

技术扩散和资本流动作用下中国区域空间结构演化 ——基于 Agent 的模拟

顾高翔¹, 王 铮^{2,3}

(1. 华东师范大学人口研究所和地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;

2. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190;

3. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 空间结构是区域的基本组成部分, 在空间交互过程和区域经济发展方面起着重要的作用。本文的主要研究目标是在不同的道路交通系统作用下, 中国区域空间结构的发展演化过程。这对于解决中国当前经济发展中的不平衡问题, 探索使区域平衡发展的方法具有重要意义。与传统的研究方法不同, 本文从自上而下建模的角度构建了一个基于 Agent 的动态区域经济模型。在模型中, 中国的每个地级市都被定义为企业 Agent, 拥有不同技术水平的劳动者 Agent 为企业提供劳动力, 并在 Wilson 空间吸引力模型的作用下在区域之间迁移。技术作用于劳动力之上, 随劳动者的迁移而扩散。资本由企业的投资行为而转移。模型中的道路交通网具有不同的权值, 这意味着道路交通网是异质的。通过情景模拟, 得到以下结论: 在分级道路交通网的作用下, 传统的中心—腹地扩散模式已不再适用。技术服从枢纽—网络结构从中心城市向外扩散。资本的流动也具有与技术扩散相似的过程和空间结构。交通条件可以在很大程度上影响区域的发展, 同时自然条件仍然起着空间锁定的作用。优惠的税率政策可以在一定程度上打破这种空间锁定, 有利于吸引劳动者迁移, 提高当地的生产技术水平。

关键词: 基于 Agent 模拟; 空间结构; 道路交通网络; 技术扩散; 资本流动; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201406008

1 引言

空间学派的产生是现代地理学发展过程中的重要现象之一。经过多年的发展, 空间学派已经发展成为地理学的 4 大学派之一, 而空间结构分析也已经成为地理学中最重要研究领域之一, 其重要性越来越受到人们的重视^[1]。空间结构是区域的基本组成部分, 其变化与区域间交互过程和区域经济的发展有着紧密的联系。

本文的主要研究目标是在不同道路交通系统作用下, 中国区域空间结构的发展和演化过程及其对区域经济和空间交互的影响。本文采用区域间的技术扩散和资本流动来显示空间结构发展和变化过程。技术水平和资本聚集程度是区域竞争力的重要标志。尽管过去 30 年, 中国在经济和社会发展上取得了令人瞩目的成就, 但是其经济活动的空间分布仍极不平衡, 区域间差距非常大^[2]。因此, 研究宏观尺度上中国多区域空间结构的机制和演化过程及其对区域经济发展的影响, 具有非常重要的现实意义。

空间结构对经济和社会的影响一直是地理学研究中的一个热点问题。Parr 通过案例分析研究了区域经济变化与区域结构之间的关系^[3]。Bruinsma、Rietveld 采用基于重力的可

收稿日期: 2013-06-29; 修订日期: 2014-05-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (70933002); 国家重大研究计划 (973) 项目 (2012CB955800) [Foundation: The Key Project of National Natural Science, No.70933002; The State Key Development Program on Basic Research of China, No.2012CB955800]

作者简介: 顾高翔 (1985-), 男, 浙江宁波人, 博士, 研究方向为地理计算、经济计算。

E-mail: caesarggx@163.com

通讯作者: 王铮 (1954-), 男, 云南陆良人, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员 (S110003918M), 主要从事经济计算、地理计算、区域科学与管理研究。E-mail: wangzheng@mail.casipm.ac.cn

达性因子排名,研究了3种交通网络(公路、铁路、航空)的变化对欧洲42个城市聚集情况的影响^[4]。Gutierrez等使用加权平均距离因子衡量欧洲高速铁路建成后对各个主要城市可达性的影响,并分析了由高速铁路建设带来的欧洲主要城市和它们的腹地之间不平衡性的增加^[5]。陆玉麒总结了中国区域空间结构研究的发展过程,对国内现有各种空间结构模式进行体系化归类^[1]。Gastner、Newman将运输成本和收益作为最优条件,使用Monte Carlo最优化模型研究了空间网络结构的定性特征^[6]。

但是,这些传统的对区域空间结构的研究以描述、测度、分类的静态方法为主^[7],通过统计经济和地理数据,计算指标值,对区域的空间结构进行划分和归类,通过分析定量的统计结果得到空间结构演化的研究结论。传统的计量、统计研究方法无法对空间结构演化发展的动力学机制进行分析和解释,也无法从深层次分析导致区域空间结构演化的内部因素和机制及其动态实现过程。

自20世纪80年代以来,区域科学的研究开始由静态的、均衡的范式逐渐向一种动态演化的范式转变,开始应用复杂性科学的理论和方法来研究和分析区域问题及其时空演化的内在规律,其研究方法包括细胞自动机、分形、人工神经网络、基于Agent模型等^[8]。本文尝试引入基于Agent的模拟方法(Agent-based Simulation, ABS),使用Agent来刻画空间中的微观个体。ABS是复杂系统分析模拟领域一个重要的分支,其核心思想是复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)理论,即个体适应性造就复杂性^[9-11]。ABS的核心假设是社会现象是由agent之间相互作用而“涌现”出来的^[12],这意味着宏观层面上的现象是由微观层面上的agent的行为所产生的^[13]。基于Agent模拟在社会和经济模拟领域得到了广泛讨论和应用,已经成为一种强大的甚至是主流的模拟方法^[14-18]。

在地理学和空间结构领域,尤其是其动态形成机制方面,基于Agent模拟的方法同样被广泛采用。Berger提出了一个用于评估创新扩散和资源使用改变方面政策选择的空间ABS模型^[19]。Ligtenberg研究了如何使用ABS方法分情景模拟空间规划过程中的多目标决策问题^[20]。戴霄晔^[21], Wang等^[22]结合Nelson、Winter和Zhang的模型^[23]研究了多因素作用下技术在空间中扩散溢出的问题。姚梓璇将这个模型扩展,应用于中国实际的研发创业模拟之中^[24]。薛领、翁谨构建了一个基于垄断竞争、规模经济、交通成本等要素的大都市两区域空间结构模型^[25]。但是,大多数上述模型均缺乏对空间网络结构的考虑,或仅仅考虑了空间位置而不是其相互之间的联系。此外,空间结构的形成过程通常由多个区域相互作用决定,这是两区域模型所无法表达的。

因此,为了克服基于Agent模型在空间结构研究中的缺陷,探索经济地理演化的动态机制,本文构建了一个由技术扩散和资本流动行为反映空间结构演化和改变的Agent-based区域经济模型。另外,基于Agent模拟在地理学中的应用以人口地理为主,研究经济地理及其相关动态演化的工作相对较少,着眼于经济学的角度来解读基于Agent模拟,因此对于资本移动和技术扩散过程的模拟是本文的重点。

2 模型规则设计与详细结构

2.1 模型假设与基本规则设计

假设在经济系统中包含了多个空间节点,这些空间节点代表了居民地、城镇、城市。在经济活动中,这些空间节点具有相似的属性和行为。本文使用企业Agent来代表这些空间节点,同时使用劳动者Agent来表示为企业提供劳动力的工人。因此所构建的模型具有多层结构:位于个体层面的劳动者Agent和位于区域层面的企业Agent。整个经济系统可以被抽象为一个由两层Agent和外部环境组成的复杂系统。

(1) 将中国362个地级市、自治州、以及由省直接管辖的县级市定义为企业Agent,这

样模型中就存在 362 个企业 Agent。这就相当于将整个中国的国土划分为 362 片，每片都代表一个企业 Agent。从这方面来说，本文的模型同时具有元胞自动机的特征。

(2) 模型采用时序模拟，第 0 期即系统的初始状态。企业 Agent 在第 0 期都是存活的。

(3) 劳动者 Agent 为企业提供劳动力。每个劳动者每期可提供一单位的劳动力。劳动者 Agent 通过比较全市场企业 Agent 的工资率、人口拥挤程度、以及自然条件来决定是否迁移。

