

运动干预改善注意缺陷多动障碍儿童脑可塑性的神经机制

陈佳鑫¹, 王春苗¹, 赵德强¹, 陈潇潇², 张彦峰¹

1. 国家体育总局体育科学研究所国民体质与科学健康研究中心, 北京 100061; 2. 锦州医科大学体育与运动康复学院

【摘要】 注意缺陷多动障碍 (ADHD) 儿童存在脑结构发育异常、神经递质失衡及脑功能网络调节障碍。运动可通过促进神经发生、增强突触可塑性、调节神经营养因子表达及改善脑血流和脑代谢等途径促进脑可塑性, 并通过增强前额叶功能活动、优化脑网络连接和调节神经递质系统, 改善注意力、执行功能及行为表现。为阐明运动干预改善 ADHD 儿童脑可塑性的作用, 本研究综述了 ADHD 儿童脑可塑性异常特征、运动促进脑可塑性的主要机制及相关实证进展。未来应加强标准化干预研究, 并结合多模态指标进一步验证其作用机制。

【关键词】 儿童; 运动疗法; 神经系统疾病; 发育障碍

【中图分类号】 R 179 G 806 R 748 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-9817(2026)09-1358-06

Neural mechanisms of exercise intervention in improving brain plasticity in children with attention-deficit hyperactivity disorder

CHEN Jiaxin*, WANG Chunmiao, ZHAO Deqiang, CHEN Xiaoxiao, ZHANG Yanfeng

* National Physical Fitness and Scientific Exercise Research Center, China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China

【Abstract】 Children with attention-deficit hyperactivity disorder (ADHD) exhibit abnormal brain structural development, neurotransmitter imbalance, and dysregulation of brain functional networks. Exercise can promote brain plasticity through multiple pathways, including promoting neurogenesis, enhancing synaptic plasticity, regulating neurotrophic factor expression, and improving cerebral blood flow and cerebral metabolism. It can also improve attention, executive function, and behavioral performance by enhancing prefrontal functional activity, optimizing brain network connectivity, and regulating neurotransmitter systems. To elucidate the role of exercise intervention in improving brain plasticity in children with ADHD, the review summarizes the abnormal characteristics of brain plasticity in children with ADHD, the main mechanisms by which exercise promotes brain plasticity, and related empirical advances. Future research should strengthen standardized intervention studies and incorporate multimodal indicators to further verify the mechanisms underlying the effects of exercise intervention.

【Keywords】 Child; Exercise therapy; Nervous system diseases; Developmental disabilities

注意缺陷多动障碍 (attention-deficit/hyperactivity disorder, ADHD) 是儿童期常见的神经发育障碍之一, 其核心症状表现为注意力不集中、多动及冲动行为^[1]。流行病学研究显示, 学龄儿童 ADHD 患病率为 5%~7%^[2], 且部分个体的症状可持续至青春期甚至成年期^[3]。该障碍不仅影响儿童的学习表现和课堂行为, 还可能对社会适应、人际关系及心理健康产生长期不良影响^[4], 已成为儿童青少年心理与行为健康领域的重要公共卫生问题^[5]。

近年来, 随着神经影像学与神经生物学研究的不断深入, ADHD 被认为是一种涉及多层级神经系统异常的神经发育障碍。研究表明, ADHD 儿童在前额

叶-纹状体回路、默认模式网络及执行控制网络等方面存在结构与功能差异, 从而影响注意调控、行为抑制及认知控制能力^[6-7]。同时, 儿童青少年大脑具有较高的可塑性, 其神经结构与功能能够在环境刺激及行为经验作用下发生持续重组^[8]。因此, 从脑可塑性角度探讨 ADHD 的干预策略具有重要意义。

运动作为一种重要的生活方式因素, 在促进脑健康方面受到广泛关注。规律运动可通过促进神经发生、增强突触可塑性、调节神经营养因子表达及改善脑血流等多种途径, 对认知功能产生积极影响^[9-11]。运动干预可能改善 ADHD 儿童的注意力、执行功能及行为表现^[12], 并通过增强前额叶功能活动及优化脑网

【基金项目】 国家体育总局体育科学研究所基本科研业务费资助项目 (B25-19); 国家重点研发计划“主动健康和人口老龄化科技应对”重点专项项目 (2022YFC3600204)

