

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：符号与非符号 SNARC 效应的发展：言语能力、视空间能力和工作记忆的作用

作者：蒋家丽；戚玥；雷秀雅；卢骊霏；于晓

第一轮

审稿人 1 意见：

这一研究揭示心理数轴能力的发展规律，采用了 2 个实验，均采用阿拉伯数字和非符号数字奇偶判断任务。符号数字和非符号数字有不同的心理数轴特征，且没有相关关系，有不同的发展规律，以及有不同的认知机制。作者认为，研究结果支持分离假设。符号与非符号的空间表征问题是数学认知领域重要的基础研究问题，其结果对于促进儿童早期数学能力发展也具有重要启示意义。研究结果比较聚焦说明了分离表征观点；只有一些较小问题建议作者思考以进一步提高论文质量。

意见 1：作者需要对过去研究有比较全面的综述，一些近期的研究需要作为研究背景加以介绍。此外需要概括过去的研究，观点不够清晰。

回应：非常感谢专家的建设性意见。在修改稿中，我们增加了符号与非符号 SNARC 效应的发展特点、预测性因素相关的近期研究成果，并进一步概括了过往的研究情况，厘清了相关观点，具体如下：

(1) 在修改稿的引言“1.1 符号与非符号 SNARC 效应的发展特点”中增加了 Prpic 等人(2023)、Uccula 等人(2020)、Prpic 等人(2020)、Cheng 和 Kibbe(2023)的近期研究成果作为研究背景加以介绍(见“1.1 符号与非符号 SNARC 效应的发展特点”部分第 2 页和第 3 页蓝色字体部分)。

例如：“Prpic 等人(2023)在英国大学生群体中同时探究了符号与非符号 SNARC 效应是否存在，结果表明符号任务中存在显著的 SNARC 效应，而非符号任务中并不存在该效应。Chan 和 Wong (2016)以中国学龄前儿童(6 岁)为被试，采用点阵数量判断任务也没有发现非符号 SNARC 效应的存在。不过，近些年来，研究者在物体大小(Uccula et al., 2020)、音节(Prpic et al., 2020)、甚至情绪效价(Pitt & Casasanto, 2018)等非符号领域都发现了 SNARC 效应。此外，Gazes 等人(2017)在黑猩猩等动物中也发现了非符号 SNARC 效应的存在，这可能意味着非符号 SNARC 效应独立于文化因。”

此外，在该部分，阐述完过往研究中关于符号 SNARC 效应的发展特点后，为了凸显研究非符号 SNARC 效应的重要性，我们新增加了 Cheng 和 Kibbe(2023)关于非符号系统重要性的相关论述，因为非符号 SNARC 效应是非符号加工系统的重要方面。例如“非符号数量加工系统通常被认为是一个基本而普遍的认知系统，它能够帮助个体在没有语言或正式符号的情况下量化事物。作为非符号数量加工的重要方面，对非符号领域 SNARC 效应的发展特点进行探究有助于更全面地了解个体数字-空间联结能力的发展(Cheng & Kibbe, 2023)”

(2) 在修改稿的引言第 3 页“1.2 符号与非符号 SNARC 效应的预测因素”中增加了王强强等人(2022)的研究成果作为背景介绍(见“1.2 符号与非符号 SNARC 效应的预测因素”部分第 4 页和第 5 页蓝色字体部分)。

例如：“van Dijck 和 Fias (2011)提出工作记忆理论，认为 SNARC 效应直接源于数字在工作记忆中的空间表征。具体而言，SNARC 效应的产生是由于工作记忆中的数字序列的前

/后位置与左/右空间形成联结而产生的一条短时的、新的心理数字线。最近,王强强等人(2022)的研究结果也支持了这一理论观点,他们发现通过系列实验操作诱导的干扰情境会干扰数量信息在工作记忆中的在线空间建构,即个体对干扰刺激的加工可能会抑制其数字加工中 SNARC 效应。”

(3) 在修改稿中,我们进一步对过去的研究进行了全面的综述,并明晰了观点。

首先,修改稿的“1.1 符号与非符号 SNARC 效应的发展特点”部分,梳理了从 1999 年至今关于符号与非符号 SNARC 效应发展特点的相关研究,被试群体涵盖英国、美国、中国、意大利、德国等不同国家,也增加了动物研究中存在 SNARC 效应的相关成果。对于目前存在分歧的研究结论(例如不同研究者对于 SNARC 效应最早出现的年龄以及其年龄变化规律所得出的分歧结论)进行了整理概括,并进一步提出了自己的观点。

具体的概括与观点如下(也可见第 3 页第 2 段):“在符号 SNARC 效应的发展特点方面,虽然有部分研究者在幼儿阶段发现了显著的符号 SNARC 效应(Zhou et al., 2007; Yang et al., 2014),但大部分研究者认为符号 SNARC 效应通常出现在已经开始接受正式数学学习的学龄儿童群体中,受到教育等的影响(Wood et al., 2008),在 8-9 岁左右稳定出现(Gibson & Maurer, 2016; White et al., 2012; Wu et al., 2020)。由此可以推测 8-9 岁左右可能是符号 SNARC 效应出现的重要时期。在非符号 SNARC 效应的发展特点方面,虽然有一些研究者在幼儿群体中并未发现其存在(Chan & Wong, 2016),但近期有研究者在婴幼儿,甚至动物身上就观测到了该效应(Bulf et al., 2016; de Hevia et al., 2017; Gazes et al., 2017),且学术界普遍认为新生儿、语前期儿童、甚至一些灵长类动物都能够感知非符号数量,并且在接受正式的数学教学前,儿童就已经具备操纵非符号数量加工的能力(Cai et al., 2023),同时 Ebersbach 等人(2014)也认为非符号 SNARC 效应的存在可能独立于正式的阅读和数学学习,由此可见非符号 SNARC 效应可能在未正式接受过教育的幼儿群体中就已经存在。

同时,通过梳理前人研究可以发现,目前虽然已有研究开始验证 SNARC 效应的存在及其出现的年龄阶段,但其选取的被试群体也往往局限于一个或少数几个年龄组。极少有研究同时系统探讨两种 SNARC 效应的随年龄发展变化的规律。而对这一问题的探讨不仅有助于从数字空间表征的角度澄清符号和非符号加工的关系,也有助于较为全面地了解个体数字与空间联结能力的发展特征。因此本研究同时关注符号与非符号两种 SNARC 效应,试图在较大的年龄范围内揭示二者的发展规律及关系。”

其次,我们对“1.2 符号与非符号 SNARC 效应的预测因素”部分的梳理从理论与实证两方面进行。相关理论机制方面,我们阐述了诸如双编码等理论(Gevers et al., 2010; Pavio, 1986)认为 SNARC 效应的发生发展既需要言语能力的参与,也需要视空间能力的参与;van Dijck 和 Fias(2011)的工作记忆理论认为 SNARC 效应直接源于数字在工作记忆中的空间表征,受到工作记忆的影响。这些均从理论角度说明符号、非符号 SNARC 效应和言语能力、视空间能力、工作记忆之间存在紧密关联。随后实证证据方面,我们列举了言语能力、视空间能力、工作记忆中的言语工作记忆、视空间工作记忆分别与符号、非符号 SNARC 存在相关的例证(具体可见第 3 页-5 页)。紧接着,本文对前人研究进行了概括与观点总结如下(具体可见第 5 页最后一段):

“在符号与非符号 SNARC 效应的预测性因素方面,依据 Paivio(1986)双重编码理论以及 Gevers 等人(2010)的视觉空间与言语空间双编码理论可知,SNARC 效应可能既涉及言语编码,又涉及视空间编码,故言语与视空间相关的认知因素和符号、非符号 SNARC 效应的发展之间可能存在一定关联。随后,符号与非符号加工系统的分离假说又提出非符号系统和符号系统相互独立,符号数字加工依赖精确表征,而非符号数字加工依赖于近似表征(Sasanguie et al., 2017),基于此,本研究预期虽然 SNARC 效应可能会受到言语相关因素和视空间相关因素的影响,但同一因素对符号与非符号 SNARC 效应的影响可能不同,即符号

和非符号 SNARC 效应具有不同的认知机制。一些实证研究也验证了这一点,例如, Imbo 等人(2012)发现相比于视空间机制,言语机制在驱动九岁儿童的符号 SNARC 效应上更具优势。Deng 等人(2017)发现符号 SNARC 效应更易受到言语工作记忆的影响。同时,目前已有许多研究证实言语相关认知因素与符号数量加工之间关联密切,与非符号数量加工之间不存在相关(Yang et al., 2020),视空间相关因素与非符号数量加工之间存在紧密关联,但与符号数量加工之间相关不显著(Formoso et al., 2017; Gibson & Maurer, 2016; Yang et al., 2020)。而 SNARC 效应作为数量加工的一个重要方面,可能也会出现与数量加工研究相似的结果。基于上述理论与实证支撑,本研究推测言语能力、视空间能力、言语工作记忆、视空间工作记忆可能是和符号与非符号 SNARC 效应存在紧密关联的重要认知因素,且不同的认知因素可能与不同类型的 SNARC 效应相联系。”

参考文献:

- Bulf, H., de Hevia, M. D., & Macchi Cassia, V. (2016). Small on the left, large on the right: Numbers orient visual attention onto space in preverbal infants. *Developmental Science*, *19*(3), 394–401.
- Chan, W. W. L., & Wong, T. T. (2016). The underlying number–space mapping among kindergarteners and its relation with early numerical abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, *148*, 35–50.
- Cheng, C., & Kibbe, M. M. (2023). Is nonsymbolic arithmetic truly “arithmetic”? Examining the computational capacity of the approximate number system in young children. *Cognitive Science*, *47*(6), e13299.
- de Hevia, M. D., Veggiotti, L., Streri, A., & Bonn, C. D. (2017). At birth, humans associate “few” with left and “many” with right. *Current Biology*, *27*(24), 3879–3884.
- Formoso, J., Barreyro, J. P., Jacobovich, S., & Injoke-Ricle, I. (2017). Possible associations between subitizing, estimation and visuospatial working memory (VSWM) in children. *The Spanish Journal of Psychology*, *20*, e27.
- Gazes, R. P., Diamond, R. F. L., Hope, J. M., Caillaud, D., Stoinski, T. S., & Hampton, R. R. (2017). Spatial representation of magnitude in gorillas and orangutans. *Cognition*, *168*, 312–319.
- Gevers, W., Santens, S., Dhooge, E., Chen, Q., Van den Bossche, L., Fias, W., & Verguts, T. (2010). Verbal–spatial and visuospatial coding of number–space interactions. *Journal of Experimental Psychology General*, *139*(1), 180–190.
- 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.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. New York: Oxford University Press.
- Pitt, B., & Casasanto, D. (2018). Spatializing emotion: No evidence for a domain-general magnitude system. *Cognitive Science*, *42*(7), 2150–2180.
- Prpic, V., Basamh, Y. A., Goodridge, C. M., Agostini, T., & Murgia, M. (2023). Contrasting symbolic and non-symbolic numerical representations in a joint classification task. *Psychonomic Bulletin & Review*. Advance online publication.
- Prpic, V., Soranzo, A., Santoro, I., Fantoni, C., Galmonte, A., Agostini, T., & Murgia, M. (2020). SNARC-like compatibility effects for physical and phenomenal magnitudes: A study on visual illusions. *Psychological Research*, *84*(4), 950–965.
- Uccula, A., Enna, M., & Treccani, B. (2020). Compatibility between response position and either object typical size or semantic category: SNARC- and MARC-like effects in primary school children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *189*, Article 104682.
- Wang, Q. Q., Zhang, Q., Shi, W. D., Wang, Z. W., & Zhang, Z. P. (2022). Online construction of spatial representation of numbers: Evidence from the SNARC effect in number processing in interferential situations. *Acta Psychologica Sinica*, *54*(07), 761–771.
- [王强强, 张琦, 石文典, 王志伟, 章鹏程. (2022). 数字空间表征的在线建构: 来自干扰情境中数字 SNARC 效应的证据. *心理学报*, *54*(07), 761–771.]
- White, S. L. J., Dñes, S., & Fruzina, S. (2012). Symbolic number: The integration of magnitude and spatial representations in children aged 6 to 8 years. *Frontiers in Psychology*, *2*, Article 392.
- Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number a meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science Quarterly*, *50*(4), 489–525.
- Wu, H., Yang, X., Geng, L., Zhu, X., & Chen, Y. (2020). How do working memory and inhibition contribute to the SNARC effect in Chinese school-aged children? *Cognitive Development*, *56*, 100959.
- Yang, T., Chen, C., Zhou, X., Xu, J., Dong, Q., & Chen, C. (2014). Development of spatial representation of numbers: A study of the SNARC effect in Chinese children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *117*, 1–11.
- Yang, X., & McBride, C. (2020). How do phonological processing abilities contribute to early Chinese reading and mathematics? *Educational psychology (Dorchester-on-Thames)*, *40*(7), 893–911.

