

基于沉浸式虚拟现实技术的体育公园绿色锻炼恢复性效益研究——以走跑类运动为例

Study on the Restorative Benefits of Green Exercise in Sports Parks Utilizing Immersive Virtual Reality Technology: Taking Walking and Running Sports as an Example

张 昊 金荷仙*
ZHANG Hao JIN Hexian*

(浙江农林大学风景园林与建筑学院, 杭州 31130)
(College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou, Zhejiang, China, 311300)

文章编号: 1000-0283(2025)04-0102-11
DOI: 10.12193/j.laing.2025.04.0102.012
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-09-27
修回日期: 2024-12-31

摘 要

现代城市化高速发展, 快节奏的城市生活加剧了城市居民精神疾病和慢性病的患病风险。接触恢复性自然环境和开展体力活动都是促进居民身心健康的重要途径, 绿色锻炼是将二者结合的新兴领域。充分调研杭州市典型体育公园的走跑类运动区域, 使用沉浸式虚拟现实技术设置高沉浸感的实验环境。通过 SPSSAU 平台, 运用箱线图分析、重复测量方差分析、主效应分析、交互效应分析、邦弗伦尼事后多重比较和简单效应分析等统计学方法, 探究三种绿视率水平与三种接触形式对绿色锻炼恢复性效益的影响。结果显示: 绿视率水平、接触形式均对恢复性效益有不同程度的影响, 是影响绿色锻炼恢复性效益的重要因素; 绿视率水平和接触形式的交互作用对恢复性效益的影响存在一定的协同性。结合沉浸式虚拟现实技术, 在满足精确控制绿视率水平的基础上提高实验的生态效度, 较完整地探讨接触自然环境与开展体力活动之间的相互作用关系, 具有一定的创新性, 旨在为提升体育公园运动环境恢复性效益的绿视率标准提供参考。

关键词

风景园林; 绿色锻炼; 沉浸式虚拟现实技术; 恢复性效益; 绿视率

Abstract

The rapid pace of modern urbanization and fast-paced city life has increased the risk of mental illness and chronic disease among urban residents. Studies indicate that exposure to restorative natural environments and physical activity are both crucial in promoting residents' physical and mental health, and green exercise is an emerging area that integrates the two. This study thoroughly examined the walking and running exercise zones of typical sports parks in Hangzhou, utilizing immersive virtual reality technology to establish a highly engaging experimental environment. Using the SPSSAU platform, statistical methods including box-and-line plot analysis, repeated measures ANOVA, main effects analysis, interaction effects analysis, Bonferroni post-hoc multiple comparisons, and simple effects analysis were implemented to investigate the effects of three levels of green visibility and three forms of contact on the restorative benefits of green exercise. The findings reveal that both the level of green visibility and the form of contact influence restorative benefits to varying degrees and are essential factors affecting the restorative aspects of green exercise. There exists a synergy between the interaction effects of green visibility level and contact form on these restorative benefits. This research employs immersive virtual reality technology to enhance the ecological validity of the experiment while maintaining precise control of the green visibility level, aiming to comprehensively explore the relationship between exposure to the natural environment and the development of physical activity. This innovative approach seeks to establish a reference for the green visibility standard aimed at improving the restorative benefits of exercise environments in sports parks.

Keywords

landscape architecture; green exercise; immersive virtual reality; restorative benefit; green view index

张 昊

1999年生/男/浙江杭州人/在读硕士研究生/研究方向为康复景观

金荷仙

1964年生/女/浙江东阳人/博士/教授、博士生导师/研究方向为风景园林历史理论与遗产保护、康复花园、植物景观规划设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: lotusjhx@zafu.edu.cn

基金项目:

国家自然科学基金面上项目“视嗅感知协同作用下的城市绿地植物配置研究”(编号: 52278084); 国家自然科学基金面上项目“芳香植物配置对人体亚健康干预效应研究”(编号: 51978626)

现代城市化高速发展,快节奏的城市生活加剧了城市居民精神疾病和慢性病的患病风险,这对城市居民的身心健康造成极大威胁。越来越多的研究结果显示,自然环境能对人身心理健康产生积极影响^[1-4]。与自然环境相同,体力活动^[5-6]也是促进居民身心健康的重要途径,“绿色锻炼”是指在恢复性自然环境中进行的体力活动^[7]。目前单一因素对恢复性效益影响的研究越来越深入,但现实世界中个体接触自然环境进而促进恢复性效益通常是多方面的相互作用,厘清相互作用关系能够在指导规划设计时协调多种因素使恢复性效益最大化。同时,《关于推进体育公园建设的指导意见》《浙江省“十四五”体育公园建设实施方案》相继出台,杭州市陆续竣工多个体育公园和场馆,为城市居民进行绿色锻炼提供了更加便捷和舒适的载体,如何科学地打造全民健身新载体、改善全民健身环境、实现全民绿色锻炼是体育公园建设的重点。

绿色锻炼概念提出者Pretty的团队^[8]将绿色锻炼分为了三个层次:(1)观赏自然,如透过窗户观赏;(2)置身于大自然中,如在公园中休憩;(3)积极参与和融入大自然,如园艺、徒步或露营。三个层次接触形式的积极程度和环境的自然程度同步递增,这对后续研究产生深远的影响,主要从以下两方面展开探讨。(1)相较于其他环境,恢复性自然环境更能促进体力活动带来的恢复性效益。其中,真实的自然环境和其他环境中的体力活动恢复性效益对比受到了广泛的研究,室内环境是最常用的对照组^[9-11],研究还常以城市环境作为对照组^[12-13]。此类研究证实了自然环境相较于建成环境更具恢复性效益,但未明晰其中发挥作用的要素。这是因为真实环境天然具有的局限性,图像、视频材料较之更易控

制变量,有助于对环境在具体要素如何影响体力活动恢复性效益进行研究。如Akers等^[14]的研究表明,相较于灰色和红色,绿色环境作为视觉感受的原始特征,对积极的运动效益有促进作用。此类研究通常也因技术限制,实验环境真实感与沉浸度不高,易影响实验结果与生态效度。近年来虚拟现实技术的兴起为此提供了解决思路,已有研究表明,与二维图像相比,三维自然图像能提供更逼真的效果,并显著增强沉浸感,从而促进人体生理心理放松^[15]。然而,在绿色锻炼领域仍鲜有使用虚拟现实技术,这与当前研究主要使用非沉浸或半沉浸虚拟现实技术无法满足绿色锻炼过程中的身体活动有关^[16]。(2)部分研究证实相较于静坐观赏,体力活动更能促进恢复性自然环境带来的恢复性效益^[17]。但也有研究表明在自然环境中的剧烈活动可能会限制恢复性效益的产生^[18]。探究关于开展体力活动与接触自然之间的相互作用关系,无法忽视不同强度体力活动产生恢复性效益的差异。

