

热湿环境工位辐射空调加桌面风扇热舒适实验研究*

李念平[†], 贺德, 何颖东, 何梅玲, 章文杰

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了研究热湿环境中工位辐射空调加桌面风扇供冷方式下的人体热舒适情况,采用环境测量和主观问卷相结合的方式,在环境背景温度分别为26℃、28℃和30℃(相对湿度80%)的人工环境实验室内测试了24名受试者的整体热感觉、热舒适、热可接受度和热期望。结果表明,热湿环境中,工位辐射空调加桌面风扇供冷方式能显著改善处于热湿环境中的受试者的热舒适情况,但在26℃时,其效果并不明显。虽然背景环境参数超出了舒适范围,在工位辐射空调加桌面风扇供冷方式下,受试者的热感觉随着时间的增加逐渐趋于中性,且室内环境温度达到30℃(相对湿度80%)时,仍有超过80%受试者表示可接受其所处环境。因此,工位辐射空调加桌面风扇的供冷方式有效地扩展了夏季室内舒适温度范围。工位辐射空调加桌面风扇供冷方式的研究为非中性环境中维持人体热舒适和降低建筑能耗提供了新的途径。

关键词:工位辐射空调;桌面风扇;热感觉;热舒适;能耗

中图分类号:TU831.4

文献标志码:A

Experimental Study on Thermal Comfort with Radiant Cooling Workstation and Desktop Fan in Hot-humid Environment

LI Nianping[†], HE De, HE Yingdong, HE Meiling, ZHANG Wenjie

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This study focused on thermal comfort of subjects with radiant cooling workstation and desktop fan in hot-humid environments. Twenty-four human subjects participated in the experiments and reported their thermal sensation, thermal comfort, thermal acceptability and thermal preference in the hot-humid environments at 26, 28 and 30 °C in an environmental chamber. The obtained results show that radiant cooling workstation and desktop fan significantly improved the thermal comfort of subjects in the hot-humid environments, but the effect was not obvious at 26 °C. Subjects can still well maintain the neutral thermal sensation condition although indoor environment was as high as 30 °C and the relative humidity was 80%. Therefore, radiant cooling workstation and desktop fan can extend comfortable temperature range in summer. This study provides a new way for maintaining comfort in non-neutral environment and saving energy in buildings.

Key words: radiant cooling workstation; desktop fan; thermal sensation; thermal comfort;

* 收稿日期:2016-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578220), National Natural Science Foundation of China(51578220); 国家重点研发计划项目(2016YFC0700303, 2016YFC0700306), China National Key R & D Program(2016YFC0700303, 2016YFC0700306)

作者简介:李念平(1962—),男,湖南邵阳人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: linianping@126.com

energy consumption

随着我国社会经济的不断发展,空调的使用越来越广泛,常规的空调存在噪声过大、冷凝水排泄不畅等一系列问题,严重影响室内热舒适性及卫生状况.长期使用空调产生一系列问题,如空气质量恶化、病态建筑综合征以及能源浪费等.在传统空调环境中,即使温湿度在舒适区间内,建筑中的人仍会对其所处的室内环境产生抱怨^[1],相同温度环境下,人在辐射供冷环境中感觉更凉快^[2].许多研究已经证实,与传统的空调系统相比,辐射空调系统不仅能提高人体热舒适性且存在较大的节能潜力^[1-4].毛细管辐射空调具有良好的市场前景,必将成为未来空调系统发展的新选择^[5].近年来许多学者开展了许多相关辐射供冷热环境及人体的热舒适特性的研究.龚光彩等人^[6]对空气载能辐射空调末端系统辐射传热进行了研究,提出了一种辐射传热简化算法;Imanari 等人^[1]通过实验对比分析了辐射空调和常规空调的热舒适性、能耗以及经济性,发现辐射空调有很大优势;Miriel 等人^[7]通过数值模拟发现辐射换热能提高房间内人体热舒适性且节能;Ashfaqe 等人^[8]的研究表明在比传统中央空调系统室内空气设计温度提高 1~2 °C 的情况下,辐射供冷空调系统使人产生相同的热感觉且节能效果明显;Niu 等人^[9]通过模拟分析计算,对比得到辐射空调系统比全空气系统节能;Feustel 等人^[10]对辐射空调热舒适性和高效性进行了研究,并对其表示出较高的认可;Zhao 等人^[11]模拟发现使用地板辐射供冷与全空气系统相比具有更高的能效和舒适性;Corina 等人^[12]分析计算对比地板辐射供冷系统与通风除湿系统相结合的复合系统和传统空调系统能耗,结果认为前者远比传统空调系统节能;Doosam 等人^[13]运用 CFD 模拟了热湿地区辐射供冷空调系统,并对其营造的良好空调效果表示肯定.

