

三峡地区资源环境生态研究

重庆经济-资源-环境发展的系统动力学分析及不同情景模拟

周李磊^{1,2,3}, 官冬杰^{4*}, 杨华^{1,2}, 苏维词^{1,5}

(1. 重庆师范大学 地理科学与旅游学院; 2. 重庆高校市级 GIS 应用研究重点实验室; 3. 三峡生态环境遥感研究所, 重庆 400047; 4. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 5. 贵州科学院 山地资源研究所, 贵阳 550001)

摘要: 经济-资源-环境的协调发展是可持续发展的关键环节, 城市经济的发展越来越多的受到资源和环境方面的限制, 如何摆脱当前的困境, 实现经济资源环境的可持续发展, 是当前急需解决的问题。研究城市经济-资源-环境可持续发展的内涵及框架, 利用系统动力学的原理和方法, 以重庆市为例, 通过道格拉斯生产函数将资源、环境、技术等子系统与 GDP 子系统联系起来, 构建了经济-资源-环境系统动力学模型处理由于城市资源耗尽和环境恶化所限制的经济增长问题, 同时设定了基础、资源、环境、技术和经济 5 情景, 对不同情景模拟结果进行了比较分析。结果表明: 单独改变系统中的子系统不能实现重庆市的可持续发展, 转变经济发展模式才是重庆市可持续发展的最优化发展方案。

关键词: 可持续发展; 系统动力学; 情景模拟; 经济-资源-环境系统; 重庆

中图分类号: X24; X196; F127; F223 文献标志码: A

城市作为国家发展的重要引擎, 在区域可持续发展中有着重要地位。目前, 我国城市发展趋同化现象严重, 存在市场恶性竞争、上游污染下游、各地争夺紧缺资源的问题, 各地区不能发挥自身的优势^[1]。由此, 开展经济-资源-环境之间相互关系的研究, 可以指引城市根据自身的地域特点, 找到最适合自身发展的道路, 有针对性的制定相关政策和措施, 确定合理的产业结构和布局, 充分提高资源利用率, 有效遏制生态环境恶化, 实现经济-资源-环境系统 (Economy Resources Environment System, ERE) 的耦合协调发展^[2-4], 对城市的可持续发展有着重要的意义。重庆, 作为西部大开发的重要增长极, 在全国和区域可持续发展中具有举足轻重的地位, 是城市可持续发展研究的热点区域。关于重庆市可持续发展分析和评价的研究成果十分丰富, 主要的研究方法可以概括为两个方面: (1) 模型分析法, 主要有神经网络模型^[5]、GIS-RS 模型^[6]、灰色模型^[7]; (2) 指标法, 主要有模糊综合评价法^[8]、指标评价法^[9-12]、可持续发展综合指数评价法 (主要是生态足迹法^[13,14])。这些评价方法非常注重指标的选取, 虽然指标所涉及的面比较广, 但忽略了他们彼此之间内在的反馈关系, 指标之间相互独立的, 不能很好地反映整个系统的运行情况。面对这种耦合关系复杂、影响因素众多、多领域、多变量、非线性的复杂巨系统, 系统动力学具有较好的适应性。系统动力学自 1956 年麻

* 收稿日期: 2014-02-27 修回日期: 2014-06-19

资助项目: 国家自然科学基金 (No.41201546, No.41261038); 国家十二五科技支撑计划专题 (No.2011BAC02B02); 国家十二五科技支撑计划项目 (No.2012BAJ25B09); 重庆市自然科学基金 (No.cstc2012jjA20010)

作者简介: 周李磊, 男, 研究方向为资源环境遥感与 GIS 研究应用, Email: zhoul_001@126.com; 通讯作者: 官冬杰, 教授, E-mail: guandongjie_2000@163.com

省理工学院 Jay. W. Forrester 教授提出后,先后出版了《工业动力学》(1961)、《城市动力学》(1969)、《超越极限》(1972)、《增长的极限》(1972)等著作,引起了世界各国政府和科学家的普遍关注,被广泛运用与资源环境^[15,16]、城市发展^[17]等领域的研究中。而国内系统动力学的研究始于 1980 年,虽起步较晚,但在区域可持续发展的研究过程中已取得了初步性的研究成果,如江苏、山东、武汉^[18-20]等省域的可持续发展研究。而对重庆进行的可持续发展系统性研究的成果却相对匮乏,基于此,本研究将开展把资源、环境与经济系统看作一个复杂的大系统,采用系统动力学的方法,建立重庆市经济-资源-环境协调发展系统动力学模型,并进行仿真模拟的研究,以期重庆的可持续发展提供技术支撑和科学指导。

1 研究区概况

重庆市位于中国西南部、长江上游地区,介于 105°11'-110°11'E, 28°10'-32°13'N,东邻湖北、湖南,南接贵州,西靠四川,北连陕西。地形以丘陵、低山为主,平均海拔 400m,地势从南北两面向长江河谷倾斜,起伏较大,呈“一山一槽二岭”的地貌(图 1)。重庆市气候温和,属亚热带季风性湿润气候,年平均气温 16~18℃,雨量比较充沛,年降雨量多在 1000~1350mm。重庆市总面积 8.24 万 km²,下辖 19 个区 15 个县 4 个自治县,全市共 3343.44 万人(2012 年户口统计)。2012 年 GDP 产值 11409.60 亿元,同比增长 12.25%。

