



# 偏热环境中口罩类型对热舒适性与生理负荷的影响 ——以高校健康人群为例

李 权, 李国建, 杨文智

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 为探究在偏热环境中口罩类型对人员热舒适性与生理负荷的影响, 以高校健康人群为研究对象, 招募的 36 名受试者在 26~34 °C 温度下分别佩戴 3 类常见防护口罩(医用口罩、带阀 KN95 口罩和无阀 KN95 口罩)进行人体热舒适实验, 并同步收集其主观热感知投票以及血压、心率和血氧饱和度等生理参数; 结合线性回归分析与相关性分析, 探讨不同口罩类型及不同温度区间对受试者热舒适性与生理负荷的影响差异。结果表明: 在偏热环境中佩戴口罩对受试者的热舒适性和生理负荷有着显著影响, 随着环境温度升高, 所有类型的口罩均显著影响受试者的湿感觉, 其投票值平均上升 0.31, 并且受试者的空气质量感知投票值平均下降 0.59, 同时引起心率平均增幅 5.3% 和血氧饱和度平均降幅 4.3%, 但仅在 30 °C 以上的环境中佩戴口罩对热感觉有显著影响; 无阀 KN95 口罩引发的热不适感和生理负荷最为显著, 医用口罩对热湿感觉和生理负荷的影响最小; 主观感知指标与心率、血氧饱和度存在显著相关性( $P < 0.05$ ), 而与血压无显著关联( $P > 0.05$ )。该研究明确了偏热环境中不同口罩类型对佩戴者热舒适性与生理负荷的影响规律, 为改善室内口罩佩戴者的热舒适性提供了实验依据。

**关键词:** 主观感受; 热舒适性; 生理响应; 热环境; 口罩

**中图分类号:** TU111

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2026)05-0258-10

**引文格式:** 李权, 李国建, 杨文智. 偏热环境中口罩类型对热舒适性与生理负荷的影响——以高校健康人群为例[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(3): 258-267.

**Reference Format:** LI Quan, LI Guojian, YANG Wenzhi. Effects of mask type on thermal comfort and physiological strain in relatively hot environments: A case study of healthy university populations[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(3): 258-267.

## Effects of mask type on thermal comfort and physiological strain in relatively hot environments: A case study of healthy university populations

LI Quan, LI Guojian, YANG Wenzhi

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To investigate the effects of mask type on thermal comfort and physiological load in relatively hot environments, 36 healthy university participants were recruited for a human thermal comfort experiment. The subjects were exposed to temperatures ranging from 26 °C to 34 °C while wearing three common types of protective masks; a surgical mask, a valved KN95 respirator, and a non-valved KN95 respirator. Subjective thermal perception votes and physiological parameters including blood pressure, heart rate, and blood oxygen saturation were recorded simultaneously. Linear regression and correlation analyses were conducted to examine the differences in the effects of mask type and temperature intervals on

收稿日期: 2025-11-17 网络出版日期: 2026-03-05

基金项目: 国家重点实验室开放基金项目(SuDBE2022-06)

作者简介: 李 权(2001—), 男, 福建莆田人, 硕士研究生, 主要从事建筑热环境与建筑节能方面的研究。

通信作者: 李国建, E-mail: zjxslgj@163.com

the participants' thermal comfort and physiological load. The results showed that wearing masks in relatively hot environments significantly affected both thermal comfort and physiological load. As ambient temperature increased, all mask types significantly influenced perceived humidity, with an average increase of 0.31 in humidity perception votes, and reduced perceived air quality, with an average decrease of 0.59 in air quality perception votes. Concurrently, heart rate increased by an average of 5.3% and blood oxygen saturation decreased by an average of 4.3%. However, a significant effect on thermal sensation was observed only at temperatures above 30 °C. The non-valved KN95 respirator induced the most pronounced thermal discomfort and physiological load, whereas the surgical mask had the least effect on thermal-humid perception and physiological load. Correlation analysis further revealed significant associations between subjective perception indicators and both heart rate and blood oxygen saturation ( $P < 0.05$ ), but no significant relationship was found with blood pressure ( $P > 0.05$ ). This study clarifies the influence patterns of different mask types on the thermal comfort and physiological load of wearers in relatively hot environments, providing experimental evidence to support the improvement of thermal comfort for mask wearers in indoor settings.

**Key words:** subjective perception; thermal comfort; physiological response; thermal environment; face masks

## 0 引 言

21 世纪以来,全球公共卫生事件频发,进一步凸显了口罩在疾病防控中的重要防护价值,但在热环境中,佩戴口罩会阻碍呼吸散热与汗液蒸发,降低佩戴者的热舒适性,加重其生理负荷<sup>[1]</sup>。研究表明,人体的热舒适性与环境参数、个体生理特征及心理因素密切相关<sup>[2]</sup>。

佩戴口罩易导致面部局部区域高温、高湿,引发不适感;超过 70% 的口罩佩戴者报告有面部不适感,该比例显著高于未佩戴者<sup>[3]</sup>。多项研究进一步探讨了口罩影响舒适度的关键因素。Hu 等<sup>[4]</sup>证实佩戴口罩时间与热舒适度呈负相关,且在高温环境下受试者的热可接受时间显著缩短;Suen 等<sup>[5]</sup>发现口罩会使口鼻区域温湿度迅速上升,导致佩戴者感到热不适与呼吸困难;Zhang 等<sup>[6]</sup>的研究表明,尽管医用外科口罩对皮肤温度无显著影响,但其高温高湿的微气候是热舒适度下降的主要原因;Huo 等<sup>[7]</sup>指出 CO<sub>2</sub> 与水汽积聚是加剧不适感的重要原因。然而,尽管多数研究支持口罩在热环境下会对热舒适性产生负面影响,但研究结论仍存在分歧。例如,冯印帅等<sup>[8]</sup>发现医用口罩对热舒适性的影响因环境场景而异;杨亚龙等<sup>[9]</sup>指出,仅在温度较高或温差较大时,口罩才会对呼吸舒适度产生显著影响;而王丽娟等<sup>[10]</sup>则证实了不同类型口罩的影响存在显著差异。因此,关于不同类型口罩在偏热环境下对热舒适性的影响差异及作用机制,仍有待进一步探讨。

