

# 运动促进大脑健康：来自行为和脑科学的证据

金鑫虹, 丁宇翔, 周成林\*

上海体育学院心理学院, 上海 200438

**摘要** 从分子水平、细胞水平和器官水平机制(脑结构和功能)等方面总结了体育运动促进大脑健康的可能神经机制;结合实证研究进一步揭示了运动促进儿童和青少年大脑发育及延缓老年人认知衰退的行为和脑科学证据;建议应注重多学科交叉探讨运动促进大脑健康潜在机制的因果关系、构建多模态预测模型,基于关键性机制,针对不同人群制定个性化的最佳运动干预方案。未来可增加大样本纵向研究,为运动干预成为临床治疗相关疾病的辅助手段提供科学依据和实践指导。

**关键词** 大脑健康;儿童和青少年;老年人;运动干预

如何促进大脑健康一直都是神经科学领域关注的重要问题。大量科学证据指出,体育运动不仅可以促进骨骼、肌肉生长,增强心肺功能,改善血液循环系统、呼吸系统等机能,还是促进大脑健康的有效途径,包括改善大脑结构和大脑功能等<sup>[1]</sup>,且这种效益在不同年龄阶段人群中均有报道<sup>[2-4]</sup>。同时,长期进行体育运动有助于预防和改善肥胖、高血压、糖尿病、心血管疾病等慢性疾病,并减轻神经退行性疾病的影响。国家体育总局发布的2020年全民健身活动状况调查指出,中国居民经常参加体育锻炼人数百分比仅为37.2%,且呈现随年龄增长参加体育锻炼的次数减少现象。其中,儿童和青少

年经常参加体育锻炼的人数比例为55.9%,老年人经常参加体育锻炼人数比例为26.1%<sup>[5]</sup>。调查报道指出,坚持体育锻炼是一项主观可控、显著影响国民身心健康的保护性因素<sup>[6]</sup>,但常常被忽略。

大脑及其功能可能受到多种因素的影响(例如压力、环境、体育运动、衰老等),体现了大脑的可塑性特征。大脑可塑性(brain plasticity)是指神经连接系统在结构、功能和分子水平上发生变化的能力,包括促进大脑发育、改善因神经退行性疾病等病理变化的能力<sup>[7]</sup>。以往研究大多认为,儿童、青少年时期的大脑具有高度可塑性,是提高大脑健康的黄金时期。近30年的脑科学研究发现,大脑终生

收稿日期:2022-03-17;修回日期:2022-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(32071088)

作者简介:金鑫虹,讲师,研究方向为运动认知,电子信箱:xinhongjin0103@126.com;周成林(通信作者),教授,研究方向为运动认知与脑科学,电子信箱:chenglin\_600@126.com

引用格式:金鑫虹,丁宇翔,周成林. 运动促进大脑健康:来自行为和脑科学的证据[J]. 科技导报, 2022, 40(10): 39-48; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.10.004

具有可塑性<sup>[8]</sup>,随着人们年龄的增长,具有良好可塑性大脑的老年人可以提高认知储备和延缓衰老<sup>[9]</sup>。值得注意的是,体育运动在促进儿童、青少年和老年人大脑可塑性方面起到了至关重要的作用,也得到了大量研究的证实。但是,体育运动促进大脑健康的潜在作用机制尚需进一步探讨。因此,本研究从微观和宏观水平总结运动促进大脑健康的可能神经机制;在此基础上,结合前期行为和脑科学实证研究,进一步揭示和印证在人类大脑健康发展的关键时期(儿童、青少年时期和老年期)运动促进大脑健康的证据,并就当前研究进展提出需进一步拓展的方向,为促进大众健康发展、科学指导运动锻炼提供理论和实践依据。

## 1 运动促进大脑健康的神经机制

运动促进大脑健康的神经机制一直是体育科学和神经科学领域探讨的热点话题。研究发现,规律性的体育运动可以改善脑血容量<sup>[10]</sup>、血管反应性<sup>[11]</sup>、突触/神经可塑性、神经发生和营养因子的调节<sup>[12]</sup>等,同时也可以改善大脑的结构和功能,影响行为发育、降低疾病风险。这些结构和功能上的变化可以提高认知能力,并塑造学习能力更强、更高效的大脑。尽管当前动物模型和人类的研究多揭示体育运动有助于保持大脑健康,但其潜在机制仍需进一步探讨。有研究指出体育运动可能针对大脑结构和功能的不同方面,在健康和疾病阶段提高神经可塑性,进而促进大脑健康<sup>[2]</sup>。本文从神经营养因子等分子水平、突触可塑性和神经发生的细胞水平、认知功能相关的大脑结构和功能水平3个方面对可能机制进行探讨。

### 1.1 分子水平机制

体育运动在大脑诱发神经发生的同时会增加已有神经元的联系,这可能是通过上调神经营养因子和生长因子造成的<sup>[3, 13]</sup>。通过动物模型实验发现,体育运动可诱导神经营养因子的级联反应,在突触发生、突触可塑性、学习和记忆过程中调节运动产生的积极效益<sup>[14]</sup>。而不同神经营养因子在运动促进大脑健康机制上均有不可或缺的作用,例如

脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF)可促进神经元增殖,血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)可促进关键的血管生长,具有神经保护和神经营养功能,胰岛素样生长因子(insulin-like growth factors, IGF-1)则在运动诱导的血管生成过程中发挥重要作用<sup>[7, 14]</sup>。BDNF和IGF-1是运动促进学习和记忆能力的关键因素,而IGF-1可能是调节BDNF作用及促进运动诱导神经发生和血管生成的重要环节<sup>[15]</sup>。在生长因子中,BDNF可能是通过促进神经发生、突触可塑性和细胞存活,改善与大脑皮层和海马区相关认知能力的关键因子<sup>[16]</sup>。这些新生成的神经元在神经通路上通过突触连接相互交流。神经元之间较强的连接意味着信号传播的更有效,表明锻炼不仅能提高大脑的结构水平,还能提高学习和记忆等功能水平。虽然运动促进BDNF水平增加已经得到了大量研究证据支持,但目前人体大脑中关于分子水平的研究数据较少,对体育运动诱导营养因子产生的来源不明确<sup>[16]</sup>,尚需进一步研究证实。最近一项动物模型的研究发现,运动训练还可以提高对大脑具有保护作用的抗炎因子水平,血浆中可能存在对大脑有益的可转移抗炎因子,例如簇集蛋白(clusterin)在训练产生的抗炎作用中起到了关键作用<sup>[17]</sup>。可见,体育运动能够增加大脑中分子水平的产生和突触可塑性相关蛋白的转译,最终改善神经可塑性<sup>[2]</sup>。而不同的运动方式可以将相互作用的生长因子信号串联起来,例如有氧运动似乎选择性地上调中枢BDNF,而有氧运动和阻力运动均可上调中枢和外周IGF-1<sup>[15]</sup>,从而产生刺激结构变化、增强行为发展和刺激分子水平的效应,进而改善大脑健康。但进一步研究还需要进行严格的临床干预试验,以确定运动干预方案,如频率、强度、类型和时间,与关键神经活动的协同作用机制<sup>[2]</sup>。

### 1.2 细胞水平机制

体育运动可以促进神经细胞之间新的连接和功能,提高神经可塑性。临床研究表明,通过一系列脑刺激练习可以诱发产生新的突触和神经回路,体育运动还可以促进和加强机体的代偿功能<sup>[18]</sup>。

该研究在进一步证实体育运动促进突触可塑性和神经发生的作用机制的同时,也为临床大脑损伤提供了可行干预方案。值得注意的是,最近的研究提出了乳酸在运动促进大脑健康中的潜在作用,提示大脑代谢可能是决定大脑功能的重要生理因素。运动促进大脑健康的又一原因可能是代谢产物中提供的乳酸可以满足提高神经活动、调节脑血管系统和氧化还原状态。而这一机制也可解释实验研究中不同运动强度、间歇性和连续性运动,以及急性和长期运动干预之间健康效益的差异提供了可能机制:与乳酸代谢含量相关<sup>[19]</sup>。

### 1.3 器官水平机制(脑结构和功能)

神经影像学研究显示,与体育运动相关的大脑结构和功能连接也发生了变化,表明体育运动可以提高大脑的结构性和功能性可塑性<sup>[20-21]</sup>。一项关于啮齿类动物研究表明,自主性跑轮可以促进与认知表现和学习有关的关键大脑区域(包括海马和前额叶皮层)的潜在神经可塑性<sup>[1]</sup>。参加有氧运动可以增加脑容量、白质和灰质体积<sup>[20]</sup>。其中,灰质体积的增加反映了神经元细胞体数量的增加,而白质区域则显示轴突的增加<sup>[22]</sup>。有氧运动还提高了神经元传导速度(与白质完整性有关),以及增加了反应振幅(与皮层灰质激活有关)<sup>[7]</sup>。因此考察大脑结构和功能水平与行为表现的关系是检测大脑可塑性的有效组合,为建立新的神经回路和加强回路中神经元之间的突触连接提供了必要的实践基础。

同样地,Sexton等<sup>[23]</sup>通过分析横向和纵向磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)研究发现身体活动水平越高,老年人的白质体积越大、白质病变体积或严重程度越低,表现出白质微结构的改善<sup>[24]</sup>。即使患者开始出现认知能力下降现象,通过体育运动进行干预也能改善这种衰退。例如阿尔茨海默病患者通过运动表现出了显著的认知改善<sup>[7]</sup>。随着研究的发展,除了有氧运动和抗阻运动,身心锻炼作为一种结合动作序列、呼吸控制、注意力调节的多成分锻炼形式,逐渐成为现代人的运动选择<sup>[25]</sup>,通常包括太极拳、气功和瑜伽等。一项元分析结果显示,身心锻炼调节了大脑结构、脑神经活动和功能连接,主要在前额叶皮层、海马体/内侧

颞叶、外侧颞叶、岛叶和扣带回皮层,以及认知控制和默认模式网络,这可能是身心锻炼对大脑健康有益的基础<sup>[26]</sup>。

因此,运动促进大脑健康可体现在分子、细胞和器官水平(大脑结构和功能)上,这一效益在动物模型实验和人类研究中均得到了证实。然而,目前对于上述神经机制的研究仍处于相关关系结果,对于体育运动与上述潜在机制的因果关系尚需进一步探讨。同时,运动促进大脑健康的神经生物学机制多源于啮齿类动物的有氧运动证据<sup>[1]</sup>,在人类机体中的证据仍需进一步研究。对于其他运动形式,如无氧运动和身心锻炼,促进人类大脑效益的神经生物学机制尚需今后的研究进行检测。

