

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-056-08

地下空间办公人员满意度、 工作表现和病态建筑综合症影响因素初探

马海桐 李聪聪 胡嘉钰 关军 陈昕如

(南京理工大学能源与动力工程学院 南京 210094)

【摘要】 为探讨地下办公空间典型环境参数对人员感知与健康表现的影响机制,以华东地区地铁站内办公空间为研究对象,开展夏季现场环境监测与问卷调查,采集空气温度、相对湿度、照度及CO₂浓度等数据,并结合主观反馈分析其对满意度、SBS症状及工作表现的作用特征。研究结果显示,人员对热环境与光环境的反应存在显著阈值特征,其中室温控制在23.93-24.63℃、照度维持在214-450Lux范围内可有效降低热不满意率、SBS发生率及注意力负向反馈比例,表现出较优的舒适性与工作效率响应;相较之下,湿环境与空气质量的不满意率始终处于较高水平,未识别出满意度最优控制区间。该研究以期为地下空间环境营造提供参考。

【关键词】 地下办公空间; 室内环境满意度; 病态建筑综合症; 工作表现; 实地研究
中图分类号 TU831.1 文献标志码 A

Summer Field Study on Impact Factors of Human Satisfaction, Work Performance, and Sick Building Syndrome in Underground Official Spaces

Ma Haitong Li Congcong Hu Jiayu Guan Jun Chen Xinru

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

【Abstract】 In order to investigate the impact factors of typical environmental parameters in underground office spaces on human perception and health-related outcomes, office areas within metro stations in Eastern China were selected to conduct the field monitoring and questionnaire surveys in the summer. Air temperature, relative humidity, illuminance, and CO₂ concentration were collected for analyzing subjective responses on satisfaction, sick building syndrome (SBS) symptoms, and work performance. Results showed that, clear threshold effects for thermal and lighting conditions, that is, maintaining indoor temperatures at 23.93-24.63 °C and illuminance at 214-450 Lux markedly lowered thermal dissatisfaction, SBS occurrence rate, and negative attention-related feedback, thereby enhancing comfort and work efficiency. By contrast, dissatisfaction related to humidity and air quality remained high across the observed ranges, and no optimum satisfaction interval was identified. Those findings could provide a reference for improving environmental quality in underground workspaces.

【Keywords】 Underground official space; Indoor environment satisfaction; Sick building syndrome; Work performance; Field study

0 引言

随着城市化进程的加速,积极推动城市地下空

间的开发与利用,对于缓解有限的土地资源压力具有
重要的现实意义。据统计,地下空间可提供约

基金项目:国家自然科学基金面上项目“高人员密度室内环境挥发性有机化合物的关键特性和源解析研究”(52178077)

作者简介:马海桐(2003-),男,本科,E-mail: hatongma@163.com

通讯作者:关军(1978-),男,博士,教授,E-mail: guanjun@njust.edu.cn

收稿日期:2025-06-19

25%~40%的额外宜居空间^[1], 在城市交通、商业、办公等领域中发挥着越来越重要的作用。然而, 由于地下空间被土壤包围, 其特殊的结构特性导致封闭、潮湿、自然光线不足、噪音污染和空气流通性差等问题。因此, 开展地下空间典型客观环境参数对人员满意度、健康表现与工作效率的具体影响机制研究, 对于地下空间环境营造具有重要的科学参考意义。

目前, 已有文献从不同角度探讨了地下空间中各类环境因素对人员健康与舒适性的影响。在热湿环境方面, 已有研究发现温度与湿度波动会影响人员热舒适、心理状态与工作效率, 尤其在地下空间中, 环境调节能力受限, 热湿变化更易引发不适反应^[2-5]。在光环境方面, 已有学者揭示了长期处于无自然光照的地下空间会干扰人体昼夜节律, 引发睡眠障碍和心理不适, 光照强度、色温及光源类型对视觉舒适与认知绩效具有显著调节作用^[6-9]。在空气质量方面, 研究发现地下空间内 CO₂、PM_{2.5} 与 VOCs 等污染物浓度普遍偏高, 污染物不易扩散, 通风效率低下可能导致主观不适增强, 甚至诱发呼吸系统疾病及 SBS 症状^[10-12]。

