

# 沉浸式虚拟现实游戏对青年人执行功能的影响: 游戏中运动强度的作用

## Effects of Immersive Virtual Reality Exergaming on Executive Function Among Young Adults: The Role of Exercise Intensity in Exergaming

谷倩<sup>1</sup>,茅洁<sup>2</sup>,黄涛<sup>3</sup>,孙晋海<sup>1\*</sup>

GU Qian<sup>1</sup>, MAO Jie<sup>2</sup>, HUANG Tao<sup>3</sup>, SUN Jinhai<sup>1\*</sup>

**摘要:**目的:探究15 min不同运动强度的沉浸式虚拟现实(virtual reality, VR)运动游戏对青年人执行功能和情绪的影响。方法:采用随机交叉试验,33名受试者以随机顺序完成一次15 min不同运动强度的3种沉浸式VR运动游戏,即中等强度VR(MI-VR)、高强度VR(HI-VR)和活跃对照VR(AC-VR)运动游戏。采用Eriksen侧翼任务和任务切换测试评估抑制控制和认知灵活性。采用感觉量表和感觉唤醒量表测量受试者在VR运动游戏过程中的情绪效价和情绪唤醒。结果:中等、高强度的VR运动游戏能够提升抑制控制表现,与AC-VR组相比,MI-VR和HI-VR运动游戏后,Eriksen侧翼任务的表现有所提高,具体表现为反应时间减少。相反,任务切换范式的正确率和反应时不受VR运动游戏运动强度的影响,即单次VR运动游戏不能提升认知灵活性的表现。同时,随着VR游戏运动强度增加,情绪效价和情绪唤醒水平显著提升。结论:运动强度对VR运动游戏具有显著作用。随着运动强度的增加,沉浸式VR运动游戏可以更好地提高情绪唤醒水平,中等、高强度的沉浸式VR运动游戏可以改善青年人的特定认知表现。

**关键词:**虚拟现实游戏;运动强度;情绪;执行功能;青年人

**Abstract:** Objective: To explore the effects of 15 min immersive virtual reality (VR) exergaming with different intensities on executive function and emotional of young adults. Methods: In a randomized cross-over trial design, 33 participants completed VR exergaming of three experimental conditions with different exercise intensities for 15 min in the random order: Moderate-intensity VR (MI-VR), high-intensity VR (HI-VR) and active control VR (AC-VR) exergaming. Inhibitory control and cognitive flexibility were assessed using the Eriksen flanker task and the task-switching paradigm. The Feeling Scale and the Felt Arousal Scale were used to measure the emotional valence and emotional arousal of subjects during exercise. Results: Moderate and high-intensity VR exergaming enhanced inhibitory control performance. Compared with AC-VR group, Eriksen flanker task performance was improved after MI-VR and HI-VR exergaming, which was reflected by the decreased reaction time. Conversely, the accuracy and reaction time of the task switching paradigm were not influenced by the VR exergaming. Meanwhile, with the increase of exercise intensity of VR exergaming, the level of emotional valence and emotional arousal with increased significantly. Conclusions: Exercise intensity has a significant effect on immersive VR exergaming. With the increase of exercise intensity, immersive VR exergaming can better improve the level of emotional arousal, and immersive VR exergaming with moderate and high exercise intensity can improve the specific cognitive performance of young adults.

**Keywords:** virtual reality exergaming; intensity; emotion; executive function; young adults

**中图分类号:**G804.8 **文献标识码:**A

### 第一作者简介:

谷倩(1994-),女,在读博士研究生,主要研究方向为体育管理科学, E-mail:202120712@mail.sdu.edu.cn。

### \*通信作者简介:

孙晋海(1962-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为体育管理科学, E-mail:sunjinhai@126.com。

### 作者单位:

1. 山东大学, 山东 济南 250100;
  2. 武汉体育学院, 湖北 武汉 430079;
  3. 上海交通大学, 上海 200240
1. Shandong University, Jinan 250100, China;
2. Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China;
3. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China.

在数字和智能技术时代,人机交互和纳米技术的发展使得虚拟现实(virtual reality, VR)技术得以普及,并延伸到运动、娱乐等领域(戴琼海,2018;王辞晓等,2017)。VR

具有可视化、沉浸感和互动性的特点(惠东坡等, 2022)。事实上, VR 技术包含内生的“游戏基因”, 通常被认为与游戏相关(Cruz-Neira et al., 2018), 游戏行业中已有许多 VR 应用的案例和研究(王润东等, 2023)。近年来, VR 与游戏元素的结合不仅限于娱乐, 也已扩展到体育领域, “VR+体育”的时代已到来。

据统计, 全世界约有 25% 的成年人和 80% 的青少年缺乏身体活动(physical activity, PA)(CDC, 2013)。特别需要指出的是, 40%~50% 的 18~34 岁的青年人缺乏 PA 的原因是久坐看视频和玩电子游戏(Weaver 3<sup>rd</sup> et al., 2009)。健康促进工作强调将电子游戏整合到传统运动设备(如运动游戏)中, 利用青年人(14~35 岁)对新技术的兴趣作为 PA 的推广渠道(赵伟等, 2018; 周婷等, 2015; Gammon et al., 2014)。其中, VR 运动游戏成为一种改善 PA 的新策略。

VR 游戏包括沉浸式和非沉浸式 2 种(何思倩等, 2022; Freeman et al., 2017)。非沉浸式 VR 是指通过计算机进行虚拟体验, 用户可以控制软件中的某些角色或活动, 但环境不直接与用户交互。沉浸式 VR 结合了现实的 3D 环境、用于身体追踪的头戴式显示器(head mounted display, HMD)和手持控制器, 拥有逼真的体验, 使人感到精神沉浸在模拟世界(虚拟世界)中(曹三省等, 2018; Gao et al., 2015)。大多数 VR 运动游戏能够引起轻度至中等强度的 PA。有研究发现, VR 运动游戏可以显著提高峰值摄氧量(peak oxygen uptake,  $\dot{V}O_{2peak}$ )、代谢当量、能量消耗和心率(高于静息水平)(Gomez et al., 2018; Plante et al., 2003)。此外, 研究发现, 与传统运动相比, 基于 VR 的运动游戏还可以增加乐趣和自我效能, 同时减少疲劳和自觉用力程度(rate of perceived exertion, RPE), 并诱导对运动的积极情绪(Evans et al., 2021; Monedero et al., 2015)。因此, 在普通人群中引入 VR 运动游戏可以提高用户的参与度和锻炼依从性。

