·综　述·

基于磁共振成像的发展性阅读障碍儿童脑结构与功能特征研究

吴影慧，张琴芬

南通大学附属常州儿童医院，江苏 常州　213000

摘　要： 发展性阅读障碍是儿童期常见的神经发育障碍，严重影响个体的学业与社会功能。磁共振成像（MRI）作为非侵入性神经影像技术，近年来广泛应用于其神经机制及干预效应的研究中。本文综述了国内外关于阅读障碍儿童的结构 MRI 与功能 MRI 研究进展，重点涉及阅读相关脑区的灰质、白质改变特征，静息态与任务态功能连接模式，以及干预前后的神经可塑性变化。采用多模态 MRI 与人工智能辅助分析的结合，为发展性阅读障碍的早期识别与精准干预提供了新的方向。当前研究尚存在样本代表性不足、方法标准不统一、结果重复性较差等问题。未来应加强多中心协作、纵向追踪与多模态融合研究，推动神经影像学在儿童发展性阅读障碍中的临床转化与实践应用。

关键词： 阅读障碍；磁共振成像；神经机制；多模态影像；儿童

中图分类号：R179　**文献标识码：**A　**文章编号：**1008-6579(2026)11-1279-05　doi：10.11852/zgetbjzz2025-1022

Magnetic resonance imaging-based structural and functional brain characteristics in children with developmental dyslexia

WU Yinghui，ZHANG Qinfen

Changzhou Children's Hospital of Nantong University，Changzhou，Jiangsu 213000，China

Corresponding author：ZHANG Qinfen，E-mail：qfz2010@hotmail.com

Abstract： Developmental dyslexia is a common childhood neurodevelopmental disorder that substantially affects academic performance and social functioning. Magnetic resonance imaging (MRI)，a noninvasive neuroimaging technique，has been widely used in recent years to investigate its neural mechanisms and the effects of intervention. This review summarizes recent structural and functional MRI findings in children with developmental dyslexia，with emphasis on gray- and white-matter alterations in reading-related brain regions，resting-state and task-based functional connectivity，and intervention-related neuroplastic changes. Integrating multimodal MRI with artificial intelligence-assisted analysis may facilitate early identification and individualized intervention. However，current studies are limited by inadequate sample representativeness，a lack of methodological standardization，and limited reproducibility. Future research should prioritize multicenter collaboration，longitudinal follow-up，and multimodal integration to facilitate the clinical translation and application of neuroimaging in childhood developmental dyslexia.

Keywords： developmental dyslexia；magnetic resonance imaging；neural mechanisms；multimodal imaging；children

发展性阅读障碍（developmental dyslexia，DD）是一种以阅读困难为核心表现的神经发育障碍。尽管 DD 儿童智力正常并接受足够教育机会，却仍表现出明显的阅读准确性和流畅性问题，给学习表现和社会适应带来很大困扰[1]。近年来流行病学数据显示，DD 在学龄儿童中发生率约为 5%～10%，且男童患病率明显高于女童，提示可能存在与性别相关的易感性差异[2-3]。

尽管语言系统在文字结构、发音规则等方面存在显著差异，但 DD 仍表现出跨语言的相似性[4]。已有多种认知神经机制假说尝试解释其病理机制，包括语音加工缺陷、视觉注意力控制问题及工作记忆功能受限等[5]。这些异常可能源自某些特定脑区的结构和功能变化，如左侧颞上回、颞中回、枕颞联合区及额下回等区域[3,6]。因此，通过影像学技术探索 DD 背后的神经机制，已成为该领域的研究热点。

磁共振成像（magnetic resonance imaging，MRI）具有高空间分辨率、无创性及丰富的多模态成像功能，在探究大脑结构和功能异常方面有独特优势。具体而言，结构磁共振成像（structural MRI，

基金项目：南通大学临床医学专项科研基金项目（重点项目）（2024LZ013）；常州市应用基础研究计划（CJ20253120）

作者简介：吴影慧（1996—），女，硕士学位，主要研究方向为基于静息态功能磁共振技术的阅读障碍儿童脑网络特征研究。

通信作者：张琴芬，E-mail：qfz2010@hotmail.com

sMRI)能精确评估灰质体积、皮层厚度以及白质纤维完整性;功能磁共振成像(functional MRI, fMRI)则通过血氧水平依赖(blood oxygen level dependent, BOLD)信号反映大脑激活模式及脑区之间的功能连接。这些技术已被广泛用于研究 DD 儿童在静息态和任务状态下脑功能特征,为寻找疾病生物标志和识别潜在亚型提供了有力证据[2,4]。

