

孤独症谱系障碍儿童视觉动作学习适应能力研究

庞艳丽¹, 廖舒莹¹, 夏越², 董良山³, 宋玉¹, 卜瑾⁴

1. 华中师范大学体育学院, 武汉 湖北 430079; 2. 武汉文理学院; 3. 中国地质大学(武汉)体育学院;

4. 美国东密歇根大学心理学系

摘要: **目的** 探究孤独症谱系障碍(ASD)儿童是否可以依赖视觉反馈提高动作学习适应性, 为揭示 ASD 儿童感知动作整合的生物学基础及制定“自适应难度调节”的动作干预方案提供实证依据与理论支撑。**方法** 选取 2022 年 7 月—2023 年 12 月期间, 在武汉麟洁儿童康复服务中心进行康复训练的 21 名 ASD 儿童及在武汉市 5 所小学、幼儿园就读的 21 名典型发育(TD)儿童参加视觉动作适应实验, 实验共 3 个阶段。在基线期与适应后, 参与者的手部动作与计算机屏幕光标反馈呈一一对应关系, 而在适应期, 参与者手部动作的视觉反馈沿逆时针偏转 30°。选取方向误差(DE)、移动时(MT)、均方根误差(RMSE)以考察视觉动作学习能力。**结果** 在适应期, 随着练习次数的增加, ASD 儿童与 TD 儿童的 DE、MT 及 RMSE 表现出显著改善($F=5.445, 13.473, 11.196, P<0.05$), ASD 儿童与 TD 儿童在适应期不同阶段动作改善差异无统计学意义($P>0.05$); 在适应后, ASD 儿童的 RMSE 显著优于基线期($t=2.275, P<0.05$), 且显著优于 TD 儿童($t=2.112, P<0.05$)。**结论** ASD 儿童可以通过视觉反馈更新内在模型, 突出表现在动作控制能力的优化, 未来可在 ASD 儿童动作学习与干预中加入具体的视觉化辅助以提高干预效果。

关键词: 孤独症谱系障碍; 动作学习; 视觉反馈偏转; 视觉动作适应

中图分类号: R749.94 文献标识码: A 文章编号: 1008-6579(2026)03-0261-06 doi:10.11852/zgetbjzz2025-1295

Visuomotor adaptability in children with autism spectrum disorder

PANG Yanli¹, LIAO Shuying¹, XIA Yue², DONG Liangshan³, SONG Yu¹, BU Jin⁴

1. School of Physical Education and Sports, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China;

2. Wuhan College of Arts And Science; 3. School of Physical Education, China University of Geosciences (Wuhan);

4. Department of Psychology, Eastern Michigan University

Corresponding author: BU Jin, E-mail: jbo@emich.edu

Abstract: **Objective** To explore whether autism spectrum disorder (ASD) children can rely on visual feedback to improve motor learning adaptability, so as to reveal the biological basis of perceptual-motor integration in ASD children and to provide empirical evidence and theoretical support for developing motor intervention based on adaptive difficulty regulation. **Methods** From July 2022 to December 2023, 21 children with ASD who received rehabilitation training at the Wuhan Linjie Children's Rehabilitation Service Center, as well as 21 typically developing (TD) children attending five primary schools and kindergartens in Wuhan, participated in a computerized visuomotor adaptation experiment. The experiment consisted of three phases: baseline, adaptation (with a 30° counterclockwise rotation of visual feedback), and post-adaptation. Directional error (DE), movement time (MT), and root mean square error (RMSE) were selected to examine visuomotor learning ability. **Results** During the adaptation phase, as the number of exercises increased, both ASD and TD children showed significant improvements in DE, MT, and RMSE ($F=5.445, 13.473, 11.196, P<0.05$), and there were no significant differences between the two groups ($P>0.05$). In the post-adaptation phase, ASD children showed a significantly greater improvement in RMSE compared to their baseline performance ($t=2.275, P<0.05$) and this improvement was significantly greater than that of TD children ($t=2.112, P<0.05$). **Conclusions** ASD children can update their internal model through visual feedback, especially in motor control ability. Future motor learning and intervention programs for children with ASD should incorporate specific visual aids to improve intervention outcomes.

