

生态系统能值理论研究进展及若干问题思考

钟珍梅¹, 翁伯琦², 王义祥¹, 黄勤楼¹

(1. 福建省农业科学院农业生态研究所, 福建 福州 350013; 2. 福建省农业科学院, 福建 福州 350003)

摘要: 能值分析理论是美国著名的系统生态学家 Odum 为首创立的, 该理论的问世首次使生态系统的物质、能量和货币流通过能值转化率转化成太阳能值进行对比, 为自然资源价值的评价、生态系统结构和功能的分析及可持续发展评估提供了崭新的思路和方法。本文试就生态系统能值理论的应用研究和理论研究现状作一概述, 通过与其他几种方法对比, 从能值理论的产生、难点和发展趋势进行分析, 以期为能值理论的进一步完善提供借鉴与参考。

关键词: 生态系统; 能值理论; 生态系统评价方法; 能值转化率

中图分类号: Q 148

文献标识码: A

Advances in Ecosystem Emergy theory and thoughts on some related issues

ZHONG Zhen-mei¹, WENG Bo-qi², WANG Yi-xiang¹, HUANG Qin-lou¹

(1. Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China; 2. Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: Emergy analysis is a science created by H. T. Odum. *Emergy*, specifically, *Solar Emergy*, is "the available solar energy used up directly and indirectly to make a service or product". Odum pioneered the development and use of *emergy*. He presented it as a way of understanding the behavior of self-organized systems, valuing ecological goods and services, and jointly analyzing ecological and economic systems. This basic concept is quite straightforward, however, its implications potentially profound. This paper discusses the main progress of the science of *emergy* on its applications and theory, provides insight into the relationship between it and other ecological analysis methods, attempts to point out research difficulties, and suggests areas for further studies in order to promote and better understand it.

Key words: Ecological system; *emergy*; ecosystem evaluation; transformity

“能值”理论是 20 世纪 80 年代美国著名系统生态学家 Odum 为首创立的^[1]。“能值”是指直接或间接投入到劳务或产品中的能量总和, 即包被能 (embodied energy), 在实际应用中, 由于各种资源、产品或劳务的能量均直接或间接来源于太阳能, 故常用太阳能值 (solar emergy) 来衡量某一能量的能值大小, 其单位为太阳能焦耳 (Solar emjoules, 即 sej)^[2-3]。该理论认为, 所有的系统都是通过能量流动形成网络, 它以能值为基准, 通过能值转换率, 将生态经济系统内流动和储存的各种不同类别、不同等级的能量和物质转换为同一标准的能值, 再进行定量分析研究, 对生态系统内的自然资源的利用进行评估, 以此评估自然和社会的

真正财富^[4], 同时评估系统的可持续发展状况。Hau 等认为能值分析理论是以自然价值为基础, 将系统中各种生态流和经济流转换为能值流, 对自然环境生产与人类经济活动进行统一评价, 定量分析其结构、功能与生态经济效益^[5]。本文从能值理论的产生进行阐述, 并就其研究进展、应用范围及研究的难点进行探讨, 以期为我国能值理论的进一步发展提供新的研究思路。

1 能值分析理论的产生

19 世纪初, 生物学家 Alfred Lotka 第一次提出了系统存在和演替过程中的能量作用假设, 他将该假设命名为最大功率原则 (maximum power

收稿日期: 2010-02-09 初稿; 2010-08-19 修改稿

作者简介: 钟珍梅 (1975-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业生态研究

通讯作者: 翁伯琦 (1957-), 男, 研究员, 主要从事农业生态和水土保持研究 (E-mail: boqiweng@yahoo.com)

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAD89B13)

