

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：实地导航训练提高大脑功能连接模式稳定性

作者：俞梦霞，宋宜颖，刘嘉

第一轮

审稿人 1 意见：

总结：

该文章通过在更为真实复杂的环境中进行实地空间导航训练，结合行为和神经电生理指标，重点考察了被试的空间表征方式以及实地空间导航能力的神经机制。训练组与控制组前后测对比的结果表明，非熟悉实地空间导航以自我中心参照表征为主，且实地空间导航能力提升与自我中心参照表征的核心脑区 SPL 及其与全脑功能连接增强相关。

总体而言，该研究方法设计较为严谨，数据分析明确合理，陈述逻辑较通达清晰，对空间导航相关研究具有一定贡献。为进一步改进该文章，有以下意见和修改建议供参考。

评价：

1.方法方面，该研究基于校园环境对于健康大学生群体进行实地空间导航训练，且严格设置了较多控制条件，相较于过往的实验室训练或简单实地空间导航训练，在排除可能的混淆因素基础上，尽可能还原了更为真实复杂的情境下被试空间导航的表现。

2.结论方面，该研究一方面指出了个体非熟悉环境的实地空间导航能力提升过程以自我中心表征为主，另一方面指出了以上过程与 SPL 全脑功能性连接增强相关。该文章的发现对推进当前的空间导航能力相关神经机制研究具有一定价值。

意见：

意见 1：关于熟悉程度的控制问题。考虑到熟悉程度是本实验中相当重要的影响因素，熟悉程度是否在组间及组内进行了严格控制？如果实验组和控制组在实验持续阶段内均生活在校园内，被试是否会在日常生活中自行强化对实验涉及地点熟悉程度的情况？如果存在这种情况，是否存在个体差异？

回应：感谢审稿专家的宝贵意见。我们同意审稿人的观点，对环境的熟悉程度确实是本实验中相当重要的因素，因此，我们在实验中从多个方面综合对这一因素进行了控制。

第一，实验被试均为住校的大一新生，不同个体间对校园的熟悉程度总体较为一致。此外，在训练前，我们通过一系列导航能力行为测试（地标熟悉性自评、实地方位指向、非实地方位估计、路径距离估计、直线距离估计）评估了两组被试对校园环境的熟悉性。结果显示，实验组和控制组在这一系列测试中的行为表现均无显著差异（ $t_s < 1.043, p_s > 0.305$ 。各测试具体统计结果已在修改稿中进行补充，见正文第 14~16 页“3.4 导航能力行为测试结果”下方各段落红色字体标注）。可见，在实验前，被试对校园环境的熟悉性程度在组内和组间均得到了良好的控制和匹配。

第二，我们匹配了实验组和控制组被试校园生活的天数（前测和后测的间隔时间都是 20 天），以对实验过程中熟悉性程度的变化进行控制。然而，正如审稿人指出的，被试可能由于生活习惯等不同，在日常生活中自行增强了对某些实验涉及地点的熟悉性。而这一来源的个体差异暂时无法在我们基于真实生活环境的实地导航训练的实验中得到充分有效的

控制。在修改稿中，我们也补充了对这一问题的讨论，作为本研究的不足之一以及未来需要进一步改善的地方（详见正文第 19 页讨论部分最后一段第二点）。

“第二，虽然本研究在尽可能还原真实复杂环境下个体的空间导航情境的同时尽量控制了可能的混淆变量，但由于训练的环境是被试生活的真实环境，我们无法排除被试在日常生活中自行强化对环境的熟悉程度的可能性，也无法避免可能由此造成在熟悉程度上变化的个体差异。同时，被试在实验前就对训练地点具有一定的熟悉性，也可能对实验造成一定的影响。未来研究可以考虑使用被试完全陌生的环境进行导航学习。”

意见 2：关于导航能力的评估。实地方向指向测试结果是否综合反映了被试的空间导航能力及其对实验相关地点的熟悉程度？建议完善相关结果的数据分析方法或进行更为详尽的论述。

回应：感谢审稿专家的宝贵意见。在本研究中，被试的空间导航能力以及对实验相关地点的熟悉程度是通过一系列空间导航行为测试综合进行评估的。除了实地方向指向测试外，这些测试还包括非实地的地标间方位估计、地标间最短直线距离估计和最短路径距离估计，以及地标的熟悉性自评，从地标间的方位、路径、距离多方面综合评估了被试对环境的熟悉性及导航能力。根据审稿人的意见，我们对这部分内容进行了更为详尽的论述（见正文第 7 页方法部分“2.5 导航能力行为测试”及第 14 页结果部分“3.4 导航能力行为测试结果”第一段红色字体标注）。

“2.5 导航能力行为测试.....为了全面测量两组被试训练前后对校园环境的熟悉性和导航能力，在前后测阶段进行了一系列关于方位、距离、路径信息的行为测试，具体包括实地方向指向测试、非实地方向估计、直线距离和路径距离估计任务。另外，被试还进行了对地标的熟悉性自评。”

