arXiv:2603.01644v1 [cs.HC] 2 Mar 2026

关于.....关系的探究
沉浸感与学习：跨越三个领域

Paolo Boffi Alberto Gallace Pier Luca Lanzi

摘要——**本文以沉浸式学习认知情感模型（CAMIL）框架为视角，探究沉浸感与三个领域（文化遗产、环境意识和高中物理）中的学习之间的关系。我们介绍了为此项研究开发的三个应用，重点阐述它们共有的设计元素和各领域特有的机制。我们在实验室研究和课堂部署中采用统一的评估方案，对学习成果、用户体验、技术接受度、临场感／具身性以及晕动症进行了评估。结果表明，沉浸式虚拟现实能够提升临场感、用户体验和技术接受度。相比之下，学习成果的表现参差不一。在即时后测评估中，沉浸式虚拟现实组与对照组的事实性知识得分相近。最后，我们总结了设计指南，说明沉浸式虚拟现实在教学情境中何时可能最为有益，并依据CAMIL提出建议和策略，以改善学习成果和整体体验质量。**

索引词—**Virtual Reality (VR)、教育技术、混合方法、CAMIL、学习成果、知识保持。**

一、引言

过去十年间，随着头戴式显示器变得更加实惠且不那么笨重，虚拟现实（VR）迅速发展 [1, 2]。在教育领域，VR 有望带来独特优势：它让用户能够将抽象或不可见的现象可视化，探索已消失或无法抵达的地点，并安全地演练具有风险的操作 [2, 3, 4]。它还能提供严格受控、配备仪器的环境，从而实现对行为和学习的精确测量 [3, 1, 4]。然而，高沉浸感 VR 能否改善学习，现有证据仍不一致：综述指出，临场感和投入度有所提升，但测试表现并未持续显示优势；在某些情况下，高沉浸感甚至会妨碍学习成果 [5, 2, 6, 7, 8]。此前所有已发表研究均针对单一应用开展；尽管可以与其他研究进行定性比较，但由于实验方案存在差异，无法进行定量比较。本文采用相同的视角——沉浸式学习认知情感模型（CAMIL）框架 [9]，——并使用一套适用于三个应用领域（文化遗产、环境意识和高中物理）的共同实验方案，探究沉浸感与学习之间的关系。

Paolo Boffi（paolo.boffi@polimi.it）任职于米兰理工大学电子、信息与生物工程系（DEIB），并在米兰比可卡大学心智与行为技术中心（MiBTec）工作。Alberto Gallace（alberto.gallace1@unimib.it）任职于米兰比可卡大学心智与行为技术中心（MiBTec）。Pier Luca Lanzi（pierluca.lanzi@polimi.it）任职于米兰理工大学电子、信息与生物工程系（DEIB）。通讯作者：Paolo Boffi（paolo.boffi@polimi.it）。

一项关键挑战是从其他设计变量中分离出沉浸感对学习的具体贡献，例如交互模态、移动方式或表征保真度；这些因素也会通过临场感和能动性塑造体验。CAMIL 将这些影响视为经由心理路径（临场感、能动性）发挥作用，而这些路径又会影响兴趣、动机、认知负荷及相关构念 [9]。本文以 CAMIL 为框架来解读沉浸感对学习的影响；本文的目标并非系统检验 CAMIL 的技术因素之间的交互作用，而是在其他要素保持不变或尽可能匹配的情况下，考察不同沉浸程度与结果之间的关系。

本文采用共同的评估框架和相同的理论视角，探讨沉浸感在三个教育领域——文化遗产、环境意识和物理学——中的作用。研究包括实验室实验和生态学课堂部署，以兼顾控制和外部效度。本文的贡献包括：采用一致的测量策略，提供跨领域证据，将沉浸感与控制因素区分开来；基于 CAMIL 的分析，将临场感和能动性与动机和情感结果联系起来，同时考察学习；并提出可操作的设计建议，说明何时以及如何在教学环境中部署沉浸式虚拟现实（IVR）。

II. 相关研究

A. Virtual Reality：定义与主要特征

虚拟现实（VR）涵盖交互式计算机生成的环境，用户可通过多感官刺激和自然交互在其中探索和行动。文献中很难找到统一的定义 [10]。Biocca 和 Delaney [11]（引自 [2, 第 2]页）将其描述为“硬件和软件系统的总和，旨在完善一种包罗万象、沉浸式的感官幻觉，使人感觉自己身处另一种环境之中”。Chavez 和 Bayona [12] 提出了略有不同的观点，将虚拟现实定义为一种以图形呈现的人工环境三维数字模型，通过多感官刺激，让用户感受到自己沉浸在某个特定场所中。Lee 和 Wong 强调交互，将虚拟现实定义为“一种模拟或再现环境的方式，人可以在其中探索并与之交互” [13, 第 50]页。

根据前面的定义，我们可以推断出虚拟现实的一些关键特征。Biocca 和 Delaney [11] 强调硬件与软件系统之间的协作，以产生沉浸感 以及身处其中 模拟环境的错觉——Chavez 和 Bayona [12]也强调了这些概念。后者还特别强调了

多感官反馈的重要性，这能够增强沉浸式体验。最后，Lee 和 Wong [13] 将用户置于虚拟现实体验的中心，强调了实现用户在环境中进行交互 的重要性。

基于这些见解，我们可以确定虚拟现实系统应具备四项基本特征：沉浸感、临场感、交互性和多感官性 [14, 15]。交互性是指用户能够实时修改虚拟现实环境的程度 [16, 17]。而多感官性 则是指整合多种感官模态——例如视觉、听觉和触觉反馈——为用户营造更加真实且引人入胜的体验 [18]。

沉浸感和临场感（通常称为临场感）有时会被视为可以互换的概念 [19, 1], , 但它们体现了虚拟现实体验中彼此不同的维度。学术文献对这两个概念仍存在争论，主要有两种定义。按照 Witmer 和 Singer 的观点，沉浸感是一种心理状态，用户在这种状态下会感到自己被虚拟环境（VE）包围、置身其中，并能够在其中采取行动 [20, 21]。他们发现沉浸感与临场感之间存在正相关，并将临场感定义为：“当某个环境调动感官、吸引注意力并支持主动投入时，个体所处的‘身临其境’的心理状态” [22, , 第 298]页。根据这一观点，临场感本质上是主观的，并受到过往经验、期望和认知能力的影响。Slater 则提出了互为补充的技术视角：沉浸感是虚拟现实系统的一种客观属性，由其显示设备、追踪和交互能力所决定 [23, 24, 25]。随后，用户会对给定的沉浸感水平产生程度各异的临场感。Slater 将临场感描述为身处虚拟环境中的感受、虚拟环境相对于物理世界成为用户主要参照框架的主导地位，以及将虚拟环境体验为一个曾到访之处 而非一组渲染图像 [24]。

根据 Slater 的定义，虚拟现实系统按照沉浸程度进行分类，即它们能够在多大程度上遮挡用户的视线，使其看不到现实世界 [1, 26, 3]。依据这一标准，研究者提出了三种类别：非沉浸式（台式显示器、鼠标／键盘／游戏手柄）、半沉浸式（大屏幕／投影加上高级输入设备），以及可提供第一人称视角和头部／身体追踪交互的沉浸式头戴式显示器系统。

在本文中，我们将非沉浸式系统称为桌面虚拟现实 （DVR），将沉浸式系统称为沉浸式虚拟现实 （IVR）；我们用虚拟现实 指代这项技术的总体概念。

B. 教育虚拟现实

虚拟现实被广泛视为一种强大的教育工具，能够将抽象概念可视化，让人们在无风险环境中安全地演练操作，并探索原本无法进入的环境 [2, 27, 1, 10]。这些可供性与既有的学习范式相契合，而这些范式已应用于（或经过调整以适用于）虚拟现实。事实上，要优化传统与新颖教育方法的结合，了解人类如何学习并与技术互动至关重要。本节回顾一些最常被引用的学习理论和范式，以及它们与作为新型教育工具的虚拟现实之间的关系。

建构主义。 根据这一理论，学习者并非被动的接收者，而是知识的积极建构者 。他们根据既有的心理模型预测行动结果，在环境中采取行动，随后接收反馈。如果结果符合预期，他们的模型便会得到强化；如果不符合，模型则会更新 [28]。虚拟现实尤其适合开展建构主义学习活动，因为它能让用户主动与环境互动，并接收行动带来的多感官反馈 [2, 28]。多感官输入还能进一步强化学习过程，为学习者提供多个接收反馈并更新认知的途径。从这个意义上说，虚拟现实能够创建沉浸式、交互式且可调整的环境，是支持基于建构主义的学习的有力资源 [3, 27]。

具身认知。 该理论指出，学习不仅是一个心理过程，还涉及整个身体以及感觉运动活动 [29, 30]。由于虚拟现实能够调动多种感官，并支持在环境中进行全身交互，因此它在提供具身学习体验方面潜力巨大。此外，将虚拟现实体验与具身化虚拟化身相结合，能使用户更强烈地感知与环境的交互，并有可能提升学习成果 [31, 32]。

多媒体学习认知理论（*CTML*）。该框架基于三项原则，阐释学习者如何处理和整合多媒体信息：第一，人类通过两个通道处理信息——视觉和听觉；第二，这些通道的处理能力有限；第三，有意义学习通过主动的认知加工实现，其中包括选择、组织信息，并将信息与先前知识整合 [33]。在 CTML 理论的框架下，VR 可成为多媒体学习的有力工具，因为它能连贯地融合视觉、听觉和触觉等多种模态，从而提升学习体验 [2]。

沉浸式学习认知情感模型（*CAMIL*）。上述理论描述了学习者如何处理信息，但并未明确建模*VR* 特有的技术可供性如何影响学习。沉浸式学习认知情感模型（CAMIL；图 1） [9] 通过将核心技术因素——沉浸感、控制因素（交互设计、即时性、输入模态）和表征保真度——与两种关键心理可供性联系起来，弥补了这一不足：临场感（身临其境）和能动性（产生和控制行动的感受）。

CAMIL认为，临场感与能动性塑造了一组与学习相关的认知情感变量：兴趣、动机、自我效能感、具身性、认知负荷和自我调节。这些变量进而与可借助布卢姆分类法 [34] 加以归类的学习结果相关联——即事实性知识（对离散术语和要素的回忆）、概念性知识（理解关系与原理）、程序性知识（知道如何以及何时执行方法）以及迁移（将所学应用于新的问题和情境）。因此，在本研究中，CAMIL作为一种面向虚拟现实的机制性视角，用于将设计选择（例如沉浸感与交互性）与学习者体验及结果联系起来。

