

DOI: 10.5846/stxb201803080461

胡涛, 高艳妮, 李延风, 虞慧怡, 王世曦, 刘鑫, 杨春艳. 基于能值的陆域受威胁和濒危物种价值估算——以福建省厦门市为例. 生态学报, 2019, 39(13): - .

Hu T, Gao Y N, Li Y F, Yu H Y, Wang S X, Liu X, Yang C Y. Emergy-based assessment of threatened and endangered terrestrial species: A case study from Xiamen City, Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): - .

基于能值的陆域受威胁和濒危物种价值估算 ——以福建省厦门市为例

胡 涛^{1,2}, 高艳妮^{1,2,*}, 李延风³, 虞慧怡^{1,2}, 王世曦^{1,2}, 刘 鑫⁴, 杨春艳^{1,2}

1 中国环境科学研究院 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

2 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

3 福建省环境科学研究院, 福州 350013

4 生态环境部信息中心, 北京 100029

摘要:开展受威胁和濒危物种价值评估是生物多样性研究的关键问题之一。当前受威胁和濒危物种研究正处于濒危等级界定和保护优先性确定阶段, 存在不同保护等级交叉管理、价值评估方法欠缺及重复性计算等多方面问题。本研究利用 IUCN 濒危等级和中国特有种等级名录确定厦门市不同濒危等级物种数, 在此基础上利用能值转换率和修正的中国能值/货币比率对厦门市陆域受威胁和濒危物种价值进行估算。结果显示, 通过多途径整理纳入估算的厦门市陆域野生动植物物种数为 1444 种, 其中受威胁和濒危物种数为 318 种; 2015 年厦门市物种能值价值约为 3.53×10^{11} 元, 2010 年约为 3.08×10^{11} 元, 其中两期受威胁和濒危物种能值价值均占物种总价值的 88.31%; 中国特有种等级对价值贡献最大达 73.25%, 其次是 IUCN 濒危等级达 23.24%。研究表明, 能值评估法能够客观凸显受威胁和濒危物种价值, 研究结果可为生物多样性及物种保育的管理决策提供技术支撑。

关键词:濒危物种; 受威胁物种; 濒危等级; 能值; 能值/货币比率; 厦门市

Emergy-based assessment of threatened and endangered terrestrial species: A case study from Xiamen City, Fujian Province

HU Tao^{1,2}, GAO Yanni^{1,2,*}, LI Yanfeng³, YU Huiyi^{1,2}, WANG Shixi^{1,2}, LIU Xin⁴, YANG Chunyan^{1,2}

1 State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3 Fujian Research Academy of Environmental Sciences, Fuzhou 350013, China

4 Information Center of Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Beijing 100029, China

Abstract: The implementation of value assessments and analysis of the effectiveness of protection of different types of threatened and endangered species has become a key issue in biodiversity research. Current research into threatened and endangered species focuses on defining the level of endangerment and determining the priority of protection, and it is subject to problems, such as cross-management of different protection levels, lack of value assessment methods, and repetitive calculations. In this study, the number of different endangered species in Xiamen was determined using the IUCN endangered grade and the list of endemic species in China. Based on this, the emergy/GDP ratio was used to estimate the number of threatened and endangered species in Xiamen City. According to the collected, summarized, and analyzed

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0500205); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41501381); 中国工程院重点咨询项目(2017-ZD-09-01)

收稿日期: 2018-03-08; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoyan@craes.org.cn

results, there are 1,444 terrestrial wildlife species in Xiamen, of which 318 are threatened or endangered. The estimated emergy value of those species was found to be approximately 3.53×10^{11} yuan in 2015 and about 3.08×10^{11} yuan in 2010. The emergy value of threatened and endangered species in the two periods accounted for 88.31% of the total value of the species. The endemic species hierarchy in China contributed 73.25% of the emergy value, but the contribution rate of the IUCN endangerment classification was 23.24%. Research indicates that the emergy assessment method can highlight the value of threatened and endangered species in an objective manner. These results can provide technical support for decision-making in biodiversity and species conservation management.

Key Words: endangered species; threatened species; endangerment categories; emergy; emergy/GDP ratio; Xiamen City

当前,生物多样性丧失是与人类和环境负面影响相关的全球性挑战之一^[1-3]。物种是生物多样性的基本单元^[4],而濒危物种是一个保护生物学概念^[5],是指短时间内灭绝率较高,具有种群小、野外数量不增的生物类群^[6-7]。同时,评估物种濒危等级和确定物种保护优先序^[8]是生物多样性保护的一项重要工作,其中物种保护是其核心内容^[9],而濒危物种类别和濒危等级确定则是关键步骤。目前《IUCN 物种红色名录濒危等级和标准》是应用最为广泛且影响深远的物种濒危确定标准^[5],但濒危物种界定是一个动态更新的过程,不同评估机构及学者所理解的概念内涵不同会导致评估结果差异较大^[5,7,10]。近年来,国内外学者针对受威胁和濒危物种在价值评估^[11-12]、价值体现^[13-16]、濒危程度评级^[17-18]、受威胁现状及原因^[19-20]、优先保育及保护序列^[21-22]、就地保护状况^[23-24]及自然保护区物种多样性价值评估方法与保护优先性确定^[25]等方面开展了大量研究。而目前价值评估主要采用支付意愿法^[26-29]、条件价值法^[13,30]、成本效益法^[31]、保护性支出法^[32]、Shannon-Wiener 指数评估法^[33]及能值与 Eco-exergy 法^[34]等多种方法,但上述评估方法在生态经济学派和环境经济学派中依然存在较大分歧^[35],相比能反映出社会经济环境系统的真实财富,更能体现生态系统过程多样性和复杂性的能值评估法反而更加有效^[36-39]。此外,综合评述现阶段受威胁和濒危物种价值评估的相关研究正在从定性描述向定量评估方向转变,而评估方法也呈现多元化趋势,但也存在着概念内涵差异较大、核算标准不统一及可重复性较差等问题,导致其科学研究的实际管理决策借鉴程度较低。

