

# 生态食品工程学

**Ecological Food Engineering**

主 编 张文学

四川大学出版社

ISBN : 7-5614-3530-4

书 名 : 生态食品工程学

作 者 : 张文学 著

出版社 : 四川大学出版社

中国法分类号 : TS201.1

图书定价 : 29.00元

出版日期 : 2006年10月

## 前 言

生态食品工程学的学科思想，是食品工程学与工业生态学相互交叉融合中萌发产生的一种全新的概念。当我们将食品产业体系与自然环境相结合，以复合生态系统的方式探讨其形成和演变的内在规律性以及食品产业体系与自然环境相互协调的关系时，我们很自然地发现，研究如何实现食品产业体系与自然环境相互协调、共生发展的问题，和研究食品产业体系与自然环境的相互协调关系同样重要。这样，我们决定将工业生态学的思维方式贯穿到食品生产、流通以及食品消费、还原的全过程中，通过实现食品产业体系全方位、全过程的生态化，来解决生态食品产业体系与自然环境的相互协调和可持续发展的问题。同时，为了更好地理解和发展工业生态学，培养更多具有生态食品产业思维的食品工程专业高级技术人才，我们在研究生教学中开设了《生态食品工程学》课程及专门讲座。从食品科学类及生物技术类专业研究生的初步教学情况看，同学们对本课程（讲座）设置的反映情况良好。

虽然工业生态学思想在诞生以来短短的 20 多年时间内，在医药、化工、酒精、食品等制造及加工行业已取得了一些显著的成绩，我国在制糖、酿酒工业生态园区的建设中也做了一些有益的尝试，但在生态产业建设方面的理论准备和实践运用仍显得非常不足，特别在食品产业过程的生态化实践方面，更没有专门的书籍介绍。因此，迫切需要有一本正式的专门性教材。庆幸的是，我们关于《生态食品工程学》研究生教材的编写申请得到了四川大学研究生院的大力支持，使这本教材的出版能够成为现实。

本教材尝试用工业生态学的观点和方法系统地研究实现食品产业过程与自然环境相互协调关系中涉及的一些基本原理和技术方法，力求从食品资源的生产、食品制造与加工、食品的储存及运输、食品的包装和销售以及食品

的消费和还原等各个环节（构成食品产业生态链），探讨食品产业生态系统的物质循环、能量流动、信息传递规律及系统构成，在环境保护和清洁生产理念的基础上，更进一步地树立无环境污染、高效有序的生态型食品产业思维模式，以期能培养更多重视食品资源再生和综合利用以及重视人的生物特性的新型高级食品技术及管理人才。

本教材的教学重点不在于灌输工业生态学的理论知识，而是强调在食品生产设计、食品品质管理和食品消费还原全过程中生态化思想的运用，强调在食品产业体系的生态化过程中贯彻以人为本的基本原则。本教材可作为高等院校食品科学与工程专业、生物技术专业的研究生教材，也可供从事食品工程、生物化工、环境工程等相关领域的科研人员、企业管理干部以及高校师生作为参考书使用。

本教材是在作者多年教学、科研及生产实践的基础上，参考国内外一些相关书籍及最新科技资料编写而成的，内容涉及面较宽、深度较适宜。全书共分为七章及附录。第一章、第二章、第七章及附录由张文学执笔，石敏、肖凯等承担了部分整理编写工作；第三章、第六章由刘学文执笔，张文学、王文贤、肖凯等承担了部分整理编写工作；第四章、第五章由胡承、罗爱民执笔，王文贤、梁爱华、贾丽蓉等承担了部分整理编写工作。全书最后由张文学负责统稿和定稿。

本教材的编写大纲曾得到了日本著名水处理专家木田建次教授、中国酿酒生态学专家胡永松教授以及已故的中国绿色化学皮革专家张明让教授的审定和指导，本教材编写过程中获得了四川大学研究生院的支持和资助，教材初稿的试用得到了研究生们的勘误支援，在此一并表示感谢。

