cases} \quad (3)$$

第 5 级别 v_5 的隶属度:

$$\mu(x)_{n5} = \begin{cases} 0 & x_n \leq s_{n4} \\ \frac{x_n - s_{n4}}{s_{n5} - s_{n4}} & s_{n4} < x_n < s_{n5} \\ 1 & x_n \geq s_{n5} \end{cases} \quad (4)$$

式(2~4)中: $m = 2, 3, 4$, 分别代表第 2, 3, 4 等级, n 表示第 n 个指标, x_n 表示第 n 个指标标准化后的值, s_{nm-1} 、 s_{nm} 、 s_{nm+1} 分别对应不同的评价等级标志值, 即 $\{0, 0.2, 0.4, 0.8\}$.

(4)分层模糊评价

一级综合评价, 即指标层对准则层的模糊评价模型为:

$$B_i = W_{Ci} \cdot R_i = (B_{i1}, B_{i2}, B_{i3}, B_{i4}, B_{i5}) \quad (5)$$

式(5)中: B_i 为第 $i(i = 1, 2, 3)$ 准则的模糊评价, $W_{Ci} = (w_{Ci1}, w_{Ci2}, w_{Ci3} \cdots w_{Cin})$, w_{Cin} 为各子系统中指标层相对准则层的权重. 运算“ $\cdot$ ”为模糊算子, 本研究采用 $M(\cdot, +)$ 算子.

二级综合评价, 即准则层对目标层的模糊评价模型为:

① 计算各准则层的单项评价值:

$$A_i = B_i \cdot S \quad (6)$$

式(6)中 $S = (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9)$, 这里取各脆弱性等级的均值参与计算, A_i 为第 $i(i = 1, 2, 3)$ 准则层的模糊评价综合得分.

② 罗源湾海湾生态系统脆弱性综合评价值:

$$P = W_{B1} \cdot A_1 + W_{B2} \cdot A_2 + W_{B3} \cdot (1 - A_3) \quad (7)$$

式(7)中: W_{B1} 、 W_{B2} 、 W_{B3} 分别为暴露程度、敏感性和适应能力准则层的权重, 即准则层相对于目标层的权重. 由于暴露程度和敏感性与脆弱性呈正相关关系, 适应能力和脆弱性呈负相关关系. 根据各准则层与脆弱性的关系所选取的叠加(减法)方法可能会导致结果的负向偏移, 因此, 需对公式进行修正, 使结果约束在 $0 \sim 1$ 之间.

1.3.5 评价结果分级 为了说明系统处于何种脆弱水平, 本研究将海湾生态系统脆弱性的评价结果分为 5 个层级, 准则层的隶属度也划分为 5 个层级(表 1).

表 1 评价结果所对应的隶属度与等级划分

Tab. 1 Membership degree and hierarchies of the evaluation results

等级划分	准则层隶属度水平			脆弱性
	暴露程度	敏感性	适应能力	
0.0~0.2	很低	很低	很低	微度脆弱
0.2~0.4	较低	较低	较低	轻度脆弱
0.4~0.6	一般	一般	一般	中度脆弱
0.6~0.8	较高	较高	较高	重度脆弱
0.8~1.0	很高	很高	很高	极度脆弱

2 结果与分析

2.1 评价指标权重值

运用层次分析法确定罗源湾海湾生态系统脆弱

性评价指标的权重,采用 yaahp 0.5.2 层次分析软件构建判断矩阵,并进行一致性检验,得到各个指标的权重值(表 2).

