

分类号 TP000.0

学号 13051082

UDC

密级 公 开

公共管理硕士（MPA）硕士学位论文
上海合作组织权重网络模型构建及演化研究

硕士生姓名 王 昆

研究 方 向 国家安全与危机管理

指 导 教 师 孙多勇 教授

国防科学技术大学研究生院

二〇一五年十一月

上海合作组织权重网络模型构建及演化研究

国防科学技术大学研究生院

**Research on Architecture and Evolution of
the Shanghai Cooperation Organization
Based on Weighted Network Model**

Candidate: Wang Kun

Advisor: Sun Duoyong

A dissertation

Submitted in partial fulfillment of the requirements

for the professional degree of MPA

Graduate School of National University of Defense Technology

Changsha, Hunan, P. R. China

November, 2015

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写过的研究成果，也不包含为获得国防科学技术大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文题目：上海合作组织权重网络模型构建及演化研究

学位论文作者签名：王昆 日期：2015年11月5日

学位论文版权使用授权书

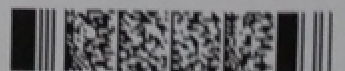
本人完全了解国防科学技术大学有关保留、使用学位论文的规定。本人授权国防科学技术大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密学位论文在解密后适用本授权书。)

学位论文题目：上海合作组织权重网络模型构建及演化研究

学位论文作者签名：王昆 日期：2015年11月5日

作者指导教师签名：孙永 日期：2015年11月5日



目 录

摘 要	i
ABSTRACT	ii
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 从“上海五国”机制到“一带一路”倡议	1
1.1.2 网络建模与国际关系研究	2
1.1.3 从拓扑结构研究到权重网络演化模型	3
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 上海合作组织研究现状	5
1.2.2 网络科学在国际关系研究中的应用	7
1.2.3 存在的问题	10
1.3 本文的主要研究工作	11
1.3.1 研究思路	11
1.3.2 研究内容	12
1.3.3 主要创新点	14
第二章 网络演化模型及相关概念	15
2.1 动态元网络分析及相关测度	15
2.1.1 动态元网络分析概述	15
2.1.2 动态元网络分析的主要测度	16
2.2 权重网络的定义及特征参数	18
2.2.1 权重网络的定义	18
2.2.2 权重网络的特征参数	19
2.3 网络无标度特性的推导方法	20
2.4 网络演化的经典模型	22
2.4.1 BA 模型	22
2.4.2 适应度模型	23
2.4.3 局域世界演化模型	24
2.4.4 BBV 模型	24
第三章 基于纵向数据的上海合作组织网络结构分析	28
3.1 研究数据来源及处理说明	28
3.1.1 研究对象的选定	28
3.1.2 数据范围的选定	28
3.1.3 样本区间的选定	28

3.2	上海合作组织动态元网络模型构建及纵向分析	29
3.2.1	上海合作组织经贸有向加权网络构建及结构分析	29
3.2.2	上海合作组织安全合作网络构建及结构分析	38
3.2.3	上海合作组织多元合作网络构建及结构分析	41
3.3	上海合作组织网络结构对等性分析	43
第四章	基于影响力感知的上海合作组织权重网络演化模型	47
4.1	国家实力指数构建	47
4.1.1	国家实力的相关研究	47
4.1.2	上海合作组织国家实力指数理论解析	48
4.1.3	上海合作组织国家实力指数构建	49
4.2	基于国家影响力感知的权重网络演化模型构建	52
4.2.1	演化模型设计	52
4.2.2	理论解析	54
4.3	实证结果分析	56
第五章	上海合作组织权重网络演化模型干预策略实验	60
5.1	实验背景	60
5.2	重要国家对权重网络模型演化的影响	61
5.3	偏好选择对权重网络模型演化的影响	63
5.4	紧张关系对权重网络模型演化的影响	65
第六章	基于演化干预实验结果的策略建议	67
6.1	强化对“域外大国”干预的妥善应对	67
6.2	强化对“上海精神”传承的笃定坚守	68
6.3	强化与“一带一路”对接的开放发展	68
第七章	总结与展望	70
7.1	本文主要工作	70
7.2	未来工作展望	70
致 谢	.....	72
参考文献	.....	73
作者攻读学位期间取得的学术成果	.....	80
获得的奖励及资助	.....	81
参与的科研项目	.....	81
担任的学术期刊和出版物审稿人	.....	81

表 目 录

表 2.1	PCANS 模型	15
表 3.1	上海合作组织成员国 1996 年经贸合作数据 (单位: 美元)	30
表 3.2	上海合作组织成员国 2001 年经贸合作数据 (单位: 美元)	31
表 3.3	上海合作组织成员国 2006 年经贸合作数据 (单位: 美元)	31
表 3.4	上海合作组织成员国 2010 年经贸合作数据 (单位: 美元)	31
表 3.5	上海合作组织成员国 2013 年经贸合作数据 (单位: 美元)	32
表 3.6	经贸有向加权网络中心势分布及变化趋势	33
表 3.7	经贸有向加权网络 Total Degree 中心度分布及变化趋势	34
表 3.8	经贸有向加权网络 Eigenvector 中心度分布及变化趋势	35
表 3.9	经贸有向加权网络 Bonacich Power 指数分布及变化趋势	35
表 3.10	经贸有向加权网络 Closeness 中心度分布及变化趋势	36
表 3.11	经贸有向加权网络 Inverse Closeness 中心度分布及变化趋势	36
表 3.12	上海合作组织 2002 年-2015 年安全合作情况统计表	39
表 3.13	上海合作组织 2002 年-2015 年安全合作隶属网络中心性指标	40
表 3.14	上海合作组织 2002 年-2015 年安全合作隶属网络测度统计表	40
表 3.15	上海合作组织成员国 1996 年经贸有向加权网络结构对等性分析	44
表 3.16	上海合作组织成员国 2013 年经贸有向加权网络结构对等性分析	44
表 3.17	上海合作组织成员国 2002 年-2015 年安全合作网络结构对等性分析	44
表 4.1	上海合作组织成员国 2010 年-2013 年劳动力人口数量	50
表 4.2	上海合作组织成员国 2010 年-2013 年国内生产总值	50
表 4.3	上海合作组织成员国 2010 年-2013 年武装力量总人数	50
表 4.4	上海合作组织成员国 2010 年-2013 年武器装备出口额	51
表 4.5	上海合作组织成员国 2013 年-2015 年创新能力指数 (GII)	51
表 4.6	上海合作组织成员国国家实力计算	51
表 4.7	国家“影响力”指数与强度的方差对比结果	58
表 5.1	干预实验对象 2010 年-2013 年国家实力数据统计 (1)	60
表 5.2	干预实验对象 2010 年-2013 年国家实力数据统计 (2)	61
表 5.3	干预实验对象国家实力指数计算结果	61

图 目 录

图 1.1	上海合作组织学术研究成果数量统计（1996-2015）	5
图 1.2	研究思路示意图	13
图 3.1	上海合作组织成员国 1996 年贸易数据统计对比图	32
图 3.2	上海合作组织成员国 2013 年贸易数据统计对比图	32
图 3.3	上海合作组织经贸有向加权网络指标与 GDP 数值相关性分析	33
图 3.4	经贸合作有向加权网络主要指标的统计分布	38
图 3.5	经贸合作有向加权网络主要统计指标的对数分布	38
图 3.6	上海合作组织 2002 年-2015 年安全合作隶属网络结构图	41
图 3.7	上海合作组织 2011 年-2014 年多元合作网络结构演化情况	42
图 3.8	上海合作组织成员国 1996 年经贸有向加权网络结构树形图	45
图 3.9	上海合作组织成员国 2013 年经贸有向加权网络结构树形图	45
图 3.10	上海合作组织成员国 2002 年-2015 年安全合作网络结构树形图	45
图 4.1	上海合作组织成员国国家实力指数主要构成	49
图 4.2	权重网络模型国家“强度”比重的演化情况	57
图 4.3	权重网络模型国家“影响力”指数演化情况	57
图 4.4	国家“影响力”指数与强度的方差分析对比累积柱状图	58
图 5.1	中国、俄罗斯和 A 国的“影响力”指数变化趋势	62
图 5.2	偏好选择国家加入后中国“影响力”指数变化趋势	64
图 5.3	关系紧张国家加入后网络平均强度增速变化情况	66

摘要

上海合作组织是中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦和塔吉克斯坦于 2001 年 6 月 15 日在中国上海宣布成立的永久性政府间合作组织。上海合作组织是目前唯一在中国境内成立，并以中国城市命名的地区性国际组织。近年来兴起的社会网络分析和复杂网络理论给国际关系的量化研究提供了一种新颖的研究视角和工具。通过模型仿真实验及其数据结果的统计分析和可视化也在逐步取代基于预测的传统决策分析。本文以基于时间截面数据的纵向网络分析为基础，尝试通过构建权重网络演化模型并引入政策干预实验，较好地识别了想定预案的未来状况及合理性。论文的主要研究工作及创新点如下：

1. 提出了一种新的上海合作组织研究视角。通过纵向网络分析与演化干预实验相结合的方法，深入研究了上海合作组织的网络结构与演化特性。通过引入权重网络建模的概念及方法，解决了传统的网络拓扑结构研究对于地区性国际组织研究存在的诸多问题和不足。同时，依据带有实际背景的模拟仿真结果，能够更为直观地帮助决策者全面评估各种预想方案的合理性。

2. 提出了一种基于影响力感知的上海合作组织权重网络演化模型。构建并计算了上海合作组织成员国以及干预对象的国家实力作为模型演化的初始条件。将国家实力作为有限支撑分布引入适应度模型，基于可变对象的局域世界演化模型，拟合了不同国家的合作偏好。分别通过理论解析和仿真结果验证了演化模型的合理性和有效性，并确定了国家“影响力”作为干预实验的观测指标。

3. 研究了想定条件下的上海合作组织权重网络演化模型干预实验。通过抽象纵向数据分析过程中发现的网络结构属性及变化趋势，确定了重要国家、偏好选择以及紧张关系三类干预实验。由于网络演化模型本身运行稳定，通过对比干预行为前后网络结构以及核心节点的指标变化，就可以确认引起系统波动的主要原因，并针对实验结果对上海合作组织发展提出策略建议。

关键词：上海合作组织；权重网络；演化模型；干预实验

ABSTRACT

China, Russia, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Uzbekistan and Tajikistan announced the establishment of the Shanghai Cooperation Organization (SCO) as a permanent Inter-governmental organization on June 15, 2001 in Shanghai China. The SCO is the only regional organization which established within China and named after a Chinese city. The social network analysis and complex networks theory, which were highly popular in the recent years, provided us a new paradigm to study the international relations with quantitative research. The processes of decision analysis based on model emulation and experimental result has gradually taken over the traditional one which was used to rely on prediction. The longitudinal network is used as the basis for structural analysis. Then an intervention experiment based on the weighted network was introduced after that. We could obtain some excellent results of the experimental scheme which would occur in the future. The main points are as follow:

1. We provided a new research perspective to study the SCO. By combining the longitudinal networks and intervention experiment, we can understand the structure and evolution properties of the network better. The weighted network can show us a better way to solve problems which were existed in the topology research about the regional organization. The policymakers could evaluate the reasonableness of the results as the simulations were all based on strong practical background.

2. We provided a weighted network model of the SCO which will be influenced on perception. It has been built and calculated that the strength of six SCO members and three nations in the intervention group. The national strength was introduced into fitness model as the finite support, and it is more grounded in reality than the previous one. The model could fit the selection bias among different kinds of countries with the help of Variable Local-world Evolving Network. The theoretical analysis and simulations both verified the scale-free property of the intensity distribution for plausibility and validity

3. We studied the intervention experiment of weighted network in a certain context of scenario. We analyzed the trends by abstracting the process of longitudinal networks. Three experiments have been designed which we called the Superpower, the Selection Bias and the Hostile Nations. As the performance of algorithm is very stable, we can easily find out the main reason by comparing the differences before and after the nations in intervention group joined the network. Some policy recommendations about the SCO were presented, especially basing on the experimental results.

Key Words : Shanghai Cooperation Organization, Weighted Network, Evolutionary Model, Intervention Experiment

第一章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 从“上海五国”机制到“一带一路”倡议

上海合作组织是由中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦和塔吉克斯坦等六国，共同于 2001 年 6 月 15 日在我国上海宣布成立的永久性政府间国际组织^[1]。上海合作组织起源于欧亚大陆错综复杂的历史地缘关系，最早可以追溯到中国和前苏联国家的勘界谈判，其前身是 1996 年建立的专注于解决边界问题和增进边境地区军事互信的“上海五国”元首定期会晤机制。“9·11”事件后，随着恐怖主义在全球范围内迅速蔓延，尤其是“三股势力”“伊斯兰国”等极端组织进入新一轮活跃期，欧亚大陆的战略地位开始日益凸显，上海合作组织因其独特的地缘环境、合作理念和发展定位开始受到国际社会的广泛关注^[2]。

上海合作组织最为困难的初创阶段，各成员国尤其是中亚四国都面临着安定内政、发展经济和改善民生等紧迫任务，国家间的政治互信也亟待修复。尽管当时的处境和前景在国际上并不被看好，但通过对内秉承“互信、互利、平等、协商、尊重多样文明、谋求共同发展”的“上海精神”，对外奉行“不结盟、不对抗、不针对任何国家和组织”的“三不原则”，各成员国在组织内部凝聚起了稳步向前的强劲动力。伴随着大国战略关系重组以及区域热点问题频发等国际局势影响的持续深入，在新安全观、外交观、合作观的引领下，上海合作组织已发展成以维护地区安全为主轴，经济、政治、文化等多领域合作融合渗透、务实推进的重要对话和交流平台，并逐步成长为欧亚大陆繁荣稳定的中流砥柱^[3]。

在复杂多变的地缘政治和战略格局下，伴随着国际和地区影响力的不断提升，加入上海合作组织的吸引力也在不断增强。通过批准《观察员条例》《对话伙伴条例》《接收新成员条例》等相关文件，上海合作组织目前共有正式成员国 6 个：中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦；观察员国 6 个：伊朗、阿富汗、蒙古、白俄罗斯、巴基斯坦和印度；对话伙伴国 6 个：斯里兰卡、土耳其、阿塞拜疆、亚美尼亚、柬埔寨和尼泊尔；参会客人 3 个：土库曼斯坦、独立国家联合体和东南亚国家联盟^[4]。2014 年杜尚别峰会通过的《给予上海合作组织成员国地位程序》《关于申请国加入上海合作组织义务的备忘录范本》修订案等，为上海合作组织正式扩大成员国奠定了坚实的法律基础^[5]。

2015 年 7 月 10 日，上海合作组织在距欧亚交界处不远，位于乌拉尔山脉西南侧的俄罗斯联邦巴什基尔自治共和国首府乌法市举行了第十五次峰会。乌法峰会正式通过了关于启动接收印度、巴基斯坦为正式成员国程序的决议，这标志着该

组织成立 15 年以来首次就扩员问题迈出实质性步伐^[6]。通过吸纳印巴两国加入，将一举打通上海合作组织在印度洋海域的战略通道，对有效打击在中亚和南亚地区肆虐的恐怖活动，特别是遏制与中国、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦等多国邻近的阿富汗境内的恐怖势力意义非凡。此外，据世界银行 2014 年数据统计，扩员后的上海合作组织总面积约 3317.8 万平方公里，占欧亚大陆的三分之二；石油和天然气储备分别超过 260 亿吨和 7 万亿立方米，占全球探明储量的 20%和 50%；人口近 31 亿，占世界人口总数的 50%，经济总量超过 15 万亿^[7]。这表明，无论从地理范围、人口总量还是经济规模来看，上海合作组织都将成为自冷战结束以来，欧亚大陆最大的地区性合作组织，同时也是当今世界最重要的国际组织之一。

2013 年 9 月和 10 月，习近平主席先后提出建设“丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”的战略构想，倡议坚持“一个核心理念”，突出“五个合作重点”，合力打造“三个共同体”^[8]。2015 年 3 月，习近平主席在博鳌亚洲论坛开幕式发表主旨演讲时表示，“一带一路”倡议主要是巩固现有的合作基础，推动沿线各国实现经济战略的相互对接、优势互补，而不是要替代现有地区协作机制。上海合作组织成员国是“一带一路”倡议衔接和实施的核心区域，即将成为正式成员国的印度和巴基斯坦同样是“一带一路”倡议辐射的关键国家，可以说两者无论是在地缘版图还是发展理念上都高度契合^[9]。随着与“一带一盟”（即：“一带一路”倡议和欧亚经济联盟）战略对接的稳步推进，上海合作组织还将继续作为欧亚大陆一体化进程的主要基石，承担更多更重要的历史使命。正如俄罗斯外交部长谢尔盖·拉夫罗夫在总结乌法峰会成果时指出：“上海合作组织对于所有成员国而言，都是一个非常适合探讨欧亚经济联盟与丝绸之路经济带对接具体事务的便利平台”^[10]。

1.1.2 网络建模与国际关系研究

早在 19 世纪 50 年代，第十届诺贝尔经济学奖获得者、美国著名经济组织决策管理大师 Herbert A. Simon 就曾指出，尽管理性选择理论的效用最大化假设可以在数学上得到很好的证明，但这种基于完备认知信息、稳定选择偏好和过人运算能力等预设条件的结论，终究只能是一种偏激的行为模型^[11]。同为诺贝尔奖获得者的 Kahneman 院士在与 Tversky 院士合作提出的“期望理论”^[12]中，通过科学系统的对比实验，证明了人在不确定性条件下，更多的还是依赖直觉和经验形成判断，这样极易产生代表性直觉偏差、易得性直觉偏差以及锚定和调整偏差，并最终影响决策的准确性^[13]。正如 Charles Machay 在《异常的公共错觉和群体癫狂》中记载的让整个 17 世纪中叶荷兰都为之狂热的“郁金香泡沫”，抑或是起源于美国次贷危机而后席卷全球的金融风暴，往往看似充满着理性的个体或组织经常会做出那些“带有遗憾的非理性行为”和“貌似非理性但无遗憾的行为”^[14]。

随着计算能力的日益增强，需要耗费大量资源的仿真及模型运算开始变得可行。通过对实验结果的统计分析和可视化，就可以让决策者更加直观地区分备选方案的优劣，进而更为全面地评估各种假设的合理性^[15]。同时，运用仿真技术构建演化模型，可以较好地克服当前困扰国际关系研究的数据缺乏等问题。美国国防部资助开发的政治意愿推理工具（Political Will Expert Reasoning Tool），引入了基于在线数据的实时挖掘技术，通过综合政治、经济、安全等因素构建预测模型，基本实现从国家行为层面对领导人政治意愿进行分析和预判，其研究成果已经被用于为美军高层决策提供依据^[16]。因成功预测中国将出兵朝鲜而声名鹊起的美国著名战略研究机构兰德公司，在战争场景预演和潜在威胁评估等方面始终保持着领先地位。该公司最近提出的鲁棒决策法是一种应对高度不确定性条件下决策困境的系统方法，主要借助计算机仿真模型和实验评估数据，探知既定的方案计划在未来各种复杂环境和条件假设下的实施结果，帮助决策者在不需要确信预测结果的情况下，识别并选择具有更强鲁棒性计划的一种方法和思路^[17]。

“复杂性”常常被认为是理解国家间合作和冲突行为的关键，Robert Keohane 和 Joseph Nye 等知名学者很早就开始通过简化网络模型等方式研究国际关系的现实及其影响^[18]。在相当长的一段时期内，政治学家和国际关系学者们更多的只是将“网络”局限为一种测量方法或统计工具，真正将其作为理论范式应用于政府合作的研究成果并不多见。近年来，许多研究人员开始意识到，通过给予政治、经济等合作行为精确的形式化定义，能够帮助我们以全新的视角来总结概括国际结构的稳定性、发展动力和演变规律。网络科学作为一种对行为体互动的研究范式，最初起源于瑞士著名数学家 Leonhard Euler 在尝试解决“哥尼斯堡七桥问题”过程中创立的图论（Graph Theory），其核心着眼点是网络中行为体的“位置及相互关系”^[19]。在国际关系建模中，通过将国家或非政府组织抽象为节点，行为体之间的经贸往来、军事合作、甚至是敌对关系等抽象为连边，借助网络科学的基础理论和计算工具，进而实现对网络动力学特征的建模分析^[20]。基于上述思想，已有的研究成果主要集中在对国际体系中的跨国治理、经贸合作和外事交流等新兴结构的初步探索，同时也为国际政治研究提供了崭新的理论视角和有力武器^[21]。

1.1.3 从拓扑结构研究到权重网络演化模型

1984年，Murray Gell-mann、Philip Anderson 和 Kenneth J. Arrow 等 24 位包括诺贝尔奖获得者的物理学家和数学家，在美国新墨西哥州首府圣塔菲市共同创办了著名的圣塔菲研究所（Santa Fe Institute, SFI）。该研究所是一个把复杂性作为主要研究方向的非盈利性机构，致力于对各种高度复杂且相互作用的系统及其网络演化机理进行探索。著名科学家钱学森对复杂网络研究也很关注，将其定义为：

“具有自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度中部分或全部性质的网络^[22]。”自然界和人类社会存在着许多复杂系统，它们由大量组分组成，不存在中央控制，通过学习和进化产生适应性，这些系统往往只能在交叉学科的背景下研究清楚^[23]。人们对于真实世界网络的理解也经历了规则网络^[24]、随机网络^[25]到复杂网络等不同研究阶段。通过对系统的混沌、涌现、渗流以及相变等动力学行为的深入研究，还原论对于复杂性问题研究的局限性也进一步凸显，正如复杂网络领域的开拓者 Barabási 指出，“在弄清楚系统各组成部分的连接关系之前，不可能完全理解复杂系统。”复杂网络研究由此也开始逐步进入非线性、非均衡的网络科学新时代^[26]。

自从 1998 年和 1999 年 Watts^[27]和 Barabási^[28]的两项开创性工作和标志性论文分别在 Nature 和 Science 期刊上发表，尤其是小世界网络（Small-world Networks）和无标度网络（Scale-free Networks）的提出，复杂网络的研究领域不再局限于数学和物理学，现实网络的普适性质和动力学行为开始发展为学科前沿的焦点课题。2006 年，为表彰其在复杂网络研究中所做的先驱性贡献，Barabási 教授被美国 John von Neumann 计算学会授予 Computing Medal^[29]，该奖项主要用于褒奖在计算机科学及相关领域取得开创性成就的学者，1976 年设立以来只颁给过 3 位杰出科学家。被誉为继 Albert Einstein 之后本世纪最伟大理论物理学家的 Stephen W. Hawking 教授曾表示：“21 世纪将是复杂性科学的世纪^[30]。”目前为止，网络建模领域最具影响力的研究成果还聚焦于以度分布、簇系数和平均距离等为主要对象的拓扑结构分析，即节点之间主要表现为有无连接关系。而越来越多的实证数据表明，如果只是单纯地考虑网络拓扑结构，这种基于静态的、线性的、固定规则的演化模型会丢失许多重要的物理内涵和连接信息^[31]。Yook 等首先提出了权重网络(Weighted Networks)的概念，通过引入点权和边权这两个超越纯拓扑结构的变量，形象地再现了许多真实网络中无标度分布的交互模型和嵌入机理，同时指出多数加权网络的拓扑结构与节点权值之间存在明显的异质性(Heterogenous)^[32]。

2004 年，Barrat, Barthelemy 和 Vespignani 提出了第一个真正意义上的权重网络演化模型 BBV 模型^[33]。该模型的网络拓扑结构与节点强度、连边权重存在一种共生演化、相互驱动的关系，为研究权重网络演化奠定了良好基础。通过考虑网络中节点数量增加后拓扑结构和连边权重的变化，可以较好的重现真实网络中拓扑结构与连边权重的耦合关系异质性^[34]。中国科技大学汪秉宏团队研究发现，BBV 模型等研究成果仅考虑了新节点加入及其同网络节点之间的关系演化，忽略了网络中原有节点之间可能的连接变化，因此对于描述真实网络所具有的高簇系数、度权非线性相关和相称混合性等现象效果不佳。在 BBV 模型的启发下，该研究组提出了一种交通流驱动的权重网络演化模型(TDE 模型)。该模型不仅考虑了拓扑结构变化对网络权重的影响，同时引入了对网络中原有节点的相互作用以及边权演

化等综合因素的思考，特别在是负载不足的情况下，网络内部交通流量与拓扑结构的相互作用，可以更全面地拟合真实网络连接度、强度和权重分布的幂率函数，以及高平均集聚程度和非相称混合性等演化特征^[35]。目前国内外比较有影响力的权重网络演化模型还包括 Holme-Kim(HK)模型^[36]、Antal-Krapivsky(AK)模型^[37]、Zheng-Trimper-Zheng-Hui(ZTZH)模型^[38]、Dorogovtsev-Mendes(DM)模型^[39]等。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 上海合作组织研究现状

上海合作组织从“上海五国”发展至今，已经由一个单纯处理边界遗留问题、增强地区军事互信的五方双边合作平台，逐渐演变为推动中亚地区安全与经济合作、增强不同文明对话的多边合作机制。国内外主流媒体和研究人员对上海合作组织的关注也在逐年增多，在谷歌搜索^[40]输入“上海合作组织”或“Shanghai Cooperation Organization”的关键词，得到的网页记录分别为 326000 条和 4380000 条。通过在国防科学技术大学图书馆的馆藏文献以及谷歌学术检索查询发现，关于上海合作组织的图书和论文等研究成果的数量，也逐年呈现出明显的上升趋势，通过图 1.1 可以对上述结论有更为直观的理解。为了便于理解讨论，我们按照研究领域将国内外关于上海合作组织的主要研究成果归纳为五个方面。

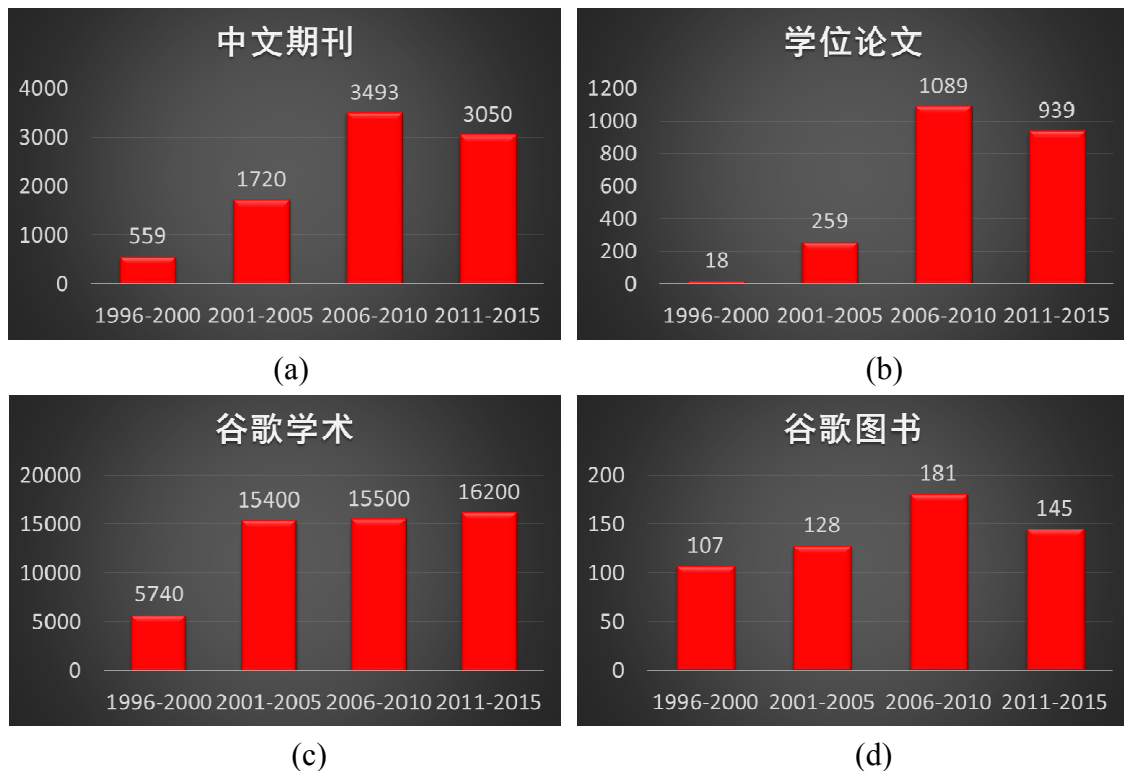


图 1.1 上海合作组织学术研究成果数量统计（1996-2015）

1.2.1.1 战略定位与发展

瑞典斯德哥尔摩国际和平研究所(SIPRI)的 Alyson Bailes 团队研究指出,进入 21 世纪以来,针对具体对象的传统安全联盟越来越少,各类地区性组织的功能更为多样,而且大多以解决成员国之间的问题为主,上海合作组织则是其中最具活力的代表之一^[41]。赵华胜从概念构筑、形象塑造、组织建设、对外关系等方面总结了上海合作组织取得的成果,同时指出其在发展模式、功能定位、安全与经济的平衡、应对中亚新的政治生态、地区稳定、组织扩大等一系列问题存在的不足^[42]。冯玉军基于“欧亚主义思想”的研究视角,对上海合作组织的战略定位与发展方式进行了深入剖析,提出包括政治、经济与安全等多领域的合作转变,以及使上海合作组织成为以“新欧亚主义”为核心价值观的欧亚区域合作共同体等主张^[43]。

