

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：顶下叶在汉语声调感知中的作用：fNIRS 导航的 TMS 研究

作者：刘淑娟，谭丽柔，齐芸，胡帅，王小娟，杨剑峰

第一轮

审稿人 1 意见：

文章汇报了两项实验：分别采用 fNIRS 定位声调声学属性和范畴知觉的脑区激活位点，再采用 TMS 干预对应靶点低比刺激前后脑区激活差异。文章关注的 IPL 脑区在言语线索范畴知觉中的参与机制是重要的学术问题，但是从对结果的解读和统计方法的使用上，很难直观推断出作者给出的结论，建议大修后再审。

意见 1：实验一的结论是“结果发现声学间隔的主效应表现在 IPL 上部(通道 15)以及 PMC，而声调范畴的主效应同时表现在 IPL 上部(通道 15)和下部(通道 11)，声学间隔与范畴信息的交互作用仅表现在 PMC 脑区”，首先，更加准确的表述应该是 IPL 背侧 (dorsal) 和腹侧 (ventral)；其次，至少从热力图中看，通道 15 和通道 11 的位置关系是前后而不是上下。

回应：完全同意审稿专家的意见。如何标注两个不同通道的定位，也是我们在写作过程比较纠结的地方。此次修改根据审稿专家的意见，将文中“IPL 上部”统一修改为“IPL 背侧”；将“IPL 下部”统一修改为“IPL 腹侧”。详见文中蓝色字体部分。

意见 2：实验二在结果分析时没有直接对 TMS 前后相同条件的结果进行对比统计检验，只是分别对刺激前后的每个条件之间做了检验，很难直观地看出 TMS 的效应。TMS 对行为结果是否有效应？TMS 对 fNIRS 信号的改变是否达到统计水平的显著？无论有无阳性刺激效应，都希望能看到有统计结果。

回应：同意接受审稿专家的建议。修改稿在实验二补充了 3(组别：无刺激组、IPL 背侧刺激组、IPL 腹侧刺激组) × 2(声调范畴：范畴间、范畴内) × 2(声学间隔：大、小声学间隔)的三因素方差分析结果。鉴于有无 TMS 刺激以及 TMS 刺激位置为被试间因素，我们保留了刺激前后分别进行的两因素方差分析的结果，通过对比刺激前后效应模式的变化，考察 TMS 对行为和脑区活动的影响。

结果发现，不管是在行为正确率上还是在兴趣脑区的 HbO 浓度变化上，三因素方差分析都展示出了组和范畴信息或者声学间隔的交互作用。在行为正确率上，组别、声学间隔和范畴信息的三次交互作用显著。在神经活动上，对 IPL 背侧、IPL 腹侧、PMC 三个区域的 HbO 浓度变化进行三因素方差分析，发现了组别和声学间隔的交互作用，对 IFG 的 HbO 浓度变化进行三因素方差分析，展现出了组别和范畴信息的交互作用，这些结果表明 TMS 刺激影响了不同脑区在声调加工时的神经活动。

刺激前后分别进行的两因素方差分析也展示出了有无 TMS 刺激及 TMS 刺激不同位置时不同的行为和脑区活动模式，和三因素方差分析结果一起表明 TMS 刺激影响了行为和脑区活动。

对正确率的方差分析结果详见 3.2.1，对 fNIRS 信号的方差分析结果详见 3.2.2，讨论也基于结果的补充进行了部分修改，详见 3.3。

意见 3: 实验二仅仅从 TMS 刺激引发了 fNIRS 信号的改变来推断脑机制的“代偿”，比较单薄，最好是有与行为结果的相关计算加以佐证：是否 TMS 引发的 fNIRS 信号的改变与行为结果被 TMS 调控的变化量有关联呢？

回应: 感谢审稿专家的建设性意见。修改稿充分采纳了专家的建议，增加了脑与行为相关的分析。分析方法见 3.1.2，结果见 3.2.3，相关图为图 5。

具体说明如下：结果首先计算了 TMS 抑制 IPL 腹侧神经活动所调控的行为正确率和 IFG 信号的变化，然后计算了两者的相关关系。结果发现在范畴间条件，行为正确率的变化和 IFG 信号的变化呈负相关，行为正确率降低得越多，IFG 信号增强得越多；范畴内条件，行为正确率的变化和 IFG 信号的改变呈正相关，行为正确率增加得越多，IFG 信号增强得越多。范畴间区分正确率的降低和范畴内区分正确率的增加都表明范畴效应的减弱，范畴效应减弱得越多，IFG 信号增强得越多。正如专家的建议，新的结果为脑机制的代偿提供了支持性证据。

意见 4: 最后能用图直观地表示声调连续体的声学特征变化；

回应: 修改稿补充了音高模式图，可以清晰地描述声调连续体基频信息的变化，详见图 1A。

意见 5: 规范语音学表述：如果是汉语拼音一声“a”，请用/a55/；

回应: 感谢审稿专家的专业性建议。此次修改，我们已将/a1/更正为/a55/，见 2.1.2。

意见 6: 请简单描述 fNIRS 空间精度的技术可靠性，这一点在支撑结论中非常重要；

回应: 感谢审稿专家的细致阅读。修改稿对 fNIRS 技术的可靠性做了相应的补充，详见 2.1.4 部分。具体说明如下：

本研究重点探究 IPL 在声调范畴知觉中的作用。fNIRS 技术的空间分辨率为 2~3 cm，测量深度为 1.5~2 cm (Pinti et al.,2020)。此前已经有研究使用 fNIRS 技术探究 IPL 在语音加工中的作用，比如 Lawrence 等人(2018)采用 fNIRS 技术,考察颞上、顶下和额下在语音理解中的作用。也有研究使用 fNIRS 技术考察声调范畴知觉的神经机制，比如 Zinszer 等人(2015)采用 fNIRS 技术，考察英语经验如何影响左侧颞中回和右侧颞上回对声调范畴信息的加工。因此，fNIRS 技术已足够解决我们的研究问题。

Lawrence, R. J., Wiggins, I. M., Anderson, C. A., Davies-Thompson, J., & Hartley, D. E. H. (2018). Cortical correlates of speech intelligibility measured using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). *Hearing Research*, 370, 53–64.

Pinti, P., Tachtsidis, I., Hamilton, A., Hirsch, J., Aichelburg, C., Gilbert, S., & Burgess, P. W. (2020). The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1464(1), 5-29.

Zinszer, B. D., Chen, P. Y., Wu, H., Shu, H., & Li, P. (2015). Second language experience modulates neural specialization for first language lexical tones. *Journal of Neurolinguistics*, 33, 50–66.

