

# 基于多智能体的城市群政府合作建模与仿真<sup>①</sup>

## ——嵌入并反馈于一个异构性社会网络

孟庆国<sup>1</sup>, 罗杭<sup>2\*</sup>

(1. 清华大学公共管理学院, 北京 100084; 2. 北京大学国际关系学院, 北京 100871)

**摘要:** 以社会网络视阈下的城市群政府合作过程中的多期进化博弈为例, 通过概念模型、数学模型和计算机模型的完整建模过程, 在微观主体互动层面建立一个考虑个体成本收益差异的非对称进化博弈系统(并同时考虑全体博弈互动和部分博弈互动的交互), 在宏观社会结构层面建立一个实现节点之间连接概率定制化的异构性社会网络模型(且同时考虑全局信息交互和局部信息交互的更替), 并通过多智能体系统(特别是交互意愿变量的引入)实现了微观互动(博弈行为)和宏观涌现(网络结构)之间的双向反馈和动态交互. 在构建模拟系统的基础上, 设计并运行了一系列的实验方案, 对仿真模型及模拟结果进行信度检验, 并结合多次模拟实验样本数据的统计分析, 考察全局交互比例、局部连接概率等网络结构变量、合作收益、惩罚措施等博弈参数变量、以及决策个性等主体属性变量对城市群政府博弈形势与合作水平的动态影响, 为促进城市群政府合作和区域一体化进程提供决策依据和政策参考, 也是政治学与公共行政学科计算实验研究的一次创新尝试.

**关键词:** 城市群政府合作; 多智能体模拟; 非对称进化博弈; 异构性社会网络; 双向反馈机制  
**中图分类号:** C93; TP39      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2017)03-0182-25

## 0 引言

统筹区域经济建设、促进地区协调发展是我国经济社会发展的重要目标<sup>[1-3]</sup>: 1) 中央层面, 相继批准了一系列区域发展规划(如《长江中游城市群发展规划》、《长江三角洲城市群发展规划》<sup>[4]</sup>等)<sup>[3]</sup>, 并相继批复了多个国家综合配套改革试验区(如武汉城市圈、长株潭城市群“两型社会”试验区等)<sup>[5]</sup>, 以创新地方发展模式、促进区域一体化协调发展<sup>[1-3]</sup>; 2) 地方层面, 不少经济发达地区也出现了基于经济集聚和协同优势的区域自发合作现象<sup>[1, 2]</sup>(如长三角城市经济协调会、珠三角世界级城市群建设等); 3) 技术层面, 伴随着无线网络技术和移动通讯技术的迅猛发展, 新一

代的电子政务与移动政务模式的普及, 使得跨地域的政府间信息共享与互动协作更加方便快捷、随时随地, 最大限度地突破了时间环境和空间环境的限制<sup>[1-3, 6]</sup>. 当前我国的区域统筹与协同发展, 无疑以城市群建设为重点和核心, 长三角、珠三角、京津冀等城市群(都市圈)不仅是我国经济增长的重要引擎, 也在发展转型和综合改革的进程中扮演着“排头兵”<sup>[3]</sup>(若干个国家层面的区域发展规划和国家综合配套改革试验区都直接致力于城市群的建设和发展<sup>[4, 5]</sup>). 然而, 这些城市群或试验区横跨多个行政市乃至多个省, 在实现协同合作与区域一体化的进程中仍面临一系列问题和挑战<sup>[1-3]</sup>: 1) 政府管理层面, 区域内各城市不存在直接的行政隶属关系, 各市享有独立的行政权,

① 收稿日期: 2014-02-12; 修订日期: 2016-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金委员会与欧盟委员会合作交流项目(7161101045).

通讯作者: 罗杭(1989-), 男, 湖北恩施人, 博士, 研究员. Email: hang.luo@pku.edu.cn

难以协同合作<sup>[1-3]</sup> (如长三角城市群中的上海虽为省级直辖市,但管不了作为地级市的苏州、无锡等,双方之间不是传统的纵向垂直型领导关系,而是横向的府际间协作关系<sup>[1]</sup>);2) 经济发展层面,区域内各城市经济社会发展不平衡,面对区域共同问题的治理,各市的利益诉求与政策偏好可能差异显著,难以达成一致意见<sup>[1-3]</sup> (如长三角城市群中上海市、江苏南部和浙江北部的一些城市的经济发展水平无疑要明显高于安徽省的一些城市,在环境优先还是经济优先等区域共同议题上,可能会存在不同的偏好);3) 决策协同层面,委托代理问题以及地方官员晋升锦标赛模式的存在<sup>[3,7]</sup>,使得各城市政府决策者(如市长、职能部门负责人等)的个人利益(如提拔、晋升)与其所任职的城市在其任期内的经济发展指标直接挂钩<sup>[3]</sup>,因而易以个体利益和短期利益为出发点,忽略集体利益和长远利益,“各自为政”、“恶性竞争”、“产业同质”、“市场分割”、地方保护主义盛行等,易陷入发展的“囚徒困境”<sup>[1-3]</sup>。

目前,国内外相关学者从城市群政府合作模式、协调机制、发展困境、对策建议等方面展开了一系列研究<sup>[8-16]</sup>,提出了不少有价值的论述和解释,但主要属于定性归纳分析或数学模型演绎,较少有研究采用多智能体系统等分布式人工智能模型和多期动态模拟的方法探讨城市群多政府政策协同<sup>[1,2]</sup>、博弈互动<sup>[3]</sup>的演化机理、或一些一般性的群体行为互动规律<sup>[17-20]</sup> (虽不直接探讨城市群政府协同问题,但能提出有借鉴意义的方法和模型)。事实上,城市群多政府协同合作问题是一个动态演变、异质构成、自组织、自适应的典型性复杂博弈系统,由多个具有独立行政权力和独自利益诉求的城市政府决策主体构成,面对区域内的共同社会经济问题,他们在相互沟通的基础上不断互动,反复博弈<sup>[1-3]</sup>,并在相对缺乏垂直领导(即没有一级地方政府能直接管理跨省的各市)的情况下,实现各主体之间的协同效应,以及多主

体与周围环境、整体目标之间的相互适应<sup>[1,3]</sup>。受制于问题类型属性、社会网络结构、利益关联程度、技术条件限制、机会成本制约、有限理性、信息不完全性等因素<sup>[1-3]</sup>,各城市政府决策者就某一特定的区域共同问题往往仅与利益直接相关的部分其他城市展开协作治理<sup>[1-3]</sup> (这个过程中存在的城市群部分城市的决策者之间的博弈互动可称之为部分博弈),而不可能对任何的区域共同问题都由城市群所有城市展开整体性的协作治理(这个过程中存在的城市群全体城市的决策者之间的博弈互动可称之为全体博弈)。例如,长江三角洲城市群中的太湖治理问题,主要在苏州、无锡、湖州等“湖畔”城市之间展开协作,而不需要由包括安徽省的合肥、安庆等市在内的城市群全体城市直接参与,而“主体功能分区”、“人口区域平衡”、“创新链产业链深度融合”<sup>[4]</sup>等事关区域统筹与协调发展的整体性重大问题,则需要城市群全体城市的共同协作配合。另一方面,各城市政府决策者在展开协作与博弈的过程中会不断相互沟通、交互信息,且各决策主体在特定时间和空间环境下往往仅受有限范围内其他主体影响(可称之为局部信息交互),而不可能随时随地的实现城市群全体城市决策者之间的直接信息共享(可称之为全局信息交互),且有限的信息交互范围也随时空环境和对象而动态变化<sup>[1-3]</sup>。例如,城市群全体城市政府决策者(如各城市市长或职能部门负责人等)共同参与的城市群联席会议<sup>②</sup>(典型如长三角城市经济协调会、武汉城市圈联席会议等),虽然提供了一个城市群全体城市的决策者共同协商和协同治理区域重大共同问题的理想平台,即可直接展开“面对面的”充分交流(即全局信息交互),但受制于高昂的时间和机会成本<sup>[2,3]</sup>,不可能也不应该成为跨地域政府间沟通协商的唯一形式,更多还是需要依靠各城市政府决策者之间日常性、自发性、灵活性的工作交流和沟通协调<sup>[2]</sup>,就利益相关的共同问题与特定范围

② 城市群各城市政府决策者之间的互动主要有两种形式,一种是制度化的协同框架城市群联席会议,如长三角城市经济协调会、武汉城市圈联席会议等,包括由各城市市长组成的市长联席会议和各城市政府职能部门负责人组成的部门级联席会议,联席会议的互动形式提供了一个全体城市群成员共同参与的全局交互平台<sup>[1-3]</sup>。另一种互动形式则是各城市政府决策者之间的日常工作互动,在部分城市的市长之间、职能部门负责人之间展开的交谈沟通、交换意见、互动协商,相比于城市群联席会议全体城市政府参与的全局互动,这种若干个城市政府之间的日常工作交流属于局部交互,且更多具有自发性、非正式性和随机性特征<sup>[2,3]</sup>。

的其他城市展开及时性的、有针对性的沟通协商(即局部信息交互),特别是依托于信息技术及移动设备的发展(网络会议、OA系统、移动终端APP等)通过电子政务和移动政务等新一代政务模式,以更便捷的方式、更低的成本实现跨地域城市政府决策者之间的实时交流与即时沟通<sup>③</sup>[1-3,6]。因此,对城市群多政府合作协同问题的研究,不仅要考虑全体博弈的情形<sup>[17,18,3]</sup>,也要考虑部分博弈的场景,且不仅要考虑全局信息的共享,也要考虑局部信息的交互,特别是全体博弈与部分博弈、全局信息与局部信息之间的更替和交互。在部分博弈互动和局部信息交互的模式下,宏观系统的整体特征通过微观个体之间的局部交互而涌现出来,并往往呈现出突现性、不确定性、多态均衡、非线性结构等复杂性特征<sup>[1-3,18]</sup>。因此,定性研究、传统的数学建模和统计研究往往难以有效地解释城市群政府互动博弈的演化过程及复杂机理<sup>[18,1-3]</sup>,有必要结合复杂性科学理论与建模方法,并应用多智能体建模与仿真技术(ABMS),从一种超脱还原论的、自底向上、微观互动到宏观涌现的视角,模拟并探究城市群政府互动博弈的演化过程和一般规律<sup>[1-3]</sup>。

本文集成非对称进化博弈系统<sup>[3]</sup>和异构性社会网络模型,在微观层面建立了一个考虑个体成本收益差异的非对称进化博弈系统<sup>[3]</sup>(同时考虑全体互动博弈与部分互动博弈的交互),以描述城市群各城市政府决策者的行为互动机制,在宏观层面建立了一个考虑节点之间连接概率差异的异构性社会网络模型(同时考虑全局信息交互和局部信息交互的更替),以描述城市群各城市政府决策者之间的沟通互动范围,并通过多智能体系统(特别是交互意愿变量的引入)实现微观互动(博弈行为)和宏观涌现(网络结构)之间的双向反馈和动态交互,以展开一个社会网络视阈下的城市群多政府博弈的模拟实验研究,本文对以往的研究<sup>[1-3,17-20]</sup>有如下改进。

1) 相关研究<sup>[1,17,19,20]</sup>对主体间行为互动范围的描述主要采用元胞自动机模型,以空间距离界定主体交互范围<sup>[2]</sup>,难以刻画网络时代和移动环

境下的主体间行为互动关系<sup>[2,3]</sup>,虽有一部分研究<sup>[2,3,18]</sup>采用了社会网络模型,但只关注于网络结构的变化(如调整连接概率<sup>[2,18]</sup>)对多主体互动演化及结果的影响(即考虑了微观层面的主体行为“嵌入于”宏观层面的社会网络结构这一维度),却忽视了主体间行为互动反过来又会对网络结构产生影响和反馈(即忽视了宏观层面的社会网络结构又“涌现于”微观层面的主体行为互动这一维度),没有建立起微观层面的主体间互动与宏观层面的网络拓扑演化之间的双向反馈和动态交互;

2) 一些研究<sup>[3,17,18]</sup>采用博弈论特别是进化博弈模型探讨群体行为互动问题,但仅构建对称性的博弈系统<sup>[17,18]</sup>,即设定各主体在博弈中的收益参数和成本参数都是一致的,没有考虑到个体差异(异质化)对收益结果和成本分摊的影响,特别是在城市群多政府互动系统中,基于各城市经济社会发展的不平衡性,或各城市利益偏好与发展规划的不同,相同区域共同问题的治理或解决对不同的城市带来的收益是不对称的、不完全一致的<sup>[3]</sup>,虽有研究<sup>[3]</sup>构建了考虑主体之间异质性的非对称进化博弈系统,但仅考虑全体博弈情形(即假定城市群所有城市的决策者都“无时无刻地”共同参与任何区域问题的治理,并在此过程展开全体博弈),而没有考虑现实环境中全体博弈和部分博弈的结合和交替(对于特定属性的区域问题,在特定的时间和空间环境下,往往只是部分的、有限数量的、有直接利害关系、或共同利益诉求的城市决策者之间展开实时、灵活、有针对性的合作协同与互动博弈);

3) 以往研究<sup>[3,18]</sup>所采用的社会网络模型是完全匀质化的,即对网络中各节点之间建立连接(即群体中各主体之间建立交互)的概率都统一赋值(如根据任务难度一致性地调节所有主体之间连接概率的高低<sup>[18]</sup>),虽有研究<sup>[2]</sup>简单考虑了群体中各主体之间建立连接概率的非对称性(以城市群政府间政策协调为例,认为城市行政级别以及经济规模的高低和异同会对其决策主体之间建立连接的概率产生影响<sup>[2]</sup>),但没有系统地考虑主体间互动在客观条件和主观意愿等各方面的差异,特别是对于一个城市群多政府互动博弈系

③ 这样一种局部信息交互的模式,往往需要借助社会网络模型加以描述。

统,任意两两主体之间建立连接(即产生信息分享和博弈互动等)的概率受政治、经济、技术、意愿等多重因素的影响而有不同的概率分布,例如,一些经济实力相当、行政层级对等、同受一个省级政府管辖、或交互期间历史收益都较理想的两两城市决策者之间建立沟通交互或协同互动的概率要比其他一些城市之间更高,从而系统地考察了城市群多政府博弈系统所嵌入的社会网络模型的异构性(即两两主体之间连接概率的“定制化”差异设计),且通过考虑两两主体建立交互期间的历史(博弈)收益对其未来连接概率的影响,建立了从微观行为互动到宏观结构涌现之间的反馈和交互。

