生态产业链的资源价值流核算框架设计

肖　序（博士生导师），陈芷汀

【摘要】生态产业链是生态工业园循环经济得以实现的载体。以生态产业链物质流为载体，界定生态产业链的资源价值流核算框架，建立一套适应于生态产业链的资源价值流核算方法，并以某生态产业链的实例对该方法的运用做一阐释，从而提高生态工业园运行效率。

【关键词】物质集成；资源价值流；生态产业链；循环经济

【中图分类号】F223　　【文献标识码】A　　【文章编号】1004-0994（2017）24-0068-7

一、引言

废弃物交换是生态工业园的首要特征。废弃物交换的结果就是形成工业共生体系，即所谓的生态产业链网，生态工业链网又是由生态产业链交织而成。生态产业链是生态工业园循环经济得以实现的基础，获得生态产业链成本效益与环境业绩的计算与分析数据，是正确判别生态产业链及工业园循环经济水平及进行循环经济改造的依据。

以往经济主体往往更多地采用物质流分析方法，但物质流的核算未涉及成本与价值的计算领域，使得循环经济的环境评价指标与经济评价指标相剥离，无法系统反映其真实效益。价值流分析弥补了这一不足，其结合了物质流分析方法和环境成本会计，采用物质流的流量管理模式记录、追踪和分析经济系统中资源的价值流转信息。本研究试图在物质流及价值流的理论基础上，建立一套适用于生态产业链的资源价值流核算方法，并以某工业园的生态产业链为例，剖析这一方法的具体应用。

二、生态产业链的价值流核算框架的构建

（一）价值流的基本核算原理与方法

物质流入工业体系并经过加工以合格品或废弃物的形式流出，产生物质转移的“明流”。伴随着物质的流动，附着于物质的价值随之流动，形成价值转移的“暗流”，价值随物质加工程度的提高而不断累积。物质在工业体系中的流动常以某主要材料或元素为典型，追踪其路线可以定义该材料或元素的工艺流路线，与此对应的价值流动则可界定为价值流路线。

以抽象的物质M工艺流程为例。物量中心是价值流核算的基本单位，在进行价值流核算之前，通常在均衡考虑价值流计算精确度要求和计算量后，将核算流程主体划分为若干个物量中心。假设该生产流程适宜划分为四个物量中心，主要原材料物质M流经各个物量中心加工形成最终产品，资源利用效率能用物质M的质量、质量函数或元素含量比例来衡量。如图1所示，物量中心3新投入的M为20单位，由上一物量中心输入的M为80单位，输出到下一物量中心的M为90单位，M废弃了30单位，其中有20单位通过内循环实现再利用，最终排放10单位。物量中心3的M的物质平衡算式可以写作：$P_2(80)+R_3(20)+20=P_3(90)+Q_3(10)+20$。

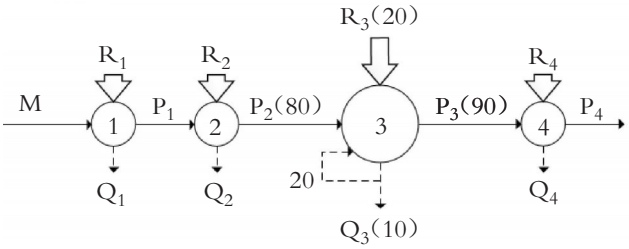

图1　物质M工艺流路线

【基金项目】国家社会科学基金重大项目（项目编号：11&ZD166）；教育部人文社会科学研究规划基金资助项目（项目编号：10YJA790205）

物量中心3的投入成本包括上一物量中心结转的有效利用成本RUV_2和本物量中心新投入成本C_3，C_3可以表达为：$C_3=C_{m3}+C_{e3}+C_{s3}$。

上式中：C_{m3}为物量中心3新增的材料成本；C_{e3}为物量中心3新增的能源成本；C_{s3}为物量中心3新增的系统成本。物量中心3对废弃物的再利用并不增加材料成本，但需要新投入能源和系统成本。

根据资源价值流方程式，物量中心3物质M的价值流平衡算式为：$RV_3=RUV_3+WLV_3+WEIV_3$。

式中：RV_3为物量中心3的资源流成本；RUV_3为该资源流的有效利用价值（正制品价值）；WLV_3为物量中心3的废弃物损失价值（负制品价值）；$WEIV_3$为物量中心3的废弃物外部环境损害价值。

以物量中心3合格品和废弃物的物料质量比为分配依据，上式可分解为：$RUV_3=P_3/(P_2+R_2)\times(RUV_2+C_3)$；$WLV_3=Q_3/(P_2+R_2)\times(RUV_2+C_3)$；$WEIV_3=\sum_{j=1}^{n} WEI_{3j}\times UEIV_{3j}$。

