

引文格式: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. DOI:10.11947/j.AGCS.2021.20210044.
ZHENG Shulei. The theory, map tools and development directions of geographic spatial cognition[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(6): 766-776. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20210044.

地理空间认知理论与地图工具的发展

郑束蕾

信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450001

The theory, map tools and development directions of geographic spatial cognition

ZHENG Shulei

Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Focused on the geographic spatial cognition, this paper introduces the origination, the current situations, the four classical geographic spatial cognition theories and the difference between two factions. In the following, for the important role of map in spatial cognition, the function and research methods are concluded. Especially, the eye-tracking technology are paid more attention to, for its advantages in evaluation and interaction. Eventually, three developing directions and the characters of geographic spatial cognition in new AI era are discussed. With a focus on theoretical issues of geospatial cognition, this paper addresses at first their origin in psychology and the state of the art. The classical theories of geospatial cognition and their impacts are then introduced. Meanwhile, the fundamental difference between the geospatial cognition and geospatial sensing is pointed out. Although both are supported by the Artificial Intelligence (AI), the former is targeted to the understanding of how human brain works for spatial tasks, whereas the latter aims to maintain a dynamic digital twin of the geospace based on sensory technology and computer vision. The role and research methods of maps as a two-way tool for spatial cognition are discussed, with emphasis on eye-tracking experiments as well as their advantage in interactions. Three development trends of geospatial cognition in the era of AI—computational semantic cognition, cognitive mechanism of the mind and embodied cognition are summarized. The parallel development and characteristics of map-based spatial cognition in this same period are outlined.

Key words: spatial cognition; geographic spatial cognition; AI; eye-tracking; digital twin

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41501507; 41701457); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2019M663993)

摘 要: 本文首先分析了地理空间认知的心理学起源与发展现状,介绍了地理空间认知经典理论及影响,指出了地理空间认知和认知地理空间的根本区别:尽管两者都需要人工智能的支持,前者旨在了解人脑在空间任务中的工作机理,后者则注重利用传感技术和计算机视觉建立、维护地理空间的动态数字孪生体;然后,讨论了地图作为空间认知的双向工具的作用和研究方法,重点是眼动跟踪试验以及它们在交互方面的优势;最后,指出了人工智能新时期地理空间认知的3个发展方向——语义计算认知、脑科学认知机制和具身认知,并概述了核心地图空间认知的平行发展和特点。

关键词: 空间认知;地理空间认知;眼动追踪;人工智能;数字孪生

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2021)06-0766-11

基金项目:国家自然科学基金(41501507;41701457);国家博士后面上基金(2019M663993)

长久以来,人们对于自身活动的环境和空间一直保持着蓬勃的好奇心,从未停止过探索的脚步。人类了解和操纵环境的心智能力也叫空间认知能力(spatial-cognitive ability)。对环境的认

知,主要指心理表征(认知绘图能力)和在环境中找路,主体是地理空间认知。地图作为人类空间认知和空间思维的重要工具,将空间认知的结果进行固化和抽象^[2],从而完成地理信息的视觉

表达和信息传递,为人们了解城市格局、制定旅行路线、打车出行或自驾导航等地理空间活动提供辅助决策^[3-4]。近年来,机器制图、智能驾驶、无人投送等人工智能技术的广泛应用,既涉及地理学、地图学,又涉及脑神经科学、生物传感,还涉及计算机、红外与信息技术等,凸显了对地理空间认知的急迫需求。认知心理学为地理空间认知研究提供了理论依据,人工智能技术为地理空间认知提供了高效计算方法,生物信息技术为地理空间认知提供了自然交互手段,共同促使其在沉寂了一段时间后再次得到关注,并且具有鲜明的时代特征。然而,受学科沿袭、专业方向、研究角度等原因影响,学术界对“空间认知”这一基本概念的理解不尽相同,分化出基于脑神经机制的空间认知机理和基于传感器量测技术的认知空间扩展两种趋势,这是由空间认知的学科交叉本质特性^[5]所决定的。本文主要思考和解决以下问题:①地理空间认知从哪里来?在当今时代有哪些发展变化,要到哪里去?②地理空间认知和认知地理空间是不是同一回事,这里的认知是名词还是动词?地理空间认知是脑科学、认知心理学的应用,还是测绘技术的延伸?③地图在其中扮演着什么角色,即将随时代进步而消亡,还是从传统测绘中解放出来?④究竟是让机器代替人,还是以机器和技术辅助人,地理空间认知的主体究竟是谁?

为此,本文将从地理空间认知的缘起与现状、理论及发展、地图工具的作用及研究方法、新时期发展方向及特点等几方面进行阐述。

1 地理空间认知的缘起与现状

1.1 空间认知的心理学起源

认知科学诞生于20世纪50、60年代的“认知革命”,脱胎于认知心理学,一般认为有6个主要学科来源^[6-7]:哲学、心理学、计算机科学、语言学、人类学、神经科学,但忽略了图形科学对认知科学的贡献,以及地图对于空间认知的重要作用。图1为修改后的认知科学六边形(原“认知科学六边形”^[6-7]中忽略了“图形科学”对认知科学的贡献,以及地图对于空间认知的重要作用,图1将“图形科学”补充至“语言学”一角。)。第一代认知科学以符号加工和联结主义的并行加工为主要研究策略。20世纪80年代,心理学家对“情境性”与“具身性”空前关注,提出了“具身认知”的概念,强调“生态效度”^[8-10]。第二代认知科学从控制试

验转向情境分析,从个体加工机制的探讨转向社会实践活动的分析,从静态表征转向认知动力学分析。认知科学与生俱来的学科交叉特性,第二阶段向情境性、具身性、动力性的范式转向^[8],以及在人工智能领域的根源贡献,为地理空间认知提供了理论基础。心理学中的文字阅读习惯^[11]、虚拟社交行为^[12]、面孔关注偏好、智能驾驶注意力分配等研究,涉及社交空间、面孔空间、驾驶空间、建筑空间、艺术空间等多种空间类型,为地理空间认知研究提供了技术借鉴^[13-14]。

