



泛地图空间认知理论与方法研究框架

董卫华¹ 刘毅龙¹ 黑巧松¹ 杨天宇¹

¹ 北京师范大学地理科学学部,北京,100875

摘要:当前,人类社会已进入地理空间、人文社会空间和信息空间相融合的三元空间。在新技术和新需求的驱动下,地图空间认知的三要素即认知主体、认知客体和表达方式呈现出泛化特征,现有的地图空间认知理论和方法已无法支撑泛地图对三元空间的精准化认知表达。因此,首先总结归纳了国内外地图空间认知研究进展及其存在的局限性;然后,在此基础上构建了实验方法体系-认知机制-表达模型的泛地图空间认知研究框架。该框架将传统的地图空间认知拓展到了泛地图空间认知,可为后续的学者提供研究思路,推动创建适应泛地图学发展趋势的空间认知理论和方法,以解决地图空间认知要素不断泛化带来的一系列问题。

关键词:泛地图;空间认知;地图学;三元空间

中图分类号:P28

文献标志码:A

地图作为人类地图空间认知的重要工具^[1],可以帮助人们认识环境中各类地理要素的位置、空间分布、相互关系以及变化规律^[2]。地图空间认知研究植根于认知心理学,文献[3]根据迷宫实验发现大鼠对外部环境的空间结构存在某种理解,并将这种对外部环境的认知结果称为认知地图;文献[4]研究了人与空间交互过程,将认知地图与地理学结合,奠定了地图空间认知研究的基础。此后,在地图空间认知的研究中,地图学家重点关注人们如何认知地理环境并进行空间记忆、决策,从而优化地图设计,提高可用性及传输效率^[5]。技术进步推动着人类空间认知能力不断提高^[6]。借助认知实验仪器与工具,国内外地图空间认知研究取得了一系列理论与应用成果,例如地图感受与地图设计^[7]、地图寻路导航^[8]和地图空间认知能力^[9]等。目前,地图空间认知已成为现代地图学和地理学重要的基础理论,也是地图自动综合、遥感智能解译、空间智能导航等地理信息科学新方法论的重要支撑。

随着信息通信技术(information and communications technology, ICT)时代的发展,人类社会已进入地理空间、人文社会空间和信息空间相融合的三元空间^[10-11]。地理大数据、人工智能、云计

算、虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)和数字孪生等新技术的兴起,搭建了现实空间与“元宇宙”之间的桥梁,并促进智慧城市建设^[12-13]、高精地图^[14-15]、增强地图导航^[16-17]等应用需求持续增长。在新技术与新需求的驱动下,地图空间认知发生了深刻的变化,地图空间认知三要素即主体(人)、客体(空间)、表达方式(地图)呈现出显著的泛化特征:(1)认知主体从专业制图者、地理学家扩展到普通大众甚至机器人;(2)认知客体从传统的地理和人文社会空间扩展到包含信息空间的三元空间;(3)表达方式突破传统静态二维地图的表达,走向动态、多维、交互、移动、实时表达。以上变化对传统的地图空间认知理论与方法提出了巨大的挑战。一方面,针对泛地图的空间认知理论与研究框架仍较为缺乏;另一方面,传统地图空间认知的实验方法对人类生理、物理数据的采集手段不够深入,难以揭示泛地图空间认知的内在机制。因此,本文梳理和总结了泛地图空间认知理论与方法研究的最新进展,构建泛地图空间认知的研究框架,以期能为后续的学者提供研究思路,推动形成适应泛地图学发展趋势的空间认知理论和方法。

收稿日期:2022-09-21

项目资助:国家自然科学基金(42230103,41871366);地理信息工程国家重点实验室、自然资源部测绘科学与地球空间信息技术重点实验室联合资助基金(2021-04-03)。

第一作者:董卫华,博士,教授,研究方向为地理空间认知与类脑导航。dongweihua@bnu.edu.cn

通讯作者:刘毅龙,硕士生。yilong.liu@mail.bnu.edu.cn

1 国内外研究进展

1.1 认知主体研究:走向多维度、多广度

认知主体是地图空间认知的首要因素,不同认知主体使用地图与外界地理环境进行交互并实施空间决策的过程存在差异。20世纪80年代,一些西方认知科学的研究者把地图作为空间认知的工具,进行了以人为认知主体的地图空间认知实验^[18-19]。以往的研究主要是针对专业制图者-新手^[20-21]以及不同性别^[22-23]被试的地图空间认知过程,有关认知主体的研究维度和研究规模还存在一定局限。

