

长株潭城市群区域产业生态创新系统仿真研究

龚常¹

(中南大学商学院, 中国湖南 长沙 410083)

【摘要】:文章在对产业生态区域创新系统运行机制分析的基础上,构建其系统动力学模型,并以长株潭城市群为典型案例,运用 VensimDSS 软件对其进行仿真模拟,通过对模型的检验与分析,预测长株潭城市群区域产业生态创新系统的运行趋势。仿真结果表明,纯粹增加企业与中介服务机构的合作力度,并不能很好地改变生态创新专利数量,也就是说无法给长株潭区域生态创新系统带来技术上的革新和突破,反而会提高企业生态创新成本。因此,在实际过程中,政府应该注意两者的相对平衡和取舍,不能盲目地促进企业与中介服务机构的合作。这为长株潭地区实现产业转型升级、走生态化创新发展道路提供理论参考。

【关键词】:区域产业 生态创新 系统仿真 优化路径 创新驱动 系统动力学模型 生态循环型产业

【中图分类号】: F406.3 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2019) 07-0022-09

产业生态化创新 (Eco-innovation) 已经成为实施创新驱动发展战略, 推动国家和地区可持续发展, 提高经济发展质量和效益的重要路径^[1]。目前, 国内外有关产业生态化创新系统的研究主要集中在创新系统的形成、运行、资源配置和有效性评价等方面, 包括其影响因素和作用机制等, 并且对不同产业的生态创新模式及路径进行探讨。Chertow 从区域产业生态创新系统构建方面进行了研究^[2]。Jouni Korhonen 等人认为区域产业生态系统中成员互动的协同进化表现为区域内企业之间的竞争、合作、寄生和捕食与被捕食等模式^[3]。Deutz 等从区域产业生态创新的角度出发, 研究生态工业园内部企业间的网络构成、合作关系以及政策立法等方面^[4]。赵武通过对区域产业生态化评价方法的分析, 得出实现区域产业生态化路径选择必须是形成新型的产业共生网络运作模式^[5]。另外, 部分学者从绿色经济、循环经济与可持续发展等视角从区域层面探讨生态创新系统的理论构架和实践运行。王宏起等以战略性新兴产业为例, 构建了区域产业创新生态系统科技资源配置模型, 并讨论了其平衡问题^[6]。

上述研究成果主要集中于产业生态系统创新概念与内涵的论述。随着相关领域研究的深化, 学者们开始从定量分析的角度探究产业生态创新系统的运行机制。如王晶等利用 BCC-DEA 和 CCR-DEA 模型, 对鄱阳湖生态经济区产业生态化效率进行评估分析^[7]。何向武等借鉴创新生态系统理论、Lotka-Volterra 模型和聚类分析法, 构建了一套较为系统的区域高技术产业创新生态系统协同性的分类评价体系并对全国 31 个省市进行了定量评价^[8]。

相较于其他城市群, 长株潭城市群有其独特的特点。一是作为全国首个“资源节约型和环境友好型社会建设综合配套改革试验区”, 长株潭城市群发展是以资源节约与环境友好为主要导向。只有通过经济发展方式转变, 依靠创新驱动, 进行生态创新才能够真正有效实现经济平稳较快增长和可持续发展。二是长株潭是多中心的网络城市, 从城市效益、空间结构、宜居环境、科学发展角度来看, 应该比单中心城市更能发挥它的效益。三是长株潭 3 个城市的基础比较好, 联系比较紧密, 能够大规模地集聚产业、集聚要素, 这点是非常重要的。以上三个特点, 也是长株潭城市群未来发展的优势。因此, 在分析长株潭城市群区域产业生态创新系统时, 不能完全照搬其他区域的经验。目前针对长株潭城市群产业生态系统的定量分析相对较少, 代表性

¹**基金项目:** 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目 (13JZD0016); 国家自然科学基金项目 (71172100)

作者简介: 龚常 (1982—), 男, 湖南益阳人, 博士研究生。主要研究方向为技术创新与管理、产业经济、生态创新。E-mail: 307462407@qq.com。

的成果主要有：袁莉等对长株潭城市群的复合生态系统循环状态进行了评价，分析了长株潭城市群可持续发展面临的主要瓶颈^[9]；郭荣中等对长株潭地区生态系统服务价值进行了分析，并预测了其发展趋势^[10]。

总体而言，目前众多学者从各自的领域进行了产业生态学理论及方法方面的分析及实践摸索，其研究方法和路径也在逐渐拓展。只是因为研究起时很晚，理论基础显得深度不够。主要还存在以下几方面研究局限：第一，定性分析多，定量分析较少或深度不够。目前关于产业生态系统的定量研究，还主要集中于对其现状的评价，而缺乏运行机制的定量刻画。第二，中观尺度产业生态系统的研究不多。地区视角下的产业生态园即称为中观的产业生态系统，对它的分析是将来学术界研究的发展趋势，而目前国内对此层面的研究尚显不足。第三，针对单一城市的研究较多，而对于城市群研究较少。目前的研究多以行政单位划分为依据，强调一省或一市的研究，而对于城市群之间如何协同，相关研究还较少。本文将在上述的研究基础上，将产业生态创新系统看成一个整体系统，以长株潭这一典型的城市群为研究对象，建立能够刻画产业生态创新发展变化的系统动力学模型，并通过仿真对模型进行验证和分析。

1 区域产业生态创新系统构成要素的理论分析

已有文献表明，区域产业生态创新系统主要由政府行为子系统、创新环境子系统、高校与科研机构行为子系统、企业行为子系统和创新服务机构行为子系统等子系统构成^[11, 12, 13, 14]。

(1) 政府行为子系统。罗贞礼^[15]和赵武^[5]等学者证明了政府在区域产业生态系统中，在政策的扶持上、资源的分配上等方面影响此系统，说明了政府在区域产业生态化发展中具有十分重要的作用。