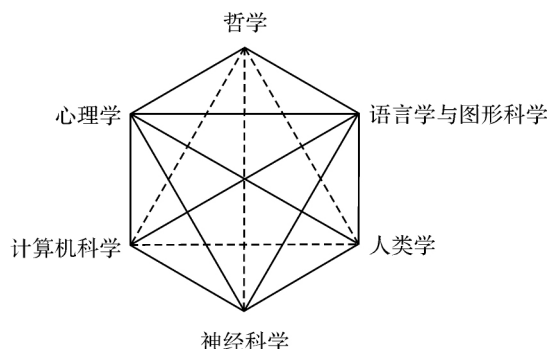


图1 修改后的认知科学六边形

Fig.1 The revised cognition hexagon model

1.2 地理空间认知的研究现状

心理学与地理学中的空间认知研究,在研究目的和地图作用等方面都有所不同。例如,心理学研究常常从实验心理学、工程心理学、人因工程及用户体验等角度出发,仅把地图作为试验测试模型和一般的图片素材;而地理学研究想要了解地理环境的认知特点,指导地图可视化设计,提高地理信息可用性及传输效率^[3,5],更加关注与位置相关的空间关系的理解、辨识、记忆、决策等认知结果。由于选题艰涩、试验困难、成果周期长、工程效益弱等困难,地理空间认知研究在很长一段时间内成为冷板凳,研究队伍断层,难有理论突破。但最近,人工智能的技术进步大大超越了理论研究的步伐,各种机器学习算法、模型、技术的自发无序的发展遭遇了严重瓶颈,人类智能和认知机制成为不可避免的问题。特别是智能驾驶遭遇的伦理选择之难,暴露了缺少认知思维的弊端。在技术应用的折戟倒逼下,地理空间认知研究重新活跃起来。

地理学者纷纷关注地理空间认知领域,呼吁解决认知理论研究滞后于技术发展的問題^[13]。文献^[15]指出了地图与空间认知的关系。文献

[16]认为,空间认知研究改进了用户界面设计、深化了人类对环境的思考 and 理解,基于位置科学的空间认知是十分活跃的研究领域。文献[17—18]关注了智能制图、知识制图与时空大数据中的基础认知问题,阐述了人脑地图空间认知与人-机融合空间认知的区别与联系。文献[19]强调了室内增强环境空间认知及人机协同问题。文献[20—22]关注了智慧城市多视角认知,呼吁在“泛地图学”时代要加强“三元空间”基础理论研究。文献[23]类比传统 GIS 的发展,提出虚拟地理空间及人文社会空间中的认知问题。文献[24]从地图信息论的角度,讨论了地图传输空间信息的核心功能及主观认知感受。文献[25—28]分别对用户的地图专业背景、性别及地理环境表达形式等造成的空间认知差异进行了眼动试验系列研究,并对当代眼动试验地理应用进行了总结。文献[29—33]对心象地图及空间认知基础理论^[29-30]、个性化地图眼动试验^[31-32]、自适应制图技术^[33]等进行了系列研究。文献[34—35]对游戏地图中的空间认知问题及三维空间认知差异进行了探索。文献[36]基于智慧空间系统的认知科学特征,提出了空间信息的自然语言表达模型,探讨了学科交叉融合趋势。文献[37]采用认知试验的方法,研究了路径认知与自然语言表达所涉及的空间关系。文献[38]从制图综合的角度,研究了地图认知表达的抽象性与具象性。文献[39]关注了应急救援室内地图的空间认知基础及过程。文献[40]从移动地图认知需要入手,提出了 POI 动态综合算法。文献[41]提出了虚拟地理环境的认知研究框架。

各大高校和研究机构纷纷依托传统的地球科学、地理信息科学、地图学、GIS、地理大数据等专业,设立空间认知实验室和研究院(所),开展国际合作。如北京师范大学-慕尼黑工业大学联合成立了地理空间认知与可视分析研究中心,重点研究空间认知理论及试验验证;武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室和遥感信息工程学院联合成立空间智能研究所,致力于空间大数据智能处理方法;郑州大学成立了空间认知研究室和认知工效学联合实验室,提出新地图学学科体系。

近年来,各类国内外学术组织中的相关委员会,也积极组织空间认知相关的专题会议,如第

29 届国际地图制图大会、第 28 届国际地理信息科学会议-国际华人地理信息科学协会年会、2018—2021 年中国地理信息科学理论与方法学术年会、第 3—6 届全国地图学理论与方法研讨会、第 1 届地图与空间认知会议、第 4—5 期地理信息科学论坛分别设置了“Cartography in mind”、“Spatial cognition in the mobile information era”、“空间认知与空间推理”、“人脑地图空间认知与人机融合多模式时空认知”、“地图空间认知理论与方法”、“空间认知与地图可视化”、“空间认知与地理智能”、“GeoAI 地理空间智能”等专题。

2 地理空间认知理论及分化

2.1 地理空间认知的经典理论模型

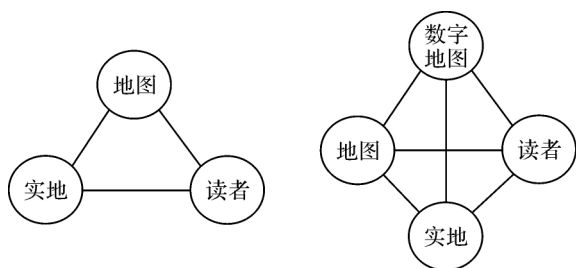
随着数字地图技术、时空大数据技术、信息技术等的发展,地理空间认知理论模型也在不断丰富和创新。下面对几种经典的地理空间认知理论模型进行介绍。

2.1.1 地图空间信息传输模型

在地理空间认知领域,文献[42]提出了地图空间信息传输模型,详细描述了地图信息传输的路径,地图在空间认知中的核心作用,以及地图制图者与用图者在空间认知理解上的影响因素。该地图信息传输模型是第一个地图空间认知模型,对于后来地理空间认知的理论发展具有重要意义^[24]。

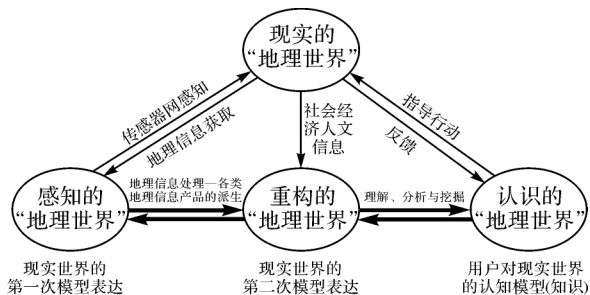
2.1.2 地图学三角形到地图学四面体模型

文献[5,43—45]认为,从地图学角度来定义空间认知,是人们认识自己赖以生存的环境,包括其中的诸事物、现象的相关位置、依存关系以及它们的变化和规律。空间认知是人们对出现于周围环境中的各种事物和现象的存在、变化方式以及它们的相关位置的认识过程和能力;是对事物和现象的发生、影响、因果进行分析研究的基础;是联系地而不是孤立地,发展地而不固定地看待事物和现象的前提。由地图学三角形到地图学四面体的转化,为现代地图学增加了数字地图—地图,数字地图—实地,数字地图—读者 3 个关系,标志着地图空间认知理论与地图制图技术的发展,反映了信息时代地图学的变革(如图 2 所示)。文献[15]继续关注人-机-环境研究,提出了放飞地图的空间认知新思想。

