

# 转型期城市生态学前沿研究进展

王如松

(中国科学院生态环境研究中心 系统生态开放研究室, 北京 100080)

**摘要:**城市是一类以人类活动为中心的社会-经济-自然复合生态系统。城市人类活动对局地、区域和全球环境的胁迫效应, 自然生态系统的响应机制, 城市时、空、量、构、序的耦合规律、动力学机制和控制论方法是当前国际社会和学术界关注的热点。介绍了转型期城市人类生态影响研究的一些主要国际科学计划, 如 SCOPE 及 IHDP 等, 综述了城市生态学研究三大前沿领域的国际研究动向和案例, 即人居生态学、产业生态学和城镇生命支持系统生态学。介绍了城市生态影响评价的几种重要的新方法, 如生命周期评价、生态能值分析及生态足迹评估等。最后扼要总结了我国城市生态学研究进展以及未来城市复合生态系统的研究框架。

**关键词:**城市生态学; 产业转型; 人居生态学; 产业生态学; 生命支持系统生态学

## The frontiers of urban ecological research in industrial transformation

WANG Ru-Song (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** City is a kind of social-economic-natural complex ecosystem, dominated by human activities. The increasing local, regional and global environmental stresses induced by urbanization and industrialization, the responses of natural ecosystem to human disturbance, the coupling rules of urban ecosystem in time, space, process, structure and function, and the dynamics and cybernetics of human dimension in production and consumption are the hot issues in urban ecological study. This paper has reviewed some of the main international scientific projects on human ecological impacts such as SCOPE and IHDP. Three main research frontiers in contemporary urban ecology are introduced with some cases: built ecology, industrial ecology and life support system ecology. A few new methodologies for urban ecological impact assessment such as the life cycle assessment, embodied energy analysis and ecological footprint analysis are unfolded. Finally, a brief review of the development in China's urban ecology study and a framework of urban complex ecosystem study in China are presented.

**Key words:** urban ecology; industrial transformation; built ecology; industrial ecology; life support system ecology

文章编号: 1000-0933(2000)02-0830-011 中图分类号: Q988, X24 文献标识码: A

### 1 产业转型期的城市人类生态影响研究

城市人类活动究竟是怎样影响区域环境和受环境所影响的? 其后果如何? 个人和社会怎样减缓和适应环境的这些变化? 决策者针对这些变化所选取的政策如何影响现在和未来的社会、经济发展? 这是目前国际社会对全球环境变化与人类活动关系研究的一个核心问题。随着环境影响的日益加剧, 社会对环境的响应也在日益升级, 要求科学界提供人类活动的生态影响机理和调控方法的呼声越来越高(表 1)。为此, 国

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(批准号 39930040)及中国科学院知识创新工程资助项目

收稿日期: 2000-04-10; 修订日期: 2000-05-16

作者简介: 王如松, 男, 南京人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事城市及人类活动密集区系统生态学研究。

际科联(ICSU)和国际社科联(ISSC)发起了有关全球环境变化研究的几个主要计划,其中与人类活动密切相关的有 SCOPE 及 IHDP 计划。

国际科联环境问题科学委员会(SCOPE)由 40 个国家或地区的科研机构以及 22 个国际学术团体组成,旨在对工业化、城市化带来的环境问题开展跨学科的前沿综合研究。30a 来它一直致力于对自然和人工环境变化及其对人类影响的信息进行综合研究、科学分析及系统评价,组织了一系列大型国际研究计划。目前正在开展的科学计划包括以下三大领域:(1)人文和自然资源管理,促进科学与决策的高层次对话,为政策咨询、规划及决策制定人员提供系统分析工具,促进有效的环境管理和政策实施。其研究项目包括:可持续生物圈计划;经济与环境;生态工程与生态系统恢复;入侵种研究计划;地球系统服务功能及人类种群;全球信息化社会中的环境;环境科学在农业生产中的作用;城市废弃物管理;人类社会的物质流分析;淡水与海水养殖对生物多样性及生态系统过程的影响。(2)生态系统过程和生物多样性,集中在对人类活动与生态系统过程的相互关系及其对生物多样性和生态系统功能影响的研究。其研究项目包括:地下水污染;氮的迁移转换;地球表面过程、物质利用及城市发展;土壤及其沉积对生物多样性和生态系统功能的影响;林-草复合系统 动力学;大尺度生态系统的行为;利用稳定同位素研究生物地化循环与全球变化的关系;陆地-海洋营养流中的硅循环;几个生物地化循环间的相互作用;分子生物学在环境研究中的应用。(3)健康与环境,旨在研究化学物质对人及生物风险的评价方法并利用已有环境污染的案例去评估某些化学物质对人体健康及环境的风险。其项目包括:燃烧过程排放的颗粒物及其挥发物对人体健康影响的评价方法;核试验的放射性污染;汞的迁移转换规律;环境中的镉;核试验基地的放射性污染;环境变化与菌源性疾病;内分泌激素平衡机制的破坏与调节等。

表 1 社会对环境响应的 4 个发展阶段(根据 Winsemius 等<sup>[1]</sup>修改)

Table 1 4 development stages in social response to environmental change

| 阶段    | Stages                | I    | II   | III     | IV   |
|-------|-----------------------|------|------|---------|------|
| 响应性质  | Response phase        | 被动响应 | 接受现实 | 建设性     | 预防性  |
| 注意的焦点 | Focus of attention    | 末端治理 | 过程控制 | 产品及产业结构 | 系统功能 |
| 主要行动者 | Actors of attention   | 专业人员 | 管理人员 | 行业和地区   | 全社会  |
| 优化目标  | Optimization goals    | 最小污染 | 最小排放 | 最优结构    | 最适功能 |
| 生态对策  | Ecological strategies | 污染防治 | 清洁生产 | 生态产业    | 生态社区 |

