

虚拟地理环境视角下地理元宇宙初探

龚建华^{1,4}, 林琚², 徐丙立³, 李文航¹, 张国永¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 江西师范大学 资源与环境学院, 南昌 330022;

3. 陆军装甲兵学院, 北京 100072;

4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:详细梳理了元宇宙、数字孪生和虚拟地理环境3个概念的内涵、源初性特征和关联集成发展趋势。提出地理元宇宙概念,依据虚实内容关系与虚实空间平行叠合特点,定义与区分了地理元宇宙的3类数字地理环境,即数字原生的虚拟地理环境、数字孪生的虚拟地理环境以及数实叠合的增强地理环境,并从时间—空间、化身人、空间参考系、在场—不在场等角度探讨了地理元宇宙的基本特性。基于人地关系以及地理元宇宙构建技术需求,建立了“人—物—场—事”映射建模、空间信息基础设施、虚拟地理实验与管理优化的地理元宇宙平台概念架构。面对逐渐展现的虚拟地理空间、化身人社会和虚实复合人地关系系统,提出建立虚拟地理环境工程学,推动地理元宇宙平台的构建和相关理论应用研究。

关键词: 遥感, 地理元宇宙, 数字孪生, 虚拟地理环境, 增强地理环境, 可计算人地关系, 虚拟科学

中图分类号: P2

引用格式: 龚建华, 林琚, 徐丙立, 李文航, 张国永. 2024. 虚拟地理环境视角下地理元宇宙初探. 遥感学报, 28(5): 1145–1160

Gong J H, Lin H, Xu B L, Li W H and Zhang G Y. 2024. Primary exploration of geographic metaverse from the perspective of virtual geographic environment. National Remote Sensing Bulletin, 28(5): 1145–1160 [DOI: 10.11834/jrs.20233004]

1 引言

2021年,随着Roblox作为元宇宙第一股成功上市,字节跳动90亿元收购Pico VR公司,在线社交平台Facebook改名Meta,百度“希壤”元宇宙公众版发布等事件的发生与影响,2021年被公认为“元宇宙”的元年(朱嘉明,2022;赵国栋等,2021)。元宇宙概念理念的广泛社会影响,既与当前全球性新冠疫情的居家隔离、在线学习会议等虚拟生活与工作有关,也与新一代(第三代)互联网(Web 3.0)发展密切相关。元宇宙是虚拟现实、区块链、人工智能、物联网、5G等多种技术的大集成和综合统摄性想象(蒲清平和向往,2023),朱嘉明(2022)认为,“元宇宙将开启人类同时在两个世界(虚拟空间、虚拟世界和现实空间、现实世界)的新生活、新时代”。在地理学界,元

宇宙、数字孪生等也引起了广泛关注,地理空间元宇宙(Geo-spatial Metaverse)、数字孪生地球、数字孪生城市、数字孪生流域等新概念与技术逐渐被提出和讨论(肖超伟等,2022;李双成等,2022;朱庆等,2022;龚建华,2022)。美国地理空间情报基金会(USGIF)和OGC(2022)提出了“地理空间元宇宙(Geospatial Metaverse)”概念,认为现实地理空间信息可以提供内容材料、丰富元宇宙建设,而元宇宙又可以转换和重塑现实地理空间;Dangermond和Goodchild(2020)在分析数字地球与数字孪生(地球)的相互关系基础上,认为数字孪生地球是数字地球的进一步发展,其强调了地球如何运行的,以及物理与社会过程、不确定性等;李德仁(2021)认为,数字孪生城市是数字城市的最高发展阶段;而由数字地球发展起来的现实黄河、数字黄河、模型黄河的3条黄

收稿日期: 2023-01-11; 预印本: 2023-04-03

基金项目: 中国科学院空天信息创新研究院前沿科学与颠覆性技术研究先导基金(编号:E211010F)

第一作者简介: 龚建华,研究方向为虚拟地理环境。E-mail: gongjh@aircas.ac.cn

河思想,则是目前数字孪生流域(龚建华,2013;宋文龙等,2022)的早期雏形。

2001年提出并发展的“虚拟地理环境 VGE (Virtual Geographic Environments)”概念思想(龚建华和林琿,2001),则与“元宇宙”内涵非常相近,二者均是关于化身人生存、生活、生产、消费等的三维虚拟世界,只是“虚拟地理环境”更侧重于现实地理环境的数字化与虚拟化。本文将从虚拟地理环境的视角出发,针对如何理解元宇宙(包括数字孪生)对于人与虚实两个世界的关系,即新展开的虚实复合人地关系,以及此背景下的人类与区域可持续发展等进行探讨。论文在仔细分析元宇宙、数字孪生与虚拟地理环境的概念思想特征和异同的基础上,提出地理元宇宙基本概念和技术平台框架,并试求建立虚拟地理环境工程学,用以研究和推进地理元宇宙构建与应用的基础理论和方法体系。

2 虚拟地理环境与元宇宙概念综述

2.1 元宇宙概念特征

元宇宙 (Metaverse),不是一个新的概念,在 1992 年 Metaverse 在科幻小说中被创建 (Stephenson, 1992),是指一个虚构的有众多化身生存和生活的条带型虚拟城市世界。然而,经过 30 余年的沉淀,在当前全球新冠疫情影响下以及数字化技术快速发展背景下火热重现的“元宇宙”,又被延续和赋予了新的使命和梦想,其隐含的新特征与涵义,目前还处在对外开放的讨论深化发展之中。

元宇宙 (Metaverse),是一个网络连接、社会共享的三维虚拟世界,也被认为是一个现实世界人、地、物的数字孪生世界。元宇宙第一股 Roblox 认为元宇宙具有 8 大关键特征(赵国栋等,2021;朱嘉明,2022):独立身份 (Identity)、社交朋友 (Friends)、沉浸式体验 (Immersive)、便捷性 (LowFriction)、内容多样性 (Variety)、随地 (Anywhere)、经济系统 (Economy)、安全 (Safety)。本文概括目前元宇宙的主要特征如下:

(1) 一个新空间、新世界:一个与现实物质世界相对等,与现实物质世界互补、相连和互动融合的,可以不断演化、永远在线的数字虚拟新世界。

(2) 一个新的数字经济文明:一个拥有基于区块链的完整数字经济系统,去中心化的三维虚拟社会世界。

(3) 一个可沉浸式体验世界:支持基于 XR (VR, AR, MR) 等终端设备进入虚拟世界,通过视觉、听觉、触觉、力觉、嗅觉等开展三维沉浸式交互、交往体验。

(4) 一个巨量人口的新世界:无限量的人们(或元宇宙原住民)基于化身(数字人、虚拟人)可以在这里同时进行社交、娱乐、创作、交易等社会生活与生产活动。

2.2 虚拟地理环境与元宇宙

基于虚拟现实技术以及 Cybertown 等虚拟世界,2001 年的《虚拟地理环境》专著提出的“虚拟界 (Virtual Realm)”与“虚拟地理环境 (VGE)”概念(龚建华和林琿,2001),从定义与本质上看,与目前的“元宇宙 (Metaverse)”概念与构想非常相似和切合。《虚拟地理环境》专著认为(龚建华和林琿,2001),“如果这个人机信息环境含有海量的数据、复杂的三维景观和相互交流交互的众多用户,那么这就会是一个与外部物质现实世界极不相同的另一世界、另一宇宙,我们把它称之为虚拟界。”虚拟界包括在线文本、在线二维以及三维的虚拟社会世界,在虚拟界的基础上,参照地理学关于“地理环境”的定义,《虚拟地理环境》专著(龚建华和林琿,2001)又提出和定义了“虚拟地理环境”的概念,即“在网络世界、虚拟界中的虚拟地理环境,也是一个客观实在且正演化展现,它可定义为包括作为主体的化身人类社会以及围绕该主体存在的一切客观环境,包括计算机、网络、传感器等硬件环境,软件环境,数据环境,虚拟图形景象环境,虚拟经济环境,和虚拟社会、政治和文化环境”。虚拟地理环境既可以是现实地理环境的表达、模拟、延伸与超越,也可以是指赛博空间中存在的一个虚拟社会(社区)世界。

因此,从概念起源和历史发展看,虚拟地理环境与元宇宙在思想本质上具有相近性,如早期都把“化身人”作为虚拟世界的核心,具有三维虚拟空间,侧重于虚拟社会(经济)活动等;但是,在与现实世界地理景观相似性、虚实环境的平行和互补性等方面,则有一定的差异,各有其

特征。而2021年后,随着元宇宙(包括数字孪生)理念、涵义被不断讨论和深化发展,虚拟地理环境与元宇宙,也开始逐渐互相影响和交叉集成,在虚实、时空、人地关系等特征方面已表现出高度的相关性、一致性,具体参见表1。所以,可以这样认为,2001年虚拟地理环境正式提出后的20余年关于虚拟化身协同、沉浸式VR/AR可视化、虚实空间认知、虚拟地理实验、虚拟地理应用等系列研究(林琿和龚建华,2002;林琿和朱庆,2005;Lin和Batty,2009;龚建华等,2010,2018;闫国年,2011;Lin等,2013;龚建华,2013),实质上就是一直在从事探索和发展“元宇宙”密切相关的理论和方法应用问题。当然,正如表1所示,当前数字技术背景和语境下的“元宇宙”思想与概念已经有了许多新的涵义,例如2021年的元宇宙概念与技术体系,在区块链、去中心化自组织DAO(Decentralized Autonomous Organization)、非同质化代币NFT(Non-Fungible Tokens)等有非常核心的创新理论基础和颠覆性技术支撑;而2001年虚拟地理环境提出时,则没有这个区块链技术的,未来元宇宙背景下的虚拟地理环境发展,则必须要充分重视区块链、数字资

