



身体锻炼联合多感官刺激对心理健康影响的系统综述

A Systematic Review of the Effects of Physical Exercise Combined with Multi-sensory Stimulation on Mental Health

黄煜州, 何晓龙*, 尤敏莎, 高景川

HUANG Yuzhou, HE Xiaolong*, YOU Minsha, GAO Jingchuan

摘要:目的:探讨身体锻炼联合多感官刺激对心理健康的影响。方法:在知网、万方、PubMed、Web of Science、Scopus 5 个电子数据库进行系统检索,筛选后纳入 11 项研究,使用 Cochrane 偏倚风险工具 2.0 进行相关研究的方法学质量评价,采用半定量的系统综述总结归纳相关文章。结果:身体锻炼联合多感官刺激能显著抑制消极情绪和促进注意力恢复,并在一定程度上改善积极情绪和心脏自主神经功能。结论:多感官刺激能产生“多感官整合”,与单一感官刺激相比,身体锻炼联合多感官刺激能促进心理健康效益。建议未来研究优化多感官刺激的核心技术,采用神经影像技术深入探讨潜在机制,增加高质量随机对照实验,并进一步探索锻炼强度、不同刺激方式、个体差异等因素的作用。

关键词: 身体锻炼;多感官;心理健康;刺激

Abstract: Objective: To explore the effects of physical exercise combined with multi-sensory stimulation on mental health. Method: Five electronic databases, namely CNKI, Wanfang, PubMed, Web of Science, and Scopus were systematically retrieved. Eleven studies were included after screening. The methodological quality of relevant studies was evaluated using the Cochrane Bias Risk Tool 2.0, and a semi-quantitative systematic review was adopted to summarize and generalize the related articles. Results: Physical exercise combined with multi-sensory stimulation can significantly inhibit negative emotions, enhance attention recovery, and improve positive emotions and cardiac autonomic nerve function to a certain extent. Conclusions: Multi-sensory stimulation can generate “multi-sensory integration”. Compared with single sensory stimulation, combined with multi-sensory stimulation can promote mental health benefits during physical exercise. It is suggested that future studies should optimize the core technologies of multi-sensory stimulation, adopt neuroimaging technology to further explore the potential mechanisms, increase high-quality randomized controlled trials, and further explore the effects of other factors such as exercise intensity, various stimulation methods, and individual differences.

Keywords: *physical exercise; multi-sensory; mental health; stimulation*

中图分类号:G804.8 **文献标识码:**A

基金项目:

国家社会科学基金后期资助项目
(23FTYB007)

第一作者简介:

黄煜州(2000-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为建成环境对居民身体活动与健康影响, E-mail:2394748750@qq.com。

*通信作者简介:

何晓龙(1987-),男,副教授,博士,主要研究方向为建成环境对居民身体活动与健康影响、绿色锻炼的健康效益等, E-mail:hexiaolong198707@163.com。

作者单位:

浙江师范大学,浙江 金华 321004
Zhejiang Normal University, Jinhua
321004, China.

在快速变化的社会环境中,科技的高速发展和社会节奏的加快对个体的心理健康状况构成了挑战(Bo et al., 2017)。据统计数据显示,我国有 39.86% 的老年人患有抑郁症(Yu et al., 2012),约 3 000 万青少年存在情感障碍与行为问题(陆林,2019)。处在老年与青少年之间的中青年更是承担着职场、家庭等多重精神压力(王记文等,2022)。不良的心理健康状况极大损害了个体的工作、学习、生活质量。因此,改善个体的心理健康状况和预防心理健康问题的发生已成为全球性的关注焦点。

身体锻炼是指以增进身体健康为目的,以身体运动为内容和手段,有计划、有组织、重复进行的,具有一定强度、频率和持续时间的身體活动(李京诚,2009),被广泛认为是

改善心理健康的非药物干预手段。一项荟萃分析发现, 身体锻炼可以减少焦虑和抑郁的发生, 对患有焦虑和抑郁的患者产生一定的治疗效果(Wegner et al., 2014)。同时, 身体锻炼能够促进青少年时期脑结构基础的完善, 有助于青少年的认知发展, 并且是改善老年人认知能力, 延缓大脑衰老的有效手段(何晓龙, 2020; Erickson et al., 2015)。近年来, 越来越多的研究者开始探索身体锻炼与多感官刺激相结合的干预模式, 以期获得更好的心理健康效益(Franco et al., 2017)。在进行身体活动时, 个体不断地、主动地从环境中接收、检测和利用各种类型的信息, 如嗅觉、听觉和视觉信息(Davids et al., 2016), 通过调动多种感官的参与, 增强锻炼对心理健康的积极影响(Briones, 2006; Li et al., 2021b)。此外, 感官系统之间并非孤立工作, 而是通过“多感官整合”机制相互作用, 大脑通过该机制协调和整合来自不同感官通道的信息(张莹莹等, 2017), 从而提高身体锻炼联合多感官刺激的心理健康效益。

多感官刺激会影响身体锻炼过程中的心理健康效益。因此, 梳理身体锻炼联合多感官刺激的核心机制和相关影响因素尤为重要。国外已有研究表明, 身体锻炼联合多感官刺激能够产生积极的心理健康效益(Jones et al., 2023b; Wang, 2023)。然而, 鉴于现有研究仅纳入情绪指标和视听刺激, 相关证据不足以证明身体锻炼联合视觉、听觉和嗅觉刺激的心理健康效益。国内关于身体锻炼联合多感官刺激对心理健康影响的研究尚待系统开展, 已有研究多聚焦于单一感官刺激。此外, 心理健康是指在身体、智能以及情感上与他人的心理健康不相矛盾的范围内, 将个人心境发展成最佳的状态(董惠娟等, 2015)。心理健康作为核心结果指标, 涵盖了情绪、压力和认知能力等多个维度(高景川等, 2023; Nukarinen et al., 2022)。因此, 本研究广泛检索身体锻炼联合视觉、听觉和嗅觉刺激改善心理健康的实证研究文献并进行系统整理和归纳, 并利用半定量分析方法对当前实证研究结果进行系统评价。

1 研究方法

1.1 检索策略

依据 PRISMA 声明, 对知网、万方、PubMed、Web of Science、Scopus 等 5 个电子数据库进行全面检索, 检索时间从各数据库建立起始至 2024 年 8 月止。检索主题词基于以下 3 个部分: 1) 感官刺激(sensory stimulation)包括“视觉”“嗅觉”“听觉”“视听”“多感官刺激”“visual”“olfactory”“auditory”“audiovisual”“multi-sensory stimulation”等; 2) 身体锻炼(physical exercise), 包括“绿色锻炼”“有氧运动”“身体活动”“锻炼”“green exercise”“aerobic exercise”“physical activity”“exercise”等; 3) 心理健康(mental health), 包括“情绪”“压力”“认知能力”“emo-

tions”“stress”“cognitive abilities”等。

检索仅限于在学术期刊以中、英文发表的对照实验文献。此外, 研究人员采用“滚雪球”法和参考文献纳入法检查相关系统评价、荟萃分析和参考文献列表, 对符合标准的文献进行补充检索。所有符合标准的文献均由 2 位研究人员审查摘要和标题, 然后根据预定的纳入标准进行全文筛选。任何分歧都通过研究人员讨论解决, 必要时需要第三位研究人员参与。

