

产业生态学研究方法^{*}

陆宏芳¹, 任海¹, 王昌伟², 彭少麟^{1, 2}

(1. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650;

2. 中山大学生命科学学院有害生物控制与资源利用国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 通过综述与分析, 阐明各种产业生态学研究方法的优缺点, 多种方法整合的可能, 并提出整合的方向。从可操作性、可比性、全面性、兼容性等方面, 对包括工程设计、过程整合、生命周期评价、系统分析、总成本评估、Exergy 分析和能值综合在内的产业生态学研究方法进行了对比分析。在整合可能与整合方向分析的基础上指出, 能值综合与 Exergy 和效益成本分析等成熟的经济数学方法的整合, 将成为产业生态学研究方法优化、完善的一个探索方向。

关键词: 生命周期评价; 系统分析; 总成本评价; Exergy 分析; 能值综合

中图分类号: Q149 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) S2-0233-07

产业革命给人类带来物质产品极大丰富和社会经济高速发展的同时, 也带来了全球性生态环境的急剧恶化和不可更新资源的迅速耗竭。因此, 产业转型不只是解决人与自然强烈冲突的关键问题, 而且是实现人类社会可持续发展的根本问题。以污染退化地的整治及其恢复生态学研究虽已取得一定的进展, 但总体而言仍属于末端治理, 难以从根本上遏止生态环境加速恶化的趋势。以生态环境退化的源头治理为根本目标的产业生态学的研究正日益受到各国学术界、政治界乃至民众界的广泛关注, 已被列为美国 21 世纪环境研究的 5 大优先学科之一^[1]。但作为在传统的自然科学、社会科学和经济学相互交叉和综合的基础上发展起来的一门新兴学科, 目前的产业生态学研究方法仍处于探索与完善阶段^[2]。

产业生态学是一门研究社会生态活动中自然资源从源、流到汇的全代谢过程、组织管理体制以了解生产、消费、调控行为的动力学机制、控制论方法及其与生命支持系统相互关系的系统科学^[3], 其研究领域涉及诸多学科领域, 包括能源供应与利用、新材料、新技术、基础科学、经济学、法学、管理学及社会科学等, 是一门探讨产业系统及其与自然系统相互关系的跨学科研究^[4]。产业生态学的多学科交叉特性, 决定了产业生态学研究方法具有多样性的特点。各种工程学、生态学、经济

学、社会学的研究方法, 诸如工程设计、过程整合、生命周期评价、系统分析、总成本评价、Exergy 分析、能值综合等, 在产业生态学的研究中均有运用价值, 但由于各自的学科侧重点不同, 研究往往不免失于偏颇, 不能从总体上全面地考查到包括生态、经济和社会在内的产业生态系统可持续发展研究的几大主要方面。本文通过综述与分析, 阐明各种产业生态学研究方法的优缺点, 多种方法整合的可能, 并提出整合的方向。

1 工程设计、过程整合等早期方法

人类对产业排放的环境影响的认识的不断深入, 推动了有意识的环境过程工程方法研究。世界各地发展了一些考虑环境因素的新工艺^[5], 包括过程设计和综合^[6-10]、过程整合^[11]、过程运作、产品设计和评价。上述方法大部分用于设备和过程层面, 在以环境和安全法规或废弃物处理作为限制因子的前提下寻求经济效益的最大化。这些方法在过程层面成功通过过程修改而防止污染和实现废弃排放的最小化。不幸的是, 这些废弃最小化方法只在设备和过程层面实现了废弃的最小化, 将环境视为经济的辅助因子的观点过于狭隘, 而且常常造成污染的转移而非减少或消除^[12]。急需建立一种更为全面和大尺度的方法来实现环境和经济的全面整合性分析和优化。生命周期评价和产业系统的系统分

* 收稿日期: 2005-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30170147, 30270282); 广东省自然科学基金资助项目 (04002319); 中国科学院华南植物研究所所长基金资助项目