(4) 企业 Agent 比较全市场其他企业 Agent 的资本回报率与市场规模的大小决定投资方向。

(5) 本文对技术的定义与一般意义上的专利技术不同，是一种宏观意义上的劳动者的生产技术水平。因此，随着劳动者的迁移，其生产技术可以随之扩散到其他地区。

(6) 劳动者与资本沿连接区域的道路交通网进行迁移和流动。

在下文中， i, j 指代区域，即企业 Agent， t 指代模拟期数。

2.2 地区间交通路径与阻尼计算

在模型中，每个企业 Agent 都代表了一个区域，而区域之间依靠交通道路网联系在一起。交通系统是区域空间结构模型中非常重要的组成部分。在 Krugman 的研究工作中，区域代理要素被归纳为两个本性 (nature)，其中第一本性代表区域的自然禀赋，第二本性即代表交通和区位条件^[26]。

空间阻尼系数是 Wilson 空间相互作用模型中重要的参数 (该模型将会在 2.3.2 节中详细介绍)。王铮证明得到了空间阻尼系数的表达式为 $\eta = \sqrt{\frac{2T}{t_{\max} \cdot \Delta}}$ ，其中， T 为扩散元素，即迁移人口从本次迁移开始到下次迁移的平均时间， Δ 是相互作用域的域元尺度^[27]。因此，如果迁移的速度加快，使得两次迁移之间所需的平均时间减少，则空间阻尼系数将下降。这种空间转移的过程同样适用于刻画资本沿着道路交通网的转移和流动^[24]。

在现实世界中，地区之间存在着多种不同类型的交通道路。而不同的道路由于平均行驶速度和运载量的不同而具有不同的道路权重。为了简化问题，假设地区之间的交通由铁路网组成，对于没有通铁路的地区，则以国道或者省道代替之。这是因为与公路系统不同，铁路网络的线路相较于公路网络更加简明，线路平直，且连通每个区域的中心地区，因此能够更好地作为衡量区域之间距离的指标。另一方面铁路仍然在长途运输中有着主导地位。从表 1 中可以看到，铁路和公路，尤其是铁路，在中国的客运量和货运量总数上占据着绝对的主导地位。但是，比较其平均载客距离和平均货运距离可以发现，公路的平均载客距离只有 51 km。由于本文所关注的主要是区域间的交互行为，而地级市之间的平均加权距离达到了 1818.6 km^①，因此公路系统在本文模型中并不适用。这是选择铁路作为道路交通网组成部分的主要原因。

本文将铁路划分为普通铁路、电气化铁路、高速铁路 3 种，包括为补充道路交通网而加入的公路，总共存在 4 种不同的道路类型，其权重为 $w_k = \max(t_k)/t_k$ $k \in [1, 2, 3, 4]$ ，其中 t_i 表示经过每公里 i 类型的路段 i ，所要花费的平均时间。据此得到地区 i 到地区 j 路径的合成权重：

① 这里使用的是由人口和 GDP 加权的道路交通距离。其表达式为 $\bar{D} = \sum_i \sum_j D_{ij} w_i / n(n-1)$ ，其中 \bar{D} 表示平均加权距离， D_{ij} 表示区域间实际距离， n 表示区域数量， w_i 表示区域 i 的权重。本文使用人口和 GDP 比值的平均值作为该区域的权重，其表达式为 $w_i = (N_i / \bar{N} + GDP_i / \overline{GDP}) / 2$ ，其中 N_i 表示该区域的人口数， \bar{N} 表示全国地级市的平均人口数。

$$W_{ij} = \frac{\sum_{k,l} D_{k,l} w_{k,l}}{\sum_{k,l} D_{k,l}} \tag{1}$$

式中： $D_{k,l}$ 是为地区*i*到地区*j*所经过的中间节点*k*到*l*的最短距离； $w_{k,l}$ 是其权重。这样，地区*i*到地区*j*的复合空间阻尼系数可以表示为

$$\eta_{ij} = \eta \sqrt{\frac{1}{W_{ij}}} = \sqrt{\frac{2T}{t_{\max} \cdot \Delta \cdot W_{ij}}} \tag{2}$$

由于劳动者迁移和资本流动的迁移间隔时间和作用域大小的不同，在实际的应用过程中，两者的空间阻尼系数是不同的。在下文中， η^l 表示劳动者迁移空间阻尼系数， η^k 表示资本流动空间阻尼系数。

2.3 Agent行为设计

2.3.1 生产行为设计 对于处于存活状态的企业 Agent，以 Cobb-Douglas 形式来定义其生产模式。Cobb-Douglas 函数是一个主流的生产函数形式，被广泛应用到许多的经济学模型中^[29-31]，并且在对经济增长和生产力发展的理论和实证分析中，仍然是一种被普遍使用的函数形式^[32]。本文在新古典增长理论的基础上刻画企业 Agent 的生产行为，因此 Cobb-Douglas 函数在这里是适用的。生产函数的具体形式为：

$$Q_{it} = (A_{it} L_{it})^{\alpha_i} K_{it}^{1-\alpha_i} \tag{3}$$

式中： Q_{it} 是企业的产出； K_{it} 是企业的资本存量； L_{it} 为企业的劳动力数量； A_{it} 是企业从事的生产技术水平； α_i 为劳动力替代弹性指数。其中，产品技术水平 A_{it} 由劳动者的受教育水平和研发创新能力决定，本文称其为学习研究能力。

$$A_{it} = a(\Phi_{it})^2 + b(\Phi_{it}) + c \tag{4}$$

式中： Φ_{it} 表示劳动者的学习研究能力； a 、 b 、 c 是回归参数，是根据统计年鉴和投入产出表中的历史数据进行多项式回归拟合得到的^[33-34]。在模拟的初始阶段，区域内每个劳动者的学习研究能力都是一样的。

企业在生产过程中，需要消耗一定量的资源等作为中间产投入，本文将这种在生产过程中生产资源的消耗定义为生产过程中的中间投入。企业每期生产所要消耗的中间投入为

$$C_{it}^p = t \cdot Q_{it} \cdot P_{R,t} \tag{5}$$

式中： t 是每单位产出的中间投入需求量； $P_{R,t}$ 为中间投入的价格。

企业其当期的工资率 w_t 由本期劳动力边际产出 d_{it}^L 和本期产品销售的价格 P_t 决定。

$$w_t = d_{it}^L \cdot P_t = \alpha_i A_{it}^{\alpha_i} L_{it}^{\alpha_i-1} K_{it}^{1-\alpha_i} \cdot P_t \tag{6}$$

企业的利润 π_{it} 由销售收入 M_{it} ，中间投入 C_{it}^p ，固定资本折旧 δK ，总工资数 W 决定：

$$\begin{aligned} \pi_{it} &= (M_{it} - \delta K_{it} - W_{it} - C_{it}^p) \cdot (1 - tax) \\ M_{it} &= Q_{it} P_t \\ K_{i,t+1} &= K_{i,t} + \pi + \sum_j K_{i,j}^{f-in} - K_i^{f-out} \end{aligned} \tag{7}$$

式中： $K_{i,t+1}$ 表示下期固定资本； $\sum_j K_{i,j}^{f-in}$ 表示当期接受其他企业投资数； K_i^{f-out} 本企业向其他企业投资数。资本流动行为的细节将在 2.3.4 节详细介绍。

2.3.2 劳动者迁移过程 在模型中，劳动者沿着连接区域的道路交通网迁移。导致劳动者在 Agent 之间的流动的推动力受多方面因素影响，这些影响因素包括工资差、人口拥挤程度、艰苦边远指数和 Agent 之间的空间距离。在流动过程中，劳动者倾向于迁移到相对于目前所在城市工资率较高的城市，人口不是很密集、同行业竞争压力较小、自然条件较好的城市。这是空间相互作用力的一种，在空间上呈现出一种随距离衰减的态势。

表 1 铁路和公路运输数据

Tab. 1 Railway and highway transport data

	铁路	公路	其他
总客运量	186226	3286220	53873
总货运量	393263	2820100	483598.5
平均客运距离	516	51	
平均货运距离	749	182	

