

生态学研究中的 烱分析与能值分析理论

付 晓,吴 钢*,刘 阳

(中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室,北京 100085)

摘要:烱与能值是研究生态系统自组织过程的两个重要的目标函数。烱分析与能值分析理论在 20 世纪 70 年代开始应用于生态学研究,它们有各自的理论起点,在应用上从不同的角度表现生态系统功能,两者的互补关系受到了生态学家的关注,并在实际应用中取得了有益的研究成果。从烱与能值各自的理论基础与研究成果出发,概述了两者在描述生态系统功能上的互补关系,并分析了其在生态学理论研究及实际应用上的重要意义。

关键词:烱分析;能值分析;自组织;生态系统

Analytical theories of exergy and emergy for ecological research

FU Xiao, WU Gang*, LIU Yang (Key Laboratory of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2621~2626.

Abstract: Exergy and Emergy have been developed as two complementary goal functions. Quantitative applications of Exergy for higher organisms were made with traditional thermodynamic considerations. The concept of Emergy originally came from systems ecology. Exergy is a property of a system, measuring the maximum work that can be extracted from a system when it goes towards the thermodynamic equilibrium with a reference state, whereas Emergy is the energy required to make a service or product expressed in energy of one form. Exergy is a measure of the actual state, of the level of organization and of the information content, while the concept of Emergy contains the history, the time and all the different processed involved up to the present state of the system. Both of them have their respective characteristics on expressing the functions of ecosystems. They represent two complementary aspects of a system. Exergy is a useful, common measure of resource quality and quantity, applicable to both materials and energy. Therefore, Exergy can be used to measure and compare resource inputs and outputs, such as wastes and losses. Exergy is expected to increase as ecosystems mature and form the thermodynamic equilibrium. At the same time, Emergy is a powerful tool for determining energy flows through biological systems and for determining sustainable economic values in the field of ecological economics. Emergy is not only a measure of what have gone into a product, but also a measure of the useful contributions that can be expected from the product as a system self-organizes for maximum production. Accordingly, Emergy is the work that the biosphere has to do to maintain a system far from equilibrium. It is seems that emergy is a production side approach, where quality is measured by the cost of producing a flow or product, while Exergy is an end-use approach, where quality is measured by the usefulness to the receiver. The two approaches are very suitable for describing self-organizing systems such as ecosystems and even more complex systems such as compound eco-ecosystems. Exergy and Emergy accounting can provide insight into the environmental performance and sustainability of eco-ecological process and product. Moreover, the ratio of Exergy to the Emergy flow indicates the efficiency of an ecosystem in producing or maintaining its organization. Considered the variation in time of Exergy and Emergy, their ratio indicates the effect of the change of available inputs in the level of organization of the system under study. A great effort in research is presently made to integrate the two approaches, which also present many common points.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40173033)

收稿日期:2004-06-17;修订日期:2004-09-02

作者简介:付晓(1976~),女,辽宁人,硕士生,主要从事区域生态系统能流过程研究。E-mail: jlf0135@sina.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wug@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 40173033)

Received date: 2004-06-17; Accepted date: 2004-09-02

Biography: FU Xiao, Master candidate, mainly engaged in energy flow of regional ecosystem. E-mail: jlf0135@sina.com

Key words: exergy; emergy; self-organization; ecosystems

文章编号: 1000-0933(2004)11-2621-06 中图分类号: F062.2, Q14 文献标识码: A

量化研究与分析生态系统自组织过程的行为与功能,评估和模拟生态系统的行为模式及发展方向,对确定生态系统在社会经济发展中的贡献和作用及其对干扰的反应都具有十分重要的意义。生态系统是由能流构成的网络,并通过利用能量流进行系统的自组织过程,维持系统远离热力学平衡的状态。根据这一特点,利用热力学方法分析和模拟生态系统的自组织行为是生态学普遍采用的方法^[1]。但是热力学的基本定律和概念来自于对物理化学过程的研究与描述,无法直接应用于生态系统,生态学家研究并提出了大量以热力学为基础的目标函数,来描述生态系统发展的组织原则。焓和能值是其中两个重要的目标函数^[2],在量化研究生态系统功能,描述和模拟生态系统行为、预测生态系统发展演化的趋势、评价和分析生态系统的可持续性的研究与应用上发挥了重要的作用。