图 2 地图学三角形向地图学四面体模型转化^[45]Fig.2 Cartographic triangle and tetrahedron model^[45]

2.1.3 多模式时空综合认知模型

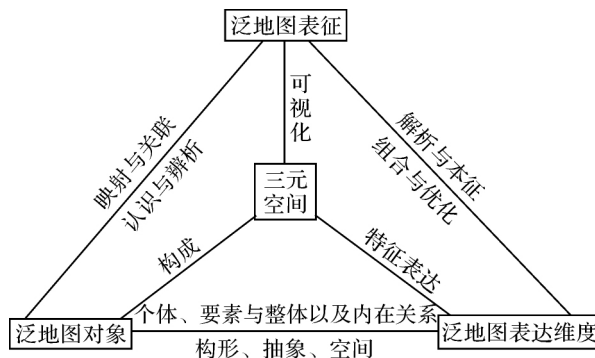
文献[3]认为,空间认知就是研究空间信息处理的过程,或者说是研究人们怎样认识自己赖以生存的环境,包括构成环境的诸事物、现象的相关位置、空间分布、依存关系,以及它们随时间变化的运动演化规律。基于传感器网络由“现实的地理世界”到“感知的地理世界”(包括感知、表象、记忆、思维等一系列过程)、“重构的地理世界”、再到“认知的地理世界”的空间认知概念模型(如图 3 所示),为大数据时代的知识制图、智能制图奠定了理论依据^[17,46]。时空大数据时代的到来,使地图空间认知模型向多模式时空综合认知模型转移。

图 3 智能制图空间认知模型^[46]Fig.3 The spatial cognitive model faced to the smart mapping^[46]

2.1.4 泛地图理论模型

文献[20—22]认为,信息与通信技术的快速发展带动人类进入地理空间、人文社会空间和空间相融合的三元空间。地图制图的目的、人员、对象和环境等均发生巨大变化,地图的类型、空间对象、表达维度、地图角色等呈现出显著泛化特征,现有地图学理论无法引领和指导当代的地图实践,地图学理论亟待“突围”。文献[20]提出 ICT (information and communication technology, ICT) 时代泛地图理论,如图 4 所示,辨析三元空间对象

的结构关系和抽象模式,构建泛地图对象空间理论;解析泛地图表达维度空间,建立泛地图表达维度谱系;挖掘泛地图表达机制与方法,揭示各类三元空间对象的有效性规律,实现对三元空间的泛地图的优化表达。

图 4 ICT 时代的泛地图理论模型^[20]Fig.4 The extensive map model in ICT era^[20]

以上理论模型分别在地理空间认知的信息传输、关系结构、脑神经基础、智能化表达等方面具有深远的意义,为当今智能化的地理空间认知打下了坚实的理论基础。

2.2 地理空间认知与认知地理空间

随着理论与技术的发展,地理空间认知的相关研究也出现了分化。一般而言,地理空间认知,指的是基于认知心理学中脑科学和神经机制研究,深入理解、剖析、解译人类大脑的空间认知能力,主要研究人类生而具有、世代传承、优胜劣汰、与时俱进的空间本能及其进化能力,通过问卷调查与生物信息技术手段进行实时监测和量化分析,通过人工智能技术得以强化和延伸,地图在其中承载了空间认知和空间思维重要工具的作用。

当前地理学界还有另一类认知地理空间的研究,重点是空间探测能力的提升及测绘技术的进步。这类研究主要借助智能数字探测技术,丰富创新测量手段,拓展人类认识的空间范围,涉及太空、地下、室内、室外等多种空间类型。它以对地观测与导航技术、深空探测与倾斜摄影测量技术、遥感数据星地协同技术、物联网环境下的实时多源异构传感技术、实时高精度导航技术、泛在互联与位置服务技术、时空大数据分析挖掘技术、云服务支撑的社会计算技术、智能感知定位与移动测量技术等技术为基础,通过各种测绘技术丰富、拓展、改造人类的认识能够到达的空间范围,注重利用传感技术和计算机视觉建立和维护“全息”、“全空

间”的时空数字地球孪生体,但目前还处于感知地理空间的技术层次,地图在其中充当了测量结果的可视化手段或定位操作技术平台的角色。文献[47]提出智慧 GIS 应用的“四个脑”,关注了智能驾驶和移动测量实时感知问题。文献[48]认为,在“人机协同”到“人机合一”的交互过程中,人与环境关系的感知、认知和相应服务成了泛在测绘的重点特色要素。文献[17,46]关注了时空大数据中 GIS 数据与行业数据的集成方法。文献[49]提出了全空间信息系统的概念,将 GIS 的空间尺度扩展到了微观和宏观空间。文献[50]从地理空间视角提出区域综合评估方法与示范。文献[51]关注了基于地理大数据的城市空间感知及空间规划等领域应用。

前者是对空间认知机理的研究,重点是以生理学、心理学为基础对人脑空间信息加工过程和规律进行分析与试验验证,其中的“认知”是名词;后者是对空间认知技术的应用,重点是如何利用测绘技术方法更精、更远、更广地认识人类生存空间,其中的“认知”是动词。两者正如地图与 GIS 一样,有所区别又紧密联系。本文主要讨论的是前者。

3 地理空间认知的重要工具——地图

3.1 地图的双向空间认知作用

空间认知是地图的主线。地图是空间认知和空间思维的工具^[2],也是国际上 3 大通用语言(音乐、绘画、地图)之一^[52]。是跨越时间和空间、自然和人文,综合运用地理学、测绘学、信息技术、认知科学、人工智能等几大科学领域知识^[45],科学表达复杂非线性地理世界空间结构和空间关系的伟大创造^[17],具有普适性和顽强的生命力。空间认知是地图学与认知科学(认知心理学)的碰撞^[5]。把认知科学的方法引入地图学研究主要有两个目的:①弄清地图是人类认知空间环境的结果,又是依据的信息加工机制;②弄清地图设计制作的思维过程并设法描述它们^[5]。

