

虚拟现实学习环境对外语词汇产出的影响： 来自行为和脑电的证据*

刘 聪¹ 刘秋霞¹ 祝梦蕊² 焦 鲁¹ 王瑞明³

(¹青岛大学教育科学学院/脑认知与语言学习实验室, 山东 青岛 266071)

(²西安交通大学外国语学院, 西安 710049) (³华南师范大学心理学院/心理应用研究中心, 广州 510631)

摘 要 虚拟现实(virtual reality, VR)等人工智能技术的快速发展为促进外语词汇习得提供了新方法, 但目前尚未有研究考察 VR 学习环境如何影响外语词汇产出。本研究结合 VR 技术与脑电实验, 以传统图词环境为参照, 系统考察 VR 环境对外语词汇产出的影响及其背后的神经机制。行为结果发现, 在即时测试阶段, VR 环境所学词汇的产出正确率高于图词环境, 但两者在延迟阶段没有差异。即时测试阶段的脑电结果发现, 相较图词环境, VR 环境诱发更小的 P200 和 LPC 成分, 且脑电时频分析发现 VR 环境下出现更明显的 μ 波抑制现象, 并伴随着 θ 波能量减弱。研究结果综合表明, 与图词环境相比, VR 环境利用感知觉-运动模拟提高词汇的具象化程度, 进而促进词汇检索与产出, 为具身认知理论提供实证支持。

关键词 虚拟现实, 外语词汇习得, 词汇产出, EEG, 时频分析

分类号 B842

1 引言

词汇习得是掌握一门外语的基础, 学习环境会影响外语词汇习得效果(Linck et al., 2009)。在传统学习环境下, 学习者通常是以母语为中介词进行图词或词词配对联想学习, 但其学习效果总是难以达到母语的水平。随着人工智能(Artificial Intelligence, AI)的高速发展, 数字化教育改革和学习模式创新已成为必然趋势。虚拟现实(virtual reality, VR)技术作为一种新兴教育工具, 通过模拟现实生活环境, 提供给学习者在传统学习环境中难以获得的身临其境的体验, 为外语词汇习得提供了新方法。

VR 技术在外语学习领域受到广泛关注, 并在正字法加工、词汇识别和语义整合方面表现出积极作用(Fuhrman et al., 2021; Tai et al., 2022)。在 VR 学习环境中, 抽象的词汇符号被具象化为 3D 客体, 学习者借助虚拟设备能够抓握、移动这些物体, 积

累感知觉-运动经验(Li & Jeong, 2020)。一些研究发现, VR 环境下所学词汇的再认效果优于传统学习环境。例如, Legault 和 Zhao 等人(2019)要求英语母语者在沉浸式 VR 环境和词词配对环境下进行汉语词汇学习, 四择一词汇再认任务发现在学习表现较差的群体中, VR 环境对外语词汇学习起到显著的促进作用。采用语义启动范式, 研究者在行为指标和脑电成分上均发现, 相较传统图词配对学习环境, 汉语母语者在 VR 环境下所学词汇的语义启动效应更大, 表明 VR 环境促进了外语词汇的语义整合水平, 并且更依赖于自动化加工机制(Jiao et al., 2026)。另外, 利用词汇回忆任务, 一项磁共振成像研究表明词汇回忆时的大脑激活模式与词汇编码阶段的关联度会影响词汇回忆正确率, 而 VR 学习环境所提供的情境信息有助于外语词汇学习与保持(Essoe et al., 2022)。

为什么 VR 环境能促进外语词汇习得? “具身

收稿日期: 2025-09-25

* 国家社会科学基金一般项目(25BYY080)资助。

通信作者: 王瑞明, E-mail: wangrm@scnu.edu.cn

认知理论”(Embodied Cognition Theory)认为,认知活动是基于个体身体与外部环境的互动经验所形成的一种全身性、情境性活动(Barsalou, 2008)。聚焦到外语学习领域,“二语社会学习理论”(Social L2 Learning)也强调在真实或虚拟仿真语言环境下,个体与环境、物体以及他人的互动可以获得丰富的语言信息和知觉信息,进而实现类似于母语学习的具身效果(Li & Jeong, 2020)。另一方面,“沉浸式学习的认知情感模型”(The Cognitive Affective Model of Immersive Learning)认为,VR环境下的学习效果不仅与学习过程中的兴趣、动机、认知负荷等因素有关,也与学习内容和测试任务特点相关(Makransky & Petersen, 2021)。

从词汇习得效果来看,成功习得一个外语词汇意味着学习者能够掌握音形义,即识别字形、理解语义并清晰地进行发音(Wallace, 1982)。需要注意的是,目前关于VR与外语词汇习得的实验证据仅关注字形识别(Jiao et al., 2024)和语义理解层面(Legault, Fang et al., 2019; Liu et al., 2024),尚未关注到VR学习环境如何影响外语词汇的产出过程。词汇理解不同于词汇产出过程,前者侧重从词汇输入到概念加工过程,而后者则侧重从概念加工到词汇输出的认知过程,表现为学习者通过语言器官把想要表达的想法说出来(彭聃龄, 2004)。由于两者存在一定的差异,我们不能简单地依据词汇理解层面的证据来推论VR环境下所学外语词汇的产出过程。

基于上述研究现状,本研究关注的问题是VR环境与图词环境下所学习外语词汇的产出效果是否存在差异?这种差异背后的神经机制是什么?其一,在行为效果层面,具身认知理论和二语社会学习理论较一致地认为VR环境中的全身互动经验会促进外语词汇习得,那么这种促进作用也应该体现在词汇产出层面。然而,这种假设可能低估了多模态感觉信息的冗余性对外语词汇习得的潜在干扰作用(高媛等, 2016)。“认知负荷理论”(Cognitive Load Theory)认为,学习依赖于内在认知负荷和外在认知负荷,前者是学习任务自身的或与其相关的认知加工,而后者则是与学习目标无关的认知处理(Sweller, 2011)。一些研究发现,相较于传统学习环境,VR环境中的冗余信息可能增大了学习者的外在认知负荷,从而可能降低学习效果(Papin & Kaplan-Rakowski, 2024)。因此,VR环境如何影响外语词汇的产出效果尚不清晰。其二,在神经机制层

面,目前相关的脑电证据均采用事件相关电位(event-related potential, ERP)分析脑电时域特征,忽略了词汇加工过程中的神经振荡活动(neural oscillations)。传统的ERP分析主要反映锁时且锁相活动,揭示认知加工的时间进程(Bastiaansen et al., 2012);时频分析则能够较好地反映出锁时非锁相活动,揭示认知加工过程中神经振荡模式的变化(Schneider et al., 2021),但这些活动在经过叠加平均后往往被抵消,无法通过ERP分析显现。因此,有必要结合ERP和时频分析,从而更好地揭示VR环境影响外语词汇产出的神经机制。

结合外语加工和记忆领域的研究,本研究在脑电时域层面关注P200成分和晚期正成分(LPC)。P200成分是刺激呈现后200ms左右出现的正走向波,反映了刺激加工的早期阶段,与选择性注意、工作记忆密切联系(Lijffijt et al., 2009)。外语加工的相关研究表明,相较母语词汇阅读任务,外语词汇诱发的P200波幅会增加,这可能是因为外语词汇的加工难度更大、注意卷入程度更高(Midgley et al., 2009)。LPC成分被认为是情景记忆提取、认知资源投入、精细化加工的重要指标(车晓玮等, 2021; Rugg & Curran, 2007)。以往外语加工的研究发现,图片命名任务的目标词汇提取难度越大,这一过程将消耗更多认知资源,从而产生更大的LPC成分(Martin et al., 2013)。