1.2 文献纳入和排除标准

文献纳入标准: 1) 身体锻炼联合以自然环境为主题的视觉、听觉或嗅觉多感官刺激; 2) 结果指标为情绪、压力和认知能力等心理健康相关指标; 3) 中英文学术期刊发表的对照实验研究论文。

文献排除标准: 1) 单一感官刺激、使用游戏作为干预措施; 2) 无法获取全文的文献和会议摘要。

1.3 文献筛选与数据提取

根据 PRISMA 声明进行文献筛选。1) 剔除重复文献: 将所有检索到的文献条目导入 Endnote 20 软件中, 剔除重复文献; 2) 初筛: 2 名研究人员根据文献标题与摘要, 剔除不相关文献; 3) 复筛: 2 名研究人员阅读全文, 剔除不符合标准的文献; 4) 纳入: 汇总从数据库以及其他途径获取的文献, 纳入符合标准的文献。

由 2 名研究人员使用 Excel 2010 独立提取所有数据。提取内容包括文章标题、第一作者、出版年份、研究对象及基本情况、样本量、研究设计及分组、运动强度及持续时间以及心理健康相关的结局指标。

1.4 文献质量评价

2 名研究员使用 Cochrane 偏倚风险工具(平行设计 RoB 2.0 与交叉设计 RoB 2.0)对纳入研究的质量进行独立评估。评估标准包括随机化过程、阶段和滞后效应引起的偏倚(随机交叉实验)、偏离既定干预措施的偏倚、结局数据缺失的偏倚、结局测量的偏倚、选择性报告结果的偏倚和总体风险。对每个项目的研究质量进行评估, 并将其分为低风险、中等风险和高风险。如果 2 名研究员评估结果出现分歧, 则由第三名研究员进行判断。

1.5 研究结果编码分类

根据身体锻炼联合多感官刺激对心理健康影响的结果进行编码分类。根据研究结果的影响方向进行分类, 依次为: “+”指研究报告结果变量在组间或/和组内有正向的显著差异; “-”指研究报告结果变量在组间或/和组内有负向的显著差异; “n.s.”指无统计学差异。通过支持结果的文献占比进行证据强度的分类, 依次为: “0”指 0~33% 的文献支持结果, 表示证据强度弱; “?”指 34%~59% 的文献支持结果, 表示证据强度不明确; “+/-”指 60%~100% 的文献支持结果, 表示证据强度强。支持结果的文献 > 3 篇时, 编码表现为“00”“??”“+/-”。

2 结果

2.1 文献检索结果

在5个数据库中检索得到5 369条记录,另外2条记录从检索所得研究的参考文献列表中确定,其中Web of Science共2 827条记录、Scopus共1 299条记录、PubMed共922条记录、中国知网共25条记录、万方共296条记录。随后,剔除重复的1 263条记录,对剩余4 108条记录的标题和摘要进行筛选,排除了4 049条不符合标准的记录。在此之后,对59项研究进行全文复评。根据预先确定的排除标准,排除了48项研究。最终,共纳入11项对照实验研究(图1)。

2.2 文献质量评价

根据Li等(2021a)的评估方法,大部分研究为低风险和中等风险。共有7项研究遵循可接受的随机化程序,4项研究未报告随机化程序,但采用了平衡顺序。仅有2项研究对随机序列和分配隐藏进行了说明(Litleskare et al., 2022; Wooller et al., 2018)。所有研究在偏离既定干预措施的偏倚、结局数据缺失的偏倚、结局测量的偏倚、选择性报告结果的偏倚4个领域均遵循可接受的设计。1项研究未报告消除阶段效应与滞留效应的具体方法,且存在滞留效应的可能(Li et al., 2021a),其余研究均报告了消除阶段效应与滞留效应的方法(表1)。

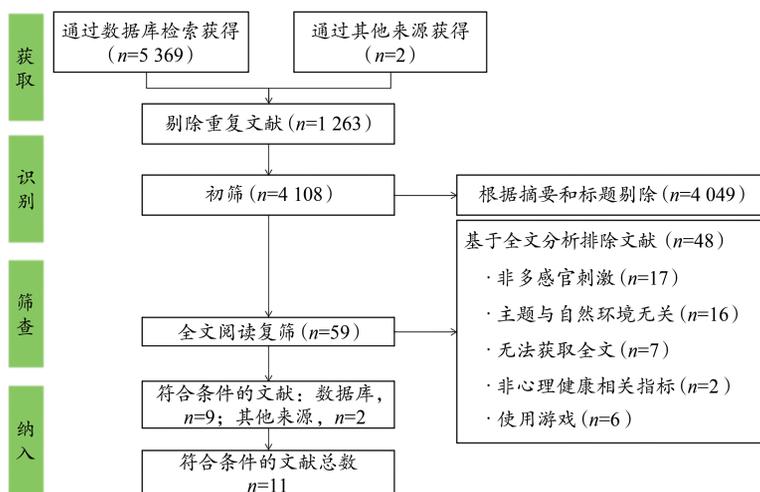


图1 文献检索流程

Figure 1. Flow Chart of Literature Retrieval

表1 RoB 2.0文献质量评价表

Table 1 RoB 2.0 Literature Quality Evaluation Table

研究文献	随机化过程	阶段效应和滞后效应引起的偏倚(交叉实验)	偏离既定干预措施的偏倚	结局数据缺失的偏倚	结局测量的偏倚	选择性报告结果的偏倚	总体
Alkahtani et al., 2019	!	!	+	+	!	!	!
Calogiuri et al., 2018	!	+	+	+	+	+	!
Chan et al., 2023	!	+	+	+	!	+	!
Jones et al., 2014	!	!	+	+	!	+	!
Jones et al., 2023a	!	!	+	+	+	!	!
Léger et al., 2022	!	+	+	+	+	+	!
Litleskare et al., 2022	+	0	+	+	+	+	+
Li et al., 2021a	!	-	+	+	+	!	-
Mavrantza et al., 2023	!	+	+	+	!	+	!
Wooller et al., 2015	!	0	+	+	+	+	!
Wooller et al., 2018	+	0	+	+	+	+	+

注: ! 表示中等风险; + 表示低风险; 0 表示非交叉试验不予评价; - 表示高风险。

2.3 文献的基本特征

本研究共纳入了2014—2023年的11项研究。6项研究来自欧洲(55%),包括英国4项和挪威2项;3项研究来自亚洲(27%),包括中国1项、新加坡1项和沙特阿拉伯1项;2项研究来自北美洲(18%),包括美国1项和加拿大