除了热舒适性之外,佩戴口罩对生理负荷的影响同样备受关注,但现有研究结论尚未达成共识。

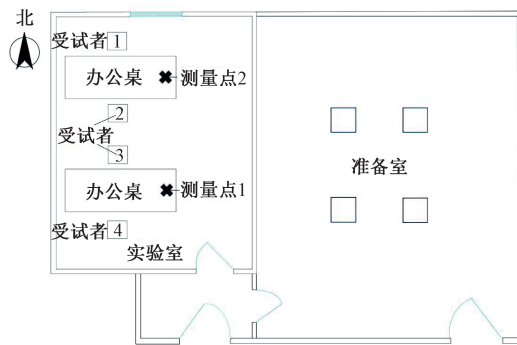
在湿热条件下,口罩可能会加剧佩戴者的热应激反应并增加代谢负担<sup>[11]</sup>。然而,Kato 等<sup>[12]</sup>发现,在湿热环境中进行轻度运动时佩戴口罩并不会增加中暑风险;Liu 等<sup>[13]</sup>的研究也表明,在 28 °C 的环境中口罩佩戴者与未佩戴者的血压无显著差异。上述结果表明,在接近中性的热条件下,口罩对生理负荷的影响可能相对有限。此外,口罩的密合性与透气性是影响舒适性的重要因素,过度密合可能会加剧摩擦不适,且低透气性材料会阻碍汗液蒸发,形成高温高湿微环境,导致热舒适性与呼吸舒适性同步下降<sup>[14]</sup>。综上,口罩对生理负荷的影响并非固定不变,而是受环境条件、人体活动强度以及口罩类型三者共同影响<sup>[15]</sup>。因此,需结合具体热环境条件与口罩类型,对佩戴者的生理负荷特征进行系统评估。

上述研究表明,在热环境中佩戴口罩会降低人员的热舒适性并加重生理负担。然而,现有研究多聚焦于热舒适区或极端高温环境<sup>[16-17]</sup>,对夏季常见的偏热温度区间(26~34 °C)关注不足,不同类型口罩在此温度区间下对佩戴者的热舒适性与生理负荷影响差异尚不明确。为此,本文通过人体热舒适实验,收集了受试者在佩戴医用口罩、无阀 KN95 口罩和带阀 KN95 口罩时的热湿感觉、热舒适和空气质量感知等主观感知投票,以及血压、心率和血氧饱和度等生理参数;基于这些数据,分析受试者主观感知投票与客观生理参数的相关性,并结合线性回归分析,探讨 26~34 °C 环境下不同类型口罩对佩戴者热舒适性及生理负荷的影响差异,并细化不同温度区间对口罩佩戴者的热舒适性和生理负荷的影响,以期改善室内口罩佩戴者的热舒适性提供实验依据。

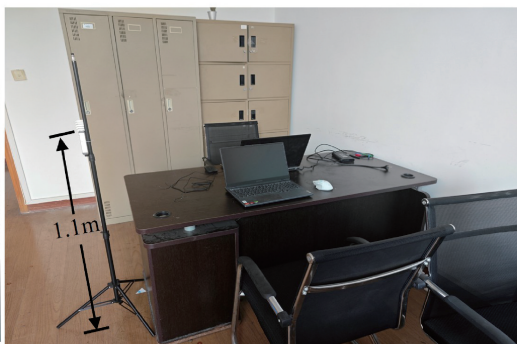
## 1 实验设计

### 1.1 实验设置

实验于2023年6月至8月在浙江省某高校的模拟实验室内进行,该实验室可模拟夏季室内偏热环境。实验室平面布局图和现场如图1所示。实验室内设置4个座位,2个环境测点(测量点1与测量



(a) 实验室平面布局图



(b) 现场照片

图1 实验室平面布局图和现场照片

### 1.2 实验受试者与实验条件

在受试者招募阶段,通过问卷筛查确保其符合实验标准。实验标准包括:在目标区域居住时间1年以上,身体健康,无吸烟、酗酒及长期熬夜等不良生活习惯。受试者被告知实验前24 h避免剧烈运动,并保持规律作息饮食。最终筛选出36名合格受试者(基本信息见表1),平均分配至9个实验组(每组男女各2名)。实验设置5档温度条件(26、28、30、32 °C和34 °C)模拟偏热环境,以及4种口罩佩

戴场景(不佩戴、医用口罩、无阀 KN95 口罩和带阀 KN95 口罩),口罩实物照片如图2所示。采用自身对照设计,要求每名受试者完成全部测试,实验顺序采用拉丁方设计平衡,以消除疲劳或学习效应。

表1 受试者基本信息

性别	年龄/岁	身高/m	体重/kg	BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )
男性	21.6	1.74	64.6	21.34
女性	21.2	1.62	47.3	18.02
平均	21.4	1.68	55.1	19.68

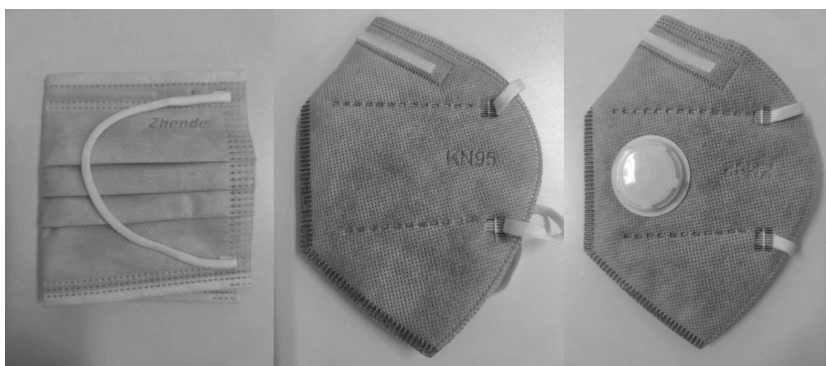


图2 口罩实物照片

### 1.3 参数选择方案

本文监测的人体生理参数包括血压、心率及血氧饱和度。因佩戴口罩对平均皮肤温度影响甚微,故未纳入评估指标。实验监测的环境参数包括:环境温度、相对湿度、风速、黑球温度和二氧化碳浓度,实验仪器规格参数详如表2所示。

主观问卷主要包含5项评价指标:热感觉投票(Thermal sensation vote, TSV)、湿感觉投票

(Humidity sensation vote, HSV)、热舒适投票(Thermal comfort votes, TCV)、空气质量感知投票(Perceived air quality vote, PAQV)和工作热情投票(Self-rated motivation vote, SMV)。根据ASHRAE 55-2023标准建议和相关研究<sup>[17]</sup>,热感觉投票、湿感觉投票、热舒适投票、空气质量感知投票和工作热情投票均采用7级量表(-3~+3)进行量化(见表3)。