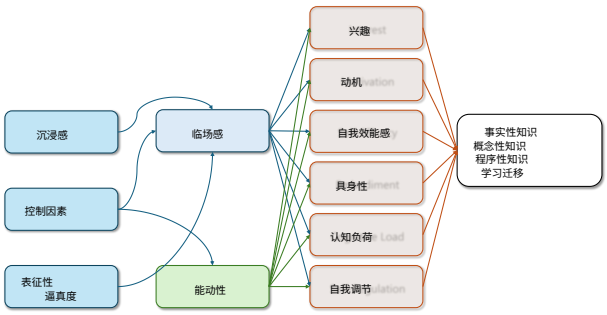


图 1：CAMIL 的框架，改编自 [9]。

表 I：明确引用学习理论或框架的论文，以及未明确引用的论文。请注意，有些论文会出现在多个类别中，因为它们涉及多种理论。

学习理论	参考文献
多媒体学习认知理论	[35, 36, 37, 38, 17, 39, 40]
多媒体学习（CTML）	
建构主义	[41, 42, 32]
具身认知	[42, 39, 32]
沉浸式学习认知情感模型	[43, 44, 45]
沉浸式学习（CAMIL）	
无理论	[46, 47, 48, 49, 8, 50, 51, 52, 53、54、55、56、57、58、59、60、61, 62, 63]

C. 沉浸对学习体验的影响

在沉浸感与临场感的基础上，我们回顾了关于沉浸感如何塑造学习的比较研究（通常为沉浸式虚拟现实与桌面虚拟现实的对比）。为使主题模式更加明确，我们将既有工作归为六个领域：（1）医学/健康培训 [46,47, 48, 49, 43]；（2）科学/生物学学习 [8, 42, 50, 51,32, 52]；（3）技术、计算与问题解决技能 [53, 41, 54, 17, 39, 55, 56]；（4）空间学习 [57,58, 35, 36, 60, 59]；（5）历史/地理 [37, 45, 61, 62]；以及（6）艺术/音乐 [63, 40, 44]。各领域的结果并不一致：沉浸式虚拟现实往往能提升临场感/投入度，但相对于桌面虚拟现实，并不总能改善学习（有时甚至会削弱学习）。

领域模式。医学与健康使用 IVR 安全地模拟高保真、高风险场景 [2]。多项研究报告称，IVR 和 DVR 的知识增益相当，且二者均优于无培训对照组 [46, 49, 48]；例如，Cecil 等人 [46] 将使用 Geomagic Touch[1] 触觉控制器的骨科模拟器与 IVR 条件进行比较，发现接受培训的组别之间没有差异。相比之下，Guti´errez-Maldonado 等人 [47] 报告称，IVR 在识别饮食失调症状方面具有优势。在一项基于 CAMIL 的分析中，Petersen 等人 [43] 发现，沉浸感提高了情境兴趣，但并未提高关于病毒性疾病的知识，这体现了情感/动机与测试表现之间反复出现的脱节。科学与生物学同样呈现出不一致的结果：在 Makransky 等人 [8] 和 Rai 等人 [50],的生物学模拟研究中，DVR 的表现优于 IVR；脑电图证据显示，IVR 中的认知负荷更高 [8]（由于许多非母语者使用英语进行模拟，这种负荷可能因语言要求而进一步增加）。其他针对类似内容的研究则报告了 IVR 的优势 [51, 32, 52]。在天文学（月相）领域，Madden 等人 [42] 发现，IVR、DVR 与动手操作对照条件之间没有差异。技术/计算/问题解决表明，当交互和具身性与目标技能相契合时，IVR 能带来优势：在渡河游戏（一种涉及受限运输和冲突规避的动态规划谜题）中，IVR 提高了对相对运动 [53] 和抽象推理的理解 [39]。在计算机组装培训中，两种交互式条件（IVR、DVR）的表现均优于被动观察，但彼此之间没有差异 [41],，这与 CAMIL 对交互的强调一致。具身性可能起决定作用：在计算思维方面，全身追踪式沉浸式虚拟现实（配有虚拟化身）的表现优于非具身 IVR 和 DVR [54]。交互模态也会调节结果：Johnson 等人 [17]发现，整体而言沉浸感没有影响，但空间能力较低的学习者从基于手势的沉浸式虚拟现实中获益最多。其他研究则报告称，IVR 与 DVR 之间没有差异 [55, 56]。空间学习通常更有利于 IVR，这得益于自我中心式探索；多项研究报告了空间记忆和导航方面的增益 [57, 58, 35, 36]。然而，当移动技术（例如传送与连续移动）及任务细节限制了潜在优势时，也会出现无显著差异的结果 [60, 59],，这表明研究结果对移动可供性和评估一致性较为敏感。历史与地理领域中，IVR 通常能带来更高的临场感、共情和欣赏，但回忆增益并不稳定：Mulders [45] 报告称，在学习安妮·弗兰克生平时，IVR 的临场感/评价高于 DVR，但事实性学习低于 DVR；Ochs 和 Sonderegger [61] 以及 Olmos Raya 等人 [62]的研究也得出了类似结果。在基于谷歌地球的活动中，IVR 和 DVR 在地理内容方面的表现可能相当 [37]。艺术与音乐表明，当手势映射和即时感知反馈处于核心地位时，沉浸感最有帮助：与 DVR 和没有视觉辅助的传统练习相比，IVR 提高了特雷门琴训练的效果 [63]。相比之下，艺术史学习未显示出 IVR 的优势 [40],；在 Kaplan-Rakowski 等人 [44],的研究中，DVR 中的集成音频产生了最强的结果，这强调了多感官设计本身，而非沉浸感的重要性。

综合与启示。总体而言，沉浸效应对学习的影响尚不明确：沉浸式虚拟现实能够稳定提升临场感和兴趣，但学习收益取决于认知负荷管理（例如语言要求、界面复杂度） [8], 具身性和交互模态（例如全身化身；手势与语音） [54, 17], 任务—技术匹配（例如空间探索有助于实现学习目标时） [57, 58], 以及系统条件关系与学习者预期的一致性。从实践角度看，这些发现表明，关键在于匹配，而非追求最大程度的沉浸：使移动方式和输入方案与目标技能相匹配，通过提供支架来减少外在认知负荷

[1]*https://it.3dsystems.com/haptics-devices/touch.*

表 II：应用、实验条件以及开展的研究。

应用（领域）	条件	研究
RHOME-VR（文化遗产）	沉浸式虚拟现实、桌面虚拟现实、幻灯片演示	混合、被试间：沉浸式虚拟现实（实验室）对比桌面虚拟现实（远程）对比幻灯片演示（远程）。
Envisioning Corals（环境意识）	沉浸式虚拟现实（具身性）；沉浸式虚拟现实与桌面虚拟现实（学习）	S1：仅沉浸式虚拟现实，被试内（化身具身化 + 皮肤电活动）。 S2：被试间IVR对比桌面虚拟现实（学习 + 日志 + 皮肤电活动）。
Physics Playground（物理教育）	沉浸式虚拟现实与幻灯片演示（实验室）；沉浸式虚拟现实、桌面虚拟现实、对照组（生态学）	S1：实验室混合方法（沉浸式虚拟现实与幻灯片演示 + 专家/教师意见对比）。 S2：高中前测–后测–保持测验（沉浸式虚拟现实、桌面虚拟现实与二维形式对比）。

，并在具身性能够直接服务于学习目标时加以运用。

最后一个趋势涉及理论基础。与以往综述一致 [2]，，许多研究并未明确阐述学习理论（表 I）。在运用理论的研究中，CTML 支持负荷敏感型多媒体设计 [35, 36, 37]；建构主义和具身认知则为主动的情境化参与提供动机依据 [41, 42, 39, 32]；而 CAMIL 则阐释了沉浸感如何与动机和认知过程相互作用 [43,44, 45]。我们需要加强理论与方法的结合，以解释混合结果，并明确沉浸感应在何时以及如何引入。总之，沉浸感并不总能促进学习。事实上，最稳健的增益出现在沉浸式可供性能够直接支持目标知识或技能、通过连贯且低负荷的设计加以实现，并以明确的理论依据为基础时。

已发表的研究通常考察单个应用，尽管在定性层面具有可比性，但由于实验方案各不相同，无法进行定量比较。在此，我们采用 CAMIL 框架和统一的实验方案，研究文化遗产、环境意识和高中物理这三个领域中的沉浸感与学习。

III. 方法

A. 概述与研究依据

我们采用横向跨领域方法，考察沉浸感如何影响三个学习领域中的学习——文化遗产（*RHOME-VR*；第四节）、环境意识（*Envisioning Corals*；第五节）和物理学（*Physics Playground*；第六节）。既有出版物介绍了这三个项目的核心系统和初步部分结果 [64, 65, 66, 67, 68]。本节介绍共同的方法学要素；各学习主题的具体项目细节将在各自的独立章节中介绍。

每项研究均采用相同的评估框架——学习、用户体验、技术接受度、临场感/具身性和晕动症评估，并辅以领域特定任务和测量指标。所有应用均以不同沉浸级别（沉浸式虚拟现实与桌面虚拟现实）呈现相同内容，并在适用时设置对照条件。这种跨研究的一致性有助于综合研究结果，同时兼顾领域限制（例如，*EnvisioningCorals*中的身体所有权/具身性，以及*Physics Playground*和*RHOME-VR*中的事实性知识习得）。所有应用均面向高中高年级和高等教育初期学习者；表 II 总结了各领域、实验条件和核心测量指标。

B. 共享方法

各项研究均保留了共同的方法学要素。招募对象主要为青年成人（18–35 岁），并使教学内容和音频语言与参与者的母语相匹配，以尽量减少外在认知负荷。研究均在实验室环境中开展，以最大限度地控制实验条件；研究方案在实验开始前均经过大学伦理委员会评估并获批准。如需移动，则采用传送方式，以减轻晕动症 [69]。

各应用采用了统一的评估框架：学习情况通过与主题目标相对应的定制选择题测试进行评估（罗马建筑；珊瑚礁生态学与亲环境策略；运动学／重力）；技术接受度和用户体验通过技术接受模型（TAM） [70, 71, 72] 以及 AttrakDiff 的实用质量／享乐质量 [73, 74] 或用户体验问卷（UEQ，可使用完整版 [75]或简版 [76] ）进行测量；临场感和具身性通过 Witmer 和 Singer 的临场感问卷 [20, 22]及化身具身感问卷 [77]进行评估；晕动症通过虚拟现实晕动症问卷（VRSQ； [78]）测量；工作负荷通过 NASA 任务负荷指数（TLX [79]）测量；在适用情况下，可用性则通过系统可用性量表（SUS [80]）测量。

各场次均遵循统一流程：知情同意及人口统计信息/经验调查、指定条件（或多个条件）下的体验（附简短的应用内教程），以及按固定顺序完成的暴露后问卷。适用情况下，在使用应用期间收集日志和生理信号。

