

工业生态学研究现状与展望

李同升, 韦亚权

(西北大学城市与资源学系, 西安 710069)

摘要:工业生态学是一门新兴交叉学科,自诞生 10 多年来,其理论研究与实践活动已经取得了长足的进展。首先介绍了工业生态学的缘起,综述了目前国外工业生态学在原料与能量流动(工业代谢)、物质减量化、技术变革和环境、生命周期规划设计与评价、为环境设计、延伸生产者的责任、生态工业园(工业共生系统)、产品导向的环境策略、生态效益等主要领域的研究进展;分析了我国工业生态学的研究现状,并结合国际发展趋势提出了我国工业生态学未来的研究框架和主要研究领域。

关键词:工业生态学;研究现状;展望

The current situation and prospect of the study on industrial ecology

LI Tong-Sheng, WEI Ya-Quan (Department of Urban and Resources sciences, Northwest University, Xi'an 710069, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 869~877.

Abstract: Industrial ecology is a new cross-discipline that has developed fast in both theory and practice in the past few decades. After a brief introduction to the origin of the discipline, it was comprehensively stated that the researches on material and energy flows (industrial metabolism), material reduction, technology innovation, life-cycle analysis and assessment, environment beneficial design (eco-design), producer's extended responsibility (product stewardship), eco-industrial parks (industrial symbiosis), product-oriented environmental policy and ecological benefit evaluation. In addition, the related theoretical approach focusing on material and energy flows and the eco-industry practice centered on eco-industrial park at home are analyzed. Then, a perspective in industrial ecology is made as follows: the international research of the industrial ecology has entered a new era, namely, theory and technology are going in the direction of being systemized, the content particularized and detailed, the applicability and popularity attended. Compared with those in the developed countries, the content, technology and practice at home are rather limited both in depth and width, characterized by following-up and shortage of breakthroughs. At the end, based on the international development and our development at home, a research framework that includes theory, policy and application is given, and major research fields and contents are put forward.

Key words: industrial ecology; current research; perspective

文章编号:1000-0933(2005)04-0869-09 中图分类号:Q14,F40 文献标识码:A

1 工业生态学的缘起

1989 年 9 月,美国通用汽车公司的研究部副总裁罗伯特·福布什(Robert Frosch)和负责发动机研究的尼古拉斯·加罗什(Nicolas Gallopoulos)在《科学美国人》杂志上发表的题为《可持续工业发展战略》的文章正式提出了工业生态学的概念,认为工业系统应向自然系统学习,并可以建立类似于自然生态系统的工业生态系统,在这样的系统中每个企业必须与其他工业企业相互依存、相互联系从而构成一个复合的大系统,以便运用一体化的生产方式来代替过去简单的传统生产方式,减少工业对环境的影响,这个定义的提出标志着工业生态学的诞生^[1]。此后不同研究人员对工业生态学亦提出了自己的理解,1995 年,加拿大的 Cote 曾对工业生态学的定义做了统计,共有 20 多种,其中较具代表性的主要为《工业生态学杂志》^[2]、美国跨部门工作组^[3]以及工业生态学国际学会的定义^[4]。尽管工业生态学的定义颇多,但本质上没有大的区别,概而言之,工业生态学是一门新兴、

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40131010)

收稿日期:2004-06-26;修订日期:2005-01-10

作者简介:李同升(1960~),男,陕西宝鸡人,博士,教授,主要从事区域发展与产业布局研究。E-mail:leetang@nwu.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 40131010)

Received date: 2004-06-26; Accepted date: 2005-01-12

Biography: LI Tong-Sheng, Ph. D., Professor, mainly engaged in regional development and industry planning. E-mail: leetang@nwu.edu.cn

蓬勃发展的综合、交叉学科,是一门研究人类工业系统和自然环境之间的相互作用、相互关系的学科,为研究人类工业社会与自然环境的协调发展提供了一种全新的理论框架,为协调各学科与社会各部门共同解决工业系统与自然生态系统之间的问题提供了具体、可供操作的方法,为可持续发展的理论奠定了厚实的基础。工业生态学追求的是人类社会和自然生态系统的和谐发展,寻求经济效益、生态效益和社会效益的统一,最终实现人类社会的可持续发展^[5]。

进入 20 世纪 90 年代后,工业生态学的研究不再停留在概念的探讨上,其理论与实践进入了蓬勃发展的阶段。工业生态学的研究以美国最为积极,20 世纪 90 年代初美国科学院就曾举行多次会议,对工业生态学的概念、内容、方法和应用前景等问题进行了研讨,形成了工业生态学的基本框架^[6,7],此后在 1993 年成立的美国可持续发展总统委员会还专门召开会议对工业生态学重要实践领域—生态工业园进行探讨^[8]。除此之外,清洁生产杂志以及生命周期评价杂志等期刊还经常刊载工业生态学方面的内容^[9]。工业生态学的研究在美国的政府、学术界以及工业界都受到了高度的关注,这引起了世界其他发达国家的重视,从而使工业生态学出现了全球性的研究热潮。影响这一热潮的主要事件有二:一是 1997 年麻省理工学院出版了全球第一份《工业生态学杂志》,专门发表工业生态学的研究论文,使得工业生态学研究人员从此有了独立发表自己研究成果、进行学术思想交流的园地^[10];另一个是美国工业生态学派的崛起,其中以 Iddo K. Wernick 和 Jesse H. Ausubel 等 16 人组成的维世奴帮(Vishnu Group)为代表^[11]。进入 21 世纪,工业生态学研究更是进入了一个崭新的发展时期,2000 年成立了工业生态学国际学会,使研究的全球普及化得到了提高^[12]。

