

基于系统动力学的港城耦合系统模型构建及仿真 —— 以连云港为例

潘 婧, 杨 山, 沈芳艳

(南京师范大学 地理科学学院, 南京 210046)

摘 要 港城互动关系具有系统动力学耦合特征, 本文根据系统动力学原理和方法, 从港城系统特征、系统模型边界和系统要素因果关系出发, 建立港城耦合系统的 SD 模型, 解剖港城耦合系统多重反馈机理和各系统相互作用过程. 将模型用到江苏省连云港的港城耦合系统中, 并借助 Vensim 软件完成结构和量纲的一致性检验, 确定模型具有可靠性后, 选择投资贡献度、三产增加系数、资源转化系数及资源利用系数等参数作为控制变量进行模型仿真. 结果表明, 连云港完成“十二五”发展规划目标, 实现港城可持续发展, 需要加大第三产业投入, 适度控制码头岸线资源利用率, 同时增加港口投资, 提升港口能力建设, 以适应战略地位提升的连云港港城发展需要.

关键词 港城耦合; 系统动力学; 模型仿真; 连云港

Construction and simulation of port city coupled system model based on systems dynamics: Taking Lianyungang as a case

PAN Jing, YANG Shan, SHEN Fang-yan

(School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract The port city interaction relations have the systems dynamics coupling characteristic, according to the systems dynamics principle and the method. This article establishes the port city coupled system's SD model, and makes the dissection port city coupled system multiple feedback mechanisms and various systems interaction process from the port city system characteristic, the system model boundary and the essential elements causal relation embarks. Using the model in Lianyungang's port city coupled system, Jiangsu Province, and drawing support from the Vensim software to complete the structure and the dimension consistency check, the article chooses investment degree of contribution, three produce increases parameters and so on coefficient, resources transformation coefficient and resources utilization factor as the controlled variable to carry on the model simulation after confirming the reliability of the model. The result indicates that to achieve “twelve-five” development project goal, and realizes the port city sustainable development, Lianyungang needs to expand the tertiary industry investment, controls the wharf waterfront availability of resources moderately, simultaneously increases the harbor investment, and promote port capacity construction, to meets the strategic position promotion Lianyungang port city development need.

Keywords port city coupling; systems dynamics; model simulation; Lianyungang City

1 引言

港口作为水陆运输的联接点, 在交通运输网络中起着重要作用. 随着经济全球化进程的加快, 国际间的产业转移活动日益频繁, 产业开始向港口积聚^[1]. 港口以港口城市为载体, 综合运输体系为动脉, 港口相关产业为支撑, 国际贸易为依托, 并通过彼此间的相互影响, 成为推动区域经济发展的重要力量^[2-3]. 港口与其所在城市是相互依存的耦合体, 城市经济越发达, 对港口的依存度越大; 城市的发展又进一步推动港口综合能力的提升. 针对港城关系, 国内外学者从港口建设的区位选址研究开始, 随着社会经济的变化, 研究范围不断拓展, 相继在实证研究^[4-5]、港城空间结构联系、港城交通网络发展、港城可持续能力等方面取得明显进

收稿日期: 2010-08-08

资助项目: 国家 908 专项 (JS-908-02-11); 江苏省海洋经济可持续发展综合评价; 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介: 潘婧 (1985-), 女, 浙江湖州人, 主要研究方向: 城市与港口系统管理, E-mail: panjingforever@126.com; 通讯作者: 杨山 (1963-), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 城乡发展与区域规划.

展^[6]。港城关系的定量系统化研究始于 21 世纪初,运用定量模型, Gleave^[7]以弗里敦为实证对象分析了港口对城市空间结构的影响; Suzuki^[8]探讨了日本港口的陆域开发问题,认为经济和社会结构的变化对港口陆域的开发范围产生了重要影响; 钟昌标^[9]及陈再齐^[10]分别在港口社会效益及港口经济效益方面取得进展; 运用系统论方法, 梁双波^[11]等对港城关联发展的生命周期模式进行了理论探索; 从空间视角和多元维度, 庄佩君^[12]等将特定地方的港-城界面演变、区位迁移和景观变化置于全球时空背景中, 结合港口城市的政治、经济、社会和文化生活阐释其演变机理。然而, 现有研究大多停留在静态相关性分析。把港城作为一个耦合系统, 揭示港城耦合机理与动态变化的研究仍处于新方法探讨阶段。本文从港城耦合系统特征出发, 运用 SD 的理论与方法构造各子系统基本结构, 分析港城耦合动态机制, 建立港城耦合系统模型, 仿真未来发展情景, 为制定港城发展政策以实现连云港“十二五”规划目标提供理论依据。

