

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：不同数学焦虑成人的算术策略运用差异：ERP 研究

作者：司继伟 徐艳丽 封洪敏 许晓华 周超

第一轮

审稿人 1 意见：

意见 1：作者关注算术策略运用过程的高低数学焦虑被试的 ERP 差异，能够深入探讨数学焦虑影响数学思维过程的神经机制；作者发现了行为数据上的无差异，但是在 ERP 数据上存在明显不同，这些结果是很有启发意义的。但是，作者需要阐明这些差异的理论意义以及合理的解释。

回应：感谢审稿专家建议。我们在修改稿中进一步重新调整并进一步阐述了行为数据与 ERP 数据之间差异的理论意义及其合理解释。

本研究中行为层面和神经生理层面的结果看似矛盾，却很有启发意义。以往大量研究发现，数学焦虑影响数学表现（Ganley & Vasilyeva, 2011; Ramirez & Beilock, 2011; Wood, 2006），然而 Ashcraft 和 Faust（1994）指出数学焦虑存在复杂性效应，一些任务中，高低数学焦虑个体表现一样好，但是随着刺激情景变得复杂或困难，高数学焦虑个体表现受损。也有研究表明限时情景中，数学焦虑损害其数学表现，而在非限时情境中却没有损害（Faust, Ashcraft, & Fleck, 1996）；进位加法中数学焦虑导致数学成绩下降，却不影响简单一位数加法的成绩。而在生理指标上，Ashcraft（1995）发现当问及难度增加的数学问题时，数学焦虑个体的心率加快，而在问及非数学相关问题中没有出现。数学焦虑与数学表现之间的关系复杂（Witt, 2012），数学焦虑可能占用特殊的神经资源，行为测量只提供内在加工的非直接证据（Suárez-Pellicionia, Núñez-Peña, & Colomé, 2013）。本研究中的行为层面与神经层面的矛盾证实这一点，并证实了加工效能理论（Eysenck, & Calvo, 1992）以及在其基础上扩展的注意控制理论（Eysenck et al., 2007）。此理论注重加工的效能（运用于加工的资源或努力）与外在加工结果（外在表现的质量）。其认为焦虑这种负性情绪会损耗部分工作记忆资源，进而影响个体的认知表现，当认知操作任务简单时，个体可以通过采取补偿策略，使得焦虑削弱个体的加工效能，而不削弱认知活动的结果，这样就观测不到焦虑外在的影响（王翠艳，

刘昌, 2007)。ERP 波幅反映信息加工中心理资源付出的多寡, ERP 潜伏期反映认知加工过程的速度。ERPs 或 fMRI 技术中的脑激活的神经生理证据被视为加工效能有效测量工具, 反应时和准确率等外在指标被视为表现结果的测量指标 (Suárez-Pellicionia, Núñez-Peña, & Colomé, 2013)。本研究中外在表现结果的行为指标没有差异, 而内在加工效能出现差异。数学焦虑优先占用耗损工作记忆资源, 出现个体内在加工的 N1-P2, N400 的潜伏期或波幅的差异。然而此种资源的占用却不足以影响到外在的正确率或反应时的表现, 可能在于两位数加法任务对于所有参与个体而言较为简单, 高数学焦虑者可以通过增加内在努力和使用辅助的加工资源(如努力延长编码的时间、增大注意力程度等)补偿。数学焦虑通过占据工作记忆资源, 进而影响个体的认知表现, 已经得到国内外很多研究的证实(如, Owens et al., 2008; 崔吉芳, 李嫩晓, 陈英和, 2011; Visu-Petra, Cheie, Benga, & Alloway, 2011)。本研究进一步证实数学焦虑与外在表现关系复杂, 却会耗损内在的资源, 数学焦虑对个体内在的努力与认知资源的影响要大于外在表现(如, Eysenck, Derakshan, Santos, & Calvo, 2007; Eysenck, et al., 2007; Derakshan, & Eysenck, 2009), 表明内在神经层面对数学焦虑的辨识度相对于外在表现更加精确, 支持数学焦虑可能占用特殊的神经资源。根据注意控制理论, 数学焦虑减少了自上而下的目标导向的注意系统, 增加了自下而上的刺激驱动的注意系统的控制。这种不平衡直接导致抑制与转换功能中的消极影响 (Suárez-Pellicionia, et al., 2013), 而且这也得到了大量研究的支持 (Ansari et al., 2008; Derakshan, Smyth, & Eysenck, 2009)。本研究也表明数学焦虑的影响途径之一是通过工作记忆影响数学表现, 数学焦虑可能占用特殊的神经资源, 行为测量只提供内在加工的非直接证据。神经层面的数学焦虑效应, 也正说明了采用高时间分辨率的 ERP 指标反映个体认知活动的内在加工过程的有效性, 表明结合生理技术探究数学焦虑内在影响机制的可行性。(4 分析与讨论, 第 1 段, 第 5 行)

意见 2: 在行文上要通俗、易懂, 做图要规范。

回应: 非常感谢审稿专家的建议。我们已遵照建议仔细核对全文文字与图表, 并进行了改正。

审稿人 2 意见:

意见 1: 摘要中的脑电结果报告应该简单明了。

回应: 感谢审稿专家的建议。我们在修改稿中重新调整并简化脑电结果。

脑电结果表明: (1) 在策略选择环节, 无论是心算还是估算, 高焦虑个体相比于低焦虑

个体诱发了更负的 N100, N400 潜伏期更短;在心算中 N100 潜伏期长,在估算中 F3、F4、PO3 电极点上,诱发更负的 N400。(2)在策略执行环节,心算中,低焦虑个体 P200 波幅相继出现在 F3 和 F4, C3 和 C4、PO3 和 PO4 电极点,高焦虑个体在 F3 电极点诱发更大的 N400;估算中,高焦虑个体诱发更大的 N100,更慢的 P200(在 C3 电极点),估算下调策略中,高低焦虑个体都在 F3 诱发更大的 N400,而高焦虑个体在 C3 诱发更大 N400,在 PO4 出现更负的 N400。这反映出数学焦虑效应在编码(0-250ms)和策略选择\执行阶段(250ms 之后)存在差异。(摘要,第 4 行)

意见 2: 引言的前两段罗列了策略、算术策略、数学焦虑等的概念,以及心算和估算的相关研究,疑似毕业论文的文献综述压缩而成,概念的堆积使得这部分内容显得冗长且毫无逻辑。比如“数学焦虑”的概念就有四个来自不同研究者的定义。

回应: 感谢审稿专家建议。我们在修改稿中进一步重新调整并补充相关内容。

人类的认知特点之一就是个体运用各种策略完成大量的认知任务 (Siegler, 2007), 策略是完成较高水平目标或任务的一个或一系列程序。策略运用研究是近些年认知科学和心理学探讨的前沿课题之一,研究者在不少领域(如,阅读、记忆、数学问题等)中都对个体的策略运用特点进行了探索,算术认知领域便是其中之一(陈亚林, 刘昌, 陈杜鹃, 2010; 陈亚林, 刘昌等, 2011)。已有大量研究表明,个体的表现取决于其所运用的策略类型,可以从策略运用视角很好地解释个体(包括成人和儿童)的算术表现差异 (Lemaire, 2010)。算术策略运用依赖于如情境、个体、问题等 (Siegler, 2007) 许多因素,其中数学焦虑是备受关注的重要个体差异因素之一 (Imbo, & Vandierendonck, 2007)。(1 引言,原第 1 段,修改稿第 1 段)

关于“数学焦虑”的研究可以追溯到自 20 世纪 50 年代。数学焦虑作为普遍存在的带有认知色彩的消极情绪,是一种特殊的学科焦虑。然而目前关于数学焦虑尚没有统一定义,依据不同的侧重点,许多研究着给焦虑下过定义。总结以往定义,我们尝试归结“数学焦虑是个体处理数学相关问题中出现的不安、紧张、畏惧等焦虑状态和回避压力感为特征的负性情绪反应。”(陈英和, 耿柳娜, 2002; Ashcraft, & Ridley, 2005; 崔吉芳, 李嫩晓, 陈英和, 2011)。数学焦虑与数学失利的害怕、逃避以及增长的皮质醇反应有关(Krinzinger, Kaumann, & Willmes, 2009; Mattarella-Micke, Mateo, Kozak, Foster, & Beilock, 2011)。大量证据表明,高数学焦虑者逃避害怕数学,进而影响个体的数学表现与数学成绩(Ashcraft, & Krause, 2007; Ashcraft, &

Ridley, 2005; Maloney, Risko, Ansari, & Fugelsang, 2010; 司继伟, 徐艳丽, 刘效贞, 2011; 宋广文, 李守龙, 2009)。(1 引言, 原第1段, 修改稿第2段)

