

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：超越屏幕：运动视频游戏训练可以更好提升儿童执行功能

作者：马超 赵璐 赵鑫

第一轮

审稿人 1 意见：

该研究以执行功能为核心，围绕儿童群体，考察运动视频游戏训练对执行功能发展的影响机制。通过两个实验，实验一比较了融合式训练(运动与视频游戏高度整合)和结合式训练(运动与视频游戏并行)对儿童执行功能四个核心成分(反应抑制、干扰抑制、工作记忆刷新、注意转换)的提升效果；实验二进一步操控运动强度(高/低)与认知参与(高/低)，探讨两因素在促进反应抑制与工作记忆刷新中的作用机制。研究发现融合式训练优于结合式训练，且认知参与对执行功能的促进作用大于运动强度，支持具身认知与联合干预机制的理论解释。

本研究主题聚焦于“运动-认知联合训练”这一应用导向的问题，结合儿童执行功能干预的现实需求，在设计上具有一定的操作性和实用价值。然而从《心理学报》“基础性、前沿性、理论性”导向看，该稿件的理论贡献较为有限，研究问题偏应用取向，缺乏理论结构的更新。论文更适合发表在心理学应用类或发展与教育心理为主的刊物上，是否适合《心理学报》的选刊标准，建议由编辑综合判断。

具体意见供参考：

意见 1：研究核心问题更倾向于“哪种干预方式更有效”，而非“为何有效、背后机制是什么”，导致缺乏理论张力与基础研究价值。

回应：我们非常感谢审稿专家的这一重要意见。的确，在初稿中，我们的研究问题在表述上更偏向于比较不同干预方式的效果，可能给人以“应用导向”强、“机制探讨”弱的印象。我们充分认同审稿人关于理论深度和基础研究价值的关注，并已在修改稿中进行了系统强化。

首先，在研究定位上，我们在引言中明确将研究目的从“比较干预效果”拓展为“揭示运动视频游戏干预促进儿童执行功能的作用机制”。我们指出，实验 1 旨在验证“融合式”与“结合式”两种运动视频游戏模式在促进执行功能方面的差异；而实验 2 则在此基础上进一步解析运动强度与认知参与两个关键机制变量的独立与交互作用。这一逻辑递进的双实验设计，使研究不再仅停留于“哪种更有效”的层面，而更关注“为何有效”“通过何种机制

有效”。除此之外，为进一步提升本研究的基础研究价值，我们还在补充实验中新增了年轻人组作为比较。通过这一对比，我们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，特别是儿童群体是否表现出更突出的认知收益。为此，我们对引言部分的研究目的进行了重新修订，详情如下：

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; George et al., 2023; Gates et al., 2019; 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 & Soylu, 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人群体作为比较组，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，与年轻成人人群体相比，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 et al., 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(Best, 2012; Audiffren et al., 2008)；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控制高阶认知功能的脑区，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，本研究将构建四种组合条件(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：(1)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；(2)两者之间存在交互效应，高认知参与在高强度运动条件下的效果最优；(3)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。

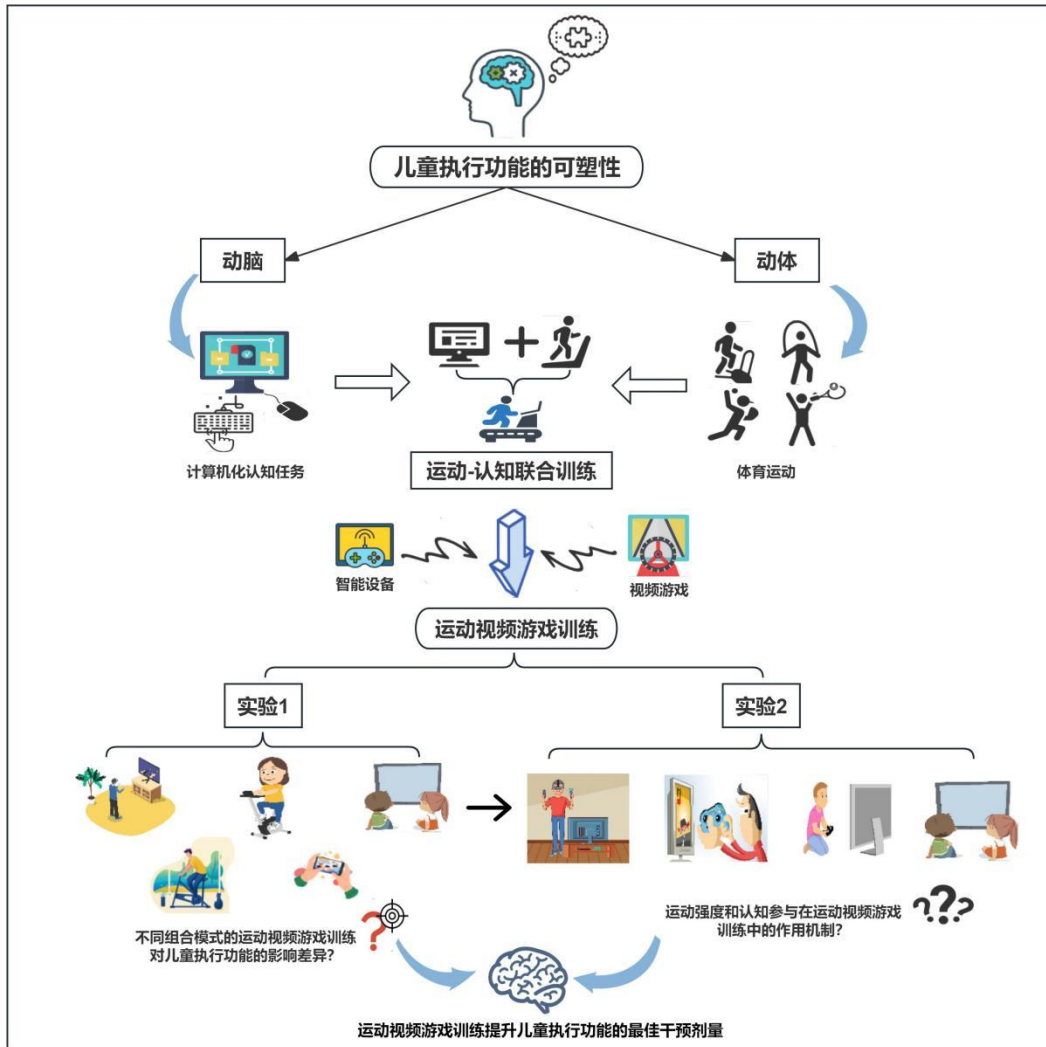


图1 本研究的整体研究思路及框架图

其次,在理论框架上,我们补充并强化了理论支撑部分。在修改稿的引言和讨论部分中,我们将研究置于“具身认知理论”与“认知刺激假说”的双重框架下:前者解释身体-环境-认知之间的动态交互如何塑造认知功能(实验 1),后者揭示认知参与如何通过激活前额叶等脑区实现执行功能的提升(实验 2)。这一整合视角有助于阐明运动视频游戏干预的深层认知机制,从而提升研究的理论张力与学术贡献。本研究的两个核心理论支撑定义如下:

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)。

“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)。

最后,在讨论部分中,我们新增了对结果背后机制的阐述:首先,我们将更明确地讨论“融合式”训练和“结合式”训练的认知机制差异。尽管这两种训练模式都涉及到运动和认知任务,但在认知整合度上存在显著差异,这种差异可能会影响训练效果。我们将加入具身认知理论的相关内容,阐明高度整合的运动与认知任务是如何通过激活更多的脑区来促进儿童执行功能的提升;其次,我们将从认知神经发育的角度来详细探讨儿童和年轻人群体在相同运动视频游戏训练中认知收益机制的差异性;最后,我们将进一步分析了不同运动强度和认知参与水平对儿童执行功能产生影响的可能神经机制解释,并指出了认知参与在长期干预中潜在的累积优势。讨论部分的修改详情如下:

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人群体执行功能的影响。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,经过为期六周的训练,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四周和六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+视频游戏训练组在四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 等人(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(Lindenberger, 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(Best, 2012; 盖笑松 等, 2021)。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。

综上所述, 我们已在修改稿中对研究目的、理论框架及讨论层面进行了全面修订, 以强化本研究的理论深度和机制导向, 确保研究不仅回答“哪种干预更有效”, 更系统揭示“为何有效、如何起效”。

参考文献:

Adcock, M., Fankhauser, M., Post, J., et al. (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 (CISS)*, 8(2), 25.
- 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.
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617-645.
- 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., Heinks, T., Eggenberger, N., & Schmidt, M. (2016). Acute cognitively engaging exergame-based physical activity enhances executive functions in adolescents. *PLoS one*, 11(12), e0167501.
- 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.
- 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*, 1-19.
- Cowan, N. (2016). Working memory maturation: Can we get at the essence of cognitive growth? *Perspectives on Psychological Science*, 11(2), 239-264.
- 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 Official Journal of the Division of Health Psychology American Psychological Association*, 30(1), 91.
- Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science*, 333(6045), 959 - 964.
- 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.
- Fabel, K., Wolf, S., Ehninger, D., et al. (2009). Additive effects of physical exercise and environmental enrichment on adult hippocampal neurogenesis in mice. *Frontiers in Neuroscience*, 3(50), 50.
- 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.
- Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). The role of exercise intensity and cognitive engagement in the promotion of executive function in children through motion-based games. *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(05), 505-514.]

- Gates, N. J., Rutjes, A. W., & Di, N., et al. (2019). Computerised cognitive training for maintaining cognitive function in cognitively healthy people in late life. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2(6), 12277.
- 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.
- Herold, F., Hamacher, D., Schega, L., et al. (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., 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, 1044–1054.
- Hötting, K., & Röder, B. (2013). Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(9), 2243-2257.
- 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., & Soyly, 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.
- 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).
- 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.
- Lindenberger, U. (2014). Human cognitive aging: Corriger la fortune? *Science*, 346(6209), 572-578.
- 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.
- Miyamoto, T., Hashimoto, S., Yanamoto, 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.
- 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.
- Tombu, M., Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29, 3-18.
- 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).

Yao, Y., Cui, R., & Li, Y., et al. (2020). Action real-time strategy gaming experience related to enhanced capacity of visual working memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 333.

Yongtawee, A., Woo, M. J., 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.

意见 2: 研究使用“干扰抑制”“反应抑制”“工作记忆刷新”“注意转换”作为 EF 成分，但未清晰区分其测量维度及相互关系。尤其“干扰抑制”任务(Stroop)与“注意转换”任务(数字转换)存在任务加工重叠，需理论澄清。另外，作者在引言中提到工作记忆是执行功能的核心成分，但是工作记忆的经典模型认为中央执行器是工作记忆的子成分，作者可以加入一点执行功能与工作记忆关系的讨论。

回应: 我们非常感谢审稿专家对本研究执行功能结构建构及任务区分提出的细致而深刻的意见。这一反馈对于进一步完善研究的理论严谨性与认知测量的清晰性极为重要。根据该意见，我们在引言与方法部分进行了系统修订，主要包括以下三个方面：

(1) 补充执行功能各子成分的相互作用关系及其与工作记忆关系的讨论

在认知心理学的主流框架下，执行功能被视为一个多维度但相互关联的控制系统，而非单一构念。根据 Miyake 等人(2000)的经典“统一与多元”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。这三者共同支持个体的目标导向行为，并在复杂任务中动态协作。执行功能的整体效能并非来自某一单独成分，而是源于各子系统的协调运作(Diamond, 2013)。

从发展心理学角度看，执行功能各子成分在发展过程中表现出相互依赖而非孤立独立的轨迹，Guarino 等人(2020)的系统综述指出，注意转换功能的成熟往往依赖于抑制与工作记忆能力的共同发展。Karr 等人(2018)进一步提出，执行功能的子成分体现出“统一性与多样性”的特征——它们在神经与认知水平上可区分，但在实际认知控制过程中协同发挥作用。

从层级结构的角度看，执行功能是一个包含多重控制机制的上位系统，其下位包含抑制控制、工作记忆和注意转换三大核心成分。抑制控制为执行功能的基础环节，使个体能够抑制无关刺激与冲动反应，从而为更高级的认知操作(如信息保持与规则转换)创造稳定的加工条件(Logue & Gould, 2014)。工作记忆在此体系中承担核心作用，负责暂时保持与加工当前任务相关的信息，并为决策、问题解决及灵活思维提供认知支撑(Miyake et al., 2000)。强大的工作记忆容量能直接促进注意转换能力，因为它为管理多重任务规则与更新操作提供了必要的资源(Peltz et al., 2011)。注意转换则依赖抑制与工作记忆的协同作用：抑制功能帮助个体屏蔽先前任务集合(task set)的干扰，而工作记忆支持新任务规则的保持与更新(Müller et al.,

2015)。

因此，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(Miyake et al., 2000; Diamond, 2013)。为此，我们在修改稿的引言部分中进一步补充了执行功能各子成分的相互作用关系及其与工作记忆的关系讨论，详情如下：

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(Ma et al., 2025; 马超 等, 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(Schäfer et al., 2024; 赵鑫 等, 2020; 祝孝亮 & 赵鑫, 2023)。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)。

(2) 明确执行功能各子成分的测量维度

基于“执行功能的理论框架”，我们在修改稿的方法部分对执行功能的测量维度进行了详细的阐述，明确了每项任务与执行功能子成分之间的关系，并进行了有效的区分。以下是每个任务测量维度的详细说明：

① Stroop 任务

采用 Stroop 任务以评估儿童的干扰抑制能力(Ma et al., 2025; 马超 等, 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 毫秒(ms)的注视点“+”，随后是 1000ms 的空白屏

幕，接着是 1500ms 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(Ma et al., 2025; 马超等, 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(Durstun 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)以及四个正式实验块(每个实验块包含 50 个 Go 试次和 50 个 No-go 试次)。在四个正式实验实验块中，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 毫秒(ms)的注视点“+”，随后是 600ms 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(Ma et al., 2025; 马超等, 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 毫秒(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(Ma et al., 2025; 马超等, 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。

