



注意捕获在体育锻炼影响老年人反应抑制中的作用机制： 一项基于体素形态学的研究

朱 昊, 吴雪萍*

(上海体育大学 心理学院, 上海 200438)

摘要:目的:分离知觉线索的注意捕获和反应抑制,进一步探讨注意捕获在体育锻炼影响老年人反应抑制中的作用机制。方法:采用横断设计,使用体育活动等级量表和三轴加速度计(ActiGraph GT3X+)对老年人的体育锻炼量进行测量,根据结果将被试分为运动组及对照组。2组被试完成经典停止信号任务、注意捕获任务和复杂任务3个行为实验,记录反应时和准确率,同时采集结构磁共振检测灰质体积。结果:1)运动组老年人的停止信号反应时显著优于对照组,且停止信号反应时与左侧辅助运动区灰质体积显著相关。2)运动组老年人的注意捕获反应时显著优于对照组,且注意捕获反应时与准确率均与右侧额下回灰质体积显著相关。3)运动组老年人的复杂任务反应时及准确率均显著优于对照组,且反应时与左侧辅助运动区、右侧额下回、右侧额上回、右侧额中回和右侧直回的灰质体积显著相关,准确率与右侧额下回的灰质体积显著相关。结论:1)运动组老年人的反应抑制优势源于更好地调节注意资源分配,加快了对冲突信号的注意捕获。2)运动组老年人在左侧中央前回、左侧辅助运动区、双侧额上回、右侧额中回、右侧额下回、右侧直回和右侧前/中扣带回表现出更大的灰质体积。3)体育锻炼对老年人反应抑制任务过程的影响主要涉及辅助运动区、额下回和额中回3个额叶亚区,其中辅助运动区的灰质体积与反应抑制相关,额下回的灰质体积与注意捕获相关,额中回的灰质体积与注意资源分配和任务的工作记忆负荷相关。

关键词:体育锻炼;老年人;反应抑制;注意捕获;灰质体积

中图分类号:G804.8

文献标识码:A

抑制控制是指抑制自动或不适当的反应,并解决由不相关或分散注意力的刺激或刺激特征引起的反应冲突,被认为是认知控制(也可称为执行功能)加工的一个重要方面(Barkley, 1997; Miller et al., 2001)。抑制控制并非单一的认知控制成分,目前一个普遍接受的区分是将其细化为反应抑制和干扰抑制(Bari et al., 2013; Wöstmann et al., 2013)。反应抑制处理的是一个相对简单和直接的过程,即对计划或已经开始行动的覆盖,通常采用停止信号任务(stop-signal task)(Logan et al., 1984)或Go/NoGo任务(Donders, 1969)进行评估。干扰抑制处理的是一个相对复杂的过程,其衡量的是解决反应冲突的能力,这些冲突是由不相关且不相容的刺激特征引起的。这种类型的抑制控制通常由 Stroop 任务(Stroop, 1935)、侧抑制任务(Flanker task)(Eriksen et al., 1974)、Simon 任务(Simon et al., 1967)等范式进行评估。尽管上述的任务范式都需要个体抑制一种自下而上的不适当反应,但现有研究表明随年龄增长导致的抑制控制衰退主要体现在反应抑制相关的任务中(Rey-Mermet et al., 2018)。

如何延缓老年人的认知衰退一直是多学科领域关注的重要问题。大量行为学与影像学研究指出体育锻炼在一定程度上可以促进老年人的反应抑制能力(Wong, 2017),且这种效益很大程度与体育锻炼对额叶的可塑性相关(Batouli et al., 2017)。但以往研究主要关注体育锻炼对反应抑制的增强,鲜有研究直接关注体育锻炼如何影响参与反应抑制的任务过程。在停止信号任务中,参与者需对 Go 信号做出反应,但当一个意外且显著的 Stop 信号在 Go 信号之后短暂出现时,参与者不得不取消先前发起的响应。值得注意的是,意外出现的显著信号会导致反应时间的延迟,这种效应被称为注意捕捉(Yantis,

收稿日期:2023-03-10; 修订日期:2023-06-01

基金项目:上海市海外高层次人才项目(TP2020063)。

第一作者简介:朱昊(1996-),男,在读博士研究生,主要研究方向为运动促进认知控制的效益与机制,E-mail: 604404186@qq.com。

*通信作者简介:吴雪萍(1972-),女,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为适应体育促进身心健康的效益与机制,E-mail: wuxueping@sus.edu.cn。

1993)。简而言之,成功实施反应抑制需要参与者快速有效地捕获显著信号的出现,理解其含义,并做出正确的反应。然而,标准的停止信号任务并不能提供一个直接衡量注意捕获的指标。因此,基于体育锻炼可以缩短被试的停止信号反应时(stop-signal reaction time, SSRT)得出体育锻炼可以促进反应抑制的结论是存在风险的,因其忽视了注意捕获的作用。已有研究无法证明体育锻炼是否直接影响反应抑制功能,即使观察到存在影响,也无法排除该影响是由注意捕获介导的可能性。

注意捕获介导的可能性是基于反应抑制心理加工机制和神经机制的研究提出的。Sharp等(2010)通过在标准停止信号任务中引入一个高级控制条件(continue信号)成功地从与反应抑制相关的神经信号中分离出注意捕获(Sharp et al., 2010)。后续多项研究也对该突破性的发现进行验证与补充(Lee et al., 2016; Sebastian et al., 2016, 2017),结果支持了独立评估注意捕获和反应抑制的合理性,因其背后的大脑系统彼此不同,具体来说右侧额下回主要与任务相关信号的注意捕获有关,而前辅助运动区直接负责反应的行为抑制。

基于体素的形态学(voxel-based morphometry, VBM)方法已被广泛用于研究个体在心理现象和社会行为方面的特征,被视为一种有效的神经结构标记(Hvid et al., 2021; Zhang et al., 2021),具有全面、客观和可重复等优势。灰质体积是VBM方法用于测量局部灰质密度的重要指标,并会随着年龄增长不断萎缩(Elliott, 2020)。值得注意的是,额叶灰质体积的萎缩更为明显(Fjell et al., 2013),这被认为是大脑功能和认知衰退的基础(Erickson et al., 2014),因此借助VBM方法探究体育锻炼影响老年人认知变化是科学和必要的。当前的研究证据表明体育锻炼对于老年人额下回和辅助运动区等额叶区域的灰质体积具有一定促进作用(Colcombe et al., 2006; Jonasson et al., 2016),然而目前还没有研究从该角度证实体育锻炼影响老年人反应抑制的认知神经机制。