在数学领域中, 心算(心理算术)作为心理学家高度关注的研究主题之一(刘昌, 王翠艳, 2008; 陈亚林, 刘昌, 2011), 是在没有外界工具(如纸笔、计算器等)的帮助下, 包括一系列的编码、运算和反应(Campbel, 2004)的认知加工的算术操作活动。目前常见的心算策略包含逐步对照、计数、垂直计算, 非快捷策略和快捷计算等(Luo, Liu, He, Tao, & Luo, 2009)。许多研究从心算策略选择的视角对其进行考察(Núñez-Peña, Cortiñas, & Escera, 2006; 陈亚林, 刘昌, 2011)。已有研究表明数学焦虑影响心算的编码、提取和策略选择等过程(王翠艳, 刘昌, 2007), 高数学焦虑者较少选择快捷的提取策略解决问题(Imbo, & Vandierendonck, 2007), 心算的问题大小效应与数学焦虑存在关系(Seyler, Kirk, & Ashcraft, 2003), 数学焦虑对简单心算影响不大, 但随着题目难度上升, 影响增强(王翠艳, 刘昌, 2007)而且随着年龄的增长, 数学焦虑对策略选择的影响越来越大(耿柳娜, 陈英和, 2005), 数学焦虑是否影响到简单问题的内在神经机制, 影响大小问题的内在神经机制差异如何等问题尚需进一步探究。作为心算、数概念和算术计算技巧之间相互作用的过程的, 估算是个体未经过精确计算而只借助原有知识对问题提出粗略答案的一种估计形式(司继伟, 2002)。近年来, 估算策略选择也逐渐成为研究的热点(司继伟, 杨佳等, 2012), 其受问题特征、策略特征、任务情境和被试特征等因素影响(Hodzik, & Lemaire, 2011), 是考察个体策略运用灵活性、多样性和变化性的有效工具。估算常用策略包含上调(向上取整, 如 $48 + 24 = 50 + 30 = 80$), 下调(向下取整, 如 $43 + 26 = 40 + 20 = 60$), 混合策略(混合取整, 如 $43 + 28 = 40 + 30 = 70$)(Lemaire, & Lecacheur, 2010, Hodzik, & Lemaire, 2011; Uittenhove, & Lemaire, 2012; Uittenhove, Poletti, Dufau & Lemaire, 2013)。数学焦虑对估算策略运用的研究较少, 国内仅见孙燕等人(2012)最近报告发现高数学焦虑影响儿童的策略执行, 并且更少使用较难的上调策略。策略选择中成人和儿童都受到数学焦虑的影响。估算和心算之间关系密切, 二者涉及一些共同的心理加工活动, 但并不是同一心理现象, 估算能力的高低有时不依赖高水平的心算熟练性, 而且二者的生理基础也不同。前人的大量研究发现前额叶和顶叶皮层与算术任务有关(Stanescu-Cosson, Pinel, van de Moortele Le Bihan, Cohen, & Dehaene, 2000; Zago & Tzourio-Mazoyer, 2002)。而关于心算与估算神经机制的差异研究发现: 心算激活语言相关脑区(左侧额叶和脑回及左右角回); 估算激活言语空间信息加工脑区(左右侧前中央沟, 左背外侧前额叶皮质, 左侧额回和小脑); 而且在刺激呈现后200-300ms(备择答案呈现前)二者脑电图出现差异(Dehaene et al., 1999)。Piazza等人(2006)采用fMRI技术进一步证实了估算激

活右侧面的额顶皮层网络,心算激活左半球前额叶,顶叶和双侧运动前区。向燕辉等人(2010)采用ERP技术,从时间进程角度发现:心算在左前额(800-1050ms)、右中央-顶叶(800-1050ms)、右顶-枕叶(800-1050ms,1200-1500ms)脑区诱发较大负波,在中前额-中央区诱发较大正波。在(第二个数)刺激呈现800-1050ms,二者就已经在右中央-顶叶区与右顶-枕叶区出现差异。何蔚祺等(2011)进一步发现刺激呈现约150毫秒,心算和估算出现分离。在顶叶皮层,心算比估算引发更大的N170波(左半球)和P3波。差异波(心算减估算波)偶极子溯源分析表明N170发生在左半球梭状回(FFG)。N170不仅反映面部特异性编码和左半球单侧化成分,还与视觉词形区(VWFA)正相关。左FFG包含左VWFA,在计算任务的数字编码阶段激活,这进一步表明心算与估算的差异在视觉数字形成阶段就已开始。心算和估算任务不仅在脑机制层面存在差异,可能不同的策略运用也存在差异。(1 引言,原第2段,修改稿第3段)

意见 3: 接下来作者提出“国内尚未出现同时考察数学焦虑对心算和估算策略运用影响差异的神经层面研究”,但是后面列举的研究均为高焦虑者的认知表现(第四段),按照作者的意思,是不是可以理解为:高焦虑者就一定伴随着数学焦虑?这个作为问题提出的依据似乎有失偏颇。

回应: 我们对上述专家意见尝试作出如下回应:

高数学焦虑者一定会伴随高焦虑,所以高焦虑的认知表现作为数学焦虑者的表现之一,而高焦虑者不一定伴随着数学焦虑。

由于国内尚未出现同时考察数学焦虑对心算和估算策略运用影响差异的神经层面研究,所以关于二者的认知表现的差异研究相对较少,而高数学焦虑作为普遍存在的带有认知色彩的消极情绪,是一种属于高焦虑中的特殊的学科焦虑。一般高焦虑者的认知表现对于数学焦虑者在特定的数学学科上存在共通性。高数学焦虑者同样存在回避威胁性信息-数学,以及数学表现受损的认知表现。

进一步,我们将普遍的高焦虑的认知表现与数学焦虑相结合,并进一步添加数学焦虑相关理论,对本部分作出修订与补充。

已有研究也发现数学焦虑通过逃避数学任务来影响焦虑个体的算术表现(Krinzinger, Kaumann, & Willmes, 2009)。Raghunathan等人(1999)发现焦虑情绪(包括状态焦虑和特质焦虑)会使焦虑个体表现出更强的风险回避。Ashcraft 等人认为高数学焦虑者试图局部避免或结束压力情景,或者整体回避数学相关任务与环境,是为了节省生理或认知成本的表现

(Ashcraft,1994)。高数学焦虑使得个体倾向于回避数学相关任务。而关于数学焦虑这种回避行为的深层次原因尚不得知，我们试图结合认知资源因素与其他心理因素解释。Gasper 和 Clore（1998）认为高焦虑者倾向回避风险的深层原因在于其对威胁性信息的注意偏向。信息加工偏向只是回避因素之一，认为负性结果会发生在自己身上的“概率偏向”因素可能是高焦虑者倾向于回避的内在原因。在数学焦虑者身上表现为回避数学的失败。Maner 等（2006）进一步提出，高焦虑者并非高估负性结果发生的可能性，而是预期负性结果所带来的难以承受的烦恼感。这正符合Raghunathan 等人（1999）认为的高焦虑者的回避倾向受情绪取向因素影响。高焦虑者对负性结果比一般人感受强烈，其回避倾向，可能并非为了回避失败本身，而是为了避免失败给自己的情绪造成强烈刺激（古若雷，罗跃嘉，2008）。而关于数学焦虑与数学表现，高数学焦虑者是为了回避数学失败，还是为了回避数学失败所造成的不安、紧张、畏惧等焦虑的负性情绪反应？已有大量研究表明数学焦虑影响数学表现。(Ashcraft, & Krause, 2007; Maloney, Risko, Ansari, & Fugelsang, 2010;司继伟, 徐艳丽, 刘效贞, 2011; 宋广文,李守龙, 2009), 降低焦虑的行为干扰能够提高数学成绩(Ramirez & Beilock, 2011; Wood, 2006)。缺陷理论认为是由于以往失败的数学表现导致高数学焦虑；而认知干扰理论则认为（Sarason，1988）是由于无关的不安、紧张等焦虑体验导致数学表现失利。然而，数学焦虑与数学表现间的关系是双向复杂的（Witt, 2012）。已有研究发现数学焦虑通过工作记忆影响数学表现（Owens et al., 2008），这就涉及到加工效能理论的表现结果（行为表现的质量）与加工效能（为达到一定表现水平需要付出的努力或使用的资源）。由于个体的工作记忆系统资源有限，高数学焦虑者的担忧占据一部分工作记忆资源，因此当前认知活动的效率会因资源竞争下降（Eysenck, & Calvo, 1992）。数学焦虑对认知效能的影响大于表现结果。当认知活动受到焦虑影响时，个体的认知效能受到影响，而个体可通过提高努力和辅助的加工资源等补偿，减少或弥补占据工作记忆资源而造成的表现结果受损（Eysenck, Derakshan, Santos, & Calvo, 2007）。注意控制理论在此基础上进一步支持数学焦虑损耗加工效能高于表现结果，由于其减少了中央执行的关键功能之一注意控制（Eysenck et al., 2007）。该理论认为存在两个注意系统，共同构成中央执行功能的基础：一是受预期、知识和当前目标影响的目标-导向注意系统（自上而下），一是受到突出和明显的刺激影响的刺激-驱动注意系统（自下而上），二者处于平衡状态。高数学焦虑减少了目标-导向注意系统的影响，并增加了刺激-驱动系统的影响。这种注意控制的不平衡直接影响到抑制功能（通过注意控制以抵制任务无关刺激或反应，防止其干扰任务表现）与转换功能（通过注意控制以灵活恰当的方式分配注意到当前任务，保证个体达到最佳反应）的效能。那么数学焦虑对算术认知策略

的影响如何仍需要进一步讨论。（1引言，倒数第二段）

意见 4：引言第二段倒数第五行，“在顶叶皮层，精确计算比估算引发更大的 N170 波（左半球）和 P3 波。差异波（心算减估算波）偶极子溯源分析表明 N170 发生在左半球梭状回（FFG）。 ” 这里的“精确计算”是指心算吗？

回应：感谢审稿专家建议， 而本研究中所参考的文献涉及的“精确计算”是心算（原引言第 2 段倒数第五行，现引言第 3 段倒数第五行）。

采用的参考文献【He, W. Q., Luo, W. B., He, H. M., Chen, X., & Zhang, D. J. (2011). N170 effects during exact and approximate calculation tasks: An ERP study. *NeuroReport*, 22(9), 437–441.】中的精确计算（exact calculation）是相对于估算（approximate calculation）而言，与本研究中的“心算”一样。

在《N170 effects during exact and approximate calculation tasks: An ERP study》的研究中涉及到的精确计算的参考文献正是本研究中采用的心算参考文献的例证，具体如：

Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284(5416), 970–974.

El Yagoubi, R., Lemaire, P., & Besson, M. (2003). Different brain mechanisms mediate two strategies in arithmetic: evidence from event-related brain potentials. *Neuropsychologia*, 41(7), 855–862.

