

珠算学习在计算障碍干预中的作用

周新林¹, 李绵军², 虎雨薇¹

1. 北京师范大学心理学部, 北京 100875; 2. 神墨教育研究院

摘要: 在数学学习中, 一些学生完成计算任务经常遇到种种困难, 包括计算出错、速度慢, 这些现象可能就是发展性计算障碍(DD)。发展性计算障碍简称为计算障碍, 是一种特定的数学学习障碍, 影响约 5%~7% 的学龄儿童。尽管不同文化背景下的儿童在数学表现上存在差异, 但计算障碍的普遍性在全球范围内相对稳定。近年来, 珠算作为一种传统的经济领域的计算工具, 逐渐成为促进儿童发展的认知学习工具, 尤其对于促进儿童计算能力发展、解决计算障碍问题方面作用明显。此文介绍了计算障碍特点、发生率、干预方法与珠算学习对于计算能力发展的促进作用以及在计算障碍干预方面的效果。

关键词: 计算障碍; 珠算; 情境数学

中图分类号: O121.5; R749.94 文献标识码: A 文章编号: 1008-6579(2025)04-0355-04 doi: 10.11852/zgetbjzz2025-0284

Role of abacus learning in the intervention of dyscalculia

ZHOU Xinlin¹, LI Mianjun², HU Yuwei¹

1. Faculty of Psychology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Education Research at Shenmo

Abstract: In mathematics learning, some students frequently encounter various difficulties when completing arithmetic tasks, including have error-prone and slow responses. The developmental difficulty could be developmental dyscalculia (DD). DD, also known as arithmetic difficulty, is a specific mathematical learning disability that affects approximately 5% to 7% of school-age children. Although there are differences in mathematical performance among children from different cultural backgrounds, the prevalence of DD remains relatively stable worldwide. In recent years, abacus, as a traditional computational tool in the economic field, has gradually become a cognitive learning tool that promotes children's development, particularly in enhancing their arithmetic skills and addressing the arithmetic disorders. This article outlines the characteristics and incidence rates of dyscalculia, intervention methods, and the role of abacus learning in promoting computational skill development and its effectiveness in intervening with dyscalculia.

Keywords: dyscalculia; abacus; situational mathematics

计算障碍分为发展性计算障碍和获得性计算障碍。发展性计算障碍(developmental dyscalculia, DD), 简称为计算障碍, 经常也被称为计算困难, 是一种特定的数学学习障碍, 不同于因大脑损伤导致的获得性计算障碍。发展性计算障碍表现为在数感、算术公式记忆、简单计算或者多步计算方面存在困难。例如, 学生完成简单的加减法时都频繁出错。根据《精神障碍诊断与统计手册(第 5 版)》(DSM-5), 计算障碍的诊断标准包括: 儿童在数学能力上显著低于同龄人, 这种困难持续至少 6 个月, 且不能归因于智力障碍或其他神经发育障碍, 以及也不是因为环境因素引起的^[1]。

计算障碍的诊断一般是在儿童家长、老师口头报告存在计算困难的基础上, 根据标准化的算术计

算能力测验的常模得分来确定的^[2-6]。计算障碍的发生率在全球范围内相对稳定, 约为 5%~7%^[2,7]。尽管不同文化背景下的儿童在数学表现上存在差异, 但计算障碍的发生率基本一致。计算障碍不仅影响学生的更多学业表现, 还可能对其将来职业发展、经济状况、心理健康产生长期的负面影响^[8-10]。因此, 寻找有效的干预方法对于改善计算障碍儿童的学业发展、生活质量等具有重要意义。

1 计算障碍的认知与神经机制

1.1 计算障碍的认知机制 计算障碍的认知机制有两种主要观点。一种是领域特异性假设, 认为计算障碍的核心缺陷是在于理解 and 处理数值大小的能力受损, 可能近似数字系统(approximate number

基金项目: 科技创新 2023-重大项目(2021ZD0200500); 珠算教育价值咨询项目(2242000035)

作者简介: 周新林(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数学认知与学习。

system, ANS) 出现了问题^[11]。最常用的评估 ANS 的方法是通过非符号点阵比较任务, 该任务要求参与者比较两个点阵中圆点的数量, 同时忽略圆点的大小^[12]。当数组之间的点比接近 1 时, 难度增加。大量研究表明, 患有计算障碍的儿童在 ANS 任务上表现较差^[3, 13-17]。

