

基于能值理论的长三角沿江城市群生态—经济—社会系统可持续发展态势研究

王大伟, 梁献超, 王潘绣

(金陵科技学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: [目的] 对长三角沿江城市群生态—经济—社会系统可持续发展态势进行研究, 为该地区生态经济可持续发展提供科学支持。[方法] 基于能值理论构建评价指标和评价体系, 分析长三角沿江城市群生态—经济—社会系统的可持续发展态势。[结果] 2017年长三角沿江城市群中29%的城市资源过度开发, 外部依赖性强; 53%的城市环境负载率低, 29.4%的城市环境负载率高; 11.7%的城市废弃物循环再生能力低; 47%的城市能值交换率低, 经济竞争力强; 35%的城市能值货币率高, 经济产出效率低。上海、苏州单位面积能值密度高, 23.5%的城市较低; 29.4%的城市人均能值福利低; 17.6%的城市人口负载率高; 41.2%的沿江城市呈可持续发展态势, 58.8%的城市呈过度发展态势。[结论] 2017年沿江城市群自给能力、环境压力、生态质量呈现上游城市强、小、优向中游基本协调, 下游弱、高、差的渐变态势。上海、苏南城市经济竞争力强, 但产出效率低; 苏中、皖中地区除省会城市外其他城市竞争力弱; 皖南城市经济发展滞后且呈沿江单边孤立发展态势。上海、苏南城市社会可持续发展优, 形成人才、资源强吸引同时存在用地短缺问题; 苏中城市较均衡并形成弱吸引; 除合肥市、铜陵市外, 皖中、皖南其他城市发展滞后, 缺乏有效吸引。沿江城市群整体可持续发展态势严峻。

关键词: 长三角; 沿江城市群; 能值; 生态经济; 可持续发展

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)04-0228-09

中图分类号: TU982, X171.1

文献参数: 王大伟, 梁献超, 王潘绣. 基于能值理论的长三角沿江城市群生态—经济—社会系统可持续发展态势研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 228-236. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.031; Wang Dawei, Liang Xianchao, Wang Panxiu. A study on sustainable development of ecological-economy-society system of urban agglomeration along Yangtze River delta based on emergy theory [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 228-236.

A Study on Sustainable Development of Ecological-Economy-Society System of Urban Agglomeration Along Yangtze River Delta Based on Emergy Theory

Wang Dawei, Liang Xianchao, Wang Panxiu

(School of Architecture and Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211169, China)

Abstract: [Objective] The situation of sustainable development of ecological-economy-society system of urban agglomeration along Yangtze River delta were studied in order to support the sustainable development of the ecological economy of the urban agglomeration in this region. [Methods] Based on the emergy theory, the sustainable development of nature, economy and social system of urban agglomeration along the Yangtze River was studied. [Results] In 2017, 29% of the ecological resources were over-exploited, with strong external dependencies, 53% of cities had a low environmental load rate while 29.4% of cities had a high environmental load rate, 11.7% of cities had low waste recycling capacity, 47% of cities had low emergy exchange rates and strong economic competitiveness, 35% of cities had high emergy currency rates, with low

收稿日期: 2020-03-07

修回日期: 2020-05-07

资助项目: 江苏高校哲学社会科学重大项目“江苏省扬子江城市群城市空间互动与协同发展机制研究”(2019SJZDA132); 国家自然科学基金基金项目“内陆边境地区门户城市与中心城市耦合的时空特征与动力机制研究”(41701127)

第一作者: 王大伟(1984—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 硕士, 副教授, 主要从事区域统筹与城乡可持续发展。Email: wangdawei@jit.edu.cn.

通讯作者: 梁献超(1972—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士, 副教授, 主要从事绿色建筑设计、城市生态环境及可持续设计。Email: lxc@jit.edu.cn.

economic output efficiency, Shanghai and Suzhou cities had high emergy density per unit area, and 23.5% of cities had lower emergy density, 29.4% of the cities had low per capita emergy welfare, 17.6% of cities had a high population load rate, 41.2% of the cities along the river were sustainable, and 58.8% of the cities were in over development situation. [Conclusion] In 2017, the urban agglomerations along the upper reaches of the Yangtze River were characterized by strong self-sufficiency, low environmental pressure, and excellent ecological quality. The urban agglomerations in the middle reaches coordinated with each other. The urban agglomerations in the lower reaches of the river were characterized by weak self-sufficiency, high environmental pressure, and poor ecological quality. Cities in Shanghai City and Southern Jiangsu Province had strong economic competitiveness, but their output efficiency was low. In Central Jiangsu Province and Central Anhui Province, except for provincial capitals, other cities had weak competitiveness. The economic development of cities in Southern Anhui Province lagged behind and isolated along the river. The sustainable development of urban society in Shanghai City and Southern Jiangsu Province was excellent, forming a strong attraction to talents and resources, and they also had the problem of land shortage at the same time. The urban social, economic and ecological development of central Jiangsu Province were relatively balanced, but it had a weak attractiveness to surrounding cities. Except for Hefei City and Tongling City, the overall development of cities in central and Southern Anhui Province lags behind, and there was no effective attraction for surrounding cities. The overall sustainable development of the urban agglomerations along the river was still severe.

Keywords: Yangtze River delta; urban agglomerations along the Yangtze River; emergy; ecological economy; sustainable development

改革开放以来伴随着城镇化的发展,城市规模不断扩大,与外界交换频率加快,联系强度增强,中国许多城市逐步脱离孤立式、扁平化的发展模式,形成城市间协同互助的高密度集群发展模式,并通过特大城市的集聚和带动效应逐渐形成大中小城市及小城镇的协同发展格局,成为国家新型城镇化的主体形态^[1],目前已形成长三角、珠三角、京津冀、长江中游、成渝、中原等19个城市群。但与此同时,经济的高速发展和高密度城市群的建设致使人、城、环境三者之间失衡,出现了城市空气污染、水体污染、生态环境污染、土壤污染等一系列“城市病”,成为中国城市群健康及可持续发展的障碍。因此如何平衡高速发展时期城市群与环境、资源、社会、经济的关系,构建生态环境与发展需求相适应的绿色低碳、高效集约型生态城市群,成为当前研究的重点议题。