由于我们的学识和水平有限，加之编写难度较大，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正，以促使生态食品工程学的理论和实践能得到科学发展并且发扬光大。

张文学

2006年1月10日

## 目 录

第1章 生态食品工程学导论 .....	(1)
1.1 生态食品工程学概述 .....	(1)
1.1.1 生态食品工程学的基本概念 .....	(1)
1.1.2 生态食品工程学与食品产业生态学的相互关系 .....	(2)
1.1.3 生态食品工程学的基本原则 .....	(3)
1.2 生态食品工程学的发展 .....	(4)
1.2.1 工业生态学思想的形成与发展 .....	(4)
1.2.2 食品产业生态学的理论发展与实际应用 .....	(7)
1.2.3 生态食品工程学发展的必然 .....	(14)
1.3 生态食品产业体系的形成及生态型食品生产现状 .....	(15)
1.3.1 食品生产技术的发展及食品产业体系的形成 .....	(15)
1.3.2 生态型食品的产生及其发展状况 .....	(20)
1.3.3 生态型食品的分类及基本特性 .....	(26)
1.4 生态食品产业体系的建设和发展趋势 .....	(31)
1.4.1 食用材质选用的合理化与产品设计 .....	(32)
1.4.2 新技术在食品生产中的高度应用 .....	(38)
1.4.3 食品生产过程的最优化与生产条件的改良 .....	(44)
1.4.4 信息技术与自动化管理 .....	(45)
1.4.5 节能技术及副废物的资源化生产 .....	(49)
1.4.6 品牌效应及生态化营销 .....	(53)
参考文献 .....	(57)
第2章 食用材质的生态化和生态工程食品 .....	(58)
2.1 生态工程食品的基本设计原则 .....	(58)

---

2.1.1	生态型食用材质的选用与食品的安全性 .....	(58)
2.1.2	对自然生态最小破坏的食用材质耗用方式 .....	(62)
2.1.3	食品的营养功能性与食用材质的高效利用 .....	(65)
2.1.4	食品生产预处理过程的生态化 .....	(67)
2.1.5	食品消费的废弃物最小化和资源再生 .....	(69)
2.2	发酵食品——自然天成的生态型食品 .....	(72)
2.2.1	天然发酵食品 .....	(73)
2.2.2	纯粹培养发酵食品 .....	(75)
2.2.3	纯种培养发酵食品 .....	(77)
2.2.4	其他可食用的发酵产品 .....	(79)
2.3	仿生食品——时尚取向的生态型食品 .....	(82)
2.3.1	微生态制剂食品 .....	(83)
2.3.2	微量元素富集食品 .....	(85)
2.3.3	固定化酶加工食品 .....	(87)
2.4	再生性资源食品——前途无限的生态型食品 .....	(90)
2.4.1	单细胞蛋白食品 .....	(90)
2.4.2	发酵转化食品及饮料 .....	(93)
2.4.3	酶降解食用材质 .....	(96)
2.5	民族地区性食品——亟待规划的生态型食品 .....	(101)
2.5.1	民族地区性食品的生态性特点及类别 .....	(102)
2.5.2	民族地区性食品的生产现状及开发意义 .....	(103)
2.5.3	一些代表性的民族地区性食品 .....	(106)
	参考文献 .....	(113)
第3章	食品加工生产过程的生态化 .....	(116)
3.1	生产现场设计的生态化要求 .....	(116)
3.1.1	食品生产现场选址时的生态化基本要求 .....	(116)
3.1.2	照度和采光 .....	(117)
3.1.3	音响和振动 .....	(120)
3.1.4	温度和湿度 .....	(123)

