

# 资源型产业系统演化分析

## ——以黄磷产业系统演化为例

郭 颖, 胡山鹰, 陈定江

(清华大学化学工程系生态工业研究中心, 北京 100084)

**摘要:**采用我国黄磷产量数据对产业系统演化过程进行 Logistic 方程拟合, 结果表明中国黄磷产业系统演化过程呈 S 型曲线, 中国黄磷产量上限为 95 万 t/a。在此基础上, 引入复杂适应系统理论, 通过对黄磷产业系统中相互作用的政府、黄磷企业、磷矿石企业、电力企业、环保机构等主体及主体间的流进行分析, 识别黄磷产业系统发展中的主要矛盾, 预测黄磷产业系统将在多主体共同作用下向生态化方向发展, 并且由于湿法磷酸的替代作用而逐渐走向衰落。

**关键词:**黄磷; 产业演化; Logistic; 主体

**中图分类号:** TQ-9; TQ126.317

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2008)03-0079-05

### Resources-oriented industrial system evolution analysis: Yellow phosphorus industrial system evolution for example

GUO Ying, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang

(Center for Industrial Ecology, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** China's production data of yellow phosphorus are used to fit the industry evolution process by Logistic equation, and the result shows that the evolution process of China's yellow phosphorus industry presents an S curve and the yellow phosphorus product capacity won't exceed 950 kt/a. Complex adaptive system (CAS) theory is adopted, the actions and interrelationships of the governments, yellow phosphorus enterprises, phosphorus ore enterprises, power plants and environment organizations are analyzed, and the primary conflicts are recognized. The development trends of yellow phosphorus industry system are forecasted as that it should develop in ecological direction by the effects of multiagent interactions, and would decline for substitute of hydro phosphate.

**Key words:** yellow phosphorus industry; industry evolution; Logistic; agent

资源型产业是基于自然资源(主要是地下的矿产资源和地上的动植物资源)占有或独占(数量和成本),以自然资源的开采和初级加工为基本生产方式,依靠资源的消耗来实现产业的增长,以资源占有优势为核心竞争力的产业类型<sup>[1-2]</sup>。在资源日益枯竭的今天,研究以资源占有和消耗为特征的资源型产业的演化规律,探索使其实现可持续发展的生产方式意义重大。

本文选取典型的矿产资源型产业——黄磷产业为例,研究其演化规律。黄磷是重要的基础工业原料,主要用于农业、医药、机械、电子、食品、国防等多个领域。同时,黄磷产业具有产品数量大、资源和能

源消耗高以及污染较严重等特点。20 世纪 70 年代以后,欧美、日本等发达国家从保护本国资源和环境角度出发,开始缩减黄磷产量,甚至不再生产黄磷,黄磷生产重心逐步向中国转移。与此同时,中国黄磷产业系统经历了由小到大、由弱到强、产量越来越多的过程。在黄磷产业系统的演化过程中,存在诸多资源、能源、环境以及社会问题。

目前对黄磷产业可持续发展方面的研究,集中在对黄磷企业的环境影响分析、废弃物处理处置、副产物再利用、产业链延伸、新技术新工艺开发、物质流生态设计等方面,缺乏以历史的眼光,从产业演化的角度,对产业发展变化、产业系统内利益主体间的

收稿日期:2007-12-04

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(20436040)及“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC02A17)资助

作者简介:郭颖(1981-),女,博士生;胡山鹰(1965-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事生态工业方面的研究,通讯联系人,010-62794513-12, hxr-dce@mail.tsinghua.edu.cn。

作用关系、产业产生各种影响的根本原因等方面的研究。本文尝试以产业演化模型和复杂适应系统理论为指导,探讨黄磷产业系统演化过程和发展规律,通过分析产业系统中主体之间的博弈关系,预测黄磷产业系统的发展趋势。以黄磷产业演化为对象的研究方法和结论,对分析化工行业中其他资源型产业系统的演化和化工行业的可持续发展具有一定意义。

