

DOI: 10.5846/stxb201803010409

马赫,张天海,罗宏森,唐明方,石龙宇.沿海快速城市化地区能值生态足迹变化分析.生态学报,2018,38(18): - .

Ma H, Zhang T H, Luo H S, Tang M F, Shi L Y. Analysis of energy ecological footprint change of coastal rapid urbanization areas. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

沿海快速城市化地区能值生态足迹变化分析

马 赫^{1,2}, 张天海³, 罗宏森³, 唐明方⁴, 石龙宇^{1,2,*}

1 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 四川师范大学, 成都 610066

4 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

摘要:当前我国经济的快速发展和生态环境之间的矛盾日益显著,不利于城市可持续发展。生态足迹目前已成为普遍接受的可持续发展指标,选定生态足迹改进方法——能值生态足迹模型,以城市化地区厦门市为研究区进行计算分析,以期发现快速城市化过程中可能面对的问题。首次计算分析了厦门市 1980 年至 2010 年的能值生态足迹动态变化,并对其可持续发展进行了评价。结果表明,30 年间厦门市人均生态足迹需求从 1980 年的 8.6 gha 持续增长至 2010 年的 52.8 gha,而供给方面的人均生态承载力却从 1980 年的 181.2 gha 持续下降为 47.5 gha,2009、2010 年该市由生态盈余转为生态赤字。同时,从生态足迹组分及其比例来看,30 年间化石燃料用地和建设用地的生态足迹增长迅速,二者对厦门市人均能值生态足迹变化贡献最大,并且成为 2000 年后总体足迹中所占比例最大的组分,各自占比超过 20%。结果分析显示,厦门市开始面临逐渐加重的生态环境压力,需要开始重视其可持续发展。因此调整厦门市的产业结构和控制城市化发展非常必要。一方面,应该降低第二产业的比例,降低对化石能源的使用,同时促进第三产业的发展 and 第一产业的现代化,以此为城市提供更多的资源供给并降低资源需求,特别是化石能源的需求。

关键词: 能值;生态足迹;城市化;动态变化;可持续发展

Analysis of energy ecological footprint change of coastal rapid urbanization areas

MA He^{1,2}, ZHANG Tianhai³, LUO Hongsen³, TANG Mingfang⁴, SHI Longyu^{1,2,*}

1 Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China

4 Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: At present, the contradiction between the rapid development of the economy and the ecological environment is becoming more obvious in China and is not conducive to sustainable urban development. An ecological footprint is generally accepted as an indicator of sustainable development. We aimed to find possible problems due to rapid urbanization in Xiamen City by selecting an improved ecological footprint method, the energy ecological footprint model (EEF). We analyzed the change in the energy ecological footprint from 1980 to 2010 and evaluated sustainable development. Over 30 years in Xiamen City, the per capita EEF demand increased from 8.6 gha in 1980 to 52.8 gha in 2010, while the per capita energy bio-capacity decreased from 181.2 gha in 1980 to 47.5 gha in 2010. In 2009 and 2010, Xiamen's ecological reserve changed to an ecological deficit. At the same time, the ecological footprint of fossil fuels and the construction on land rapidly

基金项目:国家自然科学基金项目(41501602)

收稿日期:2018-03-01; 修订日期:2018-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyshi@iue.ac.cn

increased over 30 years. These two make the greatest contribution to the ecological footprint per capita in Xiamen City, which had the largest proportion after year 2000, and each of them accounted for more than 20%. The analysis showed that Xiamen city is increasing the pressure on the ecological environment, and it is important to focus on sustainable development. Therefore, it is necessary to adjust industrial structures and control urbanization in Xiamen. It is important to reduce the proportion of fossil fuels consumed by secondary industries, as well as to ensure the supply of resources and reduce the demand and consumption of resources, especially the demand for fossil energy. Xiamen should promote the development of tertiary industries and the modernization of primary industries.

