

农业生态 工程基础

NONGYE SHENGTAI

GONGCHENG JICHU

李维炯 李季 许艇 主编

中国环境科学出版社

农业生态

工程基础

主编 王 强 副主编 王 强

主编 王 强 副主编 王 强

主编 王 强 副主编 王 强

1



农业生态工程基础

李维炯 李 季 许 艇 主编

中国环境科学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

农业生态工程基础/李维炯, 李季, 许艇主编. —北京:
中国环境科学出版社, 2004.9

ISBN 7-80163-941-3

I. 农... II. ①李... ②李... ③许... III. 农业科
学: 生态学—研究—中国 IV. S181

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 086950 号

农业生态工程基础

李维炯 李季 许艇 王编

出版发行 中国环境科学出版社

(100062 北京市崇文区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://>

电 话: 010-67113409

印 刷 北京市联华印刷厂

经 销 各地新华书店经售

版 次 2004 年 9 月第一版 2004 年 9 月第一次印刷

印 数 1—5000

开 本 787×960 1/16

印 张 14.5

字 数 284 千字

定 价 28.00 元

【版权所有, 请勿翻印、转载, 违者必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

内 容 简 介

本书是在编者多年教学和实践的基础上编撰而成。根据教学内容和时间的需要，在系统介绍生态工程基本原理的基础上，对我国传统农业的技术精髓和所取得的成功经验进行了较为规范、系统、完整的总结和概括，如农渔、农畜、桑渔、林牧等综合生态工程，有机肥还田，物质多层分级利用，地力再生维持等。本书的内容由浅入深，体现了生态农业发展的特点，可作为各农林院校生态学专业的教学教材，也可作为教学、科研人员及行政管理工作者的学习参考书。

前 言

农业生态工程 (Agro-ecological engineering) 是应用生态系统中生物群落共生原理、系统内多种组分相互协调和促进的功能原理以及地球化学物质循环和能量转化原理等, 设计与建设的合理利用自然资源, 保护生态多样性及稳定性, 维持系统高生产力的农业生态系统所涉及的理论、方法及工程技术体系。

农业生态工程是当前国内外正在迅速发展的“生态工程”的重要组成部分, 也是目前国内外生态工程研究的基础领域。生态工程 (ecological engineering) 是在 20 世纪 60 年代全球爆发生态危机以及人们为寻求解决危机对策、有效地加强资源和环境保护这一宏观背景下应运而生的。60 年代以来全球生态危机主要表现为人口激增、资源破坏、能源短缺、环境污染和食物供应不足, 这些问题在不同的国家和地区的表现不尽相同。

在西方发达国家中, 主要面临的是由于高度的工业化和强烈集约型的农业经营带来的环境污染问题。为了解决这一问题, 60 年代末, 人们曾认真讨论过“无废物”目标, 意指完全消除污染, 防止污染物进入环境。当时人们对改善环境的技术深信不疑。后来, 人们逐渐认识到, 由于种种原因, 应用常规方法不可能实现所谓的“无污染”目标。首先, 用于治理环境的人力、物力、才力是有限的, 尤其在发展中国家更是如此; 其次, 当采用某种净化技术时, 可能将污染物由一种介质转移到另一种介质之中去。为了降低污染、保护资源, 人们试图应用生态系统的某些功能 (如生物净化功能) 以实现其目标, 于是发达国家便开始了生态工程研究。

在发展中国家, 所面临的不只是单纯的环境问题, 而是由人口增长、资源破坏、生产不足和环境污染共同组成的“并发症”。这些国家不但要保护资源和环境, 更迫切的是要以有限的资源生产出足够的产品, 达到高产、低耗、优质、高效, 以供养日益增长的人口。它们必须立足于本地资源和条件去寻求适合自己的发展途径和技术, 生态工程恰恰提供了这样一种发展战略与实现低耗、高效、无污染或少废物的适用技术。目前, 生态工程已在资源管理、环境保护、工农业生产、城市建设以及重大工程建设中得到广泛的应用, 并发挥着越来越重要的作用。

