

基于能值生态足迹的海岛可持续性评估

——以舟山为例

李玉杰, 赵 晟*

(浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022)

摘 要: 基于能值理论, 结合生态足迹方法, 构建能值生态赤字/盈余、渔业足迹强度(D)、社会发展压力指数(I)和经济协调指数(Q)参数评价海岛可持续性, 选取典型海岛城市浙江省舟山市作为案例研究。结果显示: 2003—2017 年舟山能值足迹、能值承载力均呈上升趋势; 人均能值生态足迹共增加 15.78 hm^2 , 增幅为 63.26% ; 人均能值承载力增加 $5.20 \times 10^2 \text{ hm}^2$, 增幅为 82.86% ; 其中, 化石能源用地能值足迹增加最多, 社会经济承载力增加最多, 而自然承载力却有所下降。能值生态赤字/盈余和经济协调指数不能完全反映区域可持续性, 区域渔业足迹强度的不断增加表明当前的渔业经济模式不满足可持续发展要求, 社会发展压力指数增大也进一步表明舟山的发展状况偏离了可持续性的轨道。

关键词: 能值生态足迹; 海岛; 可持续性评估; 舟山

中图分类号: X826; F127

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2020)04-0297-12

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2020.04.008

引用格式: LI Y J, ZHAO S. Evaluation of island sustainability based on emergy ecological footprint: taking Zhoushan as a case[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(4): 297-308. 李玉杰, 赵晟. 基于能值生态足迹的海岛可持续性评估——以舟山为例[J]. 海岸工程, 2020, 39(4): 297-308.

海岛是散布在海洋中的小块陆地。由于地理隔离性, 海岛拥有一个相对独立、特殊的生态系统, 且其远离大陆, 使得海岛的物种来源相对较少、物种存活度不高、植被种类贫乏等。同时, 海岛的地形起伏大, 造成水土流失严重。由于海岛极易受台风、海啸等自然灾害的影响, 导致海岛生态系统较为脆弱, 易受破坏且难以恢复。海岛渔业、旅游业和港口物流的不断发展导致渔业资源减少、海岛淡水资源紧缺、水域环境恶化, 对海岛生态系统产生显著不利影响^[1-3]。所以, 评价海岛可持续性, 研究其变化特征, 对协调海岛生态系统可持续发展至关重要。

目前, 国内外许多学者采用 Willian 和 Rees^[4] 以及 Odum^[5] 提出的生态足迹和能值分析方法, 在生态系统评估方面开展了深入的探讨, 取得了丰富的研究成果^[6-10], 推动了生态系统的研究进展。然而, 有关海岛生态系统的研究却较少, 仅限于在生态承载力、生态系统健康、生态脆弱性、生态压力和能值分析等方面的研究^[11-17], 其中大多数研究^[11-12, 16-17] 因忽略了自然的贡献导致计算结果的误差较大, 缺少对海岛自然承载力的核算。近几年的研究^[13-15] 较多关注单一生态单元下生态系统状况, 忽视了不同生态单元对生态系统的影响是不同的现象, 这些都对海岛生态评估最后的结果产生了不利影响。因而, 结合不同生态单元评价海岛生态可持续性对深入认识海岛生态系统具有深远意义。

舟山群岛位于浙江省东北部, 是我国最大的群岛, 陆域面积 $1\,458.76 \text{ km}^2$ (包括滩涂面积 144.91 km^2),

收稿日期: 2020-08-28

资助项目: NSFC-浙江两化融合联合基金资助项目——基于 UWSNs 的近海环境安全实时探测新机理及关键(U1609204); 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项项目——中街山列岛水域渔业生境修复技术研究(2019YFD0901204-04)

作者简介: 李玉杰(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事海岛环境评估与保护方面研究。E-mail: liyujiej@163.com

* 通信作者: 赵 晟(1973-), 男, 教授, 主要从事海洋生态学方面研究。E-mail: zhaosh@zjou.edu.cn

(王 燕 编辑)

海域面积 2.08 万 km², 海岸线长 2 444 km。舟山群岛拥有我国最大的渔场——舟山渔场, 带动沿海地区经济发展, 但是随着淡水短缺、渔业衰退和环境恶化等一系列生态问题的出现, 舟山群岛的可持续发展问题急需引起广泛关注。

因此, 为了探究现代化发展背景下海岛生态系统可持续发展的动态变化, 本文以舟山群岛为例, 结合生态足迹方法^[4]将海岛划分为耕地、林地、草地、建设用地、化石能源用地和水域六个不同生态单元来分析不同生态单元的状况。然后结合能值密度, 从物质的能量角度, 将能值分析和生态足迹方法结合起来, 从自然、社会和经济等方面来评估 2003—2017 年舟山群岛可持续发展状况, 以期研究其他海岛可持续性评估提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

2017 年末, 舟山全市常住人口 116.8 万人, 人口密度 801 人/km²。2017 年全年地区生产总值 1 219.78 亿元, 第一、第二、第三产业比例为 11.5 : 33.0 : 55.5, 农林牧渔产业比例为 4.3 : 0.1 : 1.0 : 94.6^[15]。与往年相比, 第一产业比重下降了 48.89%, 意味着渔业在地域产业的比重下降^[18], 渔业经济包括海洋捕捞业、海水养殖业和淡水养殖业。2017 年旅游人数为 5 507.16 万, 旅游综合收入 806.52 亿元, 是 2003 年旅游收入的 16 倍。

2010 年以来, 舟山群岛出现了渔业衰退、淡水短缺和环境恶化等一系列生态问题。城市规模不断扩大, 产生的工业废水和生活用水对渔场的海域环境造成恶劣影响, 加上捕捞强度日益增强, 导致渔业资源大量衰减^[16]。随着旅游人数的不断增加, 旅游景区生态环境受到人为破坏严重, 导致自然保护区生态平衡失调, 例如朱家尖的乌石塘景区因垃圾较多导致沙滩黏土含量增加, 沙滩变黑, 进而造成景观遭受严重破坏^[12-13]。所以, 舟山群岛的可持续发展问题急需引起广大关注。