2 港城耦合系统的特征

港城耦合是港口与城市两个系统及其内部各构成要素相互作用、相互影响形成的非线性关系总和。根据相关研究成果, 港口系统内部主要包含港航能力、商贸结构、临港工业及港口规模四大与城市系统相关联的要素; 城市系统内部主要包含经济、社会、空间及基础设施四大与港口系统相关联的要素^[10-11]。港城耦合的研究目的是揭示港口内部、城市内部及港城之间相互作用的机理和反馈过程, 通过调控经济社会参数实现经济效益、社会效益及环境效益最大化, 港城耦合系统表现出动态性、复杂性和多重反馈的特征。

1) 港城耦合系统的动态性

港城耦合系统包含的社会、经济、资源等参数具有明显的动态性特征。其中投资的变化, 就业率的浮动, 贸易的涨落, 经济的增减, 产业结构的调整, 码头岸线资源的开发利用等因素都随时间而变化。

2) 港城耦合系统的复杂性

港城耦合系统具有整体性、协同性、非线性形和突变性、他组织和自组织性等复杂系统特征^[13]。系统中各要素相互作用会涌现出系统各部分所不具备的特殊的整体功能。在系统的演变发展过程中, 各因素之间合作和竞争, 推动整个系统向着持续、稳定和协调方向发展。

3) 港城耦合系统存在多重反馈

从港城耦合系统总体来看, 港口系统提供了系统发展进化的动力; 经济系统为整个系统的发展进化提供经济支持; 人口系统提供劳动力与技术; 资源系统作为约束作用与三个子系统彼此联系, 相互影响, 构成了多种反馈。

3 港城耦合系统的 SD 建模过程

1) 模型边界的确定。根据目的、有效及就简原则, 模型边界确定注重建模的时间性、有效性和解决问题的针对性^[14]。模型边界包括结构边界, 地理边界及时间边界。

2) 因果关系图的确定。因果关系图属于构思模型的初始阶段, 便于非技术性、直观地描述系统的结构。

3) 分析因果关系图中各种变量, 确定哪些变量是状态变量, 哪些变量是速率变量和辅助变量, 哪些变量是表函数和其他参数。利用系统动力学符号, 将因果关系图转化为相应流程图。

4) 利用系统动力学专有软件 Vensim, 编写模型程序并进行调试, 直到模拟结果与历史数据基本一致。

5) 给模型输入一种或一组决策变量, 通过模拟实验得出以后年份的相应结果。对结果满意, 便可以采取这种决策方案; 如果对结果不满意, 修改决策方案, 直到满意为止。

6) 使用过程中改进和完善模型。

4 港城耦合系统的 SD 模型构建

4.1 港城耦合系统总体框架

SD (system dynamics model) 模型是建立在控制论、系统论和信息论基础上, 反映系统结构、功能和动态行为特征的一类动力学模型。建立港城耦合系统的 SD 模型, 通过调控模型中各参数变化, 仿真港城未来的经济社会状态以实现经济效益、社会效益及环境效益最大化。调控的重点集中在三个方面: 一是协调港口与城市间的产业联动, 实现港口功能与城市功能的良性互动; 二是合理分配港口和城市所需占用的岸线资源, 实现港城系统的可持续发展; 三是构建港城系统优良的结构, 提升系统风险承受能力, 实现社会效应的友好

响应.

在港城系统中, 城市经济是推动港城系统发展演变和进化的动力, 经济生产创造物质财富, 满足人们的物质消费需求, 提高人口生活质量和生活水平; 同时, 经济生产创造的经济价值可以通过国民收入再分配投资于各个行业和领域, 促进该行业和领域的发展. 港口码头岸线资源是进行城市经济生产的依托, 资源的承载力直接影响港城经济生产活动. 港城系统中还应包括劳动力因素. 劳动力作用于生产部门, 可以提高生产力水平, 创造更多的物质财富和经济价值, 作用于港口部门, 可以提高港口的作业效率, 直接提高港口的综合能力, 提高港口吞吐量. 港城系统的各因素彼此联系、相互影响, 系统的总体框架图如图 1.