## 2 运动促进儿童和青少年大脑健康的证据

尽管上述神经机制多基于动物模型展开,但随着认知神经科学的发展,越来越多研究从行为和脑科学角度报道了体育运动促进大脑健康的证据。其中,儿童、青少年时期是一生中大脑发育和认知发展的关键时期,也是大脑可塑性和认知功能增强的重要时期。儿童、青少年大脑发育的首要任务是学习,运动促进大脑健康旨在促进学习效益和培养良好的行为习惯,以应对和适应新的角色和环境。然而,当前全球儿童青少年健康状况令人堪忧,例如超重或肥胖人数逐年递增,以及青少年患病(如糖尿病、心血管疾病、脂肪肝等)呈现低龄化趋势<sup>[27]</sup>,随着年龄的增长反而呈现体育活动降低的趋势<sup>[28-29]</sup>。这些疾病风险均会影响与儿童、青少年认知功能相关的大脑健康机制,因此,基于当前现状,了解体育运动对儿童青少年大脑健康的影响机制,对帮助和激励儿童青少年培养积极的生活方式,提高生活质量,提高大脑发育具有重要意义。

大量研究发现,体育运动可提高儿童青少年的大脑细胞活性、改变大脑结构,从而改善认知功能,提高注意力等<sup>[30-31]</sup>。儿童青少年体育活动参与度与其体能发展、学习表现和认知能力提升存在正相关关系<sup>[32-34]</sup>。认知能力的发展决定了学习效益,

本课题组经过长期实证研究,发现了体育运动促进儿童和青少年学习效益的行为和脑科学证据。

### 2.1 记忆能力

学龄儿童体育锻炼与学业成绩之间存在显著的正相关关系<sup>[35]</sup>。其中,记忆能力是提高学习效益的首要能力,主要体现在工作记忆和长时记忆2个方面。通过上述神经机制探讨可知,体育运动可以增强海马神经发生和与BDNF相关的记忆能力<sup>[36]</sup>,可能是运动促进记忆能力的重要神经机制。一项脑电研究发现身体活动水平越高、工作记忆绩效越好,具体表现为在记忆编码阶段,身体活动水平高的被试行为反应时更短、准确率更高,同时大脑神经活动水平上调用了更多的认知资源,体现在alpha能量更大、N1振幅更大;同时,较高的身体活动水平可以避免遗忘中前摄抑制的影响<sup>[37]</sup>,进而提高记忆能力。另一项行为研究发现,中等强度急性有氧运动干预后,青少年陈述性记忆编码阶段加工效率提高,而对程序性记忆的效益则在巩固阶段更加明显<sup>[38]</sup>。尽管有研究发现运动也可以促进成年人的记忆能力<sup>[39]</sup>,但目前关于运动对不同年龄阶段效益的差异如何,特别是关于记忆能力的纵向研究,仍需进一步探讨。值得肯定的是,儿童和青少年大脑正处于快速发育时期,其记忆能力的训练和发展是提高学习效益的重要途径。

### 2.2 抑制能力

儿童、青少年抑制能力的提高是体育运动促进认知功能的又一重要体现。一项事件相关电位(event-related potentials, ERP)研究考察了30 min中等强度(个人60%~69%最大心率)急性有氧运动对被试抑制能力的影响及血液中BDNF含量变化。而N2和P3是ERP成分中常反映抑制控制的指标,结果发现,与阅读对照组相比,急性有氧运动可有效提高对抑制信号的正确率,增加血液中BDNF含量;被试信号觉察的早期阶段(N2成分)诱发的平均波峰更小,但P3成分(晚期加工)平均波幅更大<sup>[40]</sup>。另有研究报道,经常参加体育运动还可以提高大学生不良行为习惯的抑制能力。研究发现,经常运动组在抑制控制Go/Nogo任务中的反应更快,抑制成功率更高,且在代表抑制能力的Nogo-P3脑

电指标上效应更明显<sup>[41]</sup>。可见,经常参加体育运动可有效提高对不良行为习惯(如网瘾等)的抑制,进而降低不良行为习惯的发生。

一项研究通过对比肥胖青少年与正常体重青少年认知能力发现肥胖青少年在基本认知功能和高阶认知功能(Flanker任务)上较正常体重青少年表现均较差<sup>[42]</sup>。一次20 min中等强度的有氧运动就可有效提高超重青少年的反应抑制能力与干扰抑制能力<sup>[43]</sup>;随后进行的一项长期运动干预研究进一步探讨了运动和饮食组合对超重儿童青少年认知功能的影响。其中,运动干预组每天开展2次(早上和晚上)运动,每次运动持续120 min:包括18 min热身活动、84 min低至中等强度锻炼、心率在110~130 bpm(beat per minute),以及18 min放松。运动干预6 d/周,共连续干预4周,同时配合饮食计划,而对照组则维持正常的学习生活。结果发现,运动与健康饮食结合可有效提高执行功能,体重变化可能是运动干预提高执行功能的调节变量<sup>[44]</sup>。这一研究提示,以往研究多仅探讨体育运动干预(急性或长期)对某一认知功能的影响,关于运动干预结合饮食或认知训练方案的效果是否更优尚需进一步研究,同时,今后的研究还可进一步探究其他调节变量在运动效益中的作用。

研究发现,体育运动对其他认知能力(如注意力)的影响可能会受到不同运动方式的调节。本课题组考察了开放性锻炼和闭锁性锻炼对注意网络功能的影响,结果发现,开放性和闭锁性锻炼均可提高注意的执行控制网络功能,而开放性锻炼的促进作用更明显,但两种运动对注意的警觉与定向网络功能不存在促进效益<sup>[45]</sup>。值得注意的是,运动对大脑健康效益还体现在感觉运动的交互过程中,长期舞蹈训练经验可有效提高大脑神经活动与外界刺激的同步性响应,提高对外界刺激的感知能力和动作技能表现。

### 2.3 神经影像学证据

上述行为和脑科学研究均证实,体育运动可以促进儿童青少年大脑健康发展,提高认知功能。但目前关于体育运动促进儿童青少年大脑可塑性的潜在机制仍需进一步探讨。随着认知神经科学技