principle), 并建议将其作为热力学第四定律^[6], 这标志着基于最大功率原则的能值理论已经初现。20世纪50年代, 当Odum意识到生态动力学的重要性时, 脑海里首次有了“能值”这一概念^[7]。随后Odum意识到能量质量的重要性及将不同类型能量同一化的必要性^[8], 从热力学角度出发, 延伸了最大功率原则(maximum empower principle)的内涵, 形成了开放式系统能量语言(energy system language)。到20世纪70年代, 人类面临严重的能源危机, 当人类越来越意识到工业活动对生态系统的负面影响时, Odum已经认识到生态系统在全球经济体制中的关键地位, 并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创新性的重要理论观点^[5], 如: 能量系统(energy system)、能质(energy quality)、能质链、包被能(embodyed energy, 或译体现能)、能量转换率及信息量等^[3]。80年代后期和90年代, Odum首次创立了“能值”(Energy)及“太阳能值转换率”(Solar Transformity)等一系列概念。在其发表的演讲论著和Science刊物发表的论文中, 首次阐述了能值概念理论, 论述了能值与能质、能量等级、信息、资源财富等的关系。这是第一次将能流、物质流与经济流联系在一起^[9], 以整体统筹的方式来表述, 充分体现了可用于实际操作的便携性, 从而步入了实际应用的阶段, 其在理论和方法上都实现了重大飞跃。经进一步研究和总结国际能值分析研究的成果, 1996年Odum出版了第一部能值专著^[2]。

2 能值理论的研究进展

2.1 能值理论的应用研究现状

能值理论至创立以来, 国内外研究活跃, 在国外SDS数据库中输入关键词“Energy”可搜出相关文献1584篇, 而在我国的VIP数据库中输入关键词“能值”能搜索出文献595条。国内外学者将能值理论应用于大到国家、流域、城市, 小到乡村、企业的各尺度生态经济复合系统, 既涉及到国家和地区资源环境、经济、社会发展方面的能值分析^[10~13]; 也包括具体生态系统和经济系统的能值分析^[14~17]。从国家和区域层面而言, Odum运用能值理论对美国12个州进行研究^[2], Kemp等对63个国家进行了煤炭能值估算分析, 并且将燃料利用和可更新资源对环境的贡献合并在一起分析。我国已对台湾、西藏、新疆、湖南、山东等19个省份进行能值及其宏观经济价值评估, 为我国区域

经济的发展提供了宏观决策依据。从城市层面而言, 美国迈阿密、我国的多个城市也运用能值理论进行宏观经济价值与可持续发展评估^[18~20]。在企业层面上已有对牛奶厂、电厂、生物质直燃CDM(清洁发展机制)项目等的能值研究案例^[21~22]。从生态系统类型而言, 能值研究对象逐步扩展, 从自然生态系统^[2]拓展到农业系统^[23]再到自然保护区^[24~26], 乃至城市、工业系统等各类生态系统。1987年Odum等就开始了海岸带、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^[2], Nilsson等分析了湿地的废水处理效率^[27], 王坤等对4种水果种植系统的能值和经济效益进行分析^[28]。在自然保护区的研究方面, 钱佩等应用能值理论分别对香港红树林湿地保护区、西溪国家湿地公园、盐城自然保护区、武夷山自然保护区生态旅游系统进行能值评估^[24~29]。农业生态系统的分析与评价一直是能值分析的一个热区, 我国在该领域的研究亦相当活跃, 已广泛应用于包括草地系统^[30]、蚕桑系统、种植业^[31~32]、循环农业^[33~34]的分析。

2.2 能值理论的理论研究现状

能值转换率(transformity & unit energy values)是一个重要的概念, 是指单位能量或物质相当于多少太阳能值焦耳, 它是衡量能量的能质等级的指标, 也是能值理论最重要的组成部分, 长期以来其计算和积累是国际能值理论的研究热点。1996年Odum初次进行能值转化率的计算, 能值理论发展到现在已经出版了6本能值转化率Folio手册^[35], 其他学者也做了大量的尝试, 并取得了显著的效果。Franzese等于2009年计算出风、雨水、表土、石油、电、N、P、K等的能值转换率^[36], Rydberg等计算出作物、畜产品的能值转换率^[37], Brown等计算出林产品的能值转换率^[38], Cohen等在2009年建立NEAD(The National Environmental Accounting Database)数据库, 发布了134个国家发表了几乎所有物质元素的能值转换率^[39]。

2.3 能值理论与其他方法的比较

就能值分析方法与其他方法的比较而言, 目前, 常用的生态系统环境分析方法有生态足迹法(Ecological footprint EF)、生命周期评估法(life cycle assessment LCA)、Exergy和能值分析法(Energy analysis methods EAM)^[40]。生态足迹和能值分析方法更多关注环境资源利用及环境承载力评估等, 前者主要侧重于消费评估^[41], 后者侧重