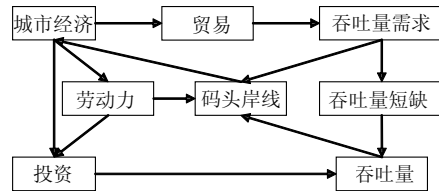


图 1 港城耦合系统总体框架

4.2 港城耦合系统因果反馈图分析

港城耦合系统的港口子系统、经济子系统、人口子系统和资源子系统都有自己的结构特点和功能, 子系统之间通过接口变量彼此联系, 接口变量是一个子系统的输出, 同时是其他子系统的输入.

4.2.1 港口子系统

港口投资额、港口吞吐能力、港口吞吐能力供给量、港口货物吞吐量、港口收入、港口利润之间形成正反馈环; 港口吞吐能力、港口吞吐量供给量、港口货物吞吐量、港口吞吐量缺口、港口 GDP 阻碍率、港口投资率、港口投资额之间存在两个负因果链, 该回路亦为正反馈环 (图 2). 由于投资对于港口吞吐能力影响较大, 港口系统反馈环充分考虑了港口投资率、港口利润、港口 GDP 阻碍率等对港口投资作用较大因素的影响, 通过反馈将港口内部的各个因素联系起来, 反映港口系统的自我发展、自我协调机制.

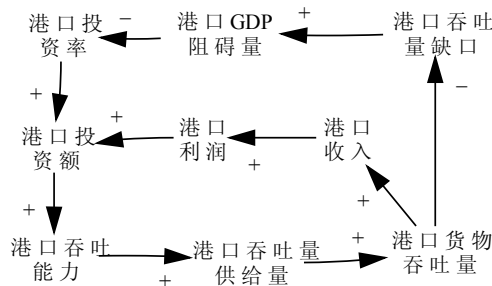


图 2 港口子系统因果反馈

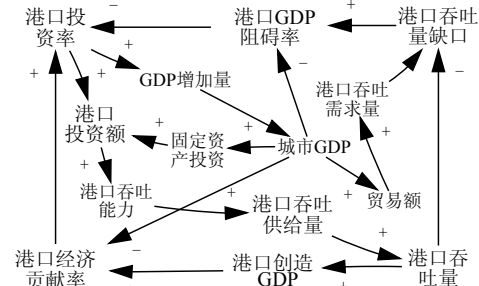


图 3 经济子系统因果反馈

4.2.2 经济子系统

城市 GDP、港口 GDP 阻碍率、港口投资率、GDP 增加量以及城市 GDP、固定资产投资、港口投资额、港口吞吐能力、港口吞吐量、港口吞吐缺口、港口 GDP 阻碍率、港口投资率、GDP 增加量之间形成正反馈环, 反映港口与城市经济之间的相互促进作用; 城市 GDP、港口经济贡献率、港口投资率、GDP 增加量以及城市 GDP、对外贸易额、港口吞吐需求量、港口吞吐缺口、港口 GDP 阻碍率、港口投资率、GDP 增加量之间形成负反馈环, 反映港口与城市经济之间的相互胁迫作用 (图 3). 其中贸易额、固定资产投资及港口经济贡献率作为经济系统的重要变量在与港口系统接口时起到桥梁作用.

4.2.3 人口子系统

城市 GDP、第三产业比重、就业率、社会就业人口、港口就业贡献率、港口投资率之间构成正反馈环, 反映城市产业结构与就业率的相互作用关系^[15]; 港口投资额、港口吞吐能力、港口吞吐供给量、港口吞吐量、港口创造的就业、港口就业贡献率、港口投资率之间构成正反馈环, 反映港口能力与港口投资、港口创造就业相互间的促进关系; 总人口、人口承载力、净迁入率间构成反映人口结构与规模的内部正反馈循环. 其中港口就业贡献率和城市 GDP 是人口系统与港口系统和经济系统间的桥梁 (图 4).