此外,在构建仿真模型和展开模拟实验的基础上,不只对每个实验方案运行一次即展开模拟结果的直观描述,而是基于多次模拟实验结果构成样本数据,以对仿真模型及其模拟实验结果的信度(稳定性)进一步做检验<sup>[2]</sup>,即检验同一模型及相同实验参数下多次的模拟运行结果是否稳定,使得模拟实验结果及其分析的可信性和可靠性获得统计依据<sup>[2]</sup>;并且,基于多次模拟实验结果的样本数据对相关变量的影响展开初步的统计分析<sup>[2]</sup>,以提炼普遍性、客观性的系统演化规律<sup>[2]</sup>。本文不仅以多智能体建模与模拟实验的方法探究了社会网络视阈下的城市群多政府博弈互动的演化机理,为政治学与公共行政领域的问题研究探索了新的分析视角,尝试了新的方法论体系,并对一般性的社会系统仿真研究在模型和方法上有所推进,集成微观层面的非对称进化博弈系统(同时考虑全体博弈和部分博弈的交互)和宏观层面的异构性社会网络模型(同时考虑全局信息交互和局部信息交互的更替)并实现了微观主体间博弈互动与宏观社会网络拓扑演化之间的双向反馈和动态交互。

## 1 模型构建

### 1.1 系统运行机理分析

城市群多政府合作是一种不同于传统垂直型

领导模式的横向府际协同框架,各城市政府决策者不存在直接的行政隶属关系,面对区域内的共同问题和共同事务,平等沟通,协同合作<sup>[1-3]</sup>。作为互不隶属、利益各异的决策主体,各城市政府决策者在治理区域共同问题的过程中不断互动、反复博弈,为谋求自身利益的最大化<sup>④</sup>,既可能选择合作策略(如积极承担区域共同责任、参与区域经济社会问题的治理、遵守区域发展规划和主体功能分区、避免产业同质化、地方保护和市场分隔等),也可能选择背叛策略(如“搭便车”、期望“坐享其成”、享受治理收益但不愿支付成本、无视区域发展规划和共同责任、自行其事一味追求自身的经济增长等)<sup>[3]</sup>。

在构建群体进化博弈模型和展开多智能体系统模拟等方面,蒋国银等人<sup>[17,18]</sup>和罗杭<sup>[3]</sup>等进行了较为成熟的研究,蒋国银等人<sup>[17,18]</sup>构建了包含惩罚参数和协同参数的离散进化博弈模型,然而却没有考虑博弈群体中的个体差异,罗杭<sup>[3]</sup>扩展了一个非对称性的进化博弈系统,将每一个博弈个体不再简单地视为成本、收益对等的同质性主体,但仅仅考虑了全体博弈的情形,没有进一步考虑全体博弈和部分博弈的交互,并将博弈系统置于一个匀质性的网络模型(即各节点之间的连接都以统一的概率进行重连),而不是嵌入于一个异构性的社会网络模型之中。基于罗杭的模型<sup>[3]</sup>,城市群多政府互动并不是一个简单的对称博弈,基于各城市经济社会发展水平的差异,有些区域问题的解决(如要素市场一体化、生态环境共治等)可能给经济实力较强的城市创造更大收益<sup>⑤</sup>,而有些区域问题的解决(如基本公共服务一体化)可能给经济实力较弱的城市带来更大获益,相应的,治理区域问题所对应的成本可能也不是完全对称的<sup>[3]</sup>。而且,当前的城市群政府合作与政策统筹也主要涉及区域经济协调发展、主体功能分区规划、产业链深度融合<sup>[4]</sup>等社会经济议题,因此,各城市的经济发展水平或经济实力规

④ 例如,各城市经济增长指标往往与其市长或相应职能部门负责人自身的利益和晋升机会紧密相关,因此,各城市政府的决策者都会追求所代表的城市利益最大化<sup>[3]</sup>。

⑤ 对于要素市场一体化政策,经济实力强、拥有众多优势企业的城市往往能够得益,因为他们能够享受到城市群市场全面开放带来的经济收益与税收增长,而经济实力弱、缺乏优势企业的城市则可能反对这一政策,奉行地方保护主义<sup>[2]</sup>。

模上的差异无疑<sup>[1-3]</sup>是影响城市群博弈格局与收益分配的一个关键因素<sup>[3]</sup>。因此,考虑城市群多政府博弈问题的特定机理,在蒋国银等人<sup>[17,18]</sup>和罗杭<sup>[3]</sup>所构模型的基础上构建一个非对称进化博弈系统,将城市群各城市主体初步划分为强经济体与弱经济体两类<sup>⑥</sup>,分别设定相应的博弈收益系数及成本分配比例<sup>[3]</sup>。构建两个对称博弈矩阵(强强博弈、弱弱博弈)和一个非对称博弈矩阵(强弱博弈),全面描述异质性主体之间的博弈形势,限于篇幅,仅列出非对称博弈矩阵。如表 1 所示,考虑一个强经济体与一个弱经济体博弈的情景,对非对称收益的设计参考罗杭的模型<sup>[3]</sup>, $b、c$  分别表示治理区域事务或遵守区域规划等的收益和成本,也可笼统称之为承担区域共同责任的收益和成本<sup>[3]</sup>:当博弈双方都采取合作策略时,强经济体收益为 $\beta b$ ,弱经济体收益为 $\gamma b$ ( $b$  为基本收益单位, $\beta、\gamma$  分别为强、弱经济体收益系数)并共同分担成本 $c$ ,其中强经济体分担的成本为 $\delta c$ ( $\delta$  为强经济体分担成本的比例),则弱经济体分担的部分为 $(1-\delta)c$ ;当强经济体采取合作策略,而弱经济体采取背叛策略时,强经济体收益为 $\beta b - c$ ,弱经济体收益为 $\gamma b$ ;当弱经济体采取合作策略,而强经济体采取背叛策略时,强经济体的收益为 $\beta b$ ,弱经济体的收益为 $\gamma b - c$ ;当双方都采取背叛策略时,区域共同问题无法得到有效治理和解决,各自收益均为 $0$ <sup>[3,17,18]</sup>。

表 1 非对称博弈矩阵

Table 1 Asymmetrical game matrix

强主体	弱主体	
	合作	背叛
合作	$\beta b - \delta c, \gamma b - (1 - \delta)c$	$\beta b - c, \gamma b$
背叛	$\beta b, \gamma b - c$	$0, 0$

该博弈可能有两个纯策略纳什均衡:(合作,

合作)和(背叛,背叛),前者明显优于后者,也是上层政府或协调机构<sup>⑦</sup>希望达到的结果,但在实际博弈过程中往往难以实现这一最理想的均衡状态<sup>[17,18]</sup>。如果背叛收益的“诱惑”太大,或部分主体的风险偏好较高,可能倾向于采取“搭便车”策略,期盼其他主体持合作策略采取行动、积极治理,而自己“坐享其成”、不支付成本而享受收益,此时背叛方的收益可能达到最高的 $\beta b$ (或 $\gamma b$ )<sup>[3,17,18]</sup>;但当各方都持冒险态度时,博弈结果可能达到最不理想的均衡状态,各方收益均为 $0$ <sup>[3,17,18]</sup>。为避免个体采取背叛策略,促进城市群合作共赢,上层政府或协调机构可以采取惩罚手段<sup>[17,18]</sup>降低背叛收益,以有效控制部分主体的投机冒险行为<sup>[3,17,18]</sup>;进一步,还可引入与惩罚措施相配套的补偿(激励)机制<sup>[3]</sup>,将惩罚背叛者的收益所得部分转移给合作者,以弥补(合作,背叛)情形中合作者的行动损失,激励其继续保持合作策略<sup>[3]</sup>。加入惩罚措施和补偿措施的非对称博弈矩阵如表 2(参考罗杭的模型<sup>[3]</sup>,但在合作水平对收益产生动态影响<sup>[3]</sup>,以及收益和成本的群体分摊<sup>[18]</sup>等方面,有不同的模型表达,且不直接体现在博弈收益矩阵中,而是在后文的博弈决策规则的数学公式中体现)所示, $d$  为惩罚参数, $\alpha d$  为补偿参数,其中 $\alpha$  为惩罚收益的转移比例, $\alpha \in [0, 1]$ <sup>[3]</sup>。

表 2 加入惩罚和补偿参数的非对称博弈矩阵

Table 2 Asymmetrical game matrix with punishment and compensation parameters

强主体	弱主体	
	合作	背叛
合作	$\beta b - \delta c, \gamma b - (1 - \delta)c$	$\beta b - c + \alpha d, \gamma b - d$
背叛	$\beta b - d, \gamma b - c + \alpha d$	$0, 0$

上述博弈模型难以通过复制动态方法或局部进化稳定策略简单求出均衡解<sup>[3,17,18]</sup>,而有必要

⑥ 以 2016 年国务院批准、国家发改委发布的《长江三角洲城市群发展规划》<sup>[4]</sup>划定的 26 个城市为例,为求简化,用相对全面、系统的 GDP 数据<sup>[21-24]</sup>衡量各城市经济实力(单位:亿元):上海市(23 567.7)、苏州市(13 760.89)、杭州市(9 206.16)、无锡市(8 205.31)、宁波市(7 610.28)、南京市(8 820.75)、南通市(5 652.69)、常州市(4 901.87)、绍兴市(4 265.88)、合肥市(5 180.56)、台州市(3 387.38)、盐城市(3 835.62)、嘉兴市(3 352.60)、扬州市(3 697.91)、金华市(3 208.20)、泰州市(3 370.89)、镇江市(3 252.44)、芜湖市(2 309.55)、湖州市(1 956.00)、马鞍山市(1 144.30)、铜陵市(716.31)、舟山市(1 015.26)、池州市(517.17)、安庆市(1 544.32)、滁州市(1 214.39)、宣城市(917.63)。观察发现,上海市、苏州市、杭州市、无锡市、宁波市、南京市 6 市的 GDP 总量均超过 7 500 亿,较其余 20 市优势明显,因此,初步将这 6 市划分为“强经济体”,而将其余 20 市划分为“弱经济体”。事实上,这 6 个强经济体城市不仅经济总量远超其他 16 市,且社会经济发展水平也在城市群 26 市中处于前列。

⑦ 以长三角城市群为例,上层政府包括国务院、发改委等,协调机构包括长三角城市经济协调会等,通过发表命令、行政协调、宏观政策、制定规划等方式促进城市群协同合作、推进区域一体化进程。

采用基于多智能体的复杂系统建模方法:一方面,城市群博弈主体之间存在个体差异,不仅各城市经济实力差异影响了博弈收益的分配结果<sup>[3]</sup>,而且博弈主体的决策个性<sup>[3,17,18]</sup>⑧也会影响多期博弈中的实时策略选择,即便在相同的形势和环境,不同的决策个性(体现为对个体历史收益和邻居收益状态参考程度的高低)也会导致不同的策略选择结果<sup>[3,17,18]</sup>;另一方面,如前文所述,受制于问题属性类型、利益关联程度、社会网络关系、机会成本限制、信息不完全性等因素,各决策主体在特定的时点往往只能与有限范围内的有限数量主体交流沟通、博弈互动,而无法随时随地的纵览全局信息和把握整体态势,而且各时点的交互范围也是动态变化的,具有一定的随机性或不确定性<sup>[1-3]</sup>.因此,有必要借助基于智能体的复杂系统建模方法动态模拟城市群多政府博弈的演化进程及复杂机理<sup>[3]</sup>.

## 1.2 建立概念模型

在模型构建方面,基于一个概念模型、数学模型和计算机模型的完整建模过程<sup>[1-3,25]</sup>.如图1所示,首先通过因果关系图设计以构建概念模型,在蒋国银等人<sup>[17,18]</sup>和罗杭的模型<sup>[3]</sup>基础上进行推进,将一个城市群多政府决策者之间的非对称进化博弈系统“嵌入”于一个异构性的社会网络模型之中,用网络中节点之间的连接(边)描述决策主体之间动态变化的局部交互范围,即各决策主体在特定时段仅能同直接建立连接的其他主体展开部分博弈互动和局部信息交互,而不可能随时随地实现整体互动协同和全局信息纵览.在宏观网络规则方面,各城市决策者之间的交互范围(可称之为“邻居域”),即该决策主体与其他主体是否在当刻建立连接,受一系列复杂要素的共同影响,结合城市群多政府互动博弈的特定机理,可综合考虑空间距离、隶属省市、行政层级<sup>[2]</sup>、经济规模、经济引力、交互意愿、技术条件等因素,为此,本文所设计的社会网络模型对以往研究<sup>[3,18]</sup>有较大改进,不是简单的设置统一的连接概率(即将各节点之间的连接概率都赋值为统一值),

而是考虑各节点之间的不同属性,赋予两两节点之间不同的连接概率,从而构建一个异构性(或非匀质化)的社会网络系统.

在微观博弈机制方面,城市群多政府博弈互动是一个有限理性群体学习适应、协同进化的多期博弈过程<sup>[3,17,18,26]</sup>.借鉴一种综合考虑个体历史收益、邻居收益状态和决策个性类型的混合学习模式<sup>[3,17,18]</sup>构建进化博弈系统,基于基本理性假设,博弈主体的策略选择主要考虑自身的收益是否满意,是否合理,即比较当期实际的收益和所期望的收益,如果实际的收益大于所期望的收益,则保持现有策略不变,如果实际的收益低于所期望的收益,则在下一期有可能调整策略,以求改变局面,改善收益<sup>[3,17,18]</sup>.实际的收益基于个体策略选择、整体博弈格局(其他主体的策略选择)和博弈收益矩阵参数计算得出;所期望的收益受个体历史收益和邻居收益状态的共同影响,并受个体决策个性的调节,如果该主体历来收益较高,自然对当期收益的期望也较高,如果该主体邻域(即交互范围)内其他主体的收益都较高,自然也会受邻居影响而对自身的收益产生较高的期望<sup>[3,17,18]</sup>.

然而,宏观网络结构与微观博弈互动之间的关系并不是单向的,即不仅宏观层面社会网络的拓扑结构决定了微观层面博弈主体的交互范围<sup>[2,3,18]</sup>,而且微观层面主体间行为互动也可能“涌现出”宏观层面网络结构的新的特征,主体间的博弈形势和收益结果也应反过来影响宏观社会网络结构的拓扑演化,而这一维度则是以往(基于社会网络模型构建群体博弈系统的)有关研究<sup>[2,3,18]</sup>较少考虑的.本文通过交互意愿变量的引入实现了微观主体互动和宏观网络演化之间的双向反馈和动态交互,两两主体之间的交互意愿主要取决于两两主体产生交互(即协同治理、互动博弈和信息共享)期间的历史收益,如果建立交互期间的各自历史平均收益高于全时段的各自历史平均收益,则两两主体之间在下一期协同合作、交互信息的意向往往更高.