表 2 实验仪器规格参数

测量参数	测量仪器	测量范围	测量精度
环境温度/°C	热舒适仪(Delta Ohm,R-LOG 7730)	-20~60	±0.5
相对湿度/%	热舒适仪(Delta Ohm,R-LOG 7730)	0~100	±2
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	热舒适仪(Delta Ohm,R-LOG 7730)	0~20	±0.01
黑球温度/°C	热舒适仪(Delta Ohm,R-LOG 7730)	-20~60	±0.5
二氧化碳浓度/10 <sup>-6</sup>	二氧化碳测试仪(AZ Instrument,AZ7755)	0~2000	±75
血氧饱和度/%	指夹式血氧仪(Beurer,DB12)	35~100	±2
血压/mmHg	电子血压计(CITIZEN,CH602B)	0~280	±3
心率/bpm	电子血压计(CITIZEN,CH602B)	30~250	±3

注:1 mmHg≈0.1333 kPa。

表 3 主观评价量表

指标名称	主观评价						
	3 级	2 级	1 级	0 级	-1 级	-2 级	-3 级
热感觉	热	暖	稍暖	适中	稍凉	凉	冷
湿感觉	很潮湿	潮湿	有点潮	适中	稍干燥	干燥	很干燥
热舒适	很不舒适	不舒适	稍不舒适	没感觉	稍舒适	舒适	很舒适
空气质量感知	很好	好	稍好	适中	稍差	差	很差
工作热情	很高	高	稍高	一般	稍低	低	很低

#### 1.4 实验流程

在实验正式启动前,由工作人员向受试者详细说明实验整体流程及各测试环节具体操作步骤,确保受试者充分理解并熟悉实验全过程。单次实验时长约 50 min,且在不同实验工况下各阶段时长保持不变。所有受试者需统一穿着服装热阻值为 0.6 clo 的夏季标准服装,其上身为短袖 T 恤,下身为运动长裤,脚部为短袜和运动鞋。实验

开始后,首先是 10 min 的准备阶段,受试者填写相关信息;然后是 30 min 的轻度活动阶段,受试者佩戴口罩后,在指定工位进行静坐、阅读等任务,模拟日常生活低强度活动;最后是 10 min 的测量阶段,受试者填写主观感受问卷和进行生理参数测量。所有测试项目完成后,受试者由工作人员引导离开实验室。整个实验流程示意图如图 3 所示。

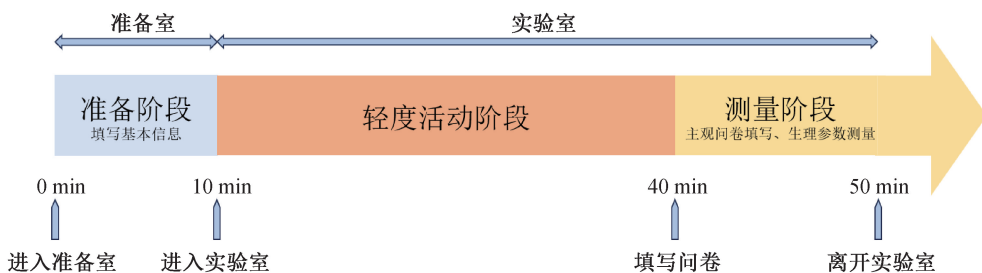


图 3 实验流程示意图

#### 1.5 数据分析

实验数据采用 SPSS 25.0 软件进行处理,通过 Shapiro-Wilk 检验严格验证数据分布的正态性。若数据符合正态分布,则采用单因素重复测量方差分析(ANOVA)检验统计显著性差异,设定显著性水平  $0.01 < P < 0.05$  表示具有统计学意义,  $P \leq 0.01$  表示高度显著差异;若不符合正态分布,则采用 Wilcoxon 检验处理。此外,采用效应量(Effect size,  $V_{ES}$ )量化组间差异的实质影响程度,置信区间

为 95%。方差分析中的效应量反映多重实验处理下不同组别间实验结果的差异幅度,其中:  $V_{ES} \geq 0.10$  为小效应,  $V_{ES} \geq 0.25$  为中效应,  $V_{ES} \geq 0.40$  为大效应。该方法为评估差异的实际影响提供了严谨的标准化框架,其计算公式如下:

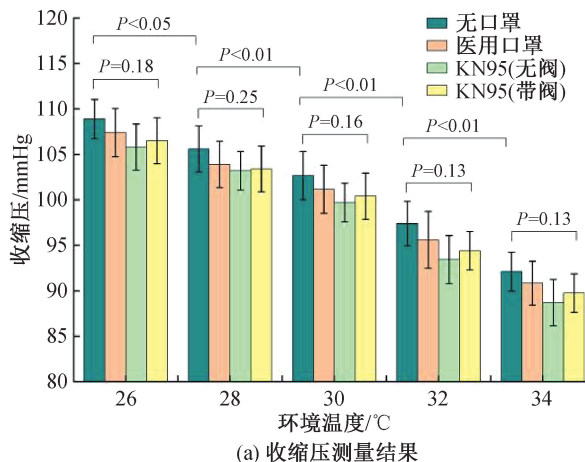
$$V_{ES} = \frac{S_g}{S_A} \quad (1)$$

其中:  $V_{ES}$  表示实验数据的效应量;  $S_g$  表示实验数据的组间方差,  $S_A$  表示实验数据的总体方差。

## 2 结果分析

### 2.1 生理参数测量结果

不同工况下受试者的血压测量结果如图4所示。图4表明:随着环境温度升高,收缩压与舒张压均呈现统计学显著下降( $P < 0.05$ ),效应量分别



为  $V_{ES} = 0.68$  (收缩压) 和  $V_{ES} = 0.67$  (舒张压); 当受试者佩戴口罩时, 血压读数虽有波动但变化未达统计学显著性 ( $P > 0.05$ ), 收缩压与舒张压的效应量分别为  $V_{ES} = 0.38$  和  $V_{ES} = 0.38$ , 不同类型口罩间的差异并不显著, 表明口罩对血压没有显著影响。

