

# 《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工机制

作者：黄雷，张军恒，姬鸣

---

## 第一轮

感谢审稿人的宝贵意见，我们在本轮修改中参考了审稿专家的意见，对全文内容进行了修改，修改后近 5 年文献占比为 53%。以下是我们对修改内容的简要叙述。

我们对每一部分中每小节内容的结构做了改动，并增加了部分新的内容。修改后论文第二部分“2 认知地图的构成与表征”中的第一节总结了认知地图的构成要素，第二节整理了研究者对认知地图中的构成要素组织形式的相关理论。第三部分“3 认知地图在视觉线索受限环境导航中的加工机制”将问题聚焦于认知地图动态加工机制中的“更新与校正阶段”，在这一阶段中，个体根据环境特征从以欧氏表征为主的认知地图中抽取以认知图谱为主的空间心智模型，并在该模型中进行空间决策与推理和路线规划。同时，个体通过多感官整合来实现空间定向和空间定位。在导航过程中根据空间环境线索更新和校正认知地图，元认知参与其中。第四部分“4 讨论与展望”中我们总结了认知地图动态加工机制的理论价值与实践意义，并提出了未来研究的展望。我们也根据文章内容修改了中英文摘要。另外，我们也对文章整体的语言表述进行修改以保证文章整体流畅性。以下是我们对审稿人意见的逐条回应。

### 审稿人 1 意见：

本文围绕认知心理学和神经科学的热点问题——认知地图展开，综述了认知地图的作用，以及认知地图构建所需的视觉条件和神经机制，以及视觉受限环境中导航功能中，多感官的整合和更新作用促进认知地图加工的相关机制。基于此，作者提出了一个“两阶段理论”来描述在视觉受限的环境中认知地图的加工过程。最后作者展望了视觉受限环境导航中的认知地图的表征方式、相应实验范式的设计以及对多感官整合的导航绩效提升方法。文章针对的视觉受限环境的认知地图加工机制对处于环境视觉线索缺失的人群，例如飞行员等，有重要的实际意义。本文内容充实，近 5 年的文献引用率为 40%，能反映目前的研究进展。本文还存在以下问题：

**意见 1：**1) 摘要部分。英文摘要详细，中文摘要简练，二者内容差距悬殊。特别是中文摘要，所针对的“视觉受限环境”以及相关科学问题的论述不够具体。

**回应：**谢审稿人的意见。我们根据修改后的论文内容对摘要进行了修改，增加了与视觉受限环境导航相关的科学问题的论述。修改后摘要字数依然遵守《心理科学进展》的投稿指南，将中文摘要的字数控制在 200 字左右，英文摘要也根据本期刊往期的投稿论文，撰写了字数为 600 字左右的英文长摘要。摘要修改内容如下：

“认知地图通过整合以视觉为主导的环境线索表征支持人类的空间导航，而视觉线索受限环境中由于视觉线索模糊和视野狭窄等因素降低了个体导航效能。研究分析了认知地图的构成要素并整理了要素组织形式的理论，提出了认知地图以构建和更新与校正两阶段的动态加工机制支持个体在视觉线索受限环境中的空间导航。个体在构建阶段中通过多感官通道获取构成要素并整合为认知地图，更新与校正阶段则通过多感官信息更新环境线索并校正空间心智模型和空间定向以实现空间导航。认知地图的动态加工机制进一步厘清不同高级加工过程如何支持复杂的空间导航行为，为未来研究空间导航能力训练、人机协同导航系统智能化等方面提供理论基础。”

意见 2：2）引言部分。文章关键词引言以及全文中并未明确体现。“视觉受限环境”并无明确定义，且表述多处出现近义词，例如“视觉受限的导航环境”，“视觉受限的环境”。作者根据动态视角将认知地图的价值过程分为两个阶段，构建阶段和更新与校正阶段。但在引言部分缺乏对这一“两阶段理论”概括性论述，和包括适用范围以及生理心理意义等等。动态视角的提出同理，动态视角的引入对目前空间地图机制的加工机制的重要意义并不明确。

回应：感谢审稿人的意见。

首先，我们在引言部分明确了“视觉受限环境”的定义，本文的研究中，我们主要探讨了有效线索较少的环境中的导航，我们将该环境称为“视觉线索受限环境”并明确了其定义，全文中涉及到的概念均统一为“视觉线索受限导航”，修改内容位于正文 p1,:

“事实上，与视觉主导的地面导航环境不同，黑暗、夜航、低能见度以及封闭空间等视觉线索受限环境(navigation in visually cue-restricted environments)中，个体受视觉线索模糊或缺失、环境信息的不确定性以及身体运动信息线索限制等因素的影响难以形成完整的空间表征，从而增加了个体空间导航难度(Creem-Regehr et al., 2021)。”

其次，针对审稿人提到“引言部分缺乏对这一“两阶段理论”概括性论述，和包括适用范围以及生理心理意义等等”这一点，我们在引言和讨论中均增加了相关内容，修改内容如下，位于正文 p2:

“然而，视觉线索受限环境中认知地图支持个体导航行为的加工机制并不清晰，如在视觉线索缺乏条件下个体如何通过整合环境线索构建认知地图？当环境发生改变后个体又如何更新和校正认知地图？基于此，本研究回顾了空间导航中认知地图和视觉线索的相关研究，阐述了个体在视觉线索受限环境导航时认知地图的动态加工机制，旨在探讨认知地图的动态加工机制对空间导航的支持作用，以提升个体在视觉线索受限环境中的导航能力。”

由于空间导航是复杂的、具有动态性的活动，因此，认知地图也以动态形式支持空间导航。引入动态视角的意义我们的讨论部分中“4.2 认知地图的动态加工机制的理论意义”中进行了详细论述，正文位于 p16-17:

#### “4.1 认知地图动态加工机制的理论意义

本研究探讨了认知地图如何动态支持个体在视觉线索受限环境中的导航行为。首先，个体在认知地图中提取空间心智模型的加工过程与方式明晰了认知地图的表征方式。认知地图如何表征一直是研究者试图厘清的内容，虽也有研究者提出欧氏表征与认知图谱两种表征形式共存，但并未阐明两种表征如何共存。本研究提出，当个体需要进行以目标为导向的导航时，会在基于欧氏表征的认知地图的基础上抽取出合适的空间心智模型对未来导航进行事先

的路线规划，而空间心智模型的表征形式即为认知图谱。这一观点明晰了两种表征形式间的关系。其次，本研究在梳理已有相关研究后，将推理、记忆、语言等高级加工过程共同纳入认知地图的动态加工机制之中，更全面地阐述了个体在视觉线索受限环境导航中的认知加工过程，也进一步厘清不同高级加工过程如何支持复杂的空间导航行为。最后，本研究将动态视角引入认知地图在空间导航中的认知加工机制，不再局限于将认知地图看作一张静态的大脑中的“地图”，能够更好地探清个体空间导航行为的内在机制。另外，提出的认知地图动态加工机制不仅适用于一般导航，更是考虑了空天海等视觉线索受限环境，也能够帮助研究者更好的理解人-环境交互中人的作用，为以后更深入地探究个体在不同复杂环境中空间导航行为提供理论基础。

#### 4.2 认知地图动态加工机制的实践意义

首先，研究者能够从空间心智模型在认知地图的作用机制出发提升当前人与各种导航辅助软件的人机交互设计或人机协同导航中。例如，在自动驾驶中对智能导航系统的设计中，将表象的显示、情景记忆的线索提醒、元认知监控具象化等理念融入其中，能够更好地提高个体的空间导航绩效。其次，空间迷失一直以来都是空间导航领域的难题。尤其对于身处视觉线索受限环境中的个体来说，一旦产生空间迷失很容易发展为空间定向障碍而造成严重后果。例如美国国家运输安全委员会在 2021 年公布的科比空难事故的调查结果显示，造成空难的根本原因是飞行员违规飞入云层，在迷雾中迷失方向出现了空间定向障碍。本研究提出个体在视觉线索受限环境中利用认知地图中的相关信息定向，能够帮助个体通过针对性训练来提升个体空间定向的准确率。例如，研究者可以通过加强对飞行人员元认知水平的训练，提升个体在空间导航中的元认知水平，并保持在空间导航过程中元认知情感的稳定。通过类似训练，不仅能够提高个体的空间定向水平，即使个体产生了空间迷失，也能够保持稳定的情绪水平，减少负面情绪对认知操作的影响。最后，本研究中提出的认知地图的动态加工机制也能够帮助解决个体在视觉线索受限环境导航中的难点。例如，在无人机飞行任务中，当 GPS 导航信号中断或消失时，无人机飞行员的操作能力就变得至关重要。而在这种环境下，无人机飞行员并无法得到真实的环境线索，只能通过已有数据进行推理，此时，个体可根据认知地图

**意见 3:** (3) 认知地图的综述部分。作者在第一节将各要素文献进行总结，认为各种要素按照属性的不同可分为路线知识和定向知识。第二节关于要素间的连接方式中引入了多个概念，但未阐明这些模型或者方式与这两类知识要素的关系，哪个理论更贴近实际或更贴近所提出的“两阶段理论”。第三节关于神经机制的叙述未能明确要素以及要素连接的脑区。同时后文第三部分再次提到脑区和功能。建议将认知地图构建的相关神经机制集中在一起阐

**回应 3:** 感谢审稿人的意见。本轮修改中，我们将原本第二节“各要素的连接方式”修改为“认知地图的表征方式。做这一修改的主要原因是 (1) 认知地图的表征方式中体现着各要素的表征方式，这种表述能够更好地从理论层面表现两节内容间的联系；(2) 我们增加了关于认知地图表征形式的理论，这些理论体现认知地图中各要素如何连接的同时，还为下一部分所提出的“认知地图的动态加工机制”提供理论支撑。正文修改内容位于 p2-9:

“ Wolbers 和 Hegarty(2010)提出的空间导航加工模型总结了个体在空间导航过程中涉及的环境空间线索和个体空间认知能力并提出了空间表征的离线和在线两种形式。基于该模型和个体在空间导航中涉及的环境特征和认知特点,研究总结了认知地图所包含的构成要素,并系统地梳理了认知地图中各要素的组织形式。”

## 2.1 认知地图的构成要素

从空间导航的人-环境交互的角度出发,认知地图的构成要素可分为以环境特征为主的环境要素和以个体认知加工过程为主的认知要素。对环境要素的分类依据空间环境知识分为以路线知识为主的路标的视觉要素、语义特征、有效性等,和以定向知识为主的路标可见性、空间轴向、空间边界和转弯/交叉路口等。对认知要素的分类依据以往研究以“事件(event)”象征个体在不同时空点下与情景记忆密切相关的状态。以下是对两类要素内容的详细阐述。

环境要素中,个体通过对要素单独或叠加的使用识别路标的独特性形成路线知识。路标以视觉要素(如颜色、形状等)为主并包含了诸多感知信息。Ishikawa 和 Nakamura(2012)发现人们会倾向于将面积更大、色彩饱和度更高的建筑物视为路标,并影响路线选择。除此之外,其他感知觉信息如听觉信息、前庭觉信息等均能作为路标以提高个体导航绩效(Wunderlich et al., 2023; Gao et al., 2021; Jabbari et al., 2021; Karim et al., 2018)。而路标的语义特征赋予了路标独特性。语义特征一般包含文化与历史因素(Nuhn & Timpf, 2018),文化因素指具有特定功能的建筑物,如博物馆、体育馆等,而历史因素为具备历史价值的建筑物,如某旧址、天坛等。另外,位于不同地理位置的路标也赋予路标独特性。Ishikawa 和 Nakamura(2014)发现人们常将交叉路口处的建筑物视为路标,而当个体位于陌生环境时,对位于路口处路标的识记率更高(Yesiltepe et al., 2021)。个体对路标的各种偏好均以识别有效路标为目的,若记忆中的路标与真实环境不一致则容易使个体产生迷失感。以路线知识为主的环境要素更多以离散形式存在,定向知识为主的环境要素能够帮助个体连接离散要素并构建整体空间表征。路标可见性能够辅助个体定向,根据可见性可将路标分为整体路标(global landmark)和局部路标(local landmark)两类(Yesiltepe et al., 2019)。山脉、大厦等可以从远距离观测到的路标为整体路标,而仅在少部分地区或近距离才能观察到的路标为局部路标,个体通过对整体路标与局部路标方位的判断确定自己在空间中的位置。然而,关于整体路标和局部路标对认知地图影响作用的研究结果尚未有定论,有研究认为局部路标有效支持个体空间导航,但也有研究提出整体路标在基于认知地图的导航中更为重要(Credé et al., 2020; Meilinger et al., 2014)。除路标之外的相关环境特征要素中,空间框架理论(spatial framework)提出个体以自我中心参考系表征空间信息,并以头脚轴、前后轴和左右轴三个轴定位物体信息,其中个体最易辨认头脚轴方向的位置关系,最难辨认左右轴方向的位置关系(Pitt et al., 2022),因此,空间轴向作为环境要素的同时也会影响个体纳入认知地图的要素数量。另外,空间边界会调节环境几何表征并分割沿途发生的事件从而影响个体对空间环境的情景记忆,如人们容易将同一房间内的信息组块记忆(Hao et al., 2020; Brunec et al., 2018)。类似的环境属性要素还有转弯路口或交叉路口。路口将连续路线分割为路线片段储存于空间记忆中,路线间的方位分布构成了认知地图的空间基础,分离的路线片段也能够在认知地图的基础上灵活重组,构成新的空间表征(Nardi et al., 2020; Brunec et al., 2018; Bonasia et al., 2016)。

认知地图不仅包含对环境物理特征表示,还包含了情境中与个体状态相关的信息。已有大量研究证明海马和内侧颞叶参与认知地图构建,而内侧颞叶也和与心理表征相关的情景

记忆(episodic memory)有关。场景构建理论(scene construction theory)认为海马(hippocampus, HC)支持个体构建复杂空间情景,该情景可作为“脚手架”帮助个体整合经验并补充额外细节(Maguire & Mullally, 2013)。Sheldon 等(2017)也发现不同的认知机制支持个体同时形成事件和场景的表征,而事件表征则通过情景记忆支持各种知识构建结构规则。事件反映了个体在环境中的一系列状态,使空间导航具备时空特性(Teghil et al., 2019),本研究也将个体的时间知觉纳入“事件”中考虑。Ekstrom 和 Ranganath(2018)认为海马是围绕空间和时间组织经验的灵活且结构化的系统,该系统帮助个体通过整合特定情境中相关的多模态输入支持从空间导航到情景记忆的各种认知功能,其中海马 CA1 接受来自内嗅皮层(entorhinal cortex, ERC)的信息传入以支持基于多种任务和行为状态下的记忆和空间导航(Priestley et al., 2022)。

以上要素在认知地图中并不独立存在,而是能够相互结合从而对个体的空间导航过程产生影响。例如,有研究提出在个体在使用导航辅助软件时,通过使用包含情感线索的听觉叙述赋予路标情感意义会促使个体更多的使用第一视角的地图进行导航(Lanini-Maggi, 2021)。本研究也简要梳理了当前认知地图表征形式相关理论以解释要素间的相互作用机制。

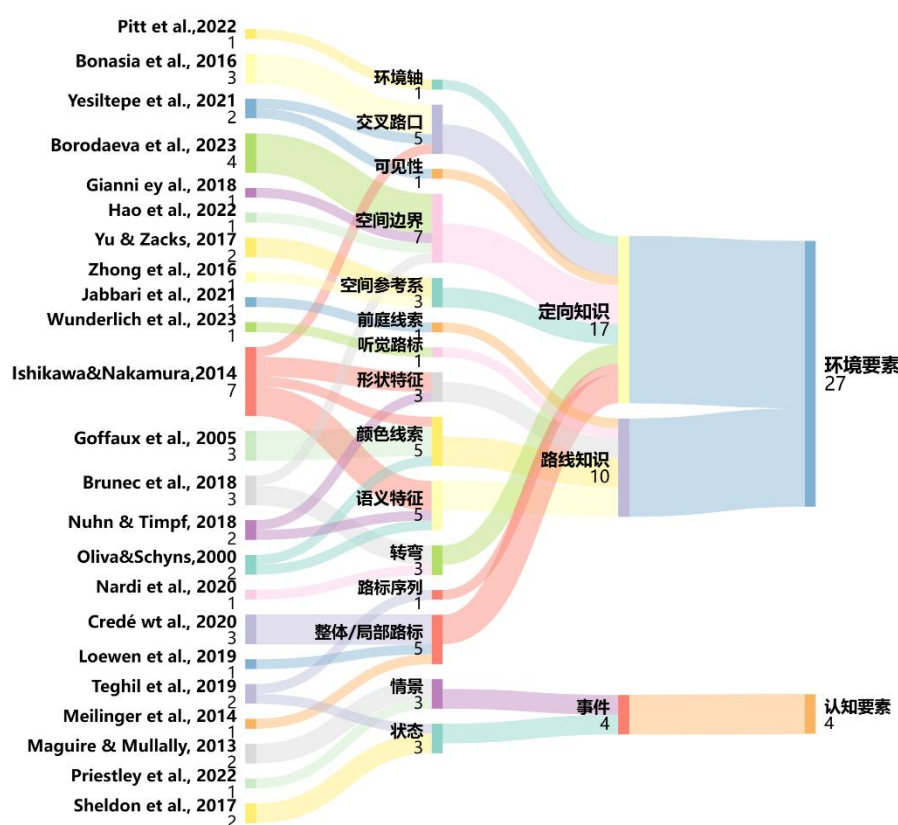


图1 认知地图构成要素文献桑基图

## 2.2 认知地图要素组织形式

认知地图通过反映对环境的完整表征支持空间导航,但这一表征往往存在认知扭曲。以欧式空间表征、认知图谱和 Spacecog 模型为代表的理论均提出了个体在认知地图中对环境要素的组织形式但认知地图也会包含与个体状态相关的认知要素, Bellmund 等(2018)提出的认知空间理论考虑了认知要素,构建了包含抽象概念的空间表征形式。

### 2.2.2 欧式空间表征和认知图谱

以路标学习和路径整合方式所构建的认知地图更符合包含了地理环境中方位和距离信

息的欧氏空间表征形式以支持个体识别方向和寻找捷径。内嗅皮层和海马中的位置细胞(place cell)和网格细胞(grid cell)编码空间位置和方位信息,神经元相互协调构建空间记忆和导航所需要的神经回路形成大脑中的导航定位系统,在脑内创立关于环境的认知地图(郑丽等, 2023)。对导航过程中海马前部和内嗅皮层活动的监测也支持了这一观点,内嗅皮层支持欧氏距离编码,该区域中包含的网格细胞的多个放电场为空间表征提供了环境坐标系(Howard et al., 2014)。在 fMRI(Doeller et al., 2010)、单神经元活动(Jacobs et al., 2013)和颅内 theta 振荡(Maidenbaum et al., 2018)的研究中也发现了类似网格细胞支持空间表征欧氏度量的证据。然而人们对空间信息的组织方式可能会发生认知扭曲从而使空间表征在不完全符合欧氏表征的情况下仍能识别两路标间的空间位置关系,研究者将这种空间信息的表征形式称为认知图谱(cognitive graph)(Peer et al., 2021; Meilinger et al., 2018; Brunec et al., 2017; Chrastil & Warren, 2014)。在认知图谱中,部分路标空间位置标记为节点(node),节点间以链接(links)的形式组织,链接仅表示节点间导航所必须的动作序列和度量信息(Warren, 2019)。因此,认知图谱可看作转换导航状态的特定动作序列集合。海马中的位置细胞可以将空间和时间划分为不同的片段(Wang et al., 2020; Bulkin et al., 2020),按照经验的层次结构进行编码以表示环境要素之间的图式关系(Sun et al., 2020; Baraduc et al., 2019)。Bicanski 和 Burgess(2020)总结了海马相关研究提出了向量编码细胞在空间认知中的作用及其编码机制,提出多种类型的向量编码细胞(如边界向量细胞、对象向量细胞和地标向量细胞)在远离感觉外围的脑区中编码环境中的距离和方向信息。这些细胞通过相互连接和转换参考框架支持了自我定位、记忆和导航规划等空间认知功能。可见,对空间环境的表征形式可能存在一定结构性,底层结构以欧式表征表示空间度量信息,上层结构实现空间认知加工。

### 2.2.3 Spacecog 大尺度空间认知神经计算模型

Burkhardt 等(2023)提出了名为 Spacecog 的大尺度空间认知神经计算模型解释人类多个脑区间如何相互作用以通过空间记忆表征物体位置(图 2)。该模型整合了物体识别和物体探测的注意模型(Beuth, 2019),扫视空间知觉模型(Bergelt & Hamker, 2019),空间记忆和表象模型(Bicanski & Burgess, 2018)三个独立的神经计算模型,并将物体记忆与视觉感知相结合,对应个体的编码及心理想象过程。编码过程中,代理(agent)通过特征注意进行视觉搜索,改变了视觉皮层 V4/IT 区域上对象细胞的反应曲线,同时,V4/IT 信息驱动额眼区(frontal eye field, FEE)进行目标选择,而相关空间信息则通过顶内沟外侧壁(lateral intraparietal cortex, LIP)进行空间视觉转换,将信息从眼中心参考框架转换为头中心参考框架,接着在顶叶窗口( Parietal window, PW)与环境信息相结合,通过压后转换回路(retrosplenial transformation circuit, RSC/TR)将空间信息最终转为世界中心参考框架。空间信息在长时记忆中被编码至内侧颞叶(medial temporal lobe, MTL)中的吸引子网络(attractor network)中。在心理意象的过程中,利用物体识别通过基于线索的记忆检索机制在 MTL(内侧颞叶)中重新激活来自先前编码阶段的神经模式,此时,神经模式中包含编码过程中代理的空间信息(包含物体间的相对位置信息和相对于环境的绝对位置信息)。这些模式被用于空间导航,并通过 RSC 和 LIP 再次将空间信息从世界中心的参考框架转换为以眼为中心的参考框架,从而在 FEE 中进行注意力控制。该模型较全面地涵盖了认知地图构建过程中从视觉识别到空间表征记忆的过程,视觉与记忆在认知地图中的紧密联系能够帮助个体准确有效地重新定位先前编码过的物体。

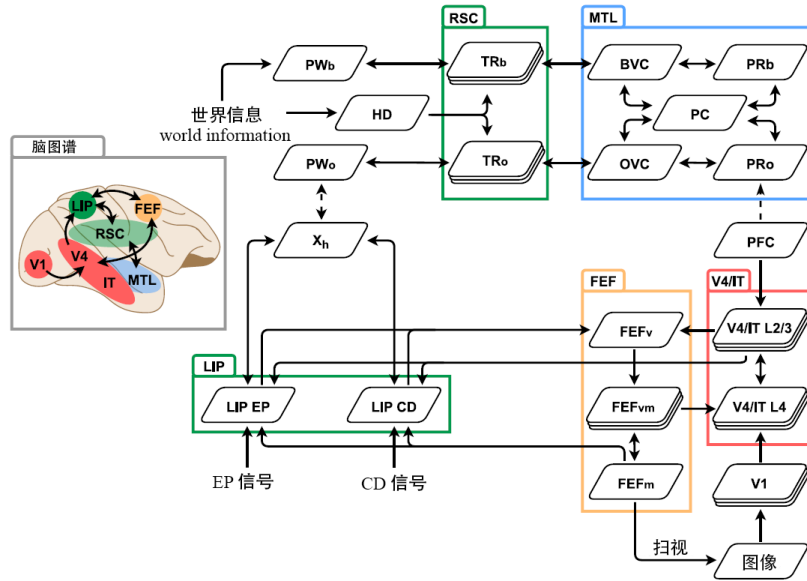
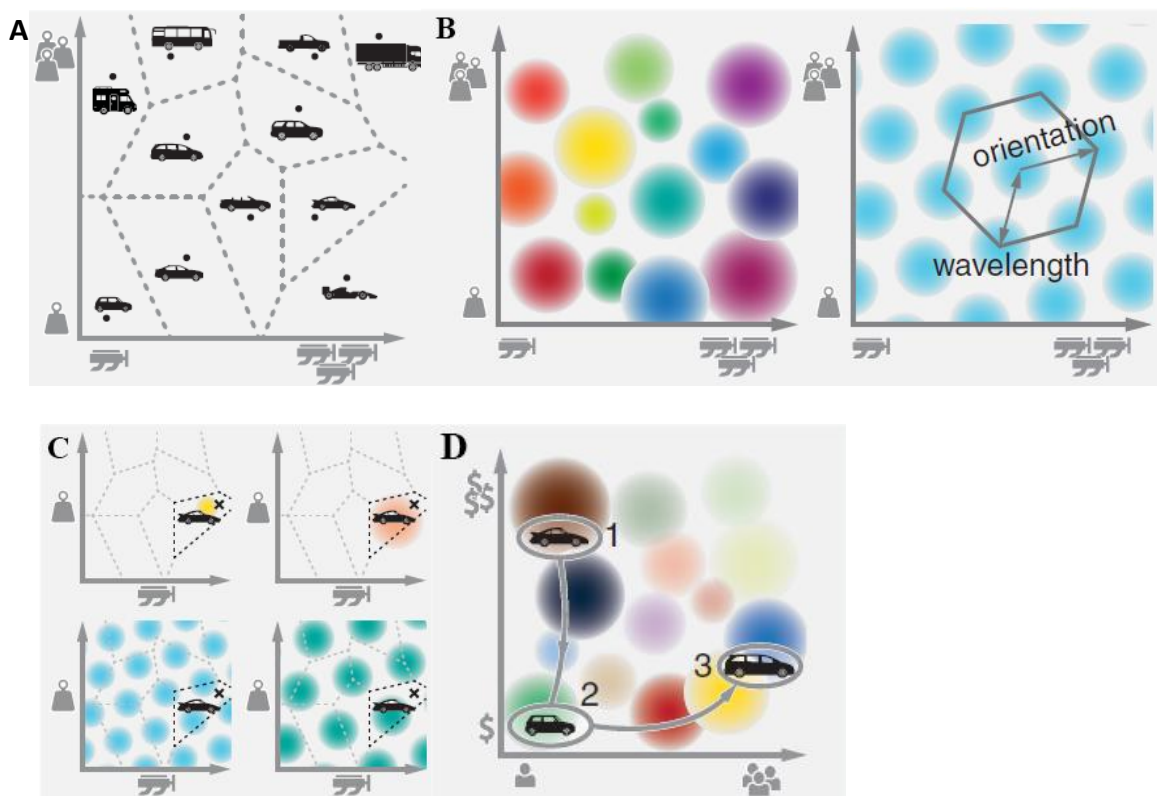


图 2 Spacecog 大尺度空间认知神经计算模型。(详解见附录)

## 2.2.4 认知空间

以上几种表征形式均聚焦于认知地图对空间环境信息的表征形式,但越来越多的研究者认为认知地图包含的不止空间环境信息,还包含了具有时序性的一系列事件序列和行动相关的抽象概念(Bellmund et al., 2018; Park et al., 2020)。Bellmund 等(2018)提出认知空间(cognitive space)是由物理特征(如位置、方向)和抽象特征(如颜色、形状)的多组质量维度构成的空间表征形式(图 3)(Gardenfors, 2004)。在认知空间中,相似的刺激物会位于相邻的位置而不同的刺激物间则会有较大的距离,每个刺激在这些维度上均有特定的特征值以在认知空间中定位。根据质量维度的几何特征,该刺激概念的属性定义为某个领域中的凸区域(convex region),即在一个维度中,如果给定两个点  $x$  和  $y$  在这个区域内,这两点之间的所有点也在这个区域内。根据属性的空间定义概念原型位于区域的中心位置,其余相关的点位于离中心远近不同的位置并使用具有欧氏度量的连续空间的 Voronoi 镶嵌将空间中所有客体的位置离散化使其接近原型,凸区域由此产生(Gardenfors, 2004; Bellmund et al., 2018)。在这种框架下,一个属性构成了一个概念的最简单的形式。将属性定位为凸区域可以帮助个体基于已有概念进行归纳推理,即如果两个刺激  $x$  和  $y$  存在共同属性,则  $x$  和  $y$  之间的任何刺激也可以推断具有相同属性,而复杂的属性由多个领域和关于它们相互关系的信息组成。一个概念被定义为多个领域中的一组凸区域并根据显著性进行加权,并包含关于不同领域中的区域如何关联的附加信息。例如,当我们要表征“故宫”时,对故宫的概念就会由它的地理位置特征区域、文化属性区域和建筑样式等多个区域共同定义。Bellmund 等(2018)提出 HC-EC 系统中的处理机制作为人类灵活且高级认知的通用格式支持认知空间。对空间导航的研究揭示了如何通过该系统中功能特定细胞的连续且多尺度的编码来映射空间。这一系统赋予了灵活映射不同环境的能力,并通过时间序列模拟空间轨迹。例如,位置细胞群的放电场提供个体周围环境的空间表征,网格细胞的六边形对称放电模式通过提供环境的坐标系支持空间导航(Hafting et al., 2005)。位置细胞和网格细胞提供的度量也可能提供的是一种通用机制用于映射经验维度,在这一机制下,位置细胞被认为支持索引由内嗅网格系统构成的认知空间中的位置。位置细胞与网格细胞的放电场随啮齿类动物海马背腹轴的延伸而增大

(Stensola et al., 2012), 这与认知空间在不同粒度下的映射相契合, 反映了知识层次或嵌套概念的多尺度表征。另外, 位置细胞和网格细胞在重建和 theta 振荡期间的序列活动使个体可以通过不同位置模拟移动轨迹(Trettel et al., 2019; Buckner et al., 2010), 从而支持适应性认知和行为。在认知空间的支持下, 当个体处于新环境时, 就能够利用已有的属性来快速适应环境实现导航。



境实现导航。

图 3 cognitive space 模型示例图。以购买汽车为例, (A)认知空间由汽车重量(纵轴)和发动机功率(横轴)两个维度构成。沿这两个轴的特征值定义汽车位置, 具有相似特性的属性位于彼此附近。属性(汽车图标)被定义为认知空间的凸区域, 使用具有欧氏度量的连续空间的 Voronoi 镶嵌将空间离散化为凸区域, 不同属性(黑点)间的距离通过基于特征维度上的相异性决定。(B)左图: 彩色圆圈代表位置细胞在由汽车发动机功率和重量两维度构成的空间中的放电场。每种颜色代表一个独立的位置细胞。整体上, 放电场覆盖了空间的所有位置。右图: 网格细胞的六边形对称放电模式(图中显示了一个细胞的模式)为空间的维度提供了度量标准。(C)不同粒度水平上的信息表征可以由海马回路中的多个空间尺度支持。狭窄(左列)或宽广(右列)的认知空间位置可以分别由位置细胞(顶行)和网格细胞(底行)编码。示意图展示了四种不同细胞的放电场。更高级别的信息(例如关于跑车概念)可以归因于更低级别的刺激(黑色十字)。(D)顺序活动模拟了认知空间中的不同位置(从 1 到 3), 在决定购买哪种汽车时, 允许沿轨迹评估不同的汽车类型。”

关于第三小节中关于神经机制的叙述, 我们在本轮修改中在论文的整体结构上将相关的神经机制的研究内容融合进文章中与之相关的部分当中, 不再将其作为单独一小节呈现以保证文章内容的流畅性。

#### 参考文献:

李丹, 杨昭宁.(2015). 空间导航: 路标信息和路径整合的关系. *心理科学进展*, 23(10), 1755-1762.  
 郑丽, 王玲, 杨佳佳 & 郑晨光.(2023). 阿尔茨海默病转基因动物认知地图损伤的细胞-网络机制. *生理学报*. 1-23.



