

# 基于SD方法的苏州市 经济—能源—环境系统模拟研究

周婧, 贺晟晨, 王远, 高倩, 陆根法

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏南京 210093)

**摘要:**对于经济—能源—环境系统的研究是当前可持续发展研究面临的一个关键问题。利用系统动力学(SD)的理论和方法,建立了苏州市经济—能源—环境系统的SD模型,并把能源结构和环保投资作为调控参数,设计了四种发展模式仿真运行。研究表明,通过能源结构的调整,只需要增加区外能源的购进,便可促使环境质量明显改善,进而实现社会经济发展的良性循环。在此基础上,提出了促进苏州市经济、能源、环境协调发展的发展模式和建议。

**关键词:**系统动力学;经济—能源—环境系统;能源结构;模拟;苏州

中图分类号:N94;X32 文献标识码:A 文章编号:1006-8759(2011)02-0010-07

## SYSTEM DYNAMICS SIMULATION OF THE ECONOMY- ENERGY-ENVIRONMENT SYSTEM IN SUZHOU

ZHOU Jing, HE Sheng-chen, WANG Yuan<sup>1</sup>, GAO Qian, LU Gen-fa

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the  
Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:**The research on the Economy-Energy-Environment system is becoming more and more important in the field of sustainable development nowadays. By the system dynamics (SD) theory and method, this paper establishes the Economy-Energy-Environment SD model of Suzhou, setting the energy structure and the environmental investment as the adjusting parameters, and designs four developing modes to simulate. Results show that, with the adjustment of the energy structure, buying more energy from the outside of the region is effective to achieve the obvious changes of environment, to realize the virtuous cycle of the society and economy. This paper also presents developing mode and suggestions that promoting the economy, energy and environment developing in harmony are submitted for Suzhou.

**Keywords:**system dynamics; Economy-Energy-Environment system; energy structure; simulation; Suzhou

## 0 引言

收稿日期:2010-12-25

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划资助(项目编号:  
2006BAC02A18);国家自然科学基金资助(项目编号:40701063)

第一作者简介:周婧(1987-),女,湖北荆州人,硕士研究生,主要  
从事环境规划与管理研究。

自改革开放以来,在经济保持高速增长的同时,我国的能源消费也在大幅度攀升,同时带来的环境污染问题也日益恶化。因此,能源和环境对经济长期增长的约束问题已成为当前人们关注的一个焦点。2006年国家“十一五”规划纲要中,首次明确提出了在5年内实现单位GDP能耗降低

20%、主要污染物的排放总量减少 10% 的约束性目标,显示了国家节能减排的决心<sup>[1]</sup>。但在“十一五”规划的开局之年—2006 年上述节能降耗和污染物减排目标均未能实现。这表明我国目前尚未建立起有效的经济—能源—环境协调发展机制,因而针对这一问题的实证研究,具有重要的理论价值和现实意义。

## 1 经济—能源—环境系统研究现状

能源是人类生存和发展的重要物质基础,也是当今国际政治、经济、军事、外交关注的焦点<sup>[2]</sup>。如何有效地生产和使用能源,保证经济的可持续发展和人类生存环境的不断改善,一直是世界各国决策者和研究者共同关心的热门话题。20 世纪 70 年代以来,诞生了许多能源—经济模型,用来分析能源消费和经济增长之间的因果关系。20 世纪 80 年代起,随着人们对这些模型研究的不断深入,以及全世界范围内对环境问题的日益关注,研究者们开始考虑将环境要素引入能源和经济二元体系进行研究,并促使一系列的经济—能源—环境三元模型的诞生。这些模型基本可以分为“自上而下”和“自下而上”两类<sup>[3]</sup>。前者一般采用经济学方法,从经济发展对部门的影响出发,给出宏观经济变化引起的能源系统供求关系变化,能够较好地描述国民经济各部门相互作用,以及资源和经济之间的关系,但对资源生产和利用技术描述比较抽象,资源消耗变化原因不够清晰,如王灿等建立的针对 CO<sub>2</sub> 减排的中国—经济—环境能源动态 CGE 模型<sup>[4]</sup>。后者强调工程学方法,给出了以最底层单位的技术经济微观变化引起的综合效应和对经济的影响,对各种技术、工艺流程有比较详细的描述,在评估资源生产技术的替代效应上有更高的可信度,清晰地说明了资源消耗变化的机理,但忽略对一般经济和非技术市场要素的反馈。比较典型的是陈文颖、吴宗鑫建立的中国 MARKAL 模型,对 1995~2050 年间中国能源消费、构成及污染排放进行了研究<sup>[5]</sup>。随着研究的发展,也出现了一些将这两种方法进行融合的模式,但相应的,此类模型也向着复杂化、巨型化的方向发展,对研究人员提出了更高的要求<sup>[6-9]</sup>。