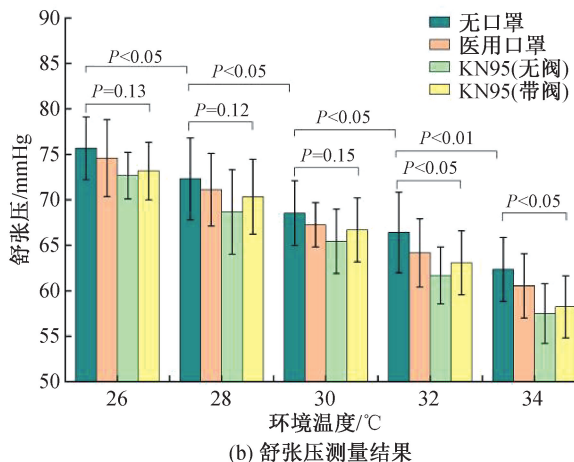


图4 不同工况下受试者血压测量结果直方图

不同工况下受试者的心率测量结果如图5所示, 从图中可以看出: 随着环境温度升高, 心率显著上升 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.73$ ); 佩戴口罩进一步导致心率显著上升 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.59$ ), 具体表现为相较于不佩戴口罩, 佩戴医用口罩、无阀 KN95 口罩和带阀 KN95 口罩分别使心率上升 3.2%、7.6% 和 5.2%, 其中无阀 KN95 口罩引发的心率增幅最大。该变化幅度由式(2)进行量化:

$$s(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{x_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中:  $s(x_i)$  表示各口罩佩戴条件相对于无口罩条件下的生理参数变化幅度;  $n$  表示温度场景编号;  $x_i$  表示不同口罩佩戴条件,  $x_0$  表示无口罩条件。

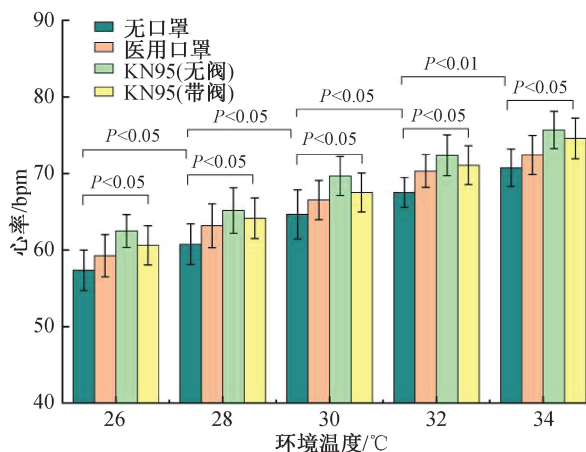


图5 不同工况下受试者心率测量结果直方图

不同工况下受试者的血氧饱和度测量结果如图6所示。由图6可以看出: 随着环境温度升高, 血氧饱和度呈现显著下降趋势 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.74$ )。与不佩戴口罩相比, 佩戴医用口罩、无阀 KN95 口罩和带阀 KN95 口罩分别使血氧饱和度下降 1.6%、6.3% 和 5.1% (通过式(2)量化), 无阀 KN95 口罩的影响最为显著 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.63$ )。

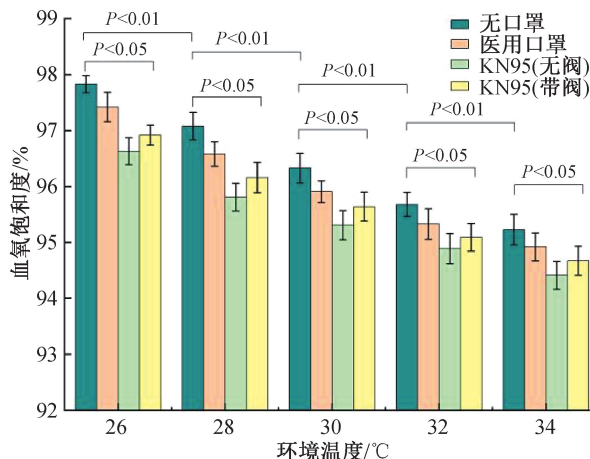


图6 不同工况下受试者血氧饱和度测量结果直方图

### 2.2 主观评价结果

在偏热环境中, 个体的热舒适性受到显著影响, 但实验室设定的温度条件往往难以全面反映现实生活中的多变环境, 这导致基于特定实验条件观测到的热舒适性投票指标变化存在局限性。为弥补此不足, 依据式(3)计算 26~34 °C 温度区间内, 个体佩戴

不同类型口罩相对于不佩戴口罩时主观评价投票值的平均变化幅度:

$$f(x_i) = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) \right| \quad (3)$$

其中:  $f(x_i)$  为各口罩佩戴条件相对于无口罩条件下的主观评价投票值平均变化幅度;  $x_i$  为不同温度下佩戴口罩的主观评价投票值,  $x_0$  为不同温度下无口罩的主观评价投票值;  $n$  为温度场景编号。

不同工况下受试者的热舒适投票值结果如图 7 所示。图 7 表明:随着环境温度升高,受试者的热舒适投票值呈现统计学显著上升 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.70$ );同时佩戴口罩显著加剧热不适感,其中无阀 KN95 口罩对热舒适性的负面影响最为突出 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.61$ ),该趋势与受试者主观热感觉高度吻合;根据式(3)计算结果,在偏热环境中相较于不佩戴口罩,受试者佩戴医用口罩、无阀 KN95 口罩和带阀 KN95 口罩时,热舒适投票值平均分别增加 0.14、0.51 和 0.34。

不同工况对受试者热感觉和湿感觉的投票值结果如图 8 所示。图 8 显示:随着环境温度升高,受试者的热感觉和湿感觉投票值均显著上升 ( $P < 0.05$ ),且效应显著 (TSV:  $V_{ES} = 0.89$ ; HSV:  $V_{ES} =$

0.79);此外,佩戴口罩对湿感觉在所有温度工况下均具有显著影响 ( $P < 0.05$ ),但对热感觉的影响仅在 30 °C 以上才显著,且佩戴无阀 KN95 口罩时,热感觉和湿感觉投票值最高,不佩戴口罩时投票值最低 (TSV:  $V_{ES} = 0.61$ ; HSV:  $V_{ES} = 0.56$ );根据式(3)的量化评估显示,在偏热环境中,相较于不佩戴口罩,佩戴医用口罩、无阀 KN95 口罩和带阀 KN95 口罩分别使热感觉投票值平均增加 0.26、0.71、0.45,湿感觉投票值平均增加 0.17、0.52、0.23。

