

能值研究的几个前沿命题

沈善瑞¹ 陆宏芳^{2*} 赵新锋³ 蓝盛芳³

(1. 淮海工学院海洋与水产学学院, 江苏 连云港 222005; 2. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650; 3. 华南农业大学生命科学学院, 广东 广州 510642)

摘要: 简要介绍了能值理论与分析方法的产生过程、基本概念、方法与步骤, 并在此基础上就能值理论和方法在应用领域的拓展研究、在理论体系和评估体系方面的优化研究、与景观生态学的交叉研究、与热动力学理论及其度量尺度间的整合研究、能值流计算方法的探索及能值转换率的统一等能值研究的几个前沿领域和命题进行了系统的综述和分析。

关键词: 能值; 应用研究; 前沿命题

中图分类号: Q148

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2004)03-0268-05

Some Frontier Points of Emergy Study

SHEN Shan-rui¹ LU Hong-fang^{2*} ZHAO Xin-feng³ LAN Sheng-fang³

(1. Ocean and Fisheries College of Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China; 2. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. College of Life Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: After a brief introduction to the history, fundamental concept, method and steps of emergy theory and analysis method, the current situation and future trends of six frontiers of emergy study are reviewed and discussed. The six frontier fields in emergy study include: applied research, emergy theory and the optimization of evaluation system, the integration study of emergy in connection with landscape ecology and other thermodynamic theory, measuring method, and unification of emergy transformity.

Key words: Emergy; Application study; Frontier research

根据能量系统理论观, 生态系统及其他系统均可视为能量系统。能量可用于表达和了解生命与环境、人类社会经济与自然的关系。不同种类不同性质的能量具有不同的能质, 不能直接进行比较和数量加减; 用一般能量单位更无从表达和衡量自然环境资源与社会经济的本质关系。能量分析碰到的这些难题, 就是所谓的“能量壁垒”问题, 即不同来源和形式的能量, 性质是不相同的, 具有等级差异。例如 1 J 电能、1 J 太阳能和 1 J 热能是不一样的, 在对系统进行能量分析时不能直接相加减。能值理论与分析方法的出现为这一问题的解决提供了全新的思路, 在创立至今的短短 20 余年间, 已在全球范围各种生态系统的研究领域得到了广泛的应用和高度的重视。本文对能值理论与分析方法的产生过

程、基本概念和方法与步骤作简要介绍, 对能值研究的几个前沿领域和命题进行系统的综述。

1 能值理论和分析方法的产生、基本概念与步骤

美国著名系统生态学家 H. T. Odum 从 20 世纪 70 年代起, 对生态系统的能量学进行了系统而深入的研究, 提出了一系列新概念和开拓性的重要理论观点, 其中包括 70-80 年代初提出的能量系统、能质、能质链、包被能(体现能)、能量转换率及信息量等观点。第一次将能流、信息流与经济流联系在一起, 能流的特质基础是物质, 这样, 生态系统中的这几个功能过程不再是孤立的了。80 年代后期和 90

收稿日期: 2003-04-22 接受日期: 2003-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(30270282, 30170147); 广东省基金团队项目(003031); 中国科学院华南植物研究所所长基金项目资助

* 通讯作者 Corresponding author

年代创立了“能值”(Emergy),以及太阳能值转换率等一系列概念,发展创立了能值理论和分析方法,广泛应用于各时空尺度、各类型的生态系统,出版了世界第一部能值专著^[1,2]。

某种流动或贮存的能量所包含的另一种流动或贮存的能量的数量,即该种能量的能值。因各种资源、产品或劳务在形成过程中均直接或间接地起源于太阳能,故在实际应用中多以太阳能为基准,用太阳能焦耳为单位来度量不同类型能量的能值。

能值分析通过能值转换率,即形成每单位某种能量或物质、信息所需的另一种能量(实际应用中常用太阳能)之量,对各种生态流价值进行统一的单位转换评价,从而突破了能量分析在数量研究上长期难以攻破的能质壁垒,通过能值(通常是太阳能值)这一统一的客观标准,实现了不同能量等级上不同质能量的统一度量。

