

DOI: 10.5846/stxb201601080056

戴铁军, 赵鑫蕊. 基于物质流分析的废纸回收利用体系生态成本研究. 生态学报, 2017, 37(15): 5210-5220.

Dai T J, Zhao X R. Study on ecological costs for waste paper recycling system based on the Material Flow Analysis. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5210-5220.

基于物质流分析的废纸回收利用体系生态成本研究

戴铁军*, 赵鑫蕊

北京工业大学循环经济研究院, 北京 100124

摘要: 废弃物回收利用在一定程度上对缓解资源和环境危机起到积极的作用, 已经成为可持续发展的重要举措, 但生产过程中消耗的资源、能源, 排放的污染物同样也会对自然环境产生负面影响。为解决此问题, 以废纸回收利用体系为例, 基于物质流分析方法构建了生态成本核算模型, 为废弃物回收利用体系优化提供基础。在对生态成本相关研究归纳总结的基础上, 定义了生态成本的概念, 界定了生态成本的研究内容, 并分析基于物质流核算生态成本的可行性。生态成本是对生态负荷的价值化, 主要分为资源耗减成本、污染产生和环境保护成本以及生态环境损害成本 3 部分。污染产生和环境保护成本可以通过将总成本按比例分配给正、负产品的方式求得, 资源耗减成本和生态环境损害成本借助 LIME 方法核算, 总生态成本是回收利用体系内部各项生态成本的总和。生态成本核算是评价生态负荷的重要手段, 在废纸回收利用体系物质流动图的基础上, 分析各生产流程生态成本的构成情况。提出的生态成本核算模型不仅适用于废纸回收利用体系, 其他废弃物也同样适用。通过生态成本的核算, 寻找到对生态环境影响较大的工序、流程, 为废弃物回收利用体系经济与环境的双赢提供理论与实践指导。

关键词: 生态成本; 物质流分析; 废弃物; 回收利用体系

Study on ecological costs for waste paper recycling system based on the Material Flow Analysis

DAI Tiejun*, ZHAO Xinrui

The Institute of Circular Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: Waste recycling has, to some extent, a positive effect on solving resource and environmental crises; therefore, it has become an important measure of sustainable development. However, the resource depletion and pollution emissions involved in recycling and manufacturing processes also have negative impacts on nature. To solve this problem, we focused on the waste paper recycling system in order to build an ecological costs model based on material flow analysis, and to provide a basis for optimizing the waste recycling system. In this paper, we define the concepts of ecological costs and sum up the existing researches on these, and ensure that counting ecological costs based on material flow analysis is practical. Ecological costs are caused by resource consumption, waste emissions in the processes of recycling, manufacturing, etc., and they are divided into the three categories: resource depletion, environmental pollution and protection, and ecological damage. Pollution yield and environmental protection costs are counted by allocating total manufacturing costs into positive and negative products, and then counting resource depletion and ecological damage costs using the LIME method. Total ecological costs in the recycling system are calculated by summing every ecological costs in the whole system. Although ecological cost accounting is an important means of evaluating the ecological load, the constitution of ecological costs for the waste paper system is depicted using the foundation of the material flow chart. The model we built is not only fit for the

基金项目: 北京市教育委员会社科计划重点项目 (SZ201610005002)

收稿日期: 2016-01-08; 网络出版日期: 2017-03-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: daitiejun@emails.bjue.edu.cn

waste paper recycling system, but also valid for other waste products. In addition, this model counts the ecological costs and finds out the manufacturing progresses with high ecological impacts, thereby improving them and providing the basis for both environmental and economic benefits; thus, it constitutes an efficient waste recycling system.

Key Words: ecological costs; material flow analysis (MFA); waste; recycling system

面对资源和环境危机,再生资源开发显得至关重要。近年来,再生资源综合利用水平快速提高,2014 年我国废钢铁、废有色金属、废塑料等十大类再生资源回收总量约为 2.45 亿 t,回收总值为 6446.9 亿元^[1],一定程度上缓解了自然资源短缺问题。在废弃物变为再生资源的过程中,虽然可在一定程度上减少废弃物处置量和原生资源消耗量,但是过程中消耗的资源、能源,排放的污染物同样会对自然环境产生负面影响。因此,废弃物回收利用对生态环境造成的负荷成为亟需研究的重点,一些学者对其过程的生态效益进行探讨,物质流分析和生命周期评价是两种主要的研究方法。

基于生命周期评价方法(LCA)对废弃物回收过程的研究,主要是根据 LCA 的系统框架,对各个生命阶段编制资源消耗和污染物排放清单,并对废弃物的主要处置方式(填埋、焚烧、回收利用等)进行比较。Finnveden^[2]等基于 LCA 框架从能源消耗、温室气体排放等角度对固体废弃物不同回收处置方式进行分析,确定了“废物利用层级”的有效性。Cherubini^[3]等基于 LCA 分析了不同回收处置方式对经济系统、生态环境的影响,认为简单填埋是对生态环境影响最大的处理方式,回收再利用、焚烧回收能量这两种方式对生态环境的影响相对较小。也有研究将价值理论引入 LCA,Reich^[4]详细论述了生命周期经济价值、生命周期环境价值和 LCA 的关系,分别介绍了各自的研究方法,认为 LCA 与经济分析相结合的方法更适用于废弃物回收利用的研究。但 LCA 仅仅是从各生命阶段的资源消耗、污染物排放两个角度分析废弃物处置的生态环境影响,并未考虑到回收利用网络之间的物质联系,以及各个生命阶段内部物质流动与循环情况,不能全面的衡量废弃物回收处置过程生态负荷。