意见 7: 通道 11 和通道 15 之间有多大距离？足以分离对两个位点 TMS 刺激的效应吗？

回应: 这是原文的疏忽，没有提供足够的技术细节。修改稿在 2.1.4 部分增加了相应的技术细节。

具体来说，本研究所使用的 fNIRS 仪器为 ETG-7100，发射和接收光极之间的距离为 3cm，通道位于发射和接收光极之间。根据通道 11 和通道 15 的位置，计算其距离，约为 2.12cm。我们选择 TMS 去探究 IPL 在声调范畴加工中的因果作用，是因为相对于经颅电刺激技术，TMS 的影响是更聚焦的。并且我们使用的是比圆形线圈更聚焦的“8”字线圈，刺激

的皮层面积可以聚焦到一平方厘米(Rossi et al.,2021)。因此从技术上来说,通道 11 和通道 15 的距离足以分离 TMS 刺激的效应。此前有 TMS 研究分别刺激初级运动皮层的不同位置,比如舌部和喉部运动皮层(Liang et al.,2023),舌部和嘴部运动皮层(D'Ausillo et al., 2009),发现刺激不同区域对语音知觉有不同的影响。两个位点 TMS 刺激的效应可以被如此精确的区分,也为通道 11 和通道 15 之间的距离足以分离两个位点 TMS 刺激的效应提供了依据。

D'Ausillo, A., Pulvermueller, F., Saimas, P., Bufalari, I., Begliomini, C., & Fadiga, L. (2009). The Motor Somatotopy of Speech Perception. *Current Biology*, 19(5), 381–385.

Liang, B. S., Li, Y. C., Zhao, W. Y., & Du, Y. (2023). Bilateral human laryngeal motor cortex in perceptual decision of lexical tone and voicing of consonant. *Nature Communications*, 14(1), 4710.

Rossi, S., Antal, A., Bestmann, S., Bikson, M., Brewer, C., Brockmoller, J., et al. (2021). Safety and recommendations for TMS use in healthy subjects and patient populations, with updates on training, ethical and regulatory issues: Expert Guidelines. *Clinical Neurophysiology*, 132(1), 269–306.

意见 8: 一些术语的表达需要规范: 如“本实验从神经因果的角度发现 IPL 参与了汉语声调的范畴加工”, “神经因果”这一次比较模糊。如果是神经机制,就用神经机制;如果是 TMS 诱发的虚拟损伤效应,目前可以考虑用“因果性”。

回应: 这是原文的疏忽,感谢审稿专家对术语表达规范性的要求。修改稿中已经将“神经因果”改为“因果性”,并仔细阅读了全文,对术语表达的问题进行检查和修改。

.....

审稿人 2 意见:

研究结合 fNIRS 和 TMS 技术探讨了左侧顶下叶(IPL)在声调感知中的作用,有助于进一步揭示声调感知的脑机制,也对语音感知的神经模型有一定意义。建议对以下几个问题再做思考。

意见 1: 引言着重从 IPL 展开,尚不清楚 IPL 在整个语音感知脑机制中的地位。考虑到作者在总讨论中分析了本研究结果对语音感知神经模型的意义,建议作者可以在引言就对语音感知脑机制有所回顾,以便更好地将 IPL 和整体的脑机制联系起来,显示本研究结果的价值。

回应: 审稿专家的建议能够很好地提升本研究的理论贡献。此次修改,我们在引言中补充了语音加工的双通路模型,该模型认为语音加工包括背侧通路和腹侧通路, IPL 是语音加工背侧通路的一部分,连接着听觉区和发音运动区。在讨论中,我们基于研究结果在双通路模型的基础上探讨了 IPL 在背侧通路中的门控作用,以及背、腹侧通路的动态协作机制。详见引言第二段。

意见 2: 两个实验均没报告伦理审查情况。

回应: 这是我们的疏忽,修改稿已经补充了相应的内容。详见 2.1.1 和 3.1.1。

意见 3: “2.1.2”的材料部分,作者采用 PSOLA 制作了声调连续体,建议提供连续体中每一个刺激的基频。另外,图 1 中区分任务的结果不是很清楚含义,区分任务是对两个刺激做判断,但是图中的结果是在单个刺激。

回应: 修改稿对图 1 进行了调整。一方面补充了音高模式图,里面包含了每个刺激的基频信息,见图 1A。另一方面增加了识别任务和区分任务结果图的注释,使其更为清晰表达每一个任务的含义。在区分任务中,每个刺激与它间隔一个的刺激组成不同刺激对(例如,1-3 刺激对),我们把区分正确率标在了两个刺激中间的刺激上(例如,刺激 2),见图 1B。

意见 4: “2.2.1”的行为结果发现交互作用，但是这个方向的结果并没体现交互作用。“3.2.1”也有类似问题。

回应: 感谢审稿专家的细致阅读，这是我们结果撰写时的疏忽，交互作用体现在简单效应效应量上的不同，此次修改我们补充了相应的结果说明，见 2.2.1 和 3.2.1。

意见 5: 根据实验操纵，声学间隔的主效应并不直接反映声学特征的加工，因为范畴间刺激对的差异不止在于声学特征，还在于范畴特征。比较范畴内大间隔和范畴内小间隔的差异才能更为直接反映声学特征的加工。基于此，目前有关声学特征加工的推测需要再做思考。

回应: 感谢审稿专家的仔细推敲与建议。针对此问题，我们进行了认真思考，并查找了相关资料。修改稿为了更加谨慎地解释这部分的结果，增加了对于声学特征与范畴加工操纵方法的讨论。详见 4.1 第二段。

意见 6: 在 TMS 的干预下，行为表现似乎和干预前没有明显差异，希望作者能对行为结果也做一定讨论和解释。

回应: 两位审稿专家都指出了这个问题，修改稿对行为结果进行了深入的分析和解释。对行为数据的补充分析结果详见 3.2.1，讨论详见 3.3。

具体说明如下：在 TMS 的干预下，行为表现是有区别的。此次修改，我们增加了对行为正确率的 3(组别：无刺激组、IPL 背侧刺激组、IPL 腹侧刺激组) × 2(声调范畴：范畴间、范畴内) × 2(声学间隔：大、小声学间隔)的三因素方差分析结果，以更直观地看行为结果如何受 TMS 干预的影响。结果发现组别、声学间隔和范畴信息的三次交互作用显著，表明对 IPL 的 TMS 刺激影响了声调的加工。在不同组别进行的两因素方差分析结果进一步表明，在无刺激组和 IPL 背侧刺激组，声学间隔和范畴信息的交互作用显著，表现为相对于小声学间隔，大声学间隔有更大的范畴效应的效应量；但是在 IPL 腹侧刺激组，声学间隔和范畴信息的交互作用不显著。结果表明 IPL 腹侧在声调范畴加工中具有因果作用，会因果性地影响声调范畴加工的行为表现，也表明 IPL 腹侧在声调范畴加工中的作用不同于 IPL 背侧，对声调范畴加工有更大的影响。

第二轮

审稿人 1 意见:

作者对此前的建议和评论都进行了详细的回复，在文章也进行了较有针对性的补充。整个研究选题有重要理论意义，在实验设计和数据采集上科学客观；数据分析和报告方面比第一稿有明显提升，但是依然存在非常大的问题，建议作者继续进行较大的修改和完善，更客观规范地报告结果。

总的来说，突出的问题有这几点：

第一：数据分析和结果机械呈现堆砌罗列痕迹明显，对主要结论不起主要作用的分析和结果（包括图表）冗余重复，值得深入挖掘的结果没有深入分析；

第二：作者报告结果时有基于统计上不稳定的结果下强结论的倾向；

第三：基于第一二点，目前作者给出的讨论和结论不足以令我信服；

第四：语言表述仍有不规范和语法标点使用不当的问题。

意见 1: 只看显著的实验数据，我给出的结论是：（1）行为结果重复了经典的范畴知觉效应（正确率：范畴间>范畴内，大间隔>小间隔）；（2）背侧 IPL 激活对范畴和声学特征

