

# 基于能值的天津滨海新区可持续发展动力学分析

李春发, 曹莹莹, 杨建超, 韩芳旭

(天津理工大学 管理学院, 天津 300384)

**摘要:** 利用能值理论与系统动力学建模方法, 设计了当前发展模式、经济优先型、环境优先型和可持续发展型四种情景, 对天津滨海新区 2012~2032 年经济-环境系统的可持续性进行了仿真与评价。结果表明: 当前发展模式与经济优先型下, 系统污染重、能值产出率低、环境负荷大, 新区经济-环境系统发展的可持续性差; 在环境优先型下, 环境质量明显优于其他三种方案, 但模拟期内, 新区 GDP 相对较低, 经济效益差, 系统可持续发展潜力小; 可持续发展型下, 系统经济效益与环境效益呈现协调增长趋势。因此, 天津滨海新区应优化产业布局, 大力发展高新技术产业与第三产业; 调整资源利用结构, 增加可更新资源投入比例; 加大环保投资力度, 治理污染源, 促进新区健康可持续发展。

**关键词:** 经济-环境系统; 系统动力学; 能值分析; 可持续发展; 天津滨海新区

**中图分类号:** F293.1; X22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-407X(2015)01-0012-07

## Dynamic Analysis of Sustainable Development in Tianjin Binhai New Area Based on Emergy

LI Chun-fa, CAO Ying-ying, YANG Jian-chao, HAN Fang-xu

(School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Applying emergy analysis and system dynamics method, four scenarios of current development, economic priority, environment priority and sustainable development are designed to simulate and evaluate sustainable development of the economy-environment system in Tianjin Binhai New Area (TBNA) during 2012 and 2032. It is shown that under the current development and economic priority scenario, there exist serious pollution, lower emergy yield ratio and excessive environment loading ratio in TBNA, which is predicted to be a lower sustainable development level; under the environment priority, environment quality is better than the other scenarios, but it has a lower GDP and poorer economic benefits; the potential of sustainable development is small. However, the sustainable development scenario appears to be a growth of coordination both in the economic and environmental benefits during the simulation period.

**Key words:** economy-environment system; system dynamics; emergy analysis; sustainable development; Tianjin Binhai New Area.

## 一、引言

天津滨海新区作为带动我国环渤海地区发展的新的增长极和全国综合配套改革试验区, GDP 总量由

2000 年的 562.4 亿元增加到 2013 年的 8020.4 亿元, 形成了先进制造、新能源、生物制药、石油化工、电子信息、汽车制造和高新技术八大产业体系, 建立了先进制造业产业区、滨海高新区、临港工业区和保税区等九大功能经济区。但新区经济的快速发展造成了资源消费

收稿日期: 2014-07-25; 修回日期: 2014-10-03

基金项目: 国家社会科学基金项目: “促进生态文明建设的产业结构研究”(08BJY004); 天津市“五个一批”人才资助项目: “基于区域创新网络的天津市产业结构优化升级研究”(2013RC01)

作者简介: 李春发(1968-), 男, 湖南郴州人, 教授, 主要从事产业生态系统优化与决策分析研究, (E-mail: chunfal@163.com); 曹莹莹(1989-), 女, 湖北随州人, 天津理工大学管理学院硕士研究生, 研究方向为产业生态学; 杨建超(1986-), 男, 河北唐山, 天津理工大学管理学院硕士研究生, 研究方向为产业生态学; 韩芳旭(1988-), 女, 河北邯郸人, 天津理工大学管理学院硕士研究生, 研究方向为生态工业工程。

的急速增加和生态环境质量的明显下降,严重影响了新区的可持续发展。如何准确把握和定量描述新区经济-环境系统的发展演化趋势,科学优化资源利用结构和合理调整产业空间布局成为当前新区发展亟待解决的问题<sup>[1]</sup>。

