

数字孪生人文地理环境

林琿¹, 徐丙立², 肖昕¹, 陈宇婷³

1. 江西师范大学 地理与环境学院, 南昌 330022;

2. 陆军装甲兵学院 信息通信系, 北京 100072;

3. 北京大学深圳研究生院 城市规划与设计学院, 深圳 518055

摘要:人文地理环境是人类活动与地理环境交互作用形成的综合环境, 环境复杂且脆弱性高。引入数字孪生方法, 构建依实驱虚、依虚控实、虚实协同演进的人文地理学问题研究新模式, 对避免扰乱现实环境、深度探索复杂问题、优化现实地理问题调控方案等, 具有重大的学科意义和应用价值。在综述国内外研究现状的基础上, 提出数字孪生人文地理环境基本概念, 详细阐述概念内涵, 同时构建了数字孪生人文地理环境系统技术框架。指出数字孪生人文地理环境是由现实人文地理环境、虚拟人文地理环境以及二者之间的交互作用组成, 通过对地理环境、人类活动、人地交互作用等的孪生构建与虚实交互, 实现现实环境与虚拟环境之间的虚实协同、优势互补、共同演进。以数字孪生白鹿洞书院为典型案例, 示范数字孪生人文地理环境构建方法、主要功能和结果形式。本文旨在抛砖引玉, 借此引起对数字孪生与人文地理环境耦合研究的思考, 共同推动人文地理学发展。

关键词: 遥感, 数字孪生, 人文地理环境, 虚拟地理环境, 虚实协同, 白鹿洞书院

中图分类号: P208/P2

引用格式: 林琿, 徐丙立, 肖昕, 陈宇婷. 2024. 数字孪生人文地理环境. 遥感学报, 28(5): 1131-1144

Lin H, Xu B L, Xiao X and Chen Y T. 2024. Digital twin human geographic environment. National Remote Sensing Bulletin, 28(5): 1131-1144 [DOI: 10.11834/jrs.20232652]

1 引言

人文地理环境是人类活动、地理环境以及二者之间的交互作用形成的综合环境, 环境组成及交互作用复杂、系统脆弱性高、不便于利用现实系统广泛深入开展研究。虚拟人文地理环境具有安全方便以及能够挖掘复杂问题的能力, 但是因与现实系统耦合松散, 使得计算结果误差累积效应显著。引入数字孪生方法, 构建现实人文地理环境的虚拟孪生体, 形成依实驱虚、依虚控实、虚实协同演进的人文地理学研究新模式, 对深度发掘复杂问题, 优化人文地理环境调控方案, 提升决策部门对地理环境和社会发展的决策科学性, 防止对现实环境和社会的破坏性干扰等, 具有重大的学科意义和应用价值。

数字孪生发起于工业制造领域, 近来向各应用领域迅速拓展。应用数字孪生技术, 探索现实地理环境与虚拟映射体之间的耦合互动, 服务地理问题分析、模拟、决策等, 已得到地理学研究人员的高度重视。然而, 目前的地理学领域的数字孪生技术和应用的研究, 主要面向城市、流域、交通等领域中有形地理环境实体, 而人文地理环境中重要组成部分——人类活动以及人地交互作用鲜有涉及。

与数字孪生自然地理环境不同, 数字孪生人文地理环境需要在关注自然环境的同时, 重在实现对人类活动及其与自然环境的交互作用的数字孪生。当前, 地理环境的三维重建、人的行为建模与模拟等均有较好的研究基础, 但是距离实现数字孪生人文地理环境尚有一定距离, 数字孪生

收稿日期: 2023-04-17; 预印本: 2023-08-20

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(编号:42330108); 国家自然科学基金(编号:41771442, 41271402); 国家自然科学基金联合基金(编号:U1811464); 装备综合研究项目(编号:LJ20222C010133); 博士后国际交流计划引进项目(编号:YJ20210217); 教育部中华优秀传统文化专项课题(编号:23JDTCA028)

第一作者简介: 林琿, 研究方向为虚拟地理环境、空间综合人文与社会科学、多云多雨遥感。E-mail: huilin@cuhk.edu.hk

通信作者简介: 徐丙立, 研究方向为虚拟地理环境、地理协同。E-mail: xublmail@126.com

人文地理环境的概念内涵需要界定, 技术架构、关键技术等均需要深入研究。本论文在综述国内外研究现状的基础上, 提出并阐述数字孪生人文地理环境的概念和基本内涵, 设计数字孪生人文地理环境的技术框架, 以数字孪生白鹿洞书院为典型案例, 示范数字孪生人文地理环境构建方法、主要功能和结果形式。本文旨在抛砖引玉, 借此引起大家对数字孪生与人文地理环境耦合研究的思考, 共同推动人文地理学发展。

2 研究现状

2.1 数字孪生研究现状

数字孪生的概念模型由 Grieves 教授于 2003 年在美国密歇根大学的产品全生命周期管理课程首次提出, 并命名为“镜像空间模型”(Grieves, 2014)。2011 年美国国家航空航天局 (NASA) 针对航天器的设计构建了数字孪生系统, 该系统被认为是将数字孪生概念的首次实际应用 (Tuegel 等, 2011)。Grieves (2014) 对数字孪生进行了归纳, 并提出 3 个组成部分: 真实空间中的物理实体、虚拟空间中的实体的虚拟表示、将虚拟实体和物理实体联系在一起的数据和信息的连接 (VanDerHorn 和 Mahadevan, 2021)。该概念被后来研究者广泛采纳并加以扩展。比如, Tao 等 (2018, 2019) 在三组件架构上增加孪生数据和服务, 形成了数字孪生五维模型的概念框架。

随着数字化和智能化技术的快速发展, 数字孪生在需求、功能和应用方面的发展被加速, 其应用方向也从最初的工业快速拓展至农业 (Verdouw 等, 2021)、医学 (Laubenbacher 等, 2021) 和能源 (Ma 等, 2022) 等诸多领域, 数字孪生对象跨越细胞 (Baumgartner, 2022)、人体 (Wei, 2021)、建筑 (Wang 等, 2022)、城市 (Li 等, 2021) 和地球 (Voosen, 2020) 等各种尺度。

在应用的过程中, 数字孪生呈现出多种形态。Verdouw 等 (2021) 针对当前的基础上, 将数字孪生梳理成 6 大类型。第 1 种是假想型数字孪生 (Imaginary Digital Twin), 即孪生对象在现实世界中并不存在, 但是假想型孪生体可以帮助设计物理实体并模拟其预期行为。例如, Yang 等 (2022) 将数字孪生用于新产品设计过程, 从不确定的数据中获得高价值信息。第 2 种是监测型数字孪生

(Monitoring Digital Twin), 即真实物理对象的实际状态、行为和轨迹的数字表示, 同时通过虚实之间 (近) 实时连接, 监控物理对象的状况、操作和外部环境 (Hollenbeck 和 Chen, 2022)。第 3 种是预测型数字孪生 (Predictive Digital Twin), 即根据物理对象的 (近) 实时数据, 使用统计模型、机器学习等技术对物理对象的未来状态和行为进行动态预测。例如数字孪生技术已经广泛应用于预测产品功能的退化趋势, 从而有效地对产品进行预防性维护 (van Dinter 等, 2022)。第 4 种是规范型数字孪生 (Prescriptive Digital Twin), 即基于优化算法或启发式方法, 对物理对象实施纠正或预防性干预。例如, 黄艳等 (2022) 在数字孪生流域中联合调度规则库引擎, 实现长江水工程防灾智能调度。第 5 种是自主型数字孪生 (Autonomous Digital Twin), 即数字孪生体能够独立运行并完全控制物理对象。全面实现自主、上下文感知、自适应的孪生, 是数字孪生技术理想的目标 (Hribernik 等, 2021)。第 6 种是回忆型数字孪生 (Recollection Digital Twin), 即记录现实世界中实体已经消失的历史。数字孪生可作为数字存储器, 用于再现物理对象的过去。

经过长期及广泛的研究, 实体数字孪生、数字孪生实体、数字孪生体等数字孪生相关概念已逐渐清晰。数字孪生体是指现实实体在虚拟空间中的数字映射体, 即虚拟映射体; 数字孪生实体是指数字孪生的概念框架相一致, 即包括现实实体、虚拟映射实体以及虚实交互 3 部分; 实体数字孪生是指针对现实实体进行数字孪生体的构建, 只描述了从实到虚的过程。

