

# 我国硫资源利用的动态分析

温诚锋<sup>1</sup>, 梁日忠<sup>1,2</sup>

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200072; 2. 上海大学循环经济研究院, 上海 200072)

**摘要:** 运用指数平滑预测方法建立了我国硫资源产业系统的动态分析模型, 对现状条件下硫资源产业系统未来发展趋势以及循环经济发展方案实施效果进行模拟与分析。此外, 对不同政策力度下多循环经济发展方案的综合实施效果进行优化, 得出了各方案在不同实施力度下的最优综合实施方案。分析结论将为实现我国硫资源产业可持续发展提供决策思路和政策依据。

**关键词:** 硫资源; 动态分析; 分析模型; 指数平滑预测

中图分类号: X24

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2007)08-0059-04

## Dynamic analysis on utilization of sulfur resources in China

WEN Cheng-feng<sup>1</sup>, LIANG Ri-zhong<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Institute of Circulation Economy, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** According to some views of scientific development and circular economy and eco-industry, a dynamic analysis of utilization of sulfur resources in China has been accomplished. The dynamic analytic models of China's sulfur resource industry are obtained using the exponential smoothing forecast method. The present status and the results of applying the circular economic development schemes in the system are simulated and analyzed by those dynamic models. Finally, the results of several circular economic development schemes used in different policy support are optimized, and the optimization-combined scheme is obtained. All those conclusions give important directions for China's sulfur resource industry to realize the sustainable development.

**Key words:** sulfur resources; dynamic analysis; analysis model; exponential smoothing forecast

硫是重要的难以再生的非金属矿资源, 不仅在化学工业中具有重要的应用价值, 而且在农业、医药等领域也扮演着重要的角色。我国硫资源产业目前存在过于依赖进口硫资源、硫矿采富弃贫、硫资源利用不充分、含硫气体排放污染严重等问题<sup>[1]</sup>。同时更为严峻的是, 硫资源利用后难以回收, 其消耗将造成严重的资源流失和环境问题。随着科学技术的进步和可持续发展观念日益深入人心, 一些先进技术策略的实施为我们提供了有效合理利用有限硫资源, 缓解资源流失和环境污染现状的可行途径<sup>[2]</sup>。

## 1 我国硫资源产业系统动态分析模型的建立

指数平滑法是时间序列预测法中经常使用的一种方法<sup>[3]</sup>。该方法给近期的观察值以较大的权数, 给远期的实际值以较小的权数, 减少了某些随机影响, 使预测值既能较多地反映最新的信息, 又能反映

大量的历史资料的信息, 从而使预测结果更符合实际情况, 在许多领域得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>。运用指数平滑预测方法来建立我国硫资源产业系统的动态分析模型, 可以体现出产业系统环节中的主要因素随时间延续的发展变化状况, 同时展现出各因素之间的动态变化和相互影响。

由于我国硫资源产业系统是一个包含自然和人为因素的复杂工业系统, 其包含多个环节, 变量众多, 结构复杂<sup>[5]</sup>。为了能够建立简洁、有效的动态分析模型, 首先构建动态模型框架结构图(见图 1), 结构图中的相关元素是我国硫资源产业系统各环节中未来发展的主要因素。

收集和整理我国硫资源产业系统中主要相关变量 2000—2005 年的统计数据(数据均来自《中国化工年鉴》和中国矿业网、中国化工信息网等或者通过相关计算间接获得)。根据近几年产业中相关

收稿日期: 2007-03-20; 修回日期: 2007-06-11

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(No. 2003034171)

作者简介: 温诚锋(1983-), 男, 硕士生, 从事生态工业及环境工程方面研究; 梁日忠(1965-), 男, 博士, 副教授, 从事循环经济、生态工业以及化学工程方面研究, 通讯联系人, liangrz@staff.shu.edu.cn。

