arXiv:2602.01084v1 [cs.HC] 1 Feb 2026

# 从不可见到可行动：增强现实与室内 $CO_2$ 的交互

Prasenjit Karmakar
prasenjitkarmakar52282@gmail.com
印度理工学院卡拉格普尔分校
印度

Manjeet Yadav
p25cs0011@iitj.ac.in
印度理工学院焦特布尔分校
印度

Swayanshu Rout
22it3057@rgipt.ac.in
拉吉夫·甘地石油学院
技术
印度

Swadhin Pradhan
swapradh@cisco.com
思科系统公司
USA

Sandip Chakraborty
sandipc@cse.iitkgp.ac.in
印度理工学院卡拉格普尔分校
印度

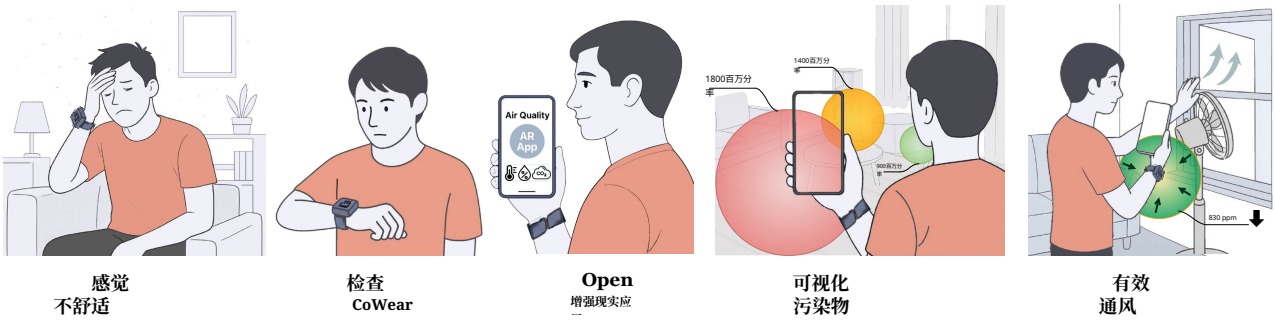



**图1：我们的系统利用增强现实（AR），使用户能够对室内空气污染形成可付诸行动的意识。(1) 当用户在室内感到不适时，(2) 可查看CoWear 腕戴式传感器，以监测实时空气质量。(3) 通过启动增强现实应用，用户可以(4) 将不可见的$CO_2$ 污染可视化为按颜色编码的空间气泡，并叠加在其所处环境中。(5) 在这些可视化的引导下，用户采用有效的通风策略，例如将气流导向高$CO_2$区域，并立即观察到污染物浓度下降，从而获得更健康的室内空气。**

## 摘要

室内二氧化碳 ($CO_2$) 会迅速累积，形成肉眼不可见的污染热点区域，由于无色无味，会带来显著的健康风险。尽管人们对用于污染物检测的可穿戴或固定式传感器越来越感兴趣，但如何有效地直观呈现 $CO_2$ 浓度并吸引人们参与，仍是一项持续面临的挑战。本文开发了一款便携式腕表大小的污染传感器，可在任何室内位置实时检测 $CO_2$，并通过突出显示浓度骤升来呈现一氧化碳$_2$ 气泡。为促进良好的通风习惯并提高用户的意识，我们还开发了一款基于智能手机的增强现实（AR）游戏，供用户寻找并驱散这些高 $CO_2$ 区域。一项针对 35 名参与者的用户研究表明，参与度有所提升，参与者对 $CO_2$健康影响的理解也有所加深。系统的可用性评估中位数得分为 1。88，表明其实用性很强。

请使用 nonacm 选项或 ACM Engage 类以启用 CC 许可。本作品[illegible] BY NC ND
署名-非商业性使用-禁止演绎 4.0 国际许可协议授权。*CHI '26，2026年4月13日至17日，西班牙巴塞罗那* © 2026 版权所有归所有者/作者所有。ACM I
SBN 979-8-4007-2278-3/2026/04 https://doi.org/10.1145/3772318.3791951

## CCS 概念

• **以人为中心的计算** → 普适与移动计算系统及工具；**可视化**；交互设计。

## 关键词

增强现实；污染可视化；互动游戏；可穿戴设备

**ACM 参考文献格式：**
Prasenjit Karmakar、Manjeet Yadav、Swayanshu Rout、Swadhin Pradhan 和 Sandip Chakraborty。2026。从不可见到可行动：增强现实与室内一氧化碳$_2$的交互。载于*2026*年计算机系统中的人为因素 *CHI* 会议论文集（*CHI '26*），*2026*年*4*月*13*日至*17*日，西班牙巴塞罗那。ACM，美国纽约州纽约市，共20页。https://doi.org/10. 1145/3772318.3791951

## 1 引言

**动机。** 空气污染仍然是我们这个时代最紧迫的环境与公共卫生挑战之一。尽管通过感知、可视化和社区参与方面的研究，室外污染已在HCI领域受到广泛关注 [27, 29, 30,41, 43, 45, 66]，但室内环境却相对缺乏研究，尽管已有证据表明，室内空气质量可能同样有害，甚至危害更大 [20]。挥发性有机化合物、CO、$CO_2$, 以及其他室内

气体会损害呼吸功能和认知功能 [55]。然而，大多数污染物对occupants而言仍然不可见、无味且无法感知。鉴于人们有多达90%的时间是在室内度过的 [52, 76], ，提高人们对室内空气质量的认识并推动采取切实可行的策略，是HCI面临的一项关键挑战。

尽管室内污染物对健康的影响已有充分记录，但大多数 occupants 并不了解自身当前所处的暴露情况，也缺乏监测这种暴露的手段。传统的感测方法通常依赖放置在固定位置的固定监测器。然而，这些监测器难以在高密度空间尺度上部署，而且往往无法提供对 occupants 具有个人意义的信息。这一局限造成了感知与可采取行动的意识之间的脱节。相比之下，可穿戴设备通过将感知功能移近个人，为用户中心的个人暴露实时测量提供了一种有前景的替代方案 [34, 46]。

结合增强现实（AR）后，可穿戴设备的数据能够在原位进行可视化，并锚定于用户周围的即时环境和具身视角之中 [7, 49]。移动设备上的 AR 已成为增强人类环境感知能力并支持新型交互的强大媒介 [10]。既有研究展示了 AR 的广泛适用性：从实现与三维深度图的交互 [18], 、支持老年人的数字素养 [35], 、促进购物 [1, 6], , 到协助用户在陌生的智能空间中导航 [14]。更广泛而言，AR 还通过沉浸式、情境化的意识体验促进了环境可持续性 [11, 15, 57, 69]。通过将不可见的环境数据融入日常感知，抽象的传感器读数可以转化为情境化且交互式的可视化。将这些路径结合起来，不仅能够让用户持续监测，还能帮助他们理解不可见的污染物并采取行动。

**研究目标**。 本文聚焦于二氧化碳（$CO_2$）——一种在日常讨论中常被忽视、却与重大健康风险相关的污染物。浓度超过 1000 ppm 时，可能损害认知能力；超过 2000 ppm 时，则会引发头痛、恶心和注意力下降 [8, 59, 73]。长期暴露于此类浓度下还可能导致高碳酸血症，即血液中 $CO_2$ 过量的一种状况；对于老年人以及患有慢性阻塞性肺疾病（COPD）、肥胖低通气综合征或哮喘等呼吸系统疾病、气体交换能力已受损的人群而言，这种状况尤其危险 [16, 75]。即使是健康个体，在室内 $CO_2$ 浓度持续超过建议阈值时，也可能出现头晕、嗜睡或工作表现下降 [3, 17, 21]。

在室内，人体呼吸、烹饪和燃烧都会导致 $CO_2$ 积聚，其积聚模式受房间大小、通风和人员占用情况影响。这意味着，如果新鲜空气供应不足，办公室、会议室、教室或地下室等常见环境中的 $CO_2$ 浓度很容易达到会引发头痛、嗜睡和决策能力受损的水平 [3, 21]。厨房 和室内健身房 也属于高风险场所，因为烹饪和剧烈呼吸会在密闭空间内迅速产生更多 $CO_2$ 。在啤酒厂和葡萄酒厂等工业或休闲环境中，发酵会产生大量 $CO_2$ ,；如果通风不足，可能造成职业风险，导致急性高碳酸血症，甚至昏迷 通风不足时亦是如此 [56]。空调并不总能有效缓解这类积聚 [70, 79], , 因此用户仍需依靠知情的通风策略。因此，本文探讨增强现实交互如何让 $CO_2$ 在用户所处的即时环境中变得可感知并与情境相关，以及如何使这些可视化具有可操作性——促使人们采取干预措施，并实时尝试各种缓解策略。由此，本研究将增强现实从环境感知拓展至情境化可操作性，在日常健康情境中连接感知、可视化与交互。

**提出的解决方案**。 我们首先对 140 名参与者开展混合模式预研究调查，以评估他们对室内 $CO_2$的意识及相关行为习惯。我们发现，尽管许多参与者承认 $CO_2$ 有害，但很少有人亲自测量过 $CO_2$ ，而且大多数人不了解安全阈值或有效的通风策略。与先前关于 occupants 周围局部“$CO_2$ 气泡”的研究相呼应 [19, 26, 54], , 我们的先导实验证实，$CO_2$ 的积聚并不均匀，若不主动驱散，还会滞留在角落。为弥补这一认知差距，我们设计并实现了*CoWear*：一款腕戴式 $CO_2$ 传感器，并集成了智能手机增强现实应用。该系统将局部 $CO_2$ 浓度可视化为颜色和大小各异的增强现实气泡，用户可以放置、观察并与之交互（图 1）。通过这些交互，用户既能监测个人暴露情况，也能尝试打开窗户或引导气流等措施，以缓解 $CO_2$ 热点区域。我们在半受控环境和真实环境中邀请 35 名参与者对*CoWear* 进行了评估。通过增强现实媒介的可视化，我们展示了室内空气质量的改善不仅源于意识的提升，也得益于及时且有针对性的通风干预。此外，该系统还支持类似游戏的互动式交互，凸显了增强现实在情境化环境管理方面的更广泛潜力。

**贡献**。 本文通过推动交互技术的发展，为人机交互领域作出贡献，使不可见污染物能够被感知、定位并转化为可采取行动的信息。具体而言，我们的工作包括：

**(1) 用于评估人们对个性化一氧化碳$_2$ 暴露的意识的人群调查**。 我们开展了一项混合模式前期调查，共有 140 位参与者，结合了在线和离线反馈。调查揭示了公众对一氧化碳$_2$ 作为室内污染物的认识存在显著不足，对通风策略存在误解，并且强烈希望获得更直观的可视化方法。这些发现为我们系统的设计需求奠定了基础，也凸显了人机交互在弥合认知差距方面的作用。

**(2) 设计一款带有智能手机增强现实界面的可穿戴设备（*CoWear*），用于个性化一氧化碳$_2$ 可视化**。 我们介绍 *CoWear*，这是一款低成本腕戴式原型，可持续监测个人一氧化碳$_2$ 暴露情况，并集成了基于智能手机的增强现实应用。通过使用动态、颜色编码的增强现实气泡，我们的系统成为一种多模态人机交互界面，将传感器数据转化为情境化、具身化的体验，从而促进环境感知与交互。

(3) **开发一款单人增强现实游戏，以提升污染意识并缓解一氧化碳$_2$气泡**。 在扩展增强现实界面的基础上，我们设计并评估了一种游戏机制，让用户通过通风策略（例如打开窗户、引导气流）主动与一氧化碳$_2$气泡交互。这款游戏不仅提升了用户参与度，也展示了趣味性交互方式如何激励行为改变，从而营造更健康的室内环境。我们在半受控环境和真实环境中对 35 名参与者进行了验证，结果表明该方法有效且易于使用。

## 2 相关工作

我们从两个方面回顾相关工作：(i) 关于 $CO_2$ 作为室内污染物所产生影响的研究；(ii) 关于污染测量、可视化及提升环境意识的交互方法的研究。

### 2.1 $CO_2$ 作为室内污染物

多项研究发现，即使 $CO_2$ 浓度低至 1000 ppm，也会对决策产生负面影响 [4, 63]。然而，家庭和卧室环境都可能导致显著的 $CO_2$ 暴露 [36], ；人们一生中近三分之一的时间用于睡眠 [8]，且超过 60% 的时间待在家中。尤其是在卧室里，门窗关闭时，$CO_2$ 浓度可能超过 2500 ppm [24, 71], ；而卧室中较低的 $CO_2$ 浓度则有助于改善睡眠质量 [36]。值得注意的是，空调（AC）系统也会影响个人 $CO_2$ 暴露，因为 $CO_2$ 密度较大，往往会聚集在较低的位置。久坐办公也可能导致 $CO_2$ 浓度升高，因为空气静止且人员活动有限，形成了人们可能再次吸入自己呼出 $CO_2$ [26] 的条件。研究表明，在正常通风条件下，个人呼吸形成的 $CO_2$ 气团平均浓度约为 1200 ppm，而周围室内空气中的浓度为 650 ppm [26]。因此，要全面了解个人 $CO_2$ 暴露情况，必须在吸入区附近进行测量。

### 2.2 污染测量与可视化

多项研究 [48, 77] 表明，静态电化学传感器和 BAM（β射线衰减监测仪）传感器可用于测量室内空气污染物（即 CO、$CO_2$, VOC、PM2.5 等）的浓度。此外，仪表板 [30, 40] 和警报系统 [66]会根据测量结果向用户提供可执行建议。传统上，污染数据可视化是通过时间序列图以及叠加在卫星图像上的二维表示来实现的。例如，Chen 等人 [13] 介绍了一种方法，利用谷歌地球可视化从中国各地固定参考站收集的空气质量数据。虽然这类表示方式足以实现数据可视化，但由于它们通过静态仪表板或移动应用程序呈现，往往难以吸引用户 [34, 51]。

近期研究强调了可视化技术的进步，例如动态和交互式仪表板或用户驱动的建议，这些可以显著增强用户对数据的参与度。例如，Lindrup 等人 [42] 展示了数据的实体化呈现如何能够增进理解与食物消费相关的环境影响。[38] 基于传感器内置显示屏中的数据可视化，报告了用户体验以及对室内空气质量的意识。[41]设计了一个数据可视化平台，用于从大规模污染物传输轨迹中提取可能的时空传输模式。 [47] 部署模块化、可变形、可配置显示器，以促进工作场所的气候意识。另一个例子是，*AirSense* [22], 能够自动识别污染事件、定位污染源，并为改善室内空气质量提供宝贵建议。与室外不同，室内污染物可能分布不均，且仅在特定的时空情形中持续存在，这使得静态传感器部署颇具挑战。多项研究 [22, 78] 提出了移动手持式或可穿戴设备传感器解决方案，以更好地近似刻画室内环境的时空污染分布。

### 2.3 面向环境意识与可行动性的沉浸式可视化

值得注意的是，增强现实正迅速成为一种新媒介，用户可借此以创新且有意义的方式理解并与周围环境互动，同时增强对环境及物体的感知。多项研究利用增强现实可视化来提升意识并辅助决策。例如，基于游戏的学习工具 EscapeCampus [11], 模拟增强现实密室逃脱，以提高学生（11 至 16 岁）对联合国 17 项可持续发展目标的认识。Saßmannshausen 等人 [62] 创建了一种增强现实可视化工具，让市民为城市规划贡献设计构想，并将建筑项目和环境变化可视化。研究 [5, 61] 还利用增强现实技术，将营养成分信息和比较数据叠加到在线及实体店商品上，帮助顾客进行选择。Jin 等人 [35]开发了一种用于学习智能手机应用的增强现实辅助工具，尤其旨在提升老年人的数字素养。

