

文章编号: 1004-8227(2009)08-0698-06

城市经济环境协调发展系统动力学模拟

贺晟晨, 王 远*, 高 倩, 石 磊, 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: 城市社会经济发展具有系统性、动态性、复杂性的特点, 运用系统动力学方法建模可以充分揭示城市系统的非线性结构和动态特征, 从而对环境约束下的城市经济发展趋势进行判断预测。在分析了苏州市经济发展和环境保护基本框架的基础上, 建立了包括经济子系统和环境子系统的苏州市经济环境协调发展系统动力学模型, 并围绕三产固定资产比重、三产劳动力比重、万元工业产值污染物排放量和环保投资比重等调控参数设计了3种发展模式, 得出经济、环境协调发展模式为最优方案。通过对不同发展模式的分析与比较, 提出苏州市应采取以下措施: 一是优化产业结构, 大力发展第三产业; 二是加大环境保护的力度, 增大环保投资, 同时控制单位产值污染物的排放。必须把两者放在同等重要的地位, 才能实现苏州市环境与经济协调发展。

关键词: 城市; 协调发展; 系统动力学; 模拟; 苏州

文献标识码: A

在可持续发展不断深入的时代背景下, 环境与经济的协调发展已成为未来城市发展的必然要求。然而随着资源利用和生产规模的不断扩大, 城市经济的快速发展正面临着环境因素的限制; 尤其在经济发达、面积相对狭小、人口稠密的东部地区, 环境问题更加突出; 而生产能力强、污染排放强度大又是该地区经济发展的一大特点^[1]。因此只有强调城市经济发展与环境保护之间的良性循环, 重视两者效益的统一, 使环境与经济内涵相互渗透, 最终才能达到环境与经济系统间的和谐状态。这就要求必须对环境约束下的城市经济发展趋势进行判断预测, 针对未来可能出现的经济和环境等不和谐问题, 准确识别并寻求解决途径, 以实现城市的可持续发展。系统动力学(System Dynamics, SD)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^[2]。它适应于经济与环境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城市发展过程中经济增长及环境保护协调发展机制的研究。自创立以来, 系统动力学被广泛应用于社会、经济、环境等复杂系统的模拟研究, 取得了巨大的成就^[3~7]。

苏州市位于长江三角洲地理中心, 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年其国内生产总值(GDP)为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。但随着经济的高速发展, 苏州市也面临着各种严峻的环境问题^[8~10], 如果盲目强调经济发展而忽视环境保护的重要性, 将对城市未来的发展造成极大影响。因此, 本文采用系统动力学方法, 通过建立模型进行模拟预测, 来寻求促使经济系统与环境系统协调发展的措施与途径, 从而为苏州市可持续发展提供政策建议。

1 经济环境系统动力学模型构建

1.1 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, 进而带动整体实力的发展。2006年苏州市工业产值占GDP比重达61.79%, 总排污量的70%来自工业排污, 因此本模型以工业产值作为联系经济和环境子系统的纽带, 通过工业产值及相关参数模拟计算污染排放量(化学需氧量, COD; 二氧化硫,

收稿日期: 2008-07-07; 修回日期: 2008-09-11

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

作者简介: 贺晟晨(1984~), 男, 安徽省定远人, 硕士, 主要从事环境规划与管理研究。E-mail: shengchenhe@gmail.com

* 通讯作者 E-mail: ywang@nju.edu.cn

SO₂; 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。

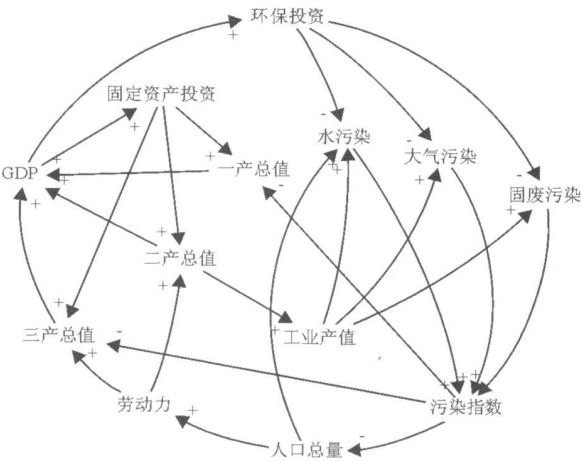


图 1 苏州市经济环境协调发展模型因果关系图
Fig. 1 Casual Loop for Coordinated Development of Economy and Environment in Suzhou

