

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2020.05.001

典型海岛城市自然资本利用时空演变及驱动力

汪海峰^{1,2,3}, 李加林^{1,2,3}, 田鹏¹, 焦会莹¹, 王中义¹

(1. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 东海研究院, 浙江 宁波 315211;
3. 宁波海陆国土资源利用与治理协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 生态环境是区域经济社会发展的物质基础和空间载体, 对其研究有助于统筹人类社会与生态系统的协调发展。以 2006—2016 年舟山市社会经济面板数据为基础, 利用三维生态足迹模型探究舟山市自然资本利用演变特征, 借助地理探测器揭示自然资本动态变化的驱动机制。结果显示: (1) 研究期内, 舟山市自然资本需求大于供给。人均生态足迹上升 $1.295 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$, 人均生态承载力增加 $0.233 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$, 表明舟山市自然资本需求不断上升, 自然资本供给能力也在不断增强。各县区自然资本供需存在差异, 定海的自然资本供应大于需求, 普陀、岱山与嵊泗均表现为自然资本需求大于供给。(2) 舟山市对自然资本存量消耗呈缓慢增加趋势, 而自然资本流量占用呈波动下降趋势, 自然资本利用处于不可可持续发展的状态。各县区的自然资本存量消耗呈增加趋势, 嵊泗自然资本流量占用逐年下降, 普陀与岱山呈倒 U 形增长, 而定海则呈波动下降趋势。(3) 因子探测结果显示, 常住人口数、废水排放量是舟山市自然资本演变的主导因素。交互探测结果显示, 各影响因素的交互作用均强于单独作用。其中, 常住人口 $\cap$ 工业废气产生量和常住人口 $\cap$ 废水排放总量的交互作用对自然资本演变的影响最大。今后舟山市应增强单位土地的生态承载力, 提高自然资本的供给能力, 并通过合理控制人口数量, 推动技术创新, 提升资源能源利用效率, 积极发展环保产业, 降低对自然资本的需求, 实现区域可持续发展。

关键词: 自然资本; 三维生态足迹; 地理探测器; 舟山市

中图分类号: F205

文献标识码: A

文章编号: 1001-6392(2020)05-0521-09

Spatial and temporal evolution of natural capital in typical island cities and driving force

WANG Haifeng^{1,2,3}, LI Jialin^{1,2,3}, TIAN Peng¹, JIAO Huiying¹, WANG Zhongyi¹

(1. Department of Geography and Spatial Information Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Donghai Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. Ningbo Land and Sea Resources Utilization and Management Collaborative Innovation Center, Ningbo 315211, China)

Abstract: Ecological environment is the material basis and spatial carrier of regional social and economic development. Its research is helpful to the coordinated development of human society and ecosystem. Based on the social and economic data from 2006 to 2016, the three-dimensional ecological footprint model was used to explore the utilization of natural capital in Zhoushan city, and the driving mechanism of the dynamic change of natural capital was revealed with the help of geographical detectors. The findings are as follows: (1) During the study period, the demand for natural capital in Zhoushan is greater than the supply. The per capita ecological footprint increased by $1.295 \text{ hm}^2 \cdot \text{man}^{-1}$, while the per capita ecological carrying capacity increased by $0.233 \text{ hm}^2 \cdot \text{man}^{-1}$, indicating that the demand for natural capital in Zhoushan city was rising, while the supply capacity of natural capital was also increasing. There are differences in natural capital supply and demand in different counties. The natural capital supply in Dinghai is greater than the demand, while the natural capital demand in Putuo, Daishan and Shengsi is greater than the supply. (2) The consumption of natural capital stock in Zhoushan city is increasing slowly,

收稿日期: 2020-02-09; 修订日期: 2020-04-24

基金项目: 国家自然科学基金 (41976209); NSFC-浙江两化融合联合基金 (U1609203)

作者简介: 汪海峰 (1994-), 硕士, 主要从事海岸带资源环境研究。电子邮箱: 1573002769@qq.com

通讯作者: 李加林, 博士, 教授、博导, 主要从事海岸带资源环境研究。电子邮箱: nbj2001@163.com

<http://hytb.nmdis.org.cn>

while the occupation of natural capital flow is decreasing in a fluctuating trend thus resulting unsustainable development. The consumption of natural capital stock in all counties and districts shows an increasing trend, while the occupancy of natural capital flow in Shengsi decreases year by year. (3) Factor detection results show that the number of permanent residents and the discharge of waste water are the leading factors for the evolution of natural capital in Zhoushan city. The results of interaction detection show that the interaction of factors is stronger than that of any single factor. Among them, the interaction between the permanent population $\cap$ the total wastewater discharge and the permanent population $\cap$ the amount of industrial waste gas production has the greatest impact on the evolution of natural capital. In the future, Zhoushan city should strengthen the ecological carrying capacity of unit land and improve the supply capacity of natural capital. In addition, measures on reasonably controlling the population, promoting technological innovation should be taken to improve the utilization efficiency of resources and energy, actively developing the environmental protection industry, reducing the demand for natural capital, and realizing sustainable regional development.

