

郝石盟, 王晨, 侯锐, 张一嵩. 虚拟疗愈环境及其疗愈效益研究进展 [J]. 风景园林, 2022, 29 (8) : 79-85.

虚拟疗愈环境及其疗愈效益研究进展

Research Progress in Virtual Healing Environments and Healing Benefits Thereof

郝石盟 王晨 侯锐 张一嵩

HAO Shimeng, WANG Chen, HOU Rui, ZHANG Yisong

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



中图分类号: TU985.12

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2022)08-0079-07

DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.08.0079.07

收稿日期: 2021-12-31

修回日期: 2022-06-12

郝石盟 / 女 / 博士 / 北京建筑大学建筑与城市规划学院副教授 / 研究方向为人因视角的健康建筑

HAO Shimeng, Ph.D., is an associate professor in the School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture. Her research focuses on healthy architecture from a human factors perspective.

王晨 / 男 / 北京建筑大学建筑与城市规划学院在读硕士研究生 / 研究方向为建筑技术科学
WANG Chen is a master student in the School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture. His research focuses on architecture technology science.

侯锐 / 男 / 北京建筑大学建筑与城市规划学院在读硕士研究生 / 研究方向为建筑技术科学
HOU Rui is a master student in the School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture. His research focuses on architecture technology science.

张一嵩 / 男 / 北京建筑大学建筑与城市规划学院在读硕士研究生 / 研究方向为建筑技术科学

ZHANG Yisong is a master student in the School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture. His research focuses on architecture technology science.

摘要: 近年来快速发展的虚拟现实 (VR) 技术为疗愈环境的研究和应用提供了技术支撑, 访问虚拟疗愈环境成为获得身心疗愈的一种途径。以 Web of Science、ScienceDirect 数据库和中国知网为依据, 对 2010—2022 年发表的与虚拟疗愈环境领域相关的文献进行综述, 系统梳理了虚拟疗愈环境的应用领域和呈现技术、疗愈效益的评价工具及影响因素。研究发现: 1) 虚拟疗愈环境在情绪干预、认知训练、运动康复等领域具有疗愈效益, 疗愈场景一般包括虚拟自然景观、亲生物性环境等; 2) 虚拟疗愈环境的呈现技术可分为头戴式设备 (HMD) 和交互媒体界面 2 类; 3) 主观感知量表结合多种类型的生理指标是实证研究中常用的疗愈效益评价工具; 4) 除疗愈场景内容外, 多感官因素和交互方式也是影响疗愈效益的重要因素。通过探讨目前实证研究中的局限性, 为今后虚拟自然的恢复性效益、亲生物性环境设计等领域的研究和实践提供参考。

关键词: 疗愈环境; 虚拟现实; 康复景观; 健康建筑; 情绪干预; 亲生物性设计

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (编号 52108004); 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (编号 20YJCZH041)

Abstract: The rapid development of virtual reality (VR) technology in recent years has provided technical support for the research and application of healing environments, and access to virtual healing environments has become a way to obtain physical and mental healing. Based on the Web of Science, ScienceDirect database and CNKI, this research reviews the literature published in the field of virtual healing environments from 2010 to 2022, and systematically combs the application fields and presentation technologies, healing benefit evaluation tools and influencing factors of virtual healing environments. Research results show that: 1) virtual healing environments have healing effects in such fields as emotional intervention, cognitive training and sports rehabilitation, and healing scenarios generally include virtual natural landscape, biophilic environments, etc.; 2) virtual healing environments can be divided into two categories by presentation technologies: head-mounted devices (HMD) and interactive media interfaces; 3) the combination of subjective perception scales and various types of physiological indicators are commonly used tools in empirical researches to evaluate healing benefits; 4) in addition to the content of healing scenarios, multisensory factors and interactive modes are also important factors influencing healing benefits. This research can, through discussing the limitations in current empirical researches, provide a reference for future research and practice in such fields as restorative benefits of virtual nature and biophilic environment design.

Keywords: healing environment; virtual reality (VR); rehabilitation landscape; healthy building; emotional intervention; biophilic design

Fund Items: Young Scientists Fund of the National Natural Science Fund of China (No. 52108004); Youth Fund Project for Research of Humanities and Social Sciences of Ministry of Education in China (No. 20YJCZH041)

随着医疗技术的发展以及对健康定义的再认知,健康的内涵已从传统的机体康健、没有疾病,扩展到生理、心理健康和社会适应性等多个方面^[1-2]。人类的绝大部分时间都生活在建筑及建成环境中,因而健康建筑领域的研究视角从单纯关注生理健康,逐渐转向全面身心健康,情绪则是影响身心健康的重要因素之一,因此空间环境因素对情绪的影响得到了建筑学、医学、心理学、神经科学等领域研究者的普遍关注^[3-6]。

虚拟疗愈环境是指以虚拟现实(virtual reality, VR)技术、增强现实(augmented reality, AR)技术等为媒介所呈现的对人身心健康有益的疗愈内容^[7-8],这些内容主要以视觉刺激为主,并伴随适当的听觉、嗅觉及其他感官刺激。已有研究证实了疗愈环境在促进积极情绪、减少消极情绪^[9-10]、促进注意力恢复^[11-12]、缓解压力^[13]、改善认知能力^[14]等方面的作用。在此基础上,多个研究团队探究了有关虚拟疗愈环境恢复性效益的研究,如Fehnhofer等^[15]发现利用虚拟的公园场景可有效诱导出受试者的快乐、悲伤和焦虑等情绪;Pallavicini等^[16]发现高沉浸度的数字VR游戏则促进了年轻人幸福感的提升,并有效缓解了他们的精神压力。此外,相比于现实环境,将虚拟环境应用于身心疗愈有3个方面的优势。1)虚拟环境可以部分代偿自然环境的疗愈作用,如因个体运动能力退化、活动空间受限或突发公共卫生事件等原因,部分人群可能无法安全地参与需要接触自然的室外活动以获得必要的自然疗愈效益。已有研究证实了虚拟自然景观在一定程度上可以代偿真实自然环境的疗愈效益^[17-18]。2)不同个体对环境刺激的反应有显著差异,虚拟环境可以基于个体的情绪反馈,为不同个体建立独立的交互数据库,实现个体的情绪支持效益最大化^[19]。3)有研究表明个体具有较高的环境掌控力时可以减缓其压力的产生,虚拟环境的交互性较强,个体由单向被动信息接收转变为双向主动信息交换,交互行为本身也可以增强个体的环境掌控力,进一步激发个体的积极情绪^[20]。

