能源与环境出版工程
（第二期）

总主编　翁史烈

“十三五”国家重点图书出版规划项目
上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

资源化视角的污染控制理论与实践

Theory and Practice of Pollution Control from the Perspective of Resource Utilization

李光明　朱昊辰　编著



上海交通大學出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



“十三五”国家重点图书出版规划项目

能源与环境出版工程（第二期）

总主编　翁史烈

上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

资源化视角的污染控制理论与实践

Theory and Practice of Pollution Control from the Perspective of Resource Utilization

李光明　朱昊辰　编著

上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为“十三五”国家重点图书出版规划项目“能源与环境出版工程”之一。主要内容包括物质代谢视角下的废物资源化、城市生活垃圾收集管理系统与技术、雨水和工业废水的回收利用、城市有机垃圾管理与资源化、电子废物管理与资源化利用和废旧轮胎管理与资源化利用等典型废物资源利用的理论与技术发展以及相应的污染控制问题，并简要归纳了废物管理与循环利用的未来发展趋势。

本书可供从事环境治理、废物管理与资源化的工程技术人员及高校环境科学与工程专业本科和研究生学习，也可供政府机关和社区从事废物管理的工作人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

资源化视角的污染控制理论与实践／ 李光明，朱昊辰编著. —上海：上海交通大学出版社，2019
能源与环境出版工程
ISBN 978-7-313-21963-3

Ⅰ. ①资… Ⅱ. ①李… ②朱… Ⅲ. ①污染控制—资源化—研究 Ⅳ. ①X32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 200790 号

资源化视角的污染控制理论与实践
ZIYUAN HUA SHIJIAO DE WURAN KONGZHI LILUN YU SHIJIAN

编　　著：李光明　朱昊辰
出版发行：上海交通大学出版社
邮政编码：200030
印　　制：上海万卷印刷股份有限公司
开　　本：710 mm×1000 mm　1/16
字　　数：444 千字
版　　次：2019 年 12 月第 1 版
书　　号：ISBN 978-7-313-21963-3
定　　价：188.00 元

地　　址：上海市番禺路 951 号
电　　话：021-64071208
经　　销：全国新华书店
印　　张：23.75
印　　次：2019 年 12 月第 1 次印刷

版权所有　侵权必究
告读者：如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话：021-56928178

能源与环境出版工程
丛书学术指导委员会

主　任

杜祥琬（中国工程院原副院长、中国工程院院士）

委　员（以姓氏笔画为序）

苏万华（天津大学教授、中国工程院院士）

岑可法（浙江大学教授、中国工程院院士）

郑　平（上海交通大学教授、中国科学院院士）

饶芳权（上海交通大学教授、中国工程院院士）

闻雪友（中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士）

秦裕琨（哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士）

倪维斗（清华大学原副校长、教授、中国工程院院士）

徐建中（中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士）

陶文铨（西安交通大学教授、中国科学院院士）

蔡睿贤（中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士）

能源与环境出版工程
丛书编委会

总主编

翁史烈（上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士）

执行总主编

黄　震（上海交通大学副校长、教授、中国工程院院士）

编　委（以姓氏笔画为序）

马重芳（北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授）

马紫峰（上海交通大学电化学与能源技术研究所教授）

王如竹（上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授）

王辅臣（华东理工大学资源与环境工程学院教授）

何雅玲（西安交通大学教授、中国科学院院士）

沈文忠（上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授）

张希良（清华大学能源环境经济研究所所长、教授）

骆仲泱（浙江大学能源工程学系系主任、教授）

顾　璠（东南大学能源与环境学院教授）

贾金平（上海交通大学环境科学与工程学院教授）

徐明厚（华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授）

盛宏至（中国科学院力学研究所研究员）

章俊良（上海交通大学燃料电池研究所所长、教授）

程　旭（上海交通大学核科学与工程学院院长、教授）

本书编委会

主编

李光明　朱昊辰

编委（以姓氏笔画为序）

于佳雪　王天雅　王璐琰　孔令照　权家薇　朱云杰
朱昊辰　许江林　许君清　孙承亮　李艾铧　李光明
李雯靖　杨冯睿　肖培源　宋端梅　汪源源　张珺婷
范建伟　罗　兰　赵思琪　贺文智　黄菊文　曹　悦

