

DOI: 10.5846/stxb202012043101

孙晓瑞, 税伟, 郑佳瑜, 陶煜, 李慧. 基于能值分析的厦门城市代谢可持续性评估. 生态学报, 2021, 41(11): 4342-4353.

Sun X R, Shui W, Zheng J Y, Tao Y, Li H. Evaluation of metabolic sustainability in Xiamen based on emergy analysis. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4342-4353.

基于能值分析的厦门城市代谢可持续性评估

孙晓瑞¹, 税伟^{1,2,*}, 郑佳瑜³, 陶煜¹, 李慧¹

¹ 福州大学环境与资源学院, 福州 350116

² 福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350116

³ 福州大学至诚学院, 福州 350116

摘要:生态城市建设是中国城市转型发展的关键节点,对中国生态文明和新型城镇化发展具有推动作用。研究以中国典型的生态城市厦门市为例,基于城市代谢框架结合能值分析法,对厦门市代谢系统进行各项能值流的核算,构建 2010—2017 年厦门市能值指标评估体系,选用可持续发展指数、可持续发展能值指标、城市健康水平能值指数 3 项指标综合评价其生态可持续性,选取部分能值指标与珠海市、深圳市进行对比分析,以期为中国生态城市的可持续发展提供科学参考。结果表明:(1)2010—2017 年,厦门市总能值呈上升趋势,2017 年的总能值为 2.51×10^{24} sej,是 2010 年总能值的 1.65 倍,货币流能值显著增加,废弃物流能值下降。能值自给率由 98.30% 逐渐递增至 99.20%,能值产出率由 8.30% 逐渐递增至 15.20%,环境承载率小于 3,属于环境低负荷状态。(2)厦门市可持续发展指标处于 1—10 之间,表明其生态经济系统具有活力和发展潜力,可持续发展能值指标由 2010 年的 3.67 增加至 2017 年的 7.76,表明厦门市的可持续发展性能愈来愈好,城市健康水平能值指数由 2010 年的 6.21 上升至 2017 年的 25.80,表明厦门市生态系统处于健康可持续发展的状态。(3)厦门市与珠海市、深圳市的能值指标对比分析表明,厦门市与珠海市均处于富有经济活力与生态可持续发展潜力阶段,且厦门市代谢系统的可持续发展水平整体优于珠海市与深圳市。(4)总体来看,厦门城市代谢系统处于可持续发展阶段,生态城市的建设有利于厦门市实现生态经济的可持续发展,研究对同类型生态城市的建设与可持续发展具有理论参考价值。

关键词:城市代谢;能值分析;生态城市;可持续性;厦门市

Evaluation of metabolic sustainability in Xiamen based on emergy analysis

SUN Xiaorui¹, SHUI Wei^{1,2,*}, ZHENG Jiayu³, TAO Yu¹, LI Hui¹

¹ College of Biological Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

² Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

³ Fuzhou University Zhicheng College, Fuzhou 350116, China

Abstract: Eco-city construction is a key node in China's urban transformation and development, and plays a driving role in China's ecological civilization and new-type urbanization development. Taking Xiamen, a typical eco-city in China, as an example, by calculating the emergy flow of the urban metabolic system of Xiamen, this study constructed an emergy index evaluation system for Xiamen from 2010 to 2017 based on the combined emergy analysis of urban metabolism, selection of emergy sustainability index, emergy index of sustainable development, emergy index of urban health, comprehensive evaluation of the ecological sustainability. Some emergy indexes were compared with Zhuhai and Shenzhen, in order to provide scientific reference for the sustainable development of eco-cities in China. The results showed that (1) the total emergy of Xiamen's metabolic system presents an upward trend from 2010 to 2017, and the total emergy of 2017 is $2.51 \times$

基金项目:国家重点研发项目(2016YFC0502905)

收稿日期:2020-01-20; 修订日期:2021-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shuiweiman@163.com

10^{24} sej, which is 1.65 times of the total emergy of 2010. The emergy of money flow shows a significant increase, and the emergy of waste is gradually decreasing from 2010 to 2017. The emergy self-support ratio of metabolic system in Xiamen gradually increases from 98.30% to 99.20%, the emergy yield ratio gradually increases from 8.30% to 15.20%, and the environmental loading ratio is less than 3, which belongs to the environmental low load state. (2) The emergy sustainability index between 1—10 shows that the ecological economic system has the vitality and development potential. The emergy index of sustainable development increased from 3.67 in 2010 to 7.76 in 2017, showed that the sustainable development of Xiamen is better. The emergy index of urban health rose from 6.21 in 2010 to 25.80 in 2017, showed that Xiamen's ecological system is in a state of healthy and sustainable development. (3) The comparative analysis of the emergy index of Xiamen, Zhuhai and Shenzhen shows that Xiamen and Zhuhai are both in the stage of abundant economic vitality and great potential of ecological sustainable development, and the metabolic system of Xiamen is better than that of Zhuhai and Shenzhen in terms of sustainable development. (4) In general, under the construction of eco-city, Xiamen's urban metabolic system is in the stage of sustainable development. The construction of eco-city is conducive to the sustainable development of Xiamen's ecological economy, and this study has theoretical reference value for the construction and sustainable development of the same type of eco-city in China.

Key Words: urban metabolism; emergy analysis; eco-city; sustainability; Xiamen

城镇化的快速推进,带动经济迅猛增长,同时也令人与自然环境之间的矛盾愈发突出^[1]。因此,满足当代人需求的同时不损害后代人对资源需求的可持续发展是中国的必然选择,也是一项长期战略^[2]。生态城市是实现人与自然和谐相处、经济可持续发展、社会和谐进步的重要理论与实践探索,是城市在进入高速发展阶段后的一种转型升级,也是中国生态文明建设和新型城镇化发展的重要途径^[3]。

“生态城市”最早来源于联合国教科文组织在 1971 发起的“人与生物圈计划”^[4],随后,前苏联城市生态学家 Yanitsky 第一次提出生态城市的概念,指出生态城市就是现代人类高效和谐的栖居环境^[5]。中国生态学家马世俊和王如松^[6]在 1984 年提出建设社会—经济—自然复合生态系统的中国生态城市的思想。此后,生态城市逐渐成为中国生态学实践和研究的一个新兴领域,吸引了不同领域学者的广泛关注^[7]。目前,中国处于快速城镇化时期,生态城市建设已经成为中国城市转型发展的关键节点^[8],对厦门市生态城市建设和快速城镇化过程中可持续发展水平的研究,不仅对厦门生态城市发展具有科学参考价值,同时对同类型生态城市的可持续发展具有很好的理论借鉴价值。