相关研究虽不断增多,但在理论整合、样本稳定性、方法一致性等方面仍存在明显不足。不同研究所用任务范式和分析方法差异较大,导致结果可比性与可重复性受限。此外,目前对脑结构异常如何伴随儿童阅读发展动态变化的纵向研究还很缺乏。因此,有必要对该领域已有成果进行回顾,以更清晰地揭示脑影像学在 DD 研究与临床转化方面的真实价值。

本文旨在综合 sMRI 与 fMRI 在儿童 DD 中的研究成果,关注灰质与白质结构异常、大脑网络功能重组以及干预训练前后脑功能可塑性变化,希望为 DD 早期筛查与个性化干预提供稳固的理论支持。

1 结构磁共振成像在阅读障碍儿童研究中的进展

近年来 sMRI 在儿童 DD 研究中取得显著进展,研究重点从宏观脑区定位拓展至微观结构特征。DD 不仅表现为语言与阅读相关脑区灰质结构异常,还涉及多个关键白质通路的微结构改变,这些差异共同构成 DD 神经机制的重要解剖基础。

在灰质结构研究中,左侧半球的枕颞联合区、颞顶区及额叶区域被认为是阅读网络重要组成部分[3-6]。其中,位于左侧枕颞区的视觉词形区(visual word form area, VWFA)负责视觉字形识别和加工。国内研究发现,DD 儿童该区域灰质体积明显减少,在文字识别任务中的神经激活也显著降低,提示该区域结构变化影响字形识别与词汇提取能力[7-9]。德国一项研究发现左侧中颞回和下颞回灰质密度降低,这些区域与语音加工和音形映射过程密切相关,其损伤可能导致语音意识发展受限[10]。通过元分析,美国南卡罗来纳医科大学证实 DD 儿童在左侧后上颞回/中颞回以及左侧眶额回/眶部区域的灰质体积明显减少[8]。

白质纤维微结构完整性也获得广泛关注。通过定量各向异性辅助差异追踪研究发现,DD 儿童在左侧侧路及双侧背侧路的白质纤维存在结构异常[11]。对阿拉伯语 DD 儿童进行的扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)研究显示,DD 个体多个关键白质通路的各向异性分数(fractional anisotropy, FA)降低,提示神经传导效率受到影响[12],阻碍了不同脑区间信息整合。其中,左侧弓状束(arcuate fasciculus, AF)是连接颞上回、角回与额下回的重要语言通路,负责语音-文字转换过程。研究表明,DD 儿童弓状束 FA 值普遍低于正常同龄儿童[13]。此外,Sadeghi 等[14]借助张量形变分析,指出连接颞叶与额叶通路的异常结构,证实了白质纤维微结构异常在 DD 神经机制中的重要作用。

值得注意的是,AF 在发育过程中是否普遍存在白质缺陷尚不明确。van der Auwera 等[15]发现其在接受阅读教学前左侧 AF 就已存在白质异常。此外,一项对使用德语儿童的研究表明,下纵束(inferior longitudinal fasciculus)连接视觉识别区与语义加工区,是实现字形到语义映射的重要桥梁[16]。DD 儿童在该通路的 FA 明显降低,提示视觉输入到语义理解的信息传导效率下降,可能导致阅读延迟和混淆[12,16]。

研究发现,灰质体积减少与白质连接异常通常在阅读早期阶段就已出现,这可能是 DD 的重要生物标记。同时,研究发现前额叶区域如中央前回的灰质密度出现代偿性升高,暗示当核心阅读通路受限时,大脑可能通过激活非典型区域以补偿阅读功能。因此,结构影像研究为 DD 神经认知模型提供坚实解剖学依据,也为疾病的早期筛查、风险识别及干预机制探索提供了重要生理基础。

2 功能磁共振成像在阅读障碍儿童研究中的进展

fMRI 被广泛应用于揭示儿童 DD 神经机制。其利用 BOLD 信号变化,实时捕捉执行特定任务时大脑的激活模式以及静息状态下不同脑区之间的功能连接,从而为理解 DD 神经基础提供动态视角[17]。