同时敏感（腹侧对范畴特征敏感，边缘显著）；（3）PMC 和 IFG 的激活在实验一中没有显著受各因素影响。但是作者在对实验一结论时非常强调 PMC 和 IFG 的功能，并且没有区分显著和边缘显著的结果，愚以为不妥。况且，PMC 和 IFG 的结果对整个研究的主要结论支持并不大。

建议把实验一的结论和讨论重点放在显著的结果上，特别是上面提到的第（2）点；PMC 和 IFG 可以适当讨论。另外，PMC 的交互作用是不显著的，并不需要进行继续的简单主效应分析，但如果确实有必要建议放在补充材料。

回应：完全接受。首先，在实验一的结果报告中，只报告了统计达到显著的结果，不再报告边缘显著的结果。其次，实验一发现的 PMC 和 IFG 都没有达到统计显著的结果，不再报告它们的统计结果，也就在讨论部分不再讨论 PMC 和 IFG 在声调感知中的功能。

因此，实验一的讨论就重点关注背侧 IPL 在汉语声调感知加工中的作用。

意见 2：作者新增了纳入不同 TMS 刺激条件的 ANOVA 分析，弥补了之前没有直接对比 TMS 效应的不足。但是，结果的报告依然冗余，重点不突出。实验二既然是在实验一的基础上加 TMS，那应该把数据分析重点放在探究 TMS 对准确率和脑区激活的效应及其调节因素上，再在此基础上考虑脑区激活与 TMS 对准确率调控的关联。基于这个原则和目前作者报告的结果，我能发现显著的结论是（1）TMS 对准确率的主效应显著，且事后对比检验显示刺激腹侧 IPL 使得准确率提升；（2）TMS 刺激背侧 IPL 对 IFG 激活的主效应显著；（3）（基于单独对每种刺激位点的 ANOVA 分析）TMS 刺激背侧 IPL 不特别影响各脑区激活对声调范畴和声学特征的区分，但刺激腹侧 IPL 使得各脑区激活对范畴和声学特征的区分性消失。有很多结论其实是边缘显著（如 TMS 刺激背侧 IPL 使得 IFG 激活增大的），甚至不显著的（如行为和脑相关的分析），作者都用显著的语气报告了，这不规范。

对于第（3）点，个人建议作者不要基于单独对每种刺激位点的 ANOVA 分析进行报告（无论是激活量还是准确率）。既然是探究 TMS 的效应，确实不提倡将不同的 TMS 刺激位点的结果单独拿出来分析。取而代之的，可以是基于三因素 ANOVA，从分析主效应、交互作用、简单主效应和事后对比分析的角度去验证第（3）点。当然，把 TMS 刺激位点除外的单个因素的不同水平分开做 ANOVA 我认为可以接受，但目的不是为了探究“不同 TMS 刺激位点中各因素对准确率和激活的影响”，而是为了探究“TMS 刺激对不同任务和脑区激活的影响”，因为实验二的目的本来就是用 TMS 虚拟扰动腹侧/背侧 IPL，通过探究其扰动效应来回答其参与的因果性问题。

由上一段引申开：实验二结果报告的重点并不是阐述所有因素（通道、声调范畴、声学间隔）的主效应和所有交互作用等统计指标，而是围绕 TMS 的主效应、TMS 主效应的事后比较分析、TMS 效应与其它因素的交互作用、（如果存在交互作用）TMS 在其它因素的单个水平的简单主效应展开；没有 TMS 这个变量参与的所有主效应和交互分析其实都是在验证实验一的结论，可以放在补充材料里。另一方面，作者在分析 TMS 这个变量本身的效应时是没有报告完全的。如分析对准确率的作用时，作者报告“而且，组别和声学间隔及范畴信息的三次交互作用显著”，但后续并没有报告与 TMS（组别）有关的简单简单主效应分析。

基于目前作者给出的结果，可以得出的小结是实验二发现了 TMS 刺激腹侧和背侧 IPL 对声调感知（准确率和脑激活）有不同的影响，刺激腹侧 IPL 同时影响准确率和多个脑区激活的区分性，而刺激背侧 IPL 则更多地引起了 IFG 的改变。这些结果之间其实存在冲突（如为什么 TMS 刺激腹侧 IPL 会提高准确率但是降低了脑区激活的区分度），但首先希望作者整理好数据分析，再看看结果是否有变动。

另外：作者在我的提议下报告了脑与行为的相关性，但是首先这些相关性只是边缘显著，其次没有做多重比较校正，再者也没有说明为什么要从很多指标中单选这几个指标做相关。
回应：完全同意审稿人的建议。

实验二不再单独考察单个 TMS 位点的数据，新的数据分析将 TMS 位点作为自变量引入，进行三因素的 ANOVA 分析：

1)分析重点不再单独考察单个 TMS 位点的数据，而是将 TMS 位点作为变量引入，进行三因素的 ANOVA 分析。

2)不再报告边缘显著的结果。

3)重点考察 TMS 位点的效应，及其与声学间隔、声调范畴之间的交互作用。从而体现 TMS 对于脑区功能的虚拟损伤效果。

4)把单独 TMS 位点的 ANOVA 分析、与行为表现的相关结果都移到附录中，尤其是一些边缘显著的结果，都仅供读者参考，不再依据它们作出推论。

意见 3：就目前的结果而言，我认为实验一和实验二能告诉我们的是：（1）腹侧和背侧 IPL 都对声调敏感（但背侧更敏感，基于实验一）；（2）刺激腹侧 IPL 更能影响行为和脑区激活两个水平的声调区分。作者可以用“门控”的概念，但建议给出更多解释。

回应：同意接受审稿专家的建议。感谢审稿人不断帮忙总结和提炼本文的研究发现。此次修改，我们进一步凝练了文章的发现：

1)左侧 IPL 参与声调范畴感知加工；

2)左侧 IPL 存在功能分离的亚区域：背侧/腹侧子区域受损的结果模式不同。

3)语音范畴加工的神经生理模型具有动态协作的机制：一方面，当背侧通路受损时，就会自动依靠腹侧通路通达 IFG 脑区来补偿加工；另一方面，当背侧的负责声调范畴感知的 IPL 背侧子区域受损，会调用大量的声学信息敏感的脑区参与。

因此，我们对于 IPL 的背侧和腹侧功能都进行深入地讨论和分析，也对“门控”机制进行了详细讨论：声调范畴感知的信息流需要经由 IPL 腹侧子区域的门控作用，如果该子区域受损，整个背侧语音通路就不再参与声调范畴感知；而在腹侧子区域正常时，背侧子区域就在声调范畴感知中起到了关键作用，该子区域受损，就需要更多对声学信息敏感的背侧脑区参与支持，从而补偿 IPL 背侧子区域对于声调信息敏感性的受损(详见 3.3 讨论最后一段，以及总讨论 4.1 最后一段)。

意见 4：建议删去报告统计量的表格，只在文中报告统计量、自由度、显著性、效应量等指标即可。

回应：已经删除了实验一的统计量表格，只在正文中报告，详细的表格数据以附件的形式报告。但是，实验二的统计数据过于繁杂，在正文中报告不利用阅读，仍然统一将数据结果报告在表格里。