Keywords: autism spectrum disorder; motor learning; visual feedback rotation; visuomotor adaptation

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31671162);国家自然科学基金青年项目(62307034);教育部人文社会科学研究一般项目(25YJC890029)

作者简介:庞艳丽(1986—),女,副教授,博士学位,研究方向为特殊儿童动作学习与干预。

通信作者:卜瑾, E-mail: jbo@emich.edu

孤独症谱系障碍 (autism spectrum disorder, ASD) 简称孤独症, 是一种常见的神经发育障碍, 其症状主要表现为社会沟通障碍、重复刻板行为和特殊兴趣^[1]。近年来, 大量临床和基础研究数据表明 ASD 儿童存在动作协调障碍, 如视觉-动作整合障碍、动作规划与控制失调等现象^[2], 尽管动作协调障碍不是 ASD 核心症状, 但其与认知、社交缺陷紧密关联^[3]。值得注意的是, 未经干预的障碍会持续存在并对 ASD 儿童生活质量及社会适应产生负向影响^[4]。鉴于此, Bo 等^[5]指出未来的研究重心应从单纯的病理描述转向对 ASD 儿童动作学习机制及其干预策略的深入探索。视觉动作适应 (visuomotor adaptation) 作为一种特殊的动作学习形式, 指当视觉目标与实际动作轨迹发生分离时, 大脑通过调整动作指令来补偿感觉误差, 从而精准执行动作的过程^[6]。这一过程不仅是探索个体如何动态调整自身动作以适应不断变化环境的关键窗口, 更是揭示感知动作整合生物学基础的重要切入点。然而, 目前鲜有研究聚焦 ASD 儿童在该类高阶动作学习中的表现特性。早期研究发现, 较之典型发育 (typically developing, TD) 儿童, ASD 儿童在利用感觉误差驱动动作更新方面存在显著困难^[7], 并倾向于依赖本体感觉反馈而忽视视觉信息的修正作用^[8]。鉴于视觉作为一种多模态感觉输入在动作校正中的核心地位, 本研究拟采用计算机屏幕光标旋转适应范式, 通过操纵视觉反馈的角度偏差, 探究 ASD 儿童动作学习适应性。研究不仅有助于揭示 ASD 儿童感知动作整合的生物学基础, 更为制定基于“自适应难度调节”的个性化康复方案提供实证依据与理论支撑。

1 对象和方法

1.1 对象 本研究采用 G * power3.1.9 软件^[9], 设置 Effect size f 为 0.3, Power ($1-\beta$) 为 80%, α 水平为 0.05, 计算出所需样本量为 18 人。选取 2022 年 7 月—2023 年 12 月期间, 在武汉麟洁儿童康复服务中心进行康复训练的 21 名 ASD 儿童, 年龄介于 5~11 (7.60 ± 1.59) 岁, 其中男生 15 名, 女生 6 名, 儿童符合美国精神医学学会编制的《精神障碍诊

断和统计手册第五版》(DSM-5) 孤独症谱系障碍诊断标准且无其他神经发育疾病的报告 (如癫痫、多动症等)。从武汉市 5 所小学及幼儿园招募与 ASD 儿童年龄、性别相匹配的 21 名 TD 儿童, 对父母或监护人进行访谈及问卷调查, 儿童未诊断过神经或精神障碍、认知障碍。所有被试视力或矫正视力正常, 均为右利手。

在此测试之前, 被试均未进行过相关动作评估及视觉动作适应实验。本研究通过华中师范大学生命科学伦理委员会的批准 (批号: CCNU-IRB-2024010029), 所有测试均取得家长或监护人同意并签订知情书。

1.2 视觉动作适应任务 主试使用同一台联想 ThinkPad14 电脑并在安静无干扰的房间对儿童单独施测, 测试约 15min。实验要求儿童端坐在电脑屏幕前, 双眼平视屏幕并用有利手控制操纵杆 (类似于鼠标)。操纵杆和电脑屏幕光标呈现一对一的映射关系, 当被试移动操纵杆便会看到电脑屏幕上出现一个黑色小点 (光标), 以此来进行视觉提示。视觉刺激材料采用 PRESENTATION 软件编写。电脑屏幕中央会一直呈现一个中心点, 用黄色笑脸表示。当光标定位在中心点位置时 (黄色笑脸变为绿色笑脸), 目标点随即出现在距离中心点 10cm 外的 8 个方位之一 (0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315°), 用黄色笑脸表示。见图 1。被试要尽可能快速地将光标从中心点移至目标点, 一旦光标到达目标点, 下一目标点即刻显现。