式中：WEI_{3j}为物量中心3第j种废弃物产量；$UEIV_{3j}$为物量中心3第j种废弃物换进损害价值系数。

按照上述核算方法，物量中心3正负制品价值流成本分配比率$P_3:Q_3=90:10$。物量中心3新投入和从物量中心2结转的有效利用成本数据如图2所示，可计算获得物量中心3的正负制品价值流成本。

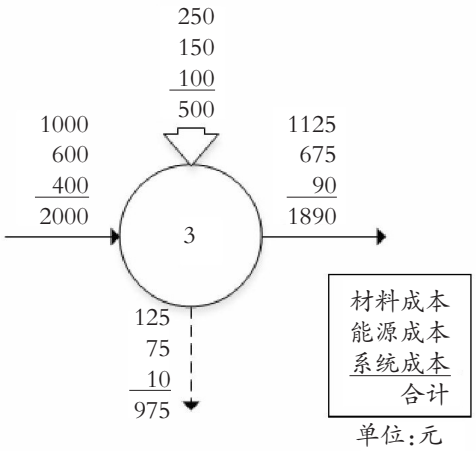

图 2 物量中心3的资源价值流

对物量中心价值流逐步结转的核算方法可以扩展到图1中物质M的整个生产流程。此外，价值流核算囊括的资源价值是基于经济环境这个大系统的价值概念，除了对资源消耗、人工和折旧费用进行核算，还涵盖了对废弃物环境损害价值的计量。本研究对废弃物外部损害价值$WEIV_3$的算法采用LIME法，该方法通过结合法以及层次分析法确定各端点之间的重要性清单，利用LIME的货币单位合并系数以货币单位估计环境负荷的外部成本。

（二）生态产业链资源价值流核算框架设计

生态产业链同企业价值流应用环境的差异为：

第一，核算对象和单位不同。企业作为核算对象时，物量中心一般确定为重要工序或工序组。而生态产业链由拥有独立经济主体地位和独立经济利益诉求的企业组成，企业的特性使得其作为一个核算整体不可拆分，所以在生态产业链的核算中应将企业设为物量中心或根据实际情况将相同性质的几个企业合并为一个物量中心。

第二，物质流动路径不同。以企业作为物量中心的生态产业链与以工序作为物量中心的企业物质流入路线相似，流出路线却更为复杂，不仅包括流向下游物量中心的合格品和流出产业链的废弃物，还包括流向下游物量中心并为之所消耗的废弃物和流出产业链的合格品两种流动路径。仍以物质M为例，绘制生态产业链物质M流动路径，如图3所示。R_i表示各物量中心新投入的原材料M；P_i表示流入下游物量中心的废弃物；F_i表示各物量中心产出的合格品；Q_i表示各物量中心产出的最终废弃物。

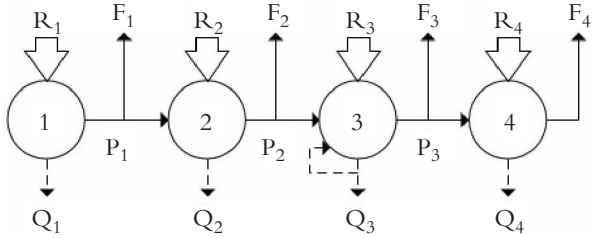

图 3 生态产业链物质M流动路径

第三，核算目的不同。企业的价值流核算是在相对固定的工艺流程之中探寻提高资源利用效率的潜力点，而生态产业链的价值流核算更重要的目的在于分析生态产业链的共生效率，对生态产业链进行物质集成，从而最终完成对生态工业园的生态设计。

基于以上三个差异点，本文对生态产业链的价值流核算做出调整，从产业链内部资源价值、共生收益及外部损害价值三个方面搭建其核算框架。

1. 生态产业链内部资源价值成本核算。生态产业链的资源价值成本核算关注的是企业之间的产成品、副产品和废弃物交换，企业内部的价值流不在本研究范围之内。在核算时可以将生态产业链看作一个独立运行的企业，将废弃物交换看作“工序”之间的物质流动。核算以上下游企业为基本单位，如果产业链结构复杂，应先将上下游企业中各生产流程或