- Anastasiou, C., Baumann, O., & Yamamoto, N. (2023). Does path integration contribute to human navigation in large-scale space?. *Psychonomic Bulletin & Review*, *30*(3), 822-842.
- Baraduc, P., Duhamel, J. R., & Wirth, S. (2019). Schema cells in the macaque hippocampus. *Science*, *363*(6427), 635-639.
- Beuth, F. (2019). *Visual attention in primates and for machines-neuronal mechanisms* (Doctoral dissertation, Dissertation, Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Germany).
- Bergelt, J., & Hamker, F. H. (2019). Spatial updating of attention across eye movements: A neuro-computational approach. *Journal of Vision*, *19*(7), 10-10.
- Bellmund, J. L., Gärdenfors, P., Moser, E. I., & Doeller, C. F. (2018). Navigating cognition: Spatial codes for human thinking. *Science*, *362*(6415), eaat6766.
- Bicanski, A., & Burgess, N. (2018). A neural-level model of spatial memory and imagery. *elife*, *7*, e33752.
- Bicanski, A., & Burgess, N. (2020). Neuronal vector coding in spatial cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, *21*(9), 453-470.
- Brunec, I. K., Javadi, A.-H., Zisch, F. E. L., & Spiers, H. J. (2017). Contracted time and expanded space: The impact of circumnavigation on judgements of space and time. *Cognition*, *166*, 425-432.
- Brunec, I. K., Moscovitch, M., & Barense, M. D. (2018). Boundaries Shape Cognitive Representations of Spaces and Events. *Trends in cognitive sciences*, *22*(7), 637-650.
- Bulkin, D. A., Sinclair, D. G., Law, L. M., & Smith, D. M. (2020). Hippocampal state transitions at the boundaries between trial epochs. *Hippocampus*, *30*(6), 582-595.
- Burkhardt, M., Bergelt, J., Gönner, L., Dinkelbach, H. Ü., Beuth, F., Schwarz, A., ... & Hamker, F. H. (2023). A large-scale neurocomputational model of spatial cognition integrating memory with vision. *Neural Networks*, *167*, 473-488.
- Buckner, R. L. (2010). The role of the hippocampus in prediction and imagination. *Annual review of psychology*, *61*(1), 27-48.
- Bonasia, K., Blommestejn, J., & Moscovitch, M. (2016). Memory and navigation: Compression of space varies with route length and turns. *Hippocampus*, *26*(1), 9-12.
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2014). From cognitive maps to cognitive graphs. *PLoS ONE*, *9*(11), e112544.
- Credé, S., Thrash, T., Hölscher, C., & Fabrikant, S. I. (2020). The advantage of globally visible landmarks for spatial learning. *Journal of Environmental Psychology*, *67*, 101369.
- Doeller, C. F., Barry, C., & Burgess, N. (2010). Evidence for grid cells in a human memory network. *Nature*, *463*(7281), 657-661.
- Ekstrom, A. D., & Ranganath, C. (2018). Space, time, and episodic memory: The hippocampus is all over the cognitive map. *Hippocampus*, *28*(9), 680-687.
- Hao, X., Yuan, Z., Lin, S., Kong, X., Song, Y., & Liu, J. (2022). Different behavioral and learning effects between using boundary and landmark cues during spatial navigation. *Current Psychology*, *42*(27), 23301-23312.
- Howard, L. R., Javadi, A. H., Yu, Y., Mill, R. D., Morrison, L. C., Knight, R., ... & Spiers, H. J. (2014). The hippocampus and entorhinal cortex encode the path and Euclidean distances to goals during navigation. *Current Biology*, *24*(12), 1331-1340.
- Ishikawa, T., & Nakamura, U. (2012). Landmark selection in the environment: Relationships with object

- characteristics and sense of direction. *Spatial Cognition & Computation*, 12(1), 1-22.
- Jacobs, J., Weidemann, C. T., Miller, J. F., Solway, A., Burke, J. F., Wei, X. X., ... & Kahana, M. J. (2013). Direct recordings of grid-like neuronal activity in human spatial navigation. *Nature neuroscience*, 16(9), 1188-1190.
- Lanini-Maggi, S., Ruginski, I., & Fabrikant, S. I. (2021). Improving pedestrians' spatial learning during landmark-based navigation with auditory emotional cues and narrative. *UC Santa Barbara: Center for Spatial Studies*.
- Gardenfors, P. (2004). *Conceptual spaces: The geometry of thought*. MIT press
- Gao, B., Chen, Z., Chen, X., Tu, H., & Huang, F. (2021). The effects of audiovisual landmarks on spatial learning and recalling for image browsing interface in virtual environments. *Journal of Systems Architecture*, 117, 102096.
- Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M. B., & Moser, E. I. (2005). Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, 436(7052), 801-806.
- Stensola, H., Stensola, T., Solstad, T., Frøland, K., Moser, M. B., & Moser, E. I. (2012). The entorhinal grid map is discretized. *Nature*, 492(7427), 72-78.
- Teghil, A., Boccia, M., Bonavita, A., & Guariglia, C. (2019). Temporal features of spatial knowledge: Representing order and duration of topographical information. *Behavioural Brain Research*, 376, 112218.
- Trettel, S. G., Trimper, J. B., Hwaun, E., Fiete, I. R., & Colgin, L. L. (2019). Grid cell co-activity patterns during sleep reflect spatial overlap of grid fields during active behaviors. *Nature neuroscience*, 22(4), 609-617.
- Jabbari, Y., Kenney, D. M., von Mohrenschildt, M., & Shedden, J. M. (2021). Vestibular cues improve landmark-based route navigation: A simulated driving study. *Memory & Cognition*, 49(8), 1633-1644.
- Karim, A. M., Rumalla, K., King, L. A., & Hullar, T. E. (2018). The effect of spatial auditory landmarks on ambulation. *Gait & posture*, 60, 171-174.
- Maguire, E. A., & Mullally, S. L. (2013). The hippocampus: A manifesto for change. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(4), 1180-1189.
- Maidenbaum, S., Miller, J., Stein, J. M., & Jacobs, J. (2018). Grid-like hexadirectional modulation of human entorhinal theta oscillations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(42), 10798-10803.
- Meilinger, T., Strickrodt, M., & Bühlhoff, H. H. (2018, September). *Spatial survey estimation is incremental and relies on directed memory structures*. Paper presented at the meeting of Spatial Cognition XI: 11th International Conference, Spatial Cognition 2018, Proceedings 11 (pp. 27-42), Tübingen, Germany.
- Meilinger, T., Riecke, B. E., & Bulthoff, H. H. (2014). Local and global reference frames for environmental spaces. *Quarterly journal of experimental psychology*, 67(3), 542-569.
- Nardi, D., Carpenter, S. E., Johnson, S. R., Gilliland, G. A., Melo, V. L., Pugliese, R., ... & Kelly, D. M. (2022). Spatial reorientation with a geometric array of auditory cues. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 75(2), 362-373.
- Nuhn, E., & Timpf, S. (2018). An Overall Framework for Personalised Landmark Selection. In: Kiefer, P., Huang, H., Van de Weghe, N., Raubal, M. (eds) *Progress in Location Based Services 2018*. LBS 2018. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Cham.
- Peer, M., Brunec, I. K., Newcombe, N. S., & Epstein, R. A. (2021). Structuring Knowledge with Cognitive Maps

- and Cognitive Graphs. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(1), 37-54.
- Park, S. A., Miller, D. S., Nili, H., Ranganath, C., & Boorman, E. D. (2020). Map making: constructing, combining, and inferring on abstract cognitive maps. *Neuron*, 107(6), 1226-1238.
- Priestley, J. B., Bowler, J. C., Rolotti, S. V., Fusi, S., & Losonczy, A. (2022). Article Signatures of rapid plasticity in hippocampal CA1 representations during novel experiences. *Neuron*, 110(12), 1978-1992.
- Renault, A. G., Auvray, M., Parseihian, G., Miall, R. C., Cole, J., & Sarlegna, F. R. (2018). Does Proprioception Influence Human Spatial Cognition? A Study on Individuals With Massive Deafferentation. *Frontiers in Psychology*, 9, 1322.
- Sun, C., Yang, W., Martin, J., & Tonegawa, S. (2020). Hippocampal neurons represent events as transferable units of experience. *Nature neuroscience*, 23(5), 651-663.
- Sheldon, S., & El-Asmar, N. (2017). The cognitive tools that support mentally constructing event and scene representations. *Memory*, 26(6), 858-868.
- Wang, L., Mou, W., & Sun, X. (2014). Development of landmark knowledge at decision points. *Spatial Cognition & Computation*, 14(1), 1-17.
- Wang, R. F. (2016). Building a cognitive map by assembling multiple path integration systems. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(3), 692-702.
- Warren, W. H. (2019). Non-euclidean navigation. *Journal of Experimental Biology*, 222(Suppl\_1), jeb187971.
- Wang, C. H., Monaco, J. D., & Knierim, J. J. (2020). Hippocampal place cells encode local surface-texture boundaries. *Current Biology*, 30(8), 1397-1409.
- Wunderlich, A., Grieger, S., & Gramann, K. (2023). Landmark information included in turn-by-turn instructions induce incidental acquisition of lasting route knowledge. *Spatial Cognition & Computation*, 23(1), 31-56.
- Wolbers, T., & Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14(3), 138-146.
- Yesiltepe, D., Dalton, R., Ayse O., Dalton, N., Noble, S., Hornberger, M., Coutrot, A. and Spiers, H. (2019, July). *Usage of Landmarks in Virtual Environments for Wayfinding: Research on the influence of global landmarks*. Paper presented at the meeting of 12SSS - 12th International Space Syntax Symposium, Beijing, China.
- Yesiltepe, D., Conroy Dalton, R., & Ozbil Torun, A. (2021). Landmarks in wayfinding: a review of the existing literature. *Cognitive processing*, 22(3), 369-410.

意见 4: (4) 在视觉受限环境导航中认知地图的加工机制部分。第一节作者对导航过程所需要的多感官整合的阐述仍然偏于罗列, 需要凝练语言进一步总结。第二节中最后一部分似乎是将“地面环境导航”作为“视觉受限环境”的反面例子, 建议进一步考虑这样的叙述是否合理。第三节的认知地图的功能的阐述内容似乎和加工机制的关系并不密切, 建议调整位置。本部分的内容与第二部分的关联性较差。

回应 4: 感谢审稿人的意见。

首先, 我们对第三部分“认知地图在视觉受限环境导航中的加工机制”内容进行了调整,

更深入地阐述了个体在基于认知地图的导航过程中,认知地图的更新与校正阶段的认知加工,这一部分的三节内容均是对这一问题的详细叙述。另外,本研究认为,认知地图的预览性功能主要体现在个体从认知地图中抽取空间心智模型这一部分,因此,我们将认知地图的功能部分不再作为单独一部分阐述,而是将相关内容在“3.1 空间心智模型”中一同阐述,修改内容如下,位于正文 p9-16:

### “3 认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工机制

视觉线索受限环境中,因视觉线索的模糊或缺失和视野狭窄削弱了个体的导航效能,降低了导航信心。此时,认知地图以构建和更新与加工的两阶段动态加工形式支持个体规划路线并实现了导航的预览功能。构建阶段中,个体通过多感官通道获取构成要素并整合为认知地图。更新与校正阶段中,个体结合环境特征和导航目的从认知地图中抽象出相应的空间心智模型并基于表象进行推理和决策以规划路线,通过多感官整合实现空间定向,同时结合环境信息更新和校正认知地图以支持视觉线索受限环境导航,元认知参与其中。

#### 3.1 空间心智模型

在视觉线索丰富的环境中,个体能够依靠即时捕捉的视觉信息来指引方向。然而,在视觉线索受限的情境里,导航便需借助先前的环境认知和初步的策略规划,空间心智模型(spatial mental model)为这一认知过程提供支持。该模型不仅映射环境结构,还融入了导航潜在风险评估以及导航者的个性偏好与经验,其灵活性和动态性能够有效辅助个体的空间决策(Perelman et al., 2017)。在基于视觉线索的导航中,人们可以快速利用视觉信息作出反应因此空间心智模型并非不可或缺,但当视觉信息有限或缺失时,视觉线索的匮乏便会降低个体的导航自信,而从认知地图中抽象出的空间心智模型能够帮助个体掌控导航进程。在这种情境下,认知地图也展现了其在视觉线索受限环境中的独特优势,通过预览功能帮助个体验证路线的正确性,并在实际导航中提升信心(Hersh, 2020)。

在探讨认知地图的表征形式时,都有充分的证据支持欧氏空间表征和认知图谱表征。结合个体认知加工过程,两种表征形式可能同时存在。个体探索新环境后形成的认知地图旨在帮助个体了解环境全貌,其中包含的环境信息越客观准确越好。研究表明,人们在自由探索空间环境形成认知地图的过程中会选择相互具有连接性的路线,并且会回访已走过的路线来确认环境中各路线间的关系以保证认知地图准确性(Brunec et al., 2023)。这一阶段认知地图的表征形式因侧重于对物理空间的精确描述更贴近欧氏空间的表征,包括对距离和方向的准确反映。Widloski 和 Fiete(2014)提出的网格细胞发展模型将网格细胞网络的发展分为可塑性阶段和活动阶段,可塑性阶段中刺激通过个体对周围环境探索时对远端线索和近端线索的整合输入位置信息,这一阶段的网格细胞为大脑提供了关于环境的位置和距离信息。在基于认知地图的导航中,个体首先从认知地图中提取相关的空间心智模型,完整且有效的空间心智模型不仅包含个体形成对各类环境要素的欧氏空间表征,还包括认知要素。而要完全整合环境要素与认知要素需消耗极大认知资源。鉴于个体认知资源的有限性,空间心智模型的表征可能倾向于采用图式或认知图谱的形式,个体依靠表象构建环境中的节点与链接并将认知要素的相关抽象概念纳入空间心智模型,认知空间可能是支持空间心智模型表征的认知神经基

础。值得注意的是，这里提到的空间心智模型的认知图谱式的表征与欧氏地图的认知地图并不独立存在，而是个体在认知地图的基础上形成的空间心智模型。

个体在空间心智模型中的加工以基于记忆和表象的抽象推理为主，通过模型中空间信息的推理制定针对未来导航的路线规划。Park 等(2020)的研究也将海马(hippocampus, HC)和内嗅皮层(entorhinal cortex, EC)在空间表征中的作用扩展至推理抽象空间信息中。首先，HC 和 EC 对空间导航、定位和情景记忆中的作用已较为明确(Ekstrom & Ranganath, 2018)。其次，在眶额皮层(orbitofrontal cortex, OFC)的研究中发现，OFC 代表一个人在认知地图中的任务空间位置而非物理空间位置，并且海马和 OFC 都参与了基于模型的推理，使原本独立的刺激可以相互关联。由此，HC-EC 系统对传递性推理尤为重要。Park 等(2020)对比了空间环境认知地图和抽象社会结构认知地图的神经活动后认为大脑会使用相同的神经系统来表征连续空间以编码抽象空间中离散客体之间的关系并进行推理。个体能够通过心智模型反映动态系统的时间关系来描述推理过程(van Ments & Treur, 2021)，同理，个体也能够通过空间心智模型模拟空间导航以达到合理规划路线的目的。由于空间心智模型中的信息以抽象信息为主并涉及到推理，个体感知到的风险或主观经验都会对空间心智模型产生影响。因此，抽象出的空间心智模型存在较大个体差异，这也能够解释个体在视觉线索受限环境中的导航绩效表现出的个体差异。

基于表象的形成过程、空间导航的复杂性以及日常导航经验，我们将语言这一因素纳入其中。计算机领域的概念可被用以说明语言在视觉线索受限环境导航中的作用。在计算机领域，研究者通常将导航看作视觉与语言导航(Vision-and-Language Navigation, VLN)，该过程要求代理理解自然语言指令、感知视觉世界，并执行导航操作以到达目标位置。这种任务的挑战在于，代理需要不断接收新的视觉观测信息，并将其与指令进行对齐(Chen et al., 2021)。Chen 等(2022)提出的机器学习模型，将导航过程分为两个模块，第一个模块是以视觉信息为基础并随时间更新的拓扑映射模块，第二个模块为全局动作规划模块，利用图形转换器捕捉跨模态的视觉与语言关联，从而引入与图形相关的拓扑知识以增强图形编码。据此推断，在视觉线索受限导航的环境中，个体同样会在其空间心智模型中借助语言信息来更新自身的位置感知并反映思维过程以进行逻辑推理，确保即使环境中视觉线索不足也能有效地进行空间导航。

### 3.2 视觉线索受限环境中的空间定向

从认知加工机制上看，个体在视觉线索受限环境中的空间定向主要依赖其他感官通道信息，例如听觉、触觉和本体觉等。听觉信息分为非言语信息与言语信息，两者在空间导航中提供的信息有所不同。非言语信息指能够辅助个体完成空间导航的无语义的声音刺激，帮助盲人判断路线距离、分辨目标物间的位置方向并识别环境整体布局(Ottink et al., 2022a)。此外，个体还能利用听觉对环境的几何特征进行编码以实现空间重定向(Nardi et al., 2022)。言语信息因内含语义信息从而使个体对言语信息的加工更为复杂。一方面，有研究认为言语信息可能会干扰空间记忆(Antony & Bennion, 2023)；另一方面，也有研究指出言语信息能够提供具体的空间信息，如以明确空间边界或关键路标等方式帮助个体形成空间表征(Peacock & Ekstrom, 2019; Santoro et al., 2020)。

对触觉的相关研究发现，当被试被限制了视觉、前庭觉及本体信息后，正常被试蒙眼时的导航任务绩效优于盲人(Ottink et al., 2022b)。相较于语音线索，盲人利用触觉地图形成的认知地图效果更好(Brayda et al., 2019; Ottink et al., 2022b)。但也有研究认为个体在跨通道处理触觉信息时，会分散个体注意力从而对导航造成干扰。例如，触觉振动会干扰短时记忆，并影响个体的语言序列回忆(Marsh et al., 2023)。

在黑暗环境中，个体依赖前庭觉估计自身运动速度，并结合时间感知更新位移距离(Kaski et al., 2016)。然而，在缺少环境线索的情况下，定向知识有限，空间定向较为困难。例如飞行员在高空缺少视觉信息。同时，在惯性力的作用下前庭觉、本体觉等感知觉难以提供准确信息，容易导致空间定向错误(游旭群, 2017)。

由此可见，仅利用单一的通道信息并不足以支持个体判断空间方向，个体还会进行多感官整合综合加工各感官通道信息。该过程中，个体通过前庭觉获取自身运动信息并感知方向(Cornell & Bourassa, 2007; Liu et al., 2023)；听觉获取与“远近”相关的空间感知并提供事件与环境信息或估计距离以帮助个体实现空间定向(Kolarik et al., 2016)；嗅觉提供特定环境或人的额外信息(Raithel & Gottfried, 2021)。人类大脑会整合多感官信息，此过程中不断获取、挑选和加工新的信息构建和完善认知地图(Medendorp & Selen, 2017)。个体的视觉、听觉和躯体感觉皮层能够接受来自各个通道的刺激信息并投射到高级联合皮质进行多感官整合(Meijer et al., 2017)。一般来说，视觉在多感官整合中占主导地位，视觉皮层的神经元会对听觉刺激直接做出反应(Meijer et al., 2017)，压后皮质(retrosplenial cortex, 顶叶 29 区、30 区)从视觉皮层接收到的信号比其他感觉皮层更强，与其他处理空间信息的脑区形成重要的神经网络(Zingg et al., 2014)。而在视觉线索受限环境导航中，初级视觉皮层能够对前庭神经刺激做出反应，光线也会影响初级视觉皮层的神经活动(Keshavarzi et al., 2023)，多感官整合能够增强神经对弱刺激的反应，并通过注意的选择性将有效信息整合在认知地图加工中(Grillini et al., 2019)。这可能是视觉线索受限环境中多感官整合的主要生理基础。

观察者模型(observer models)对飞行员的空间定向做出了系统解释，该模型认为个体会比较预期和实际的感官反应来调整运动状态估计。模型包含三个部分，内部模型是大脑内部假设的动态系统模型，用于预测感官输入；感官输入系统用于感知来自前庭系统（如半规管和耳石器官）的加速度和角速度信息、视觉和体感信息；最后比较预期反应与实际反应，将内部模型预测的感官输入与实际测量的感官输入比较后得到误差信号(Williams et al., 2021)。Voros 等(2024)在基于观察者模型的基础上加入了变化的视觉信息，提出了增强型定向感知模型以更全面地解释前庭和视觉信息在自我运动感知中的作用。该模型提出当视觉信息可用时，自我运动感知维持在一直有视觉信息时的状态，时间过程约为 10 秒。当视觉信息被移除时，感知到动态变化大约需要 30 秒。在此基础上，增强定向感知模型添加了低通滤波器以捕捉视觉信息可用性突然变化后的自我运动感知状态以解释在没有视觉信息时个体反应的变异性。两种模型均从飞行员高空飞行的角度解释了个体的空间定向机制。

空间迷失(spatial disorientation)是空间定向研究领域中的一个长期困扰研究者的难题。Knierim 和 Hamilton(2011)认为个体空间迷失的根本原因可能是认知地图的失效（例如在没有墙壁等空间边界的黑暗环境)或未能使用视觉路标更新个体的位置和方向。迷失效应表明，方向感的丧失会导致个体在所有物体的绝对定位准确性和不同物体间的相对定位准确性上均有所下降，但对房间角落等空间边界的影响较小。换言之，房间内物体的空间排列取决于

短暂的空间表征，而房间的几何形状则取决于持久的空间表征(Wang & Spelke, 2000)。空间迷失可能与个体对环境表征的参考框架相关。研究者认为盲人与常人之间定位准确性的差异可能与个体是否能够有效使用心理想象策略和灵活转换参考框架有关(Santoro et al., 2020)。当个体采用客体中心参考框架时，环境中各种要素较稳定地存在与认知地图中，而个体使用自我中心的参考框架时需要心理旋转能力的参与，使其易受到主观因素影响的同时承担了更高的认知负荷(Macauda et al., 2019)。

### 3.3 元认知在视觉线索受限环境导航中的作用

空间心智模型的构建以及空间定向过程均要求个体在认知层面进行深入加工。尤其当个体面临空天海等视觉线索受限环境中时，一般导航经验难以直接应用，这无疑会对个体的导航信心产生负面影响。在这种特定情境下，元认知的作用尤为重要。元认知(meta-cognition)是反思和调节认知过程的能力，被视为提高个体学习能力的关键因素，它包含了一系列认知策略和自我调节机制。元认知包括监控和控制，元认知监控指个体对自己认知能力的评估和学习效果的认识，而元认知控制则涉及采取具体行动以调整认知状态和学习进程。例如，若个体意识到自己未能全面记住环境的表征(监控)时可能会选择重新学习环境(控制)。Mason等(2022)虽已指出元认知在路线学习中的重要性，但未详细阐述其具体作用机制。本研究深入探讨认知地图在这一过程中的作用，并提出在个体构建的空间心智模型中同样存在着元认知监控的机制。如前所述，空间心智模型不仅包括对空间结构的认识，也包含了对环境结构以及各路标抽象概念的认识，个体也通过空间心智模型实现认知地图在视觉线索受限环境中独特的预览功能。个体在利用空间心智模型对空间导航过程进行推理和判断时涉及到助记线索(mnemonic cues)。助记线索指个体的主观体验，包括处理或检索信息的难易程度(Koriat, 1997)和对位置的不确定性(Keller et al., 2020)。例如，个体在返回起点时感到不确定就是一种助记线索。这种在空间导航时的主观体验可能在元认知监控支持空间心智模型中发挥作用。

在空间定向的相关研究中，空间迷失往往伴随着丰富的主观体验。在 Fernández Velasco 和 Casati(2022)建立的与空间迷失相关的语料库揭示了个体处于迷失状态时会伴随焦虑、无助、困惑、孤立无援和孤独感等情绪体验。而个体产生迷失往往源于其定向过程中的认知缺陷，为脱离迷失状态个体会采取各种行为来解决认知缺陷，此时，由元认知所监控的空间迷失具有评价和调节功能。因此，Fernández Velasco 和 Casati(2022)将空间迷失也看作元认知过程的一部分以解释迷失引发的情绪体验以及迷失体现出的评价和调节功能。综上，结合个体在视觉线索受限环境中所提取的空间心智模型也具备预览和调节功能，我们提出，相较于一般导航情境，元认知在视觉线索受限环境导航中参与程度更深。

### 3.4 认知地图在视觉线索受限环境中的更新与校正

在空间导航的初始阶段，认知地图由静态离线表征转换为动态在线表征(Eilam, 2014)。此时，认知地图及其衍生的空间心智模型随个体的移动而不断发生变化。个体在该过程中必须持续更新和校正环境信息，确保导航的准确性。Borodaeva 等(2023)发现空间中个体对路标和空间边界等环境线索的综合加工有助于空间更新，而丰富的空间背景能够促进这一更新过程。当人们的身体方向改变超过 90°，前庭线索提供的自我运动信息支持空间更新

