

DOI: 10.5846/stxb201508151708

齐宇, 朱坦, 高帅, 王军锋, 汲奕君, 张墨, 卜欣欣. 中国产业园区循环化改造应用关键物质流典型路径分析方法初探. 生态学报, 2016, 36(22):

Qi Y, Zhu T, Gao S, Wang J F, Ji Y J, Zhang M, Bu X X. Preliminary exploration of the Chinese industrial park's circularization reform using key material flow analysis. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22):

中国产业园区循环化改造应用关键物质流典型路径分析方法初探

齐 宇¹, 朱 坦^{1,*}, 高 帅², 王军锋¹, 汲奕君¹, 张 墨¹, 卜欣欣¹

¹ 南开大学环境与社会发展研究中心, 天津 300071

² 浙江省经济信息中心, 杭州 310006

摘要: 产业园区循环化改造是我国在“十二五”期间和今后一个时期内的一项重要工作, 也是在园区层面实施循环发展的主要内容。物质流分析 (Material flow analysis, MFA) 是产业生态学的核心分析方法, 正在成为资源环境管理领域有效的分析工具。通过梳理物质流分析方法的发展历程, 指出产业园区循环化改造应用物质流分析存在注重物质规模而忽视环境影响、黑箱过程不利定量研究、小区域研究适用性不强以及隐藏流造成的数据误差等方面问题, 同时通过大量调查实践, 认为园区循环化改造可从企业开展清洁生产、促进园区内和园区间的产业共生、加强园区资源循环基础设施建设 3 个领域入手, 在将园区全部企业分为生产性企业、再生性企业和资源循环基础设施企业 3 种类型基础上, 提出关键流概念及其识别思路, 探索构建物质流路径归类评价方法框架, 归纳出 8 条典型物质流路径, 为提升园区物质流管理水平提供方法依据, 并选取天津经济技术开发区作为典型案例进行研究, 最后对我国产业园区循环化改造应用物质流分析方法进行了展望。

关键词: 产业园区; 循环化改造; 关键流; 物质流路径归类

Preliminary exploration of the Chinese industrial park's circularization reform using key material flow analysis

QI Yu¹, ZHU Tan^{1,*}, GAO Shuai², WANG Junfeng¹, JI Yijun¹, ZHANG Mo¹, BU Xinxin¹

¹ Research Center for environmental and social development, Nankai University, Tianjin 300071, China

² Zhejiang Economic Information Center, Hangzhou 310006, China

Abstract: The industrial park's circular reconstruction is an important task in the 12th Five-Year Plan in China. It is also a chief component of circular development at the industrial-park level. As the primary analytical method of industry ecology, material flow analysis (MFA) is an effective analysis tool in the resource and environment management field. In this paper, we outline MFA's developmental process and summarize several defects: MFA placed more weight on quantity than influence; its black-box process is unsuited to quantitative study; its applicability is weak in small-scale analyses; and the hidden flow caused deviations. Based on massive investigative practice, three domains were extracted to perform the industrial park's circularization reform, which were a cleaner production in enterprise; promotion of industrial symbiosis within and among industrial parks; enhancement of the park's infrastructure construction. The enterprises in the industrial park were sorted into three types: manufacturing, reproductive, and resource-environment infrastructure. A new concept, key flow, was suggested and its recognition method was developed. After constructing the method frame of material flow path

基金项目: 天津市哲学社会科学研究规划项目 (TJYY15-006); 南开大学亚洲研究中心资助研究项目 (AS1420); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (NKZXB1411)

收稿日期: 2015-08-15; 修订日期: 2016-05-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhutan@nankai.edu.cn, qiyu@nankai.edu.cn

classification and evaluation, eight kinds of typical material flow paths were summarized and speculated to enhance the management level of material flow. Simultaneously, we choose TEDA as a typical case study. Finally, the prospect of Chinese industrial park's circularization reform using material flow analysis was anticipated.

Key Words: industrial park; circular reconstruction; key material flow; material flow path classification

1 中国产业园区循环化改造概况

中国产业园区包括经济技术开发区、高新技术产业开发区、保税区、出口加工区以及各类专业园区等,园区建设是一种有效推动产业集聚、促进资源高度集中的发展模式。我国现已建设省级以上园区逾 2000 家,其中各类国家级园区超过 300 家,这些园区为集约发展提供良好的基础设施、制度保障和服务条件等综合发展平台,是工业化提升、城镇化加快的重要载体。

园区循环化改造是我国在“十二五”期间和今后一个时期内的一项重要工作,也是在园区层面实施循环发展的主要内容,其基本遵循是以区域的资源环境承载能力为基础,根据物质流和产业关联性,结合本区域的产业和资源的比较优势,合理延伸产业链,促进资源的高效利用、反复利用、循环利用,提高资源产出率。

国家发改委将物质流分析与管理作为推进园区循环化改造的一个重要技术方法,围绕园区循环化改造成效可量化的指标、空间布局的合理性分析以及加强物质流分析与管理 3 个方面提出了工作任务^[1]。

