

基于虚拟现实的儿童学路街道空间 安全感与焦虑感量化研究

摘要：[目的/意义] 改善儿童学路上的安全隐患、淡化儿童通学焦虑感的同时提高安全感，为构建儿童友好城市的同学道路提供基础支持。[方法/过程] 基于 VR 场景实验进行数据收集，利用客观生理、客观心理及、主观语义及眼动指标获取儿童对不同条件下通学道路的感知情况，通过非参数检验方式进行组间差异分析。[结果/结论] 实验结果显示，儿童在不同条件下显示出不同程度的安全感与焦虑感，且不同年龄段儿童存在注视偏好差异。

关键词：儿童友好，环境感知，虚拟现实，感知评价

一、引言

1.1 研究背景

1.1.1 儿童在城市中的发展福祉需要得到保障

人类在其发展历程中，通过繁衍进行生理性的肉体延续，通过知识进行精神性文明传承。儿童时期是所有人类必然经历的过程，城市科学是所有文明无法绕过的领域。据联合国经社部统计，儿童的数量占全球人口数量的三分之一。在发展中国家，城市中 60%的人口自然增长仍由儿童推动（联合国经济和社会事务部人口司.联合国经济和社会事务部, 2014）。关注儿童，关注儿童在城市中的发展，具有不言而喻的重要性。

《联合国儿童权利公约》指出，儿童享有与成年人同等价值的不可剥夺的权利（联合国大会, 1989），具体表现为儿童的生存权、发展权、受保护权和参与权等。儿童与成年人同样享有人权，但儿童往往需要更多不同于成年人的特殊照顾和保护。儿童依赖于成年人以及成年人的决策（刘欣宇, 2020）。

作为成年人，在城市科学中做出有利于儿童生存发展的决策尤为重要。1979 年《儿童权利公约》提出儿童有权生活在卫生、安全的环境；1996 联合国通过“儿童友好型城市”（CFC: Child Friendly Cities）提案，建议在城市规划和街区环境营建中考虑儿童实际需求；2002 年，联合国召开特别会议呼吁建设一个“适合儿童生长的世界”，将建设服务儿童的社区与城市作为共同目标（高玥, 2020）。

我国国家发展改革委社会发展司司长欧晓理指出：“儿童是国家的未来，民族的希望。我国是人口大国，也是儿童人口大国，根据最新的‘七普’数据，0~17 周岁儿童约有 2.98 亿人。让孩子们成长得更好，是我们最大的心愿。”

1.1.2 儿童友好型城市的建设与发展

1996 年，联合国儿基会（UNICEF）和人居署（UN-Habitat）共同发起儿童友好城市倡议（Child Friendly Cities Initiative，简称 CFCI），指出少年儿童的福祉是衡量人居环境健康与否、民主社会文明程度和政府良好治理水平的终极目标。CFCI 的愿景是：每个儿童和青年都能拥有愉快的童年和青年时光，在各自城市和社区中，平等享有自身权利，充分发挥自身潜力。

国家发展改革委联合多部门印发《关于推进儿童友好城市建设的指导意见》指出：到 2025 年，在全国范围内开展 100 个儿童友好城市建设试点，让儿童友好要求在公共服务、权利保障、成长空间、发展环境、社会政策等方面充分体现；到 2035 年，预计全国百万以

上人口城市开展儿童友好城市建设的超过 50%，100 个左右城市被命名为国家儿童友好城市，推动儿童友好成为城市高质量发展的标识。

1.1.3 儿童在学路上的安全隐患需要得到改善

关注儿童在城市中的福祉，需要关注儿童的日常生活与活动。通学与每个适龄儿童的生活息息相关，同时也是儿童认知接触家庭以外社会环境的重要窗口，“两点一线”的通勤模式更让通学路成为儿童主要的活动路径及范围。但现实生活中的儿童学路存在诸多威胁儿童福祉的因素，总结相关报道，对儿童威胁最大的两重威胁为交通安全及儿童拐卖。

随着我国相关法制建设与社会共同关注，儿童拐卖呈现逐年降低的趋势。据公安部，2021 年，全国拐卖儿童案件与 2013 年相比，下降 82.6%。据最高人民检察院 2022 年 6 月 1 日发布的《未成年人检察工作白皮书（2021）》：拐卖妇女儿童犯罪呈下降趋势。2021 年，检察机关起诉拐卖妇女儿童犯罪为 1135 人，较 2012 年下降 69.32%，年均下降 12.3%。

相较于儿童拐卖方面取得的进步，我国对儿童在学路上的交通安全威胁仍需进一步的关注与改进。对于与社会接触较少的儿童而言，交通事故是致死的主要原因。WHO《2018 世界卫生统计报告》中指出全球有 135 万人死于交通事故，且人数逐年升高，交通事故是 5-14 岁儿童主要致死原因。据《中国儿童道路安全蓝皮书（2017）》。数据可知，中国每年将近 1.85 万名儿童死于交通事故，死亡率是欧美的 2.5 倍以上，机动车致死和致伤的儿童占受害儿童总数的 40.21%。

我国儿童机动车致死和致伤比例居高的主要原因与城市化的发展密切相关。伴随着快速城市化和经济的快速提升，私家车普及令城市街道中穿梭的汽车数量急剧攀升，城市“以车为本”的建设模式忽视了人的使用感受，尤其对儿童安全的需求的忽视（刘铮, 2021）。“以车为本”的交通方式不仅造成城市交通的巨大压力，还严重挤压了儿童的步行通学空间，人行道与车行道在空间上的争夺与交叉为儿童的学路带来了巨大安全隐患。此外，我国儿童上下学时间上下班时间有所重合，城市通勤高峰时间增加的通学行为使得学校及周边区域常常发生交通拥堵问题，由此也导致儿童通学出行安全问题的频现。

同时，越来越多的家长骑车驾车接送儿童通学。学龄儿童采取活跃交通方式（步行、骑行）通学的比例下降，而采取消极交通方式（如私家车）上下学的比例攀升（武凤文；陈明远, 2020）。家长期望通过接送孩子上下学来保护孩子，但是却造成学校附近上下学时间段更严重的交通拥堵及车流混乱现象（刘铮, 2021）。驾驶机动车的家长强化了儿童学路的交通安全威胁，形成恶性循环。因此，城市科学需要从更宏观、根本的角度打破闭环，改善儿童学路上的安全隐患。

1.1.4 儿童独立通学的必要性和优点

交通是个人独立性的标志，儿童通过独立交通逐步获得更多的自主权是其成长的一个重要方面（李金岸, 2020）。然而，家长在儿童通学行为中干预对儿童成长产生负面的影响。根据某自媒体的民间调查，调查对象中约有 70% 的学生表示需要父母前来接送，而这些需要父母接送的孩子中，有 42.1% 的学生害怕独自出门，超过 40% 从未独自一人出行。从这项民间调查不难得出结论：长期以来家长接送的儿童缺乏与外界社会的接触与独立交通能力，难以形成必要的独立性与自主性。

家长对儿童的保护和监控，实际上对儿童的独立活动进行了限制（Hillman, 1990）。父母认为儿童的权利应当由监护人代为行使，父母代替儿童行使权利所做出的决定不仅没有保障儿童的利益，相反却损害了儿童的独立活动与决策利益（李金岸, 2020）。这与保护儿童利益福祉的初衷相悖。

儿童独立通学具有急迫的现实性。在高密度城市环境中成长的儿童健康水平下降，缺乏

对自然的接触造成对自然观的缺失并成为心理疾病的潜在原因。近年来,我国儿童健康水平呈现下降趋势,儿童获部分致病高危因素及相关疾病的比例有所攀升。根据《中国儿童青少年营养与健康报告 2016》,30 年间我国学龄儿童肥胖率显著增高,慢性病风险随之增加。此外,1985-2005 年 20 年间,我国儿童的运动表现情况显著下降。国内抽样调查结果显示,我国 12.4%的城市儿童具有自然缺失症的倾向,症状包括注意力不集中、情绪调节能力较弱等,自然接触机会的减少制约了现代社会儿童的健康成长 (孟雪, 2020)。