表 2 罗源湾海湾生态系统脆弱性评价指标权重分配表
Tab.2 Weight assignment table for Luoyuan Bay ecosystem vulnerability assessment index

目标层	准则层(权重)	因素层	指标层	权重
罗源湾海湾生态系统脆弱性评价	暴露程度 (0.240 2)	人为胁迫	人口密度	0.026 2
			人均 GDP	0.026 2
			工业产值占 GDP 比	0.043 0
			滩涂围垦面积比	0.088 1
			海水养殖密度	0.056 8
	敏感性 (0.549 9)	环境质量	海水质量综合指数	0.073 3
			沉积环境质量综合指数	0.073 3
			海洋生物质量综合指数	0.036 7
			叶绿素 a 含量	0.026 8
			浮游植物多样性指数	0.038 7
		生物与生态	浮游动物多样性指数	0.043 4
			鱼卵仔稚鱼种类、密度	0.065 7
			潮间带底栖生物多样性指数	0.109 4
			浅海底栖生物多样性指数	0.082 7
			三产比重	0.044 6
	适应能力 (0.209 8)	社会响应	污水处理率	0.023 6
			环境整治与海洋管理	0.038 8
			环保法律法规与政策	0.073 3
			公众参与程度	0.029 4

2.2 分层模糊评价

2.2.1 一级模糊综合评价 一级模糊综合评价结果显示,1986~1990 年罗源湾海湾生态系统面临的暴露程度对应于“较低”的隶属度最大,为 42.55%,2004~2006 年则对应于“一般”和“很高”的隶属度均较大,分别为 37.22% 和 36.66%;到 2010~2012 年对应于“很高”的隶属度最大,为 57.86%,说明罗源湾海湾生态系统的暴露程度不断增大(表 3),其中围填海、工业发展和海水养殖密度是造成暴露程度增大的主要胁迫因子.

1986~1990 年罗源湾海湾生态系统的敏感性对应于“较低”的隶属度最大,为 46.31%;2004~2006 年敏感性对应于“较低”的隶属度最大,为 33.24%,但与 1986~1990 年相比,对应于“很高”的隶属度增大;2010~2012 年敏感性对应于“较高”的隶属度最大,为 39.02%,说明罗源湾海湾生态系统敏感性增加,主要体现在海洋生物质量综合指数、

浮游生物多样性指数、鱼卵仔稚鱼种类与密度和潮间带底栖生物多样性指数上.

1986~1990 年罗源湾海湾生态系统具有的适应能力对应于“较低”的隶属度最大,为 59.78%,2004~2006 年适应能力对应于“一般”的隶属度最大,为 50.47%,2010~2012 年适应能力对应于“较高”的隶属度最大,为 58.73%,表明适应能力也逐渐增强.

2.2.2 二级模糊综合评价 根据一级模糊综合评价的结果可计算出各准则层的单项评价价值,然后根据该得分和准则层相对目标层的权重可计算出最终的综合评价结果(表 4).从各子系统的得分来看,暴露程度、敏感性和适应能力均呈现逐年增大的趋势,与一级模糊综合评价结果一致.从整体得分上看,三个阶段罗源湾海湾生态系统均处于“中度脆弱”,但得分有所上升.以上说明罗源湾海湾生态系统的暴露程度有增大趋势,敏感性增加,虽然适应能力向好

的态势发展,但整体上仍表现出脆弱性增加的趋势.

表 3 罗源湾生态系统子系统脆弱性隶属度
Tab.3 Subordinate degree of subsystem vulnerability of Luoyuan Bay

年份	子系统	隶属度/%				
		很低	较低	一般	较高	很高
1986 ~ 1990	暴露程度	8.70	42.55	16.29	32.44	0.00
	敏感性	18.40	46.31	10.14	25.17	0.00
	适应能力	11.25	59.78	28.96	0.00	0.00
2004 ~ 2006	暴露程度	0.00	16.68	37.22	9.44	36.66
	敏感性	11.00	33.24	21.11	23.92	10.74
	适应能力	11.25	0.43	50.47	37.85	0.00
2010 ~ 2012	暴露程度	0.00	8.67	8.88	24.58	57.86
	敏感性	18.87	22.83	1.03	39.02	18.25
	适应能力	0.00	13.83	18.69	58.73	8.74

表 4 罗源湾生态系统子系统脆弱性得分及脆弱性综合得分
Tab.4 Scores of subsystem vulnerability and the total score of Luoyuan Bay