【作者简介】 陈佳鑫 (2001-), 男, 江苏南通人, 在读硕士, 主要研究方向为体质与健康、儿童脑科学。

【通信作者】 张彦峰, E-mail: zhangyanfeng0310@126.com

络连接促进脑功能可塑性^[13]。然而,目前相关研究仍处于发展阶段,其作用机制及最佳干预模式尚缺乏一致结论。本研究从 ADHD 儿童脑可塑性异常特征、运动促进脑可塑性的作用机制、运动干预 ADHD 的神经基础及实证研究进展等方面进行综述,以期阐明运动干预 ADHD 的作用机制并优化干预策略提供理论依据。

1 ADHD 儿童脑可塑性异常特征

随着神经影像学技术、神经生物学研究及纵向发育研究的不断发展,人们逐渐认识到 ADHD 的发生与大脑发育过程中的多层级变化有关,其中脑可塑性异常被认为是其重要神经基础之一^[14]。脑可塑性是指大脑在发育和环境刺激的作用下,通过神经元结构改变、突触连接调节以及神经网络重组等方式不断适应环境变化的能力^[15]。

1.1 脑结构发育异常 磁共振成像研究为揭示 ADHD 儿童脑结构特征提供了重要证据^[16]。ADHD 儿童在多个脑区存在结构发育差异,主要涉及前额叶皮层、基底节、小脑及海马等区域^[17]。前额叶皮层在注意控制、行为抑制及工作记忆等认知过程中发挥关键作用,而 ADHD 儿童在该区域常表现为皮层厚度减少或发育延迟^[17]。纵向研究进一步表明,与正常儿童相比,ADHD 儿童额叶皮层成熟过程存在一定滞后,主要体现在背外侧前额叶及前扣带回等与认知控制密切相关的区域^[18-19]。

基底节结构同样在 ADHD 研究中受到广泛关注^[20-21]。该结构参与运动调节、行为选择及奖励加工等多种功能^[22],其中纹状体与尾状核是多巴胺信号传递的重要枢纽^[23]。ADHD 儿童在上述区域存在体积或形态差异,这可能影响奖励加工过程并增加冲动行为倾向^[24]。此外,小脑不仅参与运动协调,还在认知调节及时间加工中发挥重要作用,ADHD 儿童小脑特定区域可能存在结构异常,从而影响注意维持及行为调控能力^[25-26]。

海马作为学习与记忆的重要脑区,在研究中亦显示出结构差异^[27]。然而,不同研究结果之间仍存在不一致性现象,可能与样本特征及研究方法差异有关^[28]。总体而言,现有证据支持 ADHD 儿童在多个与执行功能及注意控制相关脑区存在发育轨迹异常,这些变化可能反映神经发育过程中脑可塑性调节机制的异常^[29]。

1.2 神经递质系统异常 除脑结构差异外,神经递质系统异常被认为是 ADHD 的重要神经生物学基础之一^[30]。当前研究普遍认为,儿茶酚胺类神经递质系

统,尤其是多巴胺和去甲肾上腺素,在 ADHD 的发生发展中发挥关键作用^[31]。这两类神经递质广泛参与注意调控、奖励加工及执行控制等认知过程。

在 ADHD 儿童中,前额叶-纹状体相关神经环路被认为是与核心症状密切相关的关键通路^[29]。该回路在行为抑制、决策及任务监控过程中发挥重要作用,而多巴胺信号传递异常可能降低信息处理效率,从而表现为注意缺陷及冲动行为。此外,去甲肾上腺素系统在维持觉醒水平及持续注意方面具有重要作用,其功能紊乱可能进一步加剧注意不稳定^[32]。

临床药物治疗研究在一定程度上也支持了上述神经递质假说^[32]。常用的中枢兴奋剂药物,如哌甲酯及安非他命类药物,主要通过调节多巴胺和去甲肾上腺素系统发挥治疗作用^[33]。鉴于神经递质系统在突触传递及神经网络调节中的重要作用,其异常可能进一步影响突触可塑性及脑网络组织方式,从而对认知功能产生广泛影响^[34]。

1.3 脑功能网络异常 随着功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)等神经影像技术的发展,人们发现 ADHD 不仅表现为局部脑区的功能激活异常,更延伸为跨脑区的大规模功能网络连接与全脑尺度的协同调节障碍^[35]。在相关研究中,默认模式网络、执行控制网络及注意网络被认为是与 ADHD 密切相关的核心功能网络^[36]。

