

DOI: 10.5846/stxb201801050028

贾小乐,周源,延建林,魏亿钢.基于能值分析的环太湖城市群生态经济系统可持续发展研究.生态学报,2019,39(17): - .

Jia X L, Zhou Y, Yan J L, Wei Y G. Sustainable development of an ecological-economic system in the Taihu Lake city cluster based on emergy analysis. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

基于能值分析的环太湖城市群生态经济系统可持续发展研究

贾小乐^{1,2,*}, 周源², 延建林¹, 魏亿钢³

1 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088

2 清华大学公共管理学院, 北京 100084

3 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191

摘要:采用能值理论与分析方法,研究 2015 年环太湖城市群生态经济系统的能值流量,并构建多维度的生态经济系统指标体系,综合评价环太湖城市群可持续发展程度和健康水平。研究结果表明:(1)可更新资源利用不足,在能值利用总量中占比最大值仅为 7.95%;(2)不可更新资源消耗过度,在能值利用总量中占比最小值达到 56.95%;(3)(除苏州市外)可更新资源产品中肉类与水产品占比最小值已达 63.08%,急需对传统的农业结构进行调整;(4)不可更新资源产品均以水泥和钢铁为主,占比最小值已达 88.02%,应该加快传统的工业转型升级;(5)输入能值占比最大值仅为 36.27%,商品进出口呈现贸易顺差,对外经济开放仍有发展空间;(6)废弃物与可更新能值比率最大值仅为 12.8%,废弃物能值比最小值仅为 0.19%,废弃物排放和利用水平有待提高;(7)湖州市可持续指标 ESI 和能值可持续发展指标 EISD 为 1.59 和 2.99,在环太湖城市群中更具可持续发展潜力;(8)苏州市健康能值指数 EUEHI 和改进的健康能值指数 EUEHI' 为 8.22 和 1.65,在环太湖城市群中健康水平较低。据此结果提出了有助于环太湖城市群经济社会发展与自然生态环境和谐共赢的可持续发展对策。

关键词:能值分析;环太湖城市群;生态经济系统;指标体系;可持续发展

Sustainable development of an ecological-economic system in the Taihu Lake city cluster based on emergy analysis

JIA Xiaole^{1,2,*}, ZHOU Yuan², YAN Jianlin¹, WEI Yigang³

1 Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China

2 School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3 School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: In this study, we utilized an emergy analysis method to examine emergy flow, establish a variety of emergy indices of the social-economic natural subsystem, and evaluate sustainable development and health levels in the ecological-economic system in the Taihu Lake city cluster in 2015. The results showed the following: (1) renewable resources are insufficiently utilized, and the maximum proportion of renewable resources in the total emergy utilization was only 7.95%; (2) non-renewable resources are consumed too extensively, and the minimum proportion of non-renewable resources in total emergy utilization was 56.95%; (3) the traditional agricultural structure in the Taihu Lake city cluster, except the city of Suzhou, must be adjusted urgently because that the minimum proportion of meat and aquatic products in renewable resource products has reached 63.08%; (4) we should accelerate the transformation and upgrading of traditional industries as a

基金项目:中国工程院重大咨询项目(2017-ZD-08-05);清华大学绿色经济与可持续发展研究中心研究子项目(20153000181);国家自然科学基金应急管理项目(L172400027)

收稿日期:2018-01-05; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiaxiaole1009@126.com

minimum of 88.02% are currently producing products from non-renewable resources, primarily cement and steel; (5) we must accelerate the opening up of trade to the outside world, because the maximum proportion of input emergy is only 36.27% and merchandise import and export exhibits a favorable trade balance; (6) the level of waste emission and utilization needs to be improved, because the current maximum ratio of waste emergy to renewable emergy is only 12.8%, and the minimum ratio of waste emergy to total emergy utilization is only 0.19%; (7) within the Taihu Lake city cluster, the city of Huzhou has greater potential for sustainable development, because its sustainable index (ESI) and emergy sustainable development index (EISD) are 1.59 and 2.99, respectively; (8) the city of Suzhou exhibits a low level of health of the cities in the Taihu Lake city cluster, with a health emergy index (EUEHI) and an improved health emergy index (EUEHI') of 8.22 and 1.65, respectively. Based on the above results, this paper proposes some countermeasures to advance the sustainable development of the ecological-economic system in the Taihu Lake city cluster.

Key Words: emergy method; Taihu Lake city cluster; ecological-economic system; index system; sustainable development

近年城市化发展引起的城市雾霾、水体污染、城市洪水、土壤污染等环境问题事件频发,开展城市和城市群的可持续发展评价研究,系统规划城市和城市群未来的可持续发展道路,已然成为重要的科学议题和现实问题^[1-3]。

衡量城市可持续发展程度及健康水平的主要测度工具是城市可持续发展的评价指标和方法,其中能值分析方法最为代表,它是 20 世纪 80 年代由美国著名生态学家、系统能量分析先驱 H.T.Odum 创立^[4-7],是以地球系统最基础的驱动源太阳能为共同的基础参照标准,用太阳能值转化率作为各种物质或能量的转换单位,量化自然生态系统和社会经济系统中的各种能量流、物质流、货币流和信息流。它突破了不同质量的能量之间统一评价的障碍,可以衡量和比较不同形式、不同等级的能量的真实价值。

国外从 20 世纪 90 年代起应用能值分析方法开展研究,这其中代表性研究有 Ulgiati (1994)、Brown (1996)、Whitfield (1994) 等分别对意大利、泰国、美国佛罗里达杰克逊维尔市等进行能值分析研究,取得了一系列的研究成果^[8-10]。同时国内对于能值理论和方法的研究也在不断扩展,20 世纪 90 年代初,隋春花和蓝盛芳首次把能值理论和研究方法引入中国,随后有多名学者对我国的广州、西藏、北京、新疆等地的资源环境、经济活动形成的生态经济系统进行了能值分析和可持续性的评估研究^[11-16]。

城市群是生态系统和经济系统相互交织、相互作用、相互耦合而成的能值流高度密集的复合异质系统和多维结构^[16],当前城市群发展与环境保护之间的矛盾日益尖锐,但国内围绕城市群可持续发展的研究相对较欠缺,主要有蔺雪芹 (2008)^[17]、杨天姿 (2010)^[18]、楚芳芳 (2012)^[16,19-20] 和方创琳 (2017)^[21] 分别对山东省沿海城市群、长株潭城市群、京津冀城市群的生态经济环境与可持续发展进行定量研究。本文运用能值分析理论与可持续评价指标体系方法,开展城市群整体评估与内部各城市的深入剖析相结合的可持续发展量化研究和对比分析,一方面丰富和完善城市群可持续发展的理论研究基础,另一方面为系统规划城市群可持续发展提供可靠的参考评估及决策依据。