有证据表明, 有规律的运动在改善认知功能、延缓或预防与年龄相关的认知衰退和神经退行性疾病的早期发生等方面具有重要作用(张连成等, 2014; Gu et al., 2019; Jessen et al., 2020)。研究发现, 与其他认知子领域相比, 运动对执行功能(executive function, EF)的积极影响可能更大(Huang, 2020)。EF 是日常生活中进行活动时所需要的一系列高级认知过程(Best et al., 2011; Magalhães et al., 2020), 主要包括抑制控制、工作记忆、认知灵活性、计划和推理等(陈爱国等, 2011; Diamond, 2013)。EF 在学术和职业成功、社会和情感发展以及身心健康方面具有关键作用(Diamond, 2013)。现有研究已经关注到 VR 运动游戏对 EF 的影响。一项随机对照试验的系统综述和荟萃分析表明, VR 运动可以对老年人的核心 EF 产生潜在的积极影响(Montana et al., 2019; Stanmore et al., 2017)。观察性研究发现, 基于 VR 运动的 EF 康复系统对健康儿童和创伤性脑损伤儿童的核心 EF 具有重要意义(Shen et al.,

2020)。一项为期 4 周的干预研究发现, 与非沉浸式 VR 运动游戏相比, 沉浸式 VR 运动游戏能够改善老年人在抑制和任务切换方面的认知表现(Huang, 2020)。单次 VR 运动后, EF 的表现有所改善(Qi et al., 2021)。

神经科学证据表明, VR 运动产生的积极情绪可以刺激多巴胺神经系统的参与。大脑的多巴胺系统起源于腹侧被盖区和黑质, 并通过前额叶皮质和纹状体与 EF 相关(Cools, 2019; Vernaleken et al., 2007)。此外, VR 运动训练和干预可以增强与脑源性神经营养因子激活相关的大脑可塑性, 从而改善核心 EF(Bashiri et al., 2017; Liao et al., 2019)。由于现有研究多集中在儿童和老年人, 鲜见在青年人中 VR 运动、PA 与 EF 之间的潜在关联研究。同时, 现有研究多为沉浸式与非沉浸式 VR 运动游戏之间 EF 的比较, 随着 VR 技术的不断发展和用户需求的增加, 沉浸式 VR 比非沉浸式 VR 更具吸引力(王润东等, 2023; Freeman et al., 2017)。但目前仅有少量研究探讨了沉浸式 VR 运动对青年人认知功能的影响, 且研究结果并不完全一致。此外, 研究发现, 传统有氧运动的运动强度与认知表现之间可能存在“倒 U 型”关系(Kashihara et al., 2009), 而该结论是否适用于 VR 游戏中运动强度的最佳使用水平仍不清楚。

既往研究认为, 单次短时运动可以增强 EF(Hyodo et al., 2012; Tomporowski, 2003), 运动时的积极情绪可能对 EF 产生积极作用(Lambourne et al., 2010; Munn et al., 2021), 其中运动强度起到了重要作用(盖笑松等, 2021)。基于此, 本研究旨在分析 VR 条件下不同运动强度的单次短时沉浸式 VR 运动游戏对青年人情绪和 EF 的影响。本研究假设 VR 为一个环境因素, 通过 VR 游戏中运动强度的增加进而促进积极情绪和 EF 表现。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

本研究在武汉招募 37 名受试者。所有受试者均完成了包括近 1 个月生活方式问题的健康问卷。纳入标准: 1) 18~28 岁; 2) 无精神疾病、全身神经肌肉疾病、颅脑外伤史或影响认知的药物摄入史; 3) 根据 PA 准备问卷的完成情况, 无锻炼禁忌。所有受试者均阅读并签署了知情同意书。效应量从既往研究中获得, 用于样本量估计。运动强度影响 EF 的急性效应( $\eta^2=0.057$ )(Kao et al., 2017), 该效应量被 G-Power 3.1 程序用于估计所需的样本量(Faul et al., 2009), 显著性水平设置为  $\alpha=0.05$ , 所需的检验效能为 0.95(1- $\beta$ )。计算得出在目前的实验设计框架内所需的样本量至少为 22。本研究共有 33 名受试者完成了研究内容, 最终纳入统计分析的受试者共计 33 人, 受试者的基本特征按性别进行总结。结果显示, 男性身高、体重高于女性, 女性体脂率较高( $P<0.05$ ), 在其他指标上并无显著差异(表 1)。

表1 受试者基本特征

特征变量	男性(n=15)	女性(n=18)	总体(n=33)	P
年龄/岁	21.4±2.5	22.9±2.3	22.2±2.5	0.09
身高/cm	177.88±6.25	164.28±5.29	170.68±8.92	<0.001**
体重/kg	69.99±8.26	57.41±9.26	63.33±10.76	<0.001**
BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	22.17±2.38	21.37±4.02	21.72±3.32	0.52
体脂率/%	15.84±4.67	24.85±6.15	20.61±7.08	<0.001**
静息HR/(次·min <sup>-1</sup> )	69.30±6.68	72.89±7.75	70.88±6.93	0.68
IPAQ/(MET·min·w <sup>-1</sup> )	2 552.47±1 993.22	2 397.61±2 390.07	2 475.04±2 209.64	0.48

注:IPAQ. 国际体力活动问卷;\*\*P<0.001。

1.2 实验设计

采用随机交叉试验设计,受试者分4次到访实验室(图1)。第1次,受试者完成问卷填写,评估身高、体重、静息心率(heart rate, HR)等,并熟悉实验游戏。第2~4次,受试者完成一次15 min不同运动强度的沉浸式VR运动

游戏,即中等强度VR(MI-VR)、高强度VR(HI-VR)和活跃对照VR(AC-VR),并完成2项EF任务(Eriksen侧翼任务和任务切换测试)。其中,设置AC-VR组以避免可能的干扰条件(如HMD VR设备),确保实验结果由运动强度和VR场景触发。

