

# 基于绿色理念的港口城市耦合系统动力学研究

## ——以连云港市为例

乔文怡<sup>1</sup>, 管卫华<sup>1,2</sup>, 王晓歌<sup>1</sup>, 王馨<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 以连云港为例, 根据 SD 原理和方法, 建立了连云港港城耦合系统动力学模型, 该模型考虑了经济—能源—环境复杂系统内各要素间的相互作用和影响, 侧重于分析港城耦合过程中的环境污染、能源消费等问题。在证明模型具有稳定性和强壮性的基础上, 通过变换工业比重、港口 SO<sub>2</sub> 排放系数、工业 SO<sub>2</sub> 排放系数等参数, 进行多情景模拟, 结果表明以产业结构调整为主, 辅以港口业减排措施的实施, 可以实现港城的绿色发展。

**[关键词]** 港城耦合, 绿色发展, 系统动力学, 连云港

**[中图分类号]** X196 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2018)01-0140-09

## Study on the Dynamics of Port-City Coupling System Based on Green Concept

### —A Case Study of Lianyungang City

Qiao Wenyi<sup>1</sup>, Guan Weihua<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoge<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>1</sup>

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Using the System Dynamics (SD) method, this paper establishes a port-city coupling system dynamics model of Lianyungang city. This dynamics model, which takes into account of the interaction between elements within the economic-energy-environment complex system, focuses on the environmental pollution and energy consumption in the process of port-city coupling. On the basis of proving the stability and robustness of the model, this paper makes a multi-scenario simulation by changing the parameters of industrial proportion, port SO<sub>2</sub> emission coefficient and industrial SO<sub>2</sub> emission coefficient. Results show that: Lianyungang city can achieve the green development of port-city by adjusting the industrial structure with the reduction of port industry emission.

**Key words:** port-city coupling, green development, system dynamics, Lianyungang city

港口城市是一种特殊的城市类型, 具有港口和城市的双重内涵, 是港口和城市的有机结合体<sup>[1]</sup>。无论国内还是国外, 历史还是现在, 港口均在区域经济发展中作出了重要贡献。港口已经成为沿海经济发展的一个重要增长点, 成为社会进步的强大原动力。但是港口对城市经济产生巨大拉动作用的同时会消耗大量岸线资源、海洋资源、土地资源等, 也会对其周边的水体、大气等造成较为严重的环境污染; 另一方面资源的消耗和污染物的排放对经济发展又会产生胁迫作用。以牺牲能源和环境为代价的港口建设和运营是世界港口发展中的一个普遍现象。因此针对如何构建可持续发展的港城系统, 是近年来国内外学者较为关注的问题。

国外对于港口和城市的可持续发展问题的研究成果较为丰富, 最早是由 Brooke 提出了应用绿色理念建立环境影响评估程序, 并对港口建设过程中产生的环境影响因子进行了总体分析<sup>[2]</sup>。之后学者们分别在港城结构研究<sup>[3]</sup>、港城的可持续发展能力评价<sup>[4-6]</sup>以及运用系统模型定量估算和预测等方面进行了大量的探索<sup>[7]</sup>。我国现代港城关系研究发端于 20 世纪 50 年代初<sup>[8]</sup>, 相关研究和探索主要为: ①研究内容上, 探索了港口体系的空间结构和职能结构<sup>[9-10]</sup>、海港城市的成长模式及港口演变与城市发展间的关系<sup>[11]</sup>、规划问题<sup>[12]</sup>,

收稿日期: 2017-10-15.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41430635)、国家自然科学基金项目 (41271128, 41329001)、国家自然科学基金重大项目 (41590844)。

通讯联系人: 管卫华, 博士, 教授, 研究方向: 城市和区域地理。E-mail: guanweihua@njnu.edu.cn

并深入到社会、经济、周期、空间等各个领域<sup>[13-14]</sup>。21 世纪初学者们开始从港口建设<sup>[15]</sup>、海水质量<sup>[16]</sup>等方面关注绿色低碳港口城市的建设;②研究方法上,主要以构建绿色港口评价指标体系计算港口对城市的绿色经济贡献率为主<sup>[17-19]</sup>。近年来一些学者试图运用系统动力学对港城可持续状态展开定量评价<sup>[20]</sup>,但多为定性描述,对港城互动过程中所产生的诸如资源消耗、生态平衡、环境保护等制约因素缺少定量化的研究,在可持续发展的基础上以系统理论方法为绿色港城系统发展提供决策依据尚不成熟。

连云港作为江苏省最大海港、苏北和中西部最经济最便捷的出海口,是新亚欧大陆桥的东方桥头堡、我国沿海的主体枢纽港和能源外运的重要口岸之一。目前,连云港的工业结构呈现非常明显的“两高一资”特征。2015 年连云港 GDP 达到 2 161 亿元,万元 GDP 能源消耗量达到 0.836 t 标准煤,废水排放总量为 24 625.37 万 t,港口货物吞吐量突破 2 亿 t。经济发展对资源特别是不可再生资源的依赖性极强,资源和环境压力巨大。随着我国经济发展方式的进一步转变,特别是《循环经济促进法》的实施,连云港经济发展面临新的重大选择。随着资源节约型和环境友好型社会的建设,如何实现港口和城市之间经济能源环境的协调发展,是连云港发展过程中不可忽视的一个关键问题。基于此,本文采用系统动力学方法,以连云港为例,引入绿色 GDP,构建基于绿色理念的港口城市耦合系统的 SD 模型,通过变换工业比重、港口 SO<sub>2</sub> 排放系数、工业 SO<sub>2</sub> 排放系数等参数,进行多情景模拟,实证提炼和动态模拟港口经济环境能源系统的 4 种耦合作用情景,并展开比较分析,找出影响连云港可持续发展的主要影响因素,以实现经济效益、环境效益以及能源效益最大化,为港口城市可持续发展提供理论借鉴和政策建议。

