

基于 SD 模型的湖北省农业碳排放系统仿真与政策优化^{*1}

徐磊¹ 董捷¹ 张俊峰² 李璐¹

(1. 华中农业大学公共管理学院, 湖北武汉 430070;

2. 中南财经政法大学公共管理学院, 湖北武汉 430073)

【摘要】从系统论视角出发, 利用系统动力学(SD)方法分析农业碳排放系统的反馈机理, 构建湖北省农业碳排放系统动态仿真模型, 选取产业就业政策、农业投资和农业结构调整政策作为可控参数变量, 通过改变参数值和组合方式设置了12种情景进行政策模拟, 并基于农业碳排放效率最佳的原则, 运用超效率数据包络分析模型(DEA)对预测结果进行了评价和政策优化。研究结果表明:单独政策调控不能有效提高碳排放效率, 三个政策共同调节后的效率优于单独政策和双政策调节, 多政策共同调节方案是减少碳排放效率最佳的模式。该研究为分析农业碳排放系统动力机制提供了有力的理论依据, 为我国科学制定低碳农业政策提供了决策参考。

【关键词】农业碳排放; 系统动力学; 仿真; 政策模拟

【中图分类号】:X322 **【文献标志码】**:A **【文章编号】**:1005—8141(2017)09—1031—05

1 引言

全球气候变暖已成为世界各国共同关注的重点问题之一, 碳排放量逐年增加是导致全球气候变暖的重要因素^[1]。世界经济快速发展使工业生产成为最主要的碳排放源, 而农业作为基础性产业, 随着生产技术和条件的不断改善, 农业生产活动导致的碳排放也不可忽视, 农业已成为导致温室气体排放的第二大重要来源^[2]。农业生产与气候变化密切相关^[3]。随着农业现代化发展的加快, 农业生产物资大量投入, 农业生产活动导致的碳排放逐渐增加, 由此导致的气候变化已日益引起人们的广泛重视。

目前国内外关于农业碳排放的研究逐步成熟, 研究方向主要集中在农业碳排放测算^[4]、演变特征^[5]及影响因素^[6]分析方面。在农业碳排放时空特征分析方面, 学者们从区域农业生产与碳排放脱钩的时空差异^[7]、农业碳排放空间效应和驱动机制^[8, 9]进行了探索; 在农业碳排放绩效评价方面, 有学者从农业碳排放效率差异及动态特征^[10]、收敛特征等^[11]方面进行了研究; 在农业碳排放仿真方面, 国内外学者多利用系统动力学原理进行碳排放过程的仿真和预测^[12, 13]。由上可知, 农业碳排放的研究主要集中在从不同视角下对农业碳排放的机理、特征、绩效等方面, 而从系统角度出发, 对省域范围内农业碳排放系统的动力机制和仿真研究较少。此外, 在碳排放政策情景仿真与选择大多都采用定性分析, 缺乏定量研究方法, 本文在建立农业碳排放仿真

¹收稿日期:2017—07—14; 修订日期:2017—08—21

基金项目:国家自然科学基金青年项目(编号:71603288); 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(编号:14JZD009)。

第一作者简介:徐磊(1985—), 男, 河北省唐山人, 博士研究生, 研究方向为土地利用与低碳经济发展。

通讯作者简介:董捷(1960—), 女, 湖北省武穴人, 博士, 教授, 研究方向为土地资源经济。

模型的基础上，对不同政策情景下的仿真结果进行了碳排放效率评价，选取最佳方案作为低碳农业政策制定的参考和基准，拓展了政策选择路径，具有一定的现实意义。

2 研究区概况

湖北省位于我国中部，地处长江中游段，是我国的农业大省，也是重要的粮食产区和农产品生产基地，农业现代化发展较快。根据《国民经济和社会发展公报》^[14]，2015年湖北省全省第一产业增加值3309.84亿元，实现稳步增长，全年粮食种植面积446.60万hm²，粮食总产量达到2703.30万t，畜牧业发展势头较平稳，全省生猪出栏数达到4363.20万头。湖北省是我国最先开展低碳发展实验的“5省8市”之一，湖北省农业低碳发展不仅是政策的要求，在全国范围还具有典型示范作用。但随着农业经济的快速发展，湖北省实现农业碳减排的压力逐渐增加，发展低碳农业的要求十分紧迫。