此外，增强现实可视化已被证明能有效说服用户采取主动行动。例如，Schaper 等人 [65]开发了一款具有说服力的移动增强现实应用，用于教授各类废弃物的回收流程。Assor 等人 [7] 提出了ARwavs，这是一种嵌入用户熟悉环境中、呈现废弃物数据的增强现实废弃物累积可视化。与非沉浸式废弃物累积可视化和纯数字相比，ARwavs能引发更强烈的情绪反应。Mittmann 等人 [50] 推出了一款基于增强现实智能手机的协作游戏，有助于改善学生之间的社交互动。近期研究已利用增强现实来可视化空气质量数据。例如， [49] 利用附近空气质量监测站的实时数据，在增强现实场景中可视化了室外空气污染物。Katsiokalis 等人 [37] 将实时数据与增强现实叠加，以提高市民对室外空气和噪声污染数据的意识。Chae等人 [12]探索了移动增强现实系统，以可视化空调气流和温度变化。然而，针对室内污染可视化与交互的增强现实应用研究仍然较少。

### 2.4 环境意识与可行动性的交互设计

我们的研究也与日益增多的游戏和游戏化相关研究相联系。近期文献中，探讨游戏在各个领域中的应用的出版物激增

了 [2, 9, 33, 58]。例如，游戏化应用程序 AXO [33]旨在通过让青少年参与分类和识别常见的家庭垃圾，以保护一串岛屿，从而向他们传授回收知识。与此同时，Prophet 等人 [58] 开发了一款应用程序，其中空气质量以虚拟树木的生长状况表示，用户通过增强现实与树木互动，并根据当地空气质量照料树木。同样，Feldpausch-Parker 等人 [23] 制作了一款教育游戏，以增进学生对一氧化碳$_2$ 排放影响的理解；而 Albar等人 [2]则强调通过游戏化学习，培养子女的环境可持续性意识。同样，*CityOnStats* [72] 采用类似 3D 游戏的环境，让用户通过各种视觉提示探索和解读空气质量数据，以满足不同用户的偏好。此外，Relvas 等人 [60] 的研究强调了提高人们对空气污染意识的重要性。他们的研究介绍了“空中难题，”这是一款基于 Unity 的游戏，旨在通过互动式游戏玩法向玩家普及空气污染知识。

## 2.5 开放性挑战与假设

尽管既有研究已确定一氧化碳$_2$ 是一种重要的室内污染物，并开发出测量个体暴露的方法，但这些工作大多止步于数据收集。个人一氧化碳$_2$ “气泡”等不可见现象仍难以被 occupants 感知或解读，导致传感器读数与日常体验之间存在关键鸿沟。相比之下，可视化和游戏化技术已被有效用于提升人们对室外空气污染等环境问题的意识。然而，我们仍不了解如何通过交互手段，最好地将<主 style id='3'>不可见的环境数据与日常感知连接起来。我们通过拓展增强现实的作用范围，将其从环境意识提升至情境化可操作性，来应对这一挑战。一氧化碳$_2$ 的物理属性（例如扩散、积聚和持续性）适合在增强现实中进行具身化呈现。我们的目标是将抽象的感测数据、情境化可视化和交互连接成一个连贯的流程，使用户不仅能够感知自己的个人一氧化碳$_2$ 环境，还能在日常情境中对其采取行动 [2, 7, 11]。据此，我们提出以下假设：

**H1. 缺乏一氧化碳$_2$ 污染意识**。 occupants可能了解一氧化碳$_2$对健康的总体影响，但往往缺乏具体补救措施方面的知识。我们假设，以个人为尺度，让一氧化碳$_2$暴露变得可见且与情境相关，能够提升人们对有效预防措施的认识。

**H2. 从意识到可行动性**。 除了提高意识之外，我们还假设，对一氧化碳$_2$ 暴露进行增强现实可视化，能够促使occupants采取具体行动，例如使用通风系统、窗户或其他设备来降低浓度。先前研究表明，增强现实能够为情境中的决策和主动行为提供支持 [7, 50, 65], ，尤其是在沉浸式数据可视化与日常情境紧密结合时 [39, 61]。

# 3 预研究调查与动机实验

假设 **H1** 旨在了解社区对室内污染的整体认知和意识，尤其是对一氧化碳$_2$ 暴露的认知和意识。为此，我们设计了一份预研究调查问卷，目标如下。

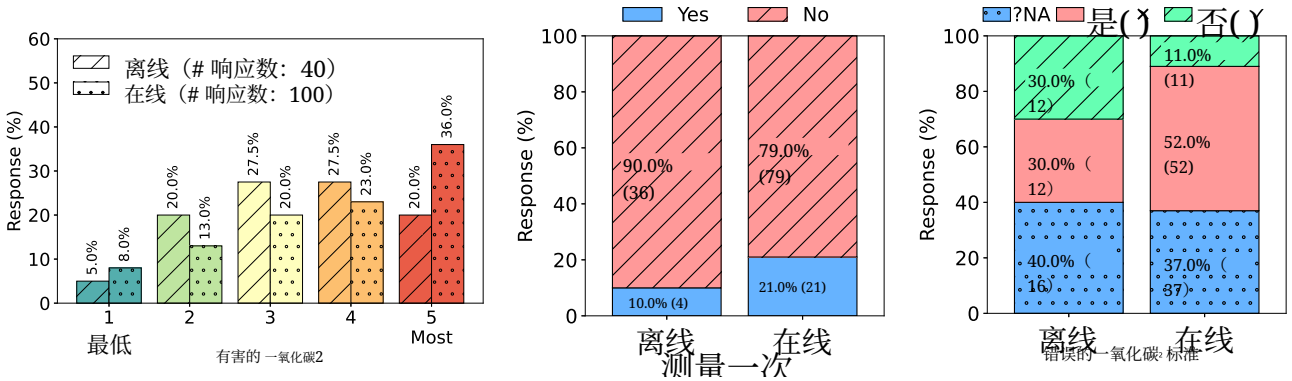
**O1.** 参与者在个人尺度（例如在家中）测量一氧化碳$_2$, 等污染物方面有多少经验？**O2.** 参与者是否了解一氧化碳$_2$ 相关标准及其影响？**O3.** 参与者如何看待通风在室内污染（尤其是一氧化碳$_2$ 暴露）中的作用？**O4.** 参与者如何看待提升自身对室内呼吸健康空气的意识?

## 3.1 调查方法

我们开展了一项混合模式前期调查，参与者分为两组——离线参与者和在线参与者。针对意识和经验，采用单侧单样本比例检验，原假设比例（$p_0$）为 0.40，预期真实比例（$p_1$）为 0.25（即小到中等效应，Cohen's $h = 0.32$），统计显著性（$\alpha$）为 0.05，检验功效为 80%，所需样本量为 N $\approx 61$ 名受访者（正态近似）。前期调查共收集到 $N = 140$ 份答复。离线参与者（$N = 40$）从大学校园招募，之后自愿参加完整研究的各个阶段（系统性能测试，详见第 5 节）。在线答题者（$N = 100$）的构成则更加多元。在线调查问卷通过社交媒体、公共论坛以及发送给目标群体/社区的电子邮件进行传播。问卷包含四个重要部分——（1）一般人口统计信息，包括年龄、性别、所在地、职业、家庭收入、房屋类型、家庭成员人数、家庭中污染相关疾病史等；（2）对室内污染的一般意识（7 个问题）；（3）对室内污染物种类、扩散情况及危害性的了解（7 个问题）；（4）对减少室内污染应对措施的看法（10 个问题，采用 1–5 分评分）。离线调查参与者主要为大学生和教职人员，年龄在 20–38 岁之间，其中 82.5% 为男性，17.5% 为女性。我们收到来自 4 个国家——德国、印度、英国和美国——30 个不同城市的在线调查答复。在线参与者年龄在 17–60 岁之间，其中男性占 75%，女性占 25%。大多数在线参与者年龄在 20–30 岁之间，占参与者总数的 55.4%；30–40 岁年龄组占 24.1%，40–50 岁年龄组占 14.4%。其余参与者（6.1%）年龄超过 50 岁。在这些在线参与者中，46% 来自城市地区，34% 来自郊区，20% 来自农村地区。

## 3.2 观察结果

*3.2.1* 污染测量经验。 如图2a所示，约一半受访者（即离线47.5%，在线59%）认为一氧化碳$_2$ 有害。然而，在测量其个人室内空间中的这些污染物时，如图2b所示，仅有10%的离线受访者和21%的在线受访者具有使用污染监测仪并进行测量的经验。总体比例（$\hat{p}$）0.178（95%置信区间： 0.115 − 0.242, z统计量 −5.35，p< .01）表明




**(a) 一氧化碳$_2$ 有害** **(b) 曾测量过污染物** **(c) 室内400百万分率是允许的**

**图2：预研究的受访者中，(a) 同意一氧化碳$_2$ 有害，但(b) 大多数人从未测量过室内污染物。(c) 对室内污染物的意识——对关于室内一氧化碳$_2$ 标准的错误陈述的回应。**

大多数认为一氧化碳$_2$ 有害的受访者实际上从不尝试测量其暴露水平。

*3.2.2* 意识与通风策略。 我们观察到，大多数受访者（即，87.5%的离线参与者和85%的在线参与者）意识到室内聚会会增加一氧化碳$_2$。然而，如图2c所示，我们观察到大多数受访者并不了解室内允许的一氧化碳$_2$ 限值（即，离线参与者中只有*30%*、在线参与者中只有*11%* 回答正确），总体比例（$\hat{p}$）为0.164（95% 置信区间：0.103 – 0.225，z统计量 −5.69，p< .01）。值得注意的是，有相当数量的调查参与者无法回答与室内污染物（如一氧化碳$_2$ ）相关的事实，也不了解在不同情境下减少室内空间污染物的策略。例如，离线和在线调查中的大多数参与者都认为分体式空调可以使污染物通风，这与现有研究 [70, 79]中的观察结果相悖。为了提高能源效率，分体式空调会使寒冷的室内空气再循环，而不是注入室外新鲜空气。因此，除非空调配有嵌入式通风系统，否则室内受污染的空气不会得到通风。

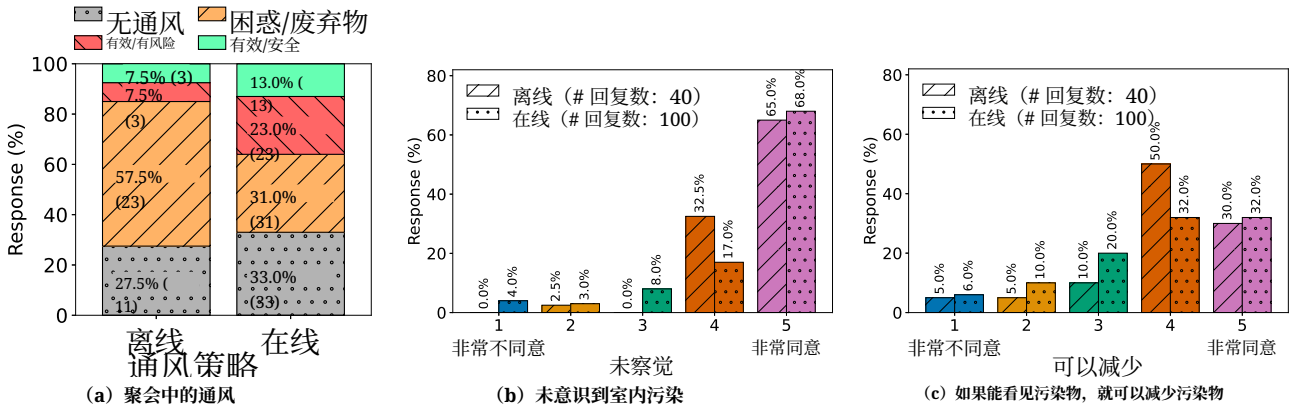
为了进一步分析，我们询问参与者在家庭聚会中会如何为 $CO_2$ 通风。有趣的是，我们发现，27.5% 的离线受访者和 33 % 的在线受访者提出了无效的解决方案（即打开分体式空调或吊扇）。此外，57.5% 的离线受访者和 31% 的在线受访者感到困惑，提出的解决方案可能有助于减少 $CO_2$，但会浪费资源（即同时打开空调和窗户）。7.5% 的离线受访者和 23% 的在线受访者能够选择有效的方法（即打开吊扇和窗户，同时关闭空调）；然而，如果室外污染严重（例如德里、和田、达卡等城市），开窗可能会增加其他污染物，如颗粒物（例如 $PM_{2.5}$）。只有 7.5% 的离线受访者和 13% 的在线受访者提出了安全且有效的方法（使用电动窗式通风或排气扇）。调查中有效且安全的通风方法的总体比例（$\hat{p}$）为 0.114（95%置信区间： 0.061 – 0.167，z 统计量 −6.9，p< .01），这表明由于对室内污染动态了解不足，大多数受访者可能无法有效地减少 $CO_2$ 等室内污染物。

*3.2.3* 可视化有帮助吗？ 如图 3b 所示，混合模式调查中的大多数受访者都同意，普通人群对室内污染物的意识较弱；而在总体比例（$\hat{p}$）中，仅有 0.06（95%置信区间： 0.019 – 0.101，z 统计量 −7.95，p< .01）的受访者持不同意见。此外，如图 3c 所示，80 % 的离线受访者和 64% 的在线受访者认为，如果能看到污染物，就可以减少污染物。这表明，采用可视化方法呈现室内污染物，对于提高普通人群的意识、促进充分通风，以及营造更健康、更舒适的室内环境十分重要。在这项验证了**H1**的预研究基础上，我们接下来将讨论试点实验中的观察结果，以了解室内 $CO_2$ 的动态，从而设计有效的数据驱动可视化。

## 3.3 我们实际上如何管理室内的 $CO_2$？

我们开展了一项试点研究，探究 $CO_2$, 的关键物理行为，包括扩散、滞留和逗留，为个人室内空间中的数据驱动可视化提供依据。研究在一间 $15 \times 10\,m^2$ 办公室进行，室内设有 10 个隔间工作站（隔间高度： $5\,m$）、两台吊扇、两台落地扇、一台窗式通风器和一台分体式空调。我们在 9 个空间位置的三个高度处部署了污染传感器（图 4）。实验期间，吊扇和分体式空调保持关闭；仅选择性地启用落地扇和窗式通风器。

随着人员占用情况增加，活跃工作站周围形成了局部一氧化碳$_2$ 积聚（图 4a），浓度随 occupants 数量成比例上升（图 4b）。与地面或天花板测量值相比，一氧化碳$_2$ 浓度始终在桌面高度最高。当所有传感器的读数都超过 1400 百万分率时，窗式通风器便启动了（图 4c）。occupants 离开后，一氧化碳$_2$ 浓度下降，尤其是在天花板高度和房间中央区域；然而，角落隔间的桌面高度仍存在持续偏高的浓度，形成局部的个人一氧化碳$_2$ 气泡 [26, 54]，浓度超过 1200 百万分率（图 4e）。启动落地




（a）聚会中的通风 （b）未意识到室内污染 （c）如果能看见污染物，就可以减少污染物

**图 3：（a）受访者感知的家庭聚会中不同通风方式的有效性。（b、c）受访者对以下情况的看法：（b）普通人群不了解室内污染这一事实；（c）他们对通过某种可视化方法减少污染的信心。调查表明，我们需要有效的污染可视化方式，例如基于增强现实的解决方案。**

扇后，将其放置在一个这样的气泡附近，显著减少了局部积聚（图 4f）。这些一氧化碳$_2$ 气泡以准静态方式增长 [19]，除非通过定向气流驱散，否则可能会滞留在角落。