年份	暴露程度 得分	敏感性 得分	适应能力 得分	脆弱性综合 得分
1986 ~ 1990	0.444 9	0.384 2	0.335 4	0.457 6
2004 ~ 2006	0.632 2	0.480 4	0.529 8	0.514 6
2010 ~ 2012	0.763 3	0.529 9	0.624 8	0.553 5

3 讨论

3.1 评价方法的选择与修正

海湾生态系统脆弱性评价是一个涉及多因素的复杂问题,在选取评价方法时,模糊评价法保留了评价结果的所有信息,避免了其他方法非此即彼的刚性划分,但在结论上带有模糊性.本研究采用模糊综合评价法对罗源湾海湾生态系统脆弱性进行了分级评价,结果不仅克服了传统综合评价结果单一刚性的缺陷,而且能计算出综合分值,进行不同年份间的比较.这在海湾生态系统脆弱性评价方法的选取上具有一定的参考意义.

二级模糊综合评价的处理方法会直接影响到综合评价的分值大小,不同学者在进行评价时有不同选择^[29-31].王国胜(2007)运用 AHP-模糊综合评价模型对河流健康进行评价时,二级模糊综合评价采取的是与一级模糊综合评价相同的方法,即 M (·,+)算子,最后采用最大隶属度来确定河流健康等级^[29].叶慕亚(2006)在对鄱阳湖湿地生态系统脆弱性进行评价时,也是采取的此方法,不同的是,它综合考虑了评判结果与各等级的评级参数,所得

结果是一个综合参数^[30].由于本研究三个子系统与脆弱性关系不同,不能简单加和,所以采取了先计算出三个子系统各自的单项分值,再乘以各自权重后相加减的方法.本研究的结果显示,三个阶段罗源湾海湾生态系统均处于“中度脆弱”状态,这与其他学者的结果是相吻合的,如陈志梅等(2013)基于多级模糊识别模型的结果显示,2007~2010 年罗源湾生态风险等级在中等和较高之间^[31].

需要指出的是,本研究所采取的方法中有减法,因而存在负值的可能,在计算海湾生态系统脆弱性绝对数值时有一定弊端,为使分值为正,需要进行一定的修正.但若是单纯比较年间变化趋势,则此种方法是可行的,不需要进行修正.此外,在计算各准则层的单项评价价值时,本研究采用五个等级的均值参与计算是较合适的.若取{0,0.2,0.4,0.6,0.8},所得结果较保守,取{0.2,0.4,0.6,0.8,1.0}又会导致估值偏大.

3.2 影响罗源湾海湾生态系统脆弱性的关键因子

模糊综合评价法的结果显示罗源湾海湾生态系统呈现出渐脆弱的趋势.对罗源湾海湾生态系统脆弱性进行关键因子分析,发现滩涂围垦面积、工业生

产比重和海水养殖密度等是影响罗源湾海湾生态系统脆弱性的主要胁迫因子。

罗源湾的滩涂围垦开发始于 20 世纪 60 年代,80 年代以后罗源湾围填海活动再掀热潮。据不完全统计,罗源湾围垦工程共 17 处^[32],围垦面积总计约 71.96 km²^[20]。而大规模的围填海工程会对生物生境造成破坏,引起底栖生物数量的减少,生物多样性降低。2004 年前后罗源湾出现大面积频繁的滩涂围垦和工业活动,使得这一时期系统的敏感性较高。例如,2004 ~ 2006 年海洋生物质量综合指数、浮游动物多样性指数、鱼卵、仔稚鱼密度、潮间带底栖生物多样性指数的敏感性评价价值均较高,且均显著高于 1986 ~ 1990 年。

2004 年后,主要胁迫来自工业活动,随着《罗源县国民经济和社会发展规划第十二个五年规划(2011 ~ 2015 年)》进入实施阶段,罗源湾周边构建起了以火电能源、钢铁冶炼加工、港口物流、船舶修造等为主的工业体系^[33]。工业生产带来的影响主要有石油、重金属、电厂温排水等。与底栖生物相比,浮游生物和鱼卵、仔稚鱼个体小,在生长过程中对水温要求严格,对环境扰动更敏感,更易受到工业污染的影响。随着该指标工业产值占 GDP 比的增加,2010 ~ 2012 年浮游生物多样性指数和鱼卵、仔稚鱼(种类、密度)的敏感性继续增加,海洋生物质量综合指数也保持很高的敏感性评价价值。

