

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.038



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



高铁站候车厅多维物理环境交互作用 对旅客满意度的影响机制

董文静^{a,b}, 黄承锋^b, 张维^a

(重庆交通大学 a. 建筑与城市规划学院; b. 经济与管理学院, 重庆 400045)

摘要: 高铁站候车厅的环境质量显著影响旅客出行体验, 为探究高铁站候车厅多维物理环境交互作用对旅客满意度的影响机制, 以国内不同地区的典型高铁站为样本, 通过现场实测与问卷调查相结合的方式, 系统收集温度、湿度、噪声、照度、PM_{2.5}浓度、CO₂浓度等多维物理环境参数及基于7分量表的旅客满意度数据。借助因子分析提取热环境、声环境、光环境和空气质量四项公因子, 构建多元线性回归模型, 定量剖析各维度对满意度的贡献权重, 并结合相关性检验确定关键影响因子。研究表明: 热环境和空气质量对总满意度的影响最为显著, 声环境和光环境的影响相对较弱; 天窗设计导致的热辐射积聚是候车厅热舒适度降低的主要原因; 候车厅普遍噪声超标; CO₂与PM_{2.5}浓度的升高会显著降低满意度; 优化温度调控、提升通风效率、降低颗粒物浓度以及采取声学处理措施是提升旅客满意度的关键策略。

关键词: 物理环境; 旅客满意度; 高铁站候车厅; 因子分析; 多元线性回归

中图分类号: TU11 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

The influence mechanism of multi-dimensional physical environment interaction in the waiting hall of high-speed railway stations on passenger satisfaction

DONG Wenjing^{a,b}, HUANG Chengfeng^b, ZHANG Wei^a

(a. School of Architecture and Urban Planning; b. School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The environmental quality of the waiting hall of high-speed railway stations significantly affects the travel experience of passengers. To explore the influence mechanism of the interaction of multi-dimensional physical environments in the waiting hall of high-speed railway stations on passenger satisfaction, this study

收稿日期: 2024-09-27

基金项目: 重庆市教委人文社科项目(24SKGH116); 重庆市教育科学规划项目(K23YG2070439); 国家自然科学基金项目(52308037)

作者简介: 董文静(1989-), 女, 博士生, 主要从交通建筑环境品质研究, E-mail: 825691279@qq.com。

黄承锋(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: 981327204@qq.com。

Received: 2024-09-27

Foundation items: Chongqing Municipal Education Commission Humanities and Social Sciences Project (No. 24SKGH116); Chongqing Municipal Education Science Planning Project (No. K23YG2070439); National Natural Science Foundation of China (No. 52308037)

Author brief: DONG Wenjing (1989-), PhD candidate, main research interest: quality of transportation building environment, E-mail: 825691279@qq.com.

HUANG Chengfeng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: 981327204@qq.com.

takes typical high-speed railway stations in different regions of China as samples and combines on-site measurement with questionnaire surveys. The system collects multi-dimensional physical environment parameters such as temperature, humidity, noise, illuminance, $\text{PM}_{2.5}$, and CO_2 concentration, as well as passenger satisfaction data based on seven subscales. By means of factor analysis, four common factors, namely thermal environment, acoustic environment, light environment and air quality, were extracted to construct a multiple linear regression model. The contribution weights of each dimension to satisfaction were quantitatively analyzed, and the key influencing factors were determined in combination with the correlation test. The research results show that the influence of thermal environment and air quality on the total satisfaction is the most significant, while the influence of acoustic environment and light environment is relatively weak. The accumulation of thermal radiation caused by the skylight design is the main reason for the reduction of thermal comfort in the waiting hall. The noise in the waiting hall generally exceeds the standard. The increase of CO_2 and $\text{PM}_{2.5}$ will significantly reduce satisfaction. Research indicates that optimizing temperature control, enhancing ventilation efficiency, reducing particulate matter concentration, and adopting acoustic treatment measures are key strategies for improving passenger satisfaction.

Keywords: physical environment; passenger satisfaction; high-speed railway station waiting hall; factor analysis; multiple linear regression

在高铁迅猛发展的时代背景下,高铁客站作为关键交通枢纽,其候车厅环境质量对旅客满意度具有举足轻重的影响,针对交通建筑环境质量的研究日益增多。以开放型的平面、高大的空间以及大量的人员聚集为典型特征的候乘空间,其室内物理环境影响因素更为复杂多元。热环境、光环境、声环境及空气质量等多维物理环境因素之间有交互作用,对旅客的舒适度和满意度产生影响。深入剖析多维物理环境的交互作用对旅客满意度的影响机制,对于提升旅客满意度、优化客站环境质量以及降低建筑综合能耗均具有积极的现实意义。

在室内环境质量评价领域,众多学者已基于室内环境质量对建筑环境等级进行评定。物理环境质量模型涵盖声环境、光环境、热环境及空气质量四个维度。Zhang 等^[1]的研究表明,室内物理环境品质对建筑空间使用者的身心健康和工作效率具有显著影响。Zhao 等^[2]在梳理室内环境质量的相关文献后提出,应加强对满意度与室内环境因子交互作用的关注。Chiang 等^[3]提出了一种室内环境质量综合评价指标的确定方法,并对 4 项物理环境因子进行了权重排序。Cao 等^[4]综合考虑多方因素,探究室内环境质量与舒适性的关系,用最小二乘法构建了总满意度的预测评价模型。Newsham 等^[5]针对环境参数对满意度的影响进行了详细的实地研究,通过分析跨越 10 年的数据证明了空气质量对满意度的影响最大。Guo 等^[6]基于有效函数法研究了室内环境整体舒适性。张甫仁等^[7]提取了影响室内物理环境质量的客观参数,借助可拓学理论,构建了室内环境评价物元模型。王谦等^[8]采用长期评估与实时

