

# 微观人群数字孪生的概念、框架与研究方法

李文航, 龚建华, 黄琳, 马浩男

中国科学院空天信息创新研究院 国家遥感应用工程技术研究中心, 北京 100094

**摘要:**传统地理学/GIS对人群时空行为的研究集中在中宏观尺度, 对微观时空行为的研究相对不足。针对这一问题, 提出了微观人群数字孪生的概念及其基础逻辑框架, 从人群行为实验方法、基础行为/场景行为建模、典型应用及案例分析等方面总结了微观人群数字孪生的技术基础及其研究现状, 并从地理学的视角, 对基于系统论的人群实验思路和可信人群实验方法、以及利己—利他、个体—群体、确定—随机统一的人群行为建模方法、微观行为地理学和微观人地关系理论体系构建等未来研究进行探讨, 希望推动地理学、GIS和虚拟地理环境对微观人群时空行为理论、方法和技术的研究。

**关键词:** 遥感, 微观人群数字孪生, 微观时空行为, 人群行为模型, 虚拟地理环境, 地理学

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 李文航, 龚建华, 黄琳, 马浩男. 2024. 微观人群数字孪生的概念、框架与研究方法. 遥感学报, 28(5): 1295–1313

Li W H, Gong J H, Huang L and Ma H N. 2024. Digital twins of micro crowd: The concept, framework, and methods. National Remote Sensing Bulletin, 28(5): 1295–1313 [DOI:10.11834/jrs.20232618]

## 1 引言

地理学的研究核心是“人地关系”, 但地理学研究的支撑工具——地理信息系统 GIS (Geographic Information System) 自提出以来就侧重于对“地”的研究, 第一个地理信息系统(加拿大地理信息系统)就是面向土地等自然资源调查需求而提出。此后 GIS 的发展, 无论是数据结构(如矢量和栅格)还是空间分析方法(如叠加分析、网络分析), 大都是面向“地”的。虽然有学者呼吁发展面向“人”的 GIS (龚建华和林琿, 2006)、面向人的地学可视化(龚建华, 2008)、或者提出“人”即空间感知器 (Citizens as voluntary sensors) (Goodchild, 2007) 的理念, 但总体而言, GIS 对人的行为的研究仍显不足。随着学科的发展, 基于 GIS 发展而来的虚拟地理环境 VGE (Virtual Geographic Environments) (龚建华和林琿, 2001; 林琿等, 2003, 2010, 2016, 2018; 唐丽玉等, 2010; 闫国年, 2011) 在理念上重视对“人”的研究(林琿和龚建华, 2002)、强调“人”的参与。但在实际的研究中, 仍以地理环境

为主, 如大气污染扩散模拟(徐丙立等, 2009; 朱军等, 2008)、水土流失(赵秀芳等, 2009)、水文水生生态安全(Liang等, 2015; Wang等, 2017)、森林生长增量(Tang等, 2019)、虚拟场景的高效数据组织(蒋秉川等, 2013)和逼真渲染(龚桂荣等, 2009; 张宗佩等, 2015)等, 而关于人的研究, 则更多地侧重于多人之间的协作/协同行为(徐丙立等, 2018; 周洁萍等, 2005)和协同研讨行为(李文航等, 2007)等, 对人的时空行为的研究则相对不足。

相对而言, 时间地理学和行为地理学等地理学分支更注重对人的时空行为的研究, 尤其是以“人”为中心的社交网络、移动感知网络和地理大数据的发展, 为学者们提供了研究人群时空行为的新手段(裴韬等, 2021; Goodchild, 2007; 龚建华和林琿, 2006)。其主要思路是, 基于手机信令、公交刷卡、微博签到等地理大数据, 从统计学的角度, 在城市或区域等大中尺度的层次, 从社会感知的角度(刘瑜, 2016)研究居民出行规律(孟斌等, 2019; 王陆一等, 2019)和时空迁移规律(彭卉等, 2019), 以此分析城市空间结构

收稿日期: 2022-11-15; 预印本: 2023-03-16

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2020YFC0833103); 国家自然科学基金(编号:41971361)

第一作者简介: 李文航, 研究方向为微观人群行为模拟。E-mail: liwh@aircas.ac.cn

(潘碧麟等, 2019)及空间关系(彭卉等, 2019)等。但也发现, 目前基于大数据的人群时空行为研究(1)主要针对中大尺度的人群行为, 其目的是通过发现人群行为规律和时空特征, 研究城市空间布局等, 对微观人群行为的研究则不足;(2)使用的手段通常是统计分析的方法, 其本质是对“人”的既有时序位置数据的再挖掘过程, 而对微观时空行为及其背后的驱动机理, 即驱动行人产生这些时空轨迹和行为特征的物理机制研究较少。

随着“数字孪生”、“元宇宙”等概念的提出及应用的推进, 对人的具象行为、微观时空行为的重构需求越来越迫切。在将数字孪生用于地理时空行为的研究时, 是以个体人及时空行为的孪生为基础, 继而实现对群体人及时空行为的孪生; 而元宇宙则在数字孪生的基础上更进一步, 它是以现实世界的孪生为目标, 构建一个由现实世界映射或超越现实世界、并可与现实世界交互的虚拟世界; 元宇宙的核心是“人”, 元宇宙中所有的活动均以个体为基准尺度, 从个体视角, 在微观的虚拟地理场所中与其他个体发生互动。对个体尺度的“人”及其微观行为进行仿真, 构建行为机理驱动的虚拟人, 是数字孪生时空行为、元宇宙发展的基础。

因此, 地理学、GIS及虚拟地理环境的发展需要突破传统的研究思路, 开展个体尺度的“人”及其微观行为的研究, 而这对地理学、虚拟地理环境等学科发展都具有重要的意义: 一方面, 地理学的研究核心和研究对象是“人地关系”, “人”、“地”本应成为并行的两个研究对象, 理应提升“人”的研究地位; 另一方面, 目前地理学的研究大多集中在中宏观尺度, 理应加强对微观尺度的研究。因此, 开展微观人群时空行为的研究, 可以推动地理学、地理信息系统/地理信息科学、虚拟地理环境的发展, 甚至可以催生新的理论方法体系和新的应用领域。

## 2 微观人群数字孪生

### 2.1 微观人群数字孪生的概念和分类

微观人群数字孪生是以微观行人个体和群体的形象和行为重构为目标的数字孪生。它包含两个层次, 第一层次是在虚拟空间中构建与现实人群平行、且具有相似形象和相似行为的孪生微观人群虚体, 现实个体及人群的行为状态及行为过程在全生

命周期内都与虚体一一对应; 第二层次是基于某时刻虚拟个体或群体的行为状态, 在虚空间中进行超前计算和演化模拟, 分析、预测一段时间后的实体个体或群体的状态, 继而修正实体的行为、指导现实人群的运行。以现实人群是否在场来分, 第一层次是在场层次, 第二层次是不在场层次。

微观人群数字孪生可以分为狭义微观人群数字孪生、广义微观人群数字孪生两个阶段。狭义微观人群数字孪生是目前在现实人群的状态采集、行为解析和虚实映射尚无法达到实时同步的前提下, 采用非实时、非同步的策略, 将某时刻现实人群行为的规律和特征抽象成虚拟人群, 在后续时刻完成虚拟人群的行为计算和模拟、分析现实人群的规律, 再在未来某时刻指导现实人群的行为。狭义微观人群数字孪生在虚实之间的行为映射、计算和反馈方面存在一定的时间滞后, 但在逻辑组成及回路控制上仍符合数字孪生的理念。广义微观人群数字孪生则是在技术充分发展的基础上, 在虚实个体及人群之间实现全生命周期实时同步的状态采集、行为解析、状态映射、行为计算和回路反馈, 从而实现严格意义上的微观人群数字孪生。

### 2.2 微观人群数字孪生的逻辑框架

首先提出微观人群数字孪生研究的四元基础框架(图1)。

(1) 人群行为研究的起点是现实社会和现实人群, 其目的是优化其运行机制和运行效率;(2) 在此基础上, 通过收集真实的事件案例或实施各种行为实验, 获取典型的人群行为数据, 抽象、归纳行为规律和行为特征, 构建整个研究的数据基础;(3) 基于人群行为的规律和特征, 采用“自上而下”或“自下而上”的方式, 对人群行为进行建模, 构建显式的数学机理模型、隐式的人工智能模型等, 形成通用的基础行为模型或场景行为模型。这是整个研究的核心;(4) 基于人群行为模型, 在计算空间中构建出虚拟人群, 设定不同的情景, 驱动虚拟人群或虚拟社会运行, 对人群行为、社会运作等进行模拟、推演和预测, 获得新的规律、新的知识和新的发现, 而这些新的知识和发现可进一步反馈给现实社会和现实人群, 指导、优化其运行机制, 提升其运行效率, 或开始新一轮循环, 由此形成螺旋上升的人群行为研究和应用模式。

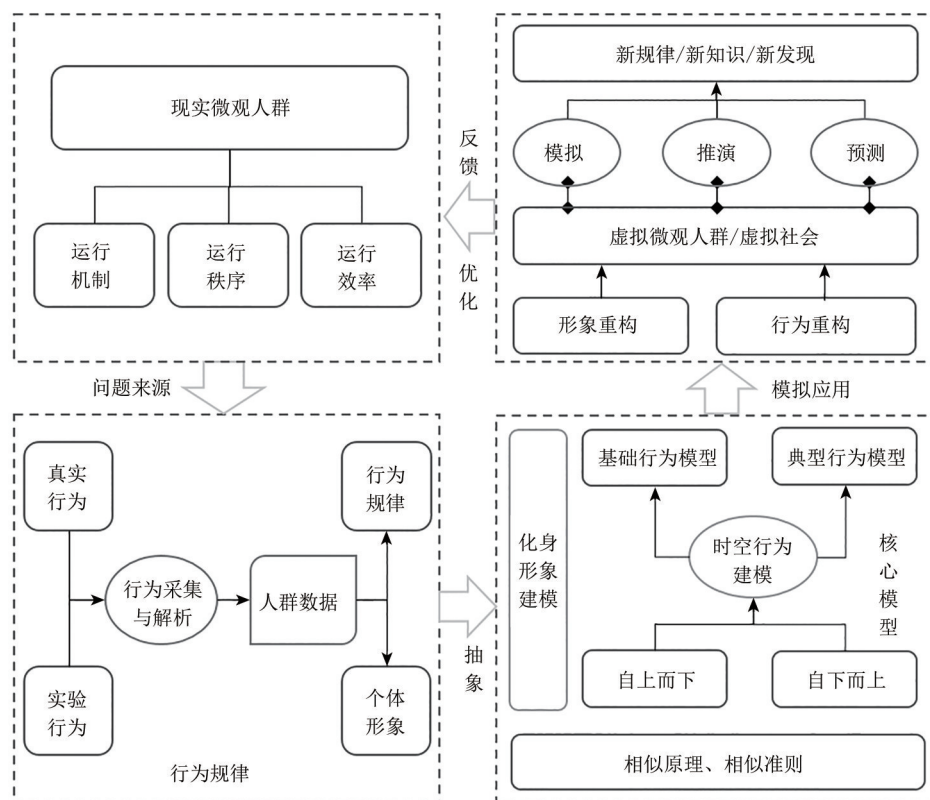


图1 微观人群数字孪生的逻辑框架

Fig. 1 Framework of micro-crowd digital twins

依据上述逻辑模型，在后续章节，我们将从微观人群时空行为实验、微观人群形象与行为建模、微观人群行为应用现状及典型案例等几个方面，分析微观人群数字孪生的技术基础及相关进展。

