

基于系统动力学的区域生态承载力的 政策仿真方案设计 ——以江西省为例

邵猷根, 陈运平, 钟成林
(江西师范大学 江西 南昌 330022)

摘要: 提升生态承载力是区域可持续发展的重要保障。在对区域生态承载力系统动力学模型的边界进行清晰界定的基础上,选取区域生态承载力模型的主要监测变量,构建区域生态承载力的系统动力学模型。并以2005–2030年为系统仿真区间,以工业污水处理率、第一产业产值增长率、技术进步等22个政策干预点,设计了污染治理加强模式、产业结构优化模式、节约用水与技术进步模式、综合发展模式等4种提高区域生态承载力的政策仿真模式,对江西省的区域生态承载力进行政策仿真,仿真的结果表明:(1)若按现有的情况发展下去,江西省将会在2022年达到生态承载力容纳量的上限,承载人口约为47934700万人,承载经济规模为46806.2亿元;(2)若采用综合发展模式,在综合发展模式下,江西省在2027(推迟5年)年才会达到生态承载力容纳量的上限,此时,可承载经济规模为86381.6亿元,可承载人口49502500人,相对于现状模拟模式分别提升了84.55%和3.27%。

关键词: 生态承载力; 承载空间; 政策仿真

中图分类号: C94 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095–0098(2020)01–0034–11

一、引言

随着经济的增长和物质生活水平的提高,社会各界对于生态环境、绿色经济和可持续发展的关注度逐步提升。2018年6月24日,国务院发布了《中共中央国务院关于全面加强生态环境保护,坚决打好污染防治攻坚战的意见》,文件要求不断推进生态环境领域国家治理体系和治理能力现代化,健全区域流域海域生态环境管理体制。同年,中共中央、国务院印发文件要求长江经济带沿线区域,以生态优先、绿色发展为引领,推动区域经济、人口和环境的协调发展。一般认为,生态承载力是在资源合理开发利用和环境良性循环的条件下,“自然资源–生态环境–社会经济”复合生态系统的承载能力与承载对象压力的反映^[1]。因此,采用生态承载力这一概念可以很好地衡量区域经济、人口和环境的协调发展状况。提高区域生态承载力已成为当今乃至未来一段时间内经济社会发展的重要任务,而目前生态承载力研究却无法满足可持续发展的现实需求^[1]。区域生态系统具有非线性、多元性、多重反馈性等特征,采用系统模型的方法有助于从宏观的角度进行区域生态承载力研究。以江西省为例进行区域生态承载力研究,既可以为江西省生态发展提供路径建议,也可为长江经济带沿线区域政策设计提供参考和启示。基于这个思路,本文采用系统动力学方法来寻求推动区域经济、人口、环境的协调发展方式。

收稿日期: 2019–09–16

基金项目: 国家自然科学基金项目(G041301); 江西省社会科学规划青年博士基金项目(17YJ09)

作者简介: 陈运平(1971–)男,江西奉新人,博士,教授,博士生导师,研究方向为管理科学和区域经济。

二、文献综述

1990年,Rees^[2]提出“生态足迹”理论,明确了生态承载力是单要素承载力基于生态学的系统集成,其中资源承载力和环境承载力相辅相成。近年来,国内外学者对于资源承载力和环境承载力的研究,既有针对不同区域范围的,也有针对不同对象和不同研究方法的。从范围上来讲,廖慧璇和籍永丽等(2016)^[3]对我国资源环境承载力进行了评估,并提出相应的改进建议。卢小兰(2014)^[4]则对中国30个省份的资源环境压力进行了分析,认为资源环境压力较大省份的主要原因是资源利用粗放,技术水平相对落后,资源环境压力较小省份的主要因素是区域经济发展水平较高,资源环境技术较为先进。周侃和樊杰等(2015)^[5]通过对欠发达地区分布格局与资源环境要素的空间耦合关系进行分析,以宁夏西海固地区和云南怒江州为例,分析了欠发达地区资源环境承载力受影响的多重因素,并提出了针对性的提升资源环境承载力的政策建议。代富强和吕志强等(2012)^[6]以重庆市为例,基于生态足迹和生态承载力理论,构建了生态承载力约束下的生态足迹情景方案,以此来预测重庆市的人口规模。Yigang Wei(2015)等^[7]从城市承载力当前的研究现状出发,比较相关研究方法优缺点,并为规划者和城市管理者提出改善城市承载力建议。段春青和刘昌明等(2011)^[8]提出了基于现代进化算法思想的水资源承载力计算思路,并以辽河流域为例进行实证研究,分析计算了该区域的水资源承载规模。另外,在针对资源承载力研究方法方面,李杰兰和陈兴鹏等(2009)^[9]基于生态足迹理论,采用系统动力学方法构建青海省可持续发展评价模型,为青海省的可持续发展提供政策参考。郭秀锐和杨居荣等(2003)^[10]运用生态足迹法,以广州市为例,对其生态足迹进行估算并分析了生态足迹的动态变化。刘东和封志明等(2012)^[11]采用生态足迹模型,对我国县域尺度下各县的生态承载力供需关系进行系统评价。徐琳瑜和康鹏(2013)等^[12]基于环境承载力评价指标体系,采用突变级数法对珠海富山工业园区的环境承载力进行动态评价,这种方法很大程度避免了主观性。臧正和郑德凤等(2015)^[13]结合分岔理论和突变理论,对资源承载力进行多目标综合评价,为不同时空尺度的资源优化配置及区域可持续发展提供新的思路和评价方法。方创琳(2001)^[14]运用系统动力学方法并采用多目标决策方案优选的密切值模型生成水资源优化配置方案,以推动区域可持续发展。祝秀芝和李宪文等(2014)^[15]基于系统动力学原理和方法,建立上海市土地综合承载力系统动力学模型,并基于不同模式下的情景对上海市的土地资源承载力进行仿真预测。翁异静等(2015)^[16]构建了赣江流域的水生态系统动力学模型,设计了提升赣江流域水生态承载力的综合发展方案。

