

工业生态学的内涵与发展

石 磊

(清华大学环境科学与工程系 国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100084)

摘要: 作为一门发展不到 20a 的综合性交叉学科, 工业生态学目前需要界定其学术范畴和理论基础。首先评述了工业生态学的 4 个主要领域: (1) 社会代谢是工业生态学起源最早也是发展最为成熟的领域。它提供了宏观层次上观察和测量经济发展与物质流动关系的方法和工具, 但需要进一步细化物质流动图景和加强流动机制的解释; (2) 工业共生是工业生态学最具特征的领域。它实质上是人们出于观察视角的转变而对工业体系的重新认识。逻辑严谨且规则统一的解释框架有助于工业共生理论的发展和实践; (3) 基础设施与产业相互选择且协同演进, 二者共同构成了城市的物质基础, 而城市又是更大范围内区域经济系统的子集。这一组工业生态学的研究对象需要处理产业全球化与社会和生态要素本土化的矛盾; (4) 工业发展的可持续性工业生态学关注的核心目标, 而多样性和复杂性给其研究带来了很大的挑战。这提醒我们要避免陷入简单化、还原论或机械论的陷阱, 多开展实证研究。最后, 从本体论、方法论和隐喻 3 个标准给出了工业生态学的初步界定, 并指出 4 个重要的努力方向。

关键词: 工业生态学; 社会代谢; 工业共生; 可持续性; 复杂性

文章编号: 1000-0933(2008)07-3356-09 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Industrial ecology: a critical review

SHI Lei

SEPA Key Laboratory on Eco-industry, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3356 ~ 3364.

Abstract: With a development history of less than 20 years, it is time for industrial ecology to define its academic scope and theoretical basis. This paper first reviews the four main areas of industrial ecology: (1) Social metabolism, the well-developed area of industrial ecology. It provides macro-level methods and tools to observe and measure the linkages between economic development and material flows. The further research is to refine and strengthen the material flow picture and mechanism behind it; (2) Industrial symbiosis, the main characteristics of the industrial ecology fields. It is in fact the re-understanding of industrial system from waste exchanging perspectives. A unified framework with stringent rules of logic will benefit the development of industrial symbiosis theory and practice; (3) Infrastructure, cities and regional economic systems, a series of objects with spatial characteristics. Infrastructure and industries, with mutual co-evolution relationship, together constitute the material basis for the city, and then the city is the subset of the regional economic system. This group of fields needs to deal with conflicts resulting from the globalizing nature of the industry and the localization nature of social and ecological factors; (4) the diversity, complexity and sustainability of industrial development, the theoretical core of industrial ecology. All these bring great challenges to research agenda of industrial ecology, and remind us to avoid falling into the trap of simplistic reduction. Finally, four important directions are presented, following the definition of the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40601037)

收稿日期: 2008-01-14; 修订日期: 2008-04-01

作者简介: 石磊(1972~), 男, 山东沂南人, 博士, 副教授, 主要从事工业生态学和循环经济研究. E-mail: slone@tsinghua.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40601037)

Received date: 2008-01-14; **Accepted date:** 2008-04-01

Biography: SHI Lei, Ph. D., mainly engaged in industrial ecology and circular economics. E-mail: slone@tsinghua.edu.cn

academic scope of industrial ecology from ontology, methodology and metaphor guidelines.

Key Words: industrial ecology; social metabolism; industrial symbiosis; sustainability; complexity

按照西方主流的观点,到目前为止,工业生态学诞生接近 20a 了^[1]。国际工业生态学学会成立于 2000 年,自 2001 年起两年一届的工业生态学国际大会召开了 4 届。历任学会主席都强调工业生态学是刚刚诞生的学科。第一任主席 Thomas Graedel 强调要思考和回答“工业生态学及其学会可做何用”的问题;第二任主席 Brad Allenby 强调回答“工业生态学研究日程”的问题;第三任也是当任主席 Marina Fischer-Kowalski 在 2007 年召开的第四届大会上宣称,其在任期间的 3 项任务之一就是厘清工业生态学的研究目的和智力诉求。为了完成该项任务,已经组织了有关人员进行框架性综述文章的撰写,以进一步探索工业生态学的潜在任务和学科展望。

本文将做一次大胆的尝试,评述工业生态学领域的主要进展和学科理解。首先,分别评述构成工业生态学学科板块的基础领域:社会物质代谢,工业共生,基础设施、城市与经济区域,发展的多样性、复杂性和可持续性。然后,探讨工业生态学的学科基础和内涵界定,最后指出工业生态学当前值得关注的 4 个研究方向。