Yang, X., Zhang, X., Huo, S., & Zhang, Y. (2020). Differential contributions of cognitive precursors to symbolic versus non-symbolic numeracy in young Chinese children. *Early Childhood Research Quarterly*, 53, 208–216.

Zhou, X., Chen, Y., Chen, C., Jiang, T., Zhang, H., & Dong, Q. (2007). Chinese kindergartners' automatic processing of numerical magnitude in stroop-like tasks. *Memory & Cognition*, 35(3), 464–470.

意见 2: 作者提出了 2 个假设（不同起点和不同认知机制）。需要有明确的理由或者支持的证据。

回应: 非常感谢专家的建设性意见。首先，修改稿中，我们进一步补充了假设支持证据并提出明确的理由。

首先，关于“符号与非符号 SNARC 效应不同的年龄起点”的假设，有研究者提出符号 SNARC 效应会受到后天教育与文化因素的影响(van Galen & Reitsma, 2008)，且 8-9 岁儿童是目前大部分研究者发现的符号 SNARC 效应所出现的年龄阶段(Bulf et al., 2016; White et al., 2012; Wu et al., 2020)”，本研究据此推测“符号 SNARC 效应可能出现在学龄期 8-9 岁儿童群体中”。“而学术界普遍认为新生儿、语前期儿童、甚至一些灵长类动物都能够感知非符号数量，并且在接受正式的数学教学前，儿童就已经具备操纵非符号数量加工的能力(Cai et al., 2023)，同时 Ebersbach 等人(2014)也认为非符号 SNARC 效应的存在可能独立于正式的阅读和数学学习”，本研究据此推测非符号 SNARC 效应在 6-7 岁学前儿童群体中就已经出现。

其次，关于“符号与非符号 SNARC 效应不同认知机制”的假设。我们从理论与实证研究证据两个层面进行论述，(1)在理论层面：双重编码理论(Paivio, 1986)认为个体数量加工的过程中同时需要言语系统和视空间系统的参与。在此基础上，视觉空间与言语空间双编码理论(Gevers et al., 2010)也提出 SNARC 效应既会受到言语系统编码的影响，也会受到视觉系统编码的影响。而符号与非符号加工系统的分离假说认为非符号系统和符号系统相互独立，符号数字加工依赖精确表征，而非符号数字加工依赖于近似表征(Sasanguie et al., 2017)，基于此，我们推测 SNARC 效应可能会受到言语认知因素和视空间认知因素的影响，但同一因素对符号与非符号 SNARC 效应的影响可能不同，二者具有不同的认知机制。(2)在实证研究层面：目前直接证明符号、非符号 SNARC 效应与言语工作记忆、视空间工作记忆、言语能力、视空间能力关系的实证研究较少，在少有的研究中，“Imbo 等人(2012)发现相比于视空间机制，言语机制在驱动九岁儿童的符号 SNARC 效应上更具优势。Deng 等人(2017)发现符号 SNARC 效应更易受到言语工作记忆的影响”。此外，“目前已有许多研究证实言语相关认知因素与符号数量加工之间关联密切，与非符号数量加工之间不存在相关(Yang et al., 2020)，视空间相关因素与非符号数量加工之间存在紧密关联，但与符号数量加工之间相关不显著(Formoso et al., 2017; Gibson & Maurer, 2016; Yang et al., 2020)。而 SNARC 效应作为数量加工的一个重要方面，可能也会出现与数量加工研究相似的结果”。基于上述理论与实证支撑，我们推测符号 SNARC 效应可能与言语能力、言语工作记忆存在较大关联，非符号 SNARC 效应可能与视空间能力、视空间工作记忆相关联。(具体内容可见“1.2 符号与非符号 SNARC 效应的预测因素”部分下第 5 页最后一段和第 6 页第一段蓝色字体部分)

参考文献：

- Cai, Y., Hofstetter, S., & Dumoulin, S. O. (2023). Nonsymbolic numerosity maps at the occipitotemporal cortex respond to symbolic numbers. *The Journal of Neuroscience*, 43(16), 2950–2959.
- Deng, Z. J., Chen, Y. H., Zhu, X. S., & Li, Y. J. (2017). The effect of working memory load on the SNARC effect: Maybe tasks have a word to say. *Memory & Cognition*, 45, 428–441.
- Ebersbach, M., Luwel, K., & Verschaffel, L. (2014). Further evidence for a spatial-numerical association in children before formal schooling. *Experimental Psychology*, 61(4), 323–329.
- Formoso, J., Barreyro, J. P., Jacobovich, S., & Injoque-Ricle, I. (2017). Possible Associations between Subitizing,

- Estimation and Visuospatial Working Memory (VSWM) in Children. *The Spanish Journal of Psychology*, 20, e27.
- Georges, C., Hoffmann, D., & Schiltz, C. (2018). Implicit and explicit number–space associations differentially relate to interference control in young adults With ADHD. *Frontiers in Psychology*, 9, Article 775.
- Gevers, W., Santens, S., Dhooge, E., Chen, Q., Van den Bossche, L., Fias, W., & Verguts, T. (2010). Verbal–spatial and visuospatial coding of number–space interactions. *Journal of Experimental Psychology General*, 139(1), 180–190.
- 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.
- Imbo, I., de Brauwer, J., Fias, W., & Gevers, W. (2012). The development of the SNARC effect: Evidence for early verbal coding. *Journal of Experimental Child Psychology*, 111, 671–680.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. New York: Oxford University Press.
- Sasanguie, D., De Smedt, B., & Reynvoet, B. (2017). Evidence for distinct magnitude systems for symbolic and non-symbolic number. *Psychological Research*, 81(1), 231–242.
- van Galen, M. S., & Reitsma, P. (2008). Developing access to number magnitude: A study of the SNARC effect in 7- to 9-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 101(2), 99–113.
- White, S. L. J., Dánes, S., & Fruzina, S. (2012). Symbolic number: The integration of magnitude and spatial representations in children aged 6 to 8 years. *Frontiers in Psychology*, 2, Article 392.
- Wu, H., Yang, X., Geng, L., Zhu, X., & Chen, Y. (2020). How do working memory and inhibition contribute to the SNARC effect in Chinese school-aged children? *Cognitive Development*, 56, 100959.
- Yang, X., Zhang, X., Huo, S., & Zhang, Y. (2020). Differential contributions of cognitive precursors to symbolic versus non-symbolic numeracy in young Chinese children. *Early Childhood Research Quarterly*, 53, 208–216.

意见 3: 在前言部分提出假设模型，是非常清晰的，但是与假设一样，缺少背后的原理或者证据。

回应: 非常感谢专家的建设性意见与提醒。针对该模型，首先，在理论层面，双重编码理论 (Paivio, 1986) 认为个体数量加工的过程中同时需要言语系统和视空间系统的参与。在此基础上，视觉空间与言语空间双编码理论 (Gevers et al., 2010) 也提出 SNARC 效应既会受到言语系统编码的影响，也会受到视觉系统编码的影响。而符号与非符号加工系统的分离假说认为非符号系统和符号系统相互独立，符号数字加工依赖精确表征，而非符号数字加工依赖于近似表征 (Sasanguie et al., 2017)，基于此，我们推测 SNARC 效应可能会受到言语认知因素和视空间认知因素的影响，但同一因素对符号与非符号 SNARC 效应的影响可能不同，二者具有不同的认知机制 (具体可见第 5 页最后一段和第 6 页第一段蓝色字体部分)。

其次，在实证研究层面，我们在“1.2 符号与非符号 SNARC 效应的预测因素”中对现有的实证研究进行了梳理，发现目前关于符号、非符号 SNARC 效应与工作记忆、言语能力、视空间能力之间关系的相关研究较少，在少有的研究中，Bachot 等人 (2005) 发现视空间能力是 SNARC 效应产生的重要因素；Imbo 等人 (2012) 发现相比于视空间机制，言语机制在驱动九岁儿童的符号 SNARC 效应上更具优势；Deng 等人 (2017) 发现符号 SNARC 效应更易受到言语工作记忆的影响。不过目前有大量研究集中于从数量加工，如计数、算数等角度去探讨言语认知因素、视空间认知因素和符号与非符号加工之间的关系。如“Formoso 等人 (2017) 发现工作记忆中的视空间工作记忆能够正向预测非符号数量加工；Yang 等人 (2020) 的研究结果显示言语相关认知因素与符号数量加工之间关联密切，与非符号数量加工之间不存在相关，视空间能力对非符号数量加工具有正向预测作用，与符号数量加工之间不存在关联等”。虽然这些研究并未直接探讨言语、视空间因素和符号与非符号 SNARC 效应的关系，但 SNARC 效应属于数量加工的重要方面，故这些证据具有支撑作用。由此，本研究可以推测符号 SNARC 效应可能与言语认知因素存在较大关联，非符号 SNARC 效应可能与视空间认知因素相关联。

参考文献:

- Bachot, J., Gevers, W., Fias, W., & Roeyers, H. (2005). Number sense in children with visuospatial disabilities: Orientation of the mental number line. *Psychology Science*, 47(1), 172–183.

