

超越屏幕：运动视频游戏训练可以 更好提升儿童执行功能*

马超 赵璐 赵鑫

(西北师范大学心理学院, 兰州 730070)

摘要 运动视频游戏作为一种兼顾身体运动与认知任务的创新型训练方式, 其不同组合模式对儿童执行功能的影响, 以及认知参与和运动强度在其中的作用, 仍是当前运动-认知领域亟待深入探索的核心议题。本研究通过两项系统性实验考察究竟何种形式的运动视频游戏训练更有利于儿童执行功能的发展。实验1比较融合式(运动视频游戏)与结合式(运动+视频游戏)两种训练模式的差异化影响, 结果表明, 运动视频游戏训练显著提升了儿童的反应抑制和工作记忆刷新能力, 且效果明显优于运动+视频游戏训练。补充实验进一步发现, 相比于年轻成人, 儿童群体在运动视频游戏训练中获得了更大的认知收益, 这得益于其更高的神经可塑性。实验2进一步剖析运动强度和认知参与的作用机制, 结果显示, 认知参与对反应抑制能力的促进作用较运动强度更为显著且持久; 在工作记忆刷新方面, 运动强度和认知参与均发挥积极作用, 但二者未表现出交互效应, 提示两者可能通过独立的神经通路影响执行功能。总的来说, 本研究揭示了运动视频游戏训练在儿童执行功能提升方面的显著效果及作用机制, 为具身认知理论和认知刺激假说提供了新的实证支持, 提示未来研究应优先采用融合式训练模式, 强化认知任务的设计, 并结合个体差异调整运动强度, 以优化训练效果。

关键词 运动视频游戏, 执行功能, 儿童, 运动强度, 认知参与

分类号 B844

1 引言

执行功能(Executive function, EF)作为调控认知加工、情绪调节和行为控制的核心心理机制, 已成为发展心理学和教育心理学领域的重要研究对象。根据 Miyake 等人(2000)所提出的三维经典模型, 执行功能由三个核心子成分构成: 抑制控制、工作记忆与注意转换。在执行功能的多维结构中, 工作记忆是抑制控制与注意转换的核心支撑系统, 抑制控制通过屏蔽干扰信息提供稳定的认知资源, 而注意转换依赖工作记忆对任务规则的更新与维持, 执行功能的整体效能源自三个子成分的协同作用, 而非单一功能的独立发挥(Diamond, 2013)。其中, 抑

制控制还可以区分为反应抑制和干扰抑制, 前者强调对冲动反应的抑制, 后者则指向对无关信息或干扰源的排除(马超 等, 2025; Ma et al., 2025)。这些执行功能成分在涉及儿童认知发展的多个维度中均发挥着至关重要的作用(Blakey et al., 2020), 尤以数学、语言理解与阅读等学业能力的发展最为显著(赵鑫 等, 2020; 祝孝亮, 赵鑫, 2023; Schäfer et al., 2024)。同时, 执行功能还是情绪调节与课堂行为改善的关键支撑(Best, 2010; Diamond & Ling, 2016; Lakes & Hoyt, 2004; Mullender-Wijnsma et al., 2016), 其缺陷被广泛认为与注意缺陷多动障碍(ADHD)、冲动控制障碍和内化问题等心理风险密切相关(Cumming et al., 2019; Mothes et al., 2017)。

收稿日期: 2025-03-27

* 国家自然科学基金项目(32260207), 教育部人文社会科学研究项目(21XJA190005), 2025 年甘肃省高校研究生“创新之星”项目(2025CXZX-LXB050)资助。

通信作者: 赵鑫, E-mail: psyzhaoxin@nwnu.edu.cn

尽管执行功能在整个生命历程中不断发展,但儿童期被普遍视为其发展最迅速、最具可塑性的关键阶段(Contreras-Osorio et al., 2022; McEwen & Morrison, 2013)。这一观点不仅得到了神经发育研究的支持,也为儿童阶段的干预提供了理论基础。已有研究表明,相比于成年人,儿童群体在接受计算机化执行功能训练(如 Go/No-go、Stroop、N-back 任务)后表现出了更强的训练效果,这种效果不仅体现在特定任务表现(如反应抑制、干扰抑制、工作记忆刷新)的提升上,还体现在对其他认知成分的迁移方面,如前瞻记忆和流体智力等(Zhao et al., 2018a, 2018b; Zhao & Jia, 2019)。此外,通过数字转换任务所进行的注意转换训练也在儿童群体中展现出较强的近迁移与远迁移潜力(Zhao et al., 2020)。然而,这类训练由于其高度程序化和低趣味性,往往在长期应用中面临儿童依从性下降的问题,且静态训练模式还可能引发久坐、肥胖等身体健康风险(Gu et al., 2019; Irak & Soylu, 2023)。因此,寻找一种既能激发儿童兴趣,又兼备有效性与生态适应性的干预方式,成为当前执行功能干预研究的核心议题。

体育运动作为一种自然嵌入日常生活的干预方式,近年来在认知神经科学领域获得了广泛关注。大量的元分析与实证研究表明,规律性的体育活动不仅能够有效提升儿童的体能水平,还能在一定程度上促进执行功能等核心认知能力的发展(Chang et al., 2017; Contreras-Osorio et al., 2021; Festa et al., 2023; Formenti et al., 2021; Ishihara et al., 2017; Magistro et al., 2022; Shi et al., 2022)。然而,尽管体育运动的积极效益已被广泛证实,但其对执行功能的促进效应并非单一、稳定或线性的,而是受到多重因素的调节,诸如运动持续时间、运动强度以及认知参与等(Best, 2010; Diamond & Ling, 2016)。现有研究表明,单纯依赖身体运动属性的体育活动往往更侧重于体能或动作技能的训练(Schmidt et al., 2015; Wang et al., 2019),而在认知负荷、策略性决策与注意控制等方面的激发相对有限。这种以“体能导向”为主的运动形式虽然能够带来短期的生理活化,但对执行功能的持续提升效果较为有限(Pesce, 2012; Tomporowski et al., 2015)。因此,单纯的体育运动可能不足以引发儿童执行功能的显著改善。

为了突破单一运动干预形式的局限,同时弥补其认知刺激的不足,近年来运动-认知联合训练

(Motor-Cognitive Training)广受研究者关注。这种联合干预的手段通过整合体育运动和认知训练中的有益成分,旨在最大限度地提升个体的认知功能(Charrier et al., 2024)。实证研究表明,与单一的体育运动或认知训练相比,二者结合所产生的干预效果更为显著,尤其在执行功能提升方面表现出了更大的认知收益(Eggenberger et al., 2015; Ji et al., 2020; Lauenroth et al., 2016; Stojan & Voelcker-Rehage, 2019)。根据“适应能力模型”(Adaptive Capacity Model, ACM),运动与认知训练的联合干预可能产生叠加效应和协同作用:运动通过促进神经元增殖和突触可塑性增强大脑可塑性,而认知训练则有助于新生神经元的存活和整合,从而共同促进神经网络的重塑与功能优化(Raichlen & Alexander, 2017)。此外,“促进-引导模型”(Facilitate-Guide Model)同样认为,在运动-认知联合训练中,运动主要起到促进神经可塑性变化的作用,而认知刺激则负责引导这些变化的方向和模式(Fabel et al., 2009; Huber et al., 2024)。两者结合不仅可以增加脑血流量和神经生长因子的分泌,还能通过改善脑结构和增强神经回路的功能连接,提升认知储备和大脑的适应能力(Castellote-Caballero et al., 2024)。这些机制共同解释了为何运动-认知联合训练会在提升执行功能方面展现出超越单一干预手段的优势。尽管如此,但现有的运动-认知联合干预措施仍存在一定局限。一方面,部分训练设计认知刺激过弱,难以有效激发高阶认知加工过程,如边走路边进行单词列表的编码或语言流利性训练(Ji et al., 2020; Schaefer & Schumacher, 2011)。另一方面,若认知任务过于复杂,则会导致认知负荷过高,降低儿童参与的积极性,如边进行运动任务边完成计算机化认知任务(Lauenroth et al., 2016; Lucia et al., 2023)。因此,如何在认知刺激与动机激励之间找到一个平衡点,是干预研究设计中的关键问题。

随着智能设备的普及,研究者逐渐认识到视频游戏训练(Video Game Training)在促进儿童执行功能发展方面的潜力。作为一种复杂的认知活动,视频游戏要求玩家在动态情境中整合注意、抑制、策略规划与任务切换等多种认知过程,从而有效激发认知可塑性,促进大脑结构与功能的可调节性(Anzeneder et al., 2023; Gates et al., 2019; George et al., 2023; Yao et al., 2020)。然而,视频游戏训练也面临两项核心争议:其一,干预效果的持久性尚不确定;其二,久坐与长期屏幕暴露可能带来身体

健康风险(Irak & Soyly, 2023)。为整合视频游戏训练的认知优势并规避其健康隐患,研究者提出了将身体活动与游戏化认知挑战相结合的运动视频游戏训练(Sports Video Game/Exergaming Training)。该干预模式根植于具身认知理论(Embodied Cognition Theory),旨在充分发挥运动训练与视频游戏训练的优越性,强调认知并不是仅局限于大脑内部的信息处理过程,而是与身体运动、感觉反馈及环境的动态交互过程紧密相关(Foglia & Wilson, 2013)。这种多感官通道(如视觉、听觉、前庭觉和本体觉)的输入,不仅可以激活更为广泛的脑区,还可以提高认知加工的效率,从而促进执行功能的多维发展,增强个体在动态环境中的决策和执行控制能力(Herold et al., 2018; Huber et al., 2024)。

然而,现有研究多集中于老年人群,用以延缓认知衰退或康复训练(Charrier et al., 2024),针对正处于认知快速发展的儿童群体,系统性证据仍然有限。尤其在运动与认知任务如何整合以最大化执行功能收益方面,研究尚存在理论空白。依据 Herold 等人(2018)的运动-认知联合训练框架,运动视频游戏训练还可进一步区分为融合式与结合式两种模式。所谓融合式训练模式,是指将认知任务“嵌入”到运动任务中去,认知任务是成功完成运动任务的先决条件,强调运动与认知的高度整合,使个体同步提升认知控制和运动协调能力,即运动视频游戏训练。相比之下,结合式训练模式,是指将运动任务与认知任务并行进行,但两者在训练内容上互不关联,个体需要在进行运动训练的同时,独立完成视频游戏任务,即运动+视频游戏训练。尽管这两种训练模式在理论机制上具有区分度,但目前尚缺乏系统研究比较其在提升执行功能方面的差异性及其作用机制。

基于此,本研究的实验1旨在考察不同组合模式(融合式/结合式)的运动视频游戏训练是否会对儿童执行功能各成分产生不一样的影响路径。为排除潜在的双任务干扰效应,我们同时设置纯运动与纯视频游戏两组,从而验证融合式训练模式的独特效果。根据具身认知理论,融合式训练模式能够更强地激活身体-环境-认知的耦合系统,促使个体在动作执行中持续进行策略调整与感知反馈整合,从而更高效地激活前额叶执行网络(Barsalou, 2008; Glenberg, 2010; Herold et al., 2018; Huber et al., 2024)。相比之下,结合式模式因任务间关联较弱,可能无法充分调动这种跨系统的动态整合过程。因此,从具身认知视角出发,实验1我们假设:与“运

动+视频游戏”这种结合式训练模式相比,“运动视频游戏”融合式训练模式的“身体-认知共激活”机制更能促进儿童执行功能的多维发展。除此之外,为进一步探讨运动视频游戏训练所带来的认知收益是否特定于儿童群体,我们在补充实验中增加了年轻成人作为比较组,旨在明确运动视频游戏训练对不同发展阶段个体的认知益处。我们假设:与年轻成人相比,儿童群体将在相同的运动视频游戏训练中获得更多的认知收益。

已有研究进一步指出,运动视频游戏训练干预的效果还取决于运动强度与认知参与两个关键机制变量(Pesce, 2012)。依据唤醒理论(Arousal Theory),高强度运动可增强脑代谢与血流量,从而提升信息加工效率(Audiffren et al., 2008; Best, 2012);而“认知刺激假说”(Cognitive Stimulation Hypothesis)则认为,运动中的认知参与通过激活与控制高阶认知功能相同的脑区,优化认知资源分配并促进执行功能的提升(Ishihara et al., 2017; Pesce, 2012)。实证研究表明,即使在相同运动强度条件下,认知参与度越高,执行功能改善越显著(Benzing et al., 2016)。然而,现有研究往往仅考察单一维度,缺乏对两者交互作用的系统比较,也未在实验设计中严格控制其水平,导致其作用机制仍不清晰。因此,实验2将在实验1的基础上进一步探讨运动视频游戏训练的作用机制。通过同时操控运动强度与认知参与度,本研究将构建4种组合条件(高/低运动强度 × 高/低认知参与)以系统比较不同干预模式下儿童执行功能的变化。我们预期:认知参与相较于运动强度对执行功能的促进作用更为突出,随着干预时间延长,认知参与优势将进一步扩大。本研究旨在通过双实验设计,从“模式差异”与“机制变量”两个层面全面揭示运动视频游戏训练促进儿童执行功能的内在机制,并从具身认知理论视角进一步拓展对运动-认知交互作用的理解。为了更加清晰的呈现出本研究的整体思路,我们构建了本研究的研究框架图,详见图1。

2 实验1:不同组合模式的运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响及跨年龄段比较

2.1 方法

2.1.1 被试

采用G*power 3.1对实验1进行了样本量估算,根据效应量 $f = 0.25$ 、显著性水平 $\alpha = 0.05$ 、统计检

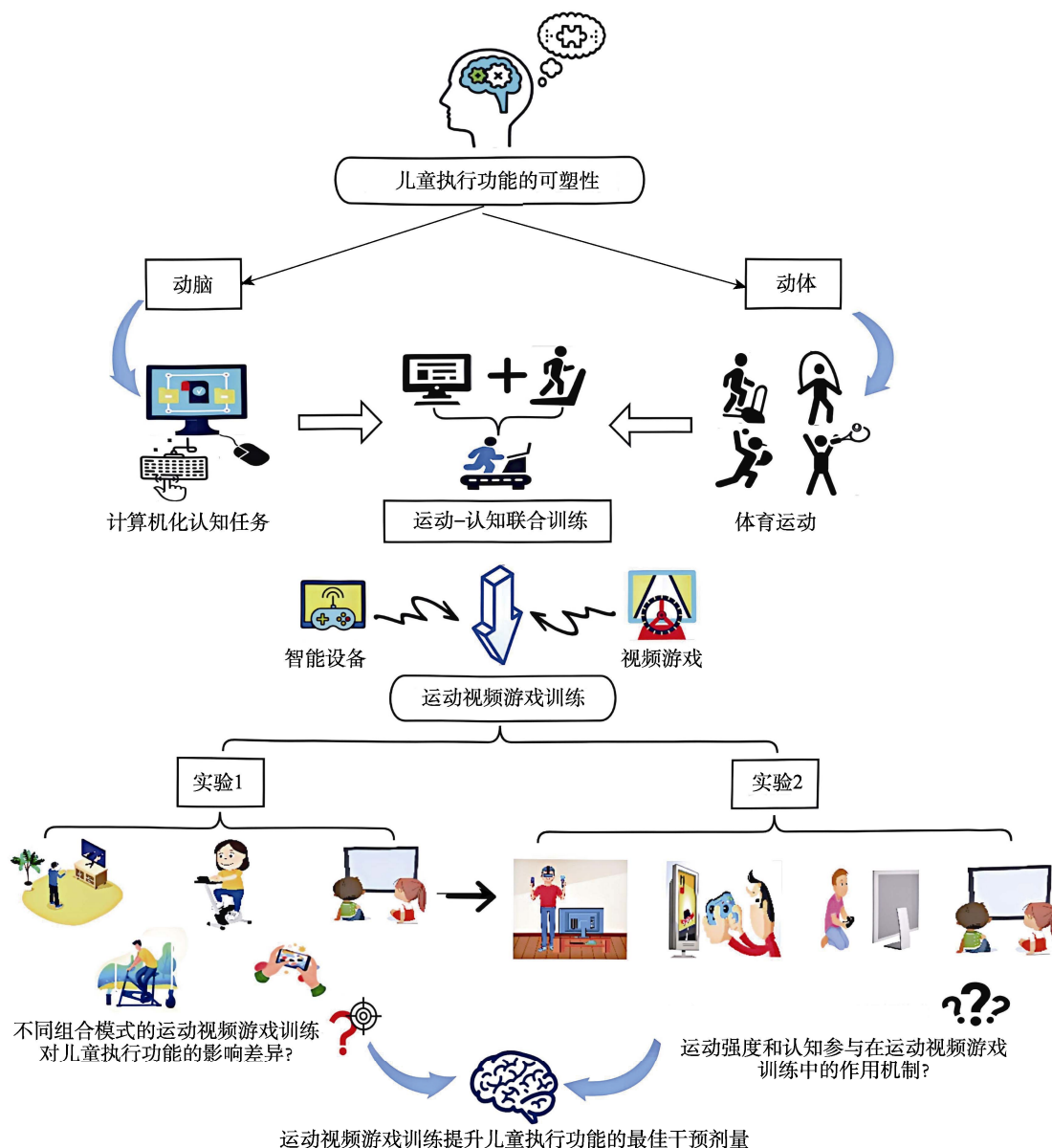


图1 本研究的整体研究思路及框架图

注: 彩图见电子版, 下同

验力 $Power = 0.95$ 的标准, 计算结果表明, 本实验至少需要 65 名被试, 每组 13 人。为确保实验 1 具有足够的统计效能, 我们在兰州某小学招募了 153 名儿童, 前测阶段有 3 名儿童未能完成全部任务测试, 在训练开始前予以剔除, 最终有效被试为 150 名, 男生 78 名, 女生 72 名, 平均年龄为 11.39 ± 0.53 岁, 通过随机抽样的方式, 将其分为 5 组, 每组 30 人。所有被试均为右利手, 视力或矫正视力正常, 无色盲, 身体健康且无实验前 48 小时无出现失眠状况、大负荷运动, 并且他们此前均未参加过类似实验。所有参与实验的儿童均得到了学校、家长和班主任老师的知情同意, 在实验结束后给予了一定的奖励。本研究经西北师范大学