为了解决上述问题,本研究采用3个经典停止信号任务的变体来分离反应抑制与注意捕获,以此考察体育锻炼对老年人反应抑制的促进作用是否源于体育锻炼加快对冲突信号的注意捕获,并借助VBM方法探讨体育锻炼影响反应抑制任务过程的神经机制。据此提出研究假设:运动组老年人反应抑制及注意捕获能力均优于对照组;相较于对照组,运动组在与反应抑制相关的脑区(如辅助运动区)及负责注意捕获的脑区(如额下回)中会表现出更大的灰质体积。

1 方法

1.1 研究对象及分组

本研究从上海市某社区运动健康中心招募社区老年

人,初筛标准为:1)年龄60~75岁;2)受教育年限 ≥ 6 年;3)蒙特利尔认知评估(montreal cognitive assessment, MoCA)评分 ≥ 22 分;4)右利手;5)视力或矫正视力正常,听力正常;6)无严重躯体、心理疾病,无脑部神经系统疾病(包括严重失眠);7)满足上海体育大学磁共振扫描条件;8)自愿参与本研究,配合完成测试任务,并签署知情同意书。本研究获得上海体育大学伦理委员会批准(102772020RT054)。

满足以上条件的被试根据运动锻炼调查结果进行分组。运动组入选标准为:有规律地进行运动锻炼并且坚持1年及以上时间,并且为了减少和运动剂量有关的组内异质性,只招募体育活动等级量表(physical activity rating scale-3, PARS-3)评定结果为“中等运动量”和“大运动量”的被试;对照组的入选标准为:过去没有规律运动习惯。为了减少被试填写问卷的主观误差,本研究将使用三轴加速度计(ActiGraph GT3X+)测量被试在随机的一周中各项身体活动强度的持续时间。由于中高强度身体活动(moderate-to-vigorous physical activity, MVPA)主要通过运动提升,本研究定义运动组被试应该满足世界卫生组织推荐的老年人每周至少进行150 min的中等强度身体活动(Bull et al., 2020)。根据该划分标准,加速度计测量结果与PARS-3初步分组结果不符合的被试数据不纳入后续统计分析。最终,实际完成实验且为有效数据的被试人数为运动组32人,对照组30人。

1.2 实验任务

3项行为实验任务均在上海体育大学脑成像中心的行为实验室中完成,每个实验呈现的刺激及流程见图1,3项实验任务均改编自Erika等(2014)的研究,并参照王宴庆等(2019)的研究进一步完善。测试程序采用E-prime 2.0编程,行为数据[反应时(reaction time, RT)、准确率]通过该软件自动收集。被试距离显示器60 cm远。

实验1为经典停止信号任务(图1a),被试在看到左右朝向的黑色箭头时立即按下左或右键(左手食指按“F”键代表“黑色箭头朝左”,右手食指按“J”键代表“黑色箭头朝右”),被试在被不常见的上下红色箭头打断的试次中取消原有的按键反应。该任务通过SSRT评估被试的反应抑制能力。初始停止信号延迟(stop signal delay, SSD)设置为200 ms,若当前Stop试次抑制失败,则下个Stop试次的SSD缩短34 ms,反之SSD增加34 ms(王宴庆等, 2019)。SSRT的估算采用如下公式: $SSRT = (n \times t)^{\frac{1}{n}} \times GoRT - SSD_{mean}$ 。其中, n 为Stop试次的错误率, t 为Go试次正确按键反馈的数量, SSD_{mean} 为SSD平均值,将正确反应的Go试次RT由小到大排序,取第 $(n \times t)$ 位的RT,再减 SSD_{mean} 得到SSRT。

从反应抑制的执行过程来看,对目标信息的注意捕获发生在认知加工的早期,先于抑制控制。从功能上看,注意捕获主要负责在视觉范围内探测目标相关的信息,进

而将目标信息传递给抑制控制。因此,个体对目标信息的注意捕获是完成后认知加工的关键。为此,实验2在实验1的基础上分离并量化个体对小概率出现的显著刺激的RT。如图1b所示,在黑色箭头被上下红色箭头打断的试次中,被试根据黑色箭头的朝向按下左或右键,在其他所有试次中无需反应。实验2的反应规则被更改以创造类似实验1的冲突环境,具体来看,实验1中的Go试次出现概率较大,使得被试形成按键倾向,而小概率的红色箭头对应的停止按键指令则会与已经形成的按键倾向产生冲突。而实验2中的Stop试次出现概率较大,使得被试已经形成停止按键倾向,此时小概率的红色箭头对应的按键指令会与已经形成的停止按键倾向产生冲突。不同于实验1,实验2需要被试快速捕获红色箭头并启动按键,无需其他的加工过程,RT越短代表注意捕获速度越快。因此可以通过Go试次的RT来衡量个体对红色箭头的注意捕获能力。

实验3(图1c)在实验2的基础上需要被试处理一套更复杂的刺激-反应规则。只有当黑色箭头被朝上红色箭头打断的试次中,被试需根据黑色箭头的朝向按下左或右键,在其他所有试次中无需反应。该实验通过靶试次的RT及准确率评估被试对注意资源的分配能力。实验2与3的信号延迟在(312±115)ms随机变化(Erika-Florence et al., 2014; Hampshire, 2015)。

在每次实验前,被试都被告知任务的反应规则,并接受40次有反馈的练习试次。练习结束后,要求被试口头报告是否掌握了相应任务的反应规则。如果没有掌握反应规则,则需要再次练习。每个实验之间休息10 min。将实验完成顺序在一半的被试中(运动组为16人,对照组为15人)颠倒以消除顺序效应。实验1、2包含2个组块,每个组块60试次,整个实验中红色箭头出现40次(向上向下各20次)。实验3包含3个组块,每个组块60试次,整个实验中红色箭头出现60次(向上向下各30次)。

1.3 磁共振数据采集及VBM分析

使用上海体育大学脑成像中心Siemens 3.0T MAGNETOM Prisma磁共振成像系统进行扫描。T1加权结构图像由3D MP2RAGE序列(该序列可以获得更均匀且无磁敏感伪影的T1对比)采集,扫描参数为:重复时间(TR)=3 130 ms,回波时间(TE)=2.98 ms,翻转角(FA)=4°,视野(FOV)=256 mm×256 mm,矩阵(matrix)=256×256,体素大小=1 mm×1 mm×1 mm,层数=176层,层厚=1 mm。

