

# 生态经济系统可持续发展能值研究进展

## ——基于文献计量的述评

顾琦玮<sup>1</sup>, 赵晓辉<sup>2</sup>, 张亮<sup>1</sup>, 王焕松<sup>1\*</sup>, 石舒洋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>轻工业环境保护研究所环境咨询监测中心, 北京

<sup>2</sup>中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京

Email: guqw@mail.bnu.edu.cn, \*liepi\_wanghs@163.com

收稿日期: 2021年1月24日; 录用日期: 2021年2月24日; 发布日期: 2021年3月3日

### 摘要

能值分析是生态经济系统可持续发展定量研究的重要手段之一。为把握该领域相关研究现状与发展趋势, 运用Excel和HistCite文献计量方法, 对生态经济系统可持续发展能值研究文献进行了系统述评。研究发现: 1) 发文量自2005年起处于快速增长趋势。其中, “低估年份”的出现推测与能值转换率难统一有关; 2) 国内外研究内容关注度具有相似性, 农村生态经济系统因具有决定其他生态经济系统平衡的植物结构而最高, 区域生态经济系统则因研究面广而较高, 其他内容依次为城市生态经济系统、企业生态经济系统和综述。综上, 目前该领域研究热点是各系统可持续性水平评估。结合生态环境保护 and 城市群协同发展等研究的迫切性, 推测未来研究趋势将会侧重于农村面源污染影响、区域协同发展模式及尺度推绎问题、系统动态变化主导诱因及城市代谢、企业生态经济系统内部耦合关系等方面。

### 关键词

能值分析, 生态经济系统, 可持续发展

## The Application of Emergy Analysis in Sustainable Development Research of Eco-Economic Systems: A Bibliometric Review

Qiwei Gu<sup>1</sup>, Xiaohui Zhao<sup>2</sup>, Liang Zhang<sup>1</sup>, Huansong Wang<sup>1\*</sup>, Shuyang Shi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Environmental Consulting and Monitoring Center, Environmental Protection Research of Light Industry, Beijing

<sup>2</sup>Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing

\*通讯作者。

文章引用: 顾琦玮, 赵晓辉, 张亮, 王焕松, 石舒洋. 生态经济系统可持续发展能值研究进展[J]. 可持续发展, 2021, 11(2): 169-177. DOI: 10.12677/sd.2021.112020

## Abstract

Emergy analysis is crucial quantitative research on the Sustainable Development of Eco-Economic Systems (SDEES). For obtaining the current state and development trend in this field, papers were systematically reviewed by adopting the bibliometric analysis of EXCEL and HistCite, relating to the Application of Emergy Analysis in Sustainable Development Research of Eco-Economic Systems (AEASDREES). Results showed as follows: 1) The number of papers published has been increasing rapidly since 2005. However, the emergence of “underestimation years” was relevant to the difficulty of unifying the emergy conversion rate; 2) Domestic and international research contents were similar. While rural eco-economic systems were the highest because of plant architecture that determined the balance of another eco-economic system, regional eco-economic systems were higher because of the wide range of research. And the remaining contents were urban eco-economic systems, enterprise eco-economic systems, and overviews. In conclusion, AEASDREES focused on sustainability assessment for various systems, and so on. Combined with the urgency of ecological environment protection and the coordinated development of urban agglomerations, it speculated that future research trends would focus on the following aspects. There was agricultural non-point source pollution, coordinated development modes and yardstick reasoning, leading causes of system changes and urban metabolism, the internal coupling of enterprise eco-economic systems, and so on.