对于经济子系统各生态流及自然子系统与经济子系统界面不宜用能值转换率进行转换度量的生态流,能值分析方法采用能值/货币比率,即当年该国全年能值应用总量与当年该国国民生产总值的比,推算出其能值后进行统一分析。同时,能值/货币比亦可看作是衡量货币实际购买力和劳动力实际能力的标准。反之,已知能值量亦可通过能值/货币比率计算其所相当的能值货币价值,从而解决了在分析评价和应用中自然环境与经济社会的对接难题。

能值分析的具体方法与步骤因研究对象和研究者而有所不同,但基本上分为以下5步:(1)确定研究系统的边界和内容,绘制系统能量和能值图;(2)收集所需的各种资料和数据,整理分类,输入计算机贮存处理;(3)编制能值分析表,计算系统的主要能量流、物质流、经济流。能值分析表一般包括编号、项目、原始数据、太阳能值转换率、太阳能值、能值货币价值等6项,其中“太阳能值”等于“原始数据”乘以“太阳能值转换率”、“能值货币价值”等于“太阳能值”除以当年的国家“能值/货币比率”;(4)能值指标体系建立及分析,能值指标主要有能值投资率、能值交换率、净能值产出率、环境承载力等;(5)系统的发展评价和策略分析,并对系统的优化提出建议。

2 国内外研究的几个前沿命题及其概况

能值理论和分析方法问世时间不长,但其对正确分析人类与自然、环境资源与社会经济价值的相

互关系,及制定可持续发展战略有重要作用,因而备受国际生态学界、经济学界、系统学界及政府决策者的关注。近10多年来,能值分析方法和应用研究,尤其对国家或地区、自然资源、工农业系统的能值分析十分活跃^[1]。在国际上,20世纪80年代美国国家科学基金率先开展能值研究,意大利、瑞典、澳大利亚等国于90年代迅速开展。我国于20世纪90年代初由留美学者蓝盛芳引入能值理论^[3],开展了国家与地区、农业、自然保护区和城市方面的能值分析和理论方法研究。目前在广州、南京、上海、北京等地大学和科研单位均进行有关研究^[2]。现就能值研究领域中的几个前沿命题作简要综述。

2.1 研究应用领域上的拓展

国外能值研究以Odum为首在各个时空尺度和各类型的生态经济系统进行了较系统的研究,与此同时,能值研究方法在恢复生态学、产业生态学等新兴学科领域中的应用亦日渐成为能值研究新的增长点。

在空间尺度上,对从大到国家、流域,小到城市、乡村、企业的各尺度生态经济复合系统进行了大量能值分析研究。Odum自20世纪80年代发展了一套国家能值分析方法^[4],并先后在包括中国在内的12个国家相继开展研究^[4],如美国已对12个州进行过研究^[1,5];我国主要对台湾^[6,7]、西藏^[8]、新疆^[9]、及大陆各省区市农林牧渔主要产品的能值及其宏观经济价值进行评估^[10]。在城市系统尺度的能值分析案例有美国迈阿密、中国香港^[11]、台北^[12]、广州^[13]等。研究表明能值功率密度和转换率的确定有助于明确城市地区的经济发展和能量等级,并为规划者指明住房、工业、运输、交通、信息中心的大约位置。乡村层面上的能值研究主要包括辅助环境政策、主要资源的宏观经济价值等;企业层面上已有对牛奶厂等的研究案例^[14]。

在生态系统类型上,能值研究对象从自然生态系统拓展到自然保护区再到农业系统、环境治理工程乃至城市、工业系统等各类生态系统。Odum等于1987年就开始了海岸带、盐沼地、热带雨林、江河流域、甚至鲸鱼等自然生态系统和生物的能值评估研究^[1],粟娟等把能值概念应用到中国的森林效益评估研究^[15],Nilsson等分析了湿地的废水处理效率^[16]。在自然保护区的研究方面,钦佩等对香港红树林湿地保护区^[17],朱洪光等亦在盐城自然保护区^[18]进行能值研究。农业生态系统的分析与评价一直是