不同领域对可持续发展的定义多种多样,其中较多的是从经济、技术、环境和社会这些维度进行考虑^[9]。在经济快速发展下,如何直观地识别自然环境与经济发展之间的现状关系,是目前国内外生态环境领域研究的热点^[10]。城市可持续评价已经形成各种成熟的方法与框架,如联合国环境规划署提出的“压力—状态—响应模型”^[11],被广泛用于评价人类活动对生态环境的影响程度。物质流分析法被广泛用于定量分析城市经济系统和生态系统中的直接和间接物质流^[12]。生态足迹法被用作衡量系统的生态压力和承载力^[13],为城市生态承载力提供了一套评估指标^[14]。生命周期评估通过量化产品或服务的环境影响和资源消耗^[15],可以从下至上地测量城市运转过程^[16]。然而,压力状态响应模型不能衡量城市整体系统与各个子系统要素投入产出的效率,物质流分析方法忽略了材料和能源的贡献^[17],生态足迹法很难揭示人口变化、技术进步和物质消费的影响^[18],生命周期法不能反映系统边界外的间接流动^[19]。

1965 年 Wolman 引入城市新陈代谢框架,指出城市系统的运转是一个复杂的新陈代谢过程,通过城市新陈代谢可以对系统各类要素进行统一核算^[20]。因此,本文采用著名的城市代谢框架,结合能值分析法去衡量厦门城市代谢系统物质循环与能量流动过程。能值分析法是由美国生态学家 Odum^[21]提出,作为一个应用最广泛且能定量分析区域生态经济系统可持续的方法,可以将区域生态系统和人类经济系统有效的连接起来,同时结合研究区域的地域独特性、资源储量、经济水平,促进自然生态系统和人类经济系统可持续研究的发

展。近年来,国内外学者已经将能值分析方法应用于各个领域及区域,并进行了大量的可持续性研究^[22]。例如,国外学者通过能值分析对缅甸州^[23]、罗马^[24]等地区的复杂系统进行了可持续性分析和评价。20 世纪 90 年代,能值理论被应用于广州和上海城市代谢系统的比较分析,发现广州在自然再生资源和生态承载力方面明显优于上海^[25]。对沈阳新兴市场的测度,发现沈阳经济增长与环境压力呈现不稳定的发展趋势^[26]。能值分析法评估区域可持续性的优势被国内外学者广泛认可^[27],类似的研究也被用于评估不同区域系统的可持续性,如中国和中国的某些区域^[28-32]。

中国正处于快速城镇化时期,生态城市建设是城市转型升级的关键,对文献的梳理发现,目前还缺乏对中国生态城市的可持续性评估。因此,研究选取快速城镇化时期中国生态城市建设的典范—厦门市作为研究对象,基于城市代谢框架运用能值分析法构建厦门市能值可持续评估指标体系,对 2010—2017 年厦门市可持续性进行综合评价,同时选取珠海市、深圳市进行对比分析,系统评价厦门市生态可持续性,不仅对厦门市生态文明和新型城镇化发展具有科学参考价值,同时对同类型生态城市的建设具有理论借鉴意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

厦门市地处中国东南沿海,福建省东南部,是台湾海峡西岸中部、中国闽南金三角的中心,由东南部沿厦门湾的大陆地区和厦门岛、鼓浪屿等岛屿和厦门湾组成,土地面积 1699.39 km² (2017 年),属亚热带海洋性季风气候。2017 年,厦门市常住人口 401 万人,全年地区生产总值 3784.25 亿元,常住人口人均 GDP 为 97282 元;全年空气优良率 98.9%,建成区绿化覆盖率 42.93%,人均公园绿地面积 19.98 km²。此外,厦门市海洋资源丰富,拥有大小岛屿 31 座,具有良好的自然本底资源。

自 1980 年建设经济特区以来,厦门市城区持续扩张和沿岸围垦造地,形成了独特的海湾型城市格局。厦门在这一时期经历了快速城镇化,城市化率由 1980 年的 35.0% 增加到 2016 年的 89.0%,港口、旅游业和工业的快速发展给当地生态环境带来了压力。面对土地利用快速变化和资源匮乏的挑战,厦门市积极推进生态文明建设,取得了一定成效。2010 至 2016 年绿化覆盖率由 39.8% 提高到 42.93%,在 2016 年被正式命名为国家级生态城市,在 2020 年 1 月荣获“国家生态园林城市”。

1.2 数据来源

通过整理获得 2011—2018 年厦门市自然资源和社会经济统计数据,建立能值信息基础数据库。社会经济数据及自然资源数据均来自《厦门市经济特区年鉴(2011—2018)》、《厦门市经济和社会发展统计公报(2011—2018)》、《厦门市环境统计公报(2011—2018)》、《福建省统计年鉴(2011—2018)》、《深圳市统计年鉴(2011—2018)》、《深圳市经济和社会发展统计公报(2011—2018)》、《深圳市环境统计公报(2011—2018)》、《广东省统计年鉴(2011—2018)》、《珠海市统计年鉴(2011—2018)》、《珠海市经济和社会发展统计公报(2011—2018)》、《珠海市环境统计公报(2011—2018)》。

1.3 研究方法

1.3.1 能值分析法

能值分析法是一种客观且突出的用于评价不同尺度区域可持续发展能力的综合分析方法。能值理论由 Odum 提出,全面阐述了区域系统中的资源和能源^[33]。在能值理论中,能值被定义为直接和间接应用于产品或服务形成过程中的有效能量^[34]。由于太阳能是所有能量的原始形式,它通常被用作量化其他形式的能量当量,被表示为太阳焦耳,简称为 sej。能值分析法由能值转换率将自然环境和经济系统中不可直接进行比较和加减的能量、货币、服务等转换为同一量级指标(即太阳能焦耳)。基于太阳能当量测量各种形式的能源、资源和人类服务,可以直接比较区域的投入和产出流,可以从社会、环境、经济 3 个不同维度去分析区域系统的可持续发展水平,对合理利用有限的自然资源和制定科学有效的区域经济发展政策具有重要的指导意义^[35]。

1.3.2 城市代谢系统能值分析

基于能值分析结合城市新陈代谢系统进行可持续评估的主要步骤通常如下:

(1) 识别城市社会经济系统边界,绘制城市能值系统图。如图 1 为厦门市的能值系统图,主要显示了厦门市的不同能值资源流的流动情况。

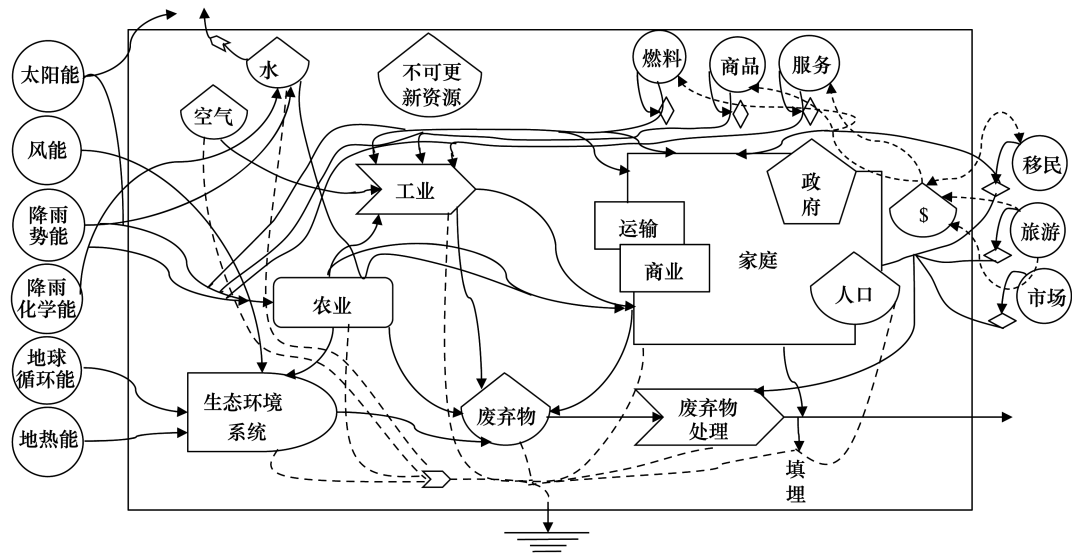


图 1 厦门城市代谢系统能值系统图
Fig.1 The emergy system diagram of Xiamen metabolism

(2) 确定并量化城市代谢系统中维持生产和消费模式的主要物质流和能量流。然后将上述能值流分为可更新资源(R0)、可更新资源产品(R1)、不可更新资源(N)、进口流(I)、出口流(O)、废弃物流(W),其中总能值用量($U = R0 + R1 + N + I$),将厦门市代谢系统 2010—2017 年不同流的能量含量或质量或货币价值乘以其能值转换率(UEV),计算各流的能值。本研究使用的 UEV 详细数据见表 1。

表 1 厦门市城市代谢能值指标核算
Table 1 Urban metabolizable energy index of Xiamen

资源项目 Resource category	原始数据 Raw data	能值转换率 Emergy transformity/ (sej/unit)	能值 Emergy /sej	参考文献 References
可更新资源(R0) Renewable resources				
太阳能 Sunlight/J	1.61×10^{19}	1.00×10^0	1.61×10^{19}	[21]
风能 Wind energy/J	2.21×10^{16}	2.51×10^3	5.55×10^{19}	[21]
雨水化学能 Rain chemical/J	2.08×10^{16}	1.74×10^4	3.63×10^{20}	[21]
雨水势能 Rain geopotential/J	2.61×10^{18}	3.05×10^4	7.97×10^{22}	[21]
地球循环能 Earth cycle/J	1.79×10^{16}	2.59×10^4	4.65×10^{20}	[21]
波浪能 Wave energy/J	2.85×10^{15}	5.76×10^4	1.64×10^{20}	[21]
可更新资源产品(R1) Renewable production				
粮食 Foods/J	9.92×10^{14}	1.14×10^5	1.13×10^{20}	[22]
蔬菜 Vegetables/J	2.33×10^{15}	7.37×10^4	1.72×10^{20}	[22]
水果 Fruits/J	1.10×10^{14}	8.88×10^4	9.79×10^{18}	[22]
肉类 Meat/J	6.78×10^{14}	5.31×10^6	3.60×10^{21}	[22]
不可更新资源(N) Nonrenewable resource				
土壤流失能 Soil erosion/g	4.73×10^9	1.68×10^{15}	1.61×10^{24}	[21]
净表土损失能 Topsoil loss/g	1.04×10^{15}	1.23×10^5	1.28×10^{20}	[22]
原煤 Raw coal/J	2.10×10^{17}	6.69×10^4	1.41×10^{22}	[22]
汽油 Gasoline/J	1.46×10^{15}	6.29×10^4	9.21×10^{19}	[27]

续表

资源项目 Resource category	原始数据 Raw data	能值转换率 Emergy transformity/ (sej/unit)	能值 Emergy /sej	参考文献 References
柴油 Diesel/J	2.83×10^{15}	6.60×10^4	1.87×10^{20}	[27]
燃料油 Fuel oil/J	1.08×10^{15}	5.40×10^4	5.86×10^{19}	[27]
进口流 (I) The flow of imported				
旅游收入 Tourism revenue/ \$	4.36×10^{10}	8.67×10^{12}	2.34×10^{22}	[31]
外商投资 Foreign investment/J	4.73×10^{13}	5.40×10^4	2.53×10^{18}	[31]
原煤 Raw coal/J	2.03×10^{17}	6.69×10^4	1.36×10^{22}	[31]
汽油 Gasoline/J	1.42×10^{15}	6.29×10^4	8.90×10^{19}	[31]
柴油 Diesel/J	2.82×10^{15}	6.60×10^4	1.86×10^{20}	[31]
燃料油 Fuel oil/J	1.07×10^{15}	5.40×10^4	5.75×10^{19}	[31]
出口流 (O) The flow of exported				
商品 Commodity/ \$	3.47×10^{11}	8.67×10^{12}	4.82×10^{23}	[34]
服务 Service/ \$	3.36×10^8	2.50×10^{12}	5.23×10^{21}	[34]
废物流 (W) Waste flow				
废固 Solid waste/J	6.64×10^{14}	1.80×10^6	1.20×10^{21}	[34]
废水 Waste water/J	1.07×10^{15}	6.66×10^5	7.13×10^{20}	[34]
废气 Waste gas/J	1.21×10^{13}	5.26×10^4	6.36×10^{17}	[34]

1.3.3 城市代谢系统能值指标体系

城市是人类在改造与顺应自然生态环境过程中,建立起来的“自然—社会—经济”复合生态系统^[36]。因此,本文在 Odum^[21]的能值理论基础上结合城市代谢框架,参考刘耕源^[33]的能值指标体系,并结合 Brown^[37]、陆宏芳^[38]、刘耕源等^[39]相继提出的能值可持续评价指标,从社会、经济和自然三个子系统出发,构建厦门市城市代谢系统能值指标评价体系(表2)。