综合上述研究表明, 地下空间典型客观环境参数对人员满意度、健康表现与工作效率存在影响,

然而现有研究大多聚焦于部分单一环境因子的作用机制, 对于热湿环境、光环境与空气质量等多类客观参数对地下办公空间人员感知、满意度、生理表现及工作效率的定量研究仍较为缺乏。因此, 本文以华东地区地铁站典型地下办公空间为对象, 开展夏季实地调研, 旨在深入认识主要环境参数对人体响应的影响规律, 以期为地下空间环境的优化策略提供科学参考。

1 研究方法

本研究于 2024 年夏季, 选取华东地区某城市 4 个地铁站的车站控制室与站长室开展实地调研。调查测试期间, 空调系统处于正常运行状态, 研究围绕夏季工况下地下办公空间中空气温度、湿度、照度与 CO₂ 浓度等典型环境参数, 探讨其对人员主观感知、满意度、SBS 症状及工作表现的影响关系。

环境参数监测包括空气温度、相对湿度、照度和二氧化碳 (CO₂) 浓度。测试仪器布设于呼吸高度和办公桌位置, 采用三点平均法对每个空间进行连续监测, 结果表明室内空间各测点差异不显著, 可视为均一环境进行分析。各类测试仪器的相关信息如表 1 所示。

表 1 测试仪器相关信息

Table 1 Testing equipment information

监测参数	仪器名称及型号	量程	分辨率	误差
温湿度	温湿度自记仪 (RC-4HC, 精创, 中国)	-20℃~40℃ 0%~99%RH	0.1℃ 0.1%	±0.5℃ ±3%RH
CO ₂	无线 CO ₂ 记录仪 (WEZY-1 型, 天建华仪, 中国)	0~5000ppm	1ppm	±50ppm
PM _{2.5}	气溶胶检测仪 (DUSTTARKII-8530, TSI, 美国)	0.001~400mg/m ³	0.001mg/m ³	±0.1%
TVOC	TVOC 检测仪 (MP189 盟蒲安, 美国)	1ppb~200ppb	1ppb	≤±5%
照度	照度仪 (TES-1339R, 泰仕, 中国)	0.01~999900Lux	0.01Lux	±3%
黑球温度	黑球温度自记仪 (HQZY-1, 天建华仪, 中国)	-20~80℃	0.1℃	±0.3℃

为进一步了解现场受试者的主观感知影响, 本文还开展了问卷调查, 获得有效问卷 255 份。内容涵盖受试者基本信息、室内环境感知与满意度、工

作状态评价及 SBS 症状反馈。其中, 感知与满意度部分包括热感觉、热环境满意度、湿感觉、湿环境满意度、感知空气新鲜程度、室内空气质量满意

度、光感知、光环境满意度投票等。表 2 给出了主要问卷调查的评价内容及其标度。其中,感知投票采用了 ASHRAE-55^[13]建议的李克特七点连续量表,满意度投票则采用了六点断裂分割量表^[14];工作状态主要评估清醒程度、注意力、工作意愿与效率,采用范围从-3 到+3 的七分制量表^[14];SBS 部分涵盖 15 类典型不适症状,并记录其发生频率与严重程度,采用五分制量表进行程度评分^[15]。

所有受试者均为地下空间长期工作者,其中男女比约为 0.8:1,年龄主要集中在 18-44 岁(占比 82.0%),该样本特征与其办公人群的年龄与性别构成基本一致,具有一定代表性。另外,通过问卷调查筛选近 24 小时内出现发热、感冒、嗅觉异常等症状,以及饮酒、摄入咖啡因等行为信息的受试者样本,以最大限度排除受试者身体状况与生活习惯等差异对研究结果的影响。

表 2 主要问卷调查的评价内容及其标度

Table 2 Main evaluation items and scales in the questionnaire survey

评价内容	标度
冷热感觉	a.热; b.暖; c.较暖; d.适中; e.较凉; f.凉; g.冷
热环境满意度	a.非常满意; b.满意; c.有点满意; d.有点不满意; e.不满意; f.非常不满意
潮湿感觉	a.非常潮湿; b.潮湿; c.有点潮湿; d.适中; e.有点干燥; f.干燥; g.非常干燥
湿度满意度	a.非常满意; b.满意; c.有点满意; d.有点不满意; e.不满意; f.非常不满意
照明感觉	a.非常暗; b.暗; c.有点暗; d.适中; e.有点亮; f.亮; g.非常亮
光环境满意度	a.非常满意; b.满意; c.有点满意; d.有点不满意; e.不满意; f.非常不满意
空气新鲜程度	a.非常新鲜; b.新鲜; c.有点新鲜; d.没感觉; e.有点不新鲜; f.不新鲜; g.非常不新鲜
空气质量满意度	a.非常满意; b.满意; c.有点满意; d.有点不满意; e.不满意; f.非常不满意

