

2008年以来地图学眼动与视觉认知研究新进展

董卫华, 廖 华, 詹智成, 刘 兵, 王圣凯, 杨天宇

(北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 地图是人类日常生活中不可或缺的工具。地图认知作为研究人对地图的感知、学习、记忆、推理和决策的科学, 一直以来是地图学基础理论的重要内容。作为地图认知研究的核心, 近年来地图视觉认知在相关学科(如心理学、认知科学和计算机视觉)和新的研究手段(如眼动跟踪、脑电和核磁)的促进下取得了一系列新的研究成果。尤其是眼动跟踪方法作为地图视觉认知研究的重要手段之一, 越来越受到研究者的关注, 为地图视觉认知研究的量化、实用化提供了有力支撑。本文系统地梳理了2008年以来眼动跟踪方法在地图视觉认知研究中取得的新进展, 并将其归纳为6个发展趋势, 分别包括: ① 刺激材料: 从静态地图到动态交互地图; ② 研究范围: 从地图认知到地图空间认知; ③ 实验环境: 从实验室环境到真实环境; ④ 地图维度: 从二维地图到三维地图; ⑤ 个体差异: 从单一维度到多维度; ⑥ 研究目的: 从规律探究到实践应用。本文最后总结了未来研究面临的挑战、难点和可能的解决方法, 期望能在地图视觉认知研究中起到抛砖引玉的作用。

关键词: 眼动跟踪; 视觉注意; 地图设计; 可用性评价; 地图空间认知; 行人导航

DOI: 10.11821/dlxb201903015

1 引言

地图是对复杂地理空间信息的抽象化表达, 自诞生之日起就成为了人们认识自然和社会现象的有效工具。20世纪40年代, 美国认知心理学家Tolman开创性地使用现代实验方法研究了小鼠与人类在迷宫中的寻路能力, 首次提出了“认知地图”(cognitive maps)的概念^[1]。到20世纪60年代, Golledge将动物的空间认知研究推广到人类空间活动的认知研究中, 奠定了地理空间认知研究的基础^[2]。从20世纪90年代中期开始, 地理空间认知在地理信息科学中得到了长足的发展^[3]。作为地理空间认知的重要组成部分, 地图认知研究的是人类对地图的感知、学习、记忆、推理与传输空间信息的过程和机理。1995年美国国家地理信息与分析中心(NCGIA)将地理空间认知模型研究列入地理信息科学的三大战略领域之一^[4]。21世纪初, 国际制图协会(ICA)就将认知与可用性问题的研究作为本世纪地理信息可视化的4个研究主题之一^[5-6]。地图认知理论与制图综合理论、地图信息传输理论、地图符号理论等成为现代地图学理论的基本内容^[7-10]。

眼动跟踪方法为地图认知研究提供了一条新的途径。俗话说“眼睛是心灵的窗户”, 视觉是人类所有感官中能力最强的感官通道, 眼睛的运动(即: 眼动)反映了大脑的视觉信息处理过程^[11]。文献表明, 人类大脑多达40%的功能都用来处理视觉信息^[12]。因

收稿日期: 2018-11-09; 修订日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871366) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41871366]

作者简介: 董卫华(1976-), 男, 山东东明人, 博士, 教授, 研究方向为地理信息空间认知理论与方法。

E-mail: dongweihua@bnu.edu.cn

通讯作者: 廖华(1989-), 男, 博士, 研究方向为行人地图导航空间认知。E-mail: liaohua@mail.bnu.edu.cn

此,使用精密仪器(眼动仪)记录眼球的运动并以此分析视觉认知规律和大脑信息处理过程就成为认知研究中最自然的研究手段。眼动跟踪方法从20世纪60年代开始应用于心理学、神经科学的研究中^[13-14],此后,在70年代初被引入地图学与地理信息科学中。地图学眼动研究在经历了发展期(20世纪70年代-80年代末)和沉寂期(20世纪80年代末-20世纪末)之后重新受到学者的重视,在过去的10多年中,国内外以眼动跟踪为手段的地图视觉认知研究在理论和应用上取得了一系列新的研究成果,地图学眼动研究焕发出新的活力。因此,本文试图总结2008年以来国内外的地图学眼动研究取得的新进展,并分析当前研究面临的挑战,期望能在地图视觉认知研究中起到抛砖引玉的作用。20世纪至21世纪初的相关研究不在本文的关注范围,读者可参阅文献^[3, 15-16]。

2 眼动跟踪方法

地图学眼动研究属于实验研究或者用户研究,总体上可以分为两大类,并且这两类存在很大的不同^[17]:

(1) 心理学驱动(psychology-driven)的眼动研究:根植于心理学,严格遵循实验心理学的研究流程和规范(典型的实验过程如图1所示),核心在于控制变量,目的在于通过严格的控制实验和假设检验方法得到可归纳(generalizable)、可复制(reproducible)的实验结果,优点在于可以推导出因果关系,因此对于被试人数、实验条件、实验环境、实验流程等要求严格。缺点在于由于该类型研究为了使实验最大程度地可控以建立因果关系,在设计刺激材料时需要对地图进行大幅度地简化^[18-19](图2a~2c),使得刺激材料与真实地图相去甚远(图2d),因而导致其结果不一定能推广到真实地图之中^[20]。

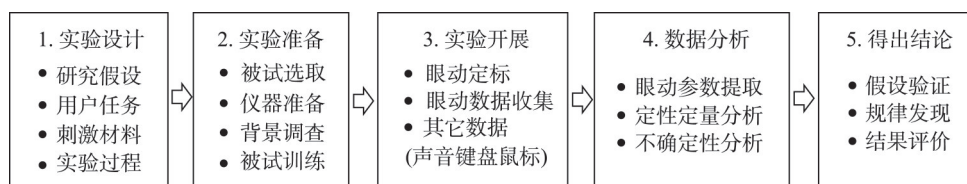


图1 眼动跟踪实验的典型过程

Fig. 1 Typical procedure of eye tracking experiments

(2) 可用性工程驱动(usability engineering, UE-driven)的眼动研究:源于可用性工程^[22],核心在于评价地图产品的功能是否达到要求,常用的方法是评价地图的有效性(effectiveness)、效率(efficiency)和用户满意度(satisfactory)^[23],目的在于发现地图设计中的问题,用来改进地图设计、寻求可迁移到其他类似情况下的地图设计原则,虽然实验流程与心理学驱动研究类似,但是对实验的控制程度较低。该类型的研究通常需要对完整的、真实的地图设计进行评价,以此来提高实验的生态效度(ecological validity)^[24],缺点在于只能得到相关关系而非因果关系。

可以看出,眼动跟踪方法作为一个技术手段,既可以应用心理学驱动的方法来探求地图视觉认知规律,又可以应用可用性工程驱动的方法来评价地图设计。因此,眼动跟踪方法可以很好地与地图设计的各个阶段相结合。具体来说,通过眼动跟踪方法挖掘得到的视觉认知规律可以使用“以用户为中心”(user-centered design, UCD)的方法应用于地图设计,即通过:用户认知规律挖掘→地图原型设计→地图可用性评价→地图设计改进→地图再评价的迭代流程来设计满足用户需求、高可用性的地图。相比于传统地图设



图2 两种类别的眼动研究所用的刺激材料示例 (a. b. c. 心理学驱动^[21]; d. 可用性驱动^[20])