全球环境变化的人类影响国际研究计划(IHDP)定义人类影响是个人和社会对环境变化的影响方式和途径;受环境变化影响的程度和过程;以及减缓和适应环境变化的对策和行动。IHDP 组织了以下四大科学领域的研究:土地利用与土地覆盖变化(LUCC);全球环境变化和人类安全(GECHS);全球环境变化的体制因素(IDGEC)和产业转型(IT)。IT 计划是其中最活跃的一组,过去一年中先后在世界各地召开了 9 次有关产业转型的区域性会议,并在此基础上制定了产业转型与人类影响的科学研究计划<sup>[2]</sup>,提出了产业转型研究与城市生态系统有关的一系列关键科学问题(表 2)。该计划认为,为了满足世界人口增长的需要而可持续地利用环境资源,生产、生活体制及行为方式的改变是必需的。IT 的目标是理解复杂的社会经济相互作用,辨识变化的动力学机制,探索能显著减少环境影响的发展途径。IT 研究就是要以产业为突破口,将生产者 and 消费者相关联,研究城市社会-经济-环境变化间的系统关系,及其与全球环境有关的系统变化,如水、交通、居住、食物、能源、物质利用、信息与通讯、金融服务、娱乐旅游等。其实质就是人类生态关系的系统研究。其内涵远远超过生产过程、效率或产品的“绿化”,或单个部门或行业的改造,它是一种系统创新(技术加体制);不能只靠单个行动者或单个部门,涉及大的地理尺度(跨国、跨洲)和时间及行业范围,要求多学科的系统研究。

IT 计划<sup>1</sup>研究数据环境经济、激励与调控政策、生产、消费等四大研究方向及转型过程;分析方法与工具;管理、监测与体制;城市和产业转型;能源;食物;信息与通讯等 7 个研究领域。1999 年 10 月在日本神户

召开的 IHDP 城市环境与产业转型项目立项会上确定了以下 5 类优先项目:碳及主要生物地化循环元素在城市中的代谢途径;人类活动密集区及沿海地区城市化过程的环境影响;全球气候变化对城市的影响及人的适应过程——对城市理化、生物及人文复合过程的综合模拟;亚洲城市温室气体排放通量及代谢过程;城市碳排放、就业机会和成本效益间社会-经济-自然耦合关系的优化方法研究。IT 计划还辨识了不同类型国家的转型重点。OECD 国家:经济增长的同时如何减低环境影响;中、东欧国家:政治、经济、产业和环境的同步转型;快速发展中国家:高速增长速率不以可再生资源的退化和不可再生资源的耗竭为代价;超级发展中国家:快速的城市化过程、多元化的产业转型和地域多样性的关系;而对欠发达国家则要满足生态脆弱和政治敏感环境下的生存需求。

表 2 城市产业转型研究与城市生态系统有关的关键科学问题<sup>[2]</sup>

Table 2 Key scientific questions in urban ecosystem research for industrial transformation

| 研究重点<br>Research focus                                 | 关键科学问题<br>Key scientific questions  |
|--|---|
| 能流<br>物流<br>Energy &<br>materials                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 从地域、行业和公司尺度看,导致能源和物质有效利用的技术更新和经济发展的动力和性质是什么?</li> <li>• 国际公约(如气候变化的框架性公约、WTO 等)将怎样影响国际能源贸易,能源基础设施的投资以及相关的物能流?</li> <li>• 民营能源部门开发低碳排放技术和市场的技术、经济和社会动因是什么?</li> <li>• 拉动能源和物质消费需求 and 选择的动因是什么? 什么样的体制、社会心理和技术安排会影响购买力、投资和生活方式以显著降低环境影响?</li> </ul> |
| 食物<br>Food   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 可否在满足不断增长的食物数量、质量及种类需求的同时减少环境影响?</li> <li>• 各种食物——消费——生产系统(FCPS)可持续能力的区域差异是什么? FCPS 在区域发展中起什么作用?</li> <li>• 全球食物变化趋势及可预见的解决办法</li> <li>• FCPS 可持续能力的测度手段,区域政策是怎样影响不同 FCPS 对全球环境变化的贡献率的? 怎样去调整这些政策?</li> </ul>                                      |
| 城市交通与水<br>Urban<br>transportation &<br>water           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 在发展交通运输的同时减少或不增加碳排放的机会与约束是什么?</li> <li>• 为什么不同城市的交通系统其碳排放通量不同?</li> <li>• 怎样从技术、空间和体制层面去重新设计系统以使局域和远距离环境影响最小?</li> <li>• 怎样才能满足不断增加的水需求的同时不加剧区域水文循环的负担?</li> <li>• 为什么这些影响因城而异?</li> <li>• 技术、空间和体制的重新设计将怎样帮助降低水利用的环境负影响?</li> </ul>               |
| 信息与通讯<br>Information &<br>communication                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 全球环境变化对电子、信息和通讯产业部门的大公司的战略决策有何影响?</li> <li>• 新技术将以何种方式改变全球生产和消费系统,从而在提高物质利用效率和减少全球环境负担的同时提高生活水平?</li> <li>• 信息和通讯技术将怎样通过改变环境资源的利用方式去影响社会 and 生活方式?</li> <li>• 信息和通讯技术在何种程度上将通过向全社会以及学术团体、决策者传播全球环境变化的知识,促进国际文明社会的发展。</li> </ul>                    |
| 管理与转型过程<br>Governance and<br>transformation<br>process | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 社会-环境的关系历史上和当前是如何发生系统变化的? 社会经济活动与生态环境的关系是由什么样的过程决定的?</li> <li>• 为达到系统调控社会-环境关系的目的,哪种现代转型过程应该严格控制?</li> <li>• 影响全球环境变化的最强的超国家及非政府级的动力是什么?</li> <li>• 国家在全球环境变化中的全球化作用是什么?</li> <li>• 通过政策或社会干预促进生态建设的成功模式</li> </ul>                                |

当前,各国城市生态系统研究特别注重城市各种自然生态因素,技术物理因素和社会文化因素耦合体的等级性、异质性和多样性;注意城市物质代谢过程、信息反馈过程和生态演替过程的健康程度;以及城市

的经济生产、社会生活及自然调节功能的强弱和活力<sup>[4]</sup>。其中生态资产、生态健康和生态服务功能是当前城市生态系统研究的热点。这些研究正逐渐形成几门城市可持续发展的应用生态学分支:一是产业生态学(Industrial ecology),研究产业及流通、消费活动中资源、产品及废物的代谢规律和耦合方法,促进资源的有效利用和环境正面影响的生态建设方法。二是人居生态学(Built ecology),研究按生态学原理将城市住宅、交通、基础设施及消费过程与自然生态系统融为一体,为城市居民提供适宜的人居环境(包括居室环境、交通环境和社区环境)并最大限度减少环境影响的生态学措施;三是城镇生命支持系统生态学(Life support system ecology),研究城镇发展的区域生命支持系统的网络关联、景观格局、风水过程、生态秩序、生态基础设施及生态服务功能等(图 1)。