伦理委员会批准, 审批号为 2024010。各组被试基本情况详见表 1。

表 1 实验 1 被试人口学变量

组别	总计	男	女	年龄($M \pm SD$, 岁)
运动视频游戏训练组	30	14	16	11.43 ± 0.50
运动+视频游戏训练组	30	13	17	11.33 ± 0.48
纯运动训练组	30	17	13	11.40 ± 0.62
纯视频游戏训练组	30	18	12	11.50 ± 0.57
控制组	30	16	14	11.27 ± 0.45
总计	150	78	72	11.39 ± 0.53

2.1.2 实验设计及流程

实验 1 采用 5 (组别: 运动视频游戏训练组、运

动+视频游戏训练组、纯运动训练组、纯视频游戏训练组和控制组) × 3 (测试阶段: 前测、4 周后测和 6 周后测) 的混合实验设计, 组别为被试间变量, 测试阶段为被试内变量, 因变量为执行功能 4 个子成分(干扰抑制、反应抑制、工作记忆刷新和注意转换)任务的正确率或反应时。实验采用个别施测的方式, 分别对各组被试进行为期 6 周, 每周 3 次, 每次 30 分钟的干预, 并在每次干预前后进行 5 分钟的热身和肌肉放松活动, 每位被试在实验期间不进行相关额外训练。

在签署知情同意后, 所有被试完成了前测任务, 包括 Stroop 任务、Go/No-go 任务、数字刷新任务和数字转换任务。随后, 所有被试参与为期 6 周、共计 18 次的干预训练。具体而言: 运动视频游戏组进行 Switch《健身环大冒险》游戏训练; 运动+视频游戏组进行功率自行车+地铁跑酷小游戏训练; 纯运动训练组仅进行功率自行车训练; 纯视频游戏训练组仅进行地铁跑酷小游戏训练; 控制组则在相同的时间和环境观看健康视频《托马斯和他的朋友

们》。在训练 4 周后, 所有组别的被试均完成第一次后测, 后测任务与前测一致。经过 6 周的干预训练后, 所有组别再次完成第二次后测, 后测任务同样与前测一致。最后, 研究将比较运动视频游戏训练、运动+视频游戏训练和控制组在前测、4 周后测和 6 周后测中的得分差异, 以评估各实验组训练的效果。实验 1 具体实施流程详见图 2。

2.1.3 干预时长与频率的设定依据

本研究采用为期 6 周、每周 3 次、每次 30 分钟的干预方案, 并分别在第 4 周与第 6 周进行后测。这一设计综合考虑了既有研究的实证支持、神经可塑性形成的时间规律以及执行功能变化的动态轨迹, 旨在平衡干预的有效性、可行性与儿童发展规律的契合性。

(1) 干预时长的选择

6 周的干预周期已被多项研究验证为引发执行功能显著改善的有效时程。例如, 盖笑松等人 (2021) 对 4~6 岁儿童实施为期 6 周的体感游戏训练,

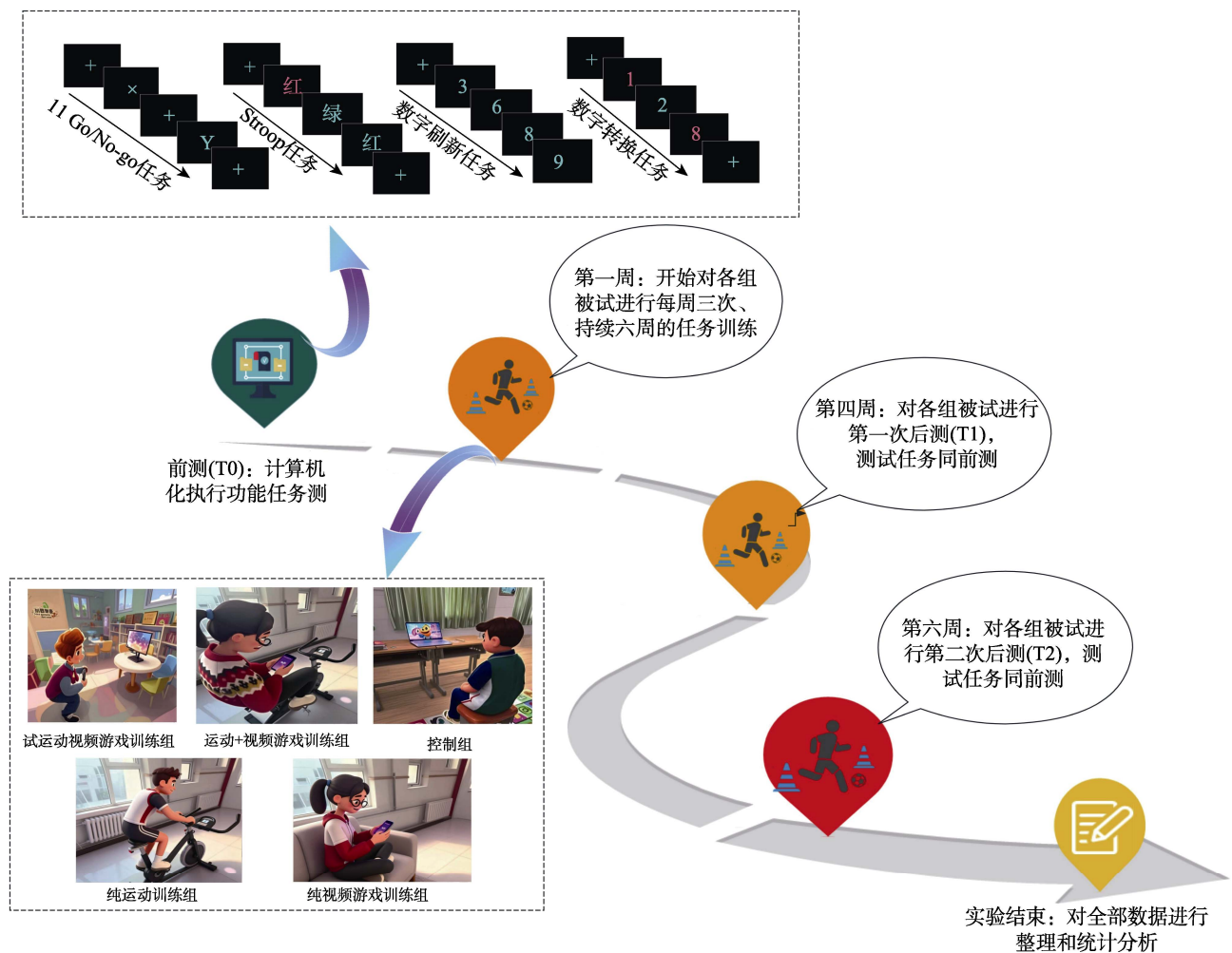


图 2 实验 1 实施流程图

发现运动强度和认知参与均显著提升了儿童的执行功能水平;Schmidt等人(2015)对10~12岁儿童进行为期6周的认知参与型运动干预,结果显示,高运动强度与高认知参与条件下儿童执行功能得到了显著提升。这些研究表明,6周周期不仅足以触发慢性运动干预的神经适应效应,还能区分不同训练机制的贡献。同时,还有研究显示4周的连续训练能够在神经与行为层面引发初步的执行功能改善。例如, Kim等人(2014)发现脑卒中患者接受4周双任务训练后其执行功能水平得到了显著改善,且在干预结束后两周仍持续增强。Huang(2020)采用为期4周、每周两次的体感游戏训练,发现健康老年人的抑制控制与注意转换能力均得到了显著提升。这些证据支持“4周干预周期为执行功能可塑性变化的可检测窗口期”。

基于此,本研究在总体6周干预框架下于第4周设置第一次后测,旨在捕捉“早期增益-持续巩固”的动态变化轨迹。对于儿童而言,执行功能的发展通常呈现“早期可检测增益→随时间逐步巩固与扩展”的规律(Diamond, 2013)。第4周后测有助于识别干预初期的敏感变化点,判断不同干预机制的即时效应。第6周后测则用于验证这些初期收益是否持续或深化,进而明确运动视频游戏训练的剂量效应。

(2) 干预频率的选择

本研究选择每周3次的干预频率主要基于儿童认知可塑性与体能恢复的平衡考虑。一方面,每周3次的训练频率能够在保持高认知刺激的同时,给予儿童充分的身体与神经恢复时间。研究表明,频率过低(如每周1次)难以维持认知刺激的累积效应,而频率过高(如每日训练)则可能引起疲劳和注意力下降,从而削弱干预成效(Best, 2010)。另一方面,多项实证研究采用类似频率并获得显著成效。例如,盖笑松等人(2021)采用每周3次、每次30分钟的体感游戏训练显著提升了儿童执行功能; Egger等人(2019)指出认知-运动联合训练若以每周2~3次的频率持续4~8周,可在认知和神经网络层面引发稳定的可塑性变化。因此,每周3次的设计与国际上较为一致的运动认知干预频率相符,并被验证为在儿童群体中平衡“认知负荷-身体恢复”的最优频率区间。

2.1.4 前后测任务

(1) Stroop 任务

采用 Stroop 任务以评估儿童的干扰抑制能力

(马超等, 2025; Ma et al., 2025)。该实验使用两种颜色词汉字(“红”与“绿”)及一串无意义字符(“####”)作为实验材料,共包括三个实验条件:一致条件(颜色与词汇相匹配的“红”字与“绿”字)、不一致条件(颜色与词汇不匹配的“红”字与“绿”字)以及中性条件(颜色呈现于无意义字符“####”上)。每个实验块起始,屏幕中央将展示一个持续500 ms的注视点“+”,随后是1000 ms的空白屏幕,接着是1500 ms的刺激呈现时间,之后屏幕再次空白,进入下一个试次。实验共包括1个练习实验块和3个正式实验块,练习实验块旨在使被试熟悉实验流程,只有当被试在练习实验块的正确率达到或超过85%时,才能进入正式实验阶段。在正式实验的每个实验块中,三种条件(一致、不一致、中性)各包括12个试次,每个块总共36个试次,整个实验共计108个试次。被试需根据呈现的汉字或字符颜色,通过按下相应的键盘按钮(红色为“F”键,绿色为“J”键)作出反应。该实验主要记录被试在不一致条件、一致条件及中性条件下的平均反应时,干扰效应的计算方法为不一致条件与中性条件下的平均反应时之差。

(2) Go/No-go 任务

在本研究中,Go/No-go任务被用于评估儿童的反应抑制能力(马超等, 2025; Ma et al., 2025)。该实验任务主要包含两个实验条件,即Go实验条件和No-go实验条件,Go与No-go刺激的呈现比例分别为75%和25%。以在被试中建立强烈的反应倾向,从而有效激发反应抑制机制(Aron et al., 2004; Verbruggen & Logan, 2008)。相较于50%:50%的平衡设计,这一比例更能诱发自动化反应并检验个体在面对少量抑制信号时的控制能力(Durston et al., 2002)。实验设计包括两个练习实验块(每个实验块包含10个Go试次和10个No-go试次)以及4个正式实验块(每个实验块包含50个Go试次和50个No-go试次)。在4个正式实验块中,两个实验块设置为字母X呈现时按“J”键(Go试次),字母Y呈现时不作响应(No-go试次),另外两个实验块的设置则相反(字母Y呈现时按“J”键)。每种设置下都包括一个练习实验块,旨在使被试熟悉实验流程,被试只有在练习实验块中的正确率达到或超过85%时,才能进入正式实验阶段。每个实验块的开始,屏幕中央将展示一个持续1000 ms的注视点“+”,随后是600 ms的刺激展示时间,刺激结束后屏幕将变为空白,进入下一个试次。该实验主要记录被试在Go条件或No-go条件下的平均反应时和正确率,

由于小学高年级阶段儿童的反应抑制能力已经发展较为成熟,因而本研究主要采用 No-go 条件下的平均正确率作为儿童反应抑制能力的衡量指标。

(3)数字刷新任务

采用数字刷新任务来考察儿童在工作记忆中信息刷新的能力(马超 等, 2025; Ma et al., 2025)。该任务分为简单任务(刷新 1750 任务)和复杂任务(刷新 750 任务)两个级别,二者的主要区别在于数字呈现时间的长短。在具体而言,简单任务中,每个数字的呈现时间为 1750 ms,而在复杂任务中,每个数字的呈现时间缩短至 750ms。简单任务和复杂任务均包含一个练习实验块,共 8 个试次,每种长度各出现两次,以及两个正式实验块,每个实验块 12 个试次,每种长度随机出现三次。在任务过程中,被试将被随机展示一系列 0 至 9 的数字,系列长度依次升高为 5、7、9 和 11。在每种系列长度出现时,被试需要持续复述呈现的数字,并记住每个系列中最后出现的三个数字,例如,如果屏幕依次展示数字 9、8、5、2、1、3,被试需记忆并复述从“9”逐步更新至“213”,并在屏幕上的黑色框内输入最后三个数字后按空格键以进入下一个系列。该实验主要记录被试在简单或复杂任务条件下的平均正确率,本研究将简单和复杂任务的平均正确率作为衡量儿童工作记忆刷新能力的指标。

(4)数字转换任务

本研究采用了数字转换任务,旨在评估儿童的注意转换能力(马超 等, 2025; Ma et al., 2025)。在此任务中,首先呈现出 1400 ms 的注视点,随后被试会看到 1 至 9 的数字(5 除外),当数字呈现颜色为红色时,需要判断该数字是比 5 大还是比 5 小(任务 A);当数字呈现颜色为蓝色时,需要判断该数字是奇数还是偶数(任务 B)。实验设计共包括两种实验条件:即执行单一任务(仅进行任务 A 或任务 B)和执行混合任务(同时进行任务 A 和 B)。任务 A 将红色数字与 5 进行比较,大于 5 时按“A”键,小于 5 时按“L”键;任务 B 对蓝色数字进行奇偶性判断,奇数时按“A”键,偶数时按“L”键。在正式实验前,设置了两个单一任务的练习实验块以帮助被试熟悉实验流程,只有在被试的正确率达到 75%或以上时,才能进入正式实验阶段。正式实验由 20 个实验块,共计 250 个试次构成,其中单一任务实验块和混合任务实验块均有 10 个,这些实验块会随机呈现,每个单一任务实验块包含 8 个试次,每个混合任务实验块包含 17 个试次。该任务的统计指标为单一试

次、非转换试次和转换试次的平均反应时,其中,转换代价作为衡量儿童注意转换能力的重要指标,其计算方式为转换试次的平均反应时减去非转换试次的平均反应时。

为进一步澄清执行功能各任务的区别,我们呈现出了详细的各实验任务示例,以帮助更好地理解各任务区分的逻辑与测量依据,详见网络版附图 S5。

2.1.5 训练任务

为保证运动视频游戏训练组与运动+视频游戏训练组中运动和认知任务的同质性,我们采用情境、难度类似的 Switch《健身环大冒险》和功率自行车+地铁跑酷小游戏的形式对干预组进行训练。与此同时,我们还增加了两个额外的单任务训练条件,即纯运动训练组和纯视频游戏训练组,以帮助我们进一步排除运动+视频游戏训练这种“结合式训练模式”中可能存在的潜在双任务干扰效应,从而更好的确认运动视频游戏训练中“融合式训练模式”效果的独特性。在实验过程中,所有参与运动的被试均佩戴 PolarRS400 心率绑带,记录其在训练期间的平均心率,每 5 分钟评估一次心率,确保被试维持在中等强度运动(最大心率的 64%~76%)。各组具体操纵情况如下:

运动视频游戏训练组:采用任天堂 Switch《健身环大冒险》游戏对被试进行干预训练。该游戏共分为 6 个模块,分别是冒险、轻松、自定义、背景执行模式、节奏游戏以及小知识点清单。本实验选择了自定义模块对被试进行训练,玩家可以根据自身运动能力和偏好选择不同动作并进行动作的自定义组合,游戏中需要判断障碍物种类例如浮木、石头等,通过挤拉健身环使儿童不停地跑、跳、深蹲等对不同障碍物做出相应的身体姿势,来控制游戏中的人物前进,同时沿途还需要收集藏在各个角落的金币,全程都需要进行思考和决策。详见网络版附图 S6。

运动+视频游戏训练组:采用的是骑功率自行车+地铁跑酷小游戏的方式对被试进行干预训练,要求被试一边骑有氧动感单车一边玩地铁跑酷小游戏,运动任务和认知任务分开同时进行。游戏的主线从三条铁轨上展开,玩家要以孩子 Jake 的身份不断在铁轨中及时穿梭来躲避列车,同时收集金币,注意躲避警察及猎狗的追捕。详见网络版附图 S7。