Fig. 2 Example stimuli of the two types of user studies in (a, b, c) psychology-driven studies^[21] and in (d) UE-driven studies^[20]

计流程中强调制图者的设计水平, UCD方法更强调让用户参与规律挖掘、需求分析和地图评价的过程, 从而提高地图的可用性。

通过眼动实验收集到眼动数据以后, 需要对原始眼动数据进行统计分析, 检验不同组别(自变量的不同水平)之间的差异是否具有统计学意义, 从而完成假设检验过程。自变量可以是不同时段(如训练前和训练后)^[25]、不同用户群体(如专家和新手)^[26]、不同地图类型(如二维地图和三维地图)^[27]、不同的感兴趣区(AOI)(如图例的不同位置)^[28]等, 比较的内容是各类眼动指标。不同的眼动指标能够反映大脑视觉信息处理过程的不同特征, 这是使用眼动跟踪方法研究地图视觉认知的基础。基本的眼动行为可以分为两类: 一类是眼跳(saccade), 有的文献中也译作“扫视”, 即眼球的快速移动(通常移动速度高达500°/s); 另一类是注视(fixation), 即眼跳之后保持相对静止(持续时间约200~300 ms)^[29]。研究表明, 人的视觉系统在眼跳的过程中受到抑制, 因而几乎不处理视觉信息, 视觉信息处理主要发生在注视的过程中^[30]。因此, 眼跳和注视两个基本特征能够分别表征视觉搜索和信息处理过程, 再结合AOI, 可以衍生出一系列的眼动指标用于统计分析。此外, 大脑认知负担的变化会引起瞳孔大小的变化, 因此, 瞳孔大小的相关参数也常用于表征大脑认知负担的高低^[31]。本文把常见的眼动指标按照其所反映的认知规律分成三大类, 即基于注视点的信息处理指标、基于眼跳的视觉搜索指标、以及基于瞳孔大小的认知负担指标。表1分别列出了常见眼动指标及其认知意义^[32-36]。

除了眼动指标之外, 眼动实验根据任务设计不同通常搭配其他指标进行辅助分析, 如使用任务完成时间(反应时长)表征效率、被试答题的正确率表征有效性以及鼠标点击次数表征地图交互次数等^[23]等。

将眼动数据可视化是辅助分析的常用方法^[37](图3)。比如, 注视轨迹图和热点图能够直观地显示被试的注视点空间分布, 为进一步的分析提供初步的、定性的证据。其它的可视化方法还包括: ① 眼动轨迹综合: 由于多个被试的眼动轨迹叠加容易造成视觉上的混乱, 因此可以对眼动轨迹进行简化、综合, 或者制作轨迹密度图, 从而更清晰地表达眼动的整体分布规律^[38]; ② 时空立方体(Space-Time-Cube, STC)分析法: Li等借鉴了Hägerstrand提出的时空立方体^[39], 将眼动数据用STC可视化并进行分析^[40]。眼动数据

表 1 常见眼动指标及其认知意义

Tab. 1 Common eye movement metrics and their cognitive meaning

类别	眼动指标	认知意义
信息处理指标	注视点数量	数量越多说明读者处理了越多(但不一定有用)的视觉信息。
	总注视时长	越长表明读者花更长的时间解译信息、匹配用户界面和记忆。
	平均注视点持续时长	即平均单个注视点的持续时长，越长说明信息解译的难度更大(用户有具体任务时)，或者说明该区域更具有吸引力、用户对它更感兴趣(用户无任务、自由观看时)。
	首次进入 AOI 前用时	首次到达感兴趣区(AOI)之前所花的时间，越短说明该区域更快地吸引视觉注意。
	AOI 内注视点比例	AOI 内注视点数量除以总注视点数量，用来度量读者对该 AOI 的关注程度，与此类似的还有 AOI 内注视时长比例。
视觉搜索指标	注视频率	即单位时间内注视点个数，注视频率越高说明信息处理效率越高。
	眼跳次数	眼跳次数越多说明读者进行了越多的视觉搜索。
	总眼跳长度	表征视觉搜索的广度，长度越长说明搜索范围越广。
	眼跳持续时间	眼跳持续时间越长，说明读者用于搜索的时间越多。
	眼跳频率	即单位时间内的眼跳次数，频率越高说明搜索效率越高。
认知负担指标	回视次数	回视表明对先前区域的认知补充或再加工。
	平均瞳孔大小	用来表征全局的认知负担大小，越大说明实验任务的总体认知负担越重。
	最大瞳孔大小	用来表征局部的认知负担大小，越大说明某些实验任务的认知负担越重。

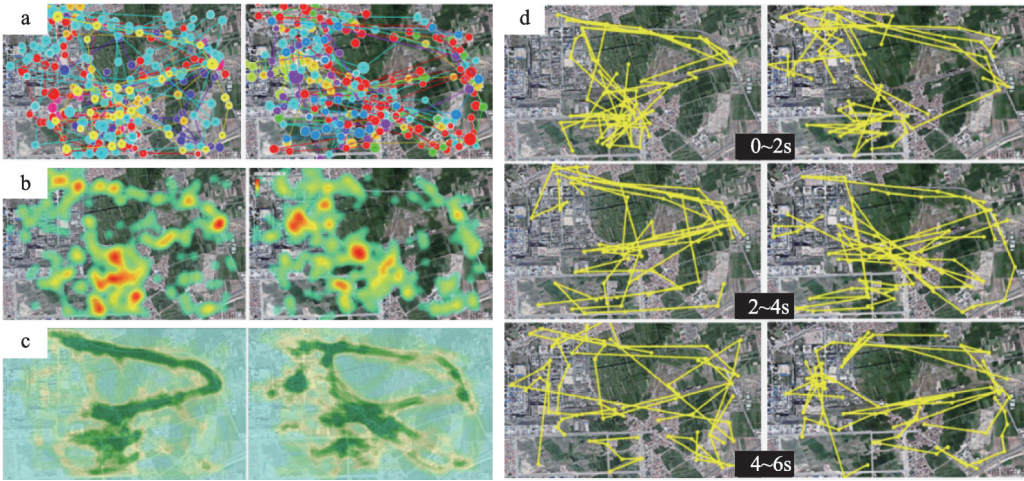


图 3 眼动数据可视化示例^[41] (a. 注视点轨迹图; b. 注视热点图; c. 眼跳密度图; d. 注视点时间序列)

Fig. 3 Illustration of visual analytics of eye movement data^[41]. (a. Eye movement trajectories; b. Fixation heat maps; c. Saccade density maps; d. Time series of eye movement trajectories)

可视化能方便地解决视觉注意“在哪里”和“多久”的问题，但更重要的是要解决“是什么”和“为什么”的问题。

3 国内外研究新进展

本文将 2008 年以来基于眼动跟踪的地图视觉认知研究取得的新进展总结为以下 6 个方面（6 个变化趋势）。需要指出的是，这 6 个趋势主要是基于研究内容和研究思路两个角度来划分的，其中，研究内容从地图信息传输的 3 个要素即：环境、地图和人 3 个方面来总结，研究思路从当前研究的范围和目的两个方面来总结。