1.2.1.2 经贸及能源合作

贾俐贞梳理了近年来中国与中亚各国开展经贸合作的有关情况,肯定了上海合作组织对于推动区域经济合作的重要意义,并对建立由中国政府倡议的上海合作组织自由贸易区的历史必然性和现实合理性进行了分析^[44]。孙永祥全面回顾了近年来上海合作组织框架内能源合作取得的丰硕成果,提出为有效应对成员国之间存在的能源战略差异、信任理解缺失以及资源竞争激烈等问题,必须从共同面对风险挑战、完善司法制度保障、制定全方位应急预案等方面务实推进合作^[45]。胡鞍钢等指出中亚经济带是“丝绸之路经济带”的核心区,环中亚经济带是“丝绸之路经济带”的重要区,亚欧经济带是“丝绸之路经济带”的拓展区,并就以上海合作组织为战略框架,不断推进中国与中亚区域经济整合提出了原则和策略^[46]。

1.2.1.3 安全与反恐合作

王晓光分析了上海合作组织新型区域安全合作模式的主要特点后指出,进一步深化框架内安全合作还面临着成员国立场统一、域外势力干扰、不稳定因素增多以及利益诉求分化等诸多现实问题和挑战,并尝试提出维护地区稳定的针对性措施^[47]。德拉干那·米特洛维克通过评估上海合作组织所处的地缘安全环境,认为该组织在外部需要应对美国和北约等强势介入对周边地区局势稳定提出的严峻挑战,在内部如何更为有效地深化合作并挖掘经济发展潜能则成为当务之急^[48]。王涛总结得出上海合作组织自成立以来,以建立军事互信为起点,根据形势发展不断扩大安全合作,努力维护地区战略平衡,有效震慑了“三股势力”,并对深化拓展框架内的防务合作,完善综合安全体系进行了展望^[49]。潘光等以上海合作组织为例,梳理了当前国际恐怖主义出现的新特点、新趋势,通过成本、能力、收益三个维度,对构建反恐合作评估体系的科学路径进行了探索^[50]。

1.2.1.4 文化及教育合作

李葆修分析了文化交流在国际关系中的重要地位，提出应当针对上海合作组织成员国的文化差异，充分发挥文化本身的纽带作用，在文化部长定期会晤等机制的推动下，探索多种形式的交流合作，持续深化成员国政治互信的支撑基础^[51]。张全生等总结指出，政府主导的中亚孔子学院开展人文交流合作具有运行模式本地化、资金来源多渠道化、合作主体多元化、组织形式多样化等特点，存在机制建设不完备、发展规划不明晰、互信基础不牢靠等问题，提出应当努力拓宽合作内容领域、建立长效人文交流机制、加大政策支持力度等思路建议^[52]。蔡文伯等对上海合作组织大学经历的理论构想、创建启动、补充完善的各发展阶段进行了全面回顾，列举了该项目运作过程中许多亟待解决的问题和挑战，提出按照立足长远、着眼未来、统筹规划的思路进一步拓宽和提升发展空间^[53]。

1.2.1.5 组织扩员问题

曾向红等对上海合作组织的扩员问题进行了学理分析，通过权衡发展前景、风险挑战、安全形势等方面可能产生的成本收益，梳理出俄罗斯与中国在该组织国际定位与扩员问题的主要分歧，进而得出短时间内不太可能扩员的结论^[54]。俄罗斯总统上海合作组织问题特命全权代表 Vitaly Y. Vorobyov 曾明确表示，对该组织扩大成员国范围持保留态度，提出不应单纯考虑当前局势而在是否扩大规模等问题上摇摆，当前还是要集中精力完善制度机制、优化内部结构和落实具体任务，防止各类合作项目沦为政府高层的“外交秀”^[55]。陈小鼎等分析了上海合作组织与东盟在扩员问题的宗旨原则和外部挑战等方面的相似性，全面梳理了东盟历次扩员的历程、问题和启示，通过对比上海合作组织与东盟的国际环境差异等因素，得出可以优先考虑吸纳阿富汗或蒙古为正式成员国的结论^[56]。

1.2.2 网络科学在国际关系研究中的应用

1.2.2.1 基于研究范式分类

研究范式是指对某一具体对象被科学共同体普遍认可和选用的研究方法^[57]。目前按照理论源起、研究思路和学科背景等，网络科学分为社会网络分析和复杂网络理论两种研究范式。杨建梅分别从相互关系、方法途径和实证分析等多个维度，对复杂网络理论与社会网络分析的研究范式进行了比较，认为两者虽共有图论的渊源，但由于基础理论、路径依赖和应用领域等方面的差异，应分属互不包含的研究范畴^[58]。网络科学在国际关系领域相应的也存在两种视角：一是社会网络分析，主要分为关系网络和隶属网络两种类型。关系网也称单模网络，隶属网

也称双模网络。社会网络分析侧重于通过识别角色以及局部结构来评价国家在网络中的位置属性和相互关系。汪云林等运用结构洞理论以及中介中心性等指标,选取了 33 个与中国关系密切且国际贸易发达的经济体,利用 2004 年相关数据构建的有向网络对国家的角色和地位进行了静态分析^[59]。Memon 等引入网络效率工具测量了恐怖组织网络的拓扑连通性、结构冗余度等属性指标,综合派系、宗派、凝聚子群等聚类分析,提出使用依赖中心性、位置角色中心性等指标对隐蔽网络的核心区域和关键节点进行特征识别和综合评价^[60]。另一个是复杂网络理论,由于延续了统计物理以探索客观现象的普适性规律为目的的研究思路,复杂网络更为关注国际组织关系及网络结构的拓扑特征和演化规律。Serrano 等通过对世界主要国家 2000 年的贸易数据进行建网分析,首次对国际贸易网络的无标度等经验特征进行了检验,发现节点分布具有显著的小世界属性和高集聚系数等复杂网络的典型特征,实证结果表明其负向匹配特性会对网络演化会产生直接影响^[61]。段文奇等应用复杂网络理论,计算分析了 1950 年至 2000 年间国际贸易网络的度分布、度相关性、互惠性和群聚性等拓扑结构特征的演化规律。研究结果表明,国际贸易网络不是典型的无标度网络,其拓扑结构的一致性在演化过程中出现了比较明显的下降^[62]。此外,主要借助超图等形式描述网络节点相互作用和影响的超网络模型,开始越来越广泛的被运用到实际问题的研究中。随着国际网络和国内网络的相互交织、嵌套叠合,在垂直维度上搭建的多层次、立体式“网络状国际政治空间”结构观开始逐步形成,为解释和探索国家间“关系”打开了新的理论空间^[63]。与此同时,网络科学在国际关系研究中的实际成效也在不断的遭到质疑。Arribas 等对近年来网络科学在国际合作相关领域的主要成果进行梳理后指出,除了少数的几篇论文结合网络指标的统计特征解释了与研究对象的关系外,绝大部分的实证研究并没有对复杂网络中主要测度的实际意义做出清晰界定,故而认为网络分析方法并不能对国际关系研究产生实质性的提高和促进,现有的工作只是提供了一种新的描述国际合作模式的方式或视角,对于解释国家间互动网络中发生的动作,以及相关对策建议的提出并没有直接帮助^[64]。

1.2.2.2 基于研究路径分类

网络科学从社会学领域被引入国际关系研究以来,根据建构视角的不同主要可以区分为两种结构分析方法。一种是将网络视为整体框架进行研究。这种思路认为,网络可以通过结构特征及自然属性系统地对成员之间的行为产生影响,也就是将网络视为一种旨在改变行为个体和整体利益的协调机制。当面对制度性竞争者时,网络结构整体的组织优势或劣势会占据更突出的位置。Hafner-Burton 等认为,政府间国际合作行为可以被视为在无组织权威的行为集体中寻求“重复持久

的互动模式”，而关系格局或规则机制又反过来为网络成员提供机会或限制行为体行为，从而对研究对象的合作策略产生显著影响^[65]。姚永玲等从 2000 年至 2011 年间选取六个典型年份，将二十国集团（G20）成员国之间的贸易流量数据二值化处理后抽象为无权矩阵。通过分析成员国贸易网络总体结构和子群数量的演变趋势，验证了 G20 集团内部出现的扁平化倾向及该机制在后危机时代推动全球性合作的地位和作用^[66]。另一种思路更为关注能动者给网络结构带来的影响。网络模型往往从点的特征中抽象出结构，因而成员之间的关联会产生较为持久的影响，在一定程度上改变所在网络的结构环境和关系模式。这些行为体可以是国际组织、主权国家、恐怖组织或者其他参与国际事务的相关机构。Walter Enders 等为了更好的理解国际恐怖组织的内部优化以及政府合作的最佳打击策略，通过将理性选择模型引入社会网络分析，发现恐怖组织成员当面临通信效率与隐蔽程度选择时，存在一个理性“平衡点”，这个模型后来被推广到预测恐怖网络结构及发动袭击成功率等领域^[67]。杨辰博系统分析了国际核不扩散机制缔约国在签署条约要件和组织运作过程中的互动模式，结合案例数据对成员国网络位置与其在不扩散行为选择之间的对应关系进行了实证分析。研究结论认为，国际原子能机构作为专门致力于推动和平利用原子能的政府间协作平台，必须通过制度压力不断强化对成员国的行为约束^[68]。然而在实际过程中我们也发现，很难将这两种研究路径截然分开，两者“你中有我、我中有你”共同丰富着网络科学在国际政治领域的应用空间。

1.2.2.3 基于研究领域分类

网络科学作为一门新兴的交叉学科和分析技术，已经在自然和社会科学领域取得了令人瞩目的成就。近年来，这一理论范式在国际关系核心问题，特别是公共安全领域取得一系列革命性、标志性的研究成果。其主要结论被广泛应用到军控裁军、恐怖主义、全球治理、国际贸易、气候变化等几乎所有“新老”议题，涉及国际关系、国家安全、对外政策、政治经济学等多个学科门类^[69]。

一是传统安全领域。国家安全一直是国际关系领域最受关注的经典议题。为此，国际冲突与争端的缘起和解决，创造与为维持和平的条件等也开始成为受到关注的研究重点。刘丰等利用社会网络分析中的密度、中心势、块模型等概念，检验了联盟网络特征指标与体系内部军事冲突的相关关系。研究结果表明，上述三个变量中网络密度和子群数量与军事冲突呈正相关，而中心势呈负相关^[70]。同时，社会网络分析也为传统安全领域一些长期存在争议的问题提供了新的研究视角和工具，正如 Zeev Maoz 教授在 2010 年出版的《国家间网络：国际网络的演变、结构和影响，1816—2001》，通过构建贸易联盟、战略同盟以及非政府组织等网络模型，将过去两个世纪中主要国家间的一系列合作与冲突等互动行为简化为结

构同型指数演变结果，并讨论了网络中心性指标对冲突与战争影响的显著性，提炼的国际政治网络理论（Networked International Politics），为研究人员全面理解地缘政治的复杂性提供了新颖的分析工具^[71]。

二是非传统安全领域。2001年“9·11”恐怖袭击发生后，恐怖组织作为一种隐蔽网络开始受到网络科学领域的广泛关注，以美国为代表的西方学者围绕如何有效应对其组织结构的隐蔽性和分散性做了大量研究。其中最具代表性的成果，就是 Valdis Krebs 根据“9·11”事件发生后的几周内媒体“连续不断”的公开报道，梳理出4个航班的19名参与劫机的恐怖分子之前的住所、培训、会议以及资金等关联信息，并借助中心性指标识别出网络中的关键人物^[72]。Moon 等认为通过梳理恐怖分子社会关系及其在地理位置上的演变进程，可以有效预测相应网络模型的时空演化规律，进而确定恐怖组织的潜在领导、袭击目标及核心热点等重要信息^[73]。付举磊等综合运用地理信息系统和动态元网络分析等技术，将“东突”恐怖组织自新中国成立以来在全球范围内发动的袭击事件转换成时空演化模型，从多个角度给出了恐怖活动的定性解释，为有效提升恐怖袭击防范水平提供了决策依据^[74]。

三是政治经济合作领域。由于实证数据比较全面和丰富，政治经济领域的合作特别适合运用网络科学的方法和工具进行研究，与之相关成果也最为丰硕。Miles Kahler 在其主编的《网络政治》一书中将网络空间与现实政治联系起来，围绕“网络治理”的直接性、平等性、渗透性、便捷性等属性特点，深入探讨了互联网管理、国际人权组织、恐怖主义全球化以及跨国犯罪网络等全球性问题的成因及应对策略^[75]。Fagiolo 等引入权重的概念构建出包含159个国家的国际贸易网络，通过分析相关国家1981年至2000年中心性指标的变化趋势，发现模型的强度分布表现出显著的异质性和局部集聚性，即大多数国家的经贸往来数量和规模都比较有限，而极少数以发达国家为代表的核心节点与多数发展中国家的贸易关系存在结构性失衡^[76]。孙晓蕾等考察了全球原油贸易网络从2002年到2010年的演化过程，基于群聚性、互惠性、网络混合等拓扑特征，描述了中国能源安全的相对态势，通过对比美国、日本等主要国家的发展经验，提出中国政府应借助上海合作组织等平台实现能源供给渠道的分散化、多元化^[77]。

1.2.3 存在的问题

通过总结梳理，我们可以看到上海合作组织自成立以来，其组织结构和发展历程受到了政治、经济和学术界的高度重视和密切关注，形成了一大批很有价值的研究成果。随着网络科学逐步成长、走向成熟，这一研究范式在国际关系领域取得的应用成果也非常丰硕，并且为我们思考认识问题提供了一种新的视角和方法。与此同时，我们也看到确实还存在一些不容忽视的问题和不足。

一是针对上海合作组织的研究成果，主要还是基于传统的还原论和统计学理论，更多的仍停留在经验和政策层面。由于真实数据的获取、量化和筛选确实存在不少困难，学者们更倾向于从历史沿革、国家关系以及政策评估等视角开展定性分析。尽管行为分析及预测在一定程度上能帮助决策者洞悉对象的发展变化趋势，但这些成果不可避免的存在研究结论不具体、不直观等问题。因此，目前该领域真正具有一定政策深度的理论成果并不多见。

二是由于权重概念的缺失，导致网络科学在国际关系领域的研究成果主要集中于大尺度网络（时间跨度大，地域范围宽），并且大多只关心节点和连边的数量变化，忽视了权重差异对网络结构和演化规律的影响。实际上，政府间合作关系在有限的时间范围内具有相对稳定性，地区性国际组织的合作网络大都会涉及互动强度等动态特性，也就是说，如果直接套用二值化的方法进行简化，将使得传统的指标测度因失去意义而无法有效推广应用。

三是网络科学以“反类属律令”（Anti-categorical Imperative）为基本出发点，强调结构特征决定系统功能，其研究过程更为关注的是网络整体表现出的拓扑结构，而较少考虑行为体本身的类别属性。但是国际关系的研究对象综合实力经常差异悬殊，尤其是针对上海合作组织等规模有限的网络进行演化研究，其时间截面的事件数据往往又比较稀疏，如果仅仅从关系模式的角度刻画不同国家对其所在组织发展的影响力既不准确，也不符合实际。

四是对于政策制定者和决策者而言，在面对难以预测的高度不确定性未来时，要在各种选择中做出正确的抉择需要的不仅是基于预测的传统分析法。现有的国际关系量化研究倾向于通过对历史事件和数据的分析挖掘，发现其中隐含的关联关系。尽管借助网络科学能够比较逼真地对国际组织的行为体进行建模分析，但其对未来趋势的判断却始终无法排除主观因素的影响，这意味着网络模型的可信赖程度和决策风险的可控性将大打折扣。

1.3 本文的主要研究工作

1.3.1 研究思路

通过网络演化模型对上海合作组织进行研究需要解决以下三个问题：

1. 上海合作组织的网络类型和结构属性有那些特征？

全面合理地对网络的结构属性进行分析，是通过模型演化的方法研究上海合作组织的基础和前提。通过对历史沿革、机构设置、组织成员、合作内容、对外交往等进行梳理，分别建立有向加权网络、隶属关系网络和多元合作网络等，并对网络的节点属性和关系数据进行计算，结合时间截面数据的纵向分析，为选定和构建网络演化模型提供可靠的事实依据。

2. 如何构建符合实际的上海合作组织网络演化模型？

关于基本模型的选定与构建是网络演化研究的核心与关键。结合对已有数据纵向分析，我们可以对上海合作组织网络的结构类型、生长特性以及各中心性指标的分布情况有一个较为准确的判断。进而通过借鉴复杂网络演化研究的成熟模型和经验，构建符合研究对象实际的权重网络演化模型并完成算法的理论解析和实验结果分析，为演化干预策略实验提供基础平台。

3. 上海合作组织网络模型自身及受到干预时有哪些演化规律？

对所构建的权重网络模型的演化规律进行探索是我们研究的最终目的。通过对网络结构数据纵向分析过程中发现的演化特性进行抽象，得到干预策略实验条件构建的具体规则和依据，研究模型遇到想定背景的外部干预时，网络结构和节点属性表现出的演化规律，结合对仿真实验结果的分析解读，为可能的决策需求提供生动、客观和可靠的数据和结果支撑。

1.3.2 研究内容

在国家自然科学基金面上项目“恐怖组织网络动态演化与干预策略研究”、高等学校博士学科专项科研基金项目“基于 Agent 的犯罪组织网络时空演化计算实验方法研究”，国防科学技术大学优秀研究生创新资助、专业学位研究生优秀学位论文选题资助、研究生“部队实践能手”资助以及“长城信息杯”学员科技创新资助的联合支持下，本文对上海合作组织的网络结构属性、权重网络模型构建及演化规律进行系统深入地研究。全文共分七章，各章节的内容如下：

第一章 绪论。阐述了本文的研究背景，综述了相关领域的研究现状，分析了存在的主要问题，给出了本文的研究思路、方法路径和主要创新点。

第二章 网络演化模型及相关概念。针对纵向网络分析、演化模型构建及干预实验研究的需要，对涉及到的动态元网络、权重网络等基础概念和经典模型进行了逐一介绍，为后续研究的展开做好理论铺垫。

第三章 基于纵向数据的上海合作组织网络结构分析。通过开源途径收集上海合作组织近 20 年来在安全、经济、政治、文化、外交等领域的合作数据，运用网络分析软件得到可视化的结构图和计算结果。通过对指标分布的统计分析，得出上海合作组织网络结构的相关特性。

第四章 基于影响力感知的上海合作组织权重网络演化模型。借鉴国内外成熟经验，构建并计算了作为初始条件的国家实力指数。而后，提出了一种基于影响力感知的上海合作组织权重网络演化模型，并分别通过解析推导和仿真结果验证了模型的有效性和稳定性。

第五章 上海合作组织权重网络演化模型干预策略实验。首先计算出干预对象

的国家实力指数，并根据实际进行了调整。通过引入重要国家、偏好选择和关系紧张三类干预实验，观察并记录了演化模型网络指标的变化趋势。

第六章 基于演化干预实验结果的策略建议。综合演化干预实验的主要结论和上海合作组织所处的地缘环境等因素提出了比较具有针对性的策略建议。

第七章 总结与展望。对全文进行了总结，概况了本文的主要研究结论，指出了后续研究过程中有待进一步提高的工作和要求。

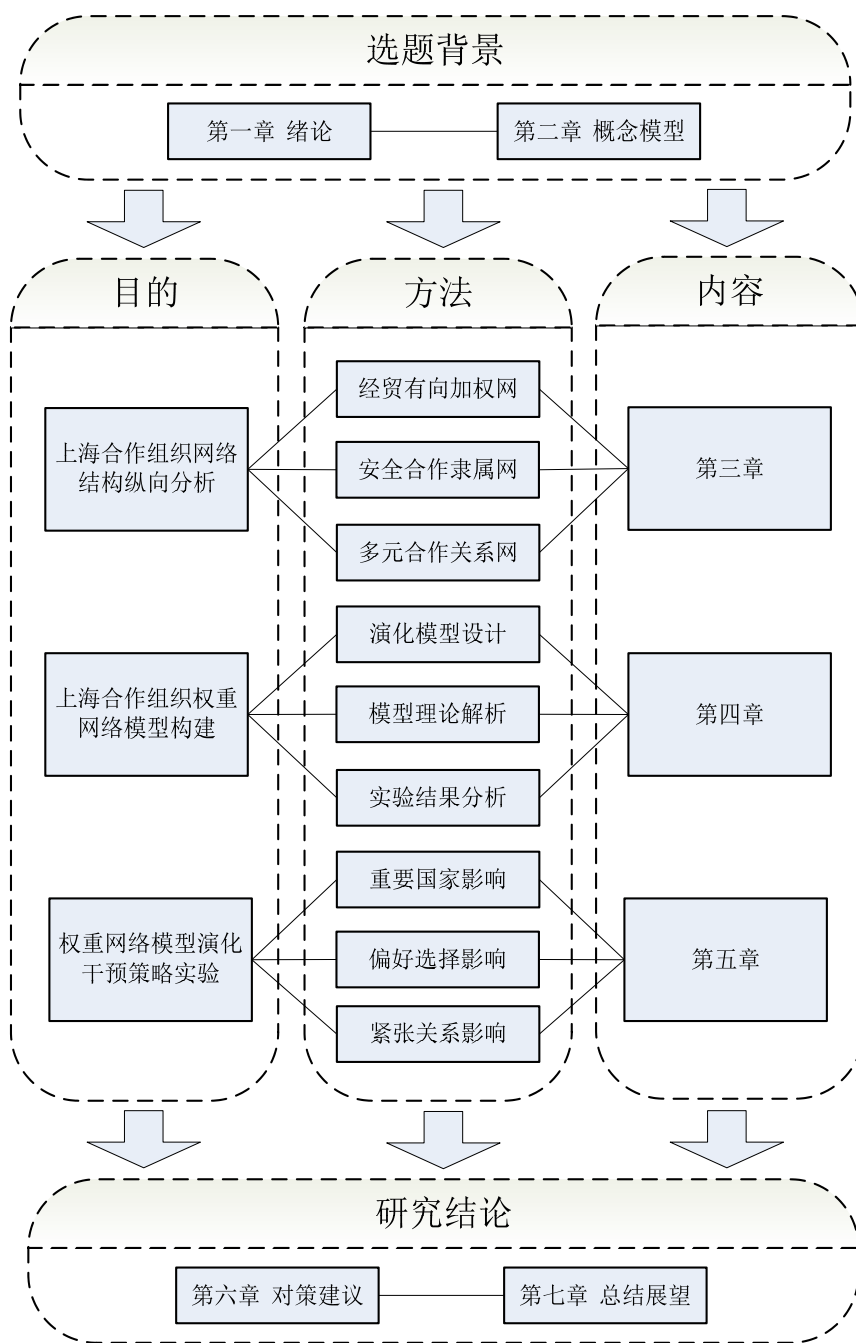


图 1.2 研究思路示意图

1.3.3 主要创新点

1. 提出了一种新的上海合作组织研究视角。

为解决因数据缺失等导致的网络构建困难等实际，通过纵向网络分析与演化干预实验相结合的方法，研究了上海合作组织的网络结构及演化特性。通过引入权重网络模型的概念及其方法，解决了传统的网络拓扑结构研究对于地区性国际组织研究存在的诸多问题和不足，研究结果相比定性研究更为具体和直观。

2. 提出了一种基于影响力感知的权重网络演化模型。

通过对上海合作组织相关事件和数据的可视化和统计分析，将国家实力指数作为有限支撑引入适应度模型，得到更符合地区性国际组织演化特性的网络模型。借助基于可变对象的局域世界演化模型，拟合了不同国家的合作选择偏好。最后运用理论解析和仿真实验相结合的方法分别推导出模型强度分布的无标度特性。

3. 研究了权重网络演化模型对外部干预的响应及对策建议。

通过实验分析的方法研究国家间的关系和行为，其结论可以在一定程度上降低人为判断的主观因素。通过权重网络演化模型进行干预实验，对比分析了干预行为对于网络结构以及核心节点的影响。由于模型本身运行稳定，便于我们分离和确认引起波动的主要因素，并依据实验结果提出具有针对性的对策建议。

第二章 网络演化模型及相关概念

近年来,网络科学的研究范畴开始出现极大的拓展和延伸,不仅在原有的物理学和工程技术等领域取得了令人瞩目的成就,也受到来自生物学、管理学背景的研究人员越来越多的关注。相对于技术性或专业性较强的传统研究,与社会科学相关的成果同普通大众联系更为紧密,而复杂网络理论与社会网络分析相结合也在成为一种新的发展趋势。真实网络中节点的互动关系和连接能力往往表现出较大的差异,当强度在演化过程中起到关键的作用时,对其进行定量刻画就显得尤为重要。因为单纯静态的、结构化的数据指标,并不能客观地反映出网络中所发生的动作及其代表的实际意义。目前,动态元网络分析和权重网络模型正在发展成网络科学最为重要、最富有挑战性的前沿课题。

2.1 动态元网络分析及相关测度

2.1.1 动态元网络分析概述

该领域比较成熟的多元网络分析,主要研究由相同或不同类型节点组成的网络模型及其结构属性,是对传统静态网络分析的一种拓展。PCANS 模型是由 Carley 和 Krackhardt 在 2000 年提出的一种简单的多元网络模型^[78],该模型将研究对象区分为行为体、任务、资源三类基本要素,并建立了优先权级、人事网络、任务分配、资源配置、技能链接等五种可能的特征关系。2002 年,Carley 将知识管理、组织理论和认知科学等领域的最新成果整合到 PCANS 模型中,创建了用于描述组织构成要素及其关系属性的元矩阵模型方法 (Meta-matrix Model)^[79]。

表 2.1 PCANS 模型

	人	知识/资源	事件/任务	组织
人	关系网络	认知网络	参与网络	成员网络
知识/资源		信息网络	需求网络	组织能力网络
事件/任务			时序网络	组织支持网络
组织				组织间网络

随着时间的推移,网络节点自身以及相互之间的关系都会发生变化,这既有可能来自系统内部力量的驱动,也可能是由于外部变化的影响导致。针对网络指标表现出的动态变化特性,Carley 及其团队系统梳理了静态社会网络分析研究存在

的不足和局限，将传统的测量方法与多主体建模技术等相结合，提出了动态网络分析(Dynamic Network Analysis)的建模思想^[80]。动态网络分析将时间等因素引入到网络结构测度的计算过程，其中最具代表性的成果就是纵向网络分析。纵向网络分析是指在一定的时间周期内，按照先后顺序对单个静态网络（网络结构固定）的演化过程进行观察和记录，通过构建时间序列模型对网络指标的变化趋势和缺失信息等进行分析预测^[81]。近年来，通过引入机器学习、人工智能和地理空间等概念，相继开发出能够对系统结构演化进行高效预警监测的建模与分析工具。最为成功的运用就是通过对恐怖组织在不同环境下策划、组织、发动袭击等过程进行动态模拟，为相关部门及时侦破和瓦解恐怖袭击提供针对性意见^[82]。Chen 等综合网络分析和数据挖掘等处理技术，自主研发的反恐专用网络爬虫软件“暗网”，能够实时从互联网等开源媒介获取和处理情报信息，实现了对恐怖活动相关的网页站点、行动类别以及活跃程度等内容的在线可视化监控^[83]。Cui 等运用现有的多主体空间演化分析工具，设计出能够模拟叛乱分子对多个军用或民用目标实施袭击的动态适应性模型，通过引入粒子群构建的干预实验，为更好地理解叛乱活动和非对称战争，进而有效瓦解叛乱组织及其行动提供了决策支撑^[84]。中国科学院王飞跃团队基于以虚实平行互动为特征的建模思想，构建了一种开放交互式突发事件仿真与计算实验平台。在此基础上开发的门户式平行管理系统“天网工程”，能够对互联网上的社会治安、热点问题等信息实时监控、在线收集和分类记录，并对舆情动态实施预警监测，实现了情报获取由不定性、多样性、复杂性到灵捷、聚焦、收敛的跨越^[85]。鉴于动态网络分析技术所表现的突出能力，Science 杂志在 2009 年出版的《复杂网络专刊》中指出“网络科学的未来方向将是动态元网络分析”^[86]。