总　　序

能源是经济社会发展的基础，同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要，进入21世纪以来，短短10余年间(2002—2017年)，全世界一次能源总消费从96亿吨油当量增加到135亿吨油当量，能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显，世界能源版图也发生了重大变化。

在此期间，改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力，我国国内生产总值从10万亿元人民币猛增到82万亿元人民币，一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体，经济社会发展取得了举世瞩目的成绩！

为了支持经济社会的高速发展，我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化，此期间全世界一次能源的消费增量38.3亿吨油当量中竟有51.3%发生在中国！经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前，为了人类社会的可持续发展，世界能源发展已进入新一轮战略调整期，发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于：提高化石能源开采和利用率；大力开发可再生能源；最大限度地减少有害物质和温室气体排放，从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言，能源问题的求解直接关系到现代化建设进程，能源已成为中国可持续发展的关键！因此，我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线，以增强自主创新能力为着力点，深化能源体制改革、完善能源市场、加强能源科技的研发，努力建设绿色、低碳、高效、安全的能源大系统。

在国家重视和政策激励之下，我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现；上海交通大学出版社出版的江泽民学长著作《中国能源问题研究》(2008年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续的健康发展之

路。为了“对接国家能源可持续发展战略，构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”，我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书，其目的在于：

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术和新成果；

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍，为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考；

三是优化能源与环境专业教材，为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书，满足人才培养对教材的迫切需求；

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线，重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题，主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、能源经济、大气污染与气候变化等专业方向，汇集能源与环境领域的关键性技术和成果，注重理论与实践的结合，注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块，其内容包括能源与环境领域的专家最先进的理论方法和技术成果，也包括能源与环境工程一线的理论和实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作；黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果和新技术。

为确保这套“能源与环境出版工程”丛书具有高品质和重大的社会价值，出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家，组建了学术指导委员会和编委会，并召开了多次编撰研讨会，商谈丛书框架，精选书目，落实作者。

该学术丛书在策划之初，就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注，与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审，截至 2018 年初，丛书中已有 9 本输出至 Springer，1 本输出至 John Wiley & Sons。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

“能源与环境出版工程”从 2013 年底开始陆续出版，并受到业界广泛关

注，取得了良好的社会效益。从2014年起，丛书已连续5年入选了上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”项目。还有些图书获得国家级项目支持，如《现代燃气轮机装置》《除湿剂超声波再生技术》(英文版)、《痕量金属的环境行为》(英文版)等。另外，在图书获奖方面，也取得了一定成绩，如《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》获“第四届中国大学出版社优秀学术专著二等奖”；《除湿剂超声波再生技术》(英文版)获中国出版协会颁发的“2014年度输出版优秀图书奖”。2016年初，“能源与环境出版工程”(第二期)入选了“十三五”国家重点图书出版规划项目。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域人才的培养，有益于能源与环境领域的技术创新，为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台，引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展！

2018年9月

序

我国正处于工业化中期阶段，传统工业文明的弊端日益显现。发达国家一二百年间逐步出现的环境问题在我国快速发展的过程中集中显现，呈现出明显的结构型、压缩型、复合型特点。产品废物、生活废物、产业废物和农业有机废物等人类生产和消费产生的各类废物成了影响环境和健康的污染物，带来典型、突出的环境问题。这些污染物往往又具有资源利用价值，由此催生了再生资源产业。