2 国外工业生态学的研究现状

20 世纪 80 年代以来,国外学术界、工业界开始从不同角度开展工业生态学的理论研究与实践,逐步形成了工业生态学研究的概念和方法论体系。1989 年 Frosch 和 Gallopulos 正式提出工业生态学概念,认为工业系统应向自然生态系统学习,并可以建立类似自然生态系统的工业生态系统^[1]。此后,众多研究人员通过系统、定性、定量等多种方法对工业生态学进行了深入的研究,涉及的研究领域相当广泛,主要有 9 个方面^[12]:①原料与能量流动(工业代谢);②物质减量化;③技术变革和环境;④生命周期规划、设计、评价;⑤为环境设计;⑥延伸生产者的责任;⑦生态工业园(工业共生系统);⑧产品导向的环境政策;⑨生态效益。

2.1 原料与能量流动(工业代谢)

研究焦点集中于工业系统、区域和全球原料与能源流向的量化;原料与能源流动的环境影响以及减少环境影响的理论、技术方法。Ayres 等人^[13]对经济运行中原料与能源流动对环境的影响进行了开拓性的研究,提出了工业代谢的概念并进行系统研究,奠定了原料与能源流分析的基本理论。其他一些学者则结合钢铁工业、化学工业、森林工业等部门对原料和能源流动的循环、转换、优化模式等做出了富有成效的探索^[14~16]。综合而言,目前工业代谢只是停留在概念层次,主要关注代谢事实的发现与方法的发展,在理论与实际操作上仍有待深入。

原料与能源流动研究采用 3 种基本分析方法:质量平衡方法(mass balance);输入-输出分析方法(input-output analysis, IOA);生命周期分析与评价。近年来一些学者提出了研究原料与能源流动更具体的新方法,Joosten 等人^[17]于 1999 年提出了原料流动分析新方法 STREAM(Statistical Research for Analyzing Material Streams),并采用这种方法对荷兰的塑料的流动进行了分析^[18];Michaelis 等人采用熵(Exergy)分析方法研究了英国钢材部门的原料与能源流动^[19],这些方法无疑为原料与能源流动分析开创了新的思路。然而,目前主要原料与能源流动分析研究方法局限于物质、能量在各个生产环节的流通,较少考虑物质、能量的转化问题,由此难以进行定量分析研究,如何进行定量化分析是今后一个富有吸引力和挑战性的问题。

2.2 物质减量化

物质减量系统化研究和物质减量与经济的关系研究是工业生态学家们关注的两个重要问题。Cleveland 和 Ruth 指出,对于特定企业、工业的原材料使用范围、运行机制、使用模式、物质减量引起经济层面的影响以及物质替代对环境的影响程度等问题也应引起重视^[20]。到目前为止,有关物质减量化的研究多基于技术和经济因素^[5],对产品和“服务”等物质减量化的理论框架尚未完善,缺乏有效的实施方法。如何对物质减量化进行评估一直是众多学者所关注的问题。迄今为止,基于物质利用强度 IU(intensity of use)这一主要评估指标,形成两种分析方法:环境库兹涅茨曲线(Environmental Kuznets Curve)理论和长波理论(Material Use and Long Waves)。除 EKC 和长波理论这两种主要评估方法外,物质分解分析(Material Decomposition Analysis)、输入-输出分析、物质利用强度的统计分析,以及动力学模型、综合国家物质利用分析等方法亦是物质减量化评估的有效手段。需要指出的是,上述方法都存在不同程度的不足,特别对综合物质利用方面的研究还存在不少问题,这无疑是未来研究需要面临的课题。

2.3 技术变革和环境

苏伦·艾尔克曼(S. Erkmann)在系统研究基础上指出工业生态技术使得无碍环境技术与其他技术的鸿沟将不复存在,环境系统分析是技术研究方法的基础,技术研究并不仅仅局限技术自身,也涉及到技术政策^[21],他还从技术研究的意义、分析方法、

内容等多方面诠释了工业生态技术。技术的发展、传播和演进是以技术群出现,按一定技术轨迹进行的,阿尔努尔夫·格鲁贝勒(Armulf Grüber)对此进行了富有成效的研究,提出了技术传播的两种发展战略:循序渐进的“增量”改进战略和发展与现存技术体系割裂的创新战略^[22]。其他工业生态学家则结合实践就如生态技术、生物技术等技术群以及化学工业、造纸工业等技术发展轨迹来探索生态工业技术的发展模式、方法,取得了一定的成果^[21,23,24]。工业生态学技术研究涉及的技术领域较广,概括而言集中于两个方面:工业系统进化科学理论、方法与技术,创新技术在工业部门应用方法^[5]。

2.4 生命周期评价

多年来,生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)的理论框架已初步形成,国际环境毒理学与化学学会(SETAC)出版的报告“Code of Practice”将 LCA 分为 4 个有机组成:目的与范围的确定、清单分析、影响评价、改善评价。这为 LCA 方法论研究的起步起到了里程碑作用。目前, LCA 主要采用两种评价方法: SETAC-EPA 分析方法和经济输入和输出生命周期评价模式(Economic Input-Output Life-Cycle Assessment model, EIO-LCA)^[25]。虽然这些方法在完整性和一贯性方面多有改进,但是也存在一些如数据量要求大、耗时耗财等不足之处。针对上述缺点, AT&T 采用了 LCA 的简便矩阵方法,这种方法可更科学、更合理地反映环境危害的主要阶段以及各种因素造成的环境影响^[26]。美国环保局(EPA)在生命周期清单分析方面做了较为系统的研究,使生命周期评价进入了实质性的推广阶段。此外, SETAC 和国际标准组织在 LCA 的国际标准化研究方面取得了重要进展^[27]。而荷兰、丹麦、英国等欧洲国家在推行 LCA 的政策、法律法规以及产品工艺等方面走在世界前列^[28]。

生命周期设计(LCD),特别强调要在生命周期评价的基础上开展产品的设计,将寻求环境影响最小化的理念渗透于每一产品系统组成,即产品、工艺、分发和管理。虽然 LCD 是很好的设计理念,但是 LCD 由于涉及面广,其实施仍存在一定困难,主要受内外因素影响:内在因素主要包括企业合作原则、企业的目的、产品表现检测方法、产品策略以及企业新工艺要求的原材料利用问题等;外在因素主要有政府政策、法律法规、市场需求、经济水平以及产品竞争等^[31]。如何克服这些种种不利因素影响,使 LCD 能够在企业中顺利实施,这需要人们进行更加深入的研究。