产等的思想和技术。最后概括地,元宇宙与虚拟地理环境两个概念的关系,从起源性与思想本质上看,都是针对同一个“在线虚拟世界”的思考与命名,具有高度的相似性。然而,从当前元宇宙与虚拟地理环境的最新研究发展看,两个概念在内容范围、研究角度等又有一定的差异性,具体体现在:元宇宙是一个由数字信息领域商业资本与技术产业推动的概念与理念,内容、应用领域上则涉及到科幻文学美学、社交游戏媒介、体验创意经济、去中心化社会组织治理等多个行业与学科领域,所以元宇宙是一个以三维在线化身虚拟世界为平台基础的、涉及内容极其广泛的大概念,更接近于早期的“虚拟界”概念;而虚拟地理环境,则是与“(自然与人文)地理环境”概念相对应、从属于地理信息科学/地理科学的学术概念,主要涉及从地理学的空间、位置/地方、距离、场景、人地关系、空间/地图认知、数字地球等角度对于数字虚拟世界的相关技术与应用探索研究,与元宇宙的宏大大概念相比,虚拟地理环境概念则具有学科专业性、涉及的研究范围要小。

表1 VGE、数字孪生、元宇宙的概念与原初性特征对照

Table 1 Concepts of VGE, Digital Twins, Metaverse against primordality characteristics

	虚拟地理环境(VGE)	数字孪生(Digital Twin)	元宇宙(Metaverse)
概念 提出时间	虚拟界/VGE概念在1997年—1998年孕育形成(龚建华等,1999;龚建华,1997),于2001年正式提出并发表在《虚拟地理环境》专著	源于NASA 19世纪60—70年代的“阿波罗计划”以及1993年的“Mirror Worlds”,2003年M. Griececs提出“信息镜像模型”和“数字孪生”思想,2010年NASA HAFTO等提出“数字孪生”概念	1992年尼尔·斯蒂芬森发表小说《雪崩》(Snow Crash),提出“Metaverse”一词;2021年的元宇宙元年,具有了新的概念涵义(如包括区块链、数字资产、数字孪生等)
提出的 背景领域	地理(信息)科学领域,强调理解和认识规律	工业制造、计算机领域,强调通信、反馈与控制	科幻文学,在线游戏与社交等领域,侧重想象与社会
时间与空间	数字地理空间,是现实地理环境空间的数字化;在时间上,虚拟地理内容是现实地理环境的某一时间断面或片段上的多尺度映射	建立一个虚拟空间,把设备实体进行数字化等价映射;在时间上,强调现实设备(本体)与数字孪生体的即时回路反馈与全生命周期	《雪崩》中“元宇宙”是一个虚拟空间,但与现实没有时间上、地理空间上的直接对应;2021年元宇宙中的时间、空间既可虚构、也可与现实相对应
虚与实	强调虚拟地理环境与现实地理环境的虚实相似性、平行性与互补性;内容偏“实”,侧重于现实地理环境的精准数字表达和虚拟仿真	具有现实空间和虚拟空间、以及现实的“实体设备”和虚拟的对应数字孪生体”;虚实关系连通和实时回路反馈,强调“以虚强实”	《雪崩》元宇宙侧重于“虚”,是想象和虚构,描述的是虚拟社会与经济交往活动;2021年元宇宙同时强调虚与实
人与地	强调“人为中心”,明确化身人群和化身人类,建立虚实结合的人—地关系	强调“物”,一般无“人”和“地”;但在“Mirror Worlds”中有“人”、“物”、“地”等元素	《雪崩》元宇宙具有虚构的虚拟人—地关系;2021年元宇宙强调虚实融合的“人—地关系”,同时已有Z世代(1995年—2009年出生的人群)原住民

鉴于近年新一轮“元宇宙”概念与理念的广泛影响,以及“虚拟界”概念与“元宇宙”本质上的相似性,原先2001年我们设计与命名的“虚

拟界/虚拟地理环境”概念框架,本文改为“元宇宙/虚拟地理环境”新框架,并且该新框架下将进一步明确和深化虚拟地理环境涵义、以及发展

“地理元宇宙”新构想。

2.3 数字孪生与虚拟地理环境

数字孪生是目前元宇宙体系中的一个重要概念和技术组成部分。“孪生”理念起源于美国国家航空航天局 NASA 19 世纪 60—70 年代的“阿波罗计划”，即构建两个相同的航天飞行器实物（系统），一个发射到太空执行任务，另一个则留在地面通过通信传输返回参数用于监控和分析太空中飞行器的设备状态和问题（郎为民等，2022）；从计算机角度，Gelernter（1993）在 Mirror Worlds 一书中描述了一个软件定义的虚拟现实世界，原初性创建了与目前数字孪生内涵一致的“数字镜像”概念；从工业制造管理角度，2003 年密歇根大学 Michael（2005）提出“信息镜像模型”、“数字孪生（Digital Twin）”思想；2010 年数字孪生概念被明确提出和定义，是指充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程（Shafto 等，2010；Glaessge 和 Stargel，2012）。所以，数字孪生目标是在数字空间构建对应于全生命周期“实体装备（本体）”的“数字等价映射物（数字孪生体）”，用于现实物理运行设备（或系统）的健康维护保障、潜在问题发现、性能效率优化、突发事故应急、激发创新思维等。目前，数字孪生在航天、飞机、汽车、工厂等工业数字化、信息化领域，特别是在工业 4.0 智能制造领域，被认为是一种实现制造信息世界与物理世界交互融合的有效手段。

从工业、航天等领域产生和发展的数字孪生

理念与概念，与地理（信息）科学领域的虚拟地理环境、数字地球等既有联系又有差别。从虚实角度看，数字孪生与虚拟地理环境/数字地球，都是基于现实世界，建立相应的数字与虚拟空间，最后“以虚强实”服务于现实实体世界，都采用了“数字虚拟思维”、“虚实二象思维”等方式。但两者不一样的地方，数字孪生则是特别强调了虚实系统即时回路反馈和全生命周期的理念，并侧重于小规模个体“物（或物系统）”，如设备、车间、工厂等；而虚拟地理环境/数字地球，则重点关注较宏观、具有高度开放复杂性的人地系统，如区域、流域、城市等。表 1 从概念提出时间与背景领域、时间与空间、虚与实、以及人与地角度，说明了数字孪生与虚拟地理环境（以及元宇宙）的原初性异同特征点。

然而，随着数字孪生技术逐渐从工业扩展到城市、文旅等地理应用领域，以及工业/工程/城市场景等相关不同计算工具的边界逐渐消失、包含数字孪生的元宇宙的广泛影响等，数字孪生（工业领域）与虚拟地理环境/数字地球（地理领域）也渐渐交叉和集成，如国际上 Autodesk 与 ESRI 合作推进 BIM 和 GIS 数据的融合，Bentley Systems 与西门子、Cesium 等公司建立开源数字孪生联盟等。如此，数字孪生地球、数字孪生城市、数字孪生流域等技术也与工程也快速发展起来，如目前中国正在建设实施的“实景三维信息基础设施”、“数字孪生流域/数字孪生水网”等，都代表了数字孪生虚拟地理环境工程的最新前沿发展和成果，更详细的介绍可以参考数字孪生相关的白皮书与报告（表 2）。

表 2 网络资源索引
Table 2 Internet resources index

序号	资源名称	作者/单位	资源 URL	日期
1	希壤	百度	https://vr.baidu.com/product/xirang	2021-12-27
2	数字孪生城市白皮书	中国信息通信研究院	http://www.caict.ac.cn/	2020-12-17
3	数字孪生应用白皮书	中国电子技术标准化研究院	http://www.cesi.cn/202011/7002.html	2020-11-18
4	地理元宇宙—空间地图、数字孪生与新型人地关系思考	龚建华	https://blog.sciencenet.cn/blog-113556-1359249.html	2022-10-12
5	苏东坡数字人正式发布	古联数字	http://www.zhbc.com.cn/zhsj/fq/news/info.html?newsid=4028859681659e11018377b3e5941798	2022-09-26
6	中国数字孪生城市研究报告	亿欧智库	https://www.iyiou.com/research/20211209936	2021-12-09
7	Second Life	Linden Research	http://secondlife.com/	2002-04-29
8	虚实世界的先行者	MC Report	https://new.qq.com/rain/a/20220330a09afg00	2022-03-30

