

武汉城市圈经济资源环境耦合的系统动力学模拟

刘承良^{1,2}, 颜 琪³, 罗 静¹

(1. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079;

2. 湖北省发展和改革委员会/华中师范大学武汉城市圈研究院, 武汉 430079;

3. 港中旅(珠海)海洋温泉有限公司, 珠海 519055)

摘要:都市圈经济资源环境系统通过相互作用形成了一个具多重反馈的耦合巨系统,三者间存在互相制约、相互作用的高阶、非线性复杂关系,传统的线性研究范式面临挑战。引入系统动力学理论,通过因果关系和流图分析方法,以武汉城市圈为例,建立经济-资源-环境耦合作用的系统动力学模型,结果显示:①模型具有很好的普适性,能真实反映系统要素之间相互耦合的动态演化过程,可以为调控经济资源环境系统协调发展提供决策参考;②借助模型可以对内部错综复杂、相互联系和相互耦合的巨系统进行动态多情景模拟,并揭示出协调发展模式下的经济快速增长为资源有效利用和环境保护治理提供更好的支持,三者相互促进,是武汉城市圈实现可持续发展的相对最佳方案。

关键词:系统动力学;耦合作用;经济资源环境系统;多情景模拟;武汉城市圈

1 引言

经济资源环境复合系统(Economy Resources Environment System, ERE)是一个复杂的巨系统,其稳定性、可控性决定着资源环境支持系统与人类社会经济系统可持续发展状态,已成为学界共同关注的焦点^[1]。相关研究和探索主要表现为:①在研究内容上,集中于城市化与生态环境^[2,3]、人口与资源环境^[4,5]、PRED(人口-资源-环境-发展)系统耦合状态^[6]、经济与环境^[7]、城乡地域空间耦合^[8]等领域,近年受可持续发展思潮影响,系统动力学不断应用于社会经济与资源环境协调发展领域;②在研究方法上,主要构建现代系统理论体系,建立非线性系统模型开展定量研究,以投入-产出模型、多目标决策模型和系统动力学模型为主^[9],特别是系统动力学已广泛应用于社会、经济、资源、环境等系统复杂性的定量研究^[10,11],能很好地揭示经济增长、资源节约、环境保护间的耦合协调发展机制^[12];③在研究尺度上,以全球或发达国家(地区)等大尺度空间为主,如罗马俱乐部以系统动力学世界模型World III为基础研究全球资源环境问题,指出资源危机的可能性^[13],一些国内学者试图运用系统动力学,对区域(中国及其山东、青海、江苏等省域)可持续发展状态展开定量评价^[9,14-16]。

综上所述,系统动力学适用于ERE系统分析中问题范围广、耦合关系复杂、影响因

收稿日期:2012-01-30;修订日期:2013-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41201130、41101361);国家社会科学基金项目(11CJL048)

作者简介:刘承良(1979-),男,汉族,湖北武汉人,博士、副教授,主要从事空间复杂性研究。

E-mail: chenglianglew@163.com

通讯作者:罗静(1966-),男,汉族,湖北松滋人,教授,博士生导师,主要从事经济地理学教学研究。

E-mail: luojing@mail.ccnu.edu.cn

素众多等特点,具有广阔发展前景。但关于ERE系统的模拟与优化方面的研究成果不多,特别是针对都市圈或城市群研究少见,从协同学角度,定量揭示都市圈经济资源环境耦合作用的动力机制和发展趋势研究相对薄弱^[17]。

当前,区域经济资源环境耦合作用强烈。一方面经济发展通过资源消耗、污染物排放等能量和物质循环方式对资源环境产生胁迫作用;另一方面经济发展所引起的资源危机和环境效应又通过资源环境承载力下降而对其产生约束作用^[18],尤其是在经济和人口密度高、城乡地域分割浅、城际关联距离近的都市圈,这种双重机制作用更加强烈^[19]。武汉城市圈是由武汉及其周边100 km范围内8座中心城市(鄂州、黄冈、黄石、孝感、咸宁5个地级市和仙桃、天门、潜江3个省直管县级市)组成的,人口、经济高度密集的(面积不到湖北省1/3,却集中了全省1/2的人口、60%成以上的GDP总量)区域综合体。近年来在整个圈域经济高速发展的同时,仍然面临着突出的资源环境问题。随着全国资源节约型和环境友好型社会(简称“两型”社会)建设综合配套改革试验区的落户,如何实现经济与资源环境协调发展,已成为当前武汉城市圈乃至其它都市圈“两型”社会建设的核心和关键议题。解决的关键是厘清都市圈经济资源环境的耦合作用机制和发展态势。基于此,本文采用系统动力学方法,构建都市圈经济资源环境耦合作用的系统动力学(System Dynamics, SD)模型,以武汉城市圈为研究区,实证提炼和动态模拟经济资源环境系统的4种耦合作用情景,并展开比较分析,以为都市圈空间可持续发展提供理论借鉴和政策建议。

2 ERE系统耦合作用的SD模型

2.1 因果反馈分析

根据系统分解协调原理,将ERE系统解构为经济子系统(产业水平、经济结构和产业投入)、资源子系统(资源生产、资源耗用和资源条件)和环境子系统(环境水平、环境压力和环境抗逆)3个子块(图1)。

根据ERE系统相互联系、相互影响和相互作用的机制,建立因果反馈流程图(图1),每一个子系统运行既取决于其内部结构,同时也受到其他子系统的关联作用^[18],其中主要的反馈关系环有:①产业水平的提高是产业和部门结构优化及固定资产投资递增的