周围环境既包括实体地理环境,也包括增强环境、虚拟环境、混合环境、孪生环境等新的环境类型,它们共同构成空间认知的基础情境;作为研究对象的各种事物和现象,既包括人类主体对自身存在的认识(具身认知^[53]),对周边事物、现象的实际地理位置、发展变化规律等的理解,也包括人类对虚拟环境中各种实体对象的推理分析,还

包括作为人类化身的机器智能对借助传感器所感知环境的人称选择、视角变换、位置预判、模型构建、知识推理等的智能计算,如 SLAM;认识过程和能力随着脑科学技术、认知心理学试验方法、计算机信息处理技术、人工智能技术、测绘技术等进步得以增强和拓展。它们的相关位置、依存关系以及变化和规律都呈现出新的特点,比如增强现实中各类虚实地物的相对位置随视角变换而实时构建,又如智能驾驶中的认知主体可以是人、机或者二者的协同,人-机-环境呈现出一种新型的依存关系。

人类借由地图重构复杂非线性地理世界,实现由“地理世界”到“地图世界”的转变;利用地图进一步认识复杂非线性地理世界,实现由“地图世界”到“地理世界”的转变。这种指导行动并反馈信息的“双向”转变的认知模式,反映了地图哲学思维^[17]。

3.2 地图空间认知的研究方法

认知心理学为地理学提供了理论依据、技术手段和试验方法^[28-29,54]。如基于刺激-反应(S-R)模型的地图设计感受心物学试验^[29],地图符号“视觉变量”中格式塔心理学的应用,基于视觉认知负荷的制图综合信息载负量计算^[55]等。近年来,心理学对地理空间认知研究方法最有力的支持来自于以下方面^[13]:

(1) 脑神经机制的研究。文献[56]提出了大海马体内存在着位置细胞。文献[57]发现了产生坐标体系的网格细胞。文献[58]中“发现大脑中形成定位系统的细胞”的研究获得了诺贝尔奖生理学或医学奖,定位系统的细胞被称为“脑内 GPS”的定位系统,在细胞层次解释了大脑位置、导向的生理机制,展示了较高认知功能的细胞基础。该文献还提出,人们在空间进行导航和形成情景记忆的能力依赖于可视化准确地呈现我们的周围环境。位置细胞、头向细胞、边界细胞和网格细胞是构成神经定位系统或者说大脑的“全球定位系统”的主要单元。近期,脑科学中对于人脑神经网络机制的研究^[28]再次为地理学中的空间认知研究提供了新的思路。

(2) 眼动追踪技术的研究。人们日常生活中所获取的信息有 80%~90% 来源于视觉通道^[59-60]。眼动追踪技术基于眼脑一致性假说^[61],因其客观、直观、不介入的优点^[28,31-32],广泛应用于医学、心理学、广告设计、体育、交通等各个行

业,通过眼动频率、眨眼频率、瞳孔直径、眼球运动方向等重要指标^[62-66]的定性定量分析^[67],支持了地铁设计(社会空间)、景区规划(旅游空间)、运动搜索(运动空间)、公共导视(舆论空间)、大数据可视化(数据空间)、阅读加工(文字空间)、网络学习(网络空间)^[65]等方面的空间认知研究。眼动追踪技术在地图学中的应用主要集中在地图阅读、界面交互^[68]、色彩设计^[69]、视觉变量^[70]、语义传输^[71-72]、地图可用性^[73-74]等方向^[68,75-77]。文献^[68,78-80]分析了地图阅读眼动模式和认知效率。文献^[70,75-76,81-82]研究了地图动态视觉搜索策略。文献^[52,74,77,84-85]关注了小屏幕导航地图和虚拟环境。国内的地图眼动研究也进展迅速,文献^[85]提出把眼动研究作为主要视觉试验方法,探求地图设计中读者对地图注意力的集中和兴趣。

(3) 以眼控为主的交互研究。“认知不仅仅发生在脑中,而更多的是产生于脑、身体及世界的动态交互作用中”^[86]。视觉搜索是获得视觉信息行为和信息加工过程的重要手段,眼动模式还能够表达人的认知需求,在获取信息的同时发出需求指令,节省认知带宽,减轻认知负荷^[14],为代替键鼠交互提供了一种新思路^[87]。特别是在VR/AR/MR环境中,眼动注视点渲染技术支持分层细节渲染,注视区域清晰显示,其他区域模糊处理,减轻服务器压力,有效地缓解了由于数据计算量大引起的配准偏差和晕动症等问题,使交互体验更加自然、流畅、人性化^[88]。因此,眼动仪厂商加紧研发轻量化眼控交互设备,百度、腾讯、苹果、微软等公司积极收购或投资眼动技术力量,促进其应用^[89],眼动、脑电、手势、语音等联合传感交互在人工智能应用中得到了越来越多的重视。但当前在地理信息服务中,眼动追踪技术仍仅仅被作为一种试验或评估手段^[61,73-74],交互应用速度远远落后于移动设备、智能驾驶、智能家居等领域^[90]。

4 新时期地理空间认知的发展

4.1 地理空间认知的3个发展方向

人工智能根源于认知心理学,因其学科交叉性和前沿性,至今尚无统一的定义^[91],主要从思维、脑、身体3个方面与空间认知相联系:基于数理逻辑运算的计算机符号操作,模拟人类的认知过程来获取知识;基于仿生学、特别是人脑模型的

研究,依据神经网络及其链接机制来开发深度学习算法;基于具身感知和行动的研究,关注智能体与外界环境的交互建立自适应“人-机-环境”系统^[8,86]。以上研究的目标都是创造出一个可以像人类一样具有智慧、能够自适应环境的智能体。但认知的核心是智能和心理,而人工智能的核心是计算和数理。目前的人工智能仍然以计算机为中心,并没有实现“以人为中心”的认知,还处于有计算而无算计、有智能而无智慧、有感知而无认知的阶段^[53]。这个阶段的地理空间认知研究,也可细分为语义计算认知、脑科学认知机制和具身认知3个主要方向:

(1) 语义计算认知。受符号主义学派影响,利用计算机模拟的多维虚实地图及其符号语义^[92]来建立各种认知计算知识系统,如由个性化地图设计系统到自适应地图可视化系统、由专家支持系统到各种知识服务系统。目前的关键问题是,如何超越直觉的理解,科学准确地定义这些认知基本变量,从而建立统一的认知基本单元模型^[93]。语义计算认知主要解决空间知识如何描述的问题。