## Keywords

Emergy Analysis, Eco-Economic Systems, Sustainable Development

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

生态经济系统可持续发展研究关注人与自然和谐共生问题，现存在诸多科学方法去定量评估生态经济系统可持续发展水平[1] [2]。其中，能值分析(Emergy Analysis, 简称 EA)将各种不同能量和物质转换为同一标准的“太阳能值”，且定量研究[3]。这种方法突破了不同能量间无法直接计算和比较分析问题[3]，开拓了自组织系统运行机制研究的新途径，既能评价生态产品和服务[4]，也能综合分析生态经济系统[5]。虽然国内外学者从不同角度采用能值分析对生态经济系统可持续发展进行研究，然而大多聚焦于现状评价[6]和案例研究[7]，鲜有基于文献计量的综述研究。相较于传统综述来说，文献计量学基于数理统计的信息挖掘和文献分析等方法，能客观地和定量化地剖析研究热点及其趋势，已被多次应用到生态环境等领域中[8]。本文以生态经济系统可持续发展能值研究为主题，运用文献计量和文献综述相结合方法，对 1994~2019 年间国内外生态经济系统可持续发展能值研究进行定量综述研究。并通过 Excel 和 HistCite 软件对其进行梳理和可视化，有助于厘清生态经济系统可持续发展能值研究进展及趋势，以期为后续相关研究提供借鉴和参考。

## 2. 数据来源与研究方法

本文以 WEB OF SCIENCER(以下简称 WOS)核心集作为数据源,通过输入“Emergy”和“Sustainability”或“Sustainable Development”的索引词进行国外文献高级检索,以及剔除主题相关度较低文献,获得1994~2018年间(1994年前无相关文献记录)WOS核心数据库文献719篇。并以维普核心数据库中主题为“能值”和“可持续发展”的文献作为数据源,搜索出558篇相关文献。

采用 Excel 软件对上述1277篇国内外文献进行计量分析,解析其研究进展特征,包括国内外研究发文量变化趋势(如图1)和国内外研究类别分布特征(如图2)。基于此,筛选影响生态经济可持续发展能值研究(以下简称,能值研究)总体趋势的重要文献,以期有助于理解研究热点和趋势。为避免重复文献所引起的干扰因素,在识别时只采用 WOS 核心数据库的719篇文献。这是因为相较于维普核心数据库来说,WOS 核心数据库涵盖全球科学家所发表的文章,显得文献计量结果更为全面与客观。

采用 HisCite 软件对719篇文献进行量化与可视化分析,旨在能准确识别生态经济系统可持续发展能值研究领域的重要文献。该软件优势在于便捷而准确地统计 WOS 数据样本,并通过分析全部论文的文献引证知识图谱,锁定该领域的重要文献[9]。具体方法是引入 HistCite 软件中 LCS 指数(Local Citation Score Index,某一文献在本地数据库中的被引用次数),相当于专家打分法,绘制重要研究论文引证知识图谱(如图3)。

## 3. 生态经济系统可持续发展能值研究计量分析

### 3.1. 国内外研究发文量变化趋势

近25年间生态经济系统可持续发展能值研究发文量总体上呈上升趋势(图1)。依据发文量增长速率可分为3个阶段。1994~1997年间发文量极少,国内研究尚未起步,国外研究也仅5篇,表明能值研究在生态经济系统可持续发展领域中处于初步探索阶段;1998~2005年发文量虽呈波动增长阶段,但发文量较少,国内外研究年均发文量10.25篇,说明该研究经验尚浅。其中,初步探索阶段和波动增长阶段主要探索如何利用能值方法将生态系统和经济社会系统有效地链接起来,形成直接计算和比较分析问题的能力[3];2005年至今,发文量持续迅速增长。截止2019年,发文量较多的国家依次有中国、美国、意大利、巴西和日本等其他国家。其中,中国高达45.76%的发文量位居第一,对国际研究动态起着决定