因此,本研究选取受威胁和濒危物种^[11-12]作为评估对象,其包括国家保护等级、世界自然保护联盟(The International Union for Conservation of Nature, IUCN)濒危物种红色名录、濒危野生动植物种国际贸易公约(Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, CITES)附录和中国特有种等级中的各类野生动植物种。同时,运用能值法估算受威胁和濒危物种价值时,重点将能值方法引入到价值评估体系中,并对当前能值应用中的中国能值/货币比率进行修正,以及去除物种不同评价等级的重复部分。本研究有助于拓展能值核算应用范畴,充实受威胁和濒危物种价值评估方法,可以为生物多样性保护政策制订及管理提供决策支撑。

1 区域概况与数据来源

1.1 区域概况

厦门市地处 $24^{\circ}23' - 24^{\circ}54'N$ 、 $117^{\circ}53' - 118^{\circ}26'E$,辖有思明区、湖里区、集美区、海沧区、同安区及翔安区 6 个行政区(图 1),国土面积 1699.39 km^2 ,其中海域面积约 390 km^2 。厦门市位于亚热带地区,受南亚热带海洋性季风气候影响,温和多雨,年平均气温在 21°C 左右,年平均降水量约为 1335.8 mm ,水量丰富且季节变化明显。2017 年厦门全市户籍人口 231.03 万人,全年地区生产总值(GDP)4351.18 亿元,三次产业结构为 $0.5:41.7:57.8$ 。2017 年全年空气优良天数 362 天,优良率为 99.18%,环境空气质量在全国 74 个重点城市中排名第四,厦门湾局部海域符合第一、第二类海水水质标准占该海域总面积的 69.1%,水质状况继续保持稳定趋于向好。

1.2 数据来源及说明

本研究中受威胁和濒危物种主要以近百年来不同时期在厦门市全境内出现的野生动植物为主,其中植物包括裸子植物类、被子植物和野生蕨类的野生维管束植物,而动物包括野生哺乳类、两栖类、爬行类、鸟类和淡水鱼类等陆生野生动物。野生动植物种类及分布数据采集主要依据前人完成的以及新中国成立后专业人员在福建省开展的生态系统和生物资源的考察与调查成果,主要有以下来源:①《中国植物志》、《中国动物志》、《福建植物志》、《福建鱼类志》以及各历史时期公开发表的期刊、书籍和专著,专业人员或专业机构的内部调查资料,其他公开发表文献中的物种分布信息等;②各研究机构和大学的植物标本馆及动物标本馆馆藏标本采集信息,部分信息在线查询中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn>);③通过实地调查收集物种标本。野生动植物名录来自中国科学院生物多样性委员会主编的《中

国生物物种名录》(Catalogue of Life China) 2011 版,而物种濒危等级确定主要参考《IUCN 物种红色名录濒危等级和标准》、《濒危野生动植物种国际贸易公约》、《中国物种红色名录》、《中国生物多样性红色名录》及《濒危物种红色名录》等。此外,能值核算过程中需要的社会经济数据来源于《2011 年中国统计年鉴》,环境污染数据来源于《2011 年中国环境统计年鉴》。

2 研究方法

本研究在 Odum^[40] 提出的能值理论上改进了受威胁和濒危物种价值评估方法,整个运算流程如下:首先,计算单个物种能值转换率;其次,构建不同濒危等级指数评估模型,并采用逐级分类筛选方式解决重复性计算问题;最后,通过社会经济环境系统的能值分析指标体系,计算中国能值/货币比率,从而得到不同濒危等级物种的能值货币价值。

2.1 单个物种能值转换率

在地球生物圈 2×10^9 a 的地质进化历史中有 1.5×10^9 个物种形成^[40-41],应用 Brown 等^[42] 2010 年的年地球生物圈能值基准值 (15.2×10^{24} sej/a),并以研究区面积占地球表面积修正得到厦门市单个物种能值转换率,计算公式如下:

$$\tau = \frac{E_b}{\frac{\mu}{\sigma}} \times \theta \quad (1)$$

式中, τ 指某一区域中单个物种的能值转换率(sej/种), E_b 指地球生物圈年能值基准值(sej/a), μ 指历史中物种形成数量(种), σ 指地质年代的时间(a), θ 为研究区国土面积占地球表面积的比例。

2.2 濒危等级评估

本研究评估方法是在王兵^[33,43] 所提出的 Shannon-Wiener 指数评估法基础上进行改进,结合表 1 中的濒危等级指数,按照中国特有种、IUCN 受威胁和濒危物种,国家保护 I 级和 II 级, CITES 附录 I、II 级和 III 级的先后顺序,分类筛选确定各濒危等级的物种数(表 2),特别说明国家保护等级和 CITES 附录等级按照 IUCN 濒危等级指数中“近危(NT)”计算,美元与人民币采用当年平均汇率转换,其各项公式如下:

公式一:受威胁和濒危物种总价值估算方法:

