

DOI: 10.5846/stxb201803300683

徐凌星, 杨德伟, 高雪莉, 郭青海. 工业园区循环经济关联与生态效率评价——以福建省蛟洋循环经济示范园区为例. 生态学报, 2019, 39(12):

Xu L X, Yang D W, Gao X L, Guo Q H. Evaluating the network nexus and efficiency of circular economy: A case study of Jiaoyang eco-industrial park. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12):

工业园区循环经济关联与生态效率评价 ——以福建省蛟洋循环经济示范园区为例

徐凌星^{1,2}, 杨德伟^{1,*}, 高雪莉^{1,3}, 郭青海¹

1 中国科学院城市环境研究所 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 工业园区因物质能量的高度集聚, 生产—消费过程的网络关联, 以及区域示范带动效应, 在循环经济发展中受到持续关注。本研究以福建省蛟洋循环经济示范园区为例, 应用物质流、生态网络和生态效率等测度分析方法, 综合评估了 2012—2016 年间园区循环经济的网络关联和生态效率。研究结果表明: (1) 园区物质流结构单一, 关联度和稳定度明显较弱; (2) 园区网络的韧性不足, 关键节点的级联效应显著, 尤其对中下游企业的影响程度大; (3) 生态效率指数分析发现, 园区关键节点企业在循环经济效益方面带动能力不足, 影响园区循环经济的前景。为此, 从园区网络关联稳定度和企业生态经济效率优化提升的角度, 探讨园区未来的循环经济发展策略。可为处于起步阶段的专一化工业园区探索可行的循环经济模式提供借鉴。

关键词: 生态工业园区; 循环经济; 生态网络分析; 生态效率; 网络韧性

Evaluating the network nexus and efficiency of circular economy: A case study of Jiaoyang eco-industrial park

XU Lingxing^{1,2}, YANG Dewei^{1,*}, GAO Xueli^{1,3}, GUO Qinghai¹

1 Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Circular economy has been recognized as an effective practice of global sustainable development. Eco-industrial park (EIP), as an ideal model for circular economy, attracts increasing concern for its dynamic flow of energy and material, and network nexus of the production-consumption process. Using the circular economy chain of Jiaoyang EIP as an example, combining the methods of material flow, ecological network, and eco-efficiency analysis, this study attempted to determine the network nexus and eco-efficiency of the EIP during 2012—2016. A circular economy chain of the EIP, i.e., the upstream-midstream-downstream chain of industries, was established by material flow analysis. Based on the circular economy chain, especially the byproduct and waste linkages, the ecological network analysis method was adopted to reveal the network nexus characteristics of the Jiaoyang EIP, consisting of the network connectivity, stability, and resilience. The network resilience analysis helped identify the critical nodes that can reflect the cascading effects. Lastly, the eco-efficiency analysis method was employed to examine the circular economy benefits and patterns of the critical node companies. The

基金项目: 福建省科技计划引导性项目(2015Y0082); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101001); 国家自然科学基金重大项目(41690142)

收稿日期: 2018-03-30; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dwyang@iue.ac.cn

results from 2012 to 2016 show that: (1) an insufficient network connectivity and stability was supported by a single circular industrial chain in the EIP; (2) the notable cascading effects of the EIP were observed in critical nodes, especially the midstream and downstream companies, which resulted in a less flexible network in the EIP; (3) the insufficient benefits of the circular economy driven by critical node companies implied there was a long way to go toward sustainable pathways for the EIP. Hence, improving strategies of the network nexus and eco-economic synergetic development are proposed for the future circular economy. On the one hand, the awareness of protecting vulnerable companies and controlling cascading failures is emphasized in the optimized network management. On the other hand, the sustainable eco-economic modes of the EIP could be achieved by efficient resource recycling and environmental waste reduction. Our results could provide valuable implications for emerging EIPs and their circular economy exploration within or beyond China.

Key Words: eco-industrial park; circular economy; ecological network analysis; eco-efficiency; network resilience

近几十年来,面对全球资源耗竭与环境退化的危机,循环经济发展模式成为实现资源、环境和经济共赢的重要途径^[1-2]。其中,“减量化,再利用和资源化”成为广为接受的循环经济发展理念^[2-3]。传统的循环体系强调废弃物资源化,忽略“减量化与再利用”的循环效益,这在单一企业和社会静脉产业中较为普遍^[4-5]。为全面优化生态效率,新型循环经济模式提出“预防-减量-清洁处理-资源培育”的全生命周期要求,生态工业园成为重要试点^[6-8]。