众所周知,区域经济-环境系统协调发展是相互促进和耦合协同发展的,具有随机性、复杂性和自适应性。经济发展对环境系统产生干扰的同时,环境系统将进行自我调节并对经济系统作出反馈。科学模拟和准确把握区域经济-环境系统的动态演进过程是区域经济-环境系统和谐可持续发展的基础,对于实现经济-环境系统的协调发展具有重要意义。系统动力学作为一种以反馈控制理论为基础和计算机模拟技术为手段,研究复杂经济系统、生态环境系统和产业生态系统等的理论方法,能定量描述区域经济发展对生态环境的影响<sup>[2](p20)</sup>,为区域经济和管理的规划提供决策支持。该方法广泛应用于地区、城市和自然系统演化规律的研究<sup>[3][4][5]</sup>。近年来通过与生态足迹理论、地理信息系统相结合<sup>[6][7]</sup>,在区域经济与环境、产业系统的可持续性研究中也得到了应用<sup>[8][9]</sup>,但现有研究存在系统中不同性质能量无法比较,各种能物流、信息流无法统一度量的问题。由 H.T.Odum 提出的能值理论解决了这一问题。能值理论以一种统一的度量单位描述系统中各种物质与能量流动情况<sup>[10](p3)</sup>,在国家、城市、工业生产等系统发展演进评价研究中受到重视<sup>[11][12][13]</sup>。为此,本文在对天津滨海新区经济-环境系统分析和系统发展关键因子确定基础上,利用系统动力学和能值理论,选取适宜的评价指标,通过构建天津滨海新区经济-环境系统的能值评价系统动力学模型,预测与评价其未来 20 年的投入产出、能源消耗、环境质量以及经济环境系统发展的可持续性,为天津滨海新区产业结构科学调整、资源合理配置、经济社会和谐发展提供决策依据。

## 二、基于能值的系统动力学模型构建

能值理论是 20 世纪 80 年代由 H.T.Odum 创立的,他将能值定义为“一种流动或存储的能量所包含另一类别能量的量”,指出任何形式能量均来源于太阳能,通过能值转换率能将各种产品、资源和劳务形成过程中所需太阳能的量进行转换,得到其具有的太阳能值<sup>[10]</sup>,单位为太阳能焦耳(solar emjoules,简称 sej)。因此,在利用能值理论进行系统可持续性评价时,可将

系统中各种输入、输出、转化和存储等形式能量转换为统一能值,同时考虑无偿可更新资源对系统的贡献<sup>[10]</sup>,避免市场、汇率和政策等因素对系统的影响,从而有利于更客观的仿真模拟和评价系统的可持续性<sup>[12]</sup>。系统动力学理论是 20 世纪 50 年代由福瑞斯特创立的,该理论通过构建系统动力学模型,利用系统仿真技术模拟、分析与预测复杂系统行为<sup>[2](p120)</sup>。

本文以系统动力学软件 Vensim 为仿真工具,根据系统动力学原理和能值分析方法,结合天津滨海新区经济-环境系统结构特点,以其当前资源配置,经济水平和环境质量为基准,以未来 20 年新区资源可持续利用和环境-经济协调发展为目标,辅以能值评价指标体系,建立新区可持续发展仿真评价模型,并根据相关指标,提出当前发展模式、经济优先型、环境优先型和可持续发展型四种发展情景,通过比较分析各项指标,对四种情景的可持续性进行评价分析<sup>[7]</sup>,具体的评价模型构建步骤如下:

(1)系统边界确定。模型边界确定注重有效性、时间性和问题的针对性。以天津滨海新区经济-环境系统为研究对象,包括滨海新区中心商务区、临空产业区、滨海高新区、先进制造业产业区、中新生态城、滨海旅游区、海港物流区、临港工业区、南港工业区九大功能区。模型仿真起点为 2012 年,终点为 2032 年,时间间隔  $DT=2$  年。

(2)系统结构分析。划分子系统,确定总系统与各个子系统的反馈机制。根据研究需要,弱化社会子系统,把重要因子并入经济子系统,将滨海新区经济子系统、环境子系统融入滨海新区能值评价系统(见表 1)<sup>[14]</sup>,选取各子系统的关键因子,如经济系统选取人口、三种产业劳动力比例、GDP、工业总产值、三种产业分产值、科技投资等;环境系统选取四种污染类型的存量与变化量、固体废物循环利用率、环保投资等;能值评价系统选取能值货币比、能值密度、能值自给率、能值产出率、能值交换率、环境负载率、能值可持续发展指数等指标。根据系统各变量间的关系,可绘制出系统因果关系图与系统流图(见图 1 和图 2)。

