DOI：10.12287/j.issn.2096-8965.20260202

脑机接口技术在孤独症谱系障碍干预训练中的研究进展

仲逢钰，陈筱青，卢姗，刘云*

［江苏省人民医院（南京医科大学第一附属医院，江苏省妇幼保健院），江苏 南京 210029］

【摘要】孤独症谱系障碍（ASD）是儿童期常见的神经发育障碍之一，主要表现为社交沟通受损、兴趣范围局限及重复刻板行为。现有研究认为，其发生发展与社会脑相关功能网络发育异常密切相关。目前常用的行为训练、言语治疗及家庭干预对部分症状具有一定改善作用，但在实际应用中，疗效评估仍较多依赖行为观察，缺少可实时反映脑功能状态的客观指标，反馈滞后和患儿配合度不稳定也会影响干预效果的判断。脑机接口（BCI）通过采集并反馈脑活动信号，为ASD干预提供了基于神经状态实时调节的新思路。近年来，随着可穿戴脑电设备、虚拟现实、社交机器人和智能算法的发展，BCI在ASD领域的研究重点已由早期可行性验证逐渐转向临床探索。闭环反馈、多模态融合和个体化训练正在成为这一领域较受关注的发展方向。本文系统综述BCI干预ASD的研究进展，重点阐述其技术原理、神经机制、主要应用模式、临床应用现状、疗效机制、现实挑战及未来发展方向，并进一步讨论BCI与其他神经调控技术的相对优势及互补性，旨在为该领域的后续研究与临床转化提供参考。

【关键词】脑机接口；孤独症谱系障碍；干预训练；神经可塑性

中图分类号：R318 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-8965（2026）02-0008-08

Research advances in brain-computer interface-based intervention training for autism spectrum disorder

Zhong Fengyu, Chen Xiaoqing, Lu Shan, Liu Yun*

［Jiangsu Province Hospital (The First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Jiangsu Maternal and Child Health Hospital), Nanjing 210029, Jiangsu, China］

【Abstract】Autism spectrum disorder (ASD) is one of the common neurodevelopmental disorders in childhood and it is mainly characterized by impairments in social communication, restricted interests, and repetitive stereotyped behaviors. Current evidence suggests that its onset and progression are closely associated with abnormal development of functional networks related to the social brain. Behavioral training, speech therapy, and family-based interventions currently in common use can improve some symptoms to a certain extent. However, in practice, efficacy assessment still relies heavily on behavioral observation, with a lack of objective indicators that can reflect brain functional states in real time. Delayed feedback and inconsistent cooperation from affected children may also affect the assessment of intervention effects. By acquiring and providing feedback on brain activity signals, brain-computer interface (BCI) technology provides a new approach to ASD intervention based on real-time adjustment of neural states. In recent years, with advances in wearable electroencephalography devices, virtual reality, social robots, and intelligent algorithms, the focus of BCI in ASD has gradually shifted from early feasibility validation to clinical exploration. Closed-loop feedback, multimodal integration, and individualized training are becoming increasingly prominent research di-

收稿日期：2026-03-05；**修回日期：**2026-05-05

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFC3605800）

通信作者：刘 云（1967-），女，江苏滨海人，教授，主任医师，博士研究生导师，主要从事糖尿病基础与临床研究，临床大数据研究，E-mail：liuyun@njmu.edu.cn

rections in this field. This review systematically summarizes the research progress in BCI-based intervention for ASD, with a focus on its technical principles, neural mechanisms, major application paradigms, current clinical applications, therapeutic mechanisms, practical challenges, and future directions. In addition, the relative advantages of BCI and its complementarity with other neuromodulation techniques are further discussed, with the aim of providing a reference for future research and clinical translation in this field.

【**Keywords**】Brain-computer interface; Autism spectrum disorder; Intervention training; Neuroplasticity

0 引言

近年来，孤独症谱系障碍（Autism Spectrum Disorder，ASD）的神经机制以及康复干预研究飞速发展，多模态数据采集和人工智能技术的融合成了一个重要趋势。功能性近红外光谱（functional Near-Infrared Spectroscopy，fNIRS）、脑电图（Electroencephalography，EEG）、深度传感器（Kinect）、虚拟现实（Virtual Reality，VR）、社交机器人等技术，正在从脑功能连接、运动行为、社交互动、干预效果等各个方面来揭示ASD儿童的神经生理特征和康复潜力。已有研究显示，运动游戏干预可以改善ASD儿童的执行功能，提高背外侧前额叶的激活和功能连接[1]；基于VR的非穿戴式行为训练系统可以提高学龄前ASD儿童的社会适应能力，并可以利用fNIRS评估训练相关脑功能的变化[2]；高剂量间歇性θ爆发刺激（intermittent Theta Burst Stimulation，iTBS）靶向左侧背外侧前额叶的随机对照试验提示其有一定的可行性，但是个案中出现过度发笑等不良反应，提示需要加强安全监测[3]；经颅直流电刺激（transcranial Direct Current Stimulation，tDCS）联合抑制控制训练也可以改善反应抑制和持续注意，并伴随前额叶激活改变[1]。