2 产业园区应用物质流分析方法遇到的问题

2.1 发展历程

物质流分析理论的萌芽可以追溯到 100 多年前,当时的研究主要集中在物质代谢理论。Jarob Molescott (1557)最早提出了物质代谢的概念,认为这是一种生命代谢现象,是生命体与环境进行物质、能量交换的过程^[2]。在 20 世纪,物质流分析理论的思想开始出现在不同的研究领域。在社会学领域,马克思在《资本论》和《经济学批判大纲》等著作中多次使用物质代谢的概念,用来阐述人类劳动、生产和商品交换等问题。在经济学领域,Leontief 在上个世纪 30 年代运用输入输出平衡分析的方法,定量分析了美国经济系统以货币计量的物流状况^[2]。到了 20 世纪 70 年代,物质流分析的理论开始进入资源环境领域,最早的两个理论成果是城市新陈代谢和城市或流域的污染物迁移路径分析。之后,学术界又提出了更具有现代环境管理意义的物质平衡理论和工业代谢理论。在此基础上,德国 Wuppertal 研究所在 20 世纪 90 年代初提出了物质流账号体系和隐藏流;欧盟委员会组建了服务于物质流分析国际合作的 Con Account 平台;世界资源研究所完成了“工业经济的物质基础”的研究,分析了美国、日本、德国、奥地利和荷兰的物质输入流,又完成了“国家之重”的研究,分析了上述国家的物质输出流。此后,多个国家和地区开展了物质流分析,并且形成了欧盟统计局“欧盟方法体系”和世界资源环境所的“WRI 方法体系”两大方法体系^[3-6]。

2.2 实践中遇到的理论问题

通过对物质流发展历程的梳理,结合我国产业园区循环化改造的应用实践情况看,产业园区作为区域层面应用物质流分析的主要方面,园区应用物质流分析方法虽然能够在一定程度上反映目标系统与自然生态系统间物质流动关系,而且正在成为资源环境管理领域有效的分析工具^[7-13],但同时存在需要解决的问题,主要包括 4 个方面。

一是物质流分析注重物质规模而忽视环境影响。物质流指标与资源环境影响的关联度较弱,对可持续发展的指导意义低,区域物质流指标体系已经逐步融合到循环经济、低碳发展等区域可持续发展理念中,为制定区域发展战略提供了量化可能^[14],并可为政府决策提供参考^[15],然而指标层面多应用于宏观经济社会发展评估,很难深入考察区域物质流具体流程与区域经济社会发展机制对资源环境的微观影响。如何从指标层

面的经济社会宏观评估走向资源环境影响评估,是区域物质流分析的应用方向。

二是黑箱过程不利于定量研究。目前物质流的分析框架普遍将经济系统视为“黑箱”,大部分区域物质流分析的案例研究都是从物质输入输出(Input-output)、存量与流量模型(Stock and flow, STAF)、材料流分析(Substance flow analysis, SFA)和区域动态模型(Regional dynamic model)等传统研究框架出发^[16-17],只有少数案例对分析框架做了部分改进^[18-20]。如何将“黑箱”变为“灰箱”甚至“白箱”?如何定量研究系统内部各环节的物质综合利用规律?都是亟待深入研究的问题。

三是小区域研究适用性不强。目前成功的物质流研究均着眼于国家大尺度和大区域,物质种类的多样性和物质流过程的复杂性,使得小尺度和小区域调查、统计、分析内容不规范,研究的数据可得性差。

四是隐藏流造成的数据误差。总物质需求受隐藏流干扰,不确定性大,隐藏流系数难以确定。区域内部物质流动过程存在复杂性和差异性,区域物质流分析的指标体系沿用国家层面物质分类和指标设计进行评估^[21-22],一些案例虽然在此基础上有所改进^[18],但整体变动不大。如何合理校正和规避隐藏流造成的数据误差而不影响物质流分析的精度,是区域层面应用物质流分析应重点探讨的内容。

3 中国产业园区循环化改造物质流路径分析总体框架

受有中国特色的企业层面推行清洁生产、园区层面建设生态工业园、社会层面建设循环型社会的循环经济发展模式启发,产业园区循环化改造可以从企业开展清洁生产、促进园区内和园区间的产业共生、加强园区资源循环基础设施建设3个领域入手,在园区的地理范围内,在不同层面上,针对不同的目标系统,应用物质流分析理论与方法,并与现有工作有机结合,为提升园区物质流管理水平提供方法依据。

针对物质流分析注重物质规模而忽视环境影响和隐藏流造成的数据误差问题,本文提出关键流的概念,关注物质消耗大宗和环境影响显著的关键流以增强物质流分析在小区域的可行性,以关键流替代总物质流分析,屏蔽隐藏流的影响;针对黑箱过程不利于定量研究的问题,提出物质流路径分类评价方法框架,通过将物质循环路径进行分类,将传统的“黑箱”模型细化为“灰箱”;通过对关键流及路径分类的研究,确立标准化的数据统计口径,提升区域物质流分析的数据可得性,解决物质流在小区域研究方面适用性不强的问题^[23-30]。

3.1 特定目标系统的设定

物质流分析是基于特定目标系统物质流动情况展开的,特定目标系统可以是某个国家、城市、行业或企业等。产业园区中企业是物质流分析的基本单元,以企业处理废弃物的方式为标准,将企业分为生产性企业、再生性企业和资源循环基础设施企业3类。生产性企业指主要原材料(输入端)是原生物质,主要产品(输出端)是原生产品;再生性企业指主要原材料(输入端)是废旧物质,主要产品(输出端)是再生产品;资源循环基础设施企业主要包括能源基础设施企业、水资源基础设施企业、固体废弃物基础设施企业等类型。

参照物质流分析的核心思想,结合产业园区实际情况,设定产业园区行政区域为循环化改造物质流分析的特定目标系统,并依据企业分类进一步分为四大子系统,具体包括生产性企业子系统、(生产性企业)产业共生子系统、再生性企业子系统和资源循环基础设施企业子系统。

3.2 关键流识别思路

关键流是指园区和企业物质流分析中一些特定物质输入、输出目标系统的物质流动,特定物质可以根据物质流分析的任务和目标系统情况来确定。识别关键流是探索服务于园区循环化改造物质流分析方法的关键工作。

(1) 关键流的概念和研究意义

物质流分析按照研究层次的不同可以划分为区域层面物质流分析、行业层面物质流分析和企业层面物质流分析。从目前的理论研究和实践应用来看,在区域层面、行业层面和企业层面都已经开展了相关工作。这些工作能够在宏观上较好的描述目标系统物质输入、输出、消耗强度和利用效率等方面的情况。但是对一些关键物质的流动情况关注不足,致使一些具有特殊资源环境影响但总量较小的物质在分析结论中没有得到有

