

系统动力学应用于中国区域绿色发展政策仿真的方法学综述

杨顺顺

(湖南省社会科学院, 长沙 410003)

摘要 绿色发展是我国“十三五”时期五大发展理念之一,是解决我国发展与保护矛盾的根本途径。系统动力学是模拟宏观社会经济发展趋势和政策效力的常用分析工具,本文对系统动力学在中国区域绿色发展政策仿真中的应用进行了梳理。研究显示:系统动力学应用的区域范围方面,该方法全面应用于从国家直至县域等各个尺度的区域绿色发展研究,区域绿色发展通常被分解为经济、社会、资源、环境等子系统;应用的主要领域方面,水土资源、能源、水环境、固废治理、绿色产业等领域应用较多,大气环境、绿色消费等领域应用相对较少;方法的改进和完善方面,软系统分析法、各类优化方法和地理信息系统与系统动力学的集成应用日益普遍。文末根据文献梳理情况,提出未来应在决策变量设计、历史数据挖掘、环境系统对经济系统的反馈等方面进行方法改进。

关键词 系统动力学;绿色发展;政策仿真;综述

中图分类号: X321; N941.3

文章编号: 1674-6252(2017)06-0041-07

文献标识码: A

DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2017.06.041

Research Progress of Application of System Dynamics in Regional Green Development Policy Simulation in China

YANG Shunshun

(Hunan Academy of Social Sciences, Changsha 410003)

Abstract: Green development is one of the five development ideas of China in the 13th Five-Year period, and also the way to solve the contradiction between development and environmental protection. System dynamics is the tool to simulate the trends of macro socio-economic development and policy effectiveness. This paper reviews the application of system dynamics for regional green development policy simulation in China. Results show that: the method is used in green development research at all geographical levels from country to county or other areas, and the system of regional green development is often divided into some subsystems, such as economy, society, resources and environment subsystems. The application are mainly focus on the fields of soil resource, water resource, energy, water environment, solid waste management and green industry, and relatively few on atmosphere environment, green consumption and so on. In terms of improvement of the method, the integration of soft system analysis, various optimization methods, GIS and system dynamics are becoming hot issue. Based on the literature review, this study proposes that the emphasis of the method improvement in the future should be the design of decision-making variables, mining of historical data, and the feedback from environmental system to economic system.

Keywords: system dynamics; green development; policy simulation; review

引言

联合国开发计划署发布的《2002年中国人类发展报告:绿色发展,必选之路》中首次明确指出中国应走绿

色发展^[1]之路。虽然与绿色发展类似的可持续发展、循环经济、低碳经济在我国早已开展了相关政策实践,但绿色发展在“十二五”伊始才正式成为国家五年规划纲要的专门章节,而2015年十八届五中全会提出的创新、

基金项目:湖南省社会科学院青年科研基金项目“绿色湖南建设的系统动力学仿真、预警及政策优化研究”(2013Qnkt18);湖南省社会科学成果评审委员会课题“长江经济带绿色发展评价体系与政策仿真研究”(XSP17YBZZ077);湖南省社会科学成果评审委员会课题“低碳视角下湖南城

市发展绿色效率测度研究”(XSPYBZZ035)。
作者简介:杨顺顺(1981—),男,副研究员,博士,研究方向为低碳经济与绿色发展、农村环境管理、复杂系统分析与仿真方法, E-mail: yangssmail@foxmail.com。

协调、绿色、开放、共享的五大发展理念,标志着绿色发展将成为我国未来相当长一段时期内的核心发展理念^[2]。

系统动力学(system dynamics, SD)方法是20世纪50年代中期发展起来的用于研究信息反馈系统动态变化规律的分析技术,其于1956年由美国麻省理工学院教授Forrester创立,他于1958年在《哈佛商业评论》刊出了其代表性成果^[3]。系统动力学最初被称为工业动力学^[4],主要用于企业这一微观主体的货物生产、销售、流通以及对应的市场问题,其后被引入城市发展等宏观问题。20世纪70年代,随着《世界动力学》、《增长的极限》等一系列经典著作的出现,系统动力学开始全面介入宏观层面的社会经济问题研究,并逐步成为政策效力仿真分析的常用工具。