循环经济模式的扩展,对当前的工业园转型提出了新挑战。如何耦合关联企业间的循环经济过程,实现园区结构优化,功能提升,逐渐成为生态工业园发展评价的焦点。为揭示园区企业间的物质流转和代谢特征,全生命周期^[9]、物质流分析^[10]、能值分析^[11]等方法被应用到循环经济过程研究中。基于工业园区循环经济的过程分析,企业关联结构与园区功能效益研究得以展开。为识别企业关联关系与园区结构,有学者着重解析了生态产业共生的结构及调控机理^[12-13];也有学者引入复杂网络^[14]、生态网络分析^[15]和社会网络分析^[1]等度量方法,构建工业园区网络,实现对循环经济结构关联度的分析。在功能效益层面,循环经济模式强调生态效率的最大化^[3,16],为此,学者们先后建立了基于生态效率的单一指标法、指标体系法和模型法,用以衡量工业园区循环经济水平^[17]。

综合来看,当前的研究提倡多指标、多方法进行生态工业园结构分析和功能评估,其中,园区结构分析突出企业关联的网络化特征,园区功效研究强调基于经济、资源和环境多维度的复合生态效率分析^[1,14,18]。综合评估工业园区关联网络特征和生态效率水平,可实现工业园区循环经济结构优化和效率提升的综合策略分析。然而,以往的研究多关注大、中型成熟工业园区的循环经济发展,缺乏对小型新兴工业园区循环经济产业链及效益优化策略的分析^[11,15,18]。因此,本文从探讨新兴工业园区企业关联度与生态效率的角度出发,以福建省蛟洋循环经济示范园区为例,在运用物质流分析方法厘清园区循环经济的物质流过程的基础上,使用生态网络分析方法评估园区网络的关联结构特征(连接度、稳定性、韧性等),并筛选园区网络中的关键节点企业,进行关键企业的生态效率评估。最后,本文以提升企业关联水平与生态效率为目的,探讨园区循环经济的发展策略,进而为类似新兴化工循环经济园区实现稳定运行和功效提升提供借鉴。

1 研究对象与数据来源

蛟洋循环经济示范园位于福建省上杭县,自 2007 年建设至今,已形成金属冶炼、化工和建材三大支柱产业,入驻企业 30 余家,园区面积达 5.78 km²,2016 年产值达 206.94 亿元。园区从 2012 年开始循环化改造,现已形成关联 9 家重点企业的循环生产网络。作为上杭县的龙头产业园区,蛟洋循环经济示范园的发展,对调整县域经济产业结构,加强现代工业城镇建设,减缓重工业(以矿产开采、金属冶炼业为首)产生的资源环境压力,实现区域可持续发展具有重要意义。

本文以园区进入循环经济的 9 家企业为研究对象,针对 2012—2016 年的企业发展情况开展了 3 次实地

调研。其中,有关园区规划和管理的数据来源于蛟洋循环经济示范园管理委员会;企业资源、环境及经济投入产出数据源自对相关企业的调研与访谈。

2 研究方法

2.1 物质流分析

物质流分析是在工业代谢分析的基础上构建的,是对系统物质流动过程进行跟踪分析的一种评价方法。基于对蛟洋园区物质输入、贮存、输出的跟踪研究,本文确定了园区循环经济生产链条。

2.2 生态网络分析

生态网络分析是通过网络关联生态系统组成要素的一种方法^[19-20]。工业园区网络由节点和路径组成,节点表示企业,路径表示企业间达成的物质交换关系^[21]。

2.2.1 连接度分析

网络结构连接度(C)表示网络各节点间的联结程度。 C 值越大,网络节点间的相关性越强^[22],公式如下:

$$C = L/n^2 \quad (1)$$

式中, n 为网络节点数, L 为节点间存在的路径数。

2.2.2 稳定性分析

在进行生态网络稳定性测算之前,首先需要计算生态网络平均交互信息指标(Average mutual information, AMI),用以表征物质交换在网络中的集中度^[23]。随着 AMI 指标值的升高,物质的流动过于集中,网络的多样性下降,从而导致网络的稳定性(D_R)降低^[19],公式如下:

$$AMI = K \sum_{i,j} \left(\frac{f_{ij}}{T_{..}} \right) \log \left(\frac{f_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}} \right) \quad (2)$$

$$D_R = - \sum_{i,j} \left(\frac{f_{ij}}{T_{..}} \right) \log \left(\frac{T_{.j}}{T_{..}} \right) - AMI \quad (3)$$

式中, K 为尺度系数(针对单一系统时, K 取1), f_{ij} 为节点 j 流向节点 i 的流量, $T_{..}$ 为网络通量, $T_{i.}$ 为流至节点 i 的总流量, $T_{.j}$ 为节点 j 流出的总流量。

2.2.3 韧性情景分析

在生态网络分析过程中引入韧性情景分析法,可实现对园区循环经济发展的抗干扰能力的评估。工业园中的干扰是指由于设备故障、生产流程升级或取缔污染企业等行为引起节点间物质和能量流的中断。一个节点的失效将会导致关联路径的消失,进而干扰整个工业园的网络关联效应,这种现象被称为级联效应^[24]。为此,本文通过情景预设,分析干扰企业后园区产生的级联效应,级联效应越强表示园区网络韧性越弱。在情景分析中,我们依据企业关联程度(节点关联的路径数与流量)衡量企业在园区网络中的重要性,按照重要性由大到小的顺序依次进行情景分析,进而得到每个干扰发生后园区循环经济网络的变化情况。