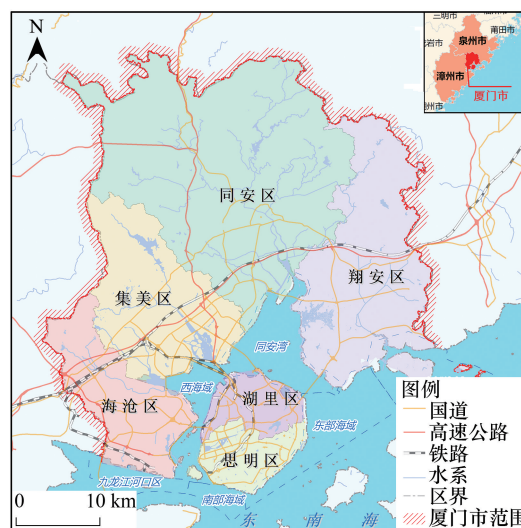


图 1 厦门市行政区划图

Fig.1 Administrative map of Xiamen City

$$U_0 = U_1 + U_2 + U_3 \quad (2)$$

式中, U_0 为厦门市受威胁和濒危物种总价值(元), U_1 为中国特有物种年物种保育价值(元), U_2 为 IUCN 受威胁和濒危种年物种保育价值(元), U_3 为同属中国特有物种和 IUCN 受威胁和濒危物种的年物种保育价值(元)。

公式二:只属于中国特有物种价值估算方法:

$$U_1 = \left(1 + 0.1 \sum_{n=1}^n B_n\right) \times n \times \tau \div \text{EMR} \quad (3)$$

式中, U_1 为中国特有物种价值(元); B_n 为评估区域内物种 n 的中国特有种指数(表 1), 一般取值为 2; n 为纳入计算的只是中国特有种指数物种数(表 2)(种); τ 指单个物种能值转换率(sej/种), EMR 指某一区域的能值/货币比率(sej/\$)。

公式三:只属于 IUCN 受威胁和濒危物种价值估算方法:

$$U_2 = \left(1 + 0.1 \sum_{m=1}^m E_m\right) \times m \times \tau \div \text{EMR} \quad (4)$$

式中, U_2 为 IUCN 受威胁和濒危物种价值(元); E_m 为评估区域内物种 m 的濒危指数(表 1); m 为纳入计算的只是 IUCN 受威胁和濒危物种数(表 2)(种); τ 指单个物种能值转换率(sej/种), EMR 指某一区域的能值/货币比率(sej/\$)。

表 1 受威胁和濒危物种等级赋值标准和特有物种分布范围

Table 1 Endangered species criteria and endemic species assignment criterion

濒危指数 Endangered index	濒危等级 Endangered criteria	特有种分布范围 Endemic species distribution range
4	极危(Critically Endangered, CR)	仅限于范围不大的山峰或特殊的自然地理环境下分布
3	濒危(Endangered, EN)	仅限于某些较大的自然地理环境下分布的类群, 如仅分布与较大的海岛(岛屿)、高原、若干个山脉等
2	易危(Vulnerable, VU)	仅限于某个大陆分布的分类群
1	近危(Near Threatened, NT)	至少在 2 个大陆都有分布的分类群
0	无危(Least Concern, LC)、数据缺失(Least Concern, LC)及未评估(Not Evaluated, NE)	世界广泛的分类群

表 2 不同等级物种数及评估方法

Table 2 Number of species of different heirarchies and assessment methods

项目 Project	物种数/种 Number of species	公式 Formula
特有+IUCN 受威胁和濒危 Endemic and IUCN threatened and endangered	22	公式四
仅 IUCN 受威胁和濒危 IUCN threatened and endangered	95	公式三
仅特有 Endemic	174	公式二
仅国家保护 I 和 II 级 National grade	21	计算在公式三之内
仅濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)附录 I、II 和 III 级 Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES) appendix	6	计算在公式三之内

公式四:同属中国特有种、IUCN 受威胁和濒危物种价值估算方法:

$$U_3 = \left(1 + 0.1 \sum_{x=1}^x E_m + 0.1 \sum_{y=1}^y B_n\right) \times (x + y) \times \tau \div \text{EMR} \quad (5)$$

式中, U_3 为同属中国特有物种、IUCN 受威胁和濒危物种价值(元); E_m 为评估区域内物种 x 的濒危指数(表

1); B_n 为评估区域内物种 y 的中国特有种指数(表 1); x 为纳入计算的濒危指数物种数(表 2)(种), y 为纳入计算的中国特有种指数物种数(表 2)(种); τ 指单个物种能值转换率(sej/种), EMR 指某一区域的能值/货币比率(sej/ \$)。

2.3 中国能值/货币比率

本研究中国能值/货币比率确定主要参考《中国经济持续发展水平的能值分析》^[44]一文中的分类体系并稍作修改(表 3), 结合当前能值研究中发现可在可更新资源和货币流两个部分都存在重复计算的问题^[45-46], 采取这两个部分的最大项作为其单项的数值, 并利用已有研究^[44, 47-48]的能值转换率参数计算能值量, 计算公式如下:

$$EMR = \frac{E_M}{GDP} \quad (6)$$

式中, EMR 指某一区域(中国)的能值/货币比率(sej/ \$), E_M 指一个国家或地区的总能值(sej), GDP 指当年的国内生产总值(\$)。

表 3 中国社会、经济和环境系统能值分析表(2010 年)

Table 3 Table of emergy evaluation of social, economic, and environmental systems in China