3.1 刺激材料:从静态地图到动态交互地图

不同于一般的自然场景图像,地图是经过高度概括综合的图形模型。地图视觉变量是信息传输的载体,不同地图形状、符号和注记的有机组合形成了复杂各异的地图表达。系统化地研究自底向上(bottom-up)的地图视觉变量的认知机理是地图视觉认知一直关注的内容,相关的研究内容包括地图注记^[20, 42]、图例^[28]、颜色和字体^[43]、源—目的地(origin-destination, OD)图^[44]、地图感知复杂度^[45]等。

随着互联网的发展,网络地图得到了越来越广泛的应用,其动态性、交互性以及小屏幕的特点成为研究者关注的重点^[46],动态交互环境下的地图视觉变量的认知规律是一个重要的切入点。认知科学的研究表明,不考虑读者主观因素的影响,不同的视觉变量对视觉注意的引导作用存在差异。比如,颜色、动画、方向和大小是最具引导性的视觉变量,其次是亮度、形状、立体景深等,语义分类、名称、三维体积等变量则可能不具有引导性^[47]。与此类似,对地图视觉变量表达信息的有效性和效率的研究发现,在动态地图中,尺寸是最有效(正确率最高且速度最快)的视觉变量,而方向是最低效的视觉变量^[48]。Dong等通过对比不同尺寸、颜色、播放频率和屏幕大小来呈现交通流数据的有效性和效率(图4),发现这些视觉变量的表现与屏幕大小有关,例如,小屏幕上的最佳播放频率要比大屏幕上的快^[49-50]。



图4 眼动跟踪应用于动态地图和交互地图^[49-50]

Fig. 4 Eye tracking studies for animated maps and interactive maps^[49-50]

地图设计与可用性评价研究是地图眼动研究中最的一类,但是由于地图本身的复杂性,目前还没有一个通用的理论来解释地图要素对认知的影响。Fabrikant等试图将自底向上的因子和自顶向下(top-down)的因子统一起来并应用于地图设计的实践中^[25]。其核心思想是:在给定任务下,读者会在任务的驱使下搜索与任务有关的视觉信息,与此同时地图不同元素的视觉显著性会吸引读者的视觉注意。因此,如果合理地使用各类地图视觉变量将与任务相关的信息设计得更加显著,而移除或者淡化不相关的信息,那么读者的视觉搜索与决策效率就会得到提高。该假设得到了Fabrikant等实验的证实。

动态和交互地图增加了眼动数据分析的难度。比如,当用户改变地图的比例尺时,刺激材料就会发生变化。为了解决这个问题,Ooms等通过记录用户在操作地图时的比例尺信息,从而将注视点的屏幕坐标换算为地理坐标解决了不同尺度下的注视点可比性的问题^[51]。在此基础上,Göbel等将金字塔的栅格地图替换成矢量地图,从而可以进一步识别每一个注视点所对应的地图要素^[52]。

3.2 研究范围:从地图认知到地图空间认知

近年来的地图学眼动研究越来越关注地图空间认知。由瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH) Martin Raubal团队发起和组织的眼动空间认知会议从2013年开始至今已经举办

了3届(ET4S: <http://spatialeyetracking.org/et4s-2018/>)。基于眼动的地图空间认知研究也吸引了来自心理学、计算机和人机交互等领域的学者的参与^[53]。

本文区分“地图认知”和“地图空间认知”是因为两者既有重叠又有区别,研究的侧重点不同:地图认知研究侧重研究用户对抽象地图符号所表达的语义信息进行解读,即对地图本身不同形状、符号和注记及它们的有机组合的解读,研究对象主要为专题地图,比如研究如何通过阅读气象地图来判断风向^[25];而地图空间认知则强调人们使用地图来认识在地理空间中“诸事物、现象的形态与分布、相互位置、依存关系以及变化和趋势的能力和过程”^[4],其中涉及到的地图多为普通地图。地图空间认知侧重通过地图获取空间知识,并用来进行空间决策(如空间定位和定向)。地图空间认知的过程,是用户对真实世界、地图世界和认知世界3个空间的认知相结合和统一的过程。典型的地图空间认知任务是使用地图进行导航与寻路。地图的加入使得信息原本在寻路者与环境两者之间进行传递,变为在寻路者、环境和地图三者之间进行传递。这个过程涉及到地图符号识别、地标识别、地图与环境匹配、空间定位与定向、路线规划、以及心理旋转等一系列复杂的认知和行为过程^[53-55],相关的研究也围绕这些认知过程展开。

3.3 实验环境:从实验室环境到真实环境

地图空间认知离不开真实环境,理想的情况是在真实环境中开展实验。但是由于真实环境的动态性和复杂性,在真实环境中开展眼动研究面临诸多挑战。比如,真实环境中的视觉刺激是不可控的、要将被试从一个环境换到另一个环境也不便利,并且会在转移的过程中使被试产生学习效应。此外,真实环境下的眼动数据质量容易受到太阳光照的影响^[56]。以往的研究大多是在实验室环境下使用虚拟环境或虚拟现实来模拟真实环境^[57-60]。与真实环境相比,虚拟环境灵活性高、易于管理和组织、更方便采集到高质量的眼动数据、可控程度高。但是虚拟环境也存在一些缺点,比如在虚拟环境中运动缺乏“本体感受”、较难维持良好的“态势感知”(situation awareness)、容易迷失方向等^[61],因此,虚拟环境不能作为真实实验环境的代替品。

通过将眼动追踪设备嵌入眼镜当中(如SMI ETG, Tobii Glasses),使得眼动跟踪可以脱离实验室环境的束缚能够在室外真实环境中进行(图5),越来越受到研究者的关注^[53, 56, 62-64],基于便携式眼动仪的穿戴计算拥有新的发展前景^[65]。比如,Kiefer等使用头戴式眼动仪开展真实环境下的地图和环境匹配实验用来研究人的空间定位定向过程^[66]。在该实验中,被试站在一个固定的位置,通过对比给定的地图与其所处的环境来判断自己



图5 真实环境下的眼动跟踪实验场景

Fig. 5 Eye tracking experiments in real environments

在地图上的位置。结果表明,与判断错误的被试相比,判断正确的被试分配了更多的视觉注意到有用的地图符号上,并且他们在匹配这些符号和真实环境中的路标时,视觉注意在地图与真实环境之间的转换次数也更多。

需要注意的是,真实环境既可以是室外开阔环境(比如城市街道、公园等),也可以是室内封闭环境(比如大楼、地铁站、商场等),使用便携式眼动仪进行室内场景的空间认知研究也是近年来研究者关注的一个重要方向。比如,Ohm等使用SMI ETG收集被试在室内环境中寻路的眼动数据,通过对比被试使用不同的导航地图寻路的表现来评价不同细节程度的地图的优劣^[67]。Wang等通过开展商场内的地图寻路实验分析不同年龄和性别的眼动差异^[68]。

真实环境下的眼动研究面临的一个挑战是如何分析基于动态刺激材料的眼动数据。由于环境在不断发生变化,被试在环境中的动作也各不相同,因此不同被试的眼动数据不能直接对比^[69]。传统的分析方法是手工对数据进行分析,比如逐帧查看眼动数据,然后将被试看到的物体记录下来进行分析^[64]、创建动态AOI^[27, 70]、手工将每一个注视点标定到参考图像上^[71]。但是真实环境下实验采集得到的视频数据量非常大,手工对这些数据进行分析非常耗时,且可靠性很难保证。

