

文章编号: 1673-5196(2020)02-0069-06

架空炕与落地炕采暖对室内环境影响的对比试验

李金平^{1,2,3,4}, 郭精韬^{1,2,3,4}, 王春龙^{1,2,3,4}, 李红博^{1,2,3,4}

(1. 兰州理工大学 西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 西北低碳城镇化支撑技术协同创新中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 4. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 落地炕和架空炕是目前北方农村冬季普遍采用的两种采暖设施, 它们的构造与密封性对采暖室内的热湿环境与空气质量有显著影响. 参照相关国家标准, 在甘肃省临洮县对使用落地炕与架空炕采暖的室内热环境和空气质量进行了连续的对比试验研究. 结果表明: 架空炕采暖室内日平均温度为 12.6 °C, 比落地炕采暖室内日平均温度 10.8 °C 高出 1.8 °C; 使用 PMV-PPD 指标评价发现, 架空炕室内热舒适度综合评价等级为 II 级, 落地炕室内综合评价等级为 III 级. 架空炕采暖室内空气质量 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 CO 指标优于落地炕采暖室内指标, 两铺炕采暖室内首要污染物均为 PM₁₀. 架空炕采暖室内空气质量等级为轻污染, 落地炕采暖室内空气质量等级为重污染.

关键词: 落地炕; 架空炕; 室内热环境; 室内空气质量; 室内舒适度

中图分类号: X82 **文献标志码:** A

Comparative test of effect of heating with suspended kang and landed kang on indoor environment

LI Jin-ping^{1,2,3,4}, GUO Jing-tao^{1,2,3,4}, WANG Chun-long^{1,2,3,4}, LI Hong-bo^{1,2,3,4}

(1. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou 730050, China; 3. Key Laboratory of Complementary Energy Supply System of Biomass Energy and Solar Energy, Gansu Province, Lanzhou 730050, China; 4. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Suspended kang and landed kang are two types of heating device used popularly in northern China in winter currently. Their structure and sealing performance have an obvious influence on the indoor thermal environment and indoor air quality. Referring to relevant National Standards, a continuous comparative experimental investigation of indoor thermal environment and air quality of heating with those two kinds of kang was conducted in county Lintao, Gansu. The result showed that the indoor daily mean temperature of heating with suspended kang would be 12.6 °C, being 1.8 °C higher than that of heating with landed kang (10.8 °C). It was found by employing PMV-PPD index evaluation that the comprehensive evaluation grade of indoor thermal comfortableness would be class-II for the suspended kang, and that of landed kang would be class-III. Indoor air quality PM_{2.5}, PM₁₀ and CO index of heating with suspended kang would be superior to that of landed kang, the indoor primary pollutant of heating with both types of kang would be PM₁₀. The indoor air quality grade of heating with suspended kang would be pollution, the indoor air quality grade of heating with landed kang would be heavy pollution.

Key words: landed kang; suspended kang; indoor thermal environment; indoor air quality; indoor comfortableness

随着中国新农村建设步伐的加快和人民生活水

平的提高, 人们对居住环境的舒适性也提出了更高的要求^[1]. 人在冬季每天 80% 的时间是在室内度过的, 室内空气质量优劣对人体健康影响极大. 研究表明, 室内空气污染引起的疾病在依赖生物燃料和低质量煤取暖的农村人群中更为严重^[2-6]. 炕作为中国

收稿日期: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51676094), 甘肃省国际科技合作专项(1604WKCA009), 兰州市人才创新创业项目(2017-RC-34)

作者简介: 李金平(1977-), 男, 宁夏中宁人, 博士, 教授, 博导.