3.1.5	空气洁净度 .....	(126)
3.1.6	人、物密度 .....	(128)
3.1.7	人流、物流的有序度 .....	(129)
3.1.8	相关设施配套建设 .....	(130)
3.1.9	相关环境建设 .....	(133)
3.2	食品生物工程和高新技术的应用 .....	(133)
3.2.1	在线非破坏检测技术 .....	(134)
3.2.2	生物传感器技术 .....	(137)
3.2.3	超微粉碎技术和纳米技术 .....	(143)
3.2.4	酶催化技术 .....	(148)
3.2.5	现代发酵技术 .....	(150)
3.2.6	超临界流体萃取技术 .....	(154)
3.2.7	膜分离技术 .....	(155)
3.2.8	真空冻干技术 .....	(159)
3.2.9	微胶囊造粒技术 .....	(162)
3.2.10	其他高新技术 .....	(165)
3.3	食品生产过程的最优化控制 .....	(168)
3.3.1	生产方法的效益化 .....	(168)
3.3.2	工艺流程的合理化 .....	(171)
3.3.3	生产条件的现代化 .....	(175)
	参考文献 .....	(178)
第4章	食品包装储运过程的生态化 .....	(181)
4.1	包装储运过程的生态化原则 .....	(181)
4.1.1	保证食品质量物流体系的建设 .....	(181)
4.1.2	食品物流体系中安全问题和绿色物流 .....	(185)
4.1.3	包装材料的生态化选择 .....	(190)
4.1.4	包装材料的再生利用 .....	(194)
4.1.5	食品包装装潢设计的生态化 .....	(199)
4.2	食品包装储运新技术的利用 .....	(205)
4.2.1	气调保鲜与储存 .....	(205)

---

4.2.2	冷链系统构成及储运技术	(211)
4.2.3	食品的绿色包装技术	(212)
4.2.4	可食用膜技术	(216)
4.3	包装储运过程的管理	(218)
4.3.1	食品品质的管理与监控	(218)
4.3.2	物流对食品工业的制约作用	(221)
4.3.3	包装储运过程的非物质化	(222)
	参考文献	(226)
第5章	食品销售消费过程的生态化	(229)
5.1	食品消费过程的生态化思维	(229)
5.1.1	引导与教育消费者形成和增强对地球环境问题的深刻意识	(229)
5.1.2	促进日常业务中节约资源运动的推广和普及	(231)
5.1.3	强化生态学思想与现实生活便利性的利弊关系	(233)
5.1.4	着眼于淡化和消除再生利用食品产业的负面形象	(233)
5.2	食品销售方案设计的生态化思维	(236)
5.2.1	开辟绿色卖场以营造良好的销售环境	(236)
5.2.2	制定合理的价格战术	(237)
5.2.3	借助网络交易平台开展电子商务	(238)
5.2.4	利用绿色广告战略宣传生态食品知识	(238)
5.3	生态食品销售消费过程的管理	(239)
5.3.1	产品的信息收集与营销策划	(239)
5.3.2	生态食品品质的管理与监控	(241)
5.3.3	销售链的合理设置与大型超级市场的利用	(243)
5.3.4	销售与服务的非物质化	(246)
5.4	生态食品的品牌效应	(247)
5.4.1	品牌与品牌效应	(247)
5.4.2	优质品牌的培育与管理	(248)
5.4.3	生态食品品牌的塑造及意义	(250)