国内关于城市群生态可持续发展的研究始于21世纪初,对长三角、珠三角、长株潭等地区城市群生态危机、生态安全及生态圈建设等问题进行剖析,并提出调控机制和策略^[2-4]。近几年由于城市群建设上升为国家战略^[5]以及城市生态问题的逐渐突出,学者针对城市群的研究呈现了显著增长,研究内容、方法逐渐丰富,相关主要集中于两方面:通过运用人口—经济—社会—空间(PESS)、压力—状态—响应(PSR)和活力—组织结构—恢复力—生态系统功能维持—人群健康模型(VORSP)等评估模型构建城市化和生

态环境等要素的评价指标体系^[6-7],对并运用耦合协调度^[8]、空间自相关^[9]等模型对城市群生态承载力、城市与生态的耦合、协调关系进行评价研究^[10-11]。其次基于Landsat卫星影像,通过计算遥感生态指数(RSEI),将湿度、绿度、热度和干度4个重要因子作为评价指标以分析城市群生态环境质量^[12-13];或通过分析土地利用与覆盖变化情况,探索特定时空尺度上土地利用变化的空间分布与格局特征,研究城市群生态效益与经济效益间的内在关系^[14-15]。该研究通过指标分析或城市影像研究能客观、定量、准确的反映出城市群与生态环境之间的内在机制,有利于城市群的健康发展。但由于城市群作为生态、社会和经济系统交互、作用、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],内部子城市则按照一定规律与生态环境及周边城市进行能量流的复杂多向交换和代谢,促使各种经济社会要素在空间上扩散与互动,共同组成城市群,但上述研究不能从根本上体现城市间及城市与生态环境间各种“能量流”的内部代谢过程及运作过程,对城市群的诊断和评价仅能进行表象分析且缺乏准确性。因此国内外学者基于系统生态学和生态经济学的理论视角提出可体现城市新陈代谢过程的能值(emergy)分析法,对城市群生态—经济系统进行定量分析,为生态经济系统的定量分析研究开拓了新途径^[17]。该理论于20世纪90年代引入中国^[18],广泛应用于城市及区域生态经济可

持续发展的评价研究,既有对北京^[19]、威海^[20]、西安^[21]等单一城市生态经济系统可持续发展的分析研究;也有对江苏^[22]、山西^[23]等省域可再生资源的生态承载力和生态经济协调性进行研究;近几年研究重点从城市或行政区逐渐向跨区域城市群转变^[24-25]。研究虽取得一定的成果,但存在研究区域较少、成果不够丰富等问题,目前尚未见到对长三角沿江城市群生态经济发展的相关研究。

本文基于能值理论,以长三角沿江城市群为研究对象,对其生态经济发展态势进行评价及分析,并提出策略指导,有助于实现人、资源环境与城市社会经济的良性发展,进而推动长三角沿江城市群生态经济可持续发展^[26]。

1 研究区域

长三角城市群作为中国经济最具活力、开放程度最高、创新能力最强、吸纳外来人口最多的区域之一,在国家现代化建设大局和全方位开放格局中具有重要的地位。长三角城市群目前已形成“一核五圈四带”的网络化空间格局。其中沿江城市群(带)社会经济发展成熟,横跨上海市、江苏省和安徽省中南部,涵盖上海、南通、苏州、无锡、常州、镇江、泰州、扬州、南京、滁州、马鞍山、合肥、芜湖、铜陵、宣城、池州、安庆 17 个城市,其依托长江黄金水道,东承上海产业转移,西担长江中游地区城市的辐射带动作用,又是中国长江经济带的起点,在长三角城市群乃至长江经济带构建具有重要战略意义。2017 年沿江 17 个城市人口数量为 1.02×10^8 人,占长三角城市群总人口的 68%;国土面积为 1.32×10^5 km²,占城市群总面积的 62%;经济总量达 1.16×10^{13} 元,约占城市群经济总量的 70%,是长三角地区人口规模、城市数量、经济产业高密度集群、叠加区域。

2 研究方法

2.1 资料统计与收集

研究所采用的自然地理、经济和社会等数据资料来源于 2017 年《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《江苏省统计年鉴》《安徽省省统计年鉴》《上海市统计年鉴》《南通市统计年鉴》《苏州市统计年鉴》《无锡市统计年鉴》《常州市统计年鉴》《镇江市统计年鉴》《泰州市统计年鉴》《扬州市统计年鉴》《南京市统计年鉴》《滁州市统计年鉴》《马鞍山市统计年鉴》《合肥市统计年鉴》《芜湖市统计年鉴》《铜陵市统计年鉴》《宣城市统计年鉴》《池州市统计年鉴》《安庆市统计年鉴》《2017 年度中国对外直接投资统计公报》《中国对

外劳务合作发展报告 2017—2018 年》以及各城市的《2017 年国民经济和社会发展统计公报》。

2.2 能值理论的内涵

能值理论将城市看作具有一定基因特征的、复杂的新陈代谢系统,其按照一定的内在机制形成内外部子系统的分工协作,通过生产、输入、消耗、产出、代谢能量进行分裂、生长,共同组成城市群落结构。但由于不同能量介质的计量方法、特质属性存在差异,传统方法难以通过统一标准进行衡量分析。而能值理论方法则可以将自然生态和社会经济系统中流动和储存的不同类别和介质的资源,通过设定不同介质的能值转换率换算成以太阳能(S_{ej})为基准刻度的能值〔公式(1)],通过统一度量解析进入系统的能量通量密度、流转路径、流转方式、速度和强度^[27],进而对城市群生态经济系统演化、发展态势进行定量评估。

$$E_m = \sum_i T_i \cdot E_i \quad (1)$$

式中: E_m 为所转化的太阳能值; T_i 为资源 i 的能值转换率; E_i 为资源 i 的具体数目,单位常用克(g)、焦耳(J)、美元(\$)或吨(t)表示。根据上述公式,可计算得到各种物质、能量以及劳务所形成直接或间接耗费的太阳能值。