注意力恢复理论(attention restoration theory,

ART)、减压理论(stress reduction theory, SRT)和亲生命假说(biophilia hypothesis, BH)作为疗愈环境(包括真实环境与虚拟环境)的重要理论基础,从机制上解释了环境对人认知水平、工作效率和情绪倾向的影响。ART阐述了自然环境对恢复人们认知能力的机制。城市环境和生活中过度的负面感官刺激,如拥挤无序的城市空间、交通噪声、空气污染带来的刺激性气味等,会使人脑信息过载,从而导致疲劳、分心;而沉浸在自然环境中会激活人的副交感神经系统,有利于身心放松和注意力恢复^[21-22]。SRT和BH则侧重于自然环境对人心理和情绪状态的影响,BH认为人类天性中具有被大自然所吸引的倾向^[23],沉浸在其中可以缓解压力,促进积极情绪的增加,并带来愉悦感^[24-26]。

在上述理论的基础上,来自多学科领域的研究者及团队开展了有关疗愈环境的实证研究。近年来,随着VR技术的发展,越来越多的团队开始关注VR技术所呈现的虚拟疗愈环境,其研究成果广泛分布于循证医学、认知科学、临床心理学、计算机图形学、康复医学等领域,研究领域较为分散,因此需要进一步对虚拟疗愈环境领域相关研究进行系统梳理和总结。

本研究对虚拟疗愈环境领域相关的文献进行综述,系统梳理了虚拟疗愈环境的应用领域和呈现技术、疗愈效益的评价工具及影响因素,总结分析了研究中所用到的主客观评价指标,为后续相关领域的研究实践提供参考。

1 文献检索及筛选

以Web of Science、ScienceDirect数据库和中国知网作为国外和国内文献数据库基础,以英文文献主题TS=virtual reality AND (healing environment OR nature OR landscape OR psychotherapy OR emotional intervention)和中文文献主题=“虚拟疗愈环境”AND“虚拟自然环境”,对综述和研究性文献开展检索,检索时间跨度为2010—2022年,共检索到26 951篇相关文献,涉及计算机科学、建筑学、心理学、行为学等多个学科。针对上述文献中的研究性文献,使用以下纳入标准,

以评估其和本研究主题的相关性:1)研究内容至少包括虚拟环境对人体生理、心理或情绪恢复影响中的一项;2)在实验过程中,研究者对参与者进行了问卷调查及生理指标测量。在得到的1 036篇与虚拟疗愈环境领域直接相关的文献中,通过阅读文献题目及摘要,将其中符合上述2条标准的文献挑出,共228篇(英文文献216篇,中文文献12篇)。对其研究背景、所使用的研究方法、实验范式、疗愈效益测量方法及主要结论进行总结与分析,共归纳出6种主要的虚拟疗愈环境的应用领域、2种虚拟疗愈环境的呈现技术和2种疗愈效益评价工具。

2 虚拟疗愈环境的应用领域和呈现技术

2.1 虚拟疗愈环境的应用领域

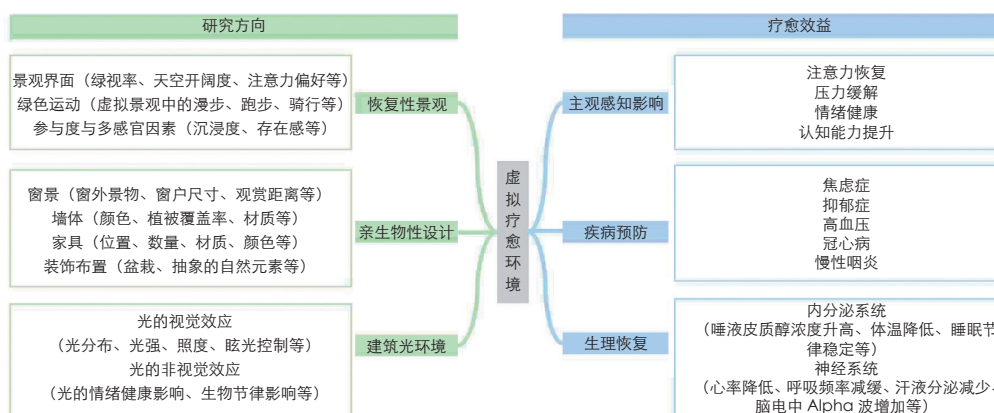
在恢复性景观、亲生物性设计、建筑光环境的研究中,VR技术常被用于构建实验环境、模拟和再现真实场景。而在此过程中,虚拟疗愈环境本身作为一种新型的沉浸式环境,其疗愈效益也得到了研究者的关注和实验数据的证实(图1)。虚拟疗愈环境在情绪干预、认知训练、运动康复、精神障碍治疗、睡眠干预、疼痛分散等领域显示出较为显著的效用^[8,27-43](表1)。

在恢复性景观的研究中,森林、海洋等自然倾向的景观影像被证实在情绪干预和认知训练方面的效益最高,人工化的自然景观(如城市绿地公园等)则有利于促进人们的社交倾向^[44-47]。Yu等^[48]考察了沉浸式虚拟城市环境与虚拟自然环境对人们情绪恢复性的影响,结果表明,相比虚拟城市环境,观看虚拟森林环境的受试者受到了更多的积极心理影响,并且他们的困惑、疲劳、愤怒、敌意、紧张和抑郁等负面心理情绪都有了显著的缓解。与此同时,对于缺乏锻炼的老年人群,在虚拟自然环境中的短时间沉浸,能够让其更有动力亲近真实的自然环境,激发他们参加户外活动的欲望^[44]。与此同时,虚拟森林、海滩等场景还被证明可以有效帮助人们缓解应激压力^[27]、分散疼痛感^[49]。在亲生物性设计的研究中,Yin等^[32]发现当受试者分别暴露于虚拟和真实亲生物性环境中时,其所表