(2) 脑科学认知机制。受联结主义学派影响,以脑科学和神经网络为基础,常因人和情境的不同导致认知结果差异,可以借助认知心理学实验手段来探索人脑中的信息加工机制,如由认知结果转向更加关注认知过程,由问卷测试转向实时的生理信息监测,由单一的视觉实验转向眼动、脑电、表情等联合实验结论。脑科学认知机制主要解决空间知识怎样存在的问题。

(3) 具身认知。受行为主义学派影响,借助多通道传感器来感知态势和智能交互,努力使计算机通过模拟人类的自然交互达到自适应环境解译和智能空间认知的目的^[8,53]。人类所独有的高阶智慧能力只需要非常少的计算能力,例如推理,但是无意识的技能和直觉却需要极大的运算能力。空间认知本身就是一种具身行为,是人类基于生活本能之上的探索空间的高级技能^[94]。具身空间认知主要解决空间知识如何应用的问题。

4.2 地图空间认知的发展及特点

地图是地理空间认知的核心。从历史上看,人类空间认知能力的进步推动着地图学的历史发展^[44,52]。依据人的空间认知的进步来定义地图史的阶段,可以划分为远古地图、古代地图、近代地图、现代地图。岩画地图表达了远古时期人们

对生存空间的记忆;《郑和航海图》、《皇舆全览图》(1708—1718)和《清乾隆内府舆图》等古代地图,表达了先祖对于航海路线和国家疆域的认知^[52,85];实测地图、地形图与地图集的出现,是人们运用制图技术思维和理解时空的体现;电子地图、手机地图、导航地图、网络地图的出现及蓬勃发展,体现了数字化、信息化技术对于人类认知空间的扩展与思维方式的冲击。

新时期人工智能技术引入地理空间认知,又在语义计算认知、脑科学认知机制和具身认知3个主要方向上,促使地图学发生着翻天覆地的变化:机器学习、神经卷积网络等算法的深入研究,刺激了机器地图、赛博地图、高精地图、时空大数据分析、空天探测技术、地理信息边缘计算及云服务创新发展;人脑细胞作用及神经网络结构的研究,使地理学与心理学的学科交叉研究更为密切,从而能够更好地解释以心象地图为核心的人脑空间认知机制;智能驾驶等新的人-机-环境具身认知需求,促使技术创新来构造更加逼真、多维、动态、沉浸、耦合的AR、VR、MR地图,同时召唤加速对新型空间认知问题的理论研究。

新时期的地图空间认知主要有以下几个方面的特点:

(1) 地图起源于认知^[2,5,18],成熟于测绘,如今又面临着新型空间认知的强烈需求,孕育着“新地图学”学科体系。地图是人对现实地理世界认识结果的表达,是一种知识的固化,而不仅仅是测绘结果的展现方式。既由人的主观意志和知识水平所主导,随传播目的、时空境遇、认知差异^[25]而不同,也受到科技发展水平的时代促进和历史局限。因此,只有将地图从传统测绘中扩展开来,才能更好地发挥它的空间认知工具的作用。

(2) 各种新地图^[16]、准地图^[19]、泛地图^[20-22]的出现,势必会带来新的地理空间认知问题,而地图在其中的作用还没有被充分发掘出来。在当前的“新地图学”学科体系和“人—机器人—地图—环境”新框架中,地理空间认知的研究重点是以地图为工具的人机协同认知问题。以视觉为主、基于多传感器的联合试验与交互研究具有很大空间。

(3) 不论时代如何变化,地理空间认知的主体仍然是人,地图仍然是空间认知最主要的、不可替代的工具,这一基本属性是不会变的^[5,18]。地图科学而艺术,感性而智能,传统而时尚,几经沉

浮仍具有顽强的生命力,经久不衰地独立于技术之外而存在,深沉地诠释着人类空间认知能力的不断提升。

5 结 语

本文介绍了地理空间认知的缘起与现状、理论及发展,阐述了地图在地理空间认知中的双向作用,归纳了脑神经机制和眼动追踪技术等研究方法,指出了地理空间认知的主要发展方向和特点。

认知科学与生俱来的学科交叉特性,决定着地理空间认知研究是一个心理学、语言学、地球科学和哲学等多学科、多领域、多技术交叉融合的复杂问题。人机协同认知可能是较长一段时期内的主要方式,同时又带来了认知主体分裂的新问题,其理论、技术与试验研究面临着巨大的机遇和挑战^[6]。信息传输与人工智能技术的迅猛发展,将地理空间认知的对象由自然空间、人文空间,扩展到模拟空间、信息空间和虚拟空间(混合空间),技术研究热点集中在脑神经机制基础、个性化与自适应技术^[45]、人文地理空间认知^[20]、数字孪生环境认知^[30]、多通道协同交互及智能控制等方面。然而,地理空间认知的基础理论研究还滞后于技术创新应用。许多无法准确定义的“新地图”、“准地图”或“泛地图”的出现,模糊了地理空间认知和地图空间认知的界限,对传统地图学中的空间认知研究产生了颠覆性的影响。但是,当前地理空间认知的主体仍然是人,地图仍然是空间认知与空间思维最主要的、不可替代的工具。如何尽快弄清人类地理空间认知规律以及人机协同认知机理,进一步发挥地图的空间认知作用,使机器真正学习、理解、增强,而不是替代或淡化人类的空间认知能力,是人工智能应用和发展新时期不可避免的问题。

参考文献:

- [1] 林崇德, 杨治良, 黄希庭. 心理学大辞典[M]. 上海: 上海教育出版社, 2003.
LIN Chongde, YANG Zhiliang, HUANG Xiting. The comprehensive dictionary of psychology[M]. Shanghai: Shanghai Educational Publishing House, 2003.
- [2] 高俊. 换一个视角看地图[J]. 测绘通报, 2009(1): 1-5.
GAO Jun. Let's take another look at map[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009(1): 1-5.
- [3] 王家耀. 地图学与地理信息工程研究[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
WANG Jiayao. Research on cartography and geographic information engineering[M]. Beijing: Science Press, 2005.