值得注意的是,虽然上述各种模型都强调了能源系统的重要地位,但针对能源结构与经济发展、环境污染间关系的研究目前仍然较为少见,且

大多数停留在总结归纳或定性分析的阶段。也有学者运用计量经济学的方法,对能源结构、能源消费、GDP 等要素间的关系进行了分析<sup>[10-11]</sup>。但总体来说,这些研究都缺乏对能源结构的变化所导致的经济、环境效益未来发展趋势做出的进一步预测和判断。因此,本文将利用系统动力学方法,通过调整能源结构来探寻经济、能源、环境三者的协调发展模式,为相关政策的制定提供参考意见,以促进我国目前以煤炭为主的能源结构的改善。

系统动力学(System Dynamics,SD)创立于 20 世纪 50 年代中期,是一门分析研究信息反馈系统的学科,也是一门认识系统问题和解决系统问题交叉的综合性学科。它是一种以反馈控制理论为基础,以计算机仿真技术为辅助手段的研究复杂社会经济系统的定量分析方法<sup>[12]</sup>。系统动力学模型强调结构的描述,擅长处理具有非线性和时变现象的系统问题,并能对其进行长期、动态、战略性的定量仿真分析与研究;能够明确表现系统内部及系统外部因素之间的相互关系;能够对系统结构和动力发展及其趋势进行判读;能够对系统行为进行动力的仿真,以观察系统在不同的组织状态或不同的政策等控制因素输入时所表现的行为和趋势。显然,系统动力学的以上诸多优势适合于经济、能源与环境三者间关系分析中问题范围广泛、关系复杂、影响因素众多等特点,可以充分运用于揭示区域经济增长、能源消费及环境保护间协调发展机制的研究。但运用 SD 方法综合研究经济—能源—环境系统的文献尚不多见<sup>[13-17]</sup>,且未发现针对能源结构变化所作的研究。因此,本文以系统动力学方法为基础,以苏州市为实例进行研究,通过建立 SD 模型并模拟预测,为苏州市可持续发展提供政策建议。

## 2 实证研究

### 2.1 苏州概况

苏州市位于长江三角洲地理中心,全市面积 8 488 km<sup>2</sup>,其中市区面积 1 650 km<sup>2</sup>,下辖张家港市、常熟市、太仓市、昆山市及吴江市。苏州市历史悠久、经济发达,作为以“苏南模式”快速发展的典型城市,2006 年国内生产总值 4 820.26 亿元人民币,人均国内生产总值为 78 236 元,在国内名列前茅。

### 2.2 因果反馈分析

系统动力学模型最初的建立,关键在于立足现实,分析系统的基本结构。苏州市近年来通过积极的招商引资,引进国外资本和先进技术,实现了工业实力的迅速增强,进而带动一产和三产的发展。2006年苏州市工业产值占GDP比重达61.79%,这充分说明了工业在苏州经济的重要地位。考虑到苏州市总排污量的70%来自工业排污,剩余部分主要是生活废弃物,本模型以工业产值作为联系经济、能源和环境三大子系统的纽带。以经济系统为核心,通过工业产值模拟计算能源消费和污染排放(化学需氧量,COD;二氧化硫,SO<sub>2</sub>;工业固废),进而对整个模型进行耦合分析。图1为本模型因果关系图。

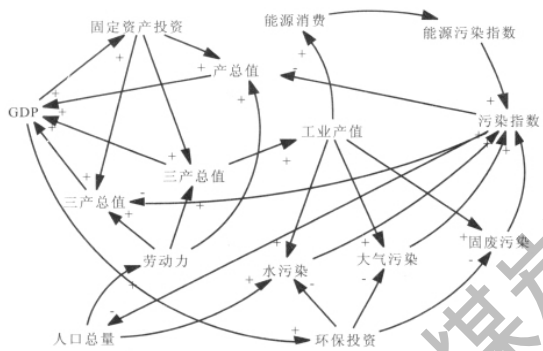


图1 苏州市经济—能源—环境系统因果关系图

### 2.3 各子系统流图

#### 2.3.1 经济子系统

经济子系统在本模型中处于核心地位。考虑

到苏州市固定资产投资率较高的实际情况,将一产固定资产总额、二产固定资产总额、三产固定资产总额及总人口设定为水平变量,其存量分别由相应的固定资产增长量和人口增长量决定;再借助Cobb-Douglass(CD)生产函数,把资金作为内部循环作用因素,将劳动力作为外部投入要素,用黑箱化方法来表示投入与产出的转换机制,其公式可以表示为:

$$Y=AL^{\alpha}K^{\beta} \quad (1)$$

其中Y为分别第一、第二和第三产业产出, $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为三次产出的劳动力和资金弹性系数,A为广义科技进步因子,分别通过回归拟合予以确定。

