

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：基于 fNIRS 的运动执行与运动想象脑激活模式比较

作者：白学军 张琪涵 章鹏 周菘 刘颖 宋星 彭国慧

第一轮

审稿人 1 意见：本文利用 fNIRS 的 HbO 信号研究了在运动执行和运动想象两种 block 任务情况下，在运动的不同强度下，男性和女性被试的脑激活程度。比较了运动任务的不同，强度的不同，性别不同所产生的差异。能够在前人的研究的基础上有所推进，研究意义较好。得到的结论基本准确，统计方法也基本正确。但是我主要在 introduction 上也就是研究的出发点有所疑问。而且在实验的描述中，作者忽略了重要细节，这些都是他人重复研究所必须的。具体问题见下：

意见 1：前言中，作者提到“运动执行和运动想象任务下的肌电反应也基本相似(A Guillot, Collet, & Dittmar, 2004;Aymeric Guillot, Haguenaer, Dittmar, & Collet, 2005)”。就我所知，运动想象任务为保证真实想象而无运动，需做肌电图，而且要保证无明显运动诱发信号。请解释这里的“基本相似”。

回应：感谢审稿人的细心审阅，是我们疏忽笔误了。运动执行与运动想象任务下能够引起相似的皮电反应，即皮肤电阻随着运动（想象）时间的延长呈 U 型曲线变化(A Guillot, Collet, & Dittmar, 2004;Aymeric Guillot, Haguenaer, Dittmar, & Collet, 2005)。运动执行与运动想象任务下的肌电反应是不一样的，并且肌电在视觉想象与动觉想象下的反应情况也不一样。一般在运动执行任务下能够清晰地反映出肌梭变化，但它没有出现于想象任务中；在动觉想象任务下，肌电信号的振幅、频率都高于视觉想象任务，并且与休息状态下的肌电信号无显著差异（Solodkin, Hlustik, Chen, & Small, 2004）。本研究通过固定被试双臂和双手的姿势、位置及主试观察等方法，确保被试不产生明显的运动信号。

Guillot, A., Collet, C., & Dittmar, A. (2004). Relationship Between Visual and Kinesthetic Imagery, Field Dependence-Independence, and Complex Motor Skills. *Journal of Psychophysiology*, 18(4), 190.

Guillot, A., Haguenaer, M., Dittmar, A., & Collet, C. (2005). Effect of a fatiguing protocol on motor imagery accuracy. *European journal of applied physiology*, 95(2-3), 186-190.

Solodkin, A., Hlustik, P., Chen, E.E., & Small, S.L. (2004). Fine modulation in network activation during motor execution and motor imagery. *Cerebral Cortex*, 14(11), 1246-1255

意见 2：在前言处比较不同研究在运动想象涉及脑区的报告结果不一致的时候，并无最新文献，大都是比较老旧的。请更新。因为最新研究越来越一致表明，运动想象显著激活 M1/Premotor/SMA。

回应：感谢审稿人的提醒，已在文中增添了最新的相关文献。例如，近期 H áu(2013)等人关于运动想象神经网络的元分析研究调查了 122 个实验（来自 75 篇论文），发现其中仅有 22 个实验（来自 16 篇论文）报告了运动想象任务下主运动区的激活。仅有 22% 的文章（共 75 篇文章）发现了运动想象能够引起主运动区激活。（详见第 1 页，黄色部分）

意见 3: 此外, 对上述结果不一致的原因进行解释时, 作者忽略了不同研究设备所带来的不同的研究对象。TMS 主要实现了虚拟损毁, 提示“至关重要/必不可少的功能区”而非一定是那些“任务中会激活的脑区”; PET 研究和 fMRI 研究的对象不一样, 两者也无法直接比较。总之, **introduction** 应该从不同想象运动强度是否会引起不同的想象运动激活这个角度引出研究的必要性。请修改前言的逻辑。对为何利用 NIRS 研究, 也需要给出理由, 比如 fMRI 无法比较真实和想象运动的激活。