2.3 生态效率

2.3.1 生态效率指标计算

生态效率本质上是一个衡量经济活动过程对自然资源利用状况或污染排放状况的指标,其核心是考察研究对象的投入产出效益。企业生态效率指标可由资源效率与环境效率两方面概括^[2,9]。在本研究中,能源、水、燃料和矿石是企业消耗的主要资源,废渣、废水、废气及其他污染气体是主要的环境污染指标,公式如下:

$$\text{绝对生态效率} = \text{工业产值} / \text{资源消耗量或环境污染排放量} \quad (4)$$

$$\text{相对生态效率} = \text{工业产值增长倍数} / \text{资源消耗量或环境污染排放量增长倍数} \quad (5)$$

2.3.2 生态效率评估模型

在采用 MIN-MAX 标准化方法和 SPSS 软件的因子分析工具,以修正相对资源效率和环境效率指标的基础上,本文选择生态效率度量模型评估工业园的循环经济水平和发展模式。该模型由曲线 $E = \sqrt{x^2 + y^2}$ 和直

线 $x=0.5$ 、 $y=0.5$ 构成, x 、 y 分别表示资源、环境效率, 曲线 E 表示生态效率的走势, 曲线离原点越远, 生态效率就越高。其中 x 、 y 位于 $[0, 1]$ 间, E 位于 $[0, \sqrt{2}]$ 间, 直线 $x=0.5$ 和 $y=0.5$ 将 $[0, 1]$ 间的正方形分成 A、B、C、D 区域, 表示不同的循环经济模式^[2, 25], 如图 1。

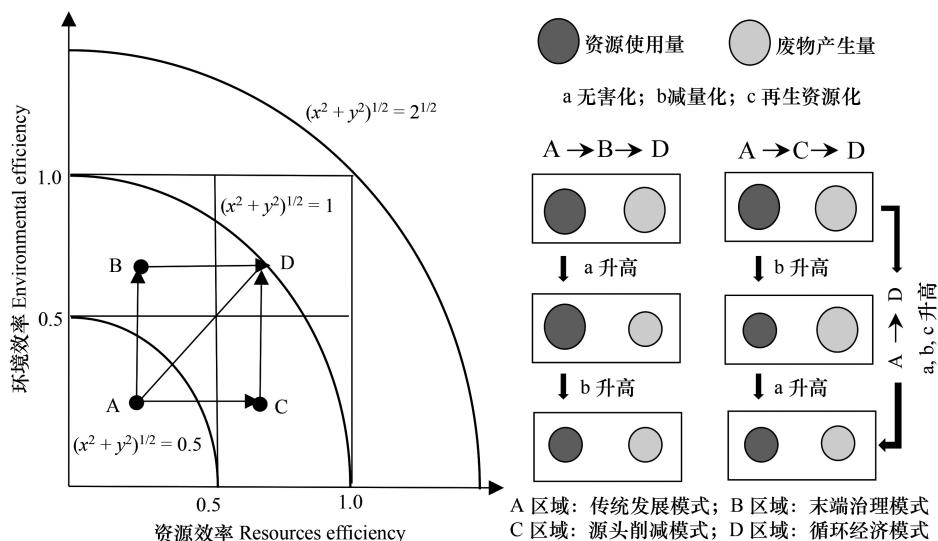


图 1 生态效率度量及循环经济模式评判模型^[25]

Fig.1 Measuring model of ecological efficiency and circular economy pattern^[25]

3 研究结果

3.1 园区物质流分析

通过关联金属冶炼、化工、建材生产及含氟新材料四大产业, 蛟洋循环经济示范园形成了“铜、金冶炼—副产品硫酸—磷、氟化工—副产品磷石膏、氟硅酸、氟化氢—建材、含氟材料生产”的循环经济产业链, 如图 2 所示。其中, 紫金铜业是上游企业, 通过金属冶炼为其他企业提供硫酸副产品; 瓮福化工、龙氟化工和瓮福蓝天是产业链的中游企业, 通过磷、氟化工生产磷石膏、氟硅酸、氟化氢, 参与园区下游循环链; 德尔科技、思康新材料、泰山石膏、四川利森和建成新建筑属于下游企业, 主要输出石膏板、水泥、多孔砖及含氟新材料。