神经振荡反映了大脑神经元的节律性反应,而时频分析是解析事件相关神经振荡的常用方法(Ward, 2003)。目前关于VR环境与外语词汇习得的神经振荡研究只有一项,即Zappa等人(2024)采用被动倾听任务比较VR环境条件和动作条件下所学习外语词汇诱发的神经振荡强度,结果发现不同学习条件在 μ 频段(8~13 Hz)和 β 频段(13~30 Hz)不存在差异。然而,有研究以语言符号学习条件为对照,结果发现多模态知觉符号学习条件明显提高外语词汇习得效果,并引发 μ 频段(8~13 Hz)和 θ 频段(4~7 Hz)神经振荡的能量变化(任维聪等, 2024)。据此,在脑电时频域层面,本研究需要关注 μ 频段,因为它是大脑镜像神经元活动的有效标记物,而镜像神经元被视为知觉模拟的神经基础(Brunsdon et al., 2019)。在本研究中,图片命名时的词汇提取过程可能受到先前编码的感知觉-运动信息的影响,使得VR环境下所学外语词汇的知觉模拟更强,进而表现出 μ 波抑制现象。另外,以往研究发现, θ 频段神经振荡的能量变化与记忆检索(Herweg et al.,

2020)、音节信息加工(蒋宇宸等, 2020)密切相关。

综上所述, 为了检验 VR 学习环境对外语词汇产出的影响, 本研究以传统图-词配对学习环境为参照, 采用图片命名任务, 一方面通过行为指标探讨 VR 环境和图-词环境下所学外语词汇的产出效果差异, 另一方面结合相关脑电时域特征(P200 和 LPC 成分)和时频域特征(μ 频段和 θ 频段)揭示这一影响背后的神经机制。结合具身认知等理论以及以往研究证据, 本研究假设如下: (1)VR 学习环境会促进外语词汇产出, 其命名正确率和命名速度优于图词环境; (2)VR 环境下外语词汇产出过程的提取难度更小, 诱发的 P200 和 LPC 波幅小于图词环境; (3)VR 学习环境所呈现的感知觉-运动信息可能影响外语词汇产出, 表现出 μ 波能量抑制效应和 θ 波能量增强效应。

2 方法

2.1 被试

利用 G*Power 软件计算所需样本量, 依据中等效果量 $f=0.25$, 当 $\alpha=0.05$, 统计功效为 0.8 时, 在单因素两水平被试内设计中所需最少样本量为 24 人(Faul et al., 2007)。本实验实际招募在校大学生 35 人进行实验, 所有被试均为右利手, 视力或矫正视力正常, 其中 6 名被试因脑电伪迹较多予以剔除, 最终保留 29 名被试(年龄: 20.10 ± 1.20 岁, 25 名女性)的有效数据。所有被试的母语均为汉语, 具备英语学习经验, 但均未学习过德语。被试均签署知情同意书, 在实验后获得一定报酬。

2.2 实验设计

本实验为单因素两水平的被试内设计。自变量为学习环境, 包括 VR 学习环境和图词学习环境。因变量为不同环境下所学词汇的产出效果, 其中行为指标包括即时测试阶段和延迟测试阶段的反应时和正确率, 脑电指标包括即时测试阶段诱发的 P200 成分、LPC 成分, 以及时频域的 μ 波和 θ 波。

2.3 实验材料

本实验的学习材料为 40 个德语词汇, 在 VR 环境和图词环境下进行学习。沉浸式 VR 学习环境是利用 Unity 软件(<https://unity.com>)模拟日常家庭生活场景, 包含客厅、卧室和厨房, 其相应的学习材料为 3D 客体, 选自标准化 3D 客体数据库(Peeters, 2018)。图词学习环境是通过电脑屏幕呈现, 其相应的学习材料为黑白线条画, 选自标准化图片数据库(张清芳, 杨玉芳, 2003)。考虑到学习材料与 VR 学习环境的适配性, 所有学习词汇均与日常家庭生活环境相关。此外, 本实验招募了一组与正式实验被试英语水平相当的汉-英双语者, 要求他们评定所筛选的德语词汇是否与他们已知的汉语或英语词汇相似。基于 5 点量表(1 = 非常不相似, 5 = 非常相似)的评定结果表明, 本实验的德语词汇与汉语和英语词汇均不相似($p < 0.001$), 排除了已有的英语词汇知识对德语词汇学习的影响。

2.4 实验流程与任务

实验流程分为学习阶段和测试阶段, 其中 1~3 天为学习阶段, 第 4 天的即时测试同步采集行为和脑电数据, 一周后的延迟测试仅采集行为数据。

在学习阶段, 被试需要在两种不同环境下学习 40 个德语词汇。所有德语词汇分为两组, 其中一组(20 个词汇)在图词环境中进行学习, 另一组(20 个词汇)在 VR 环境中进行学习(图 1)。学习材料在不同环境之间进行平衡, 即一半被试在 VR 环境中学习第一组德语词汇, 在图词环境中学习第二组德语词汇, 而另一半被试在图词环境中学习第一组德语词汇, 在 VR 环境中学习第二组德语词汇。对于 VR 学习条件, 被试需要熟悉 VR 环境和 HTC VIVE 设备。借助于头戴式显示器, 被试可以与 VR 环境进行自然交互, 会感觉身临其境; 借助于手柄操作, 被试可以选择目标物体并听到该物体对应的名称。在熟悉 VR 设备之后, 被试通过操作手柄选择目标 3D 客体, 然后通过耳机听到相应的德语词汇。而图



图 1 VR 学习环境示意图

词学习环境是在电脑屏幕上呈现 2D 线条画, 同时通过耳机播放对应的德语词汇, 被试通过按键进入下一个德语词汇的学习。被试每天在 VR 环境和图词环境中各学习 15 分钟, 学习顺序在不同被试之间进行平衡。为了控制疲劳效应, 被试在不同学习环境之间进行充分休息。

在测试阶段, 所有被试都需要完成图片命名任务, 要求被试使用德语词汇命名电脑屏幕所呈现的图片。为了保证学习阶段与测试阶段的图片材料一致性, 对于图词环境下所学词汇的测试图片与学习阶段相同, 而 VR 环境下所学词汇的测试图片为 3D 客体的平面截图。每个被试完成 80 个试次, 每个目标图片呈现两次。在每个试次中, 首先呈现 500 ms 注视点, 在 200 ms 空屏之后呈现目标图片, 被试需要说出所呈现图片对应的德语词汇, 1000 ms 空屏之后进入下一个试次。测试任务是在计算机上进行, 采用 E-prime 软件编程, 利用语音盒自动记录图片命名的反应时。延迟测试阶段的任务相同, 但仅记录行为数据。

2.5 脑电记录和预处理

采用 Brain Products 设备进行脑电数据采集, 根据国际 10~20 系统扩展的 64 导电极帽记录 EEG。在线记录过程中, 采样率为 1000 Hz, 各电极与头皮之间的阻抗小于 5 k Ω , 在线滤波带通为 0.05~100 Hz, 在线参考电极为 FCz。离线分析时, 参考电极转为双侧乳突平均作为参考, 滤波带通为 0.5~30 Hz。通过 ICA 分析(Independent Component Analysis)矫正眨眼、心电等伪迹, 并在分段和基线校正之后排除反应错误的分段以及波幅在 $\pm 80 \mu\text{V}$ 以外的伪迹信号。