2.3 长三角沿江城市群能值指标及评价体系构建

能值理论体系由能值计算指标和能值测度评价指标两个体系组成。其中能值计算指标又由城市本地可更新资源能值、本地不可更新资源能值、外部输入能值、输出能值、废弃能值 5 部分构成。其分别表征某城市从本地自然环境中获取的可更新自然资源及产品、不可更新资源及产品、城市外部资源输入和利用、城市对外输出以及在城市向环境排放的废弃物,其指标构成如表 1 所示。其中本地可再生资源中,太阳能=国土面积×太阳能平均辐射量;风能=高度×密度×涡流扩散系数×风速梯度×面积;雨水势能=面积×平均海拔高度×平均降雨量×密度×重力加速度;雨水化学能=土地面积×降雨量×吉布斯自由能;地球旋转能=国土土地面积×土地热通量。

能值评价体系是基于能值指标的基础上,通过不同的能值评价指标体现城市环境、社会、经济的压力、强度及健康可持续发展的态势。评价体系由表征城市经济亚系统发展态势的能值货币率(EDR)、能值交换率(EER)及改进的能值竞争力(ECF)指标;表征城市自然亚系统发展态势的城市能值自给率(ESR)、城市能值产出率(EYR)、城市能值废弃率(EWR)、城市环境负载率(ELR)指标;表征城市社会亚系统发展

态势的能值密度(ED)、人均能值量(EP)、人口承载量(PCC)及改进的人口负载率(PLR)指标以及表征

城市可持续发展态势的能值可持续指标(ESI)4个部分构成,其指标表征及内涵如表2所示。

表 1 资源能值计算指标构成体系

类别	项目	能值转换率	类别	项目	能值转换率
本地可更新资源能值(R)	太阳能/Sej	1	不可更新资源能值(N)	水泥/g	1.98E+09
	风能/J	6.63E+02		天然气/J	4.80E+04
	雨水势能/J	8.89E+03		焦炭/t	5.80E+14
	雨水化学能/J	1.54E+04	输入能值(I)	进口商品/\$	2.00E+12
	地球旋转能/J	2.90E+04		旅游/\$	2.50E+12
	水产品/g	1.80E+10		汽油/J	6.60E+04
	粮食/t	5.82E+15		柴油/J	6.60E+04
	棉花/t	1.48E+16		天然气/J	4.80E+04
	油料/t	4.89E+16		燃料油/J	5.40E+04
	茶叶/t	3.83E+15		实际利用外资/\$	2.50E+12
	蔬菜瓜果/t	2.85E+15		原煤/J	4.00E+04
	牛奶/t	6.18E+15		热力/J	2.00E+04
	肉类/t	3.09E+12		电能/J	1.59E+05
	禽类/t	9.20E+12	焦炭/t	5.80E+14	
	电能/J	1.59E+05	煤油/J	6.60E+04	
本地不可更新资源能值(N)	钢材/g	1.80E+15	输出能值(O)	出口商品总额/\$	2.00E+12
	铜材/t	1.84E+15		对外劳务/\$	8.67E+12
	铝材/t	1.60E+15		对外投资/\$	2.50E+12
	汽油/J	6.60E+04	废气能值(W)	固体废弃物/g	1.80E+09
	柴油/J	6.60E+04		废水/g	6.65E+08
	化肥/g	4.77E+09		废气/g	6.60E+08

注:本表各项目能源转换率参考文献[18-19,28-30]。

表 2 资源能值评价指标构成体系

类别	名称	计算公式	单位	表征
能值计算指标	可更新资源能值(R)		sej	城市可获取的可更新自然资源
	不可更新资源能值(N)		sej	城市可获取的不可再生资源
	输入能值(I)		sej	城市外部资源的输入和利用
	输出能值(O)		sej	城市资源的对外服务输出
	废弃能值(W)		sej	城市向环境排放的废弃物
	总能值量(U)	$U=R+N+I$	sej	城市总能值量
自然亚系统评价指标	能值自给率(ESR)	$ESR=(R+N)/U$		表征生态环境对城市系统的支持能力
	能值产出率(EYR)	$EYR=(R+N+I)/I$		表征城市自身系统经济效率
	能值废弃率(EWR)	$EWR=W/U$		表征城市系统的循环能力
	环境负载率(ELR)	$ELR=(N+D)/R$		表征城市发展对环境造成的压力
经济亚系统评价指标	能值货币率(EDR)	$EDR=U/GDP$		表征该城市单位货币的能值消耗量
	能值交换率(EER)	$EER=I/O$		表征对外贸易的利益得失及能力
	能值竞争力(ECF)	$ECF=ESR \times EER$		表征城市经济活力与竞争力
社会亚系统评价指标	能值密度(ED)	$ED=U/AREA$	sej/m ²	表征城市能值集约度和强度
	人均能值量(EP)	$EP=U/P$	sej/人	表征城市居民生活福利水平
	人口负载率(PLR)	$PLR=P/PCC$		表征城市人口数是否超载
	人口承载量(PCC)	$PCC=(R+I)/EP$		表征城市人口数量承载能力
可持续发展评价指标	能值可持续指标(ESI)	$ESI=EYR/ELR$		表征城市社会、经济发展与生态环境的可持续性

3 长三角沿江城市群系统可持续发展分析

3.1 能值指标结果分析

城市群各能值指标计算结果如表3所示,从数据分析可知,上海、苏州总能值量区域内最高,分别为 7.84×10^{24} 、 3.00×10^{24} ;无锡、南京、南通、合肥略低,

介于 $8.86 \times 10^{23} \sim 4.92 \times 10^{23}$,其他城市差异较小,介于 $3.28 \times 10^{23} \sim 1.17 \times 10^{23}$ 之间。从能值构成来看,上海、苏州、无锡、南京输入能值占比高,分别占总能值的97.4%,93.2%,86.5%,83.5%;而安庆、滁州、宣城、池州则本地可再生、不可再生资源占比较高,为60.6%,20.7%,59.9%,18.6%,58.7%,22.7%,36.5%,32.2%(见图1)。