效的反映,影响了人类对于物质流动情况的科学认识,难以实现系统、分类、分级的指导。引入“关键流”的概念可以有效解决这一问题。此外,园区循环化改造物质流分析主要开展园区和企业的分析工作,属于微观层面,缺乏区域层面的统计数据(如统计年鉴)支撑,通过引入关键流,能够避免陷入一些难以统计、总量很小、种类繁多的物质核算中,同时将园区循环化改造的重点关注物质加以凸显^[31-35]。

(2) 园区循环化改造中的关键流识别思路

国家发改委在《关于推进园区循环化改造的意见》中明确提出,园区循环化改造以提高资源产出率为目标,调整产业结构,优化资源配置,推进园区土地集约利用,大力推行清洁生产,推进企业间废物交换利用、能量梯级利用、废水循环利用^[36]。园区循环化改造物质流分析,要重点关注以下几类物质的流动情况:

一是资源产出率核算中涉及的物质流动情况。国家发改委在《园区循环化改造示范试点实施方案编制指南》中对资源产出率进行了指标解释,提到:“资源产出率是指主要资源单位消耗量所产出的经济总量(GDP),请各单位结合自身实际选择生产过程中消耗的主要资源,并附详细的资源种类、消耗数据和计算过程。其中,主要资源消费总量指初始资源投入总量,单位为万吨,品种包括:能源资源(煤炭、石油、天然气),矿产资源(铁矿、铜矿、铝土矿、铅矿、锌矿、镍矿、锰矿、石灰石、磷矿、硫铁矿),木材,工业用粮;地区生产总值为2010年不变价。”因此,无论在企业层面还是在园区层面开展分析,要将上述物质纳入关键流。

二是水资源的流动情况。水资源是发展国民经济不可缺少的重要资源,国家发改委在园区循环化改造工作中围绕水资源提出了水资源产出率、工业用水重复利用率和工业废水排放量等参考考核指标。因此,水资源的流动情况可以统筹考虑园区内新鲜水、废水、中水和海水淡化等,作为关键流进行分析。

三是废弃物的流动情况。减少废弃物产生和排放,加强废弃物综合利用,是园区循环化改造的重点工作。国家发改委在园区循环化改造工作中提出了工业固体废物综合利用率、废旧资源综合利用量(含进口)、工业固体废物排放量和工业固体废物处置量等参考考核指标。园区层面和企业层面都要注意废物流的分析,企业层面还要注意一般性生产企业和再生性企业的差异。

四是危险废弃物、有毒有害物质和污染物的排放情况。

五是产品产出情况。

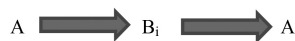
3.3 物质流路径分类评价方法框架

物质流路径用于描述物质在物质代谢主体间流动关系,包括物质代谢主体与生态环境间的物质交换,主要指某种物质由主体A流向主体B^[37-42]。

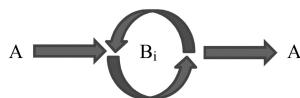
(1) 凝练典型物质流动路径

本文将产业园区中的企业分为生产性企业、再生性企业和资源循环基础设施企业。现归纳出8条典型物质流路径(图1)。

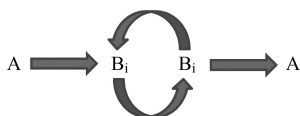
关键物质流典型路径1:物质输入生产性企业后直接输出系统。



关键物质流典型路径2:物质输入生产性企业,首先进行企业内部生产及循环利用,然后再输出。



关键物质流典型路径3:物质输入生产性企业,首先进行企业内部生产利用,后外排副产品和废弃物中的一部分在生产性企业间交换循环利用,最后最终废弃物外排到系统外部。



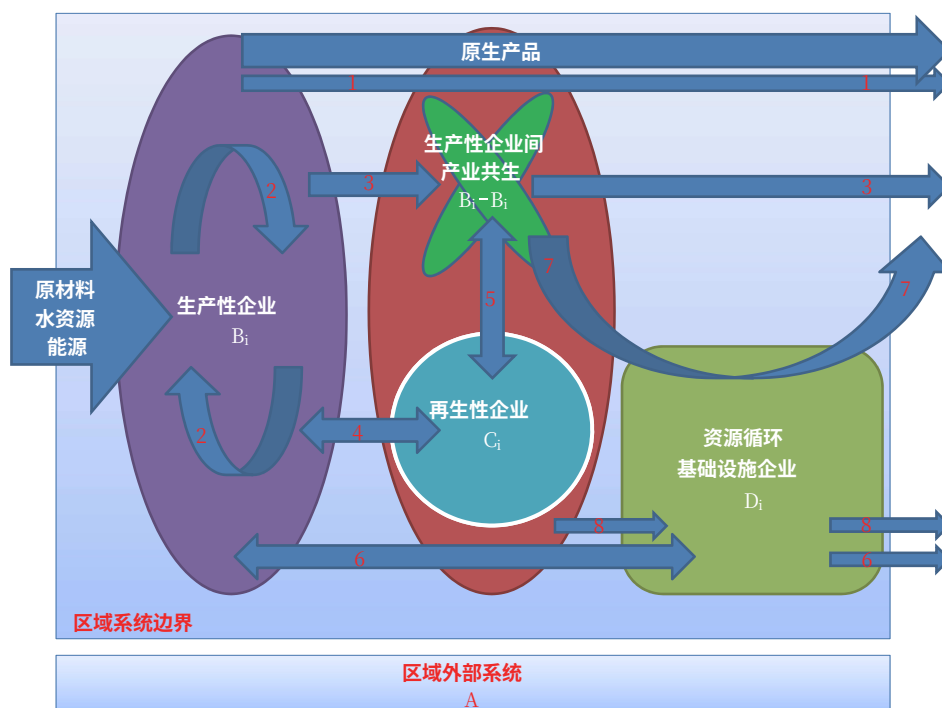


图1 产业园区循环化改造物质流分析概念模型

Fig.1 Concept model on industrial park's circularization reform by using material flow analysis