基于物质流分析(MFA)的废弃物研究主要集中在建立简明的废物回收利用体系,明确各个阶段之间的物质联系,通过控制流量和流向,达到优化废弃物回收利用体系的目标。Steubing^[5]基于 MFA 对秘鲁的废弃电脑回收处置体系进行研究,预计 2010—2019 年间废旧电脑产生量将是 2000—2009 年产生量的 4—5 倍。Nady^[6]等在 MFA 的基础上研究了印度的废纸、塑料、玻璃等的回收过程,认为回收游商在回收过程中扮演着至关重要的作用,且印度的回收水平远高于过去文献所报道的。Eva Sevice-Itoiz^[7]等综合考虑经济全球化和国内外的资源消耗和环境负荷,通过 MFA 和 CLCA 相结合的方法对纸张的物质流情况和回收过程中的温室气体排放量进行核算。相较于生命周期评价,物质流分析更能系统、全面地描绘废弃物回收利用体系的现状、各回收利用流程内部以及流程间物质流动情况,更有利于分析废弃物回收利用系统对生态环境的影响。

废纸是一种重要的再生资源,被称为“城市森林”。目前,废纸浆占全年纸浆总消耗量的 65%,废纸回收率达 44.74%,废纸利用率达 72.22%^[8],废纸已经成为我国造纸行业的主要原料,废纸回收利用过程的生态负荷大小对我国纸张市场健康发展具有重大影响。由于国内外学者对废纸回收利用体系的研究多基于生命周期评价方法^[9-13],并未考虑到物质流动情况对生态环境的影响。因此,本文以废纸为例,基于物质流分析方法,以废纸产生到废纸的最终处置(直接填埋、燃烧灰填埋、再生纸等)过程为研究的系统边界,在构建废纸回收利用体系物质流情况图的基础上,引入生态成本概念,定量计算废纸回收利用体系对生态环境的影响。

1 生态成本界定与研究基础

生态成本是在严峻的资源与环境问题面前,为解决生态问题而提出的,是对生态环境负荷的量化。此前已有学者对相关问题进行了大量探讨,主要包括生态补偿机制、资源损耗和生态降级价值核定、环境成本核算等。因此,对在生态成本相关研究进行归纳总结的基础上,界定生态成本的研究内容,并分析基于物质流核算

生态成本的可行性。

1.1 生态成本的研究基础

生态系统为社会经济提供的服务往往被当做是“免费品”,经济发展过程中造成的生态环境恶化被看做“外部性”,没有引起社会的重视。随着生态环境问题的日益严峻,学者开始采用各种手段衡量生态系统的服务价值^[14-17]、经济活动对生态环境的影响,并尝试对生态环境进行补偿^[18-22]。另外,资源损耗和生态降级的价值核定也引起了学者的广泛关注,逐步开始测算不可再生资源 and 某一地区的资源损耗成本^[23-25],以及人类活动带来生态环境损害成本^[26-27]。虽然生态补偿机制能在一定程度上遏制人类对自然环境的无限索取,但并不能从根本上找到资源浪费和环境破坏的根源和具体生产流程,因而不能提出有针对性地降低生态环境负荷的措施。

环境成本^[28-29]的概念,是对一定时期内使用、消耗环境资源和对自然资源维护、修复所发生的各种耗费,与生态成本有诸多类似之处。Buonocore^[30]等运用生命周期评价、物质流分析、能值分析等多种方法,对意大利阿尔卑斯山地区木材供应链的环境成本和可持续性进行分析。肖序^[31-37]等通过资源价值流、材料流转会计方法对燃煤发电企业和水泥厂等的环境成本进行分析并对企业环境成本的定义、分类和计量进行了探讨。但环境成本更多考虑资源生产、消费和商品使用过程的环境影响,偏重于对末端环境负荷的量化;而生态成本则在环境成本的基础上将资源耗减成本纳入到核算体系中,使核算体系更加全面、符合实际。

1.2 生态成本的界定与研究现状

目前,对生态成本的研究尚处于起步阶段,不同学者对生态成本有不同的界定。在吸取前人研究成果^[38-41]的基础上,对生态成本作如下定义:生态成本是指生产过程造成生态系统的破坏、损害导致生态系统质量、功能下降的经济估值,以及为避免生态环境恶化而产生的成本,主要包括资源耗减成本、环境污染和保护成本以及生态环境损害成本。资源耗减成本是指资源开采过程中因开发利用资源而减少的实体资源数量的价值^[42];环境污染和保护成本是指生产过程中的污染物产生成本以及为避免生态破坏而产生的成本;生态环境损害成本则是指生产活动对人类社会和生态系统产生不利影响和损害的货币估值。

针对生态成本问题的研究主要集中在对农业生产、矿产开采和大型施工工程 etc 对生态环境依赖程度高、生态负荷大的领域。学者针对粮食生产的安全问题进行大量研究^[43-44],运用经济学和生态学的方法计算某一地区粮食生态的直接成本,并估算因粮食生产造成的生态损失成本^[39,45-46]。关于矿产开采的生态成本研究,学者们分析了采矿生产的生态成本构成并进行分析估算^[47-48],王青^[41,49-51]等主要是与生态足迹相结合,构建生态成本计量模型,加强对生态成本的控制,推进矿业可持续发展。另有学者从立法的角度^[38,52]和产品定价机制^[40]等角度对生态成本展开论述。但是,生态成本较少应用在工业生产方面。事实上,工业生产是环境恶化的主要原因,生态成本的核算可以明确生产过程对环境负荷大小以及生态成本较大生产环节,对工业产业节能降耗、降低环境影响、提高经济效益起到重要作用。