(3)从《天津统计年鉴》、《天津滨海新区统计年鉴》、《中国能源年鉴》、《中国环境统计年鉴》和相关部门收集滨海新区 1999~2011 年经济-环境系统数据,并通过能值转换率转换成相应的能值数据,利用 SPSS 数据分析软件进行统计分析、回归分析和表函数等确定系统各因子间的定量关系。

表 1 天津滨海新区经济-环境系统能值评价指标体系

分类	能值指标	代表意义
系统能值流量	可更新能值	系统自有的财富基础
	不可更新能值	系统自有的财富基础
	输入能值	外界输入资源和商品能值
	输出能值	输出资源和商品的能值
	废弃物能值	向外界排放废弃物能值
	能值总量	系统的总能值财富
	自然子系统	能值自给率(ESR)
环境负载率(ELR)		经济活动对环境的压力
废弃物能值比		废弃物利用价值
经济子系统	能值货币比	经济现代化程度
	能值交换率(EER)	对外交流的得失利益
	能值产出率(EYR)	评价系统的经济效益
	能值密度	评价能值集约度和强度
系统可持续指标	可持续发展指数(ESI)	城市可持续发展程度
	能值可持续发展指数(EISD)	考虑能值交换律的可持续发展程度

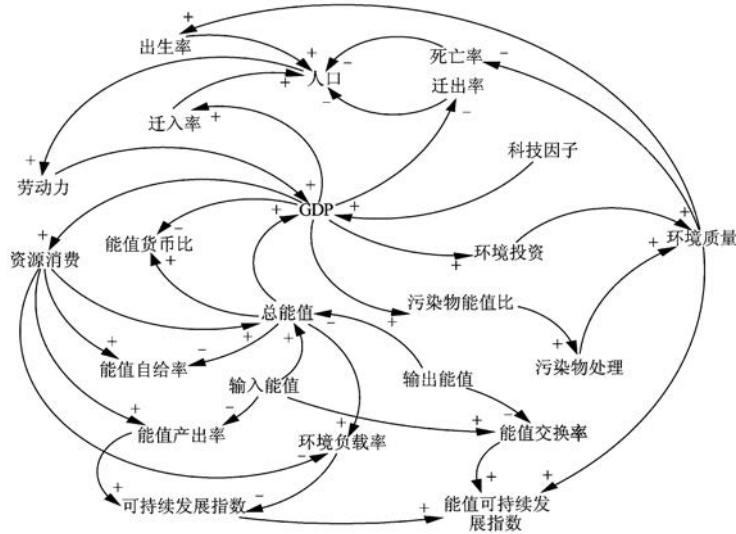


图 1 天津滨海新区经济-环境系统模型因果关系图

(4)系统模型构建。利用系统动力学软件 Vensim,整理系统流程图、编写模型方程并进行调试、检验,直到模拟结果与历史数据基本一致。模型检验通过对模型的调试与验证进行。本文采用真实性验证方法,选择 2007~2011 年的数据进行验证(见表 2)。模

型真实性检验结果显示,系统模拟结果与新区产业生态系统发展情况基本一致,其相对误差在 -8.01%~7.18% 之间,模型模拟能力较好,基本反映了研究区域发展趋势,可作为天津滨海新区经济-环境系统模拟依据。

表 2 模型真实性检验

年份	GDP(亿元)			人口			污染物能值			环境负载率		
	真实值	模拟值	相对误差	真实值	模拟值	相对误差	真实值	模拟值	相对误差	真实值	模拟值	相对误差
2007	2410.33	2599.81	-0.07	1.72E+06	1.83E+06	-0.06	4.70E+20	4.47E+20	0.05	321.47	349.28	-0.08
2008	3450.73	3269.26	0.06	2.03E+06	1.92E+06	0.06	5.15E+20	5.21E+20	-0.01	447.11	429.79	0.04
2009	3810.69	4142.58	-0.08	2.30E+06	2.15E+06	0.07	5.62E+20	5.43E+20	0.04	537.63	515.63	0.04
2010	5030.71	5467.36	-0.08	2.48E+06	2.32E+06	0.07	6.52E+20	6.79E+20	-0.04	614.44	607.09	0.01
2011	6210.74	6155.99	0.01	2.54E+06	2.51E+06	0.01	9.18E+20	8.99E+20	0.02	701.13	714.12	-0.02