1 研究区概况

环太湖城市群地处我国东部,位于江苏省南部和浙江省北部区域,即长江三角洲地区中部且环绕太湖的周边地区,临近南京、上海和杭州三大城市,是我国东部重要的城市群之一。环太湖城市群由江苏苏州、无锡、常州和浙江湖州、嘉兴五个城市组成(图 1),地理位置位于 30°21'—32°04'N, 119°08'—121°20'E,总面积约为 27250 km²,约占长江三角洲地区面积和人口总数的四分之一,是长江三角洲地区重要生态涵养区和生态屏障。近年来环太湖城市群的工业化、城市化进程不断的加速,从而使城镇人口规模不断增长,工业企业数量持续增加。随之而来的环境问题也日益突出,工业化和城市化发展导致农业生态用地的减少,增长的人口与有限的资源之间的矛盾加剧,环境质量下降,出现了诸如 2007 年太湖蓝藻污染事件和近年连续的雾霾天气等。

可见环境污染的治理和短缺资源的补给已成为环太湖城市群发展急需面对的问题。基于以上问题本研究选取环太湖城市群为研究对象展开讨论。

2 研究思路

2.1 基础资料梳理与分析

(1) 根据 2016 年《中国城市统计年鉴》、《浙江省统计年鉴》、《江苏省统计年鉴》、《苏州市统计年鉴》、《无锡市统计年鉴》、《常州市统计年鉴》、《湖州市统计年鉴》、《嘉兴市统计年鉴》和苏州、无锡、常州、湖州、嘉兴国民经济和社会发展统计公报等,收集整理环太湖城市群的自然地理、经济和社会等资料。

(2) 根据 H.T.Odum 的能量系统图方法^[4-7],绘制环

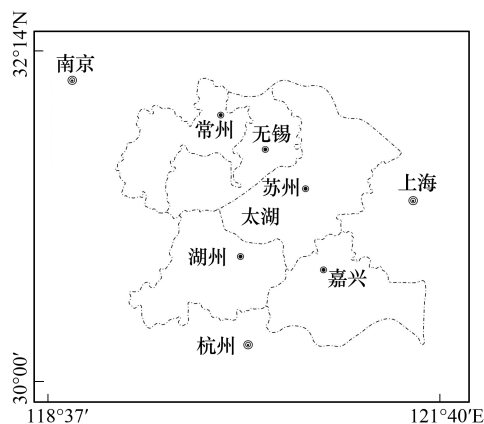


图 1 环太湖城市群行政区划位置图

Fig.1 Location of Taihu Lake city cluster

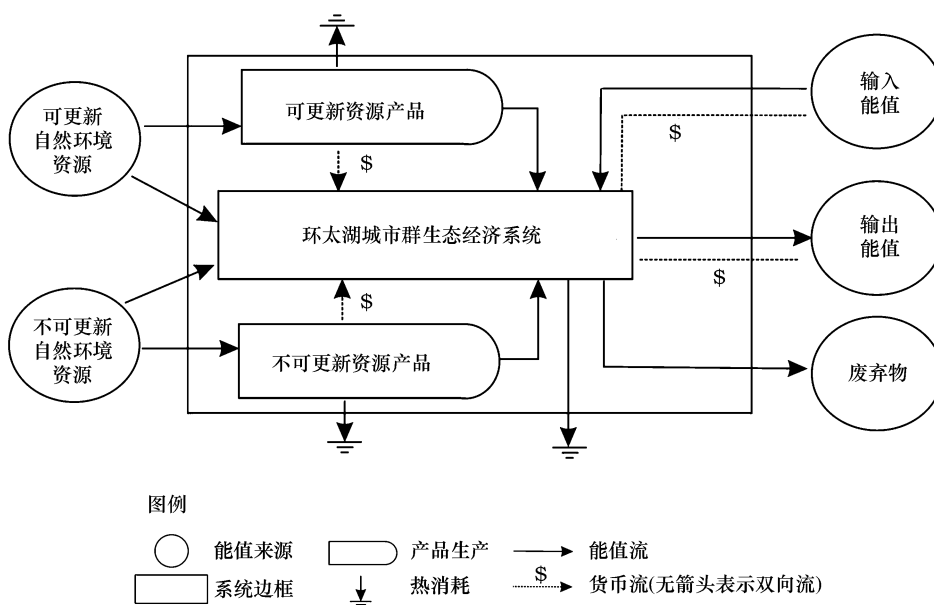


图 2 环太湖城市群生态经济系统能量系统图

Fig.2 Energy flow diagram for ecological- economic system in Taihu Lake city cluster

太湖城市群生态经济系统能量系统图(图 2),先划定环太湖城市群生态经济系统的边界,可更新自然环境资源太阳能、风能、雨水能、地球旋转能进入系统被人类的社会经济活动无偿的利用;不可更新自然环境资源土壤有机质和表土层被系统内人类社会经济活动无偿的损耗;系统内本地自然环境投入的可更新资源产品农产品、畜产品、林产品和水产品等和不可更新资源产品煤电钢、水泥、化肥等伴随产品的生产、交换活动进入人类的社会经济活动被利用并产生人的服务价值及相应的货币流;同时系统接受外界的进口商品和燃料等能量反馈输入并伴随产生人的服务价值及外资和旅游等货币流;并且随之产生相应的输出商品及货币流,系统产生的废弃物对自然环境产生影响。

2.2 开展环太湖城市群生态经济系统能值分析

(1) 可更新自然环境资源原始数据: 太阳能原始数据 = 面积 × 太阳光平均辐射量; 风能原始数据 = 高度 × 密度 × 涡流扩散系数 × 风速梯度 × 面积; 雨水势能原始数据 = 面积 × 平均海拔高度 × 年均降雨量 × 雨水密度 × 重力加速度; 雨水化学能原始数据 = 面积 × 年降雨量 × 吉布斯自由能 × 雨水密度; 地球旋转能原始数据 = 面积 × 热通量。

(2) 不可更新自然环境资源原始数据: 土壤有机质净损耗能原始数据 = 土壤面积 × (土壤侵蚀率 - 土壤形

成速率)×有机质平均含量×热能值;表土层净损耗能原始数据=农用土地面积×表土侵蚀率-植被演替面积×表土形成速率。

(3)其他资源原始数据参见统计年鉴数据,能量折算系数、能值转换率依据 H.T.Odum 的研究成果。根据环太湖城市群可更新资源、不可更新资源、货币流和废弃物流的原始数据,将各类资源换算为统一的能值单位计算各能量类别的流动量,编制成 2015 年环太湖城市群生态经济系统能值分析表(表 1)。

表 1 2015 年环太湖城市群城市生态经济系统能值分析表

Table 1 Emery analysis data of ecological- economic system in Taihu Lake city cluster (2015)