对于时域 ERP 分析, 以图片呈现前 200 ms 和呈现后 800 ms 的时间段对连续 EEG 数据进行分段, 基线校正参考图片呈现前的 -200~0 ms 的脑电活动。结合前人研究, ERP 平均波幅分析划分了 5 个电极区域, 包括前额区(F1、FZ、F2)、额-中央区(FC1、FCZ、FC2)、中央区(C1、CZ、C2)、中央-顶区(CP1、CPZ、CP2)和顶区(P1、PZ、P2)。通过平均指定区域内记录电极的波幅, 对不同学习环境下的 P200 (150~250 ms)和 LPC (400~550 ms)成分进行统计分析。

对于时频分析, 采用短时傅里叶变换方法, 使用窗宽为 200 ms 的汉宁窗, 将所有试次的 EEG 信号转换为时间-频率的信号。首先重新以图片呈现前 500 ms 和呈现后 800 ms 的时间段截取 EEG 数据,

然后对每个试次, 在每个时间点(以 1 ms 为步长)、每个频率(1~30 Hz, 以 1 Hz 为步长)进行一次短时傅里叶变换, 并将得到的频谱图在每个频率上进行基线校正(Fernandez et al., 2019; Liu et al., 2017)。结合前人研究与本研究的频谱图, 选取 150~250 ms 和 400~550 ms 时间窗的 μ 波(8~12 Hz)和 θ 波(4~7 Hz)的平均能量进行统计分析(任维聪 等, 2024; Jiao et al., 2025)。

对于数据统计分析, 本实验采用了传统的假设检验和贝叶斯因子分析。采用 R 软件进行传统的假设检验, 采用 JASP 软件进行贝叶斯因子分析(Wagenmakers et al., 2018)。贝叶斯因子分析能够量化支持备择假设(H_1)相对于零假设(H_0)的证据强度, 而不仅仅是对零假设进行二分判断, 进而弥补了传统假设检验的局限(胡传鹏 等, 2018)。其中, 先验分布采用了 $\gamma \approx 0.707$ 柯西(Cauchy)分布(Jeffreys, 1961)。

3 结果

3.1 行为结果

即时测试阶段: 首先删除反应错误数据(9.18%)、极端数据(< 200 ms 或 > 5000 ms; 0.73%), 以及 $\pm 2.5 SD$ (3.41%)之外的反应时数据。然后, 对 VR 和图词条件下的反应时和正确率(图 2)进行配对样本 t 检验。反应时结果表明, VR 环境(1375.66 ± 227.07 , 平均数 \pm 标准差, 下同)与传统图词环境(1342.56 ± 223.25)之间没有显著差异, $t(28) = 1.37$, $p = 0.18$, $d = 0.14$, 90% CI = [-0.03, 0.32]; 贝叶斯因子分析结果进一步表明, 反应时指标的贝叶斯因子为 $BF_{01} = 2.17$, 说明在(假定没有效应的)零假设下出现当前数据的可能性是在(假定存在效应的)备择假设下可能性的 2.17 倍, 表明有较弱强度的证据支持接受零假设 H_0 (Jeffreys, 1961), 即不同环境下所学习外语词汇的命名反应时无显著差异。正确率结果表明, 被试在 VR 环境下所学习词汇的命名正确率(0.92 ± 0.09)显著高于传统图词环境(0.89 ± 0.10), $t(28) = 2.40$, $p = 0.02$, $d = 0.33$, 90% CI = [0.09, 0.56]; 贝叶斯因子分析结果进一步表明, 正确率指标的 $BF_{01} = 0.41$, 表明有较弱强度的证据支持备择假设 H_1 , 即与传统图词环境相比, VR 环境下所学习词汇的命名正确率显著更高。

延迟测试阶段: 数据处理标准和分析方法同上, 删除了反应错误数据(8.96%)、极端数据(1.25%), 以及 $\pm 2.5 SD$ (3.15%)之外的反应时数据。反应时结果

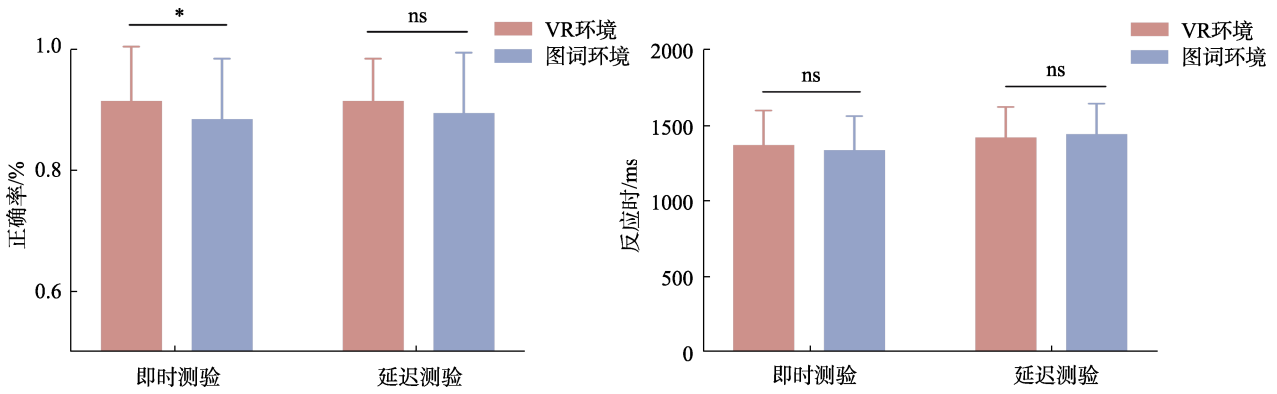


图 2 VR 和图词环境下所学外语词汇的命名正确率(左图)和反应时(右图)

注: * $p < 0.05$, ns 表示无显著差异。

表明, 经过一周的延迟, VR 环境(1426.05 ± 199.91)与传统图词环境(1447.69 ± 200.76)之间的反应时没有显著差异, $t(28) = 1.00, p = 0.32, d = 0.10, 90\% CI = [-0.07, 0.28]$; 贝叶斯因子分析结果也表明, 反应时指标是中等强度的证据支持接受零假设 H_0 ($BF_{01} = 3.20$) (Jeffreys, 1961), 即两种环境下所学外语词汇的命名反应时无显著差异。正确率结果表明, 被试在 VR 环境下所学习词汇的命名正确率(0.92 ± 0.07)与传统图词环境(0.90 ± 0.10)无显著差异, $t(28) = 1.90, p = 0.06, d = 0.25, 90\% CI = [0.02, 0.47]$; 贝叶斯因子分析结果也表明, 在正确率指标上有较弱强度的证据支持接受零假设 H_0 ($BF_{01} = 1.04$), 即两种环境下所学词汇的命名正确率无显著差异。

3.2 脑电时域结果

即时测试阶段的脑电平均波幅图如图 3 所示, 对 P200 平均波幅进行 2 (学习环境) \times 5 (电极位置)