评价相结合的研究方法,构建了公共建筑的室内环境质量评价模型。Kim 等^[9-10]调研了多个国家和气候区的建筑,引入卡诺模型对影响因素进行属性划分,并结合多元回归建立了满意度模型。

高铁客站候车室的室内环境质量已成为学者们的研究热点。相关研究主要涵盖室内物理环境参数的实测分析以及乘客对环境舒适满意度的主观评价,其中,作为环境主要使用者的乘客,其主观满意度是评估高铁客站候车厅室内物理环境质量的核心指标^[11]。Deb 等^[12]以印度火车站为研究对象,深入探讨了夏季室内环境质量,着重分析了热舒适性 with 客观环境参数的关联性。狄育慧等^[13]以西安的高铁站为例,聚焦冬季条件下旅客满意度与客观环境参数的关系,研究发现热舒适性与候车时间等因素存在相关性,且人体对环境具有一定的适应性。Liu 等^[14]针对寒冷气候区的过渡季节,对两个站点开展了热环境参数实测与乘客主观感受问卷调查,并构建了舒适度预测模型。Wang 等^[15]运用后评估体系,开展客观参数测量与主观问卷调查,选取 8 个处于不同热工分区的候乘空间进行室内环境质量研究,确定热环境和空气质量为影响室内环境质量的关键因素。Geng 等^[16]综合主客观调查与卡诺模型的综合研究方法,对各影响因素进行属性分类,并分析了单个因素对综合舒适度的影响。林波荣等^[17-18]采用实地调研、因子分析、使用后评价等方法,研究了航站楼旅客满意度与室内环境、空间感受等因素之间的关系,结果表明,旅客对室内物理环境质量的要求高于对空间环境的要求。杜晓辉等^[19-20]以寒冷地区的高铁客站建筑为研究对象,对

室内环境质量4个分项要素进行了主观调查和客观测量。研究发现,在高铁站候车厅中,旅客对各项要素的舒适满意度存在差异,且声环境对整体环境满意度的影响最为显著。

综上所述,当前室内环境质量评价研究已构建起涵盖声、光、热环境及空气质量的理论体系,并借助多元线性回归、可拓学等方法,对环境因素与满意度之间的关联进行量化分析。从现有研究成果可知,在室内环境综合评价中,各类物理环境因素的权重存在不确定性,不同的研究方法所得权重结果往往存在差异。最小二乘法、多元回归、可拓学理论、灰色系统理论等方法在众多学者的研究中被广泛应用,其中多元线性回归^[4,21]分析方法的运用已较为成熟。定量计算各项物理环境要素对整体满意度的影响权重,并据此构建综合满意度模型,是室内环境品质研究的重要方法。鉴于此,笔者采用此方法展开高铁客站候车厅多维物理环境交互作用对旅客满意度的影响机制研究。

1 研究方法

1.1 研究设计

综合运用现场实测与问卷调查方法,构建主客观数据联动分析体系。在研究设计层面,选取中国11个不同地区高铁站候车厅作为研究样本。一方面,针对候车厅核心功能区域,采用标准化仪器开展动态监测,以获取温度、湿度、噪声、照度、PM_{2.5}及CO₂浓度等物理环境参数;另一方面,在各站点候车厅向旅客发放满意度调查问卷,问卷采用7分量表,围绕热环境、声环境、光环境及空气质量4大维度设计题项,并设置整体满意度综合评分题。

在数据分析阶段,首先运用SPSS软件对物理环境参数进行描述性统计分析。通过KMO检验和Bartlett球形度检验评估数据适用性,继而采用主成分分析法提取热环境、声环境、光环境与空气质量4个公因子。随后,构建多元线性回归模型,以旅客总体满意度得分为因变量,各公因子得分作为自变量,量化不同环境维度对满意度的贡献权重。基于Spearman相关性结果排序,判断各影响因子的重要

程度。最终,解析各环境要素之间的交互作用对旅客满意度的影响机制,为高铁站候车厅环境优化提供量化依据。

1.2 数据采集

研究样本详见表1。所选样本在地理区域上涵盖西南、华东、中原及华北地区,交通枢纽等级包含二等站至特等站,最高聚集人数范围为5 000~16 000人。调研样本覆盖范围较全面,在地理区位、客流量及建筑规模等方面均具有代表性。

表1 样本高铁客站区域分布
Table 1 The distribution of the surveyed high-speed railway passenger station areas

区域	站名
西南地区	重庆西站、重庆北站、重庆沙坪坝站
中原地区	郑州东站、商丘东站、商丘站
华东地区	上海虹桥站、扬州东站、苏州站、杭州东站
华北地区	北京南站

数据采集工作涵盖客观物理环境数据采集与主观满意度采集两部分。主观满意度数据通过调查问卷获取,而客观物理环境数据则借助专业测量仪器采集,测量仪器详见表2。在物理环境数据采集过程中,测点选取遵循以下原则:兼顾代表性区域与普遍性区域、边缘区域与中心区域、动态与静态区域。鉴于人流密集区域环境问题较显著,在候车区这类具有代表性的人流密集区域部署固定设备进行实时监测;同时,针对商业区域、边缘区域等,采用便携式移动设备开展动态测量。此外,对于天窗、侧窗等特殊区域,以及太阳辐射较高的区域,用红外热成像仪进行成像拍摄。综合运用上述测量方法,有助于捕捉不同时间、不同位置的环境变化,为研究提供更为全面的数据支持。为确保各站点候车厅在夏季热环境状态下的有效对比,测量日期均选定为7月底至8月初。依据天气预报,选取测量站点均为高温全晴天气,且测量时段设定为太阳辐射较强的11:00至16:00。调研工作分两组同步开展,在一周内完成,第1组调研路线为重庆-郑州-商丘-郑州-北京,第2组调研路线为重庆-杭州-苏州-上海-扬州-徐州-北京。