综上所述,已有研究从绿色锻炼的两大维度切入,在恢复性环境的理论上探讨接触自然环境与开展体力活动之间的相互作用关系。但目前对于典型环境要素、体力活动不同强度的影响研究还不够深入。且尚缺乏对于沉浸式虚拟现实技术的应用,实验中存在控制变量与生态效度的矛盾。本研究选取绿视率这一典型绿量指标^[19-21]进行研究,并采取不同运动强度的接触形式,在充分调研杭州市典型体育公园的走跑类运动区域的基础上,运用沉浸式虚拟现实技术设置具有高度真实感与沉浸度的实验环境,以满足精确控制绿视率的需求并提高实验的生态效度。研究成果可为在体育公园运动区规划设计过程中,从绿色锻炼恢复性效益的角度对绿视率标准加以考虑提供参考。

1 研究方法

1.1 科学假设

基于上述研究基础,提出如下科学假设:

- (1) 绿视率水平对恢复性效益具有显著影响;
- (2) 接触形式对恢复性效益具有显著影响;
- (3) 绿视率水平对开展体力活动的恢复性效益具有显著影响;
- (4) 接触形式对接触自然环境的恢复性效益具有显著影响。若假设1、假设2成立则表示单独接触自然环境或开展体力活动具有恢复性效益,且绿色锻炼的恢复性效益高于前两者。若假设3、假设4成立则表示接触自然环境和开展体力活动存在相互作用。

1.2 实验场景设置

1.2.1 杭州市典型体育公园的走跑类运动区域调研

基于strave运动轨迹计步器导出杭州主城区跑步路线热力图,叠加杭州市体育公园分布图进行选择(图1)。测量并记录各公园走跑类运动区域的步道(包括道长、道宽、铺装材质),植物景观(包括植物种类、植被层次、种植间距)以及邻近景观要素(包括水体、运动场地)等信息。

1.2.2 沉浸式虚拟现实实验场景构建

根据调研所得的体育公园的走跑类运动区域信息构建实验场景(图2)。在AutoCAD 2020绘出相应长、宽度的步道平面图,然后在SketchUp 2022中搭建步道及微地形,在UnrealEngine 5中赋予模型更真实的材质、植物配置、邻近景观要素,并运用光照、云雾风、滤镜等手段进一步营造场景的真实感,最后在场景中铺设轨道与放置全景摄像机,设置好相应参数后导出实验所需的全景视频素材。共制作出4段各长10 min的全景视频,图3为不同绿视率全景视频的部分截图对比。



1.3 实验变量控制

本研究将热环境、声环境以及气味环境等进行控制, 选取绿视率指标这一典型绿量指标作为自变量, 以衡量视觉层面的环境自然程度从人造到自然的连续性变化, 而不是使用二分法划分人造环境与自然环境。这是因为视觉感知接受外部信息占据了五感的80%以上, 是感官感知的主要途径, 若能够在视觉层面进行实验验证假设, 则将为绿色锻炼中其他感官感知以及多感官感知的恢复性效益研究提供借鉴。绿视率环境变量共有三个细分水平: 无环境干预 (0绿视率)、21%~35%绿视率以及36%~60%绿视率^[19,22]。无环境干预作为对照水平, 通过在UnrealEngine5中配置不同植物数量、冠幅大小和种植间距等参数进行控制。

图1 杭州主城区跑步路线热力图与体育公园分布
Fig. 1 Heat map of running routes and distribution of sports parks in Hangzhou's main urban areas

图2 实验场景构建效果
Fig. 2 Experimental scenario construction results

图3 不同绿视率虚拟现实全景视频截图
Fig. 3 Screenshots of virtual reality panoramic videos with different green views



采取不同运动强度的接触形式作为自变量: 静坐观赏、步行与慢跑, 以衡量从静态到剧烈的连续性。静坐观赏作为对照水平, 后两者具有类似的运动特征, 运动速度是其最明显的区别之一, 也是这两种运动最容易测量的特征, 常被用来量化步行和慢跑的体力活动水平^[23]。步行的配速为6~6.5 km/h, 慢跑的配速为7~7.5 km/h, 对应体力活动能量消耗编码表 (Compendium of Physical Activities)^[24], 分别属中等强度运动和高强度运动。

1.4 受试者招募

本实验为3×3混合设计, 基于GPower3.1软件进行样本量估算, 采用F检验, 选择重复测量方差分析和主效应交互效应, 相关参数设置中效应量 (Effect Size) 为0.25, α 误差为0.05, 功效值选择默认设置0.95, 组数设置为3, 测量次数设置为4, 最后输出的推荐总样本人数为45人。本实验最终招募到60名受试者, 均为浙江农林大学东湖校区在校本科生/研究生, 此样本数量符合测试条件。

由于受试者日常运动习惯以及压力水平存在差异, 为了避免不同运动习惯与压力水平下对于绿色锻炼干预效益造成影响, 因此在实验前使用体力活动准备问卷、国际体力活动问卷以及知觉压力量表评估所有受试者健康状态、近期体力活动以及知觉压力水平

(表1), 结果显示所有数据在实验前不存在显著差异。

1.5 实验设备及指标测量

本实验选择使用HUAWEI VR Glass播放本实验的全景视频素材。步行与慢跑的运动器材是Keep K1跑步机。实验测量的指标包括生理指标和心理指标, 其理论基础为注意力恢复理论 (ART)^[1-2]、压力减轻理论/心理进化理论 (SRT)^[3-4], 均来源于近年来的恢复性环境研究。各指标与相应测度工具如表2所示。

1.5.1 生理指标

本实验测量的生理指标为血压水平、心率变异性、表面肌电信号。(1) 血压水平包括舒张压水平与收缩压水平, 利用OMRON电子血压计采集。血压水平受到自主神经系统的调控, 能够反映精神的放松状态, 血压水平的降低代表精神放松状态提高。(2) 心率变异性 (Heart Rate Variability, HRV) 包括SDNN、RMSSD、LF/HF、SD1, 利用Ergo LAB人因生理记录仪采集。HRV信号蕴含有心血管调节的大量信息, 对这些信息的提取和分析可以定量评估心脏交感神经和迷走神经活动的紧张性、均衡性及其对心血管系统活动的影响。其中, SDNN反映整体HRV大小, RMSSD评估副交感神经功能的敏感指标, SDNN/RMSSD值的增加代表HRV的