1 工业生态学基础领域评述

1.1 社会物质代谢

社会物质代谢是工业生态学起源最早也是发展最为成熟的领域。

1.1.1 物质守恒、物质流动和物质账户

社会物质代谢的理论基础是热力学定律。工业革命之初就确立了热力学第一定律,随着蒸汽机的发明和改进,热力学第二定律也随后确立。热力学定律不仅成为各种工程技术学科的基础,也是经济社会学学科研究的前提,广泛应用于设备单元、生产过程、工业园区、城市、国家乃至全球等不同尺度。

尺度不同,热力学定律的应用目的也不同。在微观尺度上,例如设备单元和生产过程层面,物质守恒可以提供精确的物理化学基础,以达到分析、设计或优化的目的。在中观和宏观上,物质守恒有助于建立区域经济系统界面上的输入-输出衡算,同时也有助于刻画系统内部的物质流动拓扑结构和时空秩序,以提供对经济和社会发展规律的认知和理解。

早在 19 世纪,马克思就曾注意到城市迅速发展导致养分循环代谢断裂的问题,指出人类社会经济系统与自然生态系统之间存在着重要的互相影响^[2]。在 20 世纪五、六十年代,城市物质代谢的概念和方法逐渐形成^[3]。国家尺度的物质代谢研究尽管相对较晚,但进展迅速。2001 年欧盟出台的“国家物质流分析(material flow analysis, MFA)导则”使国家尺度的物质流分析有了一个国际可比较的方法基础^[4]。无论在城市尺度还是国家尺度,MFA 都需要物质账户的支持。

社会物质代谢所能做到的是:对社会经济发展给出物质流动静态或动态的景象,提供了宏观层次上观察和测量经济发展与物质流动关系的方法工具。然而,它在一定程度上掩盖了微观层次的多样性和细节,没有解释这些流动是因何发生的,也就是说没有提供社会代谢的微观机制和与宏观景象的联系。

1.1.2 社会物质代谢的划分

依据考察目的不同,可以区分两大类物质流动分析类型。第一类是针对具有时空边界的系统所展开的物质流分析,即 MFA,对象尺度可以是城市、国家或更大范围。它关注对象系统中所有各种物质的输入、输出和累积情况,并设立一些指标来建立经济发展与物质代谢之间的关联^[5]。如前所述,这类分析中国家尺度的 MFA 最为成熟,至今有多达 30 多个国家测算了 MFA^[6],中国也在其列^[7]。

第二类的物质流动分析(substance flow analysis, SFA)是关注某一种或几种元素(如铜、铁、铝等金属元素或者氮、碳、磷、硫等非金属元素)、化合物(如 PVC、CFC 等)或产品的流动过程,通过研究上述对象在特定时空系统中的流动规模、途径、结构与动力机制,从而识别特定环节上减缓资源消耗和减轻对环境负面影响的可

行举措^[8]。SFA 在农业和林业等生态领域的应用起源较早,而对工业物质的研究即工业代谢较晚。Robert Ayres 是工业代谢领域的先驱者之一,Thomas Graedel 是当前 SFA 领域的集大成者,其所在的耶鲁大学课题组已经完成了多达 20 种元素不同尺度上的元素流分析,其尺度的多重性和视角的变换使得 SFA 成为分析经济发展与资源环境关联关系的重要解析工具^[9]。近年来,我国也开始开展系统性的工作^[10~12]。

在空间尺度上,MFA 可以逐层分解,由国家尺度向省或城市进行分解,直至企业或家庭等基础单元;SFA 可以向行业、产品或元素进行分解^[13]。在宏观的国家尺度和微观的企业和家庭尺度,数据获取相对较易而便于开展 MFA,而在省市等中观尺度上则因系统输入输出数据的统计问题而难以开展。一般而言,中观尺度的 MFA 需要依赖于 SFA 方法及其成果的支持。

相对 MFA 而言,物质投入产出分析(physical input-output table, PIOT)可以刻画不同产业(行业)间物质流动的细流,近来得到了越来越多的关注。有关学术团队开始致力于 PIOT 方法的标准化,以加速国际间的对比。

生命周期分析(life cycle assessment, LCA)的发展尽管有其相对独立性,但其生命周期阶段的划分与 SFA 所包含的流动环节基本一致,因此上述几种代谢工具的融合与相互支撑成为社会代谢领域需要探讨的难点和热点。

1.1.3 物质、能量、(焓)和能值

从理论上讲,社会经济系统尺度上的物质流动分析是能量流动分析的基础,但出于考察目的不同,这两种分析在最初阶段是独立开展的。

目前,面向经济系统的物质流动分析、能量流动分析、(焓)(exergy)分析和能值(emergy)分析都已存在大量的工作,相互之间的关联研究也开始兴起。然而,其关联或对比背后隐含的理论内涵和政策含义尚待发掘和厘清。

