

第 1 章 绪 论

自 18 世纪以来，工业革命使社会生产力迅速向前发展，但水平仅处于物质文明的发展层次，而人类社会也为此付出了严酷的代价。西方世界开拓的传统工业化发展道路，其原则为“人类统治自然，人类征服自然”，目标是满足富裕人的生活需求，手段为向大自然贪婪地索取、恣意地掠夺，其后果是人与自然的对抗，并不断受到自然界的严厉报复，引出一系列全球性问题——人口、资源、环境、生态……。颇具讽刺意味的是掌握先进科学、技术、文化的人类，恰恰是自然生态环境的最大破坏者，同时也是最大的受害者，成为自作自受的愚蠢的高智商动物，使人类社会走向一条不可持续发展的危险之路。

非但如此，传统工业的发展并没有解决人类社会的共同富裕问题，反而使两极分化更趋激化，贫富差异日趋悬殊。据世界银行统计，全球现有的 60 亿人口中，13 亿人口还在极端贫困线以下挣扎，预测 15 年以后，全世界极端贫困人口数将增加一倍。因此，世界各国政府都已清醒地认识到要发展决不能走老路，必需走可持续发展的新路。

人类社会已进入 21 世纪，人类总结了以前所走过的道路，吸取了失败的经验教训，已开始觉悟到人类必需“自觉”地改变发展战略，改变价值观，从人类统治自然、征服自然转变为人与自然和谐共处，协调发展，走可持续发展道路，对现有工业系统进行一场革命，从产品设计、生产流程到服务模式进行全面创新，以形成一种全新的工业革命理念。

(1) 新工业系统将十分珍惜自然资源，想方设法用尽可能少的材料和能源，获得尽可能多的产品，提高社会效益和经济效益；

(2) 在工业设计中，尽可能减少污染物的排放；

(3) 工业生产及其产品与生态系统相容；

(4) 倡导服务经济，倡导对自然资源的投资，平衡自然生态系统；

(5) 重视产品的生命周期，也就是说产品的服务功能结束后所形成的废弃物应该与自然生态环境具有相容性。

目前，地球的自然资源日益减少，有些资源，特别是矿石类资源是不可再生的，只会越用越少，总有一天会消耗殆尽，如煤、石油和矿石等，它们限制了工业的发展，限制了经济的增长。据专家预测，地球上经历了 38 亿年演化而储存下来的自然资源，若按目前的消耗速度，到 21 世纪末将几乎耗尽，而且，地球自然系统为人类生存和发展所提供的各种服务，每年产生的价值约合 33 万亿美元，其稳定性一旦被破坏，就不能恢复，这将给人类的生存带来毁灭性的灾难。

1970 年，科学家组织发起了第一个世界地球日，向全世界提出警告，人类工业活动正在破坏地球的自然生态系统的稳定性，呼吁人们保护地球。1972 年，罗马俱乐部公开发表第一个研究报告《增长的极限》，对高增长、高消费提出警告，用系统动力学方法全面阐述了人口问题、粮食问题、自然资源问题和环境污染问题（生态平衡问题）等一系列全球性问题及相互关系，产生了广泛而又深远的影响。1972 年 6 月，联合国在斯德哥尔摩召开了人类环境会议，宣读了《只有一个地球》的庄严宣言，向全世界呼吁，控制人口增长，节约能源和资源，改变盲目破坏生态环境的行为，绿化环境等，并第一次提出“贫穷是一切污染中最坏的污染”。1981 年，莱斯特·布朗出版了《建设一个可持续发展的社会》，书中引用了联合国环境方案中一句话：“我们不只是继承了父辈的地球，而且还借用了子孙的地球”，因此要求人类自觉地改变价值观念，从传统工业模式转换到可持续发展的模式。但是人类并没有认真地听取这些意见和忠告，相反，从 20 世纪 80 年代以来，环境污染和生态破坏随着科技的突飞猛进，生产力的飞速发展，越演越烈。1990 年，美国国会通过了《污染防治条例》，指出最佳的环境保护方法是在污染源头防止污染

产生。1992年6月，联合国又在里约热内卢召开了世界环境与发展大会，各国政府要员几乎全部参加，期望在全球范围内采取统一行动，解决环境问题。大会通过了《里约热内卢环境与发展宣言》，《21世纪议程》和《关于森林问题的原则声明》等重要文件，并签署了联合国《气候变化框架公约》、联合国《生物多样性公约》，为世界各国制定和实施可持续发展战略提供了范式。同年，世界各国3500位科学家又签署了《全球科学家对人类的警告》，他们指出，世界上大部分重要生态系统已处于崩溃状态，全球现有人口已3倍于地球的长期承受能力，臭氧层已形成2个巨大的空洞，整个地球温度上升，气候变暖，导致自然灾害大增，世界已进入一个危机四伏的新时期。1993年，我国政府制定了《中国21世纪议程——中国21世纪人口、环境与发展白皮书》，规定了我国经济持续发展的总体目标和实施清洁生产的战略步骤。