提高。LF/HF为低频与高频的能量比, 反映自主神经的均衡控制, LF/HF值的减少代表HRV的提高。SD1是采用非线性分析方法对HRV进行解读的庞德加莱散点图 (Poincare) 的一部分, 代表短期变异性, 一般反映副交感神经活性, SD1值的增加代表HRV的提高。(3) 表面肌电 (Surface Electromyographic, sEMG) 主要选取MPF指标, 利用Ergo LAB人因生理记录仪采集。sEMG信号是人体表面肌肉通过收缩产生的生物电流, 被广泛用于跑步研究, 其反映的是整块肌肉 (参与收缩的所有肌纤维) 的电生理特性。其中, MPF能够反映肌肉疲劳状态, MPF的降低代表肌肉疲劳状态的提高。

1.5.2 心理指标

本实验测量的心理指标为注意力水平、情绪效价、自尊水平以及运动主观疲劳感知, 注意力是避免被刺激转移的认知能力, 对于短期记忆具有重大影响。情绪是心理健康的重要组成部分。自尊是个人对自我价值的评估, 自尊与健康之间存在关联。运动主观疲劳感知是人们运动时的身体状态疲劳程度。分别使用舒尔特方格测试、正负性情绪量表、罗森伯格自尊量表以及伯格主观疲劳感知评估量表进行测度: 以完成舒尔特方格测试的时间作为注意力的量化指标, 以正负性情绪量表、罗森伯格自尊量表以及伯格主观疲劳感知

表1 受试者近期体力活动、知觉压力水平统计
Tab. 1 Statistics on subjects' recent physical activity, perceived stress levels

	特征 Characteristic	所有组 All groups	空白组 Blank group	低绿视率组 Low VGI group	高绿视率组 High VGI group
近期体力活动水平	近期体力活动 (平均 ± 标准差) / (MET-min/w)	2 052.43±1 133.68	2 106.50±1 193.65	2 089.43±1 110.15	1 961.38±1 149.12
	近期静坐时间 (平均 ± 标准差) / (hr/w)	51.96±14.58	52.63±12.73	50.75±17.57	52.50±13.67
	总体 (平均 ± 标准差) / 分	19.00±7.54	18.85±7.10	19.90±8.63	18.25±7.06
知觉压力水平	0 ~ 13 分人数 / 人	11	3	4	4
	14 ~ 26 分人数 / 人	41	15	12	14
	27 ~ 40 分人数 / 人	8	2	4	2

表2 实验指标与测度工具
Tab. 2 Experimental indicators and measurement tools

实验指标 Experimental indicator		测度工具 Measurement tool
生理指标	血压水平	OMRON 电子血压计
	心率变异性	Ergo LAB 人因生理记录仪
	表面肌电	
心理指标	注意力水平	舒尔特方格测试
	情绪效价	正负性情绪量表
	自尊水平	罗森伯格自尊量表
	运动主观疲劳感	伯格主观疲劳感知评估量

表3 绿视率水平和接触形式对生理指标的主效应和交互效应分析
Tab. 3 Analysis of main & interaction effects of level of green visibility and form of exposure on physiological indicators

指标 Index	效应 Effect	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>p</i>	
血压水平	舒张压	绿视率水平主效应	15.437	2	7.718	2.280	0.112
		接触形式主效应	2.722	2	1.361	0.506	0.605
		交互效应	4.471	4	1.118	0.415	0.797
	收缩压	绿视率水平主效应	3.508	2	1.754	0.532	0.590
		接触形式主效应	0.198	2	0.099	0.043	0.958
		交互效应	6.471	4	1.618	0.707	0.589
心率变异性	SDNN	绿视率水平主效应	9 627.047	2	4 813.523	2.427	0.097
		接触形式主效应	74 664.728	2	37 332.364	53.147	0.000*
		交互效应	10 937.095	4	2 734.274	3.893	0.005*
	RMSSD	绿视率水平主效应	26 330.112	2	13 165.056	3.213	0.048*
		接触形式主效应	93 820.380	2	46 910.190	33.086	0.000*
		交互效应	24 752.563	4	6 188.141	4.365	0.003*
	LF/HF	绿视率水平主效应	2.099	2	1.050	1.214	0.305
		接触形式主效应	35.317	2	17.659	48.850	0.000*
		交互效应	4.697	4	1.174	3.249	0.015*
	SD1	绿视率水平主效应	17 702.499	2	8 851.249	2.749	0.072
		接触形式主效应	61 004.041	2	30 502.020	41.696	0.000*
		交互效应	13 735.753	4	3 433.938	4.694	0.003*
表面肌电	MPF	绿视率水平主效应	25.548	2	12.774	0.357	0.701
		接触形式主效应	488.213	2	244.107	12.037	0.000*
		交互效应	42.772	4	10.693	0.527	0.670

注: *表示 $p \leq 0.05$, 达到显著性水平。

评估量表的最终分值作为情绪效价、自尊水平以及运动主观疲劳感知的量化指标, 用于后续的数据分析。

2 实验数据分析与结果

所有组别实验前测生理心理指标均通过正态性检验与方差齐性检验, 进一步采用单因

素方差分析评估前测生理指标之间所有数据在实验前不存在显著差异。所有组别实验后测生理心理指标均通过正态性检验与方差齐性检验, 并进行主效应和交互效应分析(表3, 表4)。对于主效应显著的指标进行邦弗伦尼事后多重比较分析绿视率水平/接触形式不同水平之间的该指标差异情况。对于交互效应显著的指标进行简单效应分析绿视率水平/接触形式在某个水平时, 另一个自变量在不同水平下的该指标差异情况。各因子各水平比较箱图见图4。