意见 5：实验流程中，trial 与 trial 之间没有刺激间隔吗？

回应：感谢审稿专家的指正，我们在文中关于实验流程的刺激间隔说明不够清楚，在修改稿中补充了“trial 与 trail 之间的时间间隔 800ms”，并修订实验流程图。

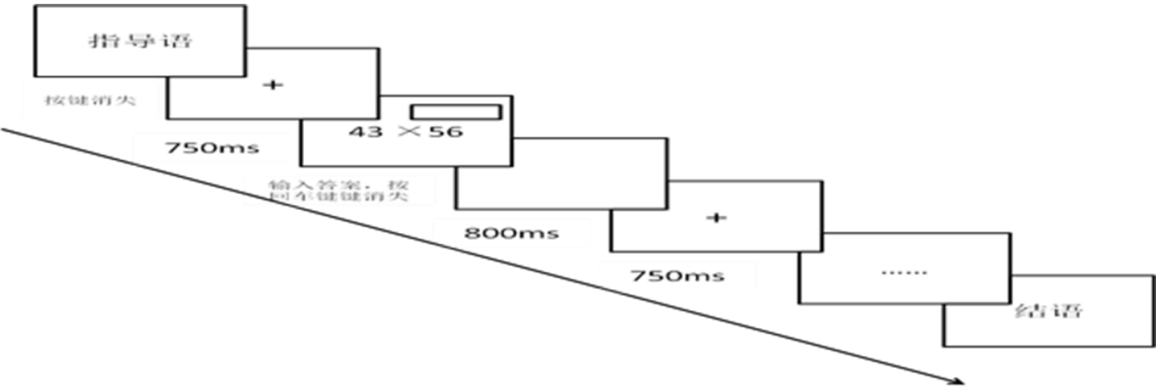


图1 实验流程图

意见 6: 数据分析部分,“以启动刺激开始呈现的时刻为起点进行脑电分段,选择启动刺激呈现后的 500ms 作为分析时程,以启动刺激呈现前 200ms 作为基线,按照高、低焦虑组分别叠加出 ERP”,这里的“启动刺激”是什么?这段话的表述不准确,标点也是中英文混用,整篇文章都存在这个问题。

回应: 非常感谢审稿专家指正,我们原稿中的“启动刺激”表述并不准确,本研究未采用“启动刺激”,我们在修改稿中改正为“分析时程为算术任务前 200ms(作为基线)和算术任务后 500ms。”

另外,我们已遵照建议仔细核对全文文字和标点,并进行了改正。

意见 7: 数据分析时,用一个电极位置代表一个脑区是否合适?用 ROI 可能较为合适。

回应: 首先非常感谢审稿专家建议,我们对此尝试作出回答。

的确是运用多个电极点平均代表可能会更好,但是我们这里考虑的脑电分析原则参见 Steven J. Luck(2005)的 ERP 分析原则,选用具有代表性的电极点,使实验效果差异最大化,采用多个电极点平均,很有可能会使得数据显著性不明显,为了报告实验的最大效果,我们采用了最具有代表性的电极点以凸显差异的最大化。

另外,由于 ERP 技术存在高时间分辨率,低空间分辨率的特点,我们意识到直接采用脑区的不适当性,因此我们将文章中的方法与结果中所涉及的脑区纠正为头皮前部,头皮中部和头皮后部,这点我们在以后的研究中会进一步注意。

Luck S. J. (2005). An introduction to the event-related potential technique. Cambridge, MA: MIT Press.

意见 8: 行为数据分析中,“策略选择由有选条件反映,策略执行由无选条件反映”,这种方式有依据吗?如果有,建议将引用的文献列出。

回应: 感谢审稿专家建议,行为数据分析中,“策略选择由有选条件反映,策略执行由无选条件反映”,这种方式是有范式依据的,并且大量研究采用此种范式,另外已遵照审稿专家的建议,在修改稿中已将所引用相关文献列出。

Lemaire 和 Siegler(1995,1997)的“选择/无法法”设计,可以得到大量个体策略信息:其中包含策略执行和策略选择。策略执行可通过无选条件中,策略运用的反应时与准确率,比较各无选子条件下的策略执行效力(反应时、准确性),反映各策略间的相对优势;策略选择和策略适应性可以通过有选择条件反映,各选择策略的行为特征(正确率和反应时)的

差异，有选条件策略选择是否更优。本范式独到之处在于无选条件的策略执行效力比较；选择条件和无选条件策略选择的差异，发现个体自主策略选择是否更具有策略适用性。

采用此方法的相关研究：

1 Siegler R S, Lemaire P. Older and younger adults' strategy choices in multiplication: testing predictions of ASCM using the choice/no-choice method. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1997, 126(1), 71–92.

2 Lemaire P, Siegler R S. Four aspects of strategic change: Contributions to children's learning of multiplication. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1995, 124(1), 83–96.

3 Lemaire P, Lecacheur M. Children's strategies in computational estimation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2002, 82(4), 281–304.

4 Imbo I, Duverne S, Lemaire P. Working memory, strategy execution, and strategy selection in mental arithmetic. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 2007, 60(9), 1246–1264.

5 Imbo I, LeFevre J A. Cultural differences in complex addition: efficient Chinese versus adaptive Belgians and Canadians. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2009, 35(6), 1465–1476.

6 Hickendorff M, van Putten C M, Verhelst N D, et al. Individual differences in strategy use on division problems: Mental versus written computation *Journal of Educational Psychology*, 2010, 102(2), 438–452.

7 Imbo I, LeFevre J A. Cultural differences in strategic behavior: A study in computational estimation *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2011, 37(5), 1294–1310.

8 司继伟, 杨佳, 贾国敬, 周超. 中央执行负荷对成人估算策略运用的影响. *心理学报*, 2012, 44(11), 1490–1500.

意见 9：整个脑电分析中，自由度似乎有问题，请作者仔细检查。因此，结果的可靠性还不太确定。另外，作者呈现的图 2，图 3，图 4 都不太清晰，尤其是条件的标注。有选心算条件下的（图 2）的 N400 不太明显，有点儿像前额负波？建议：图 2 和图 3 放在一起呈现，能直观地看到任务与数学焦虑的交互作用（如图 4）。

回应：（1）我们对审稿专家意见尝试作出如下回复。

由于高低数学焦虑者严格筛选的限制，在脑电整体数据中，我们采取的是剔除 3 名受到伪迹严重影响、平均叠加次数少于 40 次的被试，剩余有效被试 31 名，高数学焦虑被试 15 名（ ≥ 62 分），低数学焦虑被试 16 名（ ≤ 32 分）。然而由于主客观条件的制约，被试在心算的策略执行中，采用高数学焦虑者 15 名，低数学焦虑者 16 名进入最后的分析；而在估算策略执行中和策略选择中，由于筛选出的被试中部分条件叠加次数较少，未能进入最后的分析中，所以在策略执行中是高数学焦虑者 13 名，低数学焦虑者 12 名进入最后分析；在策略选择中，是高数学焦虑者 15 名，低数学焦虑者 14 名进入最后分析。所以在策略执行与策略选择中出现自由度不一的情形，这是遵循真实数据情况考量的。

（2）感谢审稿专家建议。我们在修改稿中将有选条件下的图 2 和图 3 放在一起呈现，并进一步规范作图。

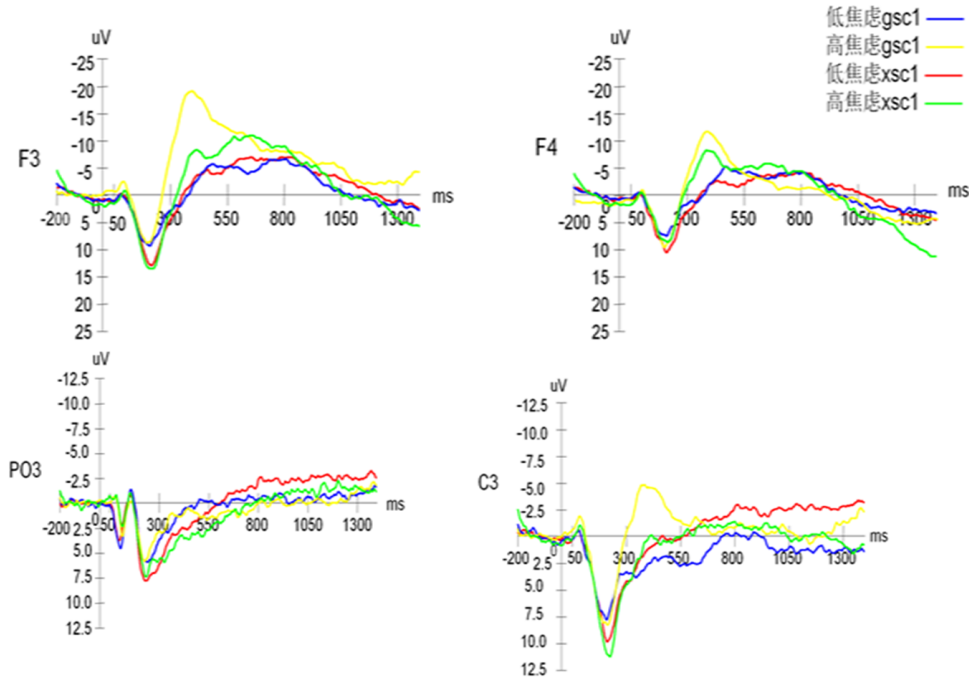


图2 有选实验条件下，高、低数学焦虑个体在F3、F4、C3、PO3电极点的平均波形比较

意见 10：在讨论中，还请作者注意区分“高焦虑”和“数学焦虑”，从引言中，作者给出的数学焦虑的概念来看，二者是不同的。

回应：感谢审稿专家建议，我们已在修改稿中对此注意，并作出了修改。

意见 11：讨论的 4.1 的开始，作者提到“N1-P2.....是与刺激的物理特性有关的外源性成分，只对数字的空间和图形属性处理，.....，反映出与视觉编码有关的皮层激活”，下一段对

其结果解释为 “本研究中高低数学焦虑个体 N100 波幅与潜伏期的差异……表明高焦虑个体策略选择过程需要更多的心理资源，需要更长的编码阶段”。前后相互矛盾。

回应：感谢审稿专家建议，我们尝试作出以下回应。

我们在讨论的4.1的开始首先从视觉编码角度阐述了N1-P2，表明数学焦虑在编码阶段就开始影响个体的数字加工。之后是从注意角度“N1是早期视觉选择性注意的标志(Yuan et al., 2009)，而P200 的出现跟知觉加工中注意的卷入有关(Yuan et al., 2007)”，进一步阐明N1-P2在知觉加工中的作用，而且已有研究发现，增大的N1表明是个体对刺激进行知觉加工中投入更多的注意资源(Mangun & Hillyard, 1990)，N1可能是焦虑个体对负性刺激选择性注意偏向的指标，使个体对威胁信息投入更多的注意资源(Mogg & Bradley, 1998；彭家欣，杨奇伟，罗跃嘉, 2013)，本研究中发现高低数学焦虑个体在心算策略选择和估算策略运用（选择与执行）中，N100的波幅差异显著，意味着高数学焦虑个体在策略运用的知觉加工中就需要投入更多的注意资源，消耗更多的心理资源。