(2) 创新环境子系统。马歇尔^[16]认为，产业内部同样存在与生物组织类似的结构，根据不同组织内联系机制和机能，实现组织各部分之间紧密联系和联合的社会组织。区域产业生态创新系统是在一定时间和空间内，由相关企业、政府、中介机构、消费者和市场以及其所在的环境组成的整体系统。

(3) 企业行为子系统。企业作为区域产业中的核心要素，其重要性显而易见。企业在整个产业链中，使得原材料转变成产品。在这个过程中，有科技人才的付出，有资金的投入，甚至政府的支持等，整个区域产业生态创新系统中的信息流、技术流、人才流、物质流等都将通过企业来产生效益。

(4) 高校与科研机构行为子系统。在知识经济时代，越来越多的科研成果诞生于高校与科研机构，其已经成为越来越多知识的源头，并深刻地影响了创新活动。可以说大学和科研院所在创造新知识过程中，起到了越来越大的作用。

(5) 创新服务机构行为子系统。创新服务机构是区域产业创新系统的信息共享平台^[17]，通过为相关企业和组织提供技术信息、鉴定评估和科技孵化等方面的咨询和服务^[18, 19]，帮助企业快速获取外部互补性技术和知识。

上述五个子系统构成了区域产业生态创新系统。其中，政府行为子系统体现了地方政府在制度建设方面的决定性作用；创新环境子系统则衡量了整个产业生态创新的外部环境；企业行为子系统则描述了作为创新主体企业的微观行为；高校与科研机构行为子系统代表了知识溢出源头的科研机构的行为；创新服务机构行为子系统表示创新服务体系。

2 产业生态创新系统的系统动力学模型构建

结合系统动力学给特定某个地区的产业生态创新系统构建模型，其内在含义就是摸索一个由定量的方法体现出地区产业生态创新系统运作机理的分析框架，深入把握系统的运作特点，寻找以系统内部运行过程中生态创新资源配置并相互影响的反馈联系及政策平衡点，继而给区域产业生态创新政策的执行及推动区域创新资源配置提供一些参考。详细来看，区域产业生

态创新系统的系统动力学仿真主要是为了：讨论某个地区产业生态创新因素结构、空间运行结构等跟生态创新主体的紧密关联，开展对产业生态创新系统运作进程中主导反馈路径的分析，寻找到对系统运作影响非常大的起到关键性作用的要素；继而在定量层面分析区域产业生态创新系统的运行机理和特点；并最后预测将来发展变化的趋势。

2.1 区域产业生态创新系统边界确定

就内部结构而言，一个地区的产业生态创新系统包括企业生态创新行为子系统、中介服务机构生态创新行为子系统、科研机构生态创新行为子系统、政府生态创新行为子系统。图1简单描述了这些子系统之间的互动关系。

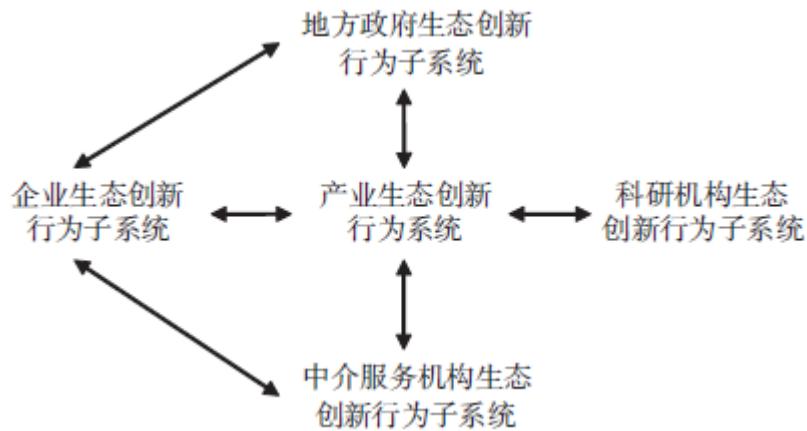


图1 区域产业生态创新系统子系统联动关系

通过在前面讨论一个地区的产业生态创新系统的内容组成及因果联系的前提下，我们把产业生态创新系统仿真模型中可能考虑到的详细变量阐述。

2.2 区域产业生态创新系统反馈回路分析

因果关系图用来描述整个区域产业生态创新系统中各变量之间的相互关系情况。这个复杂的区域产业生态创新系统必然是许多个因果反馈回路构成的，进而构成封闭回路的一种结构^[20]。一个地区产业生态创新系统运行过程中的因果关系主要包括了以下这些主要反馈回路：

(1) 产业生态创新收益↑→中介服务机构投入生态创新的动力↑→中介服务机构生态创新资金支持力度↑→生态创新专利部门数量↑→生态创新专利数量↑→地方政府对生态创新政策优惠力度↑→产业生态创新收益↑

(2) 产业生态创新收益↑→中介服务机构投入生态创新的动力↑→中介服务机构生态创新资金支持力度↑→生态创新专利部门数量↑→生态创新专利数量↑→产业生态创新机会成本↑→产业生态创新收益↓

(3) 产业生态创新收益↑→中介服务机构投入生态创新的动力↑→中介服务机构生态创新资金支持力度↑→生态创新专利部门数量↑→生态创新专利数量↑→地方政府对生态创新政策优惠力度↑→地方政府生态创新管理成本↑→产业生态创新机会成本↑→产业生态创新收益↓

(4) 产业生态创新收益↑→中介服务机构投入生态创新的动力↑→中介服务机构生态创新资金支持力度↑→生态创新专利部门数量↑→生态创新专利数量↑→产业生态创新机会成本↑→企业生态创新技术人员比例↓→企业生态创新成本↓→产业生态创新收益↑