2.1 绿视率水平、接触形式对血压水平的影响

通过主效应和交互效应分析可得, 绿视率水平、接触形式对舒张压与收缩压的影响均不具有显著性; 交互作用不具有显著性。故无需进行邦弗伦尼事后多重比较和简单效应分析。

2.2 绿视率水平、接触形式对心率变异性的影响

通过主效应分析可得, 绿视率水平对RMSSD的影响具有显著性, 接触形式对所有心率变异性指标的影响均具有显著性。故进一步运用邦弗伦尼事后多重比较分析(表5), 结合箱线图进行分析。(1) SDNN: 随接触形式剧烈程度的加大而提升, 但无环境干预组提升值低于低、高绿视率组。静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著, 不同绿视率组间差异并不显著。(2) RMSSD: 随接触形式剧烈程度的加大而提升, 低视率组RMSSD在步行后提升最多, 高绿视率组在慢跑后提升最多。静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著, 无环境干预、低绿视率组间差异显著。(3) LF/HF: 随接触形式剧烈程度的加大而降低, 高绿视率组在慢跑后提升最多, 低绿视率组次之, 无环境

表4 绿视率水平和接触形式对心理指标的主效应和交互效应分析
Tab. 4 Analysis of main & interaction effects of level of green visibility and form of exposure on psychological indicators

指标 Index	效应 Effect	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	p
注意力水平	绿视率水平主效应	524.995	2	262.498	15.149	0.000*
	接触形式水平主效应	336.873	2	168.436	32.793	0.000*
	交互效应	7.665	4	1.916	0.373	0.781
情绪效价	绿视率水平主效应	2 184.578	2	1 092.289	13.529	0.000*
	接触形式水平主效应	1 203.144	2	601.572	34.514	0.000*
	交互效应	54.522	4	13.631	0.782	0.539
自尊水平	绿视率水平主效应	360.811	2	180.406	13.664	0.000*
	接触形式水平主效应	87.411	2	43.706	14.319	0.000*
	交互效应	5.289	4	1.322	0.433	0.784
运动主观疲劳感	绿视率水平主效应	28.300	2	14.150	1.460	0.241
	接触形式水平主效应	266.233	2	133.117	39.612	0.000*
	交互效应	32.667	4	8.167	2.430	0.058

注: *表示 $p \leq 0.05$, 达到显著性水平。

干预组最少。静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著, 不同绿视率水平组间差异并不显著。

(4) SD1: 低、高绿视率组随接触形式剧烈程度的加大而提升, 空白组步行值最高。步行和静坐观赏、慢跑和静坐观赏组间差异显著, 不同绿视率水平组间差异并不显著。

通过交互效应分析可得, 绿视率水平和接触形式的交互作用具有显著性。故进一步简单效应分析(表6)。(1) SDNN: 接触形式为静坐观赏和步行时, 无环境干预、低绿视率和高绿视率组间差异均不显著; 接触形式为慢跑时, 无环境干预和低绿视率、无环境干预和高绿视率组间差异显著。这代表接触形式仅为慢跑时, 绿视率水平对SDNN具有显著影响。绿视率水平为无环境干预时, 静坐观赏

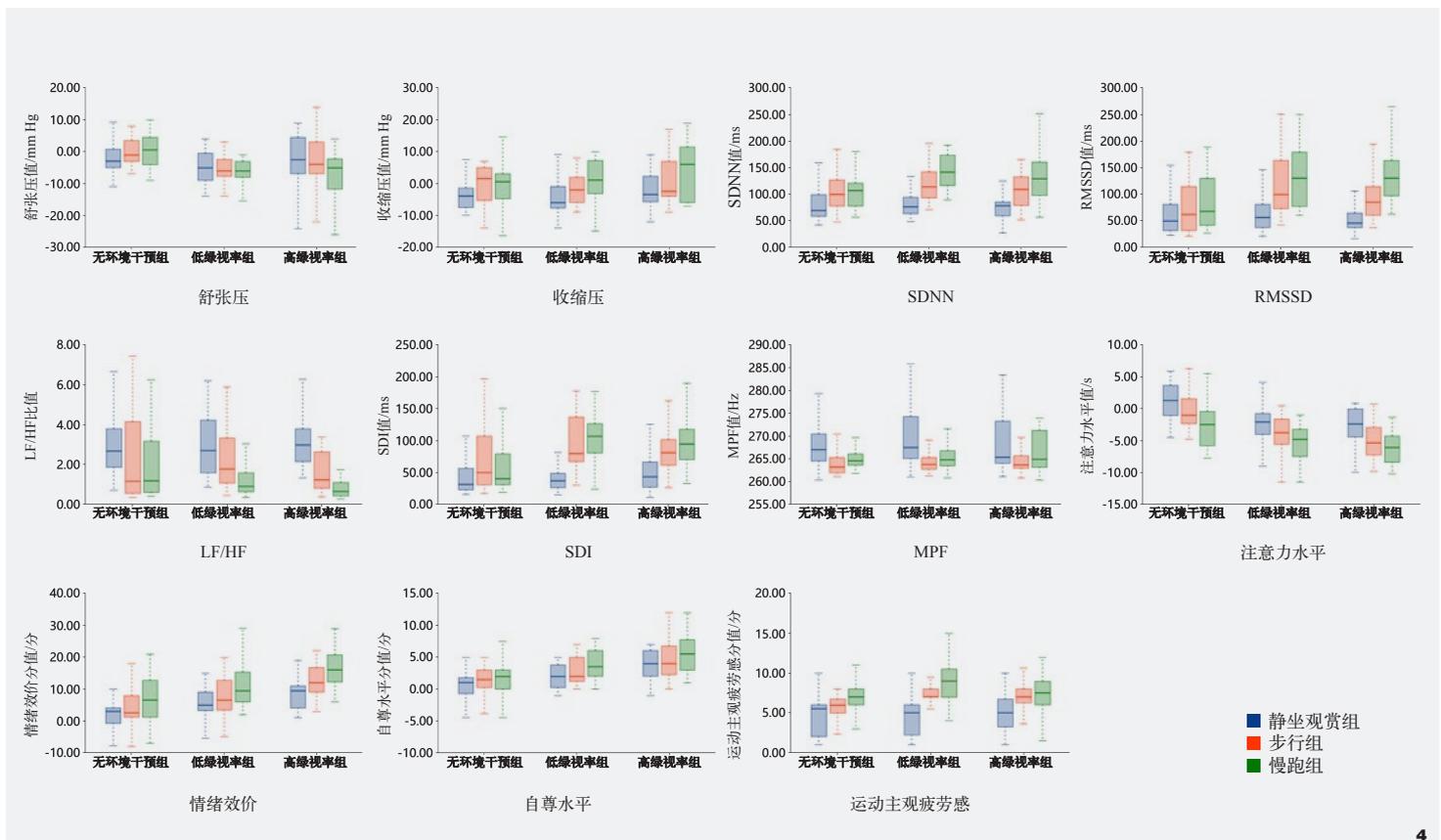


图4 各因子各水平比较箱图
Fig. 4 Comparison box plots for each level of each factor

表5 绿视率水平和接触形式对心率变异性的事后多重比较分析

Tab. 5 Post hoc multiple comparative analysis of heart rate variability by level of green visibility and form of exposure

