

物质流分析与动态管理模型研究

研究生：马红霞

导师：王海燕（教授）

东南大学

摘 要

循环经济作为新的经济范式，以循环利用的资源和环境为物质基础，以生产者、消费者和分解者高效协调的新的代谢方式来满足人类的物质需求，物质代谢就成为循环经济研究的核心问题。物质流分析作为物质代谢研究的一种重要的研究方式，成为研究循环经济的重要方法，而物质流的动态管理模型就成为发展循环经济的重要工具和手段。本文主要就循环经济模式下物质流进行了分析，并对物质流的动态管理模型进行了研究。

论文首先阐述了研究物质流分析与动态管理模型的背景和意义，总结了国内外研究现状，介绍了物质流统计研究分析、存量流分析和投入产出分析等三种物质流分析方法。引入了基于投入产出分析方法的物质流管理模型，包括静态投入产出物质流管理模型、动态投入产出物质流管理模型和动态投入产出反馈控制模型，通过模型来反映各过程的积累情况，以及各过程流随时间变化的情况。

由于原有的动态投入产出反馈模型，是建立在输出流方向上的，只是实现了系统输出和积累的调控，没有涉及到外部资源的输入。针对这一问题，论文对原有动态投入产出模型进行了改进，将模型建立在投入产出的投入方向，利用系统的积累和外部输入的资源实现过程流的增长，随着系统内部积累的增加，系统对于外部资源减少需求，从而实现循环经济所提倡的减量化原则。

同时由于循环经济本质上是一种生态经济，它不仅要实现经济目标，满足人们的物质需求，还要考虑到对于环境的影响，所以论文进一步利用基于投入产出的生命周期评价方法确定环境目标函数，通过建立多目标动态投入产出规划模型来实现物质流的多目标优化问题。

最后从循环经济的角度对城市固体废物这种特殊的物质流进行了分析，把经济收益作为目标函数，考虑到环境和社会两个方面的约束，建立了城市固体废物流优化管理混合整数规划模型。

关键词：循环经济；物质流分析；物质流管理；投入产出法；固体废物流

Research on Material Flow Analysis and Dynamic Management Model

Graduate: Ma Hongxia Supervisor: Prof. Wang Haiyan Southeast University

Abstract

As a new form of economy, circular economy is based on recycling resources and environmental capacity and meets the mankind demand for materials in the new style of material metabolism, in which producers, consumers and decomposers efficiently coordinate. Material metabolism becomes the core of research on circular economy. As an important method of research on material metabolism, Material Flow Analysis is becoming the significant approach as well the dynamic material management model turns into the means of developing circular economy. So the contents of the paper are analyzing material flow in circular economy and carries on the dynamic management model.

At first, the background and significance of the research is stated, and the present conditions in domestic and overseas are summarized. Three analysis models about material flow are introduced, which are STRAMS(Statistical Research for Analysing Material Streams),STAF(Stock And Flow)and Input-Output Analysis. Material flow management models based on Input-Output analysis are drawn into the paper, which includes static Input -Output material flow management model, dynamic Input-Output management model and dynamic Input-Output feedback model. With the aid of dynamic models, the stocks of the individual progress and changes on time are reflected.

Because the previous dynamic Input-Output feedback model established on the outflows, only adjusts the outflows and stocks in the economic system, which doesn't concern the inflows of resources from external. So an improved dynamic Input-Output management model based on the inflows is set up, in which the increase of material flows of individual progress is achieved by using internal stocks and inflows from external. With the internal stocks increasing, the demand for material from outside will be decreased, and the primary principal-reducing principal- of

circular economy is realized.

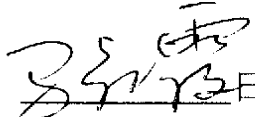
At the same time, circular economy is an ecological economy, which not only achieves economic goal –meeting the requirement of material, but also is claimed of the environmental impact. Thus a multi-objective dynamic Input-Output program model is presented in order to realize multi-objective optimization of material flow, in which an ecological Input-Output Life Cycle Assessment is introduced to set up environmental objective function.

At last, from the perspective of circular economy, the municipal solid wastes are special materials. A hybrid integral program is proposed on the analysis of the waste flow, with the economic profit being the objective function and social and environmental constraints being considered.

Keywords: Circular Economy; Material Flow Analysis; Material Flow Management; Input-Output Analysis; Solid Waste Flow

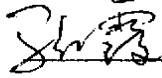
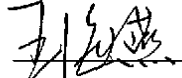
东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 日期：_____

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名： 导师签名： 日期：_____

第一章 绪论

1.1 论文的背景与意义

物质代谢是自然界演替和进化最基本的过程和最本质的原因^[1],也是人类在自身发展完善中与自然界最基本的沟通形式和交流界面。人类在其漫长的发展历史中经历了不同的经济形态,每一种经济形态都是一个很长的过程,并且都建立在与其相应的物质基础上。传统的工业经济建立在大量耗费资源、大量对外排放的基础上,耗费大量的物质来满足人类生存生活需要。资源的耗竭、污染物的大量排放使得环境不断恶化,日益威胁到人类自身的安全和发展,人类开始反思自己的行为。1987年,联合国世界环境与发展委员会向联合国提交了题为《我们的共同未来的报告》,就世界环境与人类发展的关键问题作了全面和系统地评价,明确提出可持续发展的思想。1992年6月,联合国环境与发展大会在巴西里约热内卢召开,会议通过了《里约热内卢环境与发展宣言》、《21世纪议程》等文件,标志着世界各国已普遍地认识到人类的发展必须系统地研究和解决经济、资源、环境等综合协调发展的问题。1994年9月在埃及开罗召开的国际人口与发展大会上提出了“可持续发展的中心是人”的结论。1995年3月,在丹麦哥本哈根召开的国际社会发展首脑会议上提出,将可持续发展的概念从经济、人口、资源、环境扩展到社会发展,成为整个社会的系统工程。《中国21世纪议程—中国21世纪人口、环境发展白皮书》中也指出:“走可持续发展之路是中国未来发展的自身需要和必然选择”。它提出的可持续发展战略是坚持以经济建设为中心,从人口、经济、社会、资源和环境相互协调中带动人口、资源和环境问题的解决,逐步将高投入、高消耗、低产出和低效益的发展模式转变为资源节约型的发展模式。同时,通过生产模式和生活方式的改变,重新确立人与自然和谐共处的关系,推动和建立新的社会文明^[2-6]。

可持续发展作为人类生产活动长期实践的深刻总结,其对环境与发展问题认识的重要性已被国际社会和各国政府所认同,在实践可持续发展的全球进程中,各国对实现可持续发展的具体途径在理论上进行了广泛的研究,取得了许多丰硕的成果。

对实现经济可持续发展而言，其关键在于经济发展方式的转变，把实施可持续发展战略具体到一种经济模式最能统一思想，便于实施。从提倡一些废弃资源回收和综合利用到循环经济的提出，是经济发展理论的重要突破，它打破了传统经济发展理论把经济和环境人为割裂的弊端，要求把经济发展建立在自然生态规律的基础上，促使大量生产、大量消费和大量废弃的传统工业体系转轨到物质的合理使用和不断循环利用的经济体系，循环经济为传统经济转向可持续发展的经济提供了新的理论范式，从而可以从根本上解决长期以来环境与发展之间的尖锐冲突^[7]。因此，发展循环经济是实施可持续发展战略的重要途径和实现方式。

所谓循环经济（Circular Economy），是对物资闭环流动型经济的简称，按照生态规律利用自然资源和环境容量，实现经济活动的生态化转变，因此本质上是一种生态经济，它要求运用生态学规律而不是机械论规律来指导人类社会的经济活动。循环经济倡导的是一种与环境和谐的经济发展模式，它要求把经济活动组织成一个“资源—产品—再生资源”的反馈式流程，其特征是低开采、高利用、低排放。所有的物质和能源要能在这个不断进行的经济循环中得到合理和持久的利用，以把经济活动对自然环境的影响降低到尽可能小的程度^[8]。循环经济的流程如图 1.1 所示。

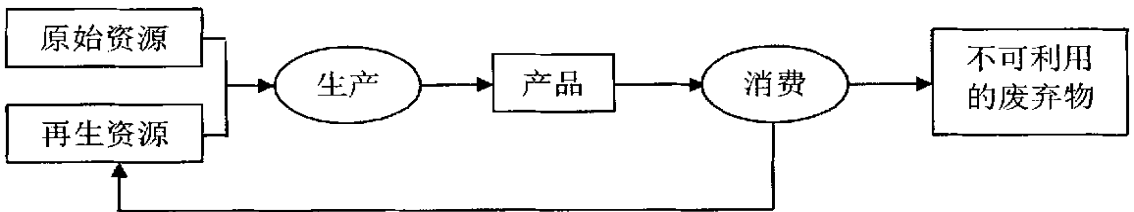


图 1.1 循环经济的流程图

循环经济不但要求人们建立“自然资源—产品—再生资源”的经济新思维，而且要求在从生产到消费的各个领域倡导新的经济规范和行为准则，即“3R 原则”：减量化（Reduce）原则、再使用（Reuse）原则和再循环（Recycle）原则，每一原则对循环经济的成功实施都是必不可少的。循环经济“3R 原则”的主要内容和要求体系在以下几个方面^[9-11]。

(1) 减量化原则。要求用较少的原料和能源，特别是使用无害于环境的资

源投入来达到既定的生产目的或消费目的,进而从经济活动的源头就注意节约资源和减少污染。它针对的是输入端,对废弃物的产生是通过预防的方式而不是末端治理的方式加以避免。例如在生产中,制造商可以通过减少每个产品的原料使用量,通过重新设计制造工艺来节约资源和减少排放,常常表现为要求产品体积小、产品质量轻型化、产品包装朴实化等,从而达到减少废物排放的目的。

(2) 再使用原则。要求制造产品和包装容器能够以初始的形式被反复使用,要求制造商应该尽量延长产品的使用期,要求抵制当今世界一次性用品的泛滥。它针对的是过程控制,目的是延长产品和服务的时间强度,即尽可能多次或多种方式地使用物品。例如在生产过程中,制造商可以使用标准尺寸进行设计,使产品容易拆解,可便捷地实现产品的升级换代,而不必更换整个产品。在生活中,人们可以将可维修的物品返回市场供别人使用。

(3) 再循环原则。要求生产出来的物品在完成其使用功能后能重新变成可以利用的资源,而不是不可恢复的垃圾。它针对的是输出端,能把废弃物再次变成资源以减少最终处理量,也就是通常所说的废品的回收利用和废物的综合利用。再循环有两种情况,一种是原级再循环,即废品被循环用来产生同种类型的新产品,例如报纸再生报纸、易拉罐再生易拉罐等等;另一种是次级再循环,即将废弃物经过处理、加工后变成与原来不同类型的新产品。原级再循环在减少原材料消耗上面达到的效率要比次级再循环高得多,是循环经济追求的理想境界。

循环经济以其低开采、高利用、低排放的特点成为新的经济增长模式,正在受到许多发达国家的重视,循环型社会的建设在日本、德国、美国及欧洲一些国家都取得了很大的进展^[12]。2003年3月9日胡锦涛总书记在中央人口资源环境工作座谈会上的讲话中指出:“要加快转变经济增长方式,将循环经济的发展理念贯穿到区域经济发展、城乡建设和产品生产中,使资源得到最有效的利用。最大限度地减少废弃物排放,逐步使生态步入良性循环。”2004年3月5日温家宝总理在第十届全国人民代表大会第二次会议上的《政府工作报告》也提出:“积极实施可持续发展战略,按照统筹人与自然和谐发展的要求,做好人口、资源、环境工作”。“加大执法力度,强化生态环境监管,严格控制主要污染物排放,抓紧解决严重威胁人民群众健康安全的环境污染问题。大力发展循环经济,推行清洁生产。”发展循环经济,实现我国经济的可持续发展,建立和谐社会正在成为

国家目前的主要任务。

循环经济作为新的经济范式，以循环利用的资源和环境为物质基础，以生产者、消费者和分解者高效协调的新的代谢方式来满足人类的物质需求，同时逐步实现非物质为中心的经济态势。要改变过去认为实物物质是经济中附带发生的想法，而是应该认为经济系统本身就是物质流动的过程^[13]，因此物质代谢就成为循环经济的核心问题。发展循环经济的本质内容就成为改造或调控现有的线性物质流动模式，提高资源和能源的利用效率，使得资源和能源得到充分高效的利用。

作为研究工业代谢的一种工具和方法，物质流分析就是对经济活动中物质流动的分析，它的基础是对物质的投入和产出进行量化分析，建立物质投入和产出的账户，以便进行以物质流为基础的优化管理。建立在物质流分析基础上的物质流管理，就是通过对物质流动方向和流量的调控，提高资源的利用效率，减少有害物质的投入和排放。

循环经济原则、本质内容与物质流的管理是一致的。循环经济强调从源头上减少资源消耗，有效利用资源，减少污染物排放，谋求以最小的环境资源成本获取最大的社会经济和环境效益，并以此来解决长期以来环境保护与经济发展之间的尖锐矛盾。可见，物质流分析是循环经济的重要技术支撑，物质流分析和管理是循环经济的核心调控手段^[14]。

从物质流分析与管理与循环经济的相互关系来看，物质流分析与管理的作用以及研究物质流分析与管理的意义主要体现在以下几个方面：

(1) 在社会经济活动中减少物质投入总量。物质投入量的多少直接决定资源的开采量和对生态环境的影响程度，特别是对于不可再生资源，物质投入量的减少就直接意味着资源使用年限的增加，其对整个社会经济和环境的意义是极为显著的。因此，循环经济强调要在减少物质总投入的情况下实现社会经济目标。

(2) 提高资源利用效率。资源利用效率反映了物质、产品之间的转化水平，其中生产技术和工艺是提高资源利用效率的核心。通过物质流分析，我们可以分析和掌握物质投入和产品产出之间的关系，并通过技术、工艺改造和更新，提高物质、产品之间的转化效率，提高资源利用效率，达到以尽可能少的物质投入达到预期经济目标的目的。

(3) 增加物质循环量。通过提高废弃物的再利用和再资源化，可以增加物

质的循环使用量,延长资源的使用寿命,减少初始资源投入,从而最终减少物质的投入总量。工业代谢、工业生态链和静脉产业等都是提高资源循环利用的重要内容和实现形式。有关资料表明,2000年日本总的物质循环利用率达到10%左右,所循环利用的大都是资源短缺或价值较高的废旧物质,如废钢、废铝、废塑料等。但是,在我国大量的物质在目前的经济、技术水平上还是没有得到很好循环利用或根本无法循环利用。

(4) 在社会经济活动中减少最终废弃物排放量。通过提高资源利用效率,增加物质循环量,不但可以减少物质投入的总量,同时也可以实现减少最终废弃物排放的目的。在发展循环经济过程中,生产工艺和技术的进步、生态工业链的发育和静脉产业的发展壮大都可以通过提高资源使用效率、增加物质循环和减少物质总投入来实现,从而达到减少最终废弃物排放量的目的。

德国等欧盟国家非常重视基于物质流分析的物质流管理,并采用物质流管理的理念成功实施了一系列经济技术可行的项目。目前德国已经成功实施了物质流管理,据测算,通过物质流管理,可以节约能源65%。

物质流分析与管理是循环经济的核心调控手段,因此,物质流分析与动态管理模型研究有着非常重要的现实意义和实际应用价值。

1.2 国内外研究现状

1、国外研究现状

物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)方法作为研究经济生产活动中物质资源新陈代谢的一种方法,其基本思想的发端可以追溯到一百多年以前。第一个基于经济学观点的国家尺度物质流分析的尝试发表于1969年。20世纪70-80年代,物质平衡、工业代谢等理论的提出和不断完善,为物质流分析方法应用于整个经济系统进行研究奠定了基础。20世纪90年代初,奥地利、日本和德国首先应用物质流分析方法对各自国家经济系统的自然资源和物质的流动状况进行了分析,从而揭开了经济系统物质流分析方法在世界范围广泛应用的序幕^[15]。

1996年,欧盟委员会(European Commission)组建了(Con Account)平台,该平台的成立可认为是经济系统物质流分析国际合作的里程碑。从1997年开始,世界资源研究所(World Resource Institute)着手对美国、日本、奥地利、德国、