参考文献:

- [1] 沈国英,黄凌风,郭丰,等. 海洋生态学[M]. 3. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 石洪华,郑伟,丁德文,等. 典型海洋生态系统服务功能及价值评估——以桑沟湾为例[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(2): 101-104.
- [3] Timmerman P. Vulnerability, resilience and the collapse of society: a review of model and possible climatic applications[M]. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [4] 周永娟,王效科,欧阳志云. 生态系统脆弱性研究[J]. 生态经济, 2009(11): 165-167.
- [5] 牛文元. 生态环境脆弱带 Ecotone 的基础判定[J]. 生态学报, 1989, 9(2): 97-105.
- [6] 王经民,汪有科. 黄土高原生态环境脆弱性计算方法探讨[J]. 水土保持通报, 1996(3): 32-36.
- [7] 王丽婧,郭怀成,刘永,等. 邛海流域生态脆弱性及其评价研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 192-196.
- [8] 周亮进. 闽江河口湿地生态脆弱性评价[J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(3): 25-31.
- [9] 徐广才,康慕谊, Marc M, 等. 锡林郭勒盟生态脆弱性[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1643-1653.
- [10] 余中元,李波,张新时. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1870-1879.
- [11] Benjamin S H, Kimberly A S, Eioenza M, et al. Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats[J]. Conservation Biology, 2007, 21(5): 1301-1315.
- [12] Boruff B J, Emrich C, Cutter S L. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties[J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(5): 932-942.
- [13] Perez R T, Feir R B, Carandang E, et al. Potential impacts of sea level rise on the coastal resources of Manila Bay: A preliminary vulnerability assessment[J]. Water Air & Soil Pollution, 1996, 92(1/2): 137-147.
- [14] Ford J D, Smit B, Wandel J. Vulnerability to climate change in the Arctic: A case study from Arctic Bay, Canada[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(2): 145-160.

此外,胁迫因子对罗源湾海湾生态系统脆弱性的影响是相互叠加的。例如,围填海会导致罗源湾纳潮海域面积减小,而纳潮量的减小直接影响到海域的水体交换能力。罗源湾口小腹大,自身水交换能力较差,围填海使之更加恶化,再加上湾内密集的养殖区,致使湾内 N、P 含量较高。自 1998 年以后,罗源湾一直处于富营养化状态^[34]。

从脆弱性的三个要素之间的关系可以看出:罗源湾海湾生态系统暴露在围填海、临港工业、海水养殖等人为干扰下,海洋生物的敏感性增加,生态系统内部出现海洋生物体重金属超标和生物多样性降低等响应,而通过相关法律法规的完善和相应的环境治理,能在一定程度上缓解系统的不稳定态势,但效果有限,系统仍然呈脆弱性趋势发展。

因此,要维持罗源湾海湾生态系统健康,关键是要通过生态系统管理从根本上防止罗源湾海湾生态系统脆弱性的进一步发展。除了提高三废处理率和调整产业布局外,还需要深入了解社会-经济-自然复合生态系统中各组分之间的相互关系,从关键因子入手,对区域内暴露程度大的胁迫因子进行控制和干预。因此,建议优化罗源湾现有的养殖布局,改变围填海方式,并整合临港工业资源。基于罗源湾水交换弱的特点,与其他相似海域相比,其控制和干预措施需要更严格些。同时从基于生态系统的管理角度,开展生物多样性可持续保护工作。