另一种是领域一般性假设, 这一假设认为发展性计算障碍是数学学习所必需的一个或多个一般认知系统的功能失调有关, 比如工作记忆、注意力、空间能力、抑制控制、视觉感知或其他一般认知系统。例如, 一项研究提供了英国有计算障碍儿童的视觉工作记忆和抑制控制受损的证据^[18]。另一个例子是在计算障碍中存在注意力不好的现象, 还有可能同时被诊断注意缺陷多动障碍 (attention-deficit/hyperactivity disorder, ADHD)^[19]。

在领域一般性假设中, 语言被认为是计算障碍的一种重要机制。Fuchs 等^[20]的研究表明, 快速命名和语音意识任务可以预测计算的流畅性。同样, 乘法也依赖于语音处理^[21]。因此, 患有计算障碍的儿童在与语言相关的任务中也会有困难。尽管计算障碍和阅读障碍的一些认知机制可以分离^[22], 但它们也有许多共同点^[23-24]。计算障碍经常与阅读障碍并存, 例如, 一项研究中对 1 928 名芬兰学生进行了一项纵向研究 (二至四年级), 重点关注数学和芬兰学生的阅读能力^[25]。他们发现, 计算障碍和阅读障碍的共发率为 40%~60%。相比之下, 另一项研究调查了 1 142 名中国儿童, 发现 66 名符合计算障碍标准的儿童中只有 18 名 (27%) 的阅读能力存在严重问题^[3]。

形状知觉缺陷也是一种领域一般性假设, 即计算障碍儿童存在形状知觉缺陷^[3, 12]。一些研究表明, 形状知觉在一定程度上解释了 ANS 和算术之间的关系^[12]。在这些研究中, 形状知觉是通过一个图形匹配任务来测量的, 该任务要求参与者快速判断左边的一张图片是否与右边的 3 张图片中的任何一张相匹配^[12]。研究发现, 计算障碍儿童的视觉形式知觉受损和 ANS 加工受损, 在控制了 3 个认知变量 (选择反应时间、心理旋转得分和视觉跟踪得分) 后, 与阅读障碍儿童和对照组相比, 计算障碍儿童在 ANS 任务上的表现仍存在显著差异。然而, 在控制了形状匹配表现而不是控制了其他变量后, 对照组和计算障碍儿童之间的 ANS 能力的差异消失了。这些结果表明, 中国学生的计算障碍可能存在形状知觉障碍^[3]。有进一步的证据表明, 这种效应是显著的, 因为视觉知觉训练可能有助于计算障碍儿童

的 ANS 处理和算术表现^[4]。

1.2 计算障碍的神经机制 在神经影像学上, 计算障碍学生在进行基础数字加工处理和算术任务时, 大脑的顶叶皮层, 尤其是顶内沟区域 (IPS), 常常会出现神经功能异常, 例如有的研究发现是顶内沟区域激活不足^[26-29], 有的则是激活过度^[30-31]。

现有研究表明, 与正常发育儿童相比, 发育性计算障碍儿童顶叶皮层灰质体积减小^[32-33], 有时也体现在额叶、海马、枕叶等脑区。总体上, 在顶叶皮层中检测到异常的结构, 更有可能出现计算障碍^[34]。

2 计算障碍的干预

计算障碍的干预是教育实践和儿童发展中迫切需要解决的问题, 大量研究也揭示多种方法的有效性。从原因出发, 干预计算障碍的方案可以分为数值加工干预方法和领域一般认知能力干预方法。

在提高计算障碍儿童数值处理能力干预措施中主要集中在以下 3 个方面: 1) 非符号数感训练; 2) 非符号数感与符号数字之间的转换训练; 3) 心理数轴训练。

在认知能力干预方法中训练工作记忆训练、执行功能训练、视觉空间感知和言语训练等。

在这众多方法中, 值得一提的是珠算的训练方法。中国的珠算曾经是一种经济工具, 在今天已经成为一种中国优秀传统文化符号, 更是促进儿童发展的工具, 例如在数学启蒙、认知能力发展中都能够发挥作用; 近年来也逐渐被引入到计算障碍的干预研究和实践中。珠算学习通过操作算盘, 帮助儿童建立非符号与符号之间的联系, 让儿童在抽象数字与具体实物之间进行反复学习, 理解数字的含义和计算本质、计算公式等, 从而提升其数感和算术计算能力。在一项随机对比实验中, 珠算学习班级中计算障碍的发生率为零^[6]。