IV. RHOME-VR

A. 应用设计

RHOME-VR 是一个古罗马住宅虚拟导览，由 Clerici 等人和 Boffi 等人介绍并评估 [65, 64]。用户可以通过一个模拟虚拟博物馆的八步引导式导览，探索重建的古罗马住宅。学习者沿着固定路线前进（图 2）；每个“讲解点”处都有一个绿色标记指示目标位置，旁边的标牌标明房间名称。触发教学音频后，将开始语音讲解，同时暂时禁用移动功能和标牌，以便集中注意力。

B. 实验设计

采用被试间设计研究来评估该方法传递历史知识的有效性，其中媒体类型作为被试间因素。



图 2：*RHOME-VR* 地图，包含八个讲解点。

参与者被随机分配到以下三种条件之一：沉浸式虚拟现实（IVR）、桌面虚拟现实（DVR）和对照组。因变量包括学习成果（事实性知识和空间学习）、用户体验、技术接受度、临场感和晕动症——其中最后两项指标仅针对虚拟现实体验进行收集。

数据收集工作在新冠肺炎疫情期间进行。为避免参与者面临风险，同时确保样本量在统计上足够可靠，研究采用了混合测试设置：沉浸式虚拟现实参与者在实验室现场接受测试，而桌面虚拟现实和对照条件则通过远程方式实施。然而，这种安排对远程条件的控制较少。

因变量通过参与者自我报告的基于问卷的测量进行评估。问卷参考了类似的文献案例研究 [81, 74]。问卷中的学习部分由研究团队与一位曾任高中历史教师的人士合作编制，包含事实性知识和空间知识两部分。事实性知识部分由历史选择题构成，空间知识则通过两项任务进行评估。第一项任务要求用户在空白的 Domus地图上标注各房间的名称（房间学习）；第二项任务要求用户将物体正确关联到其出现的房间（物体学习）。其他因变量则通过经验证的文献构念进行测量，收集技术接受度、用户体验、临场感和晕动症数据。对照条件采用幻灯片演示，其结构与虚拟现实应用相对应，并使用来自虚拟环境的截图和相同的教学音频。

C. 结果

共有161人参与了这项研究（89名女性，72名男性），年龄均在18至35岁之间（$M = 23.8$, $sd = 2.9$）。不同条件下的整体学习没有差异（图3a）。与对照组进行的 Mann–Whitney 检验结果均不显著（沉浸式虚拟现实 vs 对照组：$U = 1254.5$, $p = .16$；桌面虚拟现实 vs 对照组：$U = 1199$,$p = .25$），沉浸式虚拟现实与桌面虚拟现实之间的 Welch 方差分析也未发现显著差异（$F(1, 106) = 0.135$, $p = .71$）。将学习分解为子变量后发现，各条件在地图学习 得分上存在显著差异（图3b），表明空间知识获取存在差异：对照组参与者的表现优于沉浸式虚拟现实组（$U = 997$, $p = .003$; $M_{IVR} = 9.39$）和桌面虚拟现实组（$U = 977.5$, $p = .009$）。这一差异由房间学习 结果所驱动（图3c），其中也出现了相同的模式（沉浸式虚拟现实 vs 对照组：$U = 933.5$, $p < .001$；桌面虚拟现实 vs 对照组：$U = 864$, $p < .001$）。所有其他两两比较均未发现显著差异。

在技术接受模型方面，整体而言，沉浸式虚拟现实的得分显著高于桌面虚拟现实和对照组（图 3d），两两 Welch 方差分析检验结果显示了这一点（沉浸式虚拟现实 vs 对照组：$F(1, 107) = 16.52$, $p < .001$；沉浸式虚拟现实 vs 桌面虚拟现实：$F(1, 106) = 0.96$, $p = .003$）。对照组与桌面虚拟现实之间无显著差异（$F(1, 103) = 2.06$, $p = .154$）。在构念层面，感知易用性（PEU）分量表的结果值得关注：Mann-Whitney检验显示不同条件之间没有差异（图 3e）；而在感知有用性（PU）分量表中，沉浸式虚拟现实的表现显著优于桌面虚拟现实和对照组（图 3f）（沉浸式虚拟现实 vs 桌面虚拟现实：$U = 1949.5$, $p = .002$；沉浸式虚拟现实 vs 对照组：($U = 2161.5$,$p < .001$）。

总体用户体验方面，Welch 检验显示，沉浸式虚拟现实显著优于对照组和桌面虚拟现实（沉浸式虚拟现实 vs 对照组：$F(1, 107) =$12。04, $p < .001$；沉浸式虚拟现实 vs 桌面虚拟现实：$F(1, 106) = 14.23$, $p < .001$），而对照组与桌面虚拟现实之间没有差异（$F(1, 103) = 0.108$, $p = .742$）。分量表显示，沉浸式虚拟现实的实用性品质得分高于桌面虚拟现实（$U = 1809.5$,$p = .03$）；其享乐性品质得分则高于桌面虚拟现实（$U = 1909$, $p = .005$）和对照组（$U = 1948$,$p = .005$）。

Welch 检验显示，沉浸式虚拟现实的临场感高于桌面虚拟现实（$F(1, 106) = 14.54$, $p < .001$），这主要由投入感（$F(1, 106) = 20.41$, $p < .001$）和沉浸感（$F(1, 106) = 16.34$, $p < .001$）所驱动；感官保真度和界面质量则没有差异。总体而言，晕动症程度较低，且与实验条件无关（$\chi^2(1) = 0.493$, $p = .482$）。

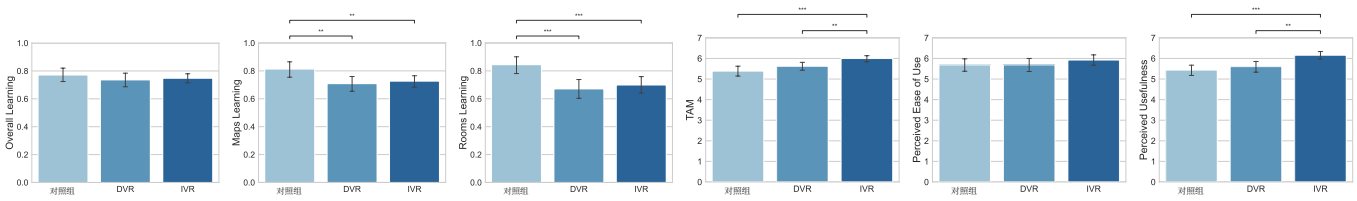
V. 构想珊瑚

A. 应用程序设计

Envisioning Corals 是一款教育类虚拟现实体验，用户可以化身为三种珊瑚礁生物之一——珊瑚、寄居蟹或海龟——同时见证珊瑚礁在六十年间发生的环境变化 [66, 68]。其设计遵循 Scurati 等人 [82]提出的环境沉浸式虚拟现实框架（情感、理性、实践）：学习者可以自由选择虚拟化身（建立情感联结），探索以马尔代夫为灵感的珊瑚礁场景，同时观察从 1960 年到现在不断推进的 60 年时间线（直观呈现长期影响），并在结尾获得关于可行行为的指导（实践提示）；此外，还会重置为一处具有修复性的场景，以避免采用一味负面的叙述方式。游戏玩法刻意保持简洁：收集适合各物种的食物，同时塑料碎屑不断累积、资源日益稀缺，因此难度逐渐上升，以此映照环境退化。轻量级抬头显示器显示生命值条、当前年份和海水温度指示器（图 4）；开头和结尾的教育解说为自由探索环节提供框架，并配有字幕。进入珊瑚礁前，玩家会先到一个专门的教程区域——该区域重现了实验室环境，并提供语音指导和不限时练习。

B. 研究*1*：具身体验评估

开展了一项实验室研究，以评估虚拟化身的特征如何调节沉浸式虚拟现实中的具身性。研究采用纯被试内设计（仅限沉浸式虚拟现实）：每位参与者都体验了



(a) 整体学习。 (b) 地图学习。 (c) 房间学习。 (d) 整体技术接受模型。 (e) 感知易用性。 (f) 感知有用性。

图 3：*RHOME-VR* 学习（(a)、(b) 和 (c)）及 TAM（(d)、(e)、(f)）结果。



图 4：*Envisioning Corals*角色收集的食物：被海流带动的微生物（珊瑚——左）、小碎屑（寄居蟹——中）和水母（海龟——右）。

全部三个虚拟化身各一次，顺序随机。研究将自我报告测量——经改编的化身具身感问卷 [77] ——与生理测量——皮肤电活动（EDA）——结合起来。对于皮肤电活动，首先要求参与者保持静止 2 分钟，以记录基线；随后从具身化发生 2 秒后开始记录皮肤电活动，持续 10 秒。

C. 研究*1*：结果

31 名参与者完成了研究（18 名女性、13 名男性，大多数年龄在 25 至 34 岁之间）。为便于进行统计解释，所有连续变量均进行了 z 标准化，结果如图 5 所示。

针对整体具身感的线性混合模型（LMM）显示，虚拟化身存在主效应（$\chi^2(2) = 7.47, p = .023$）；与珊瑚相比，寄居蟹的得分显著更高（$t(58.1) = -2.57, p = .034$）；其他组间差异均不显著。这一差异由能动性分量表驱动（$\chi^2(2) = 10.478, p = .005$），且呈现相同的模式（珊瑚 <寄居蟹；$t(60) = -3.207, p = .006$）。

随后将显著振幅（即高于 $0.01\,mV$）相加，计算皮肤电活动。线性混合模型显示，自我报告的具身性越强，皮肤电活动越高（$\chi^2(1)$ =4.433, $p = .035$）；皮肤电活动也因虚拟化身而异（$\chi^2(2) = 5.987, p = .05$）。事后检验显示，珊瑚虚拟化身对应的皮肤电活动高于寄居蟹虚拟化身（$t(47.9) = 2.501, p = .041$）；其他两两差异均不显著。

D. 研究*2*：学习评估

第二项研究采用被试内—被试间设计，比较了沉浸式虚拟现实与桌面虚拟现实中的即时学习和体验性响应，其中时间（前测与后测）为被试内因素，媒介（沉浸式虚拟现实与桌面虚拟现实）为被试间因素。根据此前的结果，研究仅使用寄居蟹虚拟化身。