现出的生理反应和认知结果差异不显著,证实了虚拟亲生物性环境与真实亲生物性环境具有相似的疗愈效益。在建筑光环境的研究中,已有研究证实了彩色动态媒体界面能通过色彩和图形的变化进行情绪诱导,其中动态的色彩图案内容与静态内容相比,使人产生情绪效益的作用更明显^[50],此类彩色动态媒体界面应用于手术治疗室、分娩室、养老机构、精神病院等室内空间,在促进使用者的积极情绪、减缓病痛和减轻精神行为症状等方面也显示出较好的效用^[27, 51-52]。Kuijsters等^[53]研究了情绪照明与老年受试者情绪倾向及唤醒度之间的关联,在对受试者施加悲伤的情绪刺激后,积极情绪倾向的氛围照明(红橙色光)比中性环境(白色光环境)能使人更快地从悲伤情绪中恢复过来;而施加焦虑情绪刺激后,放松情绪倾向的氛围照明(蓝紫色光)能使人更快地从焦虑中恢复过来。

2.2 虚拟疗愈环境的呈现技术

虚拟疗愈环境的呈现技术可分为头戴式设备(head-mounted device, HMD)^[54]和交互媒体(interactive media)界面2类。交互媒体界面的常见类型除手机、电脑等人机交互界面外,还包含结合建筑室内界面(如墙面、地面等)设置的交互投影、交互屏幕等系统^[55],交互媒体界面系统会依据用户的输入信息(如语音、动作等)计算输出内容^[56]。在2类虚拟疗愈环境的呈现技术中,HMD沉浸度较高,疗愈效果也被证实最趋近于真实自然环境,但容易造成晕动症(motion sickness);此外,HMD的视角震颤、频闪等问题也会导致人视觉不适,反而降低疗愈效果^[57];而且HMD更依赖专业人员的指导和辅助,交互过程的学习成本相对较高。而交互媒体界面较少引发头晕等不良反应,且交互过程多为自然交互(语音、手势、动作、表情等),较少需要指导和协助,更适合作为日常环境的交互模式,用来呈现虚拟疗愈内容。近年来用交互媒体界面方式呈现虚拟疗愈环境的应用场景愈加广泛,包括运动康复室(如在平衡训练中作为激励场景)、医疗检查室(减缓压力和分散疼痛),以及为自闭症儿童和认知症患者提供的多感官室(认知功能训练和减轻精神行为



1 虚拟疗愈环境的研究方向及疗愈效益框架

Research directions and healing benefits framework of virtual healing environments

表1 虚拟疗愈环境的应用领域分类^[8, 27-43]

Tab. 1 Classification of application fields of virtual healing environments^[8, 27-43]

应用领域	疗愈效益	虚拟环境内容
情绪干预	唤起积极情绪	人工照明环境 ^[8] 虚拟疗愈景观(包括森林、草原、海洋、城市绿地等) ^[27-30]
	抑制消极情绪	
	缓解压力	
认知训练	恢复注意力	虚拟疗愈景观 ^[31] 室内亲生物性环境 ^[32-34]
	激发创造性思维	
	提升工作效率	
运动康复	训练肢体肌力	虚拟日常生活任务训练 ^[35-36] 联合跑步机步行训练 ^[37] 空间定位游戏 ^[38]
	训练平衡力	
	缓解战后心理综合征	
精神障碍治疗	缓解社交焦虑症	虚拟战争场景 ^[39] 虚拟宴会和工作面试 ^[40] 虚拟蜘蛛暴露场景 ^[41]
	缓解蜘蛛恐惧症	
	改善睡眠障碍	
睡眠干预	改善睡眠障碍	综合感官刺激 ^[34, 42]
疼痛分散	缓解疼痛感知	虚拟环境中的运动 ^[43] 动态色彩图案

症状),这些虚拟体验被证实可以帮助特定人群减轻焦虑、沮丧等负面情绪,刺激记忆和认知功能等恢复性效果^[58-60]。

3 虚拟疗愈环境的疗愈效益评价工具及影响因素

3.1 虚拟疗愈环境的疗愈效益评价工具

虚拟疗愈环境的疗愈效益评价工具包括主观感知量表和生理指标测量2类。主观感知量表是应用最广泛的情绪测量工具,常用的量表包括正负情绪量表(the positive and negative affect scale, PANAS)、情绪状态量表(the profile of mood states, POMS)、厌恶敏感度量表(the disgust sensitivity scale, DSS)、多维态无聊量表(the multidimensional state boredom

scale, MSBS)、状态焦虑问卷(the state-anxiety inventory, SAI)等。在恢复性效果评价方面,知觉恢复量表(the perceived restorative scale, PRS)是使用最为广泛的量表之一,也有研究者使用自然联结量表(the connectedness to nature scale, CNS)和自然美感量表(the engagement with beauty scale, EBS)来评价人暴露于自然环境中的恢复性效果^[61]。

除主观感知量表外,生理指标也被广泛用来评价疗愈效益。当人遭遇压力或暴露于危险、恐怖的环境中时,人体神经系统中的交感神经会被激活,同时伴随着心跳加快、呼吸频率加快、体温升高、汗液分泌增加、瞳孔放大等应激反应;相反,当人身处放松和愉悦的环境中时,副交感神经则会被激活,

表2 虚拟疗愈环境的疗愈效益评价中常用生理指标

Tab. 2 Physiological indicators commonly used in the evaluation of healing benefits of virtual healing environments