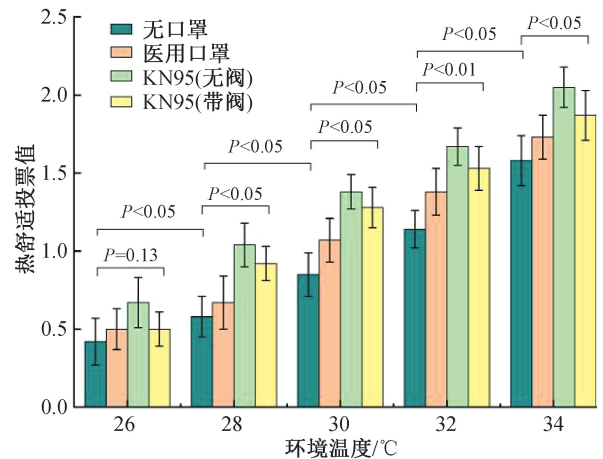
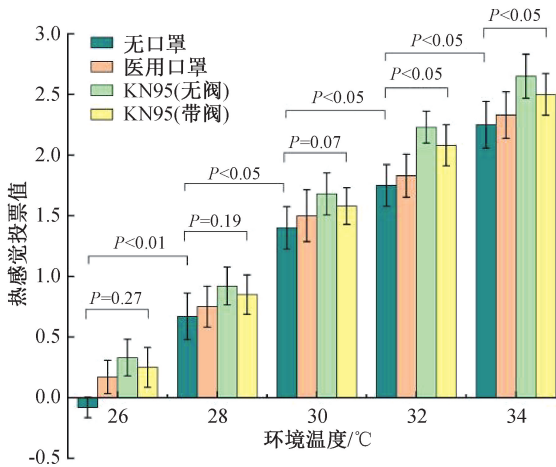
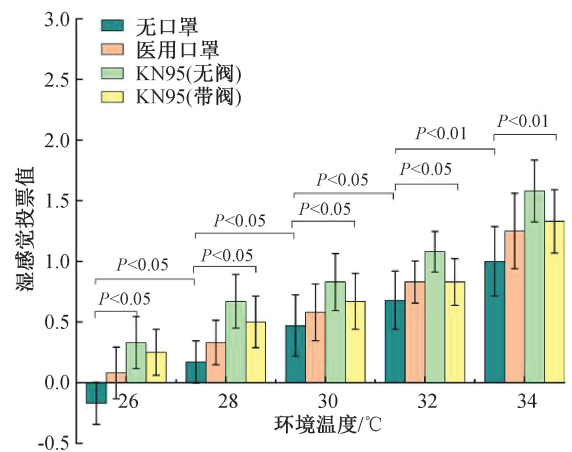


图 7 不同工况下受试者热舒适投票值直方图



(a) 热感觉投票值



(b) 湿感觉投票值

图 8 不同工况下受试者热湿感觉投票值直方图

不同工况下受试者的空气质量感知投票值结果如图 9 所示。由图 9 可知:随温度升高,空气质量感知投票值显著下降 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.65$ );在所有温度场景下佩戴口罩均显著降低了受试者的空气质量感知 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.53$ ),其中无阀 KN95 口罩的空气质量感知最差;基于式(3)计算结果显示,偏热环境中相较于不佩戴口罩,受试者佩戴医用口罩、无阀 KN95 口罩和带阀 KN95 口罩时,空气质量感知投票值平均分别降低 0.29、0.86

和 0.63。

不同工况下受试者的工作热情投票值结果如图 10 所示,从图中可以看出:随着温度逐渐升高,受试者的工作热情投票值显著下降 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.84$ );由式(3)计算的量化评估结果显示,在偏热环境中相较于不佩戴口罩,佩戴医用口罩、无阀 KN95 口罩和带阀 KN95 口罩分别使工作热情投票值平均下降 0.23、0.42、0.33,无阀 KN95 口罩的投票值下降幅度最大 ( $P < 0.05$ ,  $V_{ES} = 0.58$ )。

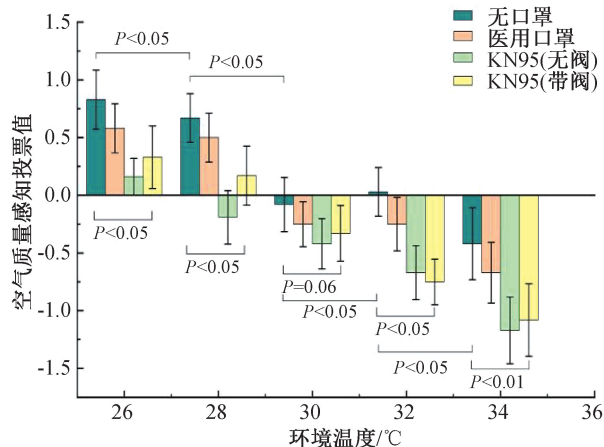


图9 不同工况下受试者空气质量感知投票值直方图

### 2.3 主观感受与生理参数的相关性分析

受试者主观感受与生理参数的相关性分析结果如表4所示。从表4可以看出:部分实验因素间的相关性均具有统计学意义,在偏热环境中,随着环境温度的升高,受试者的热感觉、湿感觉和热舒适与血

表4 受试者主观感受与生理参数的相关性分析

生理参数	热感觉	湿感觉	空气质量感知	热舒适	工作热情
收缩压	-0.327	-0.284	0.191	-0.362	0.226
舒张压	-0.361	-0.305	0.213	-0.341	0.183
心率	0.145*	0.127*	-0.157*	0.263**	-0.259**
血氧饱和度	-0.267**	-0.231**	0.167*	-0.273**	0.345**

注: \* 为  $0.01 < P < 0.05$ ; \*\* 为  $P < 0.01$ 。

不同温度下主观感受和生理参数的线性回归分析如图11所示。图11表明:随着环境温度的升高,受试者的热感觉、湿感觉和热舒适投票值呈上升趋势,心率也有所增加;而空气质量感知和工作热情投票值则呈下降趋势,血压与血氧饱和度也有所降低。同时,佩戴口罩会加剧偏热环境引发的热应激与生理反应,且不同类型的口罩影响程度不同。具体而言,随着温度升高,佩戴口罩对受试者的主观不适感与生理负荷的影响更为显著,其中佩戴无阀KN95口罩引起的不适感和生理负荷影响最大,而佩戴医用口罩的影响相对最小。

