

·运动人体科学·

基于动态低频振幅的有氧运动训练后 大脑功能可塑性研究

赵海军¹, 李贞², 詹文峰³

(1.华南师范大学 体育科学学院, 广东 广州 510006; 2.华南师范大学 脑科学与康复医学研究院, 广东 广州 510631; 3.广东省第二人民医院 影像科, 广东 广州 510310)

摘 要: 为运动影响大脑功能、结构可塑性的神经机制研究提供客观的影像学证据。基于静息态功能磁共振成像和结构磁共振成像, 采用动态低频振幅及基于体素的形态学测量方法, 分析中等强度有氧训练后大脑功能活动及灰质体积的变化, 纳入 20 名健康成年被试者参与 6 个月有氧运动训练。采集所有被试者运动训练前后 rs-fMRI 和结构磁共振数据并进行 dALFF 及 VBM 分析, 提取差异脑区。结果显示: 6 个月中等强度有氧运动训练后, 右侧颞中回、海马旁回、中央后回、楔前叶等脑区的 dALFF 较训练前增高; 左侧额下回、额中回以及右侧的缘上回、角回等脑区的 dALFF 较训练前降低。研究认为, 中等强度有氧运动训练可以引起大脑执行控制网络及额顶网络相关脑区功能可塑性改变。

关 键 词: 运动生理学; 有氧运动; 动态低频振幅; 大脑可塑性; 静息态功能磁共振成像; 灰质体积

中图分类号: G804.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2021)06-0139-06

A study on brain functional plasticity after aerobic exercise based on the dynamic low-frequency amplitude

ZHAO Hai-jun¹, LI Zhen², ZHAN Wen-feng³

(1.School of Physical Education, South China Normal University, Guangzhou 510006, China;

2.Institute for Brain Research and Rehabilitation, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

3.Radiology of Guangdong Second Provincial General Hospital, Guangzhou, 510310, China)

Abstract: The purpose of this study is to provide objective imaging evidence for the study of the neural mechanism of the effect of exercise on brain functional (structural) plasticity. Based on resting state functional magnetic resonance imaging (rs-fMRI) and structural magnetic resonance imaging, dynamic amplitude of low-frequency fluctuation (dALFF) and voxel-based morphological (VBM) measurements were used to analyze the changes of brain functional activity and gray matter volume after moderate-intensity aerobic exercise. Both rs-fMRI and structural MRI data were collected for 20 healthy adult volunteers before and after 6 months of aerobic exercise. The data were separately used for dALFF and VBM analyses to identify regions showing aerobic exercise training related changes. Results show that compared with pre-exercise, 6-month aerobic exercise training induced significantly increased dALFF in the right middle temporal gyrus, right parahippocampal gyrus, right postcentral gyrus and right precuneus, and decreased dALFF in the left inferior frontal gyrus, left middle frontal gyrus, right supramarginal gyrus and right angular gyrus. The conclusion reveals moderate-intensity aerobic exercise can cause changes in the brain functional plasticity in some regions of executive control network and frontoparietal network.

收稿日期: 2021-03-23

基金项目: 广东省科技计划重点专项(2017A020215077)。

作者简介: 赵海军(1973-), 男, 副教授, 硕士, 研究方向: 运动与神经心理。E-mail: zhaohj@sncu.edu.cn

Keywords: sports physiology; aerobic exercise; dynamic amplitude of low-frequency fluctuation; brain plasticity; resting-state functional magnetic resonance imaging; gray matter volume