生产线、分厂或辅助厂逐级向上汇总为一个大物量中心，核算其主要资源的合格品价值、用于交换的废弃物和最终废弃物价值，反映产业链内部因废弃物交换产生的内部资源流转价值。需要注意的是，组成生态产业链的企业构成复杂，产品种类众多，并不存在单一分配正负制品成本的比例。因此，在对生态链核算时应按价值流核算方法对企业工序物量中心进行核算，得出企业的价值流成本。虽然企业之间的废弃物是有偿交换，但将产业链看作一个有机整体时，企业间废弃物的有偿交换可以被看作企业关联方的内部交易，所以在产业链内部价值流核算时并不考虑废弃物的交换价格，换入废弃物成本按该废弃物换出时所分配的成本计算。

以图3为例，物量中心3换入废弃物数量为P_2，在不考虑废弃物价换价格的情况下，物量中心3按照P_2流出物量中心2所分得的成本进行结转计算。物量中心2的资源有效利用价值可以表示为：$RUV_2=RUV_{2P}+RUV_{2F}=(F_2+P_2)/(R_2+P_1)\times(C_2+RUV_1)$。

其中，RUV_{2F}为物量中心2产成品所分得的成本；RUV_{2P}为物量中心2换出废弃物的成本，也即物量中心3所换入废弃物成本。

分解RUV_{2F}和RUV_{2P}，可得：$RUV_{2F}=F_2/(R_2+P_1)\times(C_2+RUV_1)$；$RUV_{2P}=P_2/(R_2+P_1)\times(C_2+RUV_1)$。

2. 生态产业链废弃物交换的共生收益核算。生态工业园的产业链经济环境效益还体现在链条上企业之间废弃物交换所产生的共生收益中，这里将补充内部资源价值核算中未考虑的废弃物交换价格的因素。企业之间的废弃物交换是一种交易行为，不仅可能同时存在顺流、逆流交换及多种废弃物交换等复杂情况，废弃物的交换数量更是受到交换价格等多种因素的影响。本研究将影响两企业之间废弃物交换的因素归结为换出企业废弃物的产量、换入企业废弃物的需求量、废弃物无害化处理成本、被替代原材料价格、废弃物的运输及初始处理成本、政府对废弃物交换的奖励补贴等，通过对相关因素之间存在的数量关系进行分析，建立共生收益核算方程。

假设存在这样一种共生关系（详见图4），生态产业链上两个企业（A和B）之间存在一种废弃物W的交换，企业A生产主产品的同时产生废弃物W，产生的比例为a，企业B可以利用废弃物W替代原材料R生产产品，且企业B利用废弃物W生产出的产品与利用原材料R生产出的产品无差异。企业A把废弃物W排放到自然环境前，必须对废弃物W进行无害化处理。企业B利用废弃物W或原材料R均需承担运输成本和初始化处理成本，同时B因资源化废弃物W可获得外部奖励，比如政府补贴等。

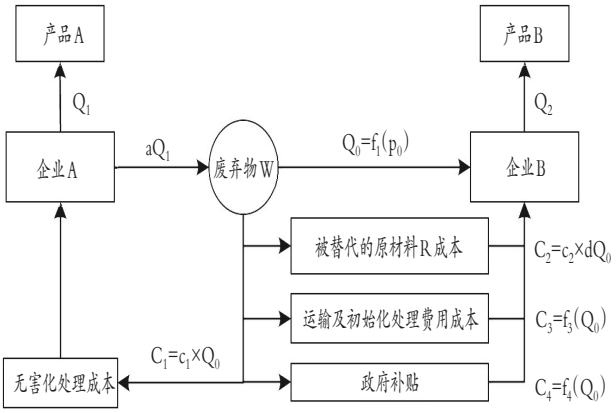

图 4 改革前集团资金收入流向

图4中：Q_1为企业A的主产品的产量，Q_2为企业B的主产品的产量，假设在一定的周期内，Q_1、Q_2保持不变；p_0为企业A出售废弃物W的价格，即企业B购买废弃物W的价格；Q_0为企业B利用废弃物W的数量；d为废弃物W转换为原材料R的数量比例；c_1为企业A无害化处理单位废弃物W的成本；C_1为节省的废弃物W无害化处理总成本；c_2为单位原材料R的市场价格；C_2为被替换的原材料R的总价格；C_3为企业B对废弃物W的运输与初始化处理成本；C_4为企业B利用废弃物W获得的政府补贴。根据上述关系，可建立方程式：$S_{AW}=p_0\times Q_0+C_1\geqslant 0$；$S_{BW}=C_2-p_0\times Q_0+C_4-C_3\geqslant 0$；$S_W=S_{AW}+S_{BW}=C_1+C_2+C_4-C_3$。

其中：S_{AW}为企业出售废弃物W而获得的收益；S_{BW}为企业B资源化废弃物W而获得的收益；S_W为企业A与企业B由于综合利用废弃物W而获得的总收益，即形成的工业共生效益。