---

5.5 生态化原则对餐饮业可持续发展的应用性指导 .....	(253)
5.5.1 食品产业生态化与餐饮业的生态化控制原则 .....	(253)
5.5.2 餐饮业可持续发展所面临的问题 .....	(254)
5.5.3 建设餐饮业可持续发展的思路 .....	(255)
参考文献 .....	(259)
<b>第6章 食品产业能源及副废物资源利用的生态化 .....</b>	<b>(260)</b>
6.1 节能降耗和非矿物能的使用 .....	(260)
6.1.1 非矿物能源使用的意义 .....	(261)
6.1.2 矿物能源的高效利用与技术革新 .....	(262)
6.1.3 生物质能的合理利用 .....	(267)
6.1.4 能源脱碳的发展趋势与展望 .....	(270)
6.2 食品工业副废物的综合利用 .....	(274)
6.2.1 食品工业副废物的来源与分类 .....	(274)
6.2.2 食品工业副废物的资源化 .....	(275)
6.2.3 食品工业副废物的资源化实例介绍 .....	(277)
6.2.4 食品工业副废物的减量化 .....	(280)
6.2.5 食品工业的清洁化生产 .....	(281)
参考文献 .....	(289)
<b>第7章 国内外生态食品工业园区的形成和发展 .....</b>	<b>(292)</b>
7.1 生态食品工业园区建设的理论与实践 .....	(292)
7.1.1 生态工业园区的基本概念 .....	(292)
7.1.2 生态食品工业园区建设中的基本常识 .....	(296)
7.1.3 生态食品工业园区建设的实践探索 .....	(299)
7.2 国外主要生态食品工业园区的建设 .....	(302)
7.2.1 国外生态食品工业园区的发展状况 .....	(302)
7.2.2 卡伦堡工业共生体的先导性作用 .....	(303)
7.2.3 美国开普查尔斯可持续科技工业园 .....	(306)
7.2.4 美国红丘陵生态园 .....	(307)
7.2.5 欧洲航天局宇航船 MELISSA 计划 .....	(307)

- 7.2.6 日本鹿本町地域资源循环型社会的构建 ..... (309)
- 7.2.7 日本南九州环境调和型烧酒综合产业系统 ..... (312)
  
- 7.3 国内主要生态食品工业园区的建设 ..... (317)
  - 7.3.1 国内生态食品工业园区的发展状况 ..... (317)
  - 7.3.2 雅安农业(生物)高科技园区 ..... (318)
  - 7.3.3 四川沱牌曲酒酿酒工业生态园区 ..... (321)
  - 7.3.4 广西贵港国家生态工业(制糖)示范园区 ..... (325)
- 参考文献 ..... (328)
  
- 附录一: ISO9000 质量管理体系认证程序 ..... (329)
- 附录二: 环境管理体系审核认证程序 ..... (333)
- 附录三: 中英文词汇拼音索引 ..... (337)

# 第1章 生态食品工程学导论

## 1.1 生态食品工程学概述

人类所有的物质生产及经济活动，总是在一定的社会化产业体系内，借助适当的生产设备，按照合理的组织、运行模式，制备出人们所需要的物质产品以及配套适宜的服务形态，以达到追求最大经济利益的目的。然而，各种形态的产业化体系的构成，包括产品生产过程的形成和后续社会服务则是一项宏大的系统工程，有其固有的规律性需要人们去认识和了解。

### 1.1.1 生态食品工程学的基本概念

食品作为人类赖以生存的食物原料及加工产品的物质形态，对其基本的物理、化学和生物化学性质及其食品加工原理的认识，构成了食品科学的研究内容，而把食品科学的基本理论和科学原理应用于食品产品设计及其制造加工过程，则是食品工程学的基本任务。

作为一种特殊的加工产品，食品的生产原料来源于自然，经过食品加工和流通消费过程，食品（包括附属产品）的形态又最终消失，还原于自然。食品生产加工以及消费还原全过程的实现，决定了食品工程学的研究必然涉及多种学科和产业领域，除了基础学科和工程学的内容外，也包括营养学、心理学、管理学、工业卫生、产业生态等人文社会学科的相关内容。可见，食品的开发、生产和营销实施，是一项融科学研究、原料生产、加工包装、技术检测、储运销售以及社会服务等各个环节为一体，横跨多部门、多行业的宏大系统工程，而通过生态化思想的理论指导和实践应用，实现食品产业体系与自然环境的相互协调和发展，则是生态食品工程学的核心研究内容。

因此，生态食品工程学可以被认为是科学地应用生命科学、环境科学、信息科学、能源科学、管理科学等学科的一些相关理论及技术原理，通过协调食品产业活动及其产品与自然环境之间的相互作用关系，以实现食品工程学与产业生态学的相互融合和交叉，促进食品产业体系可持续发展的一门新兴边缘学科。生态食品工程学是以新的眼光和思维方式来看待食品产业自身