表2 厦门市城市代谢系统能值指标评价体系

Table 2 Emergy evaluation system of urban metabolism in Xiamen

指标项目 Indicator items	表达式 Expression	含义 Implication
社会子系统 Social subsystem		
能值密度 ED Emergy density	$ED = U/A$	衡量系统经济增长的强度
人口承载力 PCC Population carrying capacity	$PCC = (R+I)/(U/P)$	评估当前系统人口压力
人均能值 EPP Per capita emergy	$EPP = U/P$	衡量居民的生活水平
经济子系统 Economic subsystem		
能值产出率 EYR Emergy yield ratio	$EYR = (R+N+I)/I$	评价系统的产出效益
能值交换率 EER Emergy exchange ratio	$EER = I/O$	评价系统对外交易的收益情况
能值货币比率 EMR Emergy to money ratio	$EMR = U/GDP$	评价系统单位货币的购买能力
自然子系统 Natural subsystem		
能值自给率 ESR Emergy self-support ratio	$ESR = (R+N)/U$	评估自然环境支撑人类活动的的能力
环境承载力 ELR Environmental loading ratio	$ELR = (I+N)/R$	评价人类经济活动对环境的影响程度
能值废弃率 EWR Emergy of wastes to total emergy ratio	$EWR = W/U$	衡量生态系统产生的废物对环境造成的压力
可持续性评估指标 Sustainability assessment indicators		
可持续发展指标 ESI Emergy sustainability index	$ESI = EYR/ELR$	评价区域系统的可持续发展水平
可持续发展能值指标 EISD Emergy index of sustainable development	$EISD = EYR \times EER/ELR$	评价单位环境压力下系统的社会经济效益
城市健康能值指数 EUEHI Emergy index of urban health	$EUEHI = (EYR \times EER \times ED)/$ $(ELR \times EMR)$	评价城市系统的生态健康水平

U:总能值 Total emergy; A:区域面积 Area area; R:可更新能值 Renewable emergy; N:不可更新能值 Nonrenewable emergy; I:进口能值 Imported emergy; P:人口 Population; O:出口能值 Exported emergy; W:废弃物能值 Waste emergy

社会子系统主要由能值密度、人口承载力、人均能值表征。能值密度指单位面积能值使用量,该指标可以反映城市的发展强度和集约程度^[33],人口承载力是指在当前生活标准下,系统所能容纳的最大人口数量,从侧面反映系统环境压力的大小^[33],人均能值用量从宏观生态经济学视角可以衡量居民生存水平和生活质量的高低^[34]。经济子系统主要由能值产出率、能值交换率、能值货币比率表征。能值产出率反映城市经济发展对系统外部的依赖度以及系统的产出效益^[33],能值交换率用来衡量系统与外界的能值交换情况^[33],能值货币比率可以表征系统货币财富购买能值的能力^[34]。自然子系统主要由能值自给率、环境承载率、能值废弃率表征。能值自给率可以反映自然系统的自给自足能力^[35],环境承载率可以反映系统自然环境所承受的压力^[35],能值废弃率可以反映系统的可更新能力^[35]。

城市代谢系统可持续性由可持续发展指标(ESI)、可持续发展能值指标(EISD)、城市健康能值指数(EUEHI)综合评估,可持续发展指标由 Brown^[37]首次提出,用来衡量生态经济系统是否具有活力和发展潜力。2002 年陆宏芳等^[38]结合中国实际情况在 ESI 的基础上提出了可持续发展能值指标,其值越高,表明在单位环境压力下的系统经济效益越高,可持续发展性能越好。刘耕源等^[39]首次以能值产出率(EYR)、环境承载率(ELR)、能值交换率(EER)分别代表活力、组织结构、恢复力三个方面,以能值密度(ED)与能值货币比率(EMR)的比值代表城市的服务维持功能,构建了城市健康能值指数(EUEHI)来衡量城市生态经济系统的健康发展情况。

2 结果与分析

2.1 基于城市代谢的能值流分析

2010—2017 年厦门的总能值呈增长趋势,其中可更新资源能值整体呈现小幅度上升的趋势,2015 年达到最高值 8.08×10^{22} sej(表 3),同时不可更新资源呈上升趋势。进口流能值和出口流能值均在 2010—2017 年都分别呈现较大的增长趋势,表明厦门市对外贸易开放度较高,经济发展强度大。厦门市的废弃物流能值在 2010—2014 年缓慢增长,而 2015 年以后就开始下降,表明厦门市的生态环境保护工作在近年有一定的成效,循环经济的推行取得一定进展。

表 3 2010—2017 年厦门市城市代谢能值流核算

Table 3 Calculation of urban metabolizable emergy flow in Xiamen from 2010 to 2017

资源项目/sej Resource category	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
可更新资源能值 Renewable resources	7.48×10^{22}	7.48×10^{22}	7.48×10^{22}	7.48×10^{22}	7.48×10^{22}	8.08×10^{22}	8.08×10^{22}	8.08×10^{22}
不可更新资源能值 Unrenewable resource	1.18×10^{24}	1.27×10^{24}	1.36×10^{24}	1.45×10^{24}	1.54×10^{24}	1.62×10^{24}	1.71×10^{24}	1.86×10^{24}
进口流 The flow of imported	2.66×10^{23}	3.41×10^{23}	3.92×10^{23}	4.27×10^{23}	4.67×10^{23}	4.87×10^{23}	5.00×10^{23}	5.65×10^{23}
出口流 The flow of exported	4.82×10^{23}	4.56×10^{23}	3.98×10^{23}	4.66×10^{23}	5.02×10^{23}	5.21×10^{23}	4.93×10^{23}	5.26×10^{23}
废物流 Waste flow	1.83×10^{21}	2.53×10^{21}	2.32×10^{21}	2.17×10^{21}	2.19×10^{21}	1.91×10^{21}	1.63×10^{21}	1.66×10^{21}
总能值 Total emergy	1.52×10^{24}	1.69×10^{24}	1.83×10^{24}	1.95×10^{24}	2.08×10^{24}	2.19×10^{24}	2.29×10^{24}	2.51×10^{24}

2.2 社会子系统

人均能值(EPP)是评价人民生活水平的指标,它可以反映城市内部资源、财富和商品的可利用程度^[34]。人均能值用量主要由城市的人口数量及总能值用量决定,可以发现从 2010 年至 2017 年以来厦门市的人均能值呈持续上升的趋势,由 2010 年的 3.19×10^{17} sej/人增加到 2017 年的 4.89×10^{17} sej/人,表明经济快速发展过程中,厦门市民人均生活水平和财富优势明显提高(图 2),同时超过了国内经济发达的城市如珠海、深圳