(3) 理论澄清：干扰抑制与注意转换的认知加工差异

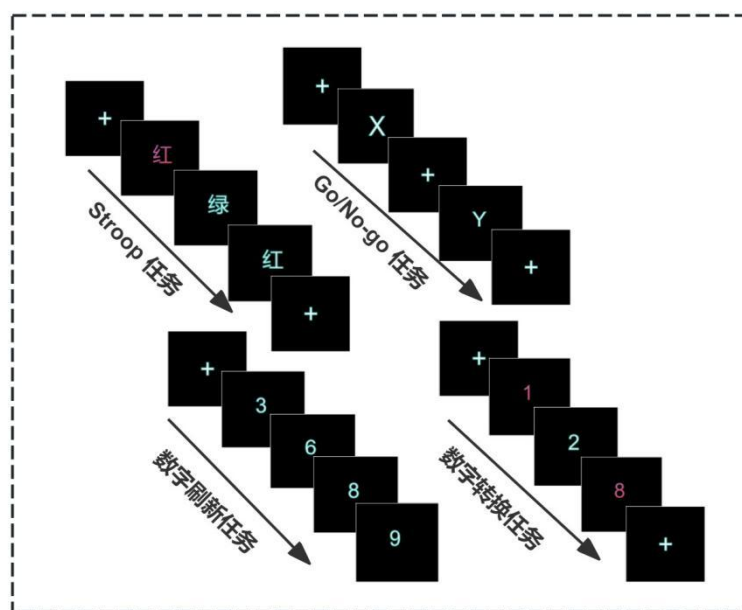
感谢审稿专家提出关于“Stroop 任务(干扰抑制)”与“数字转换任务(注意转换)”可能存在任务加工重叠的意见。我们完全理解这种担忧，并已在修改稿中对这两种任务的认知加工特征进行了更为详细的区分。

Stroop 任务(干扰抑制)：该任务要求个体在面对干扰性信息时抑制反应冲动，专注于任务目标的执行。具体而言，个体需在色词(例如，“红”字以绿色显示)面前抑制对词义的反应冲动，并专注于任务目标(颜色的识别)。Stroop 任务主要测量干扰抑制，即个体如何抑制无关刺激干扰，从而维持对目标任务的集中注意(MacLeod, 1991)。这一任务是经典的抑制控制测量工具。

数字转换任务(注意转换)：此任务主要测量个体在面对不同任务规则时的灵活切换能力。参与者通常需要在不同认知任务或信息处理规则之间进行转换(例如，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；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)。数字转换任务的核心认知过程为任务切换与规则更新，即个体在不同任务集合之间的切换能力(Monsell, 2003)。尽管此任务可能在任务转换过程中涉及抑制功能，但其主要目标是测试个体如何在任务切换中保持与更新相关规则。因此，数字转换任务的核心是注意转换而非抑制控制。

因此，尽管这两种任务都与注意控制相关，但它们分别聚焦于执行功能的不同层面：Stroop 任务强调抑制干扰刺激，而数字转换任务主要测试个体在任务转换过程中的灵活性。我们在修改稿的方法部分中进一步详细描述了两项任务的测量指标及计分方式。具体而言：在 Stroop 任务中，我们使用了不一致试次与中性试次的平均反应时之差(即“干扰效应”)作为主要测量指标，用以突出其对干扰信息的抑制能力；在数字转换任务中，我们使用了转换试次与非转换试次的平均反应时之差(即“转换代价”)，计算个体在任务切换前后反应时的差异，以测量其任务转换与认知灵活性。为进一步澄清执行功能各任务的区分，我们在修改稿的方法部分提供了详细的实验任务示例，以帮助更好地理解各任务区分的逻辑与测量依据，详见下图。



附图 S5 前后测执行功能各实验任务示例

参考文献:

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.

- 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.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135–168.
- Guarino, A., Favieri, F., Boncompagni, I., Agostini, F., Cantone, M., Casagrande, M., & Forte, G. (2020). Executive functions in Alzheimer's disease: A systematic review. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 12, 593933.
- Karr, J. E., Areshenkoff, C. N., Rast, P., & Iverson, G. L. (2018). The unity and diversity of executive functions: A systematic review and re-analysis of latent variable studies. *Psychological Bulletin*, 144(11), 1147–1185.
- Logue, S. F., & Gould, T. J. (2014). The neural and genetic basis of executive function: Attention, cognitive flexibility, and response inhibition. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 123, 45–54.
- 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). Effects of different types of academic pressure on executive function subcomponents in high school students of different grades. *Acta Psychologica Sinica*, 57(1), 18-35.
- [马超, 汪彦云, 付军军 & 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 (01), 18-35.]
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109(2), 163–203.
- 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.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134–140.
- 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.
- Müller, V. I., Langner, R., Cieslik, E. C., Rottschy, C., & Eickhoff, S. B. (2015). Interindividual differences in cognitive flexibility: influence of gray matter volume, functional connectivity and trait impulsivity. *Brain Structure and function*, 220, 2401-2414.
- Peltz, C. B., Gratton, G., & Fabiani, M. (2011). Age-related changes in electrophysiological and neuropsychological indices of working memory, attention control, and cognitive flexibility. *Frontiers in psychology*, 2, 190.
- 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.
- Zhao, X., Li, H., Jin, G., Li, S., Zhou, A., Liang, W., ... & Cai, Y. (2020). The role of phonological memory and central executive function in decoding and language comprehension among children of 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 (04), 469-484.]
- Zhu, X., & Zhao, X. (2023). The role of executive function in mathematical ability among children of 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 (05), 696-710.]

意见 3：训练操作存在显著内容差异，不仅是“融合-并行”的组织形式差异，还包括运动内容与游戏内容本身的不同，是否真正只操控“整合度”值得商榷。

回应：我们非常感谢审稿专家针对训练操作设计的深入考量，的确，运动内容与游戏内容的差异可能会对训练效果产生潜在影响，我们完全理解审稿人对单纯操控“整合度”这一变量的疑虑。在此，我们将从以下三个方面详细阐述如何最大限度的确保运动视频游戏训练组和运动+视频游戏训练组的干预内容的同质性，并在此基础上进一步提出本研究的局限性与未来研究展望。

(1) 确保运动与游戏内容的同质性：情境与难度的相似性

为了确保运动视频游戏训练组与运动+视频游戏训练组之间的运动内容与游戏内容同质性，我们选择了情境和难度相似的训练任务。具体而言：

运动视频游戏训练组：采用了 Switch《健身环大冒险》，该游戏通过身体动作控制游戏中的人物进行冒险，运动内容(如跑步、跳跃、深蹲等)与认知任务(如障碍物判断、金币收集、决策等)高度融合。玩家不仅需要进行高强度的身体运动，还需要在过程中进行认知决策。此游戏的设计确保了运动与认知任务的整合度，符合我们定义的“融合式训练模式”。

运动+视频游戏训练组：采用了骑功率自行车+地铁跑酷小游戏的方式，运动任务和认知任务分别进行，但在同一时间内并行进行。具体来说，被试在骑自行车时，同时需要玩地铁跑酷游戏(躲避列车、收集金币)。虽然两种任务分别独立，但它们在时间上的并行进行确保了运动与认知负荷的平衡，符合我们定义的“结合式训练模式”。

尽管运动+视频游戏训练组的任务结构为并行模式，但我们确保这两项任务在情境设计和难度层级上尽量保持一致。例如，两项任务均要求参与者在一定时间内完成高强度运动，同时进行认知决策或反应。通过选择这两种情境和难度相似的任务，我们力图消除运动内容与游戏内容的潜在差异对结果的干扰。

(2) 控制潜在的双任务干扰效应：单任务条件的加入

为了进一步排除运动+视频游戏训练组(“结合式训练模式”)中可能存在的双任务干扰效应，我们在实验设计中新增了两个额外的单任务训练条件。具体而言：

纯运动训练组：仅采用功率自行车进行训练，运动内容与运动+视频游戏训练组完全一致，确保运动负荷与运动内容的可比性。

纯视频游戏训练组：仅采用地铁跑酷小游戏进行认知训练，游戏内容与运动+视频游戏训练组的认知任务完全一致，确保认知负荷的可比性。

通过设置这两种单任务条件，我们可以排除在“结合式训练模式”中运动与认知任务可

能相互干扰的情况，进一步验证“融合式训练模式”在整合度上的独特优势。

(3) 运动强度的控制：心率监测与运动强度的标准化

“为了确保训练过程中各组的运动强度一致，我们采用了 PolarRS400 心率绑带，实时记录被试的心率变化，并每 5 分钟评估一次心率，以确保被试在训练期间保持在中等强度运动范围(即最大心率的 64%~76%)。”这一手段确保了各组间运动强度的统一性，避免了由于运动强度差异导致的训练效果差异，从而能够清晰地观察“融合-结合”不同组织形式所带来的独特效果。

总的来说，在本研究中，我们关注的是运动任务与认知任务之间的互动和反馈过程，并通过操控“整合度”(即运动与认知任务的结合方式)来探索其对执行功能的影响。值得注意的是，整合度本身并不完全等同于任务内容的“简单结合”，而是在融合式或结合式训练模式中，运动任务与认知任务的深度交互，从而促进身体-认知系统的协同运作，这一协同机制可能触发更广泛的脑区激活，进而有助于儿童执行功能的提升。然而，正如审稿人所指出的，运动内容与游戏内容本身的差异对训练效果的潜在影响不容忽视。单纯操控整合度并未完全排除运动内容和游戏内容差异对结果的干扰。虽然我们已尽量控制这两个变量，确保其不对训练效果产生过大影响，但这仍然是本研究设计的一项潜在局限。针对这一问题，我们进一步在修改稿“4.3 研究不足与展望”部分中详细阐明了这一观点，详情如下：

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。

意见 4：干预是本研究的重要操纵，建议在文中说明采取干预时长和干预频率的依据。能否推广到其它时长和频率？

回应：我们非常感谢审稿专家对干预时长与频率设定提出的宝贵意见。确实，干预周期的科学性是保证实验结果可靠性和可推广性的关键。我们在设计本研究干预方案(为期 6 周，每周 3 次，每次 30 分钟)时，综合考虑了既有研究的经验依据、儿童认知发展的规律以及执行功能变化的时间动态特征。以下从三个方面详细阐述这一选择的理论与实证基础，并讨论其推广可能性。

(1) 干预时长的依据：6 周周期能够有效引发执行功能的可塑性变化，同时第 4 周后测用于捕捉早期认知增益

本研究采用为期 6 周、每周 3 次、每次 30 分钟的干预方案，并在第 4 周与第 6 周分别进行后测。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、可行性与发展规律的契合性。

首先，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 122 名 4-6 岁儿童实施为期 6 周、每周 3 次的体感游戏训练后发现，运动强度与认知参与均显著提升儿童执行功能，其中高认知参与组效果最为突出。这说明 6 周的持续干预能促发稳定且分化的执行功能收益。同样，Schmidt 等人(2015)对 181 名 10-12 岁儿童进行 6 周认知参与型运动干预，结果显示，仅“高运动强度+高认知参与”条件下的儿童注意转换能力显著提升。这些研究共同表明，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。

其次，4 周干预即可诱发早期可检测的认知收益。已有研究显示，4 周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。Kim 等人(2014)发现，脑卒中患者接受 4 周双任务训练后，其执行功能显著改善，且在干预结束后两周仍持续增强，说明短时程干预足以启动并巩固高阶控制功能的改善。同样，Huang(2020)在健康老年人群中采用为期 4 周、每周两次的体感游戏训练，结果显示抑制控制与注意转换均显著提升。这些证据共同支持“4 周为执行功能变化的可检测窗口期”，即在该阶段即可观测到显著的早期增益。

基于此，我们在总体 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)。因此，第 4 周后测有助于识别干预初期的敏感变化点，判断不同机制(如运动强度与认知参与)的即时效应；而第 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。这种 6 周与 4 周的“双时点设计”使本研究在时间剂量上既与国内研究(如盖笑松 等, 2021)保持一致，又与国际研究(如 Kim et al., 2014; Huang, 2020)在短周期检测逻辑上对齐。这种双时点结构既确保了干预可塑性形成的充足时长，又允许我们系统地比较“短期效应”与“持续效应”，从而在理论上更全面地揭示运动视频游戏训练促进执行功能的时间动力机制。

(2) 干预频率的依据：每周 3 次可确保认知刺激的累积效应

我们选择每周 3 次、每次 30 分钟的干预频率，主要基于以下两个方面的考虑：首先，从认知可塑性与体能恢复的平衡角度出发，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。已有研究表明，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)。其次，从实证经验来看，多项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，显著提升了儿童的执行功能；Huang(2020)在老年群体中采用每周 2 次、每次 30 分钟的体感游戏训练，仅 4 周后便观察到抑制控制和注意转换的显著提升；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可塑性变化。因此，本研究采用每周 3 次、每次 30 分钟的设计与国际上较为一致的运动认知干预频率相符，并被多项研究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。

综上所述，根据审稿专家的建议，我们在修改稿中新增了一节“2.1.3 干预时长与频率的设定依据”，以进一步阐明本研究所采取干预时长和干预频率的依据，详情如下：

“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，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 分钟的身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。”

(3) 干预时长与频率的可推广性与未来方向

针对审稿人提出的“当前干预方案能否推广到其他时长与频率”这一问题,我们认为本研究的干预方案具有一定的推广潜力，但同时也存在需要进一步探讨的局限。

① 主要局限

首先，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; Schmidt et al., 2015; Huang, 2020)，且我们的 6 周设计正处于该区间的中间位置，兼具足够干预量与现实可行性，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。

其次，本研究未进行延时后测，因此未能充分评估运动视频游戏训练对儿童执行功能的长期影响和持续性效应(Okuyama et al., 2020)。这一局限使我们无法全面回答训练效果能否在干预结束后得以维持，特别是在反应抑制和工作记忆等核心执行功能方面的长期变化。

② 推广时的考量因素

尽管存在上述局限,我们的干预方案在推广至其他时长和频率时仍具有参考价值，但需谨慎考虑以下因素:

时长调整的边界条件：对于更短的干预周期(如 2-3 周)，可能仅能捕捉到急性效应而难以观察到稳定的认知改善；对于更长的周期(如 8-12 周)，虽然可能产生更持久的效果,但需充分考虑儿童的依从性和动机维持问题。

频率调整的适用性：每周 2 次的频率可能更适用于强度较高或认知负荷较重的训练方案，

而每周 4-5 次则需警惕疲劳累积对干预效果的潜在负面影响。

发展阶段的差异性：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)，而青少年和成人可能对较长间隔的干预反应更显著。因此，在推广时应根据目标群体的发展特征进行适应性调整。

③ 未来研究方向

基于上述局限和考量，我们提出以下未来研究建议：

第一，剂量-效应关系的系统性研究：采用多组对比设计(如 2 次/周、3 次/周、5 次/周)，系统比较不同剂量组合(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，从而确定认知提升的最佳干预时长和频率。

第二，长期效应的追踪研究：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 个月后)，全面评估干预效果的持续性,并探讨影响长期效应的调节因素。

第三，个体化干预参数的探索：进一步研究不同训练强度、认知参与度及其交互作用对执行功能即时和延时效应的影响，结合儿童的年龄、基线认知水平等个体特征,为制定个性化的最佳干预方案提供实证依据。

综上所述，虽然本研究在干预剂量的多样性和长期效应评估方面存在局限，但为运动认知干预在儿童群体中的应用提供了有力的实证支持。未来研究可以通过系统性地探讨时长、频率及其组合效应，将有助于建立更加精准和可推广的干预方案，从而最大化运动视频游戏训练对儿童执行功能发展的促进作用。为此，我们在修改稿的“4.3 研究不足与展望”部分进一步阐明了这一观点，详情如下：

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; Schmidt et al., 2015; Huang, 2020)，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 个月后)，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。

参考文献:

- 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.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168.
- 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.
- 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.
- Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). The role of exercise intensity and cognitive engagement in the promotion of executive function in children through motion-based games. *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(05), 505-514.]
- 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.
- 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.
- 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.
- Okuyama, H., Nakatani, Y., & Yamamoto, T. (2020). The impact of video games on children's cognitive development and executive function. *Cognitive Development*, 54, 100889.
- 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.