指标 Index	组间比较 Comparison between groups	细分水平 Segmentation level	均值差值 Mean difference	标准误 Standard error	p
SDNN	接触形式	静坐观赏—步行	-32.201	4.388	0.000*
		静坐观赏—慢跑	-49.100	5.264	0.000*
		步行—慢跑	-16.899	4.825	0.003*
	绿视率水平	无环境干预—低绿视率	-17.878	8.131	0.080
		无环境干预—高绿视率	-7.967	8.131	0.593
		低绿视率—高绿视率	9.912	8.131	0.447
RMSSD	接触形式	静坐观赏—步行	-32.255	7.227	0.000*
		静坐观赏—慢跑	-55.690	7.523	0.000*
		步行—慢跑	-23.435	5.741	0.000*
	绿视率水平	无环境干预—低绿视率	-29.310	11.687	0.039*
		无环境干预—高绿视率	-18.389	11.687	0.265
		低绿视率—高绿视率	10.922	11.687	0.621
LF/HF	接触形式	静坐观赏—步行	0.660	0.119	0.000*
		静坐观赏—慢跑	1.076	0.111	0.000*
		步行—慢跑	0.416	0.098	0.000*
	绿视率水平	无环境干预—低绿视率	0.101	0.170	0.825
		无环境干预—高绿视率	0.262	0.170	0.278
		低绿视率—高绿视率	0.162	0.170	0.610
SDI	接触形式	静坐观赏—步行	-39.299	5.881	0.000*
		静坐观赏—慢跑	-38.801	4.851	0.000*
		步行—慢跑	0.497	3.878	0.991
	绿视率水平	无环境干预—低绿视率	-21.484	10.360	0.104
		无环境干预—高绿视率	-20.560	10.360	0.125
		低绿视率—高绿视率	0.925	10.360	0.996

注：*表示 $p \leq 0.05$ ，达到显著性水平。

和步行、静坐观赏和慢跑组间差异显著；绿视率水平为低和高时，静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著。这代表接触形式对SDNN的影响随绿视率水平的加大而提升。(2) RMSSD：接触形式为静坐观赏时，无环境干预、低绿视率和高绿视率组间差异均不显著；接触形式为步行时，无环境干预和低绿视率组间差异显著；接触形式为慢跑时，无环境干预和低绿视率、无环境干预和高绿视率组间差异显著。这代表绿视率水平对RMSSD的影响随接触形

式剧烈程度的加大而提升。绿视率水平为无环境干预时，静坐观赏、步行和慢跑组间差异均不显著；绿视率水平为低时，静坐观赏和步行、静坐观赏和慢跑组间差异显著；绿视率水平为高时，静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著。这代表接触形式对RMSSD的影响随绿视率水平的加大而提升。(3) LF/HF：接触形式为静坐观赏和步行时，静坐观赏、步行和慢跑组间差异均不显著；接触形式为慢跑时，无环境干预和高绿视率组间差异显著。这代表接触

形式仅为慢跑时，绿视率水平对LF/HF具有显著影响。绿视率水平为无环境干预时，静坐观赏和步行、静坐观赏和慢跑组间差异显著；绿视率水平为低时，静坐观赏和慢跑、步行和慢跑组间差异显著；绿视率水平为高时，静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著。这代表接触形式对LF/HF的影响随绿视率水平的加大而提升。(4) SD1：接触形式为静坐观赏和步行时，无环境干预、低绿视率和高绿视率组间差异均不显著；接触形式为慢跑时，无环境干预和低绿视率、无环境干预和高绿视率组间差异显著。这代表接触形式仅为慢跑时，绿视率水平对SD1具有显著影响。绿视率水平为无环境干预时，步行和静坐观赏组间差异显著；绿视率水平为低时，步行和静坐观赏、步行和慢跑组间差异显著；绿视率水平为高时，步行和静坐观赏、步行和慢跑组间差异显著。这代表接触形式对SD1的影响随绿视率水平的加大而提升。

2.3 绿视率水平、接触形式对表面肌电的影响

通过主效应分析可得，接触形式对MPF的影响具有显著性，绿视率水平对MPF的影响不具有显著性，交互作用不具有显著性。故进一步运用邦弗伦尼事后多重比较分析(表7)，结合箱线图分析。步行具有较低的MPF。静坐观赏和步行、静坐观赏和慢跑组间差异显著，不同绿视率水平组间差异并不显著。

2.4 绿视率水平、接触形式对心理指标的影响

通过主效应和交互效应分析可得，绿视率水平和接触形式对注意力、情绪效价和自尊水平的影响均具有显著性，接触形式对运动主观疲劳感的影响具有显著性，交互作用不具有显著性。故进一步运用邦弗伦尼事后多重比较分析(表8)，结合箱线图分析，结果

表明: (1) 注意力随接触形式剧烈程度的加大而降低, 但无环境干预组降低值低于低、高绿视率组。静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著, 无环境干预和低绿视率、无环境干预和高绿视率组间差异显著。(2) 情绪效价随接触形式剧烈程度的加大而提升, 高绿视率组

具有较高的情绪效价, 低绿视率组次之, 无环境干预组最低。静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著, 无环境干预、低绿视率和高绿视率组间差异均显著。(3) 自尊水平随接触形式剧烈程度的加大而提升, 高绿视率组具有较高的自尊水平, 低绿视率组次之, 无环境干预组最低。静坐观赏和步行、静坐观赏和慢跑组间差异显著, 无环境干预、低绿视率和高绿视率组间差异均显著。(4) 步行具有较低的运动主观疲劳感。静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著, 不同绿视率水平组间差异并不显著。

表6 绿视率水平和接触形式对心率变异性的简单效应分析
Tab. 6 Analysis of the simple effects of level of green visibility and form of exposure on heart rate variability

