



# 锻炼对脑老化的影响及其机制

蒋长好<sup>1</sup>,高志青<sup>2</sup>,陈婷婷<sup>3</sup>

**摘要:** 当前我国老年人口快速增长,老年人是人口中的脆弱年龄群体,其大脑机能衰退,认知功能下降、老年痴呆的发病率也在逐年升高。因此,如何保持老年人认知和脑功能已成为近年心理学研究的重要问题。已有的行为研究表明,锻炼可以减缓老年人的认知功能衰退,提高执行功能;近年大量的脑影像研究发现,锻炼对老年人的大脑的结构和功能也有着可塑性影响。回顾了相关的研究进展,讨论了已有研究存在的不足,并提出未来相关研究需要深入探讨的问题。

**关键词:** 锻炼;老化;认知;脑结构;脑功能

中图分类号:G806 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2018)03-0065-06

DOI:10.12064/ssr.20180308

## Influence of Exercise on Aging and Its Mechanism

JIANG Changhao<sup>1</sup>, GAO Zhiqing<sup>2</sup>, CHEN Tingting<sup>3</sup>

(1. Capital Normal University Department of Psychology, Beijing 100048, China; 2. Beijing research institute of sports science Capital Normal University Department of Psychology, Beijing 100048, China;3.Beijing Key Lab of Physical Fitness Evaluation and Tech Analysis, Capital University of Physical Education and Sports, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The aging population is growing rapidly in China. The aged people is a vulnerable group, whose brain function is deteriorating, cognitive function is decreasing and the incidence of Alzheimer's Disease has become higher year by year. Therefore, how to maintain the cognition and brain function of the old people has become an important topic in recent psychological researches. Earlier behavior researches show that exercise may slow down the deterioration of old people's cognition function and promote executive function. A large amount of brain imaging studies in the recent years reveal that exercise also has a plasticity effect on the brain structure and function of the aged. The article reviews the relative research development, discusses the existing deficiencies and the issues need to be further studied in future researches.

**Key Words:** exercise; aging; cognition; brain structure ; brain function

当前我国逐渐迈入老龄化社会,老年人是人口中的脆弱群体,其身体机能衰退,同时认知功能下降、老年痴呆的发病率也在逐年升高。因此,如何保持老年人身心健康已日益受到社会重视。已有行为研究表明,锻炼不仅可以促进身体健康,也能减缓老年人的认知功能衰退。脑影像研究发现,锻炼能够缓解因年龄增长而出现的大脑退化现象,对老年人大脑结构、功能产生可塑性影响。本文对近年相关研究进展进行了回顾和分析。

## 1 锻炼改善大脑功能

### 1.1 锻炼增强大脑激活

老化会导致大脑神经资源不可逆转损失,妨碍大脑工作时所需的资源募集。已有研究表明,相比年轻人,老年人在完成认知任务特别是执行功能任务时脑激活更低<sup>[1]</sup>。但是,大量的脑科学研究发现,锻炼可以增强老年人的大脑脑区激活,逆转老化的不良影响。如一项研究采用事件相关电位(Event-relat-

收稿日期:2018-03-30

基金项目:国家体育总局科研课题(2015B040);国家自然科学基金(31771244);国家特殊需求博士人才培养项目(2016,2017)。

第一作者简介:蒋长好,男,副研究员。主要研究方向:锻炼心理学。E-mail:jiangchanghao@cupes.edu.cn。

作者单位:1.首都体育学院运动科学与健康学院,北京市海淀区北三环西路11号,北京1000191;

