
This is an electronic reprint of the original article.
This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

Wu, Yuxin; Liu, Hong; Li, Baizhan; Lu, Xingyu; Chen, Lu; Kosonen, Risto

南方地板辐射供暖的舒适性地板温度范围

Published in:
Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin

DOI:
[10.1360/TB-2020-1378](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1378)

Julkaistu: 18/01/2021

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Published under the following license:
Määrittelemätön

Please cite the original version:
Wu, Y., Liu, H., Li, B., Lu, X., Chen, L., & Kosonen, R. (2021). . *Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin*, 66(19), 2476-2485. <https://doi.org/10.1360/TB-2020-1378>

This material is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of the repository collections is not permitted, except that material may be duplicated by you for your research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered, whether for sale or otherwise to anyone who is not an authorised user.

Comfortable floor temperatures for radiant floor heating in Southern China

吴语欣, 刘红, 李百战², 卢星宇², 陈露² and Kosonen Risto³

Citation: [科学通报](#) **66**, 2476 (2021); doi: 10.1360/TB-2020-1378

View online: <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2020-1378>

View Table of Contents: <https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/CSB/66/19>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[Dynamic model of the floor heating system combined with the roof cooling system using the Bond Graph approach](#)

Mechanics & Industry **13**, 77 (2012);

[STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF DETRITAL MINERALS OF EAST CHINA SEA FLOOR](#)

Science in China Series B-Chemistry, Biological, Agricultural, Medical & Earth Sciences **29**, 313 (1986);

[A teratoma of the lateral floor of the mouth](#)

Journal of Oral Medicine and Oral Surgery **20**, 289 (2014);

[DRIVING MECHANISM FOR SEA FLOOR SPREADING](#)

Scientia Sinica **22**, 819 (1979);

[FVO: floor vision aided odometry](#)

SCIENCE CHINA Information Sciences **62**, 012202 (2019);



南方地板辐射供暖的舒适性地板温度范围

吴语欣^{1,2,3}, 刘红^{2*}, 李百战², 卢星宇², 陈露², Kosonen Risto³

1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018;

2. 重庆大学, 绿色建筑与人居环境营造国际合作联合实验室(教育部), 重庆 400045;

3. Department of Mechanical Engineering, Aalto University, Espoo 02150, Finland

* 联系人, E-mail: liuhong1865@163.com

2020-10-24 收稿, 2021-01-15 修回, 2021-01-15 接受, 2021-01-18 网络版发表

国家重点研发计划(2019YFE0100300-05, 2016YFC0700300)和高等学校学科创新引智计划(B13041)资助

摘要 地板辐射供暖系统应用数量在我国南方地区日益增长, 但人们对如何设定适宜的地板温度范围存在一定的疑惑. 本文通过标准解读、文献调研和实地人体实验, 对舒适性地板温度范围进行了研究. 文献总结表明, 东亚地区人群偏好的地板温度普遍高于现有标准推荐值(约25~29°C). 在重庆某住宅中, 招募了45名当地受试者, 对25~35°C的6个不同地板温度进行了问卷投票人体实验研究. 结果表明, 夏热冬冷地区人们偏好较高的地板温度. 长期停留时, 中性地板温度约为28°C, 但热舒适性地板温度约为29~32°C, 期望的地板温度在32°C左右; 而短暂停留时, 期望的地板温度在33~35°C. 因此, 针对夏热冬冷地区的分散式地板辐射供暖系统, 建议将经常停留和短暂停留区域的地板设计温度上限值分别提高到32和34°C.

关键词 地板辐射供暖, 冬季, 地板温度, 热舒适, 夏热冬冷地区

人类利用地板辐射供暖(简称“地暖”)的历史源远流长, 在中国夏商周时期的多个文献记载及考古遗址中都发现了类似加热壁面^[1]. 其大规模应用可追溯到公元前11世纪中国北方的“炕”, 这是已知人类利用地板辐射供暖的最早实践^[2]. 公元前5世纪左右, 古希腊人和罗马人也开始利用地板或墙面加热系统. 在19世纪的法国和英国, 随着工业革命的发生, 地暖系统逐渐发展为现代的辐射供暖系统^[3]. 二十世纪五六十年代, 欧洲地区地暖系统采用的是钢或铜管, 但是由于当时的建筑保温性能很差, 为了维持室内空气温度, 地板温度过高, 给地暖的应用带来了人体健康问题等负面影响. 随后, 在19世纪70年代末期, 低温塑料管成为欧美地区地暖的标准材料, 并在各个国家推广应用. 近几十年来, 在德国、奥地利和丹麦, 大约有30%~50%的新建

住宅建筑安装有地暖系统^[4]; 而在韩国, 大约90%的住宅都安装有地暖系统^[5].

近年来, 随着经济社会的发展以及南方居民冬季供暖需求不断提高^[6], 南方供暖市场日趋繁荣, 各类供暖企业及供暖设备形式如雨后春笋般出现^[7]. 作为较受南方人民偏好的供暖形式之一, 地暖系统由于减少了使用对流末端供暖时存在的不适^[8], 应用数量显著增加. 不同于北方的集中供暖建筑^[9], 南方建筑保温性能普遍不高^[10], 因此, 在实践中供暖系统的地板温度(本文中通指上表面温度)通常偏高于标准范围. 但对于南方人群, 如何营造舒适性的地板辐射供暖环境, 仍然存在参数设定标准的科学依据不足等问题. 本文对国内外有关地暖系统的标准及研究进行总结与分析, 归纳基于满足人体舒适性的地暖系统地板温度范围, 并通

引用格式: 吴语欣, 刘红, 李百战, 等. 南方地板辐射供暖的舒适性地板温度范围. 科学通报, 2021, 66: 2476–2485

Wu Y X, Liu H, Li B Z, et al. Comfortable floor temperatures for radiant floor heating in Southern China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 2476–2485, doi: 10.1360/TB-2020-1378