类别 Category	项目 Project	单位 Unit	原始数据 Raw data	能值转换率/(sej/unit) Transformity	太阳能值/sej Solar emergy
可更新资源 Renewable resources	太阳能	焦耳	5.97×10^{22}	1.00	5.97×10^{122}
	雨水化学能	焦耳	3.03×10^{19}	1.54×10^4	4.67×10^{23}
	雨水势能	焦耳	8.86×10^{19}	8.89×10^3	7.88×10^{23}
	风能	焦耳	5.84×10^{19}	6.63×10^2	3.87×10^{22}
	地球循环能	焦耳	1.39×10^{19}	2.90×10^4	4.03×10^{23}
可更新资源产品 Renewable resources product	水力发电	千瓦时	4.69×10^3	4.00×10^4	5.50×10^{22}
	林产品	万吨	3.35×10^2	3.49×10^4	1.40×10^{21}
	农产品	万吨			
	稻谷	万吨	1.96×10^4	3.59×10^4	8.78×10^{21}
	小麦	万吨	1.15×10^4	6.80×10^4	1.76×10^{22}
	玉米	万吨	1.77×10^4	8.52×10^6	5.51×10^{24}
	豆类	万吨	1.90×10^{23}	8.30×10^4	5.86×10^{21}
	油料	万吨	3.23×10^3	6.90×10^5	4.83×10^{23}
	蔬菜	万吨	9.30×10^2	5.30×10^5	4.12×10^{22}
	水果	万吨	2.14×10^4	5.30×10^4	5.72×10^{21}
	其他	万吨	1.54×10^4	2.37×10^4	1.22×10^{22}
	畜牧品	万吨			
	肉类	万吨	7.93×10^3	2.00×10^6	4.03×10^{23}
	奶类	万吨	3.75×10^3	1.71×10^6	4.49×10^{22}
	禽蛋	万吨	2.76×10^3	2.00×10^6	9.39×10^{22}
	羊毛	万吨	4.29×10^1	4.40×10^6	2.83×10^{20}
	其他	万吨	1.85	2.00×10^6	4.71×10^{19}
	水产品	万吨	5.37×10^3	2.00×10^6	1.16×10^{23}
不可更新资源产品与消耗 Nonrenewable resources product and consumption	原煤	万吨	3.24×10^5	3.98×10^4	3.77×10^{24}
	石油	万吨	2.03×10^4	5.30×10^4	4.64×10^{23}
	天然气	万吨标准煤	1.43×10^4	4.80×10^4	2.01×10^{23}
	火力发电量	万吨标准煤	2.27×10^4	1.59×10^5	1.06×10^{24}
	钢材	吨	8.03×10^{17}	1.98×10^{15}	1.59×10^{23}
	生铁	吨	5.97×10^7	1.00×10^{15}	5.97×10^{22}
	原盐	吨	7.04×10^7	1.00×10^{15}	7.04×10^{22}

续表

类别 Category	项目 Project	单位 Unit	原始数据 Raw data	能值转换率/(sej/unit) Transformity	太阳能值/sej Solar emergy
货币流 Currency flow	水泥	吨	1.88×10^9	1.98×10^{15}	3.73×10^{24}
	化肥	吨	6.34×10^7	4.77×10^{15}	3.02×10^{23}
	塑料	万吨	4.43×10^3	6.60×10^4	1.26×10^{23}
	纸	万吨	9.83×10^3	3.49×10^4	4.12×10^{22}
	焦炭	万吨	3.89×10^4	1.04×10^4	1.35×10^{23}
	农药	万吨	2.24×10^2	1.97×10^6	1.96×10^{23}
	表土净损失	吨	1.07×10^5	6.25×10^4	6.67×10^9
	GDP	美元	6.08×10^{12}	8.69×10^{12}	5.29×10^{25}
	进口商品	美元	2.11×10^{11}	2.50×10^{12}	5.28×10^{23}
	国际旅游收入	美元	7.61×10^9	2.50×10^{12}	1.90×10^{22}
	利用外资	美元	1.65×10^{10}	2.50×10^{12}	4.12×10^{22}
	出口商品	美元	2.39×10^{11}	1.46×10^{12}	3.49×10^{23}
	对外劳务	美元	1.35×10^9	8.67×10^{12}	1.17×10^{22}
废物流 Waste stream	废水	万吨	6.17×10^6	6.66×10^5	2.05×10^{23}
	废气	万吨	3.46×10^3	6.66×10^5	3.33×10^{23}
	固体废弃物	万吨	2.41×10^5	1.80×10^6	3.16×10^{24}
总能值(去除重复项) Total emergy (Removal repeated term)					7.49×10^{25}

3 结果与分析

3.1 厦门市受威胁和濒危物种种类及状况

厦门市陆域纳入计算的野生动植物物种数为 1444 种(表 4),其中动物有 5 纲 35 目 106 科 211 属 325 种,植物有 9 纲 62 目 190 科 679 属 1119 种。动物物种中,属于国家 I 级的物种数有 2 目 3 科 5 种,国家 II 级的物种数有 12 目 16 科 29 种;属于福建省重点保护的物种数有 10 目 14 科 26 种,属于中国特有物种数有 15 种。

表 4 厦门市陆域野生动植物濒危物种数及濒危等级

Table 4 Number of endangered terrestrial wildlife species and endangerment categories in Xiamen

名称 Name	等级 Grade	动物物种数/种 Animal species number	植物物种数/种 Plant species number
国家保护等级 National protection grade	国家 I 级	5	1
	国家 II 级	29	14
	未列入	291	1104
CITES 附录等级 CITES appendix grade	附录 I	12	0
	附录 II	13	34
	附录 III	2	0
	未列入	298	1085
世界自然保护联盟(IUCN)濒危等级 International Union for Conservation of Nature(IUCN) endangerment category	极危(CR)	3	5
	濒危(EN)	12	2
	易危(VU)	24	26
	近危(NT)	26	19
	无危(LC)	226	14
	未予评估(NE)	33	1053
	数据缺乏(DD)	1	0
中国特有种等级 China endemic species grade	是	15	181
	否	310	938

《IUCN 物种红色名录濒危等级和标准》中收录的属于“极危 (CR)”为 3 种、“濒危 (EN)”为 12 种、“易危 (VU)”为 24 种和“近危 (NT)”的物种数为 26 种;植物物种中,属于国家 I 级的物种数有 1 目 1 科 1 种,国家 II 级的物种数有 9 目 12 科 14 种;属于福建省重点保护的物种数有 4 目 4 科 4 种,属于中国特有的物种数为 182 种。《IUCN 物种红色名录濒危等级和标准》中收录的属于“极危 (CR)”物种数为 5 种、“濒危 (EN)”物种数为 2 种、“易危 (VU)”物种数为 26 种和“近危 (NT)”物种数为 19 种。