作者简介: 陆宏芳 (1976 年生), 副研究员, 通讯联系人, 彭少麟, E-mail: lsspsl@zsu.edu.cn

析方法应运而生。

2 生命周期评价

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）是一种对产品、生产工艺以及活动对环境的压力进行评价的客观过程，它是通过对能量和物质利用以及由此造成的环境废物排放进行辨识和量化来进行的。其目的在于评估能量和物质利用，以及废物排放对环境的影响，寻求改善环境影响的机会以及如何利用这种机会^[13]。这种评价贯穿于产品、工艺和活动的整个生命周期，包括原材料提取与加工；产品制造、运输以及销售；产品的使用、再利用和维护；废物循环和最终废物弃置^[14]。其原则性优点在于，它为科学问题的提出提供了一个宽广的框架，引导研究者超越地域的界限去发掘一些被以前的研究所忽略了因子，是信息丰富的管理工具和更全面研究的拓展基础。

作为一种有用的管理工具，LCA 已被广泛应用于许多诸如过程设计和优化之类的过程系统工程项目和产业实践^[15]。它实现了研究步骤的标准化，即确定范围和目标、清单分析、影响评价和优化评价四步^[16]，是当前产业生态学研究的主要工具，并被认为是“现代所有的环境研究案例最佳的研究尺度”^[17]，甚至是“产业生态学的思想基础”^[18]。

虽有诸多优点，LCA 中仍有不少缺憾存在。首先是数据要求过高，系统边界难以确定^[19]，评价依据不统一，研究的可操作性低^[20]，而且研究结果的可比性差^[21-23]。

其次是缺乏一个通用于产业和生态过程及其排放评价的系统的、量化的框架。注重了的排放的环境影响和不可更新能源的投入，却忽略了生态系统服务和产品^[24-25]，难以考虑到产品或过程的环境可持续性。

同时，生命周期设计将生命周期影响作为限制因子或目标函数的一部分，来力图实现经济效益的最大化^[26]。如果生命周期影响仅作为限制因子考虑，则分析决策过多地考虑经济功能目标，环境状况只能维持在底限值。如果把环境和经济等作为功能目标，则又会出现多目标优化问题，其决策需要明确两者间的相对权重问题。而这种权重的博弈结果则受人类价值观和其他主观标准的左右。

3 系统分析

系统分析与模拟以用数学模型去确定和模拟复杂系统的重要特征，强调从全局的角度出发解决问题，在近 30 年已被广泛用于生态学研究及资源与

环境管理之中^[27]，目的是寻找其数学模型的最优解，以实现最佳的系统目标功能，是一种有助于决策者将所有因素集中于单目标功能的设计工具。因为很难实现多个目标的同时最优化，追踪一个量化的环境系统策略的最大障碍是没有一个统一的变量或尺度可实现各种环境影响的统一评价^[28]。

LCA 方法通过外延和连接想象的各分离步骤，以确定各步骤的环境影响和其改进机会的发掘，而系统分析方法则模拟系统内各组分间的功能联系后进行各种联接尝试以寻找实现目标函数的最佳途径。由于数据要求不甚繁琐且系统边界的确定较为客观，从而克服了 LCA 对全过程数据的繁复要求，使系统分析具有了更大的发展弹性和更高的可行性。同时，由于系统分析所要的数据更适用于特定的优化评估目标，使它更适于作为决策工具。

系统分析方法的缺憾在于，过分追求有毒污染的最小化或限额化，而忽略了无毒但导致全球变暖或富营养化之类的环境影响；难以同时对多目标进行优化，其中最关键的障碍是没有一个统一的变量或尺度可实现各种生态经济和环境影响的统一评价。

产品生命周期评价（LCA）和系统分析都认为环境问题应从全局观的角度来评价而不是采用归谬法。虽然两者间存在着极大的不同，但对于系统边界的界定均极其敏感。事实上，产业生态学一个原则性的驱动假说是直觉，即随着系统边界的外延，会出现超最适度解。这就是说，最佳解不可能由选出的几个关键因子的综合而取得，而需要对所有的系统因子进行全面的综合。目前，产品生命周期评价和系统分析方法都只是对几个独立的系统因子进行综合分析。然而，产品生命周期评价建立于一个产品或过程的“生命过程”之中（虽然这一点难以给出任何不流于武断的定义），而系统分析的弹性则高得多。系统分析方法可适用于从单一产品或过程到整个企业或地区的棍种尺度。产品生命周期评价的目标原则上是评价，而系统分析的重心则明显地集中于优化与决策。这就是说，产品生命周期评价归于描述类研究，而系统分析归于规定类研究。因此，产品生命周期评价所需的数据较之于系统分析要广泛的多（至少系统分析方法会忽略一些超出研究目标或与优化、决策所需的信息）。因此，产品生命周期评价更适于产业代谢研究，它的重点主要放在评价某一物质流和过程，而系统分析方法更适用于产业生态学，其研究重心在于研究系统内组分的互作。