儿童独立通学、积极通学具有正面的健康、经济和社会效应。自主的步行或骑自行车上下学 (积极通学) 是儿童将体力活动融入日常生活的一种方式,是儿童体力活动的重要组成部分 (FAULKNER G E J, 2009), 可有效提高儿童体力活动水平。积极通学增加儿童体力活动,可以减少肥胖几率,增强心血管健康;可降低对机动车的依赖,具有显著的环境、经济效益,研究表明欧盟步行与骑行的经济价值每年约 660 亿、240 亿欧元;儿童在积极通学中的玩耍、观察等休闲活动有益于促进儿童间的交往行为,增强生活体验,对儿童心理和社会性发展具有积极影响 (陆明, 李瑞南, 2021)。

儿童独立通学、积极通学也为家长提供了更多工作时间与休息时间,减少家长的压力。小学生下午放学的时间提前,有些甚至提前至“下午四点半”或者“三点半”,而大部分坐班制公司下班的时间都是在下午五点到六点左右,家长一方面难以违背公司的制度,一方面不放心孩子自主通学,有相关媒体评论:谁去接送孩子上下学成为组建家庭后的最大矛盾。

1.2 研究综述

1.2.1 儿童通学的相关研究

通学行为作为城市交通的重要组成部分长期被忽视,西方社会对其关注始于新儿童社会学 (李金岸, 2020)。20 世纪八十年代以来,儿童肥胖与出行安全问题日趋严重,学者们发现步行或骑行通学能够有效地减少儿童肥胖率,此研究结论在公共健康领域中得到广泛共识 (KLESGES R C, 1990)。随着关注度的持续升高,国内外兴起了通学道的建设。从发展时间看,国外通学道建设早,经验丰富,如美国丹佛的“见学地景”项目、英国发起的“步行巴士”计划以及荷兰代尔夫特的“儿童出行路径”项目。这些项目都对我国起到了指导作用。在完善步行环境的基础上,学者们提高了对社会环境的关注。日本以学校为主导建设保障儿童安全的道路,并从交通统筹、道路设计、景观布置、报警监视系统、照明设备多方面对儿童通学进行保障,减少儿童通学路径上的犯罪威胁。我国香港与台湾地区在提升物质空间环境的同时加入社会的监督力量;深圳市借鉴国外经验,与社会机构合作,探索“步行巴士”通学模式。

在建设实践进展到一定阶段后,学者专注于提升通学道设计的精细化,通过数据分析研究建成环境 (KERR J, 2006)、建筑形式与土地利用 (REILLY M, 2003)、混合的土地利用模式 (CERVERO, 2008)、通勤距离与人口密度与通学行为的关系 (刘吉祥, 周江评, 肖龙珠, 等, 2009)。我国还有诸多对学路环境安全性感知、优化策略的研究,聚焦于建立环境评价分级体系,以及界定影响学路环境的因素。从研究成果来说,评估体系不尽相同,且具有较强的地方性,缺乏具有普遍意义的统一体系。影响因素分类详实、种类复杂,但研究因素互相关联,停留在定性层面,缺少量化研究,很难得出明确独立要素的影响,在实践中准确有效地指导。从研究方法来说,此类研究多为文献归纳、调查问卷、社会访谈以及实践探索,经验主义色彩浓厚。

1.2.2 人对环境感知的量化研究

随着科技的飞速发展,更多的方法与设备被用来量化研究不同环境带给人的不同感受。在实验暴露阶段,以往关于压迫感的研究,多采用实地街景观察 (Asgarzadeh, 2012)或用相

机取景再投放在实验室的全景放映装置的暴露方法(武井 1977, Asgarzadeh, Koga et al. 2009, Asgarzadeh, Koga et al. 2014)研测研究受试者的压迫感,但此类空间感知的方法包含诸多外界不确定的干扰因素,会对实验结果产生一定影响。VR 虚拟现实技术的发展与普及,可以让观察者摆脱二维的平面显示器,借助视觉设备输出仿真信息,产生一种沉浸于真实环境的感觉(宋晓宇, 2020)。研究者也可以通过 3D 建模的方式,更加精准的把控所呈现空间的变量,避免其他不必要因素的影响,使得实验结果更加准确。

在实验量化评估阶段,之前关于压迫感的研究,都是运用语义差异法(semantic differential, 简称 SD 法),即选取语义相反的多组形容词,让受试者从不同维度对街道的属性与特点进行主观打分,从而量化研究受试者对不同街道场景的空间感知。但是在分析和评估街道景观的特征时,运用词语进行描绘是十分主观的,这将会引发争论并缺乏客观性(Asgarzadeh, Lusk et al. 2012)。随着移动传感器的进步,更先进与便捷的设备被用于空间感知的监测,研究人员可以运用生理指标,如心率(Song, Joung et al. 2013)、皮电(Koenig, Scheider et al.)、脑电(Aspinall, Mavros et al. 2015)等,收集观察者因视觉空间变化而产生生理及心理指标的变化。

1.3 研究意义

综上所述,研究儿童对学路环境的感知具有必要性,建设发展儿童友好的独立通学路径对儿童、家庭、社会具有诸多积极影响。国际社会与我国政府对儿童通学道路的发展关注度高,国内外学界对儿童通学的研究关注度高、实践经验丰富,但存在一定的局限性。本实验采取的 VR 虚拟现实技术与 3D 建模更精确地控制了研究变量,更好地排除了干扰因素,进而得到更准确的研究成果。

而传统的儿童通学研究缺乏儿童视角于儿童参与,多为研究者模拟儿童视角于儿童行为特征。而由于儿童参与的缺位,传统研究难以获得儿童的生理指标以及心理指标,进而难以获得影响儿童通学环境感知的准确要素。基于此得出的研究成果也是一种缺乏儿童真正参与与感知的“家长式”干预,存在研究对象和实验主体的错位,并不利于真正推进儿童的福祉。本研究以学龄儿童座位研究对象与实验被试者,不仅获得了儿童对通学环境的直观感知数据,做出直接准确的分析,也有利于推动儿童对规划的参与与决策,提出儿童视角、儿童感知、儿童友好的通学环境规划建设建议。

1.4 研究框架

本研究首先对环境感知机制与环境感知实验进行文献研究,依据此进行实验设计并获得四类环境感知数据。进而基于实验数据分别对 7 种独立条件从总体到分层的组间差异,以及相关的眼动数据进行分析 and 讨论。研究框架如图 1 所示。

