arXiv:2601.04781v1 [cs.HC] 8 Jan 2026

高度沉浸式VR场景中的动态热反馈：用户体验的多模态分析

Sophie Villenave、Pierre Raimbaud 和 Guillaume Lavou´e

摘要——热反馈对于一系列虚拟现实（VR）应用至关重要，例如消防训练或热舒适度模拟。既有研究表明，加入一致的热反馈能够积极影响用户体验（UX）。然而，现有研究尚未比较不同水平的热反馈质量，并且大多使用沉浸感较低的虚拟环境。为探究科学文献中的这些空白，我们在两个高度沉浸式VR场景——荒岛（n=25）和雪山（n=24）——中开展了被试内用户研究。参与者在三种条件下探索这些场景（仅视听、静态热反馈和动态热反馈）。为评估热反馈对用户体验的复杂且细微的影响，我们通过交叉分析问卷、半结构化访谈和行为指标数据，开展了多模态分析。结果表明，尽管仅视听条件下的临场感水平已经很高，但加入热反馈后，临场感进一步提升。不同热反馈质量水平之间的比较显示，用户体验问卷结果不存在显著差异；不过，根据参与者画像和访谈结果，这一结论仍需加以细化。此外，我们发现，尽管通行顺序不会直接影响用户体验，却会影响用户行为。我们提出了在虚拟现实中使用热反馈，以及设计复杂多感官场景研究的指导原则。

索引词——虚拟现实、热反馈、用户体验、感知、临场感、行为、多模态分析

一、引言

THermal 感知是人类感官体验的基本组成部分，在舒适度 [1]、情绪 [2]，尤其是身体热调节 [3]方面发挥着至关重要的作用。尽管在传统的虚拟现实体验中，这种感官往往被忽视，但有些应用需要热反馈才能发挥作用，例如消防员培训 [4]，或人造环境中的热舒适度评估 [5]。为此，文献中已开发并评估了各种专用于虚拟现实的热反馈设备。这些评估至少服务于两个主要目标之一：确保设备能够提供逼真的热反馈，并了解热反馈如何影响虚拟现实体验。

在以往包含热反馈的虚拟现实研究中，参与者通常沉浸于交互有限、保真度较低的虚拟环境中。因此，热反馈的积极作用可能被高估。此外，对于给定的虚拟物体或环境，研究只呈现一种质量水平的热反馈，因此比较的仅是有无热模态的差异。然而，热反馈源自热传递这一物理现象，其类型（辐射、传导和对流）、方向（放热或吸热）以及表面积均可能多种多样。在虚拟现实中加入热反馈时，还必须考虑：它与虚拟环境的一致性、对交互的适应程度（即动态性），以及动作与相应刺激之间的时间间隔（即延迟）。尽管已有研究探讨了热反馈与虚拟环境的一致性，并表明一致的反馈对用户体验有积极影响 [6]，而不一致的反馈则会产生负面影响 [7]，但其他因素的影响仍缺乏充分研究。

为弥补这些不足，我们在此研究动态性作为热反馈质量因素的作用，并将研究置于这样一种环境中：视听质量较高，且用户参与任务导向场景。我们开展了一项被试内用户研究，以评估动态环境热反馈对用户体验（UX）的影响；参与者体验了两个不同虚拟现实场景中的一个：用于热刺激的荒岛（n = 25）或用于冷刺激的雪山（n = 24）。这些任务导向场景具有高保真视听环境，用户可通过传送进行探索；我们的装置还允许用户在2米×2米的物理空间内自由移动。参与者在不同热反馈条件下重复体验该场景三次：对照组（即无热反馈）、静态（即与场景一致但不随用户行动变化的热反馈）以及动态（即与场景一致且会随用户行动变化的热反馈）。

我们通过体验后问卷测量热感知、一般临场感 [8] 和身体临场感 [9]、可行动性感知 [9]，以及触觉体验 [10]。由于我们的实验条件在热反馈质量方面仅提供了细微差异，为了更细致地分析结果，我们还在最后一次（第三次）体验结束后，通过半结构式访谈收集了定性见解。问卷和访谈对于理解用户体验（UX）至关重要，但仅限于对实际体验进行主观且异步的报告 [11]。因此，为了收集同步且客观的数据，我们还使用PLUME工具箱系统地记录了虚拟现实体验过程 [12]，并分析了多项用户行为指标：参与者的物理位置和虚拟位置，以及

S. Villenave、P. Raimbaud、G. Lavou´隶属于法国里昂中央理工学院、法国国家科学研究中心、里昂国立应用科学学院、克洛德·贝尔纳里昂第一大学、LIRIS、UMR5205、ENISE，地址：法国圣艾蒂安42023。电子邮箱：name.surname@liris.cnrs.fr。稿件收稿日期xxx；修订日期xxx

以及已执行的传送次数。利用这些 0000–0000/00$00.00 © 2021年 IEEE

通过这三种互补的数据来源，我们提出了一种用户体验多模态分析，考虑两个主要因素：热反馈质量（无、静态、动态）以及被试内设计所带来的通行顺序（第一、第二、第三）。

我们的结果拓展了早期研究发现，并表明，即使在沉浸感极强的虚拟环境中，协调一致的环境热反馈也能显著增强临场感。然而，我们发现，静态热反馈与动态热反馈在用户体验问卷结果上不存在统计学显著差异。尽管如此，通过考虑热敏感性的差异以及访谈中报告的体验，我们发现静态热反馈与动态热反馈之间确实存在用户体验差异，但人们对这种差异的感知在很大程度上取决于个体。这表明，尽管在高沉浸场景中，动态热反馈可能并非必不可少，但采用考虑个体热敏感性的用户驱动方法，或许能提升其效果。关于通行顺序对用户体验的影响，虽然我们未在问卷结果中发现主效应，但通行顺序确实对行为指标产生了主效应。具体而言，在两种场景中，物理与虚拟移动距离都呈现逐次减少的趋势；在荒岛场景中，传送次数、漫游熵和运动熵也同样如此。

总而言之，我们的贡献如下：(1) 本研究通过测量高度沉浸式虚拟环境中环境热反馈对用户体验的影响，拓展了先前的研究成果。(2) 这项关于热反馈质量因素对用户体验影响的新研究，通过比较静态与动态热刺激的益处，弥补了相关研究的不足。(3) 我们提出了一种原创的多模态分析框架，用于揭示高度沉浸式虚拟现实场景中热反馈对用户体验的细微影响。(4) 最后，我们提出了方法上的建议，以探究复杂虚拟现实环境中热参数对用户体验的影响。

II. 相关工作

借助多感官虚拟现实系统，用户受到的刺激不再局限于视听线索，这意味着至少会有一种额外的感觉模态参与对虚拟环境的感知（例如，触觉 [13], 嗅觉 [14], 味觉 [15]）。触觉模态包括触觉反馈和动觉反馈 [13],，是研究最为广泛的模态 [16]，因为它们能让用户以更高的真实感和精确度感知并操控虚拟物体。（选择和操控是与虚拟物体交互的主要方式。）触觉中较少受到关注的一个方面是热感知 [16], ，它有望提升虚拟现实中的真实感和沉浸感 [6]。本节回顾了采用能够产生环境热刺激的设备开展的虚拟现实研究。我们重点介绍其中的关键发现，尤其是热反馈如何与其他感觉模态相互作用；鉴于多感官虚拟现实中跨模态感知的复杂性，这是一个重要的考量因素。我们还考察了热反馈如何影响整体用户体验，尤其是临场感。最后，我们概述了有助于在沉浸式环境中全面评估用户体验的多模态方法。

A. 虚拟现实环境热反馈显示设备

虚拟现实热反馈系统经历了显著的发展：从早期利用红外灯和/或风扇提供非接触式效果的非穿戴式装置 [17], [18]，发展到如今采用帕尔贴元件 [19], [20]的微型化可穿戴设备。da Silveira 等人 [6] 的综述梳理了这一发展历程，并指出了延迟以及受热力学约束导致响应性有限等常见挑战。无论是产生环境热反馈（旨在模拟虚拟环境中的整体环境温度），还是产生局部热反馈（模拟在虚拟环境中触摸冷热物体），都会遇到这些挑战。本研究聚焦于环境热反馈的创建与评估，其应用场景多样且值得关注：天气状况等环境线索 [21], [22],、火灾疏散演练 [23], 以及人造环境中的热条件 [5], [24]。

早在1997年，Dionisio [17] 便为非沉浸式虚拟现实制作了一套先进的热反馈系统。该系统将红外灯和风扇布置在用户周围，并在椅子的扶手中集成了帕尔贴元件；用户必须坐在这把椅子上才能体验虚拟现实。后来，人们再次采用了红外灯与风扇相结合的构想，并将其改造用于沉浸式虚拟现实：既用于 H¨ulsmann 等人 [25], 在 CAVE 中开发的系统，也用于 Villenave 等人 [26]开发的头戴式显示器装置。后者是开源的，与用于虚拟环境开发、应用最广泛的游戏引擎 Unity 完全集成，并经过了感知特性评估。Han 等人进一步拓展了这一概念，将其应用于使用头戴式显示器的沉浸式虚拟现实；他们的“Haptic Around” [27] 支持在追踪范围为 2×2 米的区域内进行完整的天气模拟，包括薄雾和风；但该系统难以复现，且仅能作用于上半身。尽管红外灯能有效产生热感，但其较低的功率（300 W）难以传递火焰的灼热感，而这对于建筑疏散模拟或消防员培训至关重要。在这些情况下，研究者使用了大功率红外加热器（1–2 kW） [28], [29] ，但无法直接对其进行控制；因此，必须在加热器前方加装金属百叶窗，并通过虚拟环境控制百叶窗，从而导致功耗显著增加。研究者还使用了更易获取的解决方案，例如可手动操作的传统加热器或落地扇 [30], [31], ，以模拟环境温度变化。尽管上述用于提供环境热反馈的系统体积庞大，而且由于热致动器作用范围有限，往往会限制虚拟现实活动区域的大小，但它们能够提供真实的全身刺激，并可由虚拟环境控制。这些系统无需穿戴，因此不会造成干扰，使用起来也很方便，适合虚拟现实用户研究，因为无需将任何设备安装在用户身上。

通过策略性布置帕尔贴元件来提供环境热反馈的尝试颇有前景，因为这种方式能最大限度地减少热系统的空间占用。为模拟环境热反馈，帕尔贴元件已被直接集成到头戴式显示器 [7], [19], [32]或可穿戴项链 [33], [34]中。然而，帕尔贴元件需要高性能冷却系统，而这类系统无法

舒适地集成在用户头部与头戴式显示器之间 [19], ，并且往往需要连接电源的线缆或电池组，从而限制行动能力，损害整体用户体验。近期有一项将帕尔贴元件集成到控制器中以增强其功能的方案，声称功耗极低 [35], ，因此既不需要大容量电池，也不需要笨重的冷却系统，但截至本文撰写时尚无用户研究可供参考。为克服帕尔贴元件的局限，Xu 等人提出了局部但不可穿戴的涡流管方案，能够快速产生冷感 [36]。在后续研究中，同一团队通过将涡流管与光结合，成功提供了持久的冷反馈 [37]。一种新兴的热感觉提供方法，是直接刺激负责产生感觉的神经，而不引起实际温度变化。Brooks 等人 [38] 以及后来的 Jasmine 等人 [39] 利用了薄荷醇和辣椒素等化学物质；Saito 等人 [40] 则表明，对额头进行电刺激能够产生冷感。尽管有研究表明，刺激面部或颈部等特定身体部位可以营造整体热变化的错觉 [1], ，但据我们所知，虚拟现实领域尚未开展确凿的比较研究，以验证这种局部反馈是否确实能够再现虚拟环境的整体环境温度。

在本研究中，我们希望采用一种环境热反馈系统，使其能够无缝融入虚拟现实体验，尽量减少干扰，能够根据用户行为做出自适应响应，并且易于集成到开发流程中。为此，我们实现了 Villenave 等人 [26], 提出的系统，在设计中优先考虑人体工学，而非活动区域大小和硬件紧凑性。

B. 热反馈对用户体验的影响

先前研究表明，热反馈会显著影响虚拟现实体验的各个方面。Han 等人 [21], [27]发现，加入包括热反馈在内的多感官刺激能够提升愉悦感、真实感和沉浸感，但保持各种刺激之间的一致性至关重要，否则会破坏沉浸感。G¨unther 等人 [22]证明，在感知温度时，热刺激往往比视觉刺激更占主导。同样，他们还发现，一致的热觉线索能提升用户参与度，而不一致的线索则会降低用户参与度。Ragozin 等人 [7] 发现，热觉线索对临场感也有相同影响。其他研究探讨了热反馈在特定情境中的作用。Shaw 等人 [23], 使用先前开发的系统 [28]，表明，在虚拟现实火灾疏散模拟中，热刺激增强了真实感，进而提高了压力，并促使用户表现出更真实的行为。Monteiro 等人 [4] 指出，对于在虚拟现实中接受训练的消防员而言，热刺激至关重要，尽管此类刺激会降低任务表现，且不会提升临场感。Mazursky 等人[41] 发现，他们的热反馈设备提升了交互式虚拟现实场景中的感官参与度和真实感。

热舒适度源于对周围热环境的感知，但由于一系列生理、心理 [42],和文化因素 [43]，个体之间存在很大差异。尽管这些个体差异具有重要意义，但在涉及热反馈的虚拟现实研究中却未受到充分关注。在这方面，Philippe 等人 [44]表明，在有座位的虚拟现实体验中，用户的热偏好会影响热刺激对情绪反应和热舒适度的作用；Han 等人 [21]还观察到，参与者的过往经历和热预期会影响其沉浸感。

总而言之，先前关于虚拟现实热反馈的研究大多局限于开关对比，且通常在简单的虚拟环境中实施。本研究旨在通过确定热反馈的最佳参数来拓展这项研究，从而提升其在更具沉浸感的虚拟现实场景中的适用性和影响力。

C. 用户体验的多模态分析

虚拟现实中的用户体验评估通常仅通过体验后问卷进行 [45]。尽管问卷对于理解用户体验至关重要，但它们与实际体验并不同步 [46] ，且可能受到偏差影响 [47], ，因此不足以全面描述用户体验，尤其是在涉及结构化任务、叙事和高度沉浸感的复杂场景中。为补充问卷，研究方案可能会纳入半结构式访谈，要求参与者回忆并反思自己的体验 [48]。尽管这类定性反馈的转录和分析耗时，但它极具价值，因为能帮助研究者深入、细致地理解参与者的亲身体验。近期研究通过利用扩展现实系统输出的数据，提出了客观且与体验同步的用户体验测量方法，因为这类系统为收集丰富的行为数据提供了低成本的途径，包括离散事件（例如交互、传送、事件标记）和连续数据流（例如头部和手部动作、眼动追踪）。这些数据源可用于推断身体、认知和情感状态，例如晕动症 [49],、认知负荷 [50], [51],、好奇心 [51], [52], 、临场感 [53]和社会临场感 [54]。尽管利用此类行为数据理解扩展现实中的用户体验显然有诸多优势，但由于分析复杂，这些数据往往会被弃置。不过，专用软件工具 [12] 的最新进展大幅降低了记录和分析扩展现实活动中的离散事件与连续信号的门槛。除行为数据外，扩展现实研究还可采用皮肤电活动、心电图和肌电图信号，这些信号已被证明有助于评估认知和情绪状态 [55]。这些策略各有优势与局限，我们认为应互为补充地使用它们，以开展多模态分析，从而更准确地捕捉扩展现实中用户体验的复杂性。在多感官虚拟现实研究中，结合问卷、访谈以及行为指标和/或生理数据进行分析的研究仍然很少，例如 Shaw 等人的研究 [23], 。在本研究中采用强有力的多模态分析后，我们发现，将客观数据进行交叉分析，并结合参与者通过问卷和/或半结构化访谈报告的体验加以解读，便能获得有意义的见解。

D. 研究动机与问题

先前采用环境热反馈系统的虚拟现实研究普遍认为，加入这一热模态有助于提升用户体验，前提是刺激与虚拟环境相符。然而，这些研究大多在视觉沉浸感较低的条件下开展 [22], , 所用虚拟环境的交互性极低或完全没有交互性 [7], , 用户移动能力有限 [5], , 或同时受到这些条件的限制。这些限制会对沉浸感产生负面影响，因此，环境热反馈所带来的益处在应用于更具沉浸感的虚拟现实体验时，未必仍然成立。因此，我们认为有必要拓展这些研究发现，以确定其是否适用于高度沉浸式虚拟现实环境。

以往研究考察了单一水平的热反馈，将有热反馈与无热反馈进行比较。然而，在虚拟现实中引入热反馈，需要考虑其与虚拟环境的一致性、对交互的适应性、空间化方式以及延迟。尽管已有研究表明，一致的反馈能对用户体验产生积极影响，但其他因素的作用仍未得到充分探讨。

为弥补这些研究空白，我们设计了一项研究，在两个视觉内容丰富、能引发用户不同热预期的环境中开展：荒岛和雪山。在每个场景中，参与者都在引导式叙事中完成任务，并体验三种条件：对照组（仅视听）、静态热反馈条件（固定强度）以及动态条件，其中热强度会根据用户的动作动态变化。为了评估用户体验，并具体探究能动性在热刺激中的作用，我们采用了多模态分析方法，结合自我报告问卷、半结构式访谈和行为指标。

我们探讨以下研究问题：

- 研究问题1：在高度沉浸式虚拟现实中加入环境热反馈，能否进一步提升用户体验?
- 研究问题2：与静态热反馈相比，动态热反馈能否提供更优的用户体验?
- 研究问题3：热反馈质量是否会影响用户行为?
- 研究问题4：被试内设计研究中固有的通行顺序是否会影响用户体验和/或用户行为?

III. 用户研究

为探究上述研究问题，我们对一项被试内用户研究进行了多模态分析，旨在比较高度沉浸式、交互式虚拟现实场景中环境热反馈的质量水平。下一节将详细介绍用于评估用户体验的实验设计、开发的虚拟现实场景、条件和评估方法。

A. 参与者

我们为荒岛场景招募了25名参与者，为雪岛招募了24名参与者。理论上，这使我们能够检测到大小分别为0.53和0.54的效应，这一点已得到验证

场景	荒岛		雪山	
	Mean	SD	Mean	SD
Age	26.83	11.4	26.58	9.67
VR 熟练度	1.71	1.23	1.92	1.10
电子游戏经验	2.38	1.50	2.58	1.56
冷敏感性	3.04	1.52	2.83	1.58
温暖敏感度	2.96	1.68	3.167	1.66
性别	11名女性；12名男性；1名其他性别		8名女性；15名男性；1名其他性别	

表 I：每个场景中参与者的性别、年龄、VR 熟练度（0 = 从未使用， 4 =专家级）、电子游戏经验（0 = 从未， 4 = 经常）和热敏感性（0 = 完全不同意， 6 = 完全同意）。

通过使用 G*Power [56]进行的实验后功效分析。参与者并不了解实验的确切目的，且视力和听力正常或经矫正后达到正常水平。本研究经里昂大学 ComUE 研究伦理委员会批准，批准编号为2023年-09-21-005。所有参与者均在参加研究前签署了知情同意书。研究结束后，研究人员要求参与者脱去外层衣物，露出手臂；理想情况下，参与者应穿着T恤，以尽可能统一参与者的着装。表I展示了两组参与者的人口统计数据。

B. 装置

1）热反馈系统：为提供环境热反馈，我们采用了一种此前开发并验证过的非穿戴式解决方案，适用于六自由度虚拟现实环境 [26],，如图 1 所示。该系统通过 300 W 红外灯提供温暖，同时最大限度地减少光输出并最大化热效应。冷却则通过轴流风扇实现，风扇以环境空气置换皮肤周围的暖空气，从而增强蒸发散热。整个装置通过 DMX-512 协议进行控制：定制的 DMX 控制器通过 USB 与虚拟现实计算机连接，从而能够根据 Unity 环境实现实时驱动。红外灯通过 4 通道 DMX 调光器进行调节，而配备集成控制器的风扇则使用 3 针 XLR 电缆进行串联，以实现同步运行。该系统能够为温暖和寒冷提供可重复且可调节的热感觉，并支持感知特征分析（参见补充材料中的附录 A）。所有硬件规格和控制软件均采用开源形式，以便研究群体重复使用和适应[1]。

2) VR 设置：硬件经过精心挑选，以提供可靠且身临其境的虚拟现实体验。为实现视觉沉浸感，我们使用了运行于 Ultra 设置（4896 x 2448 @ 90Hz）的 HTC Vive Pro 2；交互则通过 Valve Index 控制器实现，该控制器因其符合人体工学的设计和直观的操作而被选用。我们将 SteamVR 配置为房间尺度模式（2m x 2m），使参与者能够在真实空间中自由移动，但实际移动能力有限。通过缩小活动区域，我们提高了热反馈的可靠性，使其对不同参与者都能保持有效且一致。此外，这一