⑧ 可将决策个性类型分为3类<sup>[3,17,18]</sup>:1)易变型:策略选择易受群体中其他决策主体的影响,对同质性主体参考度大些,而对异质性主体参考度小些,并较少考虑自身历史信息;2)中立型:策略选择不盲目模仿其他博弈主体,综合考虑自身历史信息和邻居收益状态;3)固执型:策略选择不易受其他主体影响,比较坚持自己的策略.

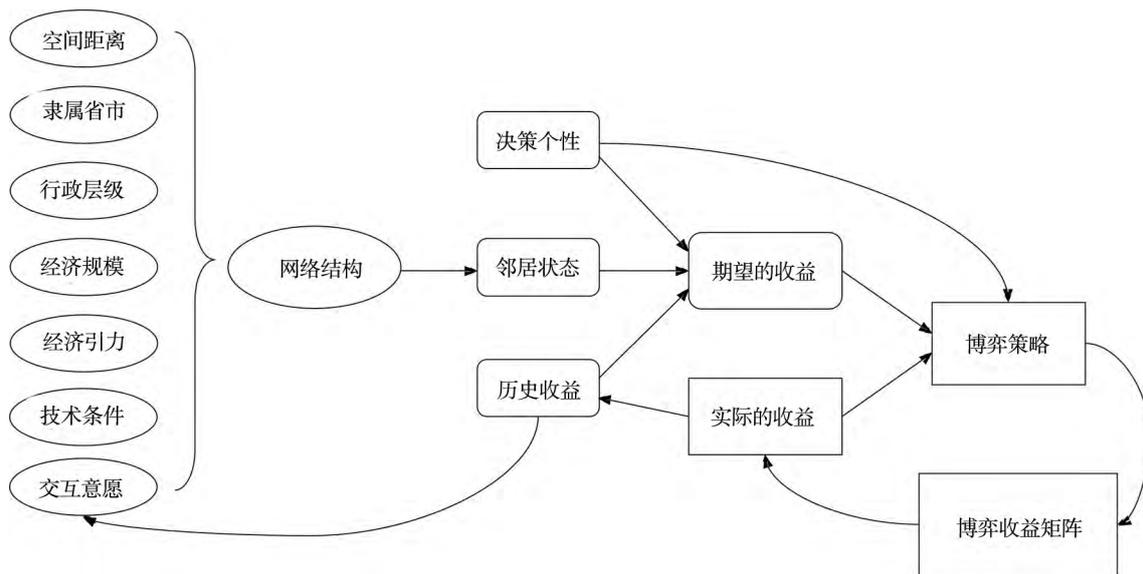


图 1 社会网络视阈下城市群多政府博弈的因果关系图

Fig. 1 Casual diagram of multi-cities' government game in the context of social networks

### 1.3 建立数学模型

如前文所述,城市群各城市政府决策者之间的互动模式主要有两种,一种是全局信息交互和全体协同治理,如城市群全体城市政府决策者共同参与的城市群联席会议(如长三角城市经济协调会等),各城市政府决策者面对面地充分交流意见,征求共识<sup>[1-3]</sup>,以及就区域整体性重大社会经济议题展开全体协商、协同治理,并在此过程中存在着涉及城市群全体城市参与的全体互动博弈;另一种则是局部信息交互和部分参与治理,即城市群部分城市政府决策者之间,就利益直接关联的特定问题,展开灵活地、实时地、日常性地工作交流与沟通协作<sup>[2]</sup>,且交互范围随问题对象和时空环境而动态变化,即对于一个城市政府决策者,可就不同的问题,在不同的时点,选择不同范围的其他城市展开信息交互与协同治理,并在此过程中存在着仅涉及城市群部分城市参与的部分互动博弈.关于如何界定局部交互的范围,有多种模型可供选择,传统的方式即从地理或物理空间的角度界定交互范围,决策个体仅能同周围的、相近的主体交流互动<sup>[2,3]</sup>,这一沟通模式可通过元胞自动机模型(如 Moore 型或 Von Neumann 型邻域)<sup>[1,17,19,20]</sup>等表达.然而,伴随着计算机网络和

移动通信技术的迅猛发展,特别是电子政务和移动政务模式的普及,借助网络会议、办公自动化系统、个人移动终端(APP)等方式,跨地域的城市政府决策者之间能够更加方便快捷、随时随地的交流信息、协同合作,最大限度的突破了时空和环境的限制<sup>[1-3,6]</sup>.元胞自动机等地理空间模型已很难描述信息时代和移动环境下的政府互动模式,真正决定决策者之间交互状态的不是空间距离的远近,而是个体自身的沟通意愿和需求<sup>[2,3]</sup>.因此,电子政务和移动政务环境下的政府群体“邻域”范围不再是实体空间范围的概念,而更多是社会网络关系的视阈,有必要应用社会网络模型作为群体博弈系统所“嵌入”的框架加以分析<sup>[2,3]</sup>.

本文以长三角城市群为例,基于社会网络模型(即节点之间的连接)描绘城市群各城市政府决策者之间的局部交互关系(相应的,一个特殊的网络拓扑:完全网络,即两两节点之间全部建立连接,即可描述城市群全体城市决策者共同参与的全局交互模式),一个网络拓扑结构的示例如图 2 所示,各城市主体基于地理空间位置布局<sup>⑨</sup>,主体之间的连线表示在当期建立直接的信息沟通和互动博弈.

⑨ 基于《长江三角洲城市群发展规划》<sup>[4]</sup>公布的长三角城市群范围图描绘.

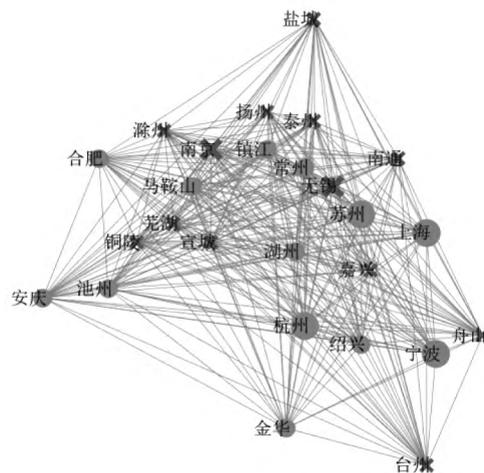


图2 网络拓扑结构示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of network topological structure

注: 网络拓扑是随机变化的, 图中仅展示完全网络的状态示例, 即两两主体之间均建立连接。 “●”代表持合作策略, “x”代表持背叛策略。

两两城市之间的连接概率受多重因素的复合影响, 可以归纳为客观要素和主观要素两方面, 如表3所示, 客观要素包括地理、行政、经济三重因素的影响, 具体涵盖5个方面: ①空间距离: 空间地理位置相对接近的城市主体之间建立交互连接的概率更高, 空间上相对接近的城市之间往往文化特征上更为趋同, 经济联系上更为密切, 交通连接上也更为便捷等; ②隶属省市: 隶属相同省级政府的城市主体之间建立连接的概率更高, 长三角城市群跨上海市(1市)、江苏省(9市)、浙江省(8市)、安徽省(8市)4个省级行政单位, 隶属同一个省级政府的城市之间往往有更多正式性的会晤或互动机会, 在同一个省级政府的辖制与统筹下, 协调合作意愿也相对更高; ③行政层级<sup>[2]</sup>: 相同行政层级的城市主体之间建立连接的概率更高, 长三角城市群有省级直辖市1个(上海)、副省级市3个(杭州、南京、宁波)、地级市22个, 基于(我国)行政系统的规律和惯例, 对等行政级别的城市政府决策者之间交互沟通、直接协作的可能性往往更大<sup>⑩</sup>; ④经济规模<sup>[2]</sup>: 相似经济规模的城市主体之间建立连接的概率也较高, 因为经济

规模相近的城市之间不仅经济政策的参考更具借鉴意义, 且在一些有关经济或市场(一体化)协议的签订中更具对等的份量; ⑤经济引力: 借鉴经济学研究中常用的引力概念, 同物理学中引力的概念类似, 城市群各城市之间也存在经济引力现象, 两两城市之间的经济引力系数与两城市的经济总量和人口规模的乘积成正比, 与两城市之间的地理或交通距离的平方成反比, 两城市主体之间的经济引力系数越大, 则设定建立连接的概率越大。另一方面, 主观因素包括交互意愿和技术条件两个方面, 前者受历史收益的影响, 后者又可细分为技术的软硬件条件: ①历史收益: 如果两个决策主体之间在建立交互连接期间各自的历史平均收益要高于各自的全时段历史平均收益, 则更倾向于在下一期继续建立信息交互和互动协作; ②技术软硬件条件: 主要指信息系统与终端设备的硬件水平, 以及政府决策者采用信息技术以提升交流水平和协作程度的主观意愿和素质能力, 电子政务和移动政务的应用和普及, 信息系统和移动设备的采纳和推广, 无疑能够对跨地域的政府决策者之间的信息交互和协作水平产生影响<sup>[1-3, 6]</sup>。

⑩ 例如, 城市之间的工作会议除城市群全体城市共同参与的联席会议之外, 往往更容易在同属一个级别的城市之间展开, 如作为副省级市的杭州、南京、宁波等, 而往往较少有作为省级直辖市的上海与地级市的台州、舟山等之间的直接“对话”, 对于省级直辖市的上海, 一般也是与同为省级的江苏、浙江之间沟通“对话”。

表 3 各项影响因素在节点连接概率中的权重分配

Table 3 Weight allocation of influence factors in linking probabilities between nodes

影响因素	1 客观因素					2 主观因素	
	1.1 地理因素	1.2 行政因素		1.3 经济因素		2.1 交互意愿	2.2 技术条件
	1.1.1 空间距离	1.2.1 隶属省市	1.2.2 行政层级	1.3.1 经济规模	1.3.2 经济引力	2.1.1 历史收益	2.2.1 软硬条件
比重上限	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
变化范围	0~0.1	0, 0.1	0, 0.05, 0.1	0, 0.02, 0.05, 0.08, 0.1	0~0.1	0, 0.1, 0.2	0.05, 0.15, 0.25

进一步,设定各项影响因素在决定总连接概率(总值为 1)中的比重,初步将客观因素体系和主观因素体系的权重分配各设为 0.5。客观因素方面:①地理因素(空间距离)的权重为 0.1,长三角城市群 26 市中距离最小的两个城市主体之间此部分的连接概率赋值为 0.1,其余两两城市主体之间此部分的连接概率按其距离与最小距离之间的比例关系求反比;②行政因素(隶属省市部分)的权重为 0.1,长三角城市群 26 市分属四个省市,隶属相同省市的城市主体之间此部分的连接概率赋值为 0.1,相异省市则赋值为 0;③行政因素(行政层级部分)的权重为 0.1,长三角城市群共涉及省级直辖市、副省级市、地级市三种行政级别,相同级别的城市主体之间此部分的连接概率赋值为 0.1,跨一级赋值为 0.05,跨两级赋值为 0;④经济因素(经济规模部分)的权重为 0.1,将长三角城市群 26 市的经济规模大体细分为 5 档<sup>①</sup>,相同层级的城市主体之间此部分的连接概率赋值为 0.1,跨一级赋值为 0.08,跨两级赋值为 0.05,跨三级赋值为 0.02,跨四级赋值为 0。主观因素方面:①交互意愿(受历史收益影响)的权重设置为

0.2,对于两个城市决策主体,考察双方沟通协商、博弈互动(即建立交互连接)期间的历史平均收益与全时段历史平均收益的比较,如果双方在建立交互期间的历史平均收益都优于其各自的全时段历史平均收益,则双方之间此部分的连接概率赋值为 0.2,如果其中只有一方在建立交互期间的历史平均收益优于其全时段历史平均收益,则此部分的连接概率赋值为 0.1,而如果没有任何一方在建立交互期间的历史平均收益优于各自的全时段历史平均收益,则此部分连接概率赋值为 0;②技术条件(技术硬件/设备和技术软件/理念)的权重设置为 0.3,主要依据政府信息化建设的硬件(构建信息系统和装备信息设备的质量和功能)和软件(政府决策者对信息系统的采纳意愿和操作能力等)两方面的水平,在模拟实验环节,将统一调节该部分的连接概率并观察运行结果,可大体区分高、中、低三档水平,此部分的连接概率分别赋值为 0.25、0.15、0.05 三个变化范围。各项影响因素决定的连接概率值份额相加可得相应两个城市主体之间在特定时点下建立信息交互和博弈互动的(总)概率。<sup>②</sup>

① 基于 2014 年 GDP 数据<sup>[21-24]</sup> 将长三角城市群 26 市的经济规模大体细分为 5 档:20 000 亿元以上为第一档(上海),10 000 亿元以上为第二档(苏州),7 000 亿元以上为第三档(杭州、无锡、宁波、南京),3 000 亿元以上为第四档(南通、常州、绍兴、合肥、台州、盐城、嘉兴、扬州、金华、镇江、泰州),其余为第五档(湖州、马鞍山、舟山、芜湖、铜陵、池州、安庆、滁州、宣城)。

② 需要指出的是,本文各项要素所决定的连接概率部分的比重参数设置主要根据一般性常识,以及依据简化平均处理的原则,仅提供了一种示例,其中客观因素和主观因素的权重各占一半(0.5、0.5)。客观要素的指标体系有五项(空间距离、隶属省市、行政层级、经济规模、经济引力),因此各自权重均赋值为 0.1。主观要素的指标体系有两项(交互意愿和技术条件),其中技术条件主要是由电子政务和移动政务的普及程度、信息技术和平台的硬件条件,以及政府人员信息化技能和接受度等软件条件决定,本文的城市群跨地域政府博弈互动也主要是置于电子政务、移动政务(突破空间环境限制)的普及这样一个网络时代和移动环境下探讨的,着重考察(无限网络与移动信息)的技术软硬件条件对决策主体之间交互范围和沟通程度的影响<sup>[1-3,6]</sup>,所以这一项权重赋值略高一点,为 0.3,另一项交互意愿则为 0.2。本文各项影响因素的比重参数设定不仅根据一些常识性的判断,也结合了研究的侧重点,未来的研究可以采用一些调查问卷、统计分析等方式来实证的测度一些参数,需要大量调研数据,而且,对于不同的研究主题和不同的研究侧重,可以对重点考察的影响要素着重分析,调整权重等。

1.3.1 定义变量

微观博弈机制部分

1)  $Strategy_{(i)}(t)$  ,简写为  $S_{(i)}(t)$  ,表示第  $i$  个城市主体在  $t$  时刻的策略选择  $S_{(i)}(t) = \{1, 2\}$  , 1 为合作策略 2 为背叛策略;

2)  $Economy(i)$  ,简写为  $E(i)$  ,表示第  $i$  个城市主体的经济实力强弱状态<sup>[1-3]</sup> ,以决定非对称博弈中的收益与成本分配<sup>[3]</sup> , $E(i) = \{1, 2\}$  , 1 为强经济体 2 为弱经济体;

3)  $Payoff-factual_{(i)}(t)$  ,简写为  $Pf_{(i)}(t)$  ,表示第  $i$  个主体在第  $t$  时刻的实际的收益<sup>[3, 17, 18]</sup>;

4)  $Payoff-expected_{(i)}(t)$  ,简写为  $Pe_{(i)}(t)$  ,表示第  $i$  个主体在第  $t$  时刻的所期望的收益<sup>[3, 17, 18]</sup>;

5)  $Personality(i)$  ,简写为  $Pr(i)$  ,表示第  $i$  个主体的决策个性类型  $Pr(i) = \{1, 2, 3\}$  ,其中 1 表示易变型 2 表示中立型 3 表示固执型<sup>[3, 17, 18]</sup>;

6)  $\rho^{Pr(i)}$  表示第  $i$  个主体做决策时受邻域(交互范围内其他主体)影响的权重分布,受其决策个性类型  $Pr(i)$  的调节,相应的  $1 - \rho^{Pr(i)}$  则表示该主体受自身历史收益影响的权重分布<sup>[17]</sup> .