系统动力学方法于20世纪70年代末引入我国学界,80年代在科研院所得到了强力推广,涌现出了如杨通谊、王其藩、许庆瑞、贾仁安等一批著名学者^[5]和经典著作^[6]。系统动力学基于反馈控制理论自上而下建立仿真模型,常用的仿真平台包括DYNAMO、Stella和PowerSim、Vensim等^[7], Vensim等可视化集成平台方法的出现,极大地降低了系统动力学模型差分方程组和程序语言的编写难度,使仿真模型变得直观和易于理解,推动了系统动力学方法在各个学科领域的全面应用。目前,在中国知网以系统动力学为关键词可搜索到学术论文接近1万篇,其在社会科学、自然科学和工程技术领域的应用已极其广泛。

本文将对系统动力学方法应用于我国区域绿色发展政策仿真优化的相关研究,从研究的空间范围、领域范畴、方法改进等方面进行全面梳理和述评,在此基础上提出进一步完善该方法应用实践的对策建议,为相关领域研究者提供参考借鉴。

1 系统动力学的研究尺度

1.1 全国范围研究

系统动力学方法应用于全国范围尺度绿色发展的研究,主要集中于:①对国家绿色发展指数的探讨和评价。张雪花等构建了区域社会环境复杂系统仿真模型,通过系统动力学方法辨识影响人类绿色发展指数的关键因素^[8];郑宏娜构建了包含经济、环境、政策子系统的系统动力学评价模型,测算了1992—2011年我国的绿色福祉指数和绿色发展指数^[9]。②对我国绿色增长模式的筛选和判断。此类研究常常结合情景分析方法共同实施,如佟贺丰等构建了中国可持续发展模型,模拟了发展绿色经济情景下农业等7个不同行业的发展情况^[10];郝芳等构建了中国绿色增长评价模型和“调整产业结构”等6种发展模式,分析了未来直至2020年我国社会、经济、资源环境和能源系统中第三产业占比、“三废”存量、万元GDP能耗等关键指标的运行趋势,认为现有生态创

新水平尚不能满足“十三五”时期的绿色发展目标^[11]。

③应用于国家间绿色发展比较分析。李文超等建立了涵盖人口、资源、资本、污染子系统的经济可持续发展模型,并对OECD国家通过生态创新转变系统衰退趋势的作用进行了分析^[12]。

1.2 省、市域范围研究

系统动力学方法应用于省、市域或类似范围尺度绿色发展的研究,主要集中于:①对省域绿色发展情景的仿真分析。和国家范围尺度类似,此类研究常常将绿色发展体系分解为经济、人口、资源、环境等子系统的结合,如秦钟等模拟了广东省循环经济发展情景^[13],王耕等对辽宁省实施了生态安全预警评价^[14],刘耀彬等以江苏省为例建立了区域城市化与生态环境耦合发展模型^[15],李素峰等以黑龙江省为例讨论了矿产资源密集型区域可持续发展模式^[16]。②对市域绿色发展情景的仿真分析。Tsolakis等提出了通过系统动力学实施生态城市可持续性评价的整体框架^[17],与省域相比,此范围尺度的模型在保留普适性的基础上,大多加入了案例区域的特征要素,如Jin等利用系统动力学方法开发了一个城市生态足迹的动态预测和决策支持框架^[18];王向华等以湿地生态系统为评估重点,对厦门建设海湾型生态城市模式进行了评价^[19];郭振峰等^[20]和徐鹏等^[21]分别以港城互动和低碳城市为特色,分析了深圳市低碳生态城市建设路径。③对跨省级、市级行政区域,具有共同自然资源禀赋或者经济社会发展区位特征区域的绿色发展研究。此类研究进一步强调了研究区域的独特性,系统动力学模型针对区域特色设计相应模块,已见报道的研究包括对大型河流^[22]及其三角洲^[23]、半岛城市群^[24]、大湖经济区^[25,26]、大型水库区^[27]和山区经济^[28]等区域社会经济环境协调发展的研究。

1.3 县域及以下范围研究

县域及以下范围尺度绿色发展的研究,既包括对区域或乡镇,也包括对工业园、开发区等小而集中的发展板块的分析,目前的研究包括:①对县域经济-生态系统发展趋势的考察。在20世纪80年代至90年代初,出现了一批以特定县域为研究对象的系统动力学研究成果^[29],目前由于此类研究和省域、市域研究思路过于接近,报道已日益减少。②对小城镇、村落绿色发展模式分析。李桂君构建了小城镇发展系统动力学流程图,揭示了其自组织规律^[30];宫德圆建立了严寒地区村镇绿色发展模型^[31]。此类研究由于研究区域偏小且偏向乡村地区,很多都转向绿色农业政策的系统动力学仿真分析^[32]。③对新区新城、园区等经济社会活动高度活跃的小型经济单元的研究。瞿庆玲等以徐州经济开发区为例,将系统动力学应用于工业园的管理与调控^[33];李春发等^[34]和韦静等^[35]分别将能值和生态足迹的方法与系统动力学相结合,评价了中新天津生态城和博鳌特别规划区的可