1.2 工业共生

工业共生被公认为工业生态学最具特征的领域。

1.2.1 工业共生的发现

工业共生的经典案例是丹麦卡伦堡工业体系。20 世纪 70 年代初期,卡伦堡已经存在着最初的废物交换行为,80 年代初期和 90 年代又先后两次发生了较为密集的废物交换。卡伦堡工业共生体系引发关注的重要原因在于废物交换的自发性或自组织性^[14]。事实上,奥地利、日本和法国的工业系统中早已存在较卡伦堡规模更大的共生体系,同样前苏联和过去计划经济时代的我国也比比皆是^[15,16]。至于废物交换的个别行为甚至是“废物交换俱乐部”形式,在 19 世纪的英国和德国就已经出现^[17]。

事实上,工业的发展就是副产物或废物不断得到开发利用的过程,这从钢铁、石化、化工等行业的发展历程略见一斑^[18]。也就是说,废物交换是工业发展的必要手段,工业共生是工业发展的常态,没有哪家企业是孤立存在的。在绝大多数经济学家眼里,废物并不是一种累赘,而更是一种商机^[19]。

既然如此,工业共生应是熟视无睹的事情,其所以在近来受到普遍关注的原因在于工业发展的“反弹效应”:在环境污染的危害充分暴露之前,历史条件决定了这些废物交换和共生的努力并不会是一种工业整体的自觉行为,零散的努力最终被工业发展规模和速度所掩盖。废物交换或共生的成功与否取决于具体的技术条件、市场需求以及相对规模等因素,由于共生行为的这种范围经济性和规模经济性,企业迫于竞争压力或其它因素开始自觉寻求企业间的废物交换,由此在特定地域内形成了大小不一和种类多样的工业共生体。当人们需要全面审视废物时,这些共生体就成为人们称颂甚至争相效仿的对象。换句话说,工业共生体系由来已久,只是由于人们对于废物视角的变化导致了对工业共生的重新认识。

1.2.2 工业共生的解释

早期,往往运用简单的分类系统来解释工业共生行为,例如从技术、经济、组织、信息、法律和社会文化背景 6 个方面进行阐述^[20]。这类解释方法试图避免使用抽象的理论原理和方法工具,偏好于运用不完全归纳

和跨学科的经验主义方法来理解复杂现实中的时空型态。事实上,这种解释给出的答案往往是片断式的、不连贯甚至相互冲突的,也难以达到经典数理主义所追求的形式完美。因此,其给予工业共生机制的解释是暂时的,也必然让位于建立在统一逻辑或规则体系下的解释框架。

新古典经济学在古典经济学基础上,通过考虑不完全或非对称信息、“有限”理性等作用因子,发展出了代理理论、行为经济学、产业组织理论和其它分支等^[21]。借助于这一体系中交易成本或博弈分析等方法,可以分析“有限理性”的决策者以及垄断产业结构下的工业共生后果。然而,新古典经济学虽然创造了解释微观层面或具体的废物交换/工业共生行为的可能,但由于其局限于静态资源配置的理论框架,而对宏观增长进程中的工业共生景象难以给出令人信服的解释。

为此,工业共生需要新的逻辑严谨的解释框架。演化经济学的发展为此提供了可能。演化经济学试图探讨社会经济演化的一般特征,以便抓住经济系统独特的运行方式,掌握它们怎样与社会和自然系统交互作用^[22]。现代演化计算工具的发展使得应对工业共生这一复杂社会经济现象建立在了算法结构和动态模拟的基础之上,通过设计或试验简单的规则系统来达到观察和模拟复杂形态的效果,同时也提供了理解工业共生现实的途径。如此以来,演化经济学提供了一种逻辑并不粗糙、既强调个案又能提供系统解释的方法论,避免了新古典经济学趋向于“自闭锁定”的方法论整体主义解释。

1.2.3 工业共生的实践

工业共生实践最主要的形式就是生态工业园区。卡伦堡工业共生体系的发掘是一个分界线,此前的实践无论是自由市场体制下的奥地利和日本还是计划体制下的前苏联基本都是“摸着石头过河”,之后就转向有目的的自觉实践。稍早的如美国和加拿大,后期跟进的中国、韩国和日本等^[23]。

在生态工业园区实践的广度、深度和热度方面,我国无疑是首屈一指的。截止到目前,仅由国家环保总局批准建设的生态工业示范园区就有 26 个,由国家发改委等六部委批示的两批循环经济国家试点中包含了 23 个工业园区。省市级的实践案例更是难以计数。这些实践既包含开发区和高新区,也包含以特定资源综合利用为主的工业园区,最近还涵盖了废物资源循环利用为主的园区。与工业化国家形成鲜明对比的是,我国绝大多数园区都是政府主导的开发模式,并且园区变化日新月异。

