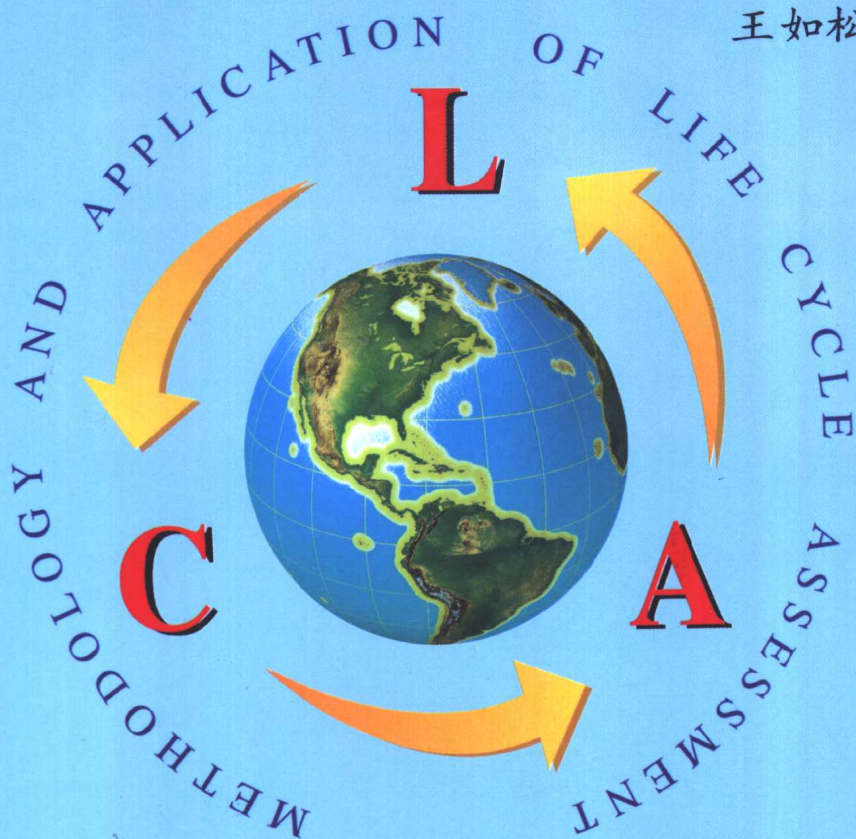


# 产品生命周期评价 方法及应用

杨建新  
徐成 编著  
王如松



气象出版社

# 产品生命周期评价方法及应用

杨建新 徐成 王如松 编著

气象出版社

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了生命周期评价的理论,较全面地评述了国际上主要评价方法;并提出了一套在中国开展生命周期评价研究的方法和模型;还总结了几年来应用生命周期评价进行产品分析、评价、设计、管理等不同领域的研究案例。

本书可供产品开发、设计、管理人员以及环境设计、环境评价和环境管理的有关人员参考,也可供相关大专院校的师生参阅。

### 图书在版编目(CIP)数据

产品生命周期评价方法及应用/杨建新,徐成,王如松  
编著.-北京:气象出版社,2002.6  
ISBN 7-5029-3348-4

I.产… II.①杨…②徐…③王… III.工业产  
品-环境影响-评价 IV.X820.3  
中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第036391号

## 产品生命周期评价方法及应用

杨建新 徐成 王如松 编著

责任编辑:王桂梅 终审:纪乃晋

封面设计:廖志勇 责任技编:陈红 责任校对:陈亮

\* \* \*

气象出版社出版

(北京市海淀区中关村南大街46号 邮编:100081)

北京市兴怀印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

\* \* \*

开本:787×1092 1/16 印张:11.25 字数:288千字

2002年6月第一版 2002年6月第一次印刷

印数:1—1200 定价:36.80元

ISBN 7-5029-3348-4/X·0067

## 前 言

人类的健康、福利和环境取决于当今人类自身的行为。以往人类所采取的不持续的生产方式和消费模式,已使人类生活的地球面临巨大的压力,我们赖以生存的地球环境正在继续恶化。值得庆幸的是,人们已经认识到目前这种生产和生活方式以及消费模式的“不可持续性”,意识到 21 世纪的工业生产必将发生一场以保护环境、节约资源为核心的革命。1992 年 6 月联合国环境与发展大会是人类环境保护史上的一座里程碑,会议通过的一系列文件是指导世界各国环境保护的纲领性文件,极大地推动了全球环境保护运动。与此同时,“清洁生产”、“绿色消费”运动在世界范围内开展得如火如荼。ISO14000 环境管理系列标准正是响应了这一全球性环境运动而采取的标准化行动,是落实 1992 年全球环境与发展大会精神的重要步骤,也是当今国际标准化领域的新课题。

当前中国生态环境的状况是局部有所改善,整体仍在恶化。尤其是处于转型期的中国正面临生态环境的严峻挑战。由于快速的工业化进程,密集的人类活动,快速的结构性增长和高物耗、高污染型的产业发展对生态环境的胁迫效应以正反馈形式发展。水体、大气、土壤和生境严重污染,农田、森林、草原、湿地的生态破坏,环境事故、生态灾难、生态难民及自然灾害频率的不断增加,生物多样性、水源涵养能力及生态系统服务功能的持续下降,给人们的身心健康、国家环境安全和经济的持续发展造成了严重地威胁。

环境污染和生态破坏是工业革命和殖民主义的副产品。随着大工业的发展,专业化分工越来越细,经济效益成为企业生产的惟一目标。企业从遍布全球的自然生态系统中无偿或低偿索取资源,并将生产和消费过程中未被有效利用的大量副产品以污染物或废弃物的形式排出厂外,形成环境问题。其实质是资源代谢在时间、空间尺度上的阻滞或耗竭,在结构、功能关系上的错位和失谐。

传统环境工程脱离生态系统的整体代谢过程,通过高投入、高能耗方式对废弃物进行末端治理。而 20 世纪 80 年代以来兴起的清洁生产技术,从改革内部工艺着手,使废物减量化和环境影响最小化,但对于部门外的资源、环境及与其它部门的共生关系却涉及甚少。

