

智能体仿真模拟： 推进行动与结构互构研究*

吕 鹏

提要:社会复杂系统的运行是一个多层次的“行动—结构”二元互构过程。当前理论研究提供了行动与结构二者关系的主观诠释,却往往得不到客观过程的证据支撑;定量研究能够客观揭示状态、趋势方面的变化,但难以收集行动与结构联动的直接数据。智能体仿真模拟(ABM)能够综合理论阐释的灵活性与定量研究的客观性,通过机制研究行动,通过涌现研究“从行动到结构”,通过学习研究“从结构到行动”,推动二元互构研究。ABM通过真实结果拟合和反事实推演拓展了社会学的知识边界。ABM应与理论研究、定量研究联动,共建计算社会学方法生态,助力学术共同体的形成。

关键词:计算社会学 多智能体仿真 ABM 仿真模拟 行动—结构互构

一、导 言

复杂系统视角是社会研究的基本视角之一。系统论认为系统由微观元素构成,元素之间存在互动、通信、共享等关系;系统具有相对稳态的宏观结构和跨自然、社会的普适性。社会同样是一个复杂动态系统,由众多行动者构成。钱学森等(1990)将社会视为典型的开放的复杂巨系统。卢曼(Niklas Luhmann)认为,社会系统的复杂性具有绝对性、普遍性(焦瑶光、吕寿伟,2007),国内学者亦持类似观点(梁玉成、贾小双,2016;罗家德等,2018)。复杂系统视角拓展了社会研究的边界。科尔曼(1999)指出,解释社会系统的活动是社会学研究的核心任务。社会现象与社会治理可分别被视为社会复杂系统的运行与控制优化问题。

* 本文系中央引导地方发展专项“‘全息东湖’智能社会模拟器研发”(2023EGA035)的阶段性成果。感谢邱泽奇、陈云松、刘精明和张成岗教授提供宝贵意见,感谢匿名评审专家的指正,文责自负。

社会复杂系统研究的重要方法之一是仿真模拟,即通过构建人工动态系统来解决现实中的复杂系统问题。卢曼较早指出,社会系统的复杂性要求研究工具必须具备相应的复杂度(丁东红,2005)。钱学森等(1990)也主张,考虑到社会系统的复杂性,应采用“系统仿真建模”方法。社会学领域的仿真模拟基础的工作在于通过系统动力学、元胞自动机、智能体仿真来构建“人工社会”(artificial society)。郑作彧(2018)追溯到齐美尔,认为仿真模拟能够揭示“形式社会学”问题。在计算社会学时代,社会系统的结构特征越来越多地被揭示出来。社会仿真模拟作为研究社会系统的重要方法,将会发挥更大的作用。

智能体仿真模拟(Agent-Based Modeling, 简称 ABM)是社会模拟的最新阶段。ABM 方法最早可追溯到 20 世纪 70 年代的生命游戏(life game)。在 1987 年阿克塞尔罗德主持的“囚徒困境重复博弈”研究(阿克塞尔罗德,2017)中,ABM 处在元胞自动机时代。随后雷诺兹(Reynolds,1987)等人使用模拟研究生命进化,ABM 进入“人工生命”阶段(Langton,1998)。1996 年糖域模型(sugarscape model)的提出(Epstein & Axtell,1996)标志着社会模拟进入 ABM 时代。ABM 通过构建众多智能体模拟系统动态演化,揭示个体行动塑造宏观社会的“黑匣子”过程(科尔曼,1999)。目前 ABM 已成为计算社会科学的重要范式,并在国内多个学科获得发展,涉及社会心理(Ye et al., 2021)、群体行为(吕鹏等,2021;吕鹏,2021;王双燕等,2021)、群体决策(Nie et al., 2021; Wang et al., 2022)、政策仿真(陈忱,2021)、城市规划(马妍等,2019)、公共卫生(谢丽等,2020)、应急疏散(尹僮鹏等,2020;冯佳昊等,2022)、企业管理(赵晓丽等,2013)、金融领域(王一涵、王国成,2017)等议题。

回顾 ABM 在国内社会学界的进展,沙莲香等(2005)较早使用 ABM 模拟民众心态。冯泽鲲(2021)模拟了社会地位的形成机制。2021 年邱泽奇和黄诗曼在《社会学研究》发文,模拟乡村电商创业中的创新模仿机制(邱泽奇、黄诗曼,2021),在 ABM 的社会学研究应用中具有代表性。目前,ABM 在社会研究中是“无法回避的方法问题”(乔天宇、邱泽奇,2020)。国内已有对使用 ABM 的梳理(梁玉成、贾小双,2016;邱泽奇,2022),但偏重于对相关研究的梳理,本文则侧重于对 ABM 方法自身的系统性梳理。作为新方法、新事物,ABM 在研究复杂、系统现象方面具有优势(Janssen, 2004)。如何运用 ABM 助力解决学科的重大关切、核心问题?鉴于行动与结构问题是社会学的核心议题之一,本文聚焦于行动—结构互构,考察 ABM 在思路、逻辑、方法方面如何分析和呈现这一互构关系、助力提升解决行动—结构二元难题研究能力。

二、社会研究的行动—结构二元难题

孔德最早提出静力学(结构与秩序)和动力学(行动与变迁)议题。此议题贯穿社会学发展的全过程。在系统视角看来,社会复杂系统具有行动—结构二元性。

在社会复杂系统中,社会行动具有微观性和动态性,行动者应是研究的起点。帕森斯对此有系统性论述。社会行动包含四个逻辑要件:行动者、目的、处境(条件和手段)以及规范性取向。具体而言,行动者是一个实体,能够根据条件、目的、情境做出决策。条件是个体不能改变的,但手段可以选择。行动具有持续性、自发性,并在特定的规范下开展。规范是宏大的社会结构性约束,其意义在于把行动与社会秩序结合起来(帕森斯,2012)。在行为机制、决策条件、互动过程、学习进化等方面,问卷访谈、个案研究、心理分析等方法尽管能够研究个体,但不能实现“呈现—分析—验证”合一。

社会结构是社会复杂系统的宏观模式,具有宏观性、相对静态性,是一种稳定的社会关系。例如,吉登斯(2016)便认为社会结构是使社会系统时空“束集”在一起的结构化特征。斯梅尔瑟(Neil Smelser)则将结构概括为不同社会类属之间的稳定关系模式,如部门、阶层之间、利益群体之间的关系(王思斌主编,2021)。吉登斯认为,规则和资源组合形成社会结构(郑杭生、赵文龙,2003)。学界主要用统计调查、数据挖掘等方法来刻画社会复杂系统的结构特征。

行动产生结构,结构又反过来引导行动(佟庆才,1980)。行动与结构的关系以及微观与宏观的关系一直是社会研究中“最为棘手的老问题”(苏国勋,1996)。由于对行动—结构互动关系长期缺乏有效的研究方法,造成了微观与宏观研究“两张皮”,即行动—结构二元难题(赵鼎新,2020)。学术界也一直在努力尝试解决这一难题,在理论上也取得了一定进展。帕森斯是理论上的集大成者。他提出了结构功能主义,并在社会行动、社会结构之间建立了理论联系。他通过AGIL模型整合各层次社会实体,形构社会结构(周怡,2000)。吉登斯则提出了结构二重性理论,解释了宏观结构、微观行动之间的转化关系(吉登斯,2016),在理论上打通了互构通道。此外,杨方(2010)也尝试通过模式变量理论沟通行动者与社会系统。但是,与理论上的进展相比,方法上的发展始终滞后。科尔曼使用“船型模型”阐明了宏观和微观的双向互动关系,但没有明确方法(赫斯特洛姆,2010)。定量方法与大数据方法能够刻画群体和社会,但难以收

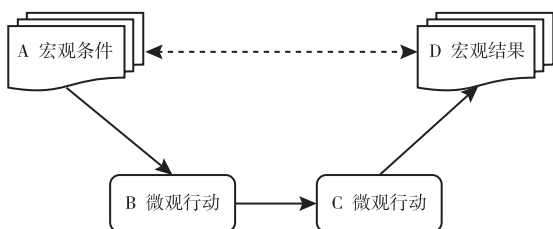
集个体行动如何导致社会结构变化的直接数据。这两类研究基于客观结果变化所提供的过程与机制解释往往是一种主观陈述,缺乏过程、动态数据的直接支撑与独立验证。

发展分析行动与结构过程、推动行动—结构二元互构研究的方法,是社会学研究长期的内在需求。ABM 被越来越多地采用,是因为它能够同时实现如下三个目标。一是将微观个体与宏观社会纳入同一个系统。ABM 构建的“人工社会”是一个多智能体系统(Multi-Agents System,简称 MAS),能够同时呈现个体与社会,增强了研究的整体性。二是以行动作为研究的出发点。微观是宏观的支撑,行动是结构的支撑。ABM 基于社会行动者来建模,抓住了行动—结构互构的逻辑起点。使用智能体刻画的行动者具有感知、认知、决策能力,且遵守社会规范(结构性因素)。通过行为规则设置,ABM 能对真实个体进行极大化近似估计与拟合(郑耀东等,2022)。三是直接呈现二元互动过程。结构化既不是结构,也不是非结构,而是一个二元互构过程。ABM 能够超越理论分析直接建模,并展示结构化的过程特征。当然,实证数据资料的验证可以提升“人工社会”在情景、场域方面的精确性。ABM 缓解了对社会过程建模的无力感(乔天宇、邱泽奇,2020),成为研究复杂社会过程的重要工具。