ASD患儿除了社交沟通障碍、重复刻板行为外，还会伴有注意调节困难、感觉处理异常、情绪波动、执行功能受损等，这些症状都会影响患儿的日常适应能力，也给家庭照护带来持续的负担[4]。目前普遍认为ASD相关脑功能异常不是孤立的某一脑区出现异常，而是多个网络系统即社会脑网络、镜像神经元系统、前额叶–颞顶联合区、语言相关网络等发育过程中协同失衡。该特征决定了只能依靠行为表现干预，很难准确找到它的神经基础，也使得疗效评价缺乏客观性。

目前，ASD康复主要以行为干预、言语治疗、感觉统合训练、家庭参与式训练为主。这些方法在部分患儿中可以带来一定的收益，但是临床实践中也暴露出一些共性问题，干预靶点多依靠行为观察，缺少客观的神经指标支撑，训练反馈多为延迟反馈，不能及时反映患儿真实的认知和注意状态，由于ASD患者个体间病因、表型、神经特征差异较大，同质化训练方案难以满足精准康复需求。因此，可以实时反映脑功能状态并支持个体化反馈调节的技术逐渐受到关注，脑机接口（Brain-Computer Interface，BCI）技术就是其中具有代表性的方法。BCI是采集并解码大脑神经活动信号，在大脑和外部设备之间建立直接通信通道的技术，可以实现实时神经反馈训练和靶向神经调控[5]。与传统的依靠行为观察的训练方式相比，BCI有同步获取脑活动信息、及时给予反馈、根据个体反应调整训练内容等优点[6]。2023—2024年被看作BCI技术迅速发展的关键时期，许多突破性进展相继出现。另外，机器学习方法也被用于ASD早期识别，比如用静息态fNIRS多特征结合进化算法和集成分类器，在学龄前儿童中可以达到90%以上的分类准确率，关键特征通道包括额下回、顶下小叶和初级躯体感觉皮层等区域；Kinect联合fNIRS的多模态评估显示，ASD儿童在左手运动和特定颜色刺激条件下脑激活存在差异，提示运动侧化和感觉偏好可以为康复方案的优化提供依据[7]。

目前，BCI在ASD中的研究已经从单纯的可行性验证转向临床应用的探索，但是现有的文献仍然存在研究范式分散、干预参数不统一、机制证据链不完整、长期疗效数据不足等问题。本文拟从神经机制、应用模式、临床研究现状、疗效解释、与其他神经调控技术的关系、现实限制等几个方面，对本领域研究进行归纳和讨论。

1 BCI干预ASD的技术原理

BCI干预ASD的理论基础就是ASD核心症状不单是行为异常，而且和脑网络连接障碍、神经振荡失衡、社会信息加工通路异常有关。BCI通过实时监测这些神经活动特征，将其转化为视觉、听觉或者

任务反馈，从而形成神经监测、即时反馈、行为调整的闭环训练模式，利用神经可塑性促进功能重组。因此，BCI不但是辅助训练工具，也是神经机制和行为康复之间建立桥梁的重要手段。

1.1 ASD相关神经机制与BCI干预基础

从神经机制上讲，ASD患者存在广泛的脑功能连接异常，主要是社会脑网络功能失调。EEG研究显示，ASD儿童在静息和任务状态下都存在特征性的神经活动异常，μ波抑制缺陷，μ波（8～13 Hz）是镜像神经元系统活动的重要标志，正常人观察他人动作时会出现μ波去同步化，ASD患者μ波去同步化减弱，与模仿能力缺陷、社交障碍有关[8]；γ波段异常，高频γ波（30～80 Hz）参与多感觉整合和高级认知加工，ASD患者γ波功率和相位同步性降低，提示信息整合效率受损[9]；P300成分异常，P300反映注意资源分配和刺激评估过程，ASD患者对面孔、目光等社交刺激的P300波幅降低、潜伏期延长，提示其社交注意定向和社会信息加工效率下降[10]。

fNIRS研究也表明ASD儿童存在静息态功能连接异常。ASD儿童双侧颞叶、前额叶和顶叶区域功能连接强度比正常发育儿童低很多，并且伴睡眠障碍者减弱更明显[11]。动态功能连接分析得到ASD儿童β、γ频段有异常状态转换特征，多模态协方差网络显示其右侧颞顶联合区和左侧Broca区功能耦合减弱，右侧背外侧前额叶和左侧Broca区耦合增强[12]。异常连接、社交障碍、重复刻板行为的严重程度和异常连接有关。