[1]https://github.com/liris-xr/6dof-vr-thermal-feedback

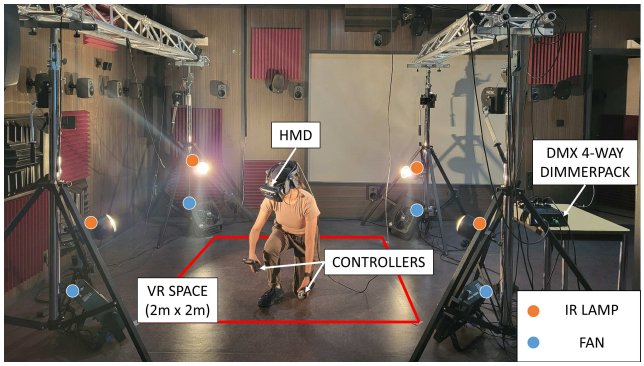


图 1：带热反馈系统的 VR 设置

套设置的性能超过了房间规模虚拟现实的最低要求，且易于复现，从而确保我们的研究发现具有广泛的适用性。用于在头戴式显示器中渲染虚拟环境的计算机配备了高端中央处理器（参考型号：Intel Core i9-9900KF）和图形处理器（参考型号：NVidia RTX 3080ti）。音频通过主动降噪耳机（参考型号：Sony WH-1000XM5）播放。

3）Valve Index 控制器教程：本实验使用 Valve Index 控制器，我们认为它在标准 Steam VR 控制器（HTC Vive Wand）与手部追踪之间实现了良好的折中。Valve Index 控制器固定在用户手上，并使用触觉区域代替扳机来进行抓取交互。因此，参与者始终可以保持放松的手部姿势，从而减轻疲劳；他们还可以用整只手抓取虚拟物体，而不只是用中指，提升交互的真实感和直观性。与基于计算机视觉的手部追踪相比，用户无需在整个体验过程中始终将双手置于头戴式显示器的传感器前方。此外，控制器提供通用的被动和主动触觉接口，因为控制器本身可作为虚拟物体的物理代理物，而悬停时产生的振动则能清晰提示可供性。为确保参与者尽可能熟悉这些控制器，并尽量减少 VR 熟练度对其完成高交互性场景时表现造成的偏差，我们设计了一个简短的专门教程。教程首先指导参与者在虚拟场景中行走，并触及活动区域边界附近的四个标记点。此任务旨在帮助参与者感知校准后的活动空间的虚拟边界，并适应沉浸式环境。接下来，画面中会出现手部的视觉呈现。参与者需要在空间中移动真实的手，将手部的本体感觉与虚拟手的视觉呈现联系起来。随后，教程会展示控制器的三维模型。每个按钮依次以红色高亮显示，提示用户按下相应按钮以取消高亮。虚拟手会相应地做出动画，以强化物理输入与视觉反馈之间的联系。之后，教程通过虚拟控制器上方的工具提示介绍移动方式。由于物理活动空间有限，但参与者仍需探索虚拟环境，因此他们将学习如何进行瞬转（即使用摇杆快速旋转 45°），以及传送。参与者必须使用这种方式穿越 15 米的虚拟距离。最后，教程以交互训练收尾。后续场景只要求参与者掌握抓取物体以完成所需操作，因此他们会练习抓取 3 个虚拟立方体，并获鼓励通过堆叠或投掷来摆弄这些立方体。补充材料中提供了展示该教程的视频。

C. 虚拟环境

虚拟环境使用 Unity 2022.3.21f 开发，实验中的虚拟现实部分则由 OpenXR 和 XR Interaction Toolkit 插件管理。这些虚拟环境旨在通过高质量的视觉和听觉刺激，最大限度地提升用户的临场感。为确保视觉连贯性，每个环境都经过精心设计，具有一致的网格质量、细致的地形和逼真的物体。音频采用非空间化的环境音来营造整体氛围，并以局部空间化声音增强沉浸感，使用户交互更具影响力。为与此前研究热刺激对用户体验影响的研究保持一致 [21], [34], ，我们创建了刻板化的热环境，即能够引发普遍热感觉的环境。具体而言，在动态条件下，每个环境都提供两个不同的热反馈强度水平：一个对应参与者暴露在外时，另一个对应参与者处于庇护所时。在移动方面，参与者可以传送至整个地形表面，因为该表面被标记为传送区域。传送虽会略微降低临场感和参与者在虚拟环境中的定向能力 [57], ，从而限制晕动症风险，但非常适合本实验采用的引导式场景。最后，对两个场景的结构进行了安排，以确保热刺激的时间安排和顺序保持可比。场景有意设计得尽可能线性，便于理解，同时尽量减少不必要的探索。场景的每个步骤都清晰地显示在屏幕底部的悬浮画布上，以引导用户。

荒岛场景参与者在飞机失事后醒来，发现自己被困在荒岛上，开始体验（1 - 有遮蔽）。随着太阳愈发炽烈，他们被提示寻找补水来源。场景指出附近有椰子，并指示参与者用周围的一块石头用力将其砸开，饮用里面的椰汁（2 - 暴露）。补充水分后，参与者被指示搭建一个小型庇护所，以保护自己免受不断升高的热量影响。为此，他们必须收集散落在树木周围的大块棕榈叶，并将其插入沙地上指定的位置（3 - 暴露）。成功搭建小屋后，他们被指示躲进里面避开太阳，在等待救援的同时打开第二个椰子并饮用其中的椰汁（4 - 有遮蔽）。最终，一架救援直升机靠近该岛，参与者需要向其移动，以完成该场景（5 - 暴露）。图 2 描绘了这一场景。

雪山场景 当参与者进入虚拟环境时，他们发现自己置身于一间小屋中，周围是

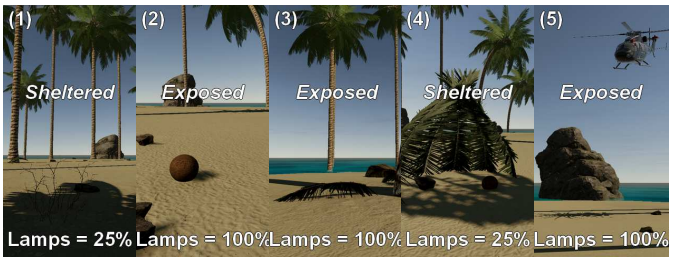


图 2：漫游荒岛场景。

积雪森林，预示着即将到来的冬季。场景要求他们收集柴火，为即将到来的寒冷做好准备，并要求他们戴上手套、拿起斧头（1—有庇护）。装备齐全后，参与者走出小屋，前往树木所在处，用斧头连续劈砍树木，将其砍倒（2—暴露）。倒下的树木留下原木，参与者必须将原木放入板条箱中，以便运输（3—暴露）。随后，他们将装满木材的板条箱搬进小屋，并将原木堆放在架子上（4—有庇护）。堆放完成后，参与者必须走出小屋并返回自己的住所，以结束体验（5—暴露）。图 3 展示了这一场景。

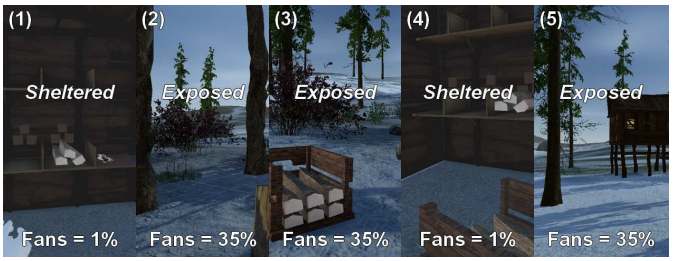


图 3：漫游雪山场景。

热刺激选择为开展本研究，我们对热反馈系统进行了校准，以提出与虚拟环境相一致的刺激强度。为此，10 名参与者沉浸在上述虚拟环境中。他们需要使用滑块微调热反馈系统的强度，其中风扇的调节范围为 0 至 50，灯的调节范围为 0 至 100。对于每个场景，他们需要针对两个位置——“暴露处”和“有庇护处”（见第 III-C 节）——确定理想的热反馈。以此次校准结果为指导，我们确定了设备的不同强度水平，如表 II 所示。

D. 体验设计

我们的研究采用被试内实验设计，以控制个体差异的影响。每位参与者都体验了同一场景下的三种不同条件。参与者体验这些条件的顺序采用平衡拉丁方进行平衡，

	雪山（风扇）		荒岛（灯）	
	有庇护	暴露	有庇护	暴露
静态	35		100	
动态	1	35	25	100

表 II：系统在不同虚拟环境、实验条件以及用户在虚拟环境中的位置下的强度水平（%）。

以减轻潜在的顺序效应。实验条件如下：

- 对照组：视听 +控制器振动
- 静态：视听 + 控制器振动 + 与热反馈一致，且在整个场景中强度保持不变。
- 动态：视听 + 控制器振动 +与热反馈一致，且强度根据用户在虚拟环境中的操作而变化。

表 II 列出了各虚拟环境以及静态和动态条件下使用的热反馈强度水平。

E. 实验流程

实验流程总结见图4。参与者到达后，首先完成知情同意书。随后，他们参加了虚拟现实教程，在引导下熟悉 Valve Index 控制器以及场景中实现的交互机制，具体包括物体抓取和传送（见第 III-B3 小节）。参与者被随机分配至两个场景中的一个，之后依次体验三个实验条件。在每次虚拟现实体验期间，使用 PLUME [12] 记录交互和移动情况。每个条件结束后，参与者退出虚拟环境，完成一组沉浸后问卷，以评估临场感、可行动性感知、触觉体验和热感知。完成第三个也是最后一个条件后，参与者填写实验后问卷，我们收集了参与者档案数据，包括人口统计信息（年龄和性别）、此前使用虚拟现实和电子游戏的经验（采用5点量表评分： 1 =非常低至 5 = 非常高），以及热敏感性。热敏感性通过范·索梅伦等人的热敏感性与调节问卷 [58] 中的2个条目进行测量：“人们体验温暖/冷的速度或强度各不相同。请指出，与他人相比，您体验温暖/冷的速度。”（评分范围为-3 = 晚得多至 +3 =快得多）。最后，参与者参加了一次录音的半结构式访谈，以收集关于其整体体验的更丰富的定性反馈，包括感知愉悦度、可用性、晕动症以及总体体验质量（QoE）。每位参与者的实验总时长约为55分钟。

F. 沉浸后问卷

为衡量用户体验如何随热刺激质量水平变化，参与者完成了一系列

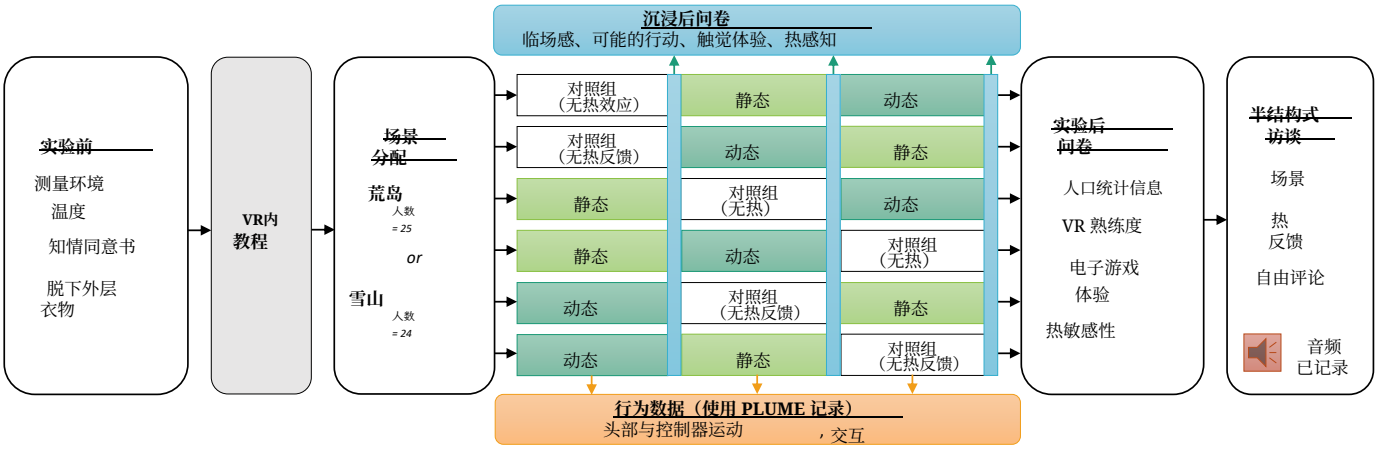


图 4：实验方案。

问卷，每种条件结束后填写。我们使用 Anwar 等人编制的触觉体验问卷 [10] 以及 ASHRAE55 7点李克特量表 [59] 测量热触觉体验和感知热感觉（范围从-3 = 非常冷到 +3 =很热）。参与者还使用自定义的4点评分量表（0 = 无、 1 =轻微、 2 = 中等、 3 = 强烈）评估热变化的强度。鉴于在虚拟现实体验中加入热反馈旨在增强沉浸感，进而提升虚拟现实中的临场感 [60]，我们测量了空间临场感和总体临场感，以便与先前的研究结果进行比较；测量工具为 IPQ 的总体临场感条目 [8] 和 SPES 的自我定位子量表 [9]。此外，由于静态条件与动态条件的主要区别在于用户对热刺激的控制权，我们假设不同条件下的能动感会有所不同。为评估这一点，我们纳入了 SPES 的可能行动子量表 [9]。

G. 行为指标

使用 PLUME [12]，，我们记录了实验过程，以进行全面的虚拟现实场景记录，包括但不限于每一帧中所有场景物体的变换（位置、旋转和缩放）、用户输入操作，以及 Unity XR Interaction Toolkit（XRITK）定义的交互事件。根据这些记录，我们提取了用户与虚拟物体的交互，以及头显和控制器的物理位置、虚拟位置和旋转。位置以米为单位表示，旋转以四元数表示。我们利用这些数据计算了以下段落中描述的行为指标。

1）传送次数：为了量化虚拟环境中的移动方式，我们记录了每位参与者执行的传送次数。在我们的实现中，参与者通过射线投射交互系统选择指定的传送区域（例如场景中的地形），从而触发传送。因此，传送事件总数对应于体验过程中成功选择地形的次数。

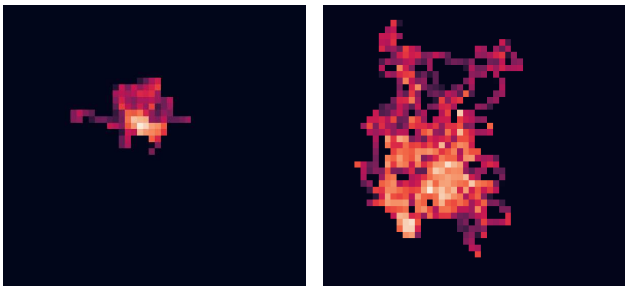
2）物理距离和虚拟距离：为量化用户在现实世界中的物理移动以及他们在 VE 中的虚拟移动方式，我们使用虚拟摄像机游戏对象的变换提取了头戴式显示器的位置。

校准后的游玩区域内的物理移动（如行走、蹲伏）通过摄像机的局部变换进行评估，该变换是在校准期间相对于VR设置原点定义的。相比之下，VE 内的虚拟移动方式（包括与传送和瞬间旋转相结合的物理移动）则通过相对于 VE 原点定义的世界变换进行测量。对于每个环节，我们通过累加连续帧之间的欧几里得距离，计算物理和虚拟移动的总距离；还通过累加连续帧之间的角距离，计算物理和虚拟旋转的总量。

3) 漫游熵：Freund等人定义的漫游熵（RE） [61] 是衡量探索空间多样性的定量指标。其计算方法是将探索过的空间离散化为三维网格，每个网格单元代表虚拟环境中的固定体积。计算在每个单元中花费的时间，再将该时间除以沉浸总时长，转换为出现概率。随后，使用这些概率计算香农熵：

$$RE = -\sum_{i=1}^{N} p_i log(p_i)$$

其中， p_i 表示在单元格i中出现（临场）的概率， N 表示单元格总数。如图5所示，较低的漫游熵（RE）反映了对特定区域受限且重复的探索，而较高的漫游熵则表明对环境进行了更广泛且均匀的探索。单元格大小定义如下：对于物理空间，每个单元格的尺寸为 1 cm × 1cm × 1 cm；对于虚拟空间，每个单元格的尺寸为 1 m × 1 m × 1 m。网格大小根据所有记录位置所覆盖的包围盒确定，以确保完整的空间覆盖，同时避免不必要的计算开销，因为参与者可活动的区域十分广阔。荒岛的物理空间和虚拟空间对应的网格尺寸分别为 3.1 m x 2.1 m x 2.8 m 和 134 m x 8 m x 121 m；雪山的物理空间和虚拟空间对应的网格尺寸分别为 3.1 m x 1.9 m x 2.4 m 和 142 m x 5 m x 52 m。



(a) 低漫游熵
(参与者 4，漫游熵 = 0.71)

(b) 高漫游熵
(参与者 25，漫游熵 = 0.88)

图 5：不同用户在物理空间中出现概率的投影热图（位于 X-Z 平面）

4）头部运动熵：与漫游熵类似，运动熵用于衡量体验过程中头部方向的多样性。该指标基于头部旋转计算，关注俯仰角（垂直轴）和偏航角（水平轴），二者分别被离散为 36 个和 18 个区间，每个区间跨度为 10°，从而覆盖完整的 360° 和 180°可活动范围。与空间位置不同，头部方向受绝对范围限制，因此分箱过程简单直接，且不受记录数据分布的影响。每次记录的四元数形式的头部旋转都会被转换为欧拉角，并将帧时间加到对应的区间中。随后，采用上文所述的相同公式计算熵。

IV. 结果

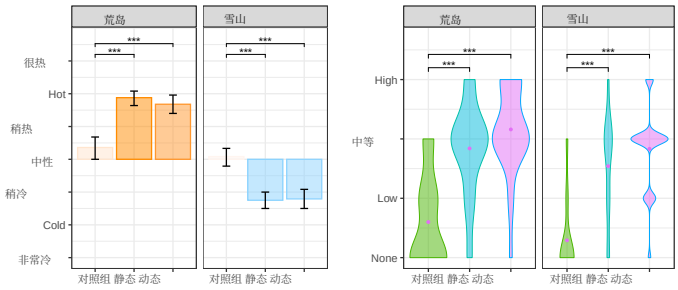
针对每个场景，我们研究两个因素对沉浸后问卷和行为指标的影响：

- 热条件（对照组、静态、动态）。
- 通行顺序（第1次、第2次、第3次）。

统计分析使用 R [62] 和 α =0.05 完成。所有因变量和行为指标均不满足正态性假设，因此我们采用非参数弗里德曼检验处理数据。如果弗里德曼检验结果显著，则进行事后两两比较和配对威尔科克森检验，并采用霍尔姆校正。我们还计算了斯皮尔曼等级相关，以探究人口统计信息与问卷结果之间的单调关系。本节重点介绍显著结果；补充统计结果见补充材料。

A. 热感知（图 6）

热感觉。对于荒岛场景，参与者在两种热条件下都感到热，因为配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 1.3 \cdot 10^{-4}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 3.2 \cdot 10^{-4}$）。雪山场景也得到了类似结果：配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 1.9 \cdot 10^{-4}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 3.3 \cdot 10^{-4}$），参与者感到稍冷。两种场景下，通行顺序均未影响热感觉。

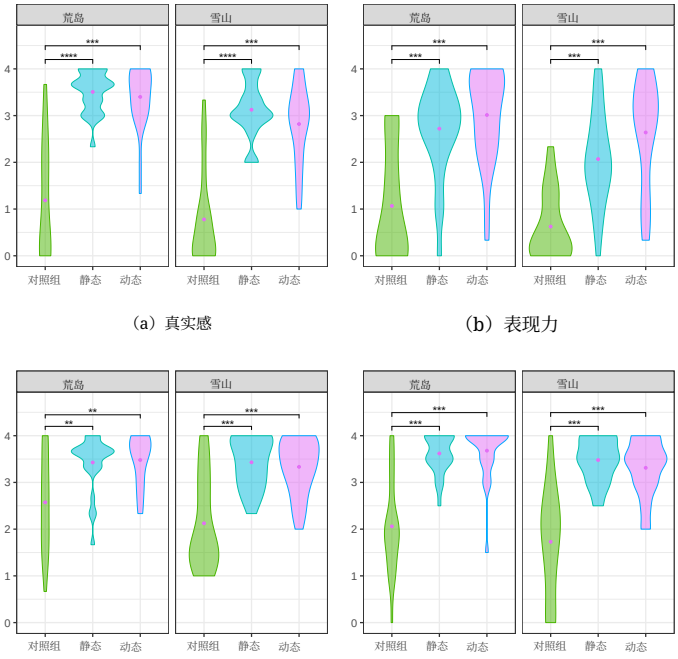


(a) 热感觉　　(b) 热变化

图6：热感知

热变化。对于荒岛场景，参与者在两种热条件下都感到热变化程度适中，因为配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 6.6 \cdot 10^{-4}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 6.6 \cdot 10^{-4}$）。雪山场景也得到了类似结果：配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 2.8 \cdot 10^{-4}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 2.5 \cdot 10^{-4}$）。两种场景下，通行顺序均未影响热变化。

