

产业生态学最新研究进展及趋势展望

袁增伟¹, 毕 军^{2, *}

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 污染控制与资源化研究
国家重点实验室, 环境管理与政策研究中心, 南京大学环境学院, 南京 210093)

摘要:传统末端治理方式的弊端和清洁生产技术的局限性促使人们探求新的污染防治模式, 生态学尤其是仿生学的发展激发了人们仿照自然生态系统来改造人类生产系统的想法, 基于这种背景, 产业生态学应运而生。分析了产业生态学诞生的背景及其形成过程, 并全面系统论述了产业生态学领域的国内外进展, 识别了目前我国该领域面临的问题与困境, 并给出了对策建议。在此基础上, 文章从学科发展的角度对产业生态学的发展趋势和前景作了展望。

关键词:产业生态学; 生态工业园区; 产业共生

文章编号: 1000-0933(2006)08-2709-07 **中图分类号:** Q143 **文献标识码:** A

Progress and perspectives of industrial ecology: a critical review

YUAN Zeng-Wei¹, BI Jun^{2, *} (1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, Center for Environmental Management and Policy, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2709 ~ 2715.

Abstract: The limitations of end-of-pipe solution and cleaner production (CP) technologies inspired people of new thinking in pollution prevention and control. Formally proposed in 1989, Industrial Ecology is an emerging field that focuses on the twin goals of economic development and environmental quality. The concept requires that an industrial system be viewed not in isolation from its surrounding systems, but in concert with them. It is a system view in which one seeks to optimize the total materials cycle, from virgin material, to finished material, to component, to product, to obsolete product, and to ultimate disposal. In the past two decades, industrial ecology made an astonishing progress in both theory and practices. The paper provides a critical review of its background and development, and specifically discusses its opportunities and challenges in China, with an emphasis on eco-industrial parks (EIP). In addition, the paper also explores the future of industrial ecology from the perspectives of academic merits and practices in the real world. It is expected that industrial ecology will be widely applied in not only developing countries, but developed countries as well. Its philosophy particularly finds its most possible application in the promotion of circular economy in China. So far, China has the most EIPs in the world. Central government of China is taking circular economy as one of key components in its second scientific development strategy. In terms of methodology, a new trend is the introduction of social sciences into the analytical framework. More quantitative analysis and in-depth work need to be done in the next stage to turn ideas into results. However, there is still debate about if IE can be called a paradigm. Such doubts in most cases come from economists and ecologists. Therefore, industrial ecologists owe them satisfactory answers not only in theory, but in practices as well.

Key words: Industrial Ecology (IE); Eco-Industrial Park (EIP); industrial symbiosis

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40501027; 40471057)

收稿日期: 2005-06-28; **修订日期:** 2006-05-31

作者简介: 袁增伟(1975 ~), 男, 河南省平顶山人, 博士, 主要从事产业生态学与循环经济、环境规划与管理研究. E-mail: yuanzw@tsinghua.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jbi@nju.edu.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40501027, 40471057)

Received date: 2005-06-28; **Accepted date:** 2006-05-31

Biography: YUAN Zeng-Wei, Ph.D., mainly engaged in industrial ecology, circular economy, environmental planning and management.

20 世纪后半期,末端治理的弊端如成本高、效果不明显、治标不治本且容易造成二次污染等日益凸现;同时,清洁生产的局限性(偏重于局部工艺和技术而不是整个系统)也愈益明显;加上现实中环境保护活动的边际效益日益萎缩,并且其边际成本业已逐渐增加到人们无法承受的地步。种种现象和问题使人们认识到以分散式污染防治为特征的末端治理和清洁生产已经不能适应日益多样化、复杂化和区域化(全球化)的环境问题。在这种情况下,人们开始将视角转向经济发展活动本身,希望能从经济发展的自身规律中找到解决环境污染问题的根源解。同期,生态学尤其是仿生学的突飞猛进,从而激发了人们模仿自然生态系统物质循环原理来改造人类生产系统,从而将其构筑成一个物质闭路循环系统的想法,于是,在 20 世纪 80 年代末 90 年代初,产业生态学作为这一思维变迁的集中体现应运而生。本文介绍了产业生态学的源起和发展现状,并对其发展态势做了简要的评述和展望。