ASD患儿在神经振荡模式、事件相关电位、脑区耦合等各方面的异常，给BCI训练靶点的确定提供了重要的神经生理学依据。

1.2 P300事件相关电位BCI

P300是事件相关电位中潜伏期约为300 ms的正向成分，是大脑对罕见、有意义刺激的注意分配和认知评价。在Oddball范式中，标准刺激序列中随机插入低频偏差刺激，后者可以引起明显的P300成分[13]。ASD患者在社交刺激面前会表现出P300的特征性异常，同时伴有面孔特异性N170成分减弱，说明其在面孔加工、社会注意定向以及刺激评价上存在缺陷[14]。因此，P300事件相关电位BCI（P300-BCI）主要用于ASD干预中对于注意定向和选择、社交线索识别、社交决策和回应选择这些靶点的训练[15]。将认知任务设计成反馈式游戏，P300-BCI可以提高患儿训练兴趣，在一定程度上改善注意和认知功能。

1.3 稳态视觉诱发电位BCI

稳态视觉诱发电位（Steady-State Visual Evoked Potential，SSVEP）是大脑对持续闪烁视觉刺激产生的稳态反应，在闪烁频率及其谐波处可以明显看到功率增强。当个体注视不同的频率刺激时，枕叶视觉皮层就会产生相应的频率响应，进而通过频谱分析解码出注意的目标[16]。虽然目前关于ASD的SSVEP研究较少，但是视觉注意异常是ASD的重要表现之一，因此SSVEP-BCI可以用于视觉注意评估、视觉追踪训练和多目标选择训练[17]。

1.4 神经反馈BCI

神经反馈BCI不需要固定的诱发范式，而是持续监测EEG频谱特征，将特定频段功率变化以视觉或者听觉的方式实时反馈给受试者，其核心就是通过操作性条件反射促进个体学习自主调节脑电模式[18]。该模式在ASD中主要的训练靶点有觉醒调节、注意力维持、焦虑和情绪控制、感觉运动整合。与被动接受刺激不同的是，神经反馈BCI重视个体的主动参与和内源性调节，因此更适合于需要长期训练和行为迁移的康复场景。

1.5 动物模型与基础神经机制研究

临床应用不断推进的时候，基础实验研究给BCI干预ASD赋予了重要的神经生物学支撑。目前常用的孤独症动物模型有基于基因突变（*SHANK3*、*FMR1*）、环境暴露（丙戊酸钠）和神经发育异常诱导的模型，同ASD的主要症状如社交行为缺陷、重复刻板行为、感觉异常等各方面相吻合。基础研究显示ASD模型动物存在兴奋/抑制平衡失调、突触可塑性异常、脑网络连接改变[19-20]。丙戊酸钠模型小鼠出现前额叶皮层γ振荡异常和突触传递效率降低，这些神经振荡就是BCI神经反馈训练的调控靶点[21]。BCI通过调节神经振荡模式和网络连接状态，可以对异常脑功能的电生理层面进行重塑，而不仅仅是影响行为表现。

总体上各个BCI技术模式的信号来源、训练方式、适用场景是不同的。临床应用时要依照患儿的功能水平、核心症状、配合程度以及干预目的挑选合适的技术范式，而且要慢慢塑造起分层分型的个体化应用策略。

2 BCI干预ASD的主要应用模式

在确定技术原理之后，BCI干预ASD已形成了许多比较典型的模式。主要有神经反馈训练、BCI-VR融合干预、BCI-机器人系统、多模态联合干预等，其目的都是用闭环调节促进社交、认知、行为

功能的改善。

2.1 EEG神经反馈训练

神经反馈BCI是目前ASD干预中应用最成熟的一种，其基本原理是将实时EEG活动以可视化或听觉化的方式反馈给患儿，使患儿学会调节特定的脑电成分[6]。近年来，可穿戴EEG设备同机器学习算法结合之后，家庭化、游戏化干预变得可行，从而大大提高了训练的依从性。

已有随机对照试验[6]表明，可穿戴BCI系统用脑控社交互动视频游戏对ASD儿童言语、社交、知觉、μ波水平进行量化训练，干预8周（每周3次，每次30 min）后患儿表达性语言、认知意识明显提高，3个月随访疗效仍可。另外，用头戴式EEG设备做数字化认知训练，可以促进注意力、记忆力、手眼协调能力的提高。

需要指出的是，神经反馈BCI的优势不在于可以训练，而在于可以量化。与传统的以治疗师行为观察为主的训练方式不同，神经反馈BCI可以同步记录患儿训练过程中的脑电变化，给疗效评价和参数调整提供客观依据。如果可以结合个体脑电特征进行分层干预，那么神经反馈BCI在ASD中的应用价值就会进一步提高。另外，神经反馈BCI和传统的行为干预、家庭康复、数字化训练平台联合使用，会产生协同增效的效果。一项随机对照研究[22]纳入了60例ASD儿童，在康复团队的指导下进行早期家庭干预，在常规干预的基础上联合VR训练的干预组在社交认知、社交沟通、孤独症行为方式评分上优于对照组。该结果表明，BCI相关训练如果融入到现有的康复训练体系中，会对核心症状的改善和社会功能的提高起到更好的促进作用。