荷兰等5个国家经济系统的物质流动状况进行了全面的分析。与此同时,运用物质流分析方法对本国经济系统进行分析的国家不断增加,比如意大利、丹麦、芬兰、瑞典和英国等。2001年,欧盟统计局(EUROSTAT)出版了第一部经济系统物质流分析研究方法手册,该手册的出版对经济系统物质流分析的深入研究起到了很大的作用。

物质流分析的研究通常分为宏观、中观和微观三个层次。宏观层次指国家级的物质流核算(National Material Flow Accounting);中观层次指区域的物质流核算(Local Material Flow Accounting),而微观层次的物质流核算是针对具体企业的^[16]。目前的研究大多集中在宏观的和微观的物质流分析,完成国家级物质流分析研究的国家有奥地利、日本、德国、英国、荷兰、意大利、美国、芬兰、瑞典和澳大利亚等国家。

物质流分析模型最早出现在1989年Ayres描述工业代谢概念中^[17],由于它类似于经济学中的投入产出分析(Input-Output Analysis),因此有时也称为“生态投入产出分析”(Ecological Input-Output Analysis)。物质流分析与一般的投入产出法不同的是,投入产出分析建立在部门与部门之间的资金形式的物质交换关系,而物质流分析是建立在产品与产品的实物交换基础上。物质流分析的主要原则是物质守恒原则。静态的物质流分析可以帮助发现造成污染的源头,同时可以估计经济活动中,物质流的改变对于环境的影响^[18],文献[19]和[20]分别研究了铜、锌两种物质循环在美国和欧洲的循环利用情况,分析了铜、锌的利用效率,定量描述了铜、锌的排放量,为制定相应的资源和环境保护政策提供定量依据。文献[20]还提供了一种物质流分析模型,称为存量流(Stock And Flow, STAF)模型。存量流模型研究的是一种物质从开采、生产、使用、废弃的生命全过程,通过估计和分析在一定地理区域的物质流状况,可以在资源使用、环境评价以及环境和资源的长期管理中提供帮助。利用存量流分析方法可以估计社会中某些物质的存量以及在将来的排放与流失,并可以根据这些数据制定相关的资源回收策略和最终处置方法,从而减少从自然环境的获取和环境负担,这种方法已经广泛地用于金属的循环分析中。在文献[21]中提出一种基于供应—使用表(Supply—Use Table)来描述通过整个社会的某种物质流的分析方法。在这个方法中,对某种物质从开采到最终消费直至垃圾整个阶段进行了“从摇篮到坟墓”的追踪分析,

分析从进入社会经济系统的某种物质的输入量到最终成为废物的输出量,从中可以分析出该种物质在系统内的存量及物质的利用效率,分析方法框架清晰,但是每次都要大量的统计数据,而且要计算不同产品的物质浓度,计算复杂,工作量大,也不能为物质流管理提供一个很好的计算框架。文献[22]建立了基于投入产出表的物质流分析模型,建立了实物维的投入产出模型,计算内容包括以下几个方面:(1)每一经济活动对于原材料的需求;(2)每一经济活动单位货币产出消耗的直接原材料;(3)每一货币单位最终使用中的全部原材料,即计算出最终使用的产品的物质强度。

动态的物质流分析可以分析在经济活动中物质流将来的排放及废弃物的产生^[23]。文献[24]指出现在的社会物质存量是将来的废物和排放,以瑞典的PVC材料为例,提出一种假设在某种PVC新产品不同的需求曲线、不同PVC产品的平均寿命以及不同产品寿命延长曲线的条件下,将来的废物的产生和排放的预测方法。文献[25]中作者研究了有关物质循环系统的动态非线性模型的计算框架,但是主要侧重于物质用后循环的部分,对于在生产、流通环节的循环没有涉及到,而且模型只出现一个循环的理想情况。

Railey 在文献[26][27]中建立了基于投入产出法的物质流管理模型,利用投入产出方法和技术来分析工业系统中的物质流。基于投入产出的物质流管理方法,既能分析各过程之间的直接流,又能够分析过程之间的间接流,为完整地分析一个工业系统的物质流提供了理论方法。Railey 还在文献[27]中分析了基于投入产出分析的物质流管理模型的优缺点,提出首先考虑到物质在时间上的变化和积累,再利用生命周期评价来评价环境影响,并指出建立动态物质流管理模型是今后研究工业系统物质流的发展方向。

2、国内研究现状

物质流分析在我国刚刚起步,文献[28][29]利用物质流的理论和方法(欧盟物质流分析框架)分别分析了1995-2002年、1989~1996年间我国经济系统的物质需求总量、物质消耗强度和物质生产力。文献[30]利用物质流分析方法分析了中国经济系统中石化燃料的利用现状。文献[31]首次将物质流分析的方法运用在区域层次上,对贵阳市的经济增长方式进行初步分析,给出了贵阳市2000年物质流全景、1978-2002年资源投入以及1996-2002年污染排放的总量、结构、

强度与人均规模的变化,为贵阳市循环经济建设规划编制奠定基础。这些研究都是从宏观层次上研究进出经济系统的物质利用情况,对于系统内部的物质流动的结构没有涉及。文献[32]对于南通市的物质和能量流进行分析研究,指出目前南通市的物质和能量代谢中,物质的输入远远超过了自然供给的能力,物质循环利用率低,造成大量的废弃物排放到环境中,影响了南通市的生态系统,必须进行物质流和能流的管理,建立生态友好的资源管理体系,优化资源的综合利用。然而,目前在国内涉及到区域经济系统内部物质流动结构的物质流管理模型的研究还很少见。文献[33]中结合无锡生态工业园的建设,在基于投入产出的物质流管理模型基础上,考虑到积累的发生以及物质流在时间上的变化,在投入产出的输出流方向建立了动态的投入产出反馈模型,并运用于生态工业园的建设中。建立在输出方向的动态投入产出模型,只是在输出与积累之间进行调控,没有涉及到输入方向物质流的控制,而循环经济的首要原则是减少资源的输入,所以模型还需要进一步改进。

1.3 论文主要工作

循环经济从本质上来说,是改变现有的系统内的物质流方式,实现系统低输入(自然资源)、高利用、低排放(废物)的发展目标。本文将主要在现有的物质流管理模型的基础上进行改进、完善,从而更好地实现物质流的优化管理,论文的具体研究工作包括以下几个方面。

第一章分析了论文研究的背景和研究意义,对国内外关于物质流分析与动态管理模型的研究现状进行了总结。

第二章阐述了物质流分析的三种方法,即物质流统计研究分析方法、存量流分析方法和投入产出分析方法。物质流分析主要是一种静态的分析工具,研究物质从开采、生产、消费、回收到最终处置全过程的代谢,并分析物质流对于环境的影响。

第三章引入了基于投入产出分析方法的物质流管理定量模型。投入产出技术是研究经济的最为熟悉、最广泛采用的形式,利用投入产出方法分析经济系统的物质流动情况,不仅分析经济系统不同的流程之间的直接的物质关系,而且能够分析系统内部不同的环节之间的间接流动关系,更加全面的研究物质流动情况,

有助于进行物质流的规划，但是静态的投入产出方法，不能考虑到物质流在时间上的变化，所以，要建立动态的投入产出及反馈控制模型。

第四章从两个方面对原有的动态投入产出物质流管理模型进行了改进。一方面，原有的动态投入产出反馈模型，是建立在输出流方向上的，只是实现了系统输出和积累的调控，没有涉及到外部资源的输入问题。本章将模型建立在投入产出的投入方向，利用系统的积累和外部输入的资源实现过程流的增长，随着系统内部积累的增加，系统对于外部资源减少需求，从而实现循环经济所提倡的减量化原则。同时通过输出参数的调节，控制输出，从而实现了排放的控制。另一方面，由于循环经济本质上是一种生态经济，它不仅要实现经济目标，满足人们的物质需求，同时考虑到对于环境的影响，所以本章建立了多目标动态投入产出规划模型来实现物质流的多目标优化问题。文中利用基于投入产出的生命周期评价方法建立环境目标函数，这在国内的相关研究中还是第一次出现。

第五章分析了城市固体废物这种特殊的物质流以及其动态管理模型。循环经济是模仿自然生态系统的一种新型的经济形态，把以往传统经济中的固体废物看作是时空错置的资源。城市固体废物流优化管理，就是将固体废物转化为有用的资源，在循环经济系统中，实际上起到了类似自然生态系统中分解者的作用。本章从循环经济的角度分析了城市固体废物流，将经济收益作为目标函数，考虑到环境和社会两个方面的约束，建立了城市固体废物流优化管理混合整数规划模型。

第六章对全文进行了总结。

第二章 物质流分析方法

物质流分析主要是一种静态的分析工具，研究物质从开采、生产、消费、回收收到最终处置全过程的代谢，并分析物质流对于环境的影响。其研究方法主要有物质流统计研究分析（STREAMS）方法^[21]、存量流分析（STAF）方法^[19, 20, 35]和投入产出方法^[22]。

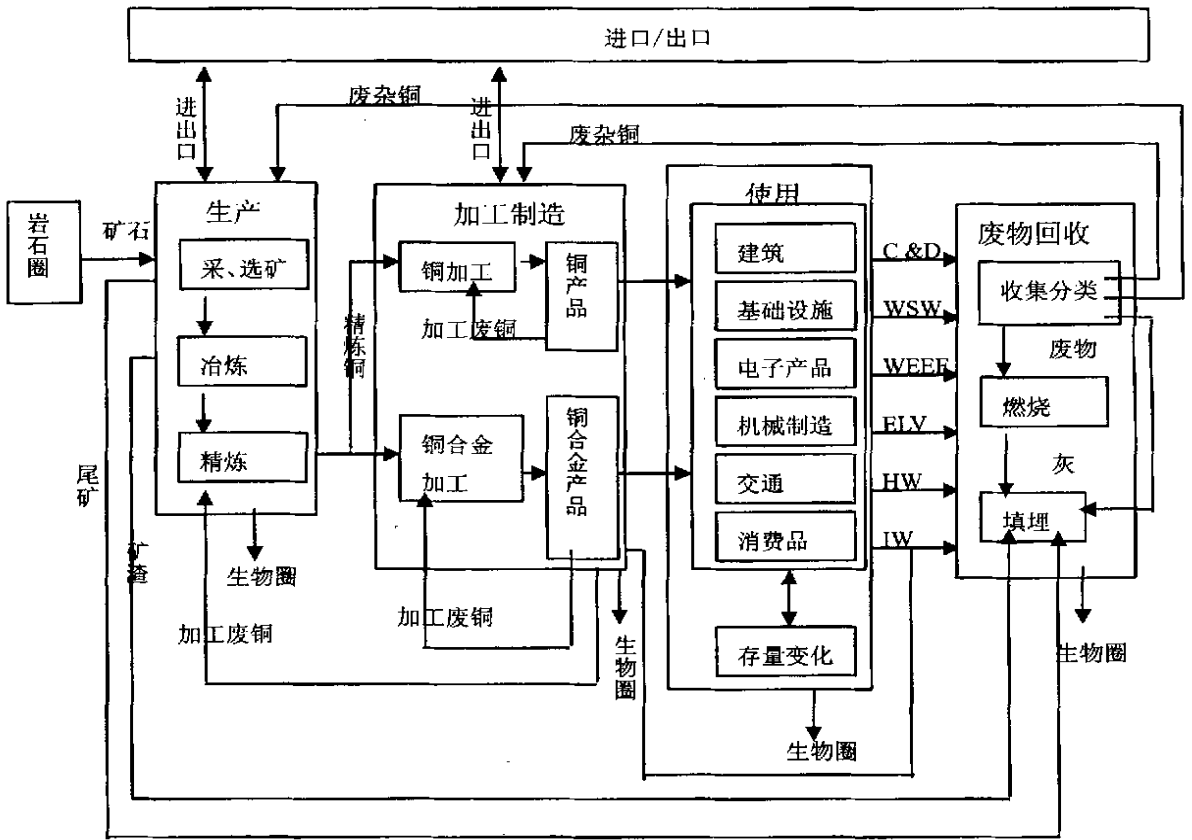
2.1 物质流统计研究分析方法

物质流统计研究分析（Statistical Research for Analysing Material Streams, STRAMS）法是建立在宏观层次的分析模型，模型建立在经济供应和使用表格（Supply—Use Table）的基础上，分析了某种物质从开采以原料的形式进入经济系统的物质总量，以各种形式存在于系统内的量和最终成为消费的物质总量，最终成为废弃物输出到系统外部的量。这样，可以清楚地分析出系统对于某种物质一年的吞吐量，计算出物质利用效率。物质流统计研究分析法建立在物质供应和使用的大量的统计数据基础上，以货币的形式而不是物质的质量来描述物质质量的多少，不能如实反映物质流的实际状况及环境影响，所以在目前应用的比较少。

2.2 存量流分析方法

存量流（Stock And Flow, STAF）分析方法实际上是物质流（Substance Flow Analysis, SFA）的一种具体的方法体现。存量流分析方法研究的是一种物质从开采、生产、使用到最终废弃的生命全过程，通过估计和分析物质在一定地理区域的物质流，可以在资源使用、环境评价以及环境和资源的长期管理中提供帮助。

利用存量流分析方法可以估计社会中某些物质的存量以及在将来的排放与流失，并可以根据这些数据制定相关的资源回收策略和最终处置方法，从而减少从自然环境的获取和环境负担。这种方法已经广泛地用于金属的循环分析中，如文献^[34]中，利用存量流分析方法对于我国的铜利用现状进行分析，详细的流程图如图 2.1 所示。



图中符号意义：C&D—建筑及拆除过程中产生的垃圾；WSW—固体垃圾；WEEE—报废电子元器件；ELV—报废的交通工具；HW—有害废物；IW—工业废物。

图 2.1 中国铜循环的存量流分析模型

借助于图 2.1 可以清晰地看到铜的整个生命周期流程。按照此流程图整理数据，就得到某时间段（通常为一年）一定区域内（这里是国家层次上）铜流量图，清楚地展现某时间段内一定区域铜的使用状况，同时计算出铜金属在经济活动中的存量，在一定的铜循环技术基础上，计算出可循环利用量，从而从生产的源头减少新铜矿的开采。“具有时间概念的产品生命周期物质流分析方法”将 $\tau - \nabla\tau$ 年生产的铜产品在其生命周期 $\nabla\tau$ 结束后作为 τ 年的原料进入到生产中，形成铜的循环利用^[35]。

存量流分析方法作为一种分析模型，只适用于分析单一物质，需要注意的是存量流也是关注物质流的流向和流量的，它也可以利用投入产出表来表示，当有多种物质时可以利用下面的投入产出方法进行分析。

2.3 投入产出分析方法

投入产出分析是研究经济系统各个部分之间的相互依存关系的经济数量分析的方法，最早是由法国经济学家 Quesnay 在 18 世纪提出的，20 世纪 30 年代美国经济学家 Leontief 在 Quesnay 工作的基础上发展了投入产出分析方法。

Leontief 提出了静态投入产出模型，模型以整个国民经济为描述对象，反映某一时间段内（通常为一年）各部门或产品之间的投入与产出的内在联系。投入产出模型按所使用的计量单位划分，主要包括实物型和价值型两种，而每种模型均有两种表现形式：投入产出表和与其对应的投入产出数学模型。

价值型投入产出表如表 2.1 所示。

表 2.1 列氏价值型投入产出表

投入 \ 产出		中间产品				最终产品					总产品	
		部 门 1	部 门 2	.....	部 门 n	产	大 修 及 固 定 资	更 新 改 造	积 累	消 费		出 口
中 间 投 入	部门 1	X_{11}	X_{12}	.....	X_{1n}			Y_1				X_1
	部门 2	X_{21}	X_{22}	.....	X_{2n}			Y_2				X_2
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮			⋮				⋮
	部门 n	X_{n1}	X_{n2}	.....	X_{nn}			Y_n				X_n
初 始 投 入	折 旧	D_1	D_2	.....	D_n							
	劳动报酬	V_1	V_2	.....	V_n							
	社会纯收入	M_1	M_2	.....	M_n							
总投入		X_1	X_2	.....	X_n							