中国从 20 世纪 80 年代初首先在农业的可持续发展领域开始生态工程的探索, 并逐步形成了具有特色的生态工程分支——农业生态工程。多年来, 我国传统农业积累了丰富的精湛技术和成功的经验, 如轮作、套种、间作制度, 农渔、

农畜、桑渔、林牧等综合生态工程，有机肥还田，物质多层分级利用，地力再生维持等，这些都符合生态学原理，且很多至今仍被广泛应用，在与现代农业科技结合的过程中，保证了我国以占世界耕地 7% 的土地供养占全球 22% 的人口，并长期维持地力不衰。这些成功的传统农业精华本身就是中国现代生态工程发展的重要基础。农业生态工程研究虽然已取得了很大的成就，但目前尚缺乏进一步的理论探索与系统总结，特别是缺乏规范化、系统化、完整化的样板实体，而经验性的、低水平的、重复性的工作却很多，限制了农业生态工程在理论和技术方面发展。

生态工程是一个新兴的富有挑战性的学科，随着可持续发展在各国的实施以及循环经济的提出，生态工程必将发挥愈来愈重要的作用。本书仅是基于以往本科教学资料的总结，尚属生态工程的基础部分，希望以后能逐步形成具有我国特色的生态工程系列教材及专著，以满足生态产业的发展要求。

由于编者知识有限，尽管在编著过程中力求遵循生态学的基本原理和研究思路，客观地反映事物的本质，但书中难免出现错误和疏漏之处，欢迎读者提出批评和改进意见。

本书在编写过程中，何英、阎素芬等参与了教材的图件制作、排版等工作，另外本书出版得到了中国环境科学出版社杨吉林女士的大力支持，谨致谢意。

编 者

2004 年 8 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 生态工程的概念和意义	1
第二节 生态工程的主要类型和特征	6
第三节 生态工程的发展历史及现状	11
第四节 我国生态工程的发展战略	19
第二章 农业生态工程基本原理与设计思路	23
第一节 系统原理	23
第二节 生态原理	27
第三节 经济原理	31
第四节 工程原理	34
第五节 生态工程设计思路	36
第三章 土壤生态工程	40
第一节 土壤生态系统的特点	40
第二节 土壤培肥生态工程	43
第三节 水土保持生态工程	51
第四节 土壤改良生态工程	55
第五节 土壤综合生态工程	58
第四章 农田生态工程	63
第一节 农田生态系统的主要特征	63
第二节 农田作物生态工程	67
第三节 农田林网生态工程	71
第四节 农田病虫害的生物防治生态工程	78
第五节 复合农林业生态工程	85
第五章 养殖业生态工程	95
第一节 放牧动物群落生态工程	95
第二节 畜牧养殖生态工程	98
第三节 水体养殖生态工程	102
第四节 农渔复合生态工程	108

第六章 微生物生态工程	114
第一节 食用菌生态工程	114
第二节 微生物生态工程	117
第三节 植物微生物生态工程	120
第四节 动物微生物生态工程	124
第五节 环境微生物生态工程	128
第七章 庭院生态工程	131
第一节 庭院生态系统的特点	131
第二节 庭院种植业生态工程	134
第三节 庭院养殖业生态工程	141
第四节 庭院加工业生态工程	144
第五节 庭院食物链复合生态工程	145
第六节 庭院住宅建筑生态工程	149
第八章 农村能源生态工程	155
第一节 农村能源现状及问题	155
第二节 节能工程	157
第三节 可再生能源合理开发利用	160
第四节 沼气的开发利用	166
第九章 农业污染防治生态工程	183
第一节 农业污染现状及特点	183
第二节 农业大气污染防治生态工程	185
第三节 水污染防治生态工程	189
第四节 土壤污染防治生态工程	194
第十章 综合农业生态工程	202
第一节 农林牧渔综合生态工程	202
第二节 生态村建设	207
第三节 生态县建设	213