表3 长三角沿江城市群能值指标计算结果

地区	可再生资源能值	不可再生资源能值	输入能值	输出能值	废弃能值	总能值
上海	2.65E+22	1.77E+23	7.63E+24	1.04E+25	9.17E+20	7.84E+24
苏州	2.20E+22	1.81E+23	2.80E+24	3.76E+24	8.12E+20	3.00E+24
无锡	1.53E+22	1.03E+23	7.67E+23	9.94E+23	4.46E+20	8.86E+23
常州	2.70E+22	7.94E+22	2.20E+23	4.70E+23	7.80E+19	3.27E+23
南通	2.22E+23	7.22E+22	2.90E+23	5.18E+23	1.79E+20	5.84E+23
泰州	9.76E+22	5.75E+22	1.41E+23	1.76E+23	1.80E+20	2.96E+23
南京	5.02E+22	8.20E+22	6.77E+23	7.60E+23	5.60E+20	8.09E+23
镇江	3.90E+22	5.76E+22	1.38E+23	1.46E+23	1.61E+20	2.35E+23
扬州	6.40E+22	5.54E+22	1.07E+23	1.65E+23	6.92E+20	2.26E+23
马鞍山	5.33E+22	8.26E+22	8.12E+22	3.51E+22	4.24E+20	2.17E+23
滁州	9.40E+22	3.00E+22	3.47E+22	3.88E+22	7.22E+19	1.59E+23
合肥	1.64E+23	5.08E+22	2.76E+23	3.16E+23	1.37E+20	4.92E+23
芜湖	6.46E+22	5.40E+22	8.58E+22	8.53E+22	1.70E+20	2.04E+23
宣城	6.89E+22	2.66E+22	2.18E+22	2.89E+22	7.17E+19	1.17E+23
铜陵	3.71E+22	6.72E+22	1.28E+23	1.25E+22	1.39E+20	2.32E+23
池州	4.44E+22	4.18E+22	4.06E+22	4.90E+21	7.08E+19	1.27E+23
安庆	1.47E+23	5.15E+22	4.67E+22	2.20E+22	7.82E+19	2.45E+23

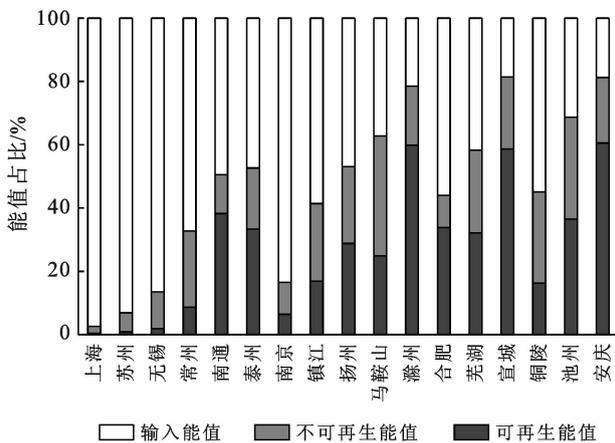


图1 长三角沿江城市群总能值构成分析

3.2 生态系统评价分析

城市能值自给率表征城市代谢系统中对自身资源的利用程度和对外部资源的依赖程度,数值越高其自身资源依赖程度越高,对外开放性和经济发展水平越低。如图2所示,上海、苏州、无锡、南京、常州能值自给率指标较低,分别为0.03,0.07,0.14,0.17和0.33,表明其自身资源开发利用少,对外界输入资源

依赖程度高,外界能值流动频率高,城市开放性较高;而镇江、合肥、铜陵、南通、泰州、扬州、芜湖自给率分别为0.41~0.58,内部资源开发程度适中,仍对外部资源有一定依赖性;而马鞍山、池州、滁州、安庆、宣城能值自给率最高分别为0.62,0.69,0.79,0.81和0.81,城市发展所需能值依靠自身资源开发,自给自足的能力强,城市对外开放性较低。

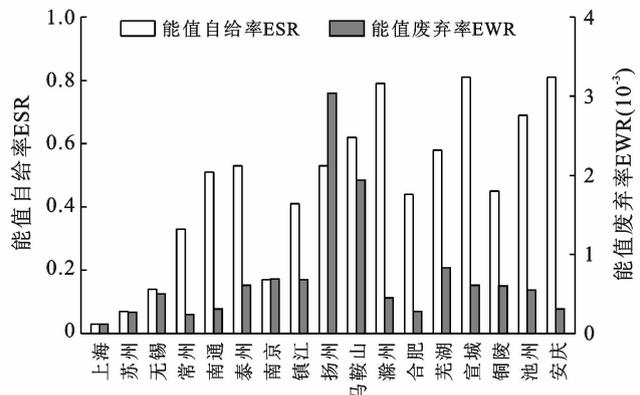


图2 长三角沿江城市群能值自给率、能值废弃率

城市能值废弃率表征城市对废弃物再利用能力及对环境的影响力,数值越大城市资源利用效率和废弃物再生资源化能力越低,对自然环境负向影响越大。如图 2 所示,上海、常州、苏州、合肥、南通、安庆能值废弃率低分别为 1.20×10^{-4} , 2.40×10^{-4} , 2.70×10^{-4} , 2.80×10^{-4} , 3.10×10^{-4} , 3.10×10^{-4} , 表明城市排放的废弃物的利用程度高,城市系统的循环再生能力强;滁州、无锡、池州、铜陵、泰州、宣城、镇江、南京、芜湖能值废弃率在 $4.50 \times 10^{-4} \sim 8.30 \times 10^{-4}$ 之间,城市系统循环利用能力较好;马鞍山、扬州的能值废弃率较高,分别为 1.94×10^{-3} 和 3.04×10^{-3} ,表明该城市系统利用资源的效率和废弃物循环再生能力相对较低。城市环境负载率表征城市发展对环境造成的压力,根据 Brown 和 Ulgiat 研究^[31]表明环境负载率数值 0~3 之间为低环境负载,3~10 为中等环境负载,大于 10 为高环境负载。如图 3 所示,上海(277.30)、苏州(123.77)、无锡(52.72)为超高环境负载,表明城市发展中能对值利用强度高,但对生态环境造成压力大;南京(14.63)、常州(10.62)为高等环境负载;铜陵(5.16)、镇江(4.90)、马鞍山(3.02)为中等环境负载;扬州(2.48)、芜湖(2.11)、泰州(2.00)、合肥(1.96)、池州(1.74)、南通(1.62)、宣城(0.70)、滁州(0.67)、安庆(0.65)环境负载率为低环境负荷,对环境综合压力较小。