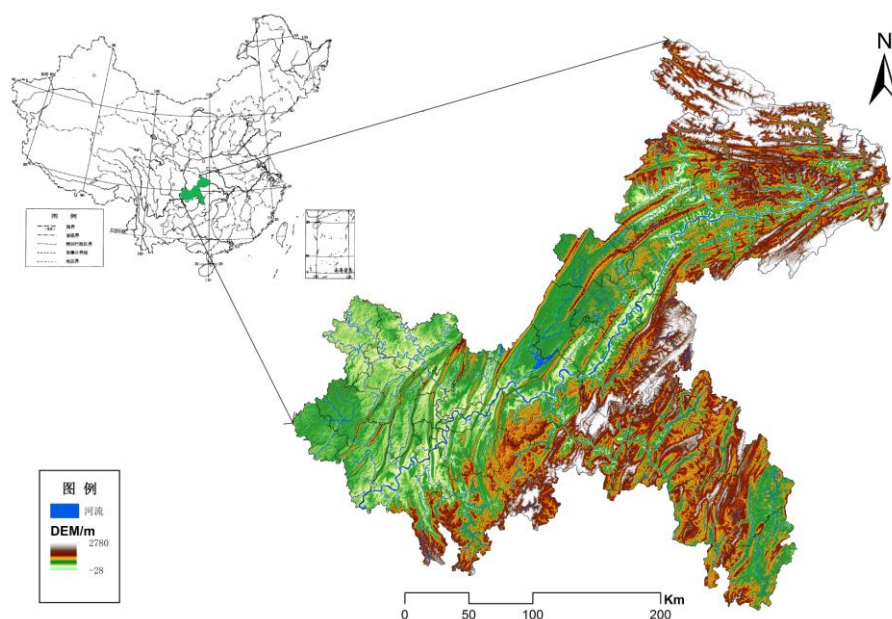


图 1 重庆市地理位置

Fig1 Location of Chongqing

2 研究数据与研究方法

2.1 研究方法及数据来源

系统动力学简称 SD (System Dynamics),它是一种以计算机模拟技术为主要手段,通过结构-功能分析,研究和解决复杂动态反馈性系统问题的仿真方法^[21]。

本文使用的建模软件是系统动力学的常用软件 Vensim-PLE,模型运行时间为 2000-2050 年,仿真步长

为1年。主要的数据来源源于2001-2013年的《重庆统计年鉴》、《重庆市水资源公报》、《重庆市环境统计公报》、《全国环境统计公报》、《中国能源统计年鉴》。

2.2 模型的建立

为了使模型结构更接近于现实系统的运行规律, 本文将SD模型与计量地理学相结合, 在Woodwell构建的经济-资源模型基础上^[22], 增加了环境系统, 并根据重庆市的实际情况, 对系统结构及各变量之间的关系作了调整, 构建了重庆市经济-资源-环境系统动力学模型(简称重庆市ERE模型)(图2)。

模型采用柯布-道格拉斯生产函数:

$$Y = H \times L^a \times K^b \times R^c \times N^d \quad (1)$$

式中: Y为产出水平(GDP); H为生产中的技术; L为人力资本投入(劳动力); K为固定资产投入; R为可更新资源投入; N为不可更新资源投入; a, b, c, d分别代表L、K、R、N这4种投入要素的弹性系数, 而且 $a+b+c+d=1$, 代表该生产函数为规模报酬不变的生产函数^[23,24]。

2.3 各子系统模型介绍

在重庆市ERE模型中(图2), 包含6个子系统, 即人口子系统、生产资本子系统、技术子系统、GDP子系统、资源子系统和环境子系统。其中人口子系统、生产资本子系统、技术子系统和GDP子系统属于ERE系统中的经济系统; 资源子系统属于ERE系统中的资源系统; 环境子系统属于ERE系统中的环境系统。

2.3.1 人口子系统 一个区域的人口数量会影响到其经济发展的规模和环境污染物的排放量; 且在道格拉斯生产函数中, 劳动力是重要的投入要素, 而劳动力又与人口有着密切的联系。故在人口子系统中, 将人口总数确定为状态函数, 年出生人数和年死亡人数为速率函数, 再通过辅助函数出生率、死亡率, 就可以算出重庆市每年的人口总数, 最后在根据劳动力人口比例这个辅助函数, 就可以求出重庆市每年的劳动力。

2.3.2 生产资本子系统 经济的发展主要是生产性投资不断增加的结果, 在本系统中生产资本投入是状态函数, 资本增加量和资本减少量是速率函数, 其他的是辅助函数, 在本系统中随着经济的不断发展, 投资也会不断地累加, 随着投资的增加反过来又会促进经济的发展。

2.3.3 技术子系统 经济的发展除了不断地进行各种投资外, 还和技术的发展有关系, 故技术子系统在道格拉斯生产函数中是必不可少的, 在技术子系统中, 生产中的技术是状态函数, 技术增长量是速率函数。随着经济的发展, 在技术上的投资也在不断地加大; 同时, 由于技术的发展, 反过来给经济带来的利益也是不断增加的。

2.3.4 GDP子系统 经济系统中GDP是整个模型的核心, 根据道格拉斯生产函数, 将生产资本投入、劳动力、生产中的技术、不可再生资源消耗量和可再生资源消耗量作为GDP的输入, 而环境污染和资源短缺对经济发展有制约作用, 故通过净GDP这个辅助变量, 将资源子系统和环境子系统连接到经济系统中, 这样

就实现了重庆市 ERE 系统动力学模型各子系统之间的相互联系。

2.3.5 资源子系统 资源子系统由可再生资源系统和不可再生资源系统组成。由于目前没有被认可的统一的资源价值衡量手段,同时查清全部资源存储量是很困难的,所以本文选取了可以量化的水资源和原煤为突破口,通过各自在可再生资源和不可再生资源中所占的比例来研究可再生资源 and 不可再生资源的现状。

经济的发展离不开资源的供给,而资源短缺又会限制经济的发展。本系统中的状态函数是水资源缺口和煤炭缺口,供给和消耗量是速率函数,其他是辅助函数。通过水资源在可再生资源中的比例和原煤在不可再生资源中的比例来确定可再生资源和不可再生资源的消耗量。