2 产业生态学的源起

产业生态学是伴随着人类环境保护思想的演变而逐渐形成和发展起来的,从某种程度上可以说,产业生态学的发展史其实也就是人类环境保护思维的演变史。这里将其演变过程划分为 4 个阶段:孕育阶段、萌芽阶段、诞生阶段和快速发展阶段。

2.1 孕育阶段(20 世纪 50 年代~70 年代初期)

早在生态学发展的初期,Howard Odum 和 Ramon Margalef 等先驱们就已经意识到“人类活动的生物物理基质同样服从于自然生态系统的规律”^[1]。但在当时,生态学家们更多地将精力集中在与自然生态系统相似的农业生态系统研究方面。一直到 20 世纪 50、60 年代,生态学蓬勃发展,尤其是仿生学的快速发展,才使人们产生了能否模仿自然生态系统,按照其物质循环和能量流动的规律重构产业系统的想法。

20 世纪 60 年代末,日本通产省政府注意到工业化的环境代价相当高,于是指定其隶属机构——产业机构咨询委员会开展一次前瞻性研究,并成立了一个由 50 位专家组成的技术组,这些专家分别来自实业界、政府高级官员、消费者协会等不同领域。该课题主要研究发展那些对原料消耗依赖程度小而更多地依靠信息与知识的经济部门,以便提升日本经济发展质量的可能性。1971 年 5 月,该委员会公开发表了题为《70 年代前瞻》的报告,根据报告建议,通产省成立了 15 个工作小组进行前瞻课题研究,产业-生态工作小组是其中之一。该小组于 1972 年 5 月发表了题为《产业生态学:生态学引入产业政策的引论》的研究报告,虽然该小组最终没有能够持续下来,但毫无疑问,他们的工作为日后的很多研究奠定了基础。由于这一阶段的很多提法都已经带有明显的产业生态学思想,并已经开始进行有意识的研究行为,但又没有明确表达,因此,该阶段被认为是产业生态学的孕育阶段。

2.2 萌芽阶段(20 世纪 70 年中期~80 年代中期)

20 世纪 70 年代以后,产业生态学的思想已经初具雏形。Ted Taylor 于 1972 年提出了一些与目前的产业生态学思想十分接近的观念^[2]。1976 年,在联合国欧洲经济委员会组织的“技术与无废料生产”报告会上,与会者提出了很多类似于目前清洁生产和产业生态学概念的观点;之后,在 1977 年的德国地球学年会上,美国地球化学家 Preston Cloud 在其论文中首先使用了“产业生态学”一词^[3]。紧接着,1978 年日本通产省发起了提高能源使用效率的“月光计划”,1980 年又创立了“新能源发展组织”,不久后又发起了“全面环境技术项目”,这一系列活动大大推动了产业生态学思想的形成。

20 世纪 80 年代初期,产业生态学的典型代表是“比利时生态系统”研究,1983 年比利时的政治研究与信息中心出版发行题为《比利时生态系统:产业生态学研究》的专著,该书中反映了生物、化学、经济学等领域 6 位学者对产业系统存在问题的思考^[4]。其基本出发点是“深信生态学的观念和方法是可以运用到现代产业社会的运行机制研究中去,并以此指导新时代某些方面的发展”。该书清楚地表述了产业生态学的基本原则:“用生态学观点分析产业活动,就是要对企业与其供应商、产品流通销售网络以及与使用其产品的消费者们之间的关系进行研究,应该大致地把产业社会定义为这样一个生态系统:由其生产能力、流通与消费渠道、所运用的原料和能源的储备、产生的废弃物所构成的总和。用物质与能量的流动来表述,事实上为人们提供了经

济活动物质形态的事实,并表明社会是如何来管理其物质资源的”。

2.3 诞生阶段(20 世纪 80 年代末 ~ 90 年代初)

