



体感游戏训练周期中运动强度和认知参与对大学生空间认知功能的影响

杨波^{1,2}

(1. 华东师范大学 体育与健康学院, 上海 200241; 2. 上海外国语大学贤达经济人文学院, 上海 200083)

摘要:目的:考察体感游戏训练对大学生空间认知功能的促进机制。方法:采用2(运动强度:低/中高)×2(认知参与程度:低/高)×4(时间:前测、一次性训练、5周训练、10周训练)的三因素混合实验设计,对72名大学文科生进行为期10周(3次/周,60分/次)的体感游戏训练。结果:1)一次性训练后,仅中高强度-高认知组的空间可视化水平显著提升;2)随着训练时间的增加,中高强度-高认知组的优势进一步扩大,低强度-高认知组的优势也逐渐凸显,且均优于低认知组;3)仅中高强度-高认知组在训练5周后消除了空间可视化方面的性别差异,但随着训练时间的增加,差异再次显现。结论:1)一次性体感游戏训练后,空间认知功能主要受运动强度影响;2)长期体感游戏训练后,空间认知功能受到运动强度和认知参与程度的共同影响,且认知参与所产生的空间认知效应大于运动强度;3)体感游戏训练不能消除空间认知功能的性别差异。

关键词:体感游戏;空间认知功能;运动强度;认知参与

中图分类号:G804.8

文献标识码:A

空间认知功能是个体在环境中能准确感知视觉图像、表征视觉信息,并想象、理解和操纵物体之间空间关系的能力,是衡量智力的重要指标,主要包括空间关系和空间可视化两个核心部分(Khine, 2017)。空间关系能力即在大脑中执行二维或三维图像快速精准旋转的能力;空间可视化能力即在空间画板中将二维信息进行空间位置转换、拆分和重组,并可视觉化为三维立体物的能力。空间认知功能对学生在STEM领域[科学(science)、技术(technology)、工程(engineering)和数学(math)]的发展至关重要。其中,空间认知加工技能,如空间可视化、空间组块设计、空间感知、嵌入等与数学信息加工过程的相似性是二者紧密联系的基础(Newcombe, 2018);在解决工程力学问题时,运用三角学和几何学知识能够有效平移和旋转物体的心理图像,从而实现空间位置信息的精准匹配(Hitzer et al., 2022);同样,具有高空间认知能力的个体能在脑海中精确构建化学结构,正确操作原子间的电子交换和新结构的产生(Merchant et al., 2013)。

鉴于空间认知功能在STEM领域的重要作用,学者们以电子游戏为空间认知功能的训练手段,取得了一系列成果。在空间感知方面,由于游戏参与者需同时处理多个转瞬即逝的视觉刺激,长此以往,参与者能够更高效地感知视觉刺激间的差异(刘芳芳等, 2021)。此外,高强度

的视觉刺激使得参与者的腹侧视觉通道功能性连接增强,在感知和区分低级视觉特征(方向、颜色、线条)与高级图案(字母、纹理、形状)间的差异上更加出色,如横向掩蔽效应减弱,即受目标刺激周围元素影响的程度更低(张豹等, 2019; Chopin et al., 2019);潜伏期缩短,即对视觉刺激做出正确反应的速度更快(张业安等, 2022)。在视觉空间注意方面,动作游戏参与者时刻处于多目标追踪状态,因而发展出出色的选择注意能力(王慈等, 2016)和注意力资源储备水平(项明强等, 2010),确保了对目标信息的高效定位及编码。如将注意资源从相关程度较低的信息刺激中分离出来(注意瞬脱),并迅速分配给更有价值的信息刺激(空间定向),以实现在复杂游戏中的快速反应(Gan et al., 2020; Wu et al., 2021)。与视觉空间注意力密切相关的是视觉空间工作记忆,因个体不能同时注意4个以上物体,所以工作记忆容量一般也不超过4个。而游戏中的多目标追踪过程伴随着空间信息的短时存储,强化了额顶神经网络间的功能性连接,负责工作记忆的脑区的神经突触间信号传递效能得到优化,空间

收稿日期:2023-07-19; 修订日期:2023-10-24

作者简介:杨波(1993-),男,讲师,博士,主要研究方向为运动心理学,

E-mail:1278075247@qq.com.

工作记忆容量也因此得到发展(Waris et al., 2019)。

然而,传统的电子游戏所伴随的久坐行为并不利于身心健康发展,而在空间信息加工过程中,目标对象与自身空间位置的动态变化过程刚好与一些类型的有氧运动的信息加工过程不谋而合,是故基于可行性方面的考量,采用有氧运动进行空间认知功能训练似乎是一种不错的选择。对于技巧类运动项目(如体操、杂耍等),运动中不仅包含了大量的空中翻腾转体、抛接等动力性肢体动作,还对静力性平衡动作有着较高的要求,因此在练习过程中感觉运动系统必须根据实时接收到的身体的运动轨迹信息调整姿态以精准完成动作。由于感觉运动系统与心理旋转的空间感知系统存在连接,在整个过程中运动者的视觉空间能力也得到了强化(冯甜等, 2021)。对于协调性运动项目(如太极拳等),该类运动不仅能够优化视觉空间工作记忆、视觉空间注意广度,还能够强化负责视觉空间信息处理的大脑神经网络结构(Dunsky, 2019),提高前体细胞储备水平,使得个体在整个生命周期中能够对视觉空间信息保持良好的注意、存储及操作状态(柯金宏等, 2022),以更快地收集视觉空间信息,缩短认知加工所需的时间(张亚茹等, 2022)。而结合了力量和功能的高强度功能性训练则能够极大促进个体对外在环境刺激的抑制控制能力,强化视觉模式分离和抑制控制水平(赵梅玲, 2020)。对于结合了空间认知和体能训练的复合型运动项目,如定向越野运动,参与者始终处在动态变化的陌生环境当中,当遇到空间障碍物时,为按照既定的路线继续前进,需时刻将当下所处环境与地图信息结合起来,生成三维空间地图,这在无形中培养了参与者的空间信息检索和空间可视化能力(宋杨等, 2021, 朱瑜等, 2011),而外在参考物的持续变换又迫使参与者必须及时更新自身与参考物的相对空间关系,其心理旋转能力也相应地得到强化。

尽管有氧运动的空间认知促进效果显著,但是较低的运动参与动机限制了这一效果的发挥。因此,人们将电子游戏和有氧运动相结合推出了体感游戏,并在实际应用中发现,由于参与者在体感游戏中可以更直接地调控运动强度和认知参与程度,相较于久坐式电子游戏,体感游戏增加了参与者的热量消耗。其次,团体协作模式的游戏设置,为参与者带来了更多的社交机会,情绪状态也相应地得到改善,有利于在一定程度上减少久坐所引发的心理危机。不仅如此,参与者在整个游戏过程中需要做出大量的粗大和精细动作,从而其平衡性和协调性也得到一定的发展。但体感游戏所产生的空间认知效应可能会因实验所采取的运动强度和认知参与水平的不同而存在差异。而既有研究大多未对认知参与程度进行严格界定,也未对身体活动强度指标(如心率、能量代谢)进行详细记录,这可能限制了对研究结果的解释的充分性,即

以何种方式组合体感游戏中的认知参与程度与身体活动强度,才能最大程度发挥体感游戏在空间认知促进方面的作用,仍有待深入探究。此外,现有研究多指出体感游戏训练能消除空间认知功能的性别差异,但鲜有研究严格区分被试的学科知识背景所带来的认知优势(Atit et al., 2020; Tomai et al., 2023),因此其阳性结果也值得进一步斟酌。

据此,本研究旨在探讨以下问题:1)一次性训练中,运动强度和认知参与程度对空间认知功能的影响是否存在时序差异;2)长期训练中,运动强度和认知参与程度对空间认知功能影响的权重是否存在差异;3)训练过程中,空间认知功能在性别上的差异是否会缩小甚至消失。