### 3 微观人群时空行为实验研究进展

根据实验场所和事件组成，人群行为实验可以分为以下几种类型。

#### 3.1 真实场所+真实事件

该种模式是在真实的场所中，通过视频或其他方式，记录真实事件驱动下的人群行为过程，然后通过视频解译等方式分析人群的躲避、逃生等应激反应和行为特征。这种模式可以获得最直接的行为数据。Li等（2015a）根据2013年中国雅安地震时某教室内师生的逃生视频，提取了社会力模型所需的经验参数，使之能产生与现实逃生过程相似的过程。然后基于模拟发现，疏散指导人员的存在对疏散过程有着显著的影响，有利于维持学生的平静和秩序，并可最大程度地避免踩踏等事故的发生。

#### 3.2 真实场所+模拟事件

该种模式是在真实的场所中，基于模拟的事件，驱动人群由一个空间位置移动到另一个空间位置，以视频、空间定位等方式记录人群行为过程，然后通过视频解译、轨迹提取等手段，分析个体和群体的轨迹及行为特征，用于行为模型的参数标定，或构建新的人群行为模型。这种模式最常见的是在真实场所中实施的各种疏散演习。Li等（2017）在浙江省平湖实验小学内开展了应急疏散实验，并构建数学机理模型，模拟疏散的过程，结果表明，模拟的疏散过程与现实疏散过程在定性和定量的层次都具有相似性，在此基础上，进一步分析了错峰疏散、班级布局、班级人数等对疏散效率的影响；Yao和Lu（2021）在大连一所幼儿园内开展疏散实验，计算得到儿童的自由行走速度为 $1.05 \pm 0.11$  m/s，疏散期间的平均水平行走速度为 $0.86 \pm 0.20$  m/s，在此基础上，进一步分析了儿童疏散时的速度—密度的关系；Ding等（2021）在一所学校的教室内开展了恐怖袭击疏散实验，分析了学生在面对恐怖袭击时的应急逃生行为特征，结果表明，当恐怖袭击发生时，大多数学生



在逃生前会有很长时间的迟疑，同时，袭击者的路线对撤离者的路线和出口选择有重大影响，疏散人员的主要目的不是寻找最近的出口，而是与攻击者保持安全距离。

3.3 模拟场所+模拟事件

该种模式是目前人群行为研究中最常用的一种实验方式，它通过人为构建与某真实场所相似的物理空间，以受控的方式，研究单一或少数因素影响下的人群行为。Liu等（2016）设计了一个有前后出口的空间以模拟现实的公交车，分析行人的流入行为，结果表明，入口的空间分布、不活跃人员的存在都会影响行人的流入过程；Wang等（2020）设计了12 m×3 m的空间，用于模拟现实中的一个通道，通过一系列的受控实验，分析了固定障碍物和临时障碍物（即某行人突然停止行进）对通道内单向行人流动的影响。Von Krüchten和Schadschneider（2017）设计了一个5 m×5 m的拥有单一出口的空间，用于模拟现实的房间，并以小学生为实验对象，分析群组对疏散的影响，实验结果表明，大群组可以降低疏散时间，群组内成员的合作行为，则会导致疏散出现更强的聚集性和间歇性的疏散特征。

3.4 虚拟场所+虚拟事件

该种模式针对现实实验时灾害重构不安全、参与人员召集不易、重复实验费用较高等问题，转而基于虚拟现实技术、尤其是沉浸式虚拟现实技术，在虚拟空间中构建出虚拟场景和虚拟事件，由现实的人参与虚拟实验继而产生虚拟行为的过程。这是随着虚拟现实技术的发展而迅速发展的一种人群实验模式，由于虚拟实验与现实实验具有相似性，虚拟行为也与现实行为相似。Lovreglio等（2022）基于沉浸式虚拟现实，开展了应急逃生时出口选择的行为实验。结果表明，逃生者对出口的选择会同时受对出口的熟悉程度、出口处的人流量、距离远近以及烟雾是否存在等因素的综合影响，而每一种因素都不能单独地影响出口的选择；Huang等（2021）基于沉浸式虚拟现实与眼动设备，开展了针对逃生标识的虚拟实验，获取了行人对标识的感知时间、感知视角等数据，提出了标识感知参数，并对标识系统进行了优化，然后使用社会力模型模拟了标识系统优化前后的疏散过程，证明了优化后的标识系统可较大幅度提升疏散效率。

这里，本文可以对比不同人群行为实验方式的优缺点（表1）。

表1 不同人群实验方式的对比  
Table 1 Comparison of different experiment methods

实验方式	优点	缺点
现实场所 + 现实事件	行人行为过程最为真实,是人群行为研究的最真实数据	(1)具有突发性和不可预见性 (2)全程数据采集较为困难,通常为片段 (3)属于不可控过程,行人行为受多重因素共同的影响,难以单独研究某一因素的影响
现实场所 + 模拟事件	在真实场所中开展的可控实验,可按需对有限因素进行实验,可全程采集行人的定量行为数据	(1)需要召集多人参加,有时会受人数限制,很难长期、重复实验 (2)实验时如何基于模拟的事件刺激行人情绪、确保虚拟行为与真实事件下行为的相似性,具有难度
模拟场所 + 模拟事件	(1)当无法在真实场所开展实验时,在其他空间构建与真实场所相似的物理空间 (2)可控实验,可对有限因素进行实验,可全程采集行人的定量数据	(1)需要召集多人参加,受人数的限制,很难长期、随时实验 (2)实验时如何基于模拟的事件刺激行人情绪、确保虚拟行为与真实事件下行为的相似,具有难度 (3)模型空间通常为局部空间或变态空间(即经过等比缩放或不等比缩放),需要合适的方式将行为结果映射回原有比例
虚拟场所 + 虚拟事件	(1)虚拟实验的成本较低 (2)完全可控实验,场所空间和事件过程的重构相对容易,实验者可单人、多人协同、甚至与虚拟人群一起开展实验 (3)可在虚拟空间中重构在现实世界中从常见到极少出现的事件情景,以此研究不同事件驱动下的人群行为 (4)实验过程中行人的精确位置、动作、视点、甚至心跳、血压等均可被完整、同步地记录下来,实验过程可随时回放	(1)如何在虚拟空间中使用虚拟事件真正激发行人的情绪,并产生合理的行为,是其中的难点 (2)现有的虚拟现实设备或多或少存在分辨率、视场角等问题,虚拟引擎不同投影方式存在场景变形等问题,会影响行人的认知。因此,需要对虚拟行为的相似性进行定性、定量评价,并在必要时进行校正 (3)不同于上述3种实现方式,虚拟实验只存在信息流,多感知的重构也存在一定的难度,目前以视觉、听觉重构为主,其他感觉尤其是触觉的重构较难,使得实验者在虚拟体验时或多或少存在感觉缺失问题,一定程度上也会影响参与者的感知

## 4 微观人群建模

### 4.1 微观人群形象建模

微观人群数字孪生需要在虚拟空间中重构现实人群的虚拟化身,化身是现实人在数字孪生空间中的“载体”或“代理”,其建模包括:

(1) 化身形象建模。和现实世界一样,数字孪生空间中的微观人群需要具备外在形象,包括表情、外貌、衣着、体态、身高等。广义数字孪生时,化身形象应保持与现实个体相同,狭义数字孪生时,化身形象应与现实个体相同或相似。数字孪生化身形象建模的代表性方法有3D扫描法和单图片重构法等。这些方式各有优缺点:其中,3D扫描法通过采集人体的三维点云,可以精确地重构现实人的真实外形,但其成本较高、较为费时;单图片重构法则是基于单张二维图片,使用人工智能等方式,推算其深度信息,可以快速、批量、廉价地生成人体外形三维模型,但因其三维信息是估算的,故而与真实的人体会存在一定的误差。

(2) 化身动作建模。指化身在数字孪生空间中与其他化身发生交互时的具象动作,包括肢体动作(如走、跑、跳、挥手等)、表情动作(如笑容、愤怒等)、语音动作(如说话、喊叫等)等。当现实人群在场时,可以通过将基于光学动作捕捉或惯性动作捕捉的现实人的动作实时映射到虚拟化身,实现虚实动作的同步;而当现实人群不在场时,化身的动作可以由数学模型或人工智能算法来控制 and 驱动,实现对真实人的动作、与其他虚拟化身交互过程的模拟。

### 4.2 微观人群时空行为建模

#### 4.2.1 基础人群行为模型

##### 4.2.1.1 人群行为模型的建模原则

人群行为模型是人群行为研究的核心。总体而言,人群行为在建模时会遵循以下原则。

(1) 通用性,所有的基础行为模型都做了最大限度的精简,定位于最基本的空间位移行为,即基于某种理论或算法,为某时刻的行人求取合适的速度,更新一定时间步长后的位置,而更复杂的上层逻辑(如全局寻径等)则不包括在基本模型中。

(2) 所有的基础行为模型都至少包括3个基本要素:行人的目标点、行人的行人邻居(可简称为“人”)、和障碍物邻居(可简称为“地”),正是在这3种基本要素的作用下,行人才可求解到合适的速度,朝向目标逐渐前行。

(3) 在时间上,所有的基础行为模型都是时间相关且离散模型,即行人速度的计算是基于某时刻的状态完成的,而其状态更新(包括位置和速度)则是在后续时间步长内完成,在该时间步长内,行人被认为是匀速运动的。因此,从总体上看,相当于整个时间轴被离散化成一段一段的时间单元,而时间步长的大小可称为时间分辨率。

(4) 在空间上,基础行为模型可根据所选架构和理念不同分为空间连续模型和空间离散模型,空间连续模型不需要离散计算空间,所有的行人状态的计算只与绝对位置相关;而离散模型则将空间离散化成多个网格,所有涉及位置的计算均以网格中心代替,行人的位移方向也受到一定限制(通常只向邻居网格移动),因此,网格的划分方式(如三角形、正方形、正六边形等)以及网格大小都会影响计算精度,可称之为空间分辨率。

