

基于三维生态足迹扩展模型的中国海岸带生态足迹及其影响因素研究

曹慧博¹, 张颖¹, 杨静¹, 孟伟庆^{1,2}

(1. 天津师范大学 地理与环境科学学院, 天津 300387; 2. 天津市环境变化与生态修复校企合作协同创新实验室, 天津 300387)

摘要: [目的] 计算中国大陆海岸带地区的生态足迹并分析其驱动因素, 为生态文明建设与可持续发展提供参考。[方法] 基于三维生态足迹扩展模型, 计算中国大陆海岸带地区 2008—2017 年的生态足迹、生态承载力、足迹深度, 从时间和空间两方面分析中国海岸带地区可持续发展的状况, 并利用偏最小二乘法对驱动因素进行分析。[结果] ① 2008—2017 年中国海岸带地区总生态承载力、人均生态足迹逐年增大, 从组分贡献率来看, 化石燃料用地人均生态足迹最大; ② 2008—2017 年人均生态承载力变幅不大, 在各省市中, 广西壮族自治区人均生态承载力始终最大, 上海市人均生态承载力始终最小; ③ 足迹深度呈现出逐年增大趋势且深度值均大于 1, 消耗自然资本存量, 生态赤字加剧。从空间上看, 中北部省市的人均足迹深度普遍较大, 南部的广西、广东、福建 3 省足迹深度则相对较低; ④ 经济发展、城市规模、环境污染和区际交流是导致生态足迹和足迹深度增加的驱动因素; 生态建设和科学技术提高对缓解生态足迹和足迹深度加大有着积极作用。[结论] 未来可以通过调整产业结构和人口结构, 改变消费方式, 进一步加强生态建设和提高科技水平来实现中国海岸带地区的可持续发展。

关键词: 三维生态足迹; 扩展模型; 海岸带; 驱动因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0252-08

中图分类号: K903, F205

文献参数: 曹慧博, 张颖, 杨静, 等. 基于三维生态足迹扩展模型的中国海岸带生态足迹及其影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 252-259. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2021. 01. 035; Cao Huibo, Zhang Ying, Yang Jing, et al. A study on ecological footprint and its influencing factors in China's coastal zone based on three-dimensional ecological footprint expansion model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 252-259.

A Study of Ecological Footprint and Its Influencing Factors in China's Coastal Zone Based on Three-Dimensional Ecological Footprint Expansion Model

Cao Huibo¹, Zhang Ying¹, Yang Jing¹, Meng Weiqing^{1,2}

(1. School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2. Co-innovation Laboratory of Environmental Change and Ecological Restoration of Tianjin, Tianjin 300387, China)

Abstract: [Objective] The ecological footprint was calculated and the driving factors in China's continental coastal zone was analyzed in order to provide a reference for ecological civilization construction and sustainable development. [Methods] Based on the three-dimensional ecological footprint expansion model, the ecological footprint, biological capacity, and footprint depth of China's mainland coastal zone from 2008 to 2017 were calculated. The sustainable development of China's coastal zone was analyzed in terms of time and space, and the driving factors were analyzed using the partial least-squares method. [Results] ① In the 10 years from 2008 to 2017, the total biological capacity and the per capita ecological footprint of China's coastal zone increased yearly. In terms of component contribution, the per capita ecological footprint of energy fossil land was the largest. ② From 2008 to 2017, the per capita biological capacity did not vary significantly. Among all provinces and cities, the per capita biological capacity of Guangxi Zhuang Autonomous Region was always

收稿日期: 2020-08-24

修回日期: 2020-10-19

资助项目: 天津市科学技术局“天津市环境变化与生态修复校企合作协同创新实验室(17PTSJYC00160)”建设专项经费资助。

第一作者: 曹慧博(1994—), 女(汉族), 河北省张家口市人, 硕士研究生, 研究方向为海岸带可持续发展。Email: 493598601@qq.com。

通讯作者: 孟伟庆(1979—), 男(汉族), 山西省长治市人, 博士, 副教授, 主要从事环境变化与生态修复、碳排放估算与可持续发展研究。Email: mengweiqing01@126.com。

the largest, while that of Shanghai City was always the smallest. ③ The depth of the footprint showed a trend of increasing year by year, and the depth was greater than 1, which consumed the natural capital stock and aggravated the ecological deficit. From the perspective of space, the depth of the per capita footprint was generally large in central and northern provinces, while the depth of the per capita footprint in Southern Guangxi, Guangdong, and Fujian provinces was relatively low. ④ Economic development, urban scale, environmental pollution, and interregional communication were the driving factors that lead to an increase in ecological footprint and footprint depth. Ecological construction and the improvement of science and technology played a positive role in alleviating the ecological footprint and increasing the depth of the footprint. [Conclusion] In the future, the sustainable development of China's coastal zones can be realized by adjusting the industrial and population structures, changing consumption patterns, further strengthening ecological construction, and improving the scientific and technological levels.

Keywords: three-dimensional ecological footprint; extension model; coastal zone; driving factors

可持续发展是实现人地和谐的重要途径。随着社会经济的发展,人们对自然资源的需求量日益增加,可持续发展受到社会各界的广泛关注。可持续发展评价的一个常用方法是生态足迹法。加拿大经济学家 Rees^[1]于 1992 年首先提出了生态足迹的概念,即通过判断生态供需平衡来判断区域经济发展是否保持在合理的承载能力范围内,是一种以生产性土地面积作为衡量单位的可持续发展评估方法。Wackernagel 等^[2-3]在此基础上提出生态足迹模型并将模型应用于全球和国家层面的自然资本核算。生态足迹在一定程度上可以反映出生态赤字问题,但缺少对自然资本流量和自然资本存量的分析^[4]。Niccolucci 等^[5]在 2009 年提出三维生态足迹模型,引入足迹深度和足迹广度的概念,从自然资源存量角度解释人类对资源的过度消耗,实现了生态足迹模型从二维平面向三维立体空间的扩展研究。