1 研究对象与方法

1.1 实验设计

研究采用2(运动强度:中高/低)×2(认知参与程度:高/低)×4(时间:前测、一次性训练、5周训练、10周训练)三因素混合实验设计,被试间变量为运动强度和认知参与程度,将被试随机分配至中高强度-高认知、中高强度-低认知、低强度-高认知、低强度-低认知4组。训练方案为3次/周,60分/次,共10周。采用重复测量范式分别在训练前、一次性训练后、5周训练后和10周训练后进行空间认知功能测量,采用A-B-A范式消除叠加效应的干扰。

1.2 研究对象

基于已有研究结论,再结合G*Power 3.1的计算结果($\alpha=0.05$, $1-\beta=95\%$, $ES=0.30$),推测研究所需样本量为72人,考虑到被试退出的风险,招募80名大学生并随机分配至4组,训练期间各组均有2人退出。Mann-Whitney U检验结果显示,退出者的年龄($Z=-0.91$, $P=0.36$)与剩余被试无显著差异,但身高($Z=-3.09$, $P<0.01$)和体重($Z=-2.05$, $P=0.04$)差异显著,这可能是因为男生(87.5%)在总退出人群中的比例高于女生。最终72人完成全部流程(男生35人,女生37人),平均年龄(20.77 ± 1.31)岁。如表1所示,4组被试的年龄($F=0.54$, $P=0.66$)、身高($F=0.05$, $P=0.99$)、体重($F=0.25$, $P=0.86$)、BMI($F=0.43$, $P=0.73$)、基础代谢($F=0.45$, $P=0.72$)、静息心率($F=1.93$, $P=0.13$)、心理旋转正确率(mental rotation test-accuracy, MRT-ACC)($F=0.71$, $P=0.55$)、心理旋转反应时(mental rotation test-reaction time, MRT-RT)($F=0.15$, $P=0.93$)、空间可视化测试(multipolar aptitude test-spatial visualization test, MAT-SVT)($F=2.38$, $P=0.08$)前测差异均不显著。所有被试均为右利手,视力和听力正常,无精神疾病史,1年内未参与过任何形式的电子游戏;高中及大学期间专业均为人文社科方向,以此控制学科知识背景对空间认知能力的影响。研究伦理审批号为HR 295-2021。

表1 被试基本信息特征

Table 1 Basic Information of Participants

基本信息	中高强度-高认知	中高强度-低认知	低强度-高认知	低强度-低认知	F	P
性别(男/女)/名	9/9	9/9	8/10	9/9		
年龄/岁	20.50±1.20	20.89±1.53	20.56±1.60	21.06±1.77	0.54	0.66
身高/m	1.68±0.06	1.68±0.09	1.68±0.08	1.67±0.08	0.05	0.99
体重/kg	61.81±12.92	60.05±12.60	62.70±14.59	59.44±11.39	0.25	0.86
基础代谢/(kcal/h)	67.20±10.08	65.55±8.16	63.66±8.69	64.72±9.90	0.45	0.72
静息心率/BPM	71.44±1.46	71.78±1.59	70.56±1.69	71.61±1.88	1.93	0.13
BMI/(kg/m ²)	21.68±3.18	21.20±3.19	22.32±5.16	21.08±2.34	0.43	0.73
MAT-SVT	28.28±3.59	29.78±1.67	29.72±2.54	29.83±1.62	2.38	0.08
MRT-ACC/%	85.83±2.66	86.83±3.09	85.67±3.03	85.56±2.95	0.71	0.55
MRT-RT/ms	2 408.85±376.05	2 402.50±579.28	2 403.04±457.05	2 319.45±438.90	0.15	0.93

1.3 实验程序

在游戏熟悉阶段,被试签署知情同意书并填写个人信息;然后主试示范游戏操作方法,并指导被试操作游戏直到熟练;最后确定实验日期并告知被试注意事项(如测试当天避免任何中等到高强度的体育运动,忌过量进食,实验前忌过量饮水,须着装舒适等)。正式训练前先测量被试的视觉-空间认知功能(MAT-SVT、MRT-ACC、MRT-RT)的基线水平,随后要求被试佩戴Cortex MetaMax 3B气体代谢

分析仪和心率监测仪,告知被试在10 min之内放松,记录最后5 min内的VO₂和VCO₂,以确定静息心率和基础代谢率。正式训练阶段,首先询问被试当前身心状态,得到肯定后引导其至安静、通风、光线柔和的22℃房间坐下,被试需佩戴游戏动作感应器、Polar心率表及加速度计,每次训练60 min。结束后解除设备并提取游戏中的平均心率、步数、移动距离、速度和能量代谢,随后再次进行空间认知功能测量,当被试完成全部实验任务后发放报酬(图1)。

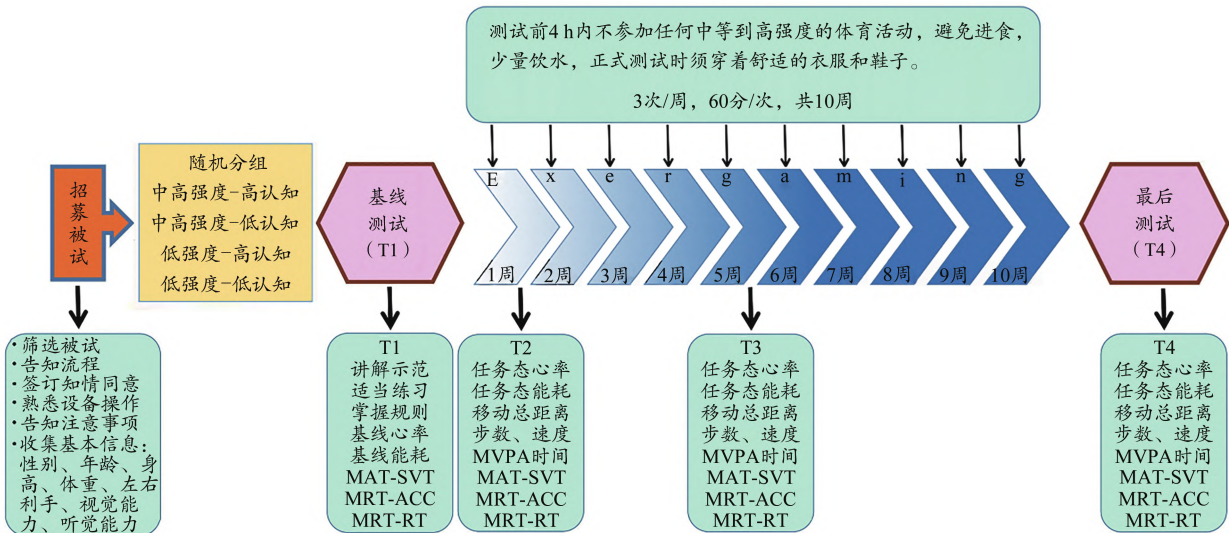


图1 实验流程

Figure 1. Experimental Flow Chart

游戏的运动强度和认知参与程度主要参照已有案例(盖笑松等,2021;Best,2011)进行划分和设置,并结合国内的主流体感游戏类型,初步选出8款游戏,由30名专家(体育学专业和心理学专业各15名)体验1.5 h后,根据自感努力程度、认知难度和趣味性对8款游戏的认知参与体验进行评分(得分范围1~8分),再进行方差分析和事后检验,最终选择4种游戏^①。1)中高强度-高认知组:选用任天堂体感游戏中的“高速滑轮”,被试与屏幕相距约2 m,要求被试用最大的速度滑动滑轮,同时身体左右移动以

躲避红色减速区域,并尽可能地将运动轨迹滑向蓝色加速区域;整个过程中的快速跑动和摆臂动作体现了中高强度运动属性,而高认知属性则体现在短时间内对于空间距离的判断和运动轨迹的选择。2)中高强度-低认知