回应: 审稿人的建议十分有道理, 已根据您的建议修改了前言部分的逻辑。着重介绍了运动(想象)强度对运动执行或运动想象任务下主运动皮层及其他相关皮层的影响情况, 以及为什么选择 fNIRS 进行该问题的探索。另外重新整理了运动想象任务下 M1 能否激活的相关影响因素, 并考虑到不同研究方法对研究结果的影响。(详见第 2 页, 绿色部分)

意见 4: HbO, HbR, HbT 需要在文中给出全程而非简称。另外请保证写法的一致性(Hbo? HbO? 氧和? 氧合?)。HbT 一般叫总血红蛋白浓度, 而非含氧量。

回应: 非常感谢审稿人的建议, 的确是我们的疏忽。已在文章中做了修改。

意见 5: 在实验设备中, 未给出设备的具体型号, 而且参数不详(如光强, 如采样率——不能是“约”)。

回应: 感谢专家的建议, 以根据您的建议对实验设备的相关内容进行了补充。(详见第 3-4 页蓝色部分)

意见 6: 运动想象任务和执行任务为何没有在被试之间 counterbalance, 这是至关重要的。我认为, 哪怕在前面加一个练习, 让他们熟悉了运动的强度和程度, 再开始正式的实验, 进行顺序的 counterbalance, 都比现在直接按照固定的顺序好。

回应: 非常感谢专家的建议。我们将在今后的研究“训练对运动想象脑激活模式的影响”中采用专家的建议。通过训练使被试记住并可提取不同运动强度的动觉体验; 通过分散训练时间降低被试变量(疲劳、情绪等)对探测信号的干扰。

本研究中, 我们对运动执行任务与运动想象任务下的运动强度(或想象强度)做了顺序上的 counterbalance, 固定地让被试先完成运动执行任务, 后完成运动想象任务。这样做得目的是: 确保被试进行运动想象任务时有较强的动觉感受。

意见 7: 在“探头布置”处, 未给出探头布置的示意图, 如导联之间如何排布的。一般的 NIRS 文章中都会给出。3D 定位仪未给出型号, 定位过程描述不细致。

回应: 已在论文中给出 3D 定位仪型号及具体定位过程, 并重新绘制了探头位置的示意图。(详见第 5-6 页灰色部分)

意见 8: 在数据分析中, 请给出 CSBI 方法的大致描述和全称。同样, 小波分析和主成分分析应给出大致描述, 特别是参数信息, 方便别人重复研究结果。

回应: 文中数据分析部分没有表述清楚, 现已对其进行了补充。本研究在数据分析时一共用了 2 种去噪声的方法, 分别是 CSBI(correlation-based signal improvement)(Cui et al., 2010)、PCA (Principal component analysis) (Zhang et al., 2005)。由于 CSBI 是基于这个假设基础上建立的, 即 HbO 和 HbR 间的相关尽可能地接近-1, 并且运动伪迹与真正信号之间的相关关系接近于 0 (Cui et al., 2010)。然而, 本实验监测被试血氧信号变化时发现, 某些时间段上的 HbO 和 HbR 是同向变化的, 不符合 CSBI 的假设基础, 故使用了 PCA 这种去噪方法。Wilcox 等人证明了 PCA 对 fNIRS 数据去噪的有效性 (Wilcox et al., 2008)。

- Cui, X., Bray, S., & Reiss, A. L. (2010). Functional near infrared spectroscopy (NIRS) signal improvement based on negative correlation between oxygenated and deoxygenated hemoglobin dynamics. *NeuroImage*, 49(4), 3039-3046.
- Zhang, Y., Brooks, D.H., Franceschini, M.A., Boas, D.A. (2005). Eigenvector-based spatial filtering for reduction of physiological interference in diffuse optical imaging. *J. Biomed. Opt.*, 10(1), 11014.
- Wilcox, T., Bortfeld, H., Woods, R., Wruck, E., & Boas, D. A. (2008). Hemodynamic response to featural changes in the occipital and inferior temporal cortex in infants: a preliminary methodological exploration. *Developmental science*, 11(3), 361-370.