1.2 各子系统流图

1.2.1 经济子系统

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:

$$Y = AL^{\alpha}K^{\beta} \tag{1}$$

式中: Y 为产出; A 为广义科技进步因子; L 为劳动投入量; K 为资本投入量; α 为劳动的产出弹性系数; β 为资本的产出弹性系数。

Cobb-Douglass 生产函数表示了在一定生产技术条件下, 资本投入量、劳动投入量与产出量之间的依存关系。为了分别对苏州市三次产业未来的发展趋势进行预测, 需要分别利用苏州市三产的生产总值、资本投入和劳动投入的历史数据对之进行模拟, 得到符合其历史发展规律的计量经济关系。三次产业的 Y 分别采用历年各自的国内生产总值; L 分别采用各产业历年在业人口数量; K 分别取各产业历年固定资产总额。

由于自 20 世纪 90 年代以来, 苏州市一产劳动力一直保持逐步减少的趋势, 直接套用 CD 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计算得出, 不与劳动力相连; 而第二产业、第三产业的产值保持与劳动力及固定资产投入的正相关关系。分别求得三产产值后, 三者相加即得苏州市 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、三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。

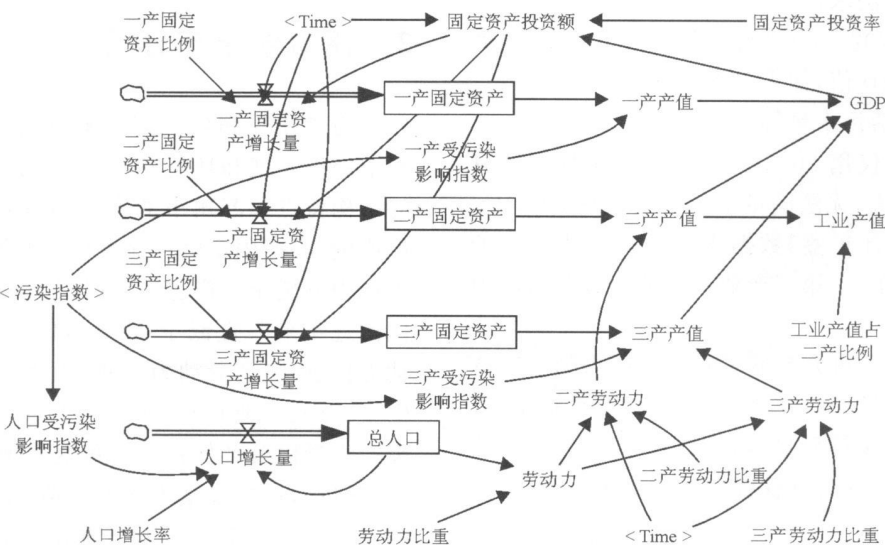


图 2 经济子系统流图

Fig. 2 Flow Chart of the Economic Subsystem

1.2.2 环境子系统

把 COD 存量、SO₂ 存量及工业固废存量作为水平变量，相应的产生量 and 处理量作为速率变量。SO₂、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；污染物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、SO₂ 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^[11]，便得到 2002~ 2020 年历年的污染指数，以此结果来表示区域环境总体污染水平。污染指数会进一步影响到环保投资比重及经济子系统的部分变量。图 3 为环境子系统流图。