## 1 SD 模型构建

### 1.1 因果反馈分析

系统动力学采用定性和定量相结合的方式来解决实际问题<sup>[21]</sup>,变单纯的静态为动态模拟<sup>[22]</sup>,而且模式非固定结构,方程形式灵活,能够有效进行系统的动力研究,有助于进行多方案比较分析<sup>[23]</sup>。因此根据系统分析协调原理,将港城系统解构为港口子系统、经济子系统、环境子系统和能源子系统 4 个子块,并建立因果反馈流程图(如图 1)。每个系统结构由积累效应的状态变量、控制作用的速度变量、辅助变量、参数、系数和常量共同构建,每一子系统运行既取决于其内部结构,同时也受其他子系统的关联作用。其中,主要的反馈关系环有:①城市 GDP→+固定资产投资额→+港口投资额→+港口吞吐能力→+港口货物吞吐量→+能源消耗量→-城市 GDP;②城市 GDP→+固定资产投资额→+港口投资额→+港口吞吐能力→+港口货物吞吐量→+污染物排放量→+环境污染经济损失→-城市 GDP;③城市 GDP→+工业增加值→+污染物排放量→+能源消耗量→-城市 GDP;④城市 GDP→+工业增加值→+污染物排放量→+环境污染经济损失→-城市 GDP;⑤港口投资额→+港口吞吐能力→+港口货物吞吐量→+港口收入→+港口利润→+港口投资额;反馈环①、②、③、④为负反馈,⑤为正反馈。反馈环①、②反映了港口业的环境污染和能源消耗状况与港口货物吞吐量的关系;反馈环③、④反映了城市工业对环境和能源的影响情况,环境污染经济损失随着废水和污染气体排放量的增加而增加,工业和港口业的生产经营活动造成能源消耗量的增加,这两者对城市 GDP 会产生负面影响;反馈环⑤反映了港口在生产经营中积累的附加值可以为自身发展提供资金支持。

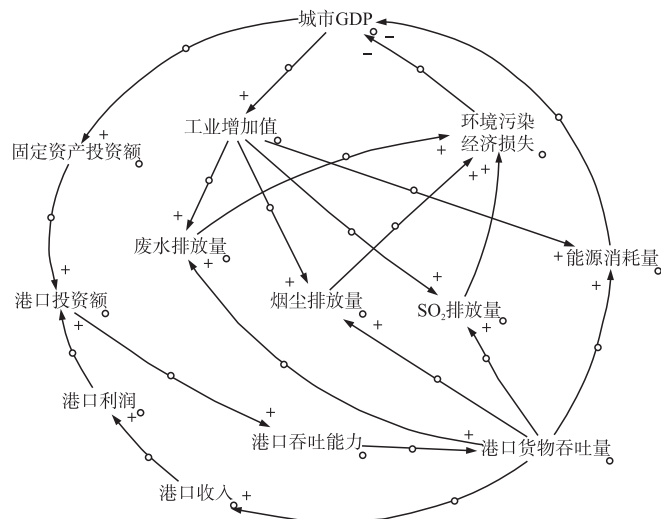


图 1 主要因果反馈回路

Fig. 1 The main causal feedback loop

反馈环①、②反映了港口业的环境污染和能源消耗状况与港口货物吞吐量的关系;反馈环③、④反映了城市工业对环境和能源的影响情况,环境污染经济损失随着废水和污染气体排放量的增加而增加,工业和港口业的生产经营活动造成能源消耗量的增加,这两者对城市 GDP 会产生负面影响;反馈环⑤反映了港口在生产经营中积累的附加值可以为自身发展提供资金支持。

### 1.2 SD 模型结构

根据港城系统主要的因果反馈回路,结合系统动力学(SD)模型的可操作性原则,本文从港口、经济、环境和能源 4 个方面,构建多指标评价体系,所选变量较为全面反映出港城绿色生态的耦合交互作用。

(1)港口子系统

港口子系统以港口吞吐能力为状态变量,其存量由速率变量港口吞吐能力增量决定. 通过反馈将港口利润、港口收入、港口投资额等辅助变量与港口货物吞吐量组成两个因果循环,反映港口系统内部的自我发展、自我协调机制. 其中,港口货物吞吐量作为与环境子系统和能源子系统的接口,港口投资额作为与经济子系统的接口.

(2)经济子系统

经济子系统是港城系统的核心组成部分,是所有城市产业的集合. 经济子系统主要通过产业结构、固定资产投资、城市 GDP、环境污染经济损失、绿色 GDP<sup>[24]</sup>来反映,本文中,绿色 GDP = 城市 GDP - 环境污染经济损失 - 能源消耗成本. 经济子系统以城市 GDP 为状态变量,其存量由速率变量 GDP 增加量决定. 其中,环境污染经济损失作为与环境子系统的接口;固定资产投资作为与港口子系统的接口,影响到港口货物吞吐能力,其结果使得港口货物吞吐量随之变化,最终对环境产生影响从而进一步影响城市 GDP.

