

《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：空间导航能力个体差异的多层次形成机制

作者：张凤翔，陈美璇，蒲艺，孔祥祯

第一轮

审稿人 1 意见：

本文从遗传、环境和早期生活经历等多个角度，回答了“为什么空间导航能力在个体之间会出现显著差异”的问题。总体而言，选题较新，内容全面丰富，但文章中仍存在以下问题需要改进：

意见 1：第二小节的题目为“空间导航的个体差异”，但内容主要是介绍检测空间导航能力的多种方法，内容和题目不符，建议作者将第二节题目进行修改。

回应：我们很认同审稿专家关于修改第二节标题的建议。在正文中已将第二小节标题改为“**空间导航能力个体差异的测量**”（第 2 页）。

意见 2：第 2.3 节中的 Sea Hero Quest 与后文提到的 SHQ 游戏是否是同一内容？若是，应当写作“Sea Hero Quest（SHQ 游戏）”。另外在第 3.3 节的倒数第二行中，也使用 SHQ 游戏简称即可。

回应：感谢审稿专家指出的问题。Sea Hero Quest 与 SHQ 游戏是同一内容。我们已对 2.3 节（第 5 页）首次出现 Sea Hero Quest 时进行了修改：“**Sea Hero Quest（下文简称“SHQ 游戏”）**”，并对之后出现的地方用“**SHQ 游戏**”进行表述（第 12 页，第 17 页）。

意见 3：在第三节中，每一个小节都分为了“与空间导航能力的关系”以及“神经生理机制”两部分，但是这两部分的划分并不清晰。例如第 11 页的第 7-9 行中写道“其可能的分子机制为……海马相关功能受损”，这是神经生理机制，不合适放在此段。

回应：感谢审稿专家的建议。在回顾第三节各小节的内容后，我们发现，原文中两个标题的划分有时候会干扰行文逻辑，影响读者对内容的理解。因此，我们认为将第三节中每一小节的两个小标题删除更加合理，以让内容间逻辑更加清晰顺畅。我们已在正文做了如下修改（第 9 页）：**①删除“与空间导航能力的关系”以及“神经生理机制”的小标题；②将 3.1 BCL2 的两段内容合为一段。**

意见 4：第 4.3 小节的倒数第二段提到生活习惯可影响空间导航能力，去年 Yoav Rechavi 等人发表在 Cell Reports 上的文章也佐证了运动可以影响海马对空间位置的编码，作者可酌情引用。

回应：感谢审稿专家提供关于运动能够影响海马对空间位置编码功能的文献。该研究从神经元编码的角度，证明了运动能增加海马进行空间位置编码的信息量，以及更高的编码质量和编码稳定性。该文献是对本文中仅仅从结构上考虑运动对海马体积影响的极佳的补充。我们在正文增加了相关的表述（第 18 页）：“**从功能上讲，积极的运动能增加海马进行空间位置编码的信息量，提高编码质量和稳定性。**”

意见 5: “脑影像遗传学”是文章的关键词之一,但本文仅在最后一段中对脑影像遗传学提出展望,而并未在前文中对脑影像遗传学进行综述,因此不太适合作为关键词。

回应:感谢审稿专家的意见。鉴于目前关于空间导航个体差异的脑影像遗传学研究还非常有限,我们在撰写正文时仅包含了少数几个相关研究。因此,我们已将“脑影像遗传学/brain imaging genomics”从关键词中移除(第 1 页,第 29 页)。

意见 6:本文中大幅综述了环境因素对空间导航能力的影响,可考虑将环境因素加入关键词。

回应:感谢审稿专家的建议。我们认同环境因素应该作为本文的关键词,并已在正文将“环境因素/environmental factors”作为关键词(第 1 页,第 29 页)。

.....