三、研究行动—结构二元问题的智能体模拟框架

(一) 船型理论对行动—结构问题的归纳

围绕“行动—结构”关系,西方理论界形成了强调个体与强调结构两个派别。在弥合二者关系方面,帕森斯、卢曼、吉登斯、科尔曼先后做出了贡献。其中,科尔曼的“船型模型”重点探讨微观、宏观转化问题(吴畏、石敬琳,2022),集中总结了二元问题(见图1)。为了解释社会系统的活动,科尔曼(1999)将其社会理性选择理论分为三部分,即宏观到微观(从A到B)、微观层次的个人互动(从B到C)以及微观至宏观的转变(从C到D)。该理论以微观行动作为研究起点,以宏观社会系统为研究目标,以合理性解释有目的社会行动。他研究行动如何产生制度结构、孕育社会系统,实现从微观到宏观的连接(丘海雄、张应祥,1998)。ABM 则借助涌现(从C微观行动到D宏观结果)和学习(从A宏观条件到B微观行动)两项功能来打通“科尔曼船”,助力行动—结构二元互构研究。



注:A指行动的宏观条件,无法被改变,构成宏观情境。B、C均指微观层面行动者的活动与互动。D指行动的社会结果,构成社会结构。D构成下一轮行动的
社会结构的重要更新,D与A之间存在持续转化关系(参见乔天宇、邱泽奇,2020)。

图1 船型模型中的行动—结构二元关系

(二) ABM 的涌现功能:分析从行动到结构的过程

“涌现”是指微观的个体、局部行为在宏观系统层面所导致的结果(霍兰,2006)。由于质性和定量方法难以处理社会系统的复杂性,我们应回到对个体行为的解释上来。从图1的船型模型来看,从C到D的路径经常比较模糊(乔天宇、邱泽奇,2020),ABM则能够基于涌现厘清相关机理。以种族隔离为例,这一宏观层面的社会现象是客观存在的,但调查数据只能给出统计特征、地理空间分布等信息;若诉诸文化、地位等社会结构因素,又不能增进对种族隔离的微观行为的认知;即使辅以入户调查,也很难获得个体在其中的真实心理动机。简言之,传统方法在这一议题上“力有不逮”,而谢林(Schelling,1971)构建了个体心理阈值,揭示了种族隔离的微观涌现机理。又例如爱泼斯坦和阿克斯特尔(Epstein & Axtell,1996)开发的第一个社会研究ABM模型(糖域模型),他们以此来模拟社会资源(财富)分布的涌现机理,涉及个体死亡、繁殖、继承、转移、交易、传播等一系列行动,用以研究社会变迁和社会系统。

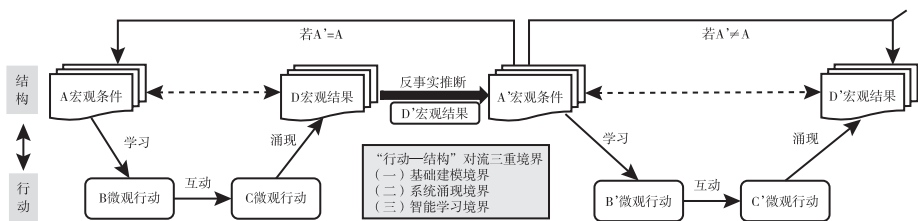
(三) ABM 的学习功能:分析从结构到行动的过程

“涌现”概念来自系统科学和复杂性科学,但仅停留于此是不够的。“A宏观条件—B微观行动—C微观行动—D宏观结果”链路中的“C微观行动—D宏观结果”路径凸显了ABM的涌现功能,而客观存在的“A宏观条件—B微观行动”路径还需要社会研究者进一步去实现。对此,ABM可通过“学习”功能来解决。学习体现了从结构到行动的过程,是个体在宏观条件下对知识的内化和反馈,帕森斯称之为社会参考结构(social reference structure)(佟庆才,1980)。学习需要纳入三方面的结构性知识。一是历史记忆。在实践过程中,历史记忆作为记忆痕迹指导个体行为(吉登斯,2016)。二是社会环境。个体从社会环境、

情境、结构中获取知识,开展自主行动。班杜拉(Bandura,2019)基于此发展出了社会学习(social learning)理论。三是反事实结果。反事实(反实证)同样具有研究价值(珀尔、麦肯齐,2019),ABM也能实现反事实模拟,以模拟个体日常生活中的索引性、能动性和反思性行为。

(四) ABM 模拟动态社会系统:持续的互构过程

2019年哥伦比亚大学埃尔斯特(Jon Elster)教授出版《解释社会行为:社会科学的机制视角》一书,提出机制是社会研究的核心概念(埃尔斯特,2019)。机制超越了因果性解释,成为连接行动与结构的核心纽带。ABM使用社会机制来揭示社会过程,且能够刻画完整的单次互构。在图2中,A(宏观条件)、D(宏观结果)表示宏观结构性特征,B(微观行动)、C(微观行动)表示社会行为体。从B(微观行动)到C(微观行动)表示个体行为交互。C(微观行动)通过涌现得到社会系统层面的D(宏观结果)。D(宏观结果)已经发生,构成下一轮社会系统A'(宏观条件)的先验部分,并约束、影响个体下一轮的学习、行动和互动过程。至此,单次二元互构分析便完成了。事实上,社会系统运行是一个持续演化过程。ABM不仅可以刻画单轮次互构(如图1),还可以模拟多轮互构(如图2),让科尔曼船“动起来”。第一轮宏观结果(D)、反事实结果(D')均纳入了宏观条件(A)。如无重大变化(A'=A),社会运行进入“内卷”循环模式(如图2左半部分所示)。如发生重大变化(A'≠A),则进入新的互构过程模式(如图2右半部分所示),将上一轮涌现结果作为下一轮宏观条件。以此类推,ABM可实现持续的二元互构过程分析。



注:“科尔曼船”具有动态性,ABM通过涌现、学习等功能实现“船”在微观、宏观两个层面的双向打通。此外,ABM还通过持续的学习进程模拟持续的动态社会系统、社会过程,使得相关的研究更加贴近社会的真实方面、真实过程。

图2 ABM多轮学习机制扩展“科尔曼船”

(五) ABM 二元互构研究的三个阶段

ABM二元互构研究分为三个阶段,构成由浅入深的三重境界(见表1)。第

一阶段是基础建模境界,其特征是以结构性因素指导模型建构,任务是建立“人工社会”,为个体模拟提供环境和情境参数。第二阶段是系统涌现境界,其特征是社会行动映射社会结构;其逻辑过程包括开展机制设计,以模拟个体在“人工社会”的动态运行,收集系统层面的社会结果涌现,并基于仿真与真实社会结果高精度匹配,挖掘真实现象的有效知识。第三阶段是智能学习境界,重点提升从结构到行动的研究能力。社会结构既是人类行动所建构的,又是产生人类行动的条件和中介(周怡,2000)。ABM 结合事实与反事实推断构建社会知识矩阵,并基于“社会知识的结构化实践”回应并模拟了“结构二重性”视角。

表 1 智能体仿真模拟三重境界与逻辑过程

| 三重境界(步骤) | 核心任务 | 逻辑过程 |
|-----------------------------|------|--|
| (一)基础建模境界 (结构性因素指导模型建构) | 情境 | (1)确定研究问题与案例对象 (2)强化社会模拟的理论基础 (3)社会环境刻画与情境呈现 |
| (二)系统涌现境界 (社会行动结果映射社会结构) | 涌现 | (4)社会行为体属性与规则设计 (5)基于社会模拟获取系统涌现数据 (6)基于仿真数据拟合社会实证数据 (7)基于实证数据拟合揭示社会过程机制 |
| (三)智能学习境界 (基于社会知识的结构化实践) | 学习 | (8)实现泛在、高维度的社会反事实推断 (9)基于社会知识矩阵实现“行动—结构”互构 (10)形成社会学习算法的智能体模拟框架 |

四、ABM 研究行动—结构二元互构的过程逻辑

(一)确定研究问题与案例对象

ABM 的研究问题具有通用科学指向,并对方法的匹配性提出了要求。适合 ABM 的研究问题应具备涌现性、过程性和动态性特征(Epstein, 1999),如合作行为机理(王世龙,2017)、群体行为演化(郑昊,2021),等等。而适合 ABM 的真实目标案例至少应满足三个标准。一是边界的确定性。案例可从现实社会场域中完整提取,不存在关键遗漏,以确保行为机制的相对独立性(规避、纳入或解决外部性)。二是结果的确定性。仿真模拟需要精准拟合“标靶”,真实案例的结果必须明确,可测量、可量化、可评估。三是过程的动态性。真实目标案例代表社会事实,发挥结构性约束的作用,因而应具有清晰、可观测的动态过程,如原始资料、历史资料等,以便于全过程验证模拟结果的准确度。