(表4)。能值密度(ED)指单位面积能值使用量,该指标愈大,表示经济发展强度愈好^[34]。厦门市的能值密度由2010年的 8.11×10^{14} sej增加到2017年的 11.50×10^{14} sej,表明厦门市是经济活动频繁的城市(图2)。研究期间厦门市能值密度的增长速度较快,与厦门市作为经济特区,经济社会发展迅速有关,快速城市化引起城市经济密度和经济发展强度相对较高,城市单位面积能量利用强度大,经济活动频繁。

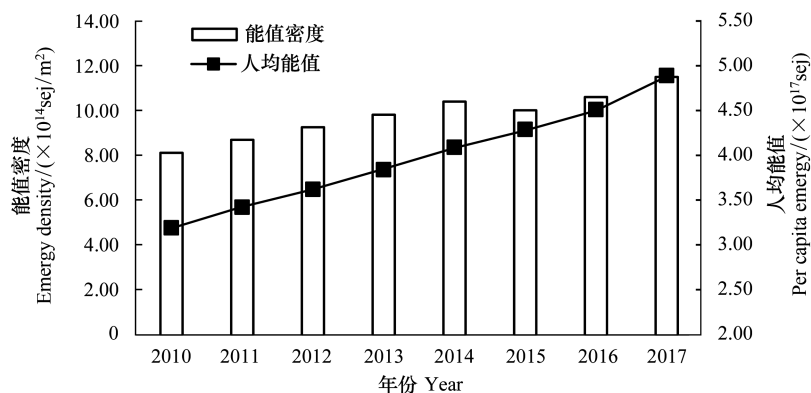


图2 厦门市2010—2017年人均能值与能值密度变化

Fig.2 Changes of per capita energy and energy density in Xiamen from 2010 to 2017

人口承载力(PCC)是指在目前生态经济情况下,系统所能承载的最大人口数量^[34]。在2010年厦门市人口承载力为302万,而实际人口为356万;2017年厦门市人口承载力为199万,相较于2010年城市系统所能承载的人口数量减少,而且2017年城市实际人口为401万,为其人口承载量的2.23倍(图3)。厦门市独特的海湾型城市格局导致城市腹地不足,且随着经济快速发展,外来务工人员增加,有限的土地与激增的人口使厦门市人口容量面临一定的压力。

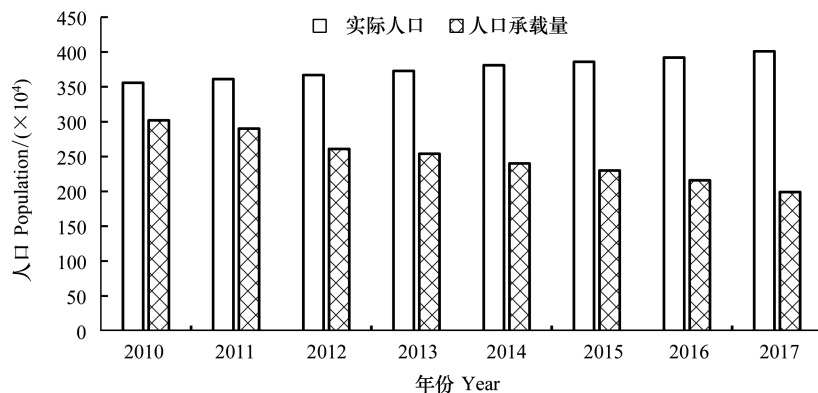


图3 厦门市2010—2017年人口承载力与实际人口变化

Fig.3 Population carrying capacity and actual population change of Xiamen from 2010 to 2017

2.3 经济子系统

能值产出率(EYR)^[27]越高,系统的自然资源与经济活动产出的能值利用效率越高。如图4,厦门市的EYR一直呈上升趋势,由2010年的8.30增加到2017年的15.20,由于厦门市创新驱动发展同时加快产业转型,使经济发展效益不断提高(图4)。能值交换率(EER)越大,说明在对外贸易中获得利益越高^[27]。厦门市的能值交换率由2000年的6.94增加到11.80,表明厦门在经济贸易过程中获得较多利益,在经济对外贸易中处于有利地位。厦门作为第一批经济特区之一,较其他城市更早享有开放的特殊政策,依靠其港口城市天然的优越条件,其对外贸易获得的利益较多。

能值货币比率(EMR)越小经济越发达,而经济落后地区的能值货币比率越小^[27]。从图4可以看出,2010至2017年厦门市的能值货币比率呈现出不断下降的趋势。2017年的能值货币比率比2016年同比下降了39.0%,这表明厦门市经济在不断发展,系统对外部的商品、服务等需求在不断增加,系统的经济活动对自然资源的需求越来越小,导致物质流动速度和货币的周转速率越来越快,继而引起能值货币比率逐年下降。能值货币比率下降,居民的收入不断增加,说明系统为当地居民提供的福祉不断增加,城市的服务功能更加完善。

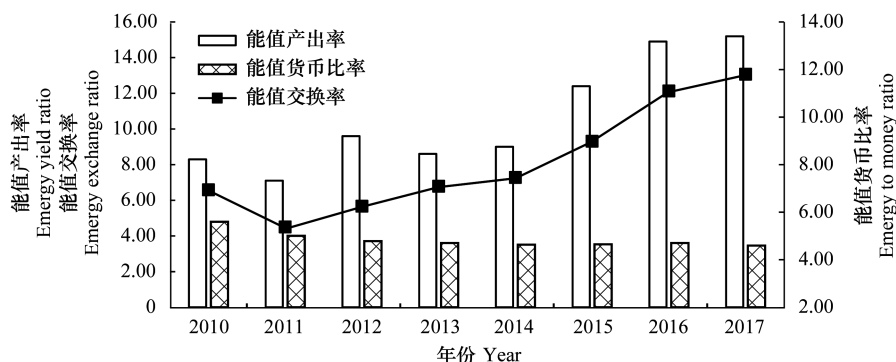


图4 厦门市2010—2017年能值货币比率、能值产出率与能值交换率变化

Fig.4 Changes of energy money ratio, energy output rate and energy exchange rate in Xiamen from 2010 to 2017