进一步分析企业间的供求关系发现, 当前园区的循环产业链仍有断裂之处, 导致副产品过剩或紧缺: 紫金铜业与瓮福化工的硫酸供需配置不合理, 瓮福化工 25% 的硫酸需求由园区外满足, 而紫金铜业 17.4% 的硫酸闲置, 通过外销处理; 泰山石膏、四川利森生产规模较小, 导致瓮福化工 63.56% 的磷石膏闲置; 副产品氟化氢在园区以外销为主, 下游企业对无水氟化氢的利用率仅为 5.45%; 紫金铜业除生产副产品硫酸外, 还输出大量末端物料, 在金属冶炼末端亟待拓展对废料再利用的产业链。

3.2 园区生态网络分析

3.2.1 连接度分析

在物质流分析的基础上, 本文采用生态网络分析方法明确了参与循环生产的节点与路径, 构建了园区循环经济网络矩阵, 若企业节点 i 与节点 j 有连接, 则矩阵的第 i 列第 j 行的元素为 1, 否则为 0, 如图 3。网络连接度关注园区企业连接的合理性, 研究园区网络节点数 n 为 9, 路径数 L 为 11, 网络连接度 C 仅为 0.136, 说明蛟洋园区中各企业的关联性一般。从流动方向上看, 大部分企业值间只存在单向的物质输入、输出关系, 而非互相流通的关系。

3.2.2 稳定性分析

网络稳定性分析结果显示, 蛟洋园区循环经济网络的 AMI 值为 0.305, 高于一般的人工网络系统^[23], 说明

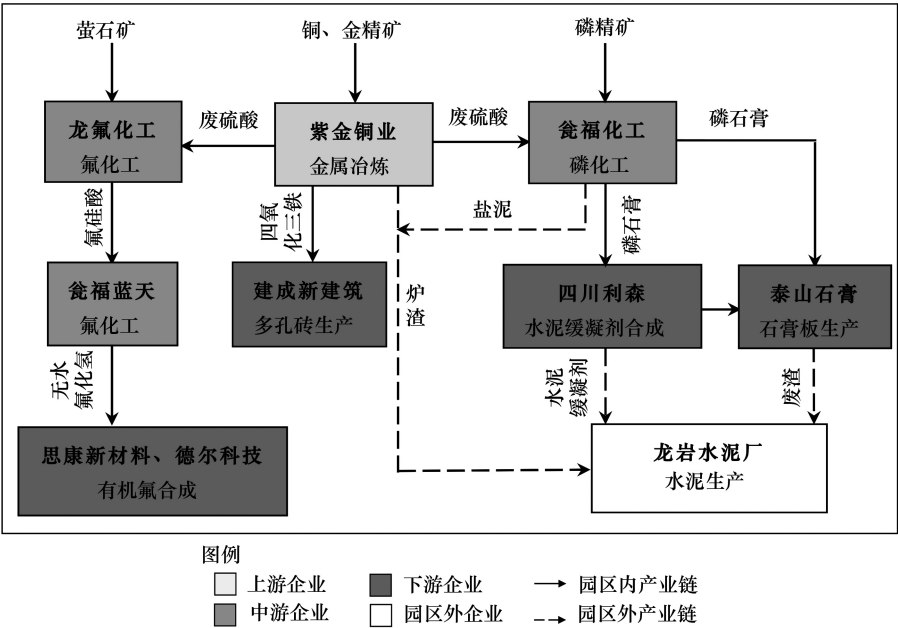


图2 园区主要循环经济链物质流图

Fig.2 The main chain of circular economy material flows in the Jiaoyang eco-industrial park

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	0	1	1	0	0	0
9	0	0	0	0	0	1	0	0	0

图3 园区循环经济网络矩阵

Fig.3 The circular economy network matrix in the Jiaoyang eco-industrial park

节点企业 1:思康新材料;节点企业 2:瓮福蓝天;节点企业 3:泰山石膏;节点企业 4:四川利森;节点企业 5:龙氟化工;节点企业 6:紫金铜业;
节点企业 7:瓮福化工;节点企业 8:德尔科技;节点企业 9:建成新建筑

物质在网络中的流动过于集中; D_R 值仅为 0.001,网络结构的稳定性不足。分析原因发现,研究园区物质集中度过高、网络稳定性不足,可能与园区网络连接度、多样性有关。由于循环网络节点间连接性较低,物质分散流动的途径较少,因此物质流动较为集中;从网络多样性角度分析,该园区循环经济生产链条单一,没有较多多样化的产业链延伸。

3.2.3 韧性情景分析

在进行韧性分析之前,首先需要对园区网络各节点的关联水平进行分析。本文依据节点关联的路径数目(向内与向外)和流量(输入与输出)两个指标,进行园区网络节点的关联水平分析和重要性的排序,如表 1 所示。

表 1 园区网络节点(企业)的关联水平评估

Table 1 The linkage degree of network nodes (companies) in the Jiaoyang eco-industrial park

节点 Node	向内路径数 Input pathways	向外路径数 Output pathways	关联路径数 Total pathway	输入流量 Input flows/t	输出流量 Output flows/t
6	0	4	4	0	880047
7	1	3	4	689847	914399
5	1	3	4	70000	5201
2	2	1	3	17000	130
8	2	0	2	2200	0
1	2	0	2	530	0
4	1	0	1	775000	0
3	1	0	1	125200	0
9	1	0	1	120000	0