①首先,在专家体验后,根据Polar心率表将游戏分为中高运动强度和低运动强度游戏;然后,在中高运动强度游戏中分别选择专家认知评分较高和较低的游戏,作为中高强度-高认知、中高强度-低认知游戏;同理,在低运动强度游戏中选出低强度-高认知、低强度-低认知游戏。

组:选用任天堂体感游戏中的“马拉松”,被试与屏幕相距约2 m,整个过程中被试只需尽最大努力跑动,既无障碍物阻隔,也无路径的选择,因此只体现了中高运动强度属性。3)低强度-高认知组:选用任天堂体感游戏中的“马里奥高尔夫”,被试需根据游戏界面提示的风速和距离判断挥杆力度和挥杆方向,游戏中的标准杆和虚拟人物间的距离较远,且虚拟高尔夫场地崎岖不平,因此会有障碍物阻隔视线,对被试的空间距离判断和深度知觉加工能力有着较高的要求,体现了游戏的高认知属性,低运动强度属性则体现在被试在肢体活动方面只需要完成挥杆动作。4)低强度-低认知组:选用任天堂体感游戏中的“瑜伽大师”,游戏难度设置为新手级别,被试全程只需模仿游戏中的简单动作,既无大幅度肢体活动,也无需过多思考。4种游戏的运动强度、认知参与程度的组间差异显著(表2),专家对游戏认知参与程度评价的一致性检验系数 $ICC=0.759>0.75$ 。

表2 自变量的有效性分析

Table 2 Validity Analysis of Independent Variables

组别	运动强度/BPM		认知参与程度	
	M	SD	M	SD
中高强度-高认知	149.60	9.72	6.07	1.53
低强度-高认知	106.27	6.82	5.60	0.62
中高强度-低认知	145.28	10.29	2.30	1.51
低强度-低认知	78.08	5.46	1.90	0.96
F	500.36***		95.23***	

注:*** $P<0.001$,下同。

1.4 综合运动指标测量

根据美国运动医学学会(American College of Sports Medicine, ACSM)的标准,运动强度达到 $55\% \sim 90\%HR_{max}$ 才可对心肺健康和身体成分产生积极效果,因此,采用Polar RS800心率表监测训练过程中的运动强度。当被试的心率低于 $55\%HR_{max}$ 时,心率监测器发出警报,被试根据游戏的实际情况决定是否需要提高运动强度。此外,采用ActiGraph GT3X-BT三轴体动记录仪记录训练过程中的能量消耗、能量代谢当量、活动步数、活动强度及不同活动强度的具体时间,将大于 $55\%HR_{max}$ 的所有时间汇总,创建中等到大强度身体活动的总时间,实验结束后将以上信息上传至电脑。

1.5 因变量空间认知功能测量

当前研究主要从衡量空间可视化的MAT-SVT和衡量空间关系的MRT两方面测量空间认知功能(Martin et al., 2017)。

1)空间可视化测验。采用王进礼等(2004)修订的MAT-SVT衡量空间可视化水平,该工具Cronbach's α 系数为0.8,信效度良好,被广泛用于衡量成年人的多重认知功能。首先呈现出一个展开的二维几何图形,要求被试

将二维图形按照线条折叠成三维物体,并在给出的4个三维几何图形中选择出正确选项(图2),共计50个试次,总分50分,测验时长约25 min。

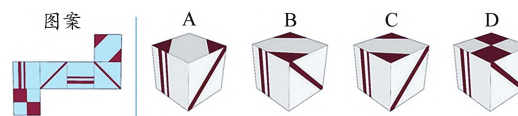


图2 空间可视化测试

Figure 2. Multipolar Aptitude Test-Spatial Visualization Test

2)空间关系测验。采用二维图片心理旋转任务(Kaltner, 2017)进行空间关系测试。被试首先通过练习任务快速理解测试规则,当完全掌握后进行正式测试。测验中每次呈现2个二维几何图片,左侧为参考图片,右侧是旋转一定角度的图片,旋转角度分别为 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° (图3)。如右侧图片旋转后与左侧图片一致(正像图片),则需按“F”键;如旋转后为左侧图片的镜像图片,即二者不一致,则需按“J”键;被试需尽可能快地做出选择。测验时长约25 min,心理旋转任务测试有2个版本(A和B),为避免重复测量产生,认知叠加效应,采用A-B-A。结果用MRT-ACC和MRT-RT表示。由于激素水平变化会影响个体在心理旋转中的表现,测试时间需避开女性被试的生理期(Griksiene et al., 2019)。

1.6 数据处理

使用SPSS 25.0进行统计分析,采用单因素方差分析比较4组被试各指标间的基线特征及训练前后的差异情况;采用三因素重复测量方差分析考察不同训练周期下各组空间认知的变化情况,以及运动强度和认知参与程度在不同周期下的作用效果,基于Greenhouse Geisser校正不满足球形检验的统计量,采用显著性水平 $\alpha=0.05$ 的双侧检验。

2 研究结果

2.1 体感游戏中综合运动指标结果

由ANOVA可知,4组被试在游戏中的能量消耗($F=490.75, P<0.001$)、平均心率($F=214.68, P<0.001$)、中大强度身体活动(moderate-to-vigorous physical activity, MVPA)($F=175.82, P<0.001$)及所达到的心率储备(heart rate reserve, HRR)($F=216.78, P<0.001$)差异显著,且上述指标在各组内的性别差异显著(表3)。

2.2 运动强度和认知参与在不同训练周期下的空间认知促进效应

三因素交互效应分析结果表明,运动强度 \times 认知参与程度 \times 时间对MAT-SVT、MRT-ACC、MRT-RT的交互作用均显著(表4)。两因素交互效应分析结果表明:1)在高认知参与程度下,运动强度 \times 时间对3个因变量具有中等且