随着数字制图的移动化、大众化以及眼动设备等技术的发展,针对认知主体的地图空间认知研究呈现出多维度、多广度的泛化趋势。近年来,基于认知主体的研究已经扩展到了专业背景、年龄、教育水平、收入和职业等多个维度,并更加注重个体差异。比如,文献[24]从不同专业背景的角度出发,探索了不同认知主体在地图空间定位定向以及空间可视化的表现差异;文献[25]则采用判别分析和聚类分析的方法,对不同职业、收入以及知识水平读图者的地图空间能力进行了定量建模和分析;文献[26]基于不同眼动指标的贝叶斯结构方程模型,对不同个体的地图空间认知能力差异进行了评估。同时,基于认知主体的地图空间认知研究还体现出多广度的发展趋势,OpenStreetMap(OSM)和Google Map等软件的出现淡化了制图者和读图者的区别,使普通大众有机会借助自己的空间认知参与地图制作、要素表达以及地图使用的整个过程,众源大数据的发展也使得针对大规模人群为认知主体的地图空间认知研究成为了可能。文献[27]基于自发地理信息(volunteered geographic information, VGI)的OSM地图,根据制图者自身的需求和经验提取了地标信息,进行人类空间记忆和导航表现的研究;文献[28]基于大数据的LBS(location based services)移动地图,测试和训练了用户在认知4D模型、导航路径选择等方面的空间认知表现。

近年来,伴随自主导航战略需求的增强,耦合人脑空间导航机制的机器人也受到了越来越多的关注,如何具备与人类相似的空间行为和空间感知能力也逐渐成为机器人仿生导航机制研究的重点,这使得机器人这一独特的认知主体也逐渐成为地图空间认知的研究重点。文献[29]

提出构建面向无人自主平台的机器地图,通过一体化建模实现战场环境认知与决策;文献[30]受小鼠位置细胞在箱内特定位置放电的启发,构建了一种基于位置细胞的认知地图动态增减模型,提高了机器人的环境交互能力;文献[31]则从海马认知机理的角度出发,借助地理环境中的颜色和深度信息,提出了一套以机器人为主体的认知地图创建方法。

1.2 认知客体研究:从二元空间到信息空间的可视化

地理空间、人文空间是人们生存并进行空间活动的基本空间,也是ICT时代前地图空间认知学者研究的主要认知客体。ICT时代,信息空间例如赛博空间、社交空间等第三元空间的介入,使人类能够在非传统地理空间中获得真实感受并完成信息交流,极大地改变了个人的社会建构和空间认知^[32]。这使得揭示适人化的信息空间地图可视化机制逐渐成为当前泛地图空间认知研究的重点之一。

针对赛博空间,文献[33]提出了一种基于用户心象地图的新可视化形式——Cyber Map,该研究将人类在赛博空间的认知过程概括为拓扑结构、节点分布、访问记忆等部分,解决了用户在网络中的认知过载和迷航问题;文献[34]认为Cyber Map是一种针对虚拟空间认知、导航的新地图形式,符合人们在赛博空间中的认知印象。随后,也有一些研究针对人们的空间认知过程提出了新的赛博空间可视化方法,如文献[35]认为人们所感知的世界是三维的,根据地图布局节点的地理属性将赛博空间与地理空间融合表示,可以让其具有距离和方向的可测量性,从而符合人们的认知特点。

随着脑科学理论和技术的发展,社交空间也逐渐成为地图空间认知研究的重点。文献[36]就认为,人们在社交和概念空间等信息空间进行记忆时,会借助一种“概念细胞”,基于这种非空间编码形式组织成的“地图”可以体现人们在信息空间中的行为;文献[37]则通过研究人们在社交空间“导航”过程中人脑不同部分的反应,发现社会地图对认知过程存在积极作用,进一步揭示了人们在社交空间中的认知表现和编码机制。

1.3 表达方式研究:新型泛地图表达的可用性成为研究重点

地图作为信息传输的载体,承载了制图者对地理空间的认知,这些认识通过地图表达传递给

读图者。因此,不同表达方式的地图往往能让读图者产生不同的认知感受,诸如视觉变量、地图符号、地图投影等不同的表达方式对地图可用性的影响也是地图空间认知领域长期关注的内容。然而,碍于传统媒介和制图模式的限制,早期有关地图表达方式的空間认知研究往往是以静态二维的地图为主^[38-40],其分析手段也较为单一。

