

# 《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：认知空间映射及其神经机制

作者：吴际，李会杰

## 第一轮

### 审稿人 1 意见：

本综述梳理了认知地图研究的新兴拓展领域，即对感知、时间、概念、社会的空间映射。涉及的文献较新，论述的内容在国内期刊中出现较少，因此具有一定的发表价值。不过，虽然作者努力将各方向的研究整合为一个框架，但当前版本仍然显得零散：

**意见 1：**在引言最后一段，作者提出了已有研究的各种问题，如“相关研究仅提供了认知空间映射某一侧面的信息……缺乏微观与宏观的综合视角”，如果已有研究都是细碎的片面的，如何能够保证仅仅通过文献梳理整合就能得到一个全面综合的图像呢？换一句话说，这个全面综合的图像有多少是有实证数据支持的，有多少是作者推断想象出来的？一种修改的思路是恰当地对前人的研究进行评价，客观评价我们已经知道什么，还需要进一步探索什么。此外，在全文的论述中，建议首尾呼应，比如研究展望部分，3.1 预测性的认知空间地图在前文中铺垫很少。

**回应：**非常感谢您的建设性意见。在修改稿中，我们对引言的最后一段进行了修改，客观陈述了已有以不同物种为研究对象，从不同研究层面，对不同信息构建为认知空间地图的研究发现，并提出未来尚需进一步探讨认知空间映射的机制。

关于“3.1 预测性认知空间地图”的首尾呼应问题，我们在 1.3.1 一般概念空间部分增加了借助“后继表征”探讨语义概念空间的相关文献，以与研究展望前述内容相呼应。

**意见 2：**第 1.2 部分，虽然该部分标题为情景记忆空间映射，但大部分内容都在讲记忆的时间维度表征，时间表征或时空整合的表征如何等同于情景记忆，还需要增加论述来加以厘清。

**回应：**非常感谢您的建议。在修改稿中，我们增加了如下论述：

“个体往往根据事件的时空特点将其转换为适宜的心理表征，以恰当地反映事件之间的关联，进而帮助情景记忆的提取(Ekstrom & Yonelinas, 2020; Gauthier & van Wassenhove, 2016)。根据 Eichenbaum 等(1997, 1999)的记忆空间理论，连续发生或经历的事件及其位置构成情景记忆，不同的情景记忆通过重叠或公共的元素互相关联，进而组织成更复杂的关系记忆网络。其中，“连续发生或经历”可以看作情景记忆的时间维度，“位置”可以看作空间维度，情景记忆空间因此可以看作是将事件沿着时间和空间维度编码的特定记忆空间。”

修改稿中，我们在 1.2 部分的第二段和第三段进一步强调了“情景记忆空间是将事件置于一定时空背景下”的论述。

**意见 3：**第 1.3 部分，概念空间映射下面又分为了奖赏空间和概念空间的研究，这三者的命名和逻辑关系让人困惑，如果只提取关键词，似乎就变成了“概念空间=奖赏空间+概念空间”，建议作者再斟酌用词或三者的逻辑关系。

**回应：**感谢您指出这个问题。在修改稿中，我们将“1.3.1 奖赏空间”修改为了“1.3.1 一般概念空间”，将“1.3.2 概念空间”修改为了“1.3.2 特殊概念空间”，以更好的区分两种

类型的概念空间。

**意见 4:** 图 2, 右下角的图是属于图 b 还是 c, 或者应该编码为 d?

**回应:** 感谢您指出这个问题。在修改稿中, 原图 2 更新为图 3, 我们已经对该图分别标上字母(图 3a 和 3b)。

**意见 5:** 第 2.1 部分, 论述了海马体支持认知空间映射可能存在三种机制, 这三种机制分别可以解释前面提到的各种空间映射的哪一种? 哪些是已有研究证明的? 哪些是还可以进一步探讨的? 建议进一步以文字或图表的形式整理分析。

**回应:** 非常感谢您的建议。在修改稿中, 我们对不同认知空间映射的研究进行了梳理(见表 1), 并在相应部分进行了总结; 同时, 我们也补充了当前研究存在的不足。

**意见 6:** 全文最后建议增加一个结论或小结。

**回应:** 非常感谢您的建议。在修改稿中, 我们增加了“结语”部分。

.....  
**审稿人 2 意见:**

该论文是一篇综述。梳理了各种认知信息被组织成认知地图的研究, 并总结了认知空间映射的神经机制。该论文的一大特色是, 从感知空间、情景记忆空间、概念空间(包含奖赏空间)和社会空间的角度, 分别对认知地图(认知空间映射)的相关研究进行了梳理, 并结合微观(细胞)和宏观(脑区)层面探讨认知空间映射的神经机制。