焓与能值两个概念的提出有其各自的理论基础和应用的需要,在发展的过程中又各有其自身的独立性。随着理论研究的不断深入和应用领域的进一步扩展,两者之间的相关性和互补性越来越明显地体现出来。本文试图从两者各自的理论基础与应用成果出发,对比总结它们之间的关系,分析其在实际应用中的重要作用和意义,并对将来可能的发展趋势做出合理的预测。

1 生态学研究中的焓理论

热力学上焓的定义为:一定形式的能量或一定状态的物质经过完全可逆的变化过程后,达到与环境完全平衡的状态,在这个过程中该能量或物质所能做的最大功^[3]。根据这一定义,焓是对能量物质达到热平衡状态的潜在做功能力的量度。焓分析的方法广泛应用于工业系统中能量的利用、传递和转化过程,用以寻求节能的环节和途径^[4~6]。

20 世纪 70 年代末期 Jørgensen 首次将焓的概念应用于生态学研究领域^[7,8],通过 20 余年的研究,对焓概念在技术上的细节,及其作为组织化和能质衡量指标的理论解释都做了详细论述,并给出了焓在生态学意义上的数学描述如下^[2,9]:

$$E_e = S(T - T_0) - V(p - p_0) + \sum_C N_C(\mu_C - \mu_{0C}) = T_0(S_{eq} - S) \quad (1)$$

式中, T_0, p_0, μ_{0C} , 和 T, p, μ_C , 分别代表温度,压强及系统 A_0 和周围环境 A 的化学势能; V 为体积, N_C 为系统中各种化学物质的分子数; S 为系统的熵,而 S_{eq} 为该系统在热平衡时的熵值。

该形式定义的焓具有如下的特点^[10,11]:

- ① 与其他热力学函数的关系清楚;
- ② 在定义中包含了一个内部项(温度)和一个外部项(负熵);
- ③ 在研究中,以系统外的环境为参考状态,这使其更适用于解释生态系统;
- ④ 通过焓的定义,将温度与信息量联系起来。

根据 Jørgensen 的定义“焓代表了系统中来自于所有成分的生物化学能,包括系统组织化的能量”^[12],提供了一个量化衡量系统组织化和复杂性及其离开平衡状态距离的方法,解决了工程学意义上的焓应用于生态系统研究所存在的问题。

生态系统通过自然演替,发展进化的过程中,倾向于朝着焓最大化的方向发展,生态系统的结构、梯度、等级、组织等这些特征都体现了其远离平衡态的距离^[13],此外,焓是时间的函数^[14],焓随时间的变化体现了系统进化的过程,生态系统进化的水平越高,其组织化水平和信息量越高,因此作为系统生物量和组织化的一个重要的目标函数,焓可用于定量地衡量生态系统成熟^[15]。

焓还可以作为一个尺度,来衡量打破一个生态系统及其全部组织化水平,使其向热力学平衡状态移动所需要的能量。由此可以得出焓与生态系统的缓冲能力之间存在一定关系——焓值越高,生态系统要达到热力学平衡状态需要从外界吸收的能量就越多^[12]。当生态系统的自组织结构与功能发生变化时,相应地会在焓的数值上有所体现,因此可以通过计算生态系统的焓,来量化衡量生态系统的功能和健康^[9,16],评价污染物的输入所产生的化学胁迫作用对生态系统健康的影响^[17~19]。