任务态 fMRI 研究呈现跨文化差异特征。在此类研究中,通常采用语音判断、押韵任务和图文匹配等语言相关范式,以诱发阅读相关脑区功能激活。美国一项研究发现,DD 儿童在执行语音加工类任务时,左侧颞顶区(如颞上回)、枕颞联合区(视觉词形区)及左侧额下回的神经激活显著减弱,而额中回和右侧脑区可能表现出代偿性激活增强,体现了一种非典型的功能重组模式[18-19]。国内研究认为,在汉语阅读中这种额叶区域的代偿性激活更加明显,可能是由于汉字在形音义整合过程中特殊的认知需求,体现了语言系统之间的差异性[19-21]。

静息态 fMRI 研究主要关注 DD 儿童在默认模式网络(default mode network, DMN)与语言网络的连接特征。静息态网络具有复杂的组织结构,内

部存在高度整合的信息传导模块及充当信息传导核心节点的关键脑区[22]。美国 Finn 等[23-24]发现，DD 个体左侧语言通路（如左额叶、颞叶、视皮层之间）的功能连接强度普遍减弱，右侧额叶、岛叶等非典型区域连接强度反而出现增强，这可能反映了 DD 儿童在静息状态下的脑功能网络重组和代偿模式。研究一致表明，儿童静息状态下的功能连接特征与其行为指标（如快速命名、工作记忆能力）显著相关，表明静息态网络连接或可成为预测阅读能力的重要神经生物学标记[25-26]。

研究表明，功能连接异常不仅存在于经典语言加工区域，也涉及注意控制网络（如前额叶皮层）和情境整合网络（如楔前叶）等多个区域。如在叙事理解任务中，DD 儿童显著性网络（salience network）连接强度显著降低，并与工作记忆表现呈负相关，表明阅读过程中的认知控制机制可能受到影响[26]。

上述研究表明，DD 儿童在大脑功能活动和神经网络连接方面存在广泛异常，表现为语言通路激活不足及静息状态下关键脑区之间信息传递效率降低。此外，大脑在功能受损时表现出代偿性重组，如非典型区域激活增强，提示神经系统具有一定程度适应性与可塑性。这些研究不仅拓展了对 DD 神经机制的理解，也为评估干预效果和优化干预策略提供了客观神经生物学依据。

3　功能磁共振成像在阅读障碍干预研究中的应用

近年来，脑功能可塑性成为理解和评估 DD 干预效果的重要突破口。fMRI 可灵敏捕捉干预前后脑功能活动变化，被广泛用于揭示不同类型训练方法对 DD 儿童脑区激活模式及功能连接特征的影响。

有研究对 DD 儿童进行听觉训练和口语训练，对其在语音处理任务中进行功能性磁共振扫描，分别记录干预前后脑活动变化。结果表明，通过干预训练，不仅可以修复与语音处理相关脑区的功能紊乱，还会在其他脑区产生额外的代谢性激活[27]。此外，一项研究将 62 名阅读障碍儿童分为语音干预组、形态干预组、等待对照组及典型发展组，通过听觉押韵任务和视觉拼写任务检测干预前后的大脑激活情况。结果发现，在神经学层面，语音干预组在听觉押韵任务中右颞中回脑激活增强，形态干预组在视觉拼写任务中表现为左额中回、左额下回和左梭状回的激活增强[28]。

也有证据表明，干预训练可促进阅读相关脑网络功能重组和整合。一项使用阅读加速计划对两组被试儿童进行阅读训练的研究表明，与典型阅读者相比，DD 儿童训练后扣带-额叶网络的静息态功能连接增强，证明了认知控制在该人群阅读中的重要性[29]。

此外，有研究尝试建立干预后神经功能变化与行为改善之间的直接联系。有研究发现，经过干预训练后，左侧额叶皮层的功能连接变化能够有效预测个体在语义流畅性任务上的进步程度，这说明 fMRI 不仅可作为干预效果的评估工具，还可为个性化干预方案的选择提供神经生物学参考依据[30]。我国一项纵向研究分析指出，DD 儿童经过干预训练后左侧缘上回区域的皮层厚度显著增加，而未接受干预的对照组和典型发展组中则未观察到这种变化，进一步强调了干预训练在神经解剖结构上的效应[31]。