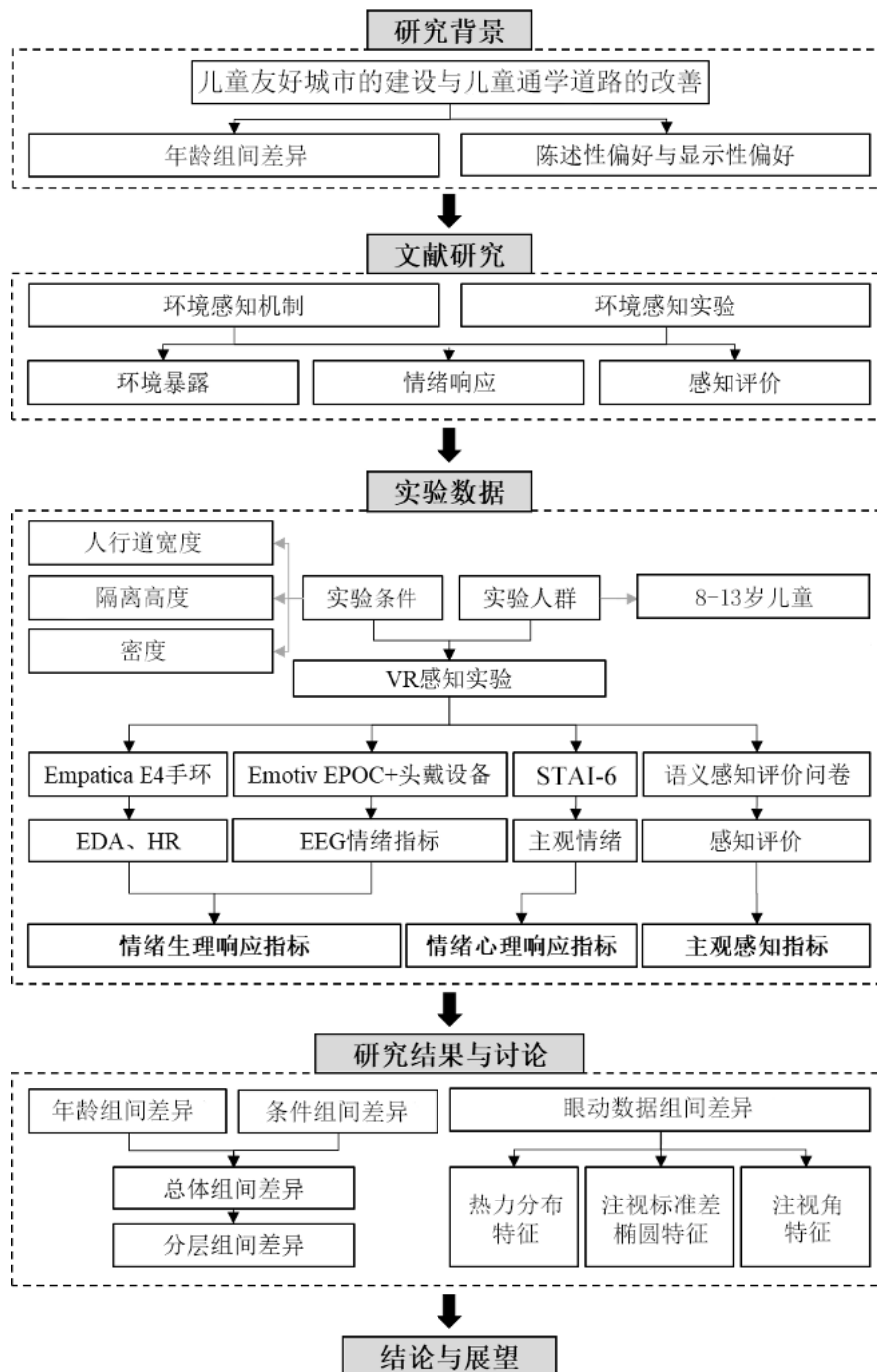


图 1 研究框架

2 实验整体论述

2.1 实验设计

过宽的人行道会造成行人之间的距离较大，往往会给行人心理上的不安全感；过窄的人行道则会造成行人之间的步行间距较小，给人一种拥挤、不舒服的压迫感。国内已有研究指出，净宽小于 1.8m 的人行道会妨碍人们的正常使用，净宽小于 1m 的人行道大多数行人不会使用。因此，在人行道规划设计中，在行人交通量较少时，应保证其最小人行道净宽不小于 1.5m (薛明, 1999)。由于儿童对步行通道宽度的心理感知和尺度感知与成年人存在差异，故从人行道的宽度设计方法对儿童学路步行通道宽度的取值进行估算。

在人行道的宽度设计中，主要有两种计算方法：第一种是按照车行道宽度的方式计算步行道宽度，第二种是使用服务等级法计算人行道宽度 (薛明, 1999)。由于在城市各街区中行人密度和街区性质不尽相同，所以第二种方法的服务水平划分在不同的街道间存在很大差异。本实验旨在探索儿童不同街道学路的普遍规律，故选取第一种计算方法。按照车行道宽度的方法计算步行道宽度的方法见下式 1：

$$B = b \cdot \frac{A}{N}$$

式 1

其中，B 代表一侧行人步行通道宽度 (m)，b 代表一条步行带所需要的宽度，与行人两手是否携带物品及携带方式有关，A 代表高峰小时人流量 (单侧、双向) (人/小时)，N 代表一条步行带的通行能力 (人/小时)。N 的计算方法可以参照计算机动车道通行能力的车头间距跑法，计算方法见下式 2：

$$N = \frac{1000V}{L}$$

式 2

其中，V 代表行人步行速度 (km/h)，L 代表行人前后之间的间距 (m)。

本实验采取上述方法估算儿童学路所需的人行道宽度的粗略值。根据实测，背着书包的儿童单人所需步道宽度为 0.5m，即 b 为 0.5；现小学普遍采取不同班级分时段放学的方式，每小时约放出 6 个班级、每班 50 人的人流量，即 A 为 3000；根据实验实测，儿童性走完 100m 实验场景需要 3 分钟，即每小时步速为 2km，V 为 2；一般街道 L 值取 3-4，考虑到学路期间，人流较密，且儿童具有结伴而行的特点，L 在本实验中取 2。计算后可得，儿童在不同街道学路的一侧步行通道宽度为 1.5m。故本实验取 1.5m 为人行道标准宽度，另取宽度为 1m 和 2m 的街道作为对照变量，探讨街道宽度对儿童学路的影响。

为探究不同宽度人行道、不同条件人行道语车道之间的隔离要素带给儿童的空间安全感与压迫感感知差异，设计实验测量在多个街道空间环境下受试者的生理和认知反映，本实验招募了 18 名志愿者进行本次研究。VR 实验场景包括三个变量，分别为街道宽度（1 米、1.5 米、2 米）、隔离高度（高于视高点 1.2m、低于视高点 0.6m）、隔离视高点处密度（高密度、低密度）。将三个变量依次排列组合，最终得出 12 个不同的街道场景，即 1 米\高于视高点\高密度、1 米\高于视高点\低密度、1 米\低于视高点\高密度、1 米\低于视高点\低密度、1.5 米\高于视高点\高密度、1.5 米\高于视高点\低密度、1.5 米\低于视高点\高密度、1.5 米\低于视高点\低密度、2 米\高于视高点\高密度、2 米\高于视高点\低密度、2 米\低于视高点\高密度、2 米\低于视高点\低密度。被试者将在相同定点观看 5 个随机街道 VR 场景，我们将通过实验获得脑电波(EEG)、皮肤电活动(EDA)和心率(HR)生理数据，及状态焦虑量表 STAI-6 与感知语义评价问卷，用以评估不同街道空间对儿童产生的空间安全感及焦虑感的感知差异。

表 1 实验变量设置

自变量	因变量
-----	-----

人行道宽度 (3)	隔离高度 (2)	隔离视高点处密度 (2)	个人特征情况	生理测量数据
(1/1.5/2)	高于视高点 低于视高点	高密度 低密度	性别、年龄、家庭教育等	状态焦虑量表 感知语义评价

2.1.1 实验样本

本研究经过了北京大学生物医学伦理委员会（PUIRB）审查同意，严格遵守相关规定及准则。在实验人群的选择上，研究人员于 2022 年 10 月招募了 20 名健康的三到六年级小学生参加实验，被试者以随机顺序参与实验。为了保证被试选取的客观性，防止无关因素对实验造成不良影响，在招募过程中，将询问被试者最近的工作学习生活状态，评定其近期心理健康状态，如有精神障碍、过度焦虑或过度压力等异常情况，则不允许进行实验。色盲色弱等视觉障碍、中耳炎等听觉障碍、心血管、内分泌、精神疾病等慢性病史、癫痫病史等将影响实验感知和实验指标测量，不纳入被试者范畴。另外，被试者被要求在参加研究之前剧烈运动，在实验前至少两个小时不喝含咖啡因的饮料。

2.1.2 实验流程

实验过程包括实验准备、场景暴露-测量、实验结束三个阶段，实验收集生理测量数据与问卷量表数据。

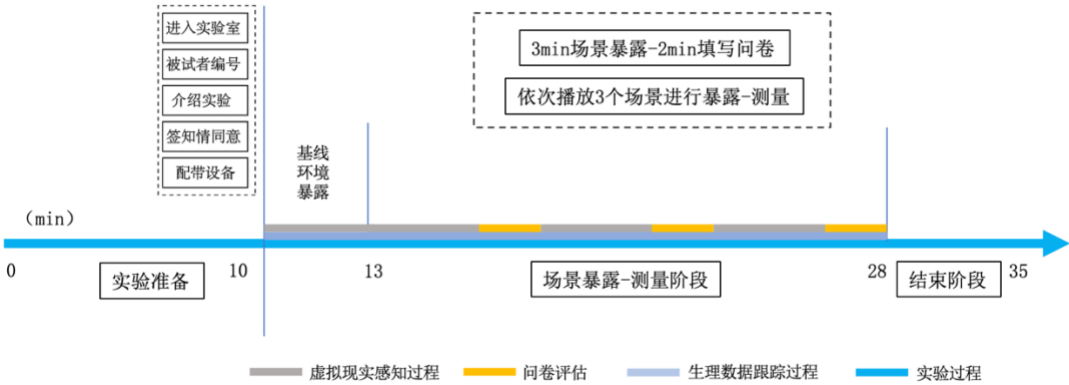


图 2 实验流程图

实验准备阶段，引导被试者进入房间后，请其阅读知情同意书并签字确认。其后引导被试者到指定区域就做，并为其依次佩戴 Empatica E4 手环、Emotiv EPOC+脑波仪和 HTC VIVE VR 头戴设备。在实验设备佩戴及调试完毕之后，与被试者确认其舒适度与耐受情况，并根据进行脑电的基线测量。