3 研究方法与数据来源

3.1 系统动力学仿真模型

系统动力学(System Dynamics, SD)创立于1956年，其创始人Forrester教授着重研究了系统结构与动态行为的相互关系，并综合系统科学、反馈理论、计算机仿真等多个学科，将其广泛应用于系统分析、决策和预测^[15]。系统动力学建模主要包括以下几个步骤：①明确系统模型建立的目的，确定系统边界。②分析系统结构，构建系统流程图，并确定方程式及参数。③检验模型。根据模型仿真效果不断改进系统结构和参数，检验模型的准确性。本文主要利用系统动力学建模软件Vensim plus进行系统仿真与预测。

3.2 数据包络分析模型

数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)是由Charnes、Cooper等学者^[16]在“相对效率评价”概念基础上发展起来的一种新的系统分析方法，但CCR模型无法对多个决策单元在效率值为1的情况下进行比较。1993年Aneresen等学者^[17]提出了一种超效率DEA模型，它能对有效前沿面上的评价对象做进一步的比较，克服了CCR模型无法对有效决策单元继续评价的缺陷。超效率DEA模型评价的基本思想是：在进行某个决策单元效率评价时，生产集不包含该决策单元的投入和产出，传统DEA模型则将这一决策单元包括在内^[18]；在进行效率评价时，无效决策单元的效率值与传统的DEA模型测算出的效率值一致，但有效决策单元可使其投入按一定比例增加而其效率不变，将投入增加的比例记为超效率评价值^[19]，具体计算方法参见有关文献^[19, 20]。

3.3 研究思路及数据来源

本文利用Vensimplus软件平台，建立了农业碳排放系统仿真模型，对不同政策情景的碳排放系统进行了仿真，得出系统变量的预测值，进而利用DEA模型进行农业碳排放效率评价，分析不同政策的仿真结果，将农业碳排放效率作为政策选择的主要条件，给出优选后的政策方案，并以湖北省为实证进行了研究，为实现低碳农业发展及提高碳排放效率提供政策参考和依据。

本文建立的系统模型和分析问题所涉及的基础数据主要来源于2001—2009年的《中国能源统计年鉴》、《中国国土资源年鉴》、《湖北省统计年鉴》、《湖北省农村统计年鉴》，并参考了相关年份的湖北省国民经济和社会发展统计公报等资料，土地利用数据主要来源于2000—2008年的湖北省土地利用变更调查数据。

4 系统建模与仿真

4.1 系统目的与边界

构建农业碳排放系统仿真模型的目的:主要是分析农业碳排放内各子系统之间的反馈关系,模拟湖北省2000—2020年农业碳排放系统动态变化,并找出影响系统发展的关键政策因素;通过SD仿真和预测,分析农业碳排放、经济与人口系统的发展趋势,设置不同政策组合方案,分析不同情景下农业碳排放系统投入与产出的变量值,为碳排放效率评价提供数据基础。本文的研究系统边界为:在空间上是以湖北省行政区范围作为研究边界;在时间上是以2000—2008年作为仿真基期,2009—2020年作为预测期,仿真步长设置为1年。