(3)环境子系统

经济发展对环境的影响主要通过 SO<sub>2</sub> 排放量、烟尘排放量,废水排放量等来反映. 其中,污染气体和废水的排放量作为辅助变量和其他模块接口.

(4)能源子系统

能源子系统主要通过能源消耗量和能源消耗成本来反映,并对整个系统起制约和胁迫作用. 本系统中能源的消耗主要考虑城市工业和港口业. 港口城市因其良好的区位条件而成为制造业聚集地,大规模的工业生产需要消耗大量的能源,成为港口城市污染气体和废物排放的主要来源;港口需要大量的装卸、运输设备对众多的靠港船舶进行作业,消耗大量的能源,释放废气排放废水.

基于港口、经济、环境、能源子系统的结构、功能与反馈关系,构建港城可持续发展仿真模型(如图 2). 模型包括 5 个状态变量,8 个速率变量,12 个辅助变量,29 个参数,5 个常数(GDP 初始值、吞吐能力初始值、废水储量初始值、SO<sub>2</sub> 储量初始值、烟尘储量初始值);模型由 22 个微分方程组成.

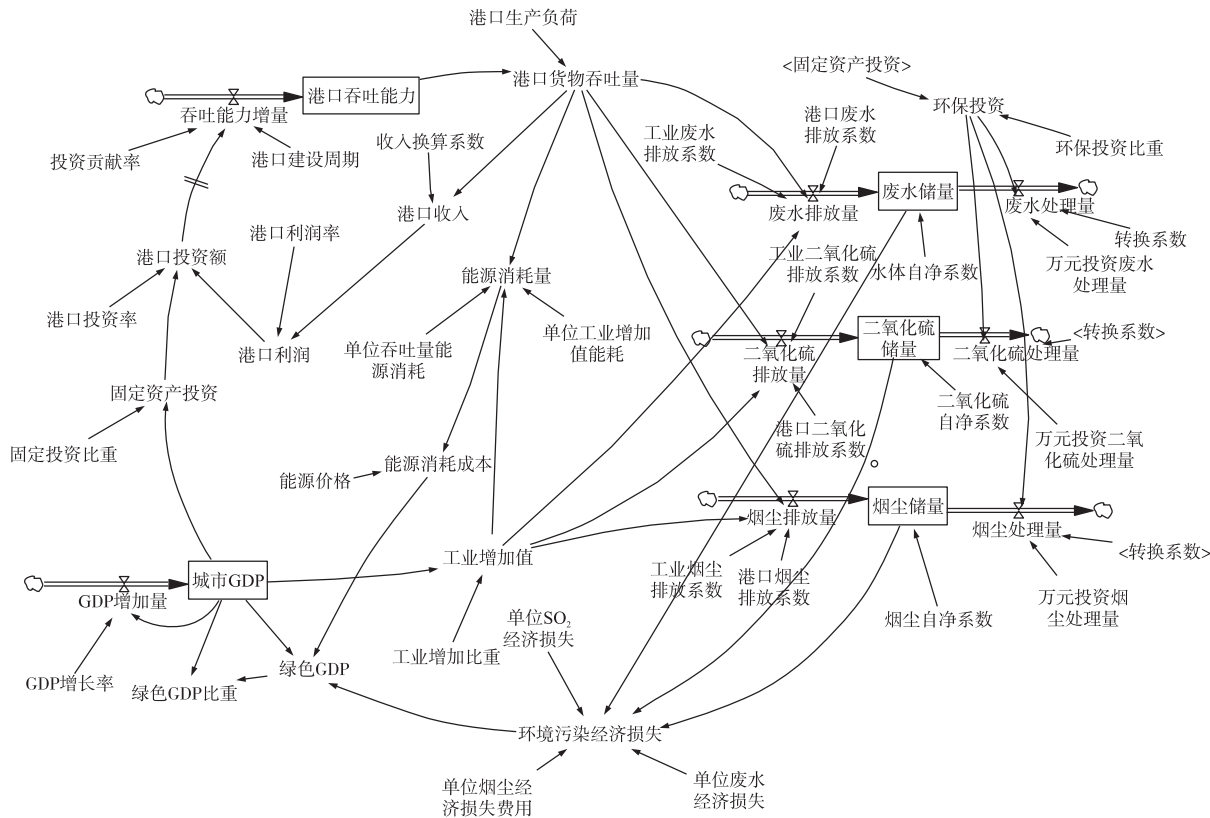


图 2 SD 模型存量和流量图

Fig. 2 The diagram of stock and flow of SD model

### 1.3 模型参数确定

模型以 2005 年为起始年份,2020 年为终止年份,模拟步长设置为 0.625。数据来源于《连云港统计年鉴》、《中国港口年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《连云港环境统计公报》以及连云港环保局官网。本文基于实际数据,根据港城绿色生态系统的结构特点以及主要变量变化的稳定性和变量之间的关联性特征,主要通过算术平均、回归法等多种方法确定模型参数。

## 2 模型有效性检验

有效性检验包括历史检验和灵敏度分析。模型借助 Vensim 软件完成结构和量纲的一致性检验。选取 2005 年-2014 年数据进行历史检验,模型所得结果与实际数据拟合误差总体上小于 $\pm 6\%$ ,只有工业增加值在 2005 年的拟合误差为 11.19%(表 1),模型具有良好的行为复制能力,能较为真实展现连云港港城经济环境能源之间的关系,可以作为模拟与预测的依据。

表 1 主要变量模拟结果与实际值比较

Table 1 The simulation results of the main variables compared with the actual values

