《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：数学焦虑个体近似数量加工的神经机制：一项 EEG 研究
作者：刘洁；李瑾琪；申超然；胡小惠；赵庭浩；关青；罗跃嘉

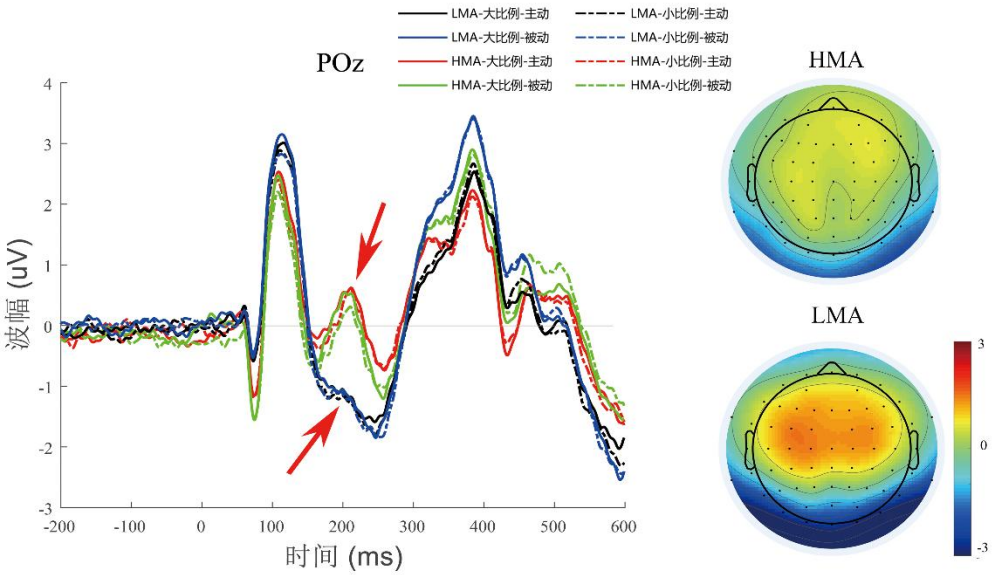
第一轮

审稿人 1 意见：

本文结合了 EEG 时域和频域的分析方法考察了高数学焦虑个体在进行近似值数量加工时的神经机制，具有一定的科学意义。

研究中主要存在两个大的问题，一是对脑电结果的讨论不足；二是 在 ERP 结果部分，低焦虑个体从波形图上看，并没有 P2p，如何证明实验设计的有效性？

回应：感谢审稿人的肯定与意见。针对脑电结果讨论不足的问题，我们在讨论部分进行了补充（详见问题 1 的回应）；针对 ERP 结果波形的问题，低焦虑个体也有 P2p 成分，由于对原有波形图进行了过度地平滑，抹去了低数学焦虑个体的相应波形。我们已进行了相应的修改。除了 POz 之外，在枕区其他电极如 PO3/PO4 也能观察到高低数学焦虑群体的 P2p 波形：



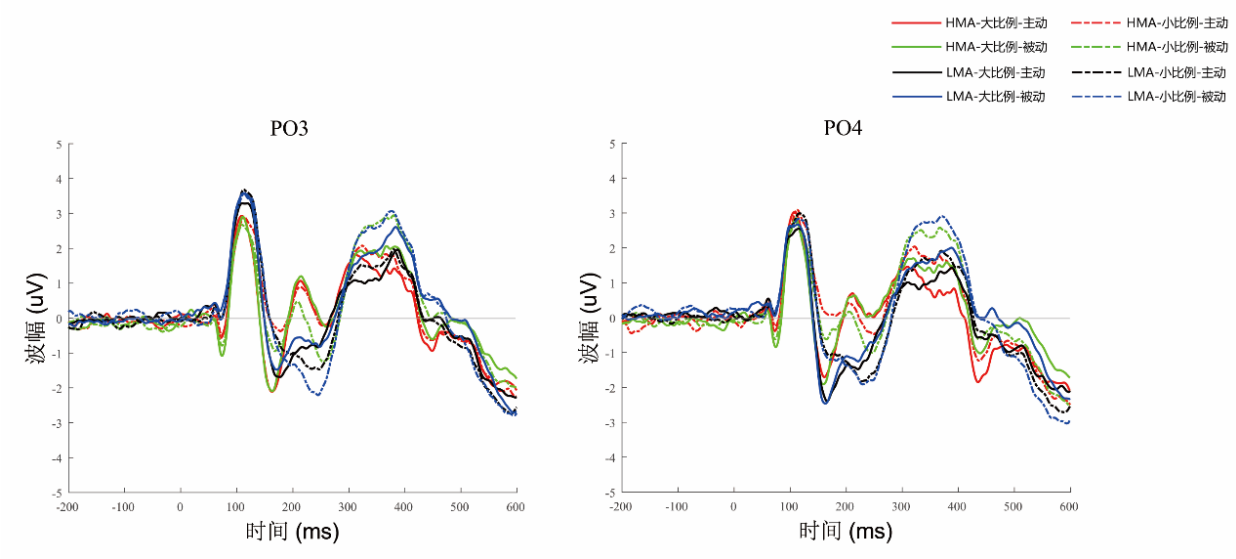


图 1 枕区电极波形图

意见 1：关于讨论部分，与对 P2p 的结果几乎没有讨论，高焦虑个体为何表现为增大，增大代表什么？还有什么可能的解释等等。那些阴性的结果又说明什么？ 同样对频域得到的结果，也需要逐条进行讨论。另外，对于 1-4hz 的频率主观的分为 δ 和 θ 波也是不合适的。当前主要关心的 1-4hz 的记录电极是在 C3\C5 和前人 Park 的 OZ/PO8 不一致，也是需要给解释的。 在讨论部分，作者提出了两种理论，但两种理论是什么？这种理论假设最好是放在前言部分提出，进一步提升本研究的科学意义。