续表

序号	资源名称	作者/单位	资源 URL	日期
9	Roblox 提出的“元宇宙”特征在国内是怎么“以讹传讹”的?	门泽宽	https://baijiahao.baidu.com/s?id=1717928273132538867&wfr=spider&for=pc	2021-12-01
10	Join Cesium at USGIF and OGC’s Geospatial Metaverse Virtual Event	Mohammed S.	https://cesium.com/blog/2021/03/08/geospatial-metaverse/	2021-03-08
11	NVIDIA	数字孪生	https://www.nvidia.cn/omniverse/solutions/digital-twins/	2024-02-27
12	企业级 AI 数字人	商汤智能产业研究院	https://oss.sensetime.com/files/AI%20digital%20man%20whitepaper.pdf	2022-04-20
13	元宇宙发展研究报告 3.0	清华大学	http://metasinan.cn/reporter/detail?news_id=MQzBIDyS	2022-11-14

3 地理元宇宙的概念与特征

3.1 地理元宇宙概念

在 1992 年的《雪崩》书中，元宇宙(Metaverse)是指一个与现实世界相平行的虚拟城市世界，是一条长长的“大街”(100 m 宽，65536 km 长)，环绕于一颗黑色球体的赤道之上，会有上亿的化身人在虚拟“大街”上生活、交易、生产、交往娱乐等。所以，元宇宙可以理解为是一个具有三维空间和地方的虚拟社会地理世界，并具有大量的化身人(数字人、虚拟人)、众多的数字物品、虚拟建筑景观以及交通场景和其他景象等。从地理学视角，这是一个关于化身人的一个新地理空间和世界，一个新型的关于(化身)“人”与(虚拟)“地”关系的元宇宙，本文特称之为“地理元宇宙”。

从组成的内容看，元宇宙具有众多、主题多样的三维虚拟世界，地理元宇宙则具有不同尺度、多样式的虚拟地理环境构成。地理元宇宙，首先从数字世界与现实世界存在虚实对等映射和连通关系看，是现实人文、自然和区域地理环境的数字孪生世界(数字孪生体)，是一个由数字人文与自然地理要素组成的开放复杂巨系统，包括数字

孪生地球、数字孪生区域、数字孪生流域、数字孪生城市等，本文统称为数字孪生的虚拟地理环境。其次，从数字世界与现实世界不存在时空或内容(如地理景观、过程等)相对应映射关系看，地理元宇宙也可以是基于某些(自然或人文)地理要素或素材，通过体验想象、虚构组合、创意设计或在线交互交往产生的虚拟社会世界，本文特称为数字原生的虚拟地理环境。另外，从人机交互方式上，当虚拟地理环境的虚拟空间精准嵌入和叠加于现实地理空间时，则形成一个新的空间几何上无缝、视觉空间与数字空间相一致的虚实融合地理世界，本文称之为数实叠合的增强地理环境 AGE (Augmented Geographic Environment)。数字原生与数字孪生的虚拟地理环境，与现实地理环境是平行的，但虚实空间之间可以(实时)连通或不连通；增强地理环境中虚拟地理空间与现实地理空间则是配准叠合的、融合的。如此，地理元宇宙，依据虚实内容关系与虚实空间平行叠合特点，定义与区分了 3 类数字地理环境，即数字原生的虚拟地理环境、数字孪生的虚拟地理环境、以及数实叠合的增强地理环境，如图 1 所示。另外，从现实与虚拟的虚实关系看，从数字原生、到数字孪生、到数实叠合，是一个“虚”从多到少、“实”从少到多的过程。

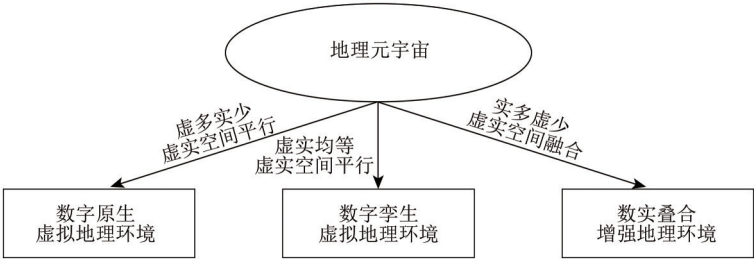


图 1 地理元宇宙组成与特征

Fig. 1 Composition and characteristics of the geographic metaverse

地理元宇宙的概念定义以及平台建设应用, 本文认为应该从现实(实体地理世界)出发, 经过数字化与虚拟化, 然后, 必须再回到现实。所以, 对于还刚刚起步的地理元宇宙, 首先应该是现实地理空间与地理环境的数字化、孪生化, 其建设目标是“以虚促实”、“以虚强实”, 是为促进现实人地关系系统的可持续发展; 其次, 基于现实的地理空间和环境, 发展数实叠合、虚实融合的增强地理元宇宙, 从而依托“现实空间与物质”的基石, 实现从“在场”向“不在场”世界的延伸和扩展; 最后, 再逐渐探索发展在数字虚拟空间中的数字原生虚拟地理环境, 实现虚拟世界的高度演进, 推进数字文明发展。需要强调的是, 地理元宇宙中虚拟世界的构建、运行和演化需要符合现实实体世界中已形成或实验创新公认的基本的物理准则、社会秩序、伦理与法律规则, 同时构建以现实准则为基础的判别和纠偏准则。换言之, 当发现虚拟世界与现实世界运行存在巨大分歧时, 应遵循现实实体世界运行的自然法则和社会规则进行纠偏, 保证虚拟世界与现实世界在组成、运行和演化过程中的映射相似性、链接协同性以及和谐共生性, 实现人类社会的可持续发展。

3.2 地理元宇宙特征

下面从时间—空间、化身人、空间参考系、在场—不在场阐释地理元宇宙的特征。

(1) 时间—空间。时间与空间, 是理解现实世界和地理元宇宙的两个基本维度。现实空间, 是物质、能量所在、所占据, 是人类生存和活动的三维实体地理世界空间; 虚拟空间, 是由计算机生成的三维数字几何空间, 是化身人、虚拟人可以生存和活动的地方和空间。对于人类而言的现实世界与实体宇宙首先是空间的, 有位置、距离、方位等, 空间距离是制约人类活动的基本变量, 空间为第一性, 时间为第二性。而对于地理元宇宙则时间为首要的, 空间则退位于第二性, 虚拟空间虽也有位置、距离等属性, 但是接触/到达某虚拟地理世界、或在虚拟世界不同地方的移动在时间上可以达到“瞬时”, 从而“零距离”成为地理元宇宙空间的一个重要特性, 距离不再成为元宇宙活动中的空间制约和束缚变量, 这样零距离带来的时空压缩, 就会影响和重塑现实地理空间

以及相关的时空活动。

在地理元宇宙, 空间是数字化的、虚拟的, 是“虚”的, 但在元宇宙活动花费的时间是现实的、实实在在的, 不是“虚”的, 所以, 时间依然是稀缺性资源, 存在着在虚拟空间与现实空间活动时间的合理分配和组合优化问题。

最后, 从空间认知角度看, 现实空间、虚拟空间都是人类视觉、听觉、触觉等可以感知的空间, 但是对于地理元宇宙中沉浸式多通道虚拟空间感知与认知, 与现实实体空间的感知认知比较, 则具有特别的新特征, 例如, 在元宇宙VR中存在“空间压缩”现象(浙江大学心理与行为科学系李峙研究组和腾讯研究院S-Tech工作室, 2018), 即VR中的感知距离与真实地理空间中的感知距离相比大约只有70%。

(2) 化身人类型。元宇宙中存在大量的化身人, 从虚拟(地理)环境的化身人主体形态上看, 化身是指主体在元宇宙中的三维形象, 其不仅是作为主体的“人”在虚拟(地理)环境中的直观可视化表达, 也是现实主体(真人)进入虚拟(地理)环境的直接媒介通道。

目前, 各类主体在虚拟(地理)环境中的化身多种多样, 其样貌、尺寸、风格等均可能有着明显的差异, 且一个主体也可能有着多个不同的化身(分身)。根据同现实中真人的相似程度, 化身可以分成3大类: 抽象化身、意象化身和具象化身。抽象化身即以某种抽象化的符号或几何图形来代表主体, 一般可用球体、立方体、胶囊体等图形, 一般用于大规模人群行为科学实验等; 意象化身即以某种拟人化的艺术形象(如卡通人物形象等)来代表主体, 意象化身常被用于影视、游戏等娱乐或教育领域; 具象化身即用一个与主体高度相似或写实的实体形象来代表主体, 其不仅包括位置、身高、身材等时空或特征属性, 还包含等了样貌、衣着等形象细节。在虚拟(地理)环境中, 高度还原的具象化身不仅应该实时再现现实主体的姿态、动作和手势等微观行为, 同时也应该能够实时再现现实主体的表情等超微观行为。

化身人主体, 从驱动力角度, 可以分为真人心智驱动和计算机计算驱动两大类。其中真人心智驱动主体, 是指现实主体, 借助于一定类型的化身表达, 在交互设备如VR、AR设备等支持下,

实时控制和驱动化身人。而计算驱动则又包括传感数据、规则模板驱动、数理模型以及人工智能(AI)等驱动方式。目前元宇宙中的数字人、虚拟人,应该属于具象化身类型,当地理元宇宙中有成千上万的化身人,就会产生新型的“化身”人—“虚拟”地关系,成为一个新的虚拟社会与经济系统,与现实的人地系统相互联系结合和协同作用后,会产生复杂的、可演化的虚实复合人地关系系统。

(3) 元宇宙空间参考系与地图。元宇宙,包含巨量、巨大的虚拟世界,其全域虚拟空间框架,需要一个可以定位和导航的地理参考基准,需要表示虚拟世界空间分布的新型“地图”。由于在元宇宙中的空间移动,距离阻力为零,从一个虚拟世界到另一个虚拟世界,可以采用“瞬移(teleport)”方式,以及存在虚拟空间/虚拟世界嵌套虚拟空间/虚拟世界的复杂三维(或高维)结构,所以,元宇宙的全域全景地图,是否需要采用传统现实世界的欧几里得几何制图原理方法,则是一个新的问题,例如,是否可以采用混合传统空

间制图加上“节点—节点”的网络制图的混合方法表达元宇宙?