一些研究者开始利用计算机视觉算法探索眼动数据的自动化分析方法。比如,Beugher等使用人脸检测和行人检测算法分析视频中被试对人的注视频率和时长^[72]。Anagnostopoulos等提出了一种将注视点匹配到一张城市全景图上的算法,当全景图上的物体事先已知时,就能识别这个注视点的语义信息^[73]。这个算法能够实现实时快速匹配,最高可以支持头部运动速度63°/s。Kiefer等在进行定位定向实验时,在被试的地图上放置若干个二维码,通过检测这些二维码来确定地图是否出现以及计算注视点在地图上的相对位置^[66]。现有文献中对眼动数据自动化分析方法的研究或是只针对特定的目标(比如人脸),或是要求被试站在固定的位置,还不能满足大数据量、自动化分析的需要。

3.4 地图维度:从二维地图到三维地图

传统的二维地图经过长期以来的发展在地图信息传输、地图视觉变量、地图概括与综合以及地图设计等方面已经比较成熟^[74]。三维地图并非最近几年才出现在地图学和GIS中,但是三维地图的设计问题伴随着近年来计算机和移动设备计算能力和显示能力的快速提高而变得越来越突出。与二维地图相比,三维地图可以提供多一维的空间来展示信息、提供更接近人类熟悉的三维世界的视角,但也存在着符号遮挡、距离和深度信息难以判断等问题^[75]。目前三维地图的很多实践都基于二维地图的设计方法,但是很显然地,三维地图不仅仅是在二维的基础上增加一个维度,还涉及到尺度、投影、三维视觉变量、地图抽象级别等诸多问题^[76-78]。

三维地图认知与设计是一个很大的话题,本文仅侧重探讨眼动跟踪方法在三维地图符号设计中的应用。近年来的地图学眼动研究开始关注三维地图的视觉认知问题,已有一些学者对三维地图符号及其视觉参量进行了研究,包括视场角和观察角度^[79](图6a)、三维视觉变量的引导性和恒常性^[80]、三维符号的抽象程度^[81-82]等。Liao等对比了用户在使用真实感三维表达(Realistic 3D representation)和传统二维地图在寻路时的视觉差异,发现两者的优劣取决于用户的任务:传统二维地图更利于空间知识获取,这是由于真实感三维表达包含过多冗余信息,导致用户进行了大量冗余的视觉搜索;而三维表达则更利于复杂路口决策,这是因为真实感三维表达有助于路标识别,从而使用户在复杂路口时进行空间定位和定向的效率更高(图6b~6c)^[60]。Lei等通过眼动实验发现与二维地图相比,使用三维地图时的平均单个注视点的注视时长更长,注视点更聚集、观察角度更

小。作者推测这有可能是由于三维地图在细节上有更高的视觉复杂度引起的^[83]。此后的研究表明,二、三维的混合表达可以使它们的优势互补,不管是三维符号和二维符号的混合(图6d~6e)^[27],还是真实感和非真实感(Non-realistic)三维符号的混合^[84],都更有利于空间记忆。

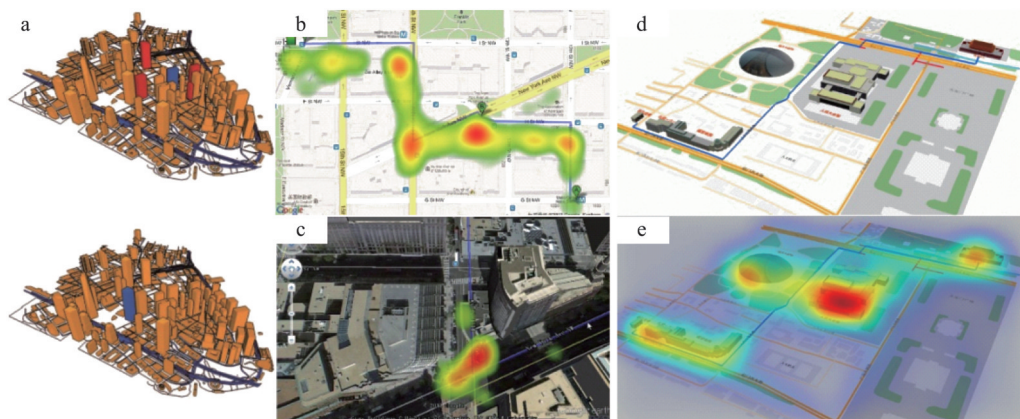


图6 眼动跟踪研究三维地图^[27, 60, 79]

Fig. 6 An eye tracking studies investigating 3D maps^[27, 60, 79]

3.5 个体差异:从单一维度到多维度

群体与个体差异是用户研究中普遍存在的问题,用户的不同年龄、性别、文化背景、读图能力、空间能力、专业和经验知识等会对用户的实验表现产生影响^[85]。以往大量的研究关注专家和新手的差异(“专家—新手”范式)^[86]以及性别差异^[87-88]的影响。比如,在完成读图任务时,专家的速度更快、正确率更高、注视频率更高,意味着他们在同样的时间内进行了更多的信息处理,并且比新手更高效地定位搜索目标^[26]。进一步地对两者的眼动序列进行对比分析可以发现,速度快的被试在解决问题时善于根据当前的任务来分配自己的视觉注意,因而当地图界面改变时他们能迅速调整搜索策略;而速度慢的被试回视次数更多,说明他们的解题策略依赖于地图的界面设计^[89]。

近年来基于眼动追踪对个体差异的研究已经从“专家—新手”差异和性别差异等单一维度扩展到了其他多个维度。比如高雪原等研究了场认知方式(场依存、场独立)、性别和惯用空间语(惯用东南西北、惯用前后左右、两者并存)对地理空间定向能力影响^[21]。Dong等探讨了不同专业背景的被试在地图空间能力上的差异^[90],结果发现在多情况下,地理学相关背景的被试在地图空间定位、空间定向和空间可视化方面比非地理学背景的被试反应时间更短、视觉搜索效率更高。

研究人员还进一步探索了使用定量模型方法来分析用户分类和个体差异,从而对用户的地图阅读能力和地图空间能力进行定量建模。比如,郑束蕾等使用聚类分析和判别分析对不同性别、年龄、教育水平、职业和收入的地图用户进行自动分类^[91]。郑束蕾等还通过分析不同被试的眼动(行为)参数,揭示了地图的个性化认知特点并构建了以眼动指标为基础的个性化地图认知适合度评估模型,为个性化地图的设计提供理论和方法基础^[92]。Dong等强调地理教育在提升个人地图空间认知能力中所发挥的重要作用^[90, 93],提出了以地图空间认知能力为核心的“图商”的概念,并基于多种眼动指标建立贝叶斯结构方程模型来评价用户的地图空间认知能力,从而将个体差异的研究定量化、模型化,将群体差异研究细化到真正的“个体”差异研究^[94]。

3.6 研究目的:从规律探究到实践应用

近年来地图学眼动研究方向的一个重要转变就是从以往的规律探究型研究转变为实践应用型研究。后者摒弃传统的心理学驱动型研究思路(即:实验假设→眼动实验→假设验证),转而采用数据驱动和实践应用问题驱动的思路,解决眼动地图交互、眼动数据挖掘和用户行为预测等实际应用问题。