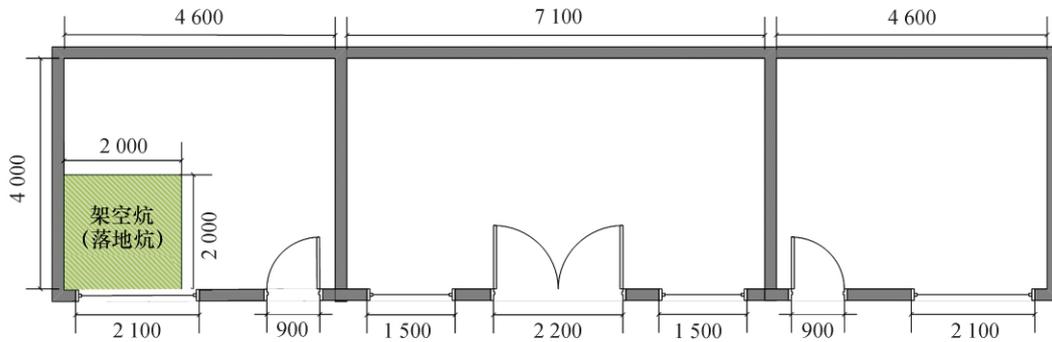
北方农村冬季使用最普遍的采暖设施,它的热性能与密封性对住房室内热环境与空气质量影响显著.落地炕在中国至今已应用了数千年,但其设计和搭建仍以民间工匠经验为主,存在炕体结构设计不合理、密封不严及热效率不高等缺点,导致室内热环境较差,室内空气污染物浓度严重超标^[7-12].架空炕主要依靠建筑结构学、流体力学及传热学等经验知识设计,具有热效率高、炕体换热面积大、密封性能好、燃烧完全(俗称不倒烟)和外形美观等优点,被认为是改善室内居住热环境、提高室内空气质量、缓解农村能源资源供求矛盾、改善生态环境的重要途径^[13-16].相关专家学者对农村炕采暖室内空气质量和热环境做了部分研究,但是至今还没有关于这两种应用最普遍的火炕对室内热环境与空气质量影响的对比试验研究.该研究对于进一步普及乡村居民对架空炕的优势性能的认识、提高农户换炕积极性、改善农村居民生存环境、促进新农村建设和保护生态环境具有重要的现实意义.为此,本文对甘肃省临

洮县落地炕与 2016 年新推广的架空炕的采暖室内热环境与空气质量进行了对比试验,研究了室内温度、湿度、PM₁₀、PM_{2.5}、CO、SO₂、CO₂、TVOC 浓度等指标,并使用 PMV-PPD 指标和空气质量指数法分别评价了炕采暖室内的热舒适度和空气质量.

1 试验

1.1 试验对象

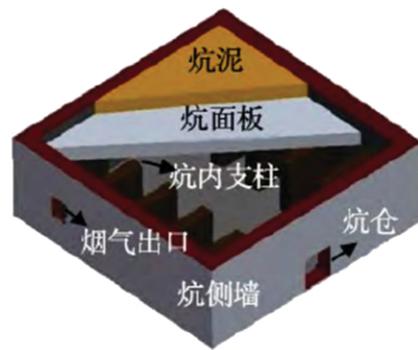
本文研究对象为甘肃省临洮县龙门镇三十铺村(N35°21',E103°57')两栋结构与朝向基本相同的建筑.每栋建筑均为坐北朝南,3 个房间,两栋建筑的西侧房内分别建有大小均为 2 m×2 m 的架空炕和落地炕,其结构图如图 1a 所示.架空炕由炕仓、炕底板、支柱、炕面板及烟道组成,炕底板和炕面板由混凝土板组成.炕内设计有长×宽×高为 5 m×0.36 m×0.16 m 的烟气循环通道.传统落地炕由炕内支柱、炕面板及炕侧墙组成,其中炕内支柱及炕面板均以土坯为建筑材料,其结构图如图 1b、1c 所示.