LCA 与系统分析有一个共同的缺陷，即缺少一

个统一的尺度平台进行各种物质、能量、排放及环境影响的统一评价和对比。LCA 在复杂问题的解决方面局限颇多, 因为优化方案之间多有不可比性存在。环境系统分析在数据方面为确定成本降低机率提供媒介而非环境提高优化。不幸的是, 现在还没有什么方法能脱颖而出的解决这踊产业生态学问题, 即从环境透视而言哪种工艺方案最好? 有三个尺度可能用以 LCA 和系统分析的联结, 以解决上述问题。即总经济成本、热动力学资源消耗及环境影响分析。

4 总成本评估

虽然金融、经济评估在 LCA 和系统分析中已发展的相当成熟, 但并不能成功的用以进行环境优化决策。Wagner 在系统分析成本最小化、产出最大化和供需双方利润最大化三种经济分析方法的基础上提出, 单纯以货币为度量尺度的经济学分析评估往往要求理想的自然环境状态是预定的, 这就要求经济学与生物学及生态学等学科的交叉, 同时依赖于社会、政治过程的支持^[29], 而这种交叉和支持及其效应的统一评估问题亦难解决。Gray 罗列了对经济评价方法在此方面的批评观点后(文献), 强烈指出这种方法太过狭隘地专注于为产业环境影响的决策者提供一些准确和客观的信息^[30]。例如, 除了经典经济学的外部成本(即外部不经济)问题之外, 在其它的一系统问题中也普遍存在忽略或错误配置内部经济成本的问题, 如偶然负债、法律会费、环境修复、雇佣道德、商标声誉、总体生产过程(而非单个产品)的管理协调费用等等。总成本评估(Total Cost Assessment, TCA)被奉为替代方法, 它与广义产业生态学的基本原则相一致即, 包容更多的更全面的处理能做出更好的决策^[31-32]。

虽然 LCA 和系统分析在 TCA 的基础上都具可行性, 但到目前为止, TCA 极少被运用在包括 LCA 在内的广义产业生态学研究当中以确定环境偏好。直观的原因在于, 有些情况中经济上的最佳策略与环境偏好并不一致^[33], 尤其是在涉及到代际外部性因素^[34], 或者是收益最佳的策略不可避免的导致自然资源的耗竭的时候。根本性的原因则在于, 以货币为度量尺度的单纯的经济分析不能实现经济成本和产出与环境的贡献和影响的统一评价。尽管如此, 经济学分析方法的长期发展仍为广义产业生态学研究方法的进一步整合和发展提供诸如区域经济分析和投入产出分析等最基本的研究思路 and 成熟的分析、模拟方法。

5 Exergy 分析

系统生态学家已为生态系统的评估、分析和模拟发展出了多种方法。与过程系统工程中的其它工艺一样, 系统生态学的一些方法也建立于热力学原则之上。这一共同点为产业和生态系统的整合评估提供了可能。当前产业生态学的热力学评价方法研究主要集中于 exergy 和 emergy 研究两个方面, 而这两种方法都提供了生态系统健康和可持续性的信息^[35, 36]。

Exergy 是系统达到与其环境或参照系统相平衡状态的过程中可被转化的功。因此, exergy 是熵自由能量, 是做功能力的真正度量, 同时体现了热力学两大定律的内涵^[37, 38]。在一定条件下, exergy 等于 Gibbs 自由能, Helmholtz 自由能或焓。

目前 Exergy 分析已被广泛用于产业系统内能量利用效率和提高可能的评价^[39, 40], 以试图建立一个更为复杂的“资源与废弃核算”, 并为可持续发展提供了一个科学基础^[41, 42], 使系统生产过程中的 exergy 消耗最小化。因此, 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, 这使得其比累积能量消耗更有用。因为 exergy 是产品或过程与平衡状态距离的度量, 它亦被建议用以度量排放对环境影响的潜力^[43]。

虽然 exergy 是一个比能量更有用的概念, 但它仅提供系统当前状态的信息, 及其未来的做功能力, 而不能就这种能量的质量或能量历史提供任何信息, 仍不足以进行生态与产业的整合分析。累积 exergy 消耗对于生态成本而言, 是一个好的但并不完全的度量, 因为并没有考虑到自然资源的产生需要消耗各自不同的生态成本。

