

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：大小判断任务中正负号及其异同对 SNARC 效应的影响

作者：韩萌 毛新瑞 蔡梦彤 贾茜 郭春彦

第一轮

审稿人 1 意见：文章有一定的创新性，不过在写作方面和数据分析方面需要改进。建议如下：

意见 1：没有说明什么是一致反应方式和不一致反应方式；

回应：非常感谢审稿专家的提醒。

由于作者的疏忽，我们仅在实验设计部分零散介绍了这两种反应方式，这样做会使读者产生疑惑。作为文章中的重要概念，“一致反应方式与不一致反应方式”确实需要在醒目位置着重叙述。因此，根据审稿专家的建议，我们在引言部分补充说明了一致反应方式与不一致反应方式（详见引言第一段蓝色字体部分，第 3 页第 8-12 行）并删除了实验设计部分的相关叙述，补充内容如下：

根据数字在心理数字线上的空间位置与反应键的空间位置的对应关系，可以区分一致反应方式与不一致反应方式：一致反应方式即反应键的空间位置与数字在心理数字线上的表征位置一致，左键对应小数、右键对应大数；不一致反应方式即反应键的空间位置与数字在心理数字线上的表征位置相反，左键对应大数、右键对应小数。SNARC 效应则表现为一致反应方式快于不一致反应方式。

意见 2：为何-5、同号的条件下没有一致性效应？这一结果与其它条件下结果的冲突是否说明负数表征的特殊性；

回应：非常感谢审稿专家的建议。

本研究一共区分了四种比较条件：+5、同号条件，-5、同号条件，+5、异号条件以及-5、异号条件。从行为结果看，确实只有+5、同号条件表现出了稳固的 SNARC 效应，而-5、同号条件以及两种异号条件并没有表现出 SNARC 效应。从脑电结果看，无论+5、同号条件还是-5、同号条件均表现出 SNARC 效应，具体表现为在 400-600ms 的时间窗口，不一致比一致反应更负且均诱发了 P3b 成分。首先解释行为结果与脑电结果的差异。ERP 技术具有很高的时间分辨率，能监测 SNARC 效应的各个加工阶段，因此能够比行为结果提供更加深层次的信息。所以，我们认为-5、同号条件是存在 SNARC 效应的。其次解释行为结果中-5、同号条件没有表现出 SNARC 效应的原因，这也就是负数表征的特殊性所在。相比于正数，

负数的表征并不稳定。Ganor-Stern 和 Tzelgov (2008) 的研究认为, 虽然正数被知觉为大数, 但负数并不被知觉为小数。负数的负号和绝对值是分开存储的, 负号在自动加工中代表了小数, 但是绝对值部分却代表了一个更大的数。因此, 两种成分的效应会相互干扰。Krajcsi 和 Igács (2010) 的结果也表明, 负数的大小表征并不稳定 (符号 VS 绝对值)。因此, 负数的 SNARC 效应难以在行为结果中表现出来。

根据审稿专家的建议, 我们在讨论 4.2 补充了相关叙述以说明-5、同号条件下没有出现 SNARC 效应的原因 (详见第 16 页 4.2 部分第 2-6 行), 具体内容如下:

本研究的实验结果表明, 一致反应与不一致反应在该条件下并无显著差异。这是因为较之于正数, 负数的表征并不稳定。正数被知觉为大数, 但负数并不被知觉为小数。负数的负号和绝对值分开存储, 负号在自动加工中代表了小数, 但是绝对值部分却代表了一个更大的数。因此, 两种成分的效应会相互干扰, 使得负数的 SNARC 效应难以在行为结果中表现出来 (Ganor-Stern & Tzelgov, 2008; Krajcsi & Igács, 2010)。

参考文献:

- Ganor-Stern, D., & Tzelgov, J. (2008). Negative numbers are generated in the mind. *Experimental Psychology*, 55(3), 157–63.
- Krajcsi, A., & Igács, J. (2010). Processing negative numbers by transforming negatives to positive range and by sign shortcut. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22, 1021–1038.

意见 3: 为何需要单独收集另外 13 人的行为数据? 目前似乎将这独立的 13 人的数据与 ERP 实验中的数据进行了合并分析。

回应: 非常感谢审稿专家的建议。

在行为数据的分析中, 我们确实将单独 13 人的行为数据与 ERP 实验中的行为数据进行了合并分析。原因如下:

对于 ERP 实验中的 16 名被试, 我们分别以反应时和正确率为因变量, 对 ERP 实验所得的行为数据进行了 2(基线数字: +5、-5)×2(正负号异同性: 目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号)×2(反应方式: 一致反应方式、不一致反应方式)的重复测量方差分析。结果表明, 在反应时上, 基线数字、正负号异同性以及反应方式的三重交互作用并不显著 [$F(1, 15)=2.53, p=0.13, \eta^2_p=0.15$]。计划性比较表明, 当基线数字与目标数字同号时, 基线数字与反应方式的交互具有显著趋势 [$F(1, 15)=3.34, p=0.087, \eta^2_p=0.18$]; 当基线数字与目标数字异号时, 基线数字与反应方式的交互作用不显著 [$F(1, 15)=0.004, p=0.95, \eta^2_p=0.000$]。这表明基线数字与目标数字同号或异号时, 基线数字与反应方式具有不同的交互趋势。在正确率上, 这三因素的交互作用不显著 [$F(1, 15)=0.01, p=0.92, \eta^2_p=0.001$]。

对于这 16 名被试的脑电结果，我们分别在 200-400ms、400-600ms 和 600-800ms 的时间窗口内，进行 4(头皮位置：左额叶、右额叶、左顶叶、右顶叶) \times 2(基线数字：+5、-5) \times 2(正负号的异同性：目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号) \times 2(反应方式：一致反应方式、不一致反应方式)的四因素重复测量方差分析。结果表明，在 200-400ms 时间窗口，头皮位置、基线数字、正负号异同性以及反应方式的交互作用显著 $[F(3, 45)=8.00, p<0.001, \eta^2_p=0.35]$ ；在 400-600ms 时间窗口，头皮位置、基线数字、正负号异同性以及反应方式存在显著的交互作用 $[F(3, 45)=19.50, p<0.01, \eta^2_p=0.57]$ ；在 600-800ms 时间窗口，头皮位置、基线数字、正负号异同性以及反应方式的交互作用显著 $[F(3, 15)=7.93, p<0.001, \eta^2_p=0.35]$ 。这些结果表明，在 200-400ms、400-600ms 以及 600-800ms 这三个时间窗口内，头皮位置、基线数字、正负号异同性与反应方式存在显著的交互作用。

脑电结果上，头皮位置、基线数字、正负号异同性与反应方式存在显著的交互作用；行为结果上，基线数字、正负号异同性与反应方式存在交互趋势。我们推测，行为结果较不稳定，受环境、被试等因素影响较大，因此需要更多数据以得到较为稳定的结果。因此，我们又单独招募了 13 人进行行为实验。加入 13 人后，我们对共计 29 名被试的反应时与正确率分别进行了 2(基线数字：+5、-5) \times 2(正负号异同性：目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号) \times 2(反应方式：一致反应方式、不一致反应方式)的重复测量方差分析。结果发现，在反应时上，三因素交互作用显著 $[F(1, 28)=7.46, p<0.01, \eta^2_p=0.21]$ ；在正确率上，三因素的交互仍不显著 $[F(1, 28)=0.10, p=0.75, \eta^2_p=0.004]$ 。该结果与我们的预期一致，即在反应时上，被试数量的增加使得行为结果更加稳定，三重交互在统计水平上达到显著。这一结果也与脑电结果一致，具有较高的可信度。

意见 4：采用比较任务，很难说明数字心理空间表征的特征，因为对大小的表征也存在空间特征；

回应：非常感谢审稿专家的建议。

先前研究大多采用两类任务来探究SNARC效应，一类任务中数字大小和目标任务无关，比如奇偶判断任务（Nuerk, Iversen, & Willmes, 2004）、数字对分任务（Rotondaro, Merola, Aiello, Pinto, & Doricchi, 2015）、数字Stroop任务（Nuerk, Bauer & Krummenacher, 2005）；另一类任务中数字大小与目标任务相关，需要被试根据数字大小做出判断，比如要求被试判断同时呈现在屏幕两侧的两个数字的大小（Shaki & Petrusic, 2005），判断目标数字相对于基线数字的大小（高在峰 et al., 2009）。这两类任务各有利弊。在第一类任务中，以奇偶判

断任务为例，被试只需根据数字的奇偶性进行判断，数字大小只是一种无关信息，因此被试无法意识到数字大小和反应手的关系，从而便于考察数字的空间表征的自动化程度。但是，当考察负数的空间表征时，奇偶判断任务并不适用。由于奇偶判断与数字正负无关，因此被试会忽略数字正负而直接判断奇偶性(Nuerk et al., 2004)，这样得到的实际是正数而非负数的空间表征。此时，第二类任务的优势就显现了出来。在大小判断任务中，大小判断需要以数字正负为依据，被试无法忽略正负号，因此可以确保得到的是负数的空间表征。同时，修正后的大小判断任务（目标数字与基线数字进行比较）也可以克服普通大小判断任务（比较同时呈现于屏幕两侧的两个数字的大小）中数字呈现的空间位置和语义一致性效应对数字空间表征的影响，结果更加准确可靠。因此，如若探究负数的空间表征，大小判断任务更合适。

大量研究者运用大小判断任务来探究数字的空间表征，取得了丰硕成果（高在峰 et al., 2009; Gut, Szumska, Wasilewska, & Jaśkowski, 2012; Hoffmann, Hornung, Martin, & Schiltz, 2013; Krajcsi & Igács, 2010），也说明了大小判断任务的适用性。

鉴于先前研究普遍证实大小判断任务适用于探究数字的空间表征，以及本研究着重探究正负号及其异同对SNARC效应的影响，必须保证被试意识到正负号差异，因此，大小判断任务是最合适的选择。

参考文献：

- Gao, Z. F., Shui, R. D., Chen, J., Chen, W., Tian, Y., & Shen, M. W. (2009). The mechanism of negative numbers' spatial representation. *Acta Psychologica Sinica*, 41, 95–102. [高在峰, 水仁德, 陈晶, 陈雯, 田瑛, & 沈模卫. (2009). 负数的空间表征机制. *心理学报*, 41, 95–102.]
- Gut, M., Szumska, I., Wasilewska, M., & Jaśkowski, P. (2012). Are low and high number magnitudes processed differently while resolving the conflict evoked by the SNARC effect? *International Journal of Psychophysiology Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 85, 7–16.
- Hoffmann, D., Hornung, C., Martin, R., & Schiltz, C. (2013). Developing number–space associations: SNARC effects using a color discrimination task in 5–year–olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116, 775–791.
- Krajcsi, A., & Igács, J. (2010). Processing negative numbers by transforming negatives to positive range and by sign shortcut. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22, 1021–1038.
- Nuerk, H. C., Bauer, F., Krummenacher, J., Heller, D., & Willmes, K. (2005). The power of the mental number line: how the magnitude of unattended numbers affects performance in an eriksen task. *Psychology Science*, 47(1), 34–50.
- Nuerk, H. C., Iversen, W., & Willmes, K. (2004). Notational modulation of the SNARC and the MARC (linguistic markedness of response codes) effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 57, 835–863.
- Rotondaro, F., Merola, S., Aiello, M., Pinto, M., & Doricchi, F. (2015). Dissociation between line bisection and mental–number–line bisection in healthy adults. *Neuropsychologia*, 75, 565–576.
- Shaki, S., & Petrusic, W. M. (2005). On the mental representation of negative numbers: context–dependent SNARC effects with comparative judgments. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 931–937.