节点向内路径数、输入流量分别指物质流入该节点的路径数、总流量;向外路径数、输出流量分别指物质流出该节点的路径数、总流量

参照节点的关联水平排序,本文依次分析了不同节点干扰情景对园区网络的级联效应,如图 4。整体来看,关联度越高的节点对园区网络的干扰程度越大,在图中表现出网络循环通量和关联节点数的大幅降低。级联效应最显著的为节点 6、7(紫金铜业、瓮福化工),硫酸、磷石膏循环生产链的断裂分别导致园区 86%、89%网络通量的损失,8、4 条路径的消失。节点 5(龙氟化工)和节点 2(瓮福蓝天)的消失虽然干扰了 3、4 条路径,但由于关联流量较低,园区网络通量还能保持 96%以上。节点 8、1、4、3、9 作为下游企业,发生干扰后,仅造成 1 至 2 条关联路径的消失,但对园区循环通量的影响不尽相同:8、1 节点(德尔科技、思康新材料)对副产品氟化氢的循环利用率不高,对园区网络通量几乎没有影响;节点 3、9(泰山石膏和建成新建筑)则干扰了园区 7%的网络通量;节点 4(四川利森)关联了园区内重要的磷石膏循环链,影响了园区 46%的网络通量。

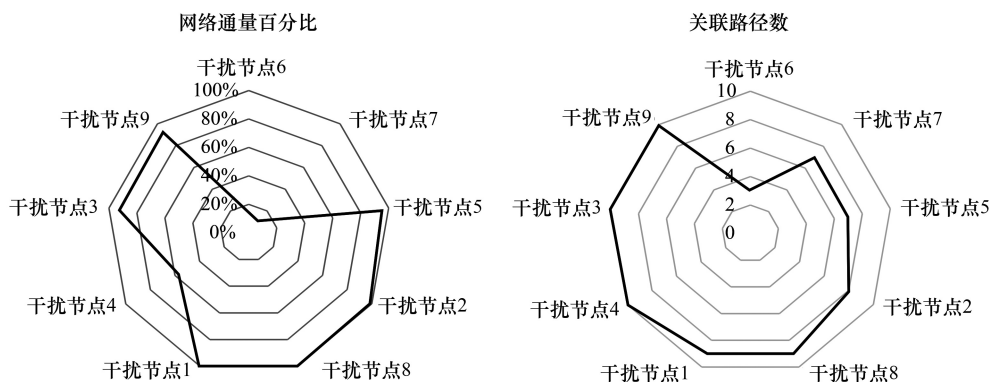


图 4 基于节点干扰的园区网络循环通量和关联路径韧性情景分析

Fig.4 The resilience scenario analysis of the system network throughflow and pathways based on the disturbance nodes in the Jiaoyang eco-industrial park

网络通量百分比指干扰情景下的网络通量占原网络通量比例;关联路径数指干扰情景下的现存路径数(干扰发生前园区路径总数为 11)

3.3 园区重点企业生态效率分析

瓮福化工、紫金铜业作为蛟洋循环经济示范园的核心企业,是发挥显著级联效应的关键节点,关乎园区循环经济发展生死,为此有必要开展相应的循环经济效率评估工作。

3.3.1 资源与环境效率变化趋势分析

在 2012—2016 年间,伴随瓮福化工经济的增长,资源消耗和环境负荷也呈现出增长趋势。由表 2 可知,瓮福化工的电、燃料和水的资源效率平均每年增长 1.01、1.05 倍和 1.28 倍,但石膏尘、SO₂、废水环境效率及矿石资源效率的年均增长倍数仅在 0.93—0.97 间,呈现下降趋势。可见随着产业、资源结构的调整,瓮福化工的资源效率得以提升,但在 2016 年,瓮福化工资源效率没有继续增长,反而下降,这与该年企业缩减生产规模、

经济效益降低有关。此外,矿石资源效率及环境效率逐年降低,企业对矿石废料的末端利用率不高,污染控制水平有待提升。

与瓮福化工相比,2012—2016 年间,紫金铜业资源消耗、环境排放的增长速度普遍低于经济增长速度,生态效率提升效果较显著。表 3 中紫金铜业除矿石资源效率和废水环境效率下降外(年均增长倍数 0.84、0.96),其他资源、环境效率皆提升(增速在 1.02—1.59 倍间),其中燃料资源效率、固体颗粒物环境效率的提升最为明显,年均增长倍数为 1.59、1.55。各类环境效率普遍改善,得益于 2015—2016 年间紫金铜业严格控制铜金矿污染,加强废弃物管理。紫金铜业发展了余热发电等节能技术,企业的资源(电、燃料、水)效率得以提升,但其经济产值的快速增长是以扩大矿石投入为代价,因此矿石资源效率逐年降低。