现有的研究虽已经确认辐射空调系统拥有节能和舒适的优势,但辐射空调存在供冷能力有限和表面结露等问题.Miriel 等人^[14]通过模拟发现无通风系统配合时辐射空调的供冷能力有限;Jeong 等人^[15]通过对辐射空调加混合对流通风进行研究,发现在混合对流下系统的供冷能力有所增强;Kitagawa 等人^[16]发现在辐射供冷系统中,室内微小的气流运动可以有效降低人体的热感,提高舒适性;李念平等人^[17]通过对贴附射流辐射冷顶板复合

空调系统的研究,发现贴附射流辐射冷顶板空调系统复合运行时,能有效降低辐射冷顶板附近空气的露点温度,防止辐射冷顶板结露;文献^[18]列举了一些与辐射空调系统相结合的空调节能技术,但辐射空调系统末端方式仍局限于有限的几种类型.

本文以一种新型的工位辐射空调加桌面风扇供冷的空调末端方式为基础,研究热湿环境中人体热舒适性.已有的研究中没有这种辐射型工位空调末端装置的研究,且以往的研究中很少涉及高温高湿环境使用的工位型辐射末端装置.本研究在湖南大学人工环境实验室进行,通过实验获得了在湿热环境中受试者的热感觉、热舒适、热可接受度等状况,并与单一风扇、传统空调环境进行对比,确定该新空调末端具有扩展人体舒适温度区间、保证高温高湿环境中的舒适、提高背景区空调设定温度上限的效果.本研究也为新型辐射空调末端方式的研究提供参考.

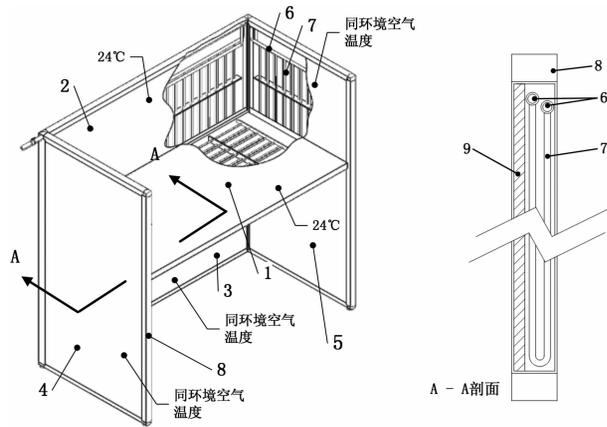
1 研究方法

1.1 实验环境

实验在湖南大学建筑环境与节能实验室的人工环境实验室内进行.实验室安装了一套工位辐射空调加桌面风扇的新型供冷空调末端装置.该装置以毛细管辐射板作为工位的隔板和桌面,整张桌子由 5 块辐射板构成.辐射工位由冷水机组提供循环冷水.在保证不结露的前提下,通过尽量降低板面温度提高末端的供冷量,从而保持较高温度环境中人体的舒适性.在正式实验之前,对该末端设备进行了测试,并邀请若干人员进行初步实验,得到反馈效果.在板面温度低于 24 °C 时,若湿度较高板面容易结露,且多数人感觉手臂太凉,因此实验期间,开启的辐射板板面温度控制在 24 °C.因为实验开始前实验房间内设备至少提前一小时开启,所以,各类参数在正式实验前基本稳定,经测量未开启的板面温度与环境温度差异非常小.环境空气温度分别为 26 °C, 28 °C 和 30 °C,实验室内背景环境参数由人工环境实验室内的另一套空调系统控制.在实验开始前预先开启空调系统(至少 1 h),使室内环境参数达到预设条件;实验过程中,该套系统的末端风口以较低风速向室内送风,送风温度与室内空气温度差