项目 Items/sej	苏州	无锡	常州	湖州	嘉兴
可更新自然环境资源 Renewable natural environment resources					
1 太阳能 Solar emery	3.98×10^{19}	2.13×10^{19}	2.01×10^{19}	2.68×10^{19}	1.80×10^{19}
2 风能 Wind emery	5.47×10^{20}	2.47×10^{20}	3.18×10^{20}	4.52×10^{20}	5.32×10^{20}
3 雨水势能 Rain potential emery	5.77×10^{21}	2.10×10^{21}	2.87×10^{21}	2.87×10^{21}	2.30×10^{21}
4 雨水化学能 Rain chemical emery	1.23×10^{21}	6.36×10^{20}	5.21×10^{20}	8.67×10^{20}	5.63×10^{20}
5 地球旋转能 Earth rotation emery	4.27×10^{20}	2.28×10^{20}	2.16×10^{20}	2.87×10^{20}	1.93×10^{20}
小计 Subtotal	8.02×10^{21}	3.24×10^{21}	3.95×10^{21}	4.50×10^{21}	3.60×10^{21}
本地可更新资源产品 Local renewable resource products					
6 粮食 Grain	1.50×10^{21}	1.00×10^{21}	1.51×10^{21}	9.31×10^{20}	1.70×10^{21}
7 棉花 Cotton	9.59×10^{18}	—	6.03×10^{18}	4.42×10^{18}	1.63×10^{19}
8 油料 Oil plants	3.43×10^{20}	1.88×10^{20}	7.84×10^{20}	5.44×10^{20}	8.53×10^{20}
9 茶叶 Tea	1.46×10^{17}	2.70×10^{18}	1.13×10^{18}	4.26×10^{18}	—
10 蚕茧 Silkworm cocoon	1.23×10^{19}	3.42×10^{19}	7.83×10^{18}	3.30×10^{20}	7.27×10^{20}
11 肉类 Meat	8.50×10^{21}	8.91×10^{21}	1.69×10^{22}	8.93×10^{21}	9.51×10^{21}
12 禽蛋 Poultry and Eggs	1.82×10^{21}	1.16×10^{21}	1.41×10^{21}	1.78×10^{21}	2.47×10^{21}
13 牛奶 Milk	6.79×10^{21}	1.79×10^{21}	1.06×10^{21}	9.25×10^{20}	9.17×10^{20}
14 蔬菜 vegetable	4.36×10^{20}	7.16×10^{20}	4.55×10^{20}	3.82×10^{20}	1.20×10^{21}
15 水果 Fruit	9.24×10^{19}	1.57×10^{20}	1.14×10^{20}	1.22×10^{20}	5.63×10^{20}
16 糖料 Sugar	3.07×10^{18}	—	8.35×10^{18}	2.70×10^{18}	4.49×10^{19}
17 木材 Wood	2.41×10^{18}	1.88×10^{18}	7.85×10^{18}	6.64×10^{19}	5.33×10^{17}
18 水产品 Aquatic products	1.10×10^{22}	5.24×10^{21}	7.45×10^{21}	1.48×10^{22}	6.30×10^{21}
19 丝 Silk	1.05×10^{19}	2.90×10^{19}	6.65×10^{18}	2.80×10^{20}	5.94×10^{20}
20 饮料酒 Drink wine	5.93×10^{20}	1.45×10^{20}	4.63×10^{20}	3.20×10^{20}	1.71×10^{20}
21 食用植物油 Edible vegetable oil	2.13×10^{22}	—	1.25×10^{20}	6.38×10^{21}	—
小计 Subtotal	5.24×10^{22}	1.94×10^{22}	3.03×10^{22}	3.58×10^{22}	2.51×10^{22}
不可更新自然环境资源 Non-renewable natural environment resources					
22 土壤有机质净损耗能 Soil organic matter net loss emery	3.74×10^{19}	2.24×10^{19}	2.48×10^{19}	3.40×10^{19}	2.49×10^{19}
23 表土层净损耗能 Surface soil net loss emery	4.42×10^{20}	3.12×10^{20}	1.77×10^{20}	4.63×10^{20}	7.00×10^{20}
小计 Subtotal	4.80×10^{20}	3.34×10^{20}	2.02×10^{20}	4.97×10^{20}	7.25×10^{20}
本地不可更新资源产品 Local non-renewable resource products					
24 发电量 Generating capacity	5.67×10^{22}	2.09×10^{22}	2.35×10^{22}	8.00×10^{21}	4.37×10^{22}
25 生铁 Cast iron	2.34×10^{22}	—	9.92×10^{21}	—	—
26 钢材 Rolled steel	5.86×10^{22}	3.10×10^{22}	2.35×10^{22}	4.94×10^{21}	8.35×10^{21}
27 钢 Steel	4.51×10^{22}	1.93×10^{22}	1.81×10^{22}	8.44×10^{20}	2.10×10^{21}
28 化肥 Chemical fertilizer	2.18×10^{20}	1.15×10^{21}	—	—	—
29 农药 Pesticide	2.20×10^{19}	5.04×10^{19}	6.03×10^{19}	1.17×10^{20}	1.25×10^{19}
30 水泥 Cement	3.19×10^{23}	5.98×10^{23}	7.80×10^{23}	4.22×10^{23}	4.86×10^{23}
31 玻璃 Glass	1.23×10^{21}	—	2.52×10^{19}	5.56×10^{20}	—
32 塑料 Plastic	3.88×10^{20}	4.74×10^{20}	1.40×10^{21}	1.97×10^{20}	3.86×10^{20}

续表					
项目 Items/sej	苏州	无锡	常州	湖州	嘉兴
33 合成氨 Synthesis ammonia	2.24×10^{21}	2.13×10^{21}	—	—	—
小计 Subtotal	5.07×10^{23}	6.73×10^{23}	8.57×10^{23}	4.37×10^{23}	5.41×10^{23}
输入能值 Input emergy					
34 进口商品总额 Imported goods total amount	2.06×10^{23}	4.36×10^{22}	1.13×10^{22}	2.24×10^{21}	1.35×10^{22}
35 实际利用外资 Disbursement of foreign capital	1.17×10^{22}	5.33×10^{21}	4.13×10^{21}	1.56×10^{21}	4.46×10^{21}
36 旅游收入 Tourist income	4.97×10^{22}	1.31×10^{22}	1.95×10^{22}	1.73×10^{22}	3.27×10^{22}
37 燃料 Fuel					
原煤 Raw coal	4.09×10^{22}	1.86×10^{22}	8.88×10^{21}	6.84×10^{21}	1.30×10^{22}
焦炭 Coke	6.36×10^{21}	4.07×10^{21}	4.70×10^{21}	1.47×10^{19}	2.63×10^{18}
汽油 Gasoline	2.00×10^{20}	7.90×10^{19}	1.20×10^{20}	3.41×10^{19}	9.50×10^{19}
柴油 Diesel oil	3.75×10^{20}	1.59×10^{20}	1.41×10^{20}	1.02×10^{20}	1.54×10^{20}
燃料油 Fuel oil	5.45×10^{20}	1.08×10^{20}	2.67×10^{18}	3.52×10^{19}	6.31×10^{19}
天然气 Natural gas	8.01×10^{21}	2.53×10^{21}	2.52×10^{21}	6.47×10^{20}	7.81×10^{20}
小计 Subtotal	3.23×10^{23}	8.75×10^{22}	5.12×10^{22}	2.87×10^{22}	6.48×10^{22}
输出能值 Output					
38 出口商品总额 Exported goods total amount	3.14×10^{23}	7.31×10^{22}	3.68×10^{22}	1.53×10^{22}	3.97×10^{22}
废弃物流能值 Waste emergy					
39 废气 Waste gas	3.55×10^{21}	1.60×10^{21}	8.87×10^{20}	5.32×10^{20}	5.67×10^{20}
40 废水 Waste water	1.79×10^{21}	6.49×10^{20}	3.83×10^{20}	6.76×10^{20}	6.48×10^{20}
41 固体废弃物 Solid waste	1.77×10^{21}	6.51×10^{20}	4.90×10^{20}	1.38×10^{20}	3.82×10^{20}
小计 Subtotal	7.11×10^{21}	2.90×10^{21}	1.76×10^{21}	1.35×10^{21}	1.60×10^{21}