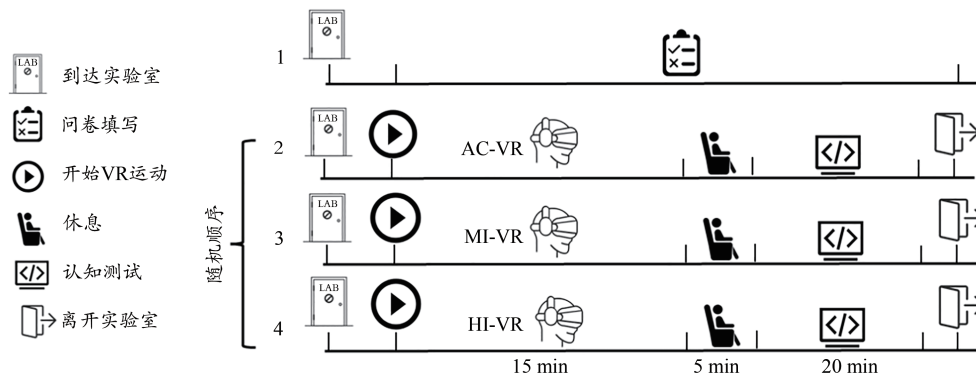


图1 实验设计流程图

Figure 1. Elow Chart of Experimental Design

本研究纳入了3组沉浸式VR运动游戏,并根据初步测试划分运动强度。在正式实验开始前,通过预实验调整运动方案,确保游戏中的运动强度达到实验要求。同时,对整个实验方案流程、VR游戏中运动强度控制、突发情况预防、测试仪器操作以及EF任务测试数据收集等进行充足准备。在实验过程中,通过HR监测对运动强度进行严格控制,积极鼓励受试者,严格把握实验方案的合理性与规范性。在每次训练期间,使用加速度计测量沉浸式VR运动游戏期间的PA强度。在实验前、后,采用Borg的RPE量表(Swain et al., 1997)、感觉量表(feeling scale, FS)和感觉唤醒量表(felt arousal scale, FAS)测量受试者的情绪效价和情绪唤醒。为了避免潜在的顺序效应,平衡每种条件随机出现的概率,每次到访实验室间隔至少7天。

1.3 材料与测量指标

1.3.1 VR设备

采用HTC Vive pro专业版VR系统,包括1个头戴式

显示系统和2个手持控制器,使用房间规模的跟踪技术,该系统允许受试者在三维空间中运动,并使用运动跟踪控制器将现实生活中的运动转化到VR环境中。每位受试者都接受教程培训,以熟悉VR运动游戏和系统。

根据实际测试以及网络测试的反馈,纳入3种不同强度但运动类型、音乐风格趋近的VR运动游戏:MI-VR运动游戏Beat Saber为VR音乐节奏游戏,伴随着动感的音乐,受试者使用手持控制器模拟光剑切开飞来的方块;HI-VR运动游戏OhShape为能带来全身活动的音乐节奏类游戏,受试者随着音乐节奏移动身体并完成相应动作;AC-VR运动游戏Aircar为简单的伴随动感音乐的沉浸式飞行游戏,受试者使用控制器作为方向盘驾驶空中飞车穿越城市景观。

1.3.2 HR

本研究使用Polar(Polar OH1,芬兰)心率带,实时监测沉浸式VR运动游戏前(HR<sub>pre</sub>)、中(HR<sub>ave</sub>)的HR变化,并及时调整游戏策略确保HR达到既定范围。采用储备HR



(Heart Rate Reserve, HRR) 百分比设定游戏中的运动强度,  $HRR[(\text{活动期间平均 HR}-\text{静息 HR})/HRR \times 100\%]$  是一种有效、可靠评估 PA 强度的方法 (ACSM, 2018; Strath et al., 2000)。VR 游戏中的运动强度如下: 活跃对照组 (RHR), 中等强度 (40%~59% HRR) 和高强度 (>60% HRR) (Swain et al., 1997)。

### 1.3.3 RPE

RPE 量表是基于受试者在 VR 运动游戏中感觉的主观评估, 并考虑了个体体能水平和感知疲劳水平 (Swain et al., 1997)。共 9 个主观运动强度等级, 从 6 级 (根本不费力) 到 20 级 (精疲力竭)。RPE 数值越大, 主观运动负荷强度越高。记录受试者在 VR 运动游戏干预前 ( $RPE_{pre}$ ) 和干预后 ( $RPE_{post}$ ) 的 RPE 数值。

### 1.3.4 PA 监测

在进行 VR 游戏时, 将 Actigraph GT3X 加速度计 (Pensacola, 美国) 佩戴在受试者右手腕和右大腿 (监测上肢和下肢 PA), 提取运动过程中的第 2~15 min 加速度数据, 数据提取的时间间隔为 60 s。采用 ActiLife 6.0 软件将加速度数据导出并进行整理, 利用以下活动计数切点 (次/min) 评估受试者 VR 游戏中的运动强度: 低强度为 100~1 951 次/min, 中等强度为 1 952~5 724 次/min, 高强度为 5 725~9 498 次/min (Freedson et al., 1998)。

### 1.3.5 唤醒水平

FS 和 FAS 分别用于测量和评估受试者在 VR 运动游戏期间的情绪效价和情绪唤醒 (Ekkekakis et al., 2001)。FS 包含 11 个项目, 用来评估 VR 运动游戏过程中受试者的情绪反应 (Ekkekakis et al., 2005)。受试者被要求在每次沉浸式 VR 运动游戏前回答关于当前感觉状态“你现在的感觉如何”(11 分量表), 评分范围从 -5 (非常糟糕) 到 5 (非常好)。Hardy 等 (1989) 表明, FS 和其他自我报告的愉悦感之间存在显著相关性。采用 FAS 测量受试者在 VR 运动游戏前、后的精神情绪和运动后的情绪激活 (Svebak et al., 1985)。FAS 包含 6 个等级, 范围从 1 (低觉醒) 到 6 (高觉醒)。用 4 个象限描述运动游戏前、后的情绪反应: 1) 高觉醒-愉悦 (能量、活力); 2) 高觉醒-不悦 (紧张、苦恼); 3) 低觉醒-不悦 (疲倦、无聊); 4) 低觉醒-愉悦 (平静、放松)。

## 1.4 EF

### 1.4.1 Eriksen 侧翼任务

Eriksen 等 (1974) 采用 Eriksen 侧翼任务范式分析干扰字母对目标字母识别影响, 后经 Gratton 等 (1992) 修改, 采用箭头代替字母。本研究采用修改后的 Eriksen 侧翼任务评估抑制控制, 即箭头作为任务刺激, 基于计算机的任务包括一致 (如 <<<<< 或 >>>>>) 和 不一致 (如 <<<< 或 >>>>) 的试验。受试者被要求根据中心侧翼箭头所示目标箭头的方向, 尽快、准确地做出反应。在正式测试前, 受试者先完成 20 个试验的练习部分, 以确保对测试的重复理解, 随后进行

2 组 150 次试验 (每组 75 次)。其中, 刺激时间为 120 ms、反应窗口为 1 350 ms。每次试验均随机刺激 1 250~1 550 ms。整个任务在 8 min 内完成。任务结果为正确反应的反应时 (reaction time, RT) 和正确率 (accuracy, ACC)。通过计算 RT (不一致 vs 一致) 和 ACC (不一致 vs 一致) 的表现差异获得干扰分数 (Hillman et al., 2009)。