随着信息技术的发展,地图从二维静态的表达方式逐渐扩展到了三维的动态表达,提供了更符合人类认知的三维动态世界的视角,也进一步推动了泛地图空间认知的研究,真实、动态、三维地图中人类的空间认知表现也逐渐成为了研究者关注的重点。在动态交互地图的空间认知研究中,文献[41]通过眼动追踪的方法,研究了不同视觉变量下被试空间认知的表现差异,从而评估了动态表达方式地图的可用性;文献[42]将传统的可用性方法与眼动追踪分析相结合,借助标准化问卷研究了动态实时交互地图的可用性;文献[43]借助触觉地图,研究了交互技术对视障人士学习时间、空间知识获取等地图空间认知过程的影响;类似地,文献[44]构建了一套基于眼动追踪技术记录用户视觉注意力的框架,考虑视觉特征对空间认知的影响,研究了人们如何阅读和理解交互式地图。

在多维地图的空间认知研究中,地图的表达方式逐渐趋于真实的地理环境,即由二维逐渐过渡到 2.5 维虚拟三维以及实景真三维的地图表达。文献[45]发现用户在三维地图表达方式的 VR 场景中,能有效缩短自身判读空间特征时的认知距离,从而提高自身的空间认知能力;文献[46]通过比较实景三维地图与传统二维地图下用户的寻路差异,发现用户在三维表达地图中路标识别以及复杂路口的空间决策表现和效率更高。同时,在实景三维表达方式的基础上,融合了 AR 技术的动态三维实景地图能够帮助用户进行路线学习、空间知识获取以及空间决策等地理空间行为,提高用户的空间认知能力^[47-49]。

综上所述,在 ICT 时代的技术驱动下,地图空间认知发生了深刻变化。然而,由于三元空间认知过程的微观性、复杂性和综合性,泛地图空间认知研究仍然面临着巨大挑战,主要表现为:(1)传统地图空间认知实验手段主要通过问卷、量表方法定性描述地理信息感知-表象-记忆-思维的宏观认知过程,无法从微观上定量揭示泛地图空间认知机制;(2)具有动态、多维、交互、移

动、实时特点的泛地图如何与人、环境相互作用过程和机制尚不明晰,其有效性和实用性缺乏实验和理论支撑;(3)人文社会空间和空间信息如何通过泛地图进行适人化表达,如何设计和实现具有效果可验证性的泛地图表达方式亟需实验-理论-实践的支持。

上述挑战对现有的地图空间认知理论与方法提出了新要求。为了深入研究三元空间下的泛地图空间认知机制,必须构建新的泛地图空间认知研究框架,才能揭示时空地理信息在三元空间-人脑空间-泛地图空间之间产生、传输、转换的机理。

2 泛地图空间认知研究框架

针对三元空间背景下地图泛化带来的难题,本文提出泛地图空间认知的主要研究内容为:(1)开展泛地图空间认知实验,构建泛地图空间认知实验与分析方法体系;(2)揭示人脑对三元空间下的泛地图空间认知机制;(3)创建耦合三元空间-大脑-地图的泛地图空间认知表达理论模型。具体的研究框架如图 1 所示。

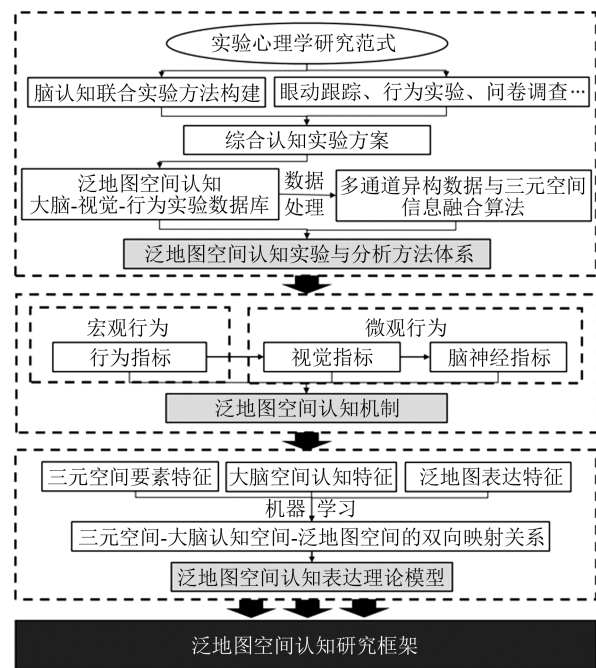


图 1 泛地图空间认知研究框架
Fig.1 Research Framework of Pan-Map Spatial Cognition

2.1 构建泛地图空间认知实验与分析方法体系

泛地图空间人脑视觉认知过程是不可见的,且观测较为困难。动态、实时、定量观测泛地图空间认知过程是揭示泛地图空间认知规律的前

提和关键,其难点源于认知实验与分析方法的信度与效度。针对这一难题,需要遵循实验心理学的范式,设计并开展功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、功能性近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)和脑电图(electroencephalogram, EEG)联合大脑认知实验,并结合行为指标、眼动跟踪、问卷量表、出声思维等手段,建立综合认知实验方案。

