

中国鲁北生态工业模式

杨珧¹, 胡山鹰¹, 梁日忠¹, 陈定江¹, 房鑫¹,
李有润¹, 沈静珠¹, 冯久田², 孔令泉²

(1. 清华大学生态工业研究中心, 北京 100084; 2. 山东鲁北企业集团, 山东 滨州 251909)

摘要: 山东鲁北生态工业系统拥有磷铵-硫酸-水泥联产、海水“一水多用”、盐碱电联产三条联系紧密的产业链, 形成了一个资源共享共管的联合企业型的生态工业模式. 利用工业生态学、系统工程、化学工程等方法对该系统进行定量分析, 揭示了系统物质、能量、共生、柔性等方面的特性, 建立了一套系统的生态工业分析方法和指标. 分析结果表明鲁北已经形成了一个较为成熟的工业生态系统.

关键词: 生态工业系统; 物质循环; 工业共生; 柔性; 能量

中图分类号: TQ028.8; X13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2004)05-0467-08

1 前言

生态工业是指仿照自然界生态过程物质循环的方式来规划和发展现行工业系统, 以实现经济和环境协调发展, 其相关理论和实践自 20 世纪 90 年代以来发展迅速^[1,2]. 许多国家都已经开展了生态工业的实践活动, 在我国, 各界也一致认识到发展生态工业、走新型工业化道路是实现我国可持续发展的必由之路.

生态工业的重要实践形式之一是生态工业园区(EIP), 包括全新规划型、现有改造型、虚拟型. 目前国内外都在积极探讨和发展这一工业模式^[3], 其中发展较为成熟的是丹麦的卡伦堡生态工业园区. 另一实践形式为以杜邦公司为代表的联合企业型生态工业系统, 在系统内部所有成员属于同一企业, 由此企业进行统一的管理和调配, 实现了园区内部物流的共管共享.

生态工业系统通过成员之间副产物和废物的交换、能量和废水的逐级利用、基础设施的共享等方式, 组成了一个工业生态系统, 系统中各过程通过物料流、能量流、货币流、信息流互相关联. 利用系统工程学、环境科学等学科知识, 采用一定的数学模型和方法定量考察生态工业系统内各组成部分之间及其与外部自然环境之间的相互关系, 研究系统内的物质、能量利用的各种复杂模式以及所达到的整体效果, 这是目前生态工业的实践和研究所缺乏的.

山东鲁北企业集团是我国重要的无机化工和盐化工企业, 它拥有磷铵-硫酸-水泥联产(PSC)、海水“一水多用”和盐碱电联产三条高度相关的产业链, 链上的各企业节点紧密关联, 其副产物和废物大都在系统内得到了充分利用. 鲁北企业集团具有联合企业型生态工业系统的特征, 所有企业属鲁北集团所有, 在系统内实现了物质和能量的共享共管, 具有密切的产业链共生耦合关系, 它还有很多自身独具的特点. 本工作将利用系统工程的方法对其进行深入的分析.

收稿日期: 2003-09-24, 修回日期: 2003-11-05

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(编号: 29836140)

作者简介: 杨珧(1978-), 男, 天津市人, 硕士, 生态工业、化学工程专业; 胡山鹰, 通讯联系人, Tel: 010-62794513. 理

2 鲁北生态工业系统分析

2.1 鲁北生态工业流程分析

鲁北集团现有三条生态产业链,其示意图如图1所示.图中对各企业节点进行了编号,并标出了主要的物流流量(单位: 10^4 t/a).由图可知,在PSC产业链中磷矿粉与硫酸制取得到的磷酸同合成氨反应制得磷铵,副产品磷石膏送往水泥厂生产水泥.富含 SO_2 的水泥窑气送往硫酸厂生产硫酸和液体 SO_2 .硫酸送往磷铵厂完成PSC工艺的硫循环,液体 SO_2 作制溴原料.以煤矸石为燃料的热电厂产生的电力和蒸汽供各厂使用,锅炉副产的炉渣、炉灰作为混合材生产水泥.在海水产业链中,在初级卤区进行水产养殖,从中度卤水中提溴,提溴后的饱和卤水晒制原盐,盐田废渣盐石膏用来制取硫酸和水泥.一部分饱和卤水还直接作为离子膜烧碱的原料用于生产烧碱、氯气和氢气.最后从苦卤中提取钾镁盐.第三条产业链是盐碱电联产,由热电厂为氯碱、溴素等工序提供动力支持,同时一部分海水送往热电厂作为冷却水使用,实现了能量的交换.这三条产业链相互关联,链上的各个节点联系紧密,其副产物和废物大都在系统内得到了充分的利用.

