



再生资源产业系统 脆性分析与调控管理

唐燕 李健/著



科学出版社

再生资源产业系统 脆性分析与调控管理

唐 燕 李 健/著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

再生资源产业是实现有限资源无限循环的新兴产业,为资源再生利用指出了产业化发展道路,对加快生态文明体制改革、建设美丽中国具有重要战略意义。本书以再生资源产业系统为对象,研究了其基本运作过程、脆性影响程度与调控策略。具体内容包括:空间维度下的系统发展模式、时间维度下的系统演变过程、系统关联结构分析、产业聚集发展趋势、关键脆性因子影响分析、脆性评价模型构建、脆性风险预警设计等。最后,以天津市为例,进行再生资源产业系统的脆性分析评价的实例研究,提出了再生资源产业可持续发展的调控措施。

本书可供管理科学、系统科学、社会科学、工商管理等专业的本科生、研究生和教师阅读,也可为各级政府部门提供决策参考。

图书在版编目(CIP)数据

再生资源产业系统脆性分析与调控管理/唐燕,李健著. —北京:科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-055717-9

I. ①再… II. ①唐… ②李… III. ①再生资源-资源产业-经济管理-研究-中国 IV. ①F124.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 294280 号

责任编辑:王丹妮/责任校对:王晓茜
责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:253 000

定价:92.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

资源与环境是人类生存发展的基础,当今时代,“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念正引领中国深刻变革与发展,人们对资源与环境的关注程度与日俱增。多年来,我国始终将转方式、调结构放在重要位置,大力推进循环经济和绿色经济发展。再生资源产业是实现有限资源无限循环的新兴产业,是可持续发展战略在我国的具体应用,为资源再生利用指出了产业化发展道路。该产业的发展虽然取得一定成就,但也存在一定的问题,主要表现为社会回收体系不健全、消费者回收意识薄弱、研究和创新能力不高、市场发展无序化、法律法规不完善等。随着再生资源产业各参与方之间传统的对抗型关系逐步向合作型关系转变,产业内部衍生出各种复杂的交互联系,各利益主体联系不紧密,产业链条结构薄弱,这意味着再生资源产业处于一定程度的脆性风险中。其根本是需要各类影响因素互相耦合,避免一个子系统崩溃而产生的连锁崩溃效应,造成不可估量的损失。如何减弱再生资源产业系统的脆性,在一定程度上来说相比单单研究其工业化发展具有更高的重要性。

本书共分7章,其中第1章和第2章为相关研究背景、国内外研究现状及理论基础支持与主要模型。以建立结构模型为目的,介绍了再生资源产业的利益回收模式、相关理论的发展历程及支持结构,以及系统动力学方法的基本建模步骤、方法。第3章至第7章为再生资源产业脆性分析及系统调控。以天津为例,更为详细地介绍了再生资源产业系统的发展演变模式、系统脆性因子辨识、系统脆性评价、多维临界调控等方法的应用过程,便于读者理解和掌握。

本书由唐燕、李健负责全书的总体设计、组织、审校和定稿工作。天津理工大学管理学院博士研究生朴胜任负责总体整理工作,研究生刘小榕、郭俊岑负责内容修订工作,本科生孟繁玥、刘紫璠、陈禹锡、齐建旭、时正彬等负责数据收集和整理工作,在此一并表示衷心的感谢!本书出版得到了国家自然科学基金青年科学基金项目“中国再生资源产业脆性生成机理、风险测度与预警策略研究”(71503179)与教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目“京津冀协同发展战略实施中若干重大问题研究”(15JZD021)的资助。

唐 燕

2018年1月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 再生资源产业系统脆性问题	1
1.2 再生资源产业与复杂系统脆性的相关述评	5
第2章 再生资源产业相关理论	16
2.1 可持续发展理论	16
2.2 复杂系统脆性理论	21
2.3 产业经济理论	27
2.4 系统动力学方法	32
第3章 再生资源产业系统分析	44
3.1 再生资源产业系统概念界定	44
3.2 空间维度下的系统发展模式分析	48
3.3 基于时间维度的系统发展演变分析	54
3.4 面向产品生命周期的系统结构分析	60
3.5 基于产业聚集度的系统发展变动趋势分析	67
3.6 本章小结	73
第4章 再生资源产业系统脆性因子辨识	75
4.1 再生资源产业系统脆性定义	75
4.2 脆性因子初步分析	76
4.3 脆性因子选择及预处理	84
4.4 计量模型构建	87
4.5 影响效果分析	93
4.6 本章小结	99
第5章 基于突变级数法的再生资源产业系统脆性评价	101
5.1 系统脆性关联结构分析	101
5.2 评价方法对比和选择	111
5.3 基于双枝模糊集的突变级数法	115
5.4 再生资源产业系统脆性评价模型	120
5.5 本章小结	123