从产业活动的目的来看，与传统产业的单向发展不同，再生资源产业可以有效推动经济系统的循环发展。传统产业从自然界获得原料，通过加工、制造，生产满足人类需求的产品，完成线性、单向的生产过程。而再生资源产业更加注重顺应自然，将人类社会经济活动所产生的废物转变为再生资源，并对无法再生的废物进行安全处置，构建新的物质循环流程，从而满足人类对资源和环境的需求。

从加工对象来看，与传统产业主要以原生矿产或半成品为原料不同，再生资源产业原料是人类生产生活产生的各类废物。原料的显著差异给再生资源产业带来了较大的复杂性和特殊性：一方面是原料的分散性和多样性导致原料的回收难度较大，回收流通成本较高，同时受人口流动、产业调整和科技水平等影响，再生资源产业原料的种类、数量、分布始终处于动态变化之中；另一方面是原料的累积属性，随着废物的不断产生，其累积量必然不断增加，且原料为废物，若得不到合理处置，将对环境造成潜在威胁。

从环境影响来看，与传统产业仅考虑企业所造成环境污染的影响不同，再生资源产业环境影响具有“两面性”。一方面，通过对废物的收集、资源化利用和无害化处置，在空间尺度上、时间尺度上均降低了废物污染环境的程度和可能性；另一方面，受生产工艺、技术及管理水平等因素制约，废物再生

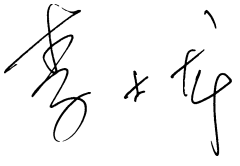
利用可能在一定区域内造成新的环境污染，因此也必须在废物资源化的过程中控制二次污染。

从产业生产过程来看，与传统产业相对单一的生产行为不同，再生资源产业涵盖范围较广，与多个传统产业相互交叉融合，同时综合了多种生产行为。再生资源产业加工对象包括废金属、废家电、废汽车、废塑料、废轮胎、一般工业固体废物等人类生产生活所产生的各类废物，并涉及废物的回收、运输、利用、深加工及安全处置等全过程，此外还包括了对传统产业副产品进行共生利用的生产行为。

从对科技的依赖程度来看，国家将再生资源产业列入战略性新兴产业，科技进步将使废物转化呈现出多途径、高附加值等特点。当前再生资源产业废物回收、分类及拆解工作仍然以重复性较高和社会性较强的劳动为主，从提高劳动生产率的角度来看，对科技创新和技术进步的要求更加迫切。

从管理角度来看，再生资源产业以循环经济理论为指导，产业管理涉及企业、园区和社会三个层面，呈现出多维度、复杂性强等特点。针对企业和园区的管理，再生资源产业侧重促进传统产业间的共生以及生产废物的资源化利用、无害化处理；针对社会层面的管理，主要通过对报废产品、生活垃圾和污水处理厂污泥等废物的再生利用，促进循环型社会的建立。

本书从资源化的角度阐述污染控制，抓住了再生资源产业发展的核心问题，具有一定的新意。比较难能可贵的是作者结合十多年从事环境科学与工程研究和教学工作的经验与心得，结合理论分析、系统视角和研发工作案例，从资源化的角度探索控制环境污染的本质问题和价值。本人认为本书对再生资源的理论发展、科技研发和产业进步具有重要的参考价值。



中国再生资源产业技术创新战略联盟　理事长

2019 年 5 月 27 日

前　言

18世纪60年代英国发起的第一次工业革命开创了以机器代替手工劳动的时代。19世纪中期，在欧洲国家和美国、日本等国家开始的第二次工业革命使人类进入了“电气时代”。第三次科技革命以原子能、电子计算机、空间技术和生物工程的发明及应用为主要标志，是涉及信息技术、新能源技术、新材料技术、生物技术、空间技术和海洋技术等诸多领域的一场信息控制技术革命。工业化发展推动了社会和人类文明进步，引起了人类生活方式和思维方式的变革。