Key words: natural capital; three-dimensional ecological footprint; geographic detector; Zhoushan

自然资本是指满足区域人类社会发展,由生态系统所提供的各类产品及服务(谢高地等,2001),包含自然资本存量与自然资本流量两方面。随着城镇化快速推进,区域社会经济发展对自然资本消耗和占用也在不断增强,严重制约区域社会经济的可持续发展,这也成为世界各国政府与学界关注的热点。目前,关于自然资本的核算方法有能值分析、货币核算、生态足迹等,而生态足迹是研究自然资本利用情况常用的方法(刘晓星,2019)。生态足迹最早由国外学者 William E. Rees 于 1992 年提出,1996 年被其学生 Wackernagel 完善补充,并逐渐成为研究能源资源消耗与区域可持续发展的重要方法(Mancini et al, 2017)。张志强等(2000)于 1999 年将生态足迹引入国内,从概念、理论、原理等方面展开介绍,并以我国西部地区为例进行模型应用。传统生态足迹可分析自然资本利用的时序变化或区域整体变化,无法将资本存量与资本流量进行区分。在传统生态足迹模型基础上,国外学者 Niccolucci (2009) 提出了三维生态足迹模型,引入足迹深度与足迹广度反映自然资本利用与占用的状态。该模型在国内外学者共同努力下不断完善和改进(Benjamin et al, 2012)。三维生态足迹模型由方恺(2013)引入中国,并对中国自然资本利用进行了测算,分析了其空间分布差异。随后中国学者利用三维生态足迹模型从城市群、省际、市尺度探究区域自然资本利用时空演变特征(史丹等,2016;张星星等,2017;李姣等,2019;靳相木等,2017),并从城镇化、工业化、人口规模、产业结构、社会发展等方面,采用 PLS 偏最小二乘回归、DEA 数据包络分析、LMDI 分解模型

等方法进行驱动机制探索。

舟山市位于东海海域,属亚热带季风气候,为典型海岛城市。全市总面积为 22 000 km²,其中海域面积为 20 800 km²,共有海岛 1 814 座,下辖定海区、普陀区、岱山县、嵊泗县(邵晨,2018),港口贸易、海岛旅游、海洋渔业等是其经济发展的主要动力。因此各类有关舟山生态环境的研究较多,以“舟山”和“生态”为检索词,以中国知网为数据库,检索到 1952—2019 年共有相关文献 222 篇,研究内容主要分为海岛旅游或海洋经济的生态效应、生态服务价值、生态承载力、生态足迹、生态安全、海洋污染和生物种群变化等。现有相关研究主要探究海岛旅游对生态系统健康、资源可持续利用、土地承载力的影响。其中,于庆东等(2011)基于生态足迹模型,测算了旅游交通、住宿、游玩、购物等行为产生的生态足迹,结果显示舟山旅游地的生态安全与可持续发展水平介于“威胁生态安全-威胁可持续发展”和“生态不安全-不可持续发展”之间。陈佳代(2017)利用生态足迹模型,得出舟山旅游生态足迹处于增加和发展处于不可持续状态的结论;邵晨(2018)综合生态足迹与能值足迹分析法,测算了舟山市 2006—2015 年间各类海产品的生态足迹,结果显示舟山的海水养殖对生态环境的压力在逐年下降。

综合国内有关自然资本及舟山的研究成果,发现其具有以下特征。(1) 中国对自然资本的研究经历从国家到城市群的尺度变化。近年来,学者增加了对生态环境脆弱等人地矛盾突出地带的关注,但对舟山这类典型海岛地域的研究鲜有报道。(2)

对自然资本利用演变驱动机制的研究大多数基于统计数据回归分析,但不同影响因素的作用效果存在空间分异,需引入对空间数据的定量分析。(3)已有关于舟山的研究,多以传统生态足迹为基础探究生态系统的演变,欠缺对驱动机制的探索。基于此,以舟山市 2006—2016 年的社会经济面板数据为基础,利用三维生态足迹模型揭示舟山市自然资本利用时空演变特征,并借助地理探测器探究社会经济活动对自然资本利用演变的影响,以期对舟山市资源能源合理利用与区域可持续发展提供科学基

础,丰富我国对典型区域自然资本的研究框架。

1 研究方法 with 数据来源

以传统生态足迹模型探究舟山市自然资本利用的时序变化,借助三维生态足迹模型中的足迹深度与足迹广度来揭示自然资本的具体变化(图 1),更完整和系统地揭示自然资本利用的时空演变特征。利用地理探测器的因子探测与交互探测研究不同因素对舟山市自然资本利用的影响机制。

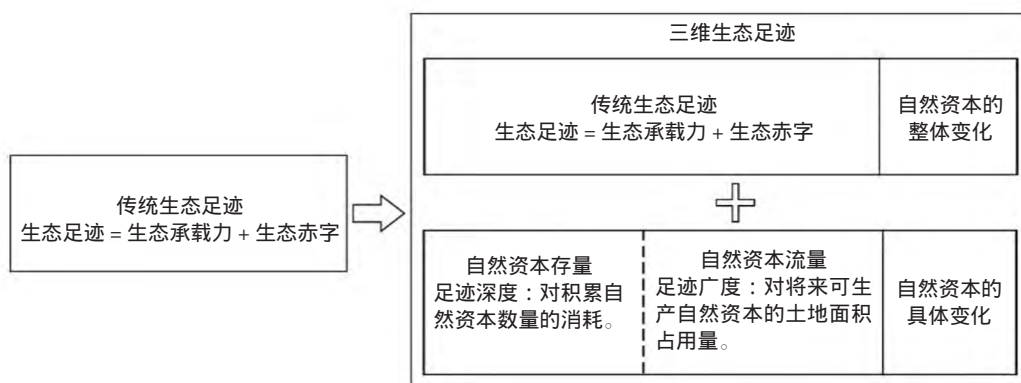


图 1 生态足迹模型的演化

1.1 三维生态足迹

1.1.1 传统生态足迹模型

生态足迹是指经济社会发展过程中,区域人口消耗资源能源和吸纳废弃物所需生产性土地的面积,由生态承载力与生态赤字构成。其计算公式(张志强等,2000)为:

$$EF = N[ef = \sum(aa_i) = \sum(c_i / p_i)] \quad (1)$$

式中, EF 为总生态足迹, N 为总人口数, ef 为人均生态足迹, aa_i 表示消耗*i*类产品所需的人均生产性土地面积, c_i 为*i*类产品的人均消耗量, p_i 为*i*类产品的生产能力。