2.5 为环境设计(DfE)

DfE 研究从一开始就十分重视实用性。较早地进行 DfE 研究的是美国环保局,其为企业在设计和重新设计产品和工艺时考虑环境问题。为了使企业产品的经济效益与环境效益达到最佳的结合,美国环保局提出了整套的实施方法^[30]。 Braden Allenby 也对 DfE 进行了系统的研究,构建了 DfE 在整个产品生命周期内的实施框架^[31,32]。与此同时, Glantschnig, W. J., and Sekutowski J. C. 则对 DfE 的设计原则、步骤程序以及设计领域等进行深入分析,取得了可喜的成果^[33]。这些研究成果对实践具有直接指导意义。

2.6 延伸生产者的责任

延伸生产者责任是工业生态学的一种方法,它通过促使生产者对其产品的整个生命周期特别是产品的回收、循环利用和最终处置承担责任,从而降低产品总体的环境影响^[5]。如何推行延伸生产者责任政策,是人们关注的热点。目前,推行延伸生产者责任政策已形成 3 种途径:强制立法,自愿参与,自愿与强制立法相结合。强制立法起源于德国,其在 1991 年就颁布了“德国包装材料条例”,要求包装行业的包装材料生产者负责处理包装废弃物;这种政策的成本虽高,且存在诸多问题,但延伸生产者责任这一观点却被认为是行之有效的,这种理念在欧洲其他国家迅速传播,其应用范围已超出包装废弃物管理的范畴,开始向电子以及汽车领域延伸。针对欧洲的强制性延伸生产者责任政策代价太大的问题,美国则形成了自愿性的环境保护政策,其他国家亦针对本国国情采取相应的推行方法。

2.7 生态工业园(工业共生系统)

生态工业园是工业生态学的核心研究内容之一。 Ernest Lowe 最早提出了生态工业园概念,并且发展了工业生态园的基础理论和实践准则,他与耿勇合著了《工业生态学和生态工业园》,该书系统、全面、详尽地阐述工业生态学基础理论研究以及实践运用,为生态工业园的理论研究和知识普及做出了较大贡献^[34]。与此同时,在借鉴卡隆堡工业共生体经验基础上,许多国家积极开展生态工业园实践,在美国、加拿大、西欧、日本等国家和地区已经有了一些初具规模的或刚刚启动的生态工业园项目^[35]。

随着生态工业园建设热潮的兴起,生态工业园的规划设计与运行成为生态工业园研究的主要方向。 Ernest Lowe 以及 Hall J 等对生态工业园的设计与操作的研究颇有建树,形成了一套完整的方法体系。 Audra J. Potts Carr 则是结合 Choctaw 工业园的改造问题,对生态工业园的土地使用和景观设计进行实际探索,为生态工业园区设计提供了新的思路^[36]。生态工业园的实施是规划设计最后的和关键的一步,目前主要形成两种不同思路:自下而上的方法和自上而下的方法^[37,38]。自下而上方法主要是通过“核心承租商(Anchor Tenant)”模式,即在一个或二个已经存在的或规划的“核心”承租商周围配置能够形成生态链的企业群,建设生态工业园;自上而下的方法考虑的重心在于整个区域及其将来的发展变化,其中涉及到多个层次的利害关系者,但在这种方法中直接利益相关者起到核心作用,该方法对各方面利益进行权衡、综合,再形成设计的方案,同时需要一个组织对整个系统负责,由其真正发起和实施项目并加以监督。此外,研究人员还就工业生态园的评价指标、生态系统性质、企业协同、生态工

业园区与社区关系和环境保护关系等进行探索,并取得了一定的成果^[39]。总的来看,生态工业园研究视野开阔,理论研究和应用研究并行,并开始出现了注重案例分析、规划实践和发展对策研究的趋势。

2.8 产品导向的环境政策

产品导向的环境政策是工业生态学的另一个重要研究领域,一些工业化国家已经开展了相关研究并正在积极推行,并取得了一定的成果。1998年丹麦国家资源与环境政策委员会发布了关于产品导向环境政策的行动计划,从行政管理上保障了产品导向环境政策的有效实施,但是对于与产品环境影响相关的组织和个人其应承担的责任并没有制度化,这会对产品导向环境政策实施产生一些不利因素。瑞典产品导向环境政策与丹麦有所不同,其强调行政管理、经济和市场等措施的综合运用,这有助于减少产品导向环境政策实施过程中的一些阻力。产品导向环境政策的制定是一项复杂工程,涉及到自然学科、社会学科等诸多学科,合作研究成为必然趋势。北欧部长委员会1999年成立的专家组,就如何开发一个公共的产品导向环境政策框架技术进行研究,并取得了阶段性成果^[40]。北欧部长委员会的公共的产品导向环境政策框架为解决不同国家的不同环境产品政策冲突构筑了有效的平台,并为产品环境政策规范化奠定了一定的基础。1998年欧盟委员会提出了IPP(Integrated Product Policy),并建议作为欧盟各国产品环境政策^[41]。欧洲工业化国家在进行产品导向的环境政策的理论研究的同时,也在实践中积极推行和完善这一政策,如丹麦和挪威等国家在开发新的技术和方法、建立和完善信息系统、营造有利市场环境等方面取得了一定的成果和经验^[42,43]。

2.9 生态效益

生态效益已成为工业生态学的一个重要研究领域与组成部分。目前,生态效益研究焦点已从概念的探讨转向生态改进和为环境设计,更加注重实用性。生态效益具体实施途径可归结为7个方面^[5]:①降低产品与服务的原料消耗强度;②降低产品与服务的能源消耗强度;③减少毒性物质的扩散;④增进原料的可回收性;⑤将可再生资源的使用最大化;⑥提高产品的耐久性;⑦增进商品的服务强度。与工业生态学其他研究领域一样,生态效益的量化仍然是研究者面对的主要问题。世界可持续发展工商理事会(WBCSD)发展了生态效益指标的理论和方法,建立了生态效益指标框架。生态效益的实践运用也取得长足进展,亚太经合组织(APEC)结合工业部门的生态效益实务,提出了完整的实施方法,具有较高的实践指导意义^[5]。