### 1.4.2 任务切换测试

采用任务切换范式评估认知灵活性。任务刺激为黑色电脑屏幕上显示的白色自然数 (1~9, 不包括 5), 数字以随机方式等概率出现。每个数字均有一个实线或虚线正方形边框, 受试者需要根据数字周围的正方形提示完成奇偶任务 (虚线, 判断该数字为奇数或偶数) 或大小任务 (实线, 判断该数字大于或小于 5)。数字每间隔 1 500 ms 出现一次, 刺激时间持续 200 ms, 该数字消失 3 000 ms 后仍然未做出任何反应, 默认该单个刺激结束。任务切换测试共包括 6 个测试组, 每个测试组 64 个测试, 前 2 个测试组为同质测试 (大小任务或奇偶任务), 后 4 个测试组为异质测试, 即奇偶任务和大小任务的混合任务, 奇偶任务和大小任务以 ABBA 顺序交替出现 (Rogers et al., 1995)。在实验任务前, 受试者均接受指导, 并进行 64 次任务练习。任务切换测试结果包括总转换成本和局部转换成本。总转换成本通过计算同质测试与异质测试 (非转换任务) 之间的 RT 和 ACC 获得 (Kamijo et al., 2010)。局部转换成本通过异质测试中的非转换任务和转换任务之间的 RT 和 ACC 获得 (Dai et al., 2013)。

## 1.5 统计分析

本研究使用 SPSS 26.0 进行统计分析, 所有数据以平均值  $\pm$  标准差 ( $M \pm SD$ ) 表示, 统计显著性均为  $P < 0.05$ 。采用配对样本  $t$  检验来检验受试者基本特征的潜在差异。本研究的实验条件与性别无显著交互作用, 因此对实验结果不分性别进行统计分析。使用 Shapiro-Wilk 检验对情绪效价和情绪唤醒的平均值进行标准化后, 分析 VR 运动游戏诱发的情绪变化。采用重复测量方差分析, 以条件 (AC/MI/HI-VR 运动游戏) 和活动 (游戏前/后) 为因素, 评估各时间点唤醒和愉悦的情绪状态变化。对于行为学结果 (Eriksen 侧翼任务和任务切换测试的 RT 和 ACC) 使用重复测量方差分析评估不同干预方式之间的差异。当方差分析显示条件因素和组别因素之间存在显著交互作用或存在主效应时, 采用 Tukey HSD 检验进行事后分析。

## 2 结果

### 2.1 VR 运动游戏结果

#### 2.1.1 PA 监测结果

PA 监测结果显示, 上、下肢 PA 的主效应显著 [ $F_{(1,32)}=7.39$ ,  $P=0.011$ ,  $\eta^2=0.19$ ]。事后分析显示, 上肢 PA [(4 620.25  $\pm$  210.35) 次/min] 比下肢 [(3 707.97  $\pm$  192.64) 次/min] 更剧

烈 ( $P<0.001$ )。VR 运动游戏运动强度的主效应显著 [ $F_{(2,64)}=125.56, P<0.001, \eta^2=0.80$ ]。事后分析显示, AC-VR 组 [ $(1181.06 \pm 123.61)$  次/min] 比 MI-VR 组 [ $(4411.23 \pm 246.03)$  次/min]、HI-VR 组 [ $(6900.03 \pm 300.89)$  次/min] 的 PA 少 ( $P<0.001$ ), MI-VR 组的 PA 比 HI-VR 组少 ( $P<0.001$ )。VR 游戏中的运动强度与上、下肢 PA 无显著交互效应。

2.1.2 HR 和 RPE 测量结果

受试者在 VR 运动游戏前和运动游戏过程中的平均 HR 如图 2A 所示。VR 运动游戏前和游戏过程中的平均 HR 与沉浸式 VR 游戏运动强度的交互效应显著 [ $F_{(2,64)}=134.98, P<0.001, \eta^2=0.81$ ]。简单效应分析发现, 相比于 VR 运动游戏前, 沉浸式 VR 运动游戏导致 HR 显著增加 [AC-VR:  $(71.03 \pm 4.57)$  BPM vs  $(100.09 \pm 4.84)$  BPM,  $P<$

$0.001$ ; MI-VR:  $(69.61 \pm 6.68)$  BPM vs  $(130.82 \pm 6.21)$  BPM,  $P<0.001$ ; HI-VR:  $(72.61 \pm 7.57)$  BPM vs  $(148.06 \pm 5.92)$  BPM,  $P<0.001$ ]。此外, HI-VR 组的 HR 提升显著高于 MI-VR 组和 AC-VR 组, MI-VR 组的 HR 提升显著高于 AC-VR 组 ( $P<0.001$ )。

受试者在 VR 运动游戏前、后的 RPE 如图 2B 所示。VR 运动游戏前、后的 RPE 与沉浸式 VR 游戏运动强度的交互效应显著。简单效应分析发现, VR 运动游戏后 RPE 显著高于 VR 运动游戏前; HI-VR 组 RPE 增加显著高于 MI-VR 和 AC-VR 组, MI-VR 组 RPE 显著高于 AC-VR 组 ( $P<0.05$ )。