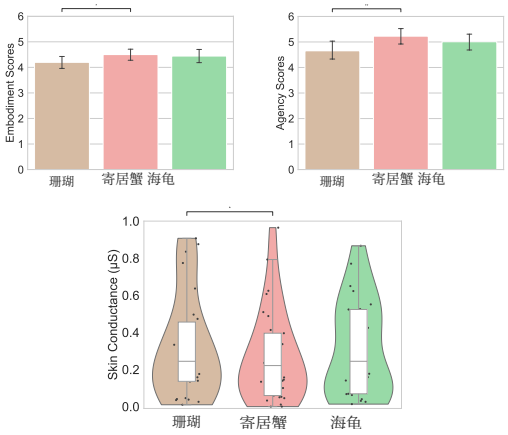


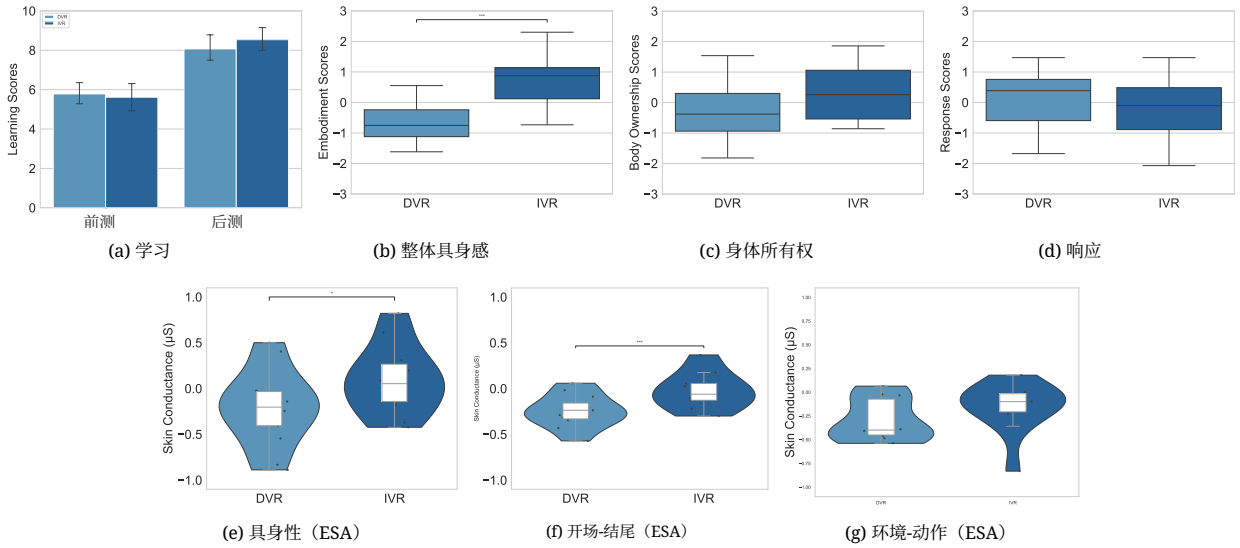
图5：*Envisioning Corals* 研究1结果，按虚拟化身划分。上：整体具身感和能动性。下：皮肤电活动。

参与者被随机分配至不同媒介条件。测量内容包括一项包含10个题目的事实知识测验和化身具身感问卷。研究记录了应用内行为，具体包括行进距离以及收集的食物/垃圾；此外，还在三个不同事件期间记录皮肤电活动：化身具身化之后（具身化）、介绍性教学音频结束时（介绍结束），以及有关亲环境行动的最后一段教学音频播放前（亲环境行动）。体验开始前，参与者在静息状态下接受了30秒的皮肤电活动基线测量。

E. 研究*2*：结果

27人完成了这项研究（20名女性、5名男性、2名非二元性别者），年龄介于19至28岁之间（$M = 20.93, sd = 2.22$）。

以学习得分为因变量的线性混合模型显示，时间点的效应显著（$\chi^2(1) = 60.66, p < .001$），这意味着参与者的知识显著提升



(a) 学习 (b) 整体具身感 (c) 身体所有权 (d) 响应

(e) 具身性（ESA） (f) 开场-结尾（ESA） (g) 环境-动作（ESA）

图 6：*Envisioning Corals* 研究 2 结果：(a) 学习；(b)–(g) 具身性（总体、身体所有权、响应、具身性（EDA）、开场-结尾（EDA）和环境-动作（EDA））。

（图 6a）。然而，媒体条件的效应并不显著（$\chi^2(1) = 0.972, p = .324$），因此两组的学习增益相当。

具身性得分（图 6b–6d）采用学生 t 检验进行评估，结果显示沉浸式虚拟现实组的得分显著更高（$t = 5.19$, $p < .001$; $M_{IVR} = 2.63$, $M_{DVR} = 1.39$）。在分量表层面，我们发现能动性、触觉、位置和外观分量表存在显著差异（沉浸式虚拟现实组的得分均显著高于桌面虚拟现实组）。相比之下，身体所有权和反应分量表未发现差异。

与之前相同，EDA 得分（图 6e–6g）是通过对每个事件发生 2 秒后开始的 10 秒时间窗口内显著振幅求和计算得出的。基于 Wilcoxon检验的分析显示，在具身性事件（$W = 137, p = .025$; $M_{IVR} = 0.164, M_{DVR} = -0.411$）和开场-结尾事件（$W = 159, p < .0a01$; $M_{IVR} = 0.209$, $M_{DVR} = -0.595$）中，沉浸式虚拟现实组的激活显著更高；而在环境-动作事件中则未发现差异（$W = 116, p = .24$）。环境-动作 EDA 测量值与具身化问卷中的反应和身体所有权分量表之间的皮尔逊相关分析显示，两者之间不存在相关性（反应：$r = -0.16$, $p = .424$；身体所有权：$r = -0.198$; $p = .323$）。

VI. PHYSICS PLAYGROUND

A. 应用程序设计

Physics Playground 旨在打造一个虚拟实验室，让用户通过引导式的动手实验探索重力相关现象 [67]。用户置身于一处类似办公室的虚拟环境（VE）中（图 7），其中包含四个房间——重力、大炮、行星和对照组——并由一条走廊连接。每个房间都专注于一个核心概念（自由落体、抛体运动、轨道运动、逃逸速度）。人形机器人 Emanon 会引导用户探索整个环境，并为用户提供有关实验及其背后物理变量的理论解释。随后，用户可以通过每个房间内的控制面板操控这些变量，并实时观察结果。每个房间都设有黑板，展示关键公式，帮助用户更好地理解实验背后的物理定律。我们还专门设置了一个简短的教程区域，让用户在进入主环境之前先熟悉交互操作。

B. 研究*1*：混合方法评估

这项定性研究通过对教授和STEM教学专家进行半结构式访谈，并与职前高中教师开展焦点小组讨论，收集见解，以评估并优化Physics Playground的学习体验。讨论以Loorbach等人提出的简化版教学材料动机调查（RIMMS）中的问题为指导， [83], 将原始材料中的封闭式问题改编为开放式问题。

这项定量研究采用被试内-被试间研究设计，其中时间（前测与后测）为被试内因素，媒体条件（IVR与对照组）为被试间因素。本研究未纳入DVR版本，因为其目的是对该应用程序设计的学习成效进行初步评估。对照组采用幻灯片演示形式，内容与IVR版本一致，并配有文本转语音旁白。

C. 研究*1*：结果

1）定性研究：专家和职前教师普遍对这次体验持积极态度，认可该应用的沉浸式特性及其吸引学生参与的潜力，尤其是因为用户能够与模拟空间环境和物理变量互动。不过，他们的意见主要集中在将*PhysicsPlayground*定位为辅助资源，而非独立资源，并建议在

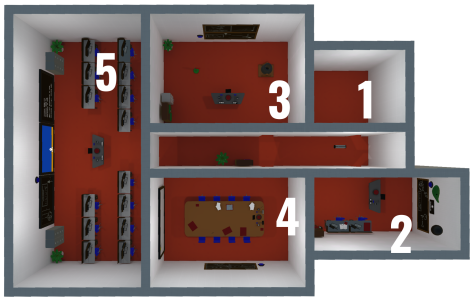


图7：*Physics Playground*虚拟环境的俯视图，数字表示需要遵循的教育路径。

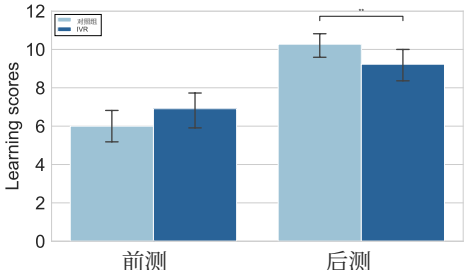


图8：按实验条件和时间点划分的*Physics Playground* 研究1学习成果。

课堂讲授之后（或通常在更深入的理论介绍之后）使用。此外，他们建议强化游戏化元素，并提供个性化而非标准化的反馈。

2）定量研究：共有44人完成了这项研究（22名男性、21名女性、1名非二元性别者），年龄在19至34岁之间（$M = 23.91$, $sd = 2.74$）。

本研究最有趣的结果涉及学习（见图 8）。不同条件下的前测知识水平没有差异（$t(42) = -1.38$, $p = .176$）。Wilcoxon检验结果显示，沉浸式虚拟现实组和对照组的物理学知识在前测与后测之间均显著提高（对照组：$W = 0.00$, $p < .001$；沉浸式虚拟现实组：$W = 5.00$, $p < .001$）。然而，即时增益更有利于幻灯片演示：对 $\Delta_{pre \to post}$ 进行 Mann-Whitney 检验后发现，对照组的增益更大（$U = 130$, $p = .008$；$M_{IVR} = 2.32$, $M_{control} = 4.27$）。

D. 从研究*1*到研究*2*：设计与方法修订

研究1的发现指出了两项相辅相成的需求：改进应用程序的设计，以及将其与理论讲座相结合。因此，*Physics Play-ground* 根据这些建议进行了修订。部分房间经过重新设计，以增强沉浸感和吸引力，并加入了游戏化元素：现在，学习者必须按照特定要求完成一项实验，才能进入下一个房间；系统还会根据用户的表现提供个性化反馈。

在方法上，通过将该应用与一段理论讲解视频相结合，重新构建了实验结构，并介绍了应用中呈现的所有概念。视频片段已嵌入应用中，用户可在执行实验前回顾理论讲解。

在第二项研究中，幻灯片演示对照组条件被替换为一个基于 PhET 模拟 [84] 的交互式网络应用程序。对照组条件由四个模拟环境组成，这些模拟环境模仿了虚拟环境的四个房间，使用户能够以简单而即时的方式与实验进行交互。

E. 研究*2*：生态学评估

为评估方法与设计改进的有效性，*Physics Playground* 被部署于为期四周的高中实验中，以在生态学情境下评估其效度与媒介效应。该实验被设计为一项被试内-被试间研究，以时间（前测、即时后测、2周保持）作为被试内因素，以媒介作为被试间因素（沉浸式虚拟现实、桌面虚拟现实、对照组）。

实验流程在各组之间进行了标准化：第1周，学生完成前测问卷，以评估其基线物理知识（16道事实性知识多项选择题）。第2周，在前测六天之后，学生观看了视频讲座；次日，他们参与了所分配的实验条件并完成后测问卷。第4周，在实验日两周之后，学生回答了保持测试问卷以评估知识保持，并参加了非正式焦点小组以获取定性见解。