除生态工业园区外,废物交换网络的构建也是工业共生的实践方式。上面提到的“废物交换俱乐部”是废物交换网络的一种组织形式。目前,国际上公认的最大规模的交换网络是英国的国家工业共生项目(NISP)。我国沈阳和天津开发区也尝试设立了类似的俱乐部,并建立了废物交换信息系统。目前,我国尚缺乏全国范围内的有组织的废物交换网络。

工业共生也存在于产业集群和特色园区等实践中。由于观察和实践视角不同,这些实践并没有挂上工业共生的名称。实际上,有必要拓展工业共生的内涵,使之更好地服务于实践。

1.3 基础设施、城市与区域经济

这是一组从空间角度界定的工业生态学研究主题。基础设施与产业相互选择且协同演进,二者共同构成了城市经济社会的物质基础,这一物质基础又与其所依附的自然生态系统共同塑造形成了区域经济等人工复合生态系统。

1.3.1 基础设施

基础设施是指为社会生产和居民生活提供公共服务的物质工程设施,它是社会赖以生存发展的一般物质条件。“基础设施”不仅包括公路、铁路、机场、通讯、水电煤气等公共设施,即物质的基础设施(physical infrastructure),而且包括教育、科技、医疗卫生、体育、文化等社会事业即“社会性基础设施(social infrastructure)”^[24]。目前,工业生态学领域主要关注能源、水、固体废弃物、交通和通讯等基础设施。

社会和物质基础设施对经济增长至关重要。一方面,基础设施的建设和发展会推动产业的发展;另一方面,基础设施也是国民物质财富重要的组成部分。当前,人们日益认识到基础设施对于改善国家尤其是发展中国家状况的重要性,并认为是减少贫困、促进增长及由此实现千年发展目标的关键因素。世界银行研究表

明:如果非洲基础设施的增长速度与 20 世纪八、九十年代亚洲的水平相当,其年经济增长率可能比实际水平要高出 1.3%。同样,有关拉美的一项研究报告测算,由于 20 世纪 90 年代该地区缺少基础设施投资,其长期增长率因而下降了 1%~3%^[25]。然而,现实情况是发展中国家的基础设施建设面临着严重的资金短缺,无论在规模还是质量方面都对基础设施存在很大的需求。

由于基础设施与产业发展之间存在着相互选择且可以协同演进的关系,同时其技术模式又具有相对的长期性,因此基础设施的生态化具有非常重要的意义。发展中国家基础设施建设需求的持续旺盛,为工业生态学这一领域的研究提供了很好的机会和平台,以此来实现基础设施建设的环保性、社会可接受性和经济可持续性。

1.3.2 城市

城市是人类社会经济文化发展到一定时期的产物。亚里士多德曾经说“人们来到城市是为了生活,人们居住在城市是为了生活得更好”。2006 年,有 50% 的世界人口居住在城市。工业化国家的城市化率一般高达 70%,我国 2006 年的城市化率达到了 43.9%^[26]。

工业生态学关注城市有两个重要理由。第一,城市综合竞争力在很大程度上取决于一个与城市相适宜的产业体系。城市竞争力的影响因素众多,包括资源禀赋、地理位置、产业基础、文化传统、人口素质和自然气候等。这些因素相互交织,共同作用,但一般情况下产业居于主导因素。事实上,工业的发展往往不是一个孤立的体系,它总是在漫长的发展过程中形成与当地城市主客观条件相适宜的产业生态体系。例如,我国东部沿海地区在开放式国际环境下形成了“昆山之路”和“江阴板块”等,而我国中西部则大量出现了以资源开发和利用为核心的中小城市。对城市而言,工业生态学领域需要关注的问题是如何因地制宜采取措施来促进城市产业生态体系的形成和发展,使得产业的演进和城市的建设都朝向可持续的方向。

第二个理由是从资源角度,城市作为人口、物质、经济、设施、活动和科技文化高度集中的庞大的人工系统,也吸纳和积存了大量的各类物质资源尤其是矿产资源,从而成为一座再生资源的“富矿”^[9]。有关研究表明,城市对物质资源的消耗远远大于农村^[27]。

1.3.3 区域经济

工业生态学需要关注区域经济。在经济全球化背景下,生产与消费的全球化是大势所趋,工业化初期生产过程与流通过程相对独立的形态逐渐隐退,其边界也更加模糊。产业已经日益国际化,更多的产品的生产过程无法在一个国度、一个工厂、一条生产线或一个工序完成,现代经济循环的流通要素几乎都已经跨越了国界。