然而,真正形成“产业生态学”的核心思想是在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初。这个时期以 R. Frosch 等人开展的“产业代谢”研究为代表,该研究旨在模拟生物新陈代谢和生态系统的循环再生过程。1989 年 9 月, Frosch 和 Gallopoulos 在《科学的美国人》发表题为“制造业的战略”一文,正式提出产业生态学概念,认为产业系统应向自然生态系统学习,并可以建立类似于自然生态系统的产业生态系统。在这样的系统中,产业企业之间相互依存、互相联系,构成一个复合的大系统^[5]。实际上,20 世纪 80 年代末期,美国工程科学院就曾发起过“科技与环境”计划,并于 1989 年出版了其第一个报告文集《科技与环境》,其中已经包含了许多向产业生态学演变观点,但由于会议人数很少(不超过 20 人),并没有引起很大的关注^[6]。

1990 年,美国国家科学院与贝尔实验室共同组织了全球首次“产业生态学”论坛,对产业生态学的概念、内容和方法及应用前景进行了全面系统地总结,基本上形成了产业生态学的概念框架。1991 年 5 月,美国科学院在华盛顿组织召开产业生态学研讨会,罗伯特出任首任助理主任,他在会议上发言时指出,产业生态学思想在空中已经飘忽了几十年了,特别是从联合国环境署成立以来^[7]。

2.4 蓬勃发展的阶段(20 世纪 90 年代 ~)

20 世纪 90 年代以后,产业生态学研究进入蓬勃发展时期。期间,国际上产业生态学发展历程中的一系列重大事件见下表 1。

表 1 国际产业生态学领域重大事件(1993 ~ 2001)

Table 1 Key events of industrial ecology development between 1993 and 2001

年份 Year	事件及内容 Key events
1993	清洁生产杂志(International Journal of Cleaner Production)出版,该杂志经常刊发有关产业生态学研究的文章 美国成立了可持续发展总统委员会(President's Council on Sustainable Development, PCSD)
1996	美国可持续发展总统委员会召开生态产业园(Eco-Industrial Parks)研讨会,对生态产业园区的定义、建设原则及美国生态产业园区建设实践情况作了研讨 产业生态学研究内容之一的生命周期评价杂志(International Journal of Life Cycle Assessment)发行
1997	美国耶鲁大学和麻省理工合办了全球第一个产业生态学杂志(International Journal of Industrial Ecology) 美国环境科学与技术杂志(International Journal of Environmental Science and Technology)发表了“21 世纪研究的优先领域”专题报告,介绍了今后 20a 需要加强关注的 6 个优先领域:经济与风险评估,环境监测与生态学,环境中的化学品,能源系统,产业生态学和人口等
1998	耶鲁大学成立产业生态学研究中心 美国白宫环境质量委员会召开生态产业研讨会 美国国家科学基金会资助 18 项有关生态产业的基础研究课题 美国矿产资源局(USGS)在 Virginia 举行了“关于科学、可持续能力和天然资源管理:USGS 物质与能量流动研究”专题工作会,与会者就产业生态学、物质与能量流动进行了研讨,认为物质与能量流动研究对于正在形成的产业生态学研究具有重要的意义
2000	国际产业生态学学会(International Society of Industrial Ecology)成立 美国跨部门工作小组发表题为“产业生态学——美国的物质与能量的流动”的报告 ^[8]
2001	美国国家生态产业发展研究中心(National Center for Eco-industrial Development)在康乃尔大学成立;中国国家环保总局批准广西贵港和广东南海为国家生态工业建设示范园区
2004	产业生态学分支领域——产业共生学术研讨会在耶鲁大学召开,来自世界各国的专家和学者就产业共生的内涵、理论和方法做了界定
2005	第三届国际产业生态学大会在瑞典召开,包括经济学、社会学等传统学科的 500 余名专家出席了本次大会

目前,产业生态学和生态产业研究已经在全球范围内广泛开展起来,美国已有 30 多所大学开设了此课程,产业生态学思想受到了美国、日本、德国、比利时、丹麦、荷兰、瑞士、瑞典等国政府、企业和国际组织的高度重视。

3 国外产业生态学研究进展

产业生态学诞生后,世界各国不同领域的学者纷纷介入这一领域,并针对其不同方向开展了广泛的研究。归纳起来,可以概括为以下几个方面:

(1)概念及内涵的界定 有关产业生态学的定义多达20几种,但迄今为止尚无普遍接受的定义。这些定义多从以下几方面表述:模仿生态学的定义,从其学科产生和发展的角度提出产业生态学是一门集多学科的理论和方法来研究经济系统和环境系统协调发展的综合性交叉学科^[9];从系统思想在产业生态学研究中重要性出发提出系统思想是产业生态学的核心^[10];从产业生态学存在的意义及其与可持续发展的关系角度提出产业生态学是实现可持续发展的重要手段^[11,12];从产业生态学的研究对象和研究目标出发,提出产业生态学是研究实现产业生态化技术和方法的一门学科^[13]。

(2)内容与方法研究 国际产业生态学会将其研究内容和研究方法分为环境设计、生命周期评价、生命周期设计、物质流能量流分析等12项^[14]; Graedel. T. E. 和 Allenby B. R. 在《产业生态学》(第2版)中对产业生态学的研究内容、研究方法做了系统论述,该书提出产业生态学的研究范畴不仅包括产业经济系统、还包括生活消费系统^[17]。除此之外,还有一些具体方法的研究,如 Suren Erkman 在其专著《产业生态学》一书中对产业代谢进行了专门研究^[15];美国国家环保局产业生态工作组用物质流分析方法系统研究了提高产业生态效率的途径和方法^[16]。

(3)生态产业园区建设 随着产业生态学理论的快速发展,有关产业生态学的实践研究也蓬勃发展起来,这方面的研究主要集中在生态产业园区建设方面,内容涉及生态产业园区生态系统的性质^[18]、能量传递、物质循环和协同机制^[19]、生态产业园区的设计与操作^[20]、生态产业网络模型^[21]、案例研究^[22, 23]等。伴随着理论研究的加深,实践方面也取得了重大突破,20世纪90年代以来,生态产业园区开始成为世界产业园区发展领域的主题,并取得了较丰富的经验。丹麦 Kalunborg 生态产业园是目前世界上最成功的生态产业园,其模式在各国得到广泛推广,美国自20世纪70年代开始生态产业园区建设,目前已有近20个生态产业园区,并各具特色;加拿大约有40个生态产业园区,其中有9个被认为具备很强的生态产业园性质。其他国家如泰国、印度尼西亚、菲律宾、纳米比亚和南非等发展中国家也正积极兴建生态产业园区。

总的来看,国外有关产业生态学研究视野开阔,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。但由于国外产业发展水平较高、产业技术相对先进(尤其是清洁生产技术),加上卡伦堡废物循环利用模式的影响根深蒂固等原因,导致国外生态产业园区建设更偏重于废物循环利用,虽然基础设施共享也很受重视,但方法上明显单一。

4 国内产业生态学研究进展

产业生态学在中国有两种叫法,即工业生态学和产业生态学,主要是因为:早期从事工业生态学研究的主要是自20世纪90年代开始从事中国产业清洁生产的工程技术人员,前期从事工业清洁生产的经历使他们惯性地使用了工业生态学的说话。另外一些生态学家则从产业经济发展和生态学的角度考虑的,将其翻译成“产业生态学”,如中国科学院生态环境研究中心的王如松等^[24]。随着认识的不断深入,后者开始被越来越多的人接受。

4.1 理论和方法研究

有关我国产业生态学的诞生和发展,施涵等曾专门做过详细评述^[25]。当前,我国高校、科研单位纷纷成立专门的产业生态学研究机构。如2001年4月清华大学化工系成立了生态产业研究中心;大连理工大学成立了生态规划与发展研究所;2003年,南京大学与江苏省环境保护厅联合成立了环境管理与政策研究中心;其它如国家环保局环境科学研究院、中国科学院生态环境研究中心、武汉大学、同济大学等都先后开展了产业生态学相关方面的研究。总体来说,国内产业生态学研究主要集中在以下几个领域:国外文献的翻译及评述^[26-28];内涵及方法;相关概念及其相互之间关系的梳理和意义阐释^[29];理论体系框架^[30, 31];产业共生模式和机理^[32-35];生态工业园区理论和方法^[36-38]等。

