

• 综 述 •

汉语发展性阅读障碍儿童的语言与认知事件相关电位研究进展

黄子怡^{1,2,3}, 韩江华^{2,3}, 李群¹

1. 四川大学华西医院耳鼻咽喉头颈外科, 四川 成都 610041; 2. 四川大学文学与新闻学院, 四川 成都 610225;

3. 四川大学语言符号认知神经科学实验室, 四川 成都 610225

摘 要: 发展性阅读障碍是影响儿童阅读能力的神经发育障碍, 对儿童乃至整个家庭造成了巨大影响。研究发现, 汉语发展性阅读障碍儿童在语言层面与一般认知层面, 存在不同程度的事件相关电位(ERP)异常, 但目前核心缺陷尚有争论, 神经心理机制尚未完全明确。本文就汉语发展性阅读障碍儿童的语言与认知事件相关电位进行研究综述, 可为未来研究方向提供参考。

关键词: 发展性阅读障碍; 事件相关电位; 语音意识; 语素意识; 正字法意识; 感觉运动; 执行功能

中图分类号: R179 文献标识码: A 文章编号: 1008-6579(2026)02-0212-05 doi:10.11852/zgetbjzz2025-0320

Progress of language and cognitive event-related potentials in Chinese children with developmental dyslexia

HUANG Ziyi^{1,2,3}, HAN Jianghua^{2,3}, LI Qun¹

1. Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, West China Hospital of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. School of Literature and Journalism of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610225, China; 3. Neurocognitive Laboratory for Linguistics and Semiotics of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610225, China

Corresponding author: LI Qun, E-mail: liqun2021@wchscu.cn

Abstract: Developmental dyslexia is a neurodevelopmental disorder that impairs children's reading ability and imposes substantial challenges on both the affected individuals and their families. Research has shown that Chinese children with developmental dyslexia exhibit varying degrees of abnormalities in event-related potentials (ERP) at both linguistic and general cognitive levels. However, controversies remain regarding the core deficits, and the underlying neuropsychological mechanisms have yet to be fully elucidated. This review summarizes language and cognitive event-related potentials in Chinese children with developmental dyslexia, aiming to provide insights for future research directions.

Keywords: developmental dyslexia; event-related potentials; phonological awareness; morphological awareness; orthographic awareness; sensorimotor; executive function

发展性阅读障碍(developmental dyslexia, DD)是一种神经发育障碍, 主要表现为个体具有正常的智力、生活环境及教育水平, 在听觉、视觉和神经系统方面不存在明显障碍, 但难以准确和/或流利地识别文字^[1]。在我国, 学龄儿童中阅读障碍患病率约为 4.5%~8%^[2], 且有数据显示, DD 患者抑郁、焦虑、自杀、犯罪等发生率明显高于正常同龄人, 是学习困难儿童面临的最显著问题之一^[3]。

阅读障碍在拼音文字(phonetic writing system, 以记录语音为核心功能的文字体系)中已有较为深入的研究, 学术界也普遍认为语音意识缺陷是

拼音文字 DD 患者的核心缺陷。拼音文字通过符号记录语音间接表义, 而表意文字(logographic writing system, 通过字形直接或间接表达词或语素意义的文字体系)字形与语音的对应关系较弱。汉字作为表意文字, 主要通过笔画、部件的二维空间组合直接关联语义。由于汉语阅读障碍研究起步晚且诊断标准尚未统一, 目前关于汉语 DD 的核心缺陷仍存在很大争议, 主要的观点除语音意识缺陷外, 还有语素意识、正字法意识、感觉功能、执行功能缺陷等, 主要可分为语言本体与一般的认知信息加工两大方向^[4]。

基金项目: 四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2022YFH0107); 四川省教育科学规划重点课题(SCJG25B017)

作者简介: 黄子怡(2002—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为神经语言学、认知语言学。

通信作者: 李群, E-mail: liqun2021@wchscu.cn

近年来,事件相关电位(event-related potentials, ERP)技术已逐渐成为研究阅读障碍神经机制的重要工具。本综述旨在借助核心缺陷分类标准,系统梳理近年来基于 ERP 技术的汉语 DD 儿童的研究进展,重点探讨其语言层面缺陷和认知层面缺陷的神经机制,为后续研究提供参考,并为临床诊断和干预提供理论支持。