纯运动训练组:仅采用功率自行车对被试进行干预训练,运动操纵情况同运动+视频游戏训练

组。详见网络版附图 S8。

纯视频游戏训练组:仅采用地铁跑酷小游戏对被试进行干预训练,游戏内容同运动+视频游戏训练组。详见网络版附图 S9。

控制组:观看健康动画片《托马斯和他的朋友们》。详见网络版附图 S10。

2.1.6 数据分析

使用 SPSS 26.0 进行数据分析,通过重复测量方差分析方法检验各实验组儿童执行功能各子成分的提升效果。为使实验结果更加直观,我们采用 Python 3.10.11 对全部数据分析结果进行了可视化呈现。

2.2 结果

2.2.1 儿童执行功能各成分基线水平的描述统计与差异检验

在实验 1 开始前,我们先对运动视频游戏训练组、运动+视频游戏训练组、纯运动训练组、纯视频游戏训练组和控制组 5 组被试执行功能的基线水平进行测试,采用方差分析对 5 组被试的成绩进行差异检验,以排除基线执行功能水平对训练效果的影响。结果显示,5 组被试执行功能各成分的基线水平均不存在显著差异($p > 0.05$),说明基线各组控制有效,详见网络版附表 S4。

2.2.2 各组训练前后儿童群体执行功能各成分的提升效果

为更清晰的观察到各组训练前后儿童执行功能各成分的表现,我们对运动视频游戏组、运动+视频游戏组和控制组在前测、4 周后测和 6 周后测的成绩进行了描述统计,详见网络版附表 S5。在描述统计的基础之上,我们进一步采用采用 5 (组别:运动视频游戏训练组、运动+视频游戏训练组、纯运动训练组、纯视频游戏训练组和控制组) $\times$ 3 (测试阶段:前测、4 周后测和 6 周后测)的重复测量方差分析对儿童在执行功能各任务上的表现进行分析,其中,测试阶段为被试内变量,组别为被试间变量,结果详见表 2。

对于干扰抑制而言,结果显示,测试阶段主效应不显著, $F(4, 145) = 1.73, p = 0.180$; 组别主效应不显著, $F(4, 145) = 0.82, p = 0.513$; 测试阶段 $\times$ 组别的交互作用不显著, $F(4, 145) = 0.35, p = 0.947$ 。这表明,经过长期的干预训练后,各组儿童的干扰抑制能力均未得到显著提升。各组干扰抑制得分的变化趋势详见图 3。

对于反应抑制而言,结果显示,测试阶段主效

应显著, $F(4, 145) = 10.22, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.07$ 。事后检验结果显示,4 周后测($M = 0.85, SD = 0.01$)和 6 周后测($M = 0.86, SD = 0.01$)的反应抑制得分均显著高于前测($M = 0.80, SD = 0.01$), $ps < 0.01$; 组别主效应显著, $F(4, 145) = 3.70, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.09$ 。事后检验结果显示,运动视频游戏训练组($M = 0.88, SD = 0.01$)的反应抑制得分显著高于纯运动训练组($M = 0.82, SD = 0.01$)、纯视频游戏训练组($M = 0.82, SD = 0.01$)和控制组($M = 0.82, SD = 0.01$), $ps < 0.05$ 。相比之下,运动+视频游戏训练组的得分与纯运动训练组、纯视频游戏训练组和控制组之间均不存在显著差异, $ps > 0.05$; 测试阶段 $\times$ 组别的交互作用不显著, $F(4, 145) = 0.85, p = 0.562$ 。这些结果表明,经过长期的干预训练后,仅运动视频游戏训练组的反应抑制能力得到了显著提升,并且这种效果的提升是由“融合式训练模式”的益处所带来的,而非由“结合式训练模式”中双任务性质的相互干扰所导致。各组反应抑制得分的变化趋势详见图 4。

对于工作记忆刷新而言,结果显示,测试阶段主效应显著, $F(4, 145) = 31.38, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.18$ 。事后检验结果显示,6 周后测($M = 0.65, SD = 0.01$)的工作记忆刷新得分显著高于 4 周后测($M = 0.63, SD = 0.01$),4 周后测的得分显著高于前测($M = 0.52, SD = 0.01$), $ps < 0.05$; 组别主效应显著, $F(4, 145) = 8.21, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.19$ 。事后检验结果显示,运动视频游戏训练组($M = 0.67, SD = 0.02$)的工作记忆刷新得分显著高于纯运动训练组($M = 0.56, SD = 0.02$)和控制组($M = 0.55, SD = 0.02$), $ps < 0.001$ 。与此同时,运动+视频游戏训练组($M = 0.62, SD = 0.02$)的得分同样显著高于控制组, $p < 0.05$ 。相比之下,运动+视频游戏训练组的得分与纯运动训练组和纯视频游戏训练组之间均不存在显著差异($ps > 0.05$),这进一步排除了运动+视频游戏训练模式中可能存在的潜在双任务干扰效应; 测试阶段 $\times$ 组别的交互作用显著, $F(4, 145) = 2.82, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.07$ 。进一步简单效应分析发现,在前测条件下,各实验组之间的工作记忆刷新得分均不存在显著差异, $ps > 0.05$ 。在 4 周后测条件下,运动视频游戏训练组($M = 0.70, SD = 0.20$)的得分显著高于纯运动训练组($M = 0.57, SD = 0.10$)和控制组($M = 0.56, SD = 0.18$), $ps < 0.05$ 。在 6 周后测条件下,运动视频游戏训练组($M = 0.78, SD = 0.16$)的得分显著高于运动+视频游戏训练组($M = 0.62, SD = 0.14$)、纯运动训练组($M = 0.59, SD = 0.11$)、纯视频游戏训练

表 2 各组干预前后儿童执行功能各子成分的提升效果

变量	任务指标	因素	dfs	F	p	η_p^2
干扰抑制	Stroop 任务 干扰效应(ms)	测试阶段	(4, 145)	1.73	0.180	0.01
		组别	(4, 145)	0.82	0.513	0.02
		测试阶段×组别	(4, 145)	0.35	0.947	0.01
反应抑制	Go/No-go 任务 No-go 正确率	测试阶段	(4, 145)	10.22	<0.001	0.07
		组别	(4, 145)	3.70	0.007	0.09
		测试阶段×组别	(4, 145)	0.85	0.562	0.02
工作记忆刷新	数字刷新任务 平均正确率	测试阶段	(4, 145)	31.38	<0.001	0.18
		组别	(4, 145)	8.21	<0.001	0.19
		测试阶段×组别	(4, 145)	2.82	0.005	0.07
注意转换	注意转换任务 转换代价(ms)	测试阶段	(4, 145)	10.46	<0.001	0.07
		组别	(4, 145)	1.75	0.143	0.05
		测试阶段×组别	(4, 145)	0.47	0.865	0.01

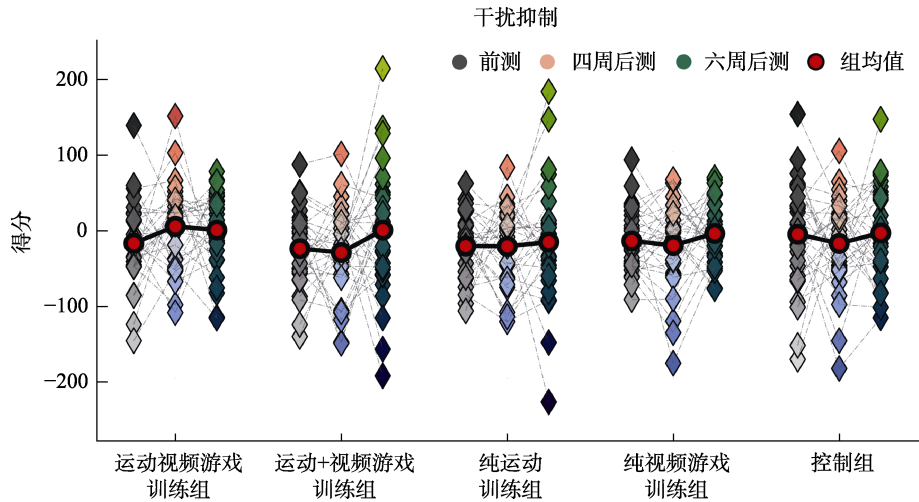


图 3 五个实验组训练前后干扰抑制得分的变化趋势

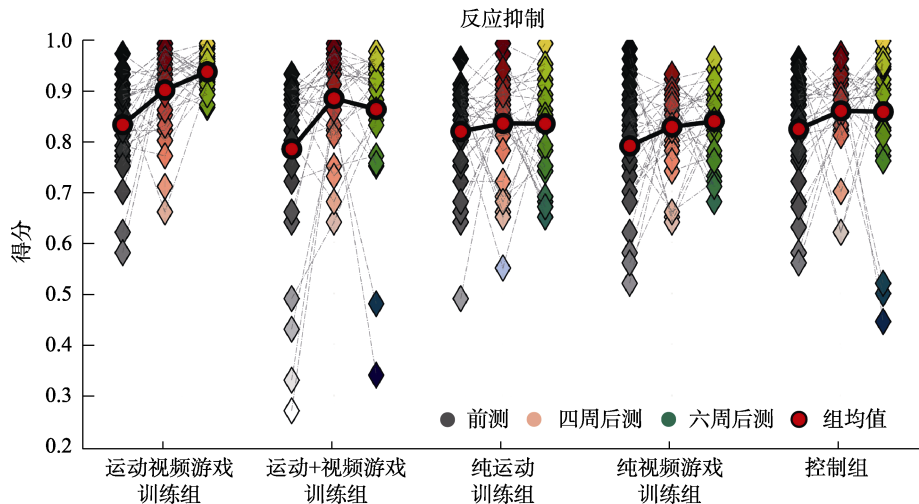


图 4 五个实验组训练前后反应抑制得分的变化趋势

组($M = 0.66$, $SD = 0.18$)和控制组($M = 0.60$, $SD = 0.17$), $ps < 0.05$ 。这说明, 在干预 4 周后, 运动视
频游戏训练组和运动+视频游戏训练组的工作记

忆刷新得分之间并未出现明显差异, 但随着训练
时间的延续, 在干预 6 周后, 运动视频游戏训练组
的得分开始高于运动+视频游戏训练组。此外, 无

论是干预4周还是干预6周,运动+视频游戏训练组的得分与纯运动训练组和纯视频游戏训练组之间均不存在显著差异,这进一步证明了运动视频游戏训练所带来的效果是由“融合式训练模式”的益处所引起的,而非由“结合式训练模式”的双任务性质引入所带来的潜在损害所导致。总的来说,这些结果表明,与运动+视频游戏训练相比,运动视频游戏训练更有助于促进儿童工作记忆刷新能力的提升。各组工作记忆刷新得分的变化趋势详见图5。

对于注意转换而言,结果显示,测试阶段主效应显著, $F(4, 145) = 10.46, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.07$ 。事后检验结果显示,6周后测($M = -61.66, SD = 11.33$)的成绩均显著高于前测($M = -148.79, SD = 17.05$)和4周后测($M = -125.15, SD = 13.81$);组别主效应不显著, $F(4, 145) = 1.75, p = 0.143$;测试阶段×组别的

交互作用不显著, $F(4, 145) = 0.47, p = 0.865$ 。这说明,经过长期训练后,各实验组的注意转换能力均得到了显著提升,但由于组别主效应不显著,无法说明究竟哪一组的提升效果最好。各组注意转换得分的变化趋势详见图6。

2.2.3 各组训练前后年轻成人群体执行功能各成分的提升效果

为更加深入探讨运动视频游戏训练对不同年龄段群体执行功能的影响,我们在补充实验中引入了年轻成人组进行相同的训练模式,并与儿童组进行了比较。实验结果表明,尽管年轻成人组在执行功能的提升上也表现出一定的训练效应,但这些效应的程度明显低于儿童组,尤其是在反应抑制和工作记忆刷新任务中的提升幅度较小。详见补充材料“1 补充实验:不同组合模式的运动视频游戏训练对年轻成人个体执行功能的影响”。

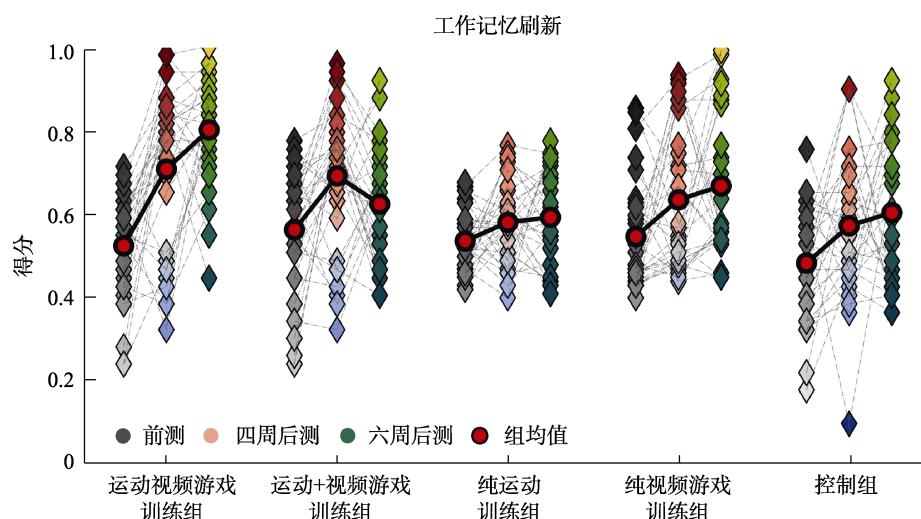


图5 五个实验组训练前后工作记忆刷新得分的变化趋势

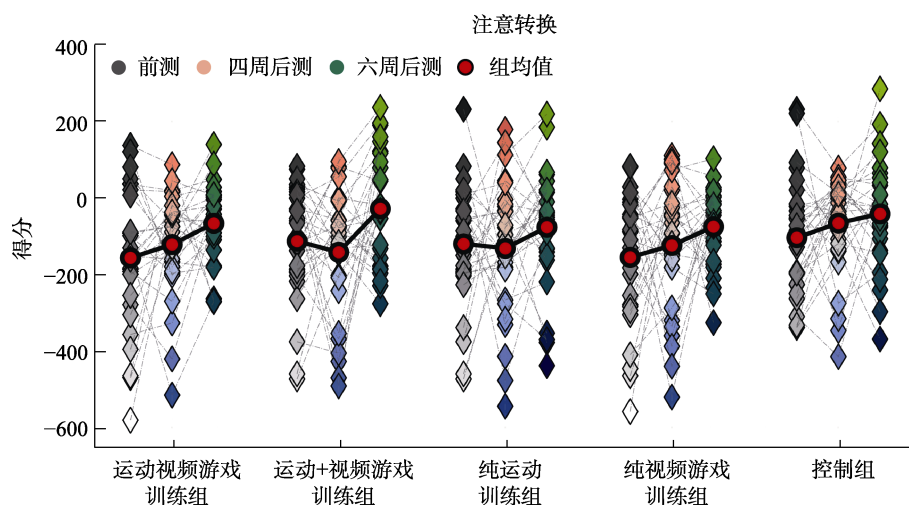


图6 五个实验组训练前后注意转换得分的变化趋势

3 实验 2: 运动视频游戏训练促进儿童的执行功能: 运动强度和认知参与的作用

3.1 方法

3.1.1 被试

采用 G*power 3.1 对实验 2 进行了样本量估算, 设置效应量 $f=0.25$ 、显著性水平 $\alpha=0.05$ 、统计检验力 Power = 0.95 的标准, 计算结果表明, 本实验至少需要 60 名被试, 每组 15 人。为了确保实验 2 具有足够的统计效能, 我们在兰州某小学招募了 124 名儿童, 通过随机抽样的方式, 将其分为 4 组, 训练期间由于个人原因中途退出 4 名, 共计剩余有效被试 120 人(每组 30 人), 男生 64 名, 女生 56 名, 平均年龄为 12.44 ± 0.61 岁。4 组被试均为右利手, 视力或矫正视力正常, 无色盲, 身体健康且无实验前 48 小时无出现失眠状况、大负荷运动, 并且他们此前均未参加过类似实验。所有参与实验的儿童均得到了学校、家长和班主任老师的知情同意, 在实验结束后给予了一定的奖励。各组被试基本情况详见表 3。

表 3 实验 2 被试人口学变量

组别	总计	男	女	年龄($M \pm SD$, 岁)
高运动强度+高认知参与组	30	17	13	12.30 ± 0.54
低运动强度+高认知参与组	30	15	15	12.53 ± 0.68
高运动强度+低认知参与组	30	14	16	12.50 ± 0.57
低运动强度+低认知参与组	30	18	12	12.43 ± 0.63
总计	120	64	56	12.44 ± 0.61

3.1.2 实验设计及流程

实验 2 采用 2 (运动强度: 高、低) $\times$ 2 (认知参与: 高、低) $\times$ 3 (测试阶段: 前测、4 周后测和 6 周后测) 的混合实验设计, 运动强度和认知参与为被试间变量, 测试阶段为被试内变量, 因变量为 Go/No-go 任务和数字刷新任务的正确率。实验采用个别施测的方式, 分别对每组被试进行为期 6 周, 每周 3 次, 每次 30 分钟的干预, 并在每次干预前后进行 5 分钟的热身和肌肉放松活动, 每位被试在实验期间不进行相关额外训练。

在签订知情同意后, 所有被试均完成了前测任务: Go/No-go 任务和数字刷新任务。之后对被试进行为期 6 周共计 18 次的干预训练, 高运动强度+高认知参与组的被试进行 Switch《健身环大冒险》游戏, 低运动强度+高认知参与组的被试进行《超级马