意见 5：ERP 数据分析比较零散、琐碎，缺乏在一定假设引导下的数据分析；

回应：非常感谢审稿专家的提醒。

本研究假设主要从三个方面出发：负数的表征机制、SNARC 效应的发生时间、SNARC 效应的皮层定位。对于 SNARC 效应的发生时间，先前研究存在刺激呈现阶段与反应选择阶段的争论，本研究选取了三种 ERP 成分分别代表刺激呈现阶段、反应选择阶段以及反应执行阶段。对于 SNARC 效应的皮层定位，先前研究认为 SNARC 效应主要激活额叶与顶叶皮层，因此本研究重点关注这两个位置。同时，为了探究正负号及其异同是否会影响 SNARC 效应的半球分布，本研究在选取电极位置时对左右半球进行了区分。因此，我们选取了左额叶皮层 (F3、FC3)、右额叶皮层 (F4、FC4)、左顶叶皮层 (P3、PO5)、右顶叶皮层 (P4、PO6) 四个区域的电极。此外，为了深入探究 SNARC 效应的皮层位置，我们又进行了溯源分析以及地形图比较。这是我们分析 ERP 数据时的基本思路。

对于 ERP 数据分析时存在零散、琐碎的问题，我们做了相应修改，具体内容如下：

- (1) 补充报告了 F 值、条件间的比较以及效应量，结果表达更加规范。
- (2) 报告了溯源分析结果的残差值，结果更加可靠。
- (3) 对于 P3b 成分，找到了其分布在额区的证据并将其与自动抑制相结合。

意见 6：如果结合理论假设，脑电源分析的结果很难有说服力；作者认为首次在大小判断任务中发现 SNARC 效应存在左右半球分离，这难以成立；

回应：非常感谢审稿专家的建议。

(1) 先前研究表明溯源分析能得到相对准确的颅内源定位(Guo, Duan, Li, & Paller, 2006; Guo, Lawson, & Jiang, 2007; Pascual-Marqui, 2002)，因此，利用溯源分析来探究 SNARC 效应的皮层位置具有可行性。

本研究假设 (3) 预测，SNARC 效应的出现会激活额叶与顶叶皮层，并且左右半球在数字空间关系中发挥不同作用，均表现出激活优势。溯源分析结果表明，当目标数字为正数时，SNARC 效应主要定位于右侧额中回和顶下小叶；当目标数字为负数时，SNARC 效应主要定位于左侧额上回。这些结果表明，SNARC 效应主要激活了额叶与顶叶皮层，同时数字正负号及其异同会使得 SNARC 效应出现左右半球的分离。这一结果印证了研究假设，也与先前脑成像结果基本一致 (Cattaneo, Silvanto, Pascual-Leone, & Battelli, 2009; Dormal, Dormal, Joassin, & Pesenti, 2012; Rusconi, Buetti, Walsh, & Butterworth, 2011)，加之地形图以及地形图分析结果的佐证，具有一定的说服力。

(2) 针对数字空间关联的皮层位置，研究者已进行了大量探索并取得了丰硕成果，但

是对于数字空间关联中出现的左右半球分离现象仍然存在争论,一些研究者认为左半球在数字加工中发挥更大作用(Dehaene, 1996),一些研究者认为数字空间关系中存在明显的右半球优势(Dormal, Dormal, Joassin, & Pesenti, 2012; Gut, Szumska, Wasilewska, & Jaśkowski, 2012)。由于这些研究所采用的数字任务不同,所以这种半球优势的差异可能表明不同数字任务具有不同的优势半球。在本研究中,我们创新性地以数字正负号及其异同为切入点,以-9到+9(排除-5、0、+5)的数字为刺激材料,采用修正后的大小判断任务,重点考察正负号及其异同对SNARC效应的皮层位置的影响。结果表明,在这一任务中,正负号差异使得SNARC效应的半球分布有所不同,目标数字为负数时激活左半球,目标数字为正数时激活右半球。这一结果具有较强的创新性。但原稿中将这一发现叙述为“首次”确实过于绝对,因此我们修改了对这一结果的叙述(详见自检报告问题1),修改内容如下:

本研究证实了额叶与顶叶皮层是SNARC效应的关键位置,同时创新性地发现在大小判断任务中,正负号及其异同会使SNARC效应产生左右半球分离。

参考文献:

- Cattaneo, Z., Silvanto, J., Pascual-Leone, A., & Battelli, L. (2009). The role of the angular gyrus in the modulation of visuospatial attention by the mental number line. *Neuroimage*, *44*, 563–568.
- Dehaene, S. (1996). Cerebral networks for number processing: evidence from a case of posterior callosal lesion. *Neurocase*, *2*, 155–174.
- Dormal, V., Dormal, G., Joassin, F., & Pesenti, M. (2012). A common right fronto-parietal network for numerosity and duration processing: an fMRI study. *Human Brain Mapping*, *33*, 1490–1501.
- Guo, C., Duan, L., Li, W., & Paller, K. A. (2006). Distinguishing source memory and item memory: brain potentials at encoding and retrieval. *Brain Research*, *1118*, 142–154.
- Guo, C., Lawson, A. L., & Jiang, Y. (2007). Distinct neural mechanisms for repetition effects of visual objects. *Neuroscience*, *149*, 747–759.
- Gut, M., Szumska, I., Wasilewska, M., & Jaśkowski, P. (2012). Are low and high number magnitudes processed differently while resolving the conflict evoked by the SNARC effect? *International Journal of Psychophysiology Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, *85*, 7–16.
- Pascual-Marqui, R. D. (2002). Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sloreta): technical details. *Methods & Findings in Experimental & Clinical Pharmacology*, *24 Suppl D(Suppl D)*, 5-12.
- Rusconi, E., Bueti, D., Walsh, V., & Butterworth, B. (2011). Contribution of frontal cortex to the spatial representation of number. *Cortex*, *47*, 2–13.

审稿人2意见:稿件《大小判断任务中正负号及其异同对SNARC效应的影响》采用ERP技术,采用大小判断任务,控制了基线数字、正负号异同性和按键反应方式三个因素,考察正负号及其异同对SNARC效应的影响。结果支持了负数空间表征的个体发展论假说,表明符号捷径机制会改变SNARC效应的发生时间,也证明了负数与正数的空间表征具有不同的优势半球。实验方法正确,实验结果较为可靠,具有一定的理论意义和价值。但研究的价值

和创新性存在较大的问题,在论文写作上也有很多不规范的地方,更重要的结果分析部分(时间窗口的选择)还需要进一步论证。因此尚不能达到《心理学报》的发表要求,需要进行较大的修改。具体意见如下:

意见 1: 个体发展论假说和系统进化论假说都认为负数是后天习得的,为什么会有不同的心理数字线的假设?两种理论在引言并没有介绍清楚。

回应: 非常感谢审稿专家的提醒。

个体发展论假说与系统进化论假说都认为负数是后天习得的,这一点是确定的。之所以在这一基础上形成了两种不同的心理数字线假设,是因为这两种假设的出发点不同。

个体发展论假说从SNARC效应也是后天形成的这一事实出发,认为既然负数与SNARC效应都是后天形成的,那么负数就可以在心理数字线上独立表征,而不需要以正数的表征作为中介。负数包括数量与符号两部分,因此,负数在心理数字线上的表征也依赖数量与符号。正数表征在心理数字线右侧,负数表征在左侧;实际值较小的负数(如-9、-8)表征在实际值较大的负数(如-2、-1)的左侧。系统进化论假说从正数来自遗传与进化这一角度出发,进而认为后天习得的负数在进行表征时必须依赖先天习得的正数。负号并不会对负数在心理数字线上的表征产生影响,负数在心理数字线上仅表征数量。因此,负数依据绝对值进行表征,绝对值较小的负数(如-1、-2)表征在绝对值较大的负数(如-8、-9)的左侧。

作者在引言部分对两种理论的介绍确实容易使读者产生误解。根据审稿专家的建议,在引言部分第二段(详见第4页17-22行、26-29行,蓝色字体部分),我们对两种理论进行了进一步的解释说明,重点补充说明了两种理论的相同点与不同点,使得两种理论更易区分。具体内容如下:

个体发展论假说与系统进化论假说都认为负数是后天习得的,但是两者却从不同角度预测了负数在心理数字线上的表征。个体发展论假说从SNARC效应与负数的起源相似性出发,认为既然负数与SNARC效应都是后天形成的(Göbel, Shaki, & Fischer, 2011; Shaki, Petrusic, & Lethsteensen, 2012; Yang et al., 2014),那么负数就能够在心理数字线上独立表征而不需要正数作为中介。负数包括数量与负号,负数在心理数字线上的表征同样依赖数量与负号。

系统进化论假说从正数与负数的不同起源出发,认为既然负数是后天习得,而正数的认知来自遗传和进化(Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; Fischer, 2003),那么负数就无法独立表征而必须依赖先天习得的正数。虽然负数包括数量与负号,但是负号并不会对负数在心理数字线上的表征产生影响,负数在心理数字线上仅表征数量。

意见 2: 根据面前的综述, SNARC 效应发生的时间(反应选择阶段)和脑区(额叶、顶叶)很明确, 为何“先前研究较少探究 SNARC 效应的发生时间及相关脑区, 少数结果也仍存在争论。”?

回应: 非常感谢审稿专家的提醒。正如审稿专家所说, 作者对 SNARC 效应的发生时间与皮层位置的描述存在前后矛盾之处。

对于 SNARC 效应的发生时间, 行为研究存在刺激呈现阶段与反应选择阶段之间的争论, 而且这些不同的结果多受到实验任务的影响, 因此行为结果对 SNARC 效应发生时间的论证是不足的。在 ERP 研究中, 虽然电生理技术表明 SNARC 效应发生在反应选择阶段(Gevers, Ratinckx, De, & Fias, 2006; Keus, Jenks, & Schwarz, 2005), 但是这两个实验均采用了奇偶判断任务, 而且所用数字均为正数。因此, 当采用大小判断任务或者数字材料为负数时, 难以确定 SNARC 效应依然发生于反应选择阶段。同时, 通过搜索相关文献, 作者发现自 Gevers (2006) 和 Keus (2005) 的研究之后, 利用 ERP 技术着重探讨 SNARC 效应发生时间的研究较少出现。因此, 相关研究还需要继续开展。

大量研究将数字与空间关联的关键位置指向额叶与顶叶皮层, 这一点很明确。但是, 数字空间关联的形式复杂多样, 不同关联形式的头皮位置也存在差异。作为数字空间关联的重要形式, SNARC 效应的头皮位置需要重点探究。同时, 先前研究大多集中关注正数的 SNARC 效应的皮层位置, 对于数字材料为负数或者正负数同时出现时的 SNARC 效应的皮层位置仍缺少探索。更重要的是, 虽然先前研究发现数字空间关系中存在左右半球分离, 但是 SNARC 效应是否存在这一分离还不清楚。因此, 作者认为对 SNARC 效应皮层位置的研究也是不充分的。

根据审稿专家建议, 我们已对前后不符之处进行了调整与修改(详见引言第四、五、六自然段, 即第 6 页 3-5 行、12-15 行、19-21 行、30 行, 第 7 页 1-2 行蓝色字体部分), 具体内容如下:

虽然这两个研究能够借助 ERP 技术的高时间分辨率说明 SNARC 效应的发生时间, 但这两个实验均运用奇偶判断任务, 采用正数作为刺激材料。因此, 对于采用大小判断任务或者负数作为实验材料时的 SNARC 效应是否仍发生于反应选择阶段还需进一步探讨。

虽然大量研究表明额叶与顶叶皮层是数字空间关联的关键位置, 但是数字空间关联的表现形式多样, 各种形式都有自己的特点, 因此, 需要继续探究不同形式间激活位置的差异。作为数字空间关联的重要形式, SNARC 效应的激活位置是否有其独特之处尤其值得关注。

更重要的是，虽然先前研究发现数字空间关系中存在左右半球分离，但是 SNARC 效应是否存在这一分离以及正负号差异对左右半球分离现象的影响还不清楚。

虽然先前研究对 SNARC 效应的发生时间及数字空间关联的大脑皮层位置进行了探讨，但是仍然存在实验方法单一，以正数刺激为主、较少涉及负数刺激等问题，对 SNARC 效应的位置特异性以及左右半球分离现象也知之甚少。

参考文献：

Gevers, W., Ratinckx, E., De, B. W., & Fias, W. (2006). Further evidence that the SNARC effect is processed along a dual-route architecture: evidence from the lateralized readiness potential. *Experimental Psychology*, 53, 58–68.

Keus, I. M., Jenks, K. M., & Schwarz, W. (2005). Psychophysiological evidence that the SNARC effect has its functional locus in a response selection stage. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 24, 48–56.