意见 9：“任务反应振幅”这一说法不够准确。

回应：已在论文中进行了修改。一般线性模型的公式为 $y=X\beta+\epsilon$ ，其中的 X 是一个设计矩阵， β 是一个参数矩阵，代表了通道中对应响应信号的强度， ϵ 为随机误差(Ye et al., 2009)。

Ye, C.J., Tak, S., Jang, K.E., Jung, J., & Jang, J. (2009). NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 44, 428-447

意见 10：多重比较校正方法描述不清楚。

回应：通过对多重比较方法的仔细研读，发现 tube formula 不适用于非高斯随机场（例如 T-统计量或 F-统计量）（Ye et al., 2009）。所以本研究决定采用一种更为恰当的多重比较方法——FDR 方法

同一时间测量大量通道会增加出现 I 型错误的风险，因此多重比较校正是不可避免的。目前仅有较少的一部分研究使用 Bonferroni 校正，这是一种最为保守的校正方案，对于神经影像数据来说过分严格。所以本研究采用一种更为适当地方法——FDR，FDR 更适用于功能性神经影像数据的处理（Singh & Dan, 2006）。

Singh, A.K., Dan, I. (2006). Exploring the false discovery rate in multichannel NIRS. *NeuroImage*, 33, 542-549.

Ye, C.J., Tak, S., Jang, K.E., Jung, J., & Jang, J. (2009). NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 44, 428-447

意见 11：在得出“男性和女性在运动执行上的激活基本相同”这一结论前，缺乏足够的统计证据。而且，为何将男女单独分开研究激活情况，在 introduction 处没有给出说明。男女的差异是本文研究的重点？

回应：感谢审稿人所提意见，男女差异不是本文研究的重点，在结论处这样表述确实不太得当。研究结果发现男性、女性在运动执行任务下都激活了主运动皮层。

在本实验中，我们使用的是 4×7 的多通道探头架，每个探头之间的间隔距离为 3cm，构成 45 个通道。以通道 36 所在位置为 Cz 点，依次布局。根据 3D 定位仪的定位结果显示，男女性同一通道所在的皮层位置不是一一对应的关系，例如男性体感皮层的对应通道包括 ch20,ch26,ch27,ch32,ch34,ch35,ch37,ch38；而女性体感皮层的对应通道仅包括 ch20,ch26。如果男性、女性使用同一 fNIRS 通道布局的话，将会存在较大的个体差异。

审稿人 2 意见：该研究目的是探讨不同运动强度是如何影响运动执行任务和运动想象任务的大脑激活模式。该研究利用 fNIRS 技术考察了不同运动强度下，不同性别的被试在运动执行任务和运动想象任务时的大脑皮层血氧浓度变化。结果发现：无显著的性别差异；运动执

行和运动想象激活的大脑区域相似，但是运动强度影响运动执行任务的大脑激活强度，而运动强度对运动想象任务的大脑激活强度则没有显著变化。总的来说，该研究思路清晰、实验设计合理，但是存在着如下一些问题，期待进一步改进。

意见 1: 文章在引言阶段列举了若干以往研究的结果，认为导致以往研究结果不一致的可能原因是任务不同和被试不同。因此，研究中引入运动强度这个变量，拟探讨其对运动执行和运动想象任务的大脑激活水平的影响。但是对为什么运动强度会影响到这两个任务的大脑活动机制缺乏充分说明。

回应: 同意审稿人的意见。已对问题提出思路进行修改。简略介绍影响主运动皮层激活的原因。详细介绍运动强度对运动执行与运动想象任务大脑皮层活动的影响。（详见第 10 页绿色部分）