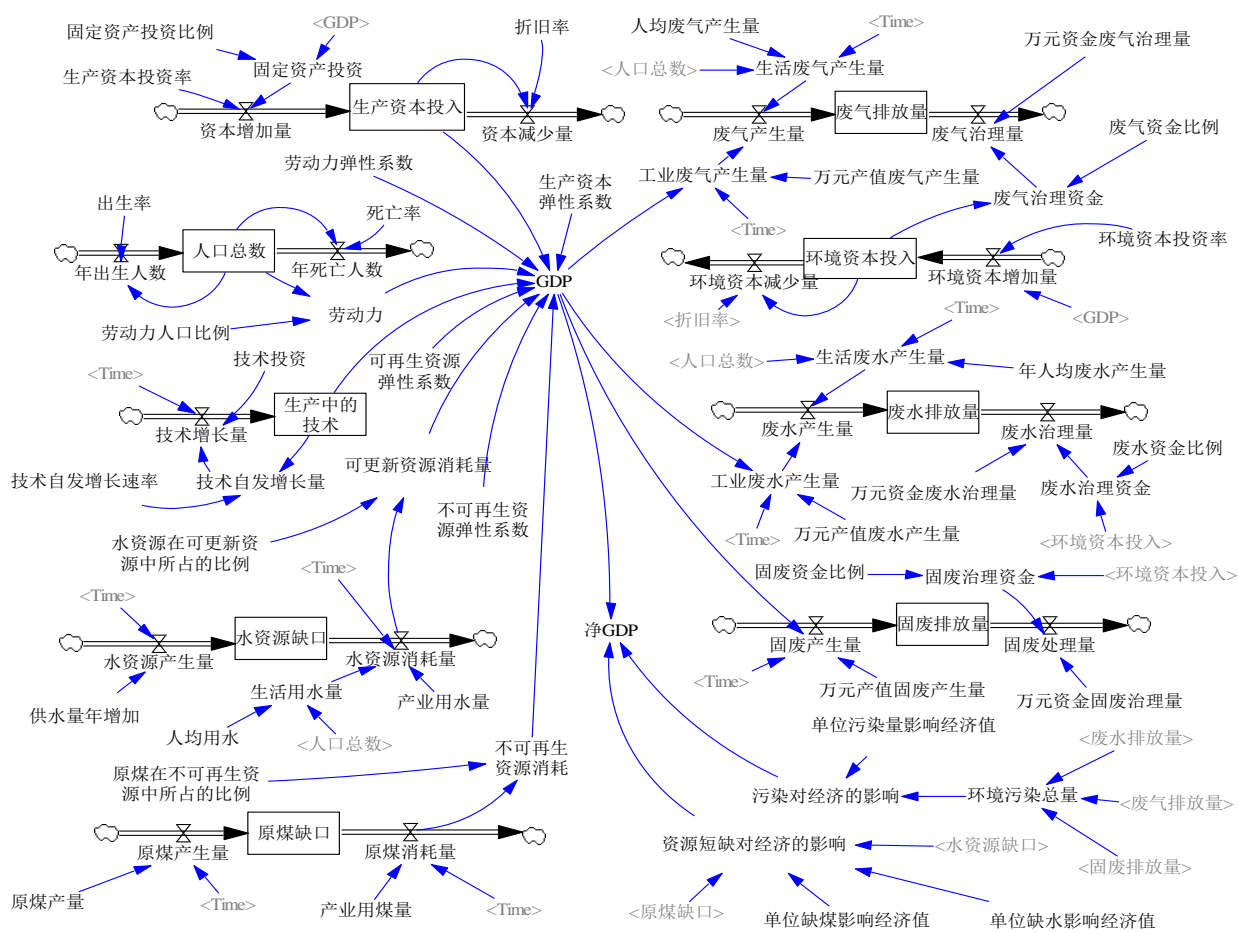


图 2 重庆市“经济-资源-环境系统”结构流图

Fig2 Structural flow diagram about“Economic-Resources-Environment System” of Chongqing

2.3.6 环境子系统 在环境系统中,主要分为两个部分,即环境资本投入和工业三废。故在环境子系统中有 4 个状态函数,环境资本投入、废气排放量、废水排放量和固废排放量;对应着有 8 个速率方程。

在环境子系统中,三废产生量和处理量都和 GDP 有着密切的关系,随着经济的快速发展,污染产生量会逐渐增加,同时环境资金的投入也会逐渐增加,三废治理量也会增加。而环境污染物的排放量反过来又会制约经济的发展。

2.4 模型检验

系统动力学模型的检验方法有直观检验法、运行检验法和历史检验法。

其中直观检验法和运行检验法主要是针对模型的适应性进行检验,历史检验法主要是对模型行为的一致性进行检验。模型经过结构检验分析(直接检验法),反复调试后成功运行(运行检验法),说明建立的模型的通过适应性检验,但模型投入实际应用和对其模拟结果进行评价之前,为确保模型的有效性和可靠性,还要对模型的一致性进行检验,即历史检验法。

选取2000-2011年的数据,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10%,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,能基本真实展现重庆市经济资源环境之间的关系,可以作为模拟与预测的依据。

由于整个系统涉及79个变量(其中包括9个状态函数、17个速率变量、53个辅助变量),检验结果就不一一赘述,在这只选取GDP和人口这两个变量进行示意说明。

表1 重庆市ERE模型中GDP误差检验表

Tab1 Error check of GDP in the ERE model of Chongqing

GDP/亿元	年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005
	预测值	1649.91	2088	2432	2810.56	3195.43	3620.87
真实值	1791	1976.86	2232.86	2555.72	3034.59	3467.72	
误差	-141.09	111.14	199.14	254.84	160.84	153.15	
误差比例	-7.88%	5.62%	8.92%	9.97%	5.30%	4.42%	
	年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	预测值	4156.69	4769.85	5408.15	6131.16	7461.31	9085.26
真实值	3907.23	4676.13	5793.66	6530.01	7925.58	10011.37	
误差	249.46	93.72	-385.51	-398.85	-464.27	-926.11	
误差比例	6.38%	2.00%	-6.65%	-6.11%	-5.86%	-9.25%	

表2 重庆市ERE模型中人口误差检验表

Tab2 Error check of population in the ERE model of Chongqing

人口/万人	年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005
	预测值	3022.77	3038.76	3054.84	3071	3087.24	3103.57
真实值	3091.09	3097.91	3113.83	3130.1	3144.23	3169.16	
误差	-68.32	-59.15	-58.99	-59.1	-56.99	-65.59	
误差比例	-2.21%	-1.91%	-1.89%	-1.89%	-1.81%	-2.07%	
	年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	预测值	3119.99	3136.5	3153.09	3169.77	3186.54	3203.39
真实值	3198.87	3235.32	3257.05	3275.61	3303.45	3329.81	
误差	-78.88	-98.82	-103.96	-105.84	-116.91	-126.42	
误差比例	-2.47%	-3.05%	-3.19%	-3.23%	-3.54%	-3.80%	