数据分析使用 SPSS 27.0 与 Origin 2021 软件,采用 Kolmogorov-Smirnovtest 检验来验证数据是否符合正态分布。若服从正态分布,采用 z-score 归一化方法去除离群值;否则,采用箱型图去除离群值的方法^[16]。使用 bin 方法对各环境参数及对应的主观投票进行分组^[17]。然后通过回归分析,定量探讨客观环境参数(包括热湿环境参数、室内空气质量参数和光环境参数)与地铁站办公人员主观环境满意度及其环境感知之间的关系。通过建立回归模型,进一步得到根据主观满意度推荐的环境参数范围。

2 结果分析

2.1 室内环境参数

调查期间 4 个站点的室内空气温度,相对湿度,CO₂浓度,照度的平均值及上下限如表 3 所示。由于各站点照明策略不同,照度数据波动较大,本文不在表中列出,相关分析见后文。

表 3 室内环境参数测试结果

Table 3 Test results of indoor environmental parameters

	空气温度/℃	相对湿度/%	CO ₂ 浓度/ppm
A 站站长室	22.4±0.7	66.9±4.6	399.4±25.8
A 站控制室	22.6±0.8	64.3±3.0	423.8±31.1
B 站站长室	25.2±0.6	64.9±3.0	450.0±29.4
B 站控制室	23.8±0.5	71.5±3.1	456.2±23.1
C 站站长室	26.1±0.7	67.5±4.7	398.6±20.9
C 站控制室	23.5±0.8	67.4±2.8	464.0±24.8
D 站站长室	25.6±0.8	66.3±3.4	434.7±22.1
D 站控制室	26.3±1.0	66.7±4.2	476.1±32.5

2.2 主观感知与不满意率

图 1 分别给出了地铁站办公空间长期工作者中感觉温暖(投票给“略暖”“暖”或“热”)、感觉凉爽(投票给“略凉”“凉爽”或“冷”)以及对热环境不满意(投票给“有点不满意”“不满意”或“非常不满意”)的百分比。每个点代表 1℃ 温度范围内的热感知和热不满意率的平均值。

图 1 (a) 结果表明, 随着温度升高, 工作人员感觉温暖的占比明显增加, 而感觉凉爽的占比则逐渐降低。当温度低于 25.01℃ 时, 感到温暖的工作人员比例低于 20%; 而当温度高于 23.49℃ 时, 感到凉爽的工作人员比例低于 20%。

图 1 (b) 结果表明, 随着温度升高, 工作人员的热环境不满意率呈明显上升趋势。当室内空气温度高于 25.01℃ 时, 不满意率超过 20%, 并随温

度继续升高而增加; 然而当温度低于 23.49℃ 时, 尽管感觉寒冷的人员比例超过了 20%, 但热环境不满意率仍然低于 20%, 表明地铁站办公区长期工作者在夏季的实际使用环境中, 更容易接受偏冷的热环境条件, 对过暖环境的接受程度明显更低。与地上办公建筑热舒适室温范围 (24–27℃) [18] 相比, 地下空间受试者在偏低温环境下更易保持较高舒适度, 而在高温环境下不适感显著增加。