价值表中横向表示经济部门产品的使用去向，各种产品之和等于总产出，其数量关系满足：

$$\text{中间产品} + \text{最终产品} = \text{总产品}$$

价值表中纵向表示的是产品中的各种投入要素，这些要素的价值量之和为总投入，其数量关系满足：

由表 2.2 可得

$$\begin{cases} Z + F - M = X \\ Z + Y = X' \end{cases} \quad (2.5)$$

令 $AX = Z$, $WX = Y$, 则有

$$X = (I - A)^{-1}(F - M), Y = W(I - A)^{-1}(F - M) \quad (2.6)$$

借助于这个模型, 可以计算满足一给定的最终需求所需的中间产品和初始投入。在此基础上建立实物型投入产出表, 如表 2.3 所示。

表 2.3 实物型投入产出表

	中间材料	最终使用		进口	国内总产出
		经济活动	最终需求		
中间材料	O_s	E_{sl}	E_{sf}	$-M_s$	X_s
原始材料	O_p	E_{pl}	E_{sp}	$-M_p$	X_p
总投入	X'_s				

表 2.3 中 O_s 表示中间材料生产的中间材料, O_p 表示中间材料生产所需的原始材料; E_{sl} 表示经济行为对于中间材料的最终使用量; E_{sf} 表示最终为分类需求所使用的中间材料的量; E_{pl} 表示经济行为最终使用的原材料的量; E_{sp} 表示最终分类需求对于原材料的使用量; M_s 表示进口的中间材料; M_p 表示进口的原材料; X_s 表示总产量 (实物形式); X_p 表示对于原材料总的需求。

利用物质守恒原则建立如下模型

$$\begin{cases} O_s + E_{sl} + E_{sf} - M_s = X_s \\ O_p + E_{pl} + E_{sp} - M_p = X_p \\ O_s + O_p = X_s \end{cases} \quad (2.7)$$

假设

$$C_{os} = O_s (X_s)^{-1} \quad (2.8)$$

$$C_{op} = O_p (X_s)^{-1} \quad (2.9)$$

$$C_{est} = E_{sl} (X)^{-1} \quad (2.10)$$

$$C_{epi} = E_{pi}(X)^{-1} \quad (2.11)$$

则 C_{os} 表示每单位中间材料的产出所需中间材料(实物型数据,质量或热量单位);
 C_{op} 表示每单位中间材料生产所需的原材料(实物型); C_{esi} 表示每货币单位经济
 活动产出最终消耗的中间材料; C_{epi} 表示每货币单位经济活动产出最终消耗的原
 材料。则有

$$\begin{cases} C_{os}X_s + E_{sl} + E_{sF} - M_s = X_s \\ C_{op}X_s + E_{pl} + E_{pF} - M_p = X_p \end{cases} \quad (2.12)$$

因此

$$\begin{cases} X_s = (I - C_{os})^{-1}(E_{sl} + E_{sF} - M_s) \\ X_p = C_{op}(I - C_{os})^{-1}(E_{sl} + E_{sF} - M_s) + E_{pl} + E_{pF} - M_p \end{cases}$$

从而有

$$\begin{aligned} X_p &= C_{op}(I - C_{os})^{-1}(C_{esi}X + E_{sF} - M_s) + C_{epi}X + E_{pF} - M_p \\ &= C_{op}(I - C_{os})^{-1}(C_{esi}(I - A)^{-1}(F - M)) + C_{op}(I - C_{os})^{-1}(E_{sF} - M_s) \\ &\quad + C_{epi}(I - A)^{-1}(F - M) + E_{pF} - M_p \\ &= (C_{op}(I - C_{os})^{-1}C_{esi} + C_{epi})(I - A)^{-1}(F - M) + C_{op}(I - C_{os})^{-1}(E_{sF} - M_s) \\ &\quad + E_{pF} - M_p \end{aligned} \quad (2.13)$$

从最后这个等式可以计算出经济活动最终需求的初始投入的数量。

利用该模型, 可以计算出

- (1) 每一经济活动对于原材料的需求;
- (2) 每一经济活动单位货币产出消耗的直接原材料;
- (3) 每一货币单位最终使用中的全部原材料, 即最终使用的产品的物质强度。

模型中 $C_{op}(I - C_{os})^{-1}E_{sF}$ 代表了直接为最终分类需求(出口或固定资产)使用的
 中间材料所消耗的原始材料的总和, $C_{epi}(I - A)^{-1}F$ 满足最终全部产品或服务的经
 济活动所需的原始材料的总和, $C_{op}(I - C_{os})^{-1}C_{esi}(I - A)^{-1}F$ 指的是为满足最终产
 品或服务活动的中间材料而需要的原始材料的总和。

下面是每一最终需求类别的原始投入的总数

$$(C_{op}(I - C_{os})^{-1}C_{esi} + C_{epi})(I - A)^{-1}F + C_{op}(I - C_{os})^{-1}E_{sF} + E_{pF} \quad (2.14)$$

其中 E_{pF} 代表了各类最终分类需求对于原始材料的直接使用。

由于循环经济本质上要求在经济活动中减少物质总量的需求,尤其是减少自然资源的投入。那末,如何减少自然资源初始投入?下一章引入的基于投入产出的物质流管理模型将研究这一问题。

第三章 物质流管理模型

把投入产出方法应用到物质流管理中建立的模型有静态投入产出物质流管理模型^[26]、动态投入产出物质流管理模型^[33]和动态投入产出反馈控制模型^[33]。

3.1 静态投入产出物质流管理模型

3.1.1 模型描述

下面把投入产出法应用到物质流分析中，主要思想是：首先利用系统分析的方法来进行物质流的分析，然后借助于投入产出表来表示物质流的流向和流量^{[26][36]}。

系统分析的方法主要包括以下三个方面：

- (1) 研究包括那些商品和过程；
- (2) 系统的边界；
- (3) 选择的时间跨度，一般为一年。

在研究过程中，物质流分析过程一般包括以下步骤：

- (1) 确定系统中包括的商品和过程数；
- (2) 确定单位时间内所有商品的质量流 (Mass Fluxes)；
- (3) 确定这些商品中所选择的元素或成分的浓度 (concentration)；
- (4) 计算质量流和元素流的质量；
- (5) 解释结果，并且可以在假设的条件下分析出未来可能出现的结果，为环境政策的制定提供参考。

在物质流分析过程中，可以是商品中的元素或者是商品本身。如果分析的是商品某种元素时，需要计算元素在商品中的“浓度”。

假设某一循环经济系统，由 n 个过程构成，这些过程包括生产过程、消费过程以及资源化过程（也可以称为物质还原过程）三类过程。如图 3.1 所示的是一简化的区域循环经济系统。

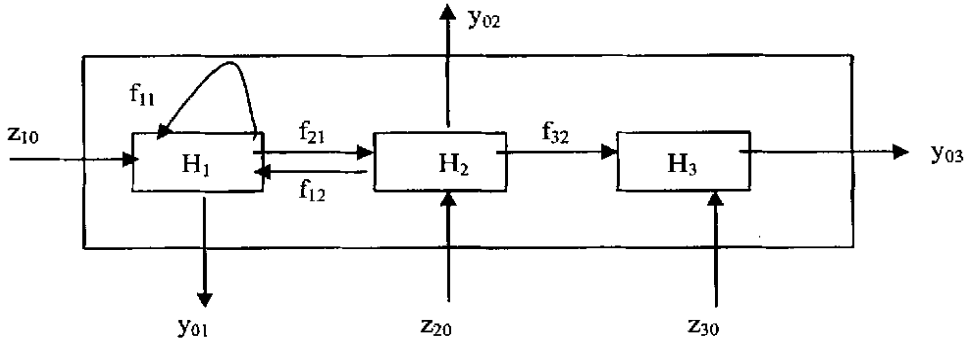


图 3.1 简化的区域循环经济系统

图 3.1 中 H_i 表示过程 i ， f_{ij} 表示从过程 H_j 流向 H_i 的流， y_{oi} 表示由过程 H_j 流出系统的流，指废物的排放； z_{io} 表示由系统外流入 H_i 的流，指自然资源的流入。

相应的投入产出矩阵 P ，如表 3.1 所示。这里的矩阵 P 是系统的一个给定物质流的表示。

表 3.1 循环经济系统物质流投入产出分析矩阵

	H_1	H_2	...	H_n	z_{1o}	z_{2o}	...	z_{no}
H_1	f_{11}	f_{12}	...	f_{1n}	z_{1o}	0	...	0
H_2	f_{21}	f_{22}	...	f_{2n}	0	z_{2o}	...	0
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
H_n	f_{n1}	f_{n2}	...	f_{nn}	0	0	...	z_{no}
y_{o1}	y_{o1}	0	...	0	0			
y_{o2}	0	y_{o2}	...	0				
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots				
y_{on}	0	0	...	y_{on}				

用 x_j 表示通过 H_j 的总流量，即通过 H_j 的入流或出流的和，则

$$x_j = \sum_{i=1}^n f_{ij} + y_{oj} \tag{3.1}$$

如果用 a_{ij} 表示从第 j 个过程流向第 i 个过程的流占第 i 个过程的总流量 x_i 的比例，则有

$$f_{ij} = a_{ij} \cdot x_i, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (3.2)$$

将 (3.2) 代入 (3.1), 则得到

$$x_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot x_i + y_{oj}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (3.3)$$

将等式 (3.3) 转化为矩阵形式:

$$x = A'x + y \quad (3.4)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, 0 \leq a_{ij} \leq 1, 0 \leq \sum_{i=1}^n a_{ij} \leq 1$$

称为系统过程流转化系数矩阵。

由 $x = A'x + y$ 可得

$$x = (I - A')^{-1} y$$

令

$$N' = (I - A')^{-1} \quad (3.5)$$

N 称为该系统的结构矩阵, 它反映了组成系统的过程之间的直接和间接关系, 也称为传递闭矩阵 (Transitive closure matrix), 则

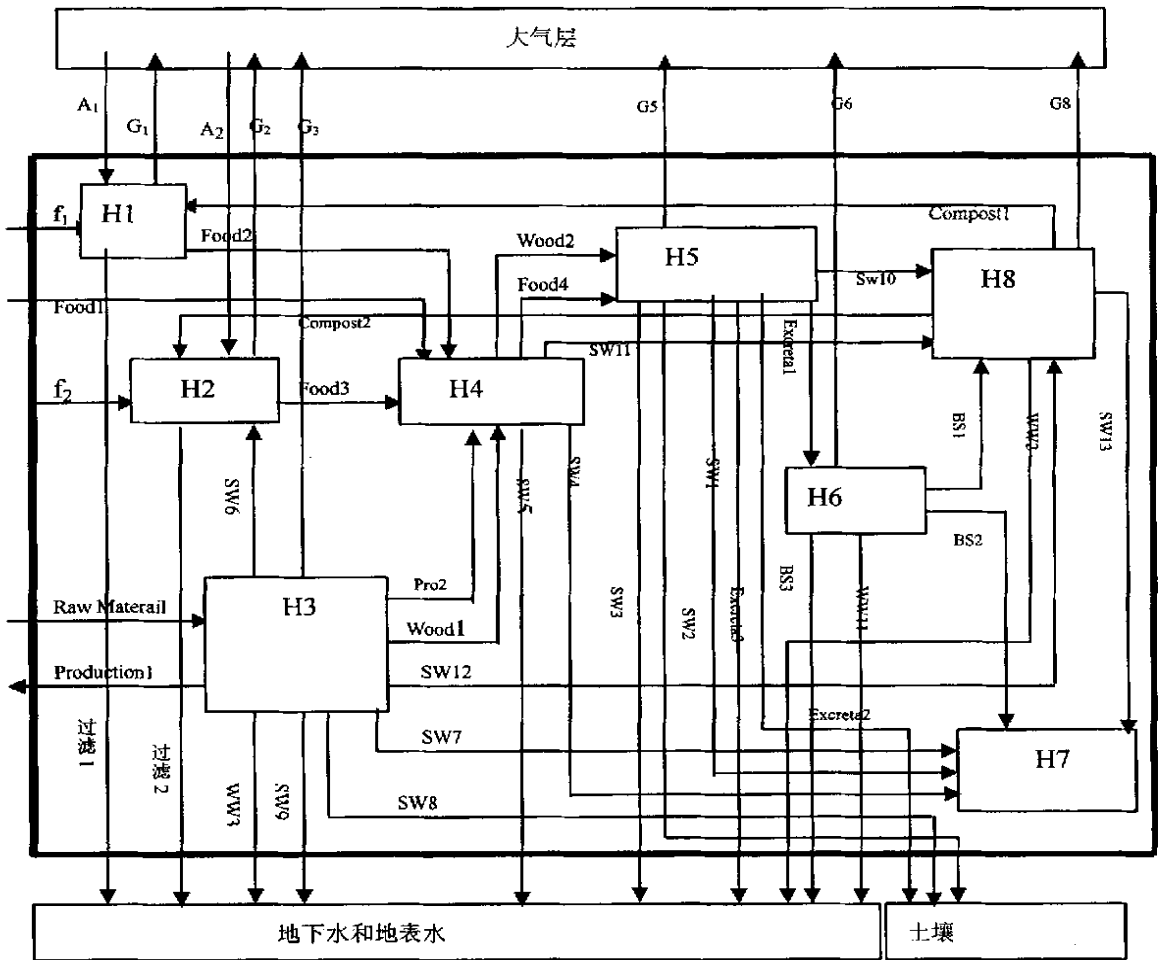
$$\lim_{l \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^l (A')^k = I + A + A^2 + \dots + A^k + \dots = (I - A')^{-1} = N \quad (3.6)$$

这里 A^k 代表系统内路径长度为 k 的所有流的集合。在这个数列中的第一项是单位矩阵, 代表系统中所有最初流; A 代表所有的直接流; A^2 代表长度为 2 的所有间接流; 无穷长度的间接流是无穷项。所以, (3.6) 式中的所有项的和代表所有的直接流和间接流, 通过矩阵 N , 系统内过程间的相互关系都被考虑进来。

基于投入产出法的物质流分析模型, 将经济系统内部的相互关系都考虑进来, 同时考虑到进出系统的物质流, 为物质流的优化提供了有力的分析工具。

3.1.2 应用实例

文献[36]利用物质流分析的方法，对加纳城市库马西的有机废物流进行研究，图 3.2 就是库马西市的有机物质流系统分析图。



图中符号意义：f—化肥；sw—城市固体垃圾；ww—废水；BS—生理废物；H1—城郊农业生产；H2—城市农业生产；H3—工业生产活动；H4—运输及市场销售过程；H5—家居生活；H6—家庭粪便处理过程；H7—卫生填埋；H8—堆肥过程。

图 3.2 库马西有机质物质流系统分析框图

为了说明问题简单方便，这里只就氮元素的状况进行了分析研究，其它物质或总体质量流的研究是同样的方法可以进行。对于氮元素的状况，利用投入产出

表分别表示在采取堆肥前后对于环境的影响的变化。

在对垃圾没有堆肥处理，而只是将固体垃圾直接填埋的情况下，氮元素一年内流状况及其对于环境的影响如表 3.2 所示。

表 3.2 传统的填埋方式下库马西地区一年内氮元素流状况及对于环境的影响

		系统内的过程关系								输出产品	大气层	地表地下水	土壤
		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8				
过程	H1	0	0	0	3200	0	0	0	-	0	<10	50	0
	H2	0	0	0	680	0	0	0	-	0	<10	110	0
	H3	0	7	0	273	0	0	1900	-	1700	560	230	150
	H4	0	0	0	0	4980	0	530	-	0	0	<10	0
	H5	0	0	0	0	0	130	1010	-	0	1000	3140	1470
	H6	0	0	0	0	0	0	15	-	0	30	90	0
	H7	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0
	H8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
外部资源	F1	120											
	F2		13										
	AIR	400	85										
	R			3200									
	food1				1150								

与此对照的是，加入堆肥处理这一过程后，氮元素流的变化情况，这里有两种假设的情景。

情景 1 (现实情况):