指标 Index	细分水平 Segmentation level	均值差值 Mean difference	标准误 Standard error	p	
SDNN	静坐观赏	无环境干预—低绿视率	3.524	8.847	0.916
		无环境干预—高绿视率	8.776	8.847	0.585
		低绿视率—高绿视率	5.252	8.847	0.824
	步行	无环境干预—低绿视率	-18.100	11.119	0.242
		无环境干预—高绿视率	-4.562	11.119	0.912
		低绿视率—高绿视率	13.539	11.119	0.448
	慢跑	无环境干预—低绿视率	-39.059	11.702	0.004*
		无环境干预—高绿视率	-28.116	11.702	0.050*
		低绿视率—高绿视率	10.943	11.702	0.620
	无环境干预	静坐观赏—步行	-20.546	7.600	0.024*
		静坐观赏—慢跑	-22.608	9.117	0.042*
		步行—慢跑	-2.061	8.358	0.967
	低绿视率	静坐观赏—步行	-42.171	7.600	0.000*
		静坐观赏—慢跑	-65.191	9.117	0.000*
		步行—慢跑	-23.020	8.358	0.021*
	高绿视率	静坐观赏—步行	-33.885	7.600	0.000*
		静坐观赏—慢跑	-59.500	9.117	0.000*
		步行—慢跑	-25.615	8.358	0.009*
RMSSD	静坐观赏	无环境干预—低绿视率	2.731	12.917	0.976
		无环境干预—高绿视率	10.608	12.917	0.691
		低绿视率—高绿视率	7.877	12.917	0.815
	步行	无环境干预—低绿视率	-38.547	15.933	0.049*
		无环境干预—高绿视率	-15.714	15.933	0.588
		低绿视率—高绿视率	22.833	15.933	0.331
	慢跑	无环境干预—低绿视率	-52.115	16.511	0.007*
		无环境干预—高绿视率	-50.061	16.511	0.010*
		低绿视率—高绿视率	2.054	16.511	0.992
	无环境干预	静坐观赏—步行	-9.722	12.518	0.719
		静坐观赏—慢跑	-17.186	13.030	0.391
		步行—慢跑	-7.464	9.943	0.734
	低绿视率	静坐观赏—步行	-51.000	12.518	0.000*
		静坐观赏—慢跑	-72.031	13.030	0.000*
		步行—慢跑	-21.031	9.943	0.096
	高绿视率	静坐观赏—步行	-36.044	12.518	0.015*
		静坐观赏—慢跑	-77.855	13.030	0.000*
		步行—慢跑	-41.811	9.943	0.000*

3 讨论

3.1 接触形式对恢复性效益的影响显著

研究表明, 接触形式对于心率变异性、表面肌电信号、注意力、情绪效价、自尊水平和运动主观疲劳感的影响具有显著性。其中, 心率变异性SD1指标、表面肌电和自尊水平的静坐观赏和步行、静坐观赏和慢跑组间差异显著; 心率变异性(SDNN、RMSSD、LF/HF指标)、注意力、情绪效价和运动主观疲劳感的静坐观赏、步行和慢跑组间差异均显著。故假设2成立。综上所述, 接触形式对除了血压水平外所有生心理指标均有显著性影响, 并且根据多重比较分析结果, 其中大部分指标显示慢跑比步行带来的恢复性效益大, 步行比静坐观赏带来的恢复性效益大, 即恢复性效益随接触形式剧烈程度的增加而提升。这表示单独进行体力活动具有恢复性效益且体力活动强度对恢复性效益具有显著影响。这与既有研究关于在自然环境中静坐与步行带来的恢复性效益差异的结论趋于一致^[17]。本研究对于体力活动强度的探讨更完整, 采取步行与慢跑两种不同强度的体力活动与静坐观赏进行对照, 以衡量从静态到剧烈的连续性, 而不是将接触自然的形式二分为静止与运动。

结上表

指标 Index	细分水平 Segmentation level	均值差值 Mean difference	标准误 Standard error	ρ	
LF/HF	静坐观赏	无环境干预—低绿视率	0.057	0.186	0.951
		无环境干预—高绿视率	-0.096	0.186	0.864
		低绿视率—高绿视率	-0.153	0.186	0.693
	步行	无环境干预—低绿视率	-0.137	0.273	0.871
		无环境干预—高绿视率	0.112	0.273	0.912
		低绿视率—高绿视率	0.249	0.273	0.636
	慢跑	无环境干预—低绿视率	0.382	0.222	0.206
		无环境干预—高绿视率	0.771	0.222	0.003*
		低绿视率—高绿视率	0.388	0.222	0.196
	无环境干预	静坐观赏—步行	0.655	0.207	0.007*
		静坐观赏—慢跑	0.678	0.192	0.002*
		步行—慢跑	0.023	0.170	0.989
低绿视率	静坐观赏—步行	0.461	0.207	0.074	
	静坐观赏—慢跑	1.004	0.192	0.000*	
	步行—慢跑	0.542	0.170	0.006*	
高绿视率	静坐观赏—步行	0.863	0.207	0.000*	
	静坐观赏—慢跑	1.545	0.192	0.000*	
	步行—慢跑	0.682	0.170	0.000*	
SDI	静坐观赏	无环境干预—低绿视率	4.712	9.986	0.885
		无环境干预—高绿视率	-7.582	9.986	0.729
		低绿视率—高绿视率	-12.294	9.986	0.440
	步行	无环境干预—低绿视率	-25.073	14.945	0.223
		无环境干预—高绿视率	-14.468	14.945	0.600
		低绿视率—高绿视率	10.606	14.945	0.759
	慢跑	无环境干预—低绿视率	-44.092	12.052	0.002*
		无环境干预—高绿视率	-39.629	12.052	0.005*
		低绿视率—高绿视率	4.463	12.052	0.927
	无环境干预	静坐观赏—步行	-27.076	10.186	0.027*
		静坐观赏—慢跑	-11.851	8.403	0.342
		步行—慢跑	15.224	6.716	0.069
低绿视率	静坐观赏—步行	-56.861	10.186	0.000*	
	静坐观赏—慢跑	-60.655	8.403	0.000*	
	步行—慢跑	-3.795	6.716	0.839	
高绿视率	静坐观赏—步行	-33.961	10.186	0.004*	
	静坐观赏—慢跑	-43.898	8.403	0.000*	
	步行—慢跑	-9.937	6.716	0.308	