此外,为避免重复计算导致结果偏差较大,逐级分类筛选之后发现属于濒危种而非特有种的“极危 (CR)”、“濒危 (EN)”、“易危 (VU)”及“近危 (NT)”等级的物种数分别为 4、16、36 和 41 种,属于特有种而非 IUCN 濒危中“极危 (CR)”、“濒危 (EN)”、“易危 (VU)”及“近危 (NT)”等级的物种数分别为 4、0、14 和 4 种;属于国家保护 I 级和 II 级、非特有、非 IUCN 受威胁和濒危的物种数为 21 种,属于 CITES、非 IUCN 受威胁和濒危、非特有的物种数为 6 种,这两个部分物种濒危等级按照等同于 IUCN 濒危等级中“近危 (NT)”等级。

3.2 厦门市受威胁和濒危物种能值与价值评估结果

经估算厦门市国土面积占地球表面积约为 3.33×10^{-6} ,采用公式 (1) 计算地球上单个物种的能值转换率为 2.03×10^{25} sej/种,2010 年中国国内生产总值为 4.13×10^{13} 元,中国社会、经济与环境系统能值总量为 7.49×10^{25} sej,而采用公式 (6) 计算得到中国能值/货币比率为 1.87×10^{12} sej/\$,与已有研究^[44,47]相比中国能值/货币比率体现出中国经济发展的应有水平。基于上述参数采用公式 (2) 估算得到 2010 年厦门受威胁和濒危物种的能值为 5.74×10^{23} sej,能值货币价值为 3.08×10^{11} 元。由于存在通货膨胀影响,以 2010 年为不变价,采用居民平均消费价格调整系数 1.15 估算得到 2015 年能值货币价值为 3.53×10^{11} 元,2015 年相比 2010 年增加 4.54×10^{10} 元。

同时,通过公式 (3) — (5) 逐级分类筛选估算同为中国特有物种、IUCN 濒危等级物种,仅为中国特有物种,仅为 IUCN 濒危等级物种,仅为国家保护等级,仅为 CITES 附录等级物种能值分别为 1.52×10^{22} 、 1.33×10^{23} 、 4.21×10^{23} 、 4.40×10^{21} sej 和 6.48×10^{20} sej,其中 2010 年能值货币价值分别为 8.12×10^9 、 7.15×10^{10} 、 2.25×10^{11} 、 2.36×10^9 元和 3.47×10^8 元,而 2015 年能值货币价值分别为 9.32×10^9 、 8.21×10^{10} 、 2.59×10^{11} 、 2.70×10^9 元和 3.99×10^8 元。此外,上述结果对比发现,仅为中国特有种占受威胁和濒危物种能值价值占比最多为 73.25%,其次为 IUCN 濒危等级物种占比为 23.24%,CITES 附录等级占比最少为 0.11%,不同保护等级能值与价值评估结果差异较大,而受威胁和濒危物种数和濒危等级指数是决定价值量估算的关键因素。

3.3 厦门市受威胁和濒危物种不同等级保护成效分析

采用公式 (2) — (4) 估算厦门市境内 2010 年不同濒危等级的陆域受威胁和濒危物种的能值货币价值如表 5 所示,其中国家保护等级中受威胁和濒危的动物和植物能值货币价值分别为 5.41×10^9 元和 1.36×10^9 元,动物是植物的 3.99 倍;CITES 附录等级中受威胁和濒危的动物和植物能值货币价值分别为 3.62×10^9 元和 5.41×10^9 元,植物是动物的 1.50 倍;IUCN 濒危等级中受威胁和濒危的动物和植物能值货币价值分别为 3.10×10^{10} 元和 2.10×10^{10} 元,动物是植物的 1.54 倍;中国特有种等级中受威胁和濒危的动物和植物能值货币价值分别为 2.17×10^9 元和 2.44×10^{11} 元,植物是动物的 112.22 倍。

以上结果表明,4 个不同的保护等级所计算出的受威胁和濒危物种能值货币价值差别较大,呈现出不均衡状况,其中最大为 2.44×10^{11} 元,最小为 1.36×10^9 元,也表明各类保护等级中受威胁和濒危动物要比植物的能值货币价值变化较小;国家保护等级和 IUCN 濒危等级中对受威胁和濒危动物的保护作用高于植物,而 CITES 附录等级和中国特有种等级中正好相反,其中中国特有种等级中两者差距最大,也说明厦门陆域中中国特种植物较多且濒危等级也较高;IUCN 濒危等级和中国特有种等级对厦门市受威胁和濒危物种的保护成效显著,国家保护等级和 CITES 附录等级保护成效相对较弱。此外,对比分析也表明厦门市作为滨海城市,也是一个典型开放的生态系统系统,其独特的地理区位和气候条件加速区域内物质能量代谢,造成在地球生物圈进化过程中形成了许多区域特有物种,而中国特有种等级也凸显了保护受威胁和濒危野生动植物的作用。

表 5 厦门市陆域不同濒危等级的能值货币价值

Table 5 Emergy value of terrestrial wildlife species under different endangerment categories in Xiamen

类别 Category	目录 Project	物种数/种 Species number	能值/sej Emergy	价值/元 Value
动物 Animal	国家保护等级	34	1.01×10^{22}	5.41×10^9
	CITES 附录等级	27	6.75×10^{21}	3.62×10^9
	IUCN 濒危等级	65	5.79×10^{22}	3.10×10^{10}
	中国特有种等级	15	4.05×10^{21}	2.17×10^9
植物 Plant	国家保护等级	15	2.53×10^{21}	1.36×10^9
	CITES 附录等级	34	1.01×10^{22}	5.41×10^9
	IUCN 濒危等级	52	3.76×10^{22}	2.01×10^{10}
	中国特有种等级	181	4.55×10^{23}	2.44×10^{11}