然而,有些要素尤其是社会和生态要素是难以全球化的。以生态工业园区为例,它是工业生态本土化的典型例子,力图在相对集中的区域上通过废物交换和基础设施共享等来实现产业体系的生态化并增强综合竞争力。然而,在实践中生态工业园区的规划和建设存在很多争议,突出的问题包括生态工业网络是否可以自主规划、其稳定性如何、其本土化的特性是否锁定或抑制了产业和技术的发展等等。

当然,全球化与本土化的矛盾并不否认生态工业网络的价值和意义。真正的问题是,生态工业发展如何平衡这对矛盾,使得工业体系向着所期望的生态工业体系演进。从演进的观点看,产业发展所表现出来的对技术和制度的路径依赖性^[28]是工业生态学的研究核心。大尺度上工业化起源的探讨^[28],小尺度上产业集群创新机制的探讨^[29],都无一例外地追溯到技术锁定、路径依赖和社会网络的根植性。

1.4 发展的多样性、复杂性与可持续性

1.4.1 发展的多样性与复杂性

发展没有统一的模式,经济发展的多样性和复杂性应该是目前普遍接受的概念。阿德尔曼曾经系统批判了发展理论中的 3 个误区,指出“计量经济学分析和历史个案研究都提供了足够的证据,证明关于经济发展的对数线性、单一道路、单一要素的观点既是错误的,也是不符合历史的”,并提出了关于发展的 4 个命题:(1) 发展过程绝对是高度非线性的;(2) 发展道路不是独一无二的;(3) 初始条件影响日后的发展;(4) 发展

的轨迹不仅是非唯一的,而且也是可变的^[21]。

也就是说,发展是一个高度多面的、非线性的、路径依赖的、动态的过程。这个过程会出现经济、政治、社会和生态等要素的互动以及互动方式系统性的转换,导致出现大量的“路径依赖”和“锁定”现象,而这种互动方式的转换又要求政策和制度随时间的推移而不断变化。为此,“我们需要一套探究经济、政治和社会变化过程的理论”^[30]。

事实上,工业系统所依赖的自然生态系统是复杂的,人类为发展工业对其的改造往往都是加以彻底的再组织和简单化,从而使之服务于人的目标。也正是有意识或无意识割裂了生态系统中所存在的关系,导致了那些试图改善人类状况的项目的失败^[31]。

忽视工业发展对社会经济背景依赖的现象也时有发生。例如,政府主导的“拉郎配”共生项目的瘫痪,区域废物交换网络的失灵等,很多都是没有充分考虑到废物利用的规模经济性、范围经济性和内在根植性。正如经济发展需要放在宏观的社会制度背景下考虑,工业作为经济系统的子集同样也需要放在这一背景下思考。

工业发展的多样性和复杂性无疑给工业生态学的研究带来了很大的挑战。这提醒人们要避免陷入简单化、还原论或机械论的陷阱,充分理解和发扬工业生态学语义中“生态”的概念,多开展个案式的实证研究。事实上,工业生态学只有到了最近才得以诞生绝非偶然,简单的机械式的分析视角和手法并不足以建构一门崭新的学科。这对于国内工业生态学的发展非常重要,概念上的堆砌和理论上的笼统化,对于一个学科的发展是起不到应有作用的。

1.4.2 发展的可持续性

与多样性和复杂性比较,发展的可持续性更应该是工业生态学领域份内的事情。随着全球对可持续发展的关注,可持续性对于学术研究而言已经不是一个陌生的概念。经济学尤其是发展经济学已经开始强调了经济发展的可持续性。“发展的目标不仅仅是经济增长,而且还包含增长的格局与分布、就业和可持续性等”,“对于发展中经济体来说,什么是发展、开发和保护可再生和非再生资源的最佳(或至少是好的)时机”^[32]。在要素上,土地、矿产甚至环境容量等生态要素都纳入了经济分析的范畴。

然而,在大多数经济学家眼里,生态和环境的要素并不能全部纳入其主流的分析框架中。生态经济学对此有所改善,一方面发掘经济发展与生态约束作用与反作用的模式与机制,另一方面致力于寻求经济生态化的途径和手段。因此,工业生态学需要更多地向生态经济学进行学习、吸收和借鉴。

一般认为,自然生态系统是可持续的。因此,“师法自然”成为人们探讨工业系统可持续性的起点和热点。“工业生态系统的概念与生物生态系统概念之间的类比不一定完美无缺,但如果工业体系模仿生物界的运行规则,人类将受益无穷”^[14]。一般地,工业系统应该向自然生态系统学习,在能量转化、物质循环、营养等级和种群关系等方面应效法生态系统,并向工业生态系统演进,以实现生产与生态的和谐。两大系统的类比是工业生态学萌芽和诞生初期讨论的焦点。例如,Thomas Graedel 等从个体和系统两个层次上对自然生态系统和工业生态系统进行了比较,认为个体相似性包括独立性,具有生长、繁殖能力和一定寿命,废物代谢,应激性及在系统中充当一定角色;系统相似性包括两个系统都可分为线形、准循环和全循环 3 个类型^[33]。