1.3 基于物质流分析核算生态成本的可行性

物质流分析^[53](MFA)是在经济系统中,对物质(包括资源、能源)的流动和数量的一种定量分析,可以明确各种物质在生产流程中的流动状况以及相互关系,可以为资源、废弃物和环境的管理提供方法学上的决策支持。物质流分析为研究系统搭建一个系统的物质流动网络,反映的是系统内实物流动关系,以质量为计量单位,准确地表示出每股物质流的流量、流向,分析各股物流对系统资源效率、环境效率的影响。因此,物质流分析为生态成本核算提供了技术支撑。

生态成本的核算是对生态环境产生负面影响大的物质和生产工序的价值进行归类、加总,实际上是基于经济系统价值流分析进行的,价值流分析可以为生态成本核算提供数据支撑。同时物质流是价值流的载体,价值流则是物质流动在经济层面的体现。生态环境恶化,在程度上取决于输入与输出经济系统的物质的数量与质量^[53],物质流分析利用物质平衡原理,分析从资源投入到产品和废弃物输出的全过程,描绘出系统内物质流动和循环过程,可以准确地找到对生态环境产生负面影响的物质,继而对其进行价值核算。可见,基于物

质流分析核算生态成本,是可行的。

2 废纸回收利用体系生态成本构成分析

生态成本的研究目的在于寻找生态影响较大的生产工序(生产流程),对该工序(流程)的生产工艺和管理水平进行优化,从而降低经济生产对生态环境的影响。在研究废纸回收利用体系生态成本的核算时,首先要依据实际情况构建废纸回收利用物质流系统,然后分析每个生产工序的物质流动情况,并在此基础上建立生态成本核算模型。

2.1 基于物质流分析的废纸回收利用体系分析

纸张经过使用后主要的流向有 5 个方面,即再利用、回收制浆、存而不用^[54]、进入生活垃圾处理体系及损失到环境之中。废纸回收利用体系中物质流主要包括:资源、能源投入(IP)、气体污染物排放(FWA)、液体污染物排放(FWL)、固体污染物排放(FWS)、返回本环节的废弃物、不合格产品(FWB_{sp})和返回上游环节的废弃物、不合格产品(FWB_{up}),具体物质流情况如图 1 所示。

在废纸的流向中,再利用和回收制浆是最主要的两个流向。再利用是指废纸经回收分拣后在再次进入经济系统;回收制浆是废纸在材料层面的循环利用,通过碎浆、出渣、脱墨、漂白等步骤制成废纸浆最终返回经济系统。废纸制浆的工艺复杂,资源和能源消耗量大,新鲜水、电力、燃料和原生木浆等均需要按照工艺要求添加。同时,制浆阶段会产生大量废水和废渣,其中包括废纸中掺杂的塑料粒、泥沙、纤维素、木质素、低分子糖、有机酸、油墨、染料等废渣^[55],碎浆机、除渣器排渣和浮选过程会产生泡沫渣、污水处理过程产生污泥等固体废弃物,废纸制浆过程还会产生废气和锅炉渣、烟道飞灰、燃烧炉灰渣等灰烬类固废^[55]。

“存而不用”指的是纸张经过使用丧失了原有功能,但因为某些原因留在日常生活当中,例如报纸糊墙等。一些纸张消费后未能进入综合回收处理体系,其中部分废纸因为缺乏回收能力、不具备回收条件的原因丧失到环境当中。部分废纸在分拣之后混入生活垃圾当中进入垃圾处理厂,处置的方式包括焚烧、填埋和简单的堆放。废纸回收利用体系中,焚化、填埋、回收制浆和其他利用方式需要投入大量资源和能源才能满足生产要求,并随着生产排放废弃物和污染物。分拣、再利用等过程虽然额外投入资源较少,但是为维持正常的营运,仍需要投入能源、劳动力以及相关环保设备。

生态成本伴随着资源消耗污染物和废弃物排放而产生,生产工序之间具体的物质循环与流动情况决定了生态成本的构成和大小。因此,研究生态成本核算的计量模型,需从研究工序间的物质流动情况入手,探究废纸回收利用体系中的生态成本构成情况和核算方法。

2.2 生态成本构成分析

废纸回收利用体系中,生态成本是由废纸回收、再制造和再生纸生产过程中资源消耗、废弃物排放引起的,在体系中输入的物质主要是回收的废纸资源、能源、水及其他生产原料,输出的物质包括经过处理加工的产品(半成品)和污染物,循环利用部分包括循环水、不合格产品、边角料等生产工序产生的部分废弃物。

生态成本核算过程中,环境污染与保护成本是污染物产生及环境保护支出的实际成本,用生产过程的实际费用表示;资源耗减成本和生态环境损害成本是对经济活动中资源消耗和污染排放所造成生态影响的价值估量,相关的核算方法有很多,SEEA、LIME 主要的核算手段。其中,SEEA(System of Integrated Environment and Economic Accounting)广泛引用于绿色 GDP 核算中,主要用于核算区域范围内资源耗减和生态退化的价值,但不适用于具体生产过程的资源耗减成本和生态环境损害成本的核算。日本开发的 LIME(Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling)方法是一种 LCA 的环境价值评价方法,比较符合我国的生态环境现状,因此本文采用 LIME 方法核算资源耗减和生态环境退化引起的生态成本。