“3.4 导航能力行为测试结果.....为了更全面地测量被试在训练前后对校园环境的熟悉性和导航能力的变化，本研究还采用实地方向指向测试、非实地方向估计、直线距离和路径距离估计等一系列行为测试任务，从地标间方位、距离和路径这三方面测量被试关于校园空间表征信息的准确性。”

意见 3：论文中未明确前后测相对于训练阶段的时间，尤其是后测的具体时间，这可能会对实验结论产生影响：训练提升空间导航能力是短时改变，还是相对稳定的变化？

回应：感谢审稿专家的宝贵意见。

首先，抱歉在论文中遗漏了这一重要信息，现已在修改稿中进行了补充（见正文第 3 页最后一段红色字体标注）。前测阶段的行为测试和 fMRI 实验在训练开始前的两天内完成，后测阶段则在训练结束后的两天内完成。

其次，本研究仅考察了训练提升空间导航能力的即时效果，未进行延时的追踪研究，因此无法检验训练对导航能力的提升是否是较长期的相对稳定的改变。这是本研究的不足，已在论文讨论部分进行了说明和讨论（见正文第 19 页讨论部分最后一段第一点）。未来研究将考虑对导航训练前、训练中、训练后即刻以及训练完一段时间后的的大脑功能网络组织模式进行更细致的考察，以刻画出更全面的学习引起的大脑全局性变化。

“本研究还存在一些不足。第一，本研究只收集了训练前后的两次测量数据，对学习行为表现和大脑活动变化过程的刻画还比较粗糙。未来的研究可以对学习前、学习过程中、学习

后即刻以及学习完一段时间后的的大脑功能网络组织模式进行更细致的考察,以刻画出更全面的学习引起的大脑全局性变化。”

其它修改建议:

意见 4: 2.2 方法部分中所述训练阶段和前后测的方法、数据采集和分析等内容逻辑较为混乱,建议调整该部分顺序或重新润色 2.2 末句:“在前后测阶段,两组被试分别完成一系列导航学习相关的行为测试及 fMRI 实验,具体如下。”以增强可读性。

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。我们同意审稿人的意见,已在修改稿中对这部分内容的框架稍做了调整,并将 2.2 末句重新表述为“在前测和后测阶段,两组被试分别完成一系列导航能力相关的行为测试及 fMRI 实验。前测阶段的行为测试和 fMRI 实验在训练开始前的两天内完成;后测阶段进行与前测阶段相同的行为测试和 fMRI 实验,在训练结束后的两天内完成。导航训练过程、fMRI 实验及数据分析、导航能力行为测试的具体细节见下文 2.3 至 2.5。”

意见 5: 2.3 未明确实验细节。如果被试回答正确,是否仍然需要实际步行到目的地?

回应: 感谢审稿专家的意见。很抱歉遗漏了重要细节。训练中,如果被试回答正确,则无需步行到目的地,直接开始下一个指路任务。具体细节已经在修改稿中作了更详细的描述(见正文第 4 页 2.3 下方段落红色字体标注)。

意见 6: 3.4 请注意错别字和格式校正,如“控住组”应为“控制组”,个别英文统计符号未使用斜体。

回应: 感谢审稿专家的意见。我们已在文中修正这一笔误(见正文第 15 页第二、三段两处红色字体标注),同时检查了全文的统计符号字体并都标为斜体。

.....
审稿人 2 意见:

该研究以大学生为研究对象,结合行为测试和功能性磁共振技术,探讨了实地导航训练提高导航表现的神经机制。作者发现,经过 20 天导航训练后,顶上小叶在导航相关任务中的激活增强,且其与全脑功能连接模式的稳定性提高,提高程度与导航训练效果有正相关。该研究设计严谨,数据分析较为合理,所得结论对理解人类空间导航具有一定参考意义。一些具体意见详列如下:

重点问题:

意见 1: 研究假设部分,作者提到,“个体在一个非熟悉环境的实地导航主要依赖自我中心参照表征”,这与本研究有何关系?研究被试是该校大一学生,在实验前测部分开始时已经对校园“较熟悉”(作者用语,3.4 部分)。如果说非熟悉和较熟悉难以精确界定的话,为何作者会假设“实地导航训练将引起后顶叶区域在进行空间任务时神经活动的改变”?实验中的导航训练是使用东西南北坐标系进行指导的,理应增强环境参考表征。

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。

针对审稿人提出的“熟悉性的界定”问题,我们做如下回应:

首先,非常抱歉原文在“熟悉性”这一重要概念的界定上造成了困惑,现做如下解释和说明。文中“3.4 导航能力行为测试结果”部分提到的“较熟悉”来自于前测阶段被试对训练中将采用的 50 个地点的熟悉性自评结果(训练组 $M = 5.35, SD = 0.97$;控制组 $M = 5.12; SD = 0.81$;对“是否了解和熟悉校园内有这一地点及其大概的位置”进行 1~7 评分)。但是,值得指