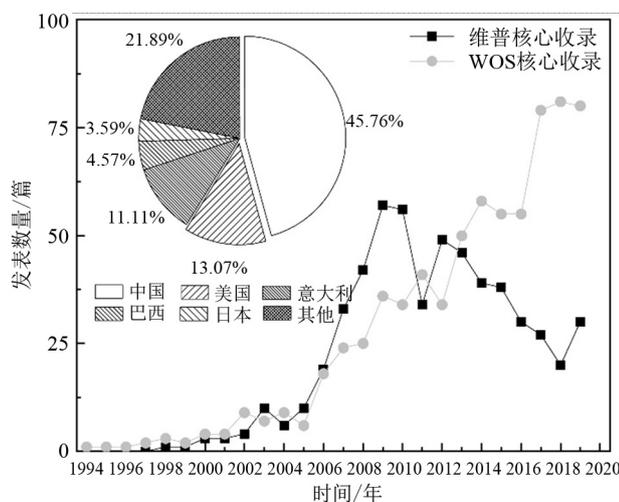
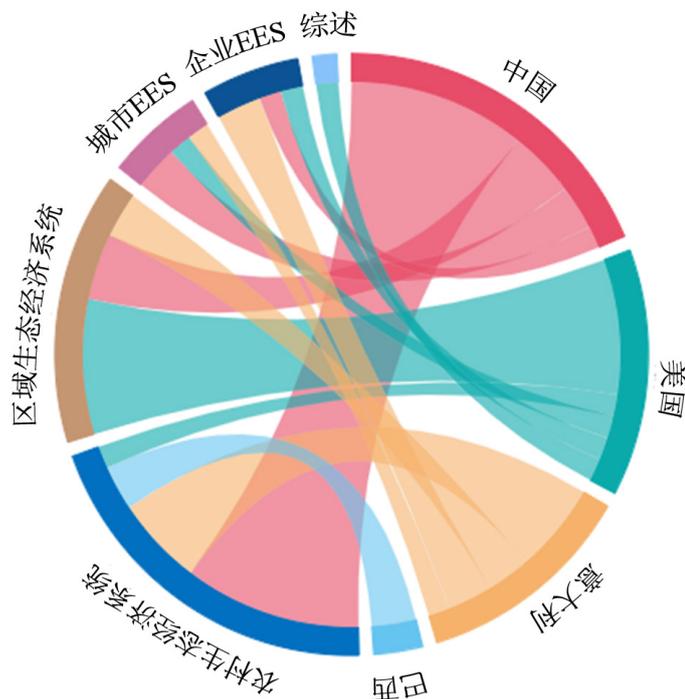


Figure 1. Trends of domestic and international research volume

图1. 国内外研究发文量变化趋势



注: Ecological Economic System (EES), 生态经济系统

Figure 2. Distribution characteristics of domestic and international research categories

图 2. 国内外研究类别分布特征

性作用。这也标志着该领域研究进入快速发展阶段。该阶段不仅针对生态经济系统可持续发展特征设计了能值新指标, 还将其他方法引入到能值方法中进行改进优化, 等等。然而, 该阶段也出现“低估”。这是因为有些专家质疑能值转换率的差异性导致评价结果可比性降低, 进而不足以完整评估可持续性[10], 阻碍该研究的深入和发展。因此, 需对能值转换率计算及其他参数核算进一步标准化和规范化, 或进一步地有机整合其他方法[11], 以期完善生态经济系统可持续发展能值研究。

### 3.2. 国内外研究类别分布特征

结合生态经济管理层面[1]和区域性生态经济学层面[2]进行国内外研究类别分类(如图 2)。其中, 农村生态经济系统是以农业为主导的生态经济系统; 区域生态经济系统是以某一经济或自然地理区域为基础的生态经济综合体, 或是流域或是多个城镇[2]; 城市生态经济系统是以人的行为为主导、自然环境为依托、资源流动为命脉、社会文化为经络的社会-经济-自然复合生态系统[1] (本文限定研究尺度为一个城镇, 区别于区域生态经济系统中不同城镇间物质能量交换研究); 企业生态经济系统是以一个以工业生产活动为主体的人工生态系统[1]。由图 2 所示, 我国研究重点与国际研究类别分布特征相一致, 依次为农村生态经济系统、区域生态经济系统、城市生态经济系统、企业生态经济系统以及综述。这是农村生态经济系统的基础结构是农业植物结构, 植物是食物链起点, 决定整个国民经济结构平衡[1]。从而, 在能值研究方面呈现出至关重要性, 国内外研究发文量占比也相应最高。不仅如此, 农业大国的中美意巴发文量占全国前四, 农村生态经济系统也会占比最高, 其中中国研究贡献最大。相较于其他系统来说, 区域生态经济系统因研究对象涵盖面更广而位居第二。其中美国研究贡献最大, 推测与经济发展程度有关。

