

·学科进展与展望·

工业生态学及生态工业的研究现状及展望

李有润 胡山鹰 沈静珠 陈定江

(清华大学化工系生态工业研究中心,北京 100084)

[摘要] 生态工业是一种新型工业发展模式。本文简要介绍了生态工业的理论研究和实践的进展,国内主要介绍了清华大学化工系生态工业研究中心所做的相关工作,最后从生态工业系统工程的角度提出若干要进行重点研究的问题。

[关键词] 生态工业,工业生态学,可持续发展

1 工业生态学和生态工业的国外研究现状

为解决工业生产造成的环境问题,实现可持续发展,需要在科学技术和政策法规等不同的层面上采取具体措施,其中技术措施可分为“末端治理——清洁生产——生态工业”三个不同的层次。末端治理不能从根本上解决污染问题。清洁生产通过对工艺流程、生产设备、产品设计、原材料等的改进或改变,来提高生产全过程中资源的利用效率,从源头预防污染和减少废物,但传统上清洁生产仅在企业层次开展。生态工业(Eco-industry)由企业层次上升到企业群落、城市或更大的范围,其基本思想是仿照自然界生态系统中物质流动的方式来重新规划工业生产、消费和废物处置系统。它从整体出发,通过成员的互利共生、绿色技术的使用及信息的共享等手段,实现系统内的物质循环和能量高效利用,达到环境与经济效益的双赢。

生态工业园区是生态工业的重要实践形式,它是由若干企业(有时也包括自然生态和居民区共同)构成的一个区域性系统。系统成员彼此合作并与地方社区协调发展,它们有计划地进行物质和能量交换,高效分享资源,寻求资源和能源消耗最小化,废物产生最小化,努力建设可持续发展的经济、生态和社会关系。生态工业的建设目前主要是以生态工业园区的形式进行,今后将逐步从功能经济、物质减量化和非碳能源利用等多方面展开。

由于生态工业是一个复杂的大系统,它需要一

个科学有效的理论进行指导。应运而生的工业生态学(Industrial Ecology)是生态工业的学科基础。它是生态、环境、能源、经济、信息技术、系统工程等多学科的交叉融合,研究内容涉及微观的分子设计、中观的过程强化以及宏观的系统分析集成和循环经济。工业生态学作为一个独立的前沿的研究学科正在引起国外从政府、大学、研究机构到大公司和市政当局的高度重视。

美国一些著名的大学在加紧开展有关生态工业的研究。麻省理工学院(MIT)于1997年在全美首先开设了工业生态学的课程。耶鲁大学于1997年组织出版第一份工业生态学杂志(J. of Industrial Ecology);1998年9月耶鲁大学成立了工业生态学研究中心。康奈尔大学在2001年成立了美国国家生态工业发展研究中心。

1998年美国白宫环境质量委员会召开专门会议讨论生态工业的研究和发展。美国国家科学基金会于1998年10月资助了18项有关生态工业的基础研究课题,课题涉及到的内容很广泛。2000年工业生态学国际学会(ISIE, International Society for Industrial Ecology)成立。

纵观国外在工业生态学方面的基础研究,其方向主要集中在以下几个方面:

(1)研究可减轻工业对环境影响的具体技术措施,包括绿色工艺、原子节约工艺、废物零排放系统、物质替代、物质减量化和功能经济;

(2)研究对整个工业生态过程进行分析、监测和

本文于2003年4月25日收到。

评价的方法,包括物流平衡分析、工业代谢、产品或过程的生命周期分析与评价、工业生态指标体系的建立等;

(3)研究工业系统集成方法,包括物质集成、能量集成、水集成、信息集成和数学优化模型等;