1.2 数据来源

本文使用数据主要来源于 2003—2017 年《舟山统计年鉴》^[19-33]《浙江省统计年鉴》^[34-39]《中国县域统计年鉴》^[40-45], 其中, 部分气候数据参考 Zhao 等^[46], 如太阳辐射量, 取值为 4.63×10^9 J/m²^[23]。部分研究数据如农产品、水产品和畜牧产品等选取其主产品(如小麦、玉米、海水养殖的水产品等)为研究对象。根据统计年鉴, 水产品的主要来源是淡水和海水养殖的水产品, 因此, 本文以淡水养殖和海水养殖的水产品作为水域足迹的计算来源。

1.3 能值足迹和能值承载力

能值足迹是区域内人类生存消耗所需单位面积的能值量, 能值承载力是区域所能承受单位面积最高能值量。传统的能值足迹的计算包括两种: 自然环境的能值承载力计算和能值足迹的计算^[46-47]。学者们考虑到社会经济的影响, 增加了社会经济能值承载力和初级工业产品的能值足迹^[48-49]。本文采用的方法遵循改进的能值生态足迹方法^[48-51], 基于 1.2×10^{25} sej/a 的全球能值基线^[49]来计算分析区域的能值足迹和能值承载力。判断人类活动强度对海岛生态系统影响程度的大小是衡量海岛可持续发展的重要因素, 当能值承载力大于能值生态足迹时, 出现生态盈余, 反之, 则出现生态赤字。通常, 通过衡量能值承载力和能值生态足迹之间的差值和比值来研究当前区域可持续状态, 本文亦采用此方法评估生态可持续性。

1.3.1 能值足迹

能值足迹反映区域生态经济特征, 表明人类的负荷强度^[48]。能值足迹主要是量化生物资源、初级工业

产品和能源资源消费的足迹^[48-51]。区域人均能值足迹(EEF,单位为 hm^2)为

$$\text{EEF} = \text{EEF}_1 + \text{EEF}_2 + \text{EEF}_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \times F_i)}{p_1 \times N}, \quad (1)$$

式中, EEF_1 为生物资源的人均能值足迹(hm^2); EEF_2 为初级工业产品的人均能值足迹(hm^2); EEF_3 为能源消费的人均能值足迹(hm^2); i 为项目种类, $i=1, 2, \dots, n$; x_i 为第 i 种项目的能量; F_i 为第 i 种资源的能值转换率; p_1 为区域能值密度(单位为 sej/hm^2), 是研究区自然可更新资源能值与区域面积的比值^[46]; N 为区域总人口数量。

1.3.2 能值承载力

能值承载力反映区域生态状况与社会经济发展状况^[48]。能值承载力的计算综合自然、社会和经济三种因素而成^[50-52], 通过量化可用的自然资源来计算能值承载力^[46]和代表人类在社会系统的活动, 以高新技术产业产值、固定资产投资和劳务的总和代表体现^[49]。人均能值承载力 ECC(单位为 hm^2)的计算式为:

$$\text{ECC} = \text{ECC}_1 + \text{ECC}_2, \quad (2)$$

式中, ECC_1 为可利用自然可更新资源人均能值承载力(hm^2); ECC_2 为社会经济的人均能值承载力(hm^2)。

1.3.2.1 自然可更新资源能值承载力

人类生存和发展所需的资源都来自于自然生态系统。自然生态系统为人类提供的资源包括可更新资源与不可更新资源^[5-6]。舟山群岛的总能值包括自然可更新资源(太阳能、雨水、潮汐等)和不可更新资源。为避免重复计算, 同一性质的能量投入取其最大值。例如: 风能、雨水化学能、雨水势能、地球循环能实质上都是太阳能的转化形式, 因此只取其中最大的一项^[6, 50-53]; 雨水化学能; 而潮汐能是由太阳、月亮对地球的吸引而产生的, 和太阳能不属于同一性质的能量, 故进行累计^[50-53]。根据能值理论^[5-6], 自然可更新资源的能值(E , 单位 sej)可根据 $E = \text{太阳辐射} + \text{潮汐能} + \text{Max}\{\text{风能, 雨水化学能, 雨水势能, 地球循环能}\}$ 计算。自然可更新资源人均能值承载力 ECC_1 计算式为

$$\text{ECC}_1 = (1 - 15\%) \times \frac{E}{p_2 \times N} = (1 - 15\%) \times \frac{\sum_{i=1}^n (r_i \times T_i)}{p_2 \times N}, \quad (3)$$

式中, N 为研究区域的常住人口数量; p_2 为年全球能值密度^[21], 是地球年能值与地球表面积的比值, 作为转换能值单位为面积的参数, 单位为 sej/hm^2 , 根据最新的全球能值基线^[49], 自然投入的年能值为 1.2×10^{25} sej/a , 地球表面积为 5.1×10^{10} hm^2 , 所以 p_2 为 2.35×10^{14} ($\text{sej} \cdot \text{a})/\text{hm}^2$; i 为项目种类, $i=1, 2, \dots, n$; r_i 为第 i 种可更新资源的能量; T_i 为第 i 种资源的能值转化率; 15% 为指为了保护生物多样性^[48-50], 将国土面积的 15% 划为生物多样性保护区。根据《浙江省生物多样性保护战略与行动计划》^[54], 到 2012 年, 全省生物多样性保护区域已达到 15%, 本文需将浙江全省总面积的 15% 划为生物多样性保护区, 因此人均能值承载能力降低了 15%。

1.3.2.2 社会经济能值承载力

根据社会经济核算, 人均能值承载力 ECC_2 的计算式^[49]为

$$\text{ECC}_2 = (1 - 15\%) \times \frac{S \times \text{PPI} \times (O + A + B)}{p_2 \times N}, \quad (4)$$