由于各城市统计口径不同,表现为部分数据分类的不一致,此表基于原始统计分类进行数据处理

2.3 建立环太湖城市群能值指标评估体系

根据能值分析理论和环太湖城市群的实际情况,建立全面反应城市群生态经济系统的指标体系,选取能值流量指标、社会亚系统评价指标、经济亚系统评价指标、自然亚系统评价指标和综合评价指标(表2)。

表 2 环太湖城市群城市生态系统能值指标体系

Table 2 Emergy index system of ecological- economic system in Taihu Lake city cluster

	能值指标 Emergy Indicators	计算表达式 Evaluation expression	代表意义 Meaning
能值流量指标	可更新资源能值流量/sej	R	系统的环境可更新资源财富基础
Emergy flow index	不可更新资源能值流量/sej	N	系统的环境不可更新资源财富基础
	输入能值/sej	I	从外界输入资源与服务
	输出能值/sej	O	输出的资源与服务
	废弃物能值/sej	W	系统向环境排放的废弃物能值
	能值总量/sej	$U=R+N+I$	系统总能值量
社会亚系统评价指标	人均能值量/(sej/人)	U/P	生活水平与质量的标志
Evaluation index for	能值密度 ED/(sej/m ²)	U/S	评价能值集约度和强度
social subsystem	人口承载力/人	$(R+I)P/U'$	目前环境水准下可容人口量
	人均电力能值/(sej/人)	E/P	反映城市科技信息发展的程度
经济亚系统评价指标	能值/货币比率 EMR/(sej/美元)	U/GDP	经济现代化程度
Evaluation index for	能值交换率 EER	$EER=I/O$	评价国际贸易对外交流的得失利益
economic subsystem	能值产出率 EYR	$EYR=U/I$	城市系统经济效益
	电力能值比	E/U	反映工业化水平
	能值投资率	$I/(R+N)$	评价产业竞争力
自然亚系统评价指标	能值自给率 ESR	$ESR=(R+N)/U$	评价自然环境支持能力

续表

	能值指标 Emergy Indicators	计算表达式 Evaluation expression	代表意义 Meaning
Evaluation index for natural subsystem	环境负载率 ELR	$ELR = (IN + N) / R$	评价系统的环境压力
	废弃物能值比 EWR	$EWR = W / U$	废弃物利用价值
	可更新能值比率	$RER = R / U$	判断自然环境利用潜力
	废弃物与可更新能值比率	W / R	废弃物排放对环境的压力
	购入能值比率	I / U	对外界资源的依赖程度
可持续综合评价指标 Sustainable comprehensive evaluation index	可持续指标	$ESI = EYR / ELR$	衡量城市生态系统可持续发展能力
	能值可持续发展指标	$EISD = (EYR \times EER) / ELR$	实际可持续发展能力
城市健康水平指标 City health level index	健康能值指数	$EUEHI = (EYR \times EER \times ED) / (ELR \times EMR)$	综合反映城市生态系统的健康水平
	改进的健康能值指数	$EUEHI' = (EYR \times EER \times ESR) / (ELR \times W / R)$	考虑系统自我发展能力及废弃物排放和处理能力综合评价城市生态系统的健康状态

P :人口数量 Population, S :土地面积 Square, E :用电量能值 Electricity; 计算公式参见 H.T.odum 的研究成果, 健康能值指数参见[15], 改进的健康能值指数参见[22]有修改

3 研究结果与分析

根据 2015 年环太湖城市群生态经济系统能值分析表(表 1)和环太湖城市群生态经济系统能值指标体系(表 2)及相应的计算表达式得出 2015 年环太湖城市群城市生态经济系统可持续发展指标参数表(表 3)。

表 3 2015 年环太湖城市群城市生态经济系统可持续发展指标参数表

Table 3 Indicators of sustainable development of ecological- economic system in Taihu Lake city cluster (2015)

能值指标 Emergy Indicators	苏州	无锡	常州	湖州	嘉兴
可更新资源能值流量 Renewable resource emergy/sej	6.05×10^{22}	2.26×10^{22}	3.42×10^{22}	4.03×10^{22}	2.87×10^{22}
不可更新资源能值流量 Non-renewable resource emergy/sej	5.08×10^{23}	6.74×10^{23}	8.57×10^{23}	4.38×10^{23}	5.41×10^{23}
输入能值 Input emergy/sej	3.23×10^{23}	8.75×10^{22}	5.12×10^{22}	2.87×10^{22}	6.48×10^{22}
输出能值 Output emergy/sej	3.14×10^{23}	7.31×10^{22}	3.68×10^{22}	1.53×10^{22}	3.97×10^{22}
废弃物能值 Waste emergy/sej	7.11×10^{21}	2.90×10^{21}	1.76×10^{21}	1.35×10^{21}	1.60×10^{21}
能值总量 Total emergy/sej	8.92×10^{23}	7.84×10^{23}	9.42×10^{23}	5.07×10^{23}	6.35×10^{23}
人均能值量 The per capita emergy/(sej/人)	8.40×10^{16}	1.63×10^{17}	2.54×10^{17}	1.92×10^{17}	1.82×10^{17}
能值密度 Emergy density/(sej/m ²)	1.03×10^{14}	1.69×10^{14}	2.16×10^{14}	8.70×10^{13}	1.62×10^{14}
人口承载力 Land carry capacity/人	1.04×10^7	4.59×10^6	4.01×10^6	4.35×10^6	2.90×10^6
人均电力能值 The per capita electricity emergy/(sej/人)	7.12×10^{15}	7.19×10^{15}	6.34×10^{15}	4.34×10^{15}	6.81×10^{15}
能值/货币比值 The ratio of emergy to monetary capital/(sej/美元)	3.81×10^{12}	5.71×10^{12}	1.11×10^{13}	1.51×10^{13}	3.40×10^{13}
能值交换率 Emergy interchange ratio	1.03	1.20	1.39	1.88	1.63
能值产出率 Emergy output ratio	2.76	8.96	18.40	17.60	9.80
电力能值比 The ratio of electricity to total emergy	8.47×10^{-2}	4.41×10^{-2}	2.49×10^{-2}	2.26×10^{-2}	3.75×10^{-2}
能值投资率 Emergy investment ratio	5.69×10^{-1}	1.26×10^{-1}	5.75×10^{-2}	6.02×10^{-2}	1.14×10^{-1}
能值自给率 Emergy self-sufficiency ratio	6.37×10^{-1}	8.88×10^{-1}	9.46×10^{-1}	9.43×10^{-1}	8.98×10^{-1}
环境负载率 Environmental load ratio	9.33	30.90	25.50	11.10	19.40
废弃物能值比 The ratio of waste emergy to total emergy	7.97×10^{-3}	3.70×10^{-3}	1.87×10^{-3}	2.66×10^{-3}	2.52×10^{-3}
可更新能值比率 The ratio of renewable resource emergy to total emergy	6.78×10^{-2}	2.88×10^{-2}	3.63×10^{-2}	7.95×10^{-2}	4.52×10^{-2}