场景感知阶段，分为基线场景、实验场景一、实验场景二、实验场景三共四个环节。三个实验场景的播放次序参考实验场景随机表（附录 1），每位被试者对应的随机表序号依据其参加试验的先后顺序从 1 至 12 循环滚动。基线场景中，首先进行 3min 的实验房间环境暴露，随后切换至实验场景一，首先进行 3min 的环境暴露，其后依次向被试者询问其 STAI-6 的 6 种情绪状态（STAI-6.1）及其对公共语义感知评价（SD.1），回答完毕后切换下一场

景。实验场景二、三依次重复上述实验场景一的操作流程，分别得到 STAI-6.2、SD.2 和 STAI-6.3、SD.3。该阶段的每一步操作均通过事先由专业人员录制好的语音提示引导被试者完成，其中问卷部分在语音播放题目的同时，题目和选项在 VR 视图中以文字方式呈现。另外，该阶段的各时间节点均通过 Unity 软件记录，以方便后续生理指标数据处理

结束调查阶段，为被试者移除仪器设备后，请其填写人口信息问卷，并引导其离开。

表 2 实验具体流程及质量控制措施

	时间	研究人员 A	研究人员 B
0	准备工作	1.检查知情同意书 2.交叉检查流程	1.设备准备并调试到预备状态 2.交叉检查流程
1	0-5min	1.引导进入实验室 2.实验研究内容介绍并签署知情同意书	1.输入被试信息并开始记录时间 2.摄像机、电脑屏幕、程序录制开始
2	5-10min	1.引导被试者坐在椅子上，为其佩戴手环，并开机。 2.佩戴脑电设备，提示对方在测试过程中头部不要大幅度晃动。 3.测瞳距，引导佩戴 VR 设备。 4.与被试确认其舒适度与耐受情况。	1.监测脑电设备连接状态，协助佩戴脑电设备，滴生理盐水。 2.监测 VR 环境质量
3	10-13min 基线场景	1.告知其放松，即将进入基线场景 2.沉浸式暴露 1min，记录其生理反应（EEG.1、EKG.1、EDA.1） 3.暴露结束后引导被试者回答状态焦虑量表与语义差异评价	1.在 VR 中播放基线场景 2.记录当前场景环境数据
4	13-28min 场景-测量	1.告知即将进入实验场景 2.沉浸式暴露 3min，记录其生理反应（EEG.1、EKG.1、EDA.1） 3.暴露 3 分钟后，给受试者 2min 时间填写状态特质焦虑量表与语义差异评价 4.重复上述操作，更换场景并让受试者进行评价，每个场景沉浸式暴露 3min，填写主观评价 2min，每个受试者将对 3 个场景进行暴露-评价。	1.切换实验场景 2.监测设备情况，保证脑电设备和 VR 设备连接正常。
5	28-35min	1.告知实验结束 2.摘除设备 3.让受试者填写人口特征数据表	1.停止生理设备记录 2.回收所有设备 3.整理本被试的所有资料

6	结束工作	1.交叉检查流程 2.引导被试离开 3.收拾整理实验环境	1.交叉检查流程 2.停止录像机 3.收拾整理实验环境
---	------	------------------------------------	-----------------------------------

2.2 数据提取与处理

本研究的环境感知实验共产生两大类数据：客观指标和主观指标。客观指标包括脑电（EEG）、皮电（EDA）和心率（HR）三类生理响应指标，主观指标包括焦虑-状态量表(STAI-6)、感知语义评价问卷和人口信息三类问卷。

2.3 数据指标

2.3.1 EEG、EDA 与 HR 数据

本研究实验使用 Emotiv EPOC+头戴设备获取 EEG 实时数据（图 3）。该设备有 14 个电极感受器捕获脑电波，同时能够基于原始 EEG 数据通过特定算法计算出 6 种衡量情绪的指标（Performance Metrics）：投入（Engagement）、兴奋（Excitement）、压力（Stress）、放松（Relaxation）、兴趣（Interest）、注意力（Focus）。投入（Engagement）衡量的是沉浸在当下的程度；兴奋（Excitement）是一种具有积极生理唤醒的意识或感觉，并与多种生理反映相关，包括汗腺刺激、心率增加等；压力（Stress）衡量的是面临当前挑战的舒适度（comfort）；放松（Relaxation）衡量的是从高度集中停止并恢复的能力；兴趣（Interest）是对当前刺激、环境或活动的吸引或厌恶的程度；注意力（Focus）是对一项特定任务的固定注意力（fixed attention）的衡量(Emy, 2019)。情绪指标的数据导出、回放和预览的频率为 0.1Hz，每一组数据包括这 10s 内的最大值（MAX）、最小值（MIN）和均值（RAW），以及据此计算出波动范围（RANGE）和缩放后的标准化值（SCALE）。本研究采用六种情绪指标数值在每个场景暴露区间内的标准化值（SCALE）的均值进行分析，以便对不同样本进行对比，取值范围为 0 到 1。其计算公式如下：

$$AVE = \frac{MAX + MIN}{2}, \quad RANGE = MAX - MIN$$

$$SCALE = 1 / (1 + \exp(-5 * \frac{raw - AVE}{RANGE}))^1$$

式 3

实验同时为受试者佩戴 Empatica E4 手环（图 4），以获取被试者的 EDA 和心率指标，输出频率分别为 4Hz 和 64Hz，输出的指标包括最大值（MAX）、最小值（MIN）、均值（AVG）和标准差（STDDEV），本研究选取每个场景暴露区间内的均值（AVG）衡量被试者相应的生理感知状态。

¹ 来源: <https://emotiv.gitbook.io/emotivpro-v2-0/csv-files#performance-metrics-data>



图 3 Emotiv EPOC+头戴设备2



图 4 Emotiv E4 手环3

2.3.2 STAI-6

实验使用的问卷包括三类：人口特征数据表、状态焦虑量表（STAI-6）和语义差异评价问卷。

在每个场景后受试者均要填写在该场景暴露后的状态-焦虑量表，以及对街景相关要素的语义差异评价问卷（SD）。每个受试者将进行 3 次场景暴露与评价，在实验结束后，统计被试者特征数据，例如性别、年龄、通学方式等等。

状态焦虑量表是 Spielberger 等编制(Spielberger, Gorsuch et al. 1983)，用来评估个体的状态焦虑水平。然而在实际应用当中，量表条目可能会引起被试者的心理抵触而影响其的填表意愿。基于此，本研究拟采用 Marteau 和 Bekke 的 1992 年修订的简表版本。简版状态焦虑量表(Marteau and Bekker 1992)依据焦虑存在与焦虑缺失 2 个维度分别等量的筛选出与量表高度相关的 6 个条目形成。全量表进行 1-4 级评分（状态焦虑：1-完全没有，2-有些，3-中等程度，4-非常明显。特质焦虑：1-几乎没有，2-有些，3-经常，4-几乎总是如此），由受试者根据自己的体验选圈最合适的等级。

表 3 STAI-6

	完全没有	有些	中等程度	非常明显
1. 我感到心情平静	①	②	③	④
2. 我是紧张的	①	②	③	④
3. 我感到不安	①	②	③	④
4. 我是轻松的	①	②	③	④
5. 我感到心满意足	①	②	③	④
6. 我是烦恼的	①	②	③	④

2.3.3 语义感知量表

语义差异法是由 Osgood 提出的一种心理测定方法，又称为感受记录法。它通过言语尺度进行心理感受的测定，可以获得被调查对象的感受，构造出定量化数据。本研究在参考相

² 来源: <https://www.emotiv.com/epoc/>

³ 来源: <https://www.empatica.com/en-int/research/e4/>

关文献的基础上，筛选出 9 组形容词对作为视觉感知评价指标，形容词对两两为一组彼此语义相反，评价标尺为 5 级，每个项目按由负面消极感知到正面积积极感知分别打分 1-5 分，分数越低越接近左侧形容词词义，反之则越接近右侧形容词词义。

表 4 SD 空间感知语义评价

空间感知语义评价	1-5 分	
开敞度	封闭	开放
自由度	束缚	自由
宽敞度	狭窄	宽阔
愉悦度	讨厌	喜爱
舒适度	不舒适	舒适
压力感	压迫	放松
焦虑感	焦虑	平静
安全感	危险	安全
满意度	不满意	满意