3 珠算学习方法在干预计算障碍中的作用

中国珠算具有广泛的世界影响力。2013 年 12 月 4 日, 联合国教科文组织保护非物质文化遗产政府间委员会第八届会议在阿塞拜疆巴库通过决议, 将“中国珠算”列入人类非物质文化遗产代表作名录。该决议指出: “珠算既是中国人文化认同的象征, 也是一种实用工具, 这种计算技术经世代传承, 融入日常生活的多个方面, 具有多重社会文化功能, 向世界提供了另一种知识体系。”决议专家将文化遗产中国珠算称作“另一种知识体系”, 是对中国珠算历史独特性、先进性的高度概括。从算术知识体系的角度, 珠算的确有别于学校的符号数学, 它是通过

物体计数来完成基本的计算过程,利用具有一定抽象程度的物体进行计数的算术,是一种非符号算术或者情境数学^[35]。情境数学与符号数学、言语数学一起构成三元数学,是学生数学能力发展的基础,也是发展的目标^[36-37]。情境数学能够让学生理解数学符号及其运算的来源与含义,获得经验支持。珠算作为一种情境数学,能够有效促进学生理解、记忆数字符号及算术运算。

已有研究揭示珠算学习对儿童发展在数学认知、一般认知能力、情感态度等多方面产生积极的促进效果。珠算学习最为明显的作用就是在数学能力发展方面的积极作用。

3.1 珠算学习能够提升非符号数感能力 非符号数感能力指对物体数量多少的估计,这一能力往往被任务是数学能力发展中的基础能力,对符号性数学能力的发展具有良好预测作用。研究发现,经过 2~3 年的珠算训练,计算障碍儿童在非符号数感任务中的表现显著优于未接受训练的对照组^[6]。另一项发现具有一定珠心算能力的小学生具有较好的非符号数感能力^[38]。这说明珠算能够学习促进非符号数感能力发展,这一能力被广泛认为是符号性数学能力发展的基础。

3.2 珠算学习能提升算术计算能力 Barner 等^[39]研究发现,经过珠算学习的儿童在算术计算任务中的表现显著优于未接受训练的对照组。一项对于职高和大学生等研究,发现职高学生、大学生经过 52 h 珠算学习后,学生的计算能力和空间能力相较于英语学习有明显提升^[40]。

3.3 珠算学习对干预计算障碍具有明显效果 基于珠算学习对数感、计算能力的作用,珠算学习必定将在计算障碍干预中发挥积极的作用。

首先非符号数感能力不足是计算障碍的认知因素之一。计算障碍儿童通常在非符号数感比较任务中表现较差,对数量的估计不准确等。珠算学习通过操作算盘算珠或者完成珠心算,帮助儿童建立数量概念、数字与数量之间的对应联系等,提升其非符号数感能力。

其次,计算障碍的核心是计算速度慢、容易出错,难以在大脑中有效建立有关数字、算式等的心理表示及其记忆。已有研究发展珠算学习对于基础数字加工、计算的促进作用是明显的,因此直接解决计算障碍中的核心问题。算珠的上下移动可以直观地表示数字的增减,帮助儿童理解数字的抽象概念。在算盘中,一颗下珠表示“1”,一颗上珠表示“5”,比如符号算式的“1+1”,在算盘上就表示为一个下珠

再加一个下珠。当儿童无法理解符号时,算盘是一个很好的工具。珠算训练还涉及大量的重复练习,有助于儿童巩固算术运算过程与结果。两项研究结果表明,珠算学习是解决计算障碍问题的有效方法。

北师大研究团队与江苏珠算协会合作,对江苏南通市和常熟市近 500 名二、三年级小学生进行了抽样调查。这些学生入学时是随机分班的。一类是珠算班,共有 6 个班,他们的课程内容中包含了珠算、珠心算内容;另一类是普通班,也有 6 个班,课程内容不包含珠算、珠心算。研究发现,珠算班学生的计算能力优于普通班,效应值为 1.26(0.5 为中等效应,0.8 为强效应)。按照国际常用方法,将计算障碍定义为计算能力低于同年龄儿童成绩的 1.5 个标准差时,普通班计算障碍发生率为 6.4%,这是一个国际上常见的平均发生水平;但是在珠算班,计算障碍发生率均为 0。这一结果说明,珠算、珠心算引入小学数学课程有可能实质性地消除计算障碍问题^[6]。