随着工业生产技术的发展，随着世界各国对环境问题的日益重视，环境保护、环境治理的力度也越来越大。但是，先发展、后治理的传统方式使环境问题非但没有趋缓，反而越来越严重。人们已认识到，只有从污染的源头杜绝污染的产生，才是主动的、高层次的治本举措。1992年，里约热内卢会议提出了“绿色科技”的概念，并指出“环境科学家的任务不再局限于环境污染的治理，而是要求对环境污染进行有效控制和对污染的环境进行修复，以及从污染源头开始杜绝环境污染的产生”。由于“绿色”的概念是一种全新的概念，代表了一种全新的生产模式，因此，至今对它的定义和理解还没有完全统一，出现了各种专业名称，如绿色化学、清洁生产、洁净技术、环境友好技术、零排放等，目前，经过全球科学家近十年的研究和探索，对绿色化学与技术的定义和原理已基本取得共识，一般将化学和化工分为两个方面来表述，但是其基本内涵是一致的。

绿色化学的定义如下。

绿色化学是一种更高层次的化学，是一种哲学思想。绿色化学是一种对环境友好的化学过程，其目标是利用可持续发展的方法来降低维持人类生活水平及科学进步所需化学产品与过程所使用与产

生的有害物质。

绿色化学的原则如下。

(1) 提倡在污染源头防止污染产生；

(2) 化学反应的设计应遵循“原子经济性”原则，即使所有的反应物都转化为产物；

(3) 化学反应的原料尽可能采用无毒或低毒物质，并且，这些原料本身的生产也是环境友好的。尽量选用可自然再生的物质作原料；

(4) 化学反应的产物应是无毒和环境友好的；

(5) 化学反应所需的溶剂、催化剂和辅助剂都应是无毒物质，而且与环境相容；

(6) 能量利用率应达到最高；

(7) 化学合成路线尽量选择常温、常压、简单和安全可靠的方法。

清洁生产的定义如下。

清洁生产是一种可持续发展的生产过程，它充分、合理地利用资源和能源，并把整个预防污染的环境战略持续地应用到生产全过程和产品生命周期全过程中，以减少对人类和环境的危害。清洁生产可以被简单地表述为：用清洁的能源和原辅材料，通过清洁的生产过程，生产出清洁的产品。

清洁生产的目标是确立“原料-工业生产-产品使用-废品回收-二次资源”这种仿生态系统的全过程控制新模式。

清洁生产的原则如下。

(1) 采用清洁能源，大力开发可再生能源，提高能源利用率。

(2) 尽量提高原材料的转化率和选择性，充分、合理地利用物质资源，尽量采用可再生资源。

(3) 废弃物最小化，即最大限度地削减有害物质的产生量和排放量。

(4) 污染源头预防，也就是说将污染消灭在产生污染的地方。

(5) 无害化工艺，即实施生产全过程控制，形成能量和物质的

闭路循环，充分利用资源和能源，整个过程只有原料和能量的输入和产品的输出，对环境没有污染。

(6) 环境相容，即原料和产品与环境相容，对生态系统的平衡没有不良影响。

近年来，要求实施清洁生产呼声最高的是化学工业，据美国 Toxics Release Inventory 在 1994 年发表的统计结果，世界上排放废弃物最多的十类工业中，化学工业名列榜首，而且化学工业每年排放的废弃物是其余九个工业行业的总和。化学工业是基础工业，已渗透到各行各业，特别是高新技术的发展，依赖于化学工业的发展，但是化学工业也给人类赖以生存的生态环境带来了严重的破坏。