式中, S 为区域能值货币比率, 它是区域可更新自然资源总能值与区域国内生产总值的比值, 单位为 $\text{sej}/\$$ ^[49-51]; PPI 为生产者价格指数, 用于消除价格波动的影响, 并确保年度价值具有可比性, 时间序列中的选择参考基期并设置为 100^[48-49], 本文以 2003 年为基期, 即以 2003 年价格为 100; O 为高新技术产业产值; A 为固定资产投资总额; B 为劳务价值, 以居民年收入代替; p_2 为全球能值密度; N 为人口数量。

1.3.2.3 能值生态赤字/盈余

EER 是衡量生态系统总体可持续状态的指标,通过衡量 ECC 与 EEF 之间的差值(ECC-EEF),来反映人类对资源的利用强度^[6]。当 EER>0 时,表示能值生态盈余,即区域资源供给满足人类的需求;当 EER<0 时,表示能值生态赤字,即人类对资源的需求超过了自然供给,区域的发展对区域的生态造成威胁;当 EER=0 时,即当 ECC=EEF 时,表明当前资源供给与资源需求均衡^[6,53]。

1.4 渔业足迹强度

在环境方面,一个区域能值足迹在不同土地类型之间分布的越均匀,该区域的足迹多样性就越高,生态环境系统也就越稳定^[48-52]。Pan 等^[49]以生态足迹多样性指数 H 来衡量研究区域足迹分布的均衡性, H 的计算公式为

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i, \quad (5)$$

式中, P_i 为第 i 种类型生产用地能值足迹在总 EEF 的占比。

本文结合海岛渔业经济比重大的特征,在式(5)的基础上,分析水域足迹在总足迹多样性中的比重,获得渔业足迹强度的指数 D :

$$D = \frac{-(P_w \ln P_w)}{H}, \quad (6)$$

式中, P_w 为水域能值足迹在总 EEF 中的占比。利用 D 可进一步分析区域的渔业足迹强度是否合理、渔业活动对生态环境是否过压以及是否导致生态环境不稳定。

1.5 社会发展压力指数

在社会方面,主要考察人类主要的社会活动是否在区域自然资源的承载力范围内。衡量当前人类对自然利用、改造行为对自然生态系统的影响程度。以 EEF/(ECC+EEF)作为参考^[48],本文通过衡量 EEF 与 ECC₁ 的比值 I 即社会发展压力指数来探究社会发展对自然生态系统的影响。社会发展压力指数反映了人类社会活动对区域生态环境的压力,即社会活动是否满足可持续发展的要求。当 $I<1$ 时,代表社会活动对区域资源的消耗小于承载力,说明区域的可持续性程度高;当 $I>1$ 时,表明区域生态系统承受的压力大,即人类社会活动对区域资源的消耗大于承载力,说明区域的发展不可持续^[49,55]。所以, I 的值越小,区域的可持续性越好。

1.6 经济协调指数

在经济方面,可以利用能值足迹(EEF)与社会经济能值承载力(ECC₂)之间的关系^[25]来反映经济系统与生态系统之间的协调性,即可以利用生态经济协调指数 $Q(Q = (ECC_2 + EEF) / \sqrt{ECC_2^2 + EEF^2})$ 研究区域经济发展与生态环境之间的协调性^[48-50],进一步分析区域经济发展是否在可持续范围内。 Q 的取值范围为(1,1.414)。当 Q 越接近 1 时,表明区域的经济不满足可持续发展要求;当 Q 越接近 1.414 时,表明区域发展满足可持续发展要求^[49]。

2 结果与讨论

2.1 能值足迹

EEF 反映了人类负荷强度和区域环境压力特征。2003—2017 年舟山 EEF 计算结果(表 1)显示,EEF 从 24.95 hm²(2003 年)上升到 40.73 hm²(2017 年),增幅为 63.26%,这表明这些年人类负荷强度和生态压

力明显增大。

表 1 2003—2017 年舟山人均能值足迹值

Table 1 Values of emergetic ecological footprint in Zhoushan from 2003 to 2017

hm²

年 份	EEF ₁	EEF ₂	EEF ₃	EEF	年 份	EEF ₁	EEF ₂	EEF ₃	EEF
2003	21.28	1.73	1.94	24.95	2011	20.80	0.44	14.24	35.48
2004	22.26	3.16	3.63	29.06	2012	22.80	0.57	12.70	34.07
2005	20.28	2.21	2.26	24.75	2013	22.32	0.52	13.57	36.41
2006	20.24	2.57	2.38	25.19	2014	23.31	0.45	17.12	40.88
2007	20.06	2.38	2.31	24.75	2015	24.06	0.43	16.99	41.48
2008	19.64	1.19	2.32	23.15	2016	20.97	0.88	17.79	39.65
2009	19.33	1.37	2.46	23.16	2017	22.22	0.55	17.96	40.73
2010	19.46	1.32	2.63	23.41					

EEF 的各子成分的变化趋势见图 1。2003 年 EEF₁、EEF₂ 和 EEF₃ 分别占比 85.31%、6.92% 和 7.76%，至 2017 年 EEF₁ 和 EEF₂ 占比分别降为 54.55% 和 1.36%，但 EEF₃ 占比却增加至 44.09%，该占比的变化情况反映出目前生物资源的能值足迹在总能值足迹中贡献最大，其次是能源消费品的能值足迹。

EEF₁ 从 21.28 hm² (2003 年) 增加到 22.22 hm² (2017 年)，增幅为 4.39%，增长幅度不大。在生物资源能值足迹中，主要贡献是鱼类，其次是肉类。这是因为舟山群岛拥有我国最大的渔场——舟山渔场。

