·儿童发育与康复·

课外身体活动对不同心肺功能儿童抑制控制的影响

钟晓珂[1,2]，尹新元[1,2]，王琛[3]，张鑫碧[2]，蒋长好[2]

1. 福建师范大学体育科学学院，福建 福州 350108；2. 首都体育学院运动科学与健康学院，北京 100191；
3. 北京回龙观医院

摘 要：目的 分析课外身体活动对儿童抑制控制与前额叶神经活动的影响，阐明心肺功能(CRF)的调节效应及神经机制，为促进儿童健康提供依据。**方法** 2021 年 9 月采用方便抽样法在清华附小昌平校区抽取 7～12 岁儿童 140 名，经 20m 折返跑(20mSRT)筛选高、低 CRF 儿童各 42 名进行 12 周干预。干预前后采用 Flanker 任务与功能性近红外光谱(fNIRS)分别评估抑制控制及前额叶神经活动。**结果** 剔除数据缺失样本，最终纳入高 CRF 组 39 名、低 CRF 组 38 名。干预前，高 CRF 组 20mSRT 得分更高($t=-10.616$，$P<0.001$)、抑制控制表现更佳(反应时更短 $F=4.776$，$P<0.05$)、双侧背外侧前额叶(DLPFC)的氧合血红蛋白浓度(oxy-Hb)更高(左 $F=6.568$，$P<0.05$；右 $F=15.190$，$P<0.001$)；干预后，仅高 CRF 组 20mSRT 高于低 CRF 组($t=-7.017$，$P<0.001$)。两组右侧背外侧前额叶的 oxy-Hb 与抑制控制均呈显著相关(低 CRF $r=0.469$，$P<0.01$；高 CRF $r=0.354$，$P<0.05$)。**结论** 运动干预通过增强 R-DLPFC 激活进而改善抑制控制，R-DLPFC 在二者间起中介作用，且该效应存在 CRF 水平差异，提示心肺功能是影响身体活动干预效果的重要因素。未来小学体育干预应聚焦 CRF 提升，同时根据 CRF 水平分层实施，以最优方式促进儿童抑制控制的发展。

关键词： 课外身体活动；心肺功能；儿童；抑制控制；功能性近红外光谱

中图分类号：R179 **文献标识码：**A **文章编号：**1008-6579(2026)11-1244-07 doi:10.11852/zgetbjzz2025-1316

Effects of extracurricular physical activity on inhibitory control in children with different levels of cardiorespiratory fitness

ZHONG Xiaoke[1,2], YIN Xinyuan[2], WANG Chen[3], ZHANG Xinbi[2], JIANG Changhao[2]

1. School of Physical Education and Sport Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350108, China;
2. School of Sport Science and Health, Capital University of Physical Education and Sports, Beijing 100191, China;
3. Beijing Huilongguan Hospital

Corresponding author: JIANG Changhao, E-mail: jiangchanghao@cupes.edu.cn

Abstract: Objective To examine the effects of exercise on inhibitory control and prefrontal cortical activity in children, and to investigate the moderating role of cardiorespiratory fitness (CRF), and explore the underlying neural correlates so as to provide reference for promoting children's health. **Methods** In September 2021, 140 children aged 7 - 12 years were recruited from Tsinghua University Primary School Changping Campus using convenience sampling. Based on performance on the 20-meter shuttle run test (20mSRT), 42 children with high CRF and 42 with low CRF were selected to participate in a 12-week extracurricular physical activity intervention. Inhibitory control and prefrontal cortical activity were assessed before and after the intervention using the Flanker task and functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), respectively. **Results** After exclusion of participants with missing data, 39 children in the high-CRF group and 38 in the low-CRF group were included in the analysis. At baseline, the high-CRF group had higher 20mSRT scores ($t=-10.616$, $P<0.001$), better inhibitory-control performance, reflected by shorter reaction times ($F=4.776$, $P<0.05$), and higher oxygenated hemoglobin (oxy-Hb) concentrations in the bilateral dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) than the low-CRF group (left: $F=6.568$, $P<0.05$; right: $F=15.190$, $P<0.001$). After the intervention, 20mSRT scores remained higher in the high-CRF group than in the low-CRF group ($t=-7.017$, $P<0.001$). Right DLPFC oxy-Hb concentration was significantly associated with inhibitory control in both groups (low-CRF group: $r=0.469$, $P<0.01$; high-CRF group: $r=0.354$, $P<0.05$). **Conclusions** Exercise intervention improves inhibitory control via right DLPFC activation, which plays a key mediating role. Effects vary across CRF levels, indicating cardiorespiratory fitness as a moderating variable. Future primary school physical activity interventions should prioritize CRF enhancement and adopt stratified

基金项目：北京市社会科学基金重点项目(19YTA001)；体医工交叉智能技术北京市重点实验室开放课题(BZ-2025-035)

作者简介：钟晓珂(1996—)，女，在读博士研究生，主要研究方向为运动与脑认知。

通信作者：蒋长好，E-mail：jiangchanghao@cupes.edu.cn

approaches based on CRF levels to optimally facilitate children's inhibitory control development.