##### 4.2.1.2 经典的基础人群行为模型

总体而言,人群行为模拟模型大概可以分为宏观模型和微观模型两种。宏观模型采取“自上而下”的建模方式,即从整体对人群行为进行建模,典型模型有连续模型(Continuum Model)(Hughes, 2002; Treuille 等, 2006);微观模型则采取了“自下而上”的模式,首先对个体行为进行建模,然后实例化出若干个体,通过个体之间的交互,形成群体行为,典型的微观模型有社会力模型 SFM (Social Force Model)、ORCA 模型 (Optimal Reciprocal Collision Avoidance)、以及面向个体的人工智能模型 AI (Artificial Intelligence) 等。因本文主要针对微观人群行为模型,故选择社会力模型、ORCA 模型、AI 模型等进行详述并对比。需要说明的是,元胞自动机模型和多智能体模型等只是一种计算框架,将其应用于人群行为研究,仍需要具体的人群行为模型进行驱动,因此,不属于基础的人群行为模型,不在本文的讨论范围内。

(1) 社会力模型。社会力模型(Helbing 和 Molnár, 1995; Helbing 等, 2000)将行人的运动抽象成是若干作用力共同作用的结果,包括目标

对人的吸引力、行人之间的作用力、行人与障碍物之间的作用力，在这些作用力合力的驱动下，行人个体逐渐向目标点移动，同时维系整个人群系统的相对平衡（图2）。

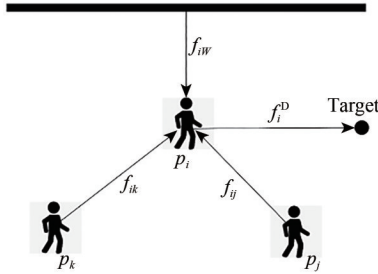


图2 社会力模型示意图

Fig. 2 The concept of social force model

基础社会力模型的计算公式为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i^0 + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_W f_{iW} \quad (1)$$

式中， $f_i^0$ 为目标吸引力， $f_{ij}$ 为行人之间作用力， $f_{iW}$ 为行人与障碍物之间的作用力，具体计算为

$$f_i^0 = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

$$f_{ij} = \left( A_i \exp\left(\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right) + kg(r_{ij} - d_{ij}) \right) n_{ij} + Kg(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t t_{ij} \quad (3)$$

$$f_{iW} = \left( A_i \exp\left(\frac{r_i - d_{iW}}{B_i}\right) + kg(r_i - d_{iW}) \right) n_{iW} + Kg(r_i - d_{iW}) (v_i \cdot t_{iW}) t_{iW} \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)中， $v_i$ 是行人的实际运动速度， $v_i^0(t)$ 是质量为 $m$ 的行人在 $t$ 时刻沿期望方向 $e_i^0(t)$ 的速率， $\tau_i$ 是行人调整实际速度至期望速度所需时间。 $r_i$ 为行人 $i$ 的半径， $r_{ij} = r_i + r_j$ 为行人 $i$ 和行人 $j$ 的半径之和， $d_{ij}$ 为两个行人质心之间的距离， $n_{ij}$ 为行人 $j$ 指向行人 $i$ 的单位法向量， $t_{ij}$ 为切向单位法向量， $\Delta v_{ji}^t$ 则是在切向上两个行人的速度差。其中 $A_i$ 和 $B_i$ 是位置参数， $k$ 是挤压系数， $K$ 为摩擦系数。 $d_{iW}$ 为行人到墙面的垂直距离， $n_{iW}$ 为墙面 $W$ 到行人 $i$ 的单位法向量， $t_{iW}$ 则为人与墙面切向单位法向量。

社会力模型可重现典型的拥挤拱形、瓶颈效应等人群现象，已被用于多种场合中的疏散过程模拟。Li等(2017)改进了社会力模型，模拟了多层教学楼中学生的应急疏散过程，分析了不同班级在教学楼中的分布对疏散效率的影响；Liu(2018)构建了行人和恐怖分子的相互作用模型，研究了公共区域中发生恐怖袭击时的人群疏散过

程，并分析了恐怖袭击发生时，恐怖分子人数、逃生出口数量、恐怖袭击发起的位置等因素对伤害的影响。虽然社会力模型应用较为广泛，但它需要较多的经验参数，同时，由于未考虑行人之间的碰撞避让机制，导致模拟出的人群普遍存在弹性碰撞现象，有待进一步改进（于萍，2021）。

(2) 速度障碍 (Velocity Obstacle) 模型。速度障碍模型着重考虑了行人之间的碰撞避让机制，其中比较典型的衍生模型是ORCA (van den Berg等, 2011; Snape等, 2011)，它解决了行人彼此靠近时的震荡问题。其原理是，它以速度障碍模型为基础，将行人行为从位置空间转换到速度空间，以行人与行人之间、行人与障碍物之间不发生碰撞为目标，充分考虑行人之间的避让责任分配，在速度空间中求解出最优的行进速度，驱动行人向目标点行进，进而模拟人群的时空活动过程。具体而言，1) 对于两个行人A和B（图3(a)），以不发生碰撞为目标，求取满足此要求的速度空间，从中再优选出双方速度变化最小的值 $u$ （式(5)），并由A和B均分该速度变化量，改变各自的行进速度；2) 对于多个行人，根据1)中原理，构建出最佳速度区域集合（图3(b)），基于线性规划算法，计算出满足某行人与其行人邻居、障碍物邻居之间避免碰撞的最优速度，作为该行人的行进速度。

$$u = \left( \argmin \left( \|v - (v_A^o - v_B^o)\| \right) - (v_A^o - v_B^o) \right) \quad (5)$$

式中， $u$ 为行人A和B共担的避碰速度m/s； $v$ 为避碰速度集合中的某一速度m/s； $v_A^o$ 为行人A的最佳速度m/s； $v_B^o$ 为行人B的最佳速度m/s。

Poulos等(2018)基于ORCA模型模拟了学校中的疏散过程，并与真实演习数据对比，证明了ORCA算法的正确性；Krasuski和Krenski(2019)将ORCA模型与烟火的模拟相结合，研究了概率疏散方法、路径发现、局部运动、以及逃生者与火的相互作用模型，用于火灾逃生的概率风险评估。

(3) 强化学习人工智能模型。近年来，强化学习RL (Reinforcement Learning) 作为人工智能领域的一个研究热点，已经在游戏、自动驾驶等领域都取得了丰硕的成果，其中尤以DeepMind研发的AlphaGo (Silver等, 2016) 击败了围棋的顶尖人类选手最为轰动。

一个典型的基于强化学习的个体行为模型如



图4所示, 它将强化学习系统抽象为“强化学习智能体”个体和“外部环境”两个部分, 强化学习的过程就是智能体个体通过与外部环境的动态交互中进行不断的尝试、犯错、积累经验, 以达到期望目标的一个过程。一个强化学习任务通常用一个马尔可夫决策过程来描述, 其目的是得到最优策略的 $\pi$ 。马尔可夫决策过程可以表述为一个元组 $(S, A, P, R, \gamma)$ , 其中 $S$ 为有限数量的状态集,  $A$ 为动作集合,  $P$ 为状态转移概率矩阵,  $R$ 为

奖励函数,  $\gamma$ 为折扣因子。在 $t$ 时刻, 强化学习智能体得到外部环境的状态 $S_t$ , 并初始化动作—价值函数 $q_\pi(S_t, A_t)$ , 计算当前所有动作 $A_i (A_i \in A)$ 在状态 $S_t$ 下的价值 $Q_t$ , 根据价值 $Q_t$ 采取动作 $A_t$ , 将环境转移到一个新的状态 $S_{t+1}$ , 智能体个体则在改变环境的过程中, 获得回报 $R_t$ , 其公式如下:

$$q_\pi(S_t, A_t) = E \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} \right] \quad (6)$$

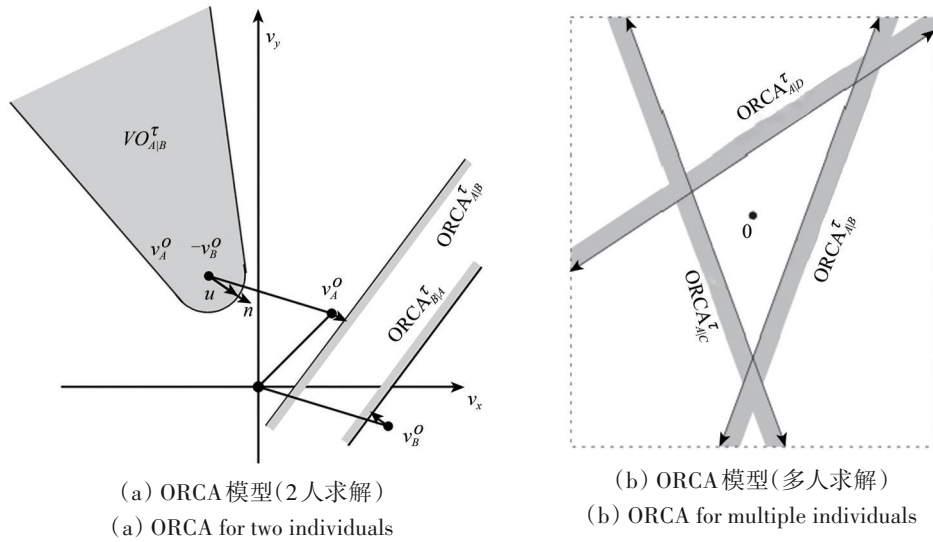


图3 基础 ORCA 模型

Fig. 3 The concept of ORCA model

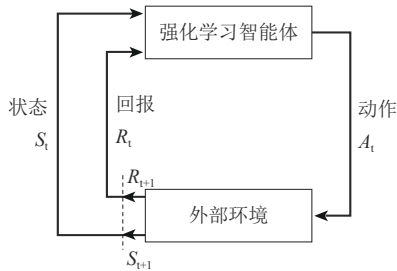


图4 强化学习的经典模型

Fig. 4 The concept of reinforcement learning

更新智能体个体的状态 $S=S_{t+1}$ 。迭代结束后, 查询 $S$ 是否为终态, 如果不是, 则重复上述过程; 如果是, 则计算得到最终的最优价值—动作函数, 公式如下:

$$q^*_\pi(S_t, A_t) = \max_{\pi} [q_\pi(S_t, A_t)] \quad (7)$$

从而进一步得到最优策略:

$$\pi^*(a|s) = \begin{cases} 1, & a = \arg \max [q^*(S_t, A_t)] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

智能体个体的学习目标是使累积回报的期望值最大化, 在时间的演化过程中, 智能体个体的

经验积累体现在其选择策略上, 该策略是从状态到每种可能行为的选择概率之间的映射, 而状态到行为映射的算法主要有3种: 1) 针对有限的离散状态—动作空间的价值函数算法, 如经典的Q-learning算法 (Watkins和Dayan, 1992) 和深度Q网络 (Deep Q-network, DQN) (Mnih等, 2015) 等。2) 针对连续状态—动作空间的学习—映射算法, 如Policy gradient方法。3) 联合值迭代和策略梯度的Actor-Critic方法, 如近端策略优化算法PPO (Proximal Policy Optimization) (Schulman等, 2017) 等。

基于人工智能的人群行为建模与模拟越来越多的被用于各种行为的重构。Martinez等 (2014) 建设了以强化学习方法为基础的人群模拟框架; Torrey等 (2010) 比较了基于规则的Agent和利用强化学习的SARSA算法构建的Agent, 并认为后者逼真效果更好。