于投入评估, 生命周期评估主要应用于工业生产过程中产品的安全生产和对环境影响评估, 而基于热力学原理的 Exergy 分析主要应用于工程和工业系统的环境评估, 这四种方法的产生背景及学术思想存在一定的差异, 且各有其优点和缺点。就生态足迹而言, 其优点为简单易懂, 数据获得容易, 评价结果具有全球可比性, 能够定量地测定人类社会发展的物质需求与自然生态承载能力之间的总体性盈亏状况^[42~43], 不足之处在于评价模型静态性, 模型参数选择的弹性不足, 忽略社会经济因素对土地生产力的影响及土地自身质量和功能的复杂性, 数据的准确性受到统计资料的限制, 评价结果与可持续程度存在非对等性^[44]。就生命周期评估而言, 其优点在于研究步骤的标准化, 注重排放对环境影响和不可更新能源的投入, 为产品安全生产全过程提供了一种评价方法^[45~46], 不足之处在于数据要求过高, 系统边界难以确定, 评价依据不统一, 研究的可操作性低, 研究的结果可比性差, 忽略了生态系统服务功能^[45], 难以考虑产品或过程的环境可持续性。而对 Exergy 分析而言, 由于累积 exergy 消耗量包含非能量类型在内的所有自然资源的消耗, 其优点在于可通过评估 exergy 消耗量度量及产品或过程与平衡状态的距离^[47], 比能量分析方法更有效^[48], 不足之处则是只能提供系统当前状态的信息, 计算过程没有考虑自然资源产生消耗的生态成本, 计算复杂, 对数据要求高^[45]。相比其他 3 种方法, 能值分析是在此基础上进一步发展和完善, 延伸了能量和物质积累和转化的研究范畴^[49], 实现了不同能量等级上不同质能量的统一度量^[3], 但也存在复杂的方法论和繁琐的计算^[49]、能值转换率计算积累、对污染物排放的评价方法不够完善^[50]等问题。

3 能值理论的难点与发展趋势

能值理论是在生态系统的物质流和能量流的基础上, 在地球上所有能量和物质均来自太阳能^[49]的学术思想上产生的, 其将物质、能量和货币流用同一标准进行评价, 研究系统内物质产生过程中所消耗的太阳能成本价值, 评估自然资源对经济发展的贡献, 系统的可持续发展水平^[3]。能值理论延伸了能量和物质流动研究范畴^[40], 实现了不同能量等级上不同质能量的统一度量^[3], 为生态系统自然资源的服务功能正确评价和系统的可持续发展评价提供了崭新的思路和方法。由于该理论问世不久, 目前在实际应用中还存在一定的难度, 笔者以为当

前能值分析的重点和难点在于以下几个方面。

3.1 能值理论的静态和动态分析

对一个生态系统而言, 既有静态过程, 也有动态过程。静态过程指系统的形式或状态不随着时间的变化而改变, 它具有相对的稳定性, 购买能值的投入属于静态投入, 而动态过程则指的是系统的形式或状态随着时间的变化而改变, 生态系统的自然资源投入则属于动态过程投入, 生态系统动态过程和静态过程相辅相成, 互相依存。以自然生态系统森林生态系统的能值分析为例, 森林是储蓄资源, 从系统形成初始就开始长时间能值动态投入, 蓝盛芳认为计算储蓄资源的能值转换率应该用投入这些资源的能值乘以资源形成的时间再除以这些资源的能量^[10], 进行此类系统的能值投入和产出分析时, 笔者以为, 自然资源的总投入也应用每年的投入乘以资源形成的时间, 再加上每年的其他投入, 以此计算系统的总产出。人工生态系统能值分析也应从动态分析和静态分析入手, 例如, 一个养殖场, 建场初始投入大量的必须连续多年使用的能值, 如固定资产、动物种苗等, 期间每年投入人力、兽药、饲料、种苗等, 该系统的产出是断续的动态产出。笔者以为, 对该系统进行能值分析应侧重于产出的动态分析, 即以年或某个时间段为系统的时间界限, 逐年进行分析, 否则可能导致投入成本漏算或重复计算的问题。总的来说, 在应用能值分析理论进行系统的投入和产出分析时, 应静态分析和动态分析相结合, 对自然生态系统以静态分析为主, 对人工生态系统应以动态分析为主, 进行能值动态分析时, 系统时间界限的设定是难点。

