文章编号：1000-8608(2018)03-0277-08

南方地区局部地面供暖舒适性及节能性研究

谭 畅，李念平*，何颖东，李 甲，颜金波，李 娜

（湖南大学 土木工程学院，湖南 长沙 410082）

摘要： 采用环境测试、主观问卷和能耗模拟相结合的方式，研究冬季局部地面供暖方式下人体舒适性以及能耗情况. 在14、16、18 ℃背景温度下的人工环境实验室内，测试了20位受试者的热感觉、热舒适、热可接受以及相应的局部地面供暖能耗. 实验结果表明：在14 ℃时，使用局部地面供暖后受试者的舒适性显著提高，在16、18 ℃时，使用局部地面供暖能满足90%以上受试者舒适性要求且所需能耗很低. 模拟结果表明：相比设定温度为20 ℃的空调系统能耗，采用局部地面供暖对西南、华东与华中地区节能效果明显，在华南地区节能率最高. 因此，局部地面供暖可以作为一种适用于南方地区的提高舒适性和节能性的采暖方法.

关键词： 热感觉；热舒适；能耗模拟；局部地面供暖

中图分类号： TU832.1 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201803008

0 引 言

南方地区无集中供暖，传统供暖模式主要为电采暖. 据研究，2004年长江流域住宅采暖总面积为 40×10^8 m^2，电耗 210×10^8 kW·h[1]. 因此，研究舒适且节能的采暖方式很有必要.

近年来，许多学者针对使用者的个人供暖进行了深入研究. He等[2]研究了一种改进型的传统供暖设备——火桶，该设备在室内温度降低到9 ℃时仍使得80%的男性受试者对其所处环境表示可以接受，并且，在保证热舒适性的前提下火桶耗电量较低. Kaczmarczyk等[3]研究了32位受试者在20 ℃背景温度下接受21、26 ℃面部送风时的热反应，结果表明呼吸区送风温度稍高于房间背景温度时，将提高人体热舒适性并减弱不适吹风感. Foda等[4]使用假人来研究人体坐姿状态下局部地面供暖系统最优化，结果表明当背景温度为18 ℃时，使用几何形状规整的表面积为1 m^{2}的局部地板供暖最优. Oi等[5]研究了在5、10、15、20 ℃时，加热汽车座椅对人体热感觉与热舒适的影响，结果表明室内背景温度下降时加热座椅能优化热感觉. Pasut等[6]研究了在16、18、29 ℃时使用制冷/加热座椅的人体热感觉与热舒适，结果表明，制冷/加热座椅能显著提高人体热感觉与热舒适，且92%的受试者在18～29 ℃感觉舒适. Deng等[7]研究了36位受试者在16 ℃使用加热座椅与18 ℃不使用加热座椅的热感觉与热舒适，结果表明相比18 ℃不使用加热座椅，16 ℃使用加热座椅能显著提高热感觉与热舒适. Lan等[8]研究热环境对睡眠质量的影响发现，可以使用局部供暖、制冷或通风系统来控制床微气候区环境. Song等[9]测试了8 ℃背景温度下可加热服装对大学生热舒适性的影响，发现可加热服装能有效提高坐在寒冷教室学生的热舒适性. 可见，个人供暖是一种既节能又提高人体舒适性的方式.

本文研究冬季局部地面供暖对人体舒适性和建筑能耗的影响. 在湖南大学人工环境实验室通过实验研究冬季使用局部地面供暖对人体热感觉、热舒适以及热可接受的影响，并基于实验结果利用EnergyPlus进行能耗模拟.

1 实验方法

本实验开展时间为2016年11～12月，地点在湖南大学人工环境实验室.

收稿日期： 2017-10-12； **修回日期：** 2018-03-19.
基金项目： “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0700303)；国家自然科学基金资助项目(51578220).
作者简介： 谭 畅(1993-)，女，硕士生，E-mail：smile_changtan@126.com；李念平*(1962-)，男，博士，教授，博士生导师，E-mail：linianping@sina.com.

1.1 实验房间介绍及实验条件

如图 1 所示,实验房间尺寸为 5.0 m×3.5 m×4.0 m,房间南面有一个 2.0 m×2.2 m 的窗户,为避免其对实验造成影响,在窗户室内面覆盖了约 40 mm 厚的保温板.