结构数据预处理在基于MATLAB R2020a的CAT12.8中完成,预处理后的灰质分割图采用8 mm平滑核进行空间平滑。在spm12中进行二阶分析,基于AAL脑图谱(Rolls et al., 2015),将额叶包括的脑区(序号为1~28,31~34)制作并添加为mask。显著水平定义为团块水平上的FWE(family wise error rate)校正后 $P<0.05$, $k>500$ 。将

具有显著差异的脑区的灰质体积值提取出来,在SPSS 27.0中进行后续分析。

1.4 统计分析

采用SPSS 27.0对实验数据进行处理。采用2×2双因素重复测量方差分析检验两组被试在实验2、3中Go试次的任务成绩差异。采用2×3双因素重复测量方差分析检验两组被试在实验3的3个组块Go试次的任务成绩差异。最后,采用皮尔逊偏相关分析检验spm12中显著差异的脑灰质体积与3项实验任务成绩的相关性。统计显著性阈限设置为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 被试特征

两组被试人口统计学特征如表1所示,年龄、性别结构、受教育年限、MoCA总分、BMI无显著差异,可认为两组同质。

2.2 停止信号任务结果

实验1的行为指标结果如表2所示。双样本检验结果显示,两组之间的停止信号试次的准确率无显著差异[$t_{(60)}=0.70$, $P>0.05$,Cohen's $d=0.18$]且接近50%,说明本任务采用的追踪算法适用于健康老年人群体。运动组的SSRT显著小于对照组[$t_{(60)}=-2.05$, $P<0.05$,Cohen's $d=-0.52$]。

2.3 注意捕获任务结果

如图2所示。在实验2中,运动组的Go RT显著短于对照组[$t_{(60)}=-2.07$, $P<0.05$,Cohen's $d=-0.52$]。Go准确率在两组之间没有显著差异[$t_{(60)}=1.63$, $P>0.05$,Cohen's $d=0.42$]。

2.4 复杂任务结果

以运动组和对照组为被试间因素,实验编号为被试内因素(实验2和实验3),采用重复测量方差分析,考察两组Go试次表现随实验难度增加的变化。结果发现,在准确率上,实验主效应显著[$F_{(1,60)}=81.32$, $P<0.01$, $\eta_p^2=0.58$],实验3的准确率显著低于实验2。在RT上,实验主效应显著[$F_{(1,60)}=221.81$, $P<0.01$, $\eta_p^2=0.79$],实验3的RT显著高于实验2;组别主效应显著[$F_{(1,60)}=8.43$, $P<0.01$, $\eta_p^2=0.12$],运动组的RT显著低于对照组。简单效应分析表明,在实验3中,运动组的Go试次RT显著短于对照组($P<0.05$)。

以运动组和对照组为被试间因素,实验3的组块为被试内因素(组块1、2和3),采用重复测量方差分析,考察两组在任务不同阶段Go试次的表现变化。结果发现,在准确率上,组别主效应显著[$F_{(1,60)}=4.69$, $P<0.05$, $\eta_p^2=0.07$],运动组的准确率显著高于对照组。简单效应分析表明,运动组在组块2的Go试次准确率显著高于对照组($P<0.05$;图3)。在RT上,主效应与交互效应均不显著($P>0.05$)。简单效应分析表明,运动组在组块2和3的Go试次RT显著小于对照组($P<0.01$;图4)。