Key Words: emergy; ecological footprint; urbanization; dynamic change; sustainable development

最先研究能值(emergy)的是 Odum 等学者^[1-2]。能值分析就是以能值为基准,把生态系统不同类、不可比的能量转换成同一标准——能值来分析和衡量,以评价其在系统中的作用和功能。由于任何形式的能量均源于太阳能,即任何产品、资源或劳务形成过程中直接或间接消耗的太阳能。因此,在实际应用中以“太阳能值”来衡量各种能量的能值就是其所具有的太阳能值,单位为太阳能焦耳。这种方法的优点是将生态系统中的各种不同性质、不同来源的能量通过能值转化率转化为具有统一量纲的太阳能值,系统中各种不同类别、不同性质的能量转化统一到共同的标准尺度,就可以将它们进行比较和汇总。自从能值理论建立以来,能值理论和分析方法备受国际生态学界、经济学界和政府决策者的关注。EEF 模型的独特优势使其能提高区域生态承载力计算的稳定性和精确性,为生态系统可持续评价提供了新思路。当前,我国正处于工业和城市化快速发展阶段,同时也面临严重的生态环境问题^[3]。因此,运用有特殊优势的能值生态指标,对快速城市化地区进行研究具有重要的理论和现实意义。

生态足迹方法通过比较人类活动消耗自然资源与自然生态系统的承载力能力进行对比,自其建立以来就成为反映可持续发展的重要指标^[4-5],不过其计算方式仍然受到广大学者的质疑^[6]。一些学者声称能值评价可以转化为可量化的空间均衡值,提供计算生态足迹的其他方式^[7]。因此 Zhao 尝试在这个途径上做一些先驱性的工作,这种新方法主要的目的是实现对人类对自然资源的需求和自然服务供给之间转换的理解^[8-9]。Zhao 将建立的基于能值分析的生态足迹模型应用于甘肃省的生态足迹实证研究之中,并与传统生态足迹模型进行了对比^[8]。Chen 等利用能值生态足迹模型计算了中国在 1953—2006 年五十多年之间的能源消费的生态足迹变化^[10]。Siche 等以秘鲁为例对能值分析与生态足迹模型的结合进行了探索^[11]。国内近几年针对生态足迹模型的研究逐渐增多^[12-14],也有其他学者对能值生态足迹做了研究与应用^[15-17]。总体来说,基于能值法计算生态足迹研究起步较晚,相关研究不多,尤其对城市方面的研究较少,但该方法在评价城市生产系统的可持续性方面具有系统性、客观性以及可量化等特点,既考虑系统自身的持续性,也将系统外部性纳入其评价指标体系,能够更全面、更准确地测度资源消耗及环境影响。

本文应用有特殊优势的能值生态足迹模型组分法,选择经济发展、城镇化和资源利用、环境保护之间矛盾突出的典型城市——厦门市,研究其从 1980 年到 2010 年 30 年间对生物、能源资源消耗的动态变化情况。探讨快速城市化地区在 30 年改革过程中工业化、城市化发展的资源消耗特征,面临的问题和可能的解决途径。尤其是着重分析影响资源消耗的关键因素,时间序列上动态变化的差异性,以期缓解生态环境压力、保护区域资源,实现城市可持续发展提供对策和参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

本文选择沿海地区处于快速城市化进程中的厦门市为研究区。该市位于福建省东南,24°23′—24°54′N、117°53′—118°26′E 之间,全市陆地面积 1699.39 km²,海域面积 390 km²,截至 2015 年底,全市总常住人口为 386 万人。厦门属南亚热带海洋性季风气候。年平均气温 20.9℃,年平均降水量 1143.5 mm,可更新能源如海