实验心理学范式的核心是控制变量^[50]。由于泛地图空间认知的影响因素繁多且存在交互效应,必须严格控制实验的自变量和因变量,合理选择实验刺激材料、实验任务和实验样本,规范泛地图空间认知实验流程。人脑对外界信息的认知是视觉和其他感官通道(如听觉、触觉)的多通道认知^[51],因此在完成实验数据收集和预处理后,需要通过特征提取、特征选择、特征标准化等手段,发展多通道异构数据与三元空间信息融合算法,构建泛地图空间认知大脑-视觉-行为数据分析体系,为泛地图空间认知机制研究提供方法基础。

2.2 揭示泛地图空间认知机制

泛地图空间认知是大脑、视觉、行为协同进行的综合认知,而现有的地图空间认知研究尚未建立起较为系统、全面的视觉-神经认知机制与宏观空间认知行为之间的联系。为了揭示泛地图空间认知机制,需要从微观和宏观层面,以泛地图空间认知实验为基础,选择、整合泛地图空间认知指标,包括脑神经指标(脑区血氧水平、脑神经功能连接、脑电信号分布),视觉指标(注视、眼跳、瞳孔、观察序列),以及人类行为指标(位置方向、量表得分、视频音频)等。同时,为了掌握这些指标在泛地图空间认知过程中的作用机理和内在含义,需要定量计算人脑对各认知指标的敏感性与权重,利用结构方程^[26]、多元非线性回归^[52]等数学模型,挖掘人脑对三元空间的认知模式,发现三元空间下的泛地图认知差异与认知一致性。

泛地图空间认知包括感知、表象、记忆、思维等一系列复杂的认知过程。因此,需要进一步探究人脑对于泛地图的视觉感知过程(整体-局部感知、自上而下-自下而上感知)、时空表象加工过程(时序-时点-时距加工、空间拓扑加工、属性语义加工、时间-空间编码加工)、时空记忆形成过程(感知记忆形成、工作记忆形成、长期记忆形成)和时空思维构建过程(时空分离思维、时空一体思维、时空互换思维)。基于脑功能连接分析^[53]、表征相似性分析^[54]、三维视觉交互建模^[55]等方

法,建立大脑-视觉两种认知机制的联系,并结合行为指标,发现人脑对三元空间泛地图感知-表象-记忆-思维的认知过程,最终揭示泛地图空间认知机制,为泛地图空间认知表达建模提供理论支撑。

2.3 创建泛地图空间认知表达理论模型

三元空间背景下,如何建立适人化的地图表达方式,是解决泛在地理信息的精准、高效、个性化表达的关键和难题。为了创建泛地图空间认知表达理论模型,需要提取三元空间要素、大脑空间认知以及泛地图表达的特征:(1)通过相关文献综述、网络信息挖掘与人文社会调查,总结地理空间、信息空间与人文社会空间的要素类型、空间属性、关联规则,构建三元空间要素特征;(2)根据泛地图认知机制,应用随机森林模型等机器学习方法,提取大脑空间认知特征;(3)利用计算机视觉与图像处理手段,挖掘泛地图表达特征(地图比例尺、地图符号、地图信息熵、视觉显著性图、语义显著性图)。

为了实现泛地图空间认知的规范化表达,需要根据泛地图空间认知机制,应用朴素贝叶斯模型、支持向量机、随机森林模型等机器学习方法,基于相关度分析、降维分析,得到特征间的相关性和冗余度,建立三元空间要素特征、大脑空间认知特征和泛地图表达特征三者之间的深层对应关系,从而搭建三元空间-大脑认知空间、大脑认知空间-泛地图空间的双向映射关系框架。在此基础上,发展泛地图空间位置、距离、方向、拓扑关系等基本空间属性及关系体系,以及泛地图符号、尺度、视角、结构、语义、维度等表达规则,最终构建耦合三元空间-大脑-地图的泛地图空间认知表达理论模型。