除学习外，所收集的测量指标还包括能动性（采用能动感量表问卷）和动机（采用RIMMS量表）。

F. 研究*2*：结果

共有五个班级参与本研究，学生在班级层面被随机分配到沉浸式虚拟现实组、桌面虚拟现实组和对照组。总体而言，74名学生（43名男性、30名女性、1名非二元性别）完成了实验的全部步骤，并被纳入最终分析。

通过为每个正确答案计 1 分、错误答案计 0 分，计算参与者的得分，以评估事实性知识获取。不同条件下的前测得分没有差异（Welch 方差分析，$F = 0.951$, $p = .391$）。所有条件下的后测得分均显著高于前测得分（学生 t 检验，$t = -9.6$, $p < .001$），而各条件之间的后测得分没有差异（Welch 方差分析，$F = 1.14$, $p = .328$）。分析保持数据发现，对照组得分显著提高（$t = -2.89$, $p = .008$），桌面虚拟现实（DVR）组得分显著下降（$t = 2.8$, $p = .01$），而沉浸式虚拟现实（IVR）组得分没有变化（$t = -0.722$, $p = .477$）。Welch 方差分析显示组间存在差异（$F = 7.5$, $p = .002$）；事后分析表明，IVR 组和对照组的得分均显著高于 DVR 组（IVR 与 DVR：$p = .012$,$\Delta_{mean} = 1.24$；对照组与 DVR：$p < .001$, $\Delta_{mean} = 1.71$）。IVR 组与对照组之间没有差异（$p = .521$）。结果见图9。

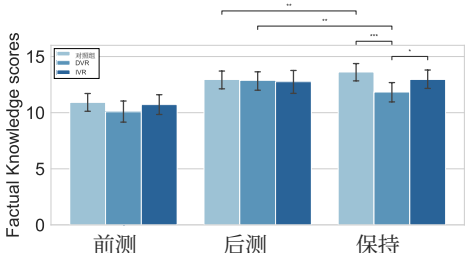


图9：事实性学习成果。所有组在前测与后测之间的得分均显著提高。

为评估能动感，对能动感量表的两个分量表进行了分析：积极能动感（SoPA；图10a）和消极能动感（SoNA；图10b）。克鲁斯卡尔-沃利斯检验显示，组间无显著差异，积极能动感（SoPA：$\chi^2 = 2.11, p = .349$）和消极能动感（SoNA：$\chi^2 = 2.94, p = .23$）均是如此。

通过克鲁斯卡尔-沃利斯检验对动机得分进行了分析，结果显示条件具有显著影响（$\chi^2 = 14.4, p < .001$）；沉浸式虚拟现实显著高于桌面虚拟现实（$W = -5.65, p < .001$；$M_{IVR} = 49.3, M_{DVR} = 45.3$；图10c）。沉浸式虚拟现实与对照组之间（$W = 3.29, p = .053$）以及桌面虚拟现实与对照组之间（$W = -2.53, p = .175$）均未出现差异。

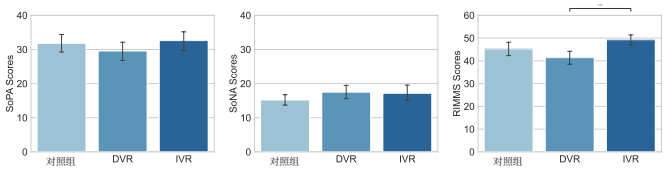
仅在虚拟现实组中收集了临场感和晕动症评分。对于前一项测量，曼-惠特尼U检验显示，沉浸式虚拟现实组的得分高于桌面虚拟现实组（$U = 64.5, p < .001$；$M_{IVR} = 166$，$M_{DVR} = 134$）。此外，临场感与能动性子量表之间的皮尔逊相关分析显示，临场感与 SoPA 呈显著正相关（$r = 0.468$，$p < .001$），但与 SoNA 均无相关性（$r = -0.121, p = .404$）。对于后一项测量，克鲁斯卡尔-沃利斯检验未发现差异，无论是总体量表（$\chi^2 = 0.612, p = .434$），还是各个分量表（眼动：$\chi^2 = 0.612, p = .434$；定向障碍：$\chi^2 = 1.354, p = .245$）均如此。

通过非正式焦点小组收集了定性反馈。参与的学生一致更倾向于沉浸式虚拟现实，因为它能提升投入度，并让他们能够在虚拟环境中采取行动；不过，他们认为，先进行简短的理论介绍，再使用沉浸式虚拟现实，效果最佳；视频讲座则被视为有用的准备材料。桌面虚拟现实被看作一种务实的折中方案（沉浸感较弱，但更易使用），而基于网络的控制因其即时性而受到认可，但投入感较低。学生还反映，沉浸式虚拟现实的交互存在一些问题，这些问题源于该技术的新奇效应；他们指出，随着对技术的熟悉程度提高，这些问题会逐渐减少。他们还强烈建议加入协作式多人模式，以更好地支持课堂使用，而不仅仅是个人使用。

七、讨论

通过对三个领域进行三角验证，这些发现呈现出共同模式。与桌面虚拟现实以及（在适用时）对照条件相比，沉浸式虚拟现实始终能提升临场感和用户体验，这与将临场感同感官／交互保真度联系起来的研究 [20, 22, 24]，以及相关综述相一致

在沉浸感较高时，报告了情感和注意力方面的增益 [2, 7, 85]。然而，与此同时，即时学习



(a) SoPA结果。 (b) SoNA 结果。 (c) 动机结果

图10：*Physics Playground* 研究2中能动性和动机结果，按条件划分。

增益参差不齐，而且在各项研究中往往与媒介无关，这表明单靠沉浸感并不会直接带来更好的近期事实性结果。在 CAMIL 框架下，我们可以认为，沉浸感主要影响心理路径，但事实性知识获取并不严格依赖于沉浸感。值得注意的是，所有研究中的晕动症和主观认知负荷测量值均较低，且不受实验条件影响，因此减少了外部因素对学习造成的混杂影响。因此，沉浸感本身似乎并不是提升即时事实性知识增益的有效工具，其效果可能取决于学习内容。

RHOME-VR 接受度结果：为这张图片添加细节。不同媒介下的感知易用性没有差异，而沉浸式虚拟现实中的感知有用性更高。实际体验中，参与者认为沉浸式导览至少与传统教学工具同样易用，而且更有用。在 CAMIL 框架下，这一模式与心理路径相符：更强的临场感和情感体验（包括可能的新奇效应提升）可以增强对有用性的感知，即使学习成果没有差异。这种“更具创新性，却不会更难用”的特征令人鼓舞，有利于沉浸式虚拟现实的普及。

在长期保持方面，沉浸感似乎也能带来学习优势。在 *Physics Playground*中，沉浸式虚拟现实组参与者的知识保持优于桌面虚拟现实组，这表明在处理复杂的三维交互式应用时，沉浸感能为知识保持带来额外价值。通过分析相关文献，我们发现这一主题的研究结果不一：有些论文显示沉浸感有利于知识保持 [62, 86]，另一些则发现没有差异 [4, 87, 52, 42]，甚至发现桌面虚拟现实优于沉浸式虚拟现实 [49]。此外，在*Physics Playground*研究2中，简单的交互式二维对照组取得了与沉浸式虚拟现实组相当的结果。

这些发现提出了三点。第一，数据表明，投入度和交互性，而非技术复杂程度本身，是知识保持的关键：当沉浸式虚拟现实（IVR）与对动态现象的主动操控相结合时，其两周后回忆效果优于桌面虚拟现实（DVR）；然而，简单的交互式二维模拟表现相近，这凸显了与目标概念相契合的主动交互循环的重要性。第二，与 CAMIL 一致，只有当任务—媒介匹配度较高（即媒介最适合用户执行任务），且外在认知负荷受到控制时，这些效果才会显现；这有助于解释为何在*RHOME-VR* 中，表征信息密集的标注任务并未因更高的沉浸感而在后测中获益，而在*PhysicsPlayground* 中，动手探索却在随访中获益。第三，教学整合很重要：在沉浸式体验之前增加理论讲座，提升了即时

成绩优于先前研究，并有助于保持，表明混合式学习——即简短的预先培训或理论讲座，加上数字化互动实践课程——是一种很有前景的策略。不过，据我们所知，在教育虚拟现实研究中，很少有研究采用这种方法，且研究结果并不一致（IVR ＞ DVR [88]；无差异 [86, 41]），这说明仍需进一步研究，以更好地了解这种方法的实际贡献。

围绕能动性还出现了其他观察结果。在*PhysicsPlayground*中，能动感得分在SoPA或SoNA分量表上均未因媒介而有所不同。值得注意的是，临场感与SoPA呈正相关——也就是说，参与者越感到“身临其境”，他们在模拟环境中实际感到的掌控感就越强——而SoNA则未显示出关联，这表明更高的临场感并不会自动减轻掌控感减弱的感受 [89]。基于这些结果，我们可以提出一些可能的解释。首先，能动性并非单一概念：课堂研究区分了对行动的能动性（运动控制）、对注意力的能动性（看向何处）以及对学习的能动性（追求什么），并表明使体验更具交互性主要提升的是行动层面的能动性，而不一定是对学习或专注的能动性 [90]。此外，即便是低交互性媒介（如沉浸式视频）也能根据设计目标和学习者身份认同来支持能动性 [90]。因此，仅凭设备并不能起决定作用：媒介设计和学习者特征可以调节能动性。这有助于解释为何即便临场感上升，SoPA仍未因媒介而有所不同：清晰、响应迅速的操控以及自主性可以使二维和桌面虚拟现实的参与者感到具有能动性。与此同时，若交互复杂度较高，复杂的沉浸式虚拟现实可能会削弱这种感受。这些观察也反映在焦点小组的定性反馈中：学生们强调，鉴于他们对技术和操控方式并不熟悉，虚拟现实——尤其是沉浸式虚拟现实——方法的新奇效应有时会让他们应接不暇。预先培训和更长时间的媒介接触可能会缓解这一问题，从而提高沉浸式虚拟现实中的感知能动性，并最终减少困惑、提升学习成果。

EnvisioningCorals 的结果补充了这一图景。在这里，IVR 中的具身性和能动性结果高于 DVR，这与采用自然交互而非通过鼠标和键盘进行中介的设计相一致。行为日志进一步揭示了一个重要细节：移动越多，能动性越低。这一结果很可能源于不同媒介采用的交互与移动方式有所不同。事实上，IVR 参与者只需转动头部即可目视查看场景，并通过传送移动；这种方式所需的努力可能更少，也有助于采用更高效的移动策略。另一方面，DVR 参与者必须依靠鼠标观察，并通过按住 WASD 持续移动。用 CAMIL 的术语来说，IVR 设置降低了控制开销，使参与者能够在任务（收集食物、躲避碎屑）中保持能动性；而 DVR 参与者可能不得不将注意资源用于寻路。