生态承载力则反映区域生态系统可供给社会经济发展活动所有类别生产性土地的面积总数,其公式(张红等,2016)为:

$$EC = N \times ec = \left(\sum_{j=1}^6 a_j \times r_j \times y_j \right) \quad (2)$$

式中, EC 为总生态承载力, N 为总人口数, ec 是人均生态承载力, a_j 为人均占用*j*类生产性土地面积, r_j 为均衡因子, y_j 为产量因子。而生态赤字由

生态足迹与生态承载力间的差值表示。

1.1.2 三维生态足迹模型

传统生态足迹可用于区域自然资本利用的时序分析,而三维生态足迹在其基础上引入了足迹深度与足迹广度,实现对自然资本利用的具体分析。三维生态足迹计算公式如下(方恺,2012;孙才志等,2017):

$$EF_{\text{depth region}} = 1 + \frac{\sum_i^n \max(EF_i - EC_i, 0)}{\sum_i^n EC_i} \quad (3)$$

$$EF_{\text{size region}} = \sum_i^n \min(EF_i - EC_i) \quad (4)$$

$$EF_{3D} = EF_{\text{depth region}} \times EF_{\text{size region}} \quad (5)$$

式中: $EF_{\text{depth region}}$ 为足迹深度(hm^2),1为自然深度, EF_i 为*i*类土地生态足迹总量, EC_i 为*i*类土地生态承载力总量; $EF_{\text{size region}}$ 为足迹广度(hm^2)。

1.1.3 存量流量利用比

自然资本存量与流量占用的比值可反映自然资

本利用的可持续性, 比值越大则可持续性越低, 公式如下 (杨屹等, 2018):

$$R_{\text{flow}}^{\text{stock}} = \frac{EF - EF_{\text{size region}}}{EF_{\text{size region}}} = \frac{ED}{EC} = EF_{\text{depth region}} - 1 \quad (6)$$

式中: $R_{\text{flow}}^{\text{stock}}$ 表示存量流量占用比, ED 为生态赤字总量, 其中 $EF > EC$ 。

1.2 地理探测器

1.2.1 地理探测器原理

地理探测器是基于空间分异性原理, 探究自变量与因变量间空间分布的统计学方法 (王劲峰等, 2017)。因子探测测算单一自变量对因变量在空间上解释力度, 用 q 值表示, 数值越大则解释力越强。 q 介于 0 到 1 之间, 当 $q = 0$ 时, 表示自变量无法解释因变量; 当 $q = 1$ 时, 自变量可完全解释因变量。交互探测研究两个自变量 (X_1 、 X_2) 揭示因变量时的组合关系, 通过比较 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行类型划分 (表 1)。

表 1 交互作用类型

序号	判断依据	作用类型
1	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
2	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
3	$\max(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2)$	双因子增强
4	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
5	$q(X_1) + q(X_2) < q(X_1 \cap X_2)$	非线性增强

1.2.2 驱动机制指标选取

已有研究成果中, 张星星等 (2017) 基于偏最小二乘法, 探究了人口结构、社会发展、经济活动和区域政策对珠江三角洲城市群自然资本利用的影响; 程钰等 (2019) 基于回归分析, 研究了人口规模、产业结构、居民生活水平和土地利用对黄河三角洲地区自然资本利用的影响; 董建红等 (2019) 基于偏最小二乘法, 探究了人口、社会消费、资源消耗、环境污染、产业结构和对外贸易等对甘肃省自然资本利用的影响机制。舟山市以海洋渔业、海洋运输、海岛旅游为支柱产业, 因此在已有研究成果基础上, 选取城镇化率、常住人口、专利申请授权量、在校学生数、人均可支配收入、实际利用外资、工业废气产生量、废水排放总量、一般工业固体废物产生量 9 个因子, 并增加连岛工程长度、海洋经济总产值与海岛旅游人数这 3 个因子构建影响因素指标体系 (表 2)。

表 2 舟山自然资本利用影响因素指标体系

编号	指标	单位
X1	城镇化率	%
X2	常住人口	万人
X3	专利申请授权量	项
X4	在校学生数	人
X5	人均可支配收入	元
X6	连岛工程长度	km
X7	海洋经济总产值	万元
X8	海岛旅游人数	万人
X9	实际利用外资	万元
X10	工业废气产生量	亿立方米
X11	废水排放总量	万吨
X12	一般工业固体废物产生量	万吨

1.3 数据来源

以舟山市为研究对象, 研究期为 2006—2016 年, 所需数据大致分为三类。(1) 生态足迹测算分为生物资源、能源消耗两方面, 生物资源包含农产品、林产品、草产品、水产品等, 能源消耗则包括能源动力产品、化石燃料产品。生态足迹测算数据来自舟山市及各县区统计年鉴与公报。(2) 生态足迹测算过程涉及均衡因子与产量因子参考全球生态足迹网 ([www.footprintnetwork.org](http://www footprintnetwork.org)) 测算指南, 并借鉴有关生态足迹研究成果 (童亿勤, 2009; 狄乾斌等, 2015)。均衡因子赋值: 耕地和建设用地为 2.8、林地和化石燃料地为 1.1、草地为 0.5、水域为 0.2、污染吸纳地为 0。产量因子赋值: 耕地和建设用地为 1.66、水域为 1、林地 0.91, 草地为 0.19。(3) 驱动机制中各指标数据取自舟山市及各县区的统计年鉴与公报。其中, 在校学生数是指包含高中、职业中学、大学等在校生。而实际利用外资需按照当年的汇率换算, 海岛旅游人数指国内外旅游人数总和。