的两因素重复测量方差分析。结果表明, 学习环境的主效应显著, $F(1, 28) = 19.85, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.42, 90\% CI = [0.18, 0.59]$, 贝叶斯因子为 $BF_{01} = 0.01$, 说明有极强强度的证据支持接受备择假设 H_1 , 表现为图词环境下所学词汇诱发的 P200 成分显著大于 VR 环境。电极位置的主效应不显著, $F(4, 112) = 2.19, p = 0.07, \eta_p^2 = 0.07, 90\% CI = [0.00, 0.13]$, $BF_{01} = 1.00$ 。重要的是, 两者的交互作用显著, $F(4, 112) = 25.04, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.47, 90\% CI = [0.35, 0.56]$, 这一效应也得到极强强度的证据支持 ($BF_{01} = 3.67 \times 10^{-12}$)。简单效应分析显示, 不同学习环境下所学词汇诱发的 P200 波幅在前额区 ($p < 0.001, \eta_p^2 = 0.54$)、额中央区 ($p < 0.001, \eta_p^2 = 0.50$)、中央区 ($p < 0.001, \eta_p^2 = 0.43$) 和中央顶区 ($p = 0.002, \eta_p^2 = 0.30$) 存在显著差异, 但在顶区不存在显著差异 ($p = 0.09, \eta_p^2 = 0.10$)。

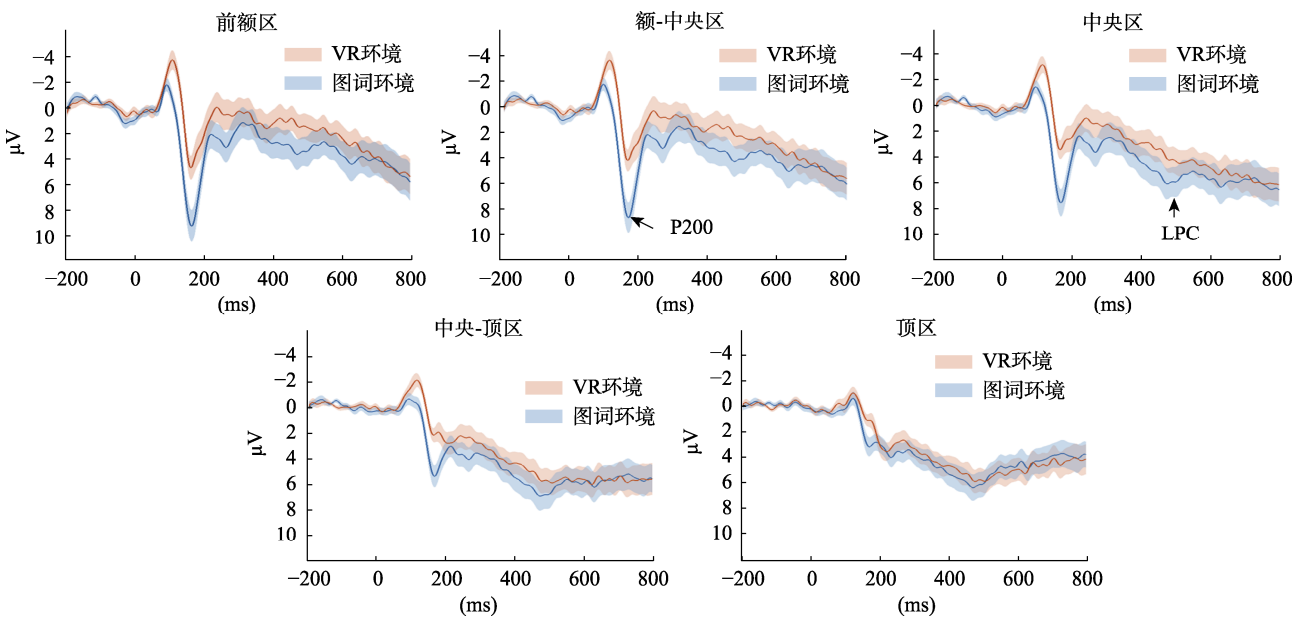


图 3 VR 和图词环境下词汇命名诱发的 P200 和 LPC 波形图

对于 LPC 平均波幅, 两因素重复测量方差分析结果表明, 电极位置的主效应显著, $F(4, 112) = 26.48, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.48, 90\% CI = [0.37, 0.56]$, 贝叶斯因子 $BF_{01} = 2.82 \times 10^{-13}$, 说明有极强强度的证据支持接受备择假设 H_1 (Jeffreys, 1961)。学习环境的主效应不显著, $F(1, 28) = 3.17, p = 0.08, \eta_p^2 = 0.10, 90\% CI = [0.00, 0.29]$, 贝叶斯因子分析发现 $BF_{01} = 0.90$, 也表明较弱强度的证据支持接受备择假设 H_1 。此外, 两因素的交互作用显著, $F(4, 112) = 9.63, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.26, 90\% CI = [0.13, 0.35]$ 。简单效应分析显示, 在前额区($p = 0.03, \eta_p^2 = 0.15$)、额中央区($p = 0.03, \eta_p^2 = 0.14$)、中央区($p = 0.04, \eta_p^2 = 0.13$), 图词环境下所学词汇诱发的 LPC 波幅显著大于 VR 环境, 但是在中央顶区($p = 0.17, \eta_p^2 = 0.06$)、顶区($p = 0.59, \eta_p^2 = 0.01$)不存在显著差异。贝叶斯因子分析发现交互作用的贝叶斯因子 $BF_{01} = 0.86 \times 10^{-4}$, 表明极强强度的证据支持接受备择假设 H_1 (Jeffreys, 1961)。

3.3 脑电时频域结果

时频分析如图4所示, 对 μ 频段在 150~250 ms 时间窗的重复测量方差分析结果表明, 学习环境的主效应显著, $F(1, 28) = 14.54, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.34, 90\% CI = [0.12, 0.53]$, 贝叶斯因子为 $BF_{01} = 0.02$,

表明非常强的证据支持学习环境的效应(备择假设 H_1)。电极位置的主效应显著, $F(4, 112) = 15.45, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.35, 90\% CI = [0.23, 0.48]$, $BF_{01} = 3.23 \times 10^{-8}$ 。而且, 两因素的交互作用显著, $F(4, 112) = 11.50, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.29, 90\% CI = [0.16, 0.38]$, $BF_{01} = 9.05 \times 10^{-6}$, 表明极强强度的证据支持接受备择假设 H_1 (Jeffreys, 1961)。简单效应分析显示, 在前额区($p < 0.001, \eta_p^2 = 0.38$)、额中央区($p < 0.001, \eta_p^2 = 0.39$)、中央区($p = 0.001, \eta_p^2 = 0.32$)和中央顶区($p = 0.03, \eta_p^2 = 0.15$), VR 环境所学词汇的 μ 波能量均显著低于图词环境所学词汇, 但这一差异没有出现在顶区($p = 0.26, \eta_p^2 = 0.04$)。

对 μ 频段在 400~550 ms 时间窗的重复测量方差分析结果表明, 学习环境的主效应显著, $F(1, 28) = 6.61, p = 0.01, \eta_p^2 = 0.19, 90\% CI = [0.02, 0.39]$, $BF_{01} = 0.27$, 表明中等强度的证据支持学习环境效应。电极位置的主效应不显著, $F(4, 112) = 0.52, p = 0.72, \eta_p^2 = 0.01, 90\% CI = [0.00, 0.04]$, $BF_{01} = 29.47$ 。两因素的交互作用显著, $F(4, 112) = 4.80, p = 0.001, \eta_p^2 = 0.15, 90\% CI = [0.04, 0.23]$, $BF_{01} = 0.03$, 表明显著的交互作用得到非常强的证据支持(Jeffreys, 1961)。简单效应分析显示, 在前额区($p = 0.006, \eta_p^2 = 0.24$)、额中央区($p = 0.009, \eta_p^2 = 0.22$)和中央区($p =$