(二) 强化社会模拟的理论基础

理论构成了一种前置性与结构性约束。ABM 不是计算机编程的“独角戏”，需要理论支撑。在计算社会科学时代，吕鹏等提出了理论、(大)数据、模拟的三角形方法生态(Lu et al., 2023)。理论居于最高地位，不仅能指导数据、大数据、实证资料的收集、处理和分析，而且能够指导 ABM。ABM 的重要任务之一是发展理论。其一是发展学科经典理论，包括社会发展、社会变迁、社会网络、城乡二元、社会环境等理论，用以指导 ABM 的社会环境建模。其二是使用和发展新理论，包括计算社会科学方法、系统科学理论(叶立国, 2013)、社会物理学、耗散结构理论等，用以指导动力学建模。三是重点挖掘个体层面的理论。智能体具有自主性、交互性和自适应性，需要个体层面的理论指导(Bandini et al., 2009)，包括心理、人际互动、人机环交互以及强化学习理论等，以提升对行动者的拟人化程度。

(三) 社会环境刻画与情境呈现

ABM 提高了刻画和呈现社会的生动性。社会过程(事件)发生在具体的社会环境中，后者作为“容器”，承载个体行为与事件，发挥总约束作用。使用 ABM 模拟具体的社会环境，可按照还原度分为两类。一是理想型环境，这反映了抽象、化约、简化的分析思路，多用于研究拓扑结构、本质问题。这类研究对具体环境的还原度低，如社会网络(Hamill & Gilbert, 2009)、博弈论研究便是如此。基于 ABM 做理论发展(孟庆国、罗杭, 2017)也沿用了此思路。二是高仿真环境，即搭建完全接近或高度接近现实的模型环境，以模拟现实社会。这一思路见于各类演化动力学研究，如人群动力学研究(王双燕等, 2021)、交通动力学研究(史雪莹等, 2019)，等等。此外，必要的环境区域设置是指对个体、群体行动空间的限制，包括不可通行区域(墙壁、栏杆等)、可通行区域(道路、广场等)、特殊区域(门、楼梯等)和阻碍区域(桌椅、路障、树木等)。

(四) 社会行为体属性与规则设计

ABM 在特定社会模型中生成智能体。智能体的数量设置一般采用两种思路。一是单机 PC 模拟，采用绝对设置法(1:1 匹配)或相对设置法(等比例缩放)。一般的经验是，常规条件下(计算机的配置为 32G 内存、8 核、NetLogo 6.0.0)，智能体规模在千人以下采用绝对设置法，否则使用相对设置法。二是大规模模拟。随着超级计算机投入使用，基于数字孪生城市的大规模社会模拟成

为可能(Makarov & Bakhtizin, 2018)。如果有数据,可采用直接设计法,参考性别、年龄、职业、社会网络等群体特征分布设置异质性个体。如果无数据,则采用间接设计法,对相关的变量进行近似估计,例如在公共安全(恐袭)模拟中个体生命值属性难以测量,此时可使用年龄变量进行近似估计(Lu & Wen et al., 2021)。在交通模拟中,可将从众心理量化为系数来研究人群的疏散(李昌宇等,2016)。行为规则作为自变量(X)是驱动个体行动、产生宏观涌现(Y)的机制性原因。常态行为建模主要使用基础物理规则,如布朗运动、社会力、流体力等(Bain & Bartolo, 2019)。在紧急状态下,人群行为模式会发生变化,这时需要依据心理学、社会学、行为科学来设计行为规则,而对多种规则的模拟可使用“奥卡姆剃刀”原则予以精炼(魏治勋,2011)。

(五)基于社会模拟获取系统涌现数据

除了实证数据,ABM生成的仿真模拟(反事实)数据将成为新的资料类型。首先来看涌现机制与系统结果(Y 变量)的关系。例如,在公共安全模拟中, Y 变量是死亡或受伤人数,全过程结果 $\{Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_T\}$ 构成模拟结果函数 $f_{sim}(\cdot)$ 的观测值。其次,我们关注因果机制参数遍历数据(X 变量)。行动具有复杂性,需要设置多个参数。参数是驱动行为涌现的 X 变量。考虑到社会结果的复杂性和多样性,ABM需要模拟众多参数取值的组合。假设有 k 个 X 变量参数 $\{X_1, X_2 \dots X_k\}$,对应 $\{n_1, n_2 \dots n_k\}$ 个参数取值,则一共有 $N = \prod_{i=1}^k n_i$ 个的取值组合(不重复)。每一组独特的参数组合代表一个(种)仿真模拟和一种可能的行为机制(猜想)。再次,我们来看社会结果($X-Y$ 映射)稳健数据。每一个仿真模拟能够同时获得行为规则(X 变量)和结果数据(Y 变量)(王飞跃,2004)。由于存在随机性扰动,需要重复模拟多次。最后是平行结果数据。对多组 X 变量参数取值组合分别进行重复模拟,所得到的稳健(平均)结果构成平行仿真结果(Bonabeau, 2002),这可以用来表征和研究社会现象的多元性、偶然性和复杂性。最终, $X-Y$ 映射数据得以构建,我们可将其用于自身研究或同行研究的重复验证。

(六)基于仿真数据拟合社会实证数据

社会模拟不能罔顾事实,需要使用和拟合实证数据。我们将最佳拟合、最优匹配的一组参数取值的组合定义为最优解,这是“1对 N ”的全局搜索问题。“1”指真实社会事件,相同的事件只发生一次,用目标函数 $f_{real}(\cdot)$ 来表示。遍历全部

参数取值组合,形成 N 个平行模拟结果,即 $f_{sim}(\cdot)$ 数据。计算仿真结果 $f_{sim}(\cdot)$ 与目标函数 $f_{real}(\cdot)$ 的差值在最小处求解。最优解的确认应综合四个标准:一是有效性 (validity)。作为最基本要求,模拟结果应精准拟合现实 (Grazzini & Richiardi, 2015)、准确命中“靶心”。二是稳健性 (robustness)。即寻求发挥稳定、多次命中,基于最优解开展重复模拟,考察分布特征拟合度。三是全过程反演 (back-calculations)。基于真实数据,ABM 能够匹配和反演真实社会事件“生命周期”全过程 (Abar et al., 2017),从而发现真实的动力学机制。其四是可解释性 (interpretable)。最优解包含的行为机制、社会环境参数应是对行动—结构以及二元互动的直接反映,因此在社会意义上需要是可解释的。

(七) 基于实证数据拟合揭示社会过程机制

对比统计上的因果关系,ABM 揭示了从社会行动出发的因果关系图景,提升了因果研究的能力。一是发现和证实因果关系。通过行为机制 (X),ABM 可复现系统宏观结果 (Y)。最优解蕴含的一套变量参数取值是关于因果机制的社会过程解释。此外,行为空间数据可以复现、追溯(使用随机种子),这提高了可重复性。二是证伪和否定因果。凡是科学理论(命题)都是有边界条件、可被证伪的 (Popper, 2002)。学术界已经认识到 ABM 在发现和验证因果机制方面的作用 (蔡晶晶, 2016),但证伪的意义同样重大,不可忽视。因果性命题通常表示为“如果发生 X 行为,那么产生 Y 结果”。ABM 通过检查是否存在“如果 X ,则非 Y ”的情况来实现证伪。我们在原“ X 假设”基础上建立 ABM 模型,如果模拟发现 X 条件不能(或不必然)导致 Y ,或者非 X 条件导致了 Y ,原因果机制则应被质疑或否定。ABM 兼具证实、证伪效果,拓展了因果研究的渠道,并为因果机制提供了有效的“试金石”。

(八) 实现泛在、高维度的社会反事实推断

反事实是社会研究高质量发展的必然需求。2018 年珀尔等提出三层次因果关系,认为反事实推断是最高层次 (珀尔、麦肯齐, 2019)。ABM 通过事实拟合与反事实推断来开展社会平行推演。反事实理念已经在社会学中推广应用。例如倾向值匹配 (Propensity Score Matching, 简称 PSM) 本质上就是两阶段回归。PSM 通过计算入样概率进行匹配分组,以此计算结果差异 (处理效应) (胡安宁, 2012),但仍有局限性:一是逻辑瑕疵。“反事实个体”仅是入样概率接近者,与案例中的个体并非同一人。二是合理性问题。PSM 用于估计的变量范围受数

据、兴趣、成本限制,难以自证其合理性(Brand & Xie, 2010)。三是状态空间的维度受限。PSM 通常推断的是一种反事实状态(邵悦心等,2019)。ABM 可以实现任意个体、任意维度的反事实推断,并且在理论上确保是同一个人。ABM 反事实推断是基于事实,而不是抛弃事实。“事实”既指观察和收集到的目标案例信息(实证资料),也指被最优解复现的社会过程。ABM 通过参数泛化获取各种场景、条件、假设下的模拟结果。