第 6 章 再生资源产业系统脆性多维临界调控	124
6.1 多维调控目标	124
6.2 系统脆性风险预警设计	125
6.3 动态反馈视角下的多维临界调控	131
6.4 系统调控策略设计	145
6.5 本章小结	149
第 7 章 天津市再生资源产业系统脆性分析与调控	150
7.1 基金补贴政策：天津市再生资源产业回收处理实践	150
7.2 科技研发机构：天津再生资源研究所科研与合作交流	155
7.3 产业集聚化发展：天津子牙循环经济产业区	159
7.4 回收处理企业：天津同和绿天使顶峰资源再生有限公司回收利用状况	163
7.5 系统脆性研究：再生资源产业系统脆性评价	168
7.6 协调实现机制：产业可持续发展调控途径	174
7.7 本章小结	179
参考文献	180

第1章 绪 论

1.1 再生资源产业系统脆性问题

1.1.1 社会现实问题

环境是人类赖以生存的 necessary 保证，也是经济发展的物质载体。人类的文明史在某种程度上也可以被称为物质使用的演进史。在这数千年文明史中，资源的开发利用强度不断被加强，最大化利用资源成为经济社会发展的重要目标，与此同时，人类却常常忽略科学、合理地利用资源。特别自第一次工业革命以来，工业化进程加速，科技进步使得人类利用海底、地下、空中资源环境的梦想变为现实，几乎所有有限的世界资源都被加以利用，直接导致环境的污染、资源的枯竭、灾害的频发等人类所面临的生存威胁。世界自然基金会发布的《地球生命力报告 2012》中指出，如果人类按目前的速度消耗资源，到 2050 年，人类将消耗掉相当于两个地球才能提供的全部自然资源。即如果工业化国家的人均资源消耗量保持稳定，如同过去 30 年一样，而世界其他地区继续目前的追赶趋势，到 2050 年，每年的矿物、矿石、化石燃料和生物量总消耗量为 1400 亿吨，90 亿人口人均消耗 16 吨。这说明资源使用和排放在未来是不可持续的，很可能超过所有现有资源数量和消化环境影响的预计能力极限。因此，选择适当的资源利用方式、转变经济发展方式、反思自身与自然的关系，已成为人类必须面对的迫切问题。

20 世纪 60 年代，随着环境保护思潮的兴起，美国经济学家 Boulding 阐述了“地球宇宙飞船”思想，指出地球资源的有限性和环境破坏的无限性，定义了可持续发展的概念^[1]。但是，人类对于如何改变资源利用方式，仍处于末端治理的思想中。直到 20 世纪 90 年代，英国环境经济学家 Pearce 和 Turner 在《自然资源和环 境经济学》中，第一次使用了“循环经济”这一概念，由过去的线性思维走向系统思维，资源再利用方式也从末端治理转变为过程治理，开始有了真正意义上的理论化研究。特别是 1992 年联合国环境与发展大会和 2002 年可持续发展世界首脑会议提出可持续发展道路之后，德国、英国、瑞典等欧洲国家提出了循环经济发展战略，进而再生资源产业成为世界各国谋求可持续发展的战略性产业，并得到迅速发展^[2]。

再生资源产业已被普遍认为是一个朝阳产业。再生资源产业的发展,已成为 21 世纪每一个国家可持续经济发展的重要组成。我国作为世界工厂,是世界最大的制造基地,每天向全球各个国家出口数以亿计的产品,这些产品消耗着中国的各种不可再生资源,消耗水平远远高于世界平均水平,透支着环境和生态,应当及时采取更加积极而稳妥的发展战略,加大再生资源产业发展力度,提高原生资源利用效率。因此,我国从 20 世纪 50 年代初期就建立了遍及城乡的废旧物资回收系统,实行周恩来提出的“变无用为有用,变一用为多用”的产业发展方针,形成了当时世界上最完善的回收系统^[3]。随着可持续发展战略的实施和资源再生利用认识的提高,我国将再生资源产业发展政策作为落实科学发展观、缓解资源压力、实现经济可持续发展的重大国策。中共中央“十一五”规划明确指出建立环境节约型、资源友好型社会,为再生资源产业的发展提供了必要的政策支持和总体战略导向。在政策指导下,我国再生资源产业规模逐步扩大、回收体系逐渐完善、回收总量不断上升、回收总值持续增长、进口总量小幅提升、再生比例增中有降。2016 年,国内回收总量约 2.56 亿吨,与 2015 年相比,增长了 3.7%,回收总值约 5902.8 亿元,比 2015 年增长近 1 倍,各类回收企业 10 万多家,回收网点 7 万多个。但我国再生资源产业的回收市场比较混乱,各地还处于试点运行阶段,仍然存在很多现实问题。