2.2 觉醒水平结果

Circumplex 模型 (图 3) 描述了不同运动强度沉浸式 VR 运动游戏前、后 FAS 和 FS 评分结果变化。

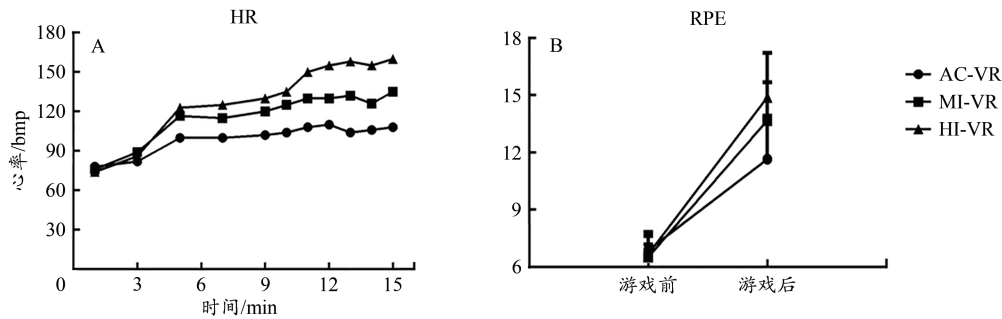


图2 HR, RPE 变化  
Figure 2. HR, RPE Changes

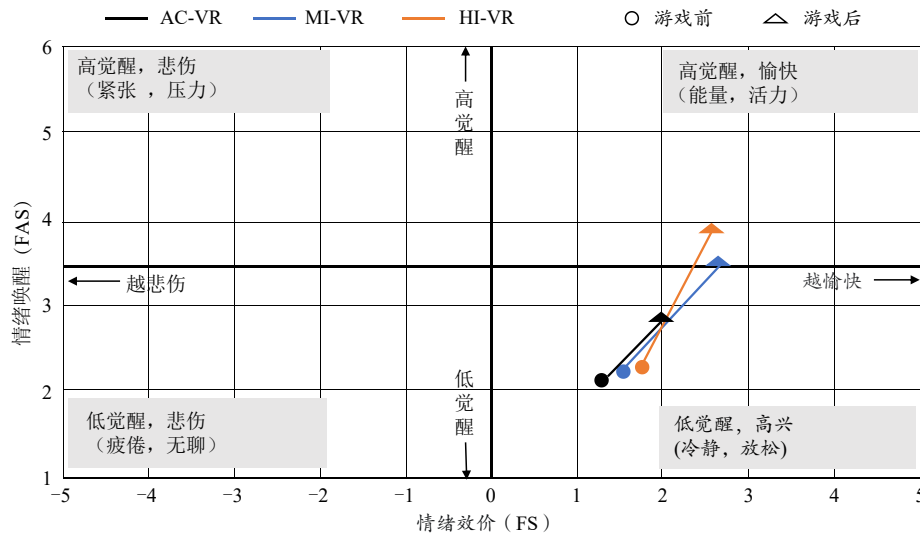


图3 FAS和FS评分结果  
Figure 3. Results of FAS and FS Score

VR 运动游戏前、后的 FAS 评分与 VR 运动游戏运动强度的交互效应显著 [ $F_{(2,64)}=4.41, P=0.016, \eta^2=0.12$ ]。简单效应分析发现, VR 运动游戏后 FAS 评分显著提升 (AC-VR:  $2.15 \pm 0.97$  vs  $2.79 \pm 1.22, P<0.001$ ; MI-VR:  $2.27 \pm 1.10$  vs  $3.39 \pm 1.25, P<0.001$ ; HI-VR:  $2.39 \pm 1.30$  vs  $3.76 \pm 1.12,$

$P<0.001$ )。此外, HI-VR 组 FAS 评分增加显著高于 AC-VR 组 ( $P<0.001$ ), MI-VR 组 FAS 评分增加显著高于 AC-VR 组 ( $P=0.025$ )。

VR 运动游戏前、后的 FS 评分与 VR 运动游戏运动强度的交互效应不显著。VR 游戏前、后 FS 评分的主效应显

著 $[F_{(1,32)}=20.51, P<0.001, \eta^2=0.39]$ 。事后分析显示,VR运动游戏后的FS评分显著高于游戏前 $(2.36\pm 0.24$  vs  $1.57\pm 0.22)$ 。VR运动游戏运动强度的主效应不显著。

### 2.3 EF结果

#### 2.3.1 Eriksen 侧翼任务结果

Eriksen 侧翼任务ACC在各实验方案和任务条件的结果如图4A所示。任务条件的主效应显著 $[F_{(2,24)}=4.942, P=0.016, \eta^2=0.292]$ 。事后分析显示,一致条件 $(99.47\%\pm 0.12\%)$ 的ACC结果显著高于不一致条件 $(96.53\%\pm 0.05\%)$ 的ACC $(P=0.004)$ 实验方案(AC/MI/Hi-VR)与任务条件(一致条件和不一致条件)的交互效应以及实验方案的主效应不显著。

Eriksen 侧翼任务RT在各实验方案和任务条件的结果如图4B所示。认知任务条件(一致条件和不一致条件)的主效应显著 $[F_{(1,31)}=154.70, P<0.001, \eta^2=0.83]$ 。事后分析显示,受试者在一致条件的RT $(319.17\pm 7.74)$  ms显著快于不一致条件的RT $(357.82\pm 8.39)$  ms $(P<0.001)$ 。实验方案的主效应显著 $[F_{(2,62)}=4.45, P=0.016, \eta^2=0.13]$ 。事后分析显示,不一致条件下AC-VR组的RT $(348.88\pm 9.41)$  ms较HI-VR组 $(333.65\pm 8.31)$  ms $(P=0.021)$ 和MI-VR组 $(332.96\pm 8.17)$  ms $(P=0.021)$ 更长。MI-VR与HI-VR之间无显著差异。实验方案(AC/MI/Hi-VR)与任务条件(一致条件和不一致条件)的交互效应不显著。

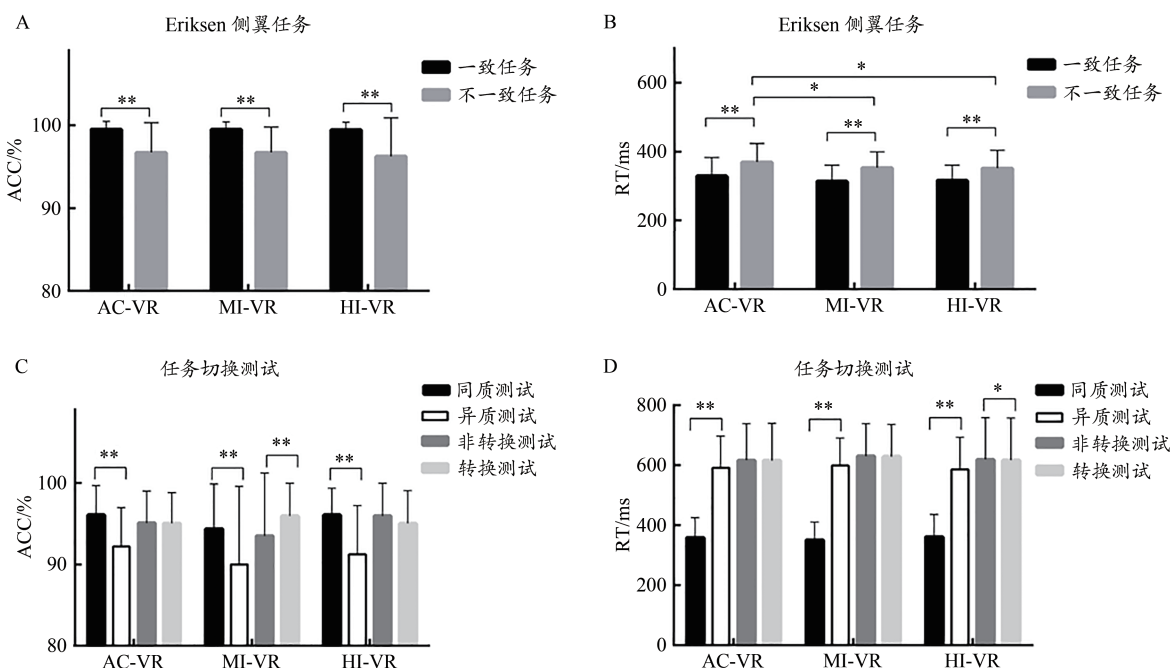


图4 EF测试结果

Figure 4. Results of EF Tests

注: \* $P<0.05$ , \*\*\* $P<0.001$ 。

此外,本研究通过RT计算干扰效应。分析结果显示,受试者AC-VR、MI-VR和HI-VR运动游戏的组间干扰效应的ACC和RT的主效应均不显著。

#### 2.3.2 任务切换测试

任务切换测试ACC在各实验方案和任务条件的结果如图4C所示。任务条件存在主效应 $[F_{(1,32)}=69.11, P<0.001, \eta^2=0.68]$ ,同质试验的ACC $(95.50\%\pm 0.60\%)$ 高于异质性试验 $(91.10\%\pm 0.90\%)$ 。实验方案(AC/MI/Hi-VR)与任务条件的交互效应以及实验方案的主效应不显著。