- [15] David K, Elise V C, Christophe M, et al. Vulnerability of Mediterranean ecosystems to long-term changes along the coast of Israel[J]. Plos One, 2014, 9(7):e102090.
- [16] 彭欣, 仇建标, 陈少波, 等. 乐清湾生态系统脆弱性研究[J]. 海洋学研究, 2009, 27(3): 111-118.
- [17] 萧艳娥. 海平面上升引起的海岸自然脆弱性评价——以珠江口为例[D]. 广州: 华南师范大学, 2003.
- [18] 李莎莎, 孟宪伟, 葛振鸣, 等. 海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2 702-2 711.
- [19] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第七分册(福建北部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1994.
- [20] 王勇智, 马林娜, 谷东起, 等. 罗源湾围填海的海洋环境影响分析[J]. 中国人口: 资源与环境, 2013, 23(11): 129-133.
- [21] 福建省交通运输厅. 福州港总体规划(2012)[EB]. [2016-05-09]. http://www.fjjt.gov.cn/xxgk/ghjh/zxgh/201412/t20141210_100636.htm.
- [22] 鲍献文. 福建省海湾数模与环境研究: 罗源湾[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [23] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(14): 8 074-8 079.
- [24] Fankhauser S, Smith J B, Tol R S J. Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions[J]. Ecological Economics, 1999, 30: 67-78.
- [25] Smit B, Wandel J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability[J]. Global Environmental Change, 2006, 16: 282-292.
- [26] Gallopin G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 235-316.
- [27] 程建新, 肖佳媚, 陈明茹, 等. 兴化湾海湾生态系统退化评价[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2012, 51(5): 944-950.
- [28] Masero J A, Perezgonzales M, Basadre M, et al. Food supply for waders(Aves:Charadrii) in an estuarine area in the bay of Cadiz (SW Iberian Peninsula)[J]. Acta Oecologica, 1999, 20(4): 429-434.
- [29] 王国胜. 河流健康评价指标体系与 AHP-模糊综合评价模型研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
- [30] 叶慕亚. 鄱阳湖典型湿地生态环境脆弱性评价[D]. 南昌: 江西师范大学, 2006.
- [31] 陈志梅, 余兴光, 陈克亮, 等. 基于多级模糊识别模型的罗源湾生态风险综合评价[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(4): 568-576.
- [32] 罗源县地方志编纂委员会. 罗源县志[M]. 北京: 方志出版社, 1998.
- [33] 余东. 罗源湾重金属环境和沿岸产业布局相关性分析及对策研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [34] 张超, 马启敏. 罗源湾水质评价与富营养化研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2011, 41(S1): 398-402.

Assessment on the vulnerability of Luoyuan Bay ecosystem, Fujian

ZHONG Hui-qi¹, BAO Shan-shan¹, HAN Yu^{1,2}, YANG Lu^{1,3}, CHEN Ming-ru¹,
YANG Sheng-yun¹, XIAO Jia-mei¹

(1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;

3. Xiamen Ocean and Fisheries Administration, Xiamen 361105, China)

Abstract: Based on the “Exposure- Sensitivity- Ability to adapt” framework, the vulnerability assessment index system was established for Luoyuan Bay ecosystem. The ecosystem vulnerabilities in 3 periods (1986 ~ 1990, 2004 ~ 2006, 2010 ~ 2012) were studied used the fuzzy comprehensive evaluation method. The results showed that all 3 periods were in “mild-vulnerability”. The scores increased in years and Luoyuan Bay ecosystem tended to be increasingly vulnerable. The evaluate results of 3 subsystems showed that the exposure intensity of Luoyuan Bay ecosystem was increasing and the major artificial stress factors were reclamation areas, port industry developments and aquaculture density. And the sensitivity of Luoyuan Bay ecosystem was obviously intense, the main sensitive factors were comprehensive index of marine life quality, biological diversity indexes of zooplankton and intertidal benthic,

and species and density of fish larvae and eggs. Meanwhile, the adaptive capacity of Luoyuan Bay ecosystem presented a good tendency. This research can provide a reference for the vulnerability assessment of bay ecosystem in similar regions.

Key words;marine environmental science; bay ecosystem; ecosystem vulnerability assessment; fuzzy comprehensive evaluation method; Luoyuan Bay

DOI;10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2017. 01. 003

(责任编辑:肖 静)