2.2.1 环境污染和保护成本

(1) 污染产生成本

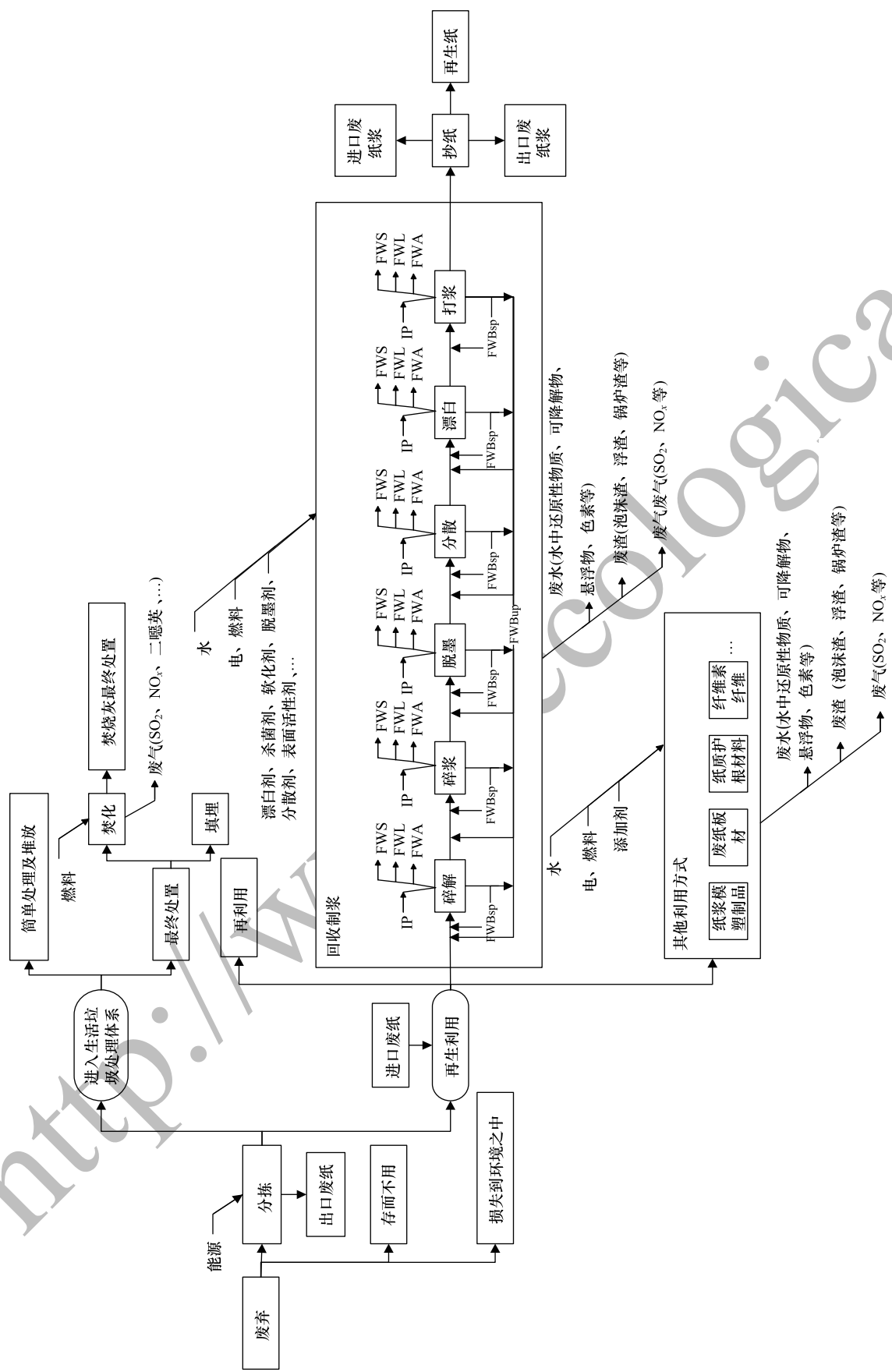


图 1 废纸回收利用体系及各工序物质流情况图

IP: 资源、能源投入Input; FWA: 气体污染物排放Flow of waste air; FWL: 液体污染物排放Flow of waste liquid; FWS: 固体污染物排放Flow of waste solid; FWBsp返回本环节的废弃物、不合格产品Flow of waste backing in the same process; FWBup返回上游环节的废弃物、不合格产品Flow of waste backing to the upriver processes

污染物伴随着工业生产过程产生,在生产流程中大部分生产原料经加工变成(半)成品(正产品),另外部分原料则转变成污染物或不合格产品(负产品)(图2)。生产过程中,负产品(废弃物、不合格产品)的产生成本记为污染产生成本(PYC)。

在废纸回收利用体系中,资源投入 IP 输入到生产工序(P_i)中,产出半成品(MOP)进入下一生产工序 P_{i+1} ,部分不合格品和废弃物 FWB_{spi} 和 $\text{FWB}_{\text{up}(i+1)}$ 作为原料返回 P_i 。 FWA_i 、 FWL_i 、 FWS_i 分别为工序 P_i 产生的气体、液体和固体污染物排放, PYC_{i1} 、 PYC_{i2} 、 PYC_{i3} 代表 FWA_i 、 FWL_i 、 FWS_i 带来的污染产生成本。工序 P_i 的污染产生成本为 PYC_i :

$$\text{PYC}_i = \text{PYC}_{i\text{FWA}} + \text{PYC}_{i\text{FWL}} + \text{PYC}_{i\text{FWS}} \quad (1)$$

$$\text{PYC}_i = \sum_{j=1}^3 \text{PYC}_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中, i 为此生产过程的第1— n 个生产工序, $j = 1, 2, \dots, m$ 分别代表工序产生的各种气体污染、液体污染物和固体废弃物。公式(2)为废纸回收利用体系中第 i 个工序的污染物产生成本,将流程内第1— n 个工序的污染产生成本加总,就可得到该生产流程的污染物产生成本为:

$$\text{PYC} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \text{PYC}_{ij} \quad (3)$$

污染产生成本是伴随着各个工序的生产运行产生的,以物质流分析为基础,通过跟踪生产过程中所有物质的输入、循环和输出情况,以产品(正产品)与污染物或不合格产品(负产品)产生的比例将总生产成本分配给产品生产成本和 PYC_{i1} 、 PYC_{i2} 、 PYC_{i3} 。