过典型重庆地区实际建筑中的人体实验进一步研究验证,为南方地区的地暖系统选取适宜的地板温度参数范围做出参考。

1 文献总结与分析

1.1 国内外标准解读

有关地暖系统地板温度范围的标准大体可分为评价标准和设计标准。评价标准包括我国的国标GB/T 50785-2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》^[11]、美国标准ASHRAE 55-2020^[12]、国际标准ISO 7730:2005^[13]、ISO/TS 13732-2:2001^[14]、ISO 13732-1:2006^[15]等,其地板温度推荐值如表1所示。这些国内外的评价标准均基于公式(1)计算地板温度可接受范围,依据主要来自20世纪70年代Olesen教授^[16]对欧美地区人体实验研究结果的总结分析,即穿轻薄鞋子时,地板温度与脚部不满意率(percentage dissatisfied, PD)关系式如下:

$$PD = 100 - 94 \exp(-1.387 + 0.118 T_f - 0.0025 T_f^2), \quad (1)$$

其中, T_f 为地板表面温度, °C; PD为不满意率, %。

具体地, ISO 7730:2005中规定: A级和B级(PD<10%)的温度范围为19~29°C; C级(PD<15%)的温度范围为17~31°C。ASHRAE 55-2020和ISO/TS 13732-2:2001中

规定也基本一致: 穿轻薄的鞋子(5~15 mm)时, 舒适的地板温度范围为19~29°C(PD<10%); 穿更厚的鞋子时为保守情况, 也可适用。而我国GB/T 50785-2012评价标准, 采用的 I 级地板表面温度范围较广, 为17~31°C(PD<15%)。赤脚以及坐在地上的情况则受皮肤表面接触材质的影响而有所差别, 推荐参考ISO 13732-2中附表数值。

欧洲设计规范有EN 1264-2:2008^[17]和EN 15377-1:2008^[18], 如表1所示, 地板推荐的温度设计范围为19~29°C, 距外墙1 m范围内可以提高到35°C。我国的设计标准/规范有GB 50019-2015^[19]、GB 50736-2012^[20]和JGJ 142-2012^[21]等, 如表2所示。我国设计标准中, 经常停留区域的设计温度推荐范围为24/25~26/27°C, 上限为29°C, 与欧洲设计标准的上限一致; 而短暂停留区域的设计温度推荐范围为28~30°C, 上限为32°C, 略高于欧洲设计标准上限29°C; 无人停留区域的设计温度推荐范围为35~40°C, 上限为42°C。ISO 13732-1:2006^[15]基于安全考虑, 规定人体皮肤长期接触的表面温度不大于43°C(8 h), 与无人停留区域的温度上限值42°C较为接近。

1.2 以往实验及调查研究综述

实验研究可给出不同地区人们对地暖系统地板温

表1 欧美及国际标准的地板温度范围规定

Table 1 The provisions on floor surface temperatures in European, USA and international standards

标准编号	类型	地板温度可接受范围	其他规定
ASHRAE 55-2020	评价标准	穿轻薄鞋子时: 19~29°C(PD<10%)	不包括赤脚以及坐在地上的情况
ISO 7730:2005	评价标准	穿轻薄鞋子时: A级和B级(PD<10%): 19~29°C; C级(PD<15%): 17~31°C	赤脚情况见ISO 13732-2
ISO/TS 13732-2:2001	评价标准	穿轻薄鞋子时(5~15 mm): 19~29°C	坐着的人舒适温度范围高1°C, 站着的人低1°C; 赤脚另附表
ISO 13732-1:2006	评价标准	/	基于安全考虑, 人体皮肤长期接触的表面温度不大于43°C(8 h)
EN 1264-2:2008	设计标准	19~29°C	无人区域可以达到35°C, 比如离外窗和外墙1 m之内
EN 15377-1:2008	设计标准	19~29°C	房间周边区域可以达到35°C

表2 国内设计规范有关地板温度(°C)规定

Table 2 The provisions on floor surface temperatures (°C) in Chinese building design codes

标准编号	标准名称	经常停留区域	短暂停留区域	无人停留区域
GB 50019-2015	工业建筑暖通设计规范	25~27, 上限 29	28~30, 上限 32	35~40, 上限 42
GB 50736-2012	民用建筑暖通设计规范	24~26, 上限 28	28~30, 上限 32	35~40, 上限 42
JGJ 142-2012	辐射供暖供冷技术规程	25~27, 上限 29	28~30, 上限 32	35~40, 上限 42

度最真实的反应. 关于地板温度对脚部舒适性影响的研究, 可追溯到二十世纪四五十年代英国的Munro和Chrenko^[22], 他们发现, 人们不喜欢高热传导率的地板. Chrenko^[23]随后发现, 过高的地板温度是人体不舒适的主要原因(50%), 但只有当地板温度高于25°C时才可能产生脚部热不舒适. 20世纪70年代, Olesen教授^[16]通过自己以及前人对欧美地区人体实验研究结果的分析, 得到了不同地板材质舒适性温度区间, 大部分落在19~29°C之间, 这些结果被现有国内外标准广泛地直接或间接引用.

类似中国北方的“炕”, 韩国人也有自己的传统地板辐射供暖方式, 被称为“ONDOL”(暖炕), 区别在于它是对整个房间地板加热. 对此也有不少研究, 例如, Sohn等人^[24]发现, 暖炕地板温度为33.6~38.8°C时, 所有韩国人都觉得非常舒适, 而低于28.5°C时, 没有一个人认为非常舒适. Kong和Sohn^[25]随后发现, “ONDOL”舒适的地板温度范围为30.8~34.4°C. 2003年, Song^[26]在人工气候室进行坐姿人体实验, 结果表明, “ONDOL”系统地板的人体中性温度为32.6°C. 2008年, Song^[27]在人工气候室招募了16名受试者(采用赤脚站立的形式), 得到“ONDOL”系统地板的舒适温度范围为27~33°C. 通过对前人研究的总结, Zhang等人^[28]也得出了适宜于日本人的地板温度舒适区间, 可接受温度为25~31°C, 而最优的地板温度范围为26~30°C.