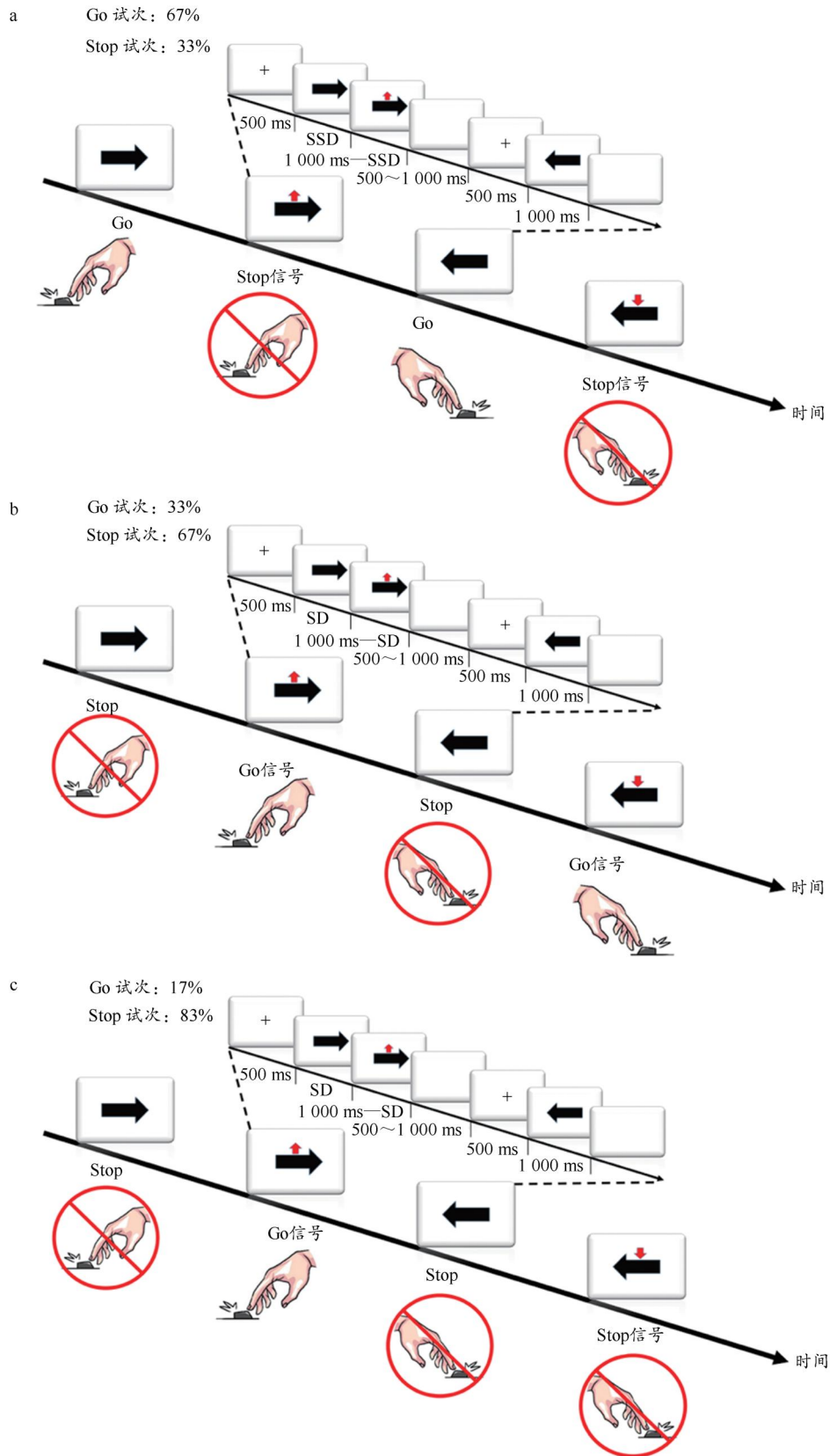


图1 任务设计及流程

Figure 1. Task Design and Process

注: a. 经典停止信号任务; b. 注意捕获任务; c. 复杂任务。

2.5 灰质体积结果

具有组间差异的脑区(表3)有左侧中央前回、左侧辅助运动区、双侧额上回、右侧额中回、右侧额下回岛盖部、

右侧直回、右侧前/中扣带回(图5)。

2.6 行为实验表现与显著差异脑区的相关性

采用偏相关分析, 以年龄、性别、MoCA 总分和和颅内

总体积(total intracranial volume)为协变量。RT方面,在停止信号任务中,SSRT与左侧辅助运动区显著相关($r=-0.36, P<0.01$)。在注意捕获任务中,Go试次RT与右侧额下回显著相关($r=-0.37, P<0.01$)。在复杂任务中,Go试次RT分别与左侧辅助运动区($r=-0.37, P<0.01$)、右侧额下回

($r=-0.32, P=0.015$)、右侧额上/中回($r=-0.31, P=0.018$)和右侧直回($r=-0.28, P=0.034$)显著相关。准确率方面,注意捕获任务的Go试次准确率与右侧额下回显著相关($r=0.39, P<0.01$)。在复杂任务中,Go试次准确率与右侧额下回显著相关($r=0.36, P<0.01$)。

表1 被试基本情况表

Table 1 The Characteristics of Participants in Each Group

| | 运动组(n=32) | 对照组(n=30) | t/χ^2 | P |
|--------------------------|---------------|-------------|------------|-------|
| 年龄/岁 | 66.47±4.33 | 67.17±4.65 | -0.61 | 0.54 |
| 性别(男/女) | 9/23 | 8/22 | 0.02 | 0.89 |
| 受教育年限/年 | 9.25±2.78 | 9.77±2.84 | -0.72 | 0.47 |
| MoCA总分 | 27.56±2.11 | 26.93±2.42 | 1.09 | 0.28 |
| BMI/(kg/m ²) | 23.59±2.33 | 24.44±3.60 | -1.11 | 0.27 |
| 运动强度得分 | 2.22±0.42 | 1.43±0.50 | 6.64 | <0.01 |
| 运动时间得分 | 4.34±0.60 | 2.51±0.58 | 12.35 | <0.01 |
| 运动频率得分 | 4.53±0.57 | 1.87±0.63 | 17.54 | <0.01 |
| PARS-3总分 | 33.47±9.63 | 3.83±2.20 | 17.03 | <0.01 |
| 身体活动时间 | | | | |
| MPA/(min/d) | 49.85±13.43 | 13.19±5.79 | 14.11 | <0.01 |
| VPA/(min/d) | 3.01±2.22 | 0.54±0.50 | 6.15 | <0.01 |
| MVPA/(min/wk) | 370.16±103.02 | 96.09±42.58 | 13.83 | <0.01 |

注:MPA.中等强度身体活动;VPA.高强度身体活动。

表2 停止信号任务的行为指标
Table 2 Indicators of Stop Signal Task

| 指标 | 运动组 | 对照组 | P |
|----------|---------------|---------------|-------|
| Go RT/ms | 595.62±76.78 | 602.87±84.09 | 0.72 |
| Go 准确率 | 0.93±0.07 | 0.93±0.07 | 0.85 |
| Stop 准确率 | 0.56±0.07 | 0.55±0.06 | 0.49 |
| SSD/ms | 348.27±103.59 | 331.30±101.31 | 0.52 |
| SSRT/ms | 211.76±72.16 | 247.72±65.48 | <0.05 |

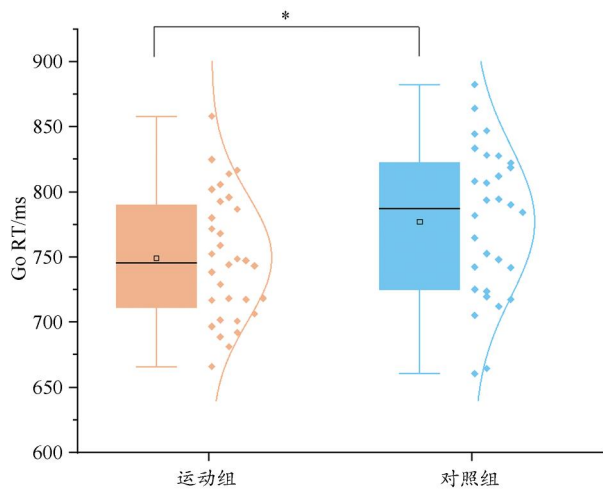


图2 注意捕获任务的反应时

Figure 2. Reaction Time of Attentional Capture Task

注:* $P<0.05$,后同。

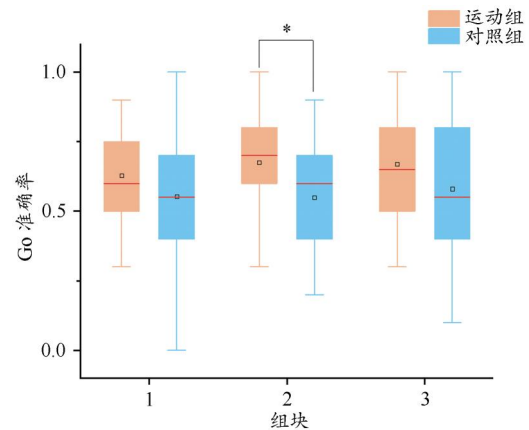


图3 复杂任务不同组块的准确率

Figure 3. Accuracy of the Go Trials in the Three Blocks of Complex Task

3 讨论

本研究采用3个行为实验考察了体育锻炼对反应抑制的促进作用是否源于体育锻炼加快老年人对冲突信号的注意捕获,并结合结构磁共振技术探索了体育锻炼影响反应抑制任务过程的神经机制。在实验1中,相较于对照组,运动组能够更快地抑制Stop信号,拥有更短的SSRT。实验2成功分离了实验1中的注意捕获,在Go信号出现后,运动组能够比对照组更快地完成对信号的响应。实验1和2的结果表明,体育锻炼对反应抑制的促进