可见,尽管国内外对于资源承载力的研究较多,但它们缺乏对区域生态承载力进行一个整体的动态评价或只是对区域的部分污染物或特定小范围区域的模型仿真。不同的方法都各有优缺点,但社会、经济、生态系统是在非平衡状态下运动、变化、发展的复杂开放系统。其中,系统动力学模型能描述系统内各种非线性的复杂时变系统与巨系统的问题^[17]。运用系统动力学方法建立区域生态承载力系统动力学仿真模型有助于对区域生态承载力的复杂大系统进行定性与定量研究。而且,通过仿真模拟可以为区域生态承载力的改善提供有效的政策建议。

三、区域生态承载力的模型构建

(一) 研究区域及数据来源

江西省在中国东南部,位于长江中下游南岸,全省面积16.69万平方公里,2017年总人口约为4622万,辖11个设区市。江西省97.7%的面积属于长江流域,水资源比较充沛,全省自然资源丰富。本文以江西省为研究区域,利用江西省数据确定模型中的部分参数,并使用数据拟合了模型中的部分方程。建模数据来源于《中国统计年鉴》《江西统计年鉴》等。

(二) 区域生态承载力的模型结构分析

基于生态承载力、大气环境承载力、水生态承载力概念及复合系统的理论,本文借鉴翁异静(2015)的做法把区域生态承载力定义为:在一定时间、空间、和区域范围内,在一定的生活水平和环境质量的要求下,在

不超过生态系统弹性限度条件下生态系统所能承载的污染物数量,以及所能支持的经济规模和有一定生活质量的人口规模。为此本文引入了水环境容量和大气环境容量这两个概念,所谓水环境容量是指在给定水域范围和水文条件、规定排污方式和水质目标的前提下,单位时间内该水域最大允许纳污量^[18]。大气环境容量是指一个区域在空气质量达标约束下的大气污染物最大允许排放量^[19]。

依据系统动力学的建模原理,以及区域经济、人口、环境自身的特性,确定区域生态承载力系统动力学的主要模块:固体废物污染及治理模块、水污染及治理模块、大气污染及治理模块。

1. 固体废物污染及治理模块

固体废物的污染主要来自于两个方面,工业固体废物及生活固体废物,其中,工业固体废物的增加主要来自于工业产值的增长,生活固体废物的增加主要来自于人口增长,对于这两种固体废物的治理方式也不一样,对于工业固体废物主要来自于工业固体废物的综合利用,生活固体废物主要来自于对于它们的无害化处理,以及固体废物的自然降解。因此本模块将固体废弃物存量作为模块的状态变量,再确定相应的速率变量分别为固体废弃物增加量、固体废弃物减少量和固体废物自然降解量,随后确定相应的辅助变量以及有关的参数。

2. 水污染及治理模块

人类一切活动对水的污染主要表现为点源污染和面源污染,主要形式为工业污水排放和生活污水的排放,对于水污染的衡量有化学需氧量 COD、生化需氧量 BOD、氨氮量、总氮量、总磷量等,在这里采用氨氮量和化学需氧量 COD,将 COD 承载空间和氨氮化物的承载空间作为衡量水环境质量的监测指标。对于水污染的治理主要来自于工业污水和生活污水的处理再排放。因此本模块以人口和 GDP 作为状态变量,并以此确定相应的速率变量,工业污水的增加主要来自于工业产值的增长,生活污水来自于农村人口和城市人口共同排放(农村人口和城市人口的人均生活污水排放量有比较大的差异),在这里借鉴翁异静(2015)确定了农业氨氮排放系数、农业 COD 排放系数和相应的面源调整系数。

3. 大气污染及治理模块

大气污染主要来自于经济增长的能源使用,中国环境监测总站采用 AQI 指数来衡量空气质量,指标包含有:PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫、二氧化氮、臭氧、一氧化碳。PM_{2.5}是由污染源排放的二氧化硫、NO_x、一次 PM_{2.5}、NH₃、VOCs 等多种污染物经化学转化形成,并可随大气的流动进行长距离传输^[12]。作为二次污染物,臭氧的形成是氮氧化物(NO_x)与挥发性有机物(VOCs)在高温和强光条件下发生光化学反应形成的。在大气中一氧化碳的含量并不高,因此本文选取二氧化硫的承载空间和氮氧化物的承载空间作为大气环境的主要监测指标,二氧化硫的排放主要来自于人类对能源的使用,来自于经济增长直接增加了的能源使用量,而技术进步和经济结构的改进会提高能源的使用效率。能源的使用包含两个方面:化石能源的使用和可再生能源的使用,其中化石能源的使用直接造成了二氧化硫的排放,经济的增长间接推动了氮氧化物的排放。它们主要是由于石油和煤炭的使用造成的废气污染,它们的治理主要来自于工业脱硫和国家宏观调控(为控制全国二氧化硫排放总量,国家环境保护总局下发《二氧化硫总量分配指导意见》),自然削减主要来自于硫沉降和氮沉降。在氮氧化物的排放方程部分,由于氮氧化物的来源复杂,而且空气中的氮也会参与氮氧化物的生成,因此本文采用人均 GDP 来拟合氮氧化物的排放量,江西省的氮氧化物的排放量拟合程度达到 98.74%,拟合的结果非常接近于真实值。