## 4. 生态经济系统可持续发展能值研究动态分析

### 4.1. 重要研究论文引证知识图谱分析

重要研究论文引证知识图谱分析如图 3 所示。图中箭头代表文献的引证关系，圆圈越大说明 LCS 值越大，也体现出该文献在该领域的重要程度越高。相较于图 3(b)来说，图 3(a)的 20 篇文献引证关系更为紧密。其中，第 1 号文献是 Ulgiati 等[12]试区域生态经济系统可持续发展能值分析的实证研究。由知识图谱的引证关系和发表时间来看，推测出该文是奠基生态经济系统可持续发展能值研究领域的重要论文之一。另一篇由 Brown 等[13]所作的第 3 号文献，这是因为后续研究论文大部分引用该文所提出的能值可持续指数。由此可推测出图 3(a)基本上可反映该领域的引证关系。而图 3(b)的知识图谱大致上呈现农村生态经济系统可持续发展能值研究的引证关系，相当于对图 3(a)知识图谱的补充。其中，以 Chen [14]所作的第 7 号文献也是图 3(a)中的第 14 号文献。该文是研究基于能值理论的中国农业生态分析及其可持续性评价，也是其他农村生态经济系统研究的重要参考依据之一。综上，通过图 3 知识图谱所识别的重要研究论文，可作为生态经济系统可持续发展能值研究动态分析的重要依据之一。然而，最新研究论文因引用次数不足导致在重要研究论文引证知识图谱分析中不体现，从而致使引证关系不全面而忽略部分最新研究成果。因此，本文根据近几年最新研究论文的相对引用次数、高频率发表论文的科研机构以及研究内容，进行人工识别与补偿。

### 4.2. 农村生态经济系统能值研究动态

农村生态经济系统是以农田生态环境为主体的典型半自然生态经济系统。研究方向围绕农村生态经济系统的结构和功能而展开，主要涵盖农村生态经济系统的生产模式优选、生产现状及趋势分析、系统修复等。例如，在生产模式优选方面，将单一农业生产的传统模式与循环经济复合生产的有机模式进行对比研究[15]，认为动物子系统是有机模式的必要部分[16]。Zhang 等[17]还设计能值自给密度(SSI)和能值自给方向(SSO)指标，反映出有机模式更具有较强竞争力。目前，生产模式优选研究虽采取“黑箱”分析，但能呈现系统的生产效率和综合效益，势必仍为该领域主流发展方向之一；在生产现状及趋势分析方面，Chen 等[18]结合三元相图改进能值应用方法，估算沼气生态系统及其子系统的现状和趋势。不仅如此，在国家尺度上 Chen 等[14]和 Jiang 等[19]分别基于能值分析得出 1980 年~2000 年和 2004 年期间中国生态农业特征已由自给传统农业转变为以不可更新资源支撑的现代工业化生产。这些充分说明能值研究可通过对系统的生态效益评价，实现农村生态经济系统的现状及趋势分析，为农业生产单元设计乃至区域农业发展规划提供参考依据，也成为农村生态经济系统另一个重要研究方向；在系统修复方面，Cohen 等[20]计算国家、区域和本土三个不同尺度的生态农业土壤损失参数。通过这些参数分析和比较，可指导系统修复方向和力度。然而，农村生态经济系统能值研究主要集中在系统内部性，至于所排放的面源污染对生态环境造成外部影响的探讨较少。而农村面源污染又是重要环境问题之一，故在能值分析指标体系构建中需考虑上述方面的影响。

### 4.3. 区域生态经济系统能值研究动态

区域生态经济系统研究自然地理区域或某一经济的发展状况及其运动变化[2]。在以自然地理区域为研究对象时，注重系统的生态服务功能价值评估和生态环境影响现状评价。例如，Zuo 等[21]通过能值分析发现中国盐城生物圈保护区的原生态湿地比人工湿地的生态服务功能价值更具有可持续性。Liu 等[22]则采用能值可持续指数表明中国北上广一线城市及长江流域城市的环境污染程度较其他地区严重。这些说明能值分析无论面对何种研究尺度时都可探讨系统的健康水平，具有重要研究意义。然而侧重于生态