持续发展模式。

综上所述,此类研究主要针对区域“社会—经济—环境”复杂巨系统如何实现绿色发展展开研究,将巨系统分解为多个子系统进行分析,通常都包括社会、经济、资源、环境子系统。研究成果主要涉及对系统运行的稳定性、协调性的评价结论,绿色发展多情景方案的优选结果和系统调控思路,以及系统关键参数的变化趋势和展望。此外,由于社会系统的参数量化模拟困难,一般社会领域只重点模拟人口系统的变化。

2 系统动力学的应用领域

2.1 资源、能源系统中的仿真应用

系统动力学方法在模拟资源、能源系统供需安全,以支撑“经济—资源”系统绿色发展方面应用颇多:①在水资源管理方面,研究主要着眼于水资源承载力、供需平衡和管理。Winz等总结了系统动力学在解决水资源管理中理论和方法的发展以及常见的问题^[36];Feng等的模拟结果显示义乌市未来必须采取节水措施,否则水资源承载力将无法满满足经济发展需求^[37];杨开宇建立了快速城镇化进程中水资源供需变化的理论模型^[38];熊鹰等则以长株潭城市群为例对比了发展经济型、节水型等多种方案的水资源供需状态,并提出了协调城镇化和水资源优化配置的决策建议^[39];曹琦等讨论了如何通过人口发展优化和产业结构调整提高区域水资源管理绩效^[40];刘芳等则从水资源项目治理中发散分析到其利益相关方形成的关系网络^[41],以及其涉及的社会风险和環境风险问题,是一个视角较独特的研究成果。②在土地资源管理方面,研究主要着眼于土地资源承载力、土壤质量控制和可持续利用。何鹏飞研究了维持生态平衡条件下,各类用地系统的土地规划问题^[42];Shen等设计了包含人口、经济、住房、交通、建成区5个子系统的城市发展模型,对香港土地可持续利用进行了模拟预测^[43];祝秀芝等认为未来上海市采用协调发展型模式的土地综合承载力指数最高^[44];陈慧等将土地安全分解为粮食安全保障、土地经济安全、土地生态安全3个维度,分析了土地资源与社会经济和自然环境间的响应关系^[45];涂小松等以无锡市为例讨论了不同优先发展模式下土壤质量的调控重点^[46]。③在能源管理方面,研究主要着眼于能源安全、能源消费结构及其引发的碳排放问题。郭玲玲等建立了中国能源安全模型,通过调节产业经济、人口、资源子系统参数,预测了能源生产、消费、供需缺口和储备量的变动^[47];李爽等模拟了能源安全和能源消费结构的关联机制^[48];Liu等^[49]、陈彬等^[50]、Feng^[51]等均从能源消费与温室气体排放关系出发,分别提出了全国、重庆市和北京市的低碳经济发展建议。

2.2 环境治理系统中的仿真应用

环境污染控制是绿色发展的核心问题之一,狭义的

绿色发展常特指环境治理领域,近年来随着公众对环境质量期望的日益提升,对经济和环境治理系统协调发展的讨论也更接近现实热点问题:①水环境治理方面,主要关注水环境承载力、水环境质量调控及其社会经济效应等内容。叶龙浩等建立了水环境承载力核算模型,并应用于沁河流域系统优化调控^[52];Yang等以铁岭为例测算了不同社会和环境情景下的水环境承载力变化^[53];盖美等辨识了影响近岸海域水环境的主要因素,并对大连市水环境质量进行了仿真调控^[54];Liu等模拟了滇池流域水环境保护策略的效果^[55];徐鹏等以南四湖为例,设计了流域社会经济水环境效应评估方法^[56]。此外,由于近年来我国城镇水环境污染问题逐步得到解决,农业面源污染控制方面的应用开始逐渐增多^[57,58]。②大气环境治理方面,主要关注大气污染排放和环境承载力等内容,由于大气质量受难以人为控制的气象原因影响较大,此类研究数量较水环境领域显著偏少。郑斯瑞等模拟了化工工业园污染排放趋势,提出了相应的工业能耗和脱硫效率目标^[59];周业晶等对引发城市灰霾天气的PM_{2.5}排放量和承载力进行了宏观动态模拟^[60]。③固体废弃物治理方面,主要分为工业固废、建筑固废和城乡生活垃圾三个方面的研究。范厚明等以辽宁省为例预测了工业固废的产生、利用、处置和贮存情况,并对政府激励和约束政策进行了仿真^[61];Zhao等以重庆为例评估了建筑和拆迁垃圾回收中心设置的最佳方案^[62];徐礼来等和王耕等分别对城市生活垃圾产生量预测和资源化处理进行了框架研究^[63]和情景分析^[64];代峰等尝试用系统动力学方法仿真生活垃圾发电三方进化博弈过程^[65],在方法上有一定的创新性。