回应：感谢审稿人的建议。

(1)针对脑电 P2p 结果增加了相关讨论(详见正文第 14 页第 21-30 行)。

(2)根据第一位与第二位审稿人的意见，原时频分析的限制条件不够合理（如限定三阶交互不显著条件下的二阶交互作用以及主效应），且忽略了任务类型变量的分析，导致原有结果不准确。我们重新进行了时频分析，思路如下：由于本研究主要关注数量加工过程，在考察被试类型和任务类型的主效应时，需要首先具有数量比例效应，即确认该感兴趣区是与数量加工相关的时频指标，并以此为前提进行寻找有显著的被试类型差异和任务类型差异的感兴趣区。因此我们分别检验了以下六种类型的感兴趣区：①数量比例的主效应显著的 ROI；②数量比例主效应显著的前提下被试类型的主效应显著的 ROI；③数量比例主效应显著的前提下任务类型的主效应显著的 ROI；④数量比例与被试类型交互作用显著的 ROI；⑤数量比例与任务类型交互作用显著的 ROI；⑥以及三因素交互作用显著的 ROI。重新分析后，我们发现存在显著数量比例与被试类型交互作用的 ROI 有 2 个：第一个是在 1-5Hz，时间窗为 83-217ms，覆盖了枕区电极包括 P5，P07，O1 和 Oz；第二个是在 29 - 34 Hz ，时间窗为 206 - 285 ms，覆盖了枕区 P5 和 P07 电极；相关内容在文章相应的部分已予以更正。在讨论部分，我们对此结果增加了详细的讨论（详见正文第 15 页第 1-14 行）

(3)我们接受审稿人的意见，将原讨论部分提出的两种理论的相关内容放入前言部分，以提升本研究的科学意义（详见正文第 2 页第 2-13 行） 。

意见 2：方法部分 2.4.1 “分别在 POz 和 Oz 电极上进行”，结果部分 3.2 “对应的电极分布在头皮后侧（包括 POz，Oz，O1，O2，PO3，PO4，PO7，PO8），我们以这些电极点上的平均波幅为因变量，” 互相矛盾。

回应：感谢审稿人提醒，此处为笔误。由于 2.4.1 处还没有报告地形分布图不应该有具体电极位置，已经改正为：“本研究选取位于枕区电极的 P2p 脑电成分进行 ERP 波形的统计分析。我们计算了时间窗为 175 ms－225 ms 内所选电极的平均波幅，并进行 2(比例类型：大比例数量和小比例数量)×2(任务类型：主动加工和被动加工)×2(被试类型：高数学焦虑和低数学焦虑)的重复测量方差分析”。

意见 3：2.4.2“，结合非参数置换检验法，寻找有显著的比例效应和显著被试类型效应的感兴趣区(Region of Interest, ROI)。”为什么只关注这两个效应，应有所说明？
回应：我们同意审稿人的意见，需要增加对感兴趣区的说明：本研究主要关注数量加工过程，因此在考察被试类型和任务类型的主效应时，需要首先具有数量比例效应，即确认该感兴趣区是与数量加工相关的时频指标，并以此为前提进行寻找有显著的被试类型差异和任务类型差异的感兴趣区（见正文第 8 页 16-18 行)。

意见 4：3.1“任务类型与被试类型交互作用显著(F(1, 58) = 5.12 p = 0.03, ηp2 = 0.08)，简单效应检验显示，高数学焦虑组在两种任务类型中差异显著(t(30)=4.14, p = 0.003, Cohen’s d = 0.80)，低数学焦虑组在两种任务类型下差异显著(t(28)=5.94, p < 0.001, Cohen’s d = 1.17)” 交互效应表现在哪里？
回应：感谢审稿人指出的问题。

“高数学焦虑组在两种任务类型中差异显著(t(30)=4.14, p = 0.003, Cohen’s d = 0.80)”，此处的 t 应为-4.14，为笔误。交互作用体现在对于主动和被动数量加工任务而言两组被试的准确率反应模式相反（见图 2)，对于主动数量加工任务，高数学焦虑组的平均准确率（0.83±0.04）低于低数学焦虑组(0.84±0.05)；对于被动数量加工任务，高数学焦虑组的平均准确率（0.79±0.06）高于低数学焦虑组（0.77±0.07)，这两个差异均为通过简单效应的显著性检验。如图 2 所示。原文表述不准确。

但由于本研究中主动数量加工任务是进行数量判断，被动数量加工任务是进行颜色判断，二者比较并无实际意义，因此在准确率这一指标上观察到的任务类型与被试类型的交互作用也无实际意义。在修改稿中，我们仅将主动数量加工的相关数据纳入行为分析。分别以准确率(ACC)和反应时(RT)为因变量，进行了 2(数量比例)×2(被试类型)的两因素重复测量方差分析。我们对原有的行为结果（三因素重复测量方差分析）进行了修改，并删除了这部分内容。