2.1.2 动态元网络分析的主要测度

动态元网络分析基于自然和社会系统的开放属性，围绕状态参量持续变化等特性展开实证研究，其主要思路是在多个维度对网络结构和节点的相互关系进行量化和可视化分析。具体来说，主要包括整体网络和局域网络两个大类，分析方法也可以区分为结构属性和个体属性。在传统的网络科学中，中心度是最常用也是最重要的静态网络几何变量，同时也是构建其他指标体系的基础。由于本文的研究对象上海合作组织特殊的网络拓扑结构，使得许多传统的参数指标失去意义，本节主要选取后续将要用到的基础测度进行介绍^[87]。

1. 密度 (Density)

密度的定义是网络拓扑中实际存在的边数与具有相同结构的全连接网络，也就是任意两个节点都直接连通时应有边数的比例。从定义中可以看出，该指标是从整体上测量网络疏密程度的重要参数，可以对许多其他中心性指标产生影响。

$$Density = \frac{2l}{n(n-1)} \quad (2.1)$$

式中 l 表示网络中实际存在连边的数量； n 表示网络中节点的总数， $n(n-1)/2$ 表示网络为全连接时的边数。由计算公式可知网络密度的取值范围是 $[0,1]$ 。

2. 点度中心度 (Degree Centrality)

点度中心度的核心定义来源于社会计量学的概念“明星”。它描述的是网络中一个节点与其余节点的连通程度。在网络拓扑结构中，少数核心节点的受欢迎程度相比其他普通节点可能会出现数量级的差异，点度中心度的概念可以超越直接联系，帮助我们迅速找到这样的核心节点。在无向网络中，

$$Degree = \sum_{j=1}^n l(n_i, n_j) \quad (2.2)$$

式中 n 表示网络中现有节点的总数。根据定义可知，如果节点 n_i 和节点 n_j 之间存在连接，则 $l(n_i, n_j)$ 取值为 1，否则取值为 0。由于在动态网络分析中图的规模，也就是网络中节点的数量会随时间出现较大变化，通常我们在计算过程中会引入相对点度中心度的概念，在无向网络中，

$$Degree' = \frac{\sum_{j=1}^n l(n_i, n_j)}{n-1} \quad (2.3)$$

公式 2.3 的 $n-1$ 表示网络中某一节点连边数量的最大理论值。由计算公式可知相对点度中心度的取值范围在 0 到 1 之间。权重网络中节点的点度中心度不仅由边的数量决定，连边上流量规模的差异也会起到重要作用。在实际应用的过程中，如果到考虑节点之间的连接具有方向性，还可以根据其方向区分入度 (In Degree) 和出度 (Out Degree) 两个概念，实现对连接情况更为精确地刻画。

3. 接近中心度 (Closeness Centrality)

接近中心度最直接的测量方法就是计算选定节点之间的距离函数及其对网络连通性的影响。具体而言，如果网络中一个节点与其他节点直接连通所需的步骤都比较少，也就是说选定节点可以根据需要迅速与其他节点产生内在连接，我们可以认为该节点在一定程度上占据了中心位置，其在信息交流的过程中也会更有效率。与点度中心度不同，具有较高接近中心度的节点不一定与核心节点直接相连，其主要考虑的是节点之间平均距离“最小化”，在无向网络中，

$$Closeness = \frac{n-1}{\sum_{j=1}^n d(n_i, n_j)} \quad (2.4)$$

式中 $d(n_i, n_j)$ 表示节点 n_i 和节点 n_j 之间的最短路径长度， n 表示网络中的节点总数。需要说明的是，接近中心度对拓扑结构依赖性较高，因此对集中程度相对

较高的网络测量效果要更为明显。Information Centrality 与 Closeness Centrality 两个网络指标的含义比较相近，都是计算选定节点的最短路径和相应连边的权重。而 Information Centrality 的定义更为明确，该测度数值较高的节点，在相同时间内获取信息的能力会更强。

4. 权力指数 (Bonacich Power)

权力指数是 Bonacich 于 1987 年提出的一个重要的中心度概念，其定义中包含一系列局部测度和整体测度。该指数计算的核心思想是测量某个节点的中心度必须考虑所有与之相连的节点。也就是说，如果一个节点与核心节点相连，该节点的中心度会相应提高，同时也会提高其他与自己相连节点的中心度，该指标在计算过程中主要考虑借助映射迭代的方法得出各个节点的重要性指标。

$$C_i = \sum_j \gamma_{ij} (\alpha + \beta_j) \quad (2.5)$$

权力指数主要由 α 和 β 两个参数进行修正。实际计算过程中，节点 i 的权力指数可以表示为与其关关节点的名望或重要性的线性组合，并用相邻节点的中心度进行加权迭代。特征向量中心度 (Eigenvector Centrality) 与权力指数的计算思路相似，二者都是从网络总体的角度，通过循环求解寻找最居于核心位置的节点。

5. 中间中心势 (Betweenness Centralization)

要理解中间中心势 (Betweenness Centralization)，首先必须要介绍中间中心度 (Betweenness Centrality) 的概念，中间中心度主要测量的是网络中所有节点的最短路径有多少经过选定节点。这一指标的重要作用是分辨出谁是网络中的“跨界者” (Boundary Spanners)，即选定节点在任意两点之间充当“媒介”的能力，也可以认为是选定节点控制其他节点联系的能力。中间中心势主要是用于测量网络中各节点中间中心度的分布情况，同时可以对网络的极化程度进行识别。如公式 2.6 所示， $C_{AB\max}$ 是选定节点的绝对中间中心度， $C_{RB\max}$ 是相对中间中心度。

$$C_B = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{AB\max} - C_{ABi})}{n^3 - 4n^2 + 5n - 2} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{BB\max} - C_{RBi})}{n - 1} \quad (2.6)$$

2.2 权重网络的定义及特征参数

2.2.1 权重网络的定义

网络建模与结构分析过程中，可以将具体的图 $G = (V, E)$ 抽象为节点集 V 和边集 E 两部分。 $A = (a_{ij})$ 表示的是网络模型对应的邻接矩阵，对于 A 是 0-1 矩阵这种情况，如果集合 V 中的节点对 (i, j) 相连，则有 $a_{ij} = 1$ ，否则 $a_{ij} = 0$ 。如果网络中任

意两个节点 (i, j) 与 (j, i) 所对应的连边完全相同, 那么该网络是无向网络(Undirected Network), 否则就是有向网络(Directed Network)。在上述模型和集合的基础上引入权重集 W , 定义模型中的连边权值均为 1, 则该网络被称为无权网络(Unweighted Network), 而如果每条边都被赋予确定的权值则为加权网络(Weighted Network)^[88]。由此可见, 无权网络确实可以描述节点间相互关系存在与否等关键信息, 但加权网络能够更加精确地定义两个节点连接作用的强度差异。也就是说, 引入权重的概念不仅能够更为真实地反映网络的拓扑关系, 而且可以更细致地刻画模型结构上的动力学特征, 对于真实系统结构的描述也更为客观。

2.2.2 权重网络的特征参数

尽管无权网络在很多时候确实大大简化了客观世界中的复杂性, 有助于我们更为直观地理解真实系统的本质特征。然而在航空、神经、生物等实际网络的研究中, 个体间的相互关系也存在诸多不同, 并且这种连接强度的差别会对网络的性质和功能产生直接影响。作为复杂网络研究的一个重要分支, 权重网络对于系统各成分间交互作用的异质性进行了更为客观地描述。但长期以来, 如何给出网络中连接权重的一般性概念, 始终制约其物理意义的有效阐释, 下面主要介绍构建仿真模型和设计干预条件将要用到的几类特征参数。

1. 度 (Degree)

节点度的定义为网络拓扑中与该节点直接相连的边的数目。从某种意义上说, 一个节点的度可以反映其占有网络资源的情况, 进而可以描述节点在网络中的重要程度, 一般而言, 节点度越高其重要性也越大。

$$d_i = \sum_{j \in E} \delta_j^i, \delta_j^i = \begin{cases} 1, & i \text{ 与 } j \text{ 之间有边直接相连} \\ 0, & i \text{ 与 } j \text{ 之间无边直接相连} \end{cases} \quad (2.7)$$

从公式 2.7 我们可以非常直观的得出节点的度数体现了这一节点与周边节点直接联系多少的结论。但这一概念也忽略了节点本身的一些影响因素, 实际上尽管一个节点自身的度数很大, 但如果与它相连的节点都不重要, 那么该节点也不一定很重要, 同理即使一个节点的度数很小, 但与它相连的节点度数都很高, 那么这个节点的重要性也可能随之上升。总体来说, 虽然度的概念具有一定局限性, 但是目前仍是评价节点重要性使用最广泛的指标。

2. 边权 (Weight)

目前还没有给出边权的统一定义, 比较权威的方法主要是依据网络节点的关系进行描述。直观上理解, 边权就是网络中赋予两个节点连边一定的权值, 具有不同边权节点组成的网络称为加权网络。在有向网络中, 边权还可以区分为相似权和相异权两种类型。相似权是指边权的数值越大, 节点之间的连接越紧密, 相

异权的则正好相反。Yook, Jeong 和 Barabási 等从网络演化的角度给出了边权的定义，对于新加入节点 j 来说，每条边权的取值可以做如下表述：

$$\omega_{ji} = \frac{k_i}{\sum_{j \in t(i)} k_j} \quad (2.8)$$

其中 $j \in t(i)$ 表示网络中与新节点 j 相连的 m 个已经存在的节点所组成的取值范围，通过将 ω_{ji} 的取值标准化， m 条连边的总权值为 $\sum_{j \in t(i)} \omega_{ji} = 1$ 。

3. 强度 (Strength)

与无权网络中节点度的概念类似，强度是权重网络中测量节点重要性的一个常用标度，对于这一网络指标最为自然的定义如下：

$$s_i = \sum_{j \in t(i)} w_{ij} \text{ 或 } s_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \omega_{ij} = \langle \omega \rangle \sum_j a_{ij} = \langle \omega \rangle k_i \quad (2.9)$$

强度的概念能够比较准确地描述网络节点的重要程度，因为既考虑到了节点的连接信息，又综合了其中包含的权重信息，因此可以认为是该节点局域信息的综合体现。从公式 2.9 可以看出，当边权的数值与网络的拓扑结构无关时，节点强度与度的函数关系为 $s_i \approx \langle \omega \rangle k_i$ ，其中 $\langle \omega \rangle$ 为网络中节点边权的平均值。需要说明的是，强度同样也具有相关性，其主要考察网络节点在演化过程中，倾向于连接更为活跃的节点，还是更倾向于与重要性不太高的节点连接。

2.3 网络无标度特性的推导方法

网络节点分布的无标度特性在统计物理学相变现象和自组织临界性等研究中具有十分特殊的地位。如果采用数学软件对网络演化模型进行仿真，其过程通常可以视为多次随机独立的实验，但每一次的结果数据在解析过程中通常很难进行精确定义和描述。目前主要有平均场理论、率方程理论和主方程理论三种网络无标度特性的推导方法，它们分别从不同的数学视角切入，对网络的度分布给出了结果近似相同的数值解析。为了便于后续章节的讨论，本节我们主要以 BA 模型为例，介绍平均场理论^[89]在网络无标度分布的推导过程及应用。

定义：在 t 时刻，从网络中随机选择一个已经存在的节点， $p(k, t)$ 表示的是被选中节点的度数恰好为 k 的概率，则 $\{p(k, t), k = 0, 1, 2, \dots\}$ 称为在 t 时刻网络的度分布。概率的极限如公式 2.10 所示：

$$p(k) = \lim_{t \rightarrow \infty} p(k, t), k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

也就是说，该网络具有稳定的度分布 $\{p(k), k = 0, 1, 2, \dots\}$ 。

Barabási 和 Albert 最先提出运用平均场理论推导节点度分布,其核心思想是在演化过程中的每个时间步,节点被选中都是随机的,而并不存在固定的备选对象。在 BA 模型中,随机选中的节点 i 在 t 时刻的度数 $k_i(t)$ 增加值可以理解为该节点在邻近区间不同时刻的平均行为。一般情况下,节点 i 进入网络的时间 t_i 近似服从 $(0,t)$ 区间上的均匀分布。假设度的增加值为连续时间变量,由于网络中原有节点 i 的择优概率为 $p(i \leftarrow j)$,可以将其转换为连续变化率 $k_i(t)$ 。按照演化规则,新节点 i 加入网络时与 m 个已经存在的节点相连, $k_i(t)$ 满足如下动力学方程:

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = mp(i \leftarrow j) = m \frac{k_i(t)}{\sum_j k_j} \quad (2.11)$$

每一时间步进入模型的新节点与网络中的 m 个老节点相连,也就是说,网络中会增加 m 条连边,网络度数增长应为 $2m$,于是 t 时刻网络节点的总度数为:

$$\sum_j k_j = 2mt + k_0 \quad (2.12)$$

将公式 2.12 的计算结果代入公式 2.11 中,则动力学方程相应可化简为:

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \frac{k_i(t)}{\sum_j k_j} = m \frac{k_i}{2mt + k_0} = \frac{k_i}{2t} \quad (2.13)$$

根据演化规则,随机选中的节点 i 在 t_i 这一时间步进入网络,且满足初始条件 $k_i(t) = m$ 。由此可得该微分方程的解为:

$$k_i(t) = m \left(\frac{t}{t_i} \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

通过分析公式 2.14 可知,网络演化过程中所有节点度都以相同的概率密度函数增长。则 $k_i(t)$ 表示在任一时刻 t 的概率分布:

$$p\{k_i(t) < k\} = p\left\{t_i > \frac{m^2 t}{k^2}\right\} \quad (2.15)$$

根据实验条件明确,节点被添加到网络中的时间间隔是相对固定的,但每个节点具体进入网络的时间是完全是随机的,因此随机变量 t_i 在 $(0,t)$ 区间上服从均匀分布。在 t 时刻系统节点的总数为 $m_0 + t$,所以其概率密度函数可表示为:

$$p_i(t) = \frac{1}{m_0 + t} \quad (2.16)$$

由此可将概率分布转化为：

$$p\left\{t_i > \frac{m^2 t}{k^2}\right\} = 1 - p\left\{t_i \leq \frac{m^2 t}{k^2}\right\} = 1 - \frac{m^2 t}{k^2(m_0 + t)} \quad (2.17)$$

通过上述推导过程，网络的度分布可以表示为：

$$p(k) = \frac{\partial p\{k_i(t) < k\}}{\partial k} = \frac{2m^2 t}{m_0 + t} k^{-3} \quad (2.18)$$

当时间 $t \rightarrow \infty$ 时，上述概率分布可以近似地简化为公式 2.19 所示：

$$p(k) \approx 2m^2 k^{-3} \quad (2.19)$$

通过以上研究，BA 模型的度分布 $p(k)$ 服从幂律分布，其分布指数为-3，取值与系统的参数 m 无关。需要说明的是，公式 2.11 为预先设定的一般意义上的平均化表述，实际引入随机概率后，演化过程中不可能保证每一个时间步，新加入节点度的增加都稳定在某一个具体数值。我们在实际推导过程中还必须对网络节点的“匹配模式”进行必要的考察，也就是在识别节点的选择偏好时要确定，与连接对象的度值是正相关还是负相关，进而确定网络是正向匹配还是反向匹配。

2.4 网络演化的经典模型

综合现有的文献可知，自然界和社会实践中许多系统都可以抽象为网络模型。如何精确而完整的描述网络演化过程中的拓扑性质和动力学特征，进而运用定性或定量方法完成模型构建与控制已经成为研究人员需要面对的重大挑战。目前，在复杂网络建模方面的成果比较丰富，主要理论模型都是依据研究对象之间的关联关系进行构建。在一般的复杂网络中，小世界现象和无标度特性是最典型的两类特征。尽管许多真实网络都表现出无标度特性，但不同模型偏好连接的形成机制也不完全一样，尤其是加权网络模型的演化过程既包含连接的增减又包含权重的演化，两者之间还可能存在复杂的相互影响。下面，主要介绍与本研究直接相关的 BA 模型、适应度模型、局域世界模型和 BBV 模型。

2.4.1 BA 模型

BA 模型^[90]由 Albert 和 Barabási 在 1999 年合作提出。该模型将真实系统自组织演化后表现出的无标度特性主要归结为生长特性和择优连接两个方面。前者意味着在每一个时间步网络模型中都有新节点加入，而后者考虑的是真实系统中节点的选择偏好，具体算法表述如下：

1. 生长特性：该模型初始状态为包含有 m_0 个节点的网络，节点之间主要是随

机连接。根据模型定义，每个时间步都有一个新节点进入网络，该节点都与原网络中 m 个不相同的老节点发生连接。实际上，当演化过程的时间步足够多时， m_0 对于整个网络结构的影响基本可以忽略。

2. 择优连接：新加入的节点与原网络中的老节点发生连接时存在一个优先概率，具体计算方法如公式 2.20 所示：

$$\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (2.20)$$

其中 k_i 表示的是网络中原有的某个节点 i 在当前时间步的连边数量，也可以理解为对新节点的吸引力。随着时间的推移，除少数节点脱颖而出最终占据核心位置，绝大多数节点都会因为活性下降而逐渐失去与新节点连接的机会。BA 模型是一种典型的基于节点和连边共同影响的网络演化模型，许多真实网络都与其有很强的相似性。相当部分后续的研究成果都是在其基础上改进和拓展，得到的网络模型均呈现为幂律度分布。但通过计算可知，网络的度分布指数 $r=3$ ，且模型中节点的度相关性为 0，这与现实世界中的网络还存在一定出入。

2.4.2 适应度模型

Bianconi 和 Barabási 共同提出的适应度模型^[91]是针对 BA 模型演化机制的一种比较成功的拓展。两种模型之间最主要的区别在于，适应度模型的优先连接概率不仅与节点的度呈正相关，而是与节点度和本身的适应度乘积成正比，并且适应度在演化的过程中往往会发挥更重要的作用，具体算法表述如下：

1. 生长特性：网络模型开始演化时共有 m_0 个节点，每个时间步引入一个新的节点，并且与原网络中已有的 m 个节点连接，为保证数据结果具有实际意义，设定数值 $m_0 \leq m$ 。网络中已有的节点，其适应度按概率分布 $\rho(\eta)$ 选取。

2. 优先连接：每一个时间步，网络中已经存在的节点 i 被新加入节点选中并建立连接的概率为 Π_i ，为了更精确地刻画适应度对于网络结构演化的影响，我们可以通过公式 2.21 计算模型的优先概率，其数据的取值主要由被选中节点 i 的度 k_i 、新加入节点 j 的度 k_j 以及新加入节点的适应度 η_i 共同决定：

$$\Pi(k_i) = \frac{\eta_i k_i}{\sum_j \eta_j k_j} \quad (2.21)$$

事实上，通过大量的仿真实验结果分析，我们可以发现适应度模型一般有两种不同类型的分布。如果模型表现为有限支撑（Finite Support），那么网络演化的

结果就与 BA 模型一样，其节点分布一般表现为无标度特性。如果表现为无限支撑（Infinite Support），那么网络中具有最高适应度的节点在后续演化过程中则很有可能会出现赢者通吃（Winner Takes All）的现象^[92]。

2.4.3 局域世界演化模型

李翔和陈关荣提出的局域世界演化模型^[93]中，新加入节点的择优连接机制被限定在网络的某个局域世界中发挥作用，事实上节点的相互作用也不太可能会扩展到整个网络，因而也只会占用网络的部分连接资源，其模型的构造算法如下：

1. 生长特性：网络初始时共有 m_0 个节点和 e_0 条边，每个时间步引入一个新节点并与网络中原有的 m 个节点发生连接。

2. 局域世界择优连接：根据研究假设，新加入节点并不与网络中的所有节点发生连接，其择优连接概率只在选定的局域世界内被遵守，该区域包含 M 个节点（ $M \geq m$ ），因此网络中原有节点被选中的概率为：

$$\Pi_{Local}(k_i) = \Pi'(i \in LW) \frac{k_i}{\sum_j Local k_j} \equiv \frac{M}{m_0 + t} \frac{k_i}{\sum_j Local k_j} \quad (2.22)$$

在每一个时间步，新加入的节点都是从局域世界 M 中按照优先概率选取 m 个已有的节点建立连接，而不是像 BA 模型那样从整个网络中选择连接对象。进一步研究发现，多数现实网络都存在不均匀的特性，网络中某些个体节点之间联系会表现得更加紧密，这一现象在针对社会关系的研究成果中更为常见^[94]。从网络研究本身而言，新加入节点构造的局域世界模型会依赖于网络连接性而变得不同，也就是说随着局域世界的规模变化，网络整体演化的非均匀性也会受到影响。需要说明的是，本节提出的模型中只考虑了随机选择这种比较简单的情形。

2.4.4 BBV 模型

2004 年，A. Barrat, M. Barthelemy 和 A. Vespignani 首次提出了真正意义上的权重网络演化模型，被称为 BBV 模型^[95]。研究发现，除了网络上节点和连边数量会随时间演化外，特定的交通动力学行为同样会对整个进程产生影响。BBV 模型以网络拓扑结构上的交通流为驱动，生成网络中节点的度、权和强度均满足幂律分布。这一结论开辟了复杂网络建模的新思路，其演化规则及具体过程如下：

1. 生长特性：该模型的初始位形中包含 m_0 个节点，网络中已经存在的连边均被赋予相同的初始权重，模型演化过程的每个时间步都会引入一个与网络中原有的 m 个节点直接连接的新节点。

2. 偏好连接：新加入网络的节点 k 与老节点 i 按公式 2.23 的强度耦合概率发生

优先连接，这一原则与 BA 模型的演化规则差别不大，所以不再深入讨论。

$$\Pi_{n \rightarrow i}(s_i) = \frac{s_i}{\sum_j s_j} = \frac{s_k s_i}{\sum_j s_k s_j} \quad (2.23)$$

其中 s_i 表示节点 i 的强度，其定义为与节点 i 所有连边的权重值之和。公式 2.24 给出了求解节点 i 强度的一般定义，其中 ω_{ij} 是节点 i 与节点 j 之间连边的权重， Ω 表示的是与节点 i 直接连接节点的集合。

$$s_i = \sum_{j \in \Omega} \omega_{ij} \quad (2.24)$$

由于考虑了交通流的作用，当新加入的节点按照优先概率与原网络中的节点 i 相连的同时，会引起所有与节点 i 已经相连的边权出现增加。根据模型的规则定义，连接权重赋值的总和为 ω_0 ，具体到每条连边，边权值的增量与当前的权重成正比，其中 δ 为常量，权值增量的计算公式如下：

$$\Delta \omega_{ij} = \delta \frac{\omega_{ij}}{s_i} \quad (2.25)$$

在当前的时间步，网络中某一节点 i 的强度增加值主要由两部分构成：一部分是节点 i 被新加入节点直接选中后会出现增加；另一部分则是新加入节点与节点 i 的邻居节点相连，而后因交通流作用引起的权重更新，因此网络中所有的连边均按如下强度耦合机制更新：

$$\frac{ds_i}{dt} = m(\omega_0 + \delta) \frac{s_i}{\sum_k s_k} + \sum_j \frac{d\omega_{ij}}{dt} \quad (2.26)$$

代入公式 2.24 的节点强度定义可得：

$$\frac{d\omega_{ij}}{dt} = \Delta \omega_{ij} = m \frac{s_j}{\sum_k s_k} * \delta \frac{\omega_{ij}}{s_j} \quad (2.27)$$

将公式 2.27 的计算结果代入公式 2.26 有：

$$\frac{ds_i}{dt} = m(\omega_0 + \delta) \frac{s_i}{\sum_k s_k} + m * \delta \frac{\sum_j \omega_{ij}}{\sum_k s_k} = m * (\omega_0 + 2\delta) \frac{s_i}{\sum_k s_k} \quad (2.28)$$

每一个时间步新加入的节点只和网络中原有的 m 个老节点相连，可知引入的权重增量为 $2m + 2\delta$ ，则 t 时刻网络权重的总和为：

$$\sum s_k = (2m\omega_0 + 2m\delta)t \quad (2.29)$$

将公式 2.29 的结果代入公式 2.28 计算可得：

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{\omega_0 + 2\delta}{2\omega_0 + 2\delta} \frac{s_i}{t} \quad (2.30)$$

由于初始条件设定为每个节点 i 进入系统时强度增加总量由 $s_i(t_i) = m\omega_0$ 进行控制，其中 t_i 为节 i 加入系统的时间。求解微分方程可得：

$$s_i(t) = m\omega_0 \left(\frac{t}{t_i}\right)^{\frac{\omega_0+2\delta}{2\omega_0+2\delta}} \quad (2.31)$$

公式 2.31 表明网络中所有的节点权重都以相同的幂指数增长，因此 $s_i(t)$ 的概率分布如下：

$$p\{s_i(t) < s\} = p\left\{t_i > \left(\frac{m\omega_0}{s}\right)^{\frac{2\omega_0+2\delta}{\omega_0+2\delta}} t\right\} \quad (2.32)$$

由于每个时间步添加新节点的间隔是相同的，那么从某一时刻来看，节点加入网络的时间可以被看作是完全随机的，随机变量 t_i 在 $(0, t)$ 区间近似服从均匀分布。又 t 时刻网络中的节点总数为 $m_0 + t$ ，其概率密度函数可表示为：

$$p_i(t) = \frac{1}{m_0 + t} \quad (2.33)$$

由此可得：

$$\begin{aligned} p\left\{t_i > \left(\frac{m\omega_0}{s}\right)^{\frac{2\omega_0+2\delta}{\omega_0+2\delta}} t\right\} &= 1 - p\left\{t_i \leq \left(\frac{m\omega_0}{s}\right)^{\frac{2\omega_0+2\delta}{\omega_0+2\delta}} t\right\} \\ &= 1 - \left(\frac{m\omega_0}{s}\right)^{\frac{2\omega_0+2\delta}{\omega_0+2\delta}} * \frac{t}{t + m_0} \end{aligned} \quad (2.34)$$

带入公式可得网络的点权重分布为：

$$p(s) = \frac{\partial p\{s_i(t) < s\}}{\partial s} = \frac{t}{m_0 + t} \frac{2\omega_0 + 2\delta}{\omega_0 + 2\delta} (m\omega_0)^{\frac{2\omega_0+2\delta}{\omega_0+2\delta}} s^{-\frac{3\omega_0+4\delta}{\omega_0+2\delta}} \quad (2.35)$$

由此可知，当时间 $t \rightarrow \infty$ 时，上述表达式可近似简化为：

$$p(s) \approx \frac{2\omega_0 + 2\delta}{\omega_0 + 2\delta} (m\omega_0)^{\frac{2\omega_0+2\delta}{\omega_0+2\delta}} s^{-\frac{3\omega_0+4\delta}{\omega_0+2\delta}} \quad (2.36)$$

BBV 模型中，节点权重分布 $p(s)$ 服从幂律分布，其分布指数如下：

$$r = \frac{3\omega_0 + 4\delta}{\omega_0 + 2\delta} = \frac{4\delta + 3}{2\delta + 1} \quad (2.37)$$

BBV 模型演化最终得到的是点权、边权和强度均呈幂律分布的权重网络，其分布指数在 2~3 之间可调。但随着研究的深入，有学者发现由于在网络结构增长方式上缺乏对节点本身存在的老化特征以及原有连边变化等情况的考虑，特别是当网络模型数值趋于无穷时，节点的点权、连接度和边权都是线性相关的，而且上述三种参数的斜率仅随同一变量可调，这一结论还不足以很好地解释真实网络所具有的统计特征。

第三章 基于纵向数据的上海合作组织网络结构分析

上海合作组织从艰难初创到逐渐趋于成熟，各成员国积极挖掘地缘政治和战略地位上的独特优势，框架内的经贸往来保持强劲增长、安全协作不断巩固深化、人文合作取得丰硕成果，组织的内部凝聚力和 international 影响力稳步提升。本章首先针对行为体在网络中的相互作用等特点，对具体研究的对象、收集数据的范围以及采样区间的选定等进行了具体说明。而后主要基于时间截面数据的纵向分析结果，对上海合作组织网络模型的中心性指标和结构对等性等特征属性的变化趋势进行探索，为后续章节的权重网络模型构建和演化干预实验设计提供相关依据。

3.1 研究数据来源及处理说明

3.1.1 研究对象的选定

上海合作组织成员国从初创时的 6 个国家，经过 15 年发展，目前共有 6 个正式成员国、6 个观察员国、6 个对话伙伴国以及 3 个参会客人。考虑到观察员国、对话伙伴国以及参会客人国等与成员国之间的互动与合作程度相对较低，对组织发展影响力也十分有限，因此本研究的对象限定必须为正式成员国。尽管 2015 年 7 月接纳印度、巴基斯坦成为正式成员国的司法程序已经启动，乌法峰会公报也明确表示随着国际制裁逐步取消，将考虑伊朗加入上海合作组织。但由于构建网络的基础数据主要分布在 2014 年以前，最终选定当前的 6 个成员国为研究对象。