意见 2: 因为本研究是针对运动执行模式下的 fNIRS 研究，最好能够对为什么 fNIRS 对运动具有高宽容性特点进行具体说明。

回应: 文章中已对选择 fNIRS 研究运动想象脑激活情况的原因进行了补充。并着重介绍了 fNIRS 对运动的高宽容性。（详见第 2-3 页绿色和粉色部分）

意见 3: 在方法部分，采样率设置为“约 90ms”有误，采样率单位一般为 Hz。

回应: 感谢专家的建议。已进行了修改。

意见 4: 应该举出文献说明为什么本文只采用 HbO 指标，而不采用 HbO 和 HbT 指标。目前在近红外成像领域提倡的通用方法是同时报告 HbO 和 HbR。

回应: 感谢专家。因为已有研究(Hoshi et al,2001)表明 HbO 是测量大脑血流量(cerebral blood flow, CBF)变化最敏感的指标，所以本研究也采用 HbO 指标。

Hoshi, Y., Kobayashi, N., & Tamura, M. (2001). Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *J Appl Physiol*, 90, 1657-1662.

意见 5: 在方法部分，采用的哑铃磅数有何依据？先前文献是握力的 20%、50% 或者 80%。本研究中，4 磅的哑铃大约只是男性被试握力的 5%。

回应: Shibusawa (2009) 等人的实验，每种力量强度呈现两次，每次 20s。在本实验中每种力量强度呈现四次，每次也是持续 20s。在本研究中虽然力量强度不大，但持续时间较长。

已有研究发现运动疲劳时，运动皮层内的氧合血红蛋白浓度明显下降(Shibuya et al., 2006; 2007)。丁南 (2012) 的研究也表明，在递增运动负荷的过程中，氧合血红蛋白的浓度会随着运动强度的增加而增大，达到最高点之后开始下降，直到运动结束；在力竭之前，氧合血红蛋白浓度骤降。由于本实验运动执行任务持续时间约为 6 分钟（休息-任务-休息），为了排除运动疲劳的干扰，本研究采用较小的力量强度，即为 3.6% 和 7.2% 的平均最大握力，男性与之对应的重量约为 4 磅、8 磅哑铃，女性与之对应的重量约 2 磅、4 磅哑铃。Kuhtz-Buschbeck 等人 (2008) 也证实了较小力量强度的变化与初级感觉运动皮层之间的积极线性关系。

Shibuya K., & Kuboyama N. (2007). Human motor cortex oxygenation during exhaustive pinching task. *Brain Research*, 1156:120-124

Shibuya K., & Tachi M. (2006). Oxygenation in the motor cortex during exhaustive pinching exercise. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 153:261-266

丁南. (2012) 运用近红外光谱技术对递增负荷运动脑血流动力学变化特点的研究. 首都体育

学院. 硕士论文

Kuhtz-Buschbeck, J.P., Gilster, R., Wolff, S., Ulmer, S., Siebner, H., & Jansen, O. (2008). Brain activity is similar during precision and power gripping with light force: an fMRI study. *NeuroImage*, 40(4), 1469-1481.

Shibusawa M., Takeda T., Nakajima K., Ishigami K., Sakatani K. (2009). Functional near-infrared spectroscopy study on primary motor and sensory cortex response to clenching. *Neuroscience Letters*, 449, 98-102

意见 6: 图 2 的通道图不够清晰, 建议重新绘画制作。

回应: 非常感谢审稿人的建议, 已在文章中重新绘制了通道位置的示意图。(详见第 6-7 页灰色部分)

意见 7: 请说明使用 tube formula 方法对结果进行校正的目的。

回应: 通过仔细研读文献, 发现 tube formula 不适用象 t 统计量或者 F 统计量这样的非高斯随机场 (Ye et al., 2009)。所以为了保证数据处理的准确性, 本研究采用 FDR 校正来排除研究结果的假阳性 (Singh & Dan, 2006)。

Singh, A.K., Dan, I. (2006). Exploring the false discovery rate in multichannel NIRS. *NeuroImage*, 33, 542-549.