2.2 BCI–VR融合干预

VR技术可以创造出可以被控制、重复的沉浸式社交场景，结合BCI之后可以构建出神经–行为闭环训练系统，对ASD社交障碍核心症状的精准干预效果比较好。

共同注意属于社交认知发展根基，并且也成了ASD早期干预的主要目标[23]。葡萄牙研究小组[24]把VR环境中的虚拟化身带入到参与者之中来关注目标物，用P300信号对注意转移进行实时探测。该系统含有咖啡厅、教室、商店这些模拟场景，用来训练目光的方向以及指向的动作这类非言语社交线索辨识。研究纳入15例高功能ASD成人，经过4个月、每周2次训练后，孤独症治疗评估量表总分显著下降，社交维度、感知/认知意识维度和健康/行为维度均有改善，Vineland适应行为量表沟通领域评分也有所提高。

为了提高干预的效果，研究者又对多模态反馈机制进行了研究。一项可行性研究[25]使用g.Nautilus无线EEG系统加视觉反馈（VR场景变化）、听觉反馈（正性的语音提示），对方案的可行性进行试验，被试者是15～21岁高功能ASD男性4例。所有的实验参与者都成功完成了社交刺激跟随、联合注意实验，系统信号稳定满足了即时反馈的要求，耐受性高。系统评价[26]结果表明，g.Nautilus无线EEG系统在ASD研究中具有准备时间短、信号稳定、舒适性好等优点。虽然现有的研究还存在着样本量小、缺少对照组等不足，但是总体上提示BCI-VR范式有改善学龄期ASD个体的社交、认知技能的潜力。

BCI-VR融合干预最大的优点就是提高训练的生态效度。传统的实验室范式虽然便于控制变量，但是很难还原真实的社会情境，而VR可以模拟课堂、商店、家庭、同伴互动等复杂的环境，结合BCI实时监测注意分配和脑状态变化，可以更精准地训练患儿在真实生活中需要的社交技能。

2.3 BCI–机器人与多模态系统

社交机器人和BCI结合属于ASD康复领域的前沿研究方向，其目的是用意念控制的互动方式提高患儿的主动性以及干预效果。机器人把乏味乏善的训练任务变成游戏化的活动，依靠即时反馈加强内在动机。个性化的互动模式可以延长注意的保持时间，并且可以同时采集脑电、行为等方面的数据，为个体化的干预提供依据。部分研究[27]试图把患儿的注意力、情绪等脑电信号转化为人形机器人的动作指令，从而达到抓取、击掌等互动行为的目的，为早期干预提供量化信息。社交机器人还可以和大语言模型相连，从而提高与ASD患儿实时对话、情感识别的能力，自适应疗法在共同注意、模仿能力训练方面具有潜力。

针对ASD共病注意缺陷多动障碍（Attention Deficit Hyperactivity Disorder，ADHD）的复杂表现，有研究者开发了融合BCI、增强现实（Augmented Reality，AR）和康复机器人的综合干预系统。本系统使用SSVEP-BCI解码视觉注意力，用AR眼镜呈现虚拟的社交信息，人形机器人有物理交互以及情感反应。初步结果表明，该系统可以改善注意维持能力，在一定程度上减轻多动和冲动表现，但还需更多的对照研究支持[26]。社交机器人NAO、Pepper和BCI结合，可以依据患儿的注意状态调整互动策略，从而达到个性化自适应训练的目的。一项Meta分析[28]显示，机器人辅助训练可以提高ASD儿童的

参与度和愉悦感，但是人机交互的自然性、适应性还需要进一步提高。

从研究设计的角度来说，BCI和机器人结合的价值不单是增加训练的形式，更重要的是它给脑状态识别、反馈呈现、社交行为输出之间建立了比较清晰的对应关系。如果后面的信号稳定、情感识别、自适应算法等有所改进，那么它的应用范围就会更加广泛。

2.4 BCI与其他神经调控技术的比较与互补性

除BCI外，近年来被用于ASD干预的神经调控技术还有tDCS、重复经颅磁刺激和iTBS等。与tDCS、重复经颅磁刺激或者iTBS等外源性调控方法相比，BCI最具有代表性的特点就是它依靠实时脑信号反馈的闭环训练机制。脑刺激类方法主要是通过外加电流或者磁刺激影响皮层的兴奋性，而BCI更侧重于识别个体自身的脑活动，通过反馈促进主动调节，两者的作用路径不同。因此BCI更适合用在持续性训练和功能学习上。BCI和其他方法不是替代，而是互补的关系。VR可以提高训练生态效度，机器人可以增强社交动机，行为治疗可以提供稳定的训练框架，BCI可以给上述干预提供客观的神经指标和动态反馈。从理论上讲，如果先用脑刺激技术改善某个脑区的可塑性状态，再结合BCI进行针对性训练，可能会更有利于提高干预效率，但是这种联合模式还需要实证研究验证。因此更合适的是把BCI看作是现有康复体系的补充工具，它的意义主要体现在给训练过程提供客观的神经信息，使干预策略逐步走向更精细的个体化调整。