(三) 模型的主要监测变量

人口和经济增长都会增加污染物排放,污染物的排放反过来也会限制经济和人口的增长。本文以区域环境污染物排放的承载能力构建了系统动力学模型,采用以下假设:经济的增长会提高能源使用量,技术进步会提高能源使用效率从而减少能源使用,经济结构改进会减少能源使用,能源过多使用主要是化石能源的使用会直接导致污染排放物的增加,环保规制会直接强制减少污染物的排放。另外,人口的增长会直接导致各种生活污染物的排放增加,它们主要表现为生活污水和固体废物。

因此,为了更直观监测污染物的排放与环境的承载力,构造了 COD 的承载空间,氨氮化物的承载空间,

氮氧化物的承载空间、二氧化硫的承载空间,来表示污染物排放给生态环境造成的压力。

概念 1: COD 的承载空间 = COD 健康容量 - COD 入河总量

概念 2: 氨氮的承载空间 = 水生态健康氨氮容量 - 氨氮入河总量

概念 3: 氮氧化物的承载空间 = 大气氮氧化物健康容量 - 大气氮氧化物排放量

概念 4: 大气二氧化硫承载空间 = 大气二氧化硫健康容量 - 大气二氧化硫排放量

(四) 系统边界的确定

人口子系统和经济子系统的发展受到区域生态承载力的约束,经济子系统推动了能源子系统的发展,生态子系统是经济子系统和人口子系统发展的基础,生态子系统的发展会更好推动经济 and 人口子系统的发展。人口、经济、能源和生态子系统相互作用,构成了区域生态承载力的系统动力学模型,水、能源、GDP、污染物连接各个子系统。COD 的排放、氮氧化物的排放、二氧化硫的排放、氨氮化物的排放是整个系统生态承载空间的主要监测指标,氨氮化物和 COD 的排放主要来自于农业和工业的排放,人类对污水的排放表现为点源污染和面源污染。二氧化硫和氮氧化物的排放主要来自于工业,能源的使用直接增加了二氧化硫的排放,经济增长间接推动了氮氧化物的排放。区域生态承载力是由人口、能源、经济和生态 4 个子系统构成的区域复杂生态系统。

在上述污染治理模块的基础上,对区域生态承载力系统的人口子系统、经济子系统、能源子系统、生态子系统 4 个主要子系统进行分析,确定了系统的边界。

表 1 区域生态承载力的系统动力学边界

子系统	变量
经济子系统	GDP、GDPR、经济规划、第一产业产值、第一产业产值比例、第二产业产值、第二产业产值比例、第三产业产值、第三产业产值比例、第一产业产值增长率、第二产业产值增长率、第三产业产值增长率
生态子系统	水生态健康状况、水生态影响因子、氨氮承载空间、水生态健康氨氮容量、固体废弃物存量、固体废弃物减少、生态环境影响因子、水环境 COD 容量、氨氮承载空间、工业污水排放总量、净工业污水排放量、农业氨氮排放量、面源氨氮排放总量、农业氨氮排放系数、氨氮面源调整系数、城镇人口人均生活污水排放量、农村人口人均生活污水排放量、生活污水处理率、生活氨氮排放系数、工业氨氮排放系数、生活污水净排放量、生活 COD 排放系数、工业 COD 排放系数、固体废弃物增加量、万元工业产值固废产生量、生活固废排放量、自然降解系数、固废处理水平因子、点源 COD 排放总量、COD 入河总量、面源 COD 排放总量、COD 入河系数、COD 面源调整系数、农业 COD 排放量、排放系数、氮氧化物承载空间、大气氮氧化物健康容量、大气二氧化硫健康容量、大气二氧化硫排放量、大气二氧化硫承载空间、硫沉降率、环保规制、汽油国标、汽油、柴油国标、柴油、工业二氧化硫去除率、煤中硫系数 2、煤中硫系数 1、本省生产、外省调入、石油、石油比例、煤炭、煤炭比例
能源子系统	能源消费量、能源消费增加量、能源消费减少量、化石能源增长量、可再生能源增长量、可再生能源、化石能源减少量、经济结构、技术进步
人口子系统	人口、死亡率、出生率、生育影响因子、DB、净增长、自然增长率、净迁移率、净迁移人口、ncbb(农村人口比例表函数)、czbb(城镇人口比例表函数)、ncb(农村人口比例)、czb(城镇人口比例)、城镇人口、农村人口、城镇化因子

(五) 状态、速率变量的确定

根据系统边界的分析结果,以及生态承载力的相关定义,将人口(人)、GDP(亿元)、能源消费量(万吨)、固体废弃物存量(万吨)作为生态承载力的主要状态变量,对应的速率变量分别为净增长率、GDPR、能源消费增加量、能源消费减少量、固体废弃物增加量、固体废弃物减少量,并最终建立了系统动力学的结构模型,见图 1。

(六) 方程与参数

区域生态承载力的系统动力学模型包含了 4 个状态变量、6 个速率变量和其他诸多的内生变量和外生变量,由于篇幅有限,在此列出主要变量的初始值及数据来源,其余变量的主要数据来源为《中国统计年鉴》《江西统计年鉴》以及参考其它文献或依据历史数据而得,部分参数根据经验进行调整,主要变量的数值及数据来源如表 2 所示。