为了彻底改变化学工业对环境造成的污染，必需彻底改变“先生产，后治理”的传统观念，代之以可持续发展的新理念。为此，在 1996 年，美国设立“总统绿色化学挑战奖”，以表彰在绿色化学与技术研究领域取得卓越成就的美国环境科学家。1998 年，美国成立绿色化学研究所，专门从事化学工业绿色化的研究。1992 年以来，有关绿色化学与技术的国际会议召开了近 20 次。1998 年，我国主持召开了第一届国际绿色化学高级研讨会，以后每年举行 1 次，目前已举办了 3 次，2001 年还将在山东省召开第四届国际绿色化学高级研讨会。化学工业是目前城市生态环境最大的破坏因素，必需实施绿色化学工艺才能彻底改变传统化学工业对环境的污染，形成清洁生产。而要形成化学工业的清洁生产，其关键在于研究和开发“绿色化学工艺”，“绿色化学工艺”的核心则是构筑能量和物质的闭路循环。可以这么说，如果把化学工艺的绿色化看成是一门科学或技术的话，那么不如把它看做是一门高超的科学艺术更为确切。因为，只有深刻理解和熟练掌握了有关化学化工各领域的知识，并做到融会贯通和灵活运用，才有可能创造出“绿色化学工艺”这门艺术，本书将在以后各个章节中向读者介绍近年来在“绿色化学工艺”研究领域比较成功的一些实例，以使读者在阅读本书后，能够对“绿色化学工艺”形成初步的概念，并对今后的实际工作有所启迪和帮助。

第 2 章 工业生态学原理

生态学是属于生物学与地学之间的边缘学科，也即生态学是研究生物与环境之间的能量与物质收支平衡规律和信息交流以及相互作用机理的科学。有机体与其生存的环境是一个相互联系、相互依赖和相互制约的不可分割的整体，其中每个因素不仅本身对整体起作用，而且因素彼此之间相互影响，只要一个因素发生变化，立即会引发其他因素产生一系列连锁反应，这种错综复杂的生物和非生物因素密切相关，通过能量流动、物质循环和信息传递，在自然界构成一个相对稳定的自然体系，这个自然体系又被称为生态系统。因此，生态系统又可被看成是一定空间范围内生物与非生物通过能量流动、物质循环与信息传递过程，共同结合成的一个生态学单位，是近代生态学研究的一个基本单元。

生态系统主要包括陆地生态系统、水域生态系统和人工生态系统。陆地生态系统主要由森林生态系统和草原生态系统组成；水域生态系统主要由湖泊生态系统和海洋生态系统组成；人工生态系统主要由农田生态系统和城市生态系统组成，生态系统的分类见图 2-1 生态系统的组成可以分为两大部分，即生命成分和无生命成分。生命成分又可分为生产者、消费者和分解者；无生命成分又可分为能源、代谢物质和环境物质等，见图 2-2。

在自然界中，以纯粹一个独立的生态系统形式存在的区域是很少的，往往是以几个生态系统的相互依存、相互交叉和相互融合的形式存在。特别在城市生态系统中，一般都是两个或两个以上的生态系统组合存在。因此，为了对城市生态系统进行全面研究，目前已经有人提出了“景观生态系统”的概念。

在正常情况下，自然生态系统中的能量与物质的输入和输出在一个较长时间段内是自动趋于相等的，以保持生态系统的结构和功

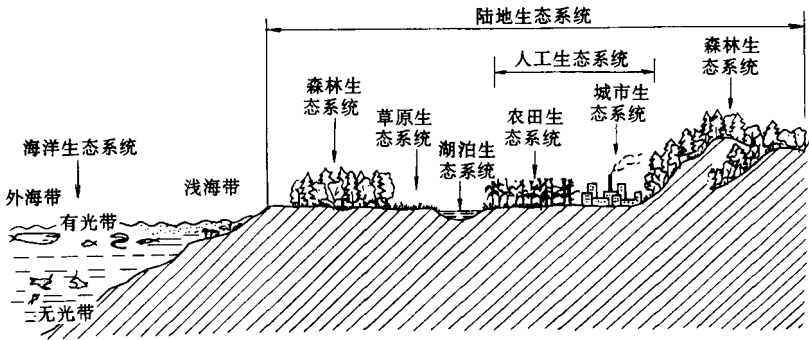


图 2-1 生态系统的分类

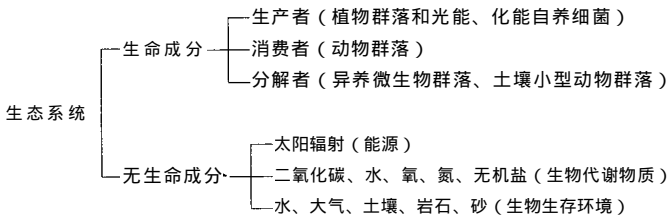


图 2-2 生态系统的组成

能始终处于稳定状态，即使受到一定程度的外来冲击或干扰，生态系统也能通过自我调节和自我净化，恢复稳定状态。因此，生态系统又是一个始终处于动态平衡的“生态平衡”系统。这里所谓的“生态平衡”不是“热力学平衡”，对任何一个封闭系统而言，由于其与环境没有能量和物质的交换，终究是要达到“热力学平衡”，也就是系统内部能量与物质均一分布，陷于无序状态，也即“死”态。与此相反，任何生态系统都是形成耗散结构的开放系统，是一种具有反馈机制的控制系统，它的平衡是通过自我调节或人为调节实现的。生态系统处在“热力学非平衡”的有序状态，系统内各因素之间的相互作用是非线性的，任何随机发生的涨落波动都能通过系统内部的非线性反馈，导致系统整体某种新的有序状态的形成。正因为生态系统是具有耗散结构的、开放的、非平衡的、有自我调节能