默认模式网络通常在静息状态下相对活跃,而在执行任务时需受到有效抑制,以便将认知资源分配至任务相关过程。ADHD 儿童在执行认知任务过程中,默认模式网络抑制不足,从而干扰任务相关信息加工,表现为注意分散及持续注意困难^[37]。执行控制网络主要由前额叶及顶叶区域构成,在任务管理、行为调节及错误监控中发挥关键作用。ADHD 儿童在该网络中的激活水平通常较低,提示其执行功能调控能力受损。注意网络在环境信息筛选及注意转移过程中具有重要作用。有研究发现,ADHD 儿童在注意网络功能连接方面存在异常,可能影响其对外界刺激的选择性加工能力^[38]。从脑可塑性角度来看,儿童青少年时期脑网络连接模式具有较高的可塑性,环境刺激及行为经验均可能对其发展轨迹产生重要影响^[39]。

以上的研究支持 ADHD 儿童在多个关键脑功能网络之间存在协调障碍,但不同研究在具体网络改变模式方面存在一定差异,可能与研究范式及分析方法不一致有关。

2 运动促进 ADHD 儿童脑可塑性的神经机制

在明确 ADHD 相关脑可塑性异常特征的基础上,

探讨能够有效促进脑可塑性的干预手段具有重要意义。近年来,相关研究表明身体活动能够在大脑结构及功能产生广泛影响^[40]。运动被视为一种重要的环境刺激因素,可通过多种神经生物学途径促进脑可塑性,包括促进神经发生、增强突触可塑性、调节神经营养因子表达以及改善脑血流与代谢等^[41]。在儿童青少年时期进行规律运动可能对认知功能及神经系统发育产生长期影响。然而不同研究在运动类型、强度及干预周期等方面存在较大差异,其作用机制及效果仍有待进一步整合与验证。

2.1 调节微观分子与神经递质系统的可塑性 运动干预改善 ADHD 儿童核心症状的底层生物学基础,首先体现在对脑内分子环境和神经递质分泌的高效调节。神经营养因子在神经元生长、突触形成及神经网络重组过程中发挥重要调节作用。其中,脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF)被认为是调控脑可塑性的关键分子之一。BDNF 能够促进神经元存活、增强突触传递并参与学习与记忆过程^[42]。规律运动可显著提高体内 BDNF 水平,从而促进神经可塑性^[43]。在儿童青少年群体中,部分研究观察到运动后外周 BDNF 水平升高,提示运动可能通过神经营养因子途径影响脑发育^[44-45]。

ADHD 的经典神经生物学假说认为,多巴胺和去甲肾上腺素系统功能异常是其核心发病机制之一^[46]。运动被认为能够直接影响神经递质系统功能,促进多巴胺释放,提高神经递质受体敏感性,从而改善神经信号传递效率。对于 ADHD 儿童而言,运动诱导的神经递质调节能够有效改善前额叶-纹状体相关回路的功能,提升神经信息传递效率^[47]。

2.2 优化中观突触与宏观脑区结构的可塑性 微观分子环境与神经递质系统的改善,进一步驱动了宏观脑结构的发育与代偿。神经发生与突触可塑性是学习与记忆的重要神经基础^[48]。动物实验表明,规律运动能够显著促进海马区神经发生,提高神经干细胞增殖水平,增强长时程等关键神经可塑性过程。规律运动同样能增加突触相关蛋白表达,促进突触形成及重塑,从而提高神经网络的信息传递效率^[49]。经常参与身体活动的儿童在海马相关认知任务中表现更优,并伴随海马体积或功能活动的增强,这从间接角度支持了运动可能促进海马相关脑区的神经可塑性。

运动还能够通过改善脑血流和脑代谢促进神经系统健康。在运动过程中,心率和血液循环速度增加,从而提高脑组织的氧气和葡萄糖供应,长期规律运动还可能促进脑血管生成,提高脑血流调节能力^[49]。神经影像学研究证实,运动通过改善脑血流和

神经代谢,有助于提高 ADHD 儿童前额叶相关脑区的功能活动^[50]。这有效代偿了其前额叶皮层发育滞后的神经缺陷。

2.3 重塑宏观脑功能网络连接的可塑性 规律身体活动能够改善儿童的执行功能,包括抑制控制、工作记忆以及认知灵活性等方面^[51]。神经影像研究发现,运动干预后,ADHD 儿童在执行控制网络和注意网络方面的功能连接可能出现改善趋势^[52],有效增强了前额叶神经网络的活动调控能力,有利于缓解执行功能缺陷。