EEF₂ 从 1.73 hm² (2003 年) 下降到 0.55 hm² (2017 年)，降幅为 67.99%。在 EEF₂ 中，化学纤维和棉纱的贡献最大，化学纤维能值占总能值的比例从 0.85% 增加到 1.25%，而棉纱能值占总能值的比例却从 6.07% 下降到 0.1%，这表明研究区养殖业和捕捞活动增多。

EEF₃ 从 1.94 hm² (2003 年) 上升到 17.96 hm² (2017 年)，增幅为 827.22%，巨大的增幅表明能源消费对生态环境的影响巨大，其中，对能源消费足迹贡献最大的是煤炭和燃料油，原煤能值占总能值的比例从 6.82% (2003 年) 上升到 21.61% (2017 年)，燃料油能值占总能值的比例从 2011 年的 19.36% 下降到 2017 年的 17.78%，这反映舟山对原煤需求增大而对燃料油的需求却有所下降。舟山有 80% 的原煤用来生产电力^[56]。因此，为应对气候变化，寻找原煤替代品至关重要^[57-58]。燃料油主要是用于船舶锅炉的燃料使用，燃料油的下降体现出近海渔业资源和近海捕捞活动正在减少。

EEF₃ 在 2010—2011 年从 2.63 hm² 增加到 14.24 hm²，增幅为 442.07%。EEF₃ 短期的较大增长一方面是因为舟山在 2011 年开始投入使用了天然气，另一方面是因为随着人均收入的增加，越来越多的家庭购买了私家车，以及舟山的旅游产业的丰富，旅游人数激增，使得原油和柴油的总能值足迹增多。虽然政府采取了一些缓解措施，如投放新能源汽车、提倡使用公共交通出行、定期设置车牌限号等，但收效显微。当前，仍应加大力度减少交通工具尾气的整体排放。

EEF₁ 缓慢增长、EEF₂ 大幅下降和 EEF₃ 持续增长，体现了舟山居民消费结构的变化。随着海岛城市化

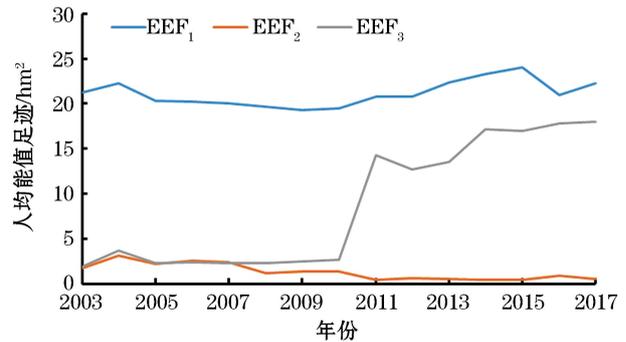


图 1 2003—2017 年舟山人均能值足迹 (EEF₁, EEF₂ 和 EEF₃) 的变化

Fig.1 Changes of EEF₁, EEF₂ and EEF₃ in Zhoushan from 2003 to 2017

进程的加快和科技发展水平的提高,人们对能源消费品的需求逐渐增加,从而产生了更多的能值足迹来改善和享受生活。

分析不同土地类型的能值足迹(图 2)可以得出:水域用地的能值足迹在总土地类型中所占比例最大,从 79.74%(2003 年)下降到 53.33%(2017 年);其次是化石能源用地,从 8.61%(2003 年)上升到 45.32%(2017 年)。2003—2017 年水域的能值足迹逐渐下降,而化石能源用地的能值足迹比例却在逐渐升高,这反映了舟山经济在慢慢改变以渔业为主的经济状态。水域能值足迹的下降主要归因于我国对捕捞政策的管控、政府对捕捞行业捕捞行为的监管,如实行休渔禁渔、渔船报废制度。此外,化石能源用地能值足迹比例的提升表明舟山在工业方面的消费有所提升,其中以煤炭为主要能源的持续消耗是能源消费足迹升高的主要原因。

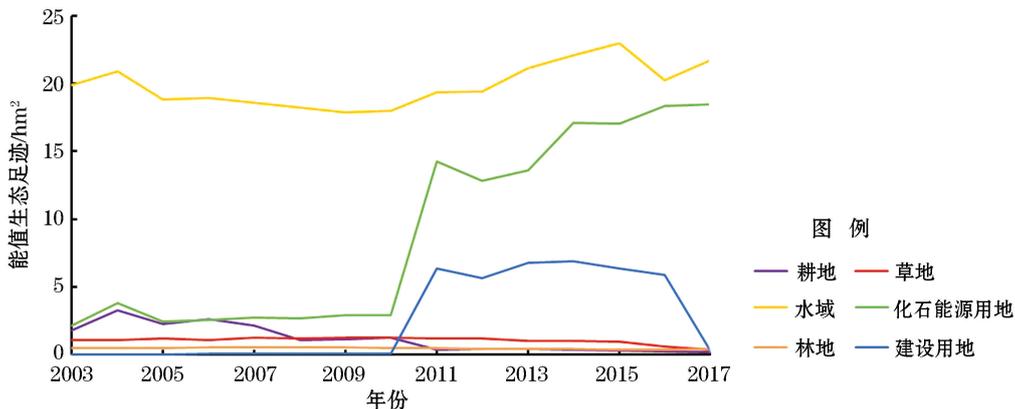


图 2 2003—2017 年舟山能值足迹土地类型的变化趋势

Fig.2 Changing tendency of energy ecological footprint land types in Zhoushan from 2003 to 2017