第一章 绪 论

第一节 生态工程的概念和意义

一、生态工程的概念及由来

生态工程是近年来发展起来的重要的应用生态学分支学科,是把生态学理论应用于生产实际,把生态科学技术转化为现实生产力的枢纽和桥梁。尤其是近年来蓬勃发展起来的生态农业研究,实际上就是农业生态工程科学的研究,即把农业生态学理论,通过各种生产工艺系统和技术在具体农业生产过程中加以实现,达到高产、优质、高效之目的。

生态是指生物与其生存环境之间的相互关系,研究这种关系的学问就是生态学。工程是指人类设计的、具有一定结构和功能(即达到一定目的)的工艺系统。

生态工程则是遵循生态学的基本原理,应用生态系统中物种共生和物质循环再生的原理,结合系统工程的最优化方法,设计的分层多级利用物质和能量的生产工艺系统(马世骏,1987),是实现把科学技术转化为现实生产力的一种手段和方法。生态工程的目标就是在维护和促进自然界良性循环的前提下,充分发挥物质的生产潜力,防止环境污染,达到经济效益与生态效益同步发展、资源利用和环境保护协调一致。它既可以是纵向的层次结构,也可以发展为由几个纵向工艺链横连而成的网状工程系统。

农业生态工程是将生态工程原理应用于农业生产和建设,是有效运用农业生态系统各生物物种,充分利用空间和资源的生物群落共生原理、多种成分(产业)相互协调和促进的功能原理,以及物质和能量多层次多途径利用和转化原理,运用最优化方法设计和建立,能够合理利用自然资源、保持生态稳定和持续高效功能的一种农业生产工艺体系和技术。

生态工程原理还可以应用于国民经济建设和生产建设的许多领域和部门,进而形成各种特定领域或部门的生态工程。因此,与生态学和工程学一样,生态工程也是一门综合性较强的多分支的综合性学科。

生态工程作为应用生态学的分支学科之一，是最近才发展起来的，其历史不过 40 多年，是一个正在形成中的学科。

首先使用生态工程 (ecological engineering) 一词的是美国的 H. T. Odum。他在 1962 年把生态工程定义为：“人类运用少量辅助能而对那种以自然能为主的系统进行的环境控制。”1971 年他又指出：“人对自然的管理即生态工程。”显然这个定义是很不确切的概念。1983 年他对此定义进行了进一步修正后提出，设计和实施经济与自然的工艺技术称之为生态工程。

1988、1989 年美国 Mitsch, W. J. 提出的生态工程概念是：“为了人类社会和自然环境两方面利益而对人类社会和自然环境的设计。”此外，Uhlmann, D. (1983), Straskraba, M. (1984, 1985)、Straskraba 和 Cnanck, A. H. (1985) 又提出了生态工艺一词，并定义为：“在深入了解生态学基础上，在措施上花最小代价，对环境以最少的损伤，……是对生态系统管理技术的运用。”从这些描述可见，尽管早在 60 年代初就有人提出了生态工程这个名词，但始终没有确切的概念，直至 1984 年我国著名动物学家和生态学家马世骏教授才提出了完整的令人信服的如前所述的生态工程定义。

早在 1954 年，马世骏在研究防治蝗虫灾害时，即从生态学理论出发，提出调整生态系统结构、控制水位及苇子面积等措施，以改变蝗虫的滋生地，改善生态系统结构和功能的生态工程设想、规划与措施。实践结果表明生态效益和经济效益十分显著。1979 年，马世骏在中国环境科学学会上作了《环境理论的发展和意义》的学术报告，在总结了自己几十年生态学研究的基础上，进一步形成了生态工程思想。他说：由于工业发展过程中出现环境受到干扰而迫切需要采取保护政策，促使人们不得不在社会-经济-生态-资源物质系统之间，考虑多方面依赖的特点，从而近来在社会科学和自然科学之间产生了新的杂交科学前沿，即社会-经济-自然生态系统的结合，它是处理当前国际上五大社会问题的重要理论依据。又说：工业城市生态学是近年开展研究的典型的社会-经济-自然生态系统，在此复合系统中，包括复杂的物质能量代谢系统及地球化学循环系统。此研究密切联系废物管理、营养物质循环和区域性食物供应系统这三个系统的循环关系，可以及时而有效地把人类和动物的废物还回土壤，把工业废物分别加以分解或再生，这对持续地维护现代化都市的优良环境和支持郊区现代化农业是至关重要的。它依据的机理就是模拟自然生态系统长期持续链环结构的功能过程，可称为生态系统工程。继而又提出生态工程的原理是生态系统的“整体、协调、再生、循环”。他强调生态工程是生态学的原理在资源管理、环境保护和工农业生产中的应用。