2.北京体育科学研究所,北京100191;3.首都师范大学心理系,北京100088。



ed Potentials, ERP)技术考察了锻炼对老年人大脑神经活动的影响。研究者以长期参加有氧锻炼的老年人、久坐少动的老年人及年轻人作为研究对象,比较了3组被试ERP的P3成分差异。研究发现,尽管老年人比年轻人P3潜伏期更长,但对比2组老年被试发现,长期参加有氧锻炼的老年人比久坐少动的老年人P3潜伏期更短,长期参加有氧锻炼的老年人和年轻人的P3潜伏期差异也更小,P3潜伏期越长,表明认知加工速度越慢<sup>[2]</sup>。这一结果提示,有氧锻炼有助于缓冲年龄相关的认知加工速度下降。另一项研究以60名老年人为被试,比较不同锻炼对老年人脑电相关成分波幅的影响。根据被试以前的锻炼经验,将他们分配到有氧运动组,协调运动组或对照组,在被试完成认知控制任务的同时记录其ERP。行为研究结果发现,锻炼组较之于非锻炼组、高体能被试较之于低体能被试,前者认知表现更好。ERP结果表明,锻炼组较之于非锻炼组,P3波幅更大、N450波幅更小<sup>[3]</sup>。研究者认为,P3波幅增强反映注意资源分配扩大,N450更小反映大脑前扣带激活更低,提示锻炼对脑功能的促进。

也有ERP研究比较了不同锻炼参与水平老年人的认知表现及脑电特征,考察锻炼对脑功能的影响。如一项研究按有氧锻炼水平将老年人分为高、中、低锻炼组,要求被试完成认知控制任务,同时记录其脑电。研究发现较之于有氧锻炼组,高、中锻炼水平组被试完成作业任务时P3波幅更高、潜伏期更短,提示高有氧锻炼组完成作业任务时大脑募集资源能力更强、加工速度更快<sup>[4]</sup>。另有研究者分析了经常参加锻炼的老年人、久坐少动的老年人及年轻人的脑电特征,考察被试在错误行动情况下,认知冲突评价引发的反应监控差异。发现经常参加锻炼的老年人及高体能的年轻人,在认知加工过程中错误关联负波(Error-related Negativity, ERN)的波幅明显小于久坐少动的老年人及低体能的年轻人。研究者认为,锻炼更多或体能更好的被试认知加工更好,表现为认知过程中抑制与监控能力更强<sup>[5]</sup>。

综上所述,经常参加有氧锻炼或体能更好的老年人,在认知加工过程中任务引发的P3潜伏期更短、P3波幅更大、ERN及M450潜伏期更短,表明加工速度更快、募集资源能力和抑制与监控能力更强。提示锻炼可以改变控制认知发展的大脑神经电活动,进而提升老年人的认知和脑功能。

与ERP技术相比,功能磁共振技术(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)的空间分辨率更高,可以更精确观察锻炼引发的脑功能变化。一些

fMRI的研究考察了锻炼对老年人大脑激活的影响。如一项研究发现,太极拳锻炼和训练结合,可显著提高老年人在连线测试(Trail Making Test, TMT)这一执行功能任务测验中的成绩,同时被试额中回(middle frontal gyrus)、额上回(superior frontal gyrus)和小脑前叶(anterior cerebellum lobe)的低频振荡振幅(Amplitude of Low Frequency Fluctuations, ALFF)也更高<sup>[6]</sup>,研究者认为,干预引发的ALFF变化可以作为预测老年人执行功能的一个指标。另有研究者比较了有氧锻炼和无氧锻炼干预对老年人认知任务表现和脑活动特征的影响,结果发现,6个月干预后,不同干预组的老年人认知表现和脑激活模式不同。有氧锻炼组的认知表现提高,上顶皮层和额中回的激活增加。无氧锻炼组的认知成绩提高则不明显,但前扣带回激活增加<sup>[7]</sup>。研究者认为,有氧锻炼干预后,前额叶对负责刺激分配和选择加工的纹状皮层和顶区的控制更有效。表明有氧锻炼改善体能,进而对老年人脑功能的整合起着积极作用。