显著的交互作用,而在低认知参与程度下,运动强度×时间对MRT-RT的交互作用不显著;2)在中高运动强度下,认知参与程度×时间对3个因变量的交互作用显著,但在

低运动强度下,认知参与程度×时间对MRT-RT的影响不显著;3)运动强度×认知参与程度仅对空间可视化的交互作用显著(表4)。

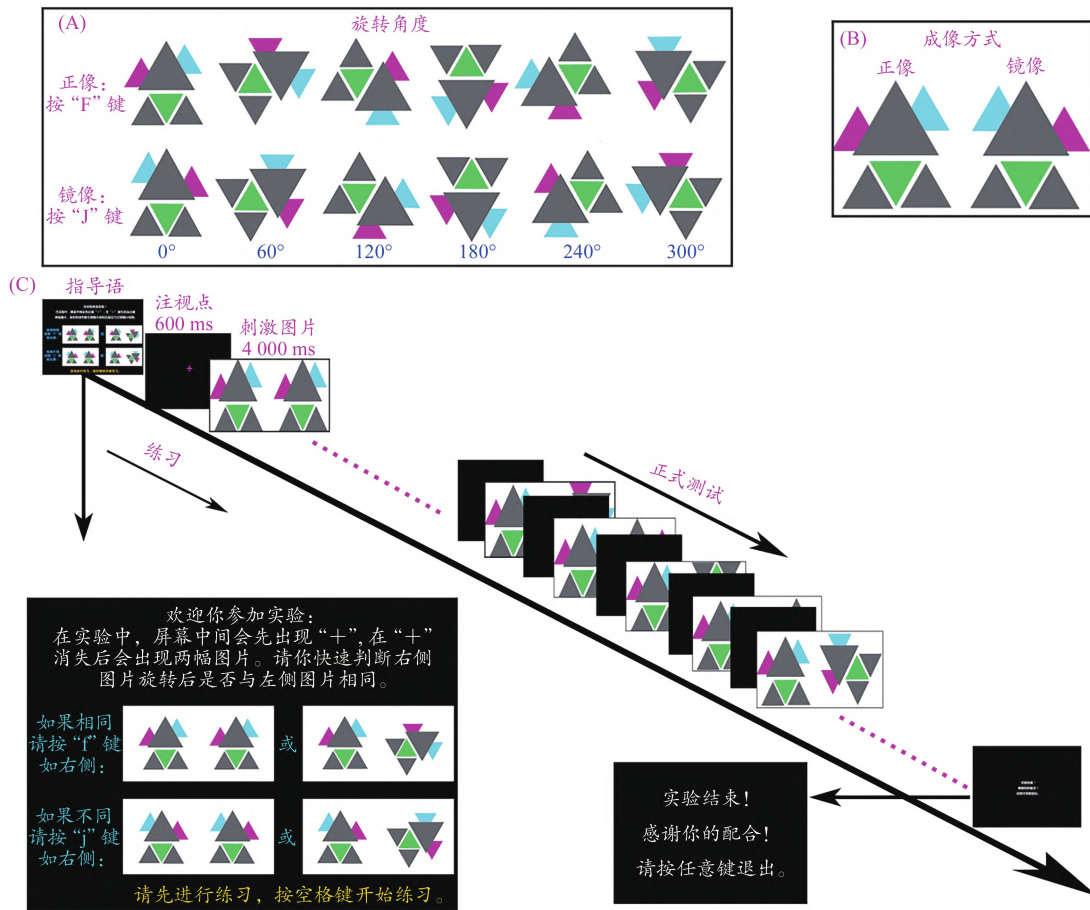


图3 E-prime流程

Figure 3. E-prime Flow Chart

表3 体感游戏训练中的运动指标监测

Table 3 Monitoring of Sports Indicators in Exergame Training

指标	中高强度-高认知	中高强度-低认知	低强度-高认知	低强度-低认知	F
平均心率/BPM	142.83±13.48	138.17±11.12	102.48±6.49	73.37±3.10	221.18***
能量代谢/(kcal/h)	319.59±21.68	296.89±21.57	174.29±26.5	93.39±5.28	490.75***
MVPA 占比					
总体/%	50.09±11.28	46.11±5.33	17.25±5.40	6.02±2.49	175.82***
男/%	55.37±9.31	48.95±4.21	19.81±4.80	6.60±2.36	
女/%	44.81±11.01	43.27±4.95	14.69±4.92	5.43±2.60	
t	2.17*	2.52*	2.26*	1.03	
HRR					
总体/%	71.42±6.74	69.08±5.56	51.24±3.25	36.69±1.55	221.12***
男/%	77.28±3.76	72.89±4.99	53.31±2.54	38.02±0.67	
女/%	65.56±2.26	65.33±3.00	49.17±2.51	35.35±0.81	
t	7.88***	3.89**	3.53**	7.91**	

注: *P<0.05, **P<0.01, 下同。

进一步进行简单效应分析,结果表明,在长期训练中,高认知参与程度对MAT-SVT($\eta^2=0.79>0.61$)、MRT-ACC($\eta^2=0.52>0.34$)和MRT-RT($\eta^2=0.37>0.23$)的认知促进效应量大于中高运动强度。

2.2.1 一次性体感游戏训练对空间认知功能的影响

在空间可视化方面,一次性体感游戏训练后,仅发现中高强度-高认知组的MAT-SVT得分显著提高($MD=-5.00$, $P<0.001$),其余3组均未发生显著改善(图4);在空间关

系方面,一次性体感游戏训练后,4组被试MRT-ACC和MRT-RT的变化均不显著(图5)。

表4 运动强度、认知参与程度及时间对空间认知功能的交互作用分析

Table 4 Interactive Effects of Exercise Intensity, Cognitive Load and Training Time on Spatial Cognition

变量	MAT-SVT					MRT-ACC					MRT-RT					
	球形度检验		主体内效应检验			球形度检验		主体内效应检验			球形度检验		主体内效应检验			
	<i>W</i>	χ^2	<i>MSI</i>	<i>F</i>	η^2	<i>W</i>	χ^2	<i>MSI</i>	<i>F</i>	η^2	<i>W</i>	χ^2	<i>MSI</i>	<i>F</i>	η^2	
运动强度×认知参与程度×时间	0.77	4.17	40.75	10.22***	0.38	0.59	8.38	5.04	3.83*	0.18	0.40	14.61*	0.23	4.60*	0.21	
运动强度×时间	低认知	0.33	17.30**	104.86	13.20***	0.44	0.39	14.90**	5.62	4.63*	0.21	0.21	24.25***	0.14	2.54	0.13
	高认知	0.97	0.55	73.93	19.94***	0.54	0.39	14.72**	34.98	14.91***	0.47	0.15	30.15***	0.95	18.80***	0.53
认知参与程度×时间	低强度	0.80	3.50	150.32	38.02***	0.69	0.42	13.58*	18.27	9.57***	0.36	0.11	35.43***	0.12	1.51	0.08
	中高强度	0.58	8.50	211.88	47.90***	0.74	0.36	15.97**	71.80	40.86***	0.71	0.05	46.64***	1.25	15.18***	0.47
运动强度×认知参与程度	1.00	0.00***	46.72	8.17**	0.32	1.00	0.00***	0.89	0.37	0.02	1.00	0.00***	0.00	0.48	0.03	
低运动-低认知	0.04	49.38***	6.84	0.65	0.04	0.22	24.06***	1.18	0.74	0.04	0.02	59.69***	0.04	0.28	0.02	
中高强度-低认知	0.65	6.81	189.83	26.58***	0.61	0.21	24.34***	18.23	8.83***	0.34	0.07	42.77***	0.29	5.00*	0.23	
低强度-高认知	0.41	14.09*	558.62	65.16***	0.79	0.34	16.80***	46.68	18.29***	0.52	0.54	9.56	0.10	9.90***	0.37	