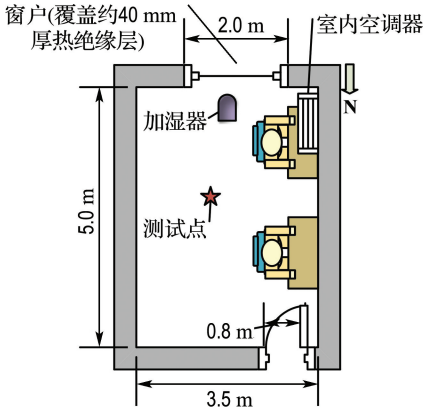


图 1 实验房间平面布置

Fig. 1 The layout of experimental room

采用分体空调器调节室内温度,加湿器保证室内相对湿度在中等水平.采用 TR-72Ui 温湿度记录仪连续测量室内外温度(测量精度±0.3 ℃)和相对湿度(测量精度±5%),TSI-8347 热线风速仪测量室内风速(测量精度±3%),TSI-8762 空气品质仪测量室内二氧化碳浓度(测量精度±3%).

1.2 局部地暖板

本研究采用以碳纤维作为发热元件的局部地暖板实现局部地面供暖.谭羽非等[10]的研究表明碳纤维发热热惯性小,温度响应速度快,电功率基本恒定,适用于办公室这种供暖要求灵活的场所.此外,Zhang 等[11]的研究表明半围合的个人暖脚器存在人体工程学方面的问题,即脚在设备内基本无法移动.本文使用的局部地暖板对脚部活动限制少,避免了需要脱鞋等问题.

如图 2 所示,本研究使用的局部地暖板(850 mm×400 mm)核心部分为中间的碳纤维发热层.不同于一般地暖,该设备仅在人员所处位置地面设置(图中画圈部分),受试者坐在办公桌前,穿上鞋套踩在电热板上对足部进行加热.相对于整个房间而言,只有人员所在区域实现局部地面供暖.受试者使用 LB-SM6 智能温控器自主控制与足部直接接触的设备表面温度,用 Pt100 传感器测量与足部接触的局部地暖板表面温度,安装 UT230A-Ⅱ功率计(测量精度±1%)测量实验过程中局部地暖板消耗的电量.

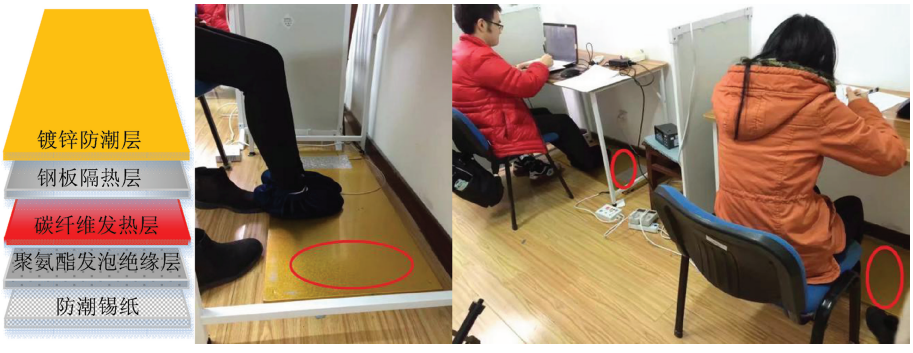


图 2 局部地暖板结构及使用

Fig. 2 Local floor heating plate structure and using

1.3 受试者

共有 20 位受试者参加本次实验,包括 10 位男性和 10 位女性,年龄在 21~25 岁.受试者全部为在校学生,健康状况良好且实验前没有吸烟、喝酒、喝热饮和做剧烈运动.他们的身高和体重分别为(166.48±8.26) cm、(56.84±9.52) kg,体质系数(body mass index,BMI)在 18.8~22.1,符合亚洲人 BMI 标准[12].此外,受试者穿着冬季服装,服装热阻为(1.29±0.17)×0.155 m^2 · ℃/W.实验过程中,受试者可坐在办公座椅上阅读、上网或使用手机,但不允许交流与实验有关的内容.