任务切换测试RT在各实验方案和任务条件的结果如图4D所示。任务条件存在主效应 $[F_{(1,32)}=929.75, P<0.001, \eta^2=0.98]$ ,同质试验的RT $(357.14\pm 9.99)$ ms快于异质试验 $(591.88\pm 13.87)$ ms。实验方案(AC/MI/Hi-VR)与任务条件的交互效应以及实验方案的主效应不显著。

此外,总转换成本和局部转换成本的结果均不显著。

### 3 讨论

本研究比较了单次短时不同运动强度沉浸式VR运动游戏对青年人EF(抑制控制和认知灵活性)和情绪的影响。研究表明,与传统运动类似,随着沉浸式VR游戏中运动强度的增加,情绪效价和情绪唤醒水平显著提升。在EF表现方面,任务切换范式的ACC和RT与沉浸式VR运动游戏的强度之间没有明显关联。相反,参与具有不同运动强度的MI-VR和HI-VR游戏后,Eriksen侧翼任务的表现有所改善,具体表现为RT减少。沉浸式VR运动游戏作为一种有趣、可行的PA形式,可能导致抑制控制的更大改善。

研究表明,沉浸式VR和运动游戏的结合增强了VR



运动游戏期间的唤醒水平,VR运动游戏可能改善青年人的抑制控制。本研究结果与前人研究结果部分一致,Qi等(2021)研究表明,一次VR竞技自行车运动增强了Stroop任务的表现。低运动强度的VR游戏则无法达到唤醒水平以促进抑制控制表现。一项为期4周的干预研究发现,VR运动游戏改善了受试者的抑制控制和任务切换(Huang,2020)。目前,研究发现游戏对认知功能的影响主要有2种机制:1)身体锻炼(移动、跳跃或跑步等),通过增加生理唤醒和运动控制技能提升注意力;2)脑力训练(记忆一项训练的规则和动作),该训练涉及到高级认知过程,使游戏玩家能够更有效地运用他们的认知功能(杨远都等,2020;Anderson-Hanley et al.,2017)。根据唤醒理论,VR游戏中运动强度对单次运动后的抑制控制有明显的作用,这可能是由于运动能够提高生理唤醒,从而使注意力资源分配更多,能够有效抵抗干扰(Hillman et al.,2009)。生理唤醒在一定程度上反映了大脑中神经递质(如多巴胺、去甲肾上腺素和血清素)释放的瞬时变化(Mecusen et al.,2001)。这些变化产生短暂的神经调节作用,促进抑制控制。Anderson-Hanley等(2017)发现,与骑自行车(传统固定式)相比,在VR环境中骑车可以提高任务切换的表现。在本研究中,任务切换的表现没有受到影响,可能是因为一次中等、高强度VR运动游戏并不会影响认知灵活性。研究表明,VR运动游戏即使是在增加沉浸水平的情况下可能需要更长的干预时间(如4周)影响认知灵活性(Huang,2020)。

本研究中,采用FS和FAS量表对VR运动游戏进行前后情绪效价和情绪唤醒水平的评估,结果表明,相较于VR运动游戏前,参与VR运动游戏后,这两方面均表现出显著的增强。特别是随着运动强度的增加,唤醒水平变得更加明显。与传统运动类似,这可能是由于急性VR运动会随着运动强度的增加而诱发心理唤醒反应,从而暂时影响认知过程(Evans et al.,2021;Halbrook et al.,2019)。用户在与虚拟环境的交互中需要心理上刺激运动环境(如想象3D环境),可能激活与EF相关的神经生物学机制(Bavelier et al.,2011;Huang,2020;Wu et al.,2021)。基于此,可以推断VR游戏中元素不断变化的新颖性以及运动游戏难度增加所引起的与觉醒相关的神经调节可能与抑制控制反应时间减少有关(Best et al.,2010)。此外,运动游戏中产生的积极情绪可能会影响EF的积极效应(Lambourne et al.,2010;McMorris,2016)。但目前尚不清楚剧烈运动对情绪是否有强烈、可重复的影响。

本研究中3个VR运动游戏均基于%HRR来进行的运动强度分类。RPE数据显示,VR运动游戏的主观疲劳感觉相比传统运动的强度略低(Evans et al.,2021)。VR游戏过程中具有多感官刺激(如音乐等),这与VR运动游戏可能会分散注意力,在保持高强度的情况下,造成运动游

戏过程中的低感知努力有关。此外,加速度计数据还提供了关于每个VR游戏的运动类型和游戏强度的有价值信息。测量数据显示,在HI-VR运动游戏过程中,达到了中等到高强度PA,而不是完全的高强度PA。一方面可能是由于本研究中VR运动游戏数据包括了游戏中常见的间歇性活动,也可能与VR运动的特点有关,VR运动游戏中全身活动的时间较短,可能是因为本研究所选取VR运动游戏主要基于上肢运动,只需要少量的下肢运动(Rutkowski et al.,2020)。对传统PA的研究发现,下肢和全身运动比上肢运动更有利于达到与中等强度PA一致的能量消耗水平(Jordan et al.,2011;Scheer et al.,2014)。本研究中,MI-VR和HI-VR运动游戏中的运动强度能够促进青年人认知表现,即中等强度运动能够更好地促进认知表现。同时,可能有必要纳入比本研究所选取的更高强度的VR运动游戏,以评估游戏中等运动强度的客观差异。提示,VR运动游戏设计者可以通过加强游戏的下肢沉浸感,促进PA。

#### 4 优势和局限性

从理论上而言,本研究弥补了VR运动游戏运动强度和青年人EF改善的研究文献。本研究结果支持中等、高强度沉浸式VR运动游戏对于改善特定认知领域的可能性。从应用层面来看,VR运动游戏兼顾娱乐性和健身性的特点,不仅能够进行PA,还能够促进EF表现。

本研究有以下不足:1)本研究招募的受试者为高校大学生,研究对象不能代表所有青年人群。由于大脑发育的不同阶段,VR运动游戏可能对不同年龄段的认知功能产生不同的影响。VR运动游戏对不同年龄人群EF的影响有待进一步研究。2)本研究采用随机交叉试验设计。虽然可以通过平衡运动干预顺序克服试验设计的局限性,但还需要在运动游戏前、后对EF结果进行进一步评估,以考虑EF与时间相关的变化。此外,本研究设置了主动对照组,排除外部因素干扰。尽管在不运动强度的VR运动游戏选择上尽可能选取同类型游戏,但结果仍可能会受到干扰。因此,行为结果的差异是否受到VR运动游戏场景(如音乐、VR游戏类型)的影响,需要进一步验证。