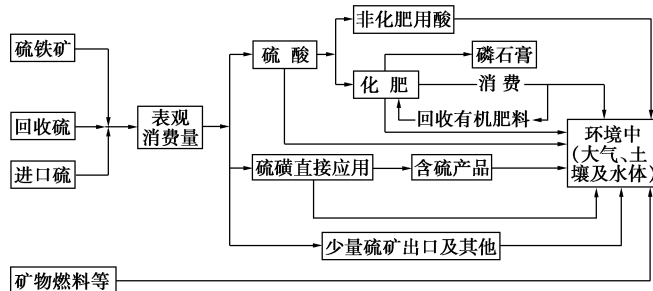


图 1 动态模型框架结构图

数据所呈现的变化趋势和产业发展的变化特点, 本文将采用三次指数平滑预测法来建立相关因素的动态预测模型。利用 EXCEL、MATLAB 及 SPSS 等统计计算工具, 对产业系统中相关量的时间数列进行三次指数平滑计算, 求出模型预测方程(由于因素较多, 本文将不逐一阐述各个模型建立的过程, 结果见动态分析部分)。

需要特别指出说明的是, 指数平滑建立的模型并非机理模型, 建立模型的统计数据的波动规律也是千变万化的, 加上社会经济现象发展变化的复杂性, 因此利用模型计算得到的预测值特别是较远期的数据, 与实际值之间的相对误差将难以估计, 所以得到的这些数值仅用来反映现状条件下以及实施方案后的系统未来发展的趋势, 而实际参考价值并不大。

## 2 我国硫资源利用的动态分析

### 2.1 现状条件下产业系统发展动态分析

根据硫资源产业全生命周期的特点, 将硫资源产业系统分成硫的来源、硫的加工和硫的排放 3 个环节。在保持产业系统发展现状的前提下, 对系统各个环节的未来发展进行情景分析, 各环节的主要因素变化趋势见图 2。该分析的前提是各种相关因素保持目前发展趋势不变。

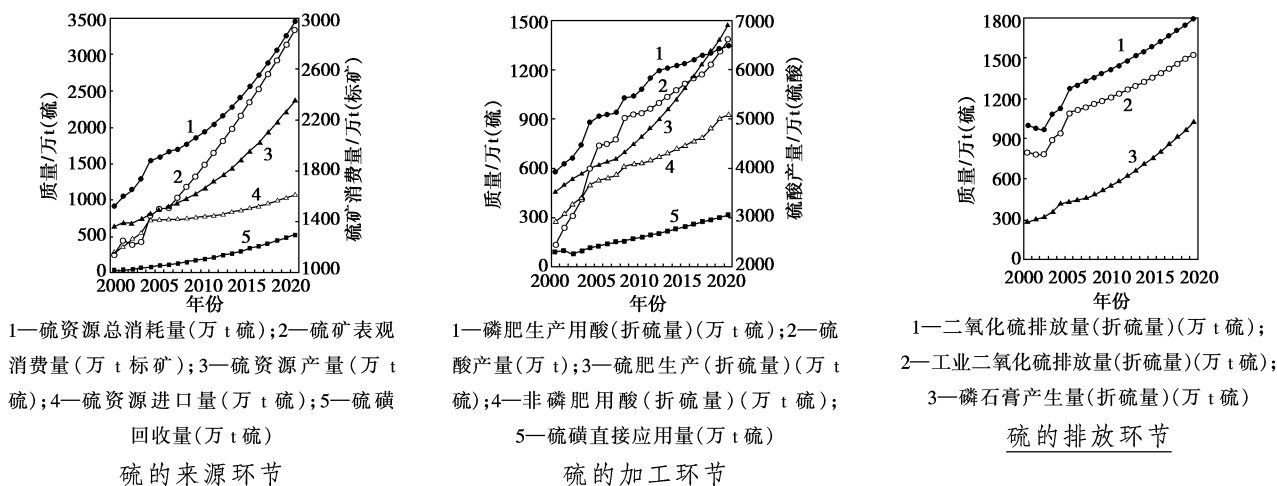


图 2 硫的各环节中主要因素变化趋势

由图 2 可知, 在保持系统发展现状的前提下, 随着时间延长, 我国对硫资源的需求量以及各加工产品的产量都将维持较快的上升趋势, 其中硫资源总消耗量、硫磺回收量、硫酸产量、硫肥产量、磷肥以及非磷肥用酸量增长速度较快, 硫资源进口量在经历大幅度增加后保持稳定持续上升, 硫矿表观消费量有所波动但总体趋势上升。磷石膏产生量和二氧化硫排放量均保持逐年增长的趋势, 大量磷石膏的产生不仅占用土地, 而且对环境状况影响巨大, 而进入大气中的二氧化硫量持续增加, 将会远远超出大气环境容量, 由此形成的酸雨将对生态环境和人类造成严重的危害。

