

# 循环经济发展模式系统仿真方法研究 ——煤炭行业的实例分析

孙静春, 席酉民, 王 军, 付永水

(西安交通大学管理学院, 西安 710049)

**[摘要]** 通过对煤炭业循环经济模式的分类研究,发现尚无在循环经济模式基础上分析主业、产业链影响因素之间数量关系的科学方法,而系统仿真方法比较适合解决这类问题。依托煤炭主业,设计了一套适于解决类似大型复杂系统的仿真方法,指出了这种方法的适用范围和局限性。并以YM集团为例,对其循环经济发展模式进行了详细的验证,得出YM集团发展循环经济有益的结论,同时说明了该方法在分析煤炭行业循环经济发展模式方面的适用性与有效性。

**[关键词]** 煤炭行业; 循环经济模式; 系统仿真方法

**[中图分类号]** F062.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2007)05-0062-01

循环经济是提升资源利用率和减少对环境污染的新型经济模式,如何利用科学的分析方法挖掘循环经济价值,是具有较好应用前景的研究课题。例如,就煤炭行业来说,我国是煤炭生产大国,过去片面追求产量和经济效益,忽视综合开发和社会效益问题,不仅对煤炭资源造成巨大浪费,而且也严重污染了社会环境,制约着企业的发展壮大。为增强煤炭资源的生态效率,解决企业发展和环境污染之间的矛盾,运用循环经济系统仿真方法模仿煤炭生产及循环利用系统的物质流和能量流,分析设计煤炭资源的产业链,尽可能实现物质的闭路循环和能量的多级利用,可以提高资源的基本生产率和满足社会的需要。

## 1 研究综述

### 1.1 煤炭业循环经济模式综述

按产业链之间关系的复杂性,煤炭业循环经济模式,可以分为3类:

#### 1.1.1 处理流程规划模式

贾晓冬<sup>[1]</sup>指出循环经济从煤炭资源开采行业来

讲,是以最有效利用资源和保护环境为基础的经济形式,其内涵主要有:

1) 综合开采——开采煤炭资源的同时,将与煤炭共伴生的矿产品、煤层气、矿井水等多种资源及废弃物,统筹规划、综合开采,并进行加工利用;

2) 深度加工——对不同煤种、品质的煤炭进行粗加工、深加工和精加工,把煤炭加工成高附加值产品;

3) 高效利用——将煤炭开采和洗选过程中产生的废弃物,如煤矸石、矿井水、煤泥、瓦斯和焦化气等进行综合利用,创造出较高的经济效益、环保效益和社会效益;

4) 循环发展——对资源低开采、高利用、低排放、高收益,从而提高环境资源的配置效率。

煤炭资源的综合开采、深度加工、高效利用、循环发展是相互依存、相互促进、优化配置的过程,它能从根本上摆脱传统煤炭工业以大量消耗资源、牺牲环境为代价的发展模式,形成煤矿生产经营与矿区人口、资源、环境协调发展的新模式,见

[收稿日期] 2006-05-29

[基金项目] 国家“九八五”工程资助项目(7200701)

[作者简介] 孙静春(1966-),男,河北唐山市人,西安交通大学管理学院副教授,博士

图 1。

在这个模式中，煤炭和煤系伴生资源的开采加工作为主导产业链，延伸出“煤矸石、煤泥—热电”、“灰渣、矸石—建材厂—建材产品”、“煤矸石—充填复垦—土地资源”、“矿井水—水处理站—供水”四条产业链。通过各条产业链的循环运行，不仅使煤炭生产过程中产生的各种废物资源得到了再利用，解决了单纯末端污染控制的被动性，而且通

过资源和能源的梯级利用，有效地提高了企业的经济效益和环境效益。

贾晓冬所提出的循环经济模式只体现了一个简单的物质转换流程，并且整个流程没能体现出物质循环利用的过程。从模型局部来看，没有明确提出循环经济的加工主体、投入、以及主产品与废弃物的区分。

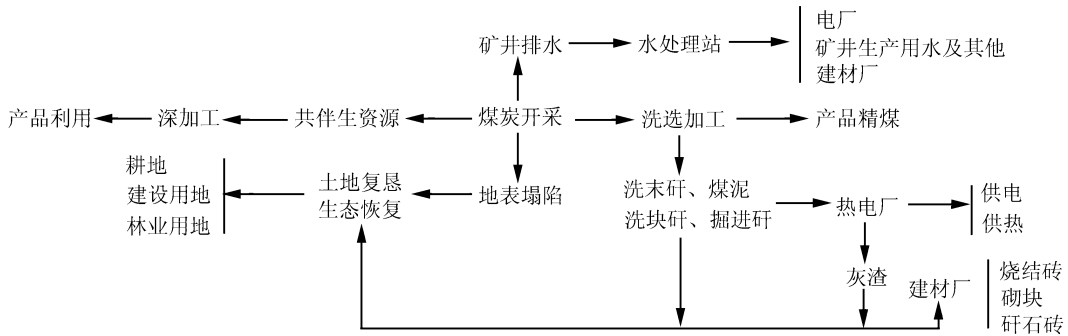


图 1 煤炭生产循环经济发展模式

Fig.1 Developing pattern of circular economy in coal mining industry

1.1.2 循环经济物质流模式

林积泉，王伯铎，马俊杰等<sup>[2]</sup>通过分析循环经济与环境效益之间的关系，指出产业链是连接它们的纽带。以煤炭工业企业为例，指出对煤炭资源进行深加工，增加其附加值，具有明显的经济效益；实现废物的减量化、再用、资源化和循环，具有明显的环境效益。依托洗精煤，以焦炭作为生态系统中的主要种群，以焦化作为产业链的主要环节，把废物综合利用作为主线，把发电厂作为各个环节能量流动的纽带，设计了循环经济产业链，模式如图 2 所示。形成了焦炭、甲醇、炭黑、化肥等多种产品结构和以电能、热能发展企业的循环经济产业链体系。

他们还以某工业企业建设项目为实例，对产业链的构成、物流、能流进行了深入分析。指出工业企业通过产业链的延长，废物的减量、再用和循环，把废物转化为电能，水进行循环使用，污水达到“零排放”，从而节约了资源，减少污染物的排放量，提高经济效益和环境效益。