ADHD 儿童在执行认知任务时通常存在默认模式网络抑制不足的现象,导致认知资源分配受到干扰。相关研究表明,运动干预能够增强默认模式网络在任务状态下的抑制能力,从而优化脑网络之间的协调连接模式^[52]。这种网络间连接可塑性的提升,有助于减少 ADHD 儿童的走神现象,使其在日常学习和任务执行中表现出更高的注意稳定性和行为控制能力^[53]。

3 ADHD 儿童运动干预的实证研究

近年来,运动干预在 ADHD 儿童中的应用逐渐成为研究热点。大量研究从行为学表现、认知功能以及神经生理指标等多个层面探讨运动对 ADHD 症状的影响。总体来看,现有证据表明规律身体活动能够改善 ADHD 儿童的注意力、执行功能以及行为问题。

3.1 急性运动干预 指单次运动活动后短时间内产生的效应。单次中等强度有氧运动后,ADHD 儿童在注意任务和执行功能任务中的表现往往有所改善^[54]。部分研究采用有氧运动形式,运动持续时间一般为 20~30 min,结果发现,运动后儿童在抑制控制任务中的反应速度明显提高,错误率下降^[55]。一些研究还观察到运动后与注意加工相关的脑电指标出现变化^[56]。急性运动干预的效果通常持续时间较短,一般在运动后 30~60 min 内表现最为明显^[57],在课堂教学或学习活动前安排适量运动可能有助于提高 ADHD 儿童的学习效率。此外,近红外脑功能成像和 fMRI 实证证据显示,单次急性运动后,ADHD 儿童在执行控制任务时,背外侧前额叶及前扣带回的血液氧合水平与功能激活显著即刻增强^[58],提示单次运动即可对前额叶认知调控网络产生急性功能可塑性诱导效应。

3.2 慢性运动干预 指持续数周或数月的规律运动训练。多项随机对照试验探讨了运动训练在 ADHD 儿童中的长期效果。一些研究采用持续 8~12 周的有氧运动训练计划,每周进行 3~5 次运动,每次 30~60 min,经过数周训练后,ADHD 儿童在注意力测试、执行功能任务以及行为量表评分方面均出现改善^[59]。

神经影像学实证研究为慢性运动干预改善 ADHD 提供了直接的脑结构与功能可塑性证据:在功能层面,持续 8~12 周的有氧运动干预后,静态与任务态 fMRI 显示 ADHD 儿童的默认模式网络在任务期间的负激活能力明显增强,执行控制网络与注意网络的功能连接密度显著优化^[50,52];在结构层面,长期规律身体活动干预后,结构磁共振成像观察到 ADHD 儿童前额叶特定皮质区域的灰质体积出现代偿性增加趋势,且扩散张量成像证实前额叶-纹状体通路等核心白质纤维束的各向异性分数提高^[13,60]。上述结构与功能双重证据直接证实了长期运动干预促进 ADHD 儿童大脑宏观重塑的显著临床效果。

3.3 不同运动类型的干预效果 常见运动形式包括有氧运动、协调性训练以及团队运动等。有氧运动是研究最为广泛的干预形式,能够改善 ADHD 儿童的注意力和执行功能表现^[59]。协调性运动如体操、跳绳及平衡训练等活动需要较高的动作控制能力,一些研究发现其能够改善儿童的注意稳定性和行为控制能力。团队运动如足球、篮球等不仅包含身体活动,还涉及规则理解、策略决策和社会互动,可能在改善执行功能和社会行为方面具有潜在优势^[61]。具有较高认知参与度的运动形式可能比单一重复运动更有利于执行功能训练。

4 小结与展望

综上所述,ADHD 是一种复杂的神经发育障碍,其发生发展与脑结构、神经递质系统及脑功能网络异常密切相关。运动作为重要的生活方式因素,能够通过促进神经发生、增强突触可塑性、调节神经营养因子及改善脑血流等途径促进脑可塑性,并对认知功能产生积极影响。相关神经影像研究也发现,运动可能通过增强前额叶功能活动及优化执行控制网络和注意网络连接,促进脑功能可塑性。