B. 触觉体验（图7）



(a) 真实感　　(b) 表现力

(c) 和谐　　(d) 参与感

图7：触觉体验

真实感。对于荒岛场景，参与者认为热条件下热反馈的真实感更高，因为配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 5.7 \cdot 10^{-5}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 1.0 \cdot 10^{-4}$）。雪山场景也得出了类似结果：配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 5.6 \cdot 10^{-5}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异

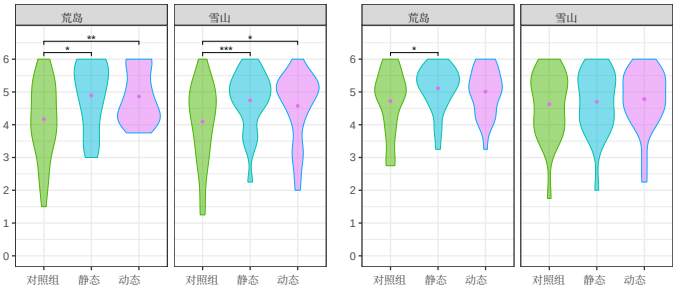
（$p = 1.8 \cdot 10^{-3}$）。通行顺序对两个场景的真实感均无影响。

表现力。对于荒岛场景，参与者认为热反馈在热条件下的表现力更高，因为配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 5.3 \cdot 10^{-4}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 5.3 \cdot 10^{-4}$）。雪山场景也得到了类似结果：配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 1.9 \cdot 10^{-4}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 1.9 \cdot 10^{-4}$）。通行顺序对两个场景中的表现力均无影响。

和谐度。对于荒岛场景，参与者认为热反馈与虚拟环境其余部分的和谐度在热条件下更高，因为配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 5.0 \cdot 10^{-3}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 5.0 \cdot 10^{-3}$）。雪山场景也得到了类似结果：配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 4.4 \cdot 10^{-4}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 6.7 \cdot 10^{-4}$）。通行顺序对两个场景中的和谐度均无影响。

参与感。对于荒岛场景，参与者认为热反馈带来的参与感在热条件下更高；配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 1.1 \cdot 10^{-4}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 1.1 \cdot 10^{-4}$）。雪山场景也得出了类似结果：配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 1.7 \cdot 10^{-4}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 3.6 \cdot 10^{-4}$）。通行顺序对两个场景的参与感均无影响。

C. 虚拟现实体验（图 8）



(a) 空间临场感　(b) 可能的行动

图 8：空间临场体验量表

总体临场感。对于荒岛场景，参与者在热条件下感受到更强的临场感；配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 1.0 \cdot 10^{-3}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 2.0 \cdot 10^{-3}$）。通行顺序对荒岛场景的总体临场感没有影响。雪山场景也得到了类似结果：配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 4.0 \cdot 10^{-3}$），对照组与动态条件之间也存在显著差异（$p = 4.0 \cdot 10^{-3}$）。尽管通行顺序的弗里德曼检验结果显著（$p = .04$），但事后检验未发现条件之间存在显著差异。

自我定位。对于荒岛，配对检验显示，参与者在热条件下的自我定位感更强

场景	n	人口统计特征	问卷	相关性	p 值
荒岛	25	电子游戏练习	总体临场感	-0.31	0.007
荒岛	25	电子游戏练习	可能的行动	-0.26	0.022
雪山	24	Age	热变化	-0.25	0.036
雪山	24	冷敏感性	真实感	0.33	0.022
雪山	24	冷敏感性	和谐	0.32	0.025
雪山	24	电子游戏练习	热变化	0.27	0.021
雪山	24	电子游戏练习	总体临场感	-0.25	0.037

表III：沉浸后问卷与个体特征之间显著相关性的报告（$p < 0.05$）。仅针对热条件（即静态和动态）下的问卷答案，检验了冷敏感性和温暖敏感性。

结果显示，对照组与静态组（$p = 1.3 \cdot 10^{-2}$）之间，以及对照组与动态组（$p = 7.0 \cdot 10^{-3}$）之间均存在显著差异。雪山场景也得到了类似结果，因为配对检验显示，对照组与静态组（$p = 1.0 \cdot 10^{-3}$）之间，以及对照组与动态组（$p = 2.7 \cdot 10^{-2}$）之间均存在显著差异。通行顺序对两个场景中的自我定位感均无影响。

可能的行动。对于荒岛场景，配对检验显示，对照组与静态条件之间存在显著差异（$p = 1.8 \cdot 10^{-2}$），参与者在静态条件下的可行动性感知更高。该问卷的其他检验均未达到显著水平。此外，两种场景中的通行顺序均未影响可行动性感知。

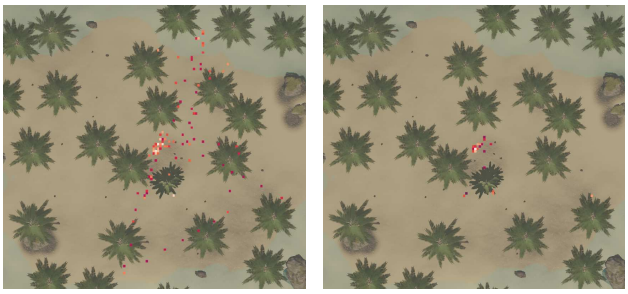
D. 人际影响（表 III）

在荒岛场景中，电子游戏练习与总体临场感呈负相关（$r = -0.31$，$p = 7.0 \cdot 10^{-3}$），与可能的行动呈负相关（$r = -0.26$，$p = 2.2 \cdot 10^{-2}$）。在雪山场景中，年龄与热变化呈负相关（$r = -0.25$，$p = 3.6 \cdot 10^{-2}$）。电子游戏练习与热变化呈正相关（$r = 0.27$，$p = 2.1 \cdot 10^{-2}$），与总体临场感呈负相关（$r = -0.25$，$p = 3.7 \cdot 10^{-2}$）。冷敏感性与真实感（$r = 0.33$，$p = 2.2 \cdot 10^{-2}$）和和谐感（$r = 0.32$，$p = 2.5 \cdot 10^{-2}$）呈正相关。

E. 行为指标（表 IV）

传送次数：在荒岛场景中，参与者在第 1 次通行期间的传送次数多于第 2 次和第 3 次；配对检验显示，第 1 次与第 2 次顺序之间（$p = 3.3 \cdot 10^{-2}$）以及第 1 次与第 3 次之间（$p = 2.0 \cdot 10^{-4}$）存在显著差异。

距离 在荒岛场景中，参与者在第1次通行期间于真实空间中移动得更多，在虚拟空间中行进得更远；第1次多于第2次，第2次又多于第3次。图9展示了荒岛场景中虚拟距离的结果。配对检验显示，第1次与第2次顺序之间的物理距离（$p = 9.1 \cdot 10^{-5}$）和虚拟距离（$p = 3.0 \cdot 10^{-3}$），以及第2次与第3次顺序之间的物理距离（$p = 1.8 \cdot 10^{-6}$）和虚拟距离（$p = 5.6 \cdot 10^{-4}$）均存在显著差异。在雪山场景中，参与者在第1次通行期间于真实空间中移动得更多；第1次多于第2次，第2次又多于第3次。配对检验显示，



(a) 高行进距离 (第1次通行，TD = 745.4)　(b) 低行进距离 (第3次通行，TD = 211.0)

图9：荒岛中 participant4 两次不同通行期间虚拟空间内出现概率的投影热图（位于 X-Z 平面）。

第1次与第2次之间的物理距离（$p = 8.6 \cdot 10^{-4}$）以及第2次与第3次之间的物理距离（$p = 1.7 \cdot 10^{-2}$）存在显著差异。热条件对两种场景的距离指标均无影响。

旋转　在荒岛场景中，参与者在第1次通行期间比第2次转头更多、在虚拟空间中的朝向调整也更多；第2次又比第3次更多。配对检验显示，第1次与第2次之间的物理旋转（$p = 9.1 \cdot 10^{-5}$）和虚拟旋转（$p = 1.3 \cdot 10^{-4}$）存在显著差异；第2次与第3次之间的物理旋转（$p = 1.8 \cdot 10^{-7}$）和虚拟旋转（$p = 3.6 \cdot 10^{-7}$）也存在显著差异。在雪山场景中，参与者在第1次通行期间比第2次和第3次转头更多、在虚拟空间中的朝向调整也更多。配对检验显示，第1次与第2次之间的物理旋转（$p = 4.5 \cdot 10^{-6}$）和虚拟旋转（$p = 4.5 \cdot 10^{-6}$）存在显著差异；第1次与第3次之间的物理旋转（$p = 1.1 \cdot 10^{-6}$）和虚拟旋转（$p = 3.5 \cdot 10^{-6}$）也存在显著差异。热条件对两个场景中的旋转指标均无影响。

荒岛的漫游熵：参与者在第 1 次通行时表现出比第 2 次和第 3 次更多的探索行为，因为第 1 次与第 2 次通行顺序之间（$p = 7.0 \cdot 10^{-3}$），以及第 1 次与第 3 次通行顺序之间（$p = 5.0 \cdot 10^{-3}$）的物理漫游熵均存在显著差异。条件对荒岛的漫游熵没有影响。对于雪山，条件和通行顺序均未对漫游熵产生影响。

荒岛的头部运动熵：参与者在第 1 次和第 2 次通行时表现出的定向／探查行为多于第 3 次，因为第 1 次与第 3 次通行顺序之间的物理运动熵（$p = 1.8 \cdot 10^{-2}$）以及虚拟头部运动熵（$p = 1.1 \cdot 10^{-2}$）均存在显著差异。对于雪山，条件和通行顺序均未对头部运动熵产生影响。

F. 定性反馈

为补充上述问卷和行为指标，我们采用主题分析法，对录制的半结构式访谈进行定性分析 [63] 。访谈中，参与者描述了场景中的任务，随后详细说明了他们在每种条件下感受到的热反馈，并评估了热反馈对其作为虚拟现实用户的体验所产生的影响。参与者还可以自由评论虚拟环境、所提出的场景及相关交互。研究人员使用 WhisperX [64]和 PyAnnote [65], [66]自动转录访谈并标注说话者。转录完成后，作者对文本进行了核验和清理。

热感知与舒适度。每位参与者都感知到了荒岛中灯具提供的热反馈，并对其表示认可；至少在热反馈出现的两种条件之一中是如此（P1：“甚至还挺舒服的，因为并没有太热！”）。多数参与者（17/25）感知到了静态条件与动态条件之间的差异，并能将温暖热反馈与暴露在太阳下的时刻联系起来。一些参与者注意到静态条件下存在轻微的热变化，尤其是在小屋里弯腰时（P21：“我感觉到的暖意或多或少会随时刻变化，尤其是有时我移动身体或弯腰捡东西的时候。”）。然而，7位参与者表示，热不适是由静态条件下长时间暴露于过强刺激，或头戴式显示器过度发热所致，后者在第三次实验时尤为明显。参与者对荒岛上的实际热体验各有不同的预期。尽管多数人认为热反馈与体验相符，但也有一些参与者认为可以调整热反馈，以提升真实感（P24：“能感觉到很热，但没有想象中普通海滩那么热。”；P9：“本该解渴的椰子并没有让我凉快下来。”；P4：“需要一点风，这样才会更有沉浸感”；P20：“我以为直升机到达时，会感觉到一阵气流。”）。

在雪山场景中，大多数参与者（19/24）在存在风扇热反馈的两种条件中，至少有一种感知到了并认可风扇提供的热反馈。其余参与者要么没有感知到风扇的热效应，要么认为这种效应不够显著，不足以改变他们的用户体验。半数参与者没有感知到静态条件与动态条件之间的差异，其中三人表示，首次体验时过于专注于场景和眼前的任务，无暇留意自己的热感觉。出乎意料的是，P58 在实验过程中没有感知到任何热刺激，并解释道：“我觉得自己当时全神贯注于任务。我满脑子想的都是怎么捡起这些原木、把它们放到正确的位置、别让板条箱掉下来，以及去对地方。我想，其实我的其他感官都被屏蔽了，尤其是热觉。”关于热刺激与虚拟环境的一致性，一些参与者认为动态条件下不够冷（P53：“最好是采用 *[动态条件]* ，但温度设为*[静态条件]*的温度。”）。

沉浸感与临场感。参与者都很喜欢这两种虚拟环境，并强调了它们的视听质量（P15谈到荒岛时说：“景色很美，而且一听到海浪声，我马上就觉得自己真的置身其中了。”；P50谈到雪山时说：“我觉得画面非常逼——

空间	指标	第一		第二		第三	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
物理	距离（米）	47.4_{a}	17.5	32.0_{b}	10.4	27.7_{c}	7.38
虚拟	距离（m）	321.0_{a}	145	245.0_{b}	63.5	220.0_{c}	44.1
物理	旋转（°）	170.0_{a}	60.9	113.0_{b}	42.3	92.7_{c}	24.4
虚拟	旋转（°）	205.0_{a}	72.2	140.0_{b}	40.9	116.0_{c}	31.0
物理	RE	0.798_{a}	0.058	0.765_{b}	0.061	0.751_{b}	0.070
虚拟	RE	0.807	0.043	0.802	0.052	0.796	0.082
物理	HME	0.883_{a}	0.027	0.872_{a}	0.028	0.866_{b}	0.031
虚拟	HME	0.893_{a}	0.024	0.882_{a}	0.027	0.874_{b}	0.035
	传送	61.3_{a}	26.1	42.8_{b}	21.5	36.6_{b}	13.0

(a) 荒岛

空间	指标	第一		第二		第三	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
物理	距离（米）	50.8_{a}	12.6	39.9_{b}	16.0	35.4_{c}	10.4
虚拟	距离（m）	315.0	89.9	280.0	30.3	285.0	36.0
物理	旋转（°）	173.0_{a}	50.0	112.0_{b}	43.1	105.0_{b}	34.7
虚拟	旋转（°）	221.0_{a}	62.2	148.0_{b}	49.0	147.0_{b}	43.9
物理	RE	0.830	0.052	0.829	0.042	0.820	0.046
虚拟	RE	0.823	0.069	0.848	0.029	0.858	0.026
物理	HME	0.869	0.031	0.876	0.018	0.878	0.021
虚拟	HME	0.874	0.033	0.885	0.018	0.887	0.016
	传送	55.4	17.8	45.4	12.0	48.9	12.9

(b) 雪山

表 IV：根据通行顺序划分的行为指标（均值 ± 标准差）。同一行中不同的上标（^{a}、^{b}、^{c}）表示事后检验中存在显著差异 $p < 0.05$。

真。”）。参与者比较对照条件和热条件时，常常提到“真实感”和“沉浸感”有所提升，让他们真切地感受到自己身临其境（P18：“我确实感受到了某种东西，也确实觉得沉浸感更上一层楼”；P43：“我觉得这让人更相信我们真的身处其中了”）。只有少数参与者的临场感略有中断：P2和P13觉得头戴式显示器线缆让他们分心；P59始终有些担心可用空间，这限制了他们的能动性。P2、P37和P48在虚拟环境中遇到了一些小碰撞问题；P41因热刺激的动态性而感到惊喜，也因此分了心；P45觉得重复体验同一个场景会让自己脱离体验。P6、P21和P47在热条件之后体验了对照组条件，觉得该条件缺少热反馈，因此与体验脱节。

交互与移动方式。在两个场景中，共有 19 名参与者提到，他们喜欢可用的交互，尤其是在荒岛中敲开椰子（见图 2）（P15：“我喜欢拿起椰子并将它砸在石头上，这看起来非常真实。”），以及在雪山中砍树（P47：“砍树的交互非常棒！”）。大多数参与者在使用传送时没有遇到问题，只有 P7、P23 和 P43 尽管完成了教程，仍难以掌握传送。到了第 2 次和第 3 次体验时，这一困难基本消失了。

行为与流畅性。在荒岛场景中，6名参与者认为，热反馈的存在影响了他们的意图和行为，促使他们做出更“恰当”的反应。与文本指令相比，热反馈被认为更加直观，正如P8所说：“热刺激是动态的，会把你引到阴凉处，并隐约提示你进入小屋，所以这更像是一种无意识的反应。”由于实验设计要求重复同一场景3次，一些参与者提到，第二次和第三次体验时，他们的行动衔接得更加流畅。（P2：“我对场景更熟悉了，所以能把这些动作串起来，砰砰砰！”）尽管重复体验，大多数参与者并未感到厌倦，因为这是一次难得且令人愉悦的体验（P42：“我真的很喜欢，因为我不是每天都会体验虚拟现实。”）。

V. 讨论

RQ1：加入环境热反馈显著提升了高度沉浸式VR场景中的临场感。根据Melo等人提出的、由IPQ测量总体临场感的 [67]定性量表，临场感阈值如下：非常好的临场感（> 4.07）和极佳的临场感（> 4.41）。在本研究中，两个场景的IPQ总体临场感问题评分表明，仅视听条件就已达到非常好的临场感水平。同样，所有条件下的可行动性感知均值都较高（$> 4.6/6$），说明我们的场景和装置带来了很强的可行动性感知。不过，无论热反馈的质量如何，加入一致性热反馈都能显著增强临场感，使两个场景的临场感均提升至极佳水平，同时降低评分方差。这表明，在隐喻性热虚拟环境中，即使视觉与听觉沉浸感已经很强，加入一致性热反馈仍具有实际价值。有趣的是，这种模态的加入提高了参与者对沉浸感的期待。一些参与者（如P6、P21和P47）表示，移除热反馈后他们感到失望，这说明一旦体验过热反馈，它便会成为人们对沉浸式体验的预期组成部分。

研究问题2：并非所有参与者都能感知到静态与动态热反馈之间的质量差异，这凸显了热感知的异质性。沉浸后问卷的回答显示，静态条件与动态条件之间没有显著差异；这一结果出乎意料，因为我们假设动态性能够改善触觉体验以及可行动性感知。尽管如此，对于雪山，结果显示静态与动态条件在真实感和表现力方面存在差异趋势。静态条件下的真实感略高于动态条件（$p = 0.094$），这与部分评论一致：动态条件下不够冷，因此与静态条件相比不够真实。然而，动态条件下的表现力略高（$p = 0.085$）。

两种动态条件均基于先前的校准以及对所用热反馈系统进行的心理物理学

研究结果制定（见补充材料中的表 I 和 II），研究表明，所呈现的两个水平带来了显著不同的热感觉。然而，定性反馈显示，并非所有参与者都能感知到静态条件与动态条件之间的差异。大多数参与者能够在荒岛场景中区分这两种条件，但在雪山场景中，只有一半参与者能够做出区分。正如我们的结果所揭示的，对这种差异的感知存在个体差异，其原因无疑是多方面的：1）不同人群的热感知存在差异，并受到生理和心理状态 [42] 以及文化背景 [43]的调节；本研究参与者在热敏感性问卷中的得分确实各不相同（见图 I）。最终，所选刺激（见表 II）对敏感度较低的参与者来说太弱，而对敏感度较高的参与者来说又太强。此外，参与者对冷的敏感度与其在触觉体验问卷中的回答之间存在相关性；在雪山场景中，这种敏感度与真实感和和谐度呈正相关（见表 III）。因此，在设计热刺激前考虑每个人的热敏感性似乎十分重要，这有助于最大限度地提升触觉体验。2）尽管我们未采用定量方法测量认知负荷，但有少数用户表示，首次体验某个场景时认知负荷较高，并解释说这改变了他们在虚拟现实中的热感知。3）由于我们的装置允许参与者在 VR 区域内移动，当参与者靠近或远离热致动器时，他们在评定静态条件时报告感受到了热变化。4）在虚拟现实中长时间使用环境热反馈会导致衣物中热量积聚，妨碍身体降温并造成热不适，从而对整体用户体验产生负面影响。

RQ3：热反馈对测得的探索行为没有影响。我们的测量结果表明，热条件对探索行为没有显著影响。然而，这并不与 Shaw 等人 [23],的发现相矛盾；他们在火灾疏散虚拟现实模拟中观察到，视听条件与多感官（包括热反馈）条件下的行为存在差异。需要注意的是，我们的测量将每次实验归纳为一个单一数值。这在一定程度上与 Shaw 等人的结果一致，因为他们汇总的总疏散时间指标同样不受沉浸条件的影响。

话虽如此，Shaw 等人的研究将行为细分为更小的单位，揭示了沉浸感在更细粒度层面上带来的差异。我们的研究并未如此详细地考察行为。诸如在荒岛的阴凉处或雪山的小屋内停留的时间等细微行为变化，或许能够体现热反馈对行为的影响。然而，在我们的研究中，任务时间有限且场景受到高度引导，这些细微差别很可能会被掩盖。