## 1 黄磷产业演化历史及规律

### 1.1 产业系统演化模型

产业系统演化和生态系统演化有相似之处,一般要经历孕育期、成长期、成熟期和衰退期等阶段。生态系统中常用来研究种群增长的模型包括两类<sup>[3-4]</sup>:与密度无关的种群增长模型和与密度有关的种群增长模型。两者的区别是,前者假定环境空间和食物资源无限丰富,后者假定环境容纳量有限。由于后者更接近自然界真实情况,使用也更为广泛。在有限环境条件下与密度有关的连续增长模型中,最简单的是 Logistic 方程。

$$\frac{dX}{dt} = \alpha X(N - X) \quad (1)$$

Logistic 方程有 3 点假设<sup>[4-5]</sup>:①种群内所有个体都具有相同的生物特性。②种群增长率只与当时的种群密度有关,并且增长率随密度上升按比例降低。③环境容纳量有限,使种群密度有上限,且种群增殖正比于种群密度与这个上限之差;种群密度达到上限时增长为零。

检验黄磷产业系统演化是否符合上述假设:①由于研究对象是黄磷产量而不是企业数目,所以仅比较产品是否具有相同特点,黄磷品质有高低之分,但总体而言,生产工艺和成本相差不大。②黄磷产量的增长的确和当时的黄磷产量有关,在产量小于需求量时,供需空间越大产量增长越快。不过,由于黄磷生产相对黄磷需求有一定滞后性,因此产量增长速度可能大于需求增长速度。另外,黄磷产量增长不只与黄磷产量有关,在黄磷生产利润较高的时期,产量增长速度远大于需求增长速度。③黄磷需求量随人口数量增加和其他工业对黄磷需求的增加而增加,但人口数量和工业需求都存在发展上限,因此黄磷需求量和产量也有上限。但是类似生态群的衰落和灭亡,以有限磷矿石为原料的黄磷产业在远期将面临灭亡,而在近期由于三聚磷酸钠的限用和湿法磷酸的替代,黄磷产业也将逐步走向衰落。

不过,黄磷产业已有的演化历史仍比较符合上述假设,可以用 Logistic 方程来描述,式(1)中, $X = X(t)$ 表示产业系统在时刻  $t$  的产量,是描述产业系统演化过程的状态变量; $\alpha$  是产业成长速度系数; $N$  是产业产品增长的极限值,产业只能在这个容量空间内发展。根据实际经济意义,应有  $\alpha > 0, N > 0$ 。设  $X(0) = a, 0 < a < N$ ,则方程(1)的解<sup>[6]</sup>为:

$$X = \frac{N}{1 + (\frac{N}{\alpha} - 1)e^{-\alpha t}} \quad (2)$$

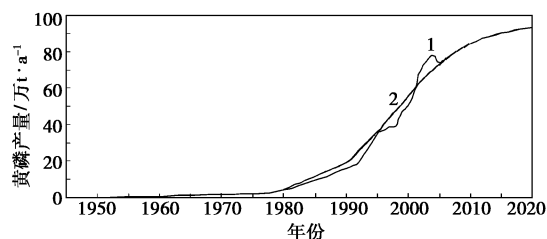
采用非线性最小二乘法(NLS)先估计下式:

$$f(\sigma, N) = \frac{N}{1 + (\frac{N}{\alpha} - 1)e^{-\sigma t}} \quad (3)$$

的参数  $\sigma, N$ ,然后通过关系式  $\alpha = \sigma/N$  得出模型(1)的参数  $\alpha, N$  的估计值(使用非线性最小二乘法的一般方法高斯-牛顿迭代法估计模型参数,即将  $f$  展开成泰勒级数之后,再利用迭代估计方法进行估计<sup>[7]</sup>),得出拟合曲线。