需要说明的是,由于自上世纪90年代以来,苏州市一产劳动力一直逐步减少,直接套用道格拉斯函数会出现劳动力与生产总值负相关的状况,因此在模型中一产产值只利用一产固定资产投资得出,而不与劳动力相连。分别求得三产产值后,相加即得苏州市GDP。另设辅助变量工业产值占二产比例,将二产产值与工业产值相连,进而影响到能源子系统与环境子系统。因环境污染程度与农业生产、旅游业、服务业以及人体健康有直接联系,分别利用辅助变量将污染子系统的变量污染指数与一产产值、三产产值及人口增长量相连,以表现其中的动态制约关系。图2为经济子系统流图。

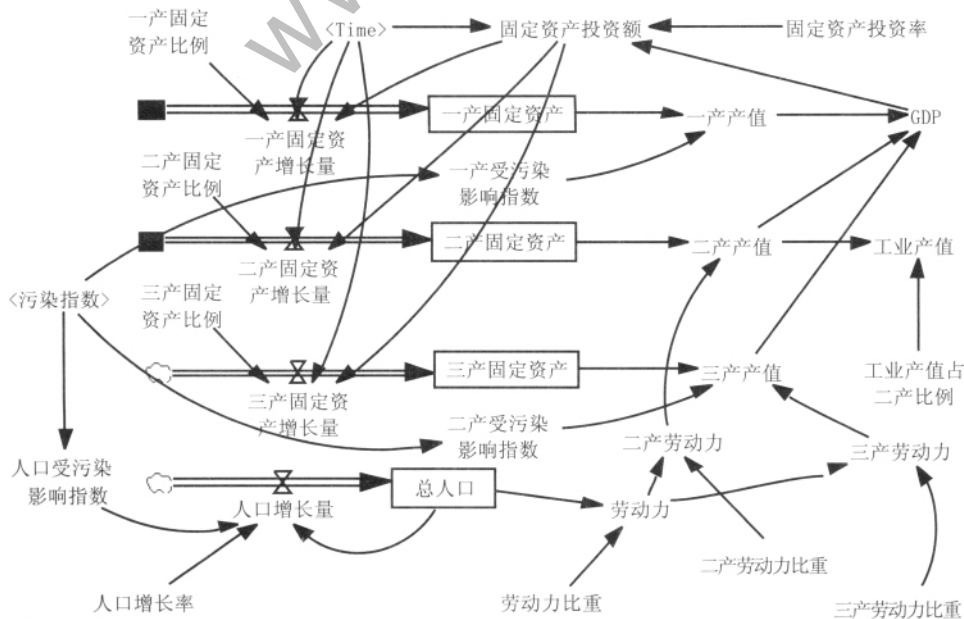


图2 经济子系统流图

### 2.3.2 能源子系统

本模型将苏州市工业生产消费的能源分为煤炭类、石油类、天然气及电力四大类,其中煤炭类包括原煤、洗精煤、其他洗煤和焦炭;石油类包括原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和液化石油气。电力只计算总量,但实际可分为本地火电、外地火电和水电三类,其中水电是清洁能源,对环境无影响;外地火电因为不对苏州市环境产生影响,因此也可算作清洁能源;只有本地火电厂发电对苏州市环境有实际影响,但这部分已计入煤炭类消耗量,所以可以认为本系统全面准确地计算了各种能源的消费对苏州市环境造成的影响。表1为苏州市2002~2006年间工业能源消费总量及各类能源消费比重。

表1 苏州市工业能源消费总量及构成

年份	能源消费总量 /万吨标准煤	占能源消费总量的比重/%			
		煤炭类	石油类	天然气	电力
2002	1 965.75	61.40	7.14	0.62	30.84
2003	2 614.66	63.24	7.54	0.07	29.15
2004	3 410.87	63.49	6.14	0.19	30.18
2005	4 955.78	68.11	4.90	0.81	26.19
2006	4 789.18	68.09	3.34	2.57	26.00

由上表可知,苏州市目前工业生产的主导能源仍然是煤炭,消费比重占60%以上,而清洁能源比重较低,尤其是天然气,还有很大的提升空间。为减轻环境压力,实现可持续发展,苏州市能源结

构的改善具有非常重要的现实意义。考虑到能源消费与污染排放之间关系的复杂性,以及苏州市的实际情况,能源子系统将在整个模型中将起到调整、优化的作用,适当简化模型,以加权的形式来计算煤炭、石油、天然气及电力的消费会对环境造成怎样的影响<sup>[18]</sup>,具体公式如下:

$$\text{能源污染系数} = (\text{电力消费量} * 0 + \text{天然气消费量} * 0.55 + \text{石油类消费量} * 0.79 + \text{煤炭类消费量}) / ((\text{电力消费量} + \text{天然气消费量} + \text{石油类消费量} + \text{煤炭类消费量}) / 0.6738) \quad (2)$$