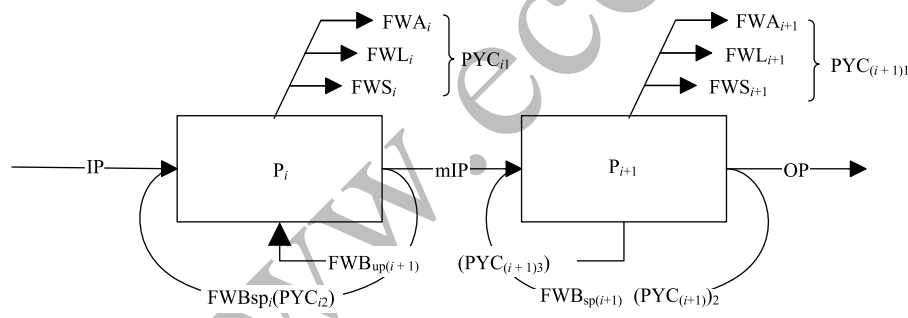


图2 生产工序物质流动情况

Fig.2 The material flow in each production process

P_i : 生产工序 i ; P_{i+1} : 生产工序 $i+1$; IP: 原材料或半成品输入 Input; MIP: 中间产品 Middle Input; OP: 产品输出 Output; PYC_i : 生产环节 i 的污染物产生成本;第 $i+1$ 个生产工序中废弃物的流向有三个:离开生产流程 FWS 和返回本工序作为原料重新加工 $\text{FWB}_{\text{sp}(i+1)}$, 返回上游工序作为原料重新加工 $\text{FWB}_{\text{up}(i+1)}$, 因此第 $i+1$ 个生产环节的废弃物产生成本分别为 $\text{PYC}_{(i+3)1}$ 、 $\text{PYC}_{(i+1)2}$ 和 $\text{PYC}_{(i+1)3}$

(2) 环境保护成本

环境保护成本(EPC)是指为避免环境污染和生态破坏所产生一部分生态成本,主要包括环境污染预防成本(PPC)和污染治理成本(PCC)。环境污染预防成本是指在污染尚未发生前,为避免或降低生产过程中的污染产生量,降低对大气、土壤、水的影响,从而购置环保设备、工艺改进、技术研发和环境管理而产生的成本。污染治理成本是发生在污染产生之后,为消除或减轻环境污染而产生的成本。包括污染物的运输、处置的费用等。环境保护成本是环境污染预防成本和污染治理成本之和,即:

$$\text{EPC} = \text{PPC} + \text{PCC} \quad (4)$$

由图3可见, PPC_{i1} 为工序 P_i 购置环保设备的成本, PPC_{i2} 为环保设备的运行成本, PPC_{i3} 环保设备的折旧成本; PCC 为 P_i 的污染治理成本,包括污染物运输、处置的费用。工序 P_i 的环境保护成本 EPC_i 为工序 P_i 中各项 PPC 与 PCC 之和,即:

$$EPC_i = \sum_{j=1}^3 PPC_{ij} + \sum_{h=1}^m PCC_{ih} \quad (5)$$

$$j = 1, 2, 3; h = 1, 2, \dots, m$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$ 分别代表此生产过程的第 1— n 个生产工序; $j = 1, 2, 3$ 分别代表此工序的生产设备购置、运行、折旧; $h = 1, 2, \dots, m$ 分别为此工序中污染物运输、处置、排放等因污染治理过程。

公式(5)为废纸回收利用体系中第 i 个工序的环境保护成本,将流程内第 1— n 个工序的环境保护成本加总,就可得到该生产流程的环境保护成本成本,即:

$$EPC = \sum_{i=1}^n EPC_i$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 PPC_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^m PCC_{ih} \quad (6)$$

2.2.2 基于 LIME 方法核算资源耗减成本和生态环境损害成本

LIME 方法将环境损害划分为空气污染、地球温室化、矿产耗减、化石燃料耗减等 11 种类别,并评估了千余种环境负荷物质^[56-57],可同时核算废纸回收利用体系中的资源耗减成本(RDC)和资源消耗带来的生态环境损害成本(EDC_R),统称为资源成本(RC),即:

$$RC = RDC + EDC_R \quad (7)$$

污染物造成的生态环境损害成本(EDC_W)与资源消耗带来的生态损害成本共同构成废纸回收利用体系的生态损害成本,即:

$$EDC = EDC_R + EDC_W \quad (8)$$

废纸回收利用系统中,工序 P_i 的资源耗减成本 RDC、资源消耗造成的生态环境损害成本 EDC_R 和污染物造成的生态环境损害成本分别为

$$RDC_i = \sum_{j=1}^m RDC_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$EDC_{R,i} = \sum_{j=1}^m EDC_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$ 分别代表此生产过程的第 1— n 个生产工序; $j = 1, 2, \dots, m$ 为此工序 P_i 消耗的各种资源。

将公式(9)、公式(10)分别带入公式(7)可以推导出资源成本:

$$RC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (RDC_{ij} + EDC_{R,ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m RC_{ij} \quad (11)$$

工序 P_i 中由污染物造成的生态环境损害成本为:

$$EDC_{W,i} = \sum_{k=1}^s EDC_{W,ik} \quad k = 1, 2, \dots, s \quad (12)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, s$ 为工序 P_i 产生的各项污染物与废弃物。

公式(12)为废纸回收利用体系中第 i 个工序中由污染物引起的生态损害成本,将流程内第 1— n 个工序中污染物引起的生态损害成本加总,就可得到该生产流程污染物造成的生态环境损害成本

$$EDC_W = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s EDC_{W,ik} \quad (13)$$