审稿人 2 意见:

本文作者聚焦于空间导航中的个体差异,不仅详细论述了空间导航领域中的各种经典研究范式,而且多角度的阐述了空间导航中个体差异的成因,如关键基因、性别、年龄和环境因素。并在对以往研究总结的基础上,提出构建遗传/环境-脑网络-行为通路,有一定的前瞻性。全文提纲清楚,写作规范流畅,有助于人们较为清晰地了解当前领域的研究进展与动态变化。

意见 1:文中提出建立空间导航的遗传/环境-大脑网络-认知和行为的通路模型,还需要对其内在机制进行具体说明。

回应:感谢审稿专家关于该通路模型内在机制补充的意见。我们已在正文进行了补充修改(第 5 页):“近年来,研究者从不同的视角考察了不同因素与个体空间导航能力之间的关联,但尚未形成清晰的遗传/环境-脑-行为通路,即哪些关键遗传和环境因素如何通过影响特定大脑的结构和功能特征,进而导致了空间导航能力的显著个体差异。”(第 19 页)“本文提出了关于空间导航个体差异的遗传/环境-脑网络-行为通路研究框架(图 1),即通过整合分析不同个体的遗传、早期生活经历和环境因素、大脑结构和功能、认知与行为等多方面的数据,考察不同关键遗传和环境因素如何影响空间导航脑功能网络的发展和老化,而导航脑网络的功能完整性又是如何影响个体在不同导航活动中的行为表现的。”

意见 2:边界和路标线索是个体空间导航中使用的重要线索,也是影响空间能力差异的不同导航策略,国内学者对其进行过相应的综述(例如郝鑫等,2022)。本文主要从遗传和环境两个视角出发,建议作者仍需简略补充导航策略、环境中心-自我中心等基本认知因素对导航能力个体差异的影响。

回应:

感谢审稿专家提供的建议。对边界和路标线索的使用是个体导航策略差异的重要部分,而个体对不同导航策略的选择也是空间导航能力的重要部分,表现出很大的个体差异。我们在正文部分对这部分进行了强调:(第 3 页)“在学习试次中,参与者成功学习从起点到终点的一系列路线;在探测试次中,在其不知情条件下改变起点位置或改变环境中的地标线索,观察参与者的选择从而区分其所用的策略是基于反应还是基于位置,即基于自我中心或环境中心的导航策略。”(第 16 页)“相较于年轻人,老年人自我报告其更多采用自我为中心的导航策略(Driscoll et al., 2005),无法对外部环境形成良好的空间表征;且从线索使用上,年轻

人偏好使用边界线索，老年人则偏好路标线索 (Schuck et al., 2015)，研究表明，使用边界线索有助于在空间导航任务中的反应误差更小(Bullens et al., 2010)，这也部分解释了老年人导航能力整体更差的原因。”

此外，线索本身的属性如何影响个体对导航策略的选择也是值得研究的重要问题，在郝鑫等人 (2022) 的文章中，对边界如何促进空间导航能力进行了综述，我们也在正文对此进行补充：(第 4 页)“在导航过程中，对不同线索利用的导航策略偏好本身即导航能力个体差异的一部分，研究者可借助上述经典范式，进一步对线索的不同属性如何影响空间导航能力进行研究(郝鑫 等, 2022)。”

意见 3：请作者考虑第二部分标题改为“空间导航能力个体差异的测量”是否更为合适？且 2.2 基于虚拟现实技术的测量部分下的三个子标题，“导航综合能力测试”“导航不同侧面测试”和“更为基础的空间能力测量”区分度不太高。

回应：

感谢审稿专家关于标题的意见。我们在正文中已将第二小节标题改为“空间导航能力个体差异的测量”(第 2 页)。

关于三个小标题，我们试图对空间导航能力进行不同层次的划分，以厘清这种复杂认知能力在定义上的多样性。其中“导航综合能力测试”总结了将空间导航能力作为一种宏观的综合导航能力进行测量的范式，而“导航不同侧面测试”则在宏观之下，总结了在大尺度下测量空间导航能力不同侧面的研究范式，其中主要包括导航策略使用、路径整合、认知地图等，而“更为基础的空间能力测量”则在大尺度的不同侧面之下，涉及到更加基础的认知能力。三个子标题直观上确实区分度不明显，为了避免误解，我们移除了三个子标题的归纳，方便读者重点关注每一段的具体内容。