(九) 基于社会知识矩阵实现“行动—结构”互构

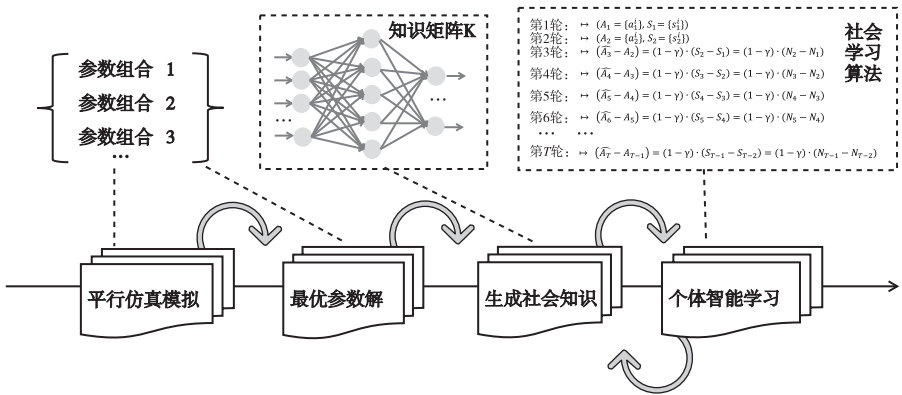
“结构化”是解释行动—结构互构过程的理论视角。结构由行为(行动)建构,反过来制约着人类行为(刘少杰,2002)。社会知识矩阵是 ABM 研究行动—结构互构的核心工具。从静态属性角度来看,社会知识是指在(社会)系统层面的理论、结果、规律、原则、映射、关联等结构性因素,具有宏观性、结构性特征。在 ABM 中,社会理论、案例信息、动力学机制、先验结果等均可以视为知识的来源,能够指导个体行动。从 ABM 实现的角度来看,社会知识不是一成不变的,而是一个进化过程,为此需要同时纳入事实和反事实来构建社会知识矩阵。ABM 使用最优解拟合和提炼社会事实知识,通过参数泛化推断反事实,系统性存储社会平行推演结果。作为一种结构性指引,社会知识矩阵的数据结构应是“如果 X 条件,那么 Y 结果”的结构性宏观总结。 X 条件既包括真实场景,也包括反事实场景。以社会知识矩阵及其动态更新为核心,ABM 提供了一种研究行为—结构双向互构过程的方案。

(十) 形成社会学习算法的智能体模拟框架

从社会知识矩阵角度来看,社会系统的动态演进存在内卷、进化、退化三个方向。如何理解社会内卷?如果社会系统在演进,但社会知识矩阵保持不变($A' = A$),不存在社会知识矩阵的实质性更新,那么个体将按照社会传统(旧矩阵)行动(如前文图 2 左半部分所示)。如果社会知识矩阵发生变化($A' \neq A$),则存在更新的必要性,个体需要学习新知识(如前文图 2 右半部分所示)。还有一种变化是社会退化,即社会结果越来越糟($A' < A$)。不过,人们更愿意看到社会进化,即社会结果越来越好($A' > A$)。基于 ABM 的“社会学习”算法能够基于过往的先验知识与经验来指导个体学习,模拟持续互构过程。社会进化需要综合考察个体行动和宏观结构两个层面。行动者(个体、法人)发挥了关键作用,其行动是一种索引性、反思性、进化性表达。ABM 能够清晰地展示个体的学习,并

可以使用社会实证资料来对其进行验证。

“社会学习”算法以社会现实场景为依据。个体在社会生活中学习的形式与来源是多样的,包括新闻报道、日常交谈、集体记忆、应急培训等都会在个体脑海中形成社会知识。当个体下次面临类似情况时,将依照学到的知识做出行为,产生新的社会结果。这是一个持续的实践过程。在前人研究中,班杜拉的“社会学习理论”强调主体、行为和环境相互作用(Bandura, 2019),偏重认知、心智,没有提出模拟思路。邱泽奇、黄诗曼(2021)考虑到了学习和模仿机制,但该研究聚焦于“创新的扩散”,非个体的反思、索引、进化过程。笔者提出的算法实现了具象化、矩阵化、自动化和拟人化的个体学习,图3详细展示了这一逻辑过程。个体具有感知、学习、决策能力。个体查询、索引、调用上一轮知识矩阵 K_0 的对应取值,确定行动策略、互动策略,采取社会行动,实现从结构到行动过程的模拟。同时,研究者也在社会系统层面对本轮行动结果进行统计、学习、反思、总结、评估和结构化,将知识矩阵动态更新为 K_1 (Lu et al., 2022),实现从行动到结构过程的模拟。以此类推,个体在新矩阵(K_1)下开展新的学习,调整行为与互动策略,产生新的结果,进行统计和计算,再次更新矩阵(K_2)。



注:个体首先遍历参数获取最优解,结合反事实推断获得第一轮初始知识矩阵 K_0 。在其指导下,个体(i)进行自主行为(a_i^1)。在社会系统场域中,所有个体的行动策略集合为 $A_1 = \{a_i^1\}$ 。记录个体(i)的行动结果(s_i^1),构成社会结果 $S_1 = \{s_i^1\}$ 。在第一轮学习结束后,个体更新知识矩阵 K_1 ,第二轮按照新矩阵(K_1)行动,产生社会结果并更新矩阵(K_2)。前两轮学习通常具有随机性和尝试性。个体会审视两次行动($a_i^1 - a_i^2$),比较前两轮结果($s_2 - s_1$),制定第三轮行动策略(a_i^3)。同时,社会系统场域也在评估前两次的社会结果差异($S_2 - S_1$)与行动策调整($A_2^i - A_1^i$),制定第三轮社会行动策略(公共政策),即 $A_3^i = \{a_i^3\}$ 。具体学习轮次因研究而异。总原则是以最终收敛的结果作为社会系统的后果。需要指出的是,图3的 A_i^j 、 A_i 与图1、图2中的A含义不同。

图3 ABM 智能学习:从拟合真实到个体智能学习

五、探索行动—结构二元互构的社会研究实例

ABM 适合研究跨层次、跨系统、动态性的社会系统问题。本文以笔者研究团队的社会安全事件仿真研究为例,介绍 ABM 如何助力行动—结构二元互构研究。

(一)使用 ABM 研究社会安全的必要性

ABM 之前的方法只能分析、呈现简单社会现象,人们没有找到有效的研究复杂社会的方法(乔天宇、邱泽奇,2020;吕鹏、陈典涵,2023)。对于社会安全事件,目前主要使用实证资料来研究宏观层面的结构性原因。但这一方法的局限性在于难以揭示个体行动过程。社会安全事件的发生具有突发性、紧急性、社会危害性,很难通过社会调查、社会实验、大数据分析等方法进行直接研究。此外,事件只发生一次,研究的结论很难被二次证实。事实上,行动者往往会及时吸取上一次的教训,在下次遇到社会安全事件时调整其行为策略。仅依靠实证资料与社会事实研究不能揭示行动的能动性、反思性、学习性和进化性,因此,需要 ABM 推断反事实,开展面向社会安全事件的二元互构研究,揭示个体行为与社会结果的互动过程。

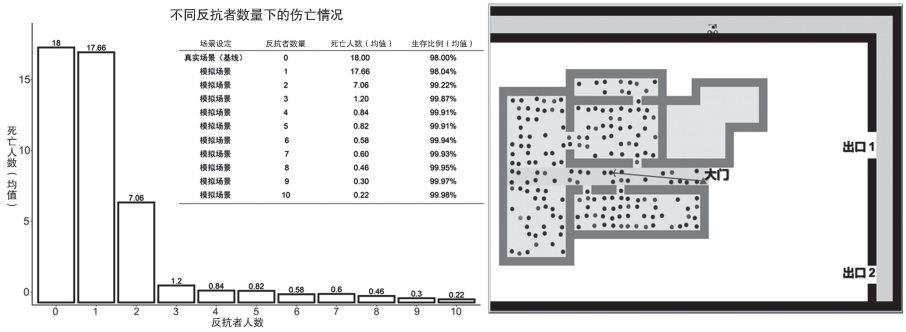
(二)拟研究的社会行动—结构问题

人们在社会生活中常常会面临一种社会困境:多数人在面临社会安全事件(如恐怖袭击)时都是被动躲避,很少出现自组织反抗者。博弈论对此提供了一种理论视角,使用合作、自私等概念来加以解释。对个体而言,尽管合作策略(反抗)对社会至关重要(Olson & Spelke, 2008),但采用自私策略(搭便车)的更普遍(Fischbacher & Gächter, 2010)。博弈论分析具有抽象性、结构性和宏观性,不能刻画客观个体在危机情况下的行为。社会困境问题兼具行动性与结构性,需要使用合适的方法来呈现和分析行动—结构二元互构的过程机理。我们需要找到一种社会制度设计解决个体后顾之忧,在提升社会安全水平的同时,保障挺身而出者的安全。