将原来过程 H_3 工业生产产生的固体垃圾 SW_7 、过程 H_4 在运输和销售中产生的固体垃圾 SW_4 、过程 H_5 居家生活产生的固体垃圾 SW_1 以及过程 H_6 家庭废物处理产生的物质 BS_2 都进行填埋的垃圾进行堆肥处理。此情景下氮元素一年内流状况及其对于环境的影响如表 3.3 所示。

情景 2 (优化情况):

除了上述 SW_1 、 SW_4 、 SW_7 、 BS_2 以外，还将过程 H_5 中产生的 SW_2 与 SW_3 、过程 H_4 中产生的 SW_5 、过程 H_3 中产生的 SW_8 全部用来堆肥。此情景下氮元素一年内流状况及其对于环境的影响如表 3.4 所示。

表 3.3 情景 1 下在库马西地区一年内氮元素流状况及对于环境的影响

		系统内的过程关系								输出产品	大气层	地表地下水	土壤
		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8				
过程	H1	0	0	0	3200	0	0	0	0	0	<10	50	0
	H2	0	0	0	680	0	0	0	0	0	<10	110	0
	H3	0	7	0	273	0	0	0	220	1700	560	230	130
	H4	0	0	0	0	4980	0	0	530	0	0	<10	0
	H5	0	0	0	0	0	130	0	1010	0	1000	3140	1470
	H6	0	0	0	0	0	0	0	15	0	30	90	0
	H7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	H8	530	700	0	0	0	0	<10	0	0	530	18	0
外部资源	F1	120											
	F2		13										
	AIR	400	85										
	R			3200									
	food1				1150								

表 3.4 情景 2 下库马西地区一年内氮元素流的状况及对于环境的影响

		系统内的过程关系								输出产品	大气层	地表地下水	土壤
		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8				
过程	H1	0	0	0	3200	0	0	0	0	0	<10	50	0
	H2	0	0	0	680	0	0	0	0	0	<10	110	0
	H3	0	7	0	273	0	0	0	370	1700	560	220	0
	H4	0	0	0	0	4980	0	0	530	0	0	<10	0
	H5	0	0	0	0	0	130	0	2300	0	1000	2500	830
	H6	0	0	0	0	0	0	0	15	0	30	90	0
	H7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	H8	1500	700	0	0	0	0	<10	0	0	960	32	0
外部资源	F1	120											
	F2		13										
	AIR	400	85										
	R			3200									
	food1				1150								

对照表 3.2 和表 3.3、3.4，我们可以看到在添加了堆肥过程后，卫生填埋的量大大减少了，由原来的 3455 千克减少为少于 10 千克。但是，对比来看对于大气层的排放却由原来的约 1960 千克分别增加到情形 1 的 2130 千克和情形 2 的 2570 千克了；对于地表、地下水的排放由原来的约 3540 千克增加到情形 1 的约

3648 千克, 而情形 2 则减少到 3012 千克; 对于土壤的排放由原来的 1620 千克减少到情形 1 的 1600 千克, 情形 2 则减少到 830 千克, 综合比较可知, 情形 2 的方案比较合理。

管理者可以根据具体的物质元素和对于环境的管理目标进行其他情景的假设, 比如对于重金属元素就应尽量避免过多进入地表地下水和土壤。可以准备多个侧重点不同的政策措施, 在情景中预测将来对于环境的影响, 根据具体环境管理目标进行取舍。

在本例中, 只是在分析原有的物质流基础上, 作了调整规划, 即情景 1 和情景 2, 清晰地展示了在不同情形下, 有机质垃圾管理系统对于环境的影响。而且通过表中转化系数可以发现, 家居生活环节是主要环节, 其物质的转化系数很高, 而且对于环境的排放方面在三种情况下都很高。所以决策者主要研究如何有效地进行家庭资源回收的策略的制定, 抓住问题的重点, 有利于整个地区有机质废物的回收和环境的保护。

但美中不足的是, 上述方法只是静态的规划方案的设计, 但是各个过程的流是随时间变化的, 如果能够考虑到流在时间上的变化, 进行物质流的动态规划, 将更加能够实现物质流的优化管理。

同时, 在本例中对于环境的影响, 是利用氮元素的排放量来计算的, 而不同的过程排放的氮化物是不同的, 对于环境的影响也是不同的, 因此, 如果利用生命周期评价法来评价, 那末得出的数据就更具有可比性, 模型将更为完善。

因此我们将在下一节中研究动态物质流管理模型。

3.2 动态投入产出物质流管理模型

在上一节中建立的物质流分析模型是静态模型, 关注的是流的路径、现状等问题, 对于流的时间上的变化没有关注。如果考虑到流在时间方面的表现以及系统内某一过程或是某些过程的积累的情况, 就要建立动态的投入产出模型^[33]。

用 ϕ_k 表示第 k 个过程的积累量规模, 假设系统每一过程下一时间上的积累量的变化与本时间段的流量的变化有关。 $\dot{\phi}_k$ 表示第 k 个过程的积累变化率, 则

$$\dot{\phi}_k = \sum_{i=1}^n b_{ik} \cdot \dot{x}_i, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.7)$$

其中 b_{ik} 表示为第 k 个过程单位积累量对于第 i 个过程的流量变化的比率，

$0 \leq b_{ik} < 1$ 。定义

$$\dot{\phi}_{k-} = \begin{cases} \dot{\phi}_k & \text{if } \dot{\phi}_k < 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3.8)$$

表示过程积累量规模的下降，在过程中通过降低存贮规模使得流量上升，故将其看作为输入流；定义

$$\dot{\phi}_{k+} = \begin{cases} \dot{\phi}_k & \text{if } \dot{\phi}_k > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3.9)$$

表示为过程积累量规模的增长，因为在过程中通过将流转化为存贮量，从而使得流量下降，所以看作是输出流。

考虑了过程中积累的循环经济物质流分析图，如图 3.3 所示。

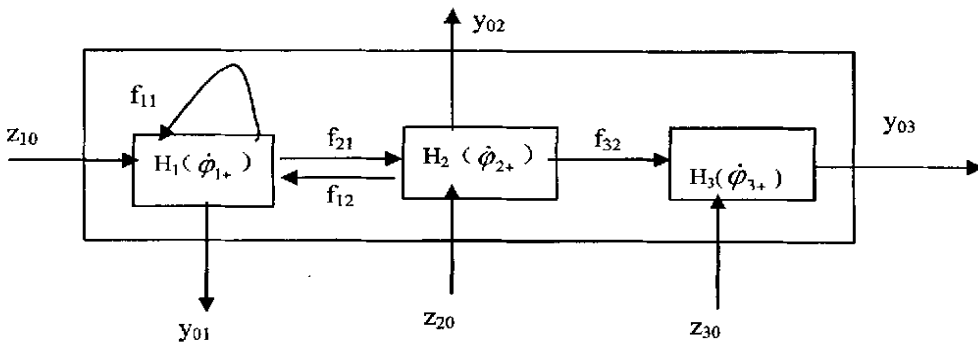


图 3.3 过程中具有积累的循环经济物质流分析图

考虑了积累量的投入产出表如表 3.5 所示。

表 3.5 考虑了积累量的循环经济物质流投入产出表

	H_1	H_2	...	H_n	Z_{1o}	Z_{2o}	...	Z_{no}	$\dot{\phi}_{1-}$	$\dot{\phi}_{2-}$...	$\dot{\phi}_{n-}$
H_1	f_{11}	f_{12}	...	f_{1n}	z_{1o}	0	...	0	$-\dot{\phi}_{1-}$	0	...	0
H_2	f_{21}	f_{22}	...	f_{2n}	0	z_{2o}	...	0	0	$-\dot{\phi}_{2-}$...	0
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
H_n	f_{n1}	f_{n2}	...	f_{nn}	0	0	...	z_{no}	0	0	...	$-\dot{\phi}_{n-}$
y_{o1}	y_{o1}	0	...	0	0							
y_{o2}	0	y_{o2}	...	0								
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots								
y_{on}	0	0	...	y_{on}								
$\dot{\phi}_{1+}$	$\dot{\phi}_{1+}$	0	...	0								
$\dot{\phi}_{2+}$	0	$\dot{\phi}_{2+}$	...	0							
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots								
ϕ_{n+}	0	0	...	$\dot{\phi}_{n+}$								

下面考虑在输出流基础上建立的动态投入产出模型，则有

$$x_k = \sum_{i=1}^n a_{ik} \cdot x_i + y_{ok} + \dot{\phi}_{k+} \tag{3.10}$$

将 (3.9) 式代入 (3.10)，得到

$$x_k = \sum_{i=1}^n a_{ik} \cdot x_i + y_{ok} + \sum_{i=1}^n b_{ik} \cdot \dot{x}_i \tag{3.11}$$

把 (3.11) 转化为矩阵形式，得

$$x = A'x + B'\dot{x} + y \tag{3.12}$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}, \quad 0 \leq b_{ij} < 1, 0 \leq \sum_{i=1}^n b_{ij} \leq 1 \tag{3.13}$$

称为系统状态增长系数矩阵。

通过 (3.13) 式可以建立以下具有一年时滞的动态投入产出模型：

$$x(t) = A'(t)x(t) + B'(t)(x(t+1) - x(t)) + y(t) \tag{3.14}$$

$$x(t+1) = B'(t)^{-1}[I - A'(t) + B'(t)]x(t) - B'(t)^{-1}y(t) \tag{3.15}$$

由于矩阵 $B'(t)$ 往往是奇异矩阵, 不能直接利用 (3.15) 计算下一时段的投入产出流的情况, 所以文献[33]在研究中等层次循环系统(生态工业系统)的投入产出情况时, 以 (3.14) 式为基础, 利用了反馈控制来调控系统的输出流和在系统内的积累。

3.3 动态投入产出反馈控制模型

3.3.1 模型描述

在建立循环经济的发展政策时, 必须要考虑到外界某些因素对于循环经济的扰动作用, 比如通过生产过程输出流需求的适度增长来刺激实际输出流的相应增长, 从而促进经济系统向前发展; 同时希望稳定的增长能够带来消费过程稳定的输出流的降低, 从而使得经济系统纳入生态良性循环的轨道。为达到上述两个目标, 就要对于生产企业的实际生产问题实现以下两个控制问题:

(1) 在 n 个过程的输出流需求量不断变化的情况下, 如何调控输出流水平, 使得过程的最终端输出流既满足社会的需求又实现供求的动态平衡;

(2) 在需求得以满足的情况下, 如何调控输出流, 使得系统对于需求的变化具有稳定性, 从而使得输出水平呈现稳定的变化。

针对这些问题, 建立如下循环经济系统的动态投入产出反馈控制模型^[33]。设第 i 个过程的输出流的社会需求量为 $d_i(t)$, 需求变化率为 $\alpha_i(t), i = 1, 2, \dots, n$, $\alpha_i(t)$ 可正可负, 也可以某种函数形式。设

$$d_i(t+1) = (1 + \alpha_i(t))d_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.16)$$

则有

$$d(t+1) = (I + D)d(t) \quad (3.17)$$

其中 $d(t) = (d_1(t), d_2(t) \dots d_n(t))'$ 为第 t 年输出流的社会需求量;

$D = \text{diag}(\alpha_1(t), \alpha_2(t) \dots \alpha_n(t))'$ 为对角阵。

为了解决上述的两个控制问题, 需要建立相应的状态空间模型。为此, 选取

状态向量为 $x(t)$ ，外部干扰变量为 $d(t)$ ，控制向量和输出向量分别为

$$\mu(t) = x(t+1) - x(t) \tag{3.18}$$

$$y^*(t) = d(t) - y(t) \tag{3.19}$$

$\mu(t)$ 的意义是总流量的增量向量，有较高的实际调控性； $y^*(t)$ 的意义是经济系统输出流的社会需求与实际过程提供的最终输出量之间的向量差。

将式 (3.14) 代入式 (3.18)，得

$$y^*(t) = d(t) - (I - A'(t))x(t) + B'(t)\mu(t) \tag{3.20}$$

将式 (3.17) (3.18) (3.20) 合在一起，便是需要的动态投入产出反馈控制模型：

$$\begin{cases} x(t+1) = x(t) + \mu(t) \\ d(t+1) = (I + D)d(t) \\ y^*(t) = -(I - A'(t))x(t) + d(t) + B'(t)\mu(t) \end{cases} \tag{3.21}$$

式 (3.17) 为外部干扰变量的状态方程，式 (3.18) 为被控系统的状态方程，式 (3.20) 为输出方程。利用文献[36]中的有关定理可以证明 (3.21) 完全可控，且是完全可观测的。其反馈控制系统如图 3.4 所示。

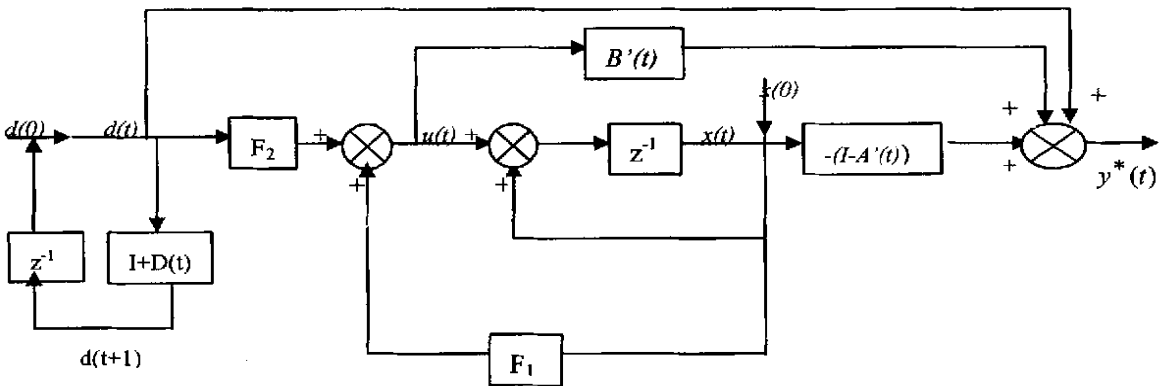


图 3.4 动态投入产出反馈控制模型

图中 F_1 、 F_2 分别是纯增益反馈控制器和状态观测器，其构造过程可以利用文献[36]中的方法，通过 MATLAB 来实现。

3.3.2 应用实例

在生态工业系统中，将工业系统的结构划分为三个部分，即资源生产、加工生产、还原生产，有这三部分构成生态工业链。资源生产部门相当于生态系统的初级生产者，主要承担不可更新资源、可更新资源的生产和永续资源的开发；加工生产部门相当于生态系统的消费者，将资源生产部门提供的初级资源转化为满足人类生产生活需要的产品；还原部门则从事的是将副产品或废弃物资源化或是加工转化为新的产品。如图 3.5 所示是一个简化的生态工业系统^[33]，所有流的单位是万吨/年。

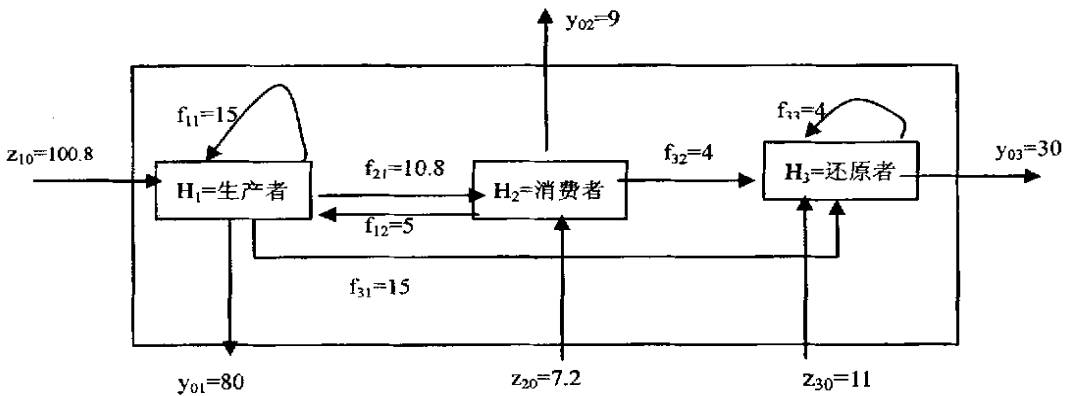


图 3.5 简化的生态工业系统

在图 3.5 中的生态工业系统中包括三个过程。 H_1 表示生态工业系统中的环氧树脂的总的生产； H_2 表示生态工业系统中的环氧树脂的总的消费； H_3 表示生态工业系统中的环氧树脂生产和消费中可回收的废物的再还原（这里主要考虑苯）。系统涉及到的流包括：