3 临床应用现状

在上述应用模式的基础上，BCI在ASD中的临床价值也逐渐被人们所认识。但是由于研究对象、训练参数、结局指标等各方面的差异，现有的证据还需要分领域谨慎解读。目前，BCI的临床应用主要集中在社交技能训练、注意和执行功能的改善、认知的促进、情绪行为的调节、语言沟通的辅助、联合干预以及居家应用等几个方面。按照功能角度对已经取得的研究成果进行整理，可以更加清楚地认识到目前本领域研究的主要方向和不足。

3.1 社交技能训练

社交沟通障碍是ASD最核心的临床表现，也是BCI研究最集中的方向之一。根据P300-BCI、神经反馈BCI或者BCI-VR系统训练，可以从联合注意、目光跟随、面孔识别、社交线索解读、回应选择等主要过程入手。在虚拟社交环境中，配合脑电实时反馈对高功能ASD个体社交认知、沟通、适应行为评分有提高作用。相比只用行为观察来训练的方法，BCI更能精确地察觉到社交加工时潜藏的注意偏向及脑活动改变，从而加强训练的靶向性[24]。

3.2 注意力与执行功能训练

注意力维持不足、反应抑制受损、执行功能异常在ASD儿童中比较常见，共病ADHD时更为明显。神经反馈BCI、SSVEP-BCI可以训练个体保持一定的注意状态、提高目标选择的效率、改善抑制控制。2025年Meta分析[29]纳入24项随机对照试验，共1 998例ASD或者ADHD儿童，结果显示58.3%的研究使用单纯EEG方案，29.1%的研究使用EEG联合眼电图方案，45.8%的研究报告BCI训练可以改善行为表现和脑电指标，共病ADHD的ASD儿童获益更明显，但是研究间异质性较高。另一项Meta分析[30]显示，BCI注意力训练游戏对于ADHD相关症状的减轻、行为改善、脑功能的改善有较好的效果，但是样本量小、方案不统一也限制了结论的外推。

3.3 认知功能与学习能力促进

除核心症状外，BCI也被用来提高ASD儿童的认知意识、工作记忆、信息加工、手眼协调能力。使用可穿戴EEG设备建立的游戏化训练平台更容易使儿童参与，一定程度上可以维持训练的兴趣和持续性。有部分研究显示，经过数周训练后，患儿在表达性语言、认知觉察、任务参与度、日常学习配合等各方面都有所改善[31]。但是，目前大多数结果都是样本量小或者随访时间短的研究，改善是否可以迁移到真实的学习和生活中，还需要进一步观察。

3.4 情绪调节与行为管理

ASD儿童常常伴有焦虑、情绪波动、行为问题。神经反馈BCI可以调节特定脑电频段，使患儿能够识别出自身的觉醒水平和情绪状态，进而学会放松和自我调节的方法。定量EEG研究[31]显示，训练后ASD儿童前额叶θ/β功率比降低，说明觉醒水平得到改善，顶叶α波相干性增加，感觉整合能力得到改善，且这些变化与行为量表评分的改善有显著相关性。另外，P300-BCI训练之后，ASD患者对社交刺激的P300波幅增大、潜伏期变短，说明注意资源分配和刺激评估的效率得到提高[32]。这些结果说明BCI干预可以经由神经可塑性机制来影响情绪行为调节的过程。

3.5 语言与沟通辅助训练

目前BCI在ASD语言干预中的应用还比较少，但是已有研究将脑信号识别与图像选择、语音反馈或者辅助沟通系统结合起来，用以促进沟通启动、

语言理解和表达意愿[33]。对言语表达能力强，但不能直接交流或者合作的患者来说，BCI给新的辅助沟通途径带来了新的想法。只是目前的证据水平还不足以形成统一的训练流程，高质量的临床试验数量也较少。

3.6 联合干预与居家应用趋势

伴随着无线传输、可穿戴设备、智能算法的发展，BCI由最初的单一实验室工具变成能进行训练、多模态、连续化、家庭化的一个系统。把BCI和VR、社交机器人、眼动追踪、远程监测系统结合起来使用，可以提高训练的频次、生态效度和个体的适应性。居家化BCI系统更适合于长期康复的ASD儿童，但是其效果还受设备舒适性、照护者配合度和专业团队远程支持能力的影响。总体上讲，联合干预、远程居家应用是BCI今后临床推广的主要方向。

4 现存挑战与局限

尽管BCI技术在ASD干预训练中取得了一些积极进展，但是它的临床推广和规范化应用还存在诸多难题。就技术而言，目前系统信号精度、运行稳定性、佩戴舒适度等各方面还有很大的不足。EEG信号采集容易受到运动伪迹、环境噪声、电极移位的影响，ASD儿童常常伴有多动、感觉过敏、佩戴耐受性差，使信号不稳定的风险更大。长时间佩戴设备会给人带来生理上的不适以及心理上的压力，从而影响训练的依从性。