Yang 等[32]通过视听整合范式的研究发现，中文 DD 儿童在语义识别过程中表现出左角回与小脑功能连接的缺陷，揭示语言整合机制的神经基础。Liu 等[33]则发现，DD 儿童在词汇形态加工过程中表现出左侧额叶和颞叶区域激活不足，支持干预重塑脑区功能激活的机制。Zhang 等[34]通过大规模网络图分析发现，DD 儿童在干预后脑功能网络从分散状态转向高度整合，说明干预诱导的代偿性功能组织变化具有可重复性。

总之，fMRI 研究为评估干预效果、阐明干预机制及开发神经预测模型提供了重要的研究工具和理论基础。

4　多模态磁共振与人工智能方法在阅读障碍研究中的前沿应用

随着影像技术和人工智能方法的发展，多模态磁共振成像（multimodal MRI）与机器学习融合已逐渐取代传统单一模态分析方法，推动了个体化诊断与干预预测的精准化发展。

近年来研究尝试整合 sMRI、功能 fMRI 以及 DTI 数据，以建立全面的脑结构-功能-行为映射框架[35]。意大利 Cara 等[35]整合了成人结构、扩散与任务态 fMRI 数据，发现多模态融合模型的分类准确率显著高于单模态分析，且能有效预测个体实际阅读表现。

人工智能有效提升了模型对复杂数据的分析能力。印度 Harismithaa 等[36]结合解剖与功能影像数据实现高精度 DD 筛查，体现出多模态融合模型在识别精度和泛化性能上的优势。另外，美国 Ouyang 等[37]的研究显示，通过机器学习方法对儿童期多模

态 MRI 数据进行处理能够预测未来阅读结果，在早期识别方面具有较大潜力。一项多模态学习研究显示，虚拟键盘大大提高了对 DD 儿童打字等表现的检测速度[38]。

未来，多模态分析将关注动态特征建模、个体精准识别以及人工智能模型的可解释性，更好地推动临床转化应用[39]。

MRI 等神经影像技术已从结构与功能异常拓展至干预可塑性与个体化预测，为基础研究与临床实践之间建立了重要连接，但该领域仍存在诸多挑战。首先，研究可重复性问题仍未解决。相同范式下，不同个体激活模式存在显著差异[40]，受样本量、任务执行力等多因素影响。尤其在左颞中回和额下回等语言区域[40]，行为表现对结果稳定性影响更大，提示应将行为指标纳入分析。其次，大多数研究仍基于小样本横断设计，缺乏纵向数据与多中心验证。虽然已有如 Shurrab 等[41]收集的大样本项目，但适用于 DD 儿童的高质量数据仍较有限。同时，功能连接在健康人群中的个体差异也非常显著，说明未来研究应更关注个体层级建模与分析策略。未来，多模态影像融合与人工智能将在 DD 识别与预测中发挥更大作用。研究表明，多模态模型明显优于单一模态[36-37]。然而，模型可解释性仍是限制其临床应用的关键问题，亟待通过生物机制约束与“灰盒模型”设计加以改进[39]。此外，纵向研究是理解阅读网络发展轨迹与干预时机的关键手段。小学阶段是大脑可塑性最强的窗口期，早期干预至关重要。但纵向设计在实施中仍面临受试者脱落、图像配准难度高、成本上升等现实挑战。未来研究应优化时间节点选择、干预节奏设定及缺失数据处理等方面，以提升研究的科学性与可行性。

综上所述，MRI 技术在揭示 DD 脑机制与评估干预效果方面发挥了重要作用。未来研究需强化多模态整合、纵向追踪与多中心协作，推动神经影像技术在儿童阅读障碍的精准识别、分类干预与实践推广中的深入应用。

利益冲突声明 本文不存在利益冲突

数据可用性声明 本研究未生成新的数据，对于纳入的每项研究均已在参考文献列表中列出。

参考文献

[1] 伊力扎提·麦麦提，买合甫来提·坎吉，迪拉热·达吾提，等. 不同文字阅读障碍儿童的视知觉加工特点[J]. 中国临床心理学杂志，2020，28(3)：460-464.
YILIZHATI Maimaiti，MAIHEFULAITI Kanji，DILARE Dawuti，et al. Visual perception with different types of dyslexia[J]. Chin J Clin Psychol，2020，28(3)：460-464.(in Chinese)

[2] Prasad S，Sagar R，KumaranSS，et al. Study of functional magnetic resonance imaging (fMRI) in children and adolescents with specific learning disorder (dyslexia)[J]. Asian J Psychiatry，2020，50：101945.