4 讨论

4.1 能值价值评估法的主要问题与应用前景

能值 (Emergy) 是某一产品或劳务形成过程中直接或间接投入应用的一种有效能 (Available Energy) 总量^[41,48], 现阶段能值价值评估法也存在如下几方面问题: ①能值/货币比率是一个动态变化的, 统计数据的缺失或不真实会导致核算结果误差, 不同研究对象和系统边界会导致数值会存在较大差异; ②地球能值基准值有待考究, 目前地球生物圈能值基准值有 Odum^[40-41] 的 9.44×10^{24} sej/a、Brown^[42,49] 的 15.2×10^{24} sej/a 和 12.0×10^{24} sej/a 等多套结果, 依然缺乏一套较为公认的结果; ③能值分类体系所包含类别不统一, 具体指标的能值转换率参数基本上来自于文献及前人的研究成果, 对于生态经济系统的能值分析而言会存在多样变化而导致结果可信度偏低; ④能值理论有待进一步扩展与延伸, 能值核算已从人类中心论到生态中心论的环境伦理观的转移阶段^[50], 这与能值方法所定义的内涵范畴相吻合, 但增加了标准化应用的难度。

因此, 后续研究中应积极研制一套统一建立起能值与价值联系的能值货币比率快速核算方法, 从而为当前我国提出的自然资源资产负债表, 官员离任审计以及生态系统与生物多样性经济学 (The Economics of Ecosystems and Biodiversity, TEEB) 主流化提供一定参考价值。同时, 本研究中只是评估了陆域受威胁和濒危物种, 对海洋受威胁和濒危物种并未纳入, 由于海陆物种栖息环境的差异, 调查与统计手段不同, 如何构建海陆统筹的评估模型使得陆地和海洋受威胁和濒危物种具有可比性是未来可进一步深入探究领域。此外, 能值方法作为一种系统生态学方法, 可从单一受威胁和濒危物种在栖息环境中的能流图着手分析其生态过程, 也可进一步了解物种栖息地变化及其扰动状况, 从而更有针对性提出物种保育管理措施。

4.2 物种濒危等级界定有待规范与及时更新

濒危等级界定是确定物种优先保护顺序和制订受威胁和濒危物种保育策略的重要依据^[33,43], 目前存在等级划分标准不统一^[7,51], 多管齐下, 给价值评估造成很大难度。同时, 以厦门市陆域为案例的研究中, 普通物种占比 77.98%, 而受威胁和濒危物种比重较小, 表明存在较多物种并未进行濒危等级界定, 而受威胁和濒危物种的濒危等级直接影响价值估算结果。此外, 物种多样性调查是一项十分复杂的工作, 需要投入更多人力物力资源, 一些常规生态学样方调查及生态系统综合观测站的实测数据应用可为未来研究提供支撑作用。而且, 物种多样性及受威胁和濒危物种的保育机制与它们栖息生境相关, 生境质量变化影响物种种群数量变化, 当前随着现代城镇化率水平不断提升, 人类活动空间不断挤压生态空间导致物种栖息地不断缩减, 物种锐减速率加快。已有研究报告也指出现有的各类物种保护名录未能及时准确覆盖我国的受威胁和濒危物种, 亟需更新^[52]。

因此, 后续研究中应综合对比已有受威胁和濒危物种界定标准, 结合我国实际情况出台受威胁和濒危物种定级规范^[18]。当前我国出台了《中华人民共和国野生动物保护法》, 相比美国 1973 年出台的《濒危物种法

案》,我国法律对受威胁和濒危的植物和海洋生物保护力度不足,亟需形成受威胁和濒危物种名录制度、栖息地保护制度及野生动物保护税费制度等相关法规保障体系^[53]。由于物种濒危等级界定是一个动态变化的过程,积极开展生态系统红色名录数据库建立很有必要^[54]。此外,受威胁和濒危物种价值评估模型离不开基础数据支撑,特别是及时更新物种红色名录,确定受威胁和濒危物种等级状况,分析物种丰度及种群密度,注重在更深层次探究受威胁和濒危物种形成及变化机制,以及物种多样性与社会自然因素的耦合关系等。

4.3 加大受威胁和濒危物种的保护成效分析

通过将纳入计算的受威胁和濒危物种及普通物种按照能值法估算能值总量为 6.50×10^{23} sej,其中 2015 年价值总量为 4.00×10^{11} 元,相当于厦门市当年 GDP 的近四分之一;2010 年为 3.48×10^{11} 元,相当于厦门市当年 GDP 的 1.5 倍;受威胁和濒危物种能值与价值都占总值的 88.31%,表明受威胁和濒危物种保护成效显著。同时,以物种大面积濒危为特征的生物多样性危机是目前人类面临的严重危机之一^[55],加大受威胁和濒危物种的保护成效分析意义更加突出,当前研究主要关注自然保护地^[9]、濒危物种拯救^[56]及自然保护区^[25,57]等方面的保护成效分析,缺乏对不同保护等级受威胁和濒危物种保护成效的对比分析,因此有学者提出可设立“珍稀濒危物种保护成效评价技术导则”^[58]。此外,现阶段我国也面临着生物多样性国际履约^[59]、IPBES^[60](The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)及 TEEB^[61]等生物多样性保护主流化议题,因此加强受威胁和濒危物种的价值评估和不同保护等级的保护成效分析有助于国际谈判和提高公民意识,推动全社会对生物多样性保护的重视与参与。

5 结论

(1) 经估算 2010 年中国社会-经济-环境系统能值为 7.49×10^{25} sej/a,能值/货币比率为 1.87×10^{12} sej/\$,地球上单个物种能值转换率为 2.03×10^{25} sej/种。