企业之间废弃物交换共生收益的核算方法可以扩展生态产业链上每一企业每一种废弃物交换所获得的共生收益中，将每一企业的共生收益加总，即可算得整条产业链的共生收益。

3. 生态产业链的外部损害成本计算。工业废弃物不仅产生了资源的损耗，而且由于废弃物的外排导致了外部环境的污染，从而形成外部环境损害价值。在考虑全球变暖、大气污染及臭氧层破坏等十多个环境污染领域后，LIME法对近千种造成环境负荷的物质进行了估价，通过单一污染物货币化指标公式对污染物的环境损害价值进行核算，公式如下：

$$\sum_{k=1}^{J}\sum_{j=1}^{I}S_j\times DF_{jk}\times WTP_k=\sum_{j=1}^{I}S_j\times\sum_{k=1}^{J}DF_{jk}\times WTP_k$$

上式中：S_j为污染物j的生命周期清单；DF_{jk}为

污染物j对保护对象k的损害系数；WTP_k为保护对象k的1指标单位损害回避意愿支付额。

采用LIME法核算时，先要将废弃物的数量单位转换为标准化单位，再将单位标准化后的废弃物数量乘以该废弃物所对应的LIME值，计算该废弃物的外部环境损害价值，最后将各个成本单元内所有废弃物的外部环境损害价值加计汇总。

三、生态产业链资源价值流核算的应用

（一）生态产业链的基本情况介绍

某生态工业园通过产业延伸和整合，实现节能降耗、资源综合利用、清洁生产和环境保护，形成了颇具代表性的一条园区热电厂废水废渣资源再循环生态产业链。该产业链主要由热电厂和建材厂组成。热电厂向开发区内的用户集中供热、供冷，并提供电力设备的修造安装及技术服务。拥有3台75吨/小时循环流化床锅炉、一台C15-4.9/0.98及一台B7.5-4.9/0.98汽轮发电电机组。热电厂已建成的一期工程年发电量1.4992×10^{11}KWh，年蒸汽产量为2.7657×10^{6}GJ。发电生产的煤灰、煤渣等副产品约16万吨、生产污水35万吨。建材厂项目总投资8000万元，拥有一条年产25万立方的粉煤灰加气混凝土砌块生产线和一条6000万块粉煤灰蒸压砂灰砌块生产线，主要产品混凝土加气砌块年产量30万立方米。热电厂废水废渣再循环生态产业链共生关系见图5。

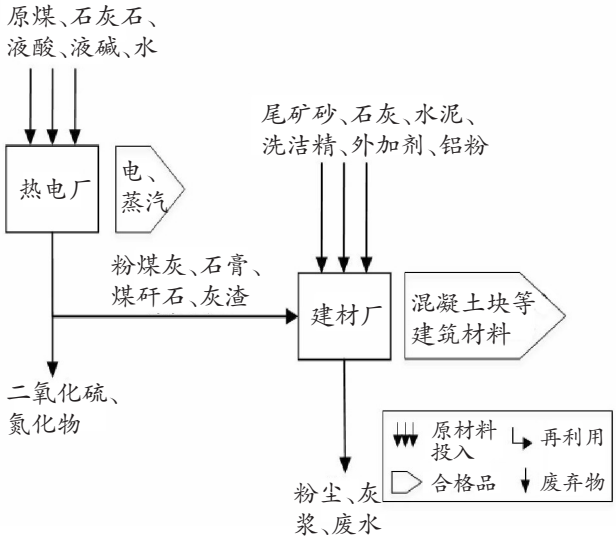

图5 热电厂废水废渣再循环生态产业链共生关系

热电厂的主要生产流程为：将破碎过的原煤送入循环，加入石灰石粉。原煤和石灰石粉混合燃烧产生热能，热能将水加热为高温高压蒸汽后送往汽轮机膨胀做功，将热能转变为机械能。最终汽轮机带动发电机转动，将机械能转变为电能，产生的电力经变压器送往电网供电。本文将热电厂生产流程简化为原煤储运、锅炉燃烧和汽轮发电三个物量中心的生产。

建材厂的主要工艺流程为：将粉煤灰、石灰等原材料进行粉碎，与一定比例的洗洁精等化学品、铝粉悬浮液、铝水等均匀加入浇筑搅拌机内搅拌，获得的料将经过模具浇筑后推入初养室进行发气初凝，最后将初养好的胚体进行切割。建材厂生产流程可简化为灰浆制备和发泡蒸养两个物量中心的生产。