异小,并避免送风气流正对受试者;桌面风扇固定在桌面右上角,以确保与被试者相对位置保持不变;辐射板内为均匀排列的塑料毛细管,在供冷条件下,辐射板表面温度最大差异不超过 1°C ,大多数测点温度与平均温度差异在 0.5°C 内.因此,可认为冷辐射板面温度均匀.该装置结构示意图如图1所示,该装置实物图见图2.

环境温度和相对湿度采用日本 TR-72i 温湿度测试仪测量,温湿度测量精度分别为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 5\%$.采用美国 TSI8347 热式风速仪测量背景区空气流速和工作区空气流速,精度为 $\pm 3\%$.辐射板面温度通过贴片式铂电阻 PT100 接无纸记录仪进行测量.



1—桌面;2—桌面上隔板;3—桌面前下隔板;
4—桌面左侧隔板;5—桌面右侧隔板;6—毛细管;
7—毛细管;8—支架;9—橡塑保温层
图1 工位辐射空调结构示意图

Fig.1 Schematic of radiant cooling workstation



图2 工位辐射空调加桌面风扇装置实物图

Fig.2 The diagram of radiant cooling workstation and desktop fan

1.2 实验工况

考虑到头部易热、足部易冷,本次实验并未开启所有辐射板,只开启了桌面以及桌面前上隔板两块辐射板.背景区温度分别设定 26°C 、 28°C 及 30°C ,相对湿度为 80% ,另外设置同等温度但只使用风扇的对照组1以及使用传统空调的对照组2.本次实验共9个工况.实验工况如表1所示.

表1 实验工况表

Tab.1 Test conditions

工况	背景区温度/ $^{\circ}\text{C}$	设备
1	26	工位辐射空调加桌面风扇
2	26	风扇
3	26	传统空调
4	28	工位辐射空调加桌面风扇
5	28	风扇
6	28	传统空调
7	30	工位辐射空调加桌面风扇
8	30	风扇
9	30	传统空调

1.3 受试者

每个工况24名受试者参与实验,受试者均为大学生,其中男生12名,女生12名,身高(167 ± 5.8)cm,体重(61 ± 10.5)kg.受试者身体健康,参加实验前具有良好的睡眠及饮食,且不应喝含酒精、咖啡因的饮料.实验中受试者的服装为夏季标准着装,上身穿短袖T恤、下身穿薄长裤,受试者的服装热阻约为 0.5 clo .

1.4 实验过程

受试者到达实验室后,按实验要求整理服装,在进入工作区之前先在背景区静坐20min,以减少外界环境对受试者感觉的影响.同时在此段时间由实验人员向受试者介绍实验的内容以及实验过程中所要注意的事项,受试者填写个人信息.然后受试者进入工作区,按事先安排好的位置坐下开始正式的测试.在实验过程中受试者可以看书、听音乐、操作电脑或轻声交谈,但谈话不能涉及问卷内容.受试者进入工作区,立即填写第一份问卷,以后每隔10min填写一份,一次实验受试者使用工位辐射空调加桌面风扇的空调末端装置40min,共填写5份答卷.

1.5 问卷调查

问卷调查内容包括受试者对室内热环境的主观热反应,包括热感觉、热舒适、热可接受度、热期望等,其中热感觉采用ASHRAE7级标度.投票使用的标度见表2.

表 2 热反应投票标度
Tab.2 Scales of thermal response

热反应	投票标度
热感觉	-3 冷, -2 凉, -1 稍凉, 0 中性, 1 稍暖, 2 暖, 3 热
热舒适	-3 非常不舒适, -2 不舒适, -1 有点不舒适, 0 没感觉, 1 有点舒适, 2 舒适, 3 非常舒适
热期望	-1 降低一点, 0 不变, 1 升高一点
热可接受度	可接受, 不可接受

2 实验结果

2.1 热环境参数

实验设定的背景环境温度分别为 26 °C, 28 °C 及 30 °C, 相对湿度 80%, 热环境参数测量值见表 3.