综上, 韩国和日本等亚洲地区的地板舒适温度范围(25~39°C之间不等)普遍高于国际(19~29°C)及我国(24~29°C)标准中推荐值, 且笔者在工程实践中也发现, 中国南方冬季, 家庭住户也喜欢把地板温度开到较暖和的范围. 由于在当地长期气候适应^[29]、生理习服(表皮粗糙程度、血流量和体格等差异)^[30]和社会习俗影

响^[31], 亚洲人形成的对地板供暖的温度需求可能会不同于欧美地区人群, 且在非集中供暖环境中, 舒适温度不等于热中性温度^[32]. 因此, 在中国夏热冬冷地区, 人们冬季偏好的地板温度范围还需要进一步研究.

2 研究方法

2.1 实验平台及设备

实验平台位于重庆市江津区的某小区住宅楼, 该楼在2013年竣工, 是多层式住宅建筑. 建筑墙体结构材料及热工性能系数满足《重庆市居住建筑节能(50%)设计标准》: 墙体(内墙)导热系数约为 $0.613 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; 外墙另加保温材料膨胀聚苯板(30 mm), 综合导热系数约为 $0.265 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; 楼板综合导热系数为 $1.43 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. 另外, 外窗(朝南)为普通中空玻璃, 传热系数为 $2.8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 玻璃遮阳系数为0.86, 玻璃可见光透射比0.71.

实验平台的供暖热源为一台燃气壁挂炉, 额定供暖热负荷20.4 kW, 供暖水温可调范围是40~76°C. 室内温度设定的最小标度为0.5°C. 房间地板下敷设了常用的地暖水管, 内径20 mm, 管间距5 cm, 如图1(a)所示. 地板表面装饰层铺设瓷砖地板, 并用水泥砂浆进行黏合, 如图1(b).

测点布置根据《建筑热环境测试方法标准》(JGJ/T 347-2014)^[33]的要求进行. 室内空气温度使用Agilent 34972A数据采集仪和T型铜-康铜热电偶温度传感器测量, 量程为-40~125°C, 精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (水浴校正后). 室内空气的相对湿度及室外空气温湿度使用温湿度仪(HOBO UX100-011)测量, 温度测量量程为-20~70°C, 精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (0~50°C); 相对湿度测量量程为1%~95%,

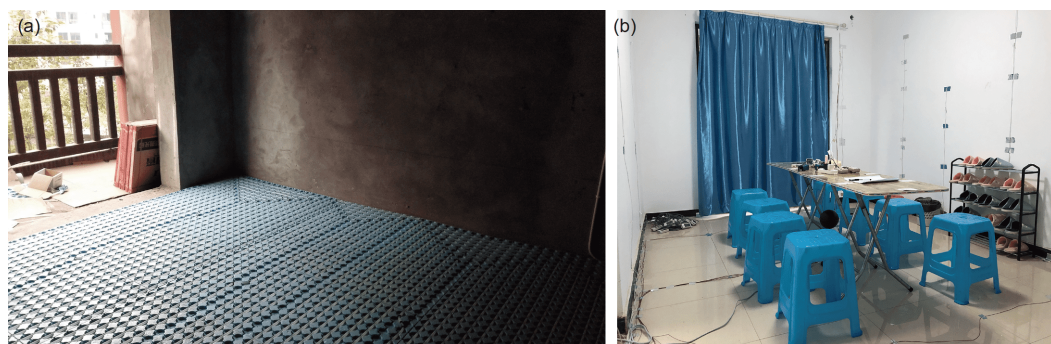


图1 (网络版彩色)现场照片. (a) 地暖水管安装; (b) 实验房间布置

Figure 1 (Color online) The on-site photos. (a) Installation of floor heating pipes; (b) layout of the room for experiments

精度为 $\pm 2.5\%$ (10%~90%)。室内黑球温度使用北京建通JTR10型WBGT热指数仪测量,量程为5~120℃,精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

2.2 受试者

实验共招募了45名当地身心健康的居民作为受试者,实验前对受试者基本生理参数、穿着和生活习惯等进行了背景调查。为了进一步对比分析,受试者分为16~27岁组(23名)和30~47岁组(22名),基础信息如表3所示。总体来说,受试者代表了部分典型南方本地人体型,平均身高和体重分别为(164.0 $\pm$ 7.8) cm和(58.5 $\pm$ 7.9) kg,体质指数(body mass index, BMI)平均值为21.7 $\pm$ 2.3,大部分受试者BMI值在正常范围(18.5~23.9)。但相对于16~27岁组,30~47岁组体型略微“发福”,BMI(23.6 $\pm$ 1.5)接近偏重阈值24,体脂率也偏高(32.0% $\pm$ 5.6%)。受试者住宅室内供暖经历约为(3.6 $\pm$ 3.6) h/d,即平均只有少数时间处于住宅供暖空间,且不同年龄差异不大。但16~27岁组多数是开启空调系统供暖,30~47岁组多数是使用局部加热装置供暖。实验中穿着典型冬季服装,一般有长裤、秋裤、秋衣、毛衣和外套,热阻约为1.2 clo。

2.3 实验工况及流程

实验于2018年12月~2019年1月开展,每次实验历时120 min。本实验设计了6个不同的地板表面温度:25、27、29、31、33和35℃。根据预实验事先得到的地板温度与供暖热量(温度及水流量)的对应关系,在实验前一晚上开启地暖系统,调节供暖水温度、流量以及室内温度设定值,使地板表面温度达到相对稳定状态的预设值范围。在实验过程中,也可根据温度的监测数据进行实时微调。

受试者需提前30 min到达实验房间(客厅),稍作休息并提前熟悉问卷相关内容。实验过程中,受试者全程保持坐姿状态(活动强度约为1.1 met),并赤脚踩在地板上,分别在1、10、30、60、90和120 min时填写

问卷。

2.4 调查问卷设计

本实验参照国际通用标准《ASHRAE 55-2020》^[12]和国家标准《热环境人类工效学》(GB/T 18977-2003)^[34]的相关标尺进行问卷设计,主要指标和标尺如表4所示,包括热感觉、脚部热舒适和地板温度热期望。热感觉的调查除了整体热感觉,还包含人体几大主要局部区域部位:头、躯干、胳膊、大腿、小腿和脚。除此之外,还对受试者脚部的不适症状包括脚痛、脚麻和脚胀,按选项“有(1)”或“无(0)”进行问卷调查。