下面将从物质、能量、共生、柔性等方面对鲁北生态工业系统进行深入的分析.

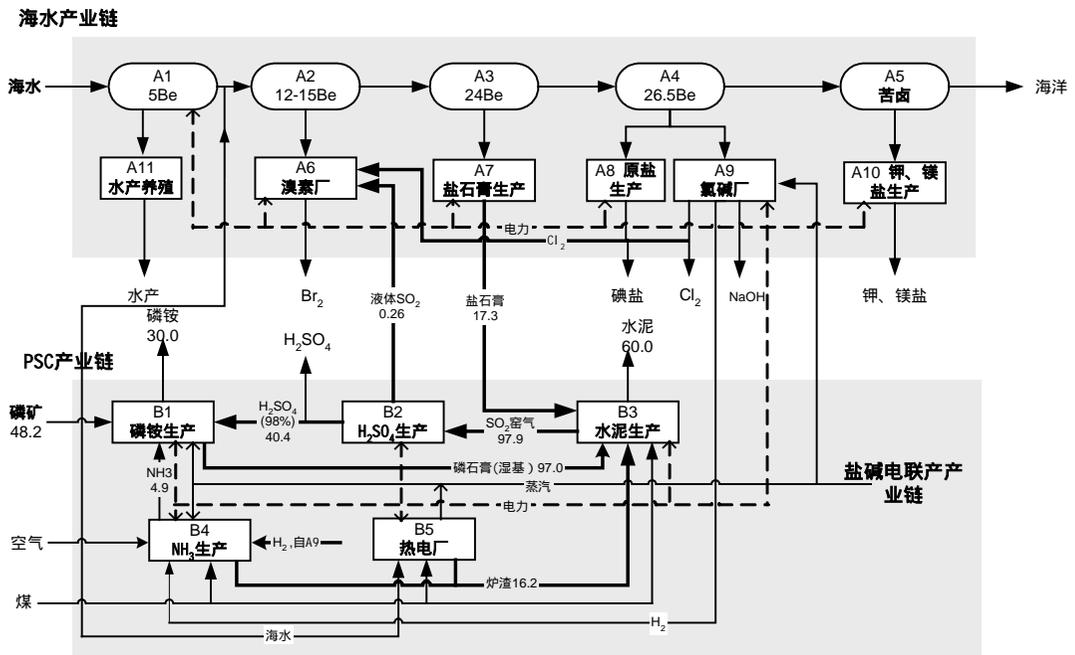


图1 鲁北生态工业系统产业链

Fig.1 Lubei eco-industrial system production chain

2.2 元素代谢和物质循环分析

生态工业系统从环境中获得原材料,经过生产者对原材料进行加工形成产品或另一过程的原料,生产过程中产生的废弃物经过再生环节重新形成原料或产品供给消费者.由于集约再循环,各系统内部不同行为者之间的物质流动远远大于出入生态工业系统的物质流,称为生态工业的物质循环.实现物质的循环利用,是生态工业所追求的目标之一,因此首先对鲁北生态工业系统的物质利用情况进行分析和研究.

2.2.1 鲁北生态工业系统硫代谢分析

对鲁北 EIP 的两条产业链进行分析, 可发现 S 元素的代谢在其中处于核心的地位. PSC 工艺的关键在于突破了磷石膏分解制水泥的技术难点, 实现了 S 元素的循环; 液体 SO₂ 和盐石膏在园区的 S 代谢网络中将 PSC 和海水产业链关联起来, 是两条链间主要的物质交换.