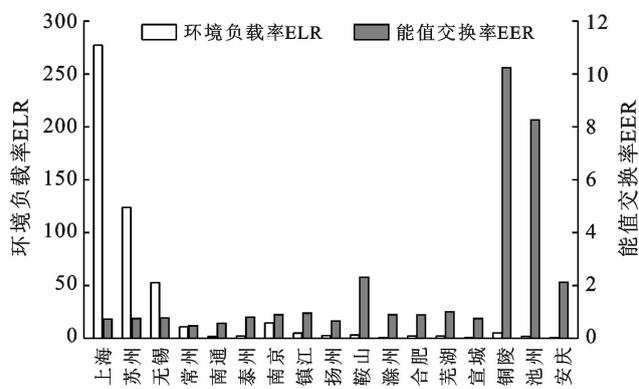


图 3 长三角沿江城市群环境负载率、能值交换率

2017 年长三角沿江城市群中下游城市(上海、苏州、无锡、南京、常州)由于自身自然资源的稀缺或前期过度开发,导致内部可开发资源变少,外部资源依赖性较强,占总城市的 29%,其他 71%的城市资源开发强度较低;其次 29.4%的城市环境负载率高,17.6%的城市负载率中等,53%的城市环境负载率较低;除个别城市(马鞍山、扬州)废弃能值较高外,沿江城市群废弃物循环再生能力整体较好、差异较小,节

能减排成效显著。可见当前长三角沿江城市群由西至东呈现上游城市自给自足能力强、环境压力小、生态环境优,中游城市环境压力及生态环境适中,下游城市自给能力弱、环境压迫力高、生态环境差的态势。随着国家“绿色生态”发展理念的提出、“污染共治、环境共保、生态共建”策略的制定、城市产业的转移,城市门槛的提高,长三角沿江区域生态环境将持续向好(图 3)。

3.3 经济系统评价分析

能值交换率表征城市对外贸易能力,数值越低城市对外贸易能力越强,单位能值所获得的收益越高。如图 3 所示,常州(0.47)、南通(0.56)、扬州(0.65)、上海(0.73)、苏州(0.75)、宣城(0.75)、无锡(0.77)、泰州(0.80)能值交换率指标较低,表明其输出能值高于输入能值,对外贸易和产出能力强,在与外界交换中处于“顺差”优势;合肥(0.88)、南京(0.89)、滁州(0.89)、镇江(0.95)、芜湖(1.0)、安庆(2.12)、马鞍山(2.31)能值交换率指标略高,对外贸易能力在区域内较弱,但其仍处于贸易平衡态势,而池州(8.27)、铜陵(10.24)的能值交换率较高,表明城市输入能值高于输出能值、能值转换能力低,在对外交易中处于“逆差”劣势。城市能值货币率表征城市能值与货币转换效率,数值越小其单位经济产出所消耗的能值量越小、能值利用率越高,经济发展能力越强。如图 4 所示,扬州、常州、镇江、泰州指标最低,分别 4.49×10^{10} , 4.95×10^{10} , 5.88×10^{10} , 6.26×10^{10} ,表明其单位货币中所消耗的能值较低,经济产出效率较高;南京、芜湖、合肥、南通、无锡、宣城、滁州能值货币率在 $6.92 \times 10^{10} \sim 1.01 \times 10^{11}$ 之间,经济产出效率较为平均且城市间差异小;而马鞍山、安庆、苏州、池州、铜陵、上海地区数值较高,介于 $1.28 \times 10^{11} \sim 2.56 \times 10^{11}$ 之间,经济产出效率在区域内最低。

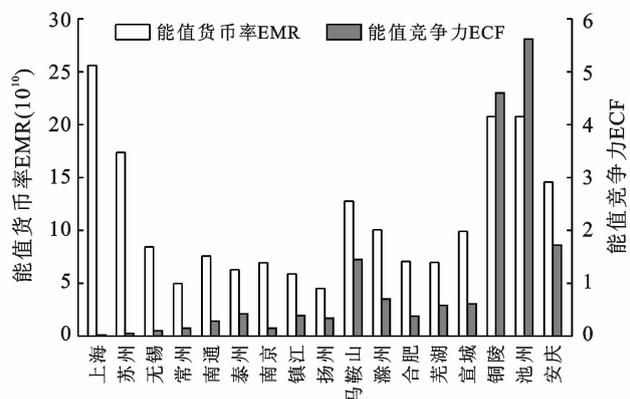


图 4 长三角沿江城市群能值货币率、能值竞争力

城市能值竞争力是城市能值自给率和能值交换率的乘积,表征城市经济的吸引力及竞争力,数值越小,城市对外开放性越好、竞争力越强。如图 4 所示,上海(0.02)、苏州(0.05)、无锡(0.10)、常州(0.15)、南京(0.15)能值竞争力指标最低,表明其经济活力和竞争力强,南通(0.28)、扬州(0.34)、合肥(0.38)、镇江(0.39)、泰州(0.42)、芜湖(0.58)、宣城(0.61)、滁州(0.70)指标略高,经济活力和竞争力次之,而马鞍山(1.45)、安庆(1.72)、铜陵(4.60)、池州(5.62)指标较高,经济竞争力处于区域内最弱。可见在长三角沿江城市群中经济发展差异明显,上海、苏南地区的苏州、无锡、常州仍是当前该区域经济发展最具竞争力和吸引力的城市,但上海、苏州地区由于其为维持经济高速运转而不断输入的大量能值超出其城市经济系统运转、代谢能力,致使其经济整体产出效率较低,限制了经济的发展;其次随着“苏中崛起战略”和“皖江产业承接战略”的实施,苏中(南京、镇江、泰州、扬州、南通市)和皖中(合肥、芜湖、宣城、滁州市)城际经济竞争力差距较小,但除省会城市(南京、合肥)有较强的经济虹吸能力外,其他城市依旧偏弱,难以对周边区域形成吸引和带动作用。皖南地区沿江城市(马鞍山、安庆、铜陵、池州市)由于薄弱经济基础、生态环境的约束和产业结构不合理,导致能源货币产出率低,经济增速缓慢且竞争力弱,如长期呈贸易“逆差”态势,将加剧自身资源的外流,不利于经济健康发展。总体上,江苏沿江城市已形成以苏州、南京为核心的“双引擎”发展模式,带动效应强并逐渐形成连片式发展格局;而安徽省沿江城市仍是以合肥为核心的“单引擎”发展模式,带动效应弱且城市间缺乏有效的组织协同,仍呈沿江单边孤立式发展格局。