2.5 数据处理

在Olesen教授^[16]的研究及国际评价标准ISO/TS 13732-2:2001^[14]中,短暂停留(short term occupancy)的时间定义为1 min,稍长停留(longer period of occupancy)的时间定义为10 min。因此,为了方便对比分析,本实验分析采用1 min时、10 min时以及30~120 min(平均)的数据分别作为短暂停留、稍长停留、长期停留的取值。

在对结果进一步分析之前,首先对两个年龄组之间主要投票值进行显著性差异检验,如表5所示。结果表明,两组人的脚部热感觉和热舒适在大部分地板温度下差异不显著,显著性仅在边界工况(脚部热感觉在35℃时,脚部热舒适在25℃时)出现,即在适中温度范围没有显著差异。但两个年龄组的地板温度期望在较多工况中(25~29℃)都有较为显著的差异,因此,在结果中对两个年龄组的地板温度期望分别统计分析。

3 实验结果

3.1 室内热湿环境

实际测得的地板温度如表6所示,各个工况的实测

表3 受试者基础信息

Table 3 The anthropometric information of the subjects

分组	室内供暖经历 ^{a)} (h/d)	年龄(岁)	身高(cm)	体重(kg)	BMI(kg/m ²)	体脂率(%)
16~27岁组	3.8 $\pm$ 4.3	21.1 $\pm$ 4.3	166.3 $\pm$ 8.2	55.6 $\pm$ 6.9	20.1 $\pm$ 1.5	18.4 $\pm$ 9.1
30~47岁组	3.4 $\pm$ 2.4	39.3 $\pm$ 5.9	161.5 $\pm$ 6.8	61.9 $\pm$ 7.8	23.6 $\pm$ 1.5	32.0 $\pm$ 5.6
总计	3.6 $\pm$ 3.6	29.6 $\pm$ 10.5	164.0 $\pm$ 7.8	58.5 $\pm$ 7.9	21.7 $\pm$ 2.3	25.7 $\pm$ 10.0

a) 以日均处于室内供暖的时间表示,单位为h/d

表 4 热舒适问卷主要评价指标和标尺

Table 4 Main evaluation indexes and scales in the thermal comfort questionnaire

标尺	热感觉	热舒适	热期望
+3	热		
+2	暖		
+1	稍暖		温度升高
0	中性	舒适	保持不变
-1	稍凉	稍不舒适	温度降低
-2	凉	不舒适	
-3	冷	非常不舒适	

表 5 不同年龄组之间的显著性检验结果

Table 5 Significance tests between different age groups

工况	脚部热感觉	脚部热舒适	地板温度期望
25°C	0.850	0.011	0.001 ^{a)}
27°C	0.170	0.088	0.014
29°C	0.960	0.578	0.001 ^{a)}
31°C	0.747	0.734	0.386
33°C	0.768	0.389	0.084
35°C	0.001 ^{a)}	0.260	0.556

a) $P < 0.01$

温度都略高于设计温度,但误差都在1°C以内.不同地板表面温度下对应的实测热环境参数也如表6所示.室外空气温度大部分在6~12°C范围内,变化不大.而室内空气温度随着地板表面温度升高而逐渐升高,在地板表面温度从25°C升高到35°C时,室内空气温度也从(19.0±0.7)°C升高到(23.3±1.0)°C.实验中,空气温度范围都处于供暖室内设计标准范围18~24°C内.实验过程中门窗紧闭,室内无明显空气流动,空气相对湿度也稳

表 6 实测环境参数

Table 6 Measured indoor environmental parameters

设计工况	室内环境					室外环境	
	地板温度 ^{a)} (°C)	空气温度 ^{a)} (°C)	相对湿度 ^{a)} (%)	黑球温度 ^{a)} (°C)	空气流速(m s ⁻¹)	空气温度(°C)	相对湿度(%)
1	25.6±0.4	19.0±0.7	50±6	19.8±1.3	<0.1	6~12	59~92
2	27.8±0.4	20.1±0.8	51±5	20.9±0.6	<0.1	9~12	63~79
3	29.6±0.4	21.5±0.9	52±5	22.3±1.2	<0.1	9~12	67~85
4	31.7±0.2	21.9±0.6	47±5	22.5±1.1	<0.1	9~12	71~83
5	33.6±0.6	22.4±0.6	47±3	23.5±1.3	<0.1	10~12	84~92
6	35.5±0.3	23.3±1.0	49±5	23.8±1.4	<0.1	10~12	77~90

a) 平均值±标准差

定在(50±6)%之内.

3.2 热感觉

通过问卷调查得到人体局部热感觉分布后,通过用不同颜色代表不同的热感觉标尺范围进行对应处理,得到可视化图像如图2所示.可以看出,在地板温度为27°C左右(空气温度为20°C)时,人体处于不冷不热的中性状态;在地板温度为25°C左右时,人体在短暂停留和稍长停留时脚部略微感觉凉一些;在地板温度为29°C时,人体处于略微暖一些的状态;而在地板温度达到31°C以上时,短暂停留时首先是脚部处于较暖的状态,随着时间延长,全身各部位也趋于偏暖状态.长期停留时热感觉随时间的变化也体现了人体在一定范围内的自我调节能力,例如,当地板温度为25~31°C时,大部分的局部热感觉随着时间更接近于中性,且不同部位之间的差值减少.但地板温度为35°C时,可能超过了人体自我调节范围,随着热暴露时间延长,蓄热增加,人体各部位热感觉逐渐升高.

通过将问卷数据平均值和地板温度测试值进行关联,得到了地板温度与脚部热感觉的定量关系,如图3所示.根据图3中公式计算的热中性地板温度,在短暂停留和稍长停留时约为27.5°C,在长期停留时约为28.0°C.脚部热感觉TSV=+0.5时的地板温度值可作为可接受的上限值,具体如下:短暂停留时为33.5°C,稍长停留时为31.5°C,长期停留时为32.5°C.长期停留的地板温度上限值相对于稍长停留时略微提升,体现了人体自适应能力.