意见 5: 请报告被试量选取依据。

回应: 我们非常感谢审稿专家关于被试样本量选取依据的建议。我们充分认同在实验设计中报告样本量估算方法的重要性, 这不仅体现研究的统计功效与方法学严谨性, 也有助于评审者判断研究结果的可靠性与推广性。根据审稿意见, 我们已在修改稿中详细补充了样本量估算的理论依据、计算过程及最终样本分配情况, 具体说明如下。

(1) 样本量估算方法与参数设定

为确保研究的统计效能(power)和组间比较的有效性,我们使用 G*Power 3.1 软件根据实验 1 和实验 2 的设计分别进行了先验功效分析。在参数设定方面,参考以往运动-认知干预领域的研究(Benzing & Schmidt, 2017, 2018; 盖笑松 等人, 2021; Huang, 2020; Schmidt et al., 2015),我们将效应量设定为中等水平($f = 0.25$),显著性水平设为 $\alpha = 0.05$,统计检验力设为 $\text{Power} = 0.95$ 。该参数组合符合心理学与教育干预研究的主流标准,既能保证研究的敏感性,又能避免样本浪费(Cohen, 1988)。

(2) 实验 1 样本量估算与实际招募

根据上述设定,在 G*Power 中选择“ANOVA: Repeated measures, within-between interaction”模型进行计算。结果表明:所需最小样本量为 65 名被试(每组 13 人)。为确保充足的统计功效并应对可能的掉队或数据缺失,我们将目标样本量上调约两倍。最终,我们在兰州市某小学随机招募了 153 名儿童参与实验 1。前测阶段有 3 名儿童因未能完成全部任务而被剔除,最终有效样本量为 150 名(男生 78 名,女生 72 名,平均年龄 11.39 ± 0.53 岁)。所有被试通过随机分配进入五个实验条件组(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),每组 30 人,样本分布均衡,确保了组间方差齐性与可比性。

(3) 实验 2 样本量估算与实际招募

针对实验 2 的四因素设计(高/低运动强度 \times 高/低认知参与),我们在 G*Power 中选择“ANOVA: Repeated measures, within-between interaction”模型。根据效应量 $f = 0.25$ 、显著性水平 $\alpha = 0.05$ 、统计功效 $\text{Power} = 0.95$ 的设定,计算结果表明:所需最小样本量为 60 名被试(每组 15 人)。为提高统计稳健性并确保交互效应检测的精度,我们在兰州市另一所小学招募了 124 名儿童。干预期间共有 4 名被试因个人原因中途退出,最终有效样本量为 120 名(男生 64 名,女生 56 名,平均年龄 12.44 ± 0.61 岁)。所有被试通过分层随机抽样的方式分配至四个实验条件组(高强度 \times 高认知参与、高强度 \times 低认知参与、低强度 \times 高认知参与、低强度 \times 低认知参与),每组 30 人。这种平衡设计使得我们能够同时检验主效应与交互效应,满足统计功效要求。

为此,我们已经在修改稿的“2.1.1 被试”和“3.1.1 被试”部分新增如下说明:

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 $\alpha = 0.05$ 、统计检验力 $\text{Power} = 0.95$ 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，将其分为五组，每组 30 人。

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，将其分为四组，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。

参考文献:

- 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.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). The role of exercise intensity and cognitive engagement in the promotion of executive function in children through motion-based games. *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(05), 505-514.]
- 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.
- 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.

意见 6: 执行功能提升是否持续、是否迁移到课堂行为、情绪调节等更高阶功能，是判断干预有效性的重要依据，请作者加以讨论性说明。

回应: 非常感谢审稿人提出的这一重要问题。我们完全同意，干预效果的持续性和迁移性是评估运动视频游戏训练有效性的关键指标。这一问题不仅关系到训练效果的生态学效度，也直接影响其在教育实践中的应用价值。根据审稿人的建议，我们在修改稿的“4.3 研究不足与展望”部分增加了关于干预效果持续性和迁移性的讨论，并补充了相关实证依据。具体回应如下：

(1) 关于干预效果的持续性

本研究设置了两个测试时间点(四周后测和六周后测)以考察运动视频游戏训练效果的动态变化。结果显示,运动视频游戏训练组在反应抑制和工作记忆刷新任务上的表现呈现持续提升趋势:四周后测($M_{\text{反应抑制}} = 0.90$; $M_{\text{工作记忆刷新}} = 0.52$)显著高于前测($M_{\text{反应抑制}} = 0.82$; $M_{\text{工作记忆刷新}} = 0.70$),而六周后测($M_{\text{反应抑制}} = 0.93$; $M_{\text{工作记忆刷新}} = 0.78$)又显著高于四周后测。这一结果提示运动视频游戏训练的效果具有累积性特征,与神经可塑性理论的预期一致(Diamond, 2013; Valenzuela et al., 2012)。

然而,我们也认识到本研究的不足之处——未能进行延时后测,因此未能充分评估运动视频游戏训练对儿童执行功能的长期影响和持续性效应(Okuyama et al., 2020)。这一局限使我们无法全面回答训练效果能否在干预结束后得以维持,特别是在反应抑制和工作记忆等核心执行功能方面的长期变化。已有研究表明,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。例如:Klingberg 等(2005)对工作记忆训练进行了3个月的追踪,发现训练效果在干预结束后仍保持稳定,提示神经可塑性变化具有一定持久性;Diamond和Ling(2016)的综述指出,高质量的执行功能干预通常能在停止训练后维持2-8个月的效果,但效果大小会随时间逐渐衰减;Benzing和Schmidt(2019)对儿童认知-运动训练的元分析发现,即使在干预结束8周后,训练组在执行功能任务上的表现仍显著优于控制组($d = 0.32$)。因此,我们强烈建议未来研究应设置多个时间点的延时后测(如训练结束后4周、12周或6个月),以全面评估干预效果的持续性。为此,在修改稿“4.3 研究不足与展望”的第2段中,我们补充了如下讨论:

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; Schmidt et al., 2015; Huang, 2020),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。

(2) 关于干预效果的迁移性

执行功能的迁移效应通常分为近迁移(即迁移到结构相似的认知任务)和远迁移(即迁移到日常生活功能,如学业表现、情绪调节、社会适应等)。

① 近迁移效应的初步证据

本研究发现,运动视频游戏训练在提升儿童执行功能方面展现出近迁移效应的初步证据。需要特别说明的是,本研究并未采用执行功能任务本身作为训练内容——训练任务为运动视频游戏(如《健身环大冒险》),而非直接的认知任务训练(如重复练习 Go/No-go 任务或数字刷新任务)。因此,儿童在 Go/No-go 任务和数字刷新任务上的显著提升,本身即体现了从运动视频游戏训练向标准化执行功能测量任务的近迁移效应。这一发现与 Diamond 和 Ling(2016)的观点一致,他们指出,有效的执行功能干预应当能够将训练情境中获得的认知技能迁移到未经训练的测量任务中。

更值得关注的是,本研究还观察到跨执行功能成分的迁移潜力。尽管注意转换并非运动视频游戏训练的直接训练目标,但实验结果显示,所有干预组在六周后测时的注意转换能力均出现上升趋势(详见图 6)。虽然组间差异未达到统计显著性水平,但这一变化趋势提示,运动视频游戏训练可能通过激活共享的执行控制网络(如前额叶皮层、前扣带回),对未经直接训练的执行功能成分产生积极影响(Diamond, 2013)。

这一发现与以往认知训练研究的迁移效应模式相呼应。例如, Zhao 等人(2018a, 2018b)的研究表明,儿童在接受计算机化工作记忆训练后,不仅在训练任务上表现提升,在未经训练的抑制控制和前瞻记忆任务上也出现改善,体现了执行功能训练的跨成分迁移特征。类似地, Karbach 和 Kray(2009)发现,任务切换训练不仅提升了儿童的转换能力,还改善了其工作记忆和抑制控制表现。本研究的贡献在于,进一步证实了这种迁移效应不仅存在于计算机化认知训练中,也同样适用于运动视频游戏这种整合了身体运动与认知挑战的复合型训练模式。

② 远迁移效应的理论基础与实证支持

尽管本研究未直接测量课堂行为、情绪调节等生态学指标,但已有大量研究为运动视频游戏训练的远迁移效应提供了实证支持:

一方面,学业表现的提升。Donnelly 等(2016)的大规模随机对照试验(RCT)显示,参与体育活动干预的儿童在数学和阅读成绩上显著优于对照组,这一效应部分由执行功能的提升所中介; Fedewa 和 Ahn(2011)的元分析还发现,体育活动对儿童学业成绩的整体效应量为 $d = 0.28$,其中执行功能改善是关键中介变量。我们在引言部分中已指出:“[执行功能在涉](#)

及儿童认知发展的多个维度中均发挥着至关重要的作用，尤以数学、语言理解与阅读等学业能力的发展最为显著(Schäfer et al., 2024; 赵鑫 等, 2020; 祝孝亮 & 赵鑫, 2023)”。

另一方面，课堂行为与情绪调节的改善。Mullender-Wijnsma 等人(2016)的研究表明，将体育活动融入课堂的儿童表现出更高的课堂参与度和任务坚持性；Best(2010) 指出，执行功能的提升与课堂行为调节能力密切相关，包括遵守规则、抑制冲动和维持注意等；Lakes 和 Hoyt(2004)发现，参与结构化体育活动的儿童在情绪控制和同伴关系上表现更佳，且这些改善与执行功能提升显著相关；Diamond 和 Ling(2016)的综述指出，执行功能训练能够改善 ADHD 儿童的冲动控制和情绪调节能力，这些效果可持续至训练结束后数月。我们在修改稿的引言部分中进一步强调：“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)”。

③ 具身认知理论的解释框架

本研究所依据的具身认知理论(Embodied Cognition Theory)为迁移效应提供了理论基础：

“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)”。

这一理论表明，运动视频游戏训练通过身体-环境-认知的整合，不仅提升了实验室任务的表现，更重要的是增强了儿童在真实情境中应对复杂挑战的能力。

(3) 本研究的局限性

我们承认，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。但基于以下理由，我们认为本研究的训练效果仍具有向真实生活迁移的潜力：

第一，训练任务的生态相似性。运动视频游戏训练(如《健身环大冒险》)要求儿童在动态情境中整合多重信息、快速决策并调整策略，这与课堂学习和日常社交情境中的认知需求高度相似。

第二，神经机制的共享性。执行功能的核心神经网络(前额叶-基底神经节-小脑回路)同

时支持实验室任务和真实生活中的自我调节行为(Diamond, 2013)。

第三,已有实证的间接支持。如前所述,多项研究已证实执行功能提升能够迁移到学业、情绪和社会功能(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; 赵鑫等, 2020; 祝孝亮 & 赵鑫, 2023)。

为了进一步提升本研究的科学严谨性和实践价值,我们在修改稿“4.3 研究不足与展望”部分中补充了以下讨论:

“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(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; 赵鑫等, 2020; 祝孝亮 & 赵鑫, 2023),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。”

参考文献:

- 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.
- 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.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168.
- 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.
- Donnelly, J. E., Hillman, C. H., Castelli, D., Etnier, J. L., Lee, S., Tomporowski, P., ... & Szabo-Reed, A. N. (2016). Physical activity, fitness, cognitive function, and academic achievement in children: A systematic review. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(6), 1197-1222.
- Fedewa, A. L., & Ahn, S. (2011). The effects of physical activity and physical fitness on children's achievement and cognitive outcomes: A meta-analysis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 82(3), 521-535.
- Foglia, L., & Wilson, R. A. (2013). Embodied cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4(3),

319-325.