Keywords: extracurricular physical activity; cardiorespiratory fitness; children; inhibitory control; functional near-infrared spectroscopy

抑制控制是个体为实现目标而抑制干扰反应与注意倾向的能力[1-2]，对儿童学习与生活具有重要作用[3-4]。研究证实，抑制控制与前额叶皮层密切相关[5]，且可通过外部干预依托脑可塑性得以改善[6]。身体活动因易实施、可行性强，被认为是切实可行的干预手段。但相关研究的结论并不一致，这可能是未考虑心肺功能(cardiorespiratory fitness，CRF)的影响[7-11]。CRF 是心肺与血液循环系统向肌肉供氧供能、维持运动的最大能力[12]。CRF 与认知的关联可追溯至 Spirduso[13]的心肺功能假说，即较高 CRF 有利于促进抑制控制。该假说虽得到横断研究的证实，但是干预研究结论存在较大分歧[14-16]。有研究认为低 CRF 者更易从运动中获益[11]；也有研究支持高 CRF 者更受益[17-18]；还有研究未发现 CRF 的调节效应[19]。此外，运动对不同 CRF 儿童脑神经活动影响的结果也存在分歧[20-21]，这可能与年龄、干预时长、评估工具等异质性有关。因此，运动对高低 CRF 儿童抑制控制和脑活动的差异化影响有待深入探索。功能性近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy，fNIRS)是无创光学脑影像技术，用于评估大脑神经活动变化。fNIRS 具有便携性、抗干扰性强、成本低等优势，适用于儿童研究。因此，本研究结合 Flanker 任务和 fNIRS 技术，分析 12 周课外身体活动对高低 CRF 儿童抑制控制与脑神经活动的影响差异及神经机制。

1　对象和方法

1.1　对象　2021 年 9 月采用方便抽样法抽取清华附小昌平校区 7～12 岁儿童 140 名，采用 20m 折返跑测试(20-meter shuttle run test，20mSRT)评估其 CRF。根据测试成绩百分位数分布，将成绩排名前 30%的 42 名儿童纳入高 CRF 组，成绩排名后 30%的 42 名儿童纳入低 CRF 组[22]。纳入标准：无器质性疾病，视力(矫正)正常、无色盲，右利手且智力正常。儿童及监护人签署知情同意书。本研究获首都体育学院伦理委员会批准(No. 2021A19)。

1.2　20m 折返跑测试　20mSRT 是渐进式有氧运动测试，广泛用于 CRF 的现场评估，信效度较高[23-24]。被试在 20m 直线上随音乐节拍往返跑，连续两次未达标或无法坚持运动则终止测试。

1.3　Flanker 任务测试　Flanker 任务是测量抑制控制的经典认知任务[25]，包含 4 个 block，即两个一致性(＜＜＜＜＜，＞＞＞＞＞)和两个不一致性任务(＜＜＞＜＜，＞＞＜＞＞)。实验流程：30s 休息→500ms 注视点“＋”→150ms 目标刺激→350ms 空屏，刺激呈现后 500ms 内按键反应，中央靶箭头“＜”按 F 键、“＞”按 J 键。见图 1。任务采用 E-prime 编程呈现，自动记录反应时与正确率。Flanker 数据采用 3 倍标准差法剔除异常值，计算平均反应时与正确率。

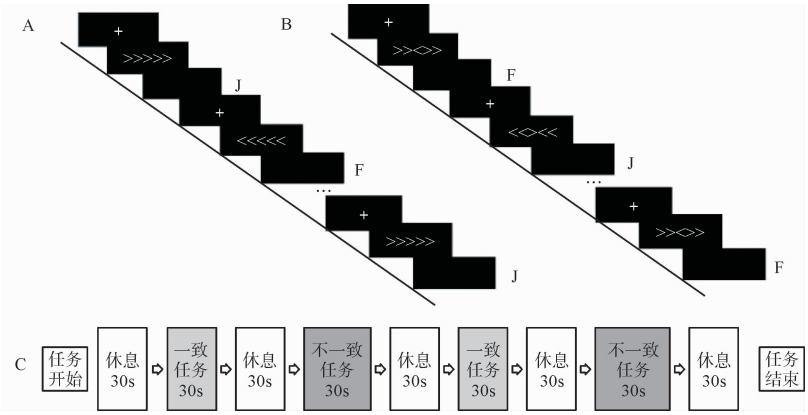


图 1　Flanker 任务流程

Fig. 1　Flowchart of the Flanker task

1.4　功能性近红外光谱测试　采用荷兰 Artinis Octamon 8 通道便携式 fNIRS 系统测试，采样频率 10Hz，光源波长为 780/850nm；光极按 EEG 10～20 系统对称放置于前额叶。经 NIRS-SPM 定位，前额叶覆盖 BA10、BA11、BA46 布罗德曼区，依据感兴趣区划分为 5 个脑区：左侧背外侧前额叶(left dorso-

lateral prefrontal cortex，L-DLPFC)(通道 5、6 和 7)、右侧背外侧前额叶(right dorsolateral prefrontal cortex，R-DLPFC)(通道 1、2 和 3)、眶额皮层(通道 4 和 8)、右额极前额叶皮层(通道 3 和 4)和左额极前额叶皮层(通道 7 和 8)。见图 2。将 fNIRS 数据导入 Matlab(R2013b) Homer2 预处理：以 0.01Hz 高通、0.1Hz 低通滤波处理，设置参数去除运动伪影并校正；再通过修正的比尔-朗伯定律转换血氧信号，选取氧合血红蛋白(oxygenated hemoglobin，oxy-Hb)浓度为分析指标；通过一般线性模型及 NIRS-SPM 计算 β 值作为脑区激活指标，并进行 FDR 校正($P<0.05$)以避免假阳性。

