

引用格式: 林琿, 胡明远, 陈旻, 等. 从地理信息系统到虚拟地理环境的认知转变[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 662-672. [Lin H, Hu M Y, Chen M, et al. Cognitive transformation from geographic information system to virtual geographic environments[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(4): 662-672.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.200048

从地理信息系统到虚拟地理环境的认知转变

林 琿¹, 胡明远², 陈 旻³, 张 帆^{4,6}, 游 兰⁵, 陈宇婷²

1. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022; 2. 香港中文大学太空与地球信息科学研究所, 香港 999077; 3. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 4. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 5. 湖北大学计算机与信息工程学院, 武汉 430062; 6. Senseable City Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, MA 02139, USA

Cognitive Transformation from Geographic Information System to Virtual Geographic Environments

LIN Hui^{1*}, HU Mingyuan², CHEN Min³, ZHANG Fan^{4,6}, YOU Lan⁵, CHEN Yuting²

1. Key Laboratory of Poyang Lake Ecological Environment and Resource Development, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Institute of Space and Earth Information Science, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, Hong Kong 999077, China; 3. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 4. Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China; 5. School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China; 6. Senseable City Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, MA 02139, USA

Abstract: Since the beginning of 1960s, Geographic Information System (GIS) has been advanced in the analysis of geographic information and the services generated from it. Yet the rate of demands from geographers and large engineering projects continues to accelerate in the multi-dimensional geographic process simulation and the assessment of simulation results before those projects carried out. The set of increasing demands gives the Chinese scholars a sense of direction to explore the emerging concept Virtual Geographic Environments (VGEs) over the subsequent decades. In a broad sense, the VGEs is a collective term for all geographic environments except the real geographic environment while in the narrow sense, the virtual geographic environment can be considered as a computer-generated digital geographic environment in which the complex geographic systems are perceived and cognized by means of multi-channel human-computer interaction, distributed geographic modeling and simulation, and cyberspace geographic collaboration. From the very beginning, this paper elaborates on the transformation from the understanding of GIS to VGEs. In the second place, the evolution process of VGEs is analyzed including its current developing stage and a series of challenges it faced with. Aimed at facilitating the research on geoscience in the context of advanced technologies and accumulated geospatial information, this paper describes the new perspectives of VGEs research as followed: geographic space based on VGEs cognitive research, VGEs and experimental geography, virtual geographic cognitive experimental methods, and VGEs and geographic knowledge engineering in the context of big data. It can be foreseen that the study

收稿日期: 2020-02-03; 修回日期: 2020-02-20.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41671378)。[**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China, No.41671378.]

作者简介: 林 琿(1954—), 男, 广东汕头人, 教授, 博士生导师, 主要从事虚拟地理环境、多云多雨环境遥感、城市和城市群 GIS 及空间综合人文与社会科学研究。E-mail: huilin@cuhk.edu.hk

of VGEs is gradually moving towards an open, group-participated, collaborative scientific research paradigm. This is also a true reflection of the development trend of scientific research in the field of geography.

Key words: geographic information; Geographic Information System; Virtual Geographic Environments; geo-spatial cognition; geo-process modeling; geo-collaboration; experimental geography; geo-knowledge engineering

***Corresponding author:** LIN Hui, E-mail: huilin@cuhk.edu.hk

摘要:自20世纪60年代初以来,地理信息系统引领了地理信息的分析与服务。然而,由于地理学家对于地理过程开展多维模拟的需求,同时许多大型工程需要对于不同方案的后果事先开展模拟评估,为此中国学者们在世纪相交之际开始了对于虚拟地理环境的探索。本文从地理信息系统到虚拟地理环境的认识上的转变着手,分析了虚拟地理环境的演进过程、当前的阶段定位与挑战,着重探讨了虚拟地理环境研究的新态势:基于虚拟地理环境的地理空间认知研究、虚拟地理环境与实验地理学新方向、大数据背景下的虚拟地理认知实验方法和虚拟地理环境与地理知识工程,并给出最新研究思路。

关键词:地理信息;地理信息系统;虚拟地理环境;地理空间认知;地理过程模拟;地理协同;实验地理学;地理知识工程

1 引言

如果说地理信息的获取手段显示出一个国家的科技水平,那么地理信息的应用程度则可以反映出一个国家的管理水平。这种水平的提高亦标志着人们对于地理信息的认知转变。自20世纪60年代初期以来,以地图数据库(空间数据库)为特征的地理信息系统(GIS)引领了地理信息分析与服务业的发展。但是,随着大数据时代的来临,仅仅依靠基于地图数据库的GIS显然无法满足地理学家对于地理过程模拟的需求,更无法应对许多大型工程对于不同方案后果的模拟评估。为此,中国学者们在世纪相交之际开始了对于虚拟地理环境的探索^[1-3]。

我们早期关于虚拟地理环境的思考缘起于20世纪90年代初期地理信息领域的一场学术辩论。在这场1991年美国科罗拉多州波德市(Boulder, Colorado)举行的第一届GIS与环境模拟国际会议上,来自地理信息系统领域的专家与来自环境模拟领域的专家(尤其是水文学家)表达了2种不同的观点:①将现有地学模型集成进GIS;②利用GIS提供的空间数据支持新的模型建模。但是无论站在哪一方的立场,大家都感觉到以空间数据库支撑的地理信息系统已经不能够满足许多地理过程研究的需求了。然而,地理科学研究的一个要点就是要对包含连续时间变量的丰富地理现象过程进行研究。尽管地理信息系统领域的学者不断尝试在空间数据库的框架下探讨对于时间要素的整合,我们开始感觉到这个“框架”外已经出现的不可忽视的变化。中国科学院院士陈述彭先生提出以多维地学信息图谱来推动“对地学现象时空规律的描述与

解释”,英国皇家科学院士Michael Batty教授借助发展虚拟地理学来加速虚拟世界与现实地理环境的联系。卫星应用技术与物联网技术让我们产生从全面感知自然到深入感知社会的冲动,科学计算可视化和虚拟现实技术不仅“颠覆”了我们的“眼见为实”,还“纵容”了我们将时间与空间尺度“任意变换”的意念,从而开始了为实验地理学寻找能够结合空间数据库与地理过程模型的探索,逐步认识这个连接真实地理环境与指导我们实践的大脑之间的虚拟地理环境。