系统的 S 元素代谢网络如图 2 所示, 图中表明了 S 所处的化学状态及数量. 图中的数据部分来源于鲁北化工总厂 15-20-30 工程环评报告, 部分通过估算获得(如根据溴的产量、各级海水用量的比值及海水中硫酸根含量估算海水带入的 S 的量), 还有一部分根据质量平衡方程计算. 图 2 中各节点编号与图 1 有两处不同: 为了更准确地标明 S 的代谢途径, 将水泥厂节点(B3)分为熟料烧制(B3^a)和最终产品配制(B3^b)两个子节点; 增加了 EIP 中实际存在的硫磺制酸节点(B6), 它生产的硫酸主要用于制取企业的其它化肥、化工产品. 该节点因与两条产业链中的节点无共生关系而未在图 1 中表示出来. 图 2 只标出与 S 代谢有关的节点.

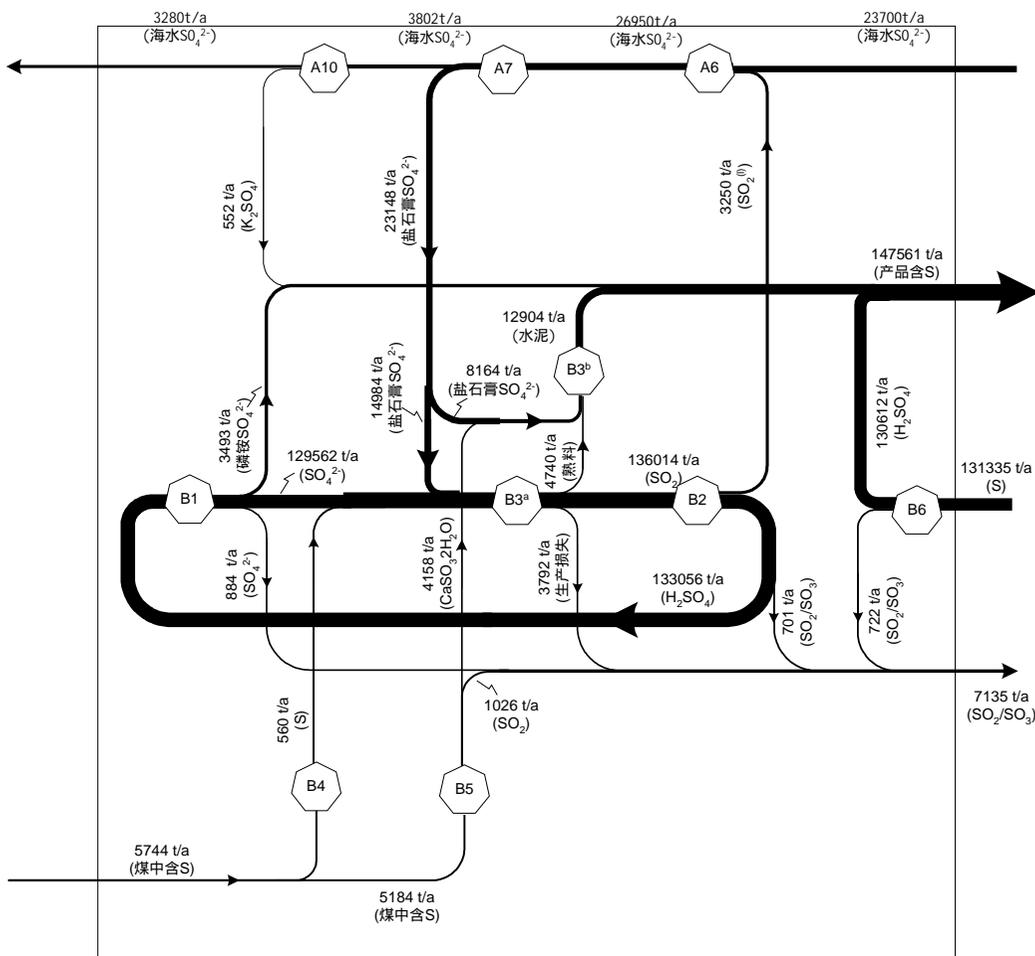


图 2 鲁北生态工业系统硫代谢网络

Fig.2 Sulfur metabolism network in Lubei eco-industrial system

为了深入分析鲁北生态工业系统的结构和物质利用效率, 采用了投入产出分析(Input-Output Analysis, IOA)方法对 S 的代谢进行分析^[4], 得到了系统平均路径长度 \overline{PL} 和系统循环指数 CI 等指

标^[5], 并与传统线性工业过程(即假定制磷铵所需要的原料硫酸全部来源于外购硫磺, 同时产生的磷石膏直接排出系统之外另作处理)进行了比较. \overline{PL} 和 CI 一起反映了系统内物质利用的效率. \overline{PL} 越大, 表明物质在离开系统前被更多的节点利用. CI 越大, 系统对物质循环利用的程度越大. 计算结果列于表 1.