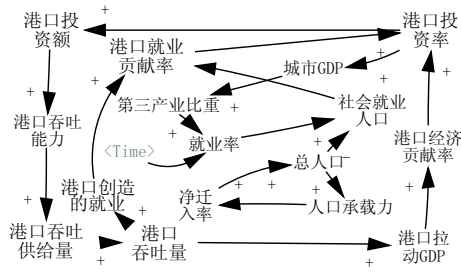


图 4 人口子系统因果反馈

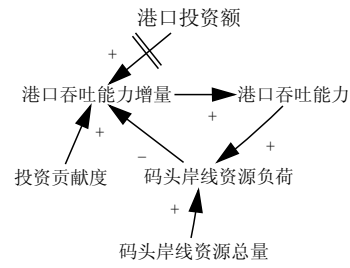


图 5 资源子系统因果反馈

4.2.4 资源子系统

资源系统通过“港口吞吐能力 - 码头岸线资源负荷 - 港口吞吐能力增量 - 港口吞吐能力”之间的负反馈对整个港城系统起制约和胁迫作用,同时资源系统连接以港口投资额为动力源的一个正反馈(图 5)。从系统动力学角度,一个正反馈与一个负反馈共同作用一个状态变量,则交替作用形成 S 型增长特性。S 型增长系统的关键在于其控制作用,速率变量(港口吞吐能力增量)的倒 U 型增加导致了状态变量(港口吞吐能力)呈现 S 型增长。

4.3 港城耦合系统的流图分析和方程建立

根据因果反馈图和各个子系统的机制分析,构建港城耦合系统动力学模型,模型构造的核心是选择状态变量、速度变量、辅助变量和常量,以及模型的结构和方程。港城耦合四个子系统的演变过程表现为动力机制、互动机制和胁迫机制,动力机制表现为人口子系统、经济子系统与港口子系统之间,人口城市化及经济的迅速发展对港城耦合初期对港口的动力作用明显;互动机制主要表现在港城耦合的成长期与成熟期,港城系统通过各子系统的功能转化与协调配合实现系统的有序渐变;胁迫机制存在于港城耦合的各个阶段,港城系统的每个发展阶段都有一个阈值,超过阈值系统会发生变异,就业率以及码头岸线资源作为控制变量在模型中发挥了调节作用。模型流图构造如图 6,模型的重要变量及参数方程如下:

- (1) 城市 GDP = INTEG(GDP 增加量, GDP 初始量), 亿元
- (2) 固定资产投资 = 系数 1 × 城市 GDP + 系数 2 × 城市 GDP + 常量, 亿元
- (3) 贸易额 = 城市 GDP × 贸易依存度, 亿元
- (4) 港口投资额 = 固定资产投资 × 港口投资率, 亿元
- (5) 港口吞吐能力 = INTEG(港口吞吐能力增量, 港口吞吐能力初始值), 万 t
- (6) 港口吞吐能力增量 = DELAY3(港口投资额 × 投资贡献度 × 码头岸线资源载荷 × 码头岸线资源系数, 港口建设周期), 万 t
- (7) 资源载荷 = MAX(资源总量 - 港口吞吐能力 × 码头岸线与吞吐量转换系数, 100), m
- (8) 港口吞吐供给量 = 港口吞吐能力 × 港口效率, 万 t
- (9) 港口吞吐量 = 港口吞吐供给量 × 港口生产负荷, 万 t
- (10) 港口收入 = 港口吞吐量 × 港口费率, 亿元
- (11) 港口利润 = 港口利润率 × 港口收入, 亿元
- (12) 港口创造 GDP = (吞吐量拉动 GDP 系数 × 港口吞吐量)² + 常数, 亿元
- (13) 港口拉动就业 = 吞吐量拉动就业系数 × 港口吞吐量 + 常数, 万人
- (14) 港口经济贡献率 = 港口创造 GDP / 城市 GDP
- (15) 港口就业贡献率 = 港口拉动就业 / 社会就业人数
- (16) 港口吞吐量需求量 = 港口吞吐量生成系数 × 贸易额 + 常量, 万 t
- (17) 港口吞吐量缺口 = 港口吞吐量需求量 - 港口吞吐量, 万 t
- (18) 港口 GDP 阻碍率 = 港口吞吐量缺口 / 城市 GDP × 港口费率
- (19) 港口投资率 = 港口经济贡献率 × 港口就业贡献率 / 港口 GDP 阻碍率
- (20) 第三产业产值 = INTEG(三产增加值, 三产初始值), 亿元
- (21) 三产增加值 = 水运对三产的刺激系数 × 港口吞吐量 + 三产投资增加系数 × 第三产业投资额, 亿元
- (22) 第三产业投资额 = 第三产业投资比重 × 城市 GDP, 亿元