## 1.2 锻炼改善脑网络

不仅如此,一些研究还发现运动和锻炼会影响脑网络。有研究者基于大脑局部一致性方法探测小球类运动员静息状态下脑功能活动的可塑性变化。研究者以小球类运动员和与之匹配的对照人群为研究对象,采集静息态功能磁共振数据,计算大脑局部一致性指标。研究发现,与对照组相比,运动员组在一些负责心脏—血管调节和反馈的自主神经反应环路的脑网络节点,诸如左侧前扣带回、脑岛、丘脑和小脑蚓部的局部一致性更高,提示这些脑区存在更有效的自主神经反应环路<sup>[8]</sup>。另一项研究比较了太极拳锻炼专家和新手的大脑一致性,发现太极拳锻炼专家的右侧中央后回(Right Post-central Gyrus, PosCG)功能一致性更高,左侧前扣带(Anterior Cingulate Cortex, ACC)和右侧背外侧前额叶(right Dorsal Lateral Prefrontal Cortex, rDLPFC)的功能一致性更低。左侧ACC的一致性降低表明功能特异性提高,右侧PosCG的一致性增加提示功能整合性提高,二者都可以用于预测老年人在Flanker这一执行功能任务中的成绩<sup>[9]</sup>。

也有研究采用全脑网络联接方法考察锻炼对老年人海马及脑网络的影响。结果发现,4个月的锻炼干预后,锻炼组比控制组的海马血流量增加,而且海马与前扣带回的联接增强<sup>[10]</sup>。还有研究考察了老年人有氧体能、默认模式网络和几种不同执行功能的关系,结果发现,老年人有氧体能水平与其执行功能



和默认模式网络功能联接正相关,且默认模式网络功能在有氧体能水平与其执行功能关系中扮演重要角色<sup>[11]</sup>。

综上所述,锻炼特别是有氧锻炼有助于提高老年人的脑功能激活、改善脑网络活动模式、提高认知表现。

## 2 锻炼影响大脑结构

锻炼不仅能增强大脑激活,提高脑网络的功能,也影响大脑结构。一些研究考察了锻炼对大脑结构的影响及与认知的关联。

### 2.1 锻炼对额区容量影响

#### 2.1.1 锻炼与额区灰质

大脑容量的增加可表现为大脑相关脑区灰质体积的增大。有研究者对不同专项运动员、非专业运动员做了一项大脑结构的比较研究,结果显示,长期的运动训练能改变大脑相关脑区的灰质体积<sup>[12]</sup>。对经常参加锻炼的老年人的研究也有类似结果。如一项研究考察了健康老年人的锻炼量和大脑灰质体积的关联,发现锻炼量更大的老年人,其大脑前额叶与扣带皮层的灰质体积的增加更明显<sup>[13]</sup>。也有研究发现,有氧体能和大脑前额叶灰质量相关联。锻炼影响老年人前额叶皮质的灰质体积,并通过增大灰质体积来增强执行功能<sup>[14]</sup>。

#### 2.1.2 锻炼与额区白质完整性

额区白质完整性也与多种认知功能相关联<sup>[15]</sup>。已有研究也发现,锻炼和大脑前额叶白质完整性相关联。一项研究考察了为期12个月的有氧锻炼干预对大脑白质完整性的影响。结果显示,有氧锻炼与额叶和颞叶中白质完整性的改变相关<sup>[16]</sup>。另有研究者以两组平均年龄为66岁的健康老年人为被试,考察心肺体能水平与白质微观结构,以及心肺体能和空间工作记忆之间的关联。研究发现,较高的心肺体能水平与前额叶、扣带回和胼体等脑区更高水平白质微观结构有关。此外,研究还显示,更高的有氧体能与更高水平的白质微观结构组织相关联,进而使老年人保持更好的空间记忆表现<sup>[17]</sup>。

#### 2.1.3 锻炼与额区灰质和白质影响比较

也有研究者对锻炼与额区灰质和白质关系做了比较。如一项研究将老年人随机指派到有氧干预组或无氧干预组,并以大学生作控制组。实验组进行为期6个月的锻炼干预,其中有氧锻炼组做步行运动,无氧锻炼组做拉伸和力量训练等运动。研究发现,参