2 结果与分析

2.1 舟山市自然资本利用的时空演变

2.1.1 自然资本需求与供给的时空演变

依据式 (1) 和式 (2), 测算出 2006—2016 年舟山市及各县区人均生态足迹、生态承载力、生态赤字 (图 2、图 3), 为更好地了解生态赤字变化趋势, 其以负值形式显示。结果显示:

(1) 人均生态足迹逐年增加, 由 2006 年的 $2.521 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 增加至 2016 年的 $3.816 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$, 年均增幅为 4.67 %。研究期内, 舟山市人口由 96.58 万人增加至 97.33 万人, 国内生产总值由 335 亿元增加至 1241 亿元, 表明人均生态足迹变化与人口和经济发展呈正相关。

(2) 人均生态承载力在 2006—2009 年增加较快, 由 $1.117 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 增加至 $1.265 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$, 2009—2016 年则增加较缓慢, 由 $1.265 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 增加至 $1.350 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$, 研究期内年均增幅为 1.90 %。

这主要是由于近些年舟山市重视对耕地、基本农田、林地的保护, 推进生态城市建设, 制定了近海环境功能区划, 以保护区域生态环境。

(3) 人均生态赤字由 2006 的 $1.404 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 增加至 2016 年的 $2.465 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$, 年均增幅达 6.87 %。综合对 2006—2016 年舟山市人均生态足迹与生态承载力分析结果发现, 舟山市对自然资本需求不断上升, 经济社会发展对环境压力持续增大。而舟山市自然资本供给能力也在不断增强, 表明舟山市在追求经济发展的同时, 对生态环境与资源利用的重

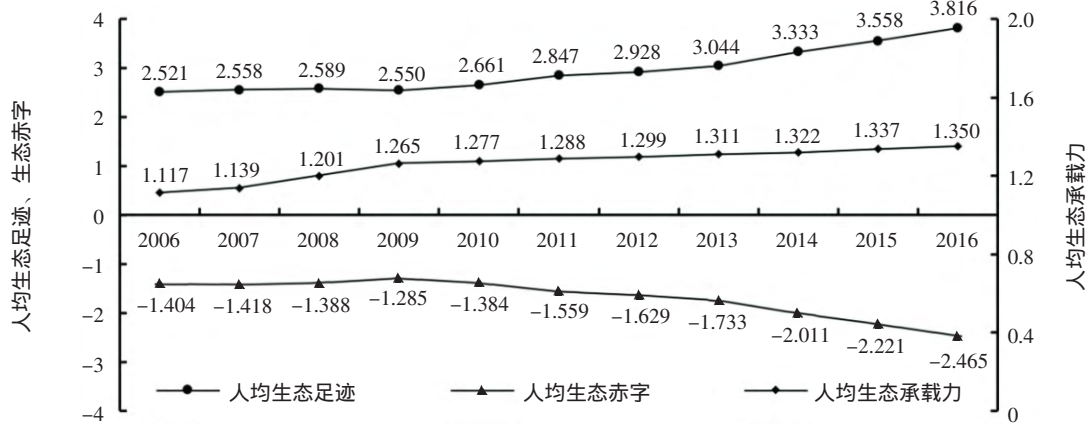


图2 2006—2016年舟山市人均生态足迹、人均生态承载力及生态赤字变化 (单位: $\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)

视也在不断增强。

依据式 (1) 和式 (2), 得出各县区人均生态指数结果 (图3—图5), 数据显示:

(1) 各县区人均生态足迹变化趋势存在明显空间分异。定海人均生态足迹较其他县区小, 且变化相对较稳定, 从 2006 的 $1.161 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 增加至 2016 的 $1.216 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 。普陀、岱山与嵊泗的人均生态足迹数值较大, 且增加幅度较快, 在 2006—2016 年间增加约 $3 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$, 年均增幅介于 4.67 % 到 8.04 % 之间。结合人均生态足迹构成 (表 3), 水域对普陀、岱山与嵊泗的生态足迹贡献达 90 %, 这些地区所辖水域面积广袤, 且海洋经济发达, 占 GDP 的比例超 60 %。

(2) 各县区人均生态承载力呈增加态势, 2006—2009 年较快增加, 年均增幅约为 3 %, 而 2009—2016 年变化则相对平稳, 年均增幅约为 1 %。结合人均生态承载力构成 (表 3), 耕地、林地与建筑用地对生态承载力贡献分别为 35.62 %、16.32 % 和 47.10 %, 而定海在耕地、林地与建筑用地的人均生态承载力均高于其他各县区, 主要由于

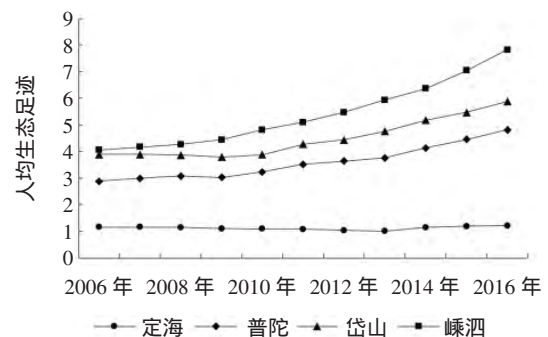


图3 2006—2016年舟山各县区人均生态足迹变化 (单位: $\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)

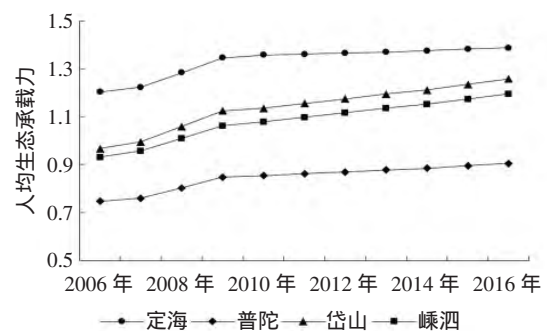


图4 2006—2016年舟山各县区人均生态承载力变化 (单位: $\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)