生理指标	二级指标	疗愈效益表征
HR	平均心率 (average heart rate, AVHR)	反映唤醒度的指标。AVHR 上升, 表示心跳加快, 情绪唤醒度、压力上升
	心率变异性 (HRV)	反映情绪状态的指标。HRV 整体下降, 表示处于压力状态或情绪紧张状态; HRV 整体上升, 表示积极情绪增加, 并且副交感神经激活
	正常窦性心搏间期的标准差 (standard deviation of NN intervals, SDNN)	反映整体 HRV 大小和评估交感神经的敏感指标。SDNN 降低, 表示个体对环境的适应能力减弱
	相邻正常心动周期差值的均方根 (root mean square of successive differences, RMSSD)	评估副交感神经的敏感指标。RMSSD 上升, 表示压力水平、认知负荷减少, 同时积极情绪增加
	高频 (high frequency, HF) 能量	反映副交感神经的激活信息
	低频 (low frequency, LF) 能量	反映交感神经的激活信息
	低频与高频的能量比 (LF/HF)	反映自主神经的均衡控制指标。LF/HF 上升, 表示交感神经兴奋、人体疲劳感增加、紧张情绪增加
EEG	Alpha 波 (8~12 Hz) 功率谱密度	在不受外界刺激、安静、闭眼、清醒的情况下占主导的脑电波形。通常与放松、舒适等状态呈正相关
	Beta 波 (13~30 Hz) 功率谱密度	在精神紧张、压力负荷增大、情绪激动的情况下占主导的脑电波形
	Theta 波 (4~7 Hz) 功率谱密度	与认知加工、疲劳水平呈正相关, 当面临困难任务时, Theta 波功率谱密度增加
EDA	皮肤电导水平 (skin conductivity level, SCL)	反映阶段性的情绪唤醒水平的指标。SCL 越低, 唤醒度越低; 紧张、焦虑等负面情绪会增加 SCL
SC	SC 浓度	SC 浓度增加, 表示压力负荷增大
SA	唾液 α 淀粉酶活性	反映交感神经系统的活性指标。唾液 α 淀粉酶活性水平与压力水平呈正相关
BP	收缩压 (systolic blood pressure, SBP)	SBP、DBP 下降, 与放松、压力缓解等积极影响有关
	舒张压 (diastolic blood pressure, DBP)	
眼动数据	瞳孔尺寸	瞳孔扩张与高情绪唤醒及认知工作负荷增加有关
	眨眼频率	与认知工作负荷和个体注意力相关, 眨眼频率低意味着注意力的高度集中, 反之意味着注意力分散
	注视位置及注视次数	反映环境中视觉吸引力较强的元素
	单一注视时间	反映某个刺激相对于其他刺激对人们的吸引程度

从而抑制心脏、大脑、泌尿系统、呼吸系统等各器官组织的兴奋性, 使人体得到充分的休息和恢复^[62-64]。常用于评价真实和虚拟疗愈环境的疗愈效益的生理指标主要包括: 心率 (heart rate, HR)、脑电图 (electroencephalograph, EEG)、皮肤电活动 (electrodermal activity, EDA)、唾液皮质醇 (salivary cortisol, SC)、唾液淀粉酶 (salivary amylase, SA)、血压 (blood pressure, BP)、眼动数据 (表2); 针对不同的指标类型, 分析方法包括时域分析、频域分析、时频域分析等, 其中 HR 的数据多采用时域分析, EEG 数据则更多采用频域分析。

3.2 虚拟疗愈环境的疗愈效益影响因素

除虚拟疗愈环境的呈现技术对疗愈效益有影响以外, 虚拟疗愈环境提供的感官信息和虚拟疗愈环境的交互方式也是影响疗愈效

益的重要因素^[27, 29, 32, 48, 65-84] (表3)。

虚拟疗愈环境提供的感官信息通常包括视觉信息、听觉信息、嗅觉信息 (一般通过放置有嗅觉刺激的物品或化学气味播放器实现) 和触觉信息。虚拟疗愈环境的早期研究以视觉信息为主, 随着关注多感官因素的实验研究的增多, 有研究发现恢复性效益不仅局限于对视觉信息的反应, 其他感官因素对恢复性和情绪效益也有显著影响^[66-67], 具体效果取决于感官信息的内容是正向刺激因素还是负向刺激因素。此外, 还与多感官信息之间是否协同密切相关。Park 等^[85] 则观察到乡村声景比城市公园或城市环境中的声景具有更高的恢复效益。Hedblom 等^[81] 的研究表明, 嗅觉刺激可能比视觉刺激更有效地减少 EDA, 从而减少交感神经的活动。Serrano 等^[79] 发现,

当虚拟环境中存在触觉和嗅觉刺激时, 受试者放松程度增加, 唤醒度明显下降。Schebella 等^[82] 的研究表明, 与仅引入视觉刺激相比, 视觉和嗅觉联合刺激更能激发情绪和情感反应, 与此同时, 多感官的刺激还有助于促进个体回忆并增加受试者在虚拟环境中的临场感^[79-81], 其生理表现为前额叶皮层中氧合血红蛋白浓度显著降低。Annerstedt 等^[27] 发现, 虚拟环境中只有同时包含自然环境的视觉和声音信息时, 才会增加人体副交感神经的活动, 使人体得到充分的休息和恢复; 单一的视觉刺激反而会抑制副交感神经系统的活动, 当受试者在被剥夺听觉体验的同时观看寂静的森林环境, 会产生不适和恐惧的情绪。

除感官信息外, 由于 VR 系统的信息交互特征, 参与者与虚拟环境的交互方式也会影响虚拟环境的疗愈效益, 而交互方式会影响参与者在虚拟环境中的沉浸程度^[66]。虚拟环境的沉浸程度可通过参与感 (involvement) 来描述, 参与感是指用户在虚拟现实中与周围环境的沟通方式^[85-86] 和体验程度^[63], 其中沟通方式指参与者对场景中的刺激做出反应, 包括肢体动作、眼动及面部肌肉动作、语音交互和情绪反应等。参与感可以从沉浸感 (immersion)、临场感 (presence) 和感知真实感 (perceived realism) 3 个维度来评价。其中沉浸感用于评价交互环境为参与者提供的刺激及体验的连续性^[85]; 临场感是指个体在虚拟环境中身临其境的主观体验^[87]; 感知真实感是指参与者对虚拟环境真实与否的主观感受评价^[88]。在虚拟环境中增强环境的交互性与人员的参与感, 如允许参与者自主选择和控制视角^[76]、与环境内容进行动作交互^[69, 71, 74]、自主改变环境参数^[79] (如照明的强度、环境的颜色等), 那么人对于周围环境的临场感会显著提升, 愉悦和放松等积极情绪水平也会显著增加, 抑郁、焦虑等负面情绪水平则会明显降低, 且积极情绪的提升水平也略高于固定视角的场景^[76]。