2.2 数字孪生在地理学中的应用

将数字孪生技术引入地理学, 已经得到地理学研究人员的重视。从三维建模到数字孪生建模已成为数字经济与智慧社会建设发展的迫切需求 (朱庆 等, 2022)。基于数字孪生开展地理学问题研究, 已经不单单是技术问题, 也是驱动地理学研究范式革新的方法问题 (李双成 等, 2022)。诚然, 地理信息领域在三维重建、模型构建、过程模拟等方面, 已经有大量的研究基础, 比如实景三维建设为数字孪生提供了大量丰富逼真的数字底座 (陈军 等, 2022)。然而, 数字孪生的核心是现实实体的数字映射体, 以及构建物理空间和虚

拟空间之间的双向映射关系 (Li等, 2021)。现有研究成果更多地集中在将物理实体映射到数字对象, 对于由虚控实的反馈链路研究却很少涉及。

在具体的研究对象上, 当前在城市、流域和全球等多个尺度上均有相关的研究案例。在城市尺度上, 数字孪生支撑构建城市数字全息底座, 对城市的运行状态进行实时感知, 实现对城市发展过程中的能源 (Huang等, 2022; Li等, 2022)、灾害 (Fan等, 2021)、交通 (Guo等, 2022) 等问题进行预测和干预。在流域尺度上, 数字孪生主要用于实现流域在水流、信息流、业务流、价值流的全过程实时镜像, 助力洪水预报、预警、预演、预案全过程模拟, 比如数字孪生黄河 (李文学和寇怀忠, 2022)、数字孪生长江 (黄艳等, 2022)、数字孪生珠江 (甘郝新和吴皓楠, 2022) 等。在全球尺度上, 欧盟提出的数字孪生地球计划 (Bauer等, 2021) 被认为不仅仅只为实现大数据汇聚, 更是一个全新的地球系统模拟和观测框架, 用于解决地球面临的气候变化问题 (Voosen, 2020)。

将数字孪生引入地理学, 构建相关的数字孪生系统, 存在诸多挑战, 其中最为显著的是地理学的综合性难以通过数字孪生的方法充分实现。数字孪生拓展到地理科学研究空间, 则预示着数字孪生从传统物理单体孪生走向了地理空间的综合孪生 (冶运涛等, 2022)。传统的数字孪生关注零部件、流水线或工厂等较小场景的空间, 而现实的地理系统是一个复杂巨系统 (闫国年等, 2021), 因此地理的数字孪生必须针对综合的地理空间进行孪生。在数字孪生城市中, 需在物理城市的空气、地面、地下、河流中部署传感器, 实现对城市中道路、桥梁、井盖、路灯、建筑物等基础设施的全面数字化建模, 从而充分感知和动态监控城市的运行状态 (Li等, 2021)。在数字孪生流域中, 需要耦合空间、气象、水文、工情、经济等多源信息和气象、水文、水力、水环境等多方面的物理模型 (黄艳等, 2022)。

有地理学家对数字孪生提出了批评。Batty院士称“数字孪生”为陈词滥调, 认为数字孪生并不能实现对现实空间的镜像, 因为现实空间很多元素被忽略 (Batty, 2018)。针对这一问题, 已经有许多学者呼吁开展将自然与人文进行耦合研究。比如从事虚拟地理环境研究的学者在界定虚拟地理环境概念框架时, 要求虚拟地理环境不仅需要

研究自然环境, 同时耦合人文环境, 构建自然与人文相融合的综合虚拟环境 (林琿和徐丙立, 2007)。Bainbridge (2007) 也呼吁加强人文地理环境的研究, 认为虚拟空间具有成为社会、行为和经济等以人为中心的研究场所巨大潜力。欧盟的“地球数字孪生”计划也试图捕捉人文要素, 从而在孪生空间衡量气候变化将如何影响社会, 以及评估人文社会如何改变气候变化 (Voosen, 2020)。由此可见, 开展数字孪生人文地理环境的研究势在必行。

2.3 人文地理环境的数字化现状与趋势

直接针对人文领域开展数字孪生系统构建的研究很少, 但地理信息科学与人文学交叉融合形成的新研究方向——空间综合人文学, 在人文地理环境的数字化进程研究方面进行了较为有效的探索。

人文地理环境在三维重建、过程模型构建、事件模拟等方向, 已经取得了一定的研究成果 (Cai等, 2021; Fan等, 2022)。自20世纪90年代初数字人文研究兴起以来, 人文学者利用数据库技术对人文资料进行处理和存储的例子已屡见不鲜 (刘炜和叶鹰, 2017)。其中哈佛大学包弼德等 (2018) 领导开发的中国历代人物传记资料库 (CBDB) 是数字人文领域重要的成果, 该数据库目前数字化了中国42万余重要名人的传记信息。然而, 以往许多数字人文研究更为注重人文社会现象的时间属性, 而常常忽略其地理空间属性。受此启发, 地理信息学者综合了数字人文和地理信息系统的方法, 提出了空间综合人文学的概念 (林琿等, 2006)。空间综合人文学强调数字化和空间化两个鲜明特点, 可以更精细地研究人文学和社会科学问题。近年来城市地理 (Liu等, 2015)、健康地理 (Kwan, 2021)、旅游地理 (Xiao等, 2020)、历史地理 (Knowles, 2014) 等研究非常活跃, 促成了时空思维与人文社会科学交叉融合研究的良好态势。

有人参与的动态虚拟化是人文地理环境数字化的未来趋势。其推动因素在于虚拟地理环境概念和技术的日趋成熟。秦昆等 (2020) 认为, 以空间可视化、虚拟现实和增强现实技术为基础的虚拟地理环境, 丰富了人文学和社会科学的研究方法, 并具有3方面的意义: (1) 重建与推演历史

场景。从陈崇成团队的“朱熹历史元宇宙” (Fan 等, 2022), 到日本立命馆大学的矢野桂司教授的“虚拟京都” (Yano 等, 2008), 让人们能够直观地了解和分析不同节日民俗。(2) 模拟未来情景。比如, 对于旅游目的地的管理者而言, 在虚拟的网络空间能够模拟游客与目的地的交流与互动, 从而预测和优化景区的管理 (Xiao 等, 2022)。(3) 亲身参与。人文社会科学研究最大的特点是实践性 (王鉴, 2010), 虚拟地理环境通过跨越真实环境与虚拟环境的增强现实手段, 克服时间与空间的限制, 将真实事件与虚拟空间结合。

从数字化的进程来看, 人文地理环境经历基于数据库的数字存储、查询分析的数字人文阶段, 到目前以地理信息系统为基础实现数字化和空间化的空间综合人文阶段。在虚拟地理环境的支持和驱动下, 未来人文地理环境将实现数字孪生化, 形成数字孪生人文地理环境。图1展示了以数据库为基础的数字人文视角下开展朱熹的社交网络分析, 在空间综合人文视角下考究朱熹在江西的行迹 (张杰, 2020), 以及在虚拟地理环境支持下的数字孪生人文地理环境中体验朱熹在白鹿洞书院讲学的场景。

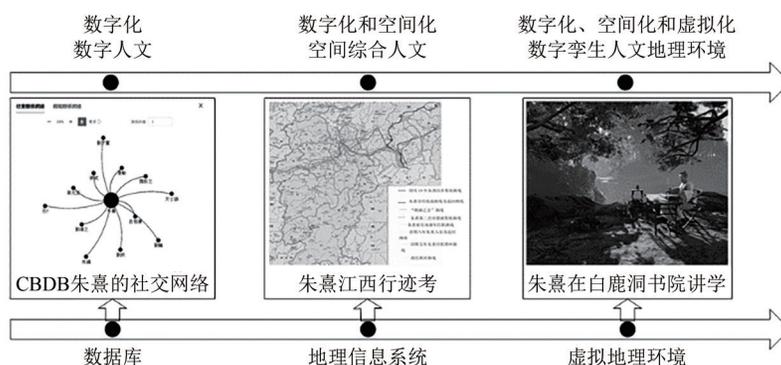


图1 从数字人文走向数字孪生人文地理环境

Fig. 1 From digital humanities to digital twin human geography

2.4 国内外研究现状小结

数字孪生技术已经在多个领域得到应用。引入数字孪生技术, 支撑地理学实现研究模式创新, 已经得到广大研究人员的重视。当前地理学领域的数字孪生研究刚刚起步, 从现实到虚拟的数字映射研究较多, 由虚到实的反馈控制研究较少; 针对自然过程的数字孪生研究较多, 针对人文过程的数字孪生研究少; 针对实体外在形态的数字孪生研究较多, 针对实体内在神行的数字孪生研究较少。整体看来, 数字孪生人文地理环境相关概念内涵、技术框架、关键技术等的系统性研究尚未展开。开展数字孪生人文地理环境研究, 探讨内涵定义, 搭建技术框架, 梳理关键技术, 对指导后续体系化研究, 解决地理学研究中“见物不见人” (林琿 等, 2006) 的问题, 具有重要的科学意义和现实应用价值。