能值分析的一个热区,已广泛应用于包括蚕丝生产、海虾养殖、农庄甚至蔗糖和番茄生产系统的分析^[1,19,20]。我国在该领域的研究亦相当活跃,蓝盛芳等^[21,22]将能值分析拓展到农业生态经济系统,并同以往的农业能量分析加以比较。在其它系统如种植业系统^[23,24]、农业生态系统^[25]、复合农业系统^[26,27]等也如火如荼地开展。在环境治理工程研究方面,Brown 等^[28]对泰国湄公河的水坝修筑方案进行了比较研究,张晟途等对江苏射阳河口的 3 种治理方法进行能值计算和评估^[29]。城市研究方面,黄书礼^[6,7]、蓝盛芳^[11]、隋春花等^[13]分别对台北、香港和广州城市系统进行了研究。能值理论方法不仅适用于自然生态系统而且适用于人类社会经济系统,被 Odum 称为“自然与经济之间的桥梁”,因此能值理论方法在恢复生态学、产业生态学等以生态经济复合系统为研究对象的新兴研究领域中的应用正在不断拓展。

2.2 在能值理论体系和评估体系的优化研究

能值理论方法的提出为能量流、物质流及货币流的评价提供了一个共同的尺度,并成功地解决了能量等级系统中各等级能量的统一评价问题,将能量生态学研究推进到了一个新的发展阶段,同时丰富了生态经济学的评价方法。但作为一个新兴学科,其评价指标体系仍不完善,尤其缺乏全面衡量系统可持续发展能力的综合指标。这种局面使得能值评价指标体系的研究成为能值研究的前沿焦点之一,新的研究成果不断涌现。1997 年美国生态学家 Brown 和意大利生态学家 Ulgiati^[30]首次提出了能值可持续指标 ESI,定义为系统能值产出率与环境负载率之比,即 EYR/ELR 。ESI 的提出初步填补了能值理论中系统可持续发展的能值综合评价指标的空缺,在系统可持续发展的能值评价方面迈进了一大步。但由于缺乏对能值产出的实际社会经济贡献的反映,ESI 的提出仍不能满足对系统可持续发展的评价要求。陆宏芳在 ESI 的基础上扩展了新的评价系统可持续发展性能的能值指标 EISD (Emergy indices of sustaintable development),定义为能值产出率与能值效率的乘积与环境负载率之比,即 $EYR \times EER/ELR$,从而实现了能值效益与经济效益分析的进一步整合,并已成功应用于珠江三角洲 3 种典型基塘农业生态工程模式的研究^[31,32]。李双成等^[33]则提出了以能值分析为理论支撑的区域性可持续发展评价指标,并计算了我国 1978-1998 年经济系统的可持续发展指数。在环境影响分析方面,针

对能值分析方法重成本结构分析而轻排污影响分析的缺陷, Ulgiati 和 Brown 提出用稀释污染物所需的生态系统服务能值来评价该污染排放对环境的影响^[34];也有学者建议直接将 exergy(即一定的环境条件下某物质或系统达到热力学平衡状态所能释放出的最大功,可用以衡量系统远离热力学平衡态的程度)引入能值分析,即能值分析与热力学分析整合,来评价目标系统所排污染物对环境的影响^[35];陆宏芳^[36]提出直接通过能值分析指标与环境学污染排放标准指标的整合,即能值分析与物质分析的整合,来评价系统污染排放对环境的影响。

2.3 与景观生态学的交叉研究

随着经济发展的全球化进程和全球环境问题日益尖锐,大尺度的生态经济研究成为必然。作为生态经济系统分析、模拟工具之一的能值理论方法,如何与景观生态学等研究方法结合亦成为一个新的命题。黄书礼^[37]结合 GIS 等手段将台北都市区分为混合利用型城市核心区、高密度城市居住区、服务与制造业区、农业区、城郊开发区和自然状态区等 6 个能值区,进而通过能值转换率和能值评价指标的计算确定了各个区所在能量等级系统所处的位置,探讨了能值研究在城市演化中的规律及其在城市规划中的应用潜力。整体而言,此领域的研究还处于起步阶段,有待进一步深入。