耗, 同时也给环境带来巨大压力, 特别是对大气环境造成严重破坏。因此, 要实现硫资源产业的可持续发展和保护生态环境, 必须改变现状发展趋势, 采取相应的有效措施, 使硫资源得到更为合理、有效的利用。

### 2.2 循环经济发展方案的实施效果动态分析

根据技术成熟度、推广难度、经济效益、环境效益和社会效益等因素<sup>[6]</sup>, 同时考虑方案实施的时间延续性, 合理假设构建以下 5 个循环经济发展实施方案。

综上所述, 在现状发展趋势下, 含硫产品的产量和消费量快速增长将导致我国有限的硫资源急速消

(1) 采用磷石膏制硫酸联产水泥, 减少对土地的占用和地表水的污染, 减少硫矿开采量和进口硫资源量, 提高硫资源利用效率。假设该方案从 2005 年开始实施(磷石膏中的硫利用率为 85%), 2005 年产生的磷石膏总量的 5% 用于生产硫酸, 依次每年产

生的磷石膏用于生产硫酸的比例以5%递增,20年后每年产生的磷石膏将全部用于生产硫酸。

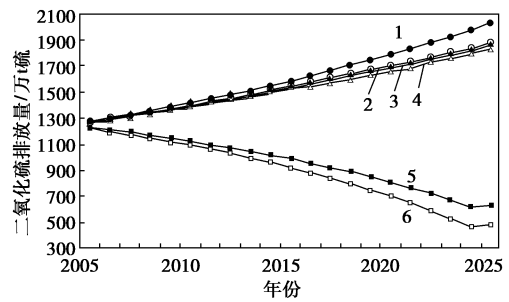
(2)采用智能缓释化肥(肥效由目前的25%提高至50%),提高硫肥使用效率,节约硫肥生产所需要的硫资源量,减少进口硫资源量和硫矿开采量。假设方案从2005年开始实施,2005年将硫肥施用总量的5%采用智能缓释化肥替代,每年替代量以5%递增,20年后将施用硫肥全部采用智能缓释化肥替代。

(3)回收人畜粪便生产有机硫肥(人畜粪便中硫资源回收率为80%),可以缓解面源污染,节约硫肥生产所需要的硫资源量,减少进口硫资源量和硫矿开采量。假设方案从2005年开始实施,2005年实现对人畜粪便总量的25%进行回收硫资源用来生产有机硫肥,10年内实现对人畜粪便总量的60%进行回收硫,20年内实现对产生的全部人畜粪便进行回收硫。

(4)对含硫煤燃烧前脱硫回收硫磺(脱硫回收率为80%),可以缓解对大气的污染,减少硫矿开采量和进口硫资源量。假设方案从2005年开始实施,2005年实现燃烧使用煤量的5%进行脱硫,依次每年对燃烧使用煤量以5%递增进行脱硫,20年内可实现对全部使用煤在燃烧前进行脱硫。

(5)对工业烟气脱硫(脱硫回收效率为80%),将回收的硫资源作为生产硫酸等的原料,可以缓解对大气的污染,减少硫矿开采量和进口硫资源量。假设方案从2005年开始实施,2005年实现工业烟气排放总量的5%进行脱硫回收利用,依次每年对工业排放烟气量以5%递增进行脱硫,20年内可实现对全部排放的工业烟气进行脱硫回收利用。

利用建立的我国硫资源产业系统的动态分析模型,对上述5个方案实施后的未来发展情景进行模拟与分析,并与在现状条件下不采取任何措施的产业系统发展趋势进行对比和分析,结果如图3、图4