意见 4：对于小尺度空间能力或空间记忆是否属于空间导航这一话题，学界一直未有定论。建议 2.2 最后一段内容与 2 部分中相关内容进行合并，不必单独介绍。

回应：感谢审稿专家对小尺度空间能力的建议。我们已将 2.2 最后一段删除，并在正文进行了修改(第 2 页)：“测量方式则需针对不同尺度的导航能力，选择相应适宜的实验范式，如自我报告式问卷测量、虚拟现实任务、智能手机游戏、计算机任务等(Coutrot et al., 2022; Coutrot et al., 2018; 张家鑫 等, 2019)。其中，小尺度的空间能力往往采用传统的计算机测试(Hegarty & Waller, 2005; Kozhevnikov et al., 2006; Pazzaglia & De Beni, 2006)，在此不过多介绍，以下综合上述两种视角，对非小尺度的空间导航能力的测量范式及其重要个体差异进行总结。”

意见 5：文中采用“物体捡起-放回”描述 Doeller 的研究 (p4)，但是在表 1 中是物体位置记忆范式，建议统一用物体位置记忆范式。

回应：感谢审稿专家对术语规范性的建议。我们已在正文将其改为“物体位置记忆范式”(第 4 页)。

意见 6：表 1 中列举了多种实验范式，但是有些实验范式在应用举例部分并非是关于个体差异的研究，建议更换所列举的研究。此外，表格中的文字描述可以考虑再精简一些。

回应：感谢审稿专家的意见。我们已更换掉不属于个体差异的研究，并将表格中的文字进行删减(第 6 页)。

意见 7: 请补充最新文献 Xu et al., 2023, The Development of Spatial Cognition and Its Malleability Assessed in Mass Population via a Mobile Game, Psychological Science。

回应: 感谢审稿专家提供的最新文献。该研究采用游戏化的心理旋转测试, 通过覆盖较宽年龄范围的大样本, 描述了空间认知的发展轨迹, 揭示了其与年龄、性别和训练的关系。我们已在正文不同部分进行了补充: (第 15 页)“在中国人群的大样本数据也显示, 男性在 11-40 岁的年龄范围内总体表现出更强的空间认知能力(Xu et al., 2023)” (第 15 页)“从发展轨迹上看, 个体小尺度的空间认知能力从幼儿时期到青少年和成人早期迅速上升, 在 21-35 岁达到顶峰后表现出平稳下降的趋势(Xu et al., 2023)。从具体能力上看, ……” (第 17 页)“Xu 等人(2023)通过游戏化的心理旋转测试, 发现个体小尺度空间认知能力的可塑性在儿童期到成年早期迅速增加, 在 16-20 岁间达到峰值并在之后的 35 岁前仍保持较高可塑性(Xu et al., 2023)。就具体能力而言, ……”

第二轮

审稿人 2 意见: 作者很好地回答了上轮中所提出的问题, 建议接受发表。

编委 1 意见: 同意发表

编委 2 意见:

意见 1: 对于空间导航的遗传-脑-行为通路这个模型的内容和解释非常单薄, 只是把几方面现有结果的罗列, 而不是有机的联系, 需要进一步提炼说明这三者的复杂联系内容。

回应:

感谢编委专家的宝贵意见。我们很赞同编委专家提到的关于建立遗传、脑和行为之间的有机联系的重要性。本文通过综述近十年的最新进展, 试图厘清重要遗传因素影响空间导航能力个体差异的神经遗传机制。然而, 我们在文献调研中发现, 目前仅有少数几个基因与空间导航建立了潜在关联, 相关作用机制并不清楚, 且大多数研究需要从多个层面进一步的验证。因此, 整体上看, 关于空间导航的遗传-脑-行为通路的研究还处于起步阶段, 还有很多重要的问题需要在未来的研究中解答, 包括进一步厘清关键因素的作用机制, 以及更全面地挖掘其他关键因素等。