注：*表示 $p \leq 0.05$ ，达到显著性水平。

3.2 绿视率水平对恢复性效益主观评估的影响显著

绿视率水平对于心率变异性RMSSD指标、注意力、情绪效价和自尊水平的影响具有显著性。其中，注意力的无环境干预和低绿视

率、无环境干预和高绿视率组间差异显著；情绪效价和自尊水平的无环境干预、低绿视率和高绿视率组间差异均显著。故假设1部分成立。综上所述，在主观评估层面，大部分指标显示高绿视率环境比低绿视率环境带来的

恢复性效益大，低绿视率环境比无环境干预带来的恢复性效益大，即主观恢复性效益随绿视率水平的增加而提升。这表示单独接触自然环境具有主观恢复性效益，且绿视率水平对主观恢复性效益具有显著影响。这与既有研究关于绿视率水平与压力恢复呈现“倒U形”关系略有不同^[19]，可能是指标选择的差异以及体力活动带来的交互作用导致。

3.3 绿视率水平和接触形式的交互作用对恢复性效益的影响存在一定的协同性

简单效应分析结果显示，绿视率水平和接触形式的交互作用对心率变异性全部指标的影响均具有显著性。其中，当绿视率水平加大，更多指标显示静坐观赏、步行和慢跑的组间差异显著。故假设3部分成立。仅当接触形式为慢跑时，大部分指标显示无环境干预和低绿视率、无环境干预和高绿视率组间差异显著。故假设4部分成立。综上所述，绿视率水平对恢复性效益的影响随接触形式的剧烈程度增加而显著。接触形式对恢复性效益的影响随绿视率水平的增加而更加显著。这表示绿色锻炼产生的恢复性效益显著高于单独观赏自然环境或单独开展体力活动，且绿视率水平对开展体力活动的影响以及接触形式剧烈程度对接触自然环境的影响具有一定的协同性。目前仅心率变异性指标显示这一趋势，绿视率水平和接触形式的交互作用对恢复性效益的影响的协同性有待于进一步研究。

3.4 体育公园走跑类运动区恢复性效益提升建议

《体育公园配置要求》(GB/T 44092-2024)明确指出，体育公园规划设计宜为运动人群提供舒适的运动环境，包括必要的冬季日照和夏季遮阴、较高的绿视率水平^[25]。但对于绿

表7 绿视率水平和接触形式对表面肌电信号的事后多重比较分析
Tab. 7 Post hoc multiple comparative analysis of surface electromyographic signals by level of green visibility and form of exposure

指标 Index	组间比较 Comparison between groups	细分水平 Segmentation level	均值差值 Mean difference	标准误 Standard error	<i>p</i>
MPF	接触形式	静坐观赏—步行	3.893	0.923	0.000*
		静坐观赏—慢跑	2.862	0.929	0.009*
		步行—慢跑	-1.031	0.558	0.164
	绿视率水平	无环境干预—低绿视率	-0.847	1.092	0.719
		无环境干预—高绿视率	-0.740	1.092	0.777
		低绿视率—高绿视率	0.107	1.092	0.995

注: *表示 $p \leq 0.05$, 达到显著性水平。

表8 绿视率水平和接触形式对心理指标的事后多重比较分析
Tab. 8 Post hoc multiple comparative analysis of green visibility levels and forms of exposure on psychological indicators

指标 Index	组间比较 Comparison between groups	细分水平 Segmentation level	均值差值 Mean difference	标准误 Standard error	<i>p</i>
注意力水平	接触形式	静坐观赏—步行	1.876	0.466	0.000*
		静坐观赏—慢跑	3.343	0.464	0.000*
		步行—慢跑	1.467	0.284	0.000*
	绿视率水平	无环境干预—低绿视率	3.323	0.760	0.000*
		无环境干预—高绿视率	3.862	0.760	0.000*
		低绿视率—高绿视率	0.539	0.760	0.759
情绪效价	接触形式	静坐观赏—步行	-2.767	0.500	0.000*
		静坐观赏—慢跑	-6.317	0.960	0.000*
		步行—慢跑	-3.550	0.756	0.000*
	绿视率水平	无环境干预—低绿视率	-4.300	1.641	0.030*
		无环境干预—高绿视率	-8.533	1.641	0.000*
		低绿视率—高绿视率	-4.233	1.641	0.033*
自尊水平	接触形式	静坐观赏—步行	-0.983	0.252	0.001*
		静坐观赏—慢跑	-1.700	0.352	0.000*
		步行—慢跑	-0.717	0.343	0.101
	绿视率水平	无环境干预—低绿视率	-1.817	0.663	0.022*
		无环境干预—高绿视率	-3.467	0.663	0.000*
		低绿视率—高绿视率	-1.650	0.663	0.041*
运动主观疲劳感	接触形式	静坐观赏—步行	-1.917	0.301	0.000*
		静坐观赏—慢跑	-2.933	0.391	0.000*
		步行—慢跑	-1.017	0.304	0.004*
	绿视率水平	无环境干预—低绿视率	-0.950	0.568	0.225
		无环境干预—高绿视率	-0.650	0.568	0.492
		低绿视率—高绿视率	0.300	0.568	0.858

注: *表示 $p \leq 0.05$, 达到显著性水平。

视率值尚未制定相关标准。本研究运用沉浸式虚拟现实技术以满足精确控制绿视率的需求, 而虚拟现实技术所能营造的沉浸感以及其模拟真实自然环境的能力受到了广泛研究成果的支持^[26-27]。本研究结果可为在体育公园运动区规划设计过程中, 从绿色锻炼恢复性效益的角度对绿视率标准加以考虑提供参考: 对于体育公园内部的登山步道用地、骑行道用地、健身广场用地以及运动场地用地等可能进行高强度运动的场地, 尽量使其绿视率水平保持在36%~60%; 对于体育公园内部的健身步道用地、健身器材用地等可能进行中等强度运动的场地, 尽量使其绿视率水平保持在21%~35%; 对于体育公园内部的可能进行静坐观赏的场地, 尽量使其绿视率水平保持在21%~35%; 另外, 对于缺少体育公园建设条件的区域, 可在其他公园绿地中可视情况适当增加能够进行中等强度以及高强度运动的步道和场地, 并分别将其绿视率水平保持在21%~35%以及36%~60%。