- (23) 总人口 = INTEG(人口净增加量, 初始人口), 万人
- (24) 净迁入率 = 系数 3 × 人均 GDP + 系数 4 × 人口承载力
- (25) 就业率 = 第三产业与就业的关联系数 × 第三产业投资比重 × 系数
- (26) 社会就业人口 = 总人口 × 就业率, 万人
- (27) 人口承载力 = 总人口/城市面积, 万人/km²

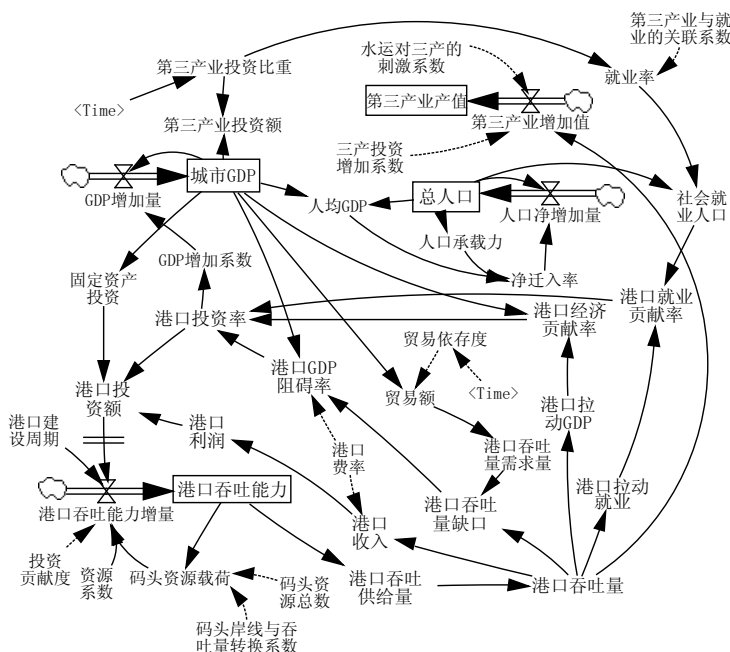


图 6 港城耦合系统的 SD 模型

5 港城耦合系统的 SD 模型仿真

5.1 研究区概况

连云港市位于江苏省东北部, 东临黄海, 北接山东, 背靠云台山, 辖东海、灌云、赣榆、灌南 4 县和新浦、海州、连云三区及国家级经济技术开发区. 连云港港位于连云港市, 呈现“一体两翼”布局, 由海湾内的连云主体港区、南翼的徐圩和灌河港区、北翼的赣榆和前三岛港区共同组成, 是新亚欧大陆桥东桥头堡, 中国十大港之一, 江苏最大海港.

5.2 数据来源及模型有效性检验

数据来源于国家 908 专项调查数据、连云港“十二五”规划建议、连云港统计年鉴、连云港港总体规划、连云港东部滨海地区规划、江苏统计年鉴、江苏海洋经济统计年报和中国海洋统计年鉴. 整个模型借助 Vensim 软件完成结构和量纲的一致性检验; 选取 2000–2008 年数据进行历史性检验, 模型所得结果与港城系统实际数据拟合误差小于 ±3.5%, 模型具有良好的行为复制能力, 能较真实反映连云港港城耦合的实际; 对模型进行灵敏度和极端条件测试, 模型依次通过了敏感性和抗冲击性检验, 具有一定的灵敏度和较强稳定性^[16].

表 1 主要变量模拟结果与实际值比较

指标	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
城市 GDP (亿元)	291/291	312/315	355/350	364/352	399/413	441/456	509/527	620/618	750/750
偏差率	0%	-0.95%	1.43%	3.41%	-3.39%	-3.29%	-3.41%	0.32%	0%
总人口 (万人)	455/456	465/459	470/464	472/468	477/469	480/473	484/479	486/482	490/488
偏差率	-0.22%	1.31%	1.29%	1.50%	1.71%	1.48%	1.04%	0.83%	0.41%
港口吞吐量 (万 t)	3022/3020	3178/3200	3330/3316	3698/3752	4198/4350	5901/6106	7302/7232	8609/8506	10058/10060
偏差率	0.1%	-0.69%	0.42%	-1.41%	-3.50%	-3.36%	0.97%	1.21%	0.01%
岸线资源负荷 (m)	9850/9800	9685/9701	9450/9302	9145/9107	8995/8877	8546/8307	8302/8169	8140/7926	7808/7800
偏差率	0.51%	-0.16%	1.10%	0.42%	1.33%	2.87%	1.69%	2.70%	0.06%