从广义上讲,虚拟地理环境是现实地理环境之外的所有地理环境的统称,既包括了地理环境在人脑中的写照以及各种形象思维所产生的“象”,如“心象地图”、“头脑中的地理场景”等;又包括了借助各种介质与媒体实现的对存在或者不存在、可感知或者不可感知的地理环境的抽象、再现和虚构;还可以用于网络空间以地理位置为特征的信息空间刻画与描述。事实上,现实地理环境并不一定就是按照人类的认知方式存在的,而我们现在所能够想象的虚拟地理环境也都是建立在一定认知基础上的,带有一定的认知特征与认知任务,这也就给广义虚拟地理环境的精确定义及描述带来了困难^[4-5]。

从狭义上讲,虚拟地理环境一词来源于2个特征术语“地理环境”和“虚拟环境”的结合。地理环境是一个相对成熟的地理学术语,用于描述由自然、社会、文化和经济因素等及其相互作用组成复杂、综合性系统,特指人类社会存在和发展的地球表面环境。地理环境由自然和人文2大要素构成,与人类生活息息相关,小到个人居住、工作、社交的场所,大到人类所赖以生存的水土气生圈层,都属

于地理环境的范畴。地理环境包含了时空局部静态、时空全局动态、系统性(综合性)等特征;对地理环境的表达,要考虑到对其空间分异、演化过程以及相互作用的表达。这里的虚拟环境是一类数字环境的特指,是基于动态可视化、虚拟现实(Virtual Reality, VR)、增强现实(Augmented Reality, AR)、混合现实(Mixed Reality, MR)等技术所构建的数字环境;结合分布式网络架构、信息传输技术以及沉浸式感知与操作技术,用户可以超越时空的限制,方便的接入到这类数字环境中,感知、操控乃至改造数字环境中的人、物以及不同对象,从而探索生活中并不存在,或者难以感知、难以到达的空间。虽然游戏和娱乐是虚拟环境构建的主要驱动力之一,但是随着其科学研究应用价值的不断发现,在设计、制造、医药、灾害预警与救援、城市规划等领域,虚拟环境都起到了重要的作用。将二者相结合,以地理环境作为虚拟环境的形成源头,以虚拟环境作为地理环境认知与研究的手段,从而实现“身临其境的感知,超越现实的理解”。因此,狭义上的虚拟地理环境可以认为是一种由计算机生成的数字化地理环境,可通过多通道人机交互、分布式地理建模与模拟、网络空间地理协同等手段实现对复杂地理系统的感知、认知和综合实验分析^[4-5]。

2 虚拟地理环境发展的阶段定位与挑战

地理学语言是人类认识地球环境和人类社会交流与传递地理信息的重要媒介。作为新一代地理语言——虚拟地理环境(Virtual Geographic Environments, VGEs)是由地图与GIS演化而来的新一代地理分析工具,提供最接近人类自然的交流与表达方式,用于解决复杂地理问题,并能够促进地理数据与知识的共享^[6]。

近年来,随着虚拟现实、增强现实的发展,很多学者认为虚拟地理环境也因此得到了快速发展,进入了快速前进的车道。然而,虚拟地理环境的发展实际上受到地理学、地理信息科学、信息科学、网络技术、虚拟现实技术等多类学科、各方面技术的综合影响,其核心是地理学知识融入、分析与应用,虚拟现实的发展确实推动着虚拟地理环境的发展,但是并不能替代虚拟地理环境的发展。时空分布格局、地理过程演化规律、地理要素间相互作用机理

所代表的自然法则是虚拟地理环境描述与表达的核心,是虚拟地理环境研究以及发展的关键推动力。

从虚拟地理环境的组件构成来看,虚拟地理环境包括了数据组件、建模与模拟组件、交互组件、协同组件^[4-5]。目前,虚拟地理环境因为其分布式地理建模与模拟、地理可视化与地理协同的特定功能,其普适性被定位是新一代地理分析工具、计算机辅助的地理实验空间以及地理知识工程实现的手段。面向虚拟地理环境发展的当前阶段定位,虚拟地理环境在各个组件设计及实现过程中,尚存在如下一些难点与挑战需要攻克。

数据环境面向的是地理现象、地理过程相关地理数据的采集、整合与组织,以服务于地理模拟与分析、地理场景的表达与交互。目前,关键在于对多源异构、不同时空尺度数据的一体化组织问题。虚拟地理环境的数据组织需要突破传统GIS以点、线、面、体表达几何形态的方式,要能够在统一的数据组织框架下,支撑离散与连续、表面与体内部、渐变与突变、流形与非流形地理对象(实体)与地理现象(场景)表达,兼顾语义、属性等多维度数据的组织与完备表达,同时还需要将时空信息进行融合表达^[7]。更重要的是,现有的数据组织在支撑复杂地理问题的模拟与计算方面能力不强,难以直接服务于计算模型的运算,造成了地理信息系统领域的数据模型与地理计算与模拟领域之间的鸿沟,也直接影响了虚拟地理环境面向复杂地理问题求解的能力,限制了虚拟地理环境的应用拓展。此外,闫国年等^[8]还认为目前地理数据的组织还存在高维空间数据与计算机一维线性寻址和存储方式间的矛盾;非结构化空间数据与结构化内外存单元间的矛盾;非均匀地理空间分布与匀质的内外分布之间的矛盾;随机的地理数据访问与计算机遍历访问间的矛盾等,需要设计同时有效支撑地理分析和计算机存取结构的组织方式和索引模式。面向虚拟地理环境多模型之间数据交换与表达,分布式网络环境下各领域专家对于地理数据的协同理解, Yue等^[9]提出在目前统一数据模型尚处于研究阶段的情况下,需要借助自描述、自解释的方法及策略,设计多源异构地理数据的普适性描述表达与交换规范,从结构、语义、单位、量纲、空间参考等多方面完善地理数据的描述机制。