3.4 社会系统评价分析

城市能值密度表征单位土地面积下能值量、集约度和等级,数值越大其土地的集约度越高,经济发展越好且等级地位越高。如图 5 所示,上海、苏州能值密度指标远高于其他城市,分别为 1.24×10^{15} 和 3.47×10^{14} ,表明其单位土地能值集约度高,经济发展水平高,同时也意味着土地资源稀缺性将成为经济长远发展的壁垒^[24];南京、无锡、铜陵、常州、南通、镇江、马鞍山、泰州、合肥、扬州、芜湖市能值密度略低,介于 $1.23 \times 10^{14} \sim 3.40 \times 10^{13}$ 之间但较为平均;而安庆、池州、滁州、宣城最低,介于 $1.80 \times 10^{13} \sim 1.00 \times 10^{13}$ 之间,说明其土地利用集约度较低,呈外延粗放式发展。城市人均能值量表征城市人均福利及生活水平,数值越大其福利水平越高,生活水平越好。如图 5 所示,上海、苏州、铜陵、无锡人均能值分别为 3.24×10^{17} ,

2.81×10^{17} , 1.45×10^{17} 和 1.35×10^{17} ,远高于其他城市,表明其人均能值福利及生活适宜度好,城市吸引力强;南京、马鞍山、池州、南通、镇江、常州、泰州、合肥人均能值在 $9.70 \times 10^{16} \sim 6.20 \times 10^{16}$ 之间,人均能值福利次之;芜湖、安庆、扬州、宣城、滁州最低在 $5.60 \times 10^{16} \sim 4.00 \times 10^{16}$ 之间,其人均能值福利最低、城市吸引力弱。

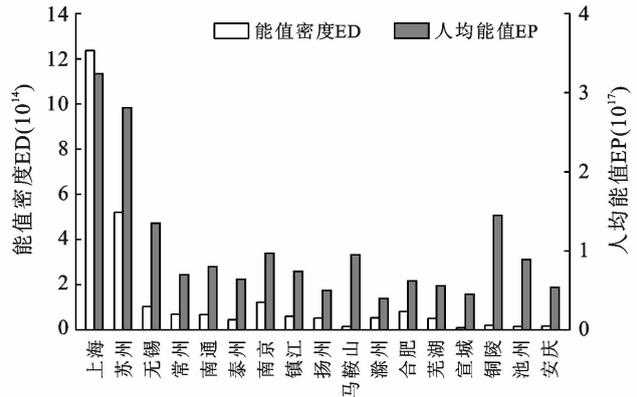


图 5 长三角沿江城市群能值密度、人均能值

人口承载量表征城市生态、经济环境下所能承载的人口量。如图 6 所示,上海人口承载量最高分别为 2.36×10^7 ,苏州、南京、合肥、南通、无锡指标在 $1.00 \times 10^7 \sim 5.80 \times 10^6$ 之间,表明其人口承载能力较强;泰州、安庆、常州、扬州、滁州、芜湖、镇江、宣城市指标介于 $3.80 \times 10^6 \sim 2.00 \times 10^6$ 之间,人口承载能力较弱且差异较小;由于马鞍山、池州市外部输入资源较少及铜陵国土面积小,造成其人口承载量较低,分别为 1.40×10^6 , 1.00×10^6 , 1.10×10^6 。人口负载率为人口承载力与现状人口的比值,表征城市人口承载压力,PLR 指标 < 1 表明城市人口未超载,PLR 指标 > 1 则表明城市人口超载,数值越大其人口负载率越高。如图 6 所示,长三角沿江城市群人口量均超出社会经济承载量,上海、苏州人口负载率较低,分别超载 1.02 倍和 1.06 倍,人口与经济、资源环境协同发展;合肥、南京、无锡、南通、滁州、泰州、安庆、宣城、常州、镇江、扬州、芜湖人口超载率略高,在 1.11~1.36 倍之间,人口与资源环境基本协同;铜陵、池州、马鞍山人口负载率较高,在 1.41~1.61 倍之间,人口与经济、资源环境趋于失调,将影响社会系统的稳定性。

城市社会福利水平、人居适宜度受经济发展水平影响,2017 年长三角沿江城市群社会系统可持续发展总体梯度差异明显,呈现上海市、苏南城市、苏中城市、皖中城市、皖南城市依次递减规律。其中上海、苏南城市(苏州、无锡、常州)能值密度高、人口承载能

力强、人均福利高及生活质量优、人口负载率低,表明其社会系统总体可持续发展最优,并形成对人才、资源的强吸引,但突出的人地矛盾和稀缺的土地资源将成为其未来可持续发展的障碍;苏中城市中各城市社会系统可持续性较为均衡且无明显短板,形成以南京为核心的人才、资源的弱吸引;而皖中、皖南沿江城市中的合肥、铜陵分别因行政权力、资源多而“国小民寡”的优势,城市社会系统整体发展较好,但铜陵未来社会可持续发展有可能随着资源的枯竭而衰减,而其他城市则存在能值密度低、人口承载量低、人口负载率过高,社会可持续发展较为滞后,难以形成有效的吸引力。

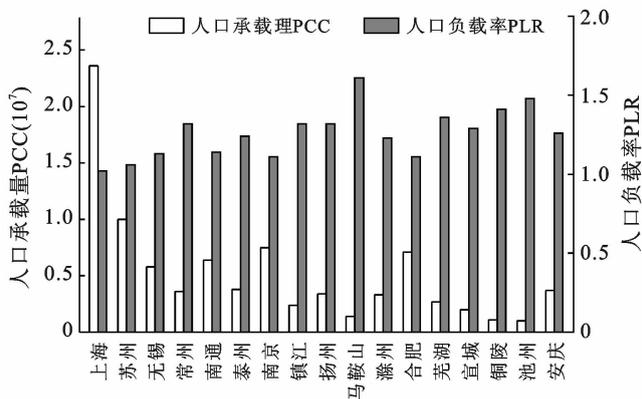


图6 长三角沿江城市群人口承载量、人口负载率

3.5 系统可持续发展指标分析

城市可持续发展指标表征单位能值环境负荷下的系统产出效率,是衡量城市生态、经济、社会系统可持续发展能力的综合指标。研究表明, $0 < ESI < 1$ 表示其属于消费型城市,社会经济发展强度高,但对生态环境的影响消耗较高, $1 < ESI < 10$ 则表示属于可持续发展型城市,社会经济与生态环境协调度及可持续发展能力较好, $ESI > 10$ 则表示城市属于资源型城市,经济系统缺乏活力且不发达,系统协调度差^[32]。如图7所示,当前长三角沿江城市群中上海、苏州、无锡、南京、常州、镇江、铜陵、扬州、马鞍山、合肥市的可持续发展值 $0 < ESI < 1$ 之间,表明其属于经济发达的消费型城市,城市生态环境的压力较高,可持续发展受限;泰州、芜湖、南通、滁州、宣城、安庆市的可持续发展值 $1 < ESI < 10$ 之间,属于经济较发达的商业型城市,城市环境压力较低,经济发展具有活力且能够实现城市经济、资源与环境的协同、可持续发展。可见在长三角沿江城市群,41.2%的城市能够实现城市生态—经济—社会的可持续发展;58.8%的城市经济发达,但经济高速发展导致环境可持续发展潜力受限。