洋潮汐能、雨水势能、风能、太阳能等比较充足^[18-19]。

厦门市由厦门本岛、鼓浪屿岛、北部内陆部分及附近海域组成,其地势由南向北倾斜。厦门市风景优美,早在 1995 年厦门市就将城市性质确定为“我国经济特区、东南沿海重要的中心城市、港口和风景旅游城市”。2009 年,厦门市发展战略的城市定位为海峡西岸重要的中心城市,厦门市的城市空间不断拓展,努力营建厦漳同城化,同时不断推进两岸金融中心、东南国际航运中心、大陆对台贸易中心的建设。2014 年 12 月 12 日起,国务院决定设立中国(福建)自由贸易试验区,其中厦门片区共 43.78 km²^[18-19]。

但是由于厦门市土地面积狭小,境内多丘陵山地,耕地资源十分有限,在快速城市化过程中大量耕地和滩涂被改变为建设用地,经济、城市化发展和资源环境之间矛盾尖锐,厦门市的可持续发展面临极大的挑战。因此本文选择厦门市作为研究区,对于研究城市化与可持续发展健康协调问题具有典型代表性和现实意义。

1.2 数据来源

所有数据来源如下:

(1) 该年份的生物资源、能源消耗数据,生物资源土地数据来自厦门市统计局^[18]。

(2) 访问世界粮农组织产量年鉴网站,获取 1980 到 2010 年全球各种农产品的产量和收获面积,如肉类、蔬菜、木材、水果等^[19],确定 1980 到 2010 年的全球平均产量。计算每种产品的全球平均产量。

(3) 生物、能源资源的太阳能值通过中国统计局、能源足迹全球平均产量、中国国家标准(GB 2589—1990)的能源折算系数等折算得到^[20-21]。

(4) 每种消耗单位千克的能量含量由能值评价手册确定^[2]。每种消耗品的能值转换率由 Ulgiati 文章中获得^[1]。

全球能量密度、世界表面积等参数由查询 Ortega 文章得到^[11]。能值转换率由查询金丹等文章得到^[22-24]。能值生态承载力计算所用其他参数由查询陈惠、黄英志、赵云华文章得到^[25-27]。

1.3 能值生态足迹

1.3.1 计算区域能值密度

全球可再生能源的总量是生态承载力的基础,也是可持续发展的基础。引入全球平均能值密度作为太阳能值与生态足迹互换的基础。全球平均能值密度等于全球一年中的自然能值数量与全球土地面积之比。

可以用下面的公式来表达:

$$\text{GED} = \text{TRE} / \text{WSA} \quad (1)$$

式中,GED 是全球能量密度(sej/hm²);TRE 是地球可更新能源(sej/a),其值为 1.583×10²⁵ sej/a;WSA 是世界表面积(hm²),其值为 5.1×10¹⁰ hm²。

因为全球能量密度代表一个平均值,可以用全球公顷 gha 为单位(global hectare)。因此,全球平均能量密度是 3.1×10¹⁴ sej gha⁻¹ a⁻¹^[10-11]。

1.3.2 计算生态承载力

自然资源可以分为可更新能源和不可更新能源,由于不可更新资源的消耗速度要快于其再生速度,随着人类的不断利用,会日益枯竭,只有利用可更新资源,生态承载力才具有可持续性,区域的发展才具有连续性。因此,在计算生态承载力时,只考虑可更新资源的能值(潮汐能、海浪能、太阳能、地球旋转能、风能、雨水化学能、雨水势能、地热能等)。

一切自然资源所包含的能量均来源于太阳能,为了避免重复计算,取可更新资源人均能值中的最大值,再折算出相对应的生态生产性土地面积,作为研究区域的人均生态承载力值。

能值生态承载力计算方式如下:

$$\text{EBC} = e / p_1 \quad (2)$$

式中,EBC 是人均生态承载力(gha);e 为可更新资源的人均太阳能值;p₁ 为全球平均能值密度(sej gha⁻¹ a⁻¹)。

1.3.3 计算生态足迹

计算各主要消费项目的人均太阳能值。首先划分消费项目,然后引入能值转换率,计算区域各消费项目的太阳能值,将能值转换率乘以给定项目的能量,该给定的能量就换算为能值。最后计算各消费项目的人均太阳能值,并将各消费项目的人均能值换算成对应的生态生产性土地面积。计算生态足迹时,其包含的消费项目主要分为两类:生物资源消费和能源资源消费。生物资源消费分为农、林、畜和水等大类产品,大类下还有细小的分类,其中农产品包括粮食、蔬菜、食糖、油类、水果等,畜产品包括牛肉、羊肉、猪肉、家禽、蛋类、奶类等,水产品即鱼虾等。能源资源消费项目的划分主要根据中国能源统计年鉴的划分,主要包括煤炭、油类和电力等。大类下也有细小的分类,其中煤包括洗精煤、原煤、焦炭等。

能值生态足迹计算方式如下^[8,10-11]:

$$EEF = \sum (a_i) = \sum \left(\frac{c_i}{P_2} \right) \quad (3)$$

式中,EEF 是人均能值生态足迹 (gha); i 是自然资源种类; a_i 是 i 种资源的人均生态足迹 (gha); c_i 是 i 种资源的人均能值 (sej); P_2 是区域能值密度 (sej $m^{-2} a^{-1}$)。

对于 c_i 其计算公式为:

$$c_i = C_i \times E_i \times T_i \quad (4)$$

式中, C_i 为 i 种资源的消耗量 (kg); E_i 为 i 种资源的含能量 (J); T_i 为 i 种资源的能值转换率 (sej/J)

1.3.4 计算生态赤字或盈余

将计算的各消费项目的人均能值生态足迹与能值生态承载力进行分别汇总和比较,计算得到生态赤字 (ED, ecological deficit) 或生态盈余 (ER, ecological reserve),从而衡量研究区域的可持续发展状况。

2 结果

厦门市 1980—2010 年间能值生态足迹计算结果如下 (表 1):

表 1 厦门市 1980—2010 年能值生态足迹、生态承载力和生态盈余/(gha)
Table 1 EEF, EBC and EER in Xiamen city during the period of 1980—2010

年份 Year	能值生态足迹 EEF Emergy ecological footprint	能值生态承载力 EBC Emergy bio-capacity	能值生态盈余 EER Emergy ecological reserve
1980	8.6	181.2	172.6
1985	11.4	164.8	153.4
1990	17.3	151.3	134.0
1995	29.0	139.4	110.4
2000	28.8	82.5	53.7
2005	41.4	62.0	20.6
2010	52.8	47.5	-5.3

gha:全球公顷, global hectare

从计算结果来看,1980—2010 年人均能值足迹分阶段上升,人均能值承载力逐年下降。30 年中,除了 2009、2010 年,人均盈余均为正值,说明此前长期时间内人类活动压力尚未超过生态环境的承载力。

能值生态足迹的计算,以 2010 年为例,各类资源的消耗,各类型生物生产性土地面积及生态足迹的计算过程和结果见表 2。按照公式(3)计算得到该年厦门市能值-生态足迹账户结果见表 2,全年人均能值-生态足迹为 52.8 gha。从计算结果组分来看,人均耕地能值足迹为 4.2 gha,人均水域能值足迹为 0.4 gha,人均草地能值足迹为 2.3 gha,人均化石燃料用地能值足迹为 5.5 gha,它们对能值足迹的贡献率达到了 36.4%,反映出厦门市对生态环境造成消耗和压力最大的是能源工业。

表 2 生态足迹中生物资源和能源资源消耗计算过程

Table 2 Calculation process of bio-resource and energy consumption of ecological footprint