(5) 产业生态创新收益↑→中介服务机构投入生态创新的动力↑→中介服务机构生态创新资金支持力度↑→生态创新专利部门数量↑→生态创新专利数量↑→地方政府对生态创新政策优惠力度↑→企业与地方政府合作力度↑→企业生态创新成本↓→产业生态创新收益↑

(6) 产业生态创新收益↑→中介服务机构投入生态创新的动力↑→中介服务机构生态创新资金支持力度↑→生态创新专利部门数量↑→生态创新专利数量↑→地方政府对生态创新政策优惠力度↑→企业生态创新 R&D 投入↑→企业生态创新技术人员比例↑→企业生态创新成本↑→产业生态创新收益↑

(7) 产业生态创新收益↑→中介服务机构投入生态创新的动力↑→中介服务机构生态创新资金支持力度↑→生态创新专利部门数量↑→生态创新专利数量↑→地方政府对生态创新政策优惠力度↑→地方政府生态创新管理成本↓→产业生态创新机会成本↓→企业生态创新技术人员比例↓→企业生态创新成本↓→产业生态创新收益↑

根据上述分析可知，一个地区的产业生态创新系统的运作行为主要是主导反馈回路和次要反馈回路之间互动影响而表现的统一结果。因此，我们可以通过分析不同反馈回路对整个系统运作的形式及一些变量的状态，去观察产业生态创新系统运作机制与特点，并通过对其中认为可控的政策变量进行调控，从而实现区域产业生态创新系统内部各主体之间的协同有序发展。

2.3 区域产业生态创新系统的系统动力学流量图及方程式的说明

流量图是在因果分析图的基础上，引入一些合理的中间变量，在保证整体系统的完整性的前提下，使得各核心变量的独立性凸显出来，有利于厘清各变量之间的相对独立性和联系性。通过在前面讨论一个地区的产业生态创新系统的内容组成因果联系的前提下，把区域产业生态创新模型的系统动力学流量图展示如图 2。

从区域产业生态创新系统流量图中可看出各变量之间的关系十分复杂，每个变量之间隐藏着数量关系，为了使得彼此之间的关系更加清晰明了，本文构建了其系统动力学方程式，详见附录 1。从附录 1 的方程式中可以看出各变量之间的详细数量关系，详细展现出各变量的符号及定义。

3 系统动力学模型的拟合优度检验

3.1 系统动力学模型的稳定性检验

由于状态变量是模型中的最关键变量，检验它们的稳定性对于整个模型具有很好的代表性。把 timestep 从 1 提高到 2，考察它们的变化趋势。如图 3。从图 3 得知，当 timestep 从 1 提高到 2，中介服务机构生态创新资金支持力度在整个研究跨度里基本保持一致的变化趋势。产业生态创新收益在整个研究跨度里，它的整体变化趋势基本没有变化。企业生态创新 R&D 投入在 timestep 从 1 增加到 2 时，它有相应的变化，但是从整个模拟时间里来看，它的整体趋势是没有变化的。从地方政府生态创新管理成本来看，在 timestep 从 1 增加到 2 时，它有相应的降低，但是从整个模拟时间里来看，它的整体趋势也是没有变化的，都是向上增加的。从生态创新专利部门数量来看，随着 timestep 变化，基本没有什么变化。因此，可以说明模型对于参数的变动不灵敏，模型稳定性很好，可以较好地在实际中推广应用。

