

基于 MFA 的生态工业园区物质代谢研究方法探析

石 焱, 杨建新*, 刘晶茹, 陈 波, 王如松

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 物质流分析 (Material Flow Analysis, MFA) 是国家尺度物质代谢研究的重要手段。首先对国内外不同地域尺度下 MFA 的研究现状进行了概述总结; 在此基础上, 从工业区内的企业及其所形成的工业共生网络 (Industrial Symbiosis Networks, ISNs) 物质核算入手, 针对如何在生态工业园区 (Eco-Industrial Parks, EIPs) 尺度开展物质代谢研究进行了详细论述, 并通过引入部门间实物型投入产出表 (Physical Input-Output Table, PIOT) 对该尺度 MFA 的核算方法进行了改进, 最终构建了 EIPs-MFA 模型及指标体系。以期为生态工业园区实践中的规划与管理提供方法指导。

关键词: 物质流分析; 生态工业园区; 工业共生网络; 实物型投入产出表

The exploration of material metabolism based on MFA for Eco-Industrial Parks

SHI Yao, YANG Jianxin*, LIU Jingru, CHEN Bo, WANG Rusong

Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Material flow analysis (MFA) is an important method for studying material metabolisms at regional and national scales. This article generalizes the status quo of MFA research in different scales. Next, a physical Input-Output Table (PIOT) is introduced as a mean of improving the analytical frameworks and accounting methods of MFA. The PIOT forms a basis framework on which all enterprises and industrial symbiosis networks in the industrial area are assessed. Finally, details concerning the study of metabolisms in Eco-Industrial Parks (EIPs) at an industrial ecosystem-scale are presented, and a EIPs-MFA model is constructed. This article concludes (1) Compared with MFA at national and regional scales, the purpose and method of EIPs-MFA are different, the object for the former studies is the socio-economic system, while for the latter it is the production system of the enterprise; (2) The former generally takes up a top-down approach, the latter bottom-up; (3) The former often treats the studied system as a black box, while the latter use a gray box; (4) Considering the particular objections of EIPs, which puts more emphasis on the metabolism of solid waste, water, and other special material flows in the park, EIPs-MFA should select these indicators above as the vital components to account and evaluate separately; (5) Last but not least, the aim of EIPs-MFA is to discern the characteristics of material flows inside and between the enterprises, and to identify and evaluate opportunities and potentials for increasing the material use efficiency through material re-use and recycling strategies.

Key Words: material flow analysis; eco-industrial parks; industrial symbiosis networks; physical input output table

人类社会面临的环境与发展问题, 究其生态原因有 3 个方面: 一是物, 即资源代谢问题; 二是事, 即系统结构和功能的问题; 三是人, 即人的行为和信息反馈机制的问题^[1]。其中, 资源代谢在时间、空间尺度上的滞留和耗竭是导致各种环境问题出现的主要症结。

产业生态学的发展为解决各种环境问题指明了新的方向。“传统的产业活动模式, 应当转化为产业生态

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2005CB724206); 国家自然科学基金面上资助项目 (70873122)

收稿日期: 2009-02-18; **修订日期:** 2009-09-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjx@rcees.ac.cn

系统的模式,在这种系统中,能源和物质的消耗是最优的,产生的废物是最少的,一个过程的排放物将作为另一个过程的原材料^[2]”,其本质是强调如何提高资源和能源的利用及转化效率。生态工业园区(Eco-Industrial Parks, EIPs)建设是实现这一模式的主要途径,而物质流分析(material flow analysis, MFA)则为其提供了有效的分析方法。

基于欧盟“物质流分析导则”^[4]框架下的国家尺度 MFA 研究方法已相当成熟,城市等中尺度 MFA 研究也日趋增多。作为城市中以工业共生网络(industrial symbiosis networks, ISNs)为特征形成的特殊区域——生态工业园区,如何基于 MFA 方法来辨识园区内各企业及其相互之间物质流动特征,并在评价其物质代谢及循环利用效率基础上,寻找是否存在物质再利用的机会与潜力,则为 EIPs 尺度开展 MFA 研究提出了迫切的需求。因此本文引入部门间实物型投入产出表(physical input-output table, PIOT)对 MFA 的核算方法、分析框架及指标体系进行改进,从园区内的企业及其所形成的工业共生网络入手,针对如何在 EIPs 尺度的经济生产系统开展物质代谢研究进行了详细论述,以期生态工业园区实践中的规划管理提供方法指导。

1 物质流分析概述

2001 年,欧盟统计局(Eurostat)出版了第一部有关物质流分析研究方法的手册^[4],该手册的出版推动了世界各国在社会-经济系统物质流分析方面的研究。2004 年,Paul H. B. 和 Helmut R. 合作编写了《Practical Handbook of Material Flow Analysis》一书,系统介绍了物质流分析的概念、历程、应用范围及目标,详细地陈述了其数据库管理、软件应用的具体操作方法,并列举了许多关于环境管理、资源保护、废弃物管理及区域物质流分析与管理的经典案例^[5]。

1.1 国家和大尺度物质流研究

国家尺度的物质流核算与研究基本都采用 Eurostat 的这一框架,即把物质流分析解析为输入、输出和存储 3 部分^[4]。在物质输入端,进入经济系统的自然物质包括直接物质输入和隐流。直接物质输入是指直接进入经济系统的自然物质,包括生物物质、固体非生物物质(包括化石燃料、工业矿物、建筑材料等)、水、空气四大类;隐流也称生态包袱,是指人类为获取直接物质输入而必须动用的数量巨大的环境物质;直接物质输入和隐藏流又分为区域内部开采和进口两部分。在物质输出端,物质输出总量由区域内物质输出、区域内隐藏流、出口物质 3 部分组成,其中区域内物质输出由经济系统排出的固体废弃物、废水、废气组成。如图 1 所示。