在我们近期的一项实验中,将 83 名三至六年级存在计算障碍的学生根据前测成绩反映出来的能力随机分成了 2 组,一组为实验组,需要在暑假的两个月里接受 52 h 的珠算训练;另外一组为对照组,不接受珠算训练。在暑期结束后统一接受测试,珠算组在数感、计算、注意力测试中表现出比对照组有更为显著的进步^[19]。经过 52 h 训练,珠算组有 7 名儿童变成计算正常儿童,转化率为 42%,控制组只有 20%。

4 珠算学习干预的未来研究

神经影像学研究表明,珠算学习能够改变一般儿童的大脑结构和功能。例如珠算学习主要激活前额叶和顶叶区域,这些区域与数字处理、空间能力和工作记忆密切相关^[41-43]。珠算学习通过增强这些脑区的功能连接,提升儿童数学能力和一般认知能力。

计算障碍有特定的大脑发育不良区域。关于珠算学习是否塑造大脑的结构,目前尚无直接的证据。目前有行为数据表明行为的改善,但是背后的神经机制需要更多研究去揭示。

此外,目前的研究大多在干预结束后立即进行评估,缺乏长期跟踪数据,难以确定干预效果的持久性。未来的研究应纳入长期跟踪评估,探讨珠算干预的长期效果。

综上所述,珠算学习不仅提升空间能力、注意力等一般认知能力,对于计算能力的促进作用是最为明显的。实验证据表明珠算学习能够将计算障碍发生

率降为零,表明它是一种有效的计算障碍干预方法。

参考文献

- [1] American PA. Diagnostic and statistical manual of mental disorders[M]. Fifth Edition. American Psychiatric Association, 2013.
- [2] Cheng D, Miao X, Wu H, et al. Dyscalculia and dyslexia in chinese children with idiopathic epilepsy: Different patterns of prevalence, comorbidity, and gender differences[J]. *Epilepsia Open*, 2022, 7(1): 160-169.
- [3] Cheng D, Xiao Q, Chen Q, et al. Dyslexia and dyscalculia are characterized by common visual perception deficits[J]. *Dev Neuropsychol*, 2018, 43(6): 497-507.
- [4] Cheng D, Xiao Q, Cui J, et al. Short-term numerosity training promotes symbolic arithmetic in children with developmental dyscalculia: The mediating role of visual form perception[J]. *Dev Sci*, 2020, 23(4): e12910.
- [5] Lu Y, Lyu J, Zhou X. The effect of a 2-month abacus training on students with developmental dyscalculia [J]. *Cogn Process*, 2024. doi:10.1007/s10339-024-01251-8.
- [6] Lu Y, Ma M, Chen G, et al. Can abacus course eradicate developmental dyscalculia[J]. *Psychology in the Schools*, 2021, 58(2): 235-251.
- [7] Kucian K, Grond U, Rotzer S, et al. Mental number line training in children with developmental dyscalculia[J]. *Neuroimage*, 2011, 57(3): 782-795.
- [8] Devine A, Hill F, Carey E, et al. Cognitive and emotional math problems largely dissociate: Prevalence of developmental dyscalculia and mathematics anxiety[J]. *Journal of Educational Psychology*, 2018, 110(3): 431-444.
- [9] Judge S, Watson SMR. Longitudinal outcomes for mathematics achievement for students with learning disabilities [J]. *Journal of Educational Research*, 2011, 104(3): 147-157.
- [10] Saga M, Rkhaila A, Ounine K, et al. Developmental dyscalculia: The progress of cognitive modeling in the field of numerical cognition deficits for children[J]. *Appl Neuropsychol Child*, 2022, 11(4): 904-914.
- [11] Butterworth B, Varma S, Laurillard D. Dyscalculia: From brain to education[J]. *Science*, 2011, 332(6033): 1049-1053.
- [12] Zhou X, Wei W, Zhang Y, et al. Visual perception can account for the close relation between numerosity processing and computational fluency[J]. *Front Psychol*, 2015, 6: 1364.
- [13] Iuculano T, Tang J, Hall CWB, et al. Core information processing deficits in developmental dyscalculia and low numeracy[J]. *Dev Sci*, 2008, 11(5): 669-680.
