DOI: 10.5846/stxb201507071442
项国鹏,宁鹏,黄玮,石磊.工业生态学研究足迹迁移—基于 Citespace II 的分析.生态学报,2016,36(22): - .
Xiang G P, Ning P, Huang W, Shi L.The migration footprint of industrial ecology research: Visualized Research Based on CiteSpace II.Acta Ecologica Sinica,2016,36(22): - .

# 工业生态学研究足迹迁移—基于 Citespace II 的分析

项国鹏[1],宁 鹏[1,*],黄 玮[1],石 磊[2]
1 浙江工商大学工商管理学院, 杭州 310018
2 清华大学环境学院, 国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100084

**摘要**:由于工业发展与环境关系愈发恶化,可持续发展问题日益突出,有必要通过回顾工业生态学研究来寻找理论指导。本文利用引文空间分析工具 Citespace II,通过绘制工业生态学知识图谱,以定量与定性结合方法,系统梳理国内外工业生态学研究成果,挖掘工业生态学的知识基础、发展脉络和研究热点。研究发现:工业生态学是一门交叉性学科,涉及环境科学、生态学、管理学和经济学;生态工业园仍为工业发展重要方向,需要结合生态系统理论与工业流程重构对其加以改善;城市、农业、共生成为当前研究热点;生命周期评估、投入产出分析和工业代谢仍为重要分析工具;我国工业生态问题将成为未来关注重点。

**关键词**:工业生态学;Citespace II;知识图谱;演化路径

# The migration footprint of industrial ecology research: Visualized Research Based on CiteSpace II

XIANG Guopeng[1], NING Peng[1,*], HUANG Wei[1], SHI Lei[2]
1 *School of Business Administration, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou* 310018, *China*
2 *SEPA Key Laboratory on Eco-industry, School of Environment, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*

**Abstract**: Recently, the relationship between industrial development and the environment has deteriorated, and sustainable development has become a prominent issue, facilitating a general review of industrial ecology research for theoretical guidance. In the present paper, a citation spatial analysis tool (Citespace II) was used to draw a knowledge map of industrial ecology, based on global qualitative and quantitative research, focusing on the knowledge base, development trails, and research hotspots. Industrial ecology research in China first began in the early 1980s, and after tireless efforts and theoretical explorations, has been developed in a Chinese context with practical extensive investigations. Simultaneously, the development of national ecological demonstration areas has progressed considerably over the past 15 years, and 45 ecological parks had been approved and named as national ecological demonstration zones. With the development of ecological civilization, national environmental protection has improved substantially. However, improvement is needed regarding ecological industry development and green manufacturing, to develop industrial ecology in a Chinese context. It has been proposed that industrial ecology is an interdisciplinary study, including environmental science, ecology, management, and economics; eco-industrial parks are an important aspect of industrial development, requiring effective integration of ecosystem theory and industrial process reconstruction. Urban and agricultural development and their symbiosis are still the current research focus, and life cycle assessment and input-output analysis are important analytical tools for this development. The ecological problems facing industrial development in China will be a key issue in future research.

**基金项目**:国家自然科学基金项目(71372010);浙江省软科学研究项目(2015C25038); 教育部人文社会科学基金项目(15YJA630044)
**收稿日期**:2015-07-07; **修订日期**:2016-05-03
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ningpeng0810@163.com

**Key Words**: industrial ecology; Citespace II; knowledge mapping; evolutionary path

工业发展与环境资源的矛盾关系驱动工业生态学研究的不断发展[1-5]。目前,工业生产进入数字化时代,环境资源日益枯竭,工业生态学研究也在相应地探索新问题。工业生态学的学科属性逐渐清晰,工业共生方法持续更新,这使工业生态学研究领域不断丰富,但是工业生态学演化路径、时期热点和方法进展仍不明晰。

工业生态学是一门综合交叉学科[4-7]。研究者来自多个学科领域,涉及生态学、管理学和系统科学等;工业生态学研究方法多种多样,其中生命周期评价法、输入输出分析与复杂网络方法旨在充分利用环境资源;不同时期研究热点跨度较大,始于生态系统理论,发展于工业系统综合研究;研究热点不断变化,以可持续发展作为研究主线。工业生态学经过 30 多年的研究进展,一般的文献梳理难以清晰描述研究内容的宽度与深度,很有必要借助科学分析工具进行整理,其中工业共生方法、研究热点变迁和学科发展足迹等亟需深入探析。

文献计量学的发展为解决上述问题提供了科学工具。基于信息计量学分析方法,利用 Citespace II 工具对以往施引文献和被引文献之间关系进行空间描述,形成各学科的知识结构和各时期的研究热点,继而廓清工业生态学研究知识基础。目前国内利用 Citespace 主要集中在管理学、高新技术专利[8],较少涉及工业生态学。本文借助 Citespace 工具,通过文献共被引、关键词共现分析挖掘工业生态学研究历程的知识结构、学科发展脉络与研究热点,再结合时区聚类、突现词分析厘清工业生态学理论框架和研究演进过程,为理论发展提供研究借鉴。

## 1 数据来源与研究方法

鉴于数据可获取性,本文使用的数据来源于 Web of Science(以下简称 WOS)数据库(SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, CCR-EXPANDED, IC),数据采集于 2015 年 5 月 23 日,检索条件为:主题(topical terms) = industrial ecology,时间段为“1989—2015”。共检索出 2639 条记录,每个记录均包括每篇引文的标题、作者、摘要、关键词、参考文献等题录信息。

本文采用信息可视化和文献计量学分析法,借助 CitespaceII 分析工具。信息可视化(Information Visualization)最早由 Robertson 等于 1989 年提出,基于计算机技术将数据以图像等形式展现出来[9]。目前可视化分析软件中文献计量使用较好的当属 Citespace,由美国德雷塞尔大学(Drexel University)的陈超美博士团队开发,它能够把研究主题的演进情况和最新趋势进行可视化呈现[10]。

## 2 工业生态学的知识结构

### 2.1 知识基础识别

工业生态学知识基础和知识结构分析为后期工业生态学研究者提供参考框架。运行知识基础分析的前提假设是,同一篇论文的参考文献(即共被引参考文献)间秉承同一研究脉络或者有着类似的研究议题,各个参考文献间的这种关系随着共被引频次的增加而强化,通过建立参考文献网络可以归纳梳理研究方向,刻画研究发展脉络,而在网络中出现频次高的参考文献就可以认为是本学科的知识基础。关键文献在一段时间内具有较大影响力。本文分析 1989 年至 2015 年 2639 篇文献,选择每个时间切片被引频次前 20 的文献参与分析,数据导入 Citespace II 分析得到 167 个节点(Nodes), 359 条连线(Links)。