## 3 讨论

### 3.1 口罩对受试人员的热湿感觉影响

在偏热环境中,不同类型防护口罩对人体热舒适性及生理负荷的影响存在显著性差异。本文通过对比医用口罩、无阀KN95口罩和带阀KN95口罩的使用效果,发现无阀KN95口罩在热感觉与湿感觉方面的增幅最为显著。Marek等<sup>[18]</sup>的研究表明,在高强度运动中佩戴口罩组的呼吸时间显著长于未

佩戴口罩组,且体力消耗感显著增强;Van Kampen等<sup>[19]</sup>则发现口罩不适感随体力负荷和佩戴时间增加而加剧,且FFP2口罩的影响最为突出。然而,以上研究虽涉及不同口罩类型与运动强度,却仅考虑了舒适温度下的影响。本文进一步证实,在高温环境下,口罩类型仍是影响热不适的关键变量。然而,也有部分研究在不同的条件下得出了不同的结论。例如,Kato等<sup>[12]</sup>发现在炎热潮湿的环境中佩戴外科口罩并未显著增加疲劳感;Yoshihara等<sup>[20]</sup>的结果表明在低至中强度的高温运动中,口罩会影响整体呼吸不适但并未增加全身热应激,温度对热感觉的影响占主导地位。这些差异可能源于环境温度湿度、活动强度和暴露时长的不同。而本文聚焦于26~34℃的夏季常见偏热区间和低代谢强度活动,更贴近日常实际场景,同时也能够更好地明确口罩类型对佩戴者热舒适性的影响差异。

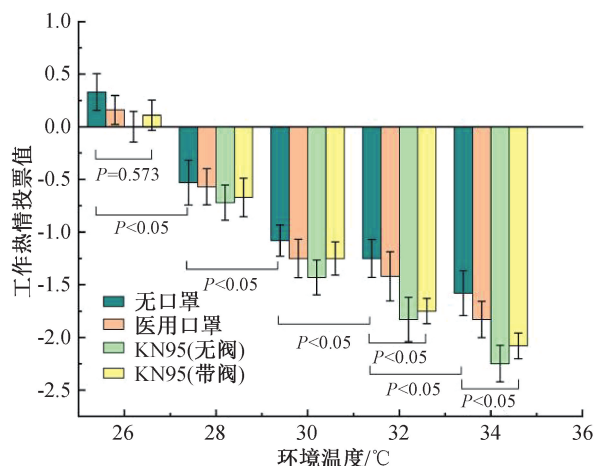


图10 不同工况下受试者工作热情投票值直方图

佩戴口罩组,且体力消耗感显著增强;Van Kampen等<sup>[19]</sup>则发现口罩不适感随体力负荷和佩戴时间增加而加剧,且FFP2口罩的影响最为突出。然而,以上研究虽涉及不同口罩类型与运动强度,却仅考虑了舒适温度下的影响。本文进一步证实,在高温环境下,口罩类型仍是影响热不适的关键变量。然而,也有部分研究在不同的条件下得出了不同的结论。例如,Kato等<sup>[12]</sup>发现在炎热潮湿的环境中佩戴外科口罩并未显著增加疲劳感;Yoshihara等<sup>[20]</sup>的结果表明在低至中强度的高温运动中,口罩会影响整体呼吸不适但并未增加全身热应激,温度对热感觉的影响占主导地位。这些差异可能源于环境温度湿度、活动强度和暴露时长的不同。而本文聚焦于26~34℃的夏季常见偏热区间和低代谢强度活动,更贴近日常实际场景,同时也能够更好地明确口罩类型对佩戴者热舒适性的影响差异。

口罩的高密合性虽然保障了防护效能,但也显著阻碍了口鼻周围的空气流动。呼出的湿热空气在口罩内部积聚并冷凝,形成高湿度微环境,从而加剧闷湿感<sup>[21]</sup>。Lin等<sup>[22]</sup>的研究表明,在湿热条件下,