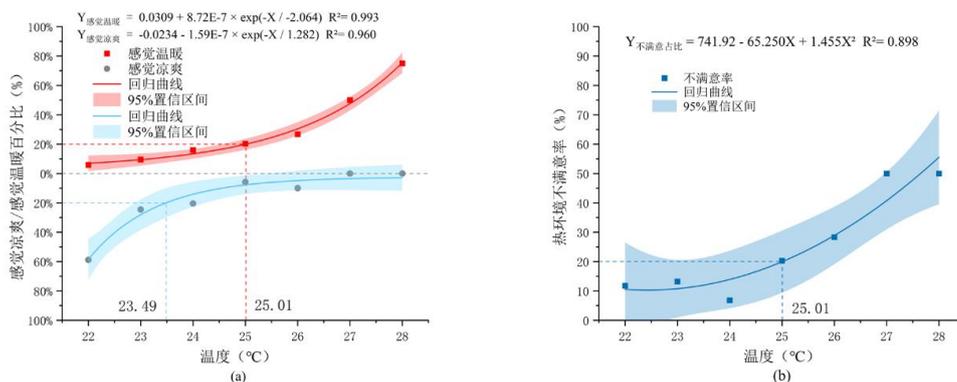


图 1 温度对热感觉及不满意率的影响

Fig.1 Impact of temperature on thermal sensation and dissatisfaction rate

图 2 分别给出了地铁站办公空间长期工作者中感觉潮湿 (投票给“非常潮湿”“潮湿”或“有点潮湿”) 以及对潮湿环境不满意 (投票给“有点不满意”“不满意”或“非常不满意”) 的百分比。每个点代表 2% 相对湿度范围内的潮湿感知和潮湿环境不满意率的平均值。

图 2 (a) 结果表明, 受试者感到潮湿的比例较高, 基本始终维持在 40% 以上, 并随着室内空气相对湿度的进一步升高而持续增加, 且大部分监测值高于《城市地下空间内部环境设计标准: CECS

441-201》限值 (65%)。

图 2 (b) 结果表明, 潮湿环境不满意率也相对较高, 始终维持在 30% 以上, 同样推测与环境相对湿度始终相对较高有关。

参考各国相关标准, 办公建筑室内相对湿度通常建议控制在 40%–70% 之间。对比本文及地面办公湿环境研究 [19] 发现, 在该区间内, 随着相对湿度的升高, 人员的不满意率均呈现显著增加趋势, 湿度控制仍是改善舒适性的关键因素。

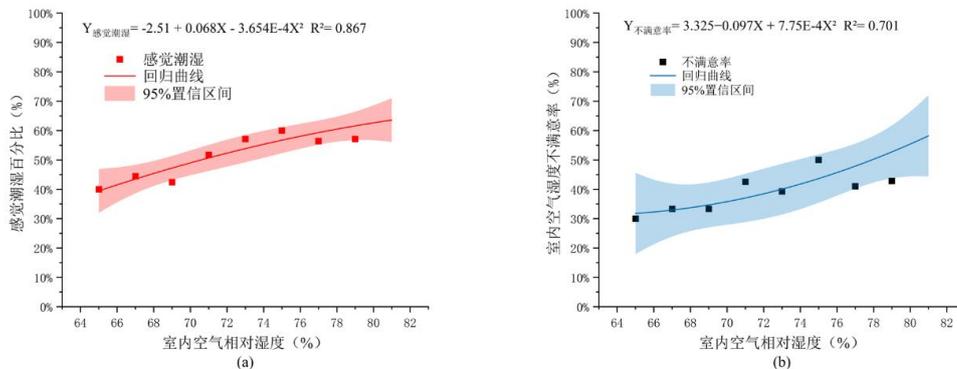


图 2 相对湿度对潮湿感觉及不满意率的影响

Fig.2 Impact of relative humidity on humid sensation and dissatisfaction rate

图 3 分别给出了受试者感觉亮（投票给“有点亮”“亮”或“非常亮”）、感觉暗（投票给“有点暗”“暗”或“非常暗”），以及对光环境不满意（投票给“有点不满意”“不满意”或“非常不满意”）的百分比。每个点代表 100Lux 照度范围内光感知与光环境不满意率的平均值。

图 3 (a) 结果表明，当照度低于 150Lux 时，超过 20%受试者认为环境偏暗；而当照度高于 150Lux 时，超过 20%受试者则认为环境偏亮。随着照度的增加，感知偏暗的比例明显降低，而感知偏亮的比例逐渐上升。当照度达到 350Lux 以上时，感知偏暗的受试者比例降至 0，表明在较低照度环

境下，受试者更容易感知到光线不足，而将照度提升至 150Lux 以上则有助于改善这一问题。

图 3 (b) 结果表明，不满意率与照度之间呈现典型的 U 型分布，不满意率在低照度和高照度条件下均较高，而在 213.7~698.5Lux 范围内达到最低（低于 20%）。在该范围内，光环境最能满足受试者的视觉需求，达到较低的光环境不满意率。