3.1.2 数据范围的选定

上海合作组织的最高决策机构是成员国元首理事会，同时还设有政府首脑理事会，以及议长、外交、国防、救灾、经济、交通、文化、卫生、执法部门领导人、总检察长、最高法院院长会议等定期会晤机制。合作范围也由最初的安全合作为主，拓展到经济、政治、科技、教育、能源、环保等多个领域。乌法峰会的核心成果《上海合作组织至 2025 年发展战略》进一步明确，2025 年以前该组织成员国之间重点围绕地区安全、经济贸易和人文交流等领域深化务实合作。考虑到建网基础数据的质量要求及获取的难易程度，本研究主要区分经贸合作、安全合作以及其他合作，分别构建有向加权网络、隶属网络和多元网络进行分析。

3.1.3 样本区间的选定

上海合作组织由专注于解决边界和军事互信问题的“上海五国”会晤机制演变而来。本文主要研究组织本身及成员国在此框架下的合作与发展，为了确保数据

的准确性和代表性，主要考虑在上海合作组织正式成立以来有完整记录的年份进行收集。具体划分过程中，分别以 4 年到 5 年为一个采样区间，最终选定 1996 年“上海五国”机制确立、2001 年上海合作组织正式成立、2006 年上海峰会召开、2010 年上海合作组织成立十周年和 2013 年“一带一路”倡议提出等具有重要历史意义的年份，尽量保证统计结果具有足够的区分度。

3.2 上海合作组织动态元网络模型构建及纵向分析

基于上一节确定的研究对象、数据范围和样本区间，我们通过联合国贸易数据库 (UN Comtrade)^[96]，世界银行官方网站 (The World Bank) 的“世界发展指标”^[97] 以及斯德哥尔摩国际和平研究所 (SIPRI)^[98] 等开源数据，分别选取 1996 年、2001 年、2006 年、2010 年和 2013 年等 5 个重要年份，收集上海合作组织 6 个正式成员国在经贸、军事、安全、外交等领域的合作信息，并将相关数据构建为标准化的邻接矩阵。之后，主要通过 Organization Risk Analysis 和 UCINET 两款常用的网络分析软件对数据进行计算处理，结合 CONCOR 迭代收敛法考察了成员国网络的结构对等性，进而实现对上海合作组织网络的关系模式及变化规律的有效探索，为下步的演化模型的构建及干预实验设计提供数据支撑。

卡内基梅隆大学社会和组织系统计算分析中心 (CASOS) 的 Carley 教授团队开发的 Organization Risk Analysis (ORA)^[99] 是一款针对动态元网络的建模分析软件，最初主要用于研究恐怖组织的动态变化特性。经过不断完善，该软件已经实现了对复杂动态网络的模型构建、结构演化、绩效评估等可视化分析。UCINET^[100] 主要由加州大学欧文分校的网络分析者编写。经过多次的扩展，逐步由最初的 Basic 语言模块发展为 DOS 程序，现在已经成为一款通用性很强的 Windows 软件。两款软件通过引入精巧的数理模型和计算方法，并且在程序开发时设计了良好的人机交互界面，极大地方便了缺乏数学背景的研究者使用。主要有以下特点：一是能直接计算并输出传统的网络指标和部分基于组织理论和认知科学的网络测度；二是通用性较强，不仅融入了结构优化、时序分析、指标检测和多智能体仿真等工具模块，而且输出结果可以兼容其他的社会网络分析软件；三是丰富的矩阵运算功能，包括矩阵转置、加减乘除等计算，为网络模型的数据处理提供了便利。

3.2.1 上海合作组织经贸有向加权网络构建及结构分析

上海合作组织成立之初，就将经贸、能源、交通、科技等领域的合作写进《上海合作组织宪章》，2003 年签署《上海合作组织成员国多边经贸合作纲要》，2009 年签署《上海合作组织成员国关于加强多边经济合作、应对全球金融危机、保障经济持续发展的共同倡议》，2012 年制定《2012—2016 年上海合作组织进一步推

动项目合作的措施清单》等一系列机制化建设成果落地，为区域经济合作向纵深推进提供了强大的制度保证。上海合作组织在过去十年间接连启动了经贸、交通、农业等多个部长级会晤机制，先后成立了实业家委员会、银行联合体，发起了工商论坛等多个交流平台，金融、投资以及能源等领域的合作也如雨后春笋般涌现，成员国之间的双边贸易额呈逐年稳步上升的趋势。2015年乌法峰会前夕，还先后同期召开了由中国、俄罗斯、印度、巴西和南非参加的金砖五国峰会和俄罗斯、哈萨克斯坦、白俄罗斯、吉尔吉斯斯坦和亚美尼亚参加的欧亚经济联盟峰会。据相关数据统计，仅中国与上海合作组织其他5个成员国的双边贸易额就实现了从2002年的142.28亿美元跃升至2013年的1294.54亿美元。

本节使用的计算数据主要来自 UN Comtrade 数据库，通过整理上海合作组织成员国之间的经贸合作数据，借助分析软件就可以方便地构建出有向加权网络。表 3.1 至表 3.5 分别是 6 个成员国 1996 年、2001 年、2006 年、2010 年和 2013 年等年份的贸易数据统计结果，其中 CHN、RUS、KAZ、KGZ、UZB、TJK 分别代表中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦和塔吉克斯坦。需要说明的是，吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦和塔吉克斯坦三国之间由存在于领土、水资源、能源等问题争端，近年来紧张关系出现升级的趋势。尽管相关国家领导人积极奉行睦邻合作政策，但塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦在此期间的贸易额仍然逐年下降近 30%，2012 年前后由于边境冲突频发，两国的贸易数据也降至近年来的最低水平。与此同时，UN Comtrade 数据库没有收录塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦两国早年的贸易数据，而吉尔吉斯斯坦由于发生“郁金香革命”等危机，个别年份与塔、乌两国的贸易数据也出现不同程度的缺失。为确保计算结果的客观性、准确性，我们主要通过中国驻塔吉克斯坦大使馆经济商务参赞处网站^[10]发布的塔吉克斯坦市场调研报告及经贸合作新闻等官方信息汇总后补齐相关数值。

表 3.1 上海合作组织成员国 1996 年经贸合作数据（单位：美元）

	CHN	RUS	KAZ	KGZ	UZB	TJK
CHN	—	1692690697	95291797	68664125	38150734	7636770
RUS	5151749984	—	2552155117	159406238	1089887303	151875293
KAZ	364591887	3041941169	—	111537506	201820324	60725243
KGZ	36814528	147198081	90767072	—	116810496	8290154
UZB	151518372	655489204	89249479	131556304	—	198900000
TJK	4075025	87998995	17509374	6300470	190700000	—

表 3.2 上海合作组织成员国 2001 年经贸合作数据（单位：美元）

	CHN	RUS	KAZ	KGZ	UZB	TJK
CHN	—	2710471970	327718673	76638733	50683849	5301046
RUS	7958794510	—	2778015485	83312994	409102726	69403951
KAZ	960650767	2017737961	—	83777900	150233500	61198000
KGZ	42220723	61862520	33455000	—	47986925	6709561
UZB	7616917	584169421	81084500	66723319	—	150040000
TJK	5451661	129703776	2254100	1497949	87130000	—

表 3.3 上海合作组织成员国 2006 年经贸合作数据（单位：美元）

	CHN	RUS	KAZ	KGZ	UZB	TJK
CHN	—	15832487030	4750480904	2112785558	406153766	305777847
RUS	17554327123	—	8983405881	560657542	1086946319	377429910
KAZ	3607272782	3838489186	—	267643130	384583088	157351188
KGZ	112915589	193803357	138886680	—	37289387	26549749
UZB	565936536	1290420312	319090214	65000380	—	176372000
TJK	18002123	126034712	27714135	2810526	67427000	—

表 3.4 上海合作组织成员国 2010 年经贸合作数据（单位：美元）

	CHN	RUS	KAZ	KGZ	UZB	TJK
CHN	—	29612073703	9320400745	4127513399	1181023679	1376501471
RUS	25913993644	—	10690357833	975377179	1663521395	672557895
KAZ	11108591383	4449350966	—	424253755	1101225226	259736709
KGZ	72069065	393290059	165720339	—	53692497	18502358
UZB	1300780404	1513472151	473310743	93832226	—	57750000
TJK	56048418	213696998	16615142	2691156	40662698	—

表 3.5 上海合作组织成员国 2013 年经贸合作数据（单位：美元）

	CHN	RUS	KAZ	KGZ	UZB	TJK
CHN	—	49591171963	12545123569	5075346113	2613355048	1869363600
RUS	39667828205	—	17218175411	2029443426	2803910147	724360141
KAZ	16050838003	5664930616	—	675159977	1145309889	496838934
KGZ	62350108	110128409	351151017	—	289292408	56446511
UZB	1938092728	1256885427	970083488	97609815	—	26700000
TJK	88751269	37883056	72636928	3460384	269697	—

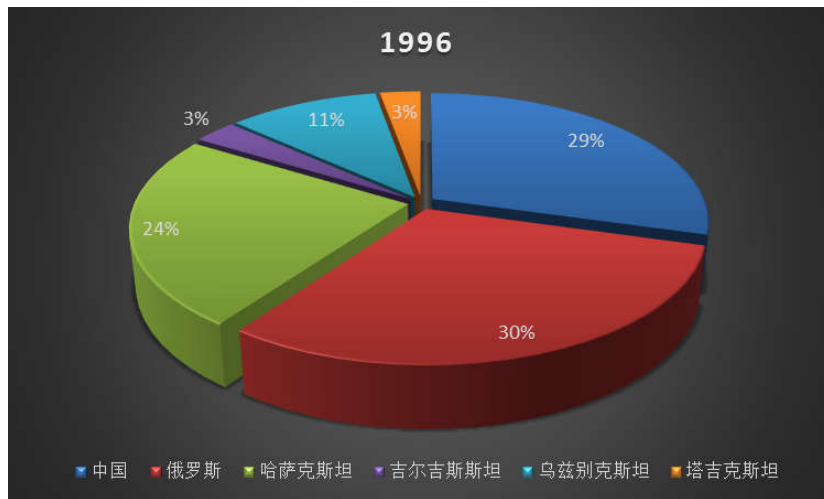


图 3.1 上海合作组织成员国 1996 年贸易数据统计对比图

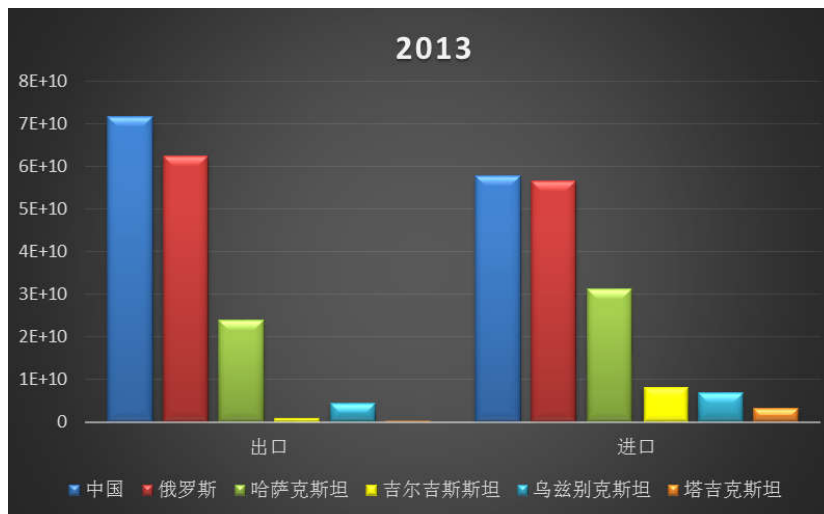


图 3.2 上海合作组织成员国 2013 年贸易数据统计对比图

中国和俄罗斯作为上海合作组织最具影响力的国家，尽管并非盟友关系，但彼此之间的战略协作伙伴关系却始终保持在较高水平。通过梳理统计，我们可以直观地发现网络指标呈逐年上升的趋势，中俄两国的贸易额总量和增幅也明显高于其他国家。图 3.1 和图 3.2 分别统计了上海合作组织成员国 1996 年和 2013 年的贸易数据比重。下步我们主要通过 Organization Risk Analysis 软件进行数值计算，探索分析经贸合作有向加权网络的结构特点及相关指标的分布情况。

表 3.6 经贸有向加权网络中心势分布及变化趋势

网络测度	统计年份				
	1996	2001	2006	2010	2013
Density	0.108	0.080	0.120	0.121	0.110
Betweenness Centralization	0.780	0.690	0.820	0.810	0.910
Closeness	0.148	0.046	0.103	0.060	0.013
Column	0.368	0.306	0.308	0.281	0.269
Efficiency	0.160	0.135	0.065	0.061	0.038
GDP	1.5838E+12	2.19315E+12	3.46635E+12	4.88174E+12	6.0243E+12

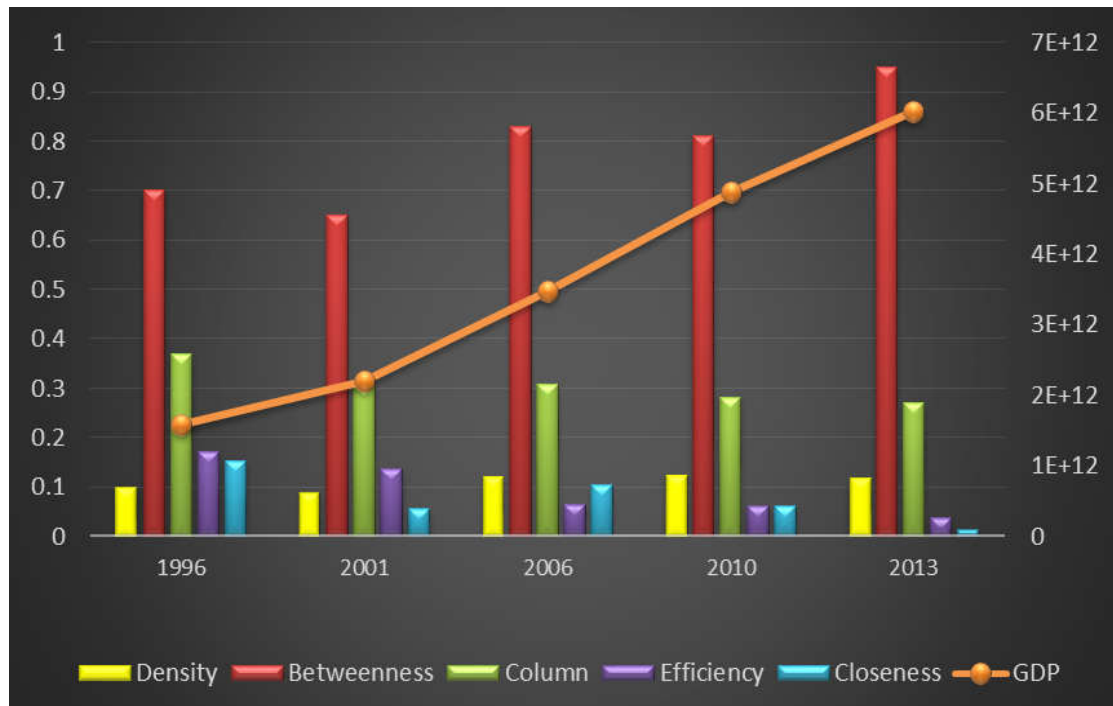


图 3.3 上海合作组织经贸有向加权网络指标与 GDP 数值相关性分析

我们首先从整体网的层面进行讨论，可以看到网络指标变化趋势具有一致性。需要特别指出的是，无权网络的指标主要由边的数量决定，而在加权网络中主要受到权值变化的影响。密度（Density）表示的是节点之间联系的紧密程度，数值越大意味着网络中合作的紧密程度越高。表 3.6 中经贸有向加权网络的密度呈逐年上升的趋势，客观上反映出各要素互动比较频繁，也可以理解为上海合作组织成员国间的合作不断加强。中间中心势（Betweenness Centralization）描述的是最核心节点与其他节点中心度的实际差值总和同最大可能的差值总和之比，可以用于测量网络整体的极化程度。例如，星型网络中间中心势为 1，即中心点是其他所有节点的桥接点，而环形网络的中间中心势则为 0。Closeness、Column 和 Efficiency 三个中心性指标主要用于描述网络的信息传递效率。在图论中，节点之间的平均路径越短，相互联系就越不依赖第三方。我们可以看到，随着国家间经贸往来的不断加强，Closeness 等三个网络指标的数值呈逐年下降趋势。应当指出的是，促进本地区合作和共同发展是上海合作组织发展最为重要的目的之一，对比图 3.3 的网络指标和成员国相关年份的 GDP 增长趋势可以看出，随着合作水平的逐年提升，成员国本身的经济增长也呈现出加速上升的趋势。

表 3.7 经贸有向加权网络 Total Degree 中心度分布及变化趋势

国家	Total Degree Centrality				
	1996	2001	2006	2010	2013
CHN	0.074	0.080	0.267	0.308	0.289
RUS	0.353	0.284	0.325	0.270	0.252
KAZ	0.147	0.082	0.094	0.117	0.097
UZB	0.016	0.005	0.006	0.005	0.004
KGZ	0.048	0.022	0.028	0.023	0.017
TJK	0.012	0.006	0.003	0.002	0.001

Total Degree 是静态和动态网络分析的核心指标之一。在无权网络中，它主要是用于测量一个节点在网络中可能存在的直接连边数量，从另一角度来看，节点的 Total Degree 得分越高，意味着该节点获取潜在关键信息的能力越强。从表 3.7 的结果我们可以看到，2006 年以前，作为重要战略支柱的俄罗斯一直保有最高的 Total Degree 数值，中国这一指标的测量值逐年上升，而其余四国则同时出现了下降的趋势，这也在一定程度上反映了实际贸易网络的结构变化。

表 3.8 经贸有向加权网络 Eigenvector 中心度分布及变化趋势

国家	Eigenvector Centrality				
	1996	2001	2006	2010	2013
CHN	0.415	0.522	0.910	0.968	0.993
RUS	1.000	1.000	1.000	0.920	0.915
KAZ	0.756	0.462	0.369	0.457	0.415
UZB	0.187	0.115	0.099	0.088	0.068
KGZ	0.059	0.019	0.018	0.016	0.006
TJK	0.032	0.026	0.008	0.008	0.003

表 3.9 经贸有向加权网络 Bonacich Power 指数分布及变化趋势

国家	Bonacich Power				
	1996	2001	2006	2010	2013
CHN	1902434176	3170814208	23407685632	45617512448	71694360576
RUS	9105074176	11298628608	28562767872	39915806720	62443716608
KAZ	3780616192	3273598208	8255339520	17343158272	24033075200
UZB	1226713344	889634112	2416819456	3439145472	4289371392
KGZ	399880320	192234736	509444768	703274240	869368448
TJK	306583872	226037488	329714400	329714400	203001344

设计特征向量中心度 (Eigenvector Centrality) 和权力指数 (Bonacich Power) 这两个网络指标目的是为了在总体结构中, 寻找居于最核心位置的节点。其核心概念认为, 一个节点的重要程度与其邻居节点的重要程度息息相关, 例如被某个核心节点认为拥有权力或者能对某个核心节点行使权力, 那么这个节点在整个网络的重要性也越高。也就是说, 与核心节点直接连接的节点一般也居于比较中心的位置, 而一个特征向量中心度较高的节点, 与它连接的很多节点往往也具有相同的属性。需要指出的是, 特征向量中心度和权力指数并不依赖于节点的初始连接数量和距离的大小, 主要考虑的是与相邻节点之间的相互影响。表 3.8 和表 3.9 的计算结果显示, 在 2001 年以前, 中国上述两个指标的测量值一直较低, 开始甚

至仅为俄罗斯的五分之一，大致相当于乌兹别克斯坦的水平。2006年以后，伴随着经济水平的迅猛发展，中国作为拉动经贸领域合作的“火车头”，其重要性开始逐渐上升，这也在一定程度上反映出各成员国组织内角色的重新定位。由于受宗教、政治等客观因素制约，后三位国家的某些测量值甚至与前三位出现了数量级的差异，这也从另一个侧面表明在贸易网络中，节点指标的极化程度已经十分明显。

表 3.10 经贸有向加权网络 Closeness 中心度分布及变化趋势

国家	Closeness Centrality				
	1996	2001	2006	2010	2013
CHN	0.113	0.054	0.008	0.002	0.000
RUS	0.025	0.018	0.007	0.004	0.000
KAZ	0.046	0.018	0.014	0.008	0.001
UZB	0.028	0.059	0.023	0.023	0.004
KGZ	0.105	0.054	0.045	0.033	0.003
TJK	0.129	0.061	0.065	0.041	0.007

表 3.11 经贸有向加权网络 Inverse Closeness 中心度分布及变化趋势

国家	Inverse Closeness Centrality				
	1996	2001	2006	2010	2013
CHN	0.227	0.151	0.008	0.002	0.000
RUS	0.025	0.019	0.007	0.004	0.000
KAZ	0.052	0.019	0.015	0.009	0.001
UZB	0.030	0.107	0.027	0.032	0.006
KGZ	0.220	0.114	0.063	0.064	0.004
TJK	0.404	0.399	0.270	0.258	0.219

之前我们已经从整体网的角度分析了接近中心势(Closeness Centralization)的概念和数值变化，而从个体节点的视角同样可以发现一些有意思的趋势。接近中心度表示的是网络中一个节点对于其他节点的依赖程度，在实际计算的过程中，节点的依赖程度越低，接近中心度(Closeness Centrality)测量值就越高，这也体现了

选定节点对于信息和交互资源的控制程度。*Inverse Closeness Centrality* 和 *Closeness Centrality* 的定义相似,但前者主要是针对有向网络计算提出的。从表 3.10 和表 3.11 的计算结果我们可以看出,接近中心度的平均水平总体呈现出下降的趋势,这就意味着网络中节点之间信息等资源交互变得更加紧密。俄罗斯在网络中始终保持较低的接近中心度,而中国的接近中心度的下降速度相较于其他节点要更快,在这个过程中,不同节点之间的数值的差距也变得更为明显。

彼此间利益的趋同性是长期国际合作能够形成并得以维持的基础和前提。对于上海合作组织各成员国而言,经济合作一直是最为重要的共同利益之一。通过对经贸合作有向加权网络进行分析,我们可以发现网络的演化趋势具有以下特征:一是网络呈现明显的增长性。随着合作内容和领域的不断扩展,无论是网络测度的整体分布,还是个体节点的属性变化,除极个别数值在少数年份出现偏移,发展趋势的一致性比较明显。对于一般的复杂网络而言,增长性是生成无标度网络的重要因素。二是中国和俄罗斯的核心地位突显。通过计算结果我们可以看到,中俄两国作为上海合作组织的创始国和核心成员,在许多领域的合作中都发挥着重要的支撑和推动作用。由于经济规模和发展水平存在较大差异,中俄两国经贸领域的合作优势在网络指标的变化上也有相应体现。三是节点属性出现极化现象。极化(Polarization)是指在一定条件下指标数值变化速度持续出现较大差异,系统相对于初始状态出现明显偏离的现象。通过统计我们发现,中国和俄罗斯相较于其他四国,网络指标分布出现了明显的极化现象。这也可以看成是为中俄两国在上海合作组织框架内发挥塑造者、引领者、推动者的角色提供了最为直接的保障。Santos 等研究网络模型的博弈行为后发现,无标度网络在演化过程中最重要的节点都逐渐被合作者占据。实证结果表明,由于核心节点之间保持着较好的连通性,选择合作行为往往能够获取更多的收益,而连接度较小的节点也会模仿此类博弈策略,最终能够促进合作行为在整个网络中大范围扩散^[102]。

我们统计了用于描述节点属性比较具有代表性的 *Total Degree*、*Eigenvector* 和 *Bonacich Power* 等三个中心性指标 2013 年的数值结果后发现,上海合作组织 6 个成员国的网络指标表现出近似幂律的分布。与泊松分布和高斯分布等概率模型不同,幂律分布的尾部并不是呈指数下降,而是呈现出明显的肥尾效应^[103]。从网络科学的视角来看,这预示着网络中存在少数核心节点,而这些核心节点往往会控制绝大多数的网络资源,并且在整个网络拓扑结构中占据支配地位,进而能够对网络结构的演化起到主导作用。图 3.4 为 *Bonacich Power* 等中心性指标的实际数值,图 3.5 为对统计结果求取自然对数后的变化趋势,我们可以看到上述三类中心性指标的幂律分布拟合非常明显。在概念介绍时我们曾经分析过,*Bonacich Power* 作为最具全局意义的中心度测量公式,其自身定义既包含了节点测量值,同时也考虑

了所有与之关联节点的中心度，因此我们可以认为 Bonacich Power 的计算结果更具代表性，也更能反映选定节点在网络中的影响力。

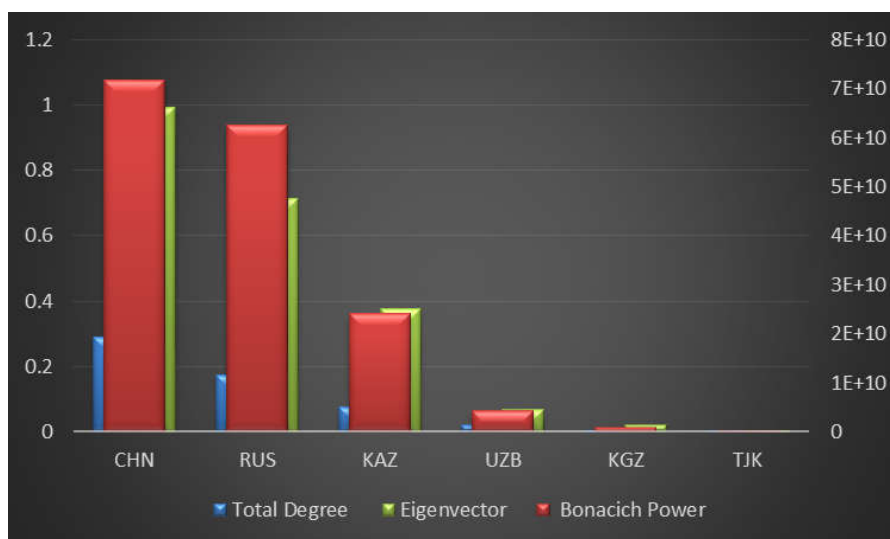


图 3.4 经贸合作有向加权网络主要指标的统计分布

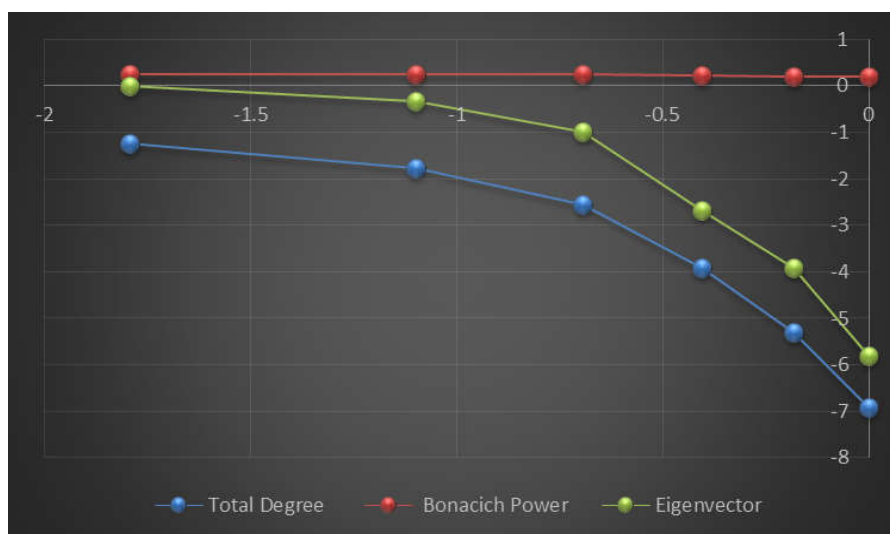


图 3.5 经贸合作有向加权网络主要统计指标的对数分布

3.2.2 上海合作组织安全合作网络构建及结构分析

冷战结束以后，作为前苏联加盟共和国的“中亚四国”（哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦），其国内及周边受到两极格局长期压制的民族宗教等矛盾开始突显。研究发现该地区的恐怖活动呈现出明显的流动性、外溢性、跨国性，包括中国和俄罗斯在内的周边国家必须采取跨境协作、联合行动等方式才能有效应对。早在成立之初，上海合作组织首次峰会就签署了《打击恐怖