发展的。它主张食品产业生产活动模仿自然生态体系的运行状态,通过对传统工艺与现代技术的集成和整合,通过对主产业与副产业的重组和调整,并将环境因素融入社会经济的运行过程之中,从而求得食品产业体系的可持续发展,即通过促进环境改善、经济增长、社会进步而实现食品产业自身在生态化轨道上的真正发展。这就决定了生态食品工程学不是把食品产业的发展孤立地看做行业一条线的发展,而是将其置于产业生态体系中,与自然环境和人类社会一道协调地发展。

在实施生态食品工程和实现食品产业生态化发展的过程中,不可避免地涉及工业生态学的一些研究方法和技术手段。通过把工业生态学的思维方法及其基本原理科学地加以应用和发挥,就形成了生态食品工程学的基本研究内容及其研究范畴,即主要着眼于研究生态食品产业体系的形成及发展。其具体包括三大部分研究内容:①食品资源生产——为食品工业生产提供原辅材料及能源;②食品加工生产——以低消耗、低污染或无污染为目标,生产人类所需的各种食品;③食品还原生产——将加工生产及销售消费中产生的各种副废物再资源化,以生产新的产品。这三部分内容并非各自分裂和孤立存在,而是根据环境特性和产业项目进行统一规划、统一运作、有机组合而形成的一个环状系统,即生态食品产业体系。然而,实现食品产业体系生态化的必要手段,即是通过实施生态食品工程,以实现食品生产加工以及消费还原全过程的生态化和可持续发展。

### 1.1.2 生态食品工程学与食品产业生态学的相互关系

20世纪80年代末,工业生态学思想逐渐成熟,并在美国正式诞生了工业生态学的概念。工业生态学被认为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,是生态学与工业体系可持续发展和相结合的一门交叉边缘学科,其基本研究内容主要包括体系内的闭路循环、污染物发散的减少、产业活动的非物质化、能量传递的非碳化等。

随着工业生态学思想的不断完善以及其基本原理在不同产业领域的实践应用,产业生态学理论得到不断发展。食品产业生态作为生态产业体系的一个分支,有关其理论研究和应用实践也成了新的研究热点,受到了人们的极大重视。食品产业生态学的基本思想在于将食品产业的生产和服务等社会经济活动视为产业生态体系运动中的一个有机过程,即认为生态环境中的物质元素以资源形式进入食品工业生产过程,经过各种类型的加工转换,再以生产过程中的“废弃物”和消费后的“剩余物”等形式重返产业生态体系,加入产业生态循环,构成产业生态链。在这种理念的指导下,食品产业生态学

被定义为采用工业生态学的观点和方法,系统地研究食品生产加工以及消费还原全过程与自然环境相互协调关系的科学。可以认为,食品产业生态学与生态食品工程学在研究目的上是一致的,在基本研究内容上也是相同的;但在研究对象上前者的重点在于系统,后者的重点在于过程。二者主要表现是,前者强调系统生态化结果的实现,后者更看重过程生态化实践的完成,二者通过“因”与“果”、“动”与“静”的关系相互关联,共同发展。

食品产业生态学通过食品产业生态链,即食品资源的产生、食品制造与加工、食品的储存及运输、食品的包装和销售以及食品的消费还原等各个环节,探讨食品产业系统中的物质循环、能量流动、信息传递的“三流运转”规律及其系统构成的基本原理。同时,生态食品工程学为食品产业生态学的研究提供了基本手段和核心动力,通过生态食品工程的实践,在清洁化生产的基础上,融合人性化设计的理念,尝试建立无环境污染、高效有序的生态型食品产业模式,以确保通过生态化食品产业体系的建立和完善,向人们提供更多更好的营养保健、卫生安全性的生态型食品极其环境友好的食品消费习惯。