表 3 热环境参数

Tab.3 Parameters of thermal environment

工况	测量值			
	背景区温度 /°C	相对湿度 /%	风扇风速 / (m · s ⁻¹)	开启的辐射板表面温度 /°C
1	26.08±0.44	81.16±4.95	1.65±0.24	23.82±0.41
2	26.12±0.34	80.81±2.78	1.63±0.32	—
3	25.85±0.35	78.86±4.38	—	—
4	27.96±0.43	79.37±3.15	1.59±0.22	24.10±0.34
5	28.20±0.51	82.10±2.61	1.61±0.15	—
6	27.93±0.58	80.76±5.61	—	—
7	30.13±0.62	81.57±4.31	1.58±0.34	23.96±0.27
8	29.98±0.55	78.93±5.14	1.62±0.18	—
9	29.89±0.59	79.86±5.48	—	—

2.2 动态的整体热感觉和热舒适

如图 3 所示, 在温度相同时, 实验组受试者整体的热感觉要明显低于对照组 1 和对照组 2 工况. 当背景温度为 26 °C, 实验组和对对照组 1 都处于偏冷侧, 且随着时间的增加, 实验组受试者平均热感觉投票标度维持在 -0.6 左右, 对照组 1 维持在 -0.4 左右, 对照组 2 稳定在 0.4 左右. 当背景温度为 28 °C 时, 实验组始终维持在 -0.2~0 之间, 受试者的热感觉非常接近中性状态, 对照组 1 维持在 0.2 左右, 对照组 2 维持在 0.8 左右. 当背景温度为 30 °C 时, 实验组维持在 0.6 以内, 最终稳定在 0.4 左右. 对照组 1 和对照组 2 受试者整体热感觉随着时间的增加, 超过了 0.6, 且对照组 2 最终超过了 1.2, 远偏离中性热感觉范围. 在本课题组之前对工位辐射空调的实验中^[19], 仅使用工位辐射空调时人员的整体热感觉结果如图 4 所示, 其中实验组为工位辐射空调工况, 对照组为传统空调工况. 与之前的实验结果进行对比可知, 在热湿环境中, 采取工位辐射空调加桌面

风扇的供冷方式比单一使用工位辐射空调能更有效降低人整体热感觉.

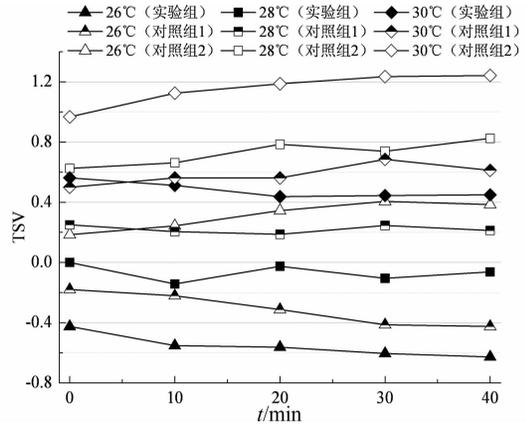


图 3 动态整体热感觉

Fig.3 Dynamic-state overall thermal sensation

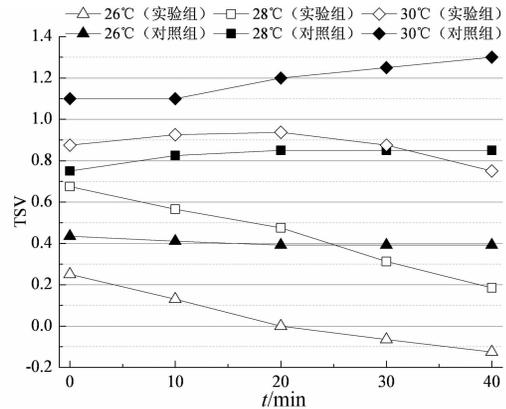


图 4 整体动态热感觉^[19]

Fig.4 Dynamic-state overall thermal sensation^[19]

由以上分析可知, 工位辐射空调加桌面风扇供冷方式能在偏热湿环境下显著改善人的热感觉, 使之接近中性状态.