(a) 试验房屋结构图(mm)



(b) 架空炕内部结构



(c) 传统落地炕结构图

图 1 房屋结构图及两铺炕结构图

Fig.1 Structure drawings of experimental houses and two types of kang

1.2 测试方案

测试仪器: 2 套生产厂家、型号、量程及精度均一致的仪器仪表,具体参数见表 1 所列.测试时间: 2016 年 11 月 4 日~2016 年 11 月 18 日.测试内容: 室内外温度湿度等参数、室内外 PM₁₀、PM_{2.5}、CO、

SO₂、CO₂、TVOC 浓度.测点布置: PM₁₀、PM_{2.5}、CO、SO₂、CO₂、TVOC 浓度、室内温度、室内湿度、风速测点位置为测试房间的几何中心,测点高度与人体呼吸带相一致,距离水平地面高 1.5 m 处^[17-19].

试验采用对比分析的方法,落地炕与架空炕每

表 1 测试仪器参数

Tab.1 Parameter of test instrumentation

| 仪器 | 型号 | 量程 | 精度 |
|-----------------------|------------------------|---------------|----------------------|
| 温度传感器 | PT100 | -50~100 °C | ±0.15 °C |
| 湿度传感器 | STH-TW2 | 0~100% RH | ±2% RH |
| 二氧化硫检测仪 | GT-901-SO ₂ | 0~20 mg/kg | 0.01 mg/kg |
| 一氧化碳检测仪 | GT-901-CO | 0~100 mg/kg | 0.1 mg/kg |
| TVOC 检测仪 | GT-901-TVOC | 0~10 mg/kg | 0.1 mg/kg |
| 二氧化碳检测仪 | TEL7001 | 0~1 500 mg/kg | ±5% |
| PM ₁₀ 检测仪 | M9 | 0~1 000 μg | 1 μg·m ⁻³ |
| PM _{2.5} 检测仪 | M9 | 0~1 000 μg | 1 μg·m ⁻³ |
| 电子台秤 | TCS-60 | 0~60 kg | ±0.02 kg |

次添加相同质量自然风干的薪柴(即每次添加 3 kg 木屑+1.5 kg 玉米叶).每天由同一试验人员将燃料分别均匀地铺在两铺炕炕仓内,为了确保两铺炕炕仓内燃料在同一时间点火燃烧,两名试验人员约定在 9:45 与 16:30 同时点火.试验中温度、湿度等参数均通过安捷伦 34972A 数据采集仪实时采集和存储,数据采集和存储间隔为 10 s^[20].

2 室内外温湿度分析

对架空炕与落地炕测试周期内的室内温湿度和 11 月 10 日的室内温湿度进行分析可得图 2a 和 2b

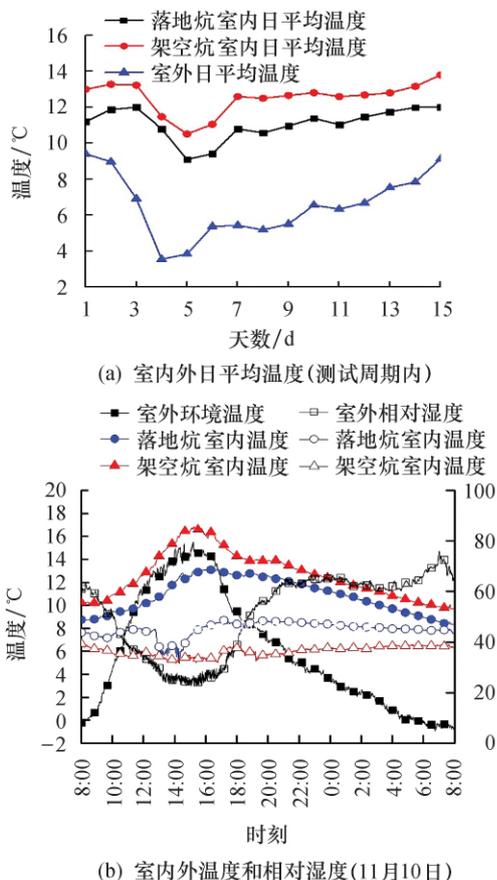


图 2 架空炕与落地炕采暖室内外温度和相对湿度

Fig.2 Indoor and outdoor temperature and relative humidity of heating with suspended and landed kang