2.4 自然子系统

能值自给率(ESR)反映城市系统对自有资源的利用情况及系统自我支持的能力^[38]。从图5可以看出厦门市的能值自给率在2010—2017年呈稳定增长趋势,从2010年的98.3%增加到2017年的99.00%,说明厦门市对外部资源的依赖程度逐渐减少。能值废弃率(EWR)反映系统的废弃物对环境带来的压力^[38]。厦门市的能值废弃率一直呈下降的趋势,由2010年的2.45下降到2017年的2.05(图5)。表明厦门市为了符合生态城市的发展目标,在建设生态城市过程中,对工业污染防治做出重大调整与转变,坚持以高新技术的开发与应用促进新兴产业的发展和传统产业的现代化改造,逐步削减污染物的排放总量,从源头上减少环境的压力。

环境承载率(ELR)反映地区社会经济与生态环境直接的协调关系^[38],系统环境承载率小于3为低负荷,3—10之间属于中度负荷,大于10属于高负荷,表明现阶段系统内环境压力变大,具有一定的环境预警作用。2010至2017年厦门市的环境承载率一直小于3,表明厦门市的环境压力处于低负荷状态,但有逐渐上升的趋势,表明随着厦门市经济快速发展的同时给系统环境带来的压力有所增大。尤其是厦门市在旅游业的带动下,区域开放程度与城市建设水平得以不断提升,但是生态系统面临相对的资源压力,加之日益增长的人口压力,厦门应该注重保障资源高效利用的同时促进区域可持续发展。

2.5 可持续性指标综合评价

可持续发展指标(ESI)是系统能值产出率与环境承载量的比值^[37],若 $1 < \text{ESI} < 10$,表明系统具有活力和发展潜力,呈可持续性;若 $\text{ESI} > 10$,说明此地区经济发展程度低,资源开发利用不够,是经济不发达的象征; $\text{ESI} < 1$ 时,为经济高度发展的资源消费型驱动系统,区域内环境压力更高。从图6可以看出,2010—2017年厦门市的ESI处于1—10之间,说明厦门市经济发展程度较好,资源得到合理的利用,生态经济系统具有活力和发展潜力。这表明厦门市不断加强科技创新,在发展绿色产业、保护生态环境、提高能源资源可持续利用水平等方面取得一定的成效。可持续发展能值指标(EISD)定义为原可持续发展指标和能值交换率的乘积^[38],EISD值越高,说明单位环境压力下的社会经济效益越高,系统可持续发展性能越好。由图6可以看出,2010—2017年,厦门市的EISD 2014年后开始出现显著上升,由2014年的3.24增加到2015年的5.54,EISD由2015年的5.54增加到2017年的7.76,分析可知2014年厦门市出台《厦门经济特区生态文明建设条例》,是中国第二部

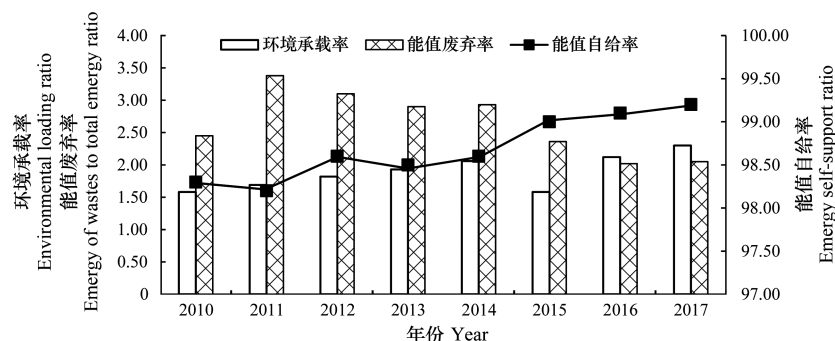


图5 厦门市2010—2017年环境承载率、能值废弃率与能值自给率变化

Fig.5 Changes of environmental carrying rate, energy abandonment rate and energy self-sufficiency rate in Xiamen City from 2010 to 2017

关于生态文明建设的地方方法,此后厦门市持续加快生态文明建设,实施污染整治、生态修复和环境风险管控,开展循环经济建设,严格控制污染物排放等措施,取得了一定效果。

厦门市城市健康水平能值指数 EUEHI^[39] 与 EISD 具有相似的变化趋势,在 2010 年—2017 年 EUEHI 呈稳定上升趋势,在 2015 年 EUEHI 比 2014 年增加了 1.65 倍,表明厦门市的城市健康水平较好且逐年上升。自 2014 年《美丽厦门战略规划》通过,厦门市加快产业、城市、社会转型,推进城市治理体系建设,注重生态保护,改善环境质量,推行绿色低碳循环经济。随着国家生态文明建设的深入开展,厦门市在城市建设过程中采取了一定的措施来保障生态环境质量。

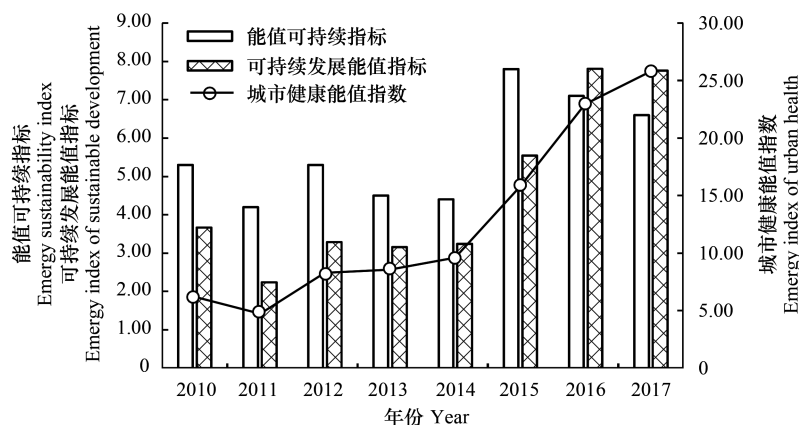


图6 厦门市2010—2017年能值可持续性指标变化

Fig.6 Changes of energy sustainability indicators in Xiamen from 2010 to 2017

2.6 生态城市能值指标比较

珠海市、深圳市与厦门市都是我国第一批经济特区,经济发展历程具有相似性。通过对珠海市、深圳市的能值进行核算,选取部分主要能值指标与厦门市的能值指标进行比较,分析厦门与珠海市、深圳市的发展差异与可持续水平。其中人均能值可以反映城市内部资源、财富和商品的可利用水平^[40],研究发现 2010 至 2017 年厦门市的人均能值均高于珠海市、深圳市,表明经济快速发展过程中,厦门市资源财富总量高于珠海市、深圳市,这与厦门市独特的海湾型城市格局有关,具有海陆两方面的优势自然资源;且厦门市人均生活水平也较高,表明厦门市做为海西经济圈的核心城市,聚集效应大,净流入人口多,经济发展潜力更高。能值自给率能反映城市系统的资源储量与自给自足能力^[40],厦门市的能值自给率在 2010—2017 年都显著高于珠海市、深