- Herold, F., Hamacher, D., Schega, L., et al. (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.
- 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.
- Karbach, J., & Kray, J. (2009). How useful is executive control training? Age differences in near and far transfer of task-switching training. *Developmental Science*, *12*(6), 978-990.
- 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.
- 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.
- 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.
- Okuyama, H., Nakatani, Y., & Yamamoto, T. (2020). The impact of video games on children's cognitive development and executive function. *Cognitive Development*, *54*, 100889.
- Schäefer, 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.
- 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.
- Valenzuela, M. J., Matthews, F. E., Brayne, C., Ince, P., Halliday, G., Kril, J. J., ... & Sachdev, P. S. (2012). Multiple biological pathways link cognitive lifestyle to protection from dementia. *Biological Psychiatry*, *71*(9), 783–791.
- 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., Li, H., Jin, G., Li, S., Zhou, A., Liang, W., ... & Cai, Y. (2020). The role of phonological memory and central executive function in decoding and language comprehension among children of 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* (04), 469-484.]
- 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*, 398-409.
- Zhu, X., & Zhao, X. (2023). The role of executive function in mathematical ability among children of different

审稿人 2 意见:

意见 1: "结合式训练模式"是否更类似于分离注意力任务,即受试者需要同时管理两个独立任务,因此可能涉及任务切换和分离注意力的过程?为充分解决这一疑虑,作者是否应该增加两个额外的单任务训练条件(即纯认知任务组和纯运动组)作为额外对照条件?否则,作者如何能够确信他们观察到的效果是由"融合式训练模式"的益处引起,而非由"结合式训练模式"的双任务性质引入的潜在损害?目前的对照组,即参与者仅观看卡通视频而不参与任何训练项目,并不足以解决这一方法学局限性。

回应:感谢审稿人提出的宝贵意见。关于“结合式训练模式”是否更类似于分离注意力任务的问题,我们完全理解审稿人对此的关注。确实,结合式训练模式需要受试者同时管理两个独立任务,因此可能涉及任务切换和分离注意力的过程。在这种模式下,受试者的认知资源可能会分散,从而影响任务执行的效果。因此,审稿人提出的增加额外的单任务训练条件(即纯认知任务组和纯运动组)作为对照条件的建议,具有重要的意义,有助于进一步明确“融合式训练模式”与“结合式训练模式”之间的区别,并有效排除由双任务性质引入的潜在干扰。

为回应这一疑虑,我们在修改稿中新加入了两个额外的单任务训练条件(纯认知任务组和纯运动组),以补充对照组。通过这种方式,我们将能够更加明确地比较不同训练模式对儿童执行功能的影响,确保观察到的效果不单单来源于“结合式训练模式”中的双任务特性,而是真正反映了融合式训练模式的独特益处。具体而言,纯认知任务组将仅进行认知任务训练,纯运动组将仅进行身体运动任务训练,这样可以明确区分认知训练和运动训练对执行功能的单独影响。通过这些额外的对照条件,我们可以有效地验证融合式训练模式的独特效果,并进一步排除可能的混杂因素。为此,我们在修改稿中对“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”部分重新进行了修订,详情如下:

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 $\alpha = 0.05$ 、统计检验力 $\text{Power} = 0.95$ 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, 将其分为五组, 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) \times 3(测试阶段: 前测、四周后测和六周后测)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, 因变量为执行功能四个子成分(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》。在训练四周后, 所有组别的被试均完成第一次后测, 后测任务与前测一致。经过六

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。

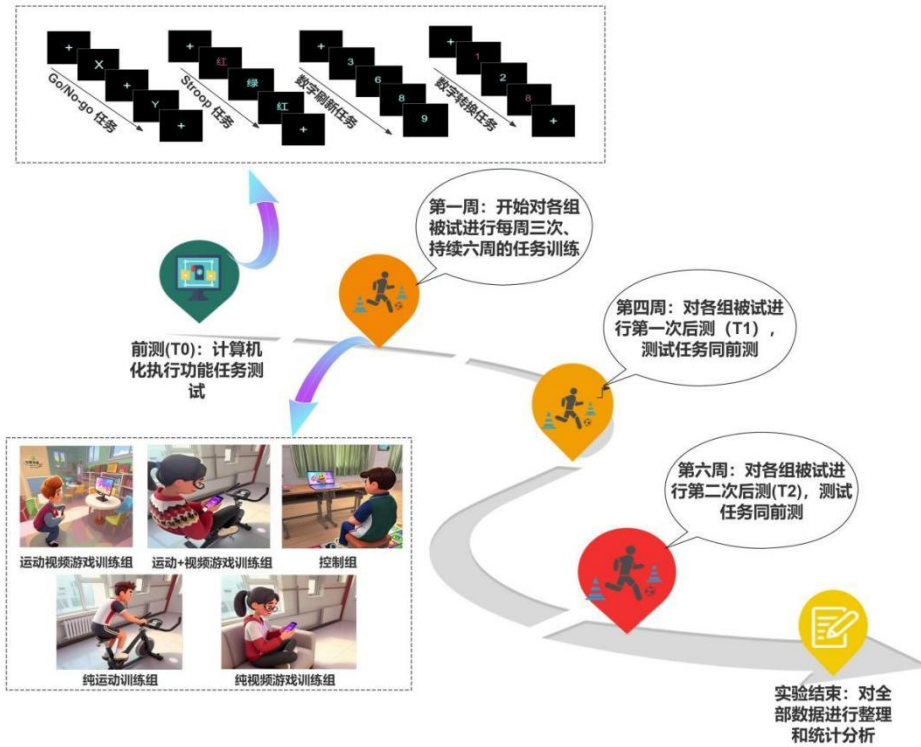


图 2 实验 1 实施流程图

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。

(3) 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，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。

(4) 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(Ma et al., 2025; 马超 等, 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毫秒(ms)的注视点“+”,随后是1000ms的空白屏幕,接着是1500ms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(Ma et al., 2025; 马超 等, 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(Durstun 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)以及四个正式实验块(每个实验块包含 50 个 Go 试次和 50 个 No-go 试次)。在四个正式实验实验块中，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 毫秒(ms)的注视点“+”，随后是 600ms 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(Ma et al., 2025; 马超 等, 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 毫秒(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(Ma et al., 2025; 马超 等, 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分，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。详见附图 S9。

控制组：观看健康动画片《托马斯和他的朋友们》。详见附图 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五组被试执行功能的基线水平进行测试，采用方差分析对五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，五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 S3。

2.2.3 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、四周后测和六周后测的成绩进行了描述统计，详见附表 S4。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)×3(测试阶段：前测、四周后测和六周后测)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。

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

对于干扰抑制而言,结果显示,测试阶段主效应不显著, $F(4, 145) = 1.73, p = 0.180, \eta_p^2 = 0.01$; 组别主效应不显著, $F(4, 145) = 0.82, p = 0.513, \eta_p^2 = 0.02$; 测试阶段×组别的交互作用不显著, $F(4, 145) = 0.35, p = 0.947, \eta_p^2 = 0.01$ 。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。

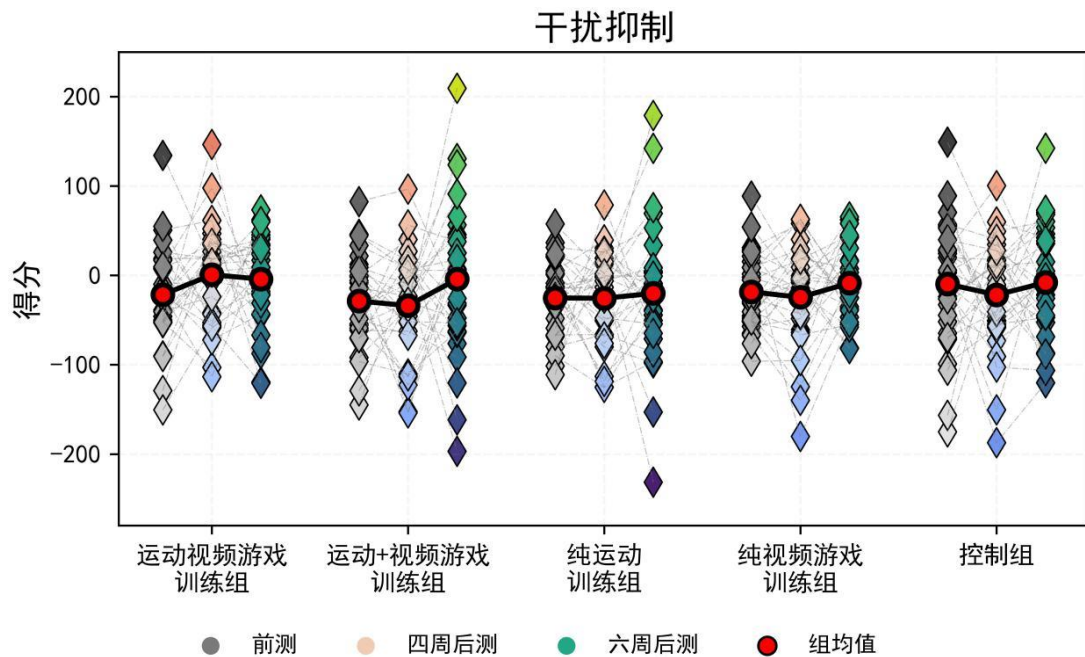


图 3 五个实验组训练前后干扰抑制得分的变化趋势

对于反应抑制而言,结果显示,测试阶段主效应显著, $F(4, 145) = 10.22, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.07$ 。事后检验结果显示,四周后测($M = 0.85, SD = 0.01$)和六周后测($M = 0.86, SD = 0.01$)的反应抑制得分均显著高于前测($M = 0.80, SD = 0.01$), $P_s < 0.01$; 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($M = 0.82, SD = 0.01$), $P_s < 0.05$ 。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, $P_s > 0.05$; 测试阶段 \times 组别的交互作用不显著, $F(4, 145) = 0.85, p = 0.562, \eta_p^2 = 0.02$ 。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。

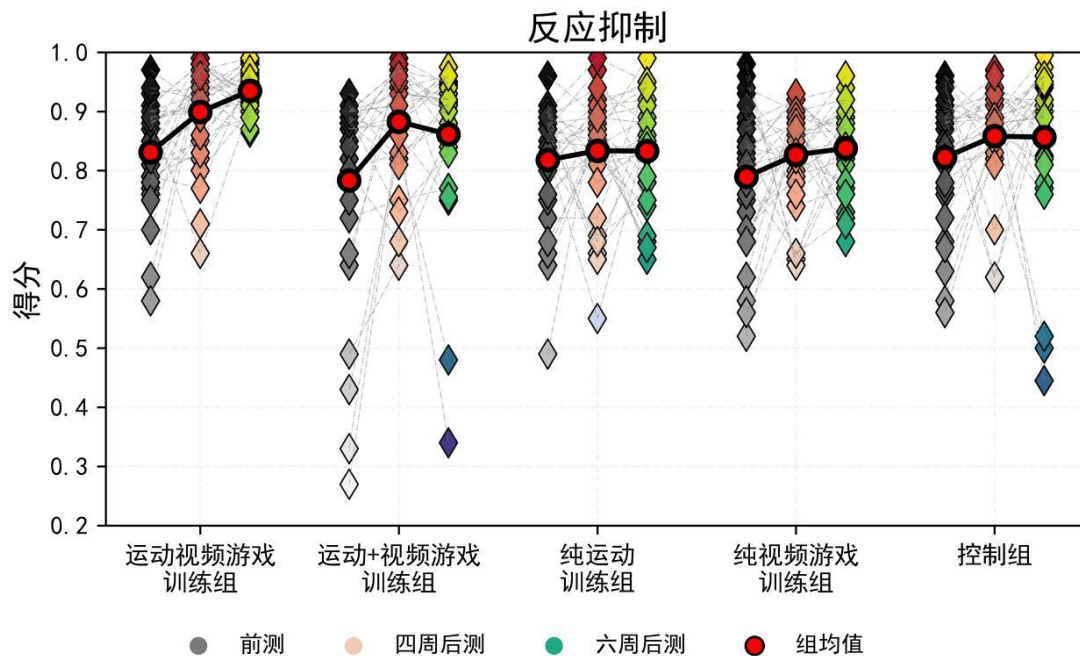


图 4 五个实验组训练前后反应抑制得分的变化趋势

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, 六周后测($M = 0.65, SD = 0.01$)的工作记忆刷新得分显著高于四周后测($M = 0.63, SD = 0.01$), 四周后测的得分显著高于前测($M = 0.52, SD = 0.01$), $P_s < 0.05$; 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($M = 0.55, SD = 0.02$), $P_s < 0.001$ 。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($P_s > 0.05$), 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×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， $P_s > 0.05$ 。在四周后测条件下，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($M = 0.56, SD = 0.18$)， $P_s < 0.05$ 。在六周后测条件下，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($M = 0.59, SD = 0.11$)、纯视频游戏训练组($M = 0.66, SD = 0.18$)和控制组($M = 0.60, SD = 0.17$)， $P_s < 0.05$ 。这说明，在干预四周后，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，在干预六周后，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，无论是干预四周还是干预六周，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。

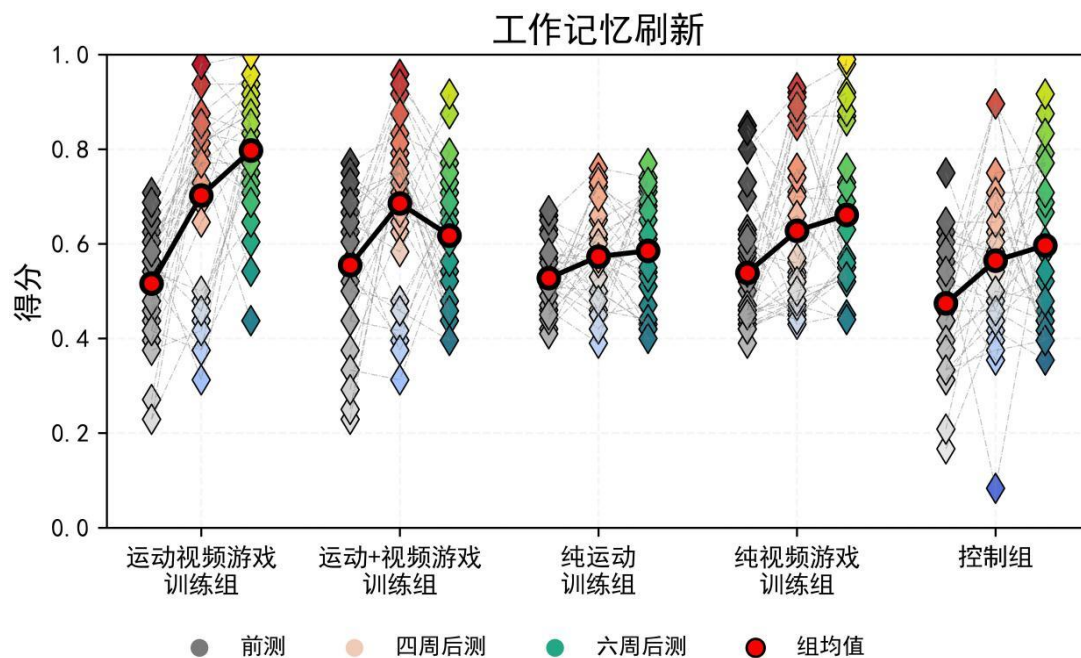


图 5 五个实验组训练前后工作记忆刷新得分的变化趋势

对于注意转换而言，结果显示，测试阶段主效应显著， $F(4, 145) = 10.46, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.07$ 。事后检验结果显示，六周后测($M = -61.66, SD = 11.33$)的成绩均显著高于前测($M =$

-148.79, $SD = 17.05$)和四周后测($M = -125.15, SD = 13.81$); 组别主效应不显著, $F(4, 145) = 1.75, p = 0.143, \eta_p^2 = 0.05$; 测试阶段 \times 组别的交互作用不显著, $F(4, 145) = 0.47, p = 0.865, \eta_p^2 = 0.01$ 。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。

