

体育运动对个体脑功能及认知的影响： 从一般结构到序列运动机制

徐 苒

苏州大学教育学院，江苏 苏州

收稿日期：2026年2月28日；录用日期：2026年4月2日；发布日期：2026年4月16日

摘 要

本文综述了运动能力会如何影响认知与脑功能，探讨了体育运动对大脑结构和功能的影响。通过分析现有研究，分别从脑细胞活性和脑结构、认知功能，以及运动中的有序运动——序列动作学习对脑功能的影响展开论述。特别关注了序列运动中个体对动作时间预估能力越好时的脑功能特点。

关键词

运动能力，认知能力，序列运动，神经振荡

The Impact of Physical Exercise on Individual Brain Function and Cognition: From General Structure to Sequential Motor Mechanisms

Ran Xu

School of Education, Soochow University, Suzhou Jiangsu

Received: February 28, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 16, 2026

Abstract

This paper reviews how motor ability affects cognitive and brain functions, and explores the impact of physical exercise on brain structure and function. By analyzing existing research, it discusses from

aspects such as brain cell activity and brain structure, cognitive functions, and the orderly movement in exercise—sequence action learning on brain functions. Special attention is paid to the brain function characteristics when individuals have better ability to predict the timing of actions in sequence movements.

Keywords

Motor Ability, Cognitive Ability, Sequence Movement, Neural Oscillation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会的进步和人类生活方式的改变,体育运动锻炼对身心健康的影响已经得到越来越多的认识。然而,体育运动锻炼的认知益处在大数人中仍然相对被低估(宋小凤, 2015),特别是忽略了对于儿童青少年成长的益处。

儿童青少年教育一直都是我国教育领域高度关注的重点问题,也是运动科学的重要研究课题。近年来,体育运动作为促进身心健康的有效途径之一,逐渐受到人们的普遍认可,已成为学校教育中不可或缺的关键环节。一项对 1490 名青春期儿童进行的随机对照实验发现,相较于课堂上不参加体育活动的儿童,经常参加体育活动的儿童总体学业成绩有所提高(Donnely et al., 2009)。另一项研究分别考察了急性身体活动(Acute Physical Activity)和认知参与在干预儿童执行功能中的作用,发现认知参与程度对认知功能测试成绩无影响,而急性身体活动(如运动游戏)提高了儿童解决视觉空间刺激冲突干扰的认知速度。与此同时,这项研究通过不同年龄组儿童对比发现,随着年龄的增长,解决干扰的准确性和总体反应时间均有所提高(Best, 2012)。这两项研究说明体育运动干预能够对学业成绩产生积极影响并且能够提高儿童的认知速度,对认知发展尤为重要。同时儿童也会受到自身固有的运动能力的影响,但自身运动能力更多与先天遗传因素有关。而本文中关注的“体育运动干预”,其本身作为一种干预手段或长期练习后对脑与认知的影响,强调通过后天有计划地参与体育活动而对个体带来优势影响。

体育运动如何通过人类的生理机制提升大脑功能效益已经成为研究的焦点。多项研究表明,体育运动可以通过增加神经递质的含量,改善细胞血流环境,促进神经胶质细胞再生以及提高突触可塑性等途径,为大脑提供必要的营养和能量,同时增强大脑的可塑性。这些效益与认知功能的增强密切相关(Voss et al., 2013)。例如,一项研究发现,体育运动可以显著增加神经发生的概率(Kronenberg et al., 2003)。

因此,经常参加体育运动的儿童在多个方面表现卓越,这一现象不仅与其身体素质密切相关,还与其大脑功能得到促进息息相关。近年来,脑科学研究逐渐揭示了体育运动对大脑多方面的影响。本文旨在综述这些研究成果,探讨体育运动干预如何改变人们的认知和脑功能特点。

2. 体育运动对大脑结构和功能的影响

2.1. 脑细胞活性和脑结构

体育运动能够增强脑细胞的活性并改善大脑结构,进而提升注意力水平、改善认知功能,并在压力缓解中发挥积极作用。有氧运动在不同生命阶段通过多种机制影响大脑和认知能力,尤其在儿童和老年个体中表现得尤为显著。

自 1921 年洛伊首次发现外周神经递质以来,神经递质的研究已从外周系统逐步扩展到中枢神经系统。目前已确认中枢神经递质种类多达数十种,主要包括氨基酸类递质、单胺类递质、肽类递质和胆碱类递质等。在运动研究中,重点关注的中枢神经递质包括氨基酸类递质、单胺类递质和肽类递质。具体而言,氨基酸类递质可分为兴奋性和抑制性两类,其中主要的抑制性递质包括 GABA 和甘氨酸(Gly),而谷氨酸(Glu)则是主要的兴奋性氨基酸。这些神经递质参与调控神经系统的多种生理功能,包括运动协调、感觉处理、内分泌调节以及镇痛作用等重要生理过程(王丽娜,郭旭昌,2002)。