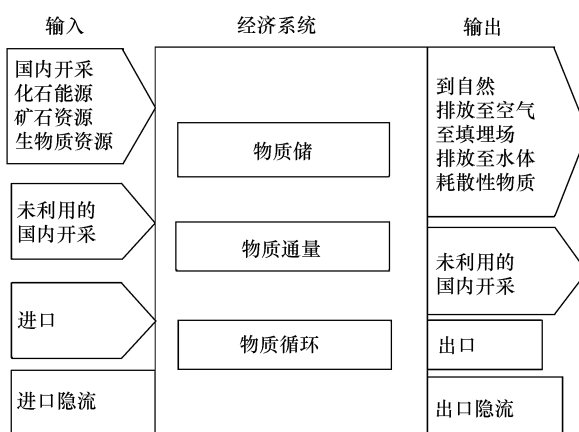


图 1 国家经济系统物质流分析框架图^①

Fig.1 Framework of Economy-Wide MFA

20 世纪 90 年代初,奥地利、日本和德国首先应用

MFA 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。自 1997 年世界资源研究所开始对美国、日本、奥地利、德国、荷兰 5 国经济系统的物质流动状况进行了全面分析与跟踪以来^[6-7],意大利^[8]、丹麦^[9]、芬兰^[10]、瑞典^[11]、英国^[12]、捷克^[13]、中国^[14-16]、西班牙^[17]等国也都在各自的国家层面展开了本国的物质流核算。

1.2 城市和中尺度物质流研究

城市尺度的物质流核算与研究,在总体结构和物质分类上与国家尺度并没有不同,但在计算方法上有所区别。其中,金属矿物及其产品、工业非金属矿物及其产品、建筑材料三类物质在城市中的净存量的计算,是与国家 MFA 核算最大的不同^[18]。城市尺度物质流分析框架如图 2 所示。

①引自:经济系统物质流核算及指标分析——方法手册。欧盟委员会,2001

继国家尺度物质流核算与研究热潮之后,国内外学者开始在城市与区域尺度对物质流分析方法与应用展开研究。在该尺度物质流分析方法的探讨方面,Philip S. 等应用区域投入产出矩阵和产品生命周期数据库建立了区域物质流综合分析模型,并对伦敦市的物质代谢进行了初步研究^[19];徐一剑等构建了基于三维物质投入-产出表(PIOT)的物质流核算模型,并对义马市的社会经济系统进行了物质代谢方面的研究^[20];石磊则针对进出城市系统边界的物质数据缺乏且难以统计的特点,引入了面向元素或产品的物质流分析(SFA)要素,建立了一种统一的且可用于不同城市间比较的城市物质流分析框架,并应用该框架对邯郸市进行了案例研究^[18,21]。在城市尺度物质流分析应用研究上,除了上述学者在 MFA 方法改进后的研究外,大多数学者基本

采用了欧盟准则的框架,如 John Barrett 等应用国家尺度 MFA 方法对 York 市的物质流进行了分析,并以此对本地的生态足迹进行了核算^[22];徐一剑等针对贵阳市建设国家循环经济试点城市,进行了经济系统物质代谢过程的分析,并对其现阶段经济发展过程中的“高资源投入、高污染排放”状况予以了识别^[23];国内其他城市如天津^[24]、张掖^[25]、唐山^[26]、大理^[27]、深圳^[28]、常州^[29]、青岛^[30]等城市的研究同样得出了类似的结论。

1.3 工业区和小尺度物质流研究

城市尺度的物质流研究方兴未艾,更小尺度的工业区物质流研究却已逐步展开。工业区物质流分析总体结构和物质分类同样与国家尺度物质流分析基本保持一致,但数据获取途径及指标设计方面则与国家及城市尺度存在很大差异。如 Cristina S. 通过对西班牙 Catalonia 工业区所有企业发放调查问卷的方式,获取了园区及园区内各企业物质流向及流量的数据,并通过物质流核算探讨了该工业园区在生态产业转型方面的一些策略^[31]。钱易、金涌在广西贵港、贵阳开阳等工业区进行了大量的基于 SFA 的物质代谢研究。但伴随着我国生态工业示范园区建设工作的进行,至今并没有提出一个统一的工业园区物质流分析框架。

可以看出,目前工业区尺度的物质流分析,尤其是在工业区尺度开展 MFA 的方法研究方面,国内外还都基本处于空白。既有的研究成果也只是停留在传统国家尺度 MFA 方法的简单应用,并以此来探讨工业区内的资源利用和环境污染问题。如何通过生态工业园区建设保证园区内的物质循环利用,能量高效传递,废弃物最小排放等,都为工业园区尺度开展 MFA 研究提出了迫切的需求。

1.4 物质流分析的其他应用研究

另外,物质流分析也应用到了特殊产业部门、特定的物质(水、固废、危废)等尺度,以及深入到社区消费系统的特殊物质流分析中来^[32-36]。而在物质流分析指标方面,继欧盟准则之后许多学者都对其进行了逐步改进,或对具有特殊物质流特征的特定系统进行新的指标体系构建。如 Patsarporn P. 等针对工业固体废弃物进行了新的物质流指标体系构建,并以泰国为例进行了核算^[37];Joachim H. S. 等通过构建基于物质流分析的指标对环境绩效进行预报与考核^[38];Henrik J. 针对资源利用和废物排放等方面的环境管理政策制定了特定的物质流分析指标框架^[39];日本则是通过用“资源生产力”作为投入指标,用“循环利用率/(物质循环利用总量+国内物质输入)”作为循环指标,用“废物最终处理量”作为产出指标来反映日本构建循环型经济社会的评价指标^[40]等。