4.2 生态产业园区建设

在生态产业园区建设实践方面。2001年,全国第一个生态工业园区规划——浙江衢州沈家生态工业园区规划完成;同年,国家环保总局批准广西贵港工业园区为国家第一个生态工业(制糖)建设示范园区;之后,

又陆续批准了一系列示范园区,如包头国家生态工业(铝业)建设示范园区、南海国家生态工业建设示范园区等。据统计,截至 2005 年 12 月,国家环保总局已经累计批准在建生态工业示范园区 15 个。

2005 年 10 月,国家发展和改革委员会、国家环保总局、科技部、财政部、商务部、国家统计局六部委联合下发了《关于组织开展循环经济试点(第一批)工作的通知》,其中又包括了河北省曹妃店循环经济示范区、内蒙古蒙西高新技术工业园区、黑龙江省牡丹江经济技术开发区、上海化学工业区、江苏省张家港扬子江冶金工业园等 13 个产业园区。

除此之外,各种地方生态工业园区不计其数,仅江苏省 2003 年公布的第一批循环经济试点中就有 10 个园区被列为江苏省循环经济试点园区。据不完全统计,到 2006 年元月,全国已有地方各级生态工业和循环经济园区 200 多个。

4.3 存在问题与对策建议

总的看来,在产业生态学理论和方法研究方面,我国还主要停留在文献综述及意义阐释和关系梳理等方面,对产业生态学的基本理论和方法的研究比较少,而将其原理应用到实践方面的探索就更少了。在实践方面,几乎所有的生态产业园建设都强调了物质的闭路循环,突出废物的再利用,但却忽视了生态产业园区建设的首要原则:减量化。当把大量的资源浪费后再特意地设置其闭路再利用系统,本身就是一种严重的浪费。导致这种现象的主要原因是作为产业生态学实践载体的生态产业园区规划理论和方法体系还没有成型,对产业园区生态系统的本质还缺乏充分的认识,因此,至今还没有人提出协调和优化产业园区生态系统的机制和方法。目前的生态产业园充其量只能算是形式上的废物循环。

要走出时下的误区,首先,要展开产业生态学基础理论与方法研究,以便为生态产业园区建设提供坚实的理论和方法支撑;其次,必须突破单纯的废物循环的生态产业园区建设模式,探索更深层次的生态产业园区理念及实践。就目前来说,生态产业园区的建设首先应该瞄准资源能源高效利用、环境影响最小和社会经济效益最大化的目标,把减量化放在首位,即通过产业结构、产品结构调整优化、绿色产品开发、清洁生产、生态化管理等措施大幅度提高园区资源能源的利用效率;在此基础上,建立完善的企业产品服务体系、延伸生产责任制度和交易市场,以此带动和促进废旧产品的在使用;最后,通过园区绿色基础设施建设和废弃物资源化技术开发实现末端废物的再利用。

5 产业生态学发展趋势展望

作为一门新兴学科,产业生态学的内涵仍在不断深化,研究范畴也还在不断拓展,研究方法更是日新月异,总体上呈现出理论系统化、方法集成化、研究具体化的趋势。在 2005 年 6 月召开的第三届国际产业生态学大会上,这种趋势非常明显。就笔者看来,未来产业生态学领域呈现以下几个方面的趋势。

5.1 学科交叉更加强烈

源于仿生学、生态学、经济学、环境学等多学科理论和方法的产业生态学从一开始就注定了其多学科交叉性,随着其内涵的不断深化和研究范畴逐步由生产领域向消费领域拓展,必然会有更多领域的人进入该领域,因为系统的复杂性和问题的多重性必然迫使其采用相关学科的理论和方法,至少在目前尚没有完善体系的情况下是这样。而多学科的介入必然会推动产业生态学及相关学科的交叉和融合。