另外,对于元宇宙的某一局部虚拟地理环境而言,都需要一张地图表达其空间参考原点、空间范围大小、以及化身人、物品和景象等的空间分布。地理元宇宙包含数字原生和数字孪生的虚拟地理环境地图,对于数字原生的虚拟地理环境,其虚拟空间参考系可以自己选择和确定,一般都采用“网格”作为地图几何和制图基础。如图2所示,分别表示“第二生活”和“希壤”两个元宇宙虚拟世界的2022年地图(地图网络资源链接见表2)。然而,地理元宇宙中的数字孪生虚拟地理环境,由于是现实世界的人群、空间几何、地物、场景和过程事件等的真实表达,以及孪生技术要求的虚实链接融合等,虚实参考坐标系上必须精准统一的,这时的虚拟地理环境地图制作技术与使用方式,与现实世界相类似一致。这里补充一点,元宇宙的时间参考系,在原生虚拟世界一般也是创造者自己确定,但是在孪生原生虚拟世界,则应该与现实世界相对应和协调同步。

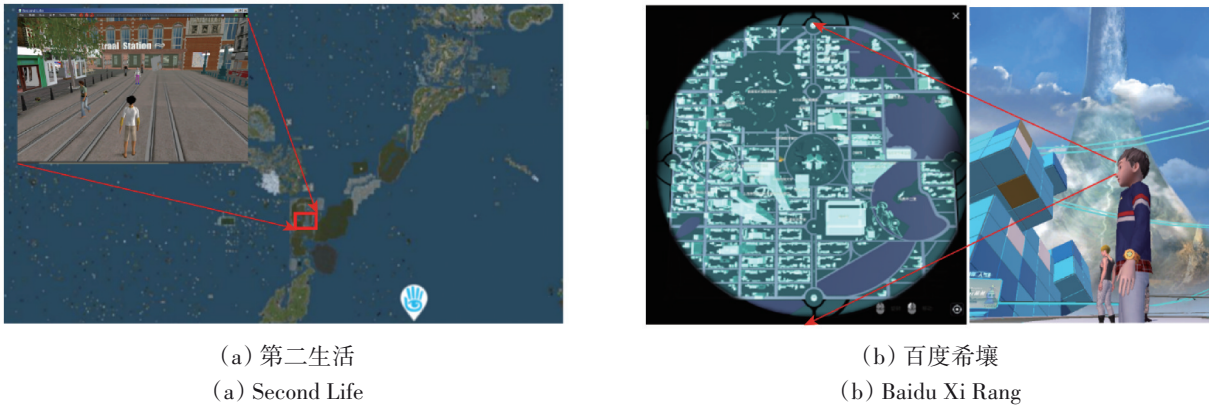


图2 元宇宙地图
Fig. 2 Map of the metaverse

(4) 在场与不在场。从在场与不在场看,元宇宙中3类数字地理环境各有其特点。数字原生的虚拟地理环境,强调想象、创意、虚构等,以艺术、设计、可能性为先,主要体现对于“不在场”事物的表达和探索,目前以Second Life、希壤等虚拟世界为典型代表;数字孪生的虚拟地理环境,强调相似对等映射、实时回路反馈、分析控制优化等,是以科学为先,主要体现对于“在场”事物的表达、分析和模拟优化,目前以

“Ominiverse Earth-2”、中国数字孪生流域等为典型代表。数实叠合的增强地理环境,则是基于现实位置和环境,以真实人的具身交互方式,通过AR设备等接入到地理元宇宙,强调对于现实地理环境的信息增强,以现实地理实践为先,主要体现“在场”与“不在场”的事物的拉近、集聚和融合,目前以基于Hololens AR的综合视觉增强系统(IVAS)以及XReal、Rokid AR眼镜系统等为典型代表。

4 地理元宇宙平台概念框架

在地理（信息）科学，数字孪生技术以及虚拟地理环境平台的建设，是地理元宇宙中应该最先能落地并具有“以虚强实”的现实应用价值，所以，本文以数字孪生为核心，结合区块链技术的去中心化自组织（DAO）、非同质化代币（NFT）等方法，设计与讨论地理元宇宙平台的概念与技术框架。

地理元宇宙平台的概念框架（图3），主要包括3大部分，具体如下：（1）“人—物—场—事”映射建模。从多尺度人—地系统的组成与内容看，现实地理环境包括人（个体/群体）、物（物体/物

件/设备）、场（面场/体场）、事（过程/事件）4大部分，即把“人—地”中的“地”具体展开为“物”、“场”和“事”，因此，可以从上述4方面开展虚拟地理环境的三维等价映射建模。（2）支持地理元宇宙的空间信息基础设施，包括“感”、“算”、“端”3个方面的技术和设备体系。（3）虚拟地理实验与管理优化。基于构建的地理元宇宙系统，可以开展两个主要的创新实践和目标，即虚拟地理模拟实验与现实地理系统（即“人—地关系”系统）的优化调控、以及虚拟社会地理实验与数字社会经济系统（即“人—人关系”系统）的管理优化。

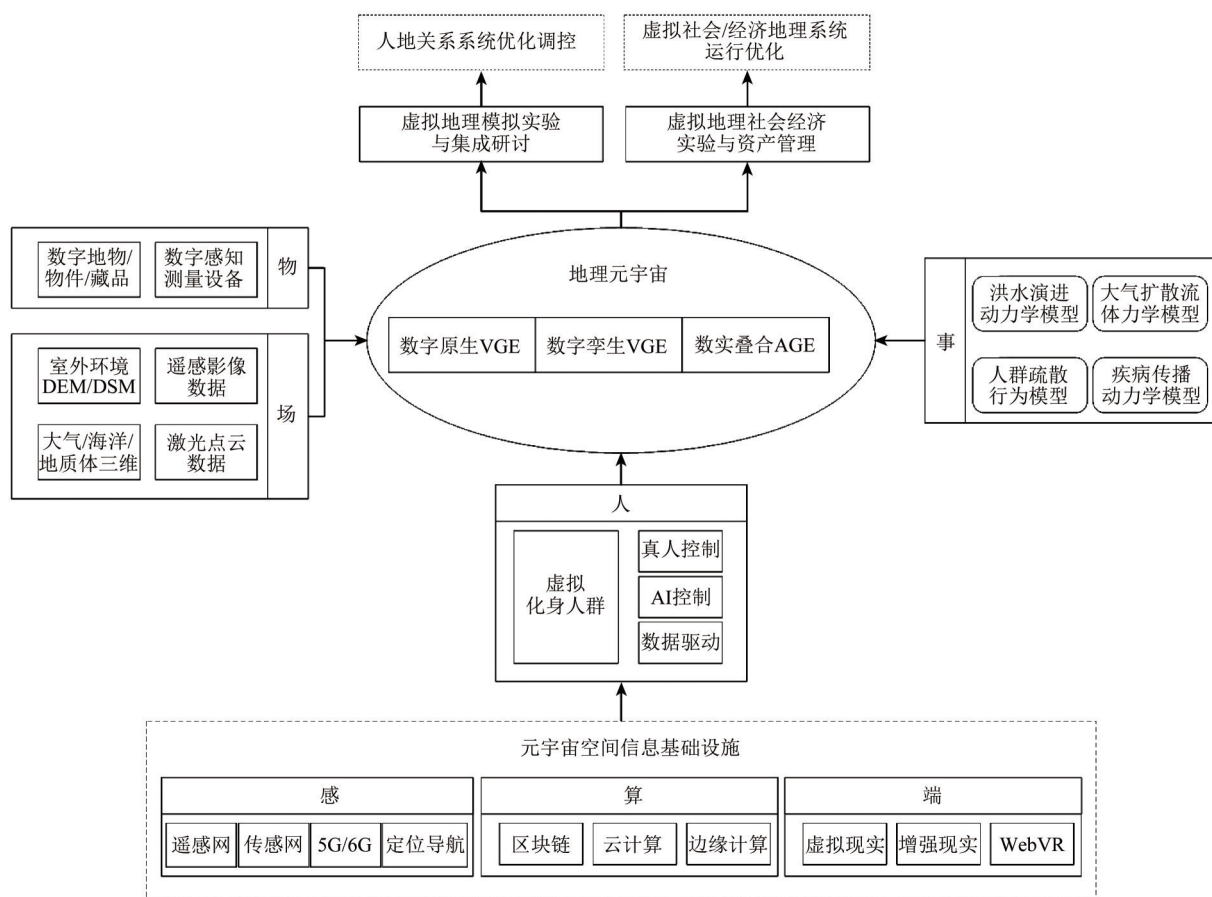


图3 地理元宇宙平台概念框架

Fig. 3 Conceptual framework of geographic metaverse

4.1 “人—物—场—事”映射建模

4.1.1 人

地理环境中人的建模重构是地理元宇宙的核心，具体包括个体化身建模、化身群体行为建模、

现实群体活动孪生建模、机器人孪生建模。（1）个体化身建模，目前在元宇宙中主要是虚拟数字人的建模，包括三维形象（面部、头发、身体、衣服、不同角色风格等）、文本驱动、口型驱动、表情驱动、肢体动作驱动、AI交互驱动等建模；