圳市,表明厦门市具有海湾型城市格局,自然区位条件更具优势。厦门市系统自身资源相对较丰富,自然本底与发展基础较好。2010—2017 年厦门市的能值产出率都显著高于珠海市、深圳市,表明厦门市对资源的利用相较更充足合理。

厦门市、珠海市、深圳市的环境承载率在 2010—2017 年均小于 3,表明三个城市生态系统的环境压力处于低负荷状态,城市具有活力与潜力,生态文明建设都取得一定的成效。然而,与珠海相比,厦门市、深圳市的环境承载率有上升趋势,表明随着经济的快速发展,厦门、深圳市生态系统受到一定的影响,未来需要更加关注生态系统保护。2010—2017 年厦门市与珠海市的可持续发展指标均处于 1—10 之间,但厦门市的 ESI 高于珠海市,表明厦门市经济系统在获得单位社会效益的同时生态环境系统承受的压力相对较小,即厦门市的可持续发展水平相对优于珠海;而深圳市 ESI 小于 1,表明深圳市在经济发展过程中过度依赖外界资源的支持,属于消费驱动型经济系统。

相较来看,厦门市和珠海市在生态城市建设过程中,各项能值评估指标都处于可持续发展水平,城市系统处于具有发展潜力的阶段,可持续水平评估也符合生态城市的目标。然而,深圳市的可持续发展指标反映出其城市系统不利于长期发展。总体来看,厦门市的资源储量更丰富,对资源的利用较为合理,生态环境压力比珠海市、深圳市小,城市生态系统可持续发展性优于珠海市、深圳市。

表 4 2010—2017 年厦门市与珠海市、深圳市能值指标对比

Table 4 Comparison of emergy indexes between Xiamen, Zhuhai and Shenzhen from 2010 to 2017

能值评估指标 Emergy evaluation index	城市 City	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
人均能值/sej	厦门	3.19×10^{17}	3.42×10^{17}	3.62×10^{17}	3.84×10^{17}	4.09×10^{17}	4.29×10^{17}	4.51×10^{17}	4.89×10^{17}
Per capita emergy	珠海	7.96×10^{16}	7.92×10^{16}	7.85×10^{16}	9.98×10^{16}	8.16×10^{16}	6.78×10^{16}	7.12×10^{16}	6.33×10^{16}
	深圳	2.89×10^{14}	3.22×10^{14}	3.55×10^{14}	4.02×10^{14}	3.66×10^{14}	3.34×10^{14}	3.14×10^{14}	3.29×10^{14}
能值自给率	厦门	98.30	98.20	98.60	98.50	98.60	99.00	99.10	99.20
Emergy self-support ratio	珠海	49.55	39.4	46.78	52.57	45.33	50.45	62.83	55.24
	深圳	36.20	32.40	29.50	26.00	28.40	31.21	33.31	33.46
能值产出率	厦门	8.30	7.10	9.60	8.60	9.00	12.40	14.90	15.20
Emergy yield ratio	珠海	1.98	1.65	1.88	2.11	1.83	2.02	2.69	2.23
	深圳	1.57	1.48	1.41	1.35	1.40	1.45	1.50	1.48
环境承载率	厦门	1.58	1.69	1.82	1.93	2.06	1.58	2.12	2.30
Environmental loading ratio	珠海	1.97	3.34	2.01	1.35	1.97	1.74	1.00	1.43
	深圳	1.86	2.20	2.53	2.95	2.63	2.33	2.09	2.26
可持续发展指标	厦门	5.30	4.20	5.30	4.50	4.40	7.80	7.10	6.60
Emergy sustainability index	珠海	1.01	0.49	0.93	1.56	0.93	1.16	2.69	1.56
	深圳	0.84	0.67	0.56	0.46	0.53	0.62	0.72	0.66

3 结论

本研究选取具有独特区位优势与资源优势的生态城市—厦门市为研究区,基于城市代谢框架结合能值分析法,构建厦门城市代谢系统能值可持续评估指标体系,对 2010—2017 年厦门市的经济子系统、社会子系统、自然子系统进行综合评估以探究其生态可持续性,同时与珠海市、深圳市进行能值指标对比分析,以期在生态文明背景下,生态城市的建设提供科学支撑。结果表明:

(1) 2010—2017 年,厦门市总能值呈上升趋势,2017 年的总能值为 2.51×10^{24} sej,是 2010 年总能值的 1.65 倍,货币流能值显著增加,其中废弃物流能值下降。厦门市人均能值与能值密度显著上升,表明厦门市人均生活水平提高,经济活动频繁;人口承载量小于实际人口数量,表明厦门市面临人口激增与土地资源有限的矛盾。

(2) 2010—2017 年,厦门市能值自给率与能值产出率持续升高,表明厦门市资源储量丰富且对资源的利用水平较为合理;环境承载率逐年上升,表明厦门市环境压力处于低负荷状态,获得高社会经济效益的同时可持续发展性能较好。

(3) 2010—2017 年厦门市的可持续发展指标处于 1—10 之间,表明其生态经济系统具有活力和发展潜力;可持续发展能值指标持续上升,表明厦门市的可持续发展性能愈来愈好;城市健康水平能值指数由 2010 年的 6.21 上升至 2017 年的 25.80,表明厦门市生态经济系统处于健康可持续发展的状态。

(4) 与珠海市、深圳市的能值指标对比表明,厦门市与珠海市均处于富有经济活力与生态可持续发展潜力阶段,且厦门市的可持续发展水平整体优于珠海市与深圳市。

(5) 基于城市代谢框架将能量流、物质流、货币流及人口流进行能值统一核算,可以较好的反映城市代谢过程的可持续发展水平。但是能值分析也有一些不足,在数据获取上尚有局限,对城市系统内部各种能值的分类不够细致,这在未来的研究中有待完善。

参考文献 (References):