所示曲线.室外环境温度昼夜变化大,但室内由于火炕的加热作用,室温均在较窄的范围内波动.进一步分析可知,当室外最高、最低和平均气温分别为 16.6、-2.8 和 5.4 °C 时,采用架空炕采暖的室内最高、最低和平均气温分别为 16.8、9.7 和 12.6 °C,而落地炕分别为 13.2、8.3 和 10.8 °C,可见,架空炕对室内增温效果较落地炕明显.这是由于架空炕底部架空,使其向室内的散热面积增大为落地炕的 1.4 倍.架空炕体内高温烟气可经烟道充分换热后排出于烟囱,烟气热量利用率高,而落地炕烟道短且炕体材料热阻大使得烟气热量大部分被外排损失,部分通过地面向下传递.从 18:00 点到次日 08:00 点,室内温度逐渐下降,是因为目前西北农村单体建筑均未对围护结构进行保温处理,室外气温降低导致房屋散热量增大,同时夜间炕温也开始下降,导致室内热舒适度变差.两种炕的采暖室内湿度均处于《室内空气质量标准》范围.架空炕和落地炕室内相对湿度日平均值分别为 36.4% 和 44.3%,室外相对湿度为 51.4%.

3 室内空气质量分析

对架空炕与落地炕测试周期内的室内空气质量和 11 月 10 日的室内空气质量数据进行分析可得图 3a~3f 所示图形曲线.图 3a 和 3b 分别为测试周期内架空炕与落地炕室内 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、CO₂、SO₂ 变化趋势,图 3c~3f 分别为 11 月 10 日架空炕与落地炕采暖室内 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、CO₂、SO₂ 浓度变化趋势.

对图 3a 和 3b 分析可得,整个测试周期内,架空炕采暖室内空气各指标浓度明显低于落地炕采暖室内浓度,架空炕采暖室内空气质量优于落地炕.测试周期内架空炕采暖室内 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、SO₂ 和 CO₂ 浓度范围分别为 70~153 μg/m³、283~423 μg/m³、0.06~2 mg/m³、0.03~0.11 mg/m³ 和 0.05%~0.07%,而落地炕采暖室内各浓度范围分别为 145~297 μg/m³、523~859 μg/m³、3.9~8.8 mg/m³、0.02~0.14 mg/m³ 和 0.05%~0.06%.对图 3c 和 3d 分析可得,落地炕采暖室内的 PM_{2.5} 含量明显高于架空炕采暖室内.上午 9:45 和下午 16:30 炕仓点火后,落地炕采暖室内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度急剧上升,随即达到峰值.PM₁₀ 与 PM_{2.5} 浓度变化趋势相同,架空炕和落地炕采暖室内 PM_{2.5} 峰值分别为 254 μg/m³ 和 531 μg/m³,PM_{2.5} 日均值浓度分别为 136 μg/m³ 和 297 μg/m³,分别超出国家标准 1.8 倍和 3.96 倍.架空炕采暖室内 PM₁₀ 浓度峰值