然而,目前研究仍存在一定局限:第一,许多研究样本量较小,且研究对象存在差异,可能影响研究结果的稳定性。第二,不同研究在运动强度、持续时间以及评价指标方面缺乏统一标准,导致研究结果之间存在一定异质性。第三,大多数研究主要关注行为学指标,对神经机制的探索仍相对有限。未来应开展大样本、多中心随机对照研究,并结合多模态神经影像和神经生物学指标,进一步阐明运动促进脑可塑性的机制。同时,还需探索不同运动类型、强度及干预周期的最佳方案,为 ADHD 儿童制定更科学的运动干预策略。作为一种安全、低成本且易于推广的干预方式,随着研究的不断深入,运动干预有望在促进 ADHD

儿童认知发展与身心健康方面发挥更为重要的作用。

利益冲突声明 所有作者声明无利益冲突。

参考文献

- [1] Salari N, Ghasemi H, Abdoli N, et al. The global prevalence of ADHD in children and adolescents: a systematic review and Meta-analysis[J]. Ital J Pediatr, 2023,49(1):48.
- [2] Ayano G, Demelash S, Gizachew Y, et al. The global prevalence of attention deficit hyperactivity disorder in children and adolescents: an umbrella review of Meta-analyses[J]. J Affect Disord, 2023,339:860-866.
- [3] Pliszka S. Practice parameter for the assessment and treatment of children and adolescents with attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. J Am Acad Child Adolesc Psychiatry, 2007,46(7):894-921.
- [4] 李华, 张萍, 甄志平. 不同运动方式对注意缺陷多动障碍儿童抑制控制影响的网状 Meta 分析[J]. 中国学校卫生, 2024,45(4):497-502.
Li H, Zhang P, Zhen Z P. A network Meta-analysis of the effects of different exercise modalities on inhibitory control in children with attention deficit hyperactivity disorder[J]. Chin J Sch Health, 2024, 45(4):497-502. (in Chinese)
- [5] 赖美琪, 李可芯, 曾思慧, 等. 1990—2021 年中国及全球儿童和青少年注意缺陷多动障碍疾病负担分析[J]. 协和医学杂志, 2026, 17(2):452-462.
Lai M Q, Li K X, Zeng S H, et al. Burden of attention deficit hyperactivity disorder in children and adolescents in China and globally from 1990 to 2021[J]. Med J Peking Union Med Coll Hosp, 2026,17(2):452-462. (in Chinese)
- [6] Rubia K. Cognitive neuroscience of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) and its clinical translation[J]. Front Hum Neurosci, 2018,12:100.
- [7] Cortese S, Kelly C, Chabernaud C, et al. Toward systems neuroscience of ADHD: a Meta-analysis of 55 fMRI studies[J]. Am J Psychiatry, 2012,169(10):1038-1055.
- [8] Castellanos F X, Aoki Y. Intrinsic functional connectivity in attention-deficit/hyperactivity disorder: a science in development[J]. Biol Psychiatry Cogn Neurosci Neuroimaging, 2016,1(3):253-261.
- [9] Erickson K I, Hillman C, Stillman C M, et al. Physical activity, cognition, and brain outcomes: a review of the 2018 physical activity guidelines[J]. Med Sci Sports Exerc, 2019,51(6):1242-1251.
- [10] De Miguel Z, Khoury N, Betley M J, et al. Exercise plasma boosts memory and dampens brain inflammation via clusterin[J]. Nature, 2021,600(7889):494-499.
- [11] Zhang M, Jia J, Yang Y, et al. Effects of exercise interventions on cognitive functions in healthy populations: a systematic review and Meta-analysis[J]. Ageing Res Rev, 2023,92:102116.
- [12] Ng Q X, Ho C Y X, Chan H W, et al. Managing childhood and adolescent attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD) with exercise: a systematic review[J]. Complement Ther Med, 2017,34:123-128.
- [13] Valkenborghs S R, Noetel M, Hillman C H, et al. The impact of physical activity on brain structure and function in youth: a systematic review[J]. Pediatrics, 2019,144(4):e20184032.