如图 5 所示, 当背景温度为 26 °C 时, 在工位辐射空调加桌面风扇供冷方式下, 受试者整体的热舒适投票标度小于 0, 随着时间的增加, 稳定在 -0.2 左右. 对照组 1 整体热舒适投票标度处于 -0.2~0 之间. 对照组 2 最终稳定在 0.1 左右. 当背景温度为 28 °C 时, 实验组热舒适投票标度刚开始比较低, 随着时间的增加, 最终稳定在 0.5 左右, 处于舒适的一侧. 对照组 1 整体热舒适最终维持在 0.2 左右. 对照组 2 受试者整个过程热舒适投票标度维持在 -0.4 左右, 处于不适的一侧. 当背景温度为 30 °C 时, 实验组热舒适投票标度维持在 0.2~0.4, 随着时间的增加, 稳定在 0.2 左右. 对照组 1 最终稳定在 -0.6 左右. 随着时间的增加, 对照组 2 的热舒适投票标度稳定在 -1.2 左右, 受试者有明显的不适感.

由以上分析可知,工位辐射空调加桌面风扇供冷方式在偏热湿环境中能显著改善人的舒适性.

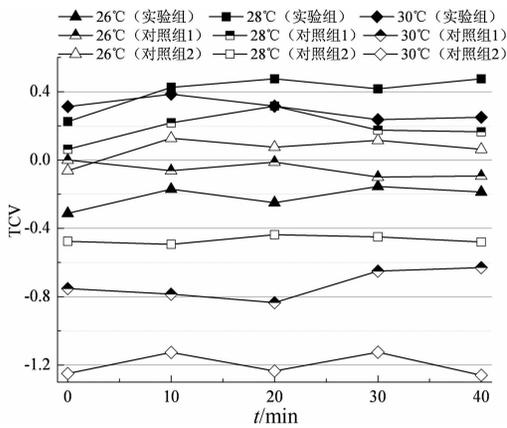


图5 动态整体热舒适

Fig.5 Dynamic-state overall thermal comfort

2.3 稳态的整体热感觉,热舒适,热可接受度,热期望

当实验进行到 20 min 后,受试者进入稳定期,取最后 3 份问卷的平均值,作为稳定期的数据.当实验组和对照组进入稳定期后,对其数据进行分析.图 6 为 9 个工况的热感觉箱线图.

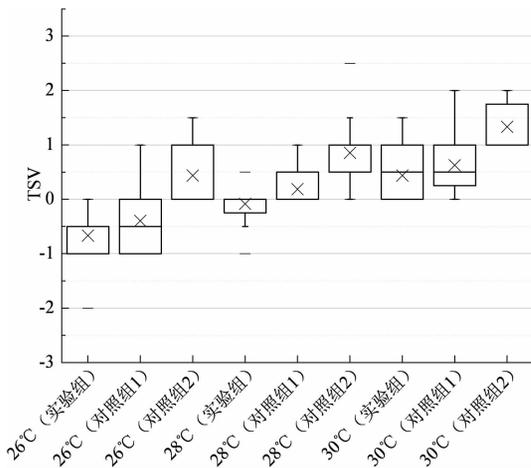


图6 稳态整体热感觉

Fig.6 Steady-state overall thermal sensation

当背景温度为 26 °C 时,实验组和对照组 1 整体的热感觉较对照组 2 更低,超过 75% 的受试者都感觉偏冷.对照组 2 受试者平均热感觉投票标度值为 0.4 左右.实验组和对照组 1 无显著性差异 ($P > 0.05$),实验组和对照组 2 存在极显著差异 ($P < 0.01$).当背景温度为 28 °C 时,实验组平均热感觉投票标度值为 0 左右,受试者处于中性状态.对照组 1 和对照组 2 投票范围为 0~1.5,处于中性状态范围内.实验组和对照组 1 存在显著差异 ($P < 0.05$),实验组和对照组 2 存在极显著差异 ($P < 0.01$).当背景

温度为 30 °C 时,实验组平均热感觉投票标度值为 0.4 左右,对照组 1 超过 50% 受试者投票标度值在 0.5 以上.对照组 2 受试者热感觉投票标度值明显要高,投票标度值均在 1 以上.实验组和对照组 1 存在显著差异 ($P < 0.05$),实验组和对照组 2 存在极显著差异 ($P < 0.01$).由以上分析可知,工位辐射空调加桌面风扇供冷方式在热湿环境中具有显著降低热感的效果.