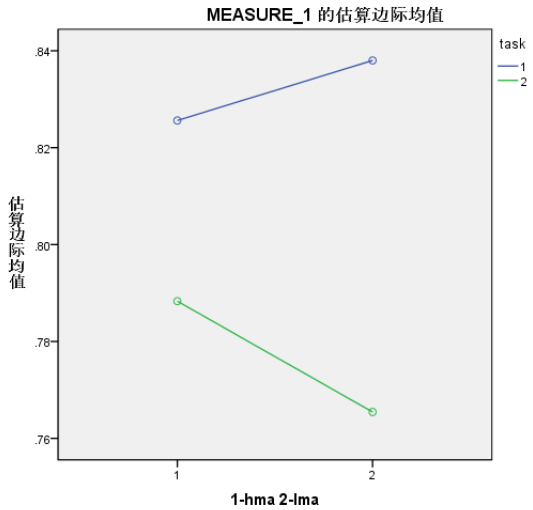


图 2 ACC 指标上任务类型与被试类型交互作用示意图

意见 5：讨论第二段 “结果显示在被动小比例条件下准确率与数学焦虑得分呈显著正相关（r = 0.27, p = 0.038），即数学焦虑得分越高，准确率越高；被动大比例条件下准确率与数学焦虑得分呈正相关(r = 0.12, p > 0.05)；主动大比例(r = －0.16)和主动小比例(r = －0.15 条件下准确率与数学焦虑呈负相关(ps > 0.05)。” 放结果部分。

回应：感谢审稿人的意见。我们已在修改稿中将该描述的主动数量加工相关内容放入了结果部分。

意见 6：文中设计了任务类型变量，但在结果和讨论部分都没有给出说明。

回应：感谢审稿人的提醒，原文中的确忽略了任务类型变量的结果与讨论，我们已经予以更正。

前人 ERP 的相关研究提示不管在主动加工还是被动加工数量时，都能够观察到 P2p 波形（Libertus et al., 2007; Hyde et al., 2009, 2011, 2012; Park et al., 2015; Fornaciai et al., 2017），但前人没有在同一研究中对比两种不同任务的 P2p 成分，而本研究将任务类型设置为一个变量，可以直接对比这两个任务产生的 P2p 的差异。针对任务类型变量的结果与讨论，在文中我们进行了如下修改：

(1)行为结果：由于被动数量加工任务仅要求被试做颜色判断，该过程与本研究所关心的数量加工无关，因此不将被动数量加工的相关数据纳入行为分析。我们分别以准确率(ACC)和反应时(RT)为因变量，进行了 2(数量比例)×2(被试类型)的两因素重复测量方差分析。我们对原有的行为结果（三因素重复测量方差分析）进行了修改。

(2)脑电结果：我们认为被动数量加工是一种内隐的数量加工，在脑电指标上应与主动数量加工同质，因此我们在脑电分析保留了原有的三因素重复测量方差分析。此外，在时频分析和结果部分增加了数量比例效应和任务类型变量交互作用的分析(数据分析详见正文第 8 页 15-21 行，结果报告详见第 12 页第 6-15 行)。

(3)在讨论部分，我们增加了对任务类型相关脑电结果的具体讨论（详见正文第 15 页第 15-28 行)。

……

审稿人 2 意见：

该论文研究并对比了高、低数学焦虑个体近似数量加工的神经机制。论文研究的问题较有意义，但是在研究实施和分析过程中还存在一些比较大的问题。

意见 1：这篇论文最大的一个问题是脑电部分的频域结果部分存在循环论证。通过先前的分析，设定了特定的限制条件（见方法部分），这些设定条件就包含了三阶交互作用不显著，部分二阶交互作用显著及主效应显著等，找出作者所谓的 ROI，然后再对这些 ROI 进行统计分析，统计结果又与前面所设置的先行条件无异。属于循环论证。另外，作者的这部分数据分析，没有建立在已有研究的基础上。

回应：感谢审稿人的意见，对于这个问题回答如下：

首先，我们完全同意审稿人的意见，时频分析中原有限制条件不够合理（如限定三阶交互不显著条件下的二阶交互作用以及主效应），且原文仅分析了数量比例和被试类型相关的实验效应，忽略了任务类型相关效应的分析。新的分析思路如下：本研究主要关注数量加工过程，因此在考察被试类型和任务类型的主效应时，需要首先具有数量比例效应，即确认该感兴趣区是与数量加工相关的时频指标，并以此为前提进行寻找有显著的被试类型差异和任务类型差异的感兴趣区。满足以下条件的时频点可进入后续分析：①数量比例的主效应显著的ROI；②数量比例主效应显著的前提下被试类型的主效应显著的ROI；③数量比例主效应显

著的前提下任务类型的主效应显著的ROI；④数量比例与被试类型交互作用显著的ROI；⑤数量比例与任务类型交互作用显著的ROI；⑥以及三因素交互作用显著的ROI。上述六种ROI均满足初始p值小于0.01且包含30个连续的时间点。我们修改了相应的时频分析结果（详见正文第8页，第16-22行），并进行了相应的讨论（详见修改稿第15页）。

其次，时频分析的流程主要参照了Maris和Oostenveld(2007)所建议的分析方法：该方法首先通过点对点的分析定义感兴趣的原始效应（Raw effect），然后从原始效应中找到对应的统计量F总和最大的一个cluster，通过置换检验考察这些cluster中实验效应是否真实存在，控制虚报率（见文中第8-9页，第29行）。置换检验的原理是：如果条件概率 f（Dr = dr）的分布在所有实际分布中遵循一定的规则 f，该置换检验的零假设是，在n个可能的分布中，所有数据出现概率f(Dr)(n=1,2,…,n)都是相等的，f(D1) = f(D2) = …= f(Dn)。换句话说，不管数据来自什么实验条件，其分布的概率应该均等。由于本研究对原始效应的定义较为严格（p < 0.01且涵盖30个及以上的时频点），这些原始效应都通过了置换检验，拒绝了零假设，表明脑电的时频振荡遵循实验条件的变化规律。脑电分析软件Fieldtrip中的分析逻辑也主要基于上述分析的基本思路(Oostenveld, Fries, Maris, & Schoffelen, 2011)，目前也有许多采用上述思路进行分析并发表的论文(如Konvalinka et al., 2014; Zhang, Hu, Hung, Mouraux & Iannetti, 2013)。