宏观网络规则部分

如前文所述,网络节点之间的连接概率(即城市主体之间建立交互的概率)受多重因素的影响,由多个部分组成.

7)  $Distance(ij)$  ,简写为  $D(ij)$  ,表示  $i$  城市和  $j$  城市之间的空间距离,设由空间距离决定的  $i$  城市和  $j$  城市政府决策者之间的网络连接概率份额为  $PoDij$  ,两个城市之间的空间距离越小,则建立交互连接的概率越大;

8)  $Administration(i)$  ,简写为  $A(i)$  ,表示第  $i$  个城市的行政层级<sup>[1, 2]</sup> , $A(i) = \{1, 2, 3\}$  , 1 表示省级直辖市 2 表示副省级市 3 表示地级市,设由行政层级决定的  $i$  城市和  $j$  城市决策者之间的连接概率份额为  $PoAij$  ,可用个体概率匹配度<sup>[3, 17, 18]</sup> 描述,两个城市的行政级别越接近,则建立交互连接的概率越大;

9)  $Province(i)$  ,简写为  $P(i)$  ,表示第  $i$  个城市

的隶属省市  $P(i) = \{1, 2, 3, 4\}$  , 1 表示上海市 2 表示江苏省 3 表示浙江省 4 表示安徽省,设由隶属省市决定的  $i$  城市和  $j$  城市决策者之间的连接概率份额为  $PoPij$  ,可用个体概率匹配度<sup>[3, 17, 18]</sup> 描述,两个城市隶属同一个省,则建立交互连接的概率较大;

10)  $Scale_{GDP}(i)$  ,简写为  $S(i)$  ,表示第  $i$  个城市的经济规模,基于 GDP 数据大体划分为 5 档<sup>⑬</sup>  $S(i) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  ,设由经济规模决定的  $i$  城市和  $j$  城市决策者之间的连接概率份额为  $PoSij$  ,亦可用个体概率匹配度<sup>[3, 17, 18]</sup> 描述,两个城市的经济实力越接近,则建立交互连接的概率较大;

11)  $Gravity_{Economy}(ij)$  ,简写为  $G(ij)$  ,表示  $i$  城市与  $j$  城市之间的经济引力,设各城市经济总量为  $GDP$  ,人口数量为  $PEO$  ,则  $G(ij) = \frac{\sqrt{GDP_{(i)} \times PEO_{(i)}} \times \sqrt{GDP_{(j)} \times PEO_{(j)}}}{D(ij)^2}$  , 设由

经济引力决定的  $i$  城市和  $j$  城市决策者之间的连接概率份额为  $PoGij$  ,两个城市之间的经济引力系数越大,则建立交互连接的概率越大;

12)  $Intention_{Link}(ij)(t)$  ,简写为  $I(ij)(t)$  ,表示  $i$  城市与  $j$  城市决策者之间在  $t$  时刻的(主观性)交互意愿,设由交互意愿决定的连接概率份额为  $PoIij(t)$  ,与两个城市之间截至  $t$  时刻建立交互连接期间的各自历史平均收益与全时段各自历史平均收益的差值相关,都为正,则再建立交互连接的概率最大,都为负,则再建立交互连接的概率最小;

13)  $Qualification_{Link}$  ,简写为  $Q_L$  ,表示城市群各城市决策者之间展开实时信息交互和博弈互动的技术软硬件条件,  $Q_L = \{L, M, H\}$  ,  $L$  (Low) 表示建立交互的(支撑)条件较差,  $M$  (Middle) 表示建立交互的(支撑)条件一般,  $H$  (High) 表示建立交互的(支撑)条件较好,设由技术条件决定的任意两两城市决策者之间的连接概率份额为  $PoQ$  .在本

⑬ 同博弈收益矩阵中的经济实力强弱划分(两类)相比,网络构建规则中的经济规模划分更为细致(5 档),前文有详细的介绍.

文中将由技术条件决定的连接概率份额设定为统一值<sup>[3,18]</sup>,以作为一组实验方案,通过设定不同的技术条件,以比较局部交互模式下不同的连接概率(即体现为交互水平)对群体博弈形势和收益结果所产生的影响。

14) *PROBABILITY<sub>ij</sub>*,简称为 *PB<sub>ij</sub>*,表示 *i* 城市和 *j* 城市决策者之间建立交互连接的总概率。*PB* 则表示为任意两两城市决策者之间建立交互连接的概率都设置为一个统一值。

1.3.2 设计规则

规则1 网络连接规则 城市群中 *i* 城市决策者和 *j* 城市决策者之间是否建立连接交互的概率由如下一系列规则决定

$$PoDij = \frac{D_{min}}{D(ij)} \times 0.1 \quad (1)$$

$$PoIij(t) = \begin{cases} 0.2, \forall HAP_{ij(i)}(t) \geq HAP_{(i)}(t) \cap HAP_{ij(j)}(t) \geq HAP_{(j)}(t) \\ 0.1, \forall HAP_{ij(i)}(t) \geq HAP_{(i)}(t) \cup HAP_{ij(j)}(t) \geq HAP_{(j)}(t) \\ 0, \forall HAP_{ij(i)}(t) < HAP_{(i)}(t) \cap HAP_{ij(j)}(t) < HAP_{(j)}(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中  $HAP_{(i)}(t)$  为第 *i* 个城市主体至 *t* 时刻全时段的历史平均收益 (historical-average-payoff),  $HAP_{ij(i)}(t)$  为第 *i* 个城市主体至 *t* 时刻在与第 *j* 个主体建立交互连接期间的历史平均收益。

$$PoQ = \begin{cases} 0.05, Q_L = L \\ 0.15, Q_L = M \\ 0.25, Q_L = H \end{cases} \quad (7)$$

在多重因素决定各自影响的概率份额的基础上,通过加总确定 *i* 城市决策者和 *j* 城市决策者在 *t* 时刻二者之间建立交互连接的总概率。

$$PBij(t) = PoDij + PoPij + PoAij + PoSij + PoGij + PoIij(t) + PoQ \quad (8)$$

多重因素共同构成的总连接概率越大,则两个城市政府决策者之间建立信息交互和博弈互动的可能性就越大。如果处于城市群全体城市政府决策者共同参与的全局信息交互和全体互动博弈模式下,则等同于直接令任意两两城市决策者之间建立连接的概率都为 1(即  $PB = 1$ ),即处于一个完全网络。

规则2 进化学习规则 参考并改进一个综合

其中  $D_{min}$  为最小的两两城市之间的空间距离。

$$PoAij = \begin{cases} 0.1, |A(i) - A(j)| = 0 \\ 0.05, |A(i) - A(j)| = 1 \\ 0, |A(i) - A(j)| = 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$PoPij = \begin{cases} 0.1, P(i) = P(j) \\ 0, P(i) \neq P(j) \end{cases} \quad (3)$$

$$PoSij = \begin{cases} 0.1, |S(i) - S(j)| = 0 \\ 0.08, |S(i) - S(j)| = 1 \\ 0.05, |S(i) - S(j)| = 2 \\ 0.02, |S(i) - S(j)| = 3 \\ 0, |S(i) - S(j)| = 4 \end{cases} \quad (4)$$

$$PoGij = \frac{G(ij)}{G_{max}} \times 0.1 \quad (5)$$

其中  $G_{max}$  为最大的两两城市之间的经济引力系数<sup>⑭</sup>。

考虑决策个性、历史信息及邻居信息的进化学习规则<sup>[3,17,18]</sup>,决策主体所期望的收益 (Payoff-expected) 受决策个性类型、自身收益历史、邻居收益状态等因素共同影响,设各类决策个性主体受周围邻居收益状态影响的概率分布为  $\rho^{Pr}$ ,则受个体自身历史收益影响的概率为  $1 - \rho^{Pr}$ <sup>[3,17]</sup>,令  $\rho^{Pr=1} \sim Random [0.6, 0.8]$ ,  $\rho^{Pr=2} \sim Random [0.4, 0.6]$ ,  $\rho^{Pr=3} \sim Random [0.2, 0.4]$ ,即伴随着决策个性由易变型 ( $Pr = 1$ ) 到中立型 ( $Pr = 2$ ) 再到固执型 ( $Pr = 3$ ) 的转变,主体受周围邻居影响的权重越来越小,而受个体自身影响的权重越来越大<sup>[3,17]</sup>: ①一方面,期望的收益会受邻居群体收益的影响,但对每一个邻居个体的“参考”程度是不同的,一般来说,对同质性主体参考程度较大,对异质性主体参考程度较小<sup>[3,17,18]</sup>,本文综合考察各城市主体在行政级别和经济规模<sup>[3]</sup>等方面的异同,用个体概率匹配度<sup>[3,17,18]</sup>描述不同行政级别的主体之间的“参照”程度,设为  $Map(A(i), A(j)) \in \{0.2, 0.5, 1\}$ ,  $A(i), A(j) \in \{1, 2, 3\}$  (1

⑭ 需要指出的是,上海、江苏和安徽各市的人口数据为常住人口<sup>[21,22,24]</sup>,而浙江各市的人口数据为户籍人口,因为浙江统计年鉴仅记录了各市的户籍人口数据<sup>[23]</sup>。

表示直辖市, 2 表示副省级市, 3 表示地级市), 令  $Map(1, 1) = 1, Map(2, 2) = 1, Map(3, 3) = 1, Map(1, 2) = 0.5, Map(2, 3) = 0.5, Map(1, 3) = 0.2$ , 即被参照的城市主体与参照的城市主体之间的行政级别越接近, 则在确定期望的收益的过程中被“参照”的程度越大, 反之越小; 并用个体概率匹配度<sup>[3, 17, 18]</sup>描述不同经济规模的主体之间的“参照”程度<sup>[3]</sup>, 设  $Match(E(i), E(j)) \in \{0.5, 1\}$ ,  $E(i), E(j) \in \{1, 2\}$  (如前文所述, 初步区分强弱两档经济实力), 令  $Match(1, 1) = 1, Match(2, 2) = 1, Match(1, 2) = 0.5$ ; ②另一方面, 每个决策主体在策略选择过程中也会参考自身的历史收益信息, 设历史平均收益为  $HAP$ <sup>[3, 17, 18]</sup>. 综合考虑邻居收益状态和自身历史收益两方面的因素, 以及受决策个性类型的调节, 计算第  $i$  主体在  $t$  时刻所期望的收益, 设其邻域(即交互范围)中行政级别为  $x$ (取 1, 2, 3), 经济实力为  $y$ (取 1, 2)的主体总数为  $n_{xy(i)}(t)$ , 该类群体( $x$  和  $y$  的取值都相同)的所有主体的收益之和为  $TP_{xy(i)}(t)$  (Total - Pay-off), 则有<sup>[3, 17]</sup>

$$Pe_{(i)}(t) = (1 - \rho^{Pr(i)}) \times HAP_{(i)}(t) + \rho^{Pr(i)} \times \frac{\sum_{x=1}^3 \sum_{y=1}^2 Map(A(i), x) \times Match(E(i), y) \times TP_{xy(i)}(t)}{\sum_{x=1}^3 \sum_{y=1}^2 Map(A(i), x) \times Match(E(i), y) \times n_{xy(i)}(t)} \quad (9)$$

如果是全局信息交互模式, 即相当于建立了一个完全网络, 则对任意决策主体来说, 都有统一的  $n_{xy}$  和  $TP_{xy}$  值<sup>⑤</sup>.

**规则 3 博弈决策规则**

依据自身策略选择、群体博弈形势和收益矩阵参数, 可计算各主体在特定时刻实际的收益(Payoff - factual), 对于第  $i$  个决策主体, 在第  $t$  时刻, 设其交互范围内<sup>⑥</sup>持合作策略的人数为  $p_{(i)}(t)$ , 其中强经济体数为  $p_{1(i)}(t)$ , 弱经济体数为  $p_{2(i)}(t)$ ; 持背叛策略的人数为  $q_{(i)}(t)$ , 其中强经济体数为  $q_{1(i)}(t)$ , 弱经济体数为  $q_{2(i)}(t)$ , 基于决策者自身不同的博弈策略选择和经济强弱类型, 会对应于不同的收益函数, 因此分别考虑强合作者(PfSC)、弱合作者(PfWC)、强背叛者(PfSB)、弱背叛者(PfWB)四种收益情况<sup>⑦</sup>, 则有(参考文献[17]的模型并改进拓展)

$$Pf_{(i)}(t) = \begin{cases} PfSC_{(i)}(t) = \frac{P_{1(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\beta b - c/2) + \frac{P_{2(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\beta b - \delta c) + \frac{q_{1(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\beta b - c + \alpha d) + \frac{q_{2(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\beta b - c + \alpha d), \\ \forall S_{(i)}(t) = 1 \cap E(i) = 1 \\ PfWC_{(i)}(t) = \frac{P_{1(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\gamma b - (1 - \delta)c) + \frac{P_{2(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\gamma b - c/2) + \frac{q_{1(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\gamma b - c + \alpha d) + \frac{q_{2(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\gamma b - c + \alpha d), \\ \forall S_{(i)}(t) = 1 \cap E(i) = 2 \\ PfSB_{(i)}(t) = \frac{P_{1(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\beta b - d) + \frac{P_{2(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\beta b - d), \\ \forall S_{(i)}(t) = 2 \cap E(i) = 1 \\ PfWB_{(i)}(t) = \frac{P_{1(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\gamma b - d) + \frac{P_{2(i)}(t)}{p_{(i)}(t) + q_{(i)}(t)}(\gamma b - d), \\ \forall S_{(i)}(t) = 2 \cap E(i) = 2 \end{cases} \quad (10)$$

⑤ 全局信息交互模式下相应类型的主体数量和收益总数的计算以群体全体为范围, 即包括决策主体自己。  
 ⑥ 包括决策主体自己。  
 ⑦ 用 W(weak) 标记弱经济体, 用 S(strong) 标记强经济体, 用 B(betray) 标记背叛策略, 用 C(cooperation) 标记合作策略。

如果是全体博弈互动模式,即相当于建立了一个完全网络,则对任意决策主体来说,都是在群体整体中统计合作与背叛人数等相关变量数值,即在各个时刻对每一个决策主体都有统一的人数统计值,即为  $P_{(i)}, Q_{(i)}, P_{1(i)}, P_{2(i)}, q_{1(i)}$  和  $q_{2(i)}$ <sup>⑮</sup>.