3.2 与其他生态系统评价方法的整合

能值理论从本质上讲是关于成本投入价值的理论, 其主要关注的是产品或劳务在形成过程中投入的能值成本(包括自然投入和人工投入), 依据投入成本计算产品或劳务所包含的能值。对一个产品而言, 投入成本后, 经过生产加工可能产生新的使用价值, 因此它的价值可能远大于投入成本的总和, 而能值分析理论则无法反应出这点, 此外能值分析理论也无法体现生态系统的生态服务功能。因此, 笔者认为, 在实际应用中应根据实际情况, 将能值分析方法和其他系统分析方法整合, 目前有些学者已经进行了这方面尝试。张伟等运用能值分析方法和生态足迹法分析衡东县的人均生态承载力、人均生态足迹和人均生态赤字等, 结果发现两种方法相结合的模型分析出来的结果和传统的生态足迹分析法一致, 该区域为弱可持续发展区域^[50]。陈

春锋等应用能值生态足迹法与传统的生态足迹法比较评价黑龙江省可持续发展状态,结果发现两种方法的结果一致,但能值生态足迹法从物质和能量的角度进行分析,并采用能值转换率、能值密度等更加稳定的参数进行计算,一定程度上克服了传统生态足迹方法的缺陷^[51]。孙东林运用能值分析方法修改生态承载力的计算,并将两种方法进行对比,结果发现新的方法更具有可信度和实用性^[52]。此外,依据实际情况,能值分析方法还可与产出分析方法整合,更好地评价生产过程及产出的价值、对环境的影响等,可与生命周期评估方法整合,更好地揭示系统完整的生产过程,为区域经济的可持续发展提供更科学的依据。

3.3 能值分析理论中的重复计算问题

在能值研究中,系统内能值流交叉与分支点处的计算方法仍有待进一步完善。能值理论认为,合计投入或产出能值时,同一来源的能值只能计算1次,对于相同来源的多种能值项,在合计时要进行归并取其成本的全集,以避免重复计算^[53],但这在实际计算过程中有一定的难度。例如,假设一个复合系统在相同的能值M投入情况下生产出P₁、P₂、…、P_n个产品,那么根据能值理论这n个产品的能值均为M,经过市场流通后,其中两个产品流入第2个系统,那么第2个系统在计算能值投入时将可能为2M,产生重复计算问题,若这n个产品流向n个系统,其能值总值为nM,假定这n个系统处于一个经济区域内,那该经济区能值投入总计将增加n-1倍。陆宏芳等人为,对于多组分的复杂系统,应从不同来源的输入出发追踪能值源路径,直至目标能值流后进行加和,避免重复计算^[53]。但在交通运输业极其发达以及经济日益全球化的背景下,要对各种产品进行一一追踪也是极为困难的。事实上这种问题在现实的能值评估中也确实存在。例如,Odum计算的生物圈年总能值为 9.44×10^{24} sej,而世界各国年总能值量使用量却达到了 20.24×10^{24} sej,虽然进行了同源能值合并,但结果仍比生物圈能值总量多出了1.144倍,即便是2000年修正的生物圈年总能值量为 15.83×10^{24} sej,也仅为世界各国年能值总投入的78.21%^[2]。

对于一个封闭系统而言,即便投入能值没出现重复计算的问题,能值产出计算也可能因为主产品和副产品的存在而造成一定的差异,其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^[54-55]。对此国外学者提出了联合能值转换率和

权重平均能值转换率的概念,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^[54]。

4 结束语

作为生态学与经济学的一种重要的定量分析方法,能值研究开拓性的研究已为生态学与经济学的交叉联系架起了桥梁。到目前为止国内外能值研究已有近30年历史,不少学者已将能值理论应用到了自己的研究实践中并取得了一定的成效。但能值理论从问世至今,受到来自各界科学家的质疑,除了科学家们看问题的角度立场存在差异外,也和该理论自身不够完善分不开,因此笔者以为为了更科学的发挥作用,能值分析方法尚需要不断完善和发展。但是,不容置疑的是能值分析方法在生态系统功能分析方面具有其他方法不可代替的作用,尤其在科学评估自然资源的价值与合理利用、经济发展方针的制定和可持续发展战略的实施方面具有跨时代的意义。

参考文献:

- [1] ODUM H T. Self-organization, transformity, and information [J]. Science, 1988, 242: 1132- 1139.
- [2] ODUM H T. Environment Accounting: Emergy and Environmental Decision Making [J]. New York: John Wiley & Sons, 1996: 20- 50.
- [3] 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.
- [4] ODUM H T. Handbook of emergy evaluation: a compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Folio No. I-Introduction and Global Budget. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences [J]. University of Florida, 2000.
- [5] JORGE L, HAU, BHAVIK R. Bakshi Promise and problems of emergy analysis [J]. Ecological Modelling, 2004, 178: 215- 225.
- [6] LOTKA A. Contributions to the energetics of evolution [J]. Proc Natl Acad Science USA, 1922 (8): 147- 151.
- [7] ODUM E P. Fundamentals of Ecology [M]. New York: Brooks Cole, 2004.
- [8] HALL C A S. Emergy analysis [C] // Hall, C. A. S. (Ed.), Maximum Power-The Ideas and Applications of H. T. Odum. University Press of Colorado. Niwot, 1995: 393.
- [9] 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.
- [10] 蓝盛芳, ODUM H T, 刘新茂. 中国农业生态系统的能流能值分析 [J]. 生态科学, 1998, 17 (1): 32- 39.

- [11] ODUM H T. Ecology and Economy: Emergy Analysis and Public Policy in Texas. Policy Research project Report [J]. Austin: University of Texas, 1987.
- [12] 周建, 齐安国, 袁德义. 湖南省生态经济系统的能值分析 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16 (2): 488– 494.
- [13] 刘浩, 王青, 李秀娟, 等. 辽宁省生态经济系统能值分析 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (3): 627– 633.
- [14] 张耀辉, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 海南省农业能值分析 [J]. 农村生态环境, 1999, 15 (1): 5– 9.
- [15] 沈善瑞, 陆宏芳, 蓝盛芳, 等. 三水市农业生态系统经济能值投入产出分析 [J]. 生态环境, 2004, 13 (4): 612– 615.
- [16] 隋春花, 蓝盛芳. 广州城市生态系统能值分析研究 [J]. 重庆环境科学, 2001, 23 (5): 4– 7.
- [17] 陆宏芳, 彭少麟, 蓝盛芳, 等. 基塘农业生态工程模式的能值评估 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (10): 1622– 1626.
- [18] 曹志国, 赵怡晴, 袁锋, 等. 基于能值理论的中国矿业城市发展程度分析 [J]. 中国人口资源与环境, 2010, 20 (3): 56– 61.
- [19] 吴玉琴, 严茂超, 许力峰. 城市生态系统代谢的能值研究进展 [J]. 生态环境学报, 2009, 18 (3): 1139– 1145.
- [20] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬. 基于能值分析的城市生态系统健康评价 [J]. 生态学报, 2008, 28 (4): 1720– 1728.
- [21] 罗玉和, 丁力行. 生物质直燃发电 CDM 项目可持续性的能值评价 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (12): 224– 227.
- [22] 王灵梅, 张金屯. 火电厂生态工业园的能值评估应用 [J]. 生态学报, 2004, 15 (6): 1047– 1050.
- [23] LAN S F, ODUM H T, LIU X M. Energy Flow and Emergy Analysis of the Agroecosystems of China [J]. Ecological Science, 1998, 17 (1): 32– 39.
- [24] 钦佩, 黄玉山, 谭凤仪. 从能值分析的方法来看米埔自然保护区的生态功能 [J]. 自然杂志, 1999, 21 (2): 104– 107.
- [25] 任丽燕, 吴次芳, 岳文泽. 西溪国家湿地公园生态经济效益能值分析 [J]. 生态学报, 2009, 29 (3): 1285– 1291.
- [26] 朱洪光, 钦佩, 万树文, 等. 江苏海涂两种水生利用模式的能值分析 [J]. 生态学杂志, 2001, 20 (1): 38– 44.
- [27] NILAAON D. Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants [J]. Biomass Bioenergy, 1997, 13 (1/2): 63– 73.
- [28] 王坤, 陆宏芳, 谭耀文, 等. 四种岭南水果种植系统的能值、经济与土壤整合分析 [J]. 生态环境学报, 2009, 18 (6): 2230– 2236.
- [29] 李洪波, 李燕燕. 武夷山自然保护区生态旅游系统能值分析 [J]. 生态学报, 2009, 29 (11): 5869– 5876.
- [30] 林慧龙, 任继周, 傅华. 草地农业生态系统中的能值分析方法评介 [J]. 草业学报, 2005, 14 (4): 1– 7.