意见 3：前人对负数 SNARC 效应有三种不同的结果，是什么导致了这些不同结果的产生，前人结果的矛盾点是什么？本研究能够解决或解释前人研究的矛盾吗？

回应：非常感谢审稿专家的建议。

(1) 负数包括数量与符号两部分。先前研究采用不同的实验方法和实验任务，使得负数的数量与符号同时参与到表征或者仅数量或符号参与到表征中，从而导致出现三种不同的实验结果。下面以三个研究为例。Nuerk, Iverson, & Willmes (2004) 以-9 到 0 的数字作为刺激材料，采用奇偶判断任务，结果发现了反转的 SNARC 效应。由于奇偶判断与数字正负号无关，所以被试会忽略正负号而直接通过绝对值判断奇偶性。因此，符号在该实验任务中并没有发挥作用，仅数量参与到表征。Fischer & Rottmann (2005) 利用-9 到+9 (排除 0) 的数字作为刺激材料，要求被试将数字与 0 进行比较，结果发现，不管是正数还是负数均未出现 SNARC 效应。在该任务中，被试可以仅通过数字正负号做出判断，因此，该任务仅涉及符号而与数量无关。Shaki & Petrusic (2005) 以-9 到+9 (排除-5、-4、+4、+5) 的数字作为刺激材料，要求被试对同时出现的两个数字进行大小比较 (两个数字的大小差值始终为 1)，结果发现了正常但微弱的 SNARC 效应。在该实验中，符号与数量都参与到了表征，但该范式仍存在空间位置以及语义一致性效应的干扰。通过上述三个实验，我们可以发现：在不同实验方法与实验任务下，负数的符号与数量单独或同时参与到表征中，使得负数的 SNARC 效应表现出不同的形式。

(2) 前人结果的矛盾点是负数究竟按照绝对值表征在心理数字线上还是按照实际值表征在心理数字线上，也可以说是负号会不会影响负数在心理数字线上的表征。Nuerk, Iverson, & Willmes (2004) 的研究支持负数按绝对值表征，Shaki & Petrusic (2005) 的研究支持负数按照实际值表征。另一方面，前人结果的争论也就是个体发展论假说与系统进化论假说之

间的争论。个体发展论假说从 SNARC 效应与负数的起源相似性出发,认为既然负数与 SNARC 效应都是后天形成的(Göbel, Shaki, & Fischer, 2011; Shaki, Fischer, & Petrusic, 2009),那么负数就能够在心理数字线上独立表征而不需要正数作为中介。负数包括数量与符号,负数在心理数字线上的表征同样依赖数量与符号。正数表征在心理数字线右侧,负数表征在左侧;实际值较小的负数(如-9、-8)表征在实际值较大的负数(如-2、-1)的左侧。个体发展论假说预测,被试对实际值较小的负数做左键反应更快,对实际值较大的负数做右键反应更快,因此表现出标准的 SNARC 效应(Shaki & Petrusic, 2005, 混合条件)。系统进化论假说从正数与负数的不同起源出发,认为既然负数是后天习得,而正数的认知来自遗传和进化(Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; Fischer, 2003),那么负数就无法独立表征而必须依赖先天习得的正数。负号并不会对负数在心理数字线上的表征产生影响,负数在心理数字线上仅表征数量。系统进化论假说认为,负数依据绝对值进行表征,绝对值较小的负数(如-1、-2)表征在绝对值较大的负数(如-8、-9)的左侧。系统进化论假说预测,被试对绝对值较小的负数按左键更快,而对绝对值较大的负数按右键更快,因此表现出反转的 SNARC 效应(高在峰 et al., 2009; Kong, Zhao, You, & Zhang, 2012)。

(3) 前人研究中矛盾的焦点是负数按照绝对值表征在心理数字线上还是按照实际值表征在心理数字线上。针对这一问题,我们改进了实验任务以确保负数的数量与符号都能参与表征并消除其他效应的干扰,实验结果也印证了负数按照实际大小表征在心理数字线上,因此能够解决前人研究中的争论。本研究采用大小判断任务 (Magnitude judgment task) (Gibson, & Maurer, 2016; Hoffmann, Hornung, Martin, & Schiltz, 2013),每次只在屏幕中央随机呈现一个目标数字(-9 到+9,除去-5、0、+5),要求被试将目标数字与基线数字(-5 或+5)进行快速比较并做大小判断。该任务克服了先前研究只单独进行同号数字比较的情况,目标数字随机出现使得被试无法忽视正负号或仅通过正负号做出判断,因此能够突出正负号及其异同对数字空间关系的影响;大小判断任务也不存在位置偏向以及语义一致性效应的干扰,保证了研究的客观准确性。同时,本研究采用 ERP 技术,借助该技术的高时间分辨率来探究负数空间表征的各个加工阶段,结果更加精确可靠。在结果上,本研究发现当目标数字与基线数字正负号相同且基线数字为-5 时,在左额区,不一致反应方式比一致反应方式边缘更负且均诱发 P3b 成分($p=0.060$)。P3b 成分反映了对刺激的分类以及做出分类之后的记忆存储(Conroy & Polich, 2007; Polich, 2003; Verleger, Jaskowski, & Wascher, 2005),P3b 的差异说明被试在一致反应方式与不一致反应方式下具有不同的刺激分类模式,一致反应方式所需的选择及监控努力更少,而不一致反应方式需要更多努力才能做出反应分类。这是因为,一致反应方式不

存在数字的空间表征位置与反应方式的冲突，而不一致反应方式存在并需要抑制这一冲突。这一结果说明负数按实际大小表征在心理数字线上，实际值较小的负数表征在左侧，实际值较大的负数表征在右侧，结果支持了个体发展论假说。

参考文献：

- Conroy, M. A., & Polich, J. (2007). Affective valence and P300 when stimulus arousal level is controlled. *Cognition & Emotion*, 21, 891–901.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of numbers. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 307–314.
- Fischer, M. H. (2003). Cognitive representation of negative numbers. *Psychological Science*, 14, 278–282.
- Fischer, M. H., & Rottmann, J. (2005). Do negative numbers have a place on the mental number line. *Psychology Science*, 47, 22–32.
- Gao, Z. F., Shui, R. D., Chen, J., Chen, W., Tian, Y., & Shen, M. W. (2009). The mechanism of negative numbers' spatial representation. *Acta Psychologica Sinica*, 41, 95–102. [高在峰, 水仁德, 陈晶, 陈雯, 田瑛, & 沈模卫. (2009). 负数的空间表征机制. *心理学报*, 41, 95–102.]
- Gibson, L. C., & Maurer, D. (2016). Development of SNARC and distance effects and their relation to mathematical and visuospatial abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 150, 301–313.
- Göbel, S. M., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2011). The cultural number line: a review of cultural and linguistic influences on the development of number processing. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 42, 543–565.
- Hoffmann, D., Hornung, C., Martin, R., & Schiltz, C. (2013). Developing number–space associations: SNARC effects using a color discrimination task in 5–year–olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116, 775–791.
- Kong, F., Zhao, J. J., You, X. Q., & Zhang, Y. (2012). The attentional SNARC effect caused by low–level processing of negative numbers in auditory modality. *Studies of Psychology & Behavior*, 10, 12–17. [孔凤, 赵晶晶, 游旭群, & 张宇. (2012). 听觉通道下负数的低水平加工引起注意的 SNARC 效应. *心理与行为研究*, 10, 12–17.]
- Nuerk, H. C., Iversen, W., & Willmes, K. (2004). Notational modulation of the SNARC and the MARC (linguistic markedness of response codes) effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 57, 835–863.
- Polich, J. (2003). Theoretical overview of P3a and P3b. In *Detection of Change* (pp. 83–98). Springer US.
- Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 328–331.
- Shaki, S., & Petrusic, W. M. (2005). On the mental representation of negative numbers: context–dependent SNARC effects with comparative judgments. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 931–937.
- Verleger, R., Jaskowski, P., & Wascher, E. (2005). Evidence for an integrative role of P3 in linking reaction to perception. *Journal of Psychophysiology*, 19, 165–181.

意见 4：“当目标数字与基线数字异号时，符号捷径机制会影响 SNARC 效应的发生时间，SNARC 效应不仅会出现于反应选择阶段，而且可能出现于刺激呈现阶段与反应执行阶段。”，发生时间（ERP 分析）只在异号时考察吗？同号（同为正、同为负）时呢？

回应：非常感谢审稿专家的提醒。

SNARC 效应的发生时间在同号和异号时均有考察。当目标数字与基线数字同号时，在 400-600ms 的时间窗口，无论基线数字为+5 还是-5，不一致反应都比一致反应更负且均诱发 P3b 成分。这说明当目标数字与基线数字同号时，SNARC 效应发生于反应选择阶段。当目标数字与基线数字异号时，在 400-600ms 的时间窗口，无论基线数字为+5 还是-5，不一

致反应都比一致反应更负且均诱发 P3b 成分。这说明当目标数字与基线数字异号时，SNARC 效应发生于反应选择阶段。

然而，当目标数字与基线数字异号时，符号捷径机制会影响 SNARC 效应的发生时间。这里需要注意的是，当目标数字与基线数字同号时，并不存在符号捷径机制，因此并不考虑符号捷径机制对目标数字与基线数字同号条件的影响。在 200-400ms 时间窗口，当目标数字与基线数字异号且基线数字为+5 时，在左额区，一致反应比不一致反应诱发了波幅显著更小的 N300 成分；在 600-800ms 时间窗口，当目标数字与基线数字异号且基线数字为-5 时，一致反应比不一致反应诱发了更正的 LPP。这说明当目标数字与基线数字异号时，SNARC 效应会发生于刺激呈现阶段和反应执行阶段。

本研究认为不论目标数字与基线数字异号还是同号，SNARC 效应均发现于反应选择阶段。但是，当目标数字与基线数字异号时，符号捷径机制会影响 SNARC 效应的发生时间，使得 SNARC 效应出现于刺激呈现阶段与反应执行阶段。

“当目标数字与基线数字异号时，符号捷径机制会影响 SNARC 效应的发生时间，SNARC 效应不仅会出现于反应选择阶段，而且可能出现于刺激呈现阶段与反应执行阶段。”这一表述确实会使读者误以为本研究只分析了目标数字与基线数字异号时的 SNARC 效应的发生时间。因此，根据审稿专家的建议，我们重新表述了这一实验预期（详见引言最后一段，即第 7 页第二段第 5-7 行蓝色字体部分），具体内容如下：

当目标数字与基线数字同号时，SNARC 效应发生于反应选择阶段；当目标数字与基线数字异号时，符号捷径机制会影响 SNARC 效应的发生时间，SNARC 效应不仅会出现于反应选择阶段，而且可能出现于刺激呈现阶段与反应执行阶段。

意见 5：问题提出部分没有突出研究的贡献和解决前人问题的关键点，ERP 的时程分析与定位分析的预期十分明确，和前人的一致，没有太大的新意。

回应：非常感谢审稿专家的建议。

(1) 作者在问题提出部分的叙述确实存在一些问题，根据审稿专家的建议，我们补充了本研究的贡献以及解决前人问题的关键点（详见第 6 页最后一行，第 7 页 1-2 行、6-10 行蓝色字体部分），主要分为前人研究缺陷与本研究意义两部分，补充如下：

虽然先前研究对 SNARC 效应的发生时间及数字空间关联的大脑皮层位置进行了探讨，但是仍然存在实验方法单一，以正数刺激为主、较少涉及负数刺激等问题，对 SNARC 效应的位置特异性以及左右半球分离现象也知之甚少。

本研究既在方法上加以改进，又能够探究负数在心理数字线上的表征方式，解决系统进化论假说与个体发展论假说之间的争论；细化 SNARC 效应的皮层位置，探究 SNARC 效应中是否存在左右半球分离以及正负号及其异同对左右半球分离现象的影响。因此，本研究具有重要的意义和价值。

(2) 本研究的创新性主要表现在研究角度、所用方法及所得结果上。在研究问题上，我们从正负号及其异同这一角度出发，重点探究正负号及其异同对 SNARC 效应的影响，这是前人研究较少涉及的。在方法上，我们采用修正后的大小判断任务，可以避免忽略数字正负或仅通过数字正负做判断，而且可以避免数字出现的空间位置以及语义一致性效应的干扰，准确可靠。在结果上，我们得到了丰富而有意义的结果，主要包括负数按实际大小进行表征，遵循个体发展论假说，这为解决个体发展论假说与系统进化论假说的争论提供了新的实证证据；符号捷径机制影响 SNARC 效应的发生时间，这为研究 SNARC 效应的发生时间提供了新的思路，同时深入探究了符号捷径机制的生理基础；SNARC 效应主要激活额叶与顶叶皮层，负数加工与左额叶皮层密切相关，正数加工与右额叶皮层密切相关，这说明在大小判断任务中 SNARC 效应出现了左右半球分离，正负号及其异同会影响 SNARC 效应的左右半球分离。这些结果对全面深入地了解 SNARC 效应具有重要意义。

本研究的 ERP 时程分析与定位分析十分明确，这些时程与定位得到了先前大量研究的支持验证。利用这些已证条件，本研究得到了具有创新性的结果，更能说明本实验兼具可靠性与创新性。

意见 6: 实验设计的描述比较混乱，建议修改成“本实验为 2(基线数字)×2(反应方式)被试内设计，具体。。。。。。结果考察。。。。实验包括。。次练习和。。次正式实验”

回应: 非常感谢审稿专家的建议。

根据审稿专家的建议，我们已对实验设计部分进行了相应修改（详见 2.3 实验设计，即第 8 页第二段蓝色字体部分）。这里需要特别说明的是，结合审稿专家的下一问题，我们在此将实验设计修改为 2(基线数字)×2(正负号异同性)×2(反应方式)的被试内设计，具体缘由将在下一问中详细阐述。修改内容如下：

本实验为 2(基线数字: +5、-5)×2(正负号异同性: 目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号)×2(反应方式: 一致反应方式、不一致反应方式)的被试内设计，以考察数字正负号及其异同对 SNARC 效应的影响。基线数字包括+5 与-5 两水平，正负号异同性包括目标数字与基线数字同号以及目标数字与基线数字异号两水平，反应方式包括一致反应方

式与不一致反应方式两水平。实验包括 4 组练习和 8 组正式实验, 每组练习包含 16 个试次, 每组正式实验包含 96 个试次。

意见 7: 分析脑电数据是为何实验设计又变为了“基线数字(+5、-5)、正负号异同性(目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号)、按键反应方式(一致、不一致)三因素”? 常用的基线是前 200ms, 本研究为何为前 100ms?