最后，时频分析部分没有建立在已有研究基础上的原因主要在于当前相关的研究较少，且结果还不统一。我们在前言的文献综述中已提到，关于近似数量加工的 EEG 节律能量当前仅有两项，一项是 Libertus 和 Brannon (2009)发现 7 个月大的婴儿在观看点阵图片时，α 频段(8－12Hz)和 θ 频段(4－6Hz)的神经振荡强度点阵数量大小的比例调节；第二项是 Park(2018)采用稳态视觉诱发电位技术(Steady－State Visual Evoked Potential, SSVEP)，发现在 1Hz 频率(δ 频段，1－3 Hz)下被试观看点阵所诱发的神经振荡强度会被点的数量变化所调节，而不被点的其他视觉属性(点的面积、稀疏度等)的变化所调节。由于这两项研究得到的结果并不一致，另外 Park(2018)所采用的研究范式与本研究不同，且该研究的频谱分析也没有提供时间维度上的信息。因此本研究采用了数据驱动的方法，在 1－45Hz 间所有频段、64 个电极及刺激呈现开始至 600 ms 的时间窗上进行点对点的重复测量方差分析，结合非参数置换检验法(Nonparametric Permutation Testing, Maris & Oostenveld, 2007)，寻找感兴趣区(Region of Interest, ROI)。

意见 2：论文中多次提到数学焦虑个体数量加工的缺陷，但是始终没有说清楚“这个缺陷是什么，表现在什么方面”。在引言第二段提出“数学认知能力显著下降”，但作者举的两个例子：Dietrich 等(2015) 发现高数学焦虑组在行为上表现出更强的数字距离效应，Nunez－Pena 等 (2014) 发现高数学焦虑组表现出更大的数字大小效应和数字距离效应。所列举的研究结果是如何说明数学焦虑个体存在数学认知能力下降的？

回应：

本文中所指的“缺陷”特指高数学焦虑的数量加工能力比低数学焦虑更差，具体表现在行为的准确率较低、数字大小效应、数字距离效应的较强等，或在神经指标（如 EEG 相关指标）上的异常。用“缺陷”不妥，容易引起误解，我们已将全文相应描述改为“能力下降”。

引言第二段所举的例子说明数学焦虑个体的数量加工能力下降的逻辑是：在数字大小比较的任务中（如比较 3 和 4 哪个更大），数字距离效应表现为当参与比较的两个数字很接近（3 和 4）时，相对于不接近的两个数字（1 和 4），数字接近时难度更大。而高低数学焦虑个体上存在难度与组别的交互作用：对于低难度的任务（如 1 和 4）两组的行为表现差异较小，对于高难度任务（如 3 和 4）两组行为表现差异较大。由此推测高数学焦虑的数量加工能力有所下降。数字大小效应表现为，数量较大的数字的比较（9 和 10）相对于数量较小的

数字的比较（1 和 2）难度更大，在高低数学焦虑个体上存在难度与组别的交互作用：数量较小的数字的比较的组间差异低于数量较大的数字的组间差异。上述的数字距离效应和数字大小效应在行为指标和 EEG 波幅上都可说明高数学焦虑个体的数量加工能力有所下降。正文中补充了对数量大小效应和数字距离效应的详细解释（详见正文第 1 页 22-28 行）。

意见 3：高数学焦虑个体可能存在近似数量加工“缺陷”，是建立在什么逻辑之上的？表现为什么？本研究问题提出的思路不够清晰。

回应：本文中所指的“缺陷”特指高数学焦虑的数量加工能力比低数学焦虑更差，具体表现在行为的准确率较低、数字大小效应、数字距离效应的较强等，或在神经指标（如 EEG 相关指标）上的异常。

在修改稿中，我们尝试重新进行问题提出，思路如下：为什么高数学焦虑个体的数学加工能力下降？目前有“干扰理论”和“能力减退理论”两种理论（原文讨论部分），由于近似数量加工过程具有不易受干扰的特点，探讨高数学焦虑的近似数量加工过程的特点可以很好地支持能力减退理论。当前已有一项行为研究表明数学焦虑水平越高，近似数量加工能力越低（Lindskog et al., 2017），但还没有来自神经指标的相关证据，本研究拟通过对高低数学焦虑个体在近似数量加工中的 EEG 指标的分析，为“能力减退理论”提供来自实证研究的证据（详见正文第 2 页第 2-13 行）。

意见 4：在“2.2.4 视觉搜索”部分，作者提到“被试完成所有测试之后，根据两组被试在所有任务上的平均得分确定入组被试。”如何确定的？请详细阐述。

回应：感谢审稿人的提醒。确定入组被试的流程是：首先有高低数学焦虑各 40 名被试在在线心理学实验平台上(www.dweipsy.com/lattice, Zhou, Wei, Zhang, Cui, & Chen, 2015)完成了非言语矩阵推理、快速视知觉图形匹配、视觉搜索三个测验，我们从中分别挑选 31 名被试进入高低数学焦虑组，挑选标准是两组被试间在三项测验的平均得分上均无显著的组间差异（平均得分见原文表 1）。已在文章中做了相应修改。