(1) 眼动地图交互。有别于传统的使用鼠标或者触摸的地图交互方式,研究者开始利用眼动跟踪开发出新的人机交互模式,并且集成基于位置的服务(LBS),从而为用户提供更加个性化与智能化的地理信息服务^[95]。比如, Giannopoulos等通过分析用户在使用手机地图时的对地图进行的缩放操作与眼动之间的关系,开发了一套称作“GeoGazemarks”的眼动交互原型系统,该系统能使用户在进行地图缩放操作时快速找到原先注意过的地点,用以提高地图搜索和定位的效率^[96]。类似地还有 Kluge等提出了一个基于便携式眼动仪的行人导航系统原型,该系统通过增强现实环境提高行人导航效率^[97]。Gkonos等将眼动与触觉相结合开发了“VibroGaze”的导航辅助系统,当用户在十字路口环顾四周决定前进方向时,用户佩戴的眼动仪实时监测用户注视的方向,当用户注视到正确的行进方向时,与系统联动的一个可以产生振动的腰带就会发生振动,提醒用户当前注视的方向是正确的^[98]。这种新型的交互方式可以避免用户在定向时频繁地查看手机和环境。

(2) 眼动数据挖掘。研究者将眼动数据作为富信息源进行数据挖掘,典型的应用是从眼动数据中识别导航地标^[99-101]。比如,智梅霞通过分析地标的视觉显著度与眼动指标的相关性,构建了一个复合视觉因子的地标视觉显著性模型^[102]。研究者还将眼动数据用于用户兴趣建模等^[103]。

(3) 用户行为预测。智慧地图服务的一个前提是识别和预测用户的行为、挖掘用户的行为模式^[19, 63, 104],在此基础上进行信息推荐。传统的方法是用户通过交互显式地将自己的需求输入系统,而当前的研究主要使用机器学习和数据挖掘的方法从眼动数据中预测用户行为,属于隐式交互。比如, Kiefer等从用户阅读地图的眼动数据中提取了229个特征,使用支持向量机(SVM)对眼动特征进行学习,并以此预测用户的6种阅读行为,最高达到了77.7%的总体分类精度^[105]。Liao等对真实环境中的行人导航场景中的眼动数据进行特征提取,基于随机森林分类器推断行人在导航期间的五种常见任务,最高达到67%的总体精度^[106]。Krejtz等通过探测用户注视位置和周边信息进行信息推荐^[107]。

4 未来研究挑战

基于眼动跟踪的地图视觉认知研究仍面临许多挑战,具体表现在以下6个方面,同时对应于6个发展趋势:

(1) 动态交互地图的视觉认知机理。动态交互地图的广泛应用使得探究其视觉认知机理(从而指导地图设计)成为未来研究面临的挑战之一。其多样性、动态性和交互性增加了实验控制和分析的难度,需要运用人机交互理论对地图交互的类别、特点和应用场景进行系统地分析,从而针对性地设计地图认知实验。在分析方法上,需要综合运用已有的数理统计、可视分析、以及GIS时间序列数据建模等方法,定性和定量地分析用户眼动和视觉认知的动态变化过程。

(2) 地图空间认知规律的形式化表达与建模。这是未来地图视觉认知研究挑战之二,也是地图视觉认知研究从理论探讨走向实践应用的重要前提,需要在传统以理论驱

动（自上而下）的研究思路的基础上，加入数据驱动（自下而上）的研究方法，针对多种空间认知场景（如行人导航场景、驾驶场景、室内场景和室外场景）、多种实验环境（如真实环境、桌面式虚拟环境、沉浸式虚拟环境）、多种认知模式（如主动认知与被动认知）以及多种用户任务（如地图视觉搜索、空间定位与定向、路线规划、路线记忆等）进行规律探究与建模。

（3）真实环境下的眼动数据自动处理方法。如前文所述，真实环境下的眼动实验产生大量视频和眼动数据，传统的手工方法已经不能满足研究的需要，如何对这些数据进行自动化处理是未来研究挑战之三，其难点在于确定注视点的语义信息。需要利用计算机视觉方法如图像匹配、语义分割等算法来进行注视点的自动语义识别。

（4）三维地图视觉变量的认知机理。目前三维地图在认知理论和设计实践上还没有普遍认同的原则，甚至对于三维地图的研究还有相互不一致的结论^[108]。由于地图视觉变量是构成地图的基本要素，因此三维地图的认知研究可以从三维地图视觉变量的认知机理研究中寻找突破，这也是未来地图视觉认知研究的挑战之四。三维地图的视觉认知一方面需要放到三维信息可视化这个更广的领域去研究，另一方面需要针对它的不同应用场景和不同的用户任务进行讨论。

（5）地图视觉认知个体差异的定量度量。随着对用户多个维度细分研究的深入，各个维度之间的交互作用、它们对地图空间认知能力影响的强弱，以及如何对用户多个维度的个体差异进行定量度量是未来研究挑战之五，其难点在于用户的影响因素复杂且各个因素之间相互影响、用户的某些维度（如经验知识）难以度量。可能的解决方案包括使用因子分析和主成分分析等方法将用户多种特征进行降维，使用聚类分析、判别分析和结构方程模型等数据驱动的方法对用户眼动特征进行自下而上的建模。

（6）基于眼动跟踪的个性化和智能化地理信息服务。随着眼动追踪设备的进一步小型化、廉价化和追踪精度的提高，在便携设备中（如谷歌眼镜、手机、笔记本电脑和虚拟现实设备等）嵌入眼动仪在不远的将来可能成为一个普遍的功能，因此，实现基于眼动跟踪的个性化和智能化的地理信息服务是未来研究挑战之六，其难点在于用户行为的精准和实时预测。需要结合多源传感器信息如头动、GPS^[109]、脑电 EEG^[110]等，利用机器学习和数据挖掘方法来开发实时高效的眼动数据挖掘算法，从而更加精准地预测用户行为、提高眼动交互系统的可用性。

5 总结与展望

地图学眼动与视觉认知研究的最终目的是探究用户的地图视觉认知机理，设计出能够有效引导用户视觉注意的地图来辅助视觉信息处理和用户行为决策，从而降低用户认知负担，促进用户对复杂地理环境和地图的认知过程，提高地理信息传输效率，实现高效、健壮的地图智慧服务。这是地图学认知理论的核心问题，也是当前认知科学与地理信息科学领域的研究热点和科学前沿^[111]。

总结 2008 年以来地图学眼动研究可以发现，眼动跟踪方法作为一种技术手段，已经受到来自各个领域研究人员的关注。利用眼动方法评价地图可用性、探求因果关系的研究思路已经较为清晰，研究范式也已逐渐形成；但是将眼动方法拓展到动态交互地图和三维地图、实验环境由实验室环境拓展到真实环境进行地图空间认知研究还处于探索起步阶段；利用眼动跟踪方法进行数据挖掘、构建新型的地图交互模式以及其他实践应用也成为新的研究趋势。

地图视觉认知研究作为一个交叉研究领域,在理论研究和实践中需要将心理学、认知科学、计算机科学乃至社会科学的研究方法与地图学和 GIS 的基本理论和方法相结合,需要各领域专家的协作。我们必须看到,要真正实现地图眼动与视觉认知研究的自动化、实用化和智能化还有相当长的一段路要走。

参考文献(References)