焓与能量不同,在生态系统对物质和能量的利用与转化的过程中,焓不守恒,自初级生产者通过光合作用固定能量起,到能量利用与传递的终端止,整个过程中,焓逐级损失;但同时,焓也作为潜能累积和储存在系统的结构化和组织化的过程中。在生态经济学的研究中,焓的这一特性,被用来衡量物质和能量资源的质量,整合计算生态经济系统中不同类别的物质和能量^[20];由此提出累积焓耗费(CEC)的概念,来表达生产过程中使用的能源或非能源的自然资源中包含的全部焓的总和^[13],通过计算不可更新资源的累积焓耗费,作为生态成本的一部分,来衡量经济活动中不可更新自然资源的消耗^[21]。通过计算流出系统外的产品或废物中包含的焓,可以得到有关系统行为对其周围环境影响的信息,人类经济活动所产生的未完全利用的焓(废热或未燃烧的燃料)和散失的焓(低温的热)以及排放到环境中的废物和有毒物质的焓,都会打破自然环境的动态平衡状态从而对环境造成危害,因此,焓分析可用在生命周期尺度上,评价生产过程的环境影响^[22];此外,基于热力学焓分析的原理与方法,结合生

态系统自身的特性,还提出了生态系统的熵分析方法,通过分析有机体与其周围环境之间的能量及熵交换的过程,建立熵平衡方程,可以在系统水平上研究和评价不同生态过程的熵效率^[23]。

2 生态学中的能值理论

能值理论是 H. T. Odum 在生态学中的一个伟大创举,该理论的提出,为量化评价生态系统产品及服务的价值提供了一个能量学的基础^[24]。在对自然生态系统能流过程的研究中,Odum 逐渐意识到不同类别的能量物质,其做功能力即能量质量是有差别的,“能质”概念的提出是能值理论发展的一个重要基点^[25]。根据 Odum 的定义,能值是生产某种产品或服务所需的直接或间接投入的某种可用能^[26],一般来说,用太阳能作为统一的能量标准来衡量不同能量的质量,因此能值的单位为“太阳能焦耳”(sej)^[27]。能值概念的基本组织原则是 Alfrek Lotka 所提出的“最大功率原则”,根据这一原则,在竞争中占优势的系统,通过系统的组织化强化生产过程,克服限制因素,从输入的能值源中获得更多的有用功^[28]。

太阳能值转换率是能值理论中的一个重要的概念,是能值理论基本原理的集中体现,也是能值计算分析中的一个关键参数。太阳能值转换率被定义为:生产一焦耳产品或服务所需要投入的太阳能值。太阳能值与太阳能值转换率之间的关系如下^[29]:

$$M = \tau \times B \tag{2}$$

式中, M 为太阳能值, τ 为太阳能值转换率, B 为可用能。

根据 Odum 的能值理论,“宇宙中的能量流是按照能量转换的等级来组织的”,能量物质在“能量等级中的位置由转换率来衡量”,因此说,太阳能值转换率是衡量能量质量的尺度,它体现了包括了人类劳动在内的一切含能物质的能量等级。

能值分析方法以系统生态学为理论基础,借鉴生态系统中的食物链理论,通过网络分析的方法计算生产某一产品或服务所需要的全部的能量投入,因此,能值又被称作体现在产品或服务中的“能量记忆”。由此看来,太阳能值和太阳能值转换率的数值依赖于到达特定状态所选择的路径,对于自然生态系统来说,其自组织化程度已经达到很高效的程度,因此对于来自于自然界的产品和服务,其太阳能值转换率的数值相对来说是稳定的,Odum 及其合作者们已经计算了这些资源的太阳能值转换率的数值^[28],可在研究中直接引用;然而,对工业产品和服务的太阳能值转换率的计算,会因为所选择的原材料、生产方式、途径和效率的不同而变化,因此难以给出确定的数值^[30]。

经过 30 多年的发展,能值理论已形成了完整的理论体系,提供了一系列用于生态系统可持续性分析与评价的指标体系^[31],其最优越的特点体现在^[24]:

- ① 提供了经济与生态系统相联接的桥梁;
- ② 弥补了货币无法客观评价非市场性输入的缺陷,提供了一种以生态为中心的评价方法;
- ③ 科学上的合理性,兼具热力学方法的严密性;
- ④ 量纲统一,可以在一个平等的基础上比较所有不同质的资源;
- ⑤ 为当前许多与环境相关的决策方法提供了一个更加全面的分析方案。

能值分析方法的提出,克服了传统经济学与能量分析方法无法在统一的尺度上对不同质的资源价值进行量化计算的局限,为客观评价一切自然与经济活动的产品及服务提供了一个统一的平台,给出有关系统发展过程中的环境贡献与资源利用可持续性的信息^[32],广泛应用于对自然生态系统、农业生态系统^[33,34]、工业生产系统^[35,36]、城市生态系统^[37]以及区域生态系统^[38]发展现状可持续性的分析、评价与比较,通过能值分析,对比可供选择的发展与规划方案^[39,40],评价人类生产活动对生态系统可能产生的影响^[41],为生态管理与生态设计提供决策上的指导。

3 熵与能值之间的关系

熵与能值是研究生态系统自组织过程,模拟及评价生态系统状况的两个重要的目标函数,两者之间在概念定义及研究应用的出发点上都存在一定的差别,通常作为一对补充的目标函数应用于生态过程分析与模拟,表 1 列出了熵与能值体现在不同方面的性质与特点。

4 结论与讨论

通过比较可以得出这样的结论,熵与能值在理论和应用上不是相互对立的,随着研究工作的扩展与深入,两者的相关性与补充性越来越受到研究者的重视,在实际案例分析的应用中,取得了有益的研究成果。例如,在对系统排放的废物的评价上,熵分析的方法可以在一定程度上弥补能值分析方法对污染物排放所产生的环境影响评价不足的缺陷^[32]。利用能值与熵的互补性,提出了新的指标——能值/熵比率^[14]。这个新指标表明了维持某一结构远离平衡态,所需要从外界输入的能值,其值越高,系统的效率越低;如果能值/熵比率趋于下降,意味着自然选择使得系统朝着组织化水平提高的热力学路径发展。该比率随时间的变化可以