一项研究以射击运动员为研究对象,专业射击运动员与新手在静息状态下显示出明显的神经功能差异。研究结果发现,专业射击员在左脑颞叶区、左脑后颞叶区、左脑额叶区、左脑中央区以及右脑顶叶区展现出更强的功能连接。此外,专业射击员在 theta 节律(4-8 Hz)和低 alpha 节律(8-13 Hz)中表现出更高的网络聚类系数和特征(Gong et al., 2019)。另一方面,研究揭示了静息状态下脑电节律与射击准确度之间的关系。全脑高 beta 节律的强度较低与额叶和顶叶、额叶和枕叶之间的连接强度较低相关,这表明大脑网络的重构能力越强,射击反应时间越短,射击准确度越高(Rogala et al., 2020)。射击训练从新手到专业水平的过程不仅显著改变了神经功能,还可能导致神经结构的变化。此外,通过射击类游戏进行的研究显示,这类训练能够显著提升静息状态下左丘脑和左海马旁回之间的功能连接(Momi et al., 2021),并增加双侧海马旁皮质、躯体感觉皮质、顶叶以及右侧脑岛的皮质厚度(Momi et al., 2018)。

综上所述,体育运动确实有利于促进神经元的发育和成熟,增加神经元网络的复杂连接,并提高神经元的活跃度和神经递质水平。此外,体育运动还能促进不同脑区之间的功能连接,对改善脑细胞的活动和脑结构的成熟化具有显著的益处。

2.2. 认知功能

体育运动对认知功能的影响主要表现在记忆、感知-运动协调、对动作的预期和执行动作功能等多个方面。研究显示,运动能够通过改变脑结构和功能来促进认知功能的提升。

研究表明,体育运动能促进动物大脑中神经元的生长和发育,特别是影响海马区域,例如一项研究表明,体育锻炼不仅能增加海马和小脑等脑区结构的体积,还影响脑区的激活水平和功能连接(夏海硕等, 2018)。运动刺激可以增加神经发生,即新神经元的产生,这对于学习和记忆功能至关重要。例如,一项动物研究表明,与控制组不运动的小鼠相比,跑步干预提升了小鼠海马神经发生、脊髓神经密度、突触可塑性以及神经营养蛋白水平,并显著提高了其空间记忆能力(Van Praag, 2008)。此外,不同类型的体育运动对各种群体的多种认知功能均具有促进作用,并且相关的生理机制也在不同层面上得到了深入研究。在微观层面上,体育运动有助于改善脑细胞的营养供应和能量代谢,促进神经元的存活和突触形成。增加突触的可塑性,即神经元之间连接的灵活性,有助于记忆形成和信息处理。运动会提高动物大脑中的神经营养蛋白水平,如脑源性神经营养因子(简称“BDNF”),这些蛋白质有助于神经元的生存和功能(乔玉成, 2022)。高水平的 BDNF 与更好的学习和认知能力相关联。通过促进神经发生和突触可塑性,体育运动有助于改善动物在空间记忆任务和其他学习任务中的表现。这是因为运动能够提高大脑中与空间导航和记忆相关的结构的功能和容量。动物在进行体育运动后,往往在学习任务中表现更佳。这可能与运动后大脑神经元的兴奋性增加、神经递质释放增加以及更高的注意力水平相关(蕊付等, 2021)。

综上所述,体育运动的训练有效地促进了生物认知能力的发展,特别是在记忆和运动动作预期方面。

2.3. 序列运动对脑功能的影响

以上章节分别从宏观的脑结构以及微观的神经机制两方面综述了体育运动对基础认知功能(如工作记忆)的促进作用。然后,在现实生活中的体育运动,特别是技巧性项目,往往设置一系列的动作,即序

列运动。序列运动是一种需要按照特定时空顺序执行动作的模式，对运动者的要求更高，需要整合内外部线索进行精准的时间与空间预测，是连接基础认知(注意力、记忆)与高级脑网络功能的绝佳切入点，为深入探讨大脑在复杂环境中如何实施运动提供了机会。