总的来说, 这篇论文的分类角度还是很有趣的, 涵盖的内容也非常广。但我觉得论文的写作存在很大的问题。论文在介绍他人工作的时候, 描述的非常不清楚, 很多地方的描述让人难以理解, 甚至有些地方的表达让读者不知所云。以下我举例说明, 但文章有问题的地方远不只我列举的这几处。

**意见 1:** 第 4 页, 第 3 段, “内嗅皮层的网格细胞以六重旋转对称性(sixfold symmetry)的放电模式编码了猴子视野中的离散位置”。这里的六重旋转对称性的放电模式指的是什么? 视野中的离散位置又指的是什么?

**回应:** 非常感谢您指出这个问题。简单的以一个词“六重旋转对称性放电模式”来概括网格细胞的活动确实会让人难以理解。在修改稿中, 我们以配图的形式解释该文献的工作(图 1a-c), 以更直观的展示六重旋转对称性放电模式。网格细胞对空间中的多个位置进行放电, 这些放电位置会排列成周期性的正六边形。当视线移动到正六边形的顶点和中心时, 该细胞的激活程度最大。“离散位置”即指网格细胞在视觉空间中放电的位置, 这些位置并不是连续的, 而是以正六边形的模式分布在空间中。为更易理解, 在修改稿中, 我们把“离散位置”修改为了“多个位置”。

修改稿中, 我们也通过图示展现了六重旋转对称性 BOLD 信号的产生原理(图 1d-g)。抽象空间“导航”形成的轨迹与网格方向对齐时, 与不对齐相比, 会产生更大的 BOLD 信号, 并以 60° 为周期, 该 BOLD 信号对应网格细胞六重旋转对称性放电模式。

**意见 2:** 第 4 页, 第 3 段, “研究者发现人类个体能够通过嗅闻在两种气味所构成的二维气味空间中导航”。什么是二维气味空间? 我无法理解气味如何形成二维空间。

**回应:** 非常感谢您指出这个问题。该文献中的“气味空间”是指由两种具有不同强度的单一气味作为两个维度构成的二维空间。在文字部分二维“气味空间”的后面增加了解释:“(气

味空间中的两个维度分别以单一气味的强度标定)”，并且配图展示二维气味空间(图 1f)以进一步阐述。

**意见 3:** 第 6 页，第 1 段，“结果发现网格细胞的神经活动会受跑步距离和经历时间的影响 (Kraus et al., 2015)，表明网格细胞可以整合距离和时间信息”。我不理解网格细胞的神经活动是如何受跑步距离和经历时间影响的，又是如何整合距离和时间信息的。

**回应:** 非常感谢您指出这个问题。在修改稿中，相关内容修改如下：

“此外，Kraus 等(2013, 2015)发现位置细胞和网格细胞可以单独编码或整合时间和空间信息。Kraus 等(2013)将大鼠放在跑步机上，由于没有发生空间位移，大鼠不能通过运动模式或环境线索的改变来激活位置细胞。建模分析结果显示，一部分海马神经元的放电活动被跑动距离或时间单独解释，另一部分则被跑动距离和时间两个因素共同解释。Kraus 等(2015)采用类似的范式，同样发现内嗅皮层中既存在可以单独编码跑动时间或距离的网格细胞，也存在同时编码跑动时间和距离的网格细胞(Kraus et al., 2015)。位置细胞和网格细胞对时空信息的整合实际上是将跑动这一事件置于一定的时空背景下。上述研究从不同方面佐证了海马体能够根据任务需求，单独或同时对时间和空间维度进行编码。”

**意见 4:** 第 6 页，第 2 段，“近期，研究者在人类癫痫患者的海马和内嗅皮层中记录到了与位置细胞具有相似映射功能的时间细胞”。能否解释一下什么是时间细胞，该细胞有什么样的特定，怎么与位置细胞相似了。

**回应:** “时间细胞”是在海马体中发现的一种能够编码时间信息的神经元。“时间细胞”在一个与事件关联的时间结构中的某一时刻放电，不同的时间细胞在不同的时刻放电，覆盖整个时间结构，为编码事件发生的顺序提供支持。位置细胞在生物体所走路线的某一位置放电，不同的位置细胞在不同的位置放电，覆盖整条路线。时间细胞和位置细胞采用类似的映射方式分别对时间序列和路线位置序列进行编码。

感谢您提出这个问题。在修改稿中，我们对 1.2 中第二段的文字表述进行了修改，以帮助更好的理解“时间细胞”。

**意见 5:** 第 7 页，第 3 段，“最近一项关于猕猴的研究通过改变三张图片的奖赏价值，研究者发现海马中存在“价值位置细胞”，这些细胞编码了由三张图片的奖赏价值维度构成的三维“奖赏空间”中的不同位置”。单从这些文字很难理解所谓的奖赏空间是什么样的？最好能通过示意图进行更详细的解释。