(1) 输入流。 z_{10} ：100.8 万吨/年代表生产环氧树脂的原材料； z_{20} ：7.2 万吨/年代表从系统外进口的作为消费的环氧树脂； z_{30} ：11 万吨/年代表从系统外收入的作为回收苯生产的原材料。

(2) 内部流。 f_{11} ：15 万吨/年代表环氧树脂生产中实施清洁生产回收到的原材料； f_{12} ：5 万吨/年代表回收环氧树脂的二次生产； f_{21} ：10.8 万吨/年代表

输出给消费过程的环氧树脂； f_{31} ：15 万吨/年代表环氧树脂生产过程中可回收的废物苯； f_{32} ：4 万吨/年代表环氧树脂消费中可回收废物苯； f_{33} ：4 万吨/年代表苯还原生产中实施清洁生产回收得到的原材料。

(3) 输出流。 y_{o1} ：80 万吨/年代表环氧树脂的输出； y_{o2} ：9 万吨/年代表消费环氧树脂后产生的不可回收的废物； y_{o3} ：30 万吨/年代表苯的输出。

由 (3.2) 式，即 $f_{ij} = a_{ij} \cdot x_i$ 可得，过程流转化系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0.124 & 0.041 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 \\ 0.441 & 0.118 & 0.118 \end{bmatrix}$$

系统状态增长系数矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$$

假设总流量保持不变，仍然为 $x(0) = (120.8, 18, 34)'$ 。假设此时社会需求量 $d(0) = (75, 9, 28)'$ ，为简单起见，假设每年的过程流转化系数矩阵 A 和系统状态增长系数矩阵 B 都不变。利用上面建立的模型 (3.21)，确立了这个简化的生态工业系统，如图 3.6 所示，所有流的单位是万吨/年，构成的投入产出矩阵如表 3.6 所示。

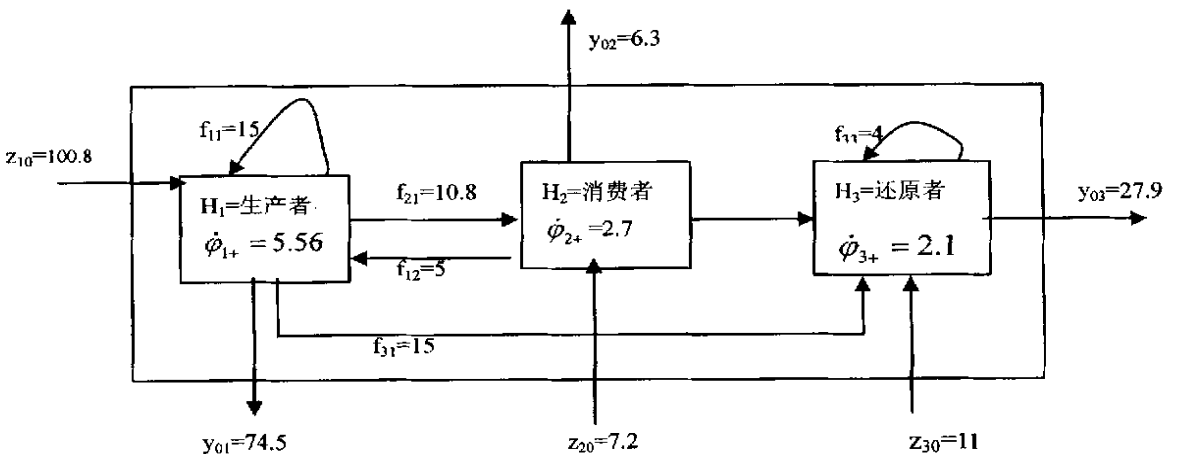


图 3.6 具有积累的生态工业系统

表 3.6 具有积累的生态工业系统投入产出表

P	H_1	H_2	H_3	Z_{1o}	Z_{2o}	Z_{3o}	$\dot{\phi}_{1-}$	$\dot{\phi}_{2-}$	$\dot{\phi}_{3-}$
H_1	15	5	0	100.8	0	0	0	0	0
H_2	10.8	0	0	0	7.2	0	0	0	0
H_3	15	4	4	0	0	11	0	0	0
y_{o1}	75.4	0	0	0					
y_{o2}	0	6.3	0						
y_{o3}	0	0	21.9						
$\dot{\phi}_{1+}$	5.56	0	0						
$\dot{\phi}_{2+}$	0	2.7	0						
$\dot{\phi}_{3+}$	0	0	2.1						

以表 3.6 中的数据作为初始值进行计算，假设每年的变化率为 $\alpha_1 = 0.1$ ， $\alpha_2 = -0.05$ ， $\alpha_3 = 0.08$ ，进行为期五年的预测规划。利用 MATLAB 进行 SIMULINK 动态仿真，得到的结果如表 3.7、3.8 所示^[33]。

从结果中可以看出，生态工业系统的动态投入产出反馈控制模型在 3 个过程的输出流需求量不断变化的情况下，能够较好调控输出流水平，使得过程输出流既满足社会的需求又能够实现供求的动态平衡，并且输出水平变化稳定。

表 3.7 三个过程的年控制值 μ (单位: 万吨/年)

过程 \ 年份	1	2	3	4	5
H_1	12.939	11.987	13.139	14.514	15.962
H_2	3.0319	0.68031	0.80464	0.93741	1.0796
H_3	2.6617	2.9753	3.2165	3.4775	3.7598

表 3.8 三个过程的年总流量仿真结果 (单位: 万吨/年)

过程 \ 年份	1	2	3	4	5
H_1	120.8	133.19	145.18	158.37	172.89
H_2	18	21.032	21.712	22.517	23.454
H_3	34	36.662	39.637	42.853	46.331

第四章 改进的物质流管理模型

由于列氏动态投入产出模型中的矩阵 $B'(t)$ 常常是奇异矩阵，所以文献[33]建立了动态投入产出反馈控制模型。但是，该动态投入产出反馈模型只是对于系统的积累和流出系统的物质流进行了调控，没有涉及到进入系统的物质流，而循环经济三原则中首要原则就是减少系统对于资源的投入，尤其是不可再生资源的利用。同时，系统内各过程物质流流量的变化从根本原因上来说，是投入引起的，所以，本章对于原有的动态投入产出模型进行改进，建立在投入方向的动态投入产出模型。

4.1 改进的动态投入产出物质流管理模型

4.1.1 模型描述

在投入产出表中，各个产业的产品一部分作为部门之间的交换产品，一些作为最终产品，最终产品中一部分以产品的形式输出经济系统边界，另一部分作为投资而在系统内形成积累，这部分投资与系统外部的投资共同影响某些产业的增产，实际上是投资决定了某些产业的增产，所以要在投入方向上建立动态的投入产出方程^[37]。

在以投入产出为基础的物质流管理中，同样存在这样的情况。在循环经济系统中，某一个过程的输出流一部分输出系统边界，一部分在系统内部形成积累。例如在循环经济系统中，生产者通过清洁生产将部分副产品或废弃物在自身生产过程中消纳，或者将其输送给还原生产者，从而增加了系统中某种或某些物质的积累；消费者延长使用时间，用后返回到生产者（原级资源化—纸张、玻璃等）或输送到还原者（次级资源化过程）；还原生产者将废弃物转化为资源或新的产品，再回到生产或消费过程中，减少了向外界环境的流失，从而增加了系统物质的积累。在这里，生产、消费、还原过程减少了物质作为废物而流失的量，增加整个系统物质存量，将这部分物质投入生产或消费，在不改变外界投入的情况下，系统内各过程的流量得以增加，在这样系统内物质不断的循环利用时，达到一定量时，系统对于外界的物质需求大大减少，实现了循环经济的减量化原则，而且

系统内物质的循环利用,增加了物质的利用效率,所以说系统的存量和系统外界的输入流共同影响着系统内部过程中物质流量的变化。

考虑到循环经济本质的要求,只是在输出方向建立动态管理模型是不够的。事实上,是投入从根本上影响着系统内过程物质流的增加。为此,在投入方向上建立以下动态投入产出方程

$$x(t) = \tilde{A}'(t)x(t) + \tilde{B}'(t)(x(t+1) - x(t)) + z(t) \quad (4.1)$$

其中

$$\tilde{A}'(t) = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n a_{1,j}(t) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^n a_{2,j}(t) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \sum_{j=1}^n a_{n,j}(t) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\tilde{B}'(t) = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n b_{1,j}(t) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^n b_{2,j}(t) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \sum_{j=1}^n b_{n,j}(t) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$z(t) = [z_{1,o}(t), z_{2,o}(t), \cdots, z_{n,o}(t)]$ 是从系统外输入流。这里, $A(t)$ 仍是系统过程流转化系数矩阵, $\tilde{A}'(t)$ 中的元素是系统过程流转化矩阵 $A(t)$ 中每行元素之和,

即 $\tilde{a}_{ii}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t)$ 表示各过程流向第 i 个过程的流之和占第 i 过程总流的比例;

$B(t)$ 仿照原来的形式,但意义发生变化, b_{ij} 表示 j 过程减少单位存储量(作为投资)对于 i 过程流量变化比例。 $\tilde{B}'(t)$ 中的元素是 $B(t)$ 的每行元素之和,即

$\tilde{b}_{ii}(t) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(t)$, 表示各过程对于 i 过程的“投资”比之和。显然,这里的 $\tilde{A}'(t)$ 与

$\tilde{B}'(t)$ 都是非奇异矩阵,所以式(4.1)有唯一解。

$$x(t+1) = [\tilde{B}'(t)^{-1}(I - \tilde{A}'(t)) + I]x(t) - \tilde{B}'(t)^{-1}z(t) \quad (4.4)$$

$$y(t+1) = (I - A')^{-1} x(t+1) \quad (4.5)$$

对于模型中的参数讨论如下。

由于矩阵 A 和 B 都体现了技术水平与管理水平, 矩阵 A 反映的是经济系统的结构构成, 在一段时间内相对比较稳定, 可以从投入产出表获得, 可以采用改进的 RAS 方法来修正^[38]。

对于矩阵 B , 它是随着生产中的清洁生产水平以及物质的回收利用技术的提高而适当的调整, 是一个变化的矩阵。调整方法可以是专家调查法或者是试算分析相结合的办法。

在上述 (4.1) 模型中, $\Delta x(t)$ 作为“部门投资”加入到投入方向上。在这里明确 $\delta_y(t)y(t)$ 是通过提高资源的利用效率而增加的物质在系统内的积累量, 用 $\delta_y(t)$ 来表示输出流中通过再利用、资源化转化为系统内积累量占总的输出流的比率, $\delta_y(t)$ ($0 < \delta_{y_{ii}}(t) < 1$) 是一主对角矩阵。

输出方向仍然满足质量守恒的原则, 只是将输出流分成两部分, 输出外界的 $y(t)$ 和在系统内部形成的积累 $\delta_y(t)y(t)$ 。

$$x(t) = A'(t)x(t) + (I + \delta_y(t))y(t) \quad (4.6)$$

整理得:

$$y(t) = (I + \delta_y(t))^{-1} (I - A'(t))x(t) \quad (4.7)$$

将 t 时刻的积累列入 $t+1$ 时刻的投入, 从而在投入方向建立的动态方程为

$$x(t+1) = \tilde{A}'(t+1)x(t+1) + \tilde{B}'(t+1)\delta_y(t)y(t) + z(t+1) \quad (4.8)$$

整理得

$$x(t+1) = (I - \tilde{A}'(t+1))^{-1} (\tilde{B}'(t+1)\delta_y(t)y(t) + z(t+1)) \quad (4.9)$$

将 (4.7) 代入 (4.9), 得

$$x(t+1) = (I - \tilde{A}'(t+1))^{-1} \{ \tilde{B}'(t+1)\delta_y(t)(I + \delta_y(t))^{-1} (I - A'(t))x(t) + z(t+1) \} \quad (4.10)$$

令

$$W = (I + \delta_y(t))^{-1} (I - A'(t)), \quad V = (I - \tilde{A}'(t+1))^{-1}, \quad G = V\tilde{B}'(t+1)\delta_y(t)W$$

则 $y(t) = Wx(t)$, 从而

$$x(t+1) = Gx(t) + Vz(t+1) \quad (4.11)$$

假设 $z(t) = \delta_z(t)z(0)$, $\delta_z(t)$ 是一主对角矩阵, $0 < \delta_{zii}(t) \leq 1$, 则 (4.11) 改写为

$$x(t+1) = Gx(t) + V\delta_z(t+1)z(0) \quad (4.12)$$

利用递推法得到

$$x(t) = G^t x(0) + V\{G^{t-1}\delta_z(1) + G^{t-2}\delta_z(2) + \cdots + I\delta_z(t)\}z(0) \quad (4.13)$$

借助于 MATLAB 便可以计算出方程的解。

4.1.2 应用实例

以 3.3.2 节中的例子为例, 有

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0.124 & 0.041 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 \\ 0.441 & 0.118 & 0.118 \end{bmatrix}$$

由于 $B(t)$ 的意义发生变化, 这里, 稍作改动, 有

$$B(t) = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.15 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$$

则有

$$\tilde{A}'(t) = \begin{bmatrix} 0.165 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0.677 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}'(t) = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix}$$

假设

$$\delta_y(t) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.45 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 \end{bmatrix}, \quad \delta_z(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} 0.7964 & -0.5455 & -0.4009 \\ -0.0283 & 0.6897 & -0.0814 \\ 0 & 0 & 0.6785 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} 1.1976 & 0 & 0 \\ 0 & 2.5000 & 0 \\ 0 & 0 & 3.0960 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.0715 & -0.0490 & -0.0360 \\ -0.0048 & 0.1164 & -0.0137 \\ 0 & 0 & 0.2521 \end{bmatrix}$$

利用递推法计算得到:

$$x_t = \begin{bmatrix} 128.9196 + 4.8989 \times 0.0668^t - 10.1749 \times 0.1211^t - 2.8418 \times 0.2521^t \\ 18.358 - 13.1416 \times 0.0668^t + 12.5151 \times 0.1211^t + 0.2651 \times 0.2521^t \\ 45.5662 - 11.5647 \times 0.2521^t \end{bmatrix}$$

其中 0.0668、0.1211、0.2521 为矩阵 G 的特征值。

$$y_t = \begin{bmatrix} 74.3898 + 11.0702 \times 0.0668^t - 14.9303 \times 0.1211^t + 2.2285 \times 0.2521^t \\ 5.3040 - 9.2024 \times 0.0668^t + 8.9196 \times 0.1211^t + 1.2046 \times 0.2521^t \\ 30.9167 - 7.8466 \times 0.2521^t \end{bmatrix}$$

取 $t=1$, 则

$$x_1 = [127.2982 \quad 19.0626 \quad 42.6507]'$$

$$y_1 = [73.8830 \quad 6.0731 \quad 28.938]'$$

由此可知, 按现有的清洁生产和回收利用技术, 一年后的系统积累为

$$\delta, y_1 = [7.3883 \quad 2.7329 \quad 8.6814]'$$

其中用于“投资”的量为

$$\tilde{B}\delta, y_1 = [5.5412 \quad 0.4099 \quad 3.4726]'$$

这样的动态投入产出模型比建立在输出流基础上的动态模型, 更加全面地刻画了循环经济的经济特征, 清楚地描述了循环经济系统中初始资源的投入、物质在系统中的积累以及系统对于外部的输出情况, 所以, 该模型对于循环经济系统进行发展规划有着非常重要的意义。

4.2 多目标规划动态投入产出规划模型

4.2.1 环境目标函数的确定

对于某一循环经济系统的物质流优化,从经济角度来讲系统输出的产品要满足外界的需求,环境方面要减少自然资源投入的同时还要减少废弃物的排放。生态方面主要是考虑对于环境造成的影响即环境负荷 Q_k ,在规划中要使得环境负荷减少的方向发展。