4. 2 系统构成

在分析各子系统之间相互关系的基础上，设置农业碳排放系统的各种变量，并分析各子系统内变量之间的逻辑和因果关系，建立系统流程图，见图 1。耕地是进行农业生产活动的重要承载基础，也是土地作为农业生产要素功能的体现。耕地子系统间接影响种植业生产活动中的碳排放量，耕地面积决定了可播种面积，进而影响种植业碳排放系统。耕地增加主要是通过土地开发、整理及农业结构调整等方面；耕地减少主要是由于建设用地占用、生态退耕、灾毁及农业结构改变等方面的原因。种植业与畜牧业生产子系统是农业碳排放的重要来源之一。在模型结构中，播种总面积受到耕地变化的影响，同时与复种指数也有一定程度的关系，而种植业投资通过推动农业物资使用来影响碳排放水平。畜牧业养殖业产生的碳排放主要是受到畜牧业投资的影响，本文只考虑投资对畜牧业发展的动力机制，其投资水平通过刺激和改变牲畜养殖数量来影响该系统的碳排放水平。在人口与经济发展子系统中，人口子系统为农业经济发展提供劳动力，是推动经济发展的重要动力。总人口数量主要受到人口增长率和减少率的影响，是系统中重要的状态变量之一。经济发展是推动整个碳排放系统的根本动力，该子系统主要受到从业人员和农业投资政策的影响。此外，农业投资政策也是影响种植业和畜牧业生产活动的重要变量因素之一。