林积泉等人的模型有了一定的改进，首先在模型中分出了物质流和能量流，并通过两者的流通实现了经济产业链的循环发展。然而同循环经济的总体要求相比，该模型的问题：一是在物质流和能量流的流通过程中都未能体现流通的工艺过程；二是

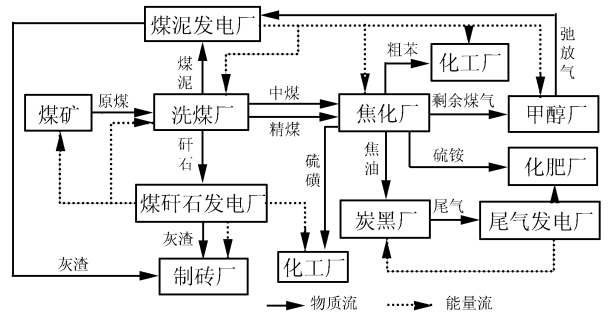


图 2 煤炭工业企业循环经济产业链

Fig.2 Industry chain of circular economy in coal enterprise

没能区分循环经济的加工主体、主产品以及废弃物。

1.1.3 工艺流程模式

刘红艳<sup>[3]</sup>首先介绍了南非萨索尔公司煤基产业链，通过对萨索尔公司产业链中煤炭开采、煤炭气化、费托合成燃料油、燃料油的炼制、化学品以及副产品的分离与加工、热电联供等的阐述和分析，对我国煤炭企业具有很大的借鉴意义。且以兖矿集团为例，提出“以煤炭转化和清洁利用为导向的煤化电产业链”，是一个集成国际上众多单项技术创新成果为洁净高效多联产系统的巨型工程，见图 3。

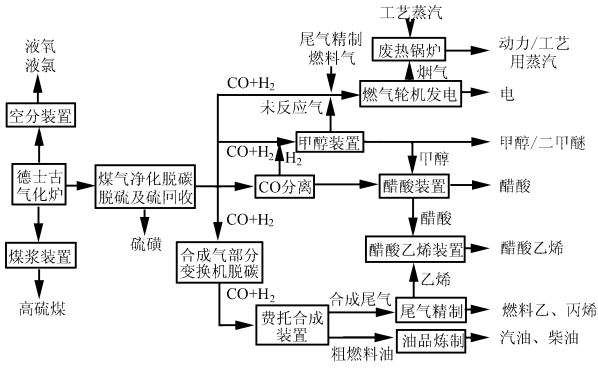


图3 兖矿集团多联产系统示意框图  
Fig.3 Framework of coal chemical system

该系统在生产过程中不仅能最大限度地实现物料综合利用和能量等级利用，大幅度提高煤炭资源的利用效率，而且可以依靠高新技术在煤炭利用中对环境有害物质进行集中、高效的处理和控制在煤炭利用中对环境有害物质进行集中、高效的处理和控制在煤炭利用中，从而达到经济、社会和环境效益的最佳统一。该煤炭行业循环经济发展模式是较为合理的，基本体现了发展循环经济的各项要求。唯一遗憾的是在产出方面没能把主产品和废弃物相分离。

以上三种类型的煤炭循环经济发展模式，其各产业链投入产出数据关系特征及价值链的特征类似，但在发展模式却无法呈现出来，也缺乏系统和定量的分析工具，以把握和透视各模式的行为特性。面对此类复杂大型系统的行为分析难题，作者试图利用系统仿真方法解决这类问题。

1.2 基于元胞自动机的系统仿真方法研究煤炭循环经济的可能性

元胞自动机 (cellular automata, CA) 是 20 世纪 50 年代由 Neumann 为模拟生物体中的自复制行为提出的<sup>[4]</sup>。它能通过简单的基元和简单的规则产生复杂现象，从而具有模拟复杂系统的能力。20 世纪 80 年代以来，由于计算机技术和科学的进步，其广泛地应用于经济、交通、物理、化学等复杂系统和复杂现象以及人工生命的研究，但尚未发现用于大型循环经济复杂系统的分析。

在煤炭业循环经济发展模式中，各产业链、各子系统之间既相互独立又相互联系，充分体现了元胞自动机的独立性与复制特性。每一子系统取有限的离散状态，遵循相似的作用规则，依据确定的局部规则作同步更新，大量子系统通过简单的相互作用而构成系统的演化。循环经济模式符合元胞自动

机在时间、空间、状态都离散的特点，这表明运用系统仿真方法研究循环经济是可行的。

2 循环经济模式下大型工程系统仿真模型的建立

设计用于研究大型工程的系统仿真方法，其步骤如下：

1) 针对所要研究的问题预估并建立仿真模型，根据模型中所涉及到的参数和变量，利用实地调查、历史数据和统计资料等方式获得第一手数据，并运用统计软件对原始数据进行分布拟合并检验，得出数据的分布特征参数。

2) 产业链子系统构造——根据研究的实际问题和具体情况，分析其所涉及的产业链，选取影响整体经济发展和体现循环经济发展的产业链作为研究对象。针对每条产业链，分析影响其发展的关键变量以及未来循环经济制约其发展关键因素。在模型中体现各产业链及其加工主体、加工工艺、投入、主要产品、废弃物等与循环经济子系统相关的主要影响因素，构成各个子系统的共性特征，这些是产业链的系统结构可以复制的基础。产业链子系统的基本构造图如图 4 所示。

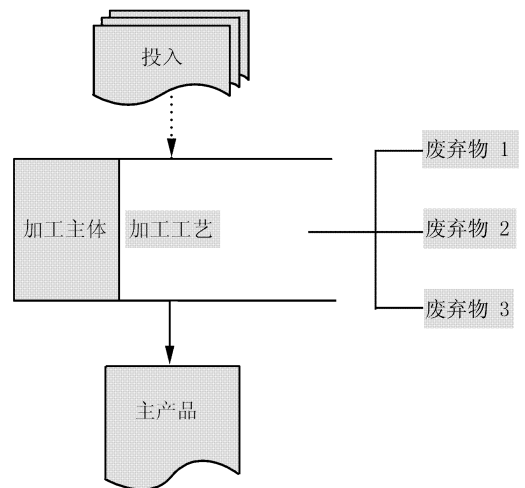


图4 产业链子系统结构示意图  
Fig.4 Structure of subsystem in industry chain

3) 各子系统链接——将各子系统链接成循环经济发展的总系统，主要体现在两个层面上，一是通过各子系统中共有的物质将其链接起来，包括原材料、半成品、产成品、废弃物；二是通过能量流将其链接起来，实现了能量的再利用、循环利用。通过物质流和能量流形成整个经济系统的大循环。