表 1 焓与能值分析理论的特点在不同方面的体现

Table 1 Comparison of exergy and emergy analysis theory from different aspect		
	焓分析理论 Exergy analysis theory	能值分析理论 Emergy analysis theory
理论基础 Basis of theory	热力学	系统生态学
与其他热力学函数的关系 Relationship to other thermodynamic functions	与其他热力学函数的关系清楚,具有严格的热力学意义上的定义	与其他热力学函数关系有混淆,不具备热力学意义上的严格定义
是否满足守恒定律 If satisfies conservation law	不满足守恒定律,在能量传递与转化的过程中,逐级耗散	不满足守恒定律
最大化原则 Maximized principle	焓最大化原则:自组织系统努力地利用可用能使 其自身保持在一种低熵的水平,远离平衡态,即使系统的焓值趋于最大化	最大能值功率原则:在竞争中占优势的系统,通过系统的组织化,强化生产过程,克服限制因素,从输入的能值源中获得更多的有用功,使系统的能值趋于最大化
对能质的定义 Definition of “energy quality”	着眼于能量的最终使用,“能质”的概念被定义为物理学意义上的做功能力,代表了一个系统过程相对于其环境的热力学潜能,由对接收者来讲的有用性来衡量 ^[13]	从产品出发,能质被描述为产品或服务的内在属性,与生产它所需要的全部生产消耗相关,太阳能值转换率是能质的量化表达
与时间的关系 Relationship to time	焓是时间的函数,表达了系统当前的组织化水平和信息量,代表系统生物地球化学能的现状,也是对系统未来做功能力的量度 ^[42]	能值考虑了时间的区间,能值的概念体现了系统的历史,代表生产和维持系统的组织化所需要消耗的来自于生物圈的全部可用能
与生产路径的关系 Relationship to pathway of production	焓的值依赖于计算中所选择的参照状态,而与生产产品所经过的途径无关	能值和转换系数的值依赖于到达特定状态所选择的路径 ^[30]
单位变量的意义 ^[42] Meaning of unitage	焓密度是单位面积所包含焓的量,代表系统离开平衡状态的距离,是衡量生态系统自组织复杂性的尺度	能值密度被定义为单位面积上投入的能值量,是衡量环境压力的尺度,是人类活动对系统压力的警告指数
建立理论的视角 Aspect of theorization	系统的焓值给出生物体的结构和组织上的信息,反映了系统的组织化水平,能够体现进化的过程	能值计算建立在生态网络、营养级的水平上,可以反映有机体或系统的在生态行为(如竞争)上的差别 ^[12]
衡量污染物的输入对系统的影响 Measure of pollutant’s influence	污染物的输入,有可能破坏系统的组织结构,导致系统的焓值下降	污染物的输入,使系统的能值增大
衡量生态系统服务功能 Measure of ecosystem’s service	将累积焓耗费作为生态成本来衡量生态系统的服务,但是,它没有考虑到自然资源的生产过程中需要的生态作用是不同的,因此还不能全面表达生态系统服务功能	能值分析是以生态系统为中心的方法,充分考虑了生态系统服务功能,在太阳能值转换率的计算中包含了来自于全部可更新和不可更新资源以及全部生态作用的贡献
表达生态系统健康 Expression of ecosystem’s health	系统的焓值可以作为一个指标来表达生态系统健康的状况及其变化	通过能值指标衡量系统的可持续性,间接表达了生态系统健康
衡量资源价值 Measure of resource’s value	无法对以非物质形态存在的能量投入(如人类服务)以及有关产品性能的价值进行量化计算 ^[20]	可以衡量包括人类劳动在内的,来自于自然和经济领域的所有资源的价值
在模型研究中的应用 Appliance to simulation	在模型研究中,以焓作为参数构建非平衡态的热力学模型	在模型研究中,采用以能值语言符号表达的网络模型 ^[1]
研究及应用目的 Objective of research and appliance	用于分析工业过程及生态系统资源利用效率及生产效率	考虑了全部的环境贡献,用于分析、对比与评价不同尺度生态系统发展的可持续性
与产品价格的关系 Relationship to produce’s price	焓和价格从某种意义上讲呈负相关,即产品经过一系统处理过程,到达最终产品被出售的那一点,其价格与产品中所保留的最初焓的比例之间表现出负相关,初始的焓被耗散得越多,其价格越高 ^[44]	根据 Odum 的能值理论,产品价格与能值表现为正相关,即投入产品中的能量和服务越多,产品的价值和价格相应地越高
对环境压力的考虑 Consideration of environmental stress	通过计算系统排放到环境中废物的焓可以从一定程度上衡量系统所造成的环境压力	通过环境为系统提供的服务来衡量系统对环境施加的压力;目前,用能值分析的方法,从废物排放的角度来衡量系统产生的环境负荷在计算上还存在困难,大部分能值分析都忽略了系统的排放物对环境的影响 ^[45]

力学效率降低的方向发展。相反,如果参数值下降,则表明系统朝着更有效地利用可用资源的方向发展,达到组织化形式更复杂或减少外部输入的需要。能值/焓比率可以被看作一个衡量系统复杂性,内部热力学效率以及环境可持续性的集合尺度^[43]。采用不同的分析方法相结合,评价同一目标,能够从不同的角度对评价对象给出更全面的评价结果^[46]。研究人员在探讨不同分析方法之间差别的同时,相互借鉴,发展了新的分析方法,如将扩展的焓分析(EEA)方法用于评价系统及过程的可持续性,同时考