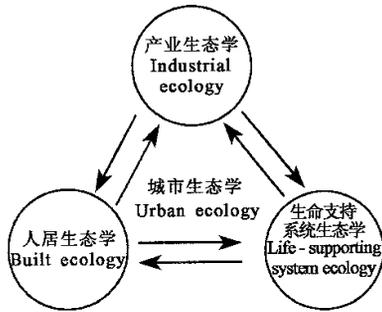


图 1 城市生态学的三大前沿领域

Fig. 1 The three research frontiers in urban ecology

## 2 城市人居生态学 (Built ecology)

尽管国际城市生态学的启蒙研究归功于美国的芝加哥人类生态学派<sup>[3]</sup>,但国际城市生态学研究的主流却一直在欧洲。自 19 世纪末叶以来,快速的工业化城市化过程和高的人口密度迫使欧洲人不得不认真研究城市化、工业化带来的生态问题、过程、对策与技术手段。从霍华德的田园城运动到德国法兰克福的灵敏度模型,特别是 1970 年代以来以“增长的极限”为催化剂的环境运动和联合国教科文组织人与生物圈计划(MAB)倡导的城市生态研究,为西方国家城市环境的改善和生态功能的强化奠定了科学基础。进入 1990 年代以来,城市生态学已成为城市可持续发展及制定 21 世纪议程的科学基础,各种类型的国际城市生态学术讨论会如火如荼,仅 1991 年以来

在美洲、澳洲、欧洲和非洲就举行了 20 余次国际生态城市学术讨论会。1996 年 6 月的土耳其联合国人居环境大会专门制定了人居环境议程,提出城市可持续发展的目标为:“将社会经济发展和环境保护相融和,在生态系统承载能力内去改变生产和消费方式、发展政策和生态格局,减少环境压力,促进有效的和持续的自然资源利用(水、土、气、生、林、能)。为所有居民,特别是贫困和弱小群组提供健康、安全、殷实的生活环境,减少人居环境的生态痕迹,使其与自然和文化遗产相和谐,同时对国家的可持续发展目标作出贡献”。

美国国家自然科学基金委员会将城市生态学列为今后重点支持领域之一,并重点支持了凤凰城和巴尔的摩城市生态系统研究。其领域研究内容包括:(1)初级生产格局和调控方法;(2)营养物质流的时空分布规律;(3)表层和底层有机质积累的格局与调控;(4)土壤、地下水和地表水中污染物的迁移转化规律;(5)人类对生态系统干扰的格局和频率;(6)人类对城乡土地利用和地表变化的影响及其与生态系统动态的关系;(7)监测城乡生态系统中人与环境相互作用和效应;社会经济及环境复合生态系统数据的收集分析方法(如 GIS);人与自然耦合关系的系统综合方法;(8)将研究结果与学校及社会的生态教育结合的对策和措施。

从可持续发展的口号走向生态建设的具体行动,这是当今国际城市人居生态研究的主流。研究对象主要集中在生态城(村、镇)、生态住宅、生态交通、生态代谢、生态能源、雨水资源利用、生态恢复以及生态产业的设计、规划、试验和管理的示范研究上。近年来,欧洲、美洲、大洋洲(如澳大利亚的 Halifax 和 Whyalla)和亚洲都涌现出一批生态示范社区或村镇,其工作主要是引进一批高效、实用、先进的生态示范技术,建设一类人与自然和谐共生、有一定超前性的典型生态社区,诱导一种整体、协调、循环、自生的生态文明。示范的指标包括发达的生产力、先进的生产关系、满意的生活质量、良好的生命素质及和谐的生态秩序。其中和谐的生态秩序包括区域生命支持系统的生态服务功能是否正常与稳定,土地、水体、大气、景观、气候、动植物及微生物所构成的人类生命支持系统是否健康,是否有一个天蓝、水清、地绿、景美的充满活力的环境,生态数据持续积累与盈余是衡量自然生态秩序高低的准绳;而社会的贫富差距及安定满意程度则是衡量社会生态秩序的标准<sup>[5]</sup>。

澳大利亚的 Halifax 生态城是在 Adelaide 市外 60km 的一片 17hm<sup>2</sup> 的退化的农田上建设的。当地居民通过社区自助性开发方式进行生态恢复、治理水土流失,并向传统房地产商挑战。首期开发了一片 2.4 hm<sup>2</sup> 混合功能居住区,居民 800 余人,90% 的技术是对区内及区域环境友好的,70% 的植物种是当地种。区内综合开发了各种节水、节能、节物的生态建筑技术,包括太阳能供热水、制冷、取暖、自然采光、中水及雨水利用技术,选用对人体无毒、无过敏、节能、低温温室气体排放的建筑材料等。其发起人 Joan Bourne 太太患癌症 30a,通过这种生态建设活动及健康的人居环境,其生理和心理健康明显增强。Whyalla 生态市在 Adelaide 市北 400km,占地 15 hm<sup>2</sup>,居民 2.6 万人。该地原是一个废弃的钢铁工业基地,建设者们通过各种生态恢复措施,如人工湿地,废水回用,垃圾堆肥,太阳能的利用以及生态建筑的规划设计与社区参与型管理等进行生态建设。城市形态和格局一反澳大利亚传统方格式的殖民地形态的城市布局,按 Kevin Lynch 提出的 3 种城市形态进行生态设计。其生态建设的 12 条原则是:退化生态系统的恢复;适应当地生态型;在环境容量限度内开发;防止城镇摊大饼式外延;优化能源结构和效率;创造和促进新的经济增长点;提供卫生、安全的人居环境;社区共生;基础设施及社区服务共享;历史文化的延续性;突出多样性的文化景观,修复和支持生态基础设施<sup>[6]</sup>。