1 语言层面的事件相关电位研究

1.1 语音意识加工缺陷 语音意识是指个体对语言中语音单元的感知、分析和操作能力^[5],是阅读能力的重要基础。语音加工技能一直是国外研究焦点,认为“语音意识缺陷是阅读障碍的核心缺陷”,我国学者早期主要根据拼音文字语言的特点、对汉语 DD 患者的听觉语音加工进行研究。Meng 等^[6]采用被动 Oddball 范式,发现汉语 DD 儿童在汉语语音模式下,偏差刺激诱发的失匹配负波(mismatch negativity, MMN)显著小于正常发育(typically developing, TD)儿童,而纯音频率偏差刺激的 MMN 无显著差异。邓柯高^[7]使用类似的实验范式也发现 DD 组在纯音刺激下的 MMN 波幅显著小于 TD 组。这些研究表明 DD 儿童在早期听觉感觉加工或对语音变化的自动化侦测上存在异常。

在语音意识缺陷的基础之上,基于双通道模型理论(dual-route model),有学者认为 DD 的核心缺陷可能在于其词典前(形-音)通路的功能障碍,即形音通达缺陷假说。张瑞瑞^[8]通过视觉与听觉的词汇判断任务发现,DD 儿童在音义通路反应时显著慢于形义通路,P1 与 N2 的脑电波波幅显著小于 TD 儿童,表明 DD 儿童在语音信息识别方面存在困难,进而影响了单字识别过程。

1.2 语素意识加工缺陷 语素意识是指个体对语言中最小的意义单位——语素的感知和操作能力,是元语言意识的一种。Shu 等^[9]最早发现了语素意识对儿童早期汉字识别的重要作用,并提出语素意识缺陷可能是汉语阅读障碍核心缺陷的观点。关于语素意识的 ERP 实验范式设计,探讨同音语素意识、同形语素意识多是从同音字或含有相同部件的形近字着手,如 Meng 等^[10]以同音字和形近字为材料,通过句子阅读的句尾词汇判断任务,发现汉语 DD 儿童的 N400 波幅较 TD 组更小,且 DD 的组内分析结果显示,形近字诱发的 N400 波幅比同音字诱发的更小,这表明其在语素意识加工方面存在一定程度的缺陷,需要依赖更多的语音信息来获取词汇语义。探讨语素意识多以词汇判断任务为实验范

式,如黄海伟等^[11-12]采用汉语双字真词和假词(由两个不能组成词的汉字组成)作为实验材料,结果发现 DD 组的 N400 在同种条件下比 TD 儿童的波幅更小,脑区分布范围较广。

1.3 正字法意识加工缺陷 正字法意识是指个体对文字书写规则和结构的感知和操作能力。汉语的正字法结构复杂,部件被认为是汉字正字法加工的基本单元^[13],关于正字法的 ERP 研究多从 N400 和 N170 成分作为神经生物指标进行。

Chung 等^[14]通过真假词汇判断任务发现,DD 儿童在处理正字法信息时的 N400 效应异常。Tzeng 等^[15]通过语义判断任务,发现 TD 儿童在处理非字(违背正字法的假字)时表现出显著的 N400 效应,而 DD 儿童则未表现出这种差异,表明其对正字法规则的敏感性较差。

Zhou 等^[16-17]同样通过词汇判断任务,发现汉语 DD 儿童的 N170 波幅显著高于 TD 儿童,表明其在早期视觉词处理阶段存在功能障碍或处理效率低下。而 Xue 等^[18]在近期的研究中基于前人经验,根据 N170 成分反映出的调谐效应(tuning effect),对汉语 DD 儿童印刷品精细神经调谐效应(fine neural tuning for print)的损伤做出了更深入的研究,结果发现 DD 儿童 N1(N170)的波幅在假字条件下比笔画组合条件下更强。这表明粗调节是完整的,但假字和非字之间的 N1 差异相较于 TD 组更小,说明汉语 DD 儿童在亚词汇水平上的精细神经调节存在选择性损伤。

1.4 句法、语义加工缺陷 句法加工是指个体对语言中句子结构和语法规则的感知和操作能力,语义加工是指大脑对词汇、句子和篇章的语义信息进行理解和整合的过程。郑雳等^[19-20]的研究发现 DD 儿童在加工词汇句法表征更复杂的句子时,会诱发比 TD 儿童波幅更大的 N400 且出现右半球的偏侧化效应。表明 DD 儿童在句法结构复杂时更倾向于使用右半球完成句法加工,与 TD 儿童的加工模式不同。此外,DD 儿童在加工主语、宾语关系从句时未出现与 TD 组一致的 P600 差异,表明其无法根据关系从句线性距离的变化调整处理资源的投入量。关于语义的研究结果普遍发现 DD 儿童在语义加工任务中的 N400 波幅显著大于 TD 儿童^[21-22],表明 DD 儿童在语义加工过程中需要投入更多的认知资源,这可能与其语义整合能力不足有关。