从这些方面的研究可以看出,物质流分析方法的精髓在于其针对不同的资源环境问题,从不同角度和尺度提出相应的研究方法途径,它不仅局限于国家和欧盟标准的范畴,更重要是如何把其思想拓展到不同的研究领域。

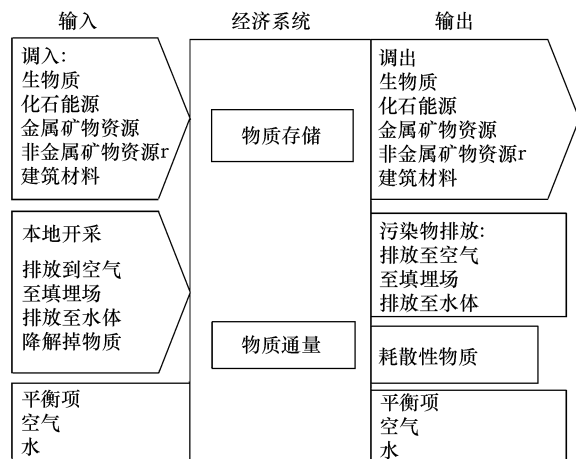


图2 城市物质流分析框架图^[18]

Fig. 2 Framework of Urban-Wide MFA

1.5 不同尺度物质流分析方法的区别

国家尺度的物质流核算,可以通过明确进出各国家系统边界的物质流量来反映经济发展对本国所产生的资源环境压力,同样通过进出口隐流(hidden flow)或生态包袱的计算,也可以反映出其对本国的生态破坏程度和全球的环境影响;城市的发展往往同样伴随着资源耗用、环境污染和生态占用,而这些问题也可以归结为城市物质代谢在时间、空间尺度上的阻滞与耗竭^[1],因此,城市尺度的物质代谢和物质流核算可以通过系统解析和度量城市系统的物质通量、分布及其机制,研究城市发展和建设过程中资源、环境和生态问题的形成过程和机理,并据此提出相应的城市生态调控策略^[41],同时,区域内各城市之间的物质流核算也可以为其间的生态补偿提供一定科学依据;而工业园区等小尺度的物质流研究,核算对象主要是园区内的工业生产系统,并且除了物质流量上的核算,园区内各企业、行业及其与社会系统之间的物质流向也需要辨析,其重点是通过园区系统及企业等子系统的物质流的分析,来寻找企业与企业、企业与社会等不同利益体之间,在物质再利用方面合作的机会与潜力,并最终通过特殊物质或元素的代谢路径来构建园区内的生态产业链。另外,不同尺度物质流分析的重点也不同,城市 MFA 重点探讨城市的各种物质存量分析^[18],工业区 MFA 则重点探讨其物质消耗及循环利用问题^[18,29](表 1)。

表 1 不同尺度物质流分析的比较
Table 1 Comparison of MFA method among different geographical scale

项目 Item	国家尺度 Country-Scale	城市尺度 Urban-Scale	工业区尺度 Industrial Park-Scale
分析重点 Point	与国家物质输入输出相关的 隐流	与城市物质输入输出相关的 隐流	工业区内物质的循环利用
对象 Object	国家	城市	工业共生网络
对象性质 feature	社会经济系统	社会经济系统	工业生产系统
分析框架 Framework	经济系统物质流	经济系统物质流 + 面向元素及 产品的物质流 EW-MFA + SFA	经济系统物质流 + 面向元素及产 品的物质流 + 物质投入产出表 EW-MFA + SFA + PIOT
分析方法 Method	Top-Down	Top-Down + Bottom-Up	Bottom-Up
系统类型 Style of system	黑箱	黑箱 + 灰箱	灰箱
数据获取 Date Mining	国家统计局	城市部门统计	企业调查
指标类型 Indicator	物质原料及产品	物质原料及产品	物质原料产品、水、能源

2 生态工业园区物质代谢分析方法与 EIPs-MFA 模型建立

生态工业园区是由不同类型制造企业,通过能源、水、物料等资源要素再利用方面的合作和管理而行成的企业群落,以实现园区整体环境与经济的双重效益与协调发展^[42]。

2.1 EIPs-MFA 分析框架

EIPs-MFA 的主要流程包括系统边界的确定、系统内所有物质流过程的辨识、数据的收集整理、园区企业物质投入产出表的编制、指标的计算和分析 5 个环节(图 3)。

考虑到 EIPs-MFA 的研究是基于“Bottom-Up”这一方法,因此,图 4 中列出了从“企业-工业共生网络——园区”3 个环节逐步展开的 EIPs-MFA 框架。首先是园区内的最小功能单元——企业子系统,即把企业作为黑箱,对流入流出各个企业的所有物质按 Eurostat MFA 物质分类方法进行核算,并在此基础上增加各种物质的流向内容,以此作为下一环节——工业共生网络物质流分析的数据来源;工业共生网络环节的物质核算只涉及园区内的生产子系统,尽管其数据基础来源于企业层面的物质流核算,但并不是园区内所有企业物质流入、流出的简单相加,而是按照工业类型划分要求对各类型企业物质核算数据进行汇总,并通过各产业之间的物质投入产出表的设计,对流入、流出该工业共生网络系统的物质重新进行核算,工业共生网络环节的物质流分析,是辨别和直接反映工业园区资源消费、物质重复循环利用、以及废物产生和生态效率等方面动态变化程度