第一,未建立完善的社会化回收体系,再生资源产业园区生产能力过剩。《中华人民共和国循环经济促进法》第十二条对各地制定循环经济规划的规定,促使再生资源产业园区数量大幅增加。但是,再生资源产业的主体属于工业产业,需要源源不断的废旧电子信息产品、报废汽车、橡塑等原料供给,以维持主体产业的生产。2016 年,我国彩色电视机产量为 1.57 亿台、空调 1.64 亿台、冰箱 0.8 亿台、计算机 3.31 亿台、手机 21 亿部、汽车 2811.9 万辆。其中电视机、冰箱、手机等电子废弃物,由于科技水平的提升,更新换代速度越来越快,报废数量剧增。但是我国再生资源回收体系组织化程度低,大部分回收企业或个人仅仅停留在单一化回收方式,以手工操作、买废卖废为主,各自为政,没有形成规模化、网络化回收体系,导致再生资源产业园区虽然扩大了再生利用企业的规模,相应的回收企业却小而分散,未形成整体产业链的对接,没有实现再生资源产业的协同发展。

第二,废弃物的资源化水平低,研究和创新能力低。美国、德国、荷兰、日本等发达国家已经建立了完整的再生资源技术研发利用体系,再生资源的综合利用率较高。例如,美国对废旧家电的回收利用率已经达到 97% 以上,仅利用废旧家电回收制造的再生钢就占到钢铁生产总量的 10%。目前,我国废钢铁利用率占钢铁产量的比例为 26%,而世界平均水平为 37%;我国再生铝产量占铝产量的

21%，而世界平均水平为 40%；我国轮胎翻新率仅占新胎产量的 4%，而发达国家一般为 10%。目前，我国废弃物的利用技术相对落后，科研经费投入不足，使得一些研究成果难以推广应用，废弃物的综合利用率不高。由于自主创新能力低，再生产品以再生金属等初级产品为主，产业化程度不高，没有建立起全面系统的研发体系，未与制造业等其他工业产业形成整体网络化发展，降低了一些价值比较高的稀贵金属的利用效率，减少了再生资源产业的再生产品附加值，不能带动其他工业的发展。

第三，再生资源产业交易市场无序发展，政策法规制度不完善。我国废弃物的回收、综合利用和无害化处理环节分属不同的企业，缺乏统一有效的管理，再生资源产业的发展呈现出自发性、无序性等特征，未能建立起区域专业化和综合性的市场体系^[4]。近年来，许多发达国家将我国作为废旧资源的出口地，将大量的电子垃圾倾倒在到我国，严重扰乱了我国的生态平衡。因此，导致许多地区严重存在跨地区进口和倒卖国外废旧物资、虚开发票、倒卖废旧物资回收或经营许可证的现象，扰乱了正常的市场秩序。而且，废旧资源回收交易市场的交易方式落后，没有建立现代化水平的再生资源商贸市场，不能避免废弃资源的二次污染。这同时也是由于现有再生资源利用产业发展的法律政策不完善、不系统，在相关法律法规的衔接上存在一些问题，激励和引导产业发展的政策不健全，相应的准入制度和技术标准未颁布实施，从而影响了该产业长期稳定的发展。

1.1.2 科学问题的提出

再生资源产业产生于特殊的历史背景之下，是可持续发展战略在我国的具体应用，为资源再生利用指出了产业化发展道路。但是，从研究背景可以看出，再生资源产业的发展虽然取得一定成就，但也存在一定的问题，主要表现为社会回收体系不健全、研究和创新能力不高、市场发展无序化、法律法规不完善等^[5]。这些问题既有时间空间限制的问题，也有产业发展自身的问题，其根本是一些不确定因素的存在，导致再生资源产业的集聚化均处于不稳定的发展状态，不能完全解决经济发展与环境保护之间的冲突问题，走入了尴尬的瓶颈发展阶段，影响了可持续发展目标的实现和最终完成。对于任何工业产业系统来说，可持续发展是至关重要的，需要各类影响因素互相耦合，避免一个子系统崩溃而产生的连锁崩溃效应，造成不可估量的损失。如何减弱再生资源产业系统的脆性，在一定程度上来说相比仅研究其工业化发展更具有重要性，这也成为本书研究的重要内容。