关键物质流典型路径4:物质输入生产性企业,首先进行企业内部生产利用,后外排废弃物进入再生性企业再生利用,最后最终废弃物外排到系统外部。

$$A \longrightarrow B_i \longleftrightarrow C_i \longrightarrow A$$

关键物质流典型路径5:物质输入生产性企业,首先进行企业内部生产利用,后外排副产品和废弃物中的一部分在生产性企业间交换,剩余废弃物进入再生性企业再生利用,最后最终废弃物外排到系统外部。

$$A \longrightarrow B_i \begin{matrix} \text{B}_i \\ \text{B}_i \end{matrix} \longleftrightarrow C_i \longrightarrow A$$

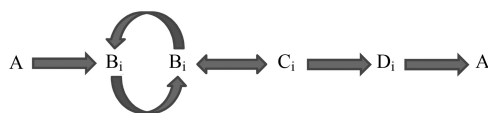
关键物质流典型路径6:物质输入生产性企业,首先进行企业内部生产利用,后外排废弃物进入资源循环基础设施企业循环利用,最后最终废弃物外排到系统外部。

$$A \longrightarrow B_i \longleftrightarrow D_i \longrightarrow A$$

关键物质流典型路径7:物质输入生产性企业,首先进行企业内部生产利用,后外排副产品和废弃物中的一部分在生产性企业间交换,剩余外排废弃物进入资源循环基础设施企业,最后最终废弃物外排到系统外部。

$$A \longrightarrow B_i \begin{matrix} \text{B}_i \\ \text{B}_i \end{matrix} \longleftrightarrow D_i \longrightarrow A$$

关键物质流典型路径8:物质输入生产性企业,首先进行企业内部生产利用,后外排副产品和废弃物中的一部分在生产性企业间交换,剩余外排废弃物进入再生性企业,后剩余废弃物进入资源循环基础设施企业,最后最终废弃物外排到系统外部。



(2) 物质流路径归类

物质流路径归类是开展物质流管理的关键环节,归类原则是围绕 3 个重点领域,目标是建立以促进提高资源产出率为核心的指标体系。现将中国产业园区循环化改造物质流分析概念模型中,物质流路径 1 和 2 归类于重点企业开展清洁生产,路径 3、4 和 5 归类于产业共生,路径 6、7 和 8 归类于园区层面的资源循环基础设施建设。在构建指标体系时,重点企业循环化改造的核心是考核重点企业的资源产出率,结合企业具体情况,在重点消耗资源、亟待开展减量化的资源等方面设置考核指标;在促进产业共生领域,应建立以循环经济产业关联度为核心的考核指标,用于描述园区循环经济产业链培育情况和水平;在园区资源循环基础设施企业,建立描述水资源(包括新鲜水、废水、再生水和海水淡化等)利用、固体废弃物综合利用和危险废物安全处置为核心的指标体系。

4 案例研究

本文选取天津市经济技术开发区作为典型案例,该园区是国家首批“循环经济试点园区”和首批“循环化改造试点园区”,承担着探索园区层面应用物质流分析工具的方法学研究任务,园区围绕物质流管理开展了一系列工作,为进行案例研究提供了坚实的实践基础。由于园区目前不具备传统物质流分析所需的大量细致的统计数据,同时上述总体框架符合园区物质综合利用实际情况,因此,案例研究从关键物质流典型路径角度,对园区物质流进行识别和分析评估。

4.1 关键物质流典型路径识别

依据目前天津经济技术开发区循环化改造的实践基础,结合《天津滨海新区产业共生及节能减排案例集》及相关实地调研等最新掌握的数据资料信息(天津经济技术开发区环境保护局、天津泰达低碳经济促进中心提供),本案例中识别出关键物质流典型路径 1、2、3、4、6 五种类型。

(1) 关键物质流典型路径 1:以水资源为例,原水输入 A 公司(生产性企业)后,直接排放到天津经济技术开发区行政区域系统边界外部,废水排放量为 10679.2 吨/年。

(2) 关键物质流典型路径 2:以水资源为例,原水输入 A 公司(生产性企业)后,产生的废水首先在公司内部进行循环利用,然后再排放到天津经济技术开发区行政区域系统边界外部,废水排放量为 54158.0t/a。

(3) 关键物质流典型路径 3:物质输入 A 公司(生产性企业)后,每年产生的 2400.0t 废木屑作为 B 公司(生产性企业)的原材料进行资源化利用,最终废弃物外排到系统外部。

(4) 关键物质流典型路径 4:物质输入 A 公司(生产性企业)后,每年产生的 8.0t 相机外壳废弃物作为 B 公司(再生性企业)的原材料进行资源化利用,最终废弃物外排到系统外部。

(5) 关键物质流典型路径 6:物质输入 A 公司(生产性企业)后,每年产生的 95040.0t 废水,作为 B 公司(资源循环基础设施企业)的原材料进行资源化利用,最终废弃物外排到系统外部。

4.2 关键物质流典型路径分析评估

通过以上对关键物质流典型路径的识别,在识别出的典型路径 1、2、3、4、6 中,物质流路径 1 和 2 归类于重点企业开展清洁生产,概念模型中推测存在的物质流典型路径均有多个实践案例,显示区域开展清洁生产工作基础扎实,企业内部资源利用效率较高;路径 3 和 4 归类于产业共生,3 种理论存在的物质流中识别出 2 种,同时存在大量的产业共生案例,表明区域开展产业共生工作效果显著,极大地提升了区域资源产出率;物质流路径 6 归类于园区层面的资源循环基础设施建设,表明资源循环基础设施建设已具备一定的基础,在今后的循环化改造中需进一步鼓励资源循环基础设施企业的建设,特别是提供资源化利用技术和管理咨询服务的资源循环基础设施企业,例如水资源、能源等基础设施企业,丰富、完善典型物质流的建设。