(4) 典型基础微观人群行为模型的对比。这里, 我们将上述3种典型的微观人群行为模型的优缺点对比于表2。

表2 典型基础微观人群行为模型的对比

Table 2 Comparison of typical micro crowd behavior models

模型名称	优点	缺点
社会力模型	(1)理念直观简单,容易改进,是目前人群行为研究中使用较多的基础模型 (2)可重构多种与现实特征相似的群体行为,如快即是慢、拱形拥堵	(1)所需经验参数较多,在实际应用中较难精确对其进行标定 (2)作用力的存在使行人成为弹性个体,个体在相互靠近时会出现弹性碰撞现象,人群较为密集时也会存在弹性震荡现象 (3)根据力来计算速度,需要较多的开方运算,计算量较大 (4)是无序行为模型,单纯地以个体为基本单位、以利己为准则运动,在任何瓶颈处一旦发生拥堵就会出现拱形拥挤现象 (5)从力学角度对特殊行为方式建模难度较大,且多种特殊行为方式组合并非简单的力叠加,相互制约和影响较大
ORCA 模型	(1)原生具有碰撞避让能力,不会出现弹性碰撞现象 (2)所需经验参数较少,较易对模型进行标定	(1)模型理念相比于社会力模型较为复杂 (2)与社会力模型一样,也是基于个体利己的无序行为,在瓶颈节点处也会出现无序拥挤现象
AI 模型	(1)对随机行为的重构具有较强的优势,符合现实行为随机的特点 (2)对于无法使用明确规则或需要巨量规则描述的复杂行为尤为适用	(1)模型的训练对算力要求较高 (2)合理地选取和设置训练参数,以便模型快速收敛,需要较高的专家经验和专家知识 (3)是隐式模型,如何以显式的方式固化得到的知识是难点 (4)基于特定场景训练的模型迁移到其他场景时会存在问题 (5)对于大型、复杂空间的行为训练存在难度

4.2.2 典型的场景行为建模

不同于基础行为模型,场景行为模型是在基础行为模型上扩展而成的、面向特殊空间的行为模型,这些空间通常比较简单但极具代表性,不同场景行为的组合可进一步形成更复杂的场景行为。从地理学的角度,典型的场景人群行为至少

包括3个要素:“人”、“地”、“事件”,我们称之为“人—地—事”三要素模型,其中,“人”是核心和主体,“地”为人群行为发生的空间,限制着人群行为的边界,而“事”则是驱使人群产生特定行为的动力。本文总结了一些典型的场景行为汇总于表3。

表3 典型场景行为列表

Table 3 Typical scenario crowd behaviors

行为模型	行为描述	代表文献
多目标优选	从多个可选目标(如出口)中优选出最佳目标的行为	Haghani等,2014;Sticco等,2017
寻径及路线优选	当到达目标的过程中有多个可选路线时,基于A*,Dijkstra、或蚁群等算法,优选出最佳路线的行为,最佳路线可能是距离最短,可能是时间最短,也可能是最舒适(人数最少),还可能是最安全等	Cisek和Kapalka,2014
折返行为	当对多个目标抉择不时,或因场景的动态变化,会导致行人在前往某目标的过程中转而向其他目标行进,出现折返行为	Gao等,2020
瓶颈节点行为	在狭窄通道或出入口处形成的拥挤行为	Tang等,2016
交叉通行行为	双向或多向行人在某空间中交叉通行,形成渠化效应	Van den Berg等,2011
踩踏行为	由于人群过于拥挤,或者前方行人突然停止行进,导致其被撞倒并引发的踩踏现象	Li等,2015b,2016;Huo等,2022;Yi等,2020
上下扶梯行为	上下扶梯并站立在扶梯上跟随扶梯共同行进的行为	Li等,2014
群组行为	多个行人因社会关系一同行进的过程,同一群组内的行人具有相似的行为方向和行为特征;群组会保持一定的队形,并会依据地理空间的变化而发生动态形变	Huang等,2021;von Krüchten和Schadschneider,2017
跟随行为	一个或多个行人以前方行人为目标,连续跟随其前行的行为	Li等,2016b;Lopez-Carmona和Garcia,2022
从众行为	参照周围邻居的行为(如行走方向、行走速度等),在行为上保持基本一致,但位置上没有严格的先后顺序	Liu和Mao,2022
排队行为	多个行人以队列的形式行进,具有严格的次序,后方行人不可超越前方行人;前后方行人之间保持最小间距,并在行动上保持一致,即前方行人停止行进时,后方行人也需要停止行进,而前方行人继续行进时,后方行人也相应继续行进。排队行为是一种典型的有序行为	Li等,2022;Arita和Schadschneider,2011



续表

行为模型	行为描述	代表文献
汇聚行为	从多个通道汇聚到一个通道的行为,行人会因空间变窄而不可避免地产生拥挤	Liang 等,2020;Chen 等,2012
礼让行为	某个或某些行人礼让其他行人优先通行的行为	本文 5.2 节
绕障行为	当行进方向上存在障碍物时,主动避开而非与其碰撞,并选择较优的路线绕过障碍物继续行进的行为	Qu 等,2018

5 微观人群行为的应用研究

5.1 典型应用方向及进展

微观人群数字孪生、微观人群时空行为建模与模拟的目的是为了重构人群的时空行为过程,继而通过挖掘“人”、“地”、“事”三要素的特征及其规律,探寻优化策略,以提升人地系统的运

行效率。目前,微观人群行为的研究空间多为人员密集场所,包括有明确空间边界限定和约束的室内场所(如学校、地铁、公交枢纽、邮轮、办公楼等),以及范围稍大但仍可与个体尺度匹配的室外场所(如景区、街区等)(Li 等,2017;于萍,2021)。本文总结了典型的应用方向,列于表 4。

表 4 典型应用方向及研究思路  
Table 4 Typical applications and the ideas

类型	应用方向	研究思路	代表文献
地	空间定量优化、瓶颈节点定位	该应用的主要思想是从整体效率出发,优化地理环境:首先,基于人群模拟实验,定位影响人群通行效率的拥堵点和瓶颈节点;然后,设定不同的瓶颈节点宽度和形状,分别实施情景模拟,在其他参数不变的前提下,以整体空间通行能力最优为目标,优选通行效率最高的尺寸或形状;此外,地理空间布局的优化如出口的位置调整、出口的数量优化也是该应用的重要研究内容	于萍,2021; Wu 等,2022
	疏散标识系统的优化	标识系统是地理环境的重要组成部分,用于引导人群在空间中通行,标识系统的合理性是影响通行效率的重要因素。该应用主要针对标识的空间布局、标识大小、色调配置、摆放位置、高度/间隔、动态变化(灯光闪烁等)、声音引导、与环境的对比度和显著性、易懂性等进行优化,以使人群的通行效率更高	Ran 等,2014; Ma 等,2019; Huang 等,2021
人	疏散路线优化	当场景中有多个可选疏散路线时,基于基础的路线搜索算法如 Dijkstra 算法、A*算法、或人工智能算法,考虑静态的因素(如道路宽度、路线距离、道路的宽度等)和动态的因素(如灾害过程对疏散路线的动态阻隔、路线上人群流量的动态变化、安全性的变化等),以距离最短、时间最短、最安全、最舒适等为目标,选出最优的疏散路线	Haghani 等,2014; Sticco 等,2017; Cisek 和 Kapalka,2014
	人群布局优化	针对人群在地理空间的布局(如不同班级在教学楼中的分布),以整体空间的疏散效率最高为目标,综合考虑疏散时不同人群的速度差异、不同楼层人群之间可能的拥挤等因素,分析人群在空间中的最优布局	Li 等,2017
	指挥引导人员的设置	分析引导指挥人员的存在与否、人员数量、空间分布等对通行效率的影响	Cao 等,2016
	疏散策略优化	针对不同的疏散策略,如集中疏散、错峰疏散、礼让疏散、绕行疏散、无序疏散、排队疏散等,以整体空间或局部空间的疏散效率最高或安全性最高为目标,优选出最优的疏散策略	Li 等,2017; 于萍,2021;
事	不同事件的影响	针对引起人群出现大规模疏散的典型事件,如火灾、地震、爆炸、洪水、恐怖袭击(包括人员袭击、生物毒气袭击等)等,对不同事件驱动下的人群行为进行模拟,通过事件阻塞路线、促使人群行为发生改变,将事件传导给人群,继而获得量化的疏散预案	Li 等,2017; Ding 等,2021;

5.2 典型应用案例分析——学校疏散数字孪生

本文选择浙江省平湖实验小学的 3 层教学楼(图 5)作为研究案例,探讨狭义数字孪生人群的应用。图 5(c)是校园的整体布局。3 层楼的教学楼位于校园的左上方,如图 5(a)所示。在教学楼中,有两个楼梯,这里称为左楼梯和右楼梯。每层楼有 4 间教室,分别名为 R1、R2、R3 和 R4。教室的布局如图 5(b)所示。教室有两扇门(后

门和前门),分别与楼层走廊相连。

本文基于修正的 ORCA 模型(Li 等,2022),对该栋教学楼内的应急疏散过程进行了模拟,其中模拟了两种疏散模式:无序疏散模式(图 6)和有序排队礼让疏散模式(图 7)。无序疏散是比较传统的疏散方式,疏散的师生不需要过多的行为约束,由学生依据自己的判断规划逃生路线,并以利己的原则进行疏散;而有序排队礼让疏散行

为是一个班级由1位老师在前方领队,班级的学生排成两列,跟随在教师身后,整个疏散过程由教师控制,并且为了避免拥挤和混乱,当教师发现某通道被其他班级占据时,她会主动停下来,礼让正在通行的班级,直至其他班级完全通过,然后再跟随这些班级身后进行疏散。排队礼让疏散时,教师与学生的行为也会保持一致:当教师停

止行进时,后方学生也都停止行进,并保持严格的次序,列队在教师身后等待;当教师继续疏散时,后方学生也继续疏散。结果表明,无论是无序排队疏散行为的模拟结果,还是有序排队礼让疏散行为的模拟结果,都与现实疏散行为非常相似,实现了由“实”到“虚”的映射。