Ye, C.J., Tak, S., Jang, K.E., Jung, J., & Jang, J. (2009). NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 44, 428-447

意见 8: 在结果呈现的时候最好能够把通道名称与大脑结构对应起来, 便于读者阅读和理解。

回应: 十分感谢专家的建议。已在文中重新绘制了研究结果示意图。(详见第 9-13 页内的研究结果示意图)

意见 9: 在讨论阶段, 关于为什么运动强度对于运动想象的大脑活动模式无影响, 研究者给出的理由是“虽然在《运动想象自评问卷》种实验被试都认为这两种强度的运动想象存在差异, 但差异程度不大。”根据这个推理, 如果实验增强差异程度 (比如说, 2 磅和 20 磅), 运动强度是否会对运动想象产生影响?

回应: 感谢审稿人的建议, 我们也打算对该问题做进一步的探讨。在接下来的工作中, 我们会考察增加想象差异后被试主运动皮层的激活情况。

意见 10: 在讨论阶段, 作者提出“腹侧 PMC”和“背侧 PMC”。建议对脑区的描述采用统一标准的用词, 不要中英文夹杂。

回应: 感谢专家的建议, 以根据您的建议进行了修改。

第二轮

审稿人 1 意见: 我的意见已经给予了很好的回复和改进。我没有其他意见了。

审稿人 2

意见 1: 检查笔误。P10“神经基质”应该为“神经机制”。P14 第一行多了一个顿号。

回应: 感谢审稿人的建议, 已改正并仔细检查文内笔误。

意见 2: P15 不应该是 $FDR < .05$, 而应该是矫正后的 $p < .05$

回应: 感谢审稿人的提醒, 已改正。

意见 3: 首次出现缩写的时候, 请用全称。比如 P10 上的 fNIRS

回应: 感谢审稿人的细心审阅, 已改正。

意见 4: 之前审稿人提出的问题: “运动想象任务和执行任务为何没有在被试之间 counterbalance, 这是至关重要的。我认为, 哪怕在前面加一个练习, 让他们熟悉了运动的强度和程度, 再开始正式的实验, 进行顺序的 counterbalance, 都比现在直接按照固定的顺序好。”这是研究的局限性, 需要在讨论中提出来。

回应: 已在讨论部分添加此部分内容, 详见 P15 黄色部分。

意见 5: 3D 定位仪的参考点只有四个? Cz、Nz、AL 和 AR?

回应: 3D 定位仪根据这四个参考点生成一个球面坐标系。其中 AL 与 AR 的中点是这个坐标系的原点; AL、AR 所在直线为 x 轴; 通过 Nz、AL、AR 三点定义 y 轴, 在平面内 y 轴过原点垂直于 x 轴; 根据 Cz 点确定 z 轴, z 轴垂直于 x 轴、y 轴。然后在这个球面坐标系的基础上, 对各个探头位置进行了定位。

一般在进行配准定位时都会选择 Nz、AL、AR 三点, 如果 Iz 作为第四个参考点将会存在以下局限: 其一, Iz 点定位的变异性较大; 其二, 将会在一个水平限制面内定位四个参考点, 进行的仿射变换是极其不稳定的。虽然 Cz 点是依赖于 Iz 点确定的, 但它能够提供足够的垂直面的信息, 因此在许多实践领域中, 配准方法往往避开 Iz 选择 Cz (Tsuzuki et al., 2012)。所以本研究选择 Cz、Nz、AL 和 AR 作为配准过程的参考点。

Tsuzuki, D., Cai, D.-S., Dan, H., Kyutoku, Y., Fujita, A., Watanabe, E., & Dan, I. (2012) Stable and convenient spatial registration of stand-alone NIRS data through anchor-based probabilistic registration. *Neuroscience Research*, 72: 163-171