表2 测量工具型号及检测参数
Table 2 Coverage of measuring tool models and parameters

仪器名称	规格型号	检测参数(分辨率,量程范围)
室内环境质量监测仪	OSEN-XD200	温度(0.1℃, -40~80℃)、湿度(0.1%RH, 0~100%RH)、PM _{2.5} 浓度(1 μg/m ³ , 0~1 000 μg/m ³)、PM ₁₀ (1 μg/m ³ , 0~1 000 μg/m ³)、CO ₂ 浓度(1.2 mg/m ³ , 0~6 150 mg/m ³)、噪声(0.1 dB, 30~130 dB)、照度(1 lx, 0~200 000 lx)
便携式气象仪	KESTREL 5500	温度(0.1℃, -29~70℃)、湿度(2%RH, 10%~90%RH)、即时风速(0.1 m/s, 0~40 m/s)
红外热成像仪	FLIR E8	建筑界面温度分布(分辨率320像素×240像素,测量范围-20~550℃)

2 结果与讨论

2.1 物理环境测量数据统计与分析

11个高铁站各分区的测量数据见表3。其中,物理环境参数中的温度、风速、酷热指数以及湿度4个参数由便携式气象仪KESTREL 5500测得。测量时,依据各高铁站候车厅的规模和空间布局进行分区,于各分区中心点实施实时数据测量。测量过程中,将仪器静置于分区中心位置达规定时长,待仪器数据稳定后进行读取。随后,对各区域测得的实时数据进行整合,并计算其平均值。对于通风参数,则取所有区域中的最小值和最大值以确定范围。以此代表该站的室内环境参数数值。

光照、噪声、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及 CO_2 浓度等参数则由OSEN-XD200仪器测得。测量时,将该仪器置于各高铁站候车厅的人流集中区域,仪器每隔1.5 min生成一组数据。基于仪器所呈现的各时刻数据值,绘制箱图,如图1所示。在此条件下生成的数据,反映了高铁站环境参数在一段时间内的波动范围。

1) 热环境

依据物理环境参数测量统计表(表3),在热环境要素的温度、湿度、通风、酷热指数4项指标中,重庆西站、重庆沙坪坝站与扬州站的温度能够维持在相对舒适的区间,具体温度范围为26.8~29.3℃。进一步分析各区域数据可知,重庆西站温

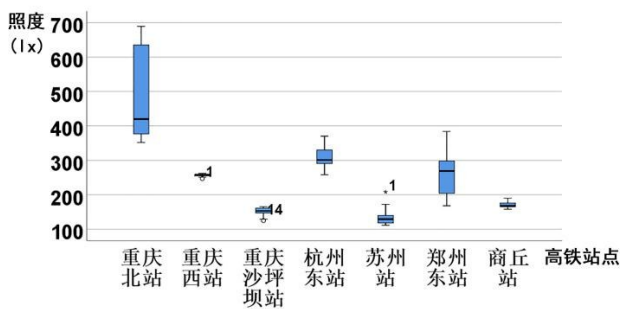
表3 高铁客站的室内物理环境参数测量数据表

Table 3 Measurement data of indoor environmental parameters in high-speed railway passenger stations

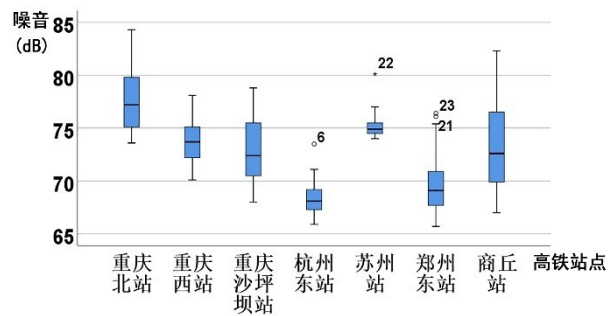
站名	温度/℃	酷热指数/℃	湿度/%	风速/(m/s)
重庆西站	26.8	28.9	76.7	0.4~0.6
重庆北站	28.3	32.6	67.8	0~0.3
重庆沙坪坝站	29.3	35.2	68.0	0~0.5
郑州东站	32.6	42.3	68.3	0
苏州站	31.9	41.0	64.3	0~0.3
上海虹桥站	32.2	43.4	44.6	0
北京南站	29.7	34.7	69.0	0
商丘东站	30.7	39.4	78.0	0
商丘站	29.6	37.4	82.9	0
扬州东站	27.3	29.7	67.7	0~0.4
杭州东站	30.2	34.2	65.6	0~0.3

度稳定在26~28℃,中间通道位置偶有0.4~0.6 m/s的微风,酷热指数为28.9℃,整体舒适度较高。与之形成对比的是,上海虹桥站、苏州站和郑州东站的室内温度始终高于30℃。其中郑州东站最高温度达32.6℃,内部温度远超舒适范围,旅客在静止候车的状态下仍持续出汗,热环境状况恶劣。

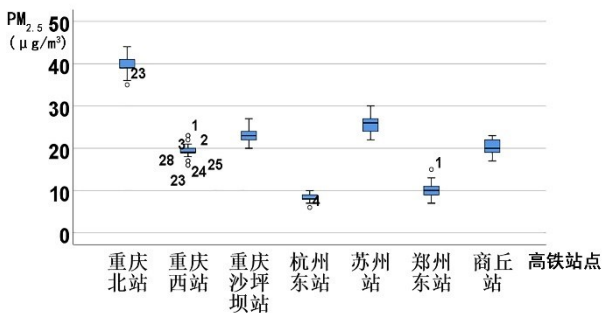
实地调研发现,候车厅室内的热环境状况与建筑的围护结构形式密切相关,尤其是建筑顶部的天窗设计。郑州东站、苏州站、上海虹桥站均采用顶部天窗设计。夏季,太阳辐射强度极大,太阳辐射