1项。在研究类型方面,大部分研究采用了随机交叉实验(73%),其他采用了随机对照实验。在研究对象方面,多数研究对象为30岁以下的年轻人,仅1项研究既包含30岁以下年轻人又包括70岁以上老年人;纳入研究的样本总量为414人,男性占有所有研究对象的54%,样本规模50人

及以上的研究仅 3 项。在结局指标方面, 10 项研究报告了心理健康指标, 其中所有研究均报告了情绪量表得分, 3 项研究报告了心率变异性(30%)、2 项研究报告了神经影像技术(20%)和 2 项研究报告了压力指标(20%), 4 项研究报告了认知能力, 大部分研究采用注意力量表(75%), 1 项研究采用记忆力与执行能力指标(表 2)。

表 2 身体锻炼联合多感官刺激对心理健康的影响

Table 2 The Effects of Physical Exercise Combined with Multi-sensory Stimulation on Mental Health

研究文献	研究设计	研究对象 n/男 性 n	年龄/岁	结果指标/ 测试工具	分组	运动方式/强度/ 时间	刺激方式/ 一致性	结果
Alkahtani et al., 2019	RCD	23/23	20.5±1.2	情绪:SEES	对照组、VR 组	骑行/90% $\dot{V}O_{2peak}$ / 20 min	VR/不一致	SEES n.s.
Calogiuri et al., 2018	RCD	26/14	26±8	情绪:PAAS、 ENJOYMENT	户外运动组、IVE 组、IVE 运动组	步行/自选速度/ 10 min	360°视频/ 一致	ENJOYMENT -; PAAS(积极) +; PAAS(消极) -;
Chan et al., 2023	RCD	研究 1: 30/9 研究 2: 20/2	研究 1: 20.0±1.5 研究 2: 72.0±8.8	研究 1:情绪: PANAS、RMSSD 研究 2:情绪: 积极情绪压力	虚拟自然组、虚 拟城市组	步行/5 min 步行/3 min	VR/一致	研究 1: PANAS(积极) n.s.; PANAS(消极) -; RMSSD n.s. 研究 2: 积极情绪 +; 压力 n.s.
Jones et al., 2014	RCD	38/19	21.1±1.9	情绪:FS、FAS 认知能力(注意力): 单项目注意力量表 (single-item attention scale)	音乐组、视频组、 音乐视频组、控 制组	骑行/低于 VT10%; 高于 VT5%/10 min	投影机;壁 挂式立体声 系统/不一致	FS +; FAS +; ATTENTION +
Jones et al., 2023a	RCD	12/8	26.2±7.7	情绪:FS、fNIRS 认知能力(注意力): 单项目注意力量表	对照组、VR 组、 360°视频组	骑行/VR: 73.38%HR _{max} ; 360°:79.73%HR _{max} / 20 min	360°;VR/ 一致	FS +; ATTENTION +; ΔHbDiff +
Léger et al., 2022	RCD	78/35	20~25	认知能力(执行能力): TMT 认知能力(记忆 力):数字广度测试 (digit span test)	户外散步组、虚 拟现实散步组	步行/跑步机速度 5 km·h ⁻¹ /5 min	VR/一致	TMT n.s.; 数字广度测试 +
Li et al., 2021a	RCD	18/18	27.9±6.1	情绪:FS、HRV	对照组、自然视 频组	靠墙深蹲/2 min	显示器/一 致	FS +; RMSSD +
Litleskare et al., 2022	RCT	60/32	29.9±12.4	情绪:PAAS、 ENJOYMENT	3D 组、360°视频 组、对照组	跑步/自选速度/ 10 min	360°、3D/ 一致	PAAS(积极) +; PAAS(消极) +; ENJOYMENT +
Mavrantza et al., 2023	RCD	30/13	24.2±4.2	情绪:FS、FAS、SMS、 EEG、HRV 认知能力(注意力): 单项目注意力量表	对照组、绿色锻 炼组、虚拟绿色 锻炼组	步行/自选速度/ 6 min	iPad/一致	ATTENTION +; FS n.s.; FAS n.s.; θ 波 n.s.; RMSSD +
Wooller et al., 2015	RCT	29/15	25.6±8.6	情绪:POMS	视觉闭塞、听觉 闭塞、嗅觉闭塞	骑行/30 min/ 40%PPO	视频;扬声 器;燃烧松 树油/一致	TMD -
Wooller et al., 2018	RCT	50/34	27.2±10.2	情绪:POMS 压力:PSS	休息组、纯骑行 组、声音骑行组、 视频骑行组、视 频声音骑行组	骑行/40%EPP0/ 5 min	屏幕/一致	TMD -; STRESS -

注:RCD. 随机交叉实验;RCT. 随机对照实验;SEES. 主观运动体验量表;PAAS. 身体活动影响量表; ENJOYMENT. 享受;PANAS. 积极和消极影响量表;RMSSD. 相邻正常心动周期差值的均方根;FS. 感觉量表;FAS. 感知激活量表;fNIRS. 功能性近红外光谱技术;TMT. 步道制作测试;HRV. 心率变异性;SMS. 状态正念量表;EEG. 脑电图;POMS. 心境量表;PSS. 感知压力量表;VR. 虚拟现实;IVE. 沉浸式虚拟环境;PPO. 峰值功率输出;EPPO. 估计峰值功率输出;ATTENTION. 注意力;ΔHbDiff. 前额叶氧合;TMD. 消极情绪纷乱总分;STRESS. 压力。

2.4 不同刺激方式的文献归纳

对不同的刺激方式类型进行归纳分类:1)视觉刺激分为2D技术与虚拟现实(virtual reality, VR)技术。2D技术包括平板电脑、投影仪、照片、视频等,VR技术包括360°视频、头戴显示器、3D模型等(Li et al., 2021a)。2)听觉刺激分为一致听觉刺激和不一致听觉刺激。一致是指感官刺激信息在时间与空间上具有一定的相似性,或语义内容相似(Shams et al., 2008)。Melo等(2022)研究发现,视听信息不一致可能会导致情绪加工冲突,产生消极

影响。因此,将听觉刺激分为与视觉刺激内容一致和与视觉刺激内容不一致。3)由于仅纳入了1项嗅觉刺激的研究,不对嗅觉刺激进行分类。在身体锻炼联合视听刺激方面,视觉刺激中VR(60%)比2D(40%)的使用频率略高。听觉刺激中,大部分研究使用与视觉刺激信息一致的听觉刺激(80%),仅2项研究使用不一致的听觉刺激(20%)。在身体锻炼联合视听嗅刺激方面,仅纳入1项相关研究,使用了2D视觉刺激、一致的听觉刺激与燃烧松树油产生的嗅觉刺激(表3)。

表3 身体锻炼联合多感官刺激的刺激方式

Table 3 Stimulation Methods of Physical Exercise Combined with Multi-sensory Stimulation