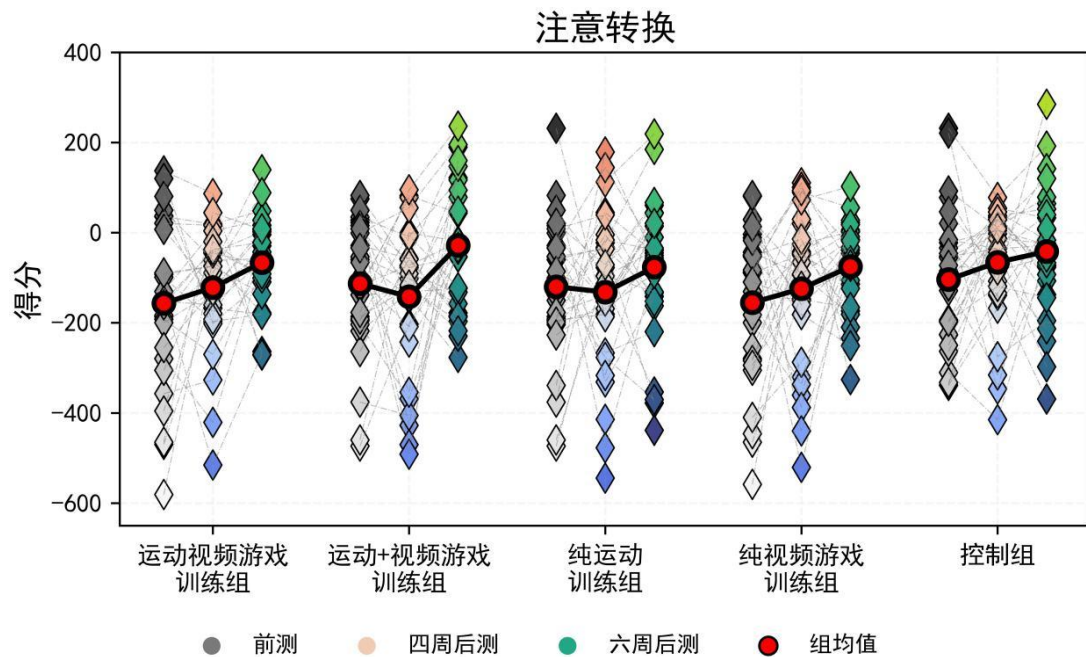


图 6 五个实验组训练前后注意转换得分的变化趋势

总的来说, 通过新增的“纯运动训练组”和“纯视频游戏训练组”, 我们能够明确区分“融合式训练模式”与“结合式训练模式”对执行功能各维度的具体影响。实验结果表明, 运动视频游戏训练组在反应抑制和工作记忆刷新方面表现出显著的优势, 这一效应可以归因于“融合式训练模式”中运动与认知任务的深度融合, 而非由于“结合式训练模式”中的双任务性质引起的干扰。此外, 运动+视频游戏训练组和纯运动训练组、纯视频游戏训练组的表现没有显著差异, 这进一步排除了“双任务干扰效应”的影响。再次感谢审稿人提出的建设性建议, 我们相信通过对实验设计的进一步优化, 能够更好地解答这一问题, 并提升研究的严谨性和可信度。

参考文献:

- 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.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135-168.

- 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.
- Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). The role of exercise intensity and cognitive engagement in the promotion of executive function in children through motion-based games. *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*(05), 505-514.]
- 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.
- 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.
- 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.
- 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). Effects of different types of academic pressure on executive function subcomponents in high school students of different grades. *Acta Psychologica Sinica*, *57*(1), 18-35.
- [马超, 汪彦云, 付军军 & 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* (01), 18-35.]
- Okuyama, H., Nakatani, Y., & Yamamoto, T. (2020). The impact of video games on children's cognitive development and executive function. *Cognitive Development*, *54*, 100889.
- 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.

意见 2: 关于第一个研究问题: "正处于认知发展关键期的儿童群体, 是否同样会在运动视频游戏训练中获得较多的认知收益?" 为检验儿童是否确实表现出更大的认知收益("较多的认知收益"), 作者是否应该包括一个由年轻成人组成的比较组, 这些成人推测上来说可能从相同的视频游戏训练中获得较少的认知收益? 包含这样的比较组将有助于阐明增强的认知收益是否特定于儿童, 或可推广至不同发展阶段。

回应: 感谢审稿人提出的宝贵建议。为了回答“正处于认知发展关键期的儿童群体, 是否同样会在运动视频游戏训练中获得较多的认知收益?”这一研究问题, 并更深入地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。通过这一对比, 我们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, 特别是儿童群体是否表现出更突出的认知收益。根据意见 1 修订后的结果, 我们进一步排除了运动+视频游戏训练组中可能存在的“双任务干扰效应”, 因此在新增的年轻成人组补充实验中, 我们仅采用了 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)×3(测试阶段: 前测、四周后测

和六周后测)的混合实验设计。为此，我们在修改稿的补充材料的“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”中对新增年轻成人组的实验方法和结果进行了详细论述，详情如下：

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

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成人个体。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、四周后测和六周后测)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，因变量为执行功能四个子成分(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》。在训练四周后，所有组别的被试均完成第一次后测，后测任务与前测一致。经过六周的干预训练后，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，通过挤拉健身环使年轻成人个体不停地跑、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成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 年轻成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。

附表 S2 补充实验年轻成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 (n = 30)		运动+视频游戏训练组 (n = 30)		控制组 (n = 30)		F(2, 87)	P	η^2
	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

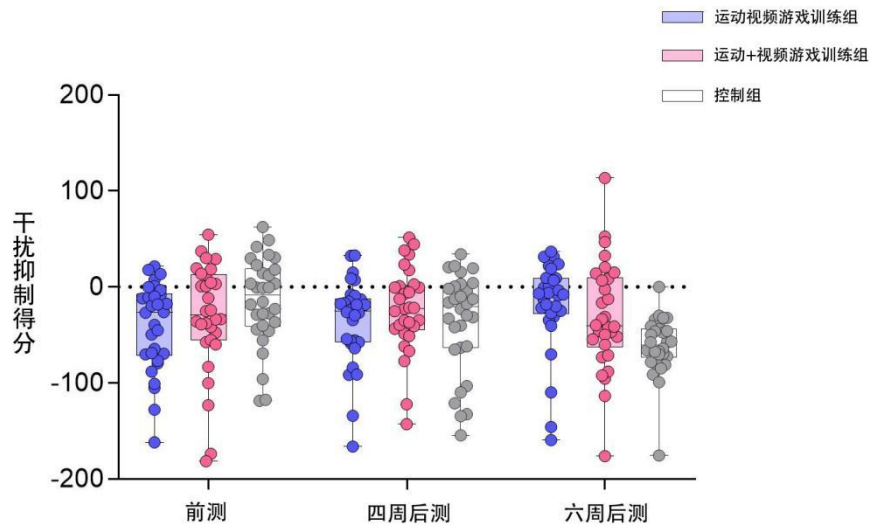
1.2.2 各组训练前后年轻成人个体执行功能各成分的提升效果

为更清晰的观察到各组训练前后年轻成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、四周后测和六周后测)的重复测量方差分析对年轻成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。

附表 S3 各组干预前后年轻人个体执行功能各子成分的提升效果

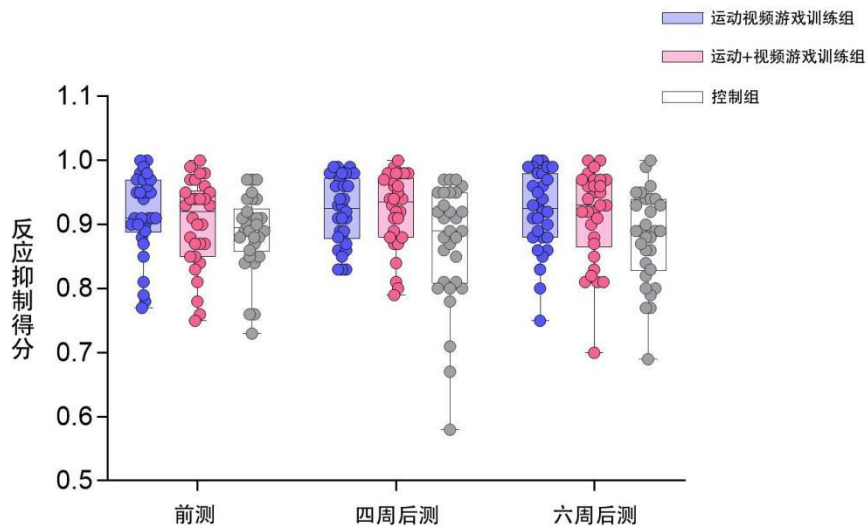
变量	任务指标	因素	dfs	F	P	η_p^2
干扰抑制	Stroop 任务 干扰效应 (ms)	测试阶段	(2,87)	0.66	0.518	0.01
		组别	(2,87)	0.77	0.465	0.02
		测试阶段×组别	(2,87)	4.50	0.003**	0.09
反应抑制	Go/No-go 任务 No-go 正确率	测试阶段	(2,87)	0.08	0.921	0.00
		组别	(2,87)	4.36	0.016	0.09
		测试阶段×组别	(2,87)	1.21	0.309	0.03
工作记忆刷新	数字刷新任务 平均正确率	测试阶段	(2,87)	9.07	<0.001***	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

对于干扰抑制而言, 结果显示, 测试阶段主效应不显著, $F(2, 87) = 0.66$, $p = 0.498$, $\eta_p^2 = 0.01$; 组别主效应不显著, $F(2, 87) = 0.77$, $p = 0.465$, $\eta_p^2 = 0.02$; 测试阶段×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, 在前测和四周后测条件下, 各组干扰抑制得分均不存在显著差异, $P_s > 0.05$; 在六周后测条件下, 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著差异, $p > 0.05$ 。这表明, 只有在经过六周的干预训练后, 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

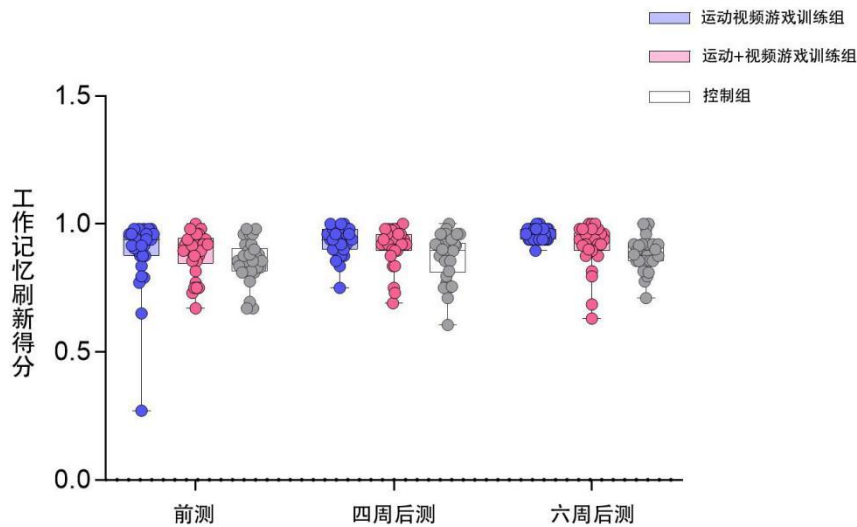
对于反应抑制而言，结果显示，测试阶段主效应不显著， $F(2, 87) = 0.08$, $p > 0.05$, $\eta_p^2 = 0.00$ ；组别主效应显著， $F(2, 87) = 4.36$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.09$ 。事后检验结果显示，运动视频游戏训练组($M = 0.92$, $SD = 0.01$)的反应抑制得分显著高于控制组($M = 0.88$, $SD = 0.01$), $p < 0.05$ ；测试阶段 \times 组别的交互作用不显著， $F(2, 87) = 1.21$, $p = 0.309$, $\eta_p^2 = 0.03$ 。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。



附图 S2 三个实验组训练前后反应抑制得分的变化趋势

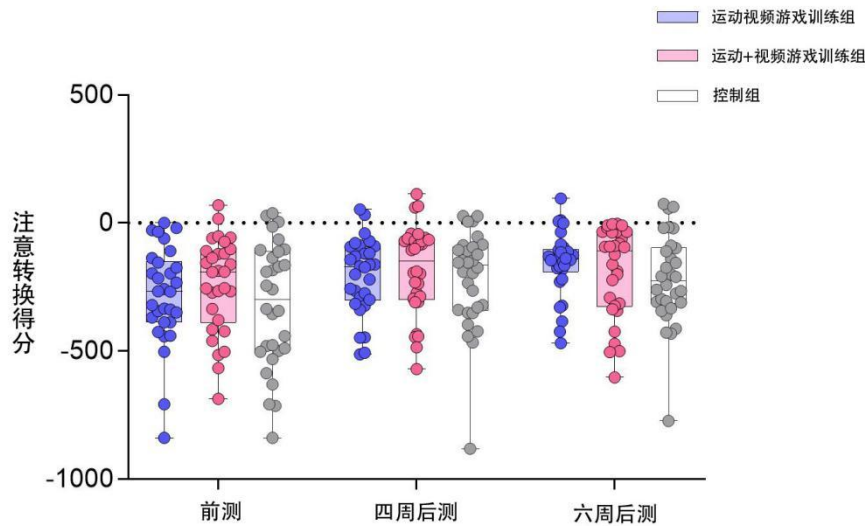
对于工作记忆刷新而言，结果显示，测试阶段主效应显著， $F(2, 87) = 9.07$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.09$ 。事后检验结果显示，四周后测($M = 0.90$, $SD = 0.01$)和六周后测($M = 0.92$, $SD = 0.01$)

的工作记忆刷新得分显著高于前测($M = 0.88, SD = 0.01$), $P_s < 0.05$; 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, $F(2, 87) = 1.21, p = 0.310, \eta_p^2 = 0.03$ 。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 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, 四周后测($M = -203.64, SD = 18.08$)和六周后测($M = -189.52, SD = 17.24$)的注意转换得分均显著高于前测($M = -282.10, SD = 22.01$), $P_s < 0.001$; 组别主效应不显著, $F(2, 87) = 0.76, p = 0.471, \eta_p^2 = 0.02$; 测试阶段×组别的交互作用不显著, $F(2, 87) = 1.12, p = 0.346, \eta_p^2 = 0.03$ 。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

总的来说，通过在补充实验中引入年轻成人组，我们验证了运动视频游戏训练对不同年龄段个体执行功能的影响，并发现，尽管年轻成人也能从训练中获得认知收益，但与儿童组相比，这种收益在反应抑制、工作记忆刷新等认知任务中的提升幅度较小。这表明，运动视频游戏训练在儿童群体中可能更能充分激活大脑的可塑性，产生更显著的认知效益，尤其在执行功能的提升方面。儿童在认知发展关键期的大脑可塑性使得他们在此类训练中表现出更强的适应性和认知进步。为此，我们在修改稿的讨论部分新增了一节“4.1.2 儿童与年轻人群体在运动视频游戏训练中的认知收益比较”，详情如下：

4.1.2 儿童与年轻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(Lindenberger, 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。

综上所述，这一补充实验结果帮助我们更全面地理解运动视频游戏训练对不同发展阶段个体的认知影响，进一步验证了儿童群体在这一干预中的独特认知收益。这不仅解答了审稿人提出的问题，也为未来研究提供了关于不同发展阶段认知干预效果的宝贵实证支持。再次感谢审稿人提出的重要建议，我们相信这一补充实验将使本研究的结论更加坚实和全面！

参考文献:

- Anderson, P. (2002). Assessment and development of executive function (EF) during childhood. *Child Neuropsychology*, 8(2), 71-82.
- Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science*, 333(6045), 959 - 964.
- Ludyga, S., Gerber, M., & Kamijo, K. (2022). Exercise types and working memory components during development. *Trends in Cognitive Sciences*, 26(3), 191-203.
- Cowan, N. (2016). Working memory maturation: Can we get at the essence of cognitive growth? *Perspectives on Psychological Science*, 11(2), 239-264.
- 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.
- Hötting, K., & Röder, B. (2013). Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(9), 2243-2257.
- Lindenberger, U. (2014). Human cognitive aging: Corriger la fortune? *Science*, 346(6209), 572-578.
- Herold, F., Hamacher, D., Schega, L., et al. (2018). Thinking While Moving or Moving While Thinking-Concepts of Motor-Cognitive Training for Cognitive Performance Enhancement. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10(2), 228.