其中,0.6738为根据加权算法计算出的2002年能源污染系数,这样2003~2020年的计算结果都是相对于2002年的污染系数。在下面的环境子系统中,能源污染系数将用于对整体的污染指数的修正,这样既可以更精确地模拟苏州市环境质量的修正,又能够真实地反映能源结构的变化对环境造成的不同影响。

苏州本地没有煤炭、石油等能源物质的采掘业,各行业生产所需的各类能源物质均从外地购入,且每年的消费量基本与购入量持平,不需要计算储量,因此能源子系统中不设水平变量,煤炭、石油、天然气及电力的消费量均设为辅助变量,每年随工业产值及能源结构的变化而变化。图3为能源子系统流图。

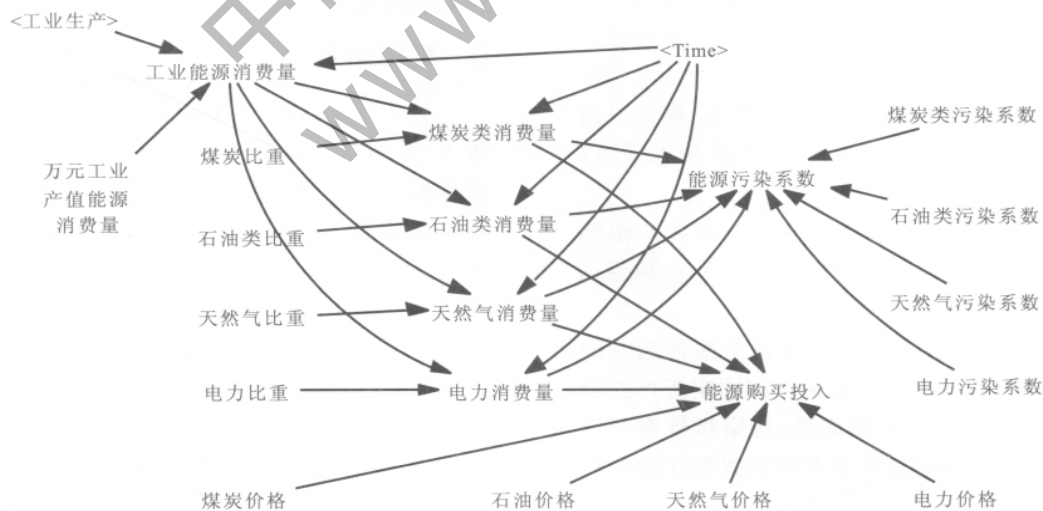


图3 能源子系统流图

### 2.3.3 环境子系统

把COD存量、SO<sub>2</sub>存量及工业固废存量作为水平变量,相应的产生量和处理量作为速率变量。SO<sub>2</sub>、固废的产生量与工业产值相连,而COD产生

量不仅与工业产值相关,还与生活污水量相关;而处理量与相应的污染治理投资相连。为在模型中体现环境污染对社会经济的影响,还需对苏州市环境总体污染水平进行评估。利用相对污染度概

念,首先将 COD 存量、SO<sub>2</sub> 存量和工业固废存量分别除以 2002 年的基准值,再将它们分别赋予一定权重后加合<sup>[9]</sup>,最后乘以能源污染系数,便得到 2002~2020 历年的污染指数,以此结果来表示区