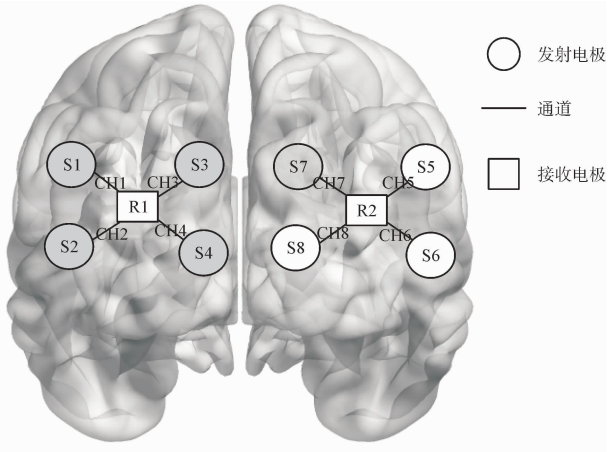


图 2 近红外光谱通道放置

Fig. 2 fNIRS channel placement

1.5 实验设计和流程 采用 2(组别：高/低 CRF 组)×2(Flanker 任务类型：一致/不一致)×2(时间：前/后测)三因素混合实验设计，对两组进行为期 12 周、每周 3 次、每次 60min 的课外排球训练。干预于周一、周三、周五课后 1h 进行，采用中等强度混合训练，整合排球技能训练与实战练习[26]。干预前后完成脑认知数据采集，正式采集前对被试进行培训练习；采集时先进行 3min 静息态基线测量，再完成 Flanker 任务并同步记录前额叶皮层血氧信号。见图 3。

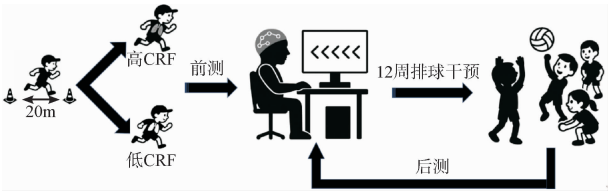


图 3 实验流程图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental procedure

1.6 统计学方法 采用 IBM SPSS statistics 22.0 对所有数据进行统计分析，采用独立样本 t 检验、χ^2 检验、2×2×2 重复测量方差分析及 Pearson 相关分析进行统计检验。$P<0.05$ 为差异有统计学意义

2 结 果

2.1 人口统计学结果 2 名被试因数据伪影大被剔除，干预流失 5 名，最终 77 名纳入分析。两组间性别、年龄、身高和体质量指数(body mass index，BMI)差异无统计学意义($P>0.05$)，具有组间同质性。但低 CRF 组体重显著高于高 CRF 组($P<0.05$)，故将体重作为协变量纳入后续分析。见表 1。

表 1 被试基本信息($\bar{x}\pm s$)

Tab. 1 Demographic characteristics of participants($\bar{x}\pm s$)

项目	低 CRF(n=38)	高 CRF 组(n=39)	t/χ^2 值	P 值
性别(男/女，n，%)	22(57.9)/16(42.1)	20(51.3)/19(48.7)	0.339[a]	0.560
年龄(岁)	9.76±0.97	9.77±1.13	−0.025[b]	0.980
身高(cm)	143.53±10.03	140.62±9.67	1.297[b]	0.199
体重(kg)	36.57±10.03	32.10±7.58	2.036[b]	0.045
BMI(kg/m^2)	17.40±3.38	16.10±2.54	1.924[b]	0.059
前测 CRF(圈)	12.58±6.72	31.59±8.82	−10.616[b]	<0.001
后测 CRF(圈)	15.97±9.61	30.13±8.04	−7.017[b]	<0.001

注：[a]χ^2 值，[b]t 值。

2.2 心肺功能比较 重复测量方差分析显示，时间与组别的交互作用显著[$F_{(1,75)}=4.447$，$P=0.030$，$\eta_p^2=0.056$]，简单效应分析显示，低 CRF 组干预后 20mSRT 成绩显著提升($P<0.05$)，高 CRF 组干预前后差异无统计学意义($P>0.05$)，但高 CRF 组前、后测成绩均显著高于低 CRF 组($P<0.001$)。

2.3 抑制控制 Flanker 任务平均正确率的重复测量方差分析显示：时间、任务类型和组别的主效应均显著($P<0.05$)。见图 4A。时间与任务类型的交互作用也显著($P<0.05$)，简单效应分析显示，两种

任务条件下高低 CRF 组后测正确率均显著高于前测（$P<0.001$）。见图 4B。Flanker 任务平均反应时的 2×2×2 的重复测量方差分析显示：时间、任务类型和组别的主效应均显著（$P<0.05$）；其他交互作用均无统计学意义（$P>0.05$）。见图 4C，见表 2。

表 2　Flanker 任务反应时、正确率和 oxy-Hb 的重复测量方差分析结果

Tab. 2　Repeated-measures ANOVA results for reaction time, accuracy, and oxy-Hb of the Flanker task