国内研究中,徐中民等^[6]率先运用生态足迹模型对甘肃省生态足迹进行核算。之后,生态足迹被广泛运用于不同空间尺度的可持续发展评价^[7-8]。随着生态足迹研究的深入,针对生态足迹研究的一些不足,生态足迹模型的应用逐渐从自然资本核算转向能值、生态安全、生态系统服务等其他领域^[9]。此外,一些学者还对三维生态足迹模型进行了改进。方恺^[10]采用改进三维生态足迹模型,分析了 11 个国家的自然资本利用特征;靳相木等^[11]对三维生态足迹模型做了改进,实现了生态盈余和生态赤字三维分析的统一。已有的研究大大推动了生态足迹相关研究的深入。

作为海陆之间相互作用的地带,海岸带地区拥有优越的资源条件和环境条件^[12]。全球超过 1/3 的人口分布在面积占地球约 4% 的海岸带地区,平均的人口密度是内陆地区的 3 倍,并且还在增长^[13]。与此同时,海岸带受到来自陆地和海洋的共同作用,既要

为经济社会发展提供土地等资源需求,又要消纳人类活动带来的生态环境压力,因此,从整体上把握中国海岸带地区的可持续发展状态,对协调陆海统筹,促进海岸带可持续发展具有重要的现实意义。通过文献查询,针对中国海岸带地区的可持续发展评估方面的研究还比较少。因此,本文采用三维生态足迹扩展模型对中国大陆海岸带地区 2008—2017 年的生态足迹进行计算和分析,以了解其可持续发展特征和动态变化,并利用偏最小二乘法分析生态足迹变化的影响因素,以期为中国大陆海岸带地区可持续发展水平的提高提供参考和决策依据。

1 研究区概况

本文的研究范围为中国大陆海岸带地区。关于海岸带目前还没有统一的定义。千年生态系统评估报告中的海岸带定义:海洋与陆地间的生境(包括岛屿),空间范围为从近海等深线 50 m 并延伸到陆地 100 km 或海拔低于 50 m 的地带。另外还有很多学者从不同角度和各自的研究目标出发给出了不同的定义,闫麒^[14]基于海洋生态系统服务功能探讨海岸带空间规划时将海岸带定义为由部分海域和部分陆域组成的海域和陆域的结合部;魏超等^[15]把海岸带定义为海洋—10 m 等深线到沿海地级市(县)行政区划边界之间的范围。这些定义导致海岸带在空间上的差异很大。中国学者针对海岸带多以沿海地区的九省二市的行政范围作为研究边界^[16-17],这样的研究范围方便之处在于统计数据容易获取。因此为了数据的获取方便,并与其他学者研究结果的可比性,本文也以沿海地区九省二市的行政范围为研究边界。

中国的大陆海岸带地区由北向南依次为辽宁省、河北省、天津市、山东省、江苏省、上海市、浙江省、福建省、广东省和广西壮族自治区,大体呈朝东南方向

外凸的弧形。10 省市面积总计 $1.25 \times 10^6 \text{ km}^2$, 仅占中国国土面积的 12.99%, 却承载全国总人口的 42.96% 和经济产值的 54.59% (2019 年中国统计年鉴)。在城镇化快速发展和经济增长的背景下, 中国海岸带地区也面临着严重的生态环境压力, 人工岸线从 1990 年的 6 287.08 km 增加到 2013 年的 10 685.22 km^[18], 从 1979 到 2014 年, 中国围填海面积达到了 11 162.89 km²^[19], 2017 年中国大陆海岸带地区的污水排放量约为 $3.69 \times 10^{10} \text{ t}$, 占全国总排放量的 52.68% (2019 年中国统计年鉴), 赤潮面积达到 3 679 km², 近海海洋生态系统有超过 93.83% 的面积处于亚健康和不健康状态 (2017 年中国海洋生态环境状况公报), 环境问题的日益突出, 已经严重影响到中国海岸带地区的可持续发展。

2 研究方法 with 数据

2.1 三维生态足迹扩展模型

三维生态足迹扩展模型在传统二维生态足迹模型和三维生态足迹模型基础上不断完善形成 (图 1)^[11]。三维生态足迹模型通过引入足迹深度和足迹广度的概念, 从自然资源存量与自然资源流量角度解释人类对资源的过度消耗。足迹广度反映了人类活动对自然资源流量的占用程度, 数值上取生态足迹和生态承载力中的最小值, 而足迹深度则反映的是人类活动对自然资源存量的占用程度, 其数值表示再生产人类一年中资源消耗量以满足区域发展需求所需年数, 具有

时间属性。在三维生态足迹模型中足迹深度取值范围始终大于或者等于 1, 其中, 1 表示足迹自然深度, 即在生态足迹大于生态承载力的情况下, 足迹深度表示为 1, 说明当前自然资源能够满足人类活动的资源消费; 反之, 足迹深度大于 1, 此时人类活动过度消耗自然资源, 现有的自然资源已不能满足人类活动的消费需求。

三维生态足迹扩展模型将足迹深度取值范围由三维生态足迹模型中的 $EF_{\text{depth}} \geq 1$ 扩展到 $EF_{\text{depth}} \geq 0$, 扩展后的三维生态足迹模型中足迹深度取生态足迹与生态承载力的比值, 表示为:

$$EF_{\text{depth}} = \frac{EF}{EC} (EF_{\text{depth}} \geq 0) \quad (1)$$

式中: EF_{depth} 为足迹深度; EF 为生态足迹; EC 为该区域的生态承载力。在该模型中, 可以划分为 3 个生态状态。当 $EF_{\text{depth}} = 1$ 时, 生态足迹和生态承载力大小相等, 即自然资源流量占用和自然资源消耗相等, 处于生态盈余和生态赤字的临界状态; 当 $0 \leq EF_{\text{depth}} \leq 1$ 时, 此时处于生态盈余 (ER) 的状态, 此时以人类活动对自然资源流量占用为特点; 当 $EF_{\text{depth}} > 1$ 时, 处于生态赤字 (ED) 的状态, 自然资源流量已耗尽, 人类消费活动开始占用自然资源存量。