- Deng, Z. J., Chen, Y. H., Zhu, X. S., & Li, Y. J. (2017). The effect of working memory load on the SNARC effect: Maybe tasks have a word to say. *Memory & Cognition*, *45*, 428–441.
- Formoso, J., Barreyro, J. P., Jacobovich, S., & Injocque-Ricle, I. (2017). Possible Associations between Subitizing, Estimation and Visuospatial Working Memory (VSWM) in Children. *The Spanish Journal of Psychology*, *20*, e27.
- Gevers, W., Santens, S., Dhooge, E., Chen, Q., Van den Bossche, L., Fias, W., & Verguts, T. (2010). Verbal–spatial and visuospatial coding of number–space interactions. *Journal of Experimental Psychology General*, *139*(1), 180–190.
- 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.
- Imbo, I., de Brauwier, J., Fias, W., & Gevers, W. (2012). The development of the SNARC effect: Evidence for early verbal coding. *Journal of Experimental Child Psychology*, *111*, 671–680.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. New York: Oxford University Press.
- Sasanguie, D., De Smedt, B., & Reynvoet, B. (2017). Evidence for distinct magnitude systems for symbolic and non-symbolic number. *Psychological Research*, *81*(1), 231–242.
- Yang, X., Zhang, X., Huo, S., & Zhang, Y. (2020). Differential contributions of cognitive precursors to symbolic versus non-symbolic numeracy in young Chinese children. *Early Childhood Research Quarterly*, *53*, 208–216.

意见 4: 非符号数量的奇偶判断是建立在数字化的基础之上的，目前观察到的分离的效应可能主要与非符号到符号的转换过程有关，包括不同的起点和不同的认知机制，需要有讨论，也是此类研究的局限性（即存在转换过程）。

回应: 非常感谢审稿专家的建设性意见。由于我们在本研究中，采用的是奇偶判断任务，且非符号材料的数量在 1-9 之间，被试在完成非符号奇偶判断任务时，理论上的确有存在非符号到符号转换过程的可能性。但本研究的实证结果可能不完全支持一定存在非符号到符号的转换过程。理由如下：首先，发展特点方面，如果被试需要将非符号数量转化为符号数字再进行奇偶判断，那么符号 SNARC 效应存在应为出现非符号 SNARC 效应出现的前提。但本研究发现非符号 SNARC 效应出现更早；更重要的是，我们在研究一同时存在符号与非符号 SNARC 效应的 8-9 岁儿童和成人团体中，通过对每为被试的符号与非符号回归斜率进行分析发现，在非符号回归斜率为负的 76 名被试（回归斜率均值为 -67.29）中，有 10 名被试的符号回归斜率为正（回归斜率均值为 38.73），由此可见出现非符号效应 SNARC 效应的被试并不一定出现符号 SNARC 效应，而如果存在转换过程可能需要所有被试都具有符号 SNARC 效应，但目前有一定比例的被试仅有非符号 SNARC 效应。其次，认知机制方面，如果完成非符号奇偶判断任务包含非符号向符号的转换以及符号奇偶判断（和符号空间表征的激活）两个过程，则观察到的非符号和符号 SNARC 效应的预测因素应有一定的重叠，然而本研究中，二者的预测因素是相互分离的。

然而，以上分析均是由本研究数据结果反推得到的，存在一定的局限性，未来研究还需要从任务设计方面直接排除非符号到符号的转换过程后，再次检验本研究的研究问题。因此，在“4.3 本研究的优势与局限性”（具体可见第 25 页第 2 段）中也补充了相应的内容：“第四，虽然本研究采用的非符号奇偶判断任务来自以往经典研究(Nuerk et al., 2005)，且形式相似的刺激材料的近期研究中也有使用(Cutini et al., 2019)。不过也有研究者认为探究非符号 SNARC 效应时应排除感数范围内的非符号数量材料(Nemeh et al., 2018)，否则可能会引发非符号向符号转换的心理过程。因此，未来研究可以排除感数范围的刺激并采用数量判断等任务进一步探究非符号 SNARC 效应的年龄特点及认知机制，进而与符号 SNARC 效应对比”。

参考文献:

- Nuerk, H., Wood, G., & Willmes, K. (2005). The universal SNARC effect: The association between number magnitude and space is amodal. *Experimental Psychology*, *52*(3), 187–194.
- Cutini, S., Aleotti, S., Di Bono, M. G., & Priftis, K. (2019). Order versus chaos: The impact of structure on number-space associations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *81*, 1781–1788.
- Nemeh, F., Humberstone, J., Yates, M. J., & Reeve, R. A. (2018). Non-symbolic magnitudes are represented

意见 5: 研究结果部分，需要报告左右手的反应速度的反应速度和错误率，目前表格中报告的是两手差值，与图有重复可能。

回应: 非常感谢专家的建设性意见。首先，我们对左右手的反应速度情况进行了补充(如表 1 所示)，替代了原先表格中的两手差值相关情况，减少了与图重复的可能(具体见修改稿第 10 页“2.2.1 各年龄组在两类 SNARC 效应任务中的描述统计”蓝色字体部分)。

其次，关于左右手错误率的问题，参照前人研究数据处理方法(White et al., 2012; Yang et al., 2014)，纳入分析处理的数据均是被试在符号与非符号奇偶判断任务中左右手反应正确试次反应时，删除了被试错误试次的的数据。不过我们也补充了各被试群体在符号与非符号奇偶判断任务中的平均错误率，如“通过描述性分析还发现所有年龄组被试在两种任务类型下的总平均错误率为 12.03%。其中，在符号奇偶判断任务中，总平均错误率为 13.17%，从 6-7 岁儿童至成人四个年龄群体的平均错误率分别为 14.21%、14.40%、13.36%和 3.13%；在非符号奇偶判断任务中，总平均错误率为 10.89%，从 6-7 岁儿童至成人四个年龄群体的平均错误率分别为：13.69%、14.52%、12.14%和 2.84%。”（具体可见第 10 页“2.2.1 各年龄组在两类 SNARC 效应任务中的描述统计”的最后一段）。

表 1 各年龄组在符号与非符号奇偶判断任务中的左右手平均反应时(ms)

量级	反应手		符号奇偶判断任务				非符号奇偶判断任务			
			6-7 岁	7-8 岁	8-9 岁	成人	6-7 岁	7-8 岁	8-9 岁	成人
非常小	右手	M	1629.90	1146.11	1062.31	613.06	1560.70	1124.46	1166.23	740.10
		SD	336.59	298.49	215.52	88.47	388.00	261.27	278.37	107.14
	左手	M	1579.23	1039.76	930.81	531.05	1396.31	1049.99	1042.01	646.35
		SD	348.54	240.21	212.45	66.49	271.92	198.65	201.40	43.78
	dRT	M	50.67	106.34	132.35	82.01	164.38	74.47	134.12	93.75
	小	右手	M	1778.45	1142.37	1040.21	581.29	1623.44	1137.55	1175.93
SD			445.36	276.32	231.75	73.68	436.73	254.54	339.13	150.63
左手		M	1705.85	1140.12	970.47	537.19	1557.71	1097.82	1142.37	653.57
		SD	389.96	359.88	177.77	62.63	450.18	269.35	274.72	105.48
dRT		M	72.60	2.25	66.00	44.10	65.73	39.73	43.35	64.26
大		右手	M	1839.24	1226.57	1032.03	541.04	1871.93	1529.89	1355.14
	SD		543.33	335.68	280.26	76.76	703.93	423.48	397.46	167.72
	左手	M	1797.23	1207.98	1092.73	600.98	1980.72	1618.86	1544.99	935.03
		SD	542.33	290.52	239.77	80.67	712.47	441.28	475.06	254.15
	dRT	M	42.01	18.59	-54.51	-59.94	-108.79	-88.97	-167.16	-75.27
	非常大	右手	M	1880.88	1238.13	985.64	532.51	1926.38	1536.89	1584.18
SD			389.51	377.97	224.89	63.19	676.96	512.58	520.09	208.92
左手		M	1770.35	1121.94	1056.61	640.67	2127.60	1800.97	1697.88	994.68
		SD	383.87	272.76	239.75	107.38	708.18	564.96	421.46	235.54
dRT		M	110.53	116.18	-68.02	-108.17	-201.23	-264.07	-120.56	-81.62

注：dRTs=右手平均反应时-左手平均反应时

参考文献:

Yang, T., Chen, C., Zhou, X., Xu, J., Dong, Q., & Chen, C. (2014). Development of spatial representation of

numbers: A study of the SNARC effect in Chinese children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 117, 1–11.

White, S. L. J., D'Ánes, S., & Fruzsina, S. (2012). Symbolic number: The integration of magnitude and spatial representations in children aged 6 to 8 years. *Frontiers in Psychology*, 2, Article 392.

意见 6: 在讨论部分, 对于心理数轴不同的起点和不同的认知机制, 需要讨论其背后的原因。

回应: 非常感谢专家的建设性意见。首先, 关于符号与非符号 SNARC 效应所出现的年龄阶段不同(即起点不同: 符号 SNARC 效应出现在 8-9 岁儿童群体中, 非符号 SNARC 效应出现在 6-7 岁儿童群体中), 其原因可能是: “符号 SNARC 效应需要个体具备加工符号数字的能力, 即只有当符号数字的大小被明确加工时, 符号 SNARC 效应才会出现(Yang et al., 2014), 这意味着符号 SNARC 效应会受到文化教育等的影响(Zhou et al., 2007)”, 因此其可能在接受正式教育的学龄儿童群体中才会出现。而“在接受正式的教育之前, 婴儿可能会先发展出一个负责非符号数字加工的近似系统(Cheng & Kibbe, 2023; de Hevia et al., 2017)。同时, Patro、Haman(2012)以及 Ebersbach 等人(2014)也提出非符号 SNARC 效应的存在可能独立于正式的阅读和数学学习”, 由此可见, 非符号 SNARC 效应可能会出现在学龄前阶段的儿童中(具体可见第 21 页蓝色字体部分)。同时, 非符号 SNARC 效应也可能出现在 6 岁以下的儿童群体中, 只是在本研究中被试的最小年龄是 6 岁, 针对这一点, 我们在第 24 页“4.3 本研究的优势与局限性”中对此进行了补充, 如“本研究中选取的最小被试群体是 6 岁, 虽然该年龄群体已经表现出明显的非符号 SNARC 效应, 但目前并不清楚非符号 SNARC 效应是否存在于 6 岁之前的儿童群体中, 且本研究结果无法说明非符号 SNARC 效应是先天的还是后天的, 未来的研究者可以从更小的年龄群体中去验证非符号 SNARC 效应的年龄特点。”