(2) 化身群体行为建模，可以分为由 VR/AR/MR 设备支持下的真人实时驱动的行为建模、机理模型（如社会力模型、速度障碍模型、连续模型等）驱动的行为建模、AI 模型（如强化学习模型）驱动的行为建模等；(3) 现实群体活动孪生建模，包括室内外环境下人群活动的空间定位、群体时空轨迹获取处理等技术；(4) 机器人孪生建模，机器人是一类具备一定自主能力的特“类人”主体，机器人依靠数据、算法、AI 构成的模型感知真实或元宇宙虚拟环境，并驱动数字或实体机器人运动。因此机器人孪生建模包括数字模型和实体模型的双向建模，即根据数字机器人的形态和功能构建其实体物理模型，或根据实体机器人的结构和功能构建其数字孪生的数字机器人化身。

图 4 表达了虚拟数字人 Vila（图 4(a)）与苏东坡（图 4(b)）（网络资源链接见表 2）、VR 实时动作驱动的化身人（图 4(c)）、以及社会力模型（图 4(d)）和 AI 强化学习驱动（图 4(e)）的应急疏散化身人群。人的建模目前需要攻克的主要难点有：(1) 三维精细数字人的构建。三维精细数字人可以在地理协同研讨（数字专家）、地理教育（数字老师）、文旅宣传（数字讲解员）等应用，但其精细构建和精准控制是难点，另外制作流程复杂、成本偏高；(2) 不同数量规模层次的几人、几十到上百人、成千上万人以上的化身动作与社会地理行为的动态建模与高效渲染可视化。

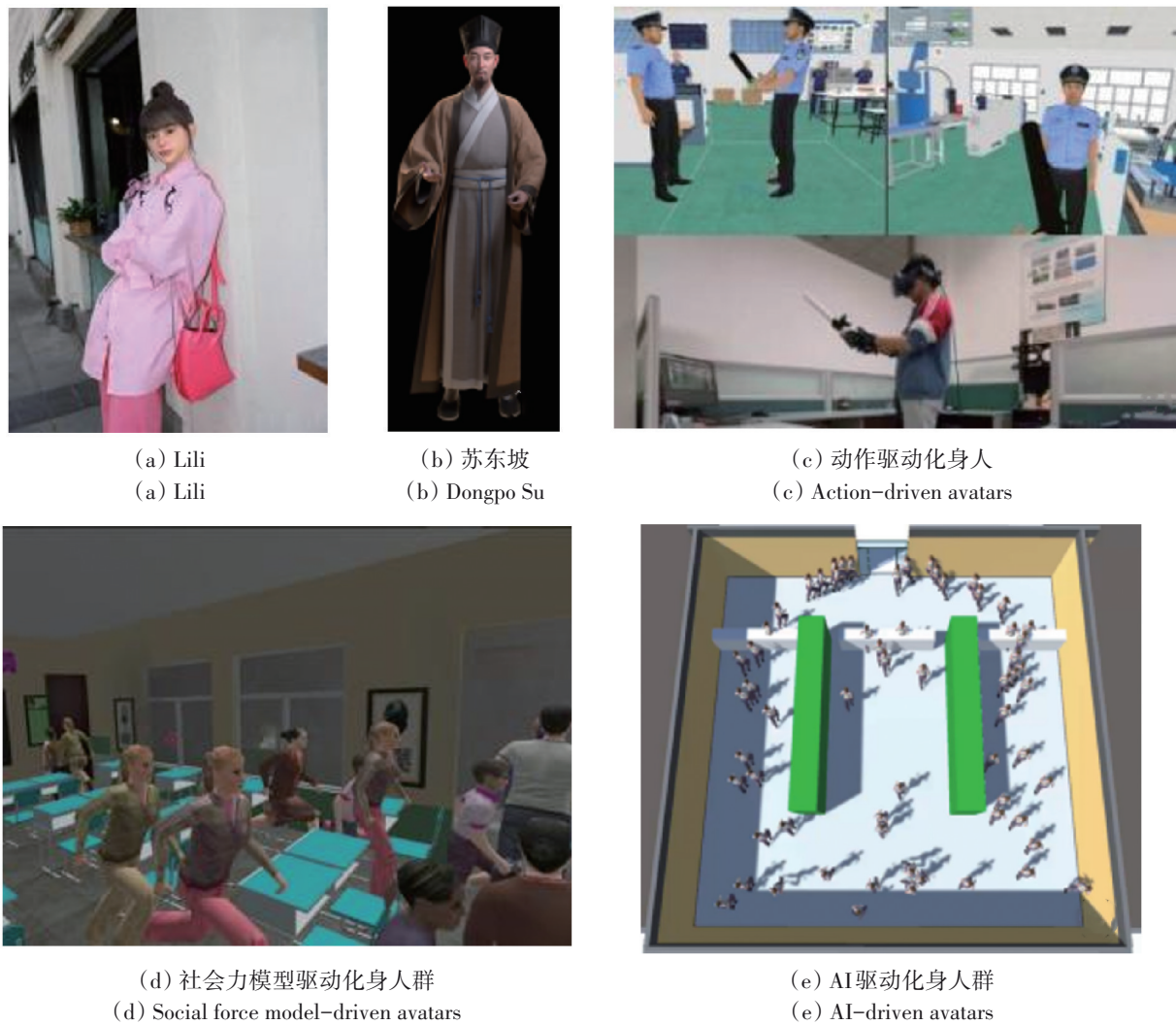


图 4 化身人类型，虚拟数字人
Fig. 4 Types of avatars, virtual digital person

4.1.2 物

物,是指地理环境中独立个体存在的自然物体或人工物,包括地物、物件和感知测量设备等。“物”的三维孪生建模,是地理元宇宙构建的重要内容生产任务之一。其中,对于地物,则包括如建筑、树木、桥梁、道路、水体等地理物体的三维建模;物件,则表示社会生产与生活中的人工制造物,如汽车、飞机、高铁、挖掘机、家具、家庭机器人等,这些以前地理系统数字化考虑较少;感知测量设备,则包括观测、感知万物和环境的设备、实验测量设备与工具等。在地理元宇宙中,通常可采用高分辨率卫星遥感、无人机遥感、地面激光扫描以及人工建模等传统方式开展“物”的三维综合建模,随着以 Chat GPT 为代表的 AIGC (AI Generated Content) 技术的发展,利用 AI 通过自然语言描述创建三维模型甚至地理场景成为一种极具潜力的建模方式。元宇宙数字孪生地理技术,与传统侧重于静态“物”的三维建模不一样的,是更需要关注对于“物”动态或运行状态的实时信息感知与全生命周期映射建模,例如,对于建筑或大坝等变形的实时监测与建模等。目前“物”三维建模的技术难点包括:(1)高精度建模、自动化高效建模、轻量化建模、遥感影像地物提取、无人机遥感倾斜摄影地物单体化、基于遥感数据的人工建模与美观处理等;(2)不同三维格式模型如 BIM、CAD、GLB 等的互操作和快捷接入到统一 VGE 场景的技术标准等。最后,需要说明的是,在地理元宇宙中,尤其在数字原生地理空间,还存在新的数字“物”,可以不与现实地理环境的“物”相对应,可以是想象或创意的地理数字物品,如创意地图、虚构建筑等。

4.1.3 场

场,是指地理环境中的地理物体、地理景观、地理属性要素等在一定区域内的连续空间分布,数学上可以视为在空间和时间的某一点赋予一个地理属性变量,并以一种空间分布连续的方式存在。可以采用遥感与测绘等技术,大面积快速地获取相关影像数据、点云数据,或者基于有规则的样本点采集加密等,构建出数字孪生地理场,并通过虚拟引擎如 Unity3D、Unreal、Cesium 等,辅以大规模数据调度和场景渲染算法,在元宇宙虚拟空间中重构出逼真的孪生虚拟地理环境。地

理场建模,包括几何、属性连续空间分布的三维数字面场或体场构建。三维数字地理面场建模,则主要包括数字高程模型 (DEM)、数字表面模型 (DSM)、数字正射影像 (DOM)、倾斜摄影三维模型、激光点云等的数据获取与生产;三维数字地理体场建模,则包括大气(云、空气质量、沙尘等)、地质、水体(海洋、湖泊、河流等)等三维体素或体元地理属性数据的获取与构建。在地理场数字孪生时,为了更好地将虚拟空间可度量,虚拟地理环境/虚拟地理空间需要有可伸缩的立体空间坐标系,这里说的可伸缩是指可适用于三维地理空间的各个尺度,尤其是从个体视角的微观尺度,到世界视角的宏观尺度都应该是连续的,从而使地理元宇宙可度量、可测量、可计算。