目前,很多研究已经开始把生命周期分析(LCA, Life Cycle Assessment)思想纳入到工艺设计和最优化过程当中,建立环境影响、经济效益和具体工艺过程的链形关系^[39]。一般情况下,将生命周期分析纳入到系统最优化过程,包括三个主要的步骤:实施生命周期分析;根据结果,将多目标最优化问题用公式表示;对于多目标问题求解,寻求最佳解决方案。但是按传统的生命周期分析,要经过目的和范围确定、清单分析、生命周期影响评价和生命周期解释几个阶段,实施起来,过程复杂,而且时间周期长。而且目前,生命周期的研究中对于环境影响因子的确定,环境影响评价模型也没有统一的方法。所以本文中为了简便起见,采用一种基于投入产出的生命周期评价方法(EIOLCA, Ecological Input-Output Life Cycle Assessment)^[40]。

如某经济系统由 n 个过程构成,对于每一过程在物质转化或转移过程中对于环境的排放,可以利用基于生态投入产出生命周期评价方法来计算。基于投入产出的生命周期评价为

$$q = EB \cdot x(t) \quad (4.14)$$

其中矩阵 EB 是过程引起的环境负荷矩阵(研究的系统的不同,其关注的环境负荷矩阵也是不同的), eb_{ij} 表示由于 j 过程单位流(实物)转化而产生的 i 类环境负荷的量,这里的环境负荷可以是资源的消耗特别是自然资源的消耗,也可以是二氧化碳、二氧化硫、或氮化物等的排放。 q_i 就表示某一种环境负荷(二氧化碳、二氧化硫、或氮化物)的总量, q 表示的是系统过程物质流转化引起的环境负荷的总量向量。

考虑了生命周期分析的多目标优化问题的环境目标函数可以是^[41]

$$\min Q_k = \sum_{i=1}^m ec_{ki} \cdot q_i \quad (4.15)$$

其中 $ec_{k,i}$ 表示负荷 q_i 对于影响 Q_k 的相关作用, 有时也可以直接利用负荷的物理量来评价计算出的数据 q_i 。假定条件是量越少, 产生的影响就越小。如一个制造过程产生的二氧化硫为 1 千克, 而另一过程生产相同的产品时产生两千克的二氧化硫, 则可以认为前者对于环境影响较小。另外, 在考虑了生命周期分析的多目标优化问题时, 应该注意到系统边界的划分, 不只是计算系统内过程之间的物质的转化或转移带来的环境影响, 还要考虑到进入系统的物质在进入系统之前的环境影响, 以及系统的产出品在离开系统后的环境影响, 所以可以采用文献[42]中的方法对于环境影响进行计算。为简单起见, 本文中环境影响的评价采用 (4.15) 式。

4.2.2 多目标动态投入产出规划模型

对于循环经济系统进行物质流优化的过程中, 涉及到多个目标的规划问题。在一个目标规划模型中, 如果两个不同目标重要程度不同, 就赋予这些目标以不同层次的优先级。优先级层次的高低分别通过优先因子表示, 目标规划适用于多个目标并且还可以带有从属目标的规划问题。

由于实际问题往往比较复杂, 而优先级的层次又不能分得过细, 因此, 可以在同一优先级中, 不同变量或不同对象在目标函数式中采用不同的权重, 也可以在同一层次中的多种目标采取加权的办法综合处理。

对于系统物质流的优化, 向着生态经济方向发展, 使得系统对于新的自然资源 (尤其是不可再生资源) 的需求减少, 同时使得产生的废弃物减少, 而且能够满足外部对于系统的需求, 既有一定的经济效益, 同时要注意生态效益。为此建立如下的多目标动态投入产出规划模型。

目标函数:

(1) 系统的输出与需求差距最小, 即

$$\min \sum_{i=1}^n (y_i(t) - d_i(t)) \quad (4.16)$$

其中 $d_i(t)$ 是规划量, 由外界给出。

(2) 系统的环境负荷最小, 即

$$\min Q_k = \sum_{i=1}^m ec_{ki} \cdot q_i \quad (k=1,2,\dots,K) \quad (4.17)$$

其中 $ec_{k,i}$ 表示负荷 q_i 对于影响 Q_k 的相关作用, 有时也可以直接利用负荷的物理量来评价计算出的数据 q_i 。

约束条件:

$$(1) \quad x(t) = G^t x(0) + V\{G^{t-1}\delta_z(1) + G^{t-2}\delta_z(2) + \dots + I\delta_z(t)\}z(0)$$

(2) 生产能力的约束

$$\mu(t)_a \leq x(t) \leq \mu(t)_b$$

其中 $\mu(t)_a$ 、 $\mu(t)_b$ 是生产的最小、最大能力。

(3) 通过清洁生产、回收利用系统物资积累能力由于技术原因受到的约束

$$\alpha_i \leq \delta_{y_i}(t) \leq \beta_i, \quad i=1,2,\dots,n, \quad \text{其中 } \alpha_i, \beta_i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n$$

4.2.3 多目标动态投入产出规划模型的求解

采用目标规划法^[43,44]求解上述模型, 下面给出具体的交互式求解算法框架。

1、将多目标优化模型转换为目标规划模型

(1) 确定每一个理想目标的期望值, 即转换为现实目标。

对于每一个目标函数, 首先要确定一个希望达到的理想值 $E_i (i=1,2,K+1)$, 这些值的确定并不要求十分的严格和精确, 可以根据以往的资料和相关的文献及政策来确定。求解的过程就是寻求某一个可行解, 使得这些目标函数的期望值如何更好地、更接近地得以实现。

(2) 每一个现实目标和约束都加上正、负偏差变量。

目标函数加上期望值称之为现实目标。现实中各个目标函数的期望值 $E_i (i=1,2,K+1)$ 往往不可能全部达到, 为了从数量上描述诸目标的期望值没有达到的程度, 对于每一个目标函数分别引入正、负偏差变量 d_i^+, d_i^- 且

$d_i^+, d_i^- \geq 0, (i = 1, 2, \dots, K + 1)$, 其中 d_i^+ 表示第 i 个目标超出期望值的数值, d_i^- 表示第 i 个目标未达到期望值的数值。由于对于同一个目标函数, 它的取值不可能在超出期望值的同时而又未达到期望值, 所以在 d_i^+ 、 d_i^- 中至少一个为零, 所以正、负偏差变量满足:

$$d_i^+ \cdot d_i^- = 0 \quad i = 1, 2, \dots, K + 1$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, K + 1$$

(3) 按重要性确定各目标的优先级及权重。

在多目标决策问题中, 各个目标重要程度一般情况下是不同的。在建立目标规划模型时, 根据目标的重要程度, 可以给每个目标以不同的权系数 w_i 和优先等级 R_i 。在相同的约束条件下, 不同的权系数、不同的优先等级将会得到完全不同的最优解。

(4) 建立达成函数, 生成目标规划模型。

这里的达成函数, 反映和衡量各种解的目标 (或约束) 达成程度的关系式或函数, 它是关于目标和约束的偏差变量的函数。

对于多目标决策问题中的各个目标函数, 通过引入期望值, 正、负偏差变量和权系数和优先级别而被列入了约束条件中。接着要考虑的就是如何选择一个可行解, 使得它的各个目标函数值最接近于各自的期望值。也就是说, 要是诸偏差达到最小值。为此要构造一个新的目标函数, 以求得有关偏差变量的最小值。转换规则如表 4.1 所示。

表 4.1 转换规则表

目标或约束类型	目标规划格式	需要最小化的偏差变量
$f_i(X) \leq E_i$	$f_i(X) + d_i^+ - d_i^- = E_i$	d_i^+
$f_i(X) \geq E_i$	$f_i(X) + d_i^+ - d_i^- = E_i$	d_i^-
$f_i(X) = E_i$	$f_i(X) + d_i^+ - d_i^- = E_i$	d_i^+, d_i^-

根据上述方法建立达成函数为:

$$\min f = w_1 d_1^+ + w_2 d_2^+ + \cdots + w_{K+1} d_{K+1}^+ \quad (4.18)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^n (y_i(t) - D_i(t)) - d_1^+ + d_1^- = E_1 \quad (4.19)$$

$$Q_k - d_k^+ + d_k^- = E_k (k=1,2,\dots,K) \quad (4.20)$$

$$x(t) = G^t x(0) + V \{G^{t-1} \delta_z(1) + G^{t-2} \delta_z(2) + \cdots + I \delta_z(t)\} z(0) \quad (4.21)$$

$$\mu(t)_a \leq x(t) \leq \mu(t)_b \quad (4.22)$$

$$\alpha_i \leq \delta_{y_i}(t) \leq \beta_i, \quad \alpha_i, \beta_i \geq 0 \quad (4.23)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0, (i=1,2,\dots,K+1) \quad (4.24)$$

2、用线性目标规划的多阶段算法求解模型的具体步骤

步骤 1: 置 $l=1$, 在这里假设物质流满足外界的需求作为第一优先等级, 从 2 开始是对于环境影响目标函数的优先等级设置。 l 表示当前考虑的优先级别, L 表示总共有优先等级数。

步骤 2: 建立含 R_l 级目标的线性规划模型

$$\min f_l = f(d_l^+, d_l^-) \quad (4.25)$$

使得:

$$Q_l - d_l^+ + d_l^- = E_l \quad (4.26)$$

$$f_j(d_j^+, d_j^-) = f_j^*(d_j^+, d_j^-), (j=1,2,\dots,l-1) \quad (4.27)$$

$$x(t) = G^t x(0) + V \{G^{t-1} \delta_z(1) + G^{t-2} \delta_z(2) + \cdots + I \delta_z(t)\} z(0) \quad (4.28)$$

$$\mu(t)_a \leq x(t) \leq \mu(t)_b \quad (4.29)$$

$$\alpha_i \leq \delta_{y_i}(t) \leq \beta_i, \quad \alpha_i, \beta_i \geq 0, \quad (4.30)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0, \quad (4.31)$$

步骤 3: 用单纯形法求解这个模型。

步骤 4: 置 $l=l+1$, 如果 $l>L$, 转步骤 5; 否则转步骤 2。

步骤 5: 最后一个单目标线性规划模型的解就是原目标规划模型的解。

步骤 6: 判断当前最优解.若满意, 则停止; 否则转步骤 7。

步骤 7: 对目标规划模型 (4.18) 进行改进 (如改变目标期望值、优先等级等), 转步骤 1。

采用这种方法的优点是: (1) 提高了解的稳定性; (2) 采用目标规划法首先要确定各目标的期望值, 由此, 使得模型求解方法成为一种人机交互式的方法, 具有了更大的灵活性, 可以得到满足不同要求的选择方案, 供有关决策部门选用。

第五章 城市固体废物流分析与管理模型

经济的快速发展、人口的激增、人们物质生活水平的提高都伴随大量固体废物的产生。目前,我国固体废物以平均每年 8%~9%的速度增长,而且城市固体废弃物人均产生量与人均收入水平成严格相关性^[45],预示着固体废物的增加在未来一段时间将是不可改变的事实,城市生态环境的压力也将加剧。城市固体废物流作为一种特殊的物质流,如何进行动态优化管理,对很好地消纳城市固体废物,保护城市的生态环境,促进城市可持续发展具有重要意义。

5.1 循环经济模式下的城市固体废物流分析

5.1.1 固体废物处理的循环经济三原则

城市的固体废物越来越影响着城市的发展,传统的固体废物处理模式对城市的环境产生了不良影响,已不适应城市的可持续发展的需要,而循环经济理论为固体废物处理提供了新的途径。循环经济是一种建立在物质和能量不断循环利用基础上的新的经济模式,它要求城市按生态规律组织生产、消费和处理废物,其本质特征是将现行的“资源—产品—废物排放”的线性、单向的开放式经济转化为“资源—产品—再资源化”的复杂闭环式经济循环链。循环经济的三个原则是减量化、再使用和再循环,减量化原则要求用较少的原料和能源投入来达到既定的生产目的或消费目的,进而从经济活动的源头就注意节约资源和减少污染;再使用原则要求制造产品和包装容器能够以初始的形式被反复使用;再循环原则要求生产出来的物品在完成其使用功能后能重新变成可以利用的资源,而不是不可恢复的垃圾。循环经济就是通过产品的再使用和再循环实现资源和能源的减量化。

城市作为一个开放的系统,其产品可能来自于其它区域,要实现城市的循环经济,除了在自己制造的产品中实现资源的减量化和再使用原则外,很重要的一点就是对城市产生的固体废物进行资源化处理。通过对城市固体废物的资源化处理,达到固体废物排放的减量化,对目前技术无法处理的固体废物进行无害化

处理, 实现循环经济原则下的固体废物处理的资源化、减量化和无害化。城市排放的固体废物进行再使用和再循环处理是城市实现循环经济的一条重要途径。

5.1.2 循环经济模式下的城市固体废物处理流程

根据循环经济三原则, 固体废物处理是一个复杂系统, 输入的是城市每天产生的固体废物, 输出的是可再使用和再循环的原料以及减量化后用于卫生填埋的废物, 见图 5.1。

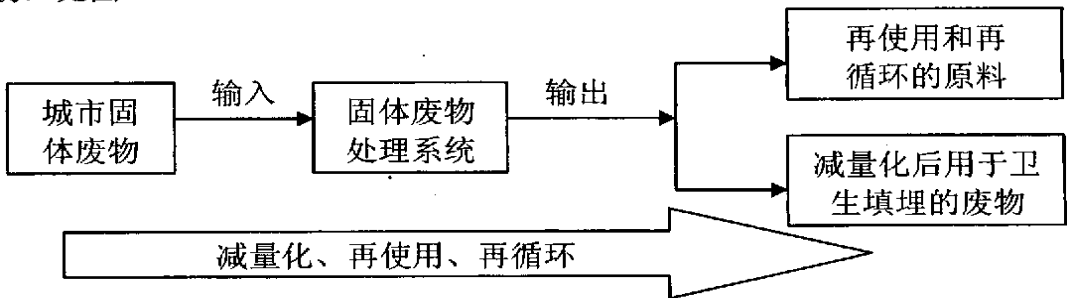


图 5.1 循环经济模式下的城市固体废物处理系统

城市固体废物包括城市工业固体废物和城市生活垃圾, 城市工业固体废物主要是冶煤废渣和粉煤灰, 处理方式是混合、掺拌、改良后作为园林绿地的种植基质土或制造环保砖; 城市生活垃圾中有十一种材料: 废纸、重塑料、塑料袋、塑料瓶、玻璃、有机材料、木材、金属、纺织品、碎片和惰性物质, 其中前九种都可分离出来进行再循环^[48]。

城市生活垃圾来自于居民家庭、单位和社区街道保洁, 循环经济模式下的垃圾处理系统首先要建立垃圾源头的初步分类体系, 实现垃圾的分类收集, 把其中可回收的物资分离出来, 进入再使用或再循环体系, 其余生活垃圾由保洁员定点收集运输到分拣中心, 进行进一步分类, 产生三种不同的物质流, 分别送到不同的处理部门进行处理。第一种物质流是可回收物资, 直接由废旧物资回收站回收进入再使用或再循环体系; 第二种物质流是湿材料, 被送到特殊的有机材料处理工厂, 产生有机材料和废渣, 有机材料可以作为农业用肥料或沼气发电, 进入再循环体系, 废渣作为减量化后的废物卫生填埋; 第三种物质流是干材料, 具有低湿度和高热值, 分类后被送到焚烧工厂焚烧或送到燃料提炼工厂或送到填埋场直接填埋, 焚烧工厂焚烧产生的能源进入再循环, 焚烧产生的灰直接填埋, 燃料提