意见 5：音标用中括号，[a55]，上次我建议错了:(。

回应：已将/a55/更正为[a55]，见 2.1.2 第一段。

意见 6：文中对准确率等指标的计算给出公式和计算过程。

回应：已经增加了识别任务识别分数和区分任务区分分数的计算方法(见 2.1.2 第三段)。

意见 7：实验二没有设置假刺激条件，对照组用的实验一作为空白对照组，建议在讨论中补充可能的影响。

回应：实验二使用 TMS 刺激不同的位点互作参照，在一定程度上能够克服缺少 TMS 伪刺激组的缺陷。最理想的仍然是另外增加一组 TMS 刺激 Vertex 的空白对照组，用来排除有/无 TMS 刺激的影响。本研究使用 TMS 刺激不同子区域，互作参照，虽然在结果上得到了不同的效应模式，但是不能完全排除有/无 TMS 刺激的影响。对此我们在总讨论 4.3 第一条局限中承认了可能的不足。

意见 8：英文缩写给出全称：TMS、IPL、IFG、PMC、cTBS。

回应：完全接受，返修稿已给出全称。

意见 9：柱状图至少给出主效应的显著标记，有条件可以改成箱线图+点图 (strip plot) 更能体现出个体分布。

回应：实验一已经在图中给出了主效应的显著标记。实验二不再报告具体兴趣脑区的柱状图结果。

意见 10：报告被试人口学数据的地方建议增加效应量估计说明为什么选取这样的样本量。

回应：在 2.1.1 中，增加了样本量选择说明，基于 G-Power 3.1 进行了样本量计算。

意见 11：数字的小数点后保留数位统一，两位或三位（建议三位）。

回应：按照心理学报的要求，将 p 值统一保留为小数点后三位，其它数字统一保留为小数点后两位。

意见 12：标点符号问题：下一分句如果用来解释上一分句建议用冒号。如“范畴信息的主效应显著($F(1, 30) = 333.82, p < 0.001, \eta^2 p = 0.92$): 相比于范畴内刺激对，被试对跨范畴刺激对的区分正确率更高。”

回应：文中类似的表达，按照审稿人的建议，进行了相应的修改。

意见 13：一些语言表达不通顺：“神经上，抑制背侧，IPL 背侧和腹侧及 PMC 对声学间隔敏感”。

回应：已修改。对稿件通篇进行了校正阅读和仔细修改。

.....
审稿人 2 意见：

作者较好地解决了上一轮审稿中提出的问题。建议作者就以下几方面做进一步的修改和提升。

意见 1：文中有些地方使用左侧 IPL，有些地方使用 IPL，建议作者统一表述。

回应：同意。已统一表述为左侧 IPL。

意见 2：本文重点探讨 IPL 在声调感知中的作用，但实际上也涉及了 PMC 和 IFG 两个脑区。建议作者在前言部分对 PMC 和 IFG 在声调感知或语音感知中的具体作用做必要说明，以便更好地讨论两个实验的结果。

回应：接受。已在引言倒数第二段对 PMC 和 IFG 在声调感知中的具体作用进行了阐述，从而也更明确地提出了研究的假设，即 IPL 与 PMC、IFG 脑区之间具有动态协作的机制，因

此预期当 IPL 被虚拟损伤之后,可以观察到 PMC 和 IFG 脑区会更多参与到对声调范畴的感知加工。

审稿专家的建议增强了文章的逻辑性,也提升了本研究发现的理论价值。

意见 3: 部分结果缺少统计值或具体的比较结果。例如, 2.2.1 第二段最后一句“但大声学间隔条件范畴效应的效应量更大”缺少必要的统计值。2.2.2 第二段“IPL 腹侧(通道 11)仅发现了声调范畴效应边缘显著。”不清楚范畴间和范畴内的比较结果。

回应: 同意。此次修改,已经排除了类似的结果报告内容。

意见 4: 3.2.2 IPL 背侧、IPL 腹侧、PMC 均发现组别和声学间隔的交互作用,但不清楚简单效应检验的结果如何。IFG 发现组别和声调范畴的交互作用,也不清楚简单效应检验的结果如何。虽然多个脑区的三重交互作用均不显著,但组别与声学间隔或声调范畴的交互作用也是值得关注的结果。建议作者补充相关结果并做讨论。

回应: 同意。不同 IPL 通道的功能被虚拟损伤之后,分别对应着 PMC 和 IFG 脑区的功能代偿,这正是本研究的重要发现。修改稿对此进行了讨论,在讨论 IPL 背侧和腹侧子区域的功能分离时,背侧子区域就在声调范畴感知中起到了关键作用,该子区域受损,就需要更多对声学信息敏感的背侧脑区(如 PMC 等)参与支持,从而补偿 IPL 背侧子区域对于声调信息敏感性的受损(详见 3.3 讨论最后一段,以及总讨论 4.1 最后一段)。

因为行为数据与脑反应的结果仅达到边缘显著,此次修改稿就不再在正文中报告。与行为数据的相关不显著是可以理解的,这与本研究的结果也是一致的,TMS 刺激虚拟损伤某个脑区并不一定会导致行为的重大受损,我们从脑区功能互补也可以看到,被试仅仅因为个别脑区的功能受损,会调动其它相关的功能来补偿并完成任务。

同时,PMC 与 IFG 脑区参与互补的结果也在语音感知神经生理模型的双通道动态协作机制中进行了讨论(总讨论 4.2 第二和第三段)。

第三轮

审稿人 1 意见:

作者对此前的建议和评论都进行了详细的回复,在文章也进行了补充,文章写作和数据处理都比上一版有了很大的提升。整个研究选题有重要理论意义,在实验设计和数据采集上科学客观;数据分析方面已经相对清晰切题,但是个人认为离《学报》刊出标准还有一些差距,比如实验设计、统计结果之间有对应不上情况,建议作者继续修改和完善,更客观规范地报告结果。以下分点详细列出比较重要的问题:

意见 1: 2.2.2 第二自然段: 在左侧 IPL 背侧(通道 15),声学间隔主效应显著($F(1, 30) = 4.67, p = 0.039, \eta^2 p = 0.13$): 小声学间隔比大声学间隔刺激对诱发了更强的激活;而且,左侧 IPL 背侧通道还发现了显著的声调范畴的主效应($F(1, 30) = 7.29, p = 0.011, \eta^2 p = 0.20$): 范畴间比范畴内的刺激对诱发了更强的激活。主效应显著本身并不能得出谁比谁更强的结论,所以请先补充事后比较检验(post-hoc analysis)。

回应: 这是我们的疏忽,原文在报告 HbO 数据结果时没有报告相应条件的均值和标准差,从而给审稿人的阅读导致了困惑。此次修改,我们增加了相应的均值和标准差(详见 2.2 和 3.2 结果部分),就能直观地展现主效应显著之后,哪个条件的激活更强了。当主效应显著而自变量只有两个水平时,就能通过平均数差异直观地得到差异结论。当主效应显著而实验条