从图 1 可见,首先,根据半衰期(half-life)分析,半衰期最大的为 1989 年由 Frosch 等(半衰期 12)在《科学美国人》发表题为“制造业的战略”(最初题目为“工业可持续发展战略”),该文首次提出工业生态学概念[1],使其受到国际学者广泛关注,工业生态学就此成为研究关注点。该文属于工业生态学研究初期奠基文献,提出工业生态学概念、基础知识及研究对象,被持续不断引用。

其次,根据突现度(Burst)分析,突现度反映文献在一段时间内影响力程度增加速度,也即通过被引用频

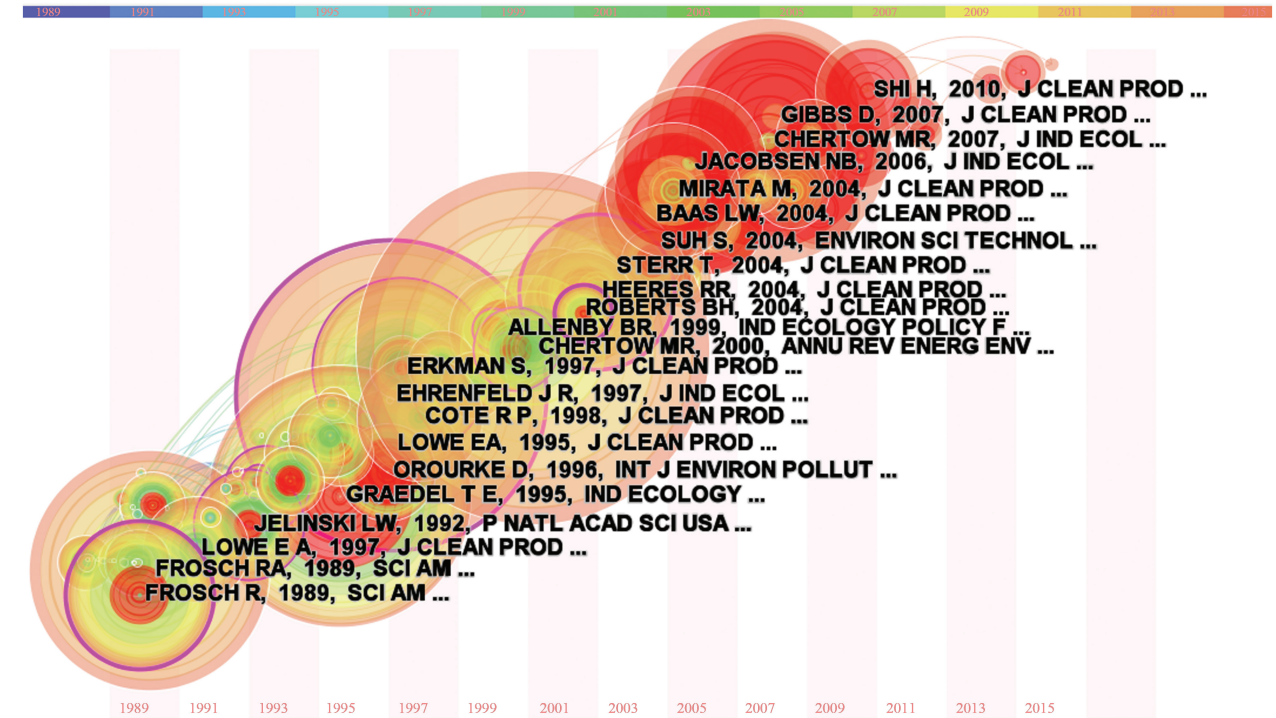


**图 1　文献被引时区视图**

**Fig.1　The time-zone view of the cited references**

Citespace 设置为: Time Slicing:2Year; Term Type: Noun Phrases;Node Types: Cited Reference、Select Top 20 most cited from each slice; Pruning: Pathfinder、Pruning the merged network; Clusters: Clustering, 其他采用默认设置

次的增加来体现。突现度最高的为 Gibbs 和 Deutz(突现度 10.16)在 2007 年通过生态工业园区发展体现工业生态学实践意义,证明工业生态学理论应用价值,并且认为工业园区内连接关系有待改善以更好践行可持续发展目标[11]。O'Rourke 等(突现度 9.98)进一步对工业生态学概念和理论框架进行辨析,梳理既往研究并建议加强分析方法等方面研究[12]。这两篇文章在第一阶段概念辨析基础上进一步明晰工业生态学内涵,同时关注工业生态学实践应用研究,进一步论证工业生态学兼具基础和应用研究价值。

再者,共被引频次(Co-citation Frequence)分析,Chertow(网络中被引频次 139)回顾工业生态学分支领域"工业共生"研究现状,指出工业共生关键在于多方合作及地缘毗邻,从而提供协作的可能性[13]。Ehrenfeld 和 Gertler (共被引频次 121)梳理丹麦卡伦堡工业生态系统的运作逻辑,发现其潜在的联系并非其他地区可以模仿学习,强调产业关联对工业共生关系的重要作用[10]。工业共生和工业系统作为工业生态学的分支研究受到实践研究者重视,同时这两篇文章也为后期生态工业园理论研究奠定坚实基础,受到长期关注。

最后,根据中心度(Centrality)分析,中心度指网络中经过某个节点并连接另外两个节点的最短路径线占这两个节点之间最短路径线总数之比,识别网络中高度连接的节点,体现网络结构中文章的相对重要性。Ehrenfeld 和 Gertler (中心度 0.31)通过分析卡伦堡工业生态系统发展模式,明确经济驱动力及企业间关系在其中发挥的关键作用,认为卡伦堡产业共生经验较难推广[14]。Frosch 和 Gallopoulos(中心度 0.3)通过工业代谢研究,提出工业生态学及工业生态系统概念内涵,开辟工业生态学研究先河[1]。

经典文献反映研究领域的知识基础。该类文献的被引用频次以及持续被引用时间(半衰期)反映该文献在研究领域的坚实地位,通过关注社会实践热点并及时总结经验为理论提炼奠定基础,具有较高的开拓性和创新性。工业生态学领域早期研究者关注工业活动与自然生态系统相关性,模拟自然生态系统能量传递以提升工业材料利用效率,进一步关注生态工业园建设,通过产业间协调实现能源多级利用。从以上 32 篇经典文献分析中发现,工业生产与环境和谐共生是历来关注焦点,未来较长一段时间也将是学术界和实践者的共同