RQ4：通行顺序对探索行为有显著影响。本研究采用被试内设计，并对条件进行平衡，以尽量消除比较不同条件时的顺序偏差。虽然我们发现顺序对沉浸后问卷的回答没有可测量的影响，但结果表明，行为会随通行顺序而改变。事实上，在两个场景中，参与者在第一轮通行时的实际移动、在虚拟环境中的移动距离、转头次数以及在虚拟环境中的方向指标值都显著较高；这些指标在第二轮通行时有所下降，第三轮时又进一步下降。这可以解释为，用户在首次体验时正在探索环境；如果他们对探索环境感到好奇，就会主动探索。这种好奇心在第二轮和第三轮体验时会大幅减弱。值得注意的是，只有荒岛场景的两项熵指标存在显著差异，雪山场景则没有。为理解这一现象，我们对较长与较短的轨迹进行了目视比较（见补充材料中的附录D）。尽管两个场景的设计尽可能相似，但我们发现，荒岛场景的设计为完成第一项任务提供了更大的移动自由度（见图2），因为用户出现在岛屿中央。他们面朝目标方向，但周围没有明显的限制。相比之下，在雪山场景中，用户受到小屋门口的限制，也不会觉得有必要通过探索来寻找第二项任务的位置。

建议

这些发现表明，仅依靠主观测量可能会忽视在用户行为中表现出来的细微顺序效应。Lavou´e 等人此前的一项研究 [68]同样指出，条件的顺序会影响虚拟现实中的主观心流体验。综合来看，这些观察结果凸显了被试内设计固有的复杂性。尽管此类设计在统计学上具有较高效力，并且能够有效控制感知中的个体间差异——这正是多感官虚拟现实研究所关注的主要问题——但仍需要谨慎进行方法学上的适应，以限制学习效应。例如，参与者可能会受益于情境相关学习阶段，因为通用的虚拟现实教程（如我们所采用的教程）似乎并不充分。此外，研究应始终通过统计检验确认条件的顺序不会影响结果。如果检测到顺序效应，就应对此进行充分解释，因为它可能会压倒所研究的主要因素。相反，如果研究旨在评估与新颖性或惊喜相关的效应，那么被试间设计可能更为合适，尽管要达到统计显著性需要更大的样本量。

在考虑于虚拟现实场景中使用热反馈时，需要注意的是，尽管所呈现的热刺激水平是根据初步小组反馈进行校准的，但热感知仍存在显著的个体间差异。这凸显了个性化校准在提升反馈效果和用户舒适度方面的潜在益处。然而，必须通过实际实现和测试校准方案来确保其有效性和可用性，因为校准的必要性可能会阻碍热反馈的实际应用。

六、局限性与展望

本研究仅关注一种热刺激形式，即热或冷（由风引起），并未探究二者的组合。然而，正如 da Silveira 等人 [6]，所指出的，有必要开展研究，以了解在同一场景中使用热和冷刺激时二者之间的交互作用。

尽管本研究使用的热系统可以根据用户相对于热致动器的位置调节刺激强度，但为了聚焦于作为一种质量层面的动态性，本研究并未使用这一功能。因此，参与者的移动导致刺激感知出现了非预期的变化。与空间化音频对沉浸感的影响类似，未来研究应评估空间一致的热提示在增强临场感和用户体验方面的附加价值。进一步而言，在热反馈系统中增加热致动器，或可实现对虚拟环境中定位的环境热源进行精确空间化，例如火或瀑布。

最后，我们的结果表明，虚拟现实中的认知负荷与热感知之间可能存在关联。Philippe 等人最近的一项研究探讨了热刺激对认知表现的影响 [44]；然而，我们研究中的定性反馈表明，认知需求也可能调节热敏感性。由于本研究并未直接测量认知负荷，这仍是一个有待解答的研究问题。未来在生态效度良好的虚拟现实场景中开展的研究，应纳入认知负荷评估，以回答这一问题，例如采用沉浸后问卷、双任务范式，或瞳孔扩张等生理指标 [69]。

总之，未来的研究应着重评估热反馈空间化对用户体验的影响，开发快速的个性化热反馈校准方法，并整合认知状态测量，以探究虚拟现实中认知负荷与热感知之间的关系。这些方向对于推动热反馈融入高度沉浸式、自适应的虚拟现实体验至关重要。

七、结论

本研究考察了动态热反馈对高度沉浸式虚拟现实环境中用户体验的影响。结果表明，即使在视听保真度较高的场景中，加入协调一致的环境热反馈也能显著增强临场感。然而，并非所有参与者都能始终分辨静态与动态热反馈，这凸显了个体热敏感性的差异。尽管在我们的实验中，热反馈质量并未显著影响用户行为，但暴露顺序对探索行为产生了显著影响；为此，我们提出了减少被试内设计中学习效应的方法。

我们的研究结果凸显了开发多感官虚拟现实体验时面临的关键挑战与机遇。值得注意的是，个体热敏感性的差异、未来研究纳入空间化环境热提示的必要性，以及认知负荷与热感知之间的交互，都是至关重要的考量因素。要解决这些问题，需要改进环境热反馈校准方法，并提升对虚拟现实中认知状态的实时监测能力。

致谢

作者谨向所有参与本研究的参与者表示感谢。本研究部分经费来自法国国家研究署为 RENFORCE项目提供的资助（ANR-22-CE38-0008）。

参考文献

[1] C. Liu, Y. Tang, L. Sun, N. Zhang, W. Gao, L. Yuan, and J. Shi, “身体局部加热对人体热感觉和热舒适度的影响”，《建筑工程杂志》，第53卷，第104543页，2022年8月。[2] X. Yang, “Thermotion：探索利用可穿戴热显示器促进情绪感知”，硕士论文，代尔夫特理工大学，2019年。[3] L. Battistel, A. Vilardi, M. Zampini, and R. Parin, “对人类环境温度敏感性的研究”，《科学报告》，第13卷，第1期，第21353页，2023年12月。[4] P. Monteiro, M. Melo, A. Valente, J. Vasconcelos-Raposo, and M. Bessa, “在虚拟现实培训中提供决策所需的关键刺激：消防员培训场景评估研究”，《IEEE人机系统汇刊》，第51卷，第2期，第65–74页，2021年4月。[5] K. Lyu, A. Brambilla, A. Globa, and R. de Dear, “一种用于研究人造环境交互的沉浸式多感官虚拟现实方法”，《自动化建设》，第150卷，第104836页，2023年6月。[6] A. C. da Silveira, E. C. Rodrigues, E. B. Saleme, A. Covaci, G. Ghinea, and C. A. S. Santos, “用于多感官人机交互的热觉和风觉设备：概述”，《多媒体工具与应用》，第82卷，第22期，第34 485–34 512页，2023年9月。[7] K. Ragozin, Xiaru Meng, R. L. Peiris, Katrin Wolf, G. Chernyshov, and K. Kunze, “ThermoQuest——一种通过热反馈增强现实体验的可穿戴头戴式显示器”，MUM，2021年5月，mAG ID：4214593503 S2ID：00159c395e1652302472a86111850c2dc36e8228。[8] T. Schubert, F. Friedmann, and H. Regenbrecht, “临场体验：因素分析见解”，《临场感：远程操控与虚拟环境》，第10卷，第3期，第266–281页，2001年6月。[9] T. Hartmann, W. Wirth, H. Schramm, C. Klimmt, P. Vorderer, A. Gysbers, S. Bocking, N. Ravaja, J. Laarni, T. Saari, F. Gouveia, and A. Sacau, “空间临场体验量表（SPES）”，《媒介心理学杂志：理论、方法与应用》，第1卷，第1–15页，2015年1月。[10] A. Anwar, T. Shi, and O. Schneider, “多种触觉模态下触觉体验的影响因素”，载于《2023年计算机系统中的人为因素CHI会议论文集》。德国汉堡：ACM，2023年4月，第1–12页。[11] S. Putze, D. Alexandrovsky, F. Putze, S. Hoffner, J. D. Smeddinck, and R. Malaka, “打破体验：问卷对虚拟现实用户研究的影响”，载于《2020年CHI计算系统人为因素会议论文集》，丛书编号CHI ’20。美国纽约：计算机协会，2020年4月，第1–15页。[12] C. Javerliat, S. Villenave, P. Raimbaud, and G. Lavoue, “PLUME：记录、回放、分析并分享用户在6DoF XR体验中的行为”，《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》，第1–11页，2024年3月。[13] A. Adilkhanov, M. Rubagotti, and Z. Kappassov, “触觉设备：基于可穿戴性的分类法与文献综述”，《IEEE Access》，第10卷，第91 923–91 947页，2022年。[14] J. Tewell and N. Ranasinghe, “虚拟现实环境嗅觉显示设计综述”，《ACM计算调查》，第56卷，第11期，第1–35页，2024年11月。[15] N. Ranasinghe, “虚拟味觉：通过电、热及混合刺激对味觉进行数字模拟”，《多媒体工具与应用》，第83卷，第19期，第56 517–56 548页，2023年12月。[16] M. Melo, G. Goncalves, Pedro Monteiro, Pedro Monteiro, P. Monteiro, H. Coelho, J. Vasconcelos-Raposo, M. Bessa, and M. Bessa, “多感官刺激是否有助于提升虚拟现实体验？系统综述。”《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》，第1–1页

, 2020年7月。

[17] J. Dionisio，“虚拟地狱：穿越火焰之旅”，IEEE 计算机图形学与应用，第17卷，第3期，第11–14页，1997年5月，会议名称：IEEE 计算机图形学与应用。[18] A. Lecuyer、P. Mobuchon、C. Megard、J. Perret、C. Andriot 和 J.-P. Colinot，“HOMERE：一种帮助视障人士探索虚拟环境的多模态系统”，载于IEEE 虚拟现实，2003年会议论文集，2003年3月，第251–258页，ISSN：1087-8270。 [在线]。获取地址：https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1191147 [19] R. L. Peiris、W. Peng、Wei Peng、Z. Chen、L. Chan 和 K. Mi-namizawa，“ThermoVR：探索与头戴式显示器集成的热触觉反馈”，CHI，第5452–5456页，2017年5月，MAG ID：2611096819 S2ID：4435d36944815f7222cb1035006fbb91b1233dca。[20] K. Zhu、S. Perrault、T. Chen、S. Cai 和 R. Lalintha Peiris，“冰与火的感知：探索智能戒指上多个热电制冷元件提供的热反馈”，《国际人机交互研究》，第130卷，第234–247页，2019年10月。[21] P.-H. Han、Y.-S. Chen、C.-E. Hsieh、H.-C. Wang 和 Y.-P. Hung，“Hap-mosphere：通过触觉反馈模拟沉浸式环境中的天气体验”，载于2019年 IEEE 世界触觉大会（WHC），2019年7月，第247–252页。[22] S. G¨unther、F. M¨uller、D. Sch¨on、O. Elmoghazy、M. M¨uhlh¨auser 和 M. Schmitz，“Therminator：理解虚拟现实中视觉反馈与身体热反馈的相互依赖性”，CHI，第1–14页，2020年4月，MAG ID：3031204245 S2ID：b46c23e40c355d0986dbee04be3fdbca4d4c1f5e。[23] E. Shaw、T. Roper、T. Nilsson、G. Lawson、S. V. Cobb 和 D. Miller，“热力全开：探索多感官虚拟环境中的用户行为与火灾疏散”，载于《2019年 CHI 计算机系统中的人为因素会议论文集》，丛书：CHI ’19。美国纽约：计算机协会，2019年5月，第1–13 [ ]页。10 1145 3290605 3300856 。在线。获取地址：https://doi.org/。/。[24] C. Nytsch-Geusen、W. Kaul、K. Mathur、L. Westermann 和 M. Kriegel，“开发一种带有用户热反馈的交互式虚拟现实仿真环境”，载于2021年建筑模拟大会，2021年9月。[25] F. H¨ulsmann、J. Fr¨ohlich、N. Mattar 和 I. Wachsmuth，“虚拟现实中的风与温暖：实现与评估”，载于2014年虚拟现实国际会议论文集，丛书：VRIC ’14。美国纽约：计算机协会，2014年4月，第1–8页。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10. 1145/2617841.2620712[26] S. Villenave、P. Raimbaud 和 G. Lavou´e，“交互式六自由度虚拟现实的动态模块化热反馈：实现与评估”，载于2025年 IEEE 虚拟现实与三维用户界面摘要及研讨会会议（VRW），2025年3月，第1204–1205页。[27] P.-H. Han、Y.-S. Chen、K.-C. Lee、H.-C. Wang、C.-E. Hsieh、J.-C. Hsiao、C.-H. Chou 和 Y.-P. Hung，“Haptic around：用于虚拟现实沉浸式环境与交互的多种触觉”，载于第24届 ACM 虚拟现实软件与技术研讨会论文集。日本东京：ACM，2018年11月，第1–10页。[28] J. Wareing、G. Lawson、C. Abdullah 和 T. Roper，“用户对多感官消防训练模拟中热源位置的感知”，载于2018年第10届计算机科学与电子工程会议（CEEC），2018年9月，第214–218页。[29] Sosuke Ichihashi、A. Horie、M. Hirose、Z. Kashino、S. Yoshida 和 M. Inami，“利用红外线和快门机构实现的高速非接触式热显示器”，载于2021年 ACM 普适与泛在计算国际联合会议附属论文集及2021年 ACM 可穿戴计算机国际研讨会论文集，2021年9月，第565–569页，MAG ID：3202914071。[30] D. Narciso、M. Melo、S. Rodrigues、J. P. Cunha、J. Vasconcelos-Raposo 和 M. Bessa，“研究多感官刺激对消防训练虚拟环境的影响”，《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》，第1–15页，2023年。[31] C. Helfenstein-Didier、A. Dhouib、F. Favre、J. Pascal 和 P. Baert，“探索虚拟现实中触觉与视觉线索的跨模态交互对温度感知的影响：一项初步研究”，载于第一届多感官体验研讨会论文集（SensoryX 2021）。巴西：巴西计算机学会，2021年6月。[32] A. Marquardt、M. Lehnort、M. Steininger、E. Kruijff、K. Kiyokawa 和 M. Perusquia-Hernandez，“温度至关重要：虚拟现实中的敬畏体验热反馈”，载于2025年 IEEE 虚拟现实与三维用户界面摘要及研讨会会议（VRW），2025年3月，第1352–1353页。 [在线]。获取地址：https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10972453 [33] N. Ranasinghe、P. Jain、S. Karwita、D. Tolley 和 E. Y.-L. Do，“Ambiotherm：通过……增强虚拟现实中的临场感”，载于《2017年CHI计算系统人为因素会议论文集》，CHI ’17系列。美国纽约州纽约：计算机协会，2017年5月，第1731–1742页。 [在线]。可访问：https://doi.org/10 1145 3025453 3025723 。/。[34] N. Ranasinghe、P. Jain、N. T. N. Tram、K. C. R. Koh、D. Tolley、S. Karwita、L. Lien-Ya、Y. Liangkun、K. Shamaiah、C. E. W. Tung、C. C. Yen 和 E. Yi-Luen，“Season Traveller：通过多感官叙述增强虚拟现实体验”，载于《2018年CHI计算系统人为因素会议》，2018年4月，第577页，mAG ID：2796270307。[35] M. Mesnage、S. Villenave、P. Raimbaud、G. Lavou´e 和 B. Massot，“StimulHeat：一种用于虚拟现实抓握时提供热反馈的夹扣式低能耗无线设备”，载于《2025年 IEEE 虚拟现实与三维用户界面摘要及研讨会会议》（VRW），2025年3月，第1602–1603页。[36] J. Xu、Y. Kuroda、S. Yoshimoto 和 O. Oshiro，“通过控制涡流管生成的低温气流实现非接触式冷感显示”，载于《2019年 IEEE 世界触觉大会》（WHC），2019年7月，第133–138页。[37] J. Xu、S. Hasegawa、K. Kiyokawa、N. Ienaga 和 Y. Kuroda，“整合独立热传递机制，以实现残余热量较低的非接触式冷感呈现”，《IEEE触觉汇刊》，第16卷，第4期，第770–784页，2023年10月。[38] J. Brooks、S. Nagels 和 P. Lopes，“基于三叉神经的温度错觉”，载于《2020年CHI计算系统人为因素会议论文集》，2020年4月，第1–12页，mAG ID：3029091907。[39] Jasmine Lu、Z. Liu、J. Brooks 和 P. Lopes，“化学触觉：通过外用刺激剂呈现触觉感受”，载于《第34届ACM用户界面软件与技术年度研讨会》，2021年10月。[40] T. Saito、J. Zhang、T. Kameoka 和 H. Kajimoto，“使用电刺激在额头产生热感觉：使用电刺激产生热感觉”，载于《2021年CHI计算系统人为因素会议扩展摘要集》，CHI EA ’21系列。美国纽约州纽约：计算机协会，2021年5月，第1–5 [ ]页。10 1145 3411763 3451724 。在线。可访问：https://doi.org/。/。[41] A. Mazursky、J. Brooks、B. Desta 和 P. Lopes，“ThermalGrasp：即使在抓握和行走时也能提供热反馈 ”，载于《2024年IEEE虚拟现实与三维用户界面会议》（VR），2024年3月，第342–353页，ISSN：2642-5254。 [在线]。可访问：https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10494134 [42] M. Schweiker、G. M. Huebner、B. R. M. Kingma、R. Kramer 和 H. Pallubinsky，“人体热感知差异的驱动因素——整体舒适度模型综述”，《Temperature》（奥斯汀，德克萨斯州），第5卷，第4期，第308–342页，2018年。[43] S. Naheed 和 S. Shooshtarian，“城市环境中的文化背景与热感知综述”，《可持续发展》，第13卷，第16期，第9080页，2021年1月，期号：16，出版方：多学科数字出版研究所。 [在线]。可访问：https://www.mdpi.com/2071 1050 13 16 9080 - / / / V. Philippe、J. Hecquard、E. Hummel、F. Argelaguet、M. J.-M. Mac´e、V. Gouranton、C. Pacchierotti、A. L´ecuyer 和 J. Saint-Aubert，“Cool Me Down：热反馈对虚拟现实中认知压力的影响”，载于《2024年欧洲触觉会议》，2024年6月，第1页。[45] D. Alexandrovsky、S. Putze、M. Bonfert、S. H¨offner、P. Michelmann、D. Wenig、R. Malaka 和 J. D. Smeddinck，“考察虚拟现实用户研究中问卷的设计选择”，载于《2020年CHI计算系统人为因素会议论文集》。美国夏威夷州檀香山：ACM，2020年4月，第1–21页。[46] Y. M. Kim、I. Rhiu 和 M. H. Yun，“从用户体验视角对虚拟现实系统进行系统综述”，《国际人机交互期刊》，第36卷，第10期，第893–910页，2020年6月。[47] B. C. K. Choi 和 A. W. P. Pak，“问卷偏差目录”，《预防慢性病》，第2卷，第1期，A13页，2005年1月。[48] N. J. Kelly、J. Hallam 和 S. Bignell，“运用解释性现象学分析，定性理解虚拟现实中的临场感”，《虚拟现实》，第27卷，第2期，第1173–1185页，2023年6月。[49] J. J. DeGuzman、K. Hirano、T. Peck、A. Guth、E. S. Rosenberg 和 T. Nie，“将运动复杂度降低作为虚拟现实中晕动症的客观指标”，载于《2025年IEEE虚拟现实与三维用户界面会议》（VR），2025年3月，第156–164页。[50] D. Reinhardt、S. Haesler、J. Hurtienne 和 C. Wienrich，“控制器运动熵反映虚拟现实中的心理工作负荷”，载于《2019年IEEE虚拟现实与三维用户界面会议》（VR），2019年3月，第802–808页。