图5 2006—2016年舟山各县区生态赤字变化 (单位: $\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)

其人均陆地面积相对较多,可用于农业、林业与建设的土地资源相对充足。

(3) 各县区人均生态赤字(盈余)变化存在明显差异。定海人均生态承载力大于人均生态足迹,呈生态盈余状态,自然资本供应大于需求。而普陀、岱山与嵊泗的人均生态足迹在不断增加,但人均生态承载力增幅相对较小,呈生态赤字状态,这三个县区自然资本供应无法满足需求。

表3 2006年和2016年舟山各县区人均生态足迹和生态承载力构成 (单位: $\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)

类型	人均生态足迹								人均生态承载力							
	2006				2016				2006				2016			
年份	定海	普陀	岱山	嵊泗	定海	普陀	岱山	嵊泗	定海	普陀	岱山	嵊泗	定海	普陀	岱山	嵊泗
耕地	0.140	0.058	0.080	0.019	0.091	0.038	0.054	0.022	0.594	0.310	0.360	0.439	0.590	0.319	0.391	0.476
草地	0.011	0.035	0.051	0.055	0.005	0.028	0.035	0.049	0.001	0.007	0.001	0.003	0.001	0.007	0.000	0.003
林地	0.002	0.007	0.011	0.012	0.001	0.007	0.010	0.013	0.236	0.196	0.239	0.133	0.221	0.189	0.244	0.136
化石燃料地	0.257	0.348	0.214	0.107	0.331	0.465	0.301	0.151	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
建筑用地	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.535	0.335	0.497	0.482	0.755	0.489	0.765	0.742
水域	0.750	2.439	3.545	3.865	0.787	4.275	5.487	7.591	0.001	0.002	0.002	0.000	0.010	0.025	0.29	0.010

2.1.2 自然资本存量与流量动态变化

依据三维生态足迹模型,由式(3)—式(6)得出舟山市人均足迹深度、人均足迹广度与自然资本存量流量利用比的结果(图5、图6)。数据显示:

(1) 2006—2016年舟山市人均生态足迹深度维持缓慢增长,人均生态足迹深度介于8.695~8.867 hm^2 之间,舟山市对生态环境的压力较大且无明显变化,表明对自然资本存量的消耗呈缓慢增加趋势。

(2) 舟山市人均足迹广度呈波动下降,2006—

2009年呈增加趋势,2009年的变化是由于水域人均足迹广度增加约0.01 hm^2 ,而2009—2016年则呈下降趋势,表明舟山对自然资本流量占用呈波动下降趋势,即占用生产性土地面积在下降。

(3) 2006—2016年舟山市自然资本存量流量比稳定增加,由7.695增加至7.867,表明舟山市当前不可可持续发展的状态在不断恶化。虽然舟山市对自然资本流量占用在减少,但对自然存量消耗远大于资本流量占用,且两者差距在逐年增大,表明目前舟山经济社会发展对生态环境压力日益增强,处于不可可持续发展状态。

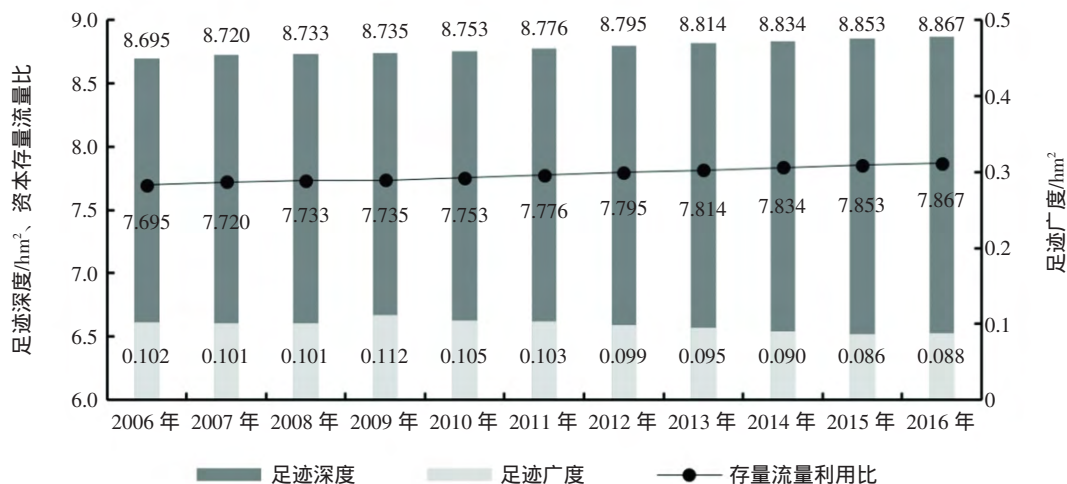
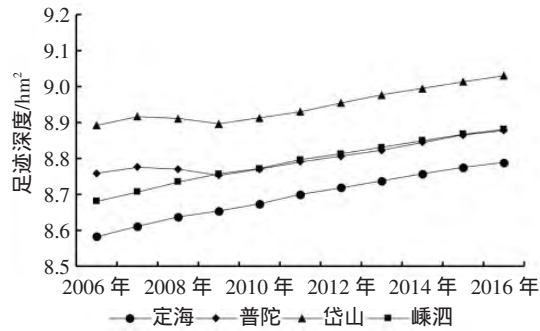


图6 2006—2016年舟山市足迹广度、足迹深度与自然资本存量流量利用比变化

各县区人均足迹深度与足迹广度结果见图 7，数据显示：

(1) 2006—2009 年各县区人均足迹深度变化可分为两类，普陀与岱山呈先增后减趋势，定海与嵊泗呈线性增加。2009—2016 年各县区均呈小幅增加态势，年均增幅约为 1%，年均增加约 0.01 hm²。其中，2006—2009 年普陀与岱山的人均足迹深度的变化，是由于耕地与林地足迹深度增加，而建筑用地足迹深度下降所致。