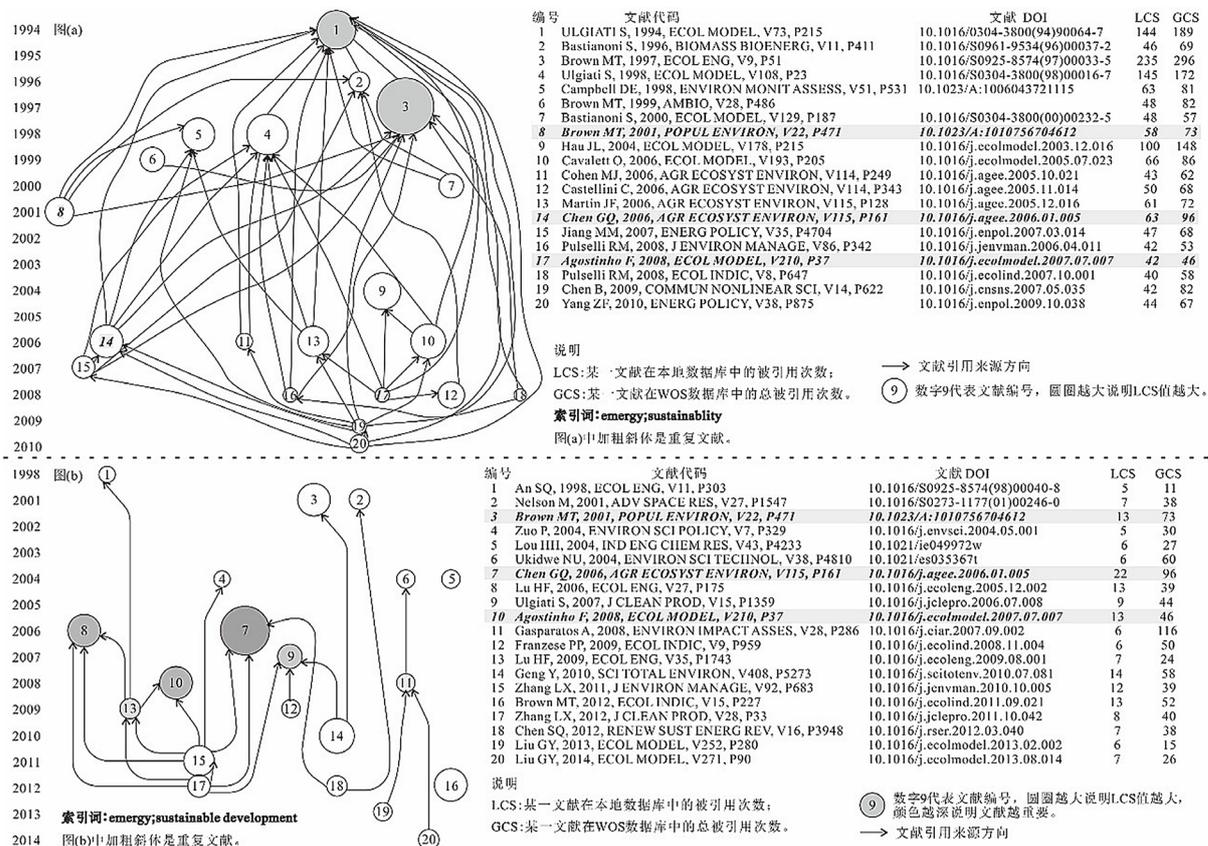


Figure 3. Knowledge map analysis on the citation relationship of important research papers