回应: 非常感谢审稿专家的提醒与建议。

(1) 首先回答第一个问题, 关于本实验的实验设计与数据分析的问题。在原稿中, 作者叙述“实验包含 2(基线数字) \times 2(反应方式)种条件, 每种条件包含 2 个组, 实验组的顺序在被试间进行平衡”。这样叙述是从具体实验分组出发, 考虑到基线数字与反应方式在不同实验组间是有差别的。具体来说, 所有的实验组共有四种条件, 即基线数字为+5、一致反应方式, 基线数字为-5、一致反应方式, 基线数字为+5、不一致反应方式, 基线数字为-5、不一致反应方式。但是, 如果从整体的实验设计出发, 必须考虑到目标数字这一因素。虽然在每个实验组中出现的目标数字没有差别(-9 到+9 的数字, 排除-5、0、+5)(这也是我们在具体实验分组时没有加入这一因素的原因), 但目标数字与基线数字却有同号与异号之分, 即当基线数字为+5 时, 与基线数字同号的目标数字为+1、+2、+3、+4、+6、+7、+8、+9, 与基线数字异号的目标数字为-1、-2、-3、-4、-6、-7、-8、-9; 当基线数字为-5 时, 则相反。因此, 目标数字与基线数字同号或者异号也作为隐含条件存在。当从整体实验设计出发以及进行数据分析时, 实验设计实际为 2(基线数字: +5、-5) \times 2(正负号异同性: 目标数字与基线同号、目标数字与基线数字异号) \times 2(反应方式: 一致反应方式、不一致反应方式)的三因素实验设计。我们在实验设计部分的叙述确实存在混淆, 十分非常感谢审稿专家的提醒。根据审稿专家的建议, 我们对该部分的叙述进行了修改(详见 2.3 实验设计, 即第 8 页第二段蓝色字体部分), 保留了数据分析时的实验设计。具体内容如下:

本实验为 2(基线数字: +5、-5) \times 2(正负号异同性: 目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号) \times 2(反应方式: 一致反应方式、不一致反应方式) 的被试内设计, 以考察数字正负号及其异同对 SNARC 效应的影响。基线数字包括+5 与-5 两水平, 正负号异同性包括目标数字与基线数字同号以及目标数字与基线数字异号两水平, 反应方式包括一致反应方式与不一致反应方式两水平。实验包括 4 组练习和 8 组正式实验, 每组练习包含 16 个试次, 每组正式实验包含 96 个试次。

(2) 下面回答第二个问题, 关于 ERP 分析的基线。一般情况下, 用于基线校正的刺激

前时间长度通常为拟分析时程的 1/10~1/5，对间隔为 1000ms（SOA）的刺激，常用的基线校正的时间长度为 200ms 与 100ms (Rugg,& Coles,1996)。在先前 ERP 研究中，刺激呈现前 200ms（Gevers, Ratinckx, De, & Fias, 2006; Keus, Jenks, & Schwarz, 2005; Schuller, Hoffmann, Goffaux, & Schiltz, 2014）以及 100ms（Gut, Szumska, Wasilewska, & Jaśkowski, 2012; He, Zhang, Li, & Guo, 2015; Li, Wang, Gao, & Guo, 2016）都被广泛用做基线，因此，本研究选择刺激呈现前 100ms 作为基线是有充分证据的。同时，在本实验中，在刺激呈现前 100ms，被试脑电波平稳，眨眼较少，以这段时间作为基线也是可行的。最后，波形图显示，各个条件的 ERP 波形并未在基线位置出现分离，基线平稳，印证了 100ms 基线的正确性。但如果审稿专家认为必须采用 200ms 作为基线，我们可以再进行修改。

参考文献：

- Gevers, W., Ratinckx, E., De, B. W., & Fias, W. (2006). Further evidence that the SNARC effect is processed along a dual-route architecture: evidence from the lateralized readiness potential. *Experimental Psychology*, 53, 58–68.
- Gut, M., Szumska, I., Wasilewska, M., & Jaśkowski, P. (2012). Are low and high number magnitudes processed differently while resolving the conflict evoked by the SNARC effect? *International Journal of Psychophysiology Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 85, 7–16.
- He, X., Zhang, W., Li, C., & Guo, C. (2015). Precision requirements do not affect the allocation of visual working memory capacity. *Brain Research*, 1602, 136–143.
- Keus, I. M., Jenks, K. M., & Schwarz, W. (2005). Psychophysiological evidence that the SNARC effect has its functional locus in a response selection stage. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 24, 48–56.
- Li, B., Wei, W., Gao, C., & Guo, C. (2016). Masked repetition priming hinders subsequent recollection but not familiarity: a behavioral and event-related potential study. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, 16(5), 1–13.
- Rugg, M. D., & Coles, M. G. H. (1996). 2. The ERP and cognitive psychology: conceptual issues. *Electrophysiology of Mind*.
- Schuller, A. M., Hoffmann, D., Goffaux, V., & Schiltz, C. (2014). Shifts of spatial attention cued by irrelevant numbers: electrophysiological evidence from a target discrimination task. *Journal of Cognitive Psychology*, 27, 442–458.

意见 8：根据前人研究确认 ERP 时间窗口不是好的理由，一般要根据自己实验的结果：峰值出现的潜伏期、持续时间、每个被试的情况等来确定时间窗口。且根据图二所示，峰值出现的潜伏期约在 200ms、300ms、400ms 三个时间，实验采用 200–400ms、400–600ms 和 600–800ms 三个时间窗口并不合适。

回应：非常感谢审稿专家的提醒与建议。

根据审稿专家的建议，我们重新选取了时间窗口，分别为 170-250ms、250-350ms、350-550ms、550-800ms。结果表明，重取时段后的结果与原稿中的结果基本保持一致（包括地形图比较和溯源分析结果）。如果审稿专家坚持需要重取时段，我们将会在征得其他审稿专家的同意后，再在原文中进行修改，您认为这样解决是否可以。具体修改内容如下：

3.1 ERP 结果

我们分别在 170–250ms、250–350ms、350–550ms 和 550–800ms 的时间窗口内, 进行 4(头皮位置: 左额叶、右额叶、左顶叶、右顶叶) \times 2(基线数字: +5、-5) \times 2(正负号的异同性: 目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号) \times 2(反应方式: 一致反应方式、不一致反应方式)的四因素重复测量方差分析, 结果如下。

3.1.1 170-250ms

在 170-250ms 的时间窗口内, 结果表明: 头皮位置的主效应显著 $[F(3, 45)=26.45, p<0.001, \eta^2_p=0.64]$, 头皮位置、基线数字、正负号异同性以及反应方式的交互作用显著 $[F(3, 45)=4.05, p<0.05, \eta^2_p=0.21]$ 。对头皮位置主效应的事后比较表明, 左额叶的波幅 $(M=5.83)$ 显著大于左顶叶 $[M=2.13, t(15)=5.05, p<0.001]$ 和右顶叶 $[M=1.53, t(15)=7.66, p<0.001]$, 右额叶的波幅 $(M=5.49)$ 也显著大于左顶叶 $[t(15)=3.87, p<0.001]$ 和右顶叶 $[t(15)=6.12, p<0.001]$ 。当目标数字与基线数字正负号相同时(见图 2A、图 3A), 基线数字、反应方式和头皮位置的三重交互作用不显著, 也不存在与反应方式有关的二重交互作用或反应方式的主效应。当目标数字与基线数字正负号相异时(见图 2B、3B), 基线数字、反应方式和头皮位置的三重交互作用显著 $[F(3, 45)=5.42, p<0.01, \eta^2_p=0.27]$ 。随后进行的二因素重复测量方差分析表明, 无论基线数字为+5(或-5), 反应方式和头皮位置的二重交互作用都不显著 $(ps>0.05)$ 。这些结果表明, 在 170-250ms 时间窗口, 一致反应与不一致反应在 P2 成分上并不存在差异。

3.1.2 250-350ms

在 250-350ms 的时间窗口内, 结果表明: 头皮位置、基线数字、正负号异同性以及反应方式的交互作用显著 $[F(3, 45)=7.23, p<0.001, \eta^2_p=0.33]$ 。当目标数字与基线数字正负号相异时(见图 2B、图 3B), 基线数字、反应方式和头皮位置存在显著的三重交互作用 $[F(3, 45)=7.15, p<0.001, \eta^2_p=0.32]$ 。随后进行的二因素重复测量方差分析表明: 当基线数字为+5 时, 反应方式与头皮位置存在显著的交互作用 $[F(3, 45)=3.16, p<0.05, \eta^2_p=0.17]$ 。在左额叶, 一致反应比不一致反应诱发了波幅显著更小的 N300 成分 $[F(1, 15)=6.94, p<0.05, \eta^2_p=0.32]$ 。这些结果表明, 在 250-350ms 时间窗口, 一致反应与不一致反应在左额叶头皮位置表现出 N300 成分上的差异。

3.1.3 350-550ms

在 350-550ms 的时间窗口内, 结果表明: 头皮位置、基线数字、正负号异同性以及反应方式存在显著的交互作用 $[F(3, 45)=19.07, p<0.01, \eta^2_p=0.56]$ 。当目标数字与基线数字的正负号相同时(见图 2A、图 3A), 头皮位置、基线数字以及反应方式存在显著的三重交互 $[F(3, 45)=8.32, p<0.001, \eta^2_p=0.36]$ 。随后进行的二因素重复测量方差分析表明: 不论基线数字为+5

(或-5), 头皮位置和反应方式都存在显著的交互作用($p < 0.01$)。当基线数字为+5时, 在右额叶, 不一致比一致反应显著更负且均诱发 P3b 成分 [$F(1, 15) = 5.24, p < 0.05, \eta^2_p = 0.26$]; 当基线数字为-5时, 在左额叶, 不一致比一致反应边缘更负且均诱发 P3b 成分 [$F(1, 15) = 3.61, p = 0.077, \eta^2_p = 0.19$]。当目标数字与基线数字的正负号相异时 (见图 2B、图 3B), 头皮位置、基线数字以及反应方式存在显著的重交互作用 [$F(3, 45) = 19.09, p < 0.001, \eta^2_p = 0.56$]。随后进行的二因素重复测量方差分析表明: 不论基线数字为+5 (或-5), 头皮位置和反应方式都存在显著的交互作用($p < 0.05$)。当基线数字为+5时, 在左额叶, 不一致比一致反应显著更负且均诱发 P3b 成分 [$F(1, 15) = 17.14, p < 0.001, \eta^2_p = 0.53$]; 当基线数字为-5时, 在右额叶, 不一致反应比一致反应边缘更负且均诱发 P3b 成分 [$F(1, 15) = 3.79, p = 0.071, \eta^2_p = 0.20$]。这些结果表明, 在 350-550ms 时间窗口, 一致反应与不一致反应在 P3b 成分上存在差异。