关注重点。

表 1 关键文献主要指标信息表

Table 1 The important information table of crucial references

| 序号 Number | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 年份 Year | 1997 | 1989 | 2002 | 2000 | 1994 | 2007 | 1992 | 1992 | 1999 | 1997 | 1994 |
| 作者 Author | Ehrenfeld | Frosch | Korhonen | Den | Frosch | Chertow | Jelinski | Frosch | Hawken | Erkman | Allen |
| 频次 Frequence | 121 | 60 | 24 | 14 | 16 | 96 | 47 | 37 | 18 | 74 | 8 |
| 中心度 Centrality | 0.31 | 0.3 | 0.23 | 0.2 | 0.18 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.14 |
| 突现度 Burst | | 9.43 | 4.37 | 5.24 | 4.58 | 9.91 | 7.19 | 6.78 | 7.24 | 4.17 | 3.6 |
| 半衰期 Half-life | 3 | 12 | 3 | 5 | 1 | 3 | 5 | 0 | 1 | 3 | 3 |
| 序号 Number | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 年份 Year | 1996 | 2006 | 2000 | 2004 | 1992 | 1998 | 2000 | 1997 | 1996 | 2001 | 1998 |
| 作者 Author | Graedel | Jacobsen | Ehrenfeld | Heeres | Duchin | Cote | Chertow | Ehrenfeld | Orourke | Korhonen | Baas |
| 频次 Frequence | 7 | 61 | 37 | 62 | 14 | 20 | 139 | 26 | 41 | 38 | 27 |
| 中心度 Centrality | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.1 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| 突现度 Burst | | 6.2 | 5.41 | | 3.9 | 9.12 | | 4.87 | 9.98 | 5.59 | |
| 半衰期 Half-life | 4 | 4 | 2 | 4 | 0 | 3 | 4 | 6 | 1 | 3 | 3 |
| 序号 Number | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | |
| 年份 Year | 1989 | 1997 | 2007 | 1989 | 2007 | 1988 | 2007 | 2010 | 2005 | 1996 | |
| 作者 Author | Frosch | Schwarz | Zhu QH | Ayres | Gibbs | Szargut | Tudor | Shi H | Mirata | Daly | |
| 频次 Frequence | 97 | 59 | 31 | 29 | 68 | 29 | 29 | 41 | 33 | 20 | |
| 中心度 Centrality | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | |
| 突现度 Burst | | | | 6 | 10.16 | | 5.55 | 9.32 | | 5.63 | |
| 半衰期 Half-life | 3 | 5 | 8 | 3 | 3 | 9 | 8 | 2 | 6 | 7 | |

## 2.2 研究网络演化分析

参考文献共引网络表征交叉研究集合,聚类代表研究共同脉络焦点。时间切片内被引文献构成参考文献网络,文章通过分析 1989 年至 2015 年的 2639 篇文献,选择每个时间切片被引频次前 25 的参考文献参与分析,数据导入 Citespace II 分析得到 214 个节点(Nodes), 504 条连线(Links),23 个主要分组聚类。

由图 2 可知,基于时间切片内引用频次前 25 位的重点文献聚类,工业共生、工业生态园和环境研究之间相关度较为紧密,同时工业生态学和工业生态园研究聚类突现度较高(聚类区域为红色)。综合参考文献时间线视图(图 2)和共现网络聚类主要信息表(表 2)来看,工业生态学研究充满学科交叉。

通过对工业生态学研究聚类进行归纳集群,形成更加集中的 6 个研究群落,如表 2 所示。工业生态学源于环境变化引发思考,结合生态学理论重新认知工业组织与环境资源的关系,以及对可持续发展目标的重要作用,伴随生态意识在工业发展中不断深化,结晶于生态工业园研究。

20 世纪 50 年代之后,工业发展带来的环境压力日趋明显。1971 年,Bryan 等基于生态学理论分析重金属污染对物种变化的影响,认为生态环境保护需要得到重视[15],工业生产模仿自然系统构建生态工程复合系统[16-17],成为实现循环经济的重要方法[18]。。1988 年,Ackers 和 Smith 基于案例研究,发现适应环境变化能够减小环境危害[19]。随着组织管理方法完善,工业生产更加重视绩效产出,Freeman 和 Hannan 提出组织生态学概念,以改进组织生产效率[20]。基于此,工业组织和生态学在利用环境资源时都加深了理解。Christensen 等梳理生态系统管理,寻找自然资源最优利用方式以实现可持续发展[21]。Ayres 发现有毒重金属任意流动破坏可持续发展目标,源头控制和高效利用成为有效缓解手段[22]。伴随着生态环境研究的增加,公众生态意识也在不断提高。Graedel 类比工业生态活动与生物生态系统,指出在工业活动中需要加强生态意识,注意生态逻辑运用[23]。综合以往研究,工业生态学理论体系基本形成。Graedel 等系统梳理工业生态学研究,初步形成理论框架[24],Desrochers 进一步探索工业生态学与企业生产之间的关系,以及市场扭曲和政策障碍对资源循