人类聚居地生态学研究围绕当前困扰城市各级部门的环境问题、交通问题、居住问题和生活质量问题,逐渐聚焦在 3M 目标:物质代谢(Metabolism)、交过程(Mobility)和生态基础设施的维护(Maintenance);和 3I + 3M 方法:影响评价(Impact assessment)、关系整合(Interaction synthesis)、体制调控(Institutional regulation)、指标测度(Measuring),动态监控(Monitoring)及系统模拟(Modeling)上<sup>[6]</sup>。

城市的核心是人,发展的动力和阻力也是人。正确处理好人与土地(包括地表的水、土、气、生物和人工构筑物)的生态关系是人居生态研究的核心任务。城市的表现形式是社区的格局、形态,而其神或魂却是生态的“生”字,包括生存能力(示范区的吸引力,离心力和竞争力),生产实力(从第一性生产到废弃物的处置),生活魅力(方便适宜的设施,丰富多彩的环境)及生境活力(风、水、花、鸟等自然生境和生物活力)。人作为复合生态系统的主体,其日常生活活动对城市生态系统功能的好坏起着重要作用。以往对产业活动和城乡建设对物理环境的单项影响研究较多,而对生活消费活动对生态系统的影响研究较少。家居生态学将家庭视为一个生态系统,隶属于更大的社区、村镇或区域,研究其可持续的生活方式、生产过程和生态对策<sup>[7]</sup>。Christensen 在《Home Ecology》一书中从食物、能量、水、光、空气、消耗品、健康、辐射、绿化等不同层面论述了人居生态系统的代谢过程以及其和动物、植物与人的关系,但还只是停留在描述性而非机理性的研究上<sup>[5]</sup>。

### 3 产业生态学(Industrial ecology)

当今城市面临的挑战是产业转型,而产业转型的方法论基础就是产业生态学。它是一门研究社会生产活动中自然资源从源、流到汇的全代谢过程,组织管理体制以及生产、消费、调控行为的动力学机制、控制论方法及其与生命支持系统相互关系的系统科学,被列为美国 21 世纪环境研究的优先学科。产业生态学起源于 20 世纪 80 年代末,Frosch 等人<sup>[8]</sup>模拟生物新陈代谢和生态系统循环再生过程所开展的“工业代谢”研究<sup>[8]</sup>。他们认为现代工业生产是一个将原料、能源和劳动力转化为产品和废物的代谢过程。并进一步提出了“产业生态系统”和“产业生态学”的概念。1991 年美国科学院与贝尔实验室共同组织了首次“产业生态学”论坛,对其概念、内容和方法以及应用前景进行了系统的总结,基本形成了产业生态学的概念框架。如贝尔实验室的 Kumar 认为:“产业生态学是对各种产业活动及其产品与环境之间相互关系的跨学科研究”<sup>[9]</sup>。90 年代以来,产业生态学发展非常迅速,产业界、环境科学和生态学界纷纷介入其理论和实践的探索。国际电力与电子工程研究所(IEEE)在一份称为“持续发展与产业生态学白皮书”的报告中指出:“产业生态学是一门探讨产业系统与经济系统以及他们同自然系统相互关系的跨学科研究,涉及诸多学科领域,包括能源供应与利用,新材料、新技术,基础科学,经济学,法律学,管理科学以及社会科学等”,是一门“研究可持续能力的科学”<sup>[10]</sup>。近年来,以 AT&T、Lucent、GM、Motorola 等公司为龙头的产业界纷纷投巨资推进产业生态学理论和实践,成为产业生态学的首批试验基地<sup>[11]</sup>。1997 年由耶鲁大学和 MIT 共同合作创刊了《产业生态学杂志》<sup>[12]</sup>。

产业生态学涉及 3 个层次:宏观上,它是国家产业政策的重要理论依据,即围绕产业发展,如何将生态学的理论与原则融入国家法律、经济和社会发展纲要中,以促进国家及全球尺度的生态安全和经济繁荣;中观上,它是部门和地区生产能力建设及产业结构调整的重要方法论基础,通过生态产业将区域国土规划、城市建设规划、生态环境规划和社会经济发展规划融为一体,促进城乡结合、工农结合、环境保护和经济建设结合。微观上,则为企业提供具体产品和工艺的生态评价、生态设计、生态工程与生态管理方法,涉及企业的竞争能力、管理体制、发展战略,行动方针,包括企业的“绿色核算体系”,“生态产品规格与标准”等<sup>[13]</sup>。

生态产业是按生态经济原理和知识经济规律组织起来的基于生态系统承载力、具有高效的经济过程及和谐的生态功能的网络型、进化型产业。它通过两个或两个以上的生产体系或环节之间的系统耦合,使物质、能量多级利用、高效产出,资源、环境能系统开发、持续利用。企业发展的多样性与优势度,开放度与自主度,力度与柔度,速度与稳度达到有机的结合,污染负效益变为经济正效益(表 3)。

表 3 生态产业不同于传统产业的特点

Table 3 The difference between ecological industry and traditional industry

| 类别 Items                                      | 特征 Characteristics  |
|---|---|
| 1. 横向耦合<br>Horizontal coupling                | 不同工艺流程间的横向耦合及资源共享,变污染负效益为资源正效益                                |
| 2. 纵向闭合<br>Vertical coupling                  | 从源到汇再到源的纵向耦合,集生产、流通、消费、回收、环境保护及能力建设为一体,第一、二、三产业在企业内部形成完备的功能组合 |
| 3. 区域耦合<br>Regional coupling                  | 厂内生产区与厂外相关的自然及人工环境构成产业生态系统或复合生态体,逐步实现有害污染物在系统内的全回收和向系统外的零排放   |
| 4. 功能导向<br>Functional orientation             | 以企业对社会的服务功能而不是以产品或利润为经营目标,谋求工艺流程和产品的多样化                       |
| 5. 柔性结构<br>Structure flexibility              | 灵活多样、面向功能的结构与体制,可随时根据环境的随机波动调整产品、产业结构及工艺流程                    |
| 6. 软硬结合<br>Combination of hardware & software | 配套的硬件、软件和心件研究与开发体系,配合默契的决策管理、工程技术和营销开发人员                      |
| 7. 自我调节<br>Self-regulation                    | 以生态控制论为基础,能自我调节的决策管理机制、进化策略和完善的风险防范对策;                        |
| 8. 增加就业<br>Increasing employment              | 合理安排和充分利用劳力资源,增加而不是减少就业机会                                     |
| 9. 人类生态<br>Human ecology                      | 工人一专多能,是产业过程自觉的设计者和调控者而不是机器的奴隶                                |
| 10. 网络经济<br>Networking economy                | 内外信息及技术网络的畅通性、灵敏性、前沿性和高覆盖度                                    |