注：数据来源：中国统计年鉴 2012 版^[28]

空间相互作用力是位于物理空间中不同位置的实体相互之间联系、做出需求/供给决定和区位选择的依据^[35]。在计算空间相互作用的模型中，Wilson 根据最大熵原理提出了随距离变量指数衰减的空间相互作用力计算公式^[36]。本文引入了 Wilson 模型刻画企业 Agent j 对企业 Agent i 劳动者的吸引力。

$$\begin{aligned} TP_{ij}(t) &= (L_i \cdot \exp(ef_i))(w_j / \exp(ef_j))\exp(-\eta_{ij}^L D_{ij}) \\ &= L_i w_j \exp((ef_i - ef_j) - \eta_{ij}^L D_{ij}) \end{aligned} \tag{8}$$

式中： w_j 为地区 j 的工资率； ef_i 表示地区 i 的自然禀赋（艰苦边远指数）； D_{ij} 为地区 i 与地区 j 的距离； η_{ij}^L 为劳动者迁移的衰减因子； L_i 表示地区 i 的劳动者数量。这样，劳动者 Agent 从地区 i 迁移到地区 j 的概率可以表示为 $p_{ij}^m = TP_{ij}(t) / \sum_i \sum_j TP_{ij}(t)$ 。在这里，艰苦边远指数被用于表现区域的自然禀赋条件。艰苦边远指数引用自夏海斌的工作^[37]。本文在劳动者吸引方程中引入自然禀赋作为人口迁移的驱动力，这反映了 Krugman 第一本性的思想^[26]。

劳动者从地区 i 迁移到地区 j 的过程如下：

- (1) 考虑地区 j ，每个劳动者 Agent 抽取一个 $[0; 1]$ 区间内均匀分布的随机数；
- (2) 若该随机数位于 $[0; p_{ij}^m]$ 区间内，则该劳动者决定迁移到地区 j ；
- (3) 若不在这个区间内，则不迁移到地区 j ，返回第 1 步，考虑下一个地区，若所有地区都已考虑过，且都不迁移，则该劳动者下期将留在本地区。

因此，从统计上来说， t 时期从地区 i 迁移到地区 j 的劳动者数量等于：

$$m_{ij}(t) = L_i \frac{TP_{ij}(t)}{\sum_i \sum_j TP_{ij}(t)} \quad i \neq j \tag{9}$$

2.3.3 技术扩散过程 考虑新古典经济增长理论对有效劳动力的定义^[38]，参照于中学模型^[39]，本文模型定义技术完全作用于劳动力之上，这样劳动者的迁移会带来生产技术的扩散。其主要表现为生产技术随着受过职业培训的劳动者从教育水平、研发能力较高的地区扩散到其他较不发达地区。这是空间知识溢出的一种实现形式。假设企业 Agent 的技术水平由劳动者的学习研究能力决定，因此会随本地劳动者的平均学习研究能力改变而改变。 t 时期一个地区劳动者的平均学习研究能力由 $t-1$ 时期迁出人口数量及其学习研究能力，迁入人口数量及其学习研究能力决定。

$$\Phi_{ii} = \frac{\sum_k^{m_{ii}(t)} \phi_{k,t-1} + \sum_k^{\tilde{L}_{i,t-1}} \phi_{k,t-1}}{L_{i,t-1} - \sum_j m_{ij}(t) + \sum_j m_{ji}(t)} \tag{10}$$

式中： $\sum_j m_{ij}$ 表示迁出地区 i 的劳动者数； $\sum_j m_{ji}$ 表示迁入地区 i 的劳动者数； $\phi_{k,t-1}$ 表示劳动者 k 的学习研究能力； $\tilde{L}_{i,t-1} = L_{i,t-1} - \sum_j m_{ij}(t)$ 表示选择留在地区 i 的劳动者数。

在教育水平较高的地区，劳动者的学习研究能力可以得到提升。在本文中，劳动者学习研究能力提高的概率 p_ϕ 由当地的教育水平 I_{sch} 和高校指数 I_{uni} 决定。

$$p_\phi = \Lambda \cdot \exp(I_{sch} + I_{uni}) \tag{11}$$

式中： Λ 是归一化指数。劳动者学习研究能力的提高通过以下步骤完成：

- (1) 劳动者抽取一个在 $[0; 1]$ 区间内均匀分布的随机数；
- (2) 若该随机数位于区间 $[0; p_\phi]$ 内，则其学习研究能力将得到提高；
- (3) 依据式 (12) 得到劳动者学习研究能力提高的份额： $\phi_{k,t}^i = \min(\phi_{k,t-1}^i + \kappa, \Phi_{i,0})$

$$\phi_{k,t}^i = \min(\phi_{k,t-1}^i + \kappa, \Phi_{i,0}) \tag{12}$$

式中： κ 表示劳动者学习研究能力提高的量， $\Phi_{i,0}$ 表示地区 i 劳动者初始的平均学习研究能

力。教育水平 I_{sch} 和高校指数 I_{uni} 同样参考了夏海斌的工作^[37]。

2.3.4 资本流动过程 在模型中,资本会趋向于流动到资本回报率较高的企业中,只有这样,资本才能获得更大的利润。同时,资本在流动过程中还要考虑目标地区的市场需求量。市场的需求量是指其他地区对该地区本地区对产品的总需求。目标地区越富有,人口越多,则人们的消费欲望和消费潜力越大,对产品的需求量也越大。因此,目标地区的消费人口数量和该地区的工资率也是资本流动的吸引力。继续使用Wilson模型来刻画决定资本流动的吸引力,得到吸引力公式如下:

$$TK_{ij}(t) = w_{ji}L_{ji}\frac{\pi_{ji}}{K_{ji}}\exp(-\eta_{ij}^K D_{ij})$$

(13)

式中: w_j 表示目标企业的工资率; L_j 表示目标企业的人口数; w_jP_j 即表示了目标企业的消费规模。 π_j/K_j 表示目标企业的利润率; η_{ij}^K 表示资本流动的空间衰减系数。

依据式(13),可以计算出对企业 i 的资本吸引力最大的地区 $\max(TK_{ij})$ 。假设企业 k 对企业 i 吸引力最大,比较 $TK_{i,k}$ 与 $TK_{k,i}$,若 $TK_{i,k} > TK_{k,i}$,则表示企业 k 对企业 i 的资本的吸引力大于企业 i 对企业 k 的资本的吸引力,企业 i 的资本将流向企业 k 。企业 i 流向企业 k 的资本为 $k_{i,k}$,企业 k 得到的资本为

$$\Delta K_{k,i}^{f-in}(t) = \omega k_{i,k}$$

(14)

式中: ω 为资本转移过程中的损失率。对于决定投资的企业Agent,其投资额为

$$\Delta K_i^{f-out}(t) = k_{i,k}$$

(15)

式中: $k_{i,k} = vK_i$ 表示企业 i 向企业 k 投资的金额。

2.4 参数设定

表2列出了本文模型涉及参数的具体取值。其中,资本折旧率、人口迁移和资本流动的空间阻尼系数、投资占固定资本比例、资本转移损失率参考戴霄晔^[21]和姚梓璇^[24]。中间投入需求和标准税率是根据2007年中国投入产出表计算得到。由于投入产出表中的数值都是以价值量来计算,因此模型设定产品价格和中间投入价格都为1。

表2 参数设定

Tab. 2 Parameter values

参数	取值
模拟期数	maxT = 200
资本折旧率	$\delta = 0.2$
劳动者迁移空间阻尼系数	$\eta^l = 0.002$
资本流动空间阻尼系数	$\eta^K = 0.02$
产品价格	P = 1
中间投入价格	$P_R = 1$
中间投入需求	$t = 0.675$
投资占固定资本比例	$v = 0.001$
资本转移损失率	$\omega = 0.05$
标准税率	tax = 0.48