工业化生产和现代生活的消费方式是从地球获取各种资源，生产、加工成各种产品后供人们消费使用。生产和消费过程会不断产生各种废弃物，这些废弃物往往会成为影响环境和健康的污染物。但这些产品废物、生活废物、产业废物和农业有机废物又有可能作为资源重新获得利用，地球上资源有限或短缺又促进了废物资源再利用产业的诞生和发展。因此从资源化的角度来控制污染，实现资源再利用成为可持续发展和解决环境污染问题的必由之路。

本书作者结合十多年从事环境科学与工程研究和教学工作的经验与心得，结合理论分析、系统视角和研发工作案例，从资源化的角度探讨控制环境污染的本质问题和价值。本书共分8章，第1章概述了污染控制与资源化的一般问题，第2章讨论物质代谢视角下的废物资源化，第3至第7章结合案例介绍了城市生活垃圾收集管理系统与技术、雨水和工业废水的回收利用、城市有机垃圾管理与资源化、电子废物管理与资源化利用和废旧轮胎管理与资源化利用等典型废物资源利用的理论与技术发展，以及相应的污染控制问题，第8章简要归纳了废物管理与循环利用的未来发展趋势。

书稿由编委会成员共同完成，编写过程中参照引用了同行专业技术人

员的相关文献和资料，以及所培养的毕业研究生的论文，在此一并向这些作者表示衷心的感谢。

由于本书涉及内容广泛、技术发展迅速，作者水平有限，书中存在的不妥和错误之处，恳请专家、学者和广大读者不吝指教。

目　　录

第 1 章　污染控制与资源化 …… 001

1.1　生产和消费的资源环境问题 …… 001

1.1.1　人类的文明进步与社会发展 …… 001

1.1.2　生产和消费的可持续发展问题 …… 005

1.2　环境污染控制中的资源化 …… 009

1.2.1　污染控制的理念与技术 …… 009

1.2.2　废物资源化利用的策略 …… 013

1.3　废物资源化的污染控制 …… 015

1.3.1　废物资源化的二次污染问题 …… 015

1.3.2　废物资源化的二次污染控制 …… 018

参考文献 …… 021

第 2 章　物质代谢视角下的废物资源化 …… 024

2.1　废物资源化途径与环境风险 …… 024

2.1.1　废物资源化途径 …… 025

2.1.2　废物资源化过程的污染排放特征 …… 027

2.1.3　废物资源化过程的物质代谢分析方法 …… 028

2.2　多尺度的废物资源化物质流分析 …… 030

2.2.1　全球系统中废物资源化的可持续性研究 …… 030

2.2.2　宏观系统中废物资源化物质流分析 …… 032

2.2.3　分子尺度的废物资源化物质流分析 …… 035

2.3　废物资源化的全生命周期分析 …… 038

2.3.1　生命周期评价的基本原则和总体框架 …… 038

2.3.2 废物资源化的生命周期清单分析 …… 040
2.3.3 废物资源化的生命周期影响评价 …… 044
2.3.4 生命周期评价在废物资源化中的应用 …… 045
2.4 废物资源化过程的能量效率分析 …… 046
2.4.1 资源化过程的能量消耗及转化 …… 046
2.4.2 资源化过程的能量流模型 …… 049
2.4.3 资源化过程的节能途径 …… 051
参考文献 …… 052

第 3 章 城市生活垃圾收集管理系统与技术 …… 056
3.1 城市生活垃圾管理的理念与实践 …… 056
3.1.1 城市生活垃圾的产生与危害 …… 057
3.1.2 国内外城市生活垃圾管理的实践 …… 058
3.1.3 城市生活垃圾管理原则和相关法规 …… 064
3.2 城市生活垃圾分类回收系统的构建 …… 072
3.2.1 城市生活垃圾源头分类需求与模式 …… 073
3.2.2 城市生活垃圾分类收运管理系统 …… 080
3.2.3 “两网协同”生活垃圾收运模式 …… 085
3.2.4 利用生命周期评价方法优化生活垃圾收运过程 …… 087
3.3 信息化技术在生活垃圾收集管理中的应用 …… 090
3.3.1 生活垃圾收运管理中的信息化技术 …… 090
3.3.2 生活垃圾信息化识别和计量 …… 093
3.3.3 生活垃圾信息化物流监管 …… 099
3.3.4 生活垃圾信息化收运管理系统 …… 105
参考文献 …… 111