3 数字孪生人文地理环境内涵定义

3.1 人文地理与人文地理环境

人文地理学之父德国地理学家Ratzel认为, 人

文地理主要研究人类社会和地球表层关系; 美国地理学家E.C Semple认为, 人文地理是研究不安分的人与不稳定的地球之间的变化关系 (Mamgain, 2022)。大英百科全书对人文地理所包含的主要内容概括为5个分支, 分别是经济地理学、政治地理学、社会地理学、历史地理学以及后来将以上分支进行综合研究的城市地理学 (Johnston, 2024)。

人文地理环境与人文地理紧密相关, 是承载人文地理学研究内容的环境场所。中国大百科全书对人文地理环境对人文地理环境的内涵进行如下概括: 人文地理环境涉及人文现象的分布、变化和扩展以及人类社会活动的空间结构等, 包括有形环境和无形环境两大部分; 有形环境主要指人类活动在地表形成物理和生物的环境, 包括人口分布、聚落形态、基础设施 (如交通道路、厂矿住房建筑等)、农耕环境、自然景观等; 无形环境主要指社会经济活动方式与文化背景, 包括生产方式、经济状况、人的行为、风俗习惯等文化景观。基于人文地理的内涵以及现有人文对环境的说明, 人文地理环境可以概括为: 人文地理环境的形成基于自然地理环境和人类活动两个核心

要素，是二者相互作用后形成的地理环境综合结果，是因人类活动对环境加以改变后形成的地理环境。与自然地理环境对比来看，人文地理环境最明显的不同点在于将人类活动作为研究的重点，更加突出对人地关系的研究。

3.2 数字孪生人文地理环境概念模型

基于Grievies对于数字孪生的定义，针对人文地理环境的内涵与特点，数字孪生人文地理环境的基本概念概括为：数字孪生人文地理环境是由现实人文地理环境、虚拟人文地理环境，以及二者之间数据和信息的交互等3部分组成（图2）；现实人文地理环境通过数字化映射形成虚拟人文地理环境，虚拟人文地理环境通过数据和信息反馈调控现实人文地理环境，数据和信息的交互通道搭建虚拟元与现实两个系统之间的通道（图3）。虚拟人文地理环境是现实人文地理环境的数字孪生体，内容涵盖受人类活动影响而形成的有形地理环境，因人类活动而产生的历史、文化、风俗

习惯、生产生活方式等无形环境，以及人类活动与地理环境之间的相互作用3个部分。另外，虚拟人文地理环境接收现实人文地理环境的数据和信息输入，对数字孪生体更新并驱动数字孪生体进行计算与模拟。虚拟人文地理环境突出“人—地”关系的孪生，包括有形地理环境数字孪生、人类活动数字孪生，以及人地交互作用过程数字孪生3个部分。现实人文地理环境接受虚拟人文地理环境实的反馈，并实施优化与调控。通过依实驱虚、依虚控实的循环往复，实现现实人文地理环境与虚拟人文地理环境之间的虚实协同、共同演化。

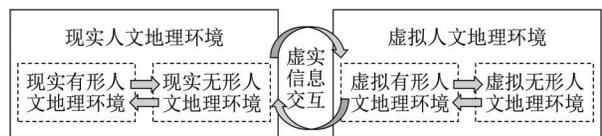


图2 数字孪生人文地理环境概念模型
Fig. 2 Conceptual model of digital twin human geographic environment

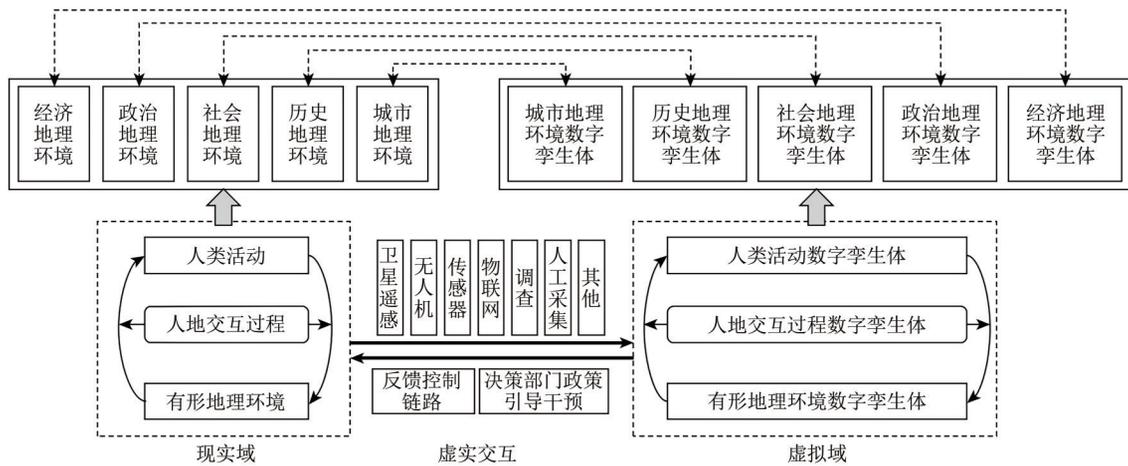


图3 数字孪生人文地理环境及映射关系
Fig. 3 Digital twin human geographic environment and mapping relationship

(1) 有形地理环境数字孪生。本文将有形人文地理环境界定为除人以外的所有具有外在形态的地理实体，是承载人文活动的现实有形地理环境。有形地理环境数字孪生体包括地形孪生体、道路孪生体、建筑孪生体、植被孪生体、水体孪生体等。描述这些孪生体，需要从属性特征、几何分布特征、物理过程等多个方面入手。属性特征是孪生体的外在形态，主要通过三维几何模型进行刻画和表达。空间分布是孪生体在地理空间环境中的分布。物理过程是孪生体动态变化或与

外界的作用过程，通过物理过程模型进行刻画和表达。

(2) 人类活动数字孪生。人是人文地理环境中的核心要素之一，人类活动是塑造人文地理环境形态与场景的关键驱动因素。人类活动数字孪生包括人的外形数字孪生和行为数字孪生两个方面。人的外形数字孪生包含个体数字外形数字孪生和群体外形数字孪生。个体外形数字孪生主要针对个体的几何外形构建三维模型，以及对个体的外在动作构建动作建模。群体外形数字孪生通

过个体外形数字孪生体的群聚实现。个体人的行为包含个体行为和群体行为。个体行为孪生主要针对个体的感知、决策、行动等3个方面进行刻画。将个体聚集在一起,并通过群体行为控制约束,形成对群体行为的数字孪生。

(3) 人地交互数字孪生。人地交互是人文地理学研究的核心内容,也是形成人文地理环境的关键要素。“人”即人类,包括上文提到的个体和群体。“地”即地理环境,是人类活动所涉及到的有形地理环境。人地交互主要反映人类活动对地理环境的改变以及地理环境对人类活动的影响和约束两个方面。人地交互数字孪生需要同时解决人类活动对地理环境的改变以及地理环境对人的行为影响两个方面的数字孪生构建。人地交互数字孪生主要通过一系列无形的过程模型进行刻画,同时利用时空过程模拟与可视化的方法进行表达。