2.5 情景设定

为了预测未来重庆市可持续发展的状况,选择资源弹性系数(包括可再生资源 and 不可再生资源)、劳动力弹性系数、生产资本弹性系数、环境资本投资率、技术投资和固定资产投资比例这些指标作为控制参量,

并根据重庆市 ERE 系统特性, 设计了以下 5 种发展情景:

情景一: 自然演变。在整个系统中, 各参数不变, 按照现有的发展趋势进行模拟。

情景二: 资源依赖。城市发展对资源依赖性较大, 导致资源紧缺, 所以设计了减少资源的依赖性情景。在整个系统中, 将可再生资源的弹性系数由原来的 0.05 降低到 0.02, 将不可再生资源的弹性系数由原来的 0.02 降低到 0.01, 同时提高劳动力弹性系数和生产资本弹性系数。

情景三: 环境保护。考虑到重庆生态环境的脆弱性, 所以设计了环境保护情景。在整个系统中调整环境资本的投资率, 由原来的 0.025 增加到 0.05。

情景四: 技术革新。技术在社会发展中有着重要地位, 所以设计了技术革新情景。在整个系统中通过增加技术投资来实现, 由原来的 0.02 增加到 0.2。

情景五: 经济投资。通过增加和减少固定资产的投资比例, 对比分析加快经济发展和放缓经济发展速度, 对整个系统的影响。

不同情景具体参数的设定如下:

表 3 不同情景参数的设定

Tab3 Setting of different scenario parameters

	情景一	情景二	情景三	情景四	情景五
可再生资源弹性系数	0.05	0.02	0.05	0.05	0.05
不可再生资源弹性系数	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
劳动力弹性系数	0.32	0.35	0.32	0.32	0.32
生产资本弹性系数	0.43	0.53	0.43	0.43	0.43
环境资本投资率	0.025	0.025	0.05	0.025	0.025
技术投资	0.02	0.02	0.02	0.2	0.02
固定资产投资比率	0.366	0.366	0.366	0.366	0.6/0.2

3 结果分析

3.1 情景一: 自然演化运行结果

模型自然演化运行的结果表明, 重庆市目前的经济发展在模拟运行期间, 将继续以较快的速度增长(图 3), 但前提是资源的缺口能够及时填补(图 4), 无论是可再生还是不可再生再生资源在模拟运行期间都出现了较大缺口, 而环境随着经济的发展也将持续的恶化(图 5)。

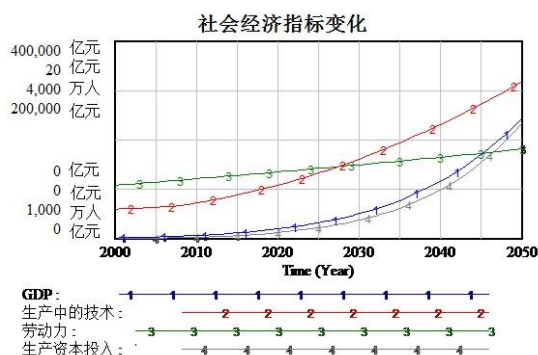


图 3 模型自然演化运行经济指标结果

Fig3 The result of economic index in the base run of model

从经济运行的结果来看, GDP 将以指数的方式平滑的增长, 在 2050 年之前还将保持较快的增长; 技术的增长对经济的贡献十分突出, 当技术的增长速度加快时, GDP 的产值也以较快的速度增长, 表现为 2015 年到 2040 年, 技术的迅速增长, 带动 GDP 的快速发展; 生产投资的趋势和 GDP 的发展走势一致, GDP 的值越大, 生产投资的投资也越大; 未来人口的走势也是按照线性方程的走势逐年增加。

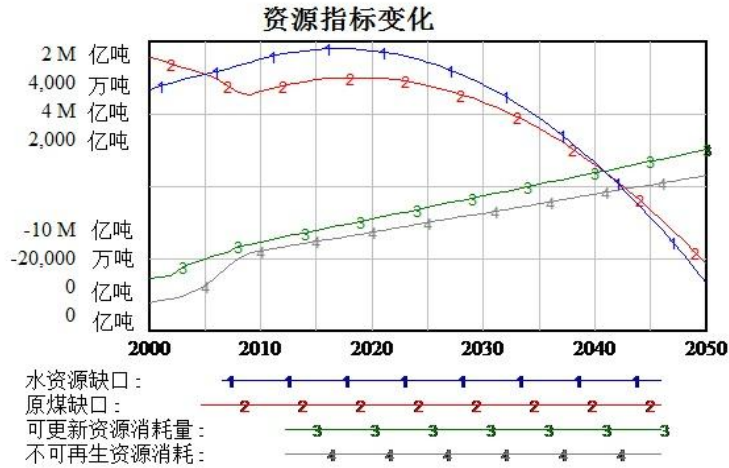


图 4 模型自然演化运行资源指标结果

Fig4 The result of resource index in the base run of model

从资源运行的结果来看, 水资源和原煤的走势是在前几年还有多余的产量, 但随着人们的对本地资源的不断开采, 以及经济的快速发展对资源需求量的增加, 使原本就存储不多的资源, 面临枯竭。资源消耗量将大于产生量, 后几十年资源将产生很大的缺口, 这将严重的影响经济的发展。表现为 2000 年到 2050 年资源的消耗量不断地增加, 而与之相应的是资源缺口也将越来越大, 资源将成为制约重庆市发展的重要因素。同时, 重庆市经济发展对可再生资源的依赖性大于不可在再生资源, 表现为可再生资源的消耗量大于不可再生资源的消耗量。