- [4] 王光霞, 游雄, 於建峰, 等. 地图设计与编绘[M]. 北京: 测绘出版社, 2011.
WANG Guangxia, YOU Xiong, YU Jianfeng, et al. Map design and compilation[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011.
- [5] 高俊. 地图的空间认知与认知地图学[C]//第四届全国地图学学术讨论会论文集. 北京: 中国地图出版社, 1992.
GAO Jun. Map cognition and cognitive cartography[C]//Proceeding of the 4th Seminar on Cartography Theory and Method. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1992.
- [6] NUÑEZ R, ALLEN M, GAO R, et al. What happened to cognitive science? [J]. *Nature Human Behaviour*, 2019, 3(8): 782-791.
- [7] 米黑尔·罗科, 威廉·班布里奇. 聚合四大科技 提高人类能力——纳米技术、生物技术、信息技术和认知科学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
ROCO M C, BAINBRIDGE W S. Converging technologies for improving human performance: nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [8] 叶浩生. 具身认知的原理与应用[M]. 北京: 商务印书馆, 2017.
YE Haosheng. Principle and application of embodied cognition[M]. Beijing: The Commercial Press, 2017.
- [9] 罗布·基钦, 马克·布莱兹. 地理空间认知[M]. 万刚, 曲云英, 陈晓慧, 等, 译. 北京: 测绘出版社, 2018.
KITCHIN R, BLADES M. The cognition of geographic space[M]. WAN Gang, QU Yunying, CHEN Xiaohui, et al., trans. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2018.
- [10] LANDAU B, JACKENDOFF R. :“What” and “where” in spatial language and spatial cognition[J]. *Behavioral & Brain Sciences*, 1993, 16(2): 217-238.
- [11] 白学军, 李馨, 闫国利. 汉语阅读眼动控制: 20年研究的总结[J]. *心理发展与教育*, 2015, 31(1): 85-91.
BAI Xuejun, LI Xin, YAN Guoli. Eye movement control in Chinese reading: a summary over the past 20 years of research[J]. *Psychological Development and Education*, 2015, 31(1): 85-91.
- [12] KUIAI Shuguang, SHAN Zhoukuidong, CHEN Jing, et al. Integration of motion and form cues for the perception of self-motion in the human brain[J]. *Journal of Neuroscience*, 2020, 40(5): 1120-1132.
- [13] 郑束蕾. 个性化地图认知及眼动分析方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
ZHENG Shulei. Personalized map cognition and eye movement analysis method[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [14] ZHENG Shulei, CHEN Yufen, WANG Chengshun. Application of eye-tracking technology in humanities, social sciences and geospatial cognition[M]. Switzerland: Springer, 2020: 431-448.
- [15] 高俊. 地图与空间认知的邂逅[C]//“地图与空间认知”学术讨论会论文集. 郑州:[s.n.], 2018.
GAO Jun. The encounter between map and spatial cognition[C]//Proceedings of the Seminar on Map and Spatial Cognition. Zhengzhou:[s.n.], 2018.
- [16] GOODCHILD M F. Geographic information systems and science: today and tomorrow[J]. *Annals of GIS*, 2009, 15(1): 3-9.
- [17] 王家耀. 地图集: 重构复杂非线性地理世界的“百科全书”[J]. *测绘地理信息*, 2021, 46(1): 1-8.
WANG Jiayao. Atlas: the “encyclopedia” of reconstructing complex nonlinear geographical world[J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(1): 1-8.
- [18] 王家耀, 成毅. 论地图学的属性和地图的价值[J]. *测绘学报*, 2015, 44(3): 237-241. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2015.20140406.
WANG Jiayao, CHENG Yi. Discussions on the attributes of cartography and the value of map[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(3): 237-241. DOI: 10.11947/j. AGCS.2015.20140406.
- [19] LIU Bing, MENG Liqu. Doctoral colloquium—towards a better user interface of augmented reality based indoor navigation application[C]//Proceedings of the 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN). San Luis Obispo, CA, USA: IEEE, 2020: 392-394.
- [20] 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.
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.
- [21] 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.
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.
- [22] 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.
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.
- [23] 林琛. 从GIS走向虚拟地理环境的认知转变[C]//2019中国地理信息科学理论与方法学术年会论文集. 上海: [s.n.], 2019.
LIN Hui. The change of cognition from GIS to VGE[C]//Proceedings of 2019 Academic Annual Conference of Geographic Information Science Theories and Methods. Shanghai: [s.n.], 2019.
- [24] LI Zhilin, GAO Peichao, XU Zhu. Information theory of cartography: an information-theoretic framework for cartographic communication [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2021, 4(1): 1-16.
- [25] DONG Weihua, ZHENG Liangyu, LIU Bing, et al. Using eye tracking to explore differences in map-based spatial ability between geographers and non-geographers[J]. *International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(9): 337.
- [26] ZHOU Yixuan, CHENG Xueyan, ZHU Lei, et al. How