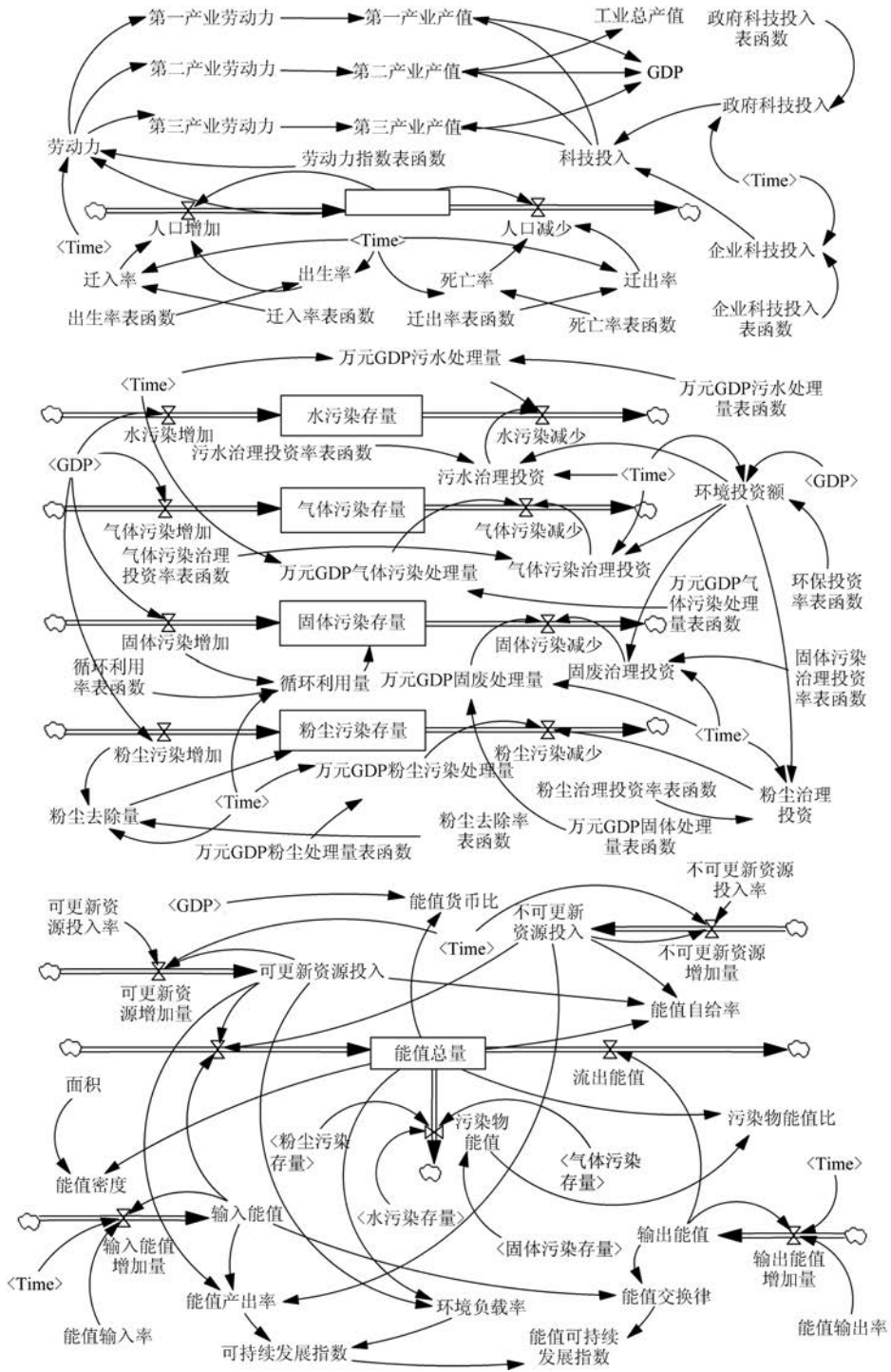


图 2 天津滨海新区经济-环境系统模型流图

(5)系统仿真分析。根据天津滨海新区经济-环境系统耦合关系和新区经济环境协调发展要求,以新区 2011 年发展状况为参照,设计了当前发展模式、经济优先型、环境优先型和可持续发展型四种不同发展情景,对未来 20 年新区经济-环境系统发展趋势进行模拟与分析。