表 1 鲁北生态工业系统硫代谢分析结果

Table 1 Analysis results of element sulfur metabolism

	Lubei eco-industrial system		Traditional process
	The whole system	Within PSC chain	
\overline{PL}	10.44	14.67	1.99
CI	0.710	0.898	0

由分析可知, 在鲁北生态工业系统的物质代谢系统中, 水泥厂担当了系统的分解者角色. 由于具有磷石膏联产水泥、硫酸这一关键“分解”技术的突破, 使系统中的物质沿着“生产者-消费者-分解者-生产者”的线路流动, 分解者将硫元素的生产者和消费者产生的废物磷石膏转变为原料硫酸供生产者再利用, 实现了硫在系统内的循环, 大大优于传统直链的利用模式, 这是生态工业所追求的理想物质流动模式.

2.2.2 鲁北生态工业系统其它元素代谢分析

利用工业代谢分析方法(Industrial Metabolism, IM)^[6], 通过绘制元素代谢网络, 建立物质结算表, 计算元素利用率(RU)即元素进入相关有用产品的比率和产品转入率(RT)即元素进入所有产品的比率, 对磷、氟、氯、钙等元素的利用情况进行了分析, 结果如表 2 所示.

表 2 鲁北生态工业系统主要元素代谢分析结果

Table 2 Metabolism analysis results of primary elements in Lubei eco-industrial system

Element	RU	RT	CI
Phosphorus	0.923	0.973	-
Fluorine	0.558	0.999	-
Chlorine	0.587	0.587	0.122
Calcium	0.984	0.984	-

通过一系列定量指标的计算和定性的分析, 可以得到如下结论: 鲁北生态工业系统的物质利用情况已经达到了较高的水平, 在系统中部分元素得到了循环利用, 主要元素得到了充分利用, 较好地体现了生态工业系统的物质利用原则.

2.3 工业共生分析

工业共生是生态工业系统的一个重要特征. 工业共生是指不同企业之间的合作, 通过这种合作, 共同提高企业的生存及获利能力, 同时, 通过这种共生实现对资源的节约和对环境的保护^[7].

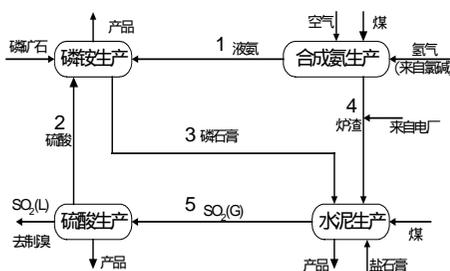


图 3 PSC 产业链共生关系图

Fig.3 Symbiosis units and relationships within the PSC chain

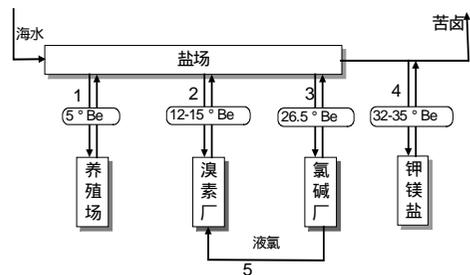


图 4 海水产业链共生关系图

Fig.4 Symbiosis units and relationships within the seawater production chain

一个生态工业共生系统被看作是系统内所有共生单元及共生关系的集合。共生单元指构成共生系统的基本物质能量生产和交换单位,即构成该系统的各个企业。共生关系是指共生单元相互作用或相结合的形式,工业共生系统是指参与工业共生各个企业之间的合作关系。

在工业共生分析中,把鲁北生态工业系统看作由三个产业链组成的共生系统。整个共生系统一共有 17 个共生关系,其中 PSC 产业链内部有 5 个共生关系,海水产业链内部有 5 个,在这三条产业链之间有 7 个共生关系,其具体分布见图 3~5。