大脑是人体最为复杂、精密的器官,可塑性是大脑的本质属性,即脑可以被环境或经验所修饰,具有在外界环境和经验的作用下不断塑造其结构和功能的能力^[1]。国内外的研究证明,有氧运动对大脑可塑性的影响可在多方面得以体现,如胶质细胞体积增加、灰质体积增加和脑区间功能整合的改变^[2-3]。一些来自神经科学领域的研究则表明,定期的运动训练可促进大鼠海马齿状回颗粒下区的细胞体积增加^[4-5],而持续性的有氧运动能够增加老年人群灰质体积和白质纤维数量^[6]。此外,一些体能较高人群(如篮球运动员和羽毛球运动员)表现出额叶、颞叶及小脑半球的体积较成人健康对照组增大^[7],从事马拉松长跑运动员的枕顶叶、前扣带回和尾状核的灰质体积较正常人增大^[8]。除了运动从宏观水平上影响人脑结构可塑性的这些发现,许多神经功能相关的研究亦指出运动还能促进大脑血管形成,影响神经活动发生,并最终改变大脑功能可塑性。神经生理的基础性研究曾指出,专业运动员在接受相应的运动项目训练后,可以改变其神经突触长期增益效应(long-term potentiation, LTP),使神经细胞产生适应性(可塑性)变化^[9]。许多大脑局部神经功能的临床研究则发现,长期进行专项舞蹈练习的运动员双侧中央后回、左侧颞上回等脑区的局部一致性活动明显高于正常人群^[10]。最近,应用动态低频振幅的分析方法,有学者发现,乒乓球运动员在不同训练程度下可发生大脑(快速)运动平衡和视觉运动协调相关脑区的局部脑自发活动的变异性变化^[11]。基于前述动物和人体实验的研究表明,运动可以在一定程度上影响大脑功能、结构的可塑性。但是迄今为止,关于运动与大脑可塑性之间潜在的机制尚不明确。先前的研究亦主要关注的是运动员群体,正常人群相关的研究相对较少,导致运动与大脑可塑性的脑神经机制认识趋于局部化、片面化,且缺乏有力的实质性证据。

近年来新出现的功能磁共振技术(functional magnetic resonance imaging, fMRI)及一些先进的影像数据分析方法,能无创地提供活体大脑组织在功能、结构等方面的信息,被广泛地应用于大脑可塑性的研究。低频振荡振幅(amplitude of low-frequency fluctuation, ALFF)可表征自发性神经元活动的强弱,从能量代谢角度客观反映神经活动^[12]。但越来越多的最新研究表明,大脑活动随时间变化是动态的,基于大脑动力学的研究可以加深对人脑机制的理解^[13-14]。因此,有学者提出使用 ALFF 结合滑动窗的动态低频振幅(dALFF)

分析方法来研究人类大脑的动态局部脑活动,有助于提高研究结果的可靠性^[15-16]。据此,本研究拟采用 dALFF 的分析方法,对比正常人群有氧运动训练前后脑局部功能区域活动的差异,动态地从大脑神经元活动的层面探讨运动与大脑可塑性的神经机制,同时应用 VBM 计算方法,分析大脑灰质体积的变化情况,旨在为运动影响大脑功能、结构可塑性的神经机制研究提供客观的影像学证据。

1 材料与方法

1.1 一般资料

2020年6月—2020年12月,通过广告招募20例自愿参加体能训练的健康成人,其中男性7例、女性13例,平均(28.7±8.2)岁,初中文化程度5例、高中文化程度7例、大学文化程度8例。

筛选标准:右利手;双眼裸眼视力或矫正视力正常,无色弱或色盲;无脑部创伤,无精神障碍,无精神病、神经病或遗传病史,且目前精神状况良好;无严重躯体疾病,无其他可能影响脑功能与结构的疾病;无酒精或药物依赖史;满足广东省第二人民医院影像中心磁共振扫描检查清单中的要求,如体内无植入金属(金属假牙等),身体未装有电子、磁性或机械设备(如心脏起搏器、助听器)等。

所有被试者在进行磁共振扫描前均进行了全面的神经系统检查,排除中枢神经系统疾病。在实验开始前向所有被试者全面详细地介绍本实验的目的、操作流程以及注意事项。本研究通过广东省第二人民医院医学研究伦理委员会审核批准,所有被试者在检查前均详细告知实验内容及方法,并签署知情同意书。所有被试者在体能训练前后分别进行一次焦虑自评量表(SAS)和抑郁自评量表(SDS)的心理状态评估。

1.2 中等强度有氧运动训练方案

由一名高年资体育专业教师(20年教龄)指导所有被试者进行以下有氧运动项目(跑步、自行车、跳绳)训练,具体项目类型由被试者自己选择,采用HR(heart rate, HR)遥测仪(芬兰产RS800XSD型)监控运动强度,达到个体中等强度运动负荷的HR目标区开始计时,运动30 min/d, 3 d/周,训练周期为6个月。

1.3 设备及扫描参数

采用 Philips Ingenia 3.0 T 磁共振及 24 通道相控阵表面头线圈采集结构及功能磁共振数据。所有被试者均需要进行两次扫描,一次在入组后,一次在 6 个月