(三)个体反抗的主要阻碍机制

个体反抗需要两个决策要件。(1)必要性。知道挺身而出很重要,这是前

提,其中包括主动知道(具有内生、强烈的亲社会倾向)和被动知道(不得不反抗)。ABM 通过智能体设置建模亲社会倾向、心理特征、学习过程、行为特征和决策函数(Lu et al., 2022),模拟场域风险水平。(2)有效性。仅知道重要是不够的,个体未必会行动,这是因为个体还不知道反抗是否有效。一个人反抗大概率会死亡,更多人的联合才会增加胜算。那么,到底几个人反抗才是有效的? 应急演练、社会实验等方法具有“参与者效应”,因此有必要使用 ABM 来推断反事实结果。本文作者的团队模拟了 2014 年巴基斯坦恐袭事件,初步推断了反抗者制服歹徒的有效性区间(Lu & Yang et al., 2021)。在这一案例中,0 人反抗,18 人死亡。反事实结果(图 4)表明,如果 1 人反抗,将死亡 17.66 人。这说明若某个人单独反抗,不仅本人危险,且客观增益有限。这符合大多数人对于“枪打出头鸟”的认知,人们也会选择不反抗(搭便车)。这进一步恶化了社会安全态势,使得歹徒可以从容攻击所有人。ABM 还能推断更大的图景。若 2 人反抗,将死亡 7.06 人;若 3 人反抗,将死亡 1.2 人;若 4 人反抗,将死亡 0.84 人。至此,ABM 已呈现具体的有效性边界(3~4 人)。个体如果知道有效性边界,将会调整其行为,由此也会导致不同的结果出现。



注:图中左半部分展示的是 2014 年巴基斯坦白沙瓦恐怖袭击事件的事实与反事实结果,其中的柱状图展示了见义勇为者人数与死亡人数的关系,并统计了总体生存率。图中右半部分展示了运用 NetLogo 模拟软件模拟 2019 年清真寺枪击案件真实场景的初始化界面。

图 4 反事实推断与真实社会案例场景复现

(四) 基于 ABM 模拟提炼社会事实知识

2019 年 3 月 15 日,新西兰发生了一起恐袭事件,一名枪手冲入现场约 190 人的清真寺屠杀平民。枪手第一轮射击后“从容”回到车里添加子弹,再次回到现场进行第二轮射击,其间曾有一人反抗。我们基于谷歌地图构建清真寺基础仿真环境,包括 5 个祈祷室和室内通道。清真寺内设 5 个逃生出口,事发时仅开

放1个。在外部环境方面,我们复制了院落、道路、汽车、停车场等周边环境。由于不掌握现场人口特征,我们按照国别人口特征设置初始生命健康状态值。在现场人数方面,我们设置190个平民个体以及1名歹徒。同时,我们设置个体在一定距离内受到歹徒枪击伤害,使用社会力模拟个体之间的碰撞与踩踏。在人群行为方面,我们模拟恐慌性逃散、争夺出口、拥挤等异常模式,且个体受伤倒地也会造成二次伤害。基于个体心理与亲社会偏好,我们设置了拟人化和社会化规则。此外,我们按照动态生命值(血量)判定个体存在状态(健康、受伤、倒地、死亡等类别)。具体行为机制设计见表2。

表2 ABM模拟参数与最优解

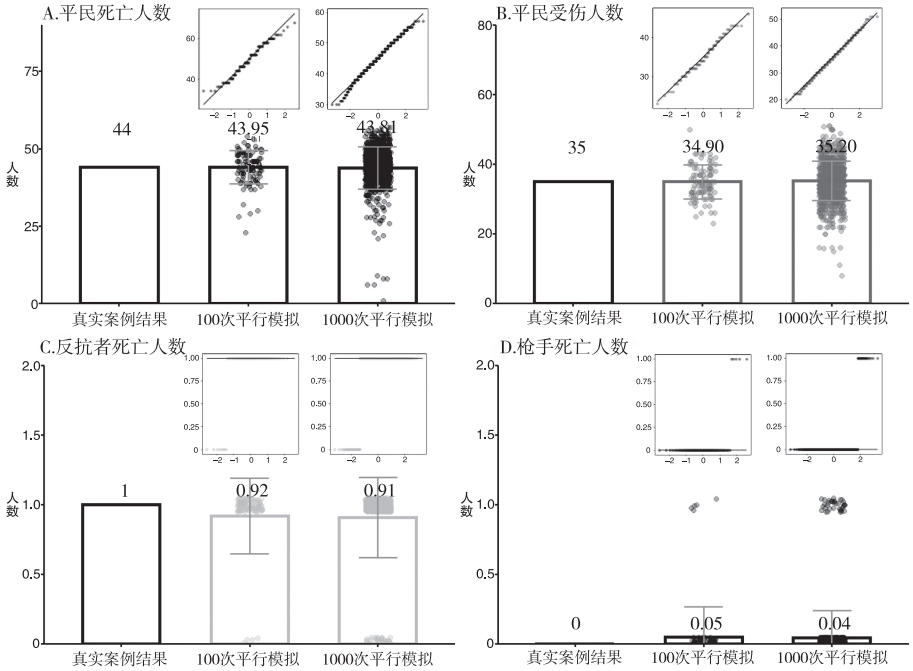
| 模拟参数(X 变量) | 中文解释 | 最优解取值 |
|-------------------------------|------------------|----------------------------|
| <i>perception radius</i> | 平民的感知范围 | 3倍单位地砖(patchs) |
| <i>perception range R</i> | 平民感知模式(同质或异质性) | 同质性 |
| <i>shooting damage</i> | 歹徒每次命中造成的伤害 | 54.5个血量 |
| <i>the collision damage</i> | 平民每次碰撞受到的伤害 | 0.1个血量 |
| <i>the trampling damage</i> | 平民跌倒每次被踩踏受到的伤害 | 0.2个血量 |
| <i>civilian moving speed</i> | 平民每时刻(tick)移动的距离 | 0.1~0.2单位地砖 |
| <i>shooters moving speed</i> | 歹徒每时刻移动的距离 | 室内0.1~0.2单位地砖 室外0.2单位地砖 |
| <i>shooting distance</i> | 歹徒的有效射击距离 | 10倍单位地砖 |
| <i>injured blood volume</i> | 平民判定受伤的失血比例 | 初始血量的63.3% |
| <i>fall blood volume</i> | 平民判定倒地的失血比例 | 初始血量的90% |
| <i>shoot hero probability</i> | 歹徒优先攻击视野内反抗者的概率 | 50%概率水平 |
| <i>fighting damage</i> | 反抗者每次攻击枪手的伤害 | 5个血量 |

我们在系统层面统计平民死亡人数(y_1)、受伤人数(y_2)、反抗者死亡人数(y_3)、歹徒死亡人数(y_4)的模拟结果,把真实案例结果(平民死亡 $Y_1=44$,平民受伤 $Y_2=35$,反抗者死亡 $Y_3=1$,歹徒死亡 $Y_4=0$)作为拟合目标,综合四个结果变量维度($y_1 \sim y_4$)求解最优参数解。图5表明,ABM的多次模拟结果高度匹配真实情况。最优解蕴含的一整套参数(表2第三列)是对危机情况下的个体、群体动力学的社会规律发现:生命值服从正态分布(血量均值100且标准差为20)、感知半径均为3、平均移动速度为0.1~0.2、每次碰撞带来0.1伤害、跌倒后每次被踩踏造成0.2伤害的190个民众,面对一个室内速度0.1~0.2、室外速度0.2、有效射击范围是10、一次枪击造成54.5伤害的歹徒时,能够复现真实结果。与此同时,那名反抗者为徒手攻击,每次给歹徒造成5伤害,歹徒也会以50%概率优先攻击他(剩余50%概率随机攻击)。

$$Parameters(*) = Argmin(\cdot) = Argmin[f_{sim} - f_{real}(\cdot)] \quad \text{式(1)}$$

$$= Argmin \sqrt{\frac{(y_1 - Y_1)^2}{(100 - 1)} + \frac{(y_2 - Y_2)^2}{(100 - 1)} + \frac{(y_3 - Y_3)^2}{(100 - 1)} + \frac{(y_4 - Y_4)^2}{(100 - 1)}}$$

$$= Argmin \sqrt{\frac{(y_1 - 44)^2}{(100 - 1)} + \frac{(y_2 - 35)^2}{(100 - 1)} + \frac{(y_3 - 1)^2}{(100 - 1)} + \frac{(y_4 - 0)^2}{(100 - 1)}}$$



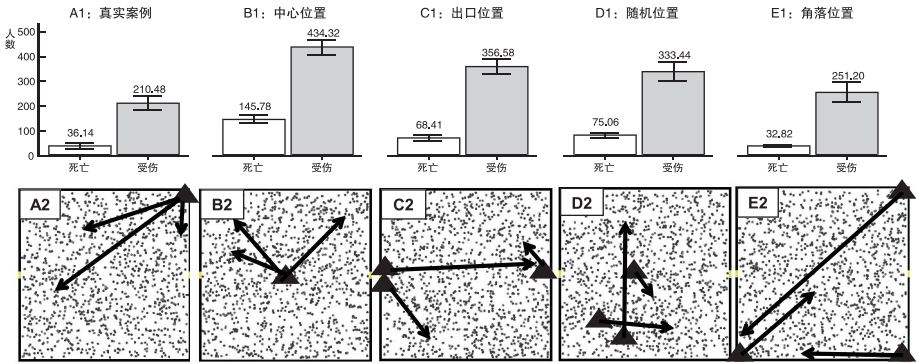
注:图中呈现了不同仿真模拟匹配目标的真实案例结果、100次重复、1000次重复模拟结果。散点是单次模拟,误差棒表示标准差。右上角Q-Q图检验重复模拟结果的正态性。