### 1.2 黄磷产业演化

1949—2006 年,我国黄磷产量演化如图 1 所示。解放后到 20 世纪 80 年代以前,中国黄磷企业规模较小,主要集中于沿海及内地缺少磷资源的华东、华中、华北及东北等地,环境和生态问题不显著。80 年代之后,云南、贵州、四川、湖北等省由于磷资源和水电资源丰富,掀起了建设黄磷企业的热潮,走磷、矿、电结合道路,建设了若干个大型黄磷生产基地;同时,东部地区的黄磷生产受市场竞争影响,逐渐向西部地区转移。在宏观调控和市场导向的双重作用下,中国磷化工逐渐形成母体产品(或基础产品)靠近原料产地,沿海地区重点发展磷系衍生物和精细磷化工的产业格局。伴随黄磷产业的蓬勃发展,环境和生态问题日益突出。同期出现的社会问题是:在利益的驱动下,越来越多的资本不足、技术落后的小型黄磷企业涌入市场,进行无序竞争,造成黄磷生产供大于求。近年来中国黄磷生产能力已达 100 万 t 以上,但产量仅占产能的 60%左右。云南、贵州、



1—实际产量;2—拟合产量

图 1 黄磷产业演化曲线

四川、湖北等地的政府为缓解产能过剩带来的资源、环境约束矛盾,保护本地区黄磷在国内外的优势,纷纷出台相关调控政策,整合小企业、淘汰落后工艺等,促使黄磷生产向大型化、自动化方向发展。目前,政策刚刚出台,对黄磷产业系统的影响还未全面开始。

用 Logistic 方程拟合黄磷产量数据。改革开放以前,人们的物质需求以及以黄磷为原料的产业发展受到制约,黄磷产业完全按国家计划安排生产,不符合 Logistic 方程的第 2 点假设;改革开放以后,黄磷产业的发展比较符合方程的 3 点假设。以 1980—2006 年间黄磷产量为状态变量  $X$  的样本值,对我国黄磷产业系统的演化过程进行实证分析,并在此基础上预测 2007—2020 年的黄磷产业走势。

在应用 Logistic 方程拟合相关数据时,以拟合曲线与实际曲线的误差平方和最小为标准,得到了拟合曲线(见图 1)及黄磷产量演化公式:

$$X = \frac{95}{1 + 21.62e^{-0.17t}} \quad (4)$$

图 1 显示我国黄磷产业系统整体演化过程呈 S 型曲线,黄磷产量上限为 95 万 t/a。

Logistic 方程作为产业演化规律的一般性总结,其拟合曲线展示了演化现象的趋势,但由于黄磷产业系统并不完全符合 Logistic 方程的假设,还需要研究更本质的原因才能判断上述参数估计值的结果及相应曲线是否正确,不能仅从数学的角度出发判断产业走势。复杂适应系统理论为从本质上探索产业演化原因提供了思路。

## 2 黄磷产业系统主体博弈分析

### 2.1 复杂适应系统理论

复杂适应系统(Complex Adaptive System,以下简称 CAS)理论由 Holland 于 1994 年正式提出。该理论从微观机制解释了系统复杂性产生的原因,合理地解释了个体行为特征和系统宏观表现之间的关系,主体间的交互作用成为整个系统演化发展的推动力,新的层次结构、新的聚合主体的出现等宏观现象都会随之涌现<sup>[8-9]</sup>。CAS 理论突破了传统的“复杂性主要来自系统外部”的观点,突出了主体的智能属性,认为其适应性的个体行为是整个模型运转的驱动力,也是各种复杂系统多态性的根源。CAS 理论将系统的宏观特征与微观机制有机地联系起来,给出了新的认识角度——涌现性,涌现性的提出,为人们认识、理解复杂系统结构以及不同层次间的相

互关系上提供新的思路。

CAS 理论解决问题的思路是:划定系统边界,分析系统内主体的属性和行为以及主体之间的流,包括物质流、资金流、信息流等,定性分析主体之间相互影响的过程及结果,在此基础上建立模型,研究不同条件下系统演化趋势。

根据复杂适应系统理论,系统中的成员称为具有适应性的主体(adaptive agent),简称主体。所谓具有适应性,就是指它能够与环境以及其他主体进行交互作用。主体在这种持续不断的交互作用的过程中,不断“学习”或“积累经验”,并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个宏观系统的演变或者进化,包括新层次的产生,分化和多样性的出现,新的、聚合而成的、更大的主体的出现等,都是在这个基础上逐步派生出来的<sup>[8]</sup>。主体之间通过交换信息、资源、能源和资金建立联系,这种联系叫做流。