主义、分裂主义和极端主义公约》，将联合打击“三股势力”就作为成员国开展相互协作的重要基础，同时决定在吉尔吉斯斯坦首都比什凯克设立反恐怖中心，不久后又在乌兹别克斯坦首都塔什干成立了地区反恐怖机构委员会，这一系列举措充分彰显了各方维护本地区安全稳定的坚强决心。近年来，各成员国在框架内围绕联合军事演习、反恐情报协调、人员交流培训等方面展开了一系列卓有成效的合作。尤其是 2005 年以来，先后开展了七次“和平使命”联合反恐演习，对于有效震慑“三股势力”、提高成员国军事协作水平发挥了极其重要的作用。2014 年以来，“伊斯兰国”等国际恐怖主义异军突起，其势力开始在东南亚、南亚、中东、非洲等地区滋生蔓延，上海合作组织正面一幅“C 型”恐怖主义新版图渐趋成型。为有效应对地区反恐局势复杂化和安全风险不断攀升等不利影响，进一步增强政府间安全合作的深度和广度，各成员国元首在 2015 年乌法峰会上共同签署了《上海合作组织成员国边防合作协定》，批准了《上海合作组织地区反恐怖机构理事会关于地区反恐机构 2015 年工作报告》《上海合作组织成员国打击恐怖主义、分裂主义和极端主义 2016 年至 2018 年合作纲要》，同时启动了《上海合作组织反极端主义公约》的制定。上述举措付诸实施后，必将为进一步提升组织内部合作和应对安全威胁能力的系统化、制度化和常态化建设发挥更积极的作用。

表 3.12 上海合作组织 2002 年-2015 年安全合作情况统计表

国家	统计年份										
	02	03	05	06	09	10	11	12	13	14	15
CHN	1	1	3	2	3	2	2	3	3	3	6
RUS	0	1	3	0	3	2	2	3	3	3	6
KAZ	0	1	0	1	0	1	1	2	1	3	3
UZB	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3
KGZ	1	1	0	0	0	1	1	2	1	3	3
TJK	0	1	0	1	0	1	1	2	1	3	3

在网络科学的实践中，当关系数据获取难度较大时，使用隶属矩阵来描述网络结构是比较明智的选择。因为每个节点属于哪个事件集是比较明确的，因此相关数据一般也比较优质。例如，两个国家参与过同一场联合军演，就可以认为这两个国家之间建立了连接，并可以赋予其一定的权重。本节我们主要通过对 2002 年以来上海合作组织成员国历年开展的双边和多边安全合作事件数据进行梳理和

归纳，其中包括联合反恐演习、国防部长定期会晤以及安全合作高级别会议等内容。通过建立组织成员国与安全合作事件之间的隶属矩阵，并借助 Organization Risk Analysis 软件对安全合作网络的拓扑结构和关系属性进行计算分析。表 3.12 统计了 2002 年至 2015 年上海合作组织官方报道的成员国安全合作事件，为了便于更加客观地反映具体事件对于组织发展的影响，我们依据合作的层次和规模等因素给不同事件的重要程度赋予了相应权重。

表 3.13 上海合作组织 2002 年-2015 年安全合作隶属网络中心性指标

国家	中心性指标				
	Authority	Total Degree	Hub	Eigenvector	Bonacich Power
CHN	0.744	0.627	0.751	0.752	361
RUS	0.735	0.592	0.738	0.729	341
KAZ	0.494	0.328	0.497	0.500	189
UZB	0.425	0.248	0.395	0.398	143
KGZ	0.489	0.325	0.492	0.495	187
TJK	0.494	0.328	0.497	0.500	189

表 3.14 上海合作组织 2002 年-2015 年安全合作隶属网络测度统计表

国家	中心性指标				
	Closeness	Inverse Closeness	Information	Situation Awareness	Constraint Burt
CHN	0.340	0.357	0.224	0.349	0.616
RUS	0.378	0.397	0.217	0.325	0.635
KAZ	0.528	0.576	0.147	0.091	0.723
UZB	0.675	0.716	0.120	0.057	0.743
KGZ	0.535	0.582	0.146	0.089	0.725
TJK	0.528	0.576	0.147	0.091	0.723

关于上海合作组织框架内军事与安全合作的公开报道内容和数据总体来说还比较有限，基于开源数据构建的网络模型不可避免会存在一定程度的信息缺失。尽管结果没有经贸合作有向加权网络的变化趋势明显，但隶属关系矩阵的网络指

标总体分布还比较清晰。从表 3.12 和表 3.13 我们可以看出，各成员国的中心性指标与之前的有向加权网络的数值分布基本一致。因为举行的双边联合军事演习次数较多以及参与的安全合作总体规模较大，中国和俄罗斯在网络中始终占据着比较核心的位置。需要说明的是，本节首次出现的 **Constraint Burt**，该中心性指标定义的核心基础是网络中节点的测地线距离，测地线指的是节点之间的最短路径，而 **Constraint Burt** 还包含了相似性测度的内涵。该指标的设计者 **Ronald Burt** 认为，节点对当前关系的强度和重要性会随着距离的增加而降低，提出通过设定具有弱对等性的距离值，对聚类结果进行适当的取舍。通过将数据输入 **Organization Risk Analysis** 软件，我们可以从图 3.6 中的结果对构建的隶属网络有更为直观的理解。

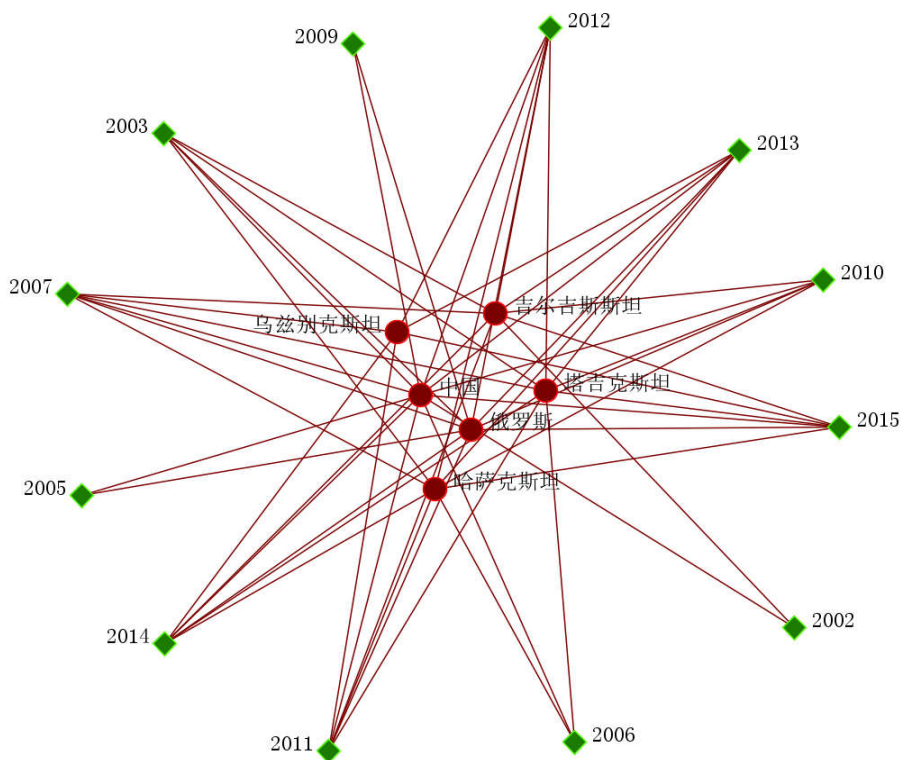


图 3.6 上海合作组织 2002 年-2015 年安全合作隶属网络结构图

3.2.3 上海合作组织多元合作网络构建及结构分析

尽管受到历史文化传统、地缘政治环境以及经济发展水平等因素制约，但随着合作内涵定位的不断延伸，上海合作组织成员国之间开始在教育、旅游、卫生等多个民生领域展开双边或多边对话与务实合作。就客观现实而言，通过定期安排部长级会晤磋商，召开政府部门联席会议，共同举办文化交流活动等，特别是《上海合作组织成员国文化部长联合声明》《上海合作组织成员国政府间教育合作协定》《上海合作组织教育部长宣言》等文件的公开发表，各成员国通过不断

加深彼此了解、增进政治互信，为进一步巩固已有成果、拓宽合作领域、提升质量效益奠定了坚实基础。本节我们主要依据由中国社会科学院俄罗斯东欧中亚研究所和上海大学上海合作组织公共外交研究院定期联合出版的《上海合作组织发展报告（2015）》^[104]，并结合上海合作组织官方网站和部分新媒体发布的信息资料，尝试构建包含政治、外交、文化等为主要内容的上海合作组织多元合作网络。为尽量保证数据的完整性和结论的客观性，我们主要选取 2011 年至 2014 年发生的相关事件为基础，借助 Organization Risk Analysis 强大的绘图功能，对收集到的数据进行了可视化处理，绘制了上海合作组织连续四年的多元合作网络拓扑结构示意图。从图 3.7 显示的结果我们可以看出，随着 2011 年到 2014 年间上海合作组织在相关领域的合作项目类型和数量出现快速增长，多元网络模型的节点之间的连边也变得更为紧密。不可否认，由于信息来源和时间因素的影响，确实存在时间距离越久远，数据缺失越严重等问题，但从现有模型连边密度的变化趋势来看，多元合作网络拓扑结构所表现出的生长特性，与之前数据相对比较完备的经贸合作有向加权网络中的指标增长趋势具有一致性。

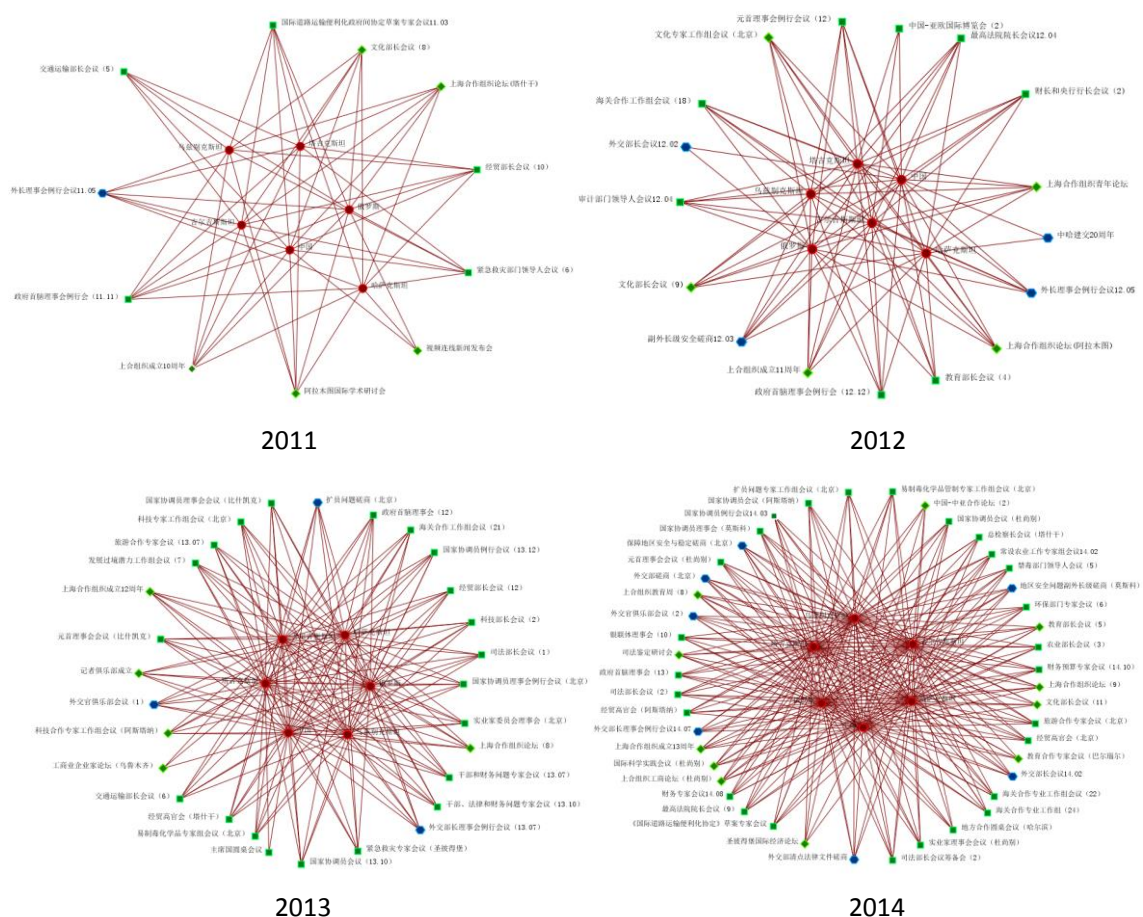


图 3.7 上海合作组织 2011 年-2014 年多元合作网络结构演化情况

3.3 上海合作组织网络结构对等性分析

通过收集分析上海合作组织在经贸、安全、政治、外交以及文化等方面的合作数据,构建有向加权网络、隶属关系网络和多元合作网络,发现中国和俄罗斯始终居于核心地位并发挥重要作用,网络节点的中心性指标呈现出幂律分布等特征。本节我们主要对选定年份的经贸有向加权网络和安全合作隶属网络进行分析,考察成员国之间的结构对等性。结果对等性(Structural Equivalence)主要研究行动者之间的位置结构,存在多大程度上的相似性、一致性,也就是说在网络局部形成了可以“相互替代”的模块。由于数据有限、测量误差等客观因素,从严格意义上讲,几乎不太可能出现结构完全等价的节点。实际研究过程中,只能采取近似等价的原则计算相关结果。CONCOR 收敛法是最早根据结构等价对行动者进行分类的迭代算法,主要由哈佛大学 H. White 教授的两个学生 Breiger 和 Schwartz,在思考如何将代数理论引入社会网络分析的研究过程中提出,然而他们只是独立地重新发现了 McQuitty 于 1968 年提出的这种矩阵聚类法。

CONCOR^[105]收敛法的名称源自其核心算法,迭代相关系数收敛(CONvergence of iterated CORrelations)。这种算法的基本原则十分简单,就是从一个社会关系矩阵开始,反复迭代计算矩阵各行(或者列)之间的相关系数。具体来说,就是用前一轮计算得到的结果作为下一轮的输入,最终得到所有值均由+1和-1组成的相关系数矩阵,其中具有完全相同关系模式的行动者相关系数为+1,而具有完全不同关系模式的行动者相关系数为-1。理论上讲,这个迭代的过程可以无限循环下去,结合对矩阵的转置以及行与列之间的同时替换,可以实现对网络中每个行动者的等级区分,进而达到简化数据的目的。每一轮迭代计算后,CONCOR 收敛法都会将网络中的行动者区分为离散且完全互斥的两个集合,由于其准确的聚类原则和数学特性仍然模糊不清,实际运用过程中还应更为谨慎,但不能否认的是该算法在社会网络分析的一些核心领域已经得到了广泛认可。

本节使用的数据与上一节构建网络模型时完全一致,在此不做赘述,具体的计算过程主要借助 UCINET 软件完成。需要指出的是,考虑到网络演化过程本身也有可能对分析结果和指标变化趋势产生影响,尤其是在个别年份可能由于统计误差或者是特殊事件而引入无法预知的随机性波动。为了尽量减少这方面的不确定性影响,我们主要选取了上海合作组织刚成立的 1996 年和接近样本区间截止的 2013 年作为分析对象,这样也有利于从时间维度考察相关结论是否具有连续性和一致性。对于隶属网络而言,考虑到 CONCOR 收敛法主要针对关系矩阵进行运算,特别的,该算法对长方形发生阵的解释能力比较有限,我们首先对安全事件数据构建的隶属矩阵进行处理,主要通过矩阵乘法 $S = A * A^T$ 将原始数据转化为方阵。

具体计算结果见表 3.15 至表 3.17 的统计数据以及图 3.8 到图 3.10 的树形图。

表 3.15 上海合作组织成员国 1996 年经贸有向加权网络结构对等性分析

	CHN	RUS	KAZ	KGZ	UZB	TJK
CHN	1.00	0.77	0.80	0.57	0.97	0.30
RUS	0.77	1.00	0.91	0.11	-0.06	-0.29
KAZ	0.80	0.91	1.00	0.68	0.89	0.24
KGZ	0.57	0.11	0.68	1.00	0.71	0.73
UZB	0.97	-0.06	0.89	0.71	1.00	0.96
TJK	0.30	-0.29	0.24	0.73	0.96	1.00

表 3.16 上海合作组织成员国 2013 年经贸有向加权网络结构对等性分析

	CHN	RUS	KAZ	KGZ	UZB	TJK
CHN	1.00	0.74	0.77	0.51	0.80	0.47
RUS	0.74	1.00	0.96	0.71	0.95	0.71
KAZ	0.77	0.96	1.00	0.52	0.95	0.55
KGZ	0.51	0.71	0.52	1.00	0.70	0.99
UZB	0.80	0.95	0.95	0.70	1.00	0.70
TJK	0.47	0.71	0.55	0.99	0.70	1.00

表 3.17 上海合作组织成员国 2002 年-2015 年安全合作网络结构对等性分析

	CHN	RUS	KAZ	KGZ	UZB	TJK
CHN	1.00	1.00	0.98	1.00	0.98	0.98
RUS	1.00	1.00	0.98	1.00	0.98	0.98
KAZ	0.98	0.98	1.00	0.99	1.00	1.00
KGZ	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99
UZB	0.98	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00
TJK	0.98	0.98	1.00	0.99	1.00	1.00

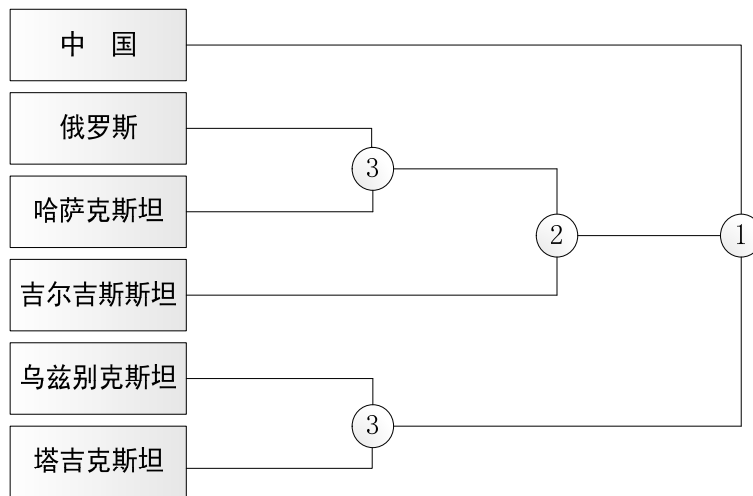


图 3.8 上海合作组织成员国 1996 年经贸有向加权网络结构树形图

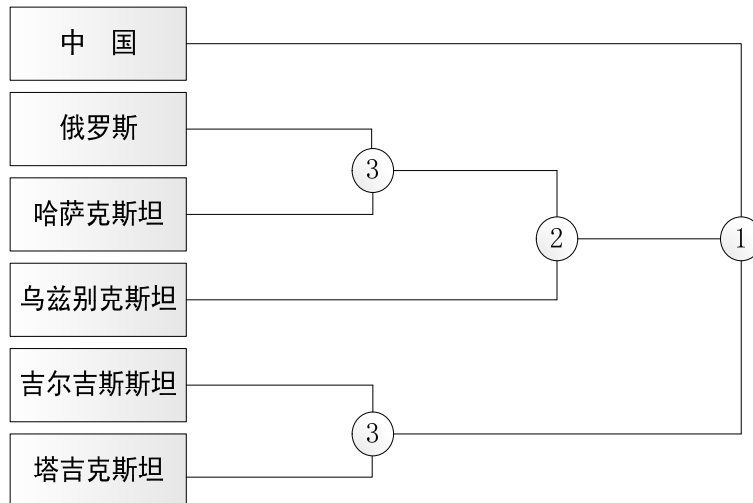


图 3.9 上海合作组织成员国 2013 年经贸有向加权网络结构树形图

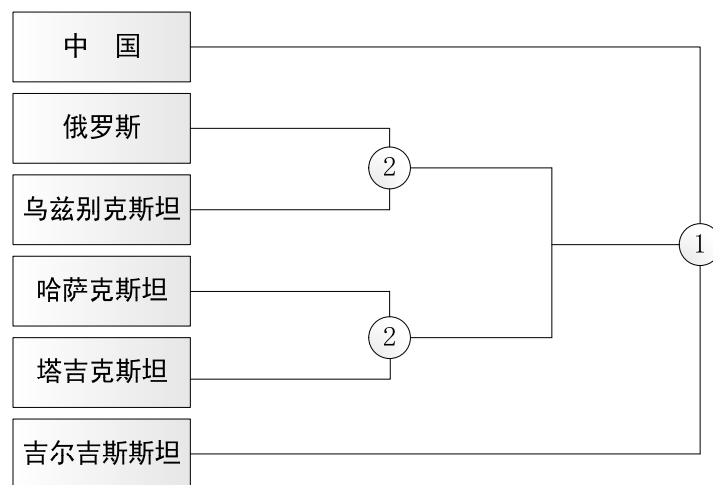


图 3.10 上海合作组织成员国 2002 年-2015 年安全合作网络结构树形图

通过上述的计算结果可知，无论是在经贸合作有向加权网络还是在安全合作隶属网络中，俄罗斯和中亚四国相比于中国始终都表现出更高的结构对等性，具体表现为局部的关系互动更为频繁，这些结论也有助于我们在后续设计仿真网络模型和干预实验时进行参考。许多实证研究也发现，真实网络中社团结构的广泛存在，这些社区内部的节点之间具有更为紧密的连接，而社区之间的连接关系则显得比较松散。尽管在很多情况下节点对于整体框架内的活动参与及影响力比较有限，但是同一社团成员的合作策略选择往往具有更高的相似性。不可否认的是，中亚地区国家相互之间进行合作的共同利益是天然存在的。从传统地缘政治的角度来看，俄罗斯等五国曾同属前苏联加盟共和国，目前又均为独联体成员国，各国具有相似的地理和文化背景，经济合作的互补性也更强等等。同时，上述分析结果也可以理解为俄罗斯在中亚地区传统影响力的一种体现。

第四章 基于影响力感知的上海合作组织权重网络演化模型

由于形成机制和结构演进的动态多变，网络模型的演化普遍表现出时空复杂性特征。传统的网络科学过于关注行为体关系属性的静态平衡，而忽略了国际社会和国家关系合作形式的丰富多样。上海合作组织作为一种具有多元性、开放性的区域合作机制，涉及的国家间协调与合作较为复杂，大国关系和双边关系都发挥着重要作用，从系统学的角度看属于远离平衡态的非线性、动态式系统。本章主要借鉴国内外成熟的研究结论，首先尝试对国家实力指数进行定义和计算，而后基于前一章对数据指标纵向分析的结果，提出了一种基于影响力感知的上海合作组织权重网络演化模型，为后续的干预策略实验提供基础的平台支撑。

4.1 国家实力指数构建

对于上海合作组织这类区域性国际组织，如果按照传统的拓扑结构演化的思路构建模型，其研究结论既不理想也不符合实际。通过梳理现有的理论成果，我们发现除考虑网络连边的权重等概念外，引入节点属性也可以作为研究的新突破口。国家实力作为节点属性至少会从以下三个方面对研究对象的合作策略产生影响：一是影响扩大对外合作的意愿；二是影响合作策略的选择；三是影响合作对象的偏好。下面首先讨论国家实力的定义、组成并完成实验对象的数值计算。

4.1.1 国家实力的相关研究

国家实力，即一个国家的综合国力研究，不同于专项和单项研究，它需要全面衡量一个国家各方面的能力和竞争力，并形成全景性、森林式的分析评估结果。根据政治经济学的观点，国家实力往往与其网络地位之间存在动态的一致性。目前国内外关于国家实力构成及量化分析成果很多，研究人员主要通过区分国家能力的内涵，对国家的综合竞争力分析框架及衡量方法进行定量评估。

2011年8月，美国兰德公司发布了题为《China and India 2025: A Comparative Assessment》的研究报告^[106]，报告通过人口情况、宏观经济、科技发展和国防支出与采购等四个方面，评估了中印两国实力在未来数年的相对水平、成就及发展前景，并对可能面临的障碍和限制进行了探讨。一是区分年龄分布、教育情况以及医疗条件等指标对两国的人口发展趋势进行了分析；二是通过解读分别由学术机构、商业组织以及国际组织独立完成的27项研究报告，对两国未来的宏观经济发展前景进行评估；三是基于政府、商界、高等教育和私人非营利组织4种资金来源的数据，综合人力资源领域的定性和定量信息，完成了对两国科技水平和可持续发展能力的评估；四是结合官方数据及其他几个重要信息来源的补充，对两

国的国防支出与采购情况进行了全面梳理并给出了未来情况预测和估算。

2008年11月,美国国家情报委员会发表的《全球趋势 2025: 转型的世界》^[107],将综合国力定义为 GDP、国防支出、人口以及技术四大类战略资源占全球比重的加权平均。2012年12月,该委员会又发表了《全球趋势 2030: 可能的世界》^[108]。该报告对综合国力计算进行了细化,共提出 11 项指标,包括 GDP(购买力平价)、贸易额、外国直接投资、对外援助、人力资本、政府财政收入、研发支出、互联网及通讯技术、国防支出、能源消耗、核武器。以上两份报告均直接对美国和中国的综合实力进行了分析和预测,并提出了相应的结论和建议。

清华大学胡鞍钢教授团队全面系统地分析了国内外相关的重要研究成果后,针对综合国力评估提出了“国家战略资源”的概念并将其定义为:“一个国家通过有目的之行动追求其战略目标的综合能力。^[109]”该团队认为国家的综合实力就是战略资源的分布组织,为了更加客观地、量化地、全面地对其评估,提出可以使用八个方面的资源类型进行描述,分别为经济资源、人力资源、自然资源、资本资源、知识技术资源、政府资源、军事资源、国际资源,并细化出 17 项指标对其进行了具体量化并赋予权重。通过对上述资源类型和相关指标的进一步解读,对中美两国过去 15 年的综合国力以及战略资源的动态变化进行了重新评估。

4.1.2 上海合作组织国家实力指数理论解析

依据国内外的成熟经验结合上海合作组织发展实际,本文研究对象的国家实力指数构成主要包括 4 个方面:一是劳动人口数量。兰德公司在研究报告《China and India, 2025: A Comparative Assessment》中指出,人口的年龄结构不合理以及劳动人口的比例问题都有可能制约人口增长转变为“人口红利”,而上海合作组织在经济与安全领域的重点合作也依赖于未来人口发展的合理性,因此本文在计算国家实力指标采用的是本国的劳动力人口数量,而非人口总量。二是经济发展水平。国内生产总值(GDP)是国家经济发展水平的重要指标,美国国家情报委员会和胡鞍钢团队的研究成果均单独将其列为经济实力的衡量指标,因此本文遵照他们的做法,将 GDP 作为国家经济实力的度量。三是武装力量规模及武器出口额。国家的武装力量人数历来被作为军事实力的重要体现,考虑到俄罗斯受国内经济发展水平制约,武装力量的规模常年在较低水平徘徊,仅用这一项指标为基础计算其军事实力存在一定的不合理性,本文同时选取能够部分代表军工发展水平的武器出口额来平衡指标数值上的差距。四是科技创新能力。全球创新指数(GII)每年由世界知识产权组织(WIPO)、美国康奈尔大学和英士国际商学院联合发布^[110]。该报告依据 79 个指标,对全世界 141 个国家和经济体的创新表现进行排名。据其官方网站统计,该数据库中的信息已覆盖世界人口的 95.1%和全球 GDP 的 98.6%。

GII 目前已成为创新方面的重要参考指标，也是决策者重要的基准工具。关于创新能力的评估本文主要援引该指数作为计算的依据。通过图 4.1 我们可以对上海合作组织国家实力指数的主要构成有一个直观的理解。