2.3 经济系统中的仿真应用

绿色经济方面涉系统动力学方法的研究很多,本文仅对部分重点领域进行梳理:①产业的绿色化转型方面,许多研究都对产业结构与污染排放间的关系进行了讨论^[66],并深入到具体的绿色制造、绿色工艺流程、绿色企业等方面^[67,68]。此外,生态产业链和绿色供应链也是此类研究一直以来的热门研究方向^[69-71]。②绿色交通领域方面,主要集中于低碳交通、交通拥堵等问题的研究。Han等分析了通过加快铁路建设、减少高速公路网络延伸和征收燃油税的方式,降低我国城际客运碳排放的可能性^[72]。③绿色建筑领域方面,涵盖了绿色建筑推广的影响因素、推进策略和政府激励机制的研究^[73,74],但受限于数据获取难度,目前国内量化研究尚不多见。④绿色消费领域方面,由于居民个体消费行为的研究需要偏好调研数据的支持,且微观主体行为分析与系统动力学自上而下建模特征吻合度较低,目前该方面的研究仅见于低碳出行、绿色产品使用等方面^[75,76]。

将系统动力学应用于区域绿色发展特定领域的政策仿真,由于研究相对深入,是目前学界报道最为集中的板块。研究的主要障碍在于,部分研究领域由于缺乏数

据支撑,很难建立参数间响应的量化方程,导致研究只能停留于流图分析层次;环境治理领域一般只能用于模拟污染物排放量的变化趋势,较难准确估计研究区域环境质量和状态的变化。

3 系统动力学与其他方法的集成应用

3.1 系统动力学与 PSR 等软系统分析技术的结合应用

系统动力学方法技术已基本成熟,其与各类评价方法的结合应用也报道甚多,本文不一一枚举。相比于仿真处理过程,系统动力学技术在建立框架模型和设计流位、流率等参量时虽有过程范式,但主要取决于建模者对研究对象的主观认识和个人意愿,缺乏相对统一的概念模型分析手段,即使对同一研究对象和同一问题,也可能出现差异很大的模型构架,导致分析结果可能相距甚远。针对系统动力学建模过程形式化程度低的问题,贾仁安等原创了流率基本入树(RIT)法创建因果关联图^[77];在绿色发展研究方面,以PSR(压力—状态—反应,可进一步扩展为DPSIR分析框架)为代表的软系统分析技术,在系统动力学前期的概念模型设计方面得到了较多应用^[78-80]。此外,复杂适应系统理论的SBC(结构—背景—变化)范式^[81]、产业经济学的SCP(结构—行为—绩效)范式^[82]等框架分析技术也有部分研究涉及。

3.2 系统动力学与优化技术的结合应用

系统动力学在区域绿色发展领域主要应用于中长期变化趋势的模拟,决策变量也多受建模者的主观影响,对仿真结果的精度要求不高,一般历史误差在10%~30%均可接受,这既增加了方法的适用范围和操作性,又导致政策仿真结果并非真实的最优解,这对结果的适用性,特别是解决近期问题产生了困扰。为解决系统动力学决策变量选择和预测方案优化问题,非线性优化和多目标规划(MOP)与之结合应用的集成方法应运而生。徐志端等应用非线性优化法确定决策变量最优解并带入系统动力学模型,讨论了西安市污水再生利用系统的优化问题^[83];张雪花等将SD-MOP整合模型应用于秦皇岛市水资源规划^[84];Chang等将多目标规划、模糊集理论和系统动力学相结合实现最优土地利用规划^[85];Wu等采用系统动力学和模糊多目标规划集成方法,预测了中国世界遗产区域内的能源消耗和二氧化碳排放量^[86]。