(4) 虚实交互。虚实交互是现实人文地理环境与虚拟人文地理环境之间的数据和信息的交互,包括从现实到虚拟以及从虚拟到现实两个方向。从现实到虚拟的交互通道,主要用于将现实人文地理环境实体、人类活动以及人地交互过程等现实数据和信息进行采集,并将其传递给虚拟人文地理环境更新数字孪生体的状态以及驱动过程模拟。从现实到虚拟的通道有多种实现方法和手段,如卫星遥感、无人机、传感器、物联网、调查、人工采集等。从虚拟到现实的方法和手段主要有两类,即反馈控制链路以及决策部门政策引导干预。反馈控制链路主要用于对可实施自动控制的实体,比如用于调控洪水的水闸开关控制链路、用于引导车流的红绿灯控制链路等。决策部门政策引导干预是指决策部门根据虚拟人文地理环境的过程模拟结果,做出相应的政策调整,引导现实人类活动发生改变,从而实现对现实人文地理环境的调控。

(5) 专业人文地理环境数字孪生。人类活动的目的差异,会产生不同的人文地理环境。针对不同的人文地理环境的数字孪生,就形成了各个专业领域的数字孪生,比如经济地理环境数字孪生、政治地理环境数字孪生、文化地理环境数字孪生、历史地理环境数字孪生、城市地理环境数字孪生等。专业人文地理环境数字孪生基于数字孪生人文地理环境通用理论方法和技术架构构建,同时需耦合本专业领域的数据、模型、知识等。

3.3 数字孪生人文地理环境基本要求

(1) 以人为中心。人文地理环境是自然环境与人类活动交互作用后所产生的综合环境。没有人类活动,人文自然环境将退化为纯粹的自然环境。因此,人文地理环境区别于自然地理环境的一个关键因素是“人”。人文地理环境数字孪生,需要也必须反映人文地理环境的这一特点,要以“人”为中心,体现出人地交互下所形成的综合环境效果。

(2) 时空多尺度。时空多尺度性是地理学显著特性之一。数字孪生人文地理环境,需要反映现实地理学问题研究的时空尺度特性。因此,数字孪生人文地理环境需要考虑研究对象的空间区域大小、对象粒度大小、时间间隔长短等要素,构建时空尺度和分辨率适宜的数字孪生体。同时,在虚实交互通道上,需要考虑交互数据和信息采集的频次、数据分辨率等问题。

(3) 数据模型双驱动。人文地理环境的数字孪生,既要针对地理环境实体等有形环境进行数字孪生,又要针对人类活动、人地交互和物理过程等无形环境等进行数字孪生。有形环境实体数字孪生,需要丰富的数字底座做支撑,构建以数据驱动的数字孪生体。对于无形交互和物理过程,需要通过科学合理的模型进行刻画,构建以模型驱动的数字孪生体。通常情况下,一个完整的人文地理环境数字孪生体构建,需要数据和模型的联合驱动方能实现。

(4) 虚实协同。虚实协同是数字孪生人文地理环境的关键特征。现实人文地理环境与虚拟人文地理环境之间通过数据共享、信息互通、状态同步等,实现虚实协同发展、共同演进。二者之间的协同涉及数据、模型、知识等多个层面,以及模拟、分析、可视化、决策等多个环节。在时间上,可以是实时的,也可以是非实时的。

(5) 多模式可视化。从形态上来说,数字孪生追求高逼真外观一致性,因此三维甚至更高维可视化是数字孪生的最初需求。然而,从研究问题的角度出发来看,能够对现实人文地理环境进行虚拟化表达的方式有很多,除了三维之外,传统的二维、虚拟现实、增强现实、混合现实、全息等,均可以作为数字孪生人文环境的可视化方式。

3.4 数字孪生人文地理环境的分类

从不同的视角来看,数字孪生人文地理环境

可以分成多种类型。基于研究学科的不同，分为数字孪生经济地理环境、数字孪生政治地理环境、数字孪生历史地理环境、数字孪生文化地理环境、数字孪生旅游地理环境等。根据数字孪生对象的存在性，分为意象场景数字孪生、历史场景数字孪生、现实环境数字孪生。根据数字孪生的阶段和程度，分为监测型数字孪生环境、预测型数字孪生环境、完全型数字孪生环境。根据数字孪生自动化程度，分为人工干预型数字孪生环境、半人工干预型数字孪生环境、全自主型数字孪生环境。

人文地理环境复杂，再加上具有高度不确定性的人类活动，使得现实人文地理环境数字孪生极其困难。研究并构建具有部分数字孪生特点的人文地理环境，将是今后很长一段时间内数字孪生人文地理环境研究常态。

4 数字孪生人文地理环境技术框架

4.1 数字孪生人文地理环境技术路径

数字孪生人文地理环境的技术实现主要包含两大部分，如图4所示。其一是通过数字化精准映射到虚拟地理环境完成对现实人文地理环境的全面感知和孪生再现。其二是通过多通道虚实交互达到虚拟人文地理环境对现实人文地理环境的智能反馈与操控。孪生人文地理环境由4个阶段构成，分别是现状孪生、学习孪生、模拟孪生以及自主孪生。在现实人文地理环境中，首先进行多源异构环境数据的自动化采集与标准化融合。采集手段包括遥感卫星、近地无人机、物联网传感器以及人工采集等。基于多模态大数据的整合对现实人文地理环境进行全息监测与多维度感知。其次，结合语义分割与识别结果对现实人文地理要素进行分类与实时建模。进而，运用地理空间智能方法挖掘并分析现实人文地理环境的时空分异规律。在虚拟人文地理环境中，首先完成各类地理场景与地理模型的实时构建并集成在虚拟环境中，以地理场景与模型为载体，对人文地理信息进行多维动态仿真与表达。然后，面向不同的政治经济情景，在虚拟环境中模拟人文地理环境演化规律，探究人地耦合机制。最后，运用人工智能深度学习算法实现虚拟人文地理环境的自主决策，并通过多种虚实交互手段达到操控及优化现实人文地理环境的目的。

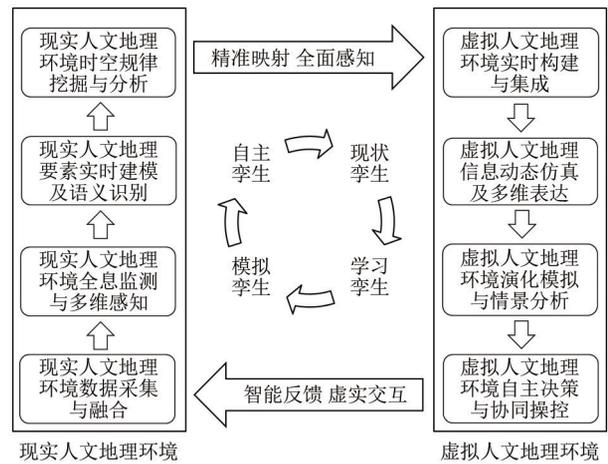


图4 数字孪生人文地理环境技术路径

Fig. 4 Technical path of digital twin human geographic environment

虚拟人文地理环境基于真实人文地理信息不断迭代进化而产生智能属性，能够建立承载经济、政治、历史、社会、城市等多元环境的统一场域。现实人文地理环境在场域中经过揉变与延展，可以形成与虚拟数字环境交融一体、共同演化的新环境。

4.2 数字孪生人文地理环境平台建设

数字孪生人文地理环境平台建设主要涵盖环境感知、数据底座、技术中台、计算引擎、知识应用5个子平台，如图5所示。

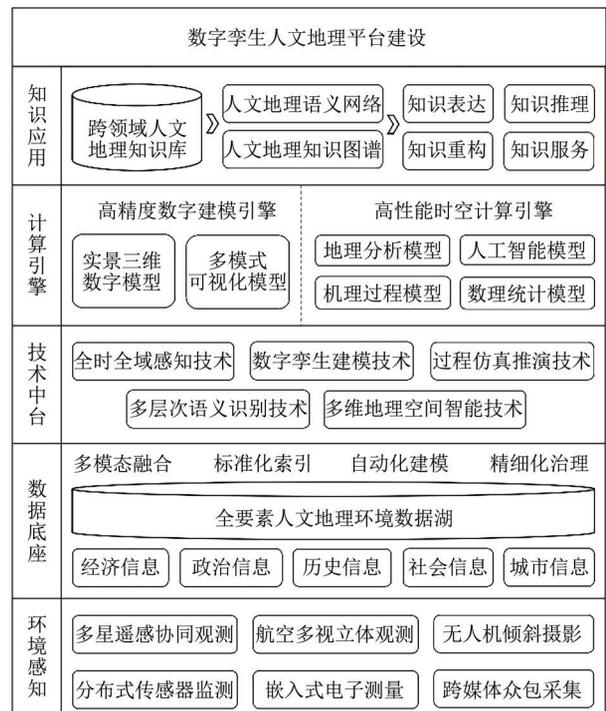


图5 数字孪生人文地理平台建设

Fig. 5 Construction of digital twin human geographic platform

(1) 环境感知与数据底座。数字孪生人文地理环境平台的环境感知子平台高效融合航天遥感、航空获取、地面观测、专业监测、众包采集等多模态感知手段, 依托泛在立体感知物联网络, 对人文环境物理空间的实体更新进行动态感知与实时监测。