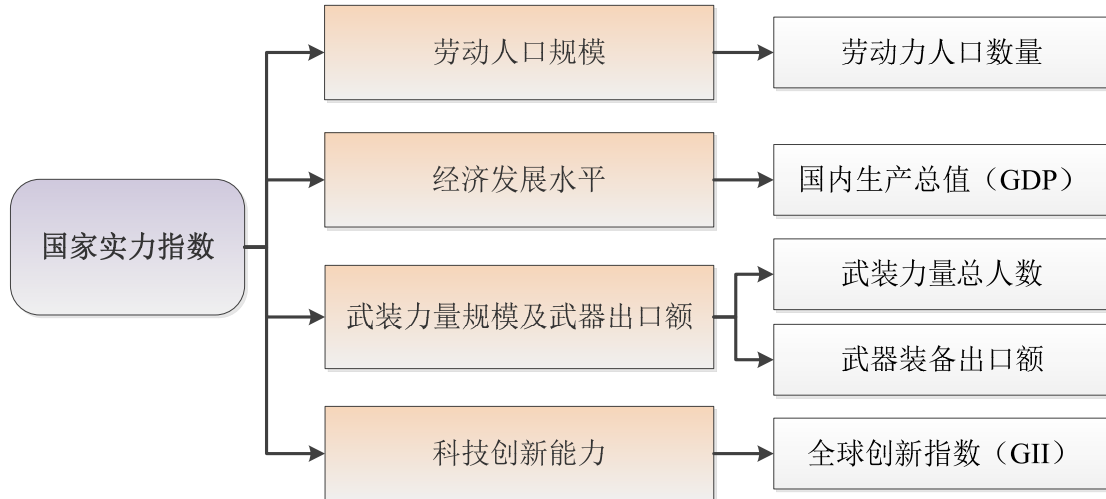


图 4.1 上海合作组织成员国国家实力指数主要构成

为简化计算并方便下步仿真网络模型的理论解析，我们主要将上述四类指标直接相乘得到国家实力指数。为区别上述指标在不同类型国家未能体现的差异性，必要时根据毛泽东主席关于超级大国、发达国家、发展中国家“三个世界”划分的重要战略思想^[11]，通过引入综合系数 α 进行适当调整，其中超级大国取值为 2，另外两类国家取值为 1。综上所述，国家实力指数的计算公式如下：

$$D = \alpha * WF * GDP * (MIL * AE) * GII \quad (4.1)$$

其中， α 为综合系数， WF 为劳动人口数量， GDP 为国内生产总值， MIL 为武装力量总人数， AE 武器出口， GII 为全球创新指数。

4.1.3 上海合作组织国家实力指数构建

基于上述理论分析，计算国家实力指数时主要依据世界银行“世界发展指标”，斯德哥尔摩国际和平研究所等开源数据库，以及由世界知识产权组织（WIPO）、美国康奈尔大学和英士国际商学院联合发布的全球创新指数（GII）等开源途径获取所需数据和信息。需要说明的是，为确保准确性的同时尽量减少偶然性和随机因素的影响，本文选取 2010 至 2013 年的统计均值作为构建指标的基础数据。与此同时，由于研究对象国家实力指数计算的原始结果之间存在着数值量级的差异，无法直接用于构建后续的网络模型，我们统一对初始结果求取自然对数后得到最终的国家实力指数，并以此作为下步演化干预实验的初始条件。

表 4.1 上海合作组织成员国 2010 年-2013 年劳动力人口数量

国家	劳动力人口数量(单位: 人)				
	2010	2011	2012	2013	权值
CHN	781054640	790183028	795863202	801790592	792222865.5
RUS	76594138	76965903	76895191	76886470	76835425.5
KAZ	8848347	8984616	9095835	9197976	9031693.5
UZB	12319568	12751469	13033823	13303330	12852047.5
KGZ	2533335	2572454	2621907	2676690	2601096.5
TJK	3289719	3383891	3479942	3577727	3432819.75

表 4.2 上海合作组织成员国 2010 年-2013 年国内生产总值

国家	国内生产总值 (GDP) (单位: 美元)				
	2010	2011	2012	2013	权值
CHN	3.867E+12	4.234E+12	4.562E+12	4.913E+12	4.394E+12
RUS	9.093E+11	9.480E+11	9.803E+11	9.935E+11	9.578E+11
KAZ	7.725E+10	8.304E+10	8.719E+10	9.242E+10	8.5E+10
UZB	2.157E+10	2.336E+10	2.528E+10	2.73E+10	2.44E+10
KGZ	3.056E+09	3.238E+09	3.235E+09	3.589E+09	3.28E+09
TJK	3.181E+09	3.417E+09	3.673E+09	3.945E+09	3.55E+09

表 4.3 上海合作组织成员国 2010 年-2013 年武装力量总人数

国家	武装部队总人数(单位: 人)				
	2010	2011	2012	2013	权值
CHN	2945000	2945000	2993000	2993000	2969000
RUS	1430000	1364000	1364000	1260000	1354500
KAZ	80500	70500	70500	70500	73000
UZB	87000	68000	68000	68000	72750
KGZ	20400	20400	20400	20400	20400
TJK	16300	16300	16300	16300	16300

表 4.4 上海合作组织成员国 2010 年-2013 年武器装备出口额

国家	武器装备出口额（单位：百万美元）				
	2010	2011	2012	2013	权值
CHN	1459	1336	1666	2068	1632.25
RUS	5993	8556	8402	8462	7853.25
KAZ	0	0	0	0	100
UZB	209	209	0	0	104.5
KGZ	0	0	0	0	100
TJK	0	0	0	0	100

表 4.5 上海合作组织成员国 2013 年-2015 年创新能力指数（GII）

国家	2013		2014		2015		权值
	Score	Percent	Score	Percent	Score	Percent	
CHN	44.7	0.91	46.6	0.8	47.5	0.8	57624.67
RUS	37.2	0.27	39.1	0.66	39.3	0.66	6723.01
KAZ	32.7	0.82	32.8	0.45	31.2	0.42	5186.23
KGZ	23.9	0.05	25.2	0.11	25.9	0.14	12.01
UZB	27	0.08	27.8	0.22	28	0.23	85.08
TJK	30	0.11	23.7	0.04	27.5	0.19	16.35

表 4.6 上海合作组织成员国国家实力计算

国家	统计分类					计算结果	
	GDP	劳动力	部队	武器出口	GII	国家实力	LN
CHN	4.394E+12	792.2E+06	2969000	1632.25	57624.67	1.008E+29	9.7
RUS	9.578E+11	76.84E+06	1354500	7853.25	6723.01	5.289E+26	9.2
KAZ	8.5E+10	9.03E+06	73000	100	5186.23	2.966E+19	6.1
UZB	2.44E+10	12.85E+06	72750	104.5	12.01	2.936E+18	7.2
KGZ	3.28E+09	2.60E+06	20400	100	85.08	1.483E+15	5.1
TJK	3.55E+09	3.43E+06	16300	100	16.35	3.467E+14	5

4.2 基于国家影响力感知的权重网络演化模型构建

目前国内外网络模型演化领域主要的理论模型有：确定性网络、随机性网络和混合性网络^[112]。最初的网络科学研究主要集中于按照确定方式生成的确定性网络，这类模型的属性指标都可以得到精确求解。自从 ER 随机图模型和小世界网络模型这两种经典的指数模型被相继提出，大批复杂网络领域的学者开始采取随机方式将不确定性引入网络演化规则，并取得了许多突破性的进展。然而，现实世界的网络模型大都处于确定性与随机性和谐统一的动态过程，混合演化模型往往能够更为准确地捕捉各种微观因素对网络的影响。为此，我们在设计模型演化规则时的基本思想是将带有一定随机性的概率分布引入相对确定的择优连接机制，确保构建的混合择优模型能够最大限度的拟合实验对象的网络特性。

4.2.1 演化模型设计

为更加真实地反映上海合作组织权重网络演化模型的结构属性，确保研究结论具有相应的实际意义，在模型设计构建的初始阶段，下列客观存在的属性必须予以关注。一是对于区域性国际组织构建的网络演化模型，其节点（国家）之间往往是全连接，而且一定时间内不太可能出现节点和连边数量的频繁增减，更多可能是边权重改变引起的结构演化。二是国家实力作为在国际体系中界定自我角色的重要影响因素，必须考虑其在网络构建及演化过程中发挥的作用。三是国际合作演化模型的适应度分布应为有限分布，因为资源及其他约束条件的限制，一个国家在国际组织的影响力不可能无限扩张。针对上述特点，本文提出了一种基于国家影响力感知的上海合作组织权重网络演化模型。由于设计的是权重演化模型，综合研究对象的基本情况和发展实际，在网络构建阶段我们没有考虑引入新节点，所以网络规模对本研究基本结论的影响可以忽略不计。需要说明的是，为了更好地拟合仿真对象的实际网络结构，同时尽量减少模型构建及演化过程中的主观因素，我们在重现网络模型的无标度特性时主要选用了生长机制和偏好依附作为演化规则，没有引入层次结构网络这类确定性的无标度网络模型^[113]。

网络模型的初始状态包含 $m_0 = 6$ 个节点，分别代表上海合作组织当前的 6 个正式成员国：中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦，根据国家实力指数计算的结果分别赋予节点初始权重。各节点之间为全连接，每一条连边的初始边权值为 w_0 。之后演化过程包括如下步骤：

1. 选取节点：在网络模型演化过程中，节点（国家）的点权重（国家实力）越大，或者与其他国家联系越紧密，该节点（国家）越有意愿和能力继续增强对外合作。因此，在每个时间步 t 网络中按照偏好概率选择一个现有的节点，节点 i 被

选中的偏好概率 $\Pi(i)$ 受其节点的点权重 a_i （即国家实力）和强度 s_i 共同影响。为更好的拟合现实世界中国家实力逐渐增长的特点，设定节点 i 的权重 a_i 每个时间步 t 增加 5%，节点 i 被选中的优先概率计算公式如下：

$$\Pi(i) = \frac{a_i (1+0.05)^t * s_i}{\sum_j b_j (1+0.05)^t * s_j} = \frac{a_i * s_i}{\sum_j b_j * s_j} \quad (4.2)$$

根据复杂网络定义，节点强度 s_i 为该节点所有连边的权重之和：

$$s(i) = \sum_{j \in \tau(i)} w_{ij} \quad (4.3)$$

为了便于讨论，我们定义节点的点权重(国家实力)和强度(对外合作水平)的乘积为该节点在网络中的权威指数(Authority)， $A(i)$ 的计算公式如下：

$$A(i) = a_i (1+0.05)^t * s_i \quad (4.4)$$

权力的核心要义在于对网络的控制能力，我们定义节点 i 的权威指数 $A(i)$ 占模型中节点权威指数总和的比重为该节点的影响力(Influence)， $I(i)$ 的计算公式如下：

$$I(i) = \frac{A(i)}{\sum_j A(j)} \quad (4.5)$$

2. 增加连边权重：在资源有限的情况下，实力越强的节点（国家）越倾向与更多节点（国家）建立或加强合作，实力较弱的节点（国家）则更倾向与核心节点（国家）强化合作。根据设计的算法，节点 i 在被优先选中后，网络中剩余节点 k 被其选中的优先概率，由节点 i 连边的数量 X 和节点 k 自身的影响力 $I(k)$ 共同决定。被优先选中的节点 i 强度增加值为 Y ，被该节点选中的其余 X 个节点根据比例增加连边的权重。需要说明的是，节点 i 被选中对节点 k 的优先概率影响仅限于其连边数量 X 。这个过程可以被理解为一种基于可变对象的局域世界网络演化模型。节点 k 的优先概率计算公式如下：

$$\Pi(k) = \frac{X}{N} \frac{a_k (1+0.05)^t * s_k}{\sum_j b_j (1+0.05)^t * s_j} = \frac{X}{N} \frac{a_k * s_k}{\sum_j b_j * s_j} \quad (4.6)$$

在时间步 t 网络的节点数量为 N ，节点 i 被选中时在权威指数的排序为 R ，可得选定节点的局域世界为： $X = N - R$ 。节点 k 与节点 i 连边权重的增加值为 ω_{ik} ：

$$\omega_{ik} = \frac{a_k * s_k}{\sum_j b_j * s_j} * Y \quad (4.7)$$

受到 BBV 模型、局域世界演化模型以及流驱动的加权网络模型的启发, 本文提出的权重网络演化模型针对研究对象的主要改进包括: 一是通过优先概率选中网络现有的节点并增加一定数量与其连接节点之间的边权重, 替代原来需要由节点数量增减引起的网络拓扑结构演化。二是充分考虑了国家实力对于区域合作组织网络演化的影响, 将其作为有限支撑的适应度分布引入优先概率的计算。三是针对有限资源情况下, 不同类型国家合作策略的选择偏好, 提出了一种基于可变对象的局域世界演化模型。上述改进较好地拟合了地区性国际组织的网络演化特点, 也包含了不同类型国家在合作中表现出的选择差异。

4.2.2 理论解析

根据模型演化规则, 节点 i 的强度增加有且只有两种情况: 一种是在第一步以优先概率 $P_1(A)$ 被选中, 其强度的增加值为 Y , 即 $\Delta\omega_i = Y$; 另一种是在第二步以概率 $P_2(B)$ 与第一步被优先选中的节点进行连接, 其强度增加值 $\Delta\omega_2$ 的计算方法同公式 (4.7)。因此, 节点 i 在任意时刻 t 强度的增加值满足下列公式:

$$\frac{ds_i}{dt} = Y * P_1(A) + (1 - P_1(A))Y * P_2(B) = Y(P_1(A) + P_2(B) - P_1(A)P_2(B)) \quad (4.8)$$

根据模型演化规则可知, 节点 i 的优先概率仅与被选中时的点权重 a_i 和强度 s_i 有关, 因此 $P_1(A)$ 和 $P_2(B)$ 相互独立, 根据概率乘法公式:

$$P_1(A)P_2(B) = P_{12}(AB) = 0 \quad (4.9)$$

因此, 公式 4.8 可改写为:

$$\frac{ds_i}{dt} = Y * P_1(A) + Y * P_2(B) \quad (4.10)$$

平均场理论的核心思想是: 把跨越一切时间和空间标度的单元之间的相互作用, 总体上等价于一个“平均场”, 而不去计算局部过程中可能存在的差异和不同。由于网络的异质化程度有限, 本研究选用平均场理论进行理论解析是有效的。假设节点 i 的强度是连续变化的, 由上述权重网络模型的演化规则以及平均场理论可知, 节点 i 的强度 s_i 随时间 t 的变化率满足如下动力学方程:

$$\begin{aligned} \frac{ds_i}{dt} &= Y * \frac{a_i(1+0.05)^t * s_i}{\sum_j b_j(1+0.05)^t * s_j} + Y * \frac{X}{N} * \frac{a_i(1+0.05)^t * s_i}{\sum_j b_j(1+0.05)^t * s_j} \\ &= \left(\frac{X+N}{N} \right) Y * \frac{a_i * s_i}{\sum_j b_j * s_j} \end{aligned} \quad (4.11)$$

在 t 时刻，由于节点强度增加的连续性可得：

$$\sum_j b_j * s_j = N * \bar{B} * \langle s(t) \rangle = N * \bar{B} * \frac{2m_0\omega_0 + 2Yt}{N} \approx 2Y\bar{B}t \quad (4.12)$$

其中 N 为模型演化到 t 这一时间步网络中节点的数量之和， \bar{B} 为当前所有节点权重（国家实力）的平均值， $\langle s(t) \rangle$ 为在 t 时间步网络中所有节点的平均强度。通过分析我们可以发现，当演化的步骤足够多时，节点的初始强度可以忽略。

$$\frac{ds_i}{dt} = \left(\frac{X}{N} + 1 \right) Y * \frac{a_i * s_i}{2Y\bar{B}t} = \frac{a_i(X+N)}{2\bar{B}N} * \frac{s_i}{t} \quad (4.13)$$

根据设定的条件，每个节点被优先选中后强度的增加值 $s_i(t_i) = Y$ ，其中 t_i 为节点 i 被选中的时刻，由此可得微分方程的解为：

$$s_i(t) = Y * \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\frac{a_i(X+N)}{2\bar{B}N}} \quad (4.14)$$

以上的分析表明，网络模型中所有节点的强度都以同样的幂指数函数增长，所以选定节点的强度 $s_i(t)$ 服从下列概率分布：

$$P\{s_i(t) < s\} = P\left\{t_i > \left(\frac{Y}{s}\right)^{\frac{a_i(X+N)}{2\bar{B}N}} t\right\} \quad (4.15)$$

因为每个实验仿真步的时间间隔相等，可以认为引入的随机变量 t_i 在 $(0, t)$ 的区间上近似服从均匀分布。从实验条件设定可以看出，演化到 t 这一时刻，网络所有节点被选中的总次数为 t ，因此其概率密度函数为：

$$P_i(t) = \frac{1}{t} \quad (4.16)$$

由此可得：

$$P\left\{t_i > \left(\frac{Y}{s}\right)^{\frac{a_i(X+N)}{2\bar{B}N}} t\right\} = 1 - P\left\{t_i \leq \left(\frac{Y}{s}\right)^{\frac{a_i(X+N)}{2\bar{B}N}} t\right\} = 1 - \left(\frac{Y}{s}\right)^{\frac{a_i(X+N)}{2\bar{B}N}} * \frac{t}{t} \quad (4.17)$$

则网络节点的强度分布为：

$$P(s) = \frac{\partial P\{s_i(t) < s\}}{\partial s} \approx \frac{2X+N}{2\bar{B}N} * (Y)^{\frac{2X+N}{2\bar{B}N}} * s^{-\left(\frac{2X+N}{2\bar{B}N} + 1\right)} \quad (4.18)$$

演化过程中网络节点的数量不变，因此 N 为常数。根据演化规则，每个时间

步网络中增加的强度 Y 也为常数。 X 为优先选中节点连接网络中其他节点的数量，与时间无关，因此可以视为常数。同时，由于模型演化为有限时间步迭代，因此节点 i 的点权重 a_i 、网络点权重的均值 \bar{B} 在时间步 t 确定时即可视为常数。由此可得，本文提出的基于影响力感知的权重网络演化模型，其强度变化服从幂律分布，其变化趋势主要依赖于网络中节点的初始权重以及优先选中节点的“影响力”指数在整个网络中数值的排序。

4.3 实证结果分析

Barabási^[114]等指出，网络模型中存在的生长机制(Growth Mechanism)和偏好依附(Preferential Attachment)是节点度分布呈现无标度特性的核心要素。由于上海合作组织的成员国数量非常有限，因此模型实验中设定的节点数量也比较少，如果使用常规的概念和测度来理解判断网络节点强度分布的无标度特性，结果显然很难体现出统计学特性。上一节我们通过平均场理论对构建的基于影响力感知的上海合作组织权重网络模型进行了理论解析，并推导出节点强度分布的无标度特性。为了验证所提网络演化模型的实际拟合效果，本节我们主要采用美国 MathWorks 公司推出的主流数学编程软件 MATLAB 8.2(R2013b)完成仿真建模以及干预实验。MATLAB 这一名称是 matrix 和 laboratory 两个单词的组合而成，其字面含义为矩阵实验室。MATLAB 软件最初是由美国新墨西哥大学计算机科学系的 Cleve Moler 主任在上世纪 70 年代使用 Fortran 语言编写的，当时的主要目的是为了减轻学生的编程负担。1984 年，MathWorks 公司正式将 MATLAB 软件推向商用市场，因其友好的图形用户界面，方便的数据可视化功能和丰富的函数工具而广受用户欢迎，目前已发展成国际控制界的标准计算软件之一。最新版本的 MATLAB 软件主要是基于 C++ 语言开发的，两者之间的语法特征也极为相似，因此生成的代码也具有可移植性好、可拓展性极强等特点，其应用范围也已经推广到图像处理、信号测试、建模分析和计算生物学等众多领域^[115]。考虑到网络规模的差异可能对结果分析带来的影响，尤其是后续干预实验还要引入部分新节点，为了便于实验结果的分析 and 讨论，本节在选择观测指标时首先设计了强度比重来描述节点分布。强度比重可以理解为对节点强度的数值进行了标准化，也就是某一节点的强度在网络中所有节点强度中所占的比重。由理论解析可知，在分析模型演化的具体时间步 t 时，网络中节点的强度比重与强度分布的差异主要体现为公式的当前时间步的强度总和这一常数系数，因此对其分布特性不会产生实质性的影响。与之前的章节一致，实验结果中的 CHN、RUS、KAZ、KGZ、UZB、TJK 分别代表中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦和塔吉克斯坦。为了简化计算的复杂度，每次仿真实验统一赋予下列初始条件： $m_0 = 6$ ， $w_0 = 1$ 和 $Y = 1$ 。

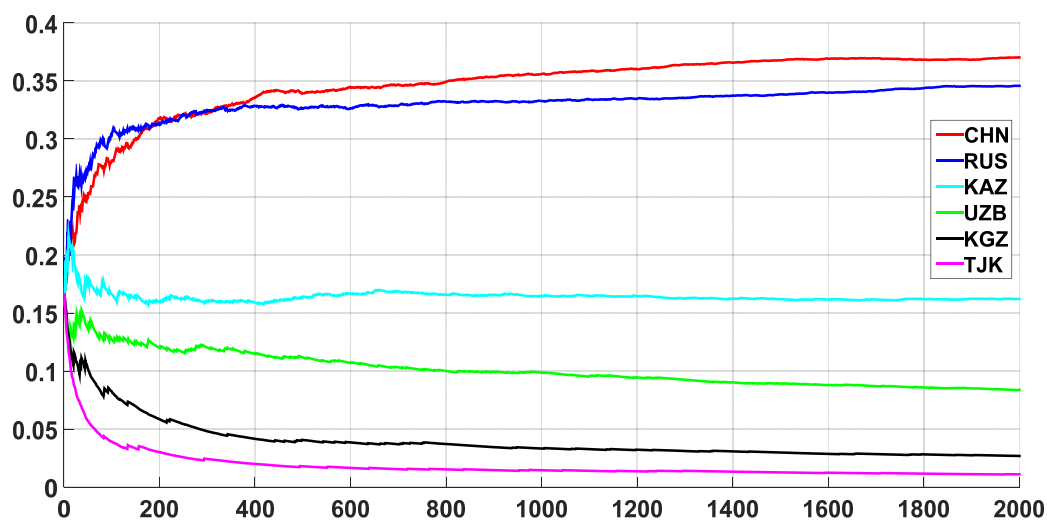


图 4.2 权重网络模型国家“强度”比重的演化情况

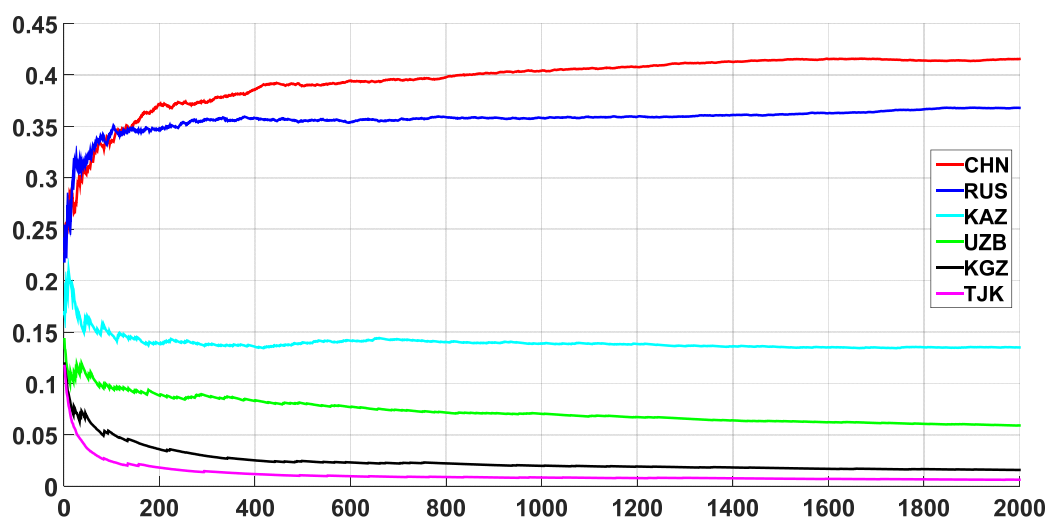


图 4.3 权重网络模型国家“影响力”指数演化情况

通过分析图 4.2 的实验结果,我们可以看到构建的权重网络演化模型较好地拟合了之前上海合作组织网络结构纵向分析的结论,具体来说:一是网络节点的强度分布相似。由强度的概念可知,其可以表征权重网络中各节点(国家)之间的整体合作情况,从曲线的变化趋势可以看出模型中定义的 6 个节点与上海合作组织成员国所处的位置结构和影响力保持了较好的一致性。二是收敛速度快。通过观察我们发现,模型中节点的强度比重收敛速度较快且效果较好,基本都在大约 400 个时间步后就可以达到稳态。收敛过程中指标的总变化趋势也比较平缓,没有出现大幅的震荡或跳跃等情况。仿真实验的曲线边界比较清晰,便于观察测量数值的比例关系。三是数值稳定。我们发现模型通过迭代达到稳态后,强度比重

的数值上下波动的范围非常有限，同时也没有出现异常的抖动和孤点，能够较好地再现模型规则描述中对于适应度为有限支撑的设定。基于归纳的这些情况和特点，我们可以通过观察分析网络结构的动态演变规律，为后续确定引发干预实验结果波动的本质因素，提供了较为稳定可靠的基础和环境。

表 4.7 国家“影响力”指数与强度的方差对比结果

	CHN	RUS	KAZ	KGZ	UZB	TJK
Var[A1]	0.02684	0.01928	0.00556	0.01579	0.01511	0.01108
Var[A2]	0.03052	0.02453	0.00436	0.01819	0.02176	0.01634
Var[B1]	0.03251	0.02009	0.01109	0.01861	0.01323	0.01094
Var[B2]	0.03581	0.02593	0.00905	0.02058	0.01891	0.01582
Var[C1]	0.02633	0.01791	0.01240	0.00968	0.01145	0.01153
Var[C2]	0.02961	0.02297	0.00976	0.01102	0.01644	0.01713
Var[D1]	0.02287	0.02074	0.00569	0.01322	0.01364	0.01334
Var[D2]	0.02741	0.02614	0.00515	0.01531	0.01974	0.01956
Var[E1]	0.04116	0.01855	0.01483	0.01417	0.01656	0.01450
Var[E2]	0.04277	0.02527	0.01203	0.01409	0.02271	0.02037

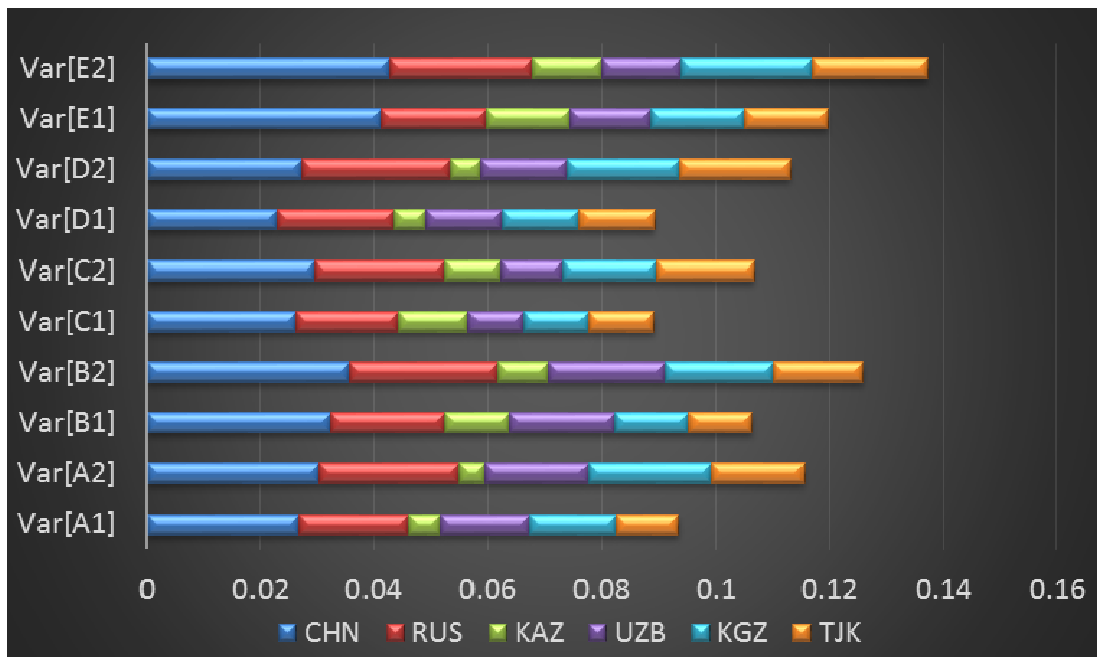


图 4.4 国家“影响力”指数与强度的方差分析对比累积柱状图

通过大量的数值模拟和理论分析，我们发现节点的点权（国家实力）确实可以通过将适应度引入优先概率的形式，对构建的权重网络模型及其演化结果产生影响。为了更为真实的拟合国家实力在合作演化过程中发挥的作用，我们在模型构建时专门定义了“影响力”这一概念，通过对比图 4.3 中国家“影响力”指数和图 4.2 中“强度”比重的演化结果，两者的变化趋势非常相近。而在模型演化的过程中，通过分析国家“影响力”指数的定义可知，相比于仅仅使用强度进行监测，选用“影响力”指数对于作为模型真实背景的国家间合作行为，其包含的实际意义更为明确。同时，在大量重复实验的过程中我们还发现，国家“影响力”指数变化趋势相对与强度收敛速度更快，实验结果达到稳态后指标的数值也更为稳定，表 4.7 和图 4.4 为随机抽取 5 次实验数据进行方差分析的结果。我们可以看到，无论是具体到每个节点（国家），还是综合考虑整体的累计和，国家“影响力”的方差始终小于强度的方差。因此，我们可以认为国家“影响力”数值的稳定性更强，在下步干预实验我们主要选定国家“影响力”作为的演化干预实验的监测对象。