注:*W*:莫来奇球形度检验 Mauchly *W*; *MSI*:交互效应均方(mean square for interaction)。

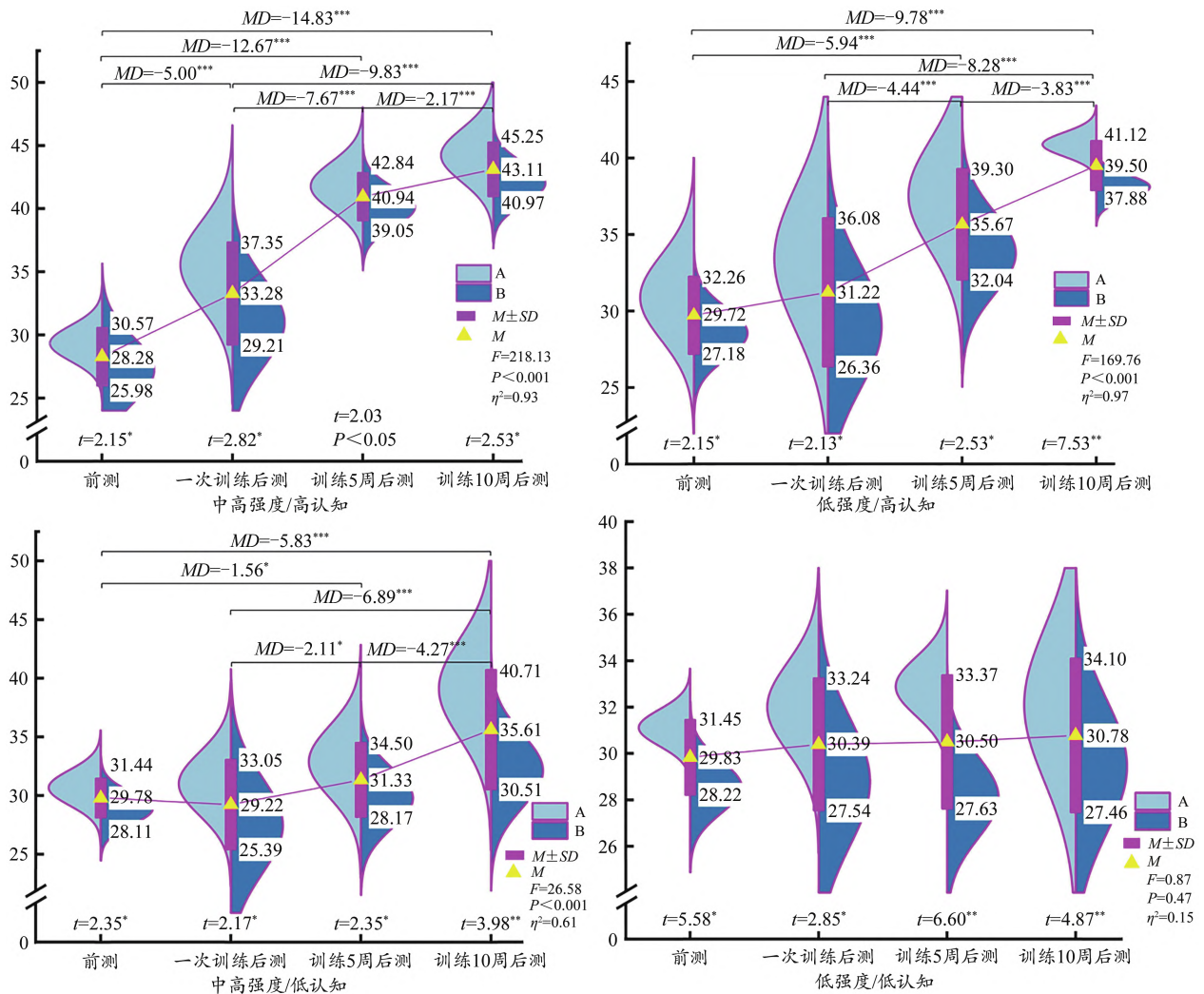


图4 不同训练周期下空间可视化能力的变化及差异分析

Figure 4. Gender Difference of Spatial Visualization in Different Training Cycle

2.2.2 长期体感游戏训练对空间认知功能的影响

在空间可视化方面,5周后中高强度-高认知组($P <$

0.001)、低强度-高认知组($P <$ 0.001)、高强度-低认知组

($P <$ 0.05)的MAT-SVT得分显著提高,10周后改善效果仍

然显著($P < 0.001$)；而低强度-低认知组的训练效果并不随着训练时间的变化而显著改变。对比中高强度-高认知组与低强度-高认知组发现,进行一次训练时,仅有高水平认知参与并不能产生显著促进作用,在中高强度运动参与下才能发挥体感游戏对空间可视化能力的显著促进作用;但随着训练周期的延长,中高强度-高认知组所产生的效应量最大,其次是低强度-高认知组,最后是高强度-低认知组。由此可知,在进行一次性体感游戏训练时,空间可视化主要受运动强度的影响,但当进行长期训练时,空间可视化受到运动强度和认知参与的共同影响(图4)。

在空间关系方面,如图5、6所示,中高强度-高认知组在5周后 MRT-ACC ($P < 0.001$) 和 MRT-RT ($P < 0.001$) 均显著改善,10周训练效果依然显著 ($P < 0.001$)；低强度-高认知组在5周后仅 MRT-RT 显著加快 ($P < 0.01$),10周 MRT-ACC 才出现显著提高 ($P < 0.001$)；而中高强度-低认知组在5周后仅 MRT-ACC 显著提高 ($P < 0.01$),10周训练效果仍然显著 ($P < 0.05$),但 MRT-RT 始终无显著变化；低强度-低

认知组训练效果始终不显著。综合来看,长期体感游戏训练能使被试在心理旋转任务中表现得更准确,而不是更快。

2.3 不同训练周期下空间认知功能的性别差异

在空间可视化方面,仅中高强度-高认知组在训练5周后性别差异出现短暂消失,但随着训练周期的延长,差异再次显现;其余训练组始终未能消除性别差异(图4)。在空间关系方面,4组训练均未消除 MRT-ACC 和 MRT-RT 的性别差异(图5、6)。

3 讨论

本研究探究了在运动强度和认知参与共同作用下,体感游戏训练对空间认知功能的改善情况,研究结果表明: 1) 一次性体感游戏训练对空间认知的即时性效应并不突出,仅在空间可视化方面存在积极改善,且效应量较小。 2) 在采用体感游戏进行训练时,运动强度和认知参与程度的不同会影响空间认知功能的改善效果。 3) 体感游戏训练并未消除空间认知功能的性别差异。

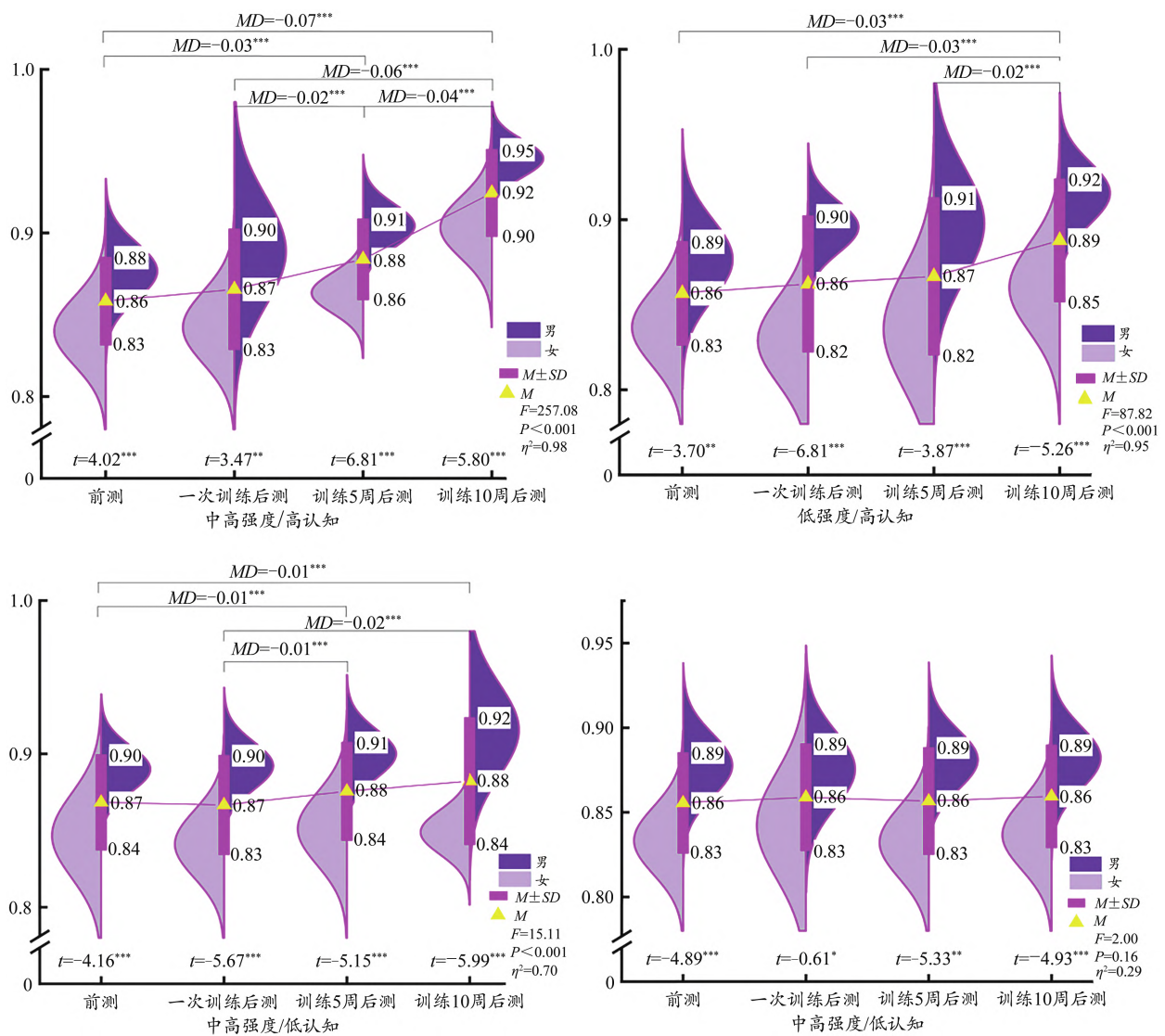


图5 不同训练周期下空间关系能力准确率的变化及差异分析

Figure 5. Changes and Differences of Accuracy of Spatial Relation in Different Training Cycle