5.3 仿真试验

5.3.1 仿真参数的设定

模型仿真是系统动力学模型应用的关键步骤,目的是通过模拟政策措施为制定政策提供决策支持;识别系统存在的潜在问题,提出对策.考虑模型历史模拟的数据时间长度和未来长时间不确定性,模型仿真起点为 2000 年,终点为 2015 年,时间间隔 $DT = 1$ 年,模型步长取 0.0625.

5.3.2 仿真方案设计

本模型在设计方案时综合考虑了连云港“十一五”期间港口与城市的发展水平,“十二五”发展规划目标几个方面,选取投资贡献度、码头岸线资源利用系数、吞吐量与码头岸线资源转换系数及第三产业投资增加系数作为控制变量,设计以下十种模拟方案(表 2),其中方案 1 为不改变参数的模拟结果.

表 2 仿真模拟方案表

方案	投资贡献度	码头岸线资源利用系数	吞吐量与码头岸线资源转换系数	第三产业投资增加系数
1	0.62	0.001	0.15	0.18
2	0.64	0.001	0.15	0.18
3	0.62	0.0015	0.15	0.18
4	0.62	0.001	0.14	0.18
6	0.64	0.001	0.14	0.18
7	0.64	0.001	0.15	0.19
8	0.62	0.001	0.14	0.19
9	0.64	0.001	0.14	0.19
10	0.62	0.0009	0.13	0.20

5.3.3 仿真结果分析

方案 1 参数值不变的模拟结果为:城市 GDP 随时间呈现指数型增长,2015 年达到 2778 亿元,基本达到十二五规划 2800 亿元的地区生产总值目标;港口吞吐量达到 28173 亿吨,与 3 亿吨的规划目标存在一定差距;码头岸线资源负荷呈现抛物线型下降,2015 年余量 3990m,港口与城市经济的发展以消耗资源环境为代价.方案 2-5 为只改变一个参数的仿真模拟,对比方案 1 结果为:增大投资贡献度对城市 GDP 的增加及港口吞吐量的提升作用明显,但导致码头岸线资源迅速下降;增加码头岸线资源利用系数较大幅度提高了港口吞吐量,对城市 GDP 影响不大,码头岸线资源则迅速下降;减小吞吐量与码头岸线资源转换系数保证了码头岸线资源的可持续,城市 GDP 与港口吞吐量略有减少;增加第三产业投资增加系数较快增加了城市 GDP 增长速率,码头岸线资源负荷减缓速率放缓,港口吞吐量略有减少.只改变一个参数的方案未能实现港城耦合的经济、社会、资源效益综合最大化,方案 6-10 为在前述方案基础上改变两个及两个以上参数的仿真模拟,对比方案 1 结果为:增加投资贡献度同时减小吞吐量与码头岸线资源转换系数的方案 6 结果显示,城市 GDP 与港口吞吐量变化不大,码头岸线资源负荷减缓速率放缓;增加投资贡献度同时增加第三产业投资系数的方案 7 结果显示,城市 GDP 增长速率加快,港口吞吐量及码头岸线资源负荷未有明显变化;减小码头岸线资源转换系数同时增加第三产业投资系数的方案 8 结果与方案 7 基本一致,但就业率较方案 7 提高;同时增加投资贡献度,减小码头岸线资源转换系数,增加第三产业投资系数的方案 9 结果显示,城市 GDP 与港口吞吐量均有明显增长,码头岸线资源呈现较可持续,实现了社会、经济与资源的综合利益最大化目的;更大幅度地减小码头岸线资源转换系数,增加第三产业投资系数同时减小码头岸线资源利用系数的方案 10 结果显示,城市 GDP 与港口吞吐量增长速率初期低于方案 9,但若将模拟终点加长为 2020 年以探求系统的发展趋势,方案 10 的城市 GDP 与港口吞吐量在 2018 年左右超越方案 9,同时码头岸线资源呈现强可持续.为实现十二五规划目标,方案 9 为最佳选择;方案 10 更适合在社会经济达到一定发展水平的后期采用.图 7 为 2008-2015 年方案 1(A 曲线)和方案 9(B 曲线)连云港港城耦合变量结果对比图,图 8 为 2008-2020 年方案 1、方案 9、方案 10(C 曲线)的模拟结果.