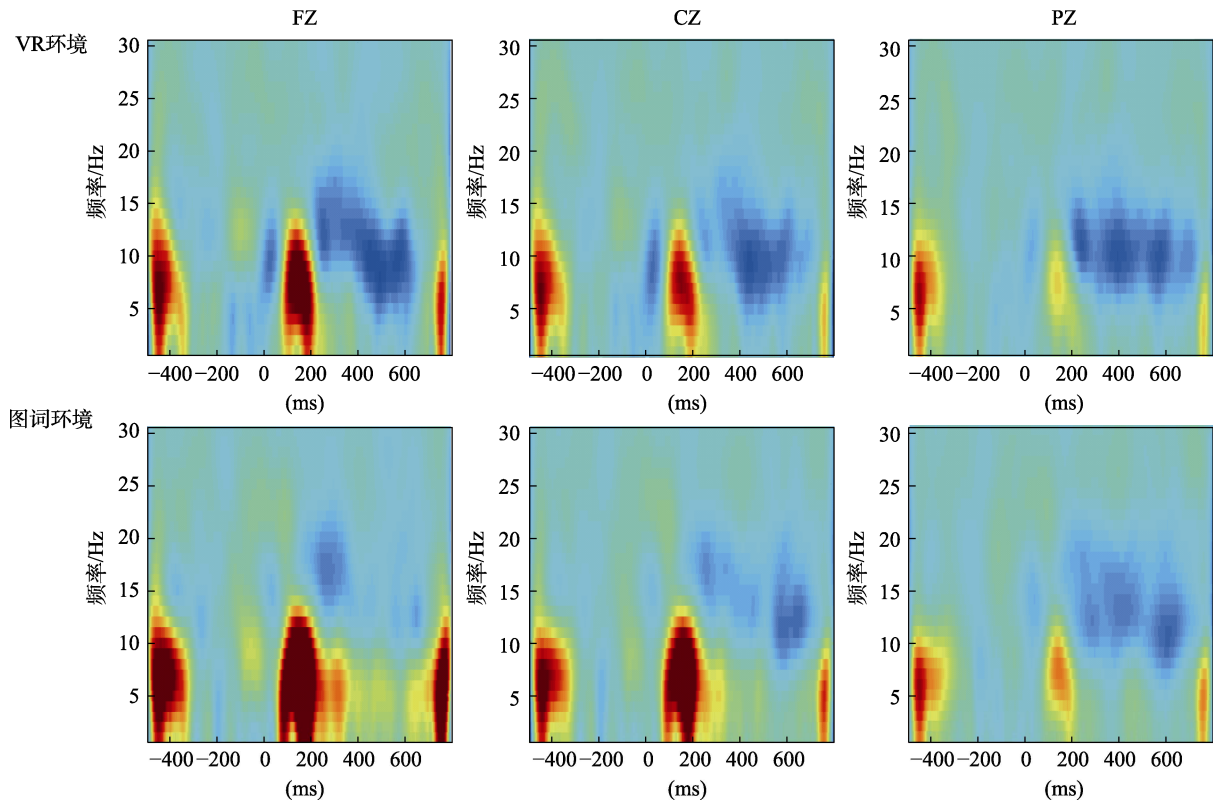


图4 VR和图词环境下词汇命名诱发的 μ 频段和 θ 频段频谱图

0.03, $\eta_p^2 = 0.15$), VR 环境所学词汇的 μ 波能量均显著低于图词环境所学词汇, 但这一差异没有出现在中央顶区($p = 0.36$, $\eta_p^2 = 0.03$)和顶区($p = 0.12$, $\eta_p^2 = 0.08$)。

对 θ 频段在 150~250 ms 时间窗的重复测量方差分析结果表明, 学习环境的主效应显著, $F(1, 28) = 10.64$, $p = 0.003$, $\eta_p^2 = 0.27$, 90% CI = [0.07, 0.47], $BF_{01} = 0.07$; 电极位置的主效应显著, $F(4, 112) = 12.58$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.31$, 90% CI = [0.18, 0.40], $BF_{01} = 1.21 \times 10^{-6}$ 。此外, 两因素的交互作用显著, $F(4, 112) = 8.62$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.23$, 90% CI = [0.11, 0.33], $BF_{01} = 3.10 \times 10^{-4}$, 表明极强强度的证据支持接受备择假设 H_1 。简单效应分析显示, 图词环境所学词汇的 θ 波能量增强主要表现在前额区($p = 0.003$, $\eta_p^2 = 0.27$)、额中央区($p = 0.002$, $\eta_p^2 = 0.29$)和中央区($p = 0.002$, $\eta_p^2 = 0.28$), 其他脑区位置的 θ 波能量在两个水平之间差异不显著($ps > 0.05$)。

对 θ 频段在 400~550 ms 时间窗的重复测量方差分析结果表明, 学习环境的主效应显著, $F(1, 28) = 9.16$, $p = 0.005$, $\eta_p^2 = 0.25$, 90% CI = [0.05, 0.45], $BF_{01} = 0.11$, 表明这一效应得到中等强度的证据支持。电极位置的主效应显著, $F(4, 112) = 0.53$, $p = 0.71$, $\eta_p^2 = 0.02$, 90% CI = [0.00, 0.04], 贝叶斯因子为 $BF_{01} = 27.91$, 表明较强强度的证据支持接受零假设 H_0 (即电极位置无效应)。两因素的交互作用显著, $F(4, 112) = 3.67$, $p = 0.008$, $\eta_p^2 = 0.11$, 90% CI = [0.02, 0.19], $BF_{01} = 0.16$, 表明中等强度的证据支持接受备择假设 H_1 (Jeffreys, 1961)。简单效应分析显示, 图词环境所学词汇在前额区($p = 0.01$, $\eta_p^2 = 0.20$)、额中央区($p = 0.01$, $\eta_p^2 = 0.21$)和中央区($p = 0.005$, $\eta_p^2 = 0.25$)出现更为显著的 θ 波能量增强效应。

4 讨论

本研究采用图片命名任务, 考察了沉浸式 VR 学习环境对外语词汇产出的影响。行为结果发现, VR 条件下所学外语词汇在即时测试中表现出更高的正确率。即时测试阶段的 ERP 分析发现, 相较于图词条件, VR 条件下所学外语词汇诱发了更小的 P200 成分和 LPC 成分; 时频分析发现, VR 条件比图词条件出现更强烈的 μ 波抑制现象, 并伴随着 θ 波能量减弱。这些结果为 VR 环境影响外语词汇产出提供了 EEG 证据, 支持了具身认知理论。

首先, 本研究的行为结果表明, 相较于传统图词环境, VR 环境下所学外语词汇出现明显的词汇产

出优势, 表现为即时测试的图片命名正确率更高, 与前人研究相一致。例如, Tai 等人(2022)比较 2D 视频条件和 VR 条件下的词汇学习效果, 结果发现 VR 条件下所学词汇在测试中表现更好。Fuhrman 等人(2021)发现在 VR 学习环境下, 被试通过执行相关动作进行词汇学习时, 图词匹配任务的正确率明显高于执行无关动作的学习条件。这些研究提示我们多模态信息整合对词汇习得的促进作用。在沉浸式虚拟环境中, 外语词汇被具象化为真实物体, 学习者可以通过视觉、听觉、触觉来增强物理沉浸感, 实现身临其境的沉浸式、情境性学习。同时, 学习者能以第一人称的视角探索虚拟环境, 操作外语词汇所对应的 3D 客体, 深入整合外语词汇相关的语言信息和非语言信息(Li & Jeong, 2020)。需要注意的是, 以往针对 VR 和外语学习的研究聚焦于词汇理解, 强调多模态的感知觉-运动信息会提高外语词汇的理解效果, 例如浅层次的词汇再认(Fuhrman et al., 2021; Liu et al., 2026)、深层次的语义整合(Jiao et al., 2026; Liu et al., 2024), 而本研究则聚焦外语词汇的产出层面。在本研究中, 即时测试观察到的外语词汇产出差异可能与 VR 环境的沉浸式和交互性特征相关。相较传统图词学习环境, VR 环境所提供的视觉、听觉、运动等非语言信息可能增强了外语词汇知识的记忆和表征, 使得被试在命名任务中实现更为准确的词汇提取。这一推测与既往实证研究(Legault, Fang et al., 2019)和具身认知理论(Barsalou, 2008)相呼应。