4 结语与展望

4.1 结论

实验证明, 单独接触自然环境或开展体力活动具有恢复性效益, 且绿色锻炼的恢复性效益高于前两者; 绿视率水平、接触形式均对恢复性效益有不同程度的影响, 是影响绿色锻炼恢复性效益的重要因素; 绿视率水平和接触形式的交互作用对恢复性效益的影响存在一定的协同性。在技术层面, 构建沉浸式虚拟现实技术实验场景设定的完整流程, 展现了沉浸式虚拟现实技术应用于绿色锻炼研究的可行性, 往后的研究应更多地尝试沉浸式虚拟现实技术, 保证生态效度的同时提高评估结果的科学性与可靠性; 采用多种心理指标以衡量恢复性效益, 其中的相互印证

与差异反映了恢复性效益产生的复杂机制。

本研究较为完整地探讨了接触自然环境与开展体力活动之间的相互作用关系,并结合沉浸式虚拟现实技术,在满足精确控制绿视率水平的基础上提高了实验的生态效度,具有一定的创新性,旨在为提升体育公园运动环境恢复性效益的绿视率标准提供参考。

4.2 展望

本研究选取绿视率指标这一典型绿量指标,以衡量从人造到自然的连续性变化,并未考虑不同的种植场景,未来可针对植物景观的其他维度开展更多精细化、定量化的研究。本研究采取步行与慢跑这两种公众的主要体力活动形式,以帮助衡量从静态到剧烈的连续性,并未考虑其他不同的体力活动形式,未来研究可探讨其他体力活动形式之间的恢复性效益差异,以对体育公园规划设计提供更精细化的参考。考虑尽可能消除个体因素差异与实验可行性,本研究招募的受试者均为在校本科生/研究生,未来也可针对体育公园的主要访问人群进行研究,研究成果可更好地为其服务。

注:文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] KAPLAN S, TALBOT J F. Psychological Benefits of a Wilderness Experience[M]. New York: Plenum Press, 1983: 163-203.
- [2] KAPLAN R, KAPLAN S. The Experience of Nature: A Psychological Perspective[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989, 13-21.
- [3] ULRICH R S. Aesthetic and Affective Response to Natural Environment[M]. New York: Plenum Press, 1983, 85-125.
- [4] ULRICH R S, SIMONS R F, LOSITO B D, et al. Stress Recovery During Exposure to Natural and Urban Environments[J]. Journal of Environmental Psychology, 1991, 11(3): 201-230.
- [5] Global Recommendations on Physical Activity for Health[M]. Geneva: World Health Organization, 2010.
- [6] LEE I M, SHIROMA E J, LOBELO F, et al. Effect of Physical Inactivity on Major Non-communicable Diseases Worldwide: An Analysis of Burden of Disease and Life Expectancy[J]. The Lancet, 2012, 380(9838): 219-229.
- [7] PRETTY J, GRIFFIN M, SELLENS M H, et al. Green Exercise: Complementary Roles of Nature, Exercise and Diet in Physical and Emotional Well-Being and Implications for Public Health Policy[D]. Colchester: University of Essex, 2003.
- [8] PRETTY J, PEACOCK J, SELLENS M, et al. The Mental and Physical Health Outcomes of Green Exercise[J]. International Journal of Environmental Health Research, 2005, 15(5): 319-337.
- [9] HANSON S, JONES A. Is There Evidence that Walking Groups Have Health Benefits? A Systematic Review and Meta-analysis[J]. British Journal of Sports Medicine, 2015, 49(11): 710-715.
- [10] FOCHT B C. Brief Walks in Outdoor and Laboratory Environments: Effects on Affective Responses, Enjoyment, and Intentions to Walk for Exercise[J]. Research Quarterly for Exercise and Sport, 2009, 80(3): 611-620.
- [11] HARTE J L, EIFERT G H. The Effects of Running, Environment, and Attentional Focus on Athletes' Catecholamine and Cortisol Levels and Mood[J]. Psychophysiology, 1995, 32(1): 49-54.
- [12] HARTIG T, EVANS G W, JAMNER L D, et al. Tracking Restoration in Natural and Urban Field Settings[J]. Journal of Environmental Psychology, 2003, 23(2): 109-123.
- [13] BERMAN M G, JONIDES J, KAPLAN S. The Cognitive Benefits of Interacting with Nature[J]. Psychological Science, 2008, 19(12): 1207-1212.
- [14] AKERS A, BARTON J, COSSEY R, et al. Visual Color Perception in Green Exercise: Positive Effects on Mood and Perceived Exertion[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16): 8661-8666.
- [15] IGARASHI M, YAMAMOTO T, LEE J, et al. Effects of Stimulation by Three-dimensional Natural Images on Prefrontal Cortex and Autonomic Nerve Activity: A Comparison with Stimulation Using Two-dimensional Images[J]. Cognitive Processing, 2014, 15: 551-556.
- [16] LI H, ZHANG X, BI S, et al. Green Exercise: Can Nature Video Benefit Isometric Exercise?[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(11): 5554.
- [17] KOBAYASHI H, IKEI H, SONG C, et al. Comparing the Impact of Forest Walking and Forest Viewing on Psychological States[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 57: 126920.
- [18] BARTON J, PRETTY J. What is the Best Dose of Nature and Green Exercise for Improving Mental Health? A Multi-study Analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(10): 3947-3955.
- [19] JIANG B, CHANG C Y, SULLIVAN W C. A Dose of Nature: Tree Cover, Stress Reduction, and Gender Differences[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 132: 26-36.
- [20] 李明霞. 基于绿视率的城市街道步行空间绿量视觉评估[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [21] 金慧, 罗川西, 金荷仙. 城市公园绿视率对人体身心健康的影响——以杭州为例[J]. 南方建筑, 2022,(06): 43-51.
- [22] 黄倩. 基于绿视率的城市绿色锻炼恢复性效益研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2023.
- [23] HAN K T. The Effect of Nature and Physical Activity on Emotions and Attention While Engaging in Green Exercise[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 24: 5-13.
- [24] AINSWORTH B E, HASKELL W L, LEON A S, et al. Compendium of Physical Activities: Classification of Energy Costs of Human Physical Activities[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 1993, 25(1): 71-80.
- [25] 体育公园配置: GB/T 44092-2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [26] PLANTE T G, ALDRIDGE A, SU D, et al. Does Virtual Reality Enhance the Management of Stress when Paired with Exercise? An Exploratory Study[J]. International Journal of Stress Management, 2003, 10(3): 203.
- [27] PLANTE T G, CAGE C, CLEMENTS S, et al. Psychological Benefits of Exercise Paired with Virtual Reality: Outdoor Exercise Energizes Whereas Indoor Virtual Exercise Relaxes[J]. International Journal of Stress Management, 2006, 13(1): 108.