的直接途径;最后则是以园区内的所有企业及其所形成的工业共生网络物质核算为基础,按照 EIPs 的特征对其进行 EIPs-MFA 指标体系的构建,并最终对各指标进行计算与分析。需要说明的是,考虑到 EIPs-MFA 的系统分析对象是工业生产系统,所以可以假设其系统物质存储与耗散为零。

(1)企业环节的输入包括企业的外部物质输入、外部新鲜水输入、和平衡项 3 部分内容,其中外部物质输入包括从园区外部和园区内部进入企业的各种生物物质、非金属和金属矿物等原材料,零部件等中间产品和包装等其他材料;外部新鲜水输入是从包括城市供水管道、地表河流水和自挖水井直接进入企业的各种用水;平衡项是参与到企业生产过程中的其他物质,以空气为主。企业环节的输出包括产品输出、废物排放和平衡项 3 部

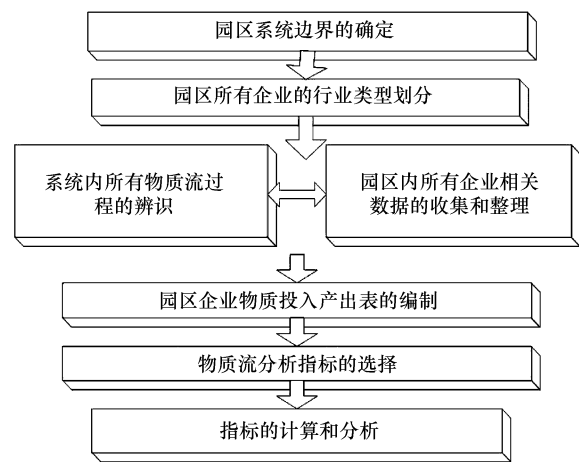


图3 生态工业园区物质流分析步骤与流程
Fig. 3 Procedure of MFA used in the EIPs

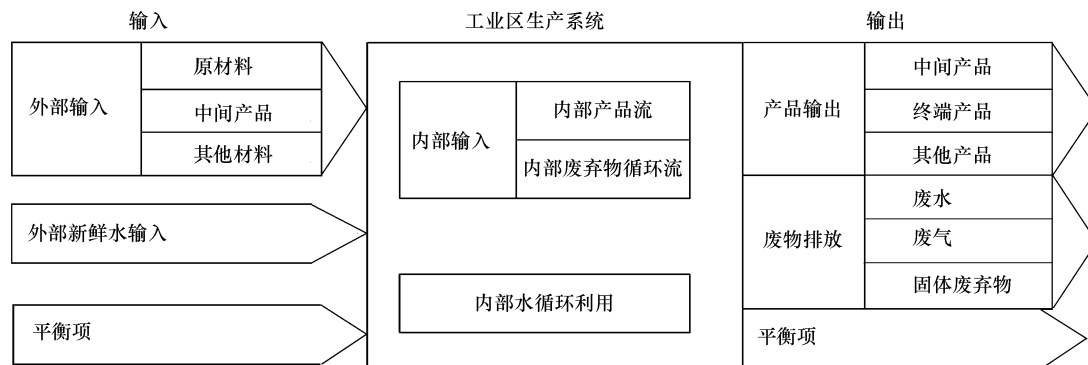


图4 EIPs-MFA 分析框架
Fig. 4 Framework of MFA used in the EIPs

分内容,其中产品输出可以是终端消费产品,也可以是为企业生产提供的零部件等中间产品;废物排放包括企业排放的废水、废气和废渣;另外企业生产环节也产生氮气、氧气等作为平衡项。

(2)由园区内的企业形成的工业共生网络环节的输入与企业环节的输入结构一致,但内容与数量则存在很大差异,主要表现在其内部物质的输入上,ISNs 的内部物质输入除了包括园区各企业内部物质的循环输入外,也包括了园区各企业之间的物质相互输入。而企业之间物质的相互输入输出则需要通过构建物质型投入产出表来进行核算。由于园区各企业的水是通过城市固定管网统一排放,因此企业之间不涉及水的循环利用。

(3)最终从整个工业区的角度对 EIPs-MFA 进行总体核算,按照图 4 所示的 EIPs-MFA 分析框架,以基于园区内的企业及其所形成的工业共生网络下的物质流核算数据为基础,进行汇总。具体的核算方法及各参数的计算如下节所述。

2.2 EIPs-MFA 的物质核算与指标体系构建

物质流分析所依据的基本原理是物质守恒定律,即系统内部物质存量的变化量等于进出系统物质质量之差。

$$\Delta S_t = I_t - O_t \quad (1)$$

式中, ΔS_t 为第 t 年系统内部物质存量的变化量,也称为当年净存量; I_t 为第 t 年系统的物质输入量; O_t 为第 t 年系统的物质输出量,单位均为 $10^4 \text{ t}^{[18]}$ 。