加有氧锻炼的老年人额叶和颞叶的灰质容量增加,大脑前部的白质容量增加,而参加无氧锻炼的老年人和作为控制组大学生,其相关脑区容量没有增加<sup>[18]</sup>。Rovio等人完成的一项长达21年的追踪研究,也发现了锻炼对大脑灰质和白质的影响,在该研究前测时被试还是中年人,研究者采集了中年人的锻炼水平、生理指标,后测时被试已进入老年,研究者在后测中增加MRI数据采集,用于评估大脑体积、大脑灰质密度以及脑白质变化情况,研究发现基线条件下锻炼更多的人较之于久坐少动的人,老年重测时大脑额叶的灰质密度更大,但中年时身体锻炼情况与老年白质体积变化的关系不明显<sup>[19]</sup>。

### 2.2 锻炼与海马形态学的改变

海马是和记忆关联的重要脑区,在控制记忆、学习和平衡感等方面扮演着重要角色,海马也是老年人发生认知功能退化的关键区域。

动物研究发现,运动能够增加动物大海马的体积<sup>[20]</sup>。对老年人的研究也发现,有氧锻炼可以通过增加老年人海马的体积来保持良好的记忆功能,改善大脑结构<sup>[21]</sup>。有氧锻炼1年后,老年人左、右侧的前侧海马回体积分别增加2.12%与1.97%,而不锻炼的控制组则平均下降1.4%,而海马回体积与空间记忆表现呈显著正相关<sup>[22]</sup>。

人类海马的功能老化的一个重要特征是随着年龄的增长,血管可塑性逐渐降低。研究发现,锻炼可以增加脑氧供应,提高脑血流量和血红蛋白浓度,增加红细胞数量,促进海马细胞的生长,改善脑的记忆和注意等认知功能<sup>[23]</sup>。而且,锻炼引发的海马灌注量和体积变化与复杂空间物体识别记忆的变化及早期回忆正相关<sup>[24]</sup>。进一步的研究发现,有氧锻炼可增加海马齿状回的脑血流量。改善心血管功能、语言学习和记忆功能,海马齿状回的脑血流量增加也被视为神经生长的标志<sup>[25]</sup>。

当前,额叶和海马是脑影像研究众多关注的脑区。然而,锻炼对脑结构的影响脑区不限于此,如有研究发现,锻炼会使脊髓束感觉运动皮质厚度发生改变,从而对脑的可塑性产生影响<sup>[26]</sup>。

上述研究结果尽管不尽相同,但是都证实了锻炼特别是有氧锻炼对大脑容量的影响。有氧锻炼能维持大脑容量,明显改善衰老引发的大脑功能减退。

## 3 展望

### 3.1 锻炼对老化影响的时间进程

就锻炼干预而言,根据时间长短可以有一次性



锻炼和长时间锻炼(或慢性锻炼),尽管许多研究表明,一次性锻炼对大脑功能会产生积极影响,但总体而言,慢性锻炼对认知和脑功能的促进效益研究结果更为一致。就锻炼对大脑结构研究而言,不同的慢性干预研究持续时间也不一致,其结果也不尽相同。如有研究发现,锻炼对相关脑区的体积的影响可能在6个月的干预中没有发生,只有在12个月之后才会显露出来<sup>[27-28]</sup>。另有研究对久坐少动者进行6周的锻炼干预,干预前后对其进行大脑扫描。研究发现,有氧锻炼引发的海马体积改变是暂时的,在没有有氧锻炼的情况下,6周后海马体积回到基线<sup>[29]</sup>。研究者认为,海马体积在整个生命期间通过有氧锻炼而被调节。可见锻炼对大脑结构的影响是动态变化的,因此进一步的研究要关注锻炼对大脑变化的时间进程特征。