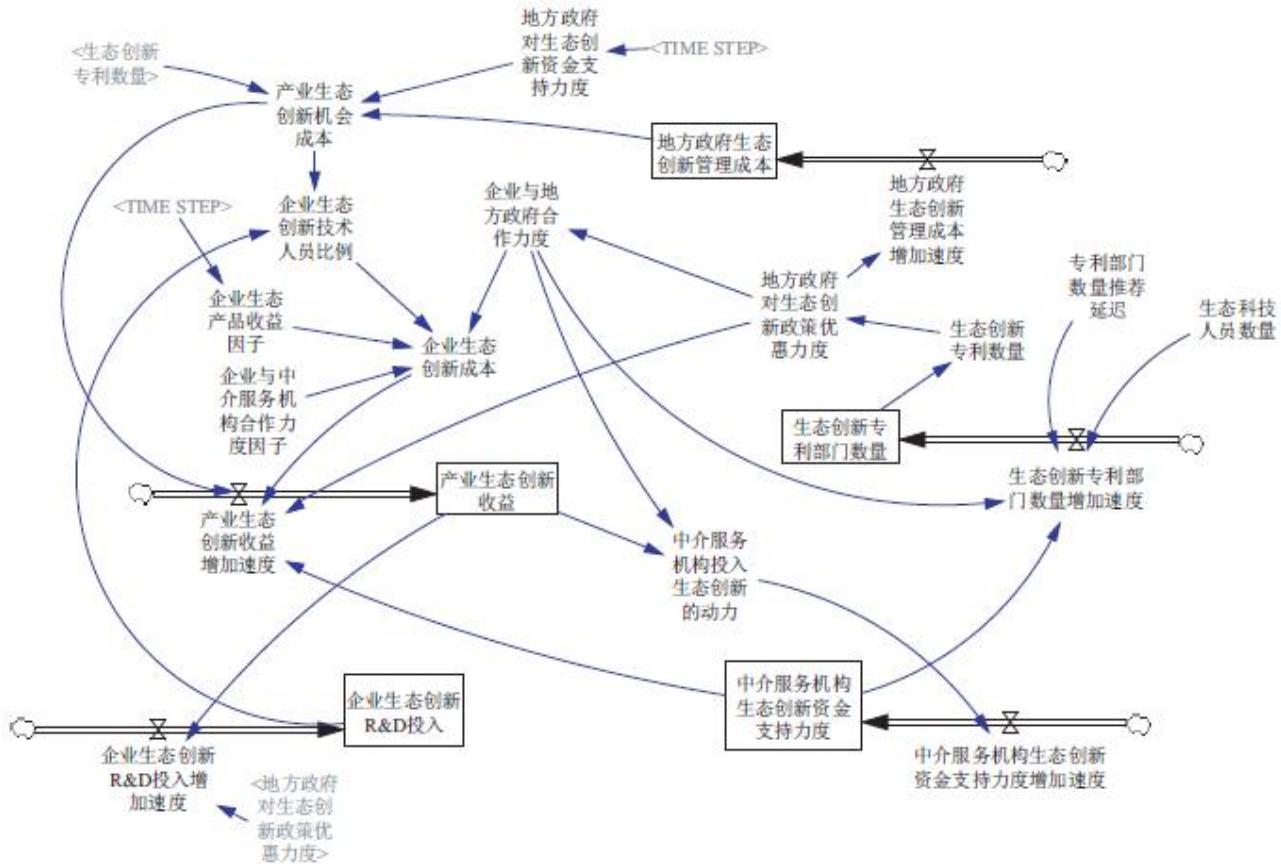


图 2 区域产业生态创新系统流量图

3.2 系统动力学模型的各变量之间因果关系的合理性检验

整个长株潭区域生态创新系统系统动力学模型中各状态变量的因果关系都是在相关专家的指导下以及相应的文献的基础上，参考实际系统确定的，在很大程度上即与实际动力学系统的实在量或观念量是相统一的。但是，状态变量之间的变化关系可能在短时间内符合实际的需要，随着时间的推移，它们之间的关系是否还能够足够代表早期的关系，有待检验。它们之间的动态关系如图 4。

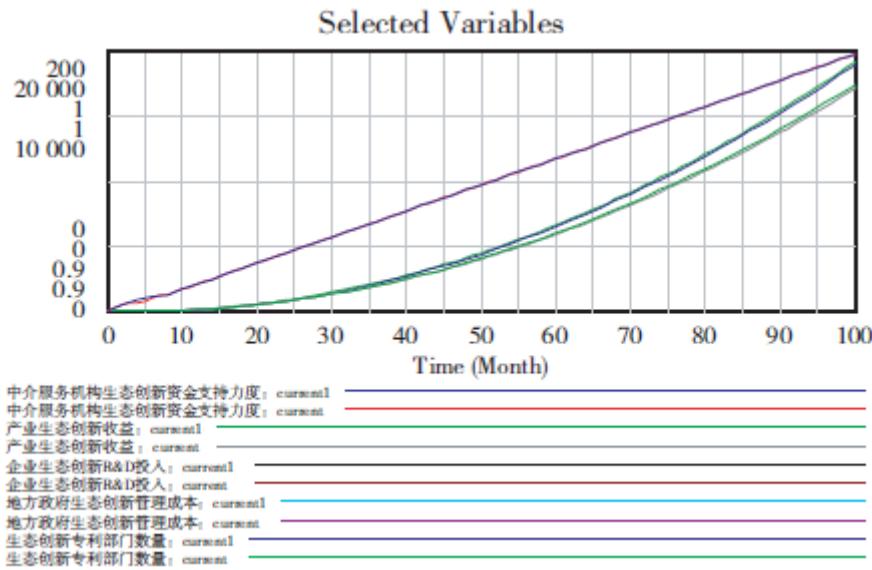


图 3 状态变量对时间步长 (1~2) 的变化灵敏度

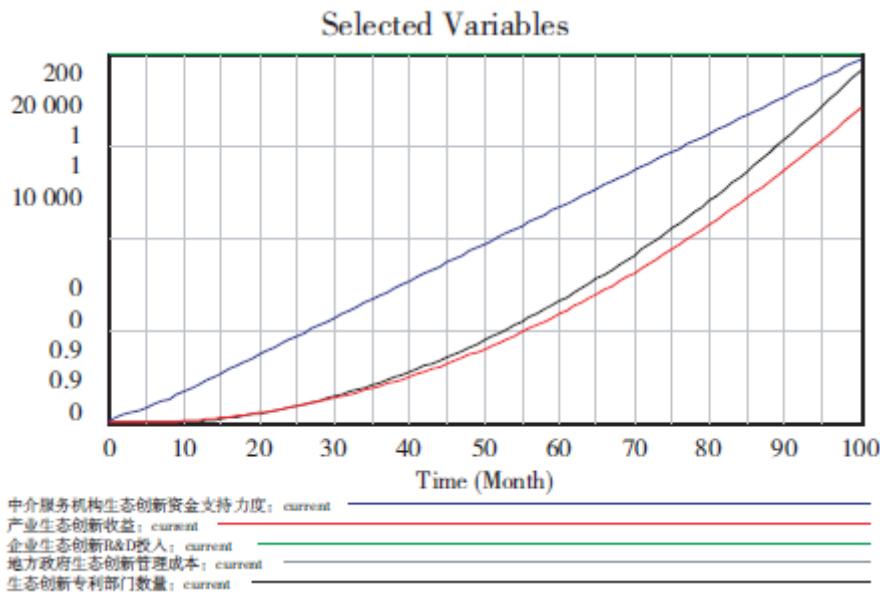


图 4 状态变量动态关系图

图 4 表明，随着时间的变化，以中介服务机构生态创新资金支持力度和产业生态创新收益为例子，从 0~20 个月的区间里来看，随着中介服务机构生态创新资金支持力度的增加，产业生态创新收益也相应地增加，虽然中介服务机构生态创新资金支持力度的增加方向基本呈现一条直线的形式，而产业生态创新收益的增加方式是以半抛物线的形式上升，但是它们之间的同增加趋势是基本一致的。此外，以地方政府生态创新管理成本和生态创新专利部门数量之间的关系可以看出，随着生态创新专利部门数量随着时间的增加，地方政府生态创新管理成本也相应增加，只是地方政府生态创新管理成本刚开始增加的速度比较快，之后增加的速度减低，但是还是保持原有的趋势上升。可以看出，各个变量相互之间的动态关系在整个时间跨度内与因果关系图中的关系吻合度很高，说明此区域生态创新系统动力学模型的各变量之间因果关系的合理性好。