(1) 企业环节物质的输入、输出核算

假定企业生产系统物质的存储与损耗为零,遵循物料平衡,投入企业的物料应该等于企业的各种产品产出和废物排放,考虑到由于采用先进工艺可能导致的企业内部物质、水的循环利用,因此,该部分也从企业产出部分单独划出。

$$B_I + I_E + I_R = I_R + O_E + B_O \quad (2)$$

$$I_{ME} + I_{WF} + B_I = I_{MI} + I_{WR} + O_W + O_P + B_O \quad (3)$$

式中, I_E 为企业的外部物质输入量, I_R 为企业的内部物质循环量, O_E 为企业的最终物质输出量, B_I 和 B_O 分别为企业的输入、输出平衡项。 $I_E = I_{ME} + I_{WF}$, 其中 I_{ME} 为从园区外部和内部其他企业购入的原料、零部件及中间产品量, I_{WF} 为从企业外部输入的新鲜自来水量; $I_R = I_{MI} + I_{WR}$, 其中 I_{MI} 为企业内部循环使用的原料及产品量, I_{WR} 为企业内部循环利用的水量; $O_E = O_W + O_P$, 其中 O_P 为企业向外输出的各种产品及半成品物质量, O_W 为企业的废物排放量, 包括废水、废气、废渣。

企业环节的物质输入、输出数据都可以通过企业环境影响评价及污染源调查资料获得。

(2) 园区产业部门投入产出表的设计与 ISNs 环节物质核算

ISNs 环节的物质核算基础是企业环节的分析结果,但考虑到园区内各企业产品结构的复杂性与多样性,及其各种物质、产品的相互利用所导致的产业共生性,因此,ISNs 环节的物质核算并不能对所有企业物质核算结果进行简单相加。笔者引入园区产业部门实物型投入产出表 (PIOT) 来对其最终结果进行重新核算。

园区 PIOT 的设计首先需要对所有企业按照产业部门进行分类汇总,随后对各部门的物质流向和流量进行统计,最终将数据汇入表内。

表 2 EIPs 部门实物型投入产出表结构

Table 2 Structure of PIOT for EIPs

投入 Input	部门 1 Sector 1	...	部门 n Sector n	产出 Output					
				最终输出 Final Output				总输出 Total output	
				产品输出 Product	废弃物 1 Waste 1	...	废弃物 t Waste t		
共生性投入 (园区内 投入) Interior Input	部门 1 Sector 1	$I_{1,1,in}$	...	$I_{1,n,in}$	P_1	$W_{P,1,1}$	...	$W_{P,1,t}$	$P_1 + W_{P,1,t}$
	...	...	...	...	...	...	...	...	
	部门 n Sector n	$I_{n,1,in}$	...	$I_{n,n,in}$	P_n	$W_{P,n,1}$	...	$W_{P,n,t}$	$P_n + W_{P,n,t}$
	合计 Total	$I_{1,in}$	...	$I_{n,in}$	P	W_{P1}	...	W_{Pt}	$P + W_P$
非共生性投入 (园区外部投入) Exterior Input		$I_{1,ex}$	...	$I_{n,ex}$					
总投入 Total Input		$I_{1,in} + I_{1,ex}$	...	$I_{n,in} + I_{n,ex}$					
平衡项 Balance factor		B_1	...	B_n					

表内涉及的各种实物包括生物质、非金属矿物及产品、金属矿物及产品 and 原料用化石能源

同企业环节物质的输入、输出的核算一致,工业共生网络 (ISNs) 核算如下:

$$I_{ISN,E} + B_{ISN,I} + I_{ISN,R} = I_{ISN,R} + P_{ISN,E} + B_{ISN,O} \quad (4)$$

$$I_{ISN,ME} + I_{ISN,WF} + I_{ISN,MI} + I_{ISN,WR} + B_{ISN,I} = I_{ISN,MI} + I_{ISN,WR} + O_{ISN,W} + O_{ISN,P} + B_{ISN,O} \quad (5)$$

将公式 5 中的各参数与表 2 及其附表中的各参数一一对应后,得出:

$$I_{ISN,ME} = \sum_{i=1}^n I_{i,ex}, I_{ISN,WF} = \sum_{i=1}^n W_{i,ex}, I_{ISN,MI} = \sum_{i=1}^n I_{i,in}, I_{ISN,WR} = \sum_{i=1}^n W_{i,in}, \quad (6)$$

$$O_{ISN,P} = \sum_{i=1}^n P_i, O_{ISN,WW} = \sum_{i=1}^n W_{wi}, O_{ISN,W} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^t W_{P,i,j}, B_{ISN} = \sum_{i=1}^n B_i$$

且各指标的意义与企业环节的一致,其中 $O_{ISN,WW}$ 为废水排放量, $W_{i,in}$ 为部门 i 各企业内部水循环利用之

和, W_{wi} 为部门 i 的废水排放量。

(3) EIPs-MFA 指标体系的构建

在明确了 EIPs-MFA 分析框架及其物质核算方法的基础上,构建 EIPs-MFA 指标体系。除了传统社会经济系统物质流分析指标外,EIPs-MFA 还增加了水的单独核算,并且,考虑到生态效率的概念和内涵以及所采用的计算指标和方法与其评价的尺度和评价的目的有非常密切的关系^[43],因此生态效率指标在生态工业园区尺度的评价也需要进行一定的修改。表 3 列举了 EIPs-MFA 的指标体系,包括系统物质输入、系统物质输出、系统生态效率、水资源流动 4 大部分。