表 2 2012—2016 年瓮福化工企业生态效率变化情况

Table 2 The eco-efficiency of Wengfu Chemical Company in the Jiaoyang eco-industrial park during 2012—2016							
指标	Indicator	单位 Unit	2012	2013	2014	2015	2016
资源效率 Resources efficiency	电力	(10 ⁴ 元/tce)	6.57	7.17	8.01	8.05	6.51
	燃料	(10 ⁴ 元/tce)	1806.18	1806.18	2348.61	2584.01	2031.86
	水	(10 ⁴ 元/t)	0.04	0.06	0.09	0.11	0.08
	矿石	(10 ⁴ 元/t)	0.09	0.10	0.10	0.09	0.07
污染效率 Environmental efficiency	石膏尘	(10 ⁴ 元/t)	37.83	43.38	38.07	37.83	29.88
	SO ₂	(10 ⁴ 元/t)	226.58	259.79	227.99	226.58	178.97
	废水	(10 ⁴ 元/t)	0.12	0.13	0.12	0.11	0.09

表 3 2012—2016 年紫金铜业企业生态效率变化情况

Table 3 The eco-efficiency of Zijin Copper Company in the Jiaoyang eco-industrial park during 2012—2016							
指标	Indicator	单位 Unit	2012	2013	2014	2015	2016
资源效率 Resources efficiency	电力	(10 ⁴ 元/tce)	171.36	233.79	241.07	243.19	336.23
	燃料	(10 ⁴ 元/tce)	37.44	77.44	87.10	106.64	206.69
	水	(10 ⁴ 元/t)	0.53	0.75	0.84	0.80	1.08
	矿石	(10 ⁴ 元/t)	7.97	7.11	1.20	1.27	1.60
环境效率 Environmental efficiency	白烟尘	(10 ⁴ 元/t)	1031.00	882.83	860.64	828.10	1337.97
	废气	(10 ⁴ 元/nm ³)	2.43	2.08	1.91	2.30	4.09
	固体颗粒物	(10 ⁴ 元/t)	11011.00	9428.59	9191.55	26849.65	39293.29
	SO ₂	(10 ⁴ 元/t)	3858.85	3304.28	3206.72	2712.69	3852.15
	NO _x	(10 ⁴ 元/t)	25852.10	22136.84	14833.80	18740.60	24583.49
	废水	(10 ⁴ 元/t)	22338.15	19127.89	17913.19	13579.47	17253.07

3.3.2 生态效率评估

在资源和环境效率分析的基础上,本文进一步评估了瓮福化工和紫金铜业的生态效率水平,如图 5、6。整体来看,瓮福化工和紫金铜业的生态效率水平和循环经济发展水平一直处于波动状态。2012—2014 年,瓮福化工的生态效率水平和循环经济效益高于紫金铜业,前者经历了末端治理、循环经济模式、源头削减模式间的演变,后者未实现循环经济的转型,仍以传统形式发展;2014 之后,紫金铜业开始发展循环经济模式,生态效率得以提升,瓮福化工发展模式反而更传统化,生态效益在弱化。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 园区循环经济发展瓶颈及优化建议

(1)生态工业园区是企业间因地理靠近和产业集聚产生的网络园区,通过设备基础和服务共享、副产品

的重复使用实现企业连接^[1]。其中,副产品的再利用效率直接影响园区的企业关联、产业链扩展和循环经济水平。在本研究中,磷石膏、氟化氢和金属冶炼末端物料等副产品的循环利用率较低,导致当前蛟洋园区的循环链条仍有断裂现象,网络关联度、多样性降低。为此,本文提出加大副产品循环利用,优化、拓展和增加循环经济链的建议:泰山石膏可增加石膏凝胶材料、陶瓷装饰生产,四川利森可增加磷石膏硫酸联产水泥生产线;在紫金铜业下游引进再生有色金属产业,对紫金铜业废料加以循环利用;适当引进以磷石膏或无水氟化氢为原料的产业,如化肥工业(磷肥、土壤改良剂)和氟化工(锂电池、脱色剂、催化剂)。

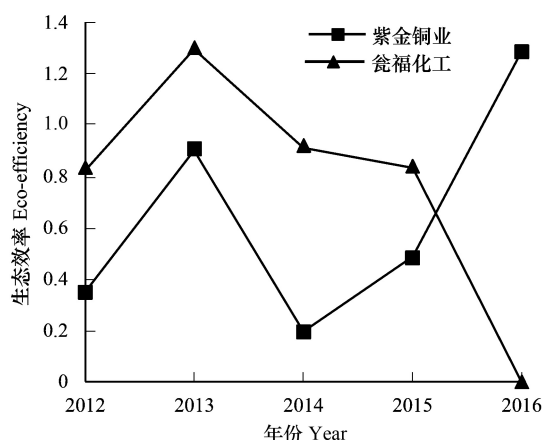


图5 瓮福化工和紫金铜业生态效率变化图

Fig. 5 The change of eco-efficiency in Wengfu Chemical Company and Zijin Copper Company during 2012—2016