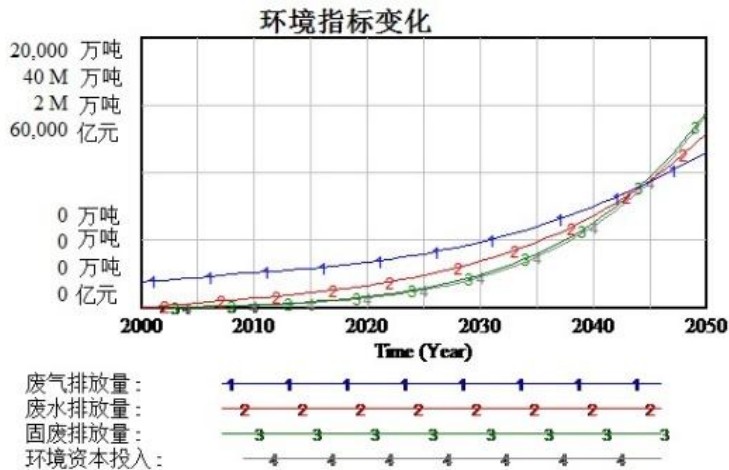


图 5 模型自然演化运行环境指标结果

Fig 5 The result of environment index in the base run of model

从环境运行的结果来看,未来几十年,环境的污染排放量将继续增加,环境将继续恶化。但通过比较可以发现,在 2044 年左右,固废和废水的排放量将大于废气的产生量,说明重庆市在大气治理发面的成就是显著地。同时环境资本随着经济的发展,每年用于环境治理的费用也在增多。同时还可以看出,固废排放量和环境资本投资量的走势和经济发展的走势一致。

3.2 情景二:减少资源依赖运行结果

从自然演化运行的结果可以看出,重庆市的发展对资源的依赖性较强。故在该情景中,将生产函数中的可再生资源弹性系数和不可再生弹性系数降低为自然演化运行结果的一半,同时提高劳动力和资本输入的弹性系数。

从两种情景分析对比可以看出,如图 6 所示:在模型运行前期,GDP 的增长明显比自然演化运行慢,之后却比自然演化运行快,具体表现为,在 2025 年之前,降低资源消耗运行的结果 GDP 增长比自然演化运行的结果慢,显然是因为资源的投入减少引起的;但随着人力资本和生产资本的不断增加积累,人力资本和生产资本的影响力将超过资源,对经济的发展有着较大的影响。

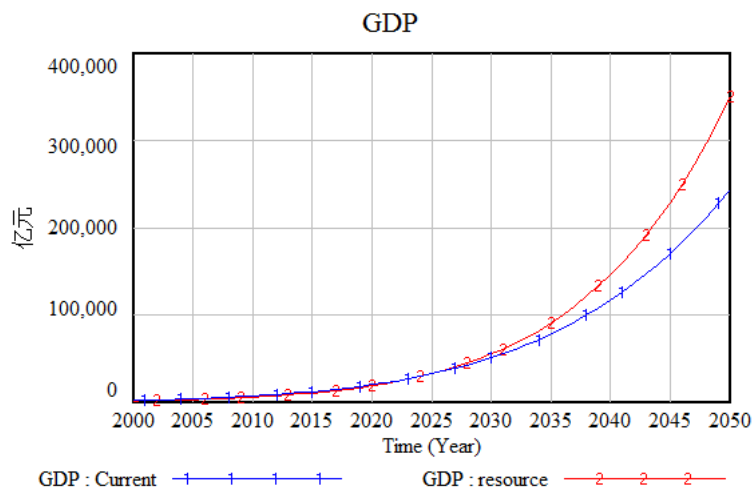


图 6 资源运行 GDP 结果

Fig6 The result of GDP in the resource run of model

3.3 情景三:环境保护运行结果

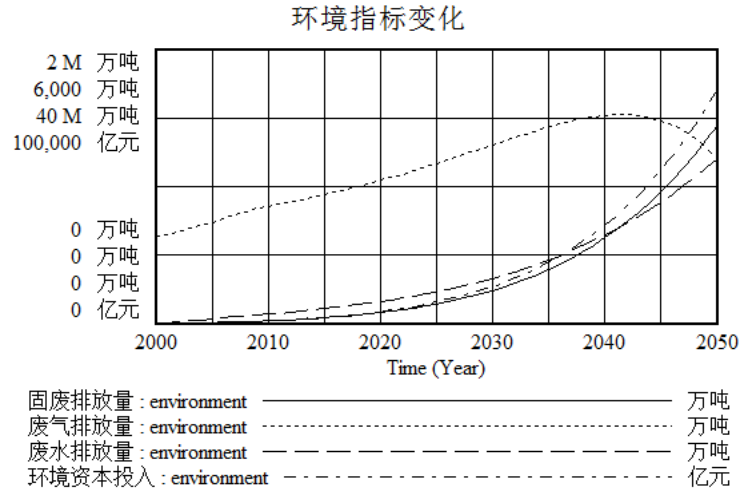


图 7 增加环境投资的运行结果

Fig7 The results of increasing the environment investment

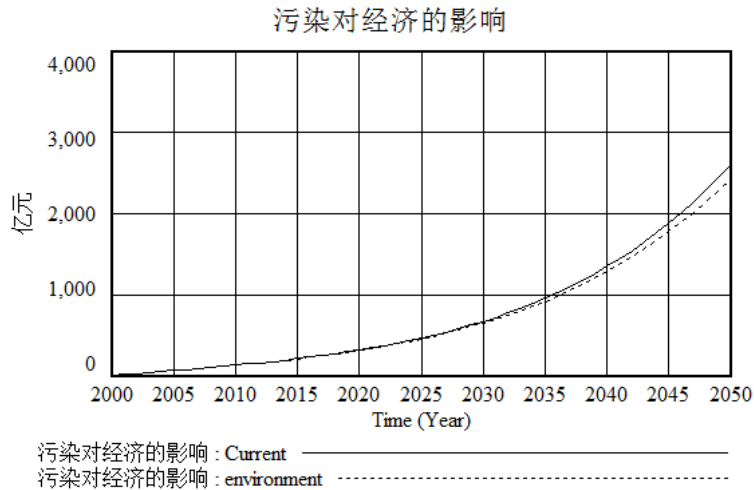


图 8 污染对经济的影响

Fig 8 The impact of pollution on the economy

如图 7 所示, 随着环境资本走入的加大, 大气污染量将在 2040 年左右停止继续上升的势头, 而水资源污染排放量和固废污染排放量却随着 GDP 的增加而增加, 同时也反映出重庆市在“三废”治理中, 治理的侧重点不一样。通过比较可以发现, 通过增加环境资本的投入, 环境对经济的影响是明显降低的 (图 8), 说明在环境方面增加投资对促进经济的发展是有效的。