3.1.4 550-800ms

在 550-800ms 的时间窗口内, 结果表明: 头皮位置的主效应显著 [$F(3, 45) = 4.98, p < 0.01, \eta^2_p = 0.25$], 头皮位置、基线数字、正负号的异同性以及反应方式的交互作用显著 [$F(3, 45) = 9.94, p < 0.001, \eta^2_p = 0.40$]。对头皮位置主效应的事后比较表明, 左额叶的波幅 ($M = 2.32$) 显著大于左顶叶 [$M = 0.78, t(15) = 2.81, p < 0.05$] 和右顶叶 [$M = 1.02, t(15) = 2.05, p < 0.05$], 右额叶的波幅 ($M = 2.23$) 也显著大于左顶叶 [$t(15) = 2.46, p < 0.05$] 和右顶叶 [$t(15) = 2.11, p < 0.05$]。当目标数字与基线数字正负号相异时 (见图 2B、图 3B), 头皮位置、基线数字以及反应方式的重交互作用显著 [$F(3, 45) = 12.87, p < 0.001, \eta^2_p = 0.46$]。随后进行的二因素重复测量方差分析表明: 当基线数字为-5时, 反应方式和头皮位置存在显著的交互作用 [$F(3, 45) = 3.96, p < 0.05, \eta^2_p = 0.21$]。在右额叶, 一致反应比不一致反应诱发了显著更正的 LPP [$F(1, 15) = 5.75, p < 0.05, \eta^2_p = 0.28$]。这些结果表明, 在 550-800ms 时间窗口, 一致与不一致反应在右额叶头皮位置表现出 LPP 成分上的差异。

3.1.5 地形图分析

为了检测 SNARC 效应的神经发生源, 我们利用平方根标准化程序 (矢量转化法) (Mccarthy & Wood, 1985) 进行了地形分布分析。先前研究认为 SNARC 效应发生于反应选择阶段 (Gevers et al., 2006; Keus et al., 2005), 因此, 我们选取 350-550ms 时间窗口, 利用所有电极的平均振幅值, 对标准化后的差异波进行了地形比较 (一致反应减不一致反应)。当目标数字与基线数字正负号相同时, 对条件和电极位置进行 2 (基线数字为+5、基线数字为-5) \times 62 (电极位置) 的重复测量方差分析, 结果表明条件和电极位置存在显著的交互作用 [$F(61, 915) = 3.40, p < 0.001, \eta^2_p = 0.19$], 基线数字为+5时的 SNARC 效应位于右半球, 而基线数字为-5

时的SNARC效应位于左半球；当目标数字与基线数字正负号相异时，对条件和电极位置进行2（基线数字为+5、基线数字为-5）×62（电极位置）的重复测量方差分析，结果也表明条件和电极位置存在显著的交互作用 $[F(61, 915)=12.44, p<0.001, \eta^2_p=0.45]$ ，基线数字为+5时的SNARC效应位于左半球，而基线数字为-5时的SNARC效应位于右半球。这些结果表明，在不同比较条件下，SNARC效应的分布存在左右半球差异（见图3）。

3.1.6 偶极子溯源分析

为了进一步探究正负号及其异同对SNARC效应的影响是否存在脑机制差异，将四种比较条件下“一致/不一致反应”的总平均ERPs差异波分别导入具有标准MRI头像的Curry 7.0系统，用LORETA电流密度法和偶极子拟合法在三壳球形模型中重建各条件在不同时间窗口的大脑颅内活动源。地形图显示350-550ms时间窗口的大脑激活最为显著。同时，在550-800ms时间窗口，当目标数字与基线数字正负号相异并且基线数字为-5时，顶区也有显著激活。因此，我们选取刺激呈现后350-550ms以及550-800ms进行偶极子溯源分析。溯源结果如图4所示：当目标数字与基线数字正负号相同时（见图4A），若基线数字为+5，SNARC效应主要定位于右侧额中回（残差为5.41%），若基线数字为-5，SNARC效应主要定位于左侧额上回（残差为6.86%）；当目标数字与基线数字正负号相异时（见图4B、图4C），若基线数字为+5，SNARC效应主要定位于左侧额上回（残差为4.18%），若基线数字为-5，SNARC效应主要定位于右侧额中回（残差为3.62%）和顶下小叶（残差为5.55%）。这些结果表明，SNARC效应主要激活了额叶与顶叶皮层。

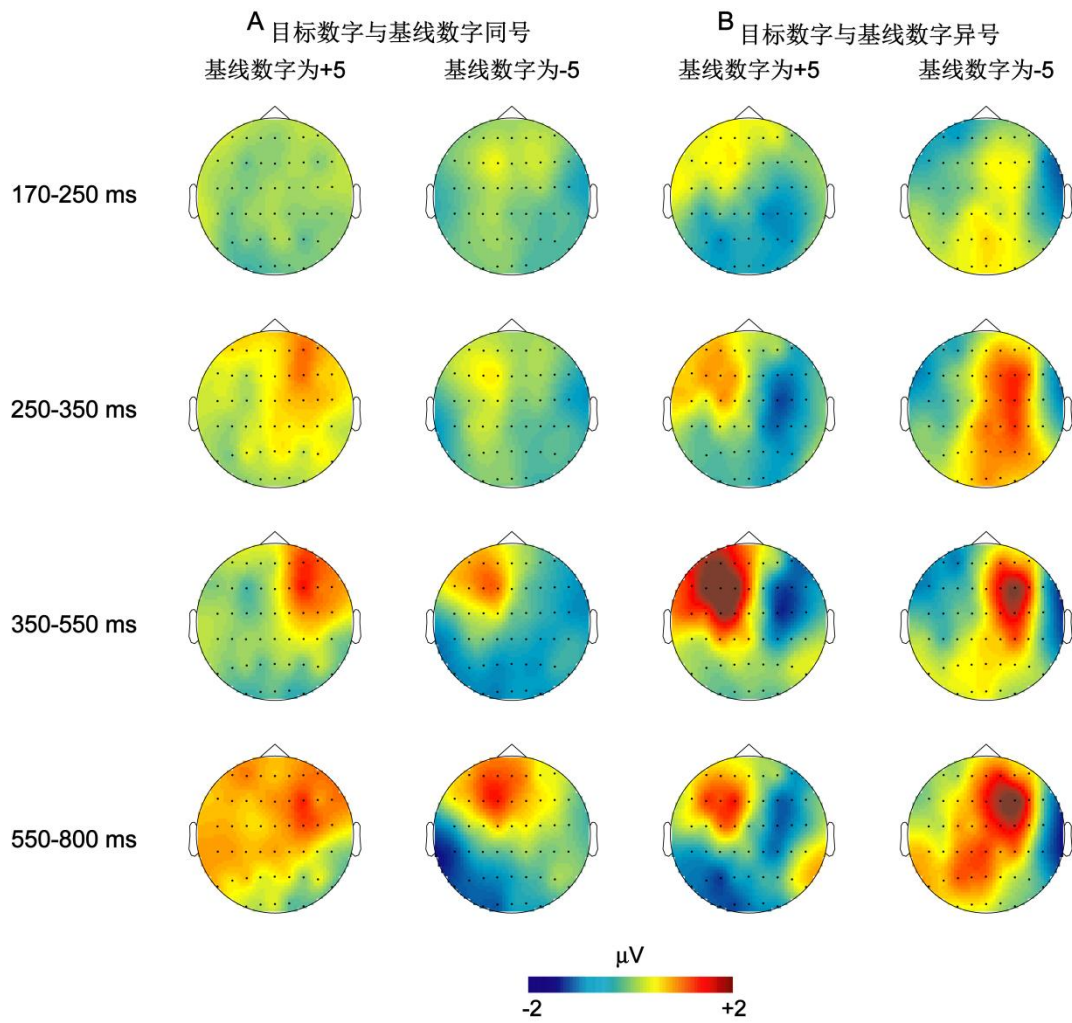


图 3 SNARC 效应的地形图

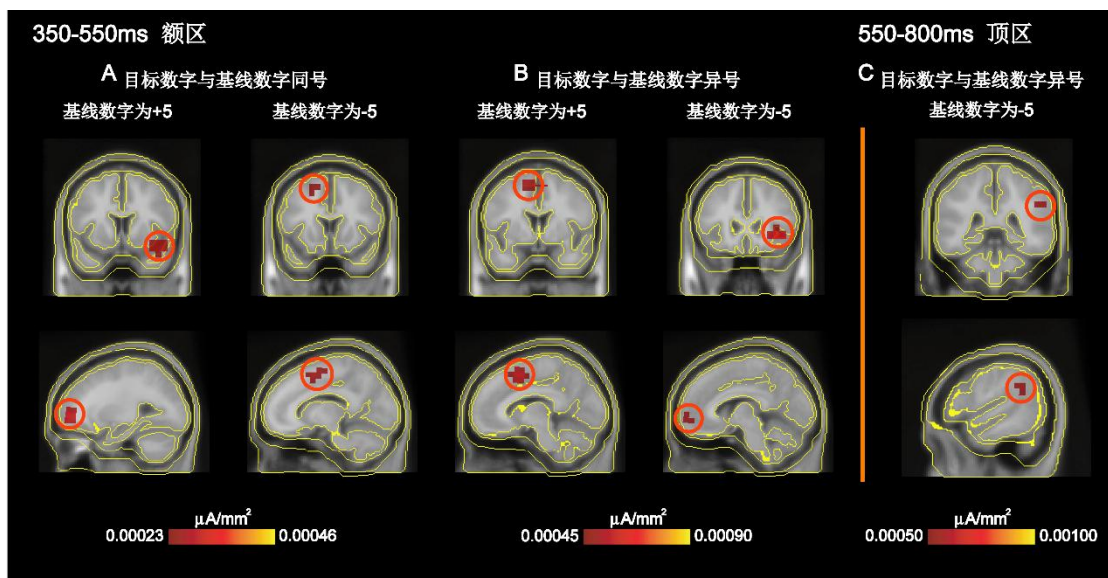


图 4 SNARC 效应的溯源分析结果

意见 9: 正确率要报告平均值+标准差, 最好不要呈现“本研究不对正确率做重点分析”。方差分析结果不能只报告 P 值, 具体参考标准呈现结果的方式 (包括 F 值, 两种条件比较, 效应量等)。

回应: 非常感谢审稿专家的建议。

(1) 在原稿中, 我们对正确率进行了初步统计, 只报告了平均值与标准误。根据审稿专家的建议, 我们对正确率进行了 2(基线数字: +5、-5)×2(正负号异同性: 目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号)×2(反应方式: 一致反应方式、不一致反应方式)的三因素重复测量方差分析以探究正负号及其异同对正确率的影响。结果表明, 基线数字的主效应显著 [$F(1, 28)=12.32, p<0.01, \eta^2_p=0.31$], 基线数字为+5 时的正确率显著高于基线数字为-5 时的正确率 [$M_1=0.98, M_2=0.97, t(28)=3.51, p<0.01$]; 正负号异同性的主效应显著 [$F(1, 28)=34.29, p<0.001, \eta^2_p=0.55$], 目标数字与基线数字异号时的正确率显著高于同号时的正确率 [$M_1=0.99, M_2=0.97, t(28)=5.86, p<0.001$], 无其他交互作用。

根据审稿专家的建议, 我们在 3.1 行为结果部分补充了对正确率的分析并在讨论 4.1 对该结果进行了补充讨论 (详见 3.1 行为结果部分, 即第 10 页 6-10 行; 讨论 4.1, 即第 15 页第二段 1-2 行、第 16 页 1-2 行中的蓝色字体), 具体内容如下:

在正确率上, 基线数字的主效应显著 [$F(1, 28)=12.32, p<0.01, \eta^2_p=0.31$], 基线数字为+5 时的正确率显著高于基线数字为-5 时的正确率 [$M_1=0.98, M_2=0.97, t(28)=3.51, p<0.01$]; 正负号异同性的主效应显著 [$F(1, 28)=34.29, p<0.001, \eta^2_p=0.55$], 目标数字与基线数字异号时的正确率显著高于同号时的正确率 [$M_1=0.99, M_2=0.97, t(28)=5.86, p<0.001$], 无其他交互作用。

目标数字与基线数字异号时的反应时显著短于目标数字与基线数字同号时的反应时, 目标数字与基线数字异号时的正确率显著高于目标数字与基线数字同号时的正确率, 这可能是符号捷径机制在发挥作用。

基线数字为+5 时的反应时显著短于基线数字为-5 时的反应时, 基线数字为+5 时的正确率显著高于基线数字为-5 时的正确率, 这可能是由于数字频率的差异。

(2) 对于方差分析结果的呈现, 我们在原稿中只报告了重要交互的 F 值、p 值以及效应量, 对其他结果均只报告了 p 值。这是考虑到本实验结果较多, 若报告所有结果会模糊重点, 但是这样做确实不符合标准的结果呈现方式。非常感谢审稿专家提醒, 根据审稿专家的建议, 我们将 F 值、p 值、效应量等在修改稿中进行了补充 (详见第 9 页到第 10 页 3.1 行为结果第一段以及第 11 页到第 12 页 3.2 ERP 结果中的蓝色字体)。