我们进一步将原稿进行补充修改。

以往研究显示N1是早期视觉选择性注意的标志(Yuan et al., 2009)，而P200 的出现跟知觉加工中注意的卷入有关(Yuan et al., 2007)，而且已有研究发现增大的N1表明个体对刺激进行知觉加工中投入更多的注意资源，N1可能是焦虑个体对负性刺激选择性注意偏向的指标，使个体对威胁信息投入更多的注意资源（彭家欣，杨奇伟，罗跃嘉，2013）。本研究中发现高低数学焦虑个体在心算策略选择和估算策略运用（选择与执行）中，N100的波幅差异显著，意味着高数学焦虑个体在策略运用的知觉加工中就需要投入更多的注意资源，消耗更多的心理资源。这符合Mogg 和Bradley (2002)认知- 动机模型，焦虑水平会影响选择性注意偏向。

（4.1 讨论 第二段）

再次感谢两位审稿专家提出的宝贵意见！

第二轮

意见 1：摘要中的脑电结果表述略显累赘，可参照结论部分简明扼要地概述之。

回应：感谢审稿专家建议。我们在修改稿中重新调整了摘要中的脑电结果。

行为结果表明：不同数学焦虑个体在策略运用的反应时、正确率上差异均不显著；而脑电结果发现：在策略选择和策略执行阶段，高低数学焦虑个体 N1-P2 复合波和 N400 成分的波幅和潜伏期差异显著。表明数学焦虑效应在编码(0-250ms)和策略选择\执行阶段(250ms

之后）存在差异。

意见 2： 问题提出部分的逻辑性不够强，读到第 3 页还不是太清楚作者的研究问题是什么。

问题提出部分的写作思路大致总结如下：

第一段：数学焦虑很重要；第二段：数学焦虑的定义；第三段：数学焦虑影响心算和估算，且心算和估算有差异；第四段：算术认知策略的神经差异（加法、乘法心算），但估算的神经机制研究较为少见；第五段：数学焦虑影响算术表现的理论。

实际上，每一段的主题还算清楚，但需要读者自己去总结，因此建议作者对这部分的文章和逻辑关系再次进行梳理。

讨论部分也存在同样的问题，导致正文过长，将近 2 万字。

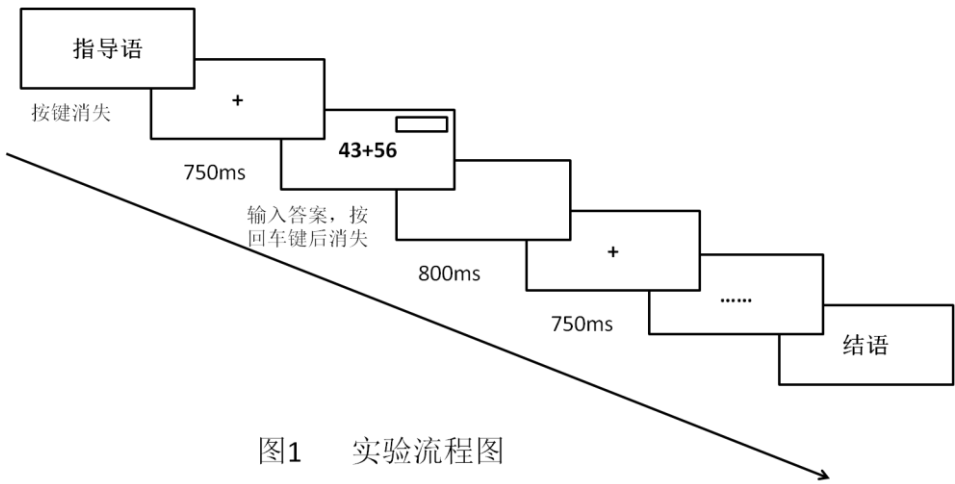
回应： 非常感谢审稿专家建议。我们在修改稿中部分调整了文章表述，并尝试将修订后的思路表述如下。

本稿件修改稿问题提出部分的写作思路大致如下：

首先，策略运用作为近年来前沿课题之一，数学焦虑是其不可或缺的重要影响因素之一。以往研究已经发现数学焦虑影响数学表现，并不断发展对其内在作用机制的理论解释。其次，随着研究的深入，研究者并不局限于数学表现结果，而开始进一步探讨数学焦虑如何影响数学过程——策略运用。前人多从算术心算的过程角度探索数学焦虑的影响，而对神经层面等方面存在差异的估算过程研究较少。最后，在神经层面，数学焦虑如何影响算术策略运用及其生理机制，前人尝试探讨心算策略运用差异，而罕见估算策略运用神经机制的探讨。因此数学焦虑对心算、估算策略运用的影响机制的研究就成为本研究旨在探讨的问题。

意见 3： 图 1 的示例“43x56”，中间应该是加号。另外，中英文标点依然需要认真校对。

回应： 非常感谢审稿专家的建议。我们已遵照建议仔细核对全文文字与图表，并进行了改正。



意见 4： 从图 4 中看不出 N400 的波幅和潜伏期（见 3.2.2 中关于 N400 的描述）

回应：非常感谢审稿专家建议。我们对此问题尝试作出回复。

图 4 脑地形图所展现的是无选下调（gsc3）的策略执行差异，由于在此条件下出现头皮区域激活差异“在下调策略中，高焦虑个体在头皮前部和中部，左脑波幅大于右脑波幅，而在头皮后部，右脑波幅大于左脑波幅；低焦虑个体只在头皮前部两半球差异显著，左脑波幅大于右脑波幅”，而 N400 潜伏期并未发现差异，因此尝试采用脑地形图展现，通过脑地形图直观看到头皮激活情况，反映出波幅差异（颜色的深浅），而不反映潜伏期。

我们意识到确实存在书面表述错误，图 4 所比较的脑地形图差异是“3.2.2（2）估算策略执行”中的 N400 差异，非常感谢指正。

依据建议，我们进一步将此进行修改，尝试呈现关注的头皮前部和头皮中部的差异，补充图4为“估算无选下调实验条件下，高和低数学焦虑个体在C3和C4，F3和F4电极点平均波幅比较及300-500ms脑地形图”。

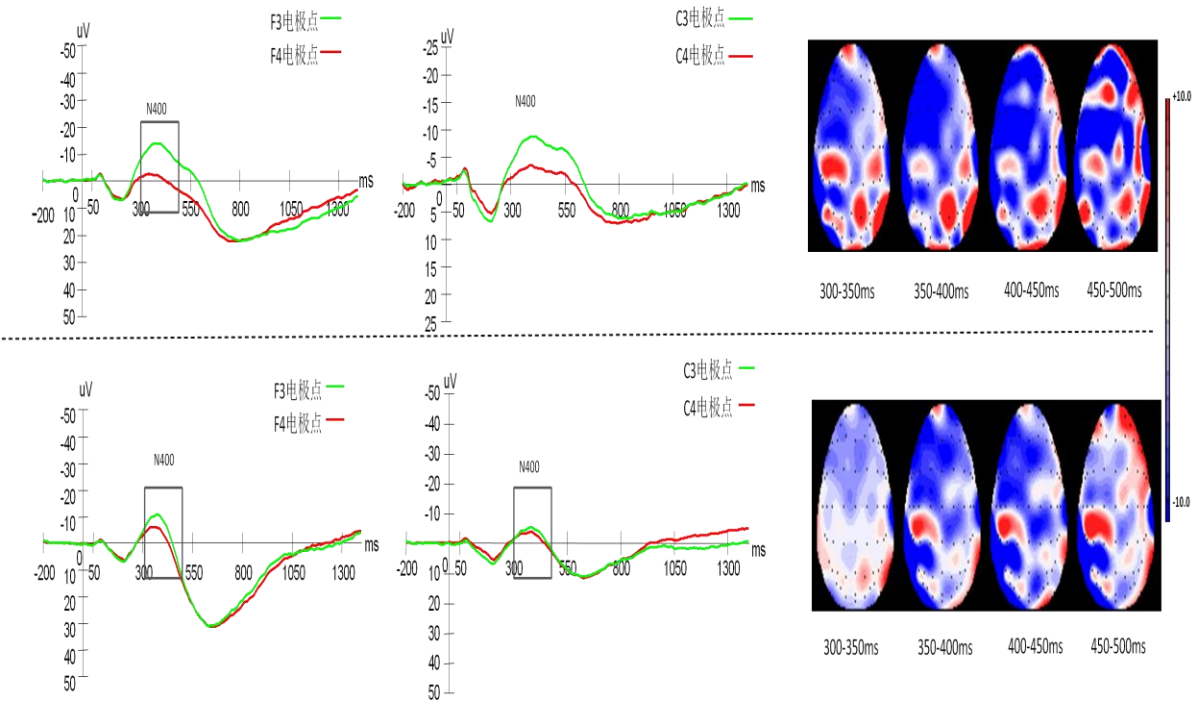


图4

（上图）估算无选下调实验条件下，高数学焦虑个体在F3和F4电极点，C3和C4电极点的平均波幅比较（脑电图）以及300-500ms的脑地形图
（下图）估算无选下调实验条件下，低数学焦虑个体在F3和F4电极点，C3和C4电极点的平均波幅比较（脑电图）以及300-500ms的脑地形图

图 4 估算无选下调条件下高、低数学焦虑个体在 F3、F4、C3、C4 电极点的
平均波幅与脑地形图

另外我们还对稿件的语言表达及文献信息进行了仔细校对。

再次感谢审稿专家提出的宝贵意见！

第三轮

意见 1: 作者对引言部分的逻辑做了一定的修改,可读性有了提高,但需要进一步凝练语言表述,明确研究假设。

回应: 感谢审稿专家建议。我们在修改稿中进一步凝练语言表述,明确研究假设。具体修改为:

首先,本研究假设一是数学焦虑影响算术认知策略,在行为层面来看数学焦虑的影响较小,从电生理层面上,数学焦虑会影响个体的策略编码(N1-P2 成分体现)和策略执行与选择(N400 成分体现)。其次,在数学认知领域中,估算与心算既有相同(编码、操作和反应),又有不同(策略、结果)。数学焦虑对二者策略运用的影响研究较为罕见。因此本研究假设二是数学焦虑对估算、心算的影响存在差异,行为层面上的差异可能不明显,脑生理层面(包括 N1-P2, N400 成分的波幅和潜伏期指标)上数学焦虑会对心算和估算策略运用会出现不同的影响。