件达到 3 及以上水平时，才需要事后比较等多重比较方法来得出具体哪个条件的激活更强。本文关心的两个自变量都只有 2 个水平，所以这里通过呈现均值的方法来直观地体现出条件间的具体差异。

意见 2: 在 2.3 讨论的第二自然段：“实验一的行为结果还发现了显著的声学间隔与声调范畴的交互作用，表明被试在声调感知加工中，对声学间隔特征和声调范畴特征同时敏感。”“同时敏感”应该是两个主效应显著就能得出的结论，如果是交互作用，那可以得出进一步结论：比如 IPL 背侧在处理大间隔和小间隔的范畴信息展现出不一样的活动模式。

回应: 完全同意审稿人的意见。此次修改，我们对结果的表述更加严谨。并在讨论 2.3 部分，我们增强对于行为上发现声学间隔和声调范畴交互作用的讨论，并明确了在大声学间隔条件下的，听者对于声调范畴的感知更加敏感，表明声学信息的模糊性会增加声调范畴感知的难度。

意见 3: 实验二 3.1.2: “实验二中的材料，程序，数据采集与处理都和实验一完全相同。TMS 刺激位置是被试间因素，在数据分析时，进行 2(TMS 位点: IPL 背侧(通道 15)、IPL 腹侧(通道 11)) × 2(声调范畴: 范畴间、范畴内) × 2(声学间隔: 大、小间隔)的三因素方差分析，以检验 TMS 虚拟损伤的效应。” TMS 只刺激了 IPL 背侧和腹侧吗？我看后面表格里还有 PMC 和 IF。根据之前的审稿记录，TMS 位点的主效应是指 TMS 前后对比的主效应，是吗？如果是，请注明。

回应: 抱歉这里给读者造成了困惑。首先，需要说明：本研究只使用 TMS 虚拟损伤 IPL 的背侧和腹侧通道。在表格中同时呈现了 PMC 和 IF 通道的结果，但是并没有对它们施加 TMS 刺激。

其次，本研究通过 TMS 虚拟损伤左侧 IPL 背侧和腹侧，同时关注 PMC 和 IFG 通道的结果，主要是为了考察虚拟损伤左侧 IPL 是否也会影响这些脑区在声调范畴感知中的参与，进而揭示出左侧 IPL 是否和其它脑区存在动态协作。

而且，文中的 TMS 位点的主效应是 TMS 虚拟损伤 IPL 背侧和腹侧通道的结果对比，是将两个刺激位点的结果互作参照，而不是指 TMS 刺激前后的对比。

最后，鉴于上述问题造成的困惑，我们在修改稿中都进行了说明：对 TMS 位点进行了说明、考察 PMC 和 IFG 通道进行了补充说明(详见 3.1.2 部分)、也在综述讨论部分明确阐述了 TMS 互做参照可能存在的局限(详见 4.4 第一段)。

意见 4: 在 3.2.1 第一二自然段：被试数量不一致，如果是 tms 头动过大，建议把这一个被试从所有结果中都删掉。

回应: 第一和第二自然段所提的被试数量的确是不一致的。对此问题的解释如下：

首先，在收集实验二数据过程，我们在努力平衡 TMS 虚拟损伤 IPL 背侧和腹侧位点的被试数量，即接受左侧 IPL 背侧和腹侧虚拟损伤的被试数量都是 31 名(腹侧组采集过程就有 2 名被试因通道信号而无效，所以共采集了 33 名被试的数据)。

其次，在分析结果时，TMS 腹侧组的 1 名被试因为头动过大，其数据全部被移除。

最后，结果报告的 TMS 腹侧和背侧组的被试数量就不一样了，腹侧组只有 30 名被试的数据，要少 1 名被试。从而导致了最终纳入分析的两组被试数量不一致。

此次修改稿中，我们在“3.1.1 被试”部分阐明了有 2 名被试因为通道信号被移除，也在“3.2 结果”部分第一段阐明了两组被试纳入数据分析的数量。

意见 5: 在 3.2.1 第四自然段：“结果还发现了显著的 TMS 刺激点与声学间隔、声调范畴的三次交互作用($F(1, 59) = 4.43, p = 0.04, \eta_p^2 = 0.07$)。进一步简单简单效应分析发现，当 TMS

刺激点在 IPL 背侧通道时,大、小声学间隔条件下的声调范畴效应都显著(小声学间隔: $F(1,59) = 84.62, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.59$; 大声学间隔: $F(1,59) = 104.52, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.64$)。当 TMS 刺激点在 IPL 腹侧通道时,在大、小声学间隔条件也都发现了显著的声调范畴效应(小声学间隔: $F(1,59) = 96.81, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.62$; 大声学间隔: $F(1,59) = 72.39, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.55$)。四种简单简单效应的结果模式相同,都表现为被试在范畴间刺激对的区分正确率要高于范畴内刺激对。”这一部分结论对于文章非常关键,但是问题比较多,希望作者继续整理一下。首先,这一段提到了三次交互作用,但是表 1 里三次交互作用是不显著的,请核实更正;

回应: 3.2.1 第四段描述的是被试的行为反应正确率的方差分析结果,而表 1 是 fNIRS 结果的方差分析结果,它们在统计结果上并不一致。为了避免误解,修改稿我们增加了对于两个实验行为结果的讨论,也增加了行为结果与 fNIRS 结果相结合的对比讨论(详见 3.3 讨论部分的倒数第三段)。

意见 6: 在 3.2.1 第四自然段中所提到的“四种简单简单效应的结果模式相同,都表现为被试在范畴间刺激对的区分正确率要高于范畴内刺激对”,这一部分建议只选取 TMS 与别的变量的交互作用和简单简单效应来报告;

回应: 同意接受审稿专家的建议。需要说明的是,实验二没有发现刺激位点的主效应及其与其它因素的交互,虽然三次交互作用显著,但是在四种材料(声学间隔 x 声调范畴)下两组不同 TMS 刺激位点的行为反应正确率的差异都不显著(见下面的统计结果)。在修改稿 3.2.1 部分,我们首先报告了这一统计结果,用以说明 TMS 刺激并没有对被试的行为反应产生显著的损伤影响。

但是,为了说明声调范畴效应在不同条件下的变化,在结果中我们换了一个方向报告三次交互作用的结果,分别报告了不同 TMS 刺激位点组分别在不同声学间隔条件下的声调范畴效应(详见 3.2.1 第四段)。

附:TMS 位点的简单简单效应统计结果:

大声学间隔范畴间: ($F(1,59) = 1.05, p = 0.309, \eta_p^2 = 0.02$);

小声学间隔范畴内: ($F(1,59) = 0.06, p = 0.800, \eta_p^2 = 0.00$);

大声学间隔范畴内: ($F(1,59) = 0.24, p = 0.623, \eta_p^2 = 0.00$);

大声学间隔范畴内: ($F(1,59) = 2.15, p = 0.148, \eta_p^2 = 0.04$);

意见 7: 表 1 中我能看到的是 TMS 刺激四个不同脑区 (IPL 背侧, IPL 腹侧, PMC 和 IFG) 与声学或者范畴的交互作用: 腹侧背侧 IPL 和 PMC 都是与声学的交互, IFG 是与范畴的交互。这个与前人的理论和研究是比较吻合的,因为 IPL 和 PMC 一般认为以处理音系信息为主, IFG 则更加偏向于高阶的范畴信息,所以作者看到 TMS 在 IPL 和 PMC 中效应与声学信息有交互,而在 IFG 则与范畴有交互;后面的几个自然段确实有分别讨论这些交互,但是写得不够清晰,也没有体现出结果的价值。