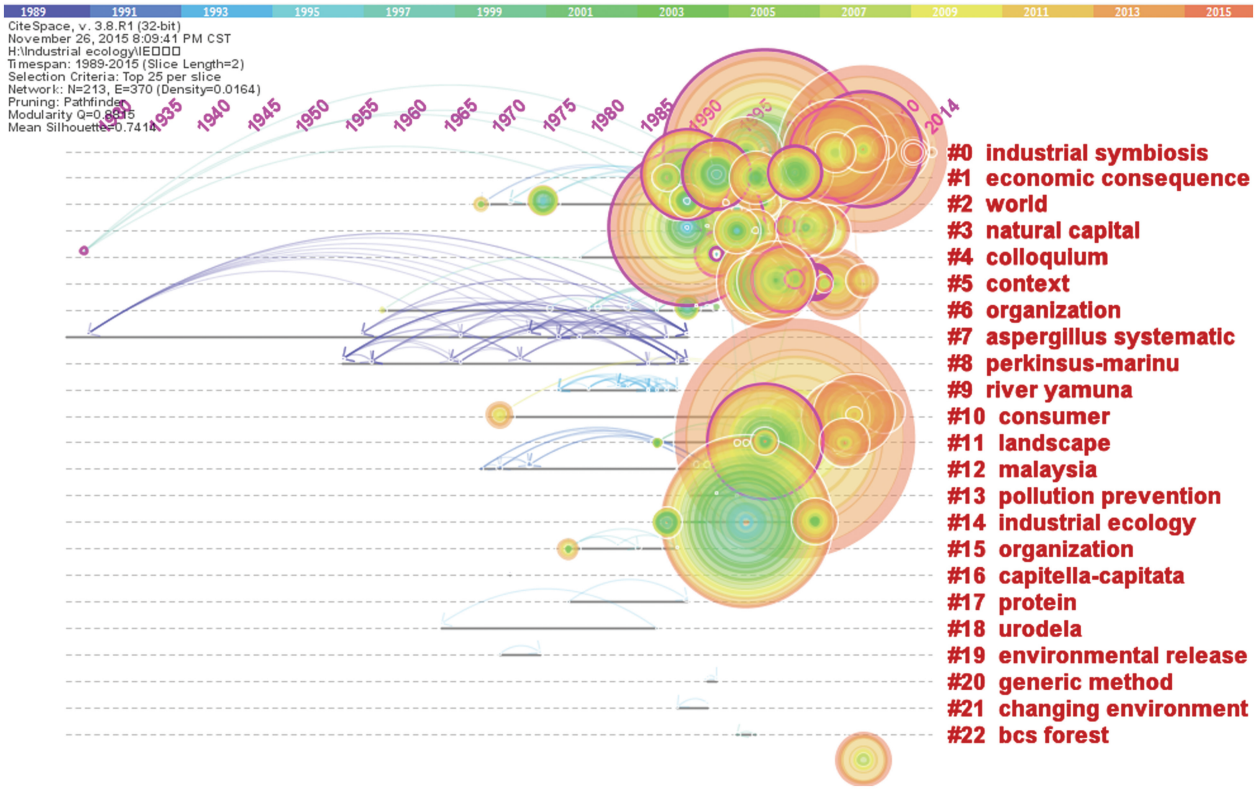


**图 2　参考文献时间线视图**

**Fig.2　The timeline-view of cited references**

Citespace 设置为: Time Slicing:2Year;Term Type: Noun Phrases; Node Types: Cited Reference、Select Top 25 most cited from each slice; Pruning: Pathfinder、Pruning the merged network; Clusters: Clustering, 其他采用默认设置

**表 2　共现网络聚类主要信息表**

**Table 2　The main information of co-occurrence network clustering**

| 研究种群 Community | 聚类主题 Theme | 主要聚类标签(TF * IDF) Label of the main cluster | 年份 Year | 代表作者 Author |
|---|---|---|---|---|
| 应用实践 | 城市工业共生 | china; industrial symbiosis; geographical thought | 2006 | Shi H;Davis |
| | 要素框架 | factor;use framework; life cycle assessment | 2001 | Joshi;Tudor;Hertwich |
| | 生态园区 | industrial park; pursuing extended producer responsibility; eco-industrial park | 1997 | Cote;Lowe |
| 工业生态学 | 工业生态学 | industrial ecology; eco-industrial initiative; circular economy | 1996 | Graedel;Desrochers |
| 政策教育 | 意识重塑 | conscious manufacturing; product recovery; natural capital; ecotoxicology | 1995 | Frosch;Graedel |
| | 经济影响 | economic consequence; sustainable economies; productive urban region | 1996 | Hajer;Daly |
| | 工业生态教育 | landscape; education; industrial symbiosis; case study | 1992 | Brown;Chertow |
| | 污染治理 | pollution prevention; macro scale; life-cycle analysis | 1992 | Frosch;Allen |
| | 工业生态反思 | reflection; concept; industrial ecology; colloquium | 1991 | Hoffman;Ross |
| 方法工具 | 清洁生产 | generic method; cleaner product | 1991 | Heijungs |
| | 物质流转 | national materials flow; industrial ecology; environment; input-output | 1990 | Barnett;Ayres |
| | 经济分析 | economic analysis; income; forest industry | 1995 | Christensen;Robertson |
| | 工业发展 | biological assessment; industrial-development; biological assessment | 1980 | Khan;Alexander;Bishop |
| | 水质管理 | conservation; management; river Yamuna | 1983 | Adholia;Ajmal;Agrawal |
| | 公司效应 | organization; firm effect; innovative performance | 1983 | Byrt;Freeman |
| | 组织生态学 | organization; firm effect; innovative performance; firm behavior | 1982 | Carroll;Hannan |
| 生态隐喻 | 生态学 | ecology | 1971 | Bryan;Buchanan |
| | 生态视角 | secondary metabolite; ecological perspective; discovery | 1983 | Jensen;Gross |

续表

| 研究种群 Community | 聚类主题 Theme | 主要聚类标签(TF * IDF) Label of the main cluster | 年份 Year | 代表作者 Author |
|---|---|---|---|---|
| | 再生生态学 | environmental release; reproductive ecology | 1972 | Bajaj |
| 环境负荷 | 微生物 | urodela; proteidae; non-troglomorphic amphibian | 1975 | Aljancic |
| | 环境变化 | changing environment; environment | 1989 | Sutherst; Ackers |
| | 污染负荷 | pollutant body burden; temperature; gulf-coast oyster | 1973 | Becjert; Andrews |
| | 微生物系统 | approach; aspergillus systematic | 1973 | Burns; Church |

环利用的影响[25],企业构建绿色供应链有效强化生态工业发展[26-27],延伸生产者责任实现经济效率和环境利用更优组合[28]。工业生态学在理论完善过程中,一直关注工业企业实践,生态工业园区建设逐渐成为工业生态学最好的实践体现。根据工业生态学研究演进路径,归纳出工业生态学演进视图(如图 3)。

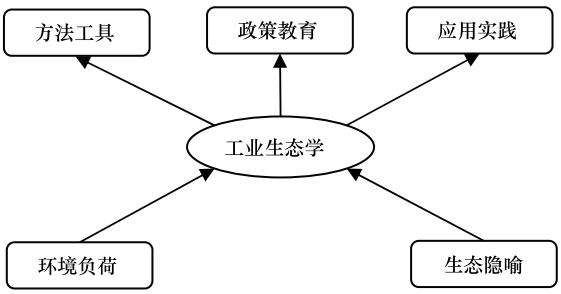


图 3 工业生态学研究演进视图

Fig.3 The evolution view of industrial ecology research

## 3 工业生态学研究演进识别

研究主题的分布及演化能够直观地体现不同时期内的热点领域、研究视角分布、研究方法变化。关键词是学术论文研究主题的核心表征,可以通过它来发现研究主题变化,一定程度上可以揭示学科领域中知识分布的内在联系。因此,本文通过关键词共现分析来鉴别工业生态学研究的主要研究方向和热点,并判断研究主体结构的发展变化。数据导入到 Citespace II 中,节点类型选择关键词(Keyword),经过 137 次迭代,得到节点(Nodes)170 个,连线(Links)379 条,再选择时间区(Timezone)视图结果,如图 4 所示。