术的发展,越来越多的研究采用MRI技术来评估体育运动对儿童青少年大脑结构和功能的影响。一项选取青春期男性被试的研究发现,有氧适能程度越高,对动作行为至关重要的白质通路(即皮质脊髓束)中的各向异性值(fractional anisotropy, FA)越低<sup>[46]</sup>。较高的有氧适能可体现在不同的皮层、皮层下和白质结构连通性上。当比较不同学习结果的大脑活动时,尽管任务表现相同,低体能青少年的海马体积明显比高体能青少年活跃<sup>[47]</sup>,这一结果提示,锻炼可能会影响大脑编码新记忆的方式,而身体状况较差的青少年可能需要利用更多的大脑资源来学习新知识<sup>[48]</sup>。此外,长期参与高策略技能训练可提高连接背侧和腹侧通路脑区的双侧皮质脊髓束、左侧上纵束、左侧下纵束和双侧额枕下束的FA,从而增强大脑背侧和腹侧通路上的白质纤维束结构完整性<sup>[49]</sup>。因此长期运动锻炼可能通过大脑结构和连接性功能的改变来改善认知功能。

《中国儿童青少年身体活动指南》建议每天累积至少60 min的中高强度身体活动,一周至少3 d,符合中国儿童青少年的生长发育需要<sup>[30]</sup>。但目前关于体育运动与大脑健康的剂量-效应关系尚需进一步研究检验<sup>[50]</sup>。为了更好地控制潜在的变量影响,今后的研究需要控制更多与儿童青少年认知能力相关的基线参考,并设置多种认知任务,以进一步明确体育运动、大脑机制与认知能力的对应关系。有趣的是,越来越多研究开始关注不同运动类型(如抗阻运动、身心运动)促进儿童青少年大脑健康的效益<sup>[51-52]</sup>,未来也可以从剂量效应角度为儿童青少年制定个性化的体育锻炼方案。

### 3 体育运动促进老年人大脑健康

如何延缓认知衰退是运动认知神经科学专家关注的另一重要课题。随着年龄的增长,大脑不可避免会出现一定程度的衰老,与年龄相关的认知障碍在很大程度上反映了大脑萎缩情况,导致涉及高级认知过程的关键大脑区域灰质减少<sup>[53]</sup>,进而影响处理智力或需要记忆和执行功能参与的任务速度<sup>[54-56]</sup>。有研究发现,大约从50岁开始,老年人的

海马体体积每年将萎缩1%~2%,这些体积的减少可能导致记忆力和执行功能的下降<sup>[57-58]</sup>。近年来,认知功能衰退和神经退行性疾病(例如中风和痴呆症等)的患病率正在逐渐增加。多项研究表明体育运动对延缓认知能力衰退有重要作用,为健康老化和神经退行性疾病患者提供了潜在的治疗可能性<sup>[9]</sup>。神经退行性敏感的大脑区域包括海马区、颞区和额叶区,体育运动对其具有保护作用<sup>[24]</sup>,很有必要进一步探究运动促进大脑健康效益在多大程度上可以延缓老年人认知衰退。

体育运动作为一种改善认知和促进大脑健康的干预策略在帮助老年人认知老化,避免和缓解认知功能损伤方面具有较大潜力<sup>[59]</sup>。一项元分析研究结果提示,高水平的体力活动可降低38%非痴呆症患者老年人认知能力下降的风险,而中低水平体力活动则与35%的风险降低相关<sup>[60]</sup>。长期锻炼也被证明可以改善老年人脑连通性和执行控制力,但不同的运动锻炼形式可能存在不同<sup>[12, 61]</sup>。持续1年的低至中等强度有氧运动与默认网络和前额执行网络之间的连通性改善有关,其中默认网络的功能障碍被认为是正常认知能力下降和阿尔茨海默病的生物标志物<sup>[62-63]</sup>。此外,在执行控制网络中,研究同样发现有氧运动可提高左右前额叶皮质之间的连通性<sup>[17]</sup>。由此可见,体育运动不仅可提高与任务相关的大脑激活程度,还有利于大脑网络连接性,这些网络对认知功能的改善起到了重要作用。

Greendale等<sup>[64]</sup>采用纵向研究的方法,考察了身体活动水平与不同认知能力(处理速度、语言情景记忆和工作记忆能力)的关系。发现,当使用人员流失和练习作为协变量时,身体活动与较高的语言情景记忆和处理速度相关;然而,当模型调整了人口统计学特征、更年期症状、激素、糖尿病和高血压变量后,身体活动与认知能力却不存在显著相关。而另一项元分析结果显示,体育运动与大脑健康和认知之间仅存在较小至中等的效应量<sup>[65]</sup>。表明身体活动和认知能力的关系,特别是老年人,可能受到其他变量的干扰,两者之间的因果关系需今后研究进一步探讨。

在一项探讨1年气功锻炼对延缓认知衰退人群认知能力的研究中,发现1年运动干预后运动能力评分与神经行为量表评分(repeatable battery for the assessment of neuropsychological status, RBANS)呈高度正相关,气功组认知能力下降风险明显低于对照组,且在整体认知功能、记忆、视觉空间能力和语言能力上明显优于对照组<sup>[66]</sup>。有研究指出,每次持续运动30~45 min,运动训练对认知功能的功效在超过6个月时可增加<sup>[67]</sup>。与单独进行有氧运动相比,将有氧运动与抗阻力量训练相结合的健康效益更大<sup>[54, 67]</sup>。不同锻炼形式可能从不同的生理途径提高大脑健康水平<sup>[21, 68]</sup>,然而目前不同运动方式对大脑和认知效益的影响尚需进一步探讨。Chen等<sup>[69]</sup>研究了随机对照运动干预对认知功能完整的老年人大脑结构和功能的影响,结果表明参与运动训练对老年人大脑健康有益,但效益受到运动剂量(即频率、强度、时间、类型等)的影响。未来的研究将致力于更好地理解大脑区域特异性与特定