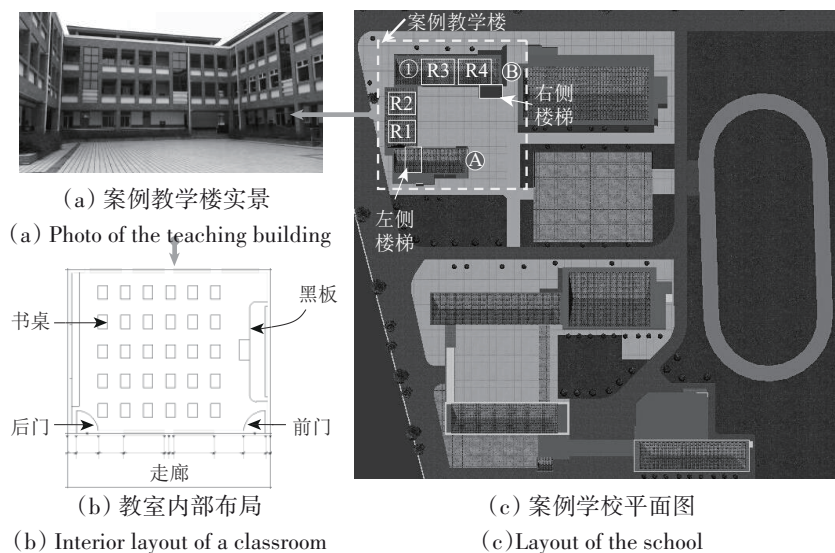


图5 研究区平面图

Fig. 5 The layout of the study area

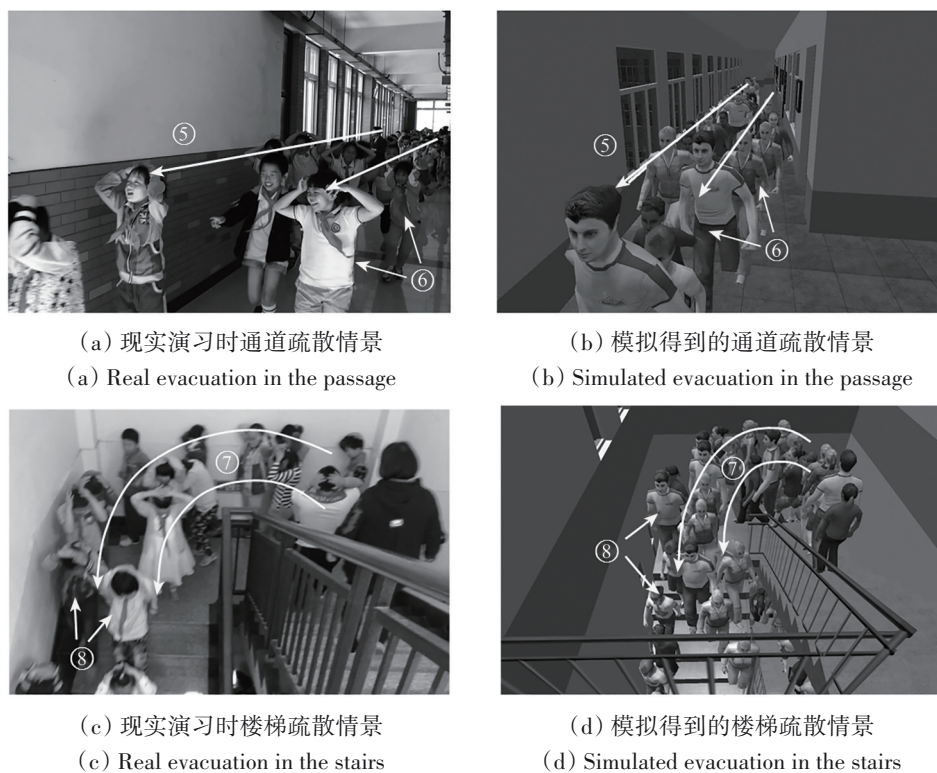


图6 无序疏散行为的模拟结果与现实疏散对比

Fig. 6 Comparison of the disordered behaviors in the real drill and in the simulations



图7 礼让排队疏散行为模拟结果与现实疏散对比  
Fig. 7 Comparison of the orderly behaviors in the real drill and in the simulations

同时，本文还可以将行为模拟的过程以沉浸式VR设备（图8（a））、AR设备（图8（b））为终端，构建交互式实验平台，用于真人参与式的人群疏散行为实验、空间认知实验等。

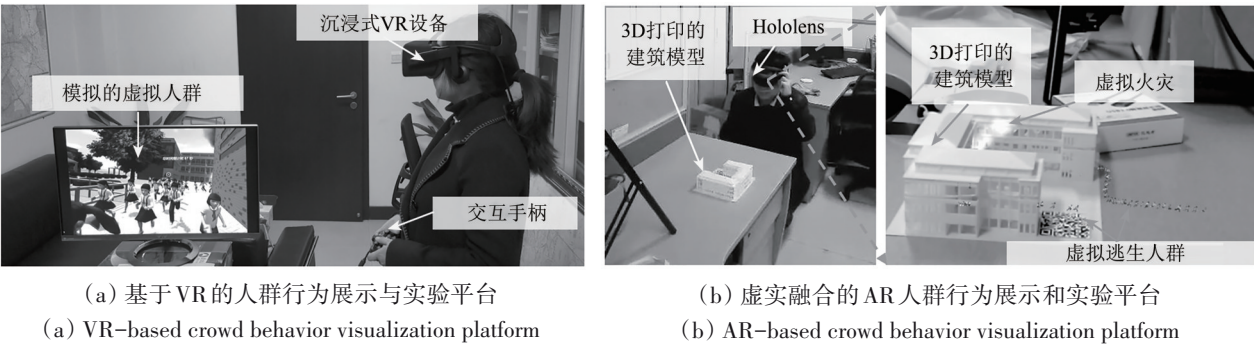


图8 基于VR/AR的人群行为虚拟展示平台  
Fig. 8 The visualization of simulated crowd behaviors based on VR and AR

在此基础上进行各种情景模拟与优化分析，如班级布局的优化（图9（a））、疏散策略的优化（图9（b））等，并根据这些模拟结论和相关规律向现实行为进行反馈，指导现实学校的班级布局、辅助疏散预案的制定等，完成“虚”到“实”的反馈，由此实现了狭义层次数字孪生。



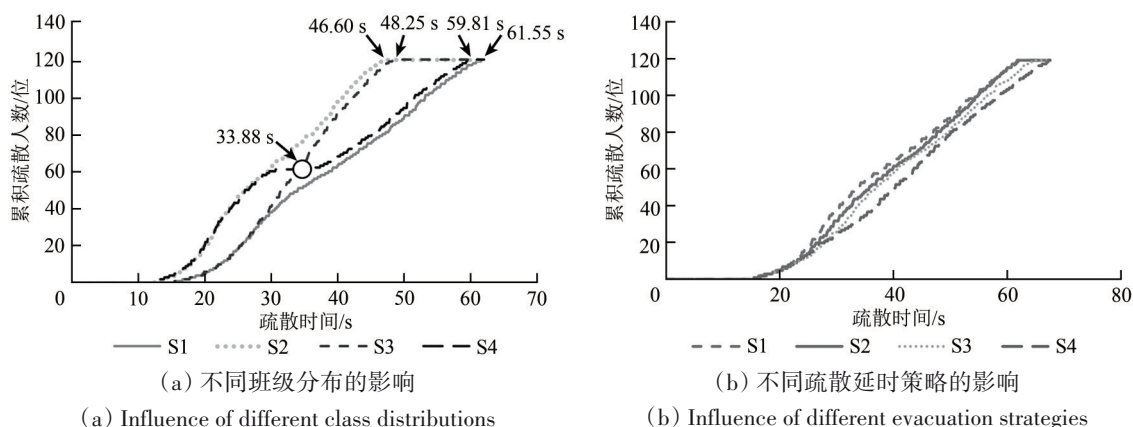


图9 基于疏散模拟的疏散预案与空间优化分析(Li等,2017)

Fig. 9 Optimization of grade deployment and evacuation plans (Li et al., 2017)

## 6 地学视角下微观人群数字孪生的未来研究思考

### 6.1 微观人群行为实验的新方法、新理念

(1) 构建微观人群行为的实验科学体系。目前的人群实验大多是基于还原论思想的实验,其基本思路是构建可控实验,分解出一种或几种因素单独进行实验,得出其影响规律,在建模时再把这些因素合在一起。但现实人群行为却是多种因素共同作用的结果,将单一因素分解、实验再综合,能否还原出真实的人群行为,这是值得商榷的。因此,构建人群行为实验本身的理论方法体系和流程规范,科学合理地设计、组织实施人群行为实验,将是人群行为实验结果可信、可验、可用的前提。

(2) 构建可信微观人群行为实验。虚拟现实,尤其是沉浸式虚拟现实,在场景构建、情景模拟、行为重构等方面与现实过程具有相似性,这一观点已被国内外研究者普遍接受。但将其用于人群行为实验时,还存在一个非常关键和核心的问题,那就是基于虚拟现实的人群行为实验能在多大程度上替代现实实验,或者说,能在多大程度上反映现实行为的特征。这是因为,在真实事件导致的应急行为中,同时存在着物质流和信息流,存在因安全和生存本能而激发的应急行为和应激反应。但在虚拟现实实验中,只存在信息流,可能因为主观和客观的因素,导致参与者的行为出现偏差:1) 主观因素可以是参与者先入为主地认知到其所参与的虚拟实验不存在威胁其人身安全的

风险,从而导致情绪不积极、不充分等问题,也导致行为实验的结果与真实行为存在偏差。2) 客观因素主要是实验设备的硬件问题,譬如虚拟现实设备的分辨率较低、视场角较小、甚至虚拟场景的投影坐标系本身存在变形,从而导致某些虚拟对象无法辨认或无法看到(如较远处的指示标识或文字),或对虚拟对象的状态(如大小形状、远近距离、相对位置、相对角度等)和状态变化(如相对速度、变化趋势等)的观察存在误差;此外,虚拟场景构建时可能还存在对某些感觉刺激的缺失,如缺少声音或声音错位以及缺少触觉等,以上因素都会影响参与者对场景的感知及场景状态的判断,继而影响行为的决策,导致虚拟实验的结果与现实行为存在一定的偏差。因此,需要1) 对虚拟行为实验的结果进行评定、尤其是定量评定,评定虚拟行为实验可在多大程度上替代现实实验,评定虚拟人群行为实验的结果能在多大程度上反应真实的人群行为特征。2) 在此基础上,发展相应的算法,对虚拟行为实验的结果进行定量纠偏和校正,使之可用于构建人群行为建模、或对现实人群行为规律进行研究、指导现实行为或现实地理环境的改进。事实上,不仅仅是虚拟人群实验,现实场景中的其他人群实验模式也存在类似的问题,因此,构建可信人群行为实验及标定体系是未来人群行为研究深入发展的关键。