表 3 EIPs-MFA 指标体系
Table 3 Indicator framework of EIPs-MFA

项目 Item	指标 Indicator	定义 Definition	说明 Expression
系统物质输入 Input Indicators	MIE/t	外部物质输入 Material Inputs form Exterior	$I_{ISN,ME}$
	MII/t	内部物质输入 Material Inputs from Interior	$I_{ISN,MI}^{1)}$
	TMI/t	物质总输入 Total Material Inputs	外部物质输入 + 内部物质输入 $MIE + MII$
系统物质输出 Output Indicator	POE/t	产品外部输出 Products Outputs to Exterior	$O_{ISN,P}$
	TWE/t	废物总排放 Total Waste Emission	$O_{ISN,W}$
	TMO/t	物质总输出 Total Material Outputs	产品外部输出 + 废物总排放 + 内部物质输入 $O_{ISN,P} + O_{ISN,W} + I_{ISN,MI}$
水资源流动 Water Flow Indicators	FWI/t	新鲜水输入 Fresh Water Inputs	$I_{ISN,WF}$
	RWI/t	重复用水输入 Recycled Water Inputs	$I_{ISN,WR}$
	TWI/t	水资源总输入 Total Water Inputs	新鲜水输入 + 重复用水输入 $FWI + RWI$
系统生态效率 Eco-Efficiency Indicators	$Eco-Ef1$	生态效率 1 Eco-efficiency ₁	年工业总产值/外部物质输入 Annual production value / MIE
	$Eco-Ef2$	生态效率 2 Eco-efficiency ₂	年工业总产值/废物总排放 Annual production value / TWE
	$Eco-Ef3$	生态效率 3 Eco-efficiency ₃	年工业总产值/新鲜水输入 Annual production value / FWI
	MER	物质交换利用率 Material Reused Rate	内部物质输入 / 物质总输入 MII / TMI
	WRR	水资源重复利用率 Water Reused Rate	重复用水输入 / 水资源总输入 RWI / TWI

1) 内部物质输入(material inputs from interior, MII) = 园区企业内部和企业之间的物质交换总量

2.3 EIPs-MFA 指标的内涵及其评价指示功能

作为具有工业共生和物质循环利用特征的生态工业园区,其探讨的关键物质流分析指标包括:

(1) 系统物质输入指标

EIPs-MFA 的物质输入指标包括外部物质输入(MIE)、内部物质输入(MII)和总物质输入(TMI)。其中 MIE 表征了工业区生产系统对其外部资源的相对消耗程度,它可以通过 TMI 与 MII 的差值算出; MII 表示工业区生产系统各部门间的横向耦合和资源再生程度,可通过物质投入产出表直接得出; TMI 则由园区内各企业物质输入的加和得出。

(2) 系统物质输出指标

EIPs-MFA 的物质输出指标包括产品外部输出(POE)、废物总排放(TWE)和总物质输出(TMO)。其中 POE 表征了工业区生产系统对其外部社会经济系统的相对贡献程度,可通过 $TMO-(MII + TWE)$ 得出; TWE 表示工业区生产系统对外界环境的相对影响程度,可通过各企业废物排放的加和得出; TMO 则由园区内各企业物质输出的加和得出。

(3) 水资源流动指标

EIPs-MFA 的水资源流动指标包括新鲜水输入(FWI)、重复用水输入(RWI)和水资源总输入(TWI)。由于水只是作为 EIPs-MFA 的特殊物质指标单独提出,因此其内涵与物质流动指标一致, FWI 表征了工业区生

产系统对水资源的消耗程度, RWI 反映了工业区分生产系统对水资源的再生利用程度。

(4) 系统生态效率指标

EIPs-MFA 的系统生态效率指标是对工业区分产业生态化程度的直接表征。从资源消耗方面衡量,可以用“工业总产值/ MIE ”表示;从环境影响方面衡量,可以用“工业总产值/ TWE ”表示;单独从水资源消耗方面衡量,则可用“工业总产值/ FWI ”表示。另外,内部物质输入(MII)占园区物质总输入(TMI)的比例可以作为反映生态工业园区物质循环利用水平和产业共生程度的一个重要指标;同样重复用水输入(RWI)占园区水资源总输入(TWI)的比例则可直接反映出生态工业园区水循环利用水平和水资源节约程度。

(5) EIPs-MFA 指标的动态评价指示功能

基于工业共生网络和生态工业园区理念的物质流分析指标,同时应具有特殊的动态指示和评价功能,如生态工业园区内一般都以系统内物质的重复循环利用和副产品、废弃物交换为特征,而反映系统输入的 MIE 值就相应降低, MII 指标则相应增加;反映系统输出的重要指标 TWE 也相对降低。基于工业共生网络和生态工业园区策略的物质流分析指标体系变化特征见表 4 所示。

表 4 传统工业园区向生态工业园区转型过程中 EIPs-MFA 指标的变化情况

Table 4 Trends of EIPs-MFA indicators in the implementation of strategies for conversion of Industrial area into EIP

生态工业园区策略/特征 Strategies or features	指标变化 Indicator
副产品交换 By-product exchange	外部物质输入降低,物质交换利用率提高 $MIE \downarrow, MII \uparrow, MER \uparrow$
对自然排放的最小化 Minimization of emission to nature	废物总排放降低 $TWE \downarrow$
产业共生网络构建 Establishment of ISNs	外部物质输入降低,物质交换利用率提高 $MIE \downarrow, MII \uparrow, MER \uparrow$
水资源的集成 Integration of water resource	新鲜水输入减少,水资源重复利用率提高 $FWI \downarrow, WRR \uparrow$

3 结语

本文重点探讨了基于工业共生网络(ISNs)模式下的园区物质代谢分析方法,并提出了适合于 EIPs 的物质流分析框架及 EIPs-MFA 模型。主要结论为:

(1) 工业园区和企业尺度的物质流分析方法与国家及区域尺度的物质流分析方法存在一定的差别,前者面向的是企业及工业共生网络的生产系统,后者面向的是特定区域范围内的社会经济系统;前者以企业物料投入产出核算为基础,采用自下而上的分析方法进行分析,后者多以社会经济统计数据为基础,采用至上而下或两者相结合的方法进行分析。

(2) EIPs-MFA 模型及其分析框架步骤主要包括企业环节物质核算,工业共生网络环节物质核算和 EIPs-MFA 指标体系构建 3 部分内容。企业环节的物质核算是把企业当成黑箱,对输入和输出其系统的物质按分类要求进行逐步核算;工业共生网络环节的物质核算以各企业物质核算数据为基础,通过产业部门实物型投入产出表的设计进行重新核算;工业共生网络环节的物质流分析,是辨别和直接反映工业园区资源消费、物质重复循环利用、以及废物产生和生态效率等方面动态变化程度的直接途径。

(3) 通过构建 EIPs-MFA 指标体系,可以为传统工业园区向生态工业园区转型提供具体的考核依据。如物质交换利用率(MER)可以作为反映生态工业园区物质循环利用水平和产业共生程度的一个重要指标。另外,通过分析工业园区输入、输出及生态效率各指标的变化,还可以直接反映出园区在动态发展过程中生态转型的程度如何,也可以为不同阶段生态工业园区的环境绩效目标制定提供科学依据。

需要强调的是,在生态工业园区内如何针对各种不同属性的废弃物,尤其是危险废弃物或重金属元素进行特定产品或元素的物质流分析(SFA),是需要进一步开展研究的问题。

致谢: 本文在整体构思及摘要润色方面得到了挪威科技大学 Anders Arvesen 博士的大力帮助,在此表示感谢。

References:

[1] Wang R S, Zhou T, Chen L, Liu J R, Wang Z. Fundamentals of Industrial Ecology. Peking: Xinhua Press, 2006:3-5.

- [2] Frosch R A, Gallopoulos N. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 1989, 261(3):144-152.
- [3] <http://www.yale.edu/jie/cfpAMFA.htm>
- [4] Economy-Wide Material Flow Accounts and Derived Indicators-A Methodological Guide. Eurostat, 2001.
- [5] Paul H. Brunner, Helmut R. Practical Handbook of Material Flow Analysis. Lewis Publishers, 2004.
- [6] Adriaanse A, Bringezu S, Hammond A, Moriguchi Y, Rodenburg E, Rogich D, Schütz H. Resources Flows: The Material Base of Industrial Economies. Washington D C: World Resource Institute, 1997.
- [7] Matthews E, Amann C, Bringezu S, Fischer-kowalski M, Hüttler W, Kleijn R, Moriguchi Y, Ottke C, Rodenburg E, Rogich D, Schandl H, Schütz H, Van Der Voet E, Weisz H. The Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies. Washing D C: World Resource Institute, 2000.
- [8] Ottilia De Marco, Giovanni Lagioia, Elsa P M. Materials Flow Analysis of the Italian Economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, 4(2):55-70.
- [9] Gravgaard P O. Material flow accounts and analysis for Denmark. Luxembourg: Meeting of the Eurostat Task Force on Material Flow Accounting, 2000.
- [10] Muukkonen J. TMR, DMI and material balances, Finland 1980—1997. Luxembourg: EUROSTAT Working Paper, No. 2 /2000 /B /1, 2000.
- [11] Isacson A, Jonsson K, Linder I, Palm V, Wadeskog A. Material flow accounts DMI and DMC for Sweden, 1987—1997. Luxembourg: EUROSTAT Working Paper, No. 2 / 2000 /B /2, 2000.
- [12] Schandl H, Schulz N. Using material flow accounting to operationalise the concept of Society's Metabolism: A preliminary MFA for the United Kingdom for the period of 1937—1997. Colchester: University of Essex, ISER Working Paper, No. 2000-3, 2000.
- [13] Milan S, Jan K, Tomas H. Material flow accounts, balances and derived indicators for the Czech Republic during the 1990s: results and recommendations for methodological improvements. *Ecological Economics*, 2003, 45 (1): 41-57.
- [14] Chen X Q, Qiao L J. Material flow analysis of Chinese economic environmental system. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(1):17-23.
- [15] Chen X Q, Qiao L J. A preliminary material input analysis of China. *Population and Environment*, 2001, 23 (1):117-126.
- [16] Xu M, Zhang T Z. Material input analysis of China economic system. *China Environmental Science*, 2005, 5(3):324-328.
- [17] Amalia Sojo, Ana Citlalic González, Ignasi P, Daniela R, Cristina S, Sílvia C. Material Flow Accounting of Spain (1980—2004). 3rd International Conference on Life Cycle Management, 2007.
- [18] Shi L, Lou Y. Methodology and Procedure for Urban-Wide Material Flows Analysis. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4):196-200.
- [19] Philip S, Eleni P, Warren M, Tim J T. Towards an Integrated Regional Materials Flow Accounting Model. *Journal of Industrial Ecology*, 2005(9): 69-84.
- [20] Xu Y J, Zhang T Z. Regional material flow analysis model based on three-dimensional physical input-output table. *J Tsinghua Univ (Sci&Tech)*, 2007, 47(3):356-360.
- [21] Lou Y, Shi L. Material Flows Analysis for Handan City. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4):201-204.
- [22] John Barrett, Harry Vallack, Andrew J, Gary H. A Material Flow Analysis and Ecological Footprint of York-Technical Report. Stockholm Environment Institute, 2002.
- [23] Xu Y J, Zhang T Z, Shi L, Chen J N. Material flow analysis in Guiyang. *J Tsinghua Univ (Sci&Tech)*, 2004, 44(12): 1688-1691, 1699.
- [24] Liu W, Ju M T, Yu J L. Analysis on Material Flow of Economic and Environmental System in Tianjin. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2006, 19(6):8-11.
- [25] Ma Z, Long A H, Shang H Y. Preliminary construction of theregional material flow account in Zhangye. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6):953-959.
- [26] Cui X Z, Zhang F G, Zhang L H. Energy and material flow analysis of urban ecosystem in Tangshan. *Journal of Ecology*, 1986, 5(4):41-45.
- [27] Du B H. Energy and material flow analysis of urban ecosystem in Dali. *Yunnan Environmental Science*, 1988(10):15-18.
- [28] Yan W H, Liu Y M, Huang X, Hu Y J. The changing of urban system metabolism and waste generation of Shenzhen. *Urban Issues*, 2003(1):40-44.
- [29] Huang H P, Bi J, Li X M, Zhang B, Yang J. Material flow analysis of an eco-economic system: a case study of Wujin District, Changzhou. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2578-2586.
- [30] Zhou Z F. Research on regional material metabolism based on material flow analysis — A case study in Chengyang District of Qingdao. *Ocean University of China*, 2006.
- [31] Cristina S, Xavier G, Teresa V. Material flow analysis adapted to an industrial area. *Journal of Industrial Ecology*, 2007(15):1706-1715.
- [32] Ma X B, Wang Z Y, Yin Z G, Albert K. Nitrogen Flow Analysis in Huizhou, South China. *Environmental Management*, 2008 (41):378-388.
- [33] Moll S, J. Acosta and A. Villanueva. Environmental implications of resource use insights from input? output analyses. European Environment Agency, Copenhagen, 2004.