由此可见,长三角沿江城市群生态、经济和社会可持续发展整体态势依然严峻。

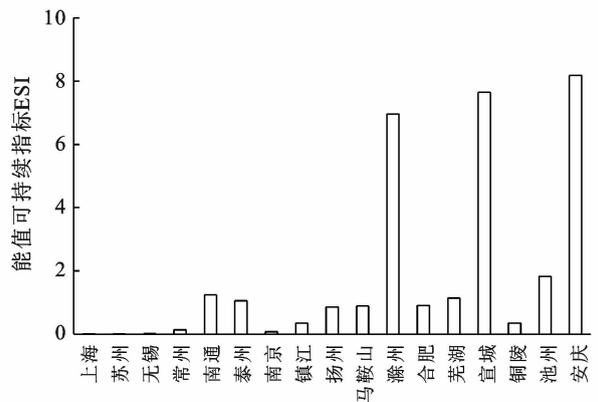


图7 长三角沿江城市群能值可持续发展指标

4 对策及讨论

4.1 对策

(1) 随着全球资源环境约束趋紧,上海、苏州、南京、无锡、常州市在经济平稳发展的同时需建立以创新发展、提质增效为核心的资源高效利用机制,优化能源结构和循环经济产业布局,引入高端高新产业和服务业,淘汰中低端制造产业,提高产业的集聚度和单位能值下的货币产出效率;其次控制城市人口数量增长,降低污染排放并提高废弃能值的循环利用技术,加强自身生态环境治理的同时实现长江流域联合治理,降低环境的压迫力;严格控制土地增量扩展,推动存量用地的活力再生和高效利用。

(2) 镇江、扬州、泰州、南通市需在保持当前生态及经济可持续发展的同时,强化这4个市与南京、苏南城市的区域一体化构建并实现多级共进,逐步提升城市经济发展水平;提高城市社会福利和人居环境适宜度,逐步加强人才、资源吸引力的同时强化区域内人才合作与互动,共建区域联合智库及共享平台;强化与上下游城市的产业协同,通过产业升级强化城市经济经济系统的产出效率和资源利用效率,进一步提升城市活力和竞争力,实现产业集聚与生态保护双赢。

(3) 皖江城市群中合肥需借助省会优势大力发展战略新兴产业,提升城市竞争力和城市政治经济的引领带动作用。其他城市应继续发挥绿色资源、旅游资源的优势,保持生态环境本底的同时将产业承接转移和提高可持续发展能力相结合,加快资源密集型产业转型升级,加强对新兴技术产业及企业的扶持,提升城市资源开发产出率。同时加强生态建设和环境

治理能力,提高与上下游城市的绿色协同发展,借助沿江水道、岸线优势实现多城市“区域联动、跨江联合、拥江发展”的新格局,提高与社会、经济和人口的协调发展能力。

4.2 讨论

能值理论为城市内部“流”的统一测量和内在规律研究提供可能且取得一定成果,但通过研究发现仍需对以下几个方面进行深入讨论与研究:①由于国内外指标数据获取的差异性,国内当前对于数据指标的构建还不够完善,部分软实力指标(如信息能值、教育能值、文化能值等)未得到体现,因此未来研究需进一步丰富能值构成指标体系;②随着城市的发展和科学技术的提高,不同能量之间的开发、利用效率逐渐提高,城市生态、经济可持续发展指标能值转换效率继而发生改变,因此未来需根据社会发展水平逐渐修正能值转换率的指标,力求评价的准确性;③各能值指标分别表征不同内涵且相互关联,产生正向影响或负向影响。但其难以直观反映出经济、生态和社会系统之间的交互耦合关系,因此未来需根据各指标之间的内在规律探寻生态环境、城镇发展之间的交互耦合规律,从而构建耦合分析模型,揭示各指标变量与城市发展之间的内在关系。

[参 考 文 献]