4.1.4 事

事,主要指地理环境中发生的具有时间演变的现象过程或事件,具体可以是复杂地理环境中的自然过程(如台风、地震、滑坡、洪水、沙尘暴等),或是因人群社会活动而产生的各种社会地理事件(如集会、踩踏、疏散、疾病传播等),或是自然与人文要素综合的地理过程(如城镇演变、土地覆盖变化等)。对地理“事”的表达方式可以分为:(1)地理过程或事件观测大数据的动态表达,通过全过程、全时段(或全生命周期)的大数据感知数据,进行过程、事件的实时表达或复盘重演;(2)需要建立数理模型,如大气扩散模型、洪水演进模型、火灾蔓延模型、疾病传播模型等,进行地理事件过程建模;(3)采用人工智能技术(如元胞自动机、多智能体、深度强化学习等),进行事件过程建模。目前对地理“事”数字孪生建模的技术难点主要在于:1)数理计算量非常大,目前还很难做到实时数值计算和实时的可视化渲染交互;2)传统的过程数理模型,强调的是计算的数值结果以及第三人称视角的可视化抽象表达,但是基于第一人称 XR 技术的地理过程的沉浸式交互体验,需要在三维精细表达、逼真效果、多通道自然交互等方面开展新的技术设计和研发。

4.2 元宇宙空间信息基础设施

支持地理元宇宙的空间信息基础设施,可以概括为“感”、“算”和“端”3个方面的技术和设备体系。(1)“感”,是指空天地一体化遥感网、

传感网、以及通信与定位导航系统等,是元宇宙虚拟空间和现实空间彼此感知、信息相互连接互通、以及定位导航的基础和纽带。(2)“算”,是将不同终端和内容融合在一起,支撑地理元宇宙按照一定的规则正常运行、运作的各种软件、硬件和算力资源,目前可能包括各种云计算、分布式计算、边缘计算、区块链等,未来应该有更先进的技术如量子计算等。需要说明的是,“算”是地理元宇宙的运行规则和运行机制的具体执行者,是将虚拟地理环境中的各种对象的内置机理模型在冲突控制、协调的基础上,完成计算和共同演进的过程。(3)“端”,即终端,是指通过沉浸式虚拟现实设备(如HTC VIVE、Oculus Quest, Pico等),沉浸式增强现实设备(如HoloLens等)、或全息设备等,辅以全身动作捕捉和虚实映射等方式,实现现实人与元宇宙虚拟环境、虚拟对象、虚拟过程的自然交互和友好体验。但在目前技术水平下,地理元宇宙主要以PC机、移动智能设备端的入口为主,在技术上多采用C/S或B/S的方式。VR/AR等终端,正在快速发展,在地理元宇宙应用领域,目前也刚刚开始,主要用于沉浸式地理可视化演示体验、空间认知实验、地理科普与教育等。

4.3 虚拟地理实验与管理优化

(1) 虚拟地理模拟实验与现实人地关系系统优化调控。地理元宇宙,尤其是数字孪生VGE构建和研究目的,是用以指导现实地理系统健康安全运行、优化现实人地关系及其运行效率、以及创造性地发展数字经济/社会等,其中,虚拟地理模拟实验与优化调控是一个关键部分。具体而言,通过上述对地理环境的“人一物一场一事”等价映射建模,可以构筑多样式、多尺度的虚拟地理环境,如数字孪生地球、数字孪生流域、数字孪生城市等。然后,在此基础上可以开展虚拟(虚实)地理计算实验或演练实验,通过情景模拟、不确定性分析、以及多专家综合集成研讨等,形成优化决策支持方案,最后通过通信与控制回路,实现对于开放复杂性现实人地系统的优化管理与调控。在具体虚拟地理实验方式上,可以分成至少两种类型:1)通过现实世界与虚拟地理环境的联动,对某一事件,在现实世界与虚拟空间开展平行推演,并利用虚拟空间中的超前计算能力和

优势,提前预测事件的走向趋势,继而指导、优化现实事件的运行,影响其发展演化过程;2)对某些特殊事件或小概率事件,在虚拟地理环境中,基于符合现实规则的机理模型,推演事件发生发展的全过程,形成各种处置预案,以便在现实世界中发生该事件后,能有据可依、及时处置,降低事件对现实人地关系的影响和相关后果。

(2) 虚拟社会地理实验与数字社会经济管理优化。从现实地球与实体宇宙的数字孪生空间看,地理元宇宙的空间范围可以是全球甚至是无限扩张的数字虚拟空间。巨大的空间可容纳海量的地理时空对象,正如前面所述,通过人一物一场一事分类建模,将现实世界中的主客体对象进行数字化三维重建和映射,就可以生成构建地理元宇宙的基础数据素材。从数字经济和Web3.0角度,这些数据素材不能仅仅看作与传统三维GIS中的点、线、面、体的时空基础数据,或者是构建“地理元宇宙”大厦的材料与基石,而且同时也可以作为有权属的一种数字资产(如地理数据资产、虚拟土地资产、地图数字藏品等)(Yoo, 2022),进行定价、交易和流通等,因此支持与提供地理数字资产管理和交易的经济系统是地理元宇宙平台需具备的一个重要基础功能。

目前,基于区块链技术的加密货币的运行以及非同质化代币(NFT)、去中心化金融(DeFi)、去中心化自治组织(DAO)等技术(Hudson-Smith和Batty, 2022),均为地理元宇宙的价值创新、知识产权保护、数字资产交易和新型社会管理组织的构建和发展,提供了大量可用的技术路线和工具箱。NFT、DAO等作为一种数字空间原生的新技术与新架构,可以采用探索性的虚拟社会和经济地理实验方法,通过不断的技术迭代改进、实验试错、不确定性消除、安全风险减小等,促进虚拟数字地理资产创新、交易、流通和组织的管理优化。所以,去中心化思想和技术的引入,为地理元宇宙中的数字资产和虚拟社会运行提供了新的管理模式,使其具备了模拟现实世界中部分经济和社会运行活动的的能力,为实现地理元宇宙的自组织运行演化提供理论与技术支撑。

5 建设虚拟地理环境工程学

Batty (1997) 提出“虚拟地理学(Virtual

Geography) ”概念, 张之沧等(2009) 构建“虚拟空间地理学纲要”, 马蔼乃(2010) 提出建立“虚拟科学”。鉴于2001年以来20余年的虚拟地理环境理论与技术的探索积累, 当前VR/AR技术、数字孪生、元宇宙等的快速发展, 以及人才培养与学科发展需求等, 本文提出建设可以促进地理元宇宙建设和应用发展的虚拟地理环境工程学。

5.1 研究对象与学科定位

虚拟地理环境工程学是关于虚拟地理环境、以及虚拟地理环境与现实地理环境集成融合的基本概念、基本原理、技术实现、行业应用等的一门学科, 可以支撑以地理时空参考为基础的虚拟或虚实耦合工程实践, 其对数字孪生地理系统、地理元宇宙等工程构建, 具有关键的理论、方法指导和支持作用。

结合钱学森关于包含是11个门类的现代人类知识体系框架的认识(于景元, 2001), 马蔼乃(2010) 提出建立与“自然科学”相对应的“虚拟科学”设想, 并把虚拟科学作为人类知识体系的第12个门类。马蔼乃认为地理环境, 已经从农业社会的自然环境发展到工业社会的自然环境与人工环境, 在未来的信息社会, 还有虚拟环境。研究自然环境有自然科学的支撑, 研究人工环境, 应该有人工科学的支撑, 而研究虚拟环境, 需要发展虚拟科学。用虚拟现实的技术研究虚拟环境, 建立虚拟科学, 从而在计算机中研究清楚人工环境与自然环境的和谐, 再付诸于实践。因此, 虚拟地理环境工程学, 属于虚拟科学的范畴, 同时由于与现实地理环境相对应的虚拟地理环境本质上植根于地理科学, 所以, 虚拟地理环境工程学, 可以理解为主要基于虚拟现实/增强现实/混合现实技术与地理学, 研究虚拟地理环境基础理论、技术方法体系以及地理元宇宙工程创建应用, 支撑全球与区域虚实人地系统可持续发展的一门交叉性学科。

5.2 内容体系

虚拟地理环境工程学, 应该包含基础支撑学科(如地理科学、地理信息科学、计算机科学、认知科学等)、学科基本理论方法、技术体系、应用体系等, 下面从工程哲学、理论、技术和应用4个层面, 阐述虚拟地理工程学包括的基本内容

架构。

(1) 工程哲学层面: 虚实论、虚拟科学哲学、地理元宇宙工程哲学、数字孪生地理工程哲学、虚拟地理美学、虚拟地理伦理与法律等。

(2) 理论方法层面: 虚实复杂地理系统工程原理、虚实空间认知、具身认知与形象思维、虚拟(虚实) 地理实验、地理元宇宙虚拟工程设计与建设理论、地理数字资产与数字经济、去中心化社会组织、可计算虚实复合人地关系理论等。