刺激模式	视觉刺激		听觉刺激		嗅觉刺激
	2D	VR	一致	不一致	
视听刺激	n=4 (Jones et al., 2014; Li et al., 2021a; Mavrantza et al., 2023; Wooller et al., 2018)	n=6 (Alkahtani et al., 2019; Calogiuri et al., 2018; Chan et al., 2023; Jones et al., 2023a; Léger et al., 2022; Litleskare et al., 2022)	n=8 (Calogiuri et al., 2018; Chan et al., 2023; Léger et al., 2022; Jones et al., 2023a; Li et al., 2021a; Litleskare et al., 2022; Mavrantza et al., 2023; Wooller et al., 2018)	n=2 (Alkahtani et al., 2019; Jones et al., 2014)	—
视听嗅刺激	n=1 (Wooller et al., 2015)	—	n=1 (Wooller et al., 2015)	—	n=1, 燃烧法 (Wooller et al., 2015)

2.5 心理健康相关影响结果

共纳入了10项结果指标与情绪相关的研究,包括积极与消极情绪、神经影像技术和心率变异性。9项研究报告了积极情绪,其中5项研究报告了身体锻炼联合多感官刺激后测比前测和/或对照组后测显著提高积极情绪,3项研究的结果变量无显著影响,1项研究报告了负向影响。总体证据强度不明确,表明身体锻炼联合多感官刺激能促进积极情绪,但仍存在分歧。5项研究报告了消极情绪,其中4项研究报告了身体锻炼联合多感官刺激后测比前测和/或对照组后测显著抑制消极情绪,1项研究报告了正向影响。总体证据强度较强,表明身体锻炼联合多感官刺激能抑制消极情绪。2项研究报告了神经影像技术:1项研究使用近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS),并报告身体锻炼联合多感官刺激比对照组显著降低前额叶皮层激活程度,而前额叶皮层激活程度被认为与不愉快的体验有关(Jones et al., 2019);1项研究使用脑电图(electroencephalogram, EEG),并报告身体锻炼联合多感官刺激后对 θ 波振幅不存在显著影响,而 θ 波的振幅上升被认为与放松有关(Lin et al., 2020)。相邻正常心动周期差值的均方根(root mean square of successive differences, RMSSD)的改善代表心脏自主神经的恢复(Gladwell et al., 2012)。纳入的研究中,3项研究报告了心率变异性,其中2项研究报告身体锻炼联合多感官刺激后RMSSD显著改善,1项研究报告无显著影响,总体

证据强度不明确(表4)。

共纳入了2项报告了压力指标的研究,1项研究报告了身体锻炼联合多感官刺激能够改善压力,1项研究报告无显著影响(表4)。

共纳入了4项结局指标与认知能力相关的研究,包括注意力、执行能力和记忆力。3项研究报告了注意力指标,所有的研究都报告身体锻炼联合多感官刺激后测比前测和/或对照组后测显著提高注意力得分。总体证据强度强,表明身体锻炼联合多感官刺激能促进注意力恢复。1项研究报告身体锻炼联合多感官刺激对记忆力有正向影响,但对执行能力无显著影响(表4)。

3 讨论

研究结果显示,身体锻炼联合多感官刺激对心理健康产生积极影响。多感官刺激(视觉、听觉和嗅觉)能够产生“多感官整合”,这是一种大脑处理多种通道的感觉信息并产生统一的感知过程。身体锻炼联合多感官刺激与单一感官刺激相比,更能够促进心理健康。具体来说,身体锻炼联合多感官刺激能显著抑制消极情绪和促进注意力恢复,在一定程度上改善积极情绪,并且改善心脏自主神经的恢复。

3.1 不同干预措施对干预效果的影响

3.1.1 身体锻炼过程中多感官刺激的持续时间

探讨身体锻炼联合多感官刺激对心理健康影响的研

究中, 身体锻炼过程中感官刺激的持续时间被认为是影响干预效果的关键因素之一。Chiang 等(2021)研究发现, 视觉刺激在 5、10、20 min 的持续时间内均能产生放松效果, 其中持续时间为 20 min 时, 运动的放松促进效果最佳; 然而, 当视觉刺激的持续时间超过 20 min 时, 放松效果并未进一步增强, 反而出现了逐渐降低的趋势。听觉刺激的相关研究表明, 听觉感官具有高度敏感性, 即使是短时间的刺激也能有效地吸引个体的注意力并调节情绪 (Terry et al., 2020)。关于嗅觉刺激, 尽管尚未得出有关

适宜的暴露时间的共识性结论, 但 Lee 等(2012)研究发现, 约 15 min 的嗅觉刺激暴露对提升积极情绪和改善心理健康的功效最佳; 随着嗅觉暴露时间的增加, 其积极效应并未持续增强, 反而出现了减少的趋势。因此, 本研究推荐在设计身体锻炼联合多感官刺激的干预方案时, 考虑将感官刺激的持续时间控制在 5~15 min。这一时间范围可能会产生最佳的心理健康效益, 同时可以避免过长时间的感官刺激导致的效益递减。

表 4 身体锻炼联合多感官刺激对心理健康影响的证据强度

Table 4 Strength of Evidence on the Effects of Physical Exercise Combined with Multi-sensory Stimulation on Mental Health

心理健康效益		结果	文献	支持结果的数量/ 研究总数(占比/%)	证据强度
情绪	积极情绪	+	Jones et al., 2014; Jones et al., 2023a; Litleskare et al., 2022; Li et al., 2021a; Chan et al., 2023	5/9(56)	??
		n.s.	Alkahtani et al., 2019; Mavrantza et al., 2023; Chan et al., 2023	3/9(33)	
	-	Calogiuri et al., 2018	1/9(11)		
	消极情绪	+	Calogiuri et al., 2018	1/5(40)	—
-		Wooller et al., 2018; Litleskare et al., 2022; Chan et al., 2023; Wooller et al., 2015	4/5(60)		
神经影像技术	fNIRS	-	Jones et al., 2023a	1/1(50)	NA
	EEG	n.s.	Mavrantza et al., 2023	1/1(50)	NA
HRV	RMSSD	+	Li et al., 2021a; Mavrantza et al., 2023	2/3(50)	?
		n.s.	Chan et al., 2023	1/3(50)	
压力		-	Wooller et al., 2018	1/2(50)	NA
		n.s.	Chan et al., 2023	1/2(50)	
认知能力	注意力	+	Jones et al., 2014; Jones et al., 2023a; Mavrantza et al., 2023	3/3(100)	+
	执行能力	n.s.	Léger et al., 2022	1/1(100)	NA
	记忆力	+	Léger et al., 2022	1/1(100)	NA