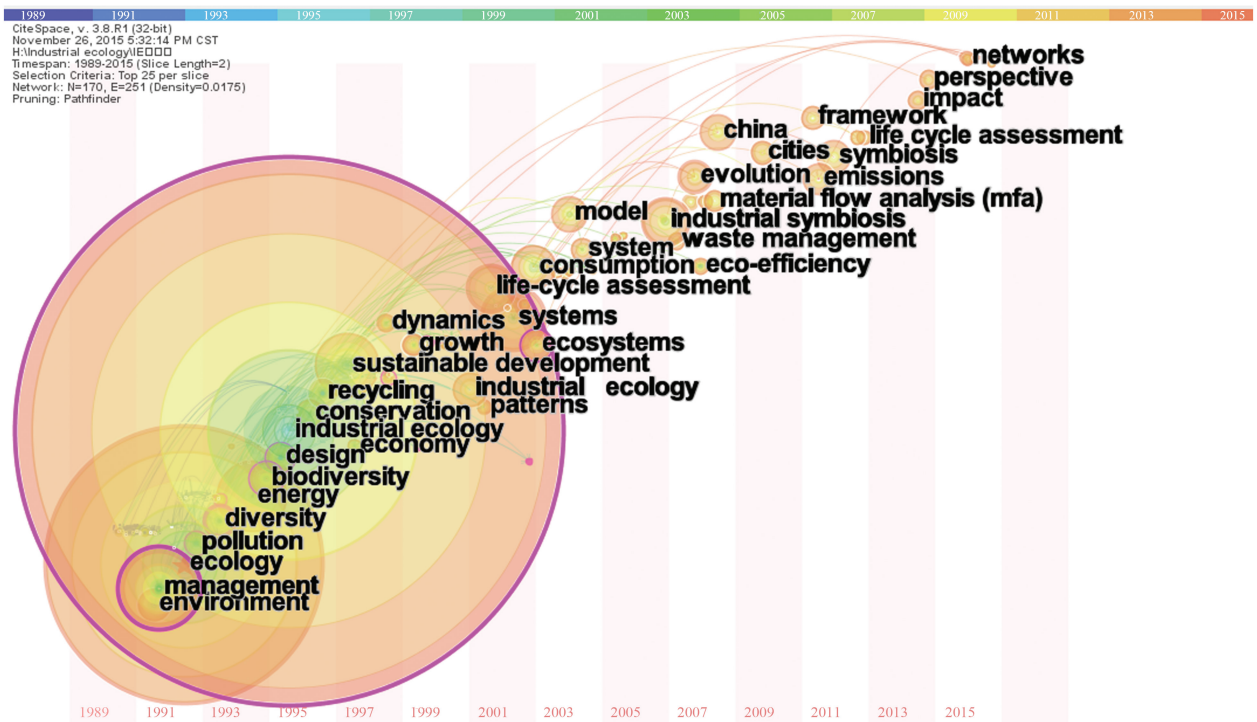


图 4 热点关键词时区视图

Fig.4 The time-zone view of Hot Keywords

Citespace 设置为:Time Slicing:2Year;Node Types: Keyword、Select Top 25 most cited from each slice;Pruning:Pathfinder、Pruning the merged network;Clusters:Clustering,其他采用默认设置

从图 4 可见,工业生态学主题演化路径较为清晰。早期关注生态学(ecology)[29-31]、工业生态学(industrial ecology)[32]及污染(pollution)[33]和环境(environment)[34]问题,中期关注可持续发展(sustainable development)[35]、生态系统(ecosystem)[36]研究工业发展和环境和谐共处之道,再到关注工业共生(industrialsymbiosis)[37]、投入产出分析(input-output analysis)[38]与生态产业园(eco-industrial parks)[39,40]等问题。对比图 2 与图 4 可以看出,随着环境变化,工业生态学研究主题逐步深入,呈现出"描述环境现象,探讨解决方式,明确解决方案"的路径。

针对主题演化路径,根据频次和中心度,整合出关键词共现网络主要信息表,如表 3 所示。可见,工业生态学和自然生态学受到持续重视,也证明其在该领域的重要地位。同时,可持续性、管理和能源问题作为"老大难"问题被不断讨论,也为未来研究提出重要挑战。网络(network)[30]作为新兴主题被较多学者关注,包括工业循环网络[41]、工业共生网络[13,42]、社会-物料网络[43]、研究合作网络[44]等。在实践中,工业企业之间不再是简单的线性链状关系,优化不同工业企业间网络关系可以更好地提升效率。

**表 3　关键词共现网络主要信息表**

**Table 3　The main information table of key words co-occurrence network**

| 频次 Freq | 中心度 Centrality | 关键词 Keyword | 年份 Year | 频次 Freq | 中心度 Centrality | 关键词 Keyword | 年份 Year |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 851 | 0.2 | industrial ecology | 1995 | 64 | 0.12 | ecosystems | 1999 |
| 457 | 0.08 | ecology | 1992 | 61 | 0.02 | recycling | 1995 |
| 142 | 0.1 | sustainability | 1997 | 58 | 0.29 | diversity | 1994 |
| 139 | 0.35 | management | 1993 | 58 | 0.11 | design | 1995 |
| 127 | 0.07 | energy | 1995 | 53 | 0.14 | pollution | 1992 |
| 120 | 0.07 | sustainable development | 1997 | 51 | 0.09 | growth | 1999 |
| 117 | 0.02 | systems | 2001 | 50 | 0.07 | dynamics | 1999 |
| 90 | 0.02 | life-cycle assessment | 2001 | 48 | 0.07 | system | 2005 |
| 81 | 0.05 | consumption | 2005 | 41 | 0.01 | networks | 2015 |
| 74 | 0.07 | model | 2005 | 40 | 0.09 | economy | 1995 |
| 72 | 0.05 | environment | 1992 | 39 | 0.04 | patterns | 1995 |
| 71 | 0.18 | biodiversity | 1995 | 37 | 0.16 | performance | 1999 |
| 71 | 0.07 | evolution | 2007 | 37 | 0.05 | political ecology | 1999 |
| 65 | 0.06 | conservation | 1995 | 37 | 0.02 | metabolism | 2011 |
| 65 | 0.02 | emissions | 2009 | 36 | 0.02 | eco-industrial park | 2003 |