意见 10：研究探讨“符号捷径机制”的目的和意义在前文中没有表述过多。

回应：非常感谢审稿专家的提醒与建议。

“符号捷径机制”确实是本文中的一个重要概念，我们在讨论部分重点讨论了该机制对 SNARC 效应发生时间的影响，但在引言只介绍了该机制，并未对探讨该机制的目的和意义做详细介绍。因此，根据审稿专家的建议，我们在引言部分补充了探究该机制的目的和意义（详见第 4 页第二段 4-6 行蓝色字体部分），具体内容如下：

先前行为研究仅能够表明符号捷径机制可以加速被试的判断，但是这一机制以何种形式影响 SNARC 效应并不清楚。深入探究符号捷径机制，明确这一机制对 SNARC 效应发生时间和大脑皮层定位的影响，对探究正负号及其异同对 SNARC 效应的影响具有重要意义。

意见 11：讨论的第一段应该总述研究的目的方法和主要结果。

回应：非常感谢审稿专家的建议。

根据审稿专家的建议，结合审稿意见第 15 条，我们将结论部分进行修改后迁移至讨论第一段，以总述研究的目的方法和主要结果（详见第 15 页讨论部分第一段），具体内容如下：

本研究采用修正的大小判断范式，以正负号及其异同为切入点，采用锁定于刺激的 ERP 成分对 SNARC 效应进行了探索，结果表明正负号及其异同是影响 SNARC 效应及数字加工机制的重要因素。首先，对于负数的表征机制，先前研究存在个体发展论假说与系统进化论假说的争论，本研究证明负数按其实际大小进行表征，对比基线数字小的数字按左键更快，对比基线数字大的数字按右键更快，这支持了个体发展论假说。其次，对于 SNARC 效应的发生时间，先前研究中存在反应选择阶段与刺激呈现阶段的争论，而本研究发现 SNARC 效应的发生时间会受到符号捷径机制的调节。无论目标数字与基线数字正负号相同还是相异，SNARC 效应普遍发生于反应选择阶段，但当目标数字与基线数字正负号相异时，符号捷径机制发挥作用：若基线数字为 +5，SNARC 效应同时发生于刺激呈现阶段；若基线数字为 -5，SNARC 效应同时发生于反应执行阶段。最后，本研究证实了 SNARC 效应会激活额叶与顶叶皮层；大小判断任务中的 SNARC 效应出现左右半球分离，即负数的 SNARC 效应激活左半球，正数的 SNARC 效应激活右半球。

意见 12：语义一致性效应到底会引起怎样的干扰？前言和讨论部分都没有解释清楚，这样很难突出本研究的重要意义。

回应：非常感谢审稿专家的提醒与建议。

首先解释语义一致性效应。语义一致性效应即在数字比较任务中，当比较对象为较大数

字对时（如+8、+9），则要求被试选择大数字比选择小数字更快；当比较对象为较小数字对时（如+1、+2），则要求被试选择小数字比选择大数字更快。

以 Fischer (2003)的研究为例，该研究以-9 到+9（排除 0）的数字作为刺激材料，数字对间的距离始终为 5，数字对以与心理数字线空间一致（或不一致）的方式呈现，要求被试对数字做出大小判断。语义一致性效应对 SNARC 效应的干扰可以分为以下三种情况：（1）当同号数字对以与心理数字线空间一致的顺序出现时（如+4、+9 或-9、-4），如果指导语是选择较小的数字，则左手反应是语义一致的，因此左手对小数反应更快；如果指导语是选择较大的数字，则右手反应是语义一致的，因此右手对大数反应更快，从而表现出 SNARC 效应。（2）当同号数字对以与心理数字线空间不一致的顺序出现时（如+9、+4 或-4、-9），左手反应和选择较大数字这一指导语是语义一致的，因此左手对大数字反应更快；右手反应和选择较小数字这一指导语是语义一致的，因此右手对小数反应更快，从而出现反转的 SNARC 效应。（3）当呈现正负号不一致的数字对时（-3、+2），左右手的反应时没有显著差异，即没有出现 SNARC 效应。该结果混淆了反应手与语义，其结果实际反映了语义一致性效应而非 SNARC 效应。

根据审稿专家的建议，我们在前言和讨论部分补充了对语义一致性效应的说明，引言部分倾向于介绍语义一致性效应以及该效应对 SNARC 效应的干扰（详见引言第三段，即第 5 页第二段 5-14 行蓝色字体部分），讨论部分重点说明本研究如何避免语义一致性效应混淆 SNARC 效应以突出本研究的意义（详见讨论 4.2，即第 17 页 9-12 行蓝色字体部分）。具体内容如下：

前言：语义一致性效应即在数字比较任务中，当比较对象为较大数字对时（如+8、+9），则被试选择大数字比选择小数字更快；当比较对象为较小数字对时（如+1、+2），则被试选择小数字比选择大数字更快。语义一致性效应对 SNARC 效应的影响主要体现在当同号数字对以与心理数字线空间一致的方式呈现时（如+4、+9 或-9、-4），如果要求选择较小的数字，则左手反应是语义一致的，因此左手对小数反应更快；如果要求选择较大的数字，则右手反应是语义一致的，因此右手对大数反应更快，从而表现出 SNARC 效应。当同号数字对以与心理数字线空间不一致的方式呈现时（+9、+4 或-4、-9），如果要求选择较小的数字，则右手反应是语义一致的，因此右手对小数反应更快；如果要求选择较大的数字，则左手反应是语义一致的，因此左手对大数反应更快，从而出现反转的 SNARC 效应。该范式混淆了反应手与语义，其结果实际反映了语义一致性效应而非 SNARC 效应。

讨论：本实验采用修正的大小判断任务，目标数字呈现于屏幕中央，从而避免受到数字

呈现的空间位置的影响。同时，要求被试将目标数字与给定的基线数字（+5 或-5）进行比较并判断目标数字的大小，并不会混淆语义与反应手，从而消除语义一致性效应的干扰。

参考文献：

Fischer, M. H. (2003). Cognitive representation of negative numbers. *Psychological Science*, 14(14), 278-82.

意见 13: 讨论部分 4.2 没有和前人研究（没有出现 SNARC 和反转 SNARC 的结果）对比和论述，“这是对个体发展论假说的重大推进”等言之太过了。

回应: 非常感谢审稿专家的提醒与建议。

（1）在原稿讨论 4.2 部分，我们围绕“负数表征遵循个体发展论假说”进行了相关讨论，主要将当前研究结果与先前同样得到负数表征遵循个体发展论假说的研究进行了对比，以突出本研究的意义。但原稿确实并未将本研究与先前未出现 SNARC 效应以及出现反转的 SNARC 效应的研究进行对比。根据审稿专家的建议，我们在讨论 4.2 补充了与这些研究的对比和论述，从而共同说明本研究的重要意义（详见讨论 4.2，第 17 页 12-18 行蓝色字体部分），具体内容如下：

较之于先前研究采用奇偶判断任务，被试会忽略数字正负而直接判断奇偶性，从而得到反转的 SNARC 效应(Nuerk et al., 2004)；以 0 作为基线数字，被试仅通过目标数字正负就可以做出大小判断，从而没有得到 SNARC 效应(Fischer & Rottmann, 2005)。在本研究中，正负数随机出现，被试无法忽视数字正负号，从而确保正负号在大小比较中发挥作用；当目标数字与基线数字同号时，被试也无法仅通过正负号做出大小判断，从而确保被试对数字进行整体比较。因此，本研究能够准确反映负数在心理数字线上的表征方式。

（2）非常感谢审稿专家的提醒，我们对该部分的语言进行了重新整理，删除了太过绝对的论述，将“这是对个体发展论假说的重大推进”修改为：“为个体发展论假说提供了新的实证证据”，使得语言更加准确规范。

意见 14: 讨论部分 4.4 的结果和前人研究基本一致，“本研究消除了先前研究中存在的弊端”，前人有哪些弊端？请论述清楚。此外，正负号的差异和 Gut et al.(2012)的大小数字的差异原理一致，只能说为符号捷径机制的脑机制提供的参考和进一步证据，并没有特别重要的理论贡献和价值。

回应: 非常感谢审稿专家的提醒与建议。

（1）首先回答第一个问题“本研究消除了先前研究中存在的弊端”。如前言所述，先前研究多存在方法上的不足，这主要表现为：当采用奇偶判断任务时，被试会忽略数字正负而

直接判断奇偶性(Nuerk et al., 2004); 当 0 作为基线数字时, 被试仅通过目标数字正负就可以做出大小判断(Fischer & Rottmann, 2005); 当在屏幕左右两侧同时呈现数字对时, 数字出现的空间位置以及语义一致性效应会对 SNARC 效应造成干扰(Fischer, 2003; Shaki & Petrusic, 2005)。本研究采用修正后的大小判断任务, 每次只在屏幕中央随机呈现一个目标数字(-9 到 +9, 除去-5、0、+5), 要求被试将目标数字与基线数字(-5 或+5)进行快速比较并做大小判断。该任务克服了先前研究只单独进行同号数字比较的情况, 目标数字随机出现使得被试无法忽视正负号或仅通过正负号做出判断, 因此能够突出正负号及其异同对数字空间关系的影响; 同时, 修正后的大小判断任务也不存在位置偏向以及语义一致性效应的干扰, 保证了研究的客观准确性。总的来说, 本研究能够真正发挥正负号对 SNARC 效应的影响, 从而探究不同数字符号下 SNARC 效应的大脑皮层分布差异。

鉴于前言与讨论部分已经多次提到先前研究中存在的方法缺陷, 因此, 在原稿中, 我们采用了较为简略的叙述。根据审稿专家的建议, 我们将“本研究消除了先前研究中存在的弊端”这一叙述进行了补充说明(详见讨论 4.4, 第 19 页 14-18 行蓝色字体部分), 具体内容如下:

本研究消除了先前研究中忽略数字正负号、仅通过数字正负做出判断、数字出现的空间位置以及语义一致性效应影响 SNARC 效应等弊端。因此能够真正体现正负号及其异同对 SNARC 效应的影响, 从而探究不同数字符号下 SNARC 效应的大脑皮层分布差异。本研究证明了正数与负数在空间反应编码上的皮层位置差异, 为正负号及其异同影响 SNARC 效应提供了生理证据。

(2) 回答第二个问题, 如审稿专家所述, 我们借用 Gut et al.(2012)研究中大小差异的原理来解释由于正负号差异引起的左右半球分离, 这一迁移看似简单, 却能够证明负数与正数具有不同的表征方式。首先, 正负号差异引起的左右半球分离并不仅仅是符号捷径机制在发挥作用, 因为当目标数字与基线数字同号时(不存在符号捷径机制), 若目标数字为正数, 则右额叶皮层出现激活, 若目标数字为负数, 则左额叶皮层出现激活。当目标数字与基线数字异号时(存在符号捷径机制), 若目标数字为正数, 右额叶皮层同样出现激活, 若目标数字为负数, 左额叶皮层同样出现激活。因此, 这种分离更多涉及正数与负数的不同表征。对于负数的空间表征, 先前研究存在个体发展论假说与系统进化论假说的争论, 两者争论的焦点是负数按照实际大小还是绝对值大小进行表征, 也就是负数可以独立表征或者必须依赖正数进行表征。当前研究表明负数与正数表征具有不同的优势半球, 能够从生理层面说明负数与正数的表征是彼此独立的。因此, 虽然本研究采用了和 Gut et al.(2012)一致的原理, 但是

意义并不局限于此。该结果对于 SNARC 效应，尤其是 SNARC 效应中负数表征方式的探讨具有重要意义和价值。

根据审稿专家的建议，我们在讨论 4.4 部分补充说明了这一结果的理论贡献和价值（详见第 19 页 12-14 行），具体内容如下：

这一结果说明负数与正数的表征具有不同的优势半球，从侧面说明负数与正数具有不同的空间表征方式，负数表征并不依赖正数，从而支持了个体发展论假说。

参考文献：

Fischer, M. H. (2003). Cognitive representation of negative numbers. *Psychological Science, 14*, 278–282.

Fischer, M. H., & Rottmann, J. (2005). Do negative numbers have a place on the mental number line. *Psychology Science, 47*, 22–32.