变量	变异来源	df	F 值	P 值	η_p^2
正确率	时间	1，75	75.120	<0.001	0.500
	组别	1，75	4.427	0.039	0.045
	任务类型	1，75	68.721	<0.001	0.478
	时间×任务类型	1，75	6.521	0.013	0.080
反应时	时间	1，75	39.361	<0.001	0.344
	组别	1，75	4.776	0.032	0.060
	任务类型	1，75	139.148	<0.001	0.650
L-DLPFC oxy-Hb	组别	1，75	6.568	0.012	0.081
R-DLPFC oxy-Hb	时间	1，75	25.251	<0.001	0.250
	组别	1，75	15.190	<0.001	0.168
	任务类型	1，75	20.140	<0.001	0.212
	时间×组别	1，75	4.343	0.041	0.055
	时间×任务类型	1，75	4.112	0.046	0.052

2.4　*脑神经活动*　L-DLPFC oxy-Hb 浓度均值进行的 2×2×2 重复测量方差分析显示：组别的主效应显著（$P<0.05$）；其他变量的主效应和交互作用均无统计学意义（$P>0.05$）。见图 4D。R-DLPFC oxy-Hb 浓度进行的 2×2×2 重复测量方差分析显示：时间、任务类型和组别的主效应均显著（$P<0.001$）；时间与组别的交互作用显著（$P<0.05$），简单效应分析表明，前测高 CRF 组 oxy-Hb 显著高于低 CRF 组（$P<0.001$），后测差异无统计学意义（$P>0.05$）；两组后测 oxy-Hb 均显著升高（高 CRF $P<0.05$；低 CRF $P<0.001$）。见图 4E。时间与任务类型的交互作用显著（$P<0.05$），简单效应分析表明，高低 CRF 两组儿童在后测一致和不一致任务中的 oxy-Hb 均显著高于前测（$P<0.05$）。见图 4F，表 2。

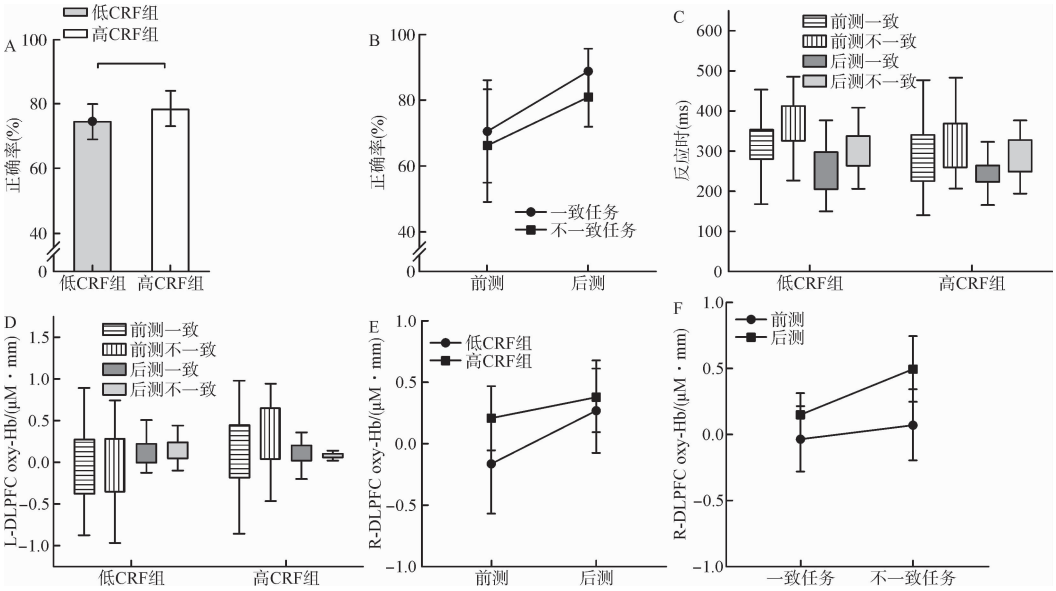


图 4　抑制控制及前额叶的 oxy-Hb 浓度

Fig. 4　Inhibitory control and oxy-Hb concentration of prefrontal cortex

对前后测各个通道的 β 值（不一致任务减去一致任务）进行配对样本 t 检验，根据 t 值结果分别绘制高、低 CRF 组在完成 Flanker 任务时的 3D 激活图。结果显示，在高 CRF 组中，与干预前相比，R-

DLPFC 的激活增加，L-DLPFC 的激活降低；而在低 CRF 组中，与干预前相比，干预后双侧 DLPFC 的激活均增加。见图 5。

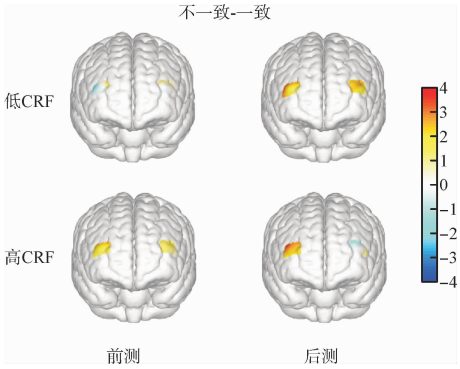


图 5 高、低 CRF 组完成 Flanker 任务的脑区激活

Fig. 5 Flanker task-related brain activation in high and low CRF groups

2.5 *抑制控制和脑神经活动的关联分析* 对 Zδ 反应时、Zδ 正确率和 Zδ oxy-Hb（后测减前测的标准差）进行 Pearson 相关分析显示，在一致任务（$r=0.769$）和不一致任务（$r=0.688$）任务中 Zδ 反应时与 Zδ 正确率均呈显著正相关（$P<0.001$）。见图 6A 和 6B。高、低 CRF 组不一致任务的 Zδ 正确率和R-DLPFC 的 Zδ oxy-Hb 均呈显著正相关（高：$r=0.354$，$P=0.027$；低：$r=0.469$，$P=0.003$）。见图 6C 和 6D。