3.3 系统动力学与地理信息技术的结合应用

系统动力学的另一个主要问题是缺乏空间处理和表现能力,而区域绿色发展与区域资源环境禀赋联系紧密,使得这一需求又极为现实。针对这一问题,将系统动力学与地理信息系统(GIS)结合应用的研究也逐渐增多。Ahmad等将系统动力学与GIS联用的方法称为空间系统动力学^[87],认为其在水资源管理领域应用前景广泛;Xu

等按照DPSIR-SD-GIS技术流程,建立城市住宅发展可持续性评估方法^[88],但尚未采用国内案例实证;Guan等采用SD-GIS联用技术,以重庆市为例分析了城市经济资源环境系统的动态演化和可持续发展^[89];张波等采用GIS-SD模型开发了水污染事故模拟系统,并应用于松花江水污染事故仿真^[90];王行风等基于SD-CA(元胞自动机)-GIS集成方法,讨论了山西省矿区人类活动环境积累效应^[91]。

可见,在系统动力学自身技术基本完善的前提下,未来在区域绿色发展政策仿真方面的模型改进将主要依托多模型整合应用的手段,并主要面向模型概念设计过程、模型分析处理过程和模型结果展示能力的优化。

4 结论与展望

系统动力学方法适用于多范围空间尺度、中长时间尺度模拟,能使用流图可视化表达系统元素间复杂反馈关系且易于进行子系统扩展的特点,使其与中国区域绿色发展“社会—经济—资源—环境”系统具有的非线性、不确定性、动态演化的特征,以及需要判断政策干预下系统绿色发展趋势的定量化需求相吻合。因此,系统动力学方法目前已被国内外学界广泛应用到我国国家、省市县等各个不同层次的区域绿色发展政策仿真领域,既用于模拟区域社会经济环境巨系统的发展,又深入到水土资源、能源、各类环境介质系统、绿色经济子板块等特定领域的研究,方法也从单一的非线性连续动力学方法发展到与其他评价技术、优化技术、地理信息技术等的集成应用,目前报道的各类成果已具备较强的研究广度和深度。

但在具体的区域绿色发展系统动力学政策仿真实现过程中,也依然存在一些待破解的方法障碍:一是系统动力学方法中各类参数,特别是决策变量设计的科学化有待讨论。其中,表函数的广泛使用,一方面使模型易于接纳其他方法的模拟参数和结果,另一方面也使模拟的主观性增强。二是在中国区域绿色发展仿真中,环境类历史数据的缺失对模型方程构建和有效性检验带来了较大困难,有待数据挖掘技术的完善和支持。三是在绿色发展模型构建中社会经济环境系统的关系问题。经济、人口参数常被认为是驱动力而被置于“投入”部分,环境系统常被认为是影响的结果而被置于“产出”部分,尽管环境变化对经济社会系统会造成反馈影响,但这种反馈影响由于定量化困难而往往在建模中被忽视;另一种常见的情况是,很多研究的情景分析中直接对资源和环境系统参数进行调整,却忽略了这些调整所必须付出的社会经济成本。这些问题都有待相关领域研究者的进一步讨论和解决。