## 4　研究前沿趋势分析

研究热点是在近期较短的一段时间内,有内在联系的、数量相对较多的一组论文所探讨的科学问题或专题。通过对研究前沿趋势分析,能够把握研究变化动态,预测未来研究动向。对于研究领域趋势分析,Citespace 提供了独特的对突变词(Burst Words)的探测技术,即通过探测在某一时间段内被引频次或共现频次突现度增加的节点来预测领域内的研究方向[10]。数据导入到 Citespace II 中,节点类型选择关键词(Keyword),结合软件突现检测算法选择突现词(Burst Terms)并筛选突现关键词,再选择名词短语(Noun Phrases)后运行分析,选择时间区(Timezone)视图,得到节点(Nodes)104 个,连线(Links)197 条,如图 5 所示。

表 4 显示,工业生态学研究趋势可以划分为四个阶段:

(1)探索萌芽阶段(1989—1994 年)。20 世纪 50、60 年代,生态学蓬勃发展,尤其是仿生学快速发展,使人们萌生模仿自然生态系统研究工业活动的想法[1]。经过生态学长期发展和工业仿生学逐渐成熟,70 年代以后工业生态学思想初具雏形。然而,"工业生态学"核心思想酝酿于 1989 年前后,Forsch 等通过研究产业代谢(旨在模拟生物新陈代谢和生态系统循环再生过程),该年 9 月在《科学美国人》(Scientific American)发表

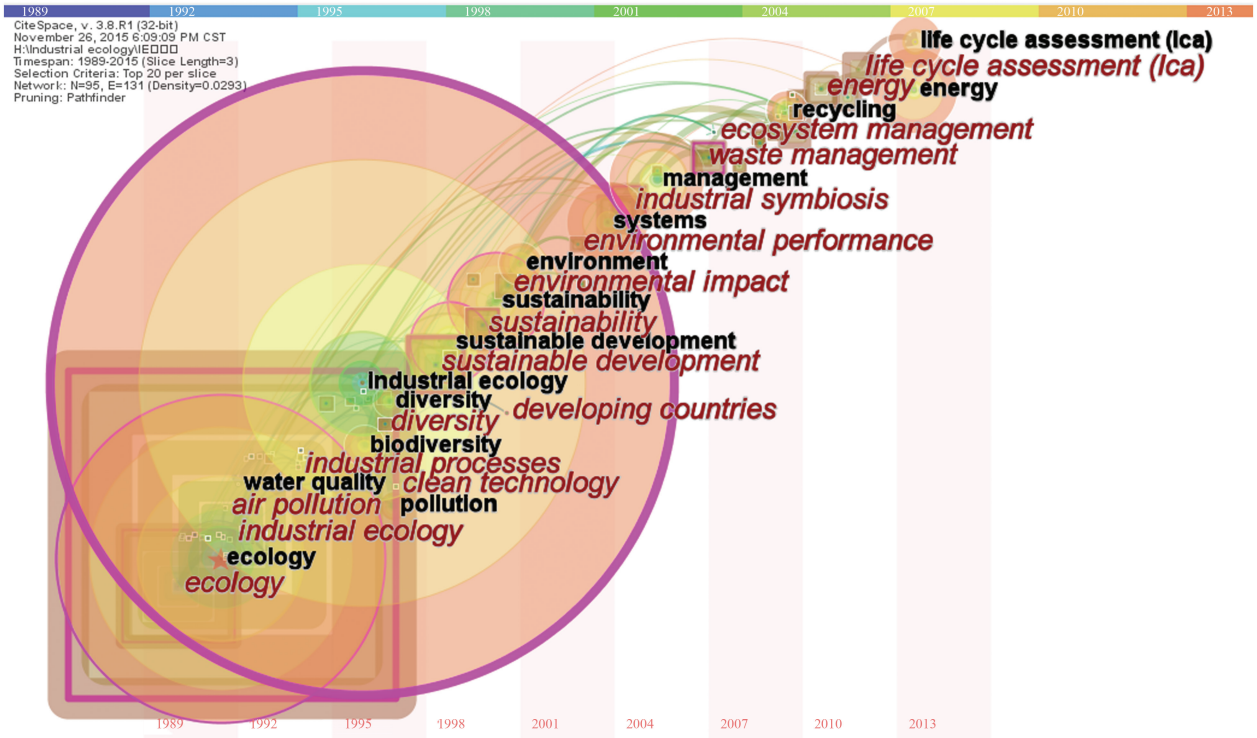


**图 5 研究前沿时区视图**

**Fig.5 The zone view of research frontier**

红色字体表示突现关键词,黑色字体表示引文关键词; Citespace 设置为:Time Slicing:3Year;Node Types: Keyword、Select Top 20 most cited from each slicePruning:Pathfinder、Pruning the merged network; Clusters: Clustering, 其他采用默认设置; 图中方形节点代表突现词语,方形大小表示突现词的权重,方形位置体现突现词出现的时间,图中圆形节点反映高被引论文,圆形大小反映该论文被引频次,通过高被引论文作为参照,可以反映出该突现词出现的背景特征

**表 4 关键词共现网络突现词语信息表**

**Table 4 The information of burst words within co-occurrence network**

| 年份 Year | 关键词 Keyword | 突现度 Burst | 年份 Year | 关键词 Keyword | 突现度 Burst |
|---|---|---|---|---|---|
| 1992 | industrial ecology | 46.28 | 1995 | population ecology | 3.96 |
| 2010 | life cycle assessment (lca) | 8.5 | 2010 | cities | 3.95 |
| 1992 | industrial activity | 5.32 | 1998 | raw material | 3.94 |
| 2001 | industrial systems | 5.22 | 2007 | evolution | 3.86 |
| 1995 | raw materials | 5.12 | 1998 | industrial microbiology | 3.73 |
| 1995 | pollution | 4.48 | 2013 | china | 3.67 |
| 1995 | carbon dioxide | 4.44 | 2007 | climate change | 3.35 |
| 1995 | sustainable development | 4.01 | | | |

题为“工业可持续发展战略”,正式提出工业生态学,并受到国际学者关注[1,45]。此时“工业生态学(industrial ecology)[46,47]”和“工业生态活动(industrial activity)[48,49]”成为突现词,表明初期工业生态学研究伴随着工业活动一起进入研究者视野,其初始目的是为了解决环境资源和工业发展的矛盾。