3 模拟结果分析

3.1 不同道路交通系统对空间结构影响模拟

人口迁移、技术扩散、资本流动是区域内部及区域间空间联系的主要类型之一,这种联系的表现形式比较复杂,在强弱上有很大的不同,构成了区域巨结构。区域巨结构包括中心—腹地结构、枢纽—网络结构等。中心—腹地结构和枢纽—网络结构是区域巨结构的两种不同的具体形式。中心—腹地结构由中心地理论发展而来,如杜能模型、克里斯塔勒模型等。在地域分异规律的作用下,要素会在某个具有空间优势的点率先聚集起来,形成中心;而与其毗邻的地区则成为依赖于中心的腹地。这是中心—腹地结构的形成过程。而在空间范围内,由于交通线的存在,围绕中心可能形成以中心为葩嵌、交通线为廓道、其他产业点或城镇为基底的枢纽—网络结构。交通线是枢纽—网络结构的连通体系,是当时当地经济条件下快速的道路,起到连接区域的作用^[40]。

尽管存在大量研究中心—腹地结构和枢纽—网络结构形成过程及其主要影响因素的文献,但是其中的大多数是基于历史数据和统计指标分析,而使用自下而上建模和动态模拟的研究较为少见。本文的主要研究目标就是研究在技术扩散和资本流动过程中,不同交通

系统影响下的不同空间结构的形成机制和过程，同时证明现代化的分级道路交通网的存在是枢纽—网络空间结构出现的重要原因。

本文设定2种情景：情景1假设道路交通网由同质的道路构成。这意味着道路的行驶速度都是一样的，所有道路的权重都被设为1。而情景2则使用2.2节中介绍的带权重的道路交通网。在上述模型和情景设置的基础上，本文进行了情景模拟，每次模拟都有200期，每期代表一个经济结算周期，即1个月，得到以下模拟结果。

3.1.1 技术扩散模拟 从图1中可以看到，在模拟初期，地区之间生产技术差异明显，直辖市、省会城市等具有较高经济地位的中心城市具有较高的生产技术水平。随着模拟的进行，到第50期，高等级的生产技术开始从中心城市扩散到周边城市，形成一种中心—腹地结构的空間扩散圈，较为明显的有京津扩散圈、长三角扩散圈、武汉扩散圈、珠江三角洲扩散圈等。到第120期，随着京津扩散圈和长三角扩散圈的范围不断扩大，地处北京、上海之间的山东和江苏大量接受来自这两大核心城市的技术辐射，生产技术水平快速上升，形成一条连接京沪的高技术带，技术带内的普通城市与核心城市（北京、上海）之间的技术差距不再明显，尤其是长三角地区，从生产技术水平上已经趋于一体。从第120期到第200期，技术扩散呈现从东部逐渐向中部、西部和东南扩散的趋势，形成一种双中心扩散的空间结构。

从模拟过程可以看到，技术是在一个具有双中心的中心—腹地扩散模式的作用下，从中心城市沿着空间距离扩散到周边的。由于是双中心地空间结构，两个中心城市之间的地区率先形成一条具有较高生产技术的产业带，随后技术沿着产业带和两端的中心城市继续向外扩张，并在此过程中吞并较小的中心城市及其辐射圈，逐渐形成一个覆盖东中部地区的大辐射圈。

而从情景2的模拟结果（图2）中可以看到，技术的扩散和传播不再是简单的从中心城市向周边扩散，而是呈现出沿交通网络扩散的模式，即技术是沿着交通线，有方向地从中心城市向外扩散。从第30期到第80期，这一特征开始显现，具有较高权重、且连接中心城市的交通主干道沿线城市（如郑州、长沙、济南）从中心城市获得了大量高技术，成为

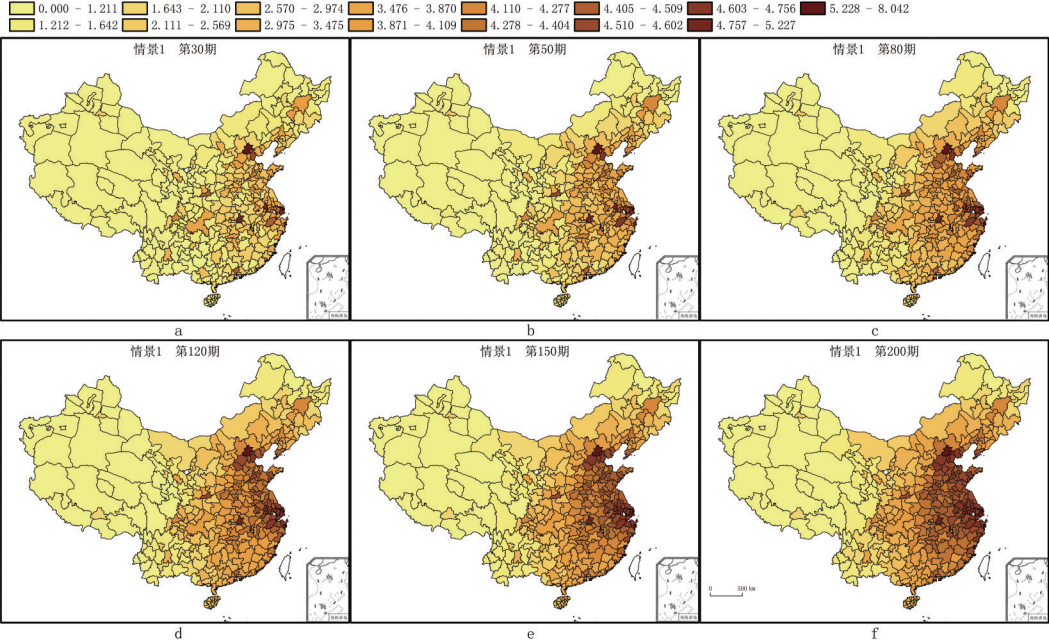


图1 情景1技术扩散分布图
Fig. 1 Technology level distribution in Scenario 1

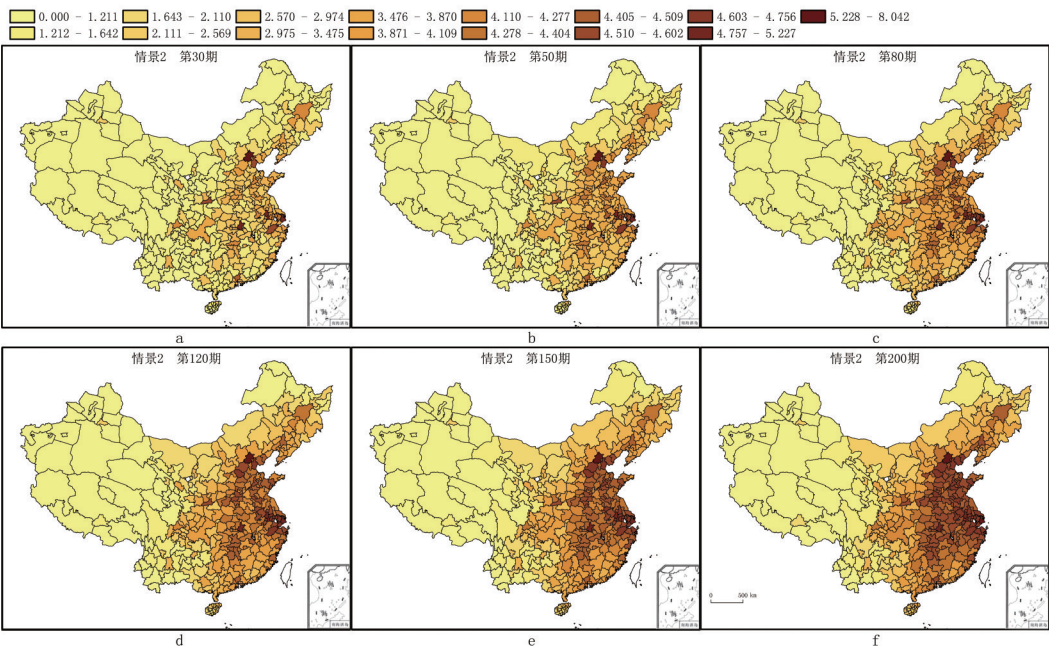


图2 情景2技术扩散分布图

Fig. 2 Technology level distribution in Scenario 2

扩散结构中的次级枢纽。从第80期到第120期，技术从次级枢纽向交通干线的沿线扩散，形成了连接中心城市的高技术带，构成了一个“A”型分布（北京—上海、北京—武汉—广州、连云港—郑州—西安）。