地理过程建模与模拟环境是虚拟地理环境的关键组件,也是虚拟地理环境区别于传统GIS的关

键核心标志。地理过程模型是地理现象以及地理规律的重要表达形式,也是地理知识的载体。虽然地理过程模型库的研究已经开展了很多年,但是考虑到虚拟地理环境开放性、探索性的需求,其建模与模拟环境需要支持多领域专家在网络环境下进行分布式建模与模拟,而由此产生的分布式地理模型共享、地理模型构建、地理模型运行以及地理模型集成与优化等问题,也就成为虚拟地理环境构建的关键点。这其中存在的问题主要包括4个方面:① 现有地理建模环境多借鉴计算机领域的框图式建模环境,缺乏鲜明的地理特色,根植于计算机领域的建模系统,无论从界面,还是建模流程,乃至操作方式,都难以为广大地理研究者所直接理解,导致了地理研究者觉得相关系统难以理解、难以应用;② 目前分布式模拟多集中在协同调整模型参数上,也就是分布式环境下,多领域专家针对选定的模型,面向特定地理情景,协商讨论参数的设置,并基于此开展实验,但是相关流程缺乏对概念建模、框图建模乃至计算建模等建模工作的协同作业支持,网络环境下协同建模的机制与策略还很欠缺。面向地理模型的共享与重用,多源异构问题依旧影响着地理模型在不同使用者之间的理解效能,地理模型的分类规范和元数据规范还不完善;③ 面向开放式网络,网络环境下模型资源、数据资源、运算资源的共享与应用情景分析还不清晰,导致目前相关资源的服务模式还不清晰;理想状况下,相关资源的分布与贡献模式,应该是所有资源的贡献者,都可以成为服务节点,而不是仅仅只有几类或者几个集中式的服务节点,这仅仅可以看成为半开放式的模式;④ 面对建模机理各异的模型,服务于模型集成的相关机理与耦合机制还处于研究阶段,支撑统一地理计算框架的计算网格还有待探索。分布式环境下,模拟过程参数调整、优化、模拟结果校验等相关工具,还处于研发过程中。相关的研究虽然都在进行中^[9-11],但问题的解决程度速度,将直接影响着虚拟地理环境的后续发展与认同。

交互组件是虚拟地理环境与用户的窗口与直接通道,虽然目前VR以及AR的发展大力推动着虚拟地理环境交互手段的发展,而信息、虚拟现实、人工智能领域等相关技术也为全方位感知与表达通道的实现提供了技术支撑(如电子鼻、沉浸式头盔、虚拟现实眼镜等),但这其中需要注意的是虚拟地理环境的地理特征。虚拟地理环境的表达是对复

杂地理场景的表达,交互与操作的对象是与场景中多样、动态的地理对象与地理过程,这是区别于计算机和VR领域交互的基本特征。目前,需要注意的问题包括3点:① 需要借助多种交互手段,便捷、自然的实现对地理场景的构建以及操作。虚拟地理环境强调了参与的沉浸式与感知的逼真感,因此相关操作应该更符合人类在自然世界中的生存方式与操作习惯。例如借助手势、肢体动作、自然语言对地物的控制,是日常生活中最常用的方式,虚拟地理环境交互组件的设计目前对这方面的支持还有待提升;② 传统的GIS多以自顶向下的视角来观察地理对象,这也不符合人类侧面观察世界的习惯,虚拟地理环境的表达需要进一步支持多角度、多方位对世界的观察方式。面向多领域用户的协同工作,除了主体的立体表达场景外,还需要设计多样化、为多领域用户所熟悉、习惯使用的联动分析工具,这些工具将服务于专业的协同分析,也属于交互组件需要关注的点;③ 目前虽然多样化的感知工具已经出现(如立体眼镜、头盔等),但是效果好的工具存在成本较高的问题,而平民化的工具其效果还有待改进,这方面问题的解决将是推动虚拟地理环境公众化使用的关键。

协同组件对于多领域专家协作式分析的意义已经得到了肯定,但是其相关理论研究也处于探索阶段。需要关注的是,虽然在角色模型、冲突检测机制、业务流程分解等研究点上已经有了相关的研究,但是还缺乏一个面向虚拟地理环境地理分析特征的一体化协同工作理论架构,指导从数据准备,到分布式建模与模拟,再到多用户交互与分析一整套地理分析流程的实施。在虚拟地理环境中,真实的人、化身人、虚拟场景及地物之间的多点关系及协同模式研究,数据、模型和用户多使用角色之间的协同模式及使用情景研究,都是需要提出解决的问题。

除了以上4个组件设计所涉及的尚未解决或者未全部解决的问题以外,虚拟地理环境的研究还涉及到地理/遥感信息技术与科学、计算机图形学/仿真/虚拟现实技术、地球表层系统的地理环境、赛博空间与虚拟社区等,并且与虚拟现实、虚拟、虚/实关系、心理学、符号学、美学、信息论等社会、心理与哲学领域有着密切的关系,这些也对虚拟地理环境的研究带来了传统GIS所不具备的复杂性^[12]。虚拟地理环境建设因为涉及到多领域、多学科、多技术的介入,虽然有了相对统一的理论框架,但是在具体

实现时,如何将相关先进的技术以及模型进行无缝融合与系统集成,也是重要的问题。只有当相关的知识与技术都能够服务于整体架构的设计与实现,虚拟地理环境才能够进入真正成熟的研究阶段。

3 虚拟地理环境研究的新态势

3.1 基于虚拟地理环境的地理空间认知探索

地理空间认知是人类对地理空间现象或地理空间实体的感知、表象、记忆和思维过程的编码、内部表达和解码,逐步理解地理空间,进行地理分析与决策等一系列心理过程^[13]。地理空间认知关注人们可以活动于其中的地理空间,如地理空间参照、地理概念、关系、不确定性、以及与认知相关的地理空间知识和人类行为等主题。有关空间认知(Spatial Cognition)研究最早可追溯到1948年由Tolman撰写的论文《鼠脑与人脑中的认知地图》中首次提出的“Cognitive Maps”的概念^[14]。此后,心理学领域开始了对有关空间认知的研究,包括人的空间行为研究、人的地理编码及检索和环境信息的应

用等研究。具身认知(Embodied Cognition)^[15]是心理学中一个新兴的研究方向,强调认知不止是大脑的信息加工过程,还和身体、环境具有密切联系。随着具身认知研究的兴起,认知被认为既是具身的,也是嵌入的,大脑嵌入身体、身体嵌入环境,构成了一体的认知系统。

鉴于具身认知与地理空间认知关注主体的相似性,基于虚拟地理环境的地理空间认知研究正努力朝向建立在地理环境、人一机理解、生理—心理一体化认知基础上的认知与分析。概括来讲,基于虚拟地理环境的地理空间认知主要强调3个层次(图1)^[16]:①基于多维表达与多通道感知的地理相似性认知。强调人的感知性和融入沉浸感,使人能够以自然的交互方式获得类似于真实地理环境的信息;②面向现象演变的地理过程认知。将具有地理参考的地理过程模型植入认知环境中来,通过传感器网络提供数据以模拟地理现象的实时变化,为地理空间认知研究重现真实的地理空间环境;③基于认知心理学与社会情感计算的行为认知与分析。在认知环境中,通过认知实验研究人的行为,