(Gramann et al., 2021)。换言之，认知地图中的各个要素首先为空间导航的更新提供基础支持。个体对要素的认知加工涉及根据导航目标选择恰当的空间更新策略，判断并筛选有效的环境线索以完善认知地图，这一过程可能在空间心智模型内完成。空间更新策略可分为连续更新和构型更新，连续更新以自身为中心，构型更新以环境为中心。构型更新计算自身在认知地图中的位置和环境朝向，使导航的精准度更高(Wiener et al., 2011; Navratilova & McNaughton, 2014)。研究发现，使用连续更新策略的个体在空间表征中也偏好形成自我中心的表征形式，但这一偏好会随着环境尺度的增加而发生变化。当个体处于城镇等空间尺度较大的环境中，他们更倾向于使用构型更新和客体中心的表征形式，并在此过程中表现出指北倾向(Zhong & Kozhevnikov, 2016; Frankenstein et al., 2012)，这意味着个体的认知地图会根据环境特征和认知加工特征灵活调整。随着个体对环境探索的不断深入，他们会持续将新的环境线索纳入认知地图当中。当个体需要去往不同的地点时，则会根据当前位置信息和环境信息从已有认知地图中抽取相对应的空间心智模型以规划接下来的导航路线。因此，在整个更新的过程中，空间心智模型展现出一定的暂时性。一般来说，个体的空间更新机制在存在丰富视觉线索的环境中自动发生(Meyerhoff et al. 2011)，而在视觉线索受限环境的导航中，个体能够通过听觉的感官替代来模仿视觉场景的空间更新(Pasqualotto & Esenkaya, 2016)，但可能无法实现自动更新。空间更新过程中的一个主要挑战是选择性注意问题。由于缺乏直观的视觉刺激，环境中噪声很难被分辨，导航者难以确定重要导航目标，使导航效率大大降低，因此，在视觉线索受限的环境中，从认知地图中提取的空间心智模型在导航中发挥着独特的作用，尽管导航效率可能较低，但能够保证个体空间导航的准确率。

一般环境导航中环境线索的整合与冲突发生在认知地图校正阶段。个体根据目标将环境线索与已有认知地图进行比对，由自上而下的注意编码将注意力分配给特定空间区域。线索一致时进行线索整合，巩固认知地图的参数细节。若线索不一致则出现线索冲突，个体需要校正认知地图的错误信息。视觉线索受限环境中空间信息的校正更多依赖个体跨通道的空间认知能力，在该过程中需要将来自不同感觉通道的信息重建为心理表征，再判断各种信息的有效性。最终在已有认知地图基础上补充整合，以符合真实环境。



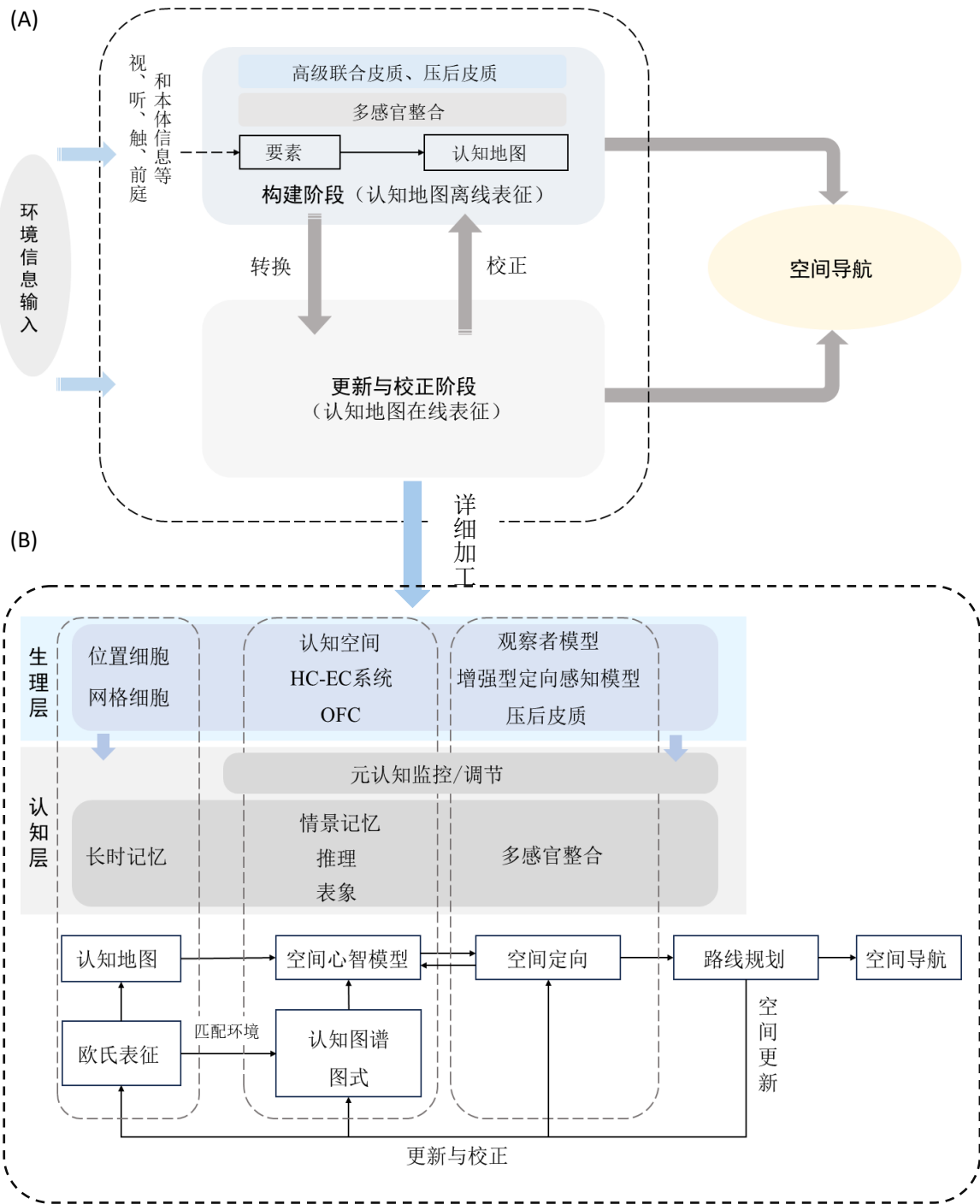


图4 认知地图在视觉线索受限环境中的认知加工机制示意图。(A)认知地图的两阶段加工论。(B)认知地图在更新与校正阶段中的认知加工过程。”

参考文献:

游旭群. (2017). 飞行空间定向. 见 游旭群(编), *航空心理学——理论、实践与应用*(pp.20-61). 浙江: 浙江教育出版社.

Antony, J. W., & Bennion, K. A. (2023). Semantic Associates Create Retroactive Interference on an Independent Spatial Memory Task. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 49(5), 701-713.

Brunec, I. K., Nantais, M. M., Sutton, J. E., Epstein, R. A., & Newcombe, N. S. (2023). Exploration patterns shape

- cognitive map learning. *Cognition*, 233, 105360.
- Brayda, L., Leo, F., Baccelliere, C., Vigni, C., & Cocchi, E. (2019, October). *A Refreshable Tactile Display Effectively Supports Cognitive Mapping Followed by Orientation and Mobility Tasks: A Comparative Multi-modal Study Involving Blind and Low-vision Participants*. Paper presented at the meeting of Proceedings of the 2nd Workshop on Multimedia for Accessible Human Computer Interfaces (pp. 9-15), New York, NY.
- Borodaeva, Z., Winkler, S., Brade, J., Klimant, P., & Jahn, G. (2023). Spatial updating in virtual reality for reproducing object locations in vista space-Boundaries, landmarks, and idiothetic cues. *Frontiers in Psychology*, 14, 1144861.
- Chen, S., Guhur, P. L., Schmid, C., & Laptev, I. (2021). History aware multimodal transformer for vision-and-language navigation. *Advances in neural information processing systems*, 34, 5834-5847.
- Chen, S., Guhur, P. L., Tapaswi, M., Schmid, C., & Laptev, I. (2022). Think global, act local: Dual-scale graph transformer for vision-and-language navigation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 16537-16547).
- Cornell, E. H., & Bourassa, C. M. (2007). Human non-visual discrimination of gradual turning is poor. *Psychological Research*, 71(3), 314-321.
- Ekstrom, A. D., & Ranganath, C. (2018). Space, time, and episodic memory: The hippocampus is all over the cognitive map. *Hippocampus*, 28(9), 680-687.
- Fernández Velasco, P., & Casati, R. (2020). Subjective disorientation as a metacognitive feeling. *Spatial cognition & computation*, 20(4), 281-305.
- Frankenstein, J., Mohler, B. J., Bühlhoff, H. H., & Meilinger, T. (2012). Is the map in our head oriented north?. *Psychological science*, 23(2), 120-125.
- Gramann, K., Hohlefeld, F. U., Gehrke, L., & Klug, M. (2021). Human cortical dynamics during full-body heading changes. *Scientific Reports*, 11(1), 18186.
- Ottink, L., Buimer, H., van Raalte, B., Doeller, C. F., van der Geest, T. M., & van Wezel, R. J. A. (2022a). Cognitive map formation supported by auditory, haptic, and multimodal information in persons with blindness. *Neuroscience & Biobehavioral Review*, 140, 104797.
- Ottink, L., van Raalte, B., Doeller, C. F., Van der Geest, T. M., & Van Wezel, R. J. A. (2022b). Cognitive map formation through tactile map navigation in visually impaired and sighted persons. *Scientific Reports*, 12(1), 11567.
- Park, S. A., Miller, D. S., Nili, H., Ranganath, C., & Boorman, E. D. (2020). Map making: constructing, combining, and inferring on abstract cognitive maps. *Neuron*, 107(6), 1226-1238.
- Pasqualotto, A., & Esenkaya, T. (2016). Sensory substitution: the spatial updating of auditory scenes “Mimics” the spatial updating of visual scenes. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 10, 79.
- Peacock, C. E., & Ekstrom, A. D. (2019). Verbal cues flexibly transform spatial representations in human memory. *Memory*, 27(4), 465-479.
- Perelman, B. S., Evans III, A. W., & Schaefer, K. E. (2017, September). Mental model consensus and shifts during navigation system-assisted route planning. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 61, No. 1, pp. 1183-1187). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

- Raithel, C. U., & Gottfried, J. A. (2021). Using your nose to find your way: Ethological comparisons between human and non-human species. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *128*, 766-779.
- Santoro, I., Murgia, M., Sors, F., & Agostini, T. (2020). The Influence of the Encoding Modality on Spatial Navigation for Sighted and Late-Blind People. *Multisensory Research*, *33*(4-5), 505-520.
- Santoro, I., Murgia, M., Sors, F., & Agostini, T. (2020). The Influence of the Encoding Modality on Spatial Navigation for Sighted and Late-Blind People. *Multisensory Research*, *33*(4-5), 505-520.
- Grillini, A., Renken, R. J., & Cornelissen, F. W. (2019). Attentional Modulation of Visual Spatial Integration: Psychophysical Evidence Supported by Population Coding Modeling. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *31*(9), 1329-1342.
- Hersh, M. (2020). Mental maps and the use of sensory information by blind and partially sighted people. *ACM Transactions on Accessible Computing*, *13*(2), 1-32.
- Kaski, D., Quadir, S., Nigmatullina, Y., Malhotra, P. A., Bronstein, A. M., & Seemungal, B. M. (2016). Temporoparietal encoding of space and time during vestibular-guided orientation. *Brain*, *139*(2), 392-403.
- Keshavarzi, S., Velez-Fort, M., & Margrie, T. W. (2023). Cortical Integration of Vestibular and Visual Cues for Navigation, Visual Processing, and Perception. *Annual Review of Neuroscience*, *46*, 301-320.
- Keller, A. M., Taylor, H. A., & Brunyé, T. T. (2020). Uncertainty promotes information-seeking actions, but what information?. *Cognitive Research: Principles and Implications*, *5*(1), 42.
- Knierim, J. J., & Hamilton, D. A. (2011). Framing spatial cognition: neural representations of proximal and distal frames of reference and their roles in navigation. *Physiological reviews*, *91*(4), 1245-1279.
- Koriat, A. (1997). Monitoring one's own knowledge during study: A cue-utilization approach to judgments of learning. *Journal of experimental psychology: General*, *126*(4), 349.
- Marsh, J. E., Vachon, F., Sörqvist, P., Marsja, E., Röer, J., Richardson, B. H., & Ljungberg, J. K. (2023). Irrelevant changing-state vibrotactile stimuli disrupt verbal serial recall: implications for theories of interference in short-term memory. *Journal of Cognitive Psychology*, *36*(1), 78-100.
- Macauda, G., Moisa, M., Mast, F. W., Ruff, C. C., Michels, L., & Lenggenhager, B. (2019). Shared neural mechanisms between imagined and perceived egocentric motion - A combined GVS and fMRI study. *Cortex*, *119*, 20-32.
- Mason, L. A., Thomas, A. K., & Taylor, H. A. (2022). On the proposed role of metacognition in environment learning: recommendations for research. *Cognitive Research: Principles and Implications*, *7*(1), 104.
- Meyerhoff, H. S., Huff, M., Papenmeier, F., Jahn, G., & Schwan, S. (2011). Continuous visual cues trigger automatic spatial target updating in dynamic scenes. *Cognition*, *121*(1), 73-82.
- Medendorp, W. P., & Selen, L. J. P. (2017). Vestibular contributions to high-level sensorimotor functions. *Neuropsychologia*, *105*, 144-152.
- Meijer, G. T., Montijn, J. S., Pennartz, C. M. A., & Lansink, C. S. (2017). Audiovisual Modulation in Mouse Primary Visual Cortex Depends on Cross-Modal Stimulus Configuration and Congruency. *Journal of Neuroscience*, *37*(36), 8783-8796.
- Nardi, D., Carpenter, S. E., Johnson, S. R., Gilliland, G. A., Melo, V. L., Pugliese, R., ... & Kelly, D. M. (2022). Spatial reorientation with a geometric array of auditory cues. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *75*(2), 362-373.

- Navratilova, Z., & Mcaughton, B. L. (2014). Models of Path Integration in the Hippocampal Complex. In: Derdikman, D., Knierim, J. (eds) *Space, Time and Memory in the Hippocampal Formation*. Springer, Vienna.
- van Ments, L., & Treur, J. (2021). Reflections on dynamics, adaptation and control: a cognitive architecture for mental models. *Cognitive Systems Research*, 70, 1-9.
- Voros, J., Kravets, V., Smith, K., & Clark, T. K. (2024). Humans gradually integrate sudden gain or loss of visual information into spatial orientation perception. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1274949.
- Wang, R. F., & Spelke, E. S. (2000). Updating egocentric representations in human navigation. *Cognition*, 77(3), 215-250.
- Williams, H. P., Voros, J. L., Merfeld, D. M., Clark, T. K., & Naval Medical Research Unit Dayton University of Colorado Ohio State University. (2021). Extending the observer model for human orientation perception to include in-flight perceptual thresholds. *NAVAL MEDICAL RESEARCH UNIT DAYTON*.
- Wiener, J. M., Berthoz, A., & Wolbers, T. (2011). Dissociable cognitive mechanisms underlying human path integration. *Experimental Brain Research*, 208(1), 61-71.
- Widloski, J., & Fiete, I. R. (2014). A model of grid cell development through spatial exploration and spike time-dependent plasticity. *Neuron*, 83(2), 481-495.
- Zingg, B., Hintiryan, H., Gou, L., Song, M. Y., Bay, M., Bienkowski, M. S., . . . Dong, H. W. (2014). Neural Networks of the Mouse Neocortex. *Cell*, 156(5), 1096-1111.
- Zhong, J. Y., & Kozhevnikov, M. (2016). Relating allocentric and egocentric survey-based representations to the self-reported use of a navigation strategy of egocentric spatial updating. *Journal of Environmental Psychology*, 46, 154-175.

其次，关于第二节中将“地面环境导航”与“视觉线索受限环境导航”的反面例子这一点，本研究所提及的地面环境导航是指个体在一般环境中的导航，一般环境导航和视觉线索受限环境导航均存在于个体日常生活中，地面环境导航并不能作为视觉线索受限环境导航。为明晰这一点，我们根据审稿人的意见与视觉受限环境导航的定义，将以视觉为基础的导航称为“一般环境导航”，并在全文中修改了这一表述，并对相关内容作了修改，位于正文 p16:

“一般环境导航中环境线索的整合与冲突发生在认知地图校正阶段。个体根据目标将环境线索与已有认知地图进行比对，由自上而下的注意编码将注意力分配给特定空间区域。线索一致时进行线索整合，巩固认知地图的参数细节。若线索不一致则出现线索冲突，个体需要校正认知地图的错误信息。视觉线索受限环境中空间信息的校正更多依赖个体跨通道的空间认知能力，在该过程中需要将来自不同感觉通道的信息重建为心理表征，再判断各种信息的有效性。最终在已有认知地图基础上补充整合，以符合真实环境。”

**意见 5:** 展望部分。对于视觉受限环境的认知地图的动态加工机制的叙述不够具体，仅出现一张图片和一句话。后面展望中缺少一些对这一框架的作用，或者是否能够更好解释某些生理或者心里学现象的论述。最后一小节突然出现的 tDCS 并没有说明是什么。总之，该理论模型似乎是全文的重点，但缺乏其理论价值的阐明。

回应 5: 关于认知地图在视觉受限环境导航中的动态加工机制的内容, 我们在第三部分做了更为详细的阐述, 并将本文的重点落在个体基于认知地图的空间导航过程中的认知加工机制。基于对认知地图动态加工机制的叙述, 我们在展望部分则增加对这一框架的理论价值和实践意义的部分, 增加的内容如下, 位于正文 p16-17:

## “4 讨论与展望

### 4.1 认知地图动态加工机制的理论意义

本研究探讨了认知地图如何动态支持个体在视觉线索受限环境中的导航行为。首先, 个体在认知地图中提取空间心智模型的加工过程与方式明晰了认知地图的表征方式。认知地图如何表征一直是研究者试图厘清的内容, 虽也有研究者提出欧氏表征与认知图谱两种表征形式共存, 但并未阐明两种表征如何共存。本研究提出当个体需要进行以目标为导向的导航时, 会在基于欧氏表征的认知地图的基础上抽取出合适的空间心智模型对未来导航进行事先的路线规划, 而空间心智模型的表征形式即为认知图谱。这一观点明晰了两种表征形式间的关系。其次, 本研究在梳理已有相关研究后, 将推理、记忆、语言等高级加工过程共同纳入认知地图的动态加工机制之中, 更全面地阐述了个体在视觉线索受限环境导航中的认知加工过程, 也进一步厘清不同高级加工过程如何支持复杂的空间导航行为。最后, 本研究将动态视角引入认知地图在空间导航中的认知加工机制, 不再局限于将认知地图看作一张静态的大脑中的“地图”, 能够更好地探清个体空间导航行为的内在机制。另外, 提出的认知地图动态加工机制不仅适用于一般导航, 更是考虑了空天海等视觉线索受限环境, 也能够帮助研究者更好地理解人-环境交互中人的作用, 为以后更深入地探究个体在不同复杂环境中空间导航行为提供理论基础。

### 4.2 认知地图动态加工机制的实践意义

首先, 研究者能够从空间心智模型在认知地图的作用机制出发提升当前人与各种导航辅助软件的人机交互设计或人机协同导航中。例如, 在自动驾驶中对智能导航系统的设计中, 将表象的显示、情景记忆的线索提醒、元认知监控具象化等理念融入其中, 能够更好地提高个体的空间导航绩效。其次, 空间迷失一直以来都是空间导航领域的难题。尤其对于身处视觉线索受限环境中的个体来说, 一旦产生空间迷失很容易发展为空间定向障碍而造成严重后果。例如美国国家运输安全委员会在 2021 年公布的科比空难事故的调查结果显示, 造成空难的根本原因是飞行员违规飞入云层, 在迷雾中迷失方向出现了空间定向障碍。本研究提出个体在视觉线索受限环境中利用认知地图中的相关信息定向, 能够帮助个体通过针对性训练来提升个体空间定向的准确率。例如, 研究者可以通过加强对飞行人员元认知水平的训练, 提升个体在空间导航中的元认知水平, 并保持在空间导航过程中元认知情感的稳定。通过类似训练, 不仅能够提高个体的空间定向水平, 即使个体产生了空间迷失, 也能够保持稳定的情绪水平, 减少负面情绪对认知操作的影响。最后, 本研究中提出的认知地图的动态加工机制也能够帮助解决个体在视觉线索受限环境导航中的难点。例如, 在无人机飞行任务中, 当 GPS 导航信号中断或消失时, 无人机飞行员的操作能力就变得至关重要。而在这种环境下, 无人机飞行员并无法得到真实的环境线索, 只能够通过已有数据进行推理, 此时, 个体可根据认知地图中的空间心智模型对整体环境及无人机状态进行判断并做出决策, 甚至重新进行路线规划。”

参考文献:

Coutrot, A., Manley, E., Goodroe, S., Gahnstrom, C., Filomena, G., Yesiltepe, D., ... & Spiers, H. J. (2022). Entropy of city street networks linked to future spatial navigation ability. *Nature*, 604(7904), 104-110.

Martolini, C., Cappagli, G., Luparia, A., Signorini, S., & Gori, M. (2020). The Impact of Vision Loss on Allocentric Spatial Coding. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 565.

Mou, W., McNamara, T. P., Rump, B., & Xiao, C. (2006). Roles of egocentric and allocentric spatial representations in locomotion and reorientation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32(6), 1274.

Perelman, B. S., Evans III, A. W., & Schaefer, K. E. (2017, September). Mental model consensus and shifts during navigation system-assisted route planning. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 61, No. 1, pp. 1183-1187). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

意见 6: (6) 此外, 本文许多语言和逻辑还有待斟酌。固定概念的词语建议统一, 许多句子没有主语, 例如“为更好地理解认知地图在视觉受限环境中的加工机制, 从动态视角将认知地图的加工过程分为两阶段”和“本研究回顾了现有空间导航中认知地图和视觉线索相关的研究, 阐述在视觉受限环境导航中个体对认知地图的加工机制, 以动态视角构建个体的认知地图加工机制”等。还有些语句含义不明, 例如“无论是路径整合、空间更新的形成机制, 还是认知地图与导航行为关系的研究成果, 都促进了研究者对空间导航中认知地图加工机制的了解, 在实践中提升了空间导航行为绩效。”

回应 6: 感谢审稿人的意见。首先, 在本次修改中我们统一了全文中出现的名词, 将“视觉受限环境”。其次, 我们核对全文, 修改了全文的语言, 保证了每个句子的逻辑性和语句的通顺。

.....

审稿人 2 意见:

视觉受限环境中的认知地图形成机制是目前研究较少, 较新颖的研究主题, 应用场景较为广阔。该主题具有较强的吸引力, 但是本文并没有很好地对围绕这一主题进行深入地阐述, 尤其是全文前半部分主要讲述路标知识对认知地图形成的作用, 不利于文章中心的突出。还有一些具体的问题如下:

意见 1: 1) 图 1 描述的 Wolbers 和 Hegarty(2010)所提出空间导航加工模型, 对视觉受限环境的认知地图形成有哪些具体的启发和帮助呢? 该模型之后, 陆续有很多研究者提出进一步的认知地图形成的模型, 比如 Bicanski2020 的综述等, 这些可能对认知地图的形成机制阐述更有帮助。

回应 1: 感谢审稿人的意见。Wolbers 和 Hegarty(2010)所提出空间导航加工模型总结了个体

在空格导航过程中所涉及的环境线索以及个体空间认知能力,该模型启发我们从环境线索和个体认知能力的角度考虑认知地图的构成。同时,该模型提到空间导航过程中认知地图会由离线表征转为在线表征,这一观点启发我们从认知地图的动态加工机制考虑认知地图在视觉线索导航环境中的作用。我们在正文中增加了相关的叙述,增加的内容位于正文 p2:

“Wolbers 和 Hegarty(2010)提出的空间导航加工模型总结了个体在空间导航过程中涉及的环境空间线索和个体空间认知能力并提出了空间表征的离线和在线两种形式。基于该模型和个体在空间导航中涉及的环境特征和认知特点,研究总结了认知地图所包含的构成要素,并系统地梳理了认知地图中各要素的组织形式。”

正如专家所说,该模型之后还有许多认知地图形成相关的模型,我们在本次修改中加入了相关模型,新增内容如下,位于正文“2.2 认知地图要素组织形式”p2-9:

## “2.2 认知地图要素组织形式

认知地图通过反映对环境的完整表征支持空间导航,但这一表征往往存在认知扭曲。以欧式空间表征、认知图谱和 Spacecog 模型为代表的理论均提出了个体在认知地图中对环境要素的组织形式但认知地图也会包含与个体状态相关的认知要素,Bellmund 等(2018)提出的认知空间理论考虑了认知要素,构建了包含抽象概念的空间表征形式。

### 2.2.2 欧式空间表征和认知图谱

以路标学习和路径整合方式所构建的认知地图更符合包含了地理环境中方位和距离信息的欧氏空间表征形式以支持个体识别方向和寻找捷径。内嗅皮层和海马中的位置细胞(place cell)和网格细胞(grid cell)编码空间位置和方位信息,神经元相互协调构建空间记忆和导航所需要的神经回路形成大脑中的导航定位系统,在脑内创立关于环境的认知地图(郑丽等, 2023)。对导航过程中海马前部和内嗅皮层活动的监测也支持了这一观点,内嗅皮层支持欧氏距离编码,该区域中包含的网格细胞的多个放电场为空间表征提供了环境坐标系(Howard et al., 2014)。在 fMRI(Doeller et al., 2010)、单神经元活动(Jacobs et al., 2013)和颅内 theta 振荡(Maidenbaum et al., 2018)的研究中也发现了类似网格细胞支持空间表征欧氏度量的证据。然而人们对空间信息的组织方式可能会发生认知扭曲从而使空间表征在不完全符合欧氏表征的情况下仍能识别两路标间的空间位置关系,研究者将这种空间信息的表征形式称为认知图谱(cognitive graph)(Peer et al., 2021; Meilinger et al., 2018; Brunec et al., 2017; Chrastil & Warren, 2014)。在认知图谱中,部分路标空间位置标记为节点(node),节点间以链接(links)的形式组织,链接仅表示节点间导航所必须的动作序列和度量信息(Warren, 2019)。因此,认知图谱可看作转换导航状态的特定动作序列集合。海马中的位置细胞可以将空间和时间划分为不同的片段(Wang et al., 2020; Bulkin et al., 2020),按照经验的层次结构进行编码以表示环境要素之间的图式关系(Sun et al., 2020; Baraduc et al., 2019)。Bicanski 和 Burgess(2020)总结了海马相关研究提出了向量编码细胞在空间认知中的作用及其编码机制,提出多种类型的向量编码细胞(如边界向量细胞、对象向量细胞和地标向量细胞)在远离感觉外周的脑区中编码环境中的距离和方向信息。这些细胞通过相互连接和转换参考框架支持了自我定位、记忆和导航规划等空间认知功能。可见,对空间环境的表征形式可能存在一定结构性,底层结构以欧式表征表示空间度量信息,上层结构实现空间认知加工。