[51] M. Poupard、F. Larrue、M. Bertrand、D. Liguoro、A. Tricot 和 H. Sauz´eon，《从运动到学习：利用虚拟现实行为指标评估认知负荷与好奇心》，2025年2月，尚未发表。[52] D. Cen、E. Teichert、C. J. Hodgetts 和 M. J. Gruber，《好奇心塑造人类的空间探索与认知地图形成》，《Communications Psychology》，第2卷，第1期，第1–14页，2024年12月。[53] L. Gehrke 和 K. Gramann，《利用参数映射揭示虚拟现实临场体验中的运动相关性》，载于《2024年IEEE虚拟现实与3D用户界面会议摘要与研讨会》，2024年3月，第374–380页。[54] M. Ochs、J. Bousquet、J.-M. Pergandi 和 P. Blache，《虚拟患者社会互动期间临场感与社会临场感的多模态行为线索分析》，《Frontiers in Computer Science》，第4卷，2022年4月。[55] A. Halbig 和 M. E. Latoschik，《虚拟现实中的生理测量、影响因素、方法与应用：系统综述》，《Frontiers in Virtual Reality》，第2卷，2021年7月。[56] F. Faul、E. Erdfelder、A.-G. Lang 和 A. Buchner，《G*Power 3：一款适用于社会科学、行为科学和生物医学科学的灵活统计功效分析程序》，《Behavior Research Methods》，第39卷，第2期，第175–191页，2007年。[57] M. Al Zayer、P. MacNeilage 和 E. Folmer，《虚拟移动：综述》，《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》，第26卷，第6期，第2315–2334页，2020年6月。[58] E. J. W. Van Someren、K. Dekker、B. H. W. Te Lindert、J. S. Benjamins、S. Moens、F. Migliorati、E. Aarts 和 S. van der Sluis，《温度敏感性与调节体验问卷》，《Temperature: Multidisciplinary Biomedical Journal》，第3卷，第1期，第59–76页，2015年12月。[59] 美国采暖、制冷与空调工程师学会（ASHRAE），《人体占用热环境条件》（ASHRAE标准55-2004）。佐治亚州亚特兰大：ASHRAE，2004年。[60] R. Skarbez、F. P. Brooks, Jr. 和 M. C. Whitton，《临场感及相关概念综述》，《ACM计算调查》，第50卷，第6期，第96:1–96:39页，2017年11月。[61] J. Freund、A. M. Brandmaier、L. Lewejohann、I. Kirste、M. Kritzler、A. Kr¨uger、N. Sachser、U. Lindenberger 和 G. Kempermann，《遗传相同的小鼠个体差异的显现》，《Science》，第340卷，第6133期，第756–759页，2013年5月。 [在线]。网址：https://www.science.org/doi/10.1126/science.1235294[62]R核心团队，《R：统计计算语言与环境》，R统计计算基金会，奥地利维也纳，2024年。[在线]。网址：https://www.R-project.org/ [63] V. Braun 和 V. Clarke，《在心理学中运用主题分析》，《Qualitative Research in Psychology》，第3卷，第2期，第77–101页，2006年1月。[64] M. Bain、J. Huh、T. Han 和 A. Zisserman，《Whisperx：长篇音频的精准计时语音转录》，INTERSPEECH 2023，2023年。[65] H. Bredin，《pyannote.audio 2.1说话人分离流水线：原理、基准测试与操作方案》，载于INTERSPEECH 2023论文集，2023年。[66] A. Plaquet 和 H. Bredin，《用于神经说话人分离的幂集多分类交叉熵损失》，载于INTERSPEECH 2023论文集，2023年。[67] M. Melo、G. Gonc.alves、J. Vasconcelos-Raposo 和 M. Bessa，《临场感达到什么程度才够？用于解读Igroup临场感问卷得分的定性量表》，《IEEE Access》，第11卷，24 685，2023年24 675页。[68] E. Lavou´e、S. Villenave、A. Serna、C. Didier、P. Baert 和 G. Lavou´e，《场景与玩家特质对虚拟现实中心流的影响》，《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》，第1–14页，2023年，会议名称：IEEE可视化与计算机图形学汇刊。 [在线]。网址：https: //ieeexplore.ieee.org/document/10315963
[69] J. Y. Lee、N. de Jong、J. Donkers、H. Jarodzka 和 J. J. G. van Merri¨enboer，《通过瞳孔测量评估虚拟现实训练中的认知负荷》，《IEEE学习技术汇刊》，第17卷，第704–710页，2024年。 [在线]。网址：https://ieeexplore.ieee.org/document/10292541



Sophie Villenave Sophie Villenave 是法国 ´里昂中央理工学院 - ENISE 的博士生。她于2021年获得里昂国立应用科学学院的计算机科学文凭，随后在 LIRIS实验室攻读博士学位。目前，她的研究重点是实现和评估用户界面，以便在高度沉浸式虚拟现实应用中提供热反馈。



Pierre Raimbaud Pierre Raimbaud 是法国 ´里昂中央理工学院 - ENISE 的副教授。他的研究围绕虚拟现实用户展开。博士期间，他专注于用户交互设计的理论方法，之后研究了虚拟环境中的人机交互。他目前的研究旨在从用户和社会的角度理解虚拟现实中的人类行为。



Guillaume Lavou´e Guillaume Lavou´e 是法国 ´里昂中央理工学院 - ENISE 的教授。自 2006 年起，他一直是 LIRIS实验室的成员，研究领域涵盖广义上的计算机图形学、虚拟现实和感知。作为 LIRIS XR团队负责人，他已在经过同行评审的期刊和会议上合著约 100 篇国际论文。

《动态热反馈在高度沉浸式VR场景中的应用：用户体验的多模态分析》补充材料

Sophie Villenave、Pierre Raimbaud 和 Guillaume Lavou´e

附录

A. 装置

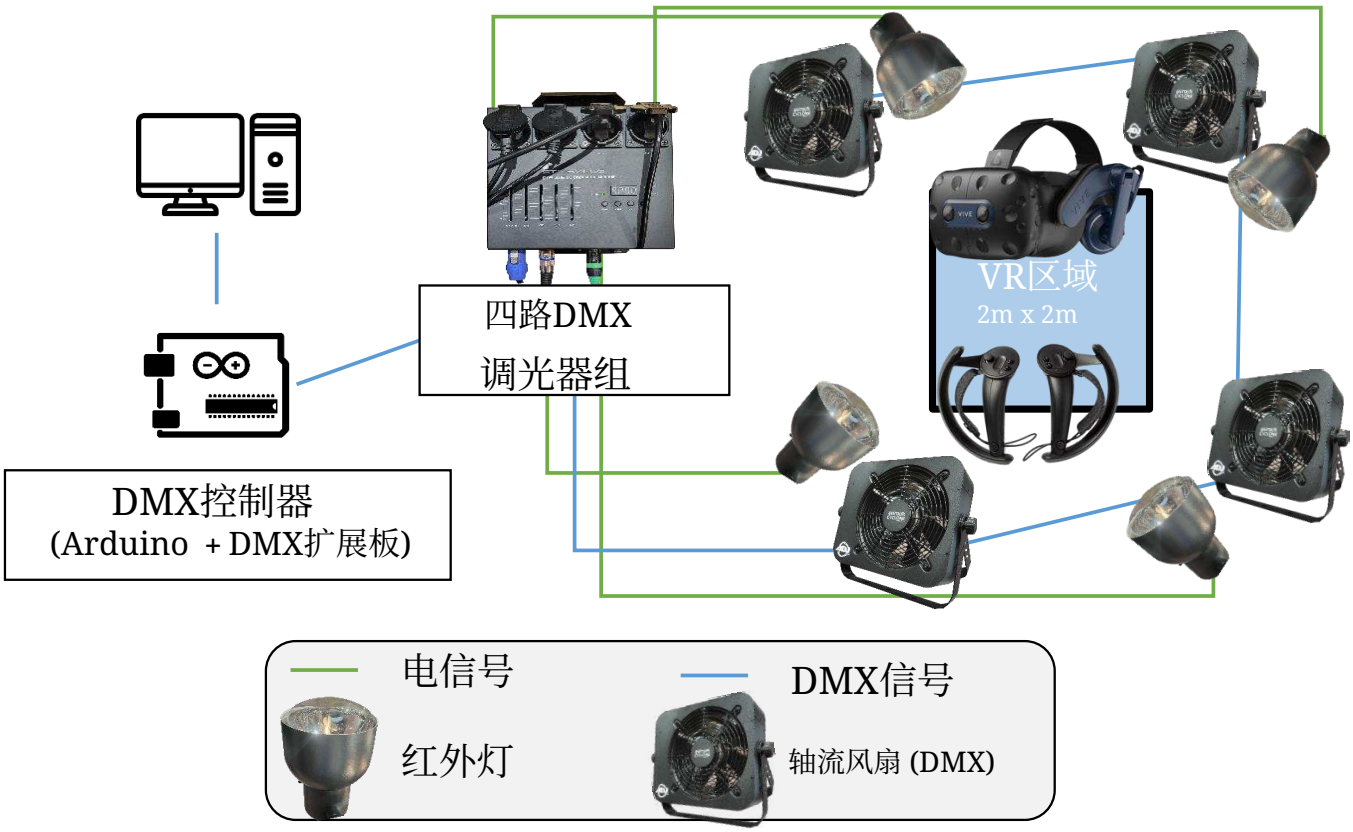


Fig. 1：已实现热反馈系统的示意概览。引自 Villenave 等人 [1] .

S. Villenave、P. Raimbaud、G. Lavou´e 隶属于里昂中央理工学院、法国国家科学研究中心、里昂国立应用科学学院、里昂第一大学、LIRIS、UMR5205、ENISE，地址：法国圣艾蒂安 42023。电子邮箱：name.surname@liris.cnrs.fr。

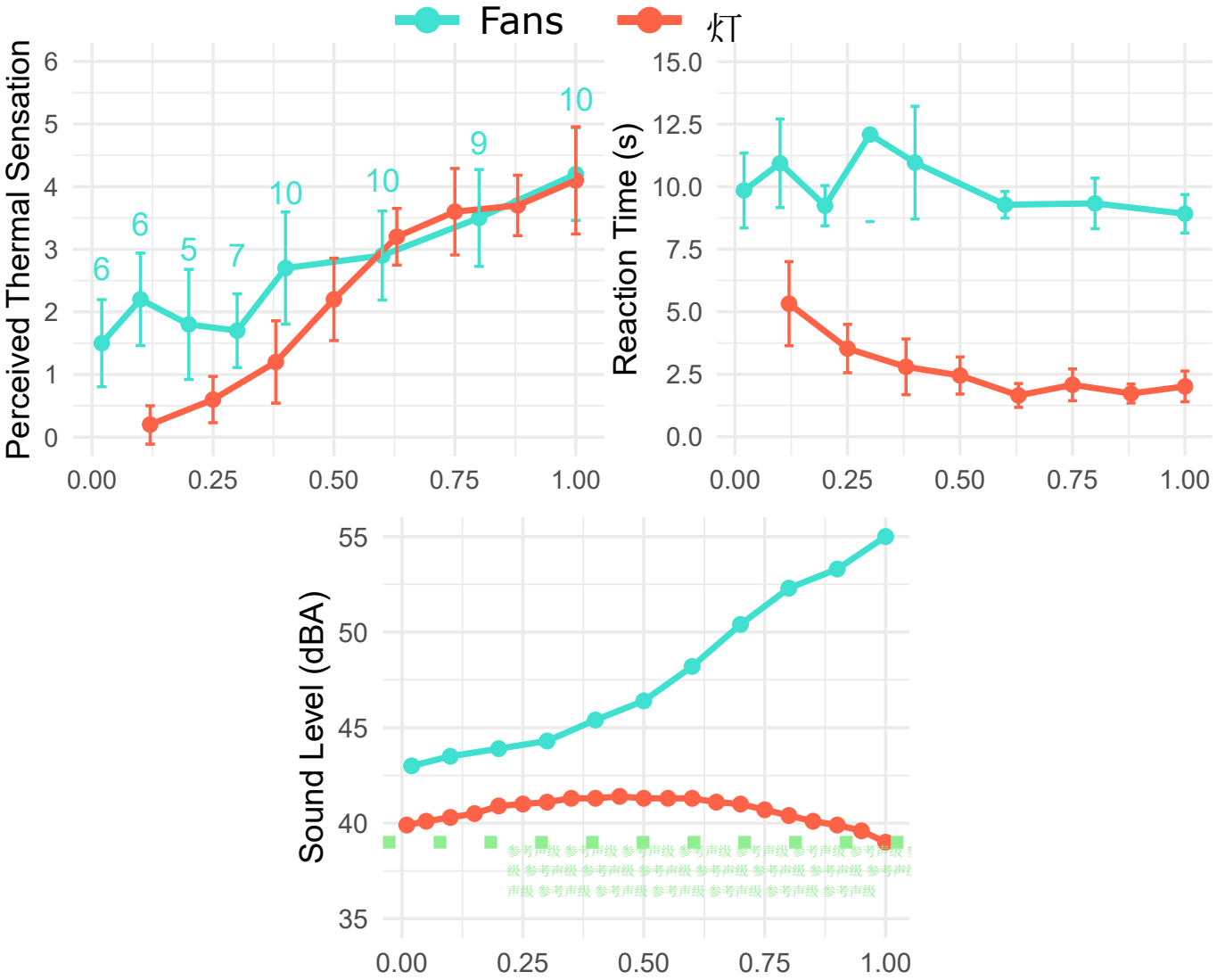


图 2：心理物理学测量值和声级测量值与热致动器强度的关系。风扇强度（0–50%）和灯强度（0–100%）均已归一化至 [0, 1]。在感知热感觉图中显示了感知到风的参与者人数（共 10 人）。引自 Villenave 等人 [1]

表 I：灯具启动强度水平（以 % 表示）的 Student 检验比较。

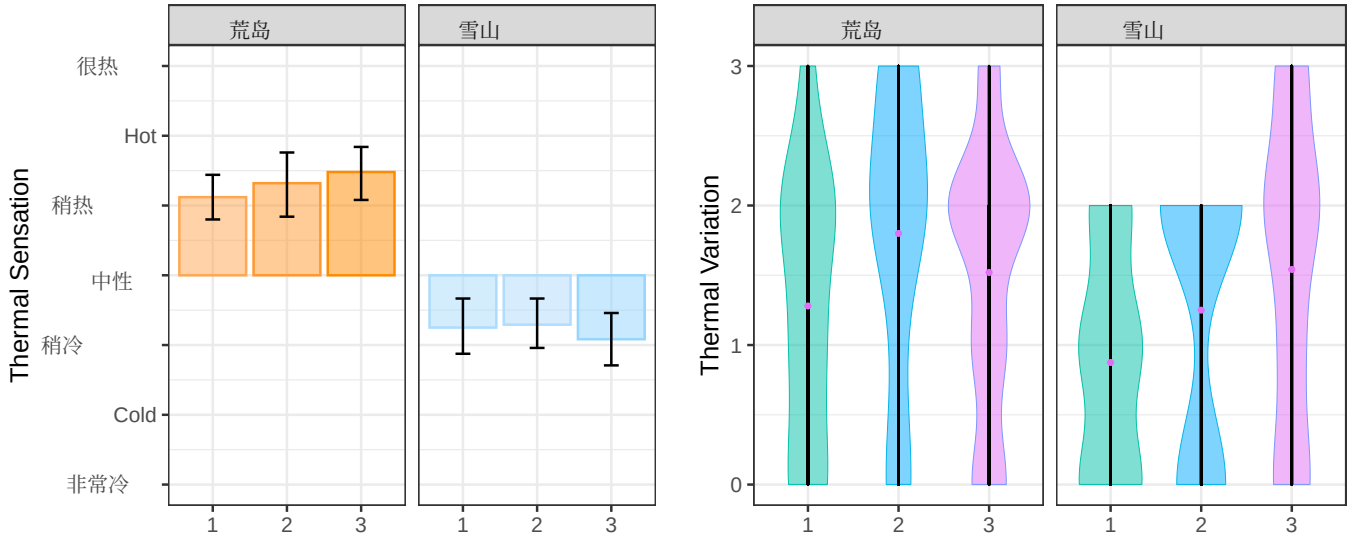
组1	组2	n1	n2	统计量	df	p	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
12	25	10	10	-2.4494897	9	3.70e-02	4.90e-02	*
12	38	10	10	-4.7434165	9	1.00e-03	2.00e-03	**
12	50	10	10	-6.7082039	9	8.77e-05	2.23e-04	***
12	63	10	10	-11.6189500	9	1.00e-06	1.30e-05	****
12	75	10	10	-9.1598704	9	7.40e-06	3.45e-05	****
12	88	10	10	-15.6524758	9	1.00e-07	2.20e-06	****
12	100	10	10	-10.3012756	9	2.80e-06	1.95e-05	****
25	38	10	10	-2.2500000	9	5.10e-02	6.20e-02	ns
25	50	10	10	-4.7067872	9	1.00e-03	2.00e-03	**
25	63	10	10	-9.7500000	9	4.40e-06	2.48e-05	****
25	75	10	10	-8.2158384	9	1.79e-05	5.43e-05	****
25	88	10	10	-11.1958843	9	1.40e-06	1.30e-05	****
25	100	10	10	-8.1742389	9	1.86e-05	5.43e-05	****
38	50	10	10	-2.3717082	9	4.20e-02	5.30e-02	ns
38	63	10	10	-6.0000000	9	2.02e-04	4.35e-04	***
38	75	10	10	-6.0000000	9	2.02e-04	4.35e-04	***
38	88	10	10	-8.1348922	9	1.94e-05	5.43e-05	****
38	100	10	10	-8.3330887	9	1.60e-05	5.43e-05	****
50	63	10	10	-2.7386128	9	2.30e-02	3.40e-02	*
50	75	10	10	-2.8062430	9	2.00e-02	3.20e-02	*
50	88	10	10	-5.5815631	9	3.42e-04	6.84e-04	***
50	100	10	10	-3.9427724	9	3.00e-03	6.00e-03	**
63	75	10	10	-1.3093073	9	2.23e-01	2.40e-01	ns
63	88	10	10	-1.6269784	9	1.38e-01	1.55e-01	ns
63	100	10	10	-2.5861310	9	2.90e-02	4.10e-02	*
75	88	10	10	-0.2307692	9	8.23e-01	8.23e-01	ns
75	100	10	10	-1.6269784	9	1.38e-01	1.55e-01	ns
88	100	10	10	-1.0000000	9	3.43e-01	3.56e-01	ns

表 II：Student 检验比较风扇驱动的强度水平（%）。

组1	组2	n1	n2	统计量	df	p	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
1	5	10	10	-1.5609177	9	1.53e-01	0.204000	ns
1	10	10	10	-0.5797410	9	5.76e-01	0.613000	ns
1	15	10	10	-0.5570860	9	5.91e-01	0.613000	ns
1	20	10	10	-3.3425161	9	9.00e-03	0.020000	*
1	30	10	10	-3.0962811	9	1.30e-02	0.024000	*
1	40	10	10	-4.0451992	9	3.00e-03	0.011000	*
1	50	10	10	-6.0206826	9	1.97e-04	0.002000	**
5	10	10	10	0.7682213	9	4.62e-01	0.539000	ns
5	15	10	10	1.3416408	9	2.13e-01	0.271000	ns
5	20	10	10	-1.0476454	9	3.22e-01	0.392000	ns
5	30	10	10	-1.7685190	9	1.11e-01	0.155000	ns
5	40	10	10	-2.6234239	9	2.80e-02	0.048000	*
5	50	10	10	-3.8729833	9	4.00e-03	0.012000	*
10	15	10	10	0.2307692	9	8.23e-01	0.823000	ns
10	20	10	10	-2.2119262	9	5.40e-02	0.089000	ns
10	30	10	10	-3.1608267	9	1.20e-02	0.023000	*
10	40	10	10	-4.0193631	9	3.00e-03	0.011000	*
10	50	10	10	-4.8107024	9	9.59e-04	0.005000	**
15	20	10	10	-3.3541020	9	8.00e-03	0.020000	*
15	30	10	10	-4.8107024	9	9.59e-04	0.005000	**
15	40	10	10	-7.2160535	9	5.00e-05	0.000700	***
15	50	10	10	-9.3026051	9	6.50e-06	0.000182	***
20	30	10	10	-0.6882472	9	5.09e-01	0.570000	ns
20	40	10	10	-1.9215378	9	8.70e-02	0.135000	ns
20	50	10	10	-3.3084658	9	9.00e-03	0.020000	*
30	40	10	10	-1.7650452	9	1.11e-01	0.155000	ns
30	50	10	10	-3.2843925	9	9.00e-03	0.020000	*
40	50	10	10	-4.5825757	9	1.00e-03	0.006000	**