2.2 能值承载力

由 2017 年舟山能值承载力结果(表 2)可知:舟山的自然可更新资源的人均能值承载力为 9.69 hm^2 , 社会经济人均能值承载力为 $1.02 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。因此,2017 年舟山的能值承载力为 $1.03 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。同理,计算出 2003—2017 年舟山的能值承载力,如图 3 所示,从总趋势来看,总 ECC 从 $6.25 \times 10^2 \text{ hm}^2$ (2003 年)增加到 $1.03 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (2017 年),增幅为 64.76%。承载力的提高主要是因为海岛本身的脆弱性在人类活动如建设港口、防护堤、植树造林和增加绿地面积等的影响下得到了改善。ECC₁ 从 11 hm^2 (2003 年)降到 9.69 hm^2 (2017 年),降幅为 12.00%。ECC₁ 的降低主要归因于人口数量的增加(2003 年人口数量为 9.71×10^5 , 2017 年人口数量增至 1.17×10^6)。ECC₂ 从 $6.14 \times 10^2 \text{ hm}^2$ (2003 年)增到 $1.02 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (2017 年),增幅为 66.14%。由图 3 可见:总 ECC 主要由 ECC₂ 组成,这表明舟山的能值承载力主要来源于社会经济系统(固定资产投资、高新技术产业产值和劳务)的贡献,从侧面反映舟山群岛的科技发展和教育水平有所提高。

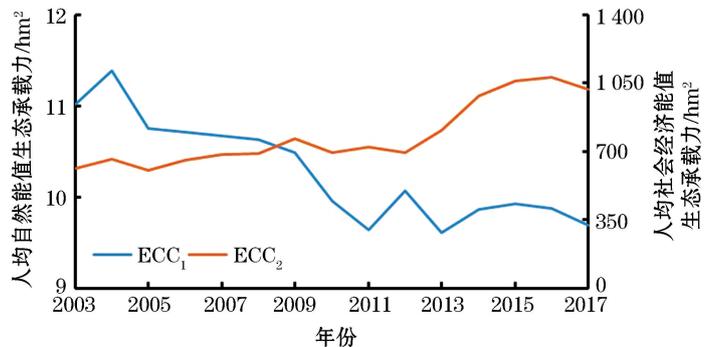


图 3 2003—2017 年舟山的能值承载力

Fig.3 The energy carrying capacity in Zhoushan from 2003 to 2017

表 2 2017 年舟山能值承载力

Table 2 The emergy carrying capacity in Zhoushan in 2017

项 目	原始数据	能值转换率	太阳能值	人均能值	人均能值承载力
太阳辐射	8.95×10^{19} J/a	1 sej/J	8.95×10^{19} sej	7.66×10^{13} sej	0.28 hm ²
风能	5.94×10^{16} J/a	2.51×10^3 sej/J	1.49×10^{20} sej	1.28×10^{14} sej	0.46 hm ²
雨水化学能	1.02×10^{16} J/a	3.05×10^4 sej/J	3.10×10^{20} sej	2.66×10^{14} sej	0.96 hm ²
雨水势能	2.02×10^{15} J/a	1.76×10^4 sej/J	3.55×10^{19} sej	3.04×10^{13} sej	0.11 hm ²
地球循环能	4.38×10^{15} J/a	5.76×10^4 sej/J	2.52×10^{20} sej	2.16×10^{14} sej	0.78 hm ²
潮汐能	3.11×10^{16} J/a	7.39×10^4 sej/J	2.30×10^{21} sej	1.97×10^{15} sej	7.1 hm ²
高新技术产值	4.45×10^7 \$/a	1.49×10^{11} sej/\$	6.51×10^{18} sej	5.57×10^{12} sej	1.86 hm ²
固定资产投资	2.19×10^{10} \$/a	1.49×10^{11} sej/\$	3.21×10^{21} sej	2.75×10^{15} sej	918.38 hm ²
劳务价值	1.77×10^9 \$/a	1.49×10^{11} sej/\$	2.59×10^{20} sej	2.22×10^{14} sej	99.68 hm ²

注:原始数据来自文献[19-45]

2.3 可持续性评价指标

2003—2017 年舟山由于降雨量丰富,生物量高,有很多的自然承载力产生,但随着人口的增多,人均生态足迹却有所下降。由舟山能值足迹可持续性评价指标值计算结果(表 3)可知:EED/EES, D 和 I 值均有所增高,其中 EED/EES 从 600 hm²(2003 年)增至 989 hm²(2017 年), D 从 0.25(2003 年)增至 0.44(2017 年), I 从 2.27(2003 年)增至 4.20(2017 年)。然而, Q 值变化不大,维持在 1.04 左右,主要归因于舟山群岛人均能值足迹逐年增加,这反映了生态系统与经济系统之间的协调性并没有得到改善,舟山政府在经济结构调整、污染物控制活动和社会经济规模等方面还应继续努力。

表 3 2003—2017 年舟山可持续发展指标值

Table 3 Values of sustainable development index in Zhoushan from 2003 to 2017

年 份	EED/EES	D	I	Q	年 份	EED/EES	D	I	Q
2003	600	0.25	2.27	1.04	2011	697	0.37	3.68	1.05
2004	645	0.27	2.55	1.04	2012	672	0.36	3.38	1.05
2005	592	0.26	2.30	1.04	2013	782	0.36	3.79	1.04
2006	642	0.26	2.35	1.04	2014	953	0.38	4.14	1.04
2007	672	0.26	2.32	1.04	2015	1 028	0.39	4.18	1.04
2008	676	0.26	2.32	1.03	2016	1 049	0.41	4.01	1.03
2009	755	0.26	2.21	1.03	2017	989	0.44	4.20	1.04
2010	680	0.26	2.35	1.03					

分析 2003—2017 年舟山可持续性指标的结果(图 4)可知:2003—2017 年舟山 EER 都大于零,属于盈余状态; D 值从 2003 年的 0.25 增加到 2017 年的 0.44,表明当前渔业活动过多,即水域足迹比重过多,舟山政府应继续且长期实行休渔政策来控制渔业捕捞活动; I 也不断增大,进一步表明研究区当前的发展是不可持续的; Q 值接近 1,且最大值为 1.048(2011 年),小于 1.414,这说明当年舟山生态系统与经济系统的协调性较好。