3 我国工业生态学研究现状

经过十多年的跟踪和学习,我国工业生态学也已取得了长足进展,并初步形成了既与国际研究主流接轨又符合中国国情特色的理论和方法。

3.1 以物质和能量为核心的工业生态系统理论研究

对工业生态系统理论探索是我国工业生态学研究的重点,在大量翻译和介绍西方研究成果的基础上,我国工业生态系统理论的研究也取得了积极的进展。汤慧兰及王子彦等首先从不同角度出发分析了工业生态系统的基本特征、内容、特性并提出了工业生态系统建设的基础、原则和对策等^[44,45],对工业生态系统理论框架的构建进行了有益的探索。胡山鹰等人则深入地分析了工业生态系统内的系统集成问题,提出了工业生态系统的物质、能量、信息等集成的有效方法和途径^[46]。吴伟等人认为应加强对工业生态系统的控制和管理,并探讨了工业生态系统的运行和控制机制,提出了递阶控制和分散控制等方法^[47]。在工业生态系统的综合评价、工业生态系统内部企业链、工业系统内物质循环和能量流动等方面,一些研究人员亦进行了初步研究并取得一定的成果^[48~50]。其他研究人员则从实践上进行探索,薛东峰对南海生态工业园的工业生态系统进行了规划设计,为其他园区生态工业系统的构建提供了新思路^[51];杨青山等也结合九台市生态工业园对生态工业系统的建设模式进行了富有成效的探索^[52];肖松文等则结合矿业开发提出了构建矿业生态系统模式^[53]。可见我国生态工业系统研究已经不仅仅局限于理论的探讨,研究人员更多的从理论和实践相结合进行研究,使研究内容不断深入,研究广度不断拓宽。

在工业生态系统研究内容不断深入的同时,在借鉴国外研究方法的基础上,我国工业生态系统研究方法亦有所发展,周哲等在用工业代谢分析方法对煤炭利用过程进行了分析,并提出了相应的改进模型,从而发展了工业代谢分析这一主要分析手段;胡山鹰等提出了热力学分析及柔性分析研究方法^[46];陈定江则用数学非线性原理分析工业系统,并以枣庄为例搭建工业生态系统模型^[54];王兆华等运用经济学交易理论分析了工业生态系统,揭示了系统共生的机理^[55]。整体而言,我国工业生态系统的研究方法逐步由单纯的定性研究走向定性和定量相结合,单纯的理论探讨走向理论与实践相结合;我国工业生态系统研究的理论观点、方法既凝练了工业生态学的核心基础,又在国内的大量案例研究中有所发展。

3.2 以生态工业园为中心的生态工业建设实践

生态工业园区建设是解决结构性污染和区域性污染,调整产业结构和工业布局,实现我国新型工业化的一种新的发展模式。我国研究人员在实践基础上对生态工业园建设进行了积极的探索,取得了可喜的成果。

陈定江及李有润指出生态工业园区的设计和管理需要建立在定量分析的基础上,提出了引入逻辑表达式的生态工业园模型,为园区决策系统提供了核心模型^[54]。耿勇等则从工业生态学内涵出发,提出了建设工业生态园区的原则、策略和方法^[56];刘

力等亦提出了园区一体化管理模式,并应用到实践当中^[57]。与此同时,一些研究人员开始探索生态工业园区以及区内企业的规划设计原理和方法,并进行实证分析^[53,58~60]。此外,对生态工业园区的评价方法已取得了一定的进展^[61]。目前,我国已经形成一批具有代表性的国家生态工业示范园区^[62],如贵港国家生态工业(制糖)示范园区、南海国家生态工业园区、黄兴国家生态工业示范园、包头国家生态工业(铝业)示范园区以及石河子国家生态工业(造纸)示范园区等,为加快我国生态工业建设奠定了良好基础。

4 工业生态学研究展望

4.1 国际工业生态学发展趋势

国际工业生态学的研究已进入了一个崭新的发展时期,表现为理论和方法研究走向系统化,研究内容具体化和细化,并注重研究成果的可操作性和推广性。

对原料与能源流动的研究无疑有助于理解社会和自然系统之间的相互关系,但当前的研究还只是在概念层次,系统性的理论尚未成熟,缺乏可操作性^[20],因此今后还应注意以下 4 个方面^[63]:①工业代谢内部要素研究;②工业内部的原料及产品等形成闭环系统研究;③物质、能量的转化与量化分析;④工业系统边界范围划分方法的科学研究。

物质减量化的研究已经有了较大的进展,然而 Cleveland 及 Ruth 在综合分析大量物质减量化研究文献后指出,今后物质减量化研究应着重以下 3 个方面^[20]:①对于特定物质或企业的物质减量化研究有待深入;②由于缺乏物质减量化有效的评价方法,其经济效益难以估算,因此需加强评价方法及指标体系的研究;③环境影响评价是实现可持续发展的重要衡量手段,工业生产中不同物质的利用对环境的影响各异,目前物质的减量或替代的环境影响还未引起重视,加快这方面的研究将有利于各类物质的最有效利用。

促进工业体系进化以使工业系统能像自然生态系统那样运行的理论、方法与技术是技术变革和环境领域的主要研究内容,而这种研究一般都基于两个事实:其一,技术变革的速率及方向很大程度上决定着社会、经济活动的环境影响;其二,环境政策本身亦对技术变革的进程产生一定的制约或促进作用。因此,Adam B. Jaffe, Richard G. Newell 以及 Robert N. Stavins 指出,今后还应围绕上述两个事实开展技术变革和环境的研究,一方面加强各类生态技术的研究开发、生态技术在工业系统的应用研究、技术的影响评价分析等方面研究;另一方面还应加强环境政策与技术变革的关联、影响分析,环境政策的全球影响,环境政策的实施以及监测等方面的研究^[64]。