其次, 对于词汇产出过程的脑电时域特征, 本研究发现 VR 环境所学外语词汇诱发的 P200 和 LPC 成分更小, 主要集中在前额区、额中央区 and 中央区。以往研究表明, P200 成分与选择性注意有关, 更大的 P200 成分意味着加工难度增大, 注意资源需求增加(Midgley et al., 2009)。在本研究中, P200 波幅的变化可能与学习阶段的信息编码相关, 相较于图词环境下的单模态信息编码, VR 学习环境可能有助于多模态信息与语义网络的整合, 加深词汇信息与非语言感觉信息(图片、动作等)之间的联结。因此, 当测试阶段呈现图片时, 图词环境下所学词汇只能激活抽象的母语语言符号或单一的图片信息, 而 VR 环境下所学词汇可能会激活更多的非语言信息, 降低了词汇提取和产出的难度, 表现为 P200 波幅减小。需要注意的是, 由于本研究未能采集学习编码阶段的神经活动, 这一推测值得进一步考察。对于反映情景记忆提取、策略化加工的晚期

LPC成分(Kutas & Federmeier, 2011; Rugg & Curran, 2007), 本研究发现VR条件下所学词汇诱发的LPC成分明显小于图词条件。在VR条件下, 外语词汇的产出过程可以借助于先前编码的情景记忆线索, 实现更加自动化的词汇加工, 但在图词条件下被试无法进行情景记忆编码, 因此词汇产出可能更依赖于策略化加工, 需要占用更多的注意资源进行语义检索和词汇提取。相一致的, 传统环境下的外语词汇习得研究也发现, 当通过词词/图词匹配习得外语词汇时, 其语义检索和整合效应表现在LPC成分, 表明策略化加工机制的参与(Lei et al., 2022)。

再次, 两种学习环境对词汇产出的影响也体现在脑电时频域层面, 表现为 μ 频段和 θ 频段的能量变化。一方面, 相较于图词环境, VR环境下所学外语词汇出现了更强烈的 μ 波抑制现象, 与前人研究所发现的知觉符号作用相一致(任维聪等, 2024)。 μ 频段的能量变化与镜像神经元的活动有关, 反映了知觉模拟参与的认知加工(Brunsdon et al., 2019)。在本研究中, 被试在VR词汇学习过程中都是通过感知-运动模拟来实现情境化的多模态认知加工, 例如利用头戴式VR设备与3D客体进行实时互动等。这一学习过程伴随着神经镜像元的活跃, 可能使得知觉模拟信息和外语词汇信息深度捆绑, 并在词汇产出过程中得到激活, 从而诱发 μ 波抑制现象。然而图词环境所习得的外语词汇, 在先前编码阶段难以实现充分的知觉模拟, 镜像神经元活动较弱, 使得 μ 波抑制现象并不明显。另一方面, 本研究中的VR环境未能观察到 θ 频段能量增强效应, 这一结果不符合本研究的预期。在以往的词汇理解任务中, 研究者发现知觉信息丰富的学习条件会产生 θ 波能量增强效应, 而不是本研究所观察到的VR条件的 θ 波能量减弱。这种不一致的结果可能是因为外语词汇加工的认知需要差异: 本研究中的词汇产出任务需要正确报告图片对应的外语词汇, 侧重于语音信息的输出; 而以往研究采用的词汇理解任务需要识别外语词汇, 侧重于语音或字形信息的输入(任维聪等, 2024)。当然, 本研究未能同时考察VR环境对外语词汇产出和词汇理解的神经机制, 该推测有待进一步验证。

最后, 从理论贡献层面, 一方面, 本研究揭示了VR环境中所学外语词汇的产出优势, 为具身认知理论(Barsalou, 2008)以及二语社会学习理论(Li & Jeong, 2020)提供了新的实证支持。VR环境中的感知-运动交互使得学习者能够将外语词汇信息与

多模态的感知-运动信息进行深度整合, 增强词汇表征与感官特征之间的联结, 从而促进外语词汇的习得与产出(石如彬等, 2022; 杨静, 王晓婵, 2023)。这一推论与以往相关脑成像研究相一致, 例如, Legault和Fang等人(2019)发现VR环境中的外语学习效果与右侧顶上小叶皮层厚度密切相关, 而该区域正是负责感知-动作整合与具身表征的关键脑区。这些研究证据共同表明, 感知-运动交互可能是VR环境促进外语词汇产出的重要机制。另一方面, 本研究有助于我们深入认识VR学习中认知负荷的作用模式。虽然认知负荷理论(Sweller, 2011)指出学习环境中的多模态冗余信息可能增加外在认知负荷并干扰学习, 但VR环境的沉浸感和交互性可以提升学习者的兴趣、动机与自我效能感, 进而增加内在认知负荷并对学习产生积极影响(Makransky & Petersen, 2021)。当内在认知负荷大于外在认知负荷时, 学习者能够将认知资源更多地投入到学习内容本身的相关要素, 从而形成有意义的生成式学习(Mayer, 2005)。因此, 我们推测VR环境的影响并非简单地增加或减少认知负荷, 而是不同类型认知负荷共同作用的结果, 未来研究有必要直接探讨不同类型认知负荷对VR环境下外语词汇学习的影响。

此外, 从实践应用层面, 随着我国教育数字化战略行动的深入实施, VR等AI技术应用到教育教学过程是一个必然趋势, 本研究综合运用AI、脑科学和认知科学等研究方法, 为外语教育数字化转型提供科学依据。目前, 虽然有研究认识到传统教学环境的局限性, 但真实环境下的外语习得研究很少(Liu et al., 2021), 其结论也难以推广, 因为学习者们不可能都有机会前往真实环境中进行外语习得(例如, 为了学习韩语而久居韩国)。随着AI技术的进步, VR技术已经从桌面式环境发展到沉浸式环境, 从单一手部控制发展到全身追踪技术, 从单人操作发展到多人互动等, 这些新技术的发展为外语习得的实证研究和教学应用提供了丰富的可能性。但需要指出的是, VR环境下的多模态信息不一定是越丰富越好。结合认知负荷理论(Sweller, 2011), 相较于图词学习环境, VR学习环境的冗余信息更多, 对无关信息的抑制控制需求更大, 认知负荷更重, 这可能导致学习者难以有效选择和整合目标信息, 反而限制了外语词汇的习得。有实证研究发现, 相较佩戴头戴显示器的高沉浸VR学习环境, 借助于桌面式设备实现的低沉浸VR学习环境更有