4) Monte Carlo 实验分析——针对所构建的循环经济系统模型,运用统计数据进行 Monte Carlo 仿真实验。在实验结果的基础上,确定分析内容,如频数分析、敏感性分析,各种构成变量的直接关系和间接关系分析,并选取进行这些分析所需要的变量和数据。

5) 绘制变量关系表和反应变量规律的趋势图。结合客观情况、循环经济模型、仿真假设对经济系统进行分析。

6) 确定实验结果的优点、缺陷,改进仿真模型。针对分析出现的工艺技术、产业链等方面的新问题,加入新的变量和子系统,对新的系统进行描述、运算、分析,如此反复不断完善系统模型,解决实际中出现的新问题。

### 3 仿真模型的作用和应用范围

作为一种重要的研究方法,系统仿真方法在解决预测问题中发挥了重要作用,在未来的研究中,它仍将继续发挥作用。和其它预测研究方法相比,它考虑了更多的系统影响因素及其复杂的关系。结合预测精度、变量关系、数值变化范围等,系统仿真方法有自己的优势,但也存在不足:

首先,系统仿真方法通过构建仿真模型来反映现实系统,但现实系统的复杂性可能很难或者根本不可能完成建模。为了解决问题,建模势必基于一定的假设,比如在研究煤炭行业循环经济的问题时,可能只能选择经济系统中的某个或几个重要产业链进行分析,以及对系统的影响因素只能从经济、环境方面选取核心要素。虽然这些假设有助于简化问题,但假设越多,构建的模型自然离真实的系统越远,由此而制定的决策就可能难以完全符合实际并满足要求。

其次,系统仿真模型的特点是通过认知、发现和改变系统结构来认知、发现和改变系统的行为模式,但对于复杂的循环经济系统,由于缺乏对变化的适应能力,设计好的仿真模型可能跟不上实际循环经济系统的变化。

最后,系统仿真方法对工艺技术优化的定量仿真及模型的有效性、灵敏度分析一般采用“试凑法”。工艺优化不但要考虑系统参数变化还要考虑系统结构的变化,而“试凑法”一般是事先设计好工艺方案,通过改变系统参数进行仿真来发现问题,然后在所设计的方案中进行选优。这在很大程

度上依赖分析、建模人员的经验与技巧,虽然它能反应一定的管理学意义,但很难达到数学意义上的优化。

## 4 实例分析

根据以上对煤炭行业循环经济模式综述和系统仿真方法探讨,结合 YM 集团循环经济模式的运行,说明系统仿真方法的应用过程。

YM 集团对自身条件和周边地理环境深入分析,以煤炭作为主营业务,开展煤炭深加工、对煤炭开采中伴生矿合理利用,不断延伸产业经济链。在集团内部确立“煤—电—铝—化—建”路线对资源进行整合和深加工,加上在矿区内加强对矿井水、瓦斯进行综合治理以及对坍塌土地的复垦,从而在整个矿区和集团内建立起了循环经济的发展模式。

根据集团内物流流、能源的流动情况从而建立起循环经济示意图(图5)。

YM 集团“煤—电—铝—化—建”循环经济的发展模式,在 2005 年实现总产值 55 亿元,其中非煤产业 16 亿元。其中

煤炭开采—选洗加工产业链:原煤  $1\ 600 \times 10^4$  t/a,选洗能力  $800 \times 10^4$  t/a;

劣质煤、煤泥、煤矸石—电产业链:产电  $60 \times 10^4$  kw/a;

煤、电—氧化铝产业链:氧化铝  $20 \times 10^4$  t/a(二期  $40 \times 10^4$  t/a);

煤气化—煤化工产业链、多联产:煤气  $120 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,甲醇  $10 \times 10^4$  t/a,及其它联产化工产品(二期煤气  $300 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,甲醇  $20 \times 10^4$  t/a);

煤—矸石砖、水泥建材产业链:矸石砖  $7\ 000 \times 10^4$  块/a,普通硅酸盐水泥  $20 \times 10^4$  t/a,新建  $180 \times 10^4$  t/a 新型干发水泥;

煤—碳酸钡化工产业链,碳酸钡  $5\ 000 \times 10^4$  /a;

矿井水、瓦斯综合治理,矿井水  $1\ 100 \times 10^4$  /a,瓦斯  $197.48$  m<sup>3</sup>/s;

农林绿化,  $5\ 200$  ha。

### 4.1 系统模型构建

#### 4.1.1 子系统模型构建

煤炭生产是集团的主业,也是主要的产值和利润来源,为其它的子系统提供原煤及其煤炭开采时的伴生物如矿井水、煤矸石、铝土矿等,是循环经济的核心单位。按照成本收益核算原则,这里认为