（二）现状数据的收集

热电厂和建材厂的生产不具有周期性，生态产业链的废弃物交换也不是按月平均交易的。因此，本次价值流核算以一年为周期收集了该生态产业链上企业生产和废弃物交换的财务数据，以更好地反映废弃物交换和综合利用水平。按企业工序物量中心收集区分三种不同成本的投入物质成本，见表1。

表1 生态产业链各企业物量中心年投入成本汇总

企业物量中心	工序物量中心	项目	成本额（万元）
热电厂	原煤储运	材料成本	6293.63
		能源成本	323.75
		系统成本	663.214
	锅炉燃烧	材料成本	178.68
		能源成本	43.77
		系统成本	55.23
	汽轮发电	能源成本	15.86
		系统成本	64.61
建材厂	灰浆制备	材料成本	743.91
		能源成本	39.9
		系统成本	159.574
	发泡蒸养	材料成本	22.8
		能源成本	215.844
		系统成本	166.086

在输出端，除合格品外，该生态产业链废弃物排放情况汇总见表2。

表2 生态产业链各企业物量中心废弃物排放情况汇总

企业物量中心	工序物量中心	种类	数量（吨）
热电厂	原煤储运	煤矸石及杂质	1700
	锅炉燃烧	灰渣	93830
		烟尘	26
		废水	3860
	汽轮发电	废水	1280
		废气	140
建材厂	灰浆制备	粉尘	2589
	发泡蒸养	废水	34500

（三）产业链的价值流核算与分析

1. 资源价值流成本核算。结合从技术部门和财务部门收集来的数据，企业物量中心将本物量中心新增的价值流成本和从上一物量中心结转的有效利用资源成本按照材料、能源和系统进行分类归集，再结合自身的生产和产品特性，按照各自不同的分配比例对本物量中心的正负制品成本进行分配，可计算得出该生态产业链的价值流，如图6所示。

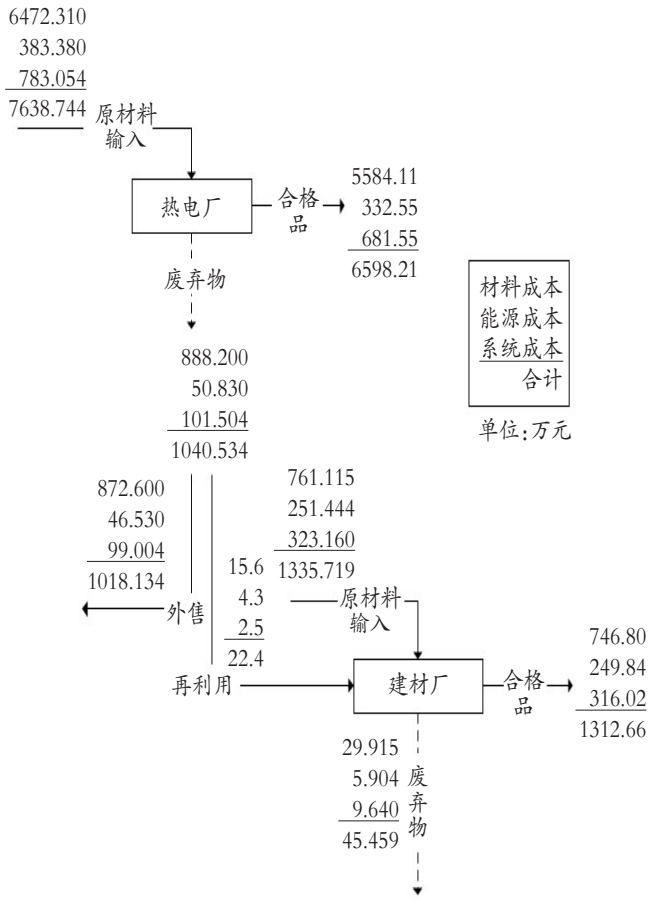

图 6 热电厂废水废渣再循环生态产业链价值流转

企业的价值流成本核算以建材厂为例。根据建材厂的产品和工艺生产的特性，本例选择该建材厂的产品材料质量作为正负制品的分配标准。两个物量中心中，灰浆制备中心的主要污染物为少量的粉尘，工艺数据显示该环节合格品灰浆占比98%，合格品流入发泡蒸养中心进行发气初凝。根据获得的该中心投入成本和正负制品成本分配比例，可计算灰浆制备中心正负制品分配的价值流成本。其中，正制品成本=正制品分配比例×价值流成本总额，应分配的材料成本为743.915×0.98=729.04（万元），应分配的能源成本为39.9×0.98=39.102（万元），应分配的系统成本为159.574×0.98=156.38（万元）。灰浆制备中心形成的正制品成本直接流入发泡蒸养中心，则发泡蒸养中心的价值流成本总额包括上一物量中心的正制品和本物量中心新投入的成本。发泡蒸养中心生产的成品加气混凝土砌块的合格率为96%，该环节产生的少量废水和砌块次品均可在灰浆制备环节循环利用。将发泡蒸养中心的价值流成本总额在正负制品之间按比例分配，则可计算得到最终建材厂的合格品成本金额。计算结果见表3。