2.4 泛地图空间认知框架应用

本文提出的泛地图空间认知框架采用定性分析和定量分析相结合、微观机理和宏观表现相结合以及研究理论与实验分析相结合的研究路线,逐层递进,系统探究三元空间下的泛地图空间认知理论与方法。当前一部分学者已经开始泛地图空间认知的相关研究,如文献[56]开展了眼动追踪和EEG联合实验,基于不同难度的地图阅读任务评估了专家和新手读图者的空间认知与记忆能力;文献[57]从认知效率的角度出发,比较了被试在阅读4种不同类型地图(交通路网地图、普通地图、街景地图、遥感影像)时旁海马回的脑区激活的差异,进一步推断不同地图表达

会影响人们对空间位置的认知;文献[58]发现空间编码、地标锚定和路线规划等传统的认知地图导航机制在非地理空间同样具有适用性。

然而,这些研究仍处于初级阶段,并没有深度解构大脑-视觉微观机制与宏观地图空间认知行为之间的关系,在更高层次的泛地图表达上仍存在不足。后续学者可参考本文提出的研究框架,根据性别、年龄、专业背景、教育水平等因素对被试进行分组,基于泛地图空间认知实验与分析方法体系,选择与整合泛地图空间认知指标,挖掘人类对三元空间的大脑、视觉和行为综合认知机制;在此基础上,发展泛地图空间认知表达规则,构建泛地图空间认知表达理论模型,实现适人化与精准化表达,最终突破地图泛化带来的空间认知研究挑战。

3 总结与展望

过去 60 多年,地图空间认知研究不断深入,相关成果为地图设计和可用性评价、个体地理能力培养等提供了重要参考。然而,随着人类社会进入三元空间,新技术的快速发展也带来了新的应用需求,现有的理论与方法已无法支撑泛地图对三元空间的精准化认知表达。基于此,本文将传统的地图空间认知拓展到了泛地图空间认知,提出了泛地图空间认知的基本研究问题,构建了实验方法体系-认知机制-表达模型的泛地图空间认知研究框架。针对多维、动态、实时和移动交互为主的泛地图表达,此框架在传统地图空间认知实验手段(例如问卷量表、行为实验)的基础上,引入 fMRI、fNIRS、EEG 等认知神经科学实验工具,并结合传统指标统计和机器学习等分析方法,深入研究三元空间下的泛地图空间认知。

然而,当前泛地图空间认知研究仍存在一些需要攻克的难点,具体包括:(1)多源认知数据的自动化处理。基于泛地图空间认知实验体系,将产生大规模的实验数据。传统的手工处理方法已不再适用,需要研究将眼动、fMRI、声音和视频等多源认知数据进行自动化处理与分析的方法。(2)泛地图空间认知的个性化差异度量。三元空间下的泛地图空间认知仍为白箱化过程,解构和剖析大脑对泛地图空间的认知模式,才能发现泛地图空间认知差异与认知一致性,揭示复杂的泛地图空间认知过程。(3)泛地图空间认知的精准化表达与建模。如何构建三元空间-大脑认知空间、大脑认知空间-泛地图空间的双向映射关系框

架,从而建立耦合三元空间-大脑-地图的泛地图空间认知表达理论模型,以实现智慧城市建设、高精地图、自动驾驶等应用场景的精准化表达,是未来泛地图空间认知研究的重点。

多学科交叉与融合推动着地图学的创新与发展^[59-60]。为了应对上述挑战,学者们必须依靠地图学、认知心理学、脑神经科学等多学科知识,借助眼动追踪、fMRI、人工智能等新技术,突破瓶颈问题,推动新理论、新方法的创建,以适应地图空间认知要素的泛化趋势。希望在未来,泛地图空间认知能持续不断地为地图学的发展注入活力。

参 考 文 献

- [1] Gao Jun. Spatial Cognition of Maps and Cognitive Cartography[M]. Beijing: Sinomap Press, 1991 (高俊. 地图的空间认知与认知地图学[M]. 北京: 中国地图出版社, 1991)
- [2] Gao Jun, Gong Jianhua, Lu Xuejun, et al. Spatial Cognition Studies in Geoscience [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 338 (高俊, 龚建华, 鲁学军, 等. 地理信息科学的空间认知研究(专栏引言)[J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 338)
- [3] Tolman E C. Cognitive Maps in Rats and Men[J]. *Psychological Review*, 1948, 55(4): 189-208
- [4] Golledge R G, Rushton G, Clark W A V. Some Spatial Characteristics of Iowa's Dispersed Farm Population and Their Implications for the Grouping of Central Place Functions [J]. *Economic Geography*, 1966, 42(3): 261-272
- [5] Zheng Shulei. The Theory, Map Tools and Development Directions of Geographic Spatial Cognition[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(6): 766-776 (郑束蕾. 地理空间认知理论与地图工具的发展[J]. 测绘学报, 2021, 50(6): 766-776)
- [6] Gao Jun, Cao Xuefeng. The New Development Direction of Cartography Promoted by Spatial Cognition[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(6): 711-725 (高俊, 曹雪峰. 空间认知推动地图学学科发展的新方向[J]. 测绘学报, 2021, 50(6): 711-725)
- [7] Brodersen L, Andersen H H, Weber S. Applying Eye-Movement Tracking for the Study of Map Perception and Map Design [M]. Denmark: National Survey and Cadastre, 2002
- [8] Montello D R. Navigation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- [9] Hegarty M, Montello D R, Richardson A E, et al. Spatial Abilities at Different Scales: Individual Dif-