### 1.1.3 生态食品工程学的基本原则

无论是食品产业生态学还是生态食品工程学,其主要理论基础均来源于工业生态学。因而,对食品产业生态学及生态食品工程学的研究和应用,应该注重对工业生态学思想的继承和发展,根据食品产业体系构成及发展的特殊规律性,探索适合于食品产业系统生态化要求的基本理论和技术方法。其具体表现在食品生产设计、食品生产管理以及食品消费还原全过程中,应该注意理解、吸收工业生态学及其相关科学领域的一些最新理论进展和应用研究成果,并运用系统论的观点和方法来认识与探究食品产业生态体系的形成及其运转规律。

目前而言,作为对工业生态学理论及实践的科学延伸和创造性发展,生态食品工程学及其食品产业生态学的研究和应用,在理论体系的构成上首先表现为必须满足以下几条基本原则:

(1) 生态工程食品的可设计性原则。它主要表现为以满足不同人群的消费需要为目的,在食用材质选用、生产工艺选择、包装及储运方式、产品类型及消费导向等各个方面,通过产品的生态化设计和生产销售,实现经济、社会及环境效益的和谐统一。

(2) 食品生产、消费体系的以人为本原则。它主要表现为以确保食品生产者、消费者双方经济利益及健康状态为目的,在食品的生产过程、流通过

程及销售消费过程中,尽可能地改善食品产品的生产和储运条件,以提高和保持产品的品质质量。

(3) 系统资源的无废物化及最小消耗原则。它主要表现为以资源的高效和综合利用为目的,在食品生产及副产品加工的全过程中,通过生态食品工程的实施以及运用食品工业生态园建设等手段,实现可利用资源在不同工序间的合理分配,使废物排放及能量消耗最小化。

## 1.2 生态食品工程学的发展

食品工业体系是在人类自身发展的漫长历史过程中,随着食品生产技术的不断进步和演变而得以形成与完善的,而人们的生态化思维则是人类在不断地与自然环境的共生发展中受到启发和培养的。特别是在20世纪70年代末工业生态学思想的诞生,才使人们意识到真正找到了解决人类工业技术进步与自然环境恶化矛盾关系的有效手段。

随着工业生态学理论的不断延伸和深入研究,借助于工业生态学原理在不同产业领域的实践和应用,推动了工业生态学学科的不断进步和发展,分支学科不断涌现。同时,大量的应用研究成果,又为其分支领域——食品工业生态学的理论研究以及生态食品工程学学科思想的发展,提供了良好的科学依据和实践范例。

### 1.2.1 工业生态学思想的形成与发展

发展是人类社会永恒的主题和基本权利,自人类产生以来,人类一直在自觉或不自觉地拓展其生存与发展的空间。18世纪以来的几次工业革命使社会生产力迅速向前发展,所创造的物质文明达到了前所未有的高度,使近200年所创造的物质文明超过了在此之前人类物质文明的总和。然而,在传统的工业化模式所创造的高度物质文明背后却是残酷的破坏自然生态的野蛮行为,人们在征服自然的同时,发现自然生态的惊人退化。随着生物多样性的降低、全球气候环境的变化、自然灾害的频繁、淡水资源的枯竭,以及沙漠化、盐渍化的加剧,自然生态系统能为人类生存与发展提供的服务功能越来越弱。

面对人类生产活动对自然生态环境损害的日益加剧,如何系统、全面地协调工业系统与自然环境的相互关系,使人类社会发展的需求与自然生态系统的发展达到动态平衡,人类开始了大量的理论和实践方面的探索。