第一，系统复杂性增加，脆性作用机理不明确。20 世纪 90 年代初，由于改

革开放政策的推进和再生金属价格的不断攀升,一些地方出现了手工小作坊式的初级拆解加工,虽然经济规模扩大速度很快,但是对环境造成极大的破坏。近期,随着国家政策的战略性引导和资源需求的日趋强烈,原有手工小作坊和回收站点在市场经济发展中找到各自定位,再生资源产业园区规模日益壮大。可见,技术的进步使得再生资源产业系统变得越来越复杂,政府、企业和生态环境对系统的需求使得系统内各个子系统进行交互联系。但这种交互作用将受到更多因素的干扰,可能引致更多问题的产生,增加系统的脆性。传统研究方法是通过探寻系统事故发生的因果链,寻找诱发事故的关键性根源因素。然而,随着系统复杂性的增加,运用还原论对系统进行因果分析的程序难以逐步实施。寻找新的从复杂系统角度去解决脆性问题的方法成为当前研究的新思路。

第二,系统节点联系不紧密,产业链条薄弱。目前,再生资源产业节点主要包括回收站点、再利用站点、消费者三大利益主体,但是各节点以追求各自利益的最大化为目标,缺乏协同与耦合,导致再生资源产业走入了尴尬的瓶颈阶段。另外,现有再生资源产业链并未包括其上游产业“装备制造业”,也未包括其补链产业“新能源和环保设备制造业”,在产业链条结构上存在一定程度的脆性。大量的文献表明,由于节点联系不紧密和产业链条薄弱引起的失衡现象已经在许多国家生态产业系统中出现^[6],如丹麦的卡伦堡^[7]、我国的鲁北和贵糖生态工业园^[8]都出现了不同程度的失稳现象。如果不能对现有再生资源产业系统进行脆性分析,将不能评价系统中一些固有的、隐性的问题的脆性程度,测度系统可持续发展的实际需要,使再生资源产业系统产生剧烈的波动,面临崩溃却不能提前预知。识别产业系统中的脆性过程与脆性程度,加深企业间耦合的纵向深度,形成稳定高效的信息协同、过程协同、管理协同,才能使整个产业系统脆性较小以实现结构上的稳定。本书将通过评价系统中各子系统间的脆性程度来进行系统脆性的研究。

第三,产业扩张速度过快,系统调控手段单一。再生资源产业的原材料主要包含废旧机电产品、废旧电子信息产品、报废汽车的拆解加工,其中,废旧机电产品和废旧电子信息产品在我国主要依赖进口,导致一些沿海地区,借助劳动力成本优势,形成较大规模的废旧金属拆解业,仅浙江、广东、江苏三个地区就占了全国再生资源产业产值的70%,再生资源产业发展十分迅速。但是,产业的高速扩张和发展是与经济、环境、社会相交织的过程,决定了系统经济、技术、政治、生态和社会等方面的脆性,单单依靠政府政策的支持与激励,无法对日益庞大的系统进行有效的调控。面临废旧物资的成倍增长,这些风险不仅不会消除,还会因其相互交织度的增强而不断加剧,使再生资源产业蒙受巨大损失,生态环境日益恶化,社会稳定面临考验,影响该产业可持续发展。对再生资源产业系统的脆性进行有效的管理与调控,在新形势下成为迫切需要解决的问题。

1.2 再生资源产业与复杂系统脆性的相关述评

1.2.1 再生资源产业

目前,再生资源产业开始受到广泛的关注,许多发达国家已将其作为一门新兴的工业体系,主要发展模式以废弃物回收、拆解、资源化、无害化处理为基础,制定了许多保障和鼓励产业健康发展的政策机制,形成了较完整的社会化产业系统。但是,国内外直接提及“再生资源产业”的相关研究较少,主要集中在城市垃圾管理、逆向物流优化和再生能源利用技术等方面。“再生资源产业”研究领域尚不能单独构成一套完整的研究体系,需要与其他研究领域进行综合性研究。通过对现有文献进行总结,认为与本书相关的研究领域大致可以分为产业管理研究、利益主体分析、回收体系分析三个领域,具体如表 1-1 所示。

表 1-1 再生资源产业相关研究领域

研究领域	研究方向	主要研究内容
产业管理	再生利用产业管理	WEEE 各个角度的再生利用管理
	能源再生替代	再生资源对自然资源的技术替代
	管理体系构建	有效的政策引导与社会经济影响因素
利益主体	EPR	不同利益责任主体与两大收费方式
	成本-效益分析	收益、回收率、价格、价值率与废旧物资产生的数量预测
回收体系	回收模式	联合回收、制造商回收、第三方回收和公益性社会机构负责的四种回收模式
	回收网络及优化	特定产品、典型区域的回收网络优化
	回收方案实施	借助生命周期分析、物质流分析、博弈方法的回收方案优化实施策略

注: EPR—extended producer responsibility, 生产者责任延伸制度;

WEEE—waste electrical and electronic equipment, 报废的电子电气设备

1. 产业管理

目前直接提及再生资源产业管理的研究很少,相关研究主要集中在废旧电子产品回收处理、能源再生技术和工业固体废弃物管理等领域。这些方面都属于再生资源的一部分,有着密切的联系,可提供相应的借鉴作用。因此,再生资源产业管理方面的研究可从再生利用产业管理、能源再生替代和管理体系构建三方面进行。