1.4 实验工况

实验研究的室内温度为 14、16、18 ℃.《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736—2012)规定[13],舒适性空调冬季室内相对湿度 30%~60%,风速不大于 0.2 m/s;ASHRAE[14]规范规定室内二氧化碳体积分数不高于 1 000×10^{-6}.设定 20 ℃作为对照组,实验工况见表 1.

表 1　实验工况

Tab. 1　Experimental conditions

工况	空调形式	背景温度/℃	地暖板调节形式	相对湿度/%	风速/(m·s^{-1})	二氧化碳体积分数/10^{-6}
1	局部地暖板＋空调	14	自主调节	55	＜0.1	＜400
2	局部地暖板＋空调	16	自主调节	55	＜0.1	＜400
3	局部地暖板＋空调	18	自主调节	55	＜0.1	＜400
4	空调	20	无局部地暖板	55	＜0.1	＜400

1.5　实验流程

如图 3 所示，每次实验持续 80 min. 开始实验前，受试者首先在温度为 20 ℃左右准备室停留 15 min，并填写背景资料，如年龄、性别、身高、体重、健康状况等. 然后进入实验第 1 阶段，两位受试者同时进入实验房间，立即按要求填写第 1 份问卷，之后每隔 10 min 填写一次问卷. 30 min 后进入实验第 2 阶段，实验人员开启局部地暖板，受试者换上鞋套踩在地暖上，5 min 后填写一次问卷，之后每隔 10 min 填写一次问卷.

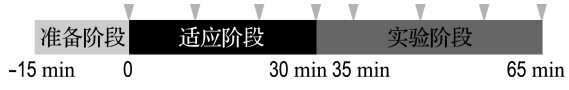


图 3　实验流程

Fig. 3　Experimental procedure

1.6　实验问卷

本实验的问卷包括 3 部分内容：热感觉、热舒适和热可接受. 其中热感觉采用 ASHRAE 的 7 级标度(见表 2)；热舒适尺度如表 2 所示；热可接受投票分为“可接受”与“不可接受”.

表 2　受试者反应评价表

Tab. 2　Scales of subjective responses

投票值	热感觉	热舒适
＋3	热	非常舒适
＋2	暖和	舒适
＋1	稍暖	有点舒适
0	中性	没感觉
－1	稍凉	有点不舒适
－2	凉	不舒适
－3	冷	非常不舒适

1.7　建筑能耗模拟

南方地区地域辽阔，以广州、成都、上海、长沙分别作为华南地区、西南地区、华东地区与华中地区的典型代表城市，用 EnergyPlus 软件模拟不同地区空调系统的能耗. 根据 1.1 节中人工环境实验房间的平面图建立实验房间模型，将建立的模型和 4 个城市的气候文件导入 EnergyPlus 中，进行参数设置从而计算分析能耗. EnergyPlus 采用传导传递函数的热平衡算法来计算建筑负荷，根据《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)规定[15]灯光功率设置为 9 W/m^2，其余用电设备为 15 W/m^2，围护结构传热系数见表 3，人员设置为两位，采用变制冷剂流量空调系统(VRF)模拟房间分体空调器，系统周末不运行，工作日运行时间设置为 7:00～18:00.

表 3　围护结构传热系数

Tab. 3　Heat transfer coefficient of maintenance structure

地区	围护结构传热系数/(W·m^{-2}·K^{-1})		
	屋顶	外墙	外窗
广州	0.497	0.791	2.939
成都/上海/长沙	0.375	0.590	2.570

2　实验结果分析

2.1　室内环境

表 4 为实验过程中室内环境参数数据，各工况下测量的背景温度与设定的背景温度相近，相对湿度基本符合设定湿度，风速测量值都在设定范围内，且二氧化碳体积分数不超过 400×10^{-6}，室内空气新鲜.

2.2　受试者热反应

适应阶段，受试者在 20～30 min 的热感觉、热舒适与热可接受投票值没有显著性差异(配对样本 t 检验，$p>0.05$)，实验阶段受试者在 55～65 min 投票值也没有显著性差异，说明受试者的主观热反应基本达到稳定. 将适应阶段最后一张问卷(第 30 min)作为 14、16、18 ℃使用局部地面供暖前热感觉、热舒适与热可接受稳定状态投票值，将实验阶段最后一张问卷(第 65 min)作为 14、16、18 ℃使用局部地面供暖后和 20 ℃无局部