(2) 2006—2016 年各县区人均足迹广度的变化



可分为三类，嵊泗呈较为稳定的缓慢增加趋势，年均增幅为 1.72%。普陀与岱山呈倒 U 形增长，年波动幅度最大达 20.73%，年均波动幅度为 0.45%，其中水域足迹广度的波动是导致人均足迹广度变化主要原因。定海则呈波动下降趋势，各类土地类型的足迹深度逐年下降。综合以上分析，耕地与林地足迹深度增加，是导致舟山市足迹深度增加的主要原因。而水域足迹广度波动下降是导致舟山市足迹广度波动下降主要原因。这类变化特征与舟山各县区海陆面积、产业结构存在相应的联系。

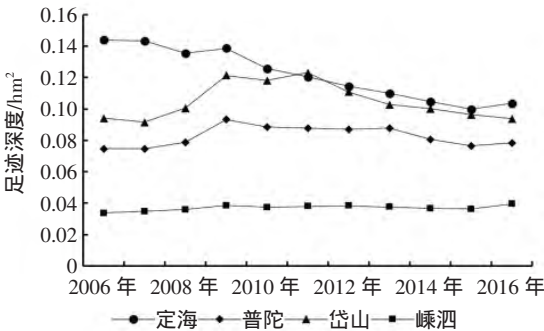


图 7 2006—2016 年舟山县区足迹深度和足迹广度变化

2.2 舟山市自然资本时空演变的影响因素地理探测

舟山市自然资本演变在不同县区存在空间分异，不同县区间在资源禀赋、经济发展、人口规模等方面存在差异，通过对空间数据的分析与解读探究自然资本演变的驱动机制。利用地理探测器的“因子探测”功能，以舟山市三维生态足迹作为因变量 Y，以 12 个社会经济指标作为自变量 X，计算社会经济影响因素对舟山自然资本演变的解释力，利用“交互探测”功能计算不同组合影响因素的解释效果。

2.2.1 地理探测器的因子探测结果

将收集的社会经济面板数据进行离散化处理，导入 GeoDetector 得到因子探测分析结果（表 4）。根据不同影响因素的 p 值，判断各影响因素的显著性水平，其中 X5（人均可支配收入）、X9（实际利用外资）、X12（一般工业固体废物产生量）的 p 值均大于 0.05，将其剔除。通过对剩余 9 个影响因子的 q 统计量进行排序：X2（常住人口）

> X11（废水排放总量）> X3（专利申请授权量）> X4（在校学生数）> X6（连岛工程长度）> X10（工业废气产生量）> X1（城镇化率）> X8（海岛旅游人数）> X7（海洋经济总产值）。结果显示：

(1) 不同影响因素在解释自然资本动态演变存在较大差异，常住人口、废水排放总量、专利申请授权量、在校学生数和连岛工程长度的解释力超过 55%，表明其对舟山市自然资本影响最为明显。

(2) 工业废气产生量、城镇化率与海岛旅游人数的解释力介于 40%与 50%之间，表明其对舟山市自然资本影响较为明显；而海洋经济总产值的解释力低于 30%，表明其对舟山市自然资本影响最小。

(3) 对 q 值超过 60%的影响因素进行分析，常住人口数量及废水排放量是舟山市自然资本变化的主导因素，反映出舟山人口规模、居民生产生活及工业活动产生污染物对舟山自然资本影响最大。今后舟山市在满足区域人口生存与发展需求的同

表 4 舟山市自然资本动态演变的因子探测结果

指标	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
q 值	0.463	0.763	0.575	0.563	0.025	0.561	0.263	0.450	0.263	0.500	0.613	0.313
p 值	0.015	0.000	0.000	0.002	0.515	0.006	0.040	0.021	0.129	0.008	0.000	0.850

时,应强化对生产生活产生的污染物处理能力,加强产业结构的优化,扩大环保产业的规模,降低人类活动对生态环境的影响。

2.2.2 地理探测器的交互探测结果

将收集数据进行离散化处理后,导入GeoDetector进行处理,结合交互作用类型(表1),得出交互探测分析结果(表5)。数据显示:

(1) 交互作用组合共有36组,不同两影响因素之间交互作用均强于单独影响因素,主要表现为双因子增强,少数为非线性增强,表明舟山市自然资本时空演变并非仅受影响因素单独作用,是受到不同因子的共同作用。

(2) 常住人口 $\cap$ 工业废气产生量和常住人口 $\cap$

废水排放总量的 q 值超过0.8,表明这两组交互类型对舟山市自然资本演变的解释力达80%。结合舟山市实际发展,常住人口及工业发展需消耗大量生物资源与化石燃料,而排放的各类废弃物需要周围生态环境进行吸纳,进而影响自然资本演变。

(3) 交互组合中 q 值介于0.6与0.7的有34组,为城镇化率、常住人口、在校学生数、海岛旅游人数、海洋经济总产值之间的组合,这些组合的交互影响相对较大,可见人口与经济活动的共同作用对舟山市自然资本影响相对较强。而专利申请授权量、工业废气产生量与废水排放总量之间构成的组合影响相对较小,但其交互作用强度均大于单独作用效果。