## 3.4 拟人化、情境化可视化与可行动性

我们方法的核心是拟人化的一氧化碳$_2$ 气泡这一概念，用以表示个体的局部暴露区域。捕捉这些高度动态且空间分布不均的气泡，通常需要密集布设静态一氧化碳$_2$ 传感器网络，正如我们的试点研究所示（见图 4）。然而，这类基础设施成本高昂、无法移动，也不适用于不断变化的环境或个人日常活动。相比之下，佩戴在手腕上的一氧化碳$_2$ 传感器可随用户移动，以较低成本和更高灵活性实现高分辨率的个性化暴露监测。实时可穿戴设备数据使基于增强现实的可视化能够在有意义的实际地点和高度呈现不断变化的一氧化碳$_2$ 气泡，将抽象的传感器读数转化为情境化、可感知的风险。这种空间锚定有助于快速识别热点区域，并鼓励用户主动探索缓解措施（例如引导气流、打开窗户）。即时视觉反馈（例如通风后气泡缩小）不仅能提升理解，还能增强信心，促进持续参与。我们认为，增强现实能够在风险位置、受影响用户与有效行动之间搭建桥梁。以下章节将详细介绍可穿戴原型和增强现实平台。

# 4 原型设计与研究流程

基于前期调查和试点实验，我们设计了一套可视化与交互方法，以缓解高浓度一氧化碳$_2$（即气泡）的问题。我们考虑以下设计目标来构建原型。

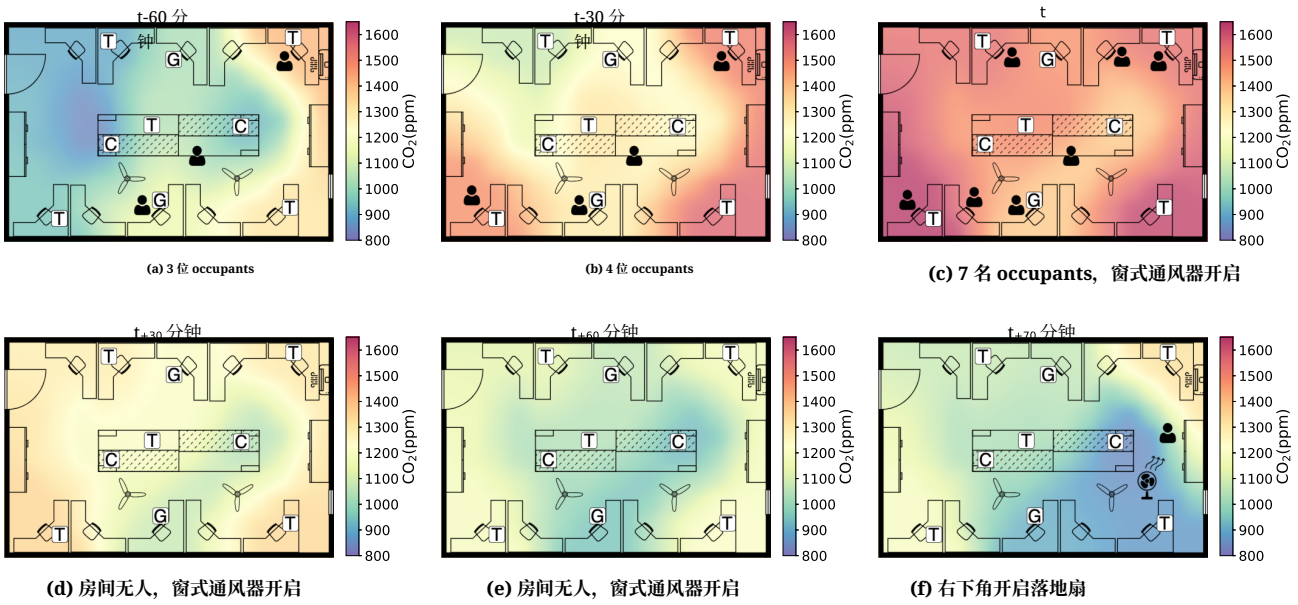
**D1.** 设计一种腕戴式设备原型，可在个人室内空间中实时有效地测量 $CO_2$ 浓度。

**D2.** 设计一款基于智能手机的增强现实游戏应用，包含两个子目标：(1) 在个人空间中可视化 $CO_2$ 气泡，同时实时显示其严重程度；(2) 通过定向操作与 $CO_2$ 气泡互动，例如开启窗式通风器、打开窗户、引导气流吹向气泡等，以降低其严重程度。下文将对此进行详细讨论。

## 4.1 *CoWear* 腕戴式传感器

我们开发了一款名为 *CoWear* 的腕戴式模块，用于感测用户的个性化污染暴露。*CoWear* 配备了温度、湿度和二氧化碳 (C$O_2$)传感器 [67]，以及一块*1250* 毫安时电池，仅需充电两小时即可提供全天候续航。值得注意的是，腕戴式设备效果最佳，原因如下：(1) 参与者可以移动双手，查看周围不断变化的 $CO_2$ 暴露情况；(2) 与市面上其他商用可穿戴污染监测仪相比，腕戴式设备重量轻、舒适耐用，例如颈戴式设备 Atmotube Pro[1]，，或需要专门随身携带的 AirSniffler[2]。开发*CoWear*时，我们采用 ESP32-S3 芯片作为设备端处理单元，该芯片集成了双核 Xtensa 32 位 LX7 微控制器，并支持 2.4 吉赫兹 Wi-Fi（802.11 b/g/n）。连接板是一块双层印刷电路板（FR4 材料）。这款可穿戴设备采用 3D 打印外壳（PLA+ 材料）封装传感器和电池。表 1 详细列出了*CoWear* 腕戴式设备的整体规格。微控制器每隔 5 秒定期测量一次 $CO_2$。测量数据通过无线信道，以 HTTPS GET 请求传输至客户端设备，延迟为 58.76 (±5.32) 毫秒。接下来，我们将介绍这款智能手机增强现实应用，它能将实时污染数据直观地呈现在室内空间中。

[1]https://atmotube.com/atmotube-pro （访问日期：2026年2月3日）
[2]https://www.airsniffler.com/ （访问日期：2026年2月3日）




(a) 3 位 occupants (b) 4 位 occupants (c) 7 名 occupants，窗式通风器开启

(d) 房间无人，窗式通风器开启 (e) 房间无人，窗式通风器开启 (f) 右下角开启落地扇

**图 4：房间不同高度各位置的 $CO_2$ 分布。 [G] 表示地面高度， [T] 表示桌面高度， [C] 表示天花板高度。未通风时（即窗式通风器在时间 *t*开启），随着房间人员占用水平增加，$CO_2$ 浓度随时间上升——(a) 三人占用， *t*-60 分钟；(b) 四人占用， *t*-30 分钟；(c) 七人占用时 *t*，左下角的 $CO_2$ 浓度最高，达到1635 百万分率，窗式通风器开启通风。 occupants 离开房间后，房间内 $CO_2$ 的分布情况如下：(d) 通风 30 分钟后；(e) 通风 60 分钟后。我们观察到，$CO_2$ 会在房间角落的源高度（即 occupants 所在高度、桌面高度）累积并滞留。最后，(f) 从右下角朝右上角开启立式风扇，减少右下角累积的 $CO_2$ 。因此，定向气流可以减少 $CO_2$ 在房间特定区域（例如角落）的滞留。**

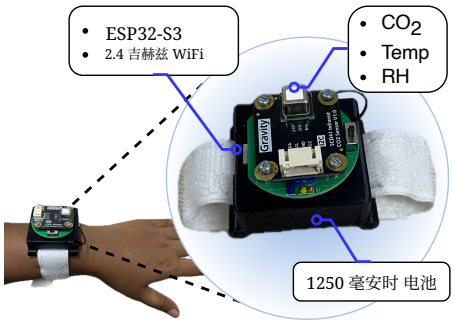



**图 5：*CoWear* 腕戴式设备。**

## 4.2 智能手机增强现实（AR）交互

我们根据第 3.3 节的观察结果，开发了一款增强现实应用，用虚拟气泡对象呈现室内 $CO_2$ 浓度。该应用有三项主要功能：空间锚定、个性化污染可视化，以及与污染物进行实时增强现实交互。该应用通过以下方式帮助用户了解室内污染热点。

*4.2.1* 三维空间锚定。 该应用程序使用 Unity3D 平面管理器库为室内环境创建相对三维坐标系。通过检测环境中的平面物体和墙壁，应用程序提供空间锚定，以跟踪虚拟物体的位置和大小，而与智能手机的位置无关。要将物体放置在任意位置，用户必须在应用程序启动时扫描整个室内空间。尽管这是必不可少的一步，但现代智能手机摄像头（例如本研究中的 Apple iPhone 13 Pro）使我们能够在极短时间内扫描整个空间。

*4.2.2* 使用 *CoWear* 进行拟人化污染可视化。增强现实应用与 *CoWear* 腕戴式设备相连，该设备可在室内空间的任何位置测量以用户为中心的一氧化碳$_2$ 暴露量。增强现实应用通过让用户生成具有代表性的增强现实气泡，以直观方式锚定一氧化碳$_2$ 数据；这些气泡的颜色和直径会随特定位置的传感器读数而变化。较小、偏绿色的气泡表示一氧化碳$_2$ 浓度较低。室外典型值为 400 百万分率，一氧化碳$_2$ 以绿色的 0.2 米气泡表示。随着一氧化碳$_2$ 读数升高，气泡会在连续色谱中先变黄，再变红。室内一氧化碳$_2$ 读数达到不健康的高值 3000 百万分率时，会以一个红色、直径为 1.5 米的气泡表示。图 6 展示了不同污染情景中的气泡。用户必须调整手的位置，使 *CoWear* 腕戴式设备与

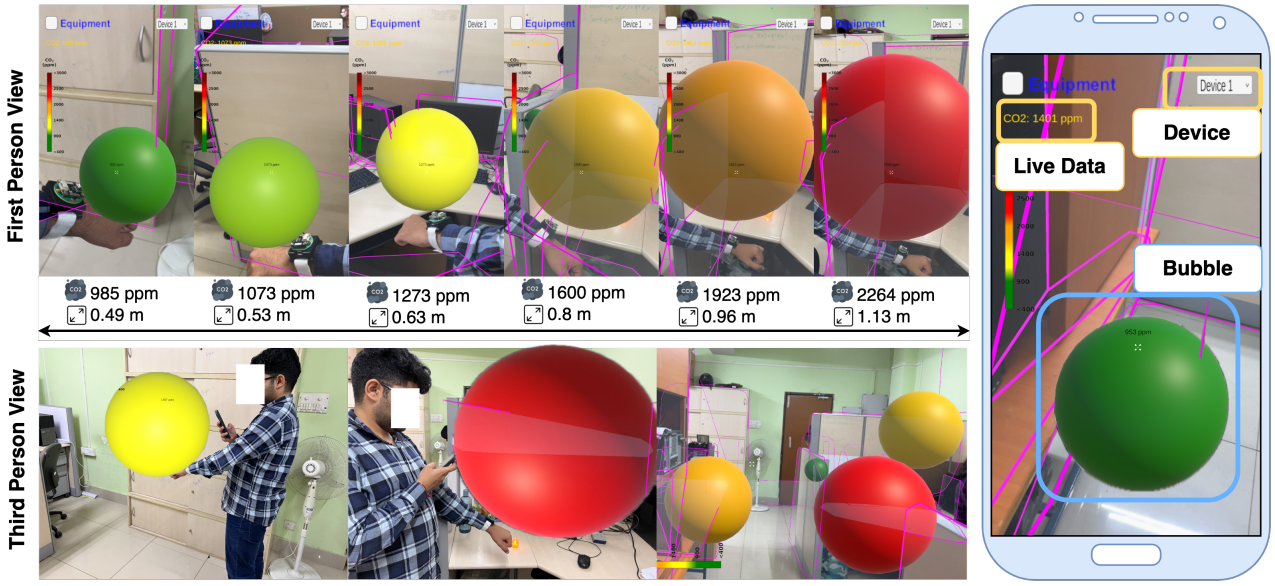



**图 6：增强现实应用——绿色气泡表示一氧化碳浓度较低，较大的黄色气泡表示一氧化碳浓度中等，最大的红色气泡表示一氧化碳浓度超过2000 百万分率。气泡的颜色和直径根据传感器读数变化（即400 百万分率 ⇒ 绿色、0.2米气泡，以及3000 百万分率 ⇒ 红色、1.5米气泡）。**

**表 1：总体规格** ***CoWear*腕戴式设备的典型条件为 25°C、50% 相对湿度、1013 毫巴环境气压** **re.**

| 系统规格 | |
|---|---|
| 微控制器 | Xtensa®32位 LX7 时钟 80~240 MHz |
| 伪静态随机存取存储器-闪存 | 8MB+8MB |
| 连接性 | Wi-Fi 2.4 吉赫兹 |
| 通信延迟（毫秒） | 58.76（±5.32） |
| 平均功率（瓦） | 0.244 @3.7V |
| 电池容量（毫安时） | 1250 |
| 尺寸（$mm^3$） | 42×49×18 |
| 重量（g） | 50 |

| 传感器 | | 运行详情 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 范围 | 重复性 | 响应时间 | | 年漂移 |
| | | | | 预热 | Poll | |
| $CO_2$ | 条件 | 400 百万分率 – 5000 百万分率 | 典型值 | 60 秒 | 5 sec (periodic samples) | ± 5 百万分率 + 0.5% 值 |
| | 精度 | ± 40百万分率 + 5% 值 | ± 10百万分率 | | | |
| 湿度 | 条件 | 0% 相对湿度 – 95% 相对湿度 -10 ◦C – 60 ◦C | 典型值 | 90秒 | | 0.25%相对湿度 |
| | 精度 | ± 6% 相对湿度 | ± 4% 相对湿度 | | | |
| 温度 | 条件 | - 10◦C – 60 ◦C | 典型值 | 120 秒 | | 0.03 ◦摄氏度 |
| | 精度 | ± 0.8◦C | ± 0.1 ◦C | | | |

增强现实气泡对齐，从而使气泡代表当地的污染浓度。用户必须停留在增强现实气泡附近（≤ 1米），才能注意到随着污染物的积聚或通风，气泡颜色和大小的变化。

*4.2.3* 与污染物的增强现实交互。一氧化碳$_2$ 来源，例如烹饪、蜡烛和室内聚会，会在室内环境中形成一氧化碳$_2$ 气泡。蜡烛持续释放一氧化碳$_2$，在周围形成一氧化碳$_2$ 气泡。由于明火，烹饪会产生大量污染物。小苏打类食品（即蛋糕和油炸食品）即使在电磁炉上加热，也会产生一氧化碳$_2$。此外，正如我们在第 3.3 节关于如何管理室内一氧化碳$_2$ 的先导实验所示，由于 occupants 的呼吸排放，小型室内聚会会导致该区域一氧化碳$_2$显著积聚。随后，除非通过外部气流将其排出，否则一氧化碳$_2$ 气泡会滞留在室内空间的各个角落。用户使用增强现实应用放置代表性的一氧化碳$_2$ 气泡，并借助吊扇、落地扇、开窗和窗式通风器等工具及现有通风设备减少气泡。例如，用户可以使用手持风扇将气流导向窗式通风器或打开的窗户，同时观察增强现实气泡逐渐缩小并改变颜色，这表明室内该位置的一氧化碳$_2$ 浓度降低。借助这些增强现实气泡，用户可以识别积聚区域或潜在污染源。此外，还可以通过监测气泡缩小情况来确认室内空间是否得到了有效通风。

## 4.3 研究条件与设置

我们在半受控环境和真实环境中对该系统进行了评估。半受控实验在两间办公室中进行。真实环境实验则在办公室、家庭、餐馆和实验室环境中进行。接下来，我们将详细讨论半受控环境和真实环境。