实验共包括 21 组块 168 试次, 分为三阶段: 1) 基线期。3 组块, 每个组块 8 试次, 操纵杆及屏幕上的光标呈现一一对应关系, 手部动作的视觉反馈正常。前两个组块为练习, 目的是让儿童熟悉实验任务; 2) 适应期。17 组块 136 试次 (含 5 个 catch 试次)。除 catch 试次外, 参与者的手部动作视觉反馈沿逆时针旋转 30° 。为考察不同阶段的视觉动作适应情况, 将适应期又分为 4 个小阶段, 适应早期 1 (组块 4 和 5), 适应早期 2 (组块 7 和 8), 适应后期 1 (组块 16 和 17), 适应后期 2 (组块 19 和 20); 3) 适应后。共 1 组块 8 试次, 手部动作的视觉反馈回归正常, 目的在于测试最后的学习效果。见图 2。

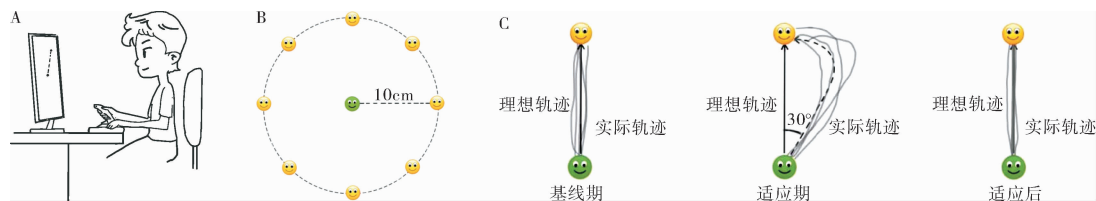


图 1 视觉动作适应任务描述

Fig. 1 The description of visuomotor adaptation task

0°			30°	30°		30°	30°		30°	30°		30°	30°		30°	30°		30°	30°	0°
B1	B2	B3	B4	B5	CATCH	B7	B8	CATCH	B10	B11	CATCH	B13	B14	CATCH	B16	B17	CATCH	B19	B20	B21
基线期			适应期																	适应后

图 2 实验各阶段组块安排

Fig. 2 Schedule of blocks in each adaption stage

1.3 统计学方法 实验数据采用 MATLAB R2017a 软件进行搜集与处理,选取方向误差(directional error, DE)、移动时(movement time, MT)、均方根误差(root mean square error, RMSE)考察视觉动作学习能力。其中,DE 用于考查参与者的动作规划能力,MT 及 RMSE 表示参与者基于反馈信息下的动作控制能力。若变量在基线期存在显著差异,则将适应期和适应后的数据标准化后再进行统计分析^[6]。标准化后的数据以标准差为单位,表示每个受试者在适应期及适应后的变量值与基线期平均值的距离,以此评估出由于适应而导致的分数变化。公式为:

$$x_{\text{标准化}} = \frac{x - \text{基线期第 3 个组块的平均值}}{\text{基线期第 3 个组块的标准差}}$$

x 表示适应期和适应后每个组段的平均值,本研究将第 3 个组块的平均值作为基线期数据。

使用 SPSS 27.0 软件对数据进行统计学分析,使用 Shapiro-Wilk 检验数据分布的正态性,若数据符合正态分布用 $\bar{x} \pm s$ 表示,不符合正态分布的采用 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,运用独立样本 t 检验或 Mann-