训练结束后。MRI 采集前首先进行常规序列的 MRI 平扫, 排除存在颅内器质性病变后再进行下述序列扫描。

1) 高分辨结构磁共振(3D-T1WI)数据采集采用 3D 快速场回波序列, 具体扫描参数如下: TR/TE=7.9/3.6 ms, 层厚/层间距=1 mm/0 mm, FOV=256 mm × 256 mm, Flip angle=8°, 矢状位连续扫描 185 层, 扫描时间为 5 min 56 s。

2) 静息态功能磁共振(Resting-state fMRI)数据采集采用梯度回波平面回波序列(GRE-EPI), 具体参数: TR/TE=2 000 ms/30 ms, 层厚=3 mm, 扫描层数=33, 层间距=0.7 mm, FOV=224 mm × 224 mm, Flip angle=90°, 扫描基线平行于前后联合线(AC-PC 线), 共采集 240 个时间点的全脑影像, 扫描时间为 8 min 6 s。

要求被试者在扫描过程中保持清醒、静息平卧于检查床, 平静呼吸, 自然放松, 固定头部并最大限度地减少头部及其他部位的主动与被动运动, 同时闭上眼睛处于休息状态, 尽量不要做任何思维活动。

1.4 数据预处理及分析

1) 采用 DPABI 对 BOLD-fMRI 原始数据进行预处理, 具体预处理步骤包括: (1) 首先去除前 10 个时间点的数据; (2) 层间时间差校正; (3) 头动矫正, 排除头动大于 1.5 mm 和 1.5° 的被试者; (4) 去除协变量及线性漂移来减少生理和头动的影响, 其中协变量包括白质信号、脑脊液信号和 24 个头动参数; (5) 标准化处理, 采用 DARTEL 方法将静息态 fMRI 数据配准到 MNI 标准空间; (6) 时间滤波(0.01~0.08 Hz), 如果是分析 ALFF, 则在计算 ALFF 后再进行滤波处理; (7) 空间平滑, 以半高全宽(full width at half maximum, FWHM)为 6 mm 的平滑核对标准化后的功能图像进行空间平滑。

2) 结构图像的预处理应用基于 SPM12 的 DARTEL 工具箱, 主要步骤: (1) 以前联合为坐标原点, 手动调整所有被试者的原始图像; (2) 对所有被试者的原始结构图像进行分割, 获得每位被试者的灰质图像; (3) 生成每组被试者的灰质模板; (4) 被试者之间配准: 所有被试者的灰质图像配准到生成的灰质模板; (5) 调整: 将灰质体积和密度图像进行 Jacobian 参数校正; (6) 平滑: 将分割后的灰质图像 FWHM 为 8 mm 的高斯核进行空间平滑; (7) 空间转化: 将平滑后的原始空间数据转化到 MNI 空间。

3) 动态低频振幅(dALFF)分析: 利用快速傅立叶变换对时间序列进行频率转换后, 在频带(0.01~0.1 Hz)计算每个频率下的功率谱求平方根, 在 0.01~0.1 Hz 内计算平均值, 得到平均 ALFF 值。其计算公式为

$$ALFF = \sum_{k: f_k \in [0.01, 0.1]} \sqrt{\frac{a_k^2(f_k) + b_k^2(f_k)}{N}}$$

其中, k 为求和的频率个数; f_k 为不同频率(0.01 ~

0.1 Hz); a_k 和 b_k 均为不同频率下对应的系数, N 为体素总个数。采用滑动窗方法进行动态分析^[7], 定义时间序列的最小频率 f_{min} , 选取 50 TRs(100 s)的最佳窗宽、步长 1 s 的窗口对 fMRI 时间信号进行动态截取, 最后应用方差量化平均 ALFF 值间的差异, 得到平均 dALFF 值。使用 DPARSF 软件中数据统计模块, 采用配对 t 检验, 比较所有被试者运动后与运动前 dALFF 差别, 并使用 GRF 校正, 设置的阈限水平为(体素 $P < 0.01$)。

4) 基于体素的灰质体积(VBM)分析: 基于平滑后的标准空间下的灰质图像(结构图像预处理后数据), 首先提取出两组被试者的全脑灰质体积, 然后采用双样本 t 检验比较所有被试者运动前、后是否存在灰质体积的改变, 结果采用 GRF 校正, 设置阈限水平(体素 $P < 0.01$)。