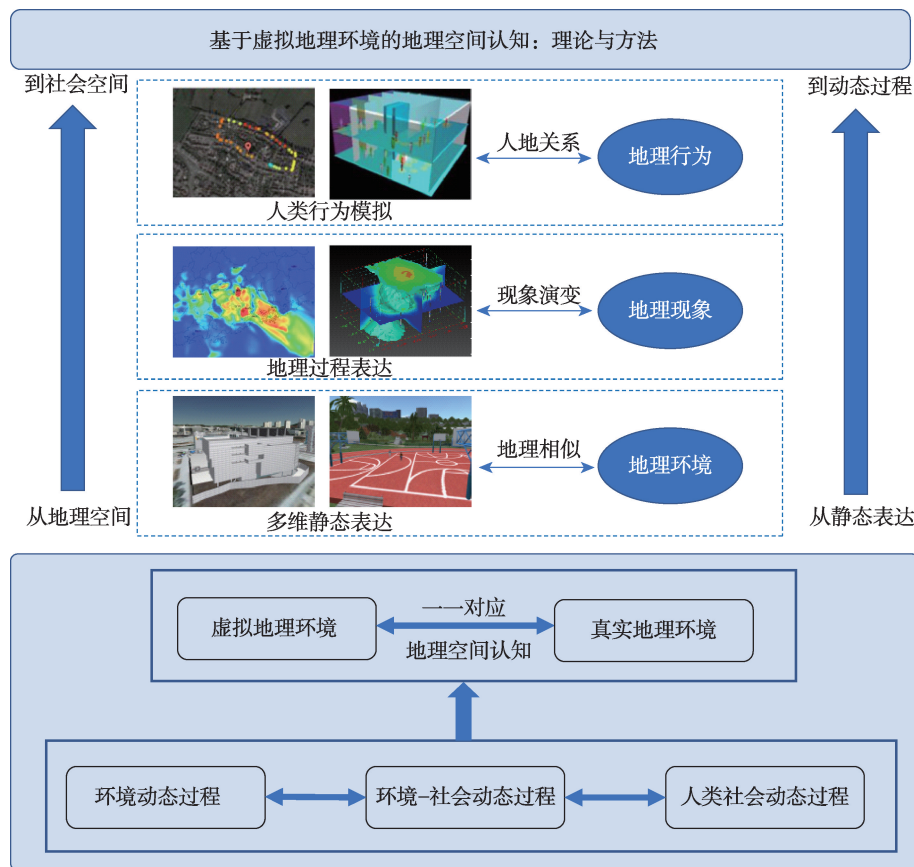


图1 基于虚拟地理环境的地理空间认知框架
Fig. 1 VGEs based geo-spatial cognition framework

并进行模拟分析。

(1) 基于多维表达与多通道感知的地理相似性认知

地理的多维信息表达是为了提供真实地理环境中的本体信息认知,也可称之为地理相似性认知,不必为传输信道的限制而放弃大量丰富的信息,有利于对静态事物的感知和动态地理现象的监测。多通道感知强调人的感知性和融入沉浸感,能够以最大限度、自然的方式(温度感知、色彩感知、声音感知等)获得地理空间信息,使自然人能够以日常的交互方式获得类似于真实地理环境的感知。

虚拟地理环境在数据组件及交互组件的设计过程中,充分考虑接入多维表达、辅以多通道表达与交互,促使虚拟地理环境在帮助理解空间分异规律、时空演化过程以及要素间相互作用等方面具有普通地理分析工具所不具备的功能,也是虚拟地理环境真正成为地理空间认知工具的首要基础。

(2) 面向现象演变的地理过程认知

地理过程是指地理事物或现象随时间的推移和相关地理要素的变化而出现的动态变化过程。根据其在时间空间上变化特征的不同,主要可分为地理循环过程、地理演变过程、地理波动性变化过程和地理扩散过程^[7]。在地球表层空间的自然环境中,有些地理过程是可见的,有些则是不可见的。地学研究者通常采用包括经验公式、确定的数理模型或不确定的概率分布描述等表达形式,来表示所研究的地理变量/要素在时间空间上的动态演化过程,因此地理过程模型包含了该研究对象在时间空间以及与其他相关地理要素之间关系的一些基本的事实、概念、原理、规律等的知识,即地理过程的知识。

基于虚拟地理环境的地理过程认知,关键在于将具有地理参考系统的地学过程模型植入认知环境中来,结合传感器网络提供数据以模拟地理现象的实时动态过程,使得地理认知环境与真实物理世界融合在一起,为地理空间认知研究重现真实的地学现象空间,具体可分为:① 面向不能或难以直观视觉感知的地空间动态现象认知;② 增强行为决策能力的地理过程模拟,共同辅助于人在实时变化的地理环境中获取信息,进行行为决策。

(3) 基于认知心理学与社会情感计算的行为认知与分析

对于以人为主要研究对象,针对个体、群体的空间认知、人地关系耦合,以及如何在虚拟地理环境中开展面向主体对环境的感知、认知、以及行为

实验等相关研究正在得到持续关注^[18-19]。基于虚拟地理环境能够构建多感知、实时动态环境信息获取,能够从地理环境信息的真实重现(环境角度)和多通道信息的获取(人的角度)为实现人的行为模拟与分析提供支撑。

一方面,可以结合认知心理学实验框架引导,建立人类个体的心理行为范式,用以指导与约束行为认知实验,建立动态过程中主客体反馈的渐进最优行为分析,在分析中将会对多种因素进行相关分析及主成分变换以确定少量的关键因素,从而建立符合实际情况的用户行为挖掘。另一方面,可以结合社会情感计算建立由人的情感所引起的生理及行为特征信号集或情感模型,并可以设计具有情感反馈的人机交互环境,从而创建个体情感计算系统,从而逐步实现个体的心理-生理统一的行为模拟认知与分析。

3.2 虚拟地理环境与实验地理学新方向

实验是产生和验证科学知识最重要的手段之一。开展综合性地理学实验的目的是试图将地理环境多要素、多过程置于统一的实验框架下开展以问题为导向的针对性研究与探索。近来,随着实验地理学的进一步发展,地理学实验更加强调对地物发展过程、要素相互作用、物质迁移能量转换等方面的探索,针对不同领域、不同尺度、不同区域的问题,以联动、定量、多尺度的视角观察、分析地学问题,从而为发展中的地学研究提供有效支撑。这其中涉及如下3个关键问题^[20]:

(1) 如何将自然以及人文社会相关的多要素、多过程整合到一个实验平台下开展实验?目前所开展的地理学实验,通常注重于自然过程的研究与探索,由于需要控制实验环境背景及过程,通常对实验场地及对象进行限定。由于实验场地有限、人为因素难以把控等原因,目前地理学实验通常难以充分考虑人文社会要素的影响,导致地理学人地关系及其规律、机理过程的研究,在实验时存在重自然、轻人文的现状。同时,综合研究需要多学科背景专家的加入,面对不同的地理要素,不同的认知与理解,在没有统一的概念性试验框架的情况下,其要素表达与整合方式将存在一定困难,这直接阻碍了综合性地理实验的开展,同时也给地球系统科学的综合研究带来了极大的挑战。

(2) 如何突破实验场地的限定,开展多时空尺度的地理实验?地理问题的综合性、复杂性特征要

求研究者需要从时间、空间、尺度等多角度对地理现象及过程进行分析、再现与处理,研究要素相互作用,揭示能量与物质的迁移规律,形成新的地学知识。传统的地理学实验在解决复杂地学研究过程中所具有的多维、多尺度、模糊性与不确定性问题时还存在不足^[21]。传统实验方式多采用野外实地实验与室内物理模型实验的研究方法,前者易受到天气、场地等自然环境影响,难以重复验证;后者通常只能造出大致的物理模拟场地环境,虽然也可以实现模拟降雨、冲沙等过程,但面向复杂性地理问题的模拟及实验,物理模型实验的可靠性与灵活性还有待提升。同时,实验中的尺度问题也是地理学研究的重点问题,目前地理实验的空间尺度一般是微观或者田间尺度,虽然理论上可以借助尺度转换方法进行不同尺度实验研究结果之间的对比和迁移,但是其实用性还有待验证。

(3)如何利用现有的计算机、虚拟现实等技术提升地理学实验的效能?随着计算机、网络、虚拟现实等信息技术的快速更新与发展,地理学实验也已经进入计算机辅助实验的阶段。例如虚拟现实技术已经广泛应用于流域水文分析、大气环流预报等领域,而开放式网络技术的发展也为分布式地理实验提供了便利。目前的难点是在计算机辅助实验中,从数据准备到实验模拟再到展示表达等各项环节,如何对不同的技术进行无缝整合,进而有效提升地理实验的功效。

虚拟地理环境可以作为计算机辅助的地理实验空间(图2)。虚拟地理环境是一个可用于模拟和分析复杂地学过程与现象,支持协同工作、知识共享和群体决策的集成化虚拟地理实验环境与工作空间,是地理学研究的虚拟实验室,可为现代实验地理学研究提供科学方法和技术手段^[22]。基于虚拟地理环境,可以倡导一种“虚实结合”的地理学实验方式,辅助实验地理学相关理论与方法的完善,并为之提供一个集成式的综合工作空间。基于虚拟地理环境开展地理学实验的优势在于虚拟地理环境具备地理可视化、地理过程模拟、地理协同和以“人”为中心参与等功能,便于突破传统地理实验在场地、经费、设备、环境等方面的限定,实现“虚实结合”的地理实验过程:①虚拟地理环境所构建的地理场景与真实地理场景具有相似性,因此也就兼备真实地理场景对要素、过程以及现象的表达能力。同时可以针对不同的地理问题及区域、时空尺度,构建不同的地理场景,并将之整合到统一的虚拟地理环境时空框架下,基于时空尺度转换等方式实现统一时空背景下地理现象的综合挖掘与分析。②虚拟地理环境的模型库构建,强调了除数据共享之外,以地理过程模型为核心的地理知识共享也是虚拟地理环境分析综合性地理问题所依赖的重要手段。在标准、形象的虚拟工作空间中,基于虚拟概念场景构建、虚拟空间模拟等手段,多领域专家可以显式地交流建模思想,进行协作式建模、

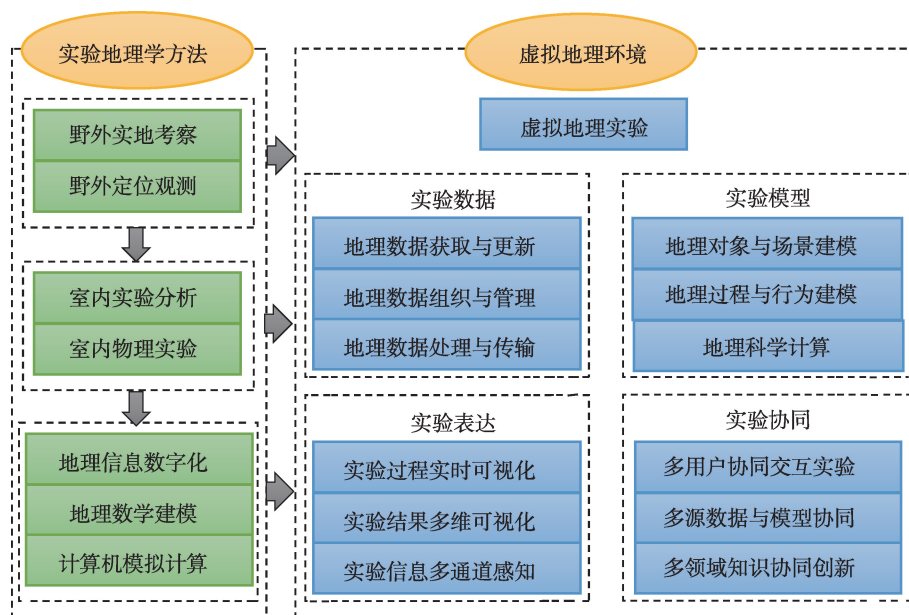


图2 改进的虚拟地理环境拓展实验地理学研究方法^[22]

Fig. 2 Modified research methods of experimental geography extended by VGEs

模拟与分析,利用数据与模型的整合、模型与模型的耦合,开展综合、集成的地理实验及模拟。③虚拟地理环境强调以“人”和“自然”为“双中心”^[23],借助多维多通道感知与反馈技术,普通用户能够以“化身人”的方式感受虚拟场景及地学现象,并提供面向虚拟场景的自身地理知识,做出虚拟选择及执行虚拟行为。“化身人”与虚拟地理环境中预设的“智能人”(基于元胞自动机、多智能体等技术)相互作用,并与“地理环境”产生相互关系,从而为地理实验引入人为要素提供条件。基于以上模式,研究者可以依据虚拟地理环境中人人关系、人地关系的相互作用,构建更加符合特定情境的模拟模型,并进一步作用于参与者,以此开展联动式、兼顾人类社会与自然环境关系的地理学实验。④虚拟地理环境的网络空间特征,同样为分布式地理学实验提供了开放的虚拟工作空间,极大减少了时间和空间对群体协同的地理实验的限制。