图5 通过最佳模拟复现的真实案例结果

(五) ABM 泛化真实场景揭示反事实知识

ABM 方法开拓了新的知识发现路径。知识不仅源自实证资料挖掘,还能够来自模拟与反事实。社会知识不仅包括事实知识,也包括反事实知识。基于最优解代表的事实知识,ABM 还可以进行反事实推断,构建社会安全方面的社会知识。社会知识是一种索引性结构,能够被个体有逻辑地读懂、内化与执行。笔者的研究团队研究巴基斯坦恐袭事件时呈现的“情境—结果”数据(见图4左半部分)仅是一维知识表达,难以服务高维度的模拟需求。我们后来模拟了2012年美国科罗拉多州电影院枪击事件,采用更加高维度的矩阵形式,系统地纳入

“场景—结果”数据类型(Lu & Wen et al., 2021)。图6具体展示了事实场景与反事实场景的结果。图6中A1反映真实场景(歹徒在角落)的结果(事实知识),B2(歹徒居中)、C2(歹徒在出口)、D2(歹徒随机分布)、E2(占据三个角落)反映各种反事实场景的死亡、受伤结果。



注:图中A1~E1是枪手发起袭击时所处的不同位置,包括真实情况和非真实情况,代表不同的攻击策略,并模拟不同情况下歹徒和平民(反抗者)的互动、对抗的过程与结果(死亡人数和受伤人数)。A2~E2是NetLogo软件对不同枪手位置情况下的模拟过程(动态过程截图)。

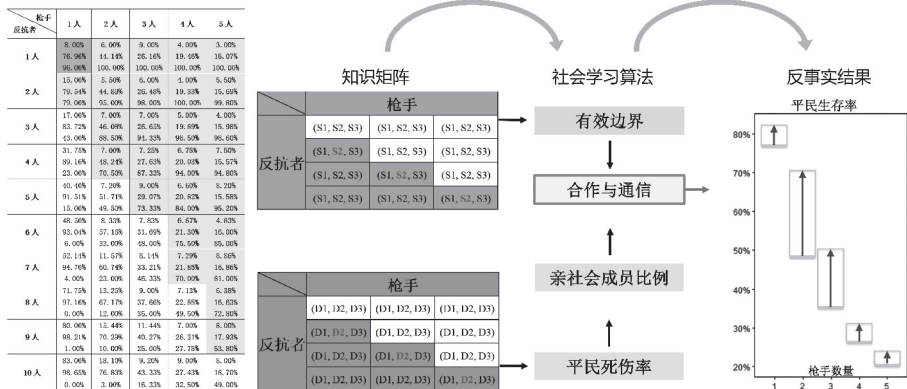
图6 事实结果复现与反事实结果推断

(六) 构建面向公共安全的社会知识矩阵

新西兰恐袭事件研究所使用的面向公共安全的社会知识矩阵由一系列“条件—结果”取值组成。“条件”是指物理环境、社会情境、行动者数量、行为机制参数等。在这项研究中,我们保持其他条件不变,以歹徒、反抗者数量变化为条件,计算联合条件下的群体、歹徒、反抗者三个子群体的生存率与风险率,以此作为“结果”构成数据单元。图7左边表格展示了事实结果(1名歹徒、1名反抗者)和模拟推断的反事实结果(1~5名歹徒、1~10名反抗者),用式2计算生存率水平(S_1, S_2, S_3)和风险率水平(100%减去生存率)。社会知识矩阵促进了社会困境的解决。一方面,该矩阵可精确告知风险率水平,解决“必要性问题”。个体与群体共享相同(共同)的风险率水平。随着攻击的进行,所有人都被逼到墙角,风险逐渐提高,反抗的必要性不断上升。另一方面,通过考察歹徒生存率,可计算有效反抗歹徒的阈值区间。具体而言,通过式3,我们以歹徒(群体)生存率低于50%(失去攻击能力)为条件,绘制有效性边界,并告知个体。

$$(S_1, S_2, S_3) = \begin{cases} S_1 = \text{mean}(a_1) \\ S_2 = \text{mean}(a_2) \\ S_3 = \text{mean}(a_3) \end{cases} \quad \text{式(2)}$$

$$Valid. Bound = round\left(\frac{\min[Size(Hereos | mean(S_3) \leq 50\%)]}{Size(Shooters | mean(S_3) \leq 50\%)}\right) \quad \text{式(3)}$$



注:图的左半部分展示案例中不同枪手—反抗者数量的社会知识矩阵。最左侧表格单元格内上中下三行百分比依次代表平民、反抗者、枪手群体生存率。图的右半部分展示个体通过学习提高社会福利的算法过程。

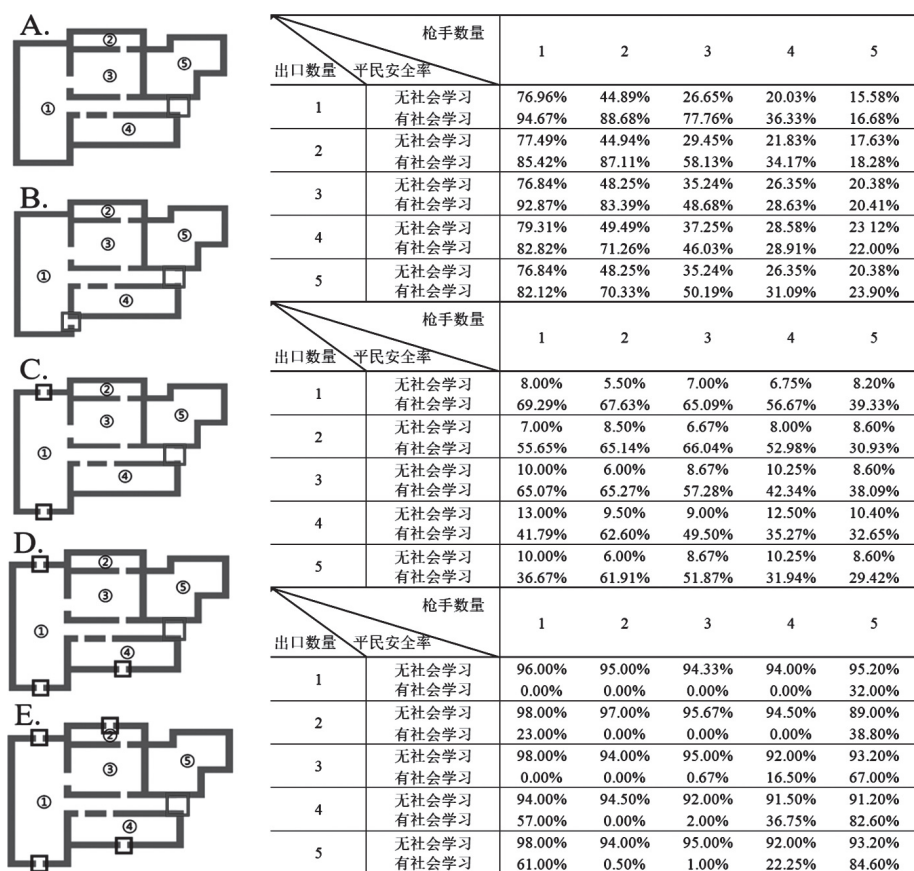
图7 社会知识矩阵支撑社会学习算法

(七) 基于个体社会学习的社会结果优化

新西兰恐袭事件中出现的反抗者只有1人,他最终死亡,反抗收效微弱,这反过来加强了“枪打出头鸟”的认知(1人反抗效果不佳)。如果人人都这样想,就没有人站出来。我们在此探讨一种反事实可能性:如果个体知道更大的知识图景,是否会自发反抗并制服歹徒?面向公共安全的社会知识矩阵提供了有效信息。图7左边的表格展示了新西兰恐袭事件所推断的有效性边界:1个歹徒发动袭击,需要至少3个人反抗;2个歹徒时需要5人反抗;3个歹徒时需要6人反抗;4个歹徒时需要8人反抗。随着袭击的继续,每一个在场者的风险水平均在上升,反抗的必要性上升,每个人都是潜在的反抗者。针对1个歹徒袭击的真实案例情况,有效性边界是3个反抗者。这意味着,该反抗者在自己之外还需要动员2人。在紧急情况下,个体(潜在反抗者)之间务必要开展紧急联络与通信,例如通过呼唤、手势、肢体动作进行沟通。如果获得对象的反馈确认,则记为1次动员。接下来,我们在社会系统层面统计动员数量,模拟对抗过程与结果,进而开展平行模拟来推断反事实情况,计算社会结果增益。