类型运动的关联,为选择合适干预措施提供科学依据<sup>[70]</sup>。同时,可采取效度更高和多层面的方法来测量运动水平和认知能力,也可以使用结构方程模型、建立潜变量之间的关系,以便更全面地理解运动-大脑健康之间的因果关系。

大量研究已证实运动锻炼可延缓认知衰退<sup>[69, 71]</sup>(图1)。尽管许多问题仍未得到解答,但已有证据均提示身体活动对大脑健康有益,将锻炼与认知任务结合起来可为人体提供神经保护<sup>[3]</sup>。有研究指出,锻炼总时间(大约52 h)是提高认知能力的显著因素<sup>[72]</sup>,然而研究中还没有明确的剂量-效应关系,关于延缓和预防老年人认知老化的最佳运动剂量尚需进一步探讨。同时,目前的研究多集中于老年人群中,关于长期体育运动对步入老年后如何延缓认知老化进程的研究仍较少,今后的研究可进一步厘清运动训练持续时间、运动项目与老年人大脑健康效益的剂量关系,同时针对不同类型老年人制定个性化的运动干预方案。

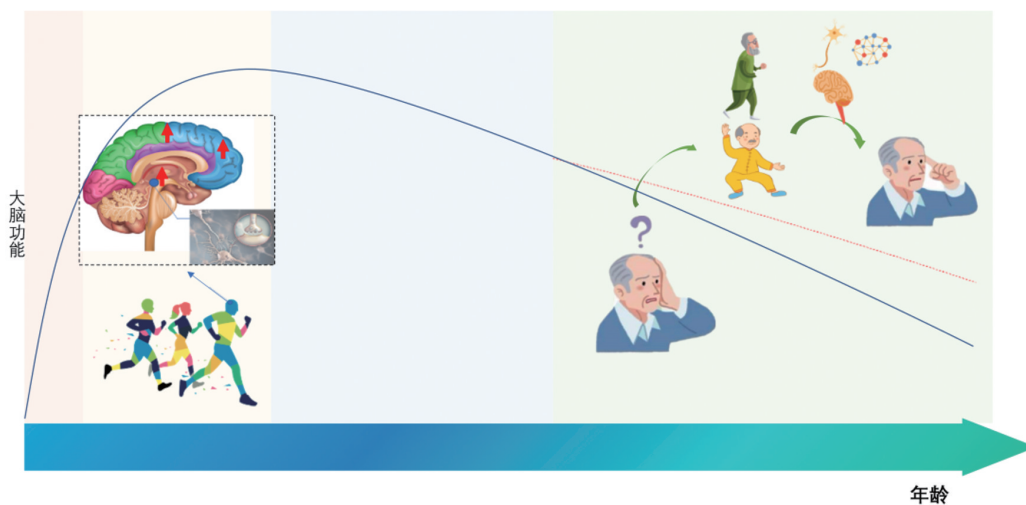


图1 运动促进大脑健康的终身效益

## 4 结论

长期坚持体育运动可以促进大脑健康。但是“如何”运动能达到健康效益最大化,仍是今后研究亟待解决的重要问题。未来可从机制和实践两个角度出发,在进一步厘清运动促进大脑健康潜在机

制的因果关系基础上,为不同人群制定个性化运动干预方案。

### 4.1 明确剂量-效应的运动处方制定

美国运动医学院提出了影响运动效果的FITT-VP原则,包括运动频率(frequency)、运动强度(intensity)、运动持续的时间(time)、运动的类型

(type)、训练量(volume)以及运动的渐进性(progression)<sup>[73]</sup>。当前研究已发现采用中等强度的有氧运动、抗阻训练和身心锻炼均能促进大脑健康,但对于不同运动类型、不同运动强度、不同训练量对大脑结构和功能的剂量-效应关系仍需进一步探讨,尚缺乏对不同人群在运动剂量、运动方式等方面的个性化处方制定。

随着运动方式的不断更新和人们生活方式的逐渐改变,抗阻运动、身心运动等不同运动形式也逐渐受到大众青睐,但这些运动促进大脑健康的神经生物学机制仍需进一步的探讨。高强度间歇训练(high-intensity interval exercise training, HIIT)因其更有效的时间效率、更好地提高代谢及心血管系统的适应性等特征,正在成为当前运动训练方式的新选择<sup>[74]</sup>。但目前关于HIIT训练方式的应用范围仍存在一定争议<sup>[75]</sup>,HIIT的积极效益以及改善身心健康的潜在机制,为间歇性运动与持续性运动效益的比较提供了思路。同时,也为进一步理解运动促进大脑健康的潜在机制(如乳酸)提供了新的思考,例如,长期运动效益是否可以理解为急性运动效益的简单叠加,两者对大脑健康的影响关系等仍是今后需要进一步探讨的问题。因此,今后的研究可进一步探究运动强度,运动强度-运动方式,以及运动强度-运动方式-持续时间对于大脑健康的不同效益特征,为制定最佳运动处方提供有效途径。