### 2.2.3 Spacecog 大尺度空间认知神经计算模型

Burkhardt 等(2023)提出了名为 Spacecog 的大尺度空间认知神经计算模型解释人类多个脑区间如何相互作用以通过空间记忆表征物体位置(图 2)。该模型整合了物体识别和物体探测的注意模型(Beuth, 2019), 扫视空间知觉模型(Bergelt & Hamker, 2019), 空间记忆和表象模型(Bicanski & Burgess, 2018)三个独立的神经计算模型, 并将物体记忆与视觉感知相结合, 对应个体的编码及心理想象过程。编码过程中, 代理(agent)通过特征注意进行视觉搜索, 改变了视觉皮层 V4/IT 区域上对象细胞的反应曲线, 同时, V4/IT 信息驱动额眼区(frontal eye field, FEE)进行目标选择, 而相关空间信息则通过顶内沟外侧壁(lateral intraparietal cortex, LIP)进行空间视觉转换, 将信息从眼中心参考框架转换为头中心参考框架, 接着在顶叶窗口( Parietal window, PW)与环境信息相结合, 通过压后转换回路(retrosplenial transformation circuit, RSC/TR)将空间信息最终转为世界中心参考框架。空间信息在长时记忆中被编码至内侧颞叶(medial temporal lobe, MTL)中的吸引子网络(attractor network)中。在心理意象的过程中, 利用物体识别通过基于线索的记忆检索机制在 MTL (内侧颞叶) 中重新激活来自先前编码阶段的神经模式, 此时, 神经模式中包含编码过程中代理的空间信息(包含物体间的相对位置信息和相对于环境的绝对位置信息)。这些模式被用于空间导航, 并通过 RSC 和 LIP 再次将空间信息从世界中心的参考框架转换为以眼为中心的参考框架, 从而在 FEE 中进行注意力控制。该模型较全面地涵盖了认知地图构建过程中从视觉识别到空间表征记忆的过程, 视觉与记忆在认知地图中的紧密联系能够帮助个体准确有效地重新定位先前编码过的物体。

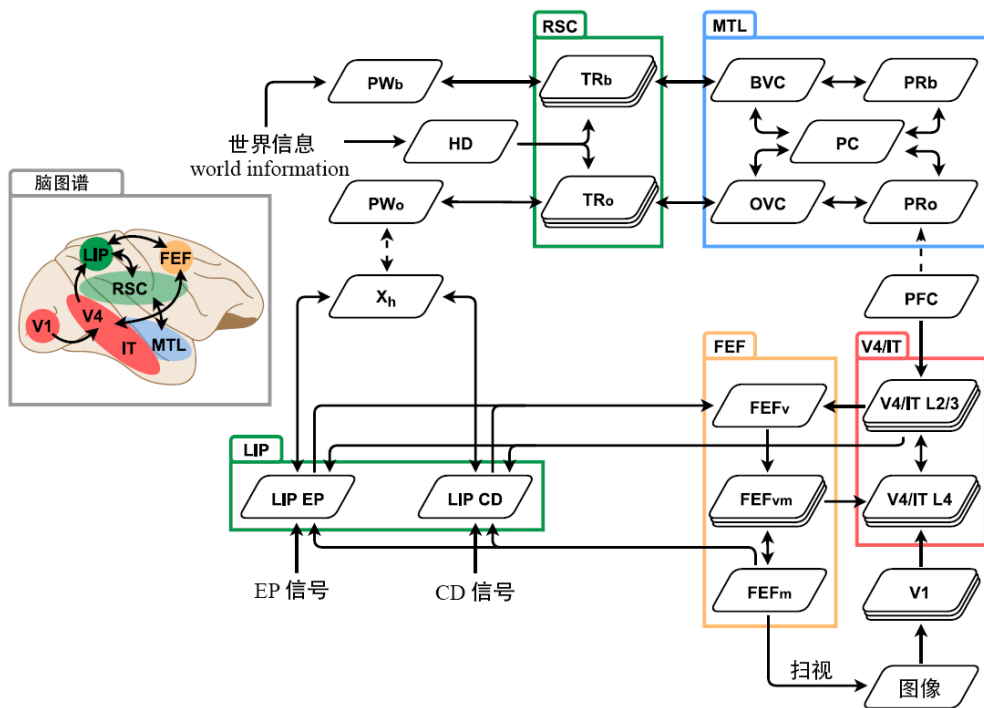


图 2 Spacecog 大尺度空间认知神经计算模型。(详解见附录)

### 2.2.4 认知空间

以上几种表征形式均聚焦于认知地图对空间环境信息的表征形式, 但越来越多的研究者认为认知地图包含的不止空间环境信息, 还包含了具有时序性的一系列事件序列和行动相关的抽象概念(Bellmund et al., 2018; Park et al., 2020)。Bellmund 等(2018)提出认知空间



(cognitive space)是由物理特征(如位置、方向)和抽象特征(如颜色、形状)的多组质量维度构成的空间表征形式(图3)(Gardenfors, 2004)。在认知空间中,相似的刺激物会位于相邻的位置而不同的刺激物间则会有较大的距离,每个刺激在这些维度上均有特定的特征值以在认知空间中定位。根据质量维度的几何特征,该刺激概念的属性定义为某个领域中的凸区域(convex region),即在一个维度中,如果给定两个点  $x$  和  $y$  在这个区域内,这两点之间的所有点也在这个区域内。根据属性的空间定义概念原型位于区域的中心位置,其余相关的点位于离中心远近不同的位置并使用具有欧氏度量的连续空间的 Voronoi 镶嵌将空间中所有客体的位置离散化使其接近原型,凸区域由此产生(Gardenfors, 2004; Bellmund et al., 2018)。在这种框架下,一个属性构成了一个概念的最简单的形式。将属性定位为凸区域可以帮助个体基于已有概念进行归纳推理,即如果两个刺激  $x$  和  $y$  存在共同属性,则  $x$  和  $y$  之间的任何刺激也可以推断具有相同属性,而复杂的属性由多个领域和关于它们相互关系的信息组成。一个概念被定义为多个领域中的一组凸区域并根据显著性进行加权,并包含关于不同领域中的区域如何关联的附加信息。例如,当我们要表征“故宫”时,对故宫的概念就会由它的地理位置特征区域、文化属性区域和建筑样式等多个区域共同定义。Bellmund 等(2018)提出 HC-EC 系统中的处理机制作为人类灵活且高级认知的通用格式支持认知空间。对空间导航的研究揭示了如何通过该系统中功能特定细胞的连续且多尺度的编码来映射空间。这一系统赋予了灵活映射不同环境的能力,并通过时间序列模拟空间轨迹。例如,位置细胞群的放电场提供个体周围环境的空间表征,网格细胞的六边形对称放电模式通过提供环境的坐标系支持空间导航(Hafting et al., 2005)。位置细胞和网格细胞提供的度量也可能提供的是一种通用机制用于映射经验维度,在这一机制下,位置细胞被认为支持索引由内嗅网格系统构成的认知空间中的位置。位置细胞与网格细胞的放电场随啮齿类动物海马背腹轴的延伸而增大(Stensola et al., 2012),这与认知空间在不同粒度下的映射相契合,反映了知识层次或嵌套概念的多尺度表征。另外,位置细胞和网格细胞在重建和 theta 振荡期间的序列活动使个体可以通过不同位置模拟移动轨迹(Trettel et al., 2019; Buckner et al., 2010),从而支持适应性认知和行为。在认知空间的支持下,当个体处于新环境时,就能够利用已有的属性来快速适应环境实现导航。

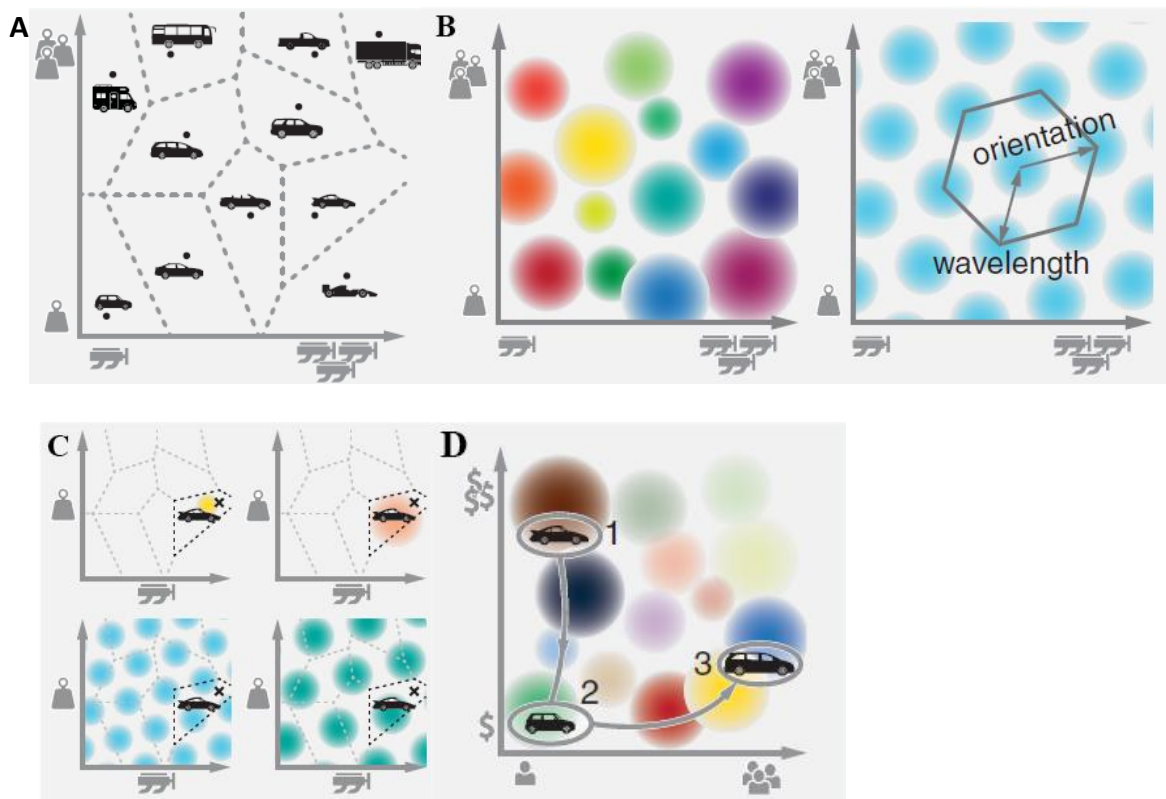


图3 cognitive space 模型示例图。以购买汽车为例，(A)认知空间由汽车重量（纵轴）和发动机功率（横轴）两个维度构成。沿这两个轴的特征值定义汽车位置，具有相似特性的属性位于彼此附近。属性（汽车图标）被定义为认知空间的凸区域，使用具有欧氏度量的连续空间的 Voronoi 镶嵌将空间离散化为凸区域，不同属性（黑点）间的距离通过基于特征维度上的相异性决定。(B)左图：彩色圆圈代表位置细胞在由汽车发动机功率和重量两维度构成的空间中的放电场。每种颜色代表一个独立的位置细胞。整体上，放电场覆盖了空间的所有位置。右图：网格细胞的六边形对称放电模式（图中显示了一个细胞的模式）为空间的维度提供了度量标准。(C)不同粒度水平上的信息表征可以由海马回路中的多个空间尺度支持。狭窄（左列）或宽广（右列）的认知空间位置可以分别由位置细胞（顶行）和网格细胞（底行）编码。示意图展示了四种不同细胞的放电场。更高级别的信息（例如关于跑车概念）可以归因于更低级别的刺激（黑色十字）。(D)顺序活动模拟了认知空间中的不同位置（从1到3），在决定购买哪种汽车时，允许沿轨迹评估不同的汽车类型。

#### 参考文献：

- 李丹, 杨昭宁.(2015). 空间导航：路标信息和路径整合的关系. *心理科学进展*, 23(10), 1755-1762.
- 郑丽, 王玲, 杨佳佳 & 郑晨光.(2023). 阿尔茨海默病转基因动物认知地图损伤的细胞-网络机制. *生理学报*, 1-23.
- Anastasiou, C., Baumann, O., & Yamamoto, N. (2023). Does path integration contribute to human navigation in large-scale space?. *Psychonomic Bulletin & Review*, 30(3), 822-842.
- Baraduc, P., Duhamel, J. R., & Wirth, S. (2019). Schema cells in the macaque hippocampus. *Science*, 363(6427), 635-639.
- Beuth, F. (2019). *Visual attention in primates and for machines-neuronal mechanisms* (Doctoral dissertation, Dissertation, Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Germany).

- Bergelt, J., & Hamker, F. H. (2019). Spatial updating of attention across eye movements: A neuro-computational approach. *Journal of Vision, 19*(7), 10-10.
- Bellmund, J. L., Gärdenfors, P., Moser, E. I., & Doeller, C. F. (2018). Navigating cognition: Spatial codes for human thinking. *Science, 362*(6415), eaat6766.
- Bicanski, A., & Burgess, N. (2018). A neural-level model of spatial memory and imagery. *elife, 7*, e33752.
- Bicanski, A., & Burgess, N. (2020). Neuronal vector coding in spatial cognition. *Nature Reviews Neuroscience, 21*(9), 453-470.
- Brunec, I. K., Javadi, A.-H., Zisch, F. E. L., & Spiers, H. J. (2017). Contracted time and expanded space: The impact of circumnavigation on judgements of space and time. *Cognition, 166*, 425-432.
- Brunec, I. K., Moscovitch, M., & Barense, M. D. (2018). Boundaries Shape Cognitive Representations of Spaces and Events. *Trends in cognitive sciences, 22*(7), 637-650.
- Bulkin, D. A., Sinclair, D. G., Law, L. M., & Smith, D. M. (2020). Hippocampal state transitions at the boundaries between trial epochs. *Hippocampus, 30*(6), 582-595.
- Burkhardt, M., Bergelt, J., Gönner, L., Dinkelbach, H. Ü., Beuth, F., Schwarz, A., ... & Hamker, F. H. (2023). A large-scale neurocomputational model of spatial cognition integrating memory with vision. *Neural Networks, 167*, 473-488.
- Buckner, R. L. (2010). The role of the hippocampus in prediction and imagination. *Annual review of psychology, 61*(1), 27-48.
- Bonasia, K., Blommestejn, J., & Moscovitch, M. (2016). Memory and navigation: Compression of space varies with route length and turns. *Hippocampus, 26*(1), 9-12.
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2014). From cognitive maps to cognitive graphs. *PLoS ONE, 9*(11), e112544.
- Credé, S., Thrash, T., Hölscher, C., & Fabrikant, S. I. (2020). The advantage of globally visible landmarks for spatial learning. *Journal of Environmental Psychology, 67*, 101369.
- Doeller, C. F., Barry, C., & Burgess, N. (2010). Evidence for grid cells in a human memory network. *Nature, 463*(7281), 657-661.
- Ekstrom, A. D., & Ranganath, C. (2018). Space, time, and episodic memory: The hippocampus is all over the cognitive map. *Hippocampus, 28*(9), 680-687.
- Hao, X., Yuan, Z., Lin, S., Kong, X., Song, Y., & Liu, J. (2022). Different behavioral and learning effects between using boundary and landmark cues during spatial navigation. *Current Psychology, 42*(27), 23301-23312.
- Howard, L. R., Javadi, A. H., Yu, Y., Mill, R. D., Morrison, L. C., Knight, R., ... & Spiers, H. J. (2014). The hippocampus and entorhinal cortex encode the path and Euclidean distances to goals during navigation. *Current Biology, 24*(12), 1331-1340.
- Ishikawa, T., & Nakamura, U. (2012). Landmark selection in the environment: Relationships with object characteristics and sense of direction. *Spatial Cognition & Computation, 12*(1), 1-22.
- Jacobs, J., Weidemann, C. T., Miller, J. F., Solway, A., Burke, J. F., Wei, X. X., ... & Kahana, M. J. (2013). Direct recordings of grid-like neuronal activity in human spatial navigation. *Nature neuroscience, 16*(9), 1188-1190.
- Lanini-Maggi, S., Ruginski, I., & Fabrikant, S. I. (2021). Improving pedestrians' spatial learning during landmark-based navigation with auditory emotional cues and narrative. *UC Santa Barbara: Center for*

*Spatial Studies.*

- Gardenfors, P. (2004). *Conceptual spaces: The geometry of thought*. MIT press
- Gao, B., Chen, Z., Chen, X., Tu, H., & Huang, F. (2021). The effects of audiovisual landmarks on spatial learning and recalling for image browsing interface in virtual environments. *Journal of Systems Architecture*, *117*, 102096.
- Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M. B., & Moser, E. I. (2005). Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, *436*(7052), 801-806.
- Stensola, H., Stensola, T., Solstad, T., Frøland, K., Moser, M. B., & Moser, E. I. (2012). The entorhinal grid map is discretized. *Nature*, *492*(7427), 72-78.
- Teghil, A., Boccia, M., Bonavita, A., & Guariglia, C. (2019). Temporal features of spatial knowledge: Representing order and duration of topographical information. *Behavioural Brain Research*, *376*, 112218.
- Trettel, S. G., Trimper, J. B., Hwaun, E., Fiete, I. R., & Colgin, L. L. (2019). Grid cell co-activity patterns during sleep reflect spatial overlap of grid fields during active behaviors. *Nature neuroscience*, *22*(4), 609-617.
- Jabbari, Y., Kenney, D. M., von Mohrenschildt, M., & Shedden, J. M. (2021). Vestibular cues improve landmark-based route navigation: A simulated driving study. *Memory & Cognition*, *49*(8), 1633-1644.
- Karim, A. M., Rumalla, K., King, L. A., & Hullar, T. E. (2018). The effect of spatial auditory landmarks on ambulation. *Gait & posture*, *60*, 171-174.
- Maguire, E. A., & Mullally, S. L. (2013). The hippocampus: A manifesto for change. *Journal of Experimental Psychology: General*, *142*(4), 1180-1189.
- Maidenbaum, S., Miller, J., Stein, J. M., & Jacobs, J. (2018). Grid-like hexadirectional modulation of human entorhinal theta oscillations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(42), 10798-10803.
- Meilinger, T., Strickrodt, M., & Bühlhoff, H. H. (2018, September). *Spatial survey estimation is incremental and relies on directed memory structures*. Paper presented at the meeting of Spatial Cognition XI: 11th International Conference, Spatial Cognition 2018, Proceedings 11 (pp. 27-42), Tübingen, Germany.
- Meilinger, T., Riecke, B. E., & Bulthoff, H. H. (2014). Local and global reference frames for environmental spaces. *Quarterly journal of experimental psychology*, *67*(3), 542-569.
- Nardi, D., Carpenter, S. E., Johnson, S. R., Gilliland, G. A., Melo, V. L., Pugliese, R., ... & Kelly, D. M. (2022). Spatial reorientation with a geometric array of auditory cues. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *75*(2), 362-373.
- Nuhn, E., & Timpf, S. (2018). An Overall Framework for Personalised Landmark Selection. In: Kiefer, P., Huang, H., Van de Weghe, N., Raubal, M. (eds) *Progress in Location Based Services 2018*. LBS 2018. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Cham.
- Peer, M., Brunec, I. K., Newcombe, N. S., & Epstein, R. A. (2021). Structuring Knowledge with Cognitive Maps and Cognitive Graphs. *Trends in Cognitive Sciences*, *25*(1), 37-54.
- Park, S. A., Miller, D. S., Nili, H., Ranganath, C., & Boorman, E. D. (2020). Map making: constructing, combining, and inferring on abstract cognitive maps. *Neuron*, *107*(6), 1226-1238.
- Priestley, J. B., Bowler, J. C., Rolotti, S. V., Fusi, S., & Losonczy, A. (2022). Article Signatures of rapid plasticity in hippocampal CA1 representations during novel experiences. *Neuron*, *110*(12), 1978-1992.
- Renault, A. G., Auvray, M., Parseihian, G., Miall, R. C., Cole, J., & Sarlegna, F. R. (2018). Does Proprioception

- Influence Human Spatial Cognition? A Study on Individuals With Massive Deafferentation. *Frontiers in Psychology*, 9, 1322.
- Sun, C., Yang, W., Martin, J., & Tonegawa, S. (2020). Hippocampal neurons represent events as transferable units of experience. *Nature neuroscience*, 23(5), 651-663.
- Sheldon, S., & El-Asmar, N. (2017). The cognitive tools that support mentally constructing event and scene representations. *Memory*, 26(6), 858-868.
- Wang, L., Mou, W., & Sun, X. (2014). Development of landmark knowledge at decision points. *Spatial Cognition & Computation*, 14(1), 1-17.
- Wang, R. F. (2016). Building a cognitive map by assembling multiple path integration systems. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(3), 692-702.
- Warren, W. H. (2019). Non-euclidean navigation. *Journal of Experimental Biology*, 222(Suppl\_1), jeb187971.
- Wang, C. H., Monaco, J. D., & Knierim, J. J. (2020). Hippocampal place cells encode local surface-texture boundaries. *Current Biology*, 30(8), 1397-1409.
- Wunderlich, A., Grieger, S., & Gramann, K. (2023). Landmark information included in turn-by-turn instructions induce incidental acquisition of lasting route knowledge. *Spatial Cognition & Computation*, 23(1), 31-56.
- Wolbers, T., & Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14(3), 138-146.
- Yesiltepe, D., Dalton, R., Ayse O., Dalton, N., Noble, S., Hornberger, M., Coutrot, A. and Spiers, H. (2019, July). *Usage of Landmarks in Virtual Environments for Wayfinding: Research on the influence of global landmarks*. Paper presented at the meeting of 12SSS - 12th International Space Syntax Symposium, Beijing, China.
- Yesiltepe, D., Conroy Dalton, R., & Ozbil Torun, A. (2021). Landmarks in wayfinding: a review of the existing literature. *Cognitive processing*, 22(3), 369-410.

**意见 2:** 2) 尽管本文提到了很多构成认知地图的要素，但基本都围绕着路标这个元素来进行阐述。当然，路标导航是近些年研究的最多，但是对认知地图形成而言，路标并不一定是最重要的，比如对于方向定位来说，路标的作用很受局限的。希望作者增加其他关键因素的影响，及其机制讨论，而并不止停留简单描述可能的影响上。

**回应 2:** 感谢审稿人的意见。我们首先凝练了与路标相关的要素并将其整合进与环境特征相关的要素当中，并从认知地图的抽象概括性和个体认知地图加工的适应性和灵活性的角度考虑增加了与个人认知加工相关的要素——“事件”。认知地图中要素的机制讨论以及影响作用在第三部分“认知地图在视觉线索受限环境导航中的加工机制”中详细讨论。结构上的修改也使第二部分与第三部分之间的联系更加紧密，体现了逻辑上的递进关系。对要素的修改及增加的内容如下，位于正文 p3-4。

“认知地图不仅包含对环境物理特征表示，还包含了情境中与个体状态相关的信息。已有大量研究证明海马和内侧颞叶参与认知地图构建，而内侧颞叶也和与心理表征相关的情

景记忆 (episodic memory) 有关。场景构建理论 (scene construction theory) 认为海马 (hippocampus, HC) 支持个体构建复杂空间情景, 该情景可作为“脚手架”帮助个体整合经验并补充额外细节 (Maguire & Mullally, 2013)。Sheldon 等 (2017) 也发现不同的认知机制支持个体同时形成事件和场景的表征, 而事件表征则通过情景记忆支持各种知识构建结构规则。事件反映了个体在环境中的一系列状态, 使空间导航具备时空特性 (Teghil et al., 2019), 本研究也将个体的时间知觉纳入“事件”中考虑。Ekstrom 和 Ranganath (2018) 认为海马是围绕空间和时间组织经验的灵活且结构化的系统, 该系统帮助个体通过整合特定情境中相关的多模态输入支持从空间导航到情景记忆的各种认知功能, 其中海马 CA1 接受来自内嗅皮层 (entorhinal cortex, ERC) 的信息传入以支持基于多种任务和行为状态下的记忆和空间导航 (Priestley et al., 2022)。

以上要素在认知地图中并不独立存在, 而是能够相互结合从而对个体的空间导航过程产生影响。例如, 有研究提出在个体在使用导航辅助软件时, 通过使用包含情感线索的听觉叙述赋予路标情感意义会促使个体更多的使用第一视角的地图进行导航 (Lanini-Maggi, 2021)。本研究也简要梳理了当前认知地图表征形式相关理论以解释要素间的相互作用机制。”

#### 参考文献

- Ekstrom, A. D., & Ranganath, C. (2018). Space, time, and episodic memory: The hippocampus is all over the cognitive map. *Hippocampus*, 28(9), 680-687.
- Lanini-Maggi, S., Ruginski, I., & Fabrikant, S. I. (2021). Improving pedestrians' spatial learning during landmark-based navigation with auditory emotional cues and narrative. *UC Santa Barbara: Center for Spatial Studies*.
- Priestley, J. B., Bowler, J. C., Rolotti, S. V., Fusi, S., & Losonczy, A. (2022). Article Signatures of rapid plasticity in hippocampal CA1 representations during novel experiences. *Neuron*, 110(12), 1978-1992.
- Maguire, E. A., & Mullally, S. L. (2013). The hippocampus: A manifesto for change. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(4), 1180-1189.
- Sheldon, S., & El-Asmar, N. (2017). The cognitive tools that support mentally constructing event and scene representations. *Memory*, 26(6), 858-868.
- Teghil, A., Boccia, M., Bonavita, A., & Guariglia, C. (2019). Temporal features of spatial knowledge: Representing order and duration of topographical information. *Behavioural Brain Research*, 376, 112218.