3.3 系统动力学模型的拟合优度检验

在对某个地区产业生态创新系统模型检验的步骤里，采用相关系数法观察 GDP 和科技人才总量等重点输出指标的模拟数值和实际数值是否拟合状况（其他指标可以类似检验拟合优度，结果显示良好，在此不再赘述）。依据计算出来的相关系数，观察这一地区产业生态创新系统仿真模型在这个指标上对长株潭城市群区域产业生态创新系统具体运作情况的拟合状况。评判标准是：0~0.3（十分低）、0.31~0.5（一般）、0.51~0.7（显著）、0.71~0.9（高）、0.91~1（很高）。

3.3.1 国内生产总值(GDP)

对长株潭城市群 2004—2012 年 GDP 的实际数值和产业生态创新系统动力学仿真数值展开对比。

通过计算得出相关系数是 0.8970，表示产业生态创新系统的系统动力学模拟过程里，GDP 对长株潭城市群产业生态创新系统的拟合的相关程度很强。

3.3.2 科技人才总数

对长株潭城市群 2004—2012 年科技人才总量的实际数值跟生态创新系统动力学模拟数值加以对比。

通过计算得出相关系数是 0.8579，表示本地区产业生态创新系统的系统动力学模拟过程里科技人才总量对产业生态创新系统的拟合相关程度同样很高。

根据上面所有分析，就长株潭城市群产业生态创新系统模型的仿真模拟及检验结果而言，此模型可以在很大程度上体现出长株潭城市群产业生态创新系统的具体实际状况，运用此模型能够更多地研究长株潭城市群产业生态创新系统的结构特征，并对现实系统展开评估，就能观察到它运作的一般规律和重要影响要素，可从理论上给地方政府有关创新政策制定提供依据，最后还可就此基础对将来系统的发展情况展开下一步的展望及预测。

4 系统仿真优化分析

4.1 数据来源

本文选择长株潭城市群作为仿真研究的主要对象，通过研究长株潭城市群区域产业生态创新系统的运行现状，发现影响长株潭城市群区域创新资源配置与创新系统运行效率的关键性要素，分析存在的问题，为长株潭城市群实现区域经济转型升级的战略目标、制定相关的政策提供参考。本文采用仿真模拟的方法来实际反映长株潭城市群区域产业生态创新系统。按照定义的变量，从《湖南省统计年鉴》选择所需的基础数据，时间跨度为长株潭两型试验区设立以来的 2010—2017 年。在仿真分析中，按照目前文献通常的处理方式，以 100 个月作为仿真时间区间，以每个月为一个时间步长。

4.2 增加地方政府对生态创新资金支持力度

地方政府对生态创新资金支持力度对于整个长株潭区域的产业生态创新系统起到至关重要的作用。因此，研究地方政府对生态创新资金支持力度对其产业创新收益、企业生态创新成本、地方政府生态创新管理成本以及生态创新专利数量的影响具有十分重要的作用。

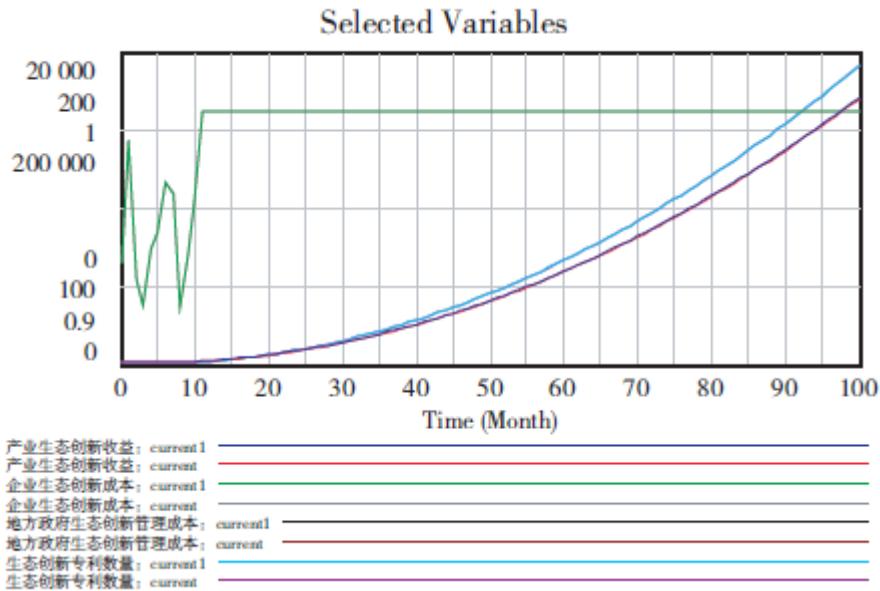


图 5 $A(t)$ 、 Q 、 $E(t)$ 、 U 对 f_A 的变化灵敏度

从图 5 可以看出，把地方政府对生态创新资金支持力度从 0.45 提高到 0.85 后，产业创新收益、企业生态创新成本、地方政府生态创新管理成本以及生态创新专利数量没有大的变化。仿真结果表明，如果在长株潭地区纯粹提高地方政府对生态创新资金支持力度，整个长株潭地区的区域产业生态创新系统中收益和专利等代表成果的变量没有较大的提高。因此，在实际情况中，以整个长株潭区域来说，不能盲目加大资金上的支持力度，这样的效果并不明显。

4.3 减少企业生态产品收益因子

企业生态产品收益因子在一定程度上能够反映出在长株潭区域企业生态创新的收益情况，此外，中介服务机构生态创新资金支持力度、产业生态创新收益、企业生态创新成本和地方政府生态创新管理成本是整个长株潭区域产业生态创新的重要指标。因此，研究其对于企业生态产品收益因子的敏感度具有重要的作用。