*4.3.1* 半受控用户实验。我们选取了两种场景进行实验：(i) 一间设有多扇窗户、风扇和窗式通风器的大型办公室（R1），以及 (ii) 一间相对较小的办公室（R2），仅设有一扇窗户、一台风扇和一个窗式通风器。大房间为 5m × 8m（40 $m^2$），小房间为 3m × 5m（15 $m^2$）。在半受控实验中，我们通过将 $CO_2$ 源放置在房间的特定区域，确保这些区域形成 $CO_2$




**图 7：真实环境实验条件——(a) 工作中的办公室，(b) 多房间家庭，(c) 餐馆，(d) 实验室环境。参与者必须先识别动态污染源，才能有效通风以排出 $CO_2$。**

源（即蜡烛、加热的小苏打和室内聚会）。参与者独立行动，找出这些气泡，并执行通风策略以降低 $CO_2$ 浓度。

*4.3.2* 真实环境用户实验。如图 7 所示，我们在工作中的办公室、家庭、餐馆和实验室环境中开展了非受控的真实环境用户实验。这些环境中的污染源是动态的，取决于其他 occupants 及其活动（例如烹饪、燃烧、聚会）。例如，在餐馆中，如果工作人员决定在每张桌子上摆放蜡烛，或提供热盘菜（如铁板烧），$CO_2$ 气泡就会增加。此外，由于聚会，$CO_2$ 可能会在办公室或实验室的角落积聚。因此，参与者必须借助*CoWear*腕戴式设备和增强现实应用，找到 $CO_2$ 气泡形成的位置。随后，他们可以采用有效的通风策略，减少空间中积聚的 $CO_2$ 气泡。

## 4.4 参与者

我们进行了先验功效分析，以确定组内混合/增强现实研究所需的最小样本量。遵循增强现实/混合现实实验指南 [53],，我们采用推荐的效应量阈值：Cohen's $d$ 的 0.40（小）、0.81（中）和 1.55（大），以及 Cramer's $V$ 的 0.17（小）、0.33（中）和 0.54（大）。我们的分析设定了足够的统计功效，使干预很可能产生中到大的效应。对于韦尔奇 t 检验，在统计功效为 80%、显著性水平 ($\alpha$) 为 0.05 时，检测中到大的效应（Cohen's $d > 0.81$）至少需要 15 名参与者。类似地，对于使用 $\chi^2$ 检验的分类比较，检测大效应（Cramer's $V > 0.54$）至中等效应（Cramer's $V > 0.33$）分别至少需要 17 至 45 名参与者。根据 [53], 对 2019 至 2023 年 CHI 论文中的效应量进行的汇总，组内研究通常包含 28.5 名参与者（增强现实/混合现实专属范围：7–40 名，中位数为 20 名）。

基于此，我们通过线下预研究调查中的志愿者招募，招募了 35 名参与者。

大多数参与者是本科生和研究生。因此，他们中的大多数都习惯于玩智能手机游戏，也习惯佩戴智能手表。他们的年龄范围为 20 至 48 岁（$\mu = 25.11$ 岁，$\sigma = 6.23$ 岁）。参与者中有 30 人（85.7%）为男性，5 人（14.3%）为女性。大多数参与者已经拥有较为丰富的智能手机游戏经验。两名参与者每天玩智能手机游戏。七名参与者每周玩一次。五名参与者每月至少玩一次。此外，12 名参与者报告称他们很少玩智能手机游戏。然而，9 名参与者不玩智能手机游戏。参与者此前对智能手机增强现实游戏的经验有限或没有经验。

在半受控用户实验中，35 名参与者中有 31 人参与了会话 S1，34 人参与了会话 S2 （即 30 人同时参与了 S1 和 S2，从而对中到大效应达到 80% 的统计功效）。此外，真实环境中的用户实验是在真实室内环境中根据机会开展的（即晚餐、研究实验室、办公室和家庭）。由于这些场所的可用时间零散，且与参与者的时间安排存在冲突，参与 S1 和 S2 的 30 名参与者中有 20 人参加了这些会话。最后，这些参与了全部增强现实环节的参与者将我们的方法与通用的二维污染热力图可视化进行了基线比较，从而确保具备足够的统计功效，以检测中到大效应，并分析用户体验和感知。

## 4.5 研究流程

招募志愿者后，本研究包含三个阶段：（1）实验前活动（即知情同意书、实验说明、增强现实应用演示等），（2）用户实验（即实时交互和游戏体验问卷），以及（3）实验后活动（即半结构化访谈和系统可用性问卷）。图8展示了整体研究流程。所有调查问卷均收录于附录A。

*4.5.1* 实验前活动。 首先，向参与者发放一份信息表，其中说明研究概述、参与者在研究期间的目标、如何使用智能手机增强现实游戏应用，以及如何使用*CoWear* 腕戴式设备测量室内空间任意位置的一氧化碳$_2$ 浓度。信息表还提及已部署的传感器以及从参与者处采集的数据模态。此后，参与者签署知情同意书，以便在本研究期间采集个人数据和实验数据。接下来，研究助理在一次会话中向新参与者提供简短教程，演示增强现实应用（即如何放置增强现实气泡，以及参与者必须如何对齐手部，使*CoWear* 腕戴式设备与增强现实气泡共定位，以观察气泡颜色和大小如何随污染物随时间积聚而变化）。

*4.5.2* 用户实验。 一名研究助理帮助参与者佩戴*CoWear* 腕戴式设备、Empatica E4手表和身体摄像机，以采集参与者个性化的$CO_2$ 暴露、生理数据及其行为的第一人称视角。在半受控实验环节中，研究助理确保

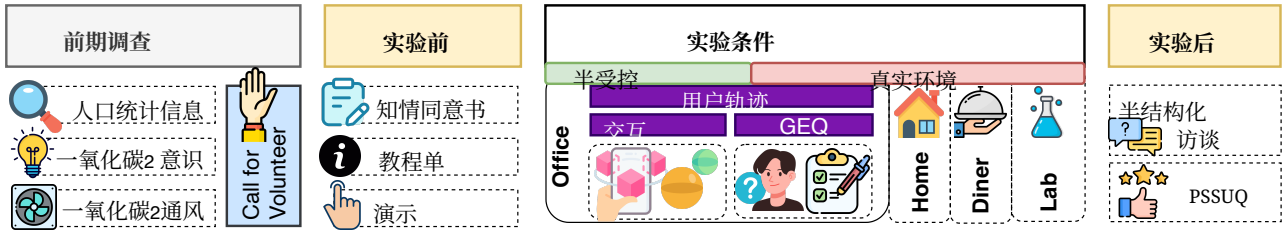



**图8：总体研究流程——我们通过前期调查评估参与者的意识并招募参与者。我们征得参与者的同意，并在每次用户试验后进行体验调查。最后，参与者参加了半结构化访谈和可用性调查。**

$CO_2$ 源在其指定位置处于开启状态。而在真实环境实验中，$CO_2$ 源是动态的，取决于occupants的室内活动，如第4.3节所述。我们将这些实验环节设计为参与者的游戏体验：他们探索室内空间，并使用应用程序放置代表性增强现实气泡，以识别 $CO_2$ 浓度较高的区域。此外，参与者利用可用工具（即手持风扇、电池供电风扇等）和通风设备（即吊扇、落地扇、窗式通风器等），将气流导向增强现实气泡，从而降低空间内的$CO_2$ 浓度，如第4.2.3节所述。我们将室内$CO_2$ 浓度800百万分率作为各实验环节的停止标准（软性界限）。不过，参与者可以继续进一步降低污染物。单个实验环节可持续20至40分钟，其中包括实验前活动。每次实验结束后，参与者填写附录A.2中的游戏体验问卷 （游戏体验问卷） [32],，以评估其借助增强现实气泡对$CO_2$ 进行通风的体验与交互。我们使用了（i）游戏中GEQ和（ii）游戏后体验问卷。请注意，不同的用户会话在不同日期进行。

*4.5.3* 实验后活动。用户实验结束后，参与者完成了关于增强现实应用的实验后系统可用性问卷（PSSUQ） [64] 。PSSUQ通过七点李克特量表中的16个问题（见附录A.3）确定用户感知的系统满意度，得分越低表示可用性越好。参与者还就以下方面提供了反馈：（i）与预研究调查相比，他们对空气污染物的看法是否有所改善；（ii）他们希望在增强现实应用未来版本中看到哪些功能。接下来，我们以焦点小组讨论的形式，在三组参与者与一名研究助理之间开展了半结构化访谈，以了解他们对系统不同方面的体验。研究助理主持了关于游戏内交互如何影响参与者对空气污染物的认知和游戏体验的讨论，并征集了改进当前平台的建议（讨论主题见附录A.4）。参与者可以按任意顺序发言，围绕当前讨论的主题分享观点，且不受时间限制。我们记录了参与者对其使用增强现实应用的总体体验以及改进系统建议的意见文字稿。接下来，我们将讨论从这些用户实验、调查和访谈中获得的观察结果。

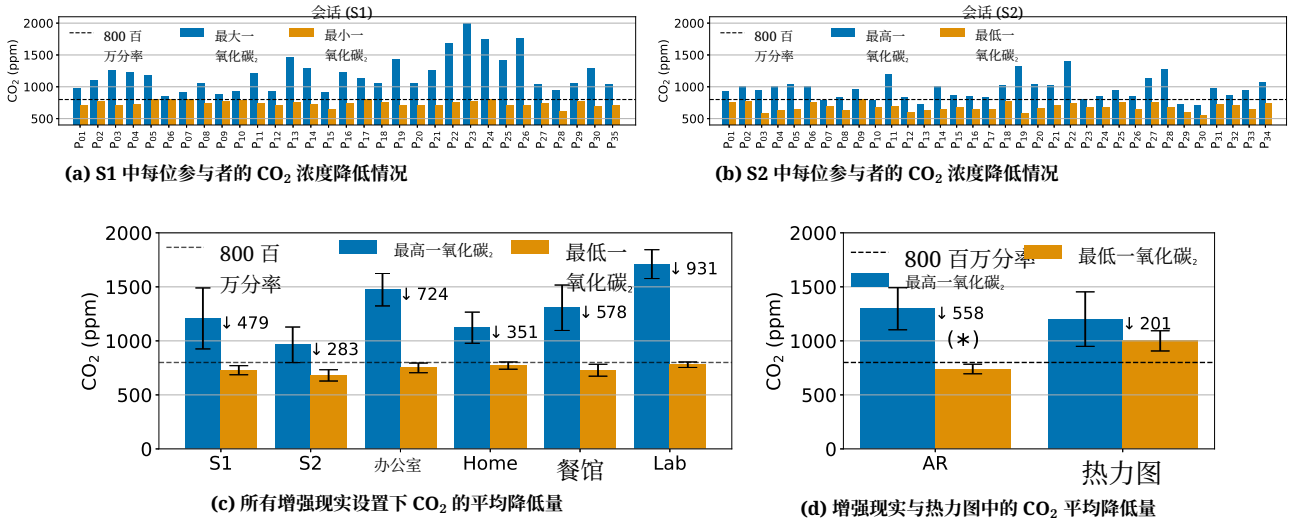
## 5 研究结果

本节分析参与者在半受控和真实环境用户实验会话期间对可视化效果、游戏玩法和总体体验的感受。

### 5.1 有效减少 $CO_2$

*5.1.1* 增强现实应用的有效性。在会话 S1 中，$CO_2$ 的平均初始浓度为 1207 ppm，最终浓度为 728 ppm。我们观察到平均减少了 479（±281）ppm。图 9a 展示了每位参与者的减少量。在 S1 中，大多数参与者刚开始接触增强现实应用。他们每减少 100 ppm 的 $CO_2$，大约需要 2.14（±1.6）分钟。S1 中，参与者为降低 100 ppm $CO_2$ 而通风所用时间最长为 6 分钟，最短为 0.34 分钟。在会话 S2 中，$CO_2$ 的平均初始浓度为 963 ppm，最终浓度为 680 ppm。如图 9b 所示，我们观察到会话期间平均减少了 283（±155）ppm。在 S2 中，30 位参与者在 S1 中已熟悉增强现实应用，因此我们观察到 $CO_2$ 通风速度更快。4 位新加入的参与者也成功将 $CO_2$ 浓度降至 800 ppm目标以下。参与者每降低 100 ppm 的 $CO_2$，大约需要 1.48（±1.11）分钟（即比 S1 少约 40 秒）。S2 中，参与者为降低 100 ppm $CO_2$ 而通风所用时间最长为 5.7 分钟，最短为 0.3 分钟。同样，在真实环境实验中，我们观察到办公室、家庭、餐馆和实验室环境中的 $CO_2$ 平均减少量分别为 724 ppm、351 ppm、578 ppm 和 931 ppm。图 9c 展示了不同室内场景下用户实验中 $CO_2$ 的平均初始和最终浓度。我们观察到，在室内环境中使用增强现实应用后，$CO_2$ 平均显著减少了 558 ppm（即使用 Welch t 检验，t 统计量为 6.54，$p < .01$，Cohen's $d = -1.36$效应量为中到大），如图 9d 所示。因此，增强现实应用和 *CoWear* 腕戴式设备有效呈现了 $CO_2$ 气泡，使参与者能够采取行动，将污染物排出室内空间。

*5.1.2* 二维空间热力图的有效性。为比较增强现实应用的有效性，我们使用二维空间热力图可视化 $CO_2$，其形式类似于第 3.3 节中的图 4。我们在办公室房间（R1）中部署了六个固定的一氧化碳2 传感器，以生成实时污染地图。此外，我们开展了用户实验，以了解参与者如何感知二维污染地图，以及如何与附近可用的通风工具和设备进行交互。这些二维




(a) S1 中每位参与者的 $CO_2$ 浓度降低情况

(b) S2 中每位参与者的 $CO_2$ 浓度降低情况

(c) 所有增强现实设置下 $CO_2$ 的平均降低量

(d) 增强现实与热力图中的 $CO_2$ 平均降低量

**图 9：*CoWear* 可穿戴设备和增强现实应用的有效性——(a、b) 会话 S1、S2 期间 $CO_2$ 读数的最大值，以及使用增强现实应用对污染物进行可视化并通风后会话结束时的 $CO_2$ 读数；(c) 各增强现实设置下 $CO_2$ 的平均降低量；(d) 增强现实与基线二维热力图可视化下 $CO_2$ 的平均降低量。(*) 表示使用增强现实应用后 $CO_2$ 降低具有统计显著性。**

热力图用户实验的开展方式与半受控增强现实环节类似，实验前由一名研究助理向参与者演示用户界面。我们观察到，参与者难以根据热力图可视化规划有针对性的通风策略，导致会话时长更长且通风不足。使用*CoWear*可穿戴设备和增强现实应用时，我们观察到 $CO_2$ 通风效果显著（即平均为 558 百万分率 $CO_2$）；然而，使用热力图时，参与者平均只能将 $CO_2$ 浓度降低至 201 百万分率，且起始与结束时的 $CO_2$ 浓度没有统计学差异，如图 9d 所示。即便会话时长更长，大多数参与者使用热力图仍无法达到 800 百万分率目标 $CO_2$ 水平。

## 5.2 对用户认知的影响

如图 10a 所示，大多数参与者报告称，智能手机增强现实应用在半受控实验期间提升了他们对室内污染物的整体理解与意识。在 S1 中，8 25.8 17 54.8 2，15（%）极其同意，（%）相当同意，而在 S 中（44.1%）极其同意，13（38.2%）相当同意对此持相同看法。我们观察到，在同时参加两个会话的 30 名参与者中，从会话 S1 到 S2，他们对室内污染物的理解存在较强关联（$\chi^2 = 41.64$，p< .01，克莱默的 $V = 0.68$）。一条与意识（空调）相关的有趣参与者评论谈到该应用程序如何增进他们对室内污染物的理解，内容如下。