出的是，对地点的自评熟悉不等同于对校园整体环境的熟悉。根据前人研究的界定，整体环境的熟悉性不仅包含对地标的熟悉性，更包括对地标之间的方位（如路径移动时建筑物先后顺序）、路径和距离等空间信息的准确掌握。个体熟悉的环境一般被认为是生活了多年的城市或区域，且在这一环境中具有丰富的导航经验（Nemmi et al., 2013; Rosenbaum et al., 2007; Rosenbaum et al., 2004; Spiers & Maguire, 2007）。在本研究中，被试为大一新生，在校园中生活的时间还较短；而且，从前测阶段的方向、路径和距离测试的结果（具体见“3.4 导航能力行为测试结果”）可以看出，训练前被试对地标之间方位、步行路径、直线距离的估计存在较大的误差。因此我们将实验涉及的环境界定为非熟悉环境。

然而，本研究考察对象为复杂真实环境（包含较多地点）中的实地导航，在操作上很难采用被试完全陌生的环境进行训练。虽然实验被试为只在校园内生活了短暂时间的大一新生，但是他们不可避免地对校园环境具有一定的熟悉性。根据审稿人的建议，我们在修改稿中的讨论部分对这一问题进行了进一步说明和讨论（见正文第 19 页讨论部分最后一段第二点）。“本研究还存在一些不足……第二，……被试在实验前就对训练地点具有一定的熟悉性，也可能对实验造成一定的影响。未来研究可以考虑使用被试完全陌生的环境进行导航学习。”

另外，我们在修改稿中的方法部分对“地标熟悉性自评”的目的和做法进行了更为详细的描述（见正文第 8 页蓝色字体标注），以期减少可能存在的歧义。

“地标熟悉性自评的目的是调查被试对训练中将采用的校园内各个地点的熟悉程度，以保证导航训练以及方位和距离测试的有效进行；同时也为了控制两组被试在实验前在地标熟悉性上没有显著差异。该自评问卷共 50 题，每题对应一个地点，要求被试对“是否了解和熟悉校园内有这一地点以及其大概的位置”进行 1~7 评分，1 表示非常不熟悉，7 表示非常熟悉。”

针对审稿人提到的“导航训练是使用东西南北坐标系进行指导的，理应增强环境参考表征。”这一问题，我们做如下回应：

一、使用东西南北坐标系进行导航训练不一定意味着环境参照表征的增强。个体在使用东西南北坐标系指导的空间任务中也有可能更多使用自我中心参照表征。例如，在 Rosenbaum 等人的一项研究中，研究者通过让被试想象并判断沿一条街道从西走到东看到的建筑物顺序（landmark sequencing）这一任务来进行对自我中心参照表征的测量，其 fMRI 的结果也发现更多激活后顶叶等自我中心参照表征相关的脑区（Rosenbaum et al., 2004）。此外，个体使用或增强哪种空间参照表征还受到**导航训练的方式**以及**个体对环境的熟悉程度**等因素的影响。一方面，以往导航经常将身临其境的实地导航或路线学习看作是自我中心参照表征的空间导航学习，而把看地图认路的学习方式看作是环境中心参照表征的导航学习（Boccia et al., 2016）。另一方面，个体在熟悉的环境中更多使用认知地图式的表征，即环境中心参照表征（Siegel & White, 1975）；而在认知地图形成之前，即在非熟悉环境中，更多需要自我中心参照表征的地标和路径信息的不断积累（Montello, 1998）。本研究采用的是非熟悉环境中的实地导航训练，因此这个过程可能会更多使用自我中心参照表征。

二、在我们的实地导航训练过程中并不能完全排除被试也会使用环境参照表征的可能性。如前人研究中也指出，被试在进行实地方向指向、直线距离或路径距离估计等导航测试时，两种表征的信息都可能被使用（Schinazi et al, 2013）。此外，如审稿人所提到的，使用东西南北坐标进行导航训练可能会在一定程度上影响被试的空间表征方式。

在修改稿中，我们在讨论部分加强了对这一内容的讨论，希望我们的理解对辨析这一观点有所帮助（见正文第 18 页讨论部分蓝色字体标注）。

“最后，值得指出的是，个体使用或增强哪种空间参照表征可能受到导航学习的方式、使用的坐标系以及个体对环境的熟悉程度等多方面的影响。一方面，以往导航经常将身临其

境的实地探索或路线学习看作是自我中心参照表征的空间导航学习,而把看地图认路的学习方式看作是环境中心参照表征的导航学习(Boccia et al., 2016)。另一方面,从使用的坐标系来看,前后左右这一相对方位坐标系常被看作是一种自我中心参照框架,而东南西北这种绝对坐标系被看作是一种环境参照框架。可见,导航学习方式和使用的坐标系对个体使用何种空间参照表征的影响是分离的。而本研究的结果发现,尽管使用东南西北这一绝对坐标系进行导航训练,当个体身处在非熟悉的真实环境进行空间导航时,仍然更多依赖自我中心参照表征进行空间信息编码。”