三维生态足迹扩展模型以圆柱体来表征生态盈余和生态赤字, 弥补了三维生态足迹模型中足迹广度二维概念的缺陷, 从而实现自然资源流量和自然资源存量占用程度核算的统一。

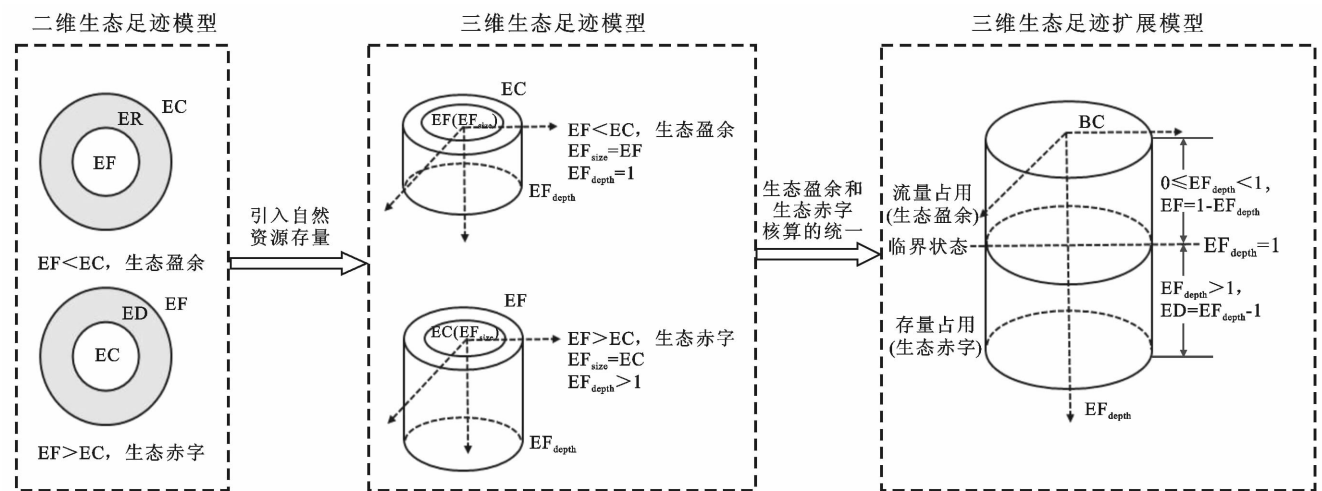


图 1 三维生态足迹扩展模型的演变过程

2.2 驱动因素分析方法

2.2.1 驱动因素指标体系及权重 本文在参考国内外研究基础上^[20-23], 综合考虑城市规模、经济发展、生态建设、科学技术、区际交流、环境污染几个方面, 建

立包含 6 个目标层和 20 个子指标的 中国大陆海岸带区域生态足迹及足迹深度驱动因素指标体系, 利用熵权法求得各子指标的权重, 具体指标体系和权重见表 1。

表 1 中国大陆海岸带区域生态足迹及足迹深度驱动因素指标体系及权重

目标层	指标层	变量	权重
城市规模(A)	年末常住人口/ 10^4 人	A_1	0.300 9
	城市建设用地面积/ km^2	A_2	0.351 5
	城镇化率/%	A_3	0.347 6
经济发展(B)	地区生产总值/ 10^8 元	B_1	0.169 2
	第一产业增加值/ 10^8 元	B_2	0.153 6
	第二产业增加值/ 10^8 元	B_3	0.151 5
	第三产业增加值/ 10^8 元	B_4	0.189 2
	全社会固定资产投资/ 10^8 元	B_5	0.164 8
	海洋生产总值/ 10^8 元	B_6	0.171 7
生态建设(C)	城市绿地面积/ 10^4 hm^2	C_1	0.179 4
	造林总面积/ 10^3 hm^2	C_2	0.298 4
	海洋自然保护区类型个数/个	C_3	0.522 2
科学技术(D)	国内专利申请受理量/项	D_1	0.336 7
	农业机械总动力/(10^4 kW)	D_2	0.452 8
	海洋机构专利申请受理数/项	D_3	0.210 5
区际交流(E)	客运量/ 10^4 人	E_1	0.537 9
	货运量/ 10^4 t	E_2	0.195 8
	邮电业务总量/ 10^8 元	E_3	0.266 2
环境污染(F)	废水排放总量/t	F_1	0.565 0
	二氧化硫排放量/t	F_2	0.435 0

表 2 中国大陆海岸带区域生态足迹及足迹深度各驱动因子之间的相关系数

R	A	B	C	D	E	F
A	1.000 0	0.989 2	0.978 7	0.682 3	-0.518 3	0.539 6
B	0.989 2	1.000 0	0.979 7	0.731 8	-0.568 6	0.603 0
C	0.978 7	0.979 7	1.000 0	0.708 9	-0.548 7	0.589 7
D	0.682 3	0.731 8	0.708 9	1.000 0	-0.478 8	0.859 1
E	-0.518 3	-0.568 6	-0.548 7	-0.478 8	1.000 0	-0.157 7
F	0.539 6	0.603 0	0.589 7	0.859 1	-0.157 7	1.000 0