参考各国照明标准，办公区域的推荐照度范围通常在 300-750Lux 之间。有地上办公建筑光环境研究发现^[20]，在 500Lux 照度条件下，办公人员的主观视觉舒适性评价最佳，与本研究得出的最优照度范围基本一致。

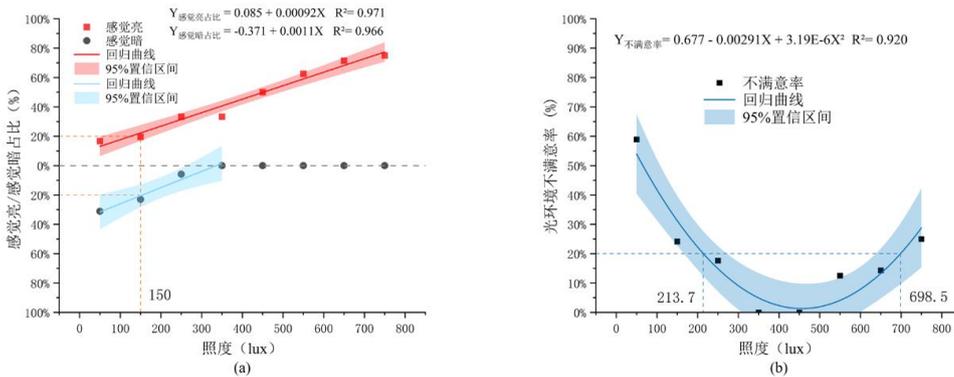


图 3 照度对光感觉及不满意率的影响

Fig.3 Impact of illuminance on visual sensation and dissatisfaction rate

影响室内空气质量的环境参数较多^[21]，考虑到本研究所涉及的建筑类型主要为办公场所，且二氧化碳（CO₂）作为人体代谢的主要产物，其浓度能够有效反映人员活动强度与空气清新程度，因此被选为衡量室内空气质量的代表性指标^[22]。

图 4 分别给出了受试者感到空气不新鲜（投票为“有点不新鲜”“不新鲜”或“非常不新鲜”）以及对室内空气质量不满意（投票给“有点不满意”“不满意”或“非常不满意”）的百分比。每个点代表 100ppm 二氧化碳浓度范围内的感知情况及不满意率的平均值。

图 4 (a) 结果表明，受试者对空气不新鲜的感知水平较高，其比例始终维持在 30%以上。当 CO₂ 浓度达到 760.2ppm 时，感到空气不新鲜的受试者比例上升至 50%，并随着浓度的进一步升高而

持续增加，且增幅明显。相较于地面办公环境，相同浓度条件下地下办公环境受试者对空气不新鲜的感知比例更高，对 CO₂ 浓度变化更为敏感。

图 4(b)结果表明，当 CO₂ 浓度达到 529.59ppm 时，空气质量不满意率已上升至 50%，并随着浓度的增加呈现快速上升趋势。当 CO₂ 浓度进一步升高至 864.19ppm 时，不满意率达到 80%。这一结果同样表明，受试者对空气质量变化的主观反应较为敏感，即使在较低 CO₂ 浓度下，也容易产生不满意感受。上述现象可能与地下空间中新风换气率普遍偏低、污染物易积聚等特性有关，也受到气味、通风感受等主观因素的显著影响，且这种主观不适应不仅与物理浓度有关，更受到密闭空间中的心理敏感性和风险认知影响^[23]。