5) 相关分析: 提取所有被试者运动前后有统计学差异的脑区的平均 dALFF 值和灰质体积值, 将之与 SAS、SDS 评分进行 Spearman 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 人口统计学情况

人口统计学资料分析显示, 入组被试者在年龄、性别及受教育程度无明显统计学差异。有氧运动训练前后情绪量表评估无明显的统计学差异, 抑郁自评量表(SDS)平均得分为(24.9 ± 9.1)分($P=0.280$); 焦虑自评量表(SAS)平均得分为(45.9 ± 10.0)分($P=0.400$)。

2.2 6 个月中等强度有氧训练前后 dALFF 值及 VBM 分析结果

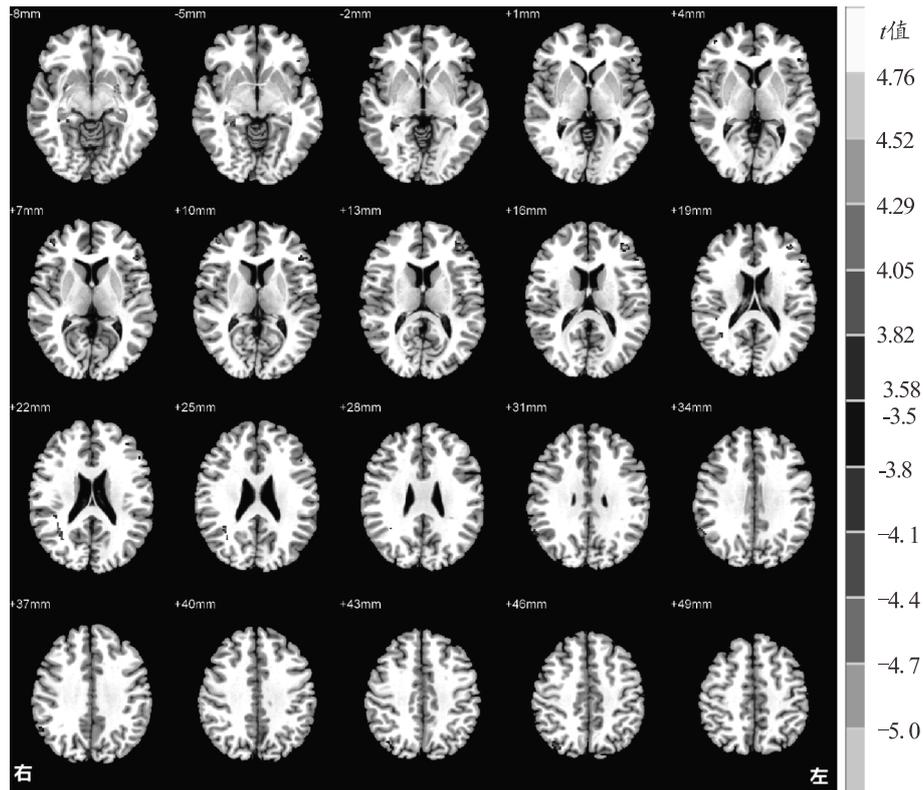
如表 1、2 及图 1 所示, 有氧运动训练后右侧颞中回、海马旁回、中央后回、楔前叶等脑区的 dALFF 明显增高; 而左侧额下回、额中回以及右侧的缘上回、角回等脑区的 dALFF 明显降低。运动训练前后灰质体积没有显著差异。

表 1 dALFF 值增高的脑区

大脑解剖学 区域	MNI坐标			激活 簇数	t 值	P 值
	X	Y	Z			
颞中回_R	62	36	-75	62	4.930 9	<0.001
海马旁回_R	27	-36	-6	32	4.876 4	<0.001
中央后回_R	33	33	-36	33	4.326 7	<0.001
楔前叶_R	37	9	-42	37	4.398 2	<0.001

表 2 dALFF 值降低的脑区

大脑解剖学 区域	MNI坐标			激活 簇数	t 值	P 值
	X	Y	Z			
额下回_L	68	-48	30	68	-4.680 6	<0.001
额中回_L	51	-39	42	51	-5.539 9	<0.001
缘上回_R	42	60	-57	42	-5.077 1	<0.001
角回_R	43	36	-75	43	-4.921 2	<0.001