参考文献

[1] 霍艳丽,刘彤.生态经济建设:我国实现绿色发展的路径

- 选择[J]. 企业经济, 2011(10): 63-66.
- [2] 李晓西.《中国绿色发展指数报告》发布六周年小记[J]. 中国环境管理, 2016(1): 116-116.
- [3] FORRESTER J W. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers[J]. Harvard business review, 1958, 36(4): 37-66.
- [4] FORRESTER J W. Industrial Dynamics[M]. Canbridge, MA: The MIT Press, 1961.
- [5] 陈国卫, 金家善, 耿俊豹. 系统动力学应用研究综述[J]. 控制工程, 2012, 19(6): 921-928.
- [6] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [7] 张波, 虞朝晖, 孙强, 等. 系统动力学简介及其相关软件综述[J]. 环境与可持续发展, 2010, 35(2): 1-4.
- [8] 张雪花, 王小双, 陶貽侠. 人类绿色发展指数的构建与测度方法研究[C]// 中国人口·资源与环境 2013 年专刊——2013 中国可持续发展论坛(一). 北京: 中国可持续发展研究会, 2013: 310-313.
- [9] 郑宏娜. 中国绿色发展系统模型构建与评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [10] 佟贺丰, 杨阳, 王静宜, 等. 中国绿色经济发展展望——基于系统动力学模型的情景分析[J]. 中国软科学, 2015(6): 20-34.
- [11] 郝芳, 王雪华, 孔丘逸. 基于系统动力学的中国绿色增长评价模型研究[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2017, 38(3): 39-45.
- [12] 李文超, 田立新, 贺丹. 生态创新促进经济可持续发展的路径研究[J]. 科学管理研究, 2013, 31(2): 16-19.
- [13] 秦钟, 章家恩, 骆世明, 等. 基于系统动力学的广东省循环经济发展的情景分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 800-806.
- [14] 王耕, 刘秋波, 丁晓静. 基于系统动力学的辽宁省生态安全预警研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(2): 144-149.
- [15] 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[J]. 地理研究, 2007, 26(1): 187-196.
- [16] 李素峰, 严良, 牛晓耕, 等. 矿产资源密集型区域可持续发展模式的系统动力学仿真研究[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(24): 86-94.
- [17] TSOLAKIS N, ANTHOPOULOS L. Eco-cities: an integrated system dynamics framework and a concise research taxonomy[J]. Sustainable cities and society, 2015, 17: 1-14.
- [18] JIN W, XU L Y, YANG Z F. Modeling a policy making framework for urban sustainability: incorporating system dynamics into the ecological footprint[J]. Ecological economics, 2009, 68(12): 2938-2949.
- [19] 王向华, 朱晓东, 李杨帆, 等. 厦门海湾型城市发展累积生态效应动态评价[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2375-2381.
- [20] 郭振峰, 范厚明, 崔文罡, 等. 港城互动构建绿色低碳港口城市系统仿真[J]. 生态经济, 2016, 32(6): 98-102.
- [21] 徐鹏, 林永红, 栾胜基. 低碳生态城市建设效应评估方法构建及在深圳市的应用[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1457-1467.
- [22] WEI S K, YANG H, SONG J X, et al. System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China[J]. European journal of operational research, 2012, 221(1): 248-262.
- [23] 刘超, 林晓乐. 城镇化与生态环境交互协调行为研究——以黄河三角洲为例[J]. 华东经济管理, 2015, 29(7): 49-58.
- [24] 艾华, 张广海, 李雪. 山东半岛城市群发展模式仿真研究[J]. 地理科学, 2006, 26(2): 144-150.
- [25] 徐升华, 吴丹. 基于系统动力学的鄱阳湖生态产业集群“产业-经济-资源”系统模拟分析[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 871-887.
- [26] GUO H C, LIU L, HUANG G H, et al. A system dynamics approach for regional environmental planning and management: a study for the Lake Erhai Basin[J]. Journal of environmental management, 2001, 61(1): 93-111.
- [27] 张梦婕, 官冬杰, 苏维词. 基于系统动力学的重庆三峡库区生态安全情景模拟及指标阈值确定[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4880-4890.
- [28] 汪一鸣. 宁夏南部山区级经济与人口、资源、环境协调发展的系统动态分析[J]. 干旱区资源与环境, 1989, 3(1): 12-22.
- [29] 杨秉赓, 赵士鹏. 龙井县社会—经济—生态复合系统动态仿真[J]. 地理科学, 1989, 9(1): 60-66.
- [30] 李桂君, 杜磊, 李玉龙. 小城镇发展系统结构及其支持政策选择[J]. 小城镇建设, 2013(10): 36-39.
- [31] 宫德圆. 基于系统动力学的严寒地区村镇绿色发展研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [32] 王翠霞, 贾仁安, 邓群钊. 中部农村规模养殖生态系统管理策略的系统动力学仿真分析[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(12): 158-169.
- [33] 瞿庆玲, 钱新, 王瑾. 综合类工业园环境系统动力学仿真与调控[J]. 环境保护科学, 2010, 36(2): 82-85, 99-99.
- [34] 李春发, 曹莹莹, 杨建超, 等. 基于能值及系统动力学的中天津生态城可持续发展模式情景分析[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2455-2465.
- [35] 韦静, 曾维华. 生态承载力约束下的区域可持续发展的动态模拟——以博鳌特别规划区为例[J]. 中国环境科学, 2009, 29(3): 330-336.
- [36] WINZ I, BRIERLEY G, TROWSDALE S. The use of system dynamics simulation in water resources management[J].