表 3　建材厂各物量中心资源流成本汇总

项目分类	内　容	灰浆制备（万元）	发泡蒸养（万元）
上一物量中心转入	材料成本		729.04
	能源成本		39.102
	系统成本		156.38
本物量中心投入	材料成本	743.915	22.8
	能源成本	39.9	215.844
	系统成本	159.574	166.086
合计	材料成本	743.915	751.84
	能源成本	39.9	254.946
	系统成本	159.574	322.466
正制品成本	材料成本	729.04	736.8
	能源成本	39.102	249.84
	系统成本	156.38	316.02
	合　计	924.522	1302.66
负制品成本	材料成本	14.875	15.04
	能源成本	0.798	5.106
	系统成本	3.194	6.446
	合　计	18.867	26.592

2. 共生收益核算。热电厂所产生的灰渣主要为粉煤灰。作为原材料输入建材厂的粉煤灰是生产粉煤灰加气混凝土砌块的主要原材料，建材厂收购的废渣为5200吨，每吨30元，替代的外购二级粉煤灰单价（含运输、装卸费等）为每吨58元。热电厂和建材厂相邻，废渣可以直接通过传送带输送到建材厂的生产车间，且可直接投入使用。园区对园区企业的配套采购鼓励为采购金额的1%，建材厂对热电厂废弃物的采购符合鼓励政策的要求。因此，生态产业链中热电厂再利用的废弃物所产生的共生收益为：$S_{热电厂}$=0.52×30=15.6（万元）；建材厂购入上游废弃物替代原材料所产生的共生收益为：$S_{建材厂}$=（58−30）×0.52+58×0.52×1%=14.862（万元）；产业链的共生收益为：S=15.6+14.862=30.462（万元）。

粉煤灰混凝土砌块的生产工艺配方显示，粉煤灰混凝土砌块中粉煤灰的含量达到70%，每立方米

砌块的粉煤灰消耗为350KG。热电厂的灰渣能完全满足建材厂对粉煤灰的需要，建材厂外购的材料主要为尾矿砂、精石灰和水泥等。但从图6可以看出，由热电厂产生的废弃物中，为建材厂所用的仅占2.153%，剩余97.847%的部分全部外售，总体而言，由于热建材厂产能的限制，对热电厂灰渣的再利用十分有限，产业链的共生效益的发挥受到限制。

3. 外部损害成本计算。产业链在生产过程中会形成大量废弃物，其中热电厂的废水废渣通过产业链的再利用和外售保证了污染物的零排放，建材厂生产的次品通过内部回收利用消耗了大部分，但仍有一部分粉尘和废水排出产业链，对环境造成危害。根据LIME的计算方法，热电厂废水废渣再循环生态产业链外部环境损害价值计算结果见表4。

表4　热电厂废水废渣再循环产业链的外部环境损害货币计算

污染物种类	废弃物数量（吨/年）	标准化（KG）	LIME值（日元/KG）	汇率	外部损害成本（万元）
粉尘	2589	2589000	0.738	16.54	11.552
废水	34500	34500000	1.18		246.131