建议统计分析以 TMS 效应为核心,围绕这四个交互效应展开讨论,格式:

a)发现了二次交互作用;

b)报告简单效应: 分别针对不同的声学/范畴 level (如范畴间和范畴内),做 TMS 的简单效应分析,说明 TMS 刺激这一脑区是否会靶向改变某一个 level (比如大声学间隔或者范畴内)的准确率;

c)报告简单效应的事后比较结果,看看 TMS 是提高还是降低了准确率。

另外腹侧 IPL 在实验一中没有效应,但是 TMS 有交互,可适当讨论说明。

回应: 同意专家的建议:

1. 在“3.2.1 行为结果”部分，第 2 段报告行为结果的声学间隔和声调范畴的主效应；第 3 段报告 TMS 和所有二次交互不显著，再报告三次交互显著。然后报告 TMS 位点效应在四种实验材料条件下都不显著。为了进一步说明不同 TMS 位点得到了相同的结果模式，换了一个方向报告简单效应结果，即分别在不同位点下报告不同声学间隔下的声调范畴效应。

2. 对于“3.2.2 fNIRS 结果”部分，此次修改过程中，我们尝试了对四个兴趣区的交互作用进行了另一个方向的简单效应分析，结果见下表。新的结果并没有比目前的数据结果更清晰地反映我们的研究目的，因此这部分数据报告仍然考察不同 TMS 位点时脑区在声学信息或声调范畴效应上的变化，具体解释如下：

首先，在四个兴趣脑区的所有与 TMS 刺激位点交互作用显著的结果中，只有在 IPL 腹侧和 IFG 脑区上的两个交互作用的简单效应分析呈现出不同条件下的不同的结果模式，另外两个交互作用显著的简单效应检验显示出了相同的结果模式。而目前的数据结果显示每个交互作用的简单效应模式都是一种在条件下差异显著，在另一种条件下差异不显著，这种结果模式更便于读者理解显著的交互作用。

重要的是，我们对比不同 TMS 刺激位点，目的并不是考察 TMS 是否会影响该脑区对特定刺激材料的激活，我们更关心的是 TMS 会不会影响到该脑区对于声学信息或声调范畴效应的敏感。也就是说，TMS 可能同时增强或降低脑区在两种不同声学间隔(声调范畴)刺激上的激活水平，但是它并没有影响脑区对声学信息或声调间隔的敏感性。这样一来，考察脑区对于某种刺激类型是否受到 TMS 刺激前后影响的作用就显得不是很重要。因此，我们在四个 ROI 脑区上的结果分析，仍然考察 TMS 刺激对于声学信息或声调范畴效应敏感性的影响。

3. 修改稿中，我们增加了对 IPL 腹侧在实验一与实验二结果的对比讨论(详见 3.3 讨论部分第三段)。

附表：TMS 刺激位点交互作用显著的结果以及相应 TMS 位点的简单效应结果

ROI	交互作用	简单效应	df	F	p	η_p^2
IPL 背侧(15)						
	TMS 位点×声学间隔		(1,59)	7.66	0.008	0.11
		TMS 位点: 小声学间隔	(1,59)	0.25	0.621	0.00
		TMS 位点: 大声学间隔	(1,59)	2.79	0.100	0.05
IPL 腹侧(11)						
	TMS 位点×声学间隔		(1,59)	6.96	0.011	0.11
		TMS 位点: 小声学间隔	(1,59)	1.11	0.297	0.02
		TMS 位点: 大声学间隔	(1,59)	4.99	0.029	0.08
PMC						
	TMS 位点×声学间隔		(1,59)	8.81	0.004	0.13
		TMS 位点: 小声学间隔	(1,59)	0.31	0.583	0.01
		TMS 位点: 小声学间隔	(1,59)	3.81	0.056	0.06
IFG						
	TMS 位点×声调范畴		(1,59)	6.08	0.017	0.09
		TMS 位点: 范畴间	(1,59)	5.73	0.020	0.09
		TMS 位点: 范畴内	(1,59)	0.41	0.524	0.01

意见 8: 在讨论部分: 与以往相比有很大的提升, 但是希望作者在完善结果部分后再做对应的完善。

回应: 此次修改根据更新的结果对讨论部分进行了完善。结果详见 2.3 和 3.3。

.....

审稿人 2 意见:

感谢作者对提升论文质量所作的努力, 但是在本轮中依然存在一些问题有待提升与完善。

意见 1: 摘要: 实验一在左侧 IPL 背侧除了发现范畴的效应, 还发现了间隔的效应, 这可能也是需要报告出来的重要结果。此外, 建议在摘要最后补充一句话体现理论价值。

回应: 完全接受。修改稿已按照建议进行修改: 在摘要中补充了实验一 IPL 背侧通路对于声学间隔敏感的结果。在摘要最后补充了本研究的理论贡献: “从声调语言的角度丰富了语音感知加工的神经生理模型, 阐明了背侧/腹侧语音加工通路在范畴感知中的协作机制。”

意见 2: 引言倒数第二段: 作者在这一段最后指出“这些脑区在声调范畴感知加工中具有动态协作的机制, 如果某个脑区功能被抑制或受损, 其它脑区会被激活承担更多负荷来完成任

务。”那么, 基于双通路模型和过去的研究, 具体会有什么样的假设呢?

回应: 完全接受审稿人的建议。通过在引言中明确提出假设, 能够帮助读者更清晰地理解实验二的逻辑。

我们在修改稿中明确提出了研究假设(详见引言倒数第二段): 即对 IPL 虚拟损伤后, PMC 和 IFG 可能会同时受到影响, 根据它们与 IPL 是否属于相同的通道关系, 从而表现出同时受损或补偿性激活的结果模式。也清晰地指出: “通过对 IPL 的虚拟损伤, 不仅可以揭示其在语音感知双通路模型中的作用, 还能阐明语音感知的背、腹侧通路之间的协作机制。”

意见 3: 引言最后一段: 实验一的问题似乎更像是左侧 IPL 的不同子区域是否对不同特征敏感, 建议作者对此再做思考。另外, 为什么实验 2 “考察背侧神经通路的 PMC、以及背侧和腹侧通路都会通达的 IFG 脑区能否参与激活”, 前文对此问题的铺垫还需要加强。

回应: 关于实验一的研究问题, 我们的结果的确发现了左侧 IPL 的不同电极通道表现出在声学信息和声调范畴敏感性上的差异, 这也是本研究的一个重要发现, 但是, 疏理前人文献还不足以清晰地推导出这一研究假设, 所以在引言部分只能提出 IPL 在语音感知加工中存在功能争论。此次修改, 我们一方面在引言中明确提出了实验一的研究问题, 在讨论部分也加强了对于 IPL 子区域功能的创新发现。

关于实验 2 的研究问题, 原稿件直接提出问题确实显得比较唐突。此次修改, 我们加强了问题提出的逻辑, 结合了双通路的逻辑, 修改了引言的最后两段文字。

意见 4: 实验 2 结果讨论似乎是与实验 1 相结合的, 为了让读者更好地实验 2 的含义, 建议作者在此回顾实验 1 主要发现, 这样有助于更好地进行比对, 也可以使得结果的总结更清晰明了。另外, 讨论第三段的最后一句“实验二对 IPL 的不同通道虚拟损伤得到了不同的神经回路, 可以用来解释前人结果在汉语声调感知加工中得到的不同功能脑区。”具体如何解释?