图像中左上角的数值为 MNI 坐标 Z 轴的值, 右侧分数条(colorbar 色标)为 t 值区域; 图中红色的区域为运动后 dALFF 值升高的脑区, 蓝色的区域为运动后 dALFF 值降低的脑区。

图 1 运动前后被试者动态自发性活动异常的脑区

2.3 相关分析

运动训练后 dALFF 发生改变的脑区未发现与 SAS、SDS 得分存在显著相关性。

3 讨论

随着认知科学技术的发展, 在体育运动领域, 无论是运动员的认知加工特征, 还是运动锻炼对大脑认知能力的促进, 都受到了研究者的关注。大量的神经生物学研究表明, 有氧运动不仅可以通过促进脑源性神经营养因子(BDNF)、内啡肽等神经递质的释放来改善大脑功能活动, 干预认知行为形成过程; 还能影响神经元增生、血管增生、胶质细胞体积增加, 影响大脑微小结构(灰质体积及白质纤维等)的可塑性^[18]。据此, 本研究基于多模态磁共振技术及 dALFF 和 VBM 计算方法, 分析正常人群有氧运动前后大脑局部神经活动及灰质结构的差异, 探索运动对大脑功能、结构可塑性影响的影像学证据。研究结果显示, 被试者在 6 个月有氧运动后表现出异常的局部脑功能活动。与运动前相比, 所有被试者运动后表现出明显增高的 dALFF 在右侧颞中回、海马旁回、中央后回及楔前叶等区域, 而左侧额下回、额中回以及右侧的缘上回、

角回等脑区的 dALFF 明显降低。

颞中回在颞叶的中间部位, 与视觉、听觉、记忆和平衡等相关, 也参与动作的计划和加工, 包括动作观察、逻辑推理、物体识别等功能。先前的文献研究发现, 持续抗阻力训练 1 年后, 健康成人左侧前岛叶和左侧颞中回功能活动明显增加^[19]。一项来自老年人的联合干预(包括认知训练、心理咨询及有氧运动训练)研究同样也证实了长期的体育锻炼有助于强化大脑颞上回、颞中回等区域的局部脑神经活动^[20]。此外, 来自任务态功能磁共振的研究亦发现, 中等强度的单次急性有氧运动训练后, 颞中回、海马旁回及顶上小叶脑局部自发性神经活动明显增强^[21]。Burdette 等^[22]的功能磁共振研究则指出, 4 个月有氧运动干预后, 海马、海马旁等区域脑血流明显增加。近期有文献基于任务态脑功能磁共振研究得出结论, 有氧运动训练可以提高人脑的工作记忆能力。虽然工作记忆有一定的神经解剖基础, 但其仍然是灵活并且可以变化的, 运动可以通过激活海马以及相关区域的脑区从而提高工作记忆能力^[23-24]。本研究得到的结果与上述报道基本一致, 即在持续中等强度有氧运动后, 海马旁回以及颞上回脑区自发性神经活动明显增强, 提示运

动训练有助于增强上述脑区的功能可塑性。此外,鉴于海马旁回在工作记忆中有着很重要的作用,而颞上回在视觉、听觉、记忆和平衡等相关认知功能中起着重要的作用,说明中等强度有氧运动对提高人的工作记忆能力以及高级认知活动执行水平有一定的积极影响。

除了海马旁回及颞中回,右侧中央后回及楔前叶等区域的dALFF呈增高表现。虽然目前尚未检索到有氧运动影响上述两个区域局部神经活动的研究,但一些相关的研究给予了有益的提示。Wei等^[25]探索长期参加太极拳练习者的脑功能局部一致性研究发现:与正常组对比,太极拳练习组在右侧中央后回及楔前叶等区域局部功能一致性显著增强,进一步的相关分析则揭示,中央后回局部一致性结构与被试者太极拳锻炼经验显著相关。此外,长期进行专项练习的舞蹈运动员双侧中央后回、左侧颞上回等脑区的局部一致性活动明显高于正常人群^[10]。基于这些发现并结合本次研究的结果,推测适当的运动干预或体能训练可以增强局部自发性神经活动,且运动过程中对于视觉-空间整合能力及自我控制能力的要求,有助于改善大脑功能活动及高级认知执行,继而引发大脑功能可塑性改变。