2.3.4 眼动

实验运用 HTC Vive Pro2 Eye 头显，对受试者进行 VR 场景暴露实验。该设备搭载了精准的眼动追踪技术，收集被试者在实验场景中的眼动数据，更加直观的了解场景构成要素对受试者的视觉吸引。眼动数据分为注视点空间坐标（X、Y、Z）、注视点物体信息以及左右 Dia。在固定了步行高度的情况下，路径数据分为平面坐标（X、Z）和 Cam（X、Y、Z）。

3.实验数据指标组间差异分析

本节在对实验数据进行描述统计分析的基础上，对 EDA、HR、EEG 数据、STAI-6 与语义评价差异问卷结果采用曼-惠特尼 U 非参数检验（Mann-Whitney U）进行组间差异分析。针对生理、心理、主观感知三类数据，首先进行全部样本在 7 种独立条件（1m 人行道宽度、1.5m 人行道宽度、2m 人行道宽度、0.6m 隔离高度、1.2m 隔离高度、低隔离密度、高隔离密度）下的差异比较，以及两个年龄段（小于 10 岁、大于 10 岁）之间的认知差异，并对 7 种条件内的年龄段感知差异及年龄段内的 7 种场景认知差异进行分析，从而探究不同年龄段儿童对通学道路的安全感与焦虑感知。其中分层感知将样本按照两个维度分为 14 组，以“X-X”形式表示，前者代表独立条件类型，后者代表年龄段类型。

	1m 人行 道宽度	1.5m 人 行道宽度	2m 人行 道宽度	0.6m 隔 离高度	1.2m 隔 离高度	低隔离 密度	高隔离 密度
10 岁以下	1-1	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1
10 岁以上	1-0	2-0	3-0	4-0	5-0	6-0	7-0

表 5 分层样本组别序号

3.1 生理指标组间差异分析

本实验的生理指标包括通过脑电设备获得的 6 种衡量情绪指标：投入（EEG.En）、兴奋（EEG.Ex）、压力（EEG.St）、放松（EEG.Re）、兴趣（EEG.In）、注意力（EEG.Fo）以及由手环获取的 EDA 和 HR 数据，处理得到 EDA 及 HR 数据的均值。以 EDA 为例，将基线场景暴露均值记作 EDA.avg.0，实验场景一至五依次记为 EDA.avg.1、EDA.avg.2、EDA.avg.3、EDA.avg.4 和 EDA.avg.5，通过如下公式计算各场景中的值与基线场景相比变动的百分比：

$$EDA.n = \frac{EDA.avg.n - EDA.avg.0}{EDA.avg.0} \quad (n = 1,2,3,4,5)$$

3.1.1 总体感知特征

经过数据筛选，有效样本量的描述统计特征和分布状况如表 6 和图 5、图 6 所示，EDA 和 HR 指标的均值分别为 9.005 和 93.287；标准差较大，分别为 14.010 和 11.708，个体差异显著。

EEG 所有指标的均值位于 0.543-0.646 区间中，但 EEG 各指标的数值波动程度存在一定差异。如 EEG 指标中压力（EEG.St）、注意力（EEG.Fo）和放松（EEG.Re）的波动范围较大，标准差分别为 0.168、0.135 和 0.127。投入（EEG.En）、兴奋（EEG.Ex）和兴趣（EEG.In）指标的波动范围则较小，变化与波动幅度均呈现出较稳定的水平。

表 6 情绪生理响应指标总体样本描述统计

	N	最小值	最大值	均值	标准 偏差
EDA	55	.046	49.213	9.005	14.010
HR	55	69.235	119.330	93.287	11.708
EEG.En	47	.491	.827	.644	.069
EEG.Ex	47	.491	.827	.644	.069
EEG.St	47	.290	.965	.646	.168
EEG.Re	47	.387	.901	.572	.127
EEG.In	47	.445	.732	.572	.070
EEG.Fo	47	.239	.808	.543	.135

	1			2			3			4		
	平均值	N	标准差	平均值	N	标准差	平均值	N	标准差	平均值	N	标准差
EDA	12.055	14	17.525	8.853	13	13.856	9.033	16	13.739	9.004	24	14.962
HR	94.601	14	10.773	90.642	13	12.487	93.899	16	12.884	93.229	24	14.155
EEG.En	0.661	11	0.077	0.646	12	0.047	0.620	14	0.067	0.649	22	0.062
EEG.Ex	0.661	11	0.077	0.646	12	0.047	0.620	14	0.067	0.649	22	0.062
EEG.St	0.609	11	0.148	0.698	12	0.154	0.638	14	0.188	0.661	22	0.160
EEG.Re	0.523	11	0.106	0.595	12	0.134	0.575	14	0.108	0.561	22	0.131
EEG.In	0.568	11	0.064	0.565	12	0.063	0.585	14	0.076	0.567	22	0.062
EEG.Fo	0.501	11	0.134	0.595	12	0.092	0.523	14	0.138	0.556	22	0.121
	5			6			7					
	平均值	N	标准差	平均值	N	标准差	平均值	N	标准差			
	9.005	31	13.478	7.213	33	11.962	11.692	22	16.555			
	93.332	31	9.650	92.222	33	10.195	94.884	22	13.771			
	0.639	25	0.076	0.646	26	0.069	0.641	21	0.071			
	0.639	25	0.076	0.646	26	0.069	0.641	21	0.071			
	0.633	25	0.178	0.637	26	0.167	0.658	21	0.174			
	0.582	25	0.125	0.586	26	0.129	0.555	21	0.125			
	0.576	25	0.077	0.580	26	0.083	0.561	21	0.049			
	0.532	25	0.148	0.538	26	0.137	0.549	21	0.136			

表 7（a）年龄间的情绪生理响应指标描述统计及组间差异比较

1	2	3	4	5	6	7
0.714	0.827	0.767	0.508	0.508	0.169	0.169
0.499	0.405	0.853	0.879	0.879	0.606	0.606
.892 ^a	0.542	0.352	0.536	0.536	0.781	0.781
.892 ^a	0.542	0.352	0.536	0.536	0.781	0.781
.495 ^a	0.213	0.852	0.749	0.749	0.684	0.684
.150 ^a	0.575	0.659	0.495	0.495	0.369	0.369
.911 ^a	0.981	0.561	1	1	0.578	0.578
.290 ^a	0.113	0.485	0.717	0.717	0.814	0.814

表 7（b） 年龄间的情绪生理响应指标描述统计及组间差异比较
（Mann-Whitney U 秩和检验）

	10 岁以下			10 岁以上			Mann-Whitney U 秩和检验
	平均值	N	标准差	平均值	N	标准差	十岁以上 十岁一下
EDA	9.028	31	14.534	8.975	24	13.613	0.387
HR	93.886	31	12.359	92.514	24	11.022	0.839
EEG.En	0.657	31	0.052	0.618	16	0.09	0.072
EEG.Ex	0.657	31	0.052	0.618	16	0.09	0.072
EEG.St	0.661	31	0.166	0.617	16	0.175	0.394
EEG.Re	0.531	31	0.109	0.652	16	0.124	0.002
EEG.In	0.565	31	0.07	0.584	16	0.07	0.432
EEG.Fo	0.536	31	0.14	0.558	16	0.128	0.753

表 8 年龄间的情绪生理响应指标描述统计及组间差异比较

7 种独立条件下，儿童在 1、7 场景中的 EDA 平均水平最高，且在 95%置信水平上显著高于同组的其他变量的数据，表明该类人群在较窄的人行道以及人行道产生宽度变化的环境中的情绪唤醒程度较高。

总体实验样本的年龄组别之间情绪生理响应指标特征及差异如表 8 所示。EEG 情绪中压力（EEG.St）在 10 岁以上和 10 岁以下的人群中存在显著的差异，具体表现为与 10 岁以下的群体相比，10 岁以上的人群压力的平均值更大，且标准差更小，意味着十岁以上的儿童普遍感到更大的压力。投入（EEG.En）和兴奋（EEG.Ex）方面，十岁以上的儿童的数据显著高于十岁以下儿童的数据，放松（EEG.Re）、兴趣（EEG.In）、注意力（EEG.Fo）方面的 EEG 数据则反之。