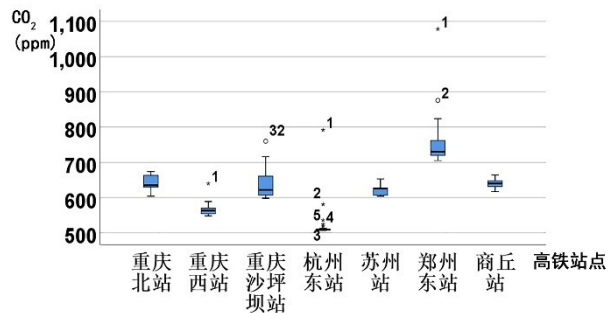
(a) 各高铁站照度(lx)数值箱图



(b) 各高铁站噪声(dB)数值箱图



(c) 各高铁站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数值箱图



(d) 各高铁站 CO_2 浓度数值箱图

图1 各站点照度、噪声、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 CO_2 浓度的数值箱图

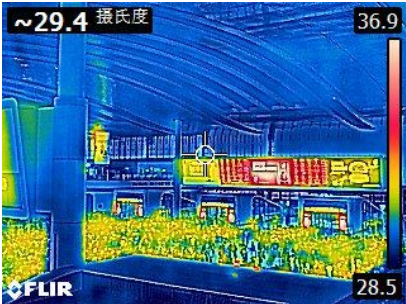
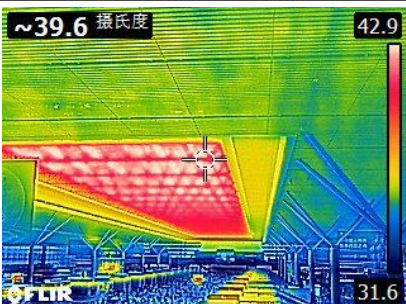
Fig.1 Box plot of light, noise, $\text{PM}_{2.5}$ concentration and CO_2 concentration data at each site

穿过顶部天窗的玻璃后作用于室内地面,致使室内地面温度升高并持续向外辐射长波,进而导致室内温度持续攀升。此外,由于候车厅存在较大的人流进出需求,多个出入口和检票乘车口持续开放,这使得空调的制冷效果大打折扣,整体空间呈现闷热状态,候车体验极差。

从红外热成像仪的拍摄数据可见(表4),顶部无天窗的重庆西站,室内温度分布均匀度高,侧窗的辐射温度最高为36.9℃,空调制冷效果显著,能

够维持地面温度在26℃左右,旅客活动层的温度较为适宜。而郑州东站和北京南站的情况则截然不同,其顶部天窗内表面温度最高可达近43℃,受太阳辐射影响,地面温度也随之升高。郑州东站地面辐射最高的区域温度达38℃,该区域也是候车厅中央的主通道,且在检票排队时段为排队区域,人员密度非常大。众多旅客不得不长时间处于高温、高太阳辐射、高地面辐射的环境中等待,环境条件极为严峻。

表 4 顶部天窗与室内热环境分布状况的关系对比

Table 4 Comparison of the relationship between the top skylight and the indoor thermal environment distribution		
车站名称	顶部(天窗)辐射温度分布	地面热辐射温度分布
重庆西站		
		
郑州东站		
		

2) 声环境

作为人员密集场所,高铁站候车厅声源构成较为复杂。除人员交谈与行动产生的声音外,还包括

行李拖动声、广播声以及车辆运行引发的振动等。在候车厅噪声环境中,噪声呈现相对稳定的特征,不存在显著的偶发性噪声。因此,可将环境中的噪

声视为稳态噪声。在建筑声学研究领域,等效声级 L_{eq} 是衡量稳态噪声的关键物理量。

在测量过程中,室内环境监测仪 OSEN-200 实时监测室内噪声值,噪声呈正态分布,分别截取连续的 100 个监测数据,并统计累计百分声级 L_N 。将监测数据按从大到小的顺序排列,取第 10、50、90 个数据分别记作 L_{10} 、 L_{50} 、 L_{90} 。等效声级 L_{eq} 和 L_{10} 、 L_{50} 、 L_{90} 满足式(1)所示的关系^[22],据此可计算出不同候车厅的等效噪声,如表 5 所示。

$$L_{eq} = L_{50} + \frac{(L_{10} - L_{90})^2}{60} \quad (1)$$

表 5 不同高铁站的声环境测量计算数据表
Table 5 Measurement and calculation data of acoustic environment at different stations

车站	L_{10}/dB	L_{50}/dB	L_{90}/dB	L_{eq}/dB	L_{max}/dB
郑州东站	75.5	69.9	67.3	71.0	79.9
商丘站	81.9	73.9	68.6	76.8	85.7
杭州东站	70.7	68.6	66.3	68.9	73.8
苏州站	78.4	76.1	74.4	76.4	82.2
重庆北站	80.9	76.6	72.3	77.8	84.3
重庆西站	78.0	73.4	70.0	74.5	80.6
沙坪坝站	77.5	72.4	69.3	73.5	78.8

依据《声环境质量标准》(GB 3096—2008)^[23],铁路干线两侧的区域在无列车通行时的环境背景噪声限值为昼间 70dB。然而,如表 5 测量结果所示,高铁站稳态噪声声级处于 68~78 dB 区间,瞬时最大噪声甚至高达 85.7 dB,已显著超出噪声卫生标准。基于问卷中关于声环境评价的结果,高铁站声环境满意度普遍较低,评分均未超过 5 分,表明其声环境舒适度不足。多数高铁站未采取有效的隔声、吸声措施,导致大量声波在候车厅内反复反射,形成复杂的声场,噪声环境质量欠佳。

表 6 候车室光环境标准
Table 6 Light environment standard of waiting room

房间/场所	车站类型	参考平面及其高度	照度 / lx
候车区/集散厅	其他车站候车室	地面	150
候车区/集散厅	特大型车站候车室	地面	200
商业区/餐饮区/多功能厅		0.75 m 水平面	300