意见 5：脑电数据为什么采用全脑平均，作者出于什么样的考虑。

回应：全脑平均是一种常用的更换参考电极的方法(Cohen, 2014)。虽然从脑电方法学角度上采用全脑平均的准确性还存在争议（如 Nunez, 2010; Yao, 2017），本研究采用全脑平均主要是参考前人研究 P2p 成分的文献中报告的方法(Fornaciai, Brannon, Woldorff, & Park, 2017; Park, DeWind, Woldorff, & Brannon, 2015)。

意见 6：脑电数据分段为何只截取了刺激出现后 600ms 而不采用更长的时间来进行时频分析？尤其当作者要分析低频信息时。

回应：首先，我们同意审稿人的意见低频信息应该选取较长的时间来分析，根据 Cohen(2014)在其书“Analyzing neural time series data”第 15 章中的描述：分段的时长需要至少包含最低频段的一个循环，最好是大于一个循环以增加信噪比（第 199 页）。本研究关注的最低频(1Hz)信号需要 1 秒的时长进行时频转换，我们选择了-1000ms-600ms 作为分析的时间窗（-1000ms-0ms 为基线）涵盖了时频振荡的一个循环是可以被接受的；其次，这里采用的时频转换方法是是短时傅里叶变换，根据 Cohen(2014)第 77 页的描述：为了减小分段边界的伪迹，时频分析相对于 ERP 需要更长的时间窗作为时频转换的缓冲区，但由于傅里叶变换中已经削弱了分段边界的强度，对于短时傅里叶变换不需要较长的缓冲区，因此本研究选取的时间窗可以接受。最后，根据前人研究的结果，近似数量加工的关键加工阶段主要发生在视觉通路上，在时间进程上发生较早（如 ERP 中的 P2p 成分即发生在刺激出现 200ms 左右），

为了减少计算量，我们只截取到刺激出现后 600ms。在 2.4 脑电记录与分析中，我们有如下陈述：由于低频转换需要较长的时间周期， 1Hz 的低频信号至少需要 1000ms 时长进行转换（Cohen, 2014），参考前人的时频分析相关参数（如 Zhang, Hu, Hung, Mouraux, & Iannetti, 2012）选取了现有的基线长度。从刺激开始到刺激出现 600ms 长度选取主要参考前人关于 P2p 研究的时间窗选取参数（如 Park et al., 2015）。

意见 7：作者为什么在分段后才做 ICA?
回应：分段后再做 ICA 有两个原因：第一是本实验平均刺激间隔有 1250 毫秒，被试反应后等待的时间约为 1300ms，即被试完成按键后共有约 2500ms 时长的等待时间，这段时间可能导致伪迹，分段之后再做 ICA 可以减少等待期间的伪迹带来的影响；第二是分段后 2 做 ICA 可以减少计算量，减少预处理的计算时间。分段后做 ICA 的预处理方法比较常见（如 Lasaponara et al., 2019; Popovych et al., 2016）。

意见 8：在“2.4.2”部分，时频分析过程中，作者采用的先行筛选条件都包含了“三因素三阶交互作用不显著”？为什么，三因素三阶交互作用显著的点为什么不能包含在进一步的分析中？
回应：感谢审稿人的建议。我们同意审稿人的观点，三因素三阶交互作用的确不应该被排除在外，我们已重新进行了这部分分析（具体见问题 1 的回应）。

细节问题 1：摘要表述不清楚，如“表明行为成绩匹配时高数学焦虑仍在相关的 EEG 指标上存在异常”，不知道作者想表达什么，什么是“行为成绩匹配”？
回应：这里想表达的是：当高数学焦虑个体的近似数量加工的行为表现与低数学焦虑无显著的统计差异时，仍能观察到 EEG 指标的显著组间差异。摘要部分已经重写。

细节问题 2：HMA LMA 等字母缩写在论文中未见到全称是什么，其第一次出现位置为表 1. 3.
回应：感谢审稿人提醒，我们在表 1 中添加了字母缩写的全称，高数学焦虑(High math anxious, HMA)，低数学焦虑(Low math anxious, LMA)。

细节问题 3：在“2.4.1 时域分析”部分，作者描述“我们选取 200 ms 附近正走向波的最大峰值”来测量 P2p,读者很容易误以为本文采用的波幅测量方法是峰值探测，而实际作者采用的是平均波幅。
回应：我们将该处改为：我们计算了时间窗为 175 ms－225 ms 内的平均脑电波幅。

细节问题 4：统计参数有些给出了效应量，有些没有给出。
回应：我们重新检查了全文，在漏掉的统计参数后添加了 ηp2 和 Cohen’s d 作为 F 检验和 t 检验的统计效应量，在文中用蓝色字体标记。

细节问题 5：多个图例看不清楚
回应：文中所有图片的图例已更新。

细节问题 6：“3.3”中，作者引用了图 4A，4B, 4C,是否引用错误，实际为图 5?
回应：图 4A，4B，4C 是引用错误，已改为图 5。

……

审稿人 3 意见：

意见 1：建议作者考察自发脑电的组间差异，即刺激前的脑电频谱在两组被试间的差异，该差异是否与行为指标相关等？

回应：依照建议我们选取刺激发生前 1000ms（-1000ms - 0ms）作为自发脑电的考察时间窗，时频分析的流程如下：

（1）对于每一个被试我们采用固定 250 ms 汉宁窗的傅里叶变换，将所有试次的 EEG 信号转换为时间－频率的信号。在每一个试次中，用固定汉宁窗的傅里叶变换对时频空间上的每一个数据点进行复杂的时频估计，时间为－1000 ms 至 0 ms（每毫秒 1 个采样点），频率为 1 至 45Hz（每赫兹 1 个采样点）。先对 EEG 数据进行单试次分析，再完成多试次的平均，最终获得各条件下的振荡能量；