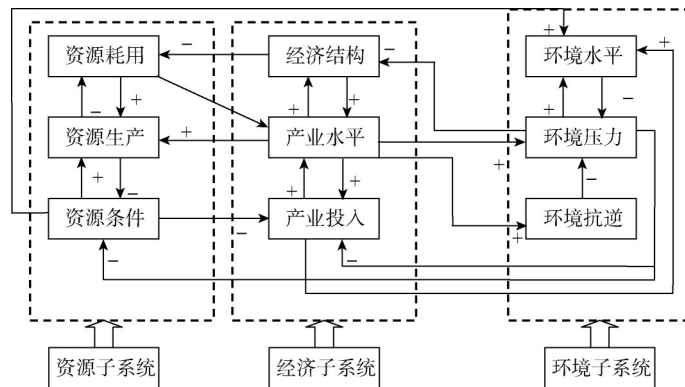


图1 ERE复合系统主要因果反馈回路

Fig. 1 The main feedback channel of ERE composite system

结果，同时产业产值的增加也带来了资源的消耗和环境的污染；② 资源的生产取决于资源开发的资产投资，而投资又直接与产业水平相关联；③ 当资源耗用速度超过资源生产供应速度（或资源条件阈值），资源将限制经济发展，使生产性投资相对减少，促进部门结构的调整；④ 高耗能、重污染的第二产业比重过大，产业水平的提高使“三废”排放量不断增加，环境问题日益突出，压力倍增，将对经济发展起到反作用，即限制生产性投资增加，从而降低产业经济增长速度；⑤ 环境系统与产业经济系统关系密切，环保性投资增加，污染治理力度越大，环境压力越小，则与经济之间的“阻力”越小，社会经济发展越快。

2.2 SD模型结构

根据ERE系统的主要因果反馈回路，结合系统动力学（SD）模型的可操作性原则，从经济、资源、环境3个方面，构建三维多指标评价体系（表1），变量较为全面反映出都市圈ERE系统的耦合交互作用机制。

(1) 经济子系统

经济子系统主要通过产业水平（GDP、一二三产的产值等）、产业投入（全社会固定资产投资等）和经济结构（劳动力水平、从业结构、产值结构等）来反映。其中，第一产业产出、第二产业产出、第三产业产出为水平变量，全社会固定资产投资、劳动力水平（为第一产业、第二产业和第三产业从业人数之和）等作为辅助变量和其他子模块接口，借助道格拉斯（CD）生产函数，将资金作为内部循环因素，将劳动力作为外部投入要素，采用黑箱化方法表示投入—产出转化机制。

(2) 资源子系统

根据当前都市圈资源和能源的利用结构和水平，将水资源、土地资源、能源作为资源子系统的重要因素，重点考量原煤、原油、电力工业资本、供水量、耕地面积、林地面积等资源能源的赋存条件、生产和耗用，作为系统的水平变量，通过对资源生产以及资源消

表1 武汉城市圈SD模型关键变量
Tab. 1 Key variables of SD model in Wuhan Metropolitan Area

一级 指标	二级 指标	三级指标	指标解释	单位
产业 水平	产业 产出	第一产业产出	第一产业总产出	亿元
		第二产业产出	第二产业总产出	亿元
		第三产业产出	第三产业总产出	亿元
		非农产业产出	农村工业、建筑业、交通运输业、批发贸易业、餐饮业、服务业和林业产出总和	亿元
	产值 水平	社会总产出	国民生产总值	亿元
		GDP	国内生产总值	亿元
		人均GDP	国内生产总值/常住总人口	元
		工业总产值	工业总产值	亿元
	增长 速度	农业总产值	农业总产值	亿元
		第一产业年增长率	第一产业产值年均增长率	/
		第二产业年增长率	第二产业产值年均增长率	/
		第三产业年增长率	第三产业产值年均增长率	/

续表 1

人口结构		总人口	常住总人口	万人	
		流动人口	流动人口数	万人	
		额定出生率	平均出生率(= 出生人数/总人口数)	/	
		额定死亡率	平均死亡率(= 死亡人数/总人口数)	/	
		计划生育影响因子	计划生育达标率	/	
经济结构	部门结构	社会劳动力	全行业从业人数	万人	
		第一产业劳动力	第一产业从业人数	万人	
		第二产业劳动力	第一产业从业人数	万人	
		第三产业劳动力	第一产业从业人数	万人	
		一产比重	第一产业占 GDP 比重	/	
产值结构		二产比重	第二产业占 GDP 比重	/	
		三产比重	第三产业占 GDP 比重	/	
	经济投入	投资规模	社会生产投资	全社会固定资产投资总额	亿元
第一产业投资			第一产业固定资产投资额	亿元	
第二产业投资			第二产业固定资产投资额	亿元	
第三产业投资			第三产业固定资产投资额	亿元	
投资结构		第一产业投资系数	第一产业投资占固定资产投资总额比重	/	
		第二产业投资系数	第二产业投资占固定资产投资总额比重	/	
		第三产业投资系数	第二产业投资占固定资产投资总额比重	/	
		社会生产投资系数	全社会固定资产投资占总投资额比重	/	
资源条件		土地资源	耕地面积	耕地面积	千 hm ²
			建成区面积年增长率	建成区面积年均增长率	%
	人均耕地面积		人均耕地面积(= 耕地面积/总人口数)	hm ² /人	
	林地面积		林地面积	km ²	
	林地面积年增长率		林地面积年均增长率	%	
		森林覆盖率	森林面积占土地面积的百分比	%	
	水资源	供水量	一年生产和生活供水总量	亿 m ³	
供水年增加量		供水量年均增长量	亿 m ³ /年		