4) 空气质量

在空气质量评估领域,室内 CO_2 浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及 PM_{10} 浓度常被用作表征室内空气质量的关键物理量。这些参数不仅能够反映室内通风效果与空气新鲜程度,还可间接体现室内有害气体的污染状况。《室内空气中二氧化碳卫生标准》(GB/T 17094—1997)明确规定,室内空气中二氧化碳卫生标准值 $\leq 0.10\%$ ($2\,000\text{ mg}/\text{m}^3$),换算约为 1 111

除噪声环境外,高铁站还需重视的另一重要声环境因素为播音效果。旅客获取行程信息的主要途径,除实时关注电子屏幕上与车票对应的信息外,便是聆听播音提醒。因此,高铁站候车厅的播音清晰度与响度在其运营过程中至关重要。调研结果显示,各高铁站在播音清晰度和响度方面表现良好,能够满足旅客的基本使用需求。

3) 光环境

根据《铁路照明设计规范》(TB 10089—2015)^[24],如表 6 所示,候车区地面照度要求为:特大型车站为 200 lx,其他车站候车室为 150 lx。在夏季晴天,太阳辐射强度较大,候车厅通过设置侧窗与天窗,通常能够满足采光的最低要求。然而,根据《建筑采光设计标准》(GB 50033—2013)及《建筑照明设计标准》(GB 50034—2013)的规定,交通运输建筑候车空间室内光线环境照度标准值应大于 450 lx,当前状况无法满足该要求。根据实地调研结果,高铁站候车厅的室内照度情况可分为两类。其一为未设置天窗的普通屋顶类型,以重庆沙坪坝站为例。此类车站白天仍需借助开启灯具来补充人工照明,但由于室内层高较高,且白天开启的灯具数量有限,致使室内光环境偏暗,照度甚至不超过 200 lx。其二为屋顶设置天窗类型,无论天窗采用何种形式,均能显著提升室内照度,但同时也会造成室内照度不均匀的问题。以郑州东站为例,在天然光线能够覆盖的区域,室内最高照度可达 20 000 lx 以上。而在无天然光线覆盖且室内灯具未开启的区域,室内照度仅有 180 lx 左右,照明效果欠佳。此外,郑州东站因天然光直射影响,地面反射率过高的铺装区域产生了明显的眩光,这不仅影响了旅客行走时的视觉舒适度,还对通行安全构成威胁。

cm^3/m^3 。调研实时监测 CO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_2 等气体的浓度以及空气中 TVOC 浓度。在诸多监测参数中, $\text{PM}_{2.5}$ 的粒径小于 PM_{10} ,其对人体的危害程度更高。因此,在筛选室内空气环境指标时,选取 $\text{PM}_{2.5}$ 作为固体颗粒物的代表参数。此外, CO_2 浓度对人体健康亦具有显著影响,与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 不同,在高铁站这类人员密集场所, CO_2 浓度不仅受通风条件等因素的制约,还会随人员流动而发生动态变化。

鉴于此,CO₂浓度也应作为代表性参数。根据监测数据结果,所测车站的各项空气质量指标均未超出标准限值。然而,由图2所示的空气质量满意度相关性分析可知,随着CO₂浓度和PM_{2.5}浓度的升高,人们对于空气质量的满意度呈下降趋势。

2.2 旅客满意度问卷结果统计与分析

1) 现场问卷设计

在问卷调查环节,测试者需根据所在高铁客站候车厅整体物理环境进行总满意度评分。基于学者前期研究分类,问卷在物理环境维度设置了4个要素层级,即热环境、光环境、声环境和空气质量^[1-10,25],每个要素层下包含了若干个相关因子。评分采用1~7分的分段制,其中1分代表非常不满意(不适宜),2分代表不满意(不适宜),3分代表比较不满意(不适宜),4分代表一般,5分代表比较满意(适宜),6分代表满意(适宜),7分代表非常满意(适宜)。为确保问卷结果的准确性,测试者选定为20~40岁的健康成年人群总计6人,性别比例均衡。同时,测试者身高处于165~175 cm区间,体重在50~70 kg之间,BMI值均处于正常范围,身体健康。参与测试的人员在夏季长期处于温度设定在舒适区间的空调室内。问卷针对11个站点分别发放,共收回有效问卷66份。在开展调研测试前,对测试者进行了关于问卷问题含义以及评判标准的详细培训,要求测试者依据自身理解和主观感受进行评判。后续,根据测试者主观评分,运用数据统计分析方法,探究分项满意度评分与整体满意度之间的相关性及其影响程度。

2) 问卷结果统计

依据问卷设计框架,将候车厅的物理环境分为热环境、光环境、声环境以及空气质量4个维度。测试人员在调研场景中模拟旅客常规行为,开展行走、拖拽行李移动、静坐待车等动作,并针对物理环境各维度的相关因子及整体物理环境进行评分。具体而言,由6名测试人员对现场各因素进行满意度评分,随后计算各因素及总体评价的6人评分均值,统计结果见表7。

基于上述统计结果,物理环境总体满意度较高的高铁站候车厅有重庆西站、重庆沙坪坝站、商丘东站、扬州东站和杭州东站,其总体评分均高于5.5分。在分项评分中,热环境评分差异显著,范围自2分至6.5分不等。调研结果显示,各站点候车厅温度分布存在显著差异。其中,重庆沙坪坝站、重庆西站及扬州东站的温度较为适宜。而以郑州东站为代表的部分车站,因屋顶天窗面积较大且缺乏有效遮阳措施,在夏季强太阳辐射作用下,室内温度

表7 高铁站物理环境各因素调查问卷满意度统计表
Table 7 Satisfaction statistics of the questionnaire on physical environment factors of high-speed railway stations