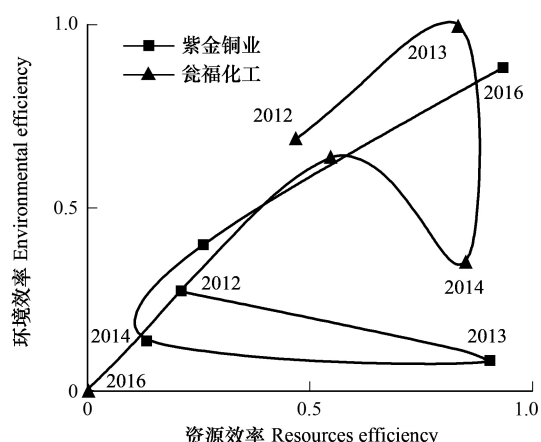


图6 瓮福化工和紫金铜业循环经济变化轨迹图

Fig. 6 The change route of circular economy in Wengfu Chemical Company and Zijin Copper Company during 2012—2016

(2) 节点的级联效应放大了园区的干扰行为,进而影响了园区网络的稳定性。在企业加紧产业结构调整、经济政策响应、技术革新的背景下,如何调整园区网络结构和适应性策略,以减缓园区的级联效应和规避外界干扰,成为当前工业园区转型的挑战^[24,26]。在本研究中,上游企业的级联效应波及整个园区的循环经济发展,严重干扰中、下游企业的发展。为此,蛟洋园区在扩展和延伸循环产业链的同时,更应注意提升园区网络的稳定度,培育专业化的产业集群,以形成良性的产业协同效应。上游企业应重点优化循环经济模式,提升自身的抗干扰能力和核心竞争力,保证企业的规模化生产和重要副产品的稳定输出;中、下游产业应确保重要原料的库存,建立专业化的市场配套体系,同时培育产业新链条,形成多向的产业共生关系。

(3) 生态效率指标的核心是通过对比资源、环境增长速度与经济发展速度,判定系统的循环效益^[2,25,27]。稳定的循环经济模式要求资源、环境效率的协同发展,强调源头削减和末端治理。从瓮福化工和紫金铜业的生态效率发展轨迹看,企业的循环经济发展水平不够稳定,尤其是矿石资源效率与环境效率较低。为此,矿石废料的二次开发利用和污染控制技术及其设备的更新对企业循环经济的发展尤为关键。

4.1.2 研究的不足与展望

在当前的生态工业园区研究中,如何实现循环经济的网络优化和生态效率提升,成为工业园区转型与发展的关键。一方面,企业关联网络优化(例如,副产品的供需平衡,废弃物管理的共享机制)可以降低生产成本、提高资源利用率和控制污染物排放,综合提升工业园区的经济、资源和环境效益^[28-29]。另一方面,企业的生态效率直接影响园区循环经济网络结构的稳定性,企业节点失效将对园区网络造成不同程度的干扰^[24,30]。

为此,本研究采用物质流分析和生态网络分析方法,评估了蛟洋园区循环经济的企业关联度;采用生态效率评估方法,分析了蛟洋园区关键节点企业的功能效率水平。通过园区循环经济关联特征和生态效率水平的整合分析,本研究从循环经济结构优化和生态效率提升的角度,探讨蛟洋园区未来的循环经济发展策略。然而,由于部分企业的历史数据较难获取,本文仅针对重点企业生态效率进行了评价,缺乏对园区历年循环经济关联结构调整的动态追踪,企业关联结构对园区生态效率的影响分析尚停留在定性阶段。为此,获取企业更

为详实和长时间的数据,开展工业园区循环经济组织结构对生态效率的影响评估,深入分析园区循环经济网络结构与功能效益的关联关系,将是进一步研究的方向。

4.2 结论

本文运用物质流、生态网络和生态效率等分析方法,从结构关联和生态效率视角,综合评估了 2012—2016 年间蛟洋循环经济示范园区的循环经济水平,结论如下:

(1) 园区循环链条单一,抗压能力不强。当前循环生产过程依托“铜、金冶炼—副产品硫酸—磷、氟化工—副产品磷石膏、氟硅酸、氟化氢—建材、含氟材料生产”单一产业链展开,上下游企业供需不平衡。

(2) 园区企业间关联性不足,网络结构稳定性较弱,韧性和抗干扰能力较差。关键节点(瓮福化工和紫金铜业)对下游企业的级联效应显著,关乎整个园区循环经济发展存亡。

(3) 园区重点企业的生态效率浮动大,尚未形成稳定的循环经济发展模式。其中,紫金铜业的生态效率增长态势较好,从传统发展、源头削减模式逐渐过渡为循环经济模式;瓮福化工的生态效率大致呈现下降趋势,早期在末端治理、循环经济、源头削减间徘徊,后期企业生态效率弱化,沦为传统发展模式。