序列运动是指通过按照特定顺序执行一系列动作或动作组合来完成的任务或达成特定的运动目标。这类运动通常涉及复杂的协调和精确的动作控制，要求运动者按照预定的顺序和时间完成一系列步骤。序列运动可以涵盖多种运动形式，包括体操、舞蹈、某些体育项目中的特定技术要求等。这种类型的运动不仅仅要求运动员在身体上具备灵活性和力量，还需要有高度的注意力、精准的运动技能和反应能力。研究序列运动能够更加理解运动技能学习的原理，探索运动控制和协调的神经机制，从而改变运动训练和技能习得的方法，并且有助于了解大脑如何计划、执行和调制复杂的动作序列，去探究大脑对预测运动动作时大脑皮层、基底节、小脑等结构的作用和相互作用。

序列运动分为两个部分，空间位置序列和时间序列。目前大部分研究聚焦于对于序列运动的时间预测上，也就是对序列运动的时间间隔进行操控，利用神经影像学及电生理技术对大脑参与时间预估过程的神经活动进行探究，发现了一些与时间预估相关的 ERP 成分和神经振荡活动。

例如功能磁共振成像研究表明，对后续感觉刺激的预测得到了几个大脑区域的支持，主要包括补充运动区(Supplementary Motor Area: SMA) (Haggard & Whitford, 2004)、小脑(Baumann et al., 2015; Blakemore et al., 2001; Leube et al., 2003; Roth et al., 2013)，后顶叶皮层(Posterior Parietal Cortex: PPC)，如角回(David et al., 2007; Farrer et al., 2008; van Kemenade et al., 2017)和颞中回(Middle Temporal Gyrus: MTG) (Leube et al., 2003)。

关于序列运动中时间预测对神经振荡活动影响的研究主要涉及 Theta 振荡与 Beta 振荡。Theta (4~7 Hz)频段神经振荡的活动在一些与时间知觉有关的研究中被观察到相应的激活，有研究者指出 theta 频段也可能参与时间信息的加工(Heusser et al., 2016; Kikumoto & Mayr, 2018)。一项任务要求被试在一个视觉线索出现后的 500 ms 至 2500 ms 的时间范围内做出抓握杠杆的动作，结果发现，在个体做出抓握杠杆的动作前 500 ms 左右开始会出现一个 theta 频段的振荡(Tomassini et al., 2015)。源自大脑初级运动皮层及感觉运动皮层的 beta 节律(15~30 Hz)是与运动极其相关的脑电指标，在运动时会产生稳定的振荡模式，具体地说，beta 节律在运动前约 500ms 能量开始显著下降(Event-Related Desynchronization, ERD)，呈现强烈的去同步化状态，并在整个运动执行过程中维持能量抑制的状态(Cheyne et al., 2014; Wilson et al., 2010)。而在运动结束后 500 ms 左右，beta 节律较基线水平显著增强(Gaetz et al., 2010; Pfurtscheller et al., 1997)，这种 beta 事件相关同步(Event-Related Synchronization, ERS)被称为运动后 beta 回复/同步增强(Postmovement Beta Rebound/Synchronization, PMBR/PMBS) (Heinrichs-Graham et al., 2014; Wilson et al., 2010)。很多研究将 beta 振荡与时间预估相关联，例如一项研究引入四种动作间时间间隔，考察不同年龄组的运动区 PMBR 在不同动作间隔下的变化，发现成人在大致相同的时间到达峰值，儿童在下个刺激到来时到达峰值。说明成人可以独立于外部刺激的情况下提前开始运动准备，而儿童还不能成熟地估计时间，只能依赖于自下而上的时间线索(张伶俐, 2021)。成人比儿童有更多的运动经验，运动能力也比儿童好，所以不难推测，随着运动能力的增长，会影响大脑运动区 beta 振荡的程度，特别是 PMBR 的改变能够反映对序列运动的时间估计。

3. 总结

体育运动不仅能够增强脑细胞的活性和改善脑结构，还能促进认知功能的发展和神经振荡的激活水平。上述研究表明，体育运动对大脑的结构和功能具有持久的有益影响，对于提高神经系统中细胞、分子和神经回路的功能，以及改变大脑结构和功能连接等多个方面均有显著作用。这些效应特别在促进儿

童和青少年认知功能方面具有重要意义(Etnier et al., 2014)。因此,将体育运动与教育结合起来被视为促进儿童和青少年大脑健康发育的有效策略,有助于提升其整体健康素质(周成林,金鑫虹,2021)。