比较第  $i$  个主体在  $t$  时刻所期望的收益与实际的收益,做出  $t + 1$  时刻的策略选择,当实际的

$$S(i)(t+1) = \begin{cases} S_{(i)}(t), \forall Pf(i)(t) \geq Pe_{(i)}(t) \\ S_{(i)}(t), \forall Pf_{(i)}(t) < Pe_{(i)}(t) \cap \rho^{Pr(i)} \leq \text{Random}(0,1) \\ \text{not}S_{(i)}(t), \forall Pf_{(i)}(t) < Pe_{(i)}(t) \cap \rho^{Pr(i)} > \text{Random}(0,1) \end{cases} \quad (11)$$

此外,加入一定的随机扰动因素(设定概率为 0.1),因为现实中的决策过程绝非纯粹或绝对理性的,受到各种因素的影响,各决策主体都有一定概率出现非理性或反理性决策现象(即做出按上述规则相反的策略选择<sup>⑯</sup>),以更好地模拟复杂现实系统中博弈行为的演化.

#### 1.4 建立计算机模型

关于多智能体模拟系统的开发,有 Netlogo、Swarm、Repast<sup>[27]</sup> 等多种平台可供选择,其中 Netlogo 具有较好的可扩展性和友好的可视界面,本文选取 Netlogo 作为模拟系统的实现工具.

## 2 模拟实验

在构建仿真系统的基础上,展开模拟实验,并结合多次模拟实验构成的样本数据展开初步的统计研究<sup>[2]</sup>,探索社会网络视阈下城市群多政府博弈的演化机理和一般规律,并对每套模拟实验结果做稳定性检验,为仿真模型、实验数据与分析结果的可靠性提供统计依据<sup>[2]</sup>. 本文基于多智能体建模与仿真方法,并集成微观层面的博弈行为互动机制和宏观层面的网络拓扑演化规则,因此有

收益大于或等于所期望的收益(即感到“满意”)时维持现有策略不变,当所期望的收益小于实际的收益时则改变现有策略,意图改变现状,改善收益<sup>[3,17]</sup>,而改变的概率还会受决策个性的影响,易变型的决策主体更容易在收益不理想时做出改变,而固执型的决策主体更倾向于“以不变应万变”不会轻易做出改变<sup>[3]</sup>,则有

必要考察博弈矩阵中的基本参数设置、网络拓扑中的主要结构特征、以及智能主体中的重要属性变量,对群体博弈形势和受益结果的动态影响.<sup>⑰</sup>

### 2.1 博弈参数对群体博弈形势和收益结果的影响

#### 2.1.1 收益 $b$

考察博弈矩阵中基本收益参数  $b$  的影响<sup>[18]</sup>,对于区域共同问题或事务,是否治理的收益回报越大,越能够促成城市群各城市的协同意愿与合作共赢?设计 3 组实验方案,博弈矩阵中的成本参数  $c$  和惩罚参数  $d$  保持不变,分别为 80、10,调整收益参数  $b$  分别为 50、100、150,考察 100 期模拟中群体博弈形势的演化,且每套实验方案模拟运行 10 次取平均值.<sup>⑱</sup>

如图 3 所示,伴随着收益  $b$  的提升,博弈形势与合作水平明显改善,方案 1 ( $b = 50$ ) 一直处于背叛方占优的状态,方案 2 ( $b = 100$ ) 呈现背叛方与合作方“势均力敌、反复争夺”的局面,方案 3 ( $b = 150$ ) 则变为合作方占优的状态.如表 4 所示,伴随着收益  $b$  的提升,合作人数、合作收益及整体收益的均值都大幅上升,但值得注意的是,背叛收益均值也有显著的上升(这是因为合作人数及比例的

⑮ 从博弈收益公式可以看出,收益和成本的分摊问题通过除以群体主体总数加以考虑,且合作水平(群体中持合作策略的主体数量)对博弈收益的影响也得以体现,特别是对于持背叛策略的博弈主体,合作水平的降低对收益的损害明显.

⑯ 体现为“满意”时改变策略,“不满意”时却可能维持策略等.

⑰ 本研究的初始策略、决策个性等变量通过实验条件控制下的随机赋值获得,在具体案例的深入应用中,可以通过调研收集实地数据(例如通过问卷调查、访谈获取决策者的初始策略状态,以及测量决策者的价值观念体系,区分其决策个性类型等)输入模拟仿真平台获取更有针对性和指导意义的政策参考<sup>[1,2]</sup>.

⑱ 其他变量的赋值为:强经济体收益系数为  $\beta = 1.5$ ,弱经济体收益系数  $\gamma = 1$ ,强经济体分摊的成本比例  $\sigma = 0.6$ ,补偿系数  $a = 0.5$ ,以 20 个模拟时间单位为一个周期,全局交互模式的比例设置为 10/20,则局部交互模式的比例亦为 10/20,且在局部交互模式下,技术条件取  $M(\text{middle})$  中档,即此部分决定的连接概率份额为 0.15.如无明确说明,之后的数次模拟实验均如此赋值.

上升使得背叛者能够享受更多“搭便车福利”<sup>②</sup>。值得注意的是,在方案3( $b = 150$ )中虽然背叛收益相比其他方案最高,但是背叛人数和比例却最低,这是因为较高的治理收益(参数 $b$ )保证了合作方的合理收益,合作收益也能够维持在较高的水平,避免了合作收益与背叛收益之间的较大差距。在方案3( $b = 150$ )中,尽管背叛方人数和比例一直维持在一定的水平,但合作方一直保持优势地位,维持了较高的合作水平和收益水平,这也与现实规律相符合,“搭便车”行为不可能完全克服,而且越是高合作水平和高收益状态下背叛行为就越有动机和空间,但应当保证合作方的合理收益,激励合作者保持合作策略,使群体中的大多数处于“建设性”的状态,较好的完成协同治理的任务并实现较高的整体收益水平。此外,比较合作

收益方差和背叛收益方差,除方案1( $b = 50$ )即背叛占优的情况以外,背叛收益方差都远大于合作收益方差(几乎是10倍以上),这是因为合作者的收益结构比较稳定<sup>③</sup>,而背叛者的收益结构显著地依赖于合作人数的比例<sup>④</sup>,而当背叛人数较少时,高合作水平使得现有的少数背叛者收益很高,会刺激更多的其他主体放弃合作策略转向背叛策略,但伴随着合作水平的下降,背叛收益难以维持在较高的水平,背叛人数又会下降,随后,背叛收益又可能伴随着合作水平的上升而上升,刺激新一轮的背叛产生,因此,在长期互动博弈中,背叛人数及比例极易陷入反复循环和大幅波动之中,背叛收益的方差也非常大,享有高收益的同时也承受更大的风险和不确定性,这也与现实系统比较相符。

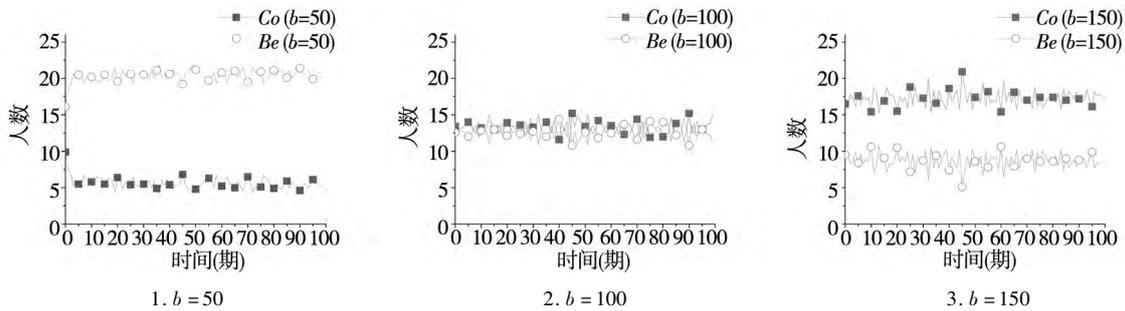


图3 方案  $b = 50, 100, 150$  在  $0 \sim 100$  时段群体博弈形势(合作方与背叛方数量)演化图

Fig. 3 Evolution diagrams of group game situation (number of cooperator and betrayer) of plan  $b = 50, 100, 150$  during  $0 \sim 100$

注:  $0 \sim 100$  全时段的博弈演化态势(合作与背叛势力的消长),空心圆形曲线代表背叛方人数,实心方框曲线代表合作方人数。

表4 模拟实验结果数据统计表(收益  $b$ )

Table 4 Statistics of simulation experiment results (benefit  $b$ )

收益 $b$	合作人数		背叛人数		合作收益		背叛收益		整体收益	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
50	5.672	5.468	20.363	5.468	-10.459	33.946	9.871	15.963	5.384	4.557
100	13.292	8.229	12.708	8.229	60.677	17.391	48.875	116.624	53.869	52.462
150	17.252	7.178	8.748	7.178	117.662	23.348	102.140	313.594	110.986	79.422

注: 均值即全时段的平均值。

其次展开统计研究,基于  $3 \times 10$  个样本数据(3套方案各模拟运行10次),以收益  $b$  为自变量,以合作人数、合作收益与整体收益的均值分别

为因变量做回归分析,三组回归分析调整后的  $R^2$  分别为0.964、0.995、0.998,都具有很好的拟合优度。如表5所示,收益  $b$  对合作水平和合作收益

② 参见前文规则3 博弈决策规则的设计,背叛方的收益与合作人数比例直接相关。因为一般来说,群体中持合作策略的人数越多,即积极参与与区域共同事务治理的主体越多,则治理效果一般越好,治理的收益也一般越大。

③ 参见规则3,合作收益由四部分构成。

④ 参见规则3,背叛收益仅由两部分构成。

都有显著的提升效果,在促进城市群协同合作的过程中,提升共同治理的收益是一个基本保障和有效措施,只有确保合作者享受合理的治理成果和回报,才能激励更多的决策者选择合作策略,积极参与区域公共事务的治理与合作,否则就会出

现方案 1 ( $b = 50$ ) 中的场景,过低的治理收益使得大部分的决策主体都不愿意参与区域公共事务治理,都想投机“搭便车”,使得博弈结果维持于背叛方占优、合作水平与收益水平极低的非理想状态。

表 5 收益  $b$  作用于合作人数均值、合作收益均值与整体收益均值的回归结果

Table 5 Regression analysis of benefit  $b$  on mean of number of cooperator, mean of revenue of cooperator and mean of revenue of whole group

		非标准化系数		标准系数	$t$	Sig.
		B	标准误差	Beta		
合作人数 均值	(常量)	-0.492	0.448		1.097	0.280
	收益 $b$	0.116	0.004	0.982	27.899	0.000
合作收益 均值	(常量)	-72.161	1.731		-41.693	0.000
	收益 $b$	1.281	0.016	0.998	79.957	0.000
整体收益 均值	(常量)	-48.856	1.055		-46.306	0.000
	收益 $b$	1.056	0.010	0.999	108.111	0.000

对模拟结果的稳定性进行检验,即信度检验,分析思路如下,在同一模拟系统和相同实验参数设置下,多次模拟运行的结果是否稳定,这一检验即属于信度检验中的重测/再测检验<sup>[2]</sup>,如前文所述,3 个方案各运行了 10 次,按照重测检验的规则,从每个方案的 10 次模拟数据中抽取 5 个模拟数据构成第一组样本(含  $3 \times 5$  个样本量),其余数据则构成第二组样本( $3 \times 5$ )<sup>⑤</sup>,做相关系数估计(在重测信度检验中,两组样本的相关系数即信度系数,相关系数越大,则信度水平越高)<sup>[2]</sup>,合作人数的 Pearson 相关系数为 0.997,显著性概率为 0.000,合作收益的 Pearson 相关系数为 1.000,显著性概率为 0.000,整体收益的 Pearson 相关系数为 1.000,显著性概率为 0.000,这说明模拟实验结果具有很高的信度水平,前文的规律分析也具有较好的可靠性和可信性。

2.1.2 惩罚  $d$

为促进城市群政府合作共赢,上层政府或协调机构可以考虑对持背叛策略的决策主体采取惩罚措施<sup>[17,18]</sup>,以降低其背叛收益,削弱其投机动机。模拟实验考察不同惩罚强度对群体合作水平与收益演化的影响,挑选合适的惩罚措

施,即要有较好的引导效果,又具有较小的强度(因为惩罚措施既降低了整体收益,也产生了额外的行政成本)<sup>[1,2]</sup>。设计 6 个方案,分别调整惩罚参数  $d$  为 0、10、20、30、40、50,并保持其他变量不变,实验模拟结果如下,每套方案模拟运行 10 次取平均值。

观察图 4 易知,伴随着惩罚强度的提升,博弈形势明显呈现出由合作背叛双方“势均力敌、反复波动”向合作水平逐渐提升,合作方逐渐占据优势的方向演化。由表 6 可知,从方案 1 到方案 6,合作人数均值不断上升,合作收益和整体收益的均值也一直呈上升趋势,体现出了惩罚措施对遏制背叛行为,提升群体合作水平与收益的有效作用。具体分析合作人数的变化,伴随着惩罚强度的提升,合作人数均值的上升呈现出三个阶段,第一阶段(方案 1 到方案 2)保持平稳,涨幅微弱,第二阶段(方案 2 到方案 5)持续大幅上升,第三阶段(方案 5 到方案 6)又保持平稳,涨幅微弱,分析其原因,当惩罚强度较小时,难以有效遏制背叛方的投机冒险行为,群体合作水平提升非常有限,而当惩罚强度过大时,群体合作水平也难以进一步提升,惩罚措施呈现出了边际效应递减的规律<sup>[2]</sup>。