3 讨 论

3.1 *课外身体活动对 CRF 的影响* 经过为期 12 周的课外身体活动干预，低 CRF 组成绩显著提升，可能是其身体各系统能够敏锐感知训练刺激，启动生理调节机制，从而改善 CRF[27-28]。虽然高 CRF 组在干预后的成绩提升不明显，但其整体水平依然显

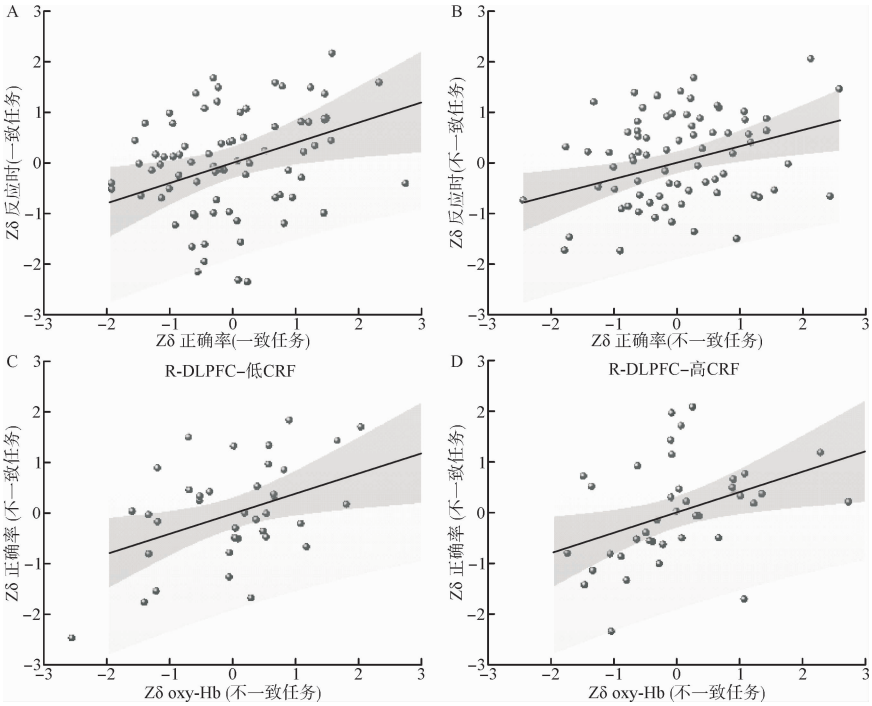


图 6 抑制控制和脑神经活动的关联分析

Fig. 6 Correlation analysis between inhibitory control and brain neural activity

著高于低 CRF 组，这提示高 CRF 组可能需要更高强度、更长时间或更复杂的训练方案才能有效[29-30]。以往研究通常采用横断面设计探讨加速度计测量的身体活动水平与 CRF 之间的关系。本研究采用纵向设计证实了身体活动可改善儿童的 CRF，为因果推断提供依据。

3.2 *课外身体活动对抑制控制的影响* 干预前一致任务中两组反应时无显著差异，随任务难度升高，不一致任务反应时增加、正确率下降，符合信息加工理论[31]。高 CRF 组抑制控制任务反应时更短，支持体适能假说[32-33]；两组间正确率差异无统计学意义（$P>0.05$），根据速度与准确率权衡法则，个体可能会在反应时和准确率两者间进行取舍[34]；反应时与正确率呈显著正相关（$r=0.769$、0.688），符合认知实验中随反应时增加正确率逐步上升的规律，直到最高渐近线水平[35]。干预后儿童的抑制控制改

善，排球作为一项开放性运动，可通过多认知过程协同促进抑制控制[36]。虽然干预后两组差异无统计学意义，但是低 CRF 组改善更明显。从个体差异角度，可能是高低 CRF 组的抑制控制基线与提升空间不同[37]；从干预方案角度，中等强度的身体活动可能更适合低 CRF 个体，高 CRF 个体需要高强度的间歇训练[29]。一项研究发现高 CRF 个体更能从运动中受益[17]，该研究样本量较小且采用前后各 50% 的宽松分组方法，这可能是结果差异的原因。

3.3　*课外身体活动对脑神经活动的影响*　干预前高 CRF 组双侧 DLPFC 激活均显著高于低 CRF 组。Chaddock 等[38]的 fMRI 研究与上述结果相似，发现高 CRF 组在执行认知任务时能够显著激活额顶叶，表现出更佳的神经适应能力。这是由于较高 CRF 个体通常具有更好的脑血流量和氧气供应能力，促进了大脑皮层的神经活动[39]。本研究还发现干预后高 CRF 组 R-DLPFC 激活增加，低 CRF 组 L-DLPFC 和 R-DLPFC 的激活均显著增加。一项 fNIRS 研究也发现干预后儿童左侧前额叶的激活增加[40]；fMRI 研究也发现，干预后儿童额上回和前扣带回的激活增加[41]。脑区激活部位的不同可能与干预目标、评估指标或成像技术不同有关。本研究关注的 DLPFC 是抑制控制的重要脑区，其功能存在侧化：L-DLPFC 更侧重语言相关的抑制控制，而 R-DLPFC 更侧重视觉空间的抑制控制[42]。本研究使用的 Flanker 任务侧重于视觉空间任务，故两组儿童 R-DLPFC 的激活均显著增加。进一步比较发现，高 CRF 组 L-DLPFC 的激活显著降低，而低 CRF 组 L-DLPFC 的激活显著增加，根据补偿相关神经环路假说，低 CRF 个体在完成认知任务时会通过激活额外的脑区来募集更多神经资源，以补偿认知资源的减少，从而维持认知加工能力[43]。