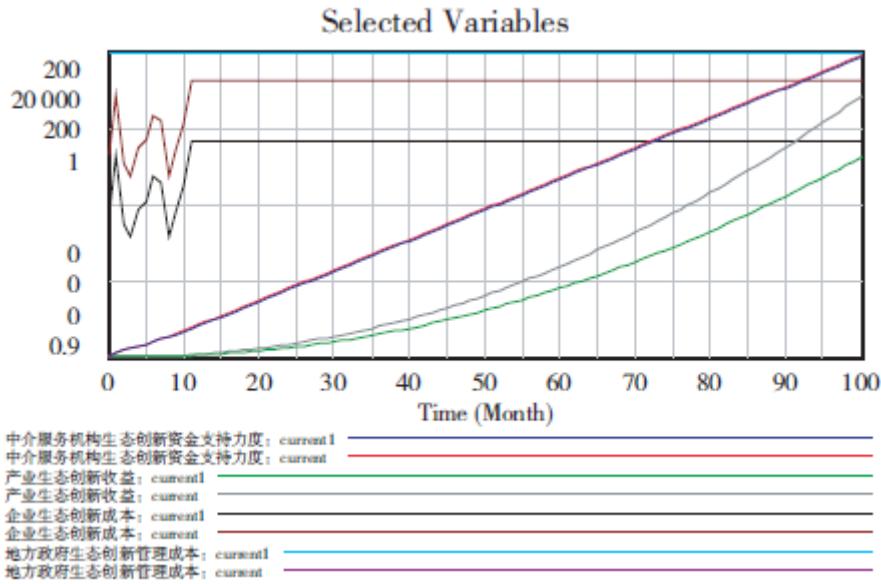


图 6 $C(t)$ 、 $A(t)$ 、 Q 、 $E(t)$ 对 f_B 的变化灵敏度

从图 6 中可以看出，把企业生态产品收益因子从 0.55 减少到 0.15 后，中介服务机构生态创新资金支持力度基本没有什么大的变化。产业生态创新收益随着企业生态产品收益因子的减少其相应减少，刚开始其减少的幅度比较小，随着时间的推移，其变化更明显。企业生态创新成本随着企业生态产品收益因子的减少其自身的降低相当明显。地方政府生态创新管理成本随着企业生态产品收益因子的减少其变化并不明显。

仿真结果表明，如果长株潭区域企业生态产品的收益减少，对其企业生态创新成本的减少具有十分重大的影响。因此，在实际过程中，一旦发现整个区域的企业综合生态创新产品的收益减少，那么必须十分注意其企业的生态创新成本。而对于地方政府生态创新管理成本的作用十分微小，因此，假设整个长株潭区域监控市场精力有限的情况下，应该更加关注企业的生态创新成本。

4.4 增加企业与中介服务机构合作力度因子

企业与中介服务机构的合作力度影响到整个区域产业生态创新的资金来源。而考察中介服务机构投入生态创新的动力、产业生态创新收益、企业生态创新 R&D 投入、企业生态创新成本以及生态创新专利数量对企业与中介服务机构的合作力度因子的敏感度具有研究意义。

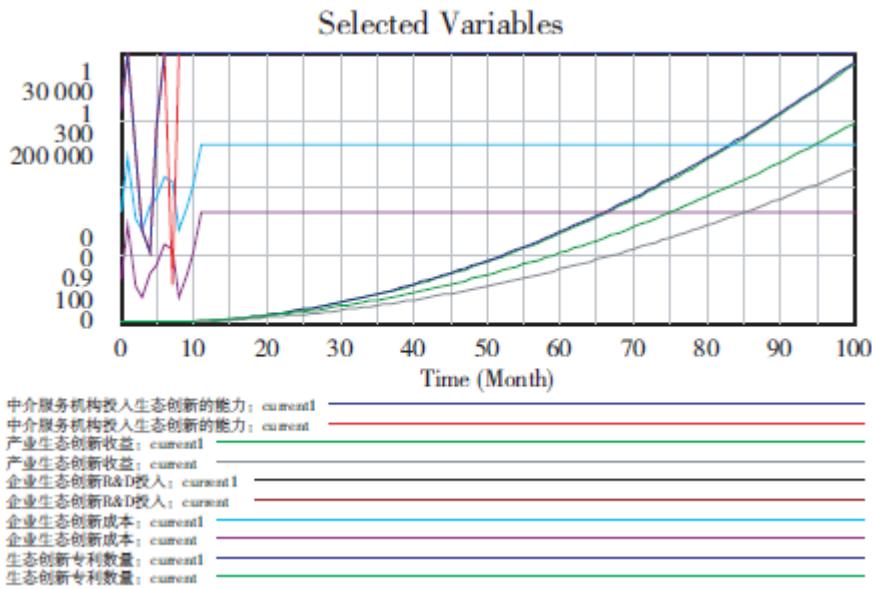


图 7 G 、 $A(t)$ 、 $B(t)$ 、 Q 、 U 对 f_c 的变化灵敏度

从图 7 可以看出，把企业与中介服务机构的合作力度因子从 0.4 增加到 0.9，中介服务机构投入生态创新的动力在前 10 个月里有变化，从 0~5 个月里基本没有变化，但是从第 5 个月后，中介服务机构投入生态创新的动力增加相对较慢。对于产业生态创新收益来说，当企业与中介服务机构的合作力度因子以较小的速度稳步增加，企业生态创新 R&D 投入基本没有什么变化，企业生态创新成本平行增加，生态创新专利数量基本没有变化。

仿真结果表明，纯粹增加企业与中介服务机构的合作力度，并不能很好地改变生态创新专利数量，也就是说无法给长株潭区域生态创新系统带来技术上的革新和突破，反而会提高企业生态创新成本。因此，在实际过程中，政府应该注意两者的相对平衡和取舍，不能盲目地促进企业与中介服务机构的合作。