利于外语词汇习得, 词汇记忆效果更好(Papin & Kaplan-Rakowski, 2024)。对此, Makransky 和 Petersen (2021)提出沉浸式学习不仅受到具身因素的影响, 更是多种因素的共同作用, 包括兴趣、动机、自我效能和认知负荷等。对于本研究而言, 我们聚焦在 VR 技术所提供的多模态信息, 尤其是具身因素对外语词汇产出的影响, 还未考虑 VR 辅助的具身因素与其他因素之间的协同作用机制。未来研究可进一步综合探讨 VR 环境下认知相关因素和情感相关因素的共同作用, 并进一步考虑如何在真实教学情境中进行应用。

本研究存在一定的不足和局限, 需要在未来研究中进一步完善。首先, 本研究的 VR 学习环境虽然能够有效模拟真实环境, 但 VR 环境的三维客体与图词环境的线条图片在色彩丰富度、视觉复杂性方面存在一定差异。后续研究可以考虑采用真实图片作为对照条件, 进而控制材料差异对 VR 环境下外语词汇学习的影响。同时, 鉴于记忆研究领域的编码特异性原则(Tulving & Thomson, 1973), 当前研究尽可能控制了测试阶段与学习阶段的材料一致性, 但这使得 VR 条件和图词条件的测试图片存在差异。未来研究应设置不同类型的测试图片, 深入探究学习环境影响外语词汇产出的特异性与稳定性。此外, 由于被试取样范围的限制, 本研究仅让汉语母语者学习了德语, 且在一定程度上存在性别不平衡性。未来研究拟扩大取样范围, 结合人口学变量(如性别、年龄)和外语词汇类型(如日语词汇、假词), 进一步探索 VR 环境影响外语词汇学习的神经机制。

5 结论

本研究基于 EEG 和 VR 技术, 揭示了沉浸式 VR 环境对外语词汇产出的影响及其神经机制。行为结果表明, 相较传统的图词学习环境, VR 环境下所学外语词汇在即时测试阶段表现出一定程度的词汇产出优势。相关的神经指标表明, VR 环境通过感知觉-运动经验整合多模态信息, 增强外语词汇相关的具身信息加工, 从而促进了外语词汇的提取与产出。本研究从外语词汇产出的角度, 为具身认知理论提供了来自行为和 EEG 的证据。本研究在被试取样、材料匹配方面存在一定的不足, 未来需要结合不同的人口学和认知相关因素, 进一步探索 VR 学习环境对外语词汇产出的影响。

参 考 文 献

- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 617-645.
- Bastiaansen, M., Mazaheri, A., & Jensen, O. (2012). Beyond ERPs: Oscillatory neuronal dynamics. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *The Oxford handbook of event-related potential components* (pp.31-50). Oxford University Press.
- Brunsdon, V. E., Bradford, E. E., & Ferguson, H. J. (2019). Sensorimotor mu rhythm during action observation changes across the lifespan independently from social cognitive processes. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 38, 100659.
- Che, X., Xu, H., Wang, K., Zhang, Q., & Li, S. (2021). Precision requirement of working memory representations influences attentional guidance. *Acta Psychologica Sinica*, 53(7), 694-713.
- [车晓玮, 徐慧云, 王凯旋, 张倩, 李寿欣. (2021). 工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响. *心理学报*, 53(7), 694-713.]
- Essoe, J. K. Y., Reggente, N., Ohno, A. A., Baek, Y. H., Dell'Italia, J., & Rissman, J. (2022). Enhancing learning and retention with distinctive virtual reality environments and mental context reinstatement. *NPJ Science of Learning*, 7(1), 31.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175-191.
- Fernandez, C. B., Litcofsky, K. A., & Van Hell, J. G. (2019). Neural correlates of intra-sentential code-switching in the auditory modality. *Journal of Neurolinguistics*, 51, 17-41.
- Fuhrman, O., Eckerling, A., Friedmann, N., Tarrasch, R., & Raz, G. (2021). The moving learner: Object manipulation in virtual reality improves vocabulary learning. *Journal of Computer Assisted Learning*, 37(3), 672-683.
- Gao, Y., Liu, D. J., Huang, Z. Z., & Huang, R. H. (2016). The core factors and challenges of virtual reality technology enhanced learning. *Journal of Educational Technology & Research*, 37(10), 77-87+103.
- [高媛, 刘德建, 黄真真, 黄荣怀. (2016). 虚拟现实技术促进学习的核心要素及其挑战. *电化教育研究*, 37(10), 77-87+103.]
- Herweg, N. A., Solomon, E. A., & Kahana, M. J. (2020). Theta oscillations in human memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(3), 208-227.
- Hu, C. P., Kong, X., Wagenmakers, E. J., Ly, A., & Peng, K. (2018). The Bayes factor and its implementation in JASP: A practical primer. *Advances in Psychological Science*, 26(6), 951-965.
- [胡传鹏, 孔祥祯, Eric-Jan Wagenmakers, Alexander Ly, 彭凯平. (2018). 贝叶斯因子及其在JASP中的实现. *心理科学进展*, 26(6), 951-965.]
- Jeffreys, H. (1961). *Theory of probability* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Jiang, Y., Cai, X., & Zhang, Q. (2020). Theta band (4~8 Hz) oscillations reflect syllables processing in Chinese spoken word production. *Acta Psychologica Sinica*, 52(10), 1199-1211.
- [蒋宇宸, 蔡笑, 张清芳. (2020). θ 频段(4~8 Hz)的活动反映了汉语口语产生中音节信息的加工. *心理学报*, 52(10), 1199-1211.]
- Jiao, L., Lin, Y., Schwieter, J. W., & Liu, C. (2026). Learning novel words in an immersive virtual-reality context: Tracking lexicalization through behavioral and event-