比较分析 2003—2017 年舟山渔业足迹强度指数 D 和社会发展压力指数 I 发现,二者的变化趋势基本一致(图 5)。 I 值的不断增加反映研究区社会系统的压力增加,主要是由于 EEF 的增加; D 值的增加表明 EEF 中水域足迹强度较大,反映出研究区的渔业足迹过大,足迹分布不均衡;社会发展活动如捕捞活动、水产养殖和发电厂发电等,都超过了自然环境的承载力范围。若想减小 I 和 D 的值,可以通过减少 EEF 和增加 EEC_1 这两个方法来实现。若想减少 EEF,可以借助替代能源来减少渔业和化石能源消费的足迹;实行计划生育政策控制人口,避免人口继续增加,则可以保持 EEC_1 的增加。

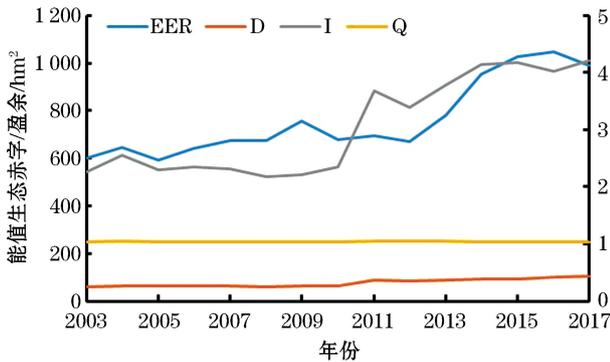


图 4 2003—2017 年舟山可持续性指标的变化趋势
Fig.4 Changing trend of sustainability indexes in Zhoushan from 2003 to 2017

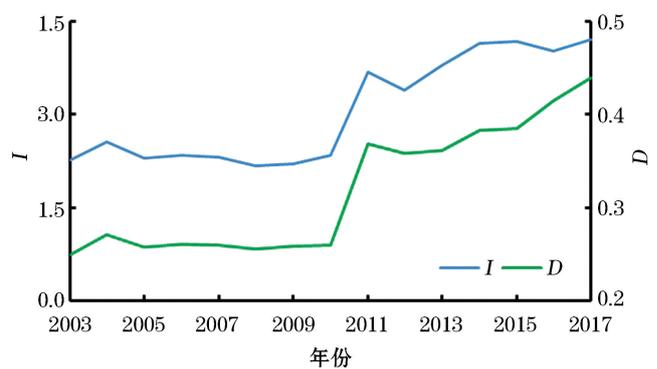


图 5 2003—2017 年舟山渔业足迹强度指数(D)和社会发展压力指数(I)
Fig.5 Fishery footprint intensity index (D) and social development pressure index (I) in Zhoushan from 2003 to 2017

3 结 论

利用能值生态足迹方法计算了舟山 2003—2017 年的能值足迹和能值承载力,并结合能值生态赤字/盈余 EER、渔业足迹强度指数 D 、社会发展压力指数 I 和经济协调指数 Q 四个可持续发展指标分析了研究区的可持续发展状况,得出结论如下:

1) 2003—2017 年舟山人均能值生态足迹共增加 15.78 hm^2 ,增幅为 63.26%;足迹分布不均,其中,生物资源能值足迹最多,能源消费能值足迹次之,初级工业产品能值足迹较少。

2) 2003—2017 年舟山人均能值承载力增加 $5.20 \times 10^2 \text{ hm}^2$,增幅为 82.86%;社会经济承载力增加最多,而自然承载力却有所下降。

3) 耕地、林地、草地、水域、建设用地和化石能源用地六种土地利用类型的能值足迹构成分布不均,其中水域足迹最多,化石能源用地足迹次之,耕地、林地、草地、建设用地足迹较少。

为了提高舟山整体可持续性发展,提出三点可行的参考建议:

1) 舟山应积极寻找可替代的清洁能源,优化能源结构。舟山作为一个海岛旅游城市,需要高质量水平的自然环境。为避免能值足迹进一步增加,使用清洁能源替代化石能源的消耗及减少化石燃料的足迹是当务之急。着力研究并开发潮汐能、风能和波浪能等可更新的清洁资源,降低对石油、煤炭等化石能源的依赖,充分发挥海岛城市的海洋能源优势。舟山风力资源丰富,适宜发展海上风电,但风电场建设成本高、维修困难、噪音大。相关部门应加强对舟山风力发电的支持,加大力度攻克技术难关。

2) 积极做好渔业资源的保护和宣传。为减少水域足迹,应降低渔业捕捞活动的强度,着力打造绿色捕捞体系,规范渔船和渔具的使用途径,研究沿岸渔场科学的可捕量,推行负责任、限量等捕捞制度;加强对水域资源利用的多样性,提供第三产业发展的旅游文化项目,减少渔业生产值;加强对海洋渔业资源保护的宣传,提高公众保护渔业资源的意识,从而减少对渔业资源的破坏。

3)推动智慧绿色渔业发展工程和绿色渔业产业链工程。为提高自然承载力,应尽可能减少人类活动对海岛自然生态系统的影响,坚决以绿色发展为核心的绿色渔业发展。例如,以渔船、渔港和水产品为主体,结合人工智能、3S和物联网等技术,构建智能绿色渔业体系;利用互联网技术对水产品交易去向进行信息化管理,实时追踪水产品物流信息;推广多功能、智能化的养殖设施(如TH-RAS养殖循环水技术),探索海陆结合的循环养殖模式,提高养殖系统的产出率。

参考文献 (References):