**回应:** 感谢您指出这个问题。在该文献中，“奖赏空间”是指由三张具有不同奖赏价值的图片作为三个维度构成的三维特征空间。在文字部分三维“奖赏空间”的后面增加了解释：“(每个维度由一张图片的奖赏价值标定)”。在修改稿中，我们增加了示意图来展示奖赏空间(图 4b)。在该示意图中，将奖赏空间与物理空间进行类比。在物理空间(二维空间)中，位置细胞编码了生物体活动轨迹上的某一位置；在奖赏空间(三维空间)中，“价值位置细胞”则编码了价值变化轨迹(由于三张图片的价值发生变化而形成)上的某一位置。

**意见 6:** 第 8 页，第 2 段，“被试观看腿部长度和脖子长度按不同比例变化的鸟时(图 2b)，内嗅皮层和腹内侧前额叶等脑区出现了六重旋转对称性 BOLD 信号(Constantinescu et al., 2016)，表明网格能够用于组织抽象的概念知识”。这里的逻辑是什么？是说只要脑区中出现了六重旋转对称性 BOLD 信号，就代表是认知地图吗？如果是的话，理由是什么？

**回应:** 海马中的位置细胞和网格细胞能够帮助构建环境中心的认知地图。具体而言，位置细胞在生物体处于特定位置时放电，不同的位置细胞对不同的位置放电(O'Keefe & Nadel,

1978); 网格细胞则对物理空间中的多个位置放电, 呈正六边形结构, 为空间提供精确的坐标(Hafting et al., 2005), 并能表示不同位置之间的矢量关系和距离(Bush et al., 2015)。位置细胞和网格细胞因其独特的活动特点为物理空间映射提供了生物学基础。

以人类为被试的 fMRI 研究中, 主要通过六重旋转对称性放电模式对应的六重旋转对称性 BOLD 信号来检验网格细胞的活动, 并且这种六重旋转对称性 BOLD 信号反应了海马体对抽象空间中位置之间关系(方向)的编码, 从而验证认知地图的形成。

在 Constantinescu 等(2016)的研究中, 被试观看腿部长度和脖子长度按不同比例变化的鸟, 可以假想为被试在一个以鸟的腿部长度和脖子长度构成的二维特征空间中进行导航。观看鸟的腿部长度和脖子长度按照不同比例变化可以假想为在二维特征空间中形成了不同的导航轨迹, 就像在二维物理空间中行走所形成的路线轨迹, 如果此时网格细胞激活(出现独特的六重旋转对称性 BOLD 信号), 那么表明前述二维特征空间以及轨迹的假想是成立的, 也就说明形成了认知空间的认知地图。

在修改稿中, 我们对 1.3.1 第二段中的文字表述进行了修改, 以帮助更好的理解“二维鸟类空间”的形成。

**意见 7:** 该论文中存在问题的表述还有不少, 我这里就不一一列举了。请论文作者多找一些对这个领域不了解的人读读这篇论文, 把他们看不懂的地方标记出来, 并认真考虑如何能用更清晰的表达方式重述

**回应:** 非常感谢您给出的建设性修改意见。在论文修改的过程中, 我们找了多人进行阅读并帮助提出意见, 在修改稿中已经对全文多处表述进行了修改。

---

## 第二轮

**审稿人 1 意见:**

在本次修改稿中, 作者对所提出的问题进行了细致认真的修改, 文章的逻辑和可读性有了明显提升。在一些细节上, 还可以进一步解释介绍得更清楚一点, 便于读者理解:

**意见 1:** “尽管物体由三个维度共同定义, 但海马 BOLD 信号只与参与概念分类的两个维度关联(Theves et al., 2020)”。这段话读下来的感觉是, 世间的所有物体都是由三个维度定义的, 但猜测作者想表达的是实验中的物体是由三个维度定义的。

**回应:** 非常感谢您指出这个问题。在修改稿中, 相关内容修改如下:

“在该研究中, 尽管物体概念由三个维度(点状频率、条纹频率和透明度)定义, 但海马 BOLD 信号只与参与概念分类的点状频率和透明度维度有关(Theves et al., 2020)。”

**意见 2:** 图 3 的图题, “正式试验前, 被试首先通过自由调整鸟的脖子和腿长度的比例来探索研究者假定的“鸟类空间”, 并熟悉按照何种比例变形可以变为某一圣诞符号。正式实验时, 被试观看一只鸟的脖子和腿的长度按照一定比例变形, 想象如果这只鸟继续按照这一比例变形是否能变成某一圣诞符号, 并做出判断”, 单纯从图 3 的示意, 实在很难想象一只鸟是如何基于脖子和腿的长度的变形变成圣诞符号的。