其次, 针对两种 SNARC 效应可能具有不同的认知机制, 其背后的原因可能有: (1) 认知行为角度, 在研究二中, 我们通过实验研究证实符号与非符号 SNARC 效应具有不同的预测性因素, 在第 22 页“4.2 言语能力、视空间能力和工作记忆对符号 SNARC 及非符号 SNARC 效应的差异性预测作用”中, 我们进一步分析了①言语认知因素在个体符号 SNARC 效应发展过程中所起的作用, 即在符号奇偶判断任务中个体需要对符号数字进行语义加工, 而非直接对其数量或空间信息进行加工(Yang et al., 2014)。这也支持了 Proctor 和 Cho(2006)的极性编码理论, 如个体对符号数字和空间的加工可能会采取两极的语义编码形式, 如对数字进行“小”或“大”的语义编码, 对空间进行“左”或“右”的语义编码, 当数字中对应“小”的一极与空间表征中对应“左”的一极产生了重叠或当数字中对应“大”的一极与空间表征中对应“右”的一极产生了重叠时, 就可能会导致符号 SNARC 效应的产生。具体而言, “言语能力中的快速自动命名通常被认为是存储存储在长期记忆中的信息访问率, 有助于识别符号数字(Yang & McBride, 2020), 且符号数字加工能力和快速自动命名能力都依赖于对符号形式(数字)和语音形式(数字词发音)之间任意关联的学习和检索; 而语音意识作为言语能力的重要成分, 需要经过一定阶段的学习与发展来获得对语言符号的掌握, 这与符号数字的学习加工过程类似, 二者可能都需要以共同的一般符号能力作为基础(Escobar et al., 2021); 同时有研究者发现语音记忆有助于获得口语数字编码的语音结构, 并且符号算术需要语音记忆来临时存储语音信息, 以便进行问题解决(Noel et al., 2003)”(具体可见第 23 页蓝色字体部分)。由此可见, 符号 SNARC 效应作为符号数量加工的重要方面, 与言语能力之间关联紧密, 并且言语能力对其可能存在促进作用。

②视空间认知因素在个体非符号 SNARC 效应发展过程中所起的作用, 即在非符号奇偶判断任务中, 点呈现在空间的不同位置, 需要被试在一定时间内根据点阵的数量做出奇偶判断。而视空间能力可以有效帮助个体利用视空间信息和相关资源来更好、更快地记忆点阵的数量。尤其在 T2 阶段, 随着任务参与者(尤其是儿童)年龄的增长, 视空间能力较高的个体可能会采用一些视觉策略来解决非符号问题, 如通过直观地估计点阵数量, 快速确认点的多少(Yang et al., 2020), 进而该数量的相对大小会更迅速地自动激活其表征对应的心理空间位

置。具体而言,“视空间能力中的视知觉能帮助个体有效利用视空间资源,快速识别非符号点阵数量的空间关系(Yang et al., 2020),而心理旋转涉及图像的空间存储和心理表征,有助于数量的空间表征(Yang & Yu, 2021),由此可见二者有助于个体在大脑中快速识别点阵的状态并激活非符号数量的空间表征,促使非符号 SNARC 效应的产生,对非符号 SNARC 效应具有正向促进作用”(具体可见第 23 页蓝色字体部分),这些证据均表明符号与非符号 SNARC 效应具有不同的认知机制。

(2)认知神经科学的角度,以往研究表明,符号数字和非符号数字加工激活的脑部区域不同,“符号数字加工过程中会激活角回和缘上回,而非符号数字加工过程中会激活枕中回、脑岛和额上回(Peters et al., 2016)”(具体可见第 22 页蓝色字体部分)。

参考文献:

- Cheng, C., & Kibbe, M. M. (2023). Is nonsymbolic arithmetic truly “arithmetic”? Examining the computational capacity of the approximate number system in young children. *Cognitive Science*, 47(6), e13299.
- de Hevia, M. D., Veggioni, L., Streri, A., & Bonn, C. D. (2017). At Birth, Humans Associate “Few” with Left and “Many” with Right. *Current Biology*, 27(24), 3879–3884.
- Ebersbach, M., Luwel, K., & Verschaffel, L. (2014). Further evidence for a spatial-numerical association in children before formal schooling. *Experimental Psychology*, 61(4), 323–329.
- Escobar, J., Porflitt, F., & Ceric, F. (2021). Evaluating the rapid automatized naming and arithmetical fluency relationship in Chilean first grade students. *Educational psychology (Dorchester-on-Thames)*, 41(6), 730–747.
- Noel, M. P., Seron, X., & Trovarelli, F. (2003). Working memory as a predictor of addition skills and addition strategies in children. *Current Psychology of Cognition*, 22(1), 3–24.
- Patro, K., & Haman, M. (2012). The spatial–numerical congruity effect in preschoolers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 111(3), 534–542.
- Peters, L., Polspoel, B., de Beeck, H. O., & De Smedt, B. (2016). Brain activity during arithmetic in symbolic and non-symbolic formats in 9-12 year old children. *Neuropsychologia*, 86(C), 19–28.
- Proctor, R. W., & Cho, Y. S. (2006). Polarity correspondence: A general principle for performance of speeded binary classification tasks. *Psychological Bulletin*, 132(3), 416–442.
- Yang, T., Chen, C., Zhou, X., Xu, J., Dong, Q., & Chen, C. (2014). Development of spatial representation of numbers: A study of the SNARC effect in Chinese children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 117, 1–11.
- Yang, X., & McBride, C. (2020). How do phonological processing abilities contribute to early Chinese reading and mathematics? *Educational psychology (Dorchester-on-Thames)*, 40(7), 893–911.
- Yang, X., & Yu, X. (2021). The relationship between mental rotation and arithmetic: do number line estimation, working memory, or place-value concept matter? *British Journal of Educational Psychology*, 91(3), 793–810.
- Yang, X., Zhang, X., Huo, S., & Zhang, Y. (2020). Differential contributions of cognitive precursors to symbolic versus non-symbolic numeracy in young Chinese children. *Early Childhood Research Quarterly*, 53, 208–216.
- Zhou, X., Chen, Y., Chen, C., Jiang, T., Zhang, H., & Dong, Q. (2007). Chinese kindergartners' automatic processing of numerical magnitude in Stroop-like tasks. *Memory & Cognition*, 35(3), 464–470.
-

审稿人 2 意见:

本研究在不同年龄组上对比了符号和非符号 SNARC 效应,发现非符号 SNARC 效应在 6-7 岁儿童上已经出现,而符号 SNARC 效应在 8-9 岁儿童上采出现,并且均与成年人组没差异,说明不同类型的 SNARC 效应出现在不同的年龄关键期。同时一旦出现,并不会随着年龄的变化而发生显著变化。在此基础上,又进一步在 8-9 岁关键学龄组儿童上做了追踪研究,发现不同的认知能力对不同 SNARC 效应具有预测作用,其中言语能力和言语工作记忆对符号 SNARC 效应预测作用显著,视空间能力和视空间工作记忆对非符号 SNARC 效应预测显著。研究实验设计合理,数据分析恰当,具有一定的创新性。但仍有一些问题,仅供参考。

意见 1: 前言“视空间能力是指个体表征、转换或生成视觉对象的能力(Tosto et al., 2014;

VanGarderen, 2006)。。。。。”这一段是为了说明视空间能力可能作为 SNARC 效应解释机制，但是引用 3 篇论文，其中只有一篇证明可能相关，剩余两篇明确表示不显著相关。

回应：非常感谢专家的建设性意见。在这一段中，我们确实存在表述不清的问题，没有写明是符号还是非符号 SNARC 效应，可能存在歧义。在原稿这一段中，为了阐明视空间能力与 SNARC 效应中的符号 SNARC 效应的关系，我们引用了 3 篇论文，第一篇论文说明视空间能力对符号 SNARC 效应具有显著的预测作用，剩余两篇说明视空间能力与符号 SNARC 效应之间并不存在关联。希望借此说明视空间能力与符号 SNARC 效应的关联性可能不大。随后引出视空间能力与 SNARC 效应中的非符号 SNARC 效应之间的关系可能更为紧密。

在修改稿中，我们对这一问题进行了完善，我们首先阐述了视空间能力与符号 SNARC 效应之间的关系，Bachot 等人(2005)证明二者之间相关，而 Gibson 等人(2016)和 Viarouge 等人(2014)证明二者之间不相关。随后阐述视空间能力与非符号 SNARC 效应之间的关系，并新增加了一些关于视空间能力与非符号数量加工之间具有显著关联的实证支撑，因为 SNARC 效应是数量加工的重要方面 (Imbo et al., 2012)，故据此在后续推测视空间能力可能对非符号 SNARC 效应的发展具有重要作用，具体表述如下（第 4 页最后 1 段与第 5 页第 1 段、第 2 段蓝色字体部分）：

在少有的关于视空间能力与符号 SNARC 效应关系的研究中，结果并不一致。Bachot 等人(2005)采用数字比较任务对比了具有视觉空间能力缺陷的 9 岁儿童与普通 9 岁儿童之间符号 SNARC 效应的差异，发现视觉空间能力缺陷的儿童不存在 SNARC 效应，但普通儿童对照组中具有明显的 SNARC 效应，表明视空间能力可能是符号 SNARC 效应产生的一个重要因素。然而，另一些研究直接探究视空间能力与符号 SNARC 效应的关系，却未能发现显著关联。例如，Gibson 及其同事(2016)在 6 至 8 岁的儿童群体中采用同样的数量比较任务和视知觉发展测试来评估儿童符号 SNARC 效应与视空间能力的关系，结果表明儿童的符号 SNARC 效应与视空间能力中的视知觉及心理旋转能力之间相关均未达到显著水平。此外，Viarouge 等人(2014)采用符号奇偶判断任务发现视空间能力中的三维心理旋转与符号 SNARC 效应大小之间不存在显著相关。

目前尚未有研究直接探究视空间能力与非符号 SNARC 效应的关系，但有较多研究探讨了视空间能力和非符号数量加工之间的关系，例如，Zhang 和 Lin(2015)的研究结果显示视空间能力中的视知觉可以显著预测儿童 11 个月后的非符号算术技能。最近，Yang 等人(2020)通过对 104 名幼儿进行为期一年的追踪研究后也发现视空间能力对中国幼儿的非符号数字加工具有显著的正向预测作用。而非符号 SNARC 效应是非符号数量加工的重要方面 (Ebersbach et al., 2014)，据此可以推测视空间能力可能对非符号 SNARC 效应的发展具有重要作用。

参考文献：

- Bachot, J., Gevers, W., Fias, W., & Roeyers, H. (2005). Number sense in children with visuospatial disabilities: Orientation of the mental number line. *Psychology Science*, 47(1), 172–183.
- 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.
- Imbo, I., de Brauwer, J., Fias, W., & Gevers, W. (2012). The development of the SNARC effect: Evidence for early verbal coding. *Journal of Experimental Child Psychology*, 111, 671–680.
- Viarouge, A., Hubbard, E. M., McCandliss, B. D., & Costantini, M. (2014). The cognitive mechanisms of the SNARC effect: An individual differences approach. *PLoS One*, 9(4), e95756.
- Yang, X., Zhang, X., Huo, S., & Zhang, Y. (2020). Differential contributions of cognitive precursors to symbolic versus non-symbolic numeracy in young Chinese children. *Early Childhood Research Quarterly*, 53, 208–216.
- Zhang X., & Lin D. (2015). Pathways to arithmetic: The role of visual-spatial and language skills in written arithmetic, arithmetic word problems, and nonsymbolic arithmetic. *Contemporary Educational Psychology*, 41, 188–197.