项目 Item	消耗量 Amount consumed/ kg	折算系数 Conversion coefficient (×J/kg)	能值转换率 Transformity (sej/J)	能值 Emergy (sej)	能值密度 Emergy density/ (sej gha ⁻¹ a ⁻¹)	能值足迹 Emergy ecological footprint/gha	分类总计 Total/gha	人均足迹 Emergy ecological footprint per capita/ (gha/人)	
生物资源 Bio-resource	粮食	224371351.4	13810000	35900	1.11×10 ²⁰	3.1×10 ¹⁴	358834.2	11362559(耕地)	4.2
	薯类	1226381.5	2302000	2700	7.62×10 ¹⁵	3.1×10 ¹⁴	24.58855		
	豆类	1779679.2	18420000	690000	2.26×10 ¹⁹	3.1×10 ¹⁴	72965.7		
	油脂类	25346680.9	25530000	690000	4.46×10 ²⁰	3.1×10 ¹⁴	1440321		
	猪肉	83571857.9	11000000	3170000	2.91×10 ²¹	3.1×10 ¹⁴	9400486		
	蔬菜	367567377.4	2790000	27000	2.77×10 ¹⁹	3.1×10 ¹⁴	89318.87		
	食糖	1026738	2300000	79900	1.89×10 ¹⁷	3.1×10 ¹⁴	608.6569		
	木材采伐量(m ³)	14525	1440000	34900	7.3×10 ¹⁴	3.1×10 ¹⁴	2.354737	1104539(林地)	0.4
	干鲜瓜果	117463603.4	5500000	530000	3.42×10 ²⁰	3.1×10 ¹⁴	1104537		
	水产品	88776994.7	11000000	2000000	1.95×10 ²¹	3.1×10 ¹⁴	6300303	6300303(水体)	2.3
	牛肉	3260557.2	11000000	5330000	1.91×10 ²⁰	3.1×10 ¹⁴	616666	14985932(草地)	5.5
	羊肉	2027946.7	11000000	5330000	1.19×10 ²⁰	3.1×10 ¹⁴	383543.6		
	禽类	38169238.6	11000000	5330000	2.24×10 ²¹	3.1×10 ¹⁴	7218911		
	蛋类	24251993.3	7000000	2000000	3.4×10 ²⁰	3.1×10 ¹⁴	1095251		
	乳制品	22982793.1	45000000	1700000	1.76×10 ²¹	3.1×10 ¹⁴	5671560		
能源资源 Energy resource	标准煤	6522657840	29307600	66900	1.28×10 ²²	3.1×10 ¹⁴	41254305	41254305 (化石能源)	15.1

能值生态承载力的计算中,以 2010 年为例,区域可更新资源能值计算结果见表 3。为避免重复计算,取可更新能源中最大值计算生态承载力^[24],即 2010 年厦门市最大可更新能源能值为 3.02×10^{21} sej。按照公式(2),计算得到 2010 年厦门市人均能值-生态承载力为 47.52 gha。

表 3 2010 年可更新资源能值计算结果

Table 3 Emergy calculation results of renewable resources in 2010

项目 Item	能量 Energy/J	能值转换率 Transformity / (sej/J)	太阳能值 Emergy/sej
太阳能能量 Solar energy	8.8931×10^{18}	1	8.8931×10^{18}
风能能量 Wind energy	3.10727×10^{18}	2510	7.79924×10^{21}
雨水化学能 Chemical energy of rainwater	8.89524×10^{15}	30500	2.71305×10^{20}
雨水势能 Rainwater potential	2.68226×10^{15}	17600	4.72077×10^{19}
地球旋转能 Earth rotation energy	2.2823×10^{15}	57600	1.3146×10^{20}
海浪能 Ocean wave energy	8.77003×10^{16}	51200	4.49026×10^{21}
潮汐能 Tidal energy	1.05477×10^{14}	51200	5.40044×10^{18}
地热能 Geothermal energy	4.37064×10^{18}	12000	5.24477×10^{22}