数据底座是集数据汇聚、通信、融合、存储与组织于一体的信息平台。基于全域全时感知的数据获取和传输基础设施, 进行全时空、全尺度、全类型的数据清洗与分类, 建立高标准、精细化治理的人文地理环境数据湖。数据管理层在现实人文地理环境与孪生人文地理环境中建立地理要素的唯一数字索引, 实现两个环境在统一地理参考下的精准链接和快速匹配。通过人工智能信息处理, 将人文空间、社会空间及网络虚拟空间有机融合, 生成人文地理全域虚拟映像空间。

(2) 技术中台。技术中台集成全时全域感知技术、数字孪生建模技术、过程仿真推演技术、多层次语义识别技术、多维地理空间智能技术, 服务于其他几个子平台的功能实现。前4项技术将在其他子平台详细介绍, 本小节着重介绍第5项技术。地理空间智能算法融合了人工智能和空间分析技术, 在地理环境科学决策方面具有独特优势。该算法对人文地理实体空间各种状态、关系、过程和格局进行定量表达, 并对人文地理空间态势进行全息监测和精准评估, 达到实时信息反馈与性能优化的目的。基于现实人文地理环境, 在数字孪生环境中得到模型耦合计算结果、人文环境动态趋势预测、地理资源优化配置等方案, 通过传感器远程控制、系统调控修正、专家协同优化等操作, 反向作用于人文地理环境实体的运行规则和机制, 实现以人为中心的群智决策、快速响应及智能操控等虚实交互效果。

(3) 计算引擎。高精度数字建模引擎采用主流数字孪生建模技术, 针对不同的数据类型, 人文地理环境从空间、时间、语义3个维度构建数字孪生模型。空间上, 运用全域标识技术实现数字孪生精准映射, 结合虚拟现实、增强现实、混合现实等多模式可视化技术, 通过高性能图形可视化引擎, 实现数字孪生体的多维动态表达。时间上, 融合历史、现状和动态监测数据, 采用三维建模、逆向建模、流程建模等建模方法, 结合物联感知技术和空间数据智能提取技术, 实现多种

人文地理环境场景的数字化以及机理模型的自动构建。语义上, 融合地理实体的基本属性、实体关系和其他社会经济信息, 对跨时空尺度、跨领域、语义交叉的人文地理要素在信息空间中进行数字孪生重建。

高性能时空计算引擎是实现数字孪生人文地理虚实互动的核心, 是支撑地理分析模型、机理过程模型、数理统计模型以及多种人工智能模型实现高性能计算的关键。为提升人文地理环境变化过程仿真的时空一致性, 该引擎采用过程仿真推演技术, 使过程推演更符合人类活动与人地交互规律。主要实现方式为运用人文地理数字孪生模型集成面向对象仿真技术、智能仿真技术、分布式交互仿真技术等。面向对象仿真从人类认知世界模式出发, 使问题空间和求解空间相一致。智能仿真以知识为核心和人类思维为背景, 融合了人工智能与仿真技术。分布式交互仿真通过计算机网络连接各地仿真设备, 构成时间与空间互相耦合的虚拟仿真环境, 并协同虚拟现实技术实现高度人机交互。

(4) 知识应用。面向数字孪生人文地理环境的智慧决策需求, 针对人文地理环境的多模态数据语义交错问题, 知识应用平台结合自然语言处理技术与地理知识图谱技术, 从资源组织、知识关联、图文交互、数据融合等方面进行数据语义化处理, 在数字孪生环境中形成虚实链接的人文地理语义网络模型。通过结构化组织专业领域知识与大数据知识丰富人文地理知识库, 建立针对业务应用的人文地理环境知识图谱, 在此基础上构造具有时空语义一致性的数字孪生人文地理环境框架。基于知识图谱实现资源结构化组织的知识化关联, 形成更全面的数字人文地理资源画像。运用知识表达、知识推理、知识重构等技术, 通过跨域数据联邦搜索与知识发现, 挖掘人文地理环境实体之间的深层次信息与隐式关系, 为数字孪生人文地理环境的全面认知、关联要素信息的快速获取以及发展规律的深度探究提供高效智能的知识服务。

5 数字孪生白鹿洞书院

5.1 项目背景

庐山地处江西省, 是中国第一批联合国教科

文组织列为世界文化遗产并富含历史文化和地理特色的名山。历史上许多文人到此旅游或居住，并留下具有历史文化特色的独特景观，朱熹就是具有代表性的一位。南宋淳熙六年（1179年），朱熹任知南康军，重建白鹿洞书院，还广邀著名的学者到白鹿洞书院讲学，开创了书院“讲会”制度的先河。当前白鹿洞书院已经成为中国儒家文化教育基地。为了满足庐山文化遗产保护和旅游行业全方位、多层次、个性化的需求，以及还原朱熹在白鹿洞书院生活与教育的生动场景，搭建现代人们与先贤交流通道，服务政府优化调控并保护历史文化景观，在国家科技支撑计划和联合

国教科文组织国际自然与文化遗产空间技术中心南昌分中心支持下，开展了数字孪生白鹿洞书院历史地理环境构建研究。

5.2 系统框架

数字孪生白鹿洞书院包括现实书院、虚拟书院以及虚实交互通道3部分组成（图6）。通过历史资料、近期地理环境数据，以及实时监测和预测数据，构建庐山全区域以及白鹿洞书院的虚拟孪生体。耦合朱熹在白鹿洞书院的教育活动，生成并还原历史文化动态场景。通过反馈控制方式和政府决策，调控现实书院，实现对参观人流控制以及书院地理环境开发规划。

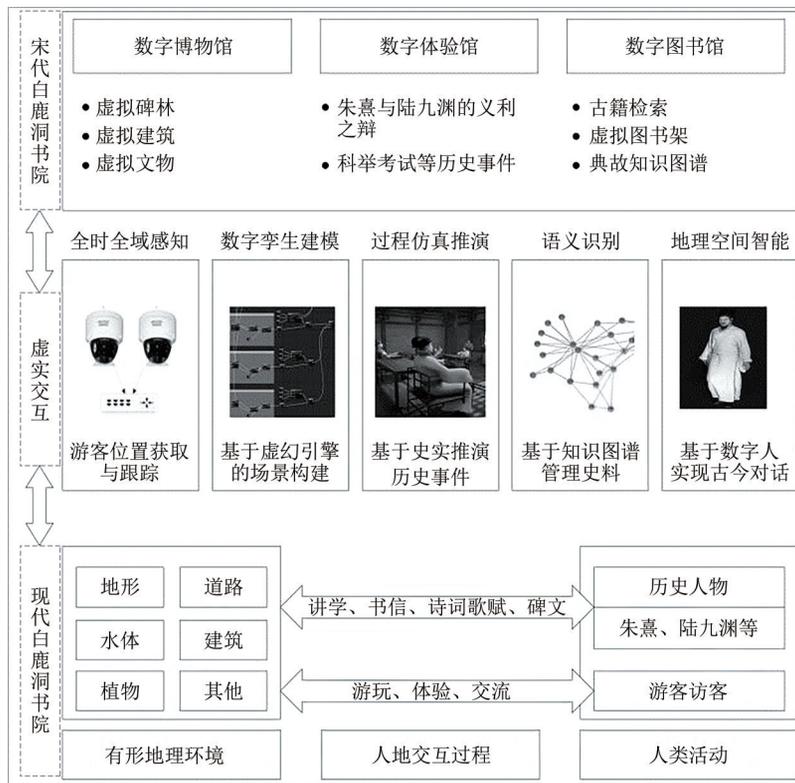


图6 数字孪生白鹿洞书院系统框架

Fig. 6 System framework of digital twin Bailudong Academy

数字孪生白鹿洞书院系统实现了对朱熹在白鹿洞书院讲学历史场景的数字孪生再现，通过虚拟现实与人机交互技术，将历史文化场景传递给现代参观者，并实现现代人类与历史人物（朱熹）的跨时空交流。同时，系统具备感知现实人流的功能，以及对参观者行为的智能分析能力，支撑现场人流实施调控和长期文化环境的发展规划。