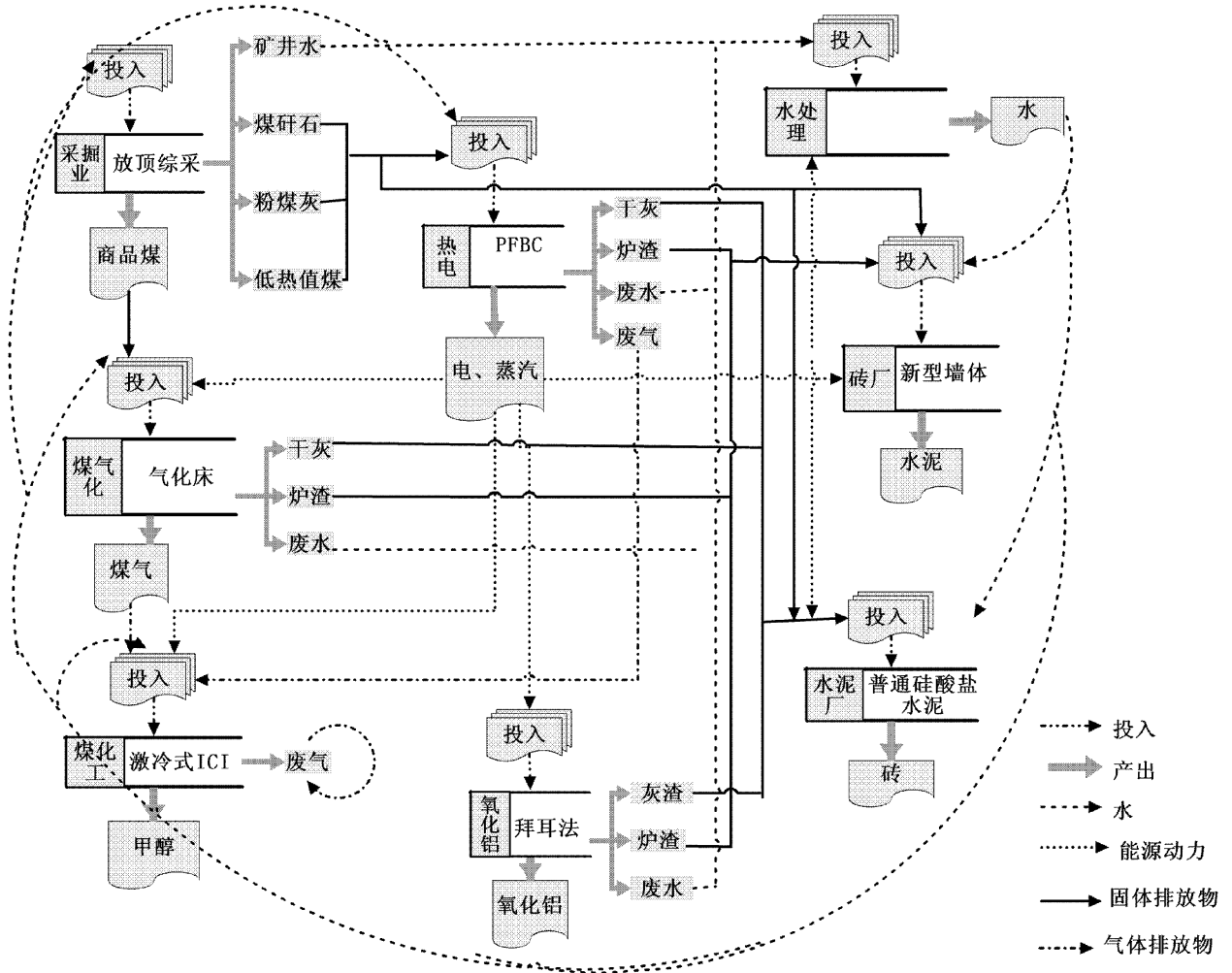


图 5 循环经济产业链关系

Fig.5 Industry chain relationship of circular economy

子系统的收入为主营业务收入，而且产品是无差异的，销售收入等于煤炭销量乘以煤炭价格；企业的成本按生产成本、销售成本、税金、环境成本来划分；然后计算系统的净收益。其成本—收益示意图如图 6。

文中数据源自 YM 集团《煤炭财务报表处理系统》，选取 2000 年 1 月到 2005 年 10 月 70 个月数据，用水晶球软件的 Batch Fit 功能对各项数据进行拟合，得到各项数据的分布及其参数<sup>[8]</sup>。详见表 1。