3.3 大数据背景下的虚拟地理认知实验方法

在关注人地关系的相关领域中,研究的尺度、规模大大受限于借助访谈、问卷、观察等传统实证研究的研究范式。随着大数据时代的到来,海量个体认知及行为数据为人地关系的研究提供了潜在的机会,同时也对虚拟地理认知实验提出了进一步的要求——如何构建新一代的虚拟地理认知实验范式,从海量人类活动和地理大数据中提取个体和场所的交互模式,挖掘其在不同尺度上相互作用过程中的新模式、新知识,从而系统地构建地理知识工程^[24]。

大数据背景下的科学研究基本范式已经从试验归纳、模型推演、仿真模拟的阶段,进入了第4类研究范式——数据密集型科学研究(Data-intensive Scientific Discovery)^[25]。大数据时代下的数据规模性、多源性、复杂异构性已经超出了个体人脑的认知和理解能力。而基于人工智能,知识图谱等技术的“认知计算”为在大数据中挖掘地理知识提供了潜在的途径,为理解人们的认知、感知和行为提供了有力的支持。结合经典的虚拟地理认知实验框架,Zhang等^[19,26]提出了大数据背景下的虚拟地理认知实验框架,更加关注在数据密集型科学范式下,如何利用精细时空尺度的个体数据与场所数据,来研究居民对场所的感知和行为以及人和地理环境的相互作用。

在众多地理大数据中,街景图像数据是观测城市物质空间的一种新型的大数据源,其观测视

角更接近于人。街景图像不但详尽地描绘了城市物质空间的组成(建筑物、道路、交通设施等),同时蕴含了大量有关人类活动和社会经济属性的信息。利用街景图像数据,相关领域等不仅实现对城市物质空间进行了量化表达^[27],同时对个体的对于城市视觉场景的感知进行了建模分析^[28],并进一步对城市视觉场景表达的城市功能、居民出行行为进行了估计。例如,张帆等^[26]构建了一种深度学习模型,通过输入单张街景图片,来预测街景图片所在街道上居民平均每小时的出行量。研究发现,仅仅依赖街景图片中展示的城市风貌内容,深度学习模型就可以还原65%以上的场所居民出行活动模式(图3)。基于人工智能模型,这样的工作构建了连接物质空间与社会活动空间关系的桥梁,可以潜在地衡量建成环境与居民活动、社会经济水平发展之间的不均衡性,从而为城市设计与管理提供参考和决策支持。

3.4 虚拟地理环境与地理知识工程

虚拟地理环境是地理知识工程实现的重要手段。地理知识是知识的概念和内涵在地理学领域的外延,是一类与地理事物或过程密切相关的领域知识,具有典型时空特征和地学机理特点,在地理问题分析、过程模拟、现象预测等方面都发挥着极其重要的作用^[24]。知识工程是以知识为研究对象的通用方法和理论,难以表达地理知识隐含的数学内涵,因此,地理知识工程概念框架被提出,通过制定一系列约束与规则来统一管理地理知识^[29]。

虚拟地理环境与地理知识工程是相互促进相互支撑的。虚拟地理环境应用于模拟地学过程、解释地理现象及分析地理规律等场景,其多维表达和智能感知特点促进了大量地理知识的产生,包括专家经验、干预规则、演化模型及增值结果等。因此,虚拟地理环境可以成为地理知识产生、演化、协同和共享的基础设施环境。虚拟地理环境支撑下的地理知识工程,具有典型的时代特点,将解决不同领域不同形态地学知识的融合、演化与创新,它将高度集成人工智能、云计算、混合现实、知识图谱等新兴计算机技术,实现符合人类认知特点和探索过程的智能化地理过程建模与模拟环境,支撑智能化虚拟地理环境^[30]。由此可见,虚拟地理环境地理知识工程是以地理知识为研究对象,以实现智能化虚拟地理环境为目标,以共同研究的相关问题为核心,可以形成完善的地理信息技术方法、理论和技术体系(图4)。