2.4 与热动力学理论及其度量尺度间的整合研究

Exergy 和 Emergy 研究是能量生态学发展的两个新的相互独立的度量尺度和研究方法。Exergy 研究方法以热力学两大定律为基础,目前已成为热动力学研究的当家方法之一。Exergy 和 Emergy 两个概念,前者表示系统目前的热力学状态、有序性程度和信息密集度,后者表示系统演化到当前状态所经历的时间和各种过程中所消耗的能量成本。因而 Bastianoni 和 Marchettini^[38]建议用两者的比值来表示系统达到目前状态的能耗效率,即系统演化的效率。Exergy 和 Emergy 间的对比和整合研究不仅在现在,而且在将来的一段时期都会是国际能量学界的一个研究热点^[1,6,38,39]。

2.5 能值流计算方法的探索

能值研究中,在系统内能值流交叉与分支点处的计算方法上仍有待进一步统一。Odum 创立的能值理论认为,因为所消耗的能值成本相同,同一生

产过程的产品与副产品(或复合产品)具有相同的能值价值,但在计算系统产出能值时,仅计入产品能值,因为产品和副产品所消耗的为同一能值成本^[29],而这就在有副产品和无副产品的系统对比研究中造成了一定的误区,即分析结果往往是有多种产出的系统的能值产出率低于单一产出的系统,而环境负载率则高于单一产出的系统。Bastianoni 和 Marchettini^[14]提出了联合转换率和权重转换率的概念,对系统的不同产出情况区别评价。联合转换率的定义是,复合产出系统生产所耗能值与总产出能量(即各种产出的能量总和)之比;权重转换率的定义是,分别生产各种产品的能值转化率乘以该产品的能量权重后的总和。通过一个有牛奶、沼气和电能3种产出的农场的案例分析认为,联合转换率可更便捷地用于对比分析各种复合产出系统和单一产出系统。

2.6 能值转换率的统一

能值分析的重点和难点就是对系统的能物流、货币流、信息流进行能值综合分析,建立可比较的能值指标体系。为此,要用能值转换率计算各种能物流、经济流、信息流的能值,首先要解决的是能值转换率的问题。Odum 所计算的太阳能值转换率可满足较大范围区域、系统的能值分析的需要,但对较小区域、系统甚至个体的能值分析的适用性则有待商榷,人类经济产品的能值转换率因生产水平和效益的差异而出现差别。在具体的能值分析实践中还需要计算适合具体研究对象的太阳能值转换率。对能值指标的具体涵义则需要和生产、经济结合起来,联系具体的实践工作进行修正、完善和充实。2000年和2002年在美国和意大利举行的第一、二届“能值分析研究大会”都一再强调在全球范围内进行各类系统、产品能值转换率的积累、共享和统一。

3 结语

能值理论与分析方法在国际生态学界和经济学界引起强烈反响,被认为是联结生态学和经济学桥梁,具有重大的科学意义。在理论上,能值分析为生态系统和复合生态系统的各种生态流进行综合分析开辟了定量分析研究的新思路,提供了一个衡量和比较各种能量的共同尺度,找到了生态系统和各种生态流进行综合分析的统一标准,发展和丰富了生态学和经济学的定量研究方法。在实际意义

上,应用能值可衡量整个自然界和人类社会经济系统,定量分析资源环境与经济活动的真实价值以及它们之间的关系,有助于调整生态环境与经济发展,对自然资源的科学评价与合理利用、经济发展方针的制定、实施可持续发展战略,均具有重要意义。

Odum 为生态系统、生态经济系统的能值分析建立了基本理论方法框架,但将其拓展到各种生态系统分析中进行应用,同时实现其在能值理论、分析方法和指标体系方面的优化都要求更多地借鉴和整合包括景观生态学、热动力学等在内的其它相关学科的尺度和方法。同时,能值转换率的积累和共享工作亦将一直伴随着能值研究发展的全过程。