2 认知层面的事件相关电位研究

2.1 感觉运动缺陷 尽管大量有关拼音文字阅读

障碍的研究认为 DD 儿童存在语音意识缺陷,但部分研究者认为语音意识缺陷只是阅读障碍的一种表现,而非原因,导致其出现语音意识缺陷的可能是更低水平的感觉运动缺陷。

周路平等^[23]通过汉字单字词词汇识别任务发现,DD 儿童左脑枕区的 P1 波幅显著小于 TD 组,但左枕颞区 N170 波幅显著大于 TD 儿童,潜伏期则无明显差异,表明 DD 儿童存在明显的早期感知觉加工问题。不少敏锐的学者以视觉大细胞通路为切入点,如 Wang 等^[24]采用视觉失匹配负波(visual mismatch negativity, vMMN)范式,发现汉语 DD 儿童在视觉大细胞通路功能上存在缺陷,进而影响其正字法加工能力。后续研究进一步对比分析视觉大细胞通路中的 M-P 系统(magnocellular-parvocellular system)^[25-26],结果一致认为 DD 患者在 M 通路(magnocellular pathway)的时间和空间加工上均存在困难。

2.2 执行功能缺陷 执行功能(executive function)是指有机体对思想和行动进行有意识控制的心理过程,是一般性的认知技能,涉及三大核心内容,分别为抑制控制(inhibitory control)、工作记忆(working memory)和认知灵活性(cognitive flexibility)。阅读障碍缺陷除感觉运动缺陷外的一般认知缺陷研究,可按照执行功能的子成分进行划分。

抑制功能是指个体对无关信息的抑制能力,在 ERP 中通常会通过 Stroop 范式进行测量。Shen 等^[27]运用经典 Stroop 范式发现 DD 儿童在一致试验中的 P2 波幅显著高于不一致试验,而 TD 儿童在不一致试验中的 P2 波幅显著高于一致试验,表明 DD 儿童在注意力分配和抑制无关信息方面存在困难。

工作记忆是指个体在短时间内存储和操作信息的能力。晏美文^[28]通过 N-back 范式,发现 DD 组在语音匹配任务中左侧枕颞区 N1 的激活明显较小、VPP 波幅明显较大、N2 波幅明显较小。徐亚晖^[29]则通过工作记忆实验范式,发现 DD 儿童的 P300 波幅小于 TD 儿童且潜伏期较长。这表明 DD 患者的语音提取和存储能力都存在困难,并且在完成任务时需要耗费更多的心理资源。

认知灵活性是指个体在任何给定的情境中进行灵活的、有意义的知觉选择以适应环境的能力。韩娟等^[30]采用听觉主动 Oddball 范式,发现 DD 儿童在注意不计数条件下 N2、P3 潜伏期较长, P3 波幅较小;在注意计数条件下,DD 组儿童记数错误率更高,其 P3 潜伏期显著延长、P3 波幅显著较低,表明 DD 儿童存在注意及记忆缺陷,进而影响其语音意识加工。

3 汉语发展性阅读障碍儿童相关研究的特点、成果与争议

大脑与语言的关系研究由来已久,针对失语症的研究让人们认识到人类大脑中与语言相关的区域,布洛卡区和韦尼克区的发现则标志着现代神经语言学的诞生。本文按语言能力和认知能力两大层面进行了分类梳理,结果表明,无论是在语言层面,还是在认知层面,汉语 DD 儿童与 TD 儿童相比,均存在显著的 ERP 成分异常。这也表明了 ERP 技术可用于捕捉阅读障碍的早期神经标记,为早期风险预测及筛查提供理论依据。

3.1 共性特征与研究成果 在语言层面,语音意识加工的早期和晚期阶段的脑电成分(如 P1、N2 和 MMN)波幅降低或潜伏期延长,语素意识加工中的 N400 波幅降低,正字法意识加工中的 N400 效应异常及 N170 过度激活,语义加工及句法加工中的 N400 波幅异常增大。