### 2.2 黄磷产业主体博弈

在黄磷产业系统中,相关利益主体的种类和数量都较多,运用一般的二元博弈论难以探讨主体之间复杂的作用关系。因此可以借助 CAS 理论分析系统内主体行为特征和系统宏观表现的关系。

黄磷产业系统各主体及其相互关系如图 2 所示,产业系统中主体包括:黄磷企业、黄磷下游企业、磷矿石企业、政府、电力企业、金融机构、环保机构等。主体之间的流包括:信息流、资金流和资源流。各主体特点及主体之间相互关系如图 2。

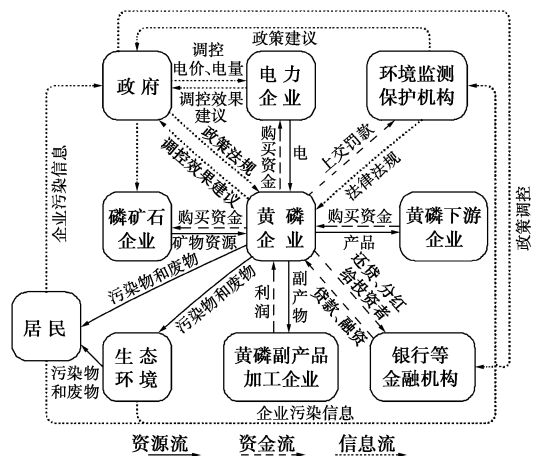


图 2 黄磷产业系统

#### 2.2.1 主体属性和行为分析

每个主体在社会生产中兼任多个角色,本文只分析各主体诸多属性、行为中和黄磷产业相关的主要属性和行为。见表 1。

表 1 主体属性和行为分析

序号	主体	主要属性	主要行为
1	政府	接收各主体信息反馈的能力、制订政策法规的权力等	制订政策法规并监督相关主体执行、接收其他主体信息反馈
2	电力企业	供电的数量、售价等	接受政策指导并调整电价及可销售电量、销售电、取得销售费用
3	磷矿石企业	磷矿石的数量、品质、售价等	接受政策指导并调整销售价格、销售磷矿石、取得销售费用
4	黄磷企业	磷矿石需求量、电力需求量、黄磷产量和价格、技术水平等	购买电、磷矿石,生产黄磷及副产物/废弃物(磷渣、尾气等)
5	黄磷下游企业	黄磷需求量,产品种类、产量和售价等	购买黄磷,以黄磷为原料生产其他化工产品(如磷酸等)
6	黄磷副产品企业	黄磷副产品需求量,产品种类、数量和价格等	购买黄磷副产物/废弃物,生产有价值的产品,如用尾气生产甲醇等
7	湿法磷酸企业	磷矿石需求量、产量、售价等	购买磷矿石,生产并销售磷酸
8	黄磷企业周边居民	直接受到污染影响产生的不满、看到生态环境被破坏产生的不满等	受到黄磷企业污染的影响、了解生态环境被黄磷企业污染、向政府和环保机构提供污染信息
9	金融机构	可提供贷款的金额、贷款利率等	接受政策法规指导调整贷款条件和额度、向黄磷企业贷款、收取贷款利息
10	环保机构	监控污染的能力、对企业污染行为进行处罚的权力等	制订环保法规、接收企业周边居民及生态环境的污染信息、向环保违规企业收取罚款