力的有序结构，因此，生态系统是一种“活”态。生态系统不断地与环境交换物质和能量，同时，生态系统内部也在不断地进行着物质和能量的循环流动，见图 2-3。

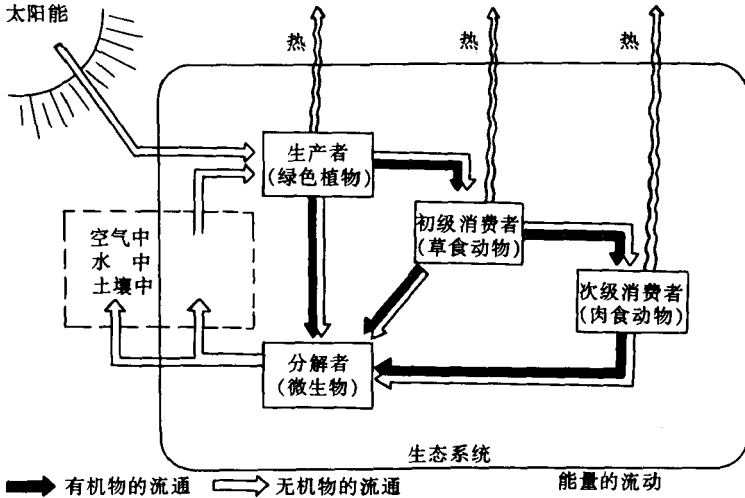


图 2-3 生态系统内物质和能量循环

在自然界中，一个正常运转的生态系统，其能量和物质的流动总是自动趋于平衡。也就是说，在一个相对平衡的生态系统中，物种之间彼此适应，相互依赖，相互制约，并维持一定数量的种群。例如，森林中食叶昆虫量增加，树木因此而受损，可是昆虫数量的增加使食虫鸟类大量繁殖，又使昆虫的增长受阻，进而使树木数量增加，维持原来的森林生态系统的平衡。又如，水域生态系统中，当水温升高时，水生植物和水生动物的新陈代谢加快，呼吸作用增强，使水中二氧化碳含量增加，氧气含量减少。但水温的升高又促使水生植物的光合作用增强，吸收二氧化碳，放出氧气，最终使水中二氧化碳和氧气的含量恢复正常。再如，草原生态系统中，每逢田鼠大量繁殖年代，狐狸也大量增加，因而抑制了田鼠的过量繁殖，维持了生物种群的平衡。生态系统都具有自动调节能力来维持生态平

衡。但是，生态系统的自动调节能力具有一定的限度，也就是说生态系统对外来冲击的耐受力是有限度的，在一定的范围内生态系统可以通过自我调节来恢复生态平衡，这个限度被称为生态系统的“生态阈限”，外来干扰一旦超越这个阈限，生态系统的自我调节能力就会消失，出现生态平衡失调，生态系统内的能量流动、物质循环和信息传递就会受阻，引发恶性连锁反应，导致整个生态系统慢性崩溃，给人类带来毁灭性灾难。例如，在农业生态系统中，依靠天然除虫剂——青蛙，基本能控制害虫的数量。但当人们过量捕杀青蛙后，使食叶和食果昆虫大量繁殖，导致粮食和蔬果减产，虫害严重时甚至颗粒无收，引发饥荒。这就迫使人们不得不大量使用对人体有害的农药（如 DDT、有机磷和有机氯等）来杀灭昆虫。但过量的有毒物质输入生态系统后超过了生态系统的自净能力，害虫虽然被消灭了，但是过量的有毒物质残留在土壤中，累积在食物的果实中，渗入地下水中，这些有毒物质沿食物链转移富集，最终全部累积在人体中，受害者是人类自己，给人类的生存带来严重危害。又如，人类社会的进步和发展，使城市化越来越发达，在生态系统中独立构成了城市生态系统。由于现代科学技术的迅猛发展和城市工业化程度的不断提高，加上城市人口的高度集中，作为城市生态系统中最具活力的人类，从生态系统中获取食物和生活物质的量大大超出了生态系统的再生能力，与此同时，人类又把生活和生产过程中产生的废弃物排放到生态系统中去。当人类排放的废弃物的量超过了生态系统的“生态阈限”时，就破坏了生态平衡，造成环境污染。因此，所谓环境污染，实质上就是生态系统被有毒有害物质所破坏，致使人类赖以生存的环境恶化；或者污染物质进入生态系统，并沿食物链转移、循环和富集，最后进入人体，危害人类身心健康。因此，人是环境污染的最大制造者，同时也是环境污染最大的受害者。图 2-4 显示了各种类型的环境污染源以及最终侵入人体的途径。