综合能值生态足迹和生态承载力计算结果(图 1),2010 年厦门市人均生态盈余为 -5.28 gha,表明该年份厦门市已经面临初步供不应求的生态环境压力。

通过对近 30 年人均能值足迹与承载力动态变化进行分析,结果发现:研究期内厦门市人均能值生态足迹呈阶段增加趋势,其值由 1980 年的 8.6 gha 增加到 2010 年的 52.8 gha,总增长率达 614.0%,其中 1980 年到 1990 年间比较平稳,2000 后增速明显加快。

厦门的人均能值生态承载力由 1980 年的 181.2 gha 持续下降到 47.5 gha,下降为 1980 年的 26.2%。这种情况的出现主要是由于导致人均能值生态承载力在 30 年间大幅减小。

从组分图来看(图 2),最初耕地的生态足迹最高,其次为水域,但是二者之后逐年下降,到 2010 年已成为

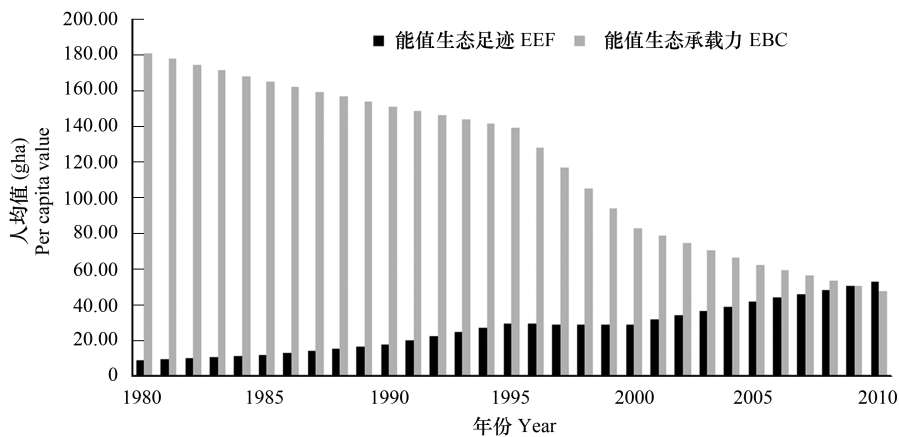


图1 能值生态足迹和生态承载力变化图

Fig.1 Component of energy ecological footprint and bio-capacity of Xiamen City

EEF:能值生态足迹,energy ecological footprint;EBC:能值生态承载力,energy bio-capacity

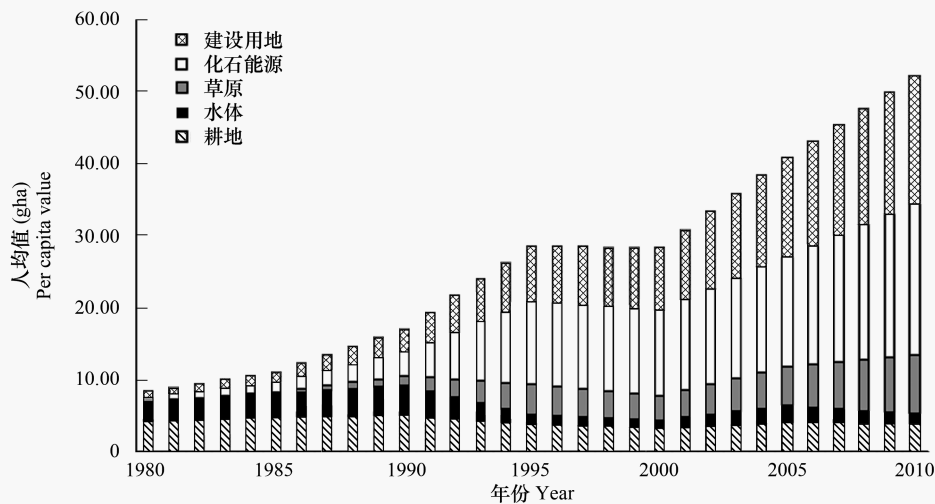


图2 能值方法计算下的各年份生态足迹

Fig.2 Energy ecological footprint of Xiamen City over 30 years

各个组分中比例最小部分。30年间化石燃料用地和建设用地的生态足迹增长迅速,二者对厦门市人均能值生态足迹变化贡献最大,并且成为2000年后总体足迹中所占比例最大的组分,各自占比超过20%。