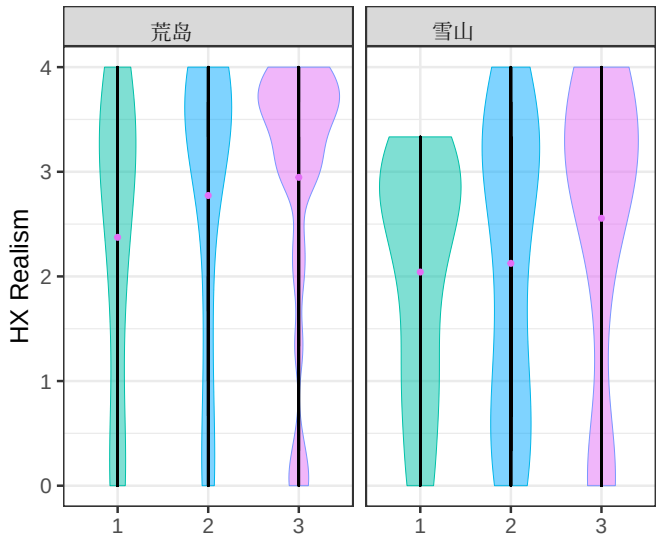
B. 结果 - 附加图表

本节展示论文结果部分的附加图表。这些图表未纳入正文，因为它们展示的是不显著的比较结果。

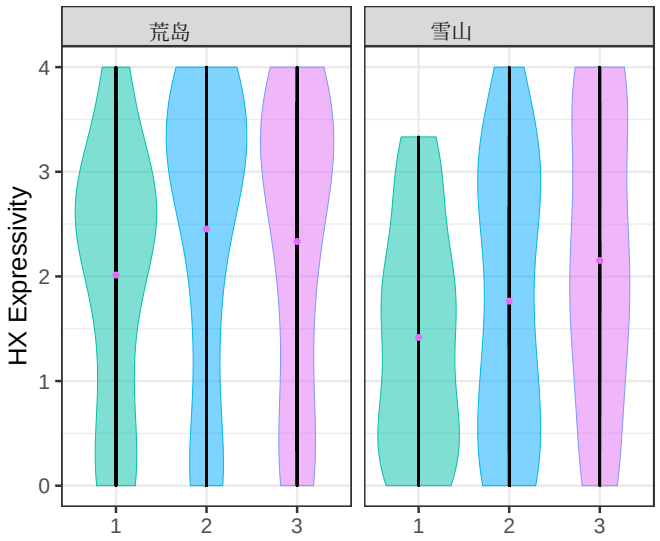


（a）热感觉　　(b) 热变化

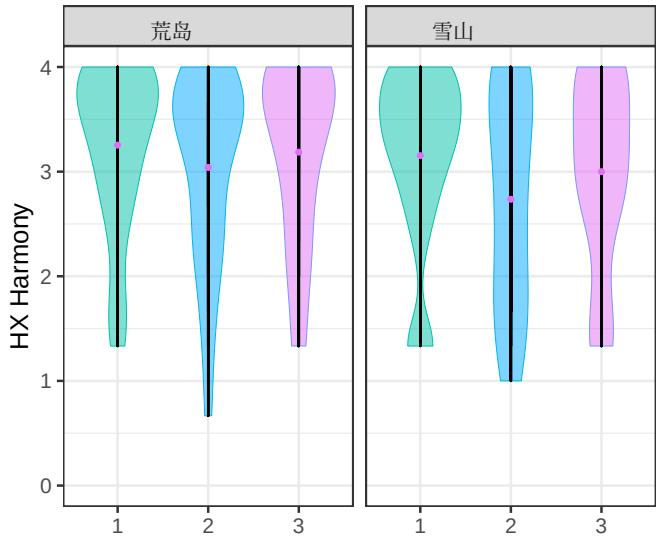
图 3：通行顺序对热感知的影响



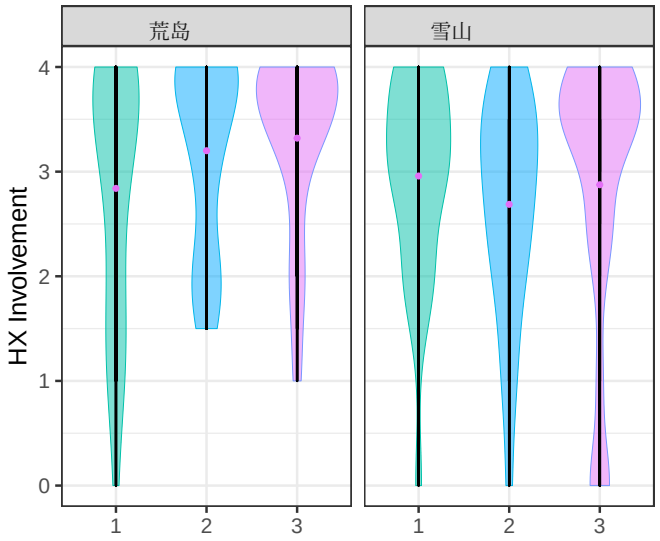
（a）真实感



（b）表现力

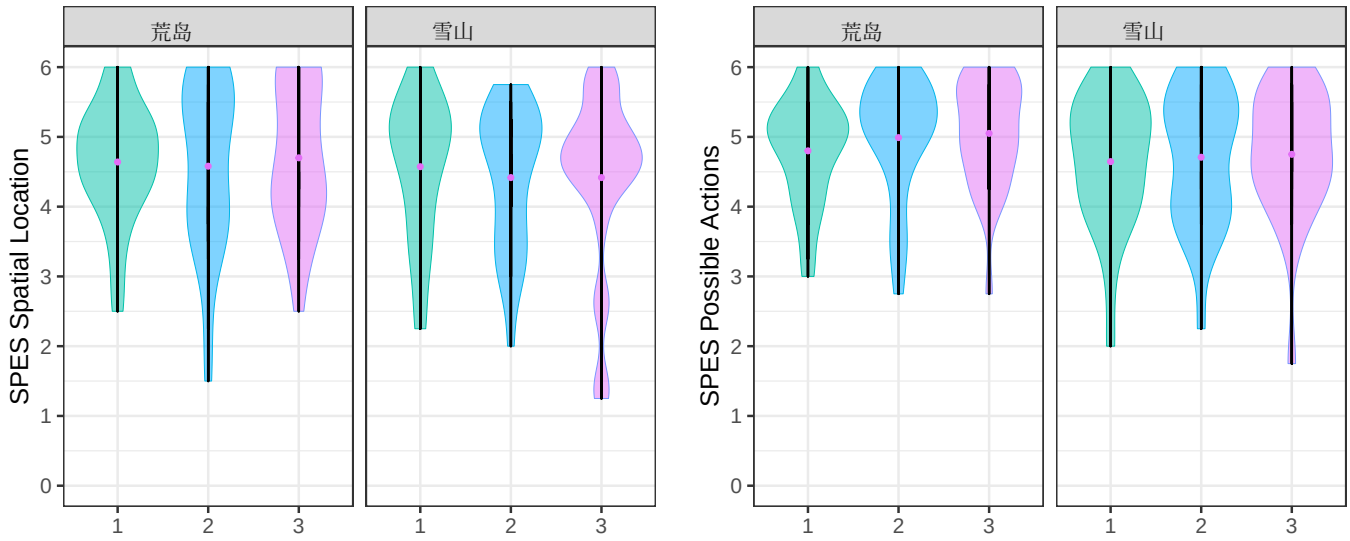


(c) 和谐



(d) 参与感

图4：通行顺序对触觉体验的影响



(a) 空间临场感

(b) 可能的行动

图 5：通行顺序对空间临场体验的影响

C. 结果——附加表格

本节展示论文“结果”部分的附加表格。这些表格详细报告了所进行的每项弗里德曼检验和威尔科克森检验的结果，以及根据参与者的人口统计学描述与问卷答案计算出的斯皮尔曼相关。

1）按实验条件列出的沉浸后问卷统计摘要：

表III：按实验条件列出的 HX 表达性统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	ci95_下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	0.000	3.00	0.667	0.00	1.67	1.67	1.067	1.194	0.239	0.640	1.533
荒岛	静态	25	0.000	4.00	3.000	2.33	3.33	1.00	2.720	0.985	0.197	2.333	3.093
荒岛	动态	25	0.333	4.00	3.333	2.33	4.00	1.67	3.013	1.007	0.201	2.600	3.373
雪山	对照组	24	0.000	2.33	0.333	0.00	1.33	1.33	0.625	0.718	0.147	0.361	0.903
雪山	静态	24	0.000	4.00	2.000	1.58	2.75	1.17	2.069	1.002	0.205	1.694	2.486
雪山	动态	24	0.333	4.00	3.000	1.92	3.33	1.42	2.639	1.167	0.238	2.167	3.056

表 IV：HX 真实感的实验条件统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	ci95_下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	0.00	3.67	1.00	0.00	2.00	2.000	1.187	1.217	0.243	0.720	1.64
荒岛	静态	25	2.33	4.00	3.67	3.33	3.67	0.333	3.507	0.432	0.086	3.320	3.67
荒岛	动态	25	1.33	4.00	3.67	3.00	4.00	1.000	3.400	0.660	0.132	3.107	3.64
雪山	对照组	24	0.00	3.33	0.50	0.00	1.00	1.000	0.778	0.991	0.202	0.417	1.19
雪山	静态	24	2.00	4.00	3.00	3.00	3.42	0.417	3.125	0.596	0.122	2.875	3.35
雪山	动态	24	1.00	4.00	3.00	2.25	3.33	1.083	2.819	0.845	0.173	2.458	3.14

表 V：HX参与度按实验条件划分的统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	0.0	4	2.0	1.5	2.50	1.000	2.06	0.993	0.199	1.66	2.44
荒岛	静态	25	2.5	4	3.5	3.5	4.00	0.500	3.62	0.415	0.083	3.46	3.76
荒岛	动态	25	1.5	4	4.0	3.5	4.00	0.500	3.68	0.575	0.115	3.44	3.88
雪山	对照组	24	0.0	4	2.0	1.0	2.50	1.500	1.73	1.161	0.237	1.27	2.17
雪山	静态	24	2.5	4	3.5	3.0	4.00	1.000	3.48	0.477	0.097	3.27	3.67
雪山	动态	24	2.0	4	3.5	3.0	3.62	0.625	3.31	0.605	0.123	3.06	3.54

表 VI：HX Harmony 各实验条件的统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	ci95_下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	0.667	4	2.67	1.67	3.33	1.667	2.57	1.025	0.205	2.17	2.97
荒岛	静态	25	1.667	4	3.67	3.33	3.67	0.333	3.43	0.582	0.116	3.20	3.63
荒岛	动态	25	2.333	4	3.67	3.00	4.00	1.000	3.48	0.545	0.109	3.27	3.69
雪山	对照组	24	1.000	4	1.67	1.33	2.75	1.417	2.12	0.977	0.199	1.75	2.51
雪山	静态	24	2.333	4	3.50	3.00	4.00	1.000	3.43	0.534	0.109	3.22	3.65
雪山	动态	24	2.000	4	3.33	3.00	3.75	0.750	3.33	0.598	0.122	3.10	3.57

表VII：总体临场感按实验条件分类的统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	ci95_下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	2	6	4	4	5.00	1.00	4.32	1.108	0.222	3.88	4.76
荒岛	静态	25	4	6	5	5	6.00	1.00	5.20	0.707	0.141	4.92	5.48
荒岛	动态	25	4	6	5	5	6.00	1.00	5.36	0.700	0.140	5.08	5.60
雪山	对照组	24	0	6	5	4	5.25	1.25	4.42	1.501	0.306	3.79	4.96
雪山	静态	24	4	6	5	5	6.00	1.00	5.25	0.676	0.138	4.96	5.50
雪山	动态	24	2	6	5	5	6.00	1.00	5.17	1.007	0.206	4.71	5.54

表 VIII：SPES 空间位置按实验条件划分的统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	1.50	6	4.25	3.50	5.25	1.750	4.17	1.179	0.236	3.71	4.61
荒岛	静态	25	3.00	6	5.00	4.25	5.75	1.500	4.89	0.995	0.199	4.51	5.28
荒岛	动态	25	3.75	6	4.75	4.25	5.50	1.250	4.86	0.788	0.158	4.59	5.18
雪山	对照组	24	1.25	6	4.38	3.44	5.00	1.562	4.09	1.229	0.251	3.58	4.58
雪山	静态	24	2.25	6	4.88	4.44	5.25	0.812	4.74	0.907	0.185	4.38	5.07
雪山	动态	24	2.00	6	5.00	4.19	5.25	1.062	4.57	1.052	0.215	4.13	4.96

表 IX：SPES可能行动按实验条件划分的统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	2.75	6	5.00	4.25	5.25	1.00	4.72	0.966	0.193	4.35	5.08
荒岛	静态	25	3.25	6	5.25	4.75	5.50	0.75	5.11	0.693	0.139	4.85	5.37
荒岛	动态	25	3.25	6	5.00	4.25	5.50	1.25	5.01	0.716	0.143	4.72	5.28
雪山	对照组	24	1.75	6	4.75	3.94	5.31	1.38	4.62	1.011	0.206	4.24	5.00
雪山	静态	24	2.00	6	4.88	4.19	5.50	1.31	4.70	0.944	0.193	4.31	5.04
雪山	动态	24	2.25	6	4.75	4.44	5.50	1.06	4.78	0.907	0.185	4.41	5.12

表 X：热感觉按实验条件划分的统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	-2	2	0	0	1.00	1.00	0.360	0.860	0.172	0.000	0.720
荒岛	静态	25	1	3	2	2	2.00	0.00	1.880	0.600	0.120	1.640	2.120
荒岛	动态	25	0	3	2	1	2.00	1.00	1.680	0.748	0.150	1.400	1.960
雪山	对照组	24	-2	1	0	0	0.25	0.25	0.083	0.717	0.146	-0.208	0.375
雪山	静态	24	-3	0	-1	-2	-1.00	1.00	-1.250	0.676	0.138	-1.501	-1.000
雪山	动态	24	-2	0	-1	-2	-1.00	1.00	-1.208	0.721	0.147	-1.500	-0.917

表 XI：热变化的实验条件统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	0	2	0	0.00	1	1.00	0.600	0.764	0.153	0.320	0.920
荒岛	静态	25	0	3	2	2.00	2	0.00	1.840	0.800	0.160	1.520	2.120
荒岛	动态	25	0	3	2	2.00	3	1.00	2.160	0.746	0.149	1.840	2.401
雪山	对照组	24	0	2	0	0.00	0	0.00	0.292	0.624	0.127	0.083	0.542
雪山	静态	24	0	3	2	1.00	2	1.00	1.542	0.884	0.180	1.167	1.875
雪山	动态	24	0	3	2	1.75	2	0.25	1.833	0.702	0.143	1.542	2.083

2）按通行顺序划分的沉浸后问卷统计摘要：

表 XII：按通行顺序划分的 HX 表达性统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	ci95_下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	0	4.00	2.33	1.000	2.67	1.67	2.01	1.27	0.254	1.51	2.49
荒岛	2	25	0	4.00	3.00	1.667	3.33	1.67	2.45	1.42	0.284	1.89	2.97
荒岛	3	25	0	4.00	3.00	1.000	3.33	2.33	2.33	1.40	0.280	1.76	2.88
雪山	1	24	0	3.33	1.50	0.333	2.00	1.67	1.42	1.07	0.219	1.01	1.86
雪山	2	24	0	4.00	1.67	0.583	3.00	2.42	1.76	1.33	0.272	1.28	2.33
雪山	3	24	0	4.00	2.33	1.250	3.42	2.17	2.15	1.39	0.283	1.60	2.69

表 XIII：按通行顺序划分的 HX 真实感统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	ci95_下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	0	4.00	3.00	1.333	3.33	2.000	2.37	1.41	0.282	1.79	2.89
荒岛	2	25	0	4.00	3.33	2.000	3.67	1.667	2.77	1.39	0.279	2.19	3.27
荒岛	3	25	0	4.00	3.33	3.000	3.67	0.667	2.95	1.25	0.251	2.45	3.40
雪山	1	24	0	3.33	2.50	1.000	3.00	2.000	2.04	1.13	0.230	1.57	2.46
雪山	2	24	0	4.00	2.50	0.667	3.33	2.667	2.12	1.40	0.286	1.62	2.67
雪山	3	24	0	4.00	3.00	1.917	3.67	1.750	2.56	1.44	0.293	1.97	3.10

表 XIV：HX参与度按通行顺序的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	0.0	4	3.5	2.00	4.00	2.00	2.84	1.231	0.246	2.36	3.28
荒岛	2	25	1.5	4	3.5	2.00	4.00	2.00	3.20	0.924	0.185	2.86	3.52
荒岛	3	25	1.0	4	3.5	3.00	4.00	1.00	3.32	0.865	0.173	2.96	3.62
雪山	1	24	0.0	4	3.0	2.38	3.62	1.25	2.96	0.988	0.202	2.56	3.29
雪山	2	24	0.0	4	3.0	2.00	3.50	1.50	2.69	1.051	0.215	2.27	3.06
雪山	3	24	0.0	4	3.5	2.50	3.62	1.12	2.88	1.329	0.271	2.33	3.33

表XV：HX Harmony 按通行顺序的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	1.333	4	3.67	3.00	4.00	1.00	3.25	0.801	0.160	2.96	3.56
荒岛	2	25	0.667	4	3.33	2.33	3.67	1.33	3.04	0.909	0.182	2.68	3.39
荒岛	3	25	1.333	4	3.67	2.67	4.00	1.33	3.19	0.856	0.171	2.87	3.49
雪山	1	24	1.333	4	3.33	2.92	3.67	0.75	3.15	0.840	0.171	2.81	3.46
雪山	2	24	1.000	4	2.83	1.67	3.67	2.00	2.74	1.040	0.212	2.29	3.14
雪山	3	24	1.333	4	3.17	2.67	3.75	1.08	3.00	0.906	0.185	2.64	3.33

表 XVI：总体临场感按通行顺序的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	4	6	5	5	6	1	5.12	0.781	0.156	4.84	5.40
荒岛	2	25	2	6	5	5	5	0	4.84	1.028	0.206	4.44	5.20
荒岛	3	25	3	6	5	4	6	2	4.92	1.077	0.215	4.48	5.32
雪山	1	24	4	6	5	5	6	1	5.29	0.690	0.141	5.04	5.58
雪山	2	24	2	6	5	4	6	2	4.88	1.035	0.211	4.46	5.25
雪山	3	24	0	6	5	4	6	2	4.67	1.551	0.317	4.04	5.25

表XVII：SPES 空间位置按通行顺序的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	2.50	6.00	4.75	4.25	5.25	1.000	4.64	0.854	0.171	4.31	4.96
荒岛	2	25	1.50	6.00	5.00	3.75	5.50	1.750	4.58	1.231	0.246	4.09	5.03
荒岛	3	25	2.50	6.00	4.50	4.00	6.00	2.000	4.70	1.046	0.209	4.31	5.10
雪山	1	24	2.25	6.00	4.88	3.94	5.25	1.312	4.57	1.031	0.210	4.20	4.96
雪山	2	24	2.00	5.75	4.75	3.50	5.25	1.750	4.42	1.010	0.206	4.00	4.82
雪山	3	24	1.25	6.00	4.75	4.25	5.06	0.812	4.42	1.255	0.256	3.91	4.92

表十八：SPES可能行动按通行顺序的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	3.00	6	5.00	4.25	5.25	1.00	4.80	0.764	0.153	4.49	5.08
荒岛	2	25	2.75	6	5.25	4.75	5.75	1.00	4.99	0.876	0.175	4.63	5.31
荒岛	3	25	2.75	6	5.00	4.75	5.75	1.00	5.05	0.791	0.158	4.71	5.35
雪山	1	24	2.00	6	4.75	4.00	5.50	1.50	4.65	0.947	0.193	4.27	5.00
雪山	2	24	2.25	6	5.00	4.00	5.50	1.50	4.71	0.980	0.200	4.31	5.06
雪山	3	24	1.75	6	4.75	4.25	5.50	1.25	4.75	0.941	0.192	4.37	5.12

表 XIX：按热感觉通行顺序分类的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	0	2	1	0	2	2	1.120	0.833	0.167	0.84	1.440
荒岛	2	25	-2	3	1	1	2	1	1.320	1.145	0.229	0.92	1.760
荒岛	3	25	-1	3	2	1	2	1	1.480	1.005	0.201	1.08	1.840
雪山	1	24	-3	1	-1	-1	0	1	-0.750	0.944	0.193	-1.08	-0.417
雪山	2	24	-2	1	-1	-1	0	1	-0.708	0.908	0.185	-1.08	-0.375
雪山	3	24	-2	1	-1	-2	0	2	-0.917	0.974	0.199	-1.29	-0.542

表 XX：按热变化通行顺序分类的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间 下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	0	3	1	0.00	2.00	2.00	1.280	0.980	0.196	0.880	1.68
荒岛	2	25	0	3	2	1.00	3.00	2.00	1.800	1.080	0.216	1.400	2.20
荒岛	3	25	0	3	2	1.00	2.00	1.00	1.520	0.963	0.193	1.120	1.88
雪山	1	24	0	2	1	0.00	1.25	1.25	0.875	0.797	0.163	0.583	1.21
雪山	2	24	0	2	2	0.00	2.00	2.00	1.250	0.989	0.202	0.833	1.67
雪山	3	24	0	3	2	0.75	2.00	1.25	1.542	1.103	0.225	1.125	1.96

3）按实验条件划分的行为指标统计摘要：

表 XXI：按实验条件划分的总局部距离统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间 下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	16.6	86.5	32.8	23.9	37.8	13.9	35.2	16.1	3.22	29.6	42.1
荒岛	静态	25	19.0	71.6	34.1	24.6	44.9	20.2	37.5	15.7	3.13	31.9	43.7
荒岛	动态	25	14.5	64.9	32.3	24.9	44.5	19.6	34.4	13.5	2.69	29.4	39.7
雪山	对照组	24	24.4	85.1	40.5	32.9	45.8	12.9	43.2	15.6	3.18	37.9	49.1
雪山	静态	24	25.1	60.9	40.8	31.3	49.4	18.1	40.3	10.4	2.11	36.1	44.0
雪山	动态	24	20.5	105.3	40.5	34.0	47.4	13.4	42.6	17.3	3.52	36.6	50.7