### 6.2 微观人群行为建模的新思路

(1) 利己与利他行为的统一。目前,人群行为建模和模拟的关注点大多集中在应急行为,如

灾害事件或突发事件发生后的应急疏散行为，这些行为通常将人看作离散的个体，个体与个体之间强调的是竞争关系；个体行为则是以利己为目的做行为假定，个体会想尽一切办法达成自己的目的，甚至在未达到自己目的的时候，不惜牺牲其他个体的利益，如频繁地挤压、推动其他个体，以获取于自己最优的疏散过程，从而导致模拟的应急行为是以无序为特征的。但元宇宙、数字孪生应用兴起后，其目标是要在虚拟空间中重构或平行重构人类世界及其发展过程，因此，除了应急行为这一特殊情景外，日常行为将成为人群行为建模和模拟的另一主要内容，甚至是占比更大的研究内容，而日常行为的重要属性就是其社会性和规则性：个体不是孤立的存在，而是与其他个体存在或多或少的社会性的联系；社会性的直接体现是规则性，人类社会是一个复杂巨系统，之所以能有序运行，是因为人类社会已经形成了或明确或潜在的社会规则和社会秩序，这些规则和秩序约束了人群的行为，从而使得人类的行为也是规则的、有序的，而这些规则、有序行为则具有“利他性”特征，典型的社会规则约束下的利他行为如有序排队行为、礼让行为、群组行为等。因此，未来应该加强对这些规则性、有序性的行为进行研究，并在利己行为和利他行为之间建立平衡，在数字孪生、元宇宙等应用的支持下，从个体、人群、社会的尺度和层次，实现对现实社会运行机制和运行效率的优化。

(2) 个体与群体行为的统一。目前，人群行为的研究大多是基于个体的，对群体行为的研究虽有所涉及，但总体仍存在不足；此外，关于个体行为与群体行为之间的关联、演变机制等问题仍需要进一步的探讨，这些问题主要表现为：个体行为是如何在群体尺度上得以涌现的？如何定义涌现过程中的量变—质变效应？某一个体行为的改变（包括确定性行为的改变和随机性行为的改变）是如何影响群体行为的，是存在蝴蝶效应，抑或是个体行为的变化在涌现的过程中会消失？涌现过程中的稳定性如何？最后，现有的人群行为模型演化出了宏观模型和微观模型。其中，宏观行为模型对群体规律的定义比较容易，在大尺度、大规模人群行为的计算上的优势明显，但对个体行为的细节刻画不足；微观行为模型则对个

体行为的建模较为细致，但对群体规律的重构存在一定的不确定性，所需计算量也较大。因此，如何整合各尺度模型的优点，发展新的行为模型，实现个体与群体的统一，在宏微观尺度无缝关联和无级切换，且兼顾计算平衡，也是未来的研究方向。

(3) 确定与随机行为的统一。确定性模型主要是数学机理模型，随机性模型主要是人工智能模型。其中，人工智能模型用于人群行为的建模是非常有潜力的研究方向，目前人工智能主要针对个体行为，但现实行人不仅有个体意识，还会有全局意识，因此，如何使用包括强化学习在内的人工智能模型对个体进行训练，使其具有个体行为的同时，兼有整体观和全局观，这是对人工智能行为模型的一个挑战。此外，我们将数学机理行为模型与人工智能（强化学习）行为模型比较于表5，可以发现，数学机理行为模型与强化学习行为模型在建模思想、建模方式、以及对行人行为的模拟等方面都有较大的互补性，二者存在结合的可能：利用数学机理模型已经固化的人群行为的知识和规律，可以辅助强化学习神经网络的参数取值，还可以辅助强化学习进行训练，使学习无需从0开始，降低训练难度和训练时间；而强化学习行为模型则可以弥补数学机理模型确定性较强而随机性不足的缺点。因此，未来的研究可以将二者融合，以数学机理模型作为确定性行为的基础，以强化学习模型作为随机性行为建模的基础，从而发展兼有确定性和随机性的微观行为模型。

表5 数学机理模型与强化学习模型的比较  
Table 5 Comparison of mathematical models and reinforcement learning models

对比项	数学机理模型	强化学习模型
核心类型	行为机理模型	神经网络模型
是否最优解	最优解模型	非最优解模型
擅长	擅长确定性行为模拟	擅长随机性行为模拟, 概率判定
建模方式	专家知识, 专家思维	自我学习, 自我演化
显式/隐式	显式参数模型	隐式网络模型

(4) 还原论与系统论的统一。与人群行为实验类似，目前的人群行为建模，无论是自上而下的方式还是自上而下的方式，其基本思路也是基于还原论的思想，将人群行为抽象成一种或几种关键因素，分析这些因素的影响规律，在建模时

再将这些因素组合在一起。但真实的人群系统却是多种因素综合作用的结果，将影响因素分解后再行组装，是否能真正地反映真实的人群系统的特征，也是值得进一步商榷的。事实上，人群系统是一个复杂巨系统，在建模时也应该从系统论的层次，对各种因素进行综合考虑，从而将建模理论从还原论进化到系统论，或者说实现还原论与系统论的统一，极有可能可以发展出新的人群行为模型，并有望解决目前人群行为模型存在的尺度离散、确定/随机离散等问题。

(5) 地学视角的建模理念。地理学在宏观尺度存在着地理学第一定律（空间相关性定律）和地理学第二定律（地理异质性定律），那么在微观尺度的人群行为是否也存在类似的空间相似性的规律？这里，微观人群行为的空间相似性至少包含两层含义：其一，同一个地理场景中的微观行为具有相似性。微观行为是有一定的距离相关性的，许多模型也体现了这一特征，比如社会力模型，其在计算人际作用力时，即采用了“距离越远作用力越小，距离越近作用力越大”的思想，换言之，距离越近的行人，彼此之间的影响较大，行为的协调和妥协越大，再加之距离越近，所处的地理环境越相似，行为往往也更能表现出相似的特征；其二，相似地理场景中的微观行为具有相似性。行人在相似的地理环境中往往也会表现出相似的行为，而这也将是在某一环境中建立的模型、得出的结论可以推广应用到其他相似环境中去的理论基础。

6.3 “微观人地关系”理论新体系的构建

传统地理学对“人地关系”的研究偏重于中宏观尺度，在“数字孪生”、“元宇宙”等面向个体的应用越来越受重视的今天，尤其是微观人群数字孪生研究的基础上，是否有可能对传统地理学进行突破，构建“微观人地关系”包括理论框架、实验方法、观测机制、认知理论、机理模型及相关应用在内的理论和方法体系？这将是一个全新的、有挑战性但却可能产生较大突破的研究领域：(1) 首先，从理论上讲，相比于传统中宏观尺度的“人地关系”，微观人地关系更关注微观尺度下的个体与个体之间的行为作用机制、个体与周围微环境的交互机制、以及二者影响下的微观时空行为机制，其建模思路是全新的；(2) 其次，在微观的尺度下，更有可能从机理的角度对行为及时间演进方式进行建模，以表达更为精准的行为细节、更精确的时空活动。在微观的尺度下，个体将是具象的、有行为能力的人，其所处的地理环境也将不再是抽象的点、线，而是有宽度、有形状、有边界的具体对象，其建模尺度是全新的；(3) 最后，这些面向个体尺度的“微观人地关系”的研究，更能与“数字孪生”、“元宇宙”等应用相结合，其应用领域也将是全新的，而通过应用的推进与反馈，则可进一步发展微观人地关系理论、技术及应用体系，也是对地理学“人地关系”研究范畴、研究理念的深化和拓展。将微观人地关系的理念和传统中宏观人地关系的研究简要对比如表6所示。

表6 宏微观人地关系的理念特征对比  
Table 6 Comparison of macro and micro man-land relationship

对比项	微观人地关系	中宏观人地关系
尺度	微观个体尺度	中宏观尺度(如全国、省、市等)
行为(“人”)	个体行为、精细行为,强调个体的异质性,尤其是个体与个体之间的相互作用机理、甚至具体到个体的动作	侧重于大规模人群的群体行为、群体特征和变化规律,较少考虑人群的异质性
空间(“地”)	个体视角下的微观空间,特别关注空间细节,如通道的形状、边界、宽度等,特别关注室内微空间	主要在室外较大范围的空间,强调抽象的拓扑,如通道以无宽度的“线”来描述
时间尺度	较短时间跨度,对行为的建模可精确到秒、分钟等级别	时间跨度较长,通常是天、周、月甚至年
群体结构	更关注异质性和人群结构	通常将人群视为均质
认知方式	个体认知、具身认知	空间分异、空间认知
建模方式	可以采用“自下而上”的理念,以速度为基础进行数学建模,从运动机理的层次,对行人的微观活动定量描述	通常从整体的层次、基于统计规律进行建模
事件	可以对微观事件的精准时空过程及微观交互进行描述	通常关注事件的整体特征,较少关注过程细节



同时, 微观人地关系的研究与传统中宏观人地关系的研究是相辅相成的, 微观人地关系的研究可将中宏观人地关系进一步细化, 甚至可以利用微观机理模型, 对中宏观人地关系的具体过程进行重构和模拟, 或通过模拟对缺失的过程进行补充, 而反过来, 中宏观人地关系则可把控微观人地关系的整体规律, 为微观人地关系的建模边界、验证提供参考, 从而形成地理学在宏观、中观、微观尺度上对“人地关系”研究的完整链条。

最后, 还需要说明的是, 微观人群行为的研究需要包括计算机科学、地理学、心理学、行为学、安全科学、实验科学等在内的多个学科、多个领域的共同参与。相信, 随着数字孪生、元宇宙等新型应用的落地和实用, 必将使微观人群行为的研究更加深入, 相关理论、方法和技术体系也会更完善, 在人类生活、社会发展和运行优化中的作用也会更重要。