1972 年 6 月，在生态灾难和环境危机日益加剧的威胁下，世界各国政府首脑聚集斯德哥尔摩，召开了有史以来第一次联合国人类环境会议，发出了“只有一个地球”的惊呼，“保护环境”已成为世

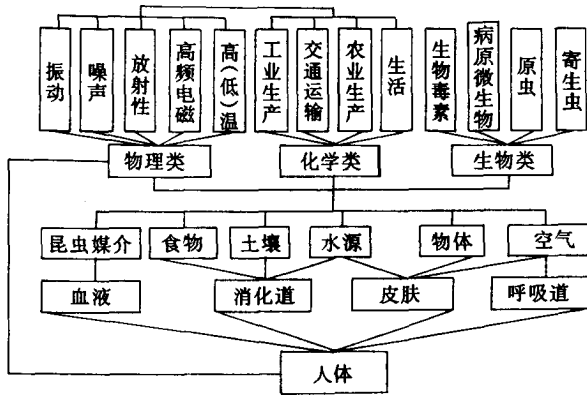


图 2-4 环境污染源与人体

界各国的共识。保护环境主要包括污染防治和生态保护两个方面。环境污染能导致生态系统的破坏；生态系统的破坏可以影响环境污染的发生。目前，对生态系统破坏性最大的因素是工业污染，主要来自工业“三废”，特别是化学工业“三废”。

(1) 废渣 工业废渣中含有有害金属，如锌、铬、铅、汞和镉等，以及难降解的有机物，是综合利用的重要资源，如果不加利用、回收，向环境排放，就会造成环境污染。

(2) 废气 工业生产排放的废气中所含污染物分为两大类，一类为直接污染物，另一类为经化学反应后变成有害物质。一次污染物包括二氧化硫、一氧化碳、氧化氮、氟化物和各种粉尘。二次污染物包括氮氧化物、烃类化合物等。

(3) 废水 化工企业排放的废水中含可溶性有机物，使水中COD、BOD增加，另有氟化物、氯化物、硝基化合物、酚、酸、重金属离子等。

另外，化工厂在生产时，总有化工机械在运转，一般噪音很大，对环境造成很大污染。噪声对人体的影响很大，能引起很多疾病，现在已引起人们的密切关注。机械噪音的污染由直接音波和次声波两部分造成，次声主要是声波在物体表面多次反射形成的。

污染防治主要是工业“三废”和城市生活垃圾的治理，而生态保护不但要消灭污染源，而且要考虑生态平衡。城市生态系统中的生态环境保护，催生了一门崭新的交叉边缘学科——工业生态学(Industria Ecology)。工业生态学研究工业生产过程中环境影响因素对城市生态系统的综合效应。工业生态学要综合考察工业生产过程的工业代谢、环境设计、生命循环、绿色化学、污染防治、环境友好制造及可持续发展性。美国环境生态学家 R. A. Frosch 模拟生物的新陈代谢过程，于 1989 年首先提出了工业代谢的概念。他认为现代工业生产过程其实就是一个将原料、能源和劳动力转化为产品和废物的代谢过程。接着 N. E. Gallopoulos 等人又提出了“工业生态系统”和“工业生态学”的概念。到了 1991 年，在美国召开了第一次全球“工业生态学”论坛，对“工业生态学”的定义、研究内容以及应用前景作了详尽的讨论，原则认定“工业生态学”是研究各种产业活动及其产品与环境之间相互关系的科学。1997 年，世界上第一份“工业生态学杂志”面世，在其创刊号上指出“工业生态学是一门迅速发展的系统科学分支，它从局部、地区和全球三个层次上系统地研究产品、工艺以及产业部门和经济部门中的能流和物流。其焦点是研究产业界在产品生命周期过程中降低环境压力的作用。产品的生命周期则包括原材料的采掘和生产、产品制造、产品使用和废弃物管理。”2000 年 7 月，在上海市举行了“大都市生态、环境和可持续发展国际研讨会”，美国洛基山研究所总裁 Paul Hawken 和他的合作者 Amory Lovins, L. Hunter Lovins 提出了“自然资本论”(Natural Capitalism) 的观念，认为全球性的第二次工业革命正在到来，人类不但必须实施清洁生产，而且必须对自然资源进行投资，也就是说，完整的工业生态学必须包括对自然资源的投资。