里奥》游戏, 高运动强度+低认知参与组的被试进行《舞动全开》游戏, 低运动强度+低认知参与组的被试观看健康动画视频《托马斯和他的朋友们》。在训练 4 周后, 对每组被试进行第一次后测, 后测任务与前测一致。在训练 6 周后, 对每组被试进行第二次后测, 后测任务与前测一致。最后, 深入考察运动强度和认知参与在运动视频游戏训练中所起的作用, 进一步明晰运动视频游戏训练促进儿童执行功能改善的机制。实验 2 具体实施流程详见图 7。

3.1.3 前后测任务

(1) Go/No-go 任务

实验 2 同样采用 Go/No-go 任务来评估儿童的反应抑制能力, 该任务程序详细参数及计分标准同实验 1。

(2) 数字刷新任务

在本实验中, 同样采用数字刷新任务来考察儿童在工作记忆中信息刷新的能力, 该任务程序详细参数及计分标准同实验 1。

3.1.4 训练任务

高运动强度+高认知参与组: 使用任天堂 Switch 游戏机与健身环套装, 游戏为《健身环大冒险》。本研究选择了冒险模块对被试进行训练, 高运动强度体现在被试需要不停地跑、跳来控制游戏中的人物前进与躲避障碍物, 健身环可拉可挤, 能上能下, 可以做深蹲、卷腹等。高认知参与则体现在游戏中需要判断障碍物种类例如浮木、石头等, 对应不同障碍物做出相应的身体姿势, 并判断障碍物出现位置, 及时作出反应, 同时沿途还需要收集藏在各个角落的金币, 全程都需要进行思考和决策。详见网络版附图 S11。

低运动强度+高认知参与组: 使用任天堂 Switch 游戏机进行《超级马里奥》游戏。低运动强度体现在儿童静坐在屏幕前通过手柄完成活动。高认知参与体现在儿童需要躲避各种障碍物, 障碍物会发生变化, 比如砖、会移动的乌龟, 并且还需要获得金币同时获得道具, 注意场景的变化, 需要高度集中注意力。详见网络版附图 S12。

高运动强度+低认知参与组: 使用任天堂 Switch 游戏机进行《舞动全开》游戏, 高运动强度体现在精确度节奏感较强, 需要全身参与活动。低认知参与体现在玩法较简单, 只需要按照游戏里面角色的动作进行舞蹈演示。详见网络版附图 S13。

低运动强度+低认知参与组: 儿童坐在电脑前观看《托马斯和他的朋友们》动画片, 儿童在距



图7 实验2实施流程图

离电脑 1.5 米左右坐好。儿童只需要静坐在屏幕前观看视频, 该活动不需要儿童运动和思考, 因此, 该活动为低运动强度和低认知参与。详见网络版附图 S14。

3.1.5 自变量操纵

为确保实验操纵的有效性, 我们在整个实验过程中对
各组被试的运动强度与认知参与都进了一定程度的控制, 具体控制方法如下:

运动强度控制: 在实验过程中, 被试佩戴 PolarRS400 心率绑带, 记录其在训练期间的平均心率, 每 5 分钟评估一次心率, 确保两个“高运动强度”组(最大心率的 57%~63%)以及两个“低运动强度”组(最大心率的 77%~95%)被试的平均心率基本一致。同时, 在每次干预结束后, 采用主观用力感量表(RPE, Borg, 1982)对被试所感受到的运动强度状态进行测量, 该问卷的评分范围为 6~20 分。

认知参与控制: 在每次干预结束后, 采用 Best (2012)所编制的认知参与问卷考察被试在训练期间

的认知参与状况。该问卷专门用于评估儿童在体育活动中的认知投入和专注度, 而非一般性的兴趣或偏好。根据 Best (2012)的定义, 认知参与是指个体在运动任务中所需的认知挑战性、注意力要求以及决策和策略应用的程度。该问卷共包含 6 道选择题, 每道题均有两个选项, 通过比较实验活动与其他常见活动(如自由游戏)来测量参与者的认知投入程度。例如, “你更喜欢参加我今天跟你做的这个活动还是在操场上玩你喜欢的游戏?” 这一问题旨在通过任务偏好间接反映实验活动对儿童认知系统的挑战性和吸引力。当儿童选择实验活动而非自由游戏时, 表明该活动包含了足够的认知需求(如持续思考、决策制定和任务完成), 从而促使其投入更多认知资源。每道题选择“今天做的活动”得 1 分, 否则 0 分, 评分范围为 0~6 分。该问卷的 Cronbach's α 系数为 0.62, 具有中等可靠性, 且在多项研究中被证明能够有效区分不同认知需求的体育活动, 并与执行功能提升幅度呈显著正相关(盖笑松等, 2021; Best, 2012; Schmidt et al., 2015)。

3.2 结果

3.2.1 实验操纵有效性分析

为了考察各实验组中运动强度和认知参与操纵的有效性,我们同样参考以往研究者对于运动强度(RPE; Borg, 1982)和认知参与(Best, 2012)的控制方法,在每次干预结束后对被试的运动强度和认知参与状况进行问卷测量,每个被试共计测量 18 次,各实验组得分详见表 4。

表 4 实验 2 操纵有效性分析

组别	运动强度		认知参与	
	M	SD	M	SD
高运动强度+高认知参与组	15.98	0.63	4.64	0.48
低运动强度+高认知参与组	7.62	0.60	4.65	0.48
高运动强度+低认知参与组	15.94	1.01	1.35	0.74
低运动强度+低认知参与组	7.57	0.62	1.36	0.62
<i>p</i>	< 0.001		< 0.001	

如图 8 所示,对于运动强度来说,4 个实验组的得分存在显著差异, $p < 0.001$ 。事后检验结果显示,两个“高运动强度”组的得分显著高于两个“低运动强度”组($ps < 0.001$),相比之下,两个“高运动强度”组之间的得分并不存在显著差异($p > 0.05$),且两个“低运动强度”组之间的得分同样不存在显著差异($p > 0.05$)。除此之外,我们还纳入了平均心率作为客观生理指标在补充材料“附表 S6 实验 2

运动强度操纵有效性补充分析(PolarRS400 平均心率)”中进行了报告,所得出的结果与 RPE 量表结果一致。心率监测与 RPE 量表结果一致说明,运动强度在各实验组之间的控制达到了预期要求,表明自变量操纵有效。

如图 9 所示,对于认知参与来说,4 个实验组的得分存在显著差异, $p < 0.001$ 。事后检验结果显示,两个“高认知参与”组的得分显著高于两个“低认知参与”组($ps < 0.001$),相比之下,两个“高认知参与”组之间的得分并不存在显著差异($p > 0.05$),且两个“低认知参与”组之间的得分同样不存在显著差异($p > 0.05$)。这说明,认知参与在各实验组之间的控制达到了预期要求,表明自变量操纵有效。

3.2.2 儿童执行功能基线水平的描述统计与差异检验

在实验 2 开始前,我们先对高运动强度+高认知参与组、低运动强度+高认知参与组、高运动强度+低认知参与组和低运动强度+低认知参与组 4 组被试反应抑制和工作记忆刷新的基线水平进行测试,采用方差分析对 4 组被试的成绩进行差异检验,以排除基线反应抑制和工作记忆刷新水平对训练效果的影响。结果显示,4 组被试的反应抑制和工作记忆刷新基线水平均不存在显著差异($ps > 0.05$),说明基线各组控制有效,详见网络版附表 S7。

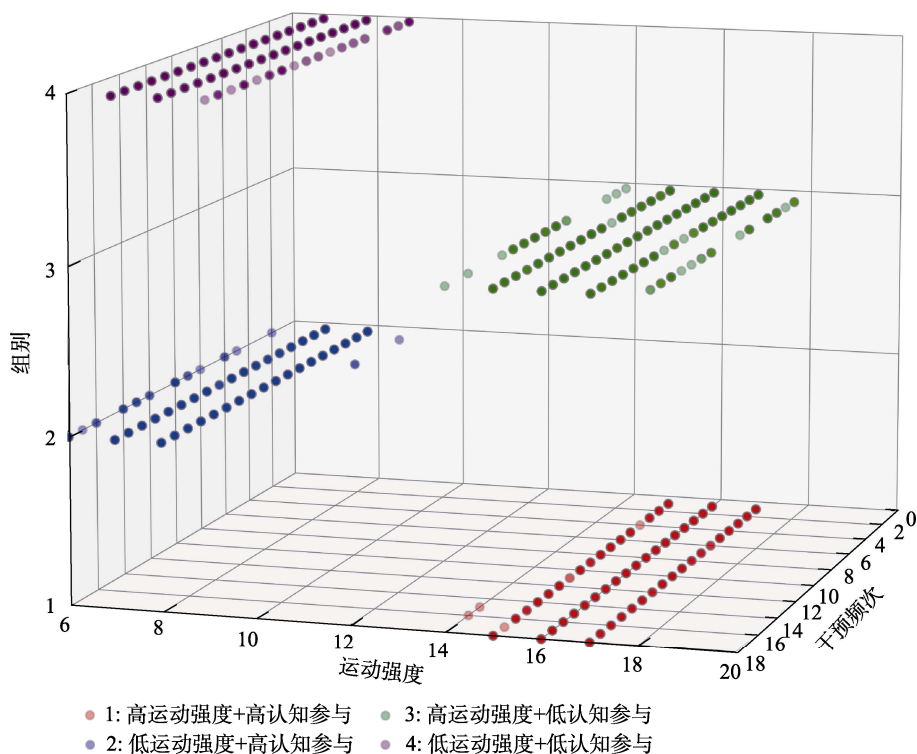


图 8 实验 2 各组被试每次干预后运动强度得分的可视化分布

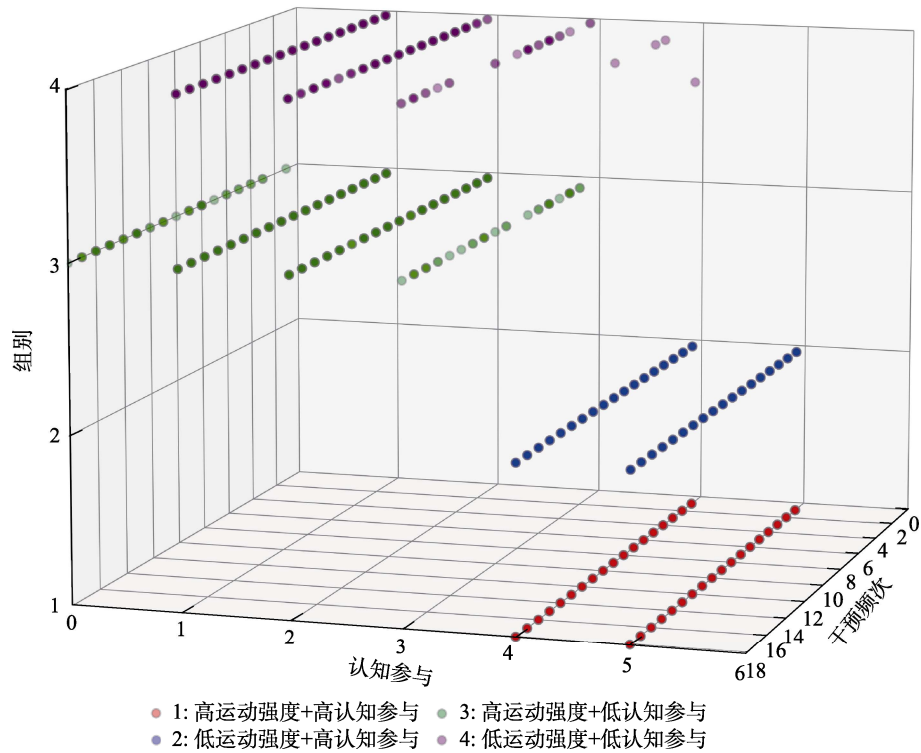


图 9 实验 2 各组被试每次干预后认知参与得分的可视化分布

3.2.3 运动强度和认知参与对儿童反应抑制和工作记忆刷新能力的影响

为观察各组训练前后运动强度和认知参与对儿童反应抑制和工作记忆刷新能力的影响效果，我们对高运动强度+高认知参与组、低运动强度+高认知参与组、高运动强度+低认知参与组和低运动强度+低认知参与组在前测、4 周后测和 6 周后测的成绩

进行了描述统计，详见网络版附表 S8。在描述统计的基础之上，我们进一步采用 3 (测试阶段：前测、4 周后测、6 周后测) × 2 (运动强度：高、低) × 2 (认知参与：高、低)的重复测量方差分析来探讨运动强度和认知参与对儿童反应抑制和工作记忆刷新能力的影响，其中，测试阶段为被试内变量，运动强度和认知参与为被试间变量，结果详见表 5。

表 5 各组干预前后运动强度和认知参与对反应抑制和工作记忆刷新的影响效果

变量	任务指标	因素	dfs	F	p	η_p^2
反应抑制	Go/No-go 任务 No-go 正确率	测试阶段	(3, 116)	29.88	<0.001	0.21
		运动强度	(3, 116)	18.84	<0.001	0.14
		测试阶段×运动强度	(3, 116)	0.84	0.435	0.01
		认知参与	(3, 116)	70.78	<0.001	0.38
		测试阶段×认知参与	(3, 116)	13.17	<0.001	0.10
		测试阶段×运动强度×认知参与	(3, 116)	0.58	0.558	0.01
		运动强度×认知参与	(3, 116)	1.20	0.276	0.01
工作记忆刷新	数字刷新任务 平均正确率	测试阶段	(3, 116)	297.25	<0.001	0.72
		运动强度	(3, 116)	40.65	<0.001	0.26
		测试阶段×运动强度	(3, 116)	18.55	<0.001	0.14
		认知参与	(3, 116)	138.78	<0.001	0.55
		测试阶段×认知参与	(3, 116)	42.94	<0.001	0.27
		测试阶段×运动强度×认知参与	(3, 116)	2.05	0.140	0.02
		运动强度×认知参与	(3, 116)	0.50	0.483	0.00

对于反应抑制而言,结果显示,测试阶段主效应显著, $F(3, 116) = 29.88, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.21$, 4 周后测($M = 0.82, SD = 0.01$)和 6 周后测($M = 0.83, SD = 0.01$)的成绩均显著高于前测($M = 0.74, SD = 0.01$); 运动强度主效应显著, $F(3, 116) = 18.84, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.14$, 高运动强度($M = 0.82, SD = 0.01$)的成绩显著高于低运动强度($M = 0.77, SD = 0.01$)的成绩; 测试阶段 $\times$ 运动强度的交互作用不显著, $F(3, 116) = 0.84, p = 0.435$; 认知参与主效应显著, $F(3, 116) = 70.78, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.38$, 高认知参与($M = 0.84, SD = 0.01$)的成绩显著高于低认知参与($M = 0.75, SD = 0.01$)的成绩; 测试阶段 $\times$ 认知参与的交互作用显著, $F(3, 116) = 13.17, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.10$ 。进一步简单效应分析发现, 在 4 周后测条件下, 高认知参与组($M = 0.88, SD = 0.02$)的反应抑制成绩显著高于低认知参与组($M = 0.76, SD = 0.02$), $F(3, 116) = 33.18, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.22$ 。在 6 周后测条件下, 高认知参与组($M = 0.90, SD = 0.01$)的反应抑制成绩同样显著高于低认知参与组($M = 0.76, SD = 0.01$), $F(3, 116) = 44.97, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.28$ 。在高认知参与条件下, 4 周后测($M = 0.88, SD = 0.02$)和 6 周后测($M = 0.90, SD = 0.01$)的反应抑制成绩均显著高于前测($M = 0.74, SD = 0.01$), $F(3, 116) = 49.27, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.46$ 。相比之下, 在低认知参与条件下, 各测试阶段的反应抑制成绩均不存在显著差异, $F(3, 116) = 2.02, p = 0.137$ 。这说明, 与运动强度相比, 运动视频游戏中的认知参与对儿童反应抑制能力的影响更大。其原因在于, 一方面, 认知参与($\eta_p^2 = 0.38$)的效应量比运动强度($\eta_p^2 = 0.14$)更大, 另一方面, 随着训练时间的延长, 运动视频游戏中的认知参与量越高, 儿童反应抑制能力的提升效果越好, 而运动强度并不存在这种现象; 测试阶段 $\times$ 运动强度 $\times$ 认知参与的交互作用不显著, $F(3, 116) = 0.58, p = 0.558$; 运动强度 $\times$ 认知参与的交互作用不显著, $F(3, 116) = 1.20, p = 0.276$ 。各实验组反应抑制得分的变化趋势详见图 10。

对于工作记忆刷新而言, 结果显示, 测试阶段主效应显著, $F(3, 116) = 297.25, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.72$, 6 周后测($M = 0.72, SD = 0.01$)的成绩显著高于 4 周后测($M = 0.70, SD = 0.01$)和前测($M = 0.54, SD = 0.01$); 运动强度主效应显著, $F(3, 116) = 40.65, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.26$, 高运动强度($M = 0.67, SD = 0.01$)的成绩显著高于低运动强度($M = 0.63, SD = 0.01$)的成绩; 测试阶段 $\times$ 运动强度的交互作用显著, $F(3,$