站名	温度	湿度	通风	噪声	室内照明	空气新鲜	总体
重庆西站	5.19	5.19	5.31	4.25	5.50	5.00	5.50
重庆北站	4.79	5.00	4.92	4.54	5.25	4.17	4.58
重庆沙坪坝站	5.25	5.00	5.50	5.00	4.33	5.25	6.50
郑州东站	2.00	3.50	2.00	4.00	5.00	3.00	3.00
苏州站	3.25	4.25	4.50	4.75	4.75	4.50	4.50
上海虹桥站	3.00	3.50	3.75	3.00	4.50	4.00	4.50
北京南站	4.17	4.67	4.33	4.47	4.89	4.67	4.67
商丘东站	4.75	5.00	5.50	4.83	5.17	5.17	6.00
商丘站	3.40	4.50	3.00	4.42	4.00	3.17	4.00
扬州东站	6.50	6.00	6.00	5.00	5.00	7.00	6.00
杭州东站	4.25	4.25	4.50	4.75	5.25	5.25	5.50

远超舒适范围。重庆西站、沙坪坝站及扬州东站通过通风设备的运行,能够在室内形成一定的空气流动,有助于提升热环境整体感受。在光环境方面,评分达到5分以上的高铁站包括重庆西站、杭州东站、重庆北站、扬州东站及郑州东站,而重庆沙坪坝站的光环境评价最低。在声环境方面,各站点候车厅的评分普遍较低。鉴于高铁站候车厅人员密集、声源复杂,尤其是大型及特大型综合交通枢纽,声环境噪杂已成为常态。此外,在候车厅设计过程中,往往不会采取有效的吸声消声措施。因此,综合因素导致高铁站声环境满意度普遍偏低。在空气质量方面,扬州东站、沙坪坝站、杭州东站及商丘东站表现较好。根据既往研究,空气质量主观满意度与人员密度和通风质量密切相关。在评分较高的4个站点中,重庆西站、重庆沙坪坝站和扬州东站的通风表现较好,而商丘东站则因人员密度极低而表现出色。

2.3 满意度与多维物理环境交互作用的关系

为了更精准地探究各维度物理环境要素的交互作用及其对旅客满意度的影响机制,对物理环境客观测量数据与调研问卷数据进行深入分析。基于现场调研获取的问卷数据开展可靠性检验,将热环境、声环境、光环境和空气质量4个维度的满意度数据与物理环境总体满意度进行相关性检验。结果显示,所得的α信度系数为0.902,表明数据信度极好。效度分析结果表明,整体维度下的KMO值为0.848,大于0.80,效度极好,显著性也低于0.01,进一步验证了问卷数据具有较高的准确性。

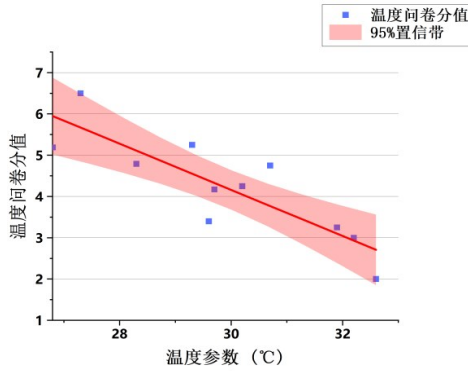
各站点物理因素的主观满意度与客观数据间的关系散点图(图2)显示,在夏季特定环境参数范围内,二者呈线性关系。将物理环境中的4个维度

(热环境、声环境、光环境、空气质量)满意度与物理环境总满意度进行线性回归,公式为

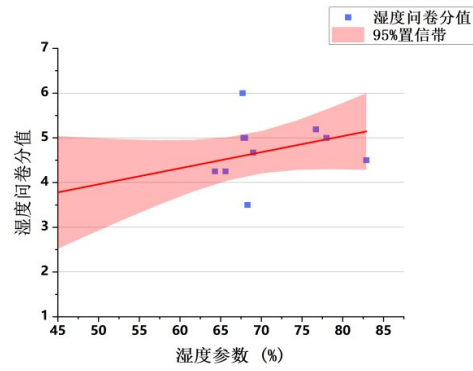
$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 \quad (2)$$

式(2)中, Y 为物理环境总满意度; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别表示热环境、声环境、光环境和空气质量的满意度。其中, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为多元线性回归中热环境、

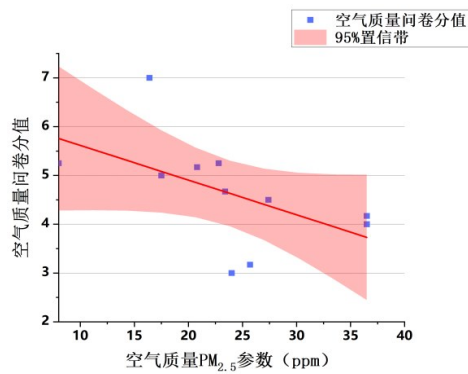
声环境光环境和空气质量满意度对应的系数值。基于4个分项对物理环境总满意度的多因素方差分析结果,多元线性回归通过了总体显著性检验,表明该回归模型具有统计学意义。由表8呈现的线性回归结果可知,物理环境4个组成部分与物理环境总满意度之间存在特定的影响关系。