丹麦 Kalundborg 镇的工业综合体可以说是一个典型的高效、和谐产业生态系统。20 世纪 80 年代初,以燃煤发电厂向炼油厂和制药厂供应余热为起点,进行工厂之间的废弃物再利用的合作。经过 10 多年的滚动发展和优化组合,目前该系统已成为一个包括发电厂,炼油厂,生物技术制品厂,塑料板厂,硫酸厂,水泥厂,种植业、养殖业和园艺业,以及 Kalundborg 镇的供热系统在内的复合生态系统。各个系统单元(企业)之间通过利用彼此的余热、净化后的废水、废气,以及硫、硫化钙等副产品作为原材料等,一方面实现了整个镇的废弃物产生最小化;另一方面,各个系统单元均从相互合作中降低了生产成本,获得了直接的经济效益。这种合作模式并没有通过政府渠道干预,工厂之间的交换或者贸易都是通过民间谈判和协商解决的。有些合作基于经济利益,有些则基于基础设施的共享。各企业在合作的初期主要追求经济利益,但近年来却更多地考虑了环境及生态效益<sup>[14]</sup>。

美国生态学首席 J. Meyer 在 1996 年全美生态学年会述职报告中将生态工程、生态经济、生态设计、产业生态学及环境伦理学列为未来生态学研究的五大前沿方向,其中生态工程名列榜首。生态工程概

念是著名生态学家 H. T. Odum 及马世骏教授于 20 世纪 60 年代及 20 世纪 70 年代分别提出来的,但各自的侧重点却不同。西方生态工程理论强调自然生态恢复,强调环境效益和自然调控。中国生态工程则强调人工生态建设,追求经济和生态效益的统一和人的主动改造与建设,强调资源的综合利用、技术的系统组合、学科的边缘交叉和产业的横向结合,是中国传统文化与西方现代技术有机结合的产物,被认为是发展中国家可持续发展的方法论基础。70 年代以来,我国生态工程理论和实践研究取得长足进展,成为我国生态学跻身国际前沿的少数几个领域之一。

#### 4 城镇生命支持系统生态学 (Life supporting system ecology)

城市生态系统的生存与发展取决于其生命支持系统的活力,包括区域生态基础设施(光、热、水、气候、土壤、生物)的承载能力及生态服务功能的强弱,城乡物质代谢链的闭合与滞竭程度,以及景观生态的时空量构序的整合性。马世骏、王如松 1984 年提出城市是一类以人类的技术和社会行为为主导,生态代谢过程为经络,受自然生命支持系统所供养的“社会-经济-自然复合生态系统”(图 2)<sup>[15]</sup>。城市可持续能力的维系有赖于对城市环境、经济、社会和文化因子间复杂的人类生态关系的深刻理解、综合规划及系统管理。从中国几千年传统的人类生态哲学中可以总结出 10 条生态控制论原理<sup>[16]</sup>。它们可以归结为 3 类:一是对有效资源及可利用的生态位的竞争或效率原则;二是人与自然之间、不同人类活动间以及个体与整体间的共生或公平性原则;三是通过循环再生与自组织行为维持系统结构、功能和过程稳定性的自生或生命力原则。三者的有机结合才能推进有中国特色的(自生),社会主义(共生)市场经济(竞争)条件下的城市可持续发展。城市社会-经济-自然复合生态系统理论目前已被各国同行所采用并得到好评<sup>[17]</sup>。Taylor 提出城市复合生态系统设计的四因子模型:功能、结构、行为和内部关系。它们通过能流、物流、生境、群落演替,营养结构及纵横等级关系变化等生态过程影响城市的形态(多样性、耦合度及复杂性)<sup>[18]</sup>。

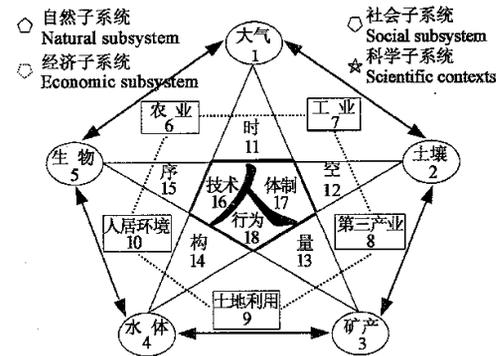


图 2 城市社会-经济-自然复合生态系统关系示意图  
Fig. 2 City: A social-economic-natural complex ecosystem

1. Air; 2. Soil; 3. Minerals; 4. Water; 5. Life; 6. Farming; 7. Industry; 8. Service; 9. Land use; 10. Settlement; 11. Time; 12. Space; 13. Quantity; 14. Coupling; 15. Order; 16. Technique; 17. Institution; 18. Behavior

美国巴尔的摩与凤凰城城市生态系统研究是美国自然科学基金支持的 21 个长期生态系统定位站中的两个。主要就集中在对城镇生命支持系统这些复杂的生态关系的探索上。其研究周期至少 20 年。第 1 期 6 年,基金委资助额度各为 430 万美元,地方政府配套多于此额度的启动资金。由马里兰大学等单位承担的巴尔的摩城市生态研究主要基于城市是一类社会、经济、生态及物理因素相互关联的人类复合生态系统的理念。其主要科学问题是:(1)各种社会、经济、生态因子是怎样相互关联,城市空间结构和时间过程是怎样演变的;(2)城市能流、物流、资金流、人口流的规律和动态变化过程;(3)怎样发展和运用城市生态系统理论与方法,从而改善城市环境质量,减少对区域和流域环境的影响。其主要假设为:城市生态系统的社会、经济和生态格局控制着其生态功能,特别是水文、生物和社会经济的异质性;高城市人口密度比低城市人口密度下人均环境影响小,穷人比富人对环境影响的总贡献小;城市生态系统物流(N、P、K、Ca、Mg)强度远远大于自然生态系统,而其输入输出平衡远远低于后者,如氮循环中只有 20% 留下而非 90%;城市生态系统的社会和生态格局是相互关联的,对临近区域和下游的生态系统有强烈影响;优势种为外来种的生态系统具有较高的生产力,短的营养物循环,更多的土壤碱以及高的人类价值,其生物多样性格局和水、气物质交换不同于本地种为优势种的生态系统;对于生态服务功能弱的城市生态系统,生态恢复可以作为一种催化剂去激励其生态和社会活力;城市生态系统数据可以促进和推动科学、人文及环境教育,并对城市和区域环境保育产生积极作用。