### 三、研究结果分析

根据天津滨海新区经济-环境系统可持续发展状况、系统动力学模型结构特点和新区“十二五”发展规划与生态文明建设要求,选取劳动力影响因子、科技投

入影响因子、劳动力比例、环保投资率、可更新资源投入、不可更新资源投入、系统外能值输入和能值输出 8 项指标作为控制变量。下面对新区当前发展模式、经济优先型、环境优先型和可持续发展型的未来 20 年发展趋势模拟情况进行分析。

### 1. GDP 与能值密度

如图 3 所示,天津滨海新区经济-环境系统 GDP 在四种情景下,均呈现出增长的趋势,到 2032 年,经济优先型情景下 GDP 达 2.09 万亿元,可持续发展型为 1.91 万亿元,当前发展模式为 1.45 万亿元,环境优先型为 1.03 万亿元,各情景 GDP 年均增长率分别为 5.18%、5.51%、4.92%、4.71%。在模拟期内,经济优先型情景 GDP 始终高于其他三种情景,但可持续发展型表现出更快速增长,说明以追求环境、经济和社会协

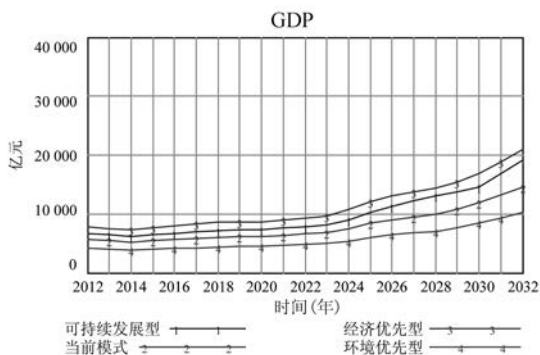


图 3 天津滨海新区 GDP 模拟结果

### 3. 能值产出率与能值交换率

能值产出率是系统产出能值与经济反馈能值之比,可评价系统产出对经济的贡献程度,其值越高,系统的经济效益越好<sup>[10]</sup>。如图 5 所示,四种情景未来 15 年变化趋势基本一致,而 2027 年以后,经济优先型和可持续发展型以相对较快的速度增长,到 2032 年可持续发展型明显高于其他三种情景,达到 11.657,说明随着时间延续,可持续发展型模式将实现经济与环境协调发展,经济在经历初期缓慢增长后,表现出较强增

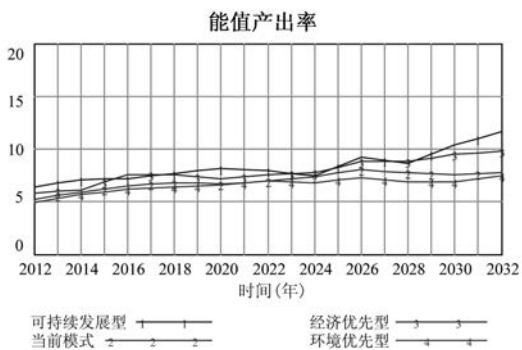


图 5 天津滨海新区能值产出率模拟结果

调发展的可持续发展系统更具活力。模拟期内能值密度均增长较快,明显高于国内其他同类地区,表明新区生态产业系统发展良好,系统能值积累多,属于发达地区行列。

### 2. 能值货币比

能值货币比是一个地区全年总能值使用量与当年国内生产总值之比,用于分析环境产出、经济产出和劳动的贡献大小,其值越高,表示经济活动所需能值中免费的可更新资源能值越多,单位货币可购买的能值越多<sup>[10]</sup>。如图 4 所示,模拟期内四种情景均为先增后降,环境优先型为  $6.9 \times 10^{12}$ ,显著高于可持续发展型的  $4.65 \times 10^{12}$ 、当前发展模式的  $5.24 \times 10^{12}$  和经济优先型的  $4.15 \times 10^{12}$ ,说明系统对外界依赖环境优先型最小,经济优先型最大,对外开放程度反之。