20 世纪 90 年代兴起的产业生态学,正是在这种形势下脱颖而出的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,它被列为美国 21 世纪环境科学研究的优先领域。美国生态学会前主席 Meyer J. 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。

作为 ISO14000 系列标准中非常重要的一个技术工具,生命周期评价(LCA)迅速得到国际产业界、学术界的极大关注和高度重视,相应的学术研究和应用探索风起云涌。LCA 成为 20 世纪 90 年代一个新的环境管理工具,而且生命周期的思想也不断得到扩展,一些新的理念和技术手段迅速得到发展,如生命周期设计(LCD),生命周期工程(LCE),生命周期管理(LCM),生命周期成本分析(LCC),为环境而设计(DfE),为再循环而设计(DfR)等。

生命周期评价的研究和应用在我国才刚刚起步。从研究的角度看,尚属于消化吸收阶段。而目前 LCA 中比较成型的一些方法,主要是依据发达国家的背景而开发的,我国很难完全照搬。从目前我国实际应用 LCA 的困难看,主要是数据的大量缺乏和适合中国国情的 LCA 方法尚待开发。正是在这种背景下,在欧盟国际合作项目“Eco-Compatibility of Industrial Processes for the Production of Primary Goods(项目号: ERBIC18-CT96-0095)”的支持下,中国科学院生态环境研究中心开展了 LCA 理论与方法的研究。历经两年多的研究,在欧洲(意大利、丹麦、德国)科学家的大力帮助下,对 LCA 方法进行了系统地研究,针对中国资源与环境状况,建立了一套系统评价中国产品生命周期环境影响的方法和模型,以期推动国内 LCA 研究和应用的发展。目前,这套评价方法已应用于国内轿车生命周期评价研究以及移动电话机壳生命周期评价研究。

参加本书编著工作的还有刘晶茹,王寿兵,刘炳江等。

杨建新

2002 年 3 月

## 目 录

## 前言

1	产品生命周期评价起源的科学与社会背景	(1)
1.1	环境压力不断加大,生态危机日益加剧	(1)
1.2	环境问题性质多变,解决途径亟需创新	(4)
1.3	末端治理穷途末路,产业发展危机四起	(5)
1.4	社会关注日益广泛,可持续发展深得人心	(6)
1.5	生态学内涵不断扩展,生态革命悄然兴起	(8)
2	产品生命周期评价与产业生态学研究	(13)
2.1	产业生态学回顾	(13)
2.2	自然生态系统的循环	(14)
2.3	产业生态系统结构与功能	(15)
2.4	产业生态系统的生态循环	(17)
2.5	生态循环调控方法	(19)
2.6	产业生态学的基本研究框架	(21)
3	产品生命周期评价的发展	(24)
3.1	生命周期评价概念演绎	(24)
3.2	生命周期评价内涵的扩展	(28)
3.3	生命周期评价的应用领域	(32)
3.4	生命周期评价的概念框架发展	(34)
3.5	生命周期评价方法研究的局限性与发展趋势	(36)
4	产品生命周期设计	(41)
4.1	产品生命周期设计概念及意义	(41)
4.2	产品生命周期设计的方法与步骤	(42)
4.3	产品生态设计战略	(43)
5	产品生命周期评价方法研究	(51)
5.1	目的与范围确定	(51)
5.2	清单分析	(54)
5.3	生命周期影响评价技术步骤	(62)
5.4	影响评价模型方法	(69)
5.5	生命周期解释	(74)
6	中国产品生命周期影响评价模型	(79)
6.1	中国产品环境影响潜值估算方法	(79)
6.2	中国环境影响标准化基准确定	(80)

6.3	确定中国环境影响权重	(94)
6.4	有关标准化基准及权重估算结果的讨论	(99)
6.5	计算机评价模型(AGP)	(102)
7	<b>中国能源生产清单分析</b>	(105)
7.1	能源生产系统框架	(105)
7.2	煤生产	(105)
7.3	能源运输	(106)
7.4	洗煤	(108)
7.5	焦炭生产	(109)
7.6	原油及天然气生产	(110)
7.7	炼油	(111)
7.8	电力生产	(112)
8	<b>中国钢材生命周期评价</b>	(115)
8.1	中国钢铁工业发展与生态环境问题	(115)
8.2	中国钢材生命周期清单分析	(116)
8.3	中国钢材生命周期影响评价	(119)
9	<b>轿车生命周期评价研究</b>	(124)
9.1	项目研究背景	(124)
9.2	研究目标	(127)
9.3	定义系统边界	(127)
9.4	清单分析模型及数据收集	(129)
9.5	轿车生产生命周期评价	(132)
9.6	轿车使用阶段生命周期评价	(135)
10	<b>移动电话外壳生态设计与改进</b>	(138)
10.1	研究背景	(138)
10.2	研究目标与范围	(138)
10.3	清单分析	(142)
10.4	生命周期影响评价	(145)
10.5	生命周期解释	(149)
11	<b>城市生活垃圾生命周期管理</b>	(153)
11.1	我国城市生活垃圾的污染及其控制	(153)
11.2	广汉市城市生活垃圾生命周期管理	(158)
	<b>参考文献</b>	(171)
	<b>后记</b>	(174)



# 1 产品生命周期评价起源的科学与社会背景

全球性生态环境的迅速恶化是 20 世纪人类发展过程中出现的重大问题,也是人类 21 世纪生存和发展所面临的重大危机,已成为国际社会普遍关注的焦点之一。面对当前在人口、资源、环境与经济发展关系方面所出现的一系列尖锐矛盾,人们需要重新认识环境问题的来源与人类活动方式以及消费模式之间的关系,通过制度创新,技术进步以及管理变革来协调人与自然之间的关系,促进人类社会的可持续发展。

当前人类面临的主要生态环境问题,可归结为环境污染和生态破坏及其对生态系统与人类健康的威胁,人类对此问题的认识也经历了一个漫长的阶段。

## 1.1 环境压力不断加大,生态危机日益加剧

自工业化以来,“高生产、高消耗、高污染”的传统发展模式,实现了国民生产总值的迅速增长。经济发展的重点是工业。这种发展以牺牲农业、林业及牧业为代价,其后果是没有发展的增长,甚至成为没有增长的负发展。