从第120期到第150期，技术开始从高技术带和枢纽城市沿着一般道路向普通节点扩散，这表示枢纽—网络的空间扩散结构已经形成。到第200期，中心城市与交通干线上的城市之间的技术差距逐渐变小，模拟初期的中心城市如上海、南京、杭州、武汉等与周围城市在技术水平上的差距已经不再明显，网络主干道沿线城市与周边城市之间的技术差距也逐渐被缩小。因此在情景2下，生产技术的扩散模式是从中心城市经过网络主干道扩散到次级枢纽，然后由次级枢纽扩散到主干道节点，再由主干道节点沿网络支路扩散到普通节点。这是一种网络—枢纽结构的空间扩散模式。

3.1.2 资本流动模拟 本节中，为了方便显示，所有城市划分为3类：资本输出型、中间节点和资本输入型。从图3中可以看到，第30期，北京、上海、广州三地成为资本枢纽，向周边城市输出资本。从第30期到第80期，资本输出城市逐渐增多，并呈现均匀分布的态势。几个重要的省会城市如西安、郑州、武汉、长沙、重庆等都成为地区资本枢纽，形成了以自身为中心的资本辐射圈。但是这些资本辐射圈大多相互独立，其覆盖范围基本不存在交集。

从第80期到第120期，这些扩散圈开始相互合并，尤其是在长三角地区，形成了以上海、南京、杭州为资本枢纽，连通内部各个城市，向周围辐射的格局。同时，大量中间节点的出现表明空间网络结构开始复杂化。但是，位于中部和西部的资本扩散圈没有出现中间节点，这表明这些地区的资本流动还不是很活跃。

从第120期到第200期，东部和中部的辐射圈基本上融为一体，形成一个密集的网状空间结构，一些原先的资本输出或资本输入的节点转变成中间节点，这表示一种多中心的中心—腹地资本流动空间结构已经形成。情景1模拟得到的资本流动网是由多个独立的资本流动圈扩张融合形成的，这样在模拟过程中地区间的资本交流相对缺乏，使得中部地区难以得到来自东部发达地区的资本辐射。

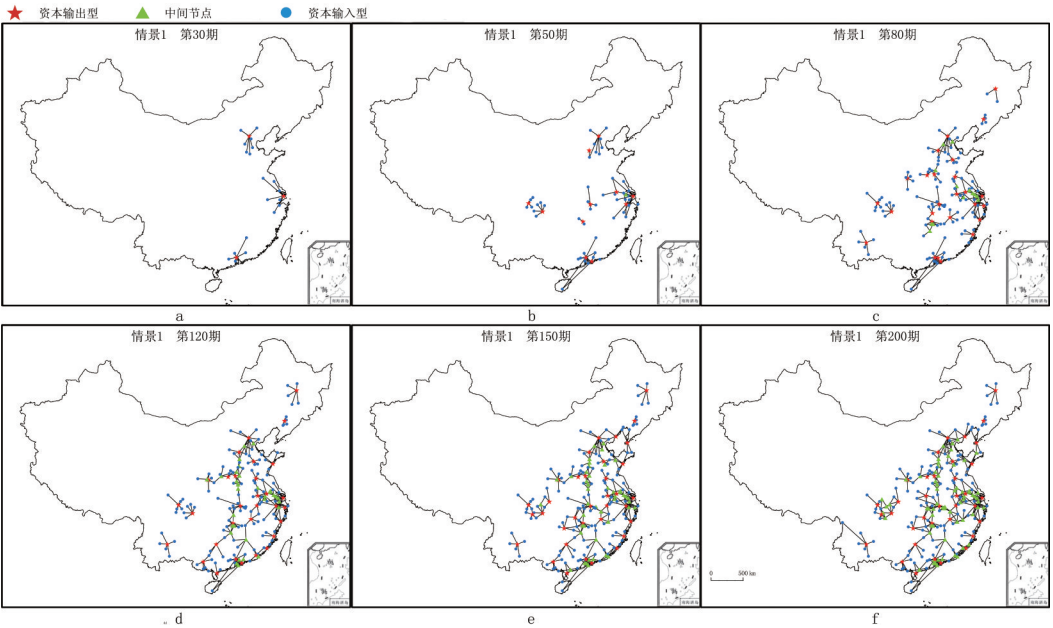


图3 情景1资本流动分布图

Fig. 3 Capital flow distribution in Scenario 1

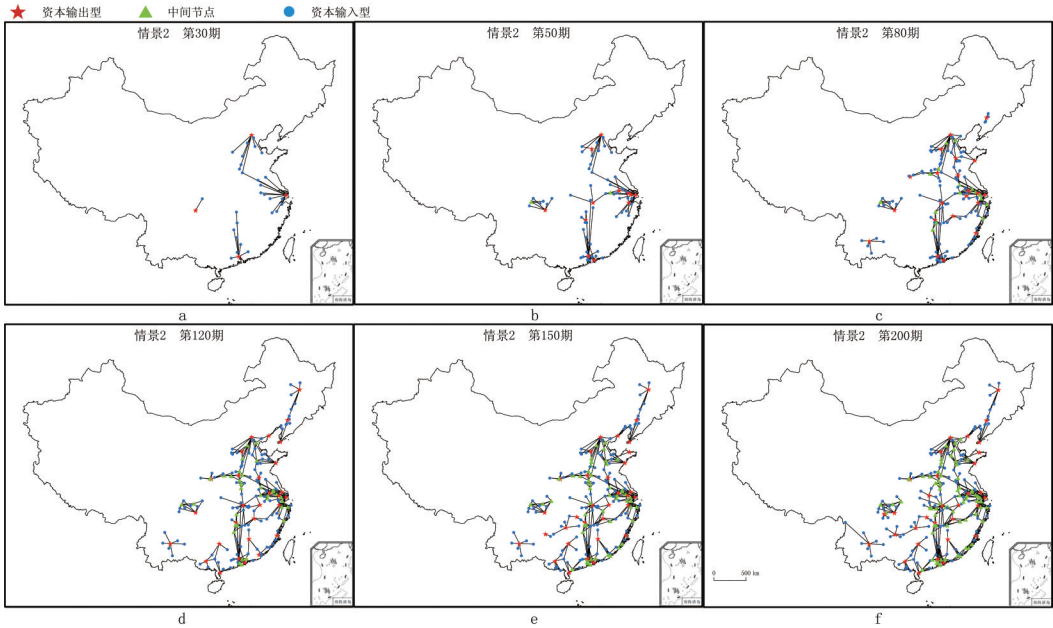


图4 情景2技术扩散分布图

Fig. 4 Technology diffusion distribution in Scenario 2

与情景1不同，从情景2的模拟结果中(图4)可以看到，由于分级道路交通网的存在，区域间资本流动的模式不再是如情景1中的中心—腹地结构，而是一种先由地区资本枢纽连通交通干道，形成沿交通干道分布的资本流动网，再由干道辐射周边普通节点的枢纽—网络结构。

从第30期到第80期，地区资本扩散圈不再是标准的以资本枢纽为中心的杜能环形状，而是以通道的形式分布于交通干道上(北京—广州、北京—上海)，这些资本流动通道

组成了一个覆盖东部中部地区的资本流动网的雏形。值得注意的是到了第80期，长江三角洲地区形成了一个密集的资本扩散网，这一点与情景1的模拟结果非常接近。这是因为在这一地区存在大量接近均匀分布的高等级交通线，因此该地区的道路交通网从某种程度上可以看作是均质的。除去长江三角洲地区，情景2在第80期出现的中间节点数要多于情景1的模拟结果 (情景2有11个，而情景1只有6个)，这表明同时期情景2所形成的网络结构更加复杂和成熟。