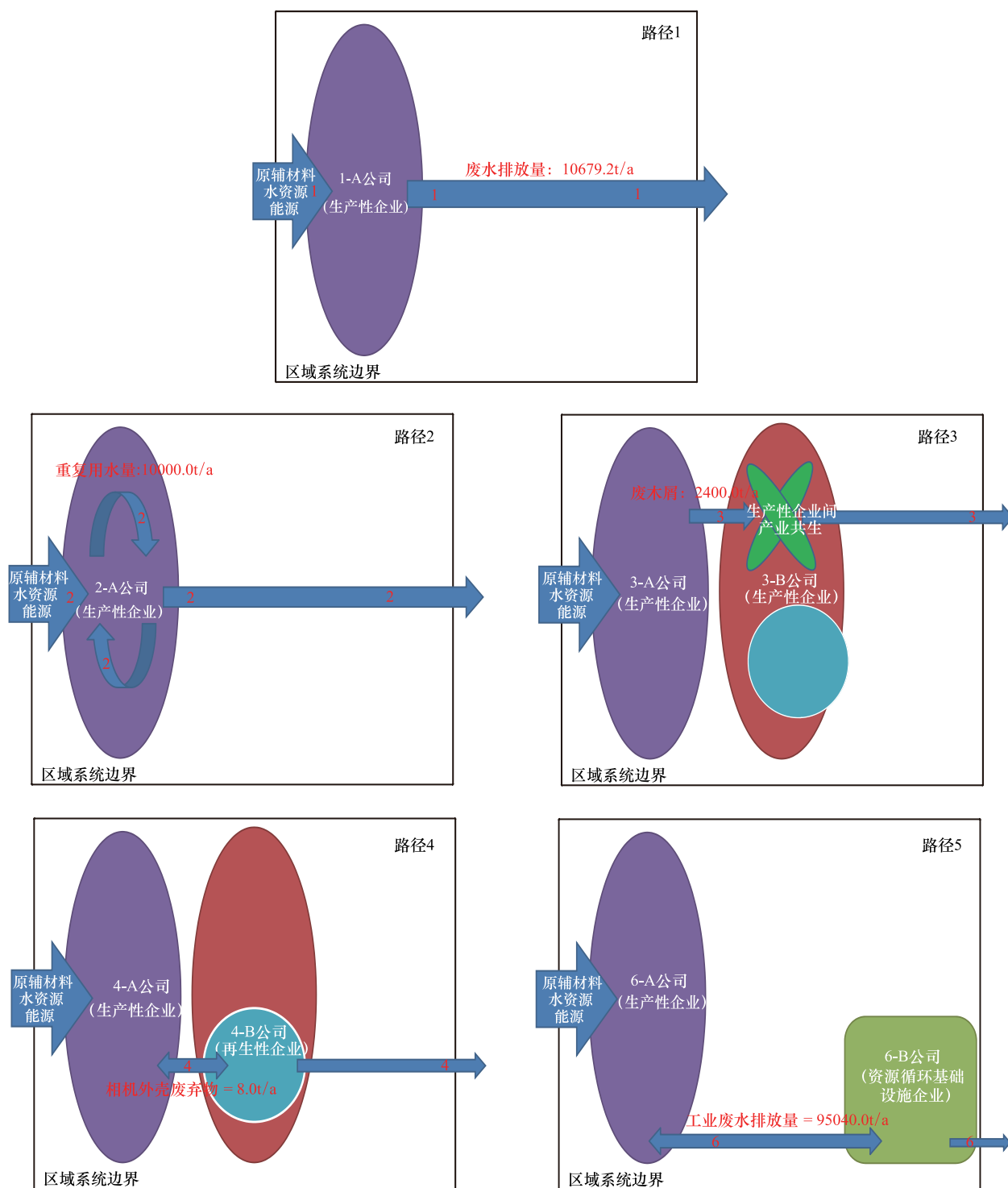


图2 关键物质流典型路径

Fig.2 Typical way of key material flow

4.2.1 关键物质流典型路径基本情况分析

表1 对关键物质流典型路径进行了定量分析评估。

从案例数及其占比看,路径类型4和路径类型6案例数所占比例较多,分别为32.88%和34.25%,说明再生性企业和资源循环基础设施企业在关键物质流典型路径的形成过程中作用显著,如果没有再生性企业和资源循环基础设施企业存在,案例数占比将减少67.13%,总CO₂减排量将减少44.19%,总经济效益将减少50.02%,说明将产业园区循环化改造的工作重点放在引进和培育再生性企业和资源循环基础设施企业上很有必

要,未来应有针对性的选择适合园区废弃物产生特点的补链企业(再生性企业和资源循环基础设施企业)入驻,提高资源产出率;同时,路径类型 5、7、8 没有相关案例存在,一部分原因在于再生性企业和资源循环基础设施企业之间产生物质流联系难度较高,也说明关键物质流典型路径在产业生态系统内部还有进一步优化的空间。

从总体指标来看,总 CO₂减排量路径类型 2 和路径类型 4 占比分别为 38.03%和 42.48%,总经济效益路径类型 2 和路径类型 4 占比分别为 34.32%和 34.62%,说明企业内部物质循环利用和通过再生性企业循环利用实现的物质减量化和经济效益最大化占主导地位,显示园区开展企业清洁生产工作和引入补链企业成效显著,对提高区域资源产出率和由此带来的经济效益产生了重要的作用。