亚利桑那州凤凰城是另一类处于干旱条件下的城市生态系统,主要由亚利桑那州立大学承担。其研究

目标为:(1)探讨并检验一般生态学理论在城市生态系统研究中的适宜性。(2)深化城市生态学的研究,包括初级生产、种群和群落动态,有机质的储存和迁移,物流以及各种人为和自然干扰下的格局研究。(3)辨识城市生态和社会经济因子间的相互反馈关系(自然生态条件怎样影响土地利用决策以及生态系统对人类活动的响应和反馈又怎样改变未来的土地利用决策)。(4)鼓励学生积极参与城市生态研究。

城镇生命支持系统生态学的一个关键科学问题是生态影响评价。常用的评价方法有:H. T. Odum 提出的能值分析法(Emergy analysis)<sup>[19]</sup>,环境毒理和化学学会(SETAC)提出的物质代谢全过程的生命周期分析法(Life cycle assessment)<sup>[20]</sup>,F. Vester 提出的基于反馈机制的生态控制论分析法(Eco-cybernetics)<sup>[21]</sup>,Daily 等提出的生态系统服务功能<sup>[22]</sup>和 Costanza 等人提出的自然资产评估法<sup>[23]</sup>,以及 Boulding 等人提出的生态经济方法<sup>[24]</sup>,W. Rees 等提出的基于土地利用的生态足迹法(Ecological footprint)<sup>[25]</sup>,以及 Bartell, Suter 等的生态风险分析法<sup>[26,27]</sup>,前景展望法(Scenario,包括趋势外推,目标反演,替代方案和对照遴选等)<sup>[28]</sup>。它们分别从能流、物流、信息流、资金流以及空间、时间尺度上评价和分析人类活动影响下的生态过程。

面对还原论与整体论,物理学与生态学,经济学与环境学,工程学与生物学的矛盾,城市生态研究的方法论正在面临一场新的革命:从过程的量化走向关系的序化;从数学优化走向生态进化;从人工智能走向生态智能。人们通过测度城市复合生态系统的属性、过程、结构与功能去辨识系统的时(届际、代际、世际)、空(地域、流域、区域)、量(各种物质、能量代谢过程)、构(产业、体制、景观)及序(竞争、共生与自生序)的生态持续能力<sup>[16]</sup>。

能值分析(Emergy 或 Embodied energy analysis)理论和方法是著名系统生态学家 H. T. Odum 提出出来的一种重要的生态价值测度理论<sup>[19]</sup>。他定义生态系统某一层中一流动或储存的能量 a 所隐含的经过上几层生态链直接或间接转换所需的另一种类别能量 b 的数值,为该层次能量 a 的 b 能值(一般以太阳能为标准,故称太阳能值)。这一方法在生态学中具有较为广泛的适用性,尤其对传统市场方法难以估价的许多自然资源不失为一种有效途径,国内外众多学者将之应用于生态经济系统的价值分析和可持续发展政策制定,并取得了可喜的成果。在生态影响评价中引进能值分析,有利于比较不同产品、过程和活动的总能耗及其影响<sup>[29]</sup>。

F. Vester 等 1980 年提出 8 条生物控制论的基本原理,并建立了基于生物控制论信息反馈机制的灵敏度模型,用之于法兰克福地区城市生态系统的研究,取得了很好的效果<sup>[21]</sup>。后来该模型又在中国得到了改善和发展,将生物控制论发展为生态控制论,与中国的复合生态系统模型相结合,形成了一类城市可持续发展的复合生态模型。

Rees 和 Wackernagel 探讨了自然资本占用的空间测度问题,提出了生态足迹(Ecological footprint)的概念<sup>[25]</sup>。生态足迹被定义为在现有技术条件下,按空间面积计量的支持一个特定地区的经济和人口的物质、能源消费和废弃物处理所要求的土地和水等自然资本的数量。他们最早估计了典型城市工业区(人口大于 300 人/km<sup>2</sup>)要占用比其所包含的区域面积大 10~20 倍的土地(包括水域)面积,由此外推,人类的物质需求现在已超过了地球的承载力。受他们的先驱工作的推动,国际上一些生态经济学家也开始从事这方面的研究,Lasson 等估计了哥伦比亚加勒比海沿岸地区半密集的养虾农场的发展对生态系统支持的占用,它占用了比农场大 35~190 倍的地表面积,大约 80%所需的养虾饲料来源于农场外的自然生态系统。Carl Folke 等估计了北欧波罗的海地区和全球城市发展的生态足迹,研究表明,波罗的海地区的 29 个大城市因对自然资本的消费占用了比该地区的城市面积大至少 565~1130 倍的自然生态系统面积。全球 774 个大城市(人口占全球的 20%)因海产品消费占用了 25%的全球可得到的具有生产力的海洋生态系统面积。同时,为降低这些城市的温室效应,需要比作为碳库的全球 10%还多的森林面积来吸收 CO<sub>2</sub>。M. Wackernagel 等在他们早期工作的基础上,完成了 52 个国家(占全球人口的 80%)的 1992 年的生态足迹研究报告,他们的报告表明,在 1992 年,人类过度使用了全球当年所生产的自然资本总量的大约 1/3 强<sup>[30]</sup>。Jeroen 等关于生态足迹及其方法作了详细的评述,对该方法中的不足之处,如所使用的累加办法、权重确定、矿物能土地概念、自然资本贸易在生态足迹计算中的特殊意义、不同地区土地的生物生产力的差异对