马世骏关于生态工程的研究和理论为引导国内外生态工程研究打开了思路、奠定了坚实的理论和实践基础。1987 他主编的《中国的农业生态工程》一书在我

国出版。1989年,马世骏等和国外学者合作编著出版了世界上第一本生态工程专著《Ecological Engineering》,标志着生态工程在国内外成为一门新兴的学科而正式问世。

二、生态工程产生的时代背景

生态工程是在20世纪60年代以来全球生态危机的爆发和人们寻求解决对策以及资源环境保护的宏观形势条件下应运而生的,是科学发展和社会需求的必然结果,有着丰富的历史背景和坚实的理论和方法基础。

60年代以来,由于人口剧增、资源破坏、能源短缺、污染和食物供应不足等因素造成了全球性的生态危机,是人类所面临的共同问题。但在不同的国家和地区表现不尽相同,在发达国家中主要面临的是由于高度的工业化和强烈集约型的农业经营带来的环境污染问题。为解决这一问题,60年代末、70年代初人们认真讨论过:“无废物”(zerodischarge)目标,并对其完全消除污染,防止进入环境,当时人们对改善环境的技术充满信心。后来的实践使人们逐渐认识到,由于种种原因,运用常规方法不可能实现所谓的“无污染”目标。主要是因为治污需要大量的人力、物力和财力,发达国家难以满足,发展中国家更是如此。同时,当采用某种净化技术时,有可能将污染物由一种介质转移到另一种介质中去,导致再度污染。为了降低污染、保护资源,人们试图运用生态系统的某些自净功能如生物净化功能来实现其目标,于是在发达国家便产生了生态工程研究。

在发展中国家,所面临的不是单纯的污染问题,而是人口增长、资源破坏、生产不足和环境污染等共同组成的“综合症”。这些国家不但要保护资源和环境,更迫切地要以有限的资源生产出足够的产品,达到高产、优质、低耗、高效以供日益增长的人口。它们不应当再走发达国家所走的“先污染、后治理”的发展模式,必须立足于本地资源和条件去寻求适合自己的发展途径和技术。生态工程恰恰提供了这样一种发展战略和实现低耗、高效、无(或少)废物生产的适用技术。因此,受到了广泛的重视。

作为一个新的学科研究领域,生态工程的产生除社会需求外,还必然要有其科学理论基础和方法论基础。

首先,上世纪三四十年代以来,生态学研究各个领域都取得了重大进展,生态学的多数重要理论在这一时期中得以形成。特别是生态系统概念的提出、生态系统生态学和全球生态系统观的建立,使生态学的研究提高到了一个崭新的水平。而且这一时期整个科学技术与生产力进入了一个突飞猛进的新时代,它不仅直接来源于自然科学及技术手段的纵深突破,更主要的是各分支学科的横向渗透与突破。即由单一学科的微观研究,逐步向多学科综合的宏观研究方向发展。生态工程学导源于生态学,虽然是应用生态学的一个分支学科,但其重要概念、理