4.5 综合改变模型中各常量的仿真分析

在整个长株潭区域产业生态创新系统中，每个可以变化的变量非常复杂，政府常常面临着十分复杂的动态的变化，单一因素的变化十分少见。因此，对各个常量的变化考察显得十分重要。

图 8 中将地方政府对生态创新资金支持力度从 0.45 提高到 0.85、企业生态产品收益因子从 0.55 减少到 0.15 以及把企业与中介服务机构的合作力度因子从 0.4 增加到 0.9 后，综合分析中介服务机构生态创新资金支持力度、产业生态创新收益、企业生态创新 R&D 投入、企业生态创新成本、地方政府生态创新管理成本和生态创新专利部门数量对其的敏感度。从图中可以看出，中介服务机构生态创新资金支持力度改变并不明显。产业生态创新收益在前 45 个月里几乎没有变化，但是随着时间的推移，收益慢慢地增加，呈现出半抛物线的形状。企业生态创新 R&D 投入几乎没有变化。企业生态创新成本在前 10 个月里，改变不明显，之后，平行增加。地方政府生态创新管理成本几乎没有变化。生态创新专利部门数量也几乎没有变化。

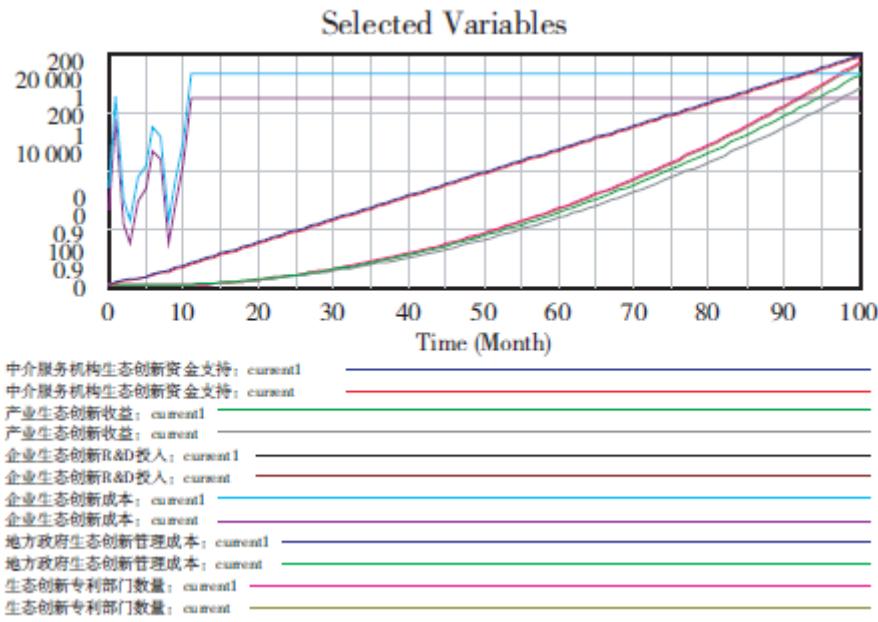


图 8 综合改变模型中各常量的仿真关系图

仿真结果表明，综合调整模型中的各个常量因子，对于企业生态创新成本的控制效果比单独调整单个因子的效果要好。同时，产业生态创新收益增加也比单独调整单个因子更加平稳。在实际操作过程中，对于地方政府生态创新管理成本和企业生态创新 R&D 投入这两块，应该分别以政府和企业独自调整为主，因为其敏感度相对较低，没必要以较大的精力去监控或者调控。

5 结语

依据对长株潭城市群产业生态创新系统运作的仿真模拟和讨论，再根据长株潭城市群区域内部生态创新能力及生态创新资源分配与利用的现实情况，发现长株潭城市群产业生态创新系统运行和创新资源的利用效率提升还有较大空间。针对仿真分析的研究结果，本文从以下四个层面提出长株潭城市群区域产业生态系统的优化机制：

第一，在企业行为层面：应加强区域产业生态技术创新。从企业行为层面看，生态循环型创新技术的支持资金投入明显不够。相比国内其它部分省市，相关企业主体里真正从事研究与开发活动的高级技术人员所占比例还是较低，这体现了长株潭城市群各产业开展研发的科技力量不够强大。通过对系统的仿真预测分析，本文认为，在企业行为层面，应该加速产业生态化技术的研发，并在区域产业层面进行推广和扩散。

第二，在政府作为层面：应强化区域生态创新基础能力建设。主要包括：提升对生态循环型产业的科技创新服务能力；提升环境监测应急能力；完善排污权交易机制；建立生态创新考核评价体系和责任追究制度。通过上述四个方面的努力，完善区域生态创新的基础条件，为企业构建良好的生态创新环境。

第三，在研究机构层面：应拓宽区域产业生态创新资金渠道。无论从国外还是国内看，许多科研成果，特别是带动国民经济发展的重大突破，都是依靠各类大学、科研院所独立或联合完成的，而且，作为科研成果与创新的主要源头，大学和科研院所还可以通过创造新思想、新知识等方式，有效地促进知识、信息、技术等的扩散或市场价值的实现。高校与科研机构在区域产业生态创新系统中作为知识创新主体，在区域产学研一体化生态化技术创新和区域生态创新知识基础构建方面具有基础性作用。基于对系统的仿真和预测，长株潭城市群区域产业生态创新目前主要存在创新资金渠道等问题。

第四，在创新人才层面：打造区域产业生态创新高端人才服务平台。人才资源是区域产业生态创新最宝贵的资源。根据对长株潭地区的仿真和预测分析，本文认为，打造区域产业生态创新高端人才服务平台是促进长株潭地区产业生态化创新的重要措施。特别是随着国家生态文明建设、“一带一路”倡议、长江中游城市群发展规划等一系列重大战略措施的出台，加快长株潭地区生态创新人才队伍建设，打造生态创新高端人才服务平台显得日趋重要。