（2）由于本分析考察的是自发脑电，不关注实验条件的差异，我们首先将所有条件下的振荡能量平均，然后寻找有显著组间差异的的感兴趣区。采用数据驱动的方法，在 1－45Hz 间所有频段、64 个电极及刺激呈现前 1000 ms 到刺激呈现开始的时间窗上进行点对点的独立样本 t 检验，然后结合非参数置换检验法（Nonparametric Permutation Testing，Maris & Oostenveld，2007）寻找感兴趣区（Region of Interest，ROI）。然后，我们对 EEG 时频图上的每一个点进行独立样本 t 检验，满足组间差异显著，且包含连续的 30 个时间点（初始 p 值小于 0.01）条件的时频点可进入后续分析，由此得到的每一个时频点上的 F 值可代表效应强度。结果显示，在所有的时间和频率点上均没有出现组间差异显著的 cluster。两组被试在 64 个电极上的地形图和原始时频图如图 3 和图 4 所示。

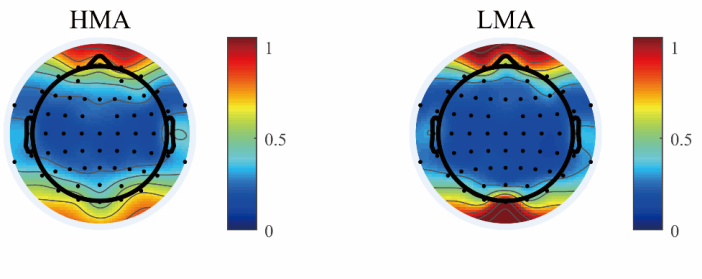


图 3 高低数学焦虑在刺激呈现-1000ms-0ms 的地形图

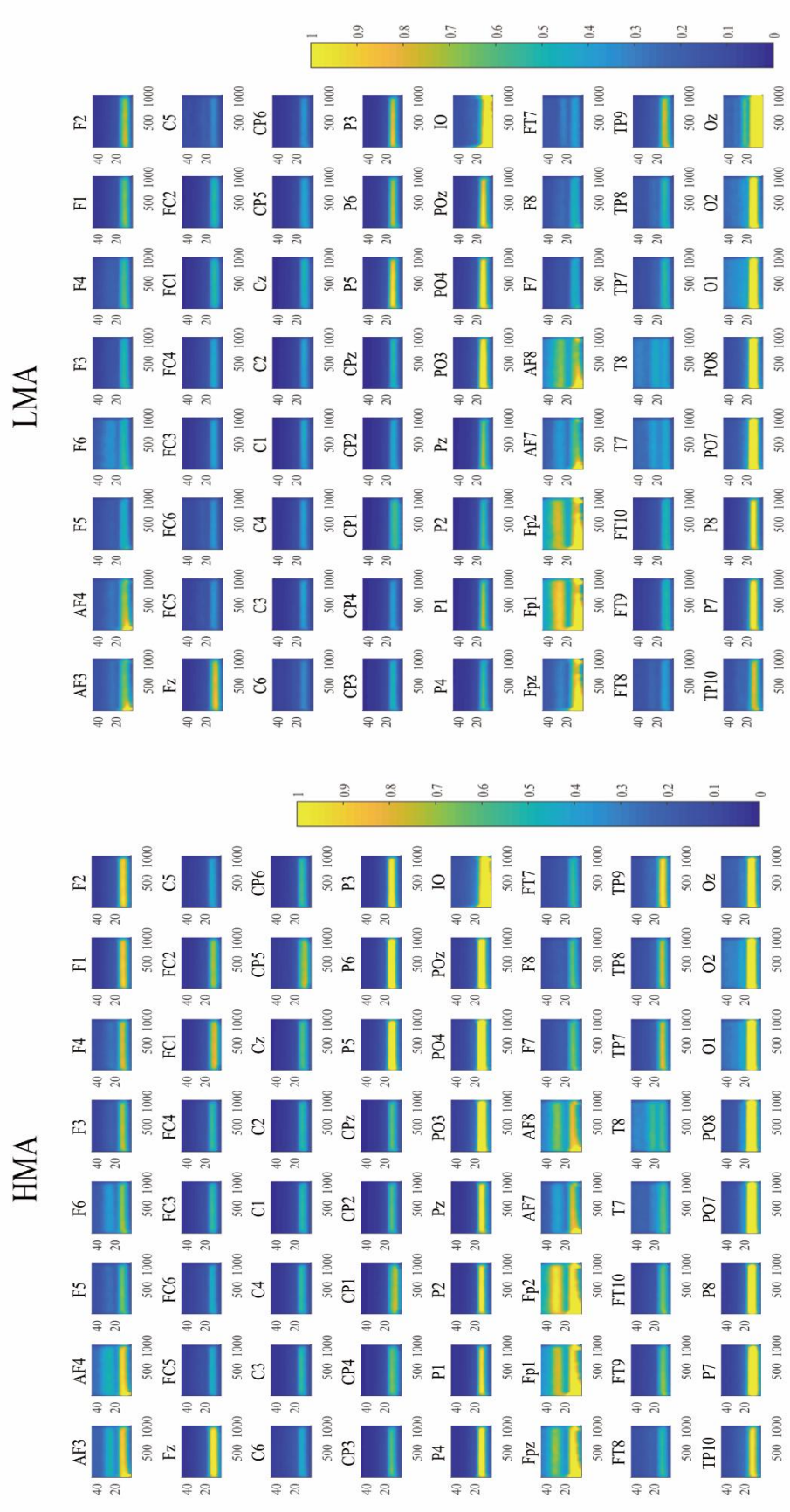


图 4 高低数学焦虑在刺激呈现-1000ms-0ms 的时频图

意见 2：建议作者呈现原始时频图，而不仅仅是统计结果，此外，建议作者呈现时频地形图，以及选取分析电极的依据等。

回应：感谢审稿人建议。我们根据意见进行了修改，分别呈现了高低数学焦虑在表现出显著组间差异的电极上的原始时频图，以及数量比例和被试类型交互作用显著的 cluster 对应的时频地形图。