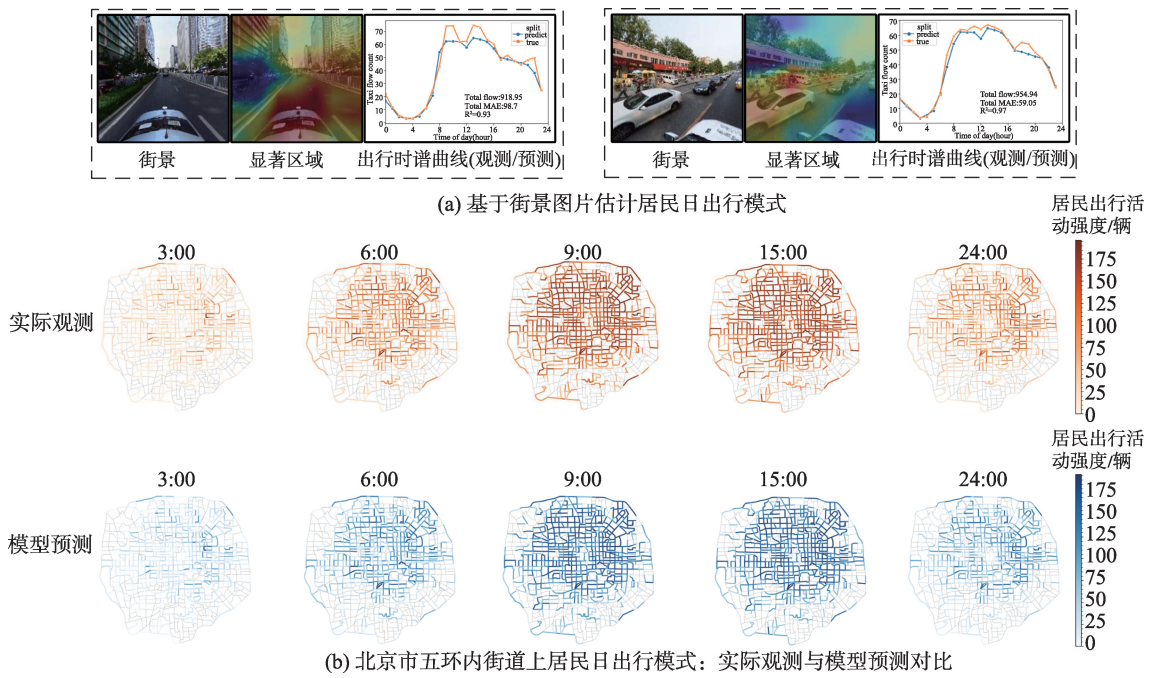


图3 基于街景图像的居民活动模式拟合

Fig. 3 Learning human daily activity curves from street view imagery

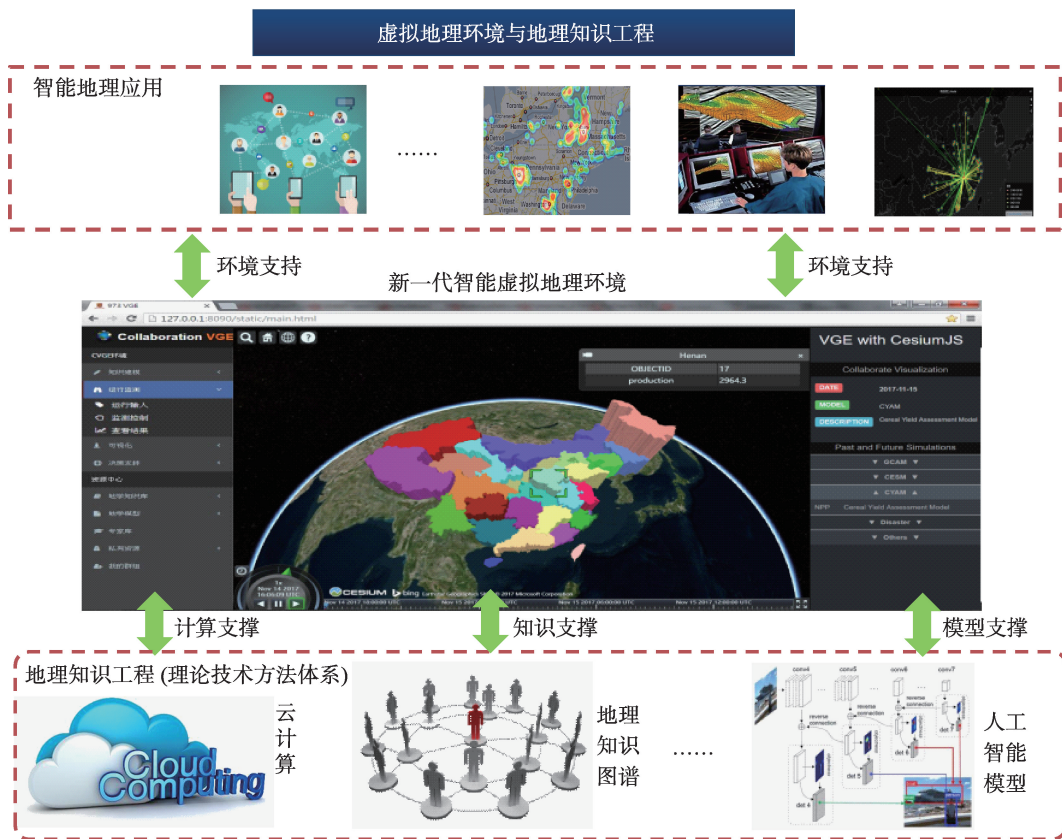


图4 虚拟地理环境与地理知识工程

Fig. 4 VGEs and geo-knowledge engineering

地理知识工程的基础理论包括地理概念、地理实例、专家知识、时空关联以及地理事件等, 相关研究面临着知识获取、表达、管理与可视化、安全与隐私等系列难题^[31]。作为人工智能技术的基石, 知识图谱强大的语义处理和互联组织能力为地理知识工程提供了知识表达和管理方式, 正好符合地理知识的实体对象、规模可扩、关联广泛等特点。结合知识图谱, 实现地理知识的抽取、表达、存储和管理, 可以为虚拟地理环境提供地理知识库, 同时支撑地理知识工程中地理知识的应用、协同和共享。通过集成人工智能算法和模型, 地理知识工程能为传统地学应用提供接近人脑智慧的经验知识, 从而实现新一代智能虚拟地理环境。

4 结语

随着时空大数据时代的到来, 大量的研究和分析开始逐渐从基于现实世界的抽象与分析转向基于数据和模型的数字化抽象与分析, 地学研究和地学分析更加需要一个可以对地理现象与地理规律进行集成分析与表达的载体^[32]。

集几何、物理和行为模型于一体的虚拟地理环境能够为构建可动态、广泛融入地理规律的人机结合的认知体系提供可能, 从而提升利用地理知识消理解海量时空数据并重现地理现象及过程的能力^[4-5]。现阶段, 虚拟地理环境正朝着面向新一代地理分析工具、计算机辅助的地理实验空间及地理知识工程实现手段而发展, 地理学的格局、过程、作用都期望在统一的研究框架下得以开展, 进而用于支撑地理科学的研究继续朝综合性、量化的方向发展。

一方面, 利用虚拟地理环境将遥感图像信息与专家知识、地理过程模型、地理协同进行综合集成, 构建对于地理环境变化认知的知识, 可突破遥感信息在图像层面上的分析与应用, 从而满足重大工程科学辅助决策、突发事件应急响应和环境监测高效分析等国家重大需求。另一方面, 新一代的虚拟地理认知实验将在环境心理学和认知计算的理论支持下, 从海量个体数据中提取微观个体、宏观群体和空间、场所之间的相互影响模式, 挖掘其在不同尺度上相互作用的机理, 为系统地构建地理知识工程提供方法支持; 加之地理学与地球系统科学所具有的天然相容性, 使得虚拟地理环境可以为全球变化与人类活动及其环境相互影响的协同模拟与评

估提供原创性基础, 具备提升全球变化与人类活动及其环境相互影响的模拟与评估的综合性、准确性与科学性的能力, 可为全球变化背景下人类活动与可持续发展研究提供新的研究思路及模式。

可以预见, 以地理知识为研究对象、以地学知识工程为导向的虚拟地理环境研究^[24]正逐步迈向开放式、群体参与式、协同合作式的地理科学研究范式。地理信息分析与实验平台的发展也将逐步从以数据库为核心的数据共享阶段过渡到以数据库与模型库为双核心的知识共享阶段。信息化、虚拟化、开放化、服务化正在成为新型实验地理学的重要标志。

参考文献(References):