除了媒介差异，虚拟形象选择在《想象珊瑚》中也很重要。在具身性研究中，整体具身性因虚拟形象而异，生理激活也与这些差异相对应。从 CAMIL 的视角来看，这表明身份路径（用户在多大程度上能够成为代理者）和控制路径（身体图式与可供性同所需动作的契合程度）都发挥了作用。形态特征与用户的感觉运动特征更自然地对应的化身，能够增强具身性和唤醒，而不会增加负担。

处理 EDA 时，*EnvisioningCorals* 还呈现了其他有趣的结果。与先前研究表明沉浸感会放大情绪投入度的发现一致，IVR 中的激活水平在实验开始时更高 [91, 92, 93]。然而，到实验结束时（就在亲环境引导音频播放之前），这一差异消失了。结合 CAMIL 来看，沉浸感似乎增强了最初的情感路径，而叙事和环境设计则使不同媒介间的投入度趋于一致。实际上，实验初期的 IVR 唤醒窗口可以激发注意力和好奇心；但随着体验时间延长，内容会优先于技术，最终带来相当的情绪唤醒。这有助于解释为何尽管早期唤醒状况不同，*EnvisioningCorals*中的学习成果在不同媒介间仍然相当。这一点也体现在具身性结果上：IVR 与 DVR 在响应和身体所有权分量表上的得分没有差异，这可能是由虚拟环境和内容设计所致。在最后一个事件中，这两个分量表均与 EDA 不相关，表明主观具身性与情绪唤醒之间可能存在脱钩。造成这些结果的原因仍有待未来研究探讨。

VIII. 结论与设计启示

本研究在统一的方法框架下，探讨了沉浸感在三大领域的教育中何时以及如何发挥作用——文化遗产（*RHOME-VR*）、环境意识（*Envisioning Corals*）和物理学（*Physics Playground*）。与既有研究一致 [7, 2, 85],，沉浸式虚拟现实始终提升了临场感和用户体验，而即时事实性学习效果则在不同媒介间基本相当。沉浸式虚拟现实确实有助于提升长期保持：在 *PhysicsPlayground* 中，两周后的测试结果显示，沉浸式虚拟现实优于桌面虚拟现实；不过，简单的交互式二维对照组也取得了相近的保持效果。这表明，推动长期保持的因素是主动操控和任务—媒介匹配，而非仅仅是技术复杂度。关于能动性的发现进一步凸显了对照组因素的作用：清晰、响应灵敏的交互有助于在不同媒介中形成积极能动感；在 *Envisioning Corals* 中，自然交互和低负担移动增强了具身性与能动性，而更高的移动需求则与较低的能动性相关。生理数据显示，沉浸式虚拟现实在早期具有唤醒优势，但随着叙事与内容的重要性超过技术，这种优势随后消失。

这些结果为教学内容提出了一些设计启示。首先，在涉及三维操控时，教师应优先将沉浸式虚拟现实用于以保持为导向的目标。事实上，当学习者必须操控三维对象并观察即时后果时，使用沉浸式虚拟现实能够随时间加强巩固。

其次，我们的结果表明，正如以往文献 [7] 所指出的，沉浸式虚拟现实应与理论介绍相结合。课堂部署表明，

短视频讲座能够改善近期学习表现，从而提高该技术的学习成效。

第三，虚拟形象选择和交互映射应当自然贴合。与具身性研究结果一致，符合学习者感觉运动预期的形态和输入策略，能够在不增加负荷的情况下提升能动性和具身性。在适当情况下，手部追踪可以进一步提升自然感；不过，这会移除控制器触觉反馈，并可能减少抓握确认。设计者应根据任务需求权衡这一取舍（例如，触觉反馈在教学上是否有帮助，还是视觉／听觉确认已经足够）。移动方式同样应尽量降低控制开销：头部注视和传送有助于在沉浸式虚拟现实中高效探索场景，而持续的键盘移动则会使注意力转向寻路，而非任务目标。

第四，应利用沉浸式虚拟现实早期的唤醒窗口来集中注意力。生理数据显示，沉浸式虚拟现实下的初始投入度更高，但随着叙事和任务内容逐渐占据主导，不同媒介间的差异随后趋于一致。应合理安排课程，在开场几分钟内吸引注意力（明确目标、设置简短挑战、呈现即时因果反馈），随后待唤醒水平趋于平稳，再通过内容和动手活动推动学习。在这一阶段保持轻量的移动方式和直接的交互，可将注意资源留给概念本身，而非界面。

最后，应规划多次沉浸式虚拟现实体验，以抑制新奇效应并提升控制熟练度。有关能动性的研究结果和学生反馈表明，对设备和操作映射不熟悉会削弱感知控制，尤其是在首次体验时。通过短时、重复的体验，并辅以使用前教程和各模块间一致的操作映射，可以增强积极能动性、减少困惑，并帮助将动机优势转化为稳定的成果。这些建议进一步阐明了我们的结论：只有当沉浸式虚拟现实的沉浸式可供性与三维、以行动为中心的目标相匹配，并通过自然、低负担的控制设计来实现，从而既利用初期的投入度，又在反复使用中培养持久技能时，沉浸式虚拟现实才最为有效。

A. 局限性与未来工作

解读这些发现时，应考虑到可能对其产生影响的一些局限性。

在各种应用中，事实性知识主要被评估为学习成果。研究并未系统评估概念性知识或程序性知识，而沉浸感、临场感和控制因素对这些知识的影响可能各不相同。未来研究应评估不同类型的知识，包括对学习迁移进行更深入、更稳健的评估。

大多数分析关注即时学习；纳入保留效果测量时，间隔为两周。尽管这为高中提供了生态效度检验，但也限制了我们对媒介效应长期持久性的判断。要更好地描述巩固过程，需要更长的间隔（例如1–3个月）或多阶段后续追踪（例如一周、一个月和六个月后）。

许多构念——临场感、动机、能动性、接受度——都是通过自我报告测量的。尽管自我报告在相关文献中十分常见，但它们容易受到记忆、需求特征和期望效应的影响，也无法充分捕捉认知负荷或情感动态。只有 *Envisioning Corals*纳入了生理指标（皮肤电活动），但分析仅关注预先定义事件前后的短时间窗口。采用更丰富的多方法测量组合将有助于提高构念效度。

在*RHOME-VR*中，沉浸式虚拟现实在实验室内进行，而桌面虚拟现实/对照组则通过远程方式进行；尽管内容一致，这仍导致用户体验/技术接受模型/临场感方面存在情境混淆。在*PhysicsPlayground*的研究2中，班级按班级层级随机分配；我们的主要分析未对聚类建模，因此班级内相关可能使标准误产生偏差。未来的重复研究应采用混合效应模型（为班级/教师设置随机截距）或聚类稳健程序。此外，不同媒介间的交互/移动方式无法完全统一（*Envisioning Corals*：沉浸式虚拟现实中采用瞬移 + 头部注视，桌面虚拟现实中则采用连续的WASD +鼠标视角控制）。尽管这体现了真实的可供性，但也使得难以将差异单纯归因于“沉浸感”，而非控制开销。应采用匹配的移动方式和反馈，以便恰当地隔离媒介效应。

许多参与者是首次使用沉浸式虚拟现实的用户。新奇效应既可能提升动机和感知有用性，也可能在用户掌握控制方式之前暂时降低其感知能动性，从而可能提高接受度，却掩盖学习和控制方面的益处 [94]。因此，需要采用包含多次沉浸式虚拟现实体验的纵向研究设计，以减轻新奇效应的影响，并恰当评估技术带来的效果。

这些局限促使我们探索若干研究方向。首先，将学习成果的考察范围从事实性记忆扩展至概念性和程序性学习，并重新设计迁移任务，以尽量减少练习和努力程度造成的混淆。其次，将自我报告与多模态信号及行为轨迹（例如心率变异性、皮肤电活动、眼动以及应用内操作）结合起来，并利用这些数据更直接地对 CAMIL 路径进行建模。

在教学设计方面，应测试沉浸式虚拟现实中的生成性学习策略（GLS） [95] （例如，情境中的自我解释、提示性比较），以考察能够引发生成活动的沉浸体验，相较于单纯接触内容，是否能改善近期和长期结果。个性化是另一项有前景的手段：学习者画像 [96] 或轻量级人工智能画像分析 [97] 可以根据用户的目标和能力调整虚拟化身形态、控制映射和节奏控制，从而有望增强 CAMIL 的身份认同和控制路径。社会层面也值得研究：与单独使用相比，包含共享任务和通信工具的协作式沉浸式虚拟现实可能会改变临场感、能动性动态及学习成果。

最后，我们建议开展生态化评估，将沉浸式虚拟现实融入更广泛的教学路径（预先培训、沉浸式虚拟现实实验室、后续活动），并通过重复体验来减轻新奇效应、提高控制熟练度。采用这种实验设置，将有助于我们更好地了解这项技术在其未来（可能的）实际使用环境中的影响。