- [1] 方创琳.中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J].地理学报,2014,69(8):1130-1144.
- [2] 王树功,周永章,麦志勤,等.城市群(圈)生态环境保护战略规划框架研究:以珠江三角洲大城市群为例[J].中国人口·资源与环境,2003,13(4):51-55.
- [3] 吴次芳,鲍海君,徐保根.中国沿海城市的生态危机与调控机制:以长江三角洲城市群为例[J].中国人口·资源与环境,2005,15(3):32-37.
- [4] 周国华,舒倩,李红霞.长株潭城市群生态安全建设研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2005,28(4):75-79.
- [5] 方创琳.中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J].地理学报,2014,69(8):1130-1144.
- [6] 梁龙武,王振波,方创琳,等.京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局[J].生态学报,2019,39(4):1212-1225.
- [7] 郭秀锐.城市生态系统健康评价[D].北京:北京师范大学,2003.
- [8] 温彦平,王雪峰.长江中游城市群城镇化视角下产业结构与生态环境耦合协调关系研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2019,53(2):263-271.
- [9] 沈威,鲁丰先,秦耀辰,等.长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素[J].生态学报,2019,39(11):3937-3951.
- [10] 朱玉林,李明杰,顾荣华.基于压力—状态—响应模型的长株潭城市群生态承载力安全预警研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(12):2057-2064.
- [11] 陈炳,曾刚,曹贤忠,等.长三角城市群生态文明建设与城市化耦合协调发展研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):530-541.
- [12] 张洁,杨燕琼.珠江三角洲城市群生态状况变化遥感评价[J].西北林学院学报,2019,34(1):184-191.
- [13] 程志峰,何祺胜.基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J].遥感技术与应用,2019,34(3):531-539.
- [14] 马冰滢,黄姣,李双成.基于生态—经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置[J].地理科学进展,2019,38(1):26-37.
- [15] 朱治州,钟业喜.长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1520-1530.
- [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[J].经济地理,2012,32(2):143-148.
- [17] Odum H T, Odum E C. Energy Basis of Man and Nature [M]. New York: McGraw-Hill, 1981.
- [18] Odum H T. 能量、环境与经济[M]. 蓝盛芳,译.北京:东方出版社,1992.
- [19] 宋涛,蔡建明,杜姗姗,等.基于能值分析的北京城市新陈代谢研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(1):38-42.
- [20] 王鹏成,郑国璋.基于能值理论的城市生态经济系统可持续发展研究:以山东省威海市为例[J].华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(3):379-388.
- [21] 滕腾,赵丹,陈新新,等.基于能值理论的西安市浐灞生态区生态系统可持续性分析[J].水土保持通报,2018,38(2):228-235.
- [22] 吴瑾.基于能值生态足迹的江苏省可持续发展分析[J].统计与决策,2017,492(24):104-106.
- [23] 苏慧,张仲伍,张兴毅,等.基于能值分析山西省生态经济系统可持续研究[J].西南农业学报,2019,23(5):1187-1193.
- [24] 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[J].中国科学:地球科学,2017,47(7):833-846.
- [25] 贾小乐,周源,延建林,等.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[J].生态学报,2019,39(17):6487-6499.
- [26] 陆宏芳,沈善瑞,陈洁,等.生态经济系统的一种整合评价方法:能值理论与分析方法[J].生态环境,2005,14(1):121-126.

速效钾分别较新增耕地年限1 a时提高了10.67%, 15.39%以及13.62%。

(3) 经过3~5 a种植后,耕种5 a,4 a和3 a的项目单位面积产能较未实施时粮食产能分别提高15.69%,9.80%和3.92%,对新增耕地粮食产能影响较为突出的因素排序为:新增耕地等别>新增耕地基础设施>新增耕地面积>新增耕地单位面积投资>新增耕地年限,因此要将新增耕地粮食产能提高的着力点放在耕地等别的提高。

[参 考 文 献]

- [1] 段亚明,周洪,刘秀华,等.中国耕地撂荒的研究进展与展望[J].江苏农业科学,2018,46(13):13-17.
- [2] 赵晓丽,张增祥,汪潇,等.中国近30年耕地变化时空特征及其主要原因分析[J].农业工程学报,2014,30(3):1-11.
- [3] 魏洪斌,吴克宁,赵华甫,等.中国耕地动态变化与占补平衡分析[J].国土资源科技管理,2015(1):115-124.
- [4] 王大鹏,姜欣怡,于森.耕地占补平衡中占补耕地质量差异对比研究:以东三省9个项目为例[J].安徽农业科学,2019,47(6):69-71.
- [5] 董秀茹,姜欣怡,卢巍巍.基于农用地分等成果的耕地质量提升潜力测算方法研究:以营口市鲅鱼圈区为例[J].土壤通报,2018,49(6):1300-1305.
- [6] 李强,余晓敏,张娜.江汉平原粮食综合生产能力评价分析[J].地理空间信息,2020,18(3):100-103.
- [7] 李效顺,曲福田,谭荣,等.中国耕地资源变化与保护研究:基于土地督察视角的考察[J].自然资源学报,2009,24(3):387-401.
- [8] 姚远,李效顺,曲福田,等.中国经济增长与耕地资源变化计量分析[J].农业工程学报,2012,28(14):209-215.
- [9] 陈海燕,彭云,郑宏刚,等.补充耕地数量质量按等级折

算的应用研究:以大理至丽江铁路为例[J].中国农业资源与区划,2014,35(1):109-113.

- [10] 张英,张红旗,李秀彬.近20年中国农业生产区耕地资源质量和产能变化研究[J].地理与地理信息科学,2011,27(4):52-56.
- [11] 石淑芹,陈佑启,姚艳敏,等.东北地区耕地自然质量和利用质量评价[J].资源科学,2008,30(3):378-384.
- [12] 徐珊,宋戈,李丹,等.东北粮食主产区耕地资源时空变化及其对粮食生产能力的影响[J].农业工程学报,2012,28(21):1-9.
- [13] 石淑芹,陈佑启,姚艳敏,等.耕地变化对粮食生产能力的影响评价:以吉林中西部地区为例[J].资源科学,2007,29(5):143-149.
- [14] 徐国鑫,金晓斌,宋佳楠,等.耕地集约利用对粮食产量变化影响的定量分析:以江苏省为例[J].地理研究,2012,31(9):1621-1630.
- [15] 杨建锋,马军成,王令超.基于多光谱遥感的耕地等别识别评价因素研究[J].农业工程学报,2012,28(17):230-236.
- [16] 吴明发,欧名豪.雷州半岛耕地流转农户行为影响因素的实证研究[J].中国农业资源与区划,2012,33(4):54-59.
- [17] 董莉莉,吴克宁,魏洪斌,等.我国中部粮食主产区耕地质量等别限制因素及提升对策[J].江苏农业科学,2016,44(12):419-424.
- [18] 魏洪斌,吴克宁,赵华甫,等.中国中部粮食主产区耕地等别空间分布特征[J].资源科学,2015,37(8):1552-1560.
- [19] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.
- [20] 中科院南京土壤研究所主编.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [30] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳.生态经济系统能值分析[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [31] Brown M T, Ulgiati S. Emergy analysis and environmental accounting [J]. Encyclopedia of Energy, 2004, 2:329-354.
- [32] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation [J]. Ecological Engineering, 1997,5(9):51-69.

(上接第236页)

- [27] 李双成,傅小锋,郑度.中国经济持续发展水平的能值分析[J].自然资源学报,2001,16(4):297-304.
- [28] 李加林,许继琴,张正龙.基于能值分析的江苏生态经济系统发展态势及持续发展对策[J].经济地理,2003,23(5):615-620.
- [29] 唐廉,权冠中,胡晓辉,等.基于能值生态足迹的贵州省生态经济系统的可持续性发展[J].贵州农业科学,2017,45(4):150-156.