意见 2: 策略选择的 ERP 结果报告不太准确,比如 N100 波幅和潜伏期的任务与数学焦虑交互作用均显著,但对前者没有做简单效应分析,而对 N400 波幅的简单简单效应的报告却以“主效应”的方式描述。从图 3 看,高焦虑条件和低焦虑条件下诱发的负波形态似乎有明显差异,作者如何确定低焦虑条件下诱发的也是 N400? 图 2 亦有同样的疑惑。

回应: 感谢审稿专家建议,我们对 N100, N400 波幅与潜伏期的相关问题尝试作出回复:

首先, N100 波幅的任务与数学焦虑交互作用均不显著,因此未作出进一步分析; N100 潜伏期的任务 \times 数学焦虑的交互作用显著($F(1,26)=5.973, p=0.022$)。原稿中简单效应分析:“对任务 \times 数学焦虑的交互作用进行简单效应分析发现,在心算中数学焦虑的效应边缘显著($t=1.967, p=0.060$),高焦虑个体 N100 潜伏期(89ms)比低焦虑个体(67ms)更长,而在估算中数学焦虑效应不显著。表明估算与心算的差异在编码阶段就出现了”。

其次,非常感谢审稿专家指正,我们原稿中对 N400 波幅的简单简单效应的报告的表述并不准确,我们在修改稿中将其修改为“数学焦虑效应不显著($F(1,28)=1.284, p=0.267$),前后维度效应不显著($F(1,28)=1.284, p=0.267$),左右维度效应不显著($F(2,56)=0.117, p=0.890, \epsilon=0.531$)”。

最后,关于 N400 成分的问题,图 2 在策略选择中出现,关于高低数学焦虑个体 N400 成分的确立:

首先依据以往研究,N400 是指峰潜伏期在 400ms 左右的负波,是一个 ERP 家族的总称。根据以往研究 N400 潜伏期在 300ms-600ms 之间 (Kounios, & Holcomb, 1992; Kutas, & Hillyard, 1980; Kutas, & Hillyard, 1984), Luo 等人 (2009) 采用的 N400 潜伏期在 320-500ms 之间, 本研究采用 N400 潜伏期 300-500ms 之间, 图 2 中显示的 N400 成分的潜伏期在原稿中“分析 N400 潜伏期发现, 数学焦虑主效应边缘显著 ($F(1,26)=3.585, p=0.069$), 高焦虑个体的 N400 潜伏期 (422ms) 短于低焦虑个体 (453ms)”, 高数学焦虑的 N400 潜伏期要快于低数学焦虑者, 而且二者的潜伏期时间均在 N400 成分潜伏期内; 同样图 3 中显示的 N400 成分的潜伏期在原稿中 “对 N400 的潜伏期分析发现, 数学焦虑主效应 ($F(1,28)=0.076, p=0.785$)、任务主效应 ($F(1,28)=0.019, p=0.890$) 和二者交互作用 ($F(1,28)=0.284, p=0.598$) 均不显著。在心算任务中, 高、低数学焦虑个体的 N400 潜伏期均没有任何显著差异”, 高低数学焦虑的 N400 潜伏期差异不显著, 二者的潜伏期时间均在 N400 的潜伏期内, 因此高低数学焦虑个体出现的波是 N400 成分。

其次, 高低数学焦虑个体差异明显的 N400 形态, 在于依据以往研究发现 N400 反映的可能不仅仅是信息融合难度, 而是与 WM 容量有关, 是 WM 容量大小的一个指标, 工作记忆容量越大, N400 的波幅越小 (Gunter,Jackson & Mulder ,1995; Salisbury,2004)。而且 Luo 等人 (2009) 也发现 N400 反映了非快捷策略比快捷策略导致更大的工作负荷, N400 可能反映工作记忆负荷。本研究中发现的高低数学焦虑个体 N400 波幅差异显著, 可能正反映出 N400 代表的工作记忆负荷差异, 高数学焦虑个体的工作记忆负荷显著高于低数学焦虑个体, 表明数学焦虑在此期间的影响。

Gunter T C, Jackson J L, Mulder G. (1995) . Language, memory, and aging: An electrophysiological exploration of the N400 during reading of memory - demanding sentences. *Psychophysiology*, 32(3), 215–229.

Kounios, J., & Holcomb, P. J. (1992). Structure and process in semantic memory: evidence from event-related brain potentials and reaction times. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121(4), 459.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207(4427), 203–205.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1984). Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association,*Nature* , 307,161–163.

Gunter T C, Jackson J L, Mulder G. (1995) . Language, memory, and aging: An

electrophysiological exploration of the N400 during reading of memory - demanding sentences. *Psychophysiology*, 32(3), 215–229.

意见 3：讨论中对 N1-P2 的解释也需要进一步斟酌。

回应：感谢审稿专家建议，我们进一步对 N1-P2 的解释进行斟酌，并进一步作出逻辑顺序的调整。具体修改如下：

已有研究发现 N1 作为早期视觉选择性注意的标志(Yuan, He, Lei, Yang, & Li, 2009)，可能是焦虑个体对负性刺激选择性注意偏向的指标，N1 波幅越大表明个体在知觉加工中对威胁信息投入越多的注意资源(彭家欣, 杨奇伟, 罗跃嘉, 2013)。P200 跟知觉加工中注意的卷入有关(Yuan, Zhang, Chen, Li, Wang, Zhuang, & Jia, 2007)，额区诱发的 P200 成分反映对无关信息的抑制能力或是对目标刺激注意集中能力(张林, 刘昌, 2006)。以往心算研究中(EI Yagoubi, et al., 2003; 陈亚林等, 2010)发现 N1-P2 复合波可能与刺激物理特性的外源性成分有关，处于约 200ms 的编码期 (Coles, & Rugg, 1995)，对数字的空间和图形属性处理，尚未执行运算，反映的是与视觉编码有关的皮层激活，EI Yagoubi 等 (2003) 进一步认为 250ms 前反映了视觉的编码与选择的策略，其研究并未发现心算与估算比较中 N1-P2 复合波差异。本研究中却同时发现高低数学焦虑个体在 N1-P2 复合波的数字编码阶段差异和估算、心算任务条件差异。

首先，研究中高低数学焦虑个体在策略选择和执行中 N100 波幅差异显著；心算策略选择中 N100 潜伏期 (0~150ms) 差异显著；在估算策略执行中，PO3 电极点 P200 潜伏期 (150~250ms) 差异显著，表明无论心算还是估算，高数学焦虑个体 N1-P2 波幅大于低数学焦虑个体，潜伏期更长。据此推断数学焦虑在视觉编码阶段就开始影响个体算术策略运用，个体的数字加工编码阶段就已经受到数学焦虑效应影响。这得到了 Hopko 等 (2002) 研究的支持：Hopko 等运用 Stroop 范式考察数学焦虑个体的编码特性，发现高、低数学焦虑组在刺激特性与数字刺激无关任务上未见显著差异；而在刺激特性与数字相关任务差异显著，相比低数学焦虑组，高数学焦虑组在数字卡片任务的反应时显著高于字母卡片任务 (Hopko, McNeil, Gleason, & Rabalais, 2002)。表明高数学焦虑个体对数字刺激、数字编码敏感，数学焦虑在编码阶段就已经开始影响个体的数字加工。

其次，数学焦虑对估算、心算在编码阶段的影响存在差异，在心算与估算的有选条件 (xsc1、gsc1) 及估算无选条件 (gsc2、gsc3) 中 N1-P2 复合波出现数学焦虑效应，但在心算无选条件 (xsc2、xsc3) N1-P2 复合波上未发现类似效应。这表明数学焦虑对心算与估算

在策略执行的编码阶段（0-250ms）N1-P2 复合波中出现差异。这与 He 等人发现估算与心算在刺激呈现后 150ms 的数字编码阶段出现差异（He, Luo, He, Chen, & Zhang, 2011）相一致。而数学焦虑对估算策略执行编码阶段影响更大，而 He 等发现的心算比估算诱发更大的 N170 波幅，需要更精确的数字编码（He, et al., 2011），表明数学焦虑效应没有受到精确编码的影响，可能在于精确编码所占用的特定认知资源与数学焦虑不同；还可能在于本研究估算任务作为不熟悉的任务，与精确心算相比，需要被试分配更多的认知资源，依据加工效能理论和注意控制理论等认知资源理论，数学焦虑在估算中占用的认知资源会远远高于心算，因而出现估算与心算的数学焦虑效应差异。而在策略选择中数学焦虑效应都显著，策略选择与执行的差异在于前者对被试要求相对较高，需要被试首先对数字的空间和图形属性精细编码，清楚数字间关系后方可选择策略并执行；而策略执行条件不要求选择策略，只需执行指定策略即可。相较而言，策略选择难于策略执行，需要抑制和转换两个及以上策略。从策略转换代价角度来看，当选择一个新策略时，个体必须抑制刚才的策略执行并且激活新的策略（Lemaire, 2010），这将占用额外的工作记忆资源。依据加工效能理论，个体的工作记忆系统资源有限，策略选择环节中焦虑情绪、策略抑制与转换、认知任务三者共同竞争有限的认知资源，分配给算术认知操作的工作记忆资源相应减少，从而导致策略选择环节的数学焦虑效应比策略执行环节更趋于显著。在编码阶段就出现数字加工的数学焦虑效应，其效应大小可能受到数字任务难度、熟悉度的影响。

最后在心算策略执行中，高数学焦虑个体在头皮前部、头皮中部、头皮后部的 P200 潜伏期差异不显著，而低焦虑个体的 P200 潜伏期却出现了头皮前部<头皮中部<头皮后部的差异。这表明高数学焦虑个体在解决心算策略执行问题中，其需要的脑区激活区域广泛包含了额、中央和顶枕叶，而低数学焦虑个体首先激活与算术任务解决相关的脑区顶枕叶，再适当激活中央，再到额叶。这与以往 Lyons 和 Beilock（2012）的发现相似，表明高数学焦虑者在解决数学问题中可能需要占用更多的脑区，尤其是前额顶网络皮层，耗损更多的工作记忆资源，才能达到与低数学焦虑者相似的表现结果。也有研究表明额区诱发的 P200 成分反映的是对无关信息的抑制能力或是对目标刺激注意集中能力（张林，刘昌，2006），这似乎意味着高数学焦虑个体在执行算术认知任务时缺乏灵活性，数学焦虑可能影响个体抑制功能的发挥。其次在估算策略执行中，高低焦虑个体在 PO3 电极点，P200 潜伏期差异显著，表明数学焦虑影响数学任务的相关区域顶枕叶的激活，高数学焦虑者对于数学任务的认知加工速度慢于低焦虑者，出现高数学焦虑者诱发的 N1-P2 复合波波幅更大，潜伏期延迟。可能在于在数学早期认知加工阶段，高数学焦虑个体可能由于无关信息（焦虑）的干扰付出更多