第五章 上海合作组织权重网络演化模型干预策略实验

第三章进行纵向数据分析的过程中，我们发现上海合作组织近几年网络指标分布表现出明显的极化现象，节点的结构对等性分析也出现了一些有意义的结果。通过第四章的计算分析可知，设计的基于影响力感知的上海合作组织权重网络演化模型的收敛速度和数值稳定性都比较好。需要指出的是，尽管乌法峰会元首理事会正式批准启动了印度和巴基斯坦成为正式成员国的司法程序，但印巴两国关于克什米尔地区的争议始终是扩员过程中不可忽略的影响因素。与此同时，美国、加拿大两国都曾因申请成为上海合作组织观察员而遭到拒绝。综上所述，这些情况都将对权重网络模型的演化和干预实验的设计产生直接影响。

5.1 实验背景

本章我们主要考察引入综合实力较强、具有选择偏好以及相互关系紧张等三种类型节点（国家）对权重网络演化模型的影响。由于演化结果对节点初始权重（国家实力）的依赖，首先分别对拟作为干预对象的 A 国、I 国和 P 国的国家实力进行计算。需要说明的是，A 国作为当今世界上唯一的超级大国，国家实力计算公式对其综合国力的描述不够全面，为确保干预实验结果的效果和可信度，我们使用调节系数对其进行了调整，使最终结果更为符合实际情况。

表 5.1 干预实验对象 2010 年-2013 年国家实力数据统计（1）

国家	武器装备出口（单位：美元）						
	2010	2011	2012	2013	权值		
A 国	8.169E+9	9.111E+9	9.018E+9	7.384E+9	8.421E+9		
I 国	5E+6	3E+6	0	11E+6	6.33E+6		
P 国	0	0	0	0	100		
国家	创新能力指数（GII）						
	2013		2014		2015		权值
	Score	Percent	Score	Percent	Score	Percent	
A 国	60.3	0.4	60.1	0.96	60.1	0.97	81127.71
I 国	36.2	0.93	33.7	0.47	31.7	0.43	7268.54
P 国	23.3	0.89	24	0.06	23.1	0.07	48.29

表 5.2 干预实验对象 2010 年-2013 年国家实力数据统计 (2)

国家	GDP (单位: 美元)				
	2010	2011	2012	2013	权值
A 国	1.35993E+13	1.3817E+13	1.41377E+13	1.44515E+13	1.40014E+13
I 国	1.24368E+12	1.32624E+12	1.39363E+12	1.48978E+12	1.36333E+12
P 国	1.29518E+11	1.33077E+11	1.37744E+11	1.43817E+11	1.36039E+11
国家	劳动力人口总数 (单位: 人)				
	2010	2011	2012	2013	权值
A 国	157632611	157980502	159329636	159851241	158698497.5
I 国	471277041	475090729	477952680	487882088	478050634.5
P 国	58604183	60158367	61816228	63649201	61056994.75
国家	武装部队总人数 (单位: 人)				
	2010	2011	2012	2013	权值
A 国	1569417	1520100	1492200	1433150	1503716.75
I 国	2625586	2647150	2728700	2749700	2687784
P 国	946000	946000	947800	947800	946900

表 5.3 干预实验对象国家实力指数计算结果

国家	统计分类					计算结果	
	GDP	劳动力	部队	武器出口	GII	国家实力	LN
A 国	1.40E+13	158.7E+06	1503717	8.421E+9	81127.71	2.283E+42	19.5(综)
I 国	1.36E+12	478.1E+06	2687784	6.33E+6	7268.54	8.064E+37	8.8
P 国	1.36E+11	61.06E+06	946900	100	48.29	3.798E+28	6.5

5.2 重要国家对权重网络模型演化的影响

适应度模型考察了具有较高适应度的年轻节点在网络演化过程中所表现出的后发优势。这一现象同样也经常出现在国际关系的研究中,在许多国际组织内部,

节点（国家）的重要程度及其增长速度并非只与加入网络（组织）的时间有关，一些综合实力较强的“年轻”节点（国家）往往可以凭借自身的属性优势，在相对较短的时间内就可以赢得大量的合作。受上述模型的启发，这一步的干预实验我们主要以某大国申请加入上海合作组织遭到拒绝为背景，通过引入综合实力较强的 A 国，对权重网络模型的演化过程进行干预，考察其对网络结构以及核心节点指标分布可能产生的影响。

干预实验与构建权重网络模型的初始条件一致，其中初始节点数量 $m_0 = 6$ ，全连接网络的每条边初始权重 $w_0 = 1$ ，第一步按优先概率被选中增加连边的节点 i 强度增加值 $Y=1$ 。

1. 初始化环境：依照权重网络模型的生成规则，构建干预实验的初始环境，大量的仿真实验结果表明，所提权重网络模型的强度比重和“影响力”指数在第 400 个时间步即可达到稳态，为确保的初始条件符合要求，我们选择在第 2000 个时间步开始进行干预实验。

2. 干预实验：将 A 国引入权重网络模型。根据规则设定，每个时间步 t 网络中节点的国家实力会同步递增 5%，为简化计算过程，A 国的国家实力借助其与中国国家实力初值的比例通过计算得出。A 国的初始强度为当前时间步 t 网络中节点最高强度数值的 0.6 倍，即 $Y_A = 0.6 * Y_{\max}$ 。A 国进入网络后与所有节点按照相同的边权重连接，计算公式为： $\omega_t = Y_A / N = (0.6 * Y_{\max}) / N$ 。将 A 国引入网络之后，实验按照权重网络模型的规则继续演化至第 4000 步结束。实验结果分别记录中国、俄罗斯、A 国的“影响力”指数的变化趋势。

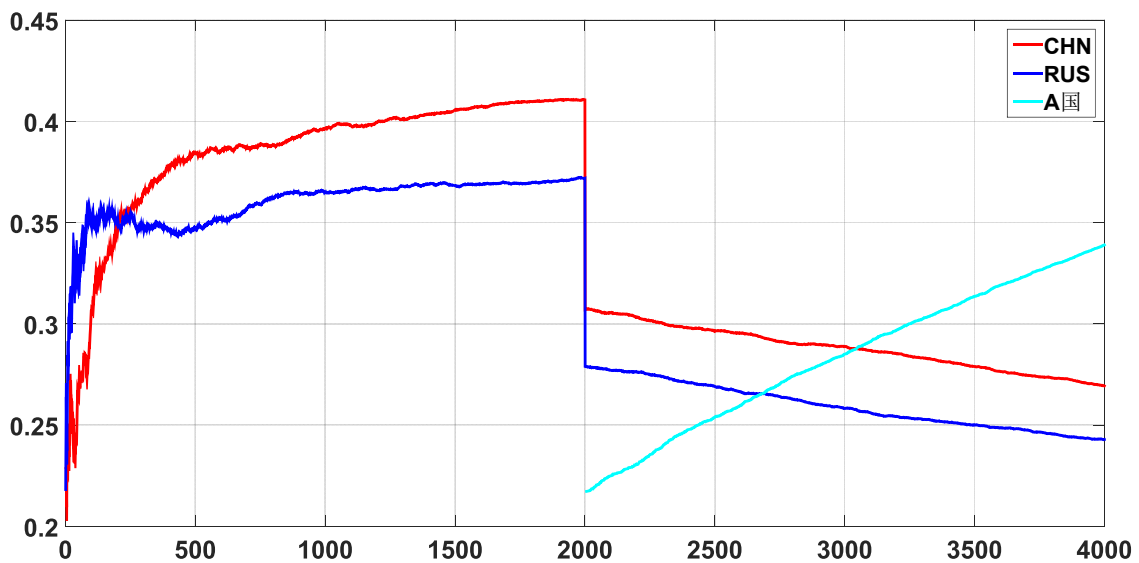


图 5.1 中国、俄罗斯和 A 国的“影响力”指数变化趋势

3. 实验结果分析：如图 5.1 所示，随着 A 国作为扰动因素于第 2000 个时间步进入网络演化模型，中国和俄罗斯的“影响力”指数随即出现了明显下降。由于赋予 A 国的初始强度数值并不高，我们可以认为 A 国刚进入权重网络模型时的“影响力”指数并不高，从图中也可以看出这一趋势。但是通过综合计算，A 国的点权重（国家实力）为当前网络中点权重（国家实力）的最高值——中国的 2 倍左右，其适应度的后发优势十分明显。随着实验步骤的继续，明显可以观察到 A 国从第 2000 个时间步进入网络演化模型开始，其在整个网络中的“影响力”指数就一直保持了快速地上升趋势。而与此相反，中国和俄罗斯等传统核心节点的“影响力”指数开始出现持续地下降。当仿真实验进入第 3000 个时间步左右，A 国的“影响力”指数一举超越中国并继续上升，最终成为网络演化模型中“影响力”指数最高的节点。因为设计的“影响力”指数定义中包含了节点的点权和强度两个部分，按照网络科学中的定义和相关结论，拥有较高强度的节点对于整个网络会表现出更强的控制力。值得注意的是，A 国和原有演化模型中的节点都没有引入偏好选择这一机制，因此仿真实验的结果显示，对于原网络的中国和俄罗斯两国之间的互动关系和数值比例，A 国的加入没有产生直接的影响。

5.3 偏好选择对权重网络模型演化的影响

局域世界演化模型主要研究节点从指定区域按照优先概率选择连接对象，而不是从整个网络中进行择优的情况。许多学者在研究世界贸易网络时也发现，全局层面的优先连接机制并不适用于那些只与少数（小于 20 个）国家有贸易往来的研究对象。实际上，多数国家更倾向于加强区域经济组织内部的贸易合作。也就是说，优先连接机制有时仅存在于区域经济体内部^[116]。根据上述研究结论，综合第三章上海合作组织结构对等性分析过程中俄罗斯与中亚四国表现出更为亲密的内部关系和选择策略，本节主要考虑引入一组具有相似偏好，但完全排斥与中国开展合作的节点（国家）依次进入权重网络模型产生的影响。

干预实验与构建权重网络模型的初始条件一致，其中初始节点数量 $m_0 = 6$ ，全连接网络的每条边初始权重 $w_0 = 1$ ，第一步按优先概率被选中增加连边的节点 i 强度增加值 $Y = 1$ 。

1. 初始环境：依照权重网络模型的生成规则，构建干预实验的初始环境，根据大量的实验结果分析，该权重网络模型在第 400 个时间步即可达到稳态，为确保初始条件符合要求，我们选择在第 2000 个时间步开始进行干预实验。

2. 干预实验：从第 2000 个时间步开始，每 500 个时间步引入一个完全排斥与中国进行合作的节点（国家），设定节点的初始权重仅为中国国家实力的十分之

一，即 $a_0 = 0.1 * a_{CN}$ 。实验过程中，引入的节点（国家）只与除中国以外的 L 个节点（国家）连接，其初始强度为当前网络中节点的平均强度 $Y_0 = \text{mean}(Y_i)$ ，这些节点与网络中现有节点连边的权重值都相等， $\omega_i = Y_0 / N = \text{mean}(Y_i) / N$ 。因为干预实验开始时网络中节点的强度分布已经极化，可知其强度均值不会太高，而根据实验条件设定，其点权重（国家实力）同样处于非常低的水平，因此我们可以判断引入的节点（国家）的“影响力”指数应该都比较低。实验过程中，除去引入节点（国家）的时间步，其余步骤均按照原权重网络模型的规则继续演化至第 4000 步结束。实验分别按 L 的取值为 2 到 5 进行记录，主要观察网络中原重要性最高，而在干预过程中受到排斥的中国的“影响力”指数的变化趋势。

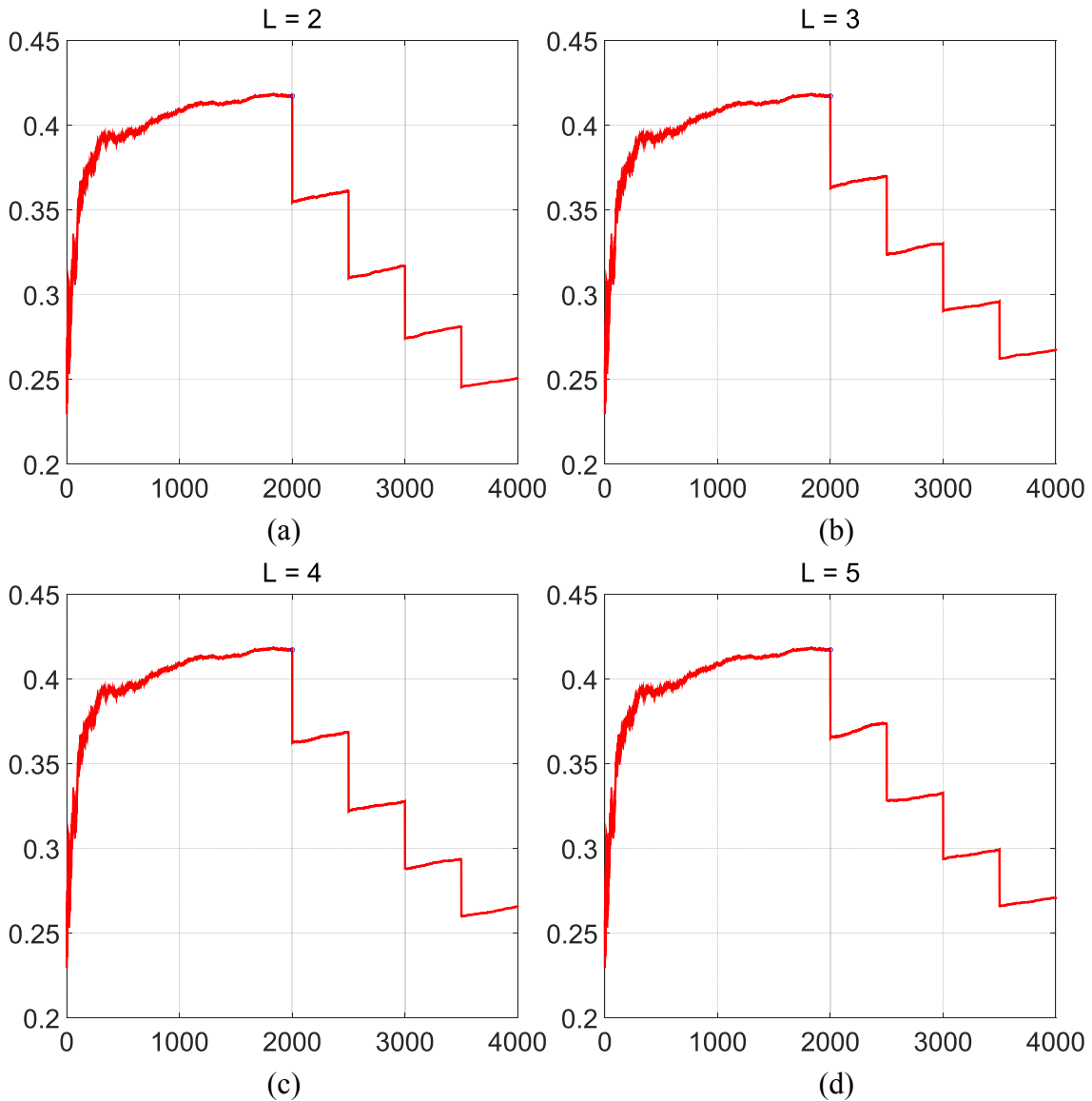


图 5.2 偏好选择国家加入后中国“影响力”指数变化趋势

3. 实验结果分析：需要说明的是，如果引入的新节点只与网络中某一个节点连接，这种实验结果的实际意义不大，因此可以直接忽略。如图 5.2 所示，我们分别选取了引入节点的偏好范围 L 为 2 到 5 共四种情况进行对比分析。理论和数值结果都表明，尽管引入节点（国家）的国家实力和初始强度都十分有限，但是当其与网络中节点（国家）进行连接的过程中出现固定的选择偏好时，对于受到排斥的节点（国家）而言，尽管开始干预时仍对网络拥有极强的控制能力，但是新节点（国家）相继加入后产生的影响仍然无法忽略。根据结果显示，干预实验结束时，观察对象的“影响力”指数数值至少降低了 40%。与此同时，通过对比我们发现，干预实验的效果与引入节点的偏好范围 L 关系不大，在这四种情况下得出的实验结果差异并不是十分明显。

5.4 紧张关系对权重网络模型演化的影响

国家与国家之间常常会因为领土、资源等问题出现争端，甚至还有可能引起国家全面关系不断恶化。由于前苏联时期对塔吉克和乌兹别克两个民族的强行拆分，造成之后成立的两个国家关于边界、水资源、能源等方面一直存在较大分歧。即使在两极格局瓦解之后，塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦两国之间依然纷争不断，这不仅影响中亚地区的政治、经济和安全形势，还牵涉到上海合作组织成员国的内部关系。由于塔、乌两国的实力有限，对整体合作造成的影响并不明显。而即将加入的上海合作组织的印度和巴基斯坦，两国之间关于克什米尔的主权争议等历史遗留问题同样值得关注，而作为两个拥有核武器的国家，其影响力肯定不可小觑。本节主要讨论当网络（组织）中实力相当的国家之间出现严重分歧，或者引入实力接近但相互之间拒绝合作的国家，导致网络原有全连接被打破的情况下，是否会对组织的整体合作发展水平产生较大的干扰？

干预实验与构建权重网络模型的初始条件一致，其中初始节点数量 $m_0 = 6$ ，全连接网络的每条边初始权重 $w_0 = 1$ ，第一步按优先概率被选中增加连边的节点 i 强度增加值 $Y = 1$ 。

1. 初始化环境：依照权重网络模型的生成规则，构建干预实验的初始环境，根据大量的仿真实验结果分析，该权重网络模型在第 400 个时间步即可达到稳态，为确保初始条件符合要求，我们选择在第 2000 个时间步开始进行干预实验。

2. 干预实验：第 2000 个时间步，同时引入互相排斥的 I 国和 P 国。经过计算，两国初始点权重分别为中国国家实力初值的 0.9 倍和 0.6 倍。I 国和 P 国的初始强度分别为该时间步网络节点强度的最高值 $Y_I = Y_P = \max(Y_t)$ ，并与原网络中的每个节点连接，连边的初始权重均相等， $\alpha_i = Y_I / N = Y_P / N = \max(Y_t) / N$ 。在整个实验的过

程中，I 国和 P 国只选择与除对方之外的节点连接。后续的实验按照权重网络模型的规则演化至第 4000 步结束。实验结果记录上述两个节点引入之后，网络中节点平均强度的增速变化情况。

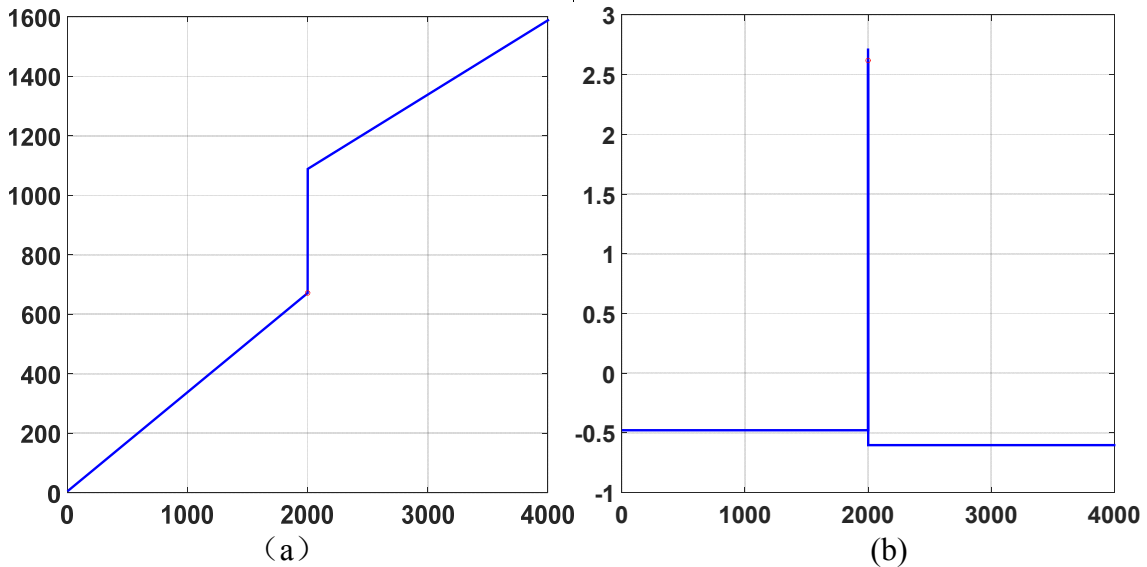


图 5.3 关系紧张国家加入后网络平均强度增速变化情况

3. 实验结果分析：如图 5.3 所示，I 国和 P 国进入权重网络演化模型后，由于实验条件设定时赋予两国的点权重（国家实力）和强度值都非常高，因此在引入两国的时刻，网络的平均强度出现了明显的跳跃，之后平均强度的增速确实出现了下降。为了便于观察干预前后的增速变化，我们将左图的折线进行求导，从处理后的右图可以看出平均强度增速的下降幅度十分有限。由于网络强度的平均增速在一定程度上可以描述网络合作增长的实际效率，由此可见实验条件设定中关系比较紧张的 I 国和 P 国进入权重网络模型后，尽管其自身的国家实力与合作强度都比较高，但是两国在互动行为中所表现出的选择偏好，对整个网络合作增长的负面影响其实并不是十分明显。

第六章 基于演化干预实验结果的策略建议

上海合作组织自成立以来，一贯秉持相互信任与睦邻友好的合作传统，鼓励成员国在各领域开展全方位多层次合作，致力于共同维护本地区安全稳定，努力建立公正合理的国际政治经济新秩序。通过上一章的干预实验结果我们清楚地看到，构建的权重网络演化模型自身达到稳态后的数值波动比较小，因此可以认定干预条件的引入就是导致观测结果出现变化的主要原因。权重网络模型的演化有时并不一定完全符合我们的预期，然而经过多次实验对比和统计分析，相对稳定的模拟结果背后，也极可能存在某些关联和原因，针对干预实验结果的研究结论，对于现实中的上海合作组织发展同样具有一定的指导意义。

6.1 强化对“域外大国”干预的妥善应对

上海合作组织是目前唯一在中国境内成立，并以中国的城市命名的地区性国际组织。在周边局势动荡不安的背景下，上海合作组织在处理本地区各种危机中坚持的平等协商、开放透明等原则，使得其影响力和号召力逐步提高。中国和俄罗斯作为上海合作组织的创始国和主要成员，对于组织的发展历来高度重视，为维护核心利益对于吸收新成员一直比较谨慎。美国史学家 Robert K. Merton 受到经济学关于发展累积优势现象的启发，提出了“马太效应”的概念，用以描述现实生活中存在的两极分化，特别是在财富分配、发展机会等问题上出现的“富者更富”“赢家通吃”等社会现象^[17]。无论是演化模型中的依附偏好，还是社会关系中的从众心理，都是马太效应存在的直接例证。美国作为当今世界唯一的超级大国，其战略利益遍布全球，综合国力和国际影响力不容小觑，而全方位加强本土防卫一直被其列为“国家战略的核心”。美国与上海合作组织的接触大多还是通过打击盘踞在阿富汗等中亚国家的恐怖组织联系起来的。冷战时期，中亚地区一直是前苏联的战略腹地，苏联解体以及“9·11”事件给美国提供了难得的契机。而上海合作组织 2005 年元首峰会发出公告，限期要求美军撤离乌兹别克斯坦的汗阿巴德空军基地，以及拒绝美国成为上海合作组织观察员，致使其在中亚地区的渗透严重受挫。从重要国家干预实验的结果可以看出，权重（国家实力）过大的节点（国家）进入网络（组织）后，很可能对原核心节点（国家）的重要性产生较大冲击，即使新节点（国家）初始合作强度水平受到严格限制，但是由于其自身的属性优势明显，在短时间内就可能迅速获取大量合作机会，而原核心节点（国家）的影响力很可能会因此而出现不可逆转的持续下滑。上海合作组织作为本地区和平稳定的重要支撑和平台，对于扩员对象的甄别应当秉持一贯的慎重态度，主要国家没有必要仅仅为了提升组织的国际影响力而盲目引入合作理念差异较大的域外强国。

6.2 强化对“上海精神”传承的笃定坚守

上海合作组织成立之初就一直坚持对内“互信、互利、平等、协商、尊重多样文明、谋求共同发展”，对外奉行“不结盟、不针对其它国家和地区”及对外开放的原则，为该组织成员国双边和多边关系的构建提供了必不可少的制度支撑。然而，共同利益是国际合作持久深入的前提和基础，国家间不可避免的会受到历史和文化因素的影响。多数国家更倾向与地理环境上相邻，文化历史上相近的国家建立和加强合作。比如上海合作组织中的俄罗斯和中亚四国，因同属前苏联加盟共和国和独联体成员国，在许多国际问题上均持有相近的立场。上世纪 20 年代，由哈佛大学心理学教授、人际关系学说的创始人 George E. Mayo 院士主持的美国科学委员会在西方电气公司下属霍桑工厂的一项实验表明，正式的组织中往往会自发形成“非正式群体”，而且会通过内部特殊的行为规范对成员的行为起到调节和控制作用^[118]。尽管霍桑实验的主要研究对象是职工，但其作为现代行为科学的重要成果对本研究仍然有很强的借鉴意义。偏好选择干预实验的结果表明，为进一步促进上海合作组织的均衡发展，各成员国应当继续遵循《上海合作组织宪章》《上海合作组织成员国长期睦邻友好合作条约》《上海合作组织至 2025 年发展战略》等基础性法规条款，忠于本组织的非联盟性质，秉承求同存异、互惠互利的原则，进一步凝聚合作共识、增进政治互信、密切磋商交流，在一些涉及多方利益，受到广泛关注的敏感事务中，尽量通过充分交流和共同规划统一立场，促成各目标方行为的相互调适，以此不断巩固自身的团结基础，最终实现正和博弈和良性互动，推动框架内多方合作不断向更高层次发展。与此同时，在合作过程中各成员国一定要着力避免在组织中出现针对某类或某个成员的选择偏好。

6.3 强化与“一带一路”对接的开放发展

近年来，由于受“三股势力”“伊斯兰国”和阿富汗国内武装冲突等影响，上海合作组织的核心议事日程始终聚焦于应对中亚地区的反恐形势和保障欧亚大陆的战略稳定等安全合作领域。当前，随着世界金融危机影响持续发酵，各国政府都面临着改善国计民生的巨大压力，上海合作组织成员国也普遍出现了经济增速放缓、贸易规模缩减以及国内货币贬值等现象。如何巩固深化已有成果、持续提升合作质效以及扩大成员国等问题已经非常现实地摆在了上海合作组织成员国的面前。作为一种崭新的区域合作模式，在这方面确实也缺乏先例和成规可循。而在上海合作组织研究中，长期以来存在着一类观点，认为应当集中主要精力继续在完善机制建设、理顺内部关系和细化发展目标等具体任务上下功夫，即使是吸收新成员也应当优先考虑问题较少的对象，而不是印度、巴基斯坦和伊朗这类可能带来

新问题的国家，防止将军事、政治等领域的争端和冲突带入到组织框架中来，特别是要着力避免是“中段陷阱”等战略性决策困境的出现。致力于实现“政策沟通、设施联通、贸易畅通、资金融通、民心相通”的“一带一路”倡议^[119]，作为当代中国的全球地缘定位和国际政治路线图，无疑为世界经济提供了一项充满东方智慧的功能性发展方案。“一带一路”倡议涵盖了开放、包容、共赢的合作理念，通过发起成立丝路基金和亚洲基础设施投资银行以及一系列有利于固牢基础的制度支撑，必将对各成员国拓宽合作渠道、对接转型升级产生积极的促进作用。有选择地吸纳新成员尽管短期内可能会对组织的内部平衡和决策效率造成一定的冲击，但从长远来看，对于突破上海合作组织已有的地域限制因素，改善其政治地理特征，进一步提升组织的区域影响力作用是显而易见的，因此扩大成员国规模无疑也将成为十分必要和较为现实的选择之一。按照国际惯例，通常印度、巴基斯坦选择加入上海合作组织就意味着认同“上海精神”，自愿遵守《上海合作组织成员国长期睦邻友好合作条约》，因此也必将有利于两国双边关系的改善。甚至有一种观点认为，“吸收伊朗加入上海合作组织将有助于其核问题的有效解决，因为与俄罗斯和中国的合作可以使德黑兰变得更加冷静清醒一些”^[120]。紧张关系干预实验的结果显示，即使是合作强度接近最高“影响力”指数的节点（国家）之间出现类似敌对的情况，只要不出现直接的冲突和对抗行为，对组织整体合作发展的影响都是可控的，因此对其可能产生的冲击过分担忧是没有必要的。