表5 舟山市自然资本动态演变的交互探测结果

$X_i \cap X_j$	X_i	X_j	$q(X_i \cap X_j)$	交互类型	$X_i \cap X_j$	X_i	X_j	$q(X_i \cap X_j)$	交互类型
$X1 \cap X2$	0.463	0.763	0.784	双因子增强	$X3 \cap X10$	0.575	0.400	0.687	双因子增强
$X1 \cap X3$	0.463	0.575	0.705	双因子增强	$X3 \cap X11$	0.575	0.500	0.628	双因子增强
$X1 \cap X4$	0.463	0.563	0.737	双因子增强	$X3 \cap X12$	0.575	0.613	0.749	双因子增强
$X1 \cap X7$	0.463	0.475	0.640	双因子增强	$X4 \cap X7$	0.563	0.475	0.749	双因子增强
$X1 \cap X8$	0.463	0.263	0.756	非线性增强	$X4 \cap X8$	0.563	0.263	0.749	双因子增强
$X1 \cap X10$	0.463	0.400	0.725	双因子增强	$X4 \cap X10$	0.563	0.400	0.745	双因子增强
$X1 \cap X11$	0.463	0.500	0.658	双因子增强	$X4 \cap X11$	0.563	0.500	0.772	双因子增强
$X1 \cap X12$	0.463	0.613	0.772	双因子增强	$X4 \cap X12$	0.563	0.613	0.754	双因子增强
$X2 \cap X3$	0.763	0.575	0.766	双因子增强	$X7 \cap X8$	0.475	0.263	0.693	双因子增强
$X2 \cap X4$	0.763	0.563	0.776	双因子增强	$X7 \cap X10$	0.475	0.400	0.725	双因子增强
$X2 \cap X7$	0.763	0.475	0.772	双因子增强	$X7 \cap X11$	0.475	0.500	0.606	双因子增强
$X2 \cap X8$	0.763	0.263	0.791	双因子增强	$X7 \cap X12$	0.475	0.613	0.721	双因子增强
$X2 \cap X10$	0.763	0.400	0.815	双因子增强	$X8 \cap X10$	0.263	0.400	0.772	非线性增强
$X2 \cap X11$	0.763	0.500	0.800	双因子增强	$X8 \cap X11$	0.263	0.500	0.781	非线性增强
$X2 \cap X12$	0.763	0.613	0.776	双因子增强	$X8 \cap X12$	0.263	0.613	0.788	双因子增强
$X3 \cap X4$	0.575	0.563	0.745	双因子增强	$X10 \cap X11$	0.400	0.500	0.723	双因子增强
$X3 \cap X7$	0.575	0.475	0.673	双因子增强	$X10 \cap X12$	0.400	0.613	0.756	双因子增强
$X3 \cap X8$	0.575	0.263	0.725	双因子增强	$X11 \cap X12$	0.500	0.613	0.760	双因子增强

3 讨论

自然资本研究有助于及时和详尽了解生态系统演变(Hein et al, 2020),对统筹区域经济社会发展与生态环境保护,实现区域绿色可持续发展有重要意义。舟山市自然资本存量消耗和资本流量占用的变化,分别受耕地、林地和水域的影响,这符合其实际发展情况。陆域土地资源不足,而海域面积充足,使得舟山此类海岛城市与内陆城市在产业结构、土地利用方式等存在明显不同,在自然资本演

变上也存在差异。舟山市作为海岛市,自身的资源禀赋决定了其社会经济发展对耕地、林地供应产品与服务压力较强,当自然资本存量无法满足消耗时,便会占用自然资本流量,导致自然资本利用处于不可持续的状态。

通过对舟山自然资本演变的驱动机制分析,为改善当前自然资本利用的现状,从自然资本供给和消耗两方面进行思考:

(1) 提升自然资本供给能力。首先,优化土地利用结构,强化对土地资源的管控,实施生态修复工程,改善破坏严重的土地,积极扩充后备土地资

源,提升土地资源承载力。其次,加强海洋生态环境的保护与管理,制定海洋主题功能区规划,提升海洋生态系统服务功能。此外,结合当前浙江省建设海洋经济强省的战略背景,积极开发海洋新能源,为舟山能源供给开辟新道路。

(2) 降低对自然资本的消耗,合理高效利用自然资源。首先,推动高耗能产业转型,发展绿色可持续的海岛旅游业,通过优化产业结构降低对能源的消耗。其次,大力引进人才资源和推动技术创新,提升资源能源利用效率,发展环保产业和强化污染物处理能力,减轻对生态环境的压力(杨屹等,2015);此外,合理控制人口数量,强化环保宣传与教育工作。

4 结论

测算与分析 2006—2016 年舟山市及各县区人均生态足迹、人均生态承载力和三维生态足迹等指数,探究舟山市自然资本时空演变特征,借助理探测器揭示自然资本演变空间分异的驱动机制,得出以下结论:

(1) 研究期内,舟山市自然资本需求大于供给。人均生态足迹上升 $1.295 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$,人均生态承载力增加 $0.233 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$,表明舟山市自然资本需求不断上升,经济社会发展对环境压力持续增大,但自然资本供给能力也在不断增强。各县区自然资本供需存在分异,定海的自然资本供应大于需求,而普陀、岱山与嵊泗都表现为自然资本需求大于供给。

(2) 舟山市对自然资本存量消耗呈缓慢增加趋势,而自然资本流量占用呈波动下降趋势,当前处于不可持续发展的状态。各县区的自然资本存量消耗基本呈增加趋势,嵊泗自然资本流量占用逐年下降,普陀与岱山呈倒 U 形增长,而定海则呈波动下降趋势。其中,耕地与林地足迹深度增加是导致全市自然资本存量消耗变化的主要原因,水域足迹广度变化是导致全市自然资本流量占用变化的主要原因。

(3) 因子探测结果表明常住人口数、废水排放量是舟山市自然资本演变的主导因素。交互探测结果显示,各影响因素的交互作用均强于单独作用。其中,常住人口 $\cap$ 废水排放总量和常住人口 $\cap$ 工业