[3] Yang LP，Li CB，Li XM，et al. Prevalence of developmental dyslexia in primary school children：A protocol for systematic review and Meta-analysis[J]. World J Pediatr，2022，18(12)：804-809.

[4] Wat EK，Jangraw DC，Finn ES，et al. Will you read how I will read? Naturalistic fMRI predictors of emergent reading[J]. Neuropsychologia，2024，193：108763.

[5] 姜琦，骆艳，邓冰. 发展性阅读障碍儿童工作记忆缺陷及其干预研究[J]. 中国学校卫生，2019，40(8)：1270-1273.

[6] Leskinen S，Singha S，Mehta NH，et al. Applications of functional magnetic resonance imaging to the study of functional connectivity and activation in neurological disease：A scoping review of the literature[J]. World Neurosurg，2024，189：185-192.

[7] Liu YF，Qian Y，Bi HY. Visual motion processing in Chinese children with developmental dyslexia：An fMRI study[J]. Dyslexia，2022，28(4)：431-447.

[8] Eckert MA，Berninger VW，Vaden KI Jr，et al. Gray matter features of reading disability：A combined meta-analytic and direct analysis approach[J]. Eneuro，2016，3(1)：ENEURO.0103-15.2015.

[9] Ren H，Li YZ，Bi HY，et al. The shared neurobiological basis of developmental dyslexia and developmental stuttering：A Meta-analysis of functional and structural MRI studies[J]. Int J Clin Heal Psychol，2024，24(4)：100519.

[10] Ligges C，Ligges M，Gaser C. Cross-sectional investigation of brain volume in dyslexia[J]. Front Neurol，2022，13：847919.

[11] Sihvonen AJ，Virtala P，Thiede A，et al. Structural white matter connectometry of reading and dyslexia[J]. NeuroImage，2021，241：118411.

[12] El-Sady S，Mohammad SA，Aboualfotouh Ahmed K，et al. Correlation between diffusion tensor imaging measures and the reading and cognitive performance of Arabic readers：Dyslexic children perspective[J]. Neuroradiology，2020，62(4)：525-531.

[13] Richards T，Stevenson J，Crouch J，et al. Tract-based spatial statistics of diffusion tensor imaging in adults with dyslexia[J]. AJNR Am J Neuroradiol，2008，29(6)：1134-1139.

[14] Sadeghi N，Arrigoni F，D'Angelo MG，et al. Tensor-based morphometry using scalar and directional information of diffusion tensor MRI data (DTBM)：Application to hereditary spastic paraplegia[J]. Hum Brain Mapp，2018，39(12)：4643-4651.

[15] Van Der Auwera S，Vandermosten M，Wouters J，et al. A three-time point longitudinal investigation of the arcuate *Fasciculus* throughout reading acquisition in children devel-

oping dyslexia[J]. Neuroimage, 2021, 237: 118087.

[16] Banfi C, Koschutnig K, Moll K, et al. White matter alterations and tract lateralization in children with dyslexia and isolated spelling deficits[J]. Hum Brain Mapp, 2019, 40(3): 765-776.

[17] Schurz M, Wimmer H, Richlan F, et al. Resting-state and task-based functional brain connectivity in developmental dyslexia[J]. Cereb Cortex. 2015, 25(10): 3502-3514.

[18] Raschle NM, Zuk J, Gaab N. Functional characteristics of developmental dyslexia in left-hemispheric posterior brain regions predate reading onset[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2012, 109(6): 2156-2161.

[19] 胡晓云，静进，范淼，等. 汉语发育性阅读障碍儿童语音与视空间记忆研究[J]. 中国当代儿科杂志，2018，20(4)：314-317.
Hu XY, Jing J, Fan M, et al. Verbal and visual-spatial memory in Chinese children with developmental dyslexia [J]. Chin J Contemp Pediatr, 2018, 20(4): 314-317. (in Chinese)

[20] 王霞，潘雪瑶，李西，等. 后基因组时代基因与语言障碍的相关性研究[J]. 中华医学遗传学杂志，2024，41(3)：377-384.
Wang X, Pan XY, Li X, et al. Studies on the association of genes with language disorders in the post-genomic era[J]. Chin J Med Genet, 2024, 41(3): 377-384. (in Chinese)

[21] Hoeft F, Meyler A, Hernandez A, et al. Functional and morphometric brain dissociation between dyslexia and reading ability[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2007, 104(10): 4234-4239.