大多数家庭用户的 WEEE 已趋于老龄化,基本没有再销售的价值,对环境危

害极大,它的闭环回收对于全球来说,是一种社会化循环的挑战与机遇^[9,10],因此再生资源的国外相关研究以 WEEE 的回收与利用管理为主,通过各个角度再生利用状况的比较,为该产业的脆性研究提供经验借鉴。从区域再生利用角度看,各国实施的重点内容各不相同。王景伟等总结了美国 WEEE 再生利用产业的产业发展背景、生产规模、经济规模、产业结构、技术工艺及相关法律法规^[11]。但针对当前企业对于 WEEE 指令的混乱执行情况, Huisman 等根据经济效益和环境影响评价结果,提出了适用于美国不同成员组织的有序的回收系统,实现资源利用与环境保护的初衷^[12]。Yamasue 等估算并对比了日本 WEEE 材料的损耗金额与中国回收 WEEE 成本及利润的影响^[13,14]。国家发展和改革委员会资源节约和环境保护司分别对德国、荷兰、日本等国电子废弃物回收处理的法律要求及资源化情况进行描述,分析了回收处理体系的组织结构、管理原则和收费模式^[15-17]。从国家间的比较角度看,郝应征等对世界主要工业国家或地区 WEEE 立法状况和再生实施过程进行了综述^[18]。而其他一些国外学者对荷兰、丹麦、德国、瑞士、瑞典、日本、韩国、中国台湾等国家和地区的 WEEE 回收管理体系与策略进行了比较分析,总结了可借鉴之处及运作体系的物流、资金流责任承担方式和竞争程度,并提出了一些可行的建议^[19-22]。

在能源再生角度,随着矿产资源的日益枯竭和原油价格创纪录的高涨,太阳能、风能、地热能源、生物质能等可再生能源资源,作为替代资源已被越来越多的国家所重视^[23,24]。Giuseppe 构建了可再生资源的内生增长模型,计算了再生资源 and 自然资源在模型中的技术替代率^[25]。从资源化的技术角度看,美国最新的光学分拣设备制备商(MSS)自动分拣的光分离技术,可识别和分离塑料、电路板、铁、有色金属、不锈钢等材料^[26],并且对再生资源进行微波消解可以保留易挥发元素,进一步保护环境^[27]。在农村能源循环方面,许多国家的农村地区都存在着再生能源供应不足的问题,可通过农业纤维利用、发展沼气工程和水力、风力发电等措施^[28-30],辅以合理分配为重点的新补贴政策^[31],加大农村再生资源利用力度。

为形成规范化的再生资源管理体系,必须首先考虑影响其实施有效性的主要影响因素。Taylor 认为在经济发达国家的废弃物管理中,政府鼓励与控制的引导政策十分重要,由公众心理、企业价值取向等因素所决定^[32]。而 Johnson 等认为社会经济因素发挥的作用也很大,如教育程度、性别、年龄、收入等因素,从回收源头影响再生资源的产业化管理^[33]。Realff 等认为各个国家应根据废旧电子产品材料实际情况的复杂多变,选择正确的收集方式,不存在最优管理策略体系^[34]。Sinha 等对比瑞士和印度的再生资源产业管理体系,认为每个国家应考虑本国经济结构和相关法规的可行性因素,以改善或优化现有管理体系^[35]。对于发展中国家来说,Troschinetz 等认为主要影响因素包括:废弃物回收和分类、废弃物管理者、废弃物从业人员教育水平、消费者受教育水平、政府的财政投

入等^[36]。Yang 等通过成本分析发现回收成本影响着再生资源产业原材料的流向,是决定产业管理体系成败的关键因素^[37]。Widmer 等对比分析了印度、中国和南非的产业管理体系,认为应从回收处理的资金来源、技术工艺及法律法规等多个因素着手,开展安全有效的新的管理策略^[38]。Goggin 等则认为一些关键回收环节和资源化技术同样影响着产业管理体系的设计与控制^[39]。