4 总结与展望

随着新冠肺炎疫情常态化、高压快节奏生活的影响, VR 技术和虚拟疗愈环境有望成

表 3 不同虚拟疗愈环境的感官信息输出和交互方式汇总^[27, 29, 32, 48, 65-84]Tab. 3 Summary of sensory information output and interaction modes for different virtual healing environments^[27, 29, 32, 48, 65-84]

疗愈界面呈现方式	感官信息			交互方式	参考文献	
	视觉	听觉	嗅觉			
VR 头盔 (360° 视频)	城市广场绿地、湖面、公园	—	—	观察	[29]	
	带有绿植、自然窗景的室内亲生物性环境	—	—	观察	[32]	
	森林、瀑布、草坪等自然景观	相应环境下背景音	—	观察	[48]	
	桉树和草坪等自然景观	鸟鸣、溪流声	—	观察	[65]	
	晴天群山景观	柔和的钢琴和小提琴音乐	—	正念、冥想	[67]	
	森林景观	鸟鸣、流水、远处人和车辆的声音	—	观察	[68]	
	平静的海滩、非洲草原及野生动物	相应环境下背景音	—	观察	[70]	
	城市中广场绿地、河流	风声、鸟鸣、交通噪声	—	观察	[77]	
	海滩	海浪声、风声	促进放松的嗅觉项链	观察	[80]	
	草坪、冷杉树、灌木等城市森林环境	风声、交通噪声、鸟鸣	草坪和冷杉树的自然气味	观察	[81]	
	稀疏树木及草原	鸟鸣、微风吹过树叶的声音	不同种类土壤、草、树叶、花朵的气味	观察	[82]	
	城市公园	风电场噪声	—	观察	[83]	
	VR 头盔 (3D 建模)	广阔的田野、森林、山脉、瀑布、动物和海滩	节拍器的声音	—	行走漫步	[69]
		海岸小径, 完整的海景、海滩和田野	—	—	行走漫步	[71]
城市带绿化道路		—	—	骑行	[74]	
亲生物性病房环境		—	—	观察	[75]	
森林小径		—	—	行走漫步	[76]	
4 种不同窗墙比的窗景		—	—	观察	[78]	
室内亲生物性环境		舒缓的音乐	薰衣草香味	自由移动并可以更改墙壁颜色、灯光强度、地板材质等环境因素	[79]	
不同色彩搭配的病房		—	—	观察	[84]	
CAVE 270° 显示系统 (270° 视频)	自然环境包括森林、溪流等	—	—	观察	[27]	
VR 头盔 (360° 视频和 3D 建模)	日落时海滩风景	风声、波浪声、篝火声	—	通过手柄控制在模型中自由移动	[66]	
电脑屏幕 (二维视频)、VR 头盔 (360° 视频和 3D 建模)	海底珊瑚景观	相应环境下背景音	—	自由探索模型场景	[72]	
游戏机屏幕 (2D 建模)	超级马里奥游戏场景	游戏背景音	—	通过屏幕触摸自由探索模型场景	[73]	

注：“—”表示文献中没有设置或没有提到相应的感官信息。

为人们在工作生活间隙获得身心疗愈的有效工具。探索虚拟疗愈环境对人身心疗愈作用, 已成为循证医学、临床心理学、认知科学等学科的热点, 也为健康建筑、康复景观、亲生物性设计等领域的研究者提供了新的视角。本研究对虚拟疗愈环境及其疗愈效益研究进展进行了较为系统的综述, 并得出以下 4 点结论。

1) 已有研究证实了虚拟疗愈环境在情绪干预、认知训练、运动康复等领域的疗愈效果, 研究中涉及的场景内容包括虚拟自然景观、亲生物性环境和虚拟光环境, 以及针对有运动康复需求人群的绿色运动等。

2) 基于目前 VR 技术的发展水平, 虚拟疗愈环境的呈现技术可分为 HMD 和交互媒体

界面 2 类, 其中 HMD 因其较高的沉浸度, 更有利于提高恢复性效益, 但也增加了产生晕动症等不良反应的风险。

3) 主观感知量表结合多种类型的生理指标是实证研究中常用的疗愈效益评价工具, 主观感知量表在辅助情绪分类、判断主观偏好等方面具有易用性, 但受限于量表对即时应激反应的敏感度和被试个体差异, 若想获得更为可靠的实验结论, 仍需结合多种类型的生理指标数据 (如 HRV、SCL、EEG、SC 等)。

4) 除虚拟疗愈内容本身和虚拟疗愈环境呈现技术的影响以外, 虚拟疗愈环境提供的感官信息类别、多感官信息之间的匹配度及虚拟疗愈环境的交互方式也是影响疗愈效益的重要因素, 且不同的虚拟显示建模和呈现

技术会直接影响人在虚拟场景的沉浸感、临场感与感知真实感。

目前相关领域研究也存在一定的局限性。

1) 已有研究来源于不同学科, 对虚拟疗愈环境的定义、内涵以及具体分类仍需要更为系统的界定; 2) 实验多采用心理学实验范式, 但对实验中使用的压力及情绪诱导方式缺乏验证, 主观感知量表和生理指标的选用也存在很大差异, 导致实验结论的信度难以验证; 3) 实验中涉及的被试者常为特殊人群 (如脑卒中患者、精神障碍患者等), 导致被试规模一般较小, 数据质量偏低, 实验操作难度较大; 4) 虚拟疗愈环境的交互方式被证实对疗愈效益有显著影响, 但此方向的研究数量较少, 并且其对疗愈效益的影响并不呈线性相

关。因此今后的研究重点应放在探索最优的交互方式上,以期获得最佳的疗愈效益;同时,因人体的个体差异性较大,虚拟疗愈环境针对不同人群(如老年人、儿童、残疾人等)所产生的特殊疗愈效益也应该成为未来研究的重点方向。

参考文献 (References):