生命周期评价的研究已经从理论探讨走向应用推广,但是 Gregory A. 和 Keoleian 认为生命周期评价在以下 4 个方面还有待深入研究^[29]:①评价目标及范围的确定,目前还缺乏相对有效的方法确定和评价企业产品时间、空间范围以及产品系统边界,这应是今后研究亟待解决的;②数据收集,目前生命周期评价研究面临一个主要问题就是数据的获取,这制约着生命周期评价理论及方法的发展,同时对于数据指标如数据精度、完整性、偏差等方面尚缺乏理论和方法上的支撑;③数据评价,目前对资源评价、人类以及生态系统的评价缺乏先进、成熟的模型和方法,此外评价结果的不确定性分析这一环节还未深入到实际工作中;④信息转化,主要是解决各级决策者与执行者之间的信息丢失问题。

为环境而设计主要是强调开发产品时应考虑生态要求和经济要求之间的平衡,其在电子行业、机电行业以及办公家具等方面都得到了初步的应用。今后环境设计这一研究领域仍然需要关注以下问题^[20]:①与生命周期评价方法相类似,为环境而设计同样面临着数据的获取及其评价的困难,因此应积极发展有效的数据收集及评价理论和方法;②为环境而设计不应局限于产品设计本身,更应该关注产品消费的环境影响,因此今后应积极发展产品消费的环境影响评价理论和方法;③对产品环境效益采取单一的评价方法可能导致产品功能或服务问题,因此需要完善多方法综合分析的理论体系。

延伸生产者责任政策作为新的环境管理概念自 20 世纪 90 年代提出以后,在发达国家得到积极响应和实际的应用。目前延伸生产者责任还大多集中于生产者承担废弃产品回收的责任,特别是在工业系统的物质循环利用方面取得了初步的进步。但是由于缺乏完整的经济和环境效益指标,难以对延伸生产者责任政策进行全面客观评价。因此,如何建立和完善延伸生产者责任评价体系将成为以后研究迫切需要解决的问题^[5]。

生态工业园(工业共生系统)的研究一直是工业生态学研究的热点,目前已形成了初步的理论框架和实践方法。今后重点是开展理论和实践相结合的系统化研究,内容包括^[34]:①生态工业园基本理论;②生态工业园与周围社区的协调;③生态工业园的规划、设计和建设方案;④生态工业园类型及其发展战略;⑤相关政策和融资、招商问题;⑥生态工业园的管理、实施;⑦生态工业园内部副产品交换问题及传统工业园的生态化改造等。国际上普遍认为,生态工业园的研究热潮方兴未艾。

产品导向的环境政策已形成了初步的理论框架,并在欧美发达国家广为推行,但是不同国家制定的产品环境政策各异,造成了国家间的冲突,为了协调各个国家的环境产品政策冲突,迫切需要一个统一的规范,这需要今后各国研究人员进行协调研究^[65]。在积极开展产品导向的环境政策研究的同时也应在实践中积极推进这一政策,在实践中不断完善产品导向的环境政策。目前,产品导向的环境政策还主要是在发达国家推行,大部分发展中国家未开展相关研究,因此产品导向的环境政策在发展中

国家的推行无疑将是未来该领域一个重要的研究方向。

生态效益已经成为国际环境管理的新概念和新潮流,特别为国际政治组织 OECD、UNEP、APEC、EFEI 等大力推荐,并建议各国推广生态效益。作为“生态效益”概念的提出者,世界可持续工商理事会(WBCSD)认为,今后生态效益的研究仍然需要关注以下 12 个方面^[66]:生态效益宏观目标以及标准的制定;强化生态效益的综合措施监测;转变现有的国际贸易、金融体系以实现减少资源消耗和废弃物排放;消费观念的转变,转向消费更具生态效益、可持续性的产品和服务;制定实现生态效益的制度措施;高校开展生态效益以及可持续发展的课程教育以及项目研究;以生态效益作为投资准则的投资制度制定;生态效益的企业交流平台的构建;生态效益的评价方法;生态效益在企业运作、产品革新、市场战略中的应用;企业生态效益的报告制度;企业支持生态效益制度的实践措施。

4.2 我国工业生态学研究展望

我国工业生态学研究虽然取得了一定的成绩,但与西方发达国家研究相比,在研究内容、研究方法、实践探索等方面的深度和广度都相对有限。在研究内容方面,我国主要集中于工业生态系统和生态工业园的研究,而西方发达国家的工业生态学研究则涉及物质和能量流的分析、技术和产品设计、工业系统、生态工业园、政策和法律等多个层面,并已经初步形成了完整的理论框架;研究方法上,国外主要采用系统分析、定量和定性相结合的方法,国内主要还是因循国外的基本研究方法,没有实质性的突破。实践上,国内外都较为重视生态工业系统的构建以及生态工业园的规划建设,但是我国工业生态学实践开展相对比较晚,在发展规模和实践研究深度、广度上都有较大的差距。面对我国工业生态学研究相对落后的现状,需要不同学科的研究人员合作,共同构建具有我国特色的工业生态学研究体系,为实现经济和社会可持续发展的最终目标服务。

4.2.1 研究的总体框架 工业生态学是生态学、经济学、地理学等多学科与工业生产实践相结合的产物,它应由基础研究、政策研究、应用研究组成。

基础研究主要包括工业生态学的概念、原则、内在特性、基本理论和方法等。加强基础性研究是工业生态学这一学科发展的内在要求,同时也是实践发展的必然需要。工业生态学作为一门交叉学科,其基础研究应着眼于创造通用的思维方式以构筑各学科交流平台,以利于学科之间的沟通。