#### 4.2 增加大样本纵向研究,构建多模态预测机制

目前关于运动干预研究多为随机对照实验设计,样本量较小,且多为横向比较。除了关于运动类型、频率和持续时间的研究外,还需要考虑其他额外变量是否可能同样导致大脑健康和认知能力的个体差异。例如,成年之后保持规律性运动习惯是否可有效预测步入老年时期的认知能力。在目前多采用急性有氧运动干预形式的同时,今后可进一步对运动干预的长期健康效益进行研究,体育运动是否可以在年龄这一时间轴中预测不同年龄阶段的认知发展水平,特别是预测老年人认知老化程度,仍是当前运动认知神经科学领域的热点问题。神经影像学研究也需采用较为一致的多模态框架,并在人类和动物模型之间加强相互作用,以研究运

动对大脑和认知在整个生命周期中的影响。通过厘清不同运动干预方案对不同年龄阶段人群的大脑健康效益,可进一步为运动干预成为临床治疗各类疾病的辅助手段提供实践指导,这将为更好地提高大脑健康、开展干预治疗及预防疾病提供科学依据。

#### 参考文献(References)

- [1] Barha C K, Galea L A, Nagamatsu L S, et al. Personalising exercise recommendations for brain health: Considerations and future directions[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2016, 51(8): 636-639.
- [2] Lee M C, Byun K, Kim J S, et al. Trends in exercise neuroscience: Raising demand for brain fitness[J]. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 2019, 15(2): 176-179.
- [3] Raichlen D A, Alexander G E. Adaptive capacity: An evolutionary neuroscience model linking exercise, cognition, and brain health[J]. *Trends in Neurosciences*, 2017, 40(7): 408-421.
- [4] Thomas A G, Dennis A, Bandettini P A, et al. The effects of aerobic activity on brain structure[J]. *Frontiers in Psychology*, 2012, 3(86): 86.
- [5] 2020年全民健身活动状况调查公报[N]. 2021-12-30(01).
- [6] 傅小兰, 张侃, 陈雪峰, 等. 中国国民心理健康发展报告(2019-2020)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021.
- [7] Konopka L M. How exercise influences the brain: A neuroscience perspective[J]. *Croatian Medical Journal*, 2015, 56(2): 169-171.
- [8] 谭力海. 人脑语言中枢与语言能力开发、保护和重塑[J]. *教育家*, 2019(24): 16-18.
- [9] Stern Y. Cognitive reserve[J]. *Neuropsychologia*, 2009, 47(10): 2015-2028.
- [10] Colcombe S J, Erickson K I, Scalf P E, et al. Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans[J]. *Journals of Gerontology*, 2006, 61(11): 1166-1170.
- [11] Murrell C J, Cotter J D, Thomas K N, et al. Cerebral blood flow and cerebrovascular reactivity at rest and during sub-maximal exercise: Effect of age and 12-week exercise training[J]. *Age (Dordrecht, Netherlands)*, 2013, 35(3): 905-920.
- [12] Cabral D F, Rice J, Morris T P, et al. Exercise for brain health: An investigation into the underlying mechanisms

- guided by dose[J]. *Neurotherapeutics*, 2019, 16(3): 580–599.
- [13] Yau S Y, Lau W M, Zhang E D, et al. Effects of voluntary running on plasma levels of neurotrophins, hippocampal cell proliferation and learning and memory in stressed rats[J]. *Neuroscience*, 2012, 222(2): 289–301.
- [14] Cotman C W, Berchtold N C, Christie L A. Exercise builds brain health: Key roles of growth factor cascades and inflammation[J]. *Trends in Neurosciences*, 2007, 30(9): 464–472.
- [15] Voss M W, Nagamatsu L S, Liu–Ambrose T, et al. Exercise, brain, and cognition across the life span[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2011, 111(5): 1505–1513.
- [16] Umegaki H, Sakurai T, Arai H. Active Life for Brain Health: A narrative review of the mechanism underlying the protective effects of physical activity on the brain[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2021, 13, 761674.
- [17] De Miguel Z, Khoury N, Betley M J, et al. Exercise plasma boosts memory and dampens brain inflammation via clusterin[J]. *Nature*, 2021, 600: 494–499.
- [18] Lourenco M V, Frozza R L, de Freitas G B, et al. Exercise-linked FNDC5/irisin rescues synaptic plasticity and memory defects in Alzheimer’s models[J]. *Nature Medicine*, 2019, 25(1): 165–175.
- [19] Hashimoto T, Tsukamoto H, Ando S, et al. Effect of exercise on brain health: The potential role of lactate as a myokine[J]. *Metabolites*, 2021, 11(12): 813.
- [20] Gajewski P D, Falkenstein M. Physical activity and neurocognitive functioning in aging: A condensed updated review[J]. *European Review of Aging and Physical Activity*, 2016, 13: 1.
- [21] Erickson K I, Voss M W, Prakash R S, et al. Exercise training increases size of hippocampus and improves memory[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(7): 3017–3022.
- [22] Prakash R S, Snook E M, Motl R W, et al. Aerobic fitness is associated with gray matter volume and white matter integrity in multiple sclerosis[J]. *Brain Research*, 2010, 1341: 41–51.
- [23] Sexton C E, Betts J F, Demnitz N, et al. A systematic review of MRI studies examining the relationship between physical fitness and activity and the white matter of the ageing brain[J]. *NeuroImage*, 2016, 131: 81–90.
- [24] Domingos C, Pêgo J M, Santos N C. Effects of physical activity on brain function and structure in older adults: A systematic review[J]. *Behavioural Brain Research*, 2021, 402: 113061.
- [25] Bo A, Mao W, Lindsey M A. Effects of mind–body interventions on depressive symptoms among older Chinese adults: A systematic review and meta–analysis[J]. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 2017, 32(5): 509–521.
- [26] Zhang X, Zong B, Zhao W, et al. Effects of mind–body exercise on brain structure and function: A systematic review on MRI studies[J]. *Brain Sciences*, 2021, 11(2): 205.
- [27] WHO. Prevalence of insufficient physical activity[EB/OL]. [2022–01–18]. [http://www.who.int/gho/ncd/risk\\_factors/physical\\_activity\\_text/en/](http://www.who.int/gho/ncd/risk_factors/physical_activity_text/en/), 2015.
- [28] Cairney J, Veldhuizen S, Kwan M, et al. Biological age and sex–related declines in physical activity during adolescence[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2014, 46(4): 730–735.
- [29] Dumith S C, Gigante D P, Domingues M R, et al. Physical activity change during adolescence: A systematic review and a pooled analysis[J]. *International Journal of Epidemiology*, 2011, 40(3): 685–698.
- [30] 周成林, 金鑫虹. 从脑科学诠释体育运动提升学习效益的理论与实践[J]. *上海体育学院学报*, 2021, 45(1): 20–28.
- [31] Sibley B A, Etnier J L. The relationship between physical activity and cognition in children: A meta–analysis[J]. *Pediatric Exercise Science*, 2003, 15(3): 243–256.
- [32] Castelli D M, Hillman C H, Buck S M, et al. Physical fitness and academic achievement in 3rd and 5th grade students[J]. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 2007, 29(2): 239–252.
- [33] Chomitz V R, Slining M M, McGowan R J, et al. Is there a relationship between physical fitness and academic achievement? Positive results from public school children in the northeastern United States[J]. *Journal of School Health*, 2009, 79(1): 30–37.
- [34] Esteban–Cornejo I, Tejero–González C M, Sallis J F, et al. Physical activity and cognition in adolescents: A systematic review[J]. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 2015, 18(5): 534–539.
- [35] Fedewa A L, Ahn S. The effects of physical activity and physical fitness on children’s achievement and cognitive outcomes: a meta–analysis[J]. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2011, 82(3): 521–535.
- [36] Sun L, Sun Q, Qi J. Adult hippocampal neurogenesis: An important target associated with antidepressant ef-