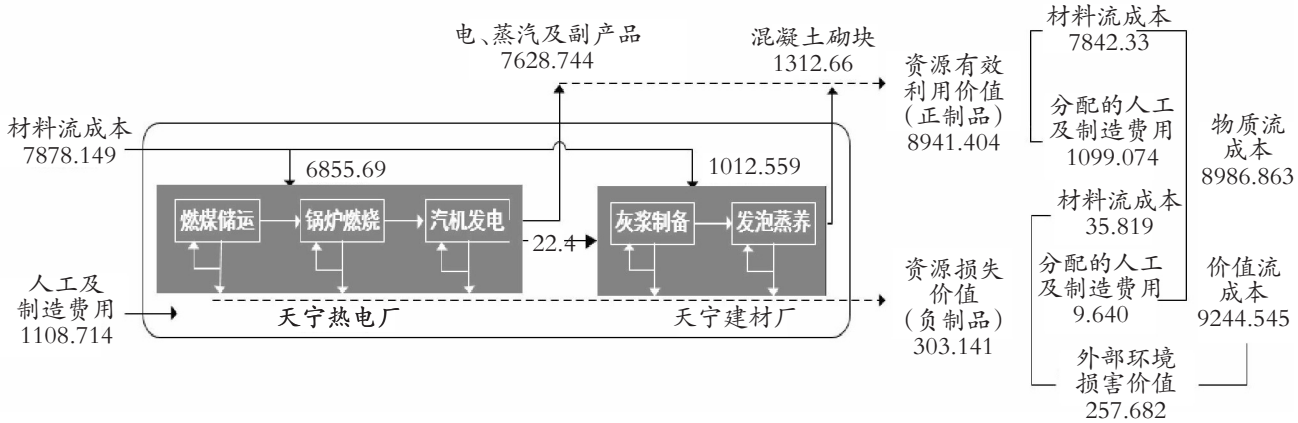

图7　热电厂废水废渣再循环产业链资源价值流

归纳上述计算，可描绘热电厂废水废渣再循环产业链的资源价值流成本及结构，如图7所示。

从图7可知，废弃物价值的构成中物质流成本占比15%，而环境损害价值占比高达85%，说明该产业链外部资源流成本很高，而内部资源流成本相对较低，应重视外部污染物的排放整治和再生化处理。

根据以上信息，有针对性地对该生态产业链进行循环经济改造。该生态产业链的主要污染物为废水和粉尘。水污染物主要为生活污水，产生量约为2.23m^3/d，主要污染物为SS和COD。该部分生活污水可经化粪池沉淀处理后外排经过城市管网进入工业园的综合污水处理厂。经过走访发现，建材厂在建设时未能实现雨水和污水的分流，在一定程度上增加了污水的排放数量。粉尘主要由建材厂项目在进行原料破碎、进仓过程中产生，排放浓度为30000mg/m^3，产生量约为0.6t/d。针对粉尘污染的治理措施建议为：在主要污染环节设置吸尘罩，通过管道进入高效布袋除尘装置。高效布袋除尘装置的效率可达到98%，经处理后的粉尘排放将小于30mg/m^3。此外，在建的建材厂二期工程预期每年生产加气混凝土砌块60万立方米，预计对上游的灰渣消化量翻倍。

增加新的物量中心污水处理厂，根据建材厂二期工程完工后的产能和建议减排措施更新成本数据，用生态产业链价值流计算方法核算生态产业链新的物质流转关系，获得循环经济后该生态产业链的资源价值流成本（图8）和外部损害成本（表5）。

表5　热电厂废水废渣再循环生态产业链循环经济后的外部环境损害货币计算

污染物种类	废弃物数量（吨/年）	标准化（KG）	LIME值（日元/KG）	汇率	外部损害成本（万元）
粉尘	103.58	1035800	0.738	16.54	4.622

在热电厂的排渣量、灰渣的交换价格和市场价格、政府对灰渣资源化的奖励政策均不变的情况下，重新计算因热电厂与建材厂灰渣交换产生的共生收益。热电厂再利用的废弃物所产生的共生收益为：$S_{热电厂}$=1.04×30=31.2（万元）；建材厂购入上游废弃物替代原材料所产生的共生收益为：$S_{建材厂}$=（58−30）×1.04+58×0.52×1%=29.422（万元）；产业链的共生收益为：S=31.2+29.422=60.622（万元）。

此外，对生活污水的处理过程中会产生沼气，处理1KgCOD约产生0.35m^{3}沼气。运用厌氧工艺将沼气收集，进入热电厂的发电机组发电，可以成为下一阶段生态产业链工业共生收益的增长点。