- [1] World Health Organization. Preamble to the Constitution of the World Health Organization as Adopted by the International Health Conference[EB/OL].(1946)[2022-06-22]. http://www.who.int/governance/eb/who_constitution_en.pdf.
- [2] 新华社. 中共中央 国务院印发《“健康中国2030”规划纲要》[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2016 (32): 5-20.
- [3] IACOVIDES A, FOUNTOULAKIS K N, KAPRINIS S, et al. The Relationship Between Job Stress, Burnout and Clinical Depression[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2003, 75(3): 209-221.
- [4] FERGUSON K T, EVANS G W. The Built Environment and Mental Health[M]//NRIAGU J. *Encyclopedia of Environmental Health*. 2nd ed. New York: Elsevier, 2019: 465-469.
- [5] BILLINGS A G, MOOS R H. Work Stress and the Stress-Buffering Roles of Work and Family Resources[J]. *Journal of Occupational Behaviour*, 1982, 3(3): 215-232.
- [6] BRATMAN G N, ANDERSON C B, BERMAN M G, et al. Nature and Mental Health: An Ecosystem Service Perspective[J]. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaax0903.
- [7] 黄舒晴, 徐磊青. 疗愈环境与疗愈建筑研究的发展与应用初探 [J]. *建筑与文化*, 2017 (10): 101-104.
- [8] ALTAF E, GUALANO R J, CROCKER R L, et al. An Integrative Health Framework for Wellbeing in the Built Environment[J]. *Building and Environment*, 2021, 205(1): 108253.
- [9] FRUMKIN H, BRATMAN G N, BRESLOW S J, et al. Nature Contact and Human Health: A Research Agenda[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(7): 075001.
- [10] WHITE M P, PAHL S, WHEELER B W, et al. Natural Environments and Subjective Wellbeing: Different Types of Exposure are Associated with Different Aspects of Wellbeing[J]. *Health and Place*, 2017, 45: 77-84.
- [11] OHLY H, WHITE M P, WHEELER B W, et al. Attention Restoration Theory: A Systematic Review of the Attention Restoration Potential of Exposure to Natural Environments[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2016, 19(7): 305-343.
- [12] STEVENSON M P, SCHILHAB T, BENTSEN P. Attention Restoration Theory II: A Systematic Review to Clarify Attention Processes Affected by Exposure to Natural Environments[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2018, 21(4): 227-268.
- [13] 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.
- [14] WELLS N M. At Home with Nature Effects of "Greenness" on Children's Cognitive Functioning[J]. *Environment and Behavior*, 2000, 32(6): 775-795.
- [15] FELNHOFER A, KOTHGASSNER O D, SCHMIDT M, et al. Is Virtual Reality Emotionally Arousing? Investigating Five Emotion Inducing Virtual Park Scenarios[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2015, 82: 48-56.
- [16] PALLAVICINI F, PEPE A, MINISSI M E. Gaming in Virtual Reality: What Changes in Terms of Usability, Emotional Response and Sense of Presence Compared to Non-immersive Video Games?[J]. *Simulation and Gaming*, 2019, 50(2): 136-159.
- [17] VALTCHANOV D, BARTON K R, ELLARD C. Restorative Effects of Virtual Nature Settings[J]. *Cyberpsychology Behavior and Social Networking*, 2010, 13(5): 503-512.
- [18] KIM S N, LEE H. Capturing Reality: Validation of Omnidirectional Video-Based Immersive Virtual Reality as a Streetscape Quality Auditing Method[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 218: 104290.
- [19] NUKARINEN T, RANTALA J, KORPELA K, et al. Measures and Modalities in Restorative Virtual Natural Environments: An Integrative Narrative Review[J]. *Computers in Human Behavior*, 2022, 126(C): 107008.
- [20] HEYDARIAN A, PANTAZIS E, WANG A, et al. Towards User Centered Building Design: Identifying End-User Lighting Preferences via Immersive Virtual Environments[J]. *Automation in Construction*, 2017, 81: 56-66.
- [21] STEPHEN K. *The Experience of Nature*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [22] OHLY H, WHITE M P, WHEELER B W, et al. Attention Restoration Theory: A Systematic Review of the Attention Restoration Potential of Exposure to Natural Environments[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2016, 19(7): 305-343.
- [23] KAHN P H. Developmental Psychology and the Biophilia Hypothesis: Children's Affiliation with Nature[J]. *Developmental Review*, 1997, 17(1): 1-61.
- [24] 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.
- [25] SHAFFEE N, SHUKOR S F A. The Effect of Natural Settings on Stress Reduction[J]. *Alam Cipta*, 2018, 11: 25-33.
- [26] BEATLEY T. Biophilic Urbanism: Inviting Nature Back to Our Communities and into Our Lives[J]. *William and Mary Environmental Law and Policy Review*, 2009, 34(1): 209-238.
- [27] ANNERSTEDT M, PETER J, WALLERG M, et al. Inducing Physiological Stress Recovery with Sounds of Nature in a Virtual Reality Forest: Results from a Pilot Study[J]. *Physiology and Behavior*, 2013, 118: 240-250.
- [28] YU C P, LEE H Y, HUANG Y C, et al. Restorative Effects of Virtual Natural Settings on Middle-Aged and Elderly Adults[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2020, 56: 126863.
- [29] WANG X X, RODIEK S, WU C Z, et al. Stress Recovery and Restorative Effects of Viewing Different Urban Park Scenes in Shanghai, China[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2016, 15: 112-122.
- [30] LI C, SUN C G, SUN M, et al. Effects of Brightness Levels on Stress Recovery When Viewing a Virtual Reality Forest with Simulated Natural Light[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2020, 56: 126865.
- [31] PALANICA A, LYONS A, COOPER M, et al. A Comparison of Nature and Urban Environments on Creative Thinking Across Different Levels of Reality[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2019, 63: 44-51.
- [32] YIN J, ZHU S H, MACNAUGHTON P, et al. Physiological and Cognitive Performance of Exposure to Biophilic Indoor Environment[J]. *Building and Environment*, 2018, 132: 255-262.
- [33] JIN Z K, JUAN Y K. Is Fengshui a Science or Superstition? A New Approach Combining the Physiological and Psychological Measurement of Indoor Environments[J]. *Building and Environment*, 2021, 201: 107992.
- [34] ABICHOU K, LA CORTE V, HUBERT N, et al. Young and Older Adults Benefit from Sleep, but not from Active Wakefulness for Memory Consolidation of What-Where-When Naturalistic Events[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2019, 11: 58.
- [35] ARLATI S, COLOMBO V, SPOLADORE D, et al. A Social Virtual Reality-Based Application for the Physical and Cognitive Training of the Elderly at Home[J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 261.
- [36] DE AMORIM J S C, LEITE R S, BRIZOLA R, et al. Virtual Reality Therapy for Rehabilitation of Balance in the Elderly: A Systematic Review and META-Analysis[J]. *Advances in Rheumatology*, 2018, 58(1): 18.
- [37] 潘志庚, 刘从晋, 葛莹莹, 等. 支持自然交互的虚拟跑步机系统的设计和实现 [J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(11): 2753-2759.
- [38] KAMIŃSKA M S, MILLER A, ROTTER I, et al. The Effectiveness of Virtual Reality Training in Reducing the Risk of Falls Among Elderly People[J]. *Clinical Interventions in Aging*, 2018, 13: 2329-2338.
- [39] SASHA C H. Virtual Healing: Militarizing the Psyche in Virtual Reality Exposure Therapy[J]. *Television and New Media*, 2019, 20(1): 56-71.
- [40] ZAINAL N H, CHAN W W, SAXENA A P, et al. Pilot Randomized Trial of Self-guided Virtual Reality Exposure Therapy for Social Anxiety Disorder[J]. *Behaviour Research and Therapy*, 2021, 147: 103984.
- [41] ROESMANN K, LEEHR E J, BÖHNLEIN J, et al. Behavioral and Magnetoencephalographic Correlates of Fear Generalization are Associated with Responses to Later Virtual Reality Exposure Therapy in Spider Phobia[J]. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 2021, 7(2): 221-230.
- [42] 王璐, 刘瑞凤, 周芸, 等. 虚拟现实技术联合生物反馈对老年高血压伴失眠患者血压及睡眠质量的改善作用 [J]. *老年医学与保健*, 2020, 26 (6): 952-955.
- [43] STAMM O, DAHMS R, MÜLLER-WERDAN U. Virtual Reality in Pain Therapy: A Requirements Analysis for Older Adults with Chronic Back Pain[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2020, 17(1): 1-12.
- [44] 张珍, 徐磊青. 虚拟自然的疗愈效益及其应用趋势 [J]. *南方建筑*, 2020 (4): 34-40.
- [45] REESE G, KOHLER E, MENZEL C. Restore or Get Restored: The Effect of Control on Stress Reduction and Restoration in Virtual Nature Settings[J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1-10.
- [46] ANDRINGA G, NUIJTEN P, MACVILLE M M, et al. Feasibility of Virtual Reality in Elderly with Dementia[M]//BRANKAERT R. *Dementia Lab 2019. Making Design Work: Engaging with Dementia in Context*. Berlin: Springer International Publishing, 2019: 146-149.
- [47] LIN C S, JENG M Y, YEH T M. The Elderly Perceived