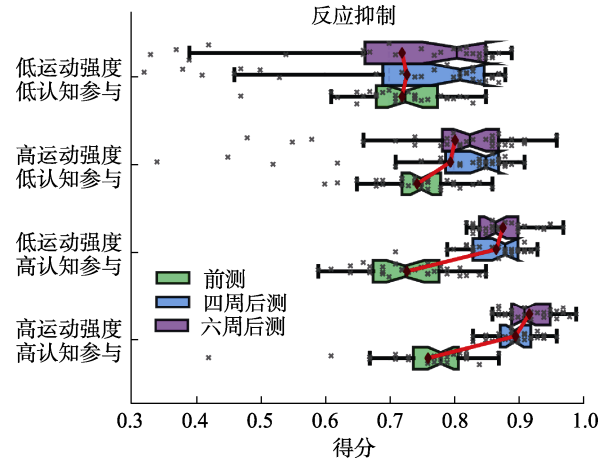


图 10 四个实验组训练前后反应抑制得分的变化趋势

$116) = 18.55, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.14$ 。进一步简单效应分析发现, 在 4 周后测条件下, 高运动强度组($M = 0.73, SD = 0.01$)的工作记忆刷新成绩显著高于低运动强度组($M = 0.66, SD = 0.01$), $F(3, 116) = 23.17, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.17$ 。在 6 周后测条件下, 高运动强度组($M = 0.76, SD = 0.01$)的工作记忆刷新成绩同样显著高于低运动强度组($M = 0.69, SD = 0.01$), $F(3, 116) = 63.16, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.35$ 。在低运动强度条件下, 6 周后测($M = 0.69, SD = 0.01$)的成绩显著高于 4 周后测($M = 0.66, SD = 0.01$)和前测($M = 0.55, SD = 0.01$), $F(3, 116) = 118.40, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.67$ 。在高运动强度条件下, 6 周后测($M = 0.76, SD = 0.01$)的成绩同样显著高于 4 周后测($M = 0.73, SD = 0.01$)和前测($M = 0.53, SD = 0.01$), $F(3, 116) = 317.29, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.85$ 。这表明, 运动强度对儿童工作记忆刷新能力的提升具有显著影响, 无论在 4 周后测还是 6 周后测, 高运动强度组的成绩均显著高于低运动强度组, 且随着运动训练的持续, 效果愈加明显。此外, 虽然低运动强度组在长期训练后其工作记忆刷新能力也表现出一定程度的进步, 但提升幅度较小, 这说明高强度运动视频游戏训练更能促进儿童工作记忆刷新能力的提升, 且具有更强的持久性; 认知参与主效应显著, $F(3, 116) = 138.78, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.55$, 高认知参与($M = 0.69, SD = 0.01$)的成绩显著高于低认知参与($M = 0.61, SD = 0.01$)的成绩; 测试阶段 $\times$ 认知参与的交互作用显著, $F(3, 116) = 42.94, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.27$ 。进一步简单效应分析发现, 在 4 周后测条件下, 高认知参与组($M = 0.76, SD = 0.01$)的工作记忆刷新成绩显著高于低认知参与组($M = 0.64, SD = 0.01$), $F(3, 116) = 69.03, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.37$ 。在 6 周后测条件下, 高认知参与组

($M = 0.79$, $SD = 0.01$)的工作记忆刷新成绩同样显著高于低认知参与组($M = 0.66$, $SD = 0.01$), $F(3, 116) = 183.37$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.61$ 。在高认知参与条件下, 6周后测($M = 0.79$, $SD = 0.01$)的工作记忆刷新成绩显著高于4周后测($M = 0.76$, $SD = 0.01$)和前测($M = 0.53$, $SD = 0.01$), $F(3, 116) = 384.64$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.87$ 。在低认知参与条件下, 6周后测($M = 0.66$, $SD = 0.01$)和4周后测($M = 0.64$, $SD = 0.01$)的工作记忆刷新成绩均显著高于前测($M = 0.54$, $SD = 0.01$), $F(3, 116) = 82.59$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.59$ 。然而, 6周后测和4周后测的成绩并不存在显著差异($P > 0.05$)。这表明, 运动视频游戏中的认知参与在促进儿童工作记忆刷新方面具有重要作用。具体而言, 无论是4周后测还是6周后测, 高认知参与组的成绩均显著高于低认知参与组, 并且随着训练时间的延续, 这种提升效果得到了进一步增强。相比之下, 尽管低认知参与组的工作记忆刷新能力也得到了提升, 但进步幅度相对较小, 并且在训练4周后, 这种提升效果趋于平稳。测试阶段 $\times$ 运动强度 $\times$ 认知参与的交互作用不显著, $F(4, 145) = 2.05$, $p = 0.140$; 运动强度 $\times$ 认知参与的交互作用不显著, $F(4, 145) = 0.50$, $p = 0.483$ 。各实验组工作记忆刷新得分的变化趋势详见图11。

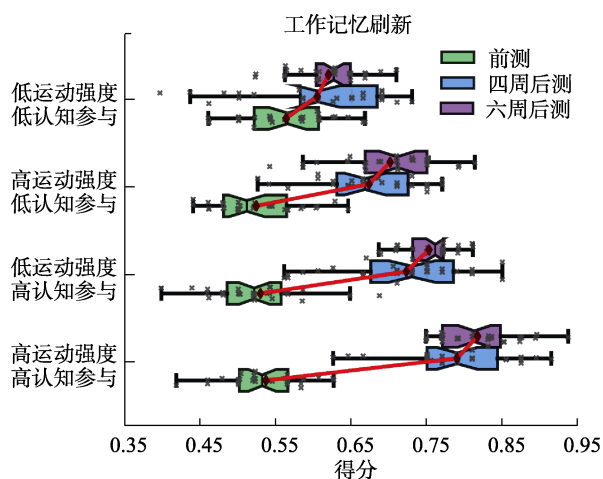


图11 四个实验组训练前后工作记忆刷新得分的变化趋势

4 讨论

4.1 不同组合模式的运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响及跨年龄段比较

本研究通过实验1和补充实验, 探讨了不同组合模式的运动视频游戏训练对儿童和年轻成人执行功能的影响。实验1发现, 在儿童群体中, 运动视频游戏训练显著提升了反应抑制和工作记忆

刷新能力, 且效果优于运动+视频游戏训练组。相较之下, 干扰抑制和注意转换能力未显示显著改善, 提示这些成分的提升可能受多种因素的调节。为了进一步探讨这一效应是否特定于儿童群体, 我们在补充实验中增加了年轻成人组作为比较组, 旨在评估运动视频游戏训练对不同发展阶段个体的认知益处。通过补充实验的验证, 我们进一步明确了运动视频游戏训练对不同年龄段个体的认知影响, 确认了儿童群体在这一干预中的独特认知收益。

4.1.1 儿童群体在运动视频游戏训练中的认知效益

本研究通过实验1探讨了不同模式的运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响, 结果表明, 运动视频游戏训练显著提高了儿童的反应抑制和工作记忆刷新能力, 且效果明显优于运动+视频游戏训练。这一发现不仅支持了具身认知理论的核心假设, 还为运动-认知融合训练模式的优化提供了新的实证依据。

首先, 实验结果显示, 经过为期6周的训练, 运动视频游戏训练组在反应抑制能力方面较运动+视频游戏训练组和控制组有显著提升。这一结果与Kou等人(2024)的元分析研究相一致, 后者表明, 运动视频游戏训练对儿童的抑制控制能力有显著促进作用。具身认知理论对这一现象提供了理论解释: 运动视频游戏训练通过多感官输入(如视觉、听觉、前庭觉和本体觉)的整合, 增强了个体在动态环境中的决策和执行控制能力, 从而促进大脑的神经可塑性和认知发展(Barsalou, 2008; Glenberg, 2010; Herold et al., 2018; Huber et al., 2024)。与传统认知训练不同, 运动视频游戏训练通过整合运动和认知任务, 要求个体在动态环境中持续进行认知控制, 从而有助于反应抑制能力的提升(Yogev-Seligmann et al., 2012)。相反, 运动+视频游戏的结合式训练模式因任务间关联较弱, 可能无法充分调动这种跨系统的动态整合过程, 进而导致其训练效果较差。此外, “中央容量共享模型”(Tombu & Jolicoeur, 2003)还指出, 在双任务情境下, 个体的认知资源有限, 必须在多个任务之间进行资源分配, 从而可能削弱某一任务的执行效果。因此, 运动+视频游戏训练中运动任务和认知任务的竞争也可能导致训练效果的下降, 而运动视频游戏训练的高融合性有效规避了这一问题, 使其成为更加有效的干预手段。

其次, 关于工作记忆刷新能力, 实验结果表明, 运动视频游戏组在干预4周和6周后的工作记忆刷新能力显著优于控制组, 并且训练效果随着时间的

延续持续提升。与此相反,运动+视频游戏训练组在 4 周后达到峰值后未能出现显著的进一步提升。这一发现支持了“适应能力模型”中的观点,即在复杂的认知活动中进行体育锻炼有助于促进神经可塑性,从而提高工作记忆能力(Raichlen & Alexander, 2017)。具身认知理论认为,运动通过激活中枢神经系统,外周的肌肉和感觉反馈能够进一步促进大脑的活动。这种生理与认知的双向互动产生了协同效应,使得运动视频游戏训练能更好地促进工作记忆的提升,并且这种效应在长期干预后得以持续和巩固(Fabel et al., 2009)。相比之下,运动+视频游戏训练因其运动和认知任务的独立性,未能形成强有力的整合机制,导致其对工作记忆刷新的长期促进效果较为有限(Huber et al., 2024)。

最后,尽管运动视频游戏训练在反应抑制和工作记忆刷新方面表现出显著效果,但在干扰抑制和注意转换能力的提升上,两种训练方式均未显示出显著改善。对于干扰抑制,训练后儿童的得分未有显著提升,甚至在某些情况下出现下降,这可能与双任务训练引发的认知负荷增加有关(Lai et al., 2017)。此外,“中央容量共享模型”进一步解释了这一现象,该模型认为,在多任务情境下,个体的认知资源被分散,导致某些任务表现不佳(Tombu & Jolicoeur, 2003)。对于注意转换任务,虽然所有组别在训练后均有所提升,但未出现显著的组间差异。这一结果与 Yongtawee 和 Woo (2017)的研究相符,他们发现,青少年的注意转换能力在运动训练后并未表现出显著改善,可能是因为运动训练主要促进较低层次的执行功能(如反应抑制和工作记忆刷新),而对较高层次的执行功能(如注意转换)影响较小。

总的来说,运动视频游戏训练在提升儿童反应抑制和工作记忆刷新能力方面效果显著,且优于运动+视频游戏训练。这一效果可能得益于运动视频游戏训练在运动和认知任务上的高度融合,形成了一个多感官、跨系统的认知提升机制,使得训练效果更加持久且具有迁移性。本研究的结果为运动视频游戏训练在儿童执行功能发展中的应用提供了有力的实证支持,并为未来的研究和实践提供了新的方向。

4.1.2 儿童与年轻成人群体在运动视频游戏训练中的认知收益比较

为了深入探讨运动视频游戏训练对不同年龄段群体的影响,本研究在补充实验中引入了年轻成人组进行相同的训练模式,并与儿童组进行了比

较。通过这一对比,我们旨在明确运动视频游戏训练的认知效益是否具有跨年龄段的普适性。实验结果表明,尽管年轻成人组在执行功能的提升上也表现出一定的训练效应,但这些效应的程度明显低于儿童组,尤其是在反应抑制和工作记忆刷新任务中的提升幅度较小。

从神经发育的角度来看,儿童处于执行功能快速发展的关键期,大脑具有更高的神经可塑性和结构重塑能力(Anderson, 2002; Diamond & Lee, 2011)。这种可塑性使得儿童能够更有效地整合运动和认知刺激,从而在训练中获得更大的认知收益(Ludyga et al., 2022)。相比之下,年轻成人的大脑神经网络已趋于稳定,工作记忆处理和执行功能逐渐成熟(Cowan, 2016; Luna et al., 2015),神经适应性显著降低(Hötting & Röder, 2013),导致其在应对新的认知挑战时表现出的弹性和灵活性受限(Lindenberg, 2014)。

具身认知理论为这一现象提供了进一步的理论支持。该理论强调认知能力不仅依赖于大脑的神经活动,还与身体运动和感知系统的反馈密切相关(Barsalou, 2008; Glenberg, 2010)。儿童在运动视频游戏训练中,其高度可塑的神经系统能够更好地协调身体运动与认知加工,促进感知-运动-认知的整合(Herold et al., 2018),从而增强执行功能(Benzing & Schmidt, 2017, 2018)。然而,年轻成人由于神经网络更具稳定性,这种身体-认知整合的潜力受到限制,使得训练诱导的神经适应性变化较为有限,导致认知效益的提升幅度相对较小(Huber et al., 2024)。因此,尽管运动视频游戏训练对年轻成人仍具有一定效果,但其认知效益显著低于儿童群体。

总的来说,本研究通过比较儿童与年轻成人群体在运动视频游戏训练中的认知收益差异,揭示了年龄在运动视频游戏训练效益中的关键作用。儿童由于其更高的神经可塑性和灵活的认知适应能力,在训练中表现出了更显著的认知提升,而年轻成人的认知提升效果则较为有限。这一发现进一步支持了具身认知理论在不同年龄段的应用,强调了大脑的可塑性和任务适应性对认知训练效果的深远影响。

4.2 运动视频游戏训练促进儿童的执行功能:运动强度和认知参与的作用

基于实验 1 所得出的结论,我们发现,相比于运动+视频游戏训练,运动视频游戏训练(融合式训练模式)更有助于儿童执行功能的提升,特别是

在反应抑制和工作记忆刷新方面。运动强度和认知参与作为影响运动干预效果的两个关键因素,实验2进一步探讨了它们在运动视频游戏训练中的作用机制。结果表明,相较于运动强度,认知参与对儿童反应抑制能力的影响更加显著且持久,提示认知参与可能是提升儿童反应抑制能力的核心因素。而在工作记忆刷新能力的提升方面,尽管运动强度和认知参与均对其有所促进,但两者的交互作用不显著,这表明它们各自通过不同的机制影响执行功能。

4.2.1 运动强度的短期唤醒效应

运动强度对执行功能的促进作用可依据生理唤醒理论加以理解。该理论认为,身体活动通过提升心率、增加脑血流量与代谢水平,从而诱发神经递质(如多巴胺、去甲肾上腺素)的释放,进而增强反应控制与信息加工速度(Dishman et al., 2006)。已有研究表明,中到高强度的运动能有效激活脑干及皮质下结构,提高认知警觉与反应速度(Hillman et al., 2009)。然而,运动强度的效应通常较为短期,且其对反应抑制的提升效果较为有限,特别是在低强度运动中,未能有效激发足够的生理唤醒,导致其促进执行功能的效果较弱(Audiffren et al., 2008)。在儿童样本中,持续的高强度运动可能因疲劳积累或注意负荷下降而削弱后期训练收益,这也进一步解释了本研究中运动强度对执行功能提升所呈现出的边际递减效应(Best, 2010; Pesce, 2012)。因此,虽然高强度运动确实能通过唤醒机制在短期内增强儿童的反应抑制能力,但其效果的持续性和长久性较为有限。

4.2.2 认知参与的核心作用与神经机制

与运动强度的生理唤醒不同,认知参与通过激活控制高阶认知过程的脑区来促进执行功能的持续改善,这一机制符合“认知刺激假说”的理论框架(Ishihara et al., 2017; Pesce, 2012)。该假说指出,个体在运动中承担的认知挑战——包括策略规划、决策制定、冲突监控与任务切换——能激活前额叶皮层(PFC)、前扣带回(ACC)及基底神经节等关键神经网络,从而促进执行功能的整合与神经可塑性增强(Valkenborghs et al., 2019)。

在本研究中,随着训练时间的延长,运动视频游戏训练中的认知参与度越高,儿童反应抑制能力的提升效果越好,而运动强度并不存在这种现象。这一发现与 Flynn 和 Richert (2018)的研究一致,后者指出,高认知参与的运动视频游戏训练显著提升

了儿童的执行功能,尤其在高认知挑战的活动中,神经可塑性变化更加明显。例如, Davis 等人(2011)采用功能性磁共振成像(fMRI)研究发现,参与包含策略与反应判断的体育活动(如足球、篮球)儿童,其前额叶皮层激活更强、神经效率更高,执行功能得分也显著高于参与单纯有氧运动的儿童。实证研究进一步发现,即使在相同运动强度条件下,认知参与度越高,执行功能改善越显著(Benzing et al., 2016)。Adcock 等人(2020)还指出,认知参与能够促进PFC-小脑-基底神经节网络的连接效率,从而实现对注意资源的更精准调度与对反应抑制的强化。本研究结果与这些研究高度一致:儿童在高认知参与的运动视频游戏中,需要不断进行动作决策、目标判断与情境应变,这不仅要求运动控制,更要求持续的认知调节与执行监控。这种多层次的信息加工使训练同时具备生理激活与认知挑战双重特征,从而在执行功能尤其是反应抑制方面产生更强、更持久的提升效应(Benzing et al., 2016; Ishihara et al., 2017)。因此,认知参与可能在执行功能的提升中起到更为核心的作用,而不仅仅是运动强度的简单补充,相较于运动强度,认知参与不仅对反应抑制具有持久的促进作用,还在工作记忆等其他执行功能方面表现出显著效果。

4.2.3 工作记忆提升:运动强度与认知参与的双路径机制

本研究还发现,运动视频游戏训练中运动强度和认知参与均对儿童工作记忆刷新能力的提升产生积极作用,但两者之间并未形成显著的交互作用。这一结果表明,运动强度与认知参与可能通过两条独立的神经路径影响工作记忆加工。一方面,运动强度通过增强大脑代谢效率和血氧供应,促进信息保持与更新所需的神经资源分配(盖笑松等, 2021; Best, 2012)。另一方面,认知参与则通过不断的任务更新、规则转换和策略选择,激活前额叶与顶叶网络的神经可塑性机制,从而提升信息刷新与调控能力(Miyamoto et al., 2018)。因此,可以认为:运动强度通过“生理唤醒-资源分配”路径影响执行功能,而认知参与通过“任务挑战-神经调控”路径增强认知可塑性。这两种机制在短期内相互独立,在长期干预中则可能表现出互补效应。