### 3.2 锻炼促进大脑可塑性的其他影响因素

锻炼改善认知功能、降低老化带来的不利影响,其脑机制是什么?有研究者提出,锻炼改善了大脑功能,进而产生认知效益;也有研究者提出,锻炼引发大脑结构变化,进而提高大脑功能。但是大脑结构是如何变化的呢?不同的研究者提出不同的证据。如有研究者发现,锻炼可以引起神经组织基因表达改变,进而影响脑网络,改变脑内DNA甲基化水平,导致脑网络的变化。研究者假设,DNA甲基化可能参与了运动促进老龄大鼠学习记忆功能与海马齿状回神经生长的调控<sup>[30]</sup>。也有研究者发现,神经可塑性的增加以及某些功能的改善受到了中枢和外周因素的共同作用。大脑中神经生长因子水平的增加可能是由运动肌肉分泌的肌肉因子、肝脏分泌的肝脏因子和脂肪分泌的脂肪细胞因子的综合影响而引发,上述不同器官分泌的因子,可借助器官间的通讯来调节机体的功能。已有研究证明肌肉分泌因子是运动促进认知功能的重要介导因子之一<sup>[31]</sup>。

也有研究发现,有氧锻炼可以促进大脑新的微血管网络形成,增强皮质对维生素B吸收的亲中性,并增加大脑多巴胺受体,促进脑源性神经因子表现。还有研究者提出,锻炼在神经营养方面促进神经液循环和脑源性神经因子增多;在脑血管方面促进神经血管耦合,提高血管反应性,增强血管自动调节;在神经代谢方面,促进能量平衡,增强线粒体活性<sup>[32]</sup>。

总之,这方面的研究日趋活跃,但还需要多学科协作、结合多种研究技术手段进一步补充证据、验证相关假设。

### 3.3 不同锻炼类型对脑健康影响的区分

锻炼细分为不同的类型,一些研究者将不同类型锻炼对脑与认知的影响做了比较,但是结果不太统一。早期的干预研究发现,有氧锻炼和无氧锻炼对大脑的功能和结构的影响不同。如研究者比较了6个月干预后,有氧锻炼和无氧锻炼组老年人完成认知任务时的脑活动特征,发现有氧锻炼组上顶皮层和额中回的激活增加,无氧锻炼组前扣带回激活增加<sup>[7]</sup>。另有研究发现参加有氧锻炼的老年人额叶和颞叶的灰质容量增加,大脑前部的白质容量增加,而参加无氧锻炼的老年人相关脑区容量没有增加<sup>[18]</sup>。

但是也有研究发现,无氧锻炼也可增加相关脑区容量。如近期的一项横断研究招募了两组平均年龄在68岁的老年人为被试,一组有跳舞锻炼的习惯,另一组有耐力或柔韧性锻炼的习惯。结果显示,在18个月干预后,两组老年人的大脑海马左侧海马相关区域体积增加。但只有跳舞组显示左侧海马齿状回和右下托容量增加<sup>[33]</sup>。研究者认为,跳舞兼有氧体能训练、感知运动训练和认知训练,可能有助于相关脑区体积的增加。另有研究者比较了改善心血管功能的锻炼(如心肺体能和肌肉力量)和提高协调能力锻炼(如平衡、运动速度、精细协调)与老年人海马体积的关联。研究者进行了为期12个月的干预训练。结果显示运动体能,而不是代谢体能与海马体积相关。干预12个月后,心血管和协调训练导致海马体积增加<sup>[34]</sup>。

总之,当前关于不同锻炼对脑功能和结构影响的研究结果还存在比较大的争议,仍需要进一步探讨。未来的研究需要细分锻炼类型、控制相关变量,尤其要注意综合横断研究和追踪研究的结果,以利于得出更为明确的结论。