2.3 废纸回收过程生态成本构成

由图 1 至图 3 的分析,可以得到废纸回收体系的生态成本构成,各流程的生态成本构成情况如图 4 所示。

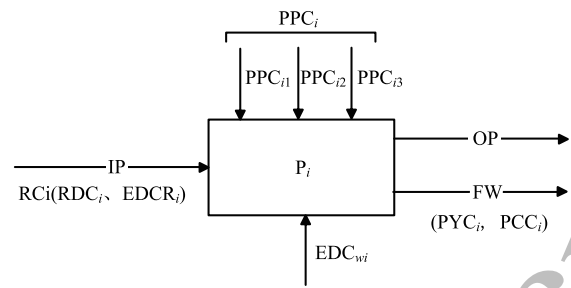


图 3 生产工序物质流情况和生态成本构成

Fig.3 Material flow and ecological costs in the process

RC_i: 生产环节 i 的资源成本 Recourse Cost; RDC_i: 生产环节 i 的资源耗减成本 Recourse Depletion Cost; EDC_{Ri}: 生产环节 i 的资源 Ecological Damage Cost of recourse; EDC_{Wi}: 污染物的生态环境损害成本 Ecological Damage Cost of waste; PYC_i: 生产环节 i 的污染物产生成本; PCC_i 为 P_i 的治理费用; PPC_{i1}: 生产环节 i 的环保设备购置费用; PPC_{i2}: 生产环节 i 的环保设备运行、折旧费用; PPC_{i3}: 环保设备的折旧费用; FW: 工序 P_i 产生的污染物或合格制品 Flow of Waste

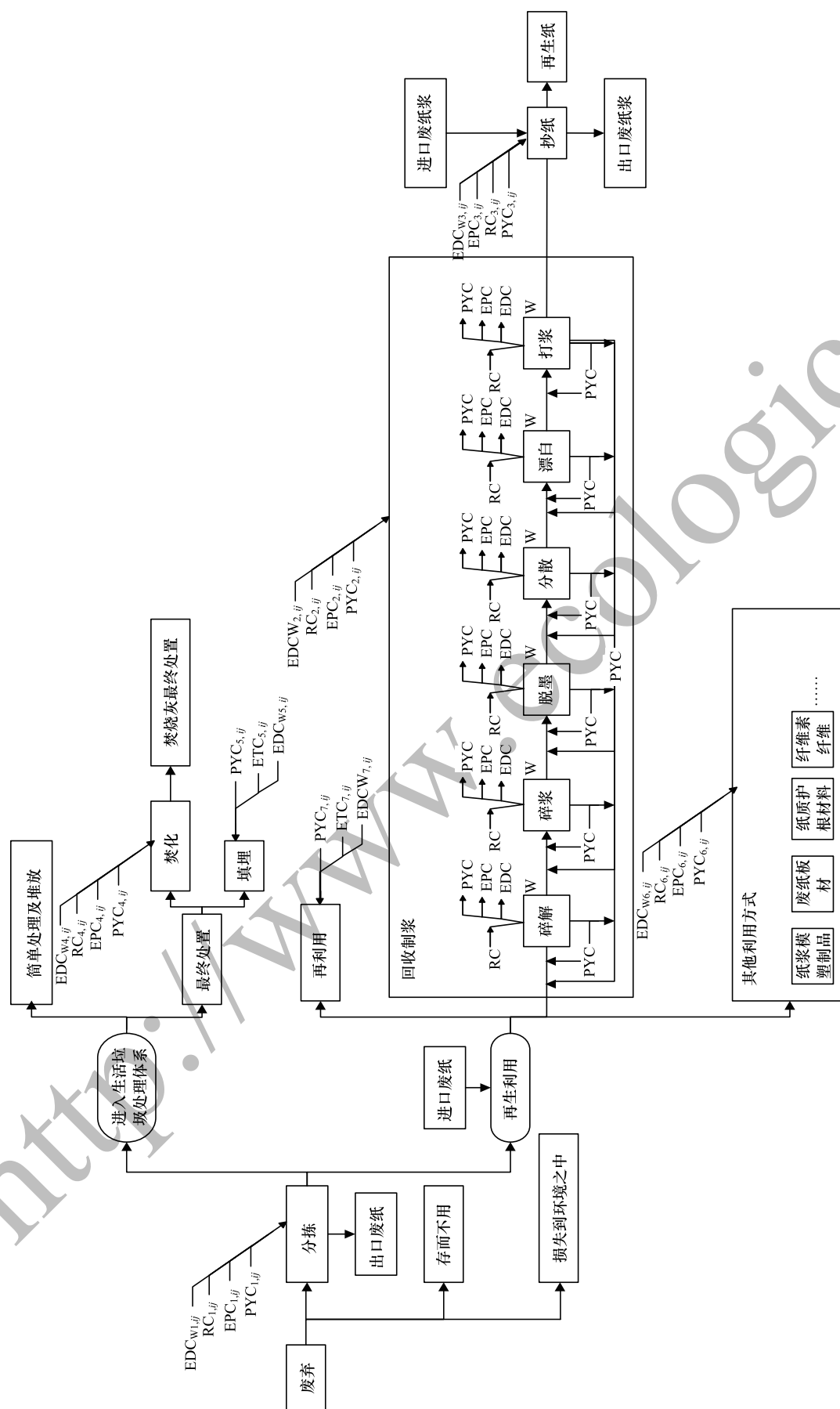


图 4 废纸回收利用体系各个流程生态成本构成情况图
Fig.4 Ecological costs in each process of the waste paper recycling system

RC:资源成本 Recourse Cost; EDC_w:资源耗减成本 Resource Depletion Cost; EDC_p:资源消耗造成的生态环境损害成本 Ecological Damage Cost made by recourse; EDC_w:污染物排放造成生态环境损害成本 Ecological Damage Cost made by waste; PYC:污染物产生成本 Pollution Yield Cost