表 4 室内环境参数

Tab. 4 Indoor environmental parameter

设定参数值				测量参数值			
温度/℃	相对湿度/%	风速/(m·s^{-1})	二氧化碳体积分数/10^{-6}	温度/℃	相对湿度/%	风速/(m·s^{-1})	二氧化碳体积分数/10^{-6}
14	55±5	<0.1	<400	14.2±0.3	61±2	0.04±0.02	221±90
16	55±5	<0.1	<400	16.0±0.4	62±7	0.03±0.02	304±73
18	55±5	<0.1	<400	17.9±0.2	65±3	0.03±0.01	239±94
20	55±5	<0.1	<400	19.9±0.6	51±8	0.05±0.02	254±87

地面供暖热感觉、热舒适与热可接受稳定状态投票值.

2.2.1 热感觉 图 4 表示在 14、16、18、20 ℃背景温度下 20 位受试者热感觉随时间的变化,其中,20 ℃工况为对照实验,只进行实验阶段. 适应阶段(无局部地面供暖):背景温度为 14、16、18 ℃时,受试者热感觉随时间增加而降低. 14 ℃时受试者经历 30 min 适应阶段其热感觉投票值低于−1,16、18 ℃时,热感觉投票值最终降至−0.5 左右. 实验阶段(使用局部地面供暖):使用 5 min 后,各工况下的热感觉投票值显著提高. 在 14 ℃背景温度下,稳定热感觉投票值提升了 0.5 个尺度,但仍低于 0. 可见,14 ℃时使用局部地面供暖能够显著提高受试者热感觉,但仍未达到中性状态. 在 16 ℃背景温度下,热感觉最终接近中性状态. 在 18 ℃背景温度下,稳定热感觉投票值提升了近 0.5,与 20 ℃时受试者热感觉相同,达到了中性状态.

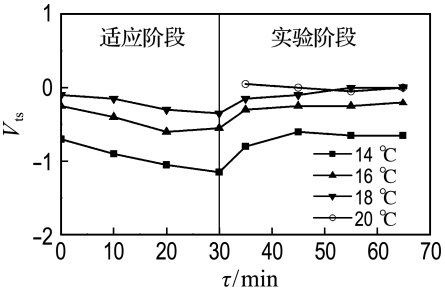


图 4 热感觉投票值随时间变化

Fig. 4 Changes in thermal sensation voting values over time

2.2.2 热舒适 图 5 表示在 14、16、18、20 ℃背景温度下,20 位受试者热舒适随时间的变化,其中,20 ℃工况为对照实验,只进行实验阶段. 适应阶段(无局部地面供暖):在 14 ℃背景温度下,热舒适投票值低于−0.5,受试者感觉不舒适;在 16、18 ℃背景温度下,受试者稳定热舒适投票值都低于 0.5. 实验阶段(使用局部地面供暖):使用 5 min 后,热舒适投票值显著增加. 在 14 ℃背景温度下,相比于适应阶段,受试者热舒适从不舒适侧提高到舒适侧,投票值变化了 1 个尺度;在 16 ℃背景温度下,稳定热舒适投票值接近 1;在 18 ℃背景温度下,稳定热舒适状态接近“舒适”,提高了 1 个尺度. 在 20 ℃无局部地暖板的情况下,受试者的热舒适状态为“有点舒适”. 结果表明局部地面供暖能有效提高人体热舒适,尤其受试者在 18 ℃使用局部地面供暖的条件下,舒适性状态比室内温度为 20 ℃无局部地面供暖的热舒适状态更佳.

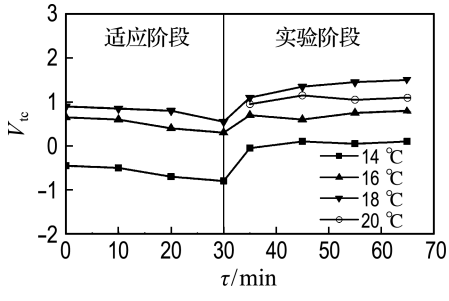


图 5 热舒适投票值随时间变化

Fig. 5 Changes in thermal comfort voting values over time

2.2.3 热可接受 图 6 给出使用局部地面供暖前后稳定热可接受投票频率(f)分布. 适应阶段(无局部地面供暖):在 14 ℃背景温度下,40%的受试者不接受当前室内热环境;在 16 ℃的情况下,15%的受试者不可接受;在 18 ℃时,所有受试者接受室内热环境. 实验阶段(使用局部地面供暖):在 14 ℃背景温度下,仅 10%的受试者不接受当前室内热环境;在 16 ℃的情况下,极少数受

试者(5%)不接受室内热环境. 在 18、20 ℃的情况下,全部受试者均认为室内热环境可以接受.