- [34] Hubacek and Giljum. Applying physical input? output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities. *Ecological economics*,2003(44):137-151.
- [35] Liu Y, Cheng J N. Flow Analysis on Phosphorus Cycle in Dianchi Basin, China. *Environmental Science*. 2006,27(8):1549-1553.
- [36] Liu Z, Hu S Y, Chen D J, Shen J Z, Li Y R. Material flow analysis on China psphosphor resource. *Modern Chemical Industry*. 2005,25(6):1-5,7.
- [37] Patsarporn PLUBCHAROENSUK, Hirofumi NAKAYAMA. Material Flow Analysis for Industrial Waste Management in Thailand. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, 2008, 68(2):107-127.
- [38] Joachim H. Spangenberg, Aldo Femia, Friedrich H, Helmut S. Material Flow-based Indicators in Environmental Reporting. Office for Official Publications of the European Communities(EEA), 1999.
- [39] Henrik Jacobsen. Revised set of indicators on waste and resource use. Office for Official Publications of the European Communities(EEA), 2005.
- [40] Japanese Environmental Agency (1992), 'Quality of the environment in Japan 1992', Tokyo.
- [41] Duan N. Urban material metabolism and its control. *Research of Environmental Sciences*. 2004,17(5):75-77.
- [42] Martin, Sheila A, Keith A W, Robert A C, Aarti S, Richard C L, Stephen R M. Eco-industrial parks: a case study and analysis of economic, environmental, technical and regulatory issues. Office of Policy, Planning and Evaluation. USEPA, Washington (DC), 1996.
- [43] Lü B, Yang J X. Review of methodology and application of eco-efficiency. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11):3898-3906.

参考文献:

- [1] 王如松,周涛,陈亮,刘晶茹,王震. 产业生态学基础. 北京:新华出版社, 2006:3-5.
- [14] 陈效速,乔立佳. 中国经济-环境系统的物质流分析. *自然资源学报*, 2000, 15(1):17-23.
- [16] 徐明,张天柱. 中国经济系统的物质投入分析. *中国环境科学*, 2005,25(3):324-328.
- [18] 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] 楼俞,石磊. 邯郸市物质流分析. *环境科学研究*, 2008, 21(4):201-204.
- [23] 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.
- [24] 刘伟,鞠美庭,于敬磊. 天津市经济-环境系统的物质流分析. *城市环境与城市生态*, 2006,19(6):8-11.
- [25] 马忠,龙爱华,尚海洋. 黑河流域张掖市物质流账户体系的初步构建. *冰川冻土*, 2007,29(6):953-959.
- [26] 崔学增,张凤岗,张连华. 唐山城市生态系统能流物流的分析. *生态学杂志*, 1986,5(4):41-45.
- [27] 杜宝汉. 大理市城市生态系统能流物流分析研究. *云南环境科学*, 1988(10):15-18.
- [28] 颜文洪,刘益民,黄向,胡玉佳. 深圳城市系统代谢的变化与废物生成效应. *城市问题*, 2003(1):40-44.
- [29] 黄和平,毕军,李祥妹,张炳,杨洁. 区域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.
- [30] 周震峰. 基于 MFA 的区域物质代谢研究——以青岛市城阳区为例. *中国海洋大学*, 2006.
- [35] 刘毅,陈吉宁. 滇池流域磷循环系统的物质流分析. *环境科学*. 2006,27(8):1549-1553.
- [36] 刘征,胡山鹰,陈定江,沈静珠,李有润. 我国磷资源产业物质流分析. *现代化工*. 2005,25(6):1-5,7.
- [41] 段宁. 城市物质代谢及其调控. *环境科学研究*. 2004,17(5):75-77.
- [43] 吕彬,杨建新. 生态效率方法研究进展与应用. *生态学报*, 2006,26(11):3898-3906.