### 参考文献:

- [1] Picton T. W., Stuss D. T., Champagne S. C., et al. The effects of age on human event-related potentials[J]. *Psychophysiology*, 1984, 21(3): 312-326.
- [2] Dustman R. E., Shearer D. E., Emmerson R. Y. EEG and event-related potentials in normal aging[J]. *Progress in neurobiology*, 1993, 41(3): 369-401.
- [3] Chang Y. K., Chu I. H., Liu J. H., et al. Exercise Modality Is Differentially Associated with Neurocognition in Older Adults[J]. *Neural plasticity*, 2017,(1):1-11.
- [4] Hillman C. H., Belopolsky A. V., Snook E. M., et al. Physical activity and executive control: implications for



- increased cognitive health during older adulthood[J]. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2004, 75(2): 176-185.
- [5] Themanson J. R., Hillman C. H., Curtin J. J. Age and physical activity influences on action monitoring during task switching[J]. *Neurobiology of Aging*, 2006, 27(9): 1335-1345.
- [6] Yin S., Zhu X., Li R., et al. Intervention-induced enhancement in intrinsic brain activity in healthy older adults[J]. *Scientific reports*, 2014, 4:7309.
- [7] Colcombe S. J., Kramer A. F., Erickson K. I., et al. Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(9):3316-3321.
- [8] 陶中平,高晴,余意,等.基于局部一致性方法的小球类运动员脑可塑性变化研究[J].*成都体育学院学报*,2017,(6):98-102.
- [9] Wei G. X., Dong H. M., Yang Z., et al. Tai Chi Chuan optimizes the functional organization of the intrinsic human brain architecture in older adults[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2014, 6(2):74.
- [10] Burdette J. H., Laurienti P. J., Espeland M. A., et al. Using network science to evaluate exercise-associated brain changes in older adults[J]. *Frontiers in aging neuroscience*, 2010, 2(23):23.
- [11] Voss M. W., Erickson K. I., Prakash R. S., et al. Functional connectivity: a source of variance in the association between cardiorespiratory fitness and cognition?[J]. *Neuropsychologia*, 2010, 48(5): 1394-1406.
- [12] 吴殷,张剑,曾雨雯,等.不同类型运动项目对运动员大脑结构可塑性变化研究[J].*体育科学*,2015,35(4):52-57.
- [13] Flöel A., Ruscheweyh R., Krüger K., et al. Physical activity and memory functions: are neurotrophins and cerebral gray matter volume the missing link?[J]. *Neuroimage*, 2010, 49(3): 2756-2763.
- [14] Weinstein A. M., Voss M. W., Prakash R. S., et al. The association between aerobic fitness and executive function is mediated by prefrontal cortex volume[J]. *Brain, behavior, and immunity*, 2012, 26(5): 811-819.
- [15] Burzynska A. Z., Wong C. N., Voss M. W., et al. White matter integrity supports BOLD signal variability and cognitive performance in the aging human brain[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0120315.
- [16] Voss M. W., Heo S., Prakash R. S., et al. The influence of aerobic fitness on cerebral white matter integrity and cognitive function in older adults: Results of a one-year exercise intervention[J]. *Human brain mapping*, 2013, 34(11): 2972-2985.
- [17] Oberlin L. E., Verstynen T. D., Burzynska A. Z., et al. White matter microstructure mediates the relationship between cardiorespiratory fitness and spatial working memory in older adults[J]. *Neuroimage*, 2016, 131:91-101.
- [18] Colcombe S. J., Erickson K. I., Scaif P. E., et al. Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans[J]. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 2006, 61(11):1166-1170.
- [19] Rovio S., Spulber G., Nieminen L. J., et al. The effect of midlife physical activity on structural brain changes in the elderly[J]. *Neurobiology of aging*, 2010, 31(11): 1927-1936.
- [20] Firth J., Stubbs B., Vancampfort D., et al. Effect of aerobic exercise on hippocampal volume in humans: A systematic review and meta-analysis[J]. *NeuroImage*, 2018, 166:230-238.
- [21] Erickson K. I., Pralash R. S., Voss M. W., et al. aerobic fitness is associated with hippocampal volume in elderly humans[J].*hippocampus*,2009,19(10):1030-1039.
- [22] 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.
- [23] Carvalho A., Rea I. M., Parimon T., et al. Physical activity and cognitive function in individuals over 60 years of age: a systematic review[J]. *Clinical interventions in aging*, 2014, 9(3): 661.
- [24] Maass A., Düzel S., Goerke M., et al. Vascular hippocampal plasticity after aerobic exercise in older adults[J]. *Molecular psychiatry*, 2015, 20(5):585.
- [25] Pereira A. C., Huddleston D. E., Brickman A. M., et al. An in vivo correlate of exercise-induced neurogenesis in the adult dentate gyrus[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(13):5638-5643.
- [26] Langer N., Hnggi J., Müller N. A., et al. Effects of limb immobilization on brain plasticity[J]. *Neurology*, 2012, 78(3):182.
- [27] Voss M. W., Prakash R. S., Erickson K. I., et al. Plasticity of brain networks in a randomized intervention trial of exercise training in older adults[J]. *Frontiers in aging neuroscience*, 2010, 2(1):32.
- [28] Jonasson L. S., Nyberg L., Kramer A. F., et al. Aerobic exercise intervention, cognitive performance, and brain structure: results from the physical influences on brain in aging (PHIBRA) study[J]. *Frontiers in aging neuroscience*, 2017, 8:336.