作用源于体育锻炼加快了对靶信号的注意捕获。在实验3中, 运动组能够更好地完成注意资源的分配, 在任务的进行过程中, 无论在准确率还是RT方面均优于对照组。VBM分析表明, 运动组老年人在中央前回、辅助运动区、额上/中回、额下回、直回、扣带回的灰质体积显著大于对照组老年人。整合行为与影像结果的偏相关分析表明, 更大的辅助运动区和额下回灰质体积分别与反应抑制和注意捕获表现显著相关。而在更高认知负荷的任务中, 任务表现与更大的辅助运动区、额下回、额上/中回和直回的灰质体积显著相关。

抑制的重要因素。实验1发现经常参与体育锻炼的老年人表现出更短的SSRT, 这验证了以往的研究结果(Xu et al., 2019), 说明体育锻炼可以改善个体的反应抑制表现。然而, 实验1的结果不能反映是体育锻炼对抑制反应的直接作用, 还是通过对Stop信号的迅速捕获作用于抑制反应。实验2通过对反应规则的转变对注意捕获进行了分离, 研究结果表明, 运动组的老年人对冲突信号的捕获优于对照组。因此, 体育锻炼可以加快个体对冲突信号的注意捕获从而提升反应抑制。在包含更多组块且反应规则更复杂的实验3中, 运动组的老年人无论在准确率还是RT上均优于对照组, 且这种差异均体现在中期或晚期组块, 而在早期组块未观察到显著差异。这是由于在执行任务的过程中, 注意资源会逐渐损耗(Sousa et al., 2019), 在早期组块, 两组老年人注意资源较多, 因此任务表现上没有差异, 随着任务进行到中后期阶段, 运动组的老年人能够更好地完成对注意资源的分配, 进而更高效地完成任务。

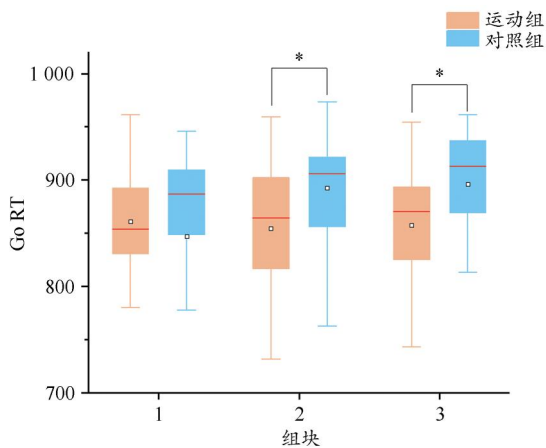


图4 复杂任务不同组块的反应时

Figure 4. Reaction Time of the Go Trials in the Three Blocks of Complex Task

3.1 注意捕获在体育锻炼影响老年人反应抑制中的作用机制

反应抑制是过程性的调控, 从任务的执行过程来看, 个体对Stop信号的捕获先于反应抑制且为成功实施反应

表3 运动组与对照组灰质体积差异显著脑区的峰值坐标
Table 3 Peak Coordinates of Brain Regions Showing Significant Difference in Grey Matter Volume between Exercise Group and Control Group

| 脑区 | 偏侧 | MNI坐标 | | | Cluster Size | T (peak-level) |
|--------|----|-------|------|-------|--------------|----------------|
| | | x | y | z | | |
| 额上/中回 | 右 | 30.0 | 67.5 | 3.0 | 4 436 | 5.67 |
| 额上回 | 左 | -19.5 | 54.0 | 21.0 | 2 624 | 5.20 |
| 中央前回 | 左 | -55.5 | 6.0 | 42.0 | 1 425 | 4.83 |
| 额下回岛盖部 | 右 | 60.0 | 18.0 | -1.5 | 1 393 | 4.52 |
| 前/中扣带回 | 右 | 7.5 | 9.0 | 40.5 | 1 209 | 5.02 |
| 直回 | 右 | 4.5 | 52.5 | -16.5 | 875 | 4.80 |
| 辅助运动区 | 左 | -13.5 | 13.5 | 55.5 | 638 | 4.11 |