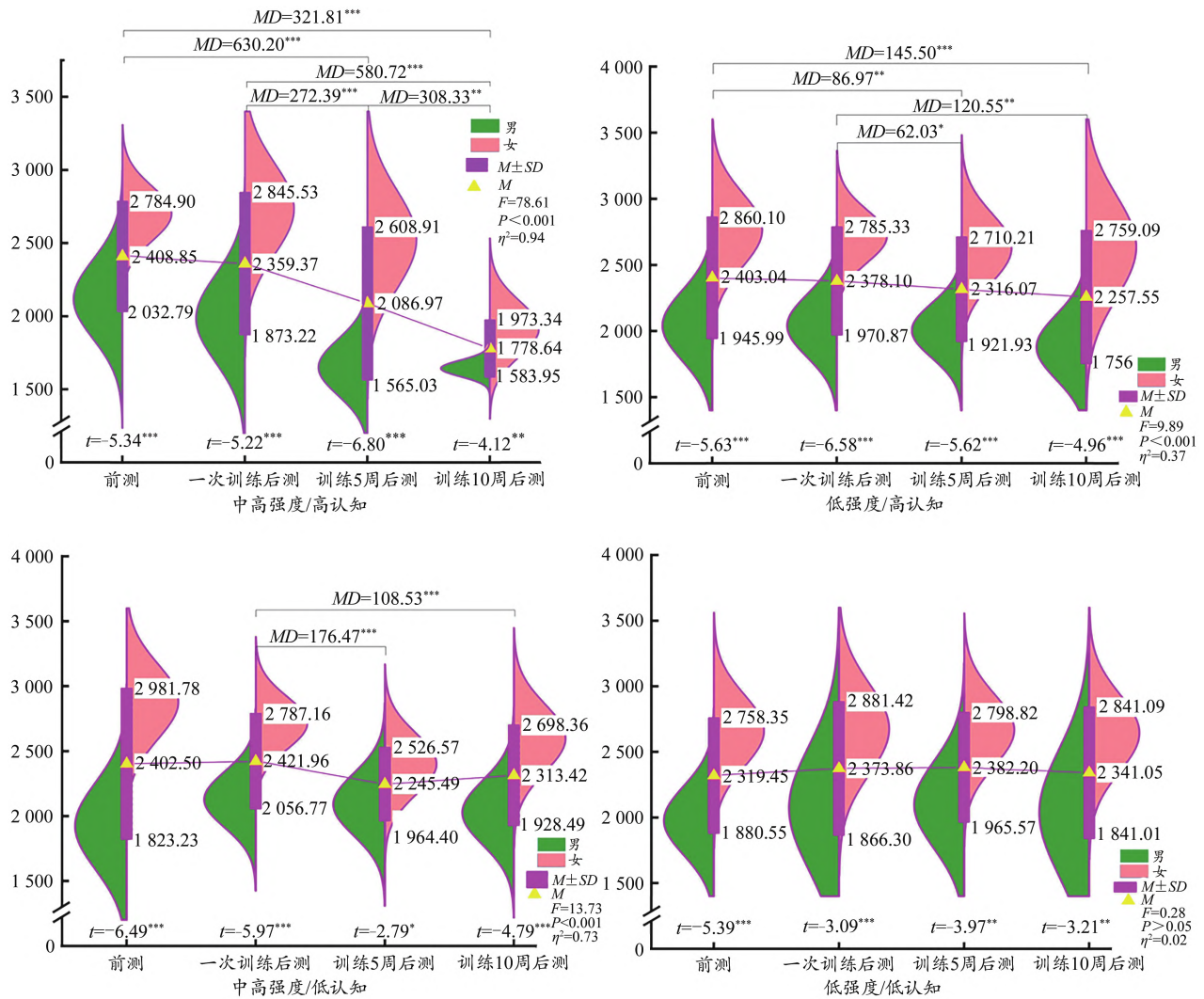


图6 不同训练周期下空间关系能力反应时的变化及差异分析

Figure 6. Changes and Differences of Reaction Time of Spatial Relation in Different Training Cycle

3.1 运动强度在一次性体感游戏训练效果中的作用

一次性体感游戏训练后,仅中高强度-高认知组的空间可视化功能发生了改善,尽管效应量很低,但依然达到了显著性水平;而低强度-高认知组的空间可视化功能并无显著变化。在实验干预周期较短的情况下,尽管施加了一定程度的认知负荷,空间认知功能的改善状况依旧微弱,而在结合了一定强度的体育运动后,空间认知功能才发生显著改善。可见在短时间内真正能发挥促进作用的因素是运动强度,这也在某种程度上解释了一定强度的身体运动对空间认知功能发展的重要性。

在一次性的体感游戏训练过程中,尽管玩家在实验开始前对游戏规则、操作方法等有一定的了解,并以此为提前形成了一套较为模糊的认知体系,但仍然需要在实际操作中不断调整并完善这一空间认知体系。这一融合过程并非一蹴而就,而是需要在一次次的游戏体验中不断优化,整个过程自然伴随着对空间认知功能的锻炼。但一次性体感游戏训练并不能提供足够的游戏体验来加速这一过程。相反,已有研究结果表明一次性的MVPA能

够提高生理唤醒水平,具体反映在神经递质[如乙酰胆碱(周跃辉等,2018)、谷氨酸(郭新明等,2021)和γ-氨基丁酸(胡琰茹等,2022)]、儿茶酚胺[如去甲肾上腺素(朱欢等,2018)、肾上腺素(高炳宏等,2021)、多巴胺和血清素(黄浩浩等,2020)]等在浓度上的变化。由于激素和神经递质在认知功能的正常运作中发挥着重要作用,并对人类行为产生重大影响,这种变化为空间认知功能的改善提供了生理基础(Aliyari et al., 2018; Drigas et al., 2020, 2021),尽管改善效果的维持时间较为短暂,但就某种程度而言依旧有效。

此外,本研究还发现一次性中高强度-高认知体感游戏训练后,MRT-ACC和MRT-RT的变化并不显著,这与已有结果一致(Anderson-Hanley et al., 2012; Huang, 2020; Sañudo et al., 2020)。分析认为,一次性训练所产生的空间认知效应在简单的空间认知测试任务上有显著作用,但是对于更高级别的空间认知功能而言,复杂且稳定的神经网络结构是确保空间认知功能正常发挥的基础,而一次性体感游戏训练的“剂量”并不足以引起神经网络

结构发生显著的变化。整个心理旋转过程涉及3个阶段:第1阶段,对旋转对象各部分间的空间关系进行信息编码;第2阶段,对已编码的物体图像在空间画板中进行心理旋转;第3阶段,将经过心理旋转的物体与参照物进行对比。整个过程相对复杂。一次性的体感游戏训练所能传达的信息很难同时促进3个阶段的加工过程,这也可能是造成被试心理旋转测试表现未发生显著改善的原因。