- Water resources management, 2009, 23(7): 1301–1323.
- [37] FENG L H, ZHANG X C, LUO G Y. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China[J]. Mathematics and computers in simulation, 2008, 79(3): 269–278.
- [38] 杨开宇. 运用系统动力学分析我国城镇化对水资源供需平衡的影响[J]. 财政研究, 2013(6): 10–13.
- [39] 熊鹰, 李静芝, 蒋丁玲. 基于仿真模拟的长株潭城市群水资源供需系统决策优化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1225–1239.
- [40] 曹琦, 陈兴鹏, 师满江. 基于SD和DPSIRM模型的水资源管理模拟模型——以黑河流域甘州区为例[J]. 经济地理, 2013, 33(3): 36–41.
- [41] 刘芳, 孙华. 水资源项目治理的社会网络动态分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(3): 144–149.
- [42] 何鹏飞. 生态试验区土地可持续利用的SD模型[J]. 中国经贸导刊, 2012(29): 8–10.
- [43] SHEN Q P, CHEN Q, TANG B S, et al. A system dynamics model for the sustainable land use planning and development[J]. Habitat international, 2009, 33(1): 15–25.
- [44] 祝秀芝, 李宪文, 贾克敬, 等. 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, 28(2): 90–96.
- [45] 陈慧, 付光辉, 刘友兆, 等. 南京市土地资源安全SD法评价研究[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 846–859.
- [46] 涂小松, 濮励杰, 严祥, 等. 土地资源优化配置与土壤质量调控的系统动力学分析[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 221–226.
- [47] 郭玲玲, 武春友, 于惊涛. 中国能源安全系统的仿真模拟[J]. 科研管理, 2015, 36(1): 112–120.
- [48] 李爽, 汤嫣嫣, 刘倩. 我国能源安全与能源消费结构关联机制的系统动力学建模与仿真[J]. 华东经济管理, 2015, 29(8): 89–93.
- [49] LIU X, MAO G Z, REN J, et al. How might China achieve its 2020 emissions target? A scenario analysis of energy consumption and CO₂ emissions using the system dynamics model[J]. Journal of cleaner production, 2015, 103: 401–410.
- [50] 陈彬, 鞠丽萍, 戴婧. 重庆市温室气体排放系统动力学研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(4): 72–79.
- [51] FENG Y Y, CHEN S Q, ZHANG L X. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: a case study of Beijing, China[J]. Ecological modelling, 2013, 252: 44–52.
- [52] 叶龙浩, 周丰, 郭怀成, 等. 基于水环境承载力的沁河流域系统优化调控[J]. 地理研究, 2013, 32(6): 1007–1016.
- [53] YANG J F, LEI K, KHU S, et al. Assessment of water environmental carrying capacity for sustainable development using a coupled system dynamics approach applied to the Tieling of the Liao River Basin, China[J]. Environmental earth sciences, 2015, 73(9): 5173–5183.
- [54] 盖美, 田成诗. 大连市近岸海域水环境质量、影响因素及调控研究[J]. 地理研究, 2003, 22(5): 644–653.
- [55] LIU H, BENOIT G, LIU T, et al. An integrated system dynamics model developed for managing lake water quality at the watershed scale[J]. Journal of environmental management, 2015, 155: 11–23.
- [56] 徐鹏, 高伟, 周丰, 等. 流域社会经济的水环境效应评估新方法及在南四湖的应用[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2285–2295.
- [57] 罗光斌, 何丙辉, 刘光平, 等. 重庆市农业面源污染SD仿真研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(9): 77–82.
- [58] 杨顺顺, 徐鹏, 李丽丽. 南方流域农业面源污染控制政策仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [59] 郑斯瑞, 钱新, 瞿庆玲. 化学工业园的系统动力学仿真与调控[J]. 环境科学研究, 2011, 24(5): 587–592.
- [60] 周业晶, 周敬宣, 肖人彬, 等. 以GDP-PM_{2.5}达标为约束的东莞大气环境容量及承载力研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2231–2241.
- [61] 范厚明, 李佳书, 丁钦, 等. 基于系统动力学模型的工业固废管理政策作用仿真[J]. 环境工程学报, 2014, 8(6): 2563–2571.
- [62] ZHAO W, REN H, ROTTER V S. A system dynamics model for evaluating the alternative of type in construction and demolition waste recycling center – the case of Chongqing, China[J]. Resources, conservation and recycling, 2011, 55(11): 933–944.
- [63] 徐礼来, 崔胜辉, 闫祯, 等. 城市生活垃圾产生预测的核心问题探讨[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(2): 184–190.
- [64] 王耕, 李优. 基于SD模型的城市生活垃圾资源化处理模拟研究——以大连市为例[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(5): 493–500.
- [65] 代峰, 戴伟. 基于系统动力学的城市生活垃圾发电进化博弈[J]. 工业工程, 2017, 20(1): 1–11.
- [66] 韩楠. 产业结构调整对环境污染影响的系统动力学仿真预测[J]. 中国科技论坛, 2016(10): 53–58, 71–71.
- [67] DONG X Q, LI C L, LI J, et al. Application of a system dynamics approach for assessment of the impact of regulations on cleaner production in the electroplating industry in China[J]. Journal of cleaner production, 2012, 20(1): 72–81.
- [68] 田红娜, 毕克新, 夏冰, 等. 基于系统动力学的制造业绿色工艺创新运行过程评价分析[J]. 科技进步与对策, 2012, 29(13): 112–118.
- [69] 李春发, 王彩凤. 生态产业链模式下企业的生态——经济系统的动力学模拟研究[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2007, 9(6): 89–92.