- [14] Soman S M, Vijayakumar N, Thomson P, et al. Cortical structural and functional coupling during development and implications for attention deficit hyperactivity disorder[J]. *Transl Psychiatry*, 2023, 13(1):252.
- [15] Sydnor V J, Larsen B, Bassett D S, et al. Neurodevelopment of the association cortices: patterns, mechanisms, and implications for psychopathology[J]. *Neuron*, 2021, 109(18):2820–2846.
- [16] Faraone S V, Banaschewski T, Coghill D, et al. The world federation of ADHD international consensus statement: 208 evidence-based conclusions about the disorder[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2021, 128:789–818.
- [17] Hoogman M, Muetzel R, Guimaraes J P, et al. Brain imaging of the cortex in ADHD: a coordinated analysis of large-scale clinical and population-based samples[J]. *Am J Psychiatry*, 2019, 176(7):531–542.
- [18] Shaw P, Malek M, Watson B, et al. Development of cortical surface area and gyrification in attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *Biol Psychiatry*, 2012, 72(3):191–197.
- [19] Wang Y, Zuo C, Xu Q, et al. Attention-deficit/hyperactivity disorder is characterized by a delay in subcortical maturation[J]. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry*, 2021, 104:110044.
- [20] Bermanke J, Luna A, Chang L, et al. Structural brain measures among children with and without ADHD in the Adolescent Brain and Cognitive Development Study cohort: a cross-sectional US population-based study[J]. *Lancet Psychiatry*, 2022, 9(3):222–231.
- [21] Chen Q R, Wang Y, Yang B R, et al. Abnormalities of gray matter volume and structural covariance in children with attention-deficit/hyperactivity disorder subtypes: implications for clinical correlations[J]. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci*, 2025, 275(7):1897–1911.
- [22] Humphries M D. Basal ganglia: mechanisms for action selection [M]//Jaeger D, Jung R. *Encyclopedia of computational neuroscience*. New York:Springer, 2022:410–415.
- [23] Yan G, Amita H, Nonomura S, et al. Fluorescence detection of dopamine signaling to the primate striatum in relation to stimulus-reward associations[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2025, 122(11):e2426861122.
- [24] Wu F, Zhang W, Ji W, et al. Stimulant medications in children with ADHD normalize the structure of brain regions associated with attention and reward[J]. *Neuropsychopharmacology*, 2024, 49(8):1330–1340.
- [25] Fernandez L, Burmester A, Duque J D, et al. Examination of cerebellar grey-matter volume in children with neurodevelopmental disorders: a coordinated analysis using the ACAPULCO algorithm[J]. *Cerebellum*, 2023, 22(6):1243–1249.
- [26] Shen F, Zhou H. Advances in the etiology and neuroimaging of children with attention deficit hyperactivity disorder[J]. *Front Pediatr*, 2024, 12:1400468.
- [27] Connaughton M, O'Hanlon E, Silk T J, et al. The limbic system in children and adolescents with attention-deficit/hyperactivity disorder: a longitudinal structural magnetic resonance imaging analysis[J]. *Biol Psychiatry Glob Open Sci*, 2024, 4(1):385–393.
- [28] Kim T H, Choi E, Kim H, et al. The association between hippocampal volume and level of attention in children and adolescents[J]. *Front Syst Neurosci*, 2021, 15:671735.
- [29] Koirala S, Grimsrud G, Mooney M A, et al. Neurobiology of attention-deficit hyperactivity disorder: historical challenges and emerging frontiers[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2024, 25(12):759–775.
- [30] MacDonald H J, Kleppe R, Szigetvari P D, et al. The dopamine hypothesis for ADHD: an evaluation of evidence accumulated from human studies and animal models[J]. *Front Psychiatry*, 2024, 15:1492126.
- [31] Jackson E F, Riley T B, Overton P G. Serotonin dysfunction in ADHD[J]. *J Neurodev Disord*, 2025, 17(1):20.
- [32] Parlatini V, Bellato A, Murphy D, et al. From neurons to brain networks, pharmacodynamics of stimulant medication for ADHD[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2024, 164:105841.
- [33] Bellato A, Perrott N J, Marzulli L, et al. Systematic review and Meta-analysis: effects of pharmacological treatment for attention-deficit/hyperactivity disorder on quality of life[J]. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*, 2025, 64(3):346–361.
- [34] Chen Z, Xu T, Liu X, et al. Cortical gradient perturbation in attention deficit hyperactivity disorder correlates with neurotransmitter -, cell type-specific and chromosome-transcriptomic signatures[J]. *Psychiatry Clin Neurosci*, 2024, 78(5):309–321.
- [35] Yin W, Li T, Mucha P J, et al. Altered neural flexibility in children with attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *Mol Psychiatry*, 2022, 27(11):4673–4679.
- [36] Norman L J, Sudre G, Price J, et al. Subcortico - cortical dysconnectivity in ADHD: a voxel-wise Meta-analysis across multiple cohorts[J]. *Am J Psychiatry*, 2024, 181(6):553–562.
- [37] Norman L J, Sudre G, Price J, et al. Evidence from "big data" for the default-mode hypothesis of ADHD: a Meta-analysis of multiple large samples[J]. *Neuropsychopharmacology*, 2023, 48(2):281–289.
- [38] Pho B, Stevenson R A, Saljoughi S, et al. Identifying developmental changes in functional brain connectivity associated with cognitive functioning in children and adolescents with ADHD[J]. *Dev Cogn Neurosci*, 2024, 69:101439.
- [39] Baker A E, Galván A, Fuligni A J. The connecting brain in context: how adolescent plasticity supports learning and development[J]. *Dev Cogn Neurosci*, 2025, 71:101486.
- [40] Boa Sorte Silva N C, Barha C K, Erickson K I, et al. Physical exercise, cognition, and brain health in aging[J]. *Trends Neurosci*, 2024, 47(6):402–417.
- [41] Augusto-Oliveira M, Arrifano G P, Leal-Nazaré C G, et al. Exercise reshapes the brain: molecular, cellular, and structural changes associated with cognitive improvements[J]. *Mol Neurobiol*, 2023, 60(12):6950–6974.
- [42] Wang C S, Kavalali E T, Monteggia L M. BDNF signaling in context: from synaptic regulation to psychiatric disorders[J]. *Cell*, 2022, 185(1):62–76.
- [43] Cefis M, Chaney R, Wirtz J, et al. Molecular mechanisms underlying physical exercise-induced brain BDNF overproduction[J]. *Front Mol Neurosci*, 2023, 16:1275924.
- [44] De Menezes-Junior F J, Jesus í C, Brand C, et al. Physical exercise and brain-derived neurotrophic factor concentration in children and adolescents: a systematic review with Meta-analysis[J]. *Pediatr Exerc Sci*, 2022, 34(1):44–53.