工业生态学研究一般由三大方法组成：

- (1) 工业代谢——面向原料的研究方法；
- (2) 生命周期评价——面向产品的研究方法；
- (3) 区域产业生态系统建设——面向区域的研究方法。

这些研究方法已被广泛应用于工业产品的开发和设计，乃至应

用于城市工业布局和工业园区规划。生命周期评价已成为国际标准化组织（ISO）于1997年颁布的ISO 14040标准中的重要内容，引发了世界工业设计的新潮流，为生命周期设计、为环境设计、为拆解设计、为再循环设计已成时尚。世界各国政府也一再加大投资力度，按工业生态学原理建设“工业生态园区”，以作示范。生态工业园区的基本要求是：园区内各工业部门和企业集团之间，以及工业部门与居民区之间，城市与环境之间都处于生态平衡。也就是说，整个生态工业园区内的物质循环、能量流动和信息传递都处于最优化组合状态，资源利用率最高，能源消耗量最少，废物排放量趋于零，实施对自然资源的投资，形成一个可持续发展的区域综合体系。

任何一个符合工业生态学原理的工业生产过程，都是对生态系统友好的可持续发展的过程。这种过程不但对生态系统不产生破坏作用，而且能促使生态系统发展得更完善，使人类的生活环境和生活质量大幅度提高。工业生态学要求任何一个工业过程，包括布局规划、工艺流程、生产环境、物质循环、能量流动、信息传递以及该过程与周围环境和过程的关系等都必须符合工业生态学原理，也即必须与生态系统相容，符合生态系统规律，促进生态系统发展。最近，Graedel—Allenby在论述到工业生态学时，给工业生态学下了一个定义，他认为“工业生态学是一门可持续发展的科学，是建立在对自然资源的充分合理利用及资源回收利用之上的可持续发展的科学。工业生态学的核心是环境设计和绿色化学”。美国国立研究院最近已将工业生态学列为21世纪前20年引起重视和投资增长的六大研究领域之一，加以重点研究。美国环境保护署（EPA）特别成立了“绿色化学研究所”，其中专门设立了“工业生态学”研究专题。美国政府还专门设立了“美国绿色化学总统奖”，专门表彰在绿色化学研究领域作出突出贡献的美国科学家。我国也于1998年在安徽省合肥市召开了第一届国际绿色化学高级研讨会；1999年在四川省成都市召开了第二届国际绿色化学高级研讨会；2000年在广东省广州市召开了第三届国际绿色化学高级研讨会，2001年在山东省济南市召开第四届国际绿色化学高级研讨会，以后将每年召开一次，

代表了我国在绿色化学研究领域的最新和最高水平。

“清洁生产”这一新的概念在我国也正被各级地方政府官员和工厂企业管理者所认可和实践，1994年末，我国成立了“国家清洁生产中心”，随后，北京、上海、山东、内蒙古等11个省、市、自治区也建立了地方性清洁生产中心，此外还成立了石化、化学、化工、冶金和飞机制造业等行业清洁生产中心。国家清洁生产中心已举办了150多个清洁生产培训班，已有11000多生产管理干部参加了培训。现在，我国已拥有自己的清洁生产外部审计员和内部审计员近千人。在环保部门、经济综合部门以及工业行业管理部门的大力推动下，总计有24个省、市、自治区已经开展或正在启动清洁生产示范项目，涉及的行业包括化学、化工、轻工、建材、冶金、旅游、石化、电力、纺织印染以及交通业等。到目前为止，全国已有400多家企业完成了清洁生产审计。据测算，实施清洁生产后，每个企业平均每年可减少污染物排放20%，产生经济效益100多万元。在已实施清洁生产的企业影响下，现在许多工厂企业在治理污染时一改以往“头疼医头，脚疼医脚”，一味修建治污设施的末端治理模式，而代之以实施“清洁生产”。在原料的选择、能源的分级利用、物料和能量的循环利用、生产工艺的改进以及加强科学生产管理等方面下功夫，结果既减少了污染，又降低了消耗，实现环境效益和经济效益“双赢”。这表明，我国治理污染的方式正由传统的末端治理向以源头削减和全生产过程控制污染为特征的清洁生产转变。