3.4 情景四: 技术革新运行结果

提高技术水平后, GDP 的产值明显增加 (图 9), 同时净 GDP 的产值也明显增加 (图 10), 这说明技术的提高, 有利于经济的快速发展, 技术因子在经济发展中占有重要地位。

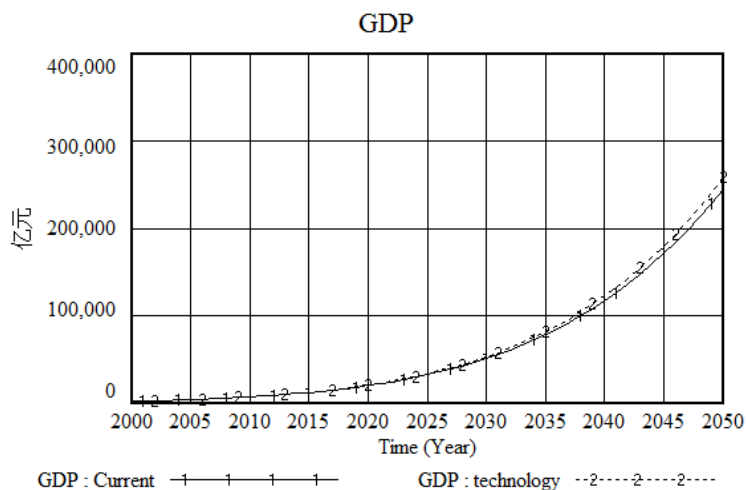


图 9 技术对经济的影响

Fig9 The impact of technology on the economy

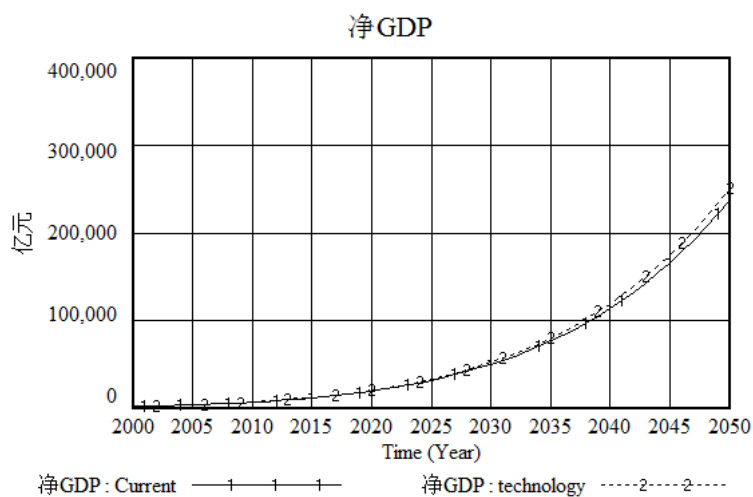


图 10 技术革新对净 GDP 的影响

Fig10 The impact of technology on net GDP

3.5 情景五：经济投资运行结果

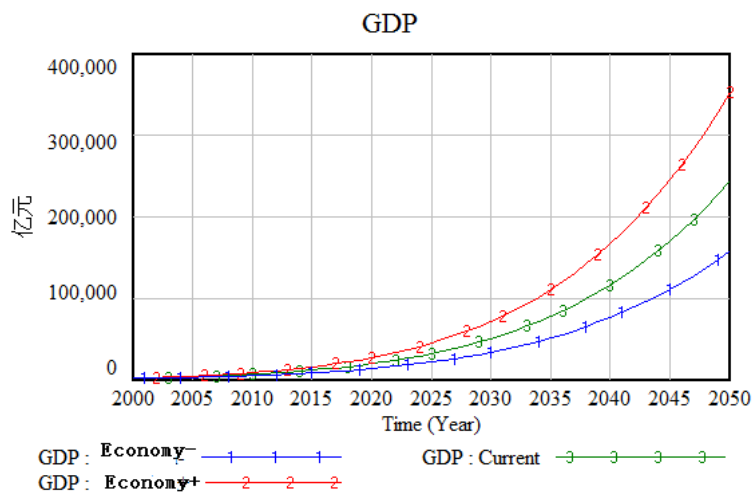


图 11 固定资产对 GDP 的影响

Fig 11 The impact of capital assets on GDP

增加或减少固定资产的投资,对经济的影响较技术有着明显的差别,较技术相比,固定资产较为敏感,从图 11 可以看出,固定资产的增加和减少对经济的发展影响是非常大的。增加投资经济会快速发展,但我们付出的代价是环境污染的加剧(图 12)。固定资产投资减少时,经济的发展会变得缓慢,但环境系统不会过早的崩溃(图 13)。