意见 3: 3) 同理, 2.2 中的空间连接方式仍然以路标知识, 可以考虑与 2.1 进行结合或者递进阐述, 现在的结构有些松散。

回应 3: 感谢审稿人的意见。我们修改了第二部分“认知地图的构成要素与表征”, “2.1 认知地图的构成要素”主要介绍了认知地图的基本构成要素, “2.2 认知地图要素组织形式”介绍了认知地图中各要素的组织形式, 即认知地图的表征形式。对第二部分认知地图基础理论的总结也为第三部分提出认知地图在视觉线索受限环境导航中的加工机制提供理论基础, 使文章结构更加紧密。对 2.2 部分的修改内容位于正文 p2-9。

## “2 认知地图的构成要素与表征

Wolbers 和 Hegarty(2010)提出的空间导航加工模型总结了个体在空间导航过程中涉及的环境空间线索和个体空间认知能力并提出了空间表征的离线和在线两种形式。基于该模型和个体在空间导航中涉及的环境特征和认知特点,研究总结了认知地图所包含的构成要素,并系统地梳理了认知地图中各要素的组织形式。

### 2.1 认知地图的构成要素

从空间导航的人-环境交互的角度出发,认知地图的构成要素可分为以环境特征为主的环境要素和以个体认知加工过程为主的认知要素。对环境要素的分类依据空间环境知识分为以路线知识为主的路标的视觉要素、语义特征、有效性等,和以定向知识为主的路标可见性、空间轴向、空间边界和转弯/交叉路口等。对认知要素的分类依据以往研究以“事件(event)”象征个体在不同时空点下与情景记忆密切相关的状态。以下是对两类要素内容的详细阐述。

环境要素中,个体通过对要素单独或叠加的使用识别路标的独特性形成路线知识。路标以视觉要素(如颜色、形状等)为主并包含了诸多感知信息。Ishikawa 和 Nakamura(2012)发现人们会倾向于将面积更大、色彩饱和度更高的建筑物视为路标,并影响路线选择。除此之外,其他感知觉信息如听觉信息、前庭觉信息等均能作为路标以提高个体导航绩效(Wunderlich et al., 2023; Gao et al., 2021; Jabbari et al., 2021; Karim et al., 2018)。而路标的语义特征赋予了路标独特性。语义特征一般包含文化与历史因素(Nuhn & Timpf, 2018),文化因素指具有特定功能的建筑物,如博物馆、体育馆等,而历史因素为具备历史价值的建筑物,如某旧址、天坛等。另外,位于不同地理位置的路标也赋予路标独特性。Ishikawa 和 Nakamura(2014)发现人们常将交叉路口处的建筑物视为路标,而当个体位于陌生环境时,对位于路口处路标的识记率更高(Yesiltepe et al., 2021)。个体对路标的各种偏好均以识别有效路标为目的,若记忆中的路标与真实环境不一致则容易使个体产生迷失感。以路线知识为主的环境要素更多以离散形式存在,定向知识为主的环境要素能够帮助个体连接离散要素并构建整体空间表征。路标可见性能够辅助个体定向,根据可见性可将路标分为整体路标(global landmark)和局部路标(local landmark)两类(Yesiltepe et al., 2019)。山脉、大厦等可以从远距离观测到的路标为整体路标,而仅在少部分地区或近距离才能观察到的路标为局部路标,个体通过对整体路标与局部路标方位的判断确定自己在空间中的位置。然而,关于整体路标和局部路标对认知地图影响作用的研究结果尚未有定论,有研究认为局部路标有效支持个体空间导航,但也有研究提出整体路标在基于认知地图的导航中更为重要(Credé et al., 2020; Meilinger et al., 2014)。除路标之外的相关环境特征要素中,空间框架理论(spatial framework)提出个体以自我中心参考系表征空间信息,并以头脚轴、前后轴和左右轴三个轴定位物体信息,其中个体最易辨认头脚轴方向的位置关系,最难辨认左右轴方向的位置关系(Pitt et al., 2022),因此,空间轴向作为环境要素的同时也会影响个体纳入认知地图的要素数量。另外,空间边界会调节环境几何表征并分割沿途发生的事件从而影响个体对空间环境的情景记忆,如人们容易将同一房间内的信息组块记忆(Hao et al., 2020; Brunec et al., 2018)。类似的环境属性要素还有转弯路口或交叉路口。路口将连续路线分割为路线片段储存于空间记忆中,路

线间的方位分布构成了认知地图的空间基础,分离的路线片段也能够在认知地图的基础上灵活重组,构成新的空间表征(Nardi et al., 2020; Brunec et al., 2018; Bonasia et al., 2016)。

认知地图不仅包含对环境物理特征表示,还包含了情境中与个体状态相关的信息。已有大量研究证明海马和内侧颞叶参与认知地图构建,而内侧颞叶也和与心理表征相关的情景记忆(episodic memory)有关。场景构建理论(scene construction theory)认为海马(hippocampus, HC)支持个体构建复杂空间情景,该情景可作为“脚手架”帮助个体整合经验并补充额外细节(Maguire & Mullally, 2013)。Sheldon 等(2017)也发现不同的认知机制支持个体同时形成事件和场景的表征,而事件表征则通过情景记忆支持各种知识构建结构规则。事件反映了个体在环境中的一系列状态,使空间导航具备时空特性(Teghil et al., 2019),本研究也将个体的时间知觉纳入“事件”中考虑。Ekstrom 和 Ranganath(2018)认为海马是围绕空间和时间组织经验的灵活且结构化的系统,该系统帮助个体通过整合特定情境中相关的多模态输入支持从空间导航到情景记忆的各种认知功能,其中海马 CA1 接受来自内嗅皮层(entorhinal cortex, ERC)的信息传入以支持基于多种任务和行为状态下的记忆和空间导航(Priestley et al., 2022)。

以上要素在认知地图中并不独立存在,而是能够相互结合从而对个体的空间导航过程产生影响。例如,有研究提出在个体在使用导航辅助软件时,通过使用包含情感线索的听觉叙述赋予路标情感意义会促使个体更多的使用第一视角的地图进行导航(Lanini-Maggi, 2021)。本研究也简要梳理了当前认知地图表征形式相关理论以解释要素间的相互作用机制。



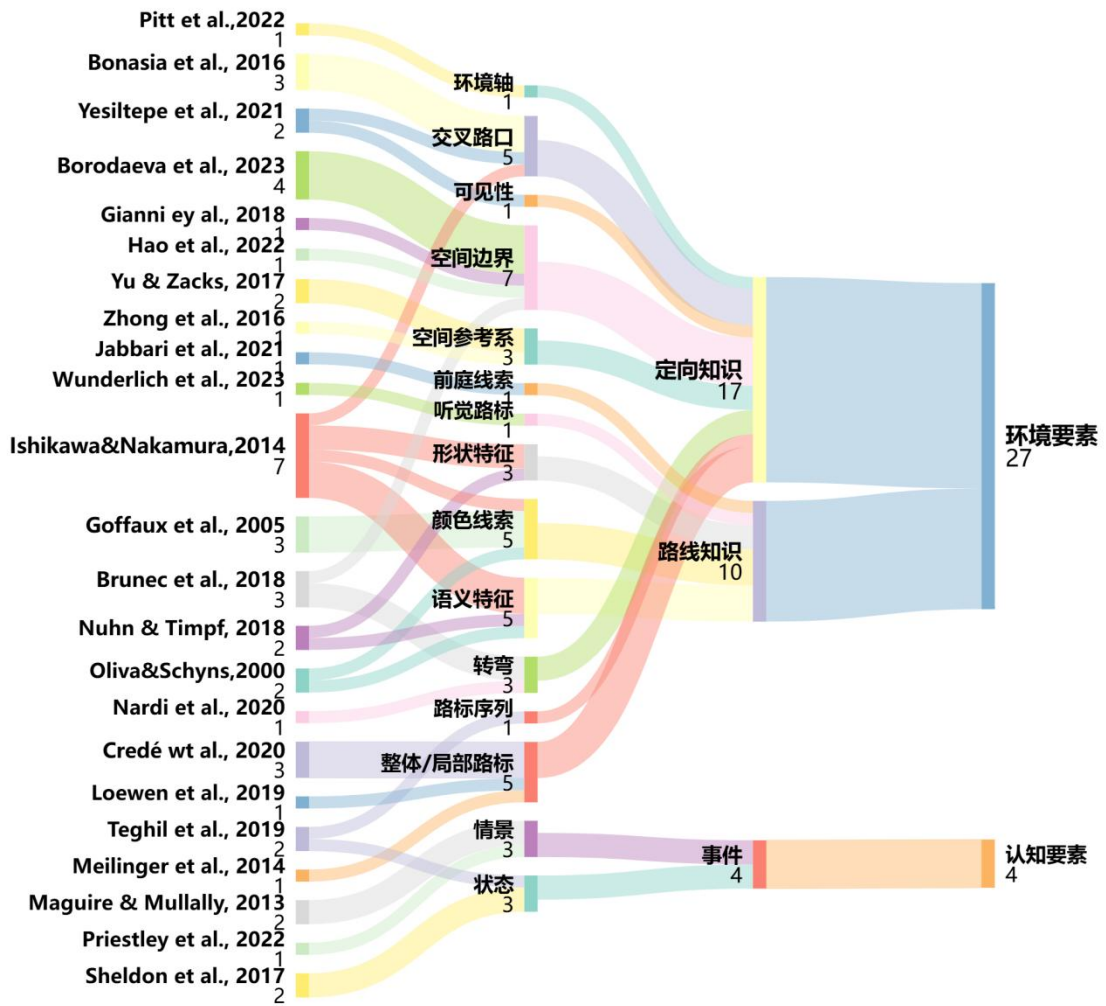


图1 认知地图构成要素文献桑基图

## 2.2 认知地图要素组织形式

认知地图通过反映对环境的完整表征支持空间导航，但这一表征往往存在认知扭曲。以欧式空间表征、认知图谱和 Spacecog 模型为代表的理论均提出了个体在认知地图中对环境要素的组织形式但认知地图也会包含与个体状态相关的认知要素，Bellmund 等(2018)提出的认知空间理论考虑了认知要素，构建了包含抽象概念的空间表征形式。

### 2.2.2 欧式空间表征和认知图谱

以路标学习和路径整合方式所构建的认知地图更符合包含了地理环境中方位和距离信息的欧氏空间表征形式以支持个体识别方向和寻找捷径。内嗅皮层和海马中的位置细胞(place cell)和网格细胞(grid cell)编码空间位置和方位信息，神经元相互协调构建空间记忆和导航所需要的神经回路形成大脑中的导航定位系统，在脑内创立关于环境的认知地图(郑丽等, 2023)。对导航过程中海马前部和内嗅皮层活动的监测也支持了这一观点，内嗅皮层支持欧氏距离编码，该区域中包含的网格细胞的多个放电场为空间表征提供了环境坐标系(Howard et al., 2014)。在 fMRI(Doeller et al., 2010)、单神经元活动(Jacobs et al., 2013)和颅内

theta 振荡(Maidenbaum et al., 2018)的研究中也发现了类似网格细胞支持空间表征欧氏度量的证据。然而人们对空间信息的组织方式可能会发生认知扭曲从而使空间表征在不完全符合欧氏表征的情况下仍能识别两路标间的空间位置关系,研究者将这种空间信息的表征形式称为认知图谱(cognitive graph)(Peer et al., 2021; Meilinger et al., 2018; Brunec et al., 2017; Chrastil & Warren, 2014)。在认知图谱中,部分路标空间位置标记为节点(node),节点间以链接(links)的形式组织,链接仅表示节点间导航所必须的动作序列和度量信息(Warren, 2019)。因此,认知图谱可看作转换导航状态的特定动作序列集合。海马中的位置细胞可以将空间和时间划分为不同的片段(Wang et al., 2020; Bulkin et al., 2020),按照经验的层次结构进行编码以表示环境要素之间的图式关系(Sun et al., 2020; Baraduc et al., 2019)。Bicanski 和 Burgess(2020)总结了海马相关研究提出了向量编码细胞在空间认知中的作用及其编码机制,提出多种类型的向量编码细胞(如边界向量细胞、对象向量细胞和地标向量细胞)在远离感觉外围的脑区中编码环境中的距离和方向信息。这些细胞通过相互连接和转换参考框架支持了自我定位、记忆和导航规划等空间认知功能。可见,对空间环境的表征形式可能存在一定结构性,底层结构以欧式表征表示空间度量信息,上层结构实现空间认知加工。

### 2.2.3 Spacecog 大尺度空间认知神经计算模型

Burkhardt 等(2023)提出了名为 Spacecog 的大尺度空间认知神经计算模型解释人类多个脑区间如何相互作用以通过空间记忆表征物体位置(图 2)。该模型整合了物体识别和物体探测的注意模型(Beuth, 2019),扫视空间知觉模型(Bergelt & Hamker, 2019),空间记忆和表象模型(Bicanski & Burgess, 2018)三个独立的神经计算模型,并将物体记忆与视觉感知相结合,对应个体的编码及心理想象过程。编码过程中,代理(agent)通过特征注意进行视觉搜索,改变了视觉皮层 V4/IT 区域上对象细胞的反应曲线,同时, V4/IT 信息驱动额眼区(frontal eye field, FEE)进行目标选择,而相关空间信息则通过顶内沟外侧壁(lateral intraparietal cortex, LIP)进行空间视觉转换,将信息从眼中心参考框架转换为头中心参考框架,接着在顶叶窗口( Parietal window, PW)与环境信息相结合,通过压后转换回路(retrosplenial transformation circuit, RSC/TR)将空间信息最终转为世界中心参考框架。空间信息在长时记忆中被编码至内侧颞叶(medial temporal lobe, MTL)中的吸引子网络(attractor network)中。在心理意象的过程中,利用物体识别通过基于线索的记忆检索机制在 MTL(内侧颞叶)中重新激活来自先前编码阶段的神经模式,此时,神经模式中包含编码过程中代理的空间信息(包含物体间的相对位置信息和相对于环境的绝对位置信息)。这些模式被用于空间导航,并通过 RSC 和 LIP 再次将空间信息从世界中心的参考框架转换为以眼为中心的参考框架,从而在 FEE 中进行注意力控制。该模型较全面地涵盖了认知地图构建过程中从视觉识别到空间表征记忆的过程,视觉与记忆在认知地图中的紧密联系能够帮助个体准确有效地重新定位先前编码过的物体。

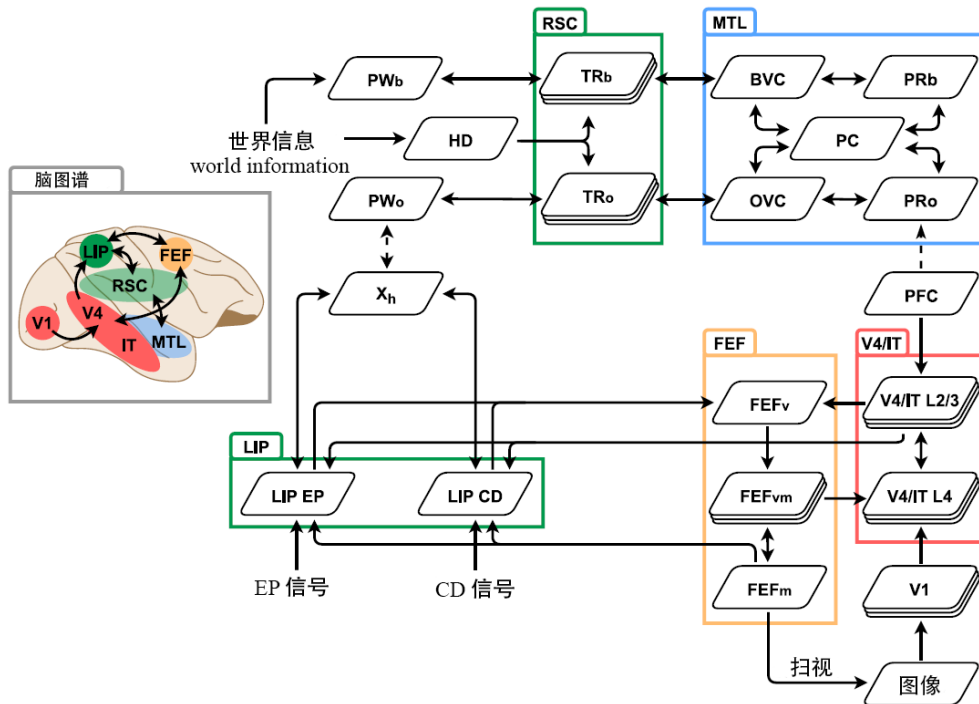


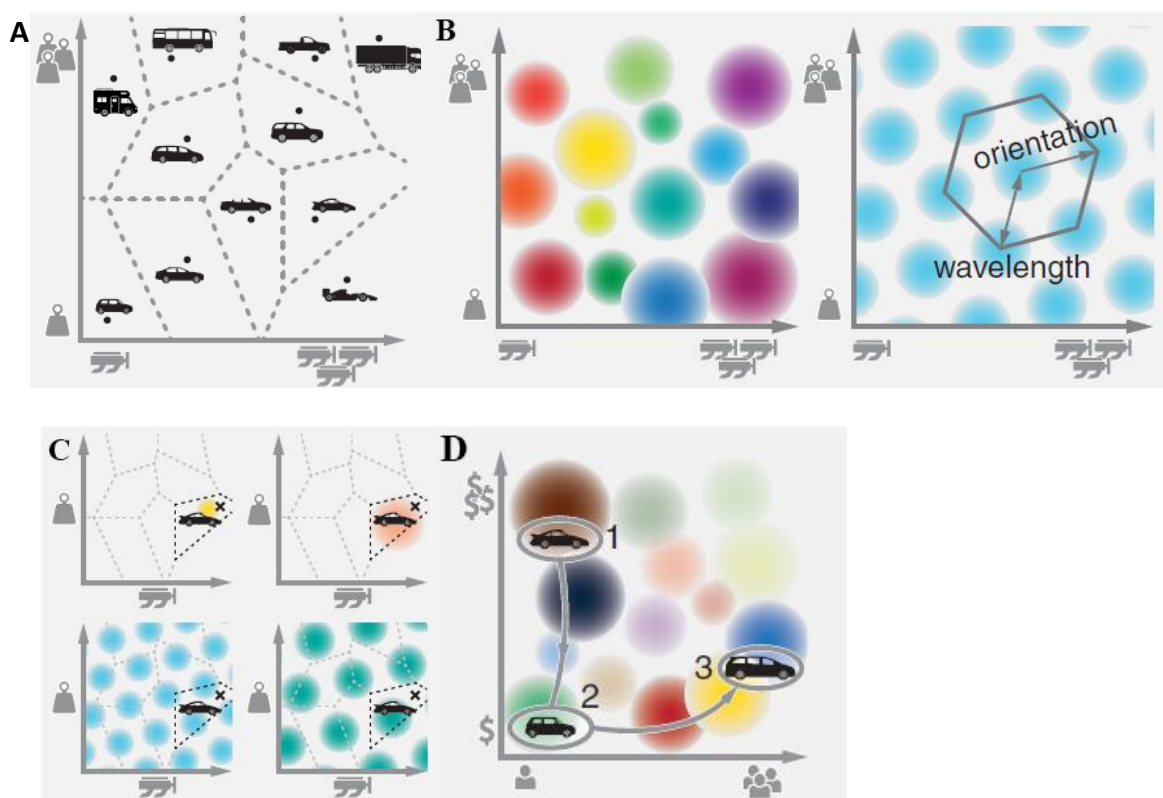
图 2 Spacecog 大尺度空间认知神经计算模型。(详解见附录)

## 2.2.4 认知空间

以上几种表征形式均聚焦于认知地图对空间环境信息的表征形式,但越来越多的研究者认为认知地图包含的不止空间环境信息,还包含了具有时序性的一系列事件序列和行动相关的抽象概念(Bellmund et al., 2018; Park et al., 2020)。Bellmund 等(2018)提出认知空间(cognitive space)是由物理特征(如位置、方向)和抽象特征(如颜色、形状)的多组质量维度构成的空间表征形式(图 3)(Gardenfors, 2004)。在认知空间中,相似的刺激物会位于相邻的位置而不同的刺激物间则会有较大的距离,每个刺激在这些维度上均有特定的特征值以在认知空间中定位。根据质量维度的几何特征,该刺激概念的属性定义为某个领域中的凸区域(convex region),即在一个维度中,如果给定两个点  $x$  和  $y$  在这个区域内,这两点之间的所有点也在这个区域内。根据属性的空间定义概念原型位于区域的中心位置,其余相关的点位于离中心远近不同的位置并使用具有欧氏度量的连续空间的 Voronoi 镶嵌将空间中所有客体的位置离散化使其接近原型,凸区域由此产生(Gardenfors, 2004; Bellmund et al., 2018)。在这种框架下,一个属性构成了一个概念的最简单的形式。将属性定位为凸区域可以帮助个体基于已有概念进行归纳推理,即如果两个刺激  $x$  和  $y$  存在共同属性,则  $x$  和  $y$  之间的任何刺激也可以推断具有相同属性,而复杂的属性由多个领域和关于它们相互关系的信息组成。一个概念被定义为多个领域中的一组凸区域并根据显著性进行加权,并包含关于不同领域中的区域如何关联的附加信息。例如,当我们要表征“故宫”时,对故宫的概念就会由它的地理位置特征区域、文化属性区域和建筑样式等多个区域共同定义。Bellmund 等(2018)提出 HC-EC 系统中的处理机制作为人类灵活且高级认知的通用格式支持认知空间。对空间导航的研究揭示了如何通过该系统中功能特定细胞的连续且多尺度的编码来映射空间。这一系统赋予了灵活映射不同环境的能力,并通过时间序列模拟空间轨迹。例如,位置细胞群的放电场提供个体周围环境的空间表征,网格细胞的六边形对称放电模式通过提供环境的坐标系支

持空间导航(Hafting et al., 2005)。位置细胞和网格细胞提供的度量也可能提供的是一种通用机制用于映射经验维度,在这一机制下,位置细胞被认为支持索引由内嗅网格系统构成的认知空间中的位置。位置细胞与网格细胞的放电场随啮齿类动物海马背腹轴的延伸而增大(Stensola et al., 2012),这与认知空间在不同粒度下的映射相契合,反映了知识层次或嵌套概念的多尺度表征。另外,位置细胞和网格细胞在重建和 theta 振荡期间的序列活动使个体可以通过不同位置模拟移动轨迹(Trettel et al., 2019; Buckner et al., 2010),从而支持适应性认知和行为。在认知空间的支持下,当个体处于新环境时,就能够利用已有的属性来快速适应环境实现导航。

图 3 cognitive space 模型示例图。以购买汽车为例,(A)认知空间由汽车重量(纵轴)和发动机功率(横轴)两个维度构成。沿这两个轴的特征值定义汽车位置,具有相似特性的属性位于彼此附近。属性(汽车图标)被定义为认知空间的凸区域,使用具有欧氏度量的连续空间的 Voronoi 镶嵌将空间离散化为凸区域,不同属性(黑点)间的距离通过基于特征维度上的相异性决定。(B)左图:彩色圆圈代表位置细胞在由汽车发动机功率和重量两维度构成的空间中的放电场。每种颜色代表一个独立的位置细胞。整体上,放电场覆盖了空间的所有位置。右图:网格细胞的六边形对称放电模式(图中显示了一个细胞的模式)为空间的维度提供了度量标准。(C)不同粒度水平上的信息表征可以由海马回路中的多个空间尺度支持。狭窄(左列)或宽广(右列)的认知空间位置可以分别由位置细胞(顶行)和网格细胞(底行)编码。示意图展示了四种不同细胞的放电场。更高级别的信息(例



如关于跑车概念)可以归因于更低级别的刺激(黑色十字)。(D)顺序活动模拟了认知空间中的不同位置(从1到3),在决定购买哪种汽车时,允许沿轨迹评估不同的汽车类型。”

意见 4: 4) 既然文题为对于视觉受限环境的导航,那为何要单独介绍小鼠的感觉加工系统呢?不是很理解。并且对于神经机制的介绍并无新意,文献较为陈旧。

**回应 4:** 感谢审稿人的意见。我们根据审稿人的意见对认知神经机制的文献研究进行了重新梳理,更新了当前的研究进展,并且不再将其作为单独一个小节呈现内容,而是融入在每一部分之后,使每部分的总结基本为认知机制-认识神经机制的结构,这样的修改也使全文每节之间的联系更为紧密。

**意见 5:** 5) 最为突出的问题是,对于核心问题,视觉受限环境导航中的认知地图加工的阐述并不深刻,因此并没有形成坚实的观点。诚然,认知地图本身较为复杂,建议选取认知地图形成过程中的部分阶段进行重点描述,会更好一些。

**回应 5:** 感谢审稿人的意见。在本轮修改中,我们将认知地图支持空间导航的空间更新与校正阶段作为重点进行阐述,阐述内容位于第三部分“3 认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工机制”。我们提出,个体首先会结合环境特点与导航目的在认知地图中抽象出空间心智模型以进行决策和推理,接着利用多感官整合过程实现空间定向,在基于认知地图的空间导航过程中,结合环境线索更新空间心智模型并校正认知地图。以下是我们在正文中对这一阶段的详细阐述,位于正文 p9-16。

### “3 认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工机制

视觉线索受限环境中,因视觉线索的模糊或缺失和视野狭窄削弱了个体的导航效能,降低了导航信心。此时,认知地图以构建和更新与加工的两阶段动态加工形式支持个体规划路线并实现了导航的预览功能。构建阶段中,个体通过多感官通道获取构成要素并整合为认知地图。更新与校正阶段中,个体结合环境特征和导航目的从认知地图中抽象出相应的空间心智模型并基于表象进行推理和决策以规划路线,通过多感官整合实现空间定向,同时结合环境信息更新和校正认知地图以支持视觉线索受限环境导航,元认知参与其中。

#### 3.1 空间心智模型

在视觉线索丰富的环境中,个体能够依靠即时捕捉的视觉信息来指引方向。然而,在视觉线索受限的情境里,导航便需借助先前的环境认知和初步的策略规划,空间心智模型(spatial mental model)为这一认知过程提供支持。该模型不仅映射环境结构,还融入了导航潜在风险评估以及导航者的个性偏好与经验,其灵活性和动态性能够有效辅助个体的空间决策(Perelman et al., 2017)。在基于视觉线索的导航中,人们可以快速利用视觉信息作出反应因此空间心智模型并非不可或缺,但当视觉信息有限或缺失时,视觉线索的匮乏便会降低个体的导航自信,而从认知地图中抽象出的空间心智模型能够帮助个体掌控导航进程。在这种情境下,认知地图也展现了其在视觉线索受限环境中的独特优势,通过预览功能帮助个体验证路线的正确性,并在实际导航中提升信心(Hersh, 2020)。

在探讨认知地图的表征形式时,都有充分的证据支持欧氏空间表征和认知图谱表征。结合个体认知加工过程,两种表征形式可能同时存在。个体探索新环境后形成的认知地图旨在帮助个体了解环境全貌,其中包含的环境信息越客观准确越好。研究表明,人们在自由探索空间环境形成认知地图的过程中会选择相互具有连接性的路线,并且会回访已走过的路线来

确认环境中各路线间的关系以保证认知地图准确性(Brunec et al., 2023)。这一阶段认知地图的表征形式因侧重于对物理空间的精确描述更贴近欧氏空间的表征,包括对距离和方向的准确反映。Widloski 和 Fiete(2014)提出的网格细胞发展模型将网格细胞网络的发展分为可塑性阶段和活动阶段,可塑性阶段中刺激通过个体对周围环境探索时对远端线索和近端线索的整合输入位置信息,这一阶段的网格细胞为大脑提供了关于环境的位置和距离信息。在基于认知地图的导航中,个体首先从认知地图中提取相关的空间心智模型,完整且有效的空间心智模型不仅包含个体形成对各类环境要素的欧氏空间表征,还包括认知要素。而要完全整合环境要素与认知要素需消耗极大认知资源。鉴于个体认知资源的有限性,空间心智模型的表征可能倾向于采用图式或认知图谱的形式,个体依靠表象构建环境中的节点与链接并将认知要素的相关抽象概念纳入空间心智模型,认知空间可能是支持空间心智模型表征的认知神经基础。值得注意的是,这里提到的空间心智模型的认知图谱式的表征与欧氏地图的认知地图并不独立存在,而是个体在认知地图的基础上形成的空间心智模型。

个体在空间心智模型中的加工以基于记忆和表象的抽象推理为主,通过模型中空间信息的推理制定针对未来导航的路线规划。Park 等(2020)的研究也将海马(hippocampus, HC)和内嗅皮层(entorhinal cortex, EC)在空间表征中的作用扩展至推理抽象空间信息中。首先,HC 和 EC 对空间导航、定位和情景记忆中的作用已较为明确(Ekstrom & Ranganath, 2018)。其次,在眶额皮层(orbitofrontal cortex, OFC)的研究中发现, OFC 代表一个人在认知地图中的任务空间位置而非物理空间位置,并且海马和 OFC 都参与了基于模型的推理,使原本独立的刺激可以相互关联。由此,HC-EC 系统对传递性推理尤为重要。Park 等(2020)对比了空间环境认知地图和抽象社会结构认知地图的神经活动后认为大脑会使用相同的神经系统来表征连续空间以编码抽象空间中离散客体之间的关系并进行推理。个体能够通过心智模型反映动态系统的时间关系来描述推理过程(van Ments & Treur, 2021),同理,个体也能够通过空间心智模型模拟空间导航以达到合理规划路线的目的。由于空间心智模型中的信息以抽象信息为主并涉及到推理,个体感知到的风险或主观经验都会对空间心智模型产生影响。因此,抽象出的空间心智模型存在较大个体差异,这也能够解释个体在视觉线索受限环境中的导航绩效表现出的个体差异。

基于表象的形成过程、空间导航的复杂性以及日常导航经验,我们将语言这一因素纳入其中。计算机领域的概念可被用以说明语言在视觉线索受限环境导航中的作用。在计算机领域,研究者通常将导航看作视觉与语言导航(Vision-and-Language Navigation, VLN),该过程要求代理理解自然语言指令、感知视觉世界,并执行导航操作以到达目标位置。这种任务的挑战在于,代理需要不断接收新的视觉观测信息,并将其与指令进行对齐(Chen et al., 2021)。Chen 等(2022)提出的机器学习模型,将导航过程分为两个模块,第一个模块是以视觉信息为基础并随时间更新的拓扑映射模块,第二个模块为全局动作规划模块,利用图形转换器捕捉跨模态的视觉与语言关联,从而引入与图形相关的拓扑知识以增强图形编码。据此推断,在视觉线索受限导航的环境中,个体同样会在其空间心智模型中借助语言信息来更新自身的位置感知并反映思维过程以进行逻辑推理,确保即使环境中视觉线索不足也能有效地进行空间导航。

### 3.2 视觉线索受限环境中的空间定向

从认知加工机制上看,个体在视觉线索受限环境中的空间定向主要依赖其他感官通道信息,例如听觉、触觉和本体觉等。听觉信息分为非言语信息与言语信息,两者在空间导航中提供的信息有所不同。非言语信息指能够辅助个体完成空间导航的无语义的声音刺激,帮助盲人判断路线距离、分辨目标物间的位置方向并识别环境整体布局(Ottink et al., 2022a)。此外,个体还能利用听觉对环境的几何特征进行编码以实现空间重定向(Nardi et al., 2022)。言语信息因内含语义信息从而使个体对言语信息的加工更为复杂。一方面,有研究认为言语信息可能会干扰空间记忆(Antony & Bennion, 2023);另一方面,也有研究指出言语信息能够提供具体的空间信息,如以明确空间边界或关键路标等方式帮助个体形成空间表征(Peacock & Ekstrom, 2019; Santoro et al., 2020)。