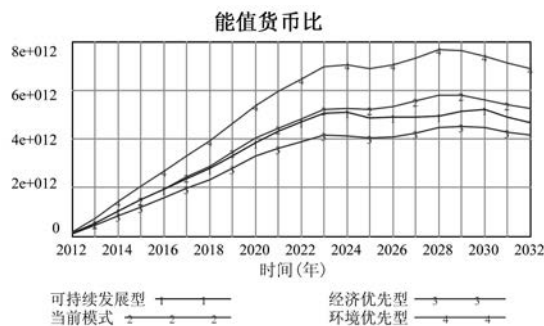


图 4 天津滨海新区能值货币比模拟结果

加动力,与 GDP 模拟中出现的结果相一致。

能值交换率是商品能值与购买者支付货币相当的能值比率,用于衡量能值在系统内外的流动过程中能值交换的比例<sup>[10]</sup>,其值越大,则系统在贸易中越有利。如图 6 所示,四种情景中能值交换率均大于 1,说明新区均处于生态盈利阶段,均呈现一种波浪形变化趋势,仿真期内变化不大。可持续发展情景高于其他三种情景,说明在此种情景下系统效益最好,系统由劳动密集型向知识密集型转型成果显著。

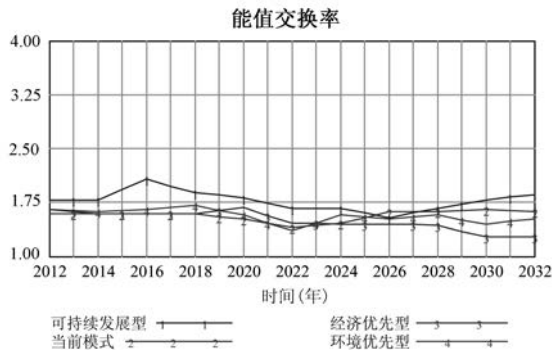


图 6 天津滨海新区能值交换率模拟结果

### 4. 污染物能值与污染物能值比

污染物能值比用于描绘传统粗放型经济模式对环境造成的冲击,其值越大,说明系统资源利用效率越低,废弃物回收利用价值越大。如图 7 和图 8 所示,四种情景污染物能值比均出现快速下降趋势,可持续发展型最低,到 2032 年为 0.00045,说明新区经济-环境系统资源利用效率与循环再生能力相对较高。但当前

发展模式和经济优先型污染物能值持续快速增长,到 2032 年达  $6.5 \times 10^{21}$  sej,经济增长仍以大量资源消耗为代价,且循环利用率较低。可持续发展型与环境优先型呈现先升后降趋势,至 2032 年分别为  $3.9910^{21}$  sej 和  $3.310^{21}$  sej,说明加大环境保护投资力度,提高资源回收利用率对于新区环境质量改善具有重要的理论意义和现实意义。

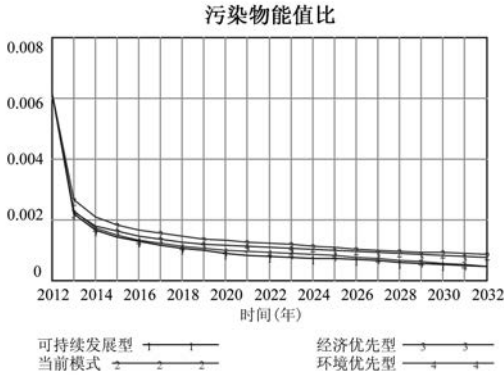


图 7 天津滨海新区污染物能值比模拟结果

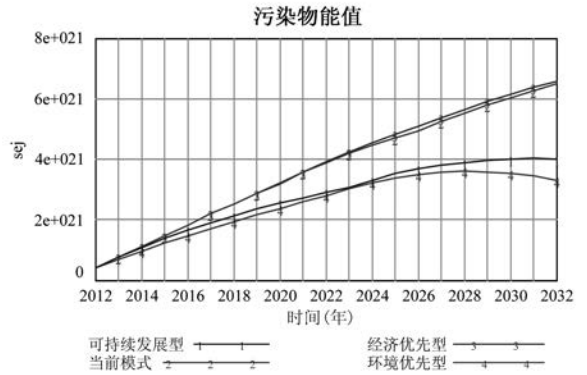


图 8 天津滨海新区污染物能值模拟结果

### 5. 环境负载率 (ELR)

环境负载率为系统不可更新资源投入能值量与可更新资源投入能值量之比,可评价经济活动对环境的影响,其值越大,系统生态环境承受压力越大,说明系统能值利用强度大。如图 9 所示,四种情景 ELR 均较高,说明系统环境负荷压力大。可持续发展型和环境优先型环境负载率相对较低,但呈现出不断增大趋势,说明未来一段时间内新区经济增长仍以大量不可更新资源消耗为主,环境胁迫严重。