虑了污染物的排放对环境的影响^[47,48];能值生命周期评价(ELCA)的方法,将能值分析以统一的尺度衡量不同形式的能量与物质的特性,应用于生命周期评价,既考虑到环境的贡献,又考虑了废物的排放与处理^[49]。

以当前的发展趋势来看,应用熵与能值分析的方法所研究的对象多样,涉及的系统尺度广泛,呈现出跨学科、交叉性的特征,这为熵与能值理论未来的发展,及其用于分析评价更复杂生态系统的功能开辟了广阔的扩展空间。

References:

- [1] Pykh Y A, Kennedy E T, Grant W E. An overview of systems analysis methods in delineating environmental quality indices. *Ecological Modelling*, 2000, **130**: 25~38.
- [2] Patten B C. Network integration of ecological extremal principles: exergy, emergy, power, ascendancy and indirect effects. *Ecological Modelling*, 1995, **79**: 75~84.
- [3] Zheng H F. Exergy philosophy of natural resource. *Journal of Beijing institute of technology*(social sciences edition), 2003, **5**(2): 37~39.
- [4] Márcio M C, Roberto S, Ernst W. Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems. *Energy*, 2001, **26**: 363~384.
- [5] Mozes E, Cornelissen R L, Hirs G G, *et al.* Exergy Analysis of The Conventional Textile Washing Process. *Energy Converse Mgmt*, 1998, **39**(16~18): 1935~1843.
- [6] Midilli A, Kucuk H. Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy*, 2003, **28**: 539~556.
- [7] Jørgensen S E, Mejer H. Ecological buffer capacity. *Ecol. Model.*, 1977, **3**: 39~61.
- [8] Jørgensen S E, Mejer H F. A holistic approach to ecological modelling. *Ecol. Model.*, 1979, **7**: 169~189.
- [9] Jørgensen S E. Application of exergy and specific exergy as ecological indicators of coastal areas. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, **3**: 419~430.
- [10] Jørgensen S E. Exergy and ecology. *Ecol. Model.*, 1992, **63**: 185~214.
- [11] Jørgensen S E. *Integration of ecosystem theories: a pattern*. Kluwer, Dordrecht, 1992.
- [12] Jørgensen S E, Nielsen S N, Mejer H. Emergy, environ, exergy and ecological modelling. *Ecological Modelling*, 1995, **77**: 99~109.
- [13] Nilsson D. Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants. *Biomass and Bioenergy*, 1997, **13**(1~2): 63~73.
- [14] Bastianoni S. A definition of 'pollution' based on thermodynamic goal functions. *Ecological Modelling*, 1998, **113**: 163~166.
- [15] Christensen V. Ecosystem maturity-towards quantification. *Ecological Modelling*, 1995, **77**: 3~32.
- [16] Xu F L, Lam K C, Zhao Z Y, *et al.* Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China. *Ecological Modelling*, 2004, **173**: 355~370.
- [17] Xu F L, Jørgensen S E, Tao S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health. *Ecological Modelling*, 1999, **116**: 77~106.
- [18] Xu F L, Dawson R W, Tao S, *et al.* System-level responses of lake ecosystems to chemical stresses using exergy and structural exergy as ecological indicators. *Chemosphere*, 2002, **46**: 173~185.
- [19] Marques J C, Nielsen S N, Pardal M A, *et al.* Impact of eutrophication and river management within a framework of ecosystem theories. *Ecological Modelling*, 2003, **166**: 147~168.
- [20] Cleveland C J, Kaufmann R K, Stern D I. Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*, 2000, **32**: 301~317.
- [21] Szargut J, Ziebig A, Stanek W. Depletion of the non-renewable natural exergy resources as a measure of the ecological cost. *Energy Conversion and Management*, 2002, **43**: 1149~1163.
- [22] Ayres R U. Eco-thermodynamics: economics and the second law. *Ecological Economics*, 1998, **26**: 189~209.
- [23] Zhou J Z, Ma S J, Hinman G W. Ecological exergy analysis: a new method for ecological energetics research. *Ecological Modelling*, 1996, **84**: 291~303.
- [24] Hau J L, Bakshi B R. Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, 2004, **178**: 215~225.
- [25] Brown M T, Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contribution to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 2004, **178**: 201~213.
- [26] Odum H T, Peterson N. Simulation and evaluation with energy systems blocks. *Ecological Modelling*, 1996, **93**: 155~173.
- [27] Lan S F, Qin P. *Emergy Assessment of eco-ecological systems*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [28] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. *Ecological Economics*, 1996, **19**: 219~235.
- [29] Odum 万方数据 *Environmental Accounting: Emergy and environmental decision making*. New York: Wiley, 1996.
- [30] Bakshi B R. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. *Computers and chemical engineering*,