域环境总体污染水平。污染指数进一步影响到环保投资比重及经济子系统的部分变量。图 4 为环境子系统流图。

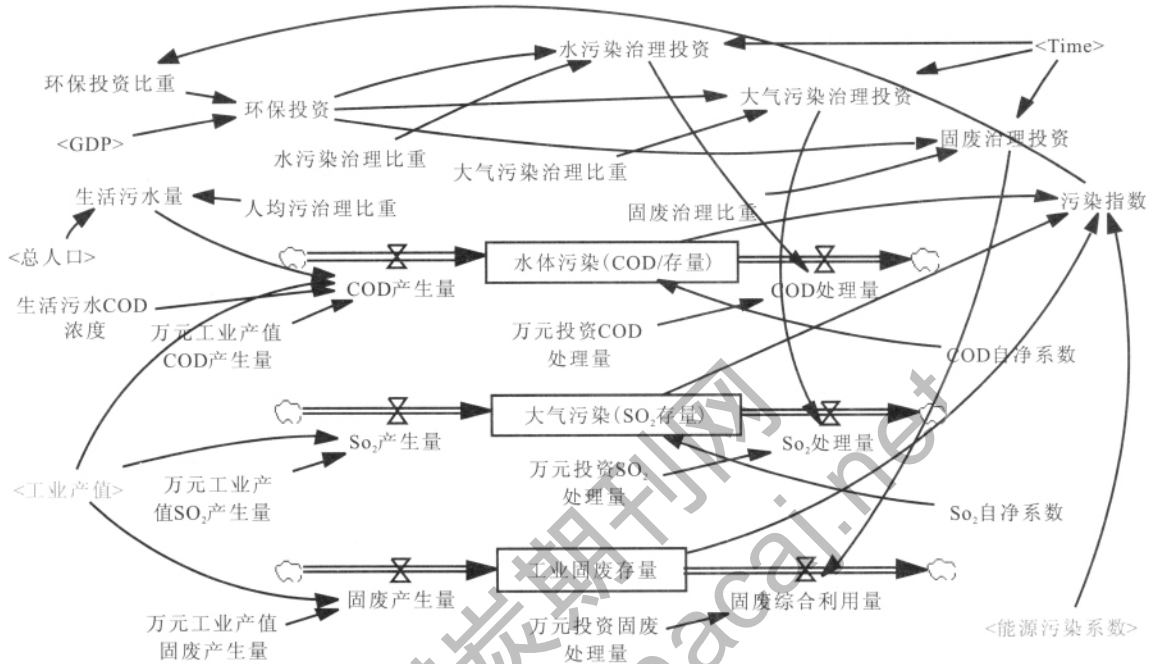


图4 环境子系统流图

### 2.4 系统参数确定

模型系统地域边界为苏州市,时间边界为 2002~2020 年,主要历史数据涉及 1989~2006 年,以 2002 年作为仿真模拟的基年,模型参数通过以下各种方法求得:

- (1)利用历史统计资料作算术平均,如人口增长率、工业产值占二产比例、人均生活污水量,以及各类能源价格等;
- (2)通过道格拉斯函数求算第一产业产出的资金弹性系数,第二、第三产业产出的资金和劳动力弹性系数。
- (3)对于变量间关系不明显或某些需随时间变化的变量用表函数予以定义,如固定资产投资率、劳动力比重、各类能源比重、污染指数对一产产值、三产产值、人口增长率及环保投资比重的影响等。

### 2.5 模型检验

主要选取 2002~2006 年共 5 年的数据进行检验。从历史检验结果看,系统模拟的结果与苏州市经济社会发展实际状况基本一致,相对误差介于-8.23%~4.31%之间,从总体上看,系统模型的行为

较为真实地反映了苏州市经济—能源—环境系统的结构和状态,拟合的精确度较高,可应用于模拟与预测。

## 3 模拟结果与分析

为了比较和探讨将来在不同的能源、环境政策下,苏州市经济发展和环境状况的变化趋势,根据本模型的结构特点和苏州市的实际情况,选择煤炭类比重、石油类比重、天然气比重、电力比重和环保投资比重等五项指标作为调控变量,通过对这些变量不同的取值,来模拟苏州市不同的发展模式。本文假设了四种发展模式:方案一为维持现状模式,方案二为能源结构调整模式,方案三为环境保护模式,方案四为能源、环境协调发展模式。现分别对四种发展模式进行模拟分析如下:

- (1)维持现状模式。保持模型中各参数不变,按苏州市现有发展趋势进行模拟。煤炭类、石油类、天然气和电力的消费比重分别为 68.09%、3.34%、2.57%和 26%,环保投资比重为 2%。预测结果显示,2020 年苏州市 GDP 将达 1.6 万亿元,但增长速度不断放缓,从 2007 年的 15%降至

2013 年的 10.6%, 2020 年降至 3.1%; 由于污染物处理量的增速远低于产生量的增速, 环境污染严重, 到 2020 年污染系数达 70.93, 这将极大地制约苏州市经济社会的健康发展; 人口增长也受到环境污染的影响, 考虑到自然增长率的降低和外来务工人员的减少, 人口总数在 2015 年达到最高值 721.2 万后, 将逐步回落至 625.7 万。显然, 这种忽视环境的发展模式是不可取的, 必然要求采取相应的政策措施, 积极应对环境问题。

(2) 能源结构调整模式。该模式着眼于能源结构的调整, 期望通过工业生产中清洁能源比重的增加, 来减轻环境压力。利用表函数, 将煤炭类、石油类、天然气和电力在 2020 年的消费比重分别调整为 30%、10%、10% 和 50%, 环保投资比重仍维持在 2%。在该种发展模式下, 苏州市 2020 年 GDP 将增加到 2 万亿元, GDP 增长率高于维持现状模式, 2020 年为 5.9%; 由于清洁能源消费量的大幅度增加, 2020 年能源污染系数降低至 0.6484, 污染指数也相应降低至 39.62, 环境质量有明显改善; 人口在 2018 年达最高值 755.4 万后, 2020 年小幅下降到 739.3 万。由此看来, 环境状况仍不容乐观。

由于电力、天然气等清洁能源的消费量大幅增加, 工业生产的能源购买投入也有较大增长, 同以 2020 年作比较, 维持现状模式的能源购买投入是 2.26 亿元, 能源结构调整模式则增加到 4.45 亿元。但相对于能源结构优化带来的环境质量改善、工业产值和 GDP 的显著增长, 这样的代价是可以接受的。