指标	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
城市 GDP (亿元)	496/ 496	595/ 596	701/ 702	826/ 814	941/ 933	1 193/ 1 193	1 411/ 1 338	1 603/ 1 600	1 810/ 1 802	1 966/ 1 989
偏差率(%)	0	-0.17	-0.14	1.47	0.85	0	5.45	0.19	0.44	-1.01
港口货物吞吐量 (万 t)	6 016/ 6 330	7 232/ 7 480	8 507/ 8 417	10 061/ 10 352	11 378/ 11 270	13 506/ 13 490	16 628/ 15 725	20 165/ 19 992	20 165/ 19 992	21 008/ 21 102
偏差率(%)	-4.96	-3.31	1.07	-2.81	0.96	0.12	5.74	0.87	0.87	-0.45
工业增加值 (亿元)	149/ 134	188/ 190	229/ 227	281/ 285	360/ 369	455/ 458	535/ 521	821/ 829	821/ 829	989/ 985
偏差率(%)	11.19	-1.05	0.88	-1.40	-2.44	-0.66	2.69	-0.97	-0.97	0.41
能源消耗量 (万 t 标准煤)	466/ 446	549/ 549	617/ 607	688/ 705	847/ 831	990/ 1 039	1 157/ 1 150	1 564/ 1 559	1 564/ 1 559	1 700/ 1 776
偏差率(%)	4.48	0	1.65	-2.41	1.93	-4.71	0.61	0.32	0.32	-4.30

注:实际值/模拟值。

一个稳定性、强壮性良好的模型对大多数参数的变化是不灵敏的,因此进行历史检验之后,还需要进行灵敏度分析,以检验模型对大多数参数变化的灵敏性,并为后续优化方案设计奠定基础<sup>[25]</sup>。灵敏度分析公式如下:

$$S_Q = \left| \frac{\Delta Q_{(t)}}{Q_{(t)}} \cdot \frac{X_{(t)}}{\Delta X_{(t)}} \right|, \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{Q_i}, \quad (2)$$

式中, $t$  为时间; $Q_{(t)}$  为状态  $Q$  在时刻  $t$  的值; $X_{(t)}$  为参数  $X$  在  $t$  时刻的值; $S_Q$  为状态变量  $Q$  对参数  $X$  的敏感度; $\Delta Q_{(t)}$ 、 $\Delta X_{(t)}$  分别为状态变量  $Q$  和参数  $X$  在  $t$  时刻的增长量; $n$  为状态变量数; $S_{Q_i}$  为  $Q_i$  的灵敏度; $S$  为参数  $X$  的平均灵敏度。

在灵敏度分析中,分别从港口子系统、经济子系统、环境子系统和能源子系统中选取 5 个变量,检验对 17 个参数变化的灵敏度值。5 个变量分别为:城市 GDP (CSGDP)、港口吞吐能力 (GKTTNL)、废水储量 (FSCL)、SO<sub>2</sub> 储量 (EYHLCL)、烟尘储量 (YCCL);17 个参数分别为 GDP 增长率 (GDPZZL)、工业增加比重 (GYZJBZ)、港口生产负荷 (GKSCFH)、工业废水排放系数 (GYFSPFXS)、工业 SO<sub>2</sub> 排放系数 (GYEYHLPFXS)、工业烟尘排放系数 (GYYPFXS)、港口废水排放系数 (GKFSPFXS)、港口 SO<sub>2</sub> 排放系数 (GKEYHLPFXS)、港口烟尘排放系数 (GKYCPFXS)、水体自净系数 (STZJXS)、SO<sub>2</sub> 自净系数 (EYHLZJXS)、烟尘自净系数 (YCZJXS)、单位吞吐量能耗 (DWTTLNH)、单位工业增加值能耗 (DWGYZJZNH)、万元投资废水处理量 (WYTZFSCLL)、万元投资 SO<sub>2</sub> 处理量 (WYTZEYHLCLL)、万元投资烟尘处理量 (WYTZYCCLL)。

检验方法为:2005 年-2020 年每个参数逐年变化 10% (本文为每个参数逐年增加 10%),考察其对 5 个变量的影响<sup>[26-27]</sup>。依据式 (1),每个状态变量可以得到 17 个针对某个参数变化的灵敏度值,17 个灵敏度值的均值可代表某一特定变量针对特定参数的灵敏度;利用式 (2) 计算出 5 个变量对某个特定参数的



平均灵敏度,共可得到 17 个数值,结果如表 2 所示.

表 2 灵敏度分析结果

Table 2 The table of sensitivity analysis results

%

项目	CSGDP	GKTTNL	FSCL	EYHLCL	YCCL	灵敏度均值
GDPZZL	18.967	4.158 7	0.461	1.925	18.027	8.708
GYZJBZ	0	0	2.885	4.863	51.673	11.884
GKSCFH	0	0.456	12.24	11.972	50.796	15.093
GYFSPFXS	0	0	2.078	0	0	0.416
GYEYHLPFXS	0	0	0	3.448	0	0.69
GYPCFXS	0	0	0	0	30.685	6.137
GKFSPFXS	0	0	12.773	0	0	2.555
GKEYHLPFXS	0	0	0	11.797	0	2.359
GKYCPFXS	0	0	0	0	54.397	10.879
STZJXS	0	0	8.716	0	0	1.743
EYHLZJXS	0	0	0	10.636	0	2.127
YCZJXS	0	0	0	0	21.289	4.258
DWTTLNH	0	0	0	0	0	0
DWGYZJZNH	0	0	0	0	0	0
WYTZFSCLL	0	0	3.107	0	0	0.621
WYTZEYHLCLL	0	0	0	2.818	0	0.564
WYTZYCCLL	0	0	0	0	37.871	7.574

由表 2 可见,除工业增加比重 (GYZJBZ)、港口生产负荷 (GKSCFH) 和港口烟尘排放系数 (GKYCPFXS) 的灵敏度较高外,其余参数的灵敏度均低于 10%,说明系统对于大多数参数的变化是不敏感的,上述几个灵敏度较高的参数即为对系统影响较大的关键因素. 从各要素的灵敏度大小可以看出各要素作用的大小程度依次为港口生产负荷 (GKSCFH)、工业增加比重 (GYZJBZ)、港口烟尘排放系数 (GKYXPFXS).