注: 采用体素水平 $P < 0.001$, 团块水平 $P < 0.05$ 的FWE多重比较矫正。

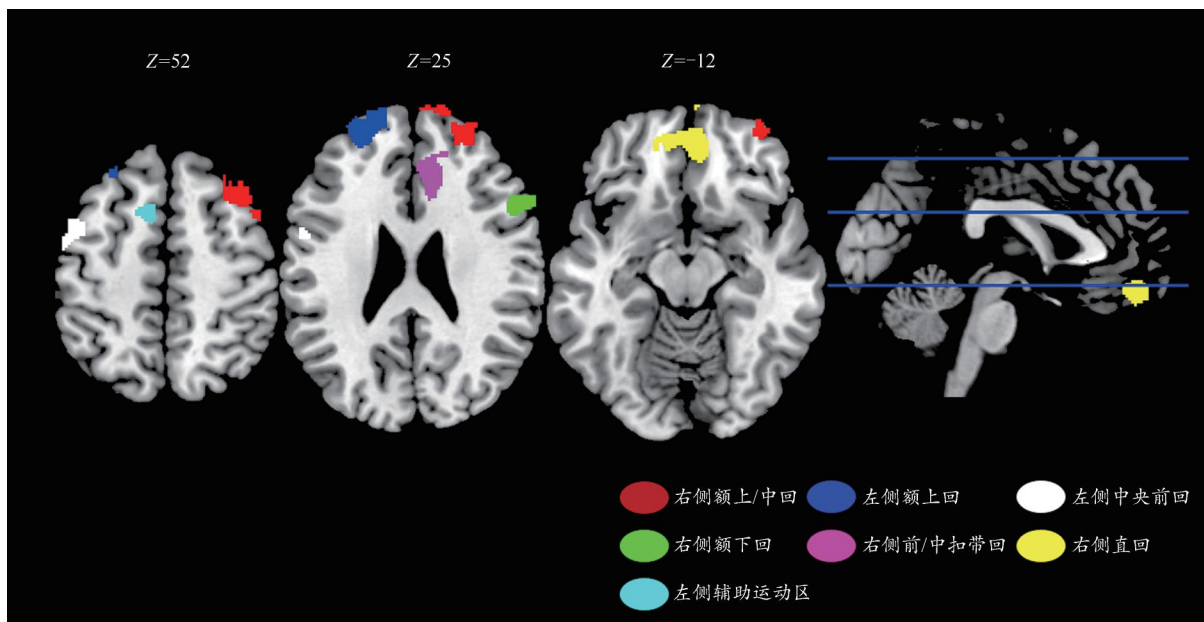


图5 运动组较对照组灰质体积存在差异的脑区

Figure 5. Brain Regions with Differences in Grey Matter Volume between Exercise Group and Control Group

3.2 体育锻炼对老年人灰质体积的影响

人类发展的生命全程,脑在外界环境和经验下不断塑造其结构和功能的能力体现了脑可塑性的特征(周加仙等,2008)。即使随着年龄的增长,有效的干预手段仍能影响灰质体积。本研究基于感兴趣区的VBM分析结果表明,运动组老年人左侧中央前回、左侧辅助运动区、双侧额上回、右侧额中回、右侧额下回、右侧直回和右侧前/中扣带回的灰质体积显著大于对照组。首先,中央前回和辅助运动区均属于运动皮层,这2个脑区是人类大脑运动系统的重要组成部分,且在动作的规范化和精细化中起着重要作用(Goldberg,1985)。个体在进行运动的过程中需要对肢体进行协调与控制,从而有效刺激该区域的灰质体积。此外,额上回与额中回均属于背外侧前额叶,该区域往往会在工作记忆任务过程中显著激活(Owen et al.,2005),且被证明与运动控制相关。近期研究表明,通过加速度计评估的MVPA的持续时间与老年人背外侧前额叶灰质体积存在关联(Northey et al.,2020)。本研究的发现不仅为该研究提供了实证证据,也体现了问卷结合加速度计测量身体活动量的可靠性。最后,额下回和扣带回均是以目标导向行为的重要脑区(陈安涛,2019),具体来看,完成言语和动作反应的认知控制任务时均会伴随额下回的显著激活(Leung et al.,2007),而扣带回则对目标导向行为实施监测,合理地调整注意资源并纠正错误(王琰等,2010)。个体在进行球类运动时,需要及时对球的落点投入足够的注意资源来进行监测,并根据场上动态变化的环境做出正确的动作反应。因此推测,经常锻炼的老年人在参与运动过程中有效调动了认知资源,进而强化了这些脑区。值得注意的是,本研究所发现的直回差异在过往研究鲜有出现,尽管近期的一项研究表明6个月的运动干预能够增加老年人的心肺功能和直回灰质体积(Frost et al.,2022),但仍需要更多的研究来证实这一发现。

3.3 体育锻炼影响老年人反应抑制任务过程的神经机制

为了考察有哪些体育锻炼所影响的脑区参与了反应抑制的任务过程,本研究进一步采用偏相关分析考察灰质体积与实验表现之间的关系。实验1的SSRT与辅助运动区的灰质体积显著相关,符合本研究的假设,并验证了辅助运动区是参与行为反应抑制的关键脑区。近年来,越来越多的研究采用控制条件的停止信号任务来考察辅助运动区在运动反应抑制中的独特作用(Boehler et al.,2011;Schaum et al.,2021),Sharp等(2010)认为前辅助运动区在响应抑制反应的过程中是特异性的激活。而Xu等(2017)通过以眼动为反馈的停止信号任务发现显著激活的脑区在额眼区。前辅助运动区负责控制骨骼运动,而额眼区负责控制眼球运动。本研究的结果与Sharp等(2010)的结论更为接近,这可能是由于2项研究均涉及手

指按键,而Xu等(2017)的任务涉及眼跳运动。已有研究表明运动可以改善老年人辅助运动区的灰质体积,但目前鲜见关于运动可以改善额眼区的灰质体积的报道。因此,运动组SSRT更短可能是由于长期体育锻炼增加了辅助运动区的灰质体积。值得注意的是,大脑双侧的辅助运动区均在反应抑制中发挥着重要作用,本研究观察到的辅助运动区的差异位于大脑的左半球,这与侯莉娟等(2020)的结果一致,而Colcombe等(2006)则发现运动引起老年人双侧辅助运动区灰质体积的增加。推测可能是本研究纳入的受试者均为右利手,在长期运动中较多训练了由左半球控制的右侧肢体。本研究实验2的准确率和RT均与额下回显著相关,近年来脑电(Schaum et al.,2021)和功能磁共振(Wolpe et al.,2022)的研究证据表明右侧额下回是调控反应抑制更为高级的脑区,即在反应抑制的执行过程中,额下回是先于辅助运动区的。具体来说,额下回将显著性信号传递给辅助运动区以完成抑制控制。而实验2的行为表现代表了老年人注意捕获的能力,这也解释了实验1的研究发现,即体育锻炼提升老年人的反应抑制是由于更快地对Stop信号完成捕获,其关键机制在于体育锻炼增加了老年人右侧额下回的灰质体积。最后,本研究发现,除了辅助运动区与额下回以外,额上/中回和直回与实验3的RT相关,这可能是由于实验3不仅需要被试捕获红色箭头的出现,还需要判断红色箭头的朝向,更复杂的任务规则使得工作记忆负荷增加。Hester等(2005)操控了Go/NoGo任务的工作记忆负荷,实验结果表明工作记忆与反应抑制共同作用的额叶区域涉及额中回与前扣带回,其中隶属背外侧的前额叶的额中回与工作记忆负荷直接相关。此外,Corbetta等(2002)的研究也验证了背外侧前额叶在调控注意资源中的重要作用,其形成的功能网络以自下而上的方式完成对显著刺激的注意转换。而本研究的结果也与2项研究存在重叠,表明体育锻炼可以增加额中回的灰质体积,利于更有效地完成注意资源分配以进行认知调控。