从第80期到第120期，随着资本流动网的不断扩张，大量位于交通干线上的资本输入点开始向外输出资本，成为中间节点。这意味着在第60期还只是锥形的资本流动网日趋成熟，发展成为资本流动主干网。从第120期到第200期，资本流动网沿主干道向周边的网络支路扩张，最终形成一个覆盖东部和中部大部分地区的枢纽—网络结构的资本流动网。到第200期，位于资本流动主干道上的节点，除了几个主要的资本枢纽外基本上都转化为中间节点。尽管网络结构变得更加复杂，但其中的资本流动主干网仍然清晰可见。

相较于情景1，情景2在模拟初期就联通了资本流动主干道，地区间的资本流动得到加强，使得中部地区可以较早接受来自东部的资本扩散，并能长期维持其对资本的吸引力直到模拟结束。而在情景1下，中部地区的累计净资本流入量在第90期就达到高峰，随后开始逐渐下降 (图5)。

3.2 优惠政策下技术扩散模拟

从图1、图2和图6中可以看到，虽然紧邻北京这一最大的技术扩散核心城市，而且也拥有高权重的交通主干道 (北京—哈尔滨、北京—大连)，东北地区平均技术水平始终很低。尤其是在情景2中，直到模拟结束都没有任何高技术带的出现。针对这个问题，本文设定税率优惠政策情景 (情景3)：对东北地区的企业所得税和个人所得税实行

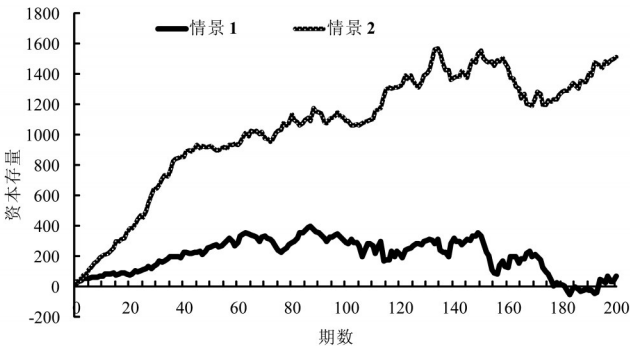
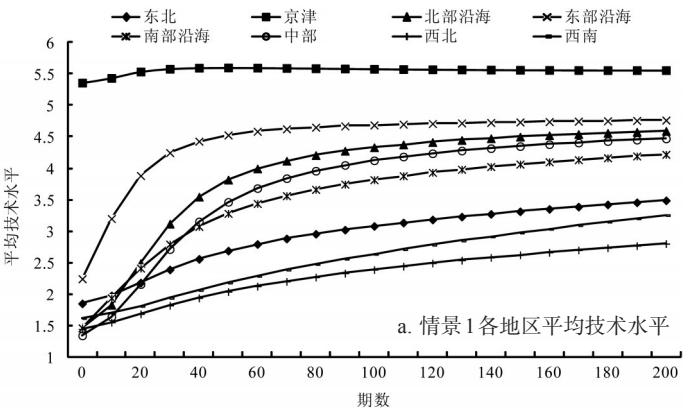
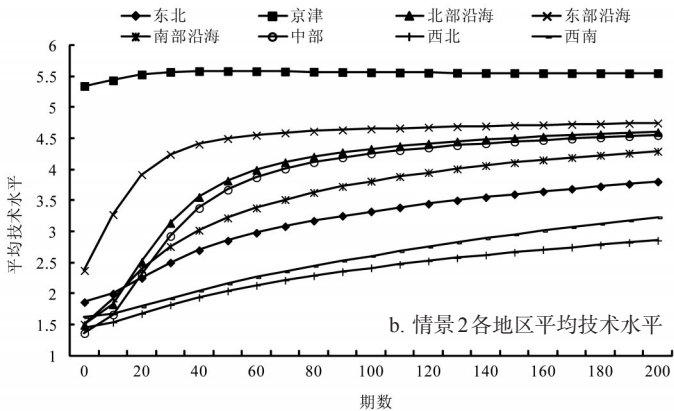


图5 中部地区累计净资本流动量

Fig. 5 The net aggregated capital flow of the provinces of central China in Scenarios 1 and 2



a. 情景1各地区平均技术水平



b. 情景2各地区平均技术水平

图6 情景1情景2各地区平均技术水平比较

Fig. 6 Comparison of technology levels of China in Scenarios 1 and 2

60%的优惠，以吸引劳动者的流动。为了更加突出实行优惠政策的区域，本节只在地图中显示北京、天津、内蒙古、河北和东北地区。

从图7中可以看到，在不采取优惠政策的情况下，东北的生产技术水平在模拟过程中始终得不到快速提升，接受核心城市辐射的能力非常弱，与河北之间的技术水平差距在模拟过程中不断加大。从第100期到第200期，东北地区只有沈阳能够较好地接受技术扩散，获得较高的技术水平。经过200期模拟之后，东北地区形成了一个由沈阳接受来自核心技术城市的技术辐射，以此为中转再扩散至其他地区的格局。

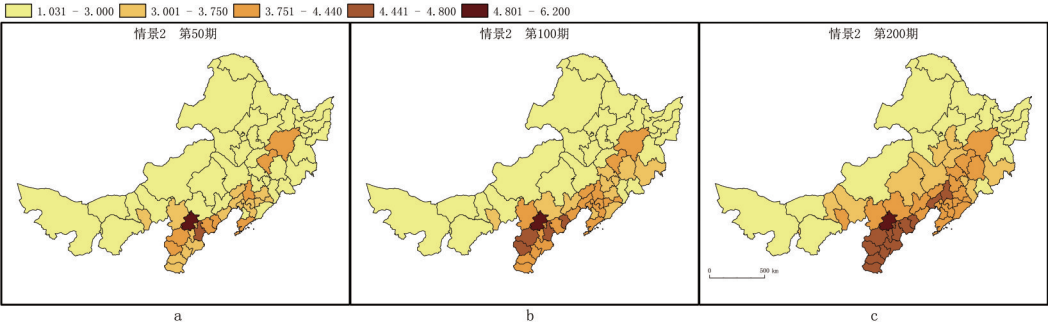


图7 情景2东北等地区技术水平分布

Fig. 7 Technology-level distribution of Northeast China in Scenario 2

而采取优惠政策之后，从图8中可以看到，东北地区接受技术扩散的能力得到明显的提升。从第100期到第200期，一条沿北京—沈阳—大连的交通干线的高技术带产业出现。高技术带上的区域，其技术水平与河北、天津等地趋近。这表明优惠政策对劳动者的迁移行为产生了比较大的作用。在优惠政策的影响下，东北地区对劳动者有了更大的吸引力，直接提升了当地的技术水平。而技术水平提高以后，企业的工资率会同样得到提高，进一步提高了该地区对劳动者的吸引力。

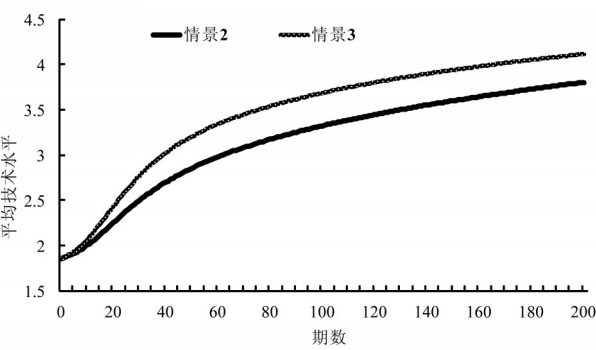


图8 情景2和情景3下东北地区平均技术水平比较

Fig. 8 Contrast of technology levels of Northeast China in Scenarios 2 and 3

情景3下，技术扩散的模式仍然是枢纽—网络结构的。从图9中可以看到，沈阳在第100期成为东北地区的技术中心，而相似的结果在情景2中发生的时间是接近第200期。从第100期到第200期，技术从次级中心(沈阳)沿道路干线扩散到周边的地区，形成一条高技术带。