(3) 工程技术层面: 时空大数据感知与采集、三维景观建模、地理过程建模、人群行为建模、空间智能建模、大数据可视化与挖掘分析、Web3D/WebXR、虚拟现实多通道交互、增强现实位姿与虚实融合、三维数字人、区块链、云计算、三维数据与平台标准体系等。

(4) 工程应用层面: 公众、政府与专题地理元宇宙平台构建与应用; 数字孪生地球、数字孪生城市、数字孪生流域、数字孪生矿山等工程建设与优化控制; 地理元宇宙工程人才教育与培训等。

6 问题与讨论

(1) 关于“地理元宇宙”的命名与涵义。在元宇宙大框架中, 目前存在“产业元宇宙”、“消费元宇宙”、“金融元宇宙”、“文化元宇宙”、“林草元宇宙”、“城市元宇宙”等不同行业或主题的分支, 参考“地理空间元宇宙”名字, 从地理学人地关系角度, 本文提出并定义的“地理元宇宙”, 如何在大元宇宙框架中确立与其他分元宇宙的相关关系, 以及“地理元宇宙”的命名合理性和内涵外延, 都需要进一步的讨论澄清和深化研究。

(2) 地理元宇宙中关于数字原生世界的“虚构与实在”的理论关系问题。与现实世界(实在世界) 相等价对应的数字孪生虚拟地理环境, 其虚实关系比较清晰和容易理解。但是对于地理元宇宙中的数字原生虚拟地理环境, 因为与虚构、想象、虚拟交互演化等相关, 涉及到“可能世界”、“不可能世界”和“实在世界”的逻辑组合和通达关系等(赵毅衡, 2013), 其“虚构与实在”、“真”与“假”、“可能性与必然性”等非常复杂, 需要如“可能世界理论”等的跨学科理论创新研究。

(3) 地理元宇宙的去中心化技术的应用问题。基于区块链构建的 NFT、Bitcoin、DAO 应用, 为地理元宇宙中虚拟数字资产的管理、交易支付、社会组织管理提供了新的运行思路, 为实现地理元宇宙的自主运行和演化提供了理论依据和技术探索。在去中心化思想下, 地理元宇宙是一个更加开放和平等的自组织系统; 同时, 去中心化技术从架构上确保了每位参与者的权级平等, 使得参与者既是地理元宇宙的建设者, 也是内容的消费者。然而, 虽然去中心化为地理元宇宙发展提供了广阔的发展空间, 但当前的基于区块链技术的应用也存在数字资产波动性大、风险高、交易效率偏低, 以及与现行的中心化管理冲突矛盾、法律监管存在分歧等问题。因此在当前阶段, 去中心化技术在地理元宇宙中的应用仍处于理论探索和原型实验阶段, 距成熟应用还有较远的距离。

(4) 地理元宇宙的虚实空间认知与思维问题。心理学是虚拟现实的物理学, 地理元宇宙涉及到 VR、AR 和 MR 技术, 沉浸式虚拟空间和虚实融合空间的感知、认知和具身交互, 与传统的现实空间认知、空间交互有何异同? 另外, 钱学森认为灵境 (VR) 技术会带来形象思维、灵感思维等的大发展, 如何结合传统地理学的地理空间思维、地图/图形/图像思维、以及人本主义地理学的地方多通道感受论等 (于景元, 2001; Tuan, 1990), 发展地理元宇宙的新型虚实地理空间/信息/具身认知、创造性地理 (形象) 思维和化身人集聚的社会思维, 是地理信息科学空间认知领域的一个新问题和挑战。

(5) 地理元宇宙演化发展中新型人地关系理论问题。人地关系是地理学的研究核心, 随着元宇宙、数字孪生技术等的发展, 李双成等 (2022) 提出采用孪生空间替代传统地理学中整合度不高的三元空间即自然地理空间、人文社会空间和地理信息空间, 以有效开展地理学综合研究。本文认为, 除了需要研究 (数字) 孪生空间外, 还需要进一步发展新型的虚实复合人地关系理论。元宇宙与现实宇宙、数字孪生地球与现实地球、虚拟地理环境与现实地理环境、以及化身人 (数字人、虚拟人) 与现实人 (自然人、机器人) 等之间的相互关系与组合复合, 将会出现非常复杂的新型 “人” 与 “地” 的关系, 需要构建和发展新的人地关系理论框架和方法体系。

7 结 语

作为中国地理学界元宇宙、数字孪生等的早期探索和开拓者, 从 2001 年成立至今的虚拟地理环境研究学术团体, 通过 20 余年的探索发展, 已初步建立了虚拟地理环境的理论方法架构和组织体系, 在 2017 年成立了 “国际数字地球学会中委会虚拟地理环境专业委员会”, 组织召开了共 8 届的 “全国虚拟地理环境学术会议”。2021 年元宇宙的兴起与快速发展, 给虚拟地理环境提供了更广阔的发展背景和舞台, 同时在前沿理论、技术工程、人才培养和学科定位等方面也提出了新挑战。

本文对于元宇宙、数字孪生与虚拟地理环境的概念起源、特性和相互关系, 进行了较为详细的梳理和总结, 认为元宇宙与虚拟地理环境在概念理念上具有高度的相似性。考虑到元宇宙涉及到很多学科、行业以及空间基座等, 提出地理元宇宙概念以及 3 个组成部分, 即数字原生的虚拟地理环境、数字孪生的虚拟地理环境和数实叠合的增强地理环境, 认为地理元宇宙首先是关于现实地理空间与环境数字化映射的孪生虚拟世界, 即关于实体地理空间的元宇宙, 其次, 因为元宇宙包括了三维虚拟空间、虚拟地方、虚拟景观、以及化身人社会经济活动等, 所以本质上元宇宙就是关于 (化身) “人” 与 (虚拟) “地” 关系的 “地理元宇宙”。论文从 “人一物一场一事” 映射建模、空间信息基础设施以及虚拟地理实验与管理优化方面, 讨论了构建地理元宇宙平台的概念架构; 考虑到虚拟地理环境 20 余年的积累发展, 地理元宇宙的构建与应用, 以及虚拟科学发展和人才培养等, 提出了建设虚拟地理环境工程学的需求和初步设想。

(地理) 元宇宙的发展刚刚起步, 还存在有大量的理论技术挑战和可能的社会 (伦理) 问题、虚拟经济泡沫、安全法律风险, 但是其展现的数字 (孪生) 空间场所、虚拟化身人社会、数字创意经济、虚实共生世界等, 将会逐渐形成一种新型的虚实复合可计算人地关系, 从而对于全球与区域人地系统演化、人类社会可持续发展产生巨大影响, 急需在基础理论、关键技术、工程应用等进行跨学科的系统性前沿研究与突破, 然而这也正是虚拟地理环境工程学、地理信息科学和地理科学创新发展的新机遇与挑战。

参考文献 (References)