与运动前相比,所有被试者运动后表现出左侧额下回、额中回及右角回等脑区dALFF明显降低的改变。前额叶皮层(额下回及额中回)、角回均为额顶网络内所包含的核心脑区,额顶网络作为一个整体,主要功能涉及躯体感、知觉和痛觉的处理。从神经科学的视角上讲,运动训练行为是由大脑调动相关脑区和脑部网络,控制身体和四肢的活动过程。先前的研究结果指出运动训练行为能够改变以前额叶为核心的大脑相应脑区的灰质体积和密度,整合额顶网络的内部一致性活动,改变额顶网络的功能活动模式^[26-27]。Wei等^[28]基于网络水平的自发性神经活动(ALFF)研究发现,太极拳运动组额顶网络静态低频振幅程度较正常对照组减低,且太极拳运动影响额顶网络的功能活动模式。进一步的相关分析表明,太极拳锻炼者执行控制能力增强,则额顶网络与腹侧注意网络之间的功能连接强度也随之增强;而太极拳锻炼经验时间越长,则额顶网络与默认网络之间的功能连接越低,进一步说明额顶网络是受太极拳运动影响较大的神经网络^[28-29]。本研究结果显示,有氧运动后额顶网络内的多个脑区(额下回、额中回、角回)dALFF的下降,与上述文献报道基本相符,同时也进一步证实了运动训练调节额顶网络的内部一致性活动这一观点。

本研究应用ALFF结合滑动窗的先进分析方法(dALFF),揭示了中等强度有氧运动训练对大脑局部神

经活动的影响,为研究正常人脑功能可塑性提供了客观的影像学证据。研究的不足在于只进行了单个时间点的纵向研究,未纳入体育专业人群或运动员人群进行相关的横向比较,且未纳入不同类型的有氧运动比较。此外,本研究中仅仅测量了抑郁、焦虑等情绪量表,未加入行为数据测量进行多元化相关分析。在后续研究中,结合多个人群、不同运动类型的横向及多时间点纵向数据,同时采集详尽的认知行为学数据,将更加深入地阐述有氧运动与大脑可塑性(结构或功能)变化之间的关系。

中等强度有氧运动训练后脑执行网络内相关脑区dALFF值增加,而额顶网络内相关脑区的dALFF值降低。本研究从静息态脑功能角度,进一步揭示中等强度有氧运动前后大脑功能可塑性的变化特点,为运动与大脑可塑性的后续研究提供客观的影像学证据。

参考文献:

- [1] KOLB B, WHISHAW I Q. Brain plasticity and behavior[J]. *Annu Rev Psychol*, 1998, 49: 43-64.
- [2] HOTTING K, RÖDER B. Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2013, 37(9 Pt B): 2243-2257.
- [3] CASSILHAS R C, TUFIK S, DE MELLO M T. Physical exercise, neuroplasticity, spatial learning and memory[J]. *Cell Mol Life Sci*, 2016, 73(5): 975-983.
- [4] PRAAG H. Neurogenesis and exercise: Past and future directions[J]. *Neuromolecular Med*, 2008, 10(2): 128-140.
- [5] VARMA V R, CHUANG Y F, HARRIS G C, et al. Low-intensity daily walking activity is associated with hippocampal volume in older adults[J]. *Hippocampus*, 2015, 25(5): 605-615.
- [6] TABEI K I, SATOH M, OGAWA J I, et al. Physical exercise with music reduces gray and white matter loss in the frontal cortex of elderly people: The mihama-kiho scan project[J]. *Front Aging Neurosci*, 2017, 9: 174.
- [7] TEIXEIRA C V, REZENDE T J, WEILER M, et al. Relation between aerobic fitness and brain structures in amnesic mild cognitive impairment elderly[J]. *Age (Dordr)*, 2016, 38(3): 51.
- [8] FREUND W, FAUST S, GASER C, et al. Regionally accentuated reversible brain grey matter reduction in ultra marathon runners detected by voxel-based morphometry[J]. *BMC Sports Sci Med Rehabil*, 2014, 6(1): 4.