**回应:** 非常感谢您指出这个问题。我们对图 3 中两个图的位置进行了对调, 首先呈现了鸟类空间的示意图(a), 以帮助读者理解该研究所假定的鸟类空间及其特征, 包括构成鸟类空间的两个维度, 以及研究者在鸟类空间中设置的 6 个圣诞符号(每个圣诞符号对应空间中的某一只鸟); 然后, 呈现了概念空间任务一个 trial 的示例(b), 展示如何借助假定的鸟类空间进行概念空间的探索。图 3 图题文字部分的内容修改如下:

“图 3 概念空间映射。(a) Constantinesc 等(2016)假定的鸟类空间。该空间由鸟脖子长度和腿长度两个维度构成。二维鸟类空间中的不同位置对应具有不同脖子长度和腿长度的鸟。研究者设置了 6 个圣诞符号，每个圣诞符号对应鸟类空间中一只鸟。轨迹 $\theta$ 代表按照一定脖子长度和腿长度比例从一只鸟变成另一只鸟；(b)概念空间(鸟类空间)任务一个 trial 的示例。正式实验前，被试通过自由调整鸟的脖子和腿长度的比例来探索和学习假定的鸟类空间。当被试把鸟变形至特定圣诞符号所对应的鸟时，该圣诞符号会出现在屏幕上。正式实验时，被试观看鸟的脖子和腿长度按照一定比例变形，接着想象如果这只鸟按照这一比例继续变形是否能变成某一圣诞符号，并做出三择一的选择。黑色方块代表这只鸟继续变形不会变成任何一个圣诞符号。”

### 审稿人 3 意见：

认知地图在非物理空间的应用和神经机制研究是近期神经科学的热点。该稿件对当前认知地图应用在情景记忆空间，概念空间，和社会等方面的进展进行了较为详尽的综述，并结合多种理论模型对各种编码提出了尝试性的整合。前期两位审稿人提出了一些问题，经过作者补充完善后，描述更易理解，内容总结也更为完整，达到了发表要求；我没法发现更多其他的问题。

---

## 第三轮

### 编委 1 意见：

请作者根据以下意见进一步完善稿件：

**意见 1：**正文中的图里很多都是从英文论文里截取的，保留了英文，建议作者对图进行重构，并以中文的形式呈现。

**回应：**非常感谢您的建议。我们对文中的配图进行了重构，并以中文的形式呈现，以帮助读者更好的理解配图对应的文字内容。

**意见 2：**目前的论文写法很大程度上有点像教科书了，而且语言不精炼。建议作者对语言进行精炼，体现前瞻性思考。

**回应：**非常感谢您的建议。我们已经对语言进行了精炼，并在展望部分撰写了前瞻性思考

**意见 3：**这篇论文的亮点在于指出除了物理空间，还有认知空间，并且把认知空间进一步区分为感知空间、情景记忆空间、概念空间和社会空间。这 4 种在某种程度上是存在交叉的。作者能否给出一个区分的标准，便于读者更好地把握其中的关系？

**回应：**感谢您指出这个问题。四种空间的确存在一定程度的交叉，所有空间都需要借助感知觉的输入，也都被存储在记忆中。从广义上来看，感知空间、情景记忆空间、社会空间皆可认为是概念空间。如果进行粗略划分，会抹煞四种空间的特殊性。本研究主要根据信息的抽象程度和信息的特殊性质对四种空间进行了区分。

首先，根据信息抽象程度的高低将认知空间分为两类：

(1) 信息抽象程度低：感知空间

感知空间将感知觉刺激捆绑到其对应的感知空间背景中，该空间背景主要由感知觉的基本属性(如声音频率、气味强度等)定义。

(2)信息抽象程度高:情景记忆空间、概念空间和社会空间。这三种空间的构建虽然也需要借助感知觉信息的输入,但对感知觉信息进行了更深层次的加工。

其次,根据抽象信息的特殊性质,区分为情景记忆空间、概念空间和社会空间三类。

(1)情景记忆空间加工的是具有时空特性的事件,因而其空间背景是确定的,即时空背景。

(2)一般概念空间加工的是抽象概念,在本研究中主要是人工概念,即实验者人为的将若干属性结合起来所形成的概念,反映一种抽象思维形式;奖赏空间中的信息形式为“奖赏”,奖赏是对具有奖赏价值事物的抽象和概括,因此我们将奖赏空间视为特殊的概念空间。

(3)社会空间所加工的信息是社会情境中的他人。社会空间构建的目的是帮助个体进行社会推理和决策,这对个体的生存和发展具有重要意义。社会空间背景往往与社会环境和人的典型社会属性如声望、能力、亲密等有关。Tavares 等(2015)发现被试与游戏角色进行交互时引发的海马 BOLD 信号与其社交能力存在相关,体现了社会空间独特的社会属性。

我们在每个空间的开头第一段文字描述了该空间所加工信息的独特性,并将相关内容补充在了表 1 中。

**编委 2 意见:** 同意发表。

**主编意见:** 同意发表。