3.4　*脑神经活动与抑制控制的关联分析*　关联分析显示，两组儿童 R-DLPFC 的激活增加与抑制控制改善均呈显著正相关。这与 Li 等[44]的元分析结果一致，证实了神经可塑性理论，即长期规律的身体活动能够增强大脑功能，进而促进认知。低 CRF 组的相关性更强，高 CRF 组则表现出较弱的关联，这反映了个体认知资源利用方式的差异。低 CRF 组较强的相关性可能反映了代偿机制[43]，而高 CRF 组较弱的相关性则可用神经效率假说解释[45]。两组差异还提示 CRF 可能在脑区激活与抑制控制间起调节作用，但研究间存在差异。如 Ludyga 等[46]的研究发现脑区激活与认知改善的关联不受 CRF 调节，这可能与横断面研究仅测量某一时间点上的静态相关，难以揭示变量随时间变化的因果关系。相比之下，本研究采用纵向设计，能够捕捉 CRF 水平的变化在时间维度上如何影响大脑功能与抑制控制，更具解释力。未来亟需更多纵向研究探索 CRF 对脑与认知关联的调节机制。

综上所述，本研究结果表明，运动干预显著提升了高、低 CRF 儿童的抑制控制能力及双侧 DLPFC 的神经激活，低 CRF 组获益更为明显；进一步分析表明，CRF 在其中发挥调节作用，运动通过提升 CRF 水平，特异性增强 R-DLPFC 的激活，进而促进抑制控制能力的改善。然而，本研究仍存在不足：一是运动训练未客观量化强度，难以保证统一负荷，未来可采用心率监测提升干预精准性与可重复性；二是仅使用 8 通道 fNIRS 覆盖前额叶，而抑制控制涉及多脑区，后续可增加通道数或结合 EEG、fMRI 等多模态技术，从多层面探究其脑神经机制。

利益冲突声明　本文不存在利益冲突

数据可用性声明　本研究的原始数据因涉及参与者隐私保护、伦理限制及法律约束等原因，无法公开共享。经脱敏处理后的数据可根据合理请求，向负责人钟晓珂（邮箱：zhongxiaoke2020@cupes.edu.cn）/蒋长好（邮箱：jiangchanghao@cupes.edu.cn）申请获取。申请人须通过伦理委员会审批，并签署数据使用协议。

AIGC **工具使用声明**　在本研究的准备过程中，作者使用了 ChatGPT 来润色英文摘要，作者根据需要对生成内容进行了必要的审查和编辑，并对出版物的内容承担全部责任。

参考文献

[1] Diamond A. Executive functions[J]. Annu Rev Psychol, 2013, 64: 135-168.

[2] Nigg JT. On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy[J]. Psychol Bull, 2000, 126(2): 220-246.

[3] Xu Y, Ma Y, Rahman Q. Sexualorientation, pubertal timing, inhibitory control, and adolescent depressive symptoms: A birth cohort study[J]. Arch Sex Behav, 2025, 54(10): 4157-4170.

[4] Mirabella G. Inhibitory control and impulsive responses in neurodevelopmental disorders[J]. Dev Med Child Neurol, 2021, 63(5): 520-526.

[5] Friedman NP, Robbins TW. The role of prefrontal cortex in cognitive control and executive function[J]. Neuropsychopharmacology, 2022, 47(1): 72-89.

[6] Santos de Sousa Fernandes M, Ordônio TF, Santos GCJ, et al. Effects of physical exercise on neuroplasticity and brain function: A systematic review in human and animal studies[J]. Neural Plast, 2020, 2020: 8856621.

[7] García-Hermoso A, Ramírez-Vélez R, Lubans DR, et al. Effects of physical education interventions on cognition and

academic performance outcomes in children and adolescents: A systematic review and Meta-analysis[J]. Br J Sports Med, 2021, 55(21): 1224-1232.

[8] Amatriain-Fernández S, Ezquerro García-Noblejas M, Budde H. Effects of chronic exercise on the inhibitory control of children and adolescents: A systematic review and Meta-analysis[J]. Scand J Med Sci Sports, 2021, 31(6): 1196-1208.

[9] Zhong X, Wang C, Xu M, et al. Physical training improves inhibitory control in children aged 7 - 12 years: An fNIRS study[J]. Behav Brain Res, 2024, 463: 114902.

[10] Wade NE, Kaiver CM, Wallace AL, et al. Objective aerobic fitness level and neuropsychological functioning in healthy adolescents and emerging adults: Unique sex effects[J]. Psychol Sport Exerc, 2020, 51:101794.

[11] Dai YF, Zhong XK, Gao XY, et al. Aerobic fitness as a moderator of acute aerobic exercise effects on executive function[J]. Cereb Cortex, 2024, 34(4): bhae141.