1) 物料消耗：指煤炭开采过程中使用的物料，

大都是一次性支出。总的材料成本： $M = \sum_{i=1}^{11} m_i$ 。

2) 能源动力：煤炭开采的能源成本，主要是电和煤炭。总的动力成本  $E = m_{12} + m_{13}$ 。

3) 人工费用：煤炭作业及其管理人员的工资、

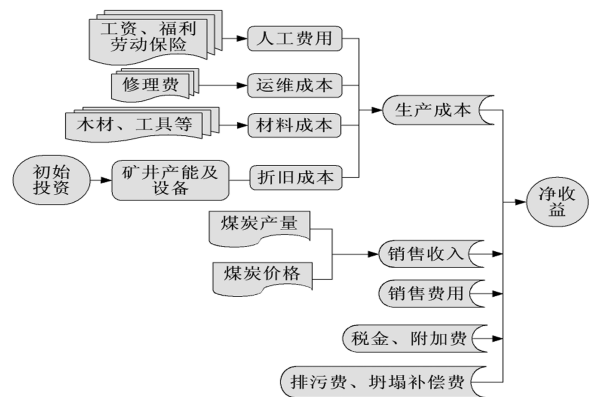


图 6 煤炭子系统成本—收益示意图

Fig.6 Cost-benefit relationship of coal mining subsystem

福利费和劳动保险费。总的人工费用为  $P = m_{14} +$

表 1 煤炭子系统仿真参数

Table 1 Parameters for coal mining subsystem

服从分布	项目	符号	Parameter
Logistic	木材	$m_1$	Mean=1.24 scale=0.17
Logistic	支护用品	$m_2$	Mean=3.67 scale=0.94
Logistic	火工用品	$m_3$	Mean=0.58 scale=0.09
Logistic	大型材料	$m_4$	Mean=2.57 scale=0.58
Extreme Value	配件	$m_5$	Mode=3.16 scale=0.73
Lognormal	专用工具	$m_6$	Mean=0.43 std=0.31
Lognormal	劳保用品	$m_7$	Mean=0.44 std=0.18
Extreme Value	建工材料	$m_8$	Mode=0.50 scale=0.16
Lognormal	油脂及乳化液	$m_9$	Mean=0.85 std=0.35
Logistic	其它材料	$m_{10}$	Mean=4.52 scale=1.11
Logistic	材料成本差异	$m_{11}$	Mean=0.62 scale=0.49
Lognormal	自用煤	$m_{12}$	Mean=0.26 std=0.24
Logistic	电力	$m_{13}$	Mean=8.46 scale=1.39
Extreme Value	工资	$m_{14}$	Mode=33.5 scale=11.80
Logistic	劳动保险费	$m_{15}$	Mean=9.82 scale=2.45
Extreme Value	福利费	$m_{16}$	Mode=4.36 scale=0.94
Logistic	折旧费	$m_{17}$	Mean=11.60 scale=2.22
Logistic	安全生产费	$m_{18}$	Mean=3.08 scale=1.26
Logistic	维简费及井巷费	$m_{19}$	Mean=7.45 scale=2.25
Normal	修理费	$m_{20}$	Mean=7.69 std=4.14
Weibull	地面塌陷赔偿费	$m_{21}$	Loc=0 scale=0.77 shape=0.63
Gamma	排污费	$m_{22}$	Loc=-164.47 scale=177 279.39 shape=0.43
Beta	其它支出	$m_{23}$	Alpha=1.42 beta=4.06 scale=66.87
Gamma	单价	$m_{24}$	Loc=130.72 scale=58.54 shape=0.76
Weibull	销量	$m_{25}$	Loc=679 091.41 scale=464. 53 shape=1.58
Gamma	税金	$m_{26}$	Loc=16.12 scale=7.15 shape=0.89
Logistic	附加费	$m_{27}$	Mean=4.76 scale=0.77

$m_{15} + m_{16}$ 。

4) 折旧费：矿井建设的初始投资和大型设备的折旧。

5) 运维成本：煤矿日常运作中产生的相关支出，包括安全生产费、设备修理费、井巷维护费等。总运维成本  $X = m_{18} + m_{19} + m_{20}$ 。

6) 环境成本：煤炭开采对环境造成破坏，为此要付出相应的成本，主要包括地面坍塌补偿、土地占压、排污等费用。总环境成本  $H = m_{21} + m_{22}$ 。

7) 其它支出：企业相关支出，没有明确的支出项目，也不可很好预测。

8) 价格：市场上煤炭价格，按照不同煤种、销售行业、区域进行了加权平均，然后进行拟合。

9) 销量：平均每个月销售情况，不考虑煤种的差异。

10) 相关税费：每吨煤平均负担的税金和其它相关的教育费附加、车船使用费等相关税费  $T = m_{26} + m_{27}$ 。

煤炭子系统收益为：

$$CP = \left[ m_{24} - \sum_{i=1}^{21} m_i - m_{23} - m_{26} - m_{27} \right] \times m_{25} - m_{22}。$$

同理，其余子系统也是独立的系统，其成本—收益构成与煤炭子系统相似，故省去具体的建模过程，收益模型如下，各子系统元素及参数见表 2。

煤电子系统收益：

$$CEP = \left[ d_9 - \sum_{i=1}^6 d_i \right] \times d_8 - d_{10} - d_i；$$

氧化铝子系统收益：

$$ALP = \left[ l_{11} \times (1 - l_{12}) - \sum_{i=1}^9 l_i \right] \times l_{10}；$$

煤化工子系统收益：

$$MHP = \left[ mh_4 \times (1 - mh_2) - mh_3 \right] \times mh_5 + mq_{11} \times (1 - mq_{10}) \times mq_{13} - mq_{12} \times \left[ \sum_{i=1}^9 mq_i \right]；$$

矽石砖子系统收益：

$$ZCQ = \left[ b_0 \times (1 - b_{10}) - \sum_{i=1}^8 b_i \right] \times b_{11}；$$

水泥子系统收益：

$$SNP = \left[ sn_9 - \sum_{i=1}^7 sn_i \right] \times sn_8 - sn_{10} - sn_{11}。$$