表 2 区域生态承载力主要变量的数值及数据来源

水环境 COD 容量	979234	t/a ,贾俊松等(2009)
水环境氨氮容量	196088	t/a ,贾俊松等(2009)
大气二氧化硫健康容量	41. 86	万吨 ,薛文博等(2014)
大气氮氧化物健康容量	39	万吨 ,薛文博等(2014)
生活污水处理率	0. 5	无量纲 ,江西省的污水处理率从 1997 从 0 到 2009 的 0. 7 ,取 0. 5
ncb(农村人口比例)	With lookup(time)	无量纲; 2005 – 2015 数据
czb(城镇人口比例)	With lookup(time)	无量纲; 2005 – 2015 数据
城镇化因子	1	无量纲; 表示城镇化速度
净迁移人口	1046570	人 ,2010 人口普查数据 ,迁入人口 48834 ,迁出人口 1095401 ,数据来源: 中国 2010 人口普查资料。
自然降解系数	0. 02	无量纲 ,刘洪波等(2017)
工业 COD 排放系数	2. 2322	吨/万吨 ,2005 年数据
生活 COD 排放系数	4. 9125	吨/万吨 ,2009 年数据
汽油国标	0. 0001	克/克 ,2006 和 2011 两个国标的均值 ,2005 ,150 微克/克; 2011 ,50 微克/克
柴油国标	0. 0022125	克/克 ,2003 ,2009 ,2013 实施过程的年数加权值 ,2003: 350 微克/克; 2009: 350 微克/克; 2013: 50 微克/克
硫沉降率	0. 6	无量纲 ,程新金等(2004)
煤中硫系数 1	0. 0191	无量纲 ,唐跃刚等(2015)
煤中硫系数 2	0. 009875	无量纲 ,唐跃刚等(2015) 江西煤炭主要调入的省份山西; 陕西 ,河南 ,安徽 ,四省的平均数 ,
生活固废无害化处理率	0. 844	无量纲 ,取 2007 – 2013 年均值 84. 4%
工业二氧化硫去除率	0. 745	无量纲 ,取 2009 年数据
技术进步	0. 063	无量纲 ,Chaoqing Yuan(2009)

区域生态承载力的方程部分采用了江西省的数据进行了拟合。在具体的方程构建部分: (1) 本文采用固体废弃物的存量来拟合人口的出生率 ,基本假设是环境中的污染物存量会影响人口的出生率 ,而且采用线性拟合的方式 ,拟合的结果良好 ,拟合后的方程结果如表 3 所示。(2) 人口的净增长不仅有包含人口的自然增长部分还包含人口的迁入和迁出(人口的迁入和迁出 ,采用了 2010 年的全国人口普查数据 ,利用净迁移人口来衡量迁入和迁出的净效应) ,在人口净增长的方程部分 ,基本假设是水生态环境中容纳的 COD 或氨氮净排放量超过环境容纳的承载极限时 ,或者大气环境中容纳的二氧化硫和氮氧化物的净排放量超过环境容纳的承载极限时 ,人口的净增长会变为 0 ,因此采用了逻辑函数来设置了这部分的方程。(3) GDPR 的方程设置部分采用了江西省的“十一五”规划,“十二五”规划,“十三五”规划中的经济增长速度规划 ,设置了方程中的经济规划这个逻辑函数。另外 ,在拟合 GDPR 方程的时候采用 1. 1 系数的拟合效果最好 ,因此采用了这一系数 ,这可能是由于环境质量越好越有利于经济的发展。(4) 在大气二氧化硫排放量方程设置部分 ,根据 2006 年的国家环境保护总局关于印发《二氧化硫总量分配指导意见》,这一通知中的江西省在 2010 年的二氧化硫排放总量比 2005 年下降 7%。因此 ,设置了环保规划的逻辑方程包含其中 ,考虑到随着人们对于环境质量要求提升和环保意识加强 ,二氧化硫排放的总量约束会越来越强 ,设置为江西省自 2005 年起至 2015 年共减少 15% ,平滑后为每年减少 0. 01464。袁鉴(2015) 认为燃中固硫一般可脱的硫为 50% ~ 60% ,因此选取 0. 5 作为脱硫系数 ,其中 2 为分子质量系数。其它部分的重要方程均采用了线性方程。主要方程如表 3 所示。