(3) 环境保护模式。该模式强调环保投资的增加对环境质量改善的影响。在保持各产业快速增长、能源消费结构不变的前提下, 利用表函数提高环保投资比重, 将相对于污染指数达 20、60 时对应的环保投资比重分别增加到 4% 和 6%。模型运行结果显示, 2020 年 GDP 将增加至 2.16 万亿元, GDP 增长率为 7.6%; 污染指数进一步降低, 2020 年为 32.68, 说明增大环保投入对环境质量的改善有更直接的影响; 该模式下人口总量保持持续增长, 2020 年达 784 万人。

虽然环境保护模式下苏州市总体环境质量、经济发展趋势和人口增长都略优于能源结构调整模式, 但由于调高了环保投资比重, 该模式下的环保投资有大幅增长, 以 2020 年作比较, 从 400 亿

增长到 1 000 亿, 相较于能源调整模式, 显然后者在相同投入下产出更大, 综合效益更佳。

(4) 能源、环境协调发展模式。综合能源结构调整模式和环境保护模式的相关政策, 本模式在追求经济快速发展的同时, 既注重清洁能源的使用, 将煤炭类、石油类、天然气和电力的消费比重分别调整为 30%、10%、10% 和 50%, 也注重环保投资比重的增加, 将污染指数达 20、60 时对应的环保投资比重分别增加到 4% 和 6%。模拟结果显示, 该模式下 GDP 将保持较快增长, 平均增长率

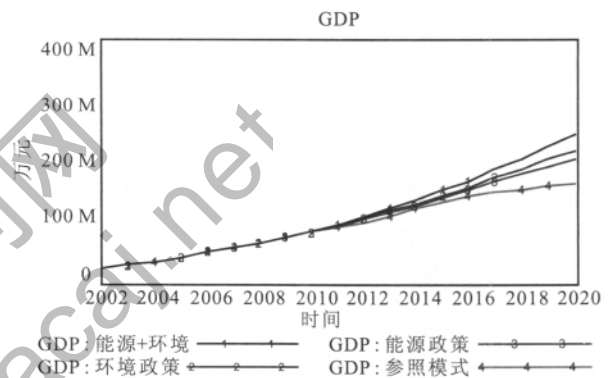


图5 各方案GDP预测曲线

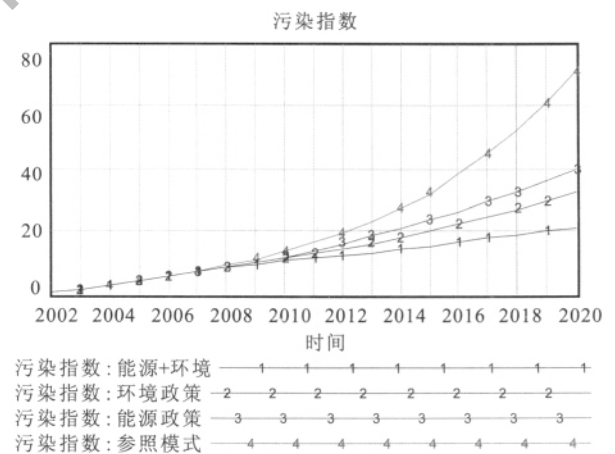


图6 各方案污染指数预测曲线

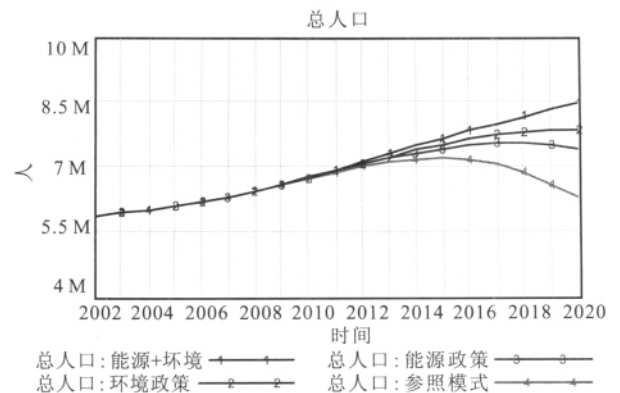


图7 各方案人口预测曲线

达 12.2%,到 2020 年总值达 2.42 万亿元;环境质量有更大改善,污染指数降低到 21.36;人口总数将在 2020 年达 846 万。环保投资比重占 4.06%,能源购买投入为 5.25 亿元。综合看来,本模式是苏州市经济、能源、环境三者协调发展的理想模式。

#### 4 结语

通过对苏州市经济—能源—环境 SD 模型的模拟研究,可以得出以下结论:

(1)应用系统动力学方法模拟经济—能源—环境系统,可以充分发挥其定性研究与定量研究结合、善于描述复杂系统的特性,并可利用相对简单的计算方法,更直观地反映出经济发展、能源消费和环境保护间的关系,给出不同情境下的发展趋势,供决策者参考。可以预见 SD 方法在该领域的研究还将有更广阔的发展空间。