*AC#1*：“这个事实我完全不知道，室内污染是我们应该讨论的问题。我们总是谈论室外污染，但我们从不谈论室内污染。我们可能会想，好吧，蜡烛和烹饪能造成多少污染，但这让我们意识到仅点燃两三支蜡烛，就能达到这样的百万分率。”

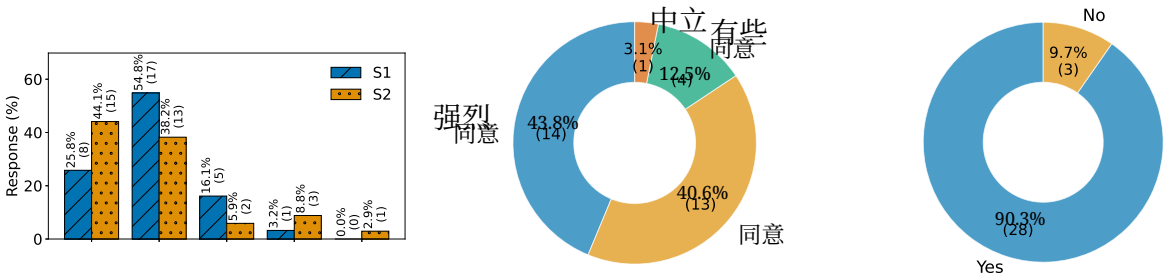
此外，54.5% 强烈同意，30.3% 同意，9%有些同意 认为这款游戏能让参与者更加意识到室内的污染源（如室内聚会、蜡烛等）。在参与者中，14（43.8%）强烈同意，13（40.6%）同意，4（12.5%）有些同意 在家庭中使用该增强现实应用，以减少烹饪时厨房以及家庭聚会时客厅等场所的污染物，如图 10b 所示。值得注意的是，28 （ 90.3% ）名参与者希望向家庭成员和朋友推荐该应用程序（见图 10c），以使他们更加意识到家庭中的污染。一些与室内污染源相关的参与者评论如下：

空调*#2*：“我们通常不会想到这一点。一些小事，例如室内小组会议，会产生如此高浓度的一氧化碳2。我想这个应用程序带来了一种感知，也让我意识到我们通常会因为污染物而感到疲倦和困倦。”

空调*#3*：“它上升得非常快，我以前没听说过室内污染的二氧化碳水平比室外污染更高。它有助于降低二氧化碳水平，也让我了解如何应对滞留污染物。”

## 5.3 定量用户反馈

在此，我们从沉浸感、参与者在各会话期间感受到的胜任力和技能水平、他们对通风以降低 $CO_2$，的兴趣与成功程度，以及积极体验的程度和相关的身体（即疲劳）与生理负荷（即紧张、挑战、消极体验等）等方面，分析参与者的游戏乐趣。




(a) 提升了我的理解 (b) 愿意在家中使用 (c) 会推荐给朋友

**图10：理解与意识调查结果——(a) 增强现实应用和 *CoWear* 提升了参与者对室内污染的理解；(b)参与者愿意在家中使用此应用程序，以减少厨房和客厅的污染；(c)参与者会向朋友和家人推荐此应用程序，让他们更加了解室内污染。**

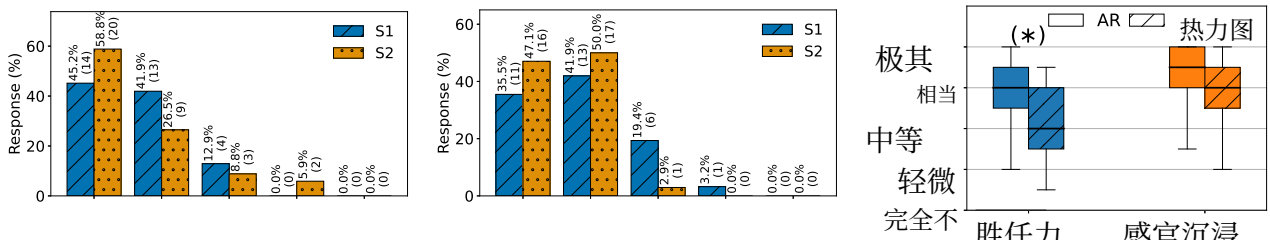
*5.3.1* 胜任力。胜任力体现了玩家完成游戏后对自身能力和技能水平的感受。我们发现，在 S1 中，大多数参与者（18 人，占 58%）表现出中等偏上至极高的胜任力水平；10 人（32.2%）表现出中等至中等偏上的水平，仅有 3 人（9.6%）在游戏过程中表现出较低至中等的胜任力水平。同样，在 S2 中，23 人（67.6%）表现出中等偏上至极高的水平，9 人（26.4%）表现出中等至中等偏上的水平，仅有 2 名参与者（5.8%）表现出较低至中等的胜任力。参加了两个半受控实验环节的 30 名参与者（$P_{01}$ 至 $P_{30}$）中，10 人（33.3%）的胜任力从 S1 到 S2 有所提升；18 人（60%）的胜任力在各会话间没有显著变化，仅有 2 人（6.6%）的胜任力得分略有下降。因此，通过更多练习，参与者可以提升使用增强现实应用有效降低 $CO_2$ 的胜任力。如图11c和图12所示，参与者在半受控实验和真实环境实验中均表现出中等偏上的胜任力。相比之下，参与者在基线空间二维热力图可视化中表现出中等胜任力。图11c表明，在参加了所有增强现实和基线二维热力图实验的 20 名参与者中，不同可视化技术导致的胜任力差异具有统计显著性（采用 Welch t 检验，t 统计量为 2.64，$p < .05$，效应量为中到大，Cohen's $d = 1.27$）。

*5.3.2* 感官与想象沉浸。 沉浸感代表对游戏世界的投入程度。在 S1 中，26 名（83.8%）参与者以及 S2 中 28 名（82.3%）参与者体验到了中等 至极度 沉浸感。尽管大多数参与者的沉浸感在各次会话中保持稳定，但有八名（26.6%）参与者的沉浸感从轻微 提升至中等 ，或从中等 提升至极度。因此，对部分参与者而言，随着会话次数增加，游戏变得更加有趣。总体而言，正如图11c所示，参与者在半受控实验和真实环境实验中的沉浸感中位数为中等至极度。相比之下，参与者对基线二维热力图的沉浸感中位数为中等，且可视化技术带来的差异在统计学上并不显著。

*5.3.3* 参与者兴趣和即时奖励。 在会话期间，参与者必须在室内空间中定位$CO_2$ 气泡并对其进行通风，从而降低$CO_2$ 浓度。如图11a所示，分别有27名（87.1%）和29名（85.3%）参与者对两个会话表现出极其 和相当 的兴趣。而有4名（12.9%）参与者在S1期间表现出中等 兴趣。已参加过S1的参与者对S2更感兴趣。20名（58.8%）对游戏故事极其感兴趣，9名（26.5%）则相当 感兴趣。在仅参加S2的参与者（$P_{31}$ 至$P_{34}$）中，有2名（5.9%）表现出轻微兴趣。

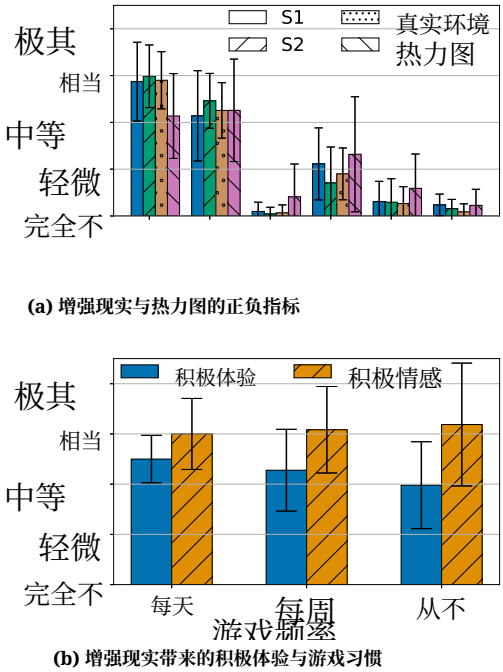
S2 中几乎所有参与者都认为自己成功降低了污染物。如图 11b 所示，16 人（47%）感到极其成功，17 人（50%）感到相当成功，只有 1 人（2.9%）感到中等程度地成功。然而，在 S1 中，分别有 11 人（35.5%）和 13 人（41.9%）认为成功程度极高和较高，另有 6 人（19.4%）认为成功程度中等。如前所述，由于 S1 的参与者刚开始接触增强现实应用和可穿戴设备，一名研究助理向他们演示了增强现实应用的用户界面和功能。在后续会话中，参与者无需任何教程即可使用增强现实应用并减少 $CO_2$ 气泡，从而提升了他们的成就感和成功感。相比之下，在基准二维热力图条件下，只有 2 名（10%）参与者极其、12 名（60%）参与者相当、6 名（30%）参与者轻微地降低了会话期间的 $CO_2$ 浓度。主要原因是缺乏紧迫感和可采取行动的局部污染情境。因此，参与者难以规划并实施一种策略，导致会话时长更长且通风不足。

*5.3.4* 积极与消极体验。如图12所示，在 S1、S2 和真实环境实验各会话中，使用增强现实应用的参与者对游戏的平均胜任感和积极体验始终相当高；而游戏内紧张感、疲倦以及游戏环节结束后的消极体验等不理想体验则微乎其微。此外，游戏挑战从 S1 到 S2 有所降低，表明参与者能够轻松掌握增强现实应用和 *CoWear* 可穿戴设备，学习曲线平缓。因此，在 S2 中，参与者寻找 $CO_2$ 气泡时遇到的挑战更少。在真实环境实验中，由于存在动态污染源，游戏挑战略有增加。不过，参与者能够自行发现、通风并减少 $CO_2$ 气泡（即 45.4% 强烈同意，33.3 % 同意，以及




(a) 我对这个游戏感兴趣　(b) 我感到很有成就感　(c) 胜任力与沉浸感

**图11：参与者的感知——(a) 对游戏故事的兴趣，(b) 玩游戏后的成就感与成功感。(c) 增强现实应用与基线二维空间热力图可视化在胜任力和沉浸感方面的比较。(*) 表示在20名参加了所有会话的参与者中，胜任力存在统计学显著差异。**




(a) 增强现实与热力图的正负指标

(b) 增强现实带来的积极体验与游戏习惯

**图12：游戏体验——(a) 增强现实应用与基线热力图的正负指标，(b) 参与者的游戏习惯与增强现实带来的积极体验。**

6% 有些同意）。相比之下，使用基线二维热力图可视化时，游戏挑战和疲倦程度均有所增加，导致游戏内胜任感降低、游戏后疲劳加重。

此外，我们还观察到，无论游戏频率如何，参与者在游戏过程中都能获得稳定的短期积极情感和长期积极体验。这表明，对于几乎没有或完全没有游戏经验的新用户而言，AR游戏体验易于学习。图12b显示，在AR游戏过程中，不玩手机游戏的参与者所获得的长期积极情感和长期积极体验，与每天玩游戏的参与者在统计上相似。

## 5.4 游戏体验与用户感知

表2使用卡方检验比较了AR应用和二维热力图可视化中不同游戏体验指标与参与者的意识、兴趣和成功之间的关联。在AR应用中，胜任力和沉浸感与意识显著相关，其中沉浸感（$\chi^2$ = 21.70，p< .01）表现出中到大的关联，胜任力（$\chi^2$ = 21.42，p< .05）表现出中等关联。此外，疲倦（$\chi^2$ = 17.26，p< .05）与意识也表现出中到大的关联。因此，当参与者探索室内空间时，他们会更加意识到污染动态。AR应用中的兴趣与沉浸感（$\chi^2$ = 63.17，p< .01）表现出大的关联，同时在主动为$CO_2$气泡通风时，与胜任力（$\chi^2$ = 20.88，p < .05）和正性情感（$\chi^2$ = 21.39，p< .05）表现出中等关联。成功与胜任力（$\chi^2$ = 85.13，p< .01）和正性情感（$\chi^2$ = 82.33，p< .01）表现出大的关联，进而对长期积极体验（$\chi^2$ = 32.26，p< .01）产生中到大的影响，凸显了AR应用在减少$CO_2$方面的有效性。

相比之下，二维热力图表现出较弱的关联。兴趣 在很大程度上与胜任力（$\chi^2$ = 23.76，p< .05）和沉浸感（$\chi^2$ = 24.20，p< .01）相关。然而，成功与所有游戏体验指标的关联均不显著，表明二维热力图在提升用户成就感方面效果较差。这些发现表明，增强现实应用提升了沉浸感 和胜任力等游戏体验指标，促使用户的意识 和兴趣 转向具体行动，例如与通风系统、窗户互动或引导气流（验证了**H2**，即从意识到可行动性），从而成功地 减少室内一氧化碳$_2$ 气泡。

## 5.5 研究后*CoWear*的系统可用性

在此，我们分析参与者的感知满意度，以及他们是否有信心使用*CoWear*腕戴式设备和增强现实应用，为积聚的 $CO_2$ 气泡通风。如图13a所示，在所有会话的参与者中，22人（62.9%）强烈同意，11人（31.4%）同意，剩余参与者（5.7%）有些同意，认为很容易找到 $CO_2$ 气泡。他们能够清楚地观察到 $CO_2$ 浓度的逐渐变化。23人（65.7%）强烈同意，9人（25.7%）同意，

**表2：卡方（$\chi^2$）统计量表明，与基线二维热力图可视化相比，增强现实应用中的游戏体验问卷指标与参与者的意识、兴趣和成功之间存在很强的关联。此处，$*$ 表示 $p < .05$，$**$ 表示 $p < .01$，并报告了组内AR研究的 Cramer's $V$ 效应量阈值：小（0.17）、中（0.33）和大（0.54） [53]。**

| 增强现实应用 | 游戏中GEQ | | | | 游戏后GEQ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 胜任力 | 沉浸感 | 挑战 | 积极情感 | 正向体验 | 疲倦 |
| 意识 | 21.42* (0.33) | **21.70** (0.41)** | 7.30 | 17.19 | 19.66 | **17.26** (0.36)** |
| 兴趣 | 20.88* (0.33) | **63.17** (0.7)** | 15.39 | 21.39* (0.33) | 16.48 | 11.84 |
| 成功 | **85.13** (0.66)** | 17.01** (0.36) | 18.11* (0.3) | **82.33** (0.65)** | **32.26** (0.41)** | 3.05 |
| **二维热力图** | **胜任力** | **沉浸感** | **挑战** | **积极情感** | **正向体验** | **疲倦** |
| 意识 | 12.83 | 10.77 | 20.62 | 9.17 | 16.50 | 4.81 |
| 兴趣 | **23.76* (0.85)** | **24.20** (0.86)** | 16.78 | 13.57 | 20.49 | 12.10 |
| 成功 | 8.38 | 7.25 | 12.22 | 4.19 | 11.17 | 6.81 |

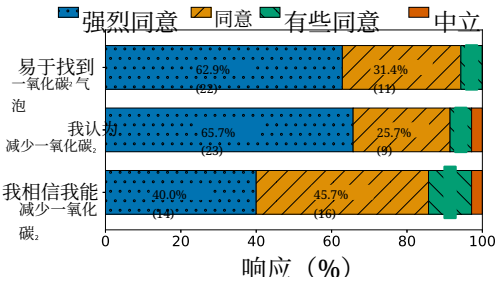
以及两位（5.7%）有些同意，认为启动窗式通风器、打开窗户等之后，他们能看到 $CO_2$ 读数下降。参与者对自己有信心：14 人（40%）坚信，16 人（45.7%）相信，4 人（11.4%）有些相信自己能够自行减少 $CO_2$。