虑能值交换率的复合型系统可持续发展指标,其值越高说明单位环境压力下的社会经济效益越好,系统的可持续性越好<sup>[10]</sup>。如图 10 所示,四种情景均呈快速下降的趋势,到 2032 年可持续发展型的指数为 0.0142,经济优先型为 0.00407,环境优先型为 0.00453,当前发展模式 0.00473,说明系统可持续性较差,这与新区资源配置和发展阶段有关,在大量不可更新资源消耗的背景下,严重地削弱了系统发展的可持续性。因此,不断扩大可更新资源的利用比例、增加能值进口、减少低附加值产品出口是新区经济-环境系统优化的方向。

### 6. 能值可持续发展指数 (EISD)

能值可持续发展指数是在 ESI 的基础上综合考

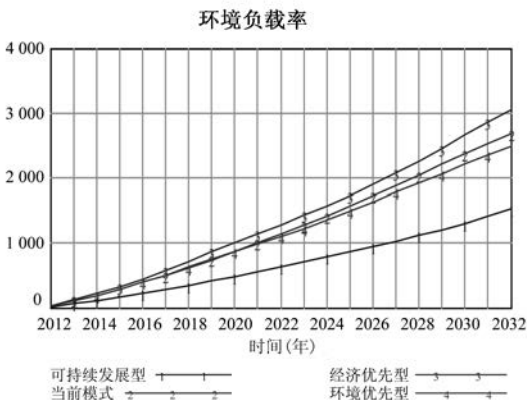


图 9 天津滨海新区环境负载率模拟结果

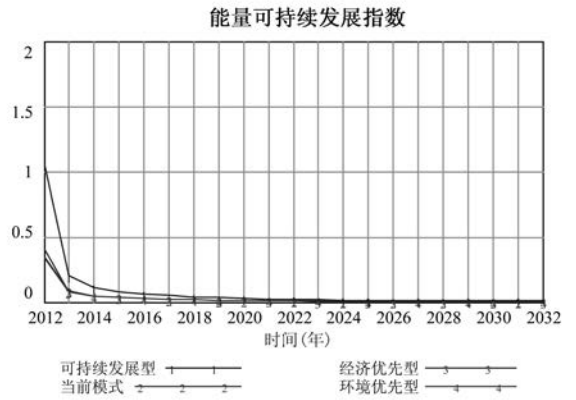


图 10 天津滨海新区能值可持续发展指数模拟结果

## 四、结 论

本文利用系统动力学和能值理论,构建天津滨海新区经济-环境系统发展的四种情景,通过系统模拟仿真分析得出可持续发展型情景为最佳。该情景能保证新区经济持续快速增长,实现环境与社会和谐发展,且各种决策变量均在可实现范围内。为确保可持续发展型情景的实现,未来滨海新区发展需采取以下措施:

第一,优化产业布局,调整资源利用结构。新区应在逐步扩大高新技术产业、先进制造业和航空航天业等规模基础上,加大发展第三产业,着力发展于家堡金融区、响螺湾商务区、泰达 MSD、海港物流区以及滨海旅游区等功能区,提高第三产业固定资产投资、增加第三产业劳动力和招商引资;提高科技投入比例,通过技术创新提高可更新资源在资源消耗中比例,重点开发太阳能资源、风能资源和潮汐能资源,降低不可更新资源依赖、调整不可更新资源利用结构。在一次能源消费中,煤炭利用比例降至 53.4% 以下,石油利用比例约为 27.5%,天然气和非化石能源利用比例分别升高至 15.9% 和 3.2%<sup>[15]</sup>。通过高新产业政策引导,促进高能质原料进口,提高能值利用效率,增加系统能值积蓄,改善新区可持续发展能力。