- [70] TIAN Y H, GOVINDAN K, ZHU Q H. A system dynamics model based on evolutionary game theory for green supply chain management diffusion among Chinese manufacturers[J]. *Journal of cleaner production*, 2014, 80: 96–105.
- [71] 成琼文, 周璐. 基于系统动力学的绿色供应链管理实践路径仿真 [J]. *科技管理研究*, 2016, 36(23): 226–231.
- [72] HAN J, HAYASHI Y. A system dynamics model of CO₂ mitigation in China's inter-city passenger transport[J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 2008, 13(5): 298–305.
- [73] 董士璇, 刘玉明. 基于系统动力学的绿色建筑规模化推进策略研究 [J]. *工程管理学报*, 2013, 27(6): 16–20.
- [74] 杨杰, 李洪砚, 杨丽. 面向绿色建筑推广的政府经济激励机制研究 [J]. *山东建筑大学学报*, 2013, 28(4): 298–302.
- [75] 刘蔚. 城市居民低碳出行的影响因素及引导策略研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [76] 肖阳, 卢雨婷. 偏好分层视角下消费者创新性与新能源汽车采用行为的关系研究 [J]. *科技管理研究*, 2016, 36(24): 247–254.
- [77] 贾仁安, 伍福明, 徐南孙. SD 流率基本入树建模法 [J]. *系统工程理论与实践*, 1998, 18(6): 18–23.
- [78] 彭乾, 邵超峰, 鞠美庭. 基于 PSR 模型和系统动力学的城市环境绩效动态评估研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(3): 121–126.
- [79] LU Y, WANG X R, XIE Y J, et al. Integrating future land use scenarios to evaluate the spatio-temporal dynamics of landscape ecological security[J]. *Sustainability*, 2016, 8(12): 1242.
- [80] LIAO Z X, REN P Y, JIN M Z, et al. A system dynamics model to analyse the impact of environment and economy on scenic's sustainable development via a discrete graph approach[J]. *Journal of difference equations and applications*, 2017, 23(1–2): 275–290.
- [81] 郝斌, 任浩. 基于 SBC 范式的模块化组织主导规则设计问题剖析 [J]. *外国经济与管理*, 2008, 30(6): 28–35.
- [82] 安莹. 三网融合背景下中国移动公司可持续发展研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [83] 徐志婧, 魏红, 黄廷林. 西安市污水再生利用系统的优化与发展趋势分析 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2008, 36(6): 212–218.
- [84] 张雪花, 郭怀成, 张宝安. 系统动力学 – 多目标规划整合模型在秦皇岛市水资源规划中的应用 [J]. *水科学进展*, 2002, 13(3): 351–357.
- [85] CHANG Y C, KO T T. An interactive dynamic multi-objective programming model to support better land use planning[J]. *Land use policy*, 2014, 36: 13–22.
- [86] WU Z B, XU J P. Predicting and optimization of energy consumption using system dynamics–fuzzy multiple objective programming in world heritage areas[J]. *Energy*, 2013, 49: 19–31.
- [87] AHMAD S, SIMONOVIC S P. Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems[J]. *Journal of computing in civil engineering*, 2004, 18(4): 331–340.
- [88] XU Z, COORS V. Combining system dynamics model, GIS and 3D visualization in sustainability assessment of urban residential development[J]. *Building and environment*, 2012, 47: 272–287.
- [89] 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.
- [90] 张波, 王桥, 孙强, 等. 基于 SD-GIS 的突发水污染事故水质时空模拟 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2009, 34(3): 348–351.
- [91] 王行风, 汪云甲, 李永峰. 基于 SD-CA-GIS 的环境累积效应时空分析模型及应用 [J]. *环境科学学报*, 2013, 33(7): 2078–2086.