[22] Demirci E, Gengeç Benli Ş, Içer S, et al. Assessment of alterations in regional homogeneity and amplitude of low-frequency fluctuations in children with dyslexia[J]. Turk J Med Sci, 2025, 55(5): 1174-1187.

[23] Finn ES, Shen X, Holahan JM, et al. Disruption of functional networks in dyslexia: A whole-brain, data-driven analysis of connectivity[J]. Biol Psychiatry, 2014, 76(5): 397-404.

[24] Wolf M, Katzir-Cohen T. Reading fluency and its intervention[J]. Sci Stud Read, 2001, 5(3): 211-239.

[25] Taran N, Gatenyo R, Hadjadj E, et al. Distinct connectivity patterns between perception and attention-related brain networks characterize dyslexia: Machine learning applied to resting-state fMRI[J]. Cortex, 2024, 181: 216-232.

[26] Twait E, Farah R, Horowitz-Kraus T. Decreased functional connectivity of the salience network during narrative comprehension in children with reading difficulties: An fMRI study[J]. Neuroimage Clin, 2018, 20: 987-992.

[27] Temple E, Deutsch GK, Poldrack RA, et al. Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: Evidence from functional MRI[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2003, 100(5): 2860-2865.

[28] Feng G, Shen L, Shi L, et al. Brain changes following two reading interventions in Chinese children with reading disability[J]. Dev Sci, 2025, 28(4): e70038.

[29] Horowitz-Kraus T, Toro-Serey C, DiFrancesco M. Increased resting-state functional connectivity in the cingulo-opercular cognitive-control network after intervention in children with reading difficulties[J]. PLoS One, 2015, 10(7): e0133762.

[30] Aboud KS, Barquero LA, Cutting LE. Prefrontal mediation of the reading network predicts intervention response in dyslexia[J]. Cortex, 2018, 101: 96-106.

[31] Economou M, Vanden Bempt F, Van Herck S, et al. Cortical structure in pre-readers at cognitive risk for dyslexia: Baseline differences and response to intervention[J]. Neurobiol Lang (Camb). 2024, 5(2): 264-287.

[32] Yang Y, Yang YH, Li J, et al. An audiovisual integration deficit underlies reading failure in nontransparent writing systems: An fMRI study of Chinese children with dyslexia [J]. J Neurolinguistics, 2020, 54: 100884.

[33] Liu L, Tao R, Wang W, et al. Chinese dyslexics show neural differences in morphological processing[J]. Dev Cogn Neurosci, 2013, 6: 40-50.

[34] Zhang J, Liu L, Li H, et al. Large-scale network topology reveals brain functional abnormality in Chinese dyslexic children[J]. Neuropsychologia, 2021, 157: 107886.

[35] Cara C, Zantonello G, Ghio M, et al. Multimodal investigation of the neurocognitive deficits underlying dyslexia in adulthood[J]. Cereb Cortex, 2025, 35(10): bhaf193.

[36] Harismithaa LR, Sadasivam GS. Multimodal screening for dyslexia using anatomical and functional MRI data[J]. JCM, 2022, 22(4): 1105-1116.

[37] Ouyang M, Whitehead MT, Mohapatra S, et al. Machine-learning based prediction of future outcome using multimodal MRI during early childhood[J]. Semin Fetal Neonatal Med, 2024, 29(2-3): 101561.

[38] Meena YK, Cecotti H, Bhushan B, et al. Detection of dyslexic children using machine learning and multimodal Hindi language eye-gaze-assisted learning system[J]. IEEE Trans Hum Mach Syst, 2023, 53(1): 122-131.

[39] Yan K, Li T, Marques JAL, et al. A review on multimodal machine learning in medical diagnostics[J]. Math Biosci Eng, 2023, 20(5): 8708-8726.

[40] Mahowald K, Fedorenko E. Reliable individual-level neural markers of high-level language processing: A necessary precursor for relating neural variability to behavioral and genetic variability[J]. Neuroimage, 2016, 139: 74-93.

[41] Shurrab S, Guerra-Manzanares A, Magid A, et al. Multimodal machine learning for stroke prognosis and diagnosis: A systematic review[J]. IEEE J Biomed Health Inform, 2024, 28(11): 6958-6973.

收稿日期：2025-09-09　**修回日期**：2026-03-02　**本文编辑**：李少闻