表 3 中国大陆海岸带区域生态足迹及足迹深度驱动因素数据来源

项目	数据细则	数据来源
生物资源产量数据	耕地:稻谷、小麦、玉米、高粱、大豆、马铃薯、棉花、花生、油菜籽等草地;猪肉、牛肉、羊肉、牛奶、禽蛋、蜂蜜	《中国统计年鉴》
	林地:干鲜果类和木材	
	水域:水产品	
化石燃料消费数据	化石能源用地:煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气建设用地;电力	《中国统计年鉴》
土地利用数据		《中国统计年鉴》《中国国土资源统计年鉴》
人口数据		《中国统计年鉴》

3 结果与分析

3.1 生态足迹和生态承载力分析

生态足迹与生态承载力包括总的生态足迹、生态承载力和人均生态足迹和生态承载力。从整体来看(图 2),中国大陆海岸带地区总生态足迹和总生态承载力呈现逐年增加的趋势,且 2008—2012 年增速加

2.2.2 偏最小二乘回归 同传统的回归模型相比,偏最小二乘回归(partial least square analysis, PLS)可以解决自变量间多重共线的问题,同时在提取成分过程中重组信息,以提高模型的精度和稳定性^[24-25]。在利用熵权法确定各指标权重基础上,通过加权求和求得各目标层的综合值,并将此作为解释变量,选取生态足迹、足迹深度作为被解释变量,即因变量 Y_1 和 Y_2 ,以构建 PLS 模型。在建模之前,首先通过 SPSS 20.0 获取各省市自变量的相关系数矩阵(表 2),结果表明部分驱动因子之间的相关系数在 0.8~1.0 之间,这表明自变量之间存在着明显的多重共线的关系。由此可见本文选取偏最小二乘回归的方法对中国大陆海岸带区域生态足迹和足迹深度的驱动因素进行分析是合理且可取的。本文运用 SIMCA-P 14.0 进行自变量的拟合,构建偏最小二乘回归模型。

2.3 数据来源

文中生物资源消费和化石能燃料费涉及 6 种土地类型,所选取的指标和数据来源见表 3。借鉴谢鸿宇等^[26]的计算方法,以联合国粮农组织(FAO)基础数据库 2008—2017 年数据为基础重新计算了全球平均生产力(表 4)。均衡因子和产量因子均采用刘某承等^[27-28]的计算结果。

快,2012—2018 年增速开始减缓。

从人均角度来看(图 3),中国大陆海岸带地区人均生态足迹逐年增加,人均生态足迹由 2008 年 $3.837 3 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增长到 2017 年的 $4.590 1 \text{ hm}^2/\text{人}$,增长幅度为 19.60%,进一步显示中国大陆海岸带地区对自然资源的消耗在不断增加。人均生态承载力具有相对稳定性,人均生态承载力 2008—2017 年变

化不大,由于人口基数较大,人均生态承载力有呈现先增加后减小的趋势,人均生态承载力由 2008 年的

0.298 8 hm²/人减少到 2017 年 0.290 9 hm²/人,变化幅度很小。

表 4 农业初级产品的全球平均产量计算结果

kg/hm²

产品种类	本文	前人 ^[26]	产品种类	本文	前人 ^[26]			
种植产品	稻谷	4 475.15	3 946.06	水果	苹果	15 757.63	23 019.88	
	小麦	3 216.59	2 790.68		香蕉	20 326.32	16 160.75	
	玉米	5 342.48	4 586.14		西瓜	31 540.59	27 256.90	
	大豆	2 541.98	2 302.22		芒果	8 064.92	7 268.65	
	木薯	11 561.74	10 817.66		甜瓜	24 822.28	21 209.77	
	花生	1 641.91	1 457.10		草莓	21 195.98	13 846.44	
	油菜籽	1 977.83	1 653.93		菠萝	24 292.46	18 831.00	
	甘蔗	70 554.96	65 082.82		葡萄	10 211.13	8 524.61	
	甜菜	56 137.19	42 226.08		畜牧产品	禽蛋	22.98	—
	蔬菜	20 676.03	16 927.24	蜂蜜		0.51	—	
	茶叶	1 458.90	1 301.62	牛肉		19.57	12.47	
	高粱	1 443.42	1 326.69	鸡肉		29.10	—	
	棉花	2 201.59	1 826.49	猪肉		34.52	—	
	番茄	35 328.31	27 321.73	羊肉	4.32	2.45		
	马铃薯	19 104.26	15 981.05	牛奶	192.62	104.10		
	大麦	2 857.57	2 544.15	非木材产品	核桃	3 092.64	2 322.66	
	水产品	水产品	2 487.24		1 475.08	板栗	3 683.71	3 216.94
	木材产品	木材	1.16		1.29	油桐子	2 749.23	2 516.23