Exergy 是生态系统发展的一个目标函数, 并与生态系统的其他目标函数强烈相关^[44]。不幸的是 exergy 不能直接通过测定获得, 而只能通过计算间接推得。这就是说, 只有当我们为 exergy 找到一个确实可靠的计算公式时, 它才能成为生态经济系统度量尺度的尚佳选择^[45]。目前的 exergy 计算公式往往十分复杂, 且对于支撑数据的要求较高^[46]。

虽然有争论认为可将 exergy 调整引入环境和道德坐标, 当前的应用仍主要集中于产业领域, 现在还没有方法可靠地将 exergy 与环境影响或生态系统功能联系起来。此外, 由于废弃物(能)的 exergy(以化学污染和废热的形式释放到环境中)的形态不同, 因而可能具有不同质量和数量的环境影响。因此, exergy 方法只能提供环境影响的一种大约的估计^[48, 47]。

LCA 和系统分析在 exergy 效率的基础上均具可行性。就 LCA 而言，可以很方便地将生命周期清单表总合成 exergy 浪费，及建立于这些度量尺度之上的对比评估。就系统分析而言，这两者中的任何一个都可被用于客观功能的评估，并在另两种尺度的约束条件之下进行优化，而实现最优解。从以上对 exergy 的分析可知，这种整合无论在前者还是后者方面都具有不完全性和不准确性的缺憾。

由于 Exergy 的这些缺憾被能值概念所弥补，所以 Hocking 建议“净能值开支可能是判定环境性能的最有效尺度”^[48]。

6 能值评估

能值是以 H. T. Odum 为首，在系统生态、能量生态、生态经济理论上研究创立的一个新的科学概念和度量标准^[49]。能值分析是传统能量分析的新发展。

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、产品或劳务的能量均直接或间接源于太阳能，故在实际应用中多以太阳能为基准，用太阳能焦耳 (Solar Emjoule 缩写为 sej) 为单位来度量不同类型的能量的能值^[50]。

能值分析通过能值转换率 (Energy transformity)，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^[51]。

对于经济子系统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 (Energy / \$Ratio，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。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生产能力的标准。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 (Emdollar value, Em \$)，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^[52]。

综上所述，Odum 创立的能值概念可同时衡量自然和人类在产品生产过程中所做的功，作为有科学根据的评估系统，它可以通过一个通用的尺度 (能值) 实现环境价值和经济价值的统一度量^[53]。

产业生态学迅速发展的重要驱动力在于避

免产业活动对环境的压力，因此必须首先研究产业系统与自然系统的交互界面^[54]。而作为“自然与经济之间的桥梁”的能值研究方法，恰恰为经济发展与环境保护价值的整合提供统一的基础，可用于不同生态系统间的比较^[49]。

输入变量直接影响系统内部状态和输出变量。而输出变量表现系统对环境的直接影响。以能值为基础的生态学模型可被认为是建立环境指标的一个好方法，并最终用以指导实践。但作为一个新兴的理论、方法，目前的能值综合方法存在下列问题需要解决和完善。

首先，能值分析方法从机理上讲是一种成本价值论的分析方法，以产业生产过程或系统运作过程中所直接或间接消耗的太阳能值为单位进行产品或系统的价值度量，以消耗能值的成本构成结构度量系统环境压力和可持续发展性能。但成本并不能反映价值的全部，产品或系统的价值不仅在于它的产生或运转消耗了其他价值成本，而更在于这些消耗的成本在产品的生产过程中或系统的运转过程中涌现了不同于原成本的新的功能，即使用价值。这种使用价值即包括正面的新涌现的产品或系统服务功能的价值，也包括产品生产或系统运转过程中产生的负面的污染和损害价值。完整的生态经济价值分析要求兼顾成本价值与产品或系统使用价值，这就要求进行能值成本分析与产品或系统生态系统功能价值分析，以及副产品或排放物污染的物质分析的整合。而在后者的分析评价方面，exergy 无疑是有强有力的工具。

能值度量达到当前状态所耗的能量，而 exergy 度量当前状态在将来的做功潜力。表面看两者是不相关的互补性评价尺度，即能值可度量产品或服务中的环境投入，而 exergy 可度量产品或服务向环境做功的潜能。但事实上，能值与 exergy 间的关系通过能值转换率实现^[55]。