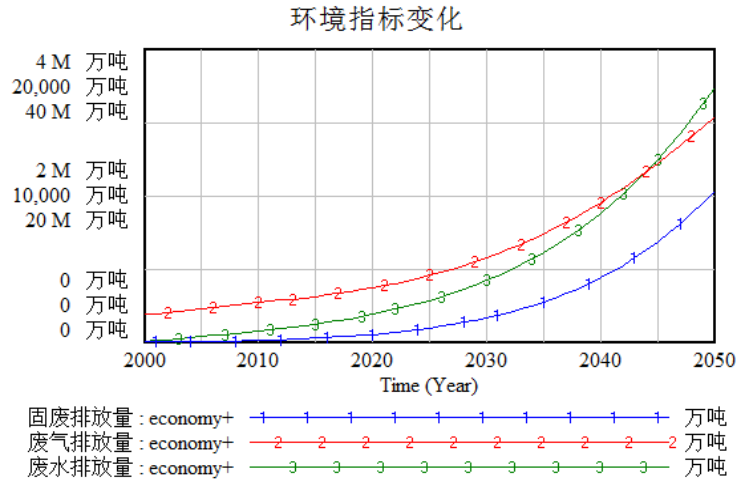


图 12 固定资产增加运行结果

Fig12 The run results of increasing the capital assets

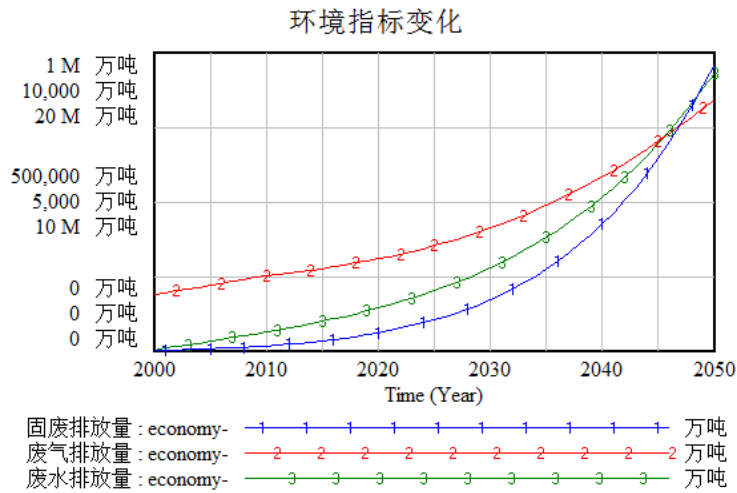


图 13 固定资产减少运行结果

Fig13 The run results of decreasing the capital assets

注: economy+表示增加固定资产投资, economy-表示减少固定资产投资

3.6 最优化情景选择

增加固定资产投资模式获得的 GDP 的利益是最高的,但同时也破坏了环境,经济的增长是以牺牲环境为代价的;减少资源依赖模式下虽然资源没有遭到很大的破坏,但在重庆这个资源匮乏的地区来说,资源本来就是短板,如果不能及时的将资源缺口补好,那么在可以预见的将来,经济还是会受到资源的严重制约,

同时,在资源模式下,环境的破坏也是很严重的;环境保护模式 GDP 等利益虽不是最高的,但可以有效地遏制环境的恶化,尤其是大气状况。所以单独的改变系统中的子系统不能实现重庆市的可持续发展,不是最优发展方案,转变经济发展模式才是重庆市可持续发展的唯一途径。

4 结论与讨论

本文通过道格拉斯生产函数将资源、环境、技术等子系统与 GDP 子系统联系起来,构建了经济-资源-环境系统动力学模型,并设定了自然演变、资源依赖、环境保护、技术革新和经济投资五种情景,进行预测模拟,得出如下结论:自然演化情景下,随着经济的发展,资源消耗越来越大,会出现较大的资源缺口,且环境进一步恶化;资源依赖情景下可以明显降低经济发展对资源的依赖,但环境问题还是没有解决;环境保护情景下可以明显改善环境质量;技术革新情景下可以明显提高经济的发展水平,同时可以改善环境质量;经济投资情景下,加大固定资产投资,可以实现经济的快速发展,但同时破坏了环境和资源。

通过对比分析,可以得出重庆市当前的经济发展是资源消耗量大、污染严重的不可持续的发展。虽然短期内可以实现经济的快速的发展,但是长期将会使经济系统走向崩溃。因此,只有改变当前经济的发展模式,在国家政策的支持下,加快产业转型升级,才能走出当前发展中的困境。通过技术进步,带动经济的发展;采用清洁生产,降低污染排放量;加大环境的投资,治理环境污染;认清自身资源存储状况,提高资源利用率,减少经济发展对资源的依赖;提高人口素质,加强教育,提升劳动力质量;加大资本投入(生产资本、环境资本和人力资本),来促进经济的发展。同时兼顾各个子系统发展,才能使重庆市经济-资源-环境系统的处于可持续发展状态。

本研究利用统计数据,结合柯布-道格拉斯生产函数,建立了重庆市经济-资源-环境系统动力学模型,模拟结果与现实结果具有较高的一致性,模拟结果准确性较高,并设定了不同的发展情景,模拟预测了重庆市未来 40 年的经济资源环境发展状况,发现问题并提出了相应的对策。但由于部分指标的统计数据难以收集,故在 ERE 模型构建过程中,参数的选取受到一定的限制。此外,为了更加科学准确的模型预测结果,在模型方程参数的设置时,如何同现有的数学统计方法(灰色模型、线性回归等)相结合,是本研究有待深入研究的一个方向。

参考文献:

- [1] 蔡林.系统动力学在可持续发展中的应用.第一版[M].北京:中国环境科学出版社,2008.
Cai L. System dynamics in the application of sustainable development [M]. Beijing: China environmental science press, 2008.
- [2] 陈本亮.资源-经济-环境复合系统协调分析[D].西安:西安交通大学,2000.
Chen B L. Resources - economy - environment coordination analysis of composite system [D]. xi'an: xi'an jiaotong university, 2000.
- [3] 刘承良,颜琪,罗静. 武汉城市圈经济资源环境耦合的系统动力学模拟[J].地理研究,2013,32(5):857-869.
Liu C L, Yan Q, Luo J. System dynamics simulation on the coupling of economy resources environment system in Wuhan Metropolitan Region[J]. Geographical Research, 2013.32(5):857-869.