⑤ 每个方案的第 1~5 次实验结果构成第一组样本,第 6~10 次实验结果构成第二组样本。

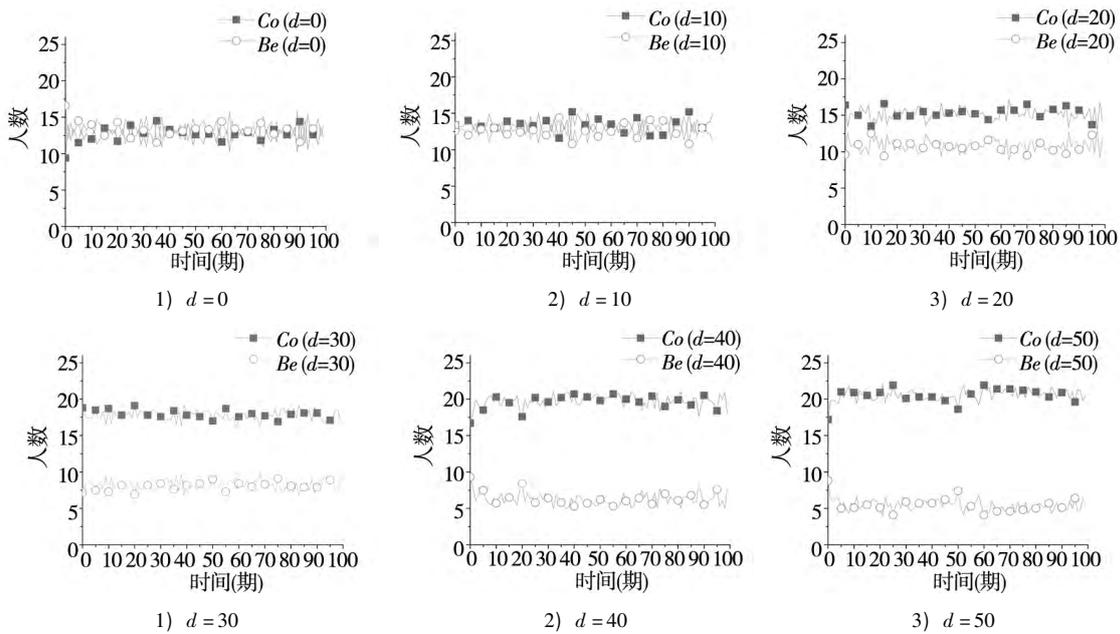


图4 方案1~方案6的群体博弈形势(合作与背叛数量)演化图

Fig. 4 Evolution diagrams of group game situation ( number of cooperator and betrayer) of plan 1 ~ plan 6

表6 模拟实验结果数据统计表(惩罚d)

Table 6 Statistics of simulation experiment results ( punishment d)

方案	合作人数		背叛人数		合作收益		背叛收益		整体收益	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
0	12.560	9.584	13.440	9.584	58.198	21.541	50.892	161.52	53.123	65.531
10	13.292	8.229	12.708	8.229	60.677	17.391	48.875	116.624	53.869	52.462
20	15.175	7.271	10.825	7.271	62.481	14.948	50.746	88.861	56.867	37.677
30	17.746	6.330	8.254	6.330	64.949	10.294	53.673	71.787	60.847	25.325
40	19.659	5.762	6.341	5.762	66.551	8.314	54.612	106.214	63.146	18.996
50	20.479	4.477	5.521	4.477	68.312	5.752	48.668	83.929	63.816	14.700

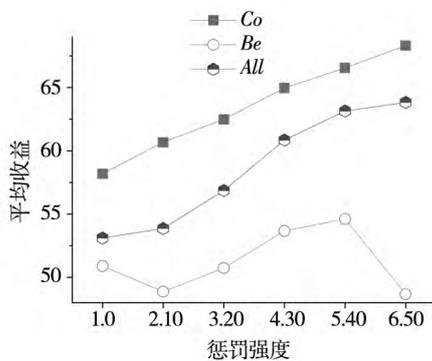


图5 方案1~方案6合作、背叛与整体收益情况的比较

Fig. 5 Comparison of cooperators , betrayer and whole revenue among plan 1 ~ plan 6

具体分析各类收益的变化,如图5所示,直观对比各方案下合作收益、背叛收益和整体收益的均值的演化:1)观察合作收益均值(实心方框曲

线)发现,伴随着惩罚强度的提升,合作方的收益稳步上升;2)观察背叛收益均值(空心圆形曲线)发现,伴随着惩罚强度的提升,呈现三个阶段,第一阶段(方案1到方案2)背叛方的收益下降了,这比较好理解,但第二阶段(方案2到方案5)背叛收益一直呈上升趋势,尽管惩罚额度不断增加,但受益于群体合作水平的不断提升,背叛收益仍呈上升趋势(但依旧小于合作收益),第三阶段(方案5到方案6)当惩罚强度由 $d=40$ 到 $d=50$ 时,背叛收益有较大幅度的下降,这是因为受制于惩罚措施的边际递减效应,合作水平的提升幅度很小,群体合作水平增加对背叛收益的提升无法抵消惩罚额度的增加对背叛收益的克减,因此背叛收益开始下降;3)观察整体收益(半实心圆形曲线)发现,伴随着惩罚强度的提升,也呈现出三

个阶段,第一阶段(方案1到方案2)和第三阶段(方案5到方案6)涨幅都较平缓,而第二阶段(方案2到方案5)升势较明显,其机理与前述相同,且变化的幅度更为平缓(因为综合了合作收益与背叛收益)。

这说明,上层政府或协调机构的惩罚措施应当维持合适的强度,即要发挥提升合作水平和收益的效果,又要避免强度过大,消耗行政成本,克减整体收益,且不利于决策群体形成自组织、自适应的良好互动秩序<sup>[1,2]</sup>。比较合作收益和背叛收益的方差,在每组方案下背叛收益的方差都远大于合作收益的方差,但背叛收益方差伴随着惩罚强度的增加虽大体呈下降趋势,但也存在一定的波动和反复(自方案3以后,背叛方都一直维持

在较低的比例和不占优的状态,相比方案1至方案2中合作与背叛“此消彼长、反复波动”的局面,背叛收益的方差有较大幅度的缩小,但在方案5有所回升),这是因为,惩罚措施对背叛投机的动机有一定的遏制,但伴随着合作水平的提高,更高的背叛收益又对投机冒险的行为有一定的“引诱”,是两种影响合力作用的结果。

基于6×10个样本数据,以惩罚强度为自变量,以合作人数、合作收益与整体收益的均值分别为因变量做回归分析,三组回归分析调整后的R<sup>2</sup>分别为0.970、0.954、0.938,都具有很好的拟合优度。如表7所示,惩罚强度对三个因变量的系数估计的显著性概率都<0.01,证明了惩罚措施能显著的提升群体合作水平与收益。

表7 惩罚强度作用于合作人数均值、合作收益均值与整体收益均值的回归结果

Table 7 Regression analysis of punishment *d* on mean of number of cooperators, mean of revenue of cooperators and mean of revenue of whole group

		非标准化系数		标准系数	<i>t</i>	Sig.
		B	标准误差	Beta		
合作人数 均值	(常量)	12.761	0.122		99.018	0.000
	惩罚措施	0.175	0.004	0.985	43.338	0.000
合作收益 均值	(常量)	58.481	0.174		336.739	0.000
	惩罚措施	0.202	0.006	0.977	35.195	0.000
整体收益 均值	(常量)	52.520	0.247		212.392	0.000
	惩罚措施	0.244	0.008	0.969	29.831	0.009

此外,对模拟结果做稳定性检验,分成两组样本(6×5,6×5),合作人数均值的相关系数为0.995,显著性概率为0.000;合作收益均值的相关系数为0.961,显著性概率为0.000;整体收益均值的相关系数为0.984,显著性概率为0.000,这说明模拟实验结果具有很高的信度水平,前文中的规律分析也具有较好的可靠性和可信性。

## 2.2 网络结构变量对博弈形势和收益结果的影响

### 2.2.1 考察全局交互比例对城市群博弈形势和收益结果的影响

主体功能分区、区域人口平衡、生态环境共治<sup>[4]</sup>等是城市群全体城市需要共同参与、协同治理的区域重大整体性议题,而且,城市群全体城市共同参加、面对面协商的联席会议也已成为城市群各城市政府决策者沟通协调的一种重要形式,在联席会议中,各城市决策主体之间互动关系的

拓扑结构不是一个随机概率的不完全网络,而是一个全面交互的完全网络,各个“节点”之间都建立直接的交互“连接”。但需要注意的是,受制于客观条件限制、机会成本制约、庞杂的本地行政事务等,城市群各城市政府决策者之间的交互沟通与协同合作不可能完全依赖于全体成员共同参与、面对面协商的联席会议形式,也并非任何类型和属性的区域问题或事务都需要城市群全体城市决策者的直接参与和共同治理,不仅成本高昂,而且并非必要<sup>[2]</sup>。因此,有必要借助电子政务与移动政务等新一代政务模式,应用信息技术和移动设备实现跨地域政府决策者之间更加灵活、便捷的信息互联和日常交流<sup>[1-3,6]</sup>。这种协商互动模式往往不是全体城市共同参与,而是根据实时实地的需要,发生于部分的、有限数量的、利益直接关联的城市之间,可见城市群政府决策者之间的沟

通协商与博弈互动包含有“全局性”和“局部性”两种模式,而在全局交互模式下,城市群全体城市决策者共同参与区域重大问题的治理,在这个过程中进行全局信息交互<sup>[2]</sup>,也直接展开全体互动博弈。因此,可以考察全局交互模式在全时段中的比例<sup>[2]②</sup>对城市群博弈互动和收益演化的持续影响,也进而比较全局交互和局部交互两种不同模式的效用。(高成本的、高投入的)全体城市政府

共同参与的全局交互模式在城市群协同合作的进程中能够发挥怎样的作用,是否能够带来相应的收效和回报。实验设计了3个方案,以每20个模拟计时为一个时间周期,全局交互与局部交互交替进行,方案1、2、3中全局交互时间所占比例分别为5/20、10/20、15/20,则(日常)局部交互的比例分别为15/20、10/20、5/20,保持其他变量不变,每套实验模拟运行10次。

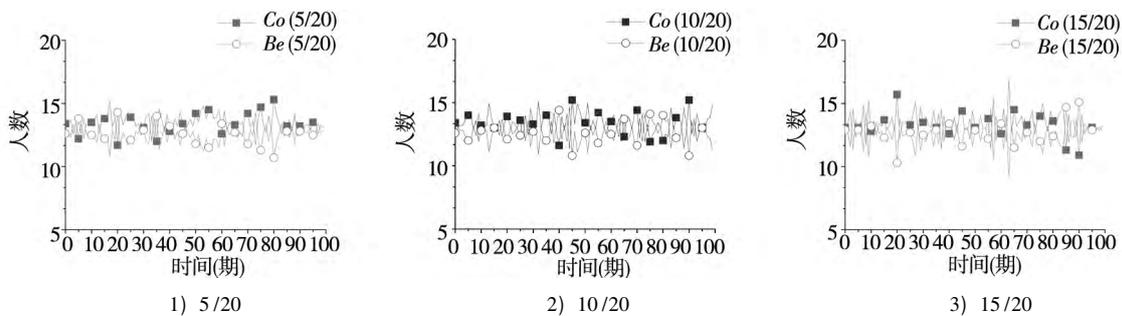


图6 方案1~方案5的群体博弈形势(合作与背叛数量)演化图

Fig. 6 Evolution diagrams of group game situation ( number of cooperator and betrayer) of plan 1 ~ plan 5

如图6所示,观察易知,全局交互比例并不能对合作方与背叛方“此消彼长、反复争夺”的博弈形势带来彻底的改变,反而伴随着全局交互比例的增加,博弈形势的波动相对更加激烈。结合表8,伴随着全局交互比例的提升,合作人数、合作收益和整体收益的均值没有明显变化,但各项指标的方差有小幅的提升,这说明全局信息交互<sup>[2]</sup>和全体博弈互动的全局交互模式对城市群政府合作协同可能起了某种程度的“反作用”,分析其原因,在全局交互状态下,即相当于完全信息和全体博弈状态下(各决策主体都能直接观察和比较其他所有主体的策略选择和相应收益),更容易出现“不良的诱导和剧烈的转变”,相异类型的主体之间直接比较收益,使得决策者更易受到高收益或冒险行为的诱导;相比,在局部交互模式的受限沟通和部分博弈状态下,不仅主体的交互范围相比有限,且建立直接联系的“小群体”往往具有较高的稳定性,因为特征更相似的主体之间更易建立交互连接,因此,局部交互模式中各个“小群体”中的决策主体特征都比较接近,例如经

济发展水平相近(都属强经济体或弱经济体<sup>[3]</sup>)、都对协作现状和历史收益较为满意等,因而博弈的成本和收益也更加接近,因此,相近特征的主体之间的互动更不容易产生不确定的变化因素,以及大幅度的变更和扰动。例如,经济发展水平相异度较大的“强经济体”与“弱经济体”城市之间直接比较收益,也容易产生“不切实际”的攀比,引发不满或心里不平衡因素,等等,而特征相似主体之间,则不易产生“盲目比较”或“胡乱参考”。因此,城市群各城市决策者之间通过自主自发的日常工作交流,就特定的区域问题,与特定范围的、利益直接关联的其他城市决策者展开互动协作,有针对性的、实时快捷的展开治理合作,相比于城市群全体城市共同参加的联席会议,或任何区域问题都交付全体城市决策者讨论协商、整合共识的其他协调模式,不仅成本更低,而且可能具有更好的协调治理效果,这一点也与复杂系统的理论相符,微观主体之间的局部互动可能会在宏观层面的全体特征上涌现出新的规律<sup>[1-3]</sup>,出现“意想不到”的效果。

② 如表现为城市群联席会议的频次及时长等。

表 8 模拟实验结果数据统计表(全局交互比例)

Table 8 Statistics of simulation experiment results (proportion of global interaction)

方案	合作人数		背叛人数		合作收益		背叛收益		整体收益	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
5/20	13.452	8.109	12.548	8.109	60.531	17.440	49.547	116.585	54.235	51.713
10/20	13.292	8.229	12.708	8.229	60.677	17.391	48.875	116.624	53.869	52.462
15/20	13.369	8.418	12.631	8.418	60.226	19.266	49.295	116.827	53.935	54.929

基于  $3 \times 10$  个样本数据,以全局交互比例为因子,以合作人数、合作收益与整体收益的均值分别为因变量做方差分析,三组的  $F$  统计值分别为 1.174、0.624、0.725,三组的显著性概率分别为 0.324、0.543、0.493,这说明全局交互模式对提升群体合作水平和整体收益确实没有显著的促进。此外,检验模拟实验结果的稳定性,分成两组配对样本( $3 \times 5, 3 \times 5$ ),合作人数均值的相关系数为 0.014,显著性概率为 0.960,合作收益均值的相关系数为 0.015,显著性概率为 0.957,整体收益均值的相关系数为 -0.120,显著性概率为 0.670,信度水平较低,这应与全局交互比例的调整不能导致相关指标的显著变化,指标数值的差异主要由随机性导致相关。