(2)虽然苏州市近年来经济发展迅速,但各种污染物累积所造成的环境问题已不容忽视,再加上苏州是一个能源依赖型城市,能源自给率很低,如果盲目强调经济发展而忽视环境和能源的重要性,将对未来的发展造成极大影响。本文提出的能源、环境协调发展模式,既考虑了国民经济的快速增长,又兼顾了能源结构的优化和生态环境的保护,是苏州市推进新型工业化进程、实现可持续发展的理想模式。

(3)以往针对能源消费的研究,虽然都强调了清洁能源的利用和改善能源结构的重要性,但缺少精确量化的计算,人们往往缺少足够的认识和动力去大力开发清洁能源;本研究通过模型模拟得到,通过能源结构的调整,只需要付出较少的能源购买的投入,增加区外能源的购进,便可换来明显的环境质量改善,进而促使社会经济的健康发展,实现良性循环。因此决策者应把优化能源结构、提高能源利用效率提高到战略决策的高度,才能实现能源、经济、环境的协调发展。

#### 参考文献

[1] ZHA Dong-lan, ZHOU De-qun. The Inequality about Provincial Energy Efficiency and Its Related CO<sub>2</sub> Emission: Decomposition Based on Kaya[J]. Systems Engineering, 2007, 25(11):65~71.  
查冬兰,周德群.地区能源效率与二氧化碳排放的差异性—基于 Kaya 因素分解[J].系统工程,2007,25(11):65~71.  
[2] JIANG Ze-min, Reflections on Energy Issues in China[J]. Journal

of Shanghai Jiaotong University, 2008,42(3):345~359.  
江泽民.对中国能源问题的思考[J].上海交通大学学报,2008,42(3):345~359.  
[3] ZHANG A-ling, ZHENG Huai, HE Jian-kun. Economy, energy, environment model for the Chinese situation system [J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2002,42(12):1616~1620.  
张阿玲,郑淮,何建坤.适合中国国情的经济、能源、环境(3E)模型[J].清华大学学报(自然科学版),2002,42(12):1616~1620.  
[4] WANG Can, CHEN Ji-ning, ZOU Ji. Impact assessment of CO<sub>2</sub> mitigation on China economy based on a CGE model [J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2005,45(12): 1621~1624.  
王灿,陈吉宁,邹骥.基于 CGE 模型的 CO<sub>2</sub> 减排对中国经济的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2005,45(12): 1621~1624.  
[5] CHEN Wen-ying, WU Zong-xin. Study on China's future sustainable energy development strategy using MARKAL model[J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2001,41(12):103~106.  
陈文颖,吴宗鑫.用 MARKAL 模型研究中国未来可持续能源发展战略[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(12):103~106.  
[6] S W Hadley, W Short. Electricity Sector Analysis in the Clean Energy Futures Study [J].Energy Policy, 2001, 29 (14): 1285~1298.  
[7] Leo Schrattenholzer, Patrick Criqui. A Longer-term Outlook on Future Energy Systems[J]. International Journal of Global Energy Issues,2000, 14 (124): 348~373.  
[8] Keywan Riahi, R Alexander Roehrl. Greenhouse Gas Emissions in a Dynamics as Usual Scenario of Economic and Energy Development [J].Technological Forecasting and Social Change, 2000, 63 (223): 175~205.  
[9] LI Ai-jun. Interregional Modeling of Energy-Environment-Economy System in China [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007,37(6):11~17.  
李爱军.我国能源—环境—经济系统的区域间建模[J].数学的实践与认识,2007,37(6):11~17.  
[10] MA Ling, JIANG Da-he. Using Co-integration Analysis to Study Relationships among Energy Consumption, GDP and Air Pollutants Emission in Shanghai [J], Environmental Science and Technology, 2006,29(9):64~73.  
马玲,蒋大和.上海市能耗与 GDP 大气污染的协整关系研究[J].环境科学与技术,2006,29(9):64~73.  
[11] ZHONG Xiao-qing, WU Hao-mei, JI Xiu-jiang, ZHU Hai-yan, YI Xia-jun. The Empirical Study on the Impact of GDP and Energy Structure on Energy Consumption in Guangzhou [J]. China Population, Resource and Environment, 2007,17(1):135~138.  
钟晓青,吴梅,纪秀江,朱海燕,易霞俊.广州市能源消费与 GDP 及能源结构关系的实证研究[J].中国人口·资源与环境,2007,17(1):135~138.  
[12] WANG Qi-fan. System Dynamics[M]. Beijing, Tsinghua University Press, 1994.  
王其藩.系统动力学(修订版)[M].北京,清华大学出版社,1994.  
[13] LU Hai-bo. Study on Sustainable Development of Energy-Economy-Environment System[D]. Tianjin University, 2004