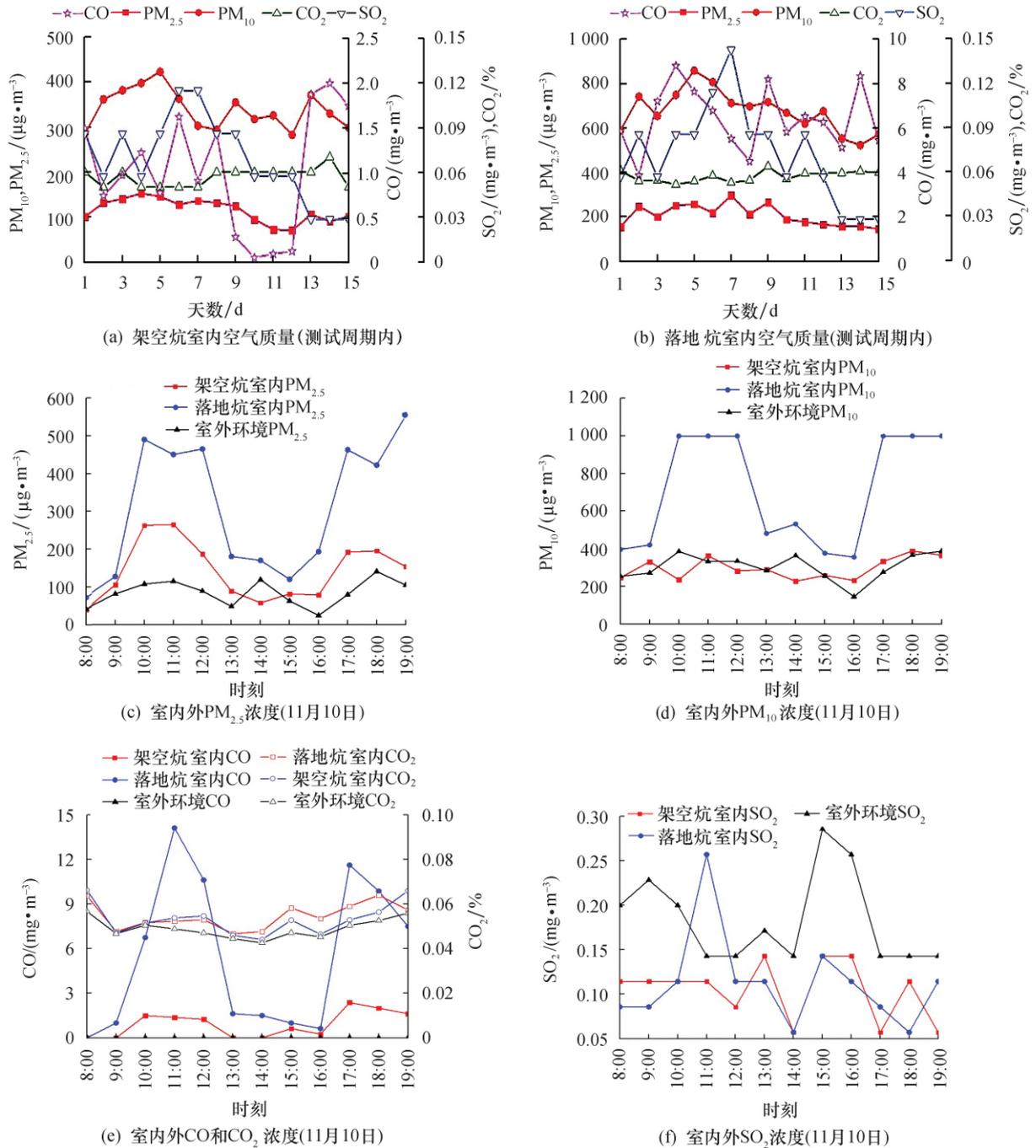


图 3 架空炕与落地炕采暖室内空气质量

Fig.3 Indoor air quality of heating with suspended and landed kang

为 388 μg/m³, 而落地炕室内浓度峰值超出 1 000 μg/m³, 两铺炕采暖室内 PM₁₀ 日均值浓度分别为 303 μg/m³ 和 713 μg/m³, 分别超出国家标准 2 倍和 9.5 倍。对图 3e 分析可得, 落地炕室内 CO 浓度变化曲线与 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 曲线变化趋势一致。架空炕和落地炕采暖室内 CO 含量峰值分别为 2.4 mg/m³ 和 14.1 mg/m³, 日均值浓度分别为 0.92 mg/m³ 和 5.52 mg/m³, CO 浓度日均值未超出国家准标规定的 10 mg/m³。落地炕采暖室内 CO₂ 浓度较架空炕