生态足迹计算值的影响、生态足迹分析对区域政策和公众行动的实际意义等等作了中肯的批评,提出了一些建设性的建议或改进意见<sup>[31]</sup>。

生命周期评价是对某种物质、过程或产品从产生到抛弃乃至再生的整个“生命”周期内的资源、环境、经济和技术评估。1990年环境毒理学与化学学会(SETAC)将生命周期评价定义为“生命周期评价是一种对产品、生产工艺以及活动对环境的压力进行评价的客观过程,它是通过对能量和物质利用以及由此造成的环境废物排放进行辨识和量化来进行的。其目的在于评估能量和物质利用,以及废物排放对环境的影响,寻求改善环境影响的机会以及如何利用这种机会。这种评价贯穿于产品、工艺和消费活动的整个生命周期,包括原材料提取与加工、产品制造、运输以及销售、产品的使用、再利用和维护,以及废物循环和最终废物的处置”<sup>[20]</sup>。目前生命周期评价(LCA)已形成了基本的概念框架、技术步骤和系统软件,其基本结构可归纳为4个有机联系的部分:定义目标与确定范围;清查分析;影响评价和改善评价等。欧盟于1996年起组织了5个国家7个科研所在华开展了工业生产过程的生态持续能力研究,主要以夏利汽车为例开展工业产品的生命周期评价并取得了可喜的成果。国际标准化组织(ISO)将生命周期评价方法规定为ISO14000认证的基本方法。有关产品生态设计的理论尽管尚不完善,但在实践上发展很快,生命周期设计(LCD),生命周期工程(LCE),为环境而设计(DfE),为拆解再生而设计(DfD),为再循环而设计(DfR)等一系列新的设计理念和正在成为产业生态学的新方法。

## 5 我国城市复合生态系统研究

中国城市生态研究比西方晚近一个世纪。20世纪80年代初,迫于我国一些经济发达城市化地区,如京津地区、长江三角洲和珠江三角洲环境污染日益恶化,在联合国人与生物圈计划对香港及法兰克福城市生态研究成果的推动,国家有关部委的支持及老一辈生态学家的倡导下,城市生态研究在北京、上海等地的科研院校悄然兴起。中国城市生态学是针对紧迫的城市环境和发展压力应运而生的,其发展不同于西方城市生态学的特点是:(1)强调发展而不是平衡:西方以追求回归自然的理想化栖境为目标,中国则以人为中心、发展为主题,追求人与自然的协调发展;(2)强调高效率适度投入:西方城市生态研究是在城市资本积累和基本建设初具规模情况下开始的,以高投入、高环境效益为目标,一般不考虑外部经济成本,我国则强调通过资源的高效利用来自我维持和补偿城市生态建设费用,化环境负担为生态效益;(3)强调硬技术的软组装和软科学的硬着陆,实现传统技术的现代化和现代技术的生态化,其中整体、循环、协调、自生是灵魂;(4)强调技术、体制、行为的结合,倡导研究、技术、管理及决策人员的结合,而不是单一的学术研究。许多城市以市长为课题负责人,研究结果的可行性较高。但是,也应该看到,由于中国城市生态学起步晚,压力大、积累少,人才缺,其发展尚属幼年时期,存在以下问题:(1)技术手段滞后于理论研究;(2)教育落后,无专业人才培养渠道;(3)受传统自然科学分类体系所束缚,学科发展举步维艰;(4)受管理体制束缚,城市生态调控在各级城市中尚无其对口的管理部门及资金、技术渠道。

西方发达国家经过两个多世纪的产业革命和社会发展,以掠夺殖民地生态资产为代价,实现了农业社会向工业社会、乡村社会向城市社会的过渡。发展中国家既没有全球广阔的殖民地提供生态资源,也没有两个多世纪的时间跨度与资金积累去治理污染。西方发达国家高能耗、高投入的环境治理和研究模式是发展中国家所难以承担的。中国城市发展不应简单效仿西方国家的生产和消费模式,而应摸索出一条有中国特色的融中国传统文化与现代技术为一体的生态建设新模式。城市环境问题的实质是资源代谢在时间、空间尺度上的滞留或耗竭,系统耦合在结构、功能关系上的错位和失谐,社会行为在经济和生态关系上的冲突和失调。人们只看到产业的物理过程,而忽视其生态过程;只重视产品的社会服务功能,而忽视其生态服务功能;只注意企业的经济成本而无视其生态成本;只看到污染物质的环境负价值而忽视其资源可再生利用的正价值。社会的生产、生活与生态管理职能条块分割,以产量产值为主的政绩考核指标和短期行为,以及生态意识低下、生态教育落后的国民素质,是我国城市环境整体继续恶化的根本原因。因此,加强城市复合生态系统的理论、方法和应用研究迫在眉睫。

1999年,在“数据”国城市生态学术讨论会总结了近年来我国城市生态理论和应用研究的进展,提出了城市复合生态系统研究框架,建议城市生态研究对象上要从以物与事为中心转向以人为中心,空间尺度

上要重视区域和流域研究,时间尺度上要重视中跨度间接影响的研究,研究方法上要从描述性转向机理性,研究目的上要从应急型、消耗型转向预防型、效益型(表 4)。

当前,城市建设的目标已从一维的社会经济繁荣走向三维的复合生态繁荣:一是财富,包括经济资产和生态资产的持续增长与正向积累;二是健康,包括人的生理和心理健康及生态系统服务功能与代谢过程的健康<sup>[32]</sup>;三是文明,包括物质文明、精神文明和生态文明。这三者中,财富是形,健康是神,文明则是本。生态建设必须从本抓起,促进形与神的统一<sup>[33]</sup>。近年来,我国自上而下和自下而上分别开展了一系列生态示范区和城镇生态建设案例研究。政府推动、科技催化、市民参与和社会兴办是这些示范区建设的基本动力。城市生态工作者应积极配合这些示范研究,通过生态规划、生态设计与生态管理,将单一的生物环节、物理环节、经济环节和社会环节组装成一个有强生命力的生态系统,从技术革新、体制改革和行为诱导入手,调节系统的结构与功能,使生态学的竞争、共生、再生和自生原理得到充分的体现,促进资源的综合利用,环境的综合整治及人的综合发展。