同样地,产业生态学会在这种多学科相互吸纳和矛盾冲突的过程中趋于成熟,并最终形成一个相对独立的理论和方法体系。最明显的例证就是来自农学、生态学、经济学、社会学、系统工程学、化学工程、林学等几十个领域的数百位专家和学者出席了 2005 年 6 月份在瑞典召开的第三届国际产业生态学大会,会上大家都从各自的背景探讨了对产业生态学的理解和界定,虽然观点不一且差异很大,但大家都认为产业生态学是一门非常有前途的新兴交叉学科,并且会有越来越多的学科介入到这一领域中来。

5.2 对相关学科的冲击力将不可低估

任何事物之间的作用都是相互的,产业生态学的多学科交叉性决定了相关学科的发展对其会产生巨大的影响,尤其是相关领域技术上的重大突破,有可能对产业生态学相关领域的研究产生根本性的变革;同样,随

着产业生态学的不断深入以及对其它学科的广泛渗透,可能推动相关学科的大发展,甚至促成某些学科的内源性转变。

就目前的发展态势而言,产业生态学对相关学科的渗透已经并且正在诞生新的研究分支:渗透到工业工程领域推动了生态设计和绿色制造的广泛应用;渗透到管理学领域促成了绿色供应链管理、生态化管理、延伸生产者责任等新方向的发展;渗透到经济学领域大大刺激了生态经济学、环境经济学、资源经济学等分支学科的突飞猛进;渗透到城市学领域,诞生了绿色人居、绿色建筑、绿色交通等分支学科。据此判断,未来产业生态学将渗透到更多的传统学科领域,并且会推动这些领域诞生新的研究分支,进而逐步从根本上影响这些学科的思维方式和研究方法。

5.3 基本理论研究将引起普遍关注

目前,产业生态学还没有形成自己完整的理论体系,而作为一门学科,建立一套具有专属性质的理论体系是必然趋势和基本要求。在作者看来,产业生态学的最终理论体系应该是生态学、社会学和经济学的融合,是运用生态学原理和社会学规则来改造或重塑现有经济理论体系的结果。其中的核心内容之一就是在传统经济学理论中增加生态约束要素,具体表现为资源和环境约束,即经济发展必须考虑资源的稀缺性,经济增长可能面临资源短缺瓶颈;经济发展是有副作用的(主要是污染排放以及由此带来的生态破坏),这种副作用必须控制在一定的范围之内,即环境承载能力之内,否则将给社会带来极其严重乃至毁灭性的危害。

在这种大范畴下,产业生态学的发展会引起现有的经济学和社会学理论乃至更大范围的领域都发生一些根本性的变革,主要体现在经济学的内生要素的根基性变化,社会行为规则必须进行意识形态上的调整等方面。最终,产业生态学将不仅仅是一种全新的根源性环境污染防治模式,而且会是一种崭新的经济发展理论和全新的社会消费行为规范。也就是说,产业生态学理论体系的形成过程,就是用其全新的思维模式去改造现有学科理论体系和塑造全新社会行为规范和培养新的社会意识形态的过程。从这一点上说,产业生态学基础理论体系的构建和完善是必然和必需。

5.4 基本方法研究和工具开发将成为重点内容

一个学科走向成熟的通用标志是看它是否具有自己专有的研究方法,并且逐步将数学也就是量化研究引入该领域。这两种现象都已经开始在产业生态学领域中出现,但迄今为止,产业生态学研究方法还基本上都是相关学科的直接“舶来品”,如经济学中的投入-产出分析、生态学中的物质流分析、环境领域的生命周期分析等;研究工具也还都是借用相关学科的现成工具或者稍做修改,如计量社会学模拟平台 Starlogo/Netlogo、社会学模拟平台 Swarm 系统,环境领域的生命周期评价软件等。

从战略层面来看,产业生态学研究方法会向专属性方法上发展,就是在借助现有学科方法的基础上,依据产业生态学研究视角和研究系统的特殊性,建立自己独特的方法体系,这不仅是学科成熟的标志,也是现实研究的必需;从微观上来看,产业生态学研究方法会向相关的具体学科领域倾斜,即来源于某一特定学科,但又不同于该学科的原有方法,或者说具有某些特质性的变革。