第二,提高环保意识,加大环保投资力度。天津滨海新区已进入工业化中期阶段,环境问题累积是不容忽视的问题。新区应根据国家节能减排要求,结合可持续发展情景的相关参数,提高环保投资比例、资源利用率和废物回收利用率,完善循环经济体系,改善环境质量。

仿真模拟分析说明,要实现新区经济-环境系统持续健康发展,需根据新区经济与环境各要素间的耦合关系,优化新区产业生态系统的资源利用结构与产业空间布局、加大高附加能值产业的引进与扶植力度、增加产业科技开发的投入、贯彻实施系统的优化改革方案,从国家战略角度规划区域的可持续演进,最大程度发挥新区发展潜力,从而实现新区经济-环境系统健康、高效、和谐发展。

### 参考文献:

[1] 谷树忠,胡咏君,周洪. 生态文明建设的科学内涵与基本路径[J]. 资源科学,2013,35(1):2-13.

- [2] 钟永光,贾晓菁,李旭. 系统动力学[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [3] CROOKES D J,BLIGNAUT J N,De WIT M P. System dynamic modelling to assess economic viability and risk trade-offs for ecological restoration in south africa [J]. Journal of Environment Management, 2013, 120 (15): 138-147.
- [4] 沈悦,马续涛. 基于系统动力学的住宅价格变化仿真模拟研究——来自上海市的经验证据[J]. 大连理工大学(社会科学版),2013,34(2):1-7.
- [5] LI F J,DONG S C,LI F. A system dynamic model for analyzing the eco-agriculture system with policy recommendations [J]. Ecological Modelling,2012,227(24):34-45.
- [6] BALA B K,HOSSAIN M A. Modeling of ecological footprint and climate change impacts on food security of the hill tracts of chittagong in bangladesh[J]. Environment Modelling & Assessment,2013,18(1):39-55.
- [7] GUAN D J,GAO W J,SU W C,et al. Modeling and dynamic assessment of urban economy-resource-environment system with a coupled system dynamics-geographic information system model [J]. Ecological Indicators,2011,11(5):1333-1344.
- [8] 刘慧,郭怀成,盛虎,等. 系统动力学在空港区域规划环境影响评价中的应用[J]. 中国环境科学,2012,32(5):933-941.
- [9] KIANI B,POURFAKHRAEI M A. A system dynamic model for production and consumption policy in iran oil and gas sector[J]. Energy Policy,2010,38(12):7764-7774.
- [10] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [11] SICHE R,PEREIRA L,AGOSTINBO F. Convergence of ecological footprint and energy analysis as a sustainability indicator of countries;peru as case study [J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat,2010,15(10):3182-3192.
- [12] 师谦友,王伟平. 基于能值分析的榆林市循环经济发展研究[J]. 地域研究与开发,2010,29(2):59-64.
- [13] 楼波,徐毅,林振冠. 煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建[J]. 生态学报,2011,31(24):7591-7599.
- [14] 孙玥,程全国,李晔,等. 基于能值分析的辽宁省生态经济系统可持续发展评价[J]. 应用生态学报,2014,25(1):188-194.
- [15] 天津市滨海新区人民政府. 天津滨海新区能源发展十二五规划 [EB/OL]. <http://www.docin.com/P-725692005.html>,2014-12-30.

# 基于能值的天津滨海新区可持续发展动力学分析

作者: [李春发](#), [曹莹莹](#), [杨建超](#), [韩芳旭](#), [LI Chun-fa](#), [CAO Ying-ying](#), [YANG Jian-chao](#),  
[HAN Fang-xu](#)  
作者单位: [天津理工大学管理学院, 天津, 300384](#)  
刊名: [大连理工大学学报 \(社会科学版\)](#)   
英文刊名: [Journal of Dalian University of Technology \(social sciences\)](#)  
年, 卷(期): 2015(1)

引用本文格式: [李春发](#). [曹莹莹](#). [杨建超](#). [韩芳旭](#). [LI Chun-fa](#). [CAO Ying-ying](#). [YANG Jian-chao](#). [HAN Fang-xu](#) [基于能值的天津滨海新区可持续发展动力学分析](#) [期刊论文] - [大连理工大学学报 \(社会科学版\)](#) 2015(1)