的心理资源，导致其注意过程相对延缓。这受到 Eysenck 等人（2007）注意控制理论的支持，即数学焦虑导致目标—导向注意系统和刺激—驱动注意系统的不平衡，使焦虑个体优先分配注意资源到任务无关的焦虑情绪上，使得其加工过程更多受到无关刺激影响，从而减少对当前算术认知任务的注意。然而，由于 ERP 技术的空间分辨率相对较差，因此需要运用 fMRI 技术进一步验证。

第四轮

意见 1：摘要与结论需要再仔细斟酌，表述清楚。

回应：感谢审稿专家建议。我们在修改稿中进一步将摘要与结论仔细斟酌，力图表述清晰，具体修改为：

摘要部分：

采用事件相关电位(ERP)技术和选择\无选法范式，在两位数加法心算和估算中，探索高、低数学焦虑个体的算术计算策略运用及其内在机制。行为结果：数学焦虑效应在策略运用的反应时和正确率指标上的差异都不显著；而脑电结果：高数学焦虑个体的 N400 波幅显著高于低数学焦虑个体；选择条件中，估算与心算的数学焦虑效应的 N100 波幅差异；无选条件中，高低数学焦虑个体 N1-P2 复合波的波幅和潜伏期差异显著。数学焦虑效应在策略编码（0-250ms）和策略选择\执行阶段（250ms 之后）存在差异。

结论部分：

本研究得出如下结论：

（1）行为结果未发现数学焦虑效应，ERP 结果发现数学焦虑对策略运用的影响，显示出应用 ERP 的脑生理技术考察算术策略运用过程中数学焦虑效应的高敏感性。

（2）在策略运用条件中，高低数学焦虑个体的估算、心算策略的 N1-P2 复合波存在差异，意味着在策略编码阶段（0-250ms）个体对数字的识别加工就受到数学焦虑，任务要求（估算、心算）的影响。

（3）不同数学焦虑个体在策略选择和执行阶段的 N400 成分差异显著，表明高数学焦虑个体的工作记忆负荷显著高于低焦虑者。

意见 2：引言的逻辑线索仍需要再理一理，建议结合讨论部分的逻辑线索顺一顺引言部分的

逻辑线索。

回应：非常感谢审稿专家建议。我们在修改稿中进一步结合讨论部分的逻辑线索梳理引言部分的逻辑线索，修改如下：

添加引言部分的二级标题将线索清晰规划： 1.1 数学焦虑；1.2 数学焦虑影响策略运用；1.3 算术策略运用（估算、心算）神经基础差异； 1.4 估算和心算认知策略运用的神经机制差异；1.5 问题提出。

将联系紧密的内容原稿第一段调整为修改稿第三段，归入 1.2 数学焦虑影响（心算、估算）策略运用部分，使之更清晰，并进一步凝练语言，具体如下：

策略是完成较高水平目标或任务的一个或一系列程序。在算术认知领域，从策略运用的视角可以很好地解释个体（包括成人和儿童）的算术表现差异（Lemaire, 2010）。关于策略运用特点的研究已成为近些年来认知科学和心理学探讨的前沿课题之一(如陈亚林, 刘昌, 陈杜鹃, 2010; 陈亚林, 刘昌, 张小将, 徐晓东, 沈汪兵, 2011)。研究证实算术策略运用依赖情境、个体、问题等因素（Siegler, 2007），其中数学焦虑是备受关注的重要个体差异因素之一（Imbo, & Vandierendonck, 2007）。（原稿引言第一段，修改稿引言第三段）

将 1.5 问题提出部分修订并划分，具体如下：

数学焦虑对算术认知策略的影响机制值得进一步探讨。首先，本研究假设一数学焦虑影响算术认知策略，行为层面数学焦虑的影响相对较小，电生理层面数学焦虑影响个体的策略编码（N1-P2 成分体现）和策略执行与选择（N400 成分体现）。其次，在数学认知领域中，估算与心算既有相同（编码、操作和反应），又有不同（策略、结果）。数学焦虑对二者策略运用的影响研究较为罕见。因此假设二数学焦虑对估算、心算的影响存在差异，行为层面差异可能不明显，脑生理层面（包括 N1-P2，N400 成分的波幅和潜伏期指标）数学焦虑会对心算和估算策略运用产生不同影响。

再次，前人考察心算和估算的范式可能存在缺陷。Dehaene 等(1999)探究简单算术的心算与估算的脑机制差异，在备选答案中，心算诱发范式选择正确结果（如 $3+4$ ， $6\sqrt{7}$ ）；而估算诱发范式选择与正确答案最接近数字（如 $3+4$ ， $6\sqrt{9}$ ）。该范式值得思考修订：首先，研究材料过于简单，被试可能倾向自动提取答案，导致心算和估算区分度不足；其次，心算要求“选择与算式正确答案一致的结果”（验证式任务），估算要求“选择与算式正确答案接近的结果”（产生式任务），其脑激活差异受干扰。本研究作出改进。

最后，数学焦虑作为学科焦虑，由数字及数字相关情境产生，是状态焦虑的特殊形式，而个体的特质焦虑可能产生干扰。众多研究也已证明算术技能与策略选择之间显著相关——高技能被试会比低技能被试更频繁地使用事实提取策略（Thevenot, Fanget, & Fayol, 2007; Imbo & Vandierendonck, 2007），算术技能影响个体的策略运用过程。鉴于此，本研究在排除特质焦虑和算术技能影响的基础上，拟采用选择\无选法范式和自编的两位数加法产生式任务，旨在从脑生理层面揭示数学焦虑对心算和估算不同计算任务策略运用的具体潜在影响。

意见 3：语言表述仍有加大的修改空间，稿件太长。

回应：感谢审稿专家建议，我们在修改稿中对引言与讨论部分进一步斟酌，凝练语言。讨论部分段落作出微调，并增加二级标题 4.1 行为和生理层面的数学焦虑效应，具体如下：

本研究从行为和脑生理层面深入考察了数学焦虑在成人心算和估算策略运用（策略选择与策略执行等）中的差异，发现在估算或心算的行为指标上（反应时、正确率）未发现显著的数学焦虑效应，这与孙燕等人（2011）所获得的发现相一致。在生理指标上却发现显著的数学焦虑效应，数学焦虑影响个体的编码、策略选择\执行阶段：高焦虑个体对数字的编码相对延缓（高焦虑个体的 N1-P2 潜伏期更晚），工作记忆负荷相对更高（高焦虑个体 N400 波幅更大）等。本研究中行为层面和神经生理层面的结果看似矛盾，却很有启发意义。（原稿讨论第一段，修改稿讨论第一段）

4.1 行为和生理层面的数学焦虑效应

大量行为研究证实数学焦虑影响数学表现（Ganley & Vasilyeva, 2011; Ramirez & Beilock, 2011; Wood, 2006）。但值得注意的是，是否出现数学焦虑效应与数学任务难度有关。例如，Ashcraft 和 Faust（1994）指出数学焦虑存在复杂性效应：某些任务中，高低数学焦虑个体表现无差异，但随着任务情境变得复杂或困难，数学焦虑效应逐渐明显，高低数学焦虑个体表现差异显著；也有研究发现，限时情境中，数学焦虑损害个体数学表现；非限时情境却没有出现数学焦虑效应；在进位加法任务中，数学焦虑导致个体的数学成绩下降，但不影响简单一位数加法任务的成绩（Faust, Ashcraft, & Fleck, 1996）。总之，行为层面的研究表明，数学焦虑效应受任务难度影响，简单任务一般不会出现显著数学焦虑效应，只有任务难度达到一定程度，才会出现显著的数学焦虑效应。（原稿讨论第一段，修改稿讨论第二段）

近年来，研究者指出，数学焦虑与数学表现之间的关系复杂（Witt, 2012），数学焦虑可能占用特殊的神经资源，行为测量只提供内在加工的非直接证据（Suárez-Pellicionia,

Núñez-Peña, & Colomé, 2013)。在生理指标上,研究者曾发现当数学焦虑个体面对难度增加的数学题时心率加快,而在面对非数学相关问题时没有出现该现象(Ashcraft, 1995)。而且 Lyons 和 Beilock (2012)发现数学问题的预知性也会影响数学表现:当预先知道面对的是数学问题时,高数学焦虑者的额顶网络区域(控制负性情绪)的激活更大,事实上这一区域的激活成功预测了高数学焦虑个体的数学表现;在参与数学题前,高数学焦虑个体的前额顶网络皮层激活越多,其表现越好。其解释为高数学焦虑个体或许在开始数学任务前,在某种程度上重新评估(或者是重组),而且这种重新评估帮助他们控制数学焦虑并最终在数学测验中展现其潜在表现。(原稿讨论第二段,修改稿讨论第三段)