回应: 感谢审稿人的建设性意见。新版修改稿对上述问题都进行了补充修改:

1) 在实验二的讨论部分增加了与实验一的结果对比(详见 3.3 讨论第一段), 在两个实验中都将行为结果与 fNIRS 结果结合起来进行了讨论。

2) 原稿在讨论第三段的这句话, 只是一句概括性的论述。此次修改, 我们专门增加了一段讨论对此进行了详细地解释和说明(详见 3.3 讨论第三段对此进行了专门论述)。

意见 5: 基于目前的实验结果，总讨论的第一部分（“4.1 左侧 IPL 在声调范畴感知中的作用”）应该侧重对背侧和腹侧的讨论，特别是和过去研究相联系的时候，例如第三段。

回应: 完全接受。新版修改稿对总讨论的内容进行了调整：在总讨论的 4.1 部分最后一段分析了 IPL 背侧和腹侧脑区的功能分离；将 4.2 部分专门讨论 IPL 在语音感知背侧和腹侧通路中的功能，结合前人研究明确提出了本研究的两个重要贡献：一是 IPL 在背/腹侧通路中的门控作用；另一个是背/腹侧通路的协作机制。

意见 6: “4.2 声调范畴感知对于语音神经模型的贡献”似乎依然聚焦于对实验结果的解释，不清楚具体是什么贡献？语音神经模型需要修改？需要补充和完善？抑或是其他？

回应: 感谢专家的建设性意见，新版修改稿增加了 4.3 部分专门从理论贡献的角度阐述了本研究对于语音神经生理模型的贡献，从而阐明了本研究的理论贡献。体现在以下三个方面：1)从声调语言的角度丰富了模型的研究证据；2)指出了 IPL 可能存在功能分离的子区域，深入阐明了 IPL 脑区在该模型中的作用；3)从神经因果的角度阐明了语音感知的背/腹侧通路的协作机制，丰富了模型的理论解释(详见总讨论 4.3 部分)。

意见 7: [a55]是几声？

回应: 55 为一声。依据五度标记法标记声调。修改稿中同时说明了为一声音节(详见 2.1.2)。

意见 8: “2.1.2 实验设计与材料”部分的第三段最后一句话：如果算上相同刺激的填充，全部试次数应该不是 240？240 应该只是用到的 5 个不同刺激对的总数。

回应: 本实验共包含四个实验条件，每个条件呈现 48 个试次，实验条件共计 192 个试次。加上相同刺激对的填充试次也是 48 个试次，全部实验试次共计 240 试次。对此，我们在修改稿(2.1.2 最后一段)中补充了相关信息。

意见 9: 图 1B 中区分任务的各点是什么含义？

回应: 图 1B 中区分任务数值点为区分分数，即每个刺激对应的百分比是对其相邻两个刺激组成的比较单元的区分分数，如，刺激 2 对应的百分比是对 1-3 的区分分数。区分分数的计算方式见 2.1.2 第三段，代表对比较单元的区分能力。此次修改，我们在图 1 的标题中增加了对区分分数的解释和描述。

意见 10: “2.1.4 fNIRS 数据采集”最后一句话不完整。

回应: 抱歉，这是我们的疏忽。这是我们在修改论文过程中，移动文字内容时的疏忽。此次修改，我们已将这半句话放到它的正确位置(详见“2.1.5 数据处理与分析”第二段)。

意见 11: 图 2B 在 IPL 背侧对显著的标记看起来似乎是交互作用。

回应: 完全接受。此次修改，图 2B 只保留了声学间隔主效应的标记。

意见 12: 实验 2 讨论第二段第三行，既对范畴敏感也对间隔敏感。

回应: 已修改。

意见 13: 虽然本研究的关注点在脑区，但是也有必要对实验 2 行为实验的结果有所讨论与解释。

回应：接受建议。我们在实验二的讨论中增加了一段文字，对行为实验的结果进行了讨论和解释，不仅回顾了实验 1 的行为结果，还讨论了行为与 fNIRS 结果的对比(详见 3.3 第五段)。

意见 14：结论第二和三行提到“左侧 IPL 腹侧子区域”和“左侧 IPL 背侧子区域”，前文内容似乎都没有提及腹侧和背侧的子区域。

回应：已修改。本文的左侧 IPL 子区域事实指的是左侧 IPL 的背侧和腹侧通道。此次修改，我们通篇统一了术语，本研究中的定位都统一为背侧和腹侧通道，介绍前人研究时使用 IPL 的不同子区域的术语。

第四轮

审稿人 1 意见：

比起上一稿，文章内容有了较大进步。尤其是实验二（TMS）部分，结果表述清晰了很多。对于研究整体的发现和讨论，我有一些建议给作者考虑。另外，文章有一些表述可以优化。

意见 1：整体来看本研究有如下发现：（1）IPL 背侧同时对声学间隔和声调范畴敏感，但 IPL 腹侧不会；（2）TMS 刺激 IPL 腹侧或者背侧都不改变被试行为成绩；（3）TMS 刺激 IPL 背侧会使得其不响应声调范畴，但是 IPL 腹侧会声调范畴；（4）TMS 刺激 IPL 背侧不改变其对声学间隔的响应，但是会增加 PMC 和 IPL 腹侧对声学间隔的响应（使其显著）；（5）TMS 刺激 IPL 腹侧会使得 IPL 失去对声学间隔和声调范畴的响应，但是会使得 IFG 对声调范畴显著。

A：从（2）结合（3）（4）（5）可以得出背侧通路出现了虚拟损毁后的代偿。

B：从（3）（4）可得 IPL 背侧参与声学 and 声调范畴表征，而 PMC 和 IPL 则相对冗余，在 IPL 背侧受损后代偿参与。

C：从（5）可得 IPL 腹侧是 IPL 参与声调加工的“门控”，如果 IPL 失效后 IFG 代偿。

所以 IPL 背侧更像一个声调声学和范畴表征的区域，而 IPL 腹侧貌似有两个功能：代偿和门控。

作者可以参考我的建议提炼一下重点。

回应：感谢审稿专家的精心梳理，上述结果和观点在修改稿得到了具体阐述：

- 1)在讨论 4.1 第一段，清晰地列出了审稿人提炼出来的 5 条具体结果。
- 2)在讨论 4.1 最后增加了一段，明确阐明了上述三条结论。

意见 2：“2.3 讨论”部分，“本实验的一项重要发现是左侧 IPL 参与了汉语声调的范畴感知加工”，过于强调发现的创新性；该自然段后面的参考文献已经说明这不是本研究独创性的发现。