3.3 热舒适与热期望

将受试者投票为稍不舒适、不舒适、非常不舒适

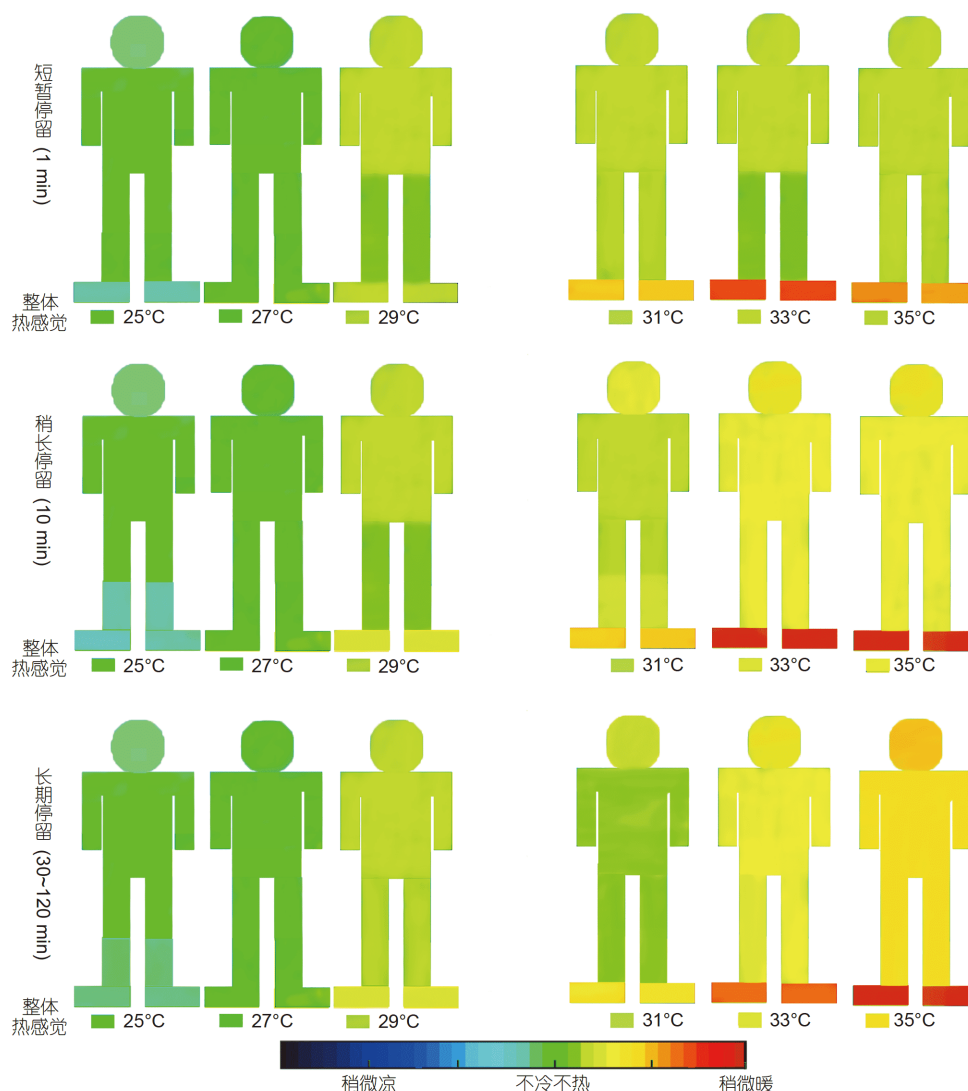


图2 不同地板温度下的人体局部热感觉分布

Figure 2 The distributions of local thermal sensation vote under different floor temperatures

占总投票的比例作为热不适率,得到图4中脚部热不适率与地板温度的关系。当要求PD<15%时,短暂停留的地板舒适温度范围为29.5~35.5°C,稍长停留的地板舒适温度范围约为29.5~32.5°C,而长期停留地板舒适温度范围则更大一些,为27.5~33.5°C。当要求PD<10%时,短暂停留和稍长停留无法达到,而长期停留地板舒适温度范围约为29~32°C。总体来说,受试者的热舒适地板温度相对于标准中范围(19~29°C)偏高。

地板温度热期望投票结果如图5所示,在地板温度小于32°C时,不同年龄受试者都期望地板表面温度升高。长期停留时,地板温度超过32°C后,大多数受试者都期望地板表面温度降低。而在短暂停留时,16~27岁

组期望温度为33°C,而30~47岁组期望温度为35°C,两组人有所差异的原因可能是实验前热经历的差异。随着实验进行,人体热状态稳定后,两组人热期望的差异性逐渐消除。

3.4 脚部不适症状

经过统计,大部分人(约95%)在实验中没有出现脚麻、脚胀或脚痛的症状,只有极个别受试者会产生类似症状。对于个别敏感受试者,地板温度偏高可能与脚部的不适症状有关,但由于不适症状整体发生率较低,工况之间相差较小,也不排除受到除了地板温度以外的其他因素影响。因此,对于一般情况的健康人群,还

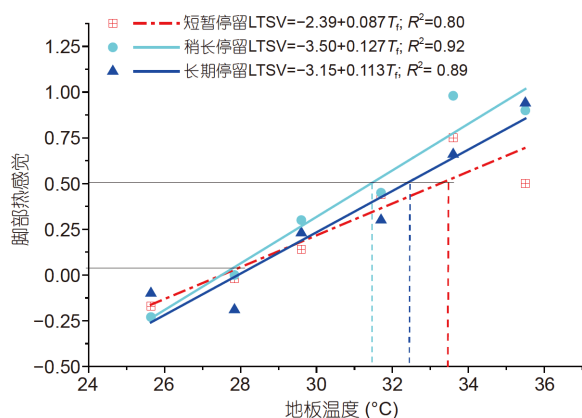


图3 (网络版彩色)地板温度与脚部热感觉的定量关系

Figure 3 (Color online) The relationships between floor surface temperatures and thermal sensation vote at feet