[12] Jones AM, Carter H. The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness[J]. Sports Med, 2000, 29(6): 373-386.

[13] Spirduso WW. Physical fitness, aging, and psychomotor speed: A review[J]. J Gerontol, 1980, 35(6): 850-865.

[14] Hsieh SS, Chueh TY, Morris TP, et al. Greater childhood cardiorespiratory fitness is associated with better top-down cognitive control: A midfrontal *Theta* oscillation study[J]. Psychophysiology, 2020, 57(12): e13678.

[15] Solis-Urra P, Sanchez-Martinez J, Olivares-Arancibia J, et al. Physical fitness and its association with cognitive performance in Chilean school children: The cogni-action project[J]. Scand J Med Sci Sports, 2021, 31(6): 1352-1362.

[16] Muntaner-Mas A, Mora-Gonzalez J, Cabanas-Sánchez V, et al. Prospective associations between physical fitness and executive function in adolescents: The UP&DOWN study[J]. Psychol Sport Exerc, 2022, 61: 102203.

[17] Netz Y, Herschkovitz SF, Levin O, et al. The effect of acute exercise on cognitive and motor inhibition-Does fitness moderate this effect[J]. Psychol Sport Exerc, 2023, 65: 102344.

[18] Luo X, Herold F, Ludyga S, et al. Association of physical activity and fitness with executive function among preschoolers[J]. Int J Clin Health Psychol, 2023, 23(4): 100400.

[19] Ludyga S, Gerber M, Brand S, et al. Acute effects of moderate aerobic exercise on specific aspects of executive function in different age and fitness groups: A Meta-analysis[J]. Psychophysiology, 2016, 53(11): 1611-1626.

[20] Liu B, Yu J, Wu J, et al. Runners with better cardiorespiratory fitness had higher prefrontal cortex activity during both single and exercise-executive function dual tasks: An fNIRS study[J]. Front Physiol, 2023, 14: 1246741.

[21] Cui J, Zou L, Herold F, et al. Does cardiorespiratory fitness influence the effect of acute aerobic exercise on executive function?[J]. Front Hum Neurosci, 2020, 14: 569010.

[22] 钟晓珂，黄辰，徐晓红，等. 心肺功能与小学儿童抑制控制的关系：基于 fNIRS 的研究[J]. 首都体育学院学报，2024，36(4)：464-472.
Zhong XK, Huang C, Xu XH, et al. The relationship between cardiopulmonary fitness and inhibitory control in elementary school children: An fNIRS study[J]. J Cap Univ Phys Educ Phys, 2024, 36(4): 464-472. (in Chinese)

[23] Léger LA, Mercier D, Gadoury C, et al. The multistage 20 metre shuttle run test for aerobic fitness[J]. J Sports Sci, 1988, 6(2): 93-101.

[24] Rollo S, Fraser BJ, Seguin N, et al. Health-related criterion-referenced cut-points for cardiorespiratory fitness among youth: A systematic review[J]. Sports Med, 2022, 52(1): 101-122.

[25] Eriksen BA, Eriksen CW. Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task[J]. Percept Psychophys, 1974, 16(1): 143-149.

[26] 国家体育总局. 全民健身指南[EB/OL]. (2017-08-11)[2025-12-20]. https://www.sport.gov.cn/n315/n20067006/c20324479/content.html

[27] Hartwig TB, Sanders T, Vasconcellos D, et al. School-based interventions modestly increase physical activity and cardiorespiratory fitness but are least effective for youth who need them most: An individual participant pooled analysis of 20 controlled trials[J]. Br J Sports Med, 2021, 55(13): 721-729.

[28] Manzano-Carrasco S, Garcia-Unanue J, Haapala EA, et al. Relationships of BMI, muscle-to-fat ratio, and handgrip strength-to-BMI ratio to physical fitness in Spanish children and adolescents[J]. Eur J Pediatr, 2023, 182(5): 2345-2357.

[29] Feng X, Zhang Z, Jin T, et al. Effects of open and closed skill exercise interventions on executive function in typical children: A Meta-analysis[J]. BMC Psychol, 2023, 11(1): 420.

[30] Gejl AK, Bugge A, Ernst MT, et al. Effects of 9 weeks of high-or moderate-intensity training on cardiorespiratory fitness, inhibitory control, and plasma brain-derived neurotrophic factor in Danish adolescents—A randomized controlled trial[J]. Scand J Med Sci Sports, 2024, 34(8): e14703.

[31] Wenger MJ, Townsend JT. Basic response time tools for studying general processing capacity in attention, perception, and cognition[J]. J Gen Psychol, 2000, 127(1): 67-99.

[32] Grao-Cruces A, Martín-Acosta F, Vaquero-Solís M, et al. Fitness, weight status and executive functions in adolescents: A cluster analysis[J]. Scand J Med Sci Sports, 2025, 35(8): e70098.