表3 区域生态承载力主要方程

变量	方程
净增长	人口 \times (自然增长率 - 净迁移率) \times IF THEN ELSE(COD 承载空间 $> 0, 1, 0$) \times IF THEN ELSE(大气二氧化硫承载空间 $> 0, 1, 0$) \times IF THEN ELSE(氮氮承载空间 $> 0, 1, 0$) \times IF THEN ELSE(氮氧化物承载空间 $> 0, 1, 0$)
城镇人口	人口 \times czb \times 城镇化因子
出生率	生育影响因子 \times (16.1142 - 0.321517 \times LN(固体废弃物存量)) /1000
GDPR	IF THEN ELSE(COD 承载空间 $> 0, 1, 1, 0$) \times IF THEN ELSE(大气二氧化硫承载空间 $> 0, 1, 1, 0$) \times IF THEN ELSE(氮氮承载空间 $> 0, 1, 1, 0$) \times IF THEN ELSE(氮氧化物承载空间 $> 0, 1, 1, 0$) \times 经济规划 \times GDP
固体废弃物存量	固体废弃物增加量 - 固体废弃物减少量 - 固体废弃物自然降解量
生活污水排放量	农村人口 \times 农村人口人均生活污水排放量 + 城镇人口 \times 城镇人口人均生活污水排放量
工业污水排放总量	(工业产业产值 \times 工业单产污水产生量 + 第三产业产值 \times 单位三产污水产生量) $\times 1e+08$
氮氮入河总量	面源氮氮排放总量 + 点源氮氮排放总量 \times 氮氮入河系数
COD 入河总量	面源 COD 排放总量 \times 水生态影响因子 + 点源 COD 排放总量 \times COD 入河系数
大气二氧化硫排放量	((外省调入 \times 煤中硫系数 2 + 本省生产 \times 煤中硫系数 1) \times (1 - 工业二氧化硫去除率) + (汽油 \times 汽油国标 + 柴油 \times 柴油国标)) \times (1 - 环保规制) \times (1 - 硫沉降率) $\times 2 \times 0.5$
能源消费量	能源消费增加量 - 能源消费减少量
化石能源减少量	能源消费量 \times 经济结构
化石能源增长量	(一产单位产值能耗增加量 \times 第一产业产值 \times 一产产值增长率 \times 单位一产产值增加值能耗增加量 + 单位二产产值增加值能耗增加量 \times 第二产业产值 \times 二产产值增长率 + 单位三产产值增加值能耗增加量 \times 第三产业产值 \times 三产产值增长率) \times (1 - 技术进步)

四、模型的有效性分析

对模型进行历史拟合优度检验,以此来验证模型的有效性,以能源、人口、GDP 的实际数据作为历史变量(固体废弃物存量没有实际的历史数据),来比较仿真值和实际值的偏差,若偏差较小,则说明建立的系统动力学模型的模拟结果有很强的可靠性和准确性。

以江西省 2005 - 2030 年为仿真区间,将仿真值与 2005 - 2015 年的实际历史数据进行比较,GDP 的模拟结果和实际值如图 2 所示,仿真结果表明在现有的发展趋势下,应对系统进行干预,以提升区域经济的可承载规模,否则 GDP 将会在 2022 年就会到达生态承载力约束下的峰值。能源消费量的模拟结果和实际值如图 3 所示,能源消费量一直保持着平稳的增长,改善现有的能源结构以提升可再生能源的使用量和提升技术以促进能源利用效率的提升都会改善现有的能源消费中化石能源的消费量以及脱硫、脱硝技术的改进,都会减少污染废气的排放。人口的模拟结果和实际值如图 4 所示,仿真结果表明在现有的发展趋势下,应对系统进行干预,人口的增长在生态承载力的约束下将在 2022 年到达峰值,需要对现有的系统进行干预,以提升区域人口的可承载规模。此外,可以很直观地看出 3 个状态变量历史性检验的历史值和仿真值的模拟程度非常接近,因此,区域生态承载力的系统动力学模型对历史数据的模拟直观效果比较好,此外,能源消费量、GDP 和人口的模拟值与实际值的拟合优度分别是 94.15%、84.16%、99.46%,说明区域生态承载力的系统动力学模型对实际的情况模拟较好,模型的有效性和可靠性较强。