当共生关系形成时,就会有共生效益生成。共生效益是一个抽象的概念,总的来讲,是指与没有共生相比,共生后整个系统增加的利益。经分析可知鲁北生态工业系统为复合实体共生模式,共生单元之间具有更为紧密的联系,可以存在偏利共生,具有更大的共生效益。在鲁北共生关系中,互利共生 15 个,偏利共生 2 个。PSC 产业链的共生效益为 4109 万元,占该产业链总效益的 15%;海水产业链共生效益为 3858 万元,占该产业链总效益的 13%;产业链之间共生关系产生效益共 14800 万元。因此整个鲁北生态工业系统共生效益为 22567 万元,占系统总效益的 14%。

2.4 柔性分析

在绝大多数系统中,都存在许多不确定的因素。生态工业系统也不例外。柔性是指一个系统灵活适应不确定条件的能力。对生态工业系统来说,由于成员之间物质、能量、信息的交换,柔性成为影响系统运行的一个重要问题。

2.4.1 价格柔性

在市场经济条件下,有很多不确定的因素,其中一个重要因素就是产品的市场价格。鲁北生态工业系统采用以下措施来增大系统的柔性:一是为了增大企业的柔性,提高企业的技术水平,使成本降低;二是在经济核算方式上,采取了统一核算的方式。这样只要整个产业链盈利,即使某个企业出现亏损时,仍然可以维持整个产业链的正常运作。这样,比起各个企业单独核算,可以承受的价格变化范围增大了,其柔性也会增大。

价格柔性可采用柔性指数 F 指标^[8]。分别计算统一核算和独立核算两种情况下的柔性指数:统一核算 $F=2.35$,独立核算 $F=0.68$ 。

柔性指数的计算结果表明了两种核算方式的差别。独立核算下的瓶颈主要在于硫酸的价格,如图 6 所示。当硫酸价格达到 192 元/t 时,就不能再降了。如果继续下降,就会使硫酸厂亏损,从而停止生产。由于生产过程彼此关联,这时整个系统都无法正常运行。而统一核算时,柔性的瓶颈主要在于水泥和磷铵的价格,如图 7 所示。当这两种产品的价格分别下降到 115 和 1210 元/t 时达到柔性边界。这时,虽然硫酸的价格也很低,使硫酸厂亏损,但由于可以通过调整硫酸厂的产量使硫酸全部被用于磷铵的生产而不对外售出,因此硫酸价格不会影响全厂的经济效益。这样统一经济核算使系统承受价格波动的能力提高,即增加了系统的柔性。

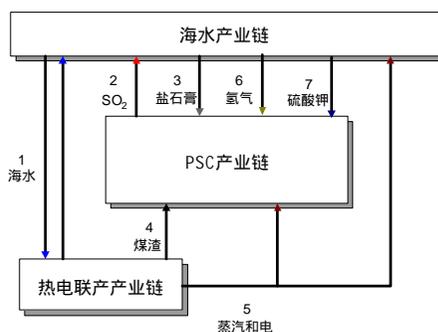


图 5 鲁北生态工业系统产业链之间共生关系图
Fig.5 Symbiosis units and relationships between the three chains