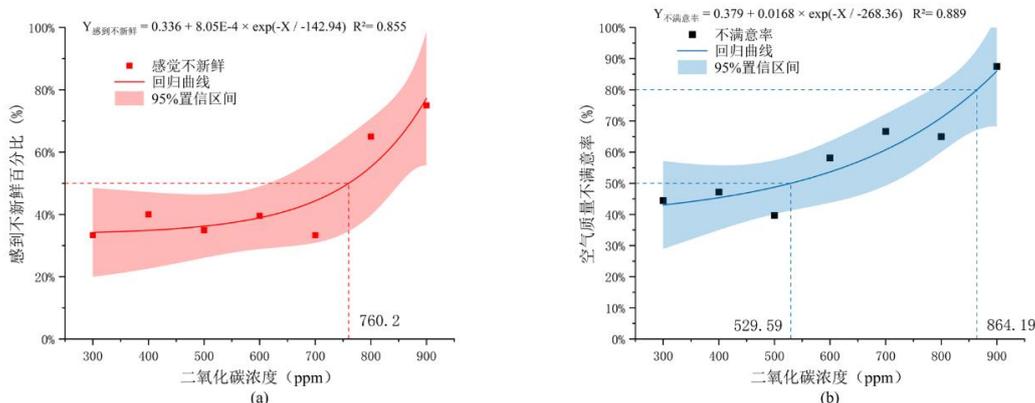


图 4 二氧化碳浓度对空气质量感知及不满意率的影响

Fig.4 Impact of CO₂ concentration on perceived air quality and dissatisfaction rate

2.3 病态建筑综合症症状发生率

图 5 给出了受试者 SBS 的表现情况。结果表明, 70.12% 的受试者呈现出不同程度的 SBS 症状。前 5 名 SBS 症状包括了疲惫 (45.42%), 口干 (40.24%), 健忘 (35.86%), 眼干 (35.46%), 嗜睡 (33.47%)。

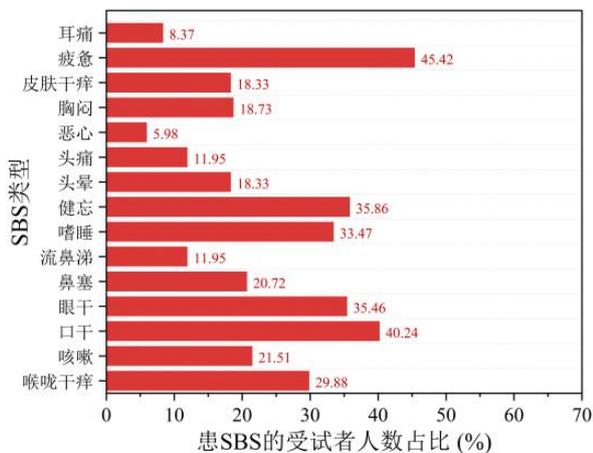


图 5 受试者的 SBS 发生率情况

Fig.5 Occurrence rate of SBS symptoms among subjects

结合 SBS 症状的发生率与客观环境参数的相关性分析发现, 受试者夏季出现 SBS 症状的发生率主要受到室内温度的影响。

图 6 进一步给出了夏季期间室内温度与存在明显 SBS 症状 (超过 4 种症状) 的受试者百分比之间的关系。结果表明, 适当降低室内温度可以显著降低受试者出现 SBS 症状的概率。当室内温度分别低于 23.87°C 和 24.63°C 时, 少于 20% 和 30% 的受试者出现 SBS 症状。此外, 已有地上办公建筑研究指出^[24], 温度是影响 SBS 症状的关键环境参数, 当室温偏低或偏高时, 症状发生率显著上升,

与本研究结论基本一致。

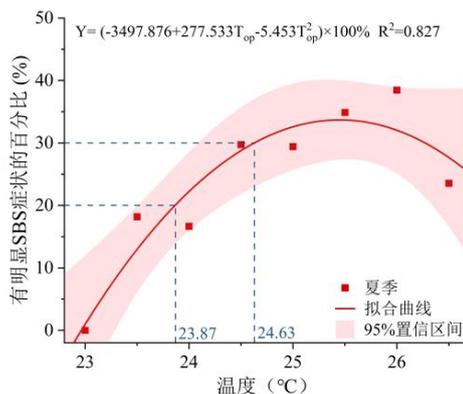


图 6 室内温度对 SBS 症状发生率的影响

Fig.6 Impact of indoor temperature on the occurrence rate of SBS symptoms

2.4 工作表现

针对受试者主观工作表现反馈 (包括清醒程度、工作意愿、注意力集中程度和工作效率) 与室内环境参数之间的相关性分析发现, 夏季受试者的工作注意力集中程度与室内温度呈显著相关性 ($p < 0.01$), 而受其他室内环境参数的影响较小。图 7 进而给出了夏季期间受试者注意力集中度负向反馈 (包括“有点不容易集中”“不容易集中”及“非常不容易集中”三个等级) 的分布特征及其与室内温度的关系。结果表明, 当室内温度维持在 26.04°C 以下时, 注意力集中度负向反馈率可控制在 30% 以下; 进一步将温度范围优化至 23.93°C-25.74°C 时, 负向反馈率可降至 20% 以下。通过回归模型求解得出, 当室内温度在 24.84°C 时, 可实现注意力集中度负向反馈率的最小化。已有地上办公建筑研究发现^[25,26], 高温 (25°C 以上) 会显著降低工作表现, 而低温 (21°C 及以下) 的负面影响相对较弱, 室温维