5.4 政策建议

从现在至 2015 年,是连云港市推动科学发展,加快经济发展方式转变的关键时期,提升港口的功能地位,加大港城联动效应,是实现“十二五”规划与港城可持续发展的必然选择.针对连云港市港口与城市的具体情况,根据模型的仿真结果,提出以下政策建议:

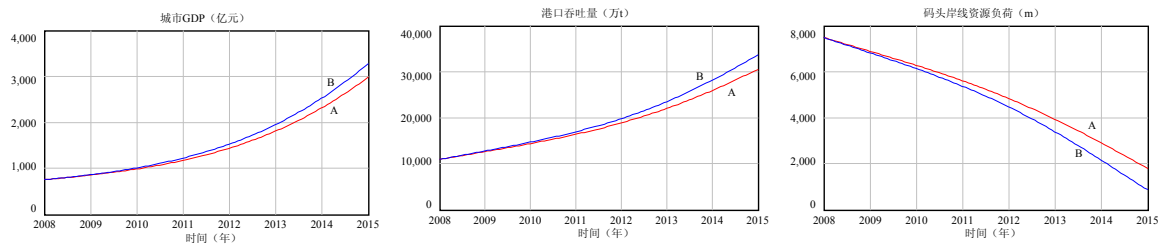


图 7 2008—2015 年方案 1 与方案 9 港城耦合变量对比

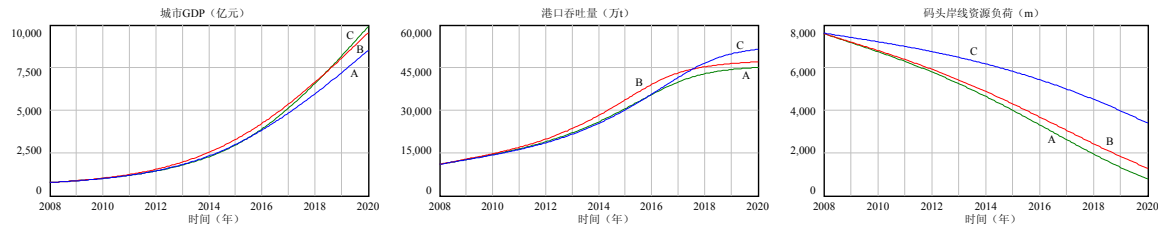


图 8 2008—2020 年方案 1、方案 9 与方案 10 港城耦合变量对比

1) 增加港口投资, 提升港口能力建设. 根据仿真分析, 现阶段港口发展需要外部动力, 同时港口能力建设亟待提高, 以适应战略地位提升的连云港港口与城市发展需要.

2) 加快城市经济发展方式的转变. “十二五”期间, 连云港将调整产业结构, 大力发展旅游业、服务业、文化产业等第三产业, 从港城耦合模型的仿真结果看, 加大第三产业投资有利于城市 GDP、就业率的提高; 加长模拟时间至 2020 年的结果显示, 产业结构调整对后期港口吞吐量及城市 GDP 的拉动作用明显, 同时码头岸线资源呈现强可持续.

3) 适度控制码头岸线资源的利用, 防止港口规模过快建设导致不可持续. 连云港近年来港口建设突飞猛进, 随着产业结构的调整, 第三产业比重逐渐加大, 现今的港口规模建设速度可能导致供过于求的矛盾, 建议适当放慢港口规模建设速度, 考虑结合技术进步, 提高码头岸线资源利用效率等措施改善港口供给能力, 避免资源浪费.