- [9] KIM S H, KIM H B, JANG M H, et al. Treadmill exercise increases cell proliferation without altering of apoptosis in dentate gyrus of Sprague-Dawley rats[J]. *Life Sci*, 2002, 71(11): 1331-1340.
- [10] BURZYNSKA A Z, FINC K, TAYLOR B K, et al. The dancing brain: Structural and functional signatures of expert dance training[J]. *Front Hum Neurosci*, 2017, 11: 566.
- [11] 张牧, 黄月, 高晴, 等. 基于动态低频振荡振幅方法的乒乓球运动员脑可塑性变化[J]. *上海体育学院学报*, 2020, 44(6): 62-69.
- [12] ZANG Y F, HE Y, ZHU C Z, et al. Altered baseline brain activity in children with ADHD revealed by resting-state functional MRI[J]. *Brain Dev*, 2007, 29(2): 83-91.
- [13] ALLEN E A, DAMARAJU E, PLIS S M, et al. Tracking whole-brain connectivity dynamics in the resting state[J]. *Cereb Cortex*, 2014, 24(3): 663-676.
- [14] LEONARDI N, RICHIARDI J, GSCHWIND M, et al. Principal components of functional connectivity: A new approach to study dynamic brain connectivity during rest[J]. *Neuroimage*, 2013, 83: 937-950.
- [15] HAN S, WANG X, HE Z, et al. Decreased static and increased dynamic global signal topography in major depressive disorder[J]. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry*, 2019, 94: 109665.
- [16] TAGLIAZUCCHI E, CARHART-HARRIS R, LEECH R, et al. Enhanced repertoire of brain dynamical states during the psychedelic experience[J]. *Hum Brain Mapp*, 2014, 35(11): 5442-5456.
- [17] LEONARDI N, VAN DE VILLE D. On spurious and real fluctuations of dynamic functional connectivity during rest[J]. *Neuroimage*, 2015, 104: 430-436.
- [18] MULLER P, DUDERSTADT Y, LESSMANN V, et al. Lactate and BDNF: Key mediators of exercise induced neuroplasticity?[J]. *J Clin Med*, 2020, 9(4).
- [19] LIU-AMBROSE T, NAGAMATSU L S, VOSS M W, et al. Resistance training and functional plasticity of the aging brain: A 12-month randomized controlled trial[J]. *Neurobiol Aging*, 2012, 33(8): 1690-1698.
- [20] ZHENG Z, ZHU X, YIN S, et al. Combined cognitive-psychological-physical intervention induces reorganization of intrinsic functional brain architecture in older adults[J]. *Neural Plast*, 2015, 2015: 713104.
- [21] CHEN A G, ZHU L N, YAN J, et al. Neural basis of working memory enhancement after acute aerobic exercise: fMRI study of preadolescent children[J]. *Front Psychol*, 2016, 7: 1804.
- [22] BURDETTE J H, LAURIENTI P J, ESPELAND M A, et al. Using network science to evaluate exercise-associated brain changes in older adults[J]. *Front Aging Neurosci*, 2010, 2: 23.
- [23] JACK C J, KNOPMAN D S, JAGUST W J, et al. Tracking pathophysiological processes in Alzheimer's disease: An updated hypothetical model of dynamic biomarkers[J]. *Lancet Neurol*, 2013, 12(2): 207-216.
- [24] SPERLING R A, BATES J F, CHUA E F, et al. fMRI studies of associative encoding in young and elderly controls and mild Alzheimer's disease[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2003, 74(1): 44-50.
- [25] 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]. *Front Aging Neurosci*, 2014, 6: 74.
- [26] DIRK K L, BELFRY G R, HEATH M. Exercise and executive function during follicular and luteal menstrual cycle Phases[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2020, 52(4): 919-927.
- [27] HSU C L, BEST J R, WANG S, et al. The impact of aerobic exercise on fronto-parietal network connectivity and its relation to mobility: An exploratory analysis of a 6-month randomized controlled trial[J]. *Front Hum Neurosci*, 2017, 11: 344.
- [28] WEI G X, GONG Z Q, YANG Z, et al. Mind-body practice changes fractional amplitude of low frequency fluctuations in intrinsic control networks[J]. *Front Psychol*, 2017, 8: 1049.
- [29] YUE C L, ZHANG Y J, JIAN M, et al. Differential effects of Tai Chi Chuan (motor-cognitive training) and walking on brain networks: A resting-state fMRI study in Chinese women aged 60[J]. *Healthcare (Basel)*, 2020, 8(1): 67.