参考文献

[1] L. Jensen 和 F. Konradsen, 《教育中虚拟现实头戴式显示器应用综述》

培训》，教育信息技术，第23卷，1515–1529页，2018年。[2] J. Radianti、T. A. Majchrzak、J. Fromm 和 I. Wohlge- nannt，《沉浸式虚拟现实在高等教育中的应用系统综述：设计要素、经验教训与研究议程》，《计算机与教育》，第147卷，文章编号103778，2020年。[3] A. F. Di Natale、C. Repetto、G. Riva 和 D. Villani，《沉浸式虚拟现实在K-12及高等教育中的应用：实证研究十年系统综述》，*British Journal ofEducationalTechnology*，第51卷第6期，2006–2033页，2020年。[4] F. Buttussi 和 L. Chittaro，《不同类型的虚拟现实显示设备对安全培训情境中的临场感和学习的影响》，*IEEE Transactionson VisualizationandComputer Graphics*，第24卷第2期，1063–1076页，2018年。[5]Z. Merchant、E. T. Goetz、L. Cifuentes、W. Keeney- Kennicutt 和 T. J. Davis，《基于虚拟现实的教学对K-12及高等教育学生学习成果的有效性：荟萃分析》，《计算机与教育》，第70卷，29–40页，2014年。[6] N. Pellas、S. Mystakidis 和 I. Kazanidis，《K-12及高等教育中的沉浸式虚拟现实：过去十年科学文献的系统综述》，*VirtualReality*，第25卷，835–861页，2021年。[7] B. Wu、X. Yu 和 X. Gu，《使用头戴式显示器的沉浸式虚拟现实对学习表现的影响：荟萃分析》，*British Journal of Educational Technology*，第51卷第6期，1991–2005页，2020年。[8]G. Makransky、T. S. Terkildsen 和 R. E. Mayer，《在科学实验室仿真中加入沉浸式虚拟现实会增强临场感，却降低学习效果》，《学习与教学》，第60卷，225–236页，2019年。[9] G. Makransky 和 G. B. Petersen，《沉浸式学习的认知情感模型（CAMIL）：一种基于理论研究的沉浸式虚拟现实学习模型》，《教育心理学评论》，第33卷第3期，937–958页，2021年。[10] A. Paino Ambrosio 和 M. I. Rodriguez Fidalgo，《虚拟现实的过去、现在与未来：技术变量与定义分析》，《文化与历史数字期刊》，10–2253页，2020年6月。[11]F. Biocca 和 B. Delaney，沉浸式虚拟现实技术。美国：L. Erlbaum Associates Inc.，1995年，第57–124页。[12] B. Chavez 和 S. Bayona，《虚拟现实在学习过程中的应用》，载于《信息系统与技术趋势及进展》，2018年。[13] E. A.-L. Lee 和 K. W. Wong，《通过桌面虚拟现实学习：空间能力较弱的学习者受到的积极影响更大》，《计算机与教育》，第79卷，49–58页，2014年。[14] K. Walsh 和 S. Pawlowski，《虚拟现实：一种亟需信息系统研究的技术》，《信息系统协会通讯》，第8卷，2002年。[15] M.-L. Ryan，作为虚拟现实的叙事*2*：重探文学与电子媒介中的沉浸感和交互性媒体。约翰斯·霍普金斯大学出版社，2015年。[16] J. Steuer，“定义虚拟现实：决定远程临场感的维度”，《虚拟现实时代的传播》，第42卷，第73–93页，1995年。[17] C. Johnson、S. Bailey、B. Schroeder 和 M. Marraffino，“虚拟现实中的程序性学习：沉浸感、交互性和空间能力的作用。”《技术、心智与行为》，第3卷，2022年11月。[18] C. Velasco 和 M. Obrist，“多感官体验：入门”，*Front.Comput.Sci.*，第3卷，第614524页，2021年。[19] R. Skarbez、F. P. Brooks, Jr. 和 M. C. Whitton，“临场感及相关概念综述”，*ACMComput.Surv.*，第50卷，第6期，2017年。[20] B. G. Witmer 和 M. J. Singer，“测量虚拟环境中的临场感：临场感问卷”，临场感：远程操作器与虚拟环境，第7卷，第3期，第225–240页，1998年。[21]N. Nilsson 和 S. Serafin，“重新审视沉浸感：现有沉浸感定义及其与不同临场感理论关系的综述”，*Human Technology*，第12卷，第108–134页，2016年11月。[22]B. G. Witmer、C. J. Jerome 和 M. J. Singer，“临场感问卷的因子结构”，临场感，第14卷，第3期，第298–312页，2005年。[23] M. Slater、M. Usoh 和 A. Steed，“虚拟环境中的临场感深度”，临场感：远程操作器与虚拟环境，第3卷，第2期，第130–144页，1994年。[24]M. Slater，“关于临场感术语的一则说明”，在线， 2003，[在线]。可通过 https://tinyurl.com/slaterpresenceterminology2003 获取。[25] ——，“虚拟现实中的沉浸感与临场感幻觉”，*BrJ Psychol.*，第3卷，第109期，第431–433页，2018年。[26]P. Cipresso、I. Giglioli、M. Raya 和 G. Riva，“虚拟现实与增强现实研究的过去、现在和未来：对发表于《心理学前沿》的文章进行网络分析和内容分析”，《心理学前沿》，第9卷，第2086页，2018年。[27]D. Kami´ńska、T. Sapi´ński、S. Wiak、T. Tikk、R. E. Haamer、E. Avots、A. Helmi、C. Ozcinar 和 G. Anbar-jafari，“ 虚拟现实及其教育应用：综述 ”，《信息》，第10卷，第10期，2019年。[28] C. Christou，《教育中的虚拟现实》，2010年，第228–243页。[29] M. Wilson，“具身认知的六种观点”，*Psycho-nomicBulletin & Review*，第9卷，第625–636页，2002年。[30]T. Ionescu 和 D. Vasc，“具身认知：心理学与教育面临的挑战”，*Procedia - Social and Behavioral Sciences*，第128卷，第275–280页，2014年，国际会议：教育与心理学挑战——知识社会的教师，第二届，EPC – TKS 2013。[31]R. Lindgren 和 M. Johnson-Glenberg，“因具身而备受鼓舞：具身学习与混合现实研究的六项原则”，《教育研究者》，第42卷，第8期，第445–452页，2013年。[32] M. C. Johnson-Glenberg、H. Bartolomea 和 E. Kalina，“平台并非命运：具身学习效应 com-

paring 将二维桌面与三维虚拟现实 STEM 体验进行比较”，*Journal of Computer Assisted Learning*，第37卷，第5期，第1263–1284页，2021年。[33] R. E. Mayer，多媒体学习认知理论，丛书《剑桥心理学手册》。剑桥大学出版社，2014年，第43–71页。[34] L. W. Anderson 和 D. R. Krathwohl，学习、教学与评估分类法：布鲁姆教育目标分类法修订版：完整版。Addison Wesley Longman, Inc.，2001年。[35] J. Parong、K. A. Pollard、B. T. Files、A. H. Oiknine、A. M. Sinatra、J. D. Moss、A. Passaro 和 P. Khooshabeh，“临场感的中介作用因沉浸式技术中的空间学习类型而异”，*ComputersinHumanBehavior*，第107卷，第106290页，2020年。[36] K. A. Pollard、A. H. Oiknine、B. T. Files、A. M. Sinatra、D. Patton、M. Ericson、J. Thomas 和 P. Khooshabeh，“沉浸程度影响虚拟环境中的空间学习：一项具有长时间组间间隔的三条件被试内研究结果”，*Virtual Reality*，第24卷，第783–796页，2020年。[37] B. De Witte、V. Reynaert、J. Hutain、D. Kieken、J. Jabbour 和 J. Possik，“在学习事实性知识的沉浸式过程中评估认知负荷和空间能力的影响”，*Computers & Education: XReality*，第5卷，第100085页，2024年。[38] M. Thompson、C. Uz-Bilgin、M. Tutwiler、M. Anteneh、J. Meija、A. Wang、P. Tan、R. Eberhardt、D. Roy 和 E. Klopfer，“与交互性相当的二维游戏相比，沉浸感能积极促进虚拟现实游戏中的学习”，*Information and Learning Sciences*，即将刊出，2021年。[39] P. Araiza-Alba、T. Keane、W. S. Chen 和 J. Kaufman，“沉浸式虚拟现实作为学习问题解决技能的工具”，《计算机与教育》，第164卷，第104121页，2021年。[40] Q. Tang、Y. Wang、H. Liu、Q. Liu 和 S. Jiang，“通过沉浸式虚拟现实或 iPad 体验艺术教育项目：考察临场感和外在认知负荷对愉悦感、注意力和保持的中介效应”，《心理学前沿》，第13卷，2022年。[41] D. Checa、I. Miguel-Alonso 和 A. Bustillo，“用于增强自主学习的沉浸式虚拟现实计算机组装严肃游戏”，*Virtual Reality*，第27卷，第3301–3318页，2023年。[42] J. Madden、S. Pandita、J. P. Schuldt、B. Kim、A. S. Won 和 N. G. Holmes，“准备就绪，学生一号：探究虚拟现实中学生学习的预测因素”，*PLOSONE*，第15卷，第3期，第1–26页，2020年。[43] G. B. Petersen、G. Petkakis 和 G. Makransky，“沉浸感和交互性如何驱动虚拟现实学习的研究”，《计算机与教育》，第179卷，第104429页，2022年。[44] R. Kaplan-Rakowski、D. Cockerham 和 R. E. Ferdig，“声音和沉浸式体验对学习者使用虚拟现实和平板电脑的影响：一项混合方法研究”，*British Journal of Educational Technology*，第55卷，第4期，第1560–1582页，2024年。

[45]M. Mulders，《在虚拟现实中了解大屠杀受害者：技术、教学方法、心流、临场感和先前知识的主要效应、中介效应与调节效应》，*Multimodal Technologiesand Interaction*，第7卷，第3期，2023年。[46] J. Cecil、A. Gupta、M. Pirela-Cruz 和 P. Ramanathan，《用于骨科手术的基于网络的虚拟现实模拟训练方法》，*ACMTrans. MultimediaComput.Commun.Appl.*，第14卷，第3期，2018年。[47]J. Guti´errez-Maldonado、M. Ferrer-Garc´ıa、J. Pla-Sanjuanelo、A. Andres-Pueyo 和 T. Caparros，《利用虚拟现实训练进食障碍诊断技能：两种低成本系统的比较》，*Studiesinhealthtechnology andinformatics*，第219卷，第75–81页，2016年。[48] A. A. Preukschas、P. A. Wise、L. Bettscheider、M. Pfeiffer、M. Wagner、M. Huber、M. Golriz、L. Fischer、A. Mehrabi、F. R¨ossler、S. Speidel、T. Hacker、B. P. M¨uller-Stich、F. Nickel 和 H. G. Kenngott，《比较虚拟现实头戴式显示器与屏幕上的三维可视化及二维计算机断层扫描数据在肝脏手术决策训练中的效果：一项随机对照研究》，*SurgEndosc*，第38卷，第2483–2496页，2024。[49]S. J. Smith、S. L. Farra、D. L. Ulrich、E. Hodgson、S. Nicely 和 A. Mickle，《两种不同水平的虚拟现实模拟的有效性》，*Nursing educationperspectives*，第39卷，第6期，2018年。[50] B. Rai、H. S. Tan 和 C. H. Leo，《通过游戏化虚拟实验室模拟将游戏带回生物学课堂》，*Journal of AppliedLearning & Teaching*，2019年。[51] G. Makransky 和 L. Lilleholt，《沉浸式虚拟现实在教育中的情感价值：结构方程模型研究》，*EducationTechResearch Dev*，第66卷，第1141–1164页，2018年。[52]S. Klingenberg、M. L. M. Jørgensen、G. Dandanell、K. Skriver、A. Mottelson 和 G. Makransky，《探究将教学作为生成式学习策略对通过桌面虚拟现实和沉浸式虚拟现实进行学习的影响：一项媒介与方法实验》，*BritishJournal ofEducational Technology*，第51卷，第6期，第2115–2138页，2020年。[53] M. Kozhevnikov、J. Gurlitt 和 M. Kozhevnikov，《在沉浸式与非沉浸式虚拟环境中学习相对运动概念》，*J SciEduc Technol*，第22卷，第952–962页，2013年。[54] D. Parmar、L. Lin、N. DSouza、S. J¨org、A. E. Leonard、S. B. Daily 和 S. V. Babu，《沉浸感和虚拟现实中的自我化身如何影响中学教育中的编程学习与计算思维》，*IEEETransactions on Visualizationand Computer Graphics*，第29卷，第8期，第3698–3713页，2023年。[55]S. Oberd¨orfer 和 M. E. Latoschik，《游戏机制中的知识编码：桌面三维和虚拟现实环境中的面向迁移的知识学习》，*International JournalofComputer GamesTechnology*，第2019卷，第1期，文章编号7626349，2019年。[56]E. Loup-Escande、E. Jamet、M. Ragot、S. Erhel 和