通过以上对模型的历史检验和灵敏度分析,可以判定:港城耦合模型有效且具有良好的稳定性和强壮性,能够用于对实际系统的模拟预测.

3 不同方案情景比较

产业结构调整作为能源节约、污染物排放削减的重要驱动力,被视为促进中国绿色发展转型的重要抓手. 从发展趋势看,未来 20-50 年间,中国需在工业化发展和温室气体排放之间进行平衡. 而连云港市恰好又处于工业化、城市化快速发展时期. 随着江苏沿海开发战略政策的相继出台,连云港市经济进入到一个速度加快和总量扩大的快速发展时期,工业化进程进一步加快,特别是近两年重化工业项目及两家钢铁企业的相继上马投产,综合能源消费量的增速成为必然趋势. 因此设计方案时,将工业增加比重设为 38%. 港口发展应该是在节能减排的约束下的可持续发展,节能减排工作也必然是在环境、能源、经济三者协调下进行. 因此本文选取工业增加比重作为产业结构变量,工业 SO<sub>2</sub> 排放系数、工业烟尘排放系数、工业废水排放系数作为工业减排变量,港口 SO<sub>2</sub> 排放系数、港口烟尘排放系数、港口废水排放系数作为港口减排变量,将这些指标作为控制参量,根据港城绿色生态耦合特性设计以下 3 种耦合发展模式,以 2014 年为基准年进行多情景模拟预测和策略调控(表 3),仿真结果如图 3 所示,图中数字代表方案.

表 3 仿真模拟方案表

Table 3 The table of simulation scheme

模式	方案	工业增加 比重	工业废水 排放系数	工业 SO <sub>2</sub> 排放系数	工业烟尘 排放系数	港口废水 排放系数	港口 SO <sub>2</sub> 排放系数	港口烟尘 排放系数
1	1	0.54	3.958 1	0.005 2	0.125 40	0.790 1	0.000 60	0.005 7
	2	0.38	3.958 1	0.005 2	0.125 40	0.790 1	0.000 60	0.005 7
2	3	0.54	2.770 0	0.003 6	0.087 78	0.790 1	0.000 60	0.005 7
	4	0.38	2.770 0	0.003 6	0.087 78	0.790 1	0.000 60	0.005 7
3	5	0.54	3.958 1	0.005 2	0.125 40	0.553 1	0.000 42	0.004 6
4	6	0.38	3.958 1	0.005 2	0.125 40	0.553 1	0.000 42	0.004 6

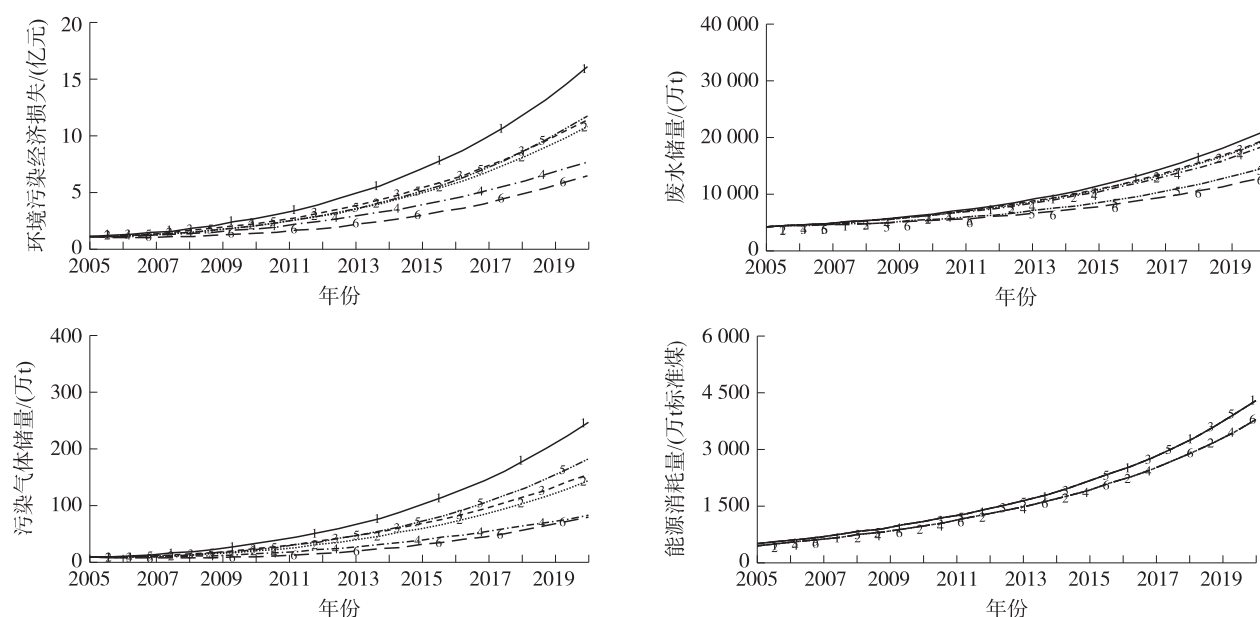


图3 2005年-2020年方案1-6港城耦合变量对比

Fig. 3 The comparison of coupling variables of scheme 1-6 in port city in 2005-2020