3.2 心理指标组间差异分析

按照记分规则，将各实验场景后 STAI-6 中每个项目的选项按 1-4 分制记分（其中 1、4、5 题为反序记分），可以获得每位被试在不同条件下的情绪心理指标。具体而言涵盖紧张、烦乱、烦恼 3 种消极情绪与平静、放松、满意 3 种积极情绪，以及分别基于两者平均值计算得出消极与积极情绪的平均值。

3.2.1 心理指标总体感知特征

整体来看各情绪的标准差积极情绪的波动大雨消极情绪，平均值积极情绪也普遍大于消极情绪，所有情绪的标准差均小于平均值，表明实验环境可以给人们的心理情绪带来较强的正面影响。消极情绪中，紧张情绪最为显著，说明儿童对实验陌生环境仍有一定的陌生感和生疏感，进而产生一定的负面情绪。

表 9 情绪心理指标总体样本描述

	平均值	个案数	标准 偏差	最小值	最大值
积极情绪	8.08	48	2.491	3	12
轻松的	2.8125	48	1.12337	1	4
心满意足的	2.6667	48	1.01758	1	4
心情平静的	2.6042	48	1.16216	1	4
消极情绪	5.6042	48	1.80707	3	12
紧张的	1.5208	48	0.87494	1	4
烦乱的	1.4167	48	0.82083	1	4
烦恼的	1.3542	48	0.66811	1	4

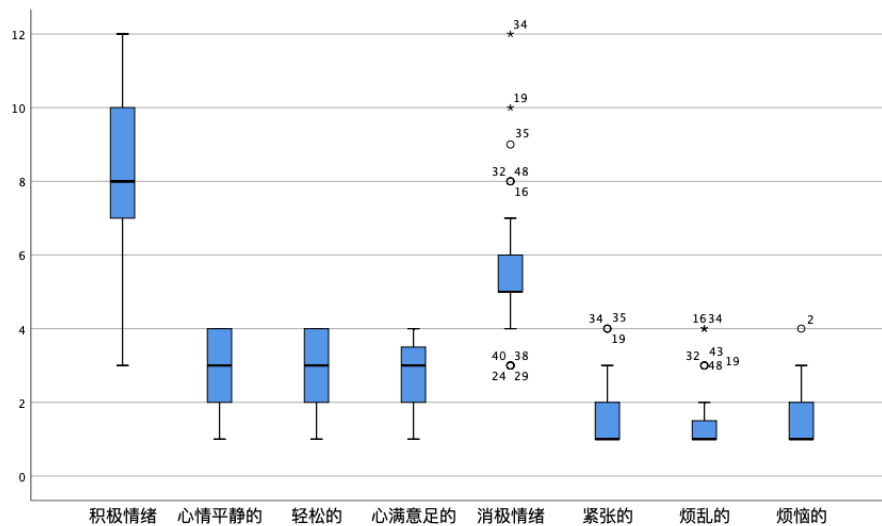


图 7 情绪心理响应指标总体分布箱线图

3.2.1 心理指标总体感知差异

总实验样本的年龄组间情绪心理指标特征及差异见表 10。根据表 10 的数据，10 岁以下与 10 岁以上的人群具有在消极情绪方面具有明显的情绪差异，在积极情绪方面差异不大。从积极与消极两个维度上看，十岁以上群体的紧张、烦乱、慌乱情绪在 95%置信水平上显著高于十岁以下人群，十岁以上群体心满意足的情绪在 95%置信水平上显著高于十岁以下人群，十岁以下群体的心情平静的情况在 95%置信水平上明显低于十岁以下人群，说明相比下情绪波动更大。

比较而言，在 7 个独立条件下儿童的积极情绪均值均高于消极情绪，可以认为儿童人群在进行试验的过程中对独立通勤的行为感到愉悦。同时，在场景 1、2、3 中，儿童对场景 1、2 的积极情绪显著高于场景 3，场景 4、5 之间积极情绪差异不大，场景 6、7 间具有显著差异。儿童更加偏好 1.5m 及更窄的人行道，过宽的道路让儿童感到更显著的消极情绪，同时，隔离带的密度对儿童通勤感知的影响较大。在置信空间 95%以上，人行道宽度对积极情绪的轻松度有较大影响，栏杆高度对积极情绪的心满意足和消极情绪的紧张感有较大影响，栏杆密度对积极情绪的心满意足以及心情平静都有较高的积极作用，显著高于其他值。

	十岁以下			十岁以上			
	平均值	个案数	标准 偏差	平均值	个案数	标准 偏差	
积极情绪	8.07	30	2.392	8.11	18	2.72	0.983
轻松的	2.7667	30	1.04	2.8889	18	1.27827	0.597
心满意足的	2.7667	30	0.93526	2.5	18	1.15045	0.586
心情平静的	2.5333	30	1.16658	2.7222	18	1.17851	0.394
消极情绪	6.0333	30	1.97368	4.8889	18	1.2314	0.059
紧张的	1.6667	30	0.99424	1.2778	18	0.57451	0.172
烦乱的	1.6	30	0.96847	1.1111	18	0.32338	0.064
烦恼的	1.5	30	0.77682	1.1111	18	0.32338	0.048

表 10 情绪心理指标描述统计及年龄组间差异

	1			2			3			4		
	平均值	个案数	标准 偏差	平均值	个案数	标准 偏差	平均值	个案数	标准 偏差	平均值	个案数	标准 偏差
积极情绪	8.19	16	2.713	8.44	16	2.394	7.63	16	2.446	8.07	30	2.559
轻松的	2.625	16	1.14746	3.125	16	1.08781	2.6875	16	1.13835	2.8	30	1.15669
心满意足的	3	16	1.0328	2.75	16	0.93095	2.25	16	1	2.7333	30	1.04826
心情平静的	2.5625	16	1.20934	2.5625	16	1.20934	2.6875	16	1.13835	2.5333	30	1.19578
消极情绪	5.75	16	1.73205	6	16	2.09762	5.0625	16	1.52616	5.7667	30	1.6955
紧张的	1.5625	16	1.03078	1.625	16	0.95743	1.375	16	0.61914	1.5	30	0.86103
烦乱的	1.1875	16	0.54391	1.625	16	1.08781	1.4375	16	0.72744	1.5333	30	0.86037
烦恼的	1.1875	16	0.40311	1.5	16	0.89443	1.375	16	0.61914	1.4333	30	0.77385
	5			6			7			Mann-Whitney U 秩和检验		
	平均值	个案数	标准 偏差	平均值	个案数	标准 偏差	平均值	个案数	标准 偏差	人行道宽度	栏杆高度	栏杆密度
积极情绪	8.11	18	2.447	7.68	25	2.529	8.52	23	2.428	0.609	0.897	0.255
轻松的	2.8333	18	1.09813	2.8	25	1.22474	2.8261	23	1.02922	0.944	0.589	0.023
心满意足的	2.5556	18	0.98352	2.64	25	1.07548	2.6957	23	0.97397	0.376	0.938	0.974
心情平静的	2.7222	18	1.12749	2.24	25	1.2	3	23	1	0.099	0.493	0.847
消极情绪	5.3333	18	2	5.56	25	1.58325	5.6522	23	2.05843	0.541	0.23	0.688
紧张的	1.5556	18	0.92178	1.52	25	0.8226	1.5217	23	0.94722	0.85	0.908	0.776
烦乱的	1.2222	18	0.73208	1.4	25	0.70711	1.4348	23	0.94514	0.363	0.104	0.744
烦恼的	1.2222	18	0.42779	1.32	25	0.62716	1.3913	23	0.72232	0.585	0.459	0.68

表 11 情绪心理指标描述统计及场景组间差异

3.3 主观感知指标分析

结合语义感知问卷，筛选提取 9 组关键指标对被试的主观感知进行组间差异分析。形容词对两两为一组彼此语义相反，评价标尺为 5 级，每个项目按由负面消极感知到正面积极感知分别打分 1-5 分。

从总体样本的描述统计特征来看（表 n），实验条件的总体感知偏负面，且压力、压迫、焦虑情绪出现在了平均值较大。开场度自由度与宽敞度的总体均值较低。另外，对实验场景的满意度平均值为 3.47，高于中间值 3，表明被试人群对实验条件的整体喜爱程度趋于正向。