对触觉的相关研究发现,当被试被限制了视觉、前庭觉及本体信息后,正常被试蒙眼时的导航任务绩效优于盲人(Ottink et al., 2022b)。相较于语音线索,盲人利用触觉地图形成的认知地图效果更好(Brayda et al., 2019; Ottink et al., 2022b)。但也有研究认为个体在跨通道处理触觉信息时,会分散个体注意力从而对导航造成干扰。例如,触觉振动会干扰短时记忆,并影响个体的语言序列回忆(Marsh et al., 2023)。

在黑暗环境中,个体依赖前庭觉估计自身运动速度,并结合时间感知更新位移距离(Kaski et al., 2016)。然而,在缺少环境线索的情况下,定向知识有限,空间定向较为困难。例如飞行员在高空缺少视觉信息。同时,在惯性力的作用下前庭觉、本体觉等感知觉难以提供准确信息,容易导致空间定向错误(游旭群, 2017)。

由此可见,仅利用单一的通道信息并不足以支持个体判断空间方向,个体还会进行多感官整合综合加工各感官通道信息。该过程中,个体通过前庭觉获取自身运动信息并感知方向(Cornell & Bourassa, 2007; Liu et al., 2023);听觉获取与“远近”相关的空间感知并提供事件与环境信息或估计距离以帮助个体实现空间定向(Kolarik et al., 2016);嗅觉提供特定环境或人的额外信息(Raithel & Gottfried, 2021)。人类大脑会整合多感官信息,此过程中不断获取、挑选和加工新的信息构建和完善认知地图(Medendorp & Selen, 2017)。个体的视觉、听觉和躯体感觉皮层能够接受来自各个通道的刺激信息并投射到高级联合皮质进行多感官整合(Meijer et al., 2017)。一般来说,视觉在多感官整合中占主导地位,视觉皮层的神经元会对听觉刺激直接做出反应(Meijer et al., 2017),压后皮质(retrosplenial cortex, 顶叶 29 区、30 区)从视觉皮层接收到的信号比其他感觉皮层更强,与其他处理空间信息的脑区形成重要的神经网络(Zingg et al., 2014)。而在视觉线索受限环境导航中,初级视觉皮层能够对前庭神经刺激做出反应,光线也会影响初级视觉皮层的神经活动(Keshavarzi et al., 2023),多感官整合能够增强神经对弱刺激的反应,并通过注意的选择性将有效信息整合在认知地图加工中(Grillini et al., 2019)。这可能是视觉线索受限环境中多感官整合的主要生理基础。

观察者模型(observer models)对飞行员的空间定向做出了系统解释,该模型认为个体会比较预期和实际的感官反应来调整运动状态估计。模型包含三个部分,内部模型是大脑内部假设的动态系统模型,用于预测感官输入;感官输入系统用于感知来自前庭系统(如半规管和耳石器官)的加速度和角速度信息、视觉和体感信息;最后比较预期反应与实际反应,将内部模型预测的感官输入与实际测量的感官输入比较后得到误差信号(Williams et al., 2021)。

Voros 等(2024)在基于观察者模型的基础上加入了变化的视觉信息,提出了增强型定向感知模型以更全面地解释前庭和视觉信息在自我运动感知中的作用。该模型提出当视觉信息可用时,自我运动感知维持在一直有视觉信息时的状态,时间过程约为 10 秒。当视觉信息被移除时,感知到动态变化大约需要 30 秒。在此基础上,增强定向感知模型添加了低通滤波器以捕捉视觉信息可用性突然变化后的自我运动感知状态以解释在没有视觉信息时个体反应的变异性。两种模型均从飞行员高空飞行的角度解释了个体的空间定向机制。

空间迷失(spatial disorientaion)是空间定向研究领域中的一个长期困扰研究者的难题。Knierim 和 Hamilton(2011)认为个体空间迷失的根本原因可能是认知地图的失效(例如在没有墙壁等空间边界的黑暗环境)或未能使用视觉路标更新个体的位置和方向。迷失效应表明,方向感的丧失会导致个体在所有物体的绝对定位准确性和不同物体间的相对定位准确性上均有所下降,但对房间角落等空间边界的影响较小。换言之,房间内物体的空间排列取决于短暂的空间表征,而房间的几何形状则取决于持久的空间表征(Wang & Spelke, 2000)。空间迷失可能与个体对环境表征的参考框架相关。研究者认为盲人与常人之间定位准确性的差异可能与个体是否能够有效使用心理想象策略和灵活转换参考框架有关(Santoro et al., 2020)。当个体采用客体中心参考框架时,环境中各种要素较稳定地存在与认知地图中,而个体使用自我中心的参考框架时需要心理旋转能力的参与,使其易受到主观因素影响的同时承担了更高的认知负荷(Macauda et al., 2019)。

### 3.3 元认知在视觉线索受限环境导航中的作用

空间心智模型的构建以及空间定向过程均要求个体在认知层面进行深入加工。尤其当个体面临空天海等视觉线索受限环境中时,一般导航经验难以直接应用,这无疑会对个体的导航信心产生负面影响。在这种特定情境下,元认知的作用尤为重要。元认知(meta-cognition)是反思和调节认知过程的能力,被视为提高个体学习能力的关键因素,它包含了一系列认知策略和自我调节机制。元认知包括监控和控制,元认知监控指个体对自己认知能力的评估和学习效果的认识,而元认知控制则涉及采取具体行动以调整认知状态和学习进程。例如,若个体意识到自己未能全面记住环境的表征(监控)时可能会选择重新学习环境(控制)。Mason 等(2022)虽已指出元认知在路线学习中的重要性,但未详细阐述其具体作用机制。本研究深入探讨认知地图在这一过程中的作用,并提出在个体构建的空间心智模型中同样存在着元认知监控的机制。如前所述,空间心智模型不仅包括对空间结构的认识,也包含了对环境结构以及各路标抽象概念的认识,个体也通过空间心智模型实现认知地图在视觉线索受限环境中独特的预览功能。个体在利用空间心智模型对空间导航过程进行推理和判断时涉及到助记线索(mnemonic cues)。助记线索指个体的主观体验,包括处理或检索信息的难易程度(Koriat, 1997)和对位置的不确定性(Keller et al., 2020)。例如,个体在返回起点时感到不确定就是一种助记线索。这种在空间导航时的主观体验可能在元认知监控支持空间心智模型中发挥作用。

在空间定向的相关研究中,空间迷失往往伴随着丰富的主观体验。在 Fernández Velasco 和 Casati(2022)建立的与空间迷失相关的语料库揭示了个体处于迷失状态时会伴随焦虑、无助、困惑、孤立无援和孤独感等情绪体验。而个体产生迷失往往源于其定向过程中的认知缺陷,为脱离迷失状态个体会采取各种行为来解决认知缺陷,此时,由元认知所监控的空间迷



失具有评价和调节功能。因此，Fernández Velasco 和 Casati(2022)将空间迷失也看作元认知过程的一部分以解释迷失引发的情绪体验以及迷失体现出的评价和调节功能。综上，结合个体在视觉线索受限环境中所提取的空间心智模型也具备预览和调节功能，我们提出，相较于一般导航情境，元认知在视觉线索受限环境导航中参与程度更深。

### 3.4 认知地图在视觉线索受限环境中的更新与校正

在空间导航的初始阶段，认知地图由静态离线表征转换为动态在线表征(Eilam, 2014)。此时，认知地图及其衍生的空间心智模型随个体的移动而不断发生变化。个体在该过程中必须持续更新和校正环境信息，确保导航的准确性。Borodaeva 等(2023)发现空间中个体对地标和空间边界等环境线索的综合加工有助于空间更新，而丰富的空间背景能够促进这一更新过程。当人们的身体方向改变超过 90°，前庭线索提供的自我运动信息支持空间更新(Gramann et al., 2021)。换言之，认知地图中的各个要素首先为空间导航的更新提供基础支持。个体对要素的认知加工涉及根据导航目标选择恰当的空间更新策略，判断并筛选有效的环境线索以完善认知地图，这一过程可能在空间心智模型内完成。空间更新策略可分为连续更新和构型更新，连续更新以自身为中心，构型更新以环境为中心。构型更新计算自身在认知地图中的位置和环境朝向，使导航的精准度更高(Wiener et al., 2011; Navratilova & McNaughton, 2014)。研究发现，使用连续更新策略的个体在空间表征中也偏好形成自我中心的表征形式，但这一偏好会随着环境尺度的增加而发生变化。当个体处于城镇等空间尺度较大的环境中，他们更倾向于使用构型更新和客体中心的表征形式，并在此过程中表现出指北倾向(Zhong & Kozhevnikov, 2016; Frankenstein et al., 2012)，这意味着个体的认知地图会根据环境特征和认知加工特征灵活调整。随着个体对环境探索的不断深入，他们会持续将新的环境线索纳入认知地图当中。当个体需要去往不同的地点时，则会根据当前位置信息和环境信息从已有认知地图中抽取相对应的空间心智模型以规划接下来的导航路线。因此，在整个更新的过程中，空间心智模型展现出一定的暂时性。一般来说，个体的空间更新机制在存在丰富视觉线索的环境中自动发生(Meyerhoff et al. 2011)，而在视觉线索受限环境的导航中，个体能够通过听觉的感官替代来模仿视觉场景的空间更新(Pasqualotto & Esenkaya, 2016)，但可能无法实现自动更新。空间更新过程中的一个主要挑战是选择性注意问题。由于缺乏直观的视觉刺激，环境中噪声很难被分辨，导航者难以确定重要导航目标，使导航效率大大降低，因此，在视觉线索受限的环境中，从认知地图中提取的空间心智模型在导航中发挥着独特的作用，尽管导航效率可能较低，但能够保证个体空间导航的准确率。

一般环境导航中环境线索的整合与冲突发生在认知地图校正阶段。个体根据目标将环境线索与已有认知地图进行比对，由自上而下的注意编码将注意力分配给特定空间区域。线索一致时进行线索整合，巩固认知地图的参数细节。若线索不一致则出现线索冲突，个体需要校正认知地图的错误信息。视觉线索受限环境中空间信息的校正更多依赖个体跨通道的空间认知能力，在该过程中需要将来自不同感觉通道的信息重建为心理表征，再判断各种信息的有效性。最终在已有认知地图基础上补充整合，以符合真实环境。

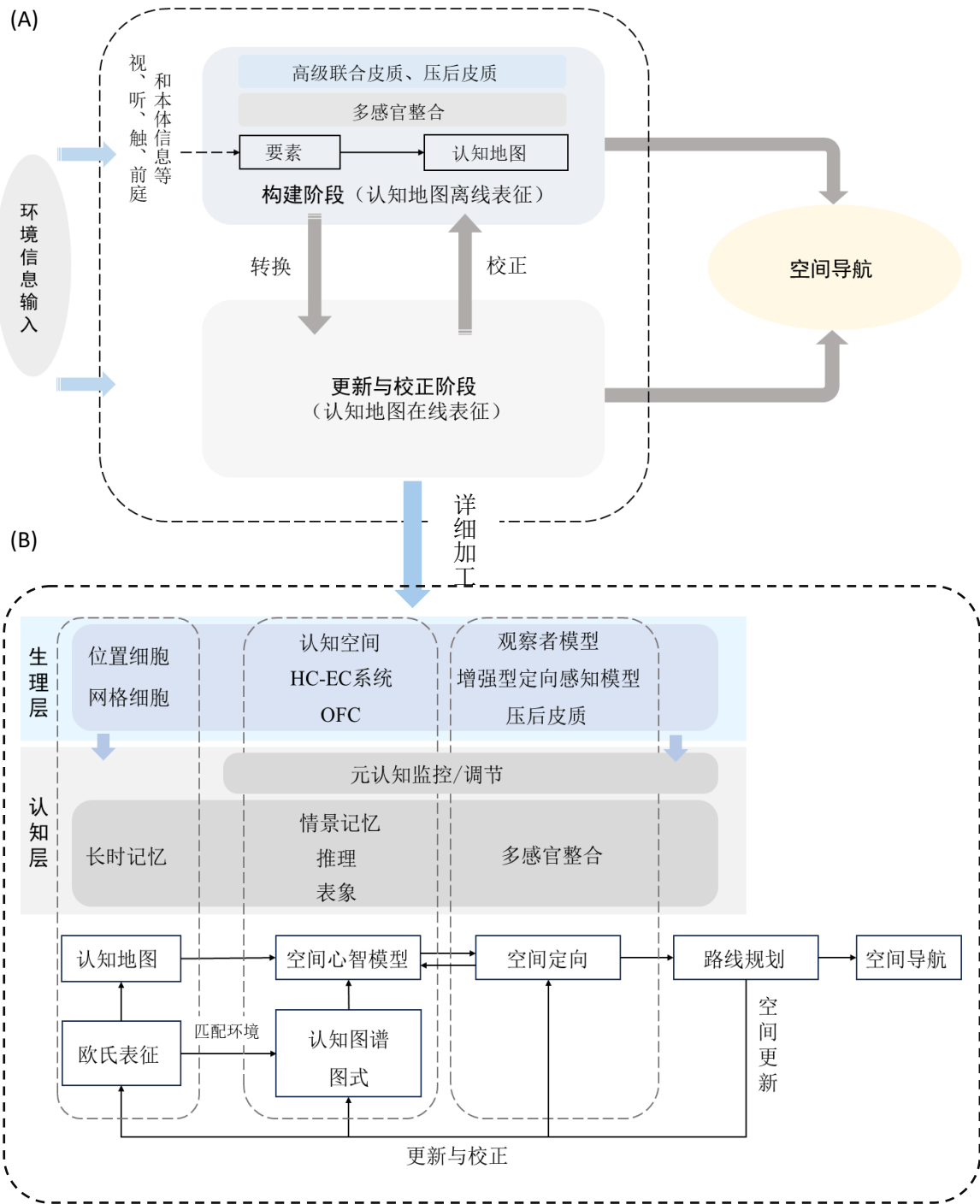


图4 认知地图在视觉线索受限环境中的认知加工机制示意图。(A)认知地图的两阶段加工论。(B)认知地图在更新与校正阶段中的认知加工过程。”

参考文献:

游旭群. (2017). 飞行空间定向. 见 游旭群(编), *航空心理学——理论、实践与应用*(pp.20-61). 浙江: 浙江教育出版社.

Antony, J. W., & Bennion, K. A. (2023). Semantic Associates Create Retroactive Interference on an Independent Spatial Memory Task. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 49(5), 701-713.

Brunec, I. K., Nantais, M. M., Sutton, J. E., Epstein, R. A., & Newcombe, N. S. (2023). Exploration patterns shape

- cognitive map learning. *Cognition*, 233, 105360.
- Brayda, L., Leo, F., Baccelliere, C., Vigni, C., & Cocchi, E. (2019, October). *A Refreshable Tactile Display Effectively Supports Cognitive Mapping Followed by Orientation and Mobility Tasks: A Comparative Multi-modal Study Involving Blind and Low-vision Participants*. Paper presented at the meeting of Proceedings of the 2nd Workshop on Multimedia for Accessible Human Computer Interfaces (pp. 9-15), New York, NY.
- Borodaeva, Z., Winkler, S., Brade, J., Klimant, P., & Jahn, G. (2023). Spatial updating in virtual reality for reproducing object locations in vista space-Boundaries, landmarks, and idiothetic cues. *Frontiers in Psychology*, 14, 1144861.
- Chen, S., Guhur, P. L., Schmid, C., & Laptev, I. (2021). History aware multimodal transformer for vision-and-language navigation. *Advances in neural information processing systems*, 34, 5834-5847.
- Chen, S., Guhur, P. L., Tapaswi, M., Schmid, C., & Laptev, I. (2022). Think global, act local: Dual-scale graph transformer for vision-and-language navigation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 16537-16547).
- Cornell, E. H., & Bourassa, C. M. (2007). Human non-visual discrimination of gradual turning is poor. *Psychological Research*, 71(3), 314-321.
- Ekstrom, A. D., & Ranganath, C. (2018). Space, time, and episodic memory: The hippocampus is all over the cognitive map. *Hippocampus*, 28(9), 680-687.
- Fernández Velasco, P., & Casati, R. (2020). Subjective disorientation as a metacognitive feeling. *Spatial cognition & computation*, 20(4), 281-305.
- Frankenstein, J., Mohler, B. J., Bühlhoff, H. H., & Meilinger, T. (2012). Is the map in our head oriented north?. *Psychological science*, 23(2), 120-125.
- Gramann, K., Hohlefeld, F. U., Gehrke, L., & Klug, M. (2021). Human cortical dynamics during full-body heading changes. *Scientific Reports*, 11(1), 18186.
- Ottink, L., Buimer, H., van Raalte, B., Doeller, C. F., van der Geest, T. M., & van Wezel, R. J. A. (2022a). Cognitive map formation supported by auditory, haptic, and multimodal information in persons with blindness. *Neuroscience & Biobehavioral Review*, 140, 104797.
- Ottink, L., van Raalte, B., Doeller, C. F., Van der Geest, T. M., & Van Wezel, R. J. A. (2022b). Cognitive map formation through tactile map navigation in visually impaired and sighted persons. *Scientific Reports*, 12(1), 11567.
- Park, S. A., Miller, D. S., Nili, H., Ranganath, C., & Boorman, E. D. (2020). Map making: constructing, combining, and inferring on abstract cognitive maps. *Neuron*, 107(6), 1226-1238.
- Pasqualotto, A., & Esenkaya, T. (2016). Sensory substitution: the spatial updating of auditory scenes “Mimics” the spatial updating of visual scenes. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 10, 79.
- Peacock, C. E., & Ekstrom, A. D. (2019). Verbal cues flexibly transform spatial representations in human memory. *Memory*, 27(4), 465-479.
- Perelman, B. S., Evans III, A. W., & Schaefer, K. E. (2017, September). Mental model consensus and shifts during navigation system-assisted route planning. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 61, No. 1, pp. 1183-1187). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

- Raithel, C. U., & Gottfried, J. A. (2021). Using your nose to find your way: Ethological comparisons between human and non-human species. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *128*, 766-779.
- Santoro, I., Murgia, M., Sors, F., & Agostini, T. (2020). The Influence of the Encoding Modality on Spatial Navigation for Sighted and Late-Blind People. *Multisensory Research*, *33*(4-5), 505-520.
- Santoro, I., Murgia, M., Sors, F., & Agostini, T. (2020). The Influence of the Encoding Modality on Spatial Navigation for Sighted and Late-Blind People. *Multisensory Research*, *33*(4-5), 505-520.
- Grillini, A., Renken, R. J., & Cornelissen, F. W. (2019). Attentional Modulation of Visual Spatial Integration: Psychophysical Evidence Supported by Population Coding Modeling. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *31*(9), 1329-1342.
- Hersh, M. (2020). Mental maps and the use of sensory information by blind and partially sighted people. *ACM Transactions on Accessible Computing*, *13*(2), 1-32.
- Kaski, D., Quadir, S., Nigmatullina, Y., Malhotra, P. A., Bronstein, A. M., & Seemungal, B. M. (2016). Temporoparietal encoding of space and time during vestibular-guided orientation. *Brain*, *139*(2), 392-403.
- Keshavarzi, S., Velez-Fort, M., & Margrie, T. W. (2023). Cortical Integration of Vestibular and Visual Cues for Navigation, Visual Processing, and Perception. *Annual Review of Neuroscience*, *46*, 301-320.
- Keller, A. M., Taylor, H. A., & Brunyé, T. T. (2020). Uncertainty promotes information-seeking actions, but what information?. *Cognitive Research: Principles and Implications*, *5*(1), 42.
- Knierim, J. J., & Hamilton, D. A. (2011). Framing spatial cognition: neural representations of proximal and distal frames of reference and their roles in navigation. *Physiological reviews*, *91*(4), 1245-1279.
- Koriat, A. (1997). Monitoring one's own knowledge during study: A cue-utilization approach to judgments of learning. *Journal of experimental psychology: General*, *126*(4), 349.
- Marsh, J. E., Vachon, F., Sörqvist, P., Marsja, E., Röer, J., Richardson, B. H., & Ljungberg, J. K. (2023). Irrelevant changing-state vibrotactile stimuli disrupt verbal serial recall: implications for theories of interference in short-term memory. *Journal of Cognitive Psychology*, *36*(1), 78-100.
- Macauda, G., Moisa, M., Mast, F. W., Ruff, C. C., Michels, L., & Lenggenhager, B. (2019). Shared neural mechanisms between imagined and perceived egocentric motion - A combined GVS and fMRI study. *Cortex*, *119*, 20-32.
- Mason, L. A., Thomas, A. K., & Taylor, H. A. (2022). On the proposed role of metacognition in environment learning: recommendations for research. *Cognitive Research: Principles and Implications*, *7*(1), 104.
- Meyerhoff, H. S., Huff, M., Papenmeier, F., Jahn, G., & Schwan, S. (2011). Continuous visual cues trigger automatic spatial target updating in dynamic scenes. *Cognition*, *121*(1), 73-82.
- Medendorp, W. P., & Selen, L. J. P. (2017). Vestibular contributions to high-level sensorimotor functions. *Neuropsychologia*, *105*, 144-152.
- Meijer, G. T., Montijn, J. S., Pennartz, C. M. A., & Lansink, C. S. (2017). Audiovisual Modulation in Mouse Primary Visual Cortex Depends on Cross-Modal Stimulus Configuration and Congruency. *Journal of Neuroscience*, *37*(36), 8783-8796.
- Nardi, D., Carpenter, S. E., Johnson, S. R., Gilliland, G. A., Melo, V. L., Pugliese, R., ... & Kelly, D. M. (2022). Spatial reorientation with a geometric array of auditory cues. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *75*(2), 362-373.

- Navratilova, Z., & McNaughton, B. L. (2014). Models of Path Integration in the Hippocampal Complex. In: Derdikman, D., Knierim, J. (eds) *Space, Time and Memory in the Hippocampal Formation*. Springer, Vienna.
- van Ments, L., & Treur, J. (2021). Reflections on dynamics, adaptation and control: a cognitive architecture for mental models. *Cognitive Systems Research*, 70, 1-9.
- Voros, J., Kravets, V., Smith, K., & Clark, T. K. (2024). Humans gradually integrate sudden gain or loss of visual information into spatial orientation perception. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1274949.
- Wang, R. F., & Spelke, E. S. (2000). Updating egocentric representations in human navigation. *Cognition*, 77(3), 215-250.
- Williams, H. P., Voros, J. L., Merfeld, D. M., Clark, T. K., & Naval Medical Research Unit Dayton University of Colorado Ohio State University. (2021). Extending the observer model for human orientation perception to include in-flight perceptual thresholds. *NAVAL MEDICAL RESEARCH UNIT DAYTON*.
- Wiener, J. M., Berthoz, A., & Wolbers, T. (2011). Dissociable cognitive mechanisms underlying human path integration. *Experimental Brain Research*, 208(1), 61-71.
- Widloski, J., & Fiete, I. R. (2014). A model of grid cell development through spatial exploration and spike time-dependent plasticity. *Neuron*, 83(2), 481-495.
- Zingg, B., Hintiryan, H., Gou, L., Song, M. Y., Bay, M., Bienkowski, M. S., . . . Dong, H. W. (2014). Neural Networks of the Mouse Neocortex. *Cell*, 156(5), 1096-1111.
- Zhong, J. Y., & Kozhevnikov, M. (2016). Relating allocentric and egocentric survey-based representations to the self-reported use of a navigation strategy of egocentric spatial updating. *Journal of Environmental Psychology*, 46, 154-175.

意见 6: 6) 针对认知地图的动态更新与校正机制, 不论视觉有无受限, 均会经过类似的过程。那么视觉受限环境所独有的环节或者加工阶段是什么呢? 本文并不大清晰。

回应 6: 感谢审稿人的意见。我们认为在视觉线索受限环境导航中, 更为关键的环节和加工过程是个体根据环境特点与导航目的在认知地图中抽象出空间心智模型以进行决策和推理, 这一过程也体现了认知地图在视觉线索受限环境中独有的预览功能, 增加的这一部分内容位于正文 p9-11。

“在视觉线索丰富的环境中, 个体能够依靠即时捕捉的视觉信息来指引方向。然而, 在视觉线索受限的情境里, 导航便需借助先前的环境认知和初步的策略规划, 空间心智模型 (spatial mental model) 为这一认知过程提供支持。该模型不仅映射环境结构, 还融入了导航潜在风险评估以及导航者的个性偏好与经验, 其灵活性和动态性能够有效辅助个体的空间决策 (Perelman et al., 2017)。在基于视觉线索的导航中, 人们可以快速利用视觉信息作出反应因此空间心智模型并非不可或缺, 但当视觉信息有限或缺失时, 视觉线索的匮乏便会降低个体的导航自信, 而从认知地图中抽象出的空间心智模型能够帮助个体掌控导航进程。在这种情境下, 认知地图也展现了其在视觉线索受限环境中的独特优势, 通过预览功能帮助个体验证路线的正确性, 并在实际导航中提升信心 (Hersh, 2020)。”

在探讨认知地图的表征形式时，都有充分的证据支持欧氏空间表征和认知图谱表征。结合个体认知加工过程，两种表征形式可能同时存在。个体探索新环境后形成的认知地图旨在帮助个体了解环境全貌，其中包含的环境信息越客观准确越好。研究表明，人们在自由探索空间环境形成认知地图的过程中会选择相互具有连接性的路线，并且会回访已走过的路线来确认环境中各路线间的关系以保证认知地图准确性(Brunec et al., 2023)。这一阶段认知地图的表征形式因侧重于对物理空间的精确描述更贴近欧氏空间的表征，包括对距离和方向的准确反映。Widloski 和 Fiete(2014)提出的网格细胞发展模型将网格细胞网络的发展分为可塑性阶段和活动阶段，可塑性阶段中刺激通过个体对周围环境探索时对远端线索和近端线索的整合输入位置信息，这一阶段的网格细胞为大脑提供了关于环境的位置和距离信息。在基于认知地图的导航中，个体首先从认知地图中提取相关的空间心智模型，完整且有效的空间心智模型不仅包含个体形成对各类环境要素的欧氏空间表征，还包括认知要素。而要完全整合环境要素与认知要素需消耗极大认知资源。鉴于个体认知资源的有限性，空间心智模型的表征可能倾向于采用图式或认知图谱的形式，个体依靠表象构建环境中的节点与链接并将认知要素的相关抽象概念纳入空间心智模型，认知空间可能是支持空间心智模型表征的认知神经基础。值得注意的是，这里提到的空间心智模型的认知图谱式的表征与欧氏地图的认知地图并不独立存在，而是个体在认知地图的基础上形成的空间心智模型。

个体在空间心智模型中的加工以基于记忆和表象的抽象推理为主，通过模型中空间信息的推理制定针对未来导航的路线规划。Park 等(2020)的研究也将海马(hippocampus, HC)和内嗅皮层(entorhinal cortex, EC)在空间表征中的作用扩展至推理抽象空间信息中。首先，HC 和 EC 对空间导航、定位和情景记忆中的作用已较为明确(Ekstrom & Ranganath, 2018)。其次，在眶额皮层(orbitofrontal cortex, OFC)的研究中发现，OFC 代表一个人在认知地图中的任务空间位置而非物理空间位置，并且海马和 OFC 都参与了基于模型的推理，使原本独立的刺激可以相互关联。由此，HC-EC 系统对传递性推理尤为重要。Park 等(2020)对比了空间环境认知地图和抽象社会结构认知地图的神经活动后认为大脑会使用相同的神经系统来表征连续空间以编码抽象空间中离散客体之间的关系并进行推理。个体能够通过心智模型反映动态系统的时间关系来描述推理过程(van Ments & Treur, 2021)，同理，个体也能够通过空间心智模型模拟空间导航以达到合理规划路线的目的。由于空间心智模型中的信息以抽象信息为主并涉及到推理，个体感知到的风险或主观经验都会对空间心智模型产生影响。因此，抽象出的空间心智模型存在较大个体差异，这也能够解释个体在视觉线索受限环境中的导航绩效表现出的个体差异。

基于表象的形成过程、空间导航的复杂性以及日常导航经验，我们将语言这一因素纳入其中。计算机领域的概念可被用以说明语言在视觉线索受限环境导航中的作用。在计算机领域，研究者通常将导航看作视觉与语言导航(Vision-and-Language Navigation, VLN)，该过程要求代理理解自然语言指令、感知视觉世界，并执行导航操作以到达目标位置。这种任务的挑战在于，代理需要不断接收新的视觉观测信息，并将其与指令进行对齐(Chen et al., 2021)。Chen 等(2022)提出的机器学习模型，将导航过程分为两个模块，第一个模块是以视觉信息为基础并随时间更新的拓扑映射模块，第二个模块为全局动作规划模块，利用图形转换器捕捉跨模态的视觉与语言关联，从而引入与图形相关的拓扑知识以增强图形编码。据此推断，在视觉线索受限导航的环境中，个体同样会在其空间心智模型中借助语言信息来更新自身的位

置感知并反映思维过程以进行逻辑推理,确保即使环境中视觉线索不足也能有效地进行空间导航。”

参考文献:

Brunec, I. K., Nantais, M. M., Sutton, J. E., Epstein, R. A., & Newcombe, N. S. (2023). Exploration patterns shape cognitive map learning. *Cognition*, 233, 105360.