- fects of exercise[J]. *Reviews in the Neurosciences*, 2017, 28(7): 693-703.
- [37] 娄莹, 周成林, 陆颖之. 不同体力活动水平大学生的生物运动工作记忆加工特征研究[J]. *首都体育学院学报*, 2019, 31(4): 364-369.
- [38] Wang X, Zhu R, Zhou C, et al. Distinct effects of acute aerobic exercise on declarative memory and procedural memory formation[J]. *Brain Sciences*, 2020, 10(10): 691.
- [39] Loprinzi P D, Frith E, Edwards M K, et al. The effects of exercise on memory function among young to middle-aged adults: Systematic review and recommendations for future research[J]. *American Journal of Health Promotion*, 2018, 32(3): 691-704.
- [40] 朱风书, 周成林. 急性中等强度有氧运动对大学生抑制能力影响的研究——来自行为学与生理学的依据[J]. *中国运动医学杂志*, 2016, 35(10): 940-946.
- [41] 朱风书, 吴雪萍, 周成林. 不同身体活动水平大学生不良行为习惯抑制能力的行为和脑电特征[J]. *沈阳体育学院学报*, 2016, 35(2): 76-81.
- [42] 解淳, 张育恺, 崔晨, 等. 肥胖青少年多层次认知功能特点的研究[J]. *天津体育学院学报*, 2017, 32(1): 68-72.
- [43] 崔晨, 王小春, 解淳, 等. 急性有氧运动对超重青少年抑制功能效益的影响[J]. *西安体育学院学报*, 2017, 34(2): 214-220.
- [44] Xie C, Wang X, Zhou C, et al. Exercise and dietary program-induced weight reduction is associated with cognitive function among obese adolescents: A longitudinal study[J]. *PeerJ*, 2017, 5: e3286.
- [45] 王诗瑶, 周成林, 王碧野. 开放性体育锻炼对大学生注意网络功能的选择性促进[J]. *中国运动医学杂志*, 2017, 36(8): 712-717.
- [46] Herting M M, Colby J B, Sowell E R, et al. White matter connectivity and aerobic fitness in male adolescents [J]. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2013, 7(1): 65-75.
- [47] Herting M M, Nagel B J. Differences in brain activity during a verbal associative memory encoding task in high- and low-fit adolescents[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2013, 25(4): 595-612.
- [48] Herting M M, Chu X. Exercise, cognition, and the adolescent brain[J]. *Birth Defects Research*, 2017, 109(20): 1672-1679.
- [49] 祁亚鹏, 王怡萱, 朱桦, 等. 长期高策略性技能训练对运动员大脑白质结构的影响: 一项DTI研究[J]. *心理学报*, 2021, 53(7): 798-806.
- [50] Tarp J, Domazet S L, Froberg K, et al. Effectiveness of a school-based physical activity intervention on cognitive performance in Danish adolescents: LComotion—learning, cognition and motion—A cluster randomized controlled trial [J]. *PLoS One*, 2016, 11(6): 0158087.
- [51] Marchetti R, Forte R, Borzacchini M, et al. Physical and motor fitness, sport skills and executive function in adolescents: A moderated prediction model[J]. *Psychology*, 2015, 6(14): 1915-1929.
- [52] Cassilhas R C, Lee K S, Fernandes J, et al. Spatial memory is improved by aerobic and resistance exercise through divergent molecular mechanisms[J]. *Neuroscience Oxford*, 2012, 202(1): 309-317.
- [53] Decarli C, Massaro J, Harvey D, et al. Measures of brain morphology and infarction in the framingham heart study: Establishing what is normal[J]. *Neurobiology of Aging*, 2005, 26(4): 491-510.
- [54] Tarumi T, Zhang R. The role of exercise-induced cardiovascular adaptation in brain health[J]. *Exercise & Sport Sciences Reviews*, 2015, 43(4): 181-189.
- [55] Salthouse T A. When does age-related cognitive decline begin?[J]. *Neurobiology of Aging*, 2009, 30(4): 507-514.
- [56] Salthouse, Timothy A. Neuroanatomical substrates of age-related cognitive decline[J]. *Psychological Bulletin*, 2011, 137(5): 753-784.
- [57] Raz N, Lindenberger U, Rodrigue K M, et al. Regional brain changes in aging healthy adults: General trends, individual differences and modifiers[J]. *Cerebral Cortex*, 2005, 15(11): 1676-1689.
- [58] Carlson M C, Qian-Li X, Zhou J, et al. Executive decline and dysfunction precedes declines in memory: The women's health and aging study II[J]. *Journals of Gerontology Series A—biological Sciences and Medical Sciences*, 2009(1): 110-117.
- [59] Liu-Ambrose T, Barha C, Falck R S. Active body, healthy brain: Exercise for healthy cognitive aging[J]. *International Review of Neurobiology*, 2019, 147: 95-120.
- [60] Sofi F, Valecchi D, Bacci D, et al. Physical activity and risk of cognitive decline: A meta-analysis of prospective studies[J]. *Journal of Internal Medicine*, 2011, 269(1): 107-117.
- [61] Wanderley F A, Moreira A, Sokhatska O, et al. Differential responses of adiposity, inflammation and autonomic function to aerobic versus resistance training in older adults[J]. *Experimental Gerontology*, 2013, 48(3): 326-333.
- [62] Buckner R L, Andrews-Hanna J, Schacter D L. The brain's default network[J]. *Annals of the New York*