总的来说,本研究的结果支持这样一个核心结论:认知参与相较于运动强度,对儿童执行功能的提升具有更显著、更持久的促进作用。这一结论不仅印证了“认知刺激假说”,也表明执行功能的优化

依赖于个体在运动情境中的认知加工深度与信息调控复杂性。相比单纯依赖运动强度的生理激活, 认知参与通过激活前额叶-基底神经节-小脑等执行控制网络, 促进神经连接重组与突触可塑性 (Valkenborghs et al., 2019), 从而产生更深层次的认知效益。

4.3 研究不足与展望

本研究在探讨运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响及不同训练模式下的干预效果方面取得了一定进展, 但仍存在一些不足之处, 值得在未来的研究中进一步改进和深入探讨。

首先, 尽管本研究通过操控“整合度”探讨了运动与认知任务的互动与反馈过程, 然而我们仍认识到整合度并非唯一影响执行功能的变量, 运动内容与游戏内容本身的差异同样可能对训练效果产生影响。为此, 未来研究应在操控整合度的同时, 进一步细致区分并联合操控运动内容类型(如有氧运动、力量训练、协调性运动)与游戏内容复杂性(如策略游戏、反应游戏、动作游戏等)。通过这种联合操控, 可以更精确地评估不同任务内容对执行功能的独立与交互作用, 进而揭示其对执行功能各子成分的确切影响。

其次, 本研究采用单一剂量设计(6周×3次/周), 未能系统比较不同时长与频率组合的干预效果。虽然现有研究表明4~8周的干预区间普遍能带来执行功能的积极改变(Hillman et al., 2008; Huang, 2020; Schmidt et al., 2015), 但缺乏与其他剂量方案的直接对比限制了我们对最优干预参数的理解。未来研究可以采用多组对比设计系统比较不同时长与频率组合(如2周×5次/周 vs. 4周×3次/周 vs. 6周×3次/周 vs. 8周×2次/周)的干预效果, 以绘制运动认知干预的剂量-效应曲线, 明确认知提升的最佳干预参数。此外, 还有研究表明, 运动-认知联合训练的效果可能在干预结束后持续数周至数月 (Benzing & Schmidt, 2019; Diamond & Ling, 2016; Klingberg et al., 2005)。未来研究还应在训练结束后设置多个时间点的延时后测(如4周后、12周后、6个月), 以全面评估干预效果的持续性。在此过程中需注意, 不同年龄群体对干预频率的敏感性可能存在差异, 儿童的神经发育期特征决定其对频繁、短时认知刺激的反应更强(Diamond, 2013), 因此应根据目标群体的发展特征进行适应性调整。

再次, 本研究中, 运动+视频游戏训练组在6周训练后部分执行功能指标未持续改善, 可能与任

务难度未能动态调整有关。既有研究表明, 动态难度调整与个体化反馈机制能够保持认知挑战与动机水平, 从而持续促进神经可塑性与执行功能发展 (Bahar-Fuchs et al., 2017; Savulich et al., 2017)。为此, 未来研究应引入渐进式的训练难度调整机制, 使参与者能够在不同难度水平上持续挑战自我, 进而确保训练效果的长期稳定性与逐步增强 (Lillard & Peterson, 2011)。这一调整不仅能够避免适应性瓶颈的产生, 还能更精准地评估不同难度设置对执行功能提升的具体影响。

最后, 本研究未纳入生态学效度指标(如教师评定的课堂行为、父母报告的情绪调节能力等), 这限制了我们对远迁移效应的直接评估。基于具身认知理论框架和大量实证研究的支持(赵鑫 等, 2020; 祝孝亮, 赵鑫, 2023; Best, 2010; Cumming et al., 2019; Diamond & Ling, 2016; Lakes & Hoyt, 2004; Mothes et al., 2017; Mullender-Wijnsma et al., 2016; Schäfer et al., 2024), 我们认为执行功能的提升可能会有效迁移到课堂行为、情绪调节和学业表现等真实生活功能。因此, 未来研究还应纳入生态学效度指标, 如教师评定的课堂行为(课堂参与度、规则遵守)、父母报告的情绪调节能力(情绪爆发频率、挫折耐受力)以及学业表现(数学、阅读成绩)等, 以全面评估训练效果向真实生活情境中的迁移程度。这不仅能够增强研究的实践应用价值, 还能为运动视频游戏训练在学校和家庭中的推广提供更有力的证据支持。

5 结论

本研究通过两项系统性实验, 并结合对年轻人群体的补充分析, 从训练模式与作用机制两个层面探讨了运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响, 得出以下主要结论:

第一, 融合式训练模式在提升儿童执行功能方面展现出显著优势。与运动+视频游戏训练(结合式)相比, 运动视频游戏训练(融合式)更有效地提升了儿童的反应抑制和工作记忆刷新能力, 这一发现支持了具身认知理论关于运动与认知任务高度整合的优势假设。

第二, 儿童群体在运动视频游戏训练中获得的认知收益显著高于年轻成人, 这源于儿童处于执行功能快速发展的关键期, 具有更高的神经可塑性。这一发现强调了年龄在运动视频游戏训练效益中的关键作用。

第三, 认知参与相较于运动强度在提升儿童执行功能方面发挥更为核心的作用。认知参与对反应抑制能力具有更显著且持久的促进效应, 其效应量明显大于运动强度, 这一发现符合认知刺激假说。在工作记忆刷新方面, 运动强度和认知参与均发挥积极作用, 但两者通过独立的神经路径影响认知加工, 未形成显著交互效应。

综上所述, 本研究系统揭示了运动视频游戏训练提升儿童执行功能的显著效应、优势模式及核心机制, 为具身认知理论和认知刺激假说提供了新的实证支持, 也为运动-认知联合训练的优化设计提供了科学依据。

参 考 文 献

- Adcock, M., Fankhauser, M., Post, J., Lutz, K., Zizlsperger, L., Luft, A. R., ... de Bruin, E. D. (2020). Effects of an in-home multicomponent exergame training on physical functions, cognition, and brain volume of older adults: A randomized controlled trial. *Frontiers in Medicine*, 6(1), 321.
- Anderson, P. (2002). Assessment and development of executive function (EF) during childhood. *Child Neuropsychology*, 8(2), 71–82.
- Anzeneder, S., Benzing, V., & Schmidt, M. (2023). Designed acute physical activity to benefit primary school children's cognition: Effects of cognitive challenge, bout duration and positive affect. *Current Issues in Sport Science*, 8(2), 25.
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 170–177.
- Audiffren, M., Tomporowski, P. D., & Zagrodnik, J. (2008). Acute aerobic exercise and information processing: Energizing motor processes during a choice reaction time task. *Acta psychologica*, 129(3), 410–419.
- Bahar-Fuchs, A., Webb, S., Bartsch, L., Clare, L., Rebok, G., Cherbuin, N., & Anstey, K. J. (2017). Tailored and adaptive computerized cognitive training in older adults at risk for dementia: A randomized controlled trial. *Journal of Alzheimer's Disease*, 60(3), 889–911.
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617–645.
- Benzing, V., Heinks, T., Eggenberger, N., & Schmidt, M. (2016). Acute cognitively engaging exergame-based physical activity enhances executive functions in adolescents. *PLoS One*, 11(12), e0167501.
- Benzing, V., & Schmidt, M. (2017). Cognitively and physically demanding exergaming to improve executive functions of children with attention deficit hyperactivity disorder: A randomised clinical trial. *BMC Pediatrics*, 17(1), 8.
- Benzing, V., & Schmidt, M. (2018). Exergaming for children and adolescents: Strengths, weaknesses, opportunities and threats. *Journal of Clinical Medicine*, 7(11), 422.
- Benzing, V., & Schmidt, M. (2019). The effect of exergaming on executive functions in children with ADHD: A randomized clinical trial. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29(8), 1243–1253.
- Best, J. R. (2010). Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental Review*, 30(4), 331–351.
- Best, J. R. (2012). Exergaming immediately enhances children's executive function. *Developmental Psychology*, 48(5), 1501–1510.
- Blakey, E., Matthews, D., Cragg, L., Buck, J., Cameron, D., Higgins, B., ... Carroll, D. J. (2020). The role of executive functions in socioeconomic attainment gaps: Results from a randomized controlled trial. *Child Development*, 91(5), 1594–1614.
- Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 377–381.
- Castellote-Caballero, Y., Carcelén Fraile, M. D. C., Aibar-Almazán, A., Afanador-Restrepo, D. F., González-Martín, A. M. (2024). Effect of combined physical-cognitive training on the functional and cognitive capacity of older people with mild cognitive impairment: A randomized controlled trial. *BMC Medicine*, 22(1), 281.
- Chang, E. C. H., Chu, C. H., Karageorghis, C. I., Wang, C. C., Tsai, J. H. C., Wang, Y. S., & Chang, Y. K. (2017). Relationship between mode of sport training and general cognitive performance. *Journal of Sport and Health Science*, 6(1), 89–95.
- Chartier, C., Godard, J., Durand, S., Humeau-Heurtier, A., Menetrier, E., Allain, P., & Besnard, J. (2024). Combinations of physical and cognitive training for subcortical neurodegenerative diseases with physical, cognitive and behavioral symptoms: A systematic review. *Neurological Sciences*, 45(12), 5571–5589. <https://doi.org/10.1007/s10072-024-07808-x>
- Contreras-Osorio, F., Campos-Jara, C., Martínez-Salazar, C., Chiroso-Ríos, L., & Martínez-García, D. (2021). Effects of sport-based interventions on children's executive function: A systematic review and meta-analysis. *Brain Sciences*, 11(6), 755.
- Contreras-Osorio, F., Guzmán-Guzmán, I. P., Cerda-Vega, E., Chiroso-Ríos, L., Ramírez-Campillo, R., & Campos-Jara, C. (2022). Effects of the type of sports practice on the executive functions of schoolchildren. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 3886.
- Cowan, N. (2016). Working memory maturation: Can we get at the essence of cognitive growth? *Perspectives on Psychological Science*, 11(2), 239–264.
- Cumming, M. M., Smith, S. W., & O'Brien, K. (2019). Perceived stress, executive function, perceived stress regulation, and behavioral outcomes of adolescents with and without significant behavior problems. *Psychology in the Schools*, 56(9), 1359–1380.
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., McDowell, J. E., Austin, B. P., Miller, P. H., Yanasak, N. E., ... Naglieri, J. A. (2011). Exercise improves executive function and achievement and alters brain activation in overweight children: A randomized, controlled trial. *Health Psychology*, 30(1), 91–98.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135–168.
- Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science*, 333(6045), 959–964.
- Diamond, A., & Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 34–48.
- Dishman, R. K., Berthoud, H. R., Booth, F. W., Cotman, C. W., Edgerton, V. R., Fleshner, M. R., ... Zigmond, M. J. (2006). Neurobiology of exercise. *Obesity*, 14(3), 345–356.
- Durstun, S., Thomas, K. M., Yang, Y., Uluğ, A. M.,

- Zimmerman, R. D., & Casey, B. J. (2002). A neural basis for the development of inhibitory control. *Developmental Science*, 5(4), F9–F16.
- Eggenberger, P., Schumacher, V., Angst, M., Theill, N., & de Bruin, E. D. (2015). Does multicomponent physical exercise with simultaneous cognitive training boost cognitive performance in older adults? A 6-month randomized controlled trial with a 1-year follow-up. *Clinical Intervetional Aging*, 10, 1335–1349.
- Egger, F., Benzing, V., Conzelmann, A., & Schmidt, M. (2019). Boost your brain, while having a break! The effects of long-term cognitively engaging physical activity breaks on children's executive functions and academic achievement. *PLOS ONE*, 14(3), e0212482.
- Fabel, K., Wolf, S., Ehninger, D., Babu, H., Leal-Galicia, P., & Kempermann, G. (2009). Additive effects of physical exercise and environmental enrichment on adult hippocampal neurogenesis in mice. *Frontiers in Neuroscience*, 3, 50.
- Festa, F., Medori, S., & Macri, M. (2023). Move your body, boost your brain: The positive impact of physical activity on cognition across all age groups. *Biomedicine*, 11(6), 1765.
- Flynn, R. M., & Richert, R. A. (2018). Cognitive, not physical, engagement in video gaming influences executive functioning. *Journal of Cognition and Development*, 19(1), 1–20.
- Foglia, L., & Wilson, R. A. (2013). Embodied cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4(3), 319–325.
- Formenti, D., Trecroci, A., Duca, M., Cavaggioni, L., D'Angelo, F., Passi, A., ... Alberti, G. (2021). Differences in inhibitory control and motor fitness in children practicing open and closed skill sports. *Scientific Reports*, 11(1), 4033.
- Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). Exergame can improve children's executive function: The role of physical intensity and cognitive engagement. *Acta Psychologica Sinica*, 53(5), 505–514.
- [盖笑松, 许洁, 闫艳, 王元, 谢笑春. (2021). 体感游戏促进儿童的执行功能: 运动强度和认知参与的作用. *心理学报*, 53(5), 505–514.]
- Gates, N. J., Rutjes, A. W., Di Nisio, M., Karim, S., Chong, L.-Y., March, E., ... Vernooij, R. W. (2019). Computerised cognitive training for maintaining cognitive function in cognitively healthy people in late life. *Cohrane Database of Systematic Reviews*, 3(3), CD012277.
- George, A. S., George, A. H., & Baskar, T. (2023). Neuro-gaming: How video games shape the brain's cognitive landscape. *Partners Universal International Research Journal*, 2(4), 128–137.
- Glenberg, A. M. (2010). Embodiment as a unifying perspective for psychology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 1(4), 586–596.
- Gu, Q., Zou, L., Loprinzi, P. D., Quan, M., & Huang, T. (2019). Effects of open versus closed skill exercise on cognitive function: A systematic review. *Frontiers in Psychology*, 10, 1707.
- Herold, F., Hamacher, D., Schega, L., & Müller, N. G. (2018). Thinking while moving or moving while thinking-concepts of motor-cognitive training for cognitive performance enhancement. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10(2), 228.
- Hillman, C. H., Erickson, K. I., & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: Exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(1), 58–65.
- Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., & Kramer, A. F. (2009). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience*, 159(3), 1044–1054.
- Hötting, K., & Röder, B. (2013). Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(9), 2243–2257.
- Huang, K. T. (2020). Exergaming executive functions: An immersive virtual reality-based cognitive training for adults aged 50 and older. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 23(3), 143–149.
- Huber, S. K., Knols, R. H., Held, J. P. O., Betschart, M., & de Bruin, E. D. (2024). PEMOCS: Evaluating the effects of a concept-guided, personalised, motor-cognitive exergame training on cognitive functions and gait in chronic Stroke—Study protocol for a randomised controlled trial. *Trials*, 25(1), 451.
- Irak, M., & Soylu, C. (2023). Effects of excessive video game playing on event-related brain potentials during working memory. *Current Psychology*, 42(3), 1881–1895.
- Ishihara, T., Sugawara, S., Matsuda, Y., & Mizuno, M. (2017). Relationship of tennis play to executive function in children and adolescents. *European Journal of Sport Science*, 17(8), 1074–1083.
- Ji, Z., Feng, T., & Wang, H. (2020). The effects of 12-week physical exercise tapping high-level cognitive functions. *Advances in Cognitive Psychology*, 16(1), 59–66.
- Kim, G. Y., Han, M. R., & Lee, H. G. (2014). Effect of dual-task rehabilitative training on cognitive and motor function of stroke patients. *Journal of Physical Therapy Science*, 26(1), 1–6.
- Klingberg, T., Fernell, E., Olesen, P. J., Johnson, M., Gustafsson, P., Dahlström, K., ... Westerberg, H. (2005). Computerized training of working memory in children with ADHD—a randomized, controlled trial. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 44(2), 177–186.
- Kou, R., Zhang, Z., Zhu, F., Tang, Y., & Li, Z. (2024). Effects of exergaming on executive function and motor ability in children: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 19(9), e0309462. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309462>
- Lai, L., Bruce, H., Bherer, L., Lussier, M., & Li, K. (2017). Comparing the transfer effects of simultaneously and sequentially combined aerobic exercise and cognitive training in older adults. *Journal of Cognitive Enhancement*, 1(4), 478–490.
- Lakes, K. D., & Hoyt, W. T. (2004). Promoting self-regulation through school-based martial arts training. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 25(3), 283–302.
- Lauenroth, A., Ioannidis, A. E., & Teichmann, B. (2016). Influence of combined physical and cognitive training on cognition: A systematic review. *BMC Geriatrics*, 16, 141.
- Lillard, A. S., & Peterson, J. (2011). The immediate impact of different types of television on young children's executive function. *Pediatrics*, 128(4), 644–649.
- Lindenberger, U. (2014). Human cognitive aging: Corriger la fortune? *Science*, 346(6209), 572–578.
- Lucia, S., Bianco, V., & Di Russo, F. (2023). Specific effect of a cognitive-motor dual-task training on sport performance and brain processing associated with decision-making in semi-elite basketball players. *Psychology of Sport and Exercise*, 64, 102302.
- Ludyga, S., Gerber, M., & Kamijo, K. (2022). Exercise types and working memory components during development. *Trends in Cognitive Sciences*, 26(3), 191–203.
- Luna, B., Marek, S., Larsen, B., Tervo-Clemmens, B., &