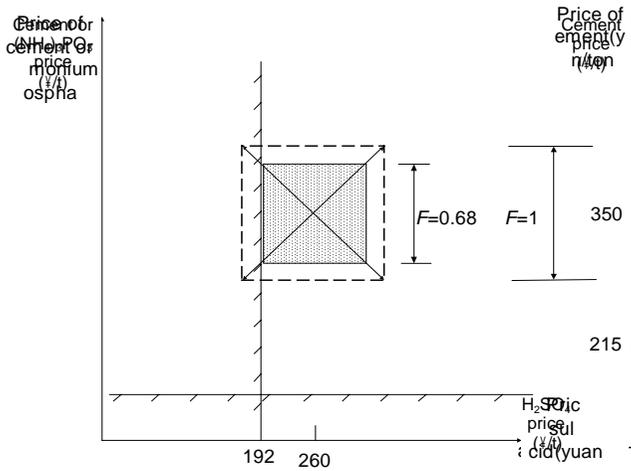


图6 独立核算
Fig.6 Price flexibility of independent accounting

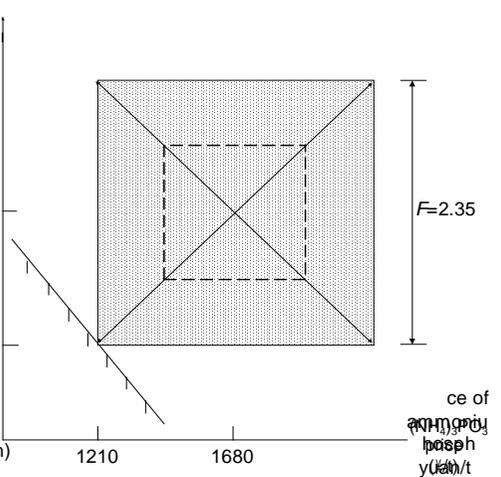


图7 统一核算
Fig.7 Price flexibility of integrated accounting

2.4.2 其它柔性

在生产过程中，为了应对可能出现的各种意外情况，鲁北产业链在联接物流的上下游之间修建仓储设施，以此来增大系统的柔性。通过对相互联接的企业安排相同检修时间和对生产同一产品工段安排不同检修时间等措施来增大仓储柔性。另外，还有工艺改进的柔性和多样性带来的柔性，都使系统总的柔性增大。

2.5 能量系统分析

工业生态系统中，过程将化学能转化为热能和电能，供应生产所用，但在能量利用过程中存在效率问题。在鲁北生态工业系统中，PSC 产业链是整个系统的核心，大部分物质和能量在此产业链中得到了充分的利用。因此，将 PSC 系统作为重点分析鲁北的能量利用情况。

在磷酸工序，磷矿石和硫酸在浸取槽中反应，生成的磷酸与氨反应再经造粒干燥和冷却形成磷铵产品；萃取后产生的磷石膏废料经过烘干后送水泥厂作为生产水泥的原料。在硫酸工序，硫磺焙烧后产生的高温二氧化硫气体经废热锅炉进行热交换后与水泥厂的含硫废气经过冷却处理后进入两转两吸工序生产硫酸。在水泥工序，水泥生料经高温窑气预热后进入回转窑生成熟料，熟料进入冷却机进行冷却，同时预热空气作为回转窑中的助燃气体。

在分析中应用系统工程方法，对 PSC 热交换系统分为两个层次进行了分析。一是从能量的数量方面进行分析，即系统焓分析；二是从能量利用的质的层次分析鲁北生态工业系统微观的能量利用情况，即系统的ㄓ分析^[9]。对于 PSC 热交换系统的分析按照稳定流动体系来计算，只计算物理，不考虑化学的变化。分析结果列于表 3。

表 3 PSC 产业链能量分析结果

Table 3 Results of energy analysis of the PSC production chain

PSC system ($\times 10^6$ kJ/h)	Input enthalpy	Utilized enthalpy	Non-utilized enthalpy	Utilization ratio of enthalpy
	155.43	127.41	27.02	0.825
PSC system (MJ/h)	Input exergy	Output exergy	Exergy loss	Utilization ratio of exergy
	86.6	52.9	33.7	0.611

对整个系统其它方面的能量利用情况分析表明，鲁北生态工业系统通过用海水来冷却热电厂汽轮机利用了全厂低温余热的 71.4%，通过在海水产业链中利用太阳能浓缩使清洁能源利用率达到 85.9%，整个系统的能量利用较为合理，减少了能量的损耗，达到了较高水准。

2.6 其它分析

遵循生态工业建设的原则，为进一步考察鲁北持续发展的潜力，还进行了演变进化分析、水系统分析、关键链接技术分析、与自然生态协调分析和信息系统分析等深入分析。

演变进化分析：定义生态生产力指标 EPI(Eco-Productivity Index)^[10]，反映资源利用效果。分析结果见表 4。

$$\text{生态生产力指标(EPI)} = \frac{\text{价值转化指标}}{\text{资源消耗指标}} \times 100\% \quad (1)$$

表 4 鲁北生态工业系统 EPI 分析结果
Table 4 EPI results of Lubei eco-industrial system

	Resource	Energy	Water
EPI	279	190	231
Growth rate of EPI (%)	4.8	2.5	5.1

水系统分析：PSC 产业链水的循环利用率达到 91.3%。

关键链接技术分析：鲁北生态工业系统成功开发出的用于磷石膏分解的链接技术，有效地解决了 CaSO_4 这一低化学势物质的转化问题，使资源在生产全过程得到高效循环利用；低品位、低密度工业能源得到有效利用。