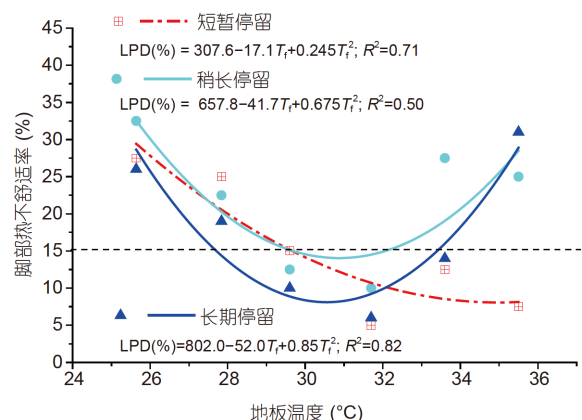


图4 (网络版彩色)地板温度与脚部不舒适率的定量关系

Figure 4 (Color online) The relationships between floor surface temperatures and percentage of discomfort at feet

难以证明稍微偏暖的地板温度会对脚部产生不适影响。而对于敏感或亚健康等特殊人群,其适宜的地板温度应日后进一步长期调查研究。

4 讨论

现有欧美和国际标准中关于地暖的地板最佳温度范围推荐值多在19~29°C,而我国标准部分参考了国际标准,推荐温度范围在24/25~26/27°C,上限28/29°C。文献总结表明,东亚地区人群普遍偏好较高的地板温度。实验结果表明,在夏热冬冷气候区,人们也偏好较温暖的地板温度而不是中性的地板温度。人体热反应在“短暂停留”与“长期停留”两种情况下存在差异,主要原因是人们的长期热经历与地暖环境存在差异,使得不同停留时间下脚部热平衡状态不一样。南方人群普遍供

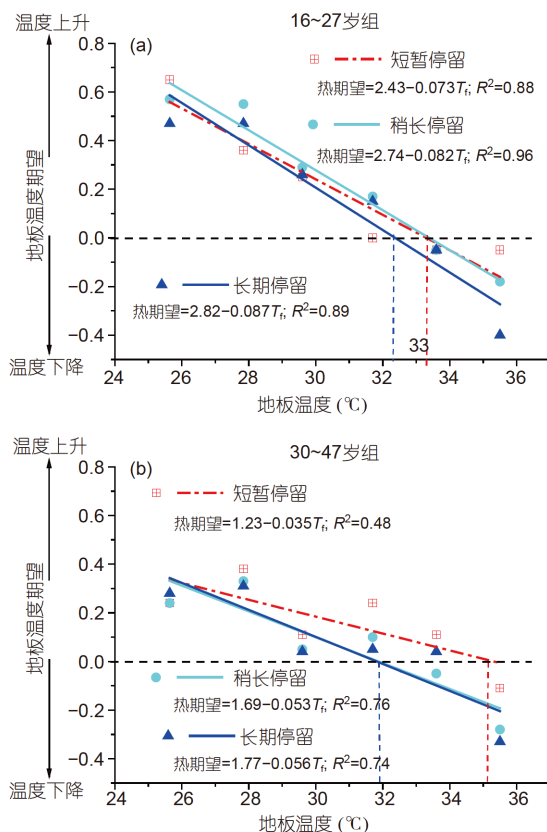


图5 (网络版彩色)不同年龄人群的热期望与地板温度关系。(a) 16~27岁年龄组;(b) 30~47岁年龄组

Figure 5 (Color online) The preferred floor surface temperatures for subjects of different ages. (a) The group with ages from 16 to 27; (b) the group with ages from 30 to 47

暖经历偏少,受试者有较多冷暴露经历,短暂停留时,受实验前经历影响,脚部热感觉较低且偏好较高地板温度。而长期停留时,随着实验时间增加,脚部热暴露量积累,且实验前经历影响权重也减少,这时偏高的地板温度反而成为一个不舒适因素。

本实验中,受试者是赤脚踩在地板上,这主要是考虑最不利状态,即赤脚不宜接触过高的温度和过快的热流量。当人们在穿着较厚鞋子时,地板对脚部不适性的影响会很小,即人体对地板温度更不敏感,能够接受的地板温度区间也会更大。因此,根据本实验基于赤脚状态给出的地板温度上限值,也能满足穿袜子或拖鞋时的地板温度安全上限值需要。实验表明,长期停留时,中性地板温度约为28°C,热舒适地板温度约为29~32°C,而2.5节显著检验显示,这些温度范围内不同年龄人群没有显著差异,因此没有对热感觉和热舒适投票分为两个年龄组来统计分析。短暂停留及稍长停

留时,影响地板温度的舒适性区间受到脚部接触物体材质、脚部皮肤温湿度^[35]、人体活动状态^[36]以及人们热经历^[37]等因素的综合影响,几乎没有一个地板温度可以满足所有情况下人的舒适性。

因此,根据本实验给出的地板温度设计值,主要适用于一般大多数情况下的夏热冬冷地区坐姿状态居民,其他情况可考虑适当进行修正。一般来说,站姿或运动状态时,人体可接受地板温度要比坐姿状态低1~2℃^[14]。相对于直接接触水泥板和瓷砖等,脚部对纺织品的可接受下限温度范围也更广^[14]。由于人体冷暴露经历越多,偏好的地板温度也会越高^[29],如果在未来南方冬季供暖大量普及造成人们热经历发生改变,相应的地板温度设定也可以适当调整。本实验的结论也较适用于南方青年人群体,对于儿童、老年人和病人等人群的特殊需求^[38]可能会有所差异。长期偏高或偏低的地板温度范围也会影响室内热湿环境^[39]和污染物分布状态^[40],长期处于其中对人体健康的影响^[41]目前还没有得到科学的量化证据。这些都需要进一步研究。