由于填埋、再利用过程对资源投入的需求量很少,因此这两个过程中生态成本仅由 PYC、EPC 和 EDC_w 构成,其余生产环节由 PYC、EPC、RC 和 EDC_w 四部分构成。

根据废纸回收过程和生态成本的构成,可以得到生态成本计算模型:

$$EC = \sum PYC_N + \sum EPC_N + \sum RC_N + \sum EDC_{w,N} \quad (14)$$

式中,EC 为回收过程的生态成本; N 为回收过程的第 N 种生产流程;PYC 为生产过程的污染产生成本;EPC 为生产过程的环境保护成本;RC 为资源耗减成本与资源引起生态环境损害成本之和; EDC_w 为生产过程中由污染物造成的环境损害成本。

在分析废纸回收利用体系的物质流动和价值流转情况的基础上,按照上文所述公式(3)、(6)、(11)、(13)分别计算出污染产生成本 PYC、环境保护成本 EPC、资源成本 RC 和废弃物造成生态环境损害成本 EDC_w ,最后根据公式(14)计算出整个回收利用体系的生态成本。

公式(14)包含了废纸回收利用体系生态成本产生的所有组成部分,可以分别核算出各个工序的生态成本和总生态成本,明确各工序、流程对生态环境的影响程度,找到需要优化重点工序、流程,为改进生产模式和优化产业结构提供建议和数据支撑。

3 结论

本文重点以物质流分析方法为基础,对废纸回收利用体系的生态成本核算方法进行研究,主要结论如下:

(1)物质流分析是生态成本核算的基础。通过物质流分析将废弃物的价值可视化,可以有效地解决废弃物成本难以确定的问题,是全面核算生态成本的基础。

(2)提出废纸回收利用体系生态成本核算模型,污染物的产生和环境保护成本是总生产成本中负产品所占份额,资源耗减和生态环境损害成本借助 LIME 方法核算。

(3)生态成本核算是评价再生资源回收利用体系生态负荷的重要手段。基于物质流分析,绘制了废纸回收利用体系及其各工序的物质流情况图,并在此基础上分析了废纸回收利用体系各个生产流程生态成本的构成情况。

(4)本文提出生态成本计算模型,不仅适用于废纸回收利用系统,也适用于其他废弃回收利用体系。通过生态成本的计算,可以有针对性地指导再生资源产业绿色健康发展,为废弃物回收利用体系经济与环境的双赢提供理论与实践指导。

参考文献(References):

- [1] 商务部流通业务发展司. 中国再生资源回收行业发展报告(2015). 北京:商务部流通业务发展司,2015.
- [2] Finnveden G, Johansson J, Lind P, Moberg Å. Life cycle assessment of energy from solid waste—part 1: general methodology and results. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(3): 213-229.
- [3] Cherubini F, Bargigli S, Ulgiati S. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*, 2009, 34(12): 2116-2123.
- [4] Reich M C. Economic assessment of municipal waste management systems—case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC). *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(3): 253-263.
- [5] Steubing B, Böni H, Schluep M, Silva U, Ludwig C. Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis. *Waste Management*, 2010, 30(3): 473-482.
- [6] Nandy B, Sharma G, Garg S, Kumari S, George T, Sunanda Y, Sinha B. Recovery of consumer waste in India — a mass flow analysis for paper, plastic and glass and the contribution of households and the informal sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 101: 167-181.
- [7] Seigné-Itoiz E, Gasol C M, Rieradevall J, Gabarrell X. Methodology of supporting decision-making of waste management with material flow analysis (MFA) and consequential life cycle assessment (CLCA): case study of waste paper recycling. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 105: 253-262.
- [8] 中国造纸学会. 中国造纸年鉴 2014. 北京:中国轻工出版社, 2015. 20-25.