ABM能够系统地评估学习带来的社会增益。模拟结果表明:学习在实现个体最优的同时,提升了社会群体安全水平。我们将无学习的真实结果(1个出

口)作为基准结果(baseline)来模拟泛化场景下的反事实结果,在五种情况(开放1~5个出口)下分别考察无学习和学习(反事实)的结果(图8右侧表格)。结果表明,学习机制均能促进反抗行为的涌现。在社会生活中,如果没有学习机制,个体将长期处于慌忙逃散、被动挨打的状态,这在国内外的社会安全事件中均有体现。前序事件的记忆痕迹、经验教训构成了先验知识,个体不会永远在慌乱逃散,而是会学习、反思与借鉴。长此以往,恐袭将在萌芽阶段被基层第一线及时控制,社会将变得越发安全,同步实现个体、群体的最优结果。这种社会优化不以牺牲反抗者的核心利益为代价,能够保障其生命安全。个体社会学习是二元持续互构的过程,也是社会进化的动力。



注:图的左侧列出了事实环境(1个出口开放)与反事实环境(2、3、4、5个出口开放)五种情况;右边三个表格展示了不同出口数量和枪手人数下社会学习在提升平民与反抗者生存率、降低歹徒生存率方面的效果。

图8 通过社会学习增强社会福祉

六、总结与讨论

基于理念、逻辑、实践的独特性,ABM能够在因果发现(沙莲香,2007)、社会预测、政策制定(沙莲香等,2005)方面赋能社会研究,开启一种“扎根于实用主义和复杂性的新范式”(乔天宇、邱泽奇,2020)。ABM将“行动—结构”互构研究推向了新境界。

ABM初步实现了“行动—结构”持续互构,成为发现知识、验证知识、扩展知识的有效工具。ABM能够通过反事实研究扩展场域维度,提高研究资料的利用率。ABM通过三个步骤分别完成“情境”“涌现”“学习”任务,实现互构研究。ABM独特的研究优势体现在四个方面。一是拓展了研究的边界。ABM能够模拟精微、动态、复杂的社会过程,揭示个体、群体行动的全过程。二是实现了实证资料的最大化使用。ABM基于实证资料推断出现实中未发生的情境与结果,帮助我们获得更多的信息、知识。三是能够呈现行动—结构二元持续互构的过程。个体的行为是一种情境式、索引性表达。ABM基于社会知识矩阵让个体进行动态学习,自主调整行为,进行社会互动。四是可用于发现、制定、反馈、评估社会政策,赋能社会治理。

ABM应与社会研究有机融合,丰富社会研究方法工具箱(见图9)。一方面,ABM需要与理论研究联动。理论研究的加工过程存在于研究者主观意识之中,研究结论受研究者的知识结构、研究偏好和研究能力影响。ABM与理论的整合有两个方向。其一是“ABM导向的理论研究”,即理论借助ABM实现过程化和动态化,获得证实、证伪与发展。其二是“理论导向的ABM研究”。理论的“大胆假设”能够指导ABM建模,而ABM在“小心求证”方面具有优势。另一方面,ABM还需要与定量研究联动(周文,2022),这也存在两个方向。一是“ABM导向的定量研究”。定量研究主要使用静态截面数据(边燕杰、肖阳,2014),且对数据的解读具有主观性,缺少动态过程数据支撑;ABM则能够强化可视性、过程性研究。定量研究一直受到可重复问题的困扰(王阳、肖昆,2020);ABM则实现了可重复验证,有助于此问题的解决。传统数据分析只能揭示统计上的因果关系,ABM则能够揭示行为意义上的因果机制,并验证其有效性、稳健性、可推广性。ABM与定量研究联动的第二个方向是“定量导向的ABM研究”。实证数据可为ABM提供参数、校准、验证(周文,2022),避免发生智能体模型设置的主观性问题,从而提升ABM在事实复现、反事实推断方面的稳健性。

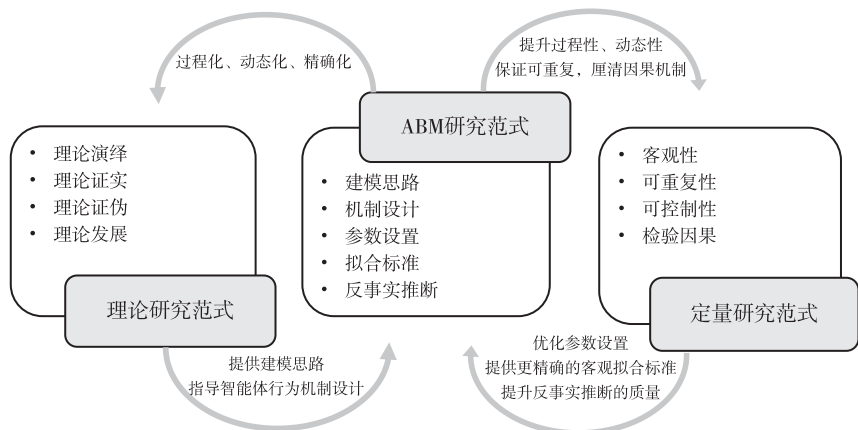


图9 ABM融入并优化社会研究生态

ABM也存在不少局限性。其一,ABM在智能体属性设置上很难确保完全的客观性、完备性,运行规则也存在过度简化的问题。其二,ABM的验证方法比较单一,除了拟合真实结果,还需要发展更多方法(贺增红,2019)。其三,ABM的有效性和通用性的张力尚未解决,ABM对特定案例越有效,其可推广性、通用性越不足。其四,当前ABM主要针对局部空间范围,还做不到直面社会真实场景的大型社会模拟。ABM存在的短板可以通过与理论、定量研究的互动逐步解决。国内学者已经开始融合质性、定量方法,进行混合研究(徐建平,2019)。展望未来,ABM应与多种方法融合、联动,构建计算社会学研究方法新生态。

参考文献:

- 阿克塞尔罗德,罗伯特,2017,《合作的复杂性:基于参与者竞争与合作的模型》,梁捷等译,上海:上海人民出版社。
- 埃尔斯特,乔恩,2019,《解释社会行为:社会科学的机制视角》,刘骥、何淑静、熊彩等译,重庆:重庆大学出版社。
- 边燕杰,肖阳,2014,《中英居民主观幸福感比较研究》,《社会学研究》第2期。
- 蔡晶晶,2016,《资源环境经济学中的基于主体建模方法最新进展》,《环境经济研究》第1期。
- 陈忱,2021,《信任的滑坡与重建——基于ABM方法的计算社会学解释》,《社会发展研究》第2期。
- 丁东红,2005,《卢曼和他的“社会系统理论”》,《世界哲学》第5期。
- 冯佳昊、韩玮、陈安,2022,《基于BDI-Agent模型的突发公共卫生事件公众应急信息传播机制建模研究》,《现代情报》第10期。
- 冯泽鲲,2021,《身份、情感与约束:本土社会地位等级形成的ABM实验》,《甘肃社会科学》第1期。
- 赫斯特洛姆,彼得,2010,《解析社会:分析社会学原理》,陈云松等译,南京:南京大学出版社。

- 贺增红,2019,《土地利用变化智能体模型研究进展》,《国土资源导刊》第2期。
- 胡安宁,2012,《倾向值匹配与因果推论:方法论述评》,《社会学研究》第1期。
- 霍兰,约翰,2006,《涌现:从混沌到有序》,陈禹等译,上海:上海科学技术出版社。
- 焦瑶光、吕寿伟,2007,《复杂性与社会分化——卢曼社会系统理论研究》,《自然辩证法研究》第12期。
- 吉登斯,安东尼,2016,《社会的构成:结构化理论纲要》,李康、李猛译,北京:中国人民大学出版社。
- 科尔曼,詹姆斯·S.,1999,《社会理论的基础》,邓方译,北京:社会科学文献出版社。
- 李昌宇、李季涛、宋小满、周茵,2016,《基于从众心理的城市轨道交通站内应急疏散仿真研究》,《铁道运输与经济》第9期。
- 梁玉成、贾小双,2016,《数据驱动下的自主行动者建模》,《贵州师范大学学报(社会科学版)》第6期。
- 刘少杰,2002,《后现代西方社会学理论》,北京:社会科学文献出版社。
- 罗家德、刘济帆、杨鲲鹏、傅晓明,2018,《论社会学理论导引的大数据研究——大数据、理论与预测模型的三角对话》,《社会学研究》第5期。
- 吕鹏,2021,《人类网络群体行为生命周期模型研究》,《湖南师范大学社会科学学报》第6期。
- 吕鹏、陈典涵,2023,《社会科学研究中的“等价共同体”问题》,《中国行政管理》第11期。
- 吕鹏、张卓、李蒙迪、陈典涵、阳厚,2021,《反恐场景中的群体效应——基于粒子运动系统的ABM仿真模拟》,《社会发展研究》第3期。
- 马妍、吴若晖、王喆好、李苗裔,2019,《基于人工智能方法的社区老年活动中心需求模拟与规划布局研究——以福州市中心城区为例》,《城市发展研究》第1期。
- 孟庆国、罗杭,2017,《基于多智能体的城市群政府合作建模与仿真——嵌入并反馈于一个异构性社会网络》,《管理科学学报》第3期。
- 帕森斯,塔尔科特,2012,《社会行动的结构》,张明德、夏遇南、彭刚译,南京:译林出版社。
- 珀尔,朱迪亚、达纳·麦肯齐,2019,《为什么:关于因果关系的新科学》,江生、于华译,北京:中信出版集团。
- 钱学森、于景元、戴汝为,1990,《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》,《自然杂志》第1期。
- 乔天宇、邱泽奇,2020,《复杂性研究与拓展社会学边界的机会》,《社会学研究》第2期。
- 丘海雄、张应祥,1998,《理性选择理论述评》,《中山大学学报(社会科学版)》第1期。
- 邱泽奇,2022,《数字社会与计算社会学的演进》,《江苏社会科学》第1期。
- 邱泽奇、黄诗曼,2021,《熟人社会、外部市场和乡村电商创业的模仿与创新》,《社会学研究》第4期。
- 沙莲香,2007,《社会心理现象计算机模拟及其方法论意义》,《社会学研究》第6期。
- 沙莲香、刘颖、王卫东、陈禹,2005,《复杂适应系统理论对危机时期民众心态的分析与模拟——重大突发事件应对措施研究》,《河南社会科学》第3期。
- 邵悦心、陈守明、王健,2019,《“营改增”政策对企业创新投入的影响研究——基于倾向得分匹配的双重差分方法》,《科研管理》第6期。
- 史雪莹、孙智诚、朱彤,2019,《基于异质性驾驶行为与碰撞的中观交通流仿真》,《中国安全科学学报》第9期。
- 苏国勋,1996,《当代西方著名哲学家评传》,济南:山东人民出版社。
- 佟庆才,1980,《帕森斯及其社会行动理论》,《国外社会科学》第10期。
- 王飞跃,2004,《平行系统方法与复杂系统的管理和控制》,《控制与决策》第5期。
- 王世龙,2017,《小世界网络中的合作行为传染仿真研究》,《系统仿真学报》第10期。
- 王双燕、邓云峰、柯霄,2021,《基于多智能体建模方法的人群应急疏散模型构建研究——以腾龙芳烃(漳