参考文献

- [1] Odum H T. Environmental Accounting — Emergy and Environmental Decision Making [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996. 20–50.
- [2] Lan S F(蓝盛芳), Qin P(钦佩), Lu H F(陆宏芳). Emergy Analysis of Ecological-economic Systems [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2002. 30–31, 420–421. (in Chinese)
- [3] Lan S F(蓝盛芳). Emergy analysis of ecological-economic systems [A]. In: Advances in Model Ecology [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 1992. 266–286. (in Chinese)
- [4] Lan S F, Odum H T. Emergy synthesis of the environmental resources basis and economy in China [J]. Ecol Sci, 1994, 14(1): 63–74.
- [5] Odum H T, Odum E C. Ecology and Economy: “Emergy” Analysis and Public Policy in Texas [M]. Texas: The Office of Natural Resources and Texas Department of Agriculture, 1987. 163–171.
- [6] Huang S L(黄书礼). The comparison and analysis of urban ecosystem in Taiwan & the strategy of sustainable city [D]. Taipei: City of Zhongxing University, 1993. 31–38. (in Chinese)
- [7] Huang S L(黄书礼). The evaluation study of city from the ecological energy viewpoint [D]. Taipei: City of Zhongxing University, 1996. 3–11. (in Chinese)
- [8] Yan M C(严茂超), Odum H T. A study on emergy evaluation and sustainable development of Tibetan eco-economic system [J]. J Natl Resour(自然资源学报), 1998, 13(2):116–125. (in Chinese)
- [9] Li H T(李海涛), Yan M C(严茂超), Shen W Q(沈文清), et al. Study on emergy evaluation and sustainable development of economical ecosystems of Xinjiang [J]. Arid Land Geog(干旱区地理), 2001, 24(4):289–296. (in Chinese)
- [10] Yan M C(严茂超), Li H T(李海涛), Cheng H(程鸿), et al. Emergy analysis and assessment of main products of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery in China [J]. J Beijing For Univ(北京林业大学学报), 2001, 23(6):66–69. (in Chinese)
- [11] Lan S F, Odum H T. Emergy synthesis of the environment and