表 12 感知评价指标总体样本描述统计表

	平均值	个案数	标准 偏差	最小值	最大值
开敞度	3.0417	48	1.32019	1	5
自由度	3.0625	48	1.29494	1	5
宽敞度	3.0417	48	1.35204	1	5
愉悦度	3.4375	48	1.07002	1	5
舒适度	3.0833	48	1.28549	1	5
压力感	3.6042	48	1.25035	1	5
焦虑感	3.8125	48	1.21439	1	5
安全感	3.5417	48	1.45804	1	5
满意度	3.4792	48	1.22021	1	5

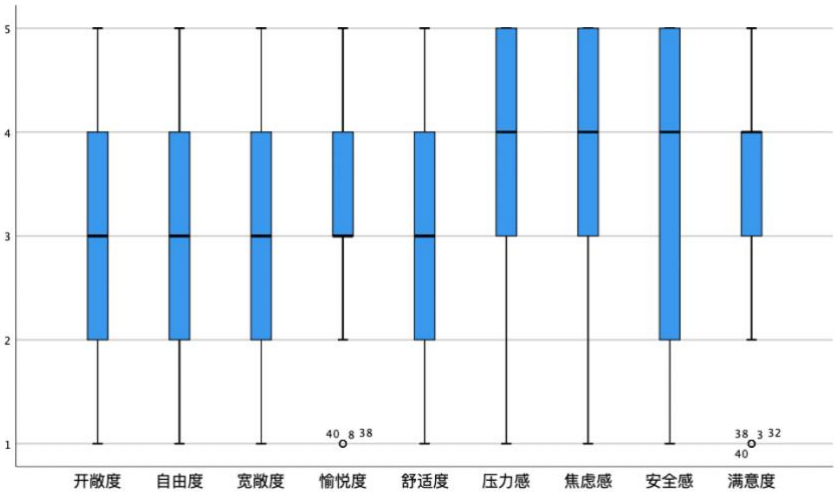


图 8 感知评价指标中舒适性及包容性评价指标总体分布箱线图

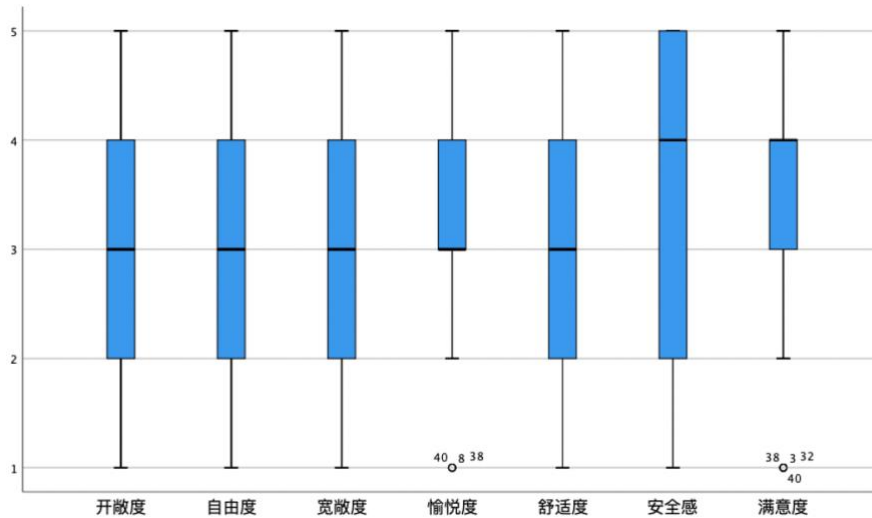


图 9 感知评价指标中正向评价指标总体分布箱图

4 实验眼动组间差异分析

本节基于 x-z 轴的平面视角下对整体样本的眼动注视特征及步行路径方式以及不同年龄段群体的眼动和路径状况进行分析。在对总体表现特征进行可视化分析的基础上，主要针对两个年龄段（小于 10 岁、大于 10 岁）之间的差异通过 T 检验进行组间差异分析。注视角（Gaze Angle）为 Schwarzkopf、Buchner 与 Holscher 等人提出量化注视方向与运动方向的指标，指视线向量（Sight Vector）和运动向量（Moving Vector）之间的角度，其中视线向量为两注视点之间的矢量连线，运动向量为在注视特定位置之前身体的平移。

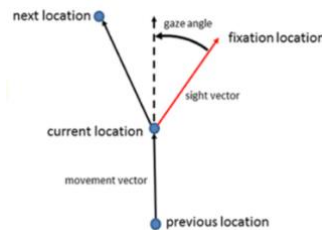


图 10 视线向量、运动向量与注视角定义

4.1 眼动热力差异特征分析

眼动数据的热力图如图 11 所示，可以看出在实验场地内样本的注视点主要集中在接近十字路口的的位置，并适度向场地右边的实验起始点偏移；同时由于起始位置位于道路右侧，其注视点也存在明显的向异侧道路偏移的倾向，即被试样本可能更加关注道路异侧的情况。此外，就注视点密度而言，相比左边靠近终点位置的路段，场地右边靠近起始点附近的路段也获得了较多的注视关注，说明样本在刚进入场景时产生的注视兴趣相较熟悉场景后更大。

就场景的眼动注视点分布而言，左右部分的注视热力密度并不均衡，基本可划分为以中轴十字路口为分界线的左右两侧。左侧注视点数量较少、密度较低且分散程度较大，右侧则更加密集；但是同时，就左右两个高密度峰值点而言，位于左侧十字路口前的眼动注视密度相较右侧的更大，尽管相较右侧的十字路口此处由于过马路等路径行为产生的停留更少。

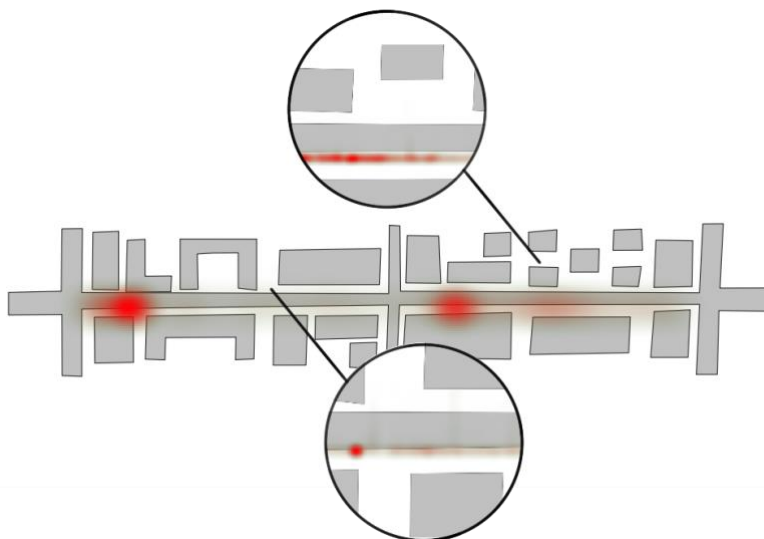


图 11 眼动注视点场景内分布热力图

4.2 组间注视角特征分析

就注视角的分组样本描述统计特征（见表 13）及显著性检验（见表 14）而言，所有样本中的均值最大值（94.1667296）出现在 10 岁以上人群中，最小值（46.5955122）出现在 10 岁以下人群中。同时根据组间的均值比较可以得到 10 岁以下的人群的注视角度数均值为 55.6502232，而 10 岁以上人群的注视角度数均值为 68.6698193，其注视方向与运动方向的偏差范围高于 10 岁以下人群 23.4%，样本 T 检验的结果也可以看出 10 岁以上群体与 10 岁以下群体的注视角数值在 90% 的程度存在显著差异。

表 13 Gaze Angle 分组均值

10 岁以下	59.5302855	60.4250265	53.6468801	46.5955122	50.0572797	47.5568094	71.7397691
10 岁以上	94.1667296	90.5400906	59.7503823	62.6323793	52.8466443	59.7503823	61.0021266

表 14 Gaze Angle 的组间差异显著性检验

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means			
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference
Equal variances assumed	3.650	.080	-1.836	12	.091	13.01959606836487

4.3 组间注视点标准差椭圆特征分析

样本眼动注视点构成的标准差椭圆均值描述统计特征如表 15 所示，各组别样本量较为均衡。从标准差椭圆的具体均值来看，10 岁以上与 10 岁以下人群注视点的标准差椭圆构成在重心横坐标 x 的均值(meanx)、优角平均偏差(majoranglerad)以及长短轴的标准差(majorsd、minorsd)上差异较大，而在重心横坐标 y 的均值(meany)、方位角(directiondeg)以及离心率(eccentricity)方面趋同。就重心横坐标均值而言，相比 10 岁以上人群，10 岁以下人群的注视点重心均值更大，意味着相比中轴线及其以左路段，其注视点更偏向右侧高密度分布。10 岁以上人群的长轴标准差均值明显高于 10 岁以下，且其短轴标准差均值低于 10 岁