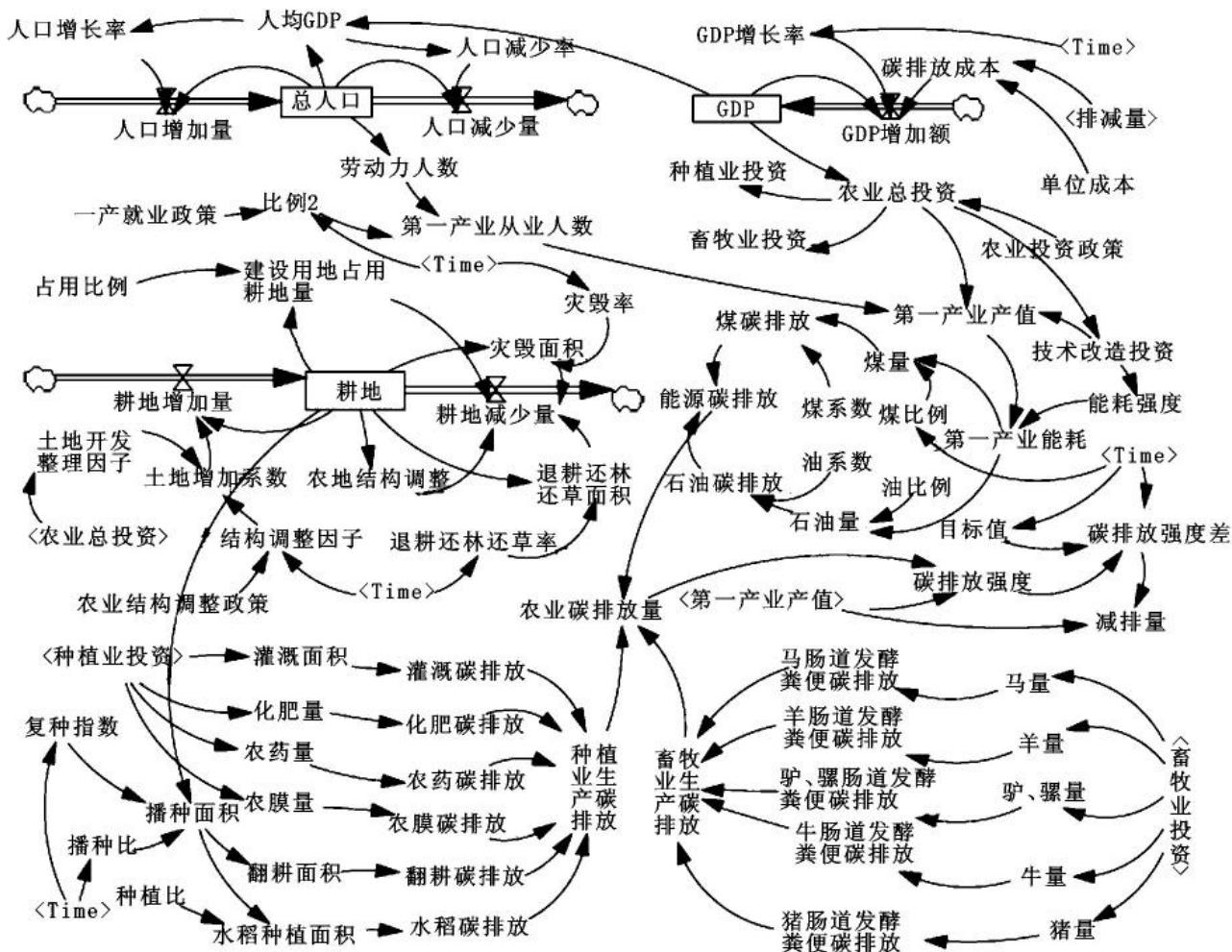


图1 农业碳排放系统流程

4. 3 参数确定

模型中状态变量的初始值以2000年为基准输入，对参数变量赋值的方法主要有：参照已有研究、资料统计、取平均值及表函数等，由于参数作用不同，赋值方法也各异；确定各种辅助变量间的方程式主要通过统计数据，结合变量之间的逻辑与因果关系，通过计量回归、经验公式等方法确立。

4. 4 模型检验

SD模型在进行仿真预测之前还要进行模型历史性检验，通过比较系统中变量仿真值与真实值的拟合情况^[21]，确定系统是否具有可信度以及模型的有效性如何。本文选取对系统影响较大的状态变量和主要的辅助变量进行检验，历史性检验结果见表1。所选取变量的仿真值与真实值拟合的误差均小于5%，符合复杂系统模型仿真的误差要求，可进行政策模拟。

表1 农业碳排放系统主要变量历史性检验

变量	比较值	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
耕地 (10 ⁴ hm ²)	真实值	492.16	490.55	482.05	471.81	469.10	467.52	466.54	466.34	466.41
	模拟值	492.16	490.29	488.44	479.72	469.25	466.43	464.71	463.62	463.44
	误差(%)	0.00	0.05	-1.33	-1.68	-0.03	0.23	0.39	0.58	0.64
农业 总投资 (10 ⁸ 元)	真实值	70.60	77.48	80.08	88.80	77.55	92.88	107.64	14.94	231.25
	模拟值	70.56	77.39	80.11	88.59	77.74	92.59	107.66	14.95	231.14
	误差(%)	0.06	0.11	-0.03	0.24	-0.24	0.32	-0.01	-0.09	0.05
碳排放量 (10 ⁴ t)	真实值	909.44	923.68	932.03	963.67	971.38	1006.65	1013.30	1009.25	1059.30
	模拟值	941.38	948.47	956.51	970.21	960.50	958.08	978.81	979.79	1011.24
	误差(%)	-3.51	-2.68	-2.63	-0.68	1.12	4.83	3.40	2.92	4.54

5 政策模拟与选择

5. 1 政策模拟

农业碳排放系统是一个受经济、社会、土地等多方面政策影响的复杂系统，本文主要从对整个系统控制的角度出发，兼顾政策调整的可行性，选取了经济子系统中农业投资政策，表示为农业资产总投资占GDP的比例；耕地子系统中农业结构调整政策，表示为农用地调整为耕地的比例；选取人口子系统中第一产业就业政策，表示为第一产业从业人数占总从业人数的比例，利用3个政策变量进行情景仿真的调控参数。由于每个政策变量都可进行调控且能自由调整变化幅度。因此，所选的3个政策变量组合在理论上会有相当数量的候选方案，将每种政策变化情景进行仿真和测算是十分困难的，也不具有可行性。本文从单政策变量、双政策变量及三政策变量分类调整入手，通过大量仿真模拟，逐步选出包括自然发展模式在内共计12种具有代表性的方案，作为其他政策变量调整和组合的参照，具体政策调整值见表2。