论、方法已经并正在为系统论、控制论、信息论、协同论、耗散结构理论、突变论及混沌现象、自组织理论等所渗透,正从过去传统的以自然科学分析为主,对自然界分门别类的研究,且越分越细的倾向,转变为以系统论的整体观、综合观为指导,在分析的基础上加以综合,将物理学、化学、生理学、毒理学、数学等自然科学的不同分支学科的基础理论、方法、成就以及在农学、土壤学、水产学、畜牧学、林学、环保工程学、运筹学、计算科学等多种技术科学,还有社会学、经济学等人文科学成就吸收渗透进来,形成应用生态学中一门多学科交叉渗透的新兴分支边缘学科。与此同时,应用生态学的其它分支学科,如农田生态学、农业生态学、城市生态学、区域生态学等也得到了迅速发展,为生态工程概念的完善和生态工程学的建立奠定了科学基础。

其次,系统科学的发展特别是系统工程学在各领域中的广泛应用为生态工程的研究也提供了理论方法论基础,发挥了重要作用。正如马世骏先生 1979 年所预料的那样:我们现在的生活状态已在相当长的时间内逾越了某种确定的概念水平,现代生态学阐明,在网状连接的结构内,一个新水平的复杂系统正从以前的非系统概念中上升出来,许多科学家预料此种相互作用的新结构及其理论,即将在今后数年中有所创造和突破。

第三,近年来迅速发展起来的系统分析方法和计算机技术,以及生态学、生物学、农学、土壤学等学科领域新技术、新方法的发展,为生态工程学的研究和实践提供了方法论和技术基础。

综上所述,生态工程的产生有着历史的背景与实际的需要,在理论上、方法上和技术上都已有了一定的基础。

三、生态工程的意义

当前,影响工农业发展的因素是自然资源和环境问题,这是国际上公认的。但是自 20 世纪 50 年代后期以来,大量可再生资源遭到破坏,工业“三废”以及农药、化肥等人工合成的化学物质侵入了自然环境和人类社会,加速了自然生态平衡的破坏和人类生存环境的恶化。自然环境是由多种因素共同构成的空间,其中包括生物因素和光、热、水、气等人类赖以生存的基本成分。生物资源的大量破坏和毁灭不仅必然要影响工业原料来源,也直接损伤环境对有害物质的自净能力。所以从大环境概念出发,合理利用自然资源和保护环境就成为一个问题的两个侧面。因而,一些国际组织认为当前世界上影响经济发展的核心问题是工业与环境的关系。如何处理好二者的关系,使工业生产与环境保护同步发展,已成为各国科学家和政府共同关心的重要课题。

工业原料,包括能源,主要来自生物与矿物。过去,由于科学技术不发达,只考虑原料的单项功能,忽视了副产物,这样不仅浪费了资源,而且“废物”还

会成为环境污染源。所谓废物不外乎三个方面：未全部转化为产品的少量原料，未能回收的微量产品和加工过程中产生的其它代谢产物。在这些废物中，可能包含着许多可利用的东西，在科学技术发达的今天，我们有能力把某些“废物”变为有用材料，也就是“变废为宝”。根据生态系统的原理而设计的无污染工艺和无废物工艺，将成为我们实现经济建设与环境保护同步发展的有力武器。

我国是一个发展中国家，我国的工农业生产正经历着巨大的变革。尤其是农业生产，正在由自给半自给经济向商品经济转化，由传统农业向现代农业转变，资源合理利用和环境保护的矛盾更加突出，因而生态工程的研究和应用意义就更大，而且越来越明显地表现出来，主要表现在以下几个方面。