综上所述,本研究整合行为与影像学技术发现,体育锻炼对老年人反应抑制的提升作用来源于体育锻炼调控了注意资源分配,进而加快了对显著刺激的注意捕获,并从灰质体积的角度揭示了不同额叶亚区参与任务过程的具体作用,为延缓老年人认知衰退、提升生活质量提供了新的视角与证据。值得注意的是,本研究所发现的辅助运动区、额下回和额中回均属于反应抑制网络(黄冬玲等,2014),因此,未来研究可以3个重要脑区为节点构建结构功能网络,更深入地探讨体育锻炼影响老年人反应抑制的认知神经机制。此外,未来需要更多的实证研究进一步考察体育锻炼影响反应抑制任务过程的因果关系。

4 结论

1) 运动组老年人的反应抑制优势源于更好地调节注意资源分配, 加快了对冲突信号的注意捕获。

2) 运动组老年人在左侧中央前回、左侧辅助运动区、双侧额上回、右侧额中回、右侧额下回、右侧直回和右侧前/中扣带回表现出更大的灰质体积。

3) 体育锻炼对老年人反应抑制任务过程的影响主要涉及辅助运动区、额下回和额中回3个额叶亚区, 其中辅助运动区的灰质体积与反应抑制相关, 额下回的灰质体积与注意捕获相关, 额中回的灰质体积与注意资源分配和任务的工作记忆负荷相关。

参考文献:

陈安涛, 2019. 认知控制基本功能的神经机制[J]. 生理学报, 71(1): 149-155.

侯莉娟, 李炬, 刘冉, 等, 2020. 运动对老年人认知功能的影响及其脑结构基础[J]. 中国体育科技, 56(9): 14-19, 65.

黄冬玲, 王优, 胡玮冰, 等, 2014. 反应控制神经机制研究新进展[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 41(6): 555-558.

王琰, 蔡厚德, 2010. 反应抑制的心理加工模型与神经机制[J]. 心理科学进展, 18(2): 220-229.

王宴庆, 陈安涛, 胡学平, 等, 2019. 奖赏通过增强信号监测提升认知控制[J]. 心理学报, 51(1): 48-57.

周加仙, 董奇, 2008. 学习与脑可塑性的研究进展及其教育意义[J]. 心理科学, 171(1): 152-155.

BARI A, ROBBINS T W, 2013. Inhibition and impulsivity: Behavioral and neural basis of response control[J]. *Prog Neurobiol*, 108: 44-79.

BARKLEY R A, 1997. Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: Constructing a unifying theory of ADHD[J]. *Psychol Bull*, 121(1): 65-94.

BATOULI S A H, SABA V, 2017. At least eighty percent of brain grey matter is modifiable by physical activity: A review study[J]. *Behav Brain Res*, 332: 204-217.

BOEHLER C N, APPELBAUM L G, KREBS R M, et al., 2011. The role of stimulus salience and attentional capture across the neural hierarchy in a stop-signal task[J]. *PLoS One*, 6(10): e26386.

BULL F C, AL-ANSARI S S, BIDDLE S, et al., 2020. World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour[J]. *Brit J Sports Med*, 54(24): 1451-1462.

COLCOMBE S J, ERICKSON K I, SCALF P E, et al., 2006. Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 61(11): 1166-1170.

CORBETTA M, SHULMAN G L, 2002. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain[J]. *Nat Rev Neurosci*, 3(3): 201-215.

DONDERS F C, 1969. On the speed of mental processes[J]. *Acta Psychol*, 30: 412-431.

ELLIOTT M L, 2020. MRI-based biomarkers of accelerated aging and dementia risk in midlife: How close are we?[J]. *Ageing Res Rev*, doi: 10.1016/j.arr.2020.101075.

ERICKSON K I, LECKIE R L, WEINSTEIN A M, 2014. Physical activity, fitness, and gray matter volume [J]. *Neurobiol Aging*, 35(Suppl 2): S20- S28.

ERIKA-FLORENCE M, LEECH R, HAMPSHIRE A, 2014. A functional network perspective on response inhibition and attentional control[J]. *Nature Commun*, doi: 10.1038/ncomms5073.

ERIKSEN B A, ERIKSEN C W, 1974. Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task[J]. *Percept Psychophys*, 16(1): 143-149.

FJELL A M, WESTLYE L T, GRYDELAND H, et al., 2013. Critical ages in the life course of the adult brain: Nonlinear subcortical aging[J]. *Neurobiol Aging*, 34(10): 2239-2247.

FROST N J, WEINBORN M, GIGNAC G E, et al., 2022. The effect of self-paced exercise intensity and cardiorespiratory fitness on frontal grey matter volume in cognitively normal older adults: A randomised controlled trial[J]. *J Int Neuropsychol Soc*, 28(9): 902-915.

GOLDBERG G, 1985. Supplementary motor area structure and function: Review and hypotheses[J]. *Behav Brain Sci*, 8(4): 567-588.

HAMPSHIRE A, 2015. Putting the brakes on inhibitory models of frontal lobe function[J]. *NeuroImage*, 113: 340-355.

HESTER R, GARAVAN H, 2005. Working memory and executive function: The influence of content and load on the control of attention[J]. *Mem Cognit*, 33(2): 221-233.

HVID L G, HARWOOD D L, ESKILDSEN S F, et al., 2021. A critical systematic review of current evidence on the effects of physical exercise on whole/regional grey matter brain volume in populations at risk of neurodegeneration[J]. *Sports Med*, 51(8): 1651-1671.

JONASSON L S, NYBERG L, KRAMER A F, et al., 2016. Aerobic exercise intervention, cognitive performance, and brain structure: Results from the Physical Influences on Brain in Aging (PHIBRA) study[J]. *Front Aging Neurosci*, doi: 10.3389/fnagi.2016.00336.

LEE H W, LU M S, CHEN C Y, et al., 2016. Roles of the pre-SMA and rIFG in conditional stopping revealed by transcranial magnetic stimulation[J]. *Behav Brain Res*, 296: 459-467.

LEUNG H C, CAI W, 2007. Common and differential ventrolateral prefrontal activity during inhibition of hand and eye movements[J]. *J Neurosci*, 27(37): 9893-9900.

LOGAN G D, COWAN W B, DAVIS K A, 1984. On the ability to inhibit simple and choice reaction time responses: A model and a method[J]. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 10(2): 276-291.