- [9] Byström S, Lönnstedt L. Paper recycling: environmental and economic impact. *Resources, Conservation and Recycling*, 1997, 21(2): 109-127.
- [10] Merrill H, Damgaard A, Christensen T H. Life cycle assessment of waste paper management: the importance of technology data and system boundaries in assessing recycling and incineration. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52(12): 1391-1398.
- [11] 王奇, 汪清, 潘国隆. 我国废纸循环利用的适度水平研究. *生态经济*, 2012, (2): 127-131, 149.
- [12] Masternak-Janus A, Rybaczewska-Błazejowska M. Life cycle analysis of tissue paper manufacturing from virgin pulp or recycled waste paper. *Management and Production Engineering Review*, 2015, 6(3): 47-54.
- [13] 赵会芳, 方程冉, 张建英. 废纸再生的环境经济评价. *西南造纸*, 2005, 34(2): 7-8.
- [14] Rodríguez-de-Francisco J C, Budds J. Payments for environmental services and control over conservation of natural resources: the role of public and private sectors in the conservation of the Nima watershed, Colombia. *Ecological Economics*, 2015, 117: 295-302.
- [15] Ghazoul J, Garcia C, Kushalappa C G. Landscape labelling: a concept for next-generation payment for ecosystem service schemes. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(9): 1889-1895.
- [16] Pham T T, Loft L, Bennett K, Phuong V T, Dung L N, Brunner J. Monitoring and evaluation of payment for forest environmental services in Vietnam: from myth to reality. *Ecosystem Services*, 2015, 16: 220-229.
- [17] 王女杰, 刘建, 吴大千, 高甦, 王仁卿. 基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例. *生态学报*, 2010, 30(23): 6646-6653.
- [18] Wei X Y, Xia J X. Ecological compensation for large water projects based on ecological footprint theory: a case study in China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1338-1345.
- [19] Villarroya A, Persson J, Puig J. Ecological compensation: from general guidance and expertise to specific proposals for road developments. *Environmental Impact Assessment Review*, 2014, 45: 54-62.
- [20] Pagiola S. Payments for environmental services in Costa Rica. *Ecological Economics*, 2008, 65(4): 712-724.
- [21] Vaissière A C, Levrel H, Hily C, Guyader D L. Selecting ecological indicators to compare maintenance costs related to the compensation of damaged ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2013, 29: 255-269.
- [22] 欧阳志云, 郑华, 岳平. 建立我国生态补偿机制的思路与措施. *生态学报*, 2013, 33(3): 686-692.
- [23] Allen C, Day G. Depletion of non-renewable resources imported by China. *China Economic Review*, 2014, 30: 235-243.
- [24] Rodríguez X A, Arias C, Rodríguez-González A. Physical versus economic depletion of a nonrenewable natural resource. *Resources Policy*, 2015, 46: 161-166.
- [25] Rimos S, Hoadley A F A, Brennan D J. Resource depletion impact assessment: impacts of a natural gas scarcity in Australia. *Sustainable Production and Consumption*, 2015, 3: 45-58.
- [26] Tichavska M, Tovar B. Environmental cost and eco-efficiency from vessel emissions in Las Palmas Port. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 83: 126-140.
- [27] Norse D, Ju X. Environmental costs of China's food security. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 5-14.
- [28] 林万祥, 肖序. 论环境成本的理论框架. *河南金融管理干部学院学报*, 2003, (4): 73-76.
- [29] 王立彦. 环境成本与 GDP 有效性. *会计研究*, 2015, (3): 3-11, 94.
- [30] Buonocore E, Häyhä T, Paletto A, Franzese P P. Assessing environmental costs and impacts of forestry activities: A multi-method approach to environmental accounting. *Ecological Modelling*, 2014, 271: 10-20.
- [31] 肖序, 周志方, 李晓青. 论资源流成本会计在铅锌冶炼业的应用. *财务与金融*, 2008, (6): 28-33.
- [32] 肖序, 周志方. 企业环境风险管理与环境负债评估框架研究. *审计与经济研究*, 2012, 27(2): 33-40.
- [33] 刘娟. 水泥行业循环经济价值流管理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [34] 郑玲. 基于生态设计的资源价值流转会计研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [35] Christ K L, Burritt R L. Material flow cost accounting: a review and agenda for future research. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 108: 1378-1389.
- [36] Nakajima M, Kimura A, Wagner B. Introduction of material flow cost accounting (MFCA) to the supply chain: a questionnaire study on the challenges of constructing a low-carbon supply chain to promote resource efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 108: 1302-1309.
- [37] Sulong F, Sulaiman M, Norhayati M A. Material flow cost accounting (MFCA) enablers and barriers: the case of a Malaysian small and medium-sized enterprise (SME). *Journal of Cleaner Production*, 2015, 108: 1365-1374.
- [38] 唐双娥, 郑太福. 生态成本控制的公私法局限. *社会科学家*, 2006, (1): 97-102.
- [39] 李晓, 谢永生, 张应龙, 芦蔚叶, 李文卓. 红壤丘陵区粮食生产的生态成本. *生态学报*, 2011, 31(4): 1101-1110.
- [40] 张亚连, 邓德胜. 构建反映生态成本的企业产品定价机制. *价格理论与实践*, 2012, (4): 32-33.
- [41] 顾晓薇, 胥孝川, 王青, 王润. 矿山开采的生态成本. *东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(4): 594-597.

- [42] 林万祥, 冷平生, 张亚连. 基于产品生命周期的环境成本分析与评估. 徐州工程学院学报, 2007, 22(11): 14-18.
- [43] 李晓. 不同类型区粮食生产生态成本典型案例研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011:.
- [44] 苏县龙. 我国粮食安全的生态成本及其优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008:.
- [45] 李晓, 谢永生, 张应龙, 李文卓. 黄土高原沟壑区粮食生产中的生态成本. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3168-3174.
- [46] 李晓, 谢永生, 李文卓, 张应龙. 黄淮海冲积平原区粮食生产生态成本探究. 中国农业科学, 2011, 44(11): 2294-2302.
- [47] 黄烈生, 张丹. 煤炭企业生态环境成本分析. 会计之友, 2008, (2): 26-27.
- [48] 邢翼, 李宝印. 矿山开采过程中造成的生态成本研究. 煤炭工程, 2012, (S2): 138-139, 143.
- [49] 王青, 胥孝川, 顾晓薇, 刘剑平, 王晓旭. 金属矿床露天开采的生态足迹和生态成本. 资源科学, 2012, 34(11): 2133-2138.
- [50] 王青, 胥孝川, 顾晓薇, 刘剑平. 考虑生态成本的露天煤矿生产计划优化. 金属矿山, 2015, (3): 23-27.
- [51] 顾晓薇, 胥孝川, 王青, 刘剑平. 露天矿最终境界的经济-生态一体化优化. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(9): 1347-1351.
- [52] 郑太福. 略论生态成本控制的市场规制法完善. 长沙大学学报, 2006, 20(6): 86-88.
- [53] 黄和平, 毕军, 李祥妹, 张炳, 杨洁. 区域生态经济系统的物质输入与输出分析——以常州市武进区为例. 生态学报, 2006, 26(8): 2578-2586.
- [54] 卢伟. 废弃物循环利用系统物质代谢分析模型及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [55] 何裔鑫. 废纸废水及固体废弃物的毒性及关键毒性物质的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
- [56] Bare J C, Gloria T P. Critical analysis of the mathematical relationships and comprehensiveness of life cycle impact assessment approaches. Environmental Science & Technology, 2006, 40(4): 1104-1113.
- [57] 肖序, 周志方, 李晓青. 论环境成本的创新——基于内部资源流成本与外部损害成本的融合研究. 上海立信会计学院学报, 2008, (5): 39-46.