(1) 白鹿洞书院地理环境数字孪生。庐山地

理环境作为白鹿洞书院数字孪生人文地理环境的底座，是书院文化遗产景观的载体。在遥感影像、地面三维激光扫描点云、全景影像和视频、无人机倾斜摄影测量等多种技术支持下，实现对庐山全区域数字基座的构建。在此基础上，基于感知传感器网络，实现对现实书院的实时监控和动态更新，将具有海量、多类型、多时态遗产景观资源和旅游信息进行数字化，完成了对白鹿洞书院地理环境的数字孪生（图7）。

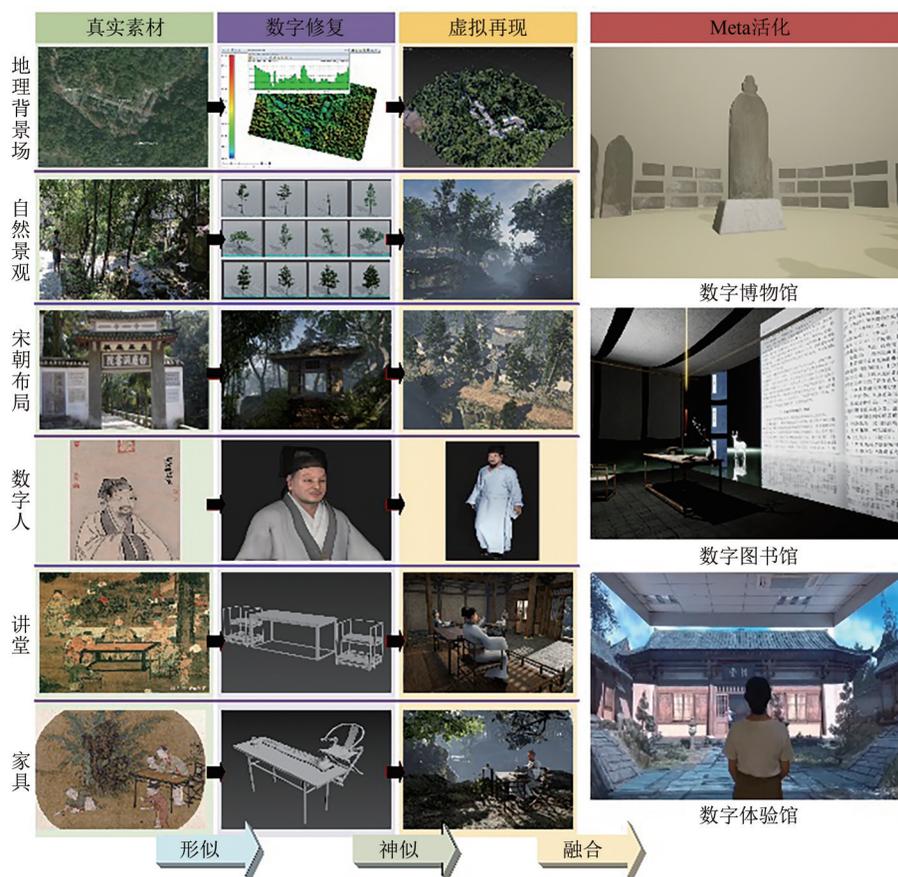


图7 数字孪生白鹿洞书院内容展示

Fig. 7 Content demonstration of digital twin Bailudong Academy

(2) 人物活动数字孪生。主要完成对历史人物(朱熹)及其活动的数字孪生构建,以及现实参观人流的监控与虚拟表达。一方面,根据古代文献及书画史料,参考现代建筑遗存,视觉化宋白鹿洞书院的文化背景,从历史典籍中考据白鹿洞书院相关名人的外观相貌、表情动作、语言思想等不同维度,构建回忆型数字孪生体(数字人),活化历史名人。利用传统调查和移动采集相结合的数字技术,构建白鹿洞书院的历史主人——朱熹的外形和行为数字孪生。另一方面,利用手机位置、视频监控、移动基站、RFID等多种移动定位技术,构建监测型和预测型相结合数字孪生体,实现当前游客群体的时空信息在虚拟空间的实时映射体。将智能终端用户的位置信息与景点和公共服务设施等地理信息相结合,构建规范型数字孪生体,为游客、景区管理部门和旅游服务企业等提供多层次、多样化、一体化的白鹿洞文化遗产旅游综合服务。

(3) 虚实交互作用。利用“虚拟与现实相结合、历史与现代相结合、体验与服务相结合”的

文化遗产交互要求,构建“数字图书馆—数字博物馆—数字体验馆”组成的白鹿洞书院“三馆”虚拟交互环境。通过在白鹿洞书院的虚拟空间孪生数字人和真实的游客,游客可以穿越时空与历史名人数字人现场互动,实现触发场景情节、人物交互和人人交互。在假想型数字孪生空间中,白鹿洞书院文化进行立体化和具象化呈现,游客可以沉浸式感受白鹿洞书院传统历史文化和历史事件,如体验科举考试和参与朱熹与陆九渊的义利之辩。白鹿洞书院虚拟空间和真实地理空间深度融合,以虚实交互、虚实协同、虚实共生的形式,提升用户的文化体验。

5.3 开发实现

本项目在多学科交叉团队的共同努力下推进,目前已经完成部分功能。地理学团队在通过物联网技术实现文化遗产地人流、空气质量、气象条件等数据实时和非实时的动态监测;历史学团队根据相关的历史典籍考据出宋代白鹿洞书院屋设规模、建筑方位、楹联内容、历史事件等;美术团队根

据宋代文献及书画史料，参考现代宋代建筑遗存，视觉化宋代白鹿洞人物、家具、陈设及相关物品。

系统基于虚幻（Unreal）引擎复原出1181年前后白鹿洞书院的基本面貌，实现在桌面端三维漫游和管理。基于PICO OpenXR插件，构建白鹿洞书院XR应用程序，通过PICO头显设备进入数字孪生白鹿洞书院的虚拟空间后，用户可以从不同的视角体验虚拟空间中的书院文化。此外利用高清投影系统构建起四面包裹的沉浸式立体虚拟环境，高度仿真模拟宋代白鹿洞书院，使用户可以身临其境地欣赏宋代白鹿洞书院。“三维-VR-CAVE”组成的三通道VR/AR体验环境，满足文化遗产保护、展示、体验、传播等需要。

6 结 语

研究数字孪生人文地理环境，构建依实驱虚、依虚控实、虚实协同演进的人文地理学问题研究新模式，对避免扰乱现实环境、深度探索复杂问题、优化现实地理问题调控方案等，具有重大的学科意义和应用价值。本论文提出数字孪生人文地理环境基本概念，详细阐述概念内涵，同时构建了数字孪生人文地理环境系统技术框架。指出数字孪生人文地理环境是由现实人文地理环境、虚拟人文地理环境以及二者之间的交互作用组成，通过对地理环境、人类活动、人地交互作用等的孪生构建与虚实交互，实现现实环境与虚拟环境之间的虚实协同、优势互补、共同演进。以数字孪生白鹿洞书院为典型案例，示范数字孪生人文地理环境构建方法、主要功能和结果形式。

数字孪生人文地理环境的价值何在？支撑其构建的理论基础是什么？其在元宇宙发展的大潮中是否具有一席之地？我们给出以下3点认知，其难免存在不足，希望引起大家的讨论。

(1) 数字孪生人文地理环境是人文地理环境研究的新方法。当前，数字孪生已经不仅仅是一项技术，而逐渐成为科学研究的一种新范式。在数字孪生范式下，虚拟系统与现实系统耦合一致、共同演进，实现优势互补，提升现实问题研究的安全性、可控性、经济性、高效性等。开展数字孪生人文地理环境研究，将现实人文地理环境映射到虚拟环境中，同时实现现实与虚拟的交互，能够在宏观与微观多种尺度上，实现人文地理环境的可计算、可推演、可回溯、可控制等新特征。