表2 湖北省农业碳排放模型政策变量参数值

类别	方案	第一产业就业政策	农业投资政策	结构调整政策
无政策调控	1	0.47350	0.02040	0.12840
	2	0.42615	0.02040	0.12840
单政策调控	3	0.47350	0.03060	0.12840
	4	0.47350	0.02040	0.02568
双政策调控	5	0.37880	0.04080	0.12840
	6	0.42615	0.02040	0.10272
	7	0.37880	0.02040	0.02568
三政策调控	8	0.47350	0.03060	0.02568
	9	0.33145	0.04080	0.15408
	10	0.42615	0.05100	0.02568
11	11	0.37880	0.05100	0.15408
	12	0.33145	0.05100	0.02568

通过SD模型系统仿真，按三类共12种方案的政策参数值进行模拟，得出系统各变量2009—2020年的预测值，作为农业碳排放效率测算的数据基础。通过仿真结果分析，不同调控方案下农业碳排放系统运行的状态各异，但每一类别的变量仿真值相差不大，不同类别之间变量变化差异比较明显，能反映出不同政策组合对系统运行的影响方向与趋势。

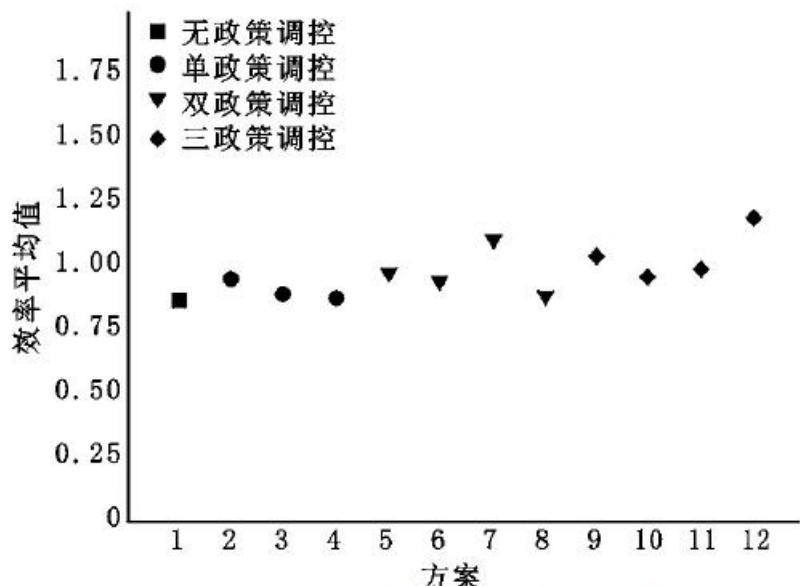


图2 不同方案农业碳排放效率平均值比较

5. 2 模拟结果评价与选择

在利用DEA模型评价农业碳排放效率时，首先需要对非期望产出指标中的农业碳排放量进行处理，参考屈小娥^[22]总结的处理方法，本文采用INP方法对非期望产出进行转换分析，将农业碳排放量作为投入指标，并拟将农业碳排放效率平均值作为政策优化的标准和参考系。系统仿真为选取农业碳排放效率评价提供了数据基础，根据DEA模型指标选择的原则和要求^[11, 23]，选

取农业总投资、第一产业从业人数、耕地面积及农业碳排放量作为投入指标，第一产业产值作为产出指标，利用超效率 DEA 模型对湖北省农业碳排放效率进行评价，运用 DEA—SOLVE R 软件测算，将所得预测期内的碳排放效率取平均值后进行比较，具体情况见图 2。