现代化工业生产过程在为人类提供消费产品的同时,也带来了地球环境的污染和破坏。各种有毒、有害废气,废水和固体废弃物直接排放到环境中,造成了一系列生态环境问题,如光化学烟雾、酸雨、水污染、水体富营养化、垃圾堆积以及臭氧层损耗与全球增温等。其影响范围有些是局部的,有些是地区性的,而有些则是全球性的。

### 1.1.1 环境污染触目惊心,环境问题不断扩展

随着现代科学技术的发展,愈来愈多的化学品被合成出来,满足人类的消费。世界上每年有 1000~2000 种化学品进入市场,目前已知的化学品 >700 万种。这些化学品好比“双刃剑”,一方面造福于人类;另一方面也为人类带来直接的和潜在的灾难。化学品数量和种类的不断增加,导致新的污染源不断出现,对人类健康和生态系统安全的威胁也不断加大。

大气中污染物主要是二氧化硫,总悬浮微粒,氮氧化物及各种芳烃类化合物。目前,全世界城市人口中的半数(约 9.9 亿)生活在  $\text{SO}_2$  超标的环境中;另有 10 亿人生活在颗粒物超标的环境里。以致于每年有几十万人过早死亡,数以万计的人患有急性或慢性疾病。城市的急剧扩展,机动车辆迅速大量增加,各种有害气体的排放也在增加,而且有害气体相互之间发生化学反应,导致更严重的环境事故,如 1946 年发生在美国洛杉矶市的光化学烟雾造成当地市民眼睛刺痛、流鼻涕、咳嗽、头痛、胸闷、恶心和气喘。据估计由此造成的损失 >100 亿美元。

酸沉降威胁着淡水渔业、农业、林业和野生生物。据估计,欧洲各国森林、湖泊和农作物受酸雨的损害每年损失超过 13 亿美元。据 1996 年我国 84 个城市统计,降水 pH 年均值为 3.84~7.54,低于 5.6 的城市占 51.2%。酸雨出现频率在 70% 以上的城市有 13 个,其中宜宾、长沙、赣州和衡阳的酸雨出现频率 >90%。我国遭受酸雨等污染物危害的农田面积已达 530 万  $\text{hm}^2$ 。水体的富营养化造成渔业产量下降,水生生物生物量减少。



大量燃烧化石燃料,使得全球每年因燃烧而排入大气中的  $\text{CO}_2$  多达 50 亿 t,导致大气中  $\text{CO}_2$  浓度比工业化以前增加了 73ppmV<sup>①</sup>,以及在其它十几种痕量气体的共同作用下,使得全球气温上升,从而将可能对海平面变化、对生态系统和资源等产生重大影响。挪威首相曾声称,气候变暖对于人类来说“将是一场仅次于核战争的灾难”。

大量使用和排放氟氯烃类物质(CFCs),造成臭氧层损耗,甚至出现空洞,使得紫外线辐射增强,直接威胁全人类的健康。据估计,大气圈中臭氧含量每减少 1%,皮肤癌病例增加 10 万人,患白内障和呼吸道疾病的人也将增多。紫外线增强也将破坏生态系统中复杂的食物链网,导致一些主要生物物种灭绝,并将使地球上 2/3 的农作物减产和歉收,导致粮食危机。

城市垃圾问题已成为全球大城市(尤其是发展中国家)面临的严峻问题。随着城市的发展,居民生活水平的提高,城市垃圾的产量总的发展趋势在不断上升,平均年增长率在 2%~5%,有些国家的年增长率达到 10%左右。20 世纪 80 年代以来,我国经济增长迅速,垃圾产生量平均每年以 10%的速度递增,进入 90 年代,增长速度开始放缓,1991—1995 年增长速度为 7%左右。大量垃圾的堆积,一方面占用了大量的土地,另一方面也造成了卫生条件的恶化,导致各种流行病发病率上升。垃圾焚烧技术容易产生二次污染,而且需要的技术和经济投入非常巨大,成为城市发展中一个严峻问题。

### 1.1.2 生态系统受损,资源消耗加剧

生态系统是地球上的生命支持系统,由于人类长期对资源的不合理开发和环境污染,使得不同空间尺度的生态系统已经受到损害,既造成区域性的生态环境问题,也导致全球性生态系统与环境的变化。区域性的生态环境问题如资源耗竭,尤其是可再生资源的衰退,土地退化、水土流失,森林破坏、土地沙化,次生盐碱化以及大气污染、水体污染和富营养化、水资源短缺等等,导致区域经济发展与生态环境维护的失调,有的地区甚至陷入经济发展困境与生态环境条件不断恶化的恶性循环中。

随着世界农业、医药和工业中生物资源的利用日甚,由于地球上人口的急剧增加,对自然资源的需求日益加大,为了人类自身的生存,对自然资源采取掠夺性开发利用。结果导致全球生物多样性正以空前的速度迅速丧失。据联合国统计,地球上现有耕地  $1.4 \times 10^9 \text{hm}^2$ ,其余可开垦为农业的土地约  $1.8 \times 10^9 \text{hm}^2$ (包括一部分森林),占地球表面的 25%。在这些土地中,只有 11%的土地对于农业没有严重的限制因素,而大部分缺乏再利用的条件。同时,由于不合理耕作,放牧和采伐,水土流失愈来愈严重,盐碱化和沙漠化也正在不断扩大。估计今后 20 年内全世界 1/3 的耕地将会消失;森林,尤其是热带雨林的破坏速度十分惊人,全球每年有 1700 万  $\text{hm}^2$  的热带森林被砍伐。由于热带森林生态系统是地球上生物多样性最集中的地区,约占地球上生物体的 1/2。据估计,以上述速度,在未来 30 年里,约有 5%~10% 的热带森林物种面临灭绝的威胁。照目前的速度,热带雨林及其所含的丰富种质资源将在 80 年内全部消失。温带森林的消失也正在加速,仅美国从 1971—1987 年就丧失了 1600 万  $\text{hm}^2$  森林。海洋生态系统和淡水生态系统的多样性也正面临严重的丧失和退化(杨建新,1993)。另外,海洋和淡水生态系统也同样遭受着“过度捕捞”和工业污染的双重压力,其所含的生物资源也正在急剧减少。