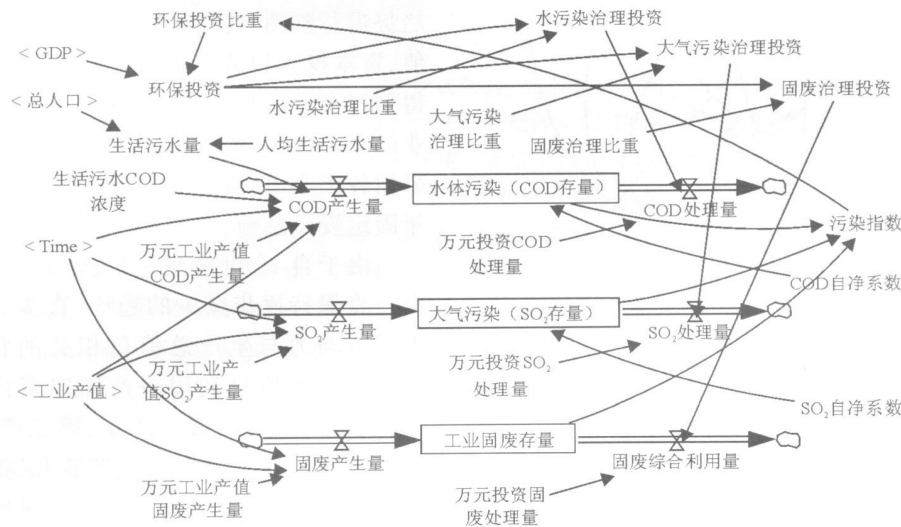


图 3 环境子系统流图

Fig. 3 Flow Chart of the Environmental Subsystem

1.3 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^[12, 13]，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 2002~ 2006 年《苏州统计年鉴》数据直接计算算术平均值，如人口增长率、工业产值占二产比例、人均生活污水量等；
- (2) 考虑到仅用 2002~ 2006 年 5 年数据计算 CD 函数误差过大，无法满足预测需要，根据 1989~ 2006 年《苏州统计年鉴》数据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、万元工业产值污染物排放量、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。

1.4 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

- 7.53%~ 4.65%。从总体上看，系统模型的行为较为真实的反映了苏州市经济与环境系统耦合发展的结构和状态，拟合精确度较高，可应用于模拟与预测。

2 模拟结果与分析

为了比较和探讨在未来不同的政策情景下，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，选择二产固定资产比例、三产固定资产比例（这两项指每年新增固定资产中分属于二产、三产的比例；由于一产固定资产比例近年来一直低于 1%，不再进行调整）、二产劳动力比重、三产劳动力比重、万元工业产值 COD 产生量、万元工业产值 SO₂ 产生量、万元工业产值固废产生量以及环保投资比重这 8 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。本文假设了维持现状模式、产业结构调整模式和经济、环境协调发展模式 3 种模式。现分别模拟分析如下。

2.1 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。二产、三产固定资产比例分别为 55.2% 和 44.7%, 二产、三产劳动力比重分别为 61.4% 和 30.2%, 万元工业产值 COD、SO₂ 和固废产生量分别为 0.017、0.019 和 0.643 t, 环保投资比重为 2%。

预测结果显示, 2020 年苏州市 GDP 将达 1.82 万亿元, 但增长速度不断放缓, 从 2007 年的 15.2% 降至 2012 年的 10.7%, 2020 年降至 3.7% (图 4);

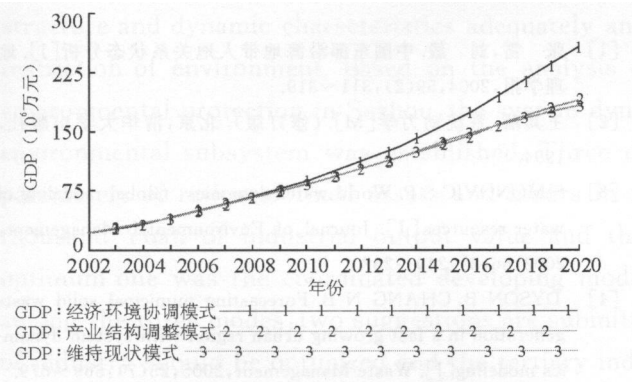


图 4 各方案 GDP 预测曲线

Fig.4 GDP Forecasting Curves in the Different Modes

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 60.02 (图 5), 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 2016 年达到最高值 743.1 万后, 将逐步回落至 706.7 万 (图 6)。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, 积极应对各种问题。