表 XXII：按实验条件划分的总世界距离统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	置信区间95% 下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	112	532	239	197	278	81.7	259	97.6	19.5	226	299
荒岛	静态	25	164	616	232	204	272	68.7	260	97.9	19.6	228	299
荒岛	动态	25	155	745	244	195	302	107.3	268	117.2	23.4	230	318
雪山	对照组	24	193	500	280	254	320	66.1	292	61.6	12.6	270	316
雪山	静态	24	135	453	284	264	319	55.3	287	68.4	14.0	261	315
雪山	动态	24	252	465	291	264	315	50.8	300	49.9	10.2	282	321

表二十三：总局部旋转距离按实验条件划分的统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	ci95_下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	53.6	303	106	87.1	156	68.5	126	60.9	12.18	104	151
荒岛	静态	25	62.9	243	124	84.7	160	75.0	127	49.2	9.85	109	147
荒岛	动态	25	45.3	288	103	84.1	168	83.4	123	57.7	11.54	101	148
雪山	对照组	24	73.4	300	110	92.2	141	48.3	131	57.9	11.82	108	156
雪山	静态	24	56.9	236	124	94.9	153	57.8	128	46.6	9.51	109	147
雪山	动态	24	55.6	282	124	100.6	147	46.2	132	54.5	11.13	112	153

TABLE XXIV：总世界旋转距离的实验条件统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间 下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	82.6	372	128	113	185	72.0	156	68.3	13.66	133	184
荒岛	静态	25	85.4	275	154	109	187	77.8	154	49.1	9.83	137	174
荒岛	动态	25	62.5	367	128	101	176	75.3	150	71.5	14.29	125	180
雪山	对照组	24	87.8	407	163	128	211	83.5	176	73.2	14.94	149	207
雪山	静态	24	74.2	298	156	128	223	94.3	173	61.0	12.46	151	195
雪山	动态	24	100.7	293	154	129	176	46.2	167	53.1	10.83	147	188

表 XXV：LocalRoamingEntropy 按实验条件的统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	ci95_下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	0.661	0.883	0.784	0.751	0.821	0.070	0.791	0.050	0.010	0.771	0.810
荒岛	静态	25	0.715	0.867	0.818	0.788	0.838	0.050	0.806	0.044	0.009	0.789	0.822
荒岛	动态	25	0.694	0.850	0.803	0.751	0.824	0.073	0.785	0.047	0.009	0.767	0.803
雪山	对照组	24	0.763	0.901	0.843	0.823	0.861	0.038	0.840	0.031	0.006	0.827	0.851
雪山	静态	24	0.730	0.885	0.836	0.812	0.866	0.054	0.830	0.045	0.009	0.813	0.846
雪山	动态	24	0.750	0.899	0.844	0.813	0.863	0.050	0.838	0.039	0.008	0.823	0.852

表XXVI：WorldRoamingEntropy 按实验条件划分的统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	0.680	0.905	0.845	0.823	0.864	0.041	0.836	0.050	0.010	0.814	0.852
荒岛	静态	25	0.765	0.888	0.836	0.816	0.856	0.041	0.833	0.032	0.006	0.821	0.845
荒岛	动态	25	0.724	0.908	0.843	0.821	0.859	0.038	0.838	0.041	0.008	0.821	0.853
雪山	对照组	24	0.770	0.912	0.851	0.844	0.875	0.031	0.854	0.029	0.006	0.841	0.865
雪山	静态	24	0.604	0.894	0.855	0.841	0.870	0.030	0.838	0.068	0.014	0.809	0.861
雪山	动态	24	0.777	0.902	0.861	0.845	0.881	0.035	0.860	0.029	0.006	0.849	0.871

表 XXVII：LocalMovementEntrop 按实验条件划分的统计摘要 y

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间 下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	0.737	0.918	0.879	0.856	0.895	0.039	0.871	0.039	0.008	0.854	0.884
荒岛	静态	25	0.817	0.912	0.882	0.869	0.898	0.029	0.879	0.025	0.005	0.868	0.888
荒岛	动态	25	0.832	0.916	0.870	0.859	0.889	0.030	0.872	0.022	0.004	0.864	0.881
雪山	对照组	24	0.844	0.909	0.878	0.870	0.890	0.020	0.878	0.017	0.003	0.871	0.885
雪山	静态	24	0.755	0.908	0.874	0.857	0.886	0.029	0.868	0.031	0.006	0.855	0.879
雪山	动态	24	0.824	0.905	0.884	0.867	0.893	0.025	0.877	0.022	0.004	0.868	0.885

表二十八：按实验条件汇总的世界移动熵统计摘要

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	0.729	0.926	0.896	0.872	0.904	0.032	0.880	0.043	0.009	0.863	0.895
荒岛	静态	25	0.822	0.921	0.886	0.873	0.900	0.027	0.885	0.023	0.005	0.876	0.893
荒岛	动态	25	0.840	0.922	0.881	0.874	0.897	0.023	0.885	0.020	0.004	0.878	0.892
雪山	对照组	24	0.856	0.918	0.891	0.875	0.900	0.025	0.888	0.016	0.003	0.881	0.894
雪山	静态	24	0.783	0.914	0.886	0.863	0.892	0.030	0.876	0.032	0.007	0.863	0.887
雪山	动态	24	0.829	0.910	0.889	0.869	0.896	0.027	0.882	0.020	0.004	0.873	0.889

表 XXIX：按实验条件划分的传送次数统计摘要 s

实验	条件	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	对照组	25	16	117	37.0	32.0	65.0	33.0	49.0	24.7	4.94	40.0	58.9
荒岛	静态	25	24	114	35.0	31.0	50.0	19.0	45.4	23.6	4.72	37.7	55.5
荒岛	动态	25	19	105	44.0	26.0	63.0	37.0	46.3	22.0	4.40	38.2	54.6
雪山	对照组	24	29	85	47.5	37.0	64.2	27.2	51.2	15.6	3.19	44.8	56.8
雪山	静态	24	28	86	50.5	36.8	58.5	21.8	50.2	16.4	3.35	43.9	56.8
雪山	动态	24	27	75	46.0	40.2	58.2	18.0	48.2	12.7	2.60	43.0	53.1

4）按通行顺序划分的行为指标统计摘要：

表 XXX：TotalLocalDistance 按通行顺序的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	ci95_下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	16.6	86.5	45.9	34.1	62.5	28.5	47.4	17.47	3.49	41.1	54.5
荒岛	2	25	16.4	53.3	32.7	23.7	40.9	17.2	32.0	10.36	2.07	28.1	35.9
荒岛	3	25	14.5	41.8	25.8	22.7	34.0	11.3	27.7	7.38	1.48	24.9	30.8
雪山	1	24	24.0	85.1	49.2	44.3	58.2	13.9	50.8	12.58	2.57	46.2	55.7
雪山	2	24	24.6	105.3	40.1	30.2	42.6	12.4	39.9	15.98	3.26	34.5	46.9
雪山	3	24	20.5	69.1	34.0	28.3	39.4	11.1	35.4	10.43	2.13	31.4	39.7

表XXXI：按通行顺序汇总的总世界距离统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	112	745	270	266	339	72.9	321	145.3	29.07	268	381
荒岛	2	25	155	442	231	204	266	62.1	245	63.5	12.70	222	271
荒岛	3	25	164	319	204	188	231	43.2	220	44.1	8.82	204	238
雪山	1	24	135	500	310	279	343	63.8	315	89.9	18.36	282	349
雪山	2	24	193	341	277	267	292	25.0	280	30.3	6.18	268	291
雪山	3	24	246	360	275	255	313	57.9	285	36.0	7.34	273	301

表XXXII：按通行顺序划分的总局部旋转距离统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	87.1	303	169.8	128.9	208	79.2	170.2	60.9	12.19	147.6	194
荒岛	2	25	52.6	201	100.8	73.4	148	75.1	112.8	42.3	8.46	97.5	129
荒岛	3	25	45.3	125	95.0	76.0	116	40.1	92.7	24.4	4.88	83.1	102
雪山	1	24	107.4	300	157.4	134.9	202	67.4	173.1	50.0	10.21	153.1	193
雪山	2	24	55.6	282	104.3	90.4	123	33.0	112.4	43.1	8.81	97.8	133
雪山	3	24	56.9	211	97.4	82.0	116	33.8	104.6	34.7	7.09	93.1	118

表XXXIII：按通行顺序划分的 TotalWorldRotationDistanc 统计摘要 e

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	102.1	372	193	167.0	242	74.7	205	72.2	14.44	178	233
荒岛	2	25	75.7	230	129	109.2	165	56.0	140	40.9	8.18	126	157
荒岛	3	25	62.5	185	111	98.9	132	33.4	116	31.0	6.20	104	129
雪山	1	24	139.9	407	210	169.5	258	88.6	221	62.2	12.69	196	245
雪山	2	24	88.0	288	135	116.5	158	41.5	148	49.0	9.99	131	168
雪山	3	24	74.2	243	146	119.3	166	46.2	147	43.9	8.96	130	164

表 XXXIV：LocalRoamingEntropy 按通行顺序的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间 下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	0.745	0.883	0.821	0.773	0.845	0.073	0.814	0.042	0.008	0.799	0.830
荒岛	2	25	0.694	0.871	0.790	0.743	0.830	0.087	0.788	0.051	0.010	0.768	0.807
荒岛	3	25	0.661	0.836	0.791	0.751	0.815	0.064	0.780	0.044	0.009	0.763	0.796
雪山	1	24	0.730	0.899	0.849	0.815	0.868	0.054	0.840	0.040	0.008	0.825	0.855
雪山	2	24	0.752	0.901	0.838	0.809	0.852	0.043	0.834	0.037	0.007	0.819	0.848
雪山	3	24	0.736	0.888	0.830	0.816	0.861	0.045	0.833	0.040	0.008	0.816	0.847

表 XXXV：WorldRoamingEntropy 按通行顺序的统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	0.735	0.888	0.848	0.831	0.862	0.032	0.843	0.031	0.006	0.829	0.853
荒岛	2	25	0.724	0.908	0.834	0.802	0.858	0.056	0.829	0.045	0.009	0.811	0.847
荒岛	3	25	0.680	0.905	0.843	0.816	0.858	0.042	0.834	0.046	0.009	0.816	0.850
雪山	1	24	0.604	0.883	0.849	0.838	0.859	0.021	0.828	0.066	0.013	0.801	0.850
雪山	2	24	0.806	0.898	0.860	0.844	0.879	0.035	0.858	0.025	0.005	0.848	0.867
雪山	3	24	0.799	0.912	0.866	0.851	0.890	0.039	0.866	0.028	0.006	0.855	0.876

表 XXXVI：按通行顺序排列的局部移动熵统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	0.807	0.918	0.889	0.871	0.903	0.031	0.883	0.027	0.005	0.872	0.893
荒岛	2	25	0.817	0.916	0.871	0.862	0.894	0.032	0.872	0.028	0.006	0.860	0.883
荒岛	3	25	0.737	0.898	0.868	0.858	0.884	0.026	0.866	0.031	0.006	0.853	0.876
雪山	1	24	0.755	0.903	0.878	0.867	0.884	0.017	0.869	0.031	0.006	0.855	0.880
雪山	2	24	0.844	0.908	0.873	0.867	0.891	0.024	0.876	0.018	0.004	0.869	0.884
雪山	3	24	0.824	0.909	0.886	0.862	0.893	0.031	0.878	0.021	0.004	0.870	0.886

表 XXXVII：按通行顺序划分的世界移动熵统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限	95%置信区间上限
荒岛	1	25	0.815	0.926	0.899	0.879	0.908	0.029	0.893	0.024	0.005	0.884	0.903
荒岛	2	25	0.822	0.922	0.887	0.867	0.900	0.033	0.882	0.027	0.005	0.872	0.893
荒岛	3	25	0.729	0.910	0.879	0.872	0.895	0.024	0.874	0.035	0.007	0.858	0.886
雪山	1	24	0.783	0.909	0.886	0.867	0.896	0.029	0.874	0.033	0.007	0.860	0.887
雪山	2	24	0.841	0.918	0.888	0.878	0.898	0.020	0.885	0.018	0.004	0.877	0.891
雪山	3	24	0.858	0.914	0.888	0.874	0.898	0.024	0.887	0.016	0.003	0.880	0.893

表 XXXVIII：按通行顺序划分的传送次数统计摘要

实验	顺序	n	min	max	中位数	q1	q3	iqr	mean	sd	se	95%置信区间下限 —	95%置信区间上限 —
荒岛	1	25	28	117	64.0	38.0	73.0	35.0	61.3	26.1	5.22	52.4	71.9
荒岛	2	25	19	104	34.0	28.0	59.0	31.0	42.8	21.5	4.29	35.4	52.0
荒岛	3	25	16	71	32.0	30.0	44.0	14.0	36.6	13.0	2.61	31.9	42.2
雪山	1	24	27	86	56.0	44.0	66.0	22.0	55.4	17.8	3.64	48.6	62.5
雪山	2	24	28	65	45.5	36.8	57.2	20.5	45.4	12.0	2.45	41.0	49.9
雪山	3	24	32	73	45.5	39.0	61.0	22.0	48.9	12.9	2.63	44.1	53.6

5）实验条件间问卷答案的比较：

表XXXIX：比较 HX 表达性实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	21.2	2	0	****
雪山	24	26.3	2	0	****

表 XL：用于比较 HX 表达性实验条件的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	10.5	0.001	***
荒岛	对照组	动态	25	25	19.0	0.001	***
荒岛	静态	动态	25	25	111.0	0.419	ns
雪山	对照组	静态	24	24	10.0	0.000	***
雪山	对照组	动态	24	24	9.5	0.000	***
雪山	静态	动态	24	24	65.5	0.085	ns

表 XLI：针对 HX 真实感比较实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	29.1	2	0	****
雪山	24	33.7	2	0	****

表 XLII：HX 真实感实验条件比较的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	0.0	0.000	****
荒岛	对照组	动态	25	25	8.0	0.000	***
荒岛	静态	动态	25	25	99.0	0.887	ns
雪山	对照组	静态	24	24	0.0	0.000	****
雪山	对照组	动态	24	24	6.5	0.000	***
雪山	静态	动态	24	24	112.0	0.096	ns

表 XLIII：比较 HX参与度实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	34.1	2	0	****
雪山	24	27.0	2	0	****

表XLIV：比较 HX参与度实验条件的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	0.0	0.000	***
荒岛	对照组	动态	25	25	2.5	0.000	***
荒岛	静态	动态	25	25	44.0	0.594	ns
雪山	对照组	静态	24	24	5.5	0.000	***
雪山	对照组	动态	24	24	19.0	0.000	***
雪山	静态	动态	24	24	81.0	0.216	ns

表 XLV：比较 HX Harmony 实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	10.8	2	0.005	**
雪山	24	21.5	2	0.000	****

表 XLVI：HX Harmony 各实验条件比较的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	35.5	0.005	**
荒岛	对照组	动态	25	25	25.5	0.005	**
荒岛	静态	动态	25	25	83.0	0.642	ns
雪山	对照组	静态	24	24	3.0	0.000	***
雪山	对照组	动态	24	24	15.5	0.001	***
雪山	静态	动态	24	24	99.5	0.282	ns

表 XLVII：比较总体临场感实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	20.2	2	0	****
雪山	24	17.7	2	0	***

表 XLVIII：总体临场感实验条件比较的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	0	0.001	***
荒岛	对照组	动态	25	25	11	0.002	**
荒岛	静态	动态	25	25	22	0.308	ns
雪山	对照组	静态	24	24	0	0.004	**
雪山	对照组	动态	24	24	6	0.004	**
雪山	静态	动态	24	24	30	0.824	ns

表 XLIX：针对 SPES 空间位置的实验条件进行比较的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	13.3	2	0.001	**
雪山	24	12.4	2	0.002	**

表 L：SPES 空间位置实验条件比较的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	31.5	0.013	*
荒岛	对照组	动态	25	25	27.5	0.007	**
荒岛	静态	动态	25	25	101.5	0.808	ns
雪山	对照组	静态	24	24	16.5	0.001	***
雪山	对照组	动态	24	24	38.5	0.027	*
雪山	静态	动态	24	24	142.5	0.164	ns

表 LI：比较 SPES 可能行动各实验条件的弗里德曼检验

s

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	11.47	2	0.003	**
雪山	24	4.23	2	0.120	ns

表 LII：比较 SPES可能行动实验条件的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	42.5	0.018	*
荒岛	对照组	动态	25	25	48.5	0.374	ns
荒岛	静态	动态	25	25	99.5	0.374	ns
雪山	对照组	静态	24	24	67.0	0.909	ns
雪山	对照组	动态	24	24	61.5	0.909	ns
雪山	静态	动态	24	24	73.0	0.909	ns

表 LIII：比较热感觉实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	29.4	2	0	****
雪山	24	29.7	2	0	****

表 LIV：热感觉实验条件比较的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	5.5	0.000	***
荒岛	对照组	动态	25	25	12.0	0.000	***
荒岛	静态	动态	25	25	43.0	0.377	ns
雪山	对照组	静态	24	24	210.0	0.000	***
雪山	对照组	动态	24	24	171.0	0.000	***
雪山	静态	动态	24	24	49.0	0.835	ns

表 LV：热变化的实验条件比较弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	24.4	2	0	****
雪山	24	26.5	2	0	****

表 LVI：比较热变化实验条件的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	15.0	0.001	***
荒岛	对照组	动态	25	25	10.5	0.001	***
荒岛	静态	动态	25	25	18.0	0.178	ns
雪山	对照组	静态	24	24	5.0	0.000	***
雪山	对照组	动态	24	24	2.5	0.000	***
雪山	静态	动态	24	24	31.0	0.162	ns

6）不同篇章顺序之间的问卷答案比较：

表 LVII：比较 HX 表达性通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	2.32	2	0.314	ns
雪山	24	3.70	2	0.157	ns

表 LVIII：针对 HX 表达性的通行顺序进行威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	113.0	0.669	ns
荒岛	1	3	25	25	88.5	0.669	ns
荒岛	2	3	25	25	148.0	0.772	ns
雪山	1	2	24	24	101.5	0.546	ns
雪山	1	3	24	24	80.0	0.240	ns
雪山	2	3	24	24	108.0	0.546	ns

表LIX：弗里德曼检验比较 HX 真实感的通行顺序

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	3.22	2	0.200	ns
雪山	24	2.55	2	0.279	ns

表 LX：用于比较 HX 真实感通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	104.0	0.723	ns
荒岛	1	3	25	25	99.0	0.723	ns
荒岛	2	3	25	25	106.5	0.767	ns
雪山	1	2	24	24	97.5	0.804	ns
雪山	1	3	24	24	71.5	0.645	ns
雪山	2	3	24	24	110.0	0.804	ns

表 LXI：比较 HX参与度通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	1.927	2	0.382	ns
雪山	24	0.837	2	0.658	ns

表 LXII：比较 HX参与度通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	80.0	0.716	ns
荒岛	1	3	25	25	83.0	0.480	ns
荒岛	2	3	25	25	67.0	0.716	ns
雪山	1	2	24	24	146.0	1.000	ns
雪山	1	3	24	24	106.0	1.000	ns
雪山	2	3	24	24	88.5	1.000	ns

表 LXIII：弗里德曼检验比较 HX Harmony 的通行顺序

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	0.621	2	0.733	ns
雪山	24	1.506	2	0.471	ns

表 LXIV：HX Harmony 通行顺序比较的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	150	1.000	ns
荒岛	1	3	25	25	102	1.000	ns
荒岛	2	3	25	25	128	1.000	ns
雪山	1	2	24	24	130	0.477	ns
雪山	1	3	24	24	118	0.720	ns
雪山	2	3	24	24	80	0.720	ns

表 LXV：比较总体临场感通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	0.286	2	0.867	ns
雪山	24	6.453	2	0.040	*

表 LXVI：比较总体临场感通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	78.0	0.894	ns
荒岛	1	3	25	25	87.0	0.894	ns
荒岛	2	3	25	25	44.0	0.943	ns
雪山	1	2	24	24	84.0	0.095	ns
雪山	1	3	24	24	39.5	0.096	ns
雪山	2	3	24	24	66.0	0.379	ns

表 LXVII：比较 SPES 空间位置通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	1.854	2	0.396	ns
雪山	24	0.023	2	0.988	ns

表 LXVIII：SPES 空间位置通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	88	1	ns
荒岛	1	3	25	25	90	1	ns
荒岛	2	3	25	25	112	1	ns
雪山	1	2	24	24	114	1	ns
雪山	1	3	24	24	171	1	ns
雪山	2	3	24	24	102	1	ns

表 LXIX：弗里德曼检验比较 SPES 可能行动的通行顺序

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	4.886	2	0.087	ns
雪山	24	0.338	2	0.845	ns

表 LXX：对 SPES 可能行动的通行顺序进行威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	76.0	0.342	ns
荒岛	1	3	25	25	44.0	0.121	ns
荒岛	2	3	25	25	72.5	0.834	ns
雪山	1	2	24	24	66.0	1.000	ns
雪山	1	3	24	24	84.5	1.000	ns
雪山	2	3	24	24	80.0	1.000	ns

表 LXXI：比较热感觉通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	0.987	2	0.610	ns
雪山	24	0.849	2	0.654	ns