意见 2: 结论部分, 作者认为实地导航训练后成绩的提高与自我中心参照表征的增强有关。支撑此结论的唯一强有力证据是 fMRI 的结果, 即与自我中心参照相关的 SPL 脑区激活的增强。其他任何行为结果都不能作为支持此结论的证据, 这一点请作者在文中表述清楚。关于 SPL 作用神经机制的研究, 作者展示了较为强有力的实验证据, 即 SPL 与其他脑区功能连接稳定性有提高且其提高程度与导航成绩的提升相关。在相关结果中: 1. 如果去掉图 7 左下侧那个数据点, 相关还显著吗? 如果不显著, 那是否说明此相关结果不是十分可靠? 2. SPL 激活的增强 (图 5B) 是否也应该与导航成绩的前后侧变化呈相关?

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见, 您提的这一系列问题都非常重要。

针对第一点, 如审稿人所说, 支撑“实地导航训练后成绩的提高与自我中心参照表征的增强有关”这一结论的结果来自训练后 SPL 激活的增强及其与全脑的功能连接模式稳定性的增强与行为的相关, 其余行为测试结果不能作为支持此结果的证据。根据您的建议, 我们在修改稿中进行了明确说明 (见正文第 18 页讨论部分倒数第二段)。

“……但是, 需要指出的是, 这些行为测试的结果并不能为实地导航训练引起的导航能力的提高与自我中心参照表征的关系提供直接证据。”

针对第二点, 即极端值是否导致相关, 在文中我们专门进行了非参数检验分析, 结果与参数检验结果一致 (斯皮尔曼相关系数 $r = 0.50, p = 0.048$, 见正文第 14 页图 7 上方段落)。同时, 图 7 的相关分析是基于标准化后的数据进行的, 未有迹象表明该数据点为极端数据 (Z 分数小于 2.5, 见图 7)。最后, 我们根据审稿专家的建议, 在去除该数据点后重新进行了皮尔逊相关分析。结果发现, 皮尔逊相关系数 $r = 0.43, p = 0.106$ 。从效应值 (r) 来看, 仍然属于中等偏强程度的相关; p 值未显著, 与被试量减少有一定的关系。据此, 我们认为相关结果可靠性较高。

针对第三点, 我们以 SPL 峰值点坐标 (20, -66, 58) 为中心画半径 3 mm 的小球, 提取训练组被试在前后测距离判断任务中小球内所有体素的平均信号变化百分比, 计算其前后测变化 (后测-前测), 并对该值与任务的反应效率前后测变化做相关分析。结果显示, 与连接稳定性的结果不同, SPL 激活的增强与距离判断成绩前后测变化相关不显著 (皮尔逊相关系数 $r = 0.02, p = 0.935$)。这一结果提示, 训练后距离判断表现的提高可能更多依赖 SPL 与全脑连接通路的稳定性而非其单个脑区的活动强度。我们在修改稿中也对这一结果进行了补充 (见正文第 14 页图 7 上方段蓝色字体标注)。

“另外, 我们也对训练组前后测 SPL 激活强度的变化与距离判断行为表现进行了相关分析, 结果显示相关并不显著 (皮尔逊相关系数 $r = 0.02, p = 0.935$)。这一结果提示, 训练后距离判断表现的提高可能更多依赖 SPL 与全脑连接通路的稳定性而非其单个脑区的活动强度。”

次要问题:

意见 3: 对表 2 数据的解读中, 作者在比较两个任务的前测表现时使用的是正确率, 在比较展开图判断任务的前后测变化时使用反应效率, 为什么? 如果看反应效率, 训练组似乎总体表现显著低于控制组, 对实验结果的解释有影响吗? 如果看正确率, 训练组似乎在后测中相较于前测有显著提升, 而控制组没有。这对实验结果的解释有影响吗?

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。针对审稿人提到的三个问题, 我们将逐一回答。

首先, 以往研究通常使用正确率指标来衡量或匹配任务难度 (e.g., Chen et al., 2023; Mo et al., 2019)。因此我们沿用了这一做法, 通过分析和比较被试在前测阶段进行这两个任务的正确率, 来说明两个任务难度没有显著差异。而在难度较大, 涉及认知过程较为复杂的实验任务中, 不同个体可能使用不同的反应策略, 在反应速度和正确率之间进行不同程度的权衡 (speed-accuracy tradeoff)。在这种情况下, 综合了正确率和反应时的反应效率指标 (正确率/反应时) 更能全面反映被试在这类任务中的表现 (Jonker et al., 2013; Reifegerste et al., 2020)。同时, 在展开图判断任务中, 我们观察到两组被试在总体反应时上存在显著差异 (训练组 $M = 5.22$ s, $SD = 0.42$ s; 控制组 $M = 4.59$ s, $SD = 1.04$ s; $t_{30} = 2.267, p = 0.035$)。特别地, 在后测阶段, 尽管训练组的正确率高于控制组 (训练组 $M = 86.33\%$, $SD = 9.87\%$; 控制组 $M = 82.16\%$, $SD = 13.96\%$), 但反应时也更长 (训练组 $M = 5.01$ s, $SD = 0.64$ s; 控制组 $M = 4.45$ s, $SD = 1.20$ s), 提示两组被试可能存在反应策略差异。因此, 我们认为反应效率指标能更综合衡量被试在展开图判断任务上的行为表现。我们在修改稿中也对这一点进行了补充说明 (见正文第 9 页“3.2 fMRI 实验行为结果”下方段落和第 10 页表 2 下方段落中蓝色字体标注)。