## 参考文献 (References)

- Arita C and Schadschneider A. 2011. Dynamical analysis of the exclusive queueing process. *Physical Review E*, 83(5): 051128 [DOI: 10.1103/PhysRevE.83.051128]
- Cao S C, Song W G and Lv W. 2016. Modeling pedestrian evacuation with guiders based on a multi-grid model. *Physics Letters A*, 380(4): 540-547 [DOI: 10.1016/j.physleta.2015.11.028]
- Chen C K, Li J and Zhang D. 2012. Study on evacuation behaviors at a T-shaped intersection by a force-driving cellular automata model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(7): 2408-2420
- Cisek M and Kapalka M. 2014. Evacuation route assessment model for optimization of evacuation in buildings with active dynamic signage system. *Transportation Research Procedia*, 2: 541-549 [DOI: 10.1016/j.trpro.2014.09.094]
- Ding N, Ma Y H, Dong D P and Wang Y D. 2021. Experiment and simulation study of emergency evacuation during violent attack in classrooms. *Journal of Safety Science and Resilience*, 2(4): 208-221 [DOI: 10.1016/j.jnlssr.2021.09.002]
- Gao J, Zhang J J, He J, Gong J H and Zhao J C. 2020. Experiment and simulation of pedestrian's behaviors during evacuation in an office. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 545: 123749 [DOI: 10.1016/j.physa.2019.123749]
- Gong G R, Du Y and Ouyang F. 2009. Method of achieving terrain verisimilitude in virtual geo-environment. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 26(6): 458-461 (龚桂荣, 杜莹, 欧阳峰. 2009. 虚拟地理环境中地面逼真感的实现方法. *测绘科学技术学报*, 26(6): 458-461) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2009.06.017]
- Gong J H and Lin H. 2001. Virtual Geographic Environments-A Geographic Perspective on Online Virtual Reality. Beijing: Higher Education Press (龚建华, 林琿. 2001. 虚拟地理环境——在线虚拟现实的地理学透视. 北京: 高等教育出版社)
- Gong J H and Lin H. 2006. Exploring human-oriented GIS. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 31(8): 704-708 (龚建华, 林琿. 2006. 面向地理环境主体 GIS 初探. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 31(8): 704-708) [DOI: 10.3321/j.issn:1671-8860.2006.08.012]
- Gong J H. 2008. Exploring human-oriented geovisualization. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 12(5): 772-779 (龚建华. 2008. 面向“人”的地学可视化探讨. *遥感学报*, 12(5): 772-779) [DOI: 10.11834/jrs.200805101]
- Goodchild M F. 2007. Citizens as voluntary sensors: spatial data infrastructure in the world of Web 2.0. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research*, 2: 24-32
- Helbing D, Farkas I and Vicsek T. 2000. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803): 487-490 [DOI: 10.1038/35035023]
- Haghani M, Ejtemai O, Sarvi M, Sobhani A, Burd M and Aghabayk K. 2014. Random utility models of pedestrian crowd exit selection based on SP-off-RP experiments. *Transportation Research Procedia*, 2: 524-532 [DOI: 10.1016/j.trpro.2014.09.070]
- Helbing D and Molnár P. 1995. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5): 4282-4286 [DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282]
- Huang L, Gong J H and Li W H. 2021. A perception model for optimizing and evaluating evacuation guidance systems. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2): 54 [DOI: 10.3390/ijgi10020054]
- Hughes R L. 2002. A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(6): 507-535 [DOI: 10.1016/S0191-2615(01)00015-7]
- Huo F Z, Li Y F, Li C and Ma Y P. 2022. An extended model describing pedestrian evacuation considering pedestrian crowding and stampede behavior. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 604: 127907 [DOI: 10.1016/j.physa.2022.127907]
- Jiang B C, You X, Xia Q and Tian J P. 2013. Voxels and the Construction of a virtual geographic environment. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 38(7): 875-878 (蒋秉川, 游雄, 夏青, 田江鹏. 2013. 体素在虚拟地理环境构建中的应用技术研究. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 38(7): 875-878) [DOI: 10.13203/j.whugis2013.07.004]
- Krasuski A and Krenski K. 2019. A-Evac: the evacuation simulator for stochastic environment. *Fire Technology*, 55(5): 1707-1732 [DOI: 10.1007/s10694-019-00827-7]
- Li M F, Zhao Y X, He L R, Chen W X and Xu X F. 2015a. The parameter calibration and optimization of social force model for the real-life 2013 Ya'an earthquake evacuation in China. *Safety Science*, 79: 243-253 [DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.018]
- Li W H, Gong J H, Yu P and Shen S. 2016a. Modeling, simulation and analysis of group trampling risks during escalator transfers. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 444: 970-984

- [DOI: 10.1016/j.physa.2015.10.091]
- Li W H, Gong J H, Yu P, Shen S, Li R and Duan Q S. 2014. Simulation and analysis of individual trampling risk during escalator transfers. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 408: 119-133 [DOI: 10.1016/j.physa.2014.03.071]
- Li W H, Gong J H, Yu P, Shen S, Li R and Duan Q S. 2015b. Simulation and analysis of congestion risk during escalator transfers using a modified social force model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 420: 28-40 [DOI: 10.1016/j.physa.2014.10.044]
- Li W H, Gong J H, Zhang L H and Zhou J P. 2007. Mobile oriented collaborative virtual geographic studio. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 32(9): 817-820 (李文航, 龚建华, 张利辉, 周洁萍. 2007. 面向移动的协同虚拟地理研讨室. 武汉大学学报(信息科学版), 32(9): 817-820) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-8860.2007.09.017]
- Li W H, Li Y, Yu P, Gong J H, Fan H K, Zhang D, Huang L and Zhang G Y. 2022. Modeling orderly queuing behavior with bending effects. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 601: 127608 [DOI: 10.1016/j.physa.2022.127608]
- Li W H, Li Y, Yu P, Gong J H and Shen S. 2016b. The Trace Model: a model for simulation of the tracing process during evacuations in complex route environments. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 60: 108-121 [DOI: 10.1016/j.simpat.2015.09.011]
- Li W H, Li Y, Yu P, Gong J H, Shen S, Huang L and Liang J M. 2017. Modeling, simulation and analysis of the evacuation process on stairs in a multi-floor classroom building of a primary school. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 469: 157-172 [DOI: 10.1016/j.physa.2016.11.047]
- Liang J M, Gong J H and Li Y. 2015. Realistic rendering for physically based shallow water simulation in virtual geographic environments (VGEs). *Annals of GIS*, 21(4): 301-312 [DOI: 10.1080/19475683.2015.1050064]
- Liang M D, Xu J, Jia L M and Qin Y. 2020. An improved model of passenger merging in a Y-shaped passage. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 540: 123233 [DOI: 10.1016/j.physa.2019.123233]
- Lin H and Gong J H. 2002. On virtual geographic environments. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 31(1): 1-6 (林琿, 龚建华. 2002. 论虚拟地理环境. 测绘学报, 31(1): 1-6) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2002.01.001]
- Lin H, Gong J H and Shi J J. 2003. From maps to GIS and VGE—A discussion on the evolution of the geographic language. *Geography and Geo-Information Science*, 19(4): 18-23 (林琿, 龚建华, 施晶晶. 2003. 从地图到地理信息系统与虚拟地理环境——试论地理学语言的演变. 地理与地理信息科学, 19(4): 18-23) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2003.04.005]
- Lin H, Huang F R, Lu X J, Hu M Y, Xu B L and Wu L. 2010. Preliminary study on virtual geographic environment cognition and representation. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 14(4): 822-838 (林琿, 黄凤茹, 鲁学军, 胡明远, 徐丙立, 武磊. 2010. 虚拟地理环境认知与表达研究初步. 遥感学报, 14(4): 822-838) [DOI: 10.11834/jrs.20100415]
- Lin H, Zhang C X, Chen M and Zheng X Q. 2016. On virtual geographic environments for geographic knowledge representation and sharing. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1290-1298 (林琿, 张春晓, 陈旻, 郑新奇. 2016. 论虚拟地理环境对地理知识的表达与共享. 遥感学报, 20(5): 1290-1298) [DOI: 10.11834/jrs.20166185]
- Lin H, Zhu Q and Chen M. 2018. The being and non-being generate each other, and the virtual and the real are mutually interactive—The progress of virtual geographic environments (VGE) studies in last 20 years. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(8): 1027-1030 (林琿, 朱庆, 陈旻. 2018. 有无相生 虚实互济——虚拟地理环境研究 20 周年综述. 测绘学报, 47(8): 1027-1030) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20180202]
- Liu Q. 2018. A social force model for the crowd evacuation in a terrorist attack. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 502: 315-330 [DOI: 10.1016/j.physa.2018.02.136]
- Liu X D, Song W G, Fu L B and Fang Z M. 2016. Experimental study of pedestrian inflow in a room with a separate entrance and exit. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 442: 224-238 [DOI: 10.1016/j.physa.2015.09.026]
- Liu Y. 2016. Revisiting several basic geographical concepts: a social sensing perspective. *Acta Geographica Sinica*, 71(4): 564-575 (刘瑜. 2016. 社会感知视角下的若干人文地理学基本问题再思考. 地理学报, 71(4): 564-575) [DOI: 10.11821/dlxb201604003]
- Liu Y X and Mao Z L. 2022. An experimental study on the critical state of herd behavior in decision-making of the crowd evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 595: 127087 [DOI: 10.1016/j.physa.2022.127087]
- Lopez-Carmona M A and Garcia A P. 2022. Adaptive cell-based evacuation systems for leader-follower crowd evacuation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 140: 103699 [DOI: 10.1016/j.trc.2022.103699]
- Lovreglio R, Dillies E, Kuligowski E, Rahouti A and Haghani M. 2022. Exit choice in built environment evacuation combining immersive virtual reality and discrete choice modelling. *Automation in Construction*, 141: 104452 [DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104452]
- Lü G N. 2011. Geographic analysis-oriented Virtual Geographic Environment: framework, structure and functions. *Science China Earth Sciences*, 54(5): 733-743 (闾国年. 2011. 地理分析导向的虚拟地理环境: 框架、结构与功能. 中国科学: 地球科学, 41(4): 549-561) [DOI: 10.1007/s11430-011-4193-2]
- Ma P J, Jiang Y Q, Zhu J F and Chen B K. 2019. The effect of escape signs on the pedestrians evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 534: 121133 [DOI: 10.1016/j.physa.2019.121133]
- Martinez-Gil F, Lozano M and Fernández F. 2014. MARL-Ped: a multi-agent reinforcement learning based framework to simulate pedestrian groups. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 47: 259-275 [DOI: 10.1016/j.simpat.2014.06.005]
- Meng B, Huang S and Yin Q. 2019. Spatial and temporal distribution