- [1] Tolman E C. Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 1948, 55(4): 189.
- [2] Golledge R G. Human wayfinding and cognitive map//Golledge R G. *Wayfinding Behavior: Cognitive Mapping and Other Spatial Processes*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press, 1999: 5-45.
- [3] Montello D R. Cognitive research in GIScience: Recent achievements and future prospects. *Geography Compass*, 2009, 3(5): 1824-1840.
- [4] Gao Jun, Gong Jianhua, Lu Xuejun, et al. Spatial cognition studies in geoscience. *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). 遥感学报, 2008, 12(2): 338.]
- [5] MacEachren A M, Kraak M J. Research challenges in geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 2001, 28(1): 3-12.
- [6] Slocum T A, Blok C, Jiang B, et al. Cognitive and usability issues in geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 2001, 28(1): 61-75.
- [7] Zhu Guorui, Wang Jianhua. Discussions on related issues of modern cartographic analysis. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1995, 24(1): 77-79. [祝国瑞, 王建华. 现代地图分析有关问题的探讨. 测绘学报, 1995, 24(1): 77-79.]
- [8] Gao Jun. Spatial Cognition of maps and cognitive cartography//Chinese Yearbook of Cartography. Beijing: SinoMaps, 1991: 23. [高俊. 地图的空间认知与认知地图学. 中国地图学年鉴. 北京: 中国地图出版社, 1991: 23.]
- [9] Bertin J. *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*. Madison: University of Wisconsin Press, 1983.
- [10] Koláčný A. Cartographic information: A fundamental concept and term in modern cartography. *The Cartographic Journal*, 1969, 6(1): 47-49.
- [11] Goldberg J H, Stimson M J, Lewenstein M M, et al. Eye tracking in web search tasks: Design implications//Proceedings of the 2002 Symposium on Eye Tracking Research & Applications. New Orleans, LA, USA: New York: ACM, 2002.
- [12] Cavanagh P. Visual cognition. *Vision Research*, 2011, 51(13): 1538-1551.
- [13] Yarbus A L, Haigh B, Riggs L A. *Eye Movements and Vision*. New York: Plenum Press, 1967.
- [14] Rayner K. Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 2009, 62(8): 1457-1506.
- [15] Steinke T R. Eye movement studies in cartography and related fields. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 1987, 24(2): 40-73.
- [16] Wang S, Chen Y, Yuan Y, et al. Visualizing the intellectual structure of eye movement research in cartography. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(10): 1-22.
- [17] Roth R E, Çöltekin A, Delazari L, et al. User studies in cartography: Opportunities for empirical research on interactive maps and visualizations. *International Journal of Cartography*, 2017: 1-29.
- [18] Franke C, Schweikart J. Mental representation of landmarks on maps: Investigating cartographic visualization methods with eye tracking technology. *Spatial Cognition & Computation*, 2017, 17(1/2): 20-38.
- [19] Wiener J M, Hölscher C, Büchner S, et al. Gaze behaviour during space perception and spatial decision making. *Psychological Research*, 2012, 76(6): 713-729.
- [20] Liao H, Wang X, Dong W, et al. Measuring the influence of map label density on perceived complexity: A user study using eye tracking. *Cartography and Geographic Information Science*, 2018: 1-19.
- [21] Gao Xueyuan, Dong Weihua, Tong Yiyi, et al. Study on the influence of field cognitive style, gender and spatial terminology on geographical spatial orientation ability: Based on experiments in virtual space. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(11): 1513-1521. [高雪原, 董卫华, 童依依, 等. 场认知方式, 性别和惯用空间语对地理空间定向能力影响的实验研究. 地球信息科学学报, 2016, 18(11): 1513-1521.]
- [22] Nielsen J. *Usability Engineering*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1993.
- [23] Manson S M, Kne L, Dyke K R, et al. Using eye-tracking and mouse metrics to test usability of web mapping navigation. *Cartography and Geographic Information Science*, 2012, 39(1): 48-60.

- [24] Montello D, Sutton P. An Introduction to Scientific Research Methods in Geography and Environmental Studies. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2012.
- [25] Fabrikant S I, Hespanha S R, Hegarty M. Cognitively inspired and perceptually salient graphic displays for efficient spatial inference making. *Annals of the Association of American Geographers*, 2010, 100(1): 13-29.
- [26] Ooms K, De Maeyer P, Fack V. Study of the attentive behavior of novice and expert map users using eye tracking. *Cartography and Geographic Information Science*, 2014, 41(1): 37-54.
- [27] Liao H, Dong W. An exploratory study investigating gender effects on using 3D maps for spatial orientation in wayfinding. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(3): 1-19.
- [28] Deng Yibo, Wang Yusheng, Wang Junchao, et al. Research on the location of the legend based on eye-movement tracking. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2012, 35(10): 201-204. [邓毅博, 王雨生, 王俊超, 等. 地图图例位置的眼动实验研究. *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(10): 201-204.]
- [29] Rayner K. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 1998, 124(3): 372-422.
- [30] Martin E. Saccadic suppression: A review and an analysis. *Psychological Bulletin*, 1974, 81(12): 899.
- [31] Chi C F, Lin Y H, Lan W S. Measurement of information processing load and visual load on a dynamic information processing task. *Behaviour & Information Technology*, 2003, 22(5): 365-374.
- [32] Goldberg J H, Kotval X P. Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1999, 24(6): 631-645.
- [33] Jacob R J, Karn K S. Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. *Mind*, 2003, 2(3): 573-605.
- [34] Poole A, Ball L J. Eye tracking in HCI and usability research//*Encyclopedia of Human Computer Interaction*, 2006: 211-219.
- [35] Li Wei, Chen Yufen, Cartography eye movements study and experimental parameter analysis. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(10): 16-20. [李伟, 陈毓芬, 地图学眼动研究及实验参数解析. *测绘通报*, 2012(10): 16-20.]
- [36] Just M A, Carpenter P A. Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 1976, 8(4): 441-480.
- [37] Andrienko G, Andrienko N, Burch M, et al. Visual analytics methodology for eye movement studies. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012, 18(12): 2889-2898.
- [38] Ooms K, Andrienko G, Andrienko N, et al. Analysing the spatial dimension of eye movement data using a visual analytic approach. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(1): 1324-1332.
- [39] Hägerstrand. *Spatial Process*. Chicago: University of Chicago, 1967.
- [40] Li X, Cöltekin A, Kraak M J. Visual exploration of eye movement data using the space-time-cube//Fabrikant S I. *Geographic Information Science*. Springer: Berlin Heidelberg, 2010: 295-309.
- [41] Dong W, Liao H, Roth R E, et al. Eye tracking to explore the potential of enhanced imagery basemaps in web mapping. *The Cartographic Journal*, 2014, 51(4): 313-329.
- [42] Ooms K, Maeyer P D, Fack V, et al. Investigating the effectiveness of an efficient label placement method using eye movement data. *The Cartographic Journal*, 2012, 49(3): 234-246.
- [43] Brychtova A, Coltekin A. An empirical user study for measuring the influence of colour distance and font size in map reading using eye tracking. *The Cartographic Journal*, 2016, 43(3): 202-212.
- [44] Dong W, Wang S, Chen Y, et al. Using eye tracking to evaluate the usability of flow maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(7): 281.
- [45] Çöltekin A, Brychtová A, Griffin A L, et al. Perceptual complexity of soil-landscape maps: A user evaluation of color organization in legend designs using eye tracking. *International Journal of Digital Earth*, 2017, 10(6): 560-581.
- [46] Cöltekin 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. *Cartography and Geographic Information Science*, 2009, 36(1): 5-17.
- [47] Wolfe J M, Horowitz T S. What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Reviews Neuroscience*, 2004, 5(6): 495-501.
- [48] Garlandini S, Fabrikant S I. Evaluating the effectiveness and efficiency of visual variables for geographic information visualization//Hornsby K S, et al. *Spatial Information Theory*. Springer: Berlin Heidelberg, 2009: 195-211.
- [49] Dong W, Liao H, Xu F, et al. Using eye tracking to evaluate the usability of animated maps. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(3): 512-522.