- Chahal, R. (2015). An integrative model of the maturation of cognitive control. *Annual Review of Neuroscience*, 38, 151–170.
- Ma, C., Song, M., & Zhao, X. (2025). The impact of executive functions on English academic performance among Chinese primary school students: A network analysis. *Learning and Instruction*, 99, 102174.
- Ma, C., Wang, Y., Fu, J., & Zhao, X. (2025). The impact of different types of academic stress on subcomponents of executive function in high school students of different grades. *Acta Psychologica Sinica*, 57(1), 18–35.
- [马超, 汪彦云, 付建军, 赵鑫. (2025). 不同类型学业压力对不同年级高中生执行功能子成分的影响. *心理学报*, 57(1), 18–35.]
- Magistro, D., Cooper, S. B., Boat, R., Carlevaro, F., Magno, F., Castagno, C., ... Musella, G. (2022). An After-School Football Session Transiently Improves Cognitive Function in Children. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 164.
- McEwen, B. S., & Morrison, J. H. (2013). The brain on stress: Vulnerability and plasticity of the prefrontal cortex over the life course. *Neuron*, 79(1), 16–29.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49–100.
- Miyamoto, T., Hashimoto, S., Yamamoto, H., Ikawa, M., Nakano, Y., Sekiyama, T., ... Fujioka, H. (2018). Response of brain-derived neurotrophic factor to combining cognitive and physical exercise. *European Journal of Sport Science*, 18(8), 1119–1127.
- Mothes, L., Haag Kristensen, C., Grassi Oliveira, R., Iracema de Lima Argimon, I., Paz Fonseca, R., & Quarti Irigaray, T. (2017). Stressful events and executive functioning in adolescents with and without history of grade repetition. *Universitas Psychologica*, 16(4), 139–150.
- Mullender-Wijnsma, M. J., Hartman, E., de Greeff, J. W., Doolaard, S., Bosker, R. J., & Visscher, C. (2016). Physically active math and language lessons improve academic achievement: A cluster randomized controlled trial. *Pediatrics*, 137(3), e20152743.
- Pesce, C. (2012). Shifting the focus from quantitative to qualitative exercise characteristics in exercise and cognition research. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 34(6), 766–786.
- Raichlen, D. A., & Alexander, G. E. (2017). Adaptive capacity: An evolutionary neuroscience model linking exercise, cognition, and brain health. *Trends in Neurosciences*, 40(7), 408–421.
- Savulich, G., Piercy, T., Fox, C., Suckling, J., Rowe, J. B., O'Brien, J. T., & Sahakian, B. J. (2017). Cognitive training using a novel memory game on an iPad in patients with amnesic mild cognitive impairment (aMCI). *International Journal of Neuropsychopharmacology*, 20(8), 624–633.
- Schäfer, S., & Schumacher, V. (2011). The interplay between cognitive and motor functioning in healthy older adults: Findings from dual-task studies and suggestions for intervention. *Gerontology*, 57(3), 239–246.
- Schäfer, J., Reuter, T., Leuchter, M., & Karbach, J. (2024). Executive functions and problem-solving—The contribution of inhibition, working memory, and cognitive flexibility to science problem-solving performance in elementary school students. *Journal of Experimental Child Psychology*, 244, 105962.
- Schmidt, M., Jäger, K., Egger, F., Roebbers, C. M., & Conzelmann, A. (2015). Cognitively engaging chronic physical activity, but not aerobic exercise, affects executive functions in primary school children: A group-randomized controlled trial. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 37(6), 575–591.
- Shi, P., Tang, Y., Zhang, Z., Feng, X., & Li, C. (2022). Effect of Physical Exercise in Real-World Settings on Executive Function of Typical Children and Adolescents: A Systematic Review. *Brain Sciences*, 12(12), 1734.
- Stojan, R., & Voelcker-rehage, C. (2019). A systematic review on the cognitive benefits and neurophysiological correlates of exergaming in healthy older adults. *Journal of Clinical Medicine*, 8(5), 734.
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(2), 3–18.
- Tomprowski, P. D., McCullick, B., Pendleton, D. M., & Pesce, C. (2015). Exercise and children's cognition: The role of exercise characteristics and a place for metacognition. *Journal of Sport and Health Science*, 4(1), 47–55.
- Valkenborghs, S. R., Noetel, M., Hillman, C. H., Nilsson, M., Smith, J. J., Ortega, F. B., & Lubans, D. R. (2019). The impact of physical activity on brain structure and function in youth: A systematic review. *Pediatrics*, 144(4), e20184032.
- Verbruggen, F., & Logan, G. D. (2008). Response inhibition in the stop-signal paradigm. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 418–424.
- Wang, C. H., Moreau, D., Yang, C. T., Lin, J. T., Tsai, Y. Y., & Tsai, C. L. (2019). The influence of aerobic fitness on top-down and bottom-up mechanisms of interference control. *Neuropsychology*, 33(2), 245–255.
- Yao, Y., Cui, R., Li, Y., Zeng, L., Jiang, J., Qiu, N., ... Liu, T. (2020). Action real-time strategy gaming experience related to enhanced capacity of visual working memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 333.
- Yogev-seligmann, G., Hausdorff, J. M., & Giladi, N. (2012). Do we always prioritize balance when walking? Towards an integrated model of task prioritization. *Movement Disorders*, 27(6), 765–770.
- Yongtawee, A., & Woo, M. J. (2017). The influence of gender, sports type and training experience on cognitive functions in adolescent athletes. *Exercise Science*, 26(2), 159–167.
- Zhao, X., Chen, L., & Maes, J. H. (2018a). Training and transfer effects of response inhibition training in children and adults. *Developmental Science*, 21(1), e12511.
- Zhao, X., & Jia, L. (2019). Training and transfer effects of interference control training in children and young adults. *Psychological Research*, 83(7), 1519–1530.
- Zhao, X., Li, H., Jin, G., Li, S., Zhou, A., Liang, W., ... Cai, Y. (2020). Effects of phonological memory and central executive function on decoding, language comprehension of children in different grades. *Acta Psychologica Sinica*, 52(4), 469–484.
- [赵鑫, 李红利, 金戈, 李世峰, 周爱保, 梁文佳 ... 蔡亚亚. (2020). 语音记忆和中央执行功能在不同年级儿童解码和语言理解中的作用. *心理学报*, 52(4), 469–484.]
- Zhao, X., Wang, H., & Maes, J. H. (2020). Training and transfer effects of extensive task-switching training in students. *Psychological Research*, 84(2), 389–403.
- Zhao, X., Xu, Y., Fu, J., & Maes, J. H. (2018b). Are training and transfer effects of working memory updating training modulated by achievement motivation? *Memory & Cognition*, 46(3), 398–409.
- Zhu, X., & Zhao, X. (2023). Role of executive function in

mathematical ability of children in different grades. *Acta Psychologica Sinica*, 55(5), 696–710.

[祝孝亮, 赵鑫. (2023). 执行功能在不同年级儿童数学能力中的作用. *心理学报*, 55(5), 696–710.]

Beyond the screen: Sports video game training can better enhance children's executive functions

MA Chao, ZHAO Lu, ZHAO Xin

(School of Psychology, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract

Although executive functions continue to develop throughout an individual's lifespan, childhood—characterized by rapid development and heightened plasticity—is widely recognized as the most critical period in this regard. Sports video game training, an innovative approach integrating physical sport with cognitive tasks, has demonstrated promising potential to enhance executive function in children. However, the differential effects of various combinations of sports and video game elements on children's executive functions—as well as the respective roles of cognitive engagement and sport intensity in facilitating these effects in the motor-cognitive domain—warrant further exploration. This study aimed to identify which form of sports video game training is most beneficial for enhancing children's executive functions, through two innovative intervention experiments.

Experiment 1, including 90 children (mean age = 11.34 ± 0.48 years), employed an integrated training mode (sports video game training) and a combined training mode (sports + video game training) to examine their differential effects on children's executive functions through a 6-week intervention (3 sessions per week, 30 minutes per session). Results demonstrated that sports video game training significantly enhanced children's response inhibition and working memory updating abilities, with effects markedly superior to those of sports + video game training and the control group. However, interference inhibition and attention switching yielded no significant improvement across training conditions. A supplementary experiment further revealed that compared with young adults, children derived greater cognitive benefits from sports video game training, likely attributable to their higher neural plasticity during this rapid developmental period of executive functions. This finding provides important evidence for prioritizing the integrated training mode in pediatric populations.

Experiment 2 included 120 children (mean age = 12.44 ± 0.61 years) and adopted a 2 (sport intensity: high vs. low) $\times 2$ (cognitive engagement: high vs. low) experimental design to further elucidate the roles of sport intensity and cognitive engagement as mechanisms underlying the effects of sports video game training on executive function. Results indicated that, compared with sport intensity, cognitive engagement exerted a more significant and enduring facilitative effect on children's response inhibition, with a substantially larger effect size ($\eta_p^2 = 0.379$) than sport intensity ($\eta_p^2 = 0.140$). Moreover, the advantage of high cognitive engagement amplified progressively with extended training duration. Regarding working memory updating, although both sport intensity and cognitive engagement contributed positively, they exhibited no significant interaction effect, suggesting that these two factors may influence executive functions through independent neural pathways—sport intensity via a “physiological arousal-resource allocation” pathway and cognitive engagement through a “task challenge-neural modulation” pathway.

In conclusion, this study revealed the significant effects of sports video game training in enhancing children's executive functions as well as the underlying mechanisms, providing novel empirical support for embodied cognition theory and the cognitive stimulation hypothesis, while also offering scientific evidence for executive function interventions in educational practice. Future research should prioritize the integrated training mode, strengthen cognitive task design, and flexibly adjust sport intensity according to children's age characteristics and individual differences, while also investigating optimal dosage parameters and the long-term sustainability of training effects to maximize intervention outcomes.

Keywords sports video game training, executive function, children, sport intensity, cognitive engagement

补充材料

- 1 补充实验: 不同组合模式的运动视频游戏训练对年轻人个体执行功能的影响
- 2 附表 S4 实验 1 儿童各变量基线水平的描述统计及方差分析结果
- 3 附表 S5 实验 1 各组干预前后儿童执行功能各成分表现的描述统计结果
- 4 附表 S6 实验 2 运动强度操纵有效性补充分析 (PolarRS400 平均心率)
- 5 附表 S7 实验 2 儿童各变量基线水平描述统计及方差分析结果
- 6 附表 S8 实验 2 各组干预前后儿童反应抑制和工作记忆刷新表现的描述统计结果
- 7 附图 S5 前后测执行功能各实验任务示例
- 8 附图 S6 实验 1 运动视频游戏训练组具体干预手段
- 9 附图 S7 实验 1 运动+视频游戏训练组具体干预手段
- 10 附图 S8 实验 1 纯运动训练组具体干预手段
- 11 附图 S9 实验 1 纯视频游戏训练组具体干预手段
- 12 附图 S10 实验 1 控制组具体干预手段
- 13 附图 S11 实验 2 高运动强度+高认知参与组具体干预手段
- 14 附图 S12 实验 2 低运动强度+高认知参与组具体干预手段
- 15 附图 S13 实验 2 高运动强度+低认知参与组具体干预手段
- 16 附图 S14 实验 2 低运动强度+低认知参与组具体干预手段

1 补充实验: 不同组合模式的运动视频游戏训练对年轻人个体执行功能的影响

1.1 方法

1.1.1 被试

采用 G*power 3.1 对补充实验进行了样本量估算, 根据效应量 $f = 0.25$ 、显著性水平 $\alpha = 0.05$ 、统计检验力 $Power = 0.95$ 的标准, 计算结果表明, 本实验至少需要 54 名被试, 每组 18 人。为确保补充实验具有足够的统计效能, 我们在兰州某高校招募了 90 名大学生, 男生 43 名, 女生 47 名, 平均年龄为 19.18 ± 0.91 岁, 通过随机抽样的方式, 将其分为 3 组, 每组 30 人。所有被试均为右利手, 视力或矫正视力正常, 无色盲, 身体健康且无实验前 48 小时无出现失眠状况、大负荷运动, 并且他们此前均未参加过类似实验。所有参与实验的大学生均得到

了学校、家长、辅导员和班主任老师的知情同意, 在实验结束后给予了一定的奖励。本研究经西北师范大学伦理委员会批准, 审批号为 2025010。各组被试基本情况详见附表 S1。

附表 S1 补充实验被试人口学变量

组别	总计	男	女	年龄($M \pm SD$, 岁)
运动视频游戏训练组	30	14	16	19.17 ± 0.87
运动+视频游戏训练组	30	13	17	19.37 ± 0.89
控制组	30	16	14	19.00 ± 0.95
总计	90	43	47	19.18 ± 0.91

1.1.2 实验设计及流程

根据实验 1 的结果, 我们发现, 运动+视频游戏训练这种“结合式训练模式”中并不存在潜在的双任务干扰效应。因此, 我们在补充实验中排除了两个额外的单任务训练条件, 仅进行运动视频游戏训练和运动+视频游戏训练, 以进一步考察运动视频游戏训练所带来的独特认知效益是否可以扩展到年轻人个体。具体而言, 补充实验采用 3(组别: 运动视频游戏训练组、运动+视频游戏训练组和控制组) $\times$ 3(测试阶段: 前测、4 周后测和 6 周后测)的混合实验设计, 组别为被试间变量, 测试阶段为被试内变量, 因变量为执行功能 4 个子成分(干扰抑制、反应抑制、工作记忆刷新和注意转换)任务的正确率或反应时。实验采用个别施测的方式, 分别对每组被试进行为期 6 周, 每周 3 次, 每次 30 分钟的干预, 并在每次干预前后进行 5 分钟的热身和肌肉放松活动, 每位被试在实验期间不进行相关额外训练。

在签署知情同意书后, 所有被试完成了前测任务, 包括 Stroop 任务、Go/No-go 任务、数字刷新任务和数字转换任务。随后, 所有被试参与为期 6 周、共计 18 次的干预训练。具体而言: 运动视频游戏组进行 Switch《健身环大冒险》游戏训练; 运动+视频游戏组进行功率自行车+地铁跑酷小游戏训练; 控制组则在相同的时间和环境观看健康视频《托马斯和他的朋友们》。在训练 4 周后, 所有组别的被试均完成第一次后测, 后测任务与前测一致。经过 6 周的干预训练后, 所有组别再次完成第二次后测, 后测任务同样与前测一致。最后, 研究将比较运动视频游戏训练、运动+视频游戏训练和控制组在前测、4 周后测和 6 周后测中的得分差异, 以评估各实验组训练的效果。

1.1.3 前后测任务

补充实验的前后测任务参数及计分方式同实验一。

1.1.4 训练任务

为保证运动视频游戏训练组与运动+视频游戏训练组中运动和认知任务的同质性, 我们采用情境、难度类

似的 Switch《健身环大冒险》和功率自行车+地铁跑酷小游戏的形式对两个干预组进行训练。在实验过程中,所有参与运动的被试均佩戴 PolarRS400 心率绑带,记录其在训练期间的平均心率,每 5 分钟评估一次心率,确保被试维持在中等强度运动(最大心率的 64~76%)。各组具体操纵情况如下:

运动视频游戏训练组:采用任天堂 Switch《健身环大冒险》游戏对被试进行干预训练。该游戏共分为 6 个模块,分别是冒险、轻松、自定义、背景执行模式、节奏游戏以及小知识清单。本实验选择了自定义模块对被试进行训练,玩家可以根据自身运动能力和偏好选择不同动作并进行动作的自定义组合,游戏中需要判断障碍物种类例如浮木、石头等,通过挤压健身环使年轻人个体不停地跑、跳、深蹲等对不同障碍物做出相应的身体姿势,来控制游戏中的人物前进,同时沿途还需要收集藏在各个角落的金币,全程都需要进行思考和决策。

运动+视频游戏训练组:采用的是骑功率自行车+地铁跑酷小游戏的方式对被试进行干预训练,要求被试一边骑有氧动感单车一边玩地铁跑酷小游戏,运动任务和认知任务分开同时进行。游戏的主线从三条铁轨上展开,玩家要以孩子 Jake 的身份不断在铁轨中及时穿梭来躲避列车,同时收集金币,注意躲避警察及猎狗的追捕。

控制组:观看健康动画片《托马斯和他的朋友们》。

1.1.5 数据分析

使用 SPSS 26.0 进行数据分析,通过重复测量方差分析方法检验各实验组年轻人个体执行功能各子成分的提升效果。为使实验结果更加直观,我们采用 Python 3.10.11 对全部数据分析结果进行了可视化呈现。

1.2 结果

1.2.1 年轻人个体执行功能各成分基线水平的描述统计与差异检验

在补充实验开始前,我们先对运动视频游戏训练组、运动+视频游戏训练组和控制组三组被试执行功能的基线水平进行测试,采用方差分析对三组被试的成绩进行差异检验,以排除基线执行功能水平对训练效果的影响。结果显示,三组被试执行功能各成分的基线水平均不存在显著差异($P_s > 0.05$),说明基线各组控制有效,详见附表 S2。

1.2.2 各组训练前后年轻人个体执行功能各成分的提升效果

为更清晰的观察到各组训练前后年轻人个体执行功能各子成分的提升效果,我们进一步采用采用 3(组别:运动视频游戏训练组、运动+视频游戏训练组和控制组) $\times$ 3(测试阶段:前测、4 周后测和 6 周后测)的重复测量方差分析对年轻人个体在执行功能各任务上的表现进行分析,其中,测试阶段为被试内变量,组别为被试间变量,结果详见附表 S3。