选取分析电极的依据如下：由于在时频方面近似数量加工的相关研究相对较少，且结果不完全统一(Libertus et al., 2009; Park, 2018)，在电极、时间窗和频段的选取上，采用了数据驱动的方法，在 1－45Hz 间所有频段、64 个电极及刺激呈现开始至 600 ms 的时间窗上进行点对点的重复测量方差分析，然后结合非参数置换检验法(Nonparametric Permutation Testing, Maris & Oostenveld, 2007)寻找感兴趣区(Region of Interest, ROI)，然后将检验后得到的有显著实验效应的 ROI 中的平均能量提取出来，进行三因素重复测量方差分析，得到有显著实验效应的电极、时间点和频段。

意见 3：“主动观看大比例数量 9±6，主动观看小数量比例 9±6，被动观看大比例数量 9±7，被动观看小比例数量 10±7”中的“小数量比例”应该是错误的。

回应：该处错误已更正。

参考文献：

Cohen, M. X. (2014). Analyzing neural time series data: theory and practice. Cambrige, Massachusetts, the MIT press.

Fornaciai, M., Brannon, E. M., Woldorff, M. G., & Park, J. (2017). Numerosity processing in early visual cortex. *NeuroImage*, *157*, 429–438.

Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2009). All numbers are not equal: an electrophysiological investigation of small and large number representations. *Journal of cognitive neuroscience*, *21*(6), 1039–1053.

Hyde, D. C., & Wood, J. N. (2011). Spatial attention determines the nature of nonverbal number representation. Journal of cognitive neuroscience, 23(9), 2336-2351.

Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2012). Spatiotemporal dynamics of processing nonsymbolic number: An event-related potential source localization study. *Human brain mapping*, *33*(9), 2189–2203.

Konvalinka, I., Bauer, M., Stahlhut, C., Hansen, L. K., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2014). Frontal alpha oscillations distinguish leaders from followers: multivariate decoding of mutually interacting brains. *Neuroimage*, *94*, 79-88.

Lasaponara, S., Pinto, M., Aiello, M., Tomaiuolo, F., & Doricchi, F. (2019). The hemispheric distribution of α-band EEG activity during orienting of attention in patients with reduced awareness of the left side of space (spatial neglect). *Journal of Neuroscience*, *39*(22), 4332-4343.

Libertus, M. E., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2007). Electrophysiological evidence for notation independence in numerical processing. *Behavioral and Brain Functions*, *3*(1), 1.

Nunez, P. L. (2010). REST: a good idea but not the gold standard. Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 121(12), 2177.

Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., & Schoffelen, J. M. (2011). FieldTrip: open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Computational intelligence and neuroscience*, *2011*, 1.

Park, J., DeWind, N. K., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2015). Rapid and direct encoding of numerosity in the visual stream. *Cerebral cortex*, *26*(2), 748–763.

Popovych, S., Rosjat, N., Toth, T. I., Wang, B. A., Liu, L., Abdollahi, R. O., ... & Daun, S. (2016). Movement-related phase locking in the delta–theta frequency band. *NeuroImage*, *139*, 439-449.

Yao, D. (2017). Is the surface potential integral of a dipole in a volume conductor always zero? A cloud over the average reference of EEG and ERP. Brain topography, 30(2), 161-171.

Zhang, Z. G., Hu, L., Hung, Y. S., Mouraux, A., & Iannetti, G. D. (2012). Gamma-band oscillations in the primary somatosensory cortex—a direct and obligatory correlate of subjective pain intensity. Journal of Neuroscience, 32(22), 7429-7438.

第二轮

审稿人 1 意见：作者根据审稿意见做了认真的修改，当前存在以下几点小的问题。

意见 1：前言部分的假设需要再具体化，根据既有研究可以推论出 P2P 成分在高低焦中的表现，即不只是有差异，还要有方向。

回应：感谢审稿人提升论文质量的宝贵意见。前言假设部分已修改为具体差异的方向（见修改稿第 2-3 页蓝色字体）。

意见 2：第 9 页 11 行，ps>0.05?

回应：感谢审稿人指出。该处已修正为：结果显示主动大比例($r = -0.16$, $p > 0.05$)和主动小比例($r = -0.15$, $p > 0.05$)条件下准确率均与数学焦虑得分呈负相关趋势（见修改稿第 9 页 11-12 行）。

意见 3：讨论部分 p15 第 6-10 行，将 1-5HZ 神经振荡推论为与 C1 成分相关，是否有更多证据支持，从频段上看，C1 应该源于更高频的振荡。

回应：感谢审稿人的意见，过往研究中的确主张 C1 成分可能源于更高频的振荡，如 C1 可能与 gamma 频段振荡有关(Fründ et al., 2007)，而其他的早期视觉成分如 P1 和 N1 可能与 alpha 频段振荡有关(Klimesch, Fellinger, & Freunberger, 2011)。但 Fornaciai 等(2017)发现在近似数量加工中，50 - 125 ms 的成分存在与 C1 成分类似的特点：当刺激在上下视野切换呈现时会该成分会出现极性的变化（见图 1）。由于该成分的波幅也可以显著的被数量比例所调节，因此有理由相信在近似数量加工的早期阶段，存在着一个来自初级视觉皮层的早期视觉成分也在加工数量相关的内容。而本研究中 1-5Hz 的神经振荡在时间窗上与该成分有重合，同时也能被数量比例调节，由此我们推测 1-5Hz 神经振荡可能来自于 Fornaciai 等人(2017)研究中发现的这一早期视觉成分。但由于 C1 成分与低频神经振荡间的关系尚未有研究证实，且本研究的数据不能支持这一推断，未来还需要结合严格的实验设计来证明 1-5Hz 的神经振荡是否与 C1 成分有关。我们已将相关讨论的内容增加到修改稿中（见修改稿第 15 页 6-12 行）。