Whitney U 检验分别考察两个组别在基线期及适应后的视觉动作学习差异。运用双因素重复测量方差分析(ANOVA)对适应期的视觉动作学习进行统计分析,其中组间因素为被试组别(ASD 儿童、TD 儿童),组内因素为适应阶段(适应早期 1、适应早期 2、适应后期 1 和适应后期 2)。当组别和适应阶段的交互效应显著时,使用 Bonferroni 事后检验对每个因素进行简单效应分析;当交互效应不显著时,只分析 2 个因素的主效应。运用单一样本 t 检验考察各组别的适应后效应,将标准化分数与基线零水平进行比较。以 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基线期 ASD 儿童与 TD 儿童视觉动作学习能力对比 结果显示,两组儿童在 DE 上差异无统计学意义($P > 0.05$),在 MT 和 RMSE 上差异有统计学意义($P < 0.05$),这表明 TD 儿童在基线期动作比 ASD 儿童更快、更流畅,见表 1。由于基线期数据的差异,后续分析将所有的适应期和适应后数据进行标准化。

表 1 ASD 儿童与 TD 在基线期的 DE、MT 和 RMSE 对比 ($\bar{x} \pm s$)Tab. 1 Comparison of DE, MT and RMSE in baseline between ASD and TD children ($\bar{x} \pm s$)

项目	ASD 儿童($n=21$)	TD 儿童($n=21$)	t/Z 值	P 值
DE(°)	-5.127 ± 15.807	-10.486 ± 13.271	1.190 ^a	0.241
MT (ms)[$M(P_{25}, P_{75})$]	2 299.000(1 358.563, 3 142.250)	1 322.750(1 010.188, 1 674.938)	-3.132 ^b	0.002
RMSE	30.484 ± 12.117	18.974 ± 8.406	3.577 ^a	<0.001

注:^a为 t 值,^b为 Z 值。

2.2 适应期 ASD 儿童与 TD 儿童视觉动作适应改善率对比 重复测量方差分析结果发现,在 DE、MT 以及 RMSE 3 个变量上,适应阶段主效应显著($F=5.445, 13.473, 11.196, P < 0.05$),表明随着适应阶段练习次数的增加,两组儿童在动作规划和执行上都表现出显著改善。组别主效应不显著($F=3.911, 2.941, 0.894, P > 0.05$)。组别与适应阶段交互效应不显著($F=0.375, 1.710, 0.846, P > 0.05$),表明两组儿童在不同适应阶段的动作学习差异无统计学意义($P < 0.05$)。见图 3。

2.3 适应后 ASD 儿童与 TD 儿童视觉动作适应效应对比 运用单样本 t 检验(参考值为 0)发现,ASD 儿童在适应后的 RMSE 较之基线期有显著性差异($t=2.275, P < 0.05$),MT 边缘显著($t=2.001, P=0.059$),DE 未见显著性差异($t=0.227, P > 0.05$)。此外,TD 儿童组在适应后的 DE, MT, RMSE 较之基线期差异无统计学意义($t=0.083, 1.198, 0.833, P > 0.05$)。独立样本 t 检验发现,ASD 儿童与 TD 儿童在适应后的 RMSE 差异有统计学意义($t=2.112, P < 0.05$),DE 和 MT 差异无统计学意义($t=0.078, 0.065, P > 0.05$)。见图 4。

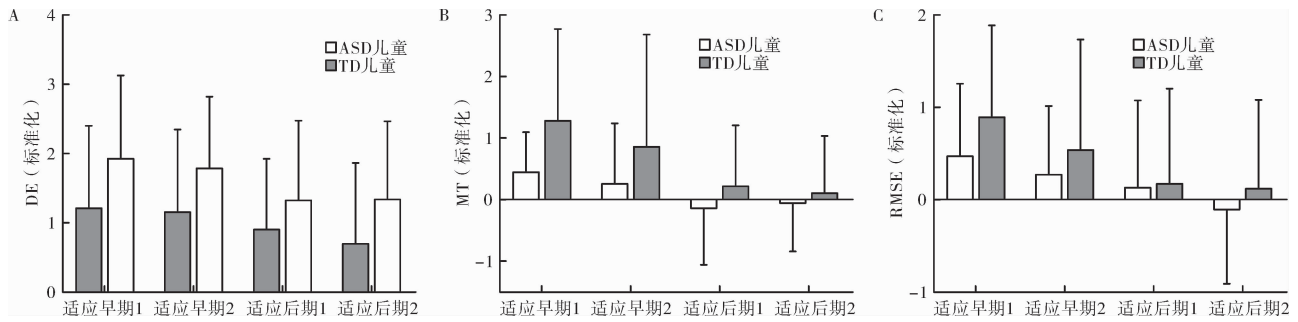


图3 ASD儿童与TD儿童在不同适应阶段下的DE、MT和RMSE对比

Fig. 3 The comparison of DE, MT and RMSE in different adaptation stages between ASD and TD children