图 3. 重要研究论文引证知识图谱分析

环境评估时需要较长时间序列分析以及详细数据支撑，导致该领域研究相对迟缓；在以某一经济为研究对象时，注重经济社会发展对系统可持续性影响程度的测量。例如，从空间异质性上，Jiang 等[23]将 2004 年的中国经济与其他国家进行能值对比分析，得出中国经济发展对本土资源产生高压作用。从时间序列上，Yang 等[24]则基于能值分析评估出 1978~2005 年期间中国经济发展主要依靠本土不可更新资源。这些验证了能值分析研究的科学性与可靠性。因而，国内外诸多学者在不同时空尺度上开展基于能值理论的区域可持续发展研究。其中，区域发展经济正由城市决定向城市群决定转化。因此，基于能值理论的城市群可持续研究中所关注的区域间物质能量交换途径和机制[5] [25]，不仅可为各区域协同发展提供科学支撑，更可能是未来区域生态经济系统的重要研究课题之一。不仅如此，在上述研究过程中，不同尺度研究单元会出现“升尺度”或“降尺度”的问题。因而，不同区域间或多层次系统的能值综合分析的尺度推绎将会成为另一个新发展方向[20]。

#### 4.4. 城市生态经济系统能值研究动态

城市生态经济系统以人类经济活动集中为主体的典型人工生态经济系统，聚焦于城市生态环境治理以及城市规划管理等。例如，从微观尺度研究上，Nelson 等[26]通过能值分析发现人工湿地处理废水能力的可持续性优越于传统工艺，为市政废水处理工艺的选择提供决策依据。从宏观尺度研究上，Liu 等[27]构建基于能值的城镇动力模型，考虑城镇资产、土地、资源、人口、水资源和经济环境损失等参数，评价和预测 1999 年~2039 年期间北京发展态势。结果显示水资源是北京城市发展的限制因子。这种系统动态变化的主导诱因研究可为城市规划管理提供理论依据，将成为城市生态经济系统能值研究前沿之一。

由此可知, 系统动态变化的主导诱因研究可识别城市发展的限制因子, 而系统的物质能量代谢途径研究又可为城市发展调控奠定基础。其中, 基于生态热力学的城市代谢(Urban Metabolism)研究是应用生物代谢作用观念来解释城市可持续发展问题, 运用能值理论来回答这类问题将是区域生态经济系统又一个重要研究课题[6] [7] [28]。

#### 4.5. 企业生态经济系统能值研究动态

企业生态经济系统是以工业生产活动为主体的人工生态系统。与其他系统不同之处, 该系统能在短时间内获取、转换和耗散大量物质和能量, 种类繁多且关系复杂。因此, 企业生态经济系统发展相对迟缓。近年来, 诸多科研人员尝试采用能值分析法去评价企业生态经济系统的可持续性。其研究方向按照产业结构模式来分, 包括单一工业生产模式和复合工业生产模式。单一工业生产模式由于产业结构简单, 能清晰地梳理物质能量流动转换关系。例如, Brown 等[29]在对六种类型电力生产系统进行能值分析比较过程中发现风力和水力发电的可持续性水平最高, 其次是地热。复合工业生产模式产业结构复杂多样, 包括工业园区评价和循环经济模式探讨。例如, 工业园区方面, Geng 等[30]将能值分析应用于大连经济开发区工业园的复合工业生产模式中。循环经济模式方面, Brown 等[31]最早提出循环经济模式的能值分析法, 并构建回收利用效益比(RBR)、回收利用产出比(RYR)和废渣填埋回收利用比(LRR)三个指标, 对再利用、再循环和副产品直接利用的环境效益进行排序。然而, 上述研究较难理清各子系统链接与耦合关系。因此, 如何深入研究系统内部物质能量流动转换是复合工业生产模式系统能值研究的主导方向和重点内容。

### 5. 结论与展望

能值分析应用于生态经济系统可持续发展研究是当前学术研究的热点话题之一, 涉及到生态学、经济学和环境学等多门学科。本文基于 WEB OF SCIENCE 和维普数据库检索生态经济系统可持续发展能值研究相关文献, 利用文献计量法分析其研究进展特征和动态。