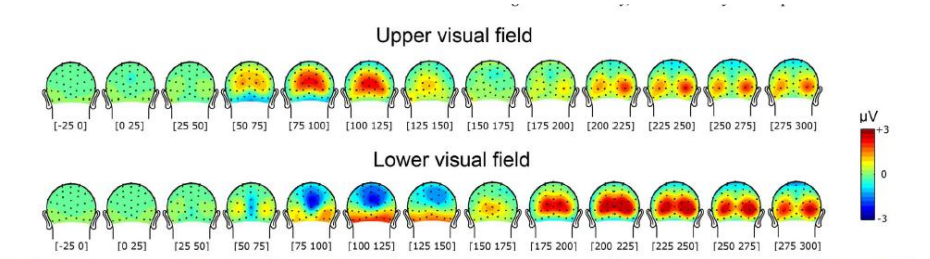


Fig. 2. Time course of brain responses to stimuli collapsed across all stimulus conditions in the upper (upper panel) and lower (lower panel) visual field. In both cases, early activity showed maximum amplitude at around 75–125 ms, with positive-polarity modulation for upper visual field stimuli and negative-polarity modulation for lower visual field stimuli. Later activity on the other hand showed maximum amplitude around 200-250 ms, with positive-polarity modulation in both visual-hemifield conditions.

图 1 引自 Fornaciai et al., 2017

审稿人 3 意见

作者已根据评审意见认真修改了论文，无更多意见。

回应：感谢审稿人对本文的肯定。

参考文献：

Fornaciai, M., Brannon, E. M., Woldorff, M. G., & Park, J. (2017). Numerosity processing in early visual cortex. *NeuroImage*, *157*, 429-438.

Fründ, I., Busch, N. A., Körner, U., Schadow, J., & Herrmann, C. S. (2007). EEG oscillations in the gamma and alpha range respond differently to spatial frequency. *Vision research*, *47*(15), 2086-2098.

Klimesch, W., Fellinger, R., & Freunberger, R. (2011). Alpha oscillations and early stages of visual encoding. *Frontiers in psychology*, *2*, 118.

第三轮

编委复审意见：

3 位外审初审结果为 1 小修 1 大修 1 拒稿，经修改后，两位 2 审专家均同意发表。我看了拒稿意见中主要“循环论证”批评意见，作者对此进行了回复和修改，我认为修改后的分析是合理的。其他并无很强的否定性意见，经作者修改后达到学报发表要求。

同意接受发表。

主编终审意见：

意见 1：在摘要中“近似数量加工是复杂数学加工的基础”，建议作者先定义一下什么是近似数量加工是什么。

回应：感谢主编的意见，已在摘要中增加了对近似数量加工的定义：“近似数量加工是指对大数目物体数量在不依赖逐个数数前提下的估计。”

意见 2：摘要写的，让人不明白本篇文章到底要做什么，建议作者按目的、研究方法，特别是实验设计、结果、结论等内容来写。

回应：依照主编意见对中文摘要进行了如下修改：

“近似数量加工是对大数目物体数量在不依赖逐个数数前提下的估计。行为学研究提示高数学焦虑人群近似数量加工能力下降，但神经机制未明。本研究探讨高数学焦虑个体近似数量加工的神经机制，比较高低数学焦虑脑电活动的差异：(1)行为上无显著组间差异；(2)高数学焦虑组的 P2p 成分波幅增加；(3) δ 频段 ERS 及 β 频段 ERD 无显著数量比例效应，而低数学焦虑组在上述指标的数量比例效应显著。本研究为高数学焦虑人群近似数量加工能力下降提供了电生理学的证据。”

意见 3：在正文中，作者说“P2p 成分与近似数量表征”有关，但本文题目是近似数量加工。近似数量表征与近似数量加工是同一个意思吗？

回应：感谢主编指出的问题。 “近似数量加工”与“近似数量表征”是不同一个意思，原有表述不准确。我们已将全文中“近似数量表征”修改为“近似数量加工”（见文中蓝色字体）。

意见 4：表 1：高低数学焦虑组的年龄、性别、数学焦虑、一般焦虑、视觉加工速度、视觉注意广度及的平均得分及标准差中的 T 值，表达不正确，应该有正负号。

回应：感谢主编的提示，很抱歉出现如此错误，我们对表 1 中 t 值修改如下：

、	年龄	性别	数学焦虑	一般焦虑	视觉加工速度	视觉注意广度	智力
高数学焦虑 (High math anxious, HMA)	20.68(1.62)	15/16	94.35(7.37)	44.70(5.35)	74.06(17.24)	58.71(18.78)	5.03(1.38)
低数学焦虑 (Low math anxious, LMA)	20.69(1.85)	17/12	41.86(6.56)	44.45(4.84)	75.86(16.19)	63.96(18.91)	5.14(0.88)
t	—	—	*29.07*	*0.2*	*-0.42*	*-1.08*	*-0.35*
p	—	—	*<.001*	*0.84*	*0.68*	*0.28*	*0.72*

注：括号中为标准差