- Academy of Sciences, 2008, 1124(1): 1–38.
- [63] Dosenbach N, Visscher K M, Palmer E D, et al. A core system for the implementation of task sets [J]. *Neuron*, 2006, 50(5): 799–812.
- [64] Greendale G A, Han W, Huang M, et al. Longitudinal assessment of physical activity and cognitive outcomes among women at Midlife[J]. *JAMA*, 2021, 4(3): e213227.
- [65] Falck R S, Davis J C, Best J R, et al. Impact of exercise training on physical and cognitive function among older adults: A systematic review and meta-analysis[J]. *Neurobiology of Aging*, 2019, 79: 119–130.
- [66] Jin J, Wu Y, Li S, et al. Effect of 1 year of Qigong exercise on cognitive function among older Chinese adults at risk of cognitive decline: A cluster randomized controlled trial[J]. *Frontiers in Psychology*, 2020, 11: 546834.
- [67] Colcombe S, Kramer A F. Fitness effects on the cognitive function of older adults: A meta-analytic study[J]. *Psychological Science*, 2003, 14(2): 125–130.
- [68] Cassilhas R, Tufik S, Mello M. Physical exercise, neuroplasticity, spatial learning and memory[J]. *Cellular & Molecular Life Sciences*, 2015, 73(5): 1–9.
- [69] Chen F T, Hopman R J, Huang C J, et al. The effect of exercise training on brain structure and function in older adults: A systematic review based on evidence from randomized control trials[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2020, 9(4): 914.
- [70] Domingos C, Pêgo J M, Santos N C. Effects of physical activity on brain function and structure in older adults: A systematic review[J]. *Behavioural Brain Research*, 2021, 402: 113061.
- [71] Vina J, Sanchis-Gomar F, Martinez-Bello V, et al. Exercise acts as a drug; the pharmacological benefits of exercise [J]. *British Journal of Pharmacology*, 2012, 167(1): 1–12.
- [72] Gomes-Osman J, Cabral D F, Morris T P, et al. Exercise for cognitive brain health in aging: A systematic review for an evaluation of dose[J]. *Neurology Clinical Practice*, 2018, 8(3): 257–265.
- [73] Armstrong L E, Balady G, Berry M, et al. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription[M]. 10th ed Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2017.
- [74] Weston K S, Wisloff U, Coombes J S. High-intensity interval training in patients with lifestyle-induced cardio-metabolic disease: A systematic review and meta-analysis[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2014, 48(16): 1227–1234.
- [75] Lucas S, Cotter J D, Brassard P, et al. High-intensity interval exercise and cerebrovascular health: Curiosity, cause, and consequence[J]. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 2015, 35(6): 902–911.

## Exercise promotes brain health: Evidence from behavioral and brain sciences

JIN Xinhong, DING Yuxiang, ZHOU Chenglin\*

School of Psychology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China

**Abstract** This paper reviews the possible neural mechanisms of the physical activity in promoting the brain health, including the molecular, cellular, and organ-level mechanisms (the brain structure and functions). According to the empirical researches, the behavioral and brain science evidences show that the exercise does promote the brain development in children and adolescents and delay the cognitive decline in the elderly. It is suggested that the attention should be paid to the multidisciplinary intersection to explore the causal relationship of the potential mechanisms how the exercise promotes the brain health, to build a multimodal predictive model, and to develop personalized optimal exercise intervention programs for different populations based on the key mechanisms. In the future, large-sample longitudinal studies can be carried out to provide a scientific basis and a practical guidance for the exercise intervention as an auxiliary means for the clinical treatment of related diseases.

**Keywords** brain health; children and adolescents; the elderly; exercise intervention ●



(责任编辑 卫夏雯)