第七章 总结与展望

7.1 本文主要工作

上海合作组织自成立以来，其发展一直备受各界的瞩目。尤其是习近平主席提出“一带一路”倡议以来，通过实施有效对接，该组织的国际关注度和影响力又有了新跃升。网络科学作为一种全新的研究范式，正在渗透到数理学科等众多不同的领域，特别是近年来关于国际关系的研究成果也开始逐渐增多并引起广泛的关注。本文通过对纵向数据的梳理分析，提出了一种基于影响力感知的上海合作组织权重网络演化模型，并以此为平台和基础，通过干预实验给出了相应的对策建议，主要完成了以下工作：

1. 针对地区性国际组织数据获取难，网络构建难等实际，通过收集上海合作组织成立以来的各类相关开源数据，分别建立有向加权网络、二模隶属网络、多元合作网络。基于各中心性指标分布的纵向分析和结构对等性分析，发现上海合作组织网络显著的生长特性、中心性指标的极化趋势、强度分布呈现无标度特性，和局部网络节点聚类等现象，为构建权重演化模型提供了研究思路和数据支撑。

2. 提出了一种基于国家影响力感知的权重网络演化模型，针对演化结果对于初始条件的敏感性，通过定义和计算国家实力、影响力等指标并将其作为有限支撑引入适应度模型，为模型演化和干预实验奠定了坚实的基础。通过引入基于对象的可变局域世界演化模型，近似地拟合出组织中不同类型国家的合作策略差异。综合考虑了节点属性和网络拓扑结构对于模型演化的影响，通过定义强度比重和国家“影响力”等分析指标，使得数据结果的实际意义更为明确。

3. 基于构建的权重网络演化模型，通过抽象在网络结构纵向分析过程中发现的指标变化趋势，提出了重要国家、偏好选择以及紧张关系三类干预实验。由于提出的权重演化网络模型本身的仿真结果比较稳定，通过大量重复实验和对比分析，可以实现对干预对象进入网络模型后，引起系统结构和相关指标出现变化的扰动因素进行有效地分离和确定。在此基础上将实验结果还原到真实网络的应用背景中，对上海合作组织的成员国关系和整体发展策略做出进一步深入分析，并以此为依据提出了具有针对性的对策建议。

7.2 未来工作展望

上海合作组织的相关理论成果主要集中于对历史资料等梳理统计后的定性分析。定量分析的相关成果，特别是演化建模研究尚处于起步阶段，本论文所涉及到的理论和方法也只是针对现实因素对网络的演化机理进行了简单的概括和探

索，距离真实完整地揭示上海合作组织的结构特征还有很多值得改进的地方，总结起来包括如下几点：

1. 演化模型结构数据的有效获取。由于国际关系研究对象的数据属性千差万别，因此使用现有的数据挖掘工具收集效果并不理想，尤其常用工具大多使用英文开发，对于中文资料的处理普遍存在一定的缺陷，手动调整的工作量非常大，这也使得基础数据获取和有效处理将成为制约研究向前推进的主要瓶颈。然而国际合作的形式和内容都非常丰富，仅仅依靠经贸和安全领域数据为基础得出的研究结论显然不够全面。近期出现的文本网络分析和数据清洗技术^[121]，可以大量减少网络构建过程中的时间和人力成本开销，使得从海量数据中精确抽取网络文本信息成为可能。下步的研究过程中如何通过计算机软件辅助，将上海合作组织框架内各国的互动行为进行合理量化，以及数据获取后的标准化、格式化等问题的进一步探索都具有十分重要的理论和应用价值。

2. 上海合作组织成员国的类型和特点都存在一定的差异性，本研究虽然通过定义国家实力、影响力等指标进行了比较概略的描述，但是在理论研究上还有很大的局限性，例如在真实世界中即使是同一个国家在不同历史阶段对于类似问题的立场也有可能发生变化。同时，在模型设计中只是单向地考虑了节点数量和权值增长的过程，没有考虑节点的吸引力会随时间下降，甚至是节点在某些特殊情况下被移除等客观存在的现象。而复杂网络上的演化博弈也为继续深入研究上述问题提供了一个比较可行的切入点，尤其是对于个体间合作行为及其内在机制的研究工作对于我们有很强的借鉴意义^[122]。为了简化理论解析及公式推导，论文中对于演化规则和初始条件等方面的假设还比较简单，然而很多研究成果表明，博弈各方往往会不断地更新策略，网络演化博弈的动力学研究将帮助我们更为客观地理解国际组织中涌现的合作行为。

3. 传统的网络模型构建对于节点数据的选取主要是通过人工方式，节点之间的关联关系及其方向和强弱更多地也是基于主观判断，这种方法的局限还比较明显。经过梳理和解析后我们可以看到，构建的权重网络演化模型对初始的节点权重是敏感的，尽管多次重复实验的结果比较稳定，但由于网络节点数量较少且演化步数有限，我们还应更多地考虑研究对象的特征规律，这对于提高研究结论的针对性具有十分重要的意义。对于国家实力的构成分析和结果计算可以说是网络演化过程能否有效模拟研究对象相关属性最为重要的初始设置，本文在这方面的处理更多地是直接借鉴国内外比较成熟的原则和方法，下步还应根据研究对象的属性差别，有针对性的进行数据和方法选择，尽量使得研究结论更有说服力。

致 谢

还有不到一个月的时间，硕士研究生的学习生活即将告一段落，回首两年半的时光无限感慨，心中的千言万语汇聚成无尽的感谢！

首先要衷心感谢的是我的导师孙多勇教授。我感到能够师从孙老师门下是我一辈子最大的财富，在这短暂的硕士生涯中，孙老师没有因为我是一名在职干部学员而放松对我的要求，始终提醒我作为全军第一名全日制培养的公共管理硕士必须牢记自己的使命担当。孙老师不仅学识渊博、能力出众，而且为人正派、光明磊落，同时在各方面对自己的要求都十分严格，因此一直是我学习和追赶的榜样。尤其孙老师是对待学术研究的态度非常端正，从入师门就不断教导和严格要求我们珍惜学术声誉。不论是课程学习还是课题研究，都要重视基础、心无旁骛，才能做到厚积薄发。在学位论文撰写的过程中，孙老师也是尽心尽意指导，严格标准要求，为我能够全面的梳理自己两年半以来的研究成果，按时顺利高质量地完成学位论文撰写提供了必要的前提和基础。

感谢管理系公共管理教研室的王瑞教授、李江副教授、迟研副教授、刘燕副教授和朱仁崎讲师、杨清清讲师等各位恩师，你们在校期间对我课程学习的悉心指导和在生活中给予我的无微不至的关怀，这些都必将使我受益终生，始终铭记在心。感谢 302 实验室的诸位师兄、师姐、师弟和师妹。感谢李博博士对我论文思路的启发，并全程协助对论文主线的梳理和难点问题的攻关，感谢林子涵博士、李泽博士在我需要的时候不遗余力的提供帮助，感谢唐旻博士给我的论文撰写和修改等提供了诸多方面的参考意见，感谢李占峰和聂三军提供的参考文献和技术支持，感谢屈晓宇、蔡琨对我的热心鼓励，感谢两年多以来同寝室的好友王志飞、贺云岳，没有他们本篇论文难以成章。

感谢两年多年来一直以来关心我的各位学院和系所领导；感谢学员队的毛万文队长、段晓峰政委、徐俊青队长、殷辉副队长和彭娟副队长。

感激父母亲多年来对我的养育和教导之恩，感谢所有关心和帮助过我的人一路走来无条件的支持。

谢谢！

参考文献

- [1] 王金存. 具有历史意义的跨越——从“上海五国”到“上海合作组织”[J]. 世界经济与政治, 2001(9):76-81.
- [2] 程国平. 携手合作 共同发展——记上海合作组织 10 年发展[J]. 求是, 2011(12):51-53.
- [3] 杨恕, 王琰. 论上海合作组织的地缘政治特征[J]. 兰州大学学报: 社会科学版, 2013(2): 49-55.
- [4] 潘光. 稳步前进的上海合作组织[M]. 时事出版社, 2014.
- [5] 孙壮志. 杜尚别峰会勾画上合发展蓝图[J]. 瞭望, 2014(37):8-8.
- [6] 林永亮. 从乌法峰会看上海合作组织发展前景[J]. 当代世界, 2015(8):46-48.
- [7] 王晓伟. 上合组织扩员的利与弊[J]. 国防教育, 2015(8): 65-66.
- [8] 刘卫东.“一带一路”战略的科学内涵与科学问题[J]. 地理科学进展, 2015, 34(5):538-544.
- [9] 王海运, 赵常庆, 李建民.“丝绸之路经济带”构想的背景、潜在挑战和未来走势[J]. 欧亚经济, 2014(4):5-58.
- [10] A·阿姆列巴耶夫. 上海合作组织与丝绸之路经济带建设前景[J]. 俄罗斯研究, 2015(6):3-30.
- [11] Simon H. A. A Behavioral Model of Rational Choice[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1955: 99-118.
- [12] Kahneman D., Tversky A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1979: 263-291.
- [13] 孙多勇. 突发事件与行为决策[M]. 社会科学文献出版社, 2007.
- [14] Mackay C. Extraordinary Popular Delusions and the Madness of Crowds[M]. Start Publishing LLC, 2012.
- [15] 郑毅. 证析: 大数据与基于证据的决策[M]. 华夏出版社, 2012.
- [16] 唐启明. 量化数据分析[M]. 社会科学文献出版社, 2012.
- [17] 兰德公司. 无需预测即可做出正确决策——高度不确定性下的鲁棒决策规划[EB/OL]. <http://www.rand.org/zh-hans/publications.html>, 2015-10-30.
- [18] Keohane R. O., Nye J. S. Power and Interdependence: World Politics in Transition[M]. Boston: Little, Brown, 1977.
- [19] 汪小帆, 李翔. 复杂网络理论及其应用[M]. 清华大学出版社, 2006.
- [20] 陈冲, 刘丰. 国际关系的社会网络分析[J]. 国际政治科学, 2009(4): 96-115.
- [21] 刘慧. 国际关系的网络分析研究简评[J]. 国际观察, 2010(6):17-23.
- [22] Mitchell M. Complexity: A Guided Tour[M]. Oxford University Press, 2009.

-
- [23] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚. 一门崭新的交叉科学: 网络科学(上)[J]. 物理学进展, 2007, 27(3):361-448.
- [24] Strogatz S. H. Strogatz, S. H. Exploring Complex Networks[J]. Nature, 2001, 410(6825):268-76.
- [25] Erdős P., Rényi A. On The Evolution of Random Graphs[J]. Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy Ofences, 1960, 38(1):17--61.
- [26] Barabási A. L., Frangos J. Linked: The New Science of Networks Science of Networks[M]. Basic Books, 2014.
- [27] Watts D.J., Strogatz S. H. Collective Dynamics of “Small-world” Networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [28] Barabási A. L., Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [29] University of Notre Dame, News and Information[EB/OL]. <http://www.news-info.nd.edu>, 2015-10-30.
- [30] Waldrop M. M. Complexity: The Emerging Science at The Edge of Order and Chaos[M]. Simon and Schuster, 1993.
- [31] 周涛, 柏文洁, 汪秉宏. 复杂网络研究概述[J]. 物理, 2005, 34(01).
- [32] Yook S. H., Jeong H., Barabási A. L. Weighted Evolving Networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(25): 5835.
- [33] Barrat A., Barthelemy M., Vespignani A. Weighted Evolving Networks: Coupling Topology and Weight Dynamics[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(22): 228701.
- [34] Barrat A., Barthelemy M., Vespignani A. Dynamical Processes on Complex Networks[M]. Cambridge University Press, 2008.
- [35] 汪秉宏, 王文旭, 周涛. 交通流驱动的含权网络[J].物理, 2006(04):304-310.
- [36] Holme P., Kim B. J., Yoon C. N. Attack Vulnerability of Complex Networks[J]. Physical Review E, 2002, 65(5): 056109.
- [37] Antal T., Krapivsky P. L. Weight-driven Growing Networks[J]. Physical Review E, 2005, 71(2): 026103.
- [38] Zheng D., Trimper S., Zheng B. Weighted Scale-free Networks with Stochastic Weight Assignments[J]. Physical Review E, 2003, 67(4): 040102.
- [39] Dorogovtsev S. N., Mendes J. F. F. Evolution of Networks[J]. Advances in Physics, 2002, 51(4): 1079-1187.
- [40] 谷歌搜索[EB/OL]. <https://www.google.com.hk/>, 2015-11-11.
- [41] Bailes A. J. K., Dunay P., Guang P. The Shanghai Cooperation Organization [M]. Stockholm: Stockholm International Peace Research Institute, 2007.
- [42] 赵华胜. 上海合作组织:评估与发展问题[J]. 现代国际关系, 2005(5):54-59.
- [43] 冯玉军. 上海合作组织的战略定位与发展方向[J]. 现代国际关系,
-

2006(11):12-17.

- [44] 贾俐贞. 构建上海合作组织自由贸易区的战略思考[J]. 俄罗斯中亚东欧研究, 2007(1):75-80.
- [45] 孙永祥. 上海合作组织框架内的能源合作[J]. 国际展望, 2011(5):105-124.
- [46] 胡鞍钢, 马伟, 鄢一龙. “丝绸之路经济带”:战略内涵、定位和实现路径[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2014(1):1-10.
- [47] 王晓光. 深化上海合作组织安全合作对策思考[J]. 国防, 2012(7):21-24.
- [48] 德拉干那·米特洛维克. 上海合作组织:亚洲安全与经济合作的新架构[J]. 国际论坛, 2009(1):7-11.
- [49] 王涛. 上海合作组织安全合作的回顾与展望[J]. 军事历史, 2014(1):38-44.
- [50] 潘光, 王震. 国际发恐怖合作:新态势、新发展和绩效评估[J]. 社会科学, 2010(11):35-43.
- [51] 李葆珍. 上海合作组织的文化合作探析[J]. 河南社会科学, 2011(3):175-178.
- [52] 张全生, 郭卫东. 中国与中亚的人文交流合作——以孔子学院为例[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2014(4):64-71.
- [53] 蔡文伯, 候立杰. 上海合作组织大学项目的发展历程与未来展望[J]. 兵团教育学院学报 2015(2):31-36.
- [54] 曾向红, 李廷康. 上海合作组织扩员的学理与政治分析[J]. 当代亚太, 2014(3):120-155.
- [55] 李硕. 上海合作组织扩员问题中的俄罗斯因素浅析[D]. 外交学院, 2012.
- [56] 陈小鼎, 王亚琪. 东盟扩员对上海合作组织的启示与借鉴——兼论上海合作组织扩员的前景[J]. 当代亚太, 2013(2):100-127.
- [57] Kuhn T. S. The Structure of Scientific Revolutions[M]. University of Chicago Press, 2012.
- [58] 杨建梅. 复杂网络与社会网络研究范式的比较[J]. 系统工程理论与实践, 2010(11): 2046-2055.
- [59] 汪云林, 李丁, 付允. 主要经济体间国际贸易的社会网络分析[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2007, 9(3): 9-12.
- [60] Memon N., Larsen H. L. Practical Algorithms for Destabilizing Terrorist Networks[C]//International Conference on Intelligence and Security Informatics. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 389-400.
- [61] Serrano M. A., Boguna M. Topology of the World Trade Web[J]. Physica A, 2003(68): 015101-015104.
- [62] 段文奇, 刘宝全, 季建华. 国际贸易网络拓扑结构的演化[J]. 系统工程理论与实践, 2008, (10): 77-81.

-
- [63] Anne-Marie Slaughter, 任晓等译. 世界新秩序[M]. 复旦大学出版社, 2010.
- [64] Arribas I., Perez F., Tortosa-Ausina E. Measuring Globalization of International Trade: Theory and Evidence[J]. *World Development*, 2009, 37(1): 127-145.
- [65] Hafner-Burton E. M., Kahler M., Montgomery A. H. Network Analysis for International Relations[J]. *International Organization*, 2009, 63(3):559-592.
- [66] 姚永玲, 李恬. 二十国集团贸易网络关系及其结构变化[J]. *国际经贸探索*, 2014, 30(11):42-50.
- [67] Enders W., Su X. Rational Terrorists and Optimal Network Structure [J]. *Journal of Conflict Resolution*, 2007, 51(1): 33-57.
- [68] 杨辰博. 国际核不扩散机制的社会网络分析[J]. *世界经济与政治*, 2015(6):81-101.
- [69] 刘军. 社会网络分析导论[M]. 社会科学文献出版社, 2004.
- [70] 刘丰, 董柞壮. 联盟网络与军事冲突:基于社会网络分析的考察[J]. *世界经济与政治*, 2015(6):65-80.
- [71] Maoz Z. Networks of Nations: The Evolution, Structure, and Impact of International Networks, 1816–2001[M]. Cambridge University Press, 2010.
- [72] Valdis Krebs. Mapping Networks of Terrorist Cells[J]. *Connections*, 24(3): 43-52, 2001.
- [73] Moon I. C., Carley K. M. Modeling and Simulating Terrorist Networks in Social and Geospatial Dimensions[J]. *Intelligent Systems IEEE*, 2007, 22(5): 40-49.
- [74] 付举磊, 孙多勇, 汪寿阳. 基于社会网络的恐怖活动时空特征分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(9):2324-2332.
- [75] Miles Kahler. Networked Politics: Agency, Power, and Governance[M]. Cornell University Press, 2015.
- [76] Fagiolo G., Reyes J., Schiavo S. The Evolution of the World Trade Web: A Weighted-network Analysis[J]. *Journal of Evolutionary Economics*, 2010, 20(4): 479-514.
- [77] 孙晓蕾, 杨玉英, 吴登生. 全球原油贸易网络拓扑结构与演化特征识别[J]. *世界经济研究*, 2012(9):11-17.
- [78] Krackhardt D., Carley K. M. PCANS Model of Structure in Organizations[M]. Carnegie Mellon University, Institute for Complex Engineered Systems, 1998.
- [79] Carley K. M., Dombroski M., Tsvetov M. Destabilizing Dynamic Covert Networks[C]. 8th International Command and Control Research and Technology Symposium. 2003.
- [80] Breiger L., Carley K. M. Dynamic Social Network Modeling and Analysis: Workshop Summary and Papers[M] National Academies Press, 2003: 423-426.
-

-
- [81] McCulloh I., Carley K. M. Detecting Change in Longitudinal Social Networks [R]. Military Academy West Point NY Network Science Center (NSC), 2011.
- [82] Carrington P., Scott J., Wasserman S. Models and Methods in Social Network Analysis[M]. Cambridge University Press, 2005.
- [83] Chen H., Reid E., Sinai J. Terrorism Informatics: Knowledge Management and Data Mining for Homeland Security[M]. Springer Science & Business Media, 2008.
- [84] Cui X., Thomas E. Potok. A Particle Swarm Social Model for Multi-agent Based Insurgency Warfare Simulation [C]5th ACIS International Conference on Software Engineering Research, Management & Applications. IEEE Xplore, 2007:177-183.
- [85] 王飞跃, 邱晓刚, 曾大军. 基于平行系统的非常规突发事件计算实验平台研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 07(4):1-10.
- [86] 方锦清. 简评美国《Science》杂志关于“复杂系统与网络”专辑[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2010, (00):53-62.
- [87] Wasserman S., Faust K. Social Network Analysis: Methods and Applications [M]. Cambridge University Press, 1994.
- [88] Chunguang L, Guanrong C A. Comprehensive Weighted Evolving Networks[J]. Physica A, 2004, 343: 288-294.
- [89] Barabási A. L., Albert R., Jeong H. Mean-field Theory for Scale-free Random Networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1999, 272(1): 173-187.
- [90] Albert R., Barabási A. L. Statistical Mechanics of Complex Networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47.
- [91] Bianconi G., Barabási A. L. Competition and Multiscaling in Evolving Networks[J]. EPL (Europhysics Letters), 2001, 54(4): 436.
- [92] Muller W. C., Strom K. Policy, Office, or Votes? How Political Parties in Western Europe Make Hard Decisions[M]. Cambridge University Press, 1999.
- [93] Li X., Chen G. A Local-world Evolving Network Model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2003, 328(1): 274-286.
- [94] Tichy N. M., Tushman M. L., Fombrun C. Social Network Analysis for Organizations[J]. Academy of Management Review, 1979, 4(4): 507-519.
- [95] Barrat A., Barthelemy M., Pastor-Satorras R. The Architecture of Complex Weighted Networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(11): 3747-3752.
- [96] The UN Comtrade Statistics Database [DB/OL]. <http://comtrade.un.org/data/>, 2015-10-10.
- [97] The World Bank [DB/OL]. <http://data.worldbank.org.cn/>, 2015-10-10.
-

-
- [98] 斯德哥尔摩国际和平研究所[EB/OL]. <http://www.sipri.org/>, 2015-10-10.
- [99] Yin Q, Chen Q. A Social Network Analysis Platform for Organizational Risk Analysis—ORA[M]. General Network Analysis. McGraw-Hill, 2012:1-12.
- [100] Borgatti S. P., Everett M. G., Freeman L. C. UCINET for Windows: Software for Social Network Analysis[J]. 2002.
- [101] 中华人民共和国驻塔吉克斯坦大使馆经济商务参赞处[EB/OL]. <http://tj.mofcom.gov.cn/>, 2015-10-10.
- [102] Santos F. C., Santos M. D., Pacheco J. M. Social Diversity Promotes The Emergence of Cooperation in Public Goods Games[J]. Nature, 2008, 454(7201): 213-216.
- [103] Bremmer I., Keat P. The Fat Tail: The Power of Political Knowledge for Strategic Investing[M]. Oxford University Press, 2010.
- [104] 李进峰, 吴宏伟, 李伟. 上海合作组织发展报告(2015)[M]. 社会科学文献出版社, 2015.
- [105] Johari R., Gupta N., Aneja S. CONCOR: Context-aware Community-oriented Routing for Intermittently Connected Network[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, 2015(1): 148.
- [106] Wolf J. C., Dalal S. China and India, 2025: A Comparative Assessment[R]. Rand National Defense Research Institution, Santa Monica CA, 2011.
- [107] 美国国家情报委员会. 全球趋势 2025:转型的世界[M]. 时事出版社, 2009.
- [108] 美国国家情报委员会, 中国现代国际关系研究院(译). 全球趋势 2030:变换的世界[M]. 时事出版社, 2013.
- [109] 胡鞍钢, 郑云峰, 高宇宁. 对中美综合国力的评估(1990-2013 年)[J]. 清华大学学报: 哲学社会科学版, 2015(1): 26-39.
- [110] WIPO, Cornell University, INSEAD. Global Innovation Index 2015[DB/OL]. <https://www.globalinnovationindex.org/content/page/GII-Home>, 2015-10-10.
- [111] 人民日报编辑部. 毛主席关于三个世界划分的理论是对马克思列宁主义的重大贡献[M]. 人民日报出版社, 1977.
- [112] 方锦清. 网络科学的理论模型探索及其进展[J]. 科技导报, 2006, 24(12):67-72.
- [113] Ravasz E., Barabási A. L. Hierarchical Organization in Complex Networks[J]. Physical Review E, 2003, 67(2): 026112.
- [114] Barabási A L. Scale-free Networks: A Decade and Beyond[J]. Science, 2009, 325(5939): 412-413.
- [115] Hunt B. R., Lipsman R. L., Rosenberg J. M. A Guide to MATLAB: for Beginners and Experienced Users[M]. Cambridge University Press, 2014.
- [116] Li X., Jin Y. Y., Chen G. Complexity and Synchronization of the World Trade Web[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2003, 328(1):287-296.
-

- [117] Merton R. K. The Matthew Effect in Science[J]. Science, 1968, 159(3810): 56-63.
- [118] Mayo E. The Human Problems of An Industrial Civilization[M]. Routledge, 2004.
- [119] 袁新涛. “一带一路”建设的国家战略分析[J]. 理论月刊, 2014(11):5-9.
- [120] 扎格纳斯·潘达, 李烁辰(译). 上合峰会展示中国影响力[J]. 环球军事, 2012(12):57-58.
- [121] Carley K. M., Columbus D., Azoulay A. Auto Map User's Guide[EB/OL]. <http://www.casos.cs.cmu.edu/publications/papers/CMU-ISR-13-105.pdf>, 2015-10-10.
- [122] 杨阳, 荣智海, 李翔. 复杂网络演化博弈理论研究综述[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(4):47-55.

作者攻读学位期间取得的学术成果

[1] Kun Wang, Duoyong Sun. An Evolutionary Algorithm of the Regional Collaborative Innovation based on Complex Network [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2016, Article ID 5061279, (SCI Index, WOS:000373081000001).

[2] Kun Wang, Duoyong Sun. Application of an Improved SPC Control Chart in Health Monitoring System Design [J]. Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology, 2015, Volume 117, Supplement 1: 1-1. (SCI Index, WOS: 000356824100003).

[3] Kun Wang, Duoyong Sun. An Empirical Evaluation of the Shanghai Cooperation Organization from Social Network Perspective [J]. Metallurgical and Mining Industry, 2015, 6: 412-421. (EI: 20153701274151).

[4] Kun Wang, Duoyong Sun. Research on the WeChat Information Transmission Topology Based on Social Network Analysis [J]. The Open Cybernetics & Systemics Journal, 2015, Volume 9, 121-130. (EI: 20162502528905).

[5] Kun Wang, Duoyong Sun. Research on the Shanghai Cooperation Organization Network Architecture from the Big Data Perspective [C]. The 2015 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining, August 2015, Paris, France. (EI: 20161502223201, 社会网络分析领域高水平国际会议).

[6] Kun Wang, Duoyong Sun. Research on Construction Methods of the Shanghai Cooperation Organization Meta-network Model [C]. IEEE International Intelligence and Security Informatics (ISI) 2015 Conference, May 2015, Baltimore, Maryland, USA. (EI: 20161702279281, 反恐领域高水平国际会议).

[7] Kun Wang, Duoyong Sun. Research on Regional Collaborative Innovation Evolution from Complex Network Perspective [C]. The 9th IEEE International Conference Application of Information and Communication Technologies, October 2015, Rostov-on-Don, Russia. (EI: 20161202125736).

[8] Kun Wang, Duoyong Sun. Research on Architecture and Evolution of the European Union Meta-Network Model [C]. The 9th IEEE International Conference Application of Information and Communication Technologies, October 2015, Rostov-on-Don, Russia. (EI: 20161202125949).

[9] Kun Wang, Duoyong Sun. An Empirical Research on Relation Model of Campus Social Networks Based on Centrality Analysis [C]. 2015 International Conference on Network and Information Systems for Computers, January 2015, Hubei, China. (EI: 20161902347345).

[10] 王昆, 孙多勇. 一种基于改进型 SPC 控制图的隐蔽网络监测装置[P]. 中国实用新型专利: 201520292568.5(授权号), 2015-07-26.

[11] 王昆, 孙多勇. 一种基于 SPC 控制的人体健康监测装置[P]. 中国实用新

型专利: 201520983369.9(授权号), 2015-07-26.

[12] 王昆, 孙多勇. 基于改进型 SPC 控制图的网络舆情监测方法及系统[P]. 中国发明专利: 2015106993083.1(申请号), 2015-10-24.

获得的奖励及资助

- [1] 国防科学技术大学 2015 年度优秀硕士毕业生并荣立三等功一次.
- [2] 国防科学技术大学 2014 年度研究生“部队实践能手”资助.
- [3] 国防科学技术大学 2015 年度优秀研究生创新资助.
- [4] 国防科学技术大学 2015 年度专业学位研究生优秀学位论文选题资助.
- [5] 国防科学技术大学 2015 年度“长城信息杯”学员科技创新资助计划资助.
- [6] 国防科学技术大学 2015 年度“强军奖学金”.
- [7] 国防科学技术大学 2015 年度校级优秀学员.
- [8] 国防科学技术大学信息系统与管理学院 2015 年度院级优秀学员.
- [9] 湖南省首届高校 MPA 案例大赛三等奖.
- [10] 湖南省首届高校 MPA 案例大赛“最佳个人风采奖”.

参与的科研项目

- [1] 恐怖组织网络动态演化与干预策略研究, 国家自然科学基金(No: 71473263).
- [2] 基于 Agent 的犯罪组织网络时空演化计算实验方法研究, 高等学校博士学科专项科研基金(No: 20134307110020).
- [3] 军队院校本科生 MOOC 教学模式与实践研究, 2015 年湖南省普通高等学校教学改革研究立项项目.

担任的学术期刊和出版物审稿人

- [1] Reviewer, Discrete Dynamics in Nature and Society (SCI 源刊).
- [2] Reviewer, The Open Cybernetics and Systemics Journal (EI 源刊).
- [3] Reviewer, Asian Research Journal of Mathematics.
- [4] Reviewer, Lecture Notes on Social Networks, an edited book published by Springer.
- [5] Program Committee, P-ASONAM-EB 2016 (社会网络分析顶级会议扩展论文集).