注:木材产品单位为 m³/hm²。

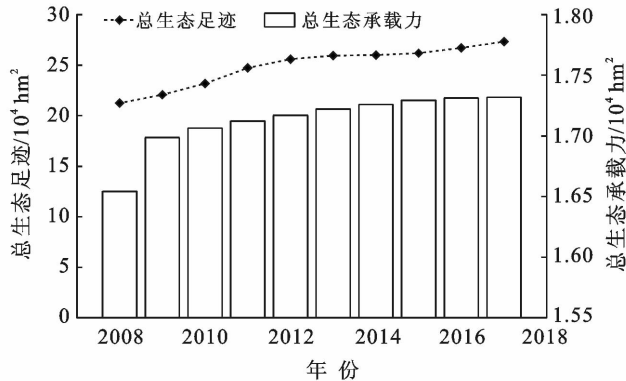


图 2 2008—2017 年中国大陆海岸带地区总生态足迹和总生态承载力变化趋势

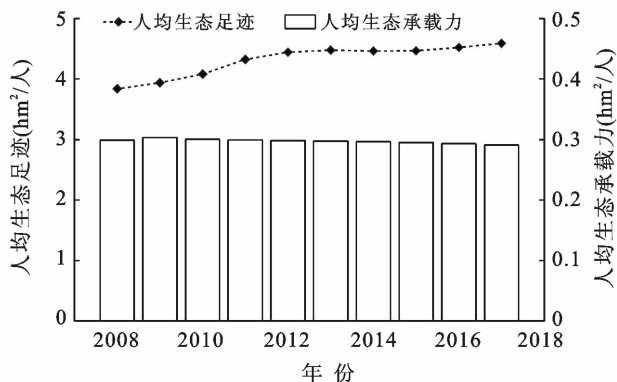


图 3 2008—2017 年中国大陆海岸带地区人均生态足迹和人均生态承载力变化趋势

分省市来看(图 4),2008—2017 年 10 a 来辽宁、河北和山东的人均生态足迹相对较大,广东、上海、浙江、福建人均生态足迹较小。从时间序列动态变化来看,辽宁、河北、天津人均生态足迹变化趋势相同,均呈现出“增加—减少”的趋势,河北、辽宁在 2008—2012 年人均生态足迹呈增加趋势,到 2012 年时最大,此后开始呈减少的趋势。天津的人均生态足迹在 2011 年时最大,此后也开始呈现出逐年下降的趋势。山东、江苏、广西整体呈上升的趋势。广西的人均生态足迹呈现出逐年增加的趋势。

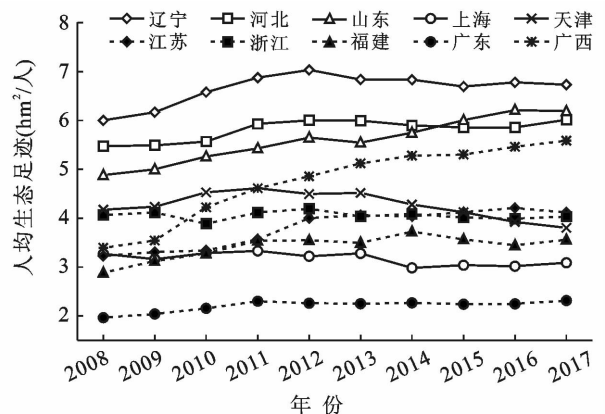


图 4 2008—2017 中国大陆海岸带各省市人均生态足迹变化趋势

在组分结构方面,2008—2017 年中国大陆海岸带区域人均生态足迹占比最大的是化石燃料用地,其次

是草地、耕地,其他土地类型如林地、水域、建筑用地比重较小。从贡献率来看,化石燃料对人均生态足迹的贡献率从 2008 年的 54.36% 上升到 2017 年的 58.65%(图 5)。中国大陆海岸带区域各省市之间生态足迹组分占比存在差异。2017 年十个省市各组分人均生态足迹占比计算结果(图 6)可知,大部分省市化石燃料用地占比最大,广西省则以林地占比最大,约占 47.26%。

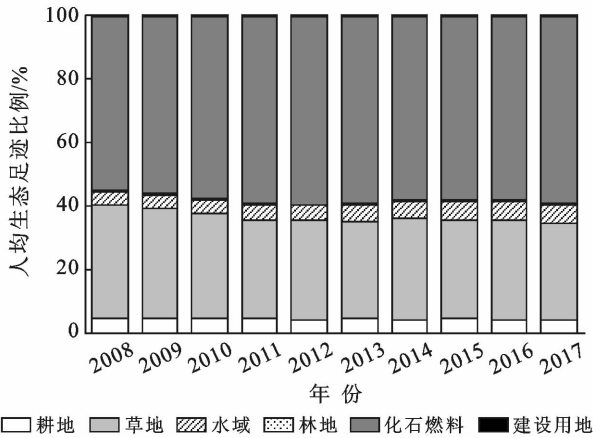


图 5 2008—2017 年中国大陆海岸带区域各组分生态足迹比例

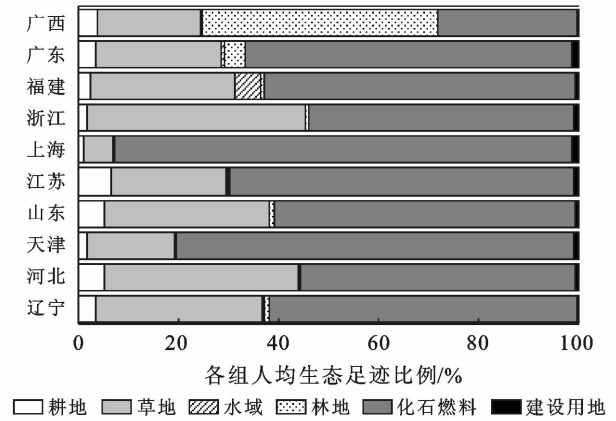


图 6 2008—2017 年中国大陆海岸带区域各省市各组分人均生态足迹比例

对于人均生态承载力而言(表 5),广西人均生态承载力始终最大,上海人均生态承载力始终最小,这与自然资源禀赋有极大的关系,广西自然资源丰富,尤其是林地和草地资源丰富,上海作为 4 大直辖市之一,自然资源禀赋较差,同样地,同为直辖市的天津,资源短缺是其城市发展的短板,因此,天津人均生态承载力在中国大陆海岸带 10 个省市中处于仅高于上海的位置。中国大陆海岸带地区 10 个省市人均生态承载力也较为稳定,变化幅度不明显。