耗分析反映资源子系统对经济和环境的影响；其中原煤、原油、电力、水资源等生产量及使用量指标主要表征圈内经济发展的资源生产及耗用情况，而原煤、原油、水电缺口等指标则重点反映圈内经济发展的外部资源供给情况。

(3) 环境子系统

经济发展对环境的影响主要体现在环境水平（如“三废”储存量）、环境压力（如“三废”排放）和环境抗逆（如“三废”治理等）方面，将环境水平（如废气、废水和固

续表 1

资源	投入	水利投资	水利设施建设投资	亿元
		水利投资比	水利设施建设投资额占固定资产投资总额比重	/
		电力工业资本	电力工业固定资产总额	亿元
		电力资本增加	电力工业固定资产增加额	亿元
		电力资本折旧	电力工业固定资产额的折旧值	亿元
		电力资本寿命	电力固定资产使用年限	年
		电力投资	电力工业年投资额	亿元
		电力投资比	电力投资额与社会生产投资比	/
		原油工业资本	原油工业固定资产总额	亿元
		原油资本增加	原油工业固定资产增加额	亿元
	生产	原油资本折旧	原油工业固定资产额的折旧值	亿元
		原油投资比	原油工业投资额与社会生产投资比	/
		原油投资	原油工业年投资额	亿元
		原煤工业资本	原煤工业固定资产总额	亿元
		原煤增加资本	原煤工业固定资产增加额	亿元
		原煤资本折旧	原煤工业固定资产额的折旧值	亿元
		原煤投资比	原煤工业投资额与社会生产投资比	/
		原煤投资	原煤工业年投资额	亿元
		原煤资本寿命	原煤固定资产使用年限	年
		发电量	为武汉城市圈送出的总电量	万 t 标煤
	产出	原油产量	能直接用于销售和生產自用的原油量	万 t 标煤
		原油生产率	原油投入与产出比	/
		原煤生产率	原煤投入与产出比	/
		原煤生产量	经过开采而产生的合格原煤的量	万 t 标煤
		用电量	用电的总量	万 t 标煤
	消耗	原油消耗量	对原油的消耗总量	万 t 标煤
		原煤消耗量	对原煤的消耗总量	万 t 标煤
		用水量	对水的消耗总量	亿 m ³
	耗用	用电缺口	需从外界填补的用电量	万 t 标煤
		原油缺口	需从外界填补的用油量	万 t 标煤
		原煤缺口	需从外界填补的用煤量	万 t 标煤
		用水缺口	需从外界填补的用水量	亿 m ³
	环境水平	废水储量	废水储存的总量	万 t
		固废存量	固废储存的总量	万 t
		废气储量	废气储存的总量	亿 m ³

体废弃物储量等)作为环境子系统的水平变量。环境水平变量通过与环境压力变量(如工业生产和居民生活的“三废”排放等)和环境抗逆变量(如环境治理和环境保护等)等辅

续表 1

环境 压力	水污染	废水年增长率	废水量每年的增长率	万 t/年
		废水年减少率	废水量每年的减少率	万 t/年
		工业废水排放量	工业废水每年的排放量	万 t
		万元工业废水排放	万元产值工业废水排放量	t/万元
		城镇人均生活废水排放	城镇人均生活废水排放	t/人
		废水污染比	造成污染的废水与废水总量的比	/
		工业固废排放量	工业固废每年的产生量	万 t
	固体 污染	万元工业固废排放	万元产值工业固废产生量	t/万元
		城市生活固废排放量	城市生活固废排放量	万 t
		城镇人均生活固废排放	城镇人均生活固废排放	t/人
		固废年增长率	固废每年的增长率	万 t/年
		固废减少率	固废每年的减少率	万 t/年
		固废污染比	造成污染的固废与固废总量的比	/
		废气年增长率	废气每年的增长率	亿 m³/年
	大气 污染	废气年减少率	废气每年的减少率	亿 m³/年
		工业废气排放量	工业废气每年的排放量	亿 m³
		万元工业废气排放	万元产值工业废气排放量	万 m³/万元
		城市生活废气排放量	城市生活废气排放量	亿 m³
		城镇人均生活废气排放	城镇人均生活废气排放	万 m³/人
		废气污染比	造成污染的废气与废气排放总量的比	/
		工业废水治理量	对工业废水治理的总量	万 t
环境 抗逆	水污染 治理	生活污水治理量	对生活污水治理的总量	万 t
		废水治理投资	治理废水的年总投资额	亿元
		工业废气治理量	对工业废气治理的总量	亿 m³
	大气污 染治理	生活废气治理量	对生活废气治理的总量	亿 m³
		废气治理投资	治理废气的年总投资额	亿元
		工业固废治理量	对工业固废治理的总量	万 t
	固体污 染治理	固废治理投资	对固废治理的总量	亿元
		环保投资	环保投资额	环境保护的年投资总额