3 讨论

从表1可以发现,30年间厦门市能值生态足迹整体增长趋势显著,增长量巨大,反映出随着厦门市工业化和城市化建设的迅速发展,各类生产、生活活动对自然资源的利用、消耗强度持续增大,居民生活水平不断提高,生态环境承受的负荷与压力日益加重。

厦门能值盈余的变化趋势是逐年缩小,由1980年的172.6 gha减少到2010年的-5.3 gha,并在2010年由生态盈余转变为生态赤字,表明从该年起,厦门市对生态环境的资源需求开始超出生态系统阈值,城市可持续发展面临压力。同时也应看到,在28年里厦门市可以一直保持生态盈余,说明境内太阳能、风能、水能、地热资源等可更新自然资源充足,具有很大的开发利用空间和潜力。

考虑到2009年厦门市的城市化率达到为88.4%(2010年11月1日零时为标准时点进行的第六次全国人口普查,常住人口353万,城镇人口312万),远高于2010年全国城市化率49.68%(2010年11月1日零时为

标准时点进行的第六次全国人口普查),因此调整厦门市的产业结构和控制城市化发展非常必要。一方面,应该降低第二产业的比例,降低对化石能源的使用,同时促进第三产业的发展 and 第一产业的现代化,以此为城市提供更多的资源供给并降低资源需求,特别是化石能源的需求。

4 结论与展望

本研究采用能值生态足迹方法,对厦门市 1980—2010 年的资源环境压力进行了时间序列的动态分析和可持续发展评价。计算分析结果显示,厦门市的能值生态足迹需求随着城市经济的发展、城市化的快速推进(建成区的快速大规模扩张)而持续增长,并且表现出明显的阶段性特征。而供给方面的能值生态承载力却在逐年持续减少,并最终在 2009、2010 年由生态盈余转为生态赤字。偏高的城市化率(88.4%,远高于全国水平 49.68%),已经出现的生态赤字(-5.3 gha),反映出厦门市目前所处的经济、城市化发展阶段和面临的生态环境压力问题,表明从该时间节点起,厦门市的可持续发展问题应当引起更进一步的重视。

能值生态足迹模型为衡量城市的可持续发展提供了一种新的度量方法,将能值理论引入到生态足迹模型中,集合了两种方法的优点,与传统生态足迹模型相比,能值生态足迹模型将物质循环与能量流动紧密结合,从能量的角度分析区域,特别是城市化进程中,人类的物质需求与生态系统服务供给的关系。而在能值计算方法中,研究区域的各种能量被统一为同一太阳能值标准,更真实准确地反映了研究区实际生态足迹现状。其中,能值方法中的能值转换率相比传统方法中的全球平均生产力因子更具有稳定性。此外,为便于将研究中生态足迹和生态承载力的计算结果与其他地区进行比较,在能值密度的选择上,计算能值-生态承载力和能值-生态足迹时都采用全球能值密度,对不同城市之间可持续发展水平的对比有重要参考意义。

能值生态足迹用能值转化率、能值密度等指标取代了传统生态足迹模型中均衡因子、产量因子、世界平均生产力等指标,虽然在一定程度上解决了传统生态足迹模型中的空间互斥性等问题,实现了对区域可持续发展的定量测算和评价,但是对于人类的主观能动作用以及城市生态系统的开放性、区域功能定位之间的差异性、生态经济系统的复杂多样性等一系列问题仍没有解决。此外,能值生态足迹模型中能值转换率的计算也比较困难。

参考文献(References):