（一）生态工程与我国的农业持续发展

我国是一个农业大国，农业是整个国民经济的重要组成部分，是基础，农业能否持续发展直接关系到整个国民经济的发展。长期以来，农业发展的道路和模式选择是科研人员与政府部门最关注的问题。我国人口众多、资源相对短缺，中低产田面积较大，经济基础薄弱，全民文化水平不高，农民科技素质较差，这些基本因素在一定程度上制约着我国农业发展道路和现代技术体系的选择。实践证明，通过资源合理开发及物质循环利用，发展资源节约型农业是适合我国国情而且行之有效的，通过提高资源的利用率和转化效率，是能够在有限的资源上生产出尽可能多的产品来。例如黄土高原的混农林业、黄淮海平原的节水农业是对水土资源的高效利用，水的利用率可上升至 90%。又如各地以绿肥和有机肥培肥土壤，土壤肥力呈上升趋势。实践又证明，我国的农业现代化不可能也不一定走西方的依靠高投入的农业发展道路。充分利用我国传统农业之精华和我国劳动力充分之优势，遵循生态学原理与生态工程技术，发展劳动密集型与技术密集型相结合的农业是可以实现农业生产合理、低投入而高效地持续发展的。所有这些战略、技术和生态工程的思想与技术正相吻合，因此，可以认为农业生态工程建设是适于我国农业持续发展的战略方向与技术路线的。

（二）生态工程与我国生态环境的保护与治理

1979 年马世骏提出了关于环境的确切概念。他说：“环境”是在一定空间与时间内，多种成分相互作用的多维结构，虽然通常只有一两个成分在当时起着显著作用，但成分之间的相互作用关系则依然存在。因此，任何一个成分所产生的作用，都不同程度地带有其它成分的影响，有些成分的作用，可能是两种成分的合力或相互激发与加强的结果，从而有可能导致事物发生质的突破。又说：只有依靠多方面的有效的环境管理，方能营造比较健康的环境和科学地利用自然资源。

环境保护是我国国策的重要内容之一，也是国土整治的一项根本性战略。对历史上人类有意识或无意识地不适当经营所造成的生态环境恶化和现状，生态工程原理和技术为缓解与恢复恶化的生态环境提供了有效的途径。例如我国“三

北”防护林生态工程建设所取得的成就已为这些提供了有力的证明。而“运用生态系统的再生原理,以闭路循环的形式,在生产过程中实现资源的合理和充分的利用,使整个生产过程保持高的生态效率并使环境高度洁净”更是目前及今后要普遍推行的环境自净工程。

(三) 生态工程与我国工业与城市发展

目前我国正处在一个城市化迅速发展的阶段,不但原有大城市人口和空间规模的膨胀,而且中小城市规模也在不断扩大,尤其是蜂拥而起的小城镇建设使我国的城市化增添了新的特点。城市的发展带来了许多矛盾,城市人口与商品需求的矛盾、人口与环境的矛盾、人口与能源的矛盾等等。因此根据社会-经济-自然三系统的循环关系,“模拟自然生态系统长期维持链环结构的功能过程”的生态工程机理研究可望在缓解这些矛盾中积极发挥“有效管理”及“化害为利,化废为宝”的重要作用。例如城市污水处理生态工程,工业废水余热利用的温室农业生态工程,农牧产品加工业的副产品及废弃物的利用等等。此外生态工程技术可用于城市的总体规划和生态经济小区规划中,如城市绿地、公园、林木的规划等。

此外,生态工程对基础科学研究也有着重要意义。从复杂系统的观点来看,世界上最复杂的系统有三种:生物体、人脑和自然生态系统,围绕对这三类系统的研究形成了当代科学的几个重要的前沿学科和领域。生命科学同时涉及了对生物体和人脑的研究,人工智能研究试图在揭示人脑奥秘的基础上进行大脑结构功能模拟设计。生态系统研究虽远不像前两学科那样在基础研究中占有重要地位,但它的确已引起越来越多的基础科学研究者的重视。例如,风靡世界的“混沌现象”与“非平衡态”研究,许多问题就是基于对生态系统的研究而提出的。如果说仿生学是对生命体的模拟研究,人工智能是对人脑的模拟研究,那么,生态工程发展正如 H. T. Odum 所说是使人类生存与竞争中与其环境变为伙伴的设计,亦即对精巧微妙的、人类赖以生存的生态环境及生态系统的模拟和创造。从这个意义上说,生态工程学就像仿生学、人工智能那样应被看作重要基础学科之一,而对它的研究可视为提供人类生存条件及提高生存质量做出重要贡献的战略思想。历史将证明,加强生态工程研究将使未来整个生物学科与农业产生重大突破。