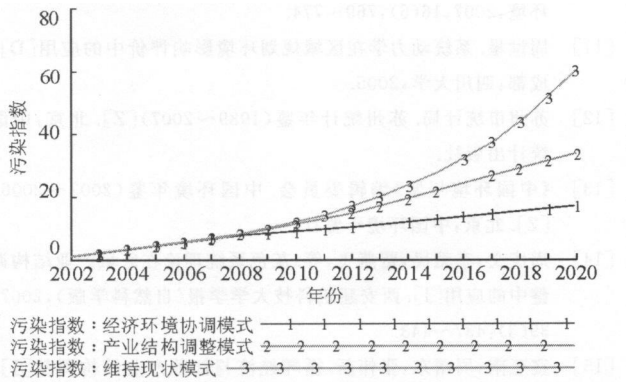


图 5 各方案污染指数预测曲线

Fig. 5 Pollution Index Forecasting Curves in the Different Modes

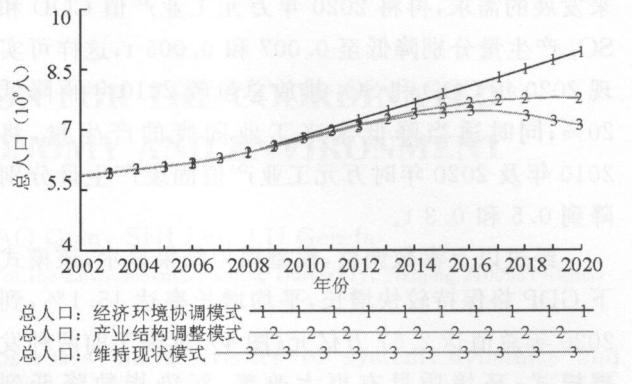


图 6 各方案人口预测曲线

Fig.6 Population Forecasting Curves in the Different Modes

2.2 产业结构调整模式

产业结构指某地区经济中各类产业之间内在联系和比例关系^[14], 苏州市 2006 年三产产值比例为 1.95 65.39: 32.66, 产业结构为工业主导型。按照产业发展规律, 第三产业的发展是经济结构调整的关键, 因此在本模式中, 将加强对第三产业的投资力度, 通过大力发展三产, 实现苏州市产业结构的调整和发展, 促使整体竞争实力的提升。根据发达国家发展经验及相关研究成果, 首先利用表函数将 2020 年二产、三产固定资产比例分别调整为 40% 和 59%, 同时增加三产劳动力, 将 2020 年二产、三产劳动力比重分别调整为 40% 和 50%^[15, 16]。万元工业产值各污染物产生量和环保投资比重保持不变。

预测结果显示, 该模式下苏州市经济总体发展趋势与维持现状模式差异不大, 三产产值的增加量与二产产值的减少量基本相当, 两种模式的 GDP 预测曲线非常接近, 2020 年 GDP 为 1.90 万亿元 (图 4), 略高于维持现状模式; 但由于第三产业对环境的影响远小于第二产业, 2020 年污染系数降至 33.41 (图 5), 环境状况有较大改善; 人口在 2019 年达最高值 776.0 万后, 2020 年小幅下降到 774.5 万 (图 6)。因此, 该种发展模式虽然明显优于维持现状模式, 但无论是经济实力还是环境质量, 都仍有进一步提升的空间。

2.3 经济、环境协调发展模式

在产业结构调整模式的基础上, 大力加强环境保护力度, 调高环保投资比重, 利用表函数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%^[17]; 另根据国家“十一五”规划纲要提出的“主要污染物的排放总量减少 10%”的要求, 经过计算, 需将 2010 年万元工业产值 COD 和 SO₂ 产生量分别降低至 0.015 和 0.017 t; 根据环境保护未

来发展的需求,再将 2020 年万元工业产值 COD 和 SO_2 产生量分别降低至 0.007 和 0.005 t,这样可实现 2020 年 COD 和 SO_2 排放总量较 2010 年再降低 20%;同时适当降低未来工业固废的产生量,将 2010 年及 2020 年时万元工业产值固废产生量分别降到 0.5 和 0.3 t。

经过以上参数调整,模型模拟结果显示,该模式下 GDP 将保持较快增长,平均增长率达 15.1%,到 2020 年总值达 2.57 万亿元(图 4),远高于前两种发展模式;环境质量有更大改善,污染指数降低到 16.80(图 5);人口总量保持持续增长,2020 年将达 891.7 万(图 6)。综合看来,本模式是实现苏州市经济与环境协调发展的理想模式。

3 结论

通过对以上 SD 模型的模拟研究,可以得出经济环境协调发展模式是苏州市实现可持续发展的相对最佳方案。它既能实现经济较快发展,又能促进经济、人口和环境协调发展,而且各种调控变量都限制在适度的范围之内,具有较强的可行性。因此苏州市在未来必须采取以下措施。

一是优化产业结构,大力发展第三产业。这主要通过提高三产固定资产投资比例和增加三产劳动力来实现。虽然在短期内优先发展第三产业与倚重第二产业相比,经济效益并不会显著增加,但可以实现环境质量的较大改善,从而为未来的发展打下良好的基础;而且根据国内外先进城市的发展经验,发展第三产业是实现城市整体实力提升的必然途径,因此苏州市未来经济发展的重点势必要转移到第三产业上;

二是加大环境保护的力度,增大环保投资,同时控制单位产值污染物的排放。苏州市已经步入工业化中期,累积的环境问题也不容忽视。为实现“十一五”规划纲要的减排目标,必然要求采取各种措施减少主要污染物的排放,并进行持续的努力。加大环保力度与经济发展的目标也是相适应的,只有强调环境保护,走循环经济的发展道路,才能实现社会经济发展的良性循环。