对于干扰抑制而言,结果显示,测试阶段主效应不显著, $F(2, 87) = 0.66, p = 0.498$;组别主效应不显著, $F(2, 87) = 0.77, p = 0.465$;测试阶段 $\times$ 组别的交互作用显著, $F(2, 87) = 4.50, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.09$ 。进一步简单效应分析发现,在前测和 4 周后测条件下,各组干扰抑制得分均不存在显著差异, $p_s > 0.05$;在 6 周后测条件下,运动视频游戏训练组($M = -18.76, SD = 47.34$)和运动+视频游戏训练组($M = -30.86, SD = 57.08$)的得分显著高于控制组($M = -61.62, SD = 30.31$), $p_s < 0.05$ 。然而,运动视频游戏训练组和运动+视频游戏训练组的得分之间不存在显

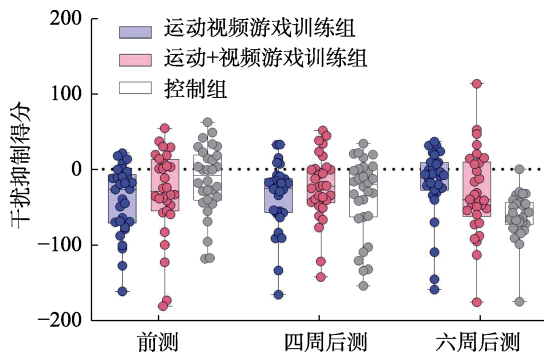
附表 S2 补充实验年轻人个体各变量基线水平描述统计及方差分析结果

变量	运动视频游戏训练组		运动+视频游戏训练组		控制组		$F(2, 87)$	p	η_{p}^2
	$(n = 30)$		$(n = 30)$		$(n = 30)$				
	M	SD	M	SD	M	SD			
干扰抑制									
Stroop 干扰效应(ms)	-41.27	45.93	-31.28	57.15	-14.81	45.86	1.42	0.25	0.03
反应抑制									
No-go 正确率	0.92	0.06	0.90	0.07	0.89	0.06	2.15	0.12	0.05
工作记忆刷新									
平均正确率	0.89	0.14	0.88	0.09	0.86	0.08	0.86	0.43	0.02
注意转换									
转换代价 (ms)	-284.75	193.22	-240.99	184.14	-320.54	243.95	1.09	0.34	0.02

附表 S3 各组干预前后年轻成人个体执行功能各子成分的提升效果

变量	任务指标	因素	dfs	F	p	η_p^2
干扰抑制	Stroop 任务 干扰效应(ms)	测试阶段	(2, 87)	0.66	0.518	0.01
		组别	(2, 87)	0.77	0.465	0.02
		测试阶段×组别	(2, 87)	4.50	0.003**	0.09
反应抑制	Go/No-go 任务 No-go 正确率	测试阶段	(2, 87)	0.08	0.921	0.00
		组别	(2, 87)	4.36	0.016	0.09
		测试阶段×组别	(2, 87)	1.21	0.309	0.03
工作记忆刷新	数字刷新任务 平均正确率	测试阶段	(2, 87)	9.07	<0.001***	0.09
		组别	(2, 87)	6.60	0.002**	0.13
		测试阶段×组别	(2, 87)	1.21	0.310	0.03
注意转换	注意转换任务 转换代价(ms)	测试阶段	(2, 87)	17.02	<0.001***	0.16
		组别	(2, 87)	0.76	0.471	0.02
		测试阶段×组别	(2, 87)	1.12	0.346	0.03

著差异, $p > 0.05$ 。这表明, 只有在经过 6 周的干预训练后, 运动视频游戏训练组和运动+视频游戏训练组年轻成人个体的干扰抑制能力才会得到显著提升, 并且这两个干预组的提升效果之间不存在显著差异。各组干扰抑制得分的变化趋势详见附图 S1。

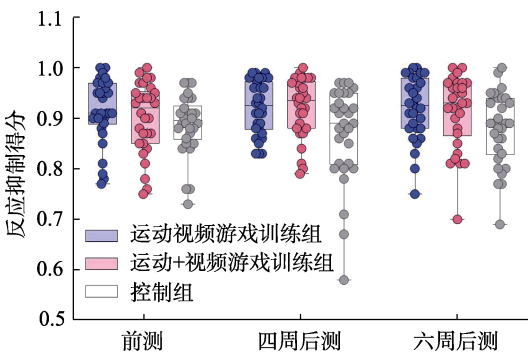


附图 S1 三个实验组训练前后干扰抑制得分的变化趋势

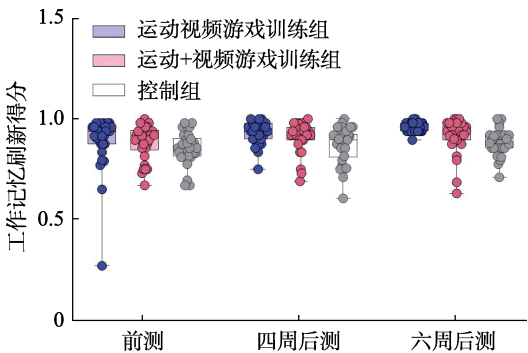
对于反应抑制而言, 结果显示, 测试阶段主效应不显著, $F(2, 87) = 0.08, p > 0.05$; 组别主效应显著, $F(2, 87) = 4.36, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.09$ 。事后检验结果显示, 运动视频游戏训练组($M = 0.92, SD = 0.01$)的反应抑制得分显著高于控制组($M = 0.88, SD = 0.01$), $p < 0.05$; 测试阶段×组别的交互作用不显著, $F(2, 87) = 1.21, p = 0.309$ 。这表明, 经过长期的干预训练后, 仅运动视频游戏训练组的反应抑制能力得到了显著提升, 然而, 由于测试阶段主效应不显著, 我们无法判断这种效果的提升究竟出现在哪一个测试阶段。各组反应抑制得分的变化趋势详见附图 S2。

对于工作记忆刷新而言, 结果显示, 测试阶段主效应显著, $F(2, 87) = 9.07, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.09$ 。事后检验结果显示, 4 周后测($M = 0.90, SD = 0.01$)和 6 周后测($M = 0.92, SD = 0.01$)的工作记忆刷新得分显著高于前测($M = 0.88, SD = 0.01$), $ps < 0.05$; 组别主效应显著, $F(2, 87) = 6.60, p$

$< 0.01, \eta_p^2 = 0.13$ 。事后检验结果显示, 运动视频游戏训练组($M = 0.93, SD = 0.01$)的工作记忆刷新得分显著高于控制组($M = 0.87, SD = 0.01$), $p < 0.01$ 。相比之下, 运动+视频游戏训练组的得分与控制组之间不存在显著差异 $p > 0.05$; 测试阶段×组别的交互作用不显著, $F(2, 87) = 1.21, p = 0.310$ 。这表明, 经过长期的干预训练后, 仅运动视频游戏训练组年轻成人个体的工作记忆刷新能力得到了显著提升。各组工作记忆刷新得分的变化趋势详见附图 S3。

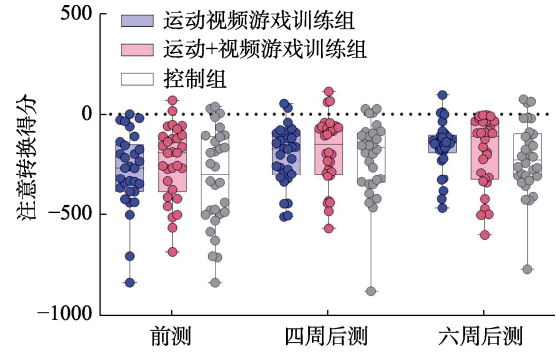


附图 S2 三个实验组训练前后反应抑制得分的变化趋势



附图 S3 三个实验组训练前后工作记忆刷新得分的变化趋势

对于注意转换而言,结果显示,测试阶段主效应显著, $F(2, 87) = 17.02, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.16$ 。事后检验结果显示,4 周后测($M = -203.64, SD = 18.08$)和 6 周后测($M = -189.52, SD = 17.24$)的注意转换得分均显著高于前测($M = -282.10, SD = 22.01$), $ps < 0.001$; 组别主效应不显著, $F(2, 87) = 0.76, p = 0.471$; 测试阶段 $\times$ 组别的交互作用不显著, $F(2, 87) = 1.12, p = 0.346$ 。这说明,经过长期训练后,各实验组的注意转换能力均得到了显著提升,但由于组别主效应不显著,我们无法判断究竟哪一组的提升效果最好。各组注意转换得分的变化趋势详见附图 S4。



附图 S4 三个实验组训练前后注意转换得分的变化趋势

附表 S4 实验 1 儿童各变量基线水平的描述统计及方差分析结果

变量	运动视频游戏训练组		运动+视频游戏训练组		纯运动训练组		纯视频游戏训练组		控制组		F (4, 145)	p	η^2_p
	(n = 30)		(n = 30)		(n = 30)		(n = 30)		(n = 30)				
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD			
干扰抑制													
Stroop 干扰效应(ms)	-21.57	55.96	-28.66	51.66	-25.24	41.97	-18.42	41.78	9.67	71.12	0.55	0.70	0.02
反应抑制													
No-go 正确率	0.82	0.12	0.78	0.18	0.81	0.12	0.79	0.12	0.80	0.17	0.25	0.91	0.01
工作记忆刷新													
平均正确率	0.52	0.13	0.56	0.15	0.53	0.07	0.54	0.13	0.47	0.14	1.70	1.15	0.05
注意转换													
转换代价(ms)	-191.70	262.41	-143.03	219.53	-149.85	225.32	-155.26	165.43	104.10	151.42	0.67	0.61	0.02

附表 S5 实验 1 各组干预前后儿童执行功能各成分表现的描述统计结果

变量	任务指标	组别	T0 ($M \pm SD$)	T1 ($M \pm SD$)	T2 ($M \pm SD$)
干扰抑制	Stroop 任务 干扰效应(ms)	运动视频游戏训练组	-21.57 $\pm$ 55.96	-8.45 $\pm$ 75.47	-4.18 $\pm$ 52.15
		运动+视频游戏训练组	-28.66 $\pm$ 51.66	-33.90 $\pm$ 60.00	-4.21 $\pm$ 85.38
		纯运动训练组	-25.24 $\pm$ 41.97	-25.61 $\pm$ 53.90	-20.08 $\pm$ 78.95
		纯视频游戏训练组	-18.42 $\pm$ 41.78	-15.64 $\pm$ 77.01	-8.63 $\pm$ 40.86
		控制组	-9.67 $\pm$ 71.12	-21.85 $\pm$ 62.08	-7.92 $\pm$ 63.30
反应抑制	Go/No-go 任务 No-go 正确率	运动视频游戏训练组	0.82 $\pm$ 0.12	0.90 $\pm$ 0.08	0.93 $\pm$ 0.03
		运动+视频游戏训练组	0.78 $\pm$ 0.18	0.87 $\pm$ 0.11	0.84 $\pm$ 0.18
		纯运动训练组	0.81 $\pm$ 0.12	0.83 $\pm$ 0.10	0.83 $\pm$ 0.10
		纯视频游戏训练组	0.79 $\pm$ 0.12	0.83 $\pm$ 0.08	0.83 $\pm$ 0.08
		控制组	0.80 $\pm$ 0.17	0.84 $\pm$ 0.14	0.84 $\pm$ 0.14
工作记忆刷新	数字刷新任务 平均正确率	运动视频游戏训练组	0.52 $\pm$ 0.13	0.70 $\pm$ 0.20	0.78 $\pm$ 0.16
		运动+视频游戏训练组	0.55 $\pm$ 0.15	0.69 $\pm$ 0.18	0.62 $\pm$ 0.14
		纯运动训练组	0.53 $\pm$ 0.07	0.57 $\pm$ 0.10	0.59 $\pm$ 0.11
		纯视频游戏训练组	0.54 $\pm$ 0.13	0.63 $\pm$ 0.17	0.66 $\pm$ 0.18
		控制组	0.47 $\pm$ 0.14	0.56 $\pm$ 0.18	0.60 $\pm$ 0.17
注意转换	注意转换任务 转换代价(ms)	运动视频游戏训练组	-191.70 $\pm$ 262.41	-139.67 $\pm$ 164.56	-66.31 $\pm$ 100.19
		运动+视频游戏训练组	-143.03 $\pm$ 219.52	-141.95 $\pm$ 164.58	-28.31 $\pm$ 143.86
		纯运动训练组	-149.84 $\pm$ 225.32	-131.89 $\pm$ 171.60	-96.58 $\pm$ 190.30
		纯视频游戏训练组	-155.26 $\pm$ 165.43	-146.52 $\pm$ 207.96	-75.27 $\pm$ 98.71
		控制组	-104.10 $\pm$ 151.42	-65.71 $\pm$ 127.21	-41.84 $\pm$ 140.20

附表 S6 实验 2 运动强度操纵有效性补充分析(PolarRS400 平均心率)

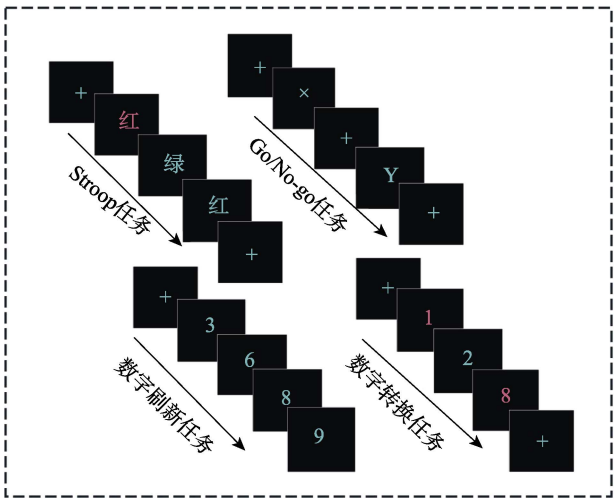
组别	运动强度	
	<i>M</i>	<i>SD</i>
高运动强度+高认知参与组	137.41	1.46
低运动强度+高认知参与组	92.28	1.45
高运动强度+低认知参与组	142.46	1.44
低运动强度+低认知参与组	97.34	1.41
<i>p</i>	<0.001***	

附表 S7 实验 2 儿童各变量基线水平描述统计及方差分析结果

变量	高运动强度+ 高认知参与组		低运动强度+ 高认知参与组		高运动强度+ 低认知参与组		低运动强度+ 低认知参与组		<i>F</i> (3, 116)	<i>p</i>	η^2_p
	<i>(n</i> = 30)		<i>(n</i> = 30)		<i>(n</i> = 30)		<i>(n</i> = 30)				
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>			
反应抑制											
NOGO 正确率	0.76	0.09	0.73	0.07	0.74	0.06	0.72	0.08	1.77	0.16	0.04
工作记忆刷新											
平均正确率	0.54	0.05	0.53	0.07	0.52	0.06	0.56	0.06	2.65	0.05	0.06

附表 S8 实验 2 各组干预前后儿童反应抑制和工作记忆刷新表现的描述统计结果

变量	任务指标	组别	T0 (<i>M</i> ± <i>SD</i>)	T1 (<i>M</i> ± <i>SD</i>)	T2 (<i>M</i> ± <i>SD</i>)
反应抑制	Go/No-go 任务 No-go 正确率	高运动强度+高认知参与组	0.76 ± 0.08	0.90 ± 0.03	0.92 ± 0.04
		低运动强度+高认知参与组	0.73 ± 0.07	0.87 ± 0.05	0.88 ± 0.04
		高运动强度+低认知参与组	0.74 ± 0.06	0.79 ± 0.14	0.80 ± 0.11
		低运动强度+低认知参与组	0.72 ± 0.08	0.73 ± 0.17	0.72 ± 0.18
工作记忆刷新	数字刷新任务 平均正确率	高运动强度+高认知参与组	0.54 ± 0.05	0.79 ± 0.07	0.82 ± 0.05
		低运动强度+高认知参与组	0.53 ± 0.07	0.72 ± 0.09	0.75 ± 0.04
		高运动强度+低认知参与组	0.52 ± 0.06	0.67 ± 0.07	0.70 ± 0.07
		低运动强度+低认知参与组	0.56 ± 0.06	0.60 ± 0.09	0.62 ± 0.04



附图 S5 前后测执行功能各实验任务示例



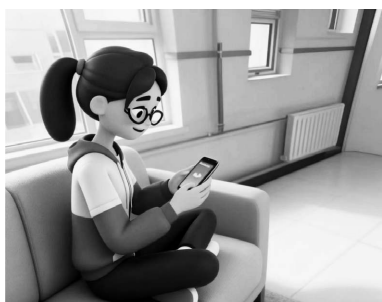
附图 S6 实验 1 运动视频游戏训练组具体干预手段
注: 考虑到伦理学因素的影响, 本研究将全部干预真实图片都进了 AI 动漫处理。下同。



附图 S7 实验 1 运动+视频游戏训练组具体干预手段



附图 S8 实验 1 纯运动训练组具体干预手段



附图 S9 实验 1 纯视频游戏训练组具体干预手段



附图 S10 实验 1 控制组具体干预手段



附图 S11 实验 2 高运动强度+高认知参与组具体干预手段



附图 S12 实验 2 低运动强度+高认知参与组具体干预手段



附图 S13 实验 2 高运动强度+低认知参与组具体干预手段



附图 S14 实验 2 低运动强度+低认知参与组具体干预手段