在编委专家意见的启发下, 我们进一步理解领域内的已有发现, 并在本文提出的多层次研究框架下提出了三个可能的实验假设: S100B 基因如何通过调控空间导航神经网络的核心节点脑区压后皮层的神经活动, 导致个体在导航行为上的个体差异? APOE 基因如何通过改变海马的结构和功能, 影响了个体在认知地图相关任务中的行为表现? 住所周边街道的复杂程度如何调节了海马的发育, 进而导致了个体在导航策略和导航能力上的不同? 我们在正文中添加了关于这三个实验假设的描述, 一方面, 希望可以通过具体的例子, 帮助读者更好地理解文中提出的空间导航的多层次通路模型; 另一方面, 通过提出三个可测试的实验假设, 希望可以启发研究者在未来的研究中进一步验证。

同时, 在更全面地挖掘其他关键因素方面, 我们对未来研究方向做了三点展望, 包括全基因组关联分析、基因与环境交互研究和脑影像遗传学研究。希望可以通过数据驱动的方法, 挖掘出更多的影响个体空间导航能力的重要因素, 更全面的刻画空间导航个体差异的多层次形成机制。

我们进一步更新了正文内容，并更新了图 1（第 20 页）：“本文提出了关于空间导航个体差异的遗传/环境-脑网络-行为通路研究框架（图 1），即通过整合分析不同个体的遗传、早期生活经历和环境因素、大脑结构和功能、认知与行为等多方面的数据，考察不同关键遗传和环境因素如何影响空间导航脑功能网络的发展和老化，而导航脑网络的功能完整性又是如何影响个体在不同导航活动中的行为表现的。如：S100B 基因如何通过调控空间导航脑网络的核心节点脑区压后皮层的神经活动，导致个体在导航行为上的个体差异？APOE 基因如何通过改变海马的结构和功能，影响了个体在认知地图相关任务中的行为表现？住所周边街道的复杂程度如何调节了海马的发育，进而导致了个体在导航策略和导航能力上的不同？通过多个层次的分析，一方面，可以进一步验证这些关键遗传和环境因素对空间导航个体差异的影响，并阐明相关作用机制；更重要的是，可以挖掘出更多的空间导航能力的影响因素，更全面地厘清导航个体差异的多层次形成机制。基于此，我们对未来方向做以下三点展望。...”