其次是，能值评价的尺度推绎问题。能值分析方法通过能值分析表将系统投入的各种能流、物流、货币流转化为能值流后，计算出上述能值评价指标，进行分析评价。现行的能值评价指标均是在系统层面进行评价，并没有对于系统间及系统内各子系统间的互作关系和程度进行评价的指标。而生态学的典型教训是，凡孤立地研究系统就会有严重歪曲的危险，因为，在生态学包括产业生态学中，各系统间的联系常常是很重要和复杂的。产业生态学的一个重要的方面是：不是孤立地考虑产业系统，而且也不能孤立地将其实施应用。如何整合局部系统的研究结果，实现研究尺度的上推？如何在

子系统层面为系统的表现寻求机理性解释? 产业生态学的问题最终必须纳入具多层次整合特性的数学模型的框架。能值分析与经济学分析模型工具及其分支学科的不断交叉渐已为此带来星火之光^[59]。

7 产业生态学研究方法的整合方向

产业的长期和顺利发展需要经济和生态工程过程的联合推动。传统的工程过程方法不能满足这种需要, 因为它们总是将环境作为经济之后的第二性因素考虑。

生命周期评价和设计方法拓宽了传统方法的思路, 但其精力过分地集中于废弃排放的环境影响方面而忽视了生态产品和服务的贡献, 将自然界(资源与能量)认为是理所当然的免费午餐将造成误导, 因为自然产品和过程对于任何产业产品和生产过程而言都是极其重要的贡献者。在数据上的过高要求和在评价中的不统一, 导致生命周期评价和设计方法同时具有可行性和可比性不高的缺点。

系统分析方法的确能实现对生态投入的度量, 但却又忽略了排放的影响评价。缺少一个统一的尺度平台进行各种物质、能量、排放及环境影响的统一评价和对比, 又难以同时进行多目标的优化是系统分析的又一缺憾。Bakshi 建议以热动力学为纽带加强过程系统工程、系统分析和生命周期评价方法间的协作, 进而克服上述方法各自的缺憾。因为任何产业和生态过程的维持和发展都受到可利用能量及其转化为有用功的限制。

exergy 消耗可为影响提供一个全局性的衡量和评价, 但其计算极其复杂且对于参照状态的选择过于敏感, 只能为环境影响提供一个大概的估计。Exergy 研究的另一个缺点是, 在成本分析方面忽略了支撑各产业活动的自然产品和服务, 对于城市或更大尺度的研究对象而言, 数据要求高, 可行性低。

能值, 即产品或服务生产所直接或间接消耗的能量。其分析, 可实现能量流、物质流和经济流的统一评价, 与上述研究方法有良好的兼容性, 能够为各种尺度的广义产业生态学研究方法的整合提供一个理想的平台。但作为一个成本价值论的评价体系, 能值理论与方法在产业系统对环境的排放影响方面仍显薄弱, 在产业系统多层次整体优化方面仍有待加强。前者可望通过能值与 exergy 的整合分析加以弥补, 后者则可望在能值分析与经济学等其他学科多尺度模型、指标工具的不断融合和借鉴中得以加强。

产业生态学研究方法多样, 且各有优缺, 优化

方向在于整合。能值综合方法对其他方法有较好的兼容性, 该方法与 exergy 分析和效益成本分析方法等成熟的经济数学方法的整合, 无疑将成为产业生态学研究方法的优化与完善的一个方向。

参考文献:

- [1] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展 [J]. 生态学报, 2000, 20(5): 830—840.
- [2] 卢兵友, 王如松, 张壬午. 中国和西方国家产业生态学思想与实践的对比分析 [J]. 农村生态环境, 1998, 14(4): 42—45.
- [3] 杨建新, 王如松. 产业生态学基本理论探讨 [J]. 城市环境与城市生态, 1998, 11(2): 56—66.
- [4] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Environment, Health and Safety Committee. "White Paper on Sustainable Development and Industrial Ecology" (See IEEE organizations \ for access.). World Wide Web site for IEEE White paper; <http://www.ieee.org/ehs/ehswp.html>, 1995.
- [5] HOSTROP M, HARPER P M, GARNI R. Design of environmentally benign processes: integration of solvent design and separation process synthesis [J]. Computers and Chemical Engineering, 1999, 23(10): 1395—1414.
- [6] ROSSITER A P. Process integration and pollution prevention //EI-HALWAGI M M. Pollution Prevention via Process and Product Modifications[C]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1995, 90(303): 12—22.
- [7] DOUGLAS J M. Process synthesis for waste minimization. I & EC Research, 1992, 31, 238—243.
- [8] LINNINGER A A, SALOMONE E, ALI S A, et al. Pollution prevention for production systems of energetic materials [J]. Waste Management, 1997, 17(2—3): 165—173.
- [9] STEFANIS S K, LIVINGSTON A G, PISTIKOPOULOS E N. Environmental impact considerations in the optimal design and scheduling of batch processes [J]. Computers & Chemistry Engineering, 1997, 21(10): 1073—1094.
- [10] CABEZAS H, BARE J G, MAILLICK S K. Pollution prevention with chemical process simulators: the generalized waste reduction (WAR) algorithm—full version [J]. Computer & Chemical Engineering, 1999, 23(4—5): 623—634.
- [11] EDEN M R, JORGENSEN S B, GANI R, et al. Property integration — a new approach for simultaneous solution of process and molecular design problems [J]. Computer & Chemical Engineering, 2002, 10: 79—84.
- [12] CANO-RUIZ J A, MCRAE G J. Environmentally conscious process design [J]. Annual Review on Energy Environment, 1998, 23: 499.
- [13] 杨建新, 王如松. 生命周期评价的回顾与展望 [J]. 环境科学进展, 1998, 6(2): 21—28.
- [14] GRAEDEL T E, ALLENBY B R. Industrial Ecology [M]. New York: Prentice Hall Press, 1995: 108—109.
- [15] EHRENFELD J R. The importance of LCAs—warts and all [J]. Journal of Industrial Ecology, 1997, 1(2): 41—49.

- [16] ISO14040. Environmental management life-cycle assessment principles and framework 1997.
- [17] ALLENBY B R. Environmental constraints and the evolution of the private firm [A]. Richards D J. The industrial green game: implications for environmental design and maintenance [C]. Washington (DC): National Academy Press 1997. 101—113.
- [18] 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.
- [19] LAVE L B, COBAS-FLORES E, HENDRICKSON C, et al. Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges [J]. Environmental Science & Technology, 1995, 29(9): 420—426.
- [20] HOFSTETTER P, BAUMGARTNER T, SCHOLZ R W. Modelling the valuesphere and the ecosphere: integrating and the decision makers' perspectives into LCA [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2000, 5(3): 161—175.
- [21] WENS J W. Life cycle assessment: constraints! on moving from inventory to impact assessment [J]. Journal of Industrial Ecology, 1997, 1(1): 37—49.
- [22] AYRES R U. Life cycle analysis: a critique [J]. Resources, Conservation & Recycling, 1995, 14: 199—223.
- [23] NASH J, STOUGHTON M D. Learning to live with life cycle assessment [J]. Environmental Science & Technology, 1994, 28(5): 236—237.
- [24] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253—260.
- [25] ARROW K, BOLIN B, COSTANZA R, et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment [J]. Science, 1995, 268: 520—521.
- [26] AZAPAGIC A, CLIFT R. Life cycle assessment and linear programming [J]. Computers Chemistry and Engineering, 1995, 19(Suppl.): 229—234.
- [27] GRANT W, PEDERSEN E K, MARIN S L. Ecological Modelling: Systems analysis and simulation [A]. JORGENSEN S E, MULLER F. Handbook of ecosystem theories and management [C]. New York: CRC Press LLC, 2000. 103—113.
- [28] FROSCHE R A, GAILOPOULOS N E. Strategies for manufacturing [J]. Scientific American, 1989, 261(3): 144—152.
- [29] WAGNER J E, LUZADIS V A, FLOYD D W. A role for economic analysis in the ecosystem management debate [J]. Landscape and Urban Planning, 1998, 40: 151—157.
- [30] GRAY R. Accounting for the environment: green accounting [M]. Princeton(NJ): Markus Weiner Publishing, 1994.
- [31] MACVE R. Accounting for environmental cost [A]. RICHARDS D. The industrial green game: implications for environmental design and maintenance [C]. Washington (DC): National Academy Press, 1997. 185—199.
- [32] WHITE A L, BECKER M, SAVAGE D. Environmentally smart accounting: using total cost assessment to advance pollution prevention [J]. Pollution Prevention Review, 1993, summer: 247—259.
- [33] LAVE L B, MACLEAN H L, HENDRICKSON C T, et al. Life-cycle analysis of alternative automobile fuel/propulsion technologies [J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(17): 3598—3605.
- [34] AYRES R U, AXTELL R. Foresight as a survival characteristic: when (if ever) does the long view pay? [J]. Technological Forecasting and Social Change, 1996, 51: 209—235.
- [35] BROWN M T, HERENDEEN R A. Embodied energy analysis and energy analysis: a comparative view [J]. Ecological Economics, 1996, 19: 219—235.
- [36] JOGENSEN S E, NIELSEN S N, MEJER H. Energy, environ, exergy and ecological modeling [J]. Ecological Modelling, 1995, 77(2—3): 99—109.
- [37] AYRES R U, AYRES L W, WARR B. Exergy, power and work in the US economy, 1900—1998 [J]. Energy, 2003, 28: 219—273.
- [38] ZHANG Y Z, WANG X. Exergy and ecological modeling of lake environment [J]. Journal of Environmental Sciences, 1998, 10(4): 497—504.
- [39] BJORK H, RASMUSON A. A method for life cycle assessment environmental optimization of a dynamic process exemplified by an analysis of an energy system with a superheated steam dryer integrated in a local district heat and power plant [J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 87: 381—394.
- [40] MOZES E, CORNELISSEN R L, HIRS G G, et al. Exergy analysis of the conventional textile washing process [J]. Energy Conversion and Management, 1998, 39(16—18): 1835—1843.
- [41] AYRES R U, AYRES L W, MARTINAS K. Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis [J]. Energy, 1998, 23(5): 355—363.
- [42] MARQUES J, NIELSEN S N, PARDAL M A, JORGENSEN S E. Impact of eutrophication and river management within a framework of ecosystem theories [J]. Ecological Modelling, 2003, 166: 147—168.
- [43] DINCER I. Thermodynamics exergy and environmental impact [J]. Energy Sources, 2000, 22: 723—732.
- [44] JORGENSEN S E. Review and comparison of goal functions in system ecology [J]. Wie Milieu, 1994, 44(1): 11—20.
- [45] PYKH Y A, KENNEDY E T, GRANT W E. An overview of systems analysis methods in delineating environmental quality indices [J]. Ecological Modelling, 2000, 130: 25—38.
- [46] TESTER J W, MODEL M. Thermodynamics and its applications. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.
- [47] SEAGER T P, THEIS T L. A uniform definition and quantitative basis for industrial ecology [J]. Journal of Cleaner