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.

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.

意见 3: 关于第二个研究问题: "第二, 在运动-认知联合训练的干预框架之下(Herold et al., 2018), 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? 与此同时, 这种差异性能否进一步扩展具身认知理论? "作者可以考虑进一步阐述"结合式训练模式"和"融合式训练模式"之间观察到的差异效应如何从具身认知理论角度进行解释。目前, 这种理论联系在文献综述中并未得到明确的探讨或解释。

回应: 非常感谢审稿专家的这一建设性意见。我们完全同意, 原稿中对“融合式训练模式”与“结合式训练模式”差异效应的理论解释确实阐述不够充分, 尤其在具身认知理论的关联方面欠缺系统论证。根据您的建议, 我们已在文献综述与讨论部分中对该理论联系进行了更为深入和明确的阐释:

(1) 在文献综述部分强化理论阐释

根据具身认知理论(Barsalou, 2008; Glenberg, 2010; Herold et al., 2018; Huber et al., 2024), 认知过程不仅依赖大脑内部表征, 还受到身体运动、感知反馈与环境互动的共同塑造。“融合式”训练模式的特征在于运动与认知任务在同一情境中同时发生并相互作用, 形成高度一体化的身体-认知耦合过程; 而“结合式”模式则多为物理运动与认知任务的并列结合, 身体活动虽存在, 但对认知系统的嵌入与反馈较弱。这种区别意味着“融合式”训练更能实现具身认知所强调的动态交互机制, 因此在促进执行功能时具备更强的理论优势。为此, 我们在修改稿的文献综述部分进一步从具身认知理论的角度, 明确说明了“融合式”与“结合式”训练模式的本质区别及其理论对应关系, 为研究问题和研究假设的提出奠定理论基础。详情如下:

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; George et al., 2023; Gates et al., 2019; 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 & Soylu, 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

轻成人群体相比，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。

(2) 在讨论部分补充理论机制解释

根据具身认知理论的观点，个体在复杂环境中的动作规划、空间感知与策略调整能够激活与执行功能密切相关的前额叶、顶叶及小脑等神经区域(Barsalou, 2008; Fabel et al., 2009; Glenberg, 2010)。我们在修改稿中进一步指出，融合式训练通过实时身体动作与情境反馈的持续耦合，可不断刺激这些脑区的协同活动，从而增强执行功能的动态调节能力。相较之下，结合式训练的运动与认知任务相对分离，缺乏对感知-运动-认知一体化过程的充分激活，因此其认知收益相对有限。为此，我们在修改稿讨论部分的“4.1.1 儿童群体在运动视频游戏训练中的认知效益”中，明确以具身认知理论为主导，对“融合式训练模式”与“结合式训练模式”训练效果上的差异进行理论解释。详情如下：

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，经过为期六周的训练，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四周和六周后的

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+视频游戏训练组在四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 等人(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。

参考文献:

- 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 (CISS)*, 8(2), 25.
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617–645.
- 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*, 1-19.

- Fabel, K., Wolf, S., Ehninger, D., et al. (2009). Additive effects of physical exercise and environmental enrichment on adult hippocampal neurogenesis in mice. *Frontiers in Neuroscience*, 3(50), 50.
- Foglia, L., & Wilson, R. A. (2013). Embodied cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4(3), 319-325.
- Gates, N. J., Rutjes, A. W., & Di, N., et al. (2019). Computerised cognitive training for maintaining cognitive function in cognitively healthy people in late life. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2(6), 12277.
- 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.
- Herold, F., Hamacher, D., Schega, L., et al. (2018). Thinking While Moving or Moving While Thinking—Concepts of Motor-Cognitive Training for Cognitive Performance Enhancement. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10(2), 228.
- 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., & Soyulu, C. (2023). Effects of excessive video game playing on event-related brain potentials during working memory. *Current Psychology*, 42(3), 1881-1895.
- 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).
- 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.
- 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.
- Tombu, M., Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29, 3-18.
- Yao, Y., Cui, R., & Li, Y., et al. (2020). Action real-time strategy gaming experience related to enhanced capacity of visual working memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 333.
- Yongtawee, A., Woo, M. J., 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.

意见 4: 为何作者选择比较 4 周与 6 周训练时长后的表现结果？两周的时长差异是否足够大，能够检测到足以证明“剂量”效应的有意义变化？作者可能希望提供额外的理论或实证依据来解释选择这些特定训练时长的原因，并明确讨论为何他们预期在如此相对较短的时间框架内能够测量到差异。

回应: 我们非常感谢审稿专家对研究设计中“4 周与 6 周干预时长比较”的关注。这一问题切中本研究探讨“运动视频游戏训练剂量效应”的核心。我们的设计初衷并非单纯比较两个任意时长，而是综合考虑了既有研究的经验依据、儿童认知发展的规律以及执行功能变化的时间动态特征。以下从三个方面详细阐述这一选择的理论与实证基础：

(1) 干预时长的依据：6 周周期能够有效引发执行功能的可塑性变化，同时第 4 周后测用于捕捉早期认知增益

本研究采用为期 6 周、每周 3 次、每次 30 分钟的干预方案，并在第 4 周与第 6 周分别进行后测。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、可行性与发展规律的契合性。

首先，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 122 名 4-6 岁儿童实施为期 6 周、每周 3 次的体感游戏训练后发现，运动强度与认知参与均显著提升儿童执行功能，其中高认知参与组效果最为突出。这说明 6 周的持续干预能促发稳定且分化的执行功能收益。同样，Schmidt 等人(2015)对 181 名 10-12 岁儿童进行 6 周认知参与型运动干预，结果显示，仅“高运动强度+高认知参与”条件下的儿童注意转换能力显著提升。这些研究共同表明，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。

其次，4 周干预即可诱发早期可检测的认知收益。已有研究显示，4 周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。Kim 等人(2014)发现，脑卒中患者接受 4 周双任务训练后，其执行功能显著改善，且在干预结束后两周仍持续增强，说明短时程干预足以启动并巩固高阶控制功能的改善。同样，Huang(2020)在健康老年人群中采用为期 4 周、每周两次的体感游戏训练，结果显示抑制控制与注意转换均显著提升。这些证据共同支持“4 周为执行功能变化的可检测窗口期”，即在该阶段即可观测到显著的早期增益。

基于此，我们在总体 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)。因此，第 4 周后测有助于识别干预初期的敏感变化点，判断不同机制(如运动强度与认知参与)的即时效应；而第 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。这种 6 周与 4 周的“双时点设计”使本研究在时间剂量上既与国内研究(如盖笑松 等, 2021)保持一致，又与国际研究(如 Huang, 2020; Kim et al., 2014)在短周期检测逻辑上对齐。这种双时点结构既确保了干预可塑性形成的充足时长，又允许我们系统地比较“短期效应”与“持续效应”，从而在理论上更全面地揭示运动视频游戏训练促进执行功能的时间动力机制。

(2) 干预频率的依据：每周 3 次可确保认知刺激的累积效应

我们选择每周 3 次、每次 30 分钟的干预频率，主要基于以下两个方面的考虑：首先，从认知可塑性与体能恢复的平衡角度出发，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。已有研究表明，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)。其次，从实证经验来看，多项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，显著提升了儿童的执行功能；Huang(2020)在老年群体中采用每周 2 次、每次 30 分钟的体感游戏训练，仅 4 周后便观察到抑制控制和注意转换的显著提升；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可塑性变化。因此，本研究采用每周 3 次、每次 30 分钟的设计与国际上较为一致的运动认知干预频率相符，并被多项研究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。

(3) 方法学考虑：两周差异虽短，但对检测“剂量效应”具有理论与统计意义

我们同意审稿专家指出“2 周差异看似短暂”，但从认知训练的动态变化规律来看，这种短时程比较并非不足，而恰恰能捕捉关键的变化坡度。首先，研究表明，执行功能的早期改善通常在干预启动后 2-4 周内出现峰值变化率(Egger et al., 2019; Ludyga et al., 2016)。因此，4 周与 6 周的间隔正好跨越这一变化拐点，足以比较“初期增长速率”与“后期巩固速度”的差异。其次，在运动与认知联合干预中，即便训练量差异不大(如 2 周)，由于儿童神经系统的高度可塑性，仍可能产生统计显著且功能上有意义的差异(Best, 2010; Pesce, 2012)。事实上，多项针对儿童的干预研究表明，增加约 2 周的训练(即额外 6 次干预，总时长 180 分钟)即可显著提高认知灵活性与抑制控制(Chang et al., 2014; Chen et al., 2019)。最后，从统计角度来看，我们在实验设计中采用重复测量设计，这能显著提高统计功效并减少个体差异对时间效应检测的影响。因此，即便时长差异较小(如 2 周)，仍能通过时间×组别的交互效应识别显著的剂量响应趋势(Cohen, 1988)。

综上所述，本研究选择在 4 周与 6 周进行后测比较，具有以下科学意义：该时间区间与已有研究中执行功能显著改善的敏感窗口一致(Egger et al., 2019; 盖笑松 等人, 2021; Huang, 2020; Kim et al., 2014; Ludyga et al., 2016; Schmidt et al., 2015); 4 周后测有助于捕捉早期神经和行为层面的可检测增益，而 6 周后测反映巩固与长期适应效应；两周的间隔虽短，但足以横跨执行功能训练效应的变化拐点，能揭示“剂量-反应”关系的阶段性差异。根据审稿专家的建议，我们在修改稿中新增了一节“2.1.3 干预时长与频率的设定依据”，以进一步阐明本研究所采取干预时长和干预频率的依据，详情如下：

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，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。

参考文献:

- 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.
- 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.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135-168.
- 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.
- Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). The role of exercise intensity and cognitive engagement in the promotion of executive function in children through motion-based games. *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*(05), 505-514.]
- 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.
- 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.
- 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.
- Ludyga, S., Gerber, M., Brand, S., Holsboer-Trachsler, E., & Pühse, U. (2016). Acute effects of moderate aerobic exercise on specific aspects of executive function in different age and fitness groups: A meta-analysis. *Psychophysiology, 53*(11), 1611-1626.
- Okuyama, H., Nakatani, Y., & Yamamoto, T. (2020). The impact of video games on children's cognitive development and executive function. *Cognitive Development, 54*, 100889.
- 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.

意见 5: 作者指出"认知参与相较于运动强度对执行功能的促进作用更强"。为何认知参与对执行功能的促进作用会比运动强度更强? 虽然我可能忽略了相关理由, 但论文将从更清晰、更明确地阐述这一特定假设背后的理论逻辑中受益。

回应: 我们非常感谢审稿专家的宝贵意见。我们完全认同该假设背后的理论逻辑应当得到更明确的阐述。为回应这一意见, 我们在修订后的引言与讨论部分系统补充了理论框架与实证支持, 进一步说明了为何认知参与相较于运动强度对执行功能的促进作用更强。以下从三个层面进行详细说明:

(1) 理论基础: 认知刺激假说 vs. 唤醒理论

我们假设认知参与在执行功能提升中扮演更关键的角色, 源于两种经典理论的不同解释

释路径:

唤醒理论(Arousal Theory)认为,运动强度主要通过生理唤醒机制影响认知表现(Audiffren et al., 2008; Best, 2012)。中高强度运动可提高心率、增加大脑血流与氧合水平,从而暂时性增强注意控制与信息加工效率(Hillman et al., 2009)。然而,这种效应往往短暂且非特异性,更倾向于提升一般性认知警觉性,而非特定的高阶执行功能(Best, 2010)。

相比之下,“认知刺激假说(Cognitive Stimulation Hypothesis)”强调,运动任务中嵌入的认知挑战(如决策、计划、冲突监控等)能够持续激活与执行功能相关的高级脑区(Ishihara et al., 2017; Pesce, 2012)。当个体在运动中同时进行策略性思考、任务更新或规则转换时,前额叶皮层(PFC)、前扣带回(ACC)及基底神经节等区域被反复激活,从而促进神经网络的可塑性与信息整合(Valkenborghs et al., 2019)。

换言之,运动强度主要通过“生理激活”影响执行功能,而认知参与则通过“神经调控”直接塑造执行功能的神经基础。因此,认知参与的作用更具任务特异性与持久性。

(2) 神经机制证据: 认知参与激活更广泛的执行控制网络

从神经影像学角度看,认知参与能引发更复杂且持久的脑区激活模式。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; Adcock et al. (2020) 的研究从神经可塑性角度证实,认知参与不仅提高前额叶皮层的代谢活动,还促进 PFC-小脑-基底神经节网络的功能连接,直接支持执行功能的持续改善。

相较而言,单纯的高强度运动虽能增加脑血流(Audiffren et al., 2008),但未必足以激活涉及抑制控制、工作记忆和注意转换等复杂的神经网络(Ishihara et al., 2017)。因此,认知参与比运动强度对执行功能的提升更具“神经靶向性”。

(3) 实证研究支持: 认知参与的独立与主导效应

大量实证研究表明,在控制运动强度的情况下,认知参与度越高,执行功能改善越显著。例如, Flynn 和 Richert(2018)的研究发现,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; Benzing 等人(2016)采用 2×2 实验设计(高/低运动强度 × 高/低认知参与),发现仅高认知参与组的认知灵活性与抑制控制显著提高,而运动强度主效应不显著; Ishihara 等人(2017)的研究指出,具有高策略性和决策负荷的运动(如羽毛球、乒乓球)对认知功能的促进作用显著高于低策略性运动(如跑步),即使两类活动的运动强度相当; 盖笑松等人(2021)在体感游戏研究中同样发现,认知参

与对执行功能的提升效应显著大于运动强度。研究者解释道，认知参与在运动情境中要求个体不断调度注意、计划与更新任务规则，从而更直接地驱动执行功能系统的塑造。这些研究结果表明，认知参与的关键价值不在于增加运动负荷，而在于提供持续的认知挑战与信息处理需求，这使得个体在训练中不断“使用并强化”执行控制能力。

总的来说，本研究假设认知参与相较于运动强度对执行功能具有更强的促进作用，不仅在理论上符合“认知刺激假说”的逻辑框架，也在实证研究与神经机制证据上得到了充分验证。在修改稿中，我们在引言部分明确补充了理论逻辑说明：

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 et al., 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(Best, 2012; Audiffren et al., 2008)；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，本研究将构建四种组合条件(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。

除此之外，为进一步更清晰、更明确地阐述为何认知参与对执行功能的促进作用会比运动强度更强这一特定假设背后的理论逻辑，同时提升本研究的理论深度，我们对修改稿讨论部分“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”重新进行了修订，详情如下：

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(Best, 2012; 盖笑松 等, 2021)。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。

参考文献:

- Adcock, M., Fankhauser, M., Post, J., et al. (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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). The role of exercise intensity and cognitive engagement in the promotion of executive function in children through motion-based games. *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(05), 505-514.]
- 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, 1044-1054.
- 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.
- Miyamoto, T., Hashimoto, S., Yanamoto, 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.
- 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.
- 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).