第二, 如果看反应效率, 虽然存在训练组总体表现低于控制组的趋势, 但差异不显著 (前后测平均反应效率: 训练组: $M = 16.52$, $SD = 2.80$, 控制组: $M = 19.39$, $SD = 7.49$; $t_{30} = 1.654$, $p = 0.114$)。此外, 本研究主要关注训练前后的变化量。因此, 上述情况并不影响对实验结果的解释。

第三, 就正确率而言, 训练组在后测中相较于前测确有显著提升 ($t_{15} = 4.40, p < 0.001$), 而控制组没有 ($t_{15} = 0.67, p = 0.512$)。然而, 如上文所述, 在这一任务中, 反应效率是更全面评估被试表现的指标, 因此我们主要通过分析反应效率的变化来考察两组被试的训练效应。如文中报告的, 反应效率的结果显示, 训练组和控制组在后测中的表现相较于前测都有显著提升 (训练组: $t_{15} = 4.07, p = 0.001$; 控制组: $t_{15} = 2.37, p = 0.016$), 且前后测变化的组间差异不显著 ($t_{30} = 0.60, p = 0.551$)。因此, 上述情况并不影响对实验结果的解释。

意见 4: 请作者删除“边缘显著”的表述, 不显著就是不显著。在图 8 上方段落中, p 值为 0.1 时被表述为“边缘显著”, 而 p 值为 0.069 时被表述为“不显著”。

回应: 感谢审稿专家的意见。原本的表述确实有失严谨, 已更正为“不显著” (见正文第 15 页和第 16 页蓝色字体标注)。

意见 5: 图 8 上方最后一句, “提示经过 20 天的实地训练被试可能仍未完全形成准确的认知地图”, 该结论从何而来? 形成准确认知地图的标准是什么? 图 8B 显示被试的估计误差已经非常小, 是否有可能是地板效应?

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。

针对审稿人提到的图 8 上方最后一句的表述, 我们认为有失严谨, 因此已修改为“这一结果表明, 实地导航训练对被试的非实地方向估计能力没有明显的提升效果。” (见正文第 15 页第三段蓝色字体标注)

针对审稿人关于图 8B 结果可能存在地板效应的顾虑, 图 8B 为非实地方向估计任务的结果。这一任务要求被试估计地点 B 在地点 A 的多少度方向。在这一任务中, 被试方向估

计完全正确的误差值为 0°(天花板效应), 估计完全随机的平均误差值应为 90°(地板效应)。实验结果显示, 两组被试在前测阶段在该任务中的估计误差约为 30°, 与 0°和 90°都有明显差距。据此, 我们认为结果存在地板效应或天花板效应的可能性较低。

参考文献:

- Boccia, M., Guariglia, C., Sabatini, U., & Nemmi, F. (2016). Navigating toward a novel environment from a route or survey perspective: neural correlates and context-dependent connectivity. *Brain Structure and Function*, 221, 2005-2021.
- Chen, X., Xu, B., Chen, Y., Zeng, X., Zhang, Y., & Fu, S. (2023). Saliency affects attentional capture and suppression of abrupt-onset and color singleton distractors: Evidence from event-related potential studies. *Psychophysiology*, 60(8), e14290.
- Jonker, T. R., Seli, P., Cheyne, J. A., & Smilek, D. (2013). Performance reactivity in a continuous-performance task: Implications for understanding post-error behavior. *Consciousness and Cognition*, 22(4), 1468-1476.
- Mo, C., Lu, J., Wu, B., Jia, J., Luo, H., & Fang, F. (2019). Competing rhythmic neural representations of orientations during concurrent attention to multiple orientation features. *Nature Communications*, 10(1), 5264.
- Montello, D. R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*, 143-154.
- Nemmi, F., Piras, F., P éran, P., Incoccia, C., Sabatini, U., & Guariglia, C. (2013). Landmark sequencing and route knowledge: an fMRI study. *Cortex*, 49(2), 507-519.
- Reifegerste, J., Jarvis, R., & Felser, C. (2020). Effects of chronological age on native and nonnative sentence processing: Evidence from subject-verb agreement in German. *Journal of Memory and Language*, 111, 104083.
- Rosenbaum, R. S., Winocur, G., Grady, C. L., Ziegler, M., & Moscovitch, M. (2007). Memory for familiar environments learned in the remote past: fMRI studies of healthy people and an amnesic person with extensive bilateral hippocampal lesions. *Hippocampus*, 17(12), 1241-1251.
- Rosenbaum, R. S., Ziegler, M., Winocur, G., Grady, C. L., & Moscovitch, M. (2004). "I have often walked down this street before": fMRI studies on the hippocampus and other structures during mental navigation of an old environment. *Hippocampus*, 14(7), 826-835.
- Schinazi, V. R., Nardi, D., Newcombe, N. S., Shipley, T. F., & Epstein, R. A. (2013). Hippocampal size predicts rapid learning of a cognitive map in humans. *Hippocampus*, 23(6), 515-528.
- Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. *Advances in child development and behavior*, 10, 9-55.
- Spiers, H. J., & Maguire, E. A. (2007). A navigational guidance system in the human brain. *Hippocampus*, 17(8), 618-626.