意见 2: 实验 1 和实验 2 的流程图是否可以画出来? 可将流程图更规范化一些, 比如单个试次统一的流程图形式, 每个屏幕呈现多长时间等。如果太长, 可以考虑放到补充材料中, 再写具体一点。建议所有实验工具的说明有一个相对统一的规范, 提供固定的信息, 比如每个实验任务耗时多长时间, 包含多少个试次, 每个试次多长时间, 实验具有什么条件, 如何测算结果和分析等。图上任务名称和正文名称的存在些许差别: 顺序背数和顺序背数字, 倒序背数和倒序背数字, 正序地鼠和正序打地鼠。

回应: 非常感谢专家的建设性意见和细致审读。目前已在文中将实验 1 和实验 2 的流程图画出, 并且, 对实验一与实验 2 中所有研究工具的说明进行了规范, 提供任务耗时、试次、试次时长等固定的信息(如下文字体加粗部分)。此外, 针对图上任务名称和正文名称存在差别的问题, 我们进行了通篇校对并统一修改为顺序背数、倒序背数、正序打地鼠。

具体如表 2:

表 2 各项实验任务的信息

实验任务名称	任务流程图	任务耗时	试次信息	实验条件	测算结果及分析
符号奇偶判断任务 (Hoffman et al., 2014)		约 15 分钟	64 个试次, 每个试次的持续时间是直到被试按下反应键或 5000ms。	任务包含两个区组(在区组 1 中, 规则要求被试按“A”表示奇数, 按“L”表示偶数; 在区组 2 中, 规则要求区组 1 相反)。	结果指标: 两个任务下被试左手和右手按键的反应时 结果分析: (1)方差分析法: 呈级主效应显著, 则表示出现显著的 SNARC 效应; (2)回归斜率法: 回归斜率(Slope)为负且 t 值显著则表明出现了 SNARC 效应
非符号奇偶判断任务 (Nuerk et al., 2005)		约 15 分钟	同上	同上	同上
汉字押韵任务 (Zhang et al., 2016)		限时 3 分钟	120 个试次, 每个试次的持续时间是直到被试按下反应键或 1500ms	两个汉字同时出现在屏幕上, 被试需要回答这两个字符是否押韵, 用“Q”键表示是, 用“P”键表示否	利用 Guilford 校准分作为儿童的最终成绩, 校正公式为: $S=R-W/(N-1)$, 其中 R 表示正确反应的题目数量, W 表示错误反应的题目数量, N 表示题目的选项数量。
数字快速自动命名任务 (Yang et al., 2019)		无限时	任务进行两次	该任务为一对一施测, 同一任务进行两次	被试两次命名这些数字的平均时间作为其快速自动命名任务的最终成绩
顺序背数任务 (Baddeley, 2003)		无限时	由于是自适应任务所以无固定试次	实验任务由记忆和回忆两个部分组成	以被试两次回答正确的最大数字量 n 减 1 作为个体的最终成绩
视觉空间关系任务 (Zhang et al., 2016)		限时 3 分钟	150 个试次, 每个试次在 1200ms 以内	刺激为四张没有具体的含义黑白线条图	采用 Guilford 校准分数 S 作为儿童的最终表现, 校正公式为: $S=R-W/(N-1)$, 其中 R 表示正确反应的题目数量, W 表示错误反应的题目数量, N 表示题目的选项数量
三维心理旋转任务 (Shepard & Metzler, 1971)		限时 3 分钟	180 个试次, 每个试次持续时间是直到被试做出按键反应以及 1000ms	被试在心理上对屏幕上上方中央的图像旋转一定角度后, 在屏幕下方的两张图片中选择出与上方图像旋转后位置相匹配的图像	采用 Guilford 校准分数 S 作为儿童的最终表现, 校正公式为: $S=R-W/(N-1)$, 其中 R 表示正确反应的题目数量, W 表示错误反应的题目数量, N 表示题目的选项数量
倒序背数任务 (Passolunghi & Costa, 2016)		无限时	由于是自适应任务所以无固定试次	实验任务由记忆和回忆两个部分组成	以被试两次回答正确的最大数字量 n 减 1 作为最终成绩
正序打地鼠任务 (Karchach et al., 2015)		无限时	由于是自适应任务所以无固定试次	实验任务由记忆和回忆两个部分组成	以被试两次回答正确的最大数字量 n 减 1 作为个体最终成绩

在实验一中:

符号奇偶判断任务和非符号奇偶判断任务: 两项任务共耗时约 30 分钟, 两项任务各包含两个区组(在区组 1 中, 规则要求被试按“A”表示奇数, 按“L”表示偶数; 在区组 2 中, 规则要求的反应按键与区组 1 相反), 共有 64 个试次。在每个区组中, 8 个刺激(符号奇偶判

断任务呈现阿拉伯数字：1、2、3、4、6、7、8、9；非符号判断任务呈现点阵图案 , , , , , , , )均各重复出现 4 次，包含 32 个试次。每个试次中刺激在屏幕上呈现的持续时间是直到被试按下反应键或 5000ms。随后在 1000ms 的空屏后再呈现下一试次。被试间随机平衡了这两个区组的呈现顺序。被试在两个区组之间休息 2 分钟。每个参与者均需完成符号和非符号奇偶判断任务，任务施测顺序在被试间进行平衡。最后记录两个任务下被试左手和右手按键的反应时作为结果指标。具体实验流程如图 2 所示(正文第 8 页蓝色字体部分)。

数据分析：我们在第 9 页“2.1.5 数据处理”对 SNARC 效应的数据分析方法进行了阐述。主要参照前人的数据处理法，对 SNARC 效应的分析采用了两种统计方法(具体见第 9 页蓝色字体部分)，如：(1)方差分析法：参照 van Galen 和 Reitsma (2008)的数据处理方法。第一步，将个体在符号或非符号奇偶判断任务中对每个数字进行右手反应的平均反应时减去左手反应的平均反应时来计算个体的双手平均反应时之差(dRTs)，dRTs 的含义为若右手比左手反应快，dRTs 为负值，反之则为正值。第二步，依据 Hoffmann 等人(2014)和 Tzelgov 等人(1992)的做法，为避免数字的奇偶属性对左右手偏侧化反应可能造成的误差，本研究将数量邻近但奇偶属性不同的数字进行了整合，将八个数字(1、2、3、4、6、7、8、9)分为四个量级：非常小(1, 2)，小(3, 4)，大(6, 7)和非常大(8, 9)，每个量级的 dRTs 的值为是邻近两个数字的 dRTs 的平均值。最后，以 dRTs 为因变量，将量级和任务类型作为被试内因素，将年龄组作为被试间因素，进行重复测量方差分析。对于每一任务类型和年龄阶段，如果量级主效应显著，则表示出现显著的 SNARC 效应 (Wu et al., 2020)。

(2)回归斜率法：参照 Fias 和 Fischer(2005)的方法，以量级(非常小、小、大、非常大)为自变量，各量级上的平均 dRTs 为因变量，进行回归，得到其回归斜率(Slope)(Yang et al., 2014)。随后采用单样本 t 检验来检验特定年龄组的平均斜率(Slope)与零的差异(Pan et al., 2019)。若回归斜率(Slope)为负且 t 值显著则表明出现了 SNARC 效应(Fias et al., 1996)。

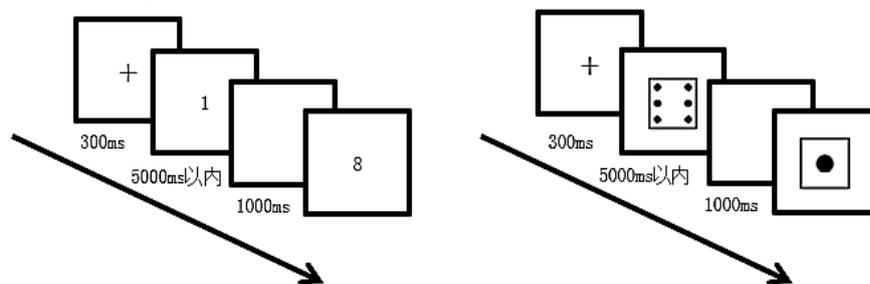


图 2 符号奇偶判断任务(左)与非符号奇偶判断任务(右)

在实验二中：

(1) 汉字押韵任务：用于评估个体的语音意识(Zhang et al., 2016)，实验流程如图 5 所示。任务限时 3 分钟，共包含 120 次试次。每个试次中刺激呈现时间是直到被试按下反应键或 1500ms，随后紧接着呈现下一个试次。在这个任务中，两个汉字同时出现在屏幕上。被试需要回答这两个字符是否押韵，用“Q”键表示是，用“P”键表示否。此外，在该任务中为了控制被试的猜测效应，利用 Guilford 校准分作为儿童的最终成绩(Zhang et al., 2016)，校正公式为： $S=R-W/(N-1)$ ，其中 R 表示正确反应的题目数量，W 表示错误反应的题目数量，N 表示题目的选项数量。原始分数经矫正后的得分范围为-120 至 120。该任务的 Cronbacha 信度系数为 0.95。(正文第 14 页蓝色字体部分)

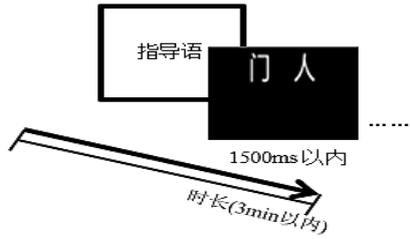


图5 汉字押韵任务

(2) 数字快速自动命名任务：用于测查个体的快速自动命名能力(Yang et al., 2019)，实验材料如图 6 所示，任务无限时。该任务为一对一施测。在该任务中，被试会看到八个由五个不同的单位数数字组成的阵列，其顺序是随机的。这项任务要求被试以最快的速度说出这些数字。同一任务进行了两次，被试两次命名这些数字的平均时间作为其快速自动命名任务的最终成绩。Cronbach'α 系数为 0.92。此外，平均命名时间为反向计分指标，即个体对给定数字进行命名的时间越短，快速自动命名能力越强。(正文第 15 页第 1 段蓝色字体部分)

4	7	9	6	2
7	2	4	9	6
9	4	6	2	7
6	7	9	2	4
7	2	6	4	9
4	6	7	9	2
2	9	4	7	6
6	2	7	4	9

图6 数字快速自动命名任务

(3) 顺序背数任务：用于测查个体的语音记忆(Baddeley, 2003)，该任务无限时，任务试次受被试工作记忆容量的个体差异影响，无统一试次数。任务示例如图 7 所示。以语音形式随机呈现 10 以内的数字。在每个试次中，被试会首先听到提示音，接着会以语音形式随机呈现 10 以内的数字，每个数字播报 1 秒（播报数字的时间即为“请记忆”界面的呈现时间）。数字播报之后会进入 5 秒的等待界面，随后进入回忆界面（无限时），要求被试在答题框中按顺序输入自己听到的数字。正式实验中，数字个数的初始水平是两个。被试连续两次正确反应，播放的数字个数增加一个。当被试连续两次反应错误，实验任务结束。最终以被试两次回答正确的最大数字量 n 减 1 作为个体的最终成绩。(正文第 15 页第 2 段蓝色字体部分)