- characteristics of residents' depart times elasticity in Beijing. *Journal of Geo-information Science*, 21(1): 107-117 (孟斌, 黄松, 尹芹. 2019. 北京市居民地铁出行出发时间弹性时空分布特征研究. *地球信息科学学报*, 21(1): 107-117) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180216]
- Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, Rusu A A, Veness J, Bellemare M G, Graves A, Riedmiller M, Fidjeland A K, Ostrovski G, Petersen S, Beattie C, Sadik A, Antonoglou I, King H, Kumaran D, Wierstra D, Legg S and Hassabis D. 2015. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540): 529-533 [DOI: 10.1038/nature14236]
- Pan B L, Wang J H, Ge Y and Ma M G. 2019. Spatial structure and population flow analysis in Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on Weibo check-in big data. *Journal of Geo-information Science*, 21(1): 68-76 (潘碧麟, 王江浩, 葛咏, 马明国. 2019. 基于微博签到数据的成渝城市群空间结构及其城际人口流动研究. *地球信息科学学报*, 21(1): 68-76) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180235]
- Pei T, Huang Q, Wang X, Chen X, Liu Y X, Song C, Chen J and Zhou C H. 2021. Big geodata aggregation: connotation, classification, and framework. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(11): 2153-2162 (裴韬, 黄强, 王席, 陈晓, 刘亚溪, 宋辞, 陈洁, 周成虎. 2021. 地理大数据聚合的内涵、分类与框架. *遥感学报*, 25(11): 2153-2162) [DOI: 10.11834/jrs.20210480]
- Peng H, Du Y Y, Yi J W, Liu Z and Wang H M. 2019. Mining urban-rural spatial interaction pattern from mobile data of Beijing. *Journal of Geo-Information Science*, 21(1): 97-106 (彭卉, 杜云艳, 易嘉伟, 刘张, 王会蒙. 2019. 基于手机数据的北京市城市与近郊交互模式挖掘. *地球信息科学学报*, 21(1): 97-106) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180262]
- Poulos A, Tocornal F, De La Llera J C and Mitrani-Reiser J. 2018. Validation of an agent-based building evacuation model with a school drill. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 97: 82-95 [DOI: 10.1016/j.trc.2018.10.010]
- Qu Y C, Xiao Y, Wu J J, Tang T and Gao Z Y. 2018. Modeling detour behavior of pedestrian dynamics under different conditions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 492: 1153-1167 [DOI: 10.1016/j.physa.2017.11.044]
- Ran H C, Sun L H and Gao X Z. 2014. Influences of intelligent evacuation guidance system on crowd evacuation in building fire. *Automation in Construction*, 41: 78-82 [DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.022]
- Schulman J, Wolski F, Dhariwal P, Radford A and Klimov O. 2017. Proximal policy optimization algorithms. *arXiv: 1707.06347* [DOI: 10.48550/arXiv.1707.06347]
- Silver D, Huang A, Maddison C J, Guez A, Sifre L, van den Driessche G, Schrittwieser J, Antonoglou I, Panneershelvam V, Lanctot M, Dieleman S, Grewe D, Nham J, Kalchbrenner N, Sutskever I, Lillicrap T, Leach M, Kavukcuoglu K, Graepel T and Hassabis D. 2016. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 529(7587): 484-489 [DOI: 10.1038/nature16961]
- Snape J, Berg J V D, Guy S J and Manocha D. 2011. The hybrid reciprocal velocity obstacle. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(4): 696-706 [DOI: 10.1109/TRO.2011.2120810]
- Sticco I M, Frank G A, Cerrotta S and Dorso C O. 2017. Room evacuation through two contiguous exits. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 474: 172-185 [DOI: 10.1016/j.physa.2017.01.079]
- Tang L Y, Chen C C and Lin D. 2010. HLA-based virtual forest environment construction. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 35(3): 353-355 (唐丽玉, 陈崇成, 林定. 2010. 利用HLA的分布式虚拟森林环境构建. *武汉大学学报(信息科学版)*, 35(3): 353-355) [DOI: 10.13203/j.whugis2010.03.024]
- Tang L Y, Peng X M, Chen C C, Huang H Y and Lin D. 2019. Three-dimensional forest growth simulation in virtual geographic environments. *Earth Science Informatics*, 12(1): 31-41 [DOI: 10.1007/s12145-018-0356-4]
- Tang M, Jia H F, Ran B and Li J. 2016. Analysis of the pedestrian arching at bottleneck based on a bypassing behavior model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 453: 242-258 [DOI: 10.1016/j.physa.2016.02.044]
- Torrey L. 2010. Crowd simulation via multi-agent reinforcement learning. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment*, 6(1): 89-94 [DOI: 10.1609/aiide.v6i1.12390]
- Treuille A, Cooper S and Popović Z. 2006. Continuum crowds. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3): 1160-1168 [DOI: 10.1145/1141911.1142008]
- van den Berg J, Guy S J, Lin M and Manocha D. 2011. Reciprocal  $n$ -body collision avoidance//14th International Symposium of Robotic Research. Astoria Hotel: Springer: 3-19 [DOI: 10.1007/978-3-642-19457-3\_1]
- Von Krüchten C and Schadschneider A. 2017. Empirical study on social groups in pedestrian evacuation dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 475: 129-141 [DOI: 10.1016/j.physa.2017.02.004]
- Wang L Y, Wu J S and Li W F. 2019. Usage patterns and driving mechanisms of public bicycle systems in small and medium-sized cities based on space-time data mining. *Journal of Geo-information Science*, 21(1): 25-35 (王陆一, 吴健生, 李卫锋. 2019. 中小城市公共自行车出行模式与驱动机制研究. *地球信息科学学报*, 21(1): 25-35) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180199]
- Wang W L, Zhang J J, Li H C and Xie Q M. 2020. Experimental study on unidirectional pedestrian flows in a corridor with a fixed obstacle and a temporary obstacle. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 560: 125188 [DOI: 10.1016/j.physa.2020.125188]
- Wang Z, Fang C and Wang Y. 2017. Design of aquatic ecological security evaluation system based on virtual geographic environment//Proceedings of the 2017 7th International Conference on Manufacturing Science and Engineering. Zhuhai: Atlantis Press: 51-54 [DOI: 10.2991/icmse-17.2017.10]
- Watkins C J C H and Dayan P. 1992. Q-learning. *Machine Learning*, 8: 279-292 [DOI: 10.1007/BF00992698]



- Wu P H, Wang Y, Jiang J C, Wang J H and Zhou R. 2022. Evacuation optimization of a typical multi-exit subway station: overall partition and local railing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 115: 102425 [DOI: 10.1016/j.simpat.2021.102425]
- Xu B L, Lin H, Zhu J and Deng L H. 2009. Construction of a virtual geographic environment for air pollution simulation in Pearl River Delta. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 34(6): 636-640 (徐丙立, 林珏, 朱军, 邓丽华. 2009. 面向珠三角空气污染模拟的虚拟地理环境系统研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 34(6): 636-640)
- Xu B L, Rao Y, Chen Y T, You L and Lin H. 2018. Role model-based geo-collaboration of virtual geographic environments. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(10): 1580-1587 (徐丙立, 饶毅, 陈宇婷, 游兰, 林珏. 2018. 使用角色构建虚拟地理环境群体协同方法. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(10): 1580-1587) [DOI: 10.13203/j.whugis20160499]
- Yao Y S and Lu W. 2021. Children's evacuation behavioural data of drills and simulation of the horizontal plane in kindergarten. *Safety Science*, 133: 105037 [DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105037]
- Yi J X, Pan S L and Chen Q. 2020. Simulation of pedestrian evacuation in stampedes based on a cellular automaton model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 104: 102147 [DOI: 10.1016/j.simpat.2020.102147]
- Yu P. 2021. Modeling and simulation of cruise emergency evacuation process for layout optimization. *China Safety Science Journal*, 31(9): 142-149 (于萍. 2021. 邮轮应急疏散过程建模、模拟与布局优化分析. *中国安全科学学报*, 31(9): 142-149) [DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.09.020]
- Zhang Z P, Wan G and Liu J. 2015. Research of the space environment simulation technology. *Engineering of Surveying and Mapping*, 24(2): 15-18, 23 (张宗佩, 万刚, 刘静. 2015. 虚拟地理环境中天空环境仿真技术研究. *测绘工程*, 24(2): 15-18, 23) [DOI: 10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2015.02.004]
- Zhao X F, Li Z B, Li P and Wen J L. 2009. Spatial cognition in virtual environment. *Science of Surveying and Mapping*, 34(S1): 35-37 (赵秀芳, 李占斌, 李鹏, 汶建龙. 2009. 水土流失动态监测体系中虚拟地理环境认知功效与评价. *测绘科学*, 34(S1): 35-37)
- Zhou J P, Gong J H, Chen Z and Du W. 2005. Study on collaborative virtual geographic environment system for multi-user interaction and communication. *Geography and Geo-Information Science*, 21(5): 33-37 (周洁萍, 龚建华, 陈铮, 杜蔚. 2005. 协同虚拟地理环境中多用户交流交互模式及实现. *地理与地理信息科学*, 21(5): 33-37) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2005.05.008]
- Zhu J, Lin H, Lin W S and Xu B L. 2008. Study on virtual geographic environment for simulation of air pollution dispersion. *Journal of System Simulation*, 20(S1): 176-179, 186 (朱军, 林珏, 林文实, 徐丙立. 2008. 用于大气污染扩散模拟的虚拟地理环境构建研究. *系统仿真学报*, 20(S1): 176-179, 186)

## Digital twins of micro crowd: The concept, framework, and methods

LI Wenhong, GONG Jianhua, HUANG Lin, MA Haonan

*National Engineering Research Center for Geomatics, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*

**Abstract:** traditional geography/GIS research on the spatiotemporal behavior of people focus on the meso and macro scale, while the research on the micro spatiotemporal behavior is relatively insufficient. To address this problem, first, a new concept of micro crowd digital twins is proposed. The idea is to map the real crowd and their behaviors into the virtual space, calculate and simulate the crowd behavior, mine the evolution mechanism, discover the operation rules, predict the trends, locate the abnormalities in advance, propose optimization strategies, and improve the efficiency and safety of real crowd and real society. The micro crowd digital twins can be divided into two stages, namely, special digital twins and general digital twins, according to whether they are synchronized in time between the real crowd and the virtual one.

Then, the technical basis and research status of micro crowd digital twins are summarized from the aspects of crowd behavior experimental approaches, basic behavior/scenario behavior modeling, and typical applications. (1) According to the types of places and events, the crowd behavior experiment approaches can be divided into "real place-real event," "real place-simulated event," "simulated place-simulated event," and "virtual place-virtual event." (2) The status of crowd behavior modeling is summarized, which can be divided into basic micro crowd behavior models and scenario behavior models. The basic micro crowd behavior models are to model individual behaviors in a simple and abstracted space, with general interactions between individuals and obstacles. The scenario behavior models are to model crowd behaviors in complex and detailed space, with comprehensive interactions between crowds, environments, and geo-events. The advantages and disadvantages of typical basic micro crowd behavior models such as Social Force Model, Velocity Obstacle model (ORCA model), and Artificial Intelligence (AI) model are analyzed. (3) A typical case of micro crowd digital twins in a school evacuation is analyzed. The platform of digital twins of crowds is developed to simulate and examine the disordered behaviors and orderly behaviors, and the spatial layout of the school and the crowd evacuation strategies are optimized. In this manner, the special micro crowd digital twin is realized.

Finally, the future research of crowd behavior experiments, crowd modeling, and theoretical system of micro human-land relationship

are awaited from the perspective of geography. (1) New approaches such as credible micro crowd behavior experiment should be developed. In the crowd behavior experiments, the behavior errors caused by subjective and objective factors in crowd experiments need to be calibrated qualitatively and quantitatively, and the deviation correction algorithm should be developed to obtain reliable experimental results. (2) New micro crowd behavior modeling ideas should be proposed. Behavior models should focus on not only emergency disordered behaviors but also those orderly behaviors under the constraints of social rules and social orders in common daily conditions. The rules of individual “self-interest” used in traditional behavior modeling also need to be expanded, and the crowd interests should be introduced to build behavioral models considering “self-interest” and “altruism” rules. (3) The deterministic and stochastic characteristics of crowd behaviors should be considered. In view of the complementary characteristics of AI behavior models and traditional mathematical behavior models as well as the advantages of AI model in stochastic modeling, they can be combined to achieve this goal. (4) On the basis of the digital twinning of micro crowd, the innovative theoretical system of “micro human-land relationship” can be developed in the future, which will break through the traditional concept of “macro human-land relationship” modeling, and will make the theoretical system and modeling system of the study of human-land relationship in geography more complete. Then, the research of geography, geographic information system, and virtual geographic environments on modeling of micro crowd behaviors, micro spaces, and the applications can be promoted.

**Key words:** remote sensing, digital twins of micro crowd, micro spatiotemporal crowd behavior, behavior modelling, VGE, geography

**Supported by** National Key Technology Research and Development Program of China (No. 2020YFC0833103); National Natural Science Foundation of China (No. 41971361)