注: 受篇幅所限, 仅显示关键指标, 如 EEG 仅显示 θ 波、HRV 仅显示 RMSSD。NA 表示支持结果的文献 < 3 篇, 不进行分析。

3.1.2 身体锻炼过程中多感官刺激的锻炼强度

Ekkekakis(2003)研究认为, 参与者的情感会随着锻炼强度变化而产生变化, 当锻炼强度低于通气量阈值时, 锻炼会促进积极情绪的产生; 当锻炼强度等于通气量阈值时, 情绪水平因人而异, 部分为积极, 部分为消极; 当锻炼强度大于通气量阈值时, 往往会产生消极情绪和较大的压力。然而, 这一结果在身体锻炼联合感官刺激领域并未得到广泛认同 (Jones et al., 2017)。Jones 等(2014)调查了身体锻炼联合多感官刺激中锻炼强度差异对情绪效益的影响, 结果显示, 锻炼强度低于 10% 通气量阈值和高于 5% 通气量阈值时, 参与者的情绪效益近似, 锻炼强度并未影响参与者从干预中获得的情绪效益。Razon 等(2009)和 Hutchinson 等(2018)研究发现, 不同锻炼强度均能在一定程度上提升心理健康水平, 但是这种效益只能持续 10~15 min。这可能是由于高强度锻炼时多感官刺激将注意力从内部感受转移到外部环境, 从而在短时间内产生了积极的心理效益。目前, 关于身体锻炼联合多

感官刺激的最佳锻炼强度仍存在争议, 未来研究需要进一步探讨身体锻炼联合多感官刺激中锻炼强度的调节作用, 以及优化锻炼参数以最大化心理健康效益的有效方式。

3.1.3 身体锻炼过程中不同感官刺激的差异

一系列实证研究已经揭示了不同感官刺激会产生不均衡的心理健康效益 (Bird et al., 2019; Chow et al., 2017)。身体锻炼联合听觉刺激会产生最佳的心理健康效益 (Wooller et al., 2018)。尽管已有研究表明, 视觉刺激在感官冲突中占据主导地位 (Koppen et al., 2009), 近 70% 的感知信息源自视觉, 比例远高于其他感官系统, 甚至超过听觉和嗅觉系统的总和 (Zhang et al., 2022), 但也有相关研究对听觉刺激的重要性提出了新的见解。Wooller 等(2015)的研究通过在身体锻炼过程中屏蔽视觉、听觉和嗅觉刺激, 观察身体锻炼时感官缺失对参与者情绪、锻炼感知和心率的影响。结果显示, 听觉刺激的缺失对情绪的负面影响远大于视觉刺激的缺失。Loizou 等(2015)和

Lin等(2013)的研究结论也支持了该观点,表明身体锻炼结合听觉刺激可能比视觉刺激更为关键。在自然环境中,声音的缺失可能与捕食者的出现或生物多样性的减少相关,这会导致人们产生恐惧心理(Annerstedt et al., 2013)。此外,当视觉信息受限时,听觉刺激能够通过联想作用,弥补视觉刺激的缺失,从而维持身体锻炼的积极影响。上述研究结果提示,在设计身体锻炼方案时,应考虑整合听觉元素以增强对心理健康的潜在益处。

3.1.4 身体锻炼过程中不同感官刺激方式的差异

身体锻炼过程中,视觉刺激方式大致可分为两类(Li et al., 2021a)。第一种是2D,如照片、图像或幻灯片;第二种是VR技术,如360°视频、3D视频、VR头戴式显示器等。与2D视觉刺激相比,VR技术提供了更加丰富的视觉信息,能够模拟现实生活中的环境,从而增强用户的存在感和情感体验(Chirico et al., 2017; Yeh et al., 2017)。Jones等(2023a)研究发现,身体锻炼联合多感官刺激时,观看360°视频进行锻炼会转移注意力,产生更积极的愉悦感。尽管VR技术在提供沉浸式体验方面具有优势,但其在身体锻炼过程中的应用仍存在缺陷。Yeh等(2017)研究指出,VR技术可能导致感知与行动之间的不协调。此外,Mostajeran等(2021)研究发现,身体锻炼过程中使用VR技术在提升积极情绪的同时也会产生更大的生理负担。Veling等(2021)研究报告,VR头戴显示器的使用可能会引起“网络病”,包括头晕、恶心和全身不适等症状,这可能是由于视觉和前庭系统之间的信号冲突或长时间缺乏姿势控制(LaViola, 2000)。在身体锻炼过程中,参与者要关注自身的锻炼感受,较难保持姿势控制,这容易导致“网络病”的产生(Litleskare et al., 2019)。因此,在选择身体锻炼过程中视觉刺激的呈现方式时,需要综合考虑其对锻炼体验和心理健康的影响。

身体锻炼过程中,听觉刺激方式可分为一致和不一致(Karageorghis et al., 1999)。Liu等(2018)研究发现,当视觉刺激与听觉刺激信息一致时,受试者的注意力范围更广。听到鸟鸣、昆虫鸣叫和水流声时,参与者倾向于扩大对植物的视觉注意区域。而当听到人类和交通声音时,参与者倾向于扩大对建筑物的视觉注意区域。Kim等(2008)研究表明,一致的感官刺激比不一致的感官刺激更有利于产生促进效果,即使在听觉刺激消失后,仅有视觉刺激时,这种效果仍能保持一段时间。相反,当感官刺激不一致时,往往会引发参与者的不良反应,影响其体验感受(Bood et al., 2013; Melo et al., 2022)。类似的结果在嗅觉刺激中也有所体现(Cui et al., 2022; Hedblom et al., 2019),但是由于仅纳入1项嗅觉刺激的相关研究,无法对其进行深入讨论。身体锻炼过程中,一致性的多感官刺激内容能够更贴近现实环境,提供更高的真实感与存在感,而不一致的多感官刺激内容则可能会分散参与

者的注意力,容易导致注意力疲劳。

目前,身体锻炼联合嗅觉刺激的研究中缺乏控制与检测环境气味浓度的工具(Amores et al., 2022),缺少量化与“复制”气味的方法以及个体嗅觉感知差异性与主观性等缺陷(Lin et al., 2021)。因此,身体锻炼联合嗅觉刺激的相关研究较少,无法得出明确的结论。未来研究应着重解决此领域的技术缺陷。

3.2 个体差异对干预效果的影响

3.2.1 年龄因素

一篇荟萃分析表明,年龄较大的人群在接触自然环境的视觉刺激时,其积极情绪反应更为显著(Barton et al., 2010)。本研究纳入了1项相关研究,分别报告了年轻人与老年人群体在接受身体锻炼联合多感官刺激干预后的心理健康效益(Chan et al., 2023),研究发现,在干预后,年轻人群体的消极情绪水平下降,而积极情绪水平未发生显著变化;老年人群体的积极情绪水平上升(未测量消极情绪)。值得注意的是,该研究中对年轻人和老年人群体采用了不同的心理健康评估工具和身体锻炼方案,这可能是导致两组间结果差异的潜在因素。未来研究应采用统一的评估工具和干预措施,以探究身体锻炼联合多感官刺激对不同年龄群体心理健康的影响。