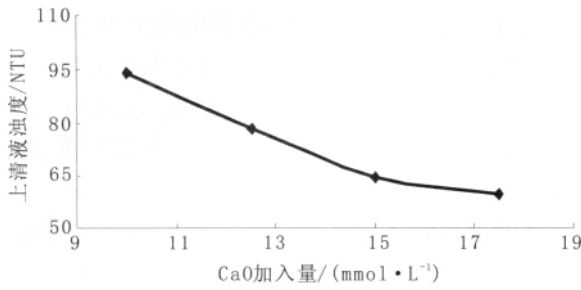


图5 CaO 加入量对絮凝效果的影响

### 4 结论

通过对以上煤泥水的絮凝沉降实验，可以得出以下结论：

(1)絮凝后上层澄清液的浊度随絮凝剂分子的分子量的变化而变化，且分子量越大沉降效果越好。同时阴离子型由于对表面带负电荷的煤泥胶体微粒具有选择絮凝作用，因此效果更好，因此选择阴离子 800 万作为最适宜的絮凝剂。

(2)加入无机电解质后，絮凝效果有了明显的提高。根据凝聚剂的作用效果与易获得性综合考虑，选取 CaO 为最适宜的凝聚剂。

(3)综合实验结果，当阴离子 800 万聚丙烯酰胺加入量为 6.25 ppm, CaO 为 15 mmol/L 时絮凝效果最佳，经济性也最合理。

### 参考文献

[1] 郝凤印,李文林.选煤手册[M].哈尔滨:哈尔滨工业出版社,1993.

[2] 唐海香,庞顶峰,吴大为.动力学因素对煤泥水絮凝沉降效果的影响[J].煤炭工程,2006.8:78-80.

[3] 苟鹏,叶向德,吕永涛等.煤泥水的水质特征及处理技术[J].工业水处理,2009.1.

[4] 韩德馨,任德贻,王延斌等.中国煤岩学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1996.

[5] 李东颖,丁淑芳.煤泥水的絮凝沉降试验研究[J].华北水利水电学院学报,2009 第 30 卷第 3 期:99-102.

[6] 陈建启,纪玉华.絮凝剂在选煤厂煤泥水处理中的合理应用[J].煤炭加工与综合利用,1998.5:15-18.

[7] 王小文,张雁秋.水污染控制工程[M].北京:煤炭工业出版社,2002.8.

[8] 郑劲松.聚丙烯酰胺类絮凝剂的现状与进展[J].山东化工,2009 第 38 卷第 7 期:24-27.

(上接第 16 页)

陆海波.能源-经济-环境系统的可持续发展研究 [D].天津大学,2004.

[14] ZHAI GAO-yue. Simulation of Renewable Energy Exploitation in Rural Area Based on System Dynamics (SD) —A Case Study in Rugao Country in China[D]. Nanjing Agricultural University, 2004

翟高粤.基于系统动力学方法的农村可再生能源开发动态模拟—以江苏如皋为例[D].南京农业大学,2004.

[15] DU Hui-bin, GU Pei-liang. Energy-Economy-Environment Complex System in Regional Development[J]. Journal of Tianjin University (social science), 2005,7(5):362-365.

杜慧滨,顾培亮.区域发展中的能源-经济-环境复杂系统[J].天津大学学报(社会科学版),2005,7(5):362-365.

[16] Fiddaman, T.S. Exploring policy options with a behavioral climate-economy model. System Dynamics Review . 2002, 18 (2): 243~

267.

[17] SAYSSEL, A.K, BARLAS, Y, YENIGUN, O, Environmental sustainability in an agricultural development project: a system dynamics approach. [J]. Environment Management. 2002.64: 247-260.

[18] WANG Li-meng, HE Kang-lin. Analysis on Temporal Variation of Environmental Impact Based on STIRPAT Model—A Case Study of Energy Consumption of China [J]. Journal of Natural Resources, 2006,21(6):862-869.

王立猛,何康林.基于 STIRPAT 模型分析中国环境压力的时间差异 [J].自然资源学报, 2006,21(6):862-869.

[19] ZHOU Shi-xing. The Application of System Dynamics to Planning Environmental Impact Assessment[D]. Sichuan University, 2005.

周世星.系统动力学在区域规划环境影响评价中的应用[D].四川大学,2005.

(上接第 20 页)

[7] 盛洁,胡建华.Excel 软件的统计功能在卡方检验中的应用[J].医学信息,2008,21(1):28-30.

[8] 贾婧.方差分析概述[J].学术探讨,2008(7):217.

[9] 吕栋雷,曹志耀,邓宝等.利用方差分析法进行模型验证[J].计算机仿真,2006,23(8):46-48.

机仿真,2006,23(8):46-48.

[10] 陶文信.Excel 在方差分析中的应用[J].郑州航空工业管理学院学报(社会科学版),2002,21(1):42-44.