虽然关于语音意识的研究起步较早,但主要研究方法多是行为测量学实验^[2],即使已有不少 fMRI 等脑成像的研究^[31],但与 ERP 相关的高时间精度的神经生物学实验研究依然较少。汉字复杂的正字法作为其独特的指标之一,一直都是研究的焦点。有学者认为,中文阅读过程中不存在明确的形-音转换规则,根据双通道理论,汉语儿童无法利用亚词汇通路完成假词阅读,这是与拼音文字的不同之处。语义 N400 的差异很有可能是因为 DD 儿童的整合能力不足,因此需要付出额外的努力对语义进行加工。前期的研究普遍将 N400 与语义整合联系在一起^[32],但近期研究逐渐将 N400 的功能拓展到其他方面,关于语素意识缺陷的研究均表明汉语 DD 患者的 N400 波幅较 TD 组更小,这一方面拓展了 N400 在探究语素意识中的应用,另一方面也表明汉语 DD 儿童在认知加工晚期的语义整合上存在困难,汉语 DD 儿童存在语素意识缺陷。

在一般认知能力层面,DD 儿童视觉和听觉加工中的枕叶 P1 波幅降低、枕颞区 N170、VPP 波幅较高、晚期 LPP 波幅偏小、MMN 波幅偏小,视觉大细胞通路功能受损,导致正字法加工效率低下;执行功能加工中的抑制控制 N2、P3 潜伏期长于 TD 儿童, P3 波幅低于 TD 儿童,表明 DD 儿童存在抑制功能缺陷,在阅读过程中无法正确抑制无关信息的干扰。此外,DD 儿童工作记忆(N1、P300)及注意转换(N2、P3)相关成分异常,表明其执行功能不足可能加剧阅读障碍。

需要注意的是,对于实验脑区的选取,现有研究

所使用的标准不一,主要与实验范式及脑电成分挂钩。Oddball 范式诱发的 MMN、P300(P3)及视觉加工的晚成分 LPP 主要位于中央脑区;与汉字识别相关的 N170(N1)、N2、VPP 选取双侧枕颞区,P1 选取双侧枕区;工作记忆范式中则选取了额叶 P300 和 N2;DD 患者 N400 的脑区分布范围较广且波幅较小,上述研究对前中后脑区的 N400 都进行了分析。

3.2 争议性观点与存在的问题 汉语阅读障碍的核心缺陷尚无定论。前文提及的研究都从各自所支持的核心缺陷假说角度出发,使用不同的实验范式,探讨不同的脑电成分,也都能通过相关神经数据进行相关性的说明。值得注意的是相关性并非因果性^[33],阅读本身就是一个非常复杂的认知过程,且语言层面与认知层面的缺陷可能相互影响,要谨慎看待作者对实验结果的解释。

汉语 DD 目前在临床上仍缺乏统一的行为与神经诊断标准。此外,现有研究的被试年龄跨度大,而学龄期儿童还处于神经发育的重要阶段,近期有研究表明,部分脑电成分如 P-MMN(positive mismatch response)、LDN(late discriminative negativity)具有年龄敏锐性^[34],故很有可能因为选取被试的年龄跨度不同而导致最终实验结果出现互相矛盾的现象。

部分研究样本量小,且被试数量的选取并无严格的理论依据,在一定程度上会影响结果的普适性。目前国内关于 ERP 的相关研究以横向研究为主,纵向追踪与干预研究不足,难以明确神经机制的发展轨迹及干预效果。国外的相关研究发现,对 DD 儿童进行听觉干预和音乐训练后,MMN 趋向正常化^[35-36]。但国内现有的干预研究多聚焦于行为训练,缺乏基于 ERP 特征的神经反馈干预探索。

基于汉语 DD 儿童 ERP 研究的现状与挑战,未来研究要尽可能使用信效度高的诊断工具与 ERP 标记构建统一诊断体系;依托成熟的阅读理论框架,深化神经机制因果探索;采用多模态技术和纵向设计追踪神经发育轨迹,开发基于 ERP 的神经反馈干预并促进临床应用。整合跨学科视角与技术手段,系统解析汉语 DD 的神经机制并推动干预策略的精准化。