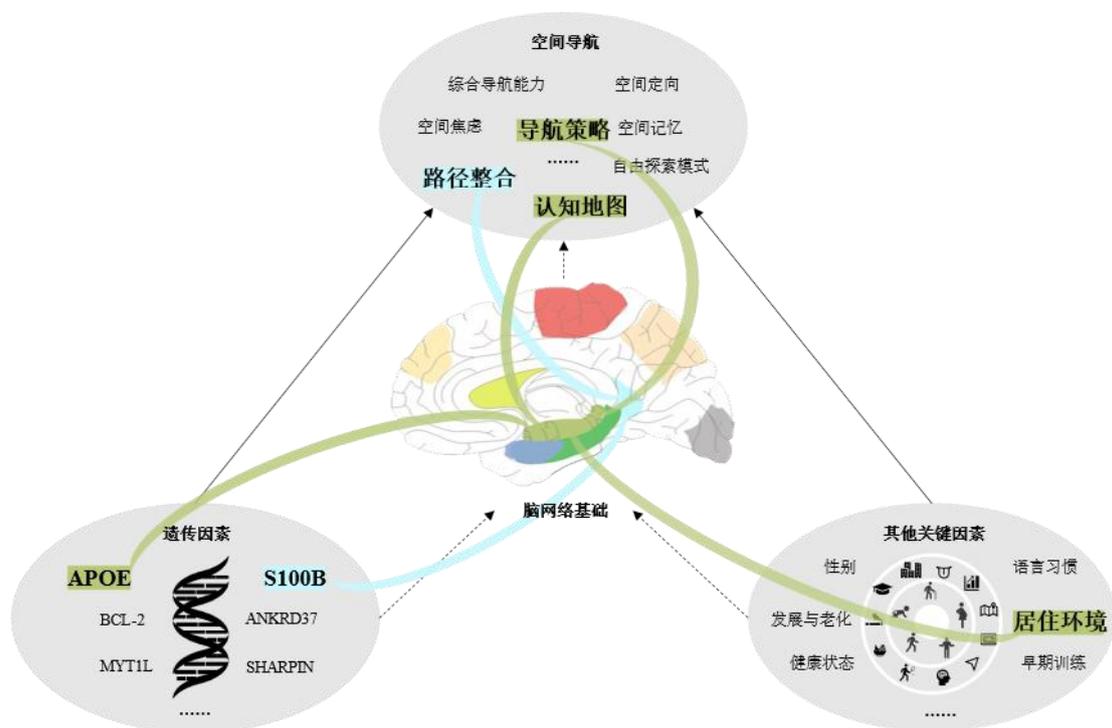


图 1. 空间导航的遗传/环境-脑网络-行为通路。图中标识出了三条可能的影响通路，即 S100B-压后皮层-路径整合、APOE-海马-认知地图、居住环境-海马-导航策略。

意见 2：脑成像和神经通路方面的研究内容非常单薄，然后突兀的提出脑影像遗传学（Brain Imaging Genetics, BIG）探索空间导航个体差异的神经遗传机制。

回应：

感谢编委专家的宝贵意见。本文旨在通过综述近十年的研究进展，总结空间导航能力个体差异的关键遗传和环境因素以及相关作用机制。根据我们的理解，编委专家提到的“脑成像和神经通路方面的研究”应该属于相关作用机制的一部分。我们很赞同，相关作用机制是理解这些遗传和环境因素如何影响空间导航能力发展的关键。针对这一问题，我们在文献调研中发现，涉及遗传或环境因素影响导航能力的脑影像和神经通路方面的研究仍非常有限，这一局限严重阻碍了我们对导航能力个体差异形成机制的深入理解。因此，基于这一局限，本文在未来研究展望部分，提出了采用脑影像遗传学研究方法建立遗传、脑和行为三者之间复杂关联的研究思路，希望相关研究成果可以填补这方面的空白。

另外，关于单纯的空间导航的神经基础方面的研究不是本文综述的重点内容，且近年来已有研究者发表了较为全面的综述论文（如：Baumann & Mattingley, 2021）。在更新后的本文中，我们主要以引用的方式，简单介绍了空间导航相关的关键脑区。读者可以通过阅读相关文献，更全面地了解领域进展。

我们在正文中作了相应的更新（第 22 页）：“第三，脑影像遗传学（Brain Imaging Genetics, BIG）探索空间导航个体差异的神经遗传机制。目前关于空间导航的遗传-脑-行为通路的研究非常有限，脑影像遗传学将遗传、脑影像、认知与行为关联起来，有助于帮助我们深入理解空间导航个体差异的形成机制。空间导航是一个复杂的认知过程，认知神经科学研究建立了空间导航与海马、内嗅皮层、旁海马回、压后皮层、内侧前额叶等多个脑区的密切关联（Baumann & Mattingley, 2021; Peer et al., 2021），并试图从多个脑区交互的角度，建立空间导航的脑网络基础（Kong et al., 2017; Weisberg & Ekstrom, 2021; 孔祥祯 等, 2023）。在未来的研究中，一方面，...”

意见 3: 适度精简，如果在表格里列了，那么正文中就可以简略描述，不需要正文表格写两遍。

回应: 感谢编委专家的建议。我们已再次检查表格与正文，对于重复部分在正文中进行删除或精简。

意见 4: 表格的内容比较混乱，需要梳理。

回应: 感谢编委专家的意见。我们对表格（主要是表 2）的内容做了进一步的梳理，以方便读者理解。

第三轮

编委 2 意见: 同意发表

主编意见:

各位审稿专家已经对此稿件提出了意见，作者进行了修改，达到了发表水平，同意发表。