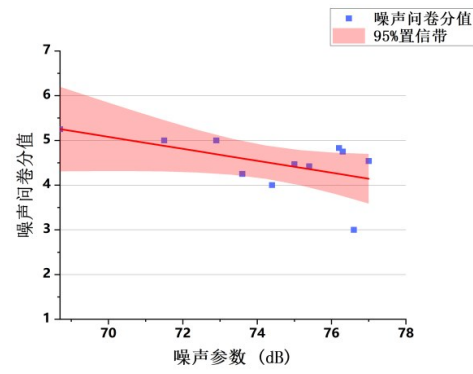
(a) 温度问卷分值与温度参数的线性拟合



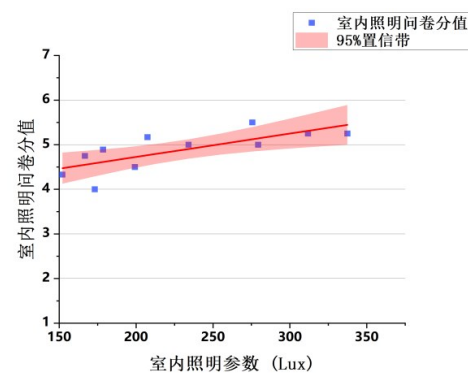
(b) 湿度问卷分值与湿度参数的线性拟合



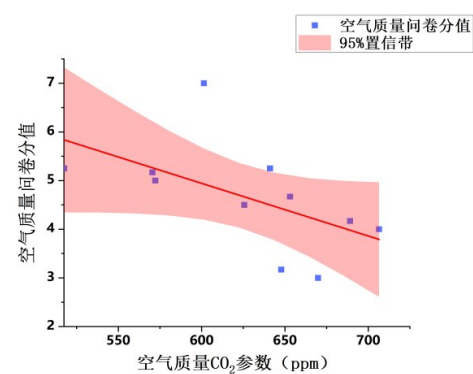
(c) 空气质量问卷分值与PM_{2.5}参数的线性拟合



(d) 噪声问卷分值与噪声参数的线性拟合



(e) 室内照明问卷分值与室内照明参数的线性拟合



(f) 空气质量问卷分值与CO₂参数的线性拟合

图2 主观满意度与物理因素客观数据的关系散点图

Fig. 2 Scatter plot of the relationship between subjective satisfaction and objective data of physical factors

回归分析结果表明,热环境与空气质量两个变量的 p 值小于0.05,呈现出显著性特征。表明这两个变量对总体满意度存在显著影响。而声环境和光环境变量的影响则未达到显著水平。通过比较Beta值可以看出,各变量对物理环境总满意度的影响程度从大到小依次为:热环境、空气质量、声环

境、光环境。此外,4个影响因素均与物理环境总满意度呈正向相关。由此可构建式(3)所示回归模型。

$$Y = 0.555X_1 + 0.223X_2 + 0.039X_3 + 0.264X_4 \quad (3)$$

式中, Y 为物理环境总满意度, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别表示热环境、声环境、光环境和空气质量的满意度。

表 8 4 个分项对物理环境总满意度的回归分析系数
Table 8 Regression analysis coefficients of the four sub-items on total satisfaction with the physical environment

物理环境	未标准化系数		标准化系数	<i>t</i>	显著性 <i>p</i>
	<i>B</i>	标准错误	Beta		
热环境	0.555	0.096	0.519	5.777	0.000
声环境	0.223	0.135	0.203	1.658	0.102
光环境	0.039	0.109	0.037	0.354	0.725
空气质量	0.264	0.101	0.239	2.625	0.011

将物理环境各因素与物理环境总满意度进行

Spearman 相关性分析,结果见表 9。由表 9 可知,在整体影响因素中,热环境因素的相关性显著高于声环境和光环境因素,空气质量因素的相关性也处于较高水平,此结果与线性回归分析结果契合。就热环境而言,湿度和通风因素与物理环境总满意度的相关性较强,其次是温度及其分布均匀度。在声环境方面,噪声以及播音清晰度的相关性较为突出。光环境中,照度因素的相关性表现较为显著。而在空气质量维度,空气污染物浓度和空气新鲜度因素均占较高比重。

表 9 物理环境总满意度与各因素的 Spearman 相关性分析
Table 9 Spearman correlation analysis between total physical environment satisfaction and each factor

热环境	相关性系数	声环境	相关性系数	光环境	相关性系数	空气质量	相关性系数
温度	0.615**	噪声	0.627**	照度	0.599**	空气新鲜度	0.747**
湿度	0.733**	环境震动	0.557**	自然光	0.405**	空气污染物	0.752**
温度分布均匀度	0.695**	播音音色	0.556**	眩光度	0.514**	空气持香度	0.623**
通风	0.702**	播音清晰度	0.598**				
		播音趣味性	0.584**				
		音乐氛围	0.534**				

注:**表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著,*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

3 结论

1)热环境对旅客综合满意度具有显著影响,涵盖温度、湿度、通风等因素。重庆西站和沙坪坝站的热环境满意度较高,归因于其温度控制得当、通风条件适宜;而郑州东站由于室内环境温度过高,致使旅客整体满意度极低。

2)高铁站普遍存在噪声超标问题,此问题与站点客流量密切相关。采取适当的建筑声学处理措施,有助于提升旅客的综合满意度。此外,在确保播音清晰度的基础上,增强播音趣味性和营造适宜的音乐氛围,是提高整体声环境满意度的有效途径。

3)光环境中的照度因素对整体满意度影响最大。多数高铁站候车厅的日间照度能够满足标准要求,仅个别站点存在照度均匀度不佳及眩光问题。例如,郑州东站的高照度区域与低照度区域对比鲜明,且地面光反射系数过高,对旅客的整体满意度产生负面影响。

4)旅客满意度随着 CO₂、PM₁₀ 及 PM_{2.5} 浓度的降低而升高,表明空气质量的改善可显著提高旅客的综合满意度。

总体而言,旅客满意度受到高铁站候车厅物理环境多维要素的交互作用,总满意度与室内环境质量各要素满意度呈现显著正相关关系。优化热环境、光环境、声环境和空气质量,能有效提高旅客综合满意度,其中基于问卷数据的多元回归分析以及

相关性分析结果均表明,热环境与空气质量对总体满意度的影响最为显著。应着重采取有效措施改善这两项环境要素。控制温度、调节湿度、适当通风以及降低空气中 CO₂和固体颗粒物浓度,应作为提升候车厅环境品质的关键举措。

参考文献

[1] ZHANG X, DU J T, CHOW D. Association between perceived indoor environmental characteristics and occupants' mental well-being, cognitive performance, productivity, satisfaction in workplaces: A systematic review [J]. Building and Environment, 2023, 246: 110985.