### 3.1 自然演变发展模式

方案1为自然演变发展模式,即各个参数不变,按照现有的发展趋势进行模拟,结果表明:①经济方面,港城经济实现稳定增长,到2020年绿色GDP由472亿元增加至5140亿元,所占比重基本不变,保持在96%左右;②能源方面,经济增长加剧了能源消耗,能源消耗量增至为4260万t标准煤,增加了将近10倍;③环境污染方面,经济发展导致了污染物排放量的增加, $\text{SO}_2$ 排放储量由4万t增至31万t,烟尘排放储量增加至215万t,废水排放量增至20874万t,经济增长加重了环境的负担,环境污染经济损失增加至16亿元,经济发展呈现出高耗能、重污染的特征。这是由于作为苏北欠发达城市,连云港目前仍处于“粗放型”的经济增长阶段,依赖于能源、资源的高投入带来了经济增长,但同时也带来了高排放。治理环境污染需要大量环保资金的投入,从而对经济增长产生负向作用。随着江苏省“两个率先”口号提出,包括连云港在内的沿海城市进入工业化加速期,在此期间广东、浙江等东部沿海经济发达省份以及苏南地区的部分重污染企业向沿海经济欠发达地区转移,大量陆源污染物、工业和生活污水排放入海,对排污口邻近海域环境影响严重;同时江苏沿海开发战略的实施,大面积的填海造地,滩涂围垦,严重影响了邻近海域海洋功能的正常发挥,这些都消耗了大量的物力财力,降低绿色经济收益。因此连云港在发展中应更多地使用清洁能源代替化石能源,提高能源效率,减少环境污染,实现经济的可持续发展。

### 3.2 调整产业结构模式

本文将调整产业结构模式分为调整工业比重、工业企业采取减排措施以及在产业结构调整的背景下企业采取节能减排措施3种模式,对未来发展进行预测。

方案2将城市的工业比重降低为0.38。仿真结果表明,到2020年:①经济方面,绿色GDP的增长速度在几种方案中位列第三,增至为5171亿元;②能源消耗量降至3756万t标准煤,为几种方案中消耗最低的;③同时经济的快速发展伴随着环境的改善,污染气体的排放储量与自然发展模式相比减少了很多,降低为141万t;废水排放量降至19171万t,从而直接促使环境污染经济损失降至10.7亿元,有较好的节能减排效果。

方案3为保持工业比重不变,工业企业采取多种减排措施,即降低工业废水排放系数、 $\text{SO}_2$ 排放系数和烟尘排放系数。仿真结果表明:①经济方面,到2020年绿色GDP增至5145亿元,同自然发展模式相比,变化不大;②能源消耗量未发生变化,没有达到节能效果;污染气体排放储量明显减少,减少为153万t;废水排放量有所降低,降低为19368万t,节能减排效果总体上不如方案2。

方案4为在产业结构调整的背景下,工业企业采取多种减排措施,即将方案2和方案3结合在一起。仿真结果表明:①经济方面,到2020年绿色GDP增至5174亿元,位列第二,同方案2相差不大;②能

源消耗量降低至3 756万t标准煤,节能效果同方案2一样;③环境上,污染气体排放储量降低得很快,降至为80万t,废水排放储量位列第三,减排效果比方案2有所好转,但相差不大。

对比方案2-4,可以发现,方案2只是降低了工业比重,但是绿色GDP却取得了显著增长,且能源消耗量也大大降低,呈现出低能耗、高绿色收益的态势;方案3工业企业虽然采取了多种减排措施,但效果并不是十分理想,能源消耗量、污染气体排放量和废水排放量一直处于较高水平,从而导致绿色GDP保持较低水平,呈现出高能耗、高污染、低绿色收益特征;方案4从产业结构和节能减排措施两个方面着手,从一定程度上降低了污染物的排放和能源的消耗量,但其节能减排效果和绿色经济收益同方案2相差不大。这是由于连云港污染主要来自于传统重工业,特别是一些发电厂、石油化工、金属冶炼、机械制造等行业,这些行业产生了大量的二氧化硫、烟尘和氮氧化物。随着企业环保措施逐渐完善,在一定程度上会降低污染物的排放,但经济可持续发展的根本在于产业结构的优化和转型升级。在“绿色都市”战略背景下,要实现经济社会又好又快发展,必须把发挥资源优势与转变发展方式有机结合起来,构建生态型发展模式。

### 3.3 港口减排模式

方案5为港口采用多种减排环保措施,即降低港口废水排放系数、SO<sub>2</sub>排放系数和烟尘排放系数。仿真结果表明,到2020年:①绿色GDP达到5 145亿元,同方案3;②污染物的排放储量在几种方案里位列第五,其中污染气体的排放储量为181万t,废水排放储量为14 387万t,取得了较好的减排效果;由于能源消耗量没有降低,与自然发展模式相比保持不变,节能效果并不理想。从工业企业和港口生产所产生污染和能源消耗的作用力度来看,港口生产对环境污染的影响大于工业企业,说明城市在发展过程中,港口产业所产生的污染也是不容忽视的。