- related-potential measures. *Language Learning*, 76(1), 5–27.
- Jiao, L., Schwieter, J. W., & Liu, C. (2025). Comprehension-based language switching in experienced and newly learned languages: Evidence from induced brain oscillations. *Journal of Neurolinguistics*, 73, 101232.
- Jiao, L., Zhu, M., Xu, Z., Zhou, G., Schwieter, J. W., & Liu, C. (2024). An ERP study on novel word learning in an immersive virtual reality context. *Bilingualism: Language and Cognition*, 27(1), 128–136.
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, 62(1), 621–647.
- Legault, J., Fang, S. Y., Lan, Y. J., & Li, P. (2019). Structural brain changes as a function of second language vocabulary training: Effects of learning context. *Brain and Cognition*, 134, 90–102.
- Legault, J., Zhao, J., Chi, Y. A., Chen, W., Klippel, A., & Li, P. (2019). Immersive virtual reality as an effective tool for second language vocabulary learning. *Languages*, 4(1), 13.
- Lei, D., Liu, Y., & van Hell, J. G. (2022). Novel word learning with verbal definitions and images: Tracking consolidation with behavioral and event-related potential measures. *Language Learning*, 72(4), 941–979.
- Li, P., & Jeong, H. (2020). The social brain of language: Grounding second language learning in social interaction. *npj Science of Learning*, 5(1), 8.
- Lijffijt, M., Lane, S. D., Meier, S. L., Boutros, N. N., Burroughs, S., Steinberg, J. L., ... Swann, A. C. (2009). P50, N100, and P200 sensory gating: Relationships with behavioral inhibition, attention, and working memory. *Psychophysiology*, 46(5), 1059–1068.
- Linck, J. A., Kroll, J. F., & Sunderman, G. (2009). Losing access to the native language while immersed in a second language: Evidence for the role of inhibition in second-language learning. *Psychological Science*, 20(12), 1507–1515.
- Liu, C., de Bruin, A., Jiao, L., Li, Z., & Wang, R. (2021). Second language learning tunes the language control network: A longitudinal fMRI study. *Language, Cognition and Neuroscience*, 36(4), 462–473.
- Liu, C., Feng, J., Schwieter, J. W., Geng, J., & Jiao, L. (2026). Neural correlates of novel word learning in an immersive virtual reality environment. *Journal of Neurolinguistics*, 78, 101300.
- Liu, C., Mao, Y., Wang, X., Schwieter, J. W., & Jiao, L. (2024). Sleep-dependent consolidation effects on foreign language word acquisition in a virtual reality environment. *Memory & Cognition*, 52(2), 302–311.
- Liu, H., Liang, L., Zhang, L., Lu, Y., & Chen, B. (2017). Modulatory role of inhibition during language switching: Evidence from evoked and induced oscillatory activity. *International Journal of Bilingualism*, 21(1), 57–80.
- Makransky, G., & Petersen, G. B. (2021). The cognitive affective model of immersive learning (Camil): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality. *Educational Psychology Review*, 33(3), 937–958.
- Martin, C. D., Strijkers, K., Santesteban, M., Escera, C., Hartsuiker, R. J., & Costa, A. (2013). The impact of early bilingualism on controlling a language learned late: An ERP study. *Frontiers in Psychology*, 4, 815.
- Mayer, R. E. (2005). Cognitive theory of multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 43–71). Cambridge University Press.
- Midgley, K. J., Holcomb, P. J., & Grainger, J. (2009). Masked repetition and translation priming in second language learners: A window on the time-course of form and meaning activation using ERPs. *Psychophysiology*, 46(3), 551–565.
- Papin, K., & Kaplan-Rakowski, R. (2024). A study of vocabulary learning using annotated 360° pictures. *Computer Assisted Language Learning*, 37(5-6), 1108–1135.
- Peeters, D. (2018). A standardized set of 3-D objects for virtual reality research and applications. *Behavior Research Methods*, 50(3), 1047–1054.
- Peng, D. L. (2004). *General psychology*. Beijing Normal University Press.
- [彭聃龄. (2004). *普通心理学*. 北京师范大学出版社.]
- Ren, W., Yang, T., & Wang, H. (2024). Different effects of linguistic and perceptual symbolic representations on foreign language vocabulary learning: Evidence from behavioral and EEG data. *Acta Psychologica Sinica*, 56(5), 542–554.
- [任维聪, 杨婷, 王汉林. (2024). 语言符号与知觉符号表征对外语词汇习得的影响比较: 来自行为与脑电的实验证据. *心理学报*, 56(5), 542–554.]
- Rugg, M. D., & Curran, T. (2007). Event-related potentials and recognition memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(6), 251–257.
- Schneider, J. M., Abel, A. D., Momsen, J., Melamed, T. C., & Maguire, M. J. (2021). Neural oscillations reveal differences in the process of word learning among school-aged children from lower socioeconomic status backgrounds. *Neurobiology of Language*, 2(3), 372–388.
- Shi, R., Xie, J., Yang, M., & Wang, R. (2022). The influence of language and context on sensorimotor simulation of concrete concepts. *Acta Psychologica Sinica*, 54(6), 583–594.
- [石如彬, 谢久书, 杨梦情, 王瑞明. (2022). 语言和情境对具体概念感知运动仿真的影响. *心理学报*, 54(6), 583–594.]
- Sweller, J. (2011). Cognitive load theory. In J. M. Spector & S. P. Lajoie (Eds.), *Psychology of learning and motivation* (Vol. 55, pp. 37–76). Academic Press.
- Tai, T. Y., Chen, H. H. J., & Todd, G. (2022). The impact of a virtual reality app on adolescent EFL learners' vocabulary learning. *Computer Assisted Language Learning*, 35(4), 892–917.
- Tulving, E., & Thomson, D. M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, 80(5), 352–373.
- Wagenmakers, E. J., Love, J., Marsman, M., Jamil, T., Ly, A., Verhagen, J., ... Morey, R. D. (2018). Bayesian inference for psychology. Part II: Example applications with JASP. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(1), 58–76.
- Wallace, M. J. (1982). *Teaching vocabulary*. London: Heinemann Educational Books.
- Ward, L. M. (2003). Synchronous neural oscillations and cognitive processes. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(12), 553–559.
- Yang, J., & Wang, X. C. (2023). Past, present, and future: Seventy years of bilingual lexical access models. *Journal of PLA University of Foreign Languages*, 46(02), 1–10+160.
- [杨静, 王晓婵. (2023). 双语心理词汇通达模型: 70年回顾与展望. *解放军外国语学院学报*, 46(02), 1–10+160.]
- Zappa, A., Bolger, D., Pergandi, J. M., Fargier, R., Mestre, D., & Frenck-Mestre, C. (2024). The neural correlates of embodied L2 learning: Does embodied L2 verb learning affect representation and retention? *Neurobiology of Language*, 5(2), 360–384.

Zhang, Q., & Yang, Y. (2003). The determiners of picture-naming latency. *Acta Psychologica Sinica*, 35(4), 447-454.

[张清芳, 杨玉芳.(2003). 影响图画命名时间的因素. *心理学报*, 35(4), 447-454.]

Effects of virtual reality learning contexts on foreign language word production: Behavioral and EEG evidence

LIU Cong¹, LIU Qiuxia¹, ZHU Mengrui², JIAO Lu¹, WANG Ruiming³

(¹ School of Education Science / Brain, Cognition, and Language Learning Laboratory, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

(² School of Foreign Languages, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(³ School of Psychology / Center for Studies of Psychological Application, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract

Vocabulary is the foundational unit of language, making word learning a key pillar of language acquisition. However, previous research has shown that word learning in a foreign language can present challenges for many individuals, particularly for adults. While some assumptions emphasize a critical period of language learning, other theories and empirical evidence point out that learning contexts play a key role. For example, compared to traditional classroom settings, immersive study abroad settings offer contextualized, real-life experience that can enhance foreign language learning outcomes. With the widespread promotion and development of innovative technologies, immersive virtual reality (VR) contexts may have similar effects given their ability to simulate language-enriching experiences through exposure to multiple types of sensory and motor information. However, very little is known about how VR contributes to foreign language learning, especially the novel word production.

The present study employed EEG technology to investigate how an immersive VR context affects novel word learning, particularly word production, and to compare these effects with those of a picture-word (PW) association learning context. During three days of learning sessions, 29 Chinese speakers were asked to learn German words, with half of words being learned in an VR context, and half via PW association context. Following three days of learning phases, participants completed the picture naming task to measure novel word learning on Day 4 and two weeks later. In the immediate post-test on Day 4, behavioral and EEG data were recorded, and in the delayed post-test two weeks later, only behavioral data were recorded.

The results of the immediate post-test showed that compared to PW-learned words, there was better behavioral performance on VR-learned words, along with decreased P200 (in the time window of 150-250 ms) and LPC (in the time window of 400-550 ms) amplitudes. Time-frequency representation analyses further revealed reduced μ power (8-12 Hz) and θ power (4-7 Hz) for VR-learned words relative to PW-learned words. However, the benefits of VR-learned words did not emerge in the delayed post-test.

Overall, the findings of the present study provide the first evidence that an immersive VR context with a rich sensory experience can have facilitative effects on novel word production. Our study also offers neural evidence for embodied cognition theory and social second language learning theory through immersive learning. It will be highly beneficial for our understanding of novel word learning if future studies continue to systematically investigate the effects of immersive learning contexts.

Keywords virtual reality, foreign word acquisition, word production, EEG, time-frequency analysis