(1) 工业生态学思想的萌芽。20世纪50年代至60年代,由于生态农业的兴起和蓬勃发展,以美国为代表的一些发达国家开始对模仿自然生态物质循环、

能量流动的规律重构工业系统产生了一些想法。

早期的探索工作以亚洲的日本开展得较早,也较为彻底。在20世纪60年代末,日本政府通产省已经注意到工业化在环境方面的极高代价,指定其直属机构——工业机构咨询委员会开展了一些前瞻性研究,探讨依赖信息与知识而非原材料消耗来提升日本经济的可能性。1971年,日本在研究报告《70年代前瞻》中,提出了以生态学的观点来重新审视现有的工业体系以及在“生态环境”中发展经济的观念;其后成立的工业-生态工作小组在1972年,发表了“工业生态学:生态学引入工业政策的引论”,为工业技术重大项目的启动做好了充分的理论准备。1973年推出了发展可再生利用新能源的“阳光计划”,1978年实施了提高能源使用率的“月光计划”,1980年通产省创设了“新能源发展组织”,这些措施使工业生态学思想在日本不仅得到了认真对待,而且被大张旗鼓地付诸实施。

在欧美,1976年,由联合国欧洲经济委员会(ECE)组织的“技术与无废料生产”的报告会上,有许多文章提到了类似于今天的清洁化生产和工业生态学概念。1977年,美国地球化学家Preston Cloud在提供给德国地球学年会的一篇学术报告中,使用了“工业生态学”一词,成为按目前的定义最早倡议“工业生态学”概念的人之一。20世纪80年代初,美国、法国、苏联的一些大学开始教授工业生态学,试图推动工业生态学概念的发展和普及,但反响甚微。1983年,比利时社会政治研究与信息中心出版了《比利时生态系统:工业生态学研究》的专著,书中很清楚地表述了工业生态学的基本原则,认为工业社会应是一个生态系统,并由其生产能力、流通和消费渠道以及原料与能源的储备及产生的废物的总和所构成;提出了原料与废料的区别只有在物质循环是在对外开放时才有意义的观点。同样,虽然该书的意义很大,但外界反应也非常有限。

(2) 工业生态学思想的诞生。1981年,莱斯特·布朗出版了《建设一个可持续发展的社会》一书,书中引用了联合国环境方案中的一句话“我们不仅继承了父辈的地球,而且还借用了子孙的地球”,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。20世纪80年代末,美国工程科学院在华盛顿发起了“科技与环境计划”讨论会,第一个报告文集《科技与环境》于1989年出版,文集中包含了许多朝着工业生态学方向演进的观点。1989年9月,美国通用汽车公司的Robert Frosch和Nicolas Gallopoulos在《科学美国人》科普月刊上发表了一篇题为“可持续工业发展战略”的文章,并推出了工业生态学这一概念。他们认为,工业系统应向自然生态系统学习,建立类似于自然生态系统的工业生态系统。系统内的每个工业企业必须与其他工业企业相互依存、相互联系,从而构成一个复合的大系统,以便运用一体化的生产方式

来代替过去简单化的传统生产方式,减少工业对环境的影响。

(3) 工业生态学思想的发展。工业生态学的概念被重新推出后,工业生态学的理论与实践进入蓬勃发展的崭新阶段,许多学者都积极地参与并发表各自的看法,工业生态学的定义、研究范围变得越来越清楚。1991年5月,美国科学院在华盛顿组织了关于工业生态学的研讨会,对工业生态学的定义、研究内容以及应用前景进行了详尽的讨论,形成了工业生态学的基本框架。1991年,由英国人 Harding Tibbs 编撰的《工业生态学:工业新环保手册》出版发行,Tibbs 的手册复述了 Frosch 和 Gallopoulos 的文章中的内容,运用实业界的语言解释了工业生态学的思想。1992年,美国电信企业官员 B. R. Allenby 首次完成了关于工业生态学的博士论文答辩。1993年10月,美国可持续发展总统委员会(PCSD)召开了生态工业园(Eco-Industry Park)工作会议,对生态工业园定义、建设原则、实践普及的情况做了研讨。1996年,生命周期评价杂志(The International Journal of Life Cycle Assessment, Int. J. LCA)在全球开始发行,预示着工业生态学的研究已经开始引起全世界各国的重视。