值得注意的是，简单的优惠政策能够在平均水平上提高区域的经济实力，但是区域内的差距反而扩大。从图9中可以看到，沿着高技术带，东北各地区的技术水平随着其到高技术带距离的增加而快速下降。因此，地区间的平衡发展需要一组更加复杂的政策组合来支持。这超出了本文讨论的范围。

4 结论

(1) 研究表明，在道路权重均为1的情况下，技术首先从中心城市向其邻近地区扩

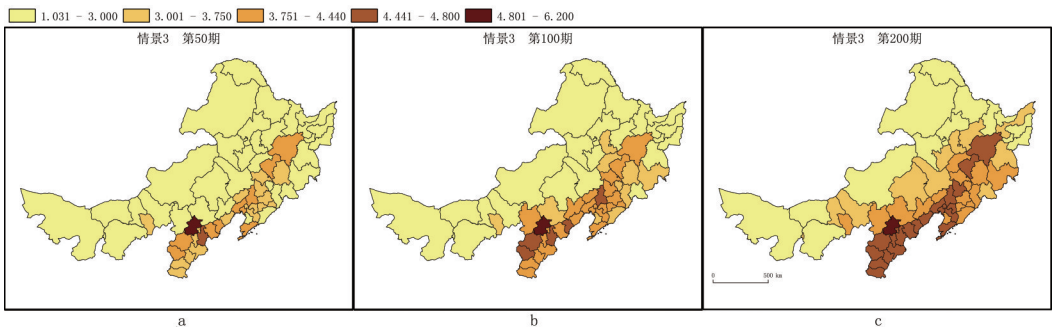


图9 情景3东北等地区技术扩散分布

Fig. 9 Technology-level distribution of Northeast China in Scenario 3

散，形成局部的技术扩散圈。这些扩散圈逐步扩张，相互融合，最后形成了一个双中心的中心—腹地技术扩散模式。而在资本流动网的形成过程中，同样可以看到类似的融合过程：模拟初期出现的许多局部资本流动圈相互融合，最后形成一个多中心的中心腹地资本扩散格局。这一过程与 Vance 研究的北美早期殖民地时期的区域空间网络形成过程比较相似^[41]，其中的聚落阶段、网络的伸展阶段和网络完善阶段可以在情景1的模拟结果中得到反映。情景1模拟结果实际上是反映了较原始的交通系统作用下的空间结构形成过程。因此，传统的中心—腹地结构在当今道路交通系统日趋成熟的世界中已不再适用。

(2) 情景2的研究结果表明，分级道路交通网络的出现是网络—枢纽结构出现的主要原因。在情景2分级道路交通网的作用下，城市之间的可达性产生了变化，形成了一个非均质的地理空间，在技术扩散和资本流动过程中形成了枢纽—网络结构的扩散流动网。这一点与 Bruinsma、Rietveld 关于高速铁路系统对南欧北意大利—巴塞罗那一线的城市轴的影响^[4]和 Gutierrez 等关于高速铁路系统对其所覆盖的区域的区域空间结构影响^[5]的研究结论一致。而交通系统将区域紧密连接，优越的交通条件能够极大地促进区域间的交互行为 (包括技术扩散和资本流动)，对于区域的经济发展有着重要的影响。这与王铮等关于交通系统是枢纽网络结构支撑体系这一结论符合^[40]，也可以与 Seitz 对于公共道路改善给私有企业带来收益^[42]和 Gallup 等对于高度密集低成本交通运输促进欧洲内陆国家高度发达^[43]的研究结果验证。

(3) 分级交通网络作用下，技术首先从中心城市沿道路交通干线向次级枢纽扩散，并形成了沿道路交通干线的高技术带。然后从次级枢纽和高技术带沿着普通道路向一般节点扩散，形成一个分层的枢纽—网络扩散结构。而资本则首先从资本枢纽沿道路交通干线扩散，形成资本流动的主干网，再从主干网和次级枢纽向普通节点流动，形成一种枢纽—网络结构的资本流动网。这反映了由交通系统带来的空间非均质影响，体现了枢纽—网络空间结构的特质。

此外，尽管过程相似，但是技术的扩散和资本的流动存在差异，体现在技术扩散的力度和范围都要大于资本扩散 (技术扩散过程中高技术带上的区域基本都会受到中心城市如北京上海的影响，而资本流动主干网上直到模拟的第200期还存在一些独立的资本输出城市)，这一特征同样出现在在情景1的模拟结果中。这一方面是由于技术扩散和资本流动的空间阻尼系数有差异，但更主要的原因是两者属性的不同，技术属于非竞争性商品，而资本则是竞争性商品。正是技术的非竞争性导致其可以随劳动者迁移大范围快速扩散传播。这一结果体现了非竞争性的技术和竞争性的资本的扩散流动过程中的不同特点。

(3) 枢纽—网络结构的形成不仅受到完善的分级道路交通网的影响，也受到区域自然禀赋的制约。在完善的道路交通网络存在的条件下，自然条件仍然是区域经济发展的基础，恶劣的自然条件会抵消交通条件给地区经济带来的正面影响。这是空间锁定的一种表

现形式^[44]。本文的结论从自下而上的角度反映了自然条件和交通条件相互作用的结果。

(4) 优惠税率政策可以提高东北地区对劳动者的吸引力,随之提高地区的平均技术水平,促进经济发展,在一定程度上打破现有的由区域自然禀赋造成的空间锁定。但是,简单的优惠政策却导致地区内部区域间的差距的扩大,表现为技术水平随着到高技术带的空间距离的增加而快速下降。因此,研究更加详细复杂的政策组合以实现区域间的均衡发展是下一步工作的重点。

本文的主要不足是在简化模型的时候忽略了外部世界的影响,将模型定义为一个封闭的世界,这导致模拟结果与现实有若干不符。而简化提取的道路交通系统主要由铁路构成,这也对模型结果产生了一定程度上的偏差。另外,模型只考虑了单一生产部门,而且 Agent 行为也相对简单,这些有待进一步的工作来完成。

致谢: 中国农业大学经济管理学院刘丽副教授参与了本研究的讨论,在此表示感谢!

参考文献 (References)

- [1] Lu Yuqi. A review and prospect of the research on chinese regional spatial structure. *Progress in Geography*, 2002, 21 (4): 468-476. [陆玉麒. 中国区域空间结构研究的回顾与展望. *地理科学进展*, 2002, 21(4): 468-476.]
- [2] Nian Meng, Sun Jiuwen. Research of regional economic spatial structure change in China. *Economic Theory and Business Management*, 2012, (2): 89-96. [年猛, 孙久文. 中国区域经济空间结构变化研究. *经济理论与经济管理*, 2012, (2): 89-96.]
- [3] Parr J B. Regional economic change and regional spatial structure: Some interrelationships. *Environment and Planning A*, 1979, 11(7): 825-837.
- [4] Bruinsma F, Rietveld P. Urban agglomerations in European infrastructure networks. *Urban Studies*, 1993, 30(6): 919-934.
- [5] Gutierrez J, Gonzalez R, Gomez G. The European high-speed train network: Predicted effects on accessibility patterns. *Journal of Transport Geography*, 1996, 4(4): 227-238.
- [6] Gastner M T, Newman M E J. The spatial structure of networks. *The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems*, 2006, 49(2): 247-252.
- [7] Xue Ling, Weng Jin. Dynamic simulation on spatial structure of metropolitan commerce based on monopolistic competition model. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(8): 938-948. [薛领, 翁瑾. 基于垄断竞争的大都市商业空间结构动态模拟. *地理学报*, 2010, 65(8): 938-948.]
- [8] Xue Ling, Yang Kaizhong. Sciences of complexity and studies of evolutionary simulation of regional spatial structure. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 79-88. [薛领, 杨开忠. 复杂性科学理论与区域空间演化模拟研究. *地理研究*, 2002, 21(1): 79-88.]
- [9] Holland J. *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995.
- [10] Holland J. *Emergence: From Chaos to Order*. Reading, MA: Perseus Books, 1998.
- [11] Wang Zheng, Wu Jing, Yang Nian. A review and prospect of the multi-agent applications in geography. *Complex Systems and Complexity Science*, 2005, 2(3): 52-60. [王铮, 吴静, 杨念. 多主体在地理学中应用的回顾和展望. *复杂系统与复杂性科学*, 2005, 2(3): 52-60.]
- [12] Jennings N R, Campos J R. Towards a social level characterization of socially responsible agents. *IEEE Proceedings, Software Engineering*, 1997, 144(1): 11-25.
- [13] Schilloa M, Funka P, Rovatsosb M. Using trust for detecting deceitful agents in artificial societies. *Applied Artificial Intelligence: An International Journal*, 2000, 14(8): 825-848.
- [14] Wooldridge M, Jennings N R. Intelligent agents: theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, 1995, 10(2): 115-152.
- [15] Wooldridge M, Jennings N R. Agent theories, architectures, and languages: A survey. *Lecture Notes in Computer Science*, 1995, (890): 1-39.
- [16] Bonabeau E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(3): 7280-7287.
- [17] Ostrom T. Computer simulation: The third symbol system. *Journal of Experimental Social Psychology*, 1988, 24: 381-

392.