### 2.2.2 考察局部连接概率对城市群博弈演化与收益结果的影响

进一步,考察城市群各城市政府决策者之间在区域局部性共同问题治理中的日常工作交流和实时协同合作(即局部信息交互和局部互动博弈)对城市群博弈形势演化的持续影响,如前文所述,将网络连接概率中的一部分权重(0.3)分配给技术条件因素,即由信息技术和设备水平等硬条件,以及政府决策者的采纳理念和操作能力等软条件影响的跨地域城市政府决策者之间的信息交互水平和互动协作程度<sup>[2,6]</sup>(即连接概率  $PoQ$ )。其决定了局部交互模式下信息沟通的范围和博弈互动的范围,相比于由客观因素决定的主体间连接概率,这一部分的连接概率也是可以人为调控和推进的部分,例如,通过加强信息技术和设备的硬件建设,以及加强对政府人员信息技术操作能力和采纳意愿的学习培训,以提升信息交互与协作水平。一般来说,电子政务和移动政务模式同传统的政务模式相比,政府决策者之间的交

流互动在相当程度上突破了时间和空间环境的限制<sup>[6]</sup>,提升了信息互联沟通的范围和水平,也提升了局部协同合作、部分博弈互动的场合和机会,如果实验结果表明城市政府决策者之间在局部交互模式下的信息交互水平及博弈互动范围与合作人数比例、合作收益水平等呈正相关,则有必要进一步普及和深化电子政务与移动政务的应用,推广和促进新一代信息技术的采纳和使用,使得跨地域的政府合作与决策协同能更加方便快捷、随时随地、深入充分<sup>[2,6]</sup>,并以更低的成本、更便捷的方式、更有针对性的范围,实现区域问题的实时有效治理。为此,设计  $3 \times 3$  组实验方案,设置三组博弈参数矩阵,并调节  $PoQ$  分别为三档: *Low* (0.05)、*Middle* (0.15)、*High* (0.25),保持其他变量不变,每套实验模拟运行 10 次取平均值。

模拟实验结果如图 7 所示,首先进行横向比较(即对比相同博弈参数下不同连接概率对博弈结果的影响)观察发现连接概率的变化并不会对合作水平和收益均值产生显著的影响,结合表 9,在三种博弈参数设置下,从低连接概率到高连接概率,合作人数、合作收益和整体收益的均值都基本持平,没有明显提升,这说明信息技术软硬件条件的推进(对局部交互模式下信息交互水平和博弈互动范围的提升)对促进城市群合作共赢没有显著影响。

然而纵向的比较(即对比相同连接概率下不同博弈参数对博弈结果的影响,本例中主要为惩罚强度的变化),观察图 7 的三组纵向比较,伴随着惩罚强度的提升(在图中自上向下),博弈形势都明显经历了三个阶段的变化,一是合作与背叛双方“争锋相对、此消彼长、反复胶着”,二是到波动幅度明显变小、博弈形势相对趋缓、合作水平略微占优,三再到合作方“牢牢”占据优势局面,处于合作占优的理想格局,比较明显的体现了惩罚

措施对促进合作水平与整体收益的效果,结合表9,在相同连接概率设定下,惩罚强度的提升对

合作人数、合作收益与整体收益的均值都有非常明显的提升.

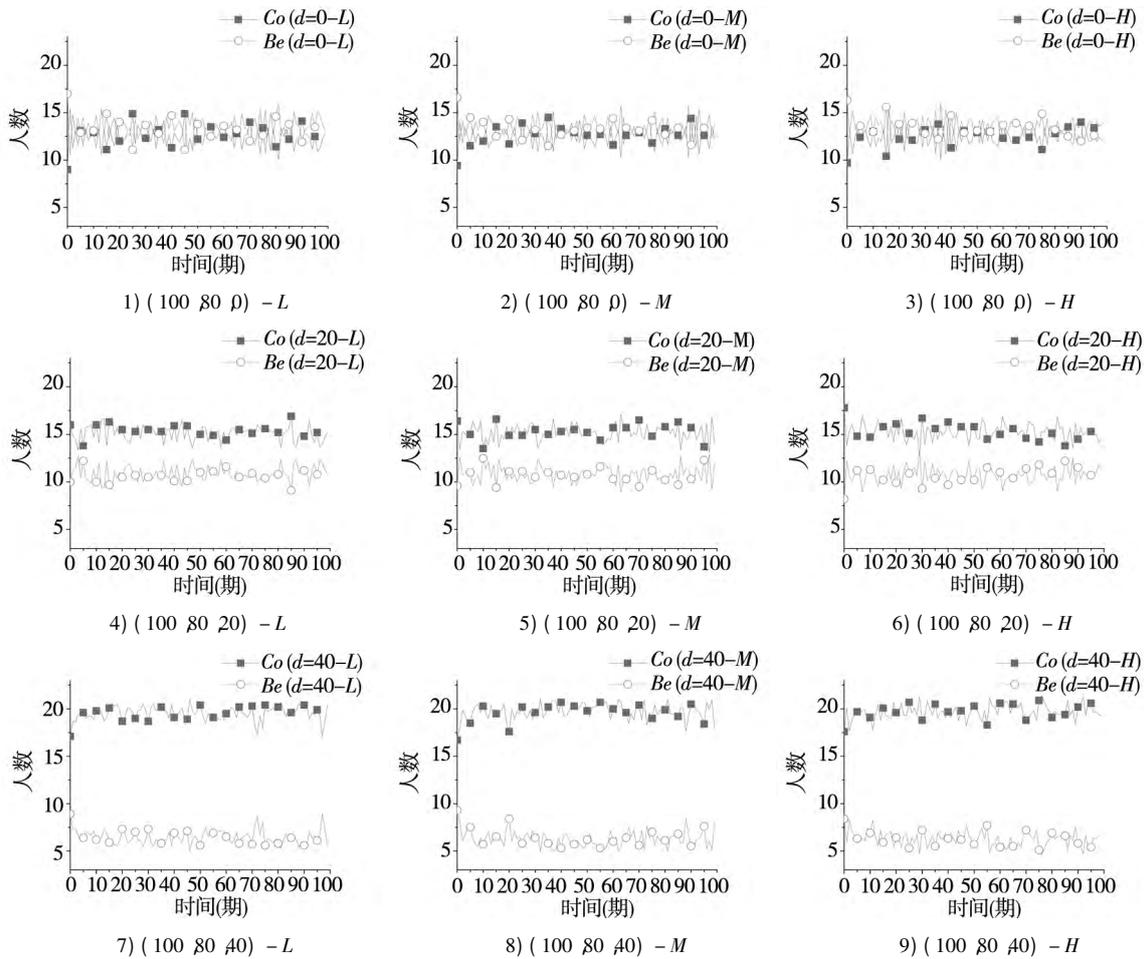


图7 方案1~方案9的群体博弈形势(合作与背叛数量)演化图

Fig. 7 Evolution diagrams of group game situation ( number of cooperator and betrayer) of plan 1 ~ plan 9

表9 模拟实验结果数据统计表(局部连接概率)

Table 9 Statistics of simulation experiment results ( probability of local linking)

参数	连接 概率	合作人数		背叛人数		合作收益		背叛收益		整体收益	
		均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
100 , 80 , 0	L	12.481	9.620	13.519	9.620	57.981	21.812	50.621	161.036	52.870	66.801
	M	12.560	9.584	13.440	9.584	58.198	21.541	50.892	161.52	53.123	65.531
	H	12.482	8.721	13.518	8.721	58.250	22.706	50.466	144.225	53.048	61.644
100 , 80 , 20	L	15.105	6.132	10.895	6.132	62.396 2	13.464	50.486	71.455	56.807	31.670
	M	15.175	7.271	10.825	7.271	62.481	14.948	50.746	88.861	56.867	37.677
	H	15.220	6.303	10.780	6.303	62.701	13.123	50.674	75.195	57.100	32.130
100 , 80 , 40	L	19.465	5.575	6.535	5.575	65.965	9.258	54.840	101.911	62.733	19.433
	M	19.659	5.762	6.341	5.762	66.551	8.314	54.612	106.214	63.146	18.996
	H	19.643	5.177	6.357	5.177	66.214	8.895	55.155	96.402	63.095	17.220

由此得到一点启示,应当更加理性的定位信息技术、网络技术在政府管理与协调治理中的作

用,理性对待电子政务和移动政务等新兴政务模式的效用,不能过度盲从和过高期望信息技术对

政府合作与工作绩效的促进作用,不能完全指望技术的进步和新技术的采纳能够解决一切问题,视技术为“万灵药方”。实际上,对比发现传统的措施往往也是最有效的,通过采取惩罚措施,直接作用于决策主体的自身收益和利害得失,能够非常有效的打击和遏制投机冒险行为,压制背叛收益,促进城市群合作共赢。

采用单因素方程分析检验分析结果,在三组不同的连接概率下,合作人数均值比较的  $F$  检验统计值为 0.013,显著性概率为 0.987,合作收益均值比较的  $F$  检验统计值为 0.069,显著性概率为 0.934,整体收益均值比较的  $F$  检验统计值为 0.039,显著性概率为 0.962,从统计上证明了连接概率确实难以对合作水平与收益产生显著的影响。而在三组不同的惩罚强度下,合作人数均值比较的  $F$  检验统计值为 8.022.748,显著性概率为 0.000,合作收益均值比较的  $F$  检验统计值为 837.149,显著性概率为 0.000,整体收益比较的  $F$  检验统计值为 2.166.031,显著性概率为 0.000,这也从统计上证明了传统的惩罚手段对提升合作

水平与收益的显著作用。

此外,对模拟结果做稳定性检验,分成两组配对样本( $9 \times 5, 9 \times 5$ ),合作人数均值的相关系数为 0.995,显著性概率为 0.000;合作收益均值的相关系数为 0.948,显著性概率为 0.000;整体收益均值的相关系数为 0.981,显著性概率为 0.000,这说明模拟实验结果具有很高的信度水平,前文中的规律分析也具有较好的可靠性和可信性。

### 2.3 智能体自身属性对博弈形势和收益结果的影响

城市群各城市政府决策者的决策个性构成<sup>[3,17,18]</sup>是否会对博弈演化与收益结果产生影响,易变型、中立型、固执型<sup>[3,17,18]</sup>的决策者哪一种更有利于促进区域协作治理与合作共赢?共设置 3 个实验方案,决策群体中易变型、中立型、固执型所占比例分别为:方案 1(1/2, 1/3, 1/6)、方案 2(1/3, 1/3, 1/3)、方案 3(1/6, 1/3, 1/2),即分别以易变型决策主体为主、均匀分布和以固执型决策主体为主,保持其他变量不变,每套方案模拟运行 10 次取平均值,实验结果如下。

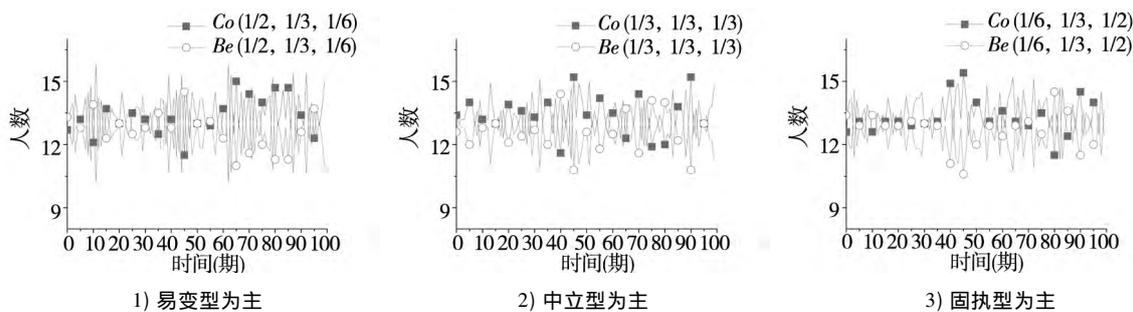


图8 方案1~方案3的群体博弈形势(合作与背叛数量)演化图

Fig. 8 Evolution diagrams of group game situation (number of cooperator and betrayer) of plan 1 ~ plan 3

如图 8 所示,从方案 1 到方案 3,合作方与背叛方人数波动的频次和密度逐渐变小。结合表 10 所示,从方案 1 到方案 3,合作收益的均值呈下降趋势,整体收益的均值没有明显的变化方向,但合作人数的方差、整体收益的方差下降明显。分析原因,易变型决策主体相比固执型决策主体在策略选择时对邻居状态(周围环境)的参考权重更大,更能广泛获取信息,且更容易在收益不理想时实时调整策略,适应环境变化,以期提升收益水平。因此,当固执型决策主体比例占优时,更少受周围群体的影响和外界环境的干扰,且不会轻易改变

原有的策略选择,博弈形势更加稳定,因此,相关指标的方差下降明显。而在易变型决策主体比例占优的情况下,伴随着信息交互范围和策略更替概率的提升,决策者受合作引导或冒险(投机)引诱的可能性都加大了<sup>[18]</sup>,因而尽管信息获取的效率和动态调整的概率相比更高,但未必能促进群体合作水平和整体收益的提升,且更易出现反复波动的局面,收益风险也相比更大(特别是对于持背叛策略的决策者,其收益直接依赖于群体合作水平,在易变型决策主体占优且博弈形势反复波动的情况下,难以获得向持合作策略的决策者

那样的稳定提升)。总结模拟结果,易变型决策主体占优的情况下合作水平与整体收益不高于均匀分布和固执型比例占优的情况,但收益的方差却较明显地高于后者,承担了相对较大的风险。基于上述分析,上层政府或协调机构在促进城市群协

同合作的过程中,可以合理调整或搭配不同决策个性主体的构成比例,既要提升城市群政府互动系统对动态环境演化的灵敏度和适应力,又要保持政策的连续性和稳定性,降低收益的风险,这对于政府部门和政府决策来说可能尤其重要。

表 10 模拟实验结果数据统计表(决策个性)

Table 10 Statistics of simulation experiment results (decision-making personality)

方案 <i>Pr</i>	合作人数		背叛人数		合作收益		背叛收益		整体收益	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
1/2, 1/3, 1/6	13.340	10.208	12.660	10.208	61.251	17.808	48.845	141.966	53.910	63.625
1/3, 1/3, 1/3	13.292	8.229	12.708	8.229	60.677	17.391	48.875	116.624	53.869	52.462
1/6, 1/3, 1/2	13.410	6.556	12.590	6.556	60.005	18.985	49.521	92.804	54.180	43.067