- [50] Dong W, Ran J, Wang J. Effectiveness and efficiency of map symbols for dynamic geographic information visualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 2012, 39(2): 98-106.
- [51] Ooms K, Coltekin A, De Maeyer P, et al. Combining user logging with eye tracking for interactive and dynamic applications. *Behavior Research Methods*, 2015, 47(4): 977-993.
- [52] Göbel F, Kiefer P, Raubal M. FeaturEyeTrack: A vector tile-based eye tracking framework for interactive maps//Societal Geo-Innovation: Short Papers, Posters and Poster Abstracts of the 20th AGILE Conference on Geographic Information Science. Wageningen, the Netherlands: Association of Geographic Information Laboratories for Europe (AGILE), 2017.
- [53] Kiefer P, Giannopoulos I, Raubal M, et al. Eye tracking for spatial research: Cognition, computation, challenges. *Spatial Cognition & Computation*, 2017, 17(1/2): 1-19.
- [54] Lobben A K. Tasks, strategies, and cognitive processes associated with navigational map reading: A review perspective. *The Professional Geographer*, 2004, 56(2): 270-281.
- [55] Montello D R. Navigation//Shah P, Miyake A. *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking*. New York: Cambridge University Press, 2005: 257-294.
- [56] Koletsis E, Elzakker C P J M, Kraak M J, et al. An investigation into challenges experienced when route planning, navigating and wayfinding. *International Journal of Cartography*, 2017, 3(1): 4-18.
- [57] Spiers H J, Maguire E A. The dynamic nature of cognition during wayfinding. *Journal of Environmental Psychology*, 2008, 28(3): 232-249.
- [58] Lin C T, Huang T Y, Lin W J, et al. Gender differences in wayfinding in virtual environments with global or local landmarks. *Journal of Environmental Psychology*, 2012, 32(32): 89-96.
- [59] Steck S D, Mallot H A. The role of global and local landmarks in virtual environment navigation. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 2000, 9(1): 69-83.
- [60] Liao H, Dong W, Peng C, et al. Exploring differences of visual attention in pedestrian navigation when using 2D maps and 3D geo-browsers. *Cartography and Geographic Information Science*, 2017, 44(6): 474-490.
- [61] Richardson A E, Montello D R, Hegarty M. Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory & Cognition*, 1999, 27(4): 741-750.
- [62] Wenczel F, Hepperle L, von Stülpnagel R. Gaze behavior during incidental and intentional navigation in an outdoor environment. *Spatial Cognition & Computation*, 2017, 17(1/2): 121-142.
- [63] Emo B. Seeing the axial line: Evidence from wayfinding experiments. *Behavioral Sciences*, 2014, 4(3): 167-180.
- [64] Foulsham T, Walker E, Kingstone A. The where, what and when of gaze allocation in the lab and the natural environment. *Vision Research*, 2011, 51(17): 1920-1931.
- [65] Yang Feng, Li Shijian. Wearable computing. *Bulletin of China Compute Federation*, 2014, 10(1): 76-81. [杨峰, 李石坚, 穿戴式计算. *中国计算机学会通讯*, 2014, 10(1): 76-81.]
- [66] Kiefer P, Giannopoulos I, Raubal M. Where am I? Investigating map matching during self-localization with mobile eye tracking in an urban environment. *Transactions in GIS*, 2014, 18(5): 660-686.
- [67] Ohm C, Müller M, Ludwig B. Evaluating indoor pedestrian navigation interfaces using mobile eye tracking. *Spatial Cognition & Computation*, 2017, 17(1/2): 89-120.
- [68] Wang C, Chen Y, Zheng S, et al. Gender and age differences in using indoor maps for wayfinding in real environments. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 8(1): 11.
- [69] Evans K M, Jacobs R A, Tarduno J A, et al. Collecting and analyzing eye-tracking data in outdoor environments. *Journal of Eye Movement Research*, 2012, 5(2): 1-19.
- [70] Brügger A, Richter K F, Fabrikant S I. Which egocentric direction suffers from visual attention during aided wayfinding? //Proceedings of the 3rd International Workshop Eye Tracking for Spatial Research. Zurich, Switzerland ETH Zurich, 2018.
- [71] SMI. BeGaze Manual Version 3.7.2017. Available from: www.humre.vu.lt/files/doc/Instrukcijos/SMI/BeGaze2.pdf.
- [72] Beugher S D, Brône G, Goedemé T. Automatic analysis of in-the-wild mobile eye-tracking experiments using object, face and person detection//2014 International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP). Lisbon, Portugal, 2014.
- [73] Anagnostopoulos V, Havlena M, Kiefer P, et al. Gaze-informed location-based services. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(9): 1770-1797.
- [74] Robinson A H, Morrison J L, Muehrcke P C, et al. *Elements of Cartography*. 6th ed. NJ, USA: John Wiley & Sons, 1995: 688.