图 7 所示为 9 个工况的热舒适情况,当背景温度为 26 °C 时,实验组平均热舒适性投票标度值为 -0.2 左右,对照组 1 和对照组 2 平均热舒适性投票值为 0 左右,超过 75% 的受试者投票标度值范围为 -1~1,彼此间无显著性差异 ($P > 0.05$).当背景温度为 28 °C 时,实验组平均热舒适性投票标度值为 0.5 左右,超过 75% 的受试者投票标度值超过 0,受试者处于舒适状态.对照组 1 平均热舒适性投票值为 0.2 左右,超过 60% 的受试者投票标度值范围处于 -1~1 之间,受试者普遍对热舒适没感觉.对照组 2 超过 75% 的受试者投票标度值处于 0 以下,普遍感觉有些不舒服.实验组和对照组 1 存在显著差异 ($P < 0.05$),实验组和对照组 2 存在极显著差异 ($P < 0.01$).当背景温度为 30 °C 时,实验组平均热舒适投票标度值为 0.2 左右,投票范围为 -1~1.5,受试者普遍对热舒适没感觉.对照组 1 投票标度值全处于 0 以下,普遍感觉有些不舒服.对照组 2 热舒适投票明显更低,平均热舒适性投票标度值为 -1.2 左右,基本上所有受试者投票标度值在 -1 以下,受试者有明显的舒适感.实验组分别和对照组 1,对照组 2 存在极显著差异 ($P < 0.01$).

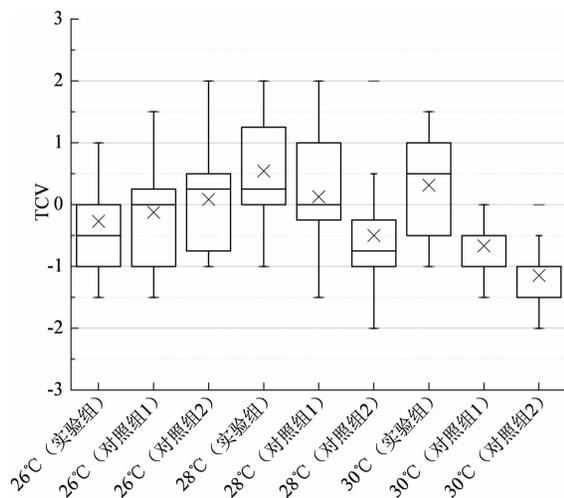


图7 稳态整体热舒适

Fig.7 Steady-state overall thermal comfort

综合以上分析可知,在热湿环境中,工位辐射

空调加桌面风扇供冷方式能明显改善人的舒适性。但在 26 °C 时,其效果并不明显。

图 8 为受试者热可接受程度投票分布情况。由图 8 可知,除了工况 1,9 下,其他工况受试者热可接受度均超过 50%,其中背景温度为 28 °C 的实验组,受试者热可接受度达 100%。在背景温度为 30 °C 对照组 2 情况下,受试者热不可接受程度超过 80%。在背景温度分别为 28 °C 和 30 °C 时,实验组的热可接受度明显要高于对照组 1 和对照组 2。由以上分析可知,在偏热湿环境下,工位辐射空调加桌面风扇供冷方式可以明显提高受试者对环境的热可接受度。