生物多样性的丧失必然减少生物圈中的生态关联,使生命支持系统的重要组成部分——生态系统的功能(承载力、恢复力和抗干扰能力)失衡,物质循环过程受阻,间接影响全球气候

<sup>①</sup> ppmV 表示某成分(此处为  $\text{CO}_2$ )的体积分数为  $10^{-6}$ ,下同。

变化,进而恶化人类生存环境,限制人类生存与发展的选择机会,甚至直接严重威胁生存的基本条件。

矿产资源是人类生存与发展的重要物质基础。在当今世界上,95%的能源以及80%的工业原材料来自于矿产资源。现代工业生产对矿物资源的消耗呈现出急剧上升的趋势。20世纪以来(1900—1989),美国的人口约增加了3倍,然而整个矿产资源的消耗却增加了10倍。矿产资源的总体态势是人不敷出,资源短缺成为新一轮产业发展的瓶颈。很大程度上未来的市场竞争是一场自然资源(主要是矿产资源)的竞争。我国采矿业在工业总产值中的比重虽然只有5.8%,但采矿加上以矿产品为原料的加工业总产值却占全部工业的68%,然而我国矿山开采和工业生产过程中的资源耗费率高,损失浪费严重。据对我国13个省区719个国营坑采矿山调查,有56%的矿山回采率低于要求,全国矿产开发的综合回收率只有30%~50%。而众多的集体、个体采矿的消耗、浪费更加严重。

二次资源回收(废旧物资资源化)是目前世界各国普遍重视的一大问题。1980—1982年欧洲共同体各国的几种金属的回收利用量占消耗量的比重为:铝39.3%,铅28.1%,铜17.75%,锌10.9%,锡30.6%。日本是世界上二次资源回收利用率最高的国家,而我国的回收率远远低于发达国家,还有很大的潜力可挖。因此,对矿产资源可持续利用对我国未来经济发展具有十分重要的意义。

### 1.1.3 整体恶化的中国生态环境态势

近20年来,中国在改革开放方针的指导下,快速的推进中国的工业化进程,而这种现代化进程主要是在东部沿海及内陆部分人口密集地区展开的。强烈的现代化需求,密集的人类活动,快速的结构增长和高物耗、高污染型的产业发展对生态环境的胁迫效应以正反馈形式发展。水体、大气、土壤和生境严重污染(如90%以上城市水源污染严重,全国基地粮食农药检出率60.1%),农田、森林、草原、湿地的生态破坏(如北方农牧交错带近10年荒漠化土地增长2.48万km<sup>2</sup>,南方丘陵山区近30年荒漠化土地从占该地区面积的8.2%发展到22.9%),环境事故、生态灾难及自然灾害频率的不断增加(如洞庭湖水灾公元295—1868年平均41年一次,最近40年平均5年一次),生物多样性、水源涵养能力及生态系统服务功能的持续下降给人们的身心健康、国家环境安全和经济的持续发展造成了严重的威胁。如黄河自1972年首次断流以来的25年中18年断流,且断流时间和长度逐年增加;桂林地区60多条河流减少到34条,漓江游程由83km缩短到20多km;河南驻马店地区1975年的特大洪水及上海市1988年30万人甲肝爆发等环境事件,人们仍记忆犹新。环境污染、生态破坏表象的后面是国有生态资产的流失,生态服务功能的退化以及国民生态素质的低下。

为此,国家不得不明令取缔、关闭和停产15类污染严重的乡镇工业。这些企业所蒙受的巨大的经济损失宣告了传统的“先污染、后治理,先规模、后效益”的工业化模式在20世纪90年代中国的不可行性。

为了改善城乡生态环境,一些大中城镇投巨资兴建了一批污水、垃圾和烟尘治理工程,一些老大难的环境污染企业也被责令限期治理其环境问题。这种投资多、能耗大、运营成本高且在有长期积累的后工业化国家行之有效的末端治理工程,虽可取得明显的环境效益,但对长期亏损的国营企业、粗放型乡镇企业和举步维艰的各级城市基础设施建设来说,却是一个沉重的经济包袱。

中国不仅是世界上人口最多的国家,也是世界上最大的产煤国和煤炭消费国,年产煤10

亿多 t, 占世界煤炭产量的 20%。目前, 我国 CO<sub>2</sub> 排放总量为 1200 万 t, 在世界上居第三位, 我国以煤炭为主的能源结构在相当长的一段时期内不会改变。为减轻大气污染, 减少 CO<sub>2</sub> 及其排放量, 我国已采取了一系列措施, 如优化能源结构, 提高能源转换效率, 发展水电, 核电, 向新能源找出路等。我国有丰富的水力资源, 目前已开发的仅占 8.7%。如果在 21 世纪中期, 将水电开发率提高到 80%, 则每年可以少排放 CO<sub>2</sub> 2.68 亿 t, 相当于 4.26 亿 t 标准煤的排放量。我国能源政策的实施, 不仅为改善中国的生态环境作出贡献, 也将为改善全球大气环境做出贡献。

中国环境问题的根源是产业和产品结构的不合理、科技水平落后, 以及环境管理能力低下。我国国营大中型企业基本上是 20 世纪 50 年代以来为适应计划经济的需求在前苏联体制影响下建立起来的。其产品结构单一, 技术装备落后, 管理体制僵化, 企业活力低下, 已不能适应当前市场经济发展的要求, 离国际 ISO14000 标准相差甚远, 亦无力投资企业的环境整治。

20 世纪 80 年代以来蓬勃兴起的、目前已与国营企业平分天下的乡镇企业机制灵活、市场竞争力强, 但技术装备落后, 物耗、能耗大, 环境污染严重, 对区域生态破坏显著, 急需根据当地生态条件调整结构、改革工艺、引进技术、更新换代, 促进企业的规模化、现代化和生态化。