#### 4.1.2 总系统模型集成

上节分别介绍了煤炭（CP）、煤电（CEP）、氧化铝（ALP）、煤化工（MHP）、矽石砖（ZCQ）、

表 2 总系统仿真电子表格  
Table 2 Spread sheet model of the total system

煤炭开采/t				w	0.75	煤气化—煤化工/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>							
<i>m</i> <sub>24</sub>	17 4.98	<i>m</i> <sub>32</sub>	1 169 701			<i>mq</i> <sub>11</sub>	8 500	<i>mq</i> <sub>12</sub>	2 313.08				
<i>m</i> <sub>25</sub>	1 096 042					<i>mq</i> <sub>13</sub>	880	<i>mq</i> <sub>14</sub>	7 210.77				
<i>m</i> <sub>26</sub>	22.48	<i>M</i> <sub>33</sub>	135.41			<i>mq</i> <sub>10</sub>	0.17	其中：	外部因数	其中：	内部因数		
<i>m</i> <sub>27</sub>	4.76	其中：	外部因数	其中：	外部因数			<i>mq</i> <sub>4</sub>	38.25	<i>mq</i> <sub>15</sub>	28		
		<i>m</i> <sub>1</sub>	1.24	<i>m</i> <sub>17</sub>	11.6			<i>mq</i> <sub>5</sub>	5.25	<i>mq</i> <sub>16</sub>	174.98		
		<i>m</i> <sub>2</sub>	3.67	<i>m</i> <sub>18</sub>	3.08	煤化工子系统收益		<i>mq</i> <sub>6</sub>	1 548.15	<i>mq</i> <sub>17</sub>	350		
		<i>m</i> <sub>3</sub>	0.58	<i>m</i> <sub>19</sub>	7.45	379 608.651 5		<i>mq</i> <sub>7</sub>	164.80	<i>mq</i> <sub>18</sub>	0.306 791		
		<i>m</i> <sub>4</sub>	2.57	<i>m</i> <sub>20</sub>	7.69			<i>mq</i> <sub>8</sub>	180	<i>mq</i> <sub>19</sub>	170		
		<i>m</i> <sub>5</sub>	3.58	<i>m</i> <sub>21</sub>	0.38			<i>mq</i> <sub>9</sub>	40	<i>mq</i> <sub>20</sub>	0.75		
煤炭子系统收益		<i>m</i> <sub>6</sub>	0.43	<i>m</i> <sub>23</sub>	17.32			<i>mh</i> <sub>4</sub>	2 163	<i>mh</i> <sub>6</sub>	6 808		
14 427 308.33		<i>m</i> <sub>7</sub>	0.44	<i>m</i> <sub>15</sub>	9.82			<i>mh</i> <sub>5</sub>	6 808	<i>mh</i> <sub>7</sub>	1 990.78	其中：	内部因数
		<i>m</i> <sub>8</sub>	0.59	<i>m</i> <sub>22</sub>	0.1			<i>mh</i> <sub>2</sub>	0.17	其中：	外部因数	<i>Mh</i> <sub>1</sub>	0.210 5
		<i>m</i> <sub>9</sub>	0.85	其中：	内部因数			<i>mh</i> <sub>3</sub>	201.53				
		<i>m</i> <sub>10</sub>	4.52	<i>m</i> <sub>28</sub>	20			氧化铝/t					
		<i>m</i> <sub>11</sub>	0.62	<i>m</i> <sub>29</sub>	0.306 791			<i>l</i> <sub>11</sub>	1 937	<i>l</i> <sub>21</sub>	17 000		
		<i>m</i> <sub>14</sub>	40.33	<i>m</i> <sub>30</sub>	10			<i>l</i> <sub>10</sub>	17 000	<i>l</i> <sub>22</sub>	1 369.280		
		<i>m</i> <sub>16</sub>	4.91	<i>m</i> <sub>31</sub>	0.75			<i>l</i> <sub>12</sub>	0.20	其中：	外部因数	其中：	内部因数
		火电/10 <sup>4</sup> kWh						<i>l</i> <sub>1</sub>	680.00	<i>l</i> <sub>13</sub>	0.4		
<i>d</i> <sub>9</sub>	2 867.91	<i>d</i> <sub>15</sub>	5 579.96					<i>l</i> <sub>2</sub>	30.88	<i>l</i> <sub>14</sub>	174.98		
<i>d</i> <sub>8</sub>	2 154.63	<i>d</i> <sub>16</sub>	2 568.634					<i>l</i> <sub>3</sub>	4.25	<i>l</i> <sub>15</sub>	500		
<i>d</i> <sub>10</sub>	19.23	其中：	外部因数	其中：	外部因数	氧化铝子系统收益		<i>l</i> <sub>4</sub>	82.24	<i>l</i> <sub>16</sub>	0.306 79		
		<i>d</i> <sub>1</sub>	540.48	<i>d</i> <sub>7</sub>	61.00	3 065 443.108		<i>l</i> <sub>5</sub>	1.69	<i>l</i> <sub>17</sub>	13.5		
		<i>d</i> <sub>2</sub>	332.67	其中：	内部因数			<i>l</i> <sub>7</sub>	29.70	<i>l</i> <sub>18</sub>	0.75		
		<i>d</i> <sub>3</sub>	45.57	<i>d</i> <sub>11</sub>	5			<i>l</i> <sub>9</sub>	40.00	<i>l</i> <sub>19</sub>	1.94		
		<i>d</i> <sub>4</sub>	512.96	<i>d</i> <sub>12</sub>	130			<i>l</i> <sub>8</sub>	4.31	<i>l</i> <sub>20</sub>	135.41		
		<i>d</i> <sub>5</sub>	46.56	<i>d</i> <sub>13</sub>	20			水泥/t					
		<i>d</i> <sub>6</sub>	425.39	<i>d</i> <sub>14</sub>	0.75			<i>sn</i> <sub>9</sub>	199.93	<i>sn</i> <sub>17</sub>	10 258.93		
		制砖/万块						<i>sn</i> <sub>8</sub>	10 258.93	<i>sn</i> <sub>18</sub>	180.32		
<i>b</i> <sub>9</sub>	1 600	<i>b</i> <sub>21</sub>	585	其中：	内部因数			<i>sn</i> <sub>10</sub>	2.20	其中：	外部因数	其中：	内部因数
<i>b</i> <sub>11</sub>	585	<i>b</i> <sub>22</sub>	1 078.62	<i>b</i> <sub>13</sub>	0.07			<i>sn</i> <sub>2</sub>	36.94	<i>sn</i> <sub>11</sub>	0.2		
<i>b</i> <sub>10</sub>	0.17	其中：	外部因数	<i>b</i> <sub>14</sub>	174.98			<i>sn</i> <sub>3</sub>	5.30	<i>sn</i> <sub>12</sub>	174.98		
		<i>b</i> <sub>12</sub>	50	<i>b</i> <sub>15</sub>	28.5			水泥子系统收益		<i>sn</i> <sub>5</sub>	28.26	<i>sn</i> <sub>13</sub>	110
		<i>b</i> <sub>5</sub>	246.85	<i>b</i> <sub>16</sub>				178 577.091 9		<i>sn</i> <sub>6</sub>	11.85	<i>sn</i> <sub>14</sub>	0.306 79
矸石砖子系统收益		<i>b</i> <sub>6</sub>	77.85	<i>b</i> <sub>17</sub>	720					<i>sn</i> <sub>7</sub>	26.97	<i>sn</i> <sub>15</sub>	3
145 888.399 8		<i>b</i> <sub>7</sub>	154.29	<i>b</i> <sub>18</sub>	0.306 791					<i>sn</i> <sub>16</sub>	0.75		
		<i>b</i> <sub>8</sub>	313	<i>b</i> <sub>19</sub>	7			总收益：19 759 427.92					
				<i>b</i> <sub>20</sub>	0.5								

水泥 (SNP) 六个子系统的收益模型和影响因素, 结合循环经济的 3R 原则来看, 各子系统之间存在相互依存、相互关联的关系: 煤炭及其伴生矿为其它系统提供能源 (发电、) 和原材料 (煤化工、矸石砖、氧化铝、水泥), 发电系统为其它系统提供能源动力、蒸汽, 发电、煤气化的炉渣和煤灰为水泥生产提供熟料, 水通过水厂处理在集团内部循环使用, 且减少污染。由此形成物资循环流动的总系统。