(4) 工业生态学思想的普及。1997年,美国耶鲁大学和麻省理工学院共同合作出版了全球第一份工业生态学杂志(Journal of Industrial Ecology),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与物流,其焦点是研究产业界在产品的生命周期过程中降低环境压力的作用,而产品的生命周期则包括原材料的采掘及生产、产品制造、产品使用和废弃物的管理等。2000年,工业生态学国际学会(The International Society for Industrial Ecology)宣告成立,会员迅速发展 to 世界各国。在中国,2001年4月,清华大学生态工业研究中心成立,作为国际生态工业协会会员单位和 中国工业生态经济与技术专业委员会执行机构,率先在国内开展生态工业研究。2002年11月,东北大学国家环境保护生态工业重点实验室经国家环境保护总局批准建设,其工业生态学研究信息室拥有大量环境和工业生态学领域的研究文献、书籍和国内外重要学术期刊,建立了工业生态学研究网站,成为国内在该领域内资料最全、信息量最大的工业生态学信息室。2004年11月,清华大学与美国耶鲁大学共同举办了 中国工业生态学教学研讨会,对加强中国工业生态学的教学进行了交流和规划,有来自北京大学、南京大学、南开大学、大连理工大学和清华大学等大学的 40 多名正在或将要从事工业生态学教学的教师参加。

现在,在欧美国家有 30 多所大学设立了工业生态学的课程,在我国也有近 10 所大学开设了相关的本科、硕士及博士研究生课程。在中国以及世界不少国家都创办了工业生态学方面的杂志,有关工业生态学的研究文章、专著不断涌

现,而且工业生态学的思想不断向相关产业领域渗透,这些领域包括纺织、化学、高分子材料、皮革制品、钢铁、造纸、食品、机械以及电子行业等。在我国,由一批先驱学者和企业家的推动与努力,工业生态园建设取得了极大发展,在生态酿酒工业的实践方面也实现了较大突破,取得了不少成绩。

### 1.2.2 食品产业生态学的理论发展与实践应用

工业生态学的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。

由于工业生态学探讨产业系统与经济系统以及它们同自然系统的相互关系,属于跨学科研究,涉及诸多学科领域。这些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。因此,工业生态学是研究可持续发展能力的科学,它根据整体、协调、循环、自身的生态控制原理去系统地设计、规划和调控人工生态系统的结构要素、工艺流程、信息反馈关系及控制机理,在系统范围内获取高的经济和生态效益。工业生态学不同于传统的末端治理的环境工程学,而是强调资源的综合利用、技术的系统结合、学科的边缘交叉和产业的横向结合,着眼于增加而不是减少就业的机会,着眼于功能完善而不是结构性增长。对于一个具体的产业化系统而言,系统优化和生命周期评价方法,可以成为研究工业生态学理论发展与实践应用的重要手段。

#### 1.2.2.1 食品产业生态学的系统控制理论

工业生态学研究的是工业系统与自然生态系统的相互作用和协调关系,研究如何促进工业生态系统向高级生态系统进化,使其与自然生态系统协调发展。工业生态系统作为自然生态系统的人类社会-经济系统中的—个子系统,其本身也是一个复杂的大系统,并针对不同的产业体系衍生出各种各样的分支系统。生态食品产业体系作为工业生态系统的—个分支,具有复合系统复杂多样性的特征,满足复合生态系统优化和发展的控制论理论要求。它具体包括以下几项基本原理:

(1) 开拓适应原理。任何一个产业系统的发展都有其特定的资源生态位,系统成功的发展必须善于拓展资源生态位和调整需求生态位,以改造和适应环境。生态食品产业体系的发展也不例外,在发展的初期需要开拓与适应环境,由于限制性因素的存在,速度较慢,且越接近某个阈值水平时,其速度越慢,然后是快速增长和出现新的限制性因素。食品产业生态系统必然通过这种不断