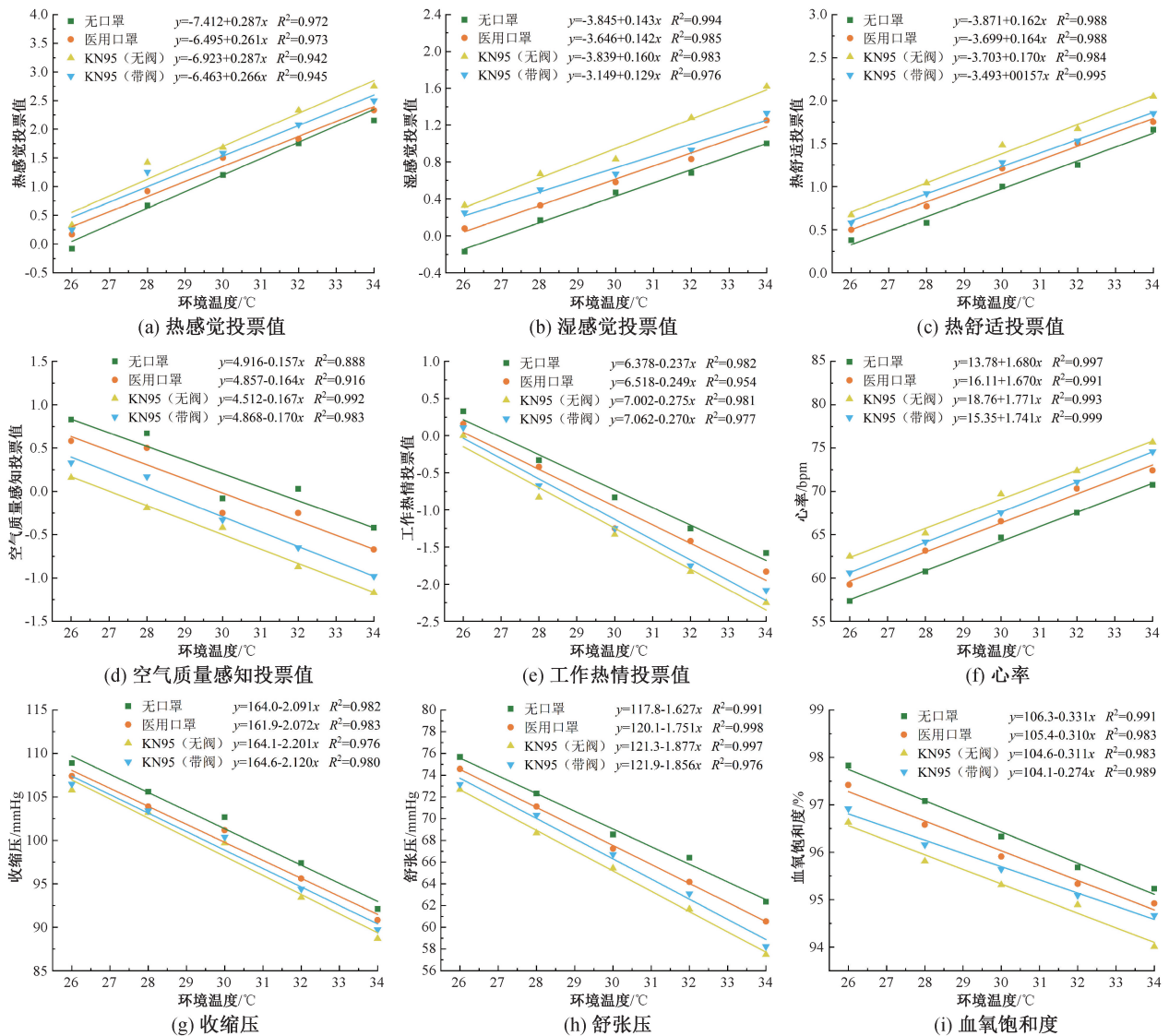


图 11 不同工况下主观感受和生理参数的线性回归分析示意图

高密合性口罩会显著增强面部热感与不适感。Zhong 等<sup>[14]</sup>的研究进一步证实,口罩内形成的高湿微环境会导致面部皮肤温度上升,并加剧热不适。本文通过主观问卷与生理监测相结合的方法,证实湿热联合作用是影响热舒适度的主要因素,与陈伟斌等<sup>[23]</sup>的结论一致。此外,赵佩等<sup>[24]</sup>的研究表明,在热环境中提高空气流速可改善热不适和降低平均皮肤温度;Tang 等<sup>[16]</sup>的研究发现,口罩佩戴者倾向于增加气流以缓解头部不适。适当增加风速可显著增强人体对流散热量<sup>[25]</sup>,可能缓解口罩带来的热湿负荷。值得注意的是,本文发现当温度处于 30℃ 以下,口罩对热感觉的影响尚不显著;而当温度升至 30℃ 以上时,则有显著影响。这一结果表明,不同环境温度对佩戴口罩时的热感觉影响有着显著差异,通过调节环境温度能在一定程度上缓解佩戴口

罩所导致的热不适。未来研究将进一步探讨,在较高活动强度或不同空气流速条件下,该温度阈值是否会发生偏移,以及口罩类型在不同温度和空气流速组合的场景中对佩戴者的热舒适性与生理负荷的影响是否有所变化。

### 3.2 口罩对受试人员的心理及空气质量感知影响

本文实验数据显示,随环境温度升高,受试者心率普遍上升,而血氧饱和度则显著下降,其中佩戴无阀 KN95 口罩的受试者变化最为显著,这一结果与既往研究结论一致<sup>[26]</sup>。这可能是口罩通过阻碍气体交换和热量散发,加剧了佩戴者的闷热感,同时导致口罩内 CO<sub>2</sub> 浓度显著升高而 O<sub>2</sub> 浓度显著降低<sup>[27]</sup>,这些变化可能进一步引发紧张、焦虑等负面情绪<sup>[28]</sup>。Lang 等<sup>[29]</sup>的研究也证实了佩戴口罩对情绪状态存在负面影响。而相关研究表明,负面情绪

会激活交感神经系统,进而导致心率上升<sup>[30]</sup>。此外,Zheng等<sup>[31]</sup>的研究指出,血氧饱和度的下降可能与呼气末二氧化碳浓度(PetCO<sub>2</sub>)升高以及氧气与二氧化碳交换不足有关,但这一结论仍需通过直接监测呼吸参数与代谢率来进一步验证。未来研究需通过多参数同步监测(如呼吸频率、代谢率及心理应激指标等),以更全面地量化各因素对口罩佩戴者的心率和血氧饱和度等生理参数的影响。

此外,主观空气质量感知的下降也是影响口罩佩戴者整体舒适度的重要因素。本文发现在不同温度条件下,佩戴口罩普遍导致受试者对空气质量感知的评价下降,其中无阀 KN95 口罩的影响最为显著。呼吸阻力增加限制了人体与外界空气的有效交换,导致呼出气体体积聚于口罩内部狭小空间,不仅降低呼吸舒适度,也劣化了空气质量的主观感受。Lang等<sup>[29]</sup>通过摘除口罩前后对比实验,证实佩戴口罩会劣化空气感知。本文进一步量化了不同环境温度下不同类型口罩对空气质量感知的差异化影响。

综上所述,在偏热环境中佩戴口罩,特别是在 30 °C 以上的较高温度时,会显著加剧人体的热湿不适与劣化空气质量感知,且口罩类型的影响各异。从环境调控与节能的角度来看,将室内温度维持在 30 °C 以下,能有效降低口罩带来的热应激和闷湿感,从而显著提升佩戴者的热舒适性。在保障必要防护的前提下,通过精准的温湿度控制,可以在节能的前提下营造出对口罩佩戴者更友好的室内环境。

## 4 结 论

本文通过人体热舒适实验,结合主观感受投票与血压、心率和血氧饱和度等生理参数,系统探讨了偏热环境(26~34 °C)中医用口罩、无阀 KN95 口罩和带阀 KN95 口罩对佩戴者热感觉、湿感觉、空气质量感知以及生理反应的影响机制,并通过相关性分析揭示主观感受与生理指标之间的内在联系,主要结论如下:

a)随着环境温度的上升,受试人员的热舒适性受到了显著的负面影响,导致受试人员的工作热情显著降低。线性回归分析表明,佩戴口罩加剧了受试人员的热不适感,其中无阀 KN95 口罩的影响最为显著。

b)当环境温度在 30 °C 以下时,口罩对热感觉影响不显著;而当温度上升至 30 °C 以上,其影响显著增强。相对地,口罩对湿感觉的影响在全温度范

围内均显著。这表明在偏热环境中,口罩引发的闷湿感是持续存在的不适感来源。

c)相关性分析结果表明,人体热不适与心率和血氧饱和度等生理指标之间存在显著关联,这为从生理角度评估口罩在偏热环境中的适用性提供了依据。

本文聚焦 26~34 °C 的夏季常见偏热区间,系统比较了佩戴医用口罩、无阀 KN95 和带阀 KN95 口罩的热舒适性和生理负荷差异,通过量化不同温度下口罩佩戴者的热不适感受和生理负荷变化,为改善室内口罩佩戴者的热舒适性提供实验依据和参考;但研究招募的受试者限于青年健康人群,未来可拓展至中老年、肥胖等易感人群,以进一步完善防护装备热舒适性评价体系。