ASD具有很强的异质性。不同的个体在症状表现、神经特征、任务配合度上存在较大差异，所以单一的BCI范式很难适应所有的患儿。目前个体化参数优化还比较困难，也没有可以用于患者筛选和疗效预测的可靠生物标志物。因此不同研究的干预效果差异较大，也限制了临床推广。就研究证据而言，目前很多临床试验仍然存在着样本量小、统计效能低、对照设计不充分等问题。2025年系统评价[26]纳入的9个BCI-VR研究中，有7个没有对照组，只有2个是随机对照试验。有部分研究没有主动进行对照组的设置，在实验前对受试者进行随机分组时就产生了期望效应、额外关注等非特异性的结果，因为实验性质的原因，参与者不能设定盲态，而且照顾者的评分也会有主观偏倚的成分。

除此之外，目前的研究随访时间大多在12个月以下，长期维持的效果还不清楚。技术、方法学问题以外的隐私保护、数据安全、伦理边界等也需要重视起来。脑电信号包含注意、情绪、认知状态等高度敏感的生物信息，一旦泄露，就会造成污名化或者歧视的风险。儿童属于特殊群体，法定监护人在代为决策时，并非一定能够全面知晓技术风险，患儿自身意愿的表达也常常被忽略。儿童大脑处在发育的关键期，BCI长期使用对神经发育的潜在影响还没有足够的纵向证据。

后续的研究和应用实践当中，有必要形成更加明确的神经数据分级管理以及使用规范。按照加密存储、匿名化处理、最小必要的原则缩减敏感信息被滥用的危害。BCI在ASD康复中起辅助作用，不能代替真实的人际互动和自然社交经验。训练设计要重视把虚拟环境或者机器人互动学到的技能迁移到家庭、学校、社区等自然社交场景中，用逐渐减少外部反馈依赖、增加真实互动任务等方式，防止患儿形成对机械化反馈的过度依赖。

5 未来发展方向

根据目前的研究基础和技术发展，BCI在ASD领域的发展重点可能会集中在个体化调参、多模态融合、居家应用等几个方面。

BCI个体匹配度高、干预效果好。根据ASD患者脑电特征、基因型、行为表型建立分层分类的BCI干预策略，可以提高治疗匹配度和响应率。由于算法能力的提升，可以对参数实时调节，使得反馈更接近个体现在的脑功能状态。开发预测疗效的生物标志物，可以提高患者的筛选和方案选择。多模态融合将EEG、fNIRS、眼动追踪、行为数据结合在一起，就可对社交认知加工的过程做出更全面的评价，并且可以建立更精确的神经反馈闭环。2025年系统评价[29]发现已经有29.1%的研究开始使用EEG+眼电图多模态方案，说明多模态融合正逐渐成为重要的发展方向。因此未来研究的重点不能只停留在提高设备性能上，而应该建立起评价—训练—反馈—再评价的闭环康复系统。如果可以将脑功能、行为表现、生理指标、家庭观察等各方面信息结合起来，再根据这些信息调整训练难度和反馈方式，BCI系统的个体适配性就会得到明显提高。此外，未来ASD的BCI研究应该从按技术分类逐渐向按症状维度、神经表型分层的研究模式转变。不同的患儿在联合注意障碍、语言沟通困难、情绪失调或者感觉异常方面的表现以及脑功能特征都不一样，对应的训练靶点和反馈范式也应有所不同。因此可以认为这样一条研究路径可以把BCI变成以症状、神经类型为支撑、精确干预的体系。

6 结论

BCI给ASD干预带来了依靠脑活动实时监测和反馈的训练方式，这是它与传统康复方法的不同之处。神经反馈BCI、BCI与VR结合的训练方式、BCI-机器人系统等，对改善社交功能、注意维持、部分认知表现等有较好的效果。其作用机制可能和脑网络连接的改变、神经可塑性改变有关，但是目前还没有一致的证据。

目前，BCI在ASD中的应用还只是探索性的研究。尚有样本量小、研究异质性高、随访不足、标准化欠缺、长期安全性及有效性证据不足等问题。未来还需要进行大样本、多中心、长随访、方法学严格的随机对照研究来确定不同BCI模式适用人群、最佳参数和真实临床获益。

BCI更应该被看作是ASD综合康复体系中的一部分，而不是独立的替代方案。如果未来设备便携性、算法稳健性、临床证据积累方面有进一步的发展，那么BCI在ASD精准康复中的实际应用价值应会得到更充分的体现。

参考文献

[1] CHEN H, LIANG Q, WANG B, et al. Sports game intervention aids executive function enhancement in children with autism-An fNIRS study[J]. Neurosci Lett, 2024, 822: 137647.

[2] KUO N, YAO Y, MA C, et al. Efficacy of non-wearable VR-based behavioral training for preschool children with high-functioning autism spectrum disorder: A protocol for an upcoming randomized clinical trial[J]. Front Psychiatry, 2025, 16(16): 1575695.