[2] ZHAO Y J, LI D. Multi-domain indoor environmental quality in buildings: A review of their interaction and combined effects on occupant satisfaction [J]. Building and Environment, 2023, 228: 109844.

[3] CHIANG C M, LAI C M. A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan [J]. Building and Environment, 2002, 37(4): 387-392.

[4] CAO B, OUYANG Q, ZHU Y X, et al. Development of a multivariate regression model for overall satisfaction in public buildings based on field studies in Beijing and Shanghai [J]. Building and Environment, 2012, 47: 394-399.

[5] LEDER S, NEWSHAM G R, VEITCH J A, et al. Effects of office environment on employee satisfaction: A new analysis [J]. Building Research & Information,

- 2016, 44(1): 34-50.
- [6] GUO T M, HU S T, LIU G D. Evaluation model of specific indoor environment overall comfort based on effective-function method [J]. *Energies*, 2017, 10(10): 1634.
- [7] 张甫仁, 杨昭, 郁文红. 室内环境评价物元模型及可拓评价方法[J]. *天津大学学报*, 2005, 38(4): 307-312.
ZHANG F R, YANG Z, YU W H. Matter-element model and extensional evaluation method of indoor environment [J]. *Journal of Tianjin University*, 2005, 38(4): 307-312. (in Chinese)
- [8] 王谦, 周浩, 张兴惠, 等. 基于实时评价和长期评估的公共建筑室内环境满意率评价模型[J]. *建筑科学*, 2022, 38(6): 8-15, 23.
WANG Q, ZHOU H, ZHANG X H, et al. Evaluation model of indoor environment satisfaction of public buildings based on real-time and long-term assessment [J]. *Building Science*, 2022, 38(6): 8-15, 23. (in Chinese)
- [9] KIM J, DE DEAR R. Nonlinear relationships between individual IEQ factors and overall workspace satisfaction [J]. *Building and Environment*, 2012, 49: 33-40.
- [10] KIM J, DE DEAR R. Impact of different building ventilation modes on occupant expectations of the main IEQ factors [J]. *Building and Environment*, 2012, 57: 184-193.
- [11] 张永超. 高铁客站候车区热、光、声环境对人体舒适度的交互作用影响研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
ZHANG Y C. Research on interaction effect of thermal, light and acoustic environment on human comfort in waiting area of high-speed railway station [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [12] DEB C, RAMACHANDRAIAH A. Evaluation of thermal comfort in a rail terminal location in India [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(11): 2571-2580.
- [13] 狄育慧, 王智鹏, 赵二庆, 等. 西安北客站候车大厅冬季热环境调查研究[J]. *建筑节能*, 2015, 43(12): 2-5.
DI Y H, WANG Z P, ZHAO E Q, et al. Thermal comfort field survey at Xi'an Bei railway station's waiting hall in winter [J]. *Building Energy Efficiency*, 2015, 43(12): 2-5. (in Chinese)
- [14] LIU G, CEN C, ZHANG Q, et al. Field study on thermal comfort of passenger at high-speed railway station in transition season [J]. *Building and Environment*, 2016, 108: 220-229.
- [15] WANG Z, ZHAO H T, LIN B R, et al. Investigation of indoor environment quality of Chinese large-hub airport terminal buildings through longitudinal field measurement and subjective survey [J]. *Building and Environment*, 2015, 94: 593-605.
- [16] GENG Y, YU J, LIN B R, et al. Impact of individual IEQ factors on passengers' overall satisfaction in Chinese airport terminals [J]. *Building and Environment*, 2017, 112: 241-249.
- [17] 黄彦祥, 朱颖心, 林波荣. 航站楼旅客满意度与空间关系解析[J]. *建筑科学*, 2021, 37(2): 8-14.
HUANG Y S, ZHU Y X, LIN B R. Analysis on relationship between passenger satisfaction and terminal building space [J]. *Building Science*, 2021, 37(2): 8-14. (in Chinese)
- [18] 余娟, 林波荣, 黄彦祥, 等. 我国航站楼用能和室内环境质量调研与实测分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2020, 60(12): 977-984.
YU J, LIN B R, HUANG Y S, et al. Investigation and analysis of the energy use and indoor air quality of Chinese airport terminals [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2020, 60(12): 977-984. (in Chinese)
- [19] 杜晓辉. 寒冷地区大型高铁客站夏季室内环境与旅客满意度实测研究[J]. *建筑科学*, 2018, 34(6): 102-108.
DU X H. Research on indoor environment quality and passengers' satisfaction in large high-speed railway station in cold area [J]. *Building Science*, 2018, 34(6): 102-108. (in Chinese)
- [20] DU X H. Investigation of indoor environment comfort in large high-speed railway stations in Northern China [J]. *Indoor and Built Environment*, 2020, 29(1): 54-66.
- [21] MAIER J, MARGGRAF-MICHEEL C. Weighting of climate parameters for the prediction of thermal comfort in an aircraft passenger cabin [J]. *Building and Environment*, 2015, 84: 214-220.
- [22] 杨春宇, 唐鸣放, 谢辉. 建筑物理: 图解版[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
YANG C Y, TANG M F, XIE H. *Building physics* [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [23] 声环境质量标准: GB 3096—2008 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
Environmental quality standards for noise: GB 3096—2008 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008. (in Chinese)
- [24] 铁路照明设计规范: TB 10089—2015 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
Code for design of railway lighting: TB 10089—2015 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [25] 黄晨. 建筑环境学[M] 2版. 北京: 机械工业出版社出版, 2018: 1-100.
HUANG C. *Building environment science* [M]. 2nd Edition. Beijing: Publishing House of Machinery Industry, 2018: 1-10. (in Chinese)