两大系统的类比可以使工业生态学受益良多,但冷静的思考更是需要。复杂网络理论可以为我们揭示深层次的东西。最新的研究成果表明,大尺度上的化学产业共生系统具有与自然新陈代谢网络非常相似的结构,同样具有小世界、无标度和等级模块性,网络的平均节点度、特征路径长度和簇系数的值与其它有生物作用的化学反应网络很接近。这一结论或许让现行工业体系不可持续的批评者感到沮丧,但它恰恰说明产业发展的确是一个演进的过程,在宏观尺度上具有与自然生态系统一样的自组织性。

当然,这并不排斥人们在微观甚至宏观层面上的作为。生态工业园区实践是非常必要的,有条件的国家产业政策和区域振兴政策也是可以接受的。或许,面对产业发展的复杂性和不确定性,“走小步”、“及时调整”等策略对于实现可持续性而言不失为明智的选择。在实践中,不要贸然去预测未来,而应该承认不确定

性,审时度势,伺机调整,以应对一个持续变化的未来。

2 工业生态学的学科思考

工业生态学因人们思考和缓解产业系统对生态系统的胁迫而产生。为此,工业生态学不仅要理解和审查工业系统对自然生态系统的影响和作用途径,而且更要致力于产业系统本身的生态化重组和演进,使之与自然生态系统和谐共处。

工业生态学应该把先前有关工业发展和生态约束的理论整合起来,在对工业发展进程中的诸多重要现象进行系统观察的基础上提供一种连贯一致的解释。因此,工业生态学是一种地道的“大科学(big science)”,学术领域带有强烈的跨学科特点。当前,世界范围内丰富多彩的实践需要提升,纷乱复杂的分支学科需要整合,工业生态学在被赋予使命之时就需要寻求其学术范畴和理论基础。为此,工业生态学应该确定学科本身所肩负的历史重任和所具有的宗旨,厘清所面临的问题和挑战,发展学科所需要的理论基础、方法和工具,以及确定学科对于经济社会环境可持续发展所做出的贡献。

这绝非是一个简单的任务。正如生态学基础学科一样,工业生态学同样也面临研究范畴无限扩大和认为没有独特研究对象而应取消的两种不良倾向^[34]。具体而言,工业生态学如果研究界定过细,必然落入具体的技术领域,变得机械甚至僵化,而导致对工业生态学存在性的怀疑;如果界定过大,必然要对其与发展经济学、生态经济学、社会科学等关系进行不断的解释。因此,工业生态学作为一个正在学术研究范围内寻找其意义的词汇就不难理解。

借鉴 Hodgson 对于演化经济学的界定^[35],可以从本体论、方法论和隐喻 3 个标准来界定工业生态学:

(1) 本体论的标准 工业生态学强调了产业发展的生物物理基础,亦即与人类活动相关的物质和能量流动与储存的总体,并在此基础上,强调产业演化过程中生态要素与经济、社会和制度的互动关系及其系统性模式转换。与演化经济学类似,工业生态学同样需要强调产业演进过程中所包含着的持续的或周期性出现的新事物、创造性以及由此产生的多样性和复杂性;

(2) 方法论的标准——是否反对还原论(reductionism) 工业生态学是一种关于工业系统结构及其与自然生态系统关系问题的全面的、一体化的分析视角。这种视角是不同于还原论观点的,即工业系统作为一类复杂系统,在其不同的层次上具有涌现性,每一个层次都不能被完全地归约到另一个层次,或在另一个层次上得到完整的解释。因此,工业生态学应该是反还原论的。

(3) 隐喻标准 是否在理论上广泛使用生态学隐喻。产业发展固然是技术的组合体,在物理化学基础上严格遵循着机械范式。但作为产业整体,尤其是从产业发展的动力而言,产业系统在其性质上更接近于生物系统而非机械系统。因此,使用生态学隐喻可以在观念上取代支配着产业演化的机械论范式。

在此工业生态学语义下,当前需要尽快在以下 4 个方面开展工作:

(1) 社会代谢作用模式研究 产业系统演化是众多变量综合作用的结果,其中存在着交互作用模式的系统性转变。从系统论的角度观察、梳理、分析并调控物质流动模式,是工业生态学的基础领域;

(2) 跨尺度研究 工业生态学从局部、地区和全球等多个尺度上对产品、工艺、产业部门和经济部门中的能流、物质流和信息流开展系统研究。因此,发展多尺度和跨尺度的研究方法和工具是工业生态学的当务之急;