MILLER E K, COHEN J D, 2001. An integrative theory of prefrontal cortex function[J]. *Annu Rev Neurosci*, 24: 167-202.

NORTHEY J M, RATTRAY B, PUMPA K L, et al., 2020. Objectively measured physical activity is associated with dorsolateral prefrontal cortex volume in older adults[J]. *NeuroImage*, doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.117150.

OWEN A M, MCMILLAN K M, LAIRD A R, et al., 2005. N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies[J]. *Hum Brain Mapp*, 25(1): 46-59.

PADILLA C, PEREZ L, ANDRES P, et al., 2013. Exercise improves cognitive control: Evidence from the stop signal task[J]. *Appl Cogn Psychol*, 27(4): 505-511.

PADILLA C, PÉREZ L, ANDRÉS P, 2014. Chronic exercise keeps working memory and inhibitory capacities fit[J]. *Front Behav Neurosci*, doi: 10.3389/fnbeh.2014.00049.

REY-MERMET A, GADE M, 2018. Inhibition in aging: What is preserved? What declines? A meta-analysis[J]. *Psychon Bull Rev*, 25(5): 1695-1716.

ROLLS E T, JOLIOT M, TZOURIO-MAZOYER N, 2015. Implementation of a new parcellation of the orbitofrontal cortex in the au-

- tomated anatomical labeling atlas[J]. *NeuroImage*, 122:1-5.
- SCHAUM M, PINZUTI E, SEBASTIAN A, et al., 2021. Right inferior frontal gyrus implements motor inhibitory control via beta-band oscillations in humans[J]. *ELIFE*, doi:10.7554/eLife.61679.
- SEBASTIAN A, JUNG P, NEUHOFF J, et al., 2016. Dissociable attentional and inhibitory networks of dorsal and ventral areas of the right inferior frontal cortex: A combined task-specific and coordinate-based meta-analytic fMRI study[J]. *Brain Struct Funct*, 221(3):1635-1651.
- SEBASTIAN A, RÖSSLER K, WIBRAL M, et al., 2017. Neural architecture of selective stopping strategies: Distinct brain activity patterns are associated with attentional capture but not with outright stopping[J]. *J Neurosci*, 37(40):9785-9794.
- SHARP D J, BONNELLE V, BOISSEZON X D, et al., 2010. Distinct frontal systems for response inhibition, attentional capture, and error processing[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107(13):6106-6111.
- SIMON J R, RUDELI A P, 1967. Auditory S-R compatibility: The effect of an irrelevant cue on information processing[J]. *J Appl Psychol*, 51(3):300-304.
- SOUSA A F M D, MEDEIROS A R, ROSSO S D, et al., 2019. The influence of exercise and physical fitness status on attention: A systematic review[J]. *Int Rev Sport Exerc Psychol*, 12(1):202-234.
- STROOP J R, 1935. Studies of interference in serial verbal reactions[J]. *J Exp Psychol General*, (18):643-662.
- WOLPE N, HEZEMANS F H, RAE C L, et al., 2022. The pre-supplementary motor area achieves inhibitory control by modulating response thresholds[J]. *Cortex*, 152:98-108.
- WONG R Y, 2017. Physical exercise, cognition, and function in older people[J]. *J Am Med Dir Assoc*, 18(4):282-283.
- WÖSTMANN N M, AICHERT D S, COSTA A, et al., 2013. Reliability and plasticity of response inhibition and interference control[J]. *Brain cogn*, 81(1):82-94.
- XU C, LU Y, WANG B, et al., 2019. Long-term high physical activity modulates event-related potential indices of inhibitory control in postmenopausal women[J]. *PeerJ*, 7: e6523.
- XU K Z, ANDERSON B A, EMERIC E E, et al., 2017. Neural basis of cognitive control over movement inhibition: Human fMRI and primate electrophysiology evidence[J]. *Neuron*, 96(6):1447-1458.
- YANTIS S, 1993. Stimulus-driven attentional capture and attentional control settings[J]. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 19(3):676-681.
- ZHANG F, WANG S, FENG Y, et al., 2021. Regional gray matter volume associated with exercise dependence: A voxel-based morphometry study[J]. *Human Brain Mapp*, 42(15):4857-4868.

The Mechanism of Attentional Capture in the Impact of Physical Exercise on Response Inhibition in the Elderly: A Voxel-based Morphometry Study

ZHU Hao, WU Xueping*

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

Abstract: Objective: To explore the mechanism of attentional capture in the impact of physical exercise on response inhibition in the elderly. Methods: The physical activity rating scale-3 and three-axis accelerometer ActiGraph GT3X+ were used to measure the physical activity levels of older adults by cross-sectional design, and then the older adults were divided into exercise group and control group according to the results. Participants in the two groups were finished three behavioral experiments, and the gray matter volume was detected by the structural magnetic resonance imaging. Results: 1) The stop signal reaction time (SSRT) of the exercise group was significantly shorter than that of the control group, and the SSRT was significantly correlated with the gray matter volume in the left supplementary motor area. 2) The attentional capture reaction time of the exercise group was significantly shorter than that of the control group, and both of the reaction time and accuracy were significantly correlated with the gray matter volume in the right inferior frontal gyrus. 3) The reaction time and accuracy of the exercise group were significantly better than that of the control group in the complex task, and the reaction time was significantly correlated with the gray matter volume in the left supplementary motor area, right inferior frontal gyrus, right superior frontal gyrus, the right middle frontal gyrus and the right rectus, the accuracy was significantly correlated with the gray matter volume in the right inferior frontal gyrus. Conclusions: 1) The physical exercise regulates the allocation of attentional resources and accelerates the capture of conflict signals are the possible mechanisms for the positive effect of physical exercise on the response inhibition in the elderly. 2) Physical exercise can increase the gray matter volume in the left precentral gyrus, left supplementary motor area, bilateral superior frontal gyrus, right middle frontal gyrus, right inferior frontal gyrus, right rectus, and right anterior/middle cingulate gyrus in the elderly. 3) The impact of physical exercise on the process of response inhibition in the elderly mainly involves the supplementary motor area, inferior frontal gyrus and middle frontal gyrus. The gray matter volume in the supplementary motor area is related to response inhibition, the gray matter volume in the inferior frontal gyrus is related to attentional capture, and the gray matter volume in the middle frontal gyrus is related to attentional resource allocation and working memory load of the task.

Keywords: *physical exercise; the elderly; response inhibition; attentional capture; gray matter volume*