- [31] 刘新茂, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 广东省种植业系统能值分析 [J]. 华南农业大学学报, 1999, 20 (4): 111– 115.
- [32] 张新焕, 杨德刚, 刘云同. 基于能值的绿洲种植业系统可持续性及敏感性评价 [J]. 生态学报, 2009, 29 (11): 6068– 6076.
- [33] 李艳春, 黄秀声, 潘勇, 等. “奶牛–沼气–牧草”循环型农业系统的能值分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26 (2): 120– 125.
- [34] 钟珍梅, 黄秀声, 黄勤楼, 等. 规模化牛场“肉牛–沼气–牧草”循环农业模式能值分析 [J]. 家畜生态学报, 2009, 30 (6): 112– 116.
- [35] <http://emergysystems.org/folios.php>.
- [36] FRANZESE P, RYDBERG T, RUSSO G, et al. Sustainable biomass production: A comparison between Gross Energy Requirement and Emergy Synthesis methods [J]. Ecological indicators, 2009 (9): 959– 970.
- [37] RYDBERG T, HADEN A. Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 117: 145– 158.
- [38] BROWN M, CAMBELL E. Evaluation of natural capital and environmental services of U. S. national forests using emergy synthesis. Final report. Center for environmental policy University of Florida [J]. 2007, PO Box 116350, Gainesville, FL 32611.
- [39] COHEN M, BROWN M, SWEENEY S, et al. Environmental Accounting and Systems Synthesis of Land Management Interventions at Multiple Scales in the Sahel Region of West Africa University of Florida [OL]. http://sahel.ees.ufl.edu/database_resources.php?search_type=basic&country=FIN (24. 11. 09).
- [40] JUAN L, TORU M, YONGHAI X. Comparison of Emergy Analysis Method with Ecological footprint, Exergy and LCA methods. Urban metabolism: measuring the ecological city [J]. ConAccount, 2008.
- [41] 王书华, 毛汉英, 王忠静. 生态足迹研究的国内外近期进展 [J]. 自然资源学报, 2002, 17 (6): 776– 781.
- [42] 陈冬冬, 高旺盛, 陈源泉. 生态足迹分析方法研究进展 [J]. 应用生态学报, 2006, 17 (10): 1983– 1988.
- [43] VANDEN B, JEROEN C J M, VERBRUGGEN, et al. Spatial sustainability trade and indicators: An evaluation of the “ecological footprint” [J]. Ecological Economics, 1999, 29: 61– 72.
- [44] 白钰, 曾辉, 魏建兵. 关于生态足迹分析若干理论与方法论问题的思考 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 44 (3): 493– 500.
- [45] 陆宏芳, 任海, 王昌伟, 等. 产业生态学研究方法 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 44 (2): 233– 239.
- [46] 霍李江. 产业生态学理论与包装设计 [J]. 中国包装, 2000, 20 (2): 51– 52.
- [47] DINCIER I. Thermodynamics, exergy and environmental impact [J]. Energy Sources, 2000, 22: 723– 732.
- [48] Zhang Y Z, WANG X. Exergy and ecological modeling of Lake Environment [J]. Journal of Environmental Sciences, 1998, 10 (4): 497– 504.
- [49] 陆宏芳, 陈飞鹏, 任海, 等. 产业生态系统多尺度能值整合评价方法 [J]. 生态环境, 2006, 15 (2): 411– 415.
- [50] 张伟, 康文星. 基于能值理论的衡东县生态足迹研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28 (2): 57– 62.
- [51] 陈春锋, 王宏燕, 肖笃宁, 等. 基于传统生态足迹方法和能

- 值生态足迹方法的黑龙江省可持续发展状态比较 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (11): 2544– 2549.
- [52] 孙东林, 刘圣, 姚成, 等. 用能值分析理论修改生物承载力的计算方法——以苏北互花米草生态系统为例 [J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2007, 43 (5): 501– 508.
- [53] 陆宏芳, 蓝盛芳, 陈飞鹏, 等. 农业生态系统能量分析 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (1): 159– 162.
- [54] 沈善瑞, 陆宏芳, 赵新锋, 等. 能值研究的几个前沿命题 [J]. 热带亚热带植物学报, 2004, 12 (3): 268– 272.
- [55] BASTIANONI S, MARCHETTINI N. The problem of co-production in environmental accounting by energy analysis [J]. Ecological Model, 2000, 129: 187– 193.

(责任编辑: 柯文辉)