在 12 种情景下的农业碳排放效率评价结果分析见图 2。方案 12 为情景模拟中平均效率最佳的方案，而无政策调控的方案 1 平均效率最低，故将方案 12 作为政策效果最佳的推荐方案。平均效率最佳方案是三个政策综合共同调控的结果，所得到的平均农业碳排放效率值优于其他方案。该方案第一产业从业人数逐渐减少，符合湖北省农业产业高级化和转型的目标，也是我国进行新型城镇化、农业现代化发展的必然趋势，政策选择符合实际需求。湖北省是农业大省，“三农”发展势头良好，农业基础设施投资与建设是加快新型农业发展、提高农民收入的有力保障。此外，农业投资还是保证粮食安全和提升农业碳排放效率重要政策之一，也符合“十三五”规划及省农业发展规划中持续增加农业投入的要求；农业结构调整目的是在保障耕地面积和质量的前提下，优化农业产业结构，符合农业供给侧结构性改革要求，合理调整耕地、园地、林地等面积，不但有助于农业生产效益的提升，而且通过优化还能发挥农用地碳排放调节的重要作用，实现农业生产过程的碳减排。政策模拟和选择的结果客观上验证了农业碳排放系统是受多个子系统影响的复杂系统，单个政策改变对系统行为影响十分有限，只有多个政策因素共同作用，才能逐步实现农业碳排放效率最佳，模拟结果符合湖北省农业低碳发展要求，可为低碳农业建设提供政策参考。

6 结论与政策启示

6. 1 结论

本文从农业碳排放碳源入手，从系统动力学角度对农业碳排放系统结构和动力机制进行了剖析，并将 SD 模型与超效率 DEA 评价方法相结合，用于农业碳排放系统仿真及政策优化，并以湖北省进行了实证分析，主要得出以下结论：①SD 模型与 DEA 模型相结合不仅能直观地描述和解释系统内部各变量之间的互动机制，准确模拟出系统内各子系统及变量间作用的动态过程，还能为政策仿真和优化提供可靠的依据和基础，实现农业碳排放分析的动态性。②湖北省农业碳排放系统政策模拟与评价结果显示：在从业人数、农业投资及农业结构调整政策三种措施综合调控的作用下，农业碳排放效率相比单独政策及双政策调节要优越。评价结果验证了农业碳排放系统是涉及多个子系统的复杂系统，只有进行多政策综合调节才能取得较好的结果。③农业碳排放系统是一个复杂非线性的动态系统，系统仿真过程也是不断改进和尝试的过程，系统内部结构和外部环境都在时刻变化，模型的参数、条件和变量关系会随着经济社会发展而改变。因此，仿真结果只是在假设条件及政策下模拟系统发展趋势，所推荐的方案只是代表一种可能性，并不是全部结果，目的在于用直观的方式表达不同政策下农业碳排放水平与效率的变化趋势，为湖北省制定低碳农业政策提供参考。

6. 2 政策启示

依据研究结论，以新型城镇化建设、农业基础设施投资、农业产业结构调整等方面出发，借鉴供给侧结构性改革理论，提供农业低碳发展的相关政策参考：①加快农村劳动力转移，提高农业碳排放效率。推动“以人为本”的新型城镇化建设，不断推动农用地流转和土地规模经营，有效降低农地细碎化和分散化程度，获取土地利用规模效益，降低单位农业产值能源消耗，提高农业生产资料利用率；发挥新型农业生产主体的积极作用，解放农村土地劳动力，推动大农业、土地规模化发展，湖北省现已呈现多元化的农业经营模式，如家庭农场、农民专业合作社等，应继续引导农业规模化、现代化、机械化及低碳化发展，提高农业碳排放效率。②提高农业基础设施投入，推广低碳农业技术。加强农田水利及节能减排工程建设，建立完善的农地设施管护体系，并扩大低碳农业科普宣传，规范田间农药与化肥使用，逐步建立农膜等生产资料回收机制，控制农业面源污染强度；以农业创新发展为驱动，加强低碳农业创新技术支持，结合省内雄厚的高校资源和科研力量，在推进低碳农业技术研发的基础上，加快成果的转化和推广，切实提高农业能源利用效率。③优化农业产业结构，发展低碳与特色农业。湖北省作为粮食生产大省，在保障粮食安全的前提下，结合农业生产及市场需求的实际情况，以供给侧结构性改革引领农业种植业的产业结构。合理调整水稻、棉花、玉米等作物面积，适当提高林地和园地比例，依据地区特色发展畜牧业、林果业，增强农用地碳汇功能和