2000, **24**:1767~1773.

- [31] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 1997, **9**:51~69.
- [32] Geber U, Björklund J. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems—a case study. *Ecological Engineering*, 2001, **18**:39~59.
- [33] Lefroy E, Rydberg T. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia. *Ecological Modelling*, 2003, **161**:195~211.
- [34] An S Q, Bao H S, Zou C J. Studies of emergy flow in a compound agro-ecosystem in the Taihu Lake area, Jiangsu Province, China. *Ecological Engineering*, 1998, **11**:303~313.
- [35] Yang H, Li Y R, Shen J Z, *et al.* Evaluating waste treatment, recycle and reuse in industrial system: an application of the emergy approach. *Ecological Modelling*, 2003, **160**:13~21.
- [36] Brown M T, Ulgiati S. Emergy evaluation and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production*, 2002, **10**:321~334.
- [37] Huang S L, Hau W L. Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape and Urban Planning*, 2003, **63**:61~74.
- [38] Higgins J B. Emergy analysis of the Oak Opening region. *Ecological Engineering*, 2003, **21**:75~109.
- [39] Tilley D R, Swank W T. Emergy-based environmental systems assessment of a multi-purpose temperate mixed-forest watershed of the southern Appalachian Mountains, USA. *Journal of Environmental Management*, 2003, **69**:213~227.
- [40] Ton S S, Odum H T, Delfino J J. Ecological-economic evaluation of wetland management alternatives. *Ecological Engineering*, 1998, **11**:291~302.
- [41] Prado-Jatar M A, Brown M T. Interface ecosystems with an oil spill in a Venezuelan tropical savannah. *Ecological Engineering*, 1997, **8**:49~78.
- [42] Tiezzi E, Bastianoni S, Marchettini N. Environmental cost and steady state: the problem of adiabaticity in the emergy value. *Ecological Modelling*, 1996, **90**:33~37.
- [43] Hornborg A. Towards an ecological theory of unequal exchange: articulating world system theory and ecological economics. *Ecological Economics*, 1998, **25**:127~136.
- [44] Bakshi B R. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. *Computers and chemical engineering*, 2002, **26**:269~282.
- [45] Federici M, Ulgiati S, Verdesca D, *et al.* Efficiency and sustainability indicators for passenger and commodities transportation systems The case of Siena, Italy. *Ecological Indicators*, 2003, **3**:155~169.
- [46] Sciubba E. Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling. *Energy*, 2003, **28**:1315~1334.
- [47] Balocco C, Papeschi S, Grazzini G, *et al.* Using exergy to analyze the sustainability of an urban area. *Ecological Economics*, 2004, **48**:231~244.
- [49] Brown M T, Buranakarn V. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resource, Conservation and Recycling*, 2003, **38**:1~22.

参考文献:

- [3] 郑宏飞. 自然资源的 分析观. 北京理工大学学报(社会科学版), 2003, **5**(2):37~39.
- [27] 蓝盛芳, 软佩. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002.