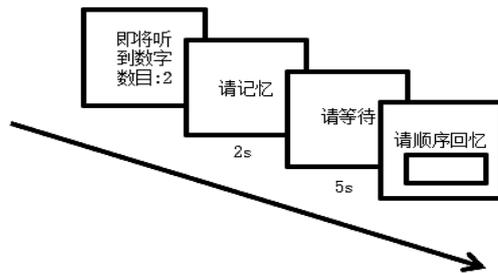


图7 顺序背数任务

注：听到的数字数目为 n，则请记忆的界面(即数字播报时间)为 n 秒，如图播报 2 个数字则记忆界面为 2 秒

(4) 视觉空间关系任务：用于测量个体的视知觉能力(Zhang et al., 2016)，是视知觉能力测验修订版(Gardner, 1996)的分测验。实验流程如图 8 所示，整个实验限时 3 分钟，共有 150 个试次，每个试次在 1200ms 以内。在每个试次中，包含四张没有具体的含义黑白线条图(屏幕左边显示一张图片，右边显示另外三张图片)，图片持续时间为 400ms，任务要求被试快速判断左边的图片是否包含在右边的三张图片中，“Q” 键表示是，“P” 键表示否。此外，在该任务中同样采用 Guilford 校准分数 S 作为儿童的最终表现(Zhou et al., 2020)，校正公式为： $S=R-W/(N-1)$ ，其中 R 表示正确反应的题目数量，W 表示错误反应的题目数量，N 表示题目的选项数量。矫正后的得分范围为-150 至 150。该任务的 Cronbachα 系数为 0.91。

(正文第 15 页最后 1 段蓝色字体部分)

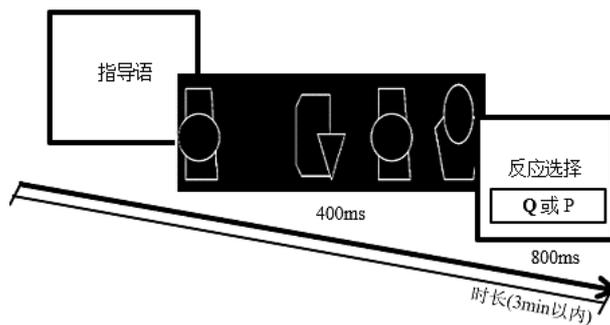


图 8 视觉空间关系任务

(5) 三维心理旋转任务：用来测查个体的心理旋转能力，实验流程如图 9 所示。该任务是基于 Shepard 的心理旋转任务(Shepard & Metzler, 1971)。该实验限时 3 分钟，实验共包含 180 个试次。在每个试次中，屏幕中会同时呈现三张三维的图像，上方中央有一张，下方有两张(用于被试进行选择)，图片持续时间是直到被试做出按键反应以及 1000ms。任务要求被试在心理上将屏幕上方中央的图像旋转一定角度后，在屏幕下方的两张图片中选择出与上方图像旋转后位置相匹配的图像，按“Q”键表示左边的图片，“P”键表示右边的图片。旋转的角度为 15°，30°，...345°，间隔为 15°。采用 Guilford 校准分数 S 作为儿童的最终表现(Zhou et al., 2020)，校正公式为： $S=R-W/(N-1)$ ，其中 R 表示正确反应的题目数量，W 表示错误反应的题目数量，N 表示题目的选项数量。这项任务的 Cronbach' α 系数为 0.90。(正文第 16 页第 2 段蓝色字体部分)

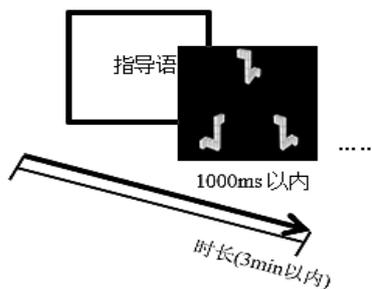


图 9 三维心理旋转任务

(6) 倒序背数任务：用以测查个体的言语工作记忆(Passolunghi & Costa, 2016)，该任务无限时，任务试次受被试工作记忆容量的个体差异影响，无统一试次数。任务示例如图 10 所示。在每个试次中，被试会首先听到提示音，接着会以语音形式随机呈现 10 以内的数字，每个数字播报 1 秒（播报数字的时间即为“请记忆”界面的呈现时间）。数字播报之后会进入 5 秒的等待界面，随后进入回忆界面，要求被试在答题框中按倒序输入自己听到的数字（无限时）。正式实验中，数字个数的初始水平是两个。被试连续两次正确反应，播放的数字个数增加一个，当被试连续两次反应错误，实验任务结束。最终以被试两次回答正确的最大数字量 n 减 1 作为个体言语工作记忆的成绩。(正文第 16 页最后 1 段蓝色字体部分)

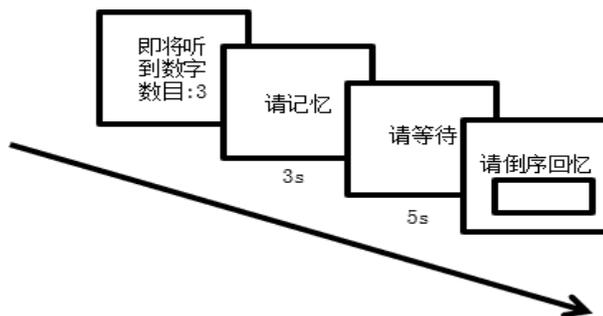


图 10 倒序背数任务

注：听到的数字数目为 n ，则请记忆的界面(即数字播报时间)为 n 秒，如图播报 3 个数字则记忆界面为 3 秒

(7) 正序打地鼠任务：用以测查的个体的视空间工作记忆(Karbach et al., 2015)，该任务无限时，任务试次受被试工作记忆容量的个体差异影响，无统一试次数。任务示例如图 11 所示。该实验任务主要由记忆和回忆两个部分组成，每个试次开始后，电脑屏幕中会先显示 5×5 的灰色正方形方块，在这些方块中会随机依次出现一定数量的老鼠，每个老鼠出现的时间为 1s（老鼠出现时间即为“请记忆”界面的持续时间），任务要求被试记住每个老鼠出现的位置，在 5 秒后，电脑屏幕中会仅显示 5×5 的灰色正方形方块，任务要求被试在这些方块中按顺序回忆之前老鼠出现的位置并用鼠标依次点击（无限时）。正式实验阶段中，一开始出现的老鼠个数为 2，任务难度会根据被试表现不断调整，当被试连续两个试次点击正确，老鼠的个数增加一个。但如果被试连续两次错误反应，则实验结束。最终以被试两次回答正确的最大的老鼠数量 n 减 1 作为被试视空间工作记忆的成绩（正文第 17 页第 2 段蓝色字体部分）。

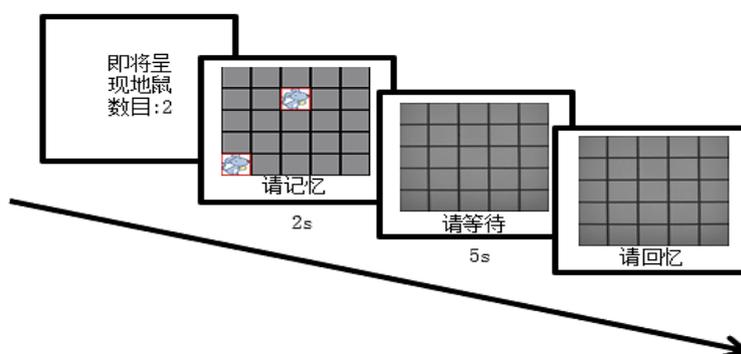


图 11 正序打地鼠任务

注：地鼠数量为 n ，则地鼠数量呈现的界面为 n 秒，如图呈现两个地鼠则地鼠呈现界面为 2 秒

(8) 符号奇偶判断任务和非符号奇偶判断任务：同实验一一致（修改稿第 8 页蓝色字体部分）。

参考文献：

- Baddeley, A. (2003). Working memory and language: an overview. *Journal of Communication Disorders*, 36(3), 189–208.
- Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F., & Ydewalle, G. D. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition*, 2(1), 95–110.
- Fias, W., & Fischer, M. H. (2005). Spatial representation of numbers. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of Mathematical Cognition* (pp. 43–54). New York: Psychology Press.
- Hoffmann, D., Pigat, D., & Schiltz, C. (2014). The impact of inhibition capacities and age on number–space associations. *Cognitive Processing*, 15(3), 329–342.
- Karbach, J., Strobach, T., & Schubert, T. (2015). Adaptive working-memory training benefits reading, but not mathematics in middle childhood. *Child Neuropsychology*, 21(3), 285–301.
- Pan, Y., Han, X., Mei, G., Bai, X., & Chen, Y. (2019). Development of number-space associations: SNARC effects and spatial attention in 7- to 11-year-olds. *PLoS ONE*, 14(3), e212204.
- Passolunghi, M. C., & Costa, H. M. (2016). Working memory and early numeracy training in preschool children. *Child Neuropsychology*, 22(1), 81–98.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171(3972), 701–703.
- Tzelgov, J., Meyer, J., & Henik, A. (1992). Automatic and intentional processing of numerical information. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(1), 166–179.
- van Galen, M. S., & Reitsma, P. (2008). Developing access to number magnitude: A study of the SNARC effect in 7- to 9-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 101(2), 99–113.
- Wu, H., Yang, X., Geng, L., Zhu, X., & Chen, Y. (2020). How do working memory and inhibition contribute to the SNARC effect in Chinese school-aged children? *Cognitive Development*, 56, 100959.
- Yang, T., Chen, C., Zhou, X., Xu, J., Dong, Q., & Chen, C. (2014). Development of spatial representation of numbers: A study of the SNARC effect in Chinese children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 117, 1–11.
- Yang, X., Peng, P., & Meng, X. (2019). How do metalinguistic awareness, working memory, reasoning, and

inhibition contribute to Chinese character reading of kindergarten children? *Infant and Child Development*, 28(3), e2122.

Zhang, Y., Chen, C., Liu, H., Cui, J., & Zhou, X. (2016). Both non-symbolic and symbolic quantity processing are important for arithmetical computation but not for mathematical reasoning. *Journal of Cognitive Psychology*, 28(7), 807–824.