- [14] Mazzocco MM, Feigenson L, Halberda J. Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability (dyscalculia)[J]. *Child Dev*, 2011, 82(4): 1224-1237.
- [15] Mejias S, Grégoire J, Noël MP. Numerical estimation in adults with and without developmental dyscalculia [J]. *Learning and Individual Differences*, 2012, 22(1): 164-170.
- [16] Olsson L, Östergren R, Träff U. Developmental dyscalculia: A deficit in the approximate number system or an access deficit? [J]. *Cognitive Development*, 2016, 39: 154-167.
- [17] Piazza M, Facoetti A, Trussardi AN, et al. Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia[J]. *Cognition*, 2010, 116(1): 33-41.
- [18] Szucs D, Devine A, Soltesz F, et al. Developmental dyscalculia is related to visuo-spatial memory and inhibition impairment[J]. *Cortex*, 2013, 49(10): 2674-2688.
- [19] Mayes SD, Calhoun SL. Frequency of reading, math, and writing disabilities in children with clinical disorders[J]. *Learning and Individual Differences*, 2006, 16(2): 145-157.
- [20] Fuchs LS, Compton DL, Fuchs D, et al. The prevention, identification, and cognitive determinants of math difficulty [J]. *Journal of Educational Psychology*, 2005, 97(3): 493-513.
- [21] Zhou X, Chen C, Zang Y, et al. Dissociated brain organization for single-digit addition and multiplication[J]. *Neuroimage*, 2007, 35(2): 871-880.
- [22] Butterworth B, Kovas Y. Understanding neurocognitive developmental disorders can improve education for all[J]. *Science*, 2013, 340(6130): 300-305.
- [23] Cui J, Zhang Y, Wan S, et al. Visual form perception is fundamental for both reading comprehension and arithmetic computation[J]. *Cognition*, 2019, 189: 141-154.
- [24] Moll K, Landerl K, Snowling MJ, et al. Understanding comorbidity of learning disorders: Task-dependent estimates of prevalence[J]. *J Child Psychol Psychiatry*, 2019, 60(3): 286-294.
- [25] Zhang X, Räsänen P, Koponen T, et al. Early cognitive precursors of children's mathematics learning disability and persistent low achievement: A 5-year longitudinal study [J]. *Child Dev*, 2020, 91(1): 7-27.
- [26] Bulthé J, Prinsen J, Vanderauwera J, et al. Multi-method brain imaging reveals impaired representations of number as well as altered connectivity in adults with dyscalculia[J]. *Neuroimage*, 2019, 190: 289-302.
- [27] Dinkel PJ, Willmes K, Krininger H, et al. Diagnosing developmental dyscalculia on the basis of reliable single case fmri methods: Promises and limitations [J]. *PloS One*, 2013, 8(12): e83722.
- [28] Mussolin C, De Volder A, Grandin C, et al. Neural correlates of symbolic number comparison in developmental dyscalculia[J]. *J Cogn Neurosci*, 2010, 22(5): 860-874.
- [29] Price GR, Holloway I, Räsänen P, et al. Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia[J]. *Current Biology*, 2007, 17(24): R1042-R1043.

(下转第 408 页)