(2)蓬勃发展阶段(1995—2001 年)。期间产生大量突现词,表明工业生态学开始成为学术热点,受到学者广泛关注。“可持续发展(sustainable development)[50]”和“工业系统(industrial systems)[51]”等突现词形成多样化研究热点。1997 年,麻省理工学院和耶鲁大学合办全球第一个工业生态学期刊《Journal of Industrial Ecology》,专门刊发工业生态学研究论文。2000 年,国际工业生态学会(International Society of Industrial

Ecology)成立,为各国该领域学者提供交流平台,各国学者更加重视工业生态学,出现大量交流平台和高质量学术期刊。

(3)平稳振荡阶段(2002—2006 年)。在此时期,学者就工业生态学研究的合法性展开深入讨论,工业生态学也逐渐获取学科合法性[52],相关学者反思工业生态学研究的科学性和独立性[53],及其对可持续发展目标的有效性[54],继而明晰其政策价值和研究意义[55]并获得学术、产业及制度合法性[56]。2004 年,工业生态学术讨论会在耶鲁大学召开,与会学者重新界定了工业生态学相关理论。经过十多年发展,工业生态学理论不断增加同时,学者开始对其概念理论进行重新界定和优化,论证学科合法性。

(4)成长成熟阶段(2007—2013 年)。期间工业生态学研究领域出现“生命周期评估(life cycle assessment)[30]”、“工业共生(industrial-symbiosis)[57,58]”、“演化论(evolution)[59]”、“生态城市(cities)[60]”以及“中国(china)[61,62]”等突现词,集中分析具体现实问题。其中生命周期评估突现度高达 8.5,表明工业生态学在关注可持续发展的同时,也在积极寻求具体方法以指导操作层面工作。其中,“中国”问题在 2013 年引起国际学者广泛关注[62],突现度为 3.67,说明中国工业化发展模式正在引起世界关注。

## 5　结论及建议

本文利用信息可视化软件 Citespace II 分析了 27 年间的工业生态学研究变迁路径,其中包括知识基础框架、主题发展脉络和研究前沿演进等,这是对工业生态学研究综述的一个新尝试。通过关键词贡献网络分析,发现各时期研究主题迁移过程。进一步分析突现词视图,辨识当前工业生态学研究前沿动态,为以后研究指明方向。研究还发现,目前工业生态学研究呈现如下特点:

(1)工业生态学是一门日趋成熟的综合交叉学科。20 世纪中期,环境恶化引起学者关注。继而以环境科学和生态学等学科为基础,结合工业组织管理理论研究生态工业园区建设,随着生态意识提升和分析工具完善,研究城市环境资源与工业生产的和谐发展。可见工业生态学是一门由现象观察到理论探索再到指导实践的学科。

(2)国内工业生态问题受到更多关注。中国作为关键词多次被提到,一定程度体现我国工业生态现状对世界范围的工业生态研究的吸引力日益增强。同时,我国作为资源大国,如何合理利用资源成为未来很长一段时间的重要议题。另外,我国工业发展水平有待提高,加强工业化与信息化的融合建设成为重要方向。

(3)我国工业生态学研究需要结合中国情境进行本土化应用。中国处于工业化快速发展阶段,环境资源条件日趋恶化。同时,生态工业建设中政策发挥主导作用,市场配置资源的基础性作用尚未充分发挥。工业生态学理论研究、生态工业园区建设与环境保护工作均需适应中国情境。

本文的不足之处在于,最新文献未得到计量方法足够重视,部分文献聚类会出现时滞现象。再者,数据库搜索“工业生态学”未包含 1989 年之前研究文献,造成检索不充分情况。总之,数据科技(Data Technology)时代到来之际,工业生态学需要借助互联网工具实现环境、资源、污染治理与工业发展的和谐共生。

**参考文献(References):**

[1] Frosch R A, Gallopoulos N E. Strategies for manufacturing. Scientific American, 1989, 261(3): 144-152.

[2] 石磊. 工业生态学的内涵与发展. 生态学报, 2008, 28(7): 3356-3364.

[3] Evan H Z. Socio-economic and labour aspects of pollution control in the chemical industries. International Labour Review, 1974, 110(3): 219-233.

[4] 王兆华, 尹建华. 工业生态学与循环经济理论: 一个研究综述. 科学管理研究, 2007, 25(1): 25-28.

[5] 李同升, 韦亚权. 工业生态学研究现状与展望. 生态学报, 2005, 25(4): 869-877.

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

[7] 袁增伟, 毕军. 产业生态学最新研究进展及趋势展望. 生态学报, 2006, 26(8): 2709-2715.

[8] 刘则渊, 陈悦, 侯海燕. 科学知识图谱: 方法与应用. 北京: 人民出版社, 2008.

[9] Keim D A. Information visualization and visual data mining. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2002, 8(1): 1-8.

[10] Chen C M. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3): 359-377.

[11] Gibbs D, Deutz P. Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(17): 1683-1695.

[12] O'Rourke D, Connelly L, Koshland C P. Industrial ecology: a critical review. International Journal of Environment and Pollution, 1996, 6(2/3): 89-112.

[13] Chertow M R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. Annual Review of Energy and the Environment, 2000, 25(1): 313-337.

[14] Ehrenfeld J, Gertler N. Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg. Journal of Industrial Ecology, 1997, 1(1): 67-79.

[15] Bryan G W, HummerstonE L G. Adaptation of the polychaete *Nereis diversicolor* to estuarine sediments containing high concentrations of heavy metals. I. General observations and adaptation to copper. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1971, 51(4): 845-863.

[16] Ma S. Ecological engineering: application of ecosystem principles. Environmental Conservation, 1985, 12(4): 331-335.

[17] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 1(1):1-9.

[18] Yuan Z, Bi J, Moriguichi Y. The circular economy: A new development strategy in China. Journal of Industrial Ecology, 2006, 10(1): 4-8.

[19] Ackers G L, Smith D H. Design and management of development projects to avoid health hazards. The Journal of Tropical Medicine and Hygiene, 1988, 91(3): 115-129.

[20] Freeman J, Hannan M T. Setting the record straight on organizational ecology: rebuttal to young. American Journal of Sociology, 1989, 95(2): 425-439.