(4)研究可促进生态工业实现的制度上的措施,包括如何在市场规则、财务制度、法律法规方面做出相应的调整以使生态工业的思想可以贯穿整个生产和生活过程。

除了理论研究以外,国外也在积极开展生态工业园区的实践。20世纪70年代初丹麦建立的卡伦堡工业园区经过几十年不断发展,成为生态工业园区的典范。美国是当前世界上最为积极投身于生态工业园区规划和建设的国家之一。从1993年开始,美国已有20个城市的市政当局与大公司合作规划建设生态工业园区。1994年美国可持续发展总统委员会资助进行4个生态工业园区示范项目的建设。美国环境署(EPA)也于1999年资助两个生态工业园区计划。加拿大、法国、日本等发达国家也积极开展类似的项目。一些发展中国家如泰国、印度尼西亚、菲律宾、纳米比亚和南非等国家已经开始考虑进行生态工业园区的建设。

2 国内主要研究成果

1999年清华大学化工系在国家自然科学基金重点项目“以经济和环境为优化目标的过程集成智能方法”的资助下,在研究中开展了生态工业系统集成方法的研究,并在国家环保总局及一些地方政府的领导和支持下开展了若干生态工业园区的规划和建设工作。2001年4月清华大学化工系成立了生态工业研究中心,积极推进我国工业生态学的理论研究和生态工业的建设实践工作,取得了一定的研究成果。

在工业生态学的理论研究方面,清华大学化工系生态工业研究中心开展了如下工作:

(1)进行多产品共生反应路径集成方法研究^[1],通过多个产品共生达到资源充分利用和原子经济的目标;进行多目标反应器网络优化综合研究,以寻求反应过程中废物的最少生成^[2]。

(2)在工业代谢分析的基础上引入输入输出分析与图论,提出了反映工业系统物流网络结构和物质利用特征的分析方法,对于深入了解生态工业系统的物流特性和提出改进措施有重要指导作用^[3]。

(3)开展了生态工业系统中物质、能量集成方法

研究,提出包括逻辑表达式约束的混合整数非线性规划数学模型,并用于生态工业园区的规划^[4];对于系统信息集成问题,有针对性地设计开发了生态工业园区信息系统^[5]。

(4)为研究生态工业系统的操作柔性,开展了在随机和模糊不确定条件下的系统综合和优化操作方法研究^[6,7]。

(5)利用热力学概念焓(emergy为任何资源、商品或劳务在形成过程中直接或间接使用的太阳能。emergy在国内有译为能值的)分析工业系统,特别是分析废物的处理和再利用、再循环、再回收对整个系统效率的影响,从而更深入认识可持续发展的工业体系的本质,并尝试提出了基于分析的适用于工业系统的可持续发展指标^[8]。

(6)中心近年来开始探索应用复杂适应系统理论研究生态工业系统的演化进程及其影响因素^[3]。生态工业系统是一个复杂适应系统,它通过成员的自适应行为、成员间以及成员与环境间的复杂交互作用逐步演化。这项研究将有助于促进生态工业系统自下而上的自组织形成过程。

以上这些理论研究对于生态工业系统的分析、集成和调控有重要指导意义。

在进行理论和方法研究的同时,清华大学生态工业研究中心还开展了若干生态工业园区的规划和研究工作,包括:

- (1)浙江衢州沈家生态工业园区规划;
- (2)广东南海环保产业生态工业园区规划;
- (3)长沙黄兴生态工业园区规划;
- (4)山东鲁北生态工业模式研究^[9];
- (5)贵阳循环经济型生态城市规划;
- (6)贵阳(国家)磷化工生态工业园区规划。

其中在鲁北生态工业园区模型研究项目中,全面分析了“磷铵——水泥——硫酸”联产、海水多级利用和盐碱电联产三条产业链中的物质循环高效利用的代谢过程以及产业共生柔性等,指出鲁北生态工业园区是我国联合企业型生态工业和循环经济的典范。

国家有关部门已经注意到发展生态工业、建立区域性产业共生系统对于解决国内众多工业园区的污染问题具有重要意义。在国家环保总局支持下,广西贵港开始建设以甘蔗制糖企业为核心的生态工业示范园区。浙江衢州、广东南海、内蒙古包头、新疆石河子等地纷纷启动了各自的生态工业园区规划与建设项目。这些已完成规划,正进入建设阶段。

国内中国环境科学研究院、中科院生态研究中心、中科院过程工程研究所、东北大学等科研单位均相继开展了生态工业园区的规划和工业生态学的研究工作,对于促进我国生态工业的发展起到了重要作用。