尽管过往研究已经取得丰富的结果,但仍存在一定的局限性。首先,实验研究中多采用横断设计,例如关注运动员与普通人的差异,难以揭示长期进行体育运动干预如何动态地影响大脑的发育过程,未来需要从纵向追踪研究中来描绘其发展轨迹,针对不同年龄段儿童青少年进行研究,探索何种运动类型对发育中的儿童青少年的健脑效果最佳,为体育运动如何促进脑发育提供更加科学的依据。其次,目前的研究方法上多采用脑电(EEG)研究,其虽具备较高的时间分辨率,能够精准观测到神经振荡活动,但其空间分辨率有限,不能精准定位深部脑区的活动,未来需要结合空间分辨率高(如功能磁共振成像技术)进一步研究体育运动所带来的深部脑区的变化。

参考文献

- 乔玉成(2022). 体育何以能够提升学业成绩——脑神经科学解释框架. *沈阳体育学院学报*, 41(4), 43-49.
- 蕊付, 桂芝徐, 海军朱, 冲丁(2021). 经颅磁刺激对学习记忆及大脑神经突触可塑性影响的研究进展. *生物医学工程学报*, 38(4), 783.
- 宋小凤(2015). 体育运动对大脑结构与功能的塑造. *佳木斯职业学院学报*, (10), 343-344.
- 王丽娜, 郭旭昌(2002). 运动与脑活性物质(综述). *体育学刊*, 9(6), 52-54.
- 夏海硕, 丁晴雯, 庄岩, 陈安涛(2018). 体育锻炼促进认知功能的脑机制. *心理科学进展*, 26(10), 1857.
- 张伶俐(2021). *运动后Beta节律回复增强受后续动作计划影响探究*. 硕士学位论文, 苏州: 苏州大学.
- 周成林, 金鑫虹(2021). 从脑科学诠释体育运动提升学习效益的理论与实践. *上海体育学院学报*, 45(1), 20-28.
- Baumann, O., Borra, R. J., Bower, J. M., Cullen, K. E., Habas, C., Ivry, R. B. et al. (2015). Consensus Paper: The Role of the Cerebellum in Perceptual Processes. *The Cerebellum*, 14, 197-220. <https://doi.org/10.1007/s12311-014-0627-7>
- Best, J. R. (2012). Exergaming Immediately Enhances Children's Executive Function. *Developmental Psychology*, 48, 1501-1510. <https://doi.org/10.1037/a0026648>
- Blakemore, S., Frith, C. D., & Wolpert, D. M. (2001). The Cerebellum Is Involved in Predicting the Sensory Consequences of Action. *Neuroreport*, 12, 1879-1884. <https://doi.org/10.1097/00001756-200107030-00023>
- Cheyne, D., Jobst, C., Tesan, G., Crain, S., & Johnson, B. (2014). Movement-Related Neuromagnetic Fields in Preschool Age Children. *Human Brain Mapping*, 35, 4858-4875. <https://doi.org/10.1002/hbm.22518>
- David, N., Cohen, M. X., Newen, A., Bewernick, B. H., Shah, N. J., Fink, G. R. et al. (2007). The Extrastriate Cortex Distinguishes between the Consequences of One's Own and Others' Behavior. *NeuroImage*, 36, 1004-1014. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.030>
- Donnelly, J. E., Greene, J. L., Gibson, C. A., Smith, B. K., Washburn, R. A., Sullivan, D. K. et al. (2009). Physical Activity across the Curriculum (PAAC): A Randomized Controlled Trial to Promote Physical Activity and Diminish Overweight and Obesity in Elementary School Children. *Preventive Medicine*, 49, 336-341. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2009.07.022>
- Etnier, J., Labban, J. D., Piepmeyer, A., Davis, M. E., & Henning, D. A. (2014). Effects of an Acute Bout of Exercise on Memory in 6th Grade Children. *Pediatric Exercise Science*, 26, 250-258. <https://doi.org/10.1123/pes.2013-0141>
- Farrer, C., Frey, S. H., Van Horn, J. D., Tunik, E., Turk, D., Inati, S. et al. (2008). The Angular Gyrus Computes Action Awareness Representations. *Cerebral Cortex*, 18, 254-261. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm050>
- Gaetz, W., MacDonald, M., Cheyne, D., & Snead, O. C. (2010). Neuromagnetic Imaging of Movement-Related Cortical Oscillations in Children and Adults: Age Predicts Post-Movement Beta Rebound. *NeuroImage*, 51, 792-807. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.01.077>
- Gong, A., Liu, J., Lu, L., Wu, G., Jiang, C., & Fu, Y. (2019). Characteristic Differences between the Brain Networks of High-Level Shooting Athletes and Non-Athletes Calculated Using the Phase-Locking Value Algorithm. *Biomedical Signal Processing and Control*, 51, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.02.009>
- Haggard, P., & Whitford, B. (2004). Supplementary Motor Area Provides an Efferent Signal for Sensory Suppression. *Cognitive Brain Research*, 19, 52-58. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2003.10.018>
- Heinrichs-Graham, E., Wilson, T. W., Santamaria, P. M., Heithoff, S. K., Torres-Russotto, D., Hutter-Saunders, J. A. L. et al. (2014). Neuromagnetic Evidence of Abnormal Movement-Related Beta Desynchronization in Parkinson's Disease. *Cerebral Cortex*, 24, 2669-2678. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht121>