表 LXXII：比较热感觉通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	80.0	1.00	ns
荒岛	1	3	25	25	72.5	0.66	ns
荒岛	2	3	25	25	65.0	1.00	ns
雪山	1	2	24	24	100.0	1.00	ns
雪山	1	3	24	24	89.0	1.00	ns
雪山	2	3	24	24	71.5	1.00	ns

表 LXXIII：针对热变化的通行顺序比较的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	3.46	2	0.178	ns
雪山	24	4.76	2	0.092	ns

表 LXXIV：比较热变化通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	59.5	0.450	ns
荒岛	1	3	25	25	69.5	0.854	ns
荒岛	2	3	25	25	93.5	0.854	ns
雪山	1	2	24	24	68.0	0.544	ns
雪山	1	3	24	24	43.0	0.054	ns
雪山	2	3	24	24	45.5	0.544	ns

7）不同条件间行为指标的比较：

表 LXX：针对总局部距离比较实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	1.520	2	0.468	ns
雪山	24	0.333	2	0.846	ns

表 LXXVI：总局部距离的实验条件比较威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	138	1	ns
荒岛	对照组	动态	25	25	167	1	ns
荒岛	静态	动态	25	25	192	1	ns
雪山	对照组	静态	24	24	173	1	ns
雪山	对照组	动态	24	24	154	1	ns
雪山	静态	动态	24	24	148	1	ns

表 LXXVII：比较 TotalWorldDista 的实验条件的弗里德曼检验 nce

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	0.32	2	0.852	ns
雪山	24	1.08	2	0.582	ns

T表 LXXVIII：比较总世界距离各实验条件的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	153	1	ns
荒岛	对照组	动态	25	25	171	1	ns
荒岛	静态	动态	25	25	174	1	ns
雪山	对照组	静态	24	24	128	1	ns
雪山	对照组	动态	24	24	120	1	ns
雪山	静态	动态	24	24	125	1	ns

表 LXXIX：针对总局部旋转距离比较实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	1.040	2	0.595	ns
雪山	24	0.083	2	0.959	ns

表 LXXX：针对总局部旋转距离比较实验条件的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	149	1	ns
荒岛	对照组	动态	25	25	167	1	ns
荒岛	静态	动态	25	25	188	1	ns
雪山	对照组	静态	24	24	142	1	ns
雪山	对照组	动态	24	24	135	1	ns
雪山	静态	动态	24	24	140	1	ns

表 LXXXI：比较总世界旋转距离各实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	0.96	2	0.619	ns
雪山	24	0.25	2	0.882	ns

表 LXXXII：总世界旋转距离的实验条件比较威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	147	1	ns
荒岛	对照组	动态	25	25	176	1	ns
荒岛	静态	动态	25	25	185	1	ns
雪山	对照组	静态	24	24	153	1	ns
雪山	对照组	动态	24	24	153	1	ns
雪山	静态	动态	24	24	163	1	ns

TA表 LXXXIII：比较 LocalRoamingEntrop 各实验条件的弗里德曼检验 y

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	3.440	2	0.179	ns
雪山	24	0.083	2	0.959	ns

TABLE LXXXIV：针对 LocalRoamingEntrop 实验条件进行比较的威尔科克森检验 y

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	121	0.550	ns
荒岛	对照组	动态	25	25	194	0.550	ns
荒岛	静态	动态	25	25	243	0.089	ns
雪山	对照组	静态	24	24	189	0.831	ns
雪山	对照组	动态	24	24	149	0.989	ns
雪山	静态	动态	24	24	119	0.831	ns

表 LXXXV：比较 WorldRoamingEntropy 实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	0.96	2	0.619	ns
雪山	24	1.00	2	0.607	ns

表 LXXXVI：针对 WorldRoamingEntropy 比较实验条件的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	193	1.000	ns
荒岛	对照组	动态	25	25	174	1.000	ns
荒岛	静态	动态	25	25	132	1.000	ns
雪山	对照组	静态	24	24	160	0.790	ns
雪山	对照组	动态	24	24	117	0.723	ns
雪山	静态	动态	24	24	108	0.723	ns

TABLE LXXXVII：弗里德曼检验比较 LocalMovementEntr 的实验条件 opy

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	0.72	2	0.698	ns
雪山	24	6.08	2	0.048	*

表 LXXXVIII：威尔科克森检验：比较局部移动熵的实验条件

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	147	1.000	ns
荒岛	对照组	动态	25	25	173	1.000	ns
荒岛	静态	动态	25	25	210	0.630	ns
雪山	对照组	静态	24	24	193	0.458	ns
雪山	对照组	动态	24	24	130	0.584	ns
雪山	静态	动态	24	24	88	0.236	ns

表 LXXXIX：比较世界移动熵实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	0.56	2	0.756	ns
雪山	24	1.75	2	0.417	ns

表 XC：对比 WorldMovementEntropy 实验条件的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	174	1.000	ns
荒岛	对照组	动态	25	25	185	1.000	ns
荒岛	静态	动态	25	25	164	1.000	ns
雪山	对照组	静态	24	24	204	0.384	ns
雪山	对照组	动态	24	24	197	0.384	ns
雪山	静态	动态	24	24	148	0.966	ns

T表 XCI：针对传送次数比较实验条件的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	1.670	2	0.434	ns
雪山	24	0.452	2	0.798	ns

TA表 XCII：比较传送次数实验条件的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	对照组	静态	25	25	132	1	ns
荒岛	对照组	动态	25	25	164	1	ns
荒岛	静态	动态	25	25	140	1	ns
雪山	对照组	静态	24	24	154	1	ns
雪山	对照组	动态	24	24	154	1	ns
雪山	静态	动态	24	24	162	1	ns

8）通行顺序之间行为指标的比较：

表 XCIII：比较总局部距离通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	28.1	2	0	****
雪山	24	22.3	2	0	****

表 XCIV：比较总局部距离通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	301	0.000	****
荒岛	1	3	25	25	320	0.000	****
荒岛	2	3	25	25	250	0.017	*
雪山	1	2	24	24	266	0.001	***
雪山	1	3	24	24	281	0.000	***
雪山	2	3	24	24	226	0.029	*

表 XCV：通行顺序对总世界距离的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	17.4	2	0.000	***
雪山	24	12.3	2	0.002	**

表 XCVI：总世界距离通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	276	0.003	**
荒岛	1	3	25	25	292	0.001	***
荒岛	2	3	25	25	245	0.025	*
雪山	1	2	24	24	232	0.054	ns
雪山	1	3	24	24	219	0.098	ns
雪山	2	3	24	24	128	0.546	ns

表 XCVII：针对总局部旋转距离比较通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	31	2	0	****
雪山	24	31	2	0	****

表 XCVIII：针对总局部旋转距离的通行顺序进行的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	301	0.000	****
荒岛	1	3	25	25	325	0.000	****
荒岛	2	3	25	25	247	0.022	*
雪山	1	2	24	24	293	0.000	****
雪山	1	3	24	24	298	0.000	****
雪山	2	3	24	24	190	0.264	ns

表 XCIX：比较总世界旋转距离通行顺序的弗里德曼检验 ce

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	27.9	2	0	****
雪山	24	23.1	2	0	****

表 C：比较总世界旋转距离通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	299	0.000	***
荒岛	1	3	25	25	324	0.000	****
荒岛	2	3	25	25	254	0.013	*
雪山	1	2	24	24	293	0.000	****
雪山	1	3	24	24	295	0.000	****
雪山	2	3	24	24	159	0.812	ns

表 CI：比较 LocalRoamingEntropy 通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	15.44	2	0.000	***
雪山	24	3.08	2	0.214	ns

表 CII：比较 LocalRoamingEntropy 通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	273	0.004	**
荒岛	1	3	25	25	285	0.001	***
荒岛	2	3	25	25	175	0.751	ns
雪山	1	2	24	24	207	0.321	ns
雪山	1	3	24	24	194	0.436	ns
雪山	2	3	24	24	155	0.900	ns

表 CIII：比较 WorldRoamingEntropy 通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	2.24	2	0.326	ns
雪山	24	8.58	2	0.014	*

表CIV：比较WorldRoamingEntropy通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	223	0.321	ns
荒岛	1	3	25	25	192	0.852	ns
荒岛	2	3	25	25	132	0.852	ns
雪山	1	2	24	24	90	0.113	ns
雪山	1	3	24	24	60	0.026	*
雪山	2	3	24	24	83	0.113	ns

表 CV：比较局部移动熵通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	3.84	2	0.147	ns
雪山	24	1.75	2	0.417	ns

表 CVI：局部移动熵通行顺序比较的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	222	0.226	ns
荒岛	1	3	25	25	262	0.018	*
荒岛	2	3	25	25	165	0.958	ns
雪山	1	2	24	24	125	0.844	ns
雪山	1	3	24	24	97	0.408	ns
雪山	2	3	24	24	121	0.844	ns

表 CVII：比较世界移动熵通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	6.480	2	0.039	*
雪山	24	0.583	2	0.747	ns

表 CVIII：比较 WorldMovementEntropy 通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	230	0.142	ns
荒岛	1	3	25	25	267	0.011	*
荒岛	2	3	25	25	196	0.381	ns
雪山	1	2	24	24	128	0.982	ns
雪山	1	3	24	24	96	0.384	ns
雪山	2	3	24	24	125	0.982	ns

表 CIX：比较传送次数通行顺序的弗里德曼检验

实验	n	统计量	df	p	p值显著性
荒岛	25	23.07	2	0.000	****
雪山	24	3.63	2	0.162	ns

表 CX：比较传送次数通行顺序的威尔科克森检验

实验	组1	组2	n1	n2	统计量	校正后的 p 值	校正后 p 值显著性
荒岛	1	2	25	25	252	0.033	*
荒岛	1	3	25	25	311	0.000	***
荒岛	2	3	25	25	184	0.581	ns
雪山	1	2	24	24	186	0.172	ns
雪山	1	3	24	24	185	0.314	ns
雪山	2	3	24	24	112	0.447	ns

9）相关性：

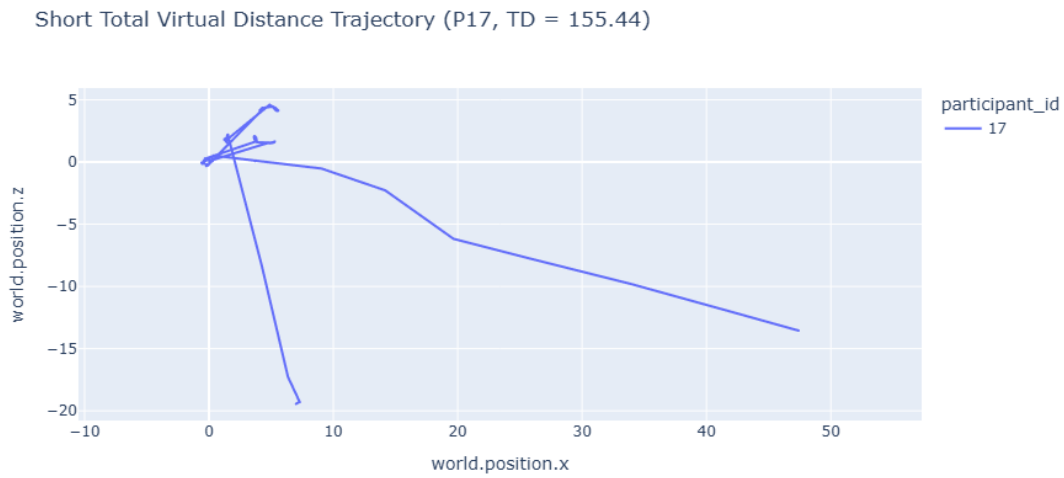
表 CXI：荒岛的参与者个体特征与沉浸后问卷之间的斯皮尔曼相关

沉浸后问题	个体特征	cor	p	p值显著性
HX 表达性	VR熟练度	-0.004	0.973	ns
HX 表达性	电子游戏练习	-0.110	0.334	ns
HX 表达性	Age	0.130	0.259	ns
HX 表达性	冷敏感性	-0.170	0.249	ns
HX 表达性	温暖敏感性	0.250	0.083	ns
HX 真实感	VR熟练度	-0.023	0.847	ns
HX 真实感	电子游戏练习	-0.015	0.899	ns
HX 真实感	Age	0.04300	0.716	ns
HX 真实感	冷敏感性	0.091	0.531	ns
HX 真实感	温暖敏感性	0.060	0.679	ns
HX参与度	VR熟练度	-0.160	0.181	ns
HX参与度	电子游戏练习	-0.088	0.452	ns
HX参与度	Age	0.18000	0.120	ns
HX参与度	冷敏感性	0.00650	0.965	ns
HX参与度	温暖敏感性	0.110	0.429	ns
HX Harmony	VR熟练度	-0.110	0.348	ns
HX Harmony	电子游戏练习	-0.093	0.425	ns
HX Harmony	Age	-0.005	0.964	ns
HX Harmony	冷敏感性	0.080	0.578	ns
HX Harmony	温暖敏感性	-0.067	0.643	ns
总体临场感	VR熟练度	-0.086	0.463	ns
总体临场感	电子游戏练习	-0.310	0.007	**
总体临场感	Age	0.044	0.711	ns
总体临场感	冷敏感性	0.130	0.369	ns
总体临场感	温暖敏感性	0.073	0.612	ns
SPES 空间位置	VR熟练度	-0.088	0.454	ns
SPES 空间位置	电子游戏练习	-0.055	0.641	ns
SPES 空间位置	Age	-0.097	0.406	ns
SPES 空间位置	冷敏感性	0.043	0.765	ns
SPES 空间位置	温暖敏感性	0.110	0.459	ns
SPES可能行动	VR熟练度	-0.140	0.243	ns
SPES可能行动	电子游戏练习	-0.260	0.022	*
SPES可能行动	Age	0.024	0.836	ns
SPES可能行动	冷敏感性	0.120	0.396	ns
SPES可能行动	温暖敏感性	-0.015	0.917	ns
热感知	VR熟练度	-0.007	0.954	ns
热感知	电子游戏练习	0.035	0.765	ns
热感知	Age	0.074	0.529	ns
热感知	冷敏感性	0.050	0.728	ns
热感知	温暖敏感性	0.074	0.609	ns
热变化	VR熟练度	-0.073	0.533	ns
热变化	电子游戏练习	-0.120	0.286	ns
热变化	Age	0.063	0.594	ns
热变化	冷敏感性	0.180	0.221	ns
热变化	温暖敏感性	0.033	0.818	ns

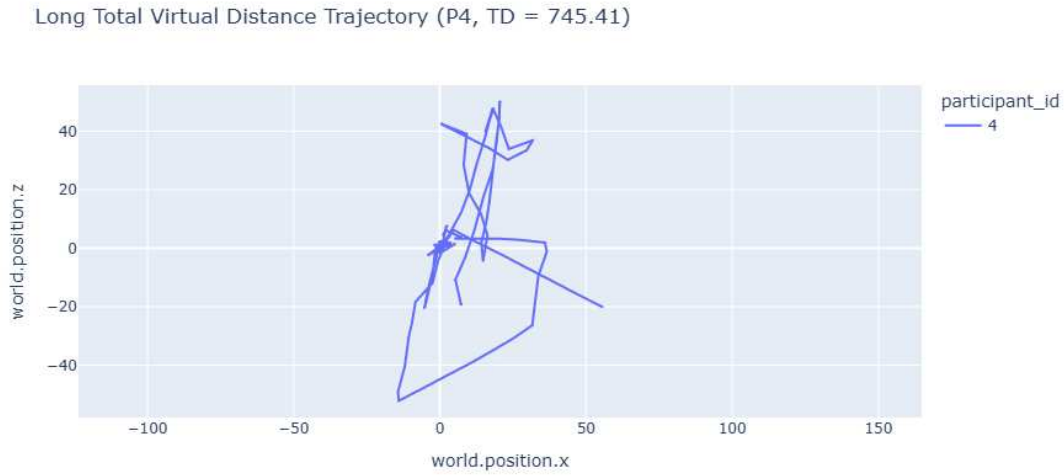
表 CXII：雪山中参与者个体特征与沉浸后问卷之间的斯皮尔曼相关

沉浸后问题	个体特征	cor	p	p值显著性
HX 表达性	VR熟练度	0.097	0.416	ns
HX 表达性	电子游戏练习	0.110	0.366	ns
HX 表达性	Age	-0.130	0.275	
HX 表达性	冷敏感性	-0.120	0.414	ns
HX 表达性	温暖敏感性	-0.006	0.968	ns
HX 真实感	VR熟练度	-0.024	0.840	ns
HX 真实感	电子游戏练习	-0.160	0.185	ns
HX 真实感	Age	-0.005	0.968	ns
HX 真实感	冷敏感性	0.330	0.022	*
HX 真实感	温暖敏感性	-0.083	0.573	ns
HX参与度	VR熟练度	0.100	0.400	ns
HX参与度	电子游戏练习	0.087	0.467	ns
HX参与度	Age	-0.120	0.335	ns
HX参与度	冷敏感性	0.240	0.099	ns
HX参与度	温暖敏感性	-0.150	0.302	ns
HX Harmony	VR熟练度	-0.001	0.997	ns
HX Harmony	电子游戏练习	-0.130	0.264	ns
HX Harmony	Age	0.006	0.960	ns
HX Harmony	冷敏感性	0.320	0.025	*
HX Harmony	温暖敏感性	0.033	0.825	ns
总体临场感	VR熟练度	-0.180	0.125	ns
总体临场感	电子游戏练习	-0.250	0.037	*
总体临场感	Age	0.085	0.477	ns
总体临场感	冷敏感性	0.004	0.978	ns
总体临场感	温暖敏感性	0.073	0.623	ns
SPES 空间位置	VR熟练度	-0.120	0.331	ns
SPES 空间位置	电子游戏练习	-0.160	0.180	ns
SPES 空间位置	Age	0.230	0.057	ns
SPES 空间位置	冷敏感性	-0.077	0.601	ns
SPES 空间位置	温暖敏感性	0.110	0.464	ns
SPES可能行动	VR熟练度	-0.091	0.445	ns
SPES可能行动	电子游戏练习	-0.039	0.743	ns
SPES可能行动	Age	0.066	0.582	ns
SPES可能行动	冷敏感性	-0.056	0.706	ns
SPES可能行动	温暖敏感性	0.170	0.251	ns
热感知	VR熟练度	0.100	0.383	ns
热感知	电子游戏练习	0.058	0.628	ns
热感知	Age	0.110	0.337	ns
热感知	冷敏感性	0.049	0.742	ns
热感知	温暖敏感性	0.081	0.585	ns
热变化	VR熟练度	0.065	0.589	ns
热变化	电子游戏练习	0.270	0.021	*
热变化	Age	-0.250	0.037	*
热变化	冷敏感性	-0.098	0.506	ns
热变化	温暖敏感性	0.056	0.706	ns

D. 讨论——补充图



(a)

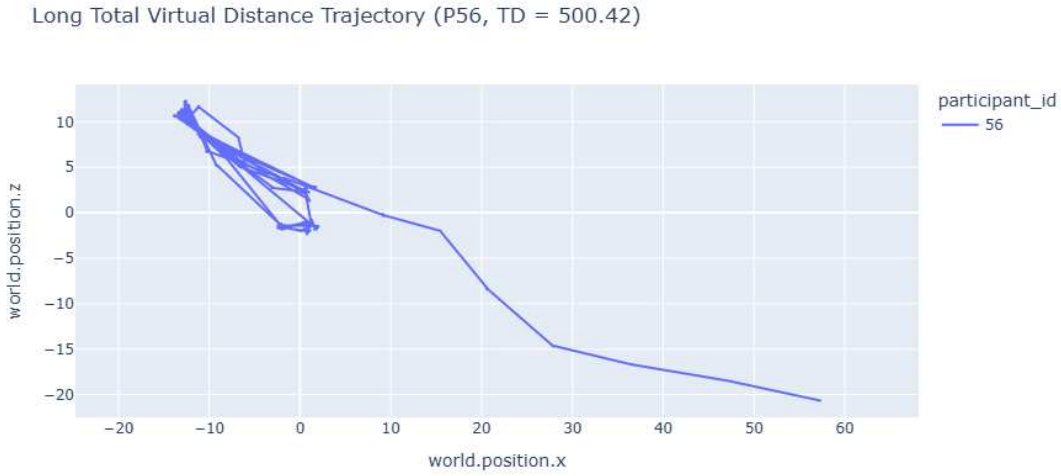


(b)

图 6：荒岛中短虚拟轨迹与长虚拟轨迹的视觉比较。



(a)



(b)

图7：雪山中短虚拟轨迹与长虚拟轨迹的视觉比较。

参考文献

[1] S. Villenave、P. Raimbaud 和 G. Lavou´e，《交互式六自由度虚拟现实的动态模块化热反馈：实现与评估》，载于《2025年 IEEE 虚拟现实与三维用户界面摘要及研讨会会议》（VRW），2025年3月，第1204–1205页。