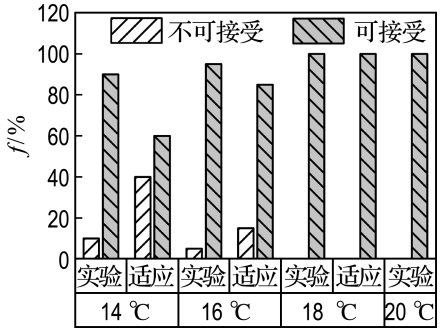


图 6　稳定状态热可接受

Fig. 6　Thermal acceptability under the steady state condition

2.3　局部地面供暖能耗

图 7 表示实验阶段局部地暖板板面温度变化. 最初 5 min 板温升高迅速;5～10 min 板温继续升高,但速度放缓;10 min 后,基本趋于稳定. 在 10～35 min 内,背景温度为 14 ℃时,板面平均温度为 49 ℃;背景温度为 16 ℃时,板面平均温度为 48 ℃;背景温度为 18 ℃时,板面平均温度为 45 ℃. 分别采用 14、16、18 ℃ 3 种工况下平均功率来计算整个供暖期局部地面供暖能耗,供暖时间与之前设置的空调供暖时间一致,结果见表 5.

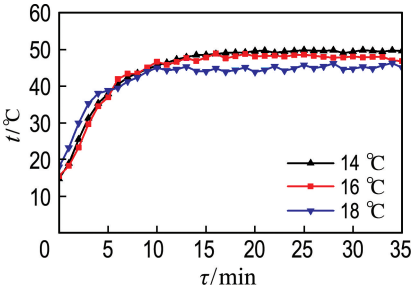


图 7　局部地暖板板面温度

Fig. 7　Surface temperature of local floor heating plate

表 5　局部地面供暖能耗

Tab. 5　Local floor heating energy consumption

地区	背景温度/℃	平均功率/(W·人$^{-1}$)	供暖时间/(h·人$^{-1}$)	整个供暖期局部地面供暖能耗/(kW·h·人$^{-1}$)
广州	14,16,18	47.0,44.2,41.7	770	36.2,34.0,32.1
成都	14,16,18	47.0,44.2,41.7	1 265	59.5,55.9,52.8
上海	14,16,18	47.0,44.2,41.7	1 320	62.0,58.3,55.0
长沙	14,16,18	47.0,44.2,41.7	1 452	68.2,64.2,60.5

3　模拟结果分析

相比于北方地区,南方地区无固定供暖期,根据气候变化需要随时供暖. 因此,4 个地区供暖时间按照全年供暖来计算. 结合实验过程中测量的局部地面供暖能耗数据(表 5),计算在 14、16、18 ℃使用局部地面供暖以及 20 ℃无局部地面供暖条件下供暖系统能耗,分析局部地面供暖方式的节能情况. 在实验过程中,每次两位受试者同时进行实验,因此在整个供暖期实验房间局部地面供暖能耗为两位受试者能耗之和.

3.1　模拟与实测数据对比分析

输出 EnergyPlus 中长沙地区某工作日工作时间(7:00～18:00)内的气象数据文件,与 TR-72Ui 温湿度记录仪实测数据对比(图 8),由图可知软件模拟结果与实测结果较吻合.