- [1] 朱纪广, 许家伟, 李小建, 姜帆, 陈玉蓉. 中国土地城镇化和人口城镇化对经济增长影响效应分析. 地理科学, 2020, 40(10): 1654-1662.
- [2] 王成新, 窦旺胜, 程钰, 刘凯. 快速城市化阶段济南城市空间扩展及驱动力研究. 地理科学, 2020, 40(9): 1513-1521.
- [3] Bibri S E. The eco-city and its core environmental dimension of sustainability: green energy technologies and their integration with data-driven smart solutions. Energy Informatics, 2020, 3: 4. <https://doi.org/10.1186/s42162-020-00107-7>
- [4] 彭海昀. 联合国人与生物圈计划(MAB)及其在中国的发展. 中国人口·资源与环境, 1990, (2): 89-92.
- [5] 胡怡. 国外生态城市建设研究及经验. 城乡建设, 2020, (11): 78-81.
- [6] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展. 生态学报, 2000, 20(5): 830-840.
- [7] 王如松, 李锋, 韩宝龙, 黄和平, 尹科. 城市复合生态及生态空间管理. 生态学报, 2014, 34(1): 1-11.
- [8] 李锋, 刘旭升, 胡翀, 王如松. 生态市评价指标体系与方法——以江苏大丰市为例. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2006-2012.
- [9] 陈利顶, 景永才, 孙然好. 城市生态安全格局构建: 目标、原则和基本框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4101-4108.
- [10] 成超男, 胡杨, 赵鸣. 城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1770-1782.
- [11] Wu J J, Wang X, Zhong B, Yang A X, Jue K S, Wu J H, Zhang L, Xu W J, Wu S L, Zhang N, Liu Q H. Ecological environment assessment for Greater Mekong Subregion based on Pressure-State-Response framework by remote sensing. Ecological Indicators, 2020, 117: 106521.
- [12] Piña W H A, Martínez C I P. Urban material flow analysis: an approach for Bogotá, Colombia. Ecological Indicators, 2014, 42: 32-42.
- [13] Wackernagel M, Kitzes J, Moran D, Goldfinger S, Thomas M. The Ecological Footprint of cities and regions: comparing resource availability with resource demand. Environment and Urbanization, 2006, 18(1): 103-112.
- [14] 吴健生, 李锐杨, 赵宇豪. 基于改进三维足迹模型的关中地区土地自然资本利用状况分析. 地理科学进展, 2020, 39(8): 1345-1355.
- [15] Mutel C L, Hellweg S. Regionalized life cycle assessment: computational methodology and application to inventory databases. Environmental Science & Technology, 2009, 43(15): 5797-5803.
- [16] Arias A, González-García S, González-Rodríguez S, Feijoo G, Moreira M T. Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of bio-adhesives for the wood panel industry. A comparison with petrochemical alternatives. Science of the Total Environment, 2020, 738: 140357.
- [17] Zhang L X, Chen B, Yang Z F, Chen G Q, Jiang M M, Liu G Y. Comparison of typical mega cities in China using emergy synthesis. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(6): 2827-2836.
- [18] Ohnishi S, Dong H J, Geng Y, Fujii M, Fujita T. A comprehensive evaluation on industrial & urban symbiosis by combining MFA, carbon footprint and emergy methods—Case of Kawasaki, Japan. Ecological Indicators, 2017, 73: 513-524.
- [19] Reap J, Roman F, Duncan S, Bras B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment: part 2: impact assessment and interpretation. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(5): 374-388.
- [20] Wolman A. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213: 179-190.
- [21] Odum E P, Finn J T, Franz E H. Perturbation theory and the subsidy-stress gradient. BioScience, 1979, 29(6): 349-352.
- [22] 李占玲, 陈飞星, 李占杰. 北京市城市生态系统能值分析. 城市问题, 2005, (6): 25-29
- [23] Campbell D E, Garmestani A S. An emergy systems view of sustainability: emergy evaluation of the San Luis Basin, Colorado. Journal of Environmental Management, 2012, 95(1): 72-97.

- [24] Ascione M, Campanella L, Cherubini F, Ulgiati S. Environmental driving forces of urban growth and development: an emergy-based assessment of the city of Rome, Italy. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 93(3/4): 238-249.
- [25] 隋春花, 蓝盛芳. 广州与上海城市生态系统能值的分析比较. *城市环境与城市生态*, 2006, 19(4): 1-3.
- [26] Sun L, Dong H J, Geng Y, Li Z L, Liu Z, Fujita T, Ohnishi S, Fujii M. Uncovering driving forces on urban metabolism—A case of Shenyang. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 171-179.
- [27] 马文静, 刘娟. 基于能值分析的中国生态经济系统可持续发展评估. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2029-2038.
- [28] Huang S L, Lee C L, Chen C W. Socioeconomic metabolism in Taiwan: emergy synthesis versus material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 48(2): 166-196.
- [29] Zhang Y, Yang Z F, Liu G Y, Yu X Y. Emergy analysis of the urban metabolism of Beijing. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2377-2384.
- [30] Pan H Y, Zhuang M F, Geng Y, Wu F, Dong H J. Emergy-based ecological footprint analysis for a mega-city: the dynamic changes of Shanghai. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 552-562.
- [31] Huang Y, Liu G Y, Chen C C, Yang Q, Wang X Q, Giannetti B, Zhang Y, Casazza M. Emergy-based comparative analysis of urban metabolic efficiency and sustainability in the case of big and data scarce medium-sized cities: a case study for Jing-Jin-Ji region (China). *Journal of Cleaner Production*, 2018, 192: 621-638.
- [32] Yu X M, Geng Y, Dong H J, Fujita T, Liu Z. Emergy-based sustainability assessment on natural resource utilization in 30 Chinese provinces. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133: 18-27.
- [33] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬. 基于能值分析方法的城市代谢过程研究——理论与方法. *生态学报*, 2013, 33(15): 4539-4551.
- [34] 黄洵, 黄民生. 基于能值分析的城市可持续发展水平与经济增长关系研究——以泉州市为例. *地理科学进展*, 2015, 34(1): 38-47.
- [35] 穆献中, 朱雪婷. 城市能源代谢生态网络分析研究进展. *生态学报*, 2019, 39(12): 4223-4232.
- [36] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [37] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. *Ecological Economics*, 1996, 19(3): 219-235.
- [38] 陆宏芳, 蓝盛芳, 李雷, 彭少麟. 评价系统可持续发展能力的能值指标. *中国环境科学*, 2002, 22(4): 380-384.
- [39] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 张妍, 张力小. 基于能值分析的城市生态系统健康评价——以包头市为例. *生态学报*, 2008, 28(4): 1720-1728.
- [40] 黄永斌, 董锁成, 李泽红. 基于能值分析的资源型城市新陈代谢水平评价——以石嘴山市为例. *资源科学*, 2015, 37(8): 1621-1628.