- [13] Zhang H, Xu L, Yu J, et al. Identification of autism spectrum disorder based on functional near-infrared spectroscopy using adaptive spatiotemporal graph convolution network[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1132231.
- [14] Wu T, Liu X, Cheng F, et al. Dorsolateral prefrontal cortex dysfunction caused by a go/no-go task in children with attention-deficit hyperactivity disorder: A functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1145485.
- [15] Miao S, Han J, Gu Y, et al. Reduced prefrontal cortex activation in children with attention-deficit/hyperactivity disorder during go/no-go task: A functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Front Neurosci*, 2017, 11: 367.
- [16] Wagner S, Sebastian A, Lieb K, et al. A coordinate-based ALE functional MRI meta-analysis of brain activation during verbal fluency tasks in healthy control subjects[J]. *BMC Neurosci*, 2014, 15: 19.
- [17] Li Y, Ma S, Zhang X, et al. ASD and ADHD: Divergent activating patterns of prefrontal cortex in executive function tasks? [J]. *J Psychiatr Res*, 2024, 172: 187-196.
- [18] Sripada CS, Kessler D, Angstadt M. Lag in maturation of the brain's intrinsic functional architecture in attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(39):14259-14264.
- [19] Dadario NB, Tanglay O, Sughrue ME. Deconvoluting human Brodmann area 8 based on its unique structural and functional connectivity [J]. *Front Neuroanat*, 2023, 17: 1127143.
- [20] Wu J, Xiao H, Sun H, et al. Role of Dopamine receptors in ADHD: A systematic Meta-analysis[J]. *Mol Neurobiol*, 2012, 45(3): 605-620.
- [21] Wu ZM, Llera A, Hoogman M, et al. Linked anatomical and functional brain alterations in children with attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *NeuroImage Clin*, 2019, 23: 101851.
- [22] Chiang HL, Wu CS, Chen CL, et al. Machine-learning-based feature selection to identify attention-deficit hyperactivity disorder using whole-brain white matter microstructure: A longitudinal study[J]. *Asian J Psychiatry*, 2024, 97: 104087.
- [23] Chen Y, Huang X, Wu M, et al. Disrupted brain functional networks in drug-naïve children with attention deficit hyperactivity disorder assessed using graph theory analysis [J]. *Hum Brain Mapp*, 2019, 40(17): 4877-4887.
- [24] Høberg A, Solberg BS, Hegvik TA, et al. Using polygenic scores in combination with Symptom Rating Scales to identify attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *BMC Psychiatry*, 2024, 24(1): 471.
- [25] Hong SB. Thalamocortical functional connectivity in youth with attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *J Psychiatry Neurosci*, 2023, 48(1): E50-E60.

收稿日期:2024-09-20 修回日期:2025-01-07 本文编辑:杨媛媛

(上接第 358 页)

- [30] Kaufmann L, Vogel SE, Starke M, et al. Developmental dyscalculia: Compensatory mechanisms in left intraparietal regions in response to nonsymbolic magnitudes[J]. *Behav Brain Funct*, 2009, 5(1): 35.
- [31] Simos PG, Kanatsoulis K, Fletcher J M, et al. Aberrant spatiotemporal activation profiles associated with math difficulties in children: A magnetic source imaging study[J]. *Neuropsychology*, 2008, 22(5): 571-584.
- [32] Mccaskey U, Von Aster M, Maurer U, et al. Longitudinal brain development of numerical skills in typically developing children and children with developmental dyscalculia[J]. *Front Human Neurosci*, 2018, 11: 629.
- [33] Rotzer S, Kucian K, Martin E, et al. Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia [J]. *Neuroimage*, 2008, 39(1): 417-422.
- [34] Rykhlevskaia E, Uddin LQ, Kondos L, et al. Neuroanatomical correlates of developmental dyscalculia: Combined evidence from morphometry and tractography [J]. *Front Hum Neurosci*, 2009, 3.
- [35] 周新林. 作为另一种知识体系的中国珠算: 非符号算术[J]. *珠算与珠心算*, 2021, (3): 6-8.
- [36] Zhou X, Zeng J. Three-component mathematics for students [J]. *Infant and Child Development*, 2022, 31(1): e2283.
- [37] 周新林. 脑科学为数学教育提供依据[J]. *教育家*, 2018, (8): 66-67.
- [38] Cui J, Xiao R, Ma M, et al. Children skilled in mental abacus show enhanced non-symbolic number sense [J]. *Cur Psych*, 2022, 41(4): 2053-2066.
- [39] Barner D, Alvarez G, Sullivan J, et al. Learning mathematics in a visuospatial format: A randomized, controlled trial of mental abacus instruction[J]. *Child Dev*, 2016, 87(4): 1146-1158.
- [40] Lu Y, Li M, Cui Z, et al. Transfer effects of abacus training on cognition[J]. *Cur Psych*, 2023, 42(8): 6271-6286.
- [41] Hanakawa T, Honda M, Okada T, et al. Neural correlates underlying mental calculation in abacus experts: A functional magnetic resonance imaging study[J]. *Neuroimage*, 2003, 19(2): 296-307.
- [42] Hu Y, Geng F, Tao L, et al. Enhanced white matter tracts integrity in children with abacus training[J]. *Human Brain Mapping*, 2011, 32(1): 10-21.
- [43] Li M, Wang Z, Yu X, et al. Single-trial interindividual correlation shows semantic and visuospatial networks are fundamental for advanced mathematical learning [J]. *Eur J Neurosci*, 2024, 60(6): 5189-5202.

收稿日期:2025-03-20 修回日期:2025-03-25 本文编辑:王悦