- [1] Lin H, Gong J H. Exploring virtual geographic environments[J]. *Geographic Information Sciences*, 2001,7(1):1-7.
- [2] 林琿, 龚建华. 论虚拟地理环境[J]. *测绘学报*, 2002,31(1):1-6. [Lin H, Gong J H. On Virtual Geographic Environments[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographic Sinica*, 2002,31(1):1-6.]
- [3] 游雄. 基于虚拟现实技术的战场环境仿真[J]. *测绘学报*, 2002,31(1):7-11. [You X. The battlefield environment simulation based on VR[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographic Sinica*, 2002,31(1):7-11.]
- [4] Lin H, Chen M, Lu G N, et al. Virtual Geographic Environments (VGEs): A new generation of geographic analysis tool[J]. *Earth-science Reviews*, 2013,126:74-84.
- [5] Lin H, Chen M, Lu G N. Virtual Geographic Environment: A workspace for computer-aided geographic experiments[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2013,103(3):465-482.
- [6] 林琿, 龚建华, 施晶晶. 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[J]. *地理与地理信息科学*, 2003,19(4):18-23. [Lin H, Gong J H, Shi J J. From maps to GIS and VGE: A discussion on the evolution of the geographic language[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2003,19(4):18-23.]
- [7] Lv G N, Yu Z Y, Zhou L C, et al. Data environment construction for virtual geographic environment[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,74(10):7003-7013.
- [8] 闰国年, 袁林旺, 俞肇元. GIS技术发展与社会化困境与挑战[J]. *地球信息科学学报*, 2013,15(4):483-490. [Lv G N, Yuan L W, Yu Z Y. Challenges to development and socialization of GIS technology[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013,15(4):483-490.]
- [9] Yue S S, Chen M, Wen Y N, et al. Service-oriented model-encapsulation strategy for sharing and integrating heterogeneous geo-analysis models in an open web environment[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*

- ing, 2016,114:258-273.
- [10] Wen Y N, Chen M, Lu G N, et al. Prototyping an open environment for sharing geographical analysis models on cloud computing platform[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013,6(4):356-382.
- [11] Wen Y N, Chen M, Yue S S, et al. A model-service deployment strategy for collaboratively sharing geo-analysis models in an open web environment[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016,10(4):405-425.
- [12] 龚建华,周洁萍,张利辉.虚拟地理环境研究进展与理论框架[J].*地球科学进展*,2010,25(9):915-926. [Gong J H, Zhou J P, Zhang L H. Study progress and theoretical framework of Virtual Geographic Environments[J]. *Advances of Earth Science*, 2010,25(9):915-926.]
- [13] Lloyd R. *Spatial cognition-geographic environments*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [14] Tolman E C. Cognitive maps in rats and men[J]. *Psychological Review*, 1948,55:189-208.
- [15] 叶浩生.有关具身认知思潮的理论心理学思考[J].*心理学报*,2011,43(5):589-598. [Ye H S. Embodied cognition: A consideration from theoretical psychology[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 2011,43(5):589-598.]
- [16] 林琿,黄凤茹,鲁学军,等.虚拟地理环境认知与表达研究初步[J].*遥感学报*,2010,14(4):822-838. [Lin H, Huang F R, Lu X J, et al. Preliminary study on virtual geographic environment cognition and representation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010,14(4):822-838.]
- [17] 李爽,姚静.虚拟地理环境的多维数据模型与地理过程表达[J].*地理与地理信息科学*,2005,21(4):1-5. [Li S, Yao J. Multidimensional data model and geographic process expression of virtual geographic environment[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2005,21(4):1-5.]
- [18] Paul M T. A computational sandbox with human automata for exploring perceived egress safety in urban damage scenarios[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018, 11(4):369-396.
- [19] Zhang F, Hu M, Che W, et al. Framework for virtual cognitive experiment in virtual geographic environments[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018,7:36.
- [20] 林琿,陈旻.利用虚拟地理环境的实验地理学方法[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2014,39(6):689-694,700. [Lin H, Chen M. Experimental geography based Virtual Geographic Environments (VGEs)[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014,39(6):689-694,700.]
- [21] 龚建华,李文航,周洁萍,等.虚拟地理实验概念框架与应用初探[J].*地理与地理信息科学*,2009,25(1):18-21. [Gong J H, Li W H, Zhou J P, et al. The conceptual framework and application of virtual geography experiment[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2009,25(1):18-21.]
- [22] 林琿,黄凤茹,闫国年.虚拟地理环境研究的兴起与实验地理学新方向[J].*地理学报*,2009,64(1):7-20. [Lin H, Huang F R, Lv G N. Development of Virtual Geographic Environments and the New Initiative in Experimental Geography[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009,64(1):7-20.]
- [23] 龚建华,林琿.面向地理环境主体GIS初探[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2006,31(8):704-708. [Gong J H, Lin H. Exploring human oriented GIS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006,31(8):704-708.]
- [24] 林琿,游兰.虚拟地理环境知识工程初探[J].*地球信息科学学报*,2015,17(12):1423-1430. [Lin H, You L. A tentative study on knowledge engineering for virtual geographic environments[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(12):1423-1430.]
- [25] Hey T, Tansley S, Tolle K M. *The fourth paradigm: data-intensive scientific discovery*[M]. WA: Microsoft research Redmond, 2009.
- [26] 张帆,胡明远,林琿.大数据背景下的虚拟地理认知实验方法[J].*测绘学报*,2018,47(8):1043-1050. [Zhang F, Hu M Y, Lin H. Experimental method of Virtual Geographic cognition in the context of big data[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2018,47(8):1043-1050.]
- [27] Zhang F, Zhang D, Liu Y, et al. Representing place locales using scene elements[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2018,71:153-164.
- [28] Zhang F, Zhou B, Liu L. Measuring human perceptions of a large-scale urban region using machine learning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018,180:148-160.
- [29] Laurini R. A conceptual framework for geographic knowledge engineering[J]. *Journal of Visual Languages & Computing*, 2014,25:2-19.
- [30] You L, Lin H. Towards a research agenda for knowledge engineering of virtual geographical environments[J]. *Annals of GIS*, 2016,22(3):163-171.
- [31] 林琿,游兰,胡传博,等.时空大数据时代的地理知识工程展望[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2018,43(12):2205-2211. [Lin H, You L, Hu C B, et al. Prospect of geoknowledge engineering in the era of spatio-temporal big data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018,43(12):2205-2211.]
- [32] 闫国年,俞肇元,袁林旺,等.地图学的未来是场景学吗?[J].*地球信息科学学报*,2018,20(1):1-6. [Lv G N, Yu Z Y, Yuan L W, et al. Is the future of cartography the scenario science?[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(1):1-6.]