2.1 工业环境设计

工业环境设计主要是工业的布局规划和工业结构问题，这是改善和保护城市生态系统的关键。一般分成老城区的已有工业布局的改善和新建城市的工业布局规划的合理化。根据工业生态学原理，基本原则如下。

(1) 工业布局应符合生态系统要求，在生态平衡的弹性度较大的地区设置工业区。

(2) 工业布局应综合考虑经济效益、社会效益和环境效益。要

以城市总体规划和城市环境保护以及城市环境建设要求为指导。

(3) 工业布局要有利于城市生态系统的发展，要与生态环境相容。

老城工业布局的改造一般采用工业用地生态因子分析和生态适宜度分析相结合的方法进行。所谓生态因子，是指对工业用地的生态效应有显著影响的生态因素，如风向、地理位置、能量流动、绿化环境、人口密度、信息传递、自然环境和人工环境以及基础设施等。所谓生态适宜度，是指工业用地适合于哪些类型的生态条件，也就是说与什么样的生态系统相容。对现有的工业布局进行综合生态适宜度分析评价，并结合分析城市总体规划、城市绿化建设和城市环境保护实施方案，以及工厂搬迁的难易程度和总体搬迁计划等主要因素，提出工业布局调整方案。一般将对居民生活环境有直接影响或处在名胜古迹保护区和城市景观区的工业部门最先搬迁；对处于一般居民区的工业部门，应结合城区改造、绿化建设等，陆续搬迁；对那些距离居民区和商业区较远的工业部门，应限期完成环境治理，并做到三达标。

在新建城市设置规划工业区，应符合工业生态学原理，并进行工业用地开发优先顺序评价。评价标准一般为土地开发度、土地生态适宜度、周边环境条件、土地等级等。

城市工业结构决定了城市经济结构，它直接影响着城市生态结构和生态系统的物质循环和能量流动，甚至于影响到城市信息的传递。合理的工业布局加上完善的工业结构，可以促进城市生态环境的良性循环，保护城市的生态环境。要改善城市工业结构，应遵循如下原则。

(1) 工业结构符合城市经济发展规划。

(2) 因地制宜，体现本地区的经济特色和优势。

(3) 工业部门之间能形成物质循环和能量流动，工业结构整体符合绿色化原则。

(4) 能产生最大的经济效益和社会效益。

改善和调整城市工业结构的过程，实质上就是一个各工业部门、

各行业之间的优化组合过程，是一个系统工程的多因素最优化过程，目标是确定一个经济效益好、排污量少、能促进生态系统良性循环的工业结构。由于影响因素很多，给定量研究工作带来困难。目前，一般较简单的做法是把排污量作为控制目标，确定各主要行业的主要污染物种类，将各行业主要排污物的万元产值排污量作为主要变量，将各行业的产值比例作为工业结构变量，建立数学模型，进行研究。有人提出如下公式：

$$B = D_1 \times A_{01}^* + (1 + \gamma_p)^t \times F_1^* \quad (2-1)$$

式中 B —— 排污量；

D_1 —— 主要污染物种类，用矩阵表示；

A_{01}^* —— 基准年，各主要行业主要污染物万元产值排污量，用矩阵表示；

F_1^* —— 工业结构变量，用矩阵表示；

γ_p —— 万元产值排污量年平均递减率；

t —— 预测时段。

工业结构调整方案可以有多套，每一套方案都采用模型进行计算，比较每套方案的计算结果，从中优选出最佳工业结构方案。

工业结构是一个整体观念，它包含一个城市的各行各业。对于一个具体的工厂而言，它只是工业结构的一个单元。要使整个城市的工业结构合理，必须首先使每一个结构单元合理，也就是说，每一个具体的工厂所采用的工艺流程必须符合生态系统的要求，必须符合工业生态学原理，即每一个工厂必须实施生态工艺，提高生态效率。工业结构内部存在着物质代谢、能量流动和信息传递过程，它们之间相互联系、相互依存和相互制约，存在着错综复杂的关系。这些关系并不是构成简单的链，也并非单个的环，而是一张环环相扣、丝丝相连、点点相通的三维立体交叉网络。生态工艺的实施，能使网络上的每一个网点和网线在最优化组合的条件下，各司其能，各得其所。物质和能量在不同层次和级别上得到充分利用。各过程排放的废弃物循环再生，资源共享。因此，各部门、各行业之间的共生关系发达，平衡协调，使得工业结构内部输入资源最少，能量损

耗最小，基本无污染物排放，物质利用率最高，整个工业结构与生态环境相容性最好。实施生态工艺的关键是构成循环和共生，图 2-5 为某化工厂实施生态工艺改造前后的情况。