基于  $3 \times 10$  个样本数据,以决策个性构成为因子,以合作收益均值为因变量做方差分析, $F$  统计值分别为 5.388,显著性概率为 0.011,这说明易变型决策主体占优的情况下合作方的收益优势确实显著,另以合作人数方差和整体收益方差为因变量做方差分析, $F$  统计值分别为 32.777、16.330,显著性概率分别为 0.000、0.000,这说明易变型决策主体占优的情况下收益的风险也显著较大,不同的决策个性构成确实会对合作水平与收益产生较显著的影响,有必要合理的调整决策个性的构成比例。

此外,对模拟实验结果做稳定性检验,分成两组配对样本( $3 \times 5, 3 \times 5$ ),合作收益方差的相关系数为 0.261,显著性概率为 0.347,合作人数方差的相关系数为 0.733,显著性概率为 0.002,整体收益方差的信度系数为 0.612,显著性概率为 0.015,这说明模拟实验结果总体上具有较好的信度水平,特别是在对收益的风险(方差分析)方面。

### 3 结束语

本文以社会网络视阈下的城市群政府合作过程中的多期进化博弈为例,通过概念模型、数学模型和计算机模型的完整建模过程,建立一个集成非对称进化博弈和异构性社会网络的多智能体模拟系统,并实现了微观互动(博弈行为)和宏观涌现(网络拓扑)之间的双向反馈和动态交互。在构

建模拟系统的基础上,设计并运行一系列的实验方案,对仿真模型及模拟结果进行信度检验,并结合多次模拟实验构成的样本数据的统计分析,考察全局交互比例、局部连接概率等网络结构变量、合作收益、惩罚措施等博弈参数变量、以及决策个性等主体属性变量对城市群政府博弈形势与收益演化的动态影响,是政治学与公共行政领域的计算模拟实验研究的一次创新尝试。本文研究初步得出了几点结论,归纳整理如下。

1) 使得区域共同问题治理的收益维持在一个较高或恰当的水平,是促进城市群政府合作协同的一个基本保障和有效措施,只有使得参与协同治理的合作主体享有合理的治理收益或回报,才能激励更多的决策者选择合作策略,积极参与区域公共事务的治理与合作,此外,“搭便车”行为不可能完全克除,而且越是高合作水平和高收益状态下背叛行为越有动机和空间,但应当保证合作方的合理收益,维持合作收益相较于背叛收益的一定优势,以激励合作方保持合作策略,使得群体中的大多数主体处于“建设性”的状态。

2) 对群体互动博弈中的背叛方采取惩罚措施能较有效的遏制背叛行为,提升群体合作水平与收益,但伴随着惩罚措施强度的提升,在不同的递增阶段会呈现出不同的规律,强度较小时调控效果难以体现,而强度过大时又呈现边际效果递减效应。上层政府或协调机构所采取的惩罚措施应当拿捏合适的强度,即要发挥提升合作水平和收益的效果,又要避免强度过大,消耗行政成本,

克减整体收益,且不利于决策群体形成自组织、自适应的良好互动秩序。

3) 在促进城市群协同合作的过程中,全局交互模式不仅成本高昂,且并不具备特别理想的协同促进效果,在特征各异、类型不同的所有主体完全互动状态下,更容易出现“盲目比较”和“胡乱参考”,产生“不当的诱导和剧烈的转变”,相比,在局部交互状态下,不仅主体的交互范围具有较高的稳定性,因为特征相似、类型相同的主体之间更易建立交互沟通,且其博弈收益和成本分配更加接近,相互之间的参考和比较也更加合理,因而不容易产生不确定的变化因素(如对收益现状的高度不满),以及大幅度的变更和扰动。

4) 相比于惩罚措施等博弈参数的调控,局部交互状态下的信息交互水平和博弈互动范围的扩大(即主体之间连接概率的提升)对群体合作水平与收益的促进作用非常有限,更充分的信息沟通、更便捷的交互机会并不必然保证更多的合作,应当更加理性的定位信息与网络技术(以及电子政务和移动政务等新兴政务模式)在政府管理与

协调治理中的效用,不能过度盲从和过高期望技术的进步和新技术的采纳对政府合作与区域协同的促进作用,实际上,对比发现传统的措施往往也是最有效的,通过采取惩罚措施,直接作用于决策主体的自身收益和利害得失,能够非常有效的打击和遏制投机冒险行为,压制背叛收益,促进城市群合作共赢。

5) 在城市群多主体互动系统中,可以合理调整或搭配不同决策个性类型主体的构成比例,各类决策个性主体在群体博弈演化的过程中都扮演了一定的角色,发挥了特定的作用,例如,易变型决策主体更能广泛获取信息,积极调整策略,适应环境变化,但受合作引导或(冒险)投机引诱的可能性都加大了,更易出现反复波动的局面,收益风险也相比更大,而固执型决策主体虽然难以实时动态的应对环境变化,但策略选择更具稳定性和一贯性,有利于促进博弈形势更早趋于均衡。因此,合理调整决策个性构成,既提升城市群政府互动系统对动态环境演化的灵敏度和适应力,又保持一定的稳定性,降低收益的风险。

#### 参考文献:

- [1] 罗 杭. 城市群一体化与政府互动的多智能体模拟[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2013, 34(2): 46-52.  
Luo Hang. Multi-agent simulation research on urban agglomeration integration and local government interaction[J]. Journal of Dalian University of Technology (Social Sciences), 2013, 34(2): 46-52. (in Chinese)
- [2] 罗 杭, 张 毅, 孟庆国. 基于多智能体的城市群政策协调建模与仿真[J]. 中国管理科学, 2015, 23(1): 55-64.  
Luo Hang, Zhang Yi, Meng Qingguo. Modeling and simulation of multi-cities' policy coordination based on Mas[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(1): 55-64. (in Chinese)
- [3] 罗 杭. 城市群政府博弈与调控机制的多智能体系统建模——集成进化博弈理论与小世界网络模型[J]. 系统科学学报, 2016, (4): 105-110.  
Luo Hang. Multi-agent system modeling of urban agglomeration' government game and control mechanism: Aggregating evolutionary game and small world networks[J]. Journal of Systems Science, 2016, (4): 105-110. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国国家发展与改革委员会国家发展改革委住房城乡建设部关于印发长江三角洲城市群发展规划的通知[DB/OL]. [http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201606/t20160603\\_806400.html](http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201606/t20160603_806400.html).  
National development and reform commission of people's republic of China[EB/OL]. The Notice of Print and Distribution of Yangtze River Delta Urban Agglomeration Development Planning by National Development and Reform Commission and Ministry of Housing and Urban-Rural Development, [http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201606/t20160603\\_806400.html](http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201606/t20160603_806400.html). (in Chinese)
- [5] 中国新闻网, 发改委: 已批准 12 个国家综合配套改革试验区[EB/OL]. <http://www.chinanews.com/gn/2014/06-10/6263631.shtml>.  
Chinanews, National Development and Reform Commission: 12 national synthetically reform testing districts have been approved[EB/OL]. <http://www.chinanews.com/gn/2014/06-10/6263631.shtml>. (in Chinese)

- [6]罗杭,郭珍,张毅. 移动政务的价值分析[J]. 情报资料工作, 2010, (4): 36-40.  
Luo Hang, Guo Zhen, Zhang Yi. Value analysis of mobile government[J]. Information and Documentation Services, 2010, (4): 36-40. (in Chinese)
- [7]周黎安. 中国地方官员的晋升锦标赛模式研究[J]. 经济研究, 2007, (7): 36-50.  
Zhou Lian. Governing china's local officials: An analysis of promotion tournament model[J]. Economic Research Journal, 2007, (7): 36-50. (in Chinese)
- [8]Bel G, Warner M E. Inter-municipal cooperation and costs: Expectations and evidence[J]. Public Administration, 2015, 93(1): 52-67.
- [9]Benton J E. Local government collaboration considerations, issues, and prospects[J]. State and Local Government Review, 2013, 45(4): 220-223.
- [10]Frère Q, Leprince M, Paty S. The impact of inter-municipal cooperation on local public spending[J]. Urban Studies, 2012, 51(8): 1741-1760.
- [11]Blair R, Janousek C L. Collaborative mechanisms in interlocal cooperation a longitudinal examination[J]. State and Local Government Review, 2013, 45(4): 268-282.
- [12]李金龙,王敏. 城市群内府际关系协调: 理论阐释、现实困境及路径选择[J]. 天津社会科学, 2010, 1(1): 83-87.  
Li Jinlong, Wang Min. Inter-government relation coordination of urban agglomeration: Theoretical explanation, real dilemma and path choice[J]. Tianjin Social Sciences, 2010, 1(1): 83-87. (in Chinese)
- [13]丁建军. 城市群经济、多城市群与区域协调发展[J]. 经济地理, 2010, (12): 2018-2022.  
Ding Jianjun. Economy of urban agglomeration, multi-urban clusters and the coordinated development of regional economy[J]. Economic Geography, 2010, (12): 2018-2022. (in Chinese)
- [14]周黎安. 转型中的地方政府: 官员激励与治理[M]. 上海: 上海人民出版社, 2008.  
Zhou Lian. Local Government in Transition: Incentive and Management of Officials[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [15]朱英明. 中国城市群一体化过程中行政主体间的信号传递博弈[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(3): 84-89.  
Zhu Yingming. Signalling game among administrative agents in the integration process of urban agglomerations in China[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2009, 29(3): 84-89. (in Chinese)
- [16]曹杰,朱莉. 考虑决策偏好的城市群应急协调超网络模型[J]. 管理科学学报, 2014, 17(11): 33-42.  
Cao Jie, Zhu Li. Super-network model of urban agglomeration emergency coordination considering decision preferences[J]. Journal of Management Sciences in China, 2014, 17(11): 33-42. (in Chinese)
- [17]蒋国银,胡斌,王缓缓. 基于Agent和进化博弈的服务商动态联盟协同管理策略研究[J]. 中国管理科学, 2009, 17(2): 86-92.  
Jiang Guoyin, Hu Bin, Wang Yuanyuan. Agent-based simulation research on collaboration strategy for dynamic coalition of service provider based on the evolution game[J]. Chinese Journal of Management Science, 2009, 17(2): 86-92. (in Chinese)
- [18]蒋国银,胡斌. 集成博弈和多智能体的人群工作互动行为研究[J]. 管理科学学报, 2011, 14(2): 29-41.  
Jiang Guoyin, Hu Bin. Study on interaction behavior between group and work based on game and multi-agent[J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(2): 29-41. (in Chinese)
- [19]吴江,胡斌. 信息化与群体行为互动的多智能体模拟[J]. 系统工程学报, 2009, 24(2): 218-225.  
Wu Jiang, Hu Bin. Multi-agent simulation for interaction of IT implementation and group behavior[J]. Journal of Systems Engineering, 2009, 24(2): 218-225. (in Chinese)
- [20]Wu J, Hu B, Zhang J, et al. Multi-agent simulation of group behavior in E-government policy decision[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, (16): 1571-1587.
- [21]上海市统计局. 上海统计年鉴 2015 [EB/OL]. <http://www.stats-sh.gov.cn/data/toTjnj.xhtml? y = 2015>.  
Shanghai Statistical Bureau. Shanghai Statistical Yearbook 2015 [EB/OL]. <http://www.stats-sh.gov.cn/data/toTjnj.xhtml? y = 2015>. (in Chinese)
- [22]江苏省统计局. 江苏统计年鉴 2015 [EB/OL]. <http://www.jssb.gov.cn/2015nj/indexc.htm>.  
Jiangsu Statistical Bureau. Jiangsu Statistical Yearbook 2015 [EB/OL]. <http://www.jssb.gov.cn/2015nj/indexc.htm>.

( in Chinese)

- [23]浙江省统计局. 浙江统计年鉴 2015 [EB/OL]. <http://www.zj.stats.gov.cn/tjsj/tjnj/DesktopModules/Reports/12.浙江统计年鉴2015/indexch.htm>.  
Zhejiang Statistical Bureau. Zhejiang Statistical Yearbook 2015 [EB/OL]. <http://www.zj.stats.gov.cn/tjsj/tjnj/DesktopModules/Reports/12.浙江统计年鉴2015/indexch.htm>. ( in Chinese)
- [24]安徽省统计局. 安徽统计年鉴 2015 [EB/OL]. [http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj\\_view.jsp?strColId=13787135717978521&\\_index=1#](http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj_view.jsp?strColId=13787135717978521&_index=1#).  
Anhui Statistical Bureau. Anhui Statistical Yearbook 2015 [EB/OL]. [http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj\\_view.jsp?strColId=13787135717978521&\\_index=1#](http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj_view.jsp?strColId=13787135717978521&_index=1#). ( in Chinese)
- [25]罗 杭,孟庆国. 安理会改革与大国博弈的多智能体模拟[J]. 世界经济与政治,2013,(6):136-155.  
Luo Hang, Meng Qingguo. Multi-agent simulation of security council reform and great power games[J]. World Economics and Politics,2013,(6):136-155. ( in Chinese)
- [26]Jorgen W. Evolution, rationality and equilibrium in games[J]. European Economic Review,1998,(42):641-649.
- [27]Railsback S. Agent-based simulation platforms: Review and development recommendations[J]. Simulation Modeling Practice and Theory,2006,82(9):609-623.

## Modeling and simulation of multi-cities' government collaboration based on MAS: Embedded in and feedbacking on heterogeneous social networks

MENG Qing-guo<sup>1</sup>, LUO Hang<sup>2\*</sup>

1. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of International Studies, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** To analyze the evolutionary game process of multi-cities' government collaboration in the context of social networks, through an integral modeling procedure of conceptual model, mathematical model, and computer model, a multi-agent simulation system, integrating evolutionary game theory and social networks model, is built. An asymmetrical evolutionary game system considering the individual differences on cost and benefit is constructed for the micro level of agent interaction (considering the interaction between entire game and partial game), and a heterogeneous social network evolving system, considering the linking probability differences between nodes, is built for the macro level of social structure (considering the interchange between global information exchange and local information exchange), to achieve the bidirectional feedback and dynamic interaction between micro game interaction and macro social network based on multi-agent system (particularly by introducing the interacting willingness). The simulation experiments investigate the dynamic effect of network structure variables such as global interacting proportion and local interlinking probability, game coefficient variables such as governance benefit and punishment measure, and agent property variable such as decision-making personality composition, on the evolving process and revenue outcome of multi-cities' continuous game. Policy suggestions are given for multi-cities' coordination and regional integration. Besides, through multiple simulation experiments of each of the experiment plan, samples of data are built for the reliability test of the simulation model and results, and for the statistical analysis of experiment results and findings. This research provides new thoughts in computational simulation experiment research in the field of politics and public administration.

**Key words:** multi-cities' government collaboration; multi-agent system; asymmetrical evolutionary game; heterogeneous social networks; bidirectional feedbacks and interactions