[3] LONG J, LIAO X, HAN K, et al. A case report of high-dose repetitive transcranial magnetic stimulation-induced excessive laughing in a 6-year-old boy with autism spectrum disorder[J]. Clin Case Rep, 2025, 13(8): e70731.

[4] SANTOMAURO D F, ERSKINE H E, MANTILLA HERRERA A M, et al. The global epidemiology and health burden of the autism spectrum: Findings from the global burden of disease study 2021[J]. Lancet Psychiatry, 2025, 12(2): 111-121.

[5] ZHU H, GAN Y, YE J, et al. Effectiveness of brain-computer interface interventions in autism spectrum disorder rehabilitation: A systematic review and meta-analysis protocol[J]. BMJ Open, 2026, 16(1): e102277.

[6] BRUNNER I, LUNDQUIST C B, PEDERSEN A R, et al. Brain computer interface training with motor imagery and functional electrical stimulation for patients with severe upper limb paresis after stroke: A randomized controlled pilot trial[J]. J Neuroeng Rehabil, 2024, 21(1): 10.

[7] ZHAO Y, ZHAO L, YANG F, et al. Assessing visual motor performance in autistic children based on Kinect and fNIRS: A case study[J]. Neuroscience, 2024, 563: 10-19.

[8] ROJAS D C, MAHARAJH K, TEALE P, et al. Reduced neural synchronization of gamma-band MEG oscillations in first-degree relatives of children with autism[J]. BMC Psychiatry, 2008, 8(1): 66.

[9] TILWANI D, BRADSHAW J, SHETH A, et al. ECG recordings as predictors of very early autism likelihood: A Machine learning approach[J]. Bioengineering, 2023, 10 (7): 827.

[10] MEKKAWY L. Efficacy of neurofeedback as a treatment modality for children in the autistic spectrum[J]. Bull Natl Res Cent, 2021, 45(1): 45.

[11] BI F, JIA Z, LV L, et al. Analysis of brain functional connectivity in children with autism spectrum disorder and sleep disorders: A fNIRS observational study[J]. Front Psychol, 2025, 16: 1544798.

[12] WAN L, LI Y, ZHU G, et al. Multimodal investigation of dynamic brain network alterations in autism spectrum disorder: Linking connectivity dynamics to symptoms and developmental trajectories[J]. NeuroImage, 2024, 302: 120895.

[13] WON K, KWON M, AHN M, et al. EEG dataset for RSVP and P300 speller brain-computer interfaces[J]. SciData, 2022, 9(1): 388.

[14] CUI T, WANG P P, LIU S, et al. P300 amplitude and latency in autism spectrum disorder: A meta-analysis[J]. Eur Child Adolesc Psychiatry, 2017, 26(2): 177-190.

[15] PEKETI S, DHOK S B. Machine learning enabled P300 classifier for autism spectrum disorder using adaptive signal decomposition[J]. Brain Sci, 2023, 13(2): 315.

[16] ASH R T, NIX K C, NORCIA A M. Stability of steady-state visual evoked potential contrast response functions[J]. Psychophysiology, 2024, 61(1): e14412.

[17] TAKARAE Y, SABLICH S R, WHITE S P, et al. Neurophysiological hyperresponsivity to sensory input in autism spectrum disorders[J]. J Neurodev Disord, 2016, 8(1): 29.

[18] JEUNET C, LOTTE F, BATAIL J M, et al. Using recent BCI literature to deepen our understanding of clinical neurofeedback: A short review[J]. Neuroscience, 2018, 378: 225-233.

[19] NELSON S B, VALAKH V. Excitatory/Inhibitory balance and circuit homeostasis in Autism Spectrum Disorders[J]. Neuron, 2015, 87(4): 684-698.

[20] ELLINGFORD R A, PANASIUK M J, DE MERITENS E R, et al. Cell-type-specific synaptic imbalance and disrupted homeostatic plasticity in cortical circuits of ASD-associated Chd8 haploinsufficient mice[J]. Mol Psychiatr, 2021, 26(7): 3614-3624.

[21] ZHAO H, MAO X, ZHU C, et al. GABAergic system dysfunction in Autism Spectrum Disorders[J]. Front Cell Dev