[33] 陈爱国，熊轩，朱丽娜，等. 体育运动与儿童青少年脑智提升：证据与理论[J]. 体育科学，2021,41(11):43-51.
Chen AG, Xiong X, Zhu LN, et al. Physical exercise and development of brain and mind in children and adolescents: Evidence and theory[J]. China Sport Sci, 2021, 41(11): 43-51. (in Chinese)

（下转第 1256 页）

Liang Y, He YX, Zhou L. Research advances on the relationship between motor competence and physical activity and its influencing factors for children[J]. Chin J Child Health Care, 2023, 31(5): 502-506, 580. (in Chinese)

[19] 王丽娟，肖毅. 父母因素对子女闲暇时间体力活动的影响——从性别差异的角度分析[J]. 上海体育学院学报，2018，42(1)：79-86.
Wang LJ, Xiao Y. Effect of parents factors on the leisure-time physical activity of their children based on gender perspectives[J]. Journal of Shanghai University of Sport, 2018, 42(1): 79-86. (in Chinese)

[20] 胡梦珠，郝寅君，崔乃雪. 祖辈参与教养与学龄前儿童屏幕暴露的关系[J]. 中国儿童保健杂志，2023，31(12)：1302-1307.
Hu MZ, Hao YJ, Cui NX. Relationship between grandparental involvement in parenting and screen exposure of preschoolers[J]. Chin J Child Health Care, 2023, 31(12): 1302-1307. (in Chinese)

[21] 王欢，杨慧婷，陈艳杰. 3～5 岁学前儿童动作技能和家庭环境变化对协调能力发展的影响——基于 1 年的追踪研究[J]. 体育科学，2021，41(3)：55-62.
Wang H, Yang HT, Chen YJ. Effects of motor skills and family environment on the development of coordination ability in preschool children aged 3 to 5 years: A one-year follow-up study[J]. China Sport Science, 2021, 41(3): 55-62. (in Chinese)

[22] 王光旭，张铈堃，苏杉，等. 不同体育活动方案干预对学龄前儿童基本动作技能的影响[J]. 上海体育学院学报，2023，47(9)：85-94.
Wang GX, Zhang SK, Su S, et al. Effects of different physical exercise program interventions on fundamental movement skills of preschool children[J]. Journal of Shanghai University of Sport, 2023, 47(9): 85-94. (in Chinese)

[23] Goodway JD, Ozmun JC, Gallahue DL. Understanding motor development: Infants, children, adolescents, adults[M]. 8th ed. Boston: McGraw Hill, 2019.

[24] 张红，汪馨垚，姚春花，等. 学龄前儿童居家户外活动时间的影响因素[J]. 中国儿童保健杂志，2023，31(5)：481-485.
Zhang H, Wang XY, Yao CH, et al. Influencing factors of the home-based outdoor activities time among preschoolers[J]. Chin J Child Health Care, 2023, 31(5): 481-485. (in Chinese)

收稿日期：2025-11-19 **修回日期**：2026-09-01 **本文编辑**：李少闻

（上接第 1250 页）

[34] Kang I, De Boeck P, Ratcliff R. Modelingconditional dependence of response accuracy and response time with the diffusion item response theory model[J]. Psychometrika, 2022, 87(2):725-748.

[35] Chen HQ, De Boeck P, Grady M, et al. Curvilinear dependency of response accuracy on response time in cognitive tests[J]. Intelligence, 2018, 69: 16-23.

[36] Ludyga S, Mücke M, Andrä C, et al. Neurophysiological correlates of interference control and response inhibition processes in children and adolescents engaging in open-and closed-skill sports[J]. J Sport Health Sci, 2022, 11(2): 224-233.

[37] Ishihara T, Drollette ES, Ludyga S, et al. The effects of acute aerobic exercise on executive function: A systematic review and Meta-analysis of individual participant data[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2021, 128: 258-269.

[38] Chaddock L, Erickson KI, Prakash RS, et al. A functional MRI investigation of the association between childhood aerobic fitness and neurocognitive control[J]. Biol Psychol, 2012, 89(1): 260-268.

[39] Salzman T, Dupuy O, Fraser SA. Effects of cardiorespiratory fitness on cerebral oxygenation in healthy adults: A systematic review[J]. Front Physiol, 2022, 13: 838450.

[40] Lai YH, Wang ZP, Yue GH, et al. Determining whether tennis benefits the updating function in young children: A functional near-infrared spectroscopy study[J]. Appl Sci, 2020, 10(1): 407.

[41] Krafft CE, Schwarz NF, Chi L, et al. An 8-month randomized controlled exercise trial alters brain activation during cognitive tasks in overweight children[J]. Obesity, 2014, 22(1): 232-242.

[42] Ocklenburg S, Guo ZV. Cross-hemispheric communication: Insights on lateralized brain functions[J]. Neuron, 2024, 112(8): 1222-1234.

[43] McDonough IM, Madan CR. Structural complexity is negatively associated with brain activity: A novel multimodal test of compensation theories of aging[J]. Neurobiol Aging, 2021, 98: 185-196.

[44] Li G, Xia H, Teng G, et al. The neural correlates of physical exercise-induced general cognitive gains: A systematic review and Meta-analysis of functional magnetic resonance imaging studies[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2025, 169: 106008.

[45] Speer ME, Soldan A. Cognitive reserve modulates ERPs associated with verbal working memory in healthy younger and older adults[J]. Neurobiol Aging, 2015, 36(3): 1424-1434.

[46] Ludyga S, Mücke M, Colledge FMA, et al. A combined EEG-fNIRS study investigating mechanisms underlying the association between aerobic fitness and inhibitory control in young adults[J]. Neuroscience, 2019, 419: 23-33.

收稿日期：2025-11-20 **修回日期**：2026-06-16 **本文编辑**：李少闻