从平均指标来看,平均 CO₂减排量路径类型 3 为 100000.00/个为最大值,平均经济效益路径类型 3 为 417.00 万元/个为最大值,说明生产性企业间一旦寻找到合适原材料和废弃物的交换机会,能通过物质交换利用带来较多的物耗、能耗下降及经济效益,未来应继续完善基于副产品和废弃物交易的网络平台,发现更多交易机会,提高资源产出率,降低交易成本。

表 1 关键物质流典型路径分析评估

Table 1 Finding and evaluation of typical way

指标 Index	路径类型 2 Route type 2	路径类型 3 Route type3	路径类型 4 Route type4	路径类型 6 Route type6
案例数 Number of cases/个	19	5	24	25
案例占比 Ratio of cases/%	26.03	6.85	32.88	34.24
总 CO ₂ 减排量 Total CO ₂ emission reduction/ton/ton	213905.27	100000.00	238892.30	9594.86
总 CO ₂ 减排量占比 Ratio of Total CO ₂ emission reduction/%	38.03	17.78	42.48	1.71
平均 CO ₂ 减排量 Average CO ₂ emission reduction/t	15278.95	100000.00	11375.82	738.07
最大 CO ₂ 减排量 Maximum CO ₂ emission reduction/t	129000.00	100000.00	204448.00	7274.01
总经济效益 Total values/ten thousand yuan/万元	2742.71	1251.00	2766.93	1230.62
总经济效益占比 Ratio of Total values/ten thousand yuan/%	34.32	15.66	34.62	15.40
平均经济效益 Average values/ten thousand yuan/万元	228.56	417.00	125.77	64.77
最大经济效益 Maximum values/ten thousand yuan/万元	1155.96	1093.00	1872.54	320.00

关键物质流典型路径 1 作为常规类型,未做统计及讨论

4.2.2 关键物质流典型路径案例 CO₂减排量和经济效益分布情况分析

图 3 是各类型关键物质流典型路径的案例数量和年 CO₂减排量分布情况。在识别出的关键物质流典型路径 2 中的 19 个案例中,有 CO₂减排量统计数据的案例为 14 个,除 0—1t 区间外的各区间均有分布且案例数量较为平均,说明企业通过开展清洁生产工作,能够普遍降低能耗、物耗,提高资源产出率,并且如果有合适的工艺改进和设备升级,会带来较大的资源产出率提升。

在识别出的关键物质流典型路径 4 中的 24 个案例中,有 CO₂减排量统计数据的案例为 21 个,主要分布在 0—2500t 区间,说明区域内再生性企业能够广泛的利用生产性企业产生的废弃物进行资源化利用,在一定程度上提高区域资源产出率,相应提高区域整体的资源利用水平,并且存在所有案例 CO₂减排量最大值 204448.00t/a,对应的企业为电子废弃物再生性企业,说明电子信息产业作为园区主导产业,产生大量的电子废弃物,相关再生性企业的存在,能够极大的提高某一类废弃物的资源化利用水平。

在识别出的关键物质流典型路径 6 中的 25 个案例中,有 CO₂减排量统计数据的案例为 13 个,主要集中在 1—100t 区间,共有 8 个案例,实现包括节电、节水、节材在内的多种资源循环利用,说明资源循环基础设施企业作为再生性企业的补充,可以全面资源化利用生产性企业产生的多种废弃物,起到“兜底”的显著作用。

图 4 是各类型关键物质流典型路径的案例数量和年经济效益分布情况。在识别出的关键物质流典型路径 2 中的 19 个案例中,有经济效益统计数据的案例为 12 个,其中 6 个案例经济效益集中在中部 100—250 万

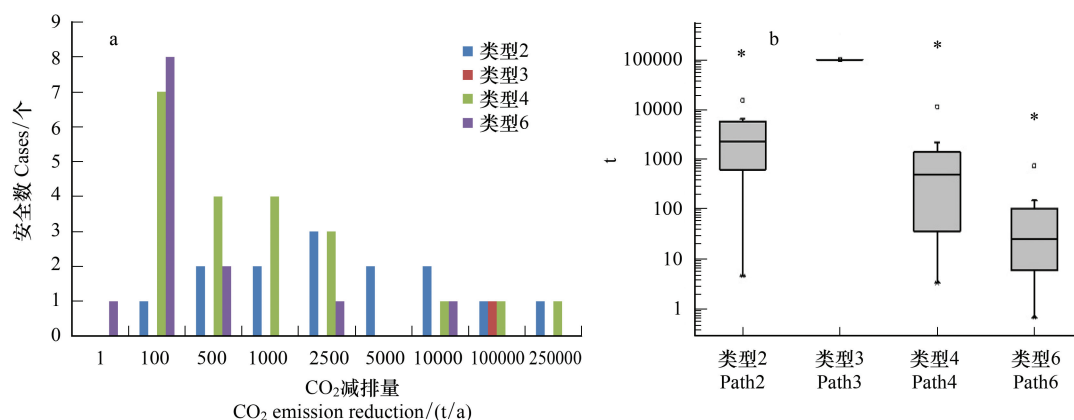


图3 泰达园区各类型关键物质流典型路径案例数量和 CO₂减排量分布之 (a) 直方图与 (b) 箱线图

Fig.3 Number and CO₂emission reduction of cases in four categories of material flow path at TEDA (a) histogram and (b) box plot

元区间,占全部案例的50%,并且案例围绕中部区间成对称分布状态,说明通过开展清洁生产工作,较容易产生生活中的经济效益,并且如果有合适的工艺改进和设备升级,会带来较大的经济回报。