- [4] 宋耀辉,马惠兰.塔吉克斯坦经济与资源环境协调发展评价研究[J].资源与产业,2013,15(3):105-110.
Song Y H, Ma H L. Evaluation of coordinated development between Tajikistan's economic and resource environment [J].Resources & Industries, 2013,15(3):105-110.
- [5] 刘杨.基于 SG-MA-ISPA 模型的区域可持续发展评价研究[D].重庆:重庆大学,2012.
Liu Y. Study on Regional Sustainable Development Evaluation Based on SG-MA-ISPA Model[D].Chongqing: Chongqing University.
- [6] 覃朝晖.成渝老工业基地可持续发展研究[D].北京:中央民族大学,2011.
Qin Z H. Study on the sustainable development of the old industrial bases in Chengdu-Chongqing[D]. Beijing: Minzu university of China.2011.
- [7] 李建国,刘金萍,刘丽丽,等.基于灰色极大熵原理的三峡库区(重庆段)生态系统健康评价[J].环境科学学报,2010,30(11):2344-2352.
Li J G, Liu J P, Liu L L, et al. ecosystem health of evaluation of the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing) based on the theory of maximum entropy and grey assessment[J].Acta Scientiae Circumstantiae.2010.30(11): 2344-2352.
- [8] 闫玲,苏维词.重庆三峡库区经济可持续发展的时空分析[J].重庆师范大学学报(自然科学版).2007.24(2):77-81.
Yan L, Su W C. Space-time Analysis of economic sustainable development of the area around the Three Gorges Reservoir in Chongqing [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition). 2007.24(2): 77-81.
- [9] 何潇,李清,童殷,等.重庆城市可持续发展能力的综合评价[J].资源开发与市场.2005.21(4):292-295.
He X, Li Q, Tong X, et al. Comprehensive Evaluation of Chongqing Urban Sustainable Development [J]. Resource Development & Market. 2005,21(4):292-295.
- [10] 李养兵,刁承泰.重庆市可持续发展评价研究[J].长江流域资源与环境,2005,14(5):660-664.
Li Y B, Diao C F. Appraisal of sustainable development in Chongqing municipality[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin. 2005,14(5):660-664.
- [11] 陈鹏.重庆可持续发展综合评价与对策研究[D].重庆:重庆工商大学.2012.
Chen P. Comprehensive evaluation and countermeasures of sustainable development in Chongqing[D].Chongqing: Chongqing university of industry and commerce.2012.
- [12] 刘辉.西部农村可持续发展能力评价研究—基于熵权主成分法的分析[J].西北农林科技大学学报(社会科学版).2013,13(1):68-72.
Liu H. An empirical analysis of evaluation of the sustainable development capacity in western rural China-based on the principle component analysis and entropy weight[J]. Journal of Northwest A&F University(Social Science Edition). 2013,13(1):68-72.
- [13] 程莉.生态足迹、产业结构与区域经济可持续发展—以重庆为例[J].当代经济管理.2013,35(11):52-57.
Chen L. Study on industrial structure, ecological footprint and regional economy sustainable development—take Chongqing as an example[J]. Contemporary Economy & Management. 2013,35(11):52-57.
- [14] 杨永奎,王定勇.重庆市直辖以来生态足迹的动态测度与分析[J].生态学报.2007,27(6):2382-2390.
Yang Y K, Wang D Y. Dynamic calculation and analysis of ecological footprint of Chongqing after establishing municipality status[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6):2382-2390.
- [15] Simonovic S P. World water dynamics: global modeling of water resources. Journal of Environmental Management,2002,66(3):249-267.
- [16] 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.
- [17] Guan Dongjie, Gao Weijun, Su Weici, Li Haifeng, Hokao Kazunori. Modeling and dynamic assessment of urban economy-resource-environment system with a coupled system dynamics - geographic information system model.[J] Ecological Indicator, 2011, 11(5), 1333-1344.
- [18] 刘耀彬,陈斐,李仁东.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.
Liu Y B, Chen F, Li R D. Simulation of regional urbanization and eco-environment coupling and regulation policies :taking Jiang su Province as a case[J]. Geographical Research. 2007, 26(1): 187-196.
- [19] 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,1998,(3):31-36.
Shen Y M, Mao H M. Major problems and comprehensive regulation of sustainable development in ShanDong peninsula[J]. China Population, Resources and

- Environment, 1998, (3): 31-36.
- [20] 刘承良,颜琪,罗静.武汉城市圈经济资源环境耦合的系统动力学模拟[J].地理研究.2013,32(5):857-869.
- Liu C L, Yan Q ,Luo J . System dynamics simulation on the coupling of economy resources environment system in Wuhan Metropolitan Region[J]. Geographical Research. 2013,32(5):857-869.
- [21] 王其藩.系统动力学[M].北京:清华大学出版社.1988.
- Wang Q F. System dynamics [M]. Beijing: Tsinghua university press. 1988.
- [22] Woodwell J C.A Simulation Model to illustrate Feedbacks among Resource Consumption , Production ,and Factors of Production in Ecological-economic Systems[J].Ecological Modeling,1998.112(2):227-247.
- [23] 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.
- Li J L ,Chen X P ,Wang Y ,et al . Research on the sustainable development in Qinghai province based on system dynamics [J].Resources Science. 2009, 31(9): 1624-1631.
- [24] 李勇进,陈兴鹏,拓学森,蒋晓娟等.甘肃省“资源-环境-经济系统”动态仿真研究 [J]. 中国人口 .资源与环境,2006,16(4):94-98.
- Li Y J, Chen X P, Jiang X J ,et al. Gansu province resources - environment - economy system dynamic simulation [J]. China population, resources and environment, 2006 (4) : 94-98.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

System Dynamics Analysis and Scenarios Simulation of Urban Economy - Resource -Environment Development

ZHOU Lilei^{1,2,3} GUAN Dongjie⁴ YANG hua^{1,2} SU Weici^{1,5}

(1. College of Geographical Science and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 2. Municipal GIS Applied Research Key Laboratory in Chongqing Colleges and Universities, Chongqing 400047, China; 3. Institute of Eco-Environment Remote Sensing in Three Gorges Reservoir, Chongqing 400047, China 4.College of River Sea, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 5.Institute of Mountain Resource, Guizhou Academy of Sciences, Guizhou 550001 China)

Abstract: The coordinated development of Economy-Resources-Environment (ERE) is the key to sustainable development. As a municipality in the southwestern China, Chongqing's economic development is subjected to the constraints from resource and environment. How to solve these developmental bottlenecks and achieve the sustainable development of economy, resources, and environment is one of the most vital issues acquired at present. Based on the connotation and framework of sustainable development of urban ERE, this paper employs the theory and methodology of System Dynamics (SD) to deal with the constrained economic growth due to urban resource depletion and environmental degradation, in which resource, environment, and technology subsystems are combined with economy subsystem in a Cobb-Douglas production. At the same time, five scenarios of foundation, resources, environment, technology and economy are designed to compare the simulation results under the different scenarios. The results demonstrate that it is not workable to achieve the sustainable development merely by changing the subsystem, but the conversion of the mode of economic development can be the best solution for the sustainable development of Chongqing.

Key words: sustainable development; system dynamics; scenario simulation; economy-resource-environment system; Chongqing