[45] 欧阳一毅, 滕秋琳, 罗炯. 运动介入对改善注意缺陷多动障碍学龄患儿身心适应研究状况[J]. 中国学校卫生, 2019, 40(6): 952-955.

Ouyang Y Y, Teng Q L, Luo J. Research status of physical intervention on improving physical and mental adaptation of school-age children with attention deficit hyperactivity disorder[J]. Chin J Sch Health, 2019, 40(6): 952-955. (in Chinese)

[46] Arnsten A F. The emerging neurobiology of attention deficit hyperactivity disorder; the key role of the prefrontal association cortex [J]. J Pediatr, 2009, 154(5): I-S43.

[47] Chan Y S, Jang J T, Ho C S. Effects of physical exercise on children with attention deficit hyperactivity disorder[J]. Biomed J, 2022, 45(2): 265-270.

[48] Chen L, Li Z, Wang W, et al. Adult hippocampal neurogenesis; new avenues for treatment of brain disorders[J]. Stem Cell Rep, 2025, 20(9): 102600.

[49] Augusto-Oliveira M, Arrifano G P, Leal-Nazaré C G, et al. Exercise reshapes the brain; molecular, cellular, and structural changes associated with cognitive improvements[J]. Mol Neurobiol, 2023, 60(12): 6950-6974.

[50] Wang H, Chen Y, Xu L, et al. Cognitively engaging running enhances inhibitory control and prefrontal activation in children with ADHD; the moderating role of physical self-efficacy[J]. Sci Rep, 2025, 15: 44313.

[51] Qiu H, Liang X, Wang P, et al. Efficacy of non-pharmacological interventions on executive functions in children and adolescents with ADHD: a systematic review and Meta-analysis [J]. Asian J Psychiatry, 2023, 87: 103692.

[52] Jiang K, Xu Y, Li Y, et al. How aerobic exercise improves executive function in ADHD children; a resting-state fMRI study[J]. Int J Dev Neurosci, 2022, 82(4): 295-302.