政策研究是利用基础研究成果形成的指导实践的政策,如法律政策、实施方法等。政策研究要立足于实际,着眼于解决发展中存在的问题;另一方面研究也要具有前瞻性,对工业生态学的未来做出合理的预测,从政策层面促进学科发展。

应用研究是将现有的知识和方法应用到实践中。它包括示范项目和实验,通过案例研究判断哪些实施方法是成功的,哪些是失败的。应用研究既是工业生态学发展的要求,又是学科发展的源泉。应用研究案例的层面、水平应是多样的,可从国家、区域、社区多层面,不同技术水平、不同工业部门进行试点建设,通过分析比较以便找出他们的不同,产生出指导性的原则和新的试点项目。

4.2.2 主要研究领域 鉴于我国的工业生态学研究起步较晚,研究范围相对有限,为加快提高我国工业生态学研究水平,需要根据我国特点对未来工业生态学研究进行合理部署,从基础理论、政策及应用等层面出发,积极开展工业生态学的理论研究和实践。

(1)基础研究 我国工业生态学的基础研究较为薄弱,要加快研究水平的提高,一方面需要积极跟踪国外研究进展,另一方面也要有选择的进行重点研究,以尽快在国际工业生态研究中占有一席之地。工业生态系统是工业生态学的核心,亦是研究热点,国内外众多的学者都对工业生态系统进行了探索性研究并且成果颇丰^[39],但是也还存在一些问题,我国可在以下领域深入研究并实现突破:①工业系统与自然系统关系;②系统的功能和结构;③系统“创建”理论;④系统的控制、运行机制;⑤系统评价。与此同时,作为工业系统的“血脉”——原料、能源和信息的研究日益受到重视,各国研究人员都已开始进行深入研究,结合国际发展趋势^[63],我国应重点研究:①原料、能量和信息流及其转化过程的优化;②原料、能源和信息流的要素组成及其替代;③原料、能量和信息的集成;④定量化分析及评价方法。

(2)政策研究 政策和法规是工业生态学应用的保障,国外对该领域研究相当重视并已在实践中推行^[67~69],而国内则刚刚开始涉及这方面的研究^[70]。因此,我国工业生态学相关政策和法规研究可谓任重道远。当务之急需要研究:①国家和地方政策。借鉴发达国家经验,制定适合我国国情的延伸生产者责任政策、产品导向的环境政策;同时,应积极制定地方性政策,以补充中央政策和行业政策的不足,促进企业界和政府之间的沟通和交流;②资源、能源政策。运用“生态效益”概念,制定相应的资源和能源政策,有效地促进污染防治,提高资源和能源利用效率;③生态工业发展的投融资政策和其他优惠与鼓励政策;④环境法规的修订和完善;⑤政策、法规及其组织的一体化问题研究。通过协调,在政府主管环境保护和经济发展的部门之间达成一致的共识,以解决目前工业部门面临的各种环境问题,促进工业健康持续发展。

(3)应用研究 以生态工业园为核心的工业生态学实践正在我国如火如荼地进行,取得了相当大的成就。目前,我国已建立了多个国家级示范性生态工业园^[62],同时地方上也掀起生态工业园的建设热潮^[71]。但是生态工业园建设实践中面临诸多问题

需要深入研究:①生态工业园的基本理论,我国生态工业园的类型及其发展战略;②生态工业园的规划、设计和建设;③产业链、企业链的构筑;④园区的运营管理;⑤旧工业区的生态改造。而生态技术是生态工业园建设的基础,亦是实现工业生态化的根基,对其进行深入研究是十分必要的。我国生态技术的研究及推广虽已有了初步的进展^[39],但是任务仍然艰巨,根据我国实情,需要在以下关键技术领域进行深入地研究:①清洁生产技术;②废物资源化技术;③再循环利用技术;④物质和能量集成技术;⑤污染治理技术;⑥生态无害化技术。

References:

- [1] Frosch R, Gallopoulos N. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 1989, **261**(3):144~152.
- [2] <http://www.mit.edu/journals/jiec/jie-cal.html>.
- [3] U. S. Interagency Working Group on Industrial Ecology. *Material and energy flows: industrial ecology material and energy flows in the United State*. Washington D. C: the National Academy of Science of the USA, 2000.
- [4] <http://www.yale.edu/is4ie/thesis>.
- [5] Deng N S and Wu f. *Industrial ecology-theory and application*. Beijing: Chemical industry press, 2002. 108~299.
- [6] Kumar C, Patel N. *Industrial ecology proceeding of colloquium*. Washington DC: the National Academy of Science of the USA, 1991.
- [7] Allenby B R, Richards D J. *The greening of industrial ecosystems*. Washington DC: National Academy Press, 1994. <http://www.nap.edu/openbook>.
- [8] *The international journal of life cycle assessment*. <http://www.ecomed.de/journals/lca/aim.hmt>.
- [9] <http://www.elsevier.com/inca/publications>.
- [10] *Journal of Industrial Ecology web site*. <http://mit.edu/journals.jiec/jie-cal.html>.
- [11] Cao X J. The final resolution of environment & development problems. *Resource and Environment*, 2000, **11**:15~17.
- [12] *The International Society for Industrial Ecology*. <http://www.yale.edu/is4ie/thesis>.
- [13] Ayres R U. *Industrial metabolism: theory and policy*. <http://www.nap.edu/openbook>.
- [14] Andersen O. Transport of fish from Norway: energy analysis using industrial ecology as the framework. *Journal of Cleaner Production*, 2002, **10**:581~588.
- [15] Graedel T E, Bertram M, Fusea K, et al. The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles. *Ecological Economics*, 2002, **42**: 9~26.
- [16] Jouni K, Margareta W, Iika S, et al. Industrial ecosystem in the Finnish forest industry: using the material and energy flow model of a forest ecosystem in a forest industry system. *Ecological Economics*, 2001, **39**:145~161.
- [17] Joosten L J. Total Materials Consumption an Estimation Methodology and Example Using Lead—A Materials Flows Analysis. *Resour Conseru Recycling*, 1999, **27**:249.
- [18] Joosten L A J. The Materials Flow of Plastic in Holand. *Resour Conseru Recycling*, 2000, **30**:135.
- [19] Michaelis P, Jackson T. Materias Flow of Metal in the U. K. *Resour Conseru Recycling*, 2000, **29**:131.
- [20] Hond F. Industrial ecology: a review. *Reg. Environ. Change*, 2000, **1**(2):60~69.
- [21] Erkman S, Xu K X. *Industrial ecology*. Beijing: Economy Daily Press, 1999. 101.
- [22] Ausubel H, Langford H D. *Technological trajectories and the human environment*. Washington D C: National Academy Press, 1997. 14~32.
- [23] Masaru Y. *From end-of-pipe technology to clean technology: effects of environmental regulation on technological change in the Chlor-Alkali industry in Japan and Western Europe*. <http://www.aee.u-tokyo.ac.jp>.
- [24] David A S. *Greening the tiger: social movements' influence on adoption of environmental technologies in the pulp and paper industries of Australia, Indonesia and Thailand*. <http://www.umi.com/hp/Products/DisExpress.html>.
- [25] Herrchen M. A framework for life-cycle impact assessment developed by the fraunhofer-gesellschaft part A: the conceptual framework. *Chemosphere*, 1997, **35**: 2589.
- [26] Graedel T E, Allenby B R, Comrie P R. Matrix approaches to abridged life cycle assessment. *Environmental Science and Technology*, 1995, (29):134~139.
- [27] Fava J A. A technical framework for life-cycle assessments. *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*. Washington D. C, National Academy Press, 1991.
- [28] Deng N S and Wu f. *Industrial ecology—theory and application*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002, **5**:164.
- [29] Andy G, Gregory A K. Industrial ecology: an introduction. *Pollution Prevention and Industrial Ecology*, 1995, (11):12~32.
- [30] USEPA. *Design for the environment*. Washington D. C: the National Academy of Science of the USA, 1999, 11.