N. M. 和，《立体显示对教育虚拟环境中的学习和用户体验的影响》，*International Journal of Human–Computer Inter-action*，第33卷，第2期，第115–122页，2017年。[57] M. Murcia-L´opez 和 A. Steed，《环境特征、自我化身和沉浸感对虚拟环境中物体位置记忆的影响》，*Frontiers inICT*，第3卷，2016年。[58] E. Krokos、C. Plaisant 和 A. Varshney，《虚拟记忆宫殿：沉浸感有助于回忆》，*VirtualReality*，第23卷，第1–15页，2019年。[59] L. Hejtmanek、M. Starrett、E. Ferrer 和 A. D. Ekstrom，《我们在虚拟现实中学到的内容有多少能迁移到现实世界的导航中？》，*Multisensoryresearch*，第33卷，第479–503页，2020年。[60]J. Zhao、T. Sensibaugh、B. Bodenheimer、T. P. McNamara、A. Nazareth、N. Newcombe、M. Minear 和 A. Klippel，《桌面虚拟环境与沉浸式虚拟环境：对空间学习的影响》，*Spatial Cognition &Computation*，第20卷，第4期，第328–363页，2020年。[61]C. Ochs 和 A. Sonderegger，《临场感与学习之间的相互作用》，*Frontiers in Virtual Reality*，第3卷，2022年。[62] E. Olmos Raya、J. Cavalcanti、M. Contero、M. Castellanos、I. Alice、I. Chicchi Giglioli 和 M. Alca˜niz Raya，《移动虚拟现实作为教育平台：沉浸感和积极情绪诱导对学习过程影响的试点研究》，*EurasiaJournal ofMathematics, Scienceand Technology Education*，第14卷，2018年。[63] D. Johnson、D. Damian 和 G. Tzanetakis，《评估使用特雷门琴进行混合现实乐器学习的有效性》，*VirtualReality*，第24卷，第303–317页，2020年。[64] M. Clerici、P. Boffi、P. L. Lanzi、L. Coppola、C. Murone 和 A. Gallace，《古罗马住宅的一天：虚拟遗产应用涉及的人为因素与教育特性》，载于*2022IEEE International Sympo-sium on Mixed and AugmentedReality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*，2022年，第692–697页。[65] P. Boffi、M. Clerici、A. Gallace 和 P. L. Lanzi，《在古罗马的一次教育体验：评估虚拟现实对人类学习过程的影响》，*Computers & Education: X Reality*，第2卷，文章编号100014，2023年。[66] P. Boffi、M. Clerici、M. Muolo、A. Gallace 和 P. L. Lanzi，《构想珊瑚：通过化身为珊瑚礁生物，提高人们对气候变化对偏远环境影响的认识》，载于*2023 9thInternational Confer-enceon Virtual Reality (ICVR)*，2023年，第239–246页。[67]E. Battipede、A. Giangualano、P. Boffi、M. Clerici、A. Calvi、L. Cassenti、R. Cialini、T. L. A. Van Den Weghe、L. Addimando、P. L. Lanzi 和 A. Gallace，《物理学游乐场：关于基于虚拟现实的学习的定量与定性研究见解》，载于*IntelligentHuman Computer Interaction*，D. Singh、J.-W. van't Klooster 和 U. S. Tiwary 编，2025年，第97–108页。[68]A. Giangualano、P. Boffi、S. A. Osimo、M. Yavari, A. Gabbiadini, P. L. Lanzi, and A. Gallace, “《自然中的具身：虚拟形象选择如何塑造水下虚拟现实体验》,” 载于*2025 IEEE InternationalConferenceon Metrology for eXtended Reality, ArtificialIntelligenceand Neural Engineering(MetroXRAINE)*，2025年，第506–511页。[69] J. Clifton and S. Palmisano, “虚拟现实头戴式显示器中转向式移动和瞬移对晕动症与临场感的影响,” *VirtualReality*，第24卷，第453–468页，2020年。[70] F. D. Davis, R. P. Bagozzi, and P. R. Warshaw, “《用户对计算机技术的接受：两种理论模型的比较》,”《管理科学》，第35卷，第8期，第982–1003页，1989年。[71] A. Rese, D. Baier, A. Geyer-Schulz, and S. Schreiber, “消费者如何接受增强现实应用程序：使用量表和意见进行比较分析,”*Tech-nological Forecasting and Social Change*，第124卷，第306–319页，2017年。[72] S. A. Salloum, A. Qasim Mohammad Alhamad, M. Al- Emran, A. Abdel Monem, and K. Shaalan, “通过开发综合技术接受模型，探讨学生对电子学习的接受度,”《*IEEE Access*》，第7卷，第128 445–128462页，2019年。[73]M. Hassenzahl,《物与我：理解用户与产品之间的关系》。Springer Netherlands，2004年，第31–42页。[74] C. Sagnier, E. Loup-Escande, D. Lourdeaux, I. Thou- venin, and G. Vall´ery, “用户对虚拟现实的接受：扩展的技术接受模型,”*Interna-tional Journal of Human–ComputerInteraction*，第36卷，第11期，第993–1007页，2020年。[75] B. Laugwitz, T. Held, and M. Schrepp, “用户体验问卷的构建与评估,” 载于《教育与工作中的人机交互和可用性》，2008年，第63–76页。[76] M. Schrepp, A. Hinderks, and J. Thomaschewski, “用户体验问卷（ueq-s）短版的设计与评估,”《国际交互式多媒体与人工智能期刊》，第4卷，第103–108页，2017年。[77] M. Gonzalez-Franco and T. C. Peck, “虚拟化身具身性：迈向标准化问卷,”《机器人学与人工智能前沿》，第5卷，2018年。[78]H. K. Kim, J. Park, Y. Choi, and M. Choe, “虚拟现实晕动症问卷（vrsq）：虚拟现实环境中的晕动症测量指标,”《应用人体工程学》，第69卷，第66–73页，2018年。[79] S. G. Hart and L. E. Staveland, “NASA-TLX（任务负荷指数）的开发：实证与理论研究结果,” 载于《人类心理工作负荷》，1988年，第52卷，第139–183页。[80]J. Brooke, “SUS：一种简便粗略的可用性量表,”*UsabilityEval. Ind.*，第189, 1995, [在线]。可见**此处**。[81] C. Kyrlitsias, M. Christofi, D. Michael-Grigoriou, D. Ba- nakou, and A. Ioannou, “一处难以抵达的考古遗址的虚拟导览：沉浸式

虚拟现实对用户体验、学习和态度改变的影响，” *Frontiers in Computer Science*，第2卷，2020年。[82] G. W. Scurati, M. Bertoni, S. Graziosi, and F. Ferrise, “探索利用虚拟现实支持环境可持续行为：体验设计框架，” *Sustainability*，第13卷，第2期，2021年。[83] N. Loorbach, O. Peters, J. Karreman, and M. Steehouder, “面向技术应用的自主指导式教学环境中教学材料动机调查（imms）的验证，” *British Journal of Educa-tional Technology*，第46卷，第1期，第204–218页，2015年。[84] K. Perkins, W. Adams, M. Dubson, N. Finkelstein, S. Reid, C. Wieman, and R. LeMaster, “Phet：用于物理教学与学习的交互式模拟，” *ThePhysicsTeacher*，第44卷，第1期，第18–23页，2006年。[85] D. Hamilton, J. McKechnie, E. Edgerton, and C. Wil- son, “沉浸式虚拟现实作为教育教学工具：定量学习成果与实验设计的系统性文献综述，” *JournalofComputers in Education*，第8卷，第1期，2021年。[86] T.-L. Lai, Y.-S. Lin, C.-Y. Chou, and H.-P. Yueh, “初中科学课程探究式虚拟实验室的评估，” *Journalof Educational Comput-ingResearch*，第59卷，第8期，第1579–1600页，2022年。[87] G. Makransky, S. Borre-Gude, and R. E. Mayer, “基于多重评估的沉浸式虚拟现实训练在动机和认知方面的益处，” *Journal ofComputer Assisted Learning*，第35卷，第6期，第691–707页，2019年。[88] A.-C. E. Ding, K.-T. T. Huang, J. DuBois, and H. Fu, “将沉浸式虚拟现实技术融入支架式游戏化学习，以提升低动机学生的多模态科学学习，” *Education TechResearchDev*，第 72 卷，第 2083–2102 页，2024年。[89]A. Ortiz and S. Elizondo, “利用情感计算技术提升能动感的沉浸式虚拟现实框架设计，” *AppliedSci-ences*，第13卷，第24期，2023年。[90] E. McGivney, “交互性与身份认同对学习者在虚拟现实实地考察中的能动感的影响，” *BritishJournal of Educational Technology*，第56卷，第1期，第410–434页，2025年。[91]C. K¨uhnel, E. D. Kecelioglu, S. Maltby, R. Hood, B. Knott, E. Ditton, F. Walker, and M. Kluge, “直接比较虚拟现实与二维呈现对临场感、情绪和生理结果测量指标的影响，” *FrontiersVirtual Real.*，第4卷，2023年。[92] Y. Niu, D. Wang,Z. Wang, F. Sun, K. Yue,and N. Zheng, “基于主观感受和生理信号的虚拟现实用户体验评估，” *JournalofImaging Science and Technology*，2019年。[93] J. Beck and R. Egger, “让我感受情绪：虚拟旅游环境中的自我报告与唤醒度测量，” 载于*Information and Communication TechnologiesinTourism 2018*，2018年，第3–15页。[94] M.-H. Huang, “设计网站属性以促成体验式接触，” *Computers in Human Behavior*，第 19 卷，第 4 期，第 425–442页，2003年。

[95] L. Fiorella和R. E. Mayer，作为生成性活动的学习：促进理解的八种学习策略。剑桥大学出版社，2015年。[96] E. Tauro、A. Gorini、C. Caglio、P. Gabanelli和E. G. Caiani，“新冠肺炎与医护人员的精神障碍：一种从在线调查开发人物角色的新型框架”，生物医学信息学杂志，第126卷，第103993页，2022年。[97] M. Sousa和H. Belchior-Rocha，“利用人工智能的创新教学方法和个性化学习体验”，载于*EDULEARN24*论文集，系列：第16届国际教育与新学习技术会议，2024，第9003–9009页。