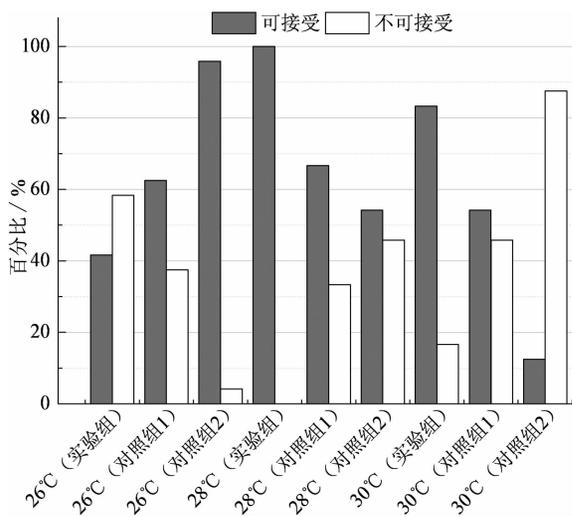


图 8 热可接受度投票分布

Fig.8 Vote distribution of thermal acceptability

图 9 为受试者热期望投票分布情况。由图 9 可知,在工况 3,4,5,7 下,超过 70% 的受试者希望温度不变。在工况 6,8,9 下,超过 70% 的受试者希望温度降低一点,其中在背景温度为 30 °C 对照组 2 情况下,全部受试者希望温度降低一点。在背景温度分别为 28 °C 和 30 °C 时,实验组希望温度不变的比例明显要高于对照组 1 和对照组 2。这一结果表明,在偏热湿环境下,工位辐射空调加桌面风扇供冷方式能显著满足受试者的热期望。

根据现有研究中的结果^[20],夏季建筑室内空调温度每提高 1 °C,空调系统约可实现节能 10%。因此,鉴于工位辐射空调加桌面风扇的供冷方式可将夏季舒适温度范围上限由 26 °C 提升到 30 °C,预计其可实现空调系统节能 30% 以上。

综合以上结果可知,该工位辐射空调加桌面风扇供冷方式能有效扩展舒适温度范围,提高夏季背景区空调设定温度,且存在较大的节能潜力。

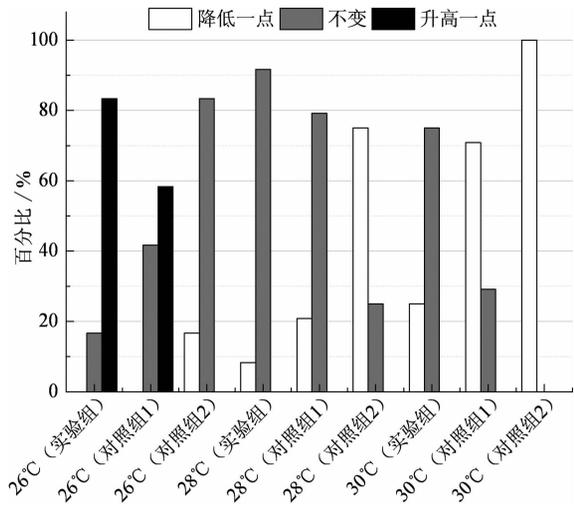


图 9 热期望投票分布

Fig.9 Vote distribution of thermal preference

3 结 论

1)热湿环境中,在工位辐射空调加桌面风扇供冷方式下,受试者的热感觉随着时间的增加逐渐趋于中性。

2)相比对照组,工位辐射空调加桌面风扇供冷方式能显著改善热舒适,但在 26 °C 时,其效果并不明显。

3)当背景温度为 30 °C 时,仍有超过 80% 的受试者在工位辐射空调加桌面风扇供冷方式下表示可以接受其所处的环境。

4)工位辐射空调加桌面风扇供冷方式能保证高温高湿环境中的热舒适、有效扩展舒适温度范围、提高夏季背景区空调设定温度上限,为建筑空调系统节能提供新途径。

参考文献

[1] IMANARI T, OMORI T, BOGAKI K. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system; comparison with the conventional all-air system[J]. Energy and Buildings, 1999, 30(2): 167—175.

[2] KIM T, KATO S, MURAKAMI S, et al. Study on indoor thermal environment of office space controlled by cooling panel system using field measurement and the numerical simulation [J]. Building and Environment, 2005, 40(3): 301—310.