本研究发现个体在计算两位数加法任务时,在行为层面上未出现明显的数学焦虑效应,而在生理层面上却发现显著的数学焦虑效应。看似矛盾的结果或许恰恰表明,数学焦虑产生额外认知负荷,行为测量只能作为个体内在加工的非直接证据,而生理测量才是考察个体内在加工的较为有效的手段。ERPs 或 fMRI 技术中的脑激活的神经生理证据已被视为加工效能的有效测量工具,反应时和准确率等外在指标被视为表现结果的测量指标(Suárez-Pellicionia, et al., 2013)。本研究中外在表现结果的行为指标(反应时和正确率)没有差异,而内在加工效能(ERP 波幅和潜伏期)出现差异。这一矛盾证实了焦虑的加工效能理论(Eysenck & Calvo, 1992)及在其基础上扩展的注意控制理论(Eysenck et al., 2007)。本研究正如加工效能理论,数学焦虑优先占用耗损对数学加工有用的工作记忆资源,出现个体内在加工的 N1-P2、N400 的潜伏期或波幅差异,然而此种资源的占用却不足以影响到外在的正确率或反应时的表现,可能在于两位数加法任务对于本研究成人被试而言较为简单,高数学焦虑者可以通过增加内在努力和使用辅助的加工资源(如努力延长编码的时间、增大注意力程度等)补偿,或者高数学焦虑个体在任务前,在某种程度上重新评估/重组控制数学焦虑。关于数学焦虑通过占据工作记忆资源,进而影响个体的认知表现,已经得到国内外很多研究的证实(如 Owens et al., 2008; 崔吉芳等, 2011)。本研究进一步证实数学焦虑与外在表现关系复杂,会造成内在的资源的损耗,表明数学焦虑对个体内在的努力与认知资源的影响要大于对个体外在表现的影响(如 Eysenck et al., 2007; Derakshan & Eysenck, 2009),也表明内在神经层面对数学焦虑的辨识度相对于外在表现更加精确,支持数学焦虑可能占用特殊的神经资源。根据注意控制理论,数学焦虑减少了自上而下的目标导向的注意系统,增加了自下而上的刺激驱动的注意系统的控制。这种不平衡直接导致抑制与转换功能中的消极影响(Suárez-Pellicionia, et al., 2013),而且这也得到了大量研究的支持(如 Ansari, Derakshan, & Richards, 2008; Derakshan, Smyth, & Eysenck, 2009)。本研究也表明数学焦虑的影响途径之一

是通过工作记忆影响数学表现，数学焦虑可能占用特殊的神经资源，行为测量只提供内在加工的非直接证据。神经层面的数学焦虑效应，也正说明了采用高时间分辨率的 ERP 指标反映个体认知活动的内在加工过程的有效性，表明结合电生理技术探究数学焦虑内在影响机制的可行性。（原稿讨论第三段，修改稿讨论第四段）

另外，我们还进一步核对了文献引用，将与本研究联系相对不够紧密，作用较小的文献适当去除。

第五轮

意见 1：作者已经就文章的文字部分进行了比较细致的修改，但作图的质量较差，请修改文中所有图。因学报最后发表的图是黑白图，所以请作者按《心理学报》2013 年第 45 卷第 7 期作者为胡哲的论文进行修改，否则将影响发表。

回应：感谢审稿专家建议。我们在修改稿中进一步细致化图形信息，力图清晰准确。具体修改如下：

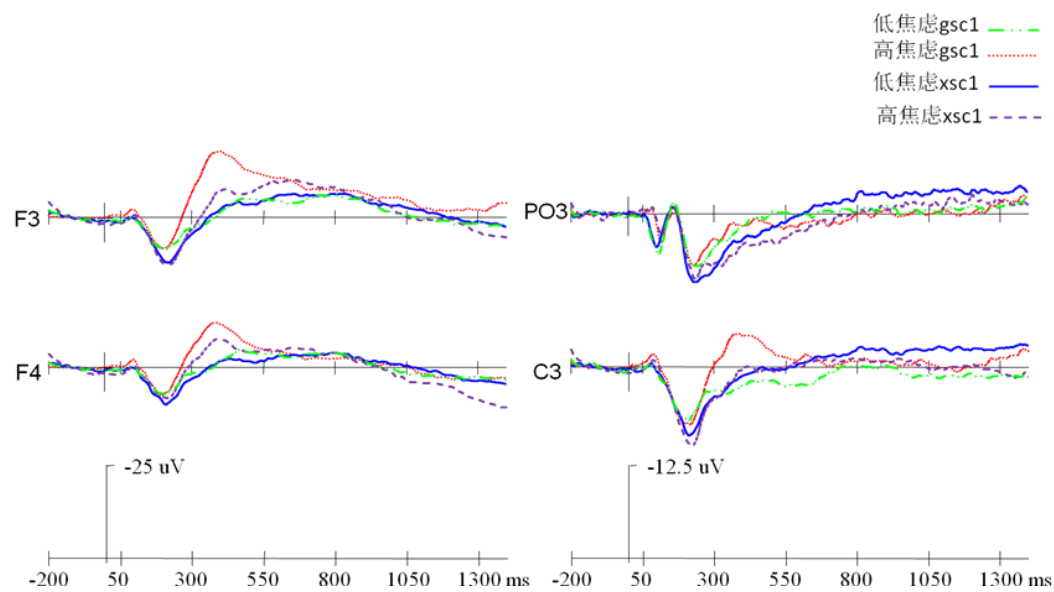


图 2 有选实验条件下，高、低数学焦虑个体在 F3、F4、P03、C3 电极点的平均波形比较

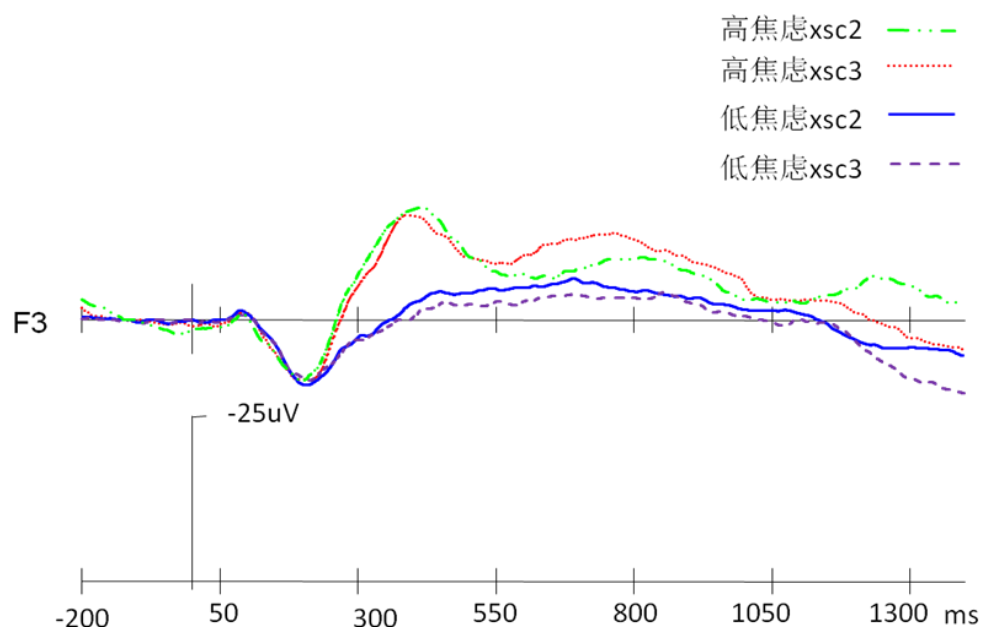


图 3 心算无选实验条件下，高、低数学焦虑个体在 F3 电极点位置的平均波形比较

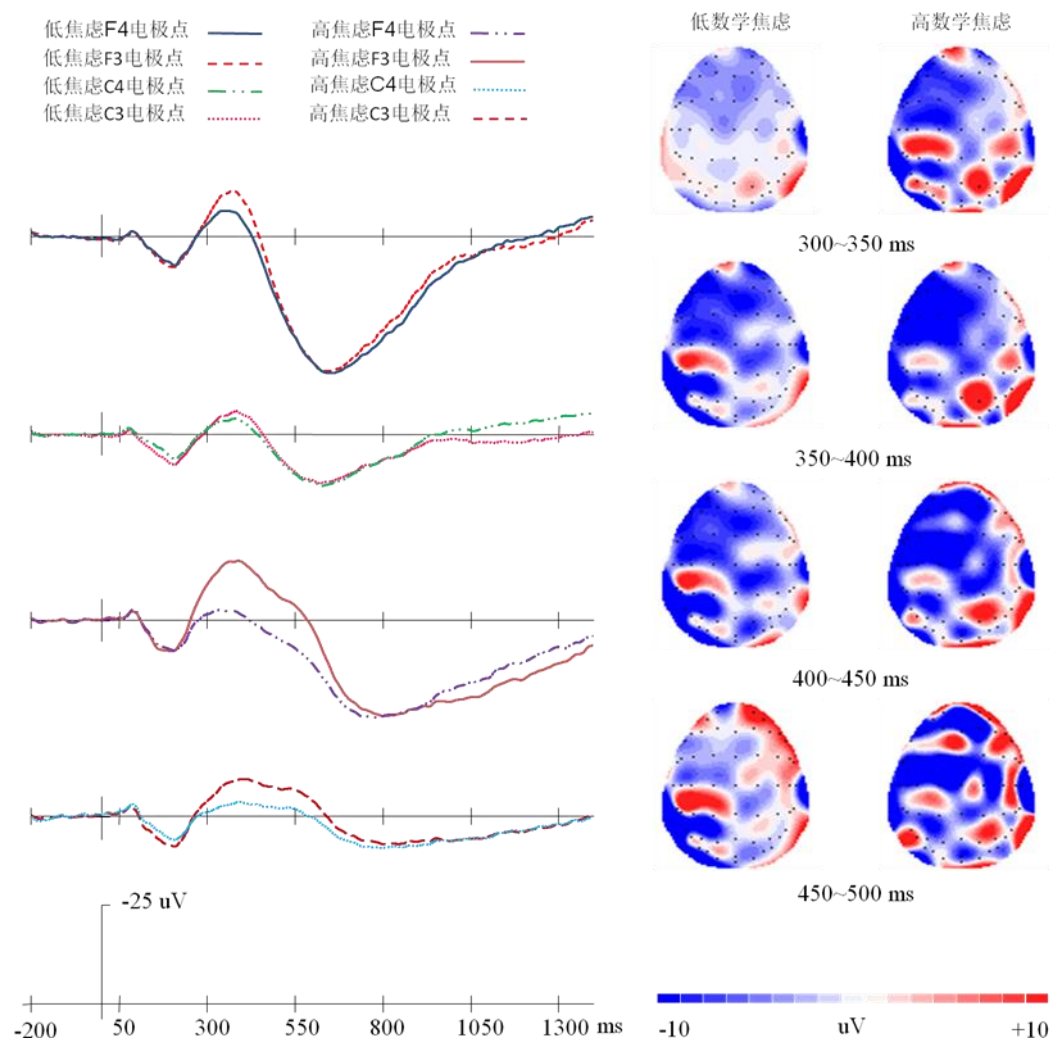


图 4 估算无选下调条件下高、低数学焦虑个体在 F3、F4、C3、C4 电极点的平均波幅与脑地形图

第六轮

意见 1：图 2 为什么实用不同的坐标：25 vs 12.5？

回应：感谢编委的问题。图 2 采用不同坐标原因在于：F3、F4 处于头皮前部激活程度较大，而且各条件脑激活差异较大，选用 12.5 μV 会出现脑电波的波峰无法完整呈现，采用 25 μV 可以将其最大程度清晰完整呈现；而 PO3、C3 相对于头皮前部的激活程度及其差异都较小，在 25 μV 下呈现，不同条件的脑激活差异很难清晰表现，而采用 12.5 μV 可将其清晰呈现。因此为了更加清晰完整呈现有选实验条件下，高、低数学焦虑个体在 F3、F4、PO3、C3 电