能值指标 Energy Indicators	苏州	无锡	常州	湖州	嘉兴
废弃物与可更新能值比率 The ratio of waste energy to renewable resource energy	1.18×10^{-1}	1.28×10^{-1}	5.15×10^{-2}	3.34×10^{-2}	5.57×10^{-2}
购入能值比率 The ratio of input energy to total energy	3.63×10^{-1}	1.12×10^{-1}	5.44×10^{-2}	5.67×10^{-2}	1.02×10^{-1}
可持续指标 Sustainable index	0.30	0.29	0.72	1.59	0.51
能值可持续发展指标 Energy sustainable development index	0.30	0.35	1.00	2.99	0.83
健康能值指数 Health energy index	8.22	10.30	19.53	17.27	3.94
改进的健康能值指数 Improved health energy index	1.65	2.40	18.45	84.40	13.31

3.1 能值流量结果与分析

根据 2015 年环太湖城市群生态经济系统可持续发展指标参数表和 2015 年环太湖城市群能值流量指标图(图 3)进行分析:

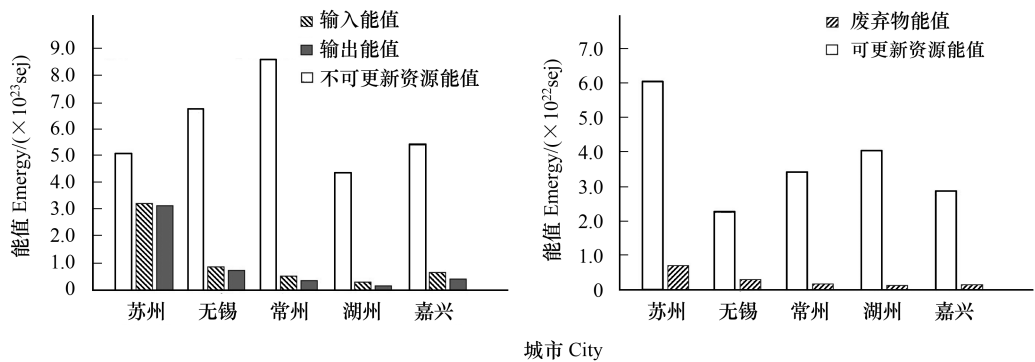


图 3 2015 年环太湖城市群能值流量指标图

Fig.3 Energy flow index for ecological- economic system in Taihu Lake city cluster(2015)

1)可更新资源能值:苏州市可更新资源能值利用量最大。由于苏州调整农业产业结构(食用植物油占比大幅提高达 40.71%),农业可持续发展潜力超过其他四市,可更新资源产品能值高于其他四市。

2)不可更新资源能值:常州市、无锡市和嘉兴市的不可更新资源能值消耗量大于苏州市。2015 年苏州市、无锡市、常州市、湖州市和嘉兴市的不可更新资源产品以水泥和钢铁为主,占比达 88.02%、96.33%、97.08%、97.97%、91.85%。

3)货币流能值:货币流能值包括输入能值和输出能值,苏州市产生的货币流输入能值和输出能值最大。其中,苏州市和无锡市的进口商品总额在其输入能值中的占比高达 63.59%和 49.76%,说明苏州和无锡的对外贸易开放度较高;而常州市、湖州市和嘉兴市的旅游收入在其输入能值中的占比较高,达到 38.02%、60.06%和 50.50%,说明旅游收入日益增长已成为它们的主要输入能值来源,也从侧面反应了服务业快速发展的趋势。同时,五个城市的燃料原煤的输入能值占比分别为 12.66%、21.30%、17.33%、23.81%和 20.04%,说明该地区能源稀缺,且依赖外界资源输入。2015 年五个城市的商品进出口呈现贸易顺差,说明 2015 年环太湖城市群对外贸易经济增长明显。

4)废弃物流能值:苏州排出的废弃物流能值最大。结果表明苏州市、无锡市、常州市的废气占比较大(达到 49.92%、55.16%、50.41%),湖州市和嘉兴市的废水占比较大(达到 50.26%和 40.57%)。

5)能值总量:2015 年五市可更新资源在能值利用总量中占比小(分别为 6.78%、2.88%、3.63%、7.95%、4.52%),说明自然可更新资源在促进环太湖城市群生态经济发展中具有重要的潜力;而五市不可更新资源在能值利用总量中占比最大,均超过 50%(分别为 56.95%、85.95%、90.93%、86.37%、85.28%),说明环太湖城市群生态经济发展主要依存于不可更新资源的开发与利用,属于资源消耗型经济生态模式;另外五市输入能值

占比小于 50% (分别为 36.27%、11.16%、5.44%、5.67%、10.21%), 说明对外贸易对环太湖城市群生态经济系统可持续发展有影响。

3.2 社会、经济、自然亚系统演变态势结果与分析

根据 2015 年环太湖城市群生态经济系统可持续发展指标参数表(表 3)和 2015 年环太湖城市群社会亚系统评价指标图(图 4)、经济亚系统评价指标图(图 5)、自然亚系统评价指标图(图 6), 可以得出 2015 年环太湖城市群 5 个城市在经济发展、社会建设、自然环境等方面有明显的差异性, 具体分析如下:

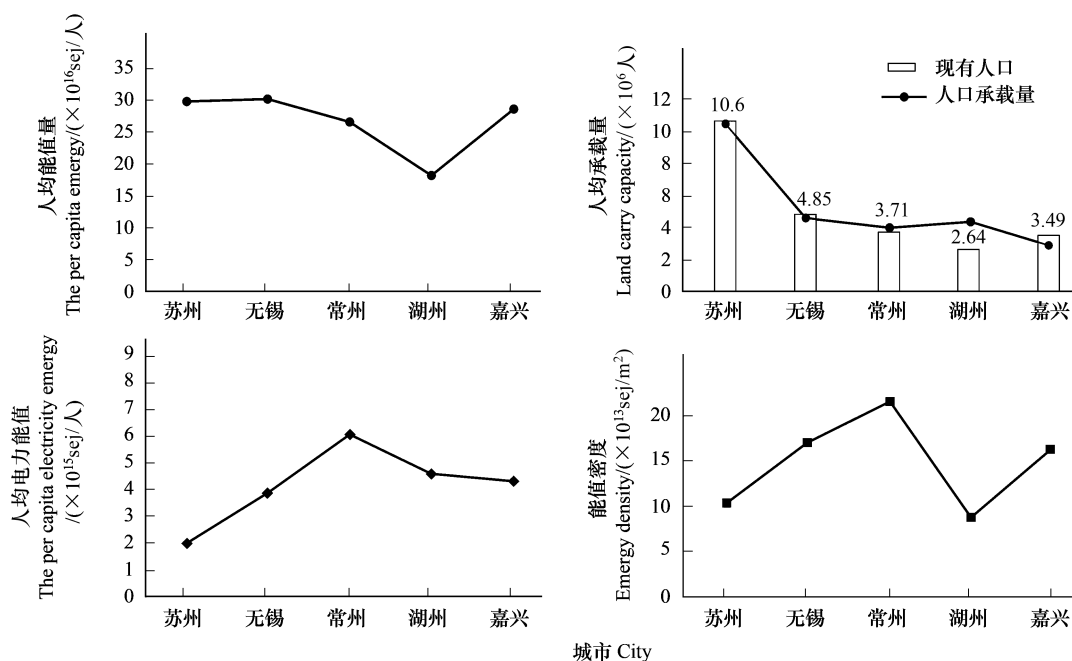


图 4 2015 年环太湖城市群社会亚系统评价指标图

Fig.4 Evaluation index for social subsystem in Taihu Lake city cluster (2015)