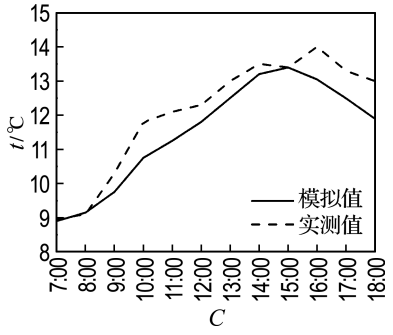


图 8　室外环境温度模拟值与实测值对比

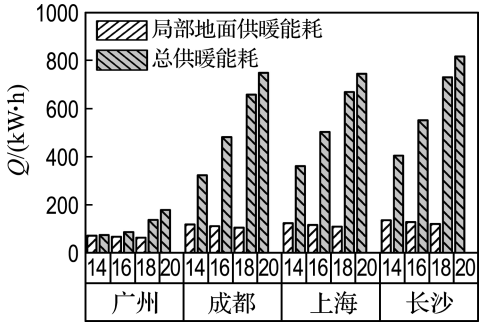
Fig. 8　Outdoor environment temperature comparison in simulation and experiment

3.2　能耗结果分析

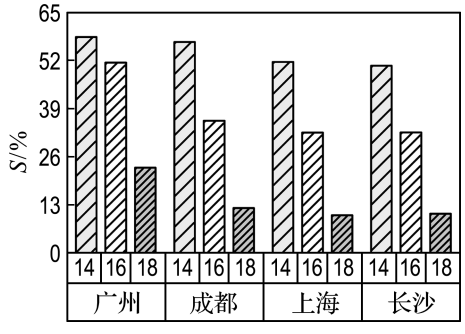
图 9(a)为实验房间在 14、16、18 ℃使用局部地面供暖和 20 ℃无局部地面供暖条件下,各地区供暖期供暖能耗(Q);图 9(b)为相对于使用 20 ℃空调,各地区分别使用 14、16、18 ℃空调加局部地面供暖系统的节能率(S).

广州位于夏热冬暖地区,冬季室外最低日均温 10 ℃. 如图 9(a)所示,广州供暖能耗最低,且 14、16 ℃时,绝大部分能耗来自局部地面供暖,空调能耗相对较低;18 ℃时,局部地面供暖能耗约占总能耗的 50%. 如图 9(b)所示,14、16、18 ℃背景温度下,节能率分别为 58.2%、51.3%、23.0%. 可见,华南地区纬度低,使用空调加局部地面供暖系统能耗最低,虽然总体供暖节能量少,

但节能率最高.成都、上海、长沙都位于夏热冬冷地区,由图9可知,3个城市的供暖能耗及节能率相差不大.可见,尽管成都、上海、长沙分别位于西南、华东、华中地区,但因纬度相近,气候条件相似,节能效果相似,在14、16、18 ℃背景温度下节能率分别达到了50%、30%、10%左右,节能效果明显.



(a) 各工况下能耗



(b) 各地区节能率

图9 供暖期能耗分析

Fig. 9 Energy consumption analysis in heating period

4 讨 论

4.1 局部地面供暖舒适性

通过2.2节在各背景温度下对热感觉、热舒适与热可接受的实验结果分析可以看出,在14、16、18 ℃背景温度下,有无使用局部地面供暖对于受试者的热感觉和热舒适都有显著影响.实验阶段(使用局部地面供暖),受试者热感觉、热舒适与热可接受都有所提升.在14 ℃背景温度下,使用局部地面供暖后受试者热反应投票值有了很明显的变化,虽然达到稳定状态后热感觉在冷的一侧且舒适度略低于16、18 ℃工况,但热可接受比例高于80%,仍然达到了ASHRAE规范中80%可接受度的要求[16].在16 ℃背景温度下,使用局部地面供暖后热感觉和热舒适投票值都接近中性状态,能基本满足受试者要求.对比18 ℃使用局部地面供暖与20 ℃无局部地暖板发现,两种条件下受试者热感觉完全一致,热舒适($p=0.103\ 6$)无显著性差异,并且在18 ℃使用局部地面供暖的条件下热舒适和热可接受状态更佳,且满足受试者的舒适性要求.

4.2 与已有研究比较

4.2.1 舒适性比较

(1)动态比较

文献[5]开启加热座椅20 min内,背景温度10 ℃时,热感觉由冷上升到热中性,热舒适由非常不舒适到没感觉到有点不舒适;15 ℃时,热感觉由凉上升到热,热舒适由不舒适到有点舒适到有点不舒适.本实验使用局部地面供暖30 min内,背景温度16 ℃时,热感觉由稍凉接近热中性,热舒适由没感觉接近有点舒适;18 ℃时,热感觉由稍凉变为热中性,热舒适由没感觉接近舒适.且文献[5]中加热座椅发热量大,较长时间加热会导致过热而降低热感觉与热舒适.本实验中局部地暖板加热5 min升温20 ℃左右,10 min后基本趋于稳定(图7).可见,局部地面供暖加热过程温和,稳定时间短,未出现过热状态.