- ferences in Aptitude-Test Performance and Spatial-Layout Learning [J]. *Intelligence*, 2006, 34(2): 151-176
- [10] Guo Renzhong, Chen Yebin, Ying Shen, et al. Geographic Visualization of Pan-Map with the Context of Ternary Spaces[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1603-1610 (郭仁忠, 陈业滨, 应申, 等. 三元空间下的泛地图可视化维度[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(11): 1603-1610)
- [11] Guo Renzhong, Chen Yebin, Zhao Zhigang, et al. A Theoretical Framework for the Study of Pan-Maps[J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(1): 9-15 (郭仁忠, 陈业滨, 赵志刚, 等. 泛地图学理论研究框架[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(1): 9-15)
- [12] Guo Renzhong, Lin Haojia, He Biao, et al. GIS Framework for Smart Cities[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1829-1835 (郭仁忠, 林浩嘉, 贺彪, 等. 面向智慧城市的GIS框架[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(12): 1829-1835)
- [13] Bibri S E, Allam Z, Krogstie J. The Metaverse as a Virtual Form of Data-Driven Smart Urbanism: Platformization and Its Underlying Processes, Institutional Dimensions, and Disruptive Impacts [J]. *Computational Urban Science*, 2022, 2(1): 24
- [14] Liu Jingnan, Zhan Jiao, Guo Chi, et al. Data Logic Structure and Key Technologies on Intelligent High-Precision Map[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(8): 939-953 (刘经南, 詹骄, 郭迟, 等. 智能高精地图数据逻辑结构与关键技术[J]. 测绘学报, 2019, 48(8): 939-953)
- [15] Meng Liqiu. Yesterday, Today and Tomorrow of Autonomous Navigation Maps[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 1029-1039 (孟立秋. 自主导航地图的昨天、今天和明天[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 1029-1039)
- [16] Cheng Y, Zhu G C, Yang C, et al. Characteristics of Augmented Map Research from a Cartographic Perspective[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2022, 49(5): 426-442
- [17] Pang Jing, Chen Guoxiong, Song Guanfu, et al. Research and Application of Augmented Reality Map [J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(1): 130-134 (庞静, 陈国雄, 宋关福, 等. 增强现实地图研究与应用[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(1): 130-134)
- [18] Levine M, Jankovic I N, Palij M. Principles of Spatial Problem Solving [J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1982, 111(2): 157-175
- [19] Moeser S D. Cognitive Mapping in a Complex Building [J]. *Environment and Behavior*, 1988, 20(1): 21-49
- [20] Thorndyke P W, Stasz C. Individual Differences in Procedures for Knowledge Acquisition from Maps [J]. *Cognitive Psychology*, 1980, 12(1): 137-175
- [21] Gilhooly K J, Wood M, Kinnear P R, et al. Skill in Map Reading and Memory for Maps [J]. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 1988, 40(1): 87-107
- [22] Bettis N C, Manson G A. An Assessment of the Geographic Learning of Fifth-Grade Students in Michigan [J]. *Journal of Geography*, 1975, 74: 16-24
- [23] Matthews M H. Gender, Home Range and Environmental Cognition [J]. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 1987(2): 43-56
- [24] Dong W H, Zheng L Y, Liu B, et al. Using Eye Tracking to Explore Differences in Map-Based Spatial Ability Between Geographers and Non-geographers [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(9): 337
- [25] Zheng Shulei, Yang Chunlei, Li Ying, et al. Research on Map User Cluster Analysis and Discriminant Analysis [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(4): 14-16 (郑束蕾, 杨春雷, 李瑛, 等. 基于聚类分析和判别分析的地图用户分类研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(4): 14-16)
- [26] Dong W H, Jiang Y H, Zheng L Y, et al. Assessing Map-Reading Skills Using Eye Tracking and Bayesian Structural Equation Modelling [J]. *Sustainability*, 2018, 10(9): 3050
- [27] Bestgen A K, Edler D, Kuchinke L, et al. Analyzing the Effects of VGI-Based Landmarks on Spatial Memory and Navigation Performance [J]. *Künstliche Intelligenz*, 2017, 31(2): 179-183
- [28] Mulder K. Inertial Navigation System Using Augmented Reality Transformation for Correction and Cognition [D]. Athabasca: Athabasca University, 2022
- [29] You Xiong, Tian Jiangpeng. Research on Geographical Battlefield Environment Model Facing Autonomous Platform [J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(9): 1645-1653 (游雄, 田江鹏. 面向无人自主平台的战场地理环境模型研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(9): 1645-1653)
- [30] Ruan Xiaogang, Li Peng, Zhu Xiaoqing, et al. A Visual Navigation Method Based on Goal-Driven Behavior and Space Topological Memory [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2021, 44(3): 594-608