- [31] Allenby B R. Design for environment; a tool whose time has come. *Semiconductor Safety Association Journal*, 1991, **9**: 5~9.
- [32] Allenby B R, Ann F. Design for environment—a new strategy for environmental management. *Pollution Prevention Review*, 1991.
- [33] Glantschnig W J, Sekutowski J C. Design for environment: philosophy, program and issues. In *green engineering: designing products for environmental compatibility*, edited by D. Navin-Chandra. New York: Academic Press, 1997.
- [34] Ernest L, Geng Y. *Industrial ecology and eco-industrial park*. Beijing: Chemical industry press, 2003. 1.
- [35] Yang Y. Commentary of eco-industrial park. *Economic geography*, 2000, **20**(4): 31~35.
- [36] Audra J, Potts C. Choctaw eco-industrial parks: an ecological approach to industrial land-use planning and design. *Landscape and Urban Planning*, 1998, **42**: 239~257.
- [37] Matton T. Transformation process towards sustainable industrial estates. Paper presented at the international conference on industrial ecology and sustainability. Troyes, France, 1999.
- [38] Siikavitra H. *The 10th international arctic workshop in industrial engineering & management*. Messia, 2000: 18.
- [39] Li Y R, Hu S Y. The development and future of Eco-industry & industrial ecology. *Scientific foundation of China*, 2003, (4): 208~210.
- [40] *Nordic product-oriented environmental strategy*. 2001: 3. http://www.norden.org/miljoe/sk/pems_engelsk.asp.
- [41] *Background information integrated product policy*. http://www.cfsd.org.uk/ipp-epd_background.html.
- [42] Kristense P. *The Danish product oriented environmental initiative—scope and challenges*. Danish Environmental protection agency. Denmark.
- [43] *Product oriented environmental policy in Norway Status*. <http://www.iisd.ca/linkages/consume/norpro.htm>.
- [44] Tang H L, Sun D S. Industrial eco-system and its construction. *Chinese environmental protection industry*, 2003, (2): 14~16.
- [45] Wang Z Y. Philosophical understanding to industry ecological system and its characteristics. *Environmental protection*, 2002, (2): 43~45.
- [46] Hu S Y, Li Y R, Shen J Z. Method and application and eco-industry system. *Environmental protection*, 2003, (1): 16~19.
- [47] Wu W, Wang H C, Chen M Y. A brief discussion on operation and control of the ecological industrial system. *Industrial Engineering and Management*, 2002, **4**: 1~4.
- [48] Wu W, Chen G Y, Chen M Y. The evaluation of industrial system. *Science & Scientific Technology*, 2002, (1): 72~74.
- [49] Wang Z H, Ying J H, Wu C Y. Research on the structure model of the Eco-industrial chain in the eco-industrial parks. *The Soft-Science of China*, 2003, **10**: 149~152.
- [50] Zhou Z, Li Y R. Coal-based industrial metabolism and ecological optimization. *Computers and Applied Chemistry*, 2001, **18**(3): 193~198.
- [51] Xue D F, Luo H, Zhou Z. Ecological planning of Nanhai eco-industrial park. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(2): 285~288.
- [52] Yang Q S, Xu X P, Wang R C. The theory of industrial ecology and eco-industrial park design——a case study of Jiutai, Jinlin province. *Economic geography*, 2000, **9**: 585~588.
- [53] Xiao S W, Zhang J S, Zeng B W. Industry eco-system and sustainable development of mining. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2001, **3**: 4~6.
- [54] Chen D J and Li Y R. A MINLP model of eco-industrial parks. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2002, **2**(1): 75~80.
- [55] Wang Z H and Wu C Y. The intergrowth mechanism of enterprise in eco-industrial parks based on the theory of transaction costs. *Science & Scientific Technology*, 2002, **8**: 9~13.
- [56] Geng Y and Wu C Y. Running and managing the industrial parks by the theory of industrial ecology. *Acta Central South University of Technology*, 2000, **6**: 12~15.
- [57] Liu L, Zhen J S. Industrial ecology perspective and eco-industrial park model. *Economic geography*, 2001, **21**(5): 620~623.
- [58] Ma W J and Wang J F. The planning of eco-industrial park of Jiangshan. *UNEP Industry and Environment*, 2003, (Sup): 108~111.
- [59] Wu Y B and Feng B. Primary study on eco-industrial park construction in Suzhou new district. *Technique of Prevention*, 2003, **16**(3): 23~25.
- [60] Wang L M and Zhang J T. A research on ecological theories and its applications in the development of eco-industrial park. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(1): 129~134.
- [61] Yuan Z L. Study on assessment indicator system of eco-industrial park. *Environment protection*, 2003, (3): 38~40.
- [62] Wang R X, Luo H, Peng Y D. Recent evolution of national eco-industrial demonstration parks. *Environment protection*, 2003, **3**: 35~38.
- [63] Bernardini O, Galli R. Dematerialization: long term trends in the intensity of use of materials and energy. *Futures*, 1993, (3): 431~448.
- [64] Adam B J, Richard G N, Robert N S. *Environmental policy and technological change*. <http://www.feem.it/web/activ/-activ.html>.
- [65] Frank de Bakker. *Product-oriented environmental management*. <http://www.tup.utwente.nl/uk/catalogue/management/poem/>.
- [66] Stephan S. *Eco-efficiency*. *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*, 2000, **10**: 29.