5 结论

本文通过标准解读、文献调研和人体实验研究,对地板辐射供暖系统的舒适性地板温度范围进行了分析。总结分析表明,东亚地区人群普遍偏好的地板温度要高于现有国际和我国标准中推荐值(约25~29℃)。人体实验研究表明,夏热冬冷地区人群也希望偏暖一些的地板温度。长期停留时,中性地板温度约为28℃,但热舒适地板温度约为29~32℃,期望的地板温度在32℃左右。在短暂停留时,可接受的地板温度较高(33.5℃时,TSV=+0.5),热舒适的地板温度范围为29~35℃,而期望的地板温度具有明显年龄差异:16~27岁组期望为33℃,30~47岁组期望为35℃,但两组人的差异随着停留时间增加逐渐消除。考虑到人体可接受地板温度受到多种复杂因素影响而可能发生变化,温度上限宜采用保守值。因此,针对夏热冬冷地区的分散式地板辐射供暖系统,建议将经常停留和短暂停留区域的地板设计温度范围分别定为25~29和28~32℃,上限值分别提高到32和34℃。

参考文献

- Guo Q. Chinese Architecture and Planning: Ideas, Methods and Techniques. Stuttgart: Edition Axel Menges, 2005
- Zhuang Z, Li Y, Chen B, et al. Chinese kang as a domestic heating system in rural Northern China—A review. *Energy Build*, 2009, 41: 111–119
- Bean R, Arch D K W K. Part 1: History of radiant heating and cooling systems. *ASHRAE J*, 2010, 52: 40–47
- Wu Y, Mäki A, Jokisalo J, et al. Demand response of district heating using model predictive control to prevent the draught risk of cold window in an office building. *J Build Eng*, 2021, 33: 101855
- Yeo M S, Yang I H, Kim K W. Historical changes and recent energy saving potential of residential heating in Korea. *Energy Build*, 2003, 35: 715–727
- Ming R, Yu W, Zhao X, et al. Assessing energy saving potentials of office buildings based on adaptive thermal comfort using a tracking-based method. *Energy Build*, 2020, 208: 109611
- Guo C Y. Heating in Southern China in 2014—The history and current situation of marketing development (in Chinese). *Heat Refrig*, 2014, 7: 52–53 [郭春雨. 南方供暖之2014——市场发展历史与现状篇. 供热制冷, 2014, 7: 52–53]
- Yu W, Li B, Jia H, et al. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. *Energy Build*, 2015, 88: 135–143
- Li B, Du C, Yao R, et al. Indoor thermal environments in chinese residential buildings responding to the diversity of climates. *Appl Therm Eng*, 2018, 129: 693–708
- Yao R, Costanzo V, Li X, et al. The effect of passive measures on thermal comfort and energy conservation. A case study of the hot summer and cold winter climate in the Yangtze River region. *J Build Eng*, 2018, 15: 298–310
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MHURD). GB/T 50785-2012, Evaluation standard for indoor thermal environments in civil buildings (in Chinese), 2012 [住房和城乡建设部. GB/T 50785-2012, 民用建筑室内热湿环境评价标准, 2012]
- ASHRAE. ASHRAE 55-2020, Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2020
- International Standardization Organization. ISO 7730:2005, Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the pmv and ppd indices and local thermal comfort criteria. Geneva, 2005
- International Standardization Organization. ISO/TS 13732-2:2001, Ergonomics of the thermal environment—Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces—Part 2: Human contact with surfaces at moderate temperature. Geneva, 2001
- International Standardization Organization. ISO 13732-1:2006, Ergonomics of the thermal environment—Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces—Part 1: Hot surfaces. Geneva, 2008