在识别出的关键物质流典型路径3中的5个案例中,有经济效益统计数据的案例为3个,其中2个案例位于中部区间,1个案例经济效益较高,达到1093.00万元。

在识别出的关键物质流典型路径4中的24个案例中,有经济效益统计数据的案例为22个,分布在除250—500万元、500—1000万元和1000—1500万元的所有区间,说明再生性企业产生的经济效益分布较广泛,小规模投入一般会产生小规模产出,高强度投入带来高产,并且存在所有案例经济效益最大值1872.54万元,对应的企业为轮胎再生性企业,主要和再生性物品对应的原生物品价值高低有关。

在识别出的关键物质流典型路径6中的25个案例中,有经济效益统计数据的案例为19个,主要分布在中部区间附近,案例数量较为平均,每个区间主要包括3个案例左右,说明资源循环基础设施企业较容易和生产性企业形成关键物质流典型路径,并且具有较高的经济性。

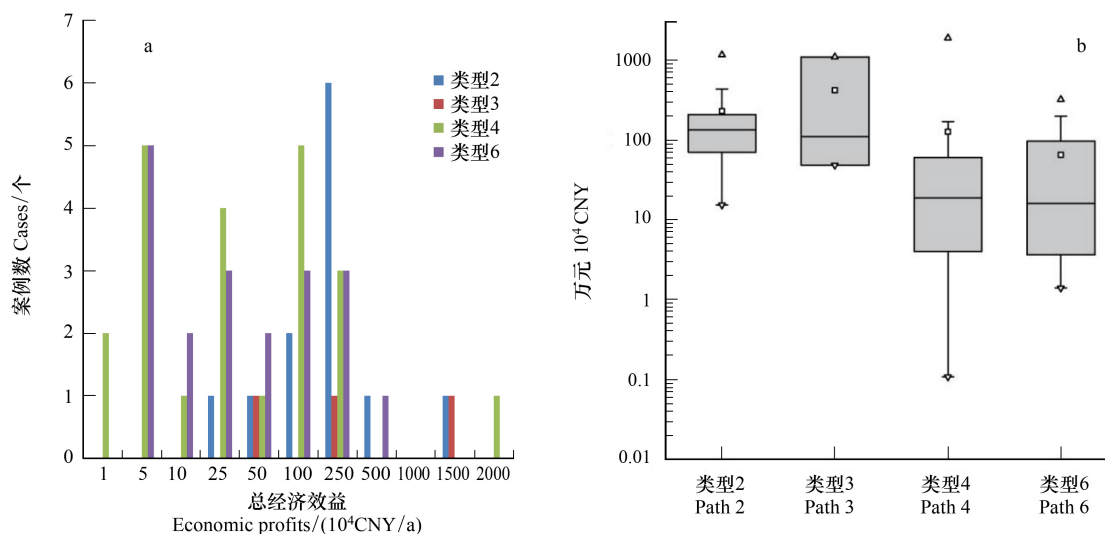


图4 泰达园区各类型关键物质流典型路径案例数量和经济效益分布之 (a) 直方图与 (b) 箱线图

Fig.4 Number and economic profits of cases in four categories of material flow path at TEDA (a) histogram and (b) box plot

4.3 小结

根据以上关键物质流典型路径识别及分析评估内容,下一步在围绕物质流管理统计口径进一步完善的条

件下,可全面系统收集园区企业的相关数据信息,建立园区关键物质流分类分级管理评价体系,核心内容包括园区正向关键物质流和逆向关键物质流的管理需求、管理目标、管理思路和管理任务等方面内容,并以关键物质流典型路径为管理工具,提出物质流的优化、管理与调控选择对策,并进行后评估,提高区域资源产出率。

5 展望

物质流分析作为产业生态学的核心分析方法,正在成为资源环境管理领域的有效分析工具。本文针对目前物质流分析注重物质规模而忽视环境影响、把目标系统视为“黑箱”而忽略内部物质流动规律、围绕园区层面的研究适用性不强,及隐藏流造成数据误差等存在的突出问题,以物质流分析思想为指导,通过长期调查实践,提出了关键流识别思路和物质流路径分类评价方法,为解决上述问题提供了切入点,未来可以重点关注各种关键物质流典型路径的物质流动组成、流动特点、流动效率、流动的关键影响因素,以及资源产出率、循环经济产业关联度等物质流核心指标,并可从园区物质流的统计与归类、识别分析与评估、管理体系建设、园区物质流管理的制度保障体系建设和信息化平台建设等方面,深入探讨物质流管理体系建设的具体内容和相关标准,使物质流分析真正成为推动我国循环化改造工作走向科学、规范和有效的资源环境管理工具^[18, 43-45]。

致谢:衷心感谢天津市经济技术开发区环境保护局卫红梅局长、宋雨燕副局长、王健,以及天津泰达低碳经济促进中心赵雅斐等所有人在实地调研和文章总体思路等方面给予的大力支持。衷心感谢日本立命馆大学王韬高级研究员对本文提出的宝贵意见和案例分析方面给予的帮助。

参考文献 (References):