1) 国内外研究发文量大致上不断增加, 并经历过初步探索阶段(1994~1997 年)、波动增长阶段(1998~2005 年)和快速发展阶段(2005 年至今)三个时期。其中, 推测“低估”年份的出现与能值转换率难统一有关。需规范化能值转换率或与其他分析方法互补联用, 才可能突破该瓶颈。虽然国外研究时间早于国内, 但国内年均发文量明显高于国外, 且国内外研究对象相似, 包括农村生态经济系统、区域生态经济系统、城市生态经济系统和企业生态经济系统。

2) 根据重要研究论文引证知识图谱分析, 国内外生态经济系统可持续发展能值研究对象主要集中在农村生态经济系统和区域生态经济系统。农村生态经济系统的基础结构是作为食物链起点的植物结构, 决定着其他生态经济系统平衡, 故而关注较多。而区域生态经济系统研究自然地理区域或某一经济的发展状况及其运动变化, 属于宏观层面的生态经济管理, 且相对于其他系统来说研究面广, 因而研究较多。

3) 根据生态经济系统可持续发展能值研究动态分析, 推测未来生态经济系统可持续发展能值研究内容重点应在农村生态经济系统的面源污染排放影响能值核算、区域生态经济系统的协同发展模式和区域间尺度推绎、城市生态经济系统的动态变化主导诱因和城市代谢研究、企业生态经济系统内部耦合关系等。而未来研究方法会侧重于能值分析的不确定性评估和能值核算的动态预测等问题解决。

### 基金项目

北京市自然科学基金青年项目(8214057); 北京市公益性科研院所改革与发展专项项目资助(2020G-1); 中国水科院基本科研业务费项目(WE0145B052020); 北京市公益性科研院所改革与发展专项

项目资助(2019G-1); 国家自然科学基金青年项目(52000181)。

## 参考文献

- [1] 陈德昌. 生态经济学[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2003: 1-305.
- [2] 胡宝清, 严志强, 廖赤眉. 区域生态经济学理论、方法与实践[M]. 北京: 中国环境出版社, 2005: 3-52.
- [3] Amaral, L.P., Martins, N. and Gouveia, J.B. (2016) A Review of Emergy Theory, Its Application and Latest Developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **54**, 882-888. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.048>
- [4] 刘耕源. 生态系统服务功能非货币量核算研究[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1487-1499.
- [5] 张雪花, 许文博, 张宝安, 等. 京津冀城市群低碳经济联系强度分形特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 755-763.
- [6] Qi, W., Deng, X.Z., Chu, X., et al. (2017) Emergy Analysis on Urban Metabolism by Counties in Beijing. *Physics and Chemistry of the Earth*, **101**, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.01.024>
- [7] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬. 基于能值分析方法的都市代谢过程——案例研究[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5078-5089.
- [8] 韦爱云. 基于文献计量分析的壮语研究综述——壮语的计量研究系列之一[J]. 广西师范大学学报(哲学社会科学版), 2015, 51(1): 153-159.
- [9] Lucio-Arias, D. and Leydesdorff, L. (2009) Main-Path Analysis and Path-Dependent Transitions in Hist-Cite(TM)-Based Historiograms. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, **59**, 1948-1962. <https://doi.org/10.1002/asi.20903>
- [10] Chen, W., Liu, W., Geng, Y., et al. (2017) Recent Progress on Emergy Research: A Bibliometric Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **73**, 1051-1060. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.041>
- [11] 陈东景. 基于能值相图的海洋渔业生态经济系统可持续发展评价——以山东省为例[J]. 生态经济, 2019, 35(4): 65-70.
- [12] Ulgiati, S., Odum, H. and Bastianoni, S. (1994) Emergy Use, Environmental Loading and Sustainability an Emergy Analysis of Italy. *Ecological Modelling*, **73**, 215-268. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)90064-7)
- [13] Brown, M.T. and Ulgiati, S. (1997) Emergy-Based Indices and Ratios to Evaluate Sustainability: Monitoring Economies and Technology toward Environmentally Sound Innovation. *Ecological Engineering*, **9**, 51-69. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00033-5)
- [14] Chen, G.Q., Jiang, M.M., Chen, B., et al. (2006) Emergy Analysis of Chinese Agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **115**, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.01.005>
- [15] Cheng, H., Chen, C., Wu, S., et al. (2017) Emergy Evaluation of Cropping, Poultry Rearing, and Fish Raising Systems in the Drawdown Zone of Three Gorges Reservoir of China. *Journal of Cleaner Production*, **144**, 559-571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.053>
- [16] Ma, F., Eneji, A.E. and Liu, J. (2015) Assessment of Ecosystem Services and Disservices of an Agro-Ecosystem Based on Extended Emergy Framework: A Case Study of Luancheng County, North China. *Ecological Engineering*, **82**, 241-251. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.100>
- [17] Zhang, L.X., Yang, Z.F. and Chen, G.Q. (2007) Emergy Analysis of Cropping-Grazing System in Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Energy Policy*, **35**, 3843-3855. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.022>
- [18] Chen, S. and Chen, B. (2012) Sustainability and Future Alternatives of Biogas-Linked Agrosystem (BLAS) in China: An Emergy Synthesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 3948-3959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.040>
- [19] Jiang, M.M., Chen, B., Zhou, J.B., et al. (2007) Emergy Account for Biomass Resource Exploitation by Agriculture in China. *Energy Policy*, **35**, 4704-4719. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.03.014>
- [20] Cohen, M.J., Brown, M.T. and Shepherd, K.D. (2006) Estimating the Environmental Costs of Soil Erosion at Multiple Scales in Kenya Using Emergy Synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **114**, 249-269. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.10.021>
- [21] Zuo, P., Wan, S.W., Qin, P., et al. (2004) A Comparison of the Sustainability of Original and Constructed Wetlands in Yancheng Biosphere Reserve, China: Implications from Emergy Evaluation. *Environmental Science & Policy*, **7**, 329-343. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.05.001>
- [22] Liu, G., Yang, Z., Chen, B., et al. (2013) Modelling a Thermodynamic-Based Comparative Framework for Urban Sustainability: Incorporating Economic and Ecological Losses into Emergy Analysis. *Ecological Modelling*, **252**, 280-287. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.02.002>