参考文献 (References):

- [1] 唐玲, 孙晓峰, 李健. 生态工业园区共生网络的结构分析: 以天津泰达为例. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S2): 216-221.
- [2] 黄和平. 基于生态效率的江西省循环经济发展模式. 生态学报, 2015, 35(9): 2894-2901.
- [3] 诸大建, 邱寿丰. 生态效率是循环经济的合适测度. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(5): 1-6.
- [4] 李健, 邱立成, 安小会. 面向循环经济的企业绩效评价指标体系研究. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(4): 121-125.
- [5] Bilitewski B. The circular economy and its risks. Waste Management, 2012, 32(1): 1-2.
- [6] 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.
- [7] Geng Y, Fujita T, Park H S, Chiu A S F, Huisinsh D. Recent progress on innovative eco-industrial development. Journal of Cleaner Production, 2015, 114: 1-10.
- [8] Ghisellini P, Cialani C, Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 11-32.
- [9] Park Y S, Egilmez G, Kucukvar M. A novel life cycle-based principal component analysis framework for eco-efficiency analysis: case of the United States manufacturing and transportation nexus. Journal of Cleaner Production, 2015, 92: 327-342.
- [10] 张培. 基于物质流分析的工业园生态效率研究. 中国市场, 2010, (23): 46-48.
- [11] Geng Y, Zhang P, Ulgiati S, Sarkis J. Emergy analysis of an industrial park: the case of Dalian, China. Science of the Total Environment, 2010, 408(22): 5273-5283.
- [12] 王兆华, 尹建华, 武春友. 生态工业园中的生态产业链结构模型研究. 中国软科学, 2003, (10): 149-152.
- [13] Boons F, Chertow M, Park J, Spekkink W, Shi H. Industrial symbiosis dynamics and the problem of equivalence: proposal for a comparative framework. Journal of Industrial Ecology, 2017, 21(4): 938-952.
- [14] 宋雨萌, 石磊. 工业共生网络的复杂性度量及案例分析. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(9): 1441-1444.
- [15] Lu Y, Chen B, Feng K S, Hubacek K. Ecological network analysis for carbon metabolism of eco-industrial parks: a case study of a typical eco-industrial park in Beijing. Environmental Science & Technology, 2015, 49(12): 7254-7264.
- [16] Lehtinen M. Eco-Efficiency: Creating More Value with Less Impact. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2000: 5-36.
- [17] 尹科, 王如松, 周传斌, 梁菁. 国内外生态效率核算方法及其应用研究述评. 生态学报, 2012, 32(11): 3595-3605.
- [18] 彭涛, 李林军, 陆宏芳. 产业园生态效率评价——以九发生态产业园为例. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1611-1616.
- [19] 李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 张漪. 生态网络分析方法研究综述. 生态学报, 2011, 31(18): 5396-5405.
- [20] Zhang Y, Zheng H M, Chen B, Su M R, Liu G Y. A review of industrial symbiosis research: theory and methodology. Frontiers of Earth Science, 2015, 9(1): 91-104.
- [21] Vermaat J E, Dunne J A, Gilbert A J. Major dimensions in food-web structure properties. Ecology, 2009, 90(1): 278-282.
- [22] Fath B D, Scharler U M, Ulanowicz R E, Hannon B. Ecological network analysis: network construction. Ecological Modelling, 2007, 208(1): 49-55.
- [23] Fang D L, Chen B. Ecological network analysis for a virtual water network. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11): 6722-6730.
- [24] Li Y, Shi L. The resilience of interdependent industrial symbiosis networks: a case of Yixing economic and technological development zone. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(2): 264-273.
- [25] 张妍, 杨志峰. 城市物质代谢的生态效率——以深圳市为例. 生态学报, 2007, 27(8): 3124-3131.
- [26] Pettit T J, Fiksel J, Croxton K L. Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. Journal of Business Logistics, 2010, 31(1): 1-21.
- [27] 谢园园, 傅泽强. 基于生态效率视角的循环经济分析. 生态经济, 2012, (9): 49-51.
- [28] Park H S, Behera S K. Methodological aspects of applying eco-efficiency indicators to industrial symbiosis networks. Journal of Cleaner Production, 2014, 64: 478-485.
- [29] Behera S K, Kim J H, Lee S Y, Suh S, Park H S. Evolution of 'designed' industrial symbiosis networks in the Ulsan Eco-industrial Park: 'research and development into business' as the enabling framework. Journal of Cleaner Production, 2012, 29-30: 103-112.
- [30] 李湘梅, 肖人彬, 曾宇, 姚智爽. 生态工业园共生网络的脆弱性. 生态学报, 2014, 34(16): 4746-4755.