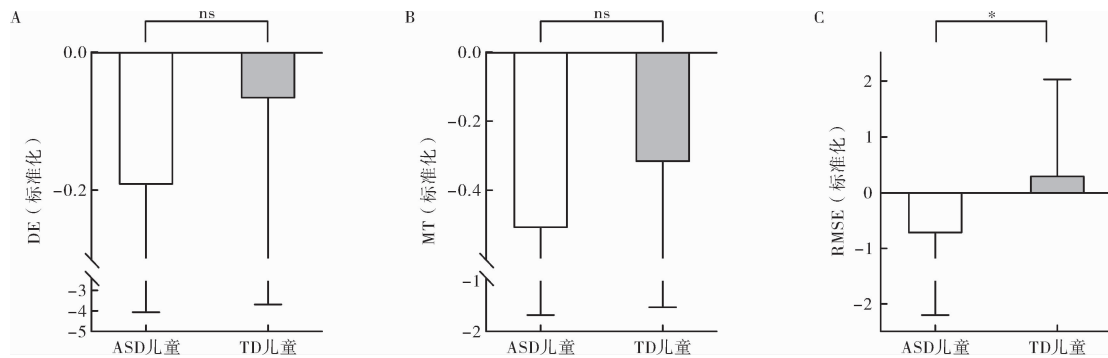


图4 ASD儿童与TD儿童在适应后的DE、MT和RMSE对比

Fig. 4 The after-effect of DE, MT and RMSE between ASD and TD children

3 讨论

本研究是为数不多的针对 ASD 儿童视觉动作适应的研究之一。为了探讨 ASD 儿童是否可以依赖视觉反馈更新内在模型从而完成视觉动作适应任务,研究运用计算机屏幕光标旋转适应范式,考察视觉反馈偏转 30° 条件下 ASD 儿童视觉动作学习适应能力。在这种动作失真的情况下,参与者必须练习获得屏幕-光标-操纵杆-视觉运动关系的内在模型。与先前的研究一致,本研究发现在基线期,与 TD 儿童相比,ASD 儿童需要更多的时间来启动和执行他们的动作^[10]。因此,本研究在适应期及适应后的数据分析中并不直接将 ASD 儿童与 TD 儿童动作表现进行对比,而是将数据进行标准化,以标准差为单位的数据分别反应不同组别儿童在加入视觉扰动以后动作执行相较于基线期的改善率及适应后效应,以此来评估 ASD 儿童基于视觉反馈的动作学习适应性。

3.1 视觉反馈偏转 30° 条件下 ASD 儿童动作学习特征 结果显示,随着练习次数增加,ASD 儿童在适应期的动作方向误差、移动时和均方根误差表现显著改善,且与 TD 儿童相比差异无统计学意义。此结果与 Gidley Larson 等^[11]研究一致,在适应期,ASD 儿童与 TD 儿童的动作方向误差、学习指数均发生了显著变化,但未见二者在适应期不同阶段的

显著性差异。Lee 等^[10]在研究中亦发现 ASD 儿童与 TD 儿童在适应期的方向误差、反应时、移动时等动作行为出现显著改善。以上结果表明 ASD 儿童可以从预测和观察到的手部动作与视觉后果之间的不匹配中学习,从而成功更新现有内在模型以应对视觉反馈的偏转。内在模型的最终目标是提高个人动作规划和执行的效率,促使大脑预测自我产生的运动命令的感官后果,当实际感觉反馈与预测的不同时,检测到的误差通过更新内在模型来驱动动作学习^[12]。在本研究中,适应期又分为了 4 小阶段,一开始视觉扰动的出现导致动作误差增大,但随着练习次数增加,方向误差越来越小,动作速度越来越快,精度亦越来越好,反映出在这个过程中,ASD 儿童不断更新手部动作的正向模型预测,并将实际感觉状态与正向模型生成的预测进行比较,进而更新逆向模型,通过连续不断地尝试提高规划精度^[10]。此外,研究指出,显性和隐性学习在视觉动作适应中同时运作;显性学习依赖于目标瞄准等认知策略,当视觉提示出现时,ASD 儿童也可能更容易跟踪自己的行踪^[13]。而隐性学习则是依赖预测的感觉结果和实际感觉反馈之间的差异,即所谓的预测误差(sensory prediction error, SPE)^[14]。SPE 用于不断更新内在正向模型,以实现对未来动作的更精确预测。在适应期,恰恰是视觉反馈的光标为参与者