- (阮晓钢, 李鹏, 朱晓庆, 等. 基于目标导向行为和空间拓扑记忆的视觉导航方法[J]. 计算机学报, 2021, 44(3): 594-608)
- [31] Yu Naigong, Yuan Yunhe, Li Ti, et al. A Cognitive Map Building Algorithm by Means of Cognitive Mechanism of Hippocampus [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(1): 52-73 (于乃功, 苑云鹤, 李侗, 等. 一种基于海马认知机理的仿生机器人认知地图构建方法[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 52-73)
- [32] Sun Zhongwei, Lu Zi, Wang Yang. The Geography of Cyberspace: Review and Prospect[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(10): 1005-1011 (孙中伟, 路紫, 王杨. 网络信息空间的地理学研究回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2007, 22(10): 1005-1011)
- [33] Jiang B, Ormeling F J. Cybermap: The Map for Cyberspace[J]. *The Cartographic Journal*, 1997, 34(2): 111-116
- [34] Ai Tinghua. Maps Adaptable to Represent Spatial Cognition[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 347-354 (艾廷华. 适宜空间认知结果表达的地图形式[J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 347-354)
- [35] Zhang Zheng. The Research on Theory of Cybermap [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2012 (张峥. 赛博地图构建理论研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2012)
- [36] Quiroga R Q, Reddy L, Kreiman G, et al. Invariant Visual Representation by Single Neurons in the Human Brain[J]. *Nature*, 2005, 435(7045): 1102-1107
- [37] Tavares R M, Mendelsohn A, Grossman Y, et al. A Map for Social Navigation in the Human Brain [J]. *Neuron*, 2015, 87(1): 231-243
- [38] Evans G W, Fellows J, Zorn M, et al. Cognitive Mapping and Architecture [J]. *Journal of Applied Psychology*, 1980, 65(4): 474-478
- [39] May M, Peruch P, Savoyant A. Navigating in a Virtual Environment with Map-Acquired Knowledge: Encoding and Alignment Effects[J]. *Ecological Psychology*, 1995, 7(1): 21-36
- [40] Denis M. The Description of Routes: A Cognitive Approach to the Production of Spatial Discourse[J]. *Current Psychology of Cognition*, 1997, 16: 409-458
- [41] Dong W H, Liao H, Xu F, et al. Using Eye Tracking to Evaluate the Usability of Animated Maps [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(3): 512-522
- [42] Çöltekin A, Heil B, Garlandini S, et al. Evaluating the Effectiveness of Interactive Map Interface Designs: A Case Study Integrating Usability Metrics with Eye-Movement Analysis[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2009, 36(1): 5-17
- [43] Brock A. Interactive Maps for Visually Impaired People: Design, Usability and Spatial Cognition[D]. Toulouse: Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2013
- [44] Göbel F, Kiefer P, Raubal M. FeaturEyeTrack: Automatic Matching of Eye Tracking Data with Map Features on Interactive Maps[J]. *GeoInformatica*, 2019, 23(4): 663-687
- [45] Liu Fang, Wang Guangxia, Qian Haizhong, et al. The Influences of Virtual Geographic Environment on Styles of Spatial Cognition[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(4): 67-69 (刘芳, 王光霞, 钱海忠, 等. 虚拟地理环境对空间认知方式的影响[J]. 测绘科学, 2009, 34(4): 67-69)
- [46] Liao H, Dong W H, Peng C, et al. Exploring Differences of Visual Attention in Pedestrian Navigation when Using 2D Maps and 3D Geo-Browsers[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2017, 44(6): 474-490
- [47] Kim K H, Wohn K Y. Effects on Productivity and Safety of Map and Augmented Reality Navigation Paradigms[J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2011, E94(5): 1051-1061
- [48] Amirian P, Basiri A. Progress in Cartography[M]. Cham: Springer, 2016
- [49] Yount Z F, Kass S J, Arruda J E. Route Learning with Augmented Reality Navigation Aids[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2022, 88: 132-140
- [50] Dong Weihua, Liao Hua, Zhan Zhicheng, et al. New Research Progress of Eye Tracking-Based Map Cognition in Cartography Since 2008[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 599-614 (董卫华, 廖华, 詹智成, 等. 2008年以来地图学眼动与视觉认知研究新进展[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 599-614)
- [51] Allport D A, Antonis B, Reynolds P. On the Division of Attention: A Disproof of the Single Channel Hypothesis[J]. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1972, 24(2): 225-235
- [52] Dimigen O, Ehinger B V. Regression-Based Analysis of Combined EEG and Eye-Tracking Data: Theory and Applications[J]. *Journal of Vision*, 2021, 21(1): 3
- [53] Fornito A, Zalesky A, Bullmore E. Fundamentals of Brain Network Analysis[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2016