我国目前的环境管理从总体上看, 仍然是“末端治理”模式。这种高投入、低效率的补救管理方式, 尽管在一些局部取得了比较有效的成绩, 但总体上讲, 难以在全国范围内整体地改善生态环境。污染治理成为企业发展的一个很重要的限制因子。“末端治理”的模式虽然使全国生态环境局部有所改善, 但它是整体环境继续恶化的根本原因。

## 1.2 环境问题性质多变, 解决途径亟需创新

环境污染控制的研究和行动在工业化国家始于 20 世纪 70 年代初。通过一系列环境污染控制措施, 如行政规定、法律和相应的技术支持行动计划, 一方面大幅度降低了传统污染物排放(废水、废气和固体废弃物); 另一方面, 也减少了新污染物的产生。在大多数情况下, 发达国家通过立法、政策和“末端控制措施”, 已有效地控制了工业点源污染。就连中国这样一个处于经济起飞阶段的发展中国家, 由于自 20 世纪 70 年代以来, 重视环境保护, 在点源污染方面做了很多工作, 结果在经济高速增长的同时, 并没有造成环境污染同步加重, 而且污染状况有所控制和减缓。例如: 由于污染控制技术水平的不断提高, 我国单位国内生产总值的“三废”排放量, 自 20 世纪 80 年代以来均呈下降趋势(杨建新, 1999)。

尽管全球范围内点源污染排放在降低, 然而环境问题的性质却发生了重要的变化。从环境影响的空间尺度看, 局地的、易发现的环境问题在减少, 而地区性、全球性潜在的环境问题却变得日益严重和复杂。CO<sub>2</sub> 增加导致的全球增温, 臭氧层损耗, 水体、土壤酸化, 生物多样性锐减等, 已引起了地球公民和国际社会的普遍关注。对污染物的传输途径也有了更深入、广泛的认识。“工厂大门以外”的污染问题已引起了产业界、环境学界和经济学界的关注, 甚至国际贸易所造成的“跨国界污染”也成为国际社会关注的焦点之一。一系列的国际经贸协议也开始逐渐涉及环境问题, 如关税贸易总协定中就涉及到环境问题的国际协作。国际标准化组织也开始制定和推行 ISO14000 环境管理系列标准, 以规范和推进环境产品的国际化和经济活动的生态化。

从环境问题的性质看, 在局地工业污染降低的同时, 资源的利用和消耗却大幅度上升。20

世纪以来,随着工业发展和生活水平的提高,对原材料的使用量大大增加,尤其是不可更新的矿物使用量增加最快。据世界观察研究所研究,1970—1991年,全球工业原料消耗量增加了38%,农业原料消耗增加40%,林木消耗增加44%,金属消耗增加26%,非金属原料消耗增加39%,而一些不可更新的有机物消耗则增加了69%(World Watch Institute, 1995)。

在资源消耗增加的同时,能源消耗也迅速增加,而且能源消耗增长快于能源生产增长。1973—1993年的20年间,全世界能源生产增长了40%,而能源消费增长了49%(World Resources Institute, 1997)。能源短缺又将成为未来全球经济增长的重要限制因子。

环境污染和生态破坏是工业革命的副产品。随着大工业的发展,专业化分工越来越细,经济效益成为企业生产的惟一目标。企业从自然生态系统中无偿或低偿地索取资源,并将生产和消费过程中未被有效利用的大量副产品以污染物或废弃物的形式排入环境,形成环境问题。其实质是资源代谢在时间、空间尺度上的阻滞或耗竭,在结构、功能关系上的错位和失谐。人们只看到产业的经济过程,而忽视其生态过程,只重视产品的物理功能,而忽视其生态功能,只看到污染物质的环境负价值而忽视其资源的正价值。

人们一般都认为电子工业是清洁产业。其实不然,如果从电子器件生产的源头算起,电子工业是全球单位产品资源消耗最多和污染最严重的行业之一。仅以硅代谢为例,目前世界工业硅年产量80万t,其中只有4%可变成超纯净电子硅,0.4%变为光电池,0.093%做成微电子芯片,而且其加工过程中还要耗氯10万t以上,酸及各种溶剂20万t。如果20年后全球电子产品需求扩大1000倍以上,即装备的光电容量从现在的50MW/a增长至500亿W/a,其全行业的资源消耗和环境污染将是触目惊心的。

以上种种环境污染问题、资源耗竭问题和生态系统破坏问题不仅来源于工业生产(制造)过程,而且与整个产品系统(即包括原材料采掘、原材料生产、产品制造、产品使用以及产品用后的处置等)有关。因此,解决此类问题的根本是重新分析、优化整个产品系统。

### 1.3 末端治理穷途末路,产业发展危机四起

环境问题是工业化过程的副产物。传统的借助于环境工程对污染进行治理的措施,尽管已在全球范围内有效地控制了工业点源污染。但是随着环境污染由点向面,以至全球的扩展,加之环境变化,生态系统变化以及资源、能源的过度消耗等一系列问题的出现,传统末端治理的方法遇到了严峻的挑战,迫切需要新的环境战略和管理工具。“末端治理”的主要弊端为:

#### 1.3.1 部门分割,缺乏协调

固体废物、危险或有毒废物、废水及大气污染等的治理,一般而言,涉及卫生、水资源管理,废物管理等不同的行政管理部门。通常各个部门更为关心的是维护本部门的特权。这种硬性的制度上的分割造成的结果就是在处理环境问题时往往过分地强调部门利益。在一个部门看来是很好的“解决办法”,很可能只是把问题转移到了另一个部门的范围之内,于是,“减少污染”变成了转移污染。例如:垃圾的焚烧处理固然可以大大减少其数量,但是焚烧后灰烬的存放同样可能污染土地和地下水,此外,焚烧还可能污染大气。

在某种程度上,环境问题处理的战略方面,也存在着类似的部门分割状态。国际上关于气候变化、生物多样性、臭氧层以及关于土地沙漠化、森林保护等等有一系列国际协议。这些国际协议由不同领域的专家拟就,他们并未真正相互间协调。