### 3.4 协调稳定发展模式

通过对以上几种发展模式深入分析,发现它们各自存在的问题:①在自然演变发展模式中,经济发展较为缓慢,污染问题突出,经济效益、生态效益均不理想。②在调整产业结构模式中,既降低工业比重,同时工业企业也采取相应的节能减排措施,其节能减排效果以及绿色经济收益与降低工业比重所取得的成效几乎一样;但是仅仅降低工业比重,虽然取得了较好的绿色经济效益和节能效果,但是伴随着较多的废水和污染气体的排放,对环境造成压力。③在港口减排模式中,环境污染造成的损失降到了最低,但能源消耗量过多,不适合连云港绿色经济的长远发展。

针对以上方案的特点和问题,考虑到环境压力和能源消耗给城市产业结构带来的负面影响,调整产业结构是关键,因此基于全面快速、协调有序的发展思路,对相关参数进行系统调整(表3方案6):①降低高污染、高能耗的工业企业,将工业比重由0.54调整为0.38,优化产业结构,增加能源存量,提升生态质量;②对港口业的排污措施进行调整,即降低港口废水排放系数、SO<sub>2</sub>排放系数和烟尘排放系数,以减少经济发展的环境承载压力和能源耗用程度。模拟结果(图3)显示:①经济发展较快,保持较高增长态势。绿色GDP增长速度加快,到2020年,绿色GDP达到5 176亿元,为上述几种模式中最高;环境污染经济损失为几种模式中最低,为6亿元,低污染带来高经济增长,呈现良好的经济发展势头;②环境质量较好,环境污染得到有效抑制。15年间,污染气体和废水的排放量维持在较低水平,远远低于上述的几种方案,环境污染程度小,生态环境质量保持良好状态;③能源消耗较少。能源处于低消耗水平状态,到2020年,万元GDP能耗下降至0.7t标准煤,经济发展呈现出低能耗、低污染、较高绿色经济收益的态势。长期以来,连云港在发展中一直滞后,港口并没有真正成为城市发展的核心战略资源,且港口业在发展的过程中造成的污染会对城市经济产生影响。作为国家首批沿海开放城市之一的连云港市,要紧紧抓住江苏沿海开发战略这一历史机遇,处理好经济发展与环境保护中的速率和公平问题。优化产业结构,发展绿色经济,推进低碳建设,合理调整能源结构、经济结构和消费结构,坚持走新型工业化道路,实现“和谐港城”的发展目标。

若将模拟终点加长为2025年以探求系统的发展趋势,方案4的污染气体排放储量将在2025年左右减少至比方案6低的水平,但污染物的排放储量还是方案6最少,其他指标的发展趋势维持不变。综合来说,该模式集合了前3个模式的优点,为连云港港城绿色生态系统耦合发展提供了较为理想的模式。

## 4 结语

本文通过构建基于绿色理念的港城耦合SD模型,选取工业增加比重作为产业结构变量,工业SO<sub>2</sub>排

放系数、工业烟尘排放系数、工业废水排放系数作为工业减排变量,港口  $\text{SO}_2$  排放系数、港口烟尘排放系数、港口废水排放系数作为港口减排变量,将这些指标作为控制参量进行多情景模拟,可以得到如下结论:

(1)采用 2005 年–2014 年的数据进行历史检验和灵敏度分析,结果表明模型有效且具有良好的稳定性和强壮性,能够用于对实际系统的模拟。

(2)本文引入了绿色 GDP 来考虑资源、环境和经济之间的可持续发展,通过调控模型中各参数变化进行多情景模拟,结果显示:①按照现有模式发展,经济发展较为缓慢,污染问题突出,经济效益、生态效益均不理想;②调整产业结构后,绿色 GDP 却取得了显著增长,且能源消耗量也大大降低,呈现出低能耗、高绿色经济收益的态势;③工业企业仅仅采取减排措施,其结果是呈现出高能耗、高污染、低绿色经济收益特征;④如果从产业结构和节能减排措施两个方面着手,其节能减排效果和绿色经济收益同仅仅调整产业结构相差不大;⑤在港口减排模式中,环境污染造成的损失降到了最低,但能源消耗量过多。

(3)从工业企业和港口生产所产生污染和能源消耗的作用力度来看,港口生产对环境污染的影响大于工业企业,即港口采取多种减排措施后,污染物的排放量远远小于工业企业采取相同减排力度后所产生的污染物;能源消耗量两者几乎相等。

(4)因此连云港要实现经济的绿色发展,首先应以产业结构调整为主,对产业结构进行优化和转型升级,取得低能耗、高绿色经济收益;同时辅以港口业减排措施的实施,从而大幅度降低污染气体的排放量,促进经济、能源、环境的健康协调发展,实现经济的绿色增长和节能环保的目标。

(5)连云港市作为江苏沿海开发的龙头,在发展中应注重社会经济与生态环境的协调多赢,合理调整能源结构、经济结构和消费结构,把发挥资源优势与转变发展方式有机结合起来,实现“和谐港城”的发展目标,打造东部沿海新的经济增长极,在服务江苏沿海开放和促进东中西三大区域共同发展中发挥新的更大作用。