- 
- [23] Jiang, M.M., Zhou, J.B., Chen, B., *et al.* (2008) Emergy-Based Ecological Account for the Chinese Economy in 2004. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **13**, 2337-2356. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.04.025>
- [24] Yang, Z.F., Jiang, M.M., Chen, B., *et al.* (2010) Solar Emergy Evaluation for Chinese Economy. *Energy Policy*, **38**, 875-886. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.038>
- [25] Fang, C.L. and Ren, Y.F. (2017) Analysis of Emergy-Based Metabolic Efficiency and Environmental Pressure on the Local Coupling and Telecoupling between Urbanization and the Eco-Environment in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Science China—Earth Sciences*, **60**, 1083-1097. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-9038-6>
- [26] Nelson, M., Odum, H.T., Brown, M.T., *et al.* (2001) “Living off the Land”: Resource Efficiency of Wetland Wastewater Treatment. *Advances in Space Research*, **27**, 1547-1556. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00246-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00246-0)
- [27] Liu, G., Yang, Z., Chen, B., *et al.* (2014) Emergy-Based Dynamic Mechanisms of Urban Development, Resource Consumption and Environmental Impacts. *Ecological Modelling*, **271**, 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.014>
- [28] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬. 基于能值分析方法的都市代谢过程研究——理论与方法[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4539-4551.
- [29] Brown, M.T. and Ulgiati, S. (2002) Emergy Evaluations and Environmental Loading of Electricity Production Systems. *Journal of Cleaner Production*, **10**, 321-334. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00043-9)
- [30] Geng, Y., Zhang, P., Ulgiati, S., *et al.* (2010) Emergy Analysis of an Industrial Park: The Case of Dalian, China. *The Science of the Total Environment*, **408**, 5273-5283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.081>
- [31] Brown, M.T. and Buranakarn, V. (2003) Emergy Indices and Ratios for Sustainable Material Cycles and Recycle Options. *Resources, Conservation and Recycling*, **38**, 1-22. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00093-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00093-9)