[3] MEMON R A, CHIRARATTANANON S, VANGTOO P. Thermal comfort assessment and application of 316 radiant cooling; a case study[J]. Building and Environment, 2008, 43(7): 1185—1196.

[4] NOVOSELAC A, SREBRIC J. A critical review on the per-

- formance and design of combined cooled ceiling and displacement ventilation systems[J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(5):497-509.
- [5] 聂鑫,朱晓涵,刘益才.毛细管平面辐射空调系统的设计研究与展望[J].*真空与低温*, 2015, 21(1):51-55.
NIE Xin, ZHU Xiaohan, LIU Yicai. The design analysis and prospects of capillary plane radiation air-conditioning system [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2015, 21(1):51-55. (In Chinese)
- [6] 龚光彩,杨厚伟,苏欢,等.空气载能辐射空调末端系统辐射传热简化算法研究[J].*湖南大学学报:自然科学版*, 2014, 41(12):31-38.
GONG Guangcai, YANG Houwei, SU Huan, *et al.* Analysis the research on simplified algorithm of radiative heat transfer for air carry energy radiant air-conditioning terminal system [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(12):31-38. (In Chinese).
- [7] MIRIEL J, SERRES L, TROMBE A. Radiant ceiling panel heating-cooling systems; experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(16): 1861-1873.
- [8] ASHFAQUE A C, RASULM G, Khan M M K. Thermal-comfort analysis and simulation for various low-energy cooling-technologies applied to an office building in a subtropical climate[J]. *Applied Energy*, 2008, 85(6): 449-462.
- [9] NIU J, KOOI J V D, RHEE H V D. Energy saving possibilities with cooled ceiling systems[J]. *Energy and Buildings*, 1995, 23(2):147-158.
- [10] FEUSTEL H E, STETIU C. Hydronic radiant cooling-preliminary assessment[J]. *Energy and Buildings*, 1995, 22(3): 193-205.
- [11] ZHAO K, LIU X H, JIANG Y. Application of radiant floor cooling in a large open space building with high-intensity solar radiation[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 66:246-257.
- [12] CORINA S. Energy and peak power saving potential of radiant cooling systems in US commercial buildings[J]. *Energy and Buildings*, 1999, 30:127-138.
- [13] DOOSAM S, SHINSUKE K. Radiational panel cooling system with continuous natural cross ventilation for hot and humid regions[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36(12): 1273-1280.
- [14] MIRIEL J, SERRES L, TROMBEZ A. Radiant ceiling panel heating-cooling systems; experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(16):1861-1873.
- [15] JEONG W J, MUMMA S A. Ceiling radiant cooling panel capacity enhanced by mixed convection in mechanically ventilated spaces[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(18): 2293-2306.
- [16] KITAGAWA K, KOMODA N, HAYANO H, *et al.* Effect of humidity and small air movement on thermal comfort under a radiant cooling ceiling by subjective experiments[J]. *Energy and Buildings*, 1999, 30(2):185-193.
- [17] 李念平,孙烨瑶,钱佳炜,等.贴附射流辐射冷顶板复合空调系统的性能研究[J].*湖南大学学报:自然科学版*, 2015, 42(11): 120-124.
LI Nianping, SUN Yeyao, QIAN Jiawei, *et al.* Analysis investigation on performance of radiant cooling combined with wall-attached-jet system[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(11):120-124. (In Chinese)
- [18] 杨伟.辐射空调系统可利用的几种节能技术分析[J].*发电与空调*, 2015, 2:85-89.
YANG Wei. Analysis on several energy saving techniques for radiant ceiling system[J]. *Power Generation & Air Condition*, 2015, 2:85-89. (In Chinese)
- [19] 何梅玲,李念平,何颖东,等.热湿工况下工位辐射空调的热舒适实验研究[J].*土木建筑与环境工程*, 2017, 39(4):11-16.
HE Meiling, LI Nianping, HE Yingdong, *et al.* Experimental study on thermal comfort of radiant panel workstation in hot-humid environment[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(4):11-16. (In Chinese)
- [20] HOYT T, ARENS E, ZHANG H. Extending air temperature setpoints; simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings[J]. *Building and Environment*, 2015, 88:89-96.