- [18] Gilbert N, Troitzsch K G. Simulation for the Social Scientist. New York: Open University Press, 2005.
- [19] Berger T. Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 2001, 25(2/3): 245-260.
- [20] Ligtenberg A, Wachowicz M, Bregt A K et al. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. *Journal of Environmental Management*, 2004, 72(1/2): 43-56.
- [21] Dai Xiaoye. Agent-based modeling of sequential innovation diffusion on network [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008. [戴霄晔. 序列创新的网络扩散自主体模拟[D]. 上海: 华东师范大学, 2008]
- [22] Wang Z, Liu T, Dai X. Effect of policy and entrepreneurship on innovation and growth: An agent-based simulation approach. *Studies in Regional Science*, 2010, 40(1): 19-26.
- [23] Zhang J F. Growing Silicon Valley on a landscape: An agent-based approach to high-tech industrial clusters. *Journal of Evolutionary Economics*, 2003, 13: 193-197.
- [24] Yao Zixuan. Agent-based modeling of multi-regional innovation diffusion and knowledge spillover [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009. [姚梓璇. 多区域创新扩散与知识溢出的自主体模拟[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.]
- [25] Xue Ling, Weng Jin, Yang Kaizhong et al. Dynamic simulation of impact factors on mono-centric urbanization by using agent based modeling. *Geographical Research*, 2009, 28(4): 947-956. [薛领, 翁谨, 杨开忠 等. 基于自主体(agent)的单中心城市化动态模拟. *地理研究*, 2009, 28(4): 947-956.]
- [26] Krugman P. First nature, second nature and metropolitan location. *Journal of Regional Science*, 1993, 33(2): 129-144.
- [27] Wang Z. Spatial interaction: A statistical mechanism model. *Chinese Geography*, 2000, 10(3): 279-284.
- [28] National Bureau of Statistics of China. China Statistics Yearbook-2012. Beijing: China Statistics Press, 2012. [国家统计局. 中国统计年鉴2012. 北京: 中国统计出版社, 2012.]
- [29] Judd K L. The welfare cost of factor taxation in a perfect-foresight model. *Journal of Political Economy*, 1987, 95(4): 675-709.
- [30] Trostel P A. The effect of taxation on human capital. *Journal of Political Economy*, 1993, 101(2): 327-350.
- [31] Antras P. Is the U.S. aggregate production function Cobb-Douglas? New estimates of the elasticity of substitution. *Contributions to Macroeconomics*, 2004, 4(1).
- [32] Felipe J, Adams F G. "A Theory of Production"--The estimation of the Cobb-Douglas function: A retrospective view. *Eastern Economic Journal*, 2005, 31(3): 427-445
- [33] National Bureau of Statistics of China. China Statistics Yearbook-2012. Beijing: China Statistics Press, 2007. [国家统计局. 中国统计年鉴2007. 北京: 中国统计出版社, 2007]
- [34] Department of National Accounts, National Bureau of Statistics of China. 2002 Input-Output Tables of China. Beijing: China Statistics Press, 2002. [国家统计局国民经济核算司. 2002年中国投入产出表. 北京: 中国统计出版社, 2002.]
- [35] Roy J R, Thill J C. Spatial interaction modeling. *Papers in Regional Science*, 2003, 83(1): 339-361.
- [36] Wilson A G. A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*, 1967, 1: 253-267.
- [37] Xia Haibin. Roughness and remoteness analysis oriented GIS-design, model and algorithm [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006. [夏海斌. 面向艰苦边远性分析的地理信息系统: 设计、模型和算法[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.]
- [38] Barro R J, Sala-i-Martin X. Economic Growth. 2nd ed. Cambridge, MA: The MIT Press, 2004.
- [39] Romer P. Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, 1990, 98: 71-102.
- [40] Wang Zheng, Xia Haibin, Wu Jing. General Geography. Beijing: Science Press, 2010. [王铮, 夏海斌, 吴静. 普通地理学. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [41] Vance J E. Capturing the Horizon: The Historical Geography of Transportation since the Transportation Revolution of the Sixteenth Century. New York: Harper & Row, 1986.
- [42] Seitz H. A dual economic analysis of the benefits of the public road networks. *The Annals of Regional Science*, 1993, 27(3): 223-239.
- [43] Gallup J L, Sachs J D, Mellinger A D. Geography and economic development. *International Regional Science Review*, 1999, 22(2): 179-232.
- [44] Xia Haibin, Wang Zheng. Evolution of land differentiation in Chinese mainland. *Geographical Research*, 2012, 31(12): 2123-2138. [夏海斌, 王铮. 中国大陆空间结构分异的进化. *地理研究*, 2012, 31(12): 2123-2138.]

Agent-based simulation on the evolution and development of regional spatial structure with technology and capital diffusion in China

GU Gaoxiang¹, WANG Zheng^{2,3}

(1. *Institute of Population Research, Key Laboratory of Geographical Information Science, Ministry of Education of China, East China Normal University, Shanghai 200241, China;*

2. *Institute of Policy and Management, CAS, Beijing, 100190, China;*

3. *Key Laboratory of Geographical Information Science, Ministry of Education of China, East China Normal University, Shanghai 200241, China)*

Abstract: Spatial structure is a basic component of regional science, and plays an important role in spatial interactions and regional economic development. The primary purpose of this paper is to examine the development and evolution of China's spatial structure under different traffic systems and its influence on the regional economy and interactions, such as technology diffusion and capital flow. This information is important because we need to explore various measures to improve the imbalanced economic development in China. In this study, unlike in previous structure researches, an agent-based dynamic regional economic model is built from the perspective of bottom-up modeling. In this model, each prefecture-level city in China has been defined as a firm agent, and the Cobb- Douglas production function is adopted. Heterogeneous laborer agents with different technology levels move between firm agents. The laborer migration behavior is affected by Wilson spatial attenuation. The technologies diffuse with the process of laborer migration. Capital also moves between agents as an investment behavior of firms. Different types of roads are endowed with different weights to form a heterogeneous traffic network in this model. A simulation system is built to combine GIS components. Three scenarios are identified to account for the effects of the hierarchical traffic network and preferential tax policies on the evolution of Chinese regional structure. The simulated results indicate that the traditional center-hinterland diffusion mode is no longer appropriate under the impact of heterogeneous traffic network in reality. The technologies firstly diffuse from center cities to sub-hubs along the major traffic lines, following a hub-net diffusion structure, and later from sub-hubs to ordinary nodes located at the branch lines. This phenomenon can also be observed in the capital flow process, in which the capital hubs first interconnect and form a capital flow network along the major traffic roads. After that, the network extends to adjacent ordinary nodes. It is also demonstrated that traffic conditions are important for regional development and that the basic spatial lock-in created by the natural endowments still exists. A preferential tax policy can break such a spatial lock-in to a certain extent and will be conducive to attracting the immigration of laborers and improving the local technology level for less developed regions.

Key words: agent-based simulation; spatial structure; traffic network; technology diffusion; capital flow; China