其他修改:

原稿中的图 1 (实验中所用位置的地图) 校园地图图片来自网络, 考虑到版权问题, 我们找人重新绘画了地图并获得了版权, 已替换进修改稿中 (见正文第 4 页图 1)。

第二轮

审稿人 1 意见:

总结与评价:

该文章以大学新生为被试,基于行为学和神经学方法,通过空间导航能力训练和一系列空间导航能力等测试,重点考察了非熟悉环境下实地导航训练的空间表征方式和神经机制。研究结果揭示了自我中心参照表征核心脑区 rSPL 区域与大脑全局连接模式稳定性的提高可能是实地导航训练背后的神经机制。

总体而言,该文章对于空间导航相关研究,特别是为实地空间导航学习机制补充神经学证据和解释方面具有一定贡献。作者在上轮审稿意见基础上进行了修改,在数据处理、统计分析、结果讨论和结构论述等方面均有改善。我的参考意见和建议如下:

主要意见:

意见 1: 建议明确关于“熟悉性”概念的说明。虽然作者在回应上一轮审稿意见时做出了较为详细的解释说明,但文章正文对于“熟悉性”的概念、操作性定义仍然不够明确。关于“熟悉性”的相关概念表述在正文中以下几处可能还需做进一步补充说明:

①前言部分大量类比“熟悉环境”和“非熟悉环境”研究,但在本文前文和方法部分均未提供“熟悉和非熟悉”间明确的界定概念或方法;

②应指出“地标熟悉性(2.5 部分)”与“熟悉性”的从属关系;

③在该修改版本的文章中,由于作者调整了原本方法和结果中关于被试对环境“熟悉性”的相关表述(例如被试对 50 个地点“总体较熟悉”),导致讨论部分中提出的结论“在一个非熟悉的环境中实地导航能力的提高主要依赖自我中心参照的空间表征……”在逻辑上有些突兀,建议在文中针对以上关于“熟悉性”的问题明确说明后仔细检查此类研究论述逻辑是否通畅。

回应:感谢审稿人细致的意见。根据审稿人的意见,我们做了如下修改:

第一,在前言部分补充了关于“熟悉环境”和“非熟悉环境”的界定(见正文第 2 页红色字体标注)。

“个体熟悉的环境一般被认为是生活了多年的城市或区域,且在这一环境中具有丰富的导航经验,准确掌握地标间的方位、路径、距离等(Nemmi et al., 2013; Rosenbaum et al., 2007; Rosenbaum et al., 2004; Spiers & Maguire, 2007);个体接触时间较短或无法进行准确导航的环境即是非熟悉环境。”

第二,在方法部分补充了关于“环境熟悉性”的界定,说明了“地标熟悉性”和“环境熟悉性”的从属关系,即环境熟悉性不仅包括地标熟悉性,更重要的是对地标之间的方位、路径、路径等空间信息的掌握(见正文第 8 页 2.5 下方红色字体标注)。

“根据前人研究,对整体环境的熟悉性不仅包含对地标的熟悉性,更包括对地标之间的方位、路径和距离等空间信息的准确掌握。”

第三,非常抱歉文中在“地标熟悉性自评”结果部分对结果的描述,即“对 50 个地点总体较熟悉”这一表述引起了歧义,这里指的是前测地标自评熟悉而非对总体环境的熟悉,只表明被试在实验前已基本知晓和了解这 50 个地标,由此保证方位、路径、距离测试以及导航训练的有效进行,即被试知道题目中的地标是哪个。为了减少概念混淆,我们在原文章中删除了“对 50 个地点总体较熟悉”这一表述,同时将地标熟悉性自评前测的结果移到了方法部分,并进行了更为详细地说明(见正文第 8 页红色字体标注)。

“地标熟悉性自评的目的是调查被试对测试和训练中将采用的校园内各个地标建筑的熟悉程度,以保证导航训练以及方位、路径和距离测试的有效进行,即被试知道题目中的地标是哪个;同时也为了控制两组被试在实验前在地标熟悉性上没有显著差异。该自评问卷共 50 题,