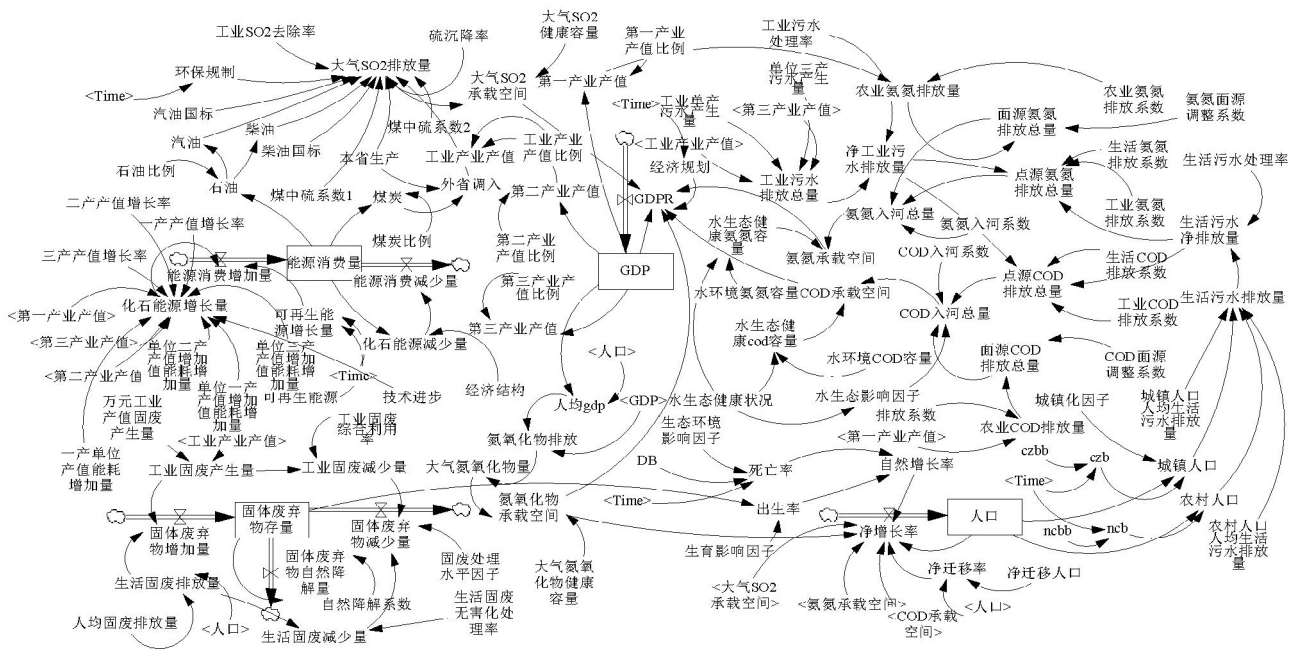


图1 区域生态承载力的系统动力学结构模型

模型结果的历史拟合优度检验如图所示。

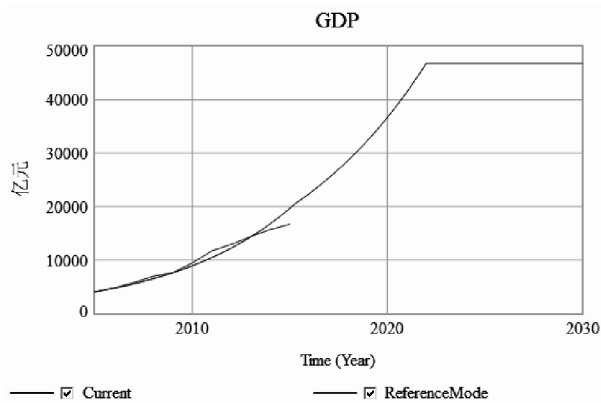


图2 GDP的历史性检验

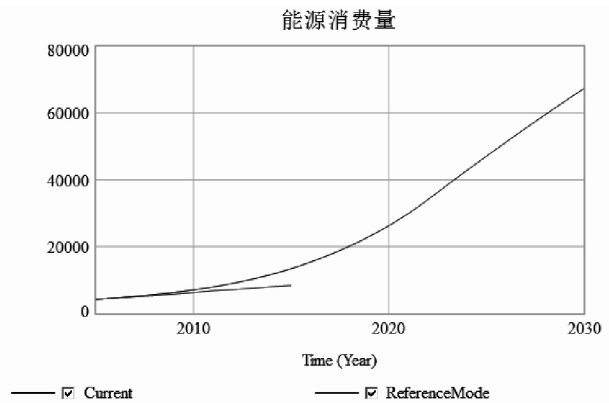


图3 能源消费量的历史性检验

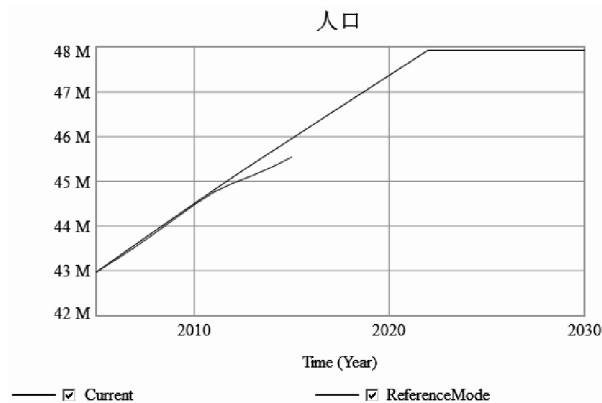


图4 人口的历史性检验

五、区域生态承载力的政策仿真

(一) 政策仿真方案的设计

参数调整是系统动力学中比较常见的政策干预手段,通过调整参数大小,模拟不同政策对于区域生态承载力系统的影响。在现状模拟的仿真预测中,江西省将会在 2022 年达到生态承载力的上限,主要是 COD 的承载空间达到极限,在 2022 年江西省的承载人口为 47934700 万人,承载经济规模为 46806.2 亿元。

因此,本文从控污和治污的角度出发来提升区域人口和经济的承载规模,从提高污染治理效率、优化产业结构、提高技术进步和节约用水这几个方面来选取政策参数,并进行政策仿真,比较不同政策作用下区域生态承载力的变化情况。对于所有参数的政策干预基本上都按照 10% 这一基准来调整,选择 10% 是因为 10% 是一个较为适中的数据调整比例。设置了 22 个政策干预点,分为 4 种模式:污染治理加强模式、产业结构优化模式、节约用水与技术进步模式、综合发展模式。

(二) 污染治理加强模式

污染治理加强模式就是提高对各种废水、废气、固体废物的处理能力,以减少区域内废物排放。一方面提高生活固废的无害化处理率、降低人均固废排放量和提高工业固废的综合利用率,另一方面提高污水处理的效率和提高工业二氧化硫的去除率。在污染治理加强模式中江西省将会在 2024 年达到生态承载力的上限,主要是 COD 的承载空间达到极限,在 2024 年江西省的承载人口为 48511000 人,承载经济规模为 58002.3 亿元。

(三) 产业结构优化模式

根据江西省“十三五”规划,未来以新型工业化为核心,协同推进现代农业和现代服务业加快发展,因此,产业结构优化的方案为第一产业产值比例和第三产业产值比例提升 10%,第二产业产值据此调整,经济发展不再只追求速度,经济发展的质量也一并兼顾。因此,在产业结构优化模式中,江西省将会在 2024 年达到生态承载力的上限,主要是 COD 承载空间达到极限,在 2024 年江西省的承载人口为 48332100 人,承载经济规模为 54554.8 亿元。

(四) 节约用水与技术进步模式

节约用水与技术进步模式主要是从生活方面通过城乡居民节约用水降低污水的排放量,以及通过技术改进的方式提高能源的使用效率和减少污染物排放。在节约用水与技术进步模式中,江西省将会在 2025 年达到生态承载力的上限,主要是二氧化硫的承载空间达到极限,在 2025 年江西省的承载人口为 48216200 人,承载经济规模为 52908.7 亿元。