第 4 章 雨水和工业废水的回收利用 …… 115
4.1 城市雨水的收集与利用 …… 115
4.1.1 城市雨水管理的技术措施 …… 115
4.1.2 基于城市雨水资源综合利用的海绵城市建设 …… 123

4.1.3　城市雨水系统数学模拟及案例分析 …… 128
4.2　分散式工业污水管理 …… 132
4.2.1　分散式工业用水的概述 …… 132
4.2.2　分散式工业用水的技术及设备 …… 133
4.2.3　分散式工业用水的处理工艺和案例分析 …… 139
4.3　工业园区的供排水网络 …… 142
4.3.1　园区尺度下的工业水系统 …… 142
4.3.2　工业园区水系统集成优化 …… 146
参考文献 …… 152

第 5 章　城市有机垃圾管理与资源化 …… 155
5.1　城市有机垃圾资源环境问题 …… 155
5.1.1　城市有机垃圾定义及其来源 …… 155
5.1.2　城市有机垃圾构成与组分 …… 157
5.1.3　城市有机垃圾的危害及处理处置方法 …… 162
5.2　城市有机垃圾收集管理系统 …… 165
5.2.1　城市有机垃圾源头的分类需求与模式 …… 165
5.2.2　城市有机垃圾的收运管理 …… 171
5.3　城市有机垃圾的资源化技术 …… 179
5.3.1　资源化技术发展现状 …… 179
5.3.2　热解技术 …… 185
5.3.3　水热资源化技术 …… 188
5.3.4　其他生物处理技术 …… 207
5.3.5　资源化技术实施案例 …… 210
参考文献 …… 227

第 6 章　电子废物管理与资源化利用 …… 230
6.1　全球的电子废物转移与收集管理 …… 230
6.1.1　电子废物的产生与跨境转移 …… 231
6.1.2　国外电子废物的管理现状 …… 235

6.1.3 中国电子废物的管理现状 …… 238
6.2 电子废物的环境风险与资源价值 …… 245
6.2.1 电子废物组成 …… 245
6.2.2 电子废物的环境健康风险 …… 246
6.2.3 电子废物的资源价值 …… 251
6.3 电子废物资源化技术过程与发展 …… 252
6.3.1 分离富集技术 …… 252
6.3.2 精细化处理技术 …… 257
6.3.3 新技术展望 …… 264
参考文献 …… 275

第 7 章 废旧轮胎管理与资源化利用 …… 279
7.1 废旧轮胎的资源环境问题 …… 279
7.1.1 轮胎的生产及利用 …… 279
7.1.2 轮胎生产的资源需求及废旧轮胎的利用价值 …… 283
7.1.3 废旧轮胎的产生及环境风险 …… 285
7.2 废旧轮胎管理及资源化技术 …… 287
7.2.1 国内外废旧轮胎的管理 …… 288
7.2.2 废旧轮胎的常规资源化利用技术 …… 295
7.3 废旧轮胎热解与高值化利用 …… 309
7.3.1 废旧轮胎热解 …… 310
7.3.2 热解产物及其特性 …… 315
7.3.3 热解炭黑的高值化利用 …… 319
参考文献 …… 327

第 8 章 废物管理与循环利用的展望 …… 331
8.1 废物管理概述 …… 331
8.1.1 废物管理发展的历史 …… 331
8.1.2 我国废物管理的现状 …… 332
8.1.3 固体废物的管理方法 …… 333