1) 社会亚系统: 2015 年环太湖城市群人均能值量远高于中国平均水平 (7.00×10^{15} sej/人, 2007 年), 说明环太湖城市群人民的生活水平与质量显著提高。2015 年环太湖城市群能值密度远高于全国平均水平 (7.54×10^{11} sej/m², 2007 年), 说明环太湖城市群的能值集约程度很高, 意味着土地资源稀缺性将成为经济长远发展的壁垒。2015 年环太湖城市群中苏州、无锡和嘉兴的人口已超过人口承载力峰值, 表明三市生态经济系统环境处于一种过度饱和的状态, 环境人口承载压力过大, 可持续发展能力受限。2015 年环太湖城市群中人均电力能值均较高, 说明环太湖城市群的城市支柱产业的技术与信息化发展程度很高。

2) 经济亚系统: 根据 2015 年环太湖城市群中能值/货币比值数据, 可以看出五个城市单位货币量所能购买的能值总量不同, 城市发展水平不同。其中苏州市经济现代化程度高于其他四市, 城市倾向于外部输入的能值, 苏州对外开放程度更高, 单位货币所能购进的资源产品更多。根据 2015 年环太湖城市群中能值交换率数据, 五市输入能值均高于输出能值。根据 2015 年能值产出率数据, 苏州市的生产效率相对较低, 应该提高城市资源的利用效率。根据 2015 年环太湖城市群中电力能值数据, 可以看出苏州市电力能值比最高, 工业化程度更高。根据 2015 年环太湖城市群中能值投资率数据, 可以看出苏州市能值投资率最高, 产业竞争力更高。

3) 自然亚系统: 根据 2015 年环太湖城市群能值自给率数据, 常州市和湖州市城市发展对本地自然生态环境的依赖度更高, 而苏州市和无锡市由内部资源利用逐渐转向依赖外界资源。根据 2015 年环太湖城市群环境负载率数据, 苏州市的环境负载率最低, 说明苏州市环境压力最低。根据 2015 年环太湖城市群废弃物能值比数据, 苏州市的废弃物利用率较高, 环境负载率较低, 可更新资源的利用效率较大。根据 2015 年环太湖城

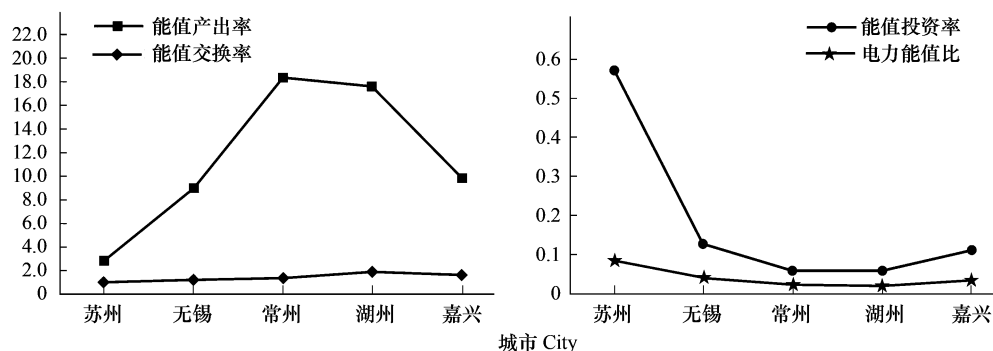


图 5 2015 年环太湖城市群经济亚系统评价指标图

Fig.5 Evaluation index for economic subsystem in Taihu Lake city cluster (2015)

市群可更新能值比率数据,湖州和苏州的可更新能值比率最高,说明对本地可更新资源的利用合理。根据 2015 年环太湖城市群废弃物与可更新能值比率数据,无锡市的废弃物与可更新能值比率最高,废弃物排放环境压力较大。根据 2015 年环太湖城市群购入能值比率数据,苏州市购入能值比率最高,对外界资源的依赖度较高。

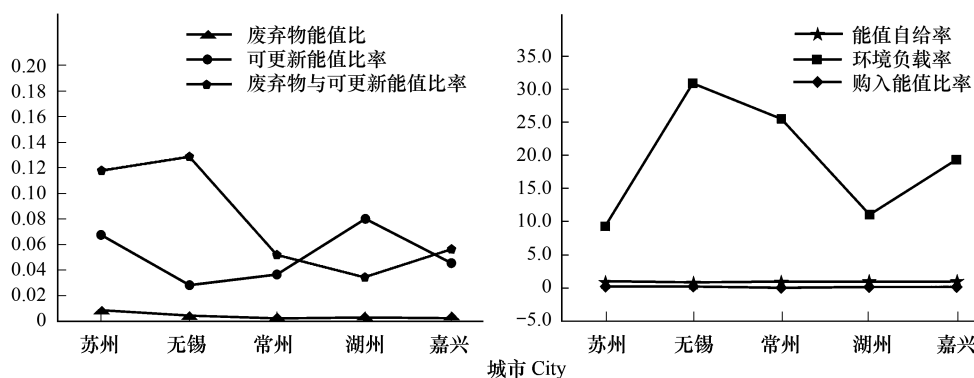


图 6 2015 年环太湖城市群自然亚系统评价指标图

Fig.6 Evaluation index for natural subsystem in Taihu Lake city cluster (2015)

3.3 可持续发展结果与分析

可持续指标 ESI 为能值产出率与环境负载率的比值,是衡量城市生态系统可持续发展能力的指标。如果一个区域经济系统能值产出率较高,环境负载率相对较低,则可持续发展指数较高,区域经济系统发展是可持续的,反之区域经济系统发展不可持续。但 Ulgiati S 指出,可持续指标 ESI 并非呈简单线性关系,ESI<1 为消费型经济系统,1<ESI<10 为经济系统富有活力和发展潜力,ESI>10 为经济不发达状况^[8,12]。根据 2015 年环太湖城市群可持续指标 ESI 数据(图 7),可以看出 1<湖州市可持续指标 ESI<10,湖州的经济系统富有活力和发展潜力,具有可持续发展特征;而其他四市均<1,属于消费型经济系统。

对可持续指标 ESI 改进获得复合型评价指标——能值可持续发展指标 EISD,它能兼顾反应社会经济效益与生态环境压力的系统可持续发展的评价特征,是反映实际可持续发展能力的指标,其值越高表明单位环境压力下的社会经济效益越高,在保持可持续发展道路上更具竞争优势。根据 2015 年环太湖城市群能值可持续发展指标 EISD 数据(图 7),可以看出湖州市能值可持续发展指标 EISD 最高,说明湖州市单位环境压力下的社会经济效益最高,更具可持续发展竞争力。