- [75] Shepherd I D. Travails in the third dimension: a critical evaluation of three-dimensional geographical visualization// Dodge M, McDerby M, Turner M. *Geographic Visualization: Concepts, Tools and Applications*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2008: 199-222.
- [76] Häberling C, Bär H, Hurni L. Proposed cartographic design principles for 3D maps: A contribution to an extended cartographic theory. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 2008, 43(3): 175-188.
- [77] Xu Zhiyong, Ai Tinghua, Wei Yongjun, et al. On visual variables of 3D map symbol. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(6): 557-560. [徐智勇, 艾廷华, 危拥军, 等. 三维地图符号视觉参量研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(6): 557-560.]
- [78] Yang Nai. Study on several issues of 3D map design based on spatial cognition [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. [杨乃. 基于空间认知的三维地图设计若干问题的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.]
- [79] Liu Bing, Dong Weihua, Wang Yanwen, et al. The Influence of FOV and viewing angle on the visual information processing of 3D maps. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(12): 1490-1496. [刘兵, 董卫华, 王彦文, 等. 视场角与观察角度对三维地图视觉信息加工的影响研究. 地球信息科学学报, 2015, 17(12): 1490-1496.]
- [80] Liu B, Dong W, Meng L. Using eye tracking to explore the guidance and constancy of visual variables in 3D visualization. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(9): 1-18.
- [81] Popelka S, Doležalová J. Non-photorealistic 3D visualization in city maps: An eye-tracking study//Brus J, Vondrakova A, Vozenilek V. *Modern Trends in Cartography*. Berlin Heidelberg: Springer, 2015: 357-367.
- [82] Lokka I E, Çöltekin A. A virtual reality experiment for improving the navigational recall: What can we learn from eye movements of high- and low- performing individuals?//Eye Tracking for Spatial Research, Proceedings of the 3rd International Workshop 2018. ETH Zurich.
- [83] Lei T C, Wu S C, Chao C W, et al. Evaluating differences in spatial visual attention in wayfinding strategy when using 2D and 3D electronic maps. *GeoJournal*, 2016, 81(2): 153-167.
- [84] Lokka I E, Çöltekin A, Wiener J, et al. Virtual environments as memory training devices in navigational tasks for older adults. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1-15.
- [85] JSTV. Yu Zhan: Super brain challenge of matching contour maps to real mountain images [OL/EB]. 2017. Available from: <http://v.jstv.com/a/20170113/1484317946746.shtml>. [江苏卫视. 于湛: 挑战项目一眼辨山. 2017. Available from: <http://v.jstv.com/a/20170113/1484317946746.shtml>.]
- [86] Ooms K, De Maeyer P, Fack V, et al. Interpreting maps through the eyes of expert and novice users. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(10): 1773-1788.
- [87] Lawton C A. Gender, spatial abilities, and wayfinding//Chrisler J C, McCreary D R. *Handbook of Gender Research in Psychology*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 317-341.
- [88] Coluccia E, Iosue G, Brandimonte M A. The relationship between map drawing and spatial orientation abilities: A study of gender differences. *Journal of Environmental Psychology*, 2007, 27(2): 135-144.
- [89] Çöltekin A, Fabrikant S I, Lacayo M. Exploring the efficiency of users' visual analytics strategies based on sequence analysis of eye movement recordings. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(10): 1559-1575.
- [90] Dong W, Zheng L, Liu B, et al. Using eye tracking to explore differences in map-based spatial ability between geographers and non-geographers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(9): 337.
- [91] Zheng Shulei, Yang Chunlei, Li Ying, et al. Research on map user cluster analysis and discriminant analysis. *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. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(4): 14-16.]
- [92] Zheng Shulei. Research on personalized map cognition mechanism [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University. [郑束蕾. 个性化地图的认知机理研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2015.]
- [93] Dong W, Ying Q, Yang Y, et al. Using eye tracking to explore the impacts of geography courses on map-based spatial ability. *Sustainability*, 2018, 11(1): 76.
- [94] Dong W, Jiang Y, Zheng L, et al. Assessing map-reading skills using eye tracking and Bayesian structural equation modelling. *Sustainability*, 2018, 10(9): 1-13.
- [95] Giannopoulos I, Kiefer P, Raubal M. GazeNav: Gaze-based pedestrian navigation//Boring S, et al. *Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, New York: ACM: Copenhagen, Denmark, 2015: 337-346.

- [96] Giannopoulos I, Kiefer P, Raubal M. GeoGazemarks: Providing gaze history for the orientation on small display maps// Morency L-P, Bohus D, Aghajan H. Proceedings of the 14th ACM International Conference on Multimodal Interaction. New York: ACM: Santa Monica, California, USA, 2012: 165-172.
- [97] Kluge M, Asche H. Validating a smartphone-based pedestrian navigation system prototype//Computational Science and Its Applications-ICCSA 2012. Springer, 2012: 386-396.
- [98] Gkonos C, Giannopoulos I, Raubal M. Maps, vibration or gaze? Comparison of novel navigation assistance in indoor and outdoor environments. Journal of Location Based Services, 2017: 1-21.
- [99] Ohm C, Müller M, Ludwig B, et al. Where is the landmark? Eye tracking studies in large-scale indoor environments// Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research (in conjunction with GIScience 2014). Vienna, Austria, 2014.
- [100] Lander C, Wiehr F, Herbig N, et al. Inferring landmarks for pedestrian navigation from mobile eye-tracking data and Google street view//Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. Denver, CO, USA: New York: ACM, 2017.
- [101] Viane P, Vansteenkiste P, Lenoir M, et al. Examining the validity of the total dwell time of eye fixations to identify landmarks in a building. Journal of Eye Movement Research, 2016, 9(3): 1-11.
- [102] Zhi Meixia. Landmark visual salience model based on eye tracking experiment [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2017. [智梅霞. 基于眼动追踪的城市建筑物地标视觉显著度模型构建[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017.]
- [103] Wang Chengshun, Chen Yufen, Zheng Shulei. User interest analysis method of web map point symbol considering eye movement data. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018(9): 1429-1437. [王成舜, 陈毓芬, 郑束蕾. 顾及眼动数据的网络地图点状符号用户兴趣分析方法. 武汉大学学报: 信息科学版, 2018(9): 1429-1437.]
- [104] Burch M, Kurzhals K, Weiskopf D. Visual task solution strategies in public transport maps//Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research (in conjunction with GIScience 2014). Vienna, Austria, 2014.
- [105] Kiefer P, Giannopoulos I, Raubal M. Using eye movements to recognize activities on cartographic maps//Acm Sigspatial International Conference on Advances in Geographic Information Systems. Orlando, FL, USA: New York: ACM, 2013.
- [106] Liao H, Dong W, Huang H, et al. Inferring user tasks in pedestrian navigation from eye movement data in real-world environments. International Journal of Geographical Information Science, 2019, 33(4): 739-763.
- [107] Krejtz K, Duchowski A T, Çöltekin, Arzu. High-level gaze metrics from map viewing: Charting ambient/focal visual Attention//Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research. Vienna, Austria, 2014.
- [108] Niedomysl T, Elldér E, Larsson A, et al. Learning benefits of using 2D versus 3D maps: Evidence from a randomized controlled experiment. Journal of Geography, 2013, 112(3): 87-96.
- [109] Sun Q, Xia J, Nadarajah N, et al. Assessing drivers' visual-motor coordination using eye tracking, GNSS and GIS: A spatial turn in driving psychology. Journal of Spatial Science, 2016, 61(2): 299-316.
- [110] Maggi S, Fabrikant S I. Triangulating eye movement data of animated displays//Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research (in conjunction with GIScience 2014). Vienna, Austria, 2014.
- [111] Wang Jiayao, Sun Linan, Cheng Yi. Innovative thinking changes cartography. Geospatial Information, 2011, 9(2): 1-5. [王家耀, 孙力楠, 成毅. 创新思维改变地图学. 地理空间信息, 2011, 9(2): 1-5.]

New research progress of eye tracking-based map cognition in cartography since 2008

DONG Weihua, LIAO Hua, ZHAN Zhicheng, LIU Bing, WANG Shengkai, YANG Tianyu
(Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Maps are a necessity in people's lives. Map cognition research, a science of investigating perception, learning, memory, reasoning and decision making of maps, has long been an important issue in the foundation of cartography. As a core part of map cognition research, studies on visual cognition of maps have made a series of achievements promoted by advancements of related fields (e.g., psychology, cognitive science and computer vision) and new techniques (e.g., eye tracking, EEG and functional magnetic resonance imaging). Particularly, eye tracking approach has gained much attention, which has been used as a crucial method to investigate map cognition. This paper reviews the new progress of eye tracking based visual cognition of maps which have been made since 2008. We summarized these progresses in six aspects: (1) stimulus: from static maps to dynamic and interactive maps; (2) research extent: from map cognition to map-based spatial cognition; (3) experiment environment: from lab environment to real environment; (4) map dimension: from 2D to 3D; (5) individual differences: from single dimension to multiple dimensions; (6) research purpose: from theory exploration to application. We also summarized future research challenges, difficulties and possible solutions. We hope this review can serve as an initial effort to open more endeavor for future eye tracking investigations into map cognition.

Keywords: eye tracking; visual attention; map design; usability evaluation; map-based spatial cognition; pedestrian navigation