每题对应一个地点，要求被试对“是否了解和熟悉校园内有这一地点及其大概的位置”进行1~7评分，1表示非常不熟悉，7表示非常熟悉。前测的结果显示，两组被试对实验中将用到的50个地标基本已了解（训练组 $M = 5.35$, $SD = 0.97$ ；控制组 $M = 5.12$ ； $SD = 0.81$ ； $t_{30} = 0.704$, $p = 0.487$ ），能够保证方向、路径和距离测试以及导航训练的有效进行。”

其它修改建议：

意见 1：与前人研究类似（例如 Noi & Piccardi, 2011），该文章也采用了一系列测试评价被试对于实验环境空间信息如地标、方位、路径、距离的熟悉程度，但在结果部分中的3.4导航能力行为测试结果中，不同分测试结果是单独进行分析的，讨论部分也未对被试的空间信息掌握程度做出综合评价。建议作者考虑是否要适当基于导航能力行为测试的前测结果，对被试的表现情况做出一定综合评价，以增强“被试在实验开始前对实验环境‘非熟悉’这一假设和结论前提的可信度。

回应：非常感谢审稿专家具有建设性的意见。根据审稿专家的意见，我们在3.4导航能力测试结果部分增加了对被试在实验前对实验环境空间信息掌握程度的综合评价（正文第16页最后一段红色字体标注）。

“总体来看，被试在前测时对地标之间的方位、路径距离、直线距离的估计还存在较大误差，对实验涉及的总体环境还不熟悉。经过20天的训练之后，训练组被试对地标间方位、路径和距离的掌握准确性明显提升。”

意见 2：关于在实验方法中选用“东南西北”坐标系，应适当在文中补充使用该方式的相关依据。

回应：感谢审稿专家的意见。我们在前言和方法部分均补充了关于选用“东南西北”坐标系进行导航训练的依据和原因。

前言部分（正文第3页红色字体标注）：“以往研究表明，使用绝对坐标（如，面朝北方）时个体在熟悉环境中的方位知觉以及对新环境的学习效果都更好（Frankenstein et al., 2012; Gagnon et al., 2014）。而且，绝对坐标系的使用程度与个体在真实环境中的方向感知力呈正相关，同时与网格细胞所在的内嗅皮层的灰质体积呈正相关（Hao et al., 2017）。因此，本研究在导航训练中将使用东南西北绝对坐标系进行指路训练，由此考察非熟悉环境实地导航中自我中心参照表征系统与环境参照表征系统的参与。”

方法部分（正文第4页红色字体标注）“本研究选用东西南北坐标而非前后左右进行指路训练的主要原因有二：一、以往研究表明，使用绝对坐标时个体在熟悉环境中的方位知觉以及对新环境的学习效果都更好（Frankenstein et al., 2012; Gagnon et al., 2014）。二、使用东南西北绝对坐标系便于判断训练中被试指路是否正确，提升训练过程的可操作性”

意见 3：考虑到在某环境中的生活时长是该环境熟悉性的辅助评估指标之一（Nori & Piccardi, 2011），建议作者考虑补充被试的平均入学时长或其它相关信息。

参考文献：

Nori, R. & Piccardi, L. (2011), Familiarity and spatial cognitive style: how important are they for spatial representation? In *Spatial Memory: Visuospatial Processes, Cognitive Performance and Developmental Effects*. Nova Science Publishers, Inc., 123-144.

回应：同意审稿专家的意见，已在修改稿中补充了被试的入学时长（见正文第3页“2.1 被试”部分红色字体标注）。

“2.1 被试..... 被试均为一年级新生，实验在被试入学三个月后进行。”

.....

审稿人 2 意见:

非常感谢作者的细致回复。但是有几个问题没有得到很好解决， 详列如下：

意见 1: 对于意见 1， 作者可否在文中说明这个实验前测部分是在大一学生入学后多久进行的？ 如此表述可能比只提大一新生能提供更多信息。对于实验假设， 更为合理的是假设是实地导航训练会改变与环境参考表征相关脑区的活动。理由是， 作者比较的是后测与前测之间的变化。如作者所言， 被试在非熟悉环境中可能会使用自我中心参考表征， 那么被试在前测时肯定对环境更不熟悉， 应该使用更多的自我中心表征才对。被试在后测时对环境熟悉度已经大为提升， 所以对比后测和前测的变化， 且考虑到训练过程中用的是东西南北坐标系进行指导， 更为合理的假设应该和作者文中的假设恰恰相反。

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。实验前测部分在一年级新生入学三个月后进行， 已经在修改稿中补充这一信息（见正文第 3 页 2.1 红色字体标注）。

“2.1 被试..... 被试均为一年级新生， 实验在被试入学三个月后进行。”

对于审稿人提出的实验假设， 我们补充了使用东南西北进行指导的实地导航训练将改变环境参照表征相关脑区活动的可能性作为假设 1， 并重新表述了原来的假设作为假设 2（详见正文第 3 页红色字体标注）， 也在讨论部分倒数第二段对假设进行了回应。