- [1] JIANG Y T, TIAN Y, ZHENG S N. A study on urban ecosecurity pattern of island city: a case study of Pingtan Island[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 769-777. 江源通, 田野, 郑拴宁. 海岛型城市生态安全格局研究——以平潭岛为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 769-777.
- [2] XIAO J H, WANG M, YU Q D, et al. Research on ecological compensation standards for island tourist destinations: the construction and application of methodology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(2): 448-46. 肖建红, 王敏, 于庆东, 等. 海岛型旅游目的地生态补偿标准方法体系的构建与应用[J]. *生态学报*, 2016, 36(2): 448-462.
- [3] JIN X X, YE S L, WU X Y, et al. A quality evaluation of human settlements in island cities: a comparison between Xiamen and Pingtan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3678-3686. 金星星, 叶士琳, 吴小影, 等. 海岛型城市人居环境质量评价——基于厦门市和平潭综合实验区的对比[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3678-3686.
- [4] WILLIAN M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective[J]. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [5] ODUM H T. *Environmental accounting: emergy and environmental decision making*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [6] LAN S F, QIN P, LU H F. *Emergy analysis of eco-systems*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. *生态经济系统能值分析*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [7] CHI Y, SHI H H, WANG Y Y, et al. Evaluation on spatial heterogeneity of island ecosystem carrying capacity: a case study of southern Miaodao Archipelago[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 1188-1200. 池源, 石洪华, 王媛媛, 等. 海岛生态系统承载力空间分异性评估——以庙岛群岛南部岛群为例[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3): 1188-1200.
- [8] ZHANG Z W, FENG A P, LI P Y, et al. Carrying capacity of uninhabited islands based on energy evaluation: a case study of Da Island [J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(4): 572-575, 585. 张志卫, 丰爱平, 李培英, 等. 基于能值分析的无居民海岛承载力: 以青岛市大岛为例[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(4): 572-575, 585.
- [9] ZHOU J. Research on the sustainable development of Emergy Analysis in island's eco-tourism; take Changdao as an example[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. 周婧. 基于能值理论的海岛生态旅游可持续发展研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [10] ZHAO S, HONG H S, ZHANG L P, et al. Emergy Value of Mangrove Ecosystem Services in China[J]. *Resources Science*, 2007, 29(1): 147-154. 赵晟, 洪华生, 张路平, 等. 中国红树林生态系统服务的能值价值[J]. *资源科学*, 2007, 29(1): 147-154.
- [11] LIU S Y, DING J L, ZHANG J Y, et al. Remote sensing diagnosis of grassland ecosystem environmental health in the Ebinur Lake Basin[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10): 1-13. 刘思怡, 丁建丽, 张钧泳, 等. 艾比湖流域草地生态系统环境健康遥感诊断[J]. *草业学报*, 2020, 29(10): 1-13.
- [12] WU J C, LIU C, SHAO C, et al. Urban ecosystem health evaluation of the dynamic island area based on the entropy weight method: a case study of Zhoushan Islands[J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(7): 53-59. 吴婧慈, 刘超, 邵晨, 等. 基于熵权的海岛地区城市生态系统健康动态评价研究——以舟山群岛新区为例[J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(7): 53-59.
- [13] XIE Z L, LI X Z, JIANG D G, et al. Spatial management strategy of Zhujiajian Island based on island ecological vulnerability simulation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(8): 2783-2792. 谢作轮, 李秀珍, 姜德刚, 等. 基于海岛生态脆弱性模拟的朱家尖岛空间管控对策[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2783-2792.
- [14] GUO X F, LI Q S. Research and practice on island ecological frangibility assessment based on GIS: a case study of Haitan Island[J]. *Environmental Protection Science*, 2011, 37(5): 43-47. 郭晓峰, 李青生. 基于 GIS 的海岛生态脆弱性评价研究与实践——以海坛岛为例[J]. *环境保护科学*, 2011, 37(5): 43-47.
- [15] SHAO Z, GUI F, WANG L Z, et al. Ecological stress evaluation of island shoreline development: a case study on Jintang Island, Zhoushan[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2020(4): 12-16. 邵卓, 桂峰, 王柳柱, 等. 海岛岸线资源开发利用生态压力评估研究——以舟山市金塘岛为例[J]. *国土与自然资源研究*, 2020(4): 12-16.
- [16] LI X R, WANG N, TIAN S. Eco-environmental quality evaluation of the Yongxing Island and its surrounding sea area from 1989 to

- 2014[J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(4): 470-480. 李雪瑞, 王娜, 田松. 永兴岛及周边海域 1989—2014 年生态环境质量评价[J]. *海洋通报*, 2019, 38(4): 470-480.
- [17] LI M C, LI S T, WANG C X, et al. Research on comprehensive evaluation and obstacles of ecological security of island-type tourism destination in China[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(5): 76-86. 李梦程, 李世泰, 王成新, 等. 中国海岛型旅游目的地生态安全综合评价与障碍因素研究[J]. *海洋科学*, 2020, 44(5): 76-86.
- [18] LUCAS P, ENRIQUE O. A modified footprint method: the case study of Brazil[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 113-127.
- [19] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2003[M]. Beijing: China Statistics Press, 2004. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2003[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [20] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2004[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2004[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005.
- [21] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2005[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2005[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [22] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2006[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [23] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2007[M]. Beijing: China Statistics Press, 2008. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2007[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [24] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2008[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [25] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2009[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2009[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [26] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2010[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [27] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2011[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [28] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2012[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [29] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2013[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [30] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [31] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [32] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [33] Zhoushan Municipal Bureau of Statistics. Zhoushan statistical yearbook in 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018. 舟山市统计局. 舟山统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [34] Zhejiang Provincial Bureau of Statistics. Zhejiang statistical yearbook in 2003[M]. Beijing: China Statistics Press, 2004. 浙江省统计局. 浙江统计年鉴 2003[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [35] Zhejiang Provincial Bureau of Statistics. Zhejiang statistical yearbook in 2004[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005. 浙江省统计局. 浙江统计年鉴 2004[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005.
- [36] Zhejiang Provincial Bureau of Statistics. Zhejiang statistical yearbook in 2005[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006. 浙江省统计局. 浙江统计年鉴 2005[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [37] Zhejiang Provincial Bureau of Statistics. Zhejiang statistical yearbook in 2006[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007. 浙江省统计局. 浙江统计年鉴 2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [38] Zhejiang Provincial Bureau of Statistics. Zhejiang statistical yearbook in 2007[M]. Beijing: China Statistics Press, 2008. 浙江省统计局. 浙江统计年鉴 2007[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [39] Zhejiang Provincial Bureau of Statistics. Zhejiang statistical yearbook in 2008[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009. 浙江省统计局. 浙江统计年鉴 2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [40] Department of Rural Social and Economic Investigation, National Bureau of Statistics. China county statistical yearbook in 2003[M]. Beijing: China Statistics Press, 2004. 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴 2003[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.