(3) 驱动力研究 可持续发展解析提出了有关“驱动力-压力-状态-响应(DPSIR)”的多重因果关系框架。社会物质代谢目前多停留在 DPSIR 框架中的压力环节,应更多地考虑驱动力方面的研究及其因果关系;

(4) 建立特征指标与数据集合 特征指标及相关数据集合的构建对于工业生态学研究至关重要,正如 GDP 对于宏观经济学那样。

3 结语

面对技术系统尤其是工业发展所带来的挑战,工业生态学的出现是合乎逻辑的事情。尽管学科内涵尚需进一步厘清、理论基础尚需要进一步建构、特征方法尚需进一步开发,但工业生态学在社会物质代谢、工业共

生、产业与基础设施协同演化分析、发展复杂性等领域展现了良好的研究态势。

我国的发展无疑为工业生态学提供了最佳的案例对象。一方面,要学习和借鉴来自国际上的理论、方法和经验,使国内工业生态学尽快与国际接轨;另一方面,要从中国意义出发大胆地观察、追踪和实验,全面研究中国工业化进程中产业发展的重要现象,打破与技术科学、生态学、经济学之间自觉与不自觉的学术分工,敢于将中国实证经验理论化,并全面服务于中国产业生态化实践。

References:

- [1] Frosch D, Gallopoulos N. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 1989, 261, 94 — 102.
- [2] Foster J. Marx's theory of metabolic rift: Classical foundation for environmental sociology. *American Journal of Sociology*, 1999, 105 (2): 366 — 405.
- [3] Abel W. The metabolism of the city. *Scientific American*, 1965, 213 (3): 178 — 193.
- [4] Euro stat. Economy-wide material flow accounts and derived indicators: A methodological guide. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.
- [5] Ayres R U, Ayres L W. Material flow analysis. In: Ayres R U, Ayres L W. *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2002. 79 — 90.
- [6] Bringezu S, Schutz H, Steger S, *et al.* International comparison of resource use and its relation to economic growth — The development of total material requirement, direct material inputs and hidden flows and the structure of TMR. *Ecological Economics*, 2004, 51 (1-2): 97 — 124.
- [7] Xu M, Zhang T Z. Material flows and economic growth in developing China. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11 (1): 121 — 140.
- [8] Ayres R U, Ayres L W. Substance flow analysis methodology. In: Ayres R U, Ayres L W. *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2002. 91 — 101.
- [9] Gordon R B, Bertram M, Graedel T E. Metal stocks and sustainability. *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*, 2006, 103 (5): 1209 — 1214.
- [10] Cheng S K, Shen L, Min Q W. A new perspective for resource sciences: resource flows study. *Resource Science*, 2006, 28 (2): 199 — 200.
- [11] Lu Z W. Tracing methodology for substance flow analysis. *China Engineering Science*, 2006, 8 (1): 18 — 25.
- [12] Liu Y, Chen J N. Substance flow analysis of phosphorus cycle system in China. *China Environmental Science*, 2006, 26 (2): 238 — 242.
- [13] Yuichi Moriguchi. Systematic description of material flows among anthrosphere and ecosphere. *Environmental Science*, 2005, 18 (4), 411 — 418.
- [14] Erkman S. *Industrial ecology: how to realize the sustainable development of industrial society*. Beijing: Economy Daily Press, 1999.
- [15] Xi D L. *No waste process: the new paradigm of industrial development*. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.
- [16] Grdzlishvili I, Sathre R. Industrial ecology in transition countries: historical precedent and future prospects. in R. N. Hull, *et al.* eds. *Strategies to Enhance Environmental Security in Transition Countries*, 95 — 115.
- [17] Paul S Phillips, Kathy Holley, Margaret P Bates, igel P Freestone. Corby Waste Not: an appraisal of the UK's largest holistic waste minimisation project. *Resources. Conservation and Recycling*, 2002, 36 (1): 1 — 31.
- [18] Robert U Ayres, Leslie W. Ayres, *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*, Cheltenham, UK and Brookfield. US: Edward Elgar, 1996.
- [19] Desrochers P. Regional development and inter-industry recycling linkages: some historical perspectives, *Entrepreneurship and Regional Development*, 2002, 14 (1): 49 — 65.
- [20] Allenby B R, Richards D J, eds. *The Greening of Industrial Ecosystems*. Washington DC: National Academy Press, 1994.
- [21] Irma Adelman. Fallacies in Development Theory and Their Implications for Policy, In: Gerald Meier, Joseph Stiglitz. *Frontiers of Development Economics the Future in Perspective*. Beijing: China Financial & Economic Publishing House, 2004. 74 — 94.
- [22] John Foster and J. Stanley Metcalfe. Jia G L, Liu G trans. *Frontiers of Evolutionary Economics: Competition, Self-Organization and Innovation Policy*, Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [23] Chertow M R. Uncovering industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11 (1): 11 — 30.
- [24] <http://baike.baidu.com/view/211721.htm>.
- [25] World Bank. Infrastructure-Meeting Increasing Demands from Developing Countries. <http://worldbank.org.cn/Chinese/Content/IB-infr.htm>.
- [26] Chinese Academy of Social Sciences. *China urban development blue book*, Beijing: Social Science Academic Press, 2007.
- [27] Tao Z P. *Eco-Rucksack and Eco-Footprint*. Beijing: Economic Science Press, 2003.
- [28] Philip H. Development or Involution? Great Britain in the Eighteenth Century and China. *Historical Research*, 2002, 4: 149 — 176.