Chen, S., Guhur, P. L., Schmid, C., & Laptev, I. (2021). History aware multimodal transformer for vision-and-language navigation. *Advances in neural information processing systems*, 34, 5834-5847.

Chen, S., Guhur, P. L., Tapaswi, M., Schmid, C., & Laptev, I. (2022). Think global, act local: Dual-scale graph transformer for vision-and-language navigation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 16537-16547).

Ekstrom, A. D., & Ranganath, C. (2018). Space, time, and episodic memory: The hippocampus is all over the cognitive map. *Hippocampus*, 28(9), 680-687.

Park, S. A., Miller, D. S., Nili, H., Ranganath, C., & Boorman, E. D. (2020). Map making: constructing, combining, and inferring on abstract cognitive maps. *Neuron*, 107(6), 1226-1238.

Perelman, B. S., Evans III, A. W., & Schaefer, K. E. (2017, September). Mental model consensus and shifts during navigation system-assisted route planning. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*.

Hersh, M. (2020). Mental maps and the use of sensory information by blind and partially sighted people. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 13(2), 1-32.

van Ments, L., & Treur, J. (2021). Reflections on dynamics, adaptation and control: a cognitive architecture for mental models. *Cognitive Systems Research*, 70, 1-9.

Widloski, J., & Fiete, I. R. (2014). A model of grid cell development through spatial exploration and spike time-dependent plasticity. *Neuron*, 83(2), 481-495.

意见 7: 7) 尽管飞行员在空中确实视觉受限,然而他们会辅助大量的传感器、仪器表盘进行地图定位等等,因此并不是特别契合实际日常生活中视觉受限情况。可以思考有迷雾、夜晚等现实生活中视觉受限情形下认知地图的形成过程。

回应 7: 感谢审稿人的意见。本文所关注的视觉线索受限环境导航希望能够包含飞行员高空飞行以及日常生活中的迷雾、夜晚等情境。为此,其次我们首先明确了“视觉线索受限环境”这一概念,明确了这一概念所包含的环境范围。其次,我们所提出空间心智模型能够回答认知地图如何支持在视觉线索受限环境中导航这一问题。对“视觉线索受限环境”的定义如下,位于正文 p1,关于认知地图在视觉线索受限环境中的动态加工机制位于文章的第三部分,位于正文 p9-16 并已在意见 5 的回应 5 中附上了这一部分内容。

“目前,空间导航相关研究多聚焦于视觉主导的地面环境,但随着人类对空天海环境的不断探索,空间导航对个体空间认知能力和导航策略的要求提出了更高的要求。事实上,与视觉主导的地面导航环境不同,黑暗、夜航、低能见度以及封闭空间等视觉线索受限环境

(navigation in visually cue-restricted environments)中, 个体受视觉线索模糊或缺失、环境信息的不确定性以及身体运动信息线索限制等因素的影响难以形成完整的空间表征, 从而增加了个体空间导航难度(Creem-Regehr et al., 2021)。”

参考文献:

Creem-Regehr, S. H., Barhorst-Cates, E. M., Tarampi, M. R., Rand, K. M., & Legge, G. E.(2021). How can basic research on spatial cognition enhance the visual accessibility of architecture for people with low vision?. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 6(3), 1-18.

**意见 8:** 8) 视觉受限下的认知地图是否更接近于抽象概念形成过程呢? 是否与视觉主导下的认知地图形成有着本质的区别呢?

**回应 8:** 感谢审稿人的意见。我们认为, 个体无论是在常规导航环境还是视觉线索受限导航环境中所构建的认知地图均以对环境表征的形式存在, 因为认知地图的主要作用以完整的环境表征支持个体空间导航。但在基于认知地图的导航过程中, 个体需要完成寻找捷径、路线规划等任务时, 需要对抽象的环境表征进行认知加工, 此时, 原本以视觉表象形式存在的环境表征应以抽象概念进行, 以便个体能够进行空间推理和决策, 实现路线规划。在视觉线索丰富的环境中, 个体往往依靠即时捕捉的视觉信息进行这一过程。然而, 在视觉线索受限的情境里, 导航便需借助先前的环境认知和初步的策略规划。由此, 我们结合以往研究提出, 个体会从认知地图中抽象出空间心智模型规划路线。空间心智模型仅映射了环境的物理结构, 还融入了导航潜在风险评估以及导航者的个性偏好与经验, 支持个体以基于记忆和表象的抽象推理制定针对未来导航的路线规划。

视觉主导形成的认知地图与空间心智模型之间存在本质差别。在本研究中所提及的认知地图的构成要素中虽然考虑了环境要素和个体认知要素, 但并未对要素间的组织形式做出系统性说明。而空间心智模型主要侧重个体基于认知地图构成要素而进行的认知加工过程。

---

## 第二轮

**审稿人 1 意见:** 该文作者做了大量的修改, 能回答评审专家的意见, 修改的内容也丰富了关于视觉线索缺失时的导航机制, 因此我的判断是该文适合发表。

**审稿人 3 意见:** 作者对审稿意见的回复和修改比较全面, 论文可发表。

**编委 1 复审意见:** 同意发表。

**编委 2 复审意见:**

这篇文章目前感觉还是存在比较大的问题, 需要修改。

**意见 1:** 第一, 这个文章最大的问题是没有很好说明视觉线索受限和非受限的情况下,



认知地图的动态加工有什么区别，说得都比较笼统模糊。

**回应 1:** 感谢编委专家的意见。认知地图的动态加工在视觉线索受限环境和视觉线索非受限（既文中提到的一般导航）导航中的区别体现在以下几方面。首先，认知地图在视觉线索受限环境导航和视觉线索非受限环境导航中的作用不同。在视觉线索非受限环境导航中，个体可直接通过视觉线索获得空间信息完成空间导航。而在视觉线索受限环境的导航中，个体依赖认知地图提供的空间信息完成空间导航和实现路线规划。相比较一般环境导航而言，认知地图在视觉线索受限环境导航中更加重要，同时也承担了更多功能。我们在第三节增加相关内容对比两种环境中认知地图加工的区别。增加内容如下，**详细内容位于正文第三节 p9-10，见红字部分。**

**“一般导航中，个体依赖视觉线索进行路径整合以构建认知地图。视觉线索蕴含丰富的空间信息，能够提供精确的距离、方向和物体位置信息，从而显著提升个体空间定位和空间导航的准确性。然而，在视觉线索受限环境导航中，因视觉线索缺失或模糊、视敏度下降和视野狭窄等问题，个体对距离、方位等空间信息的判断能力受到削弱(Creem-Regehr et al., 2021)。同时，由于缺乏视觉反馈校正路径整合过程，容易累积路径整合误差，进而导致导航失败，降低导航信心。认知地图作为反映环境空间特征的全景地图为个体提供必要的环境空间信息，相较于一般环境导航，个体在视觉线索受限环境导航中对认知地图的依赖程度更高(Cheung et al., 2012)。这一点在啮齿类动物的研究中得到了支持。研究表明，小鼠在黑暗中依赖路径整合感知周围环境(Cheung et al., 2012)。在人类导航中，因人与环境交互的复杂性，认知地图也承担更多功能。除提供基本环境信息外，为保证空间导航的准确性，个体需要主动整合多感官信息以更新和校正认知地图，体现了认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工。同时，元认知监控在整个更新和校正过程中起着至关重要的作用，它使个体能够评估和调整自己的空间信息处理策略。本节详细阐述了认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工机制，从空间心智模型的角度出发探讨了在视觉线索受限环境中认知地图的更新-校正阶段。”**

其次，认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工与一般导航最大的区别在于，个体会随着空间导航过程更新-校正认知地图，这一过程由空间心智模型支持。具体来说，个体通过听觉、前庭觉和本体觉等其他感知觉信息提供与自我运动有关的信息，以此完成空间更新。此外，个体会通过从认知地图中提取的空间心智模型为路线规划提供支持。空间心智模型不仅映射环境结构，更是以认知空间为基础融合了个体对导航过程中潜在风险的评估、导航者的个性偏好与经验以及导航过程中相关的认知事件。因其高度的灵活性和动态性，也能够有效地协助个体做出空间决策。我们在原文基础上详细叙述了相关内容，并增加了部分研究证据。修改后内容如下，**详细内容位于正文第三节的第二小节红字部分，p11-13。**

### **“3.2 认知地图在视觉线索受限环境中的更新-校正**

**空间导航开始后，认知地图由静态离线表征转换为动态在线表征(Eilam, 2014)，同时，表征的内容随环境改变而发生变化。在视觉线索受限环境中，个体依赖认知地图进行定位与路径规划，并持续更新并校正环境信息以确保空间信息的准确性。该阶段中，首先要求个体保持对自身运动方向的认识，空间更新为此提供认知基础。一般导航中，空间更新机制自动发生，路标和空间边界等环境线索促进这一过程(Borodaeva et al., 2023; Meyerhoff et al. 2011)。**

视觉线索受限环境的导航中，即使缺乏视觉信号输入，听觉、本体觉和前庭觉提供的信息也足以支持空间更新(肖承丽, 刘传军, 2014; Gramann et al., 2021; Pasqualotto & Esenkaya, 2016)。例如，当人们的身体运动方向改变超过 90°，前庭线索提供的自我运动信息支持空间更新(Gramann et al., 2021)。个体通过多感官信息弥补缺失的空间环境信息，并更新空间心智模型中的相关信息。在该过程中，个体主动参与以完成认知地图中的空间更新(肖承丽, 刘传军, 2014)。

视觉线索受限环境的导航中，认知地图的空间更新不仅涉及在线表征形式的差异，还关系到空间更新策略的选择。空间更新策略分为连续更新和构型更新。连续更新以自我为中心，通过自我运动信息动态调整自身位置。研究表明，认知地图的在线更新通常基于自我中心参考框架，并受限于工作记忆的容量(Lu et al., 2020)。然而，随着环境规模的增加，这种自我中心参考框架倾向会发生变化。个体在较大尺度环境（如城镇）中倾向于采用构型更新，即基于环境中心参考框架计算自身在认知地图中的位置和环境朝向，并容易表现出指北倾向从而获得更高的导航精度(Frankenstien et al., 2012; Wiener et al., 2011; Navratilova & McNaughton, 2014; Zhong & Kozhevnikov, 2016)。这种空间策略的变化体现出了认知地图的灵活性，该特征在视觉线索受限环境导航中尤为重要。虽然个体通常依赖连续更新策略进行导航，但在特定情境下（如视觉线索缺乏或环境发生变化时），构型更新策略会被激活，以帮助个体更好地识别环境全貌并调整导航路线。盲人的空间感知研究也表明，在没有视觉线索时，个体更多依赖听觉刺激输入并通过自我中心参考框架进行空间定位，这也支持了在视觉线索受限环境导航中连续更新策略的有效性(Vercillo & Gori, 2016)。然而，当个体察觉到环境线索与认知地图之间存在偏差或导航目标发生变化时，个体可通过提取认知地图中的空间心智模型重新规划导航路线，此时的空间更新策略也随之转换为构型更新策略。通过这种方式，个体能够高效完成空间更新，并在视觉线索受限环境导航中灵活应对变化。因此在视觉线索受限环境导航中，要求个体能够灵活转换空间更新策略。视觉线索受限环境导航中的空间更新所面临的主要挑战是选择性注意问题。由于缺乏直观的视觉刺激，环境中的噪声很难被分辨，导航者难以确定重要导航目标，使导航效率大大降低。此外，由于视觉线索受限环境导航中有更多认知活动参与其中，也会消耗更多的注意资源(Barhorst-Cates et al., 2016)，同时空间更新的构型更新策略虽然在导航精度上更优，但它通常也需要更多的认知资源，这就要求个体以更节省认知资源的方式表征环境信息。这一过程再次证明认知地图在视觉线索受限环境导航中的表征与一般导航不同，采用以认知空间为基础的空间心智模型灵活表征环境。

认知地图在更新-校正阶段的另一重要作用是支持导航的路线规划。一般环境导航中，个体以启发式方法结合空间环境特征如地形、路线复杂性等规划路线(Frame et al., 2023)。这些环境特征往往以视觉输入为主导。然而，在视觉线索受限环境的导航中，视觉线索不足往往会削弱导航信心，从而导致个体在导航过程中更加依赖认知地图以进行路线规划，其中空间心智模型能够为空间导航的路线规划提供支持。从认知地图中抽象出空间心智模型不仅映射环境结构，更融合了导航过程中的潜在风险评估以及导航者的个性偏好与经验。得益于其高度的灵活性和动态性，它能够有效地协助个体做出空间决策(Perelman et al., 2017)。部分认知神经学的研究为此提供支持。Park 等(2020)的研究将海马(hippocampus, HC)和内嗅皮层(entorhinal cortex, EC)在空间表征中的作用扩展至推理抽象空间信息中。HC 和 EC 对空间导

航、定位和情景记忆中的作用已较为明确(Ekstrom & Ranganath, 2018)。在眶额皮层(orbitofrontal cortex, OFC)的研究中发现, OFC 反映刺激在认知地图中的任务空间位置而非物理空间位置, 并且海马和 OFC 都参与了基于模型的推理过程, 使原本独立的刺激可以相互关联。Park 等(2020)对比了环境认知地图和抽象社会结构认知地图的神经活动后认为大脑会使用相同的神经系统表征连续空间以编码抽象空间中离散客体之间的关系, 并通过空间心智模型反映动态系统的时间关系来描述推理过程(van Ments & Treur, 2021)。认知地图以这种方式发挥了在视觉线索受限环境导航中的独特优势, 既通过预览功能帮助个体验证路线的正确性并提升导航信心(Hersh, 2020)。由于空间心智模型中的信息以抽象信息为主并涉及到推理, 个体感知到的风险或主观经验都会对空间心智模型产生影响。因此, 抽象出的空间心智模型存在较大个体差异, 这也能够解释在视觉线索受限环境中的导航绩效表现出的个体差异。”

**意见 2:** 第二, 提到很多概念的笼统解释, 但是这些概念之间的关系、概念的异同都没有很好说明, 认知地图, 空间心智模型, 认知图谱、图式、认知空间等等。

**回应 2:** 感谢编委专家指出的问题。针对专家提出的问题我们对文章内的两处内容进行了修改。

1、我们详细解释了文中出现的各个概念。文中在“2.2 认知地图要素组织形式”这一部分中详细解释了认知地图、认知图谱和认知空间的概念, 并增加了“2.2.5 欧式空间、认知图谱和认知空间的异同”这一小节说明各个概念间的异同。而“图式”这一概念仅出现在对“认知图谱”这一概念的解释中, 位于**正文 p5** (原文: “认知图谱可看作是转换导航状态的特定动作序列集合。海马中的位置细胞将空间和时间划分为不同片段(Wang et al., 2020; Bulkin et al., 2020), 按照经验的层次结构进行编码以表示环境要素之间的图式关系(Sun et al., 2020; Baraduc et al., 2019)。”), 因此, 没有将“图式”这一概念与“认知地图”、“认知图谱”和“认知空间”这三个概念作比较。**增加的相关内容如下, 位于正文第二节的第二小节, 详细内容见正文 p9。**

#### **“2.2.5 欧式空间、认知图谱和认知空间的异同**

认知地图反映个体对环境空间的认知。欧式空间、认知图谱和认知空间均探讨了个体对环境的表征形式, 但各概念所包含的内容并不相同, 侧重点也有所不同。欧式空间侧重于对环境空间度量信息的表征, 将环境信息纳入全局坐标系中(Peer et al., 2021), 其表征形式类似“地图”, 帮助个体有效判断物体间距离及相对方向。而认知图谱的表征形式不使用任何空间坐标系, 即使人们的欧式空间表征出现认知扭曲, 但依然了解路标之间的拓扑结构(顺序和连接性)(Lynch, 1960)。而无论是欧式空间还是认知图谱, 仅从空间信息的角度解释了认知地图各要素的表征形式, 但众多研究表明认知因素如标志性事件、时间知觉等会影响人们对环境的表征(Sheldon & El-Asmar, 2017; Teghil et al., 2019)。认知空间在环境表征的基础上将抽象概念纳入其中以更完整且灵活的形式表现空间导航, 该理论的优点是允许个体在表征空间环境信息的同时将导航中的相关“事件”作为一个凸区域存在, 使个体能够随时提取相关事件以便规划路线。

表 1 构成要素组织形式的相关概念

概念	来源	表征内容
认知地图	Tolman, 1948	空间环境信息的物理表征
认知图谱	Chrastil & Warren, 2014	仅包含节点和链接的动作序列集合
认知空间	Bullmund et al., 2018	反映知识层次或嵌套概念的多尺度表征

”

2、文章在“3.1 空间心智模型”这一部分进行了修改，详细解释了空间心智模型这一概念。由于空间心智模型并非指单个心理过程，而是包含了高级认知的复杂认知加工过程，因此，并没有将这一概念与上述的欧式空间、认知图谱和认知空间的概念做比较。修改后内容如下，位于文章第三节的第一小节，详见正文 p10-11。

### “3.1 空间心智模型

个体在探索环境后形成的认知地图旨在客观、全面地反映环境信息。在自由探索空间的过程中人们偏好选择连接性强的路径构建认知地图，并通过回访已探索的路线来校验各路径间的关系，确保认知地图准确性(Brunec et al., 2023)。因此，在构建阶段，认知地图以描述空间环境的物理特征为主，其表征形式更接近欧式空间，如对距离和方向的精确表示。Widloski 和 Fiete(2014)的网格细胞发展模型将网格细胞网络的发展划分为可塑性阶段和活动阶段。在可塑性阶段，个体整合远近环境线索为大脑提供环境和距离信息，从而支持认知地图在构建阶段的欧式空间表征。认知地图的更新-校正阶段中，空间心智模型(spatial mental model)以认知空间为基础，支持个体在视觉线索受限环境中的导航。空间心智模型能够整合特定事件的时间、空间和个体相关特征等信息，具有抽象性特征(Noordzij et al., 2006)。因视觉线索受限环境中视觉线索的限制，个体需要综合环境特征与认知因素理解环境信息。研究发现，黑暗环境中导航的小鼠在规则且可预测的环境结构中的空间行为绩效较高，该过程由网络细胞支持(Yaski et al., 2012)。与认知因素相关的研究中发现，情绪信息影响个体对路线线索的空间记忆效率(Chan et al., 2014)。有效的空间心智模型不仅表征各类环境要素，还需整合认知要素，这对个体认知资源提出了较高要求。认知空间的表征形式适应了个体认知资源的有限性，通过表象构建环境中的节点与链接，并将认知要素的相关抽象概念纳入其中。据此，本研究推测，视觉线索受限环境导航中认知地图的动态加工在空间心智模型中进行，并且以认知空间为认知基础。”

意见 3：第三，认知空间那个部分的描述很难读懂。

回应 3：感谢编委专家指出的问题，我们修改了“2.2.4 认知空间”的语言描述，修改后的内容如下，详见正文第二节的第二小节 p7-8。

## “2.2.4 认知空间

上述表征形式均聚焦于认知地图对空间环境信息的物理表征,但越来越多的研究者认为认知地图不仅涵盖空间环境信息,还包含具有时序性的事件序列和与行动相关的抽象概念(Bellmund et al., 2018; Park et al., 2020)。Bellmund 等(2018)提出认知空间(cognitive space)是由刺激的多种质量维度(包括物理特征如位置、方向和抽象特征如颜色、形状)构成的空间表征形式(图3)(Gardenfors, 2004)。刺激根据不同维度的特征值在认知空间中定位。具体来说,认知空间是由满足几何约束(如邻近性和等距性)的维度所构建的空间。每个刺激根据其在相关维度上的特征值被定位在认知空间中的特定位置。刺激的概念属性界定为相关领域内的凸区域(convex region),即在某一维度上,若设定两点的坐标为  $x$  和  $y$ ,则该区域内的任意点都包含于该区域内。基于概念属性的空间定义,概念原型位于区域核心,其他相关点则根据与核心概念的距离分布在不同位置。通过欧氏度量的连续空间 Voronoi 镶嵌,空间中所有对象的位置被离散化从而更接近概念原型,形成凸区域(Gardenfors, 2004; Bellmund et al., 2018)。在这种框架下,属性构成了概念的最简单形式,个体可基于凸区域对已有概念进行归纳推理。即如果两个刺激  $x$  和  $y$  存在共同属性,则推断  $x$  和  $y$  之间的其他刺激具有相同属性,复杂属性则由多个领域和其他相关联信息组成。概念则可根据多个领域中的凸区域以显著性加权。例如,在表征“故宫”时,其概念将由地理位置特征、文化属性和建筑样式等多个凸区域共同定义。HC-EC 系统中的处理机制作为人类高级认知的通用格式支持认知空间(Bellmund et al., 2018)。例如,位置细胞群的放电场提供个体周围环境的空间表征,网格细胞的六边形对称放电模式通过提供环境坐标系支持空间导航(Hafting et al., 2005)。位置细胞和网格细胞提供的信息可能是用于映射经验维度的通用机制,这一机制下,位置细胞支持个体索引由内嗅网格系统支持的认知空间中的刺激。位置细胞与网格细胞的放电场随啮齿类动物海马背腹轴的延伸而增大(Stensola et al., 2012),这与认知空间在不同粒度下的映射相契合,反映了知识层次或嵌套概念的多尺度表征。另外,位置细胞和网格细胞在重建和 theta 振荡期间的序列活动使个体可以通过不同位置模拟移动轨迹(Trettel et al., 2019; Buckner et al., 2010),从而支持适应性认知和行为。认知空间的几何定义允许个体灵活推理信息。通过将连续的位置细胞和网格细胞的群体编码映射到认知空间的维度,相似的刺激由于其在相关维度上的相近特征值而被放置在认知空间中的相近位置,而不相似的刺激则被放置在较远的位置。这种映射机制使得大脑能够对从未经历过的刺激进行推断,并支持高级认知功能。对认知空间的研究揭示了个体如何利用特定功能细胞的连续多尺度的编码映射空间,该系统赋予了个体灵活表征不同环境并通过时间序列模拟空间轨迹的能力。”

**意见 4:** 第四,认知地图在视觉线索受限环境中的更新与校正部分也有问题,提到的研究大多都是非受限环境下的,缺乏受限环境下的介绍和总结,而且也就是说非受限环境下一样有认知地图的动态加工,那么到底有什么区别,看起来所谓的视觉线索受限环境中只是刻意加了凸显差异,但实际上没有很好说明。

**回应 4:** 感谢编委专家指出的问题。我们对文章的第三节进行了细致的修改,并对部分内容的位置进行调整以便读者清晰了解认知地图的动态加工机制。首先文章中说明了认知地

图在视觉线索受限环境导航中的必要性。在视觉线索受限环境中，因视觉线索缺失或模糊、视敏度下降和视野狭窄等问题，个体对距离、方位等空间信息的判断能力受到削弱。同时，由于缺乏视觉反馈校正路径整合过程，容易累积路径整合误差，进而导致导航失败，降低导航信心。认知地图作为反映环境空间特征的全景地图为个体提供必要的环境空间信息，相比于一般环境导航，个体在视觉线索受限环境导航中对认知地图的依赖程度显著更高。

其次，文章在介绍了空间心智模型的基础上阐述了认知地图在视觉线索受限环境导航中的更新-校正阶段，这一部分也是认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工机制与一般导航有较大区别的阶段。一般导航中，即使个体不及时更新认知地图，也能够通过视觉线索迅速判断自身位置或自动进行空间更新。而在视觉线索受限环境导航中，个体需要通过多感官整合克服视觉线索缺乏的问题，并且在主动更新空间心智模型中相关信息的同时灵活转换空间更新策略。此外，认知地图在视觉线索受限环境导航中的另一重要作用是支持个体进行路线规划。从认知地图中抽象出空间心智模型不仅映射环境结构，更融合了导航过程中的潜在风险评估以及导航者的个性偏好与经验。得益于其高度的灵活性和动态性，它能够有效地协助个体做出空间决策。认知地图以这种方式发挥了在视觉线索受限环境导航中的独特优势，既通过预览功能帮助个体验证路线的正确性、支持路线规划并提升导航信心。

再次，无论是认知地图的更新还是校正，都需要个体准确的空间定向。因此，本研究在第三节中也详细阐述了视觉线索受限环境导航中的空间定向。我们阐述了飞行员空间定向的相关理论，以此解释在视觉线索受限环境导航中的空间定向问题。与之相对的，产生空间迷失的主要原因可能是认知地图的失效。因此，保证认知地图的准确性在视觉线索受限环境导航中格外重要。

最后，由于认知地图在视觉线索受限环境导航中的作用涉及空间心智模型的构建以及空间定向，这都受到个体主观体验的影响。结合以往研究中提到元认知在路线学习中的作用，我们提出，相较于一般导航情境，元认知在视觉线索受限环境导航中参与程度更深。

根据修改后的内容，我们也细化了认知地图在视觉线索受限环境中的认知加工机制示意图，相关内容位于正文第三节，修改部分见红字，p10-16。

### “3 认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工机制

一般导航中，个体依赖视觉线索进行路径整合以构建认知地图。视觉线索蕴含丰富的空间信息，能够提供精确的距离、方向和物体位置信息，从而显著提升个体空间定位和空间导航的准确性。然而，在视觉线索受限环境导航中，因视觉线索缺失或模糊、视敏度下降和视野狭窄等问题，个体对距离、方位等空间信息的判断能力受到削弱(Creem-Regehr et al., 2021)。同时，由于缺乏视觉反馈校正路径整合过程，容易累积路径整合误差，进而导致导航失败，降低导航信心。认知地图作为反映环境空间特征的全景地图为个体提供必要的环境空间信息，相比于一般环境导航，个体在视觉线索受限环境导航中对认知地图的依赖程度更高(Cheung et al., 2012)。这一点在啮齿类动物的研究中得到了支持。研究表明，小鼠在黑暗中依赖路径整合感知周围环境(Cheung et al., 2012)。在人类导航中，因人与环境交互的复杂性，认知地图也承担更多功能。除提供基本环境信息外，为保证空间导航的准确性，个体需要主动整合多感官信息以更新和校正认知地图，体现了认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工。同时，元认知监控在整个更新和校正过程中起着至关重要的作用，它使个体能够评估和调整

自己的空间信息处理策略。本节详细阐述了认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工机制，从空间心智模型的角度出发探讨了在视觉线索受限环境中认知地图的更新-校正阶段。