3.4 城市健康水平结果与分析

结合能值的方法进行城市生态系统的健康评价,构建健康能值指数 EUEHI,以能值产出率、能值交换率、

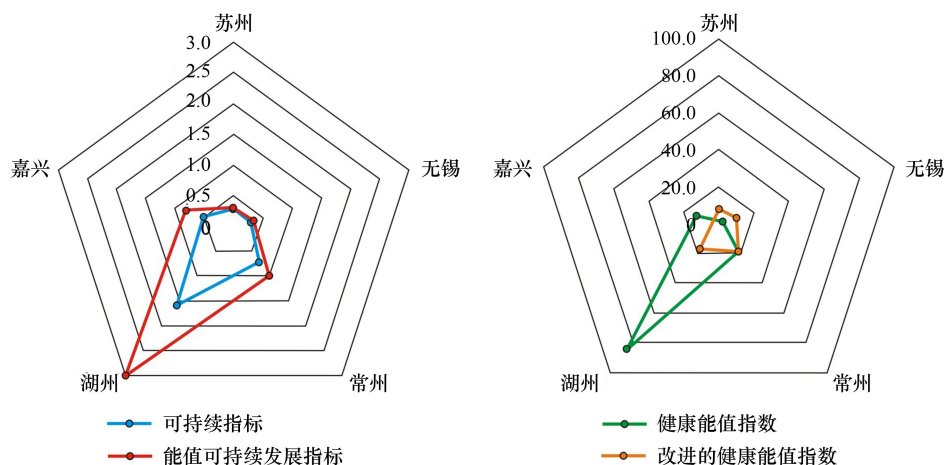


图 7 2015 年环太湖城市群可持续发展及健康水平综合评价图

Fig.7 Evaluation for sustainable development and health level of ecological-economic system in Taihu Lake city cluster (2015)

环境负载率分别代表活力、组织结构和恢复力 3 个方面,以能值密度和能值货币比值来评定城市的服务功能维持,综合反映城市生态系统的健康水平^[15]。根据城市健康评分分级标准,EUEHI<0.5 是病态,0.5<EUEHI<1.4 是不健康,1.4<EUEHI<4.4 是亚健康,4.4<EUEHI<8.1 是较健康,8.1<EUEHI 是很健康^[22],分析 2015 年环太湖城市群健康能值指数 EUEHI 数据(图 7),可以看出嘉兴市处于亚健康状态,其他四市都处于很健康的状态。但是由于没有计入废弃物的利用和资源的消耗,需要对此指数改进。

对健康能值指数 EUEHI 改进,以能值产出率、能值交换率和能值自给率分别代表系统的活力、组织结构和功能服务维持 3 个方面,以环境负载率和废弃物与可更新能值比率的乘积代表恢复力,综合构建改进的健康能值指数 EUEHI',从系统自我发展的能力以及系统对发展所带来的废弃物的控制和处理能力方面来评价城市的健康状态^[23]。根据 2015 年环太湖城市群改进的健康能值指数 EUEHI'数据(图 7),可以看出苏州市和无锡市的健康水平较低,相比较湖州市改进的健康能值指数 EUEHI'最高,综合考虑湖州更具有可持续发展的潜力。

3.5 与其他城市群的对比结果与分析

选取长株潭城市群进行对比分析:长株潭城市群是多中心网络化的生产、生活、生态协调发展的城市群典范,地处我国中部地区,在湖南省中部偏东位置,位于泛珠三角经济区与长江经济带的结合部,是中部崛起战略中重点开发的城市群之一,由长沙、株洲、湘潭三市组成,区域面积 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

长株潭城市群 2000—2005 年可持续指标 ESI 从 26.55 下降到 10.52,说明生态环境超出负荷,但负荷力下降;2006—2009 年可持续指标 ESI 从 8.977 下降到 4.494,说明生态空间尚有剩余。而 2015 年苏州市可持续指标 ESI 为 0.30,无锡市可持续指标 ESI 为 0.29,常州可持续指标 ESI 为 0.72,湖州可持续指标 ESI 为 1.59,嘉兴可持续指标 ESI 为 0.51,环太湖城市群可持续指标 ESI 为 0.68。对比分析得出 2009 年长株潭城市群经济系统更具富有活力和发展潜力,而环太湖城市群属于消费型经济系统,需要提高城市群的可持续发展潜力。

4 研究结果讨论

4.1 共性问题

根据可更新资源能值数据分析结果,无锡、常州、湖州和嘉兴市仍以传统的农业结构为主,肉类与水产品占比超过 50% (分别为 73.05%、80.33%、66.26% 和 63.08%),建议无锡、常州、湖州和嘉兴市对传统的“粮猪型”农业格局进行调整,提高农业可持续发展潜力。

根据不可更新资源能值数据分析结果,五市的不可更新资源产品均以水泥和钢铁为主,2015 年开始以去

产能、去库存、去杠杆、降成本、补短板为重点的供给侧结构性改革已经全面展开,建议环太湖城市群五市应该加快传统产业转型升级。

根据废弃物流能值数据分析结果,五市应加大对工业三废处理的绿色制造产业的布局与规划。

根据能值交换率数据、可持续指标 ESI 数据和可持续发展指标 EISD 数据分析结果,为促进城市可持续发展,建议苏州市、无锡市、常州市和嘉兴市提高城市可更新资源的利用效率,降低不可更新资源的消耗,减小环境负载压力,同时尽量出口最终产品,购买输入高能值的资源和科技产品,加大经济开发强度,提高城市的可持续发展能力。

根据人口承载力数据分析结果,为促进可持续发展,建议苏州、无锡和嘉兴应合理的规划人口发展,同时常州和湖州环境人口承载力空间较大,建议合理规划促进城市群产业和人口发展。

4.2 湖州问题

根据能值密度数据分析结果,湖州市能值密度显著低于其他四市,这主要是由于湖州能值利用总量最低,未来湖州市发展潜力巨大,建议加大可更新资源的利用潜力,同时扩大对外贸易开放程度。根据人均电力能值数据分析结果,湖州市人均电力能值低于其他四市,这主要是由于湖州支柱产业的技术与信息化发展程度低于其他四市,湖州科技与信息产业发展空间较大,建议加快新兴产业布局。

4.3 无锡和常州问题

根据环境负载率数据分析结果,建议无锡、常州降低不可更新资源的消耗量,促进城市的生态功能提升。根据可更新能值比数据分析结果,建议无锡市和常州市提高本地可更新资源利用率,促进城市可持续发展。根据废弃物与可更新能值比率数据分析结果,无锡市应引进高科技技术和工艺减少废弃物产生带来的环境压力。根据购入能值比率数据分析结果,由于常州能值利用总量较高,但输入能值较低,建议常州扩大对外开放的程度,减少对本地不可更新资源的消耗,提高城市的可持续发展潜力。

4.4 苏州问题

根据人均能值量数据分析结果,苏州人均能值量显著低于其他四市,这主要是虽然苏州能值利用总量较高,但苏州的人口(已超千万)远超其他四市,为保证苏州人民的生活水平和质量,提高城市的可持续发展能力,建议苏州合理引导人口发展。

同时值得关注的是苏州市输入输出能值显著高于其他四市,废弃物能值也显著高于其他四市,在苏州出口贸易中占主导地位的是外资企业,出口额一直占苏州市对外贸易出口额一半以上,苏州市对外出口的产品多以工业制成品为主,产品附加值低,虽然拉动苏州的就业及地区经济的发展,但由于其高耗能、高碳排放,长期会阻碍苏州的经济发展。建议苏州引入具有技术溢出效应的外资企业,提高出口产品附加值,降低本地的能耗和碳排放,提高可持续发展空间。