5.5 应用范围将不断扩大

未来的产业生态学研究将不仅仅停留在指导生态产业园区建设方面,而会向宏观决策和微观设计两个方面拓展。譬如,大区域层面的物质流分析和基于产品的生命周期分析可以为政府制定区域乃至国家和区域产业、行业政策等提供依据;而生态设计等则为微观层面企业的产品设计和制造提供了技术支撑。

另外,未来的产业生态研究会更加关注生产系统和消费系统的融合地带,会努力探索实现二者无缝连接的关键技术和方法,而其对社会消费系统的渗透也必然会刺激社会生态学的蓬勃发展,届时,产业生态学和社会生态学将分别成为研究人类生产行为和消费行为的重要支撑。

References:

- [1] Odum H T, Pinkerton R C. Times' speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems. *American Scientist*, 1955, 43: 331 ~ 343.
- [2] Taylor T B, Humpstone C. *The restoration of the earth*. New York: Harper and Row, 1972.

- [3] Preston C. Entropy, materials and posterity. *Geologische Rundschau*, 1977, 66: 678 ~ 696.
- [4] Bollen G F, Toussaint P O, and Sapire M, *et al.* L'ecosysteme belgeque: essaidecologie industrielle. Center de Recherche et d'Information Socio-Politiques-CRISP, 1983.
- [5] Frosch R A, Gallopoulos N. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 1989, 261(3): 144 ~ 152.
- [6] Jesse H A, Hedy E S eds. *Technology and Environment*. Washington D C: National Academy Press, 1989.
- [7] Frosch R A. Industrial ecology: a philosophical introduction. *Proceedings of the National Academy of Science of the U.S.A*, 1992, 89: 800 ~ 803.
- [8] Kumar C and Patel N eds. *Industrial ecology proceeding of colloquium*. Washington D. C: the National Academy of Science of the USA, 1991.
- [9] Jelinske L W, Graedel T E, Laudise R A, *et al.* Industrial ecology: concepts and approaches. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1992, 89: 800 ~ 803.
- [10] Allenby B R. Implementing industrial ecology: the AT & T matrix system. *Interfaces*, 2000, 30(3): 42 ~ 54.
- [11] Frosch, R A. Industrial ecology: adapting technology for a sustainable world. *Environment*, 1995, 37(10): 16 ~ 37.
- [12] Ehrenfeld J R. Industrial ecology: paradigm shift or normal science? *The American Behavioral Scientist*, 2000, 44(2): 229 ~ 244.
- [13] Kumar C, Patel N. *Industrial Ecology*. Proceedings of National Academy Science of USA, 1992, 89: 798 ~ 799.
- [14] ISIE (International Society of Industrial Ecology). Accessed at May 11, 2004. <http://www.is4ie.org/>.
- [15] Graedel T E, Allenby B R. *Industrial ecology (Second Edition)*. Pearson Education Inc. Prentice Hall, 2003.
- [16] Suren Erkman. *Industrial ecology*. FPH Press, 1998. 10 ~ 15.
- [17] EPA Industrial Ecology Workshop. Briefing paper on industrial ecology and EPA: focusing on the environment from the point of view of resources, products, industrial systems and eco-Efficiency, 2001.
- [18] Cote E P, Hall J. Industrial parks as ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 1995, 3(1-2): 41 ~ 46.
- [19] Thermoshare. Integrated eco-Industrial park with cogeneration, energy cascading and recycling, a report prepared for environment Canada, Industry Canada and Natural Resources Canada. Ottawa, 1997.
- [20] Ernest AL. *Eco-Industrial Park Handbook*. Accessed at June 10, 2004. <http://www.indigodev.com>.
- [21] Carolyn Eve Nobel. A model for industrial water reuse: a geographic information systems (GIS) approach to industrial ecology. The University of Texas, Austin, 1998. <http://www.usc.edu/sppd/research/NCEID>.
- [22] Research Triangle Institute. Eco-industrial park; a case study and analysis of economic, environmental, technical and regulatory issues, final report for the U. S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park (RC), 1994.
- [23] Audra J and Potts C. Choctaw eco-industrial park: an ecological approach to industrial land-use planning and design. *Landscape and Urban Planning*, 1998, 42(2-4): 239 ~ 257.
- [24] Wang R S, Yang J X. *Industrial Ecology*. Shanghai: Shanghai Scientific Press, 2002. 8 ~ 22.
- [25] Shi H, Yuichi M, Yang J X. Industrial ecology in China. *Journal of Industrial Ecology*, 2003, 6(3-4): 7 ~ 10.
- [26] Li Y R, Hu S Y, Shen J Z, *et al.* Development of industrial ecology and eco-industry. *China's Scientific Foundation*, 2003, 17(4): 208 ~ 210.
- [27] Wang R X, Luo H, Peng Y D. Advancement of national eco-industrial parks. *Environmental Protection*, 2003, (3): 53 ~ 56.
- [28] Li T S, Wei Y Q. Development of industrial ecology and the perspective on its future. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 869 ~ 877.
- [29] Teng T. Eco-economics and its contents. *Eco-economics*, 2002, (12): 2 ~ 6.
- [30] Liu L, Zheng J S. Development of industrial ecology and the construction models of eco-industrial parks. *Economic Geography*, 2001, 21(5): 620 ~ 623.
- [31] Lu C X, Shang J C. Theoretic basis for constructing eco-industrial parks. *Agriculture and Technology*, 2003, 23(3): 17 ~ 22.
- [32] Wang Z H, Yin J H, Wu C Y. Structural model of eco-industrial Network of eco-industrial parks. *China Soft Science Magazine*, 2003, (10): 149 ~ 153.
- [33] Hou K F, Li Y R, Shen J Z, *et al.* Delayed Sampling Approach to Stochastic Programming in Chemical Process. *Computer & Chemical. Engineering*, 2000, (suppl.): 619 ~ 624.
- [34] Li M H, Li Y R, Hu S Y, *et al.* Hierarchical Optimization Method for Reaction Path Synthesis. *Industry & Chem. Engineering*, 2000, 39: 4315 ~ 4319.
- [35] Xiao Y H, Chen Y. Theory of eco-industry and its application model. *China's Population, Resource and Environment*, 2001, 11(3): 100 ~ 103.
- [36] Yuan Z W, Bi J, Wang X Y, *et al.* Ecosystem tic theory of eco-industrial parks and its optimization approach. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2501 ~ 2508.
- [37] Wu Z J, Shen J Z, Li Y R, *et al.* Development of environmental management information system and analysis of river pollution source. *Computer and Chemical Engineering*, 2001, 18(5): 411 ~ 416.
- [38] Yuan J L. Evaluation index system of eco-industrial parks. *Environmental Protection*, 2003, (3): 38 ~ 40.