最后,已有研究详细探讨了实验后测试的延迟检测效应对实验结果的影响,认为在高强度运动后认知效益会延迟出现,本研究根据Brush等(2016)的建议,在训练结束后15 min进行相关测量。这虽然避免了测试时间点对MVPA效果的干扰,但却可能对低强度-低认知组和低强度-高认知组的测量产生消极影响。已有研究表明,当运动强度非常低时,最佳的测量时间点应该是在运动后即刻进行,以避免认知效益退散(Chang et al., 2012)。这也可能是造成本研究中低强度组在一次性锻炼后空间认知结果的改善效果未达到显著性水平的原因,后续研究可在实验设计层面对此问题加以关注。

3.2 运动强度和认知参与在长期训练效果中的作用

体感游戏作为一种新兴的锻炼形式,通过认知参与和运动强度的交互作用,引导大脑发生神经可塑性变化,进而增强参与者的认知功能。然而,这一过程并不符合线性发展规律,而是在运动强度和认知参与共同作用下,形成一种非线性但逐步递进的发展模式。从本研究结果来看,除了低强度-低认知组外,其余所有训练组的空间认知功能变化都符合这一规律。其中,中高强度-高认知组的效应量最大,其次是低强度-高认知组,最后是高强度-低认知组。这也与现有研究结论(Anderson-Hanley et al., 2012)相符,即当体育锻炼任务对空间认知功能有着较高的要求时,其所产生的认知益处超出了传统体育运动和认知训练本身的价值。此外,对比本次研究的另外3组结果发现,低强度-高认知组的空间认知效应显著大于中高强度-低认知组,也就是说,尽管运动强度与认知共同发挥作用,但认知参与所产生的空间认知促进效应大于运动强度。

分析认为,中高强度-高认知的体感游戏训练之所以能产生更高的空间认知促进效应,是因为两种训练效果存在叠加和相互促进的过程。以中高强度身体活动为例,已有研究表明,有氧运动提高了大脑血流量和脑氧结合水平,影响了大脑回路中神经递质分泌(包括多巴胺、去甲肾上腺素、血清素、促肾上腺皮质激素和皮质醇),从而为空间认知功能的改善奠定了物质基础(McMorris, 2016)。然而,神经递质分泌增加仅仅是暂时的,一旦运动停止,神经递质浓度便逐渐消退,空间认知功能改善所赖以发生的物质基础也不复存在。例如,儿茶酚胺在外周系统

中存在的半衰期仅为3 min,而在脑内的半衰期为8~12 h,酪氨酸羟化酶的半衰期为13~15 h(McMorris, 2016)。由此可见,虽然体育运动的作用效果显著,但在实践中不可能为了使神经递质浓度保持在理想范围内而持续运动,因此,在无后续强化的情况下,已经提高的空间认知功能会逐渐降低。就本研究而言,中高强度-高认知组的身体活动始终伴随着认知参与的过程,在身体运动后产生的神经物质的基础上,进行一系列的空间认知操作,逐渐将在游戏中习得的空间信息感知经验、肢体在空间中的运动经验应用于空间认知操作,最终使空间认知技能内化为空间认知功能并永久固定下来。

此外,由于简单的游戏任务容易引发倦怠情绪,被试在实验后期可能会因游戏任务缺乏挑战性而降低注意力水平。而中高强度-高认知的体感游戏伴随着更高的任务难度和挑战性,因而要求被试在参与过程中始终保持较高的注意力水平以捕捉空间信息,运用更多的空间认知策略完成游戏任务。这也在某种程度上锻炼了被试的视觉对比敏感度、空间分辨率和多目标追踪的能力。

3.3 体感游戏训练效果的性别差异分析

由本研究结果可知,仅中高强度-高认知组在训练5周后MAT-SVT的性别差异出现短暂的消除,但随着训练周期的增加,性别差异再次出现。此外,研究还发现在实验起始阶段,男性被试在空间可视化方面的改善情况表现出更高的即时性,但随着时间的推移开始趋于稳定;相反,女性被试表现出较为缓慢的空间认知变化趋势,仅在训练后期才发生显著改善。可见体感游戏训练只能在一定范围内缩小性别差异,且可能无法完全消除性别差异,这也支持了Uttal等(2013)关于空间认知功能性别差异的观点。Miller等(2013)同样认为,即使是8个月的空间认知训练也无法消除空间认知功能在性别上的差异,完成这一目标可能需要在未来的几年内持续地给予被试丰富的空间信息刺激。可见空间认知的性别差异难以在短时间的外在刺激下出现显著变化。

基于生物学的观点认为,3~8月幼儿在玩具偏好方面存在性别差异,且这种差异与心理旋转能力相关,男孩在玩具选择时偏好于有移动部件的物体,表现出“系统化”特征,而女孩则表现出“移情”特征(Bartlett et al., 2023),这种偏好上的差异可能导致其在面对相同游戏训练时出现不同的反应。此外,就大脑结构和功能而言,顶叶结构的差异是导致男女在心理旋转能力上存在差异的主要因素,主要表现在女性的顶叶脑容量及表面积小于男性,且位于顶叶的脑激活模式也与男性不同。具体而言,女性主要采用口头分析策略,其激活模式反映了自上而下的视觉信息处理方式,需要更多的认知资源投入,而男性主要采用视觉运动策略,其激活模式反映了自下而上的处理,需要投入的认知资源较少(Bartlett et al., 2023)。

4 结论

本研究得出以下结论:1)一次性体感游戏训练后,空间认知功能主要受运动强度影响;2)长期体感游戏训练后,空间认知功能同时受到运动强度和认知参与的影响,且认知参与所产生的空间认知效应大于运动强度;3)体感游戏训练不能消除空间认知功能的性别差异。

未来研究可围绕以下问题进一步探析:1)延迟检测效应对测量结果的影响,尤其考察不同运动强度和延迟检测效应的交互作用,为选择训练效果的最佳测量时间节点提供参照。2)电子游戏分为第一人称视角、第三人称视角和俯视视角,不同游戏视角的信息加工方式存在差异,体感游戏训练对空间认知功能的改善效应是否会受到游戏呈现视角的影响也是值得后续探究的问题。

参考文献:

冯甜,李亚伟,张忠秋,2021.跳水运动员心理旋转的时间具身效应及脑加工时程特征[J].北京体育大学学报,44(2):105-115.

高炳宏,赵永才,冯连世,2021.低氧抗阻训练诱发身体生理应激及力量适应的研究进展[J].体育科学,41(12):69-79.

郭新明,吴丽君,孙卓,等,2021.疲劳运动大鼠骨骼肌代谢组学研究[J].天津体育学院学报,36(3):354-359.

胡琰茹,侯莉娟,王大磊,等,2022.一次力竭运动过程中大鼠丘脑腹外侧核神经元电活动及NR2B、GABA α -1蛋白表达变化的研究[J].中国康复医学杂志,37(3):296-302.

黄浩浩,史冀龙,侯莉娟,等,2020.脑内5-HT能和DA能系统在运动疲劳调控作用中的研究进展[J].武汉体育学院学报,54(2):87-92.

柯金宏,汪波,2022.有氧运动对记忆的影响及其神经生物学机制[J].心理科学进展,30(1):115-128.

刘芳芳,左彭湘,唐淑婷,等,2021.发展性阅读障碍儿童视觉注意广度及动作视频游戏干预效果研究[J].中国学校卫生,42(11):1665-1669.

宋杨,唐思洁,绿红,2021.心理旋转能力对定向运动选手识图效率的影响研究[J].体育学刊,28(4):125-130.

王慈,姜正丹,孙麟惠,等,2016.体感游戏训练对生物运动工作记忆容量的影响[J].应用心理学,22(3):211-217.

王进礼,龚耀先,2004.多项能力倾向测验的初步编制[J].中国临床心理学杂志,12(2):116-120.