- Meanings and Values of Virtual Reality Leisure Activities: A Means-End Chain Approach[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(4): 663.
- [48] YU C P, LEE H Y, LUO X Y. The Effect of Virtual Reality Forest and Urban Environments on Physiological and Psychological Responses[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2018, 35: 106-114.
- [49] TANJA-DIJKSTRA K, PAHL S, WHITE M P, et al. The Soothing Sea: A Virtual Coastal Walk can Reduce Experienced and Recollected Pain[J]. *Environment and Behavior*, 2018, 50(6): 599-625.
- [50] NISHIMURA T, HIRAI K, HORIUCHI T. Color Perception Comparison of Scene Images Between Head-Mounted Display and Desktop Display[J]. *Proceedings of the International Display Workshops*, 2019, 11: 1148.
- [51] MUÑOZ J E, MONTOYA M F, BOGER J. From Exergames to Immersive Virtual Reality Systems: Serious Games for Supporting Older Adults[M]//CHOUKOU M A, SYED-ABDUL S. *Smart Home Technologies and Services for Geriatric Rehabilitation*. Pittsburgh: Academic Press, 2021: 141-204.
- [52] SHIN Y B, WOO S H, KIM D H, et al. The Effect on Emotions and Brain Activity by the Direct/Indirect Lighting in the Residential Environment[J]. *Neuroscience Letters*, 2015, 584: 28-32.
- [53] KUIJSTERS A A, REDD J, DE RUYTER B, et al. Lighting to Make You Feel Better: Improving the Mood of Elderly People with Affective Ambiances[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0132732.
- [54] HAY M E. *Lived Experience and Process of Engagement in Physical Exercise for Older Adults with Chronic Back Pain*[D]. London: The University of Western Ontario, 2018.
- [55] ANGUERA J A, BOCCANFUSO J, RINTOUL J L, et al. Video Game Training Enhances Cognitive Control in Older Adults[J]. *Nature*, 2013, 501(7465): 97-101.
- [56] LAVER K E, GEORGE S, THOMAS S, et al. Virtual Reality for Stroke Rehabilitation[J]. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2015(2): CD008349.
- [57] LIU B Y, CHEN Y, XIAO M. The Social Utility and Health Benefits for Older Adults of Amenity Buildings in China's Urban Parks: A Nanjing Case Study[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(20): 7497.
- [58] ELSADEK M, LIU B Y, LIAN Z F. Green Façades: Their Contribution to Stress Recovery and Well-Being in High-Density Cities[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2019, 46: 126446.
- [59] SONG C, IKEI H, MIYAZAKI Y. Effects of Forest-Derived Visual, Auditory, and Combined Stimuli[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2021, 64: 127253.
- [60] ELSADEK M, LIU B Y, XIE J F. Window View and Relaxation: Viewing Green Space from a High-Rise Estate Improves Urban Dwellers' Wellbeing[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2020, 55: 126846.
- [61] ZHANG J W, HOWELL R T, IYER R. Engagement with Natural Beauty Moderates the Positive Relation Between Connectedness with Nature and Psychological Well-Being[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2014, 38: 55-63.
- [62] WANG Y, CHEN H. The Influence of Dialogic Engagement and Prominence on Visual Product Placement in Virtual Reality Videos[J]. *Journal of Business Research*, 2019, 100(C): 493-502.
- [63] LI D D, LIAU A K, KHOO A. Player-Avatar Identification in Video Gaming: Concept and Measurement[J]. *Computers in Human Behavior*, 2012, 29(1): 257-263.
- [64] ZHONG Z J, YAO M Z. Gaming Motivations, Avatar-Self Identification and Symptoms of Online Game Addiction[J]. *Asian Journal of Communication*, 2013, 23(5): 555-573.
- [65] SCHUTTE N S, BHULLAR N, STILINOVIĆ E J, et al. The Impact of Virtual Environments on Restorativeness and Affect[J]. *Ecopsychology*, 2017, 9(1): 1-7.
- [66] ROCKSTROH C, BLUM J, GÖRITZ A S. Virtual Reality in the Application of Heart Rate Variability Biofeedback[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2019, 130(C): 209-220.
- [67] TARRANT J, VICZKO J, COPE H. Virtual Reality for Anxiety Reduction Demonstrated by Quantitative EEG: A Pilot Study[J]. *Frontiers in Psychology*, 2018, 9: 01280.
- [68] BROWNING M H E M, MIMNAUGH K J, VAN RIPER C J, et al. Can Simulated Nature Support Mental Health? Comparing Short, Single-Doses of 360-Degree Nature Videos in Virtual Reality with the Outdoors[J]. *Frontiers in Psychology*, 2019, 10: 2667.
- [69] HAMZEHEINEJAD N, ROTH D, GÖTZ D, et al. Physiological Effectivity and User Experience of Immersive Gait Rehabilitation[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. *The First IEEE VR Workshop on Applied VR for Enhanced Healthcare (AVEH)*. New York: IEEE, 2019.