(2)稳态比较

文献[6]中加热表面有覆盖物的座椅时,16 ℃背景温度下,感觉稍凉而有点舒适,18 ℃时感觉不冷不热且舒适.本实验在使用局部地面供暖时,16 ℃背景温度下感觉接近热中性而有点舒适,18 ℃时感觉不冷不热且接近舒适.

4.2.2 能耗比较 Zhang等[11]在室内背景温度分别为18.9、19.4、20.0、21.1 ℃的情况下分析暖脚器的能耗,采用白炽灯作为热量源,功率最高为21 W/人.本实验背景温度分别为14、16、18 ℃,局部地面供暖平均功率最高达47 W/人(表5).虽然本研究使用局部地面供暖能耗更高,但在扩展舒适温度区间方面具有优势.

4.3 工程实例对比

本研究中局部地面供暖的节能性主要来自于降低冬季采暖室内所需温度.目前,本实验采用的供暖设备尚处于实验研究阶段.因此,局部地面供暖的节能效果主要与采用类似供暖方式的工程实例进行对比分析.Zhang等[11]在加利福尼亚大学一所办公楼中对采用白炽灯作为热源的足部采暖设备进行了实地测量,由文献[11]可知:室外环境

温度为 11.1～13.8 ℃的情况下，维持室内温度 19.4、20.0 ℃所需的空调系统人均能耗分别为 266.65、288.01 W 左右，同时暖脚板的能耗分别为 14.7、12.6 W 左右. 由以上数据可得，室内温度从 20 ℃下降到 19.4 ℃，总节能率为 6.4%，即室内温度每下降 1 ℃，节能 10.7%. 艾帅[17]调研了神木某厂房的采暖系统，数据计算分析得出，工作区平面内平均温度分别为 7.8、9.8 ℃时，辐射采暖能耗分别为 690.1、766.8 kW，即室温每降低 1 ℃，可以减少 5%左右的能耗. 此外，据日本采暖研究报告，地面辐射采暖可以节能 20%～30%，相应地，室温每下降 1 ℃便可节约大概 10%的能源[18]. 由本文图 9 可知，夏热冬冷地区室内温度由 18 ℃下降到 16 ℃时，节能率约为 25%，即每下降 1 ℃，节能 12%左右. 可见，本文采用的局部地面供暖加空调系统节能率与已有文献中降低采暖室内设定温度的节能率接近，与文献[11，17-18]的节能率差异主要来自于室内外环境温度的差异性.

5　结　论

(1)局部地面供暖方式能显著提高寒冷环境中人体舒适性. 使用局部地面供暖 5 min 后，受试者热感觉和热舒适均显著提高，且背景温度低至 14 ℃时热可接受比例仍达到 80%以上.

(2)局部地面供暖扩展了人体舒适性温度范围. 受试者使用局部地面供暖达到稳定状态后，在 14 ℃背景温度下，受试者热感觉、热舒适与热可接受投票值显著提高；在 16 ℃背景温度下，各投票值都接近中性状态；在 18 ℃背景温度下，与 20 ℃无局部地面供暖条件比较，各投票值无显著性差异，达到舒适状态.

(3)局部地面供暖节能效果显著. 在 14、16、18 ℃背景温度下，单人局部地面供暖最大平均功率为 47 W.

(4)相比于 20 ℃无局部地面供暖的条件，局部地面供暖对中国南方地区都有显著的节能作用.

参考文献：

[1] 江　亿. 中国建筑能耗现状及节能途径分析[J]. 新建筑，2008(2)：4-7.
JIANG Yi. Chinese building energy consumption situation and energy efficiency strategy [J]. **New Architecture**，2008(2)：4-7. (in Chinese)

[2] HE Yingdong，LI Nianping，ZHOU Linxuan，*et al*. Thermal comfort and energy consumption in cold environment with retrofitted Huotong (warm-barrel) [J]. **Building and Environment**，2017，**112**：285-295.

[3] KACZMARCZYK J，MELIKOV A，SLIVA D. Effect of warm air supplied facially on occupants′ comfort [J]. **Building and Environment**，2010，**45**(4)：848-855.