持在 22–24℃ 区间更有利于保持工作效率。相比之下,地下办公空间中无论高温还是低温均会显著影响注意力集中度,表现出对温度变化更高的敏感性。

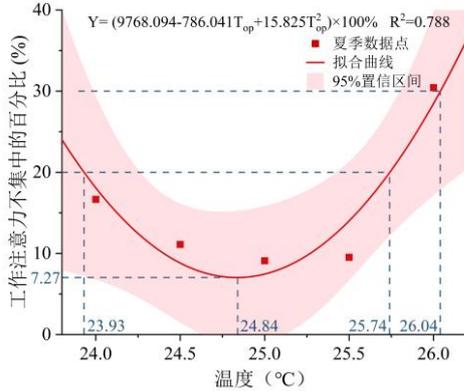


图 7 室内温度对工作表现的影响

Fig.7 Impact of indoor temperature on work performance

2.5 最佳客观环境参数范围

为综合评估地下办公空间内主要环境因素对人员主观感知、满意度、SBS 症状及工作表现的影响,本研究基于本文 2.2–2.4 节的回归建模与分组分析结果,分析得到室内空气温度、相对湿度、照度与 CO₂ 浓度等 4 类客观参数的关键作用区间,提出了面向舒适性与健康的最优环境参数建议范围,如表 4 和表 5 所示。

表 4 平衡热环境舒适度、工作表现和 SBS 症状的最佳温度

Table 4 Optimal temperature balancing thermal comfort, work performance, and SBS symptoms

性能指标	温度范围/℃
感觉温暖<20%	<25.01
感觉凉爽<20%	>23.49
不满意率<20%	<25.01
SBS 症状<30%	<24.63
注意力不集中<30%	23.93–25.74
最佳温度区间	23.93–24.63

表 5 平衡照明环境舒适度的最佳照度范围

Table 5 Optimal illuminance range for balancing visual comfort

性能指标	照度范围/Lux
感觉暗<20%	>150
不满意率<20%	214–699
最佳照度区间	214–450

针对平衡热环境舒适性、工作表现和 SBS 症状的最佳温度分析发现,当室温低于 25.01℃ 时,感知温暖与热不满意率均低于 20%,而高于 23.49℃ 时,感知凉爽者比例降至 20% 以下;SBS 显著症状在温度不高于 24.63℃ 时控制在 30% 以内;注意力负向反馈率在 23.93–25.74℃ 之间低于 30%,其中 24.84℃ 为最低点。综合各项指标,建议将最优温度区间设定在 23.93–24.63℃ 之间,以优化热舒适、降低 SBS 反应并提升工作表现。

针对平衡光环境舒适度的分析发现,当照度低于 150Lux 时,20% 以上的工作人员感到偏暗;在 214–699Lux 之间,光环境不满意率维持在 20% 以下,约 450Lux 为不满意率最低点。因此,建议将最优照度范围控制在 214–450Lux,以满足多数人员的视觉舒适需求。

在湿环境方面,尽管数据显示相对湿度升高与潮湿感知、不满意率之间存在一定的正相关关系,但在整体分析中,由于环境整体相对湿度偏高,工作人员对湿度的主观不适反馈普遍偏高,因此并未识别出明确的主观满意区间。综合考虑感知趋势及标准规范要求,建议将相对湿度控制在不高于 65% 的水平,以尽量降低潮湿感知风险。但需指出,该建议主要基于趋势性分析,尚不足以作为满意度最优控制区间。

在空气质量方面,研究发现 CO₂ 浓度对主观满意度的影响较为显著,但同样未呈现出典型的“满意区间”或“最优点”。在 CO₂ 浓度低于 530ppm 的工况下,尽管已经低于相关标准值要求,不满意率仍普遍超过 50%。因此,建议在系统设计中优先考虑提升通风换气效率,将 CO₂ 浓度控制在较低水平,以避免主观不适显著加重。