采暖室内高, 但两种炕采暖室内 CO₂ 浓度均在国标规定的 0.1 % 以内。对图 3f 分析可得, 架空炕和落地炕采暖室内 SO₂ 最大峰值分别为 0.14 mg/m³ 和 0.26 mg/m³, 均符合国标规定的 0.5 mg/m³ 以内。架空炕与落地炕相比采暖室内空气质量显著提高的主要原因是落地炕炕体结构设计不合理, 炕体密封性能较差, 而架空炕依据传热学和流体力学知识从炕体结构、搭建工艺及建筑材料上进行了改进, 烟气流顺畅且炕体密封效果好。

4 室内热舒适度及空气质量评价

4.1 室内热舒适度评价方法

PMV 热舒适模型是目前国内外应用最为广泛的室内热舒适评价模型,其综合了空气温度、风速、相对湿度、平均辐射温度、服装热阻和人体新陈代谢率 6 个影响因素^[21],其计算式如下:

$$PMV = [0.303e^{-0.036M} + 0.028] \{M - W - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99 \times (M - W) - p_a] - 0.42 \times (M - W - 58.15) - 1.73 \times 10^{-5} \times M(5867 - p_a) - 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) - 0.0014 \times M \times (34 - t_a)\} \quad (1)$$

式中: M 为人体新陈代谢量, met; W 为有用功量, 对大多数活动可忽略不计, met; t_a 为室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$; v_a 为室内空气流速, m/s; P_a 为水蒸气分压力, Pa; f_{cl} 为穿衣面积系数^[22]; t_r 为室内平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{cl} 为衣服外表面温度, $^{\circ}\text{C}$; h_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2/^{\circ}\text{C})$.

PPD(predicted percent dissatisfied) 预测不满意百分比指标,表示人群对热环境不满意的百分数,它与 PMV 的定量关系为^[23]

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad (2)$$

依据 GB/T 50785-2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》,整体评价指标等级见表 2 所列。

表 2 整体评价指标

Tab.2 Comprehensive evaluation indexes

| 等级 | 整体评价指标 |
|-------|-----------------------------------|
| I 级 | PPD ≤ 10% |
| II 级 | 10% < PPD ≤ 25% |
| III 级 | PPD > 25% |
| I 级 | -0.5 ≤ PMV ≤ +0.5 |
| II 级 | -1 ≤ PMV ≤ -0.5 或 +0.5 ≤ PMV ≤ +1 |
| III 级 | PMV < -1 或 PMV > +1 |