- Heusser, A. C., Poeppel, D., Ezzyat, Y., & Davachi, L. (2016). Episodic Sequence Memory Is Supported by a Theta-Gamma Phase Code. *Nature Neuroscience*, *19*, 1374-1380. <https://doi.org/10.1038/nn.4374>
- Kikumoto, A., & Mayr, U. (2018). Decoding Hierarchical Control of Sequential Behavior in Oscillatory EEG Activity. *Elife*, *7*, e38550.
- Kronenberg, G., Reuter, K., Steiner, B., Brandt, M. D., Jessberger, S., Yamaguchi, M. et al. (2003). Subpopulations of Proliferating Cells of the Adult Hippocampus Respond Differently to Physiologic Neurogenic Stimuli. *Journal of Comparative Neurology*, *467*, 455-463. <https://doi.org/10.1002/cne.10945>
- Leube, D. T., Knoblich, G., Erb, M., Grodd, W., Bartels, M., & Kircher, T. T. (2003). The Neural Correlates of Perceiving One's Own Movements. *NeuroImage*, *20*, 2084-2090. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.07.033>
- Momi, D., Smeralda, C. L., Di Lorenzo, G., Neri, F., Rossi, S., Rossi, A. et al. (2021). Long-Lasting Connectivity Changes Induced by Intensive First-Person Shooter Gaming. *Brain Imaging and Behavior*, *15*, 1518-1532. <https://doi.org/10.1007/s11682-020-00350-2>
- Momi, D., Smeralda, C., Sprugnoli, G., Ferrone, S., Rossi, S., Rossi, A. et al. (2018). Acute and Long-Lasting Cortical Thickness Changes Following Intensive First-Person Action Videogame Practice. *Behavioural Brain Research*, *353*, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2018.06.013>
- Pfurtscheller, G., Stancák, A., & Edlinger, G. (1997). On the Existence of Different Types of Central Beta Rhythms below 30 Hz. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *102*, 316-325. [https://doi.org/10.1016/s0013-4694\(96\)96612-2](https://doi.org/10.1016/s0013-4694(96)96612-2)
- Rogala, J., Kublik, E., Krauz, R., & Wróbel, A. (2020). Resting-State EEG Activity Predicts Frontoparietal Network Reconfiguration and Improved Attentional Performance. *Scientific Reports*, *10*, Article No. 5064. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61866-7>
- Roth, M. J., Synofzik, M., & Lindner, A. (2013). The Cerebellum Optimizes Perceptual Predictions about External Sensory Events. *Current Biology*, *23*, 930-935. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.027>
- Tomassini, A., Spinelli, D., Jacono, M., Sandini, G., & Morrone, M. C. (2015). Rhythmic Oscillations of Visual Contrast Sensitivity Synchronized with Action. *The Journal of Neuroscience*, *35*, 7019-7029. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4568-14.2015>
- van Kemenade, B. M., Arikan, B. E., Kircher, T., & Straube, B. (2017). The Angular Gyrus Is a Supramodal Comparator Area in Action-Outcome Monitoring. *Brain Structure and Function*, *222*, 3691-3703. <https://doi.org/10.1007/s00429-017-1428-9>
- van Praag, H. (2008). Neurogenesis and Exercise: Past and Future Directions. *NeuroMolecular Medicine*, *10*, 128-140. <https://doi.org/10.1007/s12017-008-8028-z>
- Voss, M. W., Vivar, C., Kramer, A. F., & van Praag, H. (2013). Bridging Animal and Human Models of Exercise-Induced Brain Plasticity. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*, 525-544. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.08.001>
- Wilson, T. W., Slason, E., Asherin, R., Kronberg, E., Reite, M. L., Teale, P. D. et al. (2010). An Extended Motor Network Generates Beta and Gamma Oscillatory Perturbations during Development. *Brain and Cognition*, *73*, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.03.001>