#### 5 结论

本研究发现,单次运动中,运动强度对VR运动游戏具有显著作用。沉浸式VR运动游戏可以提高唤醒水平,相比较低强度的VR体验,中等、高强度的沉浸式VR运动游戏可以改善青年人的特定认知表现。研究结果证明了沉浸式VR用于运动游戏的潜力,以及中等、高强度的沉浸式VR运动游戏对青年人具有认知益处。

## 参考文献:

- 曹三省,王春华,李灿,2018. VR/AR 在文化旅游与影视中的应用创新与趋势[J]. 科技导报,36(9):57-60.
- 陈爱国,殷恒婵,颜军,等,2011. 不同强度短时有氧运动对执行功能的影响[J]. 心理学报,43(9):1055-1062.
- 戴琼海,2018. 大力发展三维显示等关键技术 助力虚拟/增强现实迈进新时代[J]. 科技导报,36(9):1.
- 盖笑松,许洁,闫艳,等,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[J]. 心理学报,53(5):505-514.
- 何思倩,覃京燕,2022. 从VR/AR到元宇宙:面向 $\alpha$ 世代的沉浸式儿童绘本交互设计研究[J]. 图书馆建设,317(5):66-72.
- 惠东坡,孙葆琪,2022. 国外电视媒体VR技术应用的形式和特点[J]. 中国电视,441(11):97-104.
- 王辞晓,李贺,尚俊杰,2017. 基于虚拟现实和增强现实的教育游戏应用及发展前景[J]. 中国电化教育,(8):99-107.
- 王润东,麻珂,2023. 商业虚拟现实游戏在心理学中的应用与展望[J/OL]. 应用心理学,doi:10.20058/j.cnki.CJAP.022229.
- 杨远都,李佑发,王思佳,等,2020. 有氧运动改善儿童执行功能研究进展[J]. 中国预防医学杂志,21(1):116-120.
- 张连成,高淑青,2014. 身体锻炼对认知老化的延迟作用:来自脑科学的证据[J]. 天津体育学院学报,29(4):309-312,318.
- 赵伟,张莹,2018. 体育游戏背景下音乐速度对4~5岁幼儿体力活动水平的影响[J]. 中国体育科技,54(1):39-48.
- 周婷,李宇欣,2015. 基于互联网的运动干预项目:提升大众体育行为的新途径[J]. 体育科学,35(6):73-77,82.
- ANDERSON-HANLEY C, ARCIERO P J, BRICKMAN A M, et al., 2012. Exergaming and older adult cognition: A cluster randomized clinical trial[J]. Am J Prev Med,42(2): 109-119.
- BASHIRI A, GHAZISAEEDI M, SHAHMORADI L, 2017. The opportunities of virtual reality in the rehabilitation of children with attention deficit hyperactivity disorder: A literature review[J]. Korean J Pediatr,60(11): 337-343.
- BAVELIER D, GREEN C S, HAN D H, et al., 2011. Brains on video games[J]. Nat Rev Neurosci, 12(12): 763-768.
- BEST J R, MILLER P H, 2010. A developmental perspective on executive function[J]. Child Dev,81(6): 1641-1660.
- BEST J R, MILLER P H, NAGLIERI J A, 2011. Relations between executive function and academic achievement from ages 5 to 17 in a large, representative national sample[J]. Learn Individ Differ, 21(4): 327-336.
- CENTERS FOR DISEASE CONTROL PREVENTION (CDC), 2013. Adult participation in aerobic and muscle-strengthening physical activities: United States, 2011[J]. MMWR Morb Mortal Wkly Rep, 62(17): 326-330.
- COOLS R, 2019. Chemistry of the adaptive mind: Lessons from dopamine[J]. Neuron,104(1): 113-131.
- CRUZ-NEIRA C, FERNÁNDEZ M, PORTALÉS C, 2018. Virtual reality and games [J]. Multimodal Technol Interact, doi: 10.3390/mti2010008.
- DAI C T, CHANG Y K, HUANG C J, et al., 2013. Exercise mode and executive function in older adults: An ERP study of task-switching[J]. Brain Cogn,83(2): 153-162.
- DIAMOND A, 2013. Executive functions [J]. Ann Rev Psychol, 64: 135-168.
- EKKEKAKIS P, LIND E, 2005. Exercise does not feel the same when you are overweight: The impact of self-selected and imposed intensity on affect and exertion[J]. Intl J Obes,30(4): 652-660.
- EKKEKAKIS P, PETRUZZELLO S J, 2001. Analysis of the affect measurement conundrum in exercise psychology. III. A conceptual and methodological critique of the Subjective Exercise Experiences Scale[J]. Psychol Sport Exerc,2(4): 205-232.
- ERIKSEN B A, ERIKSEN C W, 1974. Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a non-search task[J]. Percept Psychophys, 16(1): 143-149.
- EVANS E, NAUGLE K E, KALETH A S, et al., 2021. Physical activity intensity, perceived exertion, and enjoyment during head-mounted display virtual reality games[J]. Games Health J,10(5): 314-320.
- FAUL F, ERDFELDER E, BUCHNER A, et al., 2009. Statistical power analyses using G\*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses[J]. Behav Res Methods,41(4): 1149-1160.
- FREEDSON P S, MELANSON E, SIRARD J, 1998. Calibration of the computer science and applications, inc. accelerometer[J]. Med Sci Sports Exerc, 30(5): 777-781.
- FREEMAN D, REEVE S, ROBINSON A, et al., 2017. Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders[J]. Psychol Med,47(14): 2393-2400.
- GAMMON C S, PFEIFFER K A, PENG W, et al., 2014. Contribution of active videogame play to physical activity among college students[J]. Games Health J,3(6): 395-398.
- GAO Z, CHEN S, PASCO D, et al., 2015. Effects of active video games on physiological and psychological outcomes among children and adolescents: A Meta-analysis[J]. Obes Rev,16(9): 783-794.
- GOMEZ D H, BAGLEY J R, BOLTER N, et al., 2018. Metabolic cost and exercise intensity during active virtual reality gaming[J]. Games Health J,7(5): 310-316.
- GRATTON G, COLES M G, DONCHIN E, 1992. Optimizing the use of information: Strategic control of activation of responses [J]. J Exp Psychol Gen, 121(4): 480-506.
- GU Q, ZOU L, LOPRINZI P D, et al., 2019. Effects of open versus closed skill exercise on cognitive function: A systematic review[J]. Front Psychol,doi: 10.3389/fpsyg.2019.01707.
- HARDY C J, REJESKI W J, 1989. Not what, but how one feels: The measurement of affect during exercise[J]. J Sport Exerc Psychol, 11(3): 304-317.
- HILLMAN C H, PONTIFEX M B, RAINE L B, et al., 2009. The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children[J]. Neuroscience, 159(3): 1044-1054.
- HUANG K T, 2020. Exergaming executive functions: An immersive virtual reality-based cognitive training for adults aged 50 and older[J]. Cyberpsychol Behav Soc Netw,23(3): 143-149.
- HYODO K, DAN I, SUWABE K, et al., 2012. Acute moderate exercise enhances compensatory brain activation in older adults[J]. Neurobiol Aging,33(11): 2621-2632.
- JESSEN F, AMARIGLIO R E, BUCKLEY R F, et al., 2020. The characterization of subjective cognitive decline[J]. Lancet Neurol, 19(3): 271-278.
- JORDAN M, DONNE B, FLETCHER D, 2011. Only lower limb con-