Production, 2002, 10(3): 225—235.

[48] HOCKING M. Net energy expenditure: a method for assessing the environmental impact of technologies//SCHULZE P, ed. Measures of environmental performance and ecosystem condition [C] . Washington (DC): National Academy Press, 1998, 13—28.

[49] ODUM H T. Environmental Accounting: Energy and Decision Making [M] . New York: John Wiley & Sons, 1996, 57—58, 85—86.

[50] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析 [J] . 应用生态学报, 2001, 12(1): 129—131.

[51] 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.

[52] 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.

[53] ODUM H T. System Ecology [M] . New York: Wiley, 1983, 644.

[54] 杨建新, 王如松. 产业生态学的回顾与展望 [J] . 应用生态学报, 1998, 9(5): 555—561.

[55] BAKSHI B R. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering [J] . Computers and Chemical Engineering, 2002, 24(2—7): 1767—1773.

[56] 沈善瑞, 陆宏芳, 蓝盛芳, 等. 三水区农业生态系统经济能值的投入产出分析 [J] . 生态环境, 2004, 13(4): 612—615.

Research Methods of Industrial Ecology

LU Hong-fang¹, REN Hai¹, WANG Chang-wei², PENG Shao-lin^{1,2}

(1. South China Botany Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;
2. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on review and analysis, both advantage and shortage of current study methods of industrial ecology were given out. The possibility of integration among those methods and the potential direction of the integration were mentioned out too. From the aspects of feasibility, comparison, wholeness and compatibility, the study analyzed and compared the research methods of industrial ecology that include engineering design, process synthesis, life cycle assessment, system analysis, total cost assessment, exergy analysis and emergy synthesis. Based on analysis of possibility and direction of integration among these methods, the integration among emergy synthesis, exergy analysis and economic benefit—cost analysis can be one of the main some optimization directions for study method of industrial ecology.

Key words: life cycle assessment; system analysis; total cost assessment; exergy analysis; emergy synthesis