4.2 室内空气品质评价方法

评价方法采用最高分指数与平均分指数兼顾的空气质量指数法。

分指数 I_i : 由分指数有机结合而成的评价指数能综合反映室内空气品质的优劣。

$$I_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (3)$$

式中: C_i 为第 i 种污染物浓度, mg/m^3 ; S_i 为第 i 个污染物浓度标准值, mg/m^3 。

最大分指数: 分指数中的最大值。

$$I_{\max} = \max(I_1, I_2, \dots, I_n) \quad (4)$$

式中: I_i 为污染物因子的分指数; n 为评价因子个

数。

综合指数: 最大分指数 I_{\max} 与 i 个污染物质量分指数的平均值 $1/n \sum I_i$ 的几何平均数,其数值越大,反映综合污染越严重。

$$I = \sqrt{(I_{\max}) \left(\frac{1}{n} \sum I_i \right)} \quad (5)$$

室内空气品质等级按综合指数可分为 5 级,见表 3 所列。

表 3 空气质量指数评价模式

Tab.3 Evaluation mode of air quality exponent

| 综合指数 | 等级 | 评语 | 特点 |
|---------------------|-----|-----|---------------------------------|
| $I \leq 0.49$ | I | 清洁 | 适宜于人类生活 |
| $0.5 < I \leq 0.99$ | II | 未污染 | 环境污染物均不超标,人类生活正常 |
| $1.0 < I \leq 1.49$ | III | 轻污染 | 至少有 1 个污染物超标,除了敏感者外,一般不会发生急性中毒 |
| $1.5 < I \leq 1.99$ | IV | 中污染 | 一般有 2~3 个污染物超标,人群健康明显受害,敏感者受害严重 |
| ≥ 2.00 | V | 重污染 | 一般有 3~4 个污染物超标,人群健康受害严重,敏感者可能死亡 |

4.3 室内热环境与空气质量评价等级

使用 PMV-PPD 综合评价法和空气质量指数法对 11 月 10 日架空炕和落地炕采暖室内的热舒适度和空气质量进行评价,见表 4 和表 5 所列。架空炕和落地炕采暖室内的热舒适度评价等级分别为 II 和 III 级,架空炕和落地炕采暖室内的空气质量评价等级分别为 III 级轻污染和 V 级重污染。

表 4 PMV-PPD 综合评价等级

Tab.4 PMV-PPD comprehensive evaluation grade

| 采暖方式 | PMV | PPD | 综合评价 |
|-------|-------|-------|------|
| 架空炕采暖 | -0.87 | 21.23 | II |
| 落地炕采暖 | -1.21 | 35.51 | III |

表 5 空气质量等级及首要污染物

Tab.5 Air quality grade and primary pollutants

| 研究对象 | 首要污染物 | PM ₁₀ 超标倍数 | 综合指数 | 空气质量级别 |
|-------|------------------|-----------------------|------|----------|
| 架空炕室内 | PM ₁₀ | 2.03 | 1.47 | III(轻污染) |
| 落地炕室内 | PM ₁₀ | 4.75 | 3.43 | V(重污染) |
| 室外环境 | PM ₁₀ | 2.02 | 1.46 | III(轻污染) |

在整个试验周期内架空炕采暖室内热舒适度等级为 II 级和 III 级的天数分别占试验天数的 80% 和 20%。落地炕采暖室内热舒适度等级为 II 级和 III 级的天数分别占试验天数的 13% 和 87%。在整个试验周期内架空炕采暖室内空气质量 III 级轻污染和 IV 级中污染分别占试验天数的 73% 和 27%;落地炕采暖室内空气质量等级均为 V 级重污染。

5 结论

1) 燃烧相同质量薪柴(即 3 kg 木屑+1.5 kg 玉米叶)时,架空炕采暖室内最高、平均和最低气温分别为 16.8、12.6 和 9.7 °C,而落地炕采暖室内分别为 13.2、10.8 和 8.3 °C.架空炕较落地炕采暖室内增温效果显著,室内热舒适度显著提高.使用热舒适度综合评价指标 PMV-PPD 评价发现,11 月 10 日架空炕与落地炕采暖室内热舒适度等级分别为 II 级和 III 级.在整个试验周期内架空炕采暖室内热舒适度等级为 II 级和 III 级的天数分别占试验天数的 80%和 20%.落地炕采暖室内热舒适度等级为 II 级和 III 级的天数分别占试验天数的 13%和 87%.

2) 通过对两种炕采暖室内空气质量评价发现,架空炕采暖室内 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、CO₂、SO₂ 浓度指标均优于落地炕采暖室内,两种火炕采暖室内首要污染物均为 PM₁₀.采用综合空气质量指数法对两种火炕采暖室内空气质量评价发现,11 月 10 日架空炕与落地炕采暖室内空气质量等级分别为轻污染和重污染.在整个试验周期内架空炕采暖室内空气质量 III 级轻污染和 IV 级中污染分别占试验天数的 73%和 27%;落地炕采暖室内空气质量等级均为 V 级重污染.