Gut, M., Szumska, I., Wasilewska, M., & Jaśkowski, P. (2012). Are low and high number magnitudes processed differently while resolving the conflict evoked by the SNARC effect? *International Journal of Psychophysiology Official Journal of the International Organization of Psychophysiology, 85*, 7–16.

Nuerk, H. C., Iversen, W., & Willmes, K. (2004). Notational modulation of the SNARC and the MARC (linguistic markedness of response codes) effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A, 57*, 835–863.

Shaki, S., & Petrusic, W. M. (2005). On the mental representation of negative numbers: context-dependent SNARC effects with comparative judgments. *Psychonomic Bulletin & Review, 12*, 931–937.

意见 15：结论太长，建议放到讨论第一段比较好。结论是简短概括性质的，不宜过多涉及太具体的结果和太详细的论述。

回应：非常感谢审稿专家的建议。

根据审稿专家的建议，结合修改意见第 11 条，我们将结论部分进行修改后移动到了讨论第一段，并对结论部分进行了重新叙述（详见第 19 页结论部分）。具体内容如下：

本研究利用修正后的大小判断任务来探究正负号及其异同对 SNARC 效应的影响。结果表明，负数表征遵循个体发展论假说；符号捷径机制使 SNARC 效应不仅发生于反应选择阶段，而且可能现于刺激呈现阶段与反应执行阶段；SNARC 效应会激活额叶与顶叶皮层，负数的 SNARC 效应激活左额叶皮层，正数的 SNARC 效应激活右额叶皮层。总之，本研究既解决了负数表征机制及 SNARC 效应发生时间的争论，又发现了正数与负数的 SNARC 效应的半球分布差异，这对全面深入地了解 SNARC 效应具有重要意义。

意见 16：参考文献中引用了 52 篇文献，只有 15 篇是近 5 年的文献（2011 年以后），不符合自检中的回答，请补充相应的新文献，如不能补充，请说明理由。

回应：非常感谢审稿专家的提醒与建议。我们已经在修改稿中补充了近五年的文献，补充之后，参考文献总共 52 篇，近五年的文献 23 篇，约占文献总数量的一半。

审稿人 3 意见：本研究采用行为和 ERP 的方法，结合偶极子分析技术，解决 SNARC 的机制问题和相关争议。研究具有理论上的创新意义，但还需要作出如下修改。

意见 1：第五页第一段中，Keus 等的研究结果描述不清楚，比如究竟是指什么 ERP 成分？一致反应是指什么？此结果为何能证明 SNARC 效应发生在反应选择阶段？

回应：非常感谢审稿专家的提醒与建议。

作者确实对 Keus 等人的研究描述过于简单，在 Keus 等人（2005）的研究中，研究者以 1-9（排除 5）的数字作为刺激材料，要求被试执行奇偶判断任务。对较小数字（1、2、3、4）按左键、较大数字（6、7、8、9）按右键为一致反应方式，对较小数字按右键、较大数字按左键则为不一致反应方式。研究者采用 LRP 成分来区分 SNARC 效应发生于反应选择阶段或是反应准备与执行阶段。LRP 与反应的准备与执行有关，通常作为反应准备阶段的反映。如果 LRP 的开始时间在一致反应与不一致反应条件下存在差异，即一致反应方式开始更快，那么 SNARC 效应发生于反应准备与执行阶段；如果 LRP 的开始时间在一致反应与不一致反应条件下并无差异，那么 SNARC 效应发生于反应选择阶段。锁定于反应的分析表明，Cz 和 Pz 两个电极上出现了数字大小与反应按键的交互，即出现了 SNARC 效应，该效应出现于反应执行前 380ms，持续 140ms 以上；锁定于刺激的分析表明，Pz 电极在 520-635ms 出现了 SNARC 效应。因为平均反应时为 515ms，所以这一结果说明 SNARC 效应发生于反应相关的阶段。随后对 LRP 进行分析以判断 SNARC 效应究竟发生于反应选择阶段还是反应准备与执行阶段，结果发现一致反应方式与不一致反应方式的锁定于反应的 LRP 并无显著差异，这说明 SNARC 效应并未出现于反应准备阶段，因此必然涉及先前反应选择阶段的加工。总之，该研究证明了 SNARC 效应发生于反应选择阶段，即 SNARC 效应反映了数字的心理表征到选择正确反应的映射而非到执行实际反应的映射。

根据审稿专家的建议，我们在引言第五段中对 Keus 的研究进行了补充说明（详见第 5 页第三段 4-13 行以及第 6 页第 1 行蓝色字体），补充内容如下：

Keus 等(2005)以 1-9（排除 5）的数字为刺激材料，要求被试执行奇偶判断任务。对较小数字（1、2、3、4）按左键、较大数字（6、7、8、9）按右键为一致反应方式，对较小数字按右键、较大数字按左键则为不一致反应方式。研究采用 LRP 成分来区分 SNARC 效应发生于反应选择阶段或是反应准备与执行阶段。在一致反应与不一致反应条件下，如果 LRP 的开始时间存在差异，则 SNARC 效应发生于反应准备与执行阶段；如果 LRP 的开始时间

并无差异，则 SNARC 效应发生于反应选择阶段。锁定于反应的分析表明，Cz 和 Pz 两个电极上出现了数字大小与反应按键的交互，即出现了 SNARC 效应，该效应出现于反应执行前 380ms，持续 140ms 以上；锁定于刺激的分析表明，Pz 电极在 520–635ms 出现了 SNARC 效应。因为平均反应时为 515ms，所以这一结果说明 SNARC 效应发生于反应相关的阶段。对 LRPs 的分析发现，一致反应方式与不一致反应方式的锁定于反应的 LRPs 并无显著差异，这说明 SNARC 效应并未出现于反应准备阶段，因此必然涉及先前反应选择阶段的加工。

意见 2：虽然提及了研究假设，但作者实际上并没有对结果有明确的预期，实际上是，作者对各种可能的结果都做出了预期。

回应：非常感谢审稿专家的提醒与建议。

作者在引言最后一段提出了研究假设，假设主要预期了三方面的内容：（1）当目标数字与基线数字同号且均为负数时，负数表征遵循个体发展论假说还是系统进化论假说；（2）当目标数字与基线数字正负号相异时，符号捷径机制对 SNARC 效应的发生时间的影响；（3）SNARC 效应的皮层位置与优势半球。

本实验共有四种目标数字与基线数字的组合形式，分别是：基线数字为+5、目标数字与基线数字同号；基线数字为+5、目标数字与基线数字异号；基线数字为-5、目标数字与基线数字同号；基线数字为-5、目标数字与基线数字异号。当谈到负数的空间表征问题时，需要以基线数字为-5、目标数字与基线数字同号（目标数字与基线数字均为负数）作为前提条件。而谈到符号捷径机制时，需要以基线数字为+5、目标数字与基线数字异号以及基线数字为-5、目标数字与基线数字异号（目标数字与基线数字异号）作为前提条件。因此，在进行假设预期时，我们区分了目标数字与基线数字均为负数这一前提条件以及目标数字与基线数字异号这一前提条件，分别对负数的空间表征以及 SNARC 效应的发生时间进行预期。因此，这里并不是对各种可能的结果都进行了预期，而是区分了前提条件，在特定条件下开展相应预期。

在对负数的空间表征进行预期时，作者确实预期了两种情况。非常非常感谢审稿专家的建议，根据审稿专家的建议，我们对这一预期进行了修改（详见引言最后一段，第 7 页第二段 3-5 行蓝色字体），保留了具有更大可能性的结果，以求预期更加准确合理。具体内容如下：

当目标数字与基线数字同号且均为负数时，一致反应方式快于不一致反应方式，负数按照其实际大小进行表征，结果支持个体发展论假说。

意见 3: 请报告被试的平均年龄，以及补充的 13 名被试的人口学数据。以及说明本研究是否经过伦理委员会的批准。

回应: 非常感谢审稿专家的建议。

16 名参与脑电实验的被试平均年龄为 21.88 ± 2.47 ; 补充的 13 名被试皆为女生, 年龄 19-30 岁, 平均年龄为 22.46 ± 3.18 。本研究经过了伦理委员会的批准。具体内容已经补充在 2.1 被试部分 (详见第 7 页 2.1 被试部分中的蓝色字体), 补充如下:

来自某大学的 16 名被试参加了脑电实验(11 名女生, 5 名男生, 年龄 19-27 岁, 平均年龄为 21.88 ± 2.47), 为确保实验结果的准确可靠性, 我们又招募了 13 名被试单独进行行为实验 (13 名女生, 年龄 19-30 岁, 平均年龄为 22.46 ± 3.18)。所有被试均为右利手, 视力或校正视力正常, 无精神病史, 身体健康。实验结束后给予被试一定数量的报酬。本实验已经经过伦理委员会批准。

意见 4: 在实验设计部分, 作者明确说明本实验包含 2(基线数字) \times 2(反应方式)种条件。但在数据处理时, 却变成了“按照基线数字(+5、-5)、正负号异同性(目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号)、按键反应方式(一致、不一致)三因素 8 种处理分别进行叠加”。

回应: 非常感谢审稿专家的建议。

在原稿中, 作者的叙述确实存在混淆, 给审稿专家造成了困扰。作者叙述“实验包含 2(基线数字) \times 2(反应方式)种条件, 每种条件包含 2 个组, 实验组的顺序在被试间进行平衡”。这样叙述是从具体实验分组出发, 考虑到基线数字与反应方式在不同实验组间是有差别的。具体来说, 所有的实验组共有四种条件, 即基线数字为+5、一致反应方式, 基线数字为-5、一致反应方式, 基线数字为+5、不一致反应方式, 基线数字为-5、不一致反应方式。但是, 如果从整体的实验设计出发, 必须考虑到目标数字这一因素。虽然在每个实验组中出现的目标数字没有差别 (-9 到+9 的数字, 排除-5、0、+5) (这也是我们在具体实验分组时没有加入这一因素的原因), 但目标数字与基线数字却有同号与异号之分, 即当基线数字为+5 时, 与基线数字同号的目标数字为+1、+2、+3、+4、+6、+7、+8、+9, 与基线数字异号的目标数字为-1、-2、-3、-4、-6、-7、-8、-9; 当基线数字为-5 时, 则相反。因此, 目标数字与基线数字同号或者异号也作为隐含条件存在。当从整体实验设计出发以及进行数据分析时, 实验设计实际为 2(基线数字: +5、-5) \times 2(正负号异同性: 目标数字与基线同号、目标数字与

基线数字异号) $\times 2$ (反应方式: 一致反应方式、不一致反应方式)的三因素被试内实验设计。根据审稿专家的建议, 我们对该部分的叙述进行了修改(详见第 8 页 2.3 实验设计中蓝色字体部分), 保留了数据分析时的实验设计。具体内容如下:

本实验为 2(基线数字: +5、-5) $\times 2$ (正负号异同性: 目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号) $\times 2$ (反应方式: 一致反应方式、不一致反应方式)的被试内设计, 以考察数字正负号及其异同对 SNARC 效应的影响。基线数字包括+5 与-5 两水平, 正负号异同性包括目标数字与基线数字同号以及目标数字与基线数字异号两水平, 反应方式包括一致反应方式与不一致反应方式两水平。实验包括 4 组练习和 8 组正式实验, 每组练习包含 16 个试次, 每组正式实验包含 96 个试次。

意见 5: EEG 记录和数据处理: 请作者注意, ERP 的一切结果只是头皮分布, 不能和脑区混为一谈。

回应: 非常感谢审稿专家的提醒。

作者在原稿中对这一概念存在混淆, 根据审稿专家的建议, 我们对这一概念进行了着重区分并在原文中进行了修改。修改主要涉及以下名词: 额区(改为额叶头皮位置)、顶区(改为顶叶头皮位置)、左额区(改为左额叶头皮位置)、右额区(改为右额叶头皮位置)、左顶区(改为左顶叶头皮位置)、右顶区(改为右顶叶头皮位置)、脑区(改为头皮位置)。具体内容已在修改稿中用蓝色字体标出, 考虑到修改非常分散且数量较多, 我们并未在此一一列出(详见第 11-12 页 3.2ERP 结果部分、第 18-19 页 4.3SNARC 效应的皮层定位、第 3 页摘要部分以及第 19 页结论部分)。

意见 6: 对于偶极子结果, 请报告残差值。

回应: 非常感谢审稿专家的提醒, 我们已经在修改稿中补充了残差值(详见第 14 页 3.2.5 偶极子溯源分析部分第 6-12 行), 具体内容如下:

溯源结果如图 4 所示: 当目标数字与基线数字正负号相同时(见图 4A), 若基线数字为+5, SNARC 效应主要定位于右侧额中回(残差为 4.98%), 若基线数字为-5, SNARC 效应主要定位于左侧额上回(残差为 7.37%); 当目标数字与基线数字正负号相异时(见图 4B、图 4C), 若基线数字为+5, SNARC 效应主要定位于左侧额上回(残差为 4.80%), 若基线数字为-5, SNARC 效应主要定位于右侧额中回(残差为 5.06%)和顶下小叶(残差为 5.51%)。这些结果表明, SNARC 效应主要激活了额叶与顶叶皮层。

意见 7: 作者认为行为结果的正确率 95% 以上, 出现了天花板效应, 所以并没有报告正确率结果。这个处理可能有点偏颇, 即使 95% 的正确率, 还是有可能出现不同条件之间的差异, 可能会得到有价值的结果。

回应: 非常感谢审稿专家的提醒与建议。

原稿对正确率的论断确实存在偏颇, 根据审稿专家的建议, 我们对正确率进行了 2(基线数字: +5、-5)×2(正负号的异同性: 目标数字与基线数字同号、目标数字与基线数字异号)×2(反应方式: 一致、不一致)的重复测量方差分析, 以探究正负号及其异同对正确率的影响。结果表明, 基线数字的主效应显著 [$F(1, 28)=12.32, p<0.01, \eta^2_p=0.31$], 基线数字为+5 时的正确率显著高于基线数字为-5 时的正确率 [$M_1=0.98, M_2=0.97, t(28)=3.51, p<0.01$]; 正负号异同性的主效应显著 [$F(1, 28)=34.29, p<0.001, \eta^2_p=0.55$], 目标数字与基线数字异号时的正确率显著高于同号时的正确率 [$M_1=0.99, M_2=0.97, t(28)=5.86, p<0.001$], 无其他交互作用。

这一结果与在反应时上所得结果基本一致, 可以与反应时共同说明正负号及其异同对 SNARC 效应的影响。根据审稿专家的建议, 我们在 3.1 行为结果部分补充了对正确率的分析并在讨论 4.1 对该结果进行了补充讨论 (详见 3.1 行为结果部分, 即第 10 页 6-10 行; 讨论 4.1, 即第 15 页第二段 1-2 行、第 16 页 1-2 行中的蓝色字体), 具体内容如下:

在正确率上, 基线数字的主效应显著 [$F(1, 28)=12.32, p<0.01, \eta^2_p=0.31$], 基线数字为+5 时的正确率显著高于基线数字为-5 时的正确率 [$M_1=0.98, M_2=0.97, t(28)=3.51, p<0.01$]; 正负号异同性的主效应显著 [$F(1, 28)=34.29, p<0.001, \eta^2_p=0.55$], 目标数字与基线数字异号时的正确率显著高于同号时的正确率 [$M_1=0.99, M_2=0.97, t(28)=5.86, p<0.001$], 无其他交互作用。

目标数字与基线数字异号时的反应时显著短于目标数字与基线数字同号时的反应时, 目标数字与基线数字异号时的正确率显著高于目标数字与基线数字同号时的正确率, 这可能是符号捷径机制在发挥作用。

基线数字为+5 时的反应时显著短于基线数字为-5 时的反应时, 基线数字为+5 时的正确率显著高于基线数字为-5 时的正确率, 这可能是由于数字频率的差异。

意见 8: 作者对于 ERP 成分的命名可能存在争议, 比如 P3b 成分, 文献中经典的 P3b 成分位于中后部头皮位置, 但本文中却是额区头皮位置。

回应: 非常感谢审稿专家的建议。

如审稿专家所述, 经典的 P3b 成分确实位于中后部头皮位置, 但也有研究表明, P3b 成分在某些条件下会出现于额叶头皮位置。

研究表明, Go 与 No-Go 任务在额区以及中央区电极上存在 P3 成分上的差异, 而顶区电极上并无这一差异, 这一成分开始于刺激呈现后 450ms 左右(Falkenstein, Koshlykova, Kiroj, Hoormann, & Hohnsbein, 1995; Roberts, Rau, Lutzenberger, & Birbaumer, 1994; Schupp, Lutzenberger, Rau, & Birbaumer, 1994)。这些研究认为, 额中央正电位是自动抑制的前提条件, 即自动抑制会伴随 P3b 成分出现于额中央位置。情绪领域的研究也表明, 效价会影响 P3b 成分的头皮分布, 正性图片相比于中性图片, 在额中央头皮位置诱发了更正的 P3b 成分(Delplanque, Silvert, Hot, Rigoulot, & Sequeira, 2006; Delplanque et al., 2004)。这一现象同样与冲突抑制有关, 即相比于中性刺激, 正性刺激的分类需要较强的自动抑制, 因此倾向于前额头皮分布。

以上研究说明, 当实验任务涉及冲突抑制时, P3b 会迁移至额叶头皮位置。在本研究中, 不一致反应条件下存在数字的心理数字线表征位置与反应位置间的冲突, 如果被试想要做出正确反应就必须对这一冲突进行抑制。这与上述研究中出现的冲突抑制相似。因此, 我们认为, 在 400-600ms 时间窗口, P3b 前移至额叶头皮位置, 一致反应与不一致反应在额叶头皮位置表现出 P3b 成分的差异。

参考文献:

- Delplanque, S., Lavoie, M. E., Hot, P., Silvert, L., & Sequeira, H. (2004). Modulation of cognitive processing by emotional valence studied through event-related potentials in humans. *Neuroscience Letters*, 356(1), 1-4.
- Delplanque, S., Silvert, L., Hot, P., Rigoulot, S., & Sequeira, H. (2006). Arousal and valence effects on event-related p3a and p3b during emotional categorization. *International Journal of Psychophysiology Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 60(3), 315-322.
- Diedrich, O., & Naumann, E. (1997). A frontal positive slow wave in the erp associated with emotional slides. *Journal of Psychophysiology*, 11(1), 71-84.
- Falkenstein, M., Koshlykova, N. A., Kiroj, V. N., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (1995). Late ERP components in visual and auditory go/nogo tasks. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 96(96), 36-43.
- Schupp, H. T., Lutzenberger, W., Rau, H., & Birbaumer, N. (1994). Positive shifts of event-related potentials: a state of cortical disfacilitation as reflected by the startle reflex probe. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 90(2), 135.
- Roberts, L. E., Rau, H., Lutzenberger, W., & Birbaumer, N. (1994). Mapping p300 waves onto inhibition: go/no-go discrimination. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 92(1), 44-55.

意见 9: 讨论部分 4.2 的第一段内容不符合 4.2 这个主题, 似乎更多为 SNARC 的脑机制(ERP 结果解释), 所以反而和 4.1 部分更为贴近。

回应: 非常感谢审稿专家的建议。

讨论部分 4.2 第一段内容确实解释了 SNARC 效应的脑机制, 根据审稿专家的建议, 我们将该部分调整至 4.1 对回归分析结果的讨论之后(详见讨论 4.1, 第 16 页 9-15 行蓝色字

体部分)。这样一来，讨论 4.1 部分先解释 SNARC 效应的行为表现，再解释 SNARC 效应的脑机制，最后利用心理数字线假设做出说明，结构更加合理，条理更加清晰。

意见 10: 关于 ERP 结果，作者认为是一致比不一致诱发了更正的 P3b。然而该结果也可以认为是不一致比一致条件诱发了更负的晚期负波，这种解释也符合大多数 ERP 文献中的分析，即冲突条件诱发负波，且该负波多分布在前中部头皮位置。

回应: 非常感谢审稿专家的建议。

作者在原稿中叙述“一致比不一致诱发更正的 P3b”确实存在混淆，根据审稿专家的建议，我们将“一致比不一致诱发更正的 P3b”这一叙述进行修改，修改为“不一致比一致条件更负且均诱发 P3b 成分”（详见摘要部分——第 3 页摘要 5-6 行、8-9 行，结果部分——第 12 页 3-6 行、9-12 行，讨论部分——第 16 页 10-11 行、第 16 页第 2 段 8-9 行）。

意见 11: 4.2 中第二段关于行为和 ERP 结果（行为不显著，ERP 边缘显著）的分析如何支持了个体发展论假说，还存在模糊不清，作者需要重新进行明晰的论述。

回应: 非常感谢审稿专家的提醒与建议。

我们对 4.2 部分进行了重新论述，重点从三个方面出发：行为结果不显著的原因，ERP 结果为什么能在行为结果不显著时解释负数的表征机制，ERP 结果如何说明负数表征遵循个体发展论假说（详见第 16 页第 2 段 2-10 行、第 17 页 1-6 行蓝色字体部分）。补充内容如下：

本研究的实验结果表明，一致反应与不一致反应在该条件下并无显著差异。这是因为较之于正数，负数表征并不稳定。正数被知觉为大数，但负数并不被知觉为小数。负数由负号和绝对值组成，负号在自动加工中代表了小数，但是绝对值部分却代表了一个更大的数。因此，两种成分的效应会相互干扰，使得负数的 SNARC 效应难以在行为结果中表现出来（Ganor-Stern & Tzelgov, 2008; Krajcsi & Igács, 2010）。ERP 技术具有很高的时间分辨率，能够监测加工的各个阶段，从而提供关于 SNARC 效应的深层次信息。本研究的脑电结果显示，在 400-600ms 时间窗口，不一致比一致条件更负且均诱发 P3b 成分。如前所述，P3b 的差异说明被试在一致反应条件与不一致反应条件下具有不同的刺激分类模式，一致条件不存在数字的空间表征位置与反应方式的冲突，而不一致条件存在并需要抑制这一冲突。一致反应方式要求被试对小于基线数字的数字按左键、对大于基线数字的数字按右键。与这一反应方式相对应，小于基线数字的数字表征在心理数字线左侧，大于基线数字的数字表征在右侧。

这说明负数按照实际值而非绝对值进行表征，该结果符合个体发展论假说。个体发展论假说认为，负数在心理数字线上有独立的空间编码，负数按其实际大小进行表征并必须依赖负号。因此，被试对实际数值较小的负数按左键更快，对实际数值较大的负数按右键更快(Shaki & Petrusic, 2005, 混合条件)。

参考文献：

- Ganor-Stern, D., & Tzelgov, J. (2008). Negative numbers are generated in the mind. *Experimental Psychology*, 55(3), 157–63.
- Krajcsi, A., & Igács, J. (2010). Processing negative numbers by transforming negatives to positive range and by sign shortcut. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22, 1021–1038.
- Shaki, S., & Petrusic, W. M. (2005). On the mental representation of negative numbers: context-dependent SNARC effects with comparative judgments. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 931–937.

意见 12: 请把更正的 N300 改成更小波幅的 N300, 以免引起歧义。一致比不一致诱发的 N300 波幅更小, 也符合以上的关于冲突的解释。

回应: 非常感谢审稿专家的提醒与建议。

我们已在修改稿中将更正的 N300 修改为更小波幅的 N300, 即一致比不一致诱发波幅更小的 N300 (详见第 3 页摘要部分第 6-7 行, 第 11 页 3.2.1 部分 5-6 行, 第 17 页讨论 4.3 部分 6-7 行)。

第二轮

审稿人 2 意见: 作者对初审的意见进行了较认真的回复, 对整体稿件进行了较细致的修改。修改后的稿件论述清晰, 格式规范, 是一篇水平较好的学术论文。正文中并没有使用 170-250,250-350,350-550,550-800 的时间窗口, 建议使用。

回应: 非常感谢审稿专家的建议, 我们已经将 170-250ms,250-350ms,350-550ms,550-800ms 时间窗口的分析补充在修改稿中(“图 3 SNARC 效应的地形图”以及“图 4 SNARC 效应的溯源分析结果”也依据修改后的时间窗口进行了重新绘制), 详见修改稿第 11 页-15 页, 3.2 ERP 结果部分。

审稿人 3 意见: 作者很好的回答了我所关注的所有问题, 建议可以接受发表。有一个小问题就是, 关于 P3b 的命名, 经典的分布于顶区头皮位置的 P3b (多为 oddball 范式诱发) 和本研究中的 P3b 的认知意义不同, 分布位置也不同, 为了避免混淆, 我还是建议在本研究中改成 P3。具体请作者自己把握。

回应：非常感谢审稿专家的提醒与建议。根据审稿专家的建议，我们已经在修改稿中将 P3b 成分修改为 P3 成分，详见修改稿黄色高亮部分。