1—未实施方案;2—实施方案1;3—实施方案2;4—实施方案3;  
5—实施方案4;6—实施方案5

图4 二氧化硫排放量变化趋势对比

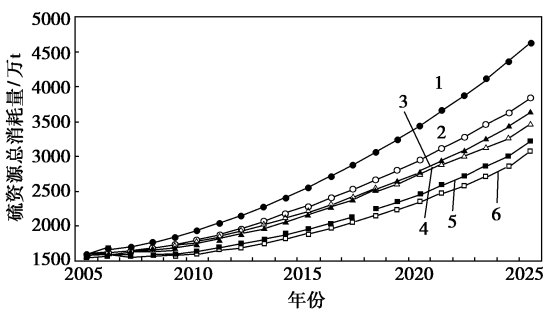
所示。分析的前提是假设与方案有关的因素按照方案中设定的规律变化,而其他相关因素则保持目前的发展趋势不变。

由图3和图4可以看出,实施磷石膏制硫酸联产水泥方案,可以对磷石膏中的硫资源充分利用,提高硫资源利用效率,明显地减少硫资源总消耗量,但对于二氧化硫排放量降低不明显;实施智能缓释化肥的方案可明显提高硫肥利用效率,减少硫肥的产量,节约肥料生产所需要的硫资源量,但对于降低二氧化硫排放量不明显;实施回收人畜粪便生产有机硫肥的方案可明显减少普通硫肥的生产量,节约硫肥生产所需的硫资源量,但对于降低二氧化硫排放量不明显;实施对含硫煤燃烧前脱硫回收硫磺的方案可以明显地减少二氧化硫的排放量,缓解对大气的污染,同时回收硫磺的再利用将明显地减少硫资源的总消耗量;实施对工业烟气脱硫的方案可以明显地减少二氧化硫的排放量,缓解对大气的污染,同时将回收的硫资源作为生产原料将明显减少硫资源的总消耗量。

### 2.3 不同政策力度下各方案综合实施效果优化

由2.2中分析可知,各个方案的实施对实现我国硫资源产业可持续发展起到了一定的作用,但实际上单独实施单个方案受推广程度、政策力度、成本投入等因素的制约,难以达到预期分析的效果。因此,需要全面、大力、综合实施循环经济发展方案。下面将对不同政策力度下多循环经济发展方案的综合实施效果进行优化。

根据目前我国硫资源产业的现状,笔者认为要想实现我国硫资源产业的可持续发展,首先必须解决资源和环境的问题。因此,目标函数确定遵循的原则是通过不同政策力度下多方案的综合实施效果优化,以达到21年中(2005—2025年)二氧化硫总排放量的控制在大气环境容量允许的范围内,同时



1—未实施方案;2—实施方案3;3—实施方案2;4—实施方案1;  
5—实施方案4;6—实施方案5

图3 硫资源总消耗量变化趋势对比

硫资源总消耗量最小。

目标函数:

$$P_{\text{SO}_2} = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{21} \text{SLD}_i \cdot \text{NSO}_{ij}}{21} \leq 700 \quad (2005-2025 \text{ 年年平均}$$

二氧化硫排放量, 万 t 硫)[注: 当全国的二氧化硫年排放量控制在 700 万 t(折硫计算)以内时, 我国酸雨污染局面才能被扭转。]

$$M_s = \min \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{21} \text{SLD}_i \cdot \text{NSR}_{ij} \quad (2005-2025 \text{ 年硫资源总消耗量, 万 t 硫})$$

约束条件:  $0 < \text{SLD}_4 < \text{SLD}_1 < \text{SLD}_3 < \text{SLD}_5 < \text{SLD}_2 < 100\%$   
(根据各方案推广实施的难易程度)