[4] FODA E，SIRÉN K. Design strategy for maximizing the energy-efficiency of a localized floor-heating system using a thermal manikin with human thermoregulatory control [J]. **Energy and Buildings**，2012，**51**：111-121.

[5] OI H，TABATA K，NAKA Y，*et al*. Effects of heated seats in vehicles on thermal comfort during the initial warm-up period [J]. **Applied Ergonomics**，2012，**43**(2)：360-367.

[6] PASUT W，ZHANG Hui，ARENS E，*et al*. Energy-efficient comfort with a heated/cooled chair：Results from human subject tests [J]. **Building and Environment**，2015，**84**：10-21.

[7] DENG Qihong，WANG Runhuai，LI Yuguo，*et al*. Human thermal sensation and comfort in a non-uniform environment with personalized heating [J]. **Science of the Total Environment**，2017，**578**：242-248.

[8] LAN L，TSUZUKI K，LIU Y F，*et al*. Thermal environment and sleep quality：A review [J]. **Energy and Buildings**，2017，**149**：101-113.

[9] SONG Wenfang，WANG Faming，ZHANG Chengjiao，*et al*. On the improvement of thermal comfort of university students by using electrically and chemically heated clothing in a cold classroom environment [J]. **Building and Environment**，2015，**94**：704-713.

[10] 谭羽非，赵登科. 碳纤维电热板地板辐射供暖系统热工性能测试[J]. 煤气与热力，2008，**28**(5)：26-28.
TAN Yufei，ZHAO Dengke. Thermodynamic performance test of carbon fiber electric heating board for floor panel heating system [J]. **Gas & Heat**，2008，**28**(5)：26-28. (in Chinese)

[11] ZHANG Hui，ARENS E，TAUB M，*et al*. Using footwarmers in offices for thermal comfort and

energy savings [J]. **Energy and Buildings**, 2015, **104**:233-243.

[12] 洪海潇，苏连勇. 天津市大学生BMI指数的15年动态分析[J]. 首都体育学院学报，2014，**26**(3)：279-283.
HONG Haixiao, SU Lianyong. Fifteen-years dynamic analysis of BMI index of college student in Tianjin [J]. **Journal of Capital University of Physical Education and Sports**, 2014, **26**(3):279-283. (in Chinese)

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范：GB 50736—2012 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design Code for Heating Ventilation and Air Conditioning of Civil Buildings: GB 50736-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[14] ASHRAE. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality: ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013 [S]. Atlanta: ASHRAE, 2013.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准：GB 50189—2015 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings: GB 50189-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

[16] ASHRAE. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 [S]. Atlanta: ASHRAE, 2013.

[17] 艾 帅. 高大空间工业建筑采暖方式的对比研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2014.
AI Shuai. Comparative study on heating system of high space industrial building [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)

[18] 李宏伟，常志强. 地面辐射采暖舒适性节能性探讨[J]. 中国房地产业，2015(8)：233.
LI Hongwei, CHANG Zhiqiang. Discussion on comfort and energy saving of radiant floor heating [J]. **Real Estate Information of China**, 2015(8):233. (in Chinese)

Study of comfort and energy saving of local floor heating in south of China

TAN Chang, LI Nianping*, HE Yingdong, LI Jia, YAN Jinbo, LI Na

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

Abstract: Combining environmental measurements, subjective questionnaires and energy consumption simulations, human body comfort and energy conservation of local floor heating in winter are studied. Thermal sensation, thermal comfort, thermal acceptability of 20 subjects and the corresponding energy consumption are tested in an experimental room where the indoor temperature is set at 14, 16, 18 ℃, respectively. The experimental results show that the local floor heating significantly improves thermal comfort of subject when the indoor temperature is 14 ℃. With indoor air temperature reaching 16 or 18 ℃, the local floor heating satisfies more than 90% of subjects while the needed energy is very low. As compared with the conventional air conditioning system whose setting temperature is 20 ℃, local floor heating could save a large amount of heating energy in Southwest China, East China and Central China, and has the highest energy-saving rate when applied in South China. Therefore, local floor heating can be regarded as a practical way for both improving comfort and saving energy in the south of China.

Key words: thermal sensation; thermal comfort; energy consumption simulation; local floor heating