## 参考文献:

- [1] Shaeri J, Mahdavejad M. Prediction indoor thermal comfort in traditional houses of Shiraz with PMV/PPD model [J]. International Journal of Ambient Energy, 2022, 43(1): 8316-8334.
- [2] 郑国忠,丰欣超,李丛,等. 高温天气人体室内热湿环境的舒适研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2022, 40(3): 327-332.
- [3] Zhou Z Q, Dong L. Experimental investigation of the effect of surgical masks on outdoor thermal comfort in Xiamen, China [J]. Building and Environment, 2023, 229: 109893.
- [4] Hu R, Liu J L, Xie Y X, et al. Effects of mask wearing duration and relative humidity on thermal perception in the summer outdoor built environment [J]. Building Simulation, 2023, 16(9): 1601-1616.
- [5] Suen W S, Huang G H, Kang Z X, et al. Development of wearable air-conditioned mask for personal thermal management [J]. Building and Environment, 2021, 205: 108236.
- [6] Zhang R H, Liu J H, Zhang L, et al. The distorted power of medical surgical masks for changing the human thermal psychology of indoor personnel in summer [J]. Indoor Air, 2021, 31(5): 1645-1656.
- [7] Huo S G, Zhang T T. Ventilation of ordinary face masks [J]. Building and Environment, 2021, 205: 108261.
- [8] 冯印帅,桂训俊,黄峙,等. 后疫情下公交、地铁和高铁中佩戴口罩对乘员热舒适影响的评估[J]. 暖通空调, 2024, 54(3): 51-57.
- [9] 杨亚龙,杨畅,张睿. 不同热环境下佩戴医用外科口罩对人体舒适性的影响研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2024, 32(2): 33-39.
- [10] 王丽娟,左国栋,张盟盟. 室内环境中口罩对人体热反应的影响 [J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(6): 39-45.
- [11] Zheng Z M, Lu J X, Dai K Q, et al. Comparison of the adaptation of outdoor thermal comfort of pedestrians with face masks in semi-open spaces [J]. Thermal Science and

- Engineering Progress, 2024, 49: 102429.
- [12] Kato I, Masuda Y, Nagashima K. Surgical masks do not increase the risk of heat stroke during mild exercise in hot and humid environment[J]. *Industrial Health*, 2021, 59(5): 325-333.
- [13] Liu C, Li G J, He Y H, et al. Effects of wearing masks on human health and comfort during the COVID-19 pandemic[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 531(1): 012034.
- [14] Zhong Q L, Song J Y, Shi D C, et al. Protective facemask-induced facial thermal stress and breathing burden during exercise in gyms[J]. *Building and Environment*, 2023, 244: 110840.
- [15] 焦娇, 胡蓉, 谢泳欣, 等. 佩戴口罩对行人室外热安全和热舒适影响探究[J]. *制冷*, 2022, 41(3): 52-58.
- [16] Tang T W, Zhu Y C, Zhou X Q, et al. Investigation of the effects of face masks on thermal comfort in Guangzhou, China [J]. *Building and Environment*, 2022, 214: 108932.
- [17] 周亦璟, 黄若辰, 孙艺华, 等. 高温热浪条件下老年人群室内热舒适性研究: 以成都市老住区为例[J]. *绿色建筑*, 2025, 17(1): 95-100.
- [18] Marek E M, van Kampen V, Jettkant B, et al. Effects of wearing different face masks on cardiopulmonary performance at rest and exercise in a partially double-blinded randomized cross-over study[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 6950.
- [19] Van Kampen V, Marek E M, Sucker K, et al. Influence of face masks on the subjective impairment at different physical workloads[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 8133.
- [20] Yoshihara A, Dierickx E E, Brewer G J, et al. Effects of face mask use on objective and subjective measures of thermoregulation during exercise in the heat [J]. *Sports Health*, 2021, 13(5): 463-470.
- [21] 王敏. 平面口罩佩戴热湿舒适性检测与评价指标研究[J]. *市场监管与质量技术研究*, 2024(6): 27-31.
- [22] Lin Y C, Chen C P. Thermoregulation and thermal sensation in response to wearing tight-fitting respirators and exercising in hot-and-humid indoor environment [J]. *Building and Environment*, 2019, 160: 106158.
- [23] 陈伟斌, 毛钰栋, 陆佳欣, 等. 初探佩戴口罩对人体热舒适性的影响[J]. *制冷*, 2022, 41(3): 41-46.
- [24] 赵佩, 李百战, 明茹, 等. 夏季湿热环境下温度-风速适宜值实验研究[J]. *暖通空调*, 2023, 53(3): 126-132.
- [25] 王丽娟, 刘艳峰, 刘加平. 风速对人体散热特性影响的实验研究 [J]. *西安工程大学学报*, 2015, 29(5): 567-572.
- [26] Beder A, Büyükköçak Ü, Sabuncuoğlu H, et al. Preliminary report on surgical mask induced deoxygenation during major surgery[J]. *Neurocirugía*, 2008, 19(2): 121-126.
- [27] Roberge R J, Coca A, Williams W J, et al. Physiological impact of the N95 filtering facepiece respirator on healthcare workers[J]. *Respiratory Care*, 2010, 55(5): 569-577.
- [28] Nasrollahi N, Jowett T, Machado L. Effects of wearing a surgical face mask on cognitive functioning and mood states: a randomised controlled trial in young adults[J]. *Cogn Process*, 2025, 26(1): 189-199.
- [29] Lang X, Vasquez N G, Liu W, et al. Effects of wearing masks indoors on the cognitive performance and physiological and subjective responses of healthy young adults[J]. *Building and Environment*, 2024, 252: 111248.
- [30] Castaldo R, Melillo P, Bracale U, et al. Acute mental stress assessment via short term HRV analysis in healthy adults: a systematic review with meta-analysis [J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2015, 18: 370-377.
- [31] Zheng C, Poon E T, Wan K W, et al. Effects of wearing a mask during exercise on physiological and psychological outcomes in healthy individuals: a systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Medicine*, 2023, 53(1): 125-150.

(责任编辑:康 锋)