(五) 综合发展模式

综合发展模式就是将以上 3 种方案整合,在污染治理、产业结构优化、节约用水和技术进步模式的基础上形成的。在综合发展模式中,江西省将会在 2027 年达到生态承载力的上限,主要是二氧化硫的承载空间和 COD 的承载空间达到极限,在 2027 年江西省的承载人口为 49502500 人,承载经济规模为 86381.6 亿元。

不同模式的政策干预点和政策模拟结果分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 不同模式参数的选取和调整方式

模式	参数	初始值	调整方式	调整值
污染治理加强模式	固废处理水平因子	1	1.1	1.1
	生活固废无害化处理率	0.844	1.1	0.9284
	工业固废综合利用率	0.454	1.1	0.4994
	人均固废排放量	6.8417×10^{-6}	0.9	5.8357×10^{-6}
	工业污水处理率	0.687	1.1	0.7557
	生活污水处理率	0.5	1.1	0.55
	工业二氧化硫去除率	0.745	1.1	0.8195
	煤炭比例	0.7122	0.9	0.64098
产业结构优化模式	第一产业产值比例	0.1347	1.1	0.14817

模式	参数	初始值	调整方式	调整值
节约用水与技术进步模式	第二产业产值比例	0.518	/	0.48706
	第三产业产值比例	0.3474	1.1	0.36477
	工业产业产值占第二产业比例	0.833	0.9	0.7497
	第一产业产值增长率	0.04767	0.9	0.042903
	第二产业产值增长率	0.1485	0.9	0.13365
	第三产业产值增长率	0.1043	0.9	0.09387
	城镇人口人均生活污水排放量	33.6	0.9	30.24
	农村人口人均生活污水排放量	24.521	0.9	22.0689
	工业 COD 排放系数	2.2322	0.9	2.00898
	生活 COD 排放系数	4.9125	0.9	4.4215
	工业氨氮排放系数	0.14822	0.9	0.13398
	生活氨氮排放系数	0.3893	0.9	0.35037
	工业单产污水产生量	0.0197	0.9	0.01773
	技术进步	0.063	1.1	0.0693
	固废处理水平因子	1	1.1	1.1
综合发展模式	生活固废无害化处理率	0.844	1.1	0.9284
	工业固废综合利用率	0.454	1.1	0.4994
	人均固废排放量	6.8417×10^{-6}	0.9	5.8357×10^{-6}
	工业污水处理率	0.687	1.1	0.7557
	生活污水处理率	0.5	1.1	0.55
	工业二氧化硫去除率	0.745	1.1	0.8195
	煤炭比例	0.7122	0.9	0.64098
	第一产业产值比例	0.1347	/	0.06543
	第二产业产值比例	0.518	1.1	0.5698
	第三产业产值比例	0.3474	1.05	0.36477
	城镇人口人均生活污水排放量	33.6	0.9	30.24
	工业产业产值占第二产业比例	0.833	0.9	0.7497
	第一产业产值增长率	0.04767	0.9	0.042903
	第二产业产值增长率	0.1485	0.9	0.13365
	第三产业产值增长率	0.1043	0.9	0.09387
	农村人口人均生活污水排放量	24.521	0.9	22.0689
	工业 COD 排放系数	0.2119	0.9	0.19071
	生活 COD 排放系数	4.9879	0.9	4.48911
	工业氨氮排放系数	0.07407	0.9	0.066663
	生活氨氮排放系数	0.385	0.9	0.3465
	工业单产污水产生量	0.0197	0.9	0.01773
	技术进步	0.063	1.1	0.069

注: (根据江西省十三五规划,未来以新型工业化为核心,协同推进现代农业和现代服务业加快发展,因此,产业结构优化的方案为第一、三产业产值比例提升 10%,第二产业产值比例据此调整)。

不同模式的仿真测试结果如表 5 所示。

表 5 四种模式的仿真测试结果

模式	达到承载上限时间	为零承载空间	承载人口/人	承载经济规模/亿元
污染治理加强模式	2024	COD 承载空间	48511000	58002.3
产业结构优化	2024	COD 承载空间	48332100	54554.8
节约用水与技术进步模式	2025	大气二氧化硫承载空间	48830300	67604.3
综合发展模式	2027	大气二氧化硫承载空间、 COD 承载空间	49502500	86381.6

在现状模拟中,在2022年,江西省就会达到最大的生态承载力的人口和经济容量。节约用水与技术进步模式能够比较显著地提升承载力的上限空间,分析后可得知主要是通过控制COD的排放来达到,这一模式对于提升人口和经济规模有比较大的作用,分别提升了1.2%和23.92%。产业结构优化模式对于提升人口和经济规模的作用略小,分别只提升了0.829%和16.55%。在2024年COD承载空间为0,表明产业结构优化和污染治理加强模式类似,COD的排放没有很好地限制,而且在2024年,经济规模和承载规模相对于污染治理加强模式略有下降。节约用水与技术进步模式,对于改善二氧化硫的排放没有太多帮助,但显著改善了COD造成的污染,对于提升人口和经济规模有比较大的作用,分别提升了1.87%和44.43%。综合发展模式是综合了三种发展模式的一个优化结果,在综合发展模式中2027年大气二氧化硫承载空间、COD承载空间都到达了极限,区域承载人口和承载经济规模相对于现状模拟模式提升人口和经济规模有非常大的作用,分别提升了3.27%和84.55%。