- 州)有限公司“4·6”爆炸着火重大事故疏散为例》,《中国安全生产科学技术》第11期。
- 王思斌主编,2021,《社会学教程》,北京:北京大学出版社。
- 王阳、肖昆,2020,《可重复性危机与预注册新进阶》,《科学学研究》第5期。
- 王一涵、王国成,2017,《基于ABM模型的投资者情绪与投资决策分析》,《重庆理工大学学报(社会科学)》第6期。
- 魏治勋,2011,《奥卡姆的自由意志思想及其启蒙价值》,《社会科学研究》第6期。
- 吴畏、石敬琳,2022,《“科尔曼船”及其变形与社会科学的说明逻辑》,《自然辩证法通讯》第1期。
- 谢丽、赵培忻、丁海欣,2020,《新发突发传染病驱动的谣言传播建模与仿真——双重网络下的研究》,《现代情报》第10期。
- 徐建平、张雪岩、胡潼,2019,《量化和质性研究的超越:混合方法研究类型及应用》,《苏州大学学报(教育科学版)》第1期。
- 杨方,2010,《论帕森斯的结构功能主义》,《经济与社会发展》第10期。
- 叶立国,2013,《国内系统科学内涵与理论体系综述》,《系统科学学报》第4期。
- 尹僊鹏、徐选华、陈晓红,2020,《基于多主体仿真的大群体应急决策风险致因分析》,《中国管理科学》第2期。
- 赵鼎新,2020,《论机制解释在社会学中的地位及其局限》,《社会学研究》第2期。
- 赵晓丽、姚进、刘志文、宋翠,2013,《基于ABM模型的企业低碳行为管理模式转变分析》,《管理评论》第10期。
- 郑杭生、赵文龙,2003,《社会学研究中“社会结构”的涵义辨析》,《西安交通大学学报(社会科学版)》第2期。
- 郑昊,2021,《复杂性开放系统驾驶人群众体行为仿真模拟研究》,《系统科学学报》第3期。
- 郑耀东、王国成、高乐,2022,《科技人文融合视角下公共政策研究进阶、场景及展望——基于ABM分析框架的探讨》,《中国行政管理》第9期。
- 郑作彧,2018,《齐美尔的社会学与计算机仿真技术》,“澎湃·上海书评”(https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_2473546)。
- 周文,2022,《社会仿真与大数据挖掘融合的可能与可行》,《中国社会科学报》11月16日。
- 周怡,2000,《社会结构:由“形构”到“解构”——结构功能主义、结构主义和后结构主义理论之走向》,《社会学研究》第3期。
- Abar, Sameera, Georgios K. Theodoropoulos, Pierre Lemariniere & Gregory M. P. O'Hare 2017, “Agent Based Modelling and Simulation Tools: A Review of the State-of-Art Software.” *Computer Science Review* 24.
- Bandura, Albert 2019, “The Social Learning Theory of Aggression.” In Richard A. Falk & Samuel S. Kim (eds.), *The War System: An Interdisciplinary Approach*. New York: Routledge.
- Bain, Nicolas & Denis Bartolo 2019, “Dynamic Response and Hydrodynamics of Polarized Crowds.” *Science* 363 (6422).
- Bandini, Stefania, Sara Manzoni & Giuseppe Vizzari 2009, “Agent Based Modeling and Simulation: An Informatics Perspective.” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12(4).
- Bonabeau, Eric 2002, “Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(suppl. 3).
- Brand, Jennie E. & Yu Xie 2010, “Who Benefits Most from College? Evidence for Negative Selection in Heterogeneous Economic Returns to Higher Education.” *American Sociological Review* 75(2).
- Epstein, Joshua M. 1999, “Agent-Based Computational Models and Generative Social Science.” *Complexity* 4(5).

- Epstein, Joshua M. & Robert Axtell 1996, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Washington, D. C. : The Brookings Institution.
- Fischbacher, Urs & Simon Gächter 2010, “Social Preferences, Beliefs, and the Dynamics of Free Riding in Public Goods Experiments.” *American Economic Review* 100(1).
- Grazzini, Jakob & Matteo Richiardi 2015, “Estimation of Ergodic Agent-Based Models by Simulated Minimum Distance.” *Journal of Economic Dynamics and Control* 51.
- Hamill, Lynne & Geoffrey Gilbert 2009, “Social Circles: A Simple Structure for Agent-Based Social Network Models.” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12(2).
- Janssen, Marco A. 2004, “Agent-Based Modelling.” In John Proops & Paul Safonov (eds.), *Modelling in Ecological Economics*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Langton, Christopher G. 1998, *Artificial Life: An Overview*. Cambridge: MIT Press.
- Lu, Peng, Dianhan Chen, Gang Zhang & Jieying Ding 2023, “Online Attention Dynamics: The Triangle Framework of Theory, Big Data and Simulations.” *Expert Systems with Applications* 233.
- Lu, Peng, Feier Wen, Yan Li, Dianhan Chen 2021, “Multi-Agent Modeling of Crowd Dynamics under Mass Shooting Cases.” *Chaos, Solitons & Fractals* 153.
- 2022, “Individual Behaviors, Social Learning, and Swarm Intelligence: Real Case and Counterfactuals.” *Expert Systems with Applications* 207.
- Lu, Peng, Hou Yang, Hao Li, Mengdi Li & Zhuo Zhang 2021, “Swarm Intelligence, Social Force and Multi-Agent Modeling of Heroic Altruism Behaviors under Collective Risks.” *Knowledge-Based Systems* 214.
- Makarov, Valery L. & Albert R. Bakhtizin 2018, “Supercomputer Technologies in Social Sciences: Existing Experience and Future Perspectives.” In Shuheng Chen, Yingfang Kao, Ragupathy Venkatachalam & Yerong Du (eds.), *Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance*. Cham: Springer.
- Nie, Xin, Jing Zhou, Peng Cheng & Han Wang 2021, “Exploring the Differences Between Coastal Farmers’ Subjective and Objective Risk Preferences in China Using an Agent-Based Model.” *Journal of Rural Studies* 82.
- Popper, Karl 2002, *The Logic of Scientific Discovery*. London: Routledge.
- Olson, Kristina R. & Elizabeth S. Spelke 2008, “Foundations of Cooperation in Young Children.” *Cognition* 108(1).
- Reynolds, Craig W. 1987, “Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model.” *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 21.
- Schelling, Thomas C. 1971, “Dynamic Models of Segregation.” *Journal of Mathematical Sociology* 1(2).
- Wang, Han, Li Qiu, Zhoupeng Chen, Fengqin Li, Peng Jiang, Anlu Zhang & Xin Nie 2022, “Is Rationality or Herd More Conducive to Promoting Farmers to Protect Wetlands? A Hybrid Interactive Simulation.” *Habitat International* 128.
- Ye, Mengbin, Lorenzo Zino, Žan Mlakar, Jan Willem Bolderdijk, Hans Risselada, Bob M. Fennis & Ming Cao 2021, “Collective Patterns of Social Diffusion Are Shaped by Individual Inertia and Trend-Seeking.” *Nature Communications* 12(1).

作者单位:中南大学社会计算研究中心、北京大学武汉人工智能研究院
责任编辑:杨 可