表 2 主体间流分析

序号	流连接的主体	主要流	流类型
1	政府—电力企业—黄磷企业	政府要求电力企业按政策法规向黄磷企业售电	☒
		电力企业向黄磷企业销售电	R
		黄磷企业向电力企业支付购电费用	¥
		电力企业、黄磷企业向政府反馈调控作用	☒
2	政府—磷矿石企业—黄磷企业	政府要求磷矿石企业出售一定品质的磷矿	☒
		磷矿石企业向黄磷企业销售矿石	R
		黄磷企业向磷矿石企业支付购买费用	¥
		电力企业、黄磷企业向政府反馈调控作用	☒
3	政府—黄磷企业	政府要求黄磷企业按规定进入行业,生产黄磷	☒
		黄磷企业向政府反馈调控作用及政策建议等	☒
4	黄磷企业之间	黄磷企业之间有激烈的竞争关系,但彼此之间的流仅为信息流,包括:市场信息、技术信息等	☒
5	黄磷企业—周边居民/生态环境—政府/环保机构	黄磷企业产生污染,影响周边居民/生态环境	R
		污染信息被反映给环保机构/政府	☒
		政府/环保机构针对污染问题对黄磷企业提出要求	☒
		黄磷企业向环保机构缴纳排污费	¥
		黄磷企业向周边居民做出经济赔偿	¥
6	黄磷企业—黄磷下游企业	黄磷企业向下游企业提供黄磷	R
		下游企业向黄磷企业支付费用	¥
7	黄磷企业—黄磷副产品企业	黄磷企业向黄磷副产品企业提供原料	R
		黄磷副产品企业向黄磷企业支付费用	¥
8	黄磷企业—湿法磷酸企业	黄磷企业和湿法磷酸企业之间为竞争关系,没有直接的资源流和资金流,只存在市场信息、技术信息	☒
9	政府—金融机构—黄磷企业	政府指导金融机构制订贷款条件和额度	☒
		金融机构向黄磷企业贷款	¥
		黄磷企业向金融机构返还本金和贷款利息	¥
		黄磷企业向政府反馈政策作用及建议	☒

注:☒代表信息流,R代表资源流,¥代表资金流。

### 2.2.2 主体间流分析

主体之间的流是连接主体并形成整个产业系统的纽带,本文仅分析主要主体之间的主要关系(见表2)。

### 2.2.3 主要矛盾分析

表2中的流不畅通就会出现矛盾,目前黄磷产业系统中的矛盾包括:电力供应不足、磷矿石消耗量大、能源利用率低、环境污染重、黄磷供大于求、企业恶性竞争严重等。不同主体在矛盾中发挥不同作用,以表2中第一组主体为例,电力是黄磷企业的必需资源,政府对电力企业有调控作用,可以借助电力企业限制或提升黄磷产业规模。这一举措同时可以影响到第5组主体的关系,对于环保不达标的黄磷企业,可以通过限制电力供应促进其开展清洁生产,所以矛盾不仅普遍存在,而且错综复杂。

在错综复杂的矛盾之中,主要矛盾是推动产业发展的决定性因素。而严重影响产业持续、健康发展的矛盾就是主要矛盾。预测产业的发展要同时认清当前主要矛盾和未来主要矛盾,未来主要矛盾是指当前主要矛盾解决之后一些相对次要矛盾将升级为主要矛盾。

纵观黄磷产业发展的历史,环境污染问题一直存在,并且伴随黄磷产业的扩大日益严重,虽然一些企业采取了废弃物处理处置和副产物利用的措施,但没有大幅度缓解产业与环境之间的矛盾。随着国家对环境保护重视程度提高及环保法规的严格,这一矛盾将成为未来主要矛盾。而当前的主要矛盾是黄磷产业的生存问题,即电力和磷矿石供应、黄磷企业间竞争的矛盾。

(1)黄磷企业与电力企业的矛盾主要包括:供电数量和供电价格两大问题。黄磷生产成本的构成为:电力占总成本50%~60%;如果外购磷矿石,磷矿石占成本15%~20%,自供磷矿石,磷矿石占成本10%;其余成本包括人工、焦炭、电极等。因此,电力是主要成本项<sup>[10]</sup>。我国的大型电力企业都归属国家所有,供电数量和价格属于非市场因素。电力企业在国家政策的支配下,决定着黄磷企业的命运。国家对黄磷产业降低电价时,黄磷产业出现迅猛发展;国家提高电价限制其发展时,黄磷产业陷入低迷。