(2) 虚拟地理环境是支撑数字孪生人文地理环境构建的理论基础。数字孪生人文地理环境在理念上追寻虚拟与现实间的相互补充、共同演进，具有以人为中心、多模式可视化、虚实协同、数据模型双核心等显著特征，这些与虚拟地理环境的理念与特征高度吻合。虚拟地理环境并非只关注虚拟空间，而是倡导通过多通道交互，实现虚拟与现实的协同，这与数字孪生虚实互动理念是一致的。虚拟地理环境在提出之初就强调化身的重要性，提倡构建以人为中心的可计算人地关系研究方法，这符合人文地理环境研究需要。虚拟地理环境的多模式可视化、数据模型双核心等特征，已经得到广泛的认可。在某些程度上，虚拟地理环境的理念已经超出了数字孪生地理环境的框架，虚拟地理环境能够很好地支撑数字孪生人文地理环境构建与研究。

(3) 数字孪生人文地理环境是地理元宇宙构建的必经之路。人文地理环境的形成与人类活动密不可分。随着元宇宙的来临，未来人类的生活将会从现实走向虚实共生状态。人文地理学必须关注这一趋势，研究范畴也需从现实人文地理环境拓展到虚拟人文地理环境。从这个趋势来看，开展数字孪生人文地理环境研究势在必行。同时，需要清楚地认识到，以地理学研究为目标的地理元宇宙，必须同时解决现实地理环境、虚拟地理环境、人地交互作用等核心要素问题。这些问题的解决，离不开数字孪生人文地理环境的基本思想和关键技术的支撑。

参考文献(References)

- Bainbridge W S. 2007. The scientific research potential of virtual worlds. *Science*, 317(5837): 472-476 [DOI: 10.1126/science.1146930]
- Batty M. 2018. Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5): 817-820 [DOI: 10.1177/2399808318796416]
- Bauer P, Stevens B and Hazeleger W. 2021. A digital twin of earth for the green transition. *Nature Climate Change*, 11(2): 80-83 [DOI: 10.1038/s41558-021-00986-y]
- Baumgartner C. 2022. The world's first digital cell twin in cancer electrophysiology: a digital revolution in cancer research?. *Journal of Experimental and Clinical Cancer Research*, 41(1): 298 [DOI: 10.1186/s13046-022-02507-x]
- Bol P K, Xia C J and Wang H S. 2018. The digital humanities and a cyberinfrastructure for China studies. *Library Journal*, 37(11): 18-25 (包弼德, 夏翠娟, 王宏甦. 2018. 数字人文与中国研究的网络基础设施建设. *图书馆杂志*, 37(11): 18-25) [DOI: 10.13663/j.cnki.lj.2018.11.003]

- Cai Z R, Fang C Y, Zhang Q and Chen F L. 2021. Joint development of cultural heritage protection and tourism: the case of mount lushan cultural landscape heritage site. *Heritage Science*, 9(1): 86 [DOI: 10.1186/s40494-021-00558-5]
- Chen J, Liu J J and Tian H B. 2022. Basic directions and technological path for building 3D realistic geospatial scene in China. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 47(10): 1568-1575 (陈军, 刘建军, 田海波. 2022. 实景三维中国建设的基本定位与技术路径. *武汉大学学报(信息科学版)*, 47(10): 1568-1575) [DOI: 10.13203/j.whugis20220576]
- Fan C, Zhang C, Yahja A and Mostafavi A. 2021. Disaster city digital twin: a vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management. *International Journal of Information Management*, 56: 102049 [DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.102049]
- Fan Z L, Chen C C and Huang H Y. 2022. Immersive cultural heritage digital documentation and information service for historical figure metaverse: a case of Zhu Xi, Song Dynasty, China. *Heritage Science*, 10(1): 148 [DOI: 10.1186/s40494-022-00749-8]
- Gan H X and Wu H N. 2022. Study on the construction of the digital twin Pearl River Basin. *China Flood and Drought Management*, 32(2): 36-39 (甘郝新, 吴皓楠. 2022. 数字孪生珠江流域建设初探. *中国防汛抗旱*, 32(2): 36-39) [DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2021340]
- Grieves M. 2014. Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication. [2022-11-30]. https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication
- Guo J J, Bilal M, Qiu Y Y, Qian C, Xu X L and Raymond Choo K K. 2022. Survey on digital twins for internet of vehicles: fundamentals, challenges, and opportunities. *Digital Communications and Networks*, In Press [DOI: 10.1016/j.dcan.2022.05.023]
- Hollenbeck D and Chen Y Q. 2022. A digital twin framework for environmental sensing with suas. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 105(1): 1 [DOI: 10.1007/s10846-021-01542-8]
- Hribernik K, Cabri G, Mandreoli F and Mentzas G. 2021. Autonomous, context-aware, adaptive digital twins—state of the art and roadmap. *Computers in Industry*, 133: 103508 [DOI: 10.1016/j.compind.2021.103508]
- Huang W H, Zhang Y J and Zeng W. 2022. Development and application of digital twin technology for integrated regional energy systems in smart cities. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 36: 100781 [DOI: 10.1016/j.suscom.2022.100781]
- Huang Y, Yu S, Luo B, Li R B, Li C W and Huang W. 2022. Development of the digital twin Changjiang River with the pilot system of joint and intelligent regulation of water projects for flood management. *Journal of Hydraulic Engineering*, 53(3): 253-269 (黄艳, 喻杉, 罗斌, 李荣波, 李昌文, 黄卫. 2022. 面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索. *水利学报*, 53(3): 253-269) [DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210865]
- Johnston R. 2024. geography. [2022-11-30]. <https://www.britannica.com/science/geography>
- Knowles A. 2014. The contested nature of historical GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(1): 206-211 [DOI: 10.1080/13658816.2013.850696]
- Kwan M P. 2021. The stationarity bias in research on the environmental determinants of health. *Health and Place*, 70: 102609 [DOI: 10.1016/j.healthplace.2021.102609]
- Laubenbacher R, Sluka J P and Glazier J A. 2021. Using digital twins in viral infection. *Science*, 371(6534): 1105-1106 [DOI: 10.1126/science.abf3370]
- Li D R, Yu W B and Shao Z F. 2021. Smart city based on digital twins. *Computational Urban Science*, 1(1): 4 [DOI: 10.1007/s43762-021-00005-y]
- Li S C, Zhang W B, Chen L Y, Liang Z, Zhang Y J and Wang Z. 2022. Digital twin space and its applications: concurrent discussion on the space reconstruction of geographical research. *Acta Geographica Sinica*, 77(3): 507-517 (李双成, 张文彬, 陈立英, 梁泽, 张雅娟, 王铮. 2022. 孪生空间及其应用——兼论地理研究空间的重构. *地理学报*, 77(3): 507-517) [DOI: 10.11821/dlxb202203001]
- Li W X and Kou H Z. 2022. Thoughts on the construction of digital twin Yellow River in the new stage. *China Flood and Drought Management*, 32(2): 27-31 (李文学, 寇怀忠. 2022. 关于建设数字孪生黄河的思考. *中国防汛抗旱*, 32(2): 27-31) [DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2021376]
- Li X M, Luo J, Li Y L, Wang W X, Hong W Y, Liu M W, Li X Y and Lv Z H. 2022. Application of effective water-energy management based on digital twins technology in sustainable cities construction. *Sustainable Cities and Society*, 87: 104241 [DOI: 10.1016/j.scs.2022.104241]
- Lin H and Xu B L. 2007. Some thoughts on virtual geographic environments. *Geography and Geo-Information Science*, 23(2): 1-7 (林琿, 徐丙立. 2007. 关于虚拟地理环境研究的几点思考. *地理与地理信息科学*, 23(2): 1-7) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2007.02.001]
- Lin H, Zhang J, Yang P and Liu J. 2006. Development on spatially integrated humanities and social science. *Geo-Information Science*, 8(2): 30-37 (林琿, 张捷, 杨萍, 刘佳. 2006. 空间综合人文与社会科学进展. *地球信息科学*, 8(2): 30-37) [DOI: 10.3969/j.issn.1560-8999.2006.02.006]
- Liu W and Ye Y. 2017. Exploring technical system and theoretical structure of digital humanities. *Journal of Library Science in China*, 43(5): 32-41 (刘炜, 叶鹰. 2017. 数字人文的技术体系与理论结构探讨. *中国图书馆学报*, 43(5): 32-41) [DOI: 10.13530/j.cnki.jlis.170020]
- Liu Y, Liu X, Gao S, Gong L, Kang C G, Zhi Y, Chi G H and Shi L. 2015. Social sensing: a new approach to understanding our socioeconomic environments. *Annals of the Association of American Geographers*, 105(3): 512-530 [DOI: 10.1080/00045608.2015.1018773]
- Lü G N, Zhou C H, Lin H, Chen M, Yue S S and Wen Y N. 2021. Development overview and some thoughts on geographic synthesis. *Chinese Science Bulletin*, 66(20): 2542-2554 (闰国年, 周成虎, 林琿, 陈旻, 乐松山, 温永宁. 2021. 地理综合研究方法的发展与思考. *科学通报*, 66(20): 2542-2554) [DOI: 10.1360/TB-2020-0799]
- Ma S Y, Ding W, Liu Y, Ren S and Yang H D. 2022. Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on infor-