- does gender affect indoor wayfinding under time pressure? [J]. Cartography and Geographic Information Science, 2020, 47(4): 367-380.
- [27] DONG Weihua, YANG Tianyu, LIAO Hua, et al. How does map use differ in virtual reality and desktop-based environments? [J]. International Journal of Digital Earth, 2020, 13(12): 1484-1503.
- [28] 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. 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.
- [29] 陈毓芬. 地图空间认知理论的研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2000. CHEN Yufen. Map spatial cognition theory research[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2000.
- [30] 陈毓芬. 电子地图的空间认知研究[J]. 地理科学进展, 2001, 20(S1): 63-68. CHEN Yufen. Spatial cognition research on electronic maps[J]. Progress in Geography, 2001, 20(S1): 63-68.
- [31] 郑束蕾. 个性化地图的认知机理研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2015. ZHENG Shulei. Research on personalized map cognition mechanism[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2015.
- [32] 郑束蕾, 陈毓芬, 杨春雷, 等. 地图个性化认知适合度的眼动试验评估[J]. 测绘学报, 2015, 44(S1): 27-35. ZHENG Shulei, CHEN Yufen, YANG Chunlei, et al. Quantitative evaluation of personalized cognition suitability on maps by eye movement experiment[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(S1): 27-35.
- [33] 王英杰, 陈毓芬, 余卓渊, 等. 自适应地图可视化原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012. WANG Yingjie, CHEN Yufen, YU Zhuoyuan, et al. Adaptive map visualization theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [34] 应申, 侯思远, 苏俊如, 等. 论游戏地图的特点[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1334-1343. YING Shen, HOU Siyuan, SU Junru, et al. Characteristics of the game map[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1334-1343.
- [35] 应申, 庄园, 黄丽娜, 等. 性别和认知差异对三维空间寻路结果的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 317-324. YING Shen, ZHUANG Yuan, HUANG Lina, et al. Impact of gender, cognitive differences in 3D scenes on wayfinding[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(3): 317-324.
- [36] 杜清运, 任福. 空间信息的自然语言表达模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(6): 682-688. DU Qingyun, REN Fu. Representation model of spatial information in natural language[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(6): 682-688.
- [37] 王剑, 龙毅, 颜言, 等. 基于自然语言路径描述的地图空间认知研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(3): 38-40. WANG Jian, LONG Yi, YAN Yan, et al. Map spatial cognition research based on route description in natural Chinese language[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(3): 38-40.
- [38] 艾廷华. 大数据驱动下的地图学发展[J]. 测绘地理信息, 2016, 41(2): 1-7. AI Tinghua. Development of cartography driven by big data[J]. Journal of Geomatics, 2016, 41(2): 1-7.
- [39] 苏明占, 於建峰, 王光霞, 等. 基于地图空间认知的室内消防救援地图设计[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(1): 58-61. SU Mingzhan, YU Jianfeng, WANG Guangxia, et al. Design of indoor fire rescue map based on map spatial cognition[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(1): 58-61.
- [40] 王美珍, 沈婕, 苏昆. 移动环境中居民地综合算法的应用[J]. 地球信息科学, 2008, 10(2): 171-176. WANG Meizhen, SHEN Jie, SU Kun. The study on generalization algorithms of settlement in the mobile environment[J]. Geo-Information Science, 2008, 10(2): 171-176.
- [41] 贾奋励, 张巍巍, 游雄. 虚拟地理环境的认知研究框架初探[J]. 遥感学报, 2015, 19(2): 179-187. JIA Fenli, ZHANG Weiwei, YOU Xiong. Cognitive research framework of virtual geographic environment[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(2): 179-187.
- [42] KOLÁČNÝ A. Cartographic information: a fundamental concept and term in modern cartography[J]. The Cartographic Journal, 1969, 6(1): 47-49.
- [43] GAO Jun. Spatial cognition of maps and cognitive cartography[C]//Proceedings of 1991 Chinese Yearbook of Cartography. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1991: 12-18.
- [44] 高俊. 地图学的历史性贡献——祝贺《国家普通地图集》出版[J]. 地图, 1997(2): 60-62. GAO Jun. Historical contribution of cartography[J]. Cartography, 1997(2): 60-62.
- [45] 高俊. 地图学四面体——数字化时代地图学的诠释[J]. 测绘学报, 2004, 33(1): 6-11. GAO Jun. Cartographic tetrahedron: explanation of cartography in the digital era[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(1): 6-11.
- [46] 王家耀. 时空大数据时代的地图学[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1226-1237. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170308. WANG Jiayao. Cartography in the age of spatio-temporal big data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1226-1237. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170308.
- [47] 李德仁. 脑认知与空间认知——论空间大数据与人工智能的集成[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1761-1767. LI Deren. Brain cognition and spatial cognition: on integration of geo-spatial big data and artificial intelligence[J].

- Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 1761-1767.
- [48] 刘经南, 郭文飞, 郭迟, 等. 智能时代泛在测绘的再思考[J]. 测绘学报, 2020, 49(4): 403-414. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190539.
- LIU Jingnan, GUO Wenfei, GUO Chi, et al. Rethinking ubiquitous mapping in the intelligent age[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(4): 403-414. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190539.
- [49] 周成虎. 全空间地理信息系统展望[J]. 地理科学进展, 2015, 34(2): 129-131.
- ZHOU Chenghu. Prospects on pan-spatial information system [J]. Progress in Geography, 2015, 34(2): 129-131.
- [50] 陈军, 彭舒, 赵学胜. 顾及地理空间视角的区域 SDGs 综合评估方法与示范[J]. 测绘学报, 2019, 48(4): 473-479. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20180563.
- CHEN Jun, PENG Shu, ZHAO Xuesheng, et al. Measuring regional progress towards SDGs by combining geospatial and statistical information[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(4): 473-479. DOI: 10. 11947/j. AGCS.2019.20180563.
- [51] 刘瑜, 姚欣, 龚咏喜, 等. 大数据时代的空间交互分析方法和应用再论[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1523-1538.
- LIU Yu, YAO Xin, GONG Yongxi, et al. Analytical methods and applications of spatial interactions in the era of big data[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1523-1538.
- [52] 邓国臣, 牛汝辰. 地图文化及其价值观——王家耀院士专访[J]. 测绘科学, 2014, 39(12): 3-7.
- DENG Guochen, NIU Ruchen. The culture and value of map: interview of academician Wang Jiayao[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(12): 3-7.
- [53] 刘伟. 追问人工智能: 从剑桥到北京[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- LIU Wei. Ask artificial intelligence[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [54] 鲁学军, 周成虎, 龚建华. 论地理空间形象思维——空间意象的发展[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 401-408.
- LU Xuejun, ZHOU Chenghu, GONG Jianhua. On geographic spatial thinking in images: the development of spatial mental images[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(5): 401-408.
- [55] 孟丽秋. 视觉载负量的计量方法及其应用[J]. 解放军测绘学院学报, 1985(2): 53-62.
- MENG Liqiu. The quantitative methods of visual map loading and its application[J]. Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping, 1985(2): 53-62.
- [56] O'KEEFE J, DOSTROVSKY J. The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat [J]. Brain Research, 1971, 34(1): 171-175.
- [57] HARTING P, FRYEN M, MOLDEN S, et al. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex[J]. Nature, 2005, 436(7052): 801-806.
- [58] KRUPIC J, BAUZA M, BURTON S, et al. Local trans- formations of the hippocampal cognitive map [H]. Science, 2018, 359(6380): 1143-1146.
- [59] GOLDBERG J H, KOTVAL X P. Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999, 24(6): 631-645.
- [60] FUHRMANN S. User-centered design for geoinformation technologies[M]//Comprehensive Geographic Information Systems. Oxford: Elsevier, 2018: 438-445.
- [61] 王梦娟. 地图空间认知的眼动研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- WANG Mengjuan. Eye tracking research on map spatial cognition[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011.
- [62] RAYNER K. The 35th Sir Frederick Bartlett Lecture: Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search[J]. Quarterly Journal of Experimental Psychology, 2009, 62(8): 1457-1506.
- [63] YARBUS A L. Eye movements and vision[M]. Boston, MA: Springer, 1967.
- [64] GOLDBERG J H, STIMSON M J, LEWENSTEIN M, et al. Eye tracking in web search tasks: Design implications [C]//Proceedings of 2002 Symposium on Eye Tracking Research and Applications. New Orleans, Louisiana: Association for Computing Machinery, 2002: 51-58.
- [65] IRWIN D E. Fixation location and fixation duration as indices of cognitive processing[M]// HENDERSON J M, FERREIRA F. The Interface of Language, Vision, and Action: Eye Movements and the Visual World. New York: Psychology Press, 2004: 105-134.
- [66] JACOB R J K, KARN K S. Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises[M]// HYÖNÄ J, RADACH R, DEUBEL H. The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Ltd., 2003: 573-605.
- [67] NOTON D, STARK L. Eye movements and visual perception [J]. Scientific American, 1971, 224(6): 35-43.
- [68] BRODERSEN L, ANDERSEN H H K, WEBER S. Applying eye-movement tracking for the study of map perception and map design [M]. Copenhagen: National Survey and Cadastre, 2002.
- [69] PHILLIPS R J, NOYES L. A comparison of colour and visual texture as codes for use as area symbols on thematic maps[J]. Ergonomics, 1980, 23(12): 1117-1128.
- [70] GARLANDINI S, FABRIKANT S I. Evaluating the effectiveness and efficiency of visual variables for geographic information visualization[EB/OL]. [2020-10-09]. [http://www. geo. uzh. ch/~ sara/pubs/garlandini _ fabs09. pdf](http://www.geo.uzh.ch/~sara/pubs/garlandini_fabs09.pdf), 2010.
- [71] OPACH T. Semantic and pragmatic aspect of transmitting information by animated maps[C]//Proceedings of the 22nd ICA International Cartographic Conference, 2005.
- [72] NOSSUM A S. Semistatic animation: integrating past, present and future in map animations[J]. The Cartographic Journal, 2012, 49(1): 43-54.