- [54] Kriegeskorte N, Mur M, Bandettini P. Representational Similarity Analysis—Connecting the Branches of Systems Neuroscience [J]. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 2008, 2: 4
- [55] de Ridder M, Jung Y, Huang R, et al. Exploration of Virtual and Augmented Reality for Visual Analytics and 3D Volume Rendering of Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) Data[C]// Big Data Visual Analytics (BDVA), Hobart, TAS, Australia, 2015
- [56] Keskin M, Ooms K, Dogru A O, et al. Exploring the Cognitive Load of Expert and Novice Map Users Using EEG and Eye Tracking [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(7): 429
- [57] Lobben A, Limpisathian P W, Lawrence M. Representations of Place in the Human Brain [J]. *Neuroimage*, 2019, 75: 228–237
- [58] Epstein R A, Patai E Z, Julian J B, et al. The Cognitive Map in Humans: Spatial Navigation and Beyond [J]. *Nature Neuroscience*, 2017, 20 (11): 1504–1513
- [59] Wang Jiayao, Wu Fang, Yan Haowen. Cartography: Its Past, Present and Future [J]. *Acta Geodastica et Cartographica Sinica*, 2022, 51 (6): 829–842 (王家耀, 武芳, 闫浩文. 大变化时代的地图学 [J]. *测绘学报*, 2022, 51(6): 829–842)
- [60] Zhong Ershun. Deep Mapping—A Critical Engagement of Cartography with Neuroscience [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI:10.13203/j.whugis20220382 (钟耳顺. 深度地图——论地图学与神经科学的结合 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, DOI:10.13203/j.whugis20220382)

Research Framework of the Theories and Methods for Pan-Map Spatial Cognition

DONG Weihua¹ LIU Yilong¹ HEI Qiaosong¹ YANG Tianyu¹

¹ Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Nowadays, human society has entered the ternary spaces, where geographical space, human space and information space are integrated. Driven by new technologies and demands, the three basic elements of map spatial cognition, cognitive subject, object and expression, have shown generalized characteristics. The existing map spatial cognition theories and methods can no longer support the accurate cognitive expression of pan-maps. Therefore, this paper first summarizes the progress of map spatial cognition research at home and abroad and its limitations, including the extension of cognitive subject studies, visualization of information space, usability of novel pan-map representation. Then, we propose a pan-map spatial cognition research framework, including experimental methodology, cognitive mechanism, and expression model. To the end, we hope that this paper can provide deep insights for future studies and promote the establishment of related theories and methods that adapt to the development trend of pan-maps, so as to solve a series of problems brought by the continuous generalization of elements of map spatial cognition.

Key words: pan-map; spatial cognition; cartography; ternary spaces

First author: DONG Weihua, PhD, professor, majors in geospatial cognition and brain-like intelligent navigation. E-mail: dongweihua@bnu.edu.cn

Corresponding author: LIU Yilong, postgraduate. E-mail: yilong.liu@mail.bnu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42230103, 41871366); State Key Laboratory of Geo-Information Engineering and Key Laboratory of Surveying and Mapping Science and Geospatial Information Technology of MNR, Chinese Academy of Surveying and Mapping (2021-04-03).

引文格式: DONG Weihua, LIU Yilong, HEI Qiaosong, et al. Research Framework of the Theories and Methods for Pan-Map Spatial Cognition [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(12): 2007–2014. DOI:10.13203/j.whugis20220604 (董卫华, 刘毅龙, 黑巧松, 等. 泛地图空间认知理论与方法研究框架 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(12): 2007–2014. DOI:10.13203/j.whugis20220604)