### 3.1 空间心智模型

个体在探索环境后形成的认知地图旨在客观、全面地反映环境信息。在自由探索空间的过程中人们偏好选择连接性强的路径构建认知地图，并通过回访已探索的路线来校验各路径间的关系，确保认知地图准确性(Brunec et al., 2023)。因此，在构建阶段，认知地图以描述空间环境的物理特征为主，其表征形式更接近欧式空间，如对距离和方向的精确表示。Widloski 和 Fiete(2014)的网格细胞发展模型将网格细胞网络的发展划分为可塑性阶段和活动阶段。在可塑性阶段，个体整合远近环境线索为大脑提供环境和距离信息，从而支持认知地图在构建阶段的欧式空间表征。认知地图的更新-校正阶段中，空间心智模型(spatial mental model)以认知空间为基础，支持个体在视觉线索受限环境中的导航。空间心智模型能够整合特定事件的时间、空间和个体相关特征等信息，具有抽象性特征(Noordzij et al., 2006)。因视觉线索受限环境中视觉线索的限制，个体需要综合环境特征与认知因素理解环境信息。研究发现，黑暗环境中导航的小鼠在规则且可预测的环境结构中的空间行为绩效较高，该过程由网络细胞支持(Yaski et al., 2012)。与认知因素相关的研究中发现，情绪信息影响个体对路线线索的空间记忆效率(Chan et al., 2014)。有效的空间心智模型不仅表征各类环境要素，还整合认知要素，这对个体认知资源提出了较高要求。认知空间的表征形式适应了个体认知资源的有限性，通过表象构建环境中的节点与链接，并将认知要素的相关抽象概念纳入其中。据此，本研究推测，视觉线索受限环境导航中认知地图的动态加工在空间心智模型中进行，并且以认知空间为认知基础。

### 3.2 认知地图在视觉线索受限环境中的更新-校正

空间导航开始后中，认知地图由静态离线表征转换为动态在线表征(Eilam, 2014)，同时，表征的内容随环境改变而发生变化。在视觉线索受限环境中，个体依赖认知地图进行定位与路径规划，并持续更新与校正环境信息以确保空间信息的准确性。该阶段中，首先要求个体保持对自身运动方向的认识，空间更新为此提供认知基础。一般导航中，空间更新机制自动发生，路标和空间边界等环境线索促进这一过程(Borodaeva et al., 2023; Meyerhoff et al. 2011)。视觉线索受限环境的导航中，即使缺乏视觉信号输入，听觉、本体觉和前庭觉提供的信息也足以支持空间更新(肖承丽, 刘传军, 2014; Gramann et al., 2021; Pasqualotto & Esenkaya, 2016)。例如，当人们的身体运动方向改变超过 90°，前庭线索提供的自我运动信息支持空间更新(Gramann et al., 2021)。个体通过多感官信息弥补缺失的空间环境信息，并更新空间心智模型中的相关信息。在该过程中，个体主动参与以完成认知地图中的空间更新(肖承丽, 刘传军, 2014)。

视觉线索受限环境的导航中，认知地图的空间更新不仅涉及在线表征形式的差异，还关系到空间更新策略的选择。空间更新策略分为连续更新和构型更新。连续更新以自我为中心，通过自我运动信息动态调整自身位置。研究表明，认知地图的在线更新通常基于自我中心参

考框架，并受限于工作记忆的容量(Lu et al., 2020)。然而，随着环境规模的增加，这种自我中心参考框架倾向会发生变化。个体在较大尺度环境（如城镇）中倾向于采用构型更新，即基于环境中心参考框架计算自身在认知地图中的位置和环境朝向，并容易表现出指北倾向从而获得更高的导航精度(Frankenstien et al., 2012; Wiener et al., 2011; Navratilova & McNaughton, 2014; Zhong & Kozhevnikov, 2016)。这种空间策略的变化体现出了认知地图的灵活性，该特征在视觉线索受限的环境中尤为重要。虽然个体通常依赖连续更新策略进行导航，但在特定情境下（如视觉线索缺乏或环境发生变化时），构型更新策略会被激活，以帮助个体更好地识别环境全貌并调整导航路线。盲人的空间感知研究也表明，在没有视觉线索时，个体更多依赖听觉刺激输入并通过自我中心参考框架进行空间定位，这也支持了在视觉线索受限环境导航中连续更新策略的有效性(Vercillo & Gori, 2016)。然而，当个体察觉到环境线索与认知地图之间存在偏差或导航目标发生变化时，个体可通过提取认知地图中的空间心智模型重新规划导航路线，此时的空间更新策略也随之转换为构型更新策略。通过这种方式，个体能够高效完成空间更新，并在视觉线索受限的环境中灵活应对变化。因此在视觉线索受限环境导航中，要求个体能够灵活转换空间更新策略。视觉线索受限环境导航中的空间更新所面临的主要挑战是选择性注意问题。由于缺乏直观的视觉刺激，环境中的噪声很难被分辨，导航者难以确定重要导航目标，使导航效率大大降低。此外，由于视觉线索受限环境导航中有更多认知活动参与其中，也会消耗更多的注意资源(Barhorst-Cates et al., 2016)，同时空间更新的构型更新策略虽然在导航精度上更优，但它通常也需要更多的认知资源，这就要求个体以更节省认知资源的方式表征环境信息。这一过程再次证明认知地图在视觉线索受限环境导航中的表征与一般导航不同，采用以认知空间为基础的空间心智模型灵活表征环境。

认知地图在更新-校正阶段的另一重要作用是支持导航的路线规划。一般环境导航中，个体以启发式方法结合空间环境特征如地形、路线复杂性等规划路线(Frame et al., 2023)。这些环境特征往往以视觉输入为主导。然而，在视觉线索受限的环境中，视觉线索的不足往往会削弱导航信心，从而导致个体在导航过程中更加依赖认知地图以进行路线规划，其中空间心智模型能够为空间导航的路线规划提供支持。从认知地图中抽象出空间心智模型不仅映射环境结构，更融合了导航过程中的潜在风险评估以及导航者的个性偏好与经验。得益于其高度的灵活性和动态性，它能够有效地协助个体做出空间决策(Perelman et al., 2017)。部分认知神经学的研究为此提供支持。Park 等(2020)的研究将海马(hippocampus, HC)和内嗅皮层(entorhinal cortex, EC)在空间表征中的作用扩展至推理抽象空间信息中。HC 和 EC 对空间导航、定位和情景记忆中的作用已较为明确(Ekstrom & Ranganath, 2018)。在眶额皮层(orbitofrontal cortex, OFC)的研究中发现，OFC 反映刺激在认知地图中的任务空间位置而非物理空间位置，并且海马和 OFC 都参与了基于模型的推理过程，使原本独立的刺激可以相互关联。Park 等(2020)对比了环境认知地图和抽象社会结构认知地图的神经活动后认为大脑会使用相同的神经系统表征连续空间以编码抽象空间中离散客体之间的关系，并通过空间心智模型反映动态系统的时间关系来描述推理过程(van Ments & Treur, 2021)。认知地图以这种方式发挥了在视觉线索受限环境导航中的独特优势，既通过预览功能帮助个体验证路线的正确性并提升导航信心(Hersh, 2020)。由于空间心智模型中的信息以抽象信息为主并涉及到推理，个体感知到的风险或主观经验都会对空间心智模型产生影响。因此，抽象出的空间心智模型存在较大个体差异，这也能够解释在视觉线索受限环境中的导航绩效表现出的个体差异。



基于语言在表象的形成过程以及日常导航经验中的作用,语言也是辅助视觉线索受限环境导航的重要因素之一。计算机领域的相关概念也可用于解释语言在视觉线索受限环境导航中的作用。在计算机领域,研究者通常将导航看作视觉与语言导航(Vision-and-Language Navigation, VLN),该过程要求代理理解自然语言指令、感知视觉世界,并执行导航操作以到达目标位置。这种任务的挑战在于,代理需要不断接收新的视觉观测信息,并将其与指令对齐(Chen et al., 2021)。Chen 等(2022)提出的机器学习模型将导航过程分为两个模块,第一个模块是以视觉线索为基础并随时间更新的拓扑映射模块,第二个模块为全局动作规划模块,利用图形转换器捕捉跨模态的视觉与语言关联,从而引入与图形相关的拓扑知识以增强图形编码。据此推断,在视觉线索受限导航的环境中,个体同样会在其空间心智模型中借助语言信息来更新自身的位置感知并反映思维过程以进行逻辑推理,确保即使环境中视觉线索不足也能有效地进行空间导航。

一般环境导航中,环境线索的整合与冲突发生在认知地图校正阶段。个体根据目标将环境线索与已有认知地图进行比对,由自上而下的注意编码将注意力分配给特定空间区域。线索一致时进行线索整合,巩固认知地图的参数细节。若线索不一致则出现线索冲突,个体需要校正认知地图的错误信息。视觉线索受限环境中空间信息的校正更多依赖个体跨通道的空间认知能力,在该过程中需要将来自不同感觉通道的信息重建为心理表征,再判断各种信息的有效性。最终在已有认知地图基础上补充整合,以符合真实环境。

### 3.3 视觉线索受限环境中的空间定向

从认知加工机制上看,个体在视觉线索受限环境的导航中主要依赖其他感官通道信息完成空间定向,例如听觉、触觉和本体觉等。听觉信息分为非言语信息与言语信息,两者在空间导航中提供的信息有所不同。非言语信息指能够辅助个体完成空间导航的无语义声音刺激,如帮助盲人判断路线距离、分辨目标物间的位置方向、识别环境整体布局和对环境的几何特征进行编码以实现空间重定向等(Ottink et al., 2022a; Nardi et al., 2022)。言语信息因内含语义信息,使个体的认知加工过程更为复杂。一方面,有研究认为言语信息可能会干扰空间记忆(Antony & Bennion, 2023);另一方面,也有研究指出言语信息能够提供空间边界或关键路标等具体的空间信息以帮助个体形成空间表征(Peacock & Ekstrom, 2019; Santoro et al., 2020)。

触觉的相关研究发现,盲人利用触觉地图也能够形成准确的认知地图并顺利完成导航任务,而正常被试在蒙眼的条件下也能够形成准确的认知地图(Brayda et al., 2019; Ottink et al., 2022b)。然而,在跨模态的相关研究中发现,个体在跨通道处理触觉信息时,会分散注意力从而对导航造成干扰。例如,触觉振动会干扰短时记忆,并影响个体的语言序列回忆(Marsh et al., 2023)。

在黑暗环境中,个体依赖前庭觉估计自身运动速度,并结合时间感知更新位移距离(Kaski et al., 2016)。然而,在缺少环境线索的情况下,定向知识有限,空间定向较为困难。例如,飞行员在高空缺少视觉线索。同时,在惯性力的作用下前庭觉、本体觉等感知觉难以提供准确信息,容易导致空间定向错误(游旭群, 2017)。

由此可见,在视觉受限环境导航中,仅利用单一的通道信息并不足以支持个体判断空间方向,个体还会进行多感官整合以综合加工各感官通道信息。该过程通过前庭觉获取自身运

动信息并感知方向(Cornell & Bourassa, 2007; Liu et al., 2023); 听觉获取与“远近”相关的空间感知, 提供事件与环境信息或估计距离以帮助个体实现空间定向(Kolarik et al., 2016); 嗅觉提供特定环境或人的额外信息(Raithel & Gottfried, 2021)。人类大脑会整合多感官信息, 并在此过程中不断获取、挑选和加工新的信息构建和完善认知地图(Medendorp & Selen, 2017)。个体的视觉、听觉和躯体感觉皮层接受来自各个通道的刺激信息并投射到高级联合皮质中进行多感官整合(Meijer et al., 2017)。一般来说, 视觉在多感官整合中占主导地位, 视觉皮层的神经元会对听觉刺激直接做出反应(Meijer et al., 2017), 压后皮质(retrosplenial cortex, 顶叶 29 区、30 区)从视觉皮层接收到的信号比其他感觉皮层更强, 与其他处理空间信息的脑区形成重要的神经网络(Zingg et al., 2014)。而在视觉线索受限环境导航中, 初级视觉皮层对前庭神经刺激做出反应, 光线也会影响初级视觉皮层的神经活动(Keshavarzi et al., 2023), 多感官整合增强神经对弱刺激的反应, 并通过注意的选择性将有效信息整合在认知地图加工中(Grillini et al., 2019)。这可能是视觉线索受限环境中多感官整合的主要生理基础。

飞行员在飞行活动中的环境为典型的视觉线索受限环境, 对飞行员空间定向的研究为视觉线索受限环境导航中的空间定向研究提供解释。观察者模型(observer models)对飞行员的空间定向做出了系统解释, 该模型认为个体会比较预期和实际的感官反应来调整运动状态估计。模型包含三个部分, 内部模型是大脑内部假设的动态系统模型, 用于预测感官输入; 感官输入系统用于感知来自前庭系统(如半规管和耳石器)的加速度和角速度信息、视觉和体感信息; 最后比较预期反应与实际反应, 将内部模型预测的感官输入与实际测量的感官输入比较后得到误差信号(Williams et al., 2021)。Voros 等(2024)在基于观察者模型的基础上加入了变化的视觉线索, 提出了增强型定向感知模型以更全面地解释前庭和视觉线索在自我运动感知中的作用。该模型提出当视觉线索可用时, 自我运动感知维持在有视觉线索时的状态, 时间过程约为 10 秒。当视觉线索被移除时, 感知到动态变化大约需要 30 秒。在此基础上, 增强定向感知模型添加了低通滤波器以捕捉视觉线索可用性突然变化后的自我运动感知状态以解释在没有视觉线索时个体反应的变异性。两种模型均从飞行员高空飞行的角度解释了个体的空间定向机制。

空间定向研究领域中长期困扰研究者的问题之一是空间迷失(spatial disorientation), 尤其在视觉线索受限环境中, 空间迷失是导致空间导航失败的首要原因。Knierim 和 Hamilton(2011)认为个体空间迷失的根本原因可能是认知地图的失效(例如在没有墙壁等空间边界的黑暗环境)或未能使用视觉路标更新个体的位置和方向。迷失效应表明, 方向感的丧失会导致个体降低对物体的绝对定位准确性和相对定位准确性, 但对房间角落等空间边界的影响较小。换言之, 房间内物体的空间排列取决于短暂的空间表征, 而房间的几何形状则取决于持久的空间表征(Wang & Spelke, 2000)。此外, 空间迷失可能也与个体对环境表征的参考框架相关。研究者认为盲人与常人之间定位准确性的差异与个体是否有效使用心理想象策略和灵活转换参考框架有关(Santoro et al., 2020)。当个体采用环境中心参考框架时, 环境中各要素较稳定地存在于认知地图中, 而个体使用自我中心参考框架时需要心理旋转能力的参与, 使其易受到主观因素的影响同时承担了更高的认知负荷(Macauda et al., 2019)。

### 3.4 元认知在视觉线索受限环境导航中的作用

空间心智模型的构建以及空间定向过程均要求个体在认知层面进行深层次加工。特别是在个体面临空天海等视觉线索受限环境中时，一般导航经验难以直接迁移应用，这无疑会对个体的导航信心产生负面影响。因此，在视觉线索受限环境的导航中，元认知的作用尤为重要。元认知(meta-cognition)是反思和调节认知过程的能力，被视为提高个体学习能力的关键因素，它包含了一系列认知策略和自我调节机制。元认知主要包括监控和控制两个方面：元认知监控指个体对自己认知能力的评估和学习效果的认识，而元认知控制则涉及采取具体行动以调整认知状态和学习进程。例如，若个体意识到自己未能全面记住环境的表征（监控）时可能会选择重新学习环境（控制）。Mason 等(2022)虽已指出元认知在路线学习中的重要性，但未详细阐述其具体作用机制。本研究深入探讨认知地图在这一过程中的作用，并提出在个体构建的空间心智模型中同样存在着元认知监控的机制。如前所述，空间心智模型不仅包括对空间结构的认识，也包含了对环境结构以及各路标抽象概念的认识，个体也通过空间心智模型实现认知地图在视觉线索受限环境导航中独特的预览功能。个体在利用空间心智模型对空间导航过程进行推理和判断时，涉及到助记线索(mnemonic cues)。助记线索指个体的主观体验，包括处理或检索信息的难易程度(Koriat, 1997)和对位置的不确定性(Keller et al., 2020)。例如，个体在返回起点时感到不确定就是一种助记线索。这种在空间导航时的主观体验可能是元认知监控支持空间心智模型中发挥作用。

在空间定向的相关研究中，空间迷失往往伴随着丰富的主观体验。Fernández Velasco 和 Casati(2022)建立的与空间迷失相关的语料库揭示了个体处于迷失状态时会伴随焦虑、无助、困惑、孤立无援和孤独感等情绪体验。而个体产生迷失往往源于其定向过程中的认知缺陷，为脱离迷失状态个体会采取各种行为来解决认知缺陷，此时，由元认知所监控的空间迷失具有评价和调节功能。因此，Fernández Velasco 和 Casati(2022)将空间迷失也看作元认知过程的一部分以解释迷失引发的情绪体验和迷失体现出的评价和调节功能。综上，结合个体在视觉线索受限环境中所提取的空间心智模型也具备预览和调节功能，我们提出，相较于一般导航情境，元认知在视觉线索受限环境导航中参与程度更深。

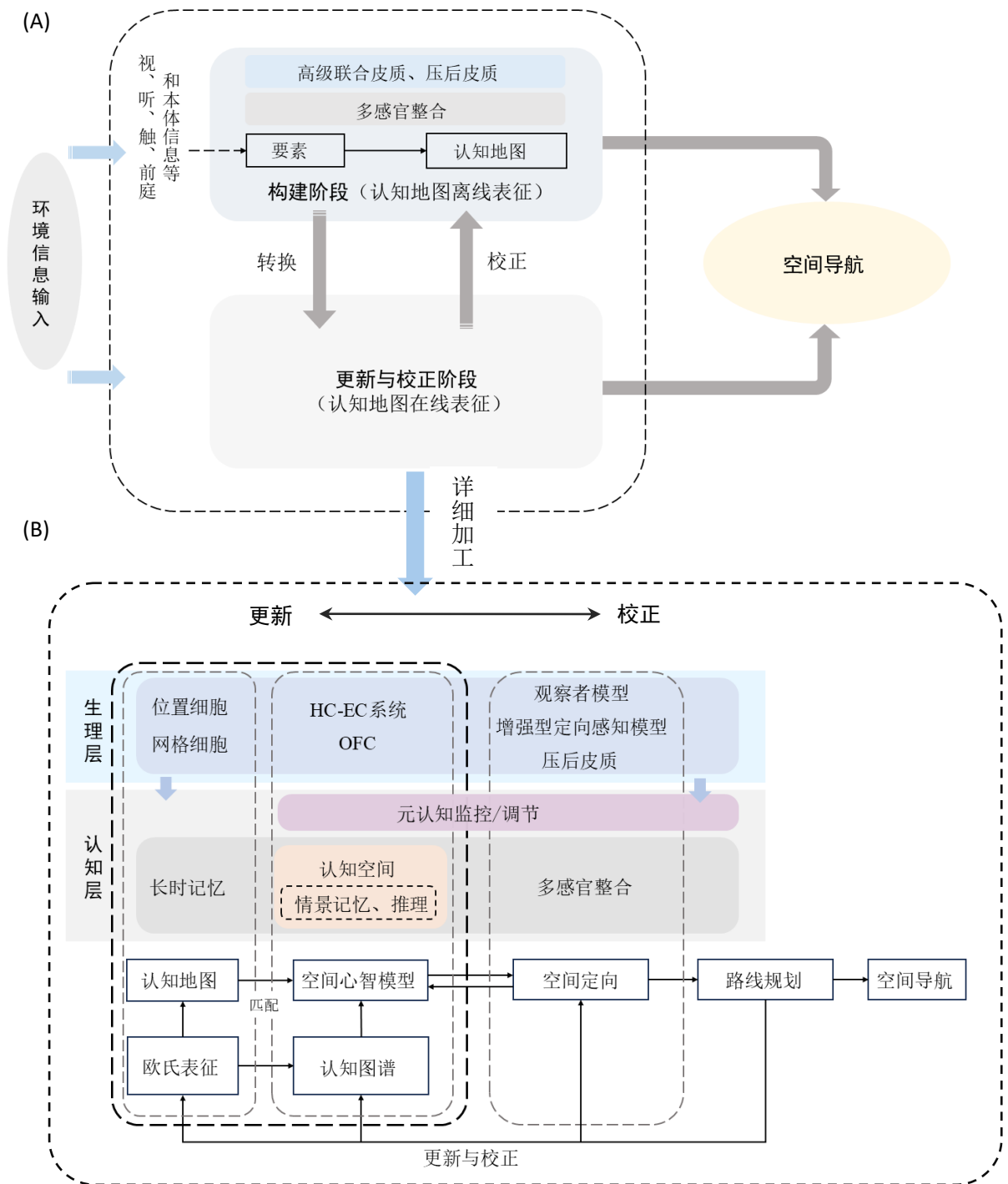


图4 认知地图在视觉线索受限环境中的认知加工机制示意图。(A)认知地图的两阶段加工论;(B)认知地图在更新-校正阶段的认知加工过程。

新增文献:

Barhorst-Cates, E. M., Rand, K. M., & Creem-Regehr, S. H. (2016). The effects of restricted peripheral field-of-view on spatial learning while navigating. *PloS one*, 11(10), e0163785.

Chan, E., Baumann, O., Bellgrove, M. A., & Mattingley, J. B. (2014). Negative emotional experiences during navigation enhance parahippocampal activity during recall of place information. *Journal of cognitive*

*neuroscience*, 26(1), 154-164.

Cheung, A., Ball, D., Milford, M., Wyeth, G., & Wiles, J. (2012). Maintaining a cognitive map in darkness: the need to fuse boundary knowledge with path integration. *PLoS Computational Biology*, 8(8), e1002651.

Frame, M. E., Schwing, M., Johnston, S., & Curtis, E. (2023). Route planning decisions: evaluating reliance on spatial heuristics under risk. *Spatial Cognition & Computation*, 23(1), 57-82.

Lu, R., Yu, C., Li, Z., Mou, W., & Li, Z. (2020). Set size effects in spatial updating are independent of the online/offline updating strategy. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 46(9), 901.

Noordzij, M. L., Zuidhoek, S., & Postma, A. (2006). The influence of visual experience on the ability to form spatial mental models based on route and survey descriptions. *Cognition*, 100(2), 321-342.

Vercillo, T., & Gori, M. (2016). Blind individuals represent the auditory space in an egocentric rather than allocentric reference frame. *Electronic Imaging*, 28, 1-5.

Yaski, O., Portugali, J., & Eilam, D. (2012). Traveling in the dark: the legibility of a regular and predictable structure of the environment extends beyond its borders. *Behavioural brain research*, 229(1), 74-81.

意见 5：第五，和之前的认知地图综述的差异凸显在哪里？

回应 5：感谢编委的意见。本研究与以往认知地图相关综述在以下几方面有显著差异：

1、研究焦点不同。已有的认知地图和空间导航的综述主要介绍了认知地图的相关概念和认知神经基础（如《认知地图及其内在机制》和《认知空间映射及其神经机制》等），侧重于认知地图和认知空间的广泛功能与神经机制。本篇综述围绕认知地图在视觉线索受限环境导航中的作用展开，通过对比视觉线索受限环境导航与一般环境导航的不同突出了认知地图在特殊环境中的重要作用，并提出了认知地图在视觉线索受限环境导航中的动态加工机制。

2、机制的侧重点不同。本研究强调了认知地图的动态性，提出了认知地图的两阶段加工理论（构建与更新-校正），特别强调元认知监控在整个动态过程中如何调节认知地图的使用，适应视觉线索不足的复杂环境。

3、应用场景不同。本研究专注于视觉线索受限环境中的特殊导航场景，并讨论了该情境下认知地图如何通过多感官输入与元认知监控支持导航，尤其是应用于飞行员的训练与任务执行。已有综述虽然也涉及到认知地图对空间导航的支持，但讨论场景较广泛，涵盖了一般物理空间以及跨领域的认知空间。

我们在文章的讨论的“4.1 认知地图动态加工机制的理论意义”增加了相关阐述，**修改内容如下，位于正文 p19 红字部分。**

#### “4.1 认知地图动态加工机制的理论意义

本研究探讨了认知地图如何支持个体在视觉线索受限环境中的导航行为。首先，研究阐明了空间心智模型在认知地图中的认知加工机制，进而揭示了认知地图的具体表征形式。认知地图如何表征一直是研究者希望厘清的内容，尽管有学者提出不同的表征形式间能够共存，但并未阐明两种表征如何共存。本研究提出，当个体进行以认知地图为基础的导航时，会在基于欧氏表征的认知地图的基础上抽取适当的空间心智模型以便规划导航路线，而空间

心智模型以认知空间为主要表征形式。这一观点明晰了不同表征形式之间的关系。其次，本研究在梳理已有相关研究后，将推理、记忆、语言等高级加工过程纳入认知地图的动态加工机制中，更全面地阐述了个体在视觉线索受限环境导航中的认知加工过程，也进一步厘清不同高级加工过程如何支持复杂的空间导航行为。最后，本研究以动态视角分析认知地图在空间导航中的认知加工机制，不局限于将认知地图看作一张静态的大脑中的“地图”，而是更深入地揭示了个体空间导航行为的内在机制。此外，以往认知地图的相关综述详细总结了认知地图的认知基础。本研究在前人坚实的研究基础上，围绕认知地图在视觉线索受限环境导航中的作用展开，通过对比视觉线索受限环境导航与一般环境导航的不同突出了认知地图在特殊环境中的重要作用。”

**意见 6:** 第六，4.2 实践意义说得不太清楚，看不出这个对于解决飞行员空间迷失有什么帮助。还有其他一些问题，建议能够更加通俗易懂地说明怎么解决实际问题。

**回应 6:** 感谢编委的建议。我们详细说明了认知地图动态加工机制的实践意义，并修改了“4.3 未来研究展望”部分，更详细地说明了未来研究方向以及如何解决实际问题，详细修改内容如下，位于正文 p18-19。

#### “4.2 认知地图动态加工机制的实践意义

首先，研究者能够从空间心智模型在认知地图的作用机制出发，提升当前人与各种导航辅助软件的人机交互设计或人机协同导航。例如，在自动驾驶领域，将表象的显示、情景记忆的线索提醒、元认知监控具象化等理念融入智能导航系统的设计中，可以显著提升个体的空间导航绩效。其次，本研究提出的认知地图动态加工机制对于提高个体在视觉线索受限环境下的导航表现具有重要价值。对于在特殊环境作业，如航天、航海、潜水等环境中的职业人群（如航海员、潜艇驾驶员等）常面临无法依赖视觉线索的情形，这种环境限制了个体获取外部视觉线索的能力。此时，个体必须依靠内部的认知地图和导航辅助仪器进行导航。通过训练个体有效使用和更新认知地图，特别是将不同感官线索整合到空间心智模型中，即便在视觉线索缺失的情况下依然准确判断自己的位置和导航方向。例如，在模拟训练中，个体可以通过反复练习视觉线索缺失的复杂情境，灵活使用认知地图进行空间推理和决策。此外，空间迷失是飞行任务中的一个重大安全隐患，特别是在视觉线索受限环境中，这类问题更易导致事故。例如，2021 年美国国家运输安全委员会公布的科比空难调查显示，造成空难的根本原因是飞行员违规飞入云层，在迷雾中迷失方向从而出现了空间定向障碍。通过对飞行员进行针对性的认知地图使用的相关训练，特别是提高飞行员在视觉线索不足时整合其他感官信息（如前庭觉、本体觉）来校准认知地图的能力可以显著降低空间迷失的风险。与此同时，元认知监控训练也能够帮助个体在面对空间迷失时保持镇定，并通过自我评估及时调整导航策略，避免情绪波动对判断的影响。通过训练，个体能够在复杂环境下维持稳定的空间定向，进而提升导航准确性。最后，本研究中提出的认知地图的动态加工机制也能够帮助解决个体在视觉线索受限环境导航中的难点。通过训练个体使用认知地图中的空间心智模型可以根据过去的飞行数据和认知推理来重新规划导航路线，避免因失去导航信号而导致操作失误。例如，当无人机的视觉或 GPS 信号消失时，操作员可以使用认知地图中的信息对环境

和飞行器状态进行推理，结合空间心智模型的抽象推理能力，确保无人机安全返航或完成既定任务。”

---

编委 2 第二轮复审意见：

同意发表。

主编意见：

稿件经过多位专家的审阅，作者进行了认真的修改，达到了发表水平，同意发表