经济产出；在低碳农业产业融资、企业引进等方面给予政策扶持，在低碳技术和生产资料中提供资金保障，建设资源集约型、环境友好型的低碳农业。

参考文献：

- [1] 吴贤荣, 张俊飚, 田云, 等. 基于公平与效率双重视角的中国农业碳减排潜力分析 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(7) : 1172—1182.
- [2] 杨红娟, 李明云, 刘红琴. 农业碳排放特征及影响因素分析——以云南为例 [J]. 生态经济, 2015, 31(10) : 76—78.
- [3] 齐晔, 李惠民, 王晓. 农业与中国的低碳发展战略 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(1) : 1—6.
- [4] 田云, 张俊飚, 李波. 中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应 [J]. 资源科学, 2012, 34(11) : 2097—2105.
- [5] 庞丽. 我国农业碳排放的区域差异与影响因素分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12) : 1—7.
- [6] 戴小文, 何艳秋, 钟秋波. 基于扩展的 Kaya 恒等式的中国农业碳排放驱动因素分析 [J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(6) : 751—759.
- [7] Bennetzen EH, Smith P, Porter JR. Agricultural Production and Green house Gas Emissions from World Regions ——The Major Trends over 40 Years [J]. Global Environmental Change, 2016, 37(3) : 43—55.
- [8] 李秋萍, 李长建, 肖小勇, 等. 中国农业碳排放的空间效应研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4) : 30—35.
- [9] 文清, 田云, 王雅鹏. 中国农业碳排放省域差异与驱动机理研究基于 30 个省(市、区)1993—2012 年的面板数据分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11) : 1—6.
- [10] 吴贤荣, 张俊飚, 朱烨, 等. 中国省域低碳农业绩效评估及边际减排成本分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(10) : 57—63.
- [11] 高鸣, 宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异——基于 Malmquist—luenberger 指数与空间计量的实证分析 [J]. 经济地理, 2015, 35(4) : 142—148, 185.
- [12] Dace E, Muizniec I, Blumberga A, et al. Searching for Solutions to Mitigate Greenhouse Gas Emissions by Agricultural Policy Decisions——Application of System Dynamics Modeling for the Case of Latvia [J]. Science of the Total Environment, 2015, 527—528C : 80—90.
- [13] 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.
- [14] 湖北省统计局. 湖北省 2015 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. 湖北省统计局网站:<http://www.stats-hb.gov.cn/>.

-
- [15] 王其藩. 系统动力学 [M]. 上海:上海财经大学出版社, 2009.
- [16] Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units [J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6) : 429—444.
- [17] Andersen P, Petersen NC. A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis [J]. Management Science, 1993, 39(10) : 1261—1264.
- [18] 吴旭晓. 中原城市群城区经济发展效率研究 [J]. 河南工业大学学报(社会科学版), 2012, 8(4) : 38—44.
- [19] 王平, 朱帮助. 基于区间超效率 DEA 的企业自主创新项目方案评价 [J]. 统计与决策, 2010, (24) : 68—70.
- [20] 张琦, 洪开荣, 罗建华. 基于超效率 DEA 模型的湖南地级市房地产投入产出效率比较分析 [J]. 经济地理, 2016, 36(4) : 120—125.
- [21] 谭术魁, 张路, 齐睿. 基于系统动力学的区域耕地压力指数研究 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(5) : 757—765.
- [22] 屈小娥. 中国省际全要素 CO₂ 排放效率差异及驱动因素——基于 1995—2010 年的实证研究 [J]. 南开经济研究, 2012, (3) : 128—141.
- [23] 王亚. 吉林省农业碳排放的效率评价研究 [D]. 长春:吉林大学硕士学位论文, 2015.