[53] Ko Y W, Kim S M, Kang K D, et al. Changes in functional connectivity between default mode network and attention network in response to changes in aerobic exercise intensity [J]. Psychiatry Investig, 2023, 20(1): 27-34.

[54] Pan Q, Zheng S, He P. Beyond binary comparisons: a Bayesian dose-response Meta-analysis of exercise on executive function in children and adolescents with ADHD[J]. Pediatr Res, 2026, 99(4): 1296-1305.

[55] Wang P, Rao F, Xu Z, et al. Effects of aerobic exercise on executive function in children and adolescents with attention deficit hyperactivity disorder; a systematic review and Meta-analysis of randomized controlled trials[J]. BMC Sports Sci Med Rehabil, 2025, 17(1): 257.

[56] Ludyga S, Brand S, Gerber M, et al. An event-related potential investigation of the acute effects of aerobic and coordinative exercise on inhibitory control in children with ADHD[J]. Dev Cogn Neurosci, 2017, 28: 21-28.

[57] Yu C L, Hsieh S S, Chueh T Y, et al. The effects of acute aerobic exercise on inhibitory control and resting state heart rate variability in children with ADHD[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 19958.

[58] Chang Y K, Liu S, Yu H H, et al. Effect of acute exercise on executive function in children with attention deficit hyperactivity disorder[J]. Arch Clin Neuropsychol, 2012, 27(2): 225-237.

[59] Wang P, Rao F, Xu Z, et al. Effects of aerobic exercise on executive function in children and adolescents with attention deficit hyperactivity disorder; a systematic review and Meta-analysis of randomized controlled trials[J]. BMC Sports Sci Med Rehabil, 2025, 17(1): 257.

[60] Chaddock-Heyman L, Erickson K I, Kienzler C, et al. Physical activity increases white matter microstructure in children [J]. Front Neurosci, 2018, 12: 950.

[61] Zhang Y, Che X, Dong Z, et al. Optimizing exercise interventions for motor skills enhancement in attention deficit hyperactivity disorder; evidence from Meta-analysis[J]. Clin Rehabil, 2026, 40(9): 1177-1194.

收稿日期: 2026-04-14 修回日期: 2026-07-02 本文编辑: 王苗苗

(上接第 1357 页)

[16] 郭宇, 廖岩, 王丽. 饮用水消毒方式及其消毒副产物研究进展 [J]. 中国预防医学杂志, 2025, 26(6): 764-768.

Guo Y, Liao Y, Wang L. Advancements in drinking water disinfection methods and their disinfection by-products[J]. Chin Prev Med, 2025, 26(6): 764-768. (in Chinese)

[17] 孙芳, 刘慧蓉. 不同供水方式对生活饮用水的影响[J]. 中国公共卫生管理, 2020, 36(3): 388-391.

Sun F, Liu H R. Influence of different water supply modes on drinking water[J]. Chin J Public Health Manag, 2020, 36(3): 388-391. (in Chinese)

[18] 王慧, 范尉尉, 牛玉杰, 等. 2021 年石家庄市农村中小学校自建设施供水卫生状况调查[J]. 环境卫生学杂志, 2025, 15(2): 123-128.

Wang H, Fan W W, Niu Y J, et al. Investigation on sanitary condition of drinking water in rural primary and secondary schools with self-constructed water supply facilities in Shijiazhuang, China, 2021[J]. J Environ Hyg, 2025, 15(2): 123-128. (in Chinese)

[19] 丁勇, 雷佩玉, 孟昭伟, 等. 关中地区 2018 年农村中小学校饮用水水质卫生现状[J]. 中国学校卫生, 2020, 41(1): 107-109.

Ding Y, Lei P Y, Meng Z W, et al. Drinking water current situation among Guanzhong Area rural primary and secondary schools in 2018 [J]. Chin J Sch Health, 2020, 41(1): 107-109. (in Chinese)

[20] 宋晓霏, 徐静, 董淑琴, 等. 2022 年山东省学校饮用水基本状况调查及卫生监管对策分析[J]. 预防医学论坛, 2025, 31(1): 61-66, 71.

Song X P, Xu J, Dong S Q, et al. Survey on basic status of school drinking water and analysis of hygienic supervision countermeasures in Shandong Province in 2022[J]. Prev Med Trib, 2025, 31(1): 61-66, 71. (in Chinese)

收稿日期: 2026-05-19 修回日期: 2026-08-09 本文编辑: 孙曼莉