6 结束语

社会经济系统的特征是系统结构的复杂性, 这种复杂性不仅体现在系统本身的要素结构中, 而且体现在系统要素的相互作用与相互联系上. 研究港城系统不能局限于港口与城市本身, 必须从系统要素间的动态关系出发, 对经济、港口、人口与资源等进行全面、综合的研究. 本文在分析港城耦合系统特征和结构基础上, 利用 SD 原理和方法, 建立港城耦合系统的 SD 模型, 模型注重港口与城市之间的相互作用与动态反馈, 旨在揭示港城耦合的内在结构与机理. 模型模拟结果显示, 港口发展依赖于城市经济、劳动力和岸线资源, 同时港口发展带来的辐射效应为城市经济与就业提供了动力. 模型通过参数的变动实现对港城系统趋势与特性的把握, 比一味追求数值的精确求解更具应用价值^[17]. 本文以连云港城市地域与连云港港口进行耦合建模, 结构边界和地理边界具有一定的局限性. 在下一步研究中将深入分析不同历史阶段的港城耦合系统变化趋势, 把连云港港口的辐射范围纳入模型之中, 使模型更具普适性和科学性.

参考文献

- [1] Yochum G R. Static and changing port economic impacts[J]. Maritime Policy and Management, 1998, 2(15): 25-31.
- [2] Davis H C. Regional port impact studies: A critique and suggested methodology[J]. Transportation Journal, 1983, 23(2): 61-71.
- [3] Wang J J, Slack B. The evolution of a regional container port system: The Pearl River Delta[J]. Journal of Transport Geography, 2000, 8(4): 263-275.
- [4] Maryer H M. The Port Geography Research Papers of Chicago and the St Lawrence Seaway[M]. Dept of Geography, No.49, 1957.
- [5] Paerson Roy L. Measuring the impact of the waterborne commerce of the ports of Virginia on employment, wages and other key indices of the Virginia economy[J]. Bureau of Population and Economic Research, 1964:

- 1953–1962.
- [6] 徐永健, 阎小培, 许学强. 西方现代港口与城市、区域发展研究述评 [J]. 人文地理, 2001, 16(4): 28–33.
Xu Y J, Yan X P, Xu X Q. A review of the western studies on modern port and urban/regional development[J]. Human Geography, 2001, 16(4): 28–33.
- [7] Gleave M B. Port activities and the spatial structure of cities: The case of Freetown, Sierra Leone[J]. Journal of Transport Geography, 1997, 5(4): 257–275.
- [8] Suzuki T. Economic and geographic backgrounds of land reclamation in Japanese ports[J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 47: 226–229.
- [9] 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.
Zhong C B, Lin B Y. Study of a method of quantitatively social effect of port— A case study on Ningbo port[J]. Economic Geography, 2000, 20(3): 70–73.
- [10] 陈再齐, 曹小曙, 闫小培. 广州港经济发展及其与城市经济的互动关系研究 [J]. 经济地理, 2005, 25(3): 373–378.
Chen Z Q, Cao X S, Yan X P. Reserach on correlation relation between the development of Guangzhou port and Guangzhou city[J]. Economic Geography, 2005, 25(3): 373–378.
- [11] 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.
Liang S B, Cao Y H, Cao W D. A study on the life-circle pattern of city-port interactive development — Taking Nanjing city-port interactive development as an example[J]. Human Geography, 2009, 5: 66–70.
- [12] 庄佩君, 汪宇明. 港 - 城界面的演变及其空间机理 [J]. 地理研究, 2010, 29(6): 1105–1116.
Zhuang P J, Wang Y M. Port-city interface: Evolution and the spatial mechanism[J]. Geographical Research, 2010, 29(6): 1105–1116.
- [13] 颜泽贤. 复杂系统演化论 [M]. 北京: 人民出版社, 1993: 12–23.
Yan Z X. Evolution of complex systems[M]. Beijing: People's Publishing House, 1993: 12–23.
- [14] 李旭. 社会系统动力学 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2009: 9–14.
Li X. Social System Dynamics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2009: 9–14.
- [15] 周志春. 中国产业结构变动对就业增长影响研究 [J]. 社会科学战线, 2010, 4(3): 259–261.
Zhou Z C. Industrial structure change on employment growth in china[J]. Social Science Front, 2010, 4(3): 259–261.
- [16] 吴传荣, 曾德明, 陈英武. 高技术企业技术创新网络的系统动力学建模与仿真 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 587–593.
Wu C R, Zeng D M, Chen Y W. Modeling and simulation of high-tech enterprises innovation networks using system dynamics[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2010, 30(4): 587–593.
- [17] 王其藩. 系统动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 17–20.
Wang Q F. System Dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 17–20.