在再生资源产业管理体系规划与设计方面,国外相关研究较少。Abduli 为德黑兰的城市固体废弃物制订了专门的管理计划,但是没从整体来考虑废弃物管理系统,缺乏相应合理的组织结构、法律、制度体系^[40]。国内相关研究相对较多,主要从管理方式、产业布局、运作模式等方面进行阐述。从全国范围内考虑,王爱兰总结和借鉴了发达国家经验,分析了我国再生资源产业发展现状及存在的主要问题,提出了加快该产业可持续发展的对策建议^[41, 42]。周宏春讨论了政府如何适应变化了的再生资源产业管理和需要,提出了规范回收体系、发展二手市场、加大技术研发投入力度、对进口废料实行园区化管理等建议^[43]。在此宏观分析基础上,一些学者相继提出了以下强化再生资源产业管理措施:建议政府和管理过程中发挥一定杠杆作用,依据一定的原则最大限度地减少不利影响^[44];对再生资源产业实施圈区管理,并辅以政府的财税扶持^[45];充分发挥再生资源行业协会的作用^[46];构建再生资源产业园与协会相结合的运作模式等^[47]。随着我国在各省区市再生资源产业建设试点工作的开展,对北京、天津、河北、湖南、珠江三角洲、台湾各地再生资源产业管理的分析也成为许多学者研究的重点,建议政府制定相关法规政策,强制生产企业或销售企业回收电子产品,成本可由消费者支付,并应着力增强产业规模、产业地位和产业市场方面的能力建设,科学合理布局再生资源产业^[48-54]。对于一些经济欠发达地区,再生资源产业发展速度虽然较慢,但也出现了一些初步研究,如青海、湖北、广西、河北文安县等地均为学者关注对象,分析了地区产业发展现状,针对产生固废污染的原因和存在的问题,提出了各自的管理实施方案^[55-58]。

2. 利益分析

大多数发达国家和地区对再生资源产业的分析、研究与调整,都是以利益分配为基础进行的,根据不同利益主体的特点,建立与其相适应的回收管理制度。从再生资源产业链条来看,其利益主体主要包括制造商、供应商、分销商/零售商、回收企业、资源化企业、消费者及政府等,各个利益主体承担着不同的责任。Chua 等在此基础上加入了紧急利益相关者和代理利益相关者,包括交易中介、科研机构、社会环境组织和地球生物圈、人类后代等^[59, 60]。不同利益责任主体对采用生产者责任延伸制原则的着重点是不同的,只有各利益主体之间积极主动合作,才能实现有效的环境进步^[61]。例如,政府通常通过增加投资、减少税收等手段,以

平衡废弃物管理的成本,或制定相应的激励措施,促进产业科研水平提高,使得产品废弃后易于拆解、再使用和再制造,产生最小的环境污染^[62];生产者会通过涨价来转嫁生产者责任延伸制度实施带来的边际成本^[63]。通过比较分析日本、韩国、美国、欧盟的生产者责任延伸制原则,发现各国诠释与实际执行情况各不相同,说明适用于各种情况的最有效率的管理策略实际是不存在的^[64,65]。针对我国具体情况,刘冰等从环境经济学角度初步探讨了我国废弃物管理中施行生产者责任延伸制面临的挑战^[66]。黄英娜等阐述了该制度的内容、特点及推行的现实意义,分析了对我国电器制造商将会产生的影响^[67]。对原生制造产品进行收费,体现了各利益主体对该产品的经济和环境责任,只有通过立法制定明确的价格机制,才能使得生产者与政府达到合作的目的^[68]。

目前,主要的收费方式有两种:原生产品销售收费模式和报废产品处置付费模式。在收费模式方面,国家发展和改革委员会环境和资源综合利用司曾对欧盟部分国家和日本的收费标准进行分析,指出由于国情差异,这些标准不能直接应用于我国再生资源的回收利用^[69]。在付费模式方面,应重视产品污染的环境问题,Walls等设计了一个集成产品生命周期外部性的生产和消费模型,表明各个利益主体应共同承担其环境影响,上游污染下游处理,下游处理上游补贴^[70,71];Macauley等建立了成本-利益模型,通过对美国废弃显像管的处置成本进行分析,认为应完善政策以使处置成本小于避免环境污染与损害人类健康的成本^[72]。在我国,应遵循“谁生产、谁销售、谁使用,谁承担”的原则,将“制造商责任制”与“生命周期化管理”作为政策制度的基础原则,由政府、制造商、分销商(零售商)、消费者共同承担再生资源回收处理产生的相关费用,建立“四位一体”的付费机制^[73-75],尤其需要对再生资源的回收处理费用、收益、回收率、价值率等方面进行研究^[76-81]。

在回收处理的整个过程中,不同回收方式导致耗费的成本不同,收集和运输所耗费的成本最大,这也需要准确地预测不同地区废旧物资产生的数量,以此量化整个回收体系的成本、物流完善程度、收费模式及政策制定^[82]。Kang等预测了美国加利福尼亚州个人计算机未来回收量,指出废旧物资本身的再生、处置成本最大^[83,84],与Hainault等的回收、运输成本较大的研究结果不同^[85]。Peralta等^[86]与Jain等^[87]分别预测了菲律宾、印度主要电子电器产品未来的废弃量,并找出影响回收处理成本-收益的关键性因素,主要包括电器产品社会保有量、技术水平及产品质量。Yang等对中国废旧电子电器产品数量进行了估算,分析了普遍存在的不规范的回收处理行为,建议细化ERP(enterprise resource planning,企业资源计划),制定规范完善的管理政策,使再生企业和制造企业之间形成生态共生网络^[88]。