- [1] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emery use, environmental loading and sustainability an emery analysis of Italy. *Ecological Modelling*, 1994, 73(3/4): 215-268.
- [2] Odum H T, Brown M T, Williams S B. *Handbook of Emery Evaluation, Folios 1: Introduction and Global Budget*. Gainesville: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2000; 32611-6450.
- [3] Sun D Q, Zhang J X, Hu Y, Jiang J L, Zhou L. Spatial analysis of China's eco-environmental quality: 1990-2010. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(4): 695-709.
- [4] 杨振华, 苏维词, 赵卫权. 岩溶地区水资源与经济发展脱钩分析. *经济地理*, 2016, 10: 159-165.
- [5] 张红, 陈嘉伟, 周鹏. 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. *经济地理*, 2016, 36(6): 155-160, 167-167.
- [6] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, Wackernagel M, Marchettini N. How deep is the footprint? A 3D representation. *Ecological Modelling*, 2009, 220(20): 2819-2823.
- [7] Wackernagel M, Yount J D. Footprints for sustainability: the next steps. *Environment, Development and Sustainability*, 2000, 2(1): 23-44.
- [8] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecological Modelling*, 2005, 185(1): 65-75.
- [9] Liu Q P, Lin Z S, Feng N H, Liu Y M. A modified model of ecological footprint accounting and its application to cropland in Jiangsu, China. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 154-162.
- [10] Chen B, Chen G Q. Ecological footprint accounting based on emery—a case study of the Chinese society. *Ecological Modelling*, 2006, 198(1/2): 101-114.
- [11] Pereira L, Ortega E. A modified footprint method: the case study of Brazil. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 113-127.
- [12] 周涛, 王云鹏, 龚健周, 王芳, 冯艳芬. 生态足迹的模型修正与方法改进. *生态学报*, 2015, 35(14): 4592-4603.

- [13] 谢文瑄, 黄庆旭, 何春阳. 山东半岛城市扩展模式与生态足迹的关系. 生态学报, 2017, 37(3): 969-978.
- [14] 潘洪义, 朱晚秋, 崔绿叶, 冯茂秋, 朱芳. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异. 生态学报, 2017, 37(19): 6335-6345.
- [15] 贺成龙. 三峡工程的能值足迹与生态承载力. 自然资源学报, 2017, 32(2): 329-341.
- [16] 谭德明, 何红渠. 基于能值生态足迹的中国能源消费可持续性评价. 经济地理, 2016, 36(8): 176-182.
- [17] 唐呈瑞, 逯承鹏, 杨青, 姜璐, 任婉侠, 薛冰. 东北老工业区生态安全动态演变过程及驱动力. 生态学报, 2017, 37(22): 7474-7482.
- [18] 厦门市地方志. [2017-11-08]. <http://www.fzb.xm.gov.cn/xmnpj/2002/>.
- [19] 厦门市统计局. [2017-11-08]. <http://www.stats-xm.gov.cn/tjzl/tjsj>.
- [20] FAO. [2017-11-08]. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>.
- [21] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfán I S L, García J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [22] Wackernagel M, Lewan L, Hansson C B. Evaluating the use of natural capital with the ecological footprint: applications in Sweden and Subregions. *Ambio*, 1999, 28(7): 604-612.
- [23] 李俊莉, 曹明明. 生态脆弱区资源型城市农业生态系统的能值分析——以榆林市为例. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2552-2560.
- [24] 金丹, 卞正富. 基于能值的生态足迹模型及其在资源型城市的应用. 生态学报, 2010, 30(7): 1725-1733.
- [25] 黄英志. 福建省厦门市地热资源利用前景分析. 能源与环境, 2011, (4): 74-74, 76-76.
- [26] 赵云华, 赵明亮, 简文彬, 黄德斌. 福建省地热能学科发展报告. 海峡科学, 2009, (1): 30-35.
- [27] 陈惠, 林晶, 李丽纯, 王加义, 马治国, 潘卫华. 福建省太阳总辐射计算方法及时空分布. 中国农学通报, 2009, 25(22): 291-295.