### 1.3.2 治理成本居高,企业不堪重负

末端治理把污染物集中在工业生产的末端进行处理,因而需要处理的污染物数量多、负荷大,一次性投资非常巨大,运行费用很高。对分散的多点源污染,又难发挥投资规模效益和综合效益。这种污染控制的不经济性,给企业带来沉重的负担。尤其是对发展中国家,企业常常难以承受该负担,导致许多企业没有治污积极性,宁愿交纳罚款或超标排污费。

而且从末端治理的成本变化看,治理效率逐步下降,污染物控制的边际成本越来越高。如垃圾处理的成本就随着标准的日益严格而不断提高,而且可能造成二次污染。

### 1.3.3 利用效率低下,资源浪费惊人

末端治理只重视污染物的净化,以减少污染物排放,而不是考虑提高资源、能源的利用效率,以减少污染物的产生量,所以,势必造成资源、能源的浪费。比如,一些本来可以回收利用的边角料得不到充分的利用,作为废物排入环境,造成资源浪费和环境污染的双重后果。

### 1.3.4 忽视系统控制,潜在二次污染

末端治理注重的是末端技术而不注重生产全过程的控制,忽视了生产过程中有害物质对企业职工健康的影响,造成直接的人员伤害。末端治理并不能从根本上消除污染,而只是污染物在不同介质中的转移,特别是有毒有害物质往往在新的介质中转移,成为新的污染物,形成恶性循环。有些污染治理技术本身也会带来其它污染。末端治理把污染控制和生产过程割裂开来,形成了控制污染制约生产发展的状况,因而使工业生产中的环境与生产的矛盾难以解决。

### 1.3.5 可能有损于发展中国家可持续发展

末端治理污染表明对发展中国家是有害的。事实上,经合组织国家是目前污染治理设备最大的市场,它们因此向发展中国家施加贸易压力,以求出售它们这方面的技术。这种对发展中国家的贸易压力会随着经合组织国家末端治污技术的日益完善和本身市场饱和而日益增加。工业化国家的这种策略对发展中国家造成双重的忧虑:首先,末端治理技术的广泛使用会阻碍发展中国家跨越一些阶段和直接进入更为现代化和更少污染的生产方式。其次,末端治理污染的基本原理会导致产生一系列的环保标准、生态指标及各种各样的技术规范,这些不仅需要日益复杂的生产方式,而且需要基础设施和专门的社会机构(信息网络、教育、管理专家、立法)。而大部分发展中国家只是部分地具备上述条件,于是有可能加重它们对发达国家,特别是以发展援助为中介的依赖。

正是由于“末端治理”存在的弊端,使得产业界在走向可持续发展的道路上,既面临着环境成本内化的压力,又必须面向正在兴起的“绿色”消费市场。因此,建立企业环境管理体系就成为20世纪90年代以来产业界纷纷启动的计划。产业界、环境学界和经济学界逐渐将目光转向于产品和工艺的过程控制(清洁生产)以及产业生态学实践,寄希望于欣欣向荣的生态产业。

## 1.4 社会关注日益广泛,可持续发展深得人心

生态环境问题的影响范围和程度正在不断扩大和加剧,直接威胁着人体健康和生态系统安全。其影响具有长期性和广泛性,不但涉及人类当前的生存与发展,而且关系到人类未来的可持续发展。1972年联合国人与环境大会,首次表明人类对于所居住的地球生存环境的关注

与担忧。1987年,世界环境与发展委员会的《我们共同的未来》中指出:“在过去我们关心的是经济发展对环境带来的影响,而我们现在则更迫切地感到生态的压力,如土壤、水、大气、森林的退化对我们经济发展所带来的影响。在不久以前我们感到国家之间在经济方面相互联系的重要性,而我们现在则感到在国家之间的生态学方面的相互依赖的重要性。生态与经济从来没有像现在这样互相紧密地连接在一个互为因果的网络之中”。进而提出了可持续发展的思想(WCED,1989)。

1992年,联合国又召开了迄今为止规模最大的地球会议——环境与发展大会,表明了人类对自身行为的反思和对未来发展方向的一种企盼。进一步完善了可持续发展的思想,而且提出了21世纪人类可持续发展的行动纲领——《21世纪议程》。在环发大会的推动下,可持续发展的思想日益普及,一场社会、经济、环境和科学领域的生态革命正在各国悄然兴起。可持续发展的行动计划正在全球每一个角落推行,成为人类共同追求的目标。

可持续发展的确切定义为“满足当代人的需求又不损害子孙后代需求的发展”(WCED,1987)。可持续发展的思想彻底否定了工业革命以来那种“高生产、高消费、高污染”的传统发展模式 and “先污染、后治理”的道路。环境与发展不可分割,要保护地球生态环境、实现可持续发展,必须建立新的全球伙伴关系,对环境与发展进行综合决策。要促进发展,就必须同时考虑环境的保护与治理;而环境污染问题的根本解决,也必须通过经济的发展,在发展过程中加以解决。

可持续发展是一种新的发展思想和发展战略,从本质上说,它是人类发展模式的一次历史性转变,也是人类生产方式、消费方式乃至思维方式的革命性变化。可持续发展以环境保护为发端,直至成为社会经济发展的总体战略。可持续发展的内涵已扩展至人口、环境、资源、社会经济等各个方面,必将对人类未来发展产生深远影响。

实现可持续发展战略的关键在于综合决策机制和管理机制的改善。实施可持续发展的最深厚根源在于民众之中。可持续发展的原则为:公平性原则;持续性原则;共同性原则。可持续发展的对策主要有:以经济建设为中心,加强可持续发展能力建设,提高人口素质、改善人口结构,因地制宜、有步骤地推广可持续农业技术,重点开发清洁煤技术、大力发展可再生能源和清洁能源,调整产业结构与布局、推动资源的合理利用、减少产业发展对交通运输的压力,大力推广清洁生产工艺技术、努力实现废物产出最小化和再资源化,组织开发、推广重大环境污染控制技术装备。