(2) 借鉴能值方法增加濒危等级的厦门市陆域受威胁和濒危物种能值量和价值量估算结果显示,去重复性计算能值总量为 5.74×10^{23} sej,其中 2015 年能值价值约为 3.53×10^{11} 元,2010 年能值价值约为 3.08×10^{11} 元。

(3) 中国特有种等级对受威胁和濒危物种价值估算贡献最大,占比为 73.25%;其次为 IUCN 濒危等级,占比为 23.24%;国家保护等级和 IUCN 濒危等级中受威胁和濒危动物的保护成效优于植物,而 CITES 附录等级和中国特有种等级正好相反;不同保护等级价值评估结果对物种保护成效作用显著,但国家保护等级和 CITES 附录等级对濒危物种价值估算贡献力度有限。

致谢:感谢厦门市环境保护局在实地调研中提供的大力帮助,中国环境科学研究院李俊生研究员对文稿所提的宝贵修改意见,在此一并致谢。

参考文献 (References):

- [1] Knapp R A, Fellers G M, Kleeman P M, Miller D A W, Vredenburg V T, Rosenblum E B, Briggs C J. Large-scale recovery of an endangered amphibian despite ongoing exposure to multiple stressors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(42): 11889-11894.
- [2] Cardinale B J, Duffy J E, Gonzalez A, Hooper D U, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace G M, Tilman D, Wardle D A, Kinzig A P, Daily G C, Loreau M, Grace J B, Larigauderie A, Srivastava D S, Naeem S. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, 489(7401): 59-67.
- [3] Spatz D R, Zilliacus K M, Holmes N D, Butchart S H M, Genovesi P, Ceballos G, Tershy B R, Croll D A. Globally threatened vertebrates on islands with invasive species. *Science Advances*, 2017, 3(10): e1603080.
- [4] 洪德元. 生物多样性事业需要科学、可操作的物种概念. *生物多样性*, 2016, 24(9): 979-999.
- [5] 蒋志刚. 论“濒危物种”与“保护物种”概念的异同. *生物多样性*, 2016, 24(9): 1082-1083.
- [6] 何友均, 李忠, 崔国发, 魏文超, 冯宗炜. 濒危物种保护方法研究进展. *生态学报*, 2004, 24(2): 338-346.
- [7] 陈领. 中国的濒危物种及其保护. *动物学报*, 1999, 45(3): 350-354.

- [8] 蒋志刚, 罗振华. 物种受威胁状况评估: 研究进展与中国的案例. 生物多样性, 2012, 20(5): 612-622.
- [9] 王伟, 辛利娟, 杜金鸿, 陈冰, 刘方正, 张立博, 李俊生. 自然保护区保护成效评估: 进展与展望. 生物多样性, 2016, 24(10): 1177-1188.
- [10] 崔国发, 成克武, 路端正, 王建中, 李俊清. 北京喇叭沟门自然保护区植物濒危程度和保护级别研究. 北京林业大学学报, 2000, 22(4): 8-13.
- [11] Amuakwa-Mensah F, Bärenhold R, Riemer O. Deriving a benefit transfer function for threatened and endangered species in interaction with their level of charisma. *Environments*, 2018, 5(2): 31.
- [12] Richardson L, Loomis J. The total economic value of threatened, endangered and rare species: An updated meta-analysis. *Ecological Economics*, 2009, 68(5): 1535-1548.
- [13] 张殷波, 刘莹立, 杜乐山, 王文智. 褐马鸡非使用价值评估及影响因素. 生态学报, 2018, 38(7): 2579-2587.
- [14] Fredman P. The existence of existence value: a study of the economic benefits of an endangered species. *Journal of Forest Economics*, 1995, 1(3): 307-327.
- [15] Smith I A. *The Intrinsic Value of Endangered Species*. New York: Routledge, 2016.
- [16] Mazzotti F J. *The Value of Endangered Species: the Importance of Conserving Biological Diversity*. Gainesville: Wildlife Ecology and Conservation, 2017.
- [17] 张殷波, 苑虎, 喻梅. 国家重点保护野生植物受威胁等级的评估. 生物多样性, 2011, 19(1): 57-62.
- [18] 成克武, 臧润国. 物种濒危状态等级评价概述. 生物多样性, 2004, 12(5): 534-540.
- [19] 蔡波, 李家莹, 陈跃英, 王跃招. 通过红色名录评估探讨中国爬行动物受威胁现状及原因. 生物多样性, 2016, 24(5): 578-587.
- [20] 蒋志刚, 李立立, 罗振华, 汤宋华, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 冯祚建, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 平晓鸽, 方红霞. 通过红色名录评估研究中国哺乳动物受威胁现状及其原因. 生物多样性, 2016, 24(5): 552-567.
- [21] 陈瑞冰, 张光富, 刘娟, 李硕. 江苏宝华山国家森林公园珍稀植物的濒危等级及优先保护. 生态与农村环境学报, 2015, 31(2): 174-179.
- [22] 刘军. 长江上游特有鱼类受威胁及优先保护顺序的定量分析. 中国环境科学, 2004, 24(4): 395-399.
- [23] 夏欣, 张昊楠, 郭辰, 钱者东, 高军, 徐网谷, 周大庆, 蒋明康. 我国哺乳动物就地保护状况评估. 生态学报, 2018, 38(10): 3712-3717.
- [24] 苑虎, 张殷波, 覃海宁, 刘燕, 喻梅. 中国国家重点保护野生植物的就地保护现状. 生物多样性, 2009, 17(3): 280-287.
- [25] 郭子良, 邢韶华, 崔国发. 自然保护区物种多样性保护价值评价方法. 生物多样性, 2017, 25(3): 312-324.
- [26] 于志鹏, 余静. 海洋保护区珍稀濒危物种价值评估研究——以厦门海洋珍稀物种国家级自然保护区为例. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 81-86.
- [27] Lew D K, Wallmo K. Temporal stability of stated preferences for endangered species protection from choice experiments. *Ecological Economics*, 2017, 131: 87-97.
- [28] Wallmo K, Lew D K. Valuing improvements to threatened and endangered marine species: an application of stated preference choice experiments. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(7): 1793-1801.
- [29] Loomis J B, White D S. Economic benefits of rare and endangered species: summary and meta-analysis. *Ecological Economics*, 1996, 18(3): 197-206.
- [30] 周学红, 马建章, 张伟, 王强. 运用 CVM 评估濒危物种保护的经济价值及其可靠性分析——以哈尔滨市居民对东北虎保护的支付意愿为例. 自然资源学报, 2009, 24(2): 276-285.
- [31] Baira L S, Yackulic C B, Springborn M R, Reimer M N, Bond C A, Coggin L G. Identifying cost-effective invasive species control to enhance endangered species populations in the Grand Canyon, USA. *Biological Conservation*, 2018, 220: 12-20.
- [32] 叶有华, 付岚, 李鑫, 陈礼, 郭微, 俞龙生. 珍稀濒危动植物资源资产价值核算体系研究. 生态环境学报, 2017, 26(5): 808-815.
- [33] 王兵, 郑秋红, 郭浩. 基于 Shannon-Wiener 指数的中国森林物种多样性保育价值评估方法. 林业科学研究, 2008, 21(2): 268-274.
- [34] 徐虹霓, 盛华夏, 张珞平. 海洋生态系统内在价值评估方法初探——以厦门湾为例. 应用海洋学学报, 2014, 33(4): 585-593.
- [35] 徐嵩龄. 生物多样性价值的经济学处理: 一些理论障碍及其克服. 生物多样性, 2001, 9(3): 310-318.
- [36] Hau J L, Bakshi B R. Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, 2004, 178(1/2): 215-225.
- [37] Burgos E, Montefalcone M, Ferrari M, Paoli C, Vassallo P, Morri C, Bianchi C N. Ecosystem functions and economic wealth: Trajectories of change in seagrass meadows. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 1108-1119.
- [38] Franzese P P, Buonocore E, Donnarumma L, Russo G F. Natural capital accounting in marine protected areas: The case of the Islands of Ventotene and S. Stefano (Central Italy). *Ecological Modelling*, 2017, 360: 290-299.
- [39] Turcato C, Paoli C, Scopesi C, Montagnani C, Mariotti M G, Vassallo P. Matuscoccus bast scale in *Pinus pinaster* forests: a comparison of two systems by means of emergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96: 539-548.
- [40] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. New York: John Wiley & Sons, 1996.