与自然生态协调分析：废物减排、兴修水利、改良土地、植树造林。

信息系统分析：实施生产自动化、ERP 管理，完善信息管理系统。

从鲁北生态工业的这些指标(生态、环境、能量等)及其与其它系统的比较来看，鲁北生态工业链与传统产业相比有明显的优越性，与国内外现有的生态工业园区相比，其指标也处于先进水平，可以说鲁北已形成了一个结构紧密、共享共管的联合企业型生态工业模式，称之为中国鲁北生态工业模式。

3 总 结

运用工业生态学、系统工程、化学工程的理论和方法，从元素代谢与物质循环、工业共生、柔性、演变进化、能量集成、水集成、关键链接技术、与自然生态协调、信息系统九个方面，对鲁北生态工业系统的三条生态产业链进行了定量的分析与比较，建立了一系列可应用于生态工业系统分析的方法和指标，总结出鲁北生态工业模式的经验启示和生态工业建设的基本原则。

对于一般的生态工业系统，可以采用文中所给出的一些技术指标进行评价分析，并可进一步综合各个指标成为一个总指标来表征一个生态工业系统的发展状况。不过，对于一些社会学指标、经济学指标等需要进一步的研究，要形成一个完整的指标评价体系还有待进一步完善。

参考文献：

- [1] Erkman S. Industrial Ecology: A Historical View [J]. J. Cleaner Prod., 1997, 5(1-2): 1-10.
- [2] 李有润, 沈静珠, 胡山鹰, 等. 生态工业及生态工业园区的研究与进展 [J]. 化工学报, 2001, 52(3): 189-192.
- [3] Raymond P C, Cohen-Rosenthal E. Designing Eco-industrial Parks: A Synthesis of Some Experience [J]. J. Cleaner Prod., 1998, (6): 181-188.
- [4] Leontief W. 投入产出经济学 [M]. 崔书香, 等译. 北京: 中国统计出版社, 1990. 12-31, 142-161.

- [5] 陈定江. 工业生态系统分析与复杂性研究 [D]. 北京: 清华大学, 2003. 31–39.
- [6] 苏伦·埃尔克曼. 工业生态学 [M]. 徐兴元, 译. 北京: 经济日报出版社, 1994. 49–75.
- [7] Lowe, Ernest A. Creating By-product Resource Exchanges: Strategies for Eco-industrial Parks [J]. *J. Cleaner Prod.*, 1997. 5: 1–2.
- [8] Swaney R E, Grossmann I E. An Index for Operational Flexibility in Chemical Process Design [J]. *AIChE Journal*, 1985, 31: 621–630.
- [9] 项新耀. 工程分析方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. 142–146.
- [10] 邓南圣, 吴峰. 工业生态学—理论与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 306–309.

The Lubei Eco-industrial Model of China

YANG Li¹, HU Shan-ying¹, LIANG Ri-zhong¹, CHEN Ding-jiang¹, FANG Xin¹,
LI You-run¹, SHEN Jing-zhu¹, FENG Jiu-tian², KONG Ling-quan²

(1. *Center for Industrial Ecology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Lubei Enterprise Group Company, Binzhou, Shandong 251909, China*)

Abstract: The Lubei eco-industrial system in Shandong Province contains three coupled industrial chains. One is the poly-generation of ammonium phosphate, sulfuric acid and cement (PSC), the second is the ocean chemical engineering which fully utilizes the sea water resource, and the third is the co-generation of salt, alkali and electricity. These three chains construct a new kind of eco-industrial pattern in which all resources are commonly used and managed in a united enterprise. In this paper, by applying principles and methods of industrial ecology, system engineering and chemical engineering, we have finished some quantitative analyses on mass cycle, energy utilization, industrial symbiosis and system flexibility to the Lubei eco-industrial system. A systematic eco-industrial analysis approach and indices are proposed. The result shows that the Lubei enterprise group has developed into a mature eco-industrial system.

Key words: eco-industrial system; mass cycle; industrial symbiosis; flexibility; energy