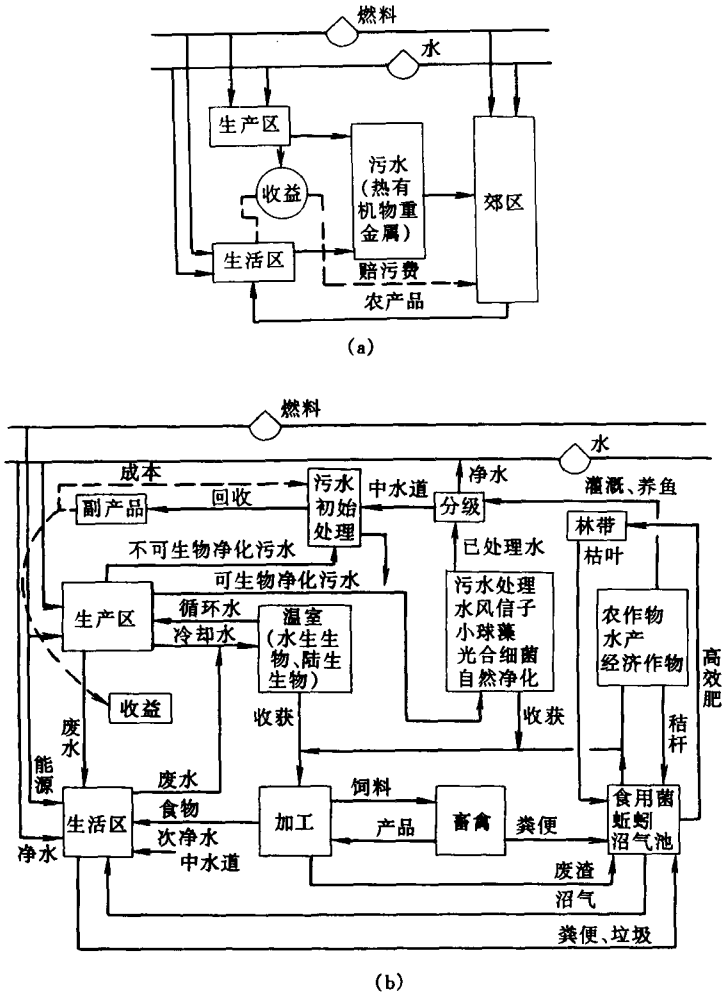


图 2-5 某化工厂实施生态工艺改造的前后情况
(a) 改造前； (b) 改造后

从图 2-5 可知，该厂原来的生活区、生产区和周围环境之间没有考虑生态建设，缺乏生态规划。物质和能量没有分层次分级别循环利用，而且废弃物的处理不完善，主要是水污染，也有有机物和重金属的污染。用生态工艺对原来化工厂进行改造后，将附近郊区与生产区、居民区划为一个功能整体统筹规划，增加了几个工艺环节：一是废热利用系统，在工厂附近建造不同温度梯度的温室，利用冷却水的余热种植蔬菜和瓜果以及养殖水生生物等，并对生活区供热。二是重点工序改造，在一些排放不能被生物净化的有毒物质工段，增加必要的处理工序，回收合成原料及副产品，最后排出可被生物净化的废水。三是外部污水处理工序，在污水处理池中引用光合细菌、小球藻、水风信子等逐次降低污水中的 BOD、COD 及重金属等的含量。污水池中经过净化的水分别按质回收作灌溉及工业、生活用水。四是农副业综合利用，从养殖的菌、藻及水风信子等水生生物中提炼食物蛋白加工食物或饲料，饲养禽畜。粪便、秸秆、秸叶经食用菌、蚯蚓、沼气池等逐级发酵，分解后可变成高效肥料，并获得沼气等副产品供生活区使用。这样一来，在投资、设备增加极少的情况下，降低了该复合系统的能量和水的消耗，整个工厂内部形成了物质循环和能量的合理流动，资源得到充分利用，同时又增加了经济收益，减少了环境污染，促进了生态系统的良性循环，获得了社会效益。

2.2 绿色化学

当今世界，和平与发展已成为主要潮流，世界范围的经济复苏，特别是发展中国家的迅速崛起，更促进了全球经济的高速持续增长，但随之也带来了对自然资源的无限制消耗及严重的环境污染和生态平衡的破坏，特别是人类对自然客观规律认识的局限性、滞后性以及生产方式、技术水平的相对落后性，使地球环境不断恶化，生态环境遭到日益严重的破坏，人类生存环境已受到前所未有的威胁。为此，世界各国政府在“保护地球生存环境”的原则下统一起来，召开了多次由政府首脑出席的“世界环境与发展大会”，专门研讨世界