3. 回收模式

废旧资源作为产品供应链中的一个特殊环节,与正向销售物流相比,有分散性、

混杂性、价格不稳定、不易回收、成本高昂、运输不安全等特点,选择不同的回收模式,逆向物流所经过的环节、造成的经济社会影响也会不同。Piet 于 1994 年提出并研究了产品回收的环境问题^[89]。刘小丽等建模分析了我国电子废物类型及其对环境问题的影响,认为量大而且增速较快的电子废物的处置和资源再生化将是未来资源再生的主要难题^[90]。Krumwiede 等提出了回收模式的定量模型,用于解决基于第三方供应商条件下的回收物流问题^[91]。Spicer 等阐述对比了制造商回收、联合回收、第三方回收三种回收模式,认为第三方回收模式能最好地体现 EPR^[92]。Ravi 等则将回收物流分为第三方回收、联合回收和虚拟逆向物流网络,并提出了基于层次分析法的网络层次分析法(analytic network process, ANP)决策模型和方法,为回收方式的选择提供了更精确的决策方法^[93]。国内学者在国外回收模式的研究基础上,根据我国现有回收情况进行了深入探讨。范江华提出了第四种运作模式,即公益性社会机构负责的回收模式^[94];姚卫新以再制造为研究对象,对三种普遍存在的联合回收、制造商回收和第三方回收模式的实施进行了对比研究^[95];魏洁等则通过模型分析验证了最优零售价和生产商利润在这三种回收模式下的不同之处^[96];裴杰夫对外包公司的废旧电子产品回收进行了研究,认为回收过程中的物流外包是再生资源产业发展的一种必然趋势^[97]。

为了提高不同回收模式下废弃资源的回收效率,需要对回收的物流网络进行优化,各国研究人员均提出了自己的见解,一般带有具体的废弃资源类别或者明显的地理位置特点,针对特定产品、典型区域的回收网络进行优化。Nagel 等通过构建项目终止(end of life, EOL)模型,优化了德国废旧冰箱的回收方式,并分析了其经济和环境的影响^[98]。在废旧计算机的回收模式中,der Horng 等应用两段启发式算法构建相关决策程序设计模型,解决了回收网络中复杂的设计问题^[99]。Krikke 等讨论了整机和零部件两种不同的回收处理方式,构建了荷兰鹿特丹废弃计算机显示器回收最大净收益的随机动态规划模型^[100];而针对其他一些生命周期较长的电子产品,提出了基于多层回收网络的混合整数线性规划模型,以成本最低为回收目标,在备选方案中选择出最优的设置地点^[101]。对于废弃资源回收方案的选择和实施,国内外学者采用了不同的管理数量方法进行分析 and 评价,如遗传算法、整数规划、生命周期分析、物质流分析、H ∞ 控制方法、博弈(包括利益博弈与寡头博弈等)等^[102-108]。其中使用最多的方法为生命周期分析(life cycle assessment, LCA),全球发展中心在报告中将生命周期法列为废弃资源管理中最有效的工具之一,可以帮助政府制定相关策略、制造商改进产品设计方案、资源化企业增加原料来源^[109]。

4. 文献述评

从以上国内外有关研究中可以看出,政府、企业和公众对再生资源回收处理的重要性认识刚刚开始,再生资源的管理、利益成本的分析、回收体系的建立在国内外都是一个较新的课题,多数研究尚处于起步阶段,存在一定的局限性。

第一,对再生资源产业的管理体系构建缺乏相应的专门理论,系统性的结构研究不足。目前的研究多是借鉴循环经济、生态学、供应链等理论方法,综合性研究多偏向定性研究,定量研究不足。而再生资源产业是一个新兴的研究领域,其结构特点具有明显的复杂性,需要系统、全面、深刻的专门理论进行有针对性的研究。

第二,具有我国国情的再生资源产业系统运行稳定性分析较少。国内有关再生资源产业系统运行的研究很多,但是主要以发达国家的实践经验为起点提出建议,与我国实际国情的结合度不够,产业系统特征不明确,多数是泛泛而谈,缺乏依据及信服力,不能准确找出影响产业系统运行稳定性的关键性要素。

第三,在回收模式的选择方面,国内外已有学者进行探索,但并不是很系统,有的研究只是针对某些方面,缺乏大规模、多种类废弃资源再生系统脆性的相关研究。如前所述,影响再生资源产业系统的因素很多,产业链条的各个节点关系复杂,对系统的作用力不同,需要进行脆性评价和调控。