- economy of Hong Kong [J]. *J Environ Sci*, 1994, 6(4):432-439.
- [12] Huang S L, Chen C S. A system to analyse environmental carrying capacity for managing urban growth of the Taipei metropolitan region [J]. *J Environ Manag*, 1990, 31:46-60.
- [13] Sui C H (隋春花), Lan S F (蓝盛芳). Emergy analysis of Guangzhou urban ecosystem [J]. *Chongqing Environ Sci (重庆环境科学)*, 2001, 23(5):4-6. (in Chinese)
- [14] Bastianoni S, Marchettini N. The problem of co-production in environmental accounting by emergy analysis [J]. *Ecol Model*, 2000, 129:187-193.
- [15] Su J (粟娟), Lan S F (蓝盛芳). A new method to evaluate integrate benefit of forestry—emergy analysis [J]. *World For Res (世界林业研究)*, 2000, 13(1):32-37. (in Chinese)
- [16] Nilsson D. Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants [J]. *Biomass Bioenergy*, 1997, 13 (1/2):63-73.
- [17] Qin P, Wong Y S, Tam N F Y. Emergy evaluation of Mai Po mangrove marshes [J]. *Ecol Eng*, 2000, 16:271-280.
- [18] Zhu H G (朱洪光), Qin P (钦佩), Wan S W (万树文). Emergy analysis of two models of wetland utilization on seashore in Jiangsu Province [J]. *Chin J Ecol (生态学杂志)*, 2001, 20(1):38-44. (in Chinese)
- [19] Bastianoni S, Marchettini N, Panzieri M, et al. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy) [J]. *J Clean Prod*, 2001, 9:365-373.
- [20] Lagerberg C. Emergy analysis of tomato production systems [A]. In: Brown M T. *Emergy Synthesis: Theory and Application of the Emergy Methodology* [M]. Gainesville: The Center for Environmental Policy, 2000. 101-106.
- [21] Lan S F (蓝盛芳). Emergy synthesis of the agricultural resource base and economy of China [A]. In: *Modern Resource Environment and Economy Development* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995. 26-29. (in Chinese)
- [22] Lan S F, Chen F P. Emergy Analysis of Chinese Agroecological — Economic System [A]. In: *Proceedings of Ecological Summit 96* [C]. Copenhagen: Elsevier, 1996.
- [23] Liu X M (刘新茂), Lan S F (蓝盛芳), Chen F P (陈飞鹏). Emergy analysis of the plant system of Guangdong Province [J]. *J South China Agri Univ (华南农业大学学报)*, 1999, 20(1):111-115. (in Chinese)
- [24] Su G L (苏国麟), Li M Z (李谋召), Lan S F (蓝盛芳), et al. Emergy analysis and sustainable development of farming system in Sanshui of Guangdong [J]. *Res Agri Modern (农业现代化研究)*, 1999, 20(6):359-361. (in Chinese)
- [25] Zhang Y H (张耀辉), Lan S F (蓝盛芳), Chen F P (陈飞鹏). Emergy analysis of agriculture of Hainan Province [J]. *Rural Eco-Environ (农村生态环境)*, 1999, 15(1):5-9. (in Chinese)
- [26] An S Q, Bao H S, Zou C J. Study of emergy flow in a compound agro-ecosystem in the Taihu lake area, Jiangsu Province, China [J]. *Ecol Eng*, 1998, 11:303-313.
- [27] Lu H F (陆宏芳), Lan S F (蓝盛芳), Li M Z (李谋召). The study on emergy analysis method of the agricultural economical ecosystem [J]. *J Shaoguan Univ (韶关大学学报)*, 2000, 21(4):74-78. (in Chinese)
- [28] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view [J]. *Ecol Econ*, 1996, 19: 219-235.
- [29] Zhang C T (张晟途), Qin P (钦佩), Wan S W (万树文). Analysis on the resource allocation structure of *Spartina alterniflora* ecological engineering from the emergy benefits aspect [J]. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, 2000, 20(6):1045-1049. (in Chinese)
- [30] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and rations to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation [J]. *Ecol Eng*, 1997, (9): 51-69.
- [31] Lu H F (陆宏芳), Lan S F (蓝盛芳), Li L (李雷), et al. Studies on emergy indices for evaluating system sustainable development property [J]. *Chin Environ Sci (中国环境科学)*, 2002, 22(4):380-384. (in Chinese)
- [32] Lu H F, Lan S F, Chen F P, et al. Emergy study on dike-pond eco-agricultural engineering modes [J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(5):145-150.
- [33] Li S C (李双成), Fu X F (傅小锋), Zheng D (郑度). Emergy analysis for evaluating sustainability of Chinese economy [J]. *J Natl Resour (自然资源学报)*, 2001, 16(4):297-304. (in Chinese)
- [34] Ulgiati S, Brown M T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions: the case of electricity production [J]. *J Clean Prod*, 2002, 10:335-348.
- [35] Bastianoni S, Marchettini N. Emergy/exergy ratio as a measure of the level of organization of systems [J]. *Ecol Model*, 1997, 99:33-40.
- [36] Lu H F, Lan S F, Peng S L. New emergy indices for sustainable development [J]. *J Environ Sci*, 2003, 15(4):562-569.
- [37] Huang S L, Lai H Y, Lee C L. Emergy hierarchy and urban landscape system [J]. *Lands Urb Plan*, 2001, 53:145-161.
- [38] Ulgiati S. Energy, emergy and embodied exergy: diverging or converging approaches? [A]. In: Brown M T. *Emergy Synthesis: Theory and Application of the Emergy Methodology* [M]. Gainesville: The Center for Environmental Policy, 2000. 15-32.
- [39] Pereira J T V, Nebra S A. Transformities and exergetic cost — a discussion [A]. In: Brown M T. *Emergy Synthesis: Theory and Application of the Emergy Methodology* [M]. Gainesville: The Center for Environmental Policy, 2000. 71-80.