项明强,胡耿丹,2010.动作电子游戏在视觉注意技能训练中的应用[J].中国临床心理学杂志,18(3):390-392.

张豹,刘树辉,缪素媚,等,2019.动作电子游戏经验对视觉注意的积极影响[J].中国临床心理学杂志,27(6):1283-1286.

张亚茹,文世林,张雪冬,等,2022.孤独症谱系障碍儿童动作协调能力与运动区皮质静息功能连接的特征分析[J].首都体育学院学报,34(2):170-179.

张业安,商晨迪,陈炳序,等,2022.电竞与电子游戏行为影响儿童青少年视力健康的国内外研究综述[J].中国体育科技,58(6):10-16.

赵梅玲,2020.两种训练干预方案对学龄前儿童体质与不同认知任务的影响[J].北京体育大学学报,43(5):89-97.

周跃辉,周成林,2018.运动对尼古丁戒断大鼠学习与记忆能力的影响及机制[J].中国运动医学杂志,37(3):224-232.

朱欢,李国政,高炳宏,2018.6周高原训练对优秀男子赛艇运动员外周儿儿茶酚胺水平的影响[J].中国应用生理学杂志,34(4):333-335.

朱瑜,许翀,王一黔,等,2011.不同认知负荷场景中定向运动员视觉注意策略研究[J].中国体育科技,47(6):82-89.

ALIYARI H, SAHRAEI H, DALIRI M R, et al., 2018. The beneficial or harmful effects of computer game stress on cognitive functions of players[J]. Basic Clin Neurosci, 9(3): 177-186.

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.

ATIT K, UTTAL D H, STIEFF M, 2020. Situating space: Using a discipline-focused lens to examine spatial thinking skills[J]. Cogn Res Princ Implic, 5(1): 19.

BARTLETT K A, CAMBA J D, 2023. Gender differences in spatial ability: A critical review[J/OL]. Educ Psychol Rev, 35:8[2023-08-20]. <https://doi.org/10.1007/s10648-023-09728-2>.

BRUSH C J, OLSON R L, EHMANN P J, et al., 2016. Dose-response and time course effects of acute resistance exercise on executive function[J]. J Sport Exerc Psychol, 38(4): 396-408.

CHANG Y K, LABBAN J D, GAPIN J I, et al., 2012. The effects of acute exercise on cognitive performance: A Meta-analysis[J]. Brain Res, 1453: 87-101.

CHOPIN A, BEDIUO B, BAVELIER D, 2019. Altering perception: The case of action video gaming[J]. Curr Opin Psychol, 29: 168-173.

DRIGAS A, MITSEA E, 2020. The 8 pillars of metacognition[J]. Int J Emerg Technol Learn, 15: 162-178.

DRIGAS A, MITSEA E, 2021. Metacognition, stress: Relaxation balance & related hormones[J]. Int J Recent Contributions Eng Sci IT, 9(1): 4-16.

DUNSKY A, 2019. The effect of balance and coordination exercises on quality of life in older adults: A mini-review[J/OL]. Front Aging Neurosci, 11:318[2023-08-20]. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2019.00318>.

GAN X Y, YAO Y T, LIU H, et al., 2020. Action real-time strategy gaming experience related to increased attentional resources: An attentional blink study[J/OL]. Front Hum Neurosci, 14: 101 [2023-08-20]. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00101>.

GRIKSIENE R, ARNATKEVICIUTE A, MONCIUNSKAITE R, et al., 2019. Mental rotation of sequentially presented 3D figures: Sex and sex hormones related differences in behavioural and ERP measures[J/OL]. Sci Rep, 9: 18843 [2022-12-21]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55433-y>.

HITZER E, LAVOR C, HILDENBRAND D, 2022. Current survey of clifford geometric algebra applications[J/OL]. Math Method Appl Sci[2023-08-20]. <https://doi.org/10.1002/mma.8316>.

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.

KALTNER D V P J, 2017. Mental rotation with egocentric and object-based transformations[J]. Q J Exp Psychol, 70(11): 2319-2330.

KHINE M S, 2017. Spatial cognition: Key to STEM success [M]// KHINE M S. Visual-spatial Ability in STEM Education: Transforming Research into Practice. Cham: Springer International Publishing:

- 3-8.
- MARTÍN G J, GONZÁLEZ M M A, 2017. Ranking and predicting results for different training activities to develop spatial abilities[M]// KHINE M S. Visual-spatial Ability in STEM Education: Transforming Research into Practice. Cham: Springer International Publishing: 225-239.
- MCMORRIS T, 2016. Exercise: Cognition Interaction[M]. San Diego, US: Elsevier Academic Press: 167-186, 459-481.
- MERCHANT Z, GOETZ E T, KEENEY-KENNICUTT W, et al., 2013. Exploring 3-D virtual reality technology for spatial ability and chemistry achievement[J]. J Comput Assist Lear, 29(6): 579-590.
- MILLER D I, HALPERN D F, 2013. Can spatial training improve long-term outcomes for gifted STEM undergraduates?[J]. Learn Individ Differ, 26: 141-152.
- NEWCORRIBE N, 2018. How big is many? Development of spatial and numerical magnitude understanding[M]// HENIK A, FIAS W. Heterogeneity of Function in Numerical Cognition. New York: Academic Press: 157-176.
- SAÑUDO B, ABDI E, BERNARDO-FILHO M, et al., 2020. Aerobic exercise with superimposed virtual reality improves cognitive flexibility and selective attention in young males[J/OL]. Appl Sci, 10(22): 8029 [2023-08-19]. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/8029>.
- TOMAI E, KOKLA M, CHARCHAROS C, et al., 2023. Exploring the relation between spatial abilities and STEM expertise[D]. Athens, Greece: National Technical University of Athens.
- UTTAL D H, MEADOW N G, TIPTON E, et al., 2013. The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies[J]. Psychol Bull, 139(2): 352-402.
- WARIS O, JAEGGI S M, SEITZ A R, et al., 2019. Video gaming and working memory: A large-scale cross-sectional correlative study[J]. Comput Human Behav, 97: 94-103.
- WU X, JIANG Y, JIANG Y P, et al., 2021. The influence of action video games on attentional functions across visual and auditory modalities[J/OL]. Front Psychol, 12: 611778 [2023-08-20]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.611778>.

The Effect of Exercise Intensity and Cognitive Involvement in Exergame on College Students' Spatial Cognition

YANG Bo^{1,2}

1. College of Physical Education and Health, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. XianDa College of Economics and Humanities, Shanghai International Studies University, Shanghai 200083, China

Abstract: Objective: To Investigate the mechanism of exergame training on spatial cognition in college students. Methods: A mixed experimental design of 2 (intensity: low/moderate-vigorous) × 2 (load: low/high) × 4 (time: pretest, single training, 5 weeks, 10 weeks) was used in this study, and 72 students were trained for 10 weeks (3 times/week; 60 minutes/time) through exergame. Results: 1) After single training, spatial visualization of the moderate-vigorous + high cognitive group was significantly improved; 2) as the training period extends, the advantages of the moderate-vigorous intensity + high cognitive training group were further expanded, and the low intensity + high cognitive training group was also better than that of the low cognitive group; 3) after 5 weeks training, only the moderate-vigorous intensity + high cognitive group eliminated the gender difference in spatial visualization, but the difference was observed again with the increase of training time. Conclusions: 1) Spatial cognition function is mainly affected by exercise intensity during single exergame training; 2) in long-term training, spatial cognition function is influenced by both exercise intensity and cognition involvement level, and the spatial cognition effect induced by cognition involvement is greater than that of exercise intensity; 3) exergame training can only reduce the gender difference in spatial cognition function, but cannot eliminate it.

Keywords: exergame; spatial cognition; exercise intensity; cognition involvement