参考文献

- [1] 李凯茜,梁丹丹.发展性阅读障碍风险儿童的大脑异常及阅读障碍的早期神经标记[J].心理科学进展,2023,31(10):1912-1923.
Li KQ, Liang DD. Abnormalities in the brain of preschool children at risk for developmental dyslexia and early neural markers of dyslexia[J]. Advances in Psychological Science, 2023,31(10):1912-1923. (in Chinese)
- [2] 赵炎,邓宇.汉语阅读障碍研究的可视化分析[J].现代特殊教育,2021,4:29-34.
Zhao Y, Deng Y. Visualization analysis of research trends on Chinese dyslexia[J]. Modern Special Education, 2021,4:29-34. (in Chinese)
- [3] 李秀红,潘宁.揭示儿童发育性阅读障碍发病机制发展本土化诊断与干预体系[J].中国学校卫生,2019,40(10):1445-1448.
Li XH, Pan N. Uncovering the etiology of developmental dyslexia and sights for localized diagnosis and intervention system[J]. Chin J Sch Health, 2019,40(10):1445-1448. (in Chinese)
- [4] 纳莹.近十年汉语发展性阅读障碍的脑机制研究进展[J].现代特殊教育,2017(4):3-7,13.
Na Y. A Study on the brain mechanisms of developmental dyslexia in Chinese over the past decade[J]. Modern Special Education, 2017(4):3-7,13.
- [5] Goswami U. A neural oscillations perspective on phonological development and phonological processing in developmental dyslexia [J]. Lang Linguist Compass, 2019, 13(5): e12328.
- [6] Meng XZ, Sai XG, Wang CX, et al. Auditory and speech processing and reading development in Chinese school children: Behavioural and ERP evidence [J]. Dyslexia, 2005, 11(4): 292-310.
- [7] 邓柯高.新疆地区汉语阅读障碍儿童纯音及语音加工的脑电特征研究[D].石河子:石河子大学,2019.
Deng KG. EEG characteristics of pure tone and speech processing in children with Chinese developmental dyslexia in Xinjiang[D]. Shihezi:Shihezi University, 2019. (in Chinese)
- [8] 张瑞瑞.汉语发展性阅读障碍儿童单字识别的形音通达研究[D].南京:南京师范大学,2021.
- [9] Shu H, McBride-Chang C, Wu S, et al. Understanding Chinese developmental dyslexia: Morphological awareness as a core cognitive construct[J]. J Educ Psychol, 2006, 98(1): 122-133.
- [10] Meng XZ, Tian XM, Jian J, et al. Orthographic and phonological processing in Chinese dyslexic children: An ERP study on sentence reading [J]. Brain Res, 2007, 1179: 119-130.
- [11] 黄海伟.阅读障碍学生语义加工的事件相关电位研究[D].郑州:河南大学,2012.
Huang HW. The event-related potential study on the semantic processing of the dyslexic students[D]. Zhengzhou: Henan University, 2012. (in Chinese)
- [12] Tong XH, Chung KKH, McBride C. Two-character Chinese compound word processing in Chinese children with and without dyslexia: ERP evidence [J]. Dev Neuropsychol, 2014, 39(4): 285-301.
- [13] 钱怡,赵婧,毕鸿燕.汉语学龄前儿童正字法意识的发展[J].心理学报,2013,45(1):60-69.
Qian Y, Zhao J, Bi HY. The development of orthographic awareness in Chinese preschool children [J]. Acta Psychologica Sinica, 2013,45(1):60-69. (in Chinese)