意见 3: 建议所有实验工具的说明有一个相对统一的规范，提供固定的信息，比如每个实验任务耗时多长时间，包含多少个试次，每个试次多长时间，实验具有什么条件，如何测算结果和分析等。

回应: 非常感谢专家的建设性意见。我们对每个实验任务的过程表述进行了进一步地规范。其中，由于数字快速自动命名存在较大个体差异、倒序背数、顺数背数、正序打地鼠四个任务是自适应任务。被试完成这四个任务时耗时差异较大，故没有注明这四个实验任务的分别耗时，其他均已注明耗时、试次、数据指标等，并画出了其流程图。具体可见意见 2 回复中的标黑数字，以及正文部分第 14-17 页蓝色字体部分。

意见 4: 实验 1 的结果部分：只报告了三重交互。这里的主效应是什么结果？比如不同年龄组的反应时是否有差异？不同的任务类型的反应时是否有差异？这些年龄段的被试区分单数/双数 or 奇数/偶数本身相对于成年被试来说就有更大的认知负荷，这是否会影响实验结果。

回应: 非常感谢专家的建议。第一，针对主效应缺失的问题，修改稿补充了对实验 1 中方差分析结果的年龄、任务类型以及量级的主效应，统计分析发现年龄的主效应不显著，因此不同的年龄群体在奇偶判断任务中右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值不存在显著差异。任务类型的主效应显著，事后检验发现相比于在符号奇偶判断任务中，个体在非符号奇偶判断任务中右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值更小，这意味着个体在非符号奇偶判断任务中右手的反应时可能会相对更快、更加灵活(具体可见第 10 页蓝色字体部分)。量级的主效应显著，个体右手平均反应时与左手平均反应时在“非常小”和“小”量级中为负，在“大”和“非常大”量级中为正，符合 SNARC 效应的趋势。修改稿中增添的具体内容如下(具体可见第 11 页蓝色字体部分)：

年龄的主效应未达到显著性水平， $F(3, 114)=0.40$ ， $p=0.75$ ， $\eta^2=0.01$ ，这表明不同的年龄群体在奇偶判断任务中右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值不存在显著差异。任务类型的主效应显著， $F(1, 114)=11.09$ ， $p=0.001$ ， $\eta^2=0.09$ ，进一步事后检验表明相比于在符号奇偶判断任务中，个体在非符号奇偶判断任务中右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值更小($d=-61.31$ ， $p=0.001$)，这表明个体在非符号奇偶判断任务中右手的反应时可能会更快、更加灵活。量级的主效应显著， $F(3, 112)=17.69$ ， $p<0.001$ ， $\eta^2=0.30$ ，进一步事后检验表明在“非常小”和“小”两个量级中，个体右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为正，在“大”和“非常大”两个量级中，个体右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为负，这意味着个体的行为表现符合 SNARC 效应的趋势(即对于较小的数字，个体左手侧反应更快，对于较大的数字，个体的右手侧反应更快)。

第二，针对儿童被试区分单数/双数 or 奇数/偶数本身相对于成年被试来说是否有更大的认知负荷的问题。本研究为了避免认知负荷对幼儿和儿童群体表现的影响，首先，参照 Yang 等人(2014)的研究方法，对幼儿及学前儿童施测奇偶判断任务时设计了适合其年龄阶段的指导语，例如对于 6-7 岁和 7-8 岁儿童，实验者使用口语术语，即单数和双数分别表示奇数和偶数。对于其他年龄组，则使用奇数和偶数的表述，以试图减轻儿童的认知负荷。其次，数据分析方面，为避免儿童和成人的反应时的平均数及全距差异较大而导致 dRTs 的数量级不同，进而影响所的 SNARC 效应大小，我们在计算 Slope 时采用了标准化回归系数。

但确实如专家所说，相比于成年被试，幼儿等由于对奇偶相关知识的掌握可能还不够熟练，使得其在完成该任务时可能存在更大的认知负荷，从而会对实验结果产生一定的误差影

响。例如，成人在符号与非符号奇偶判断任务中的左右手平均反应时以及完成这两项任务时的错误率均低于儿童群体（具体可见第 10 页蓝色字体部分）。因此，我们在“4.3 本研究的优势与局限性”对其进行了补充，例如：“相比于成年被试，幼儿等由于对奇偶相关知识的掌握可能还不够熟练，使得其在完成奇偶判断任务时可能存在更大的认知负荷，从而会对实验结果产生一定的误差影响，未来的研究者可以开发更适用于幼儿的 SNARC 测量任务（具体可见第 25 页第一段蓝色字体部分）。

参考文献：

Yang, T., Chen, C., Zhou, X., Xu, J., Dong, Q., & Chen, C. (2014). Development of spatial representation of numbers: A study of the SNARC effect in Chinese children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 117, 1-11.

意见 5：图片和表格的尺寸不合适

回应：非常感谢审稿专家的建议，目前已按照心理学报投稿要求对图片和表格中的字体均修改为宋体六号，并对全文中图片和表格的大小尺寸进行了适当的调整。

意见 6：实验 2 的结果部分：T1 和 T2 阶段的 SNARC 效应是否可以做一个前后测的分析，看是否有所变化？

回应：非常感谢专家的建设性意见。我们以被试在符号与非符号任务下的 Slope 作为 SNARC 效应的结果指标(Fias & Fischer, 2005)，对被试 T1 和 T2 阶段的 SNARC 效应做了前后测的分析，结果显示：无论是符号 SNARC 效应 $[t=0.58, p=0.57]$ 还是非符号 SNARC 效应 $[t=0.79, p=0.43]$ ，在 T1 与 T2 阶段的前后测中均不存在显著的强度差异，这验证了实验 1 中的结果，即 SNARC 效应可能不会随年龄的增长而发生变化（具体见第 19 页蓝色字体部分）。

参考文献：

Fias, W., & Fischer, M. H. (2005). Spatial representation of numbers. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of Mathematical Cognition* (pp. 43-54). New York: Psychology Press.

意见 7：讨论部分：前文表示符号 SNARC 效应受教育影响很大，成人和 8-9 岁儿童受教育差异只会更大，在这种情况下两个群体的符号 SNARC 效应表现却不存在差异，是否是因为这种效应在随着年龄增长而减弱，所以才会表现出不存在差异的情况。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵建议。在以往研究中，Berch 等人(1999)发现随着年龄增长 SNARC 效应是不断减弱的，但是我们的数据似乎不支持这一点。本研究中发现不同年龄组之间符号与非符号 SNARC 效应的强度不存在显著差异，这说明 SNARC 效应的大小不会随着年龄的增长而发生变化，该发现与 Wu 等人(2020)和 Yang 等人(2014)在中国群体的研究结果一致。

一些研究者认为这可以从“练习与抑制双重过程的影响”角度来进行解释(Knoch et al., 2004; Yang et al., 2014)。具体而言，一方面，长期的练习或教育可能会增强个体 SNARC 效应的强度，因为练习或教育会加强数字与空间之间的关联，从而使 SNARC 效应的强度可能会随着年龄的增长而增加。而另一方面，抑制能力也是随着年龄的增长而增长，这种能力的增长会削弱 SNARC 效应的强度(Wright et al., 2003; Gevers et al., 2005)，这意味着练习和抑制两个过程可能会相互抵消，从而使得符号和非符号 SNARC 效应的强度没有出现年龄差异，这种解释得到了大量研究者的认同(Gevers et al., 2005; Wu et al., 2020)。这点我们在修改稿第 21 页最后 1 段和第 22 页第 1 段进行了讨论。

除抑制能力外，本研究的实验二也发现，虽然言语能力和视空间能力分别正向预测符号和非符号 SNARC 效应，但言语工作记忆和视空间工作记忆分别负向预测符号和非符号

SNARC 效应。这种预测方向的差异也表明，可能从儿童期到成人期，经验的增加及部分认知能力（如，言语能力和视空间能力）的提升会增大 SNARC 效应，而另一些认知能力的提升（如，工作记忆和抑制控）会减小 SNARC 效应，最终导致未能发现 SNARC 效应的年龄差异。这点我们在修改稿 22 页至 23 页进行了讨论。

参考文献：

- Baghel, M. S., Singh, P., Srivas, S., & Thakur, M. K. (2019). Cognitive changes with aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 89(3), 765–773.
- Berch, D. B., Foley, E. J., Hill, R. J., & Ryan, P. M. (1999). Extracting parity and magnitude from Arabic numerals: Developmental changes in number processing and mental representation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74(4), 286–308.
- Gevers, W., Caessens, B., & Fias, W. (2005). Towards a common processing architecture underlying Simon and SNARC effects. *European Journal of Cognitive Psychology*, 17(5), 659–673.
- Knoch, D., Brugger, P., & Regard, M. (2004). Suppressing versus releasing a habit: Frequency-dependent effects of prefrontal transcranial magnetic stimulation. *Cerebral Cortex*, 15(7), 885–887.
- Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number a meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science Quarterly*, 50(4), 489–525.
- Wright, I., Waterman, M., Prescott, H., & Murdoch-Eaton, D. (2003). A new Stroop-like measure of inhibitory function development: typical developmental trends. *Journal of Child Psychology Psychiatry*, 44(4), 561–575.
- Wu, H., Yang, X., Geng, L., Zhu, X., & Chen, Y. (2020). How do working memory and inhibition contribute to the SNARC effect in Chinese school-aged children? *Cognitive Development*, 56, 100959.
- Yang, T., Chen, C., Zhou, X., Xu, J., Dong, Q., & Chen, C. (2014). Development of spatial representation of numbers: A study of the SNARC effect in Chinese children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 117, 1–11.

意见 8：一些小错误：单词写错了“SNAEC”；Yang 等人(2014)或 Zhou 等人(2007)，应该是“和”？字体不需要加粗。

回应：非常感谢审稿专家的细致审读和指正。

(1) 针对 SNARC 效应存在的部分拼写错误问题，已对通篇进行检查修改（如第 16 页和 21 页），并请校外专家进行了挑剔性阅读，以避免细节错误的出现。

(2) Yang 等人(2014)或 Zhou 等人(2007)已修改为“和”（具体可见第 21 页第 1 段蓝色字体部分）。正文中字体均已取消加粗（如第 14 页）。

第二轮

审稿人 1 意见：

作者已较好回答了我的问题。文章篇幅是否有点长。

回应：非常感谢专家的建设性意见。修改稿中我们对文章内容进行了适当精简。例如，修改稿的前言部分，我们删除了非必要的研究背景和举例，对文字进一步精炼。结果部分我们删除了赘余、重复的表述。在讨论部分，我们删除了与前言、小讨论等部分有重复的表述，进一步精简文字，以确保文章的紧凑性。

审稿人 2 意见：

经过作者的这一轮修改，文章质量进步较大，内容更加充实，分析和结果也更全面了。但还有一些小问题供参考修改。

意见 1: 作者在摘要和结论中都较强的下了这个结论：两种 SNARC 效应均不会随着年龄的增长而发生变化。这个结论可能过于强了。实验的结果是基于跨被试的分析和一组被试追踪半年的数据分析，并不能完全支持这个结论。作者在讨论中也提到并未涉及老年组。因此可以考虑将这个结论弱化一点。比如基于跨年龄组（儿童和成年人）的分析和儿童追踪半年的数据分析结果，预示着两种 SNARC 效应在一定年龄范围内可能并不会随着年龄的增长而发生变化。

回应: 非常感谢专家的建设性意见与提醒。修改稿中，我们对这一结果的表达进行了弱化。首先摘要部分，将此前的表述“两种 SNARC 效应均不会随着年龄的增长而发生变化”已改为“跨年龄组（儿童和成人）的数据和针对儿童的追踪数据分析显示两种 SNARC 效应在一定年龄范围内可能并不会随着年龄的增长而发生变化”，具体可见第 1 页摘要中蓝色字体部分。其次结论部分，此前类似表述改为“两种 SNARC 效应在一定年龄范围内可能并不会随着年龄的增长而发生变化”，具体可见第 24 页结论中蓝色字体部分。此外，在讨论中的此类表述也已进行弱化，例如第 21 页蓝色字体部分“研究发现 8-9 岁儿童和成人之间符号或非符号 SNARC 效应的强度并不存在年龄差异，即两种 SNARC 效应在一定年龄范围内可能并不会随着年龄的增长而发生变化”。