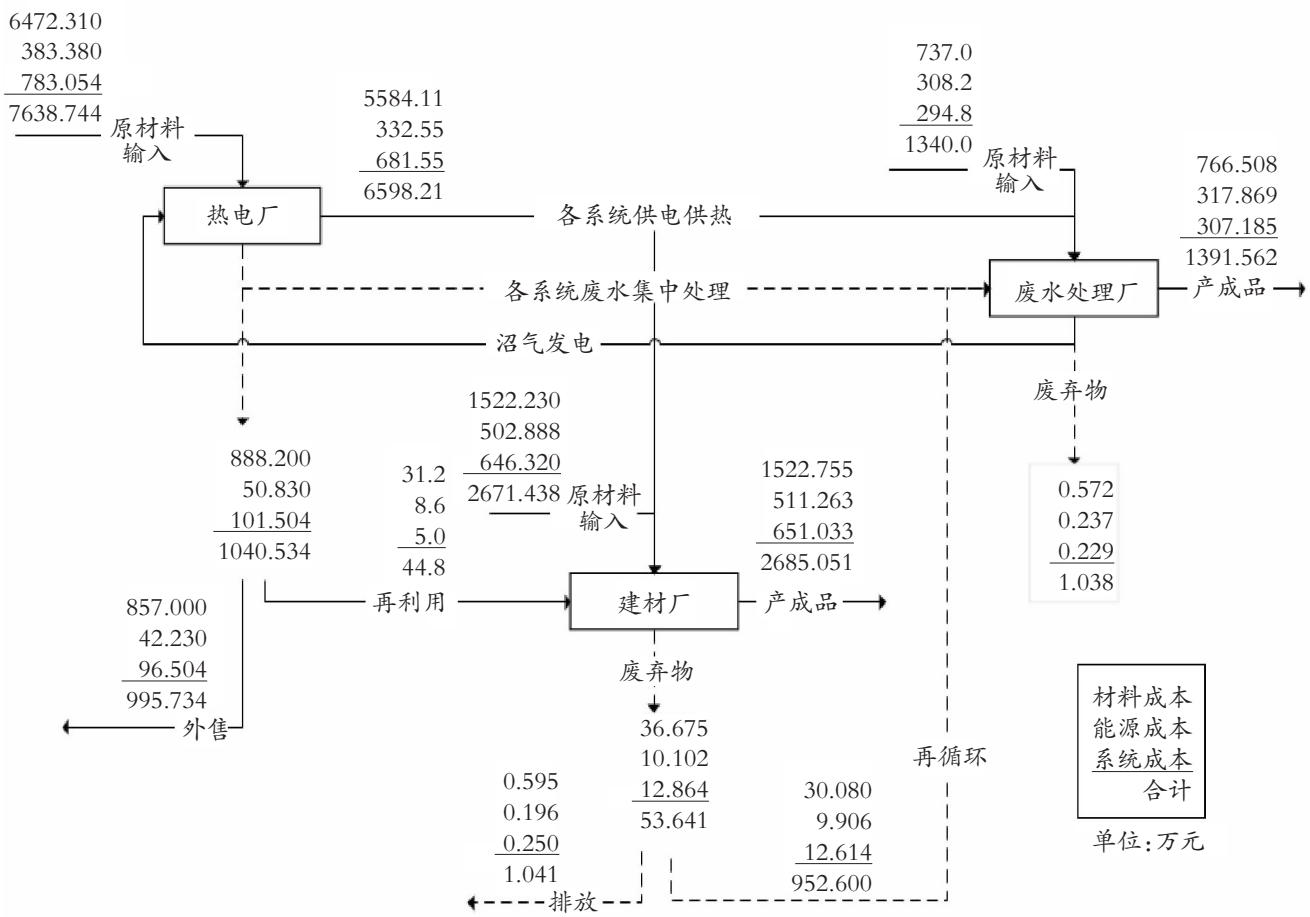

图 8 热电厂废水废渣再循环生态产业链循环经济后价值流转

(三)循环经济前后生态产业链资源价值流评价

对比图6和图8可知,循环经济前生态产业链资源废弃物的资源损失总成本为45.459万元,循环经济后废弃物资源损失成本为2.079万元,循环经济改造减少了95.427%的资源损失;由表4和表5可以看出,循环经济前后废弃物的外部环境损害成本分别为257.683元和4.622元,循环经济改造降低了98.206%的外部环境损害。此外,由于建材厂扩大了产能,生态产业链的共生收益由30.462元上升到60.622元。综上,通过对生态产业链的价值流核算,有针对性地提出诸如采用高效的减排装置、增加污水处理厂等措施有效地降低了污染物的排放量,同时提高了企业和生态产业链的经济效益,符合循环经济的可持续发展内涵。

四、结论

资源价值流核算是建立在资源流转平衡原理和物质流动路线的基础之上,在充分考虑资源利用效率的同时,也将资源价值的循环流动考虑进来。本文将这种方法从企业层面扩展至生态产业链层面,不仅能帮助生态工业园完整地核算产业链的产品成本,而且能有效地分析链上每一企业资源价值的变化情况,对提高生态产业链以及生态工业园的生态化建设水平、实现生态工业园的循环经济发展有着十分重要的意义。

主要参考文献:

郑玲.资源流成本管理研究[M].湖南:湖南科学技术出版社,2010.

肖序,陈宝玉.基于资源效率的"元素流—价值流"分析方法研究[J].环境污染与防治,2015(12).

肖序,李雨薇.锡还原熔炼过程中资源价值流的应用研究[J].财务与金融,2013(3).

苏青福.生态工业园风险识别与废弃物交换价格研究[D].天津:天津大学,2011.

原培盛.污水处理厂处理成本分析[J].环境工程,2008(2).

作者单位:中南大学商学院,长沙410083