表 4 城市复合生态系统研究框架

Table 4 The research framework of urban complex ecosystem

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 基础研究<br>Fundamental<br>research | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 生态资产动态(盈与亏,价值核算、指标体系)</li> <li>• 生态服务功能(强与弱,序的测度、冲突分析)</li> <li>• 生态代谢过程(滞与竭,水、能、土、木、矿)</li> <li>• 生态调控机制(乘与补,反馈控制,竞争、共生、自生)</li> <li>• 系统综合方法(时空量构序的综合,硬件、软件、心件的整合)</li> </ul>                                       |
| 应用研究<br>Applied research        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 生态产业与产业生态工程(纵横耦合,影响评价,产业孵化机制)</li> <li>• 生态社区与生态建筑(形与神的融合,价值准则、规划设计手段)</li> <li>• 生态景观与城郊边缘效应(构与序的协同,宏微调和对策、远近补偿机制)</li> <li>• 生态健康与生态文化(生理与心理健康、文化和历史的延续,能力建设方法)</li> <li>• 区域及流域的生态规划、生态恢复和生态管理方法及绩效评价指标</li> </ul> |

## 参考文献

- [1] Winsemius P and Guntram U. Responding to the Environmental Challenge. *Business Horizons*, Indiana University, Graduate School of Business, March-April, 1992, **35**(2): 12~20.
- [2] Vellinga P and Herb, N. *Industrial Transformation Project: IT Science Plan.*, IHDP Report No. 12, Bonn, Germany, 1999.
- [3] Park R E. Human Ecology. *American Journal of Sociology*. 1936, **24**: 15~39.
- [5] Christensen K. *Home Ecology*. Fulcrum Publishing, Golden, Colorado. 1990.
- [4] Hough M. *Cities and Natural Process*. Rowledge, London, 1995.
- [6] Breuste J, Feldmann H and Uhlmann O. *Urban Ecology*, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [7] Gilbert O L. *The Ecology of Urban Habitats*. Chapman and Hall, New York, 1989.
- [8] Frosch R A & Gallopoulos N E. Strategies for manufacturing, *Sci. Am.*, 1989, **26**(3): 144~153.
- [9] Kumar C and Patel N. Industrial Ecology. *Proc. National Acad. Sci. USA*. 1991, **89**: 798~799.
- [10] IEEE TAB. *Environment, Health and Safety Committee*, White paper on sustainable development and industrial ecology, 1995.
- [11] Graedel T E and Allenby B R. *Industrial Ecology*, New York Prentice Hall Press, 1995.
- [12] Lifset R. *Journal of Industrial Ecology*. Published by MIT Press, 1997, **1**(1).
- [13] Allenby B R. *Industrial Ecology: Policy Framework and Implementation*. Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [14] Ehrenfeld J and Nicholas Gertler. Industrial ecology in practice; the evolution of interdependence at kalundborg. *Industrial Ecology*, 1997, **1**.
- [15] 马世骏,王如松. 复合生态系统与持续发展. 见何祚麻,张焘主编. 复杂性研究. 北京: 科学出版社, 1993. 239~

250.

- [16] 王如松, 欧阳志云. 生态整合——人类可持续发展的科学方法. *科学通报*, 1996, **41**(增刊): 47~67.
- [17] Mitsch W J and Jingsong Yan, *Ecological Engineering — Contrasting Experiences in China with the West*, editorial paper. *Ecological Engineering*, 1993, **2**: 177~191.
- [18] Tayler ME and Perks W T. A Normative Model for Urban Ecology Practice; Establishing Performance Propositions for Ecological Planning and Design, In J. Breuste, H. Feldmann and O. Uhlmann Eds.: *Urban Ecology*, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [19] Odum H T and Odum E C. *Ecology and Economy: Emergy Analysis and Public Policy in Texas Lyndon B. Johnson School of Public Affairs, Policy Research Project Report*. 1987, 78.
- [20] Society of Environmental Toxicology and Chemistry. *A Technical Framework for life — Cycle Assessment*. Washington DC: SETAC, 1991.
- [21] Vester F, Hesler A V. Sensitivitatsmodell. Okologir und Plomung in Verdichnungsgebieten, *UNESCO Man and Biosphere Project 11 Report*. Frankfurt: Regionale Planungsgemeinwchaft Untemain, 1980.
- [22] Daily G C, Alexander Ehrlich S P R, et al. Ecosystem Services; Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems, *Issues in Ecology*, the Ecological Society of America, 1997, 2.
- [23] Costanza R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 1997, **387**, 15 May.
- [24] Boulding K. Economics as an Ecological Science. In: *Economics as a Science*. New York, McGraw Hill, 1970, 23~52.
- [25] Rees W E and Wackernagel M. Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity; Measuring the Natural Capital Requirements of the Human Economy. In: *Investing in Natural Capital: The Ecological Economics Approach to Sustainable Development*. Island Press, Washington, DC. 1994, 362~390.
- [26] Bartell S M, Brenkert A L, Neill R V O' et al. *Ecological Risk Estimation*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, 1992.
- [27] Suter G W. *Ecological Risk Assessment*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, 1993.
- [28] Simon K H and Anna Musinszki. Scenario Techniques as a tool for Supporting Endeavours to Analyse Complex Problems in Urban Ecology, In: J. Breuste, H. Feldmann and O. Uhlmann Eds.: *Urban Ecology*, Springer-Verlag, Berlin 1998.
- [29] Doherty S J and Odum H T, et al. *Emergy Synthesis Perspectives, Sustainable Development, and Public Policy Options for Papua New Guinea*, Center for Wetlands, Univ. of Florida, USA, 1992.
- [30] Wackernagel M, et al. National Natural Capital Accounting with the Ecological Footprint Concept. *Ecological Economics*, 1999, **29**: 375~390.
- [31] Jeroen C J M, et al. Spatial Sustainability, Trade and Indictors; An Evaluation of the 'Ecological Footprint'. *Ecological Economics*. 1999, **29**: 61~72.
- [32] Norton B G. Ecological Integrity and Social Values: At What Scale? *Ecosystem Health*, 1995, **1**: 228~241.
- [33] Wang Rusong, Zhao Jingzhu, Ouyang Zhiyun. *Wealth, Health and Faith-Sustainability Study in China*. China Environmental Science Press, 1996, 184.