第二节 生态工程的主要类型和特征

一、生态工程的主要类型

运用生态系统的基本原理(主要是生物共生、物质循环再生、食物链、生物与环境相互适应等原理),根据当地的自然条件、生产技术和需要,可以设

计出多种多样相互结合的工艺体系。马世骏等提出了下面具有一定代表性的五个类型。

(一) 物质能量的多层分级利用系统

根据森林生态系统多层分级利用光能的结构特点，可以模拟不同种类生物群落的共生功能，包含分级利用和各取所需的生物结构系统。这类系统可以进行多类型、多途径模拟，并可在短期内获得显著的经济效益。图 1-1 是利用秸秆生产食用菌和蚯蚓等的生产设计。秸秆还田是保持土壤有机质的有效措施。但是，秸秆直接返回土壤，不仅需经过长时间的发酵分解，才能发挥肥效，而且有时还容易造成 C/N 比失调影响土壤有效养分的提高。但在一定条件下，如果利用氨化、糖化和微生物发酵等过程先把秸秆变成家畜喜食的饲料，而后用家畜的排泄物及秸秆残渣来培养食用菌，生产食用菌的残余料又用于繁殖

The diagram illustrates the multi-level utilization of crop straw. It starts with '作物' (Crop) at the top left, which receives '太阳辐射' (Solar radiation). From the crop, '籽实' (Grain) is harvested, and '秸秆' (Straw) is processed through three main pathways:

- Pathway 1:** Straw is directly converted into '食用菌' (Edible mushrooms) via '接种' (Inoculation).
- Pathway 2:** Straw undergoes '糖化' (Saccharification) to become '饲料' (Feed), which is then consumed by '家畜' (Livestock). The livestock produces '粪屑' (Manure), which is used as '二级利用' (Secondary utilization) for growing '食用菌'.
- Pathway 3:** Straw is used for '菌床杂屑' (Mushroom bed waste), which is then used as '三级利用' (Tertiary utilization) for raising '蚯蚓' (Earthworms).

All three pathways result in '产品输出' (Product output). Additionally, there are arrows indicating the return of '排泄物' (Excrement) and '杂屑' (Waste) from the livestock and earthworm stages back to the initial processing stage.