在表3中，我们展示了 PSSUQ 问题与用户感知（如胜任力、沉浸感、意识，以及使用增强现实应用有效减少 $CO_2$）之间的关系。对于胜任力，最显著的关联体现在使用增强现实应用时的舒适度（Q4, $\chi^2 = 22.50$, $p < .05$）以及减少污染物的信念（Q6, $\chi^2 = 29.42$, $p < .05$）。值得注意的是，对应用程序总体体验的满意度（Q16）也呈现出较强的关联（$\chi^2 = 27.66$, $p < .01$）。这些结果表明，胜任力与易用性以及感知到的 $CO_2$ 通风效果显著相关。沉浸感 与增强现实应用的操作简便性（Q2, $\chi^2 = 18.42$, $p < .05$）存在显著关联，这突出说明易用的界面能够增强用户在体验中的沉浸感。意识 与查找 $CO_2$ 气泡的难易程度（Q10, $\chi^2 = 19.45$, $p < .01$）密切相关。对于 $CO_2$减少，其与学习难易度（Q5, $\chi^2 = 6.34$, $p < .05$）以及用户对增强现实应用的信心（Q6, $\chi^2 = 11.61$, $p < .01$）。此外，错误处理（Q7, $\chi^2 = 12.94$, $p < .05$）在很大程度上提升了人们对减少一氧化碳$_2$效果的感知。

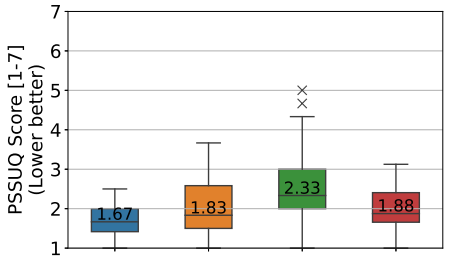
最后，图13b展示了参与者报告的 PSSUQ（研究后系统可用性问卷）得分箱线图；请注意，PSSUQ 得分越低，表示表现越好。系统可用性（SYSUSE）的中位数为 1.67，表明增强现实可视化具有实用性。此外，信息表（即首次参与时提供）和增强现实应用演示等信息也使参与者受益。信息质量（INFOQUAL）为 1.83。界面质量（INTERQUAL）为 2.33，表明应用程序界面的表现相当不错且响应灵敏。总体而言，可穿戴设备和增强现实应用的 PSSUQ 得分中位数为 1.88，参与者认为其易于使用且具有吸引力。简而言之，增强现实应用的设计元素（如易用性、清晰的视觉呈现和有效的错误处理）会显著影响用户参与度、感知能力、环境意识和影响力。不过，正如下一节所述，仍有进一步改进的空间。

## 5.6 定性用户反馈

如第4.5节前文所述，我们围绕以下主题主持了三人焦点小组讨论：（i）他们的总体




**(a) 可用性问题**




**(b) 可用性评分**

**图13：研究后的系统可用性：(a) 对可用性问题的回答；(b) 半受控和真实环境用户实验的计算可用性评分。**

增强现实游戏体验；（ii）游戏内体验如何影响他们对空气污染的认知；以及（iii）改进该平台的建议。主题详情见附录A.4。表4总结了研究各方面的情感。接下来，我们将讨论这些讨论中的核心观察结果。

*5.6.1* 增强现实应用的体验。参与者总体上对增强现实应用感到满意。值得注意的是，对于许多参与者而言，使用增强现实应用和玩增强现实游戏都是首次体验；定量反馈表明，他们很喜欢该应用程序。在焦点小组讨论中，近75%的参与者评论是正面的（例如使用了“好”“流畅”“有趣”和“很棒”等关键词），如表4所示。

*EX#1*：“最棒的是，它互动性很强，也很有创意。它就像一台能让我们观察周围 $CO_2$ 浓度的相机。”

**表3：卡方（$\chi^2$）统计量表明，系统可用性指标与参与者参与因素之间存在很强的关联。这里，$*$ 表示 $p < .05$，$**$ 表示 $p < .01$，并报告了 Cramer's $V$ 在组内AR研究中的小（0.17）、中（0.33）和大（0.54）效应量阈值 [53]。PSSUQ问卷收录于附录A.3。**

| 因素 | SYSUSE | | | | | | INFOQUAL | | | | | | 界面质量 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q6 | Q7 | Q8 | Q9 | Q10 | Q11 | Q12 | Q13 | Q14 | Q15 | Q16 |
| 胜任力 | 10.45 | 10.85 | 18.32 | 22.50* (0.6) | 16.60 | **29.42*** **(0.56)** | 20.07 | 34.32 | 17.98 | 16.06 | 23.05 | 31.00 | **42.50*** **(0.59)** | 43.44 | 21.90 | 27.66** (0.67) |
| 沉浸感 | 8.63 | **18.42*** **(0.55)** | 12.42 | 14.39 | 3.99 | 8.80 | 28.10 | 28.16 | 28.80 | 9.12 | 22.65 | 21.87 | 20.59 | 18.08 | 19.75 | 11.91 |
| 意识 | 2.24 | 5.24 | 4.93 | 5.52 | 5.62 | 9.80 | 11.61 | 17.40 | 8.51 | **19.45**** **(0.56)** | 8.61 | 11.74 | 9.50 | 7.08 | 4.15 | 2.97 |
| 一氧化碳$_2$↓(>100百万分率/m) | 0.89 | 0.12 | 2.22 | 0.67 | 6.34* (0.45) | **11.61**** **(0.61)** | **12.94*** **(0.65)** | 10.39 | 2.47 | 0.96 | 6.52 | 6.91 | 3.00 | 4.17 | 1.37 | 0.42 |

值得注意的是，参与者很乐于通过增强现实气泡观察个人污染物暴露的视觉呈现，也积极探索房间各个角落的 $CO_2$ 浓度。在第 5.2 节中，超过 80% 的参与者表示，他们对室内污染物的整体理解有所提升。在焦点小组讨论中，近 85% 的参与者对意识提升给予了高度肯定。参与者对室内 $CO_2$ 浓度迅速达到不健康水平感到惊讶。此外，参与者觉得这款增强现实应用很吸引人，近 40% 的参与者希望游戏环节能更长一些。

*EX#2*："当然，因为之前我从未见过污染的任何数值或定量数据。所以，我可以通过增强现实应用看到那些污染物，虽然不是用肉眼看到的。这真的很酷。"

*5.6.2* 应用程序的气泡可视化与用户界面。参与者主要关注用于实时监测 $CO_2$, 的增强现实气泡的动态大小和颜色，这一特点令他们感到兴奋。他们认为，增强现实气泡帮助他们更有效地与周围的 $CO_2$ 气泡互动，也促使他们触发定向气流，以减少增强现实应用中的 $CO_2$ 气泡。如表4所示，在焦点小组讨论中，近 70% 关于增强现实可视化的参与者评论为正面。我们观察到，参与者对用户界面的反馈褒贬不一（即 45% 为正面）。参与者肯定了界面清晰度，同时也对应用程序在初期不够直观表示担忧，并建议加入启动教程。

*BV#1*："在响应性和清晰度方面，它表现得非常好。除了清晰度之外，每当我放置一个气泡时，气泡的大小都会增加，然后显示出多少 *PPM*。它也在不断增加。所以，很明显你是在寻找 *$CO_2$*。"

*BV#2*："打开窗户或空调，或者打开风扇时，气泡会变小。做得很好。"

此外，60% 的参与者还认为，如果增强现实气泡的响应速度更快，就能更好地促使人们迅速采取行动。值得注意的是，当参与者离开某个增强现实气泡，之后再回来查看时，*CoWear* 腕戴式设备大约需要 30 秒才能适应该位置的一氧化碳$_2$ 浓度，并在应用程序中更新气泡的大小和颜色。

*5.6.3* 参与者的建议与反馈。 在焦点小组讨论中，我们收到了参与者提出的建设性反馈。首先，几位参与者认为，可以将首次使用时的教程说明直接嵌入应用程序中，介绍一些关于污染物及其对应表示方式的基本概念，即增强现实气泡。其次，参与者建议，不要通过多次点击在同一位置创建多个增强现实气泡，进而使应用程序界面变得杂乱，而应将重复出现的气泡合并起来，以表示该位置周围的一氧化碳$_2$ 浓度。最后，几位参与者表示，可以为增强现实气泡设置生命周期，并通过不透明度来体现，这为气泡的可信度增添了一个维度。例如，较早放置的气泡可能无法反映该位置的实际一氧化碳$_2$ 浓度，因此可以随着时间推移逐渐变得不透明，以表明数据的可信度。

## 6 讨论

本节将根据我们在整体开发 *CoWear* 过程中的经验，讨论一些重要的启示。

### 6.1 相较于基线二维热力图可视化的优势

传统二维热力图在室内空间的空间维度上呈现一氧化碳$_2$ 浓度，这限制了用户参与度，也带来了传感器布置方面的关键难题。一氧化碳$_2$ 气泡在源头高度形成，并滞留在室内空间的不同区域（见第 3.3 节中的先导实验）。因此，静态传感器的最佳布置极具挑战性，而要实现准确的环境监测，我们必须采用密集部署策略，导致成本高昂。相比之下，本文提出的增强现实方法使用低成本的 *CoWear* 腕戴式设备，通过呈现不同高度的一氧化碳$_2$ 浓度（包括在 occupants 的呼吸区域附近形成的气泡），提供更清晰的三维感知。用户可以亲自四处走动，查看实时变化，因此能够获得比静态热力图所能提供的更动态的洞察。此外，我们发现增强现实气泡增强了临场感和紧迫感（见第 5.2 节），从而促使人们更快地采取行动，例如打开窗户或开启风扇。

然而，这种基于可穿戴设备的环境感知依赖用户在室内空间中持续走动，以确保数据的可信度。因此，低成本可穿戴设备和固定式污染传感器必须协同工作，作为可信的数据来源，服务于长期以人为中心的应用；二者共同覆盖的室内空间要大于各自覆盖范围之和，从而实现连续环境感知和沉浸式增强现实可视化 [74]。我们将此留待未来工作。

**表4：不同研究方面的半结构化访谈情感总结。**

| 方面 | 情感（+%） | 反馈摘要 |
|---|---|---|
| 总体体验 | 正面（75%） | 大多数评论都对体验表示肯定（“不错”、“流畅”、“互-试用”“很棒”等评价，也有一些关于感知延迟或学习曲线的负面评价。 |
| 意识/学习 | 正面（85%） | 对意识提升的强烈正面评价，以及对室内二氧化碳水平的惊讶。 |
| 增强现实可视化 | 正面（70%） | 增强现实气泡直观，颜色/大小变化很有帮助，但存在一些顾虑关于杂乱以及气泡大小占满智能手机屏幕。 |
| 响应性 | 褒贬不一／负面（40%） | 评价褒贬不一，其中对感知延迟约 30 秒的反馈为负面，需等待系统适应新位置的二氧化碳浓度，用户希望能实时变化。 |
| 界面可用性 | 褒贬不一／负面（45%） | 认可界面清晰度，但新参与者觉得不够直观，并提出请求教程和启动说明，以降低学习曲线。 |
| 游戏时长 | 混合（60%） | 一些参与者希望游戏环节更长，但总体上认为游戏很有吸引力。 |

## 6.2 通风、热舒适度与能源之间的权衡

虽然*CoWear*的增强现实可视化会在一氧化碳$_2$浓度升高时鼓励用户通风，但在实际中，这类决策往往与热舒适度和能源消耗直接冲突。研究 [36, 78]一再发现，在寒冷气候下，即使空气质量较差，occupants也会避免打开窗户，因为这会造成热不适。在现实环境中，这种情况屡见不鲜：冬季，occupants会明确地将保暖置于通风之上。在教室 [25]和办公室 [68, 79],等共享环境中，这种矛盾会进一步加剧，因为一个人选择通风可能损害他人的舒适度，进而引发对冷风或穿堂风的分歧和抱怨。不愿通风还会导致供暖需求增加，以维持舒适的室内温度，并显著推高能源成本 [31]。认识到通风、热舒适度和能源成本之间这一艰难的权衡，有助于解释为何仅对污染物进行可视化，并不总能促使occupants在现实环境中采取通风行动。在*CoWear*的后续版本中，我们计划整合温度数据，提供更能结合具体情境的建议，帮助用户在这些相互冲突的优先事项之间权衡，而不是将通风视为应对室内污染物的唯一措施。

## 6.3 当前设置的实际局限性

我们观察到，参与者认可使用增强现实可视化实时了解空气污染物信息，并通过基于游戏的预防来减少污染暴露这一理念。与此同时，他们也对系统的响应性提出了意见（获取更新后的$CO_2$ 值大约需要等待 30 秒）、球体过于密集（能够在相近位置放置多个球体），以及为新用户提供应用程序内教程的支持等问题表示不满。其中一些问题可以轻松通过软件进行修复，但提高系统响应性更多属于硬件问题，需要仔细权衡传感器价格与精度之间的关系，这将留待未来研究解决。

## 6.4 扩展*CoWear*平台

该 *CoWear* 平台可扩展至 $CO_2$ 以外的领域，支持其他室内污染物，例如挥发性有机化合物和 $PM_{2.5}$。为此，需要在可穿戴设备中集成额外的传感器，开发能够呈现各类污染物独特扩散模式的可视化策略（例如挥发性有机化合物的波浪状扩散 [28]），并设计针对特定污染物的交互模型（例如，吊扇可以扩散气体，但可能会扬起 $PM_{2.5}$ [36, 44]）。该平台还可扩展为多人系统，将多个可穿戴设备的读数结合起来，呈现更丰富的共享暴露视图。这类协作交互（例如，一位参与者用落地扇引导气流，另一位参与者操作窗户通风）既能改善室内空气质量，也能促进协作、社交参与和环境意识 [50]。

## 7 结论

在实体空间中呈现室内 $CO_2$ 浓度对于提高人们对相关健康风险的意识至关重要。我们介绍了一种增强现实（AR）体验，将通过腕戴式 *CoWear* 传感器进行的实时 $CO_2$监测与沉浸式、游戏化交互相结合，旨在鼓励人们养成更健康的室内习惯。一项涉及 35 名参与者的研究结果显示，参与者的参与度有所提升，并且对室内污染物有了更深入的理解。此外，该系统的可用性评分中位数为 1.88，彰显了其易用性，以及其应用于现实场景、促进改善室内空气质量的潜力。

## 伦理考量

学院的伦理审查委员会已批准本研究（编号：IIT/SRIC/DEAN/2023，日期为2023年7月31日）。此外，我们已尽最大努力对参与者进行匿名化处理，以便在提供研究所需方法细节的同时保护隐私。所有参与者均签署了同意书，同意将所收集的污染物测量数据以及视频、音频和生理测量数据用于非商业研究目的。

## 致谢

作者承认使用了 OpenAI 的 ChatGPT[3] 来协助进行语法校正和文体润色。稿件中没有任何部分完全由人工智能工具生成。作者对所有内容都进行了严格审阅和核实，以确保其准确体现研究结果和学术意图。作者谨向匿名审稿人致谢，感谢他们提出的建设性意见，这些意见有助于改善论文的整体呈现。第一作者的研究由印度总理研究奖学金（PMRF）资助，资助编号为 IIT/Acad/PMRF/SPRING/2022-23，日期为2023年3月24日。本研究还得到 AI4ICPS 印度理工学院卡拉格普尔分校技术创新中心的支持，资助编号为 TRP3RD3223323，日期为2024年2月22日。