模拟结果证明,以上两方面的发展措施不能相互孤立、片面地实施,也不能厚此薄彼、有所偏颇。只有把经济系统和环境系统放在同等重要的地位,探寻经济、环境各要素间的耦合反馈关系,才能从系统的角度来分析问题并提出解决方案,从而最大程

度地发挥苏州市各方面的潜力,实现可持续发展的长期战略目标。研究结果还表明,运用系统动力学方法对产业结构调整及环保投资加强等措施的综合影响研究,可以从定性和定量两方面明确城市系统整体变化的机制,并通过对关键要素的调节实现系统的协调发展,从而为制定城市可持续发展战略提供指导,该方法对苏南其他城市的发展研究亦具有借鉴价值。

参考文献:

- [1] 张雷,刘毅.中国东部沿海地带人地关系状态分析[J].地理学报,2004,59(2):311~319.
- [2] 王其藩.系统动力学[M].(修订版).北京:清华大学出版社,1994.
- [3] SIMONOVIC S P. World water dynamics: Global modeling of water resources[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 66(3): 249~267.
- [4] DYSON B, CHANG N B. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling[J]. Waste Management, 2005, 25(7): 669~679.
- [5] 宋学锋,刘耀彬.基于 SD 的江苏省城市化与生态环境耦合发展情景分析[J].系统工程理论与实践,2006,26(3):124~130.
- [6] 郭长雷,王丽婧,梅凤乔,等.贵阳市环境经济系统协调发展策略分析[J].长江流域资源与环境,2006,15(4):427~433.
- [7] 杨养锋,薛惠锋.能源重化工工业园环境系统动力学仿真与调控[J].生态学报,2007,27(9):3801~3810.
- [8] 刘荣增,朱继业,张京祥,等.苏州市经济持续发展过程中的资源与环境问题透析[J].长江流域资源与环境,2001,10(4):289~295.
- [9] 吴蓓,汪岁羽,黄玮,等.苏州城区不同功能区地表径流污染特征[J].水资源保护,2007,23(2):57~63.
- [10] 马育军,黄贤金,肖思思,等.基于 DEA 模型的区域生态环境建设绩效评价——以江苏省苏州市为例[J].长江流域资源与环境,2007,16(6):769~774.
- [11] 周世星.系统动力学在区域规划环境影响评价中的应用[D].成都:四川大学,2005.
- [12] 苏州市统计局.苏州统计年鉴(1989~2007)[Z].北京:中国统计出版社.
- [13] 《中国环境年鉴》编辑委员会.中国环境年鉴(2003~2006)[Z].北京:中国环境年鉴社.
- [14] 周庆文,李慧民,贾燕飞,等.灰色系统理论在区域产业结构调整中的应用[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007,39(3):437~443.
- [15] 宣亚南,周曙东,张伟新.循环经济与江苏产业结构调整[J].长江流域资源与环境,2007,16(2):129~135.
- [16] 张妍,于毅毅.长春市产业结构环境影响的系统动力学优化模拟研究[J].经济地理,2003,23(5):681~685.
- [17] 张海峰.山东半岛城市群生态环境与经济协调发展模式研究[D].青岛:中国海洋大学,2005.

SYSTEM DYNAMICS SIMULATION FOR THE COORDINATED
DEVELOPMENT OF URBAN ECONOMY AND ENVIRONMENT

HE Sheng-chen, WANG Yuan, GAO Qian, SHI Lei, LU Gen-fa

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

Abstract: The urban social economic development possesses characteristics of system, dynamics and complication. Applying system dynamics method to establish models can depict systemic nonlinear structure and dynamic characteristics adequately and predict the trend of economic development with the restriction of environment. Based on the analysis of the structure including economic development and environmental protection in Suzhou, the system dynamics model composed of the economic subsystem and environmental subsystem was established. Three developing modes were designed with the adjustment parameters of ratios of fixed assets and labors in the three industrial sectors, pollutants emitted per 10 thousand Yuan of industrial output value and the proportion of environmental investigation, and the optimum one was the coordinated developing mode of economy and environment. From the comparison among the three modes, two suggestions are submitted for the government of Suzhou: firstly, the structure of industry should be optimized and the tertiary industry must be taken more efforts on it; secondly, the ratio of the investigation on environmental protection should be increased while the control of pollutant emission per unit of industrial output value is necessary. These two aspects should be paid the same importance to achieve the harmony development of economy and environment in Suzhou.

Key words: urban; coordinated development; system dynamics; simulation; Suzhou