- trolled interactive computer gaming enables an effective increase in energy expenditure[J]. *Eur J Appl Physiol*, 111(7): 1465-1472.
- KAMIJO K, TAKEDA Y, 2010. Regular physical activity improves executive function during task switching in young adults[J]. *Int J Psychophysiol*, 75(3): 304-311.
- KAO S C, WESTFALL D R, SONESON J, et al., 2017. Comparison of the acute effects of high-intensity interval training and continuous aerobic walking on inhibitory control[J]. *Psychophysiology*, 54(9): 1335-1345.
- KASHIHARA K, MARUYAMA T, MUROTA M, et al., 2009. Positive effects of acute and moderate physical exercise on cognitive function[J]. *J Physiol Anthropol*, 28(4): 155-164.
- LAMBOURNE K, TOMPOROWSKI P, 2010. The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: A Meta-regression analysis[J]. *Brain Res*, 1341: 12-24.
- LIAO Y Y, CHEN I H, LIN Y J, et al., 2019. Effects of virtual reality-based physical and cognitive training on executive function and dual-task gait performance in older adults with mild cognitive impairment: A randomized control trial [J]. *Front Aging Neurosci*, doi: 10.3389/fnagi.2019.00162.
- MAGALHÃES S, CARNEIRO L, LIMPO T, et al., 2020. Executive functions predict literacy and mathematics achievements: The unique contribution of cognitive flexibility in grades 2, 4, and 6[J]. *Child Neuropsychol*, 26(7): 934-952.
- MCMORRIS T, 2016. History of research into the acute exercise-cognition interaction: A cognitive psychology approach [C]//*Exercise-Cognition Interaction: Neuroscience Perspectives*. Elsevier. SAN DIEGO, USA: Elsevier Academic Press.
- MEEUSEN R, PIACENTINI M F, DE MEIRLEIR K, 2001. Brain microdialysis in exercise research[J]. *Sports Med*, 31(14): 965-983.
- MONEDERO J, LYONS E J, O'GORMAN D J, 2015. Interactive video game cycling leads to higher energy expenditure and is more enjoyable than conventional exercise in adults [J]. *PLoS One*, doi: 10.1371/journal.pone.0118470.
- MONTANA J I, TUENA C, SERINO S, et al., 2019. Neurorehabilitation of spatial memory using virtual environments: A systematic review[J]. *J Clin Med*, doi: 10.3390/jcm8101516.
- MUNN B R, MÜLLER E J, WAINSTEIN G, et al., 2021. The ascending arousal system shapes neural dynamics to mediate awareness of cognitive states[J]. *Nat Commun*, doi: 10.1038/s41467-021-26268-x.
- PLANTE T G, FRAZIER S, TITTLE A, et al., 2003. Does virtual reality enhance the psychological benefits of exercise? [J] *J Hum Mov Stud*, 45(6): 485-507.
- QI L, YIN Y, BU L, et al., 2021. Acute VR competitive cycling exercise enhanced cortical activations and brain functional network efficiency in MA-dependent individuals [J]. *Neurosci Lett*, doi: 10.1016/j.neulet.2021.135969.
- ROGERS R D, MONSELL S, 1995. Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks [J]. *J Exp Psychol Gen*, 124(2): 207-231.
- RUTKOWSKI S, KIPER P, CACCIANTE L, et al., 2020. Use of virtual reality-based training in different fields of rehabilitation: A systematic review and Meta-analysis[J]. *J Rehabil Med*, doi: 10.2340/16501977-2755.
- SCHEER K S, SIEBRANT S M, BROWN G A, et al., 2014. Wii, Kinect, and Move . Heart rate, oxygen consumption, energy expenditure, and ventilation due to different physically active video game systems in college students[J]. *Int J Exerc Sci*, 7(1): 22-32.
- SHEN J, XIANG H, LUNA J, et al., 2020. Virtual reality-based executive function rehabilitation system for children with traumatic brain injury: Design and usability study[J]. *JMIR Serious Games*, doi: 10.2196/16947.
- STANMORE E, STUBBS B, VANCAMPFORT D, et al., 2017. The effect of active video games on cognitive functioning in clinical and non-clinical populations: A Meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 78: 34-43.
- STRATH S J, SWARTZ A M, BASSETT JR D R, et al., 2000. Evaluation of heart rate as a method for assessing moderate-intensity physical activity[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 32(9 Suppl): S465-S470.
- SVEBAK S, MURGATROYD S, 1985. Metamotivational dominance: A multimethod validation of reversal theory constructs [J]. *J Pers Soc Psychol*, 48(1): 107-116.
- SWAIN D P, LEUTHOLTZ B C, 1997. Heart rate reserve is equivalent to % $\dot{V}O_2$  reserve, not to % $\dot{V}O_{2max}$  [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 29(3): 410-414.
- TOMPOROWSKI P D, 2003. Effects of acute bouts of exercise on cognition[J]. *Acta Psychol*, 112(3): 297-324.
- VERNALEKEN I, BUCHHOLZ H G, KUMAKURA Y, et al., 2007. 'Prefrontal' cognitive performance of healthy subjects positively correlates with cerebral FDOPA influx: An Exploratory [ $^{18}F$ ]-fluorol-DOPA-PET Investigation[J]. *Hum Brain Mapp*, 28(10): 931-939.
- WEAVER 3<sup>RD</sup> J B, MAYS D, WEAVER S S, et al., 2009. Health-risk correlates of video-game playing among adults[J]. *Am J Prev Med*, 37(4): 299-305.
- WU J, ZENG A, CHEN Z, et al., 2021. Effects of virtual reality training on upper limb function and balance in stroke patients: Systematic review and Meta-analysis[J]. *J Med Internet Res*, doi: 10.2196/3105.

(收稿日期:2023-02-22; 修订日期:2023-10-22; 编辑:尹航)