3 生态工业研究展望

生态工业是一种新型工业生产模式,它的实施需在各有关领域大力开展理论研究和实践工作,如政策法规和管理方法、绿色资源转化技术、生态过程工业技术的研究等等。同时,由于生态工业系统是由若干企业组成的大尺度的复杂系统,为促成系统的各成员间的物质、能量和信息交换,从系统科学和工程的角度开展研究也是很重要的。

生态工业系统科学问题包括系统分析、系统集成和演化三个方面,对其中的一些重点、难点问题应当投入科研力量提前加以深入研究,为更好地指导生态工业的发展奠定理论基础。比如:

(1)生态工业系统的演化是一个自适应、自组织的过程,应基于复杂适应系统的理论建立基于智能主体(agent)的系统模型,研究系统内企业主体的自适应反馈机制,研究企业间的产品共生与相互作用、企业与外部环境的相互作用等对系统的影响,确定适于生态工业系统发展的外部环境、政策条件和最优的系统结构。

(2)生态工业系统中由于企业间的相互关联增加了系统的刚性,一个企业的波动变化将会影响其它企业乃至系统的运行。因此要针对系统外部和内部的各种随机、模糊的不确定因素,应用模糊系统理论和随机优化方法分析系统的柔性,提出构造具有充分柔性的生态工业系统的方法。

(3)对生态工业系统的热力学特征及热力学目标加以研究,应用熵、焓焔等热力学函数分析系统内物质、能量信息转换过程的特征,并与自然生态系统

热力学特征相比较,以寻求达到可持续发展的热力学途径和目标。

国家自然科学基金的支持对于这些研究的开展具有十分重要的意义。目前,我国正处于经济高速发展的时期,要吸取先污染后治理的经验教训,如同中国共产党第十六次代表大会所指出的,要“走出一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化路子”。为此应当根据我国的实际情况尽早在工业体系中引入生态工业的理念,高起点地实现现代工业的可持续发展。这就要求我国的科学工作者积极开展多学科交叉的生态工业的理论和方法研究,为生态工业的发展奠定基础,促进我国生态工业的建设。

参 考 文 献

- [1] Li M H, Li Y R, Hu S Y et al. Hierarchical optimization method for reaction path synthesis. *Industry & Chem. Engng.*, 2000, 39:4 315—4 319.
- [2] Hua K L, Li Y R, Shen J Z et al. Three distribution-parameter general model for reactor network synthesis. *Computers & Chem. Eng.* 2000, suppl.:217—223.
- [3] 陈定江. 工业生态系统分析集成与复杂性研究. 清华大学博士学位论文, 2003.
- [4] 陈定江, 李有润, 沈静珠等. 生态工业园区的 MINLP 模型. *过程工程学报*, 2001, 2(1):75—80.
- [5] 王韬, 沈静珠, 李有润等. 生态工业园区信息库的分析与设计. *过程系统工程年会*, 青岛, 2001.
- [6] Hou K F, Li Y R, Shen J Z et al. Delayed sampling approach to stochastic programming in chemical process. *Computers & Chem. Eng.*, 2000, suppl.: 619—624.
- [7] 房鑫, 李有润, 沈静珠等. 两种不确定条件下工业园区的优化组合. *化工学报*, 2002, 53(9):937—941.
- [8] 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*, 2002(accepted for publication).
- [9] 胡山鹰, 李有润, 梁日忠等. 中国鲁北生态工业模式研究报告. 清华大学化工系生态工业研究中心, 2003.

ECO-INDUSTRY—A NEW PATTERN FOR INDUSTRIAL DEVELOPMENT

Li Yourun Hu Shanying Shen Jingzhu Chen Dingjiang

(Center for Industrial Ecology, Chemical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Eco-industry is a new pattern for industrial development. This paper briefly reviews the progress of eco-industry. The research work of Center for Industrial Ecology, Chem. Eng. Dept., Tsinghua University is specially introduced. Several academic issues which need further research are suggested from a system engineering viewpoint.

Key words eco-industry, industrial ecology, sustainable development