- Batty M. 1997. Virtual geography. *Futures*, 29(4/5): 337-352 [DOI: 10.1016/S0016-3287(97)00018-9]
- Dangermond J and Goodchild M F. 2020. Building geospatial infrastructure. *Geo-Spatial Information Science*, 23(1): 1-9 [DOI: 10.1080/10095020.2019.1698274]
- Gelernter D. 1993. *Mirror Worlds: Or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox... How It Will Happen and What It Will Mean*. Oxford: Oxford University Press
- Glaessgen E H and Stargel D S. 2012. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu: AIAA [DOI: 10.2514/6.2012-1818]
- Gong J H. 1997. *Geo-Visualization--Theory, Technique and Application*. Postdoctoral Report of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (龚建华. 1997. 地学可视化——理论、技术及其应用. 中国科学院地理科学与资源研究所博士后出站报告, 北京)
- Gong J H. 2013. On thought and methodology of virtual geographic experiment. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 30(4): 399-408 (龚建华. 2013. 论虚拟地理实验思想与方法. 测绘科学技术学报, 30(4): 399-408) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2013.04.012]
- Gong J H, Li W H, Zhang G Y, Shen S, Huang L and Sun J. 2018. An augmented geographic environment for geo-process visualization-A case of crowd evacuation simulation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(8): 1089-1097 (龚建华, 李文航, 张国永, 申申, 黄琳, 孙廩. 2018. 增强地理环境中过程可视化方法——以人群疏散模拟为例. 测绘学报, 47(8): 1089-1097) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20180111]
- Gong J H and Lin H. 2001. *Virtual Geographic Environments - A Geographic Perspective on Online Virtual Reality*. Beijing: Higher Education Press (龚建华, 林珪. 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, Lin H, Xiao L B and Xie C J. 1999. Perspective on geo-visualization. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 3(3): 236-244 (龚建华, 林珪, 肖乐斌, 谢传节. 1999. 地学可视化探讨. 遥感学报, 3(3): 236-244) [DOI: 10.11834/jrs.19990314]
- Gong J H, Zhou J P and Zhang L H. 2010. Study progress and theoretical framework of virtual geographic environments. *Advances in Earth Science*, 25(9): 915-926 (龚建华, 周洁萍, 张利辉. 2010. 虚拟地理环境研究进展与理论框架. 地球科学进展, 25(9): 915-926) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2010.09.0915]
- Hudson-Smith A and Batty M. 2022. Ubiquitous geographic information in the emergent Metaverse. *Transactions in GIS*, 26(3): 1147-1157 [DOI: 10.1111/tgis.12932]
- Lang W M, Tian S B, Li Y G, Yu L Q and Wang Z Y. 2022. The evolution of digital twin. *Telecommunications Information*, 7: 1-3, 9 (郎为民, 田尚保, 李宇鸽, 余亮琴, 王振义. 2022. 数字孪生的前世今生. 电信快报, (7): 1-3, 9) [doi: 10.3969/j.issn.1006-1339.2022.07.001]
- Li D R. 2021. Smart cities based on digital twins. *China Internet*, (7): 12 (李德仁. 2021. 基于数字孪生的智慧城市. 互联网天地, (7): 12)
- 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]
- Lin H and Batty M. 2009. *Virtual Geographic Environments*. Beijing: Science Press
- Lin H, Chen M and Lu G N. 2013. Virtual geographic environment: a workspace for computer-aided geographic experiments. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(3): 465-482 [DOI: 10.1080/00045608.2012.689234]
- Lin H and Gong J H. 2002. On virtual geographic environments. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 31(1): 1-6 (林珪, 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 and Zhu Q. 2005. The linguistic characteristics of virtual geographic environments. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 9(2): 158-165 (林珪, 朱庆. 2005. 虚拟地理环境的地理学语言特征. 遥感学报, 9(2): 158-165) [DOI: 10.11834/jrs.20050225]
- Li Zhi Research Group, Department of Psychological and Behavioral Sciences, Zhejiang University and S-Tech Studio Tencent Research Institute. 2018. *VR Tide: Social Implications of VR: Body, Brain, and Soul*. Shanghai: Shanghai Education Publishing House (浙江大学心理与行为科学系李峙研究组, 腾讯研究院 S-Tech 工作室. 2018. 身临其境: 那些被 VR 影响的心灵、身体与社会. 上海: 上海教育出版社)
- 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 A N. 2010. Harmonious development of natural and artificial environment//Proceedings of the 378th Xiangshan Scientific Conference on Landscape Cities and Regional Construction in China - Intersection of Geoscience and Building Science. Beijing: 11-22 (马蔼乃. 2010. 自然环境与人工环境的和谐发展//香山科学会议第 378 次学术讨论会中国山水城市与区域建设——地理科学与建筑科学交叉研究. 北京: 11-22)
- Michael M W. 2005. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2(1-2): 71-84 [DOI: 10.1504/IJPD.2005.006669]
- Pu Q P and Xiang W. 2023. Metaverse and its effect on human society. *Journal of Chongqing University (Social Science Edition)*, 29(2): 111-123 (蒲清平, 向往. 2023. 元宇宙及其对人类社会的影响与

- 变革. 重庆大学学报(社会科学版), 29(2): 111-123 [DOI: 10.11835/j.issn.1008-5831.zs.2022.01.001]
- Shafto M, Conroy M, Doyle R, Glaessgen E, Kemp C, LeMoigne J and Wang L. 2010. Modeling, simulation, information technology and processing roadmap. NASA
- Song W L, Lü J, Liu C J, Yang L, Huang H Z, Liu Y S, Shi Z Q, Yan S Q, Lü G M, Li X T and Gui R J. 2022. Application of remote sensing technology in the construction of digital twin river basins. *China Flood and Drought Management*, 32(6): 15-20 (宋文龙, 吕娟, 刘昌军, 杨磊, 黄鸿志, 刘业森, 史志强, 闫素勤, 吕国敏, 李小涛, 桂荣洁. 2022. 遥感技术在数字孪生流域建设中的应用. 中国防汛抗旱, 32(6): 15-20) [DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2022222]
- Tuan Y F. 1990. *Topophilia: A Study of Environmental Perceptions, Attitudes, and Values*. Columbia: Columbia University Press
- Xiao C W, Zhang M W, Liu H L, Qin B and Huang B. 2022. Analysis of the Metaverse's spatial restructuring. *Geography and Geo-Information Science*, 38(2): 1-9 (肖超伟, 张旻薇, 刘合林, 秦波, 黄波. 2022. “元宇宙”的空间重构分析. 地理与地理信息科学, 38(2): 1-9) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2022.02.001]
- Yoo J. 2022. A study on transaction service of virtual real estate based on metaverse. *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, 22(2): 83-88 [DOI: 10.7236/JIIBC.2022.22.2.83]
- Yu J Y. 2001. *Qian Xuesen and Modern Science and Technology*. Beijing: People's Publishing House (于景元. 2001. 钱学森的现代科学技术体系与综合集成方法论. 中国工程科学, 2001, 3(11): 10-18)
- Zhang Z C, Lü G N and Liu X Y. 2009. *The Fourth World: Creation and Exploration of a New Time and Space*. Beijing: People's Publishing House (张之沧, 闫国年, 刘晓艳. 2009. 第四世界: 一种新时空的创造和探索. 北京: 人民出版社)
- Zhao G D, Yi H H and Xu Y Z. 2021. *Metaverse*. Beijing: China Translation and Publishing House (赵国栋, 易欢欢, 徐远重. 2021. 元宇宙. 北京: 中译出版社)
- Zhao Y H. 2013. Accessibility among the three worlds: using possible world theory to explain the relationship between fiction and reality. *Journal of Lanzhou University (Social Sciences)*, 41(2): 1-7 (赵毅衡. 2013. 三界通达: 用可能世界理论解释虚构与现实的关系. 兰州大学学报(社会科学版), 41(2): 1-7)
- Zhu J M. 2022. *Metaverse and Digital Economy*. Beijing: China Translation and Publishing House (朱嘉明. 2022. 元宇宙与数字经济. 北京: 中译出版社)
- 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, 刘铭威, 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]

Primary exploration of geographic metaverse from the perspective of virtual geographic environment

GONG Jianhua^{1,4}, LIN Hui², XU Bingli³, LI Wenhong¹, ZHANG Gouyong¹

1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

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

3. *Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China;*

4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract: The connotation, initial characteristics, and development trend of association and integration of the three concepts of metaverse, digital twin, and virtual geographic environment are scrutinized. The concept of geographic metaverse is proposed, and three types of digital geographic environments of the geographic metaverse are defined and distinguished based on the relationship between virtual and real contents and the parallel superposition of virtual and real spaces, that is, the virtual geographic environment of digital native, the virtual geographic environment of digital twin, and the augmented geographic environment of digital-real superposition. The essential characteristics of the geographic metaverse are discussed in terms of time-space, avatar, spatial reference system, and presence-absence. Based on the human-earth relationship and the technical requirements of geographic metaverse construction, the conceptual architecture of geographic metaverse platform is established. In the face of the emerging virtual geographic space, avatar society, and virtual-real composite human-land relationship system. In this paper we proposes to establish virtual geographic environment engineering and to promote the construction of geographic metaverse platform and related theoretical application research.

Furthermore, grounded in the human-earth relationship and the technical prerequisites for the construction of the geographic metaverse, a conceptual architecture for a geographic metaverse platform is delineated. In light of the emergent virtual geographic sphere, avatar societies, and the composite virtual-real human-land relational framework, it is proposed to establish virtual geographic environment engineering as a pragmatic instrument for advancing the geographic metaverse. Virtual geographic environment engineering, predicated upon virtual reality, augmented reality, and mixed reality technologies alongside geography, seeks to explicate fundamental theories,

methodological frameworks, and the engineering creation and application of virtual geographic environments to bolster global and regional sustainability endeavors.

A conceptual framework for the geographic metaverse is advanced, comprising three core components. Firstly, the “Human-Object-Field-Process” mapping modeling is advocated to facilitate a three-dimensional equivalence of virtual geographical environments. Secondly, the spatial information infrastructure underpinning the geographic metaverse, encapsulating sensing, computation, and terminal technologies, is expounded upon. Thirdly, emphasis is placed on virtual geographic experimentation and management optimization, enabling innovative practices such as virtual geographical simulations and the enhancement of real geographical systems, alongside virtual social geographic experiments and the optimization of digital societal systems.

It is underscored that the development of the geographic metaverse remains in its nascent phase, beset by various theoretical and technical challenges including prospective social and ethical dilemmas, the specter of virtual economic bubbles, and legal quandaries. Nonetheless, the digital spatial domain, virtual human societies, the burgeoning digital creative economy, and the emergent virtual-real symbiotic milieu are projected to engender a novel form of composite computable human-land relationships, profoundly influencing the evolutionary trajectory of global and regional human-land systems and fostering sustainable societal development.

In geographic metaverse, interdisciplinary and systematic innovative research endeavors are deemed imperative, necessitating breakthroughs in foundational theories, pivotal technologies, and engineering applications. This undertaking presents a new frontier, concurrently constituting an opportunity and challenge for the innovative advancement of virtual geographic environment engineering, geographical information science, and earth sciences alike.

Key words: remote sensing, geographic metaverse, digital twin, virtual geographic environment, augmented geographic environment, computable human-land relationship, virtual science

Supported by Pilot Fund of Frontier Science and Disruptive Technology of Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences (No. E211010F)