[21] Christensen N L, Bartuska A M, Brown J H, Carpenter S, D'Antonio C, Francis R, Franklin J F, MacMahon J A, Noss R F, Parsons D J, Peterson C H, Turner M G, Woodmansee R G. The report of the ecological society of America committee on the scientific basis for ecosystem management. Ecological Applications, 1996, 6(3): 665-691.

[22] Ayres R U. Toxic heavy metals: materials cycle optimization. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1992, 89(3): 815-820.

[23] Graedel T E. On the concept of industrial ecology. Annual Review of Energy and the Environment, 1996, 21(1): 69-98.

[24] Graedel T E, Allenby B R. Industrial Ecology. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.

[25] Desrochers P. Industrial ecology and the rediscovery of inter-firm recycling linkages: historical evidence and policy implications. Industrial and Corporate Change, 2002, 11(5): 1031-1057.

[26] Zhu Q, Cote R P. Integrating green supply chain management into an embryonic eco-industrial development: a case study of the Guitang Group. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(8):1025 - 1035.

[27] Zhu Q, Sarkis J, Geng Y. Green supply chain management in China: pressures, practices and performance. International Journal of Operations & Production Management, 2005, 25(5): 449-468.

[28] Xin T, Lifset R, Lindhqvist T. Extended Producer Responsibility in China: Where Is "Best Practice"?. Journal of Industrial Ecology, 2008, 8(4):6 - 9.

[29] Ludwig H F, Ludwig R G, Anderson D R, Garber W F. Appropriate environmental standards in developing nations. Water Science & Technology, 1992, 25(9): 17-30.

[30] Lombardi D R, Laybourn P. Redefining industrial symbiosis. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(1): 28-37.

[31] Benders R M J, Moll H C, Nijdam D S. From energy to environmental analysis. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(2): 163-175.

[32] Hond F. Industrial ecology: a review. Regional Environmental Change, 2000, 1(2): 60-69.

[33] Gungor A, Gupta S M. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. Computers & Industrial Engineering, 1999, 36(4): 811-853.

[34] Weiss M, Haufe J, Carus M, Brandão M, Bringezu S, Hermann B, Patel M K. A review of the environmental impacts of biobased materials. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(S): S169-S181.

[35] Kümmerer K. The ecological impact of time. Time & Society, 1996, 5(2): 209-235.

[36] Kautsky N, Rönnbäck P, Tedengren M, Troell M. Ecosystem perspectives on management of disease in shrimp pond farming. Aquaculture, 2000, 191(1/3): 145-161.

[37] Lyons D I. A spatial analysis of loop closing among recycling, remanufacturing, and waste treatment Firms in Texas. Journal of Industrial Ecology, 2007, 11(1): 43-54.

[38] Fernández I, Ruiz M C. Descriptive model and evaluation system to locate sustainable industrial areas. Journal of Cleaner Production, 2009, 17

(1): 87-100.

[39] Muñoz P, Giljum S, Roca J. The raw material equivalents of international trade. Journal of Industrial Ecology, 2009, 13(6): 881-897.

[40] Gibbs D, Deutz P. Implementing industrial ecology? planning for eco-industrial parks in the USA. Geoforum, 2005, 36(4): 452-464.

[41] Schwarz E J, Steininger K W. Implementing nature's lesson: the industrial recycling network enhancing regional development. Journal of Cleaner Production, 1997, 5(1/2): 47-56.

[42] Li Y, Shi L. The resilience of interdependent industrial symbiosis networks: a case of Yixing economic and technological development zone. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(2): 264-273.

[43] Schiller F, Penn A S, Basson L. Analyzing networks in industrial ecology-a review of social-material network analyses. Journal of Cleaner Production, 2014, 76: 1-11.

[44] Kim J, Perez C. Co-authorship network analysis in industrial ecology research community. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(2): 222-235.

[45] Frosch R A. Industrial ecology: a philosophical introduction. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1992, 89(3): 800-803.

[46] Young P, Byrne G, Cotterell M. Manufacturing and the environment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(7): 488-493.

[47] Thomas V M, Graedel T E. Research issues in sustainable consumption: toward an analytical framework for materials and the environment. Environmental Science & Technology, 2003, 37(23): 5383-5388.

[48] Sutherst R W. Arthropods as disease vectors in a changing environment//Lake J V, Bock G R, Ackrill K, eds. Ciba Foundation Symposium 175-Environmental Change and Human Health. London: Academic Press, 1993: 124-145.

[49] Gopal B, Sah M. Conservation and management of rivers in India: case-study of the River Yamuna. Environmental Conservation, 1993, 20(3): 243-254.

[50] Basu A J, van Zyl D J A. Industrial ecology framework for achieving cleaner production in the mining and minerals industry. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(3/4): 299-304.

[51] Pizzocaro S. Steps to industrial ecology: reflections on theoretical aspects. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 1998, 5(4): 229-237.

[52] Ehrenfeld J R. Peer reviewed: industrial ecology: coming of age. Environmental Science & Technology, 2002, 36(13): 280A-285A.

[53] Ehrenfeld J. Industrial ecology: a new field or only a metaphor?. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(8/10): 825-831.

[54] Ehrenfeld J R. Can industrial ecology be the "science of sustainability"?. Journal of Industrial Ecology, 2004, 8(1/2): 1-3.

[55] Thomas V, Theis T, Lifset R, Grasso D, Kim B, Koshland C, Pfahl R. Industrial ecology: policy potential and research needs. Environmental Engineering Science, 2003, 20(1): 1-9.

[56] Cohen M J, Howard J. Success and its price: the institutionalization and political relevance of industrial ecology. Journal of Industrial Ecology, 2006, 10(1/2): 79-88.

[57] Liu C H, Côté R P, Zhang K. Implementing a three-level approach in industrial symbiosis. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 318-327.

[58] Berger M, Finkbeiner M. Methodological challenges in volumetric and impact-oriented water footprints. Journal of Industrial Ecology, 2013, 17(1): 79-89.

[59] Korhonen J, Snäkin J P. Analysing the evolution of industrial ecosystems: concepts and application. Ecological Economics, 2005, 52(2): 169-186.

[60] Baynes T M. Complexity in urban development and management. Journal of Industrial Ecology, 2009, 13(2): 214-227.

[61] Liang S, Zhang T Z. Investigating reasons for differences in the results of environmental, physical, and hybrid input-output models. Journal of Industrial Ecology, 2013, 17(3): 432-439.

[62] Hou W X, Tian X, Tanikawa H. Greening China's wastewater treatment infrastructure in the face of rapid development: analysis based on material stock and flow through 2050. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(1): 129-140.