#### [参考文献]

- [1] 杨伟,宗跃光. 现代化港口城市港城关系的建设:以江苏南通为例[J]. 经济地理,2008,28(2):210–213.
- [2] BROOKE J. Environmental appraisal for ports and harbours[J]. Dock and harbour authority,1990,71(820):89–94.
- [3] TAMURA I,OUCHI H. Aiming at port and Harbor technology mild to human beings and the earth[C]//Proceedings of the symposium on coastal and ocean management. Coastlines of Japan. New Orleans,1993:330–336.
- [4] TROZZI C,VACCARO R. Environmental impact of port activities[J]. WIT transactions on the built environment,2000,51:151–161.
- [5] PERIS M E,OREJAS J M D,SUBIRATS A,et al. Development of a system of indicators for sustainable port management[J]. Marine pollution bulletin,2005,50(12):1 649–1 660.
- [6] PALANTZAS G,NANIOPOULOS A,NALMPANTIS D,et al. The ‘chain’ management of ship-generated waste and cargo residues in the port of Thessaloniki[J]. Journal of marine environmental engineering,2005,8(2):161–169.
- [7] SAKAI H,WATANABE Y. The estimation model of carbon dioxide emission at container terminals[J]. Journal of Japan industrial management association,2006,57(1):68–79.
- [8] 黄盛漳. 中国港市之发展[J]. 地理学报,1951,18(1):21–40.
- [9] 曹有挥,毛汉英,许刚. 长江中下游港口体系的职能结构[J]. 地理学报,2001,56(5):590–598.
- [10] 曹有挥. 长江沿岸港口体系空间结构研究[J]. 地理学报,1999,54(3):233–240.
- [11] 吴传君,高小真. 海港城市的成长模式[J]. 地理研究,1989,8(4):9–15.
- [12] 郑弘毅. 港口城市探索[M]. 南京:河海大学出版社,1991:1–50.
- [13] 钟昌标,林炳耀. 一种港口社会效益定量分析方法的探讨:以宁波港为例[J]. 经济地理,2000,20(3):70–73.
- [14] 梁双波,曹有挥,曹卫东. 港城关联发展的生命周期模式研究:以南京港城关联发展为例[J]. 人文地理,2009,5:66–70.
- [15] 刘翠莲,黄焱兰. 论我国绿色港口建设[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版),2011,24(3):328–331.
- [16] 董国松,范厚明,温文华. 我国低碳绿色港口目标系统构成分析[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版),2011,24(5):672–675.
- [17] 王爱萍. 港口对滨海城市可持续发展影响的定量评价:以山东省日照市为例[J]. 中国人口·资源与环境,2000(10):92–94.



- [18] 赵伟娜,王诺. 港口对城市的绿色经济贡献率[J]. 水运管理,2007,29(10):10-12.
- [19] 曹德友,郭强,程海静. 港口规划环境影响评价指标体系的初步研究[J]. 环境科学与管理,2006,31(5):185-188.
- [20] 杨山,潘婧. 港城耦合发展动态模拟与调控策略:以连云港为例[J]. 地理研究,2011,30(6):1 021-1 031.
- [21] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994:285.
- [22] 贾仁安,丁荣华. 系统动力学——反馈动态性复杂分析[M]. 北京:高等教育出版社,2002:22-25,250-254.
- [23] 何红波,潘毅刚,陈利华. 关于构建区域能源需求预测模型系统的初步思考[J]. 预测与分析,2006(23):3-5.
- [24] 国家环境保护总局,国家统计局. 中国绿色国民经济核算研究报告 2004[J]. 环境经济,2006(34):10-16.
- [25] 张雪花,张宏伟,张宝安. SD 法在城市需水量预测和水资源规划中的应用研究[J]. 中国给水排水,2008,24(9):42-46.
- [26] 裴同英,张宏伟,张雪花,等. 基于系统动力学和灵敏度模型的生态校园物流分析[J]. 四川环境,2010,29(4):64-67.
- [27] 薛冰,宋新山,严登华. 基于系统动力学的天津市水资源模拟及预测[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(6):43-47.

[责任编辑:丁 蓉]

(上接第 139 页)

- [20] 宋戈,高志昊,马和. 石油城市转型期土地集约利用对策研究:以黑龙江省大庆市为例[J]. 中国国土资源经济,2008(12):21-23.
- [21] 王金地,欧名豪,胡传景. 基于 FUZZY 的城市土地集约利用评价:以扬州市为例[J]. 国土资源科技管理,2008(1):29-34.
- [22] 陈嘉,刘秀华. 基于模糊综合评价模型的城市土地集约利用潜力评价:以河南省平顶山为例[J]. 南方农业学报,2011(3):340-344.
- [23] 汪明武,金菊良,周玉良. 集对分析耦合方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [24] 黎孔清,陈银蓉. 低碳理念下的南京市土地集约利用评价[J]. 中国土地科学,2013,27(1):61-66.
- [25] 顾朝林,王颖,邵园,等. 基于功能区的行政区划调整研究:以绍兴城市群为例[J]. 地理学报,2015,70(8):1 187-1 201.
- [26] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.
- [27] 张锐,郑华伟,刘友兆. 基于压力-状态-响应模型与集对分析的土地利用系统健康评价[J]. 水土保持通报,2014,34(5):146-152.
- [28] 姚治华,王红旗,郝旭光. 基于集对分析的地质环境承载力研究:以大庆市为例[J]. 环境科学与技术,2010,33(10):188-194.
- [29] 苏飞,陈媛,张平宇. 基于集对分析的旅游城市经济系统脆弱性评价:以舟山市为例[J]. 地理科学,2013,33(5):538-544.
- [30] 余健,房莉,仓定帮,等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报,2012,28(5):260-266.

[责任编辑:丁 蓉]