意见 6: "运动视频游戏组"(健身环大冒险)和"运动+视频游戏组"(功率自行车+地铁跑酷小游戏)中"运动"和"视频"组成部分的性质似乎存在显著差异,这使得这两个实验组之间的直接性能比较变得复杂。目前尚不清楚这两种任务条件在"采用情境"和"难度类似"方面是如何被仔细匹配的。此外,尽管作者在实验 1 和实验 2 中使用 RPE 量表主观测量运动强度,但强烈建议他们也报告所有组的心率数据作为客观生理指标。纳入此类数据将为其操作检查提供收敛效度证据,并增强方法学严谨性。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见。我们理解审稿人对于“运动视频游戏组”(《健身环大冒险》)与“运动+视频游戏组”(功率自行车+地铁跑酷小游戏)之间运动内容和游戏内容差异的担忧,这确实可能对两组之间的直接性能比较带来复杂性。我们在修改稿中已经采取措施,在情境设计和任务难度上进行了更为严格的匹配,并进一步澄清了这些任务之间的相似性。同时,我们也同意审稿人关于心率数据作为客观生理指标的重要性,因此在修订后的结果部分中,我们新增了相关数据报告,以增加实验的客观性和严谨性。以下是我们在这些

方面的具体回应：

(1) 确保运动与游戏内容的同质性：情境与难度的相似性

为了确保运动视频游戏训练组与运动+视频游戏训练组之间的运动内容与游戏内容同质性，我们选择了情境和难度相似的训练任务。具体而言：

运动视频游戏训练组：采用了 Switch《健身环大冒险》，该游戏通过身体动作控制游戏中的人物进行冒险，运动内容(如跑步、跳跃、深蹲等)与认知任务(如障碍物判断、金币收集、决策等)高度融合。玩家不仅需要进行高强度的身体运动，还需要在过程中进行认知决策。此游戏的设计确保了运动与认知任务的整合度，符合我们定义的“融合式训练模式”。

运动+视频游戏训练组：采用了骑功率自行车+地铁跑酷小游戏的方式，运动任务和认知任务分别进行，但在同一时间内并行进行。具体来说，被试在骑自行车时，同时需要玩地铁跑酷游戏(躲避列车、收集金币)。虽然两种任务分别独立，但它们在时间上的并行进行确保了运动与认知负荷的平衡，符合我们定义的“结合式训练模式”。

尽管运动+视频游戏训练组的任务结构为并行模式，但我们确保这两项任务在情境设计和难度层级上尽量保持一致。例如，两项任务均要求参与者在一定时间内完成高强度运动，同时进行认知决策或反应。通过选择这两种情境和难度相似的任务，我们力图消除运动内容与游戏内容的潜在差异对结果的干扰。

(2) 控制潜在的双任务干扰效应：单任务条件的加入

为了进一步排除运动+视频游戏训练组(“结合式训练模式”)中可能存在的双任务干扰效应，我们在实验设计中新增了两个额外的单任务训练条件。具体而言：

纯运动训练组：仅采用功率自行车进行训练，运动内容与运动+视频游戏训练组完全一致，确保运动负荷与运动内容的可比性。

纯视频游戏训练组：仅采用地铁跑酷小游戏进行认知训练，游戏内容与运动+视频游戏训练组的认知任务完全一致，确保认知负荷的可比性。

通过设置这两种单任务条件，我们可以排除在“结合式训练模式”中运动与认知任务可能相互干扰的情况，进一步验证“融合式训练模式”在整合度上的独特优势。

(3) 心率数据作为客观生理指标的补充

针对审稿人提出的关于心率数据的建议，我们完全同意将客观生理指标纳入实验结果的做法。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。对于实验 1 来说，我们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，

研究目的在于考察不同训练模式在训练效果上的差异，而非运动强度和认知参与的作用。因此，在具体实验操纵时，由于实验 1 并非所有组别均参与运动，我们仅让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，目的在于确保被试维持在中等强度运动(最大心率的 64%~76%)即可。相比之下，对于实验 2 来说，我们旨在实验 2 通过同时操控运动强度和认知参与进一步探讨运动视频游戏训练的作用机制。因此，为了避免实验 1 与实验 2 产生混淆，我们仅对实验 2 的被试在运动强度和认知参与情况上提供客观的数据支持。我们修改稿的“3.1.5 自变量操纵”部分中详细描述了实验 2 心率数据的记录与分析过程，并将所有组的平均心率作为客观生理指标在补充材料中进行报告。详情如下：

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。

补充材料：运动强度操纵有效性补充分析

由表 S5 可知，对于运动强度来说，四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($P_s < 0.001$)，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($P > 0.05$)。

表 S5 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***	

尽管本研究在操控整合度作为关键变量的过程中取得了一定的进展，但我们也认识到这

一方法的局限性。值得注意的是，整合度本身并不完全等同于任务内容的“简单结合”，而是在融合式或结合式训练模式中，运动任务与认知任务的深度交互，从而促进身体-认知系统的协同运作，这一协同机制可能触发更广泛的脑区激活，进而有助于儿童执行功能的提升。然而，正如审稿人所指出的，运动内容与游戏内容本身的差异对训练效果的潜在影响不容忽视。单纯操控整合度并未完全排除运动内容和游戏内容差异对结果的干扰。虽然我们已尽量控制这两个变量，确保其不对训练效果产生过大影响，但这仍然是本研究设计的一项潜在局限。针对这一问题，我们进一步在修改稿“4.3 研究不足与展望”部分中详细阐明了这一观点，详情如下：

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。

参考文献：

- Best, J. R. (2012). Exergaming immediately enhances children's executive function. *Developmental Psychology*, 48(5), 1501-1510.
- Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 377-381.

意见 7：为何作者决定采用具有相等比例的“去/不去”试次的 go/no-go 任务？除了仅引用先前文献(如 Zhao 等, 2018)外，作者应明确论证这一特定任务参数化对其研究目标的适当性。

回应：我们非常感谢审稿专家的细致指正。经核查，我们在原文中关于 Go/No-go 任务试次比例的描述确实存在表述误差，现已更正如下：本研究采用的 Go/No-go 任务中，“Go”与“No-go”刺激的呈现比例分别为 75%与 25%，而非 1:1。这一比例设定是经过理论推理与实证依据双重验证的，其科学性主要体现在以下三个层面：

(1) 参数化的理论依据：75%-25%的不平衡设计更能激发“反应抑制”机制

Go/No-go 任务是测量反应抑制(response inhibition)的经典实验范式，其关键在于通过建立强烈的“Go 反应倾向”来考察个体对突发“抑制信号”的控制能力(Aron et al., 2004;

Verbruggen & Logan, 2008)。当“Go”试次比例较高(如 75%或 80%)时,个体会形成稳定的反应习惯;而当出现少量“No-go”刺激(25%或 20%)时,个体需要临时抑制这种自动化反应。此时被激活的正是执行功能中最核心的反应抑制过程,涉及右侧下额叶回、前扣带皮层与基底节网络的协同活动(Aron et al., 2004)。

相反,若 Go 与 No-go 比例相等(如 50% : 50%),被试会预期到随时可能出现抑制情境,从而采用“防御性反应策略”,削弱了自动反应倾向的形成,导致任务更多反映警觉监控而非纯粹的抑制控制(Durstun et al., 2002)。因此,不平衡设计(尤其是 75% : 25%)已成为当前发展心理学和认知神经科学研究中测量反应抑制的主流标准。

(2) 实证依据: 儿童样本中 75%–25%比例具有更高的敏感性与区分度

在儿童执行功能研究中,已有多项实证工作验证了 75%–25%比例的有效性: Ma 等人(2025)采用相同的比例(75% Go, 25% No-go)测量了中国小学生的反应抑制能力,并发现该比例能够有效区分不同年级儿童在反应准确率上的发展差异,且与学业表现存在显著相关。马超等人(2025)在高中生样本中同样采用 75%–25%的 Go/No-go 设计,用以探讨学业压力下执行功能的差异,结果证明该比例在不同年龄阶段均能产生稳定且显著的抑制效应。此外,国际上诸多研究(Casey et al., 1997; Cragg & Nation, 2008; Zhao et al., 2018)也采用类似比例(70%–80% Go vs. 20%–30% No-go)来确保任务难度适中,同时保持抑制负荷的生态效度。

总的来说,75%–25%的设计不仅能最大化诱发反应倾向,也能在儿童样本中获得更高的行为区分效度和神经灵敏度,这与本研究旨在考察运动视频游戏训练对儿童抑制控制的提升机制高度契合。

(3) 与本研究目标的契合性: 确保任务难度适中与认知效应可测

本研究的目标之一是考察运动与认知因素对儿童执行功能(尤其是抑制控制)的提升作用。鉴于小学高年级儿童的抑制系统已基本成熟(Best & Miller, 2010),如果采用 50%–50%比例, No-go 试次出现过于频繁,将削弱任务诱发的自动化反应强度,使得儿童能够轻易预测抑制情境,从而导致任务天花板效应。相比之下,采用 75%–25%比例的设计能够在不增加过多认知负荷的前提下,确保儿童仍需在高频反应习惯中偶尔抑制冲动反应,从而更真实地反映其反应抑制的执行效率与灵活性。该参数化设置既符合儿童发展的认知水平,也能使训练前后的改进更易被检测。为此,在修改稿的“2.1.4 前后测任务”部分,我们已对 Go/No-go 任务比例与理论依据进行了如下修订说明:

(5) 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(Ma et al., 2025; 马超 等,

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(Durstun 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)以及四个正式实验块(每个实验块包含 50 个 Go 试次和 50 个 No-go 试次)。在四个正式实验实验块中,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 毫秒(ms)的注视点“+”,随后是 600ms 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。

参考文献:

- 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.
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child Development*, 81(6), 1641-1660.
- Casey, B. J., Trainor, R. J., Orendi, J. L., et al. (1997). A developmental functional MRI study of prefrontal activation during performance of a Go/No-go task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(6), 835-847.
- Cragg, L., & Nation, K. (2008). Go or No-go? Developmental improvements in the efficiency of response inhibition in mid-childhood. *Developmental Science*, 11(6), 819-827.
- Durstun, S., Thomas, K. M., Yang, Y., et al. (2002). A neural basis for the development of inhibitory control. *Developmental Science*, 5(4), F9-F16.
- 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). Effects of different types of academic pressure on executive function subcomponents 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 (01), 18-35.]
- Verbruggen, F., & Logan, G. D. (2008). Response inhibition in the stop-signal paradigm. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 418-424.
- Zhao, X., Chen, L., & Maes, J. H. (2018). Training and transfer effects of response inhibition training in children and adults. *Developmental science*, 21(1), e12511.

意见 8: 关于实验 1 和实验 2 中使用的“认知参与问卷”，问卷项目是否专门设计用于捕捉认知参与，还是一般意义上的参与？确实，所提供的示例问题“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？”似乎更反映参与者对任务的一般兴趣或偏好，而非其认知参与程度本身。作者应明确解释这一问卷中包含的项目如何有效测量认知参与，正如该工具的名称和预期目的所暗示的那样。

回应: 我们非常感谢审稿专家对于认知参与问卷提出的宝贵意见。审稿人对问卷项目有效性的担忧非常合理，尤其是关于问卷是否真正测量了认知参与，而非一般的兴趣或偏好。以下是我们对此问题的详细澄清：

(1) 问卷设计与认知参与的界定

在本研究中，我们采用了 Best(2012)所编制的认知参与问卷来评估儿童在训练过程中的认知参与。该问卷设计的核心目的是测量参与者在训练活动中与认知任务相关的投入和专注度，而非仅仅评估他们的兴趣或偏好。因此，虽然问卷中确实有类似于“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？”的问题，但该问题旨在通过比较参与者对实验活动与常见游戏活动的偏好，间接反映他们在实验活动中的认知参与程度。

具体来说，我们的问卷包括了 6 个选择题，每道题目通过比较实验活动与其他常见活动(例如“今天做的活动”与“操场上玩的游戏”)来测量参与者对任务的认知投入程度。选择“今天做的活动”得 1 分，否则为 0 分，评分范围为 0 到 6 分。这一设计意在评估儿童对当前实验活动的认知投入，而不仅仅是对其兴趣的偏好。这些问题专门设计用于捕捉儿童在认知任务中的投入，例如在实验过程中是否需要持续的思考、决策和任务完成，进而反映他们的认知参与水平。

(2) 认知参与的量化与任务相关性

尽管问卷中的一些问题(如对活动的偏好问题)看起来可能更多地反映了参与者的兴趣偏好，但从心理学研究的角度，这种设计其实间接揭示了认知任务的吸引力与参与度。根据 Best(2012)的定义，认知参与不仅包括任务的认知挑战性，还涉及到任务对个体注意力的要求以及个体在任务中的决策和策略应用。因此，尽管问卷中的某些问题反映的是任务的吸引力，但它们与任务的认知难度和参与度直接相关，通过任务偏好的选择可以间接推测出参与者在任务中的认知参与程度。

(3) 问卷的可靠性与有效性

对于问卷的可靠性，Best(2012)报告了该问卷的 Cronbach's α 系数为 0.62，这表明其在大多数情境下具有中等可靠性。尽管该值相对较低，但它已经被证明适用于评估认知参与，

尤其是在涉及复杂任务和动机的情境中。此外，我们还参考了盖笑松等人(2021)对认知参与的测量方法，进一步增强了问卷的有效性。该研究表明，问卷中的这些选择题不仅能反映任务的认知难度，还能捕捉到任务执行过程中所需的认知投入程度。我们已在修改稿的“3.1.5 自变量操纵”部分中明确这一点，确保问卷的设计与我们对认知参与的定义一致。详情如下：

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(Best, 2012; 盖笑松 等, 2021; Schmidt et al., 2015)。

参考文献：

- Best, J. R. (2012). Exergaming immediately enhances children's executive function. *Developmental Psychology*, 48(5), 1501-1510.
- Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). The role of exercise intensity and cognitive engagement in the promotion of executive function in children through motion-based games. *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(05), 505-514.]
- 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.