因此,本书将综合国内外的研究方法,从系统理论的角度将再生资源产业系统看做一个复杂系统,从脆性理论角度对再生资源产业的脆性进行研究。

1.2.2 复杂系统脆性

迄今为止,对于复杂系统,国内外理论界公认其具有:复杂性(cocomplexity)、开放性(openness)、进化涌现性(evolutoinnad emergence)、层次性(hierarehy)。但随着社会经济、科学技术的发展,人们在研究时发现,复杂系统的运行过程中,时常受到一些因素的干扰,这些因素有的可以测度,有的不能测度;有的可以预知,有的不能预知;有的影响力很大,有的影响作用不大。这些因素的干扰会不同程度地传递崩溃性,甚至最后导致系统崩溃和坍塌。人们称复杂系统的这种性质为脆性。近年来,已有越来越多的学者,在不同领域展开了广泛的研究。脆性理论最早是根据原国防科学技术工业委员会副主任栾恩杰对复杂系统脆性监控和预测的建议,以我国学者金鸿章为主的研究团队,基于突变理论、适应性 Agent 图论、熵理论、控制论等理论,从脆性致因机制入手,建立脆性模型并仿真,应用于对交通、矿业、电力、船舶、煤矿、通信系统及非典疫情控制等方面的脆性分析,开拓了复杂系统脆性的全新研究领域^[110-122]。国外尚未明确提出复杂系统脆性这一概念,但也进行了一系列相关研究。其中,最为相关的概念为复杂系统的脆性研究,主要的研究成果和报告来自美国、英国、荷兰、瑞士、芬兰等国家,涉及国防装备制造、环境保护、气候变化、人工智能、控制系统、计算机软件工程、通信系统、电力系统、道路交通、工业生产、社会网络、煤矿事故等领域^[123-133]。为了对复杂系统的脆性问题进行全面、深入的阐述,本书将结合脆性的相关研究,从与再生资源产业相关的生态环境和产业经济领域进行分析,具体如表 1-2 所示。

表 1-2 复杂系统脆性理论主要研究领域

研究领域	研究方向	侧重点
生态环境	气候变化	“灾害事件”评估与应对
	水环境	水资源相关环境因素的脆弱影响效果
	资源承载	综合承载力脆性崩溃过程与预警
产业经济	产业风险	农业与制造业、建筑业、海洋产业等工业面临的脆性风险分析
	金融体系	金融危机脆性的程度和传导机制
	供应链系统	供应链系统连锁崩溃过程与脆性势函数模型
	企业集团	企业自主创新系统脆性结构模型与成长风险的管理问题

1. 生态环境

在当今世界国家和区域发展过程中，自然科学和社会科学学者都一直在关注和研究生态环境的脆性问题^[134]。Paul 等对人类所处环境变化的五个方面（自然规律、人类生态、政治经济、生态学构成及政治性）的优劣势做了评估，应在现实主义认识论的基础上解决社会结构、人力结构和生态环境之间相互关联的动态性问题^[135]。Edwards-Jones 等使用碳足迹对英国出口业的脆性进行了分析，通过分析三种产品运输环节、国民经济和供应链等的碳漏洞，发现远距离发展中国家的替代性出口，是导致出口脆性的最重要因素^[136]。

在生态环境脆性中，气候变化是最不受人类控制的重要因素，Füssel 对比了各种学术领域中“脆性”的定义方式，提出了适用于气候变化研究的普遍性理论框架，区分社会中四个根本性脆弱因素，用来解决全球各种气候变化风险应对问题的脆性研究方法^[125]。Sergio 等运用利益相关者等理论，分析了墨西哥农民生存环境及策略的脆性，认为政府干预更能降低气候压力风险，提出了应对的长期战略性建议^[137, 138]。Tommy 等对雅加达气候风险进行了阐述，考虑通常被忽略的关于社会经济状况影响的风险，提出了地理信息系统应该与社会经济脆性进行数据集成脆性避免方案^[139]。Suzanne 等通过在加拿大肯那根（Okanagan）山谷进行访谈，发现生产者制定战略容易受到气候变化的风险影响，可以通过提高资源、技术的可用性与获得政府的支持来适应脆性的动态变化性^[140]。Wei 等在传统脆性分析方法的基础上添加子指数，构建了综合脆性指数体系，评估中国每个区域灾害的严重性，并为区域脆性分类提供新的方法及建议^[141]。Michele 对中国四川农村这一高度脆性贫困地区进行研究，发现低消费和高脆性的作用性是类似的，应制定相关政策来促进消费以减小脆性^[142]。

水资源是维持自然生态系统的基本要素，也是支撑人类社会发展的基础性资源。然而，随着生产规模和人口数量的不断扩大，水资源所处环境的脆性问题正在