提供了明确的提示,随着时间增加,动作学习由开始的显性变为隐性学习^[15]。这亦反映出 ASD 儿童隐性动作学习功能与对照组没有差别。综上所述,如果有足够的实践练习,ASD 儿童可能会习得逐步适应环境变化的动作能力。

3.2 视觉反馈偏转撤销后 ASD 儿童适应后效应在适应后,ASD 儿童的动作移动时和均方根误差显著小于基线期,即产生了适应后效应,适应后效应被认为是衡量动作学习程度的标准,表明已经习得了新的表征或感觉动作映射^[16]。该结果进一步证实了 ASD 儿童不仅可以习得新的内在模式且能够不断更新习得稳固的内在模式,以至于当视觉扰动撤销以后,仍然可以提高动作控制的速度和精度。Tzvi 等^[17]指出在适应后阶段,当受试者恢复到他们原来的视觉动作模式时,动作误差快速得到纠正,这反映了随着新学习的视觉动作程序从记忆中消退,原始知觉动作进行了重新校准。与本研究结果不同的是, Lee 等^[10]未发现 ASD 儿童在动作控制方面的适应后效应,这或许与视觉动作适应任务设计方案不同及儿童特质有关。

然而,本研究未发现 ASD 儿童在方向误差方面显示出适应后效应。这一发现与既往研究一致,ASD 儿童在连续目标导向的手部动作任务中表现出动作规划缺陷^[18],且随着年龄的增长呈现出非典型特征^[19]。Stoit 等^[20]进一步验证了 ASD 儿童不正常的动作模式仅存在于动作规划阶段,而不存在于动作执行阶段(比如动作控制)。这或许是 ASD 儿童在动作学习中潜在的补偿机制,正是由于 ASD 儿童在运动规划存在缺陷,他们通过提高动作速度和精度来补偿。此外,不同于 ASD 儿童在适应后动作表现,在对照组儿童中未发现适应后效应,此结果可能与 TD 儿童动作学习特点相关。一是 TD 儿童在简单的点对点直线到达任务中的前后差异并不大。二是 TD 儿童的内在模型发展还未稳定,他们需要比成年人更长时间的适应练习和明显的反馈才能建立起显著后效应^[21]。

本研究意在探究 ASD 儿童的视觉动作学习适应能力,结果发现,尽管 ASD 儿童在基线期动作控制表现弱于 TD 儿童,但是通过反复练习,ASD 儿童可以不断更新调整动作以提高动作执行效率。

综上所述,ASD 儿童利用视觉反馈表现出相对完整的视觉动作学习适应能力,突出表现在动作执行的速度和精度增强。鉴于 ASD 儿童动作规划能力弱,可通过明确的视觉提醒帮助 ASD 儿童追踪动作轨迹,这将为后续的动作干预提供参考依据。

3.3 局限性与展望 本研究得出 ASD 儿童可通过视觉反馈更新内在模型从而提高动作的执行效率,但未考察 ASD 儿童的异质性。部分儿童在视觉动作适应任务中是否具有特异性? ASD 儿童的视觉动作适应效率会否受到社会功能、动作障碍的程度影响? 后续研究可进一步探讨社交与运动功能对 ASD 儿童动作适应能力的影响。其次,本研究结论是依据视觉反馈偏转 30°条件下得出的,那么不同的偏转角度是否带来同样学习效应亦或者多大角度带来的学习效应最大? 有待进一步研究,未来可考虑不同偏转角度及不同形式视觉反馈呈现方式对 ASD 儿童视觉动作学习的影响。最后,虽然 ASD 儿童获得感觉动作适应的内在模型似乎是正常的,但这仅停留在行为学层面的描述,未来研究可考虑在动作学习过程中加入多模态神经科学技术,以期全面了解 ASD 儿童高级动作学习背后的神经机制。