表 5 2008—2017 年中国大陆海岸带各省市人均生态承载力

hm²/人

省份	人均生态承载力									
	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
辽宁	0.387 1	0.422 2	0.422 9	0.423 5	0.425 2	0.428 1	0.428 5	0.430 1	0.428 0	0.427 1
河北	0.256 1	0.267 4	0.262 7	0.262 3	0.261 3	0.260 2	0.259 2	0.258 6	0.258 0	0.256 9
天津	0.124 6	0.124 2	0.118 5	0.115 3	0.110 8	0.107 4	0.104 7	0.103 0	0.102 4	0.103 0
山东	0.236 3	0.242 4	0.240 5	0.240 1	0.239 7	0.239 3	0.238 4	0.237 6	0.235 6	0.233 8
上海	0.051 4	0.050 2	0.048 7	0.048 3	0.048 0	0.047 6	0.047 7	0.048 1	0.048 2	0.048 2
江苏	0.195 4	0.196 6	0.196 4	0.196 5	0.196 6	0.196 8	0.196 8	0.197 1	0.197 1	0.197 0
浙江	0.192 9	0.195 4	0.190 5	0.191 1	0.191 2	0.191 6	0.192 2	0.191 9	0.190 7	0.189 3
福建	0.624 2	0.624 7	0.621 0	0.617 5	0.613 9	0.610 8	0.606 7	0.602 3	0.597 7	0.592 3
广东	0.256 1	0.243 4	0.237 7	0.237 6	0.236 3	0.235 9	0.234 9	0.232 8	0.230 1	0.227 0
广西	0.810 6	0.828 5	0.873 1	0.867 0	0.860 3	0.854 5	0.848 2	0.840 8	0.833 5	0.825 1

3.2 足迹深度分析

足迹深度表示自然资本流量或自然资本存量的消耗程度,从图 7 可以看出,2008—2017 年,中国大陆海岸带区域足迹深度呈逐年增加的趋势,足迹深度由 2008 年的 12.841 0 扩大到 2017 年的 15.776 5,同总生态足迹和人均生态足迹变化趋势相同,2012 年是足迹深度增速变化的一个转折点,2008—2012 年足迹深度增加率为 16.06%,2012—2017 年足迹深度增加率则下降到 5.86%。从中国大陆海岸带区域生态足迹空间分布来看,中北部省市足迹深度普遍较大,南部的广西、广东、福建 3 省足迹深度则相对较

低。在 2017 年计算结果中,10 个省市的足迹深度依次为上海(64.047 1) > 天津(36.883 4) > 山东(26.480 5) > 河北(23.407 9) > 浙江(21.312 9) > 江苏(20.913 2) > 辽宁(15.759 4) > 广东(8.978 8) > 福建(6.835 1) > 广西(6.774 4),本文计算中,2008—2017 年中国大陆海岸带地区的 10 个省市足迹深度均大于 1,均处于生态赤字的状态。2017 年广西足迹深度最小为 6.774 4,这意味着广西省自然资本在 6~7 a 才能得到更新,其自然流量资本已经无法满足当地的发展需要;上海足迹深度最大,为 64.047 1,已经处于严重的生态赤字状态,依赖于自然资本存量的供给;

中国大陆海岸带区域人均足迹深度则位于江苏省和辽宁省之间。由此可见,中国大陆海岸带区域处于不可可持续发展的状态。

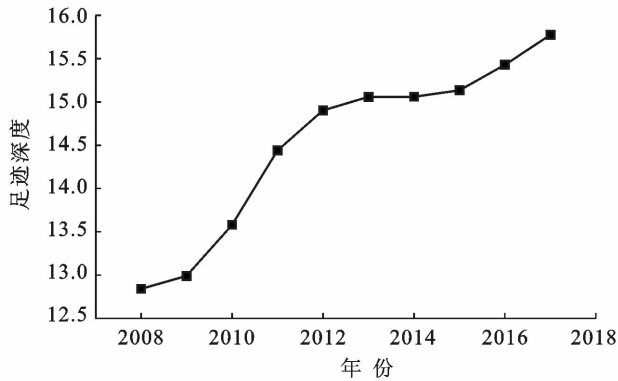


图 7 2008—2017 年中国大陆海岸带地区足迹深度变化趋势

3.3 驱动因素分析

在构建 PLS 模型中,综合考虑预测误差 PRESS 最小原则和交叉有效性(Q^2)大于 0.097 5 原则提取成分 5 个有效成分, $R_x^2(\text{cum})=0.999$, $R_y^2(\text{cum})=0.946$, $Q^2=0.829$,说明模型对 X,Y 的解释能力分别达到 99.9% 和 94.6%,对模型 Y 的预测也达到 82.9%,此外,由 SIMCA-P 14.0 软件进行特异点识别和预测分析,结果显示样本点均位于特异点识别图内,分布较为集中,因此回归模型精度和预测水平较高,回归模型拟合较好。在此基础上,得到经标准化的中国大陆海岸带关于生态足迹和足迹深度的标准化回归方程:

$$Y_1 = 23.0483 + 0.1486A + 1.6615B - 0.6878C - 0.6015D + 0.1118E + 0.5267F \quad (2)$$

$$Y_2 = 14.0949 + 0.2482A + 1.3396B - 0.3690C - 0.4289D + 0.0632E + 0.2517F \quad (3)$$

式中:A,B,C,D,E,F 分别对应表 1 的 6 个目标层。

由式(2)—(3)可以看出,经济发展、城市规模、区际交流和环境污染的回归系数为正值,与生态足迹、足迹深度正相关,经济快速发展、城市规模扩大、区际交流、环境污染加大了对自然资本的消耗和生态环境的压力,因此带来中国大陆海岸带区域生态足迹的扩大和足迹深度的加深。生态建设和科学技术回归系数为负值,在一定程度上,可以缓解该区域的生态赤字状况。

在偏最小二乘回归分析中,变量投影重要性(variable importance in the projection, VIP)可以反映不同驱动因子对因变量影响的重要程度。VIP 大于 1 时,因子非常显著;当 VIP 的值介于 0.5 与 1 之

间,因子较为显著;当 VIP 小于 0.5 时,则为不重要的因子。按驱动因素对解释生态足迹和足迹深度的重要程度由大到小排序:经济发展(1.210 2)>城市规模(1.153 4)>科学发展(1.132 6)>生态建设(0.900 6)>环境污染(0.751 4)>区际交流(0.738 9),其中经济发展、城市规模和科学发展的 VIP 值大于 1,说明对中国大陆海岸带区域生态足迹和足迹深度有显著影响。