助变量接口，影响到经济和资源子系统。

(4) ERE 系统相互作用机制

ERE 系统是经济资源环境系统高度融合的复杂巨系统，具有非线性、因果性、多阶次、动态性和多重反馈性等特点，系统间耦合作用表现为一种“行为反馈”过程：①随着

都市圈经济不断发展, 以及人口数量的持续增长, 对环境产生了巨大的压力, 导致环境质量不断降低, 从而限制经济的发展; ②资源是经济发展的基础, 经济的发展需要资源作为支撑, 经济发展促进资源的开发与利用, 过度的资源开发或者利用, 特别是不可再生资源, 对经济的发展产生巨大的约束作用; ③环境通过人口驱逐、资本排斥以及政策干预制约经济的发展, 也对资源的利用起到约束作用 (图2)。

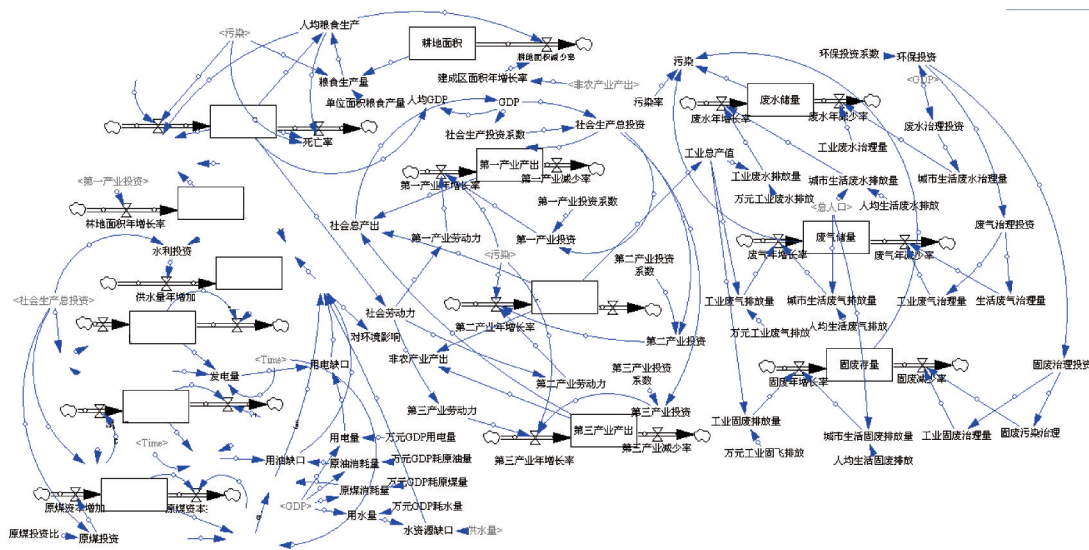


图2 武汉城市圈ERE复合系统的SD模型流图

Fig. 2 Flow chart of SD model of ERE composite system in Wuhan Metropolitan Area

2.3 参数确定

根据ERE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、趋势法、表函数、回归法、CD函数等多种方法确定模型参数 (表2)。

2.4 模型检验

选取2005-2009年数据, 借助VENSIM PLE软件完成Reality check历史检验, 结果显示仿真值和历史值的误差不超过0.65%, 部分主要指标拟合相对误差在0.1%~6.0%之间, 模型拟合度较高, 适用性较强, 具有较好的复制能力, 能基本真实展现武汉城市圈经济资源环境之间的关系, 可以作为模拟与预测的依据。

3 ERE系统耦合作用的政策实验模拟

选择社会生产性投资系数、产业部门投资系数 (包括第一、二、三产业部门投资系数)、废水排放系数 (污水排放量与用水量之比) 等多项指标作为控制参量, 并根据ERE系统耦合特性设计以下4种耦合发展模式, 对武汉城市圈未来15年 (以2005年为起始年份) 的调控策略进行多情景模拟研究。

3.1 模式一: 自然演变发展模式

在武汉城市圈ERE系统的SD模型中, 各个参数不变, 按照现有的发展趋势进行模拟 (图3), 结果表明:

表 2 参数确定方法一览表

Tab. 2 The List of the methods of parameters

方法	相关依据	主要因子及计算方式
算术平均	通过《1978~2009 年湖北省统计年鉴》等历史统计资料计算	额定出生率(平均出生率)、额定死亡率(平均死亡率)、公共绿地率(公共绿地面积占建成区绿化面积比例)、环境保护投资系数(环保投入占 GDP 比重)、第一产业投资系数(第一产业固定资产投资额占固定资产投资总额比重)、第二产业投资系数(第二产业固定资产投资额占固定资产投资总额比重)、第三产业投资系数(第三产业固定资产投资额占固定资产投资总额比重)等
趋势法	依据统计资料以及选定公式进行比例递推	计划生育影响因子(计划生育落实率)、第一产业额定增长率系数(第一产业产值平均增长率)、第二产业额定增长率系数(第二产业产值平均增长率)和第三产业额定增长率系数(第三产业产值平均增长率)等
表函数	建立 VENSIM 表函数	粮食生产对出生与死亡的影响(人均/地均粮食生产量变化与出生/死亡率关系)、供水量年增加率(供水量年均增加率)、原油生产率(原油投入与产出比)、原煤生产率(煤矿投入与产出比)、电力生产率(电力投入与产出比)等
回归法	借助简单线性回归模型	社会劳动力(三产业劳动力之和)、第一产业劳动力(第一产业的从业人数)、第二产业劳动力(第二产业的从业人数)、第三产业劳动力(第三产业的从业人数)、社会生产性投资系数(社会生产性投资与社会总投资的比)等
CD 生产函数	利用 CD 函数 $y=AK^{\alpha}L^{\beta}$	第一产业产出(第一产业总产出)、第二产业产出(第二产业总产出)、第三产业产出(第三产业总产出)以及劳动力弹性系数(从业人数增长率与 GDP 增长率的比值)等