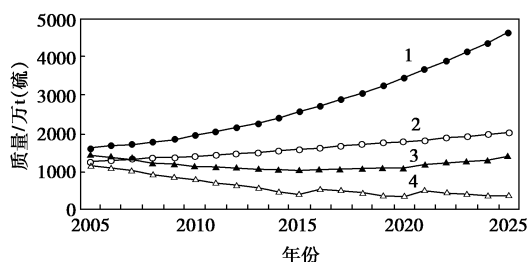
其中:  $i = 1, \dots, 5$  分别表示的 2.2 中构建的方案, 方案 1 为磷石膏制硫酸联产水泥, 方案 2 为智能缓释化肥, 方案 3 为人畜粪便生产有机硫肥, 方案 4 为对含硫煤燃烧前进行脱硫, 方案 5 为工业烟气脱硫;  $j = 1, \dots, 21$  分别表示从 2005 年起第  $j$  年;  $\text{SLD}_i$  表示方案  $i$  的实施力度;  $\text{NSR}_{ij}$  表示方案  $i$  实施后自 2005 年起第  $j$  年的硫资源消耗量, 万 t 硫;  $\text{NSO}_{ij}$  表示方案  $i$  实施后自 2005 年起第  $j$  年的二氧化硫排放量, 万 t 硫。

根据构建的目标函数, 本文采用目标规划的多阶段算法<sup>[7]</sup>来求解, 得出 5 项循环经济发展方案的优化综合实施方案。优化结果见表 1。

表 1 综合方案优化结果

项目	SLD <sub>1</sub> /%	SLD <sub>2</sub> /%	SLD <sub>3</sub> /%	SLD <sub>4</sub> /%	SLD <sub>5</sub> /%	实施方案		未实施方案	
						$P_{\text{SO}_2}$ /万 t 硫	$M_s$ /万 t 硫	$P_{\text{SO}_2}$ /万 t 硫	$M_s$ /万 t 硫
结果	70	95	75	60	90	621	23640	1607	57930

各循环经济发展方案在不同的政策实施力度下综合实施后, 硫资源总消耗量和二氧化硫排放量变化趋势如图 5 所示。



1—未实施方案硫资源总消耗量; 2—未实施方案二氧化硫排放量; 3—实施综合方案硫资源总消耗量; 4—实施综合方案二氧化硫排放量

图 5 硫资源总消耗量和二氧化硫排放量的变化趋势对比

由分析结果可得, 通过对不同政策实施力度下多循环经济发展方案的综合实施效果优化, 可以实现将二氧化硫排放量控制在大气环境容量之内时, 硫资源总的消耗量最小。

### 3 结论

运用指数平滑预测方法建立我国硫资源产业系统的动态分析模型, 利用模型对现状条件下产业系统未来发展趋势以及循环经济发展方案实施效果进行模拟与分析, 得到以下结论。

(1) 在现状发展趋势下, 含硫产品的产量和消费

量的快速增长将导致我国有限的硫资源急速消耗, 同时也给环境带来巨大压力, 特别是对大气环境造成严重破坏。

(2) 实施对含硫煤燃烧前脱硫回收硫磺、对工业烟气脱硫回收硫资源再利用等方案对改善我国硫资源产业系统可持续发展程度效果良好, 不仅能显著地节约硫资源的相对消耗量, 而且能明显改善大气污染程度。

(3) 要实现我国硫资源产业的可持续发展, 必须全面、大力、综合推进循环经济技术策略的实施。通过对不同政策实施力度下多循环经济发展方案的综合实施效果的优化, 可以实现在二氧化硫排放量控制在大气环境容量之内时, 硫资源总的消耗量最小。

### 参考文献

- [1] 盛叶彬. 我国硫资源利用趋势及相应对策[J]. 化工矿物与加工, 2004(11): 1-4.
- [2] 冯之浚. 循环经济导论[M]. 北京: 人民出版社, 2004: 62-64.
- [3] 肖庭延. 实用预测技术与应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.
- [4] 张卫中, 尹光志, 唐建新, 等. 指数平滑技术在重庆煤炭需求预测中的应用[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(1): 110-111.
- [5] 温诚锋, 梁日忠, 赵艳龙. 我国硫资源“储备—来源—加工—消费”过程的工业代谢研究[J]. 化工矿物与加工, 2006, 35(12): 1-4.
- [6] 刘征, 胡山鹰, 陈定江, 等. 我国磷资源产业系统动态模拟与分析[J]. 计算机与应用化学, 2006, 23(2): 99-100.
- [7] 崔巍. 基于动态投入产出分析的煤炭产业多目标优化模型研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2003. ■