- [29] Thomas A. G., Dennis A., Rawlings N. B., et al. Multi-modal characterization of rapid anterior hippocampal volume increase associated with aerobic exercise[J]. Neuroimage, 2016, 131:162-170.
- [30] Kaliman P., Párrizas M., Lalanza J. F., et al. Neurophysiological and epigenetic effects of physical exercise on the aging process[J]. Ageing research reviews, 2011, 10(4):475-486.
- [31] Moon H Y, van Praag H. On the run for hippocampal plasticity[J]. Cold Spring Harbor perspectives in medicine, 2017:a029736.
- [32] Moon H. Y., Becke A., Berron D., et al. Running-induced systemic cathepsin B secretion is associated with memory function[J]. Cell metabolism, 2016, 24(2):332-340.
- [33] Rehfeld K., Müller P., Aye N., et al. Dancing or fitness sport? the effects of two training programs on hippocampal plasticity and balance abilities in healthy seniors[J]. Frontiers in human neuroscience, 2017, 11:305.
- [34] Niemann C., Godde B., Voelcker-Rehage C. Not only cardiovascular, but also coordinative exercise increases hippocampal volume in older adults[J]. Frontiers in aging neuroscience, 2014, 6:170.

(责任编辑:刘畅)

(上接第 64 页)

### 参考文献:

- [1] 李明.湖北省青少年业余体育训练的发展及改革对策研究[D].华中师范大学,2004.
- [2] 王怡.我国青少年业余训练发展困境与对策研究[J].西安体育学院学报,2015(6):705-708.
- [3] 王焕福,张立.体育科技的内涵及其服务于实践的途径[J].体育科学,1992(6):13-16.
- [4] 董海军.科技对我国竞技体育发展的作用研究[J].体育世界(学术),2015(10):20-22.
- [5] 金广江,杜世权.试论培养高级体育科技人才的新途径[J].武汉体育学院学报,2000,25(3):95-97.
- [6] 卢天凤,司虎克,王恩峰.竞技体育科技服务模式及影响因素[J].2007,28(4):25-29.
- [7] 汪俊祺.科学研究与运动训练相结合的组织形式研究(综述)[J].体育科研,2000(4):8-9,13.
- [8] 何培森,丛湖平.我国体育科技发展问题研究综述[J].中国体育科技,2005,41(4):21-24.
- [9] 赵海兵.对我国体育科技创新发展现状与发展对策的研究[J].当代体育科技,2015,18(2):2-3.
- [10] 马运超,纪仲秋,孙晋海.基于开放式创新的我国体育科研协同创新体系及运行机制研究[J].北京体育大学学报,2016,39(11):18-24.

(责任编辑:杨圣韬)