可持续发展的重要标志是资源的永续利用和良好的生态环境。自然资源的永续利用是实现社会经济可持续发展的物质基础。要保护整个生命支撑系统和生态系统的完整性,保护生物多样性;解决水土流失和荒漠化等重大生态环境问题;保护自然资源,保持资源的可持续供给能力,避免侵害脆弱的生态系统;发展森林和改善城乡生态环境;预防和控制环境破坏及污染,积极治理和恢复已遭破坏及污染的环境;同时积极参与保护全球环境、生态方面的国际合作活动。逐步使资源、环境与经济、社会的发展相互协调。

美国等西方国家可持续发展管理的重点在环境保护,而中国可持续发展是在巨大的人口压力和经济不发达的条件下提出来的,资金和技术力量十分有限,可持续发展管理的战略重点只能指向那些既有利于发展经济、提高人民收入水平,又有利于缓解资源短缺、减轻环境污染行动领域,而不可能放在单纯改善环境质量之上。中国可持续发展管理的战略重点一是控制人口;二是使经济发展从主要依靠自然资源投入转移到资源节约利用的轨道上来。因此,转向于

产业生态学和面向产品的环境管理,一方面可有效地减少工业污染,另一方面可大幅度地减少资源的浪费和过度消耗。

## 1.5 生态学内涵不断扩展,生态革命悄然兴起

出现于 19 世纪末的生态学概念,将生态学定义为:“研究生物有机体与无机环境之间相互关系的科学”。经过 100 多年的发展,生态学内涵不断发展和充实,从生物个体生态学向种群、群落以至生态系统生态学扩展。马世骏院士认为,现代生态学是“一门多科学性的自然科学,研究生命系统与环境系统之间的相互作用规律及其机理”(马世骏,1979)。生态学发展的历史始终与人与自然关系的认识密切相关。

有关人与自然关系的研究,学术界一直存在着两种对立的观点:一种观点是环境决定论,认为自然环境对人类文化和文明有决定性的影响;另一种观点认为,自然环境对人类文化的发展只产生很小的限制作用。但是,事实上,人类力量的越来越强大,正不可避免地带来各种各样的环境问题。20 世纪 60 年代,Rechel Carson 发表的“寂静的春天”和 Meadows 等人发表的“增长的极限”,反映了人类重新认识人与自然关系的转折点。人类逐渐认识到人是自然界不可分割的一部分,而且,为了社会的健康发展,人类还必须努力向自然界学习。

正是对人与自然关系认识的加深,促进了人类社会的深刻变化。自 20 世纪 60 年代以来,生态学面临一个双重问题,即强烈要求生态学家去发展这门学科内蕴的生态学理论、有效管理资源和环境,例如:依据数学种群生态学来进一步发展生态学理论。同时,还面对另一要求,即根据逐步完善的生态学理论,对许多应用性问题提供专门指导,解决一些现实和未来问题。因而生态学与经济学、社会学等学科逐渐融合。马世骏,王如松(1984)提出的社会-经济-自然复合生态系统理论,强调自然、经济、社会三个子系统的整体、协调、循环、自生,将生态学扩展为自然科学与社会科学的综合。而在此理论基础上发展起来的生态工程方法就是一新兴的多学科渗透的边缘学科和综合工程,它以生态系统及社会-经济-自然复合生态系统为主要研究对象,应用生态系统中物种共生,物质再生循环以及结构与功能协调原则,结合系统工程最优化方法,以整体调控为手段,以人与自然关系为基础,高效和谐为方向,时空结合为主线,为人类社会及其自然环境双双受益、持续发展而设计的多层分级利用物质,良性循环的生产和保护环境的工艺系统,以期同步取得生态环境、经济及社会效益。1997 年,Odum E. P. (1997)更是将生态学称为“科学与社会的桥梁”,从哲学、系统学、工程学和社会科学的角度阐明了生态学不同于一般自然科学和社会科学的特点。反映了当前生态学内涵的发展和生态学科的最新进展。

从经典物理学发展起来的自然科学及其工程技术,在推动产业革命、促进现代化进程方面立下了不朽功勋。但正是其还原论的学科分类将学科之间、部门之间、企业之间以及人与自然的联系割裂开来,使现代产业形成链状而非网状结构、开环而非闭环代谢,造成了当代严峻的环境污染与生态破坏问题。传统环境工程也是脱离生态系统的整体代谢过程,通过高投入、高能耗方式对废弃物进行末端治理。而 20 世纪 80 年代以来兴起的清洁生产技术,从改革内部工艺着手,使废物减量化和环境影响最小化,但对于部门外及部门间的共生关系却涉及甚少。

美国生态学学会前任主席, Meyer J. 在 1996 年全美生态学第 81 届年会上所作的大会报告“走出黑暗-面向未来的生态学”中,回顾了生态学这一学科定义与研究范围的发展过程,总结了近年来在全球变化及其它生态问题推动下,生态学在生态监测,包括全球变化、生物多样性



性保护、生态系统管理以及生态系统的恢复等领域的新进展。提出当今生态学发展方向,应能为可持续的未来提供理论基础与技术。而且提出“生态学必须为人类与社会发展服务”的观点。建议生态学应优先发展以下五个方面:生态工程(Ecological Engineering)、生态经济(Ecological Economics)、生态设计(Ecological Design)、产业生态学(Industry Ecology)、环境伦理学(Environmental Ethics)(欧阳志云,1996)。AT&T 公司技术环境部副总裁 Allenby B. R. 称生态工程及生态产业是第二次工业革命,是实现产业持续发展的根本出路。这种趋势反映了生态学与当代国际上出现的若干重大问题的密切关系,也反映了生态学与其它学科的相互交叉和渗透。

伴随着 ISO14000 的颁布,一个以产业生态学为先导的新的产业革命正在国际上悄悄兴起。国际上一些大企业如 AT&T 公司, Motorola 公司, Fiat 公司等率先对其全球范围内的产品开展生命周期评价和系统优化设计、组织出版“产业生态学”专著等。这次革命是一次从纵向科学向横向科学、物理技术向生态技术、高新技术向系统适用技术、单一经济产业向复合生态产业、硬件产品导向向软硬件服务导向、单一经济目标转向殷实、健康、文明目标的革命。其方向是实现环境问题的资源化、产业化、规模化、系统化和全球化。