Biol, 2022, 9: 781327.
[22] 郭乃绮, 储莉婷, 姚宇凯, 等. 基于虚拟现实技术的康复训练对学龄前期孤独症谱系障碍儿童的疗效研究[J]. 中国儿童保健杂志, 2025, 33(11): 1201-1206.
[23] HOURS C, RECASENS C, BALEYTE J M. ASD and ADHD comorbidity: What are we talking about?[J]. Front Psychiatry, 2022, 13(13): 837424.
[24] AMARAL C, MOUGA S, SIMÕES M, et al. A feasibility clinical trial to improve social attention in Autistic Spectrum Disorder (ASD) using a brain computer interface[J]. Front Neurosci-Switz, 2018, 12: 477.
[25] AMARAL C P, SIMÕES M A, MOUGA S, et al. A novel brain computer interface for classification of social joint attention in autism and comparison of 3 experimental setups: A feasibility study[J]. J Neurosci Meth, 2017, 290: 105-115.
[26] ALEXOPOULOU A, PERGANTIS P, KOUTSOJANNIS C, et al. Non-invasive BCI-VR applied protocols as intervention paradigms on school-aged subjects with ASD: A systematic review[J]. Sensors, 2025, 25(5): 1342.
[27] BERTACCHINI F, DEMARCO F, SCURO C, et al. A social robot connected with ChatGPT to improve cognitive functioning in ASD subjects[J]. Front Psychol, 2023, 14: 1232177.
[28] SUN C, MCEWAN A, BOULTON K A, et al. Artificial intelligence for tracking social behaviours and supporting an autism spectrum disorder diagnosis: Systematic review and meta-analysis[J]. eBioMedicine, 2025, 120: 105931.
[29] ZHANG T, ZHOU X, LI X, et al. Noninvasive brain–computer interfaces for children with neurodevelopmental disorders: Attention deficit hyperactivity disorder and autism spectrum disorder[J]. Displays, 2025, 86: 102886.
[30] WESTWOOD S J, AGGENSTEINER P M, KAISER A, et al. Neurofeedback for attention-deficit/hyperactivity disorder: A systematic review and meta-analysis[J]. JAMA psychiat, 2025, 82(2): 118-129.
[31] YANG D, SVOBODA A M, GEORGE T G, et al. Mapping neural correlates of biological motion perception in autistic children using high-density diffuse optical tomography[J]. Mol Autism, 2024, 15(1): 35.
[32] TAN J, ZHAN Y, TANG Y, et al. EEG decoding for effects of visual joint attention training on ASD patients with interpretable and lightweight convolutional neural network[J]. Cogn Neurodynamics, 2024, 18(3): 947-960.
[33] AKCAKAYA M, PETERS B, MOGHADAMFALAHI M, et al. Noninvasive brain-computer interfaces for augmentative and alternative communication[J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2014, 7: 31-49.

（上接第7页）

cellular topology[J]. Nat Methods, 2025, 22(6): 1343-1354.
[32] YU H, QIAN W, SONG Y, et al. PerturbNet predicts single-cell responses to unseen chemical and genetic perturbations [J]. Mol Syst Biol, 2025, 21(8): 960-982.
[33] GUO Y, ZHANG H, HU H, et al. Modelling drug-induced cellular perturbation responses with a biologically informed dual-branch transformer[J]. Nat Mach Intell, 2026, 8(1): 96-112.
[34] KAMYA P, OZEROV I V, PUN F W, et al. PandaOmics: An AI-driven platform for therapeutic target and biomarker discovery[J]. J Chem Inf Model, 2024, 64(10): 3961-3969.
[35] IVANENKOV Y A, POLYKOVSKIY D, BEZRUKOV D, et al. Chemistry42: An AI-driven platform for molecular design and optimization[J]. J Chem Inf Model, 2023, 63(3): 695-701.
[36] REN F, ALIPER A, CHEN J, et al. A small-molecule TNIK inhibitor targets fibrosis in preclinical and clinical models [J]. Nat Biotechnol, 2025, 43(1): 63-75.
[37] XU Z, REN F, WANG P, et al. A generative AI-discovered TNIK inhibitor for idiopathic pulmonary fibrosis: A randomized phase 2a trial[J]. Nat Med, 2025, 31(8): 2602-2610.
[38] LI Y, ZHANG L, WANG Y, et al. Generative deep learning enables the discovery of a potent and selective RIPK1 inhibitor[J]. Nat Commun, 2022, 13(1): 6891.
[39] ZHANG L, LI Y, TIAN C, et al. From hit to lead: Structure-based optimization of novel selective inhibitors of receptor-interacting protein kinase 1 (RIPK1) for the treatment of inflammatory diseases[J]. J Med Chem, 2024, 67(1): 754-773.
[40] VLADIMER G, ALT I, SEHLKE R, et al. 23P Enriching for response: Patient selection criteria for A2AR inhibition by EXS-21546 through ex vivo modelling in primary patient material[J]. Immunooncol Technol, 2022, 16(s1): 100128.
[41] NARAYAN S, MCMAHON M, LIANOGLOU S, et al. Development of integrated stress response inhibitor RTX-117 as a treatment for neurodegenerative diseases (P9-11.028) [J]. Neurology, 2025, 104(7_Supplement_1): 4822.
[42] ÖZÇELIK R, GRISONI F. How evaluation choices distort the outcome of generative drug discovery[J]. J Cheminf, 2025, 17(1): 169.
[43] YIN Y, FU A, WANG L. Gaps between medical biology and AI drug discovery[J]. Drug Discov Today, 2025, 30 (12): 104512.
[44] ABRAMSON J, ADLER J, DUNGER J, et al. Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3[J]. Nature, 2024, 630(8016): 493-500.