3 结论

本研究以华东地区地铁典型地下办公空间为研究对象,结合实测与问卷,探讨了夏季热湿环境、照度与 CO₂ 浓度对主观满意度、工作表现与 SBS 症状的影响。其主要结论如下:

(1) 在热环境方面,受试者对偏冷环境接受度优于偏热环境。当空气温度控制在 23.93–24.63℃ 范围内时,热不满意率与 SBS 症状发生率风险均处于相对较低水平,注意力集中度负向反馈比例亦显著减少。

(2) 在光环境方面,照度水平对受试者的视觉感知与满意度具有显著影响,其中不满意率在214-699Lux范围内显著降低,其中约450Lux对应最低不满意率。

(3) 在湿环境方面,未能识别出明显的满意度最优区间,环境整体相对湿度偏高,当前湿度控制策略难以有效改善人员感知体验。

(4) 在空气质量方面,尽管CO₂浓度整体未超出标准限值,但空气质量不满意率始终高于50%,且未随浓度下降而显著改善,表明受试者对空气品质变化具有较高敏感性。

参考文献:

- [1] Zhao J W, Peng F L, Wang T Q, et al. Advances in master planning of urban underground space (UUS) in China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016,55:290-307.
- [2] Ye X, Lian Z, Jiang C, et al. Investigation of indoor environmental quality in Shanghai metro stations, China[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2010,167:643-651.
- [3] 李倩.公共地下空间热舒适性调查与研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [4] Lee E H, Christopoulos G I, Lu M, et al. Social aspects of working in underground spaces[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016,55:135-145.
- [5] Romanova E. Negative influence of underground constructions on mental health of the person[J]. *Procedia Engineering*, 2016,165:1176-1183.
- [6] Dong X, Wu Y, Chen X, et al. Effect of thermal, acoustic, and lighting environment in underground space on human comfort and work efficiency: A review[J]. *Science of The Total Environment*, 2021,786:147537.
- [7] Bonmati-Carrion M A, Arguelles-Prieto R, Martinez-Madrid M J, et al. Protecting the melatonin rhythm through circadian healthy light exposure[J]. *International journal of molecular sciences*, 2014,15(12): 23448-23500.
- [8] Figueiro M G, Rea M S. Office lighting and personal light exposures in two seasons: Impact on sleep and mood[J]. *Lighting Research & Technology*, 2016,48(3): 352-364.
- [9] Zhu M, Zhang X, Chen D, et al. Impact of lighting environment on human performance and prediction modeling of personal visual comfort in enclosed cabins[J]. *Science of The Total Environment*, 2024,927: 171970.
- [10] 李娟洁,杨春宇,汪统岳,等.地下交通空间人工照明现状调研[J].*灯与照明*,2017,41(4):18-20.
- [11] Wang Z, Liu J, Yao M, et al. Indoor air quality and sick-building syndrome at a metro station in Tianjin, China[J]. *Environment International*, 2024,187:108673.
- [12] Pan S, Du S, Wang X, et al. Analysis and interpretation of the particulate matter (PM10 and PM2.5) concentrations at the subway stations in Beijing, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019,45:366-377.
- [13] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2020.
- [14] Lipczynska A, Schiavon S, Graham L T. Thermal comfort and self-reported productivity in an office with ceiling fans in the tropics[J]. *Building and Environment*, 2018,135:202-212.
- [15] Hu J, He Y, Hao X, et al. Optimal temperature ranges considering gender differences in thermal comfort, work performance, and sick building syndrome: A winter field study in university classrooms[J]. *Energy and Buildings*, 2022,254:111554.
- [16] Hu X, Li N, Gu J, et al. Lighting and thermal factors on human comfort, work performance, and sick building syndrome in the underground building environment[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023,79:107878.
- [17] Pittana I, Morandi F, Cappelletti F, et al. Within-and cross-domain effects of environmental factors on students' perception in educational buildings[J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2023,29(7): 678-697.
- [18] Kawakubo S, Sugiuchi M, Arata S. Office thermal environment that maximizes workers' thermal comfort and productivity[J]. *Building and Environment*, 2023, 233:110092.