- 16 Olesen B W. Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet. *ASHRAE Trans*, 1977, 83: 41–57
- 17 European Committee for Standardization. EN 1264-2:2008, Water based surface embedded heating and cooling systems—Part 2: Floor heating: Prove methods for the determination of the thermal output using calculation and test methods (incorporates amendment a1: 2012). Brussels, 2013
- 18 European Committee for Standardization. EN 15377-1:2008, Heating systems in buildings—design of embedded water based surface heating and cooling systems—Part 1: Determination of the design heating and cooling capacity. Brussels, 2009
- 19 Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MHURD). GB 50019-2015, Code for design of heating ventilation and air conditioning in industrial building (in Chinese), 2015 [住房和城乡建设部. GB 50019-2015, 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范, 2015]
- 20 Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MHURD). GB 50736-2012, Code for design of heating ventilation and air conditioning in civil buildings (in Chinese), 2012 [住房和城乡建设部. GB 50736-2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范, 2012]
- 21 Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MHURD). JGJ 142-2012, Technical specification for radiant heating and cooling (in Chinese), 2013 [住房和城乡建设部. JGJ 142-2012, 辐射供暖供冷技术规程, 2013]
- 22 Munro A F, Chrenko F A. The effects of air temperature and velocity and of various flooring materials on the thermal sensations and skin temperature of the feet. *Epidemiol Infect*, 1948, 46: 451–463
- 23 Chrenko F. The effects of the temperatures of the floor surface and of the air on thermal sensations and the skin temperature of the feet. *Brit J Ind Med*, 1957, 14: 13–21
- 24 Sohn J. The state of thermal sensation researches in Korea and thermal comfort in ondol space. In: *Proceedings of the 10th Symposium on Human-Environment System*, 1986
- 25 Kong S, Sohn J. Thermal comfort criteria for Korean people in ondol heating system. *J Architect Inst Korea*, 1988, 4: 167–175
- 26 Song G S. Buttock responses to contact with finishing materials over the ondol floor heating system in Korea. *Energy Build*, 2005, 37: 65–75
- 27 Song G S. Effect of floor surface temperature on blood flow and skin temperature in the foot. *Indoor Air*, 2008, 18: 511–520
- 28 Zhang L, Emura K, Nakane Y. A proposal of optimal floor surface temperature based on survey of literatures related to floor heating environment in Japan. *Appl Human Sci*, 1998, 17: 61–66
- 29 Wu Y, Liu H, Chen B, et al. Effect of long-term thermal history on physiological acclimatization and prediction of thermal sensation in typical winter conditions. *Build Environ*, 2020, 106936, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106936>
- 30 Zhao Q, Lian Z, Lai D. Thermal comfort models and their developments: A review. *Energy Build Environ*, 2021, 2: 21–33
- 31 Wu Y, Liu H, Li B, et al. Behavioural, physiological and psychological responses of passengers to the thermal environment of boarding a flight in winter. *Ergonomics*, 2018, 61: 796–805
- 32 Liu H, Wu Y, Li B, et al. Seasonal variation of thermal sensations in residential buildings in the hot summer and cold winter zone of china. *Energy Build*, 2017, 140: 9–18
- 33 Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MHURD). JGJ/T 347-2014, Standard for test methods of building thermal environment (in Chinese), 2013 [住房和城乡建设部. JGJ/T 347-2014, 建筑热环境测试方法标准, 2014]
- 34 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine (AQSIQ). GB/T 18977, Ergonomics of thermal environment: Evaluation of thermal environment by subjective judgment scale (in Chinese), 2013 [国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18977, 热环境人类工效学: 使用主观判定量表评价热环境的影响, 2003]
- 35 Zhang S, Lin Z. Predicted mean vote with skin wettedness from standard effective temperature model. *Build Environ*, 2021, 187: 107412
- 36 Zhang S, Cheng Y, Olaide Oladokun M, et al. Improving predicted mean vote with inversely determined metabolic rate. *Sustain Cities Soc*, 2020, 53: 101870
- 37 Wu Y, Liu H, Li B, et al. Individual thermal comfort prediction using classification tree model based on physiological parameters and thermal history in winter. *Build Simul*, 2021, [doi: 10.1007/s12273-020-0750-y](https://doi.org/10.1007/s12273-020-0750-y)
- 38 Wu Y, Liu H, Li B, et al. Thermal adaptation of the elderly during summer in a hot humid area: Psychological, behavioral, and physiological responses. *Energy Build*, 2019, 203: 109450
- 39 Du C Q, Li B Z, Liu H, et al. Effect of air humidity on human acceptable thermal environments and evaluation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 311–324 [杜晨秋, 李百战, 刘红, 等. 空气湿度对人员可接受热环境的影响及评价. 科学通报, 2020, 65: 311–324]
- 40 Zhang Y P, Li B Z, Huang C, et al. Ten cities cross-sectional questionnaire survey of children asthma and other allergies in China. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 4182–4189
- 41 Cai J, Li B, Yu W, et al. Associations of household dampness with asthma, allergies, and airway diseases among preschoolers in two cross-sectional studies in Chongqing, China: Repeated surveys in 2010 and 2019. *Environ Int*, 2020, 140: 105752

Summary for “南方地板辐射供暖的舒适性地板温度范围”

Comfortable floor temperatures for radiant floor heating in Southern China

Yuxin Wu^{1,2,3}, Hong Liu^{2*}, Baizhan Li², Xingyu Lu², Lu Chen² & Risto Kosonen³

¹ School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

² Joint International Research Laboratory of Green Buildings and Built Environments (Ministry of Education), Chongqing University, Chongqing 400045, China;

³ Department of Mechanical Engineering, Aalto University, Espoo 02150, Finland

* Corresponding author, E-mail: liuhong1865@163.com

The use of floor radiant heating systems is increasing every day in Southern China. However, designers and users are constantly trying to find how to choose a suitable floor temperature range based on human comfort. This study summarized and analyzed the comfortable floor temperature range of radiant floor heating systems from three aspects: Standard interpretation, literature research, and human experiments. The thermal comfort standards, including GB/T 50785-2012, ASHRAE 55-2020, ISO 7730:2005, ISO/TS 13732-2-2001, and ISO 13732-1:2006, were reviewed. An acceptable range of 19–29°C (PD<10%) was recommended as the optimal floor temperature in these standards. In addition, building design codes EN 1264-2:2008 and EN 15377-1:2008, GB 50019-2015, GB 50736-2012, and JGJ 142-2012 were reviewed. The acceptable radiation floor temperature range for European building design codes was also specified as 19–29°C, whereas for Chinese design codes range of 24 (or 25)–26 (or 27)°C with an upper threshold of 28 (or 29)°C was recommended. However, a literature review of experiments and field studies showed that East Asia preferred higher floor temperatures than the recommended ranges in these standards, for example, 27–33°C in Korea and 26–30°C in Japan according to climate chamber studies, and could be as high as 33.6–38.8°C in a field study. Human experiments were conducted in a typical room with a radiant floor heating system located in a residential building in Chongqing. A total of 45 subjects were recruited to experience the heating system with six different floor temperatures: 25, 27, 29, 31, 33, and 35°C. The subjects were seated with bare feet to evaluate the perceptions related to floor temperatures as follows: Thermal sensation vote (TSV) of feet, thermal expectation of floor temperature, and thermal comfort of feet. The results of the experiments also revealed that the local people in the hot summer and cold winter (HSCW) climate zone of China preferred higher floor temperatures than that recommended in standards or neutral conditions. For long-term occupancy (30–120 min), the neutral floor temperature was approximately 28°C with an upper threshold of 32.5°C (i.e., TSV=+0.5), the comfort temperature range was approximately 29–32°C, and the preferred temperature was about 32°C for most subjects. For short-term occupancy (1 min), thermal comfort and preference were affected by various factors, and their values were different for subjects of different ages. For subjects aged 16–27 and 30–47, the preferred floor temperatures were 33 and 35°C for short-term occupancy, respectively, but the difference was reduced with time for long-time occupancy. Considering the fact that the acceptable floor temperatures could be affected by various factors such as floor materials, thermal history, activity levels, and skin conditions of occupants, conservation values from this study were recommended. Therefore, for an average person in normal conditions, the suitable floor temperature range in the HSCW climate zone of China is recommended to be 25–29°C with an upper threshold of 32°C for long-term occupancy and 34°C for short-term occupancy.

radiant floor heating, winter, floor temperature, thermal comfort, hot summer and cold winter climate zone

doi: [10.1360/TB-2020-1378](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1378)