3.2.2 性别因素

先前的研究表明,性别可能对身体锻炼联合多感官刺激的心理效益产生显著影响。Plante等(2006)研究发现,在多感官刺激的身体锻炼中,女性比男性体验到更大的幸福感。Jiang等(2014)进一步探讨了视觉刺激中树木密度对男性生理应激的影响,发现随着树木密度的增加,男性的生理应激恢复水平也相应增加,但仅在树木密度为1.7%~24.0%的范围内;当树木密度超过24.0%时,生理应激恢复水平不再发生显著变化;值得注意的是,当树木密度超过34.0%时,男性的恢复时间反而变慢,而女性则没有表现出这种趋势。尽管上述研究提供了性别差异的初步证据,但目前大多数研究尚未将性别作为身体锻炼联合多感官刺激产生心理健康效益的潜在影响因素进行深入探讨。此外,部分研究仅报告了单一性别,限制了对性别差异在身体锻炼联合多感官刺激中产生影响的全面理解。未来研究设计应考虑将性别作为重要的协变量,并对其进行控制,以揭示性别差异对心理健康效益的影响机制。

3.3 机制阐述

在身体锻炼过程中,人的注意力可以分为“联想”和“分离”两种模式。当注意力处于“联想”模式时,注意力主要集中于身体感觉,如呼吸模式、锻炼节奏、肌肉疲劳和心率等。相反,当注意力处于“分离”模式时,注意力主要集中于身体感觉之外的线索,如视觉、听觉和嗅觉刺激以及外界环境(Chow et al., 2017)。根据平行加工模型,

分离策略可以降低运动的感知消耗,转移锻炼所产生的身体感觉(Rejeski, 1985)。因此,身体锻炼联合多感官刺激可以通过促进注意力分离产生积极情绪、提高锻炼体验。从神经影像学角度来看,运动系统与感觉刺激能够通过激活大脑中与情绪相关的区域,如前额叶皮层、腹内侧额叶皮层、扣带皮层和杏仁核,改善情绪状态(Canbeyli, 2010; Gladwell et al., 2012)。此外,Mavrantza 等(2023)研究发现,进行身体锻炼联合多感官刺激时,被试的左半球内 α 波通信更优越, α 波的半球内连通性可以促进有意识的视觉感知,协调和分配皮质资源,提高认知总体效率。从多感官整合角度来看,不同感官之间存在多感官整合效应,这种效应能够增强感官刺激的效益。研究表明,进行多个相同模态的任务可能会引发认知冲突,导致认知超载,而利用不同模态(如听觉与视觉)则可能会减轻认知负担、提高学习效率(Washburn et al., 2004)。现有研究表明,与单一的视觉或听觉刺激相比,视听觉复合刺激能够拓展注意力广度,降低前额叶皮层的血红蛋白浓度,增加副交感神经活动,从而使人感到更放松、更舒适(Liu et al., 2020; Song et al., 2021)。在神经元加工的早期阶段,视觉刺激的情绪加工可以强烈影响听觉刺激的情绪加工,且这种影响是相互的(Baumgartner et al., 2006; Gerdes et al., 2014)。同时,视觉与听觉的共同呈现可以增加人的记忆容量,提高认知能力(Shams et al., 2008)。嗅觉与其他感官结合也具有多感官整合效应(Murray et al., 2016; Song et al., 2019)。嗅觉可以丰富视听内容,降低身体锻炼后的促肾上腺素与交感神经活动,减少压力(Murray et al., 2013; Tianlong et al., 2019)。

3.4 研究局限性与展望

3.4.1 研究局限性

本研究广泛检索身体锻炼联合视觉、听觉和嗅觉刺激改善心理健康的实证研究文献并进行系统整理和归纳,但仍存在一定的局限:1)本研究仅纳入发表在学术期刊的中英文论文,未纳入“灰色文献”,有可能导致相关论文的遗漏。2)纳入的 1 项研究未报告消除阶段效应与滞留效应的具体方法,且存在滞留效应的可能,方法学质量较低,需谨慎对待研究结果。

3.4.2 未来展望

鉴于身体锻炼联合多感官刺激的心理效益,未来可以考虑从以下几个关键领域加强研究:1)开发更高清晰度、更稳定的 VR 技术,减少因视觉失真引起的不适感;2)研究和开发能够精确控制和测量气味释放的设备,以及能够标准化和量化气味的方法,优化嗅觉刺激的相关研究;3)目前,身体锻炼联合多感官刺激的潜在机制仍有待探索,未来需增加基于神经影像技术,如功能性磁共振成像技术(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、fNIRS 等的相关脑机制研究;4)规范实证研究的设计,控

制方法学质量,更多地采用高质量的随机对照实验;5)探索不同刺激方式、性别、年龄和锻炼强度下身体锻炼联合多感官刺激的效果差异。

4 结论

本研究系统整合了身体锻炼联合多感官刺激对心理健康的影响,初步探讨了其产生机制及不同干预措施与个体差异对干预效果的影响。研究表明,身体锻炼联合适宜的视觉、听觉和嗅觉刺激有助于改善心理健康,且多感官刺激能产生“多感官整合”,心理健康效益大于单一感官刺激。建议,身体锻炼联合多感官刺激时采用一致的感官刺激信息,进行 5~15 min 的短时小剂量身体锻炼,重视听觉刺激在身体锻炼中的使用。

参考文献:

- 董惠娟,张爱珠, 2015. 大学生心理健康教育[M]. 西安:西安交通大学出版社:34.
- 高景川,陶猛, KUBIS Hans-Peter, 等, 2023. 绿蓝色视野暴露结合运动的积极和消极情绪效益研究[J]. 体育科学, 43(6):39-52.
- 何晓龙, 2020. 绿蓝色空间暴露、绿蓝色健身对儿童青少年认知功能和学业表现的影响综述[J]. 中国体育科技, 56(10):36-54.
- 李京诚, 2009. 锻炼心理学[M]. 北京:高等教育出版社:3.
- 陆林, 2019. 儿童青少年精神健康不容忽视[J]. 科技导报, 37(16):1.
- 王记文,伍小兰, 2022. 家庭代际关系对中青年精神健康的作用:性别差异与年龄模式[J]. 人口与发展, 28(6):98-108.
- 张莹莹,蒋丹青,李莎莎,等, 2017. 自身运动感知中视觉-前庭整合的研究进展[J]. 生理学报, 69(5):693-702.
- AMORES J, DOTAN M, MAES P, 2022. Development and study of Ezzence: A modular scent wearable to improve wellbeing in home sleep environments[J/OL]. Front Psychol, 13: 791768[2024-07-07]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.791768>.
- ANNERSTEDT M, JÖNSSON P, WALLERGÅRD M, et al., 2013. Inducing physiological stress recovery with sounds of nature in a virtual reality forest: Results from a pilot study[J]. Physiol Behav, 118: 240-250.
- BARTON J, PRETTY J, 2010. What is the best dose of nature and green exercise for improving mental health? A multi-study analysis[J]. Environ Sci Technol, 44(10): 3947-3955.
- BAUMGARTNER T, LUTZ K, SCHMIDT C F, et al., 2006. The emotional power of music: How music enhances the feeling of affective pictures[J]. Brain Res, 1075(1): 151-164.
- BO A, MAO W, LINDSEY M A, 2017. Effects of mind-body interventions on depressive symptoms among older Chinese adults: A systematic review and Meta-analysis[J]. Int J Geriatr Psychiatry, 32(5): 509-521.
- BOOD R J, NIJSSSEN M, VAN DER KAMP J, et al., 2013. The power of auditory-motor synchronization in sports: Enhancing running performance by coupling cadence with the right beats[J/OL]. PLoS One, 8(8): e70758[2024-07-07]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070758>.
- BIRD J M, KARAGEORGHIS C I, BAKER S J, et al., 2019. Effects of music, video, and 360-degree video on cycle ergometer ex-