参考文献

- [1] US APAD-TFAV. Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5™ (5th ed.) [J]. Codas, 2013, 25(2):191.
- [2] Kangarani-Farahani M, Malik MA, Zwicker J G. Motor impairments in children with autism spectrum disorder: A systematic review and meta-analysis [J]. J Autism Dev Disord. 2024, 54(5):1977-1997.
- [3] Medenica V, Ivanovic L. Motor planning and execution in autism spectrum disorder: A systematic review [J]. Hum Res Rehabil, 2025, 15(2): 299-310.
- [4] 庞艳丽. 自闭症儿童动作发展障碍及干预研究 [M]. 武汉:华中师范大学出版社, 2022, 80-85.
Pang YL. Research on motor development disorders and intervention in children with autism spectrum disorders [M]. Wuhan: Central China Normal University Press, 2022, 80-85. (in Chinese)
- [5] Bo J, Lee CM, Colbert A, et al. Do children with autism spectrum disorders have motor learning difficulties? [J]. Res Autism Spectr Disord, 2016, 23: 50-62.
- [6] Bo J, Shen B, Pang Y, et al. Do the enhanced errors impact visuomotor adaptation in children with autism spectrum disorder? [J]. Exp Brain Res. 2025, 243(6): 135-148.
- [7] Haswell CC, Izawa J, Dowell LR, et al. Representation of internal models of action in the autistic brain [J]. Nat Rev Neurosci, 2009, 12(8): 970-972.
- [8] Marko MK, Crocetti D, Hulst T, et al. Behavioural and neural basis of anomalous motor learning in children with autism [J]. Brain, 2015, 138(3): 784-797.
- [9] Faul F, Erdfelder E, Buchner A, et al. Statistical power analyses using G * Power 3. 1: Tests for correlation and regression analyses [J]. Behav Res Methods, 2009, 41(4): 1149-1160.
- [10] Lee CM, Bo J. Visuomotor adaptation and its relationship

- with motor ability in children with and without autism spectrum disorder[J]. *Hum Mov Sci*, 2021, 78: 102826.
- [11] Gidley Larson JC, Mostofsky SH. Evidence that the pattern of visuomotor sequence learning is altered in children with autism[J]. *Autism Res*, 2008, 1(6): 341-353.
- [12] Knaier E, Meier CE, Caffisch JA, et al. Visuomotor adaptation, internal modelling, and compensatory movements in children with developmental coordination disorder[J]. *Res Dev Disabil*, 2023, 143(9): 104624.
- [13] Glazebrook CM, Elliott D, Szatmari P. How do individuals with autism plan their movements? [J]. *J Autism Dev Disord*, 2008, 38(1): 114-126.
- [14] Albert ST, Blaum EC, Blustein DH. Sensory prediction error drives subconscious motor learning outside of the laboratory[J]. *J Neurophysiol*, 2023, 130(2): 427-435.
- [15] Werner S, Strüder HK, Donchin O. Intermanual transfer of visuomotor adaptation is related to awareness [J]. *PLoS One*, 2019, 14(9): e0220748.
- [16] Henriques DYP, Cressman EK. Visuomotor adaptation and proprioceptive recalibration[J]. *J Mot Behav*, 2012, 44(6): 435-444.
- [17] Tzvi E, Loens S, Donchin O. Mini-review: The role of the cerebellum in visuomotor adaptation[J]. *Cerebellum*, 2022, 21(2): 306-313.
- [18] Bäckström A, Johansson A M, Rudolfsson T, et al. Motor planning and movement execution during goal-directed sequential manual movements in 6-year-old children with autism spectrum disorder: A kinematic analysis[J]. *Res Dev Disabil*, 2021, 115: 104014.
- [19] Bäckström A, Johansson A M, Rudolfsson T, et al. Atypical development of sequential manual motor planning and visuomotor integration in children with autism at early school-age: A longitudinal kinematic study [J]. *Autism*, 2025, 29(6): 1510-1523.
- [20] Stoit AMB, van Schie HT, Slaats-Willemse DIE, et al. Grasping motor impairments in autism: Not action planning but movement execution is deficient[J]. *J Autism Dev Disord*, 2013, 43(12): 2793-2806.
- [21] Clayton HA, Abbas ST, Hart BM, et al. Visuomotor adaptation across the lifespan [J]. *PLoS One*, 2024, 19(7): e0306276.