(1) 经济方面, 圈域经济增长态势较明显, 保持较大增长速度和幅度。GDP 和人均 GDP 在 2020 年分别达到了 17817.21 亿元和 64061.51 元^①, 同时三次产业的产值水平保持较快增长势头, 整体上经济发展水平呈现先快速增长(2005-2010 年)后缓慢爬升(2011-2020 年)态势;

(2) 环境方面, 圈域生态环境压力不断显现, 环境污染日益严重。一方面, 环境持续恶化, 绿地面积不断减少, 废水、废气的排放量持续增加, 废水储量从 2005 年的 53235.03×10^3 亿 kg 增加到 2020 年的 73425.96×10^3 亿 kg, 增长近 50%; 另一方面, 资源消耗加剧, 单位 GDP 能耗和电耗波动中快速上升: 先缓慢提升(2005-2012 年)后直线上扬(2013-2020 年), 经济快速发展呈现高耗能、重污染、低附加值特征;

(3) 资源方面, 圈域资源能源利用率不高, 资源渐趋耗竭。尤其是耕地资源, 不断被占用, 耕地面积急剧下降, 由 2005 年的 13555.8 km^2 , 骤降至 2020 年的 11245.4 km^2 , 人均耕地面积减少了 $0.80 \text{ km}^2/\text{万人}$; 人均耕地面积持续下滑, 耕地红线被突破。

3.2 模式二: 经济加速发展模式

为了进一步推动武汉城市圈经济发展, 设计了“经济加速型”发展模式, 对参数进行了调整: ① 经济发展需要大量的资金投入, 故提高了社会生产性投资系数, 将全社会固定资源投资比重由 0.34 提高到 0.39; ② 圈域大部分中心城市正处于工业化初期和中期发展阶段, 表现为工业驱动型经济发展态, 故将第二产业投资系数由原来的 0.481 提高到 0.60, 并且对第一产业和第二产业比重进行相应调整, 其它初始参数不做大规模的调整, 对未来发展趋势进行模拟(图 4), 结果显示:

① 以 2009 年不变价进行计算, 以下相同。

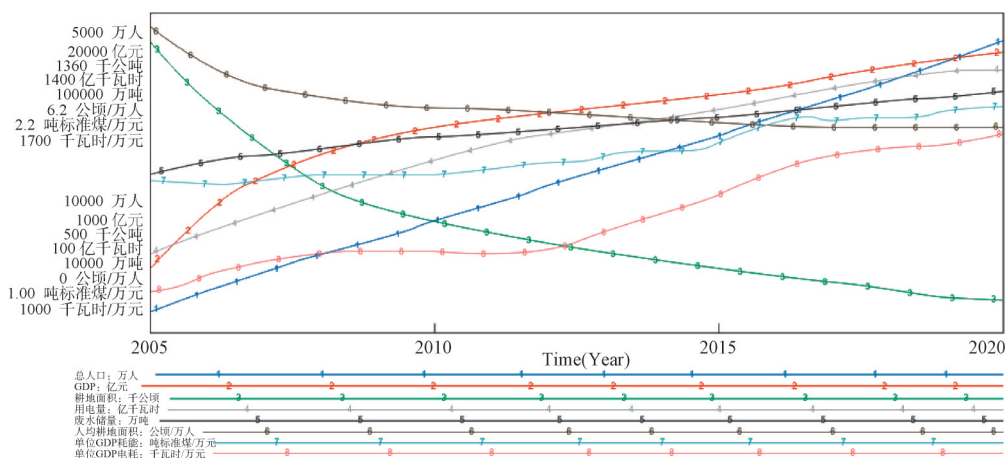


图3 武汉城市圈ERE耦合的自然演变发展模式

Fig. 3 The natural evolution model of ERE composite system

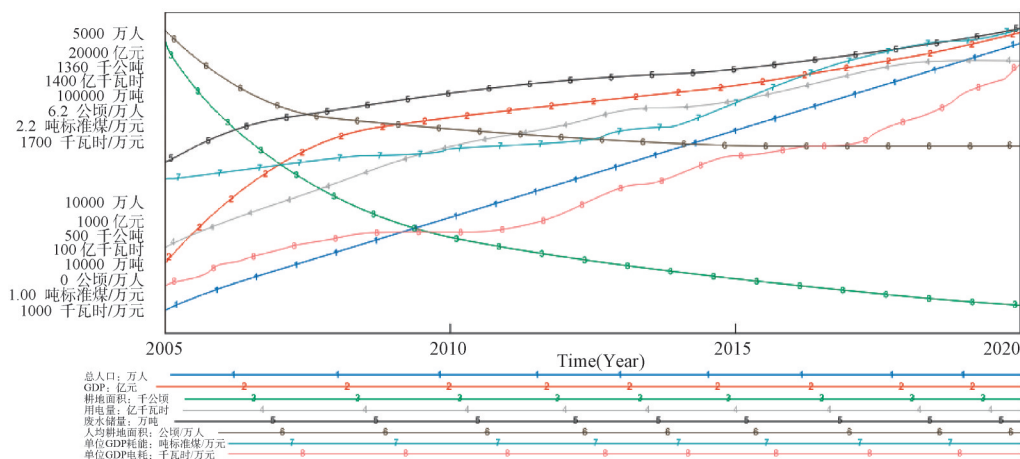


图4 武汉城市圈ERE耦合的经济加速发展模式

Fig. 4 The accelerated economic model of ERE composite system

(1) 圈域经济发展迅猛, 保持非常高的增长幅度和速度。不论是经济总量还是人均GDP, 在4种模式中数值最大, 到2020年整个圈域GDP总量达到了19642.43亿元, 人均GDP达到66428.31元; 整体上圈域经济形成指数增长态势, 呈现先直线攀升(2005-2009年)、再持续爬升(2010-2016年)、后快速上升(2017-2020年)的增长规律。

(2) 圈域环境污染问题日益严重, 环境质量不断恶化。伴随着经济高速发展的同时, 环境污染持续加剧, 环境问题是四种发展模式中最严重的, 如废水排放量在2020年高达 92146.45×10^3 万kg, 圈域经济发展面临非常严峻的生态危机和环境挑战。

(3) 圈域资源耗用快速增长, 重要资源濒临衰竭。在取得高速经济发展的同时, 核心资源被大量耗用和浪费, 尤以耕地资源侵占最为严峻, 耕地面积呈现直线下降, 跌至警戒线; 此外, 经济发展所耗用资源量持续增长, 保持较高水平, 如单位GDP能耗由2005的1.51t标准煤/万元上升到2.14。

不难看出, 整个经济加速发展是以牺牲资源和破坏环境为代价。面临巨大的资源环境

风险和压力, 仅仅适用于武汉城市圈发展中前期, 无法有效实现圈域“两型社会”建设和协调健康发展目标。

3.3 模式三: 资源环境保护模式

为了加快建设“资源节约型和环境友好型社会”, 达到节约资源和保护环境的目的, 构建“资源环境保护”模式, 对初始参数做如下调整: 考虑到环境压力和资源消耗主要是经济发展带来的负面影响, 其关键是降低生产性投资系数, 将全社会固定资产投资比重由 0.34 减少到 0.30, 将第二产业部门的投资系数由 0.481 调低至 0.40; 加大低能耗、低污染的第三产业部门的投资系数, 由原来的 0.488 增加到 0.50; 增加环境保护投资系数, 由期初的 0.017 调高到 0.02; 另外将水土资源配置也进行 10% 幅度的调高, 对未来发展趋势进行模拟 (图 5), 结果发现经过参数调整, 试验结果变化明显:

(1) 圈域环境污染显著下降, 环境质量破坏程度大幅减小。显著效果表现在“三废”排放量大幅下降, 环境质量保持稳定, 环境恶化势头得到遏制。如废水排放量到 2020 年仅为 74659.64×10^3 万 kg, 在 4 种模式退居第三。

(2) 圈域资源耗用程度有所降低, 核心资源危机暂时解除。一方面, 核心资源占用有所下降, 耕地面积下降幅度相对较低, 耕地减少势头有所抑制; 另一方面, 能源消耗保持低水平, 经济呈现资源节约型发展态势, 2020 年的能源消耗量仅为 982.36 亿 kwh 时, 位列 4 大模式之尾。

(3) 圈域主要以资源节约和环境保护为主, 经济发展速度较慢。由于生产性投资持续“疲软”, 经济发展势头有所抑制, 2020 年的 GDP 仅为 16723.65 亿元, 与人均 GDP 一样在 4 种模式中排名末尾, 人民生活水平和消费能力没有显著提高, 经济发展的社会效益不够凸显。

3.4 模式四: 协调稳定发展模式

通过对以上 3 种耦合发展模式进行深入分析, 发现它们各自存在问题: ① 在自然演变发展模式中, 经济发展较为缓慢, 资源消耗严重, 污染问题突出, 经济效益、社会效益、生态效益均不理想; ② 在经济加速发展模式中, 经济发展迅猛, 但是引致严重的环境污染和资源危机, 资源环境承载面临巨大压力, 并不适合武汉城市圈的长远发展; ③ 在资源环境保护模式中, 资源环境得到了有效地保护, 减缓了经济发展的资源环境压力, 但是经济发展过慢, 关联带动作用不够突出, 不能有效满足人类的消费要求。

针对上述 3 大模式的特点和问题, 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: ① 适当提高生产性投资系数, 以保证经济发展的资金需求, 将社会生产性投资比重由 0.34 提高到 0.36; ② 着力增加第三产业投资系数, 由 0.488 提高到 0.55, 使三产比例达到优良状态, 充分发挥第三产业高附加值、低污染的综合效应, 以减少经济发展的环境承载压力和资源耗用程度; ③ 对水土资源配置进行相应调整, 主要通过加大第一产业的投资, 增加耕地、林地面积, 将第一产业投资系数由 0.031 增加至 0.05, 以优化产业结构, 增加资源存量, 提升生态质量, 从而提升环境整体水平; ④ 增加污染治理费用, 将环境保护投资系数由 0.017 提高至 0.025, 以增强环境抗逆能力, 减少环境污染影响 (图 6), 得出:

(1) 经济发展较快, 保持高速增长态势。15 年间, 武汉城市圈经济总量 (GDP) 和均量 (人均 GDP) 直线上升, 在 2020 年圈域 GDP 和人均 GDP 分别达到 18349.15 亿元和 6531.84 元/人, 仅次于经济加速发展模式, 圈域呈现良好的经济发展势头。

(2) 环境质量较好, 环境污染有效抑制。15 年间, 环境污染 (“三废” 排放) 维持

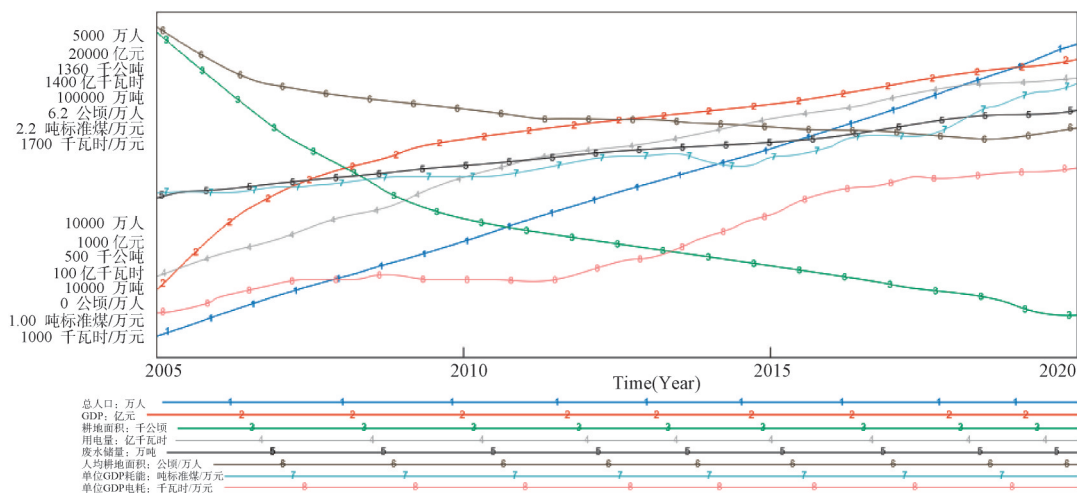


图5 武汉城市圈ERE耦合的资源环境保护模式

Fig. 5 The protection model of ERE composite system

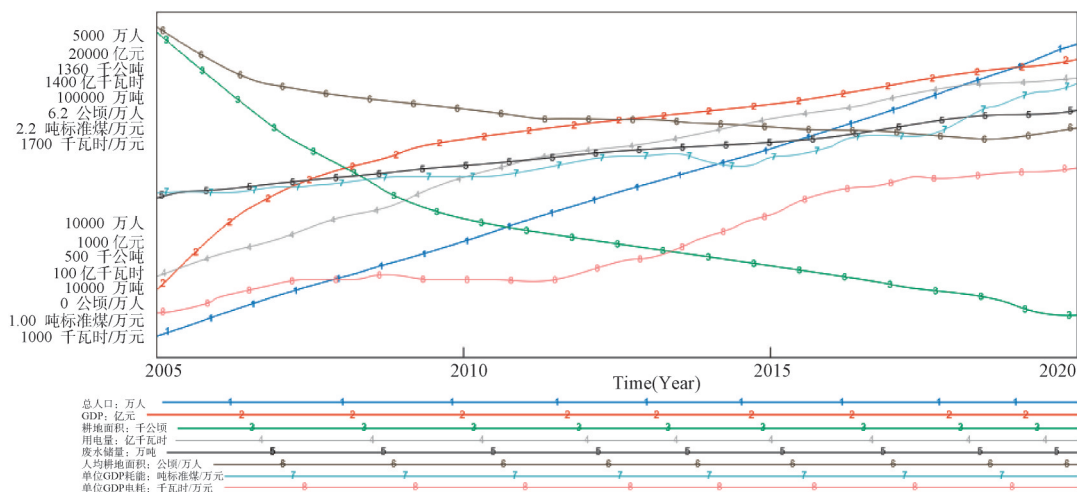


图6 武汉城市圈ERE耦合的协调发展模式

Fig. 6 The coordinated development model of ERE composite system

较低水平，生态环境质量保持良好状态。在2020年，人均绿地面积为 $0.05 \text{ km}^2/\text{万人}$ ，排名靠前，环境污染程度较小，废水储量 $73614.25 \times 10^3 \text{ 万 kg}$ 远小于经济加速模式的 $92146.45 \times 10^3 \text{ 万 kg}$ 。

(3) 资源消耗较少，能源危机得以消除。15年间，资源能源消耗处于低水平状态，经济发展呈现较低能源消耗和较高资源利用态势。2020年单位GDP电耗为 $1577 \text{ kwh}/\text{万元}$ ，小于自然演变模式的 $1582 \text{ kwh}/\text{万元}$ ，耕地面积 10454.5 km^2 也小于自然演变模式的 11245.4 km^2 。可见，协调发展模式集合了前3个模式的优点，为武汉城市圈ERE系统耦合发展提供了较为理想的模式。

4 结 论

(1) ERE复合系统是一个复杂的巨系统,其系统行为由系统结构和内部机制决定,并具有一定的惯性,其描述方程具有高阶、非线性和时变特征,传统线性的、直观的、简单的分析方法无法有效揭示其内在自组织规律,而系统动力学方法可以通过仿真和历史数据检验揭示出系统耦合作用的动力机制,并具有较好的适用性和较高的精确度。