(2)黄磷企业与磷矿石企业的矛盾。由于磷矿石是黄磷的基础资源,两类企业之间存在供需矛盾。国家对于磷矿石采挖的法律、法规将影响到磷矿石的价格和品位,从而间接影响黄磷企业。

(3)黄磷企业之间的竞争主要包括:市场竞争、

成本竞争、资本竞争。市场的竞争表现为价格战以及企业之间的吞并和被吞并。成本取决于规模、技术水平以及副产物/废弃物的增值利用等,例如生产精细下游产品、利用黄磷尾气生产甲醇、磷渣生产石膏板等,都是应对困难、提高企业竞争力的行为。我国黄磷产业聚集度曾经较低,与低聚集度并存的问题有:技术落后、成本居高不下、环保难以顾及、企业间恶性竞争等。聚集度是衡量市场结构或行业市场占有率的重要指标<sup>[11]</sup>。1999年我国黄磷产业的聚集度为31.46%,次年达到38.61%,2005年达到58.22%,这说明产业在迅猛发展的同时也自觉发生着整合。资本则一方面取决于企业自身的积累,另一方面取决于银行的支持程度,对于不同的企业,银行的支持并不平等,因为政策倾斜的影响将直接决定不同类型的企业的命运。

通过博弈分析可知,由于各种压力的限制以及经济利益的驱动,黄磷这种高耗能、高污染产业将逐渐趋向生态化发展,同时黄磷产品将向低磷、高品质方向发展,逐渐实现良性循环。但这种自发演化进程较慢,需要相关政策法规进行推动,为了确保黄磷产业的可持续发展,需要进一步加强政策法规的约束和规范作用。

另外,热法磷酸的黄磷消费量占黄磷总消费量的70%左右,而三聚磷酸钠的热法磷酸消费量约占热法磷酸的50%以上<sup>[12]</sup>,随着对三聚磷酸钠的限用愈加严格,黄磷的市场需求将下降;而且与热法磷酸相比,湿法磷酸具有污染小、耗电少的优势,虽然目前成本较高,但如果提高黄磷的环保标准或提高电价,除保留少量企业生产特殊用途的高品质黄磷外,大部分黄磷生产将被湿法磷酸取代,黄磷产业从而走向衰落。

## 3 结论

本文结合 Logistic 模型和复杂适应系统理论提出了研究黄磷产业演化的方法。我国黄磷产业演化历史符合 Logistic 方程,以拟合度最优为标准得到的拟合曲线说明,我国黄磷产业发展呈 S 型曲线,未来的发展上限是 95 万 t/年。应用复杂适应系统理论分析黄磷产业系统中主体的相互作用关系,判断出在国家宏观政策的调控之下,不同利益主体作用的最后结果是:电力、磷矿石资源的制约将迫使黄磷企业采用先进的生产技术节约资源能源、利用副产物/废弃物提高经济效益、提高行业的聚集度以增强

(下转第 85 页)

应,其中第2步反应技术来自前联碳公司。Renuva产品的差异化取决于大豆的产地和其他因素,如生长季节的干旱程度等。大豆脂肪酸组分各不相同,因此陶氏化学公司采用加氢异构化反应来解决这一问题,取得了理想效果。加氢异构化反应是一个氧化过程,在这一过程中,酯从大豆油的甘油三酸酯中分离出来,与一氧化碳和氢气反应,在烷基链上的不饱和碳键上获得一个乙醛基。这就降低了分子链上碳、碳双键的数量,从而降低了自动氧化反应的机会。由于大豆油是食用油,如果发生氧化反应则很容易腐臭,因此抑制氧化反应的发生具有重要意义。

### 1.3 存在问题

根据陶氏化学公司的资料,用于模塑泡沫的多元醇通常具有较高的分子质量、官能度和反应活性。由于多元醇含有环氧乙烷嵌段,可以使得聚合物主链末端含有一个活性的氢氧根基团,这对于将天然油基多元醇应用于模塑泡沫来说是个挑战。