附录 1：

$$\beta_1 = [Q \times C(t)] / 100 - \ln(Y \times I) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \beta_2 = & \text{IF } A(t) \times I \geq 10, 0.2, \\ & \left[\begin{array}{l} \text{RANDOM UNIFORM}(0.2, 0.9, 0.1) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\beta_3 = \text{EXP}(G) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \beta_4 = & \text{IF } f_E \geq 50, C(t) + L - f_D \times 0.1, 0.2 \\ & \left[\begin{array}{l} \end{array} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\beta_5 = 0.95 - I \quad (5)$$

$$A(t) = \text{INTEG}(\beta_1, 1) \quad (6)$$

$$B(t) = \text{INTEG}(\beta_2, 1) \quad (7)$$

$$C(t) = \text{INTEG}(\beta_3, 1) \quad (8)$$

$$D(t) = \text{INTEG}(\beta_4, 1) \quad (9)$$

$$E(t) = \text{INTEG}(\beta_5, 1) \quad (10)$$

$$f_A = 0.4 + \text{TIME STEP} \times 0.05 \quad (11)$$

$$f_B = 0.5 + \text{TIME STEP} \times 0.05 \quad (12)$$

$$f_C = 0.4 \quad (13)$$

$$f_D = \text{RANDOM UNIFORM}(1.1, 1.9, 0.1) \quad (14)$$

$$f_E = \text{RAMP}(5, 0, 100) \quad (15)$$

$$Y = \ln[U + E(t)]/f_A \quad (16)$$

$$\begin{aligned} K &= \text{IF THEN ELSE} \\ &\quad [Y \geq 100: \text{OR}: B(t) \geq 50, 0.85, 0.1] \end{aligned} \quad (17)$$

$$L = I \times 0.95 \quad (18)$$

$$Q = 100 \times (f_c + L + f_B + K) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} I &= \text{IF THEN ELSE} \\ &\quad \left[\begin{array}{l} U \geq 100, 0.8, \\ \text{RANDOM UNIFORM}(0.1, 0.8, 0.05) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} G &= \text{IF THEN ELSE} \\ &\quad \left[\begin{array}{l} A(t) \geq 50: \text{OR}: L \geq 0.5, 1, \\ \text{RANDOM UNIFORM}(0.1, 0.9, 0.1) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$U = D(t) \times 20 \quad (22)$$

参考文献:

- [1] Korhonen J. Some Suggestions for Regional Industrial Ecosystems-extended industrial ecology[J]. Eco-Management and Auditing, 2001, 8(1):57-69.
- [2] Chertow M. Developing Industrial Ecosystem: Approaches, Cases, and Tools, Bulletin NO 1106[R]. New Haven, CT: Yale School of Forestry&Environmental Studies, 2002.
- [3] Jouni Korhonena, Ilkka Savolainen, Mikael Ohlström. Applications of the industrial ecology concept in a re-search project: Technology and climate change (CLIMTECH) research in Finland[J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12:1087-1097.
- [4] Deutz P, Gibbs D C. Eco-Industrial Development and Regional Restructuring: Industrial Ecology or Marketing Tool?[J]. Business Strategy and the Environment, 2004(13):347-362.
- [5] 赵武, 马一丹. 区域产业生态化:理论演进、评价方法与实践路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11):259-260.
- [6] 王宏起, 刘梦, 李玥, 等. 结构平衡目标下区域战略性新兴产业创新生态系统科技资源配置模型[J]. 中国科技论坛, 2018, 11(6):35-43.

-
- [7] 王晶, 孔凡斌. 区域产业生态化效率评价研究[J]. 经济地理, 2012, 32(12): 102–107.
- [8] 何向武, 周文泳. 区域高技术产业创新生态系统协同性分类评价[J]. 科学学研究, 2018, 3(17): 541–549.
- [9] 袁莉, 蔡琨. 城市群可持续发展的系统评价——以长株潭城市群为例[J]. 系统科学学报, 2014, 4(11): 73–76.
- [10] 郭荣中, 杨敏华. 长株潭地区生态系统服务价值分析及趋势预测[J]. 农业工程学报, 2014, 3(5): 238–246.
- [11] 陈劲, 尹西明. 建设新型国家创新生态系统加速国企创新发展[J]. 科学学与科学技术管理, 2018, 7(12): 1–12.
- [12] 姜江, 胡振华. 区域产业集群创新系统发展路径与机制研究[J]. 经济地理, 2013, 33(8): 86–91.
- [13] 邵必林, 赵煜, 宋丹, 等. AI 产业技术创新系统运行机制与优化对策研究[J]. 科技进步与对策, 2018, 22(11): 71–78.
- [14] 张容, 钱省三. 区域产业生态系统及其生态特性研究[J]. 研究与发展管理, 2009, 21(1): 45–50.
- [15] 罗贞礼. 边缘区域产业生态化发展的策略定位与对策研究[J]. 生态经济, 2008, 2(11): 128–130.
- [16] 阿弗里德·马歇尔. 经济学原理[M]. 廉运杰, 译. 北京: 华夏出版社, 2005.
- [17] 王国红, 邢蕊, 唐丽艳. 区域产业集成创新系统的协同演化研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2012, 33(2): 74–81.
- [18] Hcwells J. Intermediation and the role of intermediaries in innovation[J]. Research Policy, 2006, 35(5): 715–728.
- [19] 刘兵, 李源, 许刚. 开发区人才聚集与区域经济发展协同机制研究[J]. 中国软科学, 2010(12): 89–96.
- [20] 朱晓霞. 基于 SD 模型的 RIS 创新驱动力研究[J]. 科学学研究, 2008, 12(15): 69–71.