因此总系统的收益与子系统有着密切的关系, 各子系统的收益构成了总收益, 实现循环经济就是要使系统整体效能最大化, 故构建总系统收益模型。

总系统收益:

$$TP = CP + CEP + ALP + MHP + ZCQ + SNP$$

总系统仿真电子表格见表 2 所示。

#### 4.2 子系统和总系统的仿真分析

##### 4.2.1 仿真结果

在 Excel XP 的基础上，加载 Crystal Ball 2000.2 的宏模块来实现仿真。通过对系统进行 10 000 组数据的仿真，分别得到各子系统和总系统的统计数据、频数图、敏感性分析图，结合产业背景和 YM 集团的实际运营情况进行分析。

针对各系统的仿真结果，结合统计数据和频数图，可以直观的得到各系统的盈利范围、盈利能力、盈利可能性，而敏感性分析图中，截取敏感性大于 10% 的因素作为关键因素进行分析，将各系统特征数据和关键变量汇总于表 3。

表 3 各子系统仿真结果汇总

Table 3 Simulation results of the subsystems and the total system

盈利项目	范围/元	盈利可能性	盈利均值/元	关键因素（敏感性指数）
煤炭	0~182 484 818.25	55.60%	18 712 960.12	价格 (0.80)、人工成本 (-0.32)、其它支出 (-0.27)、税金 (-0.11)、提取的维简费和井巷 (-0.10)
电	0~2 499 067.76	57.38%	149 430.92	并网电价 (0.47)、人工成本 (-0.34)、折旧 (-0.27)、其它费用 (-0.25)、排污费 (-0.21)
氧化铝	0~12 886 488.58	93.18%	4 704 224.72	氧化铝价格 (0.79)、税负 (-0.50)、销量 (-0.20)、电力 (-0.13)
煤气化	0~8 737 009.45	94.24%	3 193 290.34	煤气价格 (0.60)、煤 (-0.53)、甲醇价格 (0.49)、折旧费 (-0.14)、煤气销量 (0.12)
矽石砖	0~350 294.93	94.62%	133 219.83	砖单价 (0.89)、税负 (-0.19)、人工费用 (-0.15)、电 (-0.19)、销量 (0.14)
水泥	0~578 055.84	7.36%	-483 838.42	人工成本 (-0.39)、水泥销量 (-0.41)、水泥单价 (0.34)、电力成本 (-0.30)
总系统	0~285 593 690.95	84.5%	74 950 224.24	煤炭价格 (0.56)、煤气价格 (0.53)、煤炭工资 (-0.32)、煤炭其它支出 (-0.26)、煤炭税金 (-0.15)、劳动保险 (-0.11)

从表 3 可以看出各子系统收益规模、收益可能性、影响收益的关键因素各不相同。如果强调单个产业链条的最优，首当发展氧化铝、煤气化等行业，但如何提高整体收益能力、抗风险能力，如何实现物尽其用、对外提供清洁高效的产品，这才是循环经济相对于传统经济模式的优势。

从表 3 中六个子系统的变量对总系统的敏感性分析得到，影响系数大于 10 的变量共有 15 个，即煤炭价格、煤气价格、煤炭工资、煤炭其他支出、煤炭税金、煤炭提取的维简费和井巷、煤炭劳动保险费等。这主要是因为矽石砖、水泥、热电等产业规模相对煤炭主业而言很小，收益所占比重较低，故而对总系统的收益能力影响较小，但对社会和环境的影响是非常大的。

4.2.2 关键因素分析

依据模型和参数产生的 10 00 组模拟数据，然后针对每一关键变量的最大值和最小值之间分 50 个区间，对落在每一区间上的函数值计算平均值 (E) 和标准差 (δ)，然后对平均值 (E)、平均值加标准差 (E + δ)、平均值减标准差 (E - δ) 分别做出与该变量的曲线。

1) 煤炭价格对收益的影响 (图 7)，在 400 元以下基本为正的线性关系，收益随价格增加而递增，这说明煤炭收益受煤炭价格变动的的影响比较单

一，较为敏感，这也正是煤炭企业传统经济模式下收益脆弱得原因。

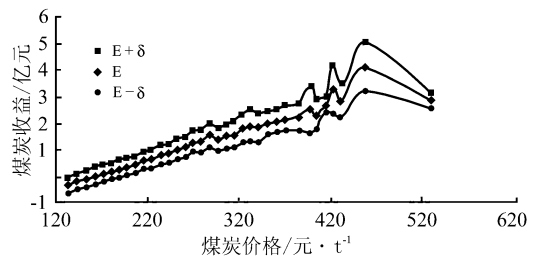


图 7 煤炭价格对煤炭收益影响趋势图

Fig.7 Relationship between coal profit and coal price

2) 成本对煤化工收益的影响 由图 8 可知煤是煤气化的最大的成本对象，主要包括原料用煤和动力煤，原料煤必须活性较好的煤，这正是 YM 煤的长处所在，YM 煤作为燃烧和动力用煤是一种浪费，但是作为化工的原料煤，要经过筛选和加工，成本比较高。

4.3 子系统与总系统的相关性分析

1) 煤炭收益与总收益关系 根据煤炭子系统仿真结果，收益区间为 -144 400 021.11~182 484 818.25 元，收益均值为 18 712 960.12 元。而目前收益规模为 18 936 575.73 元，比收益均值略高，说明还有很大的上升区间，从煤炭收益对总收



益的趋势曲线来看，总收益随煤炭收益线性增长。这与国民经济的持续增长，能源需求总量持续增加是一致的。

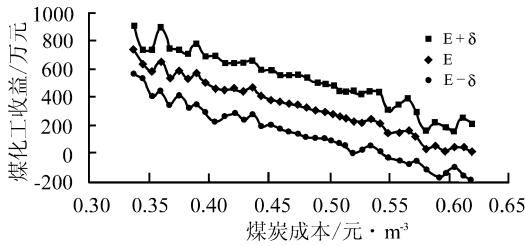


图 8 煤炭成本对煤化工收益影响趋势图  
Fig.8 Relationship between coal-chemical profit and coal cost

图 9 中，煤炭收益对集团总收益而言是持续的正向影响。这是由目前煤炭产业在集团的基础性地位和所占的比重所决定的。正是这样，煤炭产业抗风险的能力比较弱，这是大力发展循环经济，改善收益模式单一的原因之一。