另一个潜在的挑战是越来越多的植物油将用来生产生物柴油。美国总统已经多次强调要大力发展生物柴油的研究与生产,这将为大豆油基多元醇的生产带来潜在的原料竞争问题。

2005年5月,美国总统布什考察弗吉尼亚州(Virginia)生物柴油厂时表示,美国生物柴油的销售数量已经从1999年的50万加仑(1加仑=3.785 L)增至2004年的3000万加仑。随着美国政府的各项优惠措施和政策的陆续出台,如税收优惠和财政补

贴等,美国生物柴油产业将会加速发展。

陶氏化学公司聚氨酯业务开发部经理 Erin O'Driscoll指出,在过去2~3年中,大豆油市场已经发生了剧烈变化。所有植物油的价格都已经大幅上涨。为了应对这种情况,陶氏化学公司正在研究替代种子油,包括葵花籽油、红花油和油菜籽油。但是还没有研究这些替代种子油对最终产品的性能会造成何种影响。陶氏化学公司对增加原料多元化十分感兴趣,但对原料多元化究竟能在多大程度上帮助提高产品的多样化还没有把握。在对产品性能研究的基础上,陶氏化学公司选择棕榈油作为潜在的替代原料。

根据美国伊利诺斯州大学的一项研究报告,尽管美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)表示自1981年以来美国大豆油产量翻了一番,从110亿磅(1磅=453.599g)增至2006年的202亿磅。但是2007年8月伊利诺斯州(Illinois)中部的大豆现货价格比2006年9月平均上涨了42%,而同期的大豆油价格也上涨了48%。

## 2 卡吉尔公司大豆制备聚氨酯注重绿色应用

在生物基多元醇领域,陶氏化学公司的竞争对手卡吉尔(Cargill)公司在2007年北美聚氨酯展会上也发布了该公司所取得新进展。该公司将把其牌号为“BiOH”的大豆油基多元醇的生产业务拓展至南美洲,在其现有位于巴西圣保罗(Sao Paulo)的植物油

(上接第83页)

规模效应等措施,提高企业自身竞争力的同时,促进了产业的可持续发展。Logistic方程和复杂适应理论的结合使用,对于分析资源型产业系统演化有借鉴意义。

注:本文采用集中率予以表示,集中率(concentration, CR)的简单计算方法是:计算某行业排名前K位的企业总收益(或市场占有率)占整个产业的比率。计算排名前10位的企业总产量占全国总产量的比率,  $CR_{10} = \frac{\sum_{i=1}^{10} M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$ ,  $i$ 代表单个企业,  $n$ 代表企业数量,  $M_i$ 代表单个企业的收益。

### 参考文献

- [1] 王锋正,郭晓川.资源型产业集群与内蒙古经济发展[J].工业技术经济,2007,26(1):51-53.
- [2] 于志明,孙宋芝.资源型产业城市发展规律初探[J].经济问题探索,2006(3):64-67.
- [3] 李振基,陈小麟,郑海雷,等.生态学[M].2版.北京:科学出版社,2004:119-122.
- [4] 李博,杨持,林鹏,等.生态学[M].北京:高等教育出版社,2001:51-54.
- [5] 郑元润.红花岗基沙地樟子松种群优势度增长动态及自疏规律的研究[J].武汉植物学研究,1999,17(4):339-344.
- [6] 叶金国,陈燕.我国能源产业系统的演化过程与混沌[J].数学的实践与认识,2005,35(8):5-10.
- [7] 李子奈.高等计量经济学[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [8] Holland J H. Hidden order: How adaptation Builds Complexity[M]. Addison-Wesley publishing Company, 1995.
- [9] 许国志.系统科学[M].上海:上海科技教育出版社,2000.
- [10] 中国化工网信息员.目前我国磷化工可持续发展面临三大制约因素[EB/OL]. 2006-09-15. <http://news.chemnet.com/item/2006-09-15/320060.html>.
- [11] 杨大成.我国各省区产业结构效率及产业聚集度分析[J].集团经济研究,2007(25):213-214.
- [12] 中国化工网信息员.近期黄磷产销情况分析[EB/OL]. 2003-06-04. <http://cna.chemnet.com/content/2003-06-04/63594.html>. ■