回应：接受。此次修改，表述更加严谨，将这句话修改为“本实验发现左侧 IPL 参与了汉语声调的范畴感知加工。”详见 2.3 讨论第三段。

意见 3：实验二方法部分：“接受腹侧 TMS 刺激的被试因为有 2 名被试在数据采集时通道信号不好数据被移除，所以比背侧 TMS 组多 2 名被试，共收集了 33 名(18 名女性)被试的数据，平均年龄 20.42 岁(18~26 岁)”。何为“信号不好”，详述：“所以比背侧 TMS 组多 2 名被试”累赘。

回应：接受。修改稿已经删除了“所以比背侧 TMS 组多 2 名被试”，并将“信号不好”的表述修改为具体的描述“光强度太弱”。见 3.1.1 被试。

意见 4：实验二方法：“对左侧 IPL 背侧的刺激靶点位置为通道 15，对腹侧的刺激靶点位置为通道 11”，建议说明为什么对腹侧还要进行刺激，是不是有理论依据。因为实验一没有发现太多腹侧的结果。

回应：感谢审稿人的建议。此次修改，在 3.1.1 被试的第一自然段，我们补充了同时虚拟损伤左侧 IPL 背侧和腹侧的原因。一方面，实验没有假刺激和前测，可以将两个通道的损伤结果作参照，另一方面，可以更精细考察左侧 IPL 不同区域在声调范畴感知中的作用。

意见 5：实验二行为结果：建议与实验一进行对比。可以用组间统计。因为本研究的结论之一是 TMS 不改变行为指标，但是实验二没有设置空白对照组（前测或者假刺激），所以最好能与实验一（没有 TMS）直接对比说明问题。

回应：接受审稿人的建议。在 3.2.1 部分(实验二的行为结果)，增加了最后一段文字与实验一的结果进行三组被试间的对比，在数据上清晰地表明了 TMS 没有改变被试的行为指标。具体修改内容如下：

为了考察 TMS 刺激对被试行为结果的影响，将实验二接受 TMS 刺激的两组被试与实验一无刺激的被试数据进行被试的组间对比，分别在 4 种刺激条件下进行单因素完全随机方差分析的结果发现：在小声学间隔范畴内、小声学间隔范畴内和大声学间隔范畴内三种刺激条件下，三组被试的行为反应正确率之间差异都不显著(小声学间隔范畴内: $F(1,89) = 0.67, p = 0.513$; 小声学间隔范畴内: $F(1,89) = 0.17, p = 0.843$; 大声学间隔范畴内: $F(1,89) = 0.20, p = 0.817$)；仅在大声学间隔范畴内条件三组被试间的差异显著($F(1,89) = 6.09, p = 0.003, \eta_p^2 = 0.12$)，具体表现为两组接受 TMS 刺激的被试之间在行为正确率上没有差异($t(59) = 1.47, p = 0.357$)，接受 IPL 背侧 TMS 刺激的被试组与无刺激组的差异也不显著($t(60) = 1.88, p = 0.172$)，仅在接受 IPL 腹侧 TMS 刺激的被试组与无 TMS 刺激被试组的差异显著($t(59) = 3.89, p = 0.002, \text{Cohen } d = 1.00$)，而且是接受 TMS 刺激的被试组的平均正确率要高于无刺激组。结果表明 TMS 抑制刺激在行为上对被试的反应没有造成显著的影响。

意见 6：实验二 fNIRS 部分结果：“这里换一个方向进行简单简单效应分析发现”，表述过于口语化且是个病句，“这里”不能当主语；另外，“在左侧 IPL 背侧(通道 15)脑区，结果发现了显著的声学间隔主效应”，这是个病句：“结果”自己并不能发现间隔主效应，请替换主语。

回应：感谢审稿人的细致阅读。此次修改，我们将“这里换一个方向进行简单简单效应分析发现”改为“在不同刺激位点不同声学间隔考察声调范畴的简单简单效应”，见 3.2.1 行为结果第三段。将“在左侧 IPL 背侧(通道 15)脑区，结果发现了显著的声学间隔主效应”修改为“在左侧 IPL 背侧(通道 15)脑区，声学间隔的主效应主效应显著”，见 3.2.2 fNIRS 结果第二段。我们也仔细阅读了全文，对类似的表达方式都进行了修改。

意见 7：实验二讨论部分，“声调感知加工可能是由背/腹侧通路协作加工的结果”，以及后面的讨论涉及腹背侧通路部分：请明确腹侧通路和背侧通路的定义。如果是作者希望沿用 Poeppel & Hickok 的双通路模型，腹侧通路是指 STG/MTG/STS 等音义转换的通路，文章并未涉及；PMC/IFG/IPL 都属于背侧通路。如果作者希望提出自己的模型，请明确定义通路。

回应：审稿人的建议非常好。本研究的 fNIRS 技术不足以发展或修正 Poeppel & Hickok 的双通路模型，也很难与该模型的神经通路进行精确对应。修改稿在引言第二段对模型的描述进

行了调整，并在前言倒数第二段增加了本文对背/腹侧通路的定义，不仅能让读者精确理解本文的内容，也避免了术语引起的理解困惑。在此基础上，修改稿对实验二讨论的最后一段进行了调整，更详细地讨论了背/腹侧通路的协作加工。

审稿人 2 意见：

感谢作者的认真修改，本轮只有一个精益求精的小问题希望作者能进一步完善：

意见 1：引言最后两段的内容逻辑可以再理顺一些。目前是先在倒数第二段提出了预期结果，接着才在最后一段提出两个实验的具体问题。这种写法会影响对两个实验的具体理解，不清楚哪些预期分别与实验 1 和实验 2 有关。比较建议先基于对过去研究的小结提出研究问题，再结合相关的理论观点和过去研究，针对每个实验所解决的研究问题再提出所预期的结果或是研究假设，这样的写法可能在逻辑上会更顺畅一些，对于读者来说也更容易理解。

回应：感谢审稿人的肯定和建议。修改稿中更新了引言最后两段的内容，把写作逻辑改为先问题提出再对结果作出预期。

第五轮

审稿人 1 意见：

作者修改后的版本比上一次有了较大的提升，尤其是 TMS 对 fNIRS 结果部分的呈现比以前清晰很多。总体来说我认为文章已经满足了发表标准。

意见 1：TMS 部分的行为结果（3.2.1）表达比较累赘。如果这一部分只是表明 TMS 对行为结果没有明显的影响，可以只呈现 TMS 与各个条件（升学间隔和范畴间隔）之间的交互作用，说明无论 TMS 刺激哪个部位都不影响行为成绩。

回应：同意审稿人的建议，我们删除冗余的文字描述。详细的统计结果在附件里提供了。

意见 2：行为结果（3.2.1）第三自然段：“为了进一步说明被试的声调范畴效应在不同 TMS 刺激位点组的结果模式，在不同刺激位点不同声学间隔考察声调范畴的简单简单效应，，声调范畴感知效应的简单简单效应表现出相同的行为模式”，删掉一个逗号。

回应：已删除。

意见 3：讨论部分（4.2）：参考文献的字体需要统一。

回应：感谢审稿人的细致阅读。已将字体统一为 time new roman。

审稿人 2 意见：作者很好地修改和完善了稿件。

编委意见：建议录用。

主编意见：本稿经两位专家审阅均建议刊发。经终审复核，稿件内容完整、论证充分、结构合理，建议予以接受。