4 讨论与结论

4.1 讨论

三维生态足迹扩展模型与三维生态足迹模型比较,其将足迹深度的取值范围进行了扩展,自然资源流量和自然资源存量占用在核算上能够统一。与中国其他地区相比,东部沿海省市资本流量占用率高,自然资源利用可持续性相对较弱^[29]。通过三维生态足迹扩展模型计算结果显示 2017 年中国大陆海岸带区域人均生态足迹为 4.590 1 $\text{hm}^2/\text{人}$,足迹深度为 15.776 5,说明该区域需要大量的存量资本消耗来满足自身发展需要,已处于较为严重的生态赤字状态。

从驱动因素来看,经济发展、环境污染、城市规模和区际交流是中国大陆海岸带区域生态足迹和足迹深度的重要驱动因素。经济发展是中国大陆海岸带地区生态足迹和足迹深度增长最为重要的原因。但就中国大陆海岸带地区各省市而言,其生态足迹影响因素存在不同。辽宁省作为中国重工业基地,GDP 增长和能源消费增加是导致生态足迹增加较为重要的因素^[30]。河北省是人口和农业大省,城镇居民消费支出、第一产业产值、能源消费和社会消费品零售总额是影响对其生态足迹影响最大的 4 个因素;天津资源相对短缺是典型的“二、三、一”产业结构发展城市,第二产业产值和第三产业产值对其生态足迹影响较大^[31]。从整体来看,近 10 a 来,中国大陆海岸带区域地区生产总值年均增长 14.26%,经济总量的快速增加会导致自然资源的过度消耗,此外,以煤炭为主的化石能源消费导致环境污染也增大了该地区的生态压力,能源生态足迹比重增大。城市规模扩大对生态足迹和足迹深度的影响主要表现在两方面,首先人口增多会增加对自然资源的需求,从而导致更多的资源占用及能源消费;另外,城市规模扩大也体现在城市建设用地面积的增加,加速了自然资本由生物资源逐渐转向城市基础设施建设的过程,自然资本利用结构发生改变。生态建设对于减少环境污染和生态破坏有着积极的作用,科学技术提高可以提高资源利用效率和资源供给能力,因此,对于中国大陆海岸带区域,应该增加生态建设,如增加绿化面积,提高绿地覆

盖率;提高科学技术水平和资源利用效率;改善优化自然资本利用结构。

三维生态之扩展模型仍采用通过均衡因子和产量因子调整后各地类面积加和求得生态足迹和生态承载力,在一定程度上忽视了不同地类生产力和功能的不可替代性,但是该计算方法实现了各地类生产力和功能在量纲上的统一,研究结果可以反映研究区域内的总体情况,对中国大陆海岸带地区提高可持续发展的水平有一定指导意义。从区域数据获取层面考虑,本文选取 2008—2017 年的数据,数据获取过程中存在局限性,以致研究结果与研究区域的实际情况存在些许差异,但未对整个研究造成较大的影响。此外,目前关于区域闭合系统生态足迹的研究较多,很少考虑区域间的物质流动,因此,核算开放系统的生态足迹,即综合考虑本地与外界物质流动的生态足迹核算有待进一步研究。

4.2 结论

三维生态足迹扩展模型是衡量一个地区可持续发展的一个重要方法。本文通过计算中国大陆海岸带区域及该区域各省市生态足迹变化来评估可持续发展状况,并在此基础上利用偏最小二乘回归模型来揭示生态足迹和足迹深度的驱动因素,研究表明:

(1) 2008—2017 年中国大陆海岸带地区总生态足迹、人均生态足迹呈现出逐年增长的趋势,总生态足迹和人均生态足迹变化相同,2008—2012 年间增长较快,2012—2017 年增长缓慢。

(2) 各省市人均生态承载力变幅不大,广西人均生态承载力始终最大,上海人均生态承载力始终最小。

(3) 足迹深度由 2008 年的 12.841 0 增长到 2017 年的 15.776 5,生态赤字进一步加大,可见自然资本流量早已不能满足该区域的发展,严重依赖于自然资本存量,可持续发展能力较差,分省来看 2017 年人均足迹深度最大值和最小值分别为上海(64.047 1)和广西(6.774 4)。此外,足迹深度在空间分布上呈现出中北部省市相对于南部省市相对较高的现象。

(4) 经济快速发展、城市规模扩大、环境污染加剧和区际交流的扩大是该区域生态足迹和足迹深度增加的主要驱动力,生态建设和科学技术提高对缓解生态足迹和足迹深度加大有着积极作用。

[参 考 文 献]

[1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out [J]. *Environment and Urbanization*, 1992,4(2):121-130.
[2] Wackernagel M, Rees W E, Testemale P. Our ecologi-

cal footprint: Reducing human impact on the earth [J]. *Population & Environment*, 1996,1(3):171-174.