- [67] Robert H. *Enforcement of compliance with environmental regulations at department of energy facilities*. University of California, 2003.
- [68] John H. *Socio-ecological principles and indicators for sustainability*. Goteborg University, Sweden, 1995.
- [69] Paul R. *Green gold on variations of truth in plantation forestry*. Wageningen Agricultural University, The Netherlands. <http://www.nhbs.com>.
- [70] Wang G, Wan Z Q, Qian S H. The law guarantee of eco-park in China. *Science, Technology and Law*, 2003, 2: 79~83.
- [71] Geng Y, Wu C Y. A review of the development of eco-industrial park. *UNEP Industry and Environment*(added), 2003. 111~113.

参考文献:

- [5] 邓南圣, 吴峰. 工业生态学——理论与应用. 北京: 化学工业出版社, 2002, 5: 108~299.
- [11] 曹学军. 环境与发展问题的最终解决方案——工业生态学. *资源与环境*, 2000, (11): 15~17.
- [21] S. Erkman 著. 徐兴元译. 工业生态学. 北京: 经济日报出版社, 1999. 101.
- [34] Ernest Lowe, 耿勇. 工业生态学和生态工业园. 北京: 化学工业出版社, 2003. 1.
- [35] 杨咏. 生态工业园区述评. *经济地理*, 2000, 20(4): 31~35.
- [39] 李有润, 胡山鹰, 等. 工业生态学及生态工业的研究现状及展望. *中国科学基金*, 2003, (2): 208~210.
- [44] 汤慧兰, 孙德生. 工业生态系统及其建设. *中国环保产业*, 2003, (2): 14~16.
- [45] 王子彦. 对工业生态系统及其特性的哲学理解. *环境保护*, 2002, (2): 43~45.
- [46] 胡山鹰, 李有润, 沈静珠. 生态工业系统集成方法与应用. *环境保护*, 2003, (1): 16~19.
- [47] 吴伟, 王浣尘, 陈明义. 略论生态工业系统的运行和控制. *工业工程与管理*, 2002, (4): 1~4.
- [48] 吴伟, 陈功玉, 陈明义. 生态工业系统的综合评价. *科学学与科学技术管理*, 2002, (1): 72~74.
- [49] 王兆华, 尹建华, 武春友. 生态工业园中生态产业链结构模型研究. *中国软科学*, 2003, (10): 149~152.
- [50] 周哲, 李有润, 等. 煤工业的代谢分析及其生态优化. *计算机与应用化学*, 2001, 18(3): 193~198.
- [51] 薛东峰, 罗宏, 周哲. 南海生态工业园的生态规划. *环境科学学报*, 2003, 23(2): 285~288.
- [52] 杨青山, 徐效坡, 王荣成. 工业生态学理论与城市生态工业园区设计研究——以吉林省九台市为例. *经济地理*, 2002, 22(5): 585~588.
- [53] 肖松文, 张泾生, 曾北危. 产业生态系统与矿业可持续发展. *矿冶工程*, 2001, 21(1): 4~6.
- [54] 陈定江, 李有润. 生态工业园的 MINLP 模型. *过程工程学报*, 2002, 2(1): 75~80.
- [55] 王兆华, 武春友. 基于交易费用理论的生态工业园中企业共生机理研究. *科学学与科学技术管理*, 2002, (8): 9~13.
- [56] 耿勇, 武春友. 利用工业生态学理论运营和管理工业园区. *中南工业大学学报(社会科学版)*, 2000, 6(1): 12~15.
- [57] 刘力, 郑京淑. 产业生态研究与生态工业园区开发模式初探. *经济地理*, 2001, 21(5): 620~623.
- [58] 马蔚均, 王江锋, 等. 江山生态工业园区规划. *UNEP 产业与环境*, 2003, (增刊): 108~111.
- [59] 吴云波, 冯彬. 苏州新区生态工业园建设初探. *污染防治技术*, 2003, 16(3): 23~25.
- [60] 王灵梅, 张金屯. 生态学理论在发展生态工业园中的应用研究——以朔州生态工业园为实例. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 129~134.
- [67] 元炯亮. 生态工业园区评价指标体系研究. *环境保护*, 2003, (3): 38~40.
- [62] 王瑞贤, 罗宏, 彭应登. 国家生态工业示范园区建设的新进展. *环境保护*, 2003, (3): 35~38.
- [70] 王干, 万志前, 钱书华. 我国生态工业园区的法律制度保障. *科技与法律*. 2003, (2): 79~83.
- [71] 耿勇, 武春友. 国内外生态工业园发展评述. *UNEP 产业与环境(增刊)*, 2003: 111~113.