“以往研究表明， 使用绝对坐标（如， 面朝北方）时个体在熟悉环境中的方位知觉以及对新环境的学习效果都更好（Frankenstein et al., 2012; Gagnon et al., 2014）。而且， 绝对坐标系的使用程度与个体在真实环境中的方向感知力呈正相关， 同时与网格细胞所在的内嗅皮层的灰质体积呈正相关（Hao et al., 2017）。因此， 本研究在导航训练中将使用东南西北绝对坐标系进行指路训练， 由此考察非熟悉环境实地导航中自我中心参照表征系统与环境参照表征系统的参与。我们预期， 1）短期的绝对坐标指路训练可能引起从自我中心参照表征系统到环境参照表征系统的转移， 与环境参照表征相关的脑区在训练后会更多地参与到导航， 即导航方式主导大脑导航系统的使用； 或者 2）在非熟悉环境， 即使环境从不熟悉逐渐变得更熟悉， 自我中心参照表征系统会持续的参与导航并变得更为高效， 即环境主导大脑导航系统的使用。”

意见 2: 对于意见 2， 作者的回答表明图 7 的相关分析结果受到了个别值的影响。去掉一个数据点就会改变数据的显著性， 这表明相关结果不是非常可靠。而且， 在使用像 fMRI 这样的工具来探究脑与行为关系的相关研究中， 已有研究明确指出如果样本量低于 30， 其相关分析的结果很难可靠， 如此文 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hbm.25217>。可否请作者在文中讨论此点？

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。根据审稿人的意见， 我们在讨论部分补充了对样本量较小情况下进行相关分析的讨论， 作为本研究的一个局限（详见正文第 20 页红色字体标注）。

“本研究还存在一些局限和不足..... 第三， 尽管本研究发现了训练引起的连接模式稳定性改变与行为的相关， 然而有研究观点表明， 样本量小（低于 30）会降低统计检验力和结果的稳定性(Grady et al., 2021)。本研究因为是比较训练前后大脑的功能改变， 所以训练组被试量仅有 16 人。因此， 在看待该相关结果及其可推广性时需格外谨慎。未来的研究应采用更大的样本量对导航训练引起的大脑神经活动的改变与行为的关系进行进一步研究。”

意见 3: 对于意见 3, 如果作者认为反应效率能够规避只使用正确率的弊端, 何不将此结论贯彻到底, 在前测的组别比较中也使用反应效率呢?

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。根据审稿人的意见, 我们对前测展开图判断任务和距离判断任务的反应效率进行了比较, 控制组前测任务间反应效率差异不显著 ($t_{15} = 1.10, p = 0.287$), 训练组前测任务间反应效率差异显著 ($t_{15} = 2.46, p = 0.027$)。然而, 值得强调的是, 本研究的结论主要基于训练前后的变化量的组间差异, 而上述结果并不影响研究的主要发现。根据审稿人的意见, 我们在修改稿中已将正确率的结果替换成反应效率的结果(见正文第 11 页红色字体标注), 并针对该结果进行了简要讨论和解释。另外, 审稿人提到的组别比较, 原文中使用的也是反应效率指标。

“我们比较了被试在前测的展开图任务和距离判断任务中的反应效率, 控制组前测任务间反应效率差异不显著 ($t_{15} = 1.10, p = 0.287$), 训练组前测任务间反应效率差异显著 ($t_{15} = 2.46, p = 0.027$)。由于本研究主要关注训练前后的变化量及其组间差异, 因此上述差异并不影响研究的主要发现和结论。”

参考文献:

- 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.
- Gagnon, S. A., Bruny, T. T., Gardony, A., Noordzij, M. L., Mahoney, C. R., & Taylor, H. A. (2014). Stepping into a map: Initial heading direction influences spatial memory flexibility. *Cognitive science, 38*(2), 275-302.
- Hao, X., Huang, Y., Song, Y., Kong, X., & Liu, J. (2017). Experience with the cardinal coordinate system contributes to the precision of cognitive maps. *Frontiers in Psychology, 8*, 1166.

第三轮

审稿人 1 意见:

作者对于上一轮审稿给出的意见均做出了明确回复并对正文进行了针对性修订。总体而言, 该文章经前几轮修改后已基本符合研究方法合理、论述逻辑充分完整、数据结果可靠等要求, 且对实地导航训练相关领域研究具有一定贡献。

审稿人 2 意见: 感谢作者的回复。没有其他问题了。

编委意见: 同意发表。

主编意见:

本研究结合行为测试和功能核磁共振技术, 对非熟悉环境实地空间导航训练提高个体空间导航能力的脑机制进行了考察。本论文的研究选题具有新颖性, 研究方法选用恰当, 获得的研究结论可信。参考外审专家意见进行修改后, 本论文已经达到《心理学报》发表文章的相关要求, 建议发表。