- ercise at the ventilatory threshold [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 29(8): 1161-1173.
- BRIONES T L, 2006. Environment, physical activity, and neurogenesis: Implications for prevention and treatment of Alzheimer's disease[J]. *Curr Alzheimer Res*, 3(1): 49-54.
- CALOGIURI G, LITLESKARE S, FAGERHEIM K A, et al., 2018. Experiencing nature through immersive virtual environments: Environmental perceptions, physical engagement, and affective responses during a simulated nature walk [J/OL]. *Front Psychol*, 8: 2321 [2024-07-07]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02321>.
- CANBEYLI R, 2010. Sensorimotor modulation of mood and depression: An integrative review[J]. *Behav Brain Res*, 207(2): 249-264.
- CHAN S H M, QIU L, ESPOSITO G, et al., 2023. Nature in virtual reality improves mood and reduces stress: Evidence from young adults and senior citizens[J]. *Virtual Real*, 27(4): 3285-3300.
- CHIANG Y C, WENG P Y, 2021. Effects of natural environmental stimulation duration on psychophysiological recovery benefits [J]. *HortScience*, 56(11): 1387-1394.
- CHIRICO A, CIPRESSO P, YADEN D B, et al., 2017. Effectiveness of immersive videos in inducing awe: An experimental study[J/OL]. *Sci Rep*, 7(1): 1218[2024-07-07]. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01242-0>.
- CHOW E C, ETNIER J L, 2017. Effects of music and video on perceived exertion during high-intensity exercise [J]. *J Sport Health Sci*, 6(1): 81-88.
- CUI J Q, LI M, WEI Y Y, et al., 2022. Inhalation aromatherapy via brain-targeted nasal delivery: Natural volatiles or essential oils on mood disorders[J/OL]. *Front Pharmacol*, 13: 860043[2024-07-07]. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.860043>.
- DAVIDS K, ARAÚJO D, BRYMER E, 2016. Designing affordances for health-enhancing physical activity and exercise in sedentary individuals[J]. *Sports Med*, 46(7): 933-938.
- EKKEKAKIS P, 2003. Pleasure and displeasure from the body: Perspectives from exercise[J]. *Cogn Emot*, 17(2): 213-239.
- ERICKSON K I, HILLMAN C H, KRAMER A F, 2015. Physical activity, brain, and cognition[J]. *Curr Opin Behav Sci*, 4: 27-32.
- FRANCO L S, SHANAHAN D F, FULLER R A, 2017. A review of the benefits of nature experiences: More than meets the eye[J/OL]. *Int J Environ Res Public Health*, 14(8): 864[2024-07-07]. <https://doi.org/10.3390/ijerph14080864>.
- GERDES A B M, WIESER M J, ALPERS G W, 2014. Emotional pictures and sounds: A review of multimodal interactions of emotion cues in multiple domains [J/OL]. *Front Psychol*, 5: 1351 [2024-07-07]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01351>.
- GLADWELL V F, BROWN D K, BARTON J L, et al., 2012. The effects of views of nature on autonomic control [J]. *Eur J Appl Physiol*, 112: 3379-3386.
- HEDBLÖM M, GUNNARSSON B, IRAVANI B, et al., 2019. Reduction of physiological stress by urban green space in a multisensory virtual experiment [J/OL]. *Sci Rep*, 9(1): 10113 [2024-07-07]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46099-7>.
- HUTCHINSON J C, JONES L, VITTI S N, et al., 2018. The influence of self-selected music on affect-regulated exercise intensity and remembered pleasure during treadmill running[J]. *Sport Exerc Perform Psychol*, 7(1): 80-92.
- JIANG B, CHANG C Y, SULLIVAN W C, 2014. A dose of nature: Tree cover, stress reduction, and gender differences[J]. *Landsc Urban Plan*, 132: 26-36.
- JONES L, EKKEKAKIS P, 2019. Affect and prefrontal hemodynamics during exercise under immersive audiovisual stimulation: Improving the experience of exercise for overweight adults[J]. *J Sport Health Sci*, 8(4): 325-338.
- JONES L, WHEAT J, 2023a. GreeN AND PLEASANT LANDS: The affective and cerebral hemodynamic effects of presence in virtual environments during exercise[J]. *Percept Mot Skills*, 130(2): 826-843.
- JONES L, ZENKO Z, 2023b. A systematic narrative review of extrinsic strategies to improve affective responses to exercise [J/OL]. *Front Sports Act Living*, 5: 1186986[2024-07-07]. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1186986>.
- JONES L, TILLER N B, KARAGEORGHIS C I, 2017. Psychophysiological effects of music on acute recovery from high-intensity interval training[J]. *Physiol Behav*, 170: 106-114.
- KARAGEORGHIS C I, TERRY P C, LANE A M, 1999. Development and initial validation of an instrument to assess the motivational qualities of music in exercise and sport: The Brunel music rating inventory[J]. *J Sports Sci*, 17(9): 713-724.
- KOPPEN C, LEVITAN C A, SPENCE C, 2009. A signal detection study of the Colavita visual dominance effect [J]. *Exp Brain Res*, 196(3): 353-360.
- KIM R S, SEITZ A R, SHAMS L, 2008. Benefits of stimulus congruency for multisensory facilitation of visual learning[J]. *PLoS One*, 3(1): e1532[2024-07-08]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001532>.
- LAVIOLA J J, 2000. A discussion of cybersickness in virtual environments[J]. *ACM Sigchi Bull*, 32(1): 47-56.
- LEE M S, CHOI J, POSADZKI P, et al., 2012. Aromatherapy for health care: An overview of systematic reviews [J]. *Maturitas*, 71(3): 257-260.
- LÉGER M T, MEKARI S, 2022. Simulating the benefits of nature exposure on cognitive performance in virtual reality: A window into possibilities for education and cognitive health [J/OL]. *Brain Sci*, 12(6): 725[2024-07-07]. <https://doi.org/10.3390/brainsci12060725>.
- LI H S, ZHANG X, BI S L, et al., 2021a. Green exercise: Can nature video benefit isometric exercise[J/OL]. *Int J Environ Res Public Health*, 18(11): 5554 [2024-07-07]. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115554>.
- LI H S, ZHANG X, WANG H Y, et al., 2021b. Access to nature via virtual reality: A mini-review [J/OL]. *Front Psychol*, 12: 725288 [2024-07-07]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.725288>.
- LIN J H, LU F J H, 2013. Interactive effects of visual and auditory intervention on physical performance and perceived effort [J]. *J Sports Sci Med*, 12: 388-393.
- LIN P H, LIN Y P, CHEN K L, et al., 2021. Effect of aromatherapy on autonomic nervous system regulation with treadmill exercise-induced stress among adolescents[J/OL]. *PLoS One*. 6(4): e0249795 [2024-07-07]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249795>.
- LIN W, CHEN Q, JIANG M, et al., 2020. Sitting or walking? Analyzing the neural emotional indicators of urban green space behavior with mobile EEG[J]. *J Urban Health*, 97(2): 191-203.