[3]https://chatgpt.com/

# 参考文献

[1] Junho Ahn、James Williamson、Mike Gartrell、Richard Han、Qin Lv 和 Shivakant Mishra。2015。通过移动增强现实支持健康的杂货购物。*ACM*多媒体计算、通信与应用汇刊（*TOMM*）12，1s（2015），1–24。[2] Raghad Albar、Andrea Gauthier 和 Asimina Vasalou。2024。通往可持续性的趣味之路：通过游戏化干预综合儿童环境可持续性学习的设计策略。载于第*23*届 *ACM* 交互设计与儿童年度会议论文集。201–217。[3] Joseph G Allen、Piers MacNaughton、Usha Satish、Suresh Santanam、Jose Vallarino 和 John D Spengler。2016。办公室工作人员的认知功能得分与二氧化碳、通风及挥发性有机化合物暴露之间的关联：一项针对绿色办公环境和传统办公环境的受控暴露研究。《环境健康展望》124，6（2016），805–812。[4] Joseph G Allen、Piers MacNaughton、Usha Satish、Suresh Santanam、Jose Vallarino 和 John D Spengler。2016。办公室工作人员的认知功能得分与二氧化碳、通风及挥发性有机化合物暴露之间的关联：一项针对绿色办公环境和传统办公环境的受控暴露研究。《环境健康展望》124，6（2016），805–812。[5] Jesús Omar Álvarez Márquez 和 Jürgen Ziegler。2020。支持店内增强现实的产品比较与推荐。载于第*14*届 *ACM* 推荐系统会议论文集。180–189。[6] Shan An、Guangfu Che、Jinghao Guo、Haogang Zhu、Junjie Ye、Fangru Zhou、Zhaoqi Zhu、Dong Wei、Aishan Liu 和 Wei Zhang。2021。ARShoe：智能手机上的实时增强现实鞋类试穿系统。载于第*29*届 *ACM* 多媒体国际会议论文集。1111–1119。[7] Ambre Assor、Arnaud Prouzeau、Pierre Dragicevic 和 Martin Hachet。2024。增强现实废弃物累积可视化。*ACM*计算与可持续社会期刊2，2（2024），1–29。[8] Kenichi Azuma、Naoki Kagi、U Yanagi 和 Haruki Osawa。2018。室内环境中低水平吸入二氧化碳暴露的影响：关于人体健康和心理运动表现的简要综述。《国际环境》121（2018），51–56。[9] Mathias Bauer 和 Malte Weiß。2023。通过严肃游戏提升环境知识：一项实验研究。载于*2023*年 *CHI*计算系统中的人为因素会议扩展摘要集。1–10。[10] Jacky Cao、Kit-Yung Lam、Lik-Hang Lee、Xiaoli Liu、Pan Hui 和 Xiang Su。2023。移动增强现实：用户界面、框架与智能。计算机综述55，9（2023），1–36。[11] Chiara Ceccarini 和 Catia Prandi。2022。EscapeCampus：利用游戏化学习工具提升学生的可持续性知识。载于*2022*年 *ACM* 社会公益信息技术会议论文集。390–396。[12] Joohwan Chae、Donghan Kim、Wooseok Jeong、Eunchan Jo、Won-Ki Jeong、JunYoung Choi、Seung-wook Kim、Myoung Gon Kim、Jae-Won Lee、Hyechan Lee 等。2022。增强现实中的虚拟空调气流模拟与可视化。载于第*28*届 *ACM* 虚拟现实软件与技术研讨会论文集。1–11。[13] Pengyu Chen。2019。城市环境质量实时监测数据图形的可视化。*EURASIP*图像与视频处理期刊2019，1（2019），42。[14] Meghan Clark、Mark W Newman 和 Prabal Dutta。2022。ARticulate：在陌生智能空间中利用增强现实与智能助手进行一次性交互。*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术论文集6，1（2022），1–24。[15] Laura D Cosio、Oğuz'Oz' Buruk、Daniel Fernández Galeote、Isak De Villiers Bosman 和 Juho Hamari。2023。用于环境可持续性的虚拟现实与增强现实：系统综述。载于*2023*年 *CHI*计算系统中的人为因素会议论文集。1–23。[16] Balázs Csoma、Maria Rosaria Vulpi、Silvano Dragonieri、Andrew Bentley、Timothy Felton、Zsófia Lázár 和 Andras Bikov。2022。慢性阻塞性肺疾病中的高碳酸血症：病因、后果与治疗。《临床医学杂志》11，11（2022），3180。[17] Bowen Du、Marlie C Tandoc、Michael L Mack 和 Jeffrey A Siegel。2020。室内二氧化碳浓度与认知功能：批判性综述。《室内空气》30，6（2020），1067–1082。[18] Ruofei Du、Eric Turner、Maksym Dzitsiuk、Luca Prasso、Ivo Duarte、Jason Dourgarian、Joao Afonso、Jose Pascoal、Josh Gladstone、Nuno Cruces 等。2020。DepthLab：面向移动增强现实、利用深度图进行实时三维交互。载于第*33*届 *ACM* 用户界面软件与技术年度研讨会论文集。829–843。[19] Oscar R Enríquez、Chao Sun、Detlef Lohse、Andrea Prosperetti 和 Devaraj Van Der Meer。2014。二氧化碳气泡的准静态生长。《流体力学杂志》741（2014），R1。[20] 美国环境保护署。2024。《内幕：室内空气质量指南》。
h
t
t
p
s://
www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/inside-story-guide-indoor-air-quality。[21] Yuejie Fan、Xiaodong Cao、Jie Zhang、Dayi Lai 和 Liping Pang。2023。短期暴露于室内二氧化碳与认知任务表现：系统综述综述与荟萃分析。《建筑与环境》237（2023），110331。[22] Biyi Fang、Qiumin Xu、Taiwoo Park 和 Mi Zhang。2016。AirSense：用于室内空气质量分析的智能家居传感系统。载于《2016年ACM普适与泛在计算国际联合会议论文集》。109–119。[23] Andrea M Feldpausch-Parker、Megan O'Byrne、Danielle Endres 和 Tarla R Peterson。2013。Carbon Bond历险记：通过一款情节剧式游戏阐释碳捕集与封存作为应对气候变化的减缓策略。《温室气体：科学与技术》3，1（2013），21–29。[24] Elliott T Gall、Toby Cheung、Irvan Luhung、Stefano Schiavon 和 William W Nazaroff。2016。实时监测个人二氧化碳暴露。《建筑与环境》104（2016），59–67。[25] Nan Gao、Wei Shao、Mohammad Saiedur Rahaman 和 Flora D Salim。2020。n-gage：预测真实环境中的课堂情绪、行为和认知投入。《ACM交互式、移动、可穿戴与泛在技术论文集》4，3（2020），1–26。[26] Ali Ghahramani、Jovan Pantelic、Matthew Vannucci、Lorenza Pistore、Shichao Liu、Brian Gilligan、Soheila Alyasin、Edward Arens、Kevin Kampshire 和 Esther Sternberg。2019。个人二氧化碳气泡：情境相关的变化及可穿戴传感器的可用性。《建筑工程杂志》22（2019），295–304。[27] Meghna Gupta 和 Grace Eden。2022。人-空气界面：通过生活体验与数字信息应对糟糕的空气质量。载于《2022年ACM交互系统设计会议论文集》。1085–1098。[28] Nurul Liyana Lukman Hekiem、Aliza Aini Md Ralib、Farah B Ahmad、Anis Nurashikin Nordin、Rosminazuin Ab Rahim、Nor Farahidah Za'bah 等。2021。先进蒸气传感材料：用于挥发性有机化合物检测的现有及潜在声波传感器材料，可作为肺癌潜在呼出气体生物标志物。《传感器与执行器A：物理》329（2021），112792。[29] Yen-Chia Hsu、Jennifer Cross、Paul Dille、Michael Tasota、Beatrice Dias、Randy Sargent、Ting-Hao Huang 和 Illah Nourbakhsh。2020。Smell Pittsburgh：动员社区公民科学参与空气质量研究。《ACM交互智能系统汇刊（TiiS）》10，4（2020），1–49。[30] Yen-Chia Hsu、Paul Dille、Jennifer Cross、Beatrice Dias、Randy Sargent 和 Illah Nourbakhsh。2017。由社区赋能的空气质量监测系统。载于《2017年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》。1607–1619。[31] Iman Hussain、Adrian Friday 和 Douglas Booker。2023。室内空气质量三难问题：改善空气质量、减少能源消耗并满足利益相关者的要求。载于《2023年CHI计算系统中的人为因素会议扩展摘要》。1–6。[32] Wijnand A IJsselsteijn、Yvonne AW De Kort 和 Karolien Poels。2013。《游戏体验问卷》。（2013）。[33] Yohanna Ishoj-Paris、Ariane Gravel-Villeneuve、Francis Vermette-David、Lissa Dixon-Sequeira、Maxime Dicaire、Maxime Morin-Grandmont、Naomi Jomphe、Nathaelle Fournier、Ophelie Champeau-Fournier、Cassandra Paré 等。2021。AXO：一款鼓励青少年儿童回收的电子游戏。载于《2021年计算机与人类交互游戏年度研讨会扩展摘要》。350–355。[34] Yifei Jiang、Kun Li、Lei Tian、Ricardo Piedrahita、Xiang Yun、Omkar Mansata、Qin Lv、Robert P Dick、Michael Hannigan 和 Li Shang。2011。MAQS：用于室内空气质量监测的个性化移动传感系统。载于《第13届泛在计算国际会议论文集》。271–280。[35] Xiaofu Jin、Wai Tong、Xiaoying Wei、Xian Wang、Emily Kuang、Xiaoyu Mo、Huamin Qu 和 Mingming Fan。2024。探索增强现实（AR）在支持老年人探索和学习智能手机应用程序方面的潜力。载于《CHI计算系统中的人为因素会议论文集》。1–18。[36] Prasenjit Karmakar、Swadhin Pradhan 和 Sandip Chakraborty。2024。探索发展中国家的室内空气质量动态：来自印度的视角。《ACM计算与可持续社会期刊》（2024）。[37] Minas Katsiokalis、Elisavet Tsekeri、Aikaterini Lilli、Konstantinos Gobakis、Dionysia Kolokotsa 和 Katerina Mania。2023。GoNature AR：通过多模态交互式增强现实体验呈现空气质量与噪声可视化。载于《2023年ACM交互媒体体验国际会议论文集》。366–369。[38] Sunyoung Kim 和 Muyang Li。2020。意识、理解与行动：关于用户对室内空气质量可视化的体验和期望的概念框架。载于《2020年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》。1–12。[39] Sarah Krings、Enes Yigitbas、Ivan Jovanovikj、Stefan Sauer 和 Gregor Engels。2020。情境感知增强现实应用的开发框架。载于《第12届ACM SIGCHI交互式计算系统工程研讨会伴随论文集》。1–6。[40] Won Do Lee、Kayla Schulte 和 Tim Schwanen。2022。用于探索个人空气污染暴露的在线交互式仪表板。《Findings 2022》（2022）。[41] Jiayang Li 和 Chongke Bi。2023。空气污染时空模式的可视化分析。《The Visual Computer》39，8（2023），3715–3726。[42] Martin Valdemar Anker Lindrup、Arjun Rajendran Menon 和 Aksel Biørn-Hansen。2023。Carbon Scales：通过物理数据表示共同理解碳排放