- [73] MACEACHREN A M, KRAAK M J. Research challenges in geovisualization[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2001, 28(1): 3-12.
- [74] KOUA E L, MACEACHREN A, KRAAK M J. Evaluating the usability of visualization methods in an exploratory geovisualization environment[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, 20(4): 425-428.
- [75] KRASSANAKIS V. Recording the trace of visual search: a research method of the selectivity of hole as a basic shape characteristic[D]. Athens: National Technical University of Athens, 2009.
- [76] 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.
- [77] KIEFER P, GIANOPOULOS I, RAUBAL M. Where am I? Investigating map matching during self-localization with mobile eye tracking in an urban environment[J]. *Transactions in GIS*, 2014, 18(5): 660-686.
- [78] SWIENTY O. Attention-guiding geovisualisation: a cognitive approach of designing relevant geographic information[D]. Munich, Germany: Technical University of Munich, 2008.
- [79] YOU Manlai, CHEN Chunwen, LIU H, et al. A usability evaluation of web map zoom and pan functions[J]. *International Journal of Design*, 2007, 1(1): 15-25.
- [80] MONTELLO D R. Cognitive map-design research in the twentieth century: Theoretical and empirical approaches[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2002, 29(3): 283-304.
- [81] FABRIKANT S I, HESPANHA S R, MONTELLO D R, et al. A visual analytics approach to evaluate inference affordance from animated map displays[C]// *Proceedings of 2008 GIScience*. Park City, Utah: [s.n.], 2008: 1-7.
- [82] FABRIKANT S I, REBICH-HESPANHA S, ANDRIENKO N, et al. Novel method to measure inference affordance in static small-multiple map displays representing dynamic processes[J]. *The Cartographic Journal*, 2008, 45(3): 201-215.
- [83] OOMS K, DE MAEYER P, FACK V, et al. Investigating the effectiveness of an efficient label placement method using eye movement data[J]. *The Cartographic Journal*, 2012, 49(3): 234-246.
- [84] GIANOPOULOS I, KIEFER P, RAUBAL M. GeoGazemarks: providing gaze history for the orientation on small display maps[C]// *Proceedings of the 14th ACM International Conference on Multimodal Interaction*. Santa Monica, California: ACM, 2012: 165-172.
- [85] 高俊. 地图学寻迹: 高俊院士文集[M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [86] GAO Jun. Cartography tracking: papers of academician Gao Jun[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2012.
- [87] ZHANG Xuan, MACKENZIE I S. Evaluating eye tracking with ISO 9241-Part 9[C]// *Proceedings of the 12th International Conference on Human-Computer Interaction: Intelligent Multimodal Interaction Environments*. Heidelberg: Springer, 2007: 779-788.
- [88] 吴荣荣. VR 环境下的眼动追踪系统及其应用研究[D]. 天津: 天津财经大学, 2019.
- [89] FUHRMANN S. User-centered design for geoinformation technologies[M]// *Comprehensive Geographic Information Systems*. Oxford: Elsevier, 2018: 438-445.
- [90] 朱琳, 王圣凯, 袁伟舜, 等. 眼动控制的交互式地图设计[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(5): 736-743.
- [91] ZHU Lin, WANG Shengkai, YUAN Weishun, et al. An interactive map based on gaze control[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(5): 736-743.
- [92] 朱迪亚·珀尔, 达纳·麦肯齐. 为什么: 关于因果关系的新科学[M]. 江生, 于华, 译. 北京: 中信出版社, 2019.
- [93] PEARL J, MACKENZIE D. The book of why: the new science of cause and effect[M]. JIANG Sheng, YU Hua, trans. Beijing: CITIC Press, 2019.
- [94] 田江鹏, 贾奋励, 夏青, 等. 语义驱动的层次化地图符号设计方法[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(6): 736-743.
- [95] TIAN Jiangpeng, JIA Fenli, XIA Qing, et al. Design method of the semantic-driven hierarchical map symbols[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(6): 736-743.
- [96] 陈霖. 新一代人工智能的核心基础科学问题——认知和计算的关系[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(10): 1104-1106.
- [97] CHEN Lin. The core basic science issues in the new generation of AI: the relationship between cognition and computing[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(10): 1104-1106.
- [98] 史蒂芬·平克. 语言本能[M]. 欧阳明亮, 译. 杭州: 浙江人民出版社, 2015.
- [99] PINKER S. The language instinct: how the mind creates language[M]. OUYANG Mingliang, trans. Hangzhou: Zhejiang People's Publishing House, 2015.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2021-01-21

修回日期: 2021-04-29

第一作者简介: 郑束蕾(1980—),女,博士,讲师,研究方向为地理空间认知及可视化。

First author: ZHENG Shulei (1980—), female, PhD, lecturer, majors in geospatial cognition and map visualization.

E-mail: z_score2@163.com