产业生态学是一门新的综合学科,它将带来一场新的产业革命。当前在世界上,无论是政府,还是产业界都在积极推进产业的可持续发展。而产业生态学不仅涉及到产业部门内部的发展,也关系到地区、区域甚至全球的经济与环境协调发展。从比较成功的产业生态学实践看(图 1.1),逐渐从产品的末端转向于单一产品生命周期,共生产品生命周期以至整个产品系统。产业生态学从环境工程,污染预防到清洁生产,以至环境设计,生命周期评价,其影响的尺度逐渐从具体的工艺转向于整个产业界,既涉及具体的工艺设计与改善,又关系到整个国家产业政策甚至国际产业发展方向,其目的就是促进人类文明的进步和人类的可持续发展。可以说,产业生态学将成为 21 世纪产业可持续发展的议事日程。

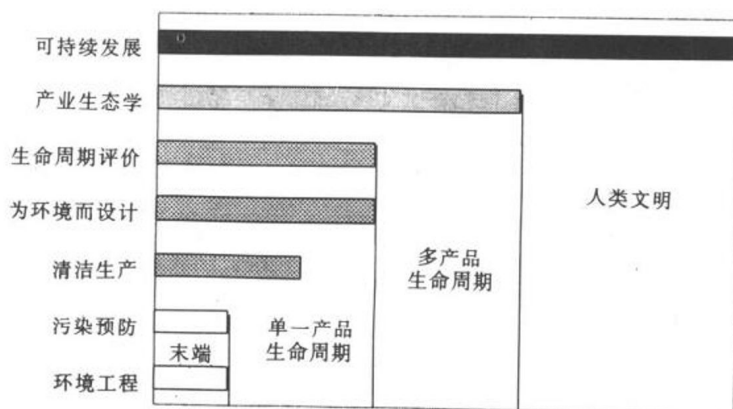


图 1.1 产业生态学与可持续发展

产业生态学发展的一个重要里程碑标志是 ISO14000 环境管理标准的形成与发展。1993 年 6 月,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)成立了 TC207 环境管理技术委员会,TC207 所制定的国际标准,通称 ISO14000 系列标准。在环境领域,ISO14000 系列标准区别于以往质量标准、地区性环保排放标准和环境标志。它为组织提供了一体化环境管理规范,即建立环境管理体系,放弃传统的末端管理模式,而采取预防的做法。ISO14000 系列标准体现了产品生命周期思想,即通过对产品从摇篮到坟墓的全过程控制,推

动全行业乃至全社会环境行动的改善。

ISO14000 是一个系列环境管理标准,它包含了基础术语定义,面向组织的 3 项标准:环境管理体系(EMS)、环境审核(EA)、环境行为评价(EPE),面向产品的 3 项标准:生命周期评价(LCA)、环境标志(EL)、产品标准中的环境指标(EAPS),如图 1.2 所示。

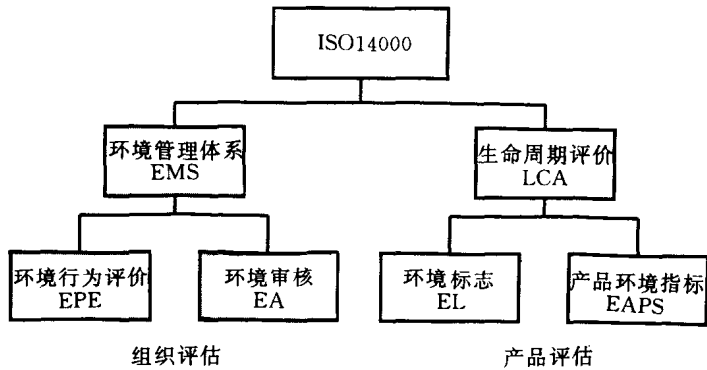


图 1.2 ISO14000 系列标准结构

ISO14000 环境管理系列标准与以往的环境标准不同,主要具有以下特点:

(1)强调法律法规的符合性。要求实施这一标准的组织必须承诺符合所在国有关环境法规和其它要求,以保证组织的行为不仅现在符合,而且将来也能满足法律与政策要求。

(2)强调污染预防。污染预防是该标准体系的基本指导思想,即首先从污染源考虑如何预防和减少污染的产生,而不是末端治理。通过方针、目标、法律法规、建立程序、审核、评审及各种技术、管理措施,减少污染的产生。

(3)强调持续改进。该标准没有规定绝对的行为标准,大部分是相对的,但要求企业环境保护逐年有所改进。有计划地实施改进措施,持续改进,不仅包括管理水平的提高,也包含技术工艺的革新,这和我国现在推广的可持续发展和清洁生产战略是一致的。

(4)要求管理过程系统化、文件化和程序化,强调管理行为和环境问题的可追溯性,体现了管理责任的严格划分。

(5)自愿性。该系列标准不带有任何强制性,建立 EMS 体系并申请认证,完全是企业的自愿行动,任何人不能强迫。这为不同层次和技术水平的组织提供了较大的可选空间。

(6)广泛适用性。该系统标准不仅适用企业,同时也可适用于事业单位、政府机构、民间机构等任何类型的组织。

(7)体现了产品生命周期思想。标准要求企业、组织不仅要自己达到标准要求,而且对其原料供应商也提出了环境要求,从而推动了整个行业、产业体系的环保行为的改善。

(8)重在体系。该系统标准不以单一的环境要素为对象,而是以环境管理体系为对象,特别注重 EMS 体系的完整性和符合性。标准不仅有方针、目标、指标,而且有实现其措施、运行机制以及纠正、审核、评审等一整套自我约束、自我完善机制。

ISO14000 系列标准的基本思想,就是从根本上解决发展生产与保护环境和资源相结合的有效途径。它的实施对改善组织的生产环境、地区环境以至全球环境均有重大意义。所带来的益处远远超过单纯环境改善,其主要作用为:

从国家实施可持续发展战略的高度上看,实施 ISO14000 系列标准,可以加速产业结构调