- [41] 孟范平, 李睿倩. 基于能值分析的滨海湿地生态系统服务价值量化研究进展. 长江流域资源与环境, 2011, 20(S1): 74-80.
- [42] Brown M T, Ulgiati S. Updated evaluation of exergy and emergy driving the geobiosphere: a review and refinement of the emergy baseline. *Ecological Modelling*, 2010, 221(20): 2501-2508.
- [43] 王兵, 宋庆丰. 森林生态系统物种多样性保育价值评估方法. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 155-160.
- [44] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析. 自然资源学报, 2001, 16(4): 297-304.
- [45] 宋豫秦, 张晓蕾. 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法. 生态学报, 2014, 34(6): 1352-1360.
- [46] Li H T, Brown M T. Emergy-based environmental accounting toward a sustainable Mongolia. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(10): 1227-1248.
- [47] Yang Z F, Jiang M M, Chen B, Zhou J B, Chen G Q, Li S C. Solar emergy evaluation for Chinese economy. *Energy Policy*, 2010, 38(2): 875-886.
- [48] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [49] Brown M T, Campbell D E, De Vilbiss C, Ulgiati S. The geobiosphere emergy baseline: A synthesis. *Ecological Modelling*, 2016, 339: 92-95.
- [50] 刘耕源. 生态系统服务功能非货币量核算研究. 生态学报, 2018, 38(4): 1487-1499.
- [51] 蒋志刚. 地球上有多少物种?. 科学通报, 2016, 61(21): 2337-2343.
- [52] 吕植, 顾垒, 闻丞, 王昊, 钟嘉. 中国自然观察 2014: 一份关于中国生物多样性保护的独立报告. 生物多样性, 2015, 23(5): 570-574.
- [53] 王昱, 李媛辉. 美国野生动物保护法律制度探析. 环境保护, 2015, 43(2): 65-68.
- [54] 朱超, 方颖, 周可新, 穆少杰, 蒋金亮. 生态系统红色名录——种新的生物多样性保护工具. 生态学报, 2015, 35(9): 2826-2836.
- [55] 蒋志刚. 能否避免物种灭绝? 科学通报, 2016, 61(18): 1978-1982.
- [56] 管振华, 阎璐, 黄蓓. 中国长臂猿科动物种群监测现状分析. 四川动物, 2017, 36(2): 232-238.
- [57] 张德铨, 吴雪, 祁威, 李士成, 摆万奇. 青藏高原自然保护区特征与保护成效简析. 资源科学, 2015, 37(7): 1455-1464.
- [58] 曹学章, 高吉喜, 徐海根, 李维新, 葛峰. 生态环境标准体系框架研究. 生态与农村环境学报, 2016, 32(6): 863-869.
- [59] 薛达元. 《生物多样性公约》履约新进展. 生物多样性, 2017, 25(11): 1145-1146.
- [60] 贾翔宇, 白彬, 张洁清, 黄艺. IPBES 评估报告对全球生物多样性保护的影响——以美国传粉者保护政策为例. 生物多样性, 2018, 26(5): 527-534.
- [61] 张雪婧. TEEB: 生物多样性保护新思路. 环境保护与循环经济, 2018, 38(4): 1-4.