参考文献:

- [24] 王如松, 杨建新. 产业生态学. 上海: 上海科学技术出版社, 2002. 8 ~ 22.
- [26] 李有润, 胡山鹰, 沈静珠, 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, 4: 208 ~ 210.
- [27] 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: 53 ~ 56.
- [28] 李同升, 韦亚权. 工业生态学研究现状与展望. *生态学报*, 2005, 4: 869 ~ 877.
- [29] 滕藤. 生态经济与相关范畴. *生态经济*, 2002, 12: 2 ~ 6.
- [30] 刘力, 郑京淑. 产业生态研究与生态工业园发展模式初探. *经济地理*, 2001, 21(5): 620 ~ 623.
- [31] 鲁成秀, 尚金城. 论生态工业园区建设的理论基础. *农业与技术*, 2003, 23(3): 17 ~ 22.
- [32] 王兆华, 尹建华, 武春友. 生态工业园中的生态产业链结构模型研究. *中国软科学*, 2003, 10: 149 ~ 153.
- [35] 肖焰恒, 陈艳. 生态工业理论及其模式实现途径探. *中国人口·资源与环境*, 2001, 11(3): 100 ~ 103.
- [36] 袁增伟, 毕军, 王习元, 等. 生态工业园区生态系统理论及调控体系研究. *生态学报*, 2004, 24 (11): 2501 ~ 2508.
- [37] 吴忠俊, 沈静珠, 李有润, 等. 生态工业园区环境管理信息系统开发及河流污染事故源的分析. *计算机与应用化学*, 2001, 18(5): 411 ~ 416.
- [38] 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.