六、研究结论

本文在借鉴已有的生态承载力概念的基础上,确立了区域生态承载力的系统动力学边界,并以江西省为例构建了区域生态承载力系统动力学模型。模型以2005–2030年作为系统的仿真区间,运用系统动力学的方法对江西省生态承载力进行系统仿真,通过系统动力学模型现状仿真和不同发展模式的仿真,对江西省的生态承载力进行分析。现状模拟仿真的结果表明,江西省将会在2022年达到生态承载力的容纳上限,承载人口约为47934700万人,承载经济规模为46806.2亿元,对于这一现状,需要进行系统干预,以提升江西省生态承载力的容纳上限。为此本文设置了22个政策干预点,从控污和治污的角度构建了4种模拟仿真模式,其中综合发展模式更好利用了区域生态承载力,在2027(推迟5年)年才会达到生态承载力的容纳上限,此时,可承载经济规模为86381.6亿元,可承载人口49502500人,分别提升了84.55%和3.27%,对人口和经济的发展有一个很好的促进效果。

参考文献:

- [1]叶菁,谢巧巧,谭宁焱.基于生态承载力的国土空间开发布局方法研究[J].农业工程学报,2017(11):262–271.
- [2]Rees W E. The ecology of sustainable development[J]. Ecologist,1990,20(1):18–23.
- [3]廖慧璇,籍永丽,彭少麟.资源环境承载力与区域可持续发展[J].生态环境学报,2016(7):1253–1258.
- [4]卢小兰.中国省域资源环境承载力评价及空间统计分析[J].统计与决策,2014(7):116–120.
- [5]代富强,吕志强,周启刚.生态承载力约束下的重庆市适度人口规模情景预测[J].人口与经济,2012(5):80–86.
- [6]周侃,樊杰.中国欠发达地区资源环境承载力特征与影响因素:以宁夏西海固地区和云南怒江州为例[J].地理研究,2015(1):39–52.
- [7]Yigang Wei; Cui Huang; Patrick T. I. Lam; Zhiyang Yuan. Sustainable urban development: A review on urban carrying capacity assessment[J]. Habitat International, 2015:64–71.
- [8]段春青,刘昌明,陈晓楠,柳文华,郑红星.区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J].地理学报,2010(1):82–90.
- [9]李杰兰,陈兴鹏,王雨,张子龙.基于系统动力学的青海省可持续发展评价[J].资源科学,2009(9):1624–1631.
- [10]郭秀锐,杨居荣,毛显强.城市生态足迹计算与分析——以广州为例[J].地理研究,2003(5):654–662.
- [11]刘东,封志明,杨艳昭.基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J].自然资源学报,2012(4):614–624.
- [12]徐琳瑜,康鹏,刘仁志.基于突变理论的工业园区环境承载力动态评价方法[J].中国环境科学,2013(6):1127–1136.

- [13] 臧正, 郑德凤, 孙才志. 区域资源承载力与资源负荷的动态测度方法初探: 基于辽宁省水资源评价的实证[J]. 资源科学 2015(1): 52–60.
- [14] 方创琳. 区域可持续发展与水资源优化配置研究——以西北干旱区柴达木盆地为例[J]. 自然资源学报 2001(4): 341–347.
- [15] 祝秀芝, 李宪文, 贾克敬, 祁帆. 上海市土地综合承载力的系统动力学研究[J]. 中国土地科学 2014(2): 90–96.
- [16] 翁异静, 邓群钊, 杜磊, 刘晓玉, 周敏. 基于系统仿真的提升赣江流域水生态承载力的方案设计[J]. 环境科学学报 2015(10): 3353–3366.
- [17] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海: 上海财经大学出版社 2009: 32–206.
- [18] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[R]. 北京: 中国环境规划院 2003: 46.
- [19] 薛文博, 付飞, 王金南, 贺克斌, 雷宇, 杨金田, 王书肖, 韩宝平. 基于全国城市 PM_{2.5} 达标约束的大气环境容量模拟[J]. 中国环境科学 2014(10): 2490–2496.

Design of Policy Simulation Scheme for Regional Ecological Carrying Capacity based on System Dynamics——Taking Jiangxi Province as an Example

SHAO Yougen, CHEN Yunping, ZHONG Chenglin
(Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China)

Abstract: Improving ecological carrying capacity is an important guarantee for regional sustainable development. Based on the clear definition of the boundary of the regional ecological carrying capacity system dynamics model, the main monitoring variables of the regional ecological carrying capacity model were selected and the system dynamics model of regional ecological carrying capacity was constructed. With 2005–2030 as the system simulation interval, 22 policy intervention points such as industrial sewage treatment rate, primary industry output value growth rate and technological progress; four policy simulation models are designed to improve the regional ecological carrying capacity, including the model of pollution control strengthening, the model of industrial structure optimization, the model of water conservation and technological progress, and the model of comprehensive development. The policy simulation of regional ecological carrying capacity in Jiangxi province was carried out, and the simulation results show that: 1. If the current situation continues, Jiangxi Province will in 2022, it will reach the upper limit of the capacity of ecological carrying capacity, with a carrying population of about 479.34 million and a carrying economy of 4680.62 billion Yuan; 2. If the comprehensive development model is adopted, under the comprehensive development model, Jiangxi Province is at 2027 (postponed 5 years). In the year, the upper limit of the capacity of ecological carrying capacity will be reached. At this time, the economic scale of the bearable economy is 8,638.16 billion yuan, which can carry a population of 49,502,500 people, which is 84.55% and 3.27% higher than the current model.

Key words: ecological carrying capacity; carrier space; policy simulation

(责任编辑: 罗序斌)