5 环太湖城市群生态经济系统发展对策

从能值分析的结果来看,环太湖城市群生态系统存在的问题主要有三个方面:第一,环太湖城市群的农业和工业结构比较传统,本地不可更新资源消耗大,本地可更新资源和废弃物利用不足,自组织程度下降,对环境造成的压力增加;第二,环太湖城市群生态经济系统环境处于饱和的状态,环境人口承载压力较大,可持续发展能力受限制;第三,环太湖城市群对外贸易的程度在不断扩大,对外资源的依赖度在不断提高。针对这些现状,结合能值分析的结果,为环太湖城市群生态经济系统的发展提出了以下对策:

5.1 调整产业结构

环太湖城市群五市(除苏州)仍以传统的农业结构为主,肉类与水产品占比大,以传统的“粮猪型”农业格局为主,农产品下游产业发展潜力巨大,应调整农业格局,促进农业可持续发展潜力,生产更多的产业链下游产品,提高出口产品的附加值,实现资源的高效利用。

同时环太湖城市群五市的工业产品以水泥和钢铁为主,在全国大力开展供给侧结构性改革的环境下,应

该加快传统产业转型升级,以市场需求为导向,引进先进的生产加工技术,转型生产高附加值钢材产品,从而降低对低附加值钢材产品的出口和高附加值钢材产品进口产生的资源利用消耗带来的价值逆差。

5.2 规划人口发展

环太湖城市群中苏州、无锡和嘉兴的人口已超过人口承载量峰值,环境人口承载压力过大,环境处于饱和的状态,苏州、无锡、常州和嘉兴的能值集约程度很高,土地资源稀缺性将成为经济长远发展的壁垒,在近期内难以改变,可持续发展能力受限。建议环太湖城市群每个城市应对区域范围内的资源环境承载力进行分析,预测未来 10 年至 20 年内的人均资源环境承载力,对城市的建设用地面积、人口规模、产业发展进行合理的控制和引导,进行主体功能分区规划,实现生态系统可持续的发展。

5.3 推进绿色智造

环太湖城市群生态经济发展主要依存于不可更新资源的开发与利用,可更新资源的利用不足,属于资源消耗型经济生态模式。同时废弃物排放环境压力较大(特别是无锡市),废弃物利用率较低(常州市)。面对经济快速增长带来的环境问题,鼓励发展“节能减排—低碳循环—绿色生态—可持续”的绿色智造模式,应以低碳产业为发展重点,优化产业结构,加大技术研发力度,引进高科技技术和工艺,建立起低开采高利用低排放高循环利用的发展模式,实现生态系统可持续的发展。

5.4 开发利用新能源

环太湖城市群燃料消耗以输入购买为主,主要为不可再生资源原煤、焦炭、汽油、柴油、燃料油和天然气,在输入能值中占比较高。建议环太湖城市群应加大技术投入,结合当地的优势特色,不断开发新能源和替代能源,积极推进风能、水能、太阳能、地热能和沼气能在社会生产和人民生活中的应用,逐步替代对不可再生资源的消耗。同时加大研发力度,生产可再生的低碳环保材料,调整能源资源结构,促进生态系统可持续的发展。

5.5 优化对外开放结构

环太湖城市群的进出口贸易呈顺差,对外贸易经济增长明显,苏州和无锡经济现代化程度更高,常州市、湖州市和嘉兴市的服务业(特别是旅游业)呈现出较快的发展趋势。但“苏州模式”的外向型经济模式对本地企业技术溢出效应较低,外资企业占对外贸易出口的主导地位,对外出口的产品附加值低。建议环太湖城市群政府创新体制机制,积极开拓国际资源供给渠道,发展跨境电商等新经济形态,引进高科技的技术和设备、高水平人才队伍、高能值的管理经验,改变以往的初级产品输出的格局,提高出口商品的质量、性能和科技附加值,以出口最终产品为目标,提高产品的能值交换率,促进生态系统可持续发展。同时建议环太湖城市群发挥政府治理作用抓住文化旅游和商务旅游的新经济形态打造面向市场的旅游特色。

参考文献(References):

- [1] 杨振山, 丁悦, 李娟. 城市可持续发展研究的国际动态评述. 经济地理, 2016, 36(7): 9-18.
- [2] 李锋, 刘旭升, 胡聃, 王如松. 城市可持续发展评价方法及其应用. 生态学报, 2007, 27(11): 4793-4802.
- [3] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9.
- [4] Odum H T. 系统生态学. 蒋有绪, 译. 北京: 科学出版社, 1993:20-50.
- [5] Odum H T. 能量、环境与经济——系统分析导引. 蓝盛芳, 译. 北京: 东方出版社, 1992.
- [6] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996: 88-156.
- [7] Odum H T. Self-organization, Transformity, and information. Science, 1988, 242(4882): 1132-1139.
- [8] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy Use, Environmental Loading and Sustainability an emergy analysis of Italy. Ecological Modelling, 1994, 73(3/4): 215-268.
- [9] Brown M T, McClanahan T R. EMergy analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals. Ecological Modelling, 1996, 91(1/3): 100-130.
- [10] Whitfield D F. Emergy Basis for Urban Land Use Patterns in Jacksonville, Florida[D]. Gainesville: University of Florida, 1994.
- [11] 严茂超, Odum H T. 西藏生态经济系统的能值分析与可持续发展研究. 自然资源学报, 1998, 13(2): 116-125.

- [12] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
- [13] 隋春花, 蓝盛芳. 广州城市生态系统能值分析研究. 重庆环境科学, 2001, 23(5): 4-6, 23-23.
- [14] 胡聃, 文秋霞, 李锋, 王震, 冯强, 张艳萍. 北京城市生态系统的能值动态分析. 城市环境与城市生态, 2006, 19(6): 1-4.
- [15] 李海涛, 严茂超, 沈文清, 刘文江. 新疆生态经济系统的能值分析与可持续发展研究. 干旱区地理, 2001, 24(4): 289-296.
- [16] 楚芳芳, 蒋涤非. 基于能值分析的长株潭城市群生态经济系统演变态势分析. 经济地理, 2012, 32(2): 143-148.
- [17] 蔺雪芹, 方创琳. 城市群地区产业集聚的生态环境效应研究进展. 地理科学进展, 2008, 27(3): 110-118.
- [18] 杨天姿. 基于能值生态足迹的山东省沿海城市群可持续发展研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 1-72.
- [19] 楚芳芳, 蒋涤非. 基于能值改进生态足迹的长株潭城市群可持续发展研究. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2): 145-150.
- [20] 楚芳芳, 蒋涤非. 基于能值理论的长株潭城市群一体化研究. 科技进步与对策, 2012, 29(5): 45-50.
- [21] 方创琳, 任宇飞. 京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合能值代谢效率及环境压力分析. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 833-846.
- [22] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析. 自然资源学报, 2001, 16(4): 297-304.
- [23] 成福伟, 张月丛, 邹斌, 杨越. 基于能值分析的区域生态经济发展研究—以承德为例. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(S1): 20-29.