收稿日期: 2025-11-17 修回日期: 2025-12-18 本文编辑: 杨媛媛

(上接第 254 页)

- [20] 祖姆热提·伊敏, 热娜·买买提, 王敏因. 孤独症谱系障碍儿童肠道菌群的变化及作用机制[J]. *中国儿童保健杂志*, 2025, 33(6): 638-642.
- Zumureti Y, Rena M, Wang MN. Changes and mechanisms of gut microbiota in children with autism spectrum disorder [J]. *Chin J Child Health Care*, 2025, 33(6): 638-642. (in Chinese)
- [21] 黄龙生. 靳三针调控 OT/OXTR 改善孤独症社交行为的疗效与机制研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2023.
- Huang LS. The study of clinical efficacy and mechanism of Jin's three-needle regulating OT/OXTR to improve social communication disorder in autism[D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2023. (in Chinese)
- [22] Chen S, Huang L, Liu G, et al. Acupuncture ameliorated behavioral abnormalities in the autism rat model via pathways for hippocampal serotonin [J]. *Neuropsychiatr Dis Treat*, 2023, 19: 951-972.
- [23] Su T, Pei L. Acupuncture and oxytocinergic system: The promising treatment for autism [J]. *Transl Neurosci*, 2021, 12(1): 96-102.
- [24] Li D, Chen QX, Zou W, et al. Acupuncture promotes functional recovery after cerebral hemorrhage by upregulating neurotrophic factor expression[J]. *Neural Regen Res*, 2020, 15(8): 1510-1517.
- [25] 高伟, 李雪, 刘安南, 等. 头穴丛刺对 APP/PS1 小鼠海马突触可塑性的影响 [J]. *中医杂志*, 2025, 66(21): 2259-2268.
- Gao W, Li X, Liu AN, et al. Effect of scalp cluster-acupuncture on hippocampal synaptic plasticity in APP/PS1 mice[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2025, 66(21): 2259-2268. (in Chinese)
- [26] Yang Y, Rao C, Yin T, et al. Application and underlying mechanism of acupuncture for the nerve repair after peripheral nerve injury: remodeling of nerve system[J]. *Front Cell Neurosci*, 2023, 17: 1253438.
- [27] Wu R, Ma H, Hu J, et al. Electroacupuncture stimulation to modulate neural oscillations in promoting neurological rehabilitation[J]. *Brain Res*, 2024, 1822: 148642.
- [28] Jiang W, Jiang X, Yu T, et al. Efficacy and safety of scalp acupuncture for poststroke depression: A meta-analysis and systematic review[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2023, 102(31): e34561.
- [29] 邓楚玉, 唐纯志. 针刺治疗孤独症谱系障碍的作用机制 [J]. *中华中医药杂志*, 2024, 39(3): 1394-1397.
- Deng CY, Tang CZ. Mechanism of acupuncture on the treatment of autism spectrum disorder [J]. *CJT CMP*, 2024, 39(3): 1394-1397. (in Chinese)
- [30] Lee Y, Lee H, Bae CH, et al. Electroacupuncture at GB34 modulates neurogenesis and BDNF-ERK signaling in a mouse model of Parkinson's disease[J]. *J Tradit Complement Med*, 2023, 13(3): 263-269.
- [31] Qin S, Zhang Z, Zhao Y, et al. The impact of acupuncture on neuroplasticity after ischemic stroke: A literature review and perspectives[J]. *Front Cell Neurosci*, 2022, 16: 817732.

收稿日期: 2025-12-30 修回日期: 2026-01-10 本文编辑: 杨媛媛