炼工厂提炼的燃料进入再循环，产生的废渣直接填埋。

循环经济模式下城市固体废物处理的详细流程见图 5.2。

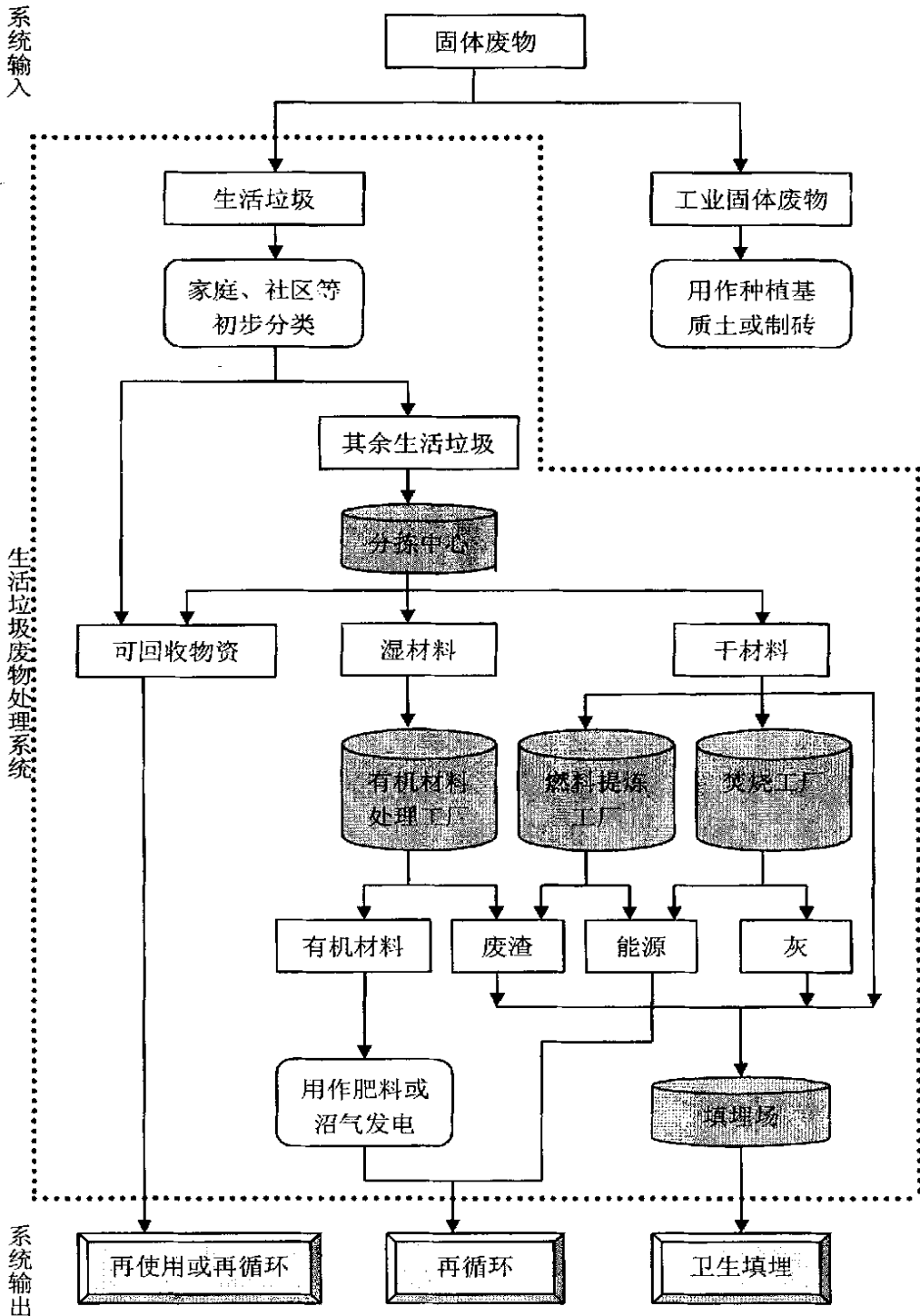


图 5.2 循环经济模式下城市固体废物处理流程

5.2 城市固体废物动态管理模型

根据循环经济模式下城市固体废物处理流程, 需要建立固体废物分拣中心、有机材料处理工厂、燃料提炼工厂、焚烧工厂和填埋场等设施, 政府在固体废物处理系统实施决策过程中, 需要确定上述设施的数量和位置, 使整个固体废物处理系统符合城市可持续发展原则。

固体废物处理模型既要考虑经济和环境两个方面的因素, 也要考虑社会因素, 理想的固体废物处理系统应该是可持续发展的, 它要求在环境保护方面是有效的、在经济方面是可负担的、在社会方面是可接受的, 因此建立定量的数学模型成为实施策略中的一种重要手段。

目前城市固体废物处理系统在建模过程中使用的方法主要有风险评估、环境影响评估、成本利益分析、多目标决策和生命周期分析等, 相关的模型主要有: 成本利益分析模型^[49]、生命周期评估模型^[50]和多目标决策模型^[51]。

本文中模型的基本框架是以环境保护和社会可接受两个方面作为约束条件, 以固体废物处理系统建设、维护和处理的成本最小为目标, 确定城市固体废物处理系统中固体废物分拣中心、有机材料处理工厂、燃料提取工厂、焚烧工厂和填埋场等基础设施的数量和位置。

城市固体废物处理系统的成本是投入和收益的差值, 投入主要指固体废物分拣中心、有机材料处理工厂、燃料提取工厂、焚烧工厂和填埋场等基础设施的建设、维护和处理成本、固体废物的运输成本等, 收益来自出售再生原材料、焚烧得到的电能和有机肥的获利。

5.2.1 模型变量

城市固体废物包括以下几类: 1-废纸; 2-硬塑料; 3-塑料袋; 4-塑料瓶; 5-玻璃; 6-有机材料; 7-木材; 8-金属; 9-碎片; 10-织物; 11-惰性物质。

假设每天产生的固体废物 R , r_i 为每天垃圾中 i 类物质的量 (吨/天)。通过分类回收, 其中纸、硬塑料、塑料瓶、塑料袋、玻璃、有机质、金属、木头、织物等 9 种物质可以直接回收循环利用。设 α_i 为通过家庭、社区初步分类收集, 而直接循环利用的 i 类物质的比率 ($i=1, 2, \dots, 11$), 其中 $\alpha_9, \alpha_{11}=0$ 。利用 $P_d (d=1, 2, \dots, D)$

来表示这样的分类收集点，设 $\chi_{p_d, i}$ 是在 P_d 收集到的 i 类物质的百分比。

剩余的没有经过分类的固体废物通过分拣中心 S_p ($p = 1, 2, \dots, P$) 分类。可回收物质循环利用，令 k_i ($k_9, k_{11} = 0, i = 1, 2, \dots, 11$) 表示经过分拣中心后进入循环的可回收利用的 i 类物质的比率。假设 η_i 表示全部 i 类物质中经过分拣中心不可回收而存在于湿垃圾的部分， $1 - \eta_i$ 表示存在于干垃圾部分。湿垃圾送到有机材料处理厂 T_s ($s = 1, 2, \dots, S$) 处理，干垃圾或者是热值高的，送到焚烧工厂 I_n ($n = 1, 2, \dots, N$)、或燃料提取厂 C_q ($q = 1, 2, \dots, Q$)、或是填埋场 L_m ($m = 1, 2, \dots, M$)。利用决策变量 ψ_{S_p, C_q} 、 ψ_{S_p, I_n} 、 ψ_{S_p, L_m} 分别表示分拣中心处理后的干垃圾送到燃料提取厂、焚烧厂、填埋场的比例，而利用决策变量 β_{S_p, T_s} 表示从分拣中心出来的湿垃圾运送到有机材料处理厂的比例。

有机材料处理工厂将湿垃圾处理为 SOM 和残渣，SOM 出售，废渣送去填埋。利用决策变量 $\gamma_{T_s, M}$ 、 γ_{T_s, L_m} 分别表示经过有机材料处理工厂后得到的 SOM 和废渣的比例。

燃料提取工厂将产生的燃料循环利用，残渣送去填埋。引入决策变量 $\theta_{C_q, M}$ 、 θ_{C_q, L_m} 分别表示相应的比例。进入焚烧工厂的干垃圾焚烧发电，灰烬进入到填埋场。引入决策变量 $\sigma_{I_n, M}$ 、 σ_{I_n, L_m} 分别表示相应的比例。

循环经济模式下城市固体废物物流系统在规划时，涉及固体废物的分拣中心、废弃物处理厂和填埋厂等设施的选址、数量和固体废弃物的流量和流向等问题。将 0-1 变量分配到所有的分拣中心、燃料提取工厂、焚烧厂、有机材料处理厂、填埋场，通过其值来表示其是否存在，记为 δ_{S_p} 、 δ_{C_q} 、 δ_{I_n} 、 δ_{T_s} 、 δ_{L_m} ，当其值为 0 时表示设施不存在，为 1 时表示设施存在。这样，就得到一个非线性混合 0-1 整数规划的问题^[53]，这样既实现了系统的结构优化，又实现了系统内部不同的处理场所的物质流的优化。

5.2.2 目标函数

在模型中主要考虑到经济收益，其他的函数作为约束条件。目标函数中主要考虑到回收、运输、运行成本出售燃料和有机肥料和能量收益。

(1) 回收成本

$$C^r = \bar{n}W \sum_{i=1}^{11} C_i^r r_i \alpha_i - B_i r_i \alpha_i \quad (5.1)$$

其中 C_i^r 表示分类收集的 i 类物质的每吨成本， B_i 是出售 i 类物质的收益。 \bar{n} 是指每年的天数。

(2) 运输成本

设 G 为可能的设施到设施的流向的集合； (s, d) 表示具体的某一设施到另一设施之间的可能的流向； $\bar{Q}_{s,d}$ 表示对应于 (s, d) 的年质量流， $\rho_{s,d}$ 表示相应于 (s, d) 有关流的强度； $\hat{Q}_{s,d}$ 表示对应于 (s, d) 的年体积流， $\bar{Q}_{s,d} / \rho_{s,d}$ ； $V_{s,d}$ 相应的单个运输工具的体积； $C_{s,d}$ 相应的一次的运输成本。

$$C^t = \sum_{(s,d) \in X} \frac{\hat{Q}_{s,d} C_{s,d}}{V_{s,d}} \quad (5.2)$$

这里的 $\bar{Q}_{s,d}$ 主要包括以下几个部分：

$$\bar{Q}_{P_d, S_p} = \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) \quad (5.3)$$

$$\bar{Q}_{S_p, C_q} = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \psi_{S_p, C_q} \quad (5.4)$$

$$\bar{Q}_{S_p, T_x} = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \beta_{S_p, T_x} \quad (5.5)$$

$$\bar{Q}_{S_p, I_n} = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \psi_{S_p, I_n} \quad (5.6)$$

$$\bar{Q}_{S_p, J_m} = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \psi_{S_p, J_m} \quad (5.7)$$

$$\bar{Q}_{C_q, L_m} = \sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \psi_{S_p, C_q} \theta_{C_q, L_m} \quad (5.8)$$

$$\bar{Q}_{I_n, L_m} = \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \psi_{S_p, I_n} \sigma_{I_n, L_m} \quad (5.9)$$

$$\bar{Q}_{T_s, L_m} = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \beta_{S_p, T_s} \lambda_{T_s, L_m} \quad (5.10)$$

(3) 设施的运行成本

设施的运行成本主要由两项组成：设施的固定的建设成本 $C_{F, \dots}$ 和运行成本，而一些成本与进入设施处理的非物流成正比，处理的废物越多成本越大。具体函数如下：

$$\begin{aligned} C^m = & \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \bar{Q}_{P_d, S_p} C_{S_p} + \sum_{p=1}^P C_{F, S_p} \delta_{S_p} + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \bar{Q}_{S_p, C_q} C_{C_q} + \sum_{q=1}^Q C_{F, C_q} \delta_{C_q} \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P \bar{Q}_{S_p, T_s} C_{T_s} + \sum_{s=1}^S C_{F, T_s} \delta_{T_s} + \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \bar{Q}_{S_p, I_n} C_{I_n} + \sum_{n=1}^N C_{F, I_n} \delta_{I_n} \\ & + \sum_{m=1}^M (\sum_{p=1}^P \bar{Q}_{S_p, L_m} + \sum_{q=1}^Q \bar{Q}_{C_q, L_m} + \sum_{s=1}^S \bar{Q}_{T_s, L_m} + \sum_{n=1}^N \bar{Q}_{I_n, L_m}) C_{L_m} + \sum_{m=1}^M C_{F, L_m} \delta_{L_m} \end{aligned} \quad (5.11)$$

(4) 整体目标函数

销售提取的燃料获利

$$B_{RDF} = \sum_{q=1}^Q p_{RDF} RDF_{C_q} \quad (5.12)$$

其中， p_{RDF} 为出售燃料的市场价格，

$$RDF_{C_q} = \bar{n} \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \psi_{S_p, C_q} \theta_{C_q, M} \quad (5.13)$$

销售能源获取收益

$$B_E = \sum_{n=1}^N p_e \left(\frac{\eta_E HV_{I_n} \bar{n}}{f} - E_{c, n} \right) \quad (5.14)$$

其中， p_e 是单位电价； $E_{c, n}$ 是第 n 个焚烧厂年平均耗电量； η_E 是焚烧产生热能的效率； f 是转化因子，为一常值； HV_{I_n} 为一整天第 n 个焚烧厂所产生的热能。

$$HV_{I_n} = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \psi_{S_p, I_n} HV_i \quad (5.15)$$

其中， $HV_i = 34.8C_i + 93.8H_i + 10.46S_i - 10.8O_i - 2.4U_i$ 表示热值，而 C_i 、 H_i 、 S_i 、

O_i 、 U_i 分别为碳、氢、硫、氧、水的含量。

这样，总的目标函数就是

$$C = C^r + C^t + C^m - (B_E + B_{RDF}) \tag{5.16}$$

5.2.3 约束条件

(1) 质量守恒原则

$$\sum_{m=1}^M \psi_{S_p, L_m} + \sum_{n=1}^N \psi_{S_p, I_n} + \sum_{q=1}^Q \psi_{S_p, C_q} = \delta_{S_p}, \quad (p=1,2\dots P) \tag{5.17}$$

$$\sum_{s=1}^S \beta_{S_p, T_s} = \delta_{S_p}, \quad (p=1,2\dots P) \tag{5.18}$$

$$\theta_{C_q, M} + \sum_{n=1}^N \theta_{C_q, I_n} = \delta_{C_q}, \quad (q=1,2\dots Q) \tag{5.19}$$

$$\sum_{m=1}^M \sigma_{I_n, L_m} = \delta_{I_n}, \quad (n=1,2\dots N) \tag{5.20}$$

$$\sum_{m=1}^M \tau_{T_s, L_m} = \delta_{T_s}, \quad (s=1,2\dots S) \tag{5.21}$$

$$\sum_{m=1}^M \gamma_{T_s, I_n} + \gamma_{T_s, M} = \delta_{T_s}, \quad (s=1,2\dots S) \tag{5.22}$$

(2) 不同处理设施的流容量约束

$$M_{I_n, a} \delta_{I_n} \leq \bar{Q}_{I_n} \leq M_{I_n, b} \delta_{I_n}, \quad (n=1,2\dots N) \tag{5.23}$$

$$\bar{Q}_{I_n} = \sum_{p=1}^P \bar{Q}_{S_p, I_n} = \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1 - \alpha_i) r_i \chi_{P_d, i} (1 - k_i) (1 - \eta_i) \psi_{S_p, C_q} \tag{5.24}$$

$M_{I_n, a}$ 表示第 n 个焚烧设施的最小容量， $M_{I_n, b}$ 表示第 n 个焚烧设施的最大容量。

同样道理有

$$M_{S_p, a} \delta_{S_p} \leq \sum_{d=1}^D \bar{Q}_{P_d, S_p} \leq M_{S_p, b} \delta_{S_p}, \quad (p=1,2\dots P) \tag{5.25}$$

$$M_{C_q, a} \delta_{C_q} \leq \sum_{p=1}^P \bar{Q}_{S_p, C_q} \leq M_{C_q, b} \delta_{C_q}, \quad (q=1,2\dots Q) \tag{5.26}$$

$$M_{T_s,a}\delta_{T_s} \leq \sum_{p=1}^P \bar{Q}_{S_p,T_s} \leq M_{T_s,b}\delta_{T_s}, \quad (s=1,2,\dots,S) \quad (5.27)$$