- LITLESKARE S, CALOGIURI G, 2019. Camera stabilization in 360° videos and its impact on cyber sickness, environmental perceptions, and psychophysiological responses to a simulated nature walk: A single-blinded randomized trial[J/OL]. *Front Psychol*, 10: 2436[2024-07-07]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02436>.
- LITLESKARE S, FRÖHLICH F, FLATEN O E, et al., 2022. Taking real steps in virtual nature: A randomized blinded trial[J]. *Virt Real*, 26(4): 1777-1793.
- LIU X, XIONG Y C, WANG Y J, et al., 2018. Soundscape effects on visiting experience in city park: A case study in Fuzhou, China[J]. *Urban Forest Urban Green*, 31: 38-47.
- LIU Y P, HU M J, ZHAO B, 2020. Interactions between forest landscape elements and eye movement behavior under audio-visual integrated conditions[J]. *J Forest Res*, 25(1): 21-30.
- LOIZOU G, KARAGEORGHIS C I, 2015. Effects of psychological priming, video, and music on anaerobic exercise performance[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 25(6): 909-920.
- MAVRANTZA A M, BIGLIASSI M, CALOGIURI G, 2023. Psychophysiological mechanisms underlying the effects of outdoor green and virtual green exercise during self-paced walking[J]. *Int J Psychophysiol*, 184: 39-50.
- MELO M, GONCALVES G, MONTEIRO P, et al., 2022. Do multi-sensory stimuli benefit the virtual reality experience? A systematic review[J]. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 28(2): 1428-1442.
- MOSTAJERAN F, KRZIKAWSKI J, STEINICKE F, et al., 2021. Effects of exposure to immersive videos and photo slideshows of forest and urban environments[J/OL]. *Sci Rep*, 11(1): 3994[2024-07-07]. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83277-y>.
- MURRAY N, QIAO Y, LEE B, et al., 2013. Subjective evaluation of olfactory and visual media synchronization[C]//Proceedings of the 4th ACM Multimedia Systems Conference. Oslo Norway: ACM: 162-171.
- MURRAY N, LEE B, QIAO Y, et al., 2016. Olfaction-enhanced multimedia: A survey of application domains, displays, and research challenges[J]. *ACM Comput Surveys*, 48(4): 1-34.
- NUKARINEN T, RANTALA J, KORPELA K, et al., 2022. Measures and modalities in restorative virtual natural environments: An integrative narrative review[J/OL]. *Comput Human Behav*, 126: 107008[2024-07-07]. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.107008>.
- PLANTE T G, CAGE C, CLEMENTS S, et al., 2006. Psychological benefits of exercises paired with virtual reality: Outdoor exercises energizes whereas indoor virtual exercises relaxes[J]. *Int J Stress Manage*, 13(1): 108-117.
- RAZON S, BASEVITCH I, LAND W, et al., 2009. Perception of exertion and attention allocation as a function of visual and auditory conditions[J]. *Psychol Sport Exerc*, 10(6):636-643.
- REJESKI W J, 1985. Perceived exertion: An active or passive process[J]. *J Sport Exerc Psychol*, 7:371-378.
- SHAMS L, SEITZ A R, 2008. Benefits of multisensory learning[J]. *Trends Cogn Sci*, 12(11): 411-417.
- SONG C, IKEI H, MIYAZAKI Y, 2019. Physiological effects of forest-related visual, olfactory, and combined stimuli on humans: An additive combined effect[J/OL]. *Urban Forest Urban Green*, 44: 126437[2024-07-07]. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126437>.
- SONG C, IKEI H, MIYAZAKI Y, 2021. Effects of forest-derived visual, auditory, and combined stimuli[J/OL]. *Urban Forest Urban Green*, 64: 127253[2024-07-07]. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127253>.
- TERRY P C, KARAGEORGHIS C I, CURRAN M L, et al., 2020. Effects of music in exercise and sport: A Meta-analytic review[J]. *Psychol Bull*, 146(2): 91-117.
- TIANLONG D, SIM Y J, 2019. Effects of different recovery methods on postboxing sparring fatigue substances and stress hormones[J]. *J Exerc Rehabil*, 15(2): 258-263.
- VELING W, LESTESTUIVER B, JONGMA M, et al., 2021. Virtual reality relaxation for patients with a psychiatric disorder: Crossover randomized controlled trial[J/OL]. *J Med Internet Res*, 23(1): e17233[2024-07-07]. <https://doi.org/10.2196/17233>.
- WANG Y B, 2023. Can acute exercise be more pleasant? Using audiovisual stimuli: A Meta-analysis[J]. *Appl Psychol Health Well Being*, 15(1): 354-368.
- WASHBURN D A, JONES L M, 2004. Could olfactory displays improve data visualization[J]. *Comput Sci Engineer*, 6(6): 80-83.
- WEGNER M, HELMICH I, MACHADO S, et al., 2014. Effects of exercise on anxiety and depression disorders: Review of Meta-analyses and neurobiological mechanisms[J]. *CNS Neurol Disord Drug Targets*, 13(6): 1002-1014.
- WOOLLER J J, BARTON J, GLADWELL V F, et al., 2015. Occlusion of sight, sound and smell during green exercise influences mood, perceived exertion and heart rate[J]. *Int J Environ Health Res*, 26(3): 267-280.
- WOOLLER J J, ROGERSON M, BARTON J, et al., 2018. Can simulated green exercise improve recovery from acute mental stress[J/OL]. *Front Psychol*, 9: 2167[2024-07-07]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02167>.
- YEH H P, STONE J, CHURCHILL S, et al., 2017. Physical and emotional benefits of different exercise environments designed for treadmill running[J/OL]. *Int J Environ Res Public Health*, 14(7): 752[2024-07-07]. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070752>.
- YU J, LI J, CUIJPERS P, et al., 2012. Prevalence and correlates of depressive symptoms in Chinese older adults: A population-based study[J]. *Int J Geriatr Psychiatry*, 27(3): 305-312.
- ZHANG Y J, YU Z F, LIU JIAN K, et al., 2022. Neural decoding of visual information across different neural recording modalities and approaches[J]. *Mach Intell Res*, 19(5): 350-365.

(收稿日期:2024-08-07; 修订日期:2024-09-10; 编辑:高天艾)