图 1-1 生态工程原理应用之一：作物秸秆的多级利用（引自马世骏，1987）

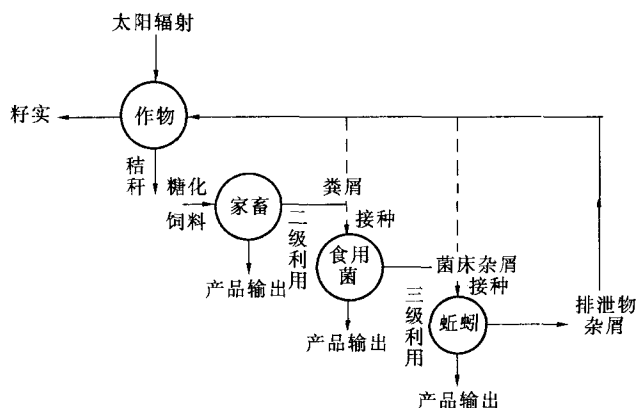


图 1-1 生态工程原理应用之一：作物秸秆的多级利用（引自马世骏，1987）

蚯蚓，最后才把利用后剩下的残物返回农田，收效就会较好。虽然最终还田的秸秆有机质的肥效有所降低，但增加了生产沼气、食用菌和蚯蚓等的直接经济效益。

（二）水陆交换的物质循环系统

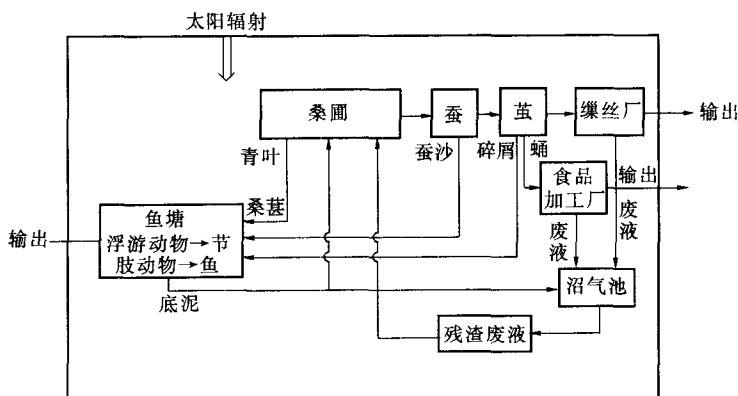


图 1-2 生态工程原理应用之二：
水陆交换生产系统（引自马世骏，1987）

食物链是生态系统的基本结构，通过初级生产、次级生产、加工、分解等完全代谢过程，完成物质在生态系统中的循环。水陆交换系统就是通过食物链关系把陆生生态系统和水生生态系统有机结合起来，组成水陆复合生态系统。桑基鱼塘是比较典型的水陆交换生产系统（图 1-2）。在这个体系里，桑树通过光合作用生成有机物质（桑叶）；桑叶喂蚕生产蚕丝及蚕茧（生物工艺的物质转化）；桑树的凋落物、桑基和蚕沙施撒到鱼塘中，经过鱼塘内另一食物链过程，转化为鱼；鱼的排泄物及其它未被利用的有机物和底泥，经过底栖生物的消化、分解，取出后可作为混合肥料，返回桑基，培养桑树。这样的生产体系无论从经济上或农业环境上都能收到很好的效益。

（三）“废物”再生利用和环境调节工程系统

工农业生产和农副产品加工过程中，会产生大量的“废物”，这些“废物”长期以来未能得到很好地利用，不但浪费了大量的可利用资源，而且成为污染城乡环境的污染源。因此，回收和消除此类污染物质是城乡建设和工矿区环境保护工作中必须考虑的重要问题。例如利用工厂余热（包括汽热和水热）作为邻近住房冬季取暖热源的方法在许多城市采用。如能根据散热及导热原理，在工厂附近建造不同温度梯度温室和利用余热养殖水生植物，收效就会更好。所收获的植物的一部分可制成饲料，喂养畜禽；畜禽的排泄物用于肥田和培育防护林；农田和防护林又可调节工厂燃料所产生的二氧化碳。这种兼顾生产和环境保护的工艺可称为利用废物再生功能的环境调节工程，若干工艺流程所构成的工程体系即废物再生的调节工程系统，图 1-3 就是此类工程的模式之一。工厂余热也可以用来加热温室或棚窖，生产蔬菜、花卉、畜禽渔产品等。

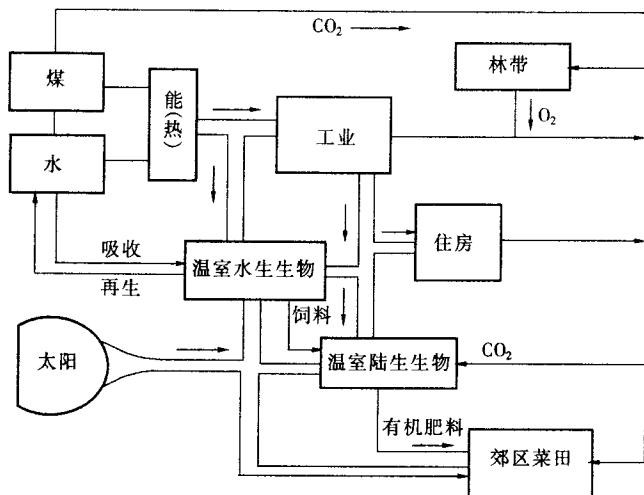


图 1-3 生态工程原理应用之三：工业城市水热再利用系统模式（引自马世骏，1987）