意见 2: 数据结果分析部分：第 11 页：“任务类型的主效应显著 $[F(1, 114)=11.09, p=0.001, \eta^2=0.09]$ ，进一步事后检验发现非符号奇偶判断任务的 dRTs 显著小于符号奇偶判断任务 $(d=-61.31, p=0.001)$ ，这表明个体在非符号奇偶判断任务中右手的反应时可能会更快、更加灵活”。这里的分析只能说明两种类型的 dRTs 差值更小，并不能说明左手或者右手反应更快。如果要说明右手反应更快，需要用左右手反应的原始数据进行比较。

回应: 非常感谢专家的建设性意见。仅有任务类型的主效应显著的结果确实不一定能得出“个体在非符号奇偶判断任务中右手的反应时可能会更快、更加灵活”的结论，不够严谨。任务类型的主效应显著只能说明非符号奇偶判断任务的右手与左手反应时之差显著小于个体在符号奇偶判断任务时的右手与左手反应时之差。具体可见第 9 页最后 1 段。具体内容如下：“任务类型的主效应显著 $[F(1, 114)=11.09, p=0.001, \eta^2=0.09]$ ，进一步事后检验发现非符号奇偶判断任务的 dRTs 显著小于符号奇偶判断任务 $(d=-61.31, p=0.001)$ ”，这表明非符号奇偶判断任务的右手与左手反应时之差显著小于个体在符号奇偶判断任务时的右手与左手反应时之差。

意见 3: 数据结果分析部分：第 11 页：“年龄的主效应未达到显著性水平 $[F(3,114)=0.40, p=0.75, \eta^2=0.01]$ ，这表明不同的年龄群体在奇偶判断任务中右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值不存在显著差异。量级的主效应显著 $[F(3, 112)=17.69, p<0.001, \eta^2=0.30]$ ，进一步事后检验表明在“非常小”和“小”两个量级中，个体右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为正，在“大”和“非常大”两个量级中，个体右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为负”。这里可以具体写出每个水平下的差值数更直观。

回应: 非常感谢专家的建设性意见。我们对被试在“非常小”、“小”、“大”、“非常大”四个量级水平下右手平均反应时与左手平均反应时之间的平均差值数 (M_{dRTs})进行了补充，分别为：104.76、49.75、-61.76、-77.12。从差值数中可以更直观的看出个体的行为表现符合 SNARC 效应的趋势，即对于较小的数字，个体左手侧反应更快，对于较大的数字，个体的右手侧反应更快。具体内容如下“进一步事后检验表明在“非常小”($M_{dRTs}=104.76$)和“小”($M_{dRTs}=49.75$)两个量级中，个体右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为正，在“大”($M_{dRTs}=-61.76$)和“非常大”($M_{dRTs}=-77.12$)两个量级中，个体右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为负，这意味着个体的行为表现符合 SNARC 效应的趋势(即对于较小的数字，个体左手侧

反应更快，对于较大的数字，个体的右手侧反应更快。”具体可见第 10 页第一段蓝色字体部分。

意见 4: 数据结果分析部分: 第 11 页: “随后对年龄与量级的二重交互作用进行简单效应分析, 结果显示 8-9 岁儿童 $[F(3, 47)=9.52, p<0.001, \eta^2=0.16]$ 和成人 $[F(3, 25)=39.57, p<0.001, \eta^2=0.59]$ 的量级主效应显著”。这里的主效应显著, 因为有 4 个水平, 还需要再进一步验证是否是符合 SNARC 效应的差异模式?

回应: 非常感谢专家的建设性意见。我们在主效应的结果后补充了四个水平左右手反应时差异的具体数值。具体内容如下, 对于符号 SNARC 效应, “8-9 岁儿童的量级主效应显著 $[F(3, 47)=9.52, p<0.001, \eta^2=0.16]$, 具体来说, 8-9 岁儿童在“非常小”($M_{dRTs}=116.30$)和“小”($M_{dRTs}=82.25$)两个量级中, 右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为正, 在“大”($M_{dRTs}=-79.81$)和“非常大”($M_{dRTs}=-60.91$)两个量级中, 右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为负, 这说明 8-9 岁儿童的行为表现符合符号 SNARC 效应的差异模式, 即对于较小的数字, 个体左手侧反应更快, 对于较大的数字, 个体的右手侧反应更快。成人的量级主效应显著 $[F(3, 25)=39.57, p<0.001, \eta^2=0.59]$, 具体来说, 成人在“非常小”($M_{dRTs}=99.16$)和“小”($M_{dRTs}=37.15$)两个量级中, 右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为正, 在“大”($M_{dRTs}=-62.31$)和“非常大”($M_{dRTs}=-103.11$)两个量级中, 右手平均反应时与左手平均反应时之间的差值为负, 这说明成人的行为表现同样符合符号 SNARC 效应的差异模式。”具体可见第 10 页第三段蓝色字体部分。

意见 5: 数据结果分析部分: 第 12 页: “在非符号奇偶判断任务中, 所有年龄组 t 值均显著”, 这里需要说明所有年龄组均显著小于 0。

回应: 非常感谢专家的建设性意见和提醒。我们在修改稿中进行了补充, 即“在非符号奇偶判断任务中, 所有年龄组的 t 值均显著, 且所有年龄组被试的平均 Slope 均显著小于 0, 这表明所有年龄组都出现了显著的非符号 SNARC 效应。”具体可见第 11 页最后 1 段蓝色字体部分。

意见 6: 实验 1 结尾部分需要有一个简单的结果讨论。再延伸到实验 2。

回应: 非常感谢专家的建设性意见和细致审读。我们在实验一结尾部分补充了一个简要的讨论。在这个讨论中, 我们讨论了实验一的结果, 并引出要做实验二的原因, 以更好地衔接实验一和实验二部分。具体内容如下: “实验 1 结果发现符号 SNARC 效应通常在 8-9 岁的儿童群体中开始出现, 而非符号 SNARC 效应在 6-7 岁儿童甚至之前的年龄阶段中就已经出现, 两种 SNARC 效应出现的年龄阶段不同, 这些发现与前人研究的相关结果一致(Berch et al., 1999; van Galen & Reitsma, 2008; Wu et al., 2020)。由此可见符号 SNARC 效应可能受到文化教育等的影响(Wood et al., 2008), 而非符号 SNARC 效应可能独立于正式的数学学习与教学(Ebersbach et al., 2014)。同时, 研究结果显示符号与非符号 SNARC 效应的强度在一定年龄范围内可能均不会随着年龄的发展而变化, 由此可知, 个体数字与空间联结的能力可能在早期发展阶段就已经形成, 并在一定年龄范围内保持相对稳定。

此外, 实验 1 中还发现符号与非符号 SNARC 效应之间不存在显著关联, 这些结果初步探究了符号与非符号 SNARC 效应之间的分离关系。在实验二将从认知机制的角度进一步验证符号与非符号 SNARC 效应之间的分离关系。”可见第 12 页蓝色字体的“2.3 讨论”部分。

同时, 我们在实验 2 的结尾也补充了一个简单的结果讨论, 具体如下: “实验 2 结果发现 T1 阶段的言语工作记忆可以负向预测 T2 阶段符号 SNARC 效应; T1 阶段的言语能力可

以正向预测 T2 阶段符号 SNARC 效应；T1 阶段的视空间工作记忆可以负向预测 T2 阶段非符号 SNARC 效应；T1 阶段的视空间能力可以正向预测 T2 阶段非符号 SNARC 效应。该结果与 Yang 等人(2020)的研究结论相似，即言语因素与符号数量加工之间存在紧密联系，视空间因素与符号数量加工之间密切相关。这些发现进一步证实了符号 SNARC 效应和非符号 SNARC 效应可能具有不同的认知机制，是相互独立的。并且，从实验 2 的结果中也可以推测出：基于奇偶判断任务所测量出的符号 SNARC 效应可能依赖于数字信息的言语空间编码，而非符号 SNARC 效应则可能依赖于数字信息的视空间编码。”可见第 19 页蓝色字体的“3.3 讨论”部分。

参考文献：

- Berch, D. B., Foley, E. J., Hill, R. J., & Ryan, P. M. (1999). Extracting parity and magnitude from Arabic numerals: Developmental changes in number processing and mental representation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74(4), 286–308.
- Ebersbach, M., Luwel, K., & Verschaffel, L. (2014). Further evidence for a spatial-numerical association in children before formal schooling. *Experimental Psychology*, 61(4), 323–329.
- He, X., Guo, P., Li, S., Shen, X., & Zhou, X. (2021). Non-symbolic and symbolic number lines are dissociated. *Cognitive Processing*, 22(3), 475–486.
- Knoch, D., Brugger, P., & Regard, M. (2004). Suppressing versus releasing a habit: Frequency-dependent effects of prefrontal transcranial magnetic stimulation. *Cerebral Cortex*, 15(7), 885–887.
- van Galen, M. S., & Reitsma, P. (2008). Developing access to number magnitude: A study of the SNARC effect in 7- to 9-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 101(2), 99–113.
- Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number a meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science Quarterly*, 50(4), 489–525.
- Wu, H., Yang, X., Geng, L., Zhu, X., & Chen, Y. (2020). How do working memory and inhibition contribute to the SNARC effect in Chinese school-aged children? *Cognitive Development*, 56, 100959.
- Yang, X., Zhang, X., Huo, S., & Zhang, Y. (2020). Differential contributions of cognitive precursors to symbolic versus non-symbolic numeracy in young Chinese children. *Early Childhood Research Quarterly*, 53, 208–216.

意见 7：实验 2 的 137 名 8-9 岁儿童被试和实验 1 的被试是同一拨被试吗？还是相同年龄不同被试？

回应：非常感谢专家的建设性意见。实验 1 与实验 2 并非是一批被试，为了避免被试由于多次进行符号与非符号奇偶判断任务而存在练习效应的误差，进而影响实验结果，我们在实验 2 中选择了 8-9 岁的非实验 1 被试儿童。我们在修改稿中也进行了补充说明：“被试均报告未参加过此类实验，且与实验 1 并非同一组被试。”可见第 13 页 3.1.1 蓝色字部分。

意见 8：所有的图片需要做的更清晰一点。

回应：非常感谢专家的建设性意见。已将所有图片进一步清晰。

第三轮

审稿人 2 意见：

作者都较好地回答了我的问题。

[颜丽珠, 陈妍秀, 刘勋, 傅世敏, 南威治. (2022). 数字空间联结的灵活性及其内在机制. *心理科学进展*, 30(1), 1–14.]。参考文献中的作者应该是刘勋。

回应：非常感谢专家的指正，已在参考文献中对此进行了修改。如“颜丽珠, 陈妍秀, 刘勋,

傅世敏, 南威治. (2022). 数字空间联结的灵活性及其内在机制. *心理科学进展*, 30(1), 1-14.”

第四轮

编委意见: I went through the reviewers' comments and the authors' responses and re-read the whole manuscript. I think the authors did a great job responding to the constructive suggestions from the reviewers. The paper is ready to be accepted.

回应: 非常感谢您的认可和审稿专家们提出的若干建设性意见。

主编意见: 本研究以不同年龄阶段的被试为研究对象, 借助符号和非符号奇偶判断任务, 对空间-数字的反应联合编码效应的发展过程进行了考察。本论文的选题具有一定新颖性, 研究方法选用恰当, 获得的研究结论真实可信。

回应: 非常感谢您的宝贵意见。