- [1] 国家发展和改革委员会. 园区循环化改造示范试点实施方案编制指南. 北京: 国家发展和改革委员会, 2012.
- [2] Ayres R U. The life-cycle of chlorine, Part I: chlorine production and the chlorine-mercury connection. *Journal of Industrial Ecology*, 1997, 1(1): 81-94.
- [3] Korhonen J. Special issue of the journal of cleaner production, 'from material flow analysis to material flow management': strategic sustainability management on a principle level. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1585-1595.
- [4] Binder C R. From material flow analysis to material flow management Part I: social sciences modeling approaches coupled to MFA. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1596-1604.
- [5] Binder C R. From material flow analysis to material flow management Part II: the role of structural agent analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1605-1617.
- [6] 王如松, 马世俊. 边缘效应及其在经济生态学中的应用. *生态学杂志*, 1985, (2): 38-42.
- [7] 毕军, 黄和平, 袁增伟, 刘凌轩. 物质流分析与管理. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 60-63.
- [9] 谢振华. 关于循环经济理论与政策的几点思考. *中国环境报*, 2003-11-15.
- [10] 诸大建, 朱远. 生态文明背景下循环经济理论的深化研究. *中国科学院院刊*, 2013, 28(2): 207-218.
- [11] Marina Fischer-Kowalski. Society's Metabolism The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I, 1860-1970. *Journal of Industrial Ecology*, 1998, 2(1): 61-78.
- [12] 段宁. 城市物质代谢及其调控. *环境科学研究*, 2004, 17(5): 75-77.
- [13] 施晓清, 杨建新, 王如松, 赵齐加. 产业生态系统资源代谢分析方法. *生态学报*, 2012, 32(7): 2012-2024.
- [14] Barles S. Society, energy and materials: the contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2010, 53(4): 439-455.
- [15] Kleijn R. Adding it all up the sense and non-sense of Bulk-MFA. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, 4(2): 7-8.
- [16] Bao Z M, Zhang S S, Chen Y, Liu S L, Zhang Y, Wang H L. A review of material flow analysis // *Proceedings of 2010 International Conference on Management and Service Science (MASS)*. Wuhan: IEEE, 2010: 1-8.
- [17] 邢芳芳, 欧阳志云, 杨建新, 郑华, 罗婷文. 经济-环境系统的物质流分析. *生态学报*, 2007, 26(2): 261-268.
- [18] 陈波, 杨建新, 石磊, 欧阳志云. 城市物质流分析框架及其指标体系构建. *生态学报*, 2010, 30(22): 6289-6296.
- [19] 石磊, 楼俞. 城市物质流分析框架及测算方法. *环境科学研究*, 2008, 21(4): 196-200.

- [20] 徐一剑, 张天柱. 基于三维物质投入产出表的区域物质流分析模型. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(3): 356-360.
- [21] 黄和平, 毕军, 张炳, 李祥妹, 杨洁, 石磊. 物质流分析研究述评. 生态学报, 2007, 27(1): 368-379.
- [22] Bringezu S, Schütz H, Moll S. Rationale for and interpretation of economy-wide materials flow analysis and derived indicators. *Journal of Industrial Ecology*, 2003, 7(2): 43-64.
- [23] 武娟妮, 石磊. 工业园区氮代谢——以江苏宜兴经济开发区为例. 生态学报, 2010, 30(22): 6208-6217.
- [24] 戴铁军, 陆钟武. 钢铁企业生态效率分析. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(12): 1168-1173.
- [25] 刘毅, 陈吉宁. 中国磷循环系统的物质流分析. 中国环境科学, 2006, 26(2): 238-242.
- [26] 徐一剑, 张天柱, 石磊, 陈吉宁. 贵阳市物质流分析. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(12): 1688-1691, 1699-1699.
- [27] 于术桐, 黄贤金. 区域系统物质代谢研究——以江苏省南通市为例. 自然资源学报, 2005, 20(2): 212-221.
- [28] 黄和平, 毕军. 基于物质流分析的区域循环经济评价——以常州市武进区为例. 资源科学, 2006, 28(6): 20-27.
- [29] Jan Kovanda. Incorporation of recycling flows into economy-wide material flow accounting and analysis: a case study for the Czech Republic. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 92: 78-84.
- [30] Kotani K, Masunaga S. Environmental impact assessment of chlorine in liquid crystal display glass (LCDG) based on material flow analysis. *Journal of Environmental Management*, 2012, 112: 304-308.
- [31] 高昂, 张道宏. 基于时间维度的循环经济物质流特征研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(9): 13-17.
- [32] 李虹, 田生, 理明佳. 物质流指标下的工业经济解耦问题研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 132-139.
- [33] 孙晓梅, 崔兆杰, 朱丽, 刘雷. 生态工业园运行效率评价指标体系的研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 124-128.
- [34] 吴开亚, 刘晓薇, 张浩. 基于物质流分析方法的安徽省环境载荷及其减量化研究. 资源科学, 2011, 33(4): 789-795.
- [35] 刘伟, 鞠美庭, 楚春礼, 邵超峰, 田文鑫. 区域环境-经济系统物质流与能流分析方法及实证研究. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1435-1445.
- [36] 国家发展和改革委员会. 关于推进园区循环化改造的意见. 北京: 国家发展和改革委员会, 2012.
- [37] 钟若愚. 中国资源生产率和全要素生产率研究. 经济学动态, 2010, (7): 28-33.
- [38] 陈敏鹏, 郭宝玲, 刘昱, 夏旭, 陈吉宁. 磷元素物质流分析研究进展. 生态学报, 2015, 35(20): 6891-6900.
- [39] 石垚, 杨建新, 刘晶茹, 陈波, 王如松. 基于 MFA 的生态工业园区物质代谢研究方法探析. 生态学报, 2010, 30(1): 228-237.
- [40] 赵卉卉, 王远, 谷学明, 王义琛, 周婧, 孙友胜. 基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例. 生态学报, 2012, 32(7): 2025-2032.
- [41] Huang S L, Lee C L, Chen C W. Socioeconomic metabolism in Taiwan: emergy synthesis versus material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 48(2): 166-196.
- [42] Kovanda J, Weinzettel J, Hak T. Analysis of regional material flows: the case of the Czech Republic. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, 53(5): 243-254.
- [43] 李慧明, 王军锋. 加强物质流分析和调控是发展循环经济的关键. 经济纵横, 2006, (2): 24-26.
- [44] 朱坦, 王天天. 资源型城市产业园区循环化改造是实现可持续发展的重要途径. 中国发展, 2012, 12(5): 9-12.
- [45] 李慧明, 王军锋, 左晓利, 朱红伟等著. 内外均衡, 一体循环——循环经济的经济学思考. 天津: 天津人民出版社, 2007.