- [70] KARACAN B, KOMBEIZ O, STEIDLE A. Powered by Virtual Realities: Promoting Emotional Recovery Through Technology-Based Recovery Interventions[J]. *Ergonomics*, 2021, 64(10): 1351-1366.
- [71] TANJA-DIJKSTRA K, PAHL S, WHITE M P, et al. The Soothing Sea: A Virtual Coastal Walk can Reduce Experienced and Recollected Pain[J]. *Environment and Behavior*, 2018, 50(6): 599-625.
- [72] YEO N L, WHITE M P, ALCOCK I, et al. What is the Best Way of Delivering Virtual Nature for Improving Mood? An Experimental Comparison of High Definition TV, 360° Video, and Computer Generated Virtual Reality[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2020, 72: 101500.
- [73] KÜHN S, GLEICH T, LORENZ R C, et al. Playing Super Mario Induces Structural Brain Plasticity: Gray Matter Changes Resulting from Training with a Commercial Video Game[J]. *Molecular Psychiatry*, 2014, 19: 265-271.
- [74] BIRENBOIM A, DIJST M, ETTEMA D, et al. The Utilization of Immersive Virtual Environments for the Investigation of Environmental Preferences[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 129-138.
- [75] GAO C, ZHANG S S. The Restorative Quality of Patient Ward Environment: Tests of Six Dominant Design Characteristics[J]. *Building and Environment*, 2020, 180(2): 107039.
- [76] LI C, SUN C A, SUN M K, et al. Effects of Brightness Levels on Stress Recovery When Viewing a Virtual Reality Forest with Simulated Natural Light[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2020, 56: 126865.
- [77] JEON J Y, JO H I. Effects of Audio-Visual Interactions on Soundscape and Landscape Perception and Their Influence on Satisfaction with the Urban Environment[J]. *Building and Environment*, 2020, 169: 106544.
- [78] YEOM S, KIM H, HONG T. Psychological and Physiological Effects of a Green Wall on Occupants: A Cross-Over Study in Virtual Reality[J]. *Building and Environment*, 2021, 204(3): 108134.
- [79] SERRANO B, BAÑOS R M, BOTELLA C. Virtual Reality and Stimulation of Touch and Smell for Inducing Relaxation: A Randomized Controlled Trial[J]. *Computers in Human Behavior*, 2016, 55: 1-8.
- [80] FERNANDEZ J A, RICHER R, ZHAO N, et al. Promoting Relaxation Using Virtual Reality, Olfactory Interfaces and Wearable EEG[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. *2018 IEEE 15th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*. New York: IEEE, 2018.
- [81] HEDBLM M, GUNNARSSON B, IRAVANI B, et al. Reduction of Physiological Stress by Urban Green Space in a Multisensory Virtual Experiment[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 10113.
- [82] SCHEBELLA M F, WEBER D, SCHULTZ L, et al. The Nature of Reality: Human Stress Recovery During Exposure to Biodiverse, Multisensory Virtual Environments[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 17(1): 56.
- [83] YU T H, BEHM H, BILL R, et al. Audio-Visual Perception of New Wind Parks[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 165: 1-10.
- [84] 陈尧东, 崔哲, 郝洛西. 基于 VR 技术的适老色彩环境循证设计方法探索: 以适老建筑室内色彩设计为例 [J]. *照明工程学报*, 2019, 30 (2) : 123-129.
- [85] PARK S H, LEE P J, JUNG T, et al. Effects of the Aural and Visual Experience on Psycho-Physiological Recovery in Urban and Rural Environments[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 169: 107486.
- [85] SEMIHA E, AHMED R, ZOU Z B, et al. Quantifying Human Experience in Architectural Spaces with Integrated Virtual Reality and Body Sensor Networks[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2019, 33(2): 04018062.
- [86] CADET L B, CHAINAY H. How Preadolescents and Adults Remember and Experience Virtual Reality: The Role of Avatar Incarnation, Emotion, and Sense of Presence[J]. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 2021, 29: 100299.
- [87] STANNEY K, SALVENDY G. Aftereffects and Sense of Presence in Virtual Environments: Formulation of a Research and Development Agenda[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1998, 10(2): 135-187.
- [88] RIBBENS W, MALLIET S. Perceived Digital Game Realism: A Quantitative Exploration of Its Structure[J]. *Presence Teleoperators and Virtual Environments*, 2009, 19(6): 585-600.

图表来源 (Sources of Figure and Tables):

图 1 由作者绘制; 表 1 由作者根据参考文献 [8][27]~[43] 整理绘制; 表 2 由作者绘制; 表 3 由作者根据参考文献 [27][29][32][48][65]~[84] 整理绘制。

(编辑 / 邓泽宜 李清清)