极点的平均波形比较，F3，F4 电极点采用 25 μ V，PO3，C3 电极点采用 12.5 μ V 呈现。

意见 2：所有图的电压标示字母有问题，应该是西文

回应：感谢编委建议。我们在修改稿中修改了电压标示字母。

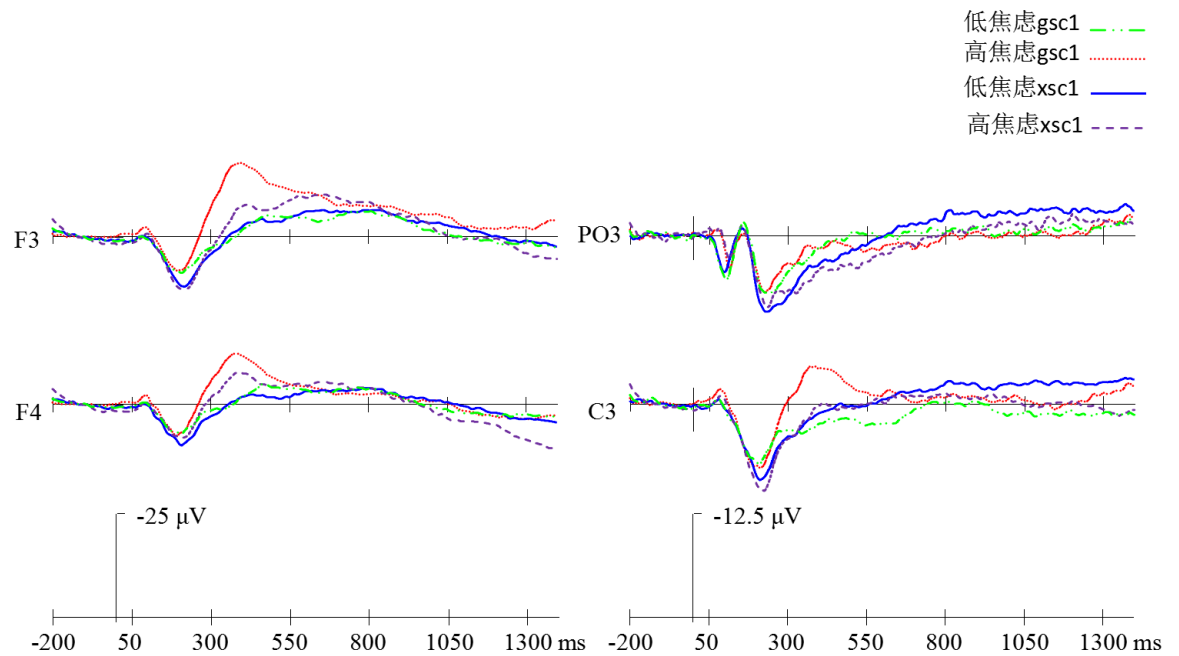


图 2 有选实验条件下，高、低数学焦虑个体在 F3、F4、PO3、C3 电极点的平均波形比较

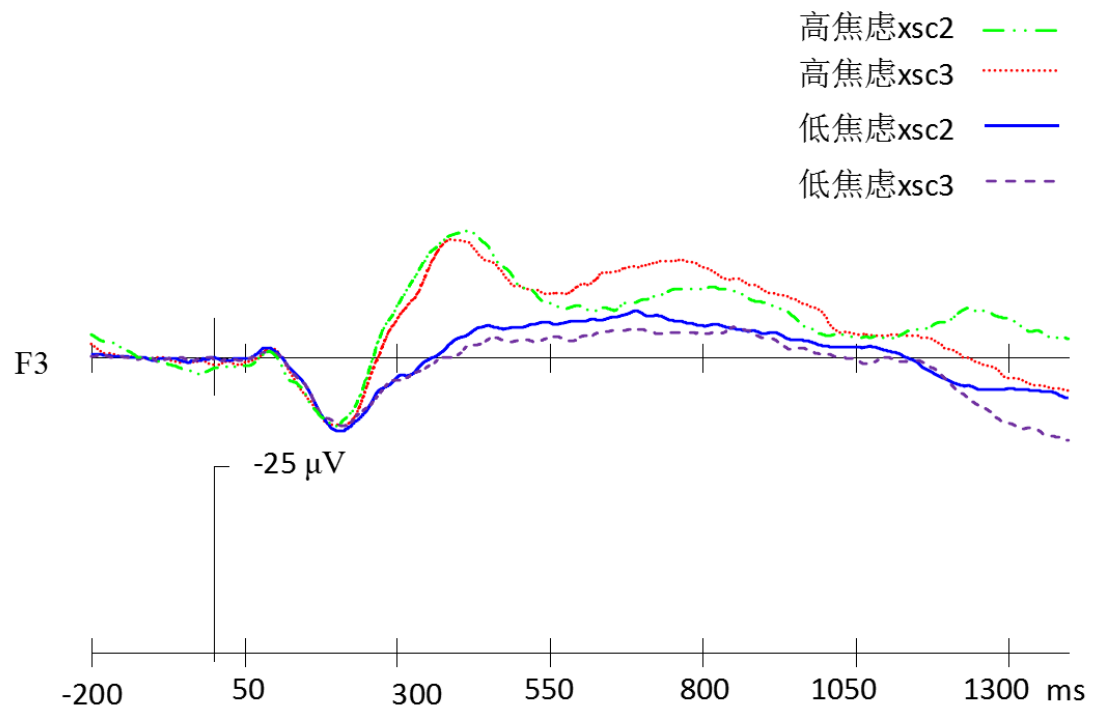


图 3 心算无选实验条件下，高、低数学焦虑个体在 F3 电极点位置的平均波形比较

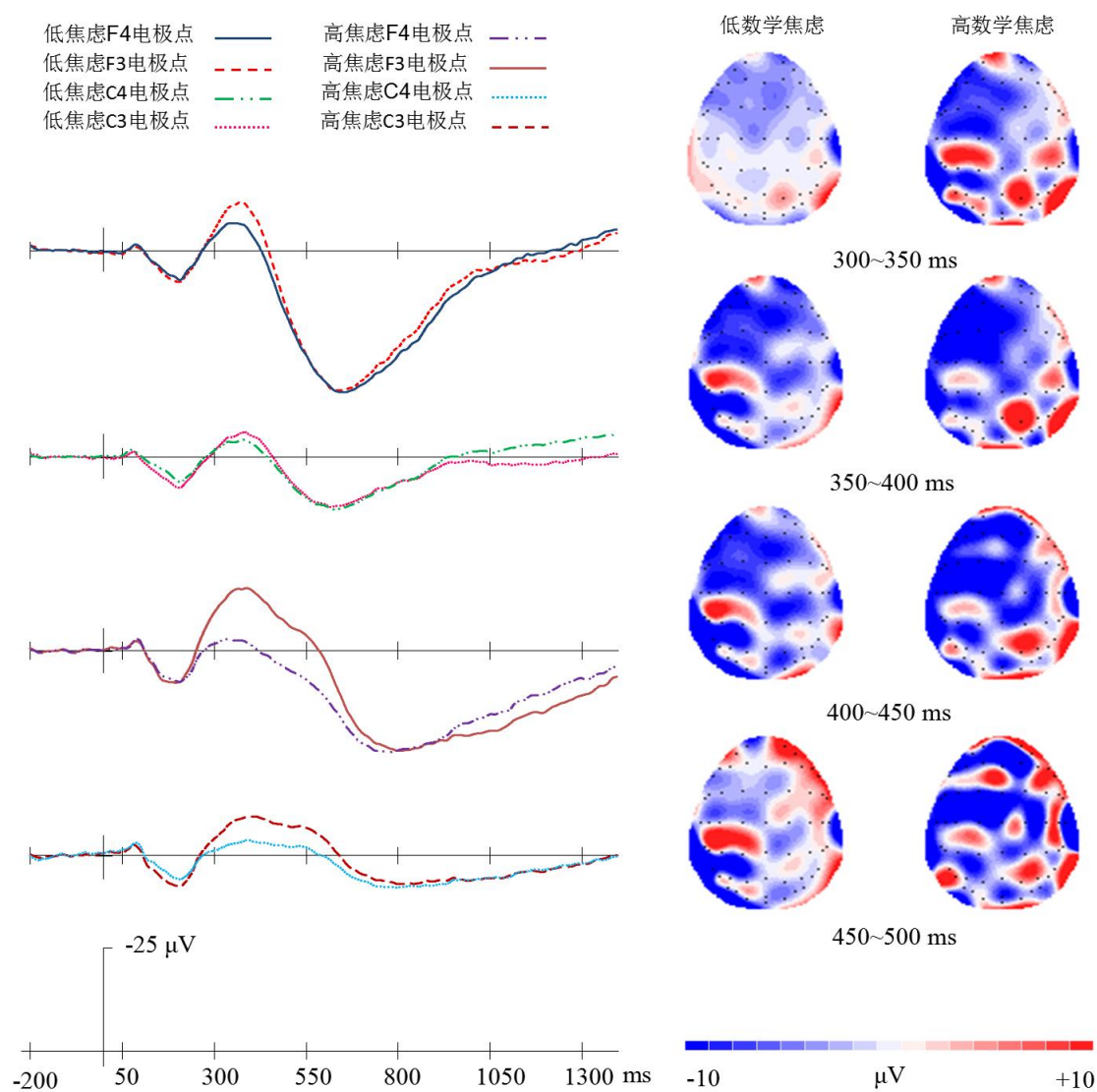


图 4 估算无选下调条件下高、低数学焦虑个体在 F3、F4、C3、C4 电极点的平均波幅与脑地形