- [29] Fan X P. Special industrial parks and regional economic development study based on embeddiness, network and social capital. Beijing: Aviation Industry Press, 2005.
- [30] Douglass North. Needed: A Theory of Change. In: Gerald Meier, Joseph Stiglitz, Frontiers of Development Economics the Future in Perspective. Beijing: China Financial & Economic Publishing House, 2004. 350.
- [31] James Scott. Wang X Y trans. Seeing Like a State: How Certain Schemes to Improve the Human Condition Have Failed, Beijing: Social Science Academic Press, 2004.
- [32] Robert Solow. Candidate Issues in Development Economics. In: Gerald Meier, Joseph Stiglitz. Frontiers of Development Economics the Future in Perspective. Beijing: China Financial & Economic Publishing House, 2004. 368.
- [33] Thomas Graedel. On the concept of industrial ecology. Annu. Rev Energy. Environ, 1996, 21:69—98.
- [34] Ma S J. Research on Developing Strategy of Chinese Ecology. Beijing: China Economy Publishing House, 1991.
- [35] Hodgson G M. Evolution and Institutions: On Evolutionary Economics and the Evolution of Economics. Cheltenham, UK: Edward Elgar, 1999. p. 131f. From: Meng Jie, The Preface of Evolutionary and Innovative Economics books. Beijing: China Remin University Press, 2007.

参考文献:

- [10] 成升魁, 沈镭, 闵庆文. 资源科学研究的新视角——自然资源流动过程的研究. 资源科学, 2006, 28(2): 199~200.
- [11] 陆钟武. 物质流分析的跟踪观察法. 中国工程科学, 2006, 8(1): 18~25.
- [12] 刘毅, 陈吉宁. 中国磷循环系统的物质流分析. 中国环境科学, 2006, 26(2): 238~242.
- [14] Suren Erkman. 工业生态学——怎样实施超工业化社会的可持续发展. 北京: 经济日报出版社, 1999. 5~12.
- [15] 席德立. 无废工艺——工业发展新模式. 清华大学出版社, 1990.
- [21] Irma Adelman. 发展理论中的误区及其对政策的含义. 见: Gerald Meier, Joseph Stiglitz. 发展经济学前沿——未来展望. 北京: 中国财政经济出版社, 2004. 74~94.
- [22] 约翰·福斯特, 斯坦利·梅特卡夫著. 贾根良, 刘刚译. 演化经济学前沿(竞争自组织与创新政策). 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [25] 世界银行. 基础设施-满足发展中国家不断增长的需求, <http://worldbank.org.cn/Chinese/Content/IB-infr.htm>.
- [26] 中国社会科学院. 中国城市发展蓝皮书. 北京: 社科文献出版社, 2007.
- [27] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹——可持续发展的重量与面积观念. 北京: 经济科学出版社, 2003.
- [28] 黄宗智. 发展还是内卷? 十八世纪英国与中国. 历史研究, 2002, 4: 149~176.
- [29] 范晓屏. 特色工业园区与区域经济发展——基于根植性、网络化与社会资本的研究. 北京: 航空工业出版社, 2005.
- [30] Douglass North. 需要一种变迁理论. 见: Gerald Meier, Joseph Stiglitz, 发展经济学前沿-未来展望. 北京: 中国财政经济出版社, 2004. 350.
- [31] James Scott. 王晓毅译. 国家的视角——那些试图改善人类状况的项目是如何失败的. 北京: 社会科学文献出版社, 2004, 序第2.
- [32] Robert Solow. 发展经济学的备选事项. 见: Gerald Meier, Joseph Stiglitz. 发展经济学前沿——未来展望. 北京: 中国财政经济出版社, 2004. 368.
- [34] 马世骏. 中国生态学发展战略研究. 北京: 中国经济出版社, 1991, 前言.