以下人群，同时其优角平均偏差也相应地高于 10 岁以下样本，可以看出 10 岁以上人群的注视点分布分散程度更大，尽管从离心率上说他们的椭圆程度相似。

注视点标准差椭圆均值的组间差异显著性检验如表 16 所示，除重心横坐标 x 均值存在 99%程度上的显著差异以外，10 岁以上人群与 10 岁以下人群的其他指标均不存在明显差异。在重心横坐标 x 均值方面，10 岁以下人群的坐标 x 为 318.845075，10 岁以上人群的坐标 x 为 264.379561，10 岁以上人群标准差椭圆分布位置更接近中轴十字路口附近，而 10 岁以下人群的标准差椭圆的分布位置则更偏向刚进入实验场景的右侧起始路段部分。

表 15 注视点标准差椭圆均值的及组间差异比较

	meanx	meany	majoranglerad	directiondeg	majorstd	minorstd	eccentricity
10 岁以下	318.845075	152.573423	0.00353913	89.7972226	78.058381	11.1669392	0.98670327
10 岁以上	264.379561	152.398406	0.00798391	89.5425555	120.473841	7.70016326	0.99759516

表 16 注视点标准差椭圆均值的组间差异显著性检验

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means			
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	
meanx	19.787	.004	1.612	6	.158	
meany	2.297	.180	.108	6	.917	
majoranglerad	1.803	.228	-.283	6	.787	
directiondeg	1.803	.228	.283	6	.787	
majorstd	2.624	.156	-2.374	6	.055	
minorstd	.069	.801	1.674	6	.145	
eccentricity	5.505	.057	-2.304	6	.061	

4 结论与展望

本研究围绕环境感知实验展开，选取 7 个儿童通学空间中的独立要素：1m、1.5m、2m 人行道宽度，高、低隔离密度以及 0.6m、1.2m 隔离高度。实验共招募 18 名被试者，其中 7 名为 10-13 岁儿童，11 名 8-9 岁儿童，且性别比例均衡。实验设计遵循“环境暴露-情绪响应-感知评价”的框架，采用 VR 设备提供控制变量虚拟街道空间场景，同时使用多种便携式生理测量仪器同步获得被试者的 EEG、EDA 和 HR 实时数据，并通过语音播放问卷问题的形式获得被试者对场景的情绪心理感受和主观感知评价。研究系统考察了各感知指标从总体到分层样本的组间差异，以及不同组间的眼动注视差异。研究结论如下：

(1) 不同年龄组间差异特征

10 岁以上与 10 岁以下儿童存在明显眼动注视差异特征。在相同的路段范围内，10 岁以上人群表现出更加持久和分散的注视习惯；同时，相对于同一区域，10 岁以上人群在行进时观察覆盖的范围更广，且对十字路口等现实世界中交通复杂的区域注视密度更大，可能是出于更加成熟的社会化后对陌生环境存在更高的警惕性和观察要求。

(2) 独立条件之间的差异

根据试验结果的初步分析，栏杆的密度以及高度会对儿童产生较大影响，其中密度越高的栏杆越给儿童带来正面情绪。更加实体、坚固的隔断可以提升儿童独自通学的安全感和积极性。此外，人行道的宽度也会影响儿童的生理和心理感知。过宽的人行道对儿童的感知不

具备较强的积极影响，控制合适的人行道范围对于建设儿童通学道路尤为重要。

5 参考文献

- Asgarzadeh A, Lusk, T. Koga and K. Hirate M., (2012). Measuring oppressiveness of streetscapes. *Landscape and Urban Planning*, 107(1), 页 1-11.
- Aspinall P, Mavros, R. Coyne and J. Roe P., (2015). The urban brain: analysing outdoor physical activity with mobile EEG. *British journal of sports medicine*, 49(4), 页 272-276.
- CERVERO R. (2008). Mixed land-uses and commuting: evidence from the American housing survey[J]. *Transportation Research A*, 5(30), 页 361-377.
- FAULKNER G E JR N, FLORA P K, et al. BULLING. (2009). Active school transport, physical activity levels and body weight of children and youth: A systematic review [J]. *Preventive medicine*, 48(1), 页 3-8.
- Hillman Adams, J., & Whitelegg, J.M., (1990). One false move: A study of children's independent mobility[M]. London: Policy Studies Institute.
- KERR JD, SALLIS J F, et al. ROSENBERG. (2006). Active commuting to school: associations with environment and parental concerns[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(4), 页 787-794.
- KLESGES R CL H, HANSON C L, et al. ECK. (1990 年 9 月). Effects of obesity, social interactions, and physical environment on physical activity in preschoolers[J]. *Health Psychology*, 4, 页 435-449.
- Koenig S, Scheider, I. Hamzi, M. Bielik, G. Schmitt and D. Donath R., (无日期). Using Geo statistical analysis to detect similarities in emotional responses of urban walkers to urban space. ETH-Zürich.
- REILLY MJ, LANDIS. (2003). The influence of built-form and land use on mode choice evidence from the 1996 bay area travel survey[R]. University of California Transportation Center Working Papers.
- Song D, Joung, H. Ikei, M. Igarashi, M. Aga, B.-J. Park, M. Miwa, M. Takagaki and Y. Miyazaki (2013). C., (无日期). Physiological and psychological effects of walking on young males in urban parks in winter. *Journal of physiological anthropology*, 32(1), 页 18-18.
- 大原.武井和昌.正. (无日期). 压迫感の計測に関する研究・1: 压迫感の意味と実験装置 [J]. 日本建築.
- 高玥. (2020). 促进儿童活力通学的城市街道环境设计优化策略. 哈尔滨工业大学.
- 光明网 . (2022 年 6 月 1 日). 检索来源: 公安部: 全国拐卖儿童案比 2013 年下降超八成: <https://m.gmw.cn/baijia/2022-06/01/1302975825.html>
- 李金岸. (2020). 通学成本与支持儿童独立上下学的通学路环境改善. 北京大学.
- 联合国经济和社会事务部人口司. 联合国经济和社会事务部. (2014). 《世界城市化前景》[M]. 纽约.
- 刘吉祥, 周江评, 肖龙珠, 等. (2009). 建成环境对步行通勤通学的影响: 以中国香港为例 [J]. *地理科学进展*, 38(6), 页 807-817.
- 刘欣宇. (2020). 基于小学生出行行为的通学环境优化策略研究——以大连市为例. 大连理工大学.

- 刘铮. (2021). 安全视角下校区附近儿童通学路径景观改造——以西安市康乐路为例. 西安建筑科技大学.
- 陆明, 李瑞南. (2021 年 11 月 28 日). “步行巴士”通学的国际经验与启示. 低温建筑艺术, 4, 页 20-25.
- 孟雪. (2020). 儿童友好导向的城市住区空间环境评价与优化设计研究. 哈尔滨工业大学.
- 母婴参考. (2019 年 5 月 24 日). 为何中国父母不敢让孩子独自上下学? 两重担忧不是没有道理. 检索来源: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1634403223199153622&wfr=spider&for=pc>
- 宋晓宇. (2020). 建筑空间认知迭代 ——VR 空间认知、设计、表达. 新建筑 New Architecture [J], 页 65-69.
- 武凤文; 陈明远. (2020 年 7 月 26 日). 儿童健康安全视角下的步行通学道评测与优化策略. 城市发展研究, 页 20-27.
- 薛明. (1999 年 5 月 15 日). 谈谈城市道路中人行道宽度问题. 上海公路, 页 14-17.
- 中国发展网. (2021 年 10 月 21 日). 100 个儿童友好城市, 这么选这么建. 检索来源: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1714193492289007951&wfr=spider&for=pc>

附录 A 实验场景随机表

表 附录-1 实验场景随机表

序号	人行道宽度	隔离密度	隔离高度
1	1	低	0.6
2	1	低	1.2
3	1	高	0.6
4	1	高	1.2
5	1.5	低	0.6
6	1.5	低	1.2
7	1.5	高	0.6
8	1.5	高	1.2
9	2	低	0.6
10	2	低	1.2
11	2	高	0.6
12	2	高	1.2