- mation management systems for energy-intensive industries. *Applied Energy*, 326: 119986 [DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119986]
- Mamgain G. 2022. What Is Human Geography? Meaning, Definition, Nature, Source. [2022-11-30]. <https://edukedar.com/what-is-human-geography/>
- Qin K, Lin H, Hu D, Xu G, Zhang X X, Lu B B and Ye X Y. 2020. A review of spatially integrated humanities and social sciences. *Journal of Geo-Information Science*, 22(5): 912-928 (秦昆, 林珲, 胡迪, 许刚, 张晓祥, 卢贵宾, 叶信岳. 2020. 空间综合人文学与社会科学研究综述. *地球信息科学学报*, 22(5): 912-928) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.200232]
- Tao F, Cheng J F, Qi Q L, Zhang M, Zhang H and Sui F. 2018. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9/12): 3563-3576 [DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1]
- Tao F, Zhang H, Liu A and Nee A Y C. 2019. Digital twin in industry: state-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4): 2405-2415 [DOI: 10.1109/TII.2018.2873186]
- Tuegel E J, Ingraffea A R, Eason T G and Spottswood S M. 2011. Re-engineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011: 154798 [DOI: 10.1155/2011/154798]
- VanDerHorn E and Mahadevan S. 2021. Digital twin: generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145: 113524 [DOI: 10.1016/j.dss.2021.113524]
- Van Dinter R, Tekinerdogan B and Catal C. 2022. Predictive maintenance using digital twins: a systematic literature review. *Information and Software Technology*, 151: 107008 [DOI: 10.1016/j.infsof.2022.107008]
- Verdouw C, Tekinerdogan B, Beulens A and Wolfert S. 2021. Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189: 103046 [DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046]
- Voosen P. 2020. Europe builds 'digital twin' of Earth to hone climate forecasts. *Science*, 370(6512): 16-17 [DOI: 10.1126/science.370.6512.16]
- Wang J. 2010. On the practicality of humane social sciences research. *Educational Research*, 31(4): 25-29 (王鉴. 2010. 论人文社会科学研究实践性. *教育研究*, 31(4): 25-29)
- Wang W X, Guo H, Li X M, Tang S J, Xia J Z and Lv Z H. 2022. Deep learning for assessment of environmental satisfaction using BIM big data in energy efficient building digital twins. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50: 101897 [DOI: 10.1016/j.seta.2021.101897]
- Wei S L. 2021. Is human digital twin possible?. *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, 1: 100014 [DOI: 10.1016/j.cmpbup.2021.100014]
- Xiao X, Fang C Y and Lin H. 2020. Characterizing tourism destination image using photos' visual content. *ISPRS International Journal of Geo-information*, 9(12): 730 [DOI: 10.3390/ijgi9120730]
- Xiao X, Fang C Y, Lin H and Chen J F. 2022. A framework for quantitative analysis and differentiated marketing of tourism destination image based on visual content of photos. *Tourism Management*, 93: 104585 [DOI: 10.1016/j.tourman.2022.104585]
- Yang J N, Langley R S and Andrade L. 2022. Digital twins for design in the presence of uncertainties. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 179: 109338 [DOI: 10.1016/j.ymsp.2022.109338]
- Yano K, Nakaya T, Isoda Y, Takase Y, Kawasumi T, Matsuoka K, Seto T, Kawahara D, Tsukamoto A, Inoue M and Kirimura T. 2008. Virtual Kyoto: 4D GIS comprising spatial and temporal dimensions. *Chigaku Zasshi (journal of Geography)*, 117(2): 464-478 [DOI: 10.5026/jgeography.117.464]
- Ye Y T, Jiang Y Z, Liang L L, Zhao H L, Gu J J, Dong J P, Cao Y and Duan H. 2022. Digital twin watershed: new infrastructure and new paradigm of future watershed governance and management. *Advances in Water Science*, 33(5): 683-704 (冶运涛, 蒋云钟, 梁犁丽, 赵红莉, 顾晶晶, 董甲平, 曹引, 段浩. 2022. 数字孪生流域: 未来流域治理管理的新基建新范式. *水科学进展*, 33(5): 683-704) [DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.05.001]
- Zhang J. 2020. Zhu Xi of Yang Zi River Right Track Test. Nanchang: Jiangxi Normal University (张杰. 2020. 朱熹江西行迹考. 南昌: 江西师范大学)
- Zhu Q, Zhang L G, Ding Y L, Hu H, Ge X M, Liu M W and Wang W. 2022. From real 3D modeling to digital twin modeling. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(6): 1040-1049 (朱庆, 张利国, 丁雨淋, 胡翰, 葛旭明, 刘铭崑, 王玮. 2022. 从实景三维建模到数字孪生建模. *测绘学报*, 51(6): 1040-1049) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210640]

Digital twin human geographic environment

LIN Hui¹, XU Bingli², XIAO Xin¹, CHEN Yuting³

1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. Department of Information and Communication, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China;

3. Department of Urban Planning and Design, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China

Abstract: The human geographic environment is a comprehensive environment formed by the interaction of human activities and the geographic environment, which is complex and highly vulnerable. Introducing the digital twin method to build a new framework of research on human geography issues has great disciplinary importance and application value because this framework has the characteristics of driving

the virtual according to the real, controlling the real according to the virtual, and the coordinated evolution of the virtual and the real. It also helps avoid disturbing the real environment, explores complex problems in depth, and optimizes the control scheme of real geographical problems. Based on the review of relative research in China and abroad, a conceptual model of the digital twin human geographic environment is proposed, and its systematic connotation is elaborated. The major components of this system include the real human geographic environment, the virtual human geographic environment, and the information interaction between them. Through the digital twin construction and simulation of the geographic environment, human activities as well as human-nature interaction, the virtual and real synergy, complementary advantages, and coevolution between the virtual and the real environment can be realized. Furthermore, a technical framework with bilateral technology roadmap for the implementation of digital twin human geographic environments is proposed. One route is to complete the comprehensive perception and twin reproduction of the real human geographic environment through digital accurate mapping to the virtual geography environment, and the other route is to achieve intelligent feedback of the virtual human geographic environment and its manipulation on the real human geographic environment through multichannel virtual-real interaction. On the basis of the above, a hierarchical construction scheme of the digital twin human geographic environment platform, which covers five sub platforms, namely, collaborative monitoring and environmental awareness platform, multimodal full-scale database, intelligent modeling and simulation technology integration, high-performance spatiotemporal computing engine, and cross-domain knowledge application for decision making is designed. Supported by the Nanchang Subcenter of the UNESCO International Natural and Cultural Heritage Space Technology Center, the digital twin of Jiangxi Bailudong Academy, the education base of Chinese Confucian culture, is taken as a typical case to demonstrate the construction method, main function, and result form of the digital twin human geographic environment. The conclusions are drawn from three perspectives: (1) The digital twin human geographic environment should be taken as a creative method for the exploratory learning of human geography. (2) The digital twin human geographic environment is currently the best way to build a geographic metaverse with human activities. (3) The virtual geographic environment can provide theoretical basis for the construction of the digital twin human geographic environment. Lastly, the purpose of this paper is to throw bricks and spark jade to arouse scholars' thinking on the research of coupling digital twins and human geographic environment, and to promote the sustainable development of human geography jointly.

Key words: remote sensing, digital twins, human geographic environment, virtual geographic environments, collaboration between the real and the virtual, Bailudong Academy

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42330108, 41771442, 41271402, U1811464)