参考文献:

[1] 李金平,王 磊,甄箫斐,等.西北农宅太阳能联合燃煤锅炉供暖的室内热环境 [J].兰州理工大学学报,2018,44(3):62-67.
 [2] 李 湘,魏泉源,魏秀英,等.农户室内空气污染现状案例分析 [J].农业工程学报,2006,22(增刊 1):231-235.
 [3] 魏晓明,魏泉源,魏秀英,等.不同炉灶和燃料类型对改善农户室内空气质量的影响 [J].农业工程学报,2006,22(增刊 1):236-239.
 [4] 张金良,帕拉沙提,刘 玲,等.中国农村室内空气污染及其对健康的危害 [J].环境与职业医学,2007,24(4):412-416.
 [5] FISCHER S,KOSHLAND C.Daily and peak 1h indoor air pollution and driving factors in a rural Chinese village [J].Environment Science and Technology,2007,41(9):3121-3126.
 [6] 高翔翔.北方农村传统采暖方式与室内热环境研究 [D].西安:西安建筑科技大学,2010.
 [7] PADILLA R P,SCHILMANN A,RODRIGUEZ R R.Respiratory health effects of indoor air pollution [J].The International

Journal of Tuberculosis and Lung Disease,2010,14(9):1079-1086.
 [8] CAO G,JOKISALO J,FENG G,*et al.*Simulation of the heating performance of the kang system in one Chinese detached house using biomass [J].Energy and Buildings,2011,43(1):189-199.
 [9] 谢栋栋.严寒地区农宅室内空气品质现场测试与分析 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
 [10] GAUTAM S K,SURESH R,SHARMA V P,*et al.*Indoor air quality in the rural india [J].Management of Environmental Quality,2013,24(2):244-255.
 [11] WEI H,JIANG Q Y,JI E J,*et al.*A study on thermal performance,thermal comfort in sleeping environment and solar energy contribution of solar Chinese kang [J].Energy & Buildings,2013,58(2):66-75.
 [12] 孔蔚慈.寒区冬季农村室内污染物的监测与控制 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
 [13] NIU S W,HU L L,QIAN Y J,*et al.*Effective pathway to improve indoor thermal comfort in rural houses:analysis of heat efficiency of elevated kangs [J].Journal of Energy Engineering,2015,142(4):1-11.
 [14] ZHI Q Z,ANDREW P Y,LIN D,*et al.*An evaluation and model of the Chinese kang system to improve indoor thermal comfort in northeast rural China-Part2:result analysis [J].Renewable Energy,2015,84(6):12-21.
 [15] ERIN O S,CURTIS W N,RYAN W A,*et al.*Indoor particulate matter in rural, wood stove heated homes [J].Environmental Research,2015,138(4):93-100.
 [16] 王昭俊,唐 瑞.严寒地区冬季农宅室内空气质量评价 [J].建筑科学,2016,32(2):48-53.
 [17] 重庆大学.民用建筑室内热湿环境评价标准:GB /T 50785-2012 [S].北京:中国建筑工业出版社,2012:1-56.
 [18] 国家环境保护局.室内空气质量标准:GB/T 18883-2002 [S].北京:中国标准出版社,2003:1-16.
 [19] 农业部.民用火炕性能试验方法:NY/T 58—2009 [S].北京:中国农业出版社,2009:1-18.
 [20] 李金平,李红博,郑 健,等.架空炕与传统落地炕热性能对比试验 [J].农业工程学报,2017,33(14):210-216.
 [21] FANGER P O. Assessment of man's thermal comfort in practice [J].British Journal of Industrial Medicine,1973,30(4):313-324.
 [22] 李 敏.适用于中国地区的热舒适服装热阻的计算方法研究 [D].北京:清华大学,2015.
 [23] 李伊洁,刘何清,高黎颖,等.关于 PMV 热舒适模型及指标的分析 [J].矿业工程研究,2016,31(2):70-75.