- [3] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics*, 1999,29(3):375-390.
[4] 方恺,李焕承. 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*, 2012,27(12):1995-2005.
[5] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation [J]. *Ecological modelling*, 2009,220(20):2819-2823.
[6] 徐中民,张志强,程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. *地理学报*, 2000,55(5):607-616.
[7] 张志强,徐中民,程国栋,等. 中国西部 12 省(区市)的生态足迹[J]. *地理学报*, 2001,56(5):599-610.
[8] 蔺海明,颀鹏. 甘肃省河西绿洲农业区生态足迹动态研究[J]. *应用生态学报*, 2004,15(5):827-832.
[9] 晋雪茹,李晓贤,张洪铭,等. 基于三维生态足迹扩展模型的浙江省自然资本动态评估[J]. *生态学杂志*, 2019,38(7):2177-2183.
[10] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析:选取 11 个国家为数据源[J]. *生态学报*, 2015,35(11):3766-3777.
[11] 靳相木,柳乾坤. 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*, 2017,37(9):2982-2993.
[12] Ramesh R, Chen Z, Cummins V, et al. Land-ocean interactions in the coastal zone: Past, present & future [J]. *Anthropocene*, 2015,12:85-98.
[13] Brown C, Unep N E, Corcoran E, et al. Marine and coastal ecosystems and human well-being: synthesis [M]. *United Nations Environment Programme*, 2006.
[14] 闫麒. 基于海洋生态系统服务功能的海岸带空间规划探讨:以厦门海沧湾为例[D]. 福建 厦门:华侨大学,2015.
[15] 魏超,叶属峰,过仲阳,等. 海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用:以南通市为例[J]. *生态学报*, 2013,33(18):5893-5904.
[16] 杜培培,侯西勇. 基于多源数据的中国海岸带地区人口空间化模拟[J]. *地球信息科学学报*, 2020,22(2):207-217.
[17] 罗敏. 2015 年中国海岸带盐沼遥感监测与生态服务价值评估[D]. 浙江 杭州:浙江大学,2019.
[18] 刘百桥,孟伟庆,赵建华,等. 中国大陆 1990—2013 年海岸线资源开发利用特征变化[J]. *自然资源学报*, 2015,30(12):2033-2044.
[19] Meng Weiqing, Hu Beibei, He Mengxuan, et al. Temporal-spatial variations and driving factors analysis of coastal reclamation in China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017,191:39-49.

- in Ciliwung Watershed [C] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2017, 54(1): 012026.
- [10] 费兵强, 韩炜, 马霄华, 等. 2010—2015 年焉耆盆地 LUCC 特征分析及预测[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(3): 395-404.
- [11] 王娟, 张飞, 张月, 等. 艾比湖区域水质空间分布特征及其与土地利用/覆被类型的关系[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 7971-7980.
- [12] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 米热古丽·艾尼瓦尔, 麦尔丹·阿不拉, 等. 新疆焉耆盆地地下水地球化学特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 263-268.
- [13] 艾克热木·热合曼. 焉耆盆地主要分水枢纽工程对植被覆盖变化的影响[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2020.
- [14] 李建涛. 焉耆盆地绿洲气候对土地利用变化的响应[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.
- [15] 崔宏. 干旱区绿洲水环境与土地利用/覆盖变化响应关系研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2017.
- [16] 汪昌树. 焉耆盆地绿洲区水体硝态氮量演变特征与趋势研究[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [17] 秦国强. “三条红线”制度控制下焉耆盆地灌溉农业可持续发展研究[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.
- [18] Liu Jiyuan, Liu mingliang, Tian Hanqin, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(4): 442-456.
- [19] Liu Jiyuan, Liu mingliang, Deng Xiangzheng, et al. The land use and land cover change database and its relative studies in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2002, 12(3): 275-282.
- [20] 李敬洋, 王震, 陈怡, 等. 基于 BP-GIS 的京津冀碳钢土壤腐蚀速率地图研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1151-1158.
- [21] 张洁, 焦树林, 赵宗权, 等. 基于 GIS 的百花湖流域土地利用变化与水质响应[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(3): 14-18.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 14848-2017 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 段峥嵘, 祖拜代·木依布拉, 夏建新, 等. 近 25 年阿克苏绿洲土地利用时空变化及其驱动力分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 413-426.
- [24] 张德锂, 刘林山, 王兆锋, 等. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2865-2875.
- [25] 哈丽旦·司地克, 玉素甫江·如素力, 海米提·依米提. 新疆焉耆盆地人类活动与气候变化的效应机制[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5750-5758.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJ/T 340-2016 绿化种植土壤[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [27] 李艳菊, 丁建丽, 米热古力·艾尼瓦尔. 渭一库绿洲土壤剖面盐分分布特征及驱动因子分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 58-65.
- [28] 代述勇, 雷加强, 赵景峰, 等. 塔里木盆地南缘策勒绿洲区地下水 TDS 空间变异及水化学特征分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 722-729.
- [29] 李彬, 史海滨, 张建国, 等. 节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 99-110.
- [30] 刘旭艳, 张心昱, 袁国富, 等. 近 10 年中国典型农田生态系统水体 pH 和矿化度变化特征[J]. 环境化学, 2019, 38(6): 1214-1222.

(上接第 259 页)

- [20] 程艳妹, 任彩凤, 郑欣, 等. 淮南市三维生态足迹及其驱动因子研究[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 106-113.
- [21] 董建红, 张志斌, 张文斌. 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, 2019, 38(10): 3075-3085.
- [22] Wang Mingquan, Liu Jingshuang, Wang Jinda, et al. Ecological footprint and major driving forces in West Jilin Province, Northeast China [J]. Chinese Geographical Science, 2010, 20(5): 434-441.
- [23] Yang Yi, Ling Sun, Zhang Ting, et al. Three-dimensional ecological footprint assessment for ecologically sensitive areas: A case study of the Southern Qinling piedmont in Shaanxi, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 540-553.
- [24] 马明德, 马学娟, 谢应忠, 等. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 682-689.
- [25] 杨春华, 杨玲. 偏最小二乘建模及其多重共线抑制能力分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 523-526.
- [26] 谢鸿宇, 叶慧珊. 中国主要农产品全球平均产量的更新计算[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2008, 7(1): 76-80.
- [27] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1550-1559.
- [28] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592-597.
- [29] 刘晓星. 基于三维生态足迹的中国自然资本利用研究[D]. 辽宁 大连: 辽宁师范大学, 2019.
- [30] 郑怀军. 辽宁省生态足迹动态分析及驱动因素研究[D]. 辽宁 大连: 辽宁师范大学, 2013.
- [31] 王琳琳. 京津冀三维生态足迹演变趋势及驱动因素研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.