(2) ERE系统间耦合作用具有非线性、因果性、多阶次、动态性和多重反馈性等特点,表现为一种“行为反馈”过程,是三个子系统间所包含的所有非线性关系的总和,宏观上系统内部明显形成经济—资源、经济—环境、资源—环境3大反馈环。

(3) ERE系统间耦合作用表现为复杂的互相制约和互相促进关系:一方面随着经济不断发展,以及人口数量的不断增长,对环境产生了巨大的压力,导致环境质量不断降低,进而限制经济的发展;一方面经济的发展需要资源作为支撑,经济发展促进资源的开发与利用,然而资源是有限的,过度的开发资源或者使用资源,特别是不可再生资源对经济的发展产生巨大的约束作用;一方面环境通过人口驱逐、资本排斥以及政策干预从而制约经济的发展,也对资源的使用起到约束作用。

(4) ERE系统耦合作用的SD模型模拟研究,表明协调发展模式是武汉城市圈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、资源和环境的健康协调发展,且各调控变量都限制在适度的范围之内,具有较强的可行性和科学性。

参考文献(References)

- [1] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. 地理学报, 2005, 60(2): 237-247.
- [2] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. 地理研究, 2003, 22(2): 212-220.
- [3] 刘耀彬, 李仁东. 江苏省城市化与生态环境的耦合规律分析. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(1): 47-51.
- [4] 吴文恒, 牛叔文. 甘肃省人口与资源环境耦合的演进分析. 中国人口科学, 2006, (2): 81-86.
- [5] 马彩虹, 赵先贵. 陕西省人口—耕地—粮食系统耦合态势研究. 干旱地区农业研究, 2005, 23(25): 217-221.
- [6] 张富刚, 刘彦随, 王介勇. 沿海快速发展地区区域系统耦合状态分析: 以海南省为例. 资源科学, 2007, 29(1): 16-20.
- [7] 张晓东, 池天河. 90年代中期中国省级区域经济与环境协调度分析. 地理研究, 2001, 20(4): 506-515.
- [8] 张振杰, 杨山. 基于系统行为的城乡耦合地域空间演变规律研究: 以南京市为例. 城市发展研究, 2007, 14(2): 88-92.
- [9] 宋世涛, 魏一鸣, 范英. 中国可持续发展问题的系统动力学研究进展. 中国人口·资源与环境, 2004, (2): 42-48.
- [10] Dyson B, Chang N B. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. Waste Management, 2005, 25(7): 669-679.
- [11] Simonovic S P. World water dynamics: global modeling of water resources. Journal of Environmental Management, 2002, 66(3): 249-267.
- [12] 贺晨晨, 王远, 高倩, 等. 城市经济环境协调发展系统动力学模拟. 长江流域资源与环境, 2009, 18(8): 698-703.
- [13] Donella H. Meadows, Jorgen Randers, Dennis L. Meadows. Limits to Growth: The 30 Year Update. Chelsea Green, 2004: 7.
- [14] 申玉铭, 毛汉英. 山东半岛可持续发展的主要问题与综合调控研究. 中国人口·资源与环境, 1988, (3): 31-36.
- [15] 李杰兰, 陈兴鹏, 王雨, 等. 基于系统动力学的青海省可持续发展评价. 资源科学, 2009, 31(9): 1624-1631.
- [16] 刘耀彬, 陈斐. 区域城市化与生态环境耦合发展模拟及调控策略: 以江苏省为例. 地理研究, 2007, 26(1): 187-196.
- [17] 吴勤堂. 产业集群与区域经济发展耦合机理分析. 管理世界, 2004, (2): 133-136.
- [18] 刘耀彬, 李仁东, 宋学峰. 中国城市化与生态环境耦合度分析. 自然资源学报, 2005, 20(5): 105-112.
- [19] 刘承良. 武汉都市圈空间发展机理与调控战略. 北京: 科学出版社, 2009: 1.

System dynamics simulation on the coupling of economy resources environment system in Wuhan Metropolitan Region

LIU Chengliang^{1,2}, YAN Qi³, LUO Jing¹

(1. School of Urban and Environmental Science, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China;

2. Academy of Wuhan Metropolitan Area, Hubei Development and Reform Commission & Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China; 3. China Travel Hongkong (Zhuhai) Ocean Spring Co., Ltd, Zhuhai 519055, Guangdong, China)

Abstract: Economy-Resources-Environment system (ERE system) is a compound dynamic system formed by the interaction, which is a nonlinear coupling system with multiple feedback channels, and there are complex relationships among the three elements, such as constraint, the interaction of higher order and nonlinear relations. Therefore, it is hard for traditional methods to deal with such problems. With the aid of System Dynamics (SD) based on the information feedback control theory, this paper sets up the SD model of ERE system for multi-scene simulation in the Wuhan Metropolitan Region. Some conclusions can be drawn as follows. (1) SD model has a strong simulation and regulation ability, and it can reflect the coupling between elements of dynamic evolution system. Moreover it is good for regulatory decision of the coordinated development of ERE system. (2) This paper examines four simulating programs for simulation of ERE system in the Wuhan Metropolitan Region, and finds out that the coordinated development model (Model IV) is the best program, because resources are effectively used and the environment is well protected with the rapid economic growth, and it is the best option for the coordinated development of the Wuhan Metropolitan Region.

Key words: system dynamics; coupling; ERE system; multi-scene simulation; Wuhan Metropolitan Region