- [41] Department of Rural Social and Economic Investigation, National Bureau of Statistics. China county statistical yearbook in 2004[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005. 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴 2004[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005.
- [42] Department of Rural Social and Economic Investigation, National Bureau of Statistics. China county statistical yearbook in 2005[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006. 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴 2005[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [43] Department of Rural Social and Economic Investigation, National Bureau of Statistics. China county statistical yearbook in 2006[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007. 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴 2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [44] Department of Rural Social and Economic Investigation, National Bureau of Statistics. China county statistical yearbook in 2007[M]. Beijing: China Statistics Press, 2008. 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴 2007[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [45] Department of Rural Social and Economic Investigation, National Bureau of Statistics. China county statistical yearbook in 2008[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009. 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴 2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [46] ZHAO S, SONG K, GUI F, et al. The emergy ecological footprint for small fish farm in China[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 29: 62-67.
- [47] ZHAO S, LI Z, LI W. A modified method of ecological footprint calculation and its application[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 185(1): 65-75.
- [48] PENG W, WANG X, LI X, et al. Sustainability evaluation based on the emergy ecological footprint method: a case study of Qingdao, China, from 2004 to 2014[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 1249-1261.
- [49] PAN H, ZHUANG M, GENG Y, et al. Emergy-based ecological footprint analysis for a mega-city: the dynamic changes of Shanghai [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 552-562.
- [50] LIU G Y, YANG Q. Non-monetary accounting on ecosystem service valuation: theory and methodology[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2018, 10(4): 10-20. 刘耕源, 杨青. 生态系统服务价值非货币量核算: 理论框架与方法学[J]. *中国环境管理*, 2018, 10(4): 10-20.
- [51] LIU G Y. A review of a non-monetary valuation of ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1487-1499. 刘耕源. 生态系统服务功能非货币量核算研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(4): 1487-1499.
- [52] YANG Q, LIU G, HAO Y, et al. Quantitative analysis of the dynamic changes of ecological security in the provinces of China through emergy-ecological footprint hybrid indicators[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 678-695.
- [53] LU H F, LAN S F, YU X H, et al. Methodology of emergy synthesis for urban complex ecosystem[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2005, 18(4): 34-37. 陆宏芳, 蓝盛芳, 俞新华, 等. 城市复合生态系统能值整合分析研究方法论[J]. *城市环境与城市生态*, 2005, 18(4): 34-37.
- [54] Ministry of Environmental Protection. Strategy and action plan of biodiversity conservation in Zhejiang Province[EB/OL]. [2019-11-16]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201009/t20100921_194841.htm. 环境保护部. 浙江省生物多样性保护战略与行动计划[EB/OL]. [2019-11-16]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201009/t20100921_194841.htm.
- [55] YANG Q, LIU G Y. Non-monetary accounting on forest ecosystem services value: case study of forests in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 29(11): 3747-3759. 杨青, 刘耕源. 森林生态系统服务价值非货币量核算: 以京津冀城市群为例[J]. *生态学杂志*, 2018, 29(11): 3747-3759.
- [56] WANG S M, SONG C, CHEN M B, et al. Technology research and engineering applications of near-zero air pollutant emission coal-fired power plants[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(4): 487-494. 王树民, 宋畅, 陈寅彪, 等. 燃煤电厂大气污染物“近零排放”技术研究及工程应用[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(4): 487-494.
- [57] QI B, WANG Y W. Study on resources environment and sustainable development in Zhoushan Archipelago[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2006(3): 29-30. 齐兵, 王跃伟. 舟山群岛的资源环境与可持续发展[J]. *国土与自然资源研究*, 2006(3): 29-30.
- [58] WANG Y, YU H X, LÜ D. Analysis on dynamic ecological security and development capacity of 2005—2009 in Qinhuangdao, China [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 607-612.

Evaluation of Island Sustainability Based on Emergy Ecological Footprint: Taking Zhoushan as a Case

LI Yu-jie, ZHAO Sheng

(Marin Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: The island sustainability is evaluated by establishing the parameters such as emergy ecological deficit/surplus, fishery footprint intensity (D), social development pressure index (I) and economic coordination index (Q) based on emergy theory and ecological footprint method. For the case study, Zhoushan of Zhejiang Province, a typical island city, is taken as the example. The results show that from 2003 to 2017 the emergy footprint and the emergy carrying capacity in Zhoushan were all on a rising trend; the emergy ecological footprint per capita increased by 15.78 hm^2 with an amplification of 63.26% and the emergy carrying capacity per capita increased by $5.20 \times 10^2 \text{ hm}^2$ with an amplification of 82.86% , of which both the emergy footprint of the land used for fossil energy and the socio-economic carrying capacity increased the most, while the natural carrying capacity decreased. The emergy ecological deficit/surplus and the economic coordination index cannot fully reflect the regional sustainability. The continuously increasing of the regional fishery footprint intensity indicates that the current fishery economic model does not meet the requirements of sustainable development. The increasing of the social development pressure index further indicates that the development status in Zhoushan has deviated from the sustainable track.

Key words: emergy ecological footprint; island; sustainability evaluation; Zhoushan

Received: August 28, 2020