- [14] Chung KK, Tong XH, McBride-Chang C. Evidence for a deficit in orthographic structure processing in Chinese developmental dyslexia: An event-related potential study[J]. *Brain Res*, 2012, 1472: 20-31.
- [15] Tzeng YL, Hsu CH, Lin WH, et al. Impaired orthographic processing in Chinese dyslexic children: Evidence from the lexicality effect on N400[J]. *Sci Stud Read*, 2018, 22(1): 85-100.
- [16] Zhou L, Yan X. Enhanced N170 elicited by words in Chinese developmental dyslexia [J]. *Neuroreport*, 2018, 29(15): 1244-1248.
- [17] Song Y, Gu J, Song S, et al. Orthographic-phonological mapping impairments in Chinese children with developmental dyslexia: Insights from an ERP investigation[J]. *Ann Dyslexia*, 2025, 75(2): 289-310.
- [18] Xue L, Zhao J, Weng X. Selective impairments in fine neural tuning for print in Chinese children with developmental dyslexia[J]. *Brain Sci*, 2023, 13(3): 379.
- [19] 郑雳. 汉语阅读障碍儿童二元非宾格结构加工的 ERP 研究 [D]. 徐州: 江苏师范大学, 2021.
- [20] 曹然. 发展性阅读障碍儿童是否有句法加工缺陷? [D]. 徐州: 江苏师范大学, 2022.
- Cao R. Does developmental dyslexic children have syntactic processing deficits? [D]. Xuzhou: Jiangsu Normal University, 2022. (in Chinese)
- [21] Chang CT, Lee CY, Chou CJ, et al. Predictability effect on N400 reflects the severity of reading comprehension deficits in aphasia[J]. *Neuropsychologia*, 2016, 81: 117-128.
- [22] Wang EG, Zhou GG, Wang YF, et al. Word recognition semantic processing defects in Chinese children with developmental dyslexia: An event-related potential study [J]. *Neuroquantology*, 2017, 15(2): 221-231.
- [23] 周路平, 李海燕. 发展性阅读障碍儿童汉字识别的早期加工: 一项 ERP 研究[J]. *心理科学*, 2011, 34(1): 108-111.
- Zhou LP, Li HY. Early processing of Chinese character recognition in children with developmental dyslexia: A study of event-related potential[J]. *Psychological Science*, 2011, 34(1): 108-111. (in Chinese)
- [24] Wang JJ, Bi HY, Gao LQ, et al. The visual magnocellular pathway in Chinese-speaking children with developmental dyslexia [J]. *Neuropsychologia*, 2010, 48(12): 3627-3633.
- [25] Meng ZL, Liu ML, Bi HY. Spatial and temporal processing difficulties in Chinese children with developmental dyslexia: An ERP study [J]. *Dyslexia*, 2022, 28(4): 416-430.
- [26] Huang X, Wong WL, Tse CY, et al. Is there magnocellular facilitation of early neural processes underlying visual word recognition? Evidence from masked repetition priming with ERP[J]. *Neuropsychologia*, 2022, 170: 108230.
- [27] Shen CW, Jiang Q, Luo Y, et al. Stroop interference in children with developmental dyslexia: An event-related potentials study[J]. *Medicine*, 2021, 100(25): e26464.
- [28] 晏美文. 阅读障碍儿童单字词加工的工作记忆研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2013.
- Yan MW. An ERP study of working memory on Chinese dyslexia in Chinese character recognition [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2013. (in Chinese)
- [29] 徐亚晖. 不同类型发展性学习障碍儿童内隐工作记忆研究—来自 ERP 的证据[D]. 郑州: 河南大学, 2015.
- Xu YJ. The characteristics of implicit working memory in children with different kinds of learning disabilities: Evidence from ERP [D]. Zhengzhou: Henan University, 2015. (in Chinese)
- [30] 韩娟, 时俊新, 饶广勋, 等. 汉语阅读障碍儿童听觉认知事件相关电位研究[J]. *中国妇幼保健*, 2008, 31: 4415-4417.
- Han J, Shi JX, Rao GX, et al. Study on the auditory cognitive event-related brain potentials in reading disorders of children[J]. *Maternal and Child Health Care of China*, 2008, 31: 4415-4417. (in Chinese)
- [31] 黄格敏, 申仁洪. 汉语发展性阅读障碍的认知神经机制与干预研究进展[J]. *中国特殊教育*, 2022, 11: 55-61, 71.
- Huang MG, Shen HR. A study on the cognitive neural mechanism and intervention of Chinese developmental dyslexia[J]. *Chinese Journal of Special Education*, 2022, 11: 55-61, 71. (in Chinese)
- [32] Kutas M, Federmeier KD. Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP) [J]. *Annu Rev Psychol*, 2011, 62: 621-647.
- [33] 李何慧, 陶伍海, 彭聃龄, 等. 发展性阅读障碍与脑异常的因果关系: 研究范式及发现[J]. *心理发展与教育*, 2017, 33(5): 631-640.
- Li HH, Wu WH, Peng DL, et al. The causal relationship between developmental dyslexia and abnormal brain regions: Research paradigms and the relevant findings[J]. *Psychological Development and Education*, 2017, 33(5): 631-640. (in Chinese)
- [34] Li Y, Liu YF, Bi HY, et al. Mismatch responses of basic auditory temporal processing: Early predictive biomarkers of Chinese reading [J]. *Lang Cogn Neurosci*, 2024, 40(1): 71-86.
- [35] Frey A, Francois C, Chobert J, et al. Music training positively influences the preattentive perception of voice onset-time in children with dyslexia: A longitudinal study [J]. *Brain Sci*, 2019, 9(4): 91.
- [36] Cancer A, Bonacina S, Antonietti A, et al. The effectiveness of interventions for developmental dyslexia: Rhythmic reading training compared with hemisphere-specific stimulation and action video games [J]. *Front Psychol*, 2020, 11: 1158.

收稿日期: 2025-03-31 修回日期: 2025-06-03 本文编辑: 李少闻