废气产生量的交互作用对自然资本演变的影响最大,而城镇化率、常住人口、在校学生数、海岛旅游人数、海洋经济总产值之间的交互作用对自然资本演变影响次之。

利用 2006—2016 年社会面板数据进行地理探测器分析,需对数据进行离散化处理,而不同离散化方式可能会影响驱动机制分析的精度,这是下一步研究所需关注和改进的问题。

参 考 文 献

- 陈佳代. 2017. 基于生态足迹模型舟山群岛旅游可持续发展研究[D]. 舟山: 浙江大学.
- 程钰, 尹建中, 王建事. 2019. 黄河三角洲地区自然资本动态演变与影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 29(4): 127-136.
- 狄乾斌, 张海红, 曹可. 2015. 基于能值的山东省海洋生态足迹研究[J]. 海洋通报, 34(1): 1-6.
- 董建红, 张志斌, 张文斌. 2019. 基于三维生态足迹的甘肃省自然资本利用动态变化及驱动力[J]. 生态学杂志, 38(10): 3075-3085.
- 方恺. 2013. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标[J]. 生态学报, 33(1): 267-274.
- 方恺, 李焕承. 2012. 基于生态足迹深度和广度的中国自然资本利用省际格局[J]. 自然资源学报, 27(12): 1995-2005.
- 高晴, 尹珊, 马永银, 等. 2016. 浙江省生态足迹动态变化及影响因素分析[J]. 现代农业科技, 44(15): 194-196+201.
- 靳相木, 柳乾坤. 2017. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究——以温州市为例[J]. 生态学报, 37(9): 2982-2993.
- 李姣, 周翠烟, 张灿明, 等. 2019. 基于生态足迹的湖南省洞庭湖生态经济区全要素生态效率研究[J]. 经济地理, 39(2): 199-206.
- 刘晓星. 2019. 基于三维生态足迹的中国自然资本利用研究[D]. 大连: 辽宁师范大学.
- 邵晨. 2018. 舟山市海产品生态足迹研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学.
- 史丹, 王俊杰. 2016. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. 中国工业经济, 32(5): 5-21.
- 孙才志, 张智雄. 2017. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局[J]. 生态学报, 37(21): 7048-7060.
- 田鹏, 龚虹波, 叶梦姚, 等. 2018. 东海区大陆海岸带景观格局变化及生态风险评价[J]. 海洋通报, 37(6): 695-706.
- 童亿勤. 2009. 基于本地生态足迹模型的浙江省可持续发展评价[J]. 长江流域资源与环境, 18(10): 896-902.
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 72(1): 116-134.
- 吴鹏, 倪勇强, 孙毛明, 等. 2013. 舟山钓梁围垦一期工程对附近海域生态系统影响研究[J]. 海洋通报, 32(05): 540-547+552.
- 肖建红, 于庆东, 刘康, 等. 2011. 舟山群岛旅游交通生态足迹评估[J]. 生态学报, 31(3): 849-857.
- 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 2001. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. 资源科学, 42(6): 5-9.

(下转第 626 页)

<http://hytb.nmdis.org.cn>

- Temperate Zone water of the Zhalong Wetland, in China[J]. *Ecotoxicology*, 23(4): 618.
- PIELOU E, 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. *Journal of theoretical biology*, 13: 131–144.
- REYNOLDS C S, 1996. The plant life of the pelagic[J]. *Verhandlungen-Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, 26: 97–113.
- SHANNON C E, 1948. A mathematical theory of communication[J]. *Bell System Technical Journal*, 27(3): 379–423.
- THIÉBAUT G, TIXIER G, GUÉROLD F, et al, 2006. Comparison of different biological indices for the assessment of river quality: application to the upper river Moselle (France)[J]. *Hydrobiologia*, 570(1): 159–164.
- ZHANG Z, TANG X, TANG H, et al, 2017. Seasonal variations in the phytoplankton community and the relationship between environmental factors of the sea around Xiaoheishan Island in China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 35(1): 163–173.

(本文编辑：袁泽轶)

(上接第 542 页)

- 徐文斌, 郭灿文, 王晶, 等, 2018. 基于熵权 TOPSIS 模型的海岛地区资源环境承载力研究——以舟山普陀区、定海区为例[J]. *海洋通报*, 37(1): 9–16.
- 杨屹, 胡蝶, 2018. 生态脆弱区榆林三维生态足迹动态变化及其驱动因素[J]. *自然资源学报*, 33(7): 1204–1217.
- 杨屹, 加涛, 2015. 21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化[J]. *生态学报*, 35(24): 7987–7997.
- 张红, 陈嘉伟, 周鹏, 2016. 基于改进生态足迹模型的海岛城市土地承载力评价——以舟山市为例[J]. *经济地理*, 36(6): 155–160+167.
- 张星星, 曾辉, 2017. 珠江三角洲城市群三维生态足迹动态变化及驱动力分析[J]. *环境科学学报*, 37(02): 771–778.
- 张志强, 徐中民, 程国栋, 2000. 生态足迹的概念及计算模型[J]. *生态经济*, 15(10): 8–10.
- HEIN L, BAGSTAD J, OBST C, et al, 2020. Progress in natural capital accounting for ecosystems[J]. *Science*, 367(6477): 514–515.
- MANCINI M S, GALLI A, NICCOLUCCI V, et al, 2017. Stocks and flows of natural capital: Implications for Ecological Footprint [J]. *Ecological Indicators*, 77:123–128.
- NICCOLUCCI V, BASTIANONI S, TIEZZIE.B.P, et al, 2009. How deep is the footprint? A 3D representation[J]. *Ecological Modelling*, 220(20): 2819–2823.
- BENJAMIN B, FRANZISKA K, STOYAN N, et al, 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. *Ecological Indicators*, 21(1):17–29.

(本文编辑：袁泽轶)