食品生产。载于《*2023*年*ACM*交互系统设计会议论文集》。1515–1530。[43] Liang Liu、Wu Liu、Yu Zheng、Huadong Ma 和 Cheng Zhang。2018。Third-eye：支持移动电话的空气质量监测众包感知系统。《*ACM*交互式、移动、可穿戴与泛在技术论文集》2，1（2018），1–26。[44] Sumei Liu、Rui Song 和 Tengfei Tim Zhang。2021。室外PM2.5污染情况下的住宅建筑通风。《建筑与环境》202（2021），108040。[45] Szu-Yu Liu、Justin Cranshaw 和 Asta Roseway。2020。赋予空气质量数据意义：通过叙述将客观测量与主观体验相结合。载于《*2020*年*ACM*交互系统设计会议论文集》。1313–1326。[46] Balz Maag、Zimu Zhou 和 Lothar Thiele。2018。W-air：实现可穿戴设备上的个人空气污染监测。《*ACM*交互式、移动、可穿戴与泛在技术论文集》2，1（2018），1–25。[47] Eleni Margariti、Vasilis Vlachokyriakos、Abigail C Durrant 和 David Kirk。2024。评估ActuAir：建筑 occupants 对变形空气质量显示器的体验。载于《*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集》。1–21。[48] Adnan Masic、Dzevad Bibic、Boran Pikula、Almir Blazevic、Jasna Huremovic 和 Sabina Zero。2020。在强度不同的城市污染现实条件下评估光学颗粒物传感器。《大气测量技术》13，12（2020），6427–6443。[49] Noble Saji Mathews、Sridhar Chimalakonda 和 Suresh Jain。2021。Air：用于空气污染可视化的增强现实应用。载于《*2021*年*IEEE*可视化会议（*VIS*）》。IEEE，146–150。[50] Gloria Mittmann、Adam Barnard、Ina Krammer、Diogo Martins 和 João Dias。2022。LINA——一款围绕心理健康展开的社交增强现实游戏，旨在支持现实世界中的联结，并增强青少年的归属感。《*ACM*人机交互论文集》6，CHI PLAY（2022），1–21。[51] Jimmy Moore、Pascal Goffin、Miriah Meyer、Philip Lundrigan、Neal Patwari、Katherine Sward 和 Jason Wiese。2018。通过感知、标注和可视化空气质量数据来管理家庭室内环境。《*ACM*交互式、移动、可穿戴与泛在技术论文集》2，3（2018），1–28。[52] Maya E Morales-McDevitt、Jitka Becanova、Arlene Blum、Thomas A Bruton、Simon Vojta、Melissa Woodward 和 Rainer Lohmann。2021。我们呼吸的空气：室内空气中的中性及挥发性PFAS。《环境科学与技术快报》8，10（2021），897–902。[53] Anna-Marie Ortloff、Florin Martius、Mischa Meier、Theo Raimbault、Lisa Geierhaas 和 Matthew Smith。2025。小、中、大？CHI研究中效应量的荟萃研究：助力解读效应量并进行统计功效计算。载于《*2025*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集》。1–28。[54] Jovan Pantelic、Shichao Liu、Lorenza Pistore、Dusan Licina、Matthew Vannucci、Sasan Sadrizadeh、Ali Ghahramani、Brian Gilligan、Esther Sternberg、Kevin Kampschroer 等。2020。个人CO2云：实验室测量典型办公桌环境中代谢性CO2在吸入区的浓度及扩散情况。《暴露科学与环境流行病学杂志》30，2（2020），328–337。[55] Shivani Patel、Julia H Miao、Ekrem Yetiskul、Anya Anokhin 和 Sapan H Majmundar。2018。生理学：二氧化碳潴留。（2018）。[56] Kris Permentier、Steven Vercammen、Sylvia Soetaert 和 Christian Schellemans。2017。二氧化碳中毒：回顾文献，探讨这一在急诊科常被忽视的中毒原因。《国际急诊医学杂志》10，1（2017），14。[57] Catia Prandi、Chiara Ceccarini 和 Paola Salomoni。2019。促进良好行为：融合数字与现实，在校园社区中推动可持续性。载于《第*5*届*EAI*智能物体与社会公益技术国际会议论文集》。189–194。[58] Jane Prophet、Yong Ming Kow 和 Mark Hurry。2018。培养环境意识：通过增强现实微型树呈现空气质量数据。载于《增强认知：智能技术：第*12*届国际会议（*AC 2018*），作为*HCI International 2018*的一部分于*2018*年*7*月*15*日至*20*日在美国内华达州拉斯维加斯举行，论文集，第一部分》。Springer，406–424。[59] Olivier Ramalho、Guillaume Wyart、Corinne Mandin、Patrice Blondeau、Pierre-André Cabanes、Nathalie Leclerc、Jean-Ulrich Mullot、Guillaume Boulanger 和 Matteo Redaelli。2015。二氧化碳与室内空气污染物及健康指南值超标之间的关联。《建筑与环境》93（2015），115–124。[60] Tiago Relvas、Pedro Mariano、Susana Marta Almeida 和 Pedro Santana。2024。一款旨在提升儿童空气污染感知的严肃游戏。《教育计算机杂志》（2024），1–31。[61] Tobias Röddiger、Dominik Doerner 和 Michael Beigl。2018。ARMart：基于增强现实的购物助手，帮助挑选和寻找商店商品。载于《*2018*年*ACM*普适与泛在计算国际联合会议暨*2018*年普适与泛在计算及可穿戴计算国际研讨会论文集》。440–443。[62] Sheree May Saßmannshausen、Jörg Radtke、Nino Bohn、Hassan Hussein、Dave Randall 和 Volkmar Pipek。2021。城市规划中的以公民为中心的设计：如何在公民参与过程中运用增强现实。载于*2021*年*ACM*交互系统设计会议论文集。250–265。[63] Usha Satish、Mark J Mendell、Krishnamurthy Shekhar、Toshifumi Hotchi、Douglas Sullivan、Siegfried Streufert 和 William J Fisk。2012。二氧化碳是一种室内污染物吗？低至中等浓度二氧化碳对人类决策表现的直接影响。《环境健康展望》120，12（2012），1671–1677。[64] Jeff Sauro 和 James R Lewis。2016。量化用户体验：用户研究实用统计学。Morgan Kaufmann。[65] Philipp Schaper、Anna Riedmann、Sebastian Oberdörfer、Maileen Krähe 和 Birgit Lugrin。2022。通过劝导式增强现实应用促进垃圾分类。《*ACM*人机交互论文集》6，MHCI（2022），1–16。[66] Daniel Schürholz、Meruyert Nurgazy、Arkady Zaslavsky、Prem Prakash Jayara- man、Sylvain Kubler、Karan Mitra 和 Saguna Saguna。2019。Myaqi：具备情境感知能力的室外空气污染监测系统。载于第九届物联网国际会议论文集。1–8。[67] SENSIRION。2022。SCD41：扩展测量范围并支持单次测量模式，提升二氧化碳测量精度。https://sensirion.com/products/catalog/SCD41。[68] Donya Sheikh Khan、Jakub Kolarik 和 Peter Weitzmann。2021。应用居住者投票系统，持续收集居住者对热环境与室内空气质量的反馈——办公空间案例研究。《能源与建筑》251（2021），111363。https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111363[69] Rafael ML Silva、Erica Principe Cruz、Daniela K Rosner、Dayton Kelly、Andrés Monroy-Hernández 和 Fannie Liu。2022。理解增强现实行动主义：对致力于社会变革的增强现实体验创作者开展的访谈研究。载于*2022*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集。1–15。[70] Stephen Snow、Michael Oakley 和 MC Schraefel。2019。设计驱动的性能：支持围绕办公室室内空气质量的决策。载于*2019*年交互系统设计会议论文集。99–111。[71] Peter Strøm-Tejsen、D Zukowska、Pawel Wargocki 和 David Peter Wyon。2016。卧室空气质量对睡眠和次日表现的影响。《室内空气》26，5（2016），679–686。[72] Bruno Teles、Pedro Mariano 和 Pedro Santana。2020。空气质量数据的游戏化三维可视化。《多模态技术与交互》4，3（2020），54。[73] Dai-Hua Tsai、Ja-Shiang Lin 和 Chang-Chuan Chan。2012。办公室工作人员的病态建筑综合征与室内二氧化碳浓度。《职业与环境卫生杂志》9，5（2012），345–351。[74] Radu-Daniel Vatavu。2022。环境智能与增强现实是否是同一枚硬币的两面？对人机交互的启示。载于*CHI*计算系统中的人为因素会议扩展摘要。1–8。[75] Xia Wei、Nan Yu、Qi Ding、Jingting Ren、Jiuyun Mi、Lu Bai、Jianying Li、Min Qi 和 Youmin Guo。2018。伴有二氧化碳潴留的慢性阻塞性肺疾病急性加重的特征。《*BMC*肺部医学》18，1（2018），124。[76] 世界卫生组织。2022。家庭空气污染。https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health。[77] Tongshu Zheng、Michael H Bergin、Karoline K Johnson、Sachchida N Tripathi、Shilpa Shirodkar、Matthew S Landis、Ronak Sutaria 和 David E Carlson。2018。低成本颗粒物传感器在高浓度和低浓度环境中的现场评估。《大气测量技术》11，8（2018），4823–4846。[78] Sailin Zhong、Hamed S Alavi 和 Denis Lalanne。2020。Hilo-wear：探索与室内空气质量预测的可穿戴交互。载于*2020*年*CHI*计算系统中的人为因素会议扩展摘要。1–8。[79] Sailin Zhong、Denis Lalanne 和 Hamed Alavi。2021。室内空气质量预测的复杂性与交互的简便性——一项针对1007场办公室会议的案例研究。载于*2021*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集。1–19。

# A 附录

## A.1 预研究调查问卷

*A.1.1* 人口统计信息。

（1）您的年龄是多少?

（2）您的性别是什么?

◦ 男性 ◦ 女性 ◦ 非二元性别 ◦ 不愿回答（3）您会如何描述您的家乡?

◦ 乡村 ◦ 郊区 ◦ 城市 (4) 您是否因工作而离开家乡居住?

◦ 是 ◦ 否 (5) 您目前居住在哪个城市？(6) 您已完成的最高教育程度是什么?

◦ 小学 ◦ 中学 ◦ 高等教育（学院 / 大学）◦ 研究生（硕士 / 博士）(7) 您有子女吗?

◦ 是 ◦ 否 (8) 您的家庭有多少位成员?

(9) 您与家人同住吗?

◦ 是 ◦ 否 (10) 您的就业状况是什么?

◦ 在职 ◦ 退休 ◦ 家庭主妇 ◦ 学生 (11) 您的家庭月收入是多少（指共同居住并共享财务的家庭成员的收入）?

◦ <250 美元 ◦ 250 - 475 美元 ◦ 475 -750 美元 ◦ 750-950 美元 ◦ >950 美元 ◦ 不愿回答 (12) 您会如何描述您的居住场所?

◦ 单层住宅 ◦ 双层住宅 ◦ 公寓 ◦ 一室一厅公寓 ◦ 宿舍房间 (13) 您或您的家庭成员是否患有由空气质量差引起的呼吸系统疾病/健康问题? ◦ 是 ◦ 否。如果是，请说明健康问题。

*A.1.2* 室内污染意识。请选择以下选项作答：◦ 正确 ◦ 错误 ◦ 不适用。

Q1 全球三分之一的人口受到有害家庭空气污染物的影响 Q2 成年人肺癌死亡病例中，约有 11% 可归因于暴露于家庭空气污染中的致癌物 Q3 室内空间中允许的二氧化碳浓度，长期标准为 400 百万分率 Q4 英国政府承诺实施新的标准、指南和法规，要求从 2025 年起新建的所有住宅减少 75-80% 的碳排放 Q5 在贵国，道路交通事故造成的死亡人数多于呼吸系统疾病 Q6 国家绿色法庭（NGT）建议政府强制要求所有公共建筑监测并报告室内空气质量 Q7 贵国部分地区严格遵守室内空气质量法规

*A.1.3* 对室内污染物的了解。

(1) 您听说过病态建筑综合征吗?

◦ 是 ◦ 否

(2) 您是否曾测量过家中或办公室的空气污染物? ◦ 是 ◦ 否 ◦ 如果是，请说明相关健康状况。(3) 您认为家庭中可能有哪些污染源？（例如，燃气灶、冰箱、熏香等）(4) 您认为什么时候家里的污染更严重?

◦ 上午（06:00-12:00） ◦ 下午（12:00-18:00） ◦ 傍晚（18:00-00:00） ◦ 夜间（00:00-06:00） (5) 您认为空气污染物可能对健康造成哪些影响（例如头晕、眼睛刺激等）？(6) 请根据您的看法，按照危害程度排列以下污染物（即 1 - 危害最小，5 - 危害最大）• 细小尘埃颗粒（PM2.5） ◦ 1 ◦ 2 ◦ 3 ◦ 4 ◦ 5

• 二氧化碳（CO2） ◦ 1 ◦ 2 ◦ 3 ◦ 4 ◦ 5
• 乙醇（C2H5OH） ◦ 1 ◦ 2 ◦ 3 ◦ 4 ◦ 5
• 挥发性有机化合物（VOC） ◦ 1 ◦ 2 ◦ 3 ◦ 4 ◦ 5
• 二氧化氮（NO2） ◦ 1 ◦ 2 ◦ 3 ◦ 4 ◦ 5 （7）在以下情境中，您会怎么做？请从以下选项中选择：◦ 打开排气扇 ◦ 打开吊扇 ◦ 打开窗式通风器 ◦ 打开分体式空调 ◦ 开窗 ◦ 清洁该区域。

• 厨房里烟雾弥漫
• 餐厅里有昨天剩下的剩菜
• 在卧室扫地扬尘
• 家庭聚会
• 在房间内吸烟

*A.1.4* 对污染与应对措施的认知。回答选项如下：◦ 强烈不同意 ◦ 不同意 ◦ 中立 ◦ 同意 ◦ 强烈同意。

Q1 排气扇有助于排出厨房中的污染物 Q2 吊扇不会影响污染物 Q3 有时卧室中的二氧化碳浓度会高于厨房 Q4 分体式空调会将二氧化碳和其他污染物排出房间 Q5 室内聚会会增加房间内的二氧化碳浓度 Q6 任何人都能感觉到家中的污染物正在累积 Q7 二氧化碳会降低我们集中精力完成任务的能力 Q8 公众对室内空气污染的意识较低 Q9 室内空气比室外空气污染更严重 Q10 如果你能看到污染物在房间中的聚集位置，就可以减少空气污染物

## A.2 会后调查问卷

游戏体验问卷得分按其条目的平均值计算。对于游戏内模块——胜任力：Q2 和 Q9，感官与想象沉浸：Q1 和 Q4，心流：Q5 和 Q10，紧张：Q6 和 Q8，挑战：Q12 和 Q13，负性情感：Q3 和 Q7，正性情感：Q11 和 Q14。对于游戏后模块——积极体验：Q1、Q5、Q7、Q8、Q12、Q16，消极体验：Q2、Q4、Q6、Q11、Q14、Q15，疲倦：Q10、Q13，回归现实：Q3、Q9、Q17。回答从以下选项中选择：◦ 完全不 ◦ 轻微 ◦ 中等 ◦ 相当 ◦ 极其。

*A.2.1 In-*游戏体验问卷 .

Q1 我对游戏故事感兴趣 Q2 我感到成功 Q3 我感到无聊 Q4 我觉得这很令人印象深刻 Q5 我忘记了周围的一切 Q6 我感到沮丧 Q7 我觉得这很令人厌倦 Q8 我感到烦躁 Q9 我觉得自己很有技巧 Q10 我完全沉浸其中 Q11 我感到满足 Q12 我感到受到挑战 Q13 我必须付出很多努力 Q14 我感觉很好

*A.2.2* 游戏后体验问卷。Q1 我感到恢复了活力 Q2 我感觉不好 Q3 我觉得很难回到现实中 Q4 我感到内疚 Q5 感觉像是一次胜利 Q6 我觉得这是在浪费时间 Q7 我感到精力充沛 Q8 我感到满意 Q9 我感到迷失方向 Q10 我感到筋疲力尽 Q11 我觉得自己本可以做些更有用的事 Q12 我感到强大 Q13 我感到疲惫 Q14 我感到后悔 Q15 我感到羞愧 Q16 我感到自豪 Q17 我感觉自己仿佛结束了一段旅程，回到了这里

*A.2.3* 实验后反馈。

(1) 玩过这个游戏后，你对室内空气污染的了解是否有所提高?

◦ 完全不 ◦ 轻微 ◦ 中等 ◦ 相当 ◦ 极其 (2) 你多久玩一次手机游戏或增强现实/虚拟现实游戏?

◦ 从不 ◦ 每天 ◦ 每周 ◦ 每月 ◦ 很少 (3) 通过本次会话，我觉得自己对这个增强现实应用更加熟悉了。

◦ 强烈不同意 ◦ 不同意 ◦ 有些不同意 ◦ 中立 ◦ 有些同意 ◦ 同意 ◦ 强烈同意 (4) 我想在家中使用这个应用程序，以了解二氧化碳气泡的位置。

◦ 强烈不同意 ◦ 不同意 ◦ 有些不同意 ◦ 中立 ◦ 有些同意 ◦ 同意 ◦ 强烈同意 (5) 你会向朋友圈中的其他人推荐这个游戏吗? ◦ 会 ◦ 不会 (6) 我希望将其他污染物（即细小尘埃颗粒、乙醇等）整合到这个应用程序中。

◦ 强烈不同意 ◦ 不同意 ◦ 有些不同意 ◦ 中立 ◦ 有些同意 ◦ 同意 ◦ 强烈同意 (7) 未来你希望看到哪些游戏功能

◦ 多人模式中增加玩家人数 ◦ 增强现实头显集成
◦ 帮助减少污染物的人工智能建议

(8) 还有什么建议可以改进这款游戏?

## A.3 研究后系统可用性问卷

PSSUQ 包含 16 项的用性评估 得分在各题项的用性评估计算——总体：Q1 至 Q16，系统实用性（SYSUSE）：Q1 至 Q6，信息质量（INFOQUAL）：Q7 至 Q12，界面质量（INTERQUAL）：Q13 至 Q16。回答选项采用七点李克特量表：◦ 强烈不同意

◦ 不同意 ◦ 有些不同意 ◦ 中立 ◦ 有些同意 ◦ 同意 ◦ 强烈同意。

Q1 总体而言，我对这款游戏的易玩程度感到满意 Q2 这款增强现实应用易于使用 Q3 我能够通过这款增强现实应用看到二氧化碳浓度降低 Q4 使用这款增强现实应用让我感到舒适 Q5 我很容易学会使用这款增强现实应用 Q6 我相信可以通过这款增强现实应用减少周围的污染物 Q7 如果会话期间出现技术错误，应用程序会提供清楚说明如何解决问题的错误消息 Q8 使用增强现实应用时，每当我犯错，都能轻松快速地恢复。（例如，错误标记设备、出现多个气泡）Q9 这款增强现实应用附带的信息（如信息表、研究助理提供的说明）清晰易懂 Q10 查找二氧化碳浓度很容易 Q11 信息表有助于我完成任务和情境 Q12 应用界面上的信息组织清晰 Q13 这款应用的界面令人愉悦 Q14 我喜欢使用这款应用的界面 Q15 这款应用具备我所期待的所有功能和能力 Q16 总体而言，我对这款应用感到满意

## A.4 半结构式访谈主题

*A.4.1* 游戏体验。

- 您觉得与游戏互动的总体体验如何?
- 您最喜欢和最不喜欢哪些部分?
- 您觉得界面设计在清晰度、响应性和易理解程度方面表现如何?
- 您对界面有哪些改进建议?

*A.4.2* 游戏内交互对空气污染物感知的影响。

- 在玩游戏之前，您对周围环境中的空气污染物有多了解?
- 这款游戏是否改变了您的意识或理解？如果是，如何改变?
- 这些可视化是否让您觉得污染物更贴近自身，或更容易注意到?

*A.4.3* 改进平台的建议。

- 您建议增加哪些功能或进行哪些改进，以增强游戏对您理解空气质量的帮助?
- 您觉得还缺少哪些工具或信息吗?