意见 9：为何“运动+视频游戏组”在某些认知测量指标(如工作记忆更新)的表现在 6 周训练条件下似乎低于 4 周条件？这样的发现似乎违反直觉，暗示延长训练时间额外两周可能会对认知表现产生负面影响。这一发现是否与先前文献一致，或者是一个意外结果？

回应：我们非常感谢审稿专家提出这一关键性问题。经过重新审查数据结果，我们发现，运

动+视频游戏训练组在反应抑制和工作记忆刷新任务上的表现呈现出 6 周条件下略低于 4 周条件下的趋势。为此，我们将运动+视频游戏训练组各测试阶段上的表现重新进行了分析，结果显示，反应抑制和工作记忆刷新任务的得分在 4 周后测和 6 周后测之间均不存在显著差异 ($P_s > 0.05$)。也就是说，在延长额外两周的训练时间之后，儿童在反应抑制和工作记忆刷新任务表现上的回落并不具备统计学意义。

尽管如此，我们仍查阅了大量的相关文献，发现运动+视频游戏训练组在第 6 周时的反应抑制和工作记忆刷新表现未进一步提升甚至略有回落的现象，并非随机波动或测量误差，可能与认知干预中的“适应性衰退效应”以及“认知挑战饱和”机制有关。这一结果在多项运动-认知训练研究中均有类似发现，体现出认知可塑性在持续训练过程中的阶段性与动态特征。以下我们将从三个方面进行说明：

(1) 理论层面：认知训练的“适应性衰退效应”

根据认知神经可塑性理论(Diamond, 2013; Valenzuela et al., 2012)，执行功能训练通常表现出“早期快速增益→中期适应性平台→后期稳定或轻度回落”的变化轨迹。早期阶段的显著提升反映了神经资源的高效动员与任务新奇性的刺激。然而，随着训练的持续，若任务难度未能动态提升，被试的认知挑战水平会下降，从而导致神经激活强度与学习增益逐渐减弱，这被称为“训练适应化”。

在本研究中，运动+视频游戏组的干预任务(骑功率自行车+地铁跑酷小游戏)在 4 周后已形成高度熟练的运动与视觉操作模式，认知负荷趋于稳定。此时被试的认知负担相对减少，使得认知刺激不足以进一步驱动前额叶皮层的可塑性变化(Wollesen et al., 2020)。因此，虽然训练时间延长，但认知难度并未同步提升，导致工作记忆刷新能力出现轻微回落或“稳定化效应”。

(2) 实证层面：同类研究中的相似现象

类似的结果已在以往多项研究中被观察并得到解释。例如，Wollesen 等人(2020)的系统综述发现，在为期 4-12 周的运动-认知联合训练干预中，超过 6 周后若训练任务未进行动态调整，执行功能提升往往趋于平缓或部分回落。这一现象被认为与认知挑战的“适应性下降”有关；Savulich 等人(2017)在针对轻度认知障碍患者的研究中指出，训练任务难度恒定会降低被试的动机和神经激活强度，而引入反馈和渐进式难度调整的游戏训练可有效防止这一衰减效应；Bahar-Fuchs 等人(2017)的随机对照研究进一步验证了这一点：采用动态难度调整的计算机认知训练组在记忆与学习任务中的提升幅度显著高于静态任务组，表明个体化的挑战维持是促进持续认知改善的关键；Wang 等人(2019)同样在儿童运动干预研究中发现，执行

功能的早期改善在 4-5 周后趋于稳定，若训练内容未更新，学习迁移效应减弱。

综合这些结果可见，本研究中运动+视频游戏训练组在 6 周后出现反应抑制和工作记忆刷新任务指标的“非线性回落”并非异常，而是与既有研究中运动-认知干预的阶段性效应曲线高度一致。

(3) 方法学与发展心理学视角：儿童的任务熟悉化与动机下降

从发展心理学角度，儿童的认知参与度对训练成效具有决定性影响(Best, 2010; Benzing & Schmidt, 2019)。由于儿童的学习动机往往依赖任务的新颖性与即时反馈，若游戏训练的情境与难度在 4 周后保持不变，儿童容易出现“心理适应”与“认知懈怠”现象，即主动策略使用减少、注意力波动增大，导致工作记忆任务表现略有下降(Diamond, 2013)。因此，我们认为这一现象反映的是训练负荷与认知挑战不匹配，而非干预无效。换言之，4 周时的显著提升体现了认知资源被充分激活，而 6 周时的平稳或轻度下降反映了认知系统的适应性调节。

综上所述，我们认为“运动+视频游戏训练组”在 6 周训练后反应抑制和工作记忆刷新表现略低于 4 周的结果具有理论合理性，并与先前文献一致。这一发现揭示了认知-运动干预在时间维度上的非线性特征，并强调未来干预设计中应引入动态难度调控与个体化认知挑战机制，以维持高水平的认知参与与持续可塑性效应。为此，我们在修改稿的“4.3 研究不足与展望”部分做了进一步说明，详情如下：

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(Savulich et al., 2017; Bahar-Fuchs et al., 2017)，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。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。

参考文献：

- 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.
- 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.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135-168.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135-168.
- 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.
- 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.
- Valenzuela, M. J., Matthews, F. E., Brayne, C., Ince, P., Halliday, G., Kril, J. J., ... & Sachdev, P. S. (2012). Multiple biological pathways link cognitive lifestyle to protection from dementia. *Biological Psychiatry, 71*(9), 783-791.
- Wang, C. H., Chang, Y. K., Liang, Y. M., Shih, C. M., Chiu, W. S., Tseng, P., & Juan, C. H. (2019). Open vs. closed skill sports and the modulation of inhibitory control. *PLoS ONE, 14*(3), e0213612.
- Wollesen, B., Wildbrecht, A., van Schooten, K. S., Lim, M. L., & Delbaere, K. (2020). The effects of cognitive-motor training interventions on executive functions in older people: A systematic review and meta-analysis. *European Review of Aging and Physical Activity, 17*(1), 9.

意见 10: 在实验 2 中，作者是否采用了任何客观措施来验证并比较三种视频游戏条件(健身环大冒险、超级马里奥、舞动全开)之间的运动强度和认知参与？目前尚不清楚作者如何系统地匹配健身环大冒险与超级马里奥之间的认知参与，以及健身环大冒险与舞动全开之间的运动强度。阐明这一方法学决策并提供客观验证措施将增强实验设计的方法学严谨性和有效性。

回应: 我们非常感谢审稿专家对实验 2 操纵效度与方法学严谨性的关注。确实，在多任务干预设计中，确保不同条件下运动强度与认知参与的匹配与区分是确保实验效度的关键环节。针对这一问题，我们在实验设计阶段采用了双重控制策略(主观+客观指标)来验证操纵的有效性，并在修改稿中补充了详细说明，具体如下：

(1) 运动强度的客观控制与验证

为了确保三种视频游戏条件在运动强度维度上的系统匹配，我们采用了 Polar RS400 心率监测系统作为客观的生理指标，对被试在整个训练过程中进行连续心率监测。每位被试均佩戴心率绑带，在训练期间每隔 5 分钟记录一次心率数据，以获得训练阶段的平均心率。这一方法能够精确捕捉被试运动过程中的生理负荷变化，并有效反映运动强度的客观水平(盖笑松 等, 2021)。根据客观测量结果，两个高运动强度条件(即“健身环大冒险”与“舞动全开”)的平均心率维持在最大心率的 77%-95%之间，符合高运动强度的标准；而两个低运动强度条件(即“超级马里奥”与“对照条件”)的平均心率维持在最大心率的 57%-63%之间，

符合低强度运动的标准。此外，我们还结合了主观用力感量表(RPE; Borg, 1982)对被试所感受到的运动强度状态进行测量。在每次干预结束后，被试使用 6–20 分量表评估自身的运动用力感。结果与心率数据趋势一致，为运动强度操纵提供了收敛效度的证据。

四组之间的运动强度差异经单因素方差分析检验结果显示：

如图 8 所示，对于运动强度来说，四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($P_s < 0.001$)，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“表 S5 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。

表 S5 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

P < 0.001***

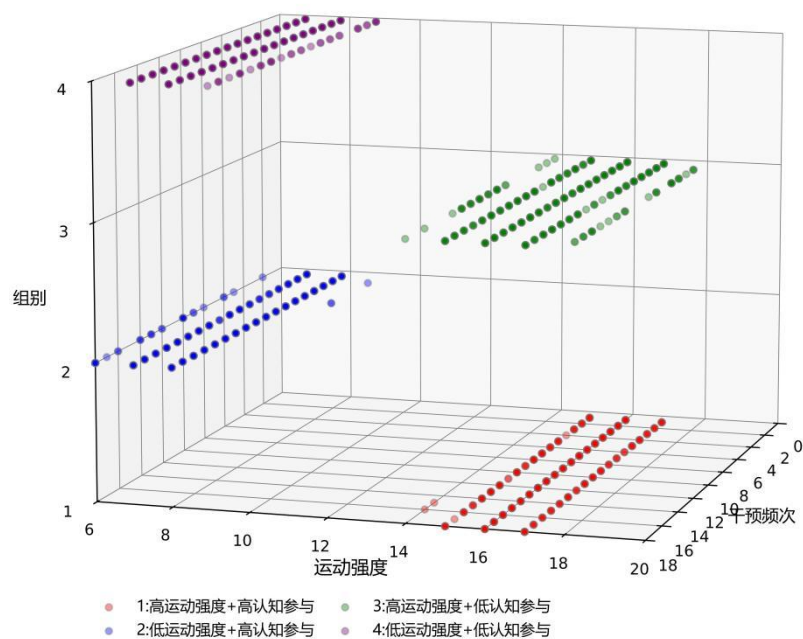


图 8 实验 2 各组被试每次干预后运动强度得分的可视化分布

(2) 认知参与的主观控制与验证

为确保不同条件下的认知参与水平能够被准确区分,在每次干预结束后,我们采用 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(Best, 2012; 盖笑松 等, 2021; Schmidt et al., 2015)。

在本研究中,我们在每次干预后立即测量认知参与,总共记录 18 次测量数据(6 周 \times 3 次/周)。结果显示:

如图 9 所示,对于认知参与来说,四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($P_s < 0.001$),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。

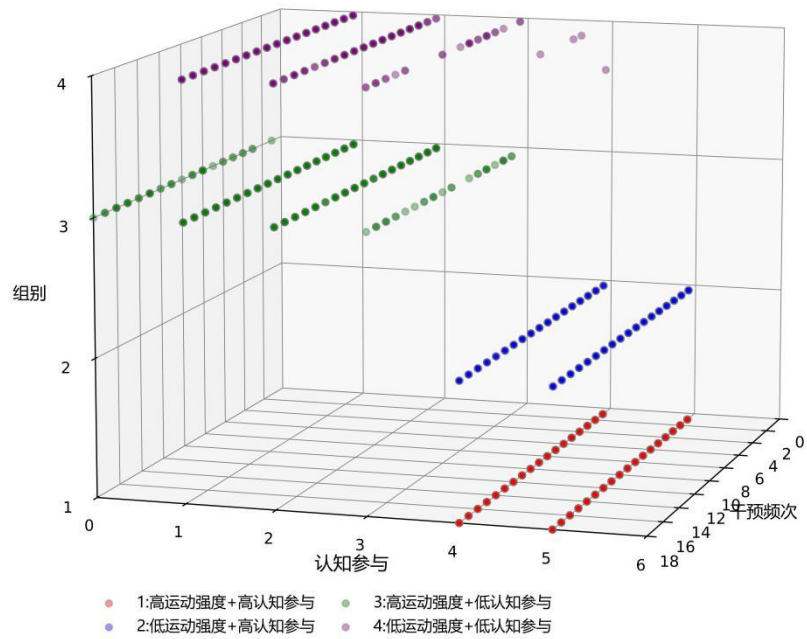


图9 实验2 各组被试每次干预后认知参与得分的可视化分布

(3) 操纵效度的总结与方法学严谨性

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, 并结合国内学者盖笑松等人(2021)在研究中操纵方法, 本研究所采用主观与客观测量的结果表明, 实验2在运动强度与认知参与两个关键维度上均实现了系统化的匹配与区分: 运动强度维度: 通过心率监测与RPE量表实现双重验证, 高低强度组的差异显著而组内差异不显著; 认知参与维度: 通过认知参与问卷的反复测量验证认知任务的复杂性与投入水平, 高低认知组区分显著且组内一致。因此, 实验2的操纵检查具备方法学上的收敛效度与区分效度(Campbell & Fiske, 1959), 确保了不同实验条件下自变量操纵的科学性与可靠性。我们已经在修改稿中进一步明确了这一方法学决策并提供了客观验证措施, 详见“3.1.5 自变量操纵”和“3.2.1 实验操纵有效性分析”部分。

参考文献:

- Best, J. R. (2012). Exergaming immediately enhances children's executive function. *Developmental Psychology*, 48(5), 1501-1510.
- Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 377-381.
- Campbell, D. T., & Fiske, D. W. (1959). Convergent and discriminant validation by the multitrait-multimethod matrix. *Psychological Bulletin*, 56(2), 81-105.
- Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). The role of exercise intensity and cognitive engagement in the promotion of executive function in children through motion-based games. *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(05), 505-514.]

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.

第二轮

审稿人 1 意见:

作者很好地回答了本人上一轮提出的问题, 本轮没有意见。

建议发表。

审稿人 2 意见:

我在上一轮评审中担任第二审稿人。作者对我的意见作出了回应, 并令人满意地解决了我在评审中提出的疑虑。尤其值得肯定的是, 作者通过开展更多实验并进行更多统计分析来回应我的关切。我建议发表这篇论文。

编委意见:

I liked the paper from the beginning and my decision is simply to accept the paper for publication.

主编意见:

经两位专家审阅, 均同意刊发。审稿程序合规, 稿件质量符合发表要求, 建议录用。