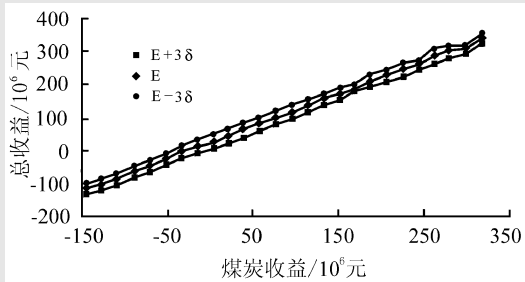


图 9 煤炭收益对总收益影响趋势图  
Fig.9 Relationship between total profit and coal mining profit

2) 煤化工收益与总收益关系 (图 10) 煤化工子系统仿真结果显示，收益区间为 -2 476 959.50~ 8 737 009.45 元，收益均值为 3 193 290.34元，而目前收益规模为：2 468 461.44 元，比收益均值低 29%。从收益的影响因素来看，主要是煤炭、煤气价格和甲醇价格。煤气作为清洁能源市场供不应求，甲醇作为有机化工的基础性原材料前景十分广阔。同时，销售煤气带来的收益和销售甲醇的收益会影响企业决定拿多少煤气生产甲醇，从而确定供应市场煤气的数量。煤化工收益对总收益的趋势曲线可以看出，总收益随煤气收益的增加而减少，这主要是由于目前煤气化厂在负债经营所致。

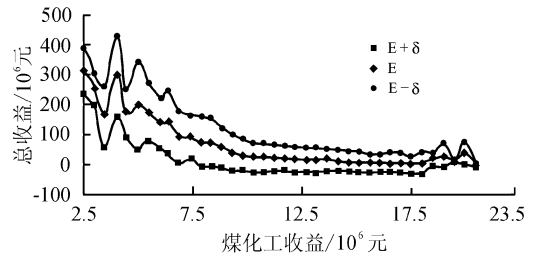


图 10 煤化工收益对总收益影响趋势图  
Fig.10 Relationship between total profit and coal-chemical profit

## 5 结论

根据 YM 集团循环经济战略规划分析，循环经济的规划为做大做强煤炭主业，依托区域资源优势，沿着煤电、煤铝、煤化工、煤建材四条产业链进行拓展，同时在矿区内大力发展农林养殖业和第三产业，改善区域环境和转移富裕劳动力，实现区域的可持续发展。

以上仿真分析分析，煤炭业作为 YM 集团的支柱产业，其风险较大，需要发展循环经济的产业链抵御风险，总系统盈利可能性为 84.5%，要大于煤炭主业的盈利可能性 55.6%，说明 YM 集团在发展煤化工、氧化铝、矽石煤泥发电等产业链取得经济效益的同时，转嫁了部分风险，增强了社会稳定和区域的可持续发展，同时还得出水泥和煤化工对总系统收益成负相关关系。

循环经济强调的是经济系统整体的最优，而不是强调单个经济链条的最清洁和最高效。譬如发电系统的盈利可能性偏低，但发电产业却为其余产业提供了能源，虽然水泥子系统的盈利可能性只有 7.36%，却实现物质能源的循环利用。

对各个子系统和总系统的敏感性分析，得出影响其收益的关键因素，例如：对煤炭子系统而言，煤炭价格、工资、其他支出等是影响煤炭收益的关键因素；并对总系统的收益进行敏感分析，得出煤炭价格和煤气价格是关键因素。

YM 集团循环经济模式系统仿真案例研究说明系统仿真方法适用于分析大型煤炭生产企业循环经济发展模式，能够针对每条产业链，分析影响其发展的关键变量以及未来循环经济制约其发展关键因素。在仿真模型中体现各产业链及其加工主体、加工工艺、投入、主要产品、废弃物等与循环经济子系统相关的主要影响因素，构成各个子系统的共性

特征，在此基础上构建的系统数量结构关系可以说明循环经济各个部分的影响程度。该方法对选择循环经济产业链、生产工艺以及生产规模是一种有效的决策分析工具。

#### 参考文献

- [1] 贾晓冬. 浅谈循环经济在煤炭工业中的发展模式[J]. 山西能源与节能, 2005, 2(37): 28~29
- [2] 林积泉, 王伯铎, 马俊杰, 等. 煤炭工业企业循环经济产业链设计与环境效益研究[J]. 环境保护, 2005, 4: 55~58
- [3] 刘红艳. 南非萨索尔公司煤基产业链对中国煤炭企业的启示[J]. 煤矿现代化, 2002, 2(47): 7~9
- [4] Neumann J V. Theory of Self-reproducing Automata[M].

Champaign: University of Illinois Press, 1966

- [5] 应尚军, 魏一鸣, 范英, 等. 基于元胞自动机的股票市场投资行为模拟[J]. 系统工程学报, 2001, 10(5): 383~388
- [6] 吴大艳, 谭惠丽, 孔令江, 等. 三车道元胞自动机交通流模型研究[J]. 系统工程学报. 2005, 20(4): 393~397
- [7] 林德明, 金鸿章, 靳相伟. 基于元胞自动机的复杂系统脆性仿真[J]. 系统工程学报. 2005, 20(4): 167~171
- [8] 詹姆斯·R·埃文斯, 维·L·奥尔森[美]. 模拟与风险分析[M]. 洪锡熙译. 上海: 上海人民出版社, 2004, 48~82

## System Simulation Method for Circular Economy Pattern ——Case Study from Coal Industry

Sun Jingchun, Xi Youmin, Wang Jun, Fu Yongshui

(School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[Abstract]** According to classification research on circular economy patterns, it is revealed that no scientific method has been applied on the basis of circular economy pattern to analyze quantitative relations between factors affecting main industry and industry chains. System simulation method is a better choice for solving such kind of problem. Thus, this article proposes a set of simulation method for analyzing large complex system such as coal industry, and also points out range of application and limitations. In the case study of YM Group, simulation method is used to make detailed analyses of its circular economy pattern, and results show that developing circular economy is beneficial to YM Group. Moreover, this study also illustrates the applicability of simulation method in analyzing circular economy pattern in coal industry.

**[Key words]** coal industry; circular economy pattern; system simulation method