(3) 设施是否存在约束

$$\sum_{d=1}^D \chi_{P_d} - \delta_{S_p} \Lambda \leq 0, \quad (p=1,2,\dots,P) \quad (5.28)$$

$$\sum_{p=1}^P \psi_{S_p,C_q} - \delta_{C_q} \Lambda \leq 0, \quad (q=1,2,\dots,Q) \quad (5.29)$$

$$\sum_{p=1}^P \psi_{S_p,I_n} - \delta_{I_n} \Lambda \leq 0, \quad (n=1,2,\dots,N) \quad (5.30)$$

$$\sum_{p=1}^P \beta_{S_p,T_s} - \delta_{T_s} \Lambda \leq 0, \quad (s=1,2,\dots,S) \quad (5.31)$$

其中 Λ 是一很大的数值。

(4) 环境约束

考虑到的环境约束主要是：提取的燃料和生产的 SOM 中不能有有害的化学成分；焚烧时对于环境的排放；卫生填埋的防渗约束。

①对于提取的燃料的约束

$$\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1-\alpha_i)r_i\chi_{P_d,i}(1-k_i)(1-\eta_i)\psi_{S_p,C_q}X_i \geq (\leq)K_i \quad (5.32)$$

其中， X_i 是关于 i 类物质的热值参数或是某类有害物质的限定参数。 K_i 为相应类物质的给定的值。

②对于 SOM(Stablized Organic Material)约束

因为经过有机材料工厂处理得到的 SOM 可以用作农业用肥，所以其中的某些成分不能超标比如 C/N，会影响土壤的酸碱度，所以要给出约束。

$$\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1-\alpha_i)r_i\chi_{P_d,i}(1-k_i)(1-\eta_i)\beta_{S_p,T_s}A_i \leq H_i \quad (5.33)$$

其中， A_i 可以是 i 类物质中含 C/N 的比例，可以借助化学中当量计算而得到。 H_i 表示对于 C/N 的约束值，是一常数。

③焚烧排放约束

焚烧垃圾过程中，主要是产生： SO_2 , HCL, NO_x , HF 等有害气体。这里主要

以对于 SO_2 的控制为例，其他废气类似。

$$Q'_{S,J_n} = \left(\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1-\alpha_i)r_i \chi_{P_d,j} (1-k_i)(1-\eta_i) \psi_{S_p,J_n} S_i \right) \quad (5.34)$$

利用化学中 SO_2 与 S 的分子式计算当量比，可以计算出 SO_2 的排放质量 Q'_{SO_2,J_n}

$$Q'_{\text{SO}_2,J_n} = 2 \left(\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^{11} (1-\alpha_i)r_i \chi_{P_d,j} (1-k_i)(1-\eta_i) \psi_{S_p,J_n} S_i \right) \leq S_b \quad (5.35)$$

其中， J_n 表示第 n 个焚烧厂二氧化硫的净化率， S_b 为一给定的参数。

5.2.4 参数估计

要对于上述模型进行求解，首先需估计模型中的相关参数。由于固体废物物流系统的复杂性以及相关数据的不足，导致模型参数估计的困难，这些参数涉及城市固体废物中各物资的变量、单位运输成本、固体废物回收利用单位收益率、各种设施的固定成本以及单位物资在各种设施中的处理成本等。随着城市管理水平的提高和数据的不断累积，这些参数的估计会变得可行，现讨论如下：

(1) 固体废物中各类物资的比例。根据历史数据以及城市发展状况，固体废物中可回收物资总量、待进一步处理物资总量和不可再利用的物资总量等都可以估算。

(2) 单位运输费用和运输距离。根据工具的类型、运输能力和交通状况，不同的设施之间的单位运输费用可通过测算获得，运输距离根据设施的备选点确定。

(3) 固体废物的回收利用的单位效益。废旧物资回收的单位收益根据不同物资的特性及回收率进行测算，比较困难的是处理工厂生产肥料、能源等的收益，要根据处理工厂的处理能力和水平进行计算。

(4) 设施的固定成本和单位物资处理成本。设施的固定成本根据实施类型、规模大小、设备数量等，从日常维护、管理、人力资本等角度进行计算；而单位物资处理成本则根据设施处理能力和水平进行测算。

第六章 结论

建设和谐社会,实现可持续发展正成为我国今后发展的方向,国内辽宁、江苏成为发展循环经济的试点省份。循环经济的建设在国内方兴未艾,循环经济的理论研究对于循环经济在国内的建设越来越重要。而目前,在国内循环经济的研 究主要是在理论上的论证循环经济的重要性,以及在政策和法律、规范方面的理论 研究,而对于循环经济的具体的实现方法和途径还鲜有研究结果出现。本文主 要是从循环经济中物质流分析和动态优化管理的角度进行了研究,引进有关模型 并加以改进。论文的主要创新点是:

(1) 改进了原有的动态投入产出模型

原有的动态投入产出模型虽然能够很好的反映流在时间上的变化以及在系 统的积累情况,并能对于输出流和在系统内的积累进行调控,但是没有涉及到系 统对于输入流的需求变化。而循环经济的首要原则减量化就是减少资源的使用, 同时,经济系统中生产量的增加是由投入决定的,所以本文中建立了投入方向的 动态投入产出模型,将系统内部的积累和外部资源作为系统物质流增加的源泉, 随着系统内的物质积累的增加,逐步减少系统对于外界的资源需求,从而实现减 量化的原则。

(2) 建立了多目标动态投入产出模型。

循环经济是一种生态经济,不仅要满足人类物质需求,同时考虑到环境影 响,所以,引入生态投入产出生命周期评价模型建立环境目标函数,从经济和环境 两方面来优化物质流的管理。

(3) 建立城市固体废物流管理优化模型

循环经济是模仿自然生态系统的一种新型的经济形态,在以往传统经济中的 废物看作是时空错置的资源。城市固体废物流优化管理,就是将垃圾转化为有用 的资源,在循环经济系统中,实际上起到了类似自然生态系统中分解者的作用。 本文建立了一个固体废物流优化管理混合整数规划模型,将经济收益作为目标函 数,考虑到环境和社会两个方面的约束。

研究中主要是对于如何实现循环经济系统中物质流的优化问题,这是研究循

循环经济实现途径的很好的切入点。但是,循环经济是一项复杂的系统工程,物质流分析与管理涉及到流入、输出、消耗,同时涉及到物质的化学、物理特性及物质流动带来的污染的计算等等诸多方面,对于物质流的研究还需要付出更大的努力。

研究中存在的主要困难和问题是:

(1) 数据收集困难

目前国内对于物质流分析研究刚刚起步,相应的研究数据缺乏,在论文中只好借用已有文献中的数据来分析问题。

(2) 参数设置的困难

物质流动态投入产出管理模型中,矩阵 $B'(t)$ 中涉及的参数设置与废物利用和资源化过程的技术紧密相关。在输出流方向建立动态投入产出反馈模型中的 $B'(t)$ 和改进的建立在投入方向的 $B'(t)$ 的元素的数值都是人为给定的,而且元素的意义不同,只能从功能上进行对比,前者实现系统内积累和输出流的调控,后者将积累作为投入与系统外界的资源共同成为过程流增加的源泉,不能很好地进行数据的比较。

综合上述研究的不足,对于今后的研究提出以下想法:

(1) 建立区域实物维的物质流数据库,同时,建立生产、消费的污染排放数据,便于对于企业或区域的物质流进行优化。

(2) 研究参数随时间变化的规律。在本文的研究中,参数假设是常数的特殊情况,而实际情况是变化的,如果能够发现参数调整的规律,无疑模型能够更好地对于循环经济系统物质流进行优化。

(3) 对于区域内某种具体物质的需求函数以及相应的产品进行寿命统计分析基础上,预测废物排放的量,对于区域废物处理措施的规划也是物质流研究的方向。

致 谢

衷心感谢王海燕教授在我攻读硕士学位期间对我的悉心指导和热情帮助！王老师以高瞻远瞩的思想、博大精深的学识、精益求精的治学态度给我们传道、授业、解惑。

感谢系统工程研究所赵林度教授、吴广谋教授、陈森发教授在我研究生学习期间给予的关心、帮助和指导，他们传授的知识为我论文的完成打下了坚实的理论基础。

感谢同窗学友方芬、张叶红，以及诸多师兄、师姐、师弟、师妹们，感谢他们在学习和生活中给我很多启发与鼓励。

最后，衷心感谢我的亲人，他们的关系和支持是我顺利完成学业的保证，也是我人生道路上的精神支柱和动力源泉！

参考文献

- [1]王如松, 复合生态与循环经济[M], 气象出版社, 2003 年
- [2]蒋正华, 张羚广, 可持续发展与复杂自循环经济系统[J], 管理科学学报, 2001, 4(1): 1~6
- [3]王浣尘, 可持续发展理论于沿革[J], 上海环境科学, 1998 (1): 6~8
- [4]Rotheroe N, Keenlyside M, Coates L. Local agenda 21: articulating the meaning of sustainable development at the level individual enterprise [J], *Journal of Cleaner Production*, 2003, 11(8): 537~548
- [5]Jansen L. The challenge of sustainable development [J], *Journal of Cleaner Production*, 2003,11(3): 231~245
- [6]谢海云, 孙力军, 张文彬, 可持续发展战略与循环经济[J], 昆明理工大学学报, 2000, 25(2): 5~9
- [7]赵亚凡, 宋明大, 循环经济—我国实现可持续发展的途径[J], 城市规划汇刊, 2002, (2): 59-61
- [8]吴易明, 循环经济与经济可持续发展[J], 经济师, 2002, (10): 84-85
- [9]诸大建, 可持续发展呼唤循环经济[J], 科技导报, 1998, (9): 39-42
- [10]李洳雄, 王建基, 循环经济是实现可持续发展的必由之路[J], 环境保护, 2000, (11): 29-30
- [11]罗宏, 孟伟, 冉圣宏, 生态工业园区—理论与实证[M], 化学工业出版社, 北京, 2004.3
- [12]刘传国, 唐学玺, 曹曼, 国内外循环经济实施现状及分析[J], 生态经济, 2004 (4): 26-28
- [13]Ayres, R.U. Industrial metabolism: Theory and policy. In the greening of industrial ecosystems, edited by B. R. Allenby and D. J. Richards. Washington, DC: National Academy Press, 1994
- [14]循环经济的核心调控手段是物质流分析与管理[N], 中国环境报, 2004-11-30
- [15]夏传勇, 经济系统物质流分析研究述评[J], 自然资源学报, 2005, 20(3):

415-419

- [16]陶在樸, 物质流核算方法, 2003
- [17]Ayres, R.U. Industrial metabolism [A], Ausubel, Sladovich (Eds.), Technology and Environment[C]. Washington D C: National Academy Press, 1989
- [18]Baccini, P., Bader, H.-P. Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 1996
- [19]D. Vexler, M. Bertram, A. Kapur, S. Spatari, T.E. Graedel, The contemporary Latin American and Caribbean copper cycle: 1 year stocks and flows , Resources, Conservation and Recycling 2004 (41) 23–46
- [20]S. Spatari a,*, M. Bertram a,b, K. Fuse a, T.E. Graedel a, Eric Shelov , The contemporary European zinc cycle: 1-year stocks and flows , Resources, Conservation and Recycling 2003 (39): 137-160
- [21]L.A.J. Joosten , M.P. Hekkert , E. Worrell b, W.C. Turkenburg , STREAMS: a new method for analyzing material flows through society , Resources, Conservation and Recycling 27 (1999): 249–266
- [22]Paul Konijn,Sake de Boer ,Jan Van ,Dalen , Input –Output Analysis of Material flows with application to iron ,steel and zinc .Structural Chang and Econmic Dynamics 1997 (8): 129-153
- [23]Bergba“ck, B.Lohm, U. Metals in society’. In: Brune, Chapman, Gwynne, Pacyna (Eds.), The Global Environment. Scandinavian Science Publishers, Wiley, VCH. 1997
- [24]Rene’ Kleijn, Ruben Huele, Ester van der Voet. ANALYSIS: Dynamic substance flow analysis: the delaying mechanism of stocks, with the case of PVC in Sweden[J], Ecological Economics2000 (32): 241–254
- [25]Jake McLaren, Stuart Parkinson , Tim Jackson .Modeling material cascades — frameworks for the environmental assessment of recycling systems , Resources, Conservation and Recycling2000 (31): 83–104
- [26]Reid Balley, Bert Bras and Janet Allen, Measuring Material Cycling in Industrial Systems[J], 2001IEEE: 4-10

- [27]Reid Bailey, Bert Bras, and Janet K. Allen, Applying Ecological Input-Output Flow Analysis to Material Flows in Industrial Systems Part II: Flow Metrics[J], *Journal of Industrial Ecology* 2004(8):69-92
- [28]李刚, 基于可持续发展的国家物质流分析[J], *中国工业经济*, 2004 (11): 11-18
- [29]陈效逖, 乔立佳, 中国经济—环境系统的物质流分析[J].*自然资源学报*, 2000, 15(1): 17-23
- [30]徐明, 张天柱, 中国经济系统中化石燃料的物质流分析[J], *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44 (9): 1167-1170
- [31]徐一剑, 张天柱, 石磊, 陈吉宁, 贵阳市物质流分析[J], *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(12): 1688-1691
- [32]黄贤金, 循环经济: 产业模式与政策体系[M], 南京大学出版社, 南京, 2004.11: 50-64
- [33]张文红, 生态工业发展的模式、途径及定量仿真模型研究[D], 2003
- [34]岳强, 陆钟武, 中国铜循环现状分析 (I) —STAF方法 [J], *中国资源综合利用*, 2005(4): 6-11
- [35]岳强, 陆钟武, 中国铜循环现状分析 (II) —具有时间概念的产品生命周期物质流分析方法[J], *中国资源综合利用*, 2005(5): 4-8
- [36]毛云英, 动态系统与最优控制[M], 高等教育出版社, 1994
- [37]王嘉谟著, 实用非线性动态投入产出模型 (兼评列氏动态投入产出模型的失真性) [M], 北京: 国防工业出版社, 2003
- [38]杨益群, 吴惠强, 刘吉显, 直耗系数矩阵 RTALS 方法数学模型研究[J], *长沙交通学院学报*, 2000, 16 (2): 21-25
- [39]邓南圣, 王小兵主编, 生命周期评价[M], 北京: 化学工业出版社, 2003
- [40]Hendrickson C T, A. Horvath, S. Joshi and L. B. Lave. "Economic Input-Output Models for Environmental Life Cycle Assessment"[J], *Environmental Science & Technology*, 1998(32): 184-191
- [41]A. Azapagic, R. Clift, Life cycle assessment and multiobjective optimization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 1999(7): 135-143
- [42]Sangwon Suh, Analysis: Function, Commodities and environmental impacts in an

- ecological-economic model [J]. *Ecological Economic*, 2004(48):451-467
- [43]赵可培, 目标规划及其应用[M], 上海: 同济大学出版社, 1989
- [44]唐焕文, 秦学志, 实用最优化方法[M], 大连: 大连理工大学出版社, 2000
- [45]何晶晶, 冯肃伟, 邵立明, 城市固体废物管理[M], 科学出版社, 2003
- [46]杨永乐, 乐毅全, 李日春. 以人与自然为本构建可持续发展城市循环经济体系[J], *研究与发展管理*, 2001, 13(3): 54-57
- [47]马红霞, 发展循环经济, 优化城市垃圾管理[J], *中国资源综合利用*, 2005(12): 16-18
- [48]P.Costi, R.Minciardi, M.Robba et al. An environmentally sustainable decision model for urban solid management[J]. *Waste Management*, 2004, 24: 277-295
- [49]Chang, Y.H., Chang, N., Optimization analysis for development of short term solid waste management strategies using presorting process prior incinerators[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 1998(24): 7-32
- [50]F.McDougall, P.White, M.Franke et al. *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*[M]. London: Blackwell Science, 2001
- [51]S.Seo, T.Aramaki, Y.Hwang et al. Evaluation of solid waste management system using fuzzy composition [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129(6): 50-531
- [52]王海燕, 循环经济理论下固体废弃物物流系统优化模型[J], *物流技术*, 2005, 157(10): 287-289

在读期间完成的论文和参加的项目

发表的论文

- [1]马红霞, 发展循环经济, 优化城市垃圾管理[J], 中国资源综合利用, 2005(12): 16-18

参加的项目:

- [1]南京市可持续发展与循环经济潜势研究, 南京市软科学研究项目, 项目编号: 宁科 200403061; 鉴定证书编号: 宁科鉴字[2005]第 077 号