

严寒地区冬季农宅室内燃烧污染及相关性

王昭俊, 谢栋栋, 唐 瑞

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 为了解严寒地区冬季农宅室内空气污染的现状,对哈尔滨附近两个村 10 户农宅室内污染物 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO、 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、TVOC 和 NH_3 进行了现场测试,并分析了其相关性.结果表明: $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO、 CO_2 、 SO_2 和 NO_x 污染严重,超标率分别为 93%、75%、62%、23%、99% 和 64%,是室内主要的污染物; PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5}$ 与 CO 之间皆显著线性相关, SO_2 与 CO_2 、 NO_x 与 SO_2 之间皆线性相关;通过室内污染物间的相关性分析,提出了严寒地区冬季农宅室内空气品质主要检测指标和简易测试方法.

关键词: 室内空气污染物;检测指标;相关性;农宅;冬季

中图分类号: X508

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)06-0060-05

Indoor air pollutants and their correlation at rural houses in severe cold region in winter

WANG Zhaojun, XIE Dongdong, TANG Rui

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To explore the indoor air pollution at rural houses in severe cold region in winter, a field study was conducted at 10 rural houses in two villages around Harbin. The indoor pollutants including $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, CO_2 , SO_2 , NO_x , TVOC and NH_3 were tested and the correlation of pollutants were analyzed. The results showed that $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_x , CO_2 and CO were the main pollutants at rural houses in winter, with the overproof rates of 93%, 75%, 62%, 23%, 99%, 64%, respectively. There were good relations between PM_{10} and $PM_{2.5}$, CO and $PM_{2.5}$, respectively. In addition, the linear correlations were also found between SO_2 and CO_2 , NO_x and SO_2 , respectively. The main test indices of pollutants were given based on the regression analysis results. The test method of pollutants was proposed at rural houses in severe cold region in winter.

Keywords: indoor air pollutants; test indices; correlation; rural houses; winter

我国农村人口约占总人口数的 60%.几乎所有的农村居民以秸秆、薪柴、低质煤等作为燃料,这些固体燃料燃烧会造成严重的室内空气污染^[1-2].在我国每年由固体燃料燃烧造成的死亡人数高达 42 万^[3].因此,农村室内空气污染不容忽视.

目前一些学者对我国农宅的室内空气品质进

行了研究,如 Fischer 等对中国北方农村冬季室内 CO 和 PM_{10} 的测试结果表明,室内 CO 和 PM_{10} 污染严重^[4].刘丛林对东北地区 4 户典型农户室内空气品质的测试结果表明,冬季室内空气污染严重, PM_{10} 超标率最高^[5].郭建斌等对农户室内 $PM_{2.5}$ 、CO 与 SO_2 的相关性分析结果表明, $PM_{2.5}$ 与 CO、 SO_2 与 CO 皆线性相关^[6].

由于严寒地区冬季农宅主要以秸秆等为燃料烧炕和用土暖气分散供暖,而且供暖时间长达 6 个月以上,农宅室内空气质量堪忧.而目前关于该地区农宅室内空气品质的研究较少.为此,本研究于 2012—2013 年冬季对哈尔滨市周边地区农宅的室内污染物进行了测试.

收稿日期: 2013-06-06.

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAJ08B07);
哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目
(2013RFXXJ045).

作者简介: 王昭俊(1965—),女,教授,博士生导师.

通信作者: 王昭俊, wangzhaojun@hit.edu.cn.

农宅一般地处偏远地区,交通不便.由于测试参数多,颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)测试仪器昂贵且笨重,而标准规定的测试方法复杂,不适用于农村测试.因此,亟待提出农村住宅室内空气品质测试指标和简易测试方法.

1 冬季农宅室内主要污染物及来源

我国室内空气质量标准^[7]规定了影响室内

表1 农宅室内主要污染物、来源及危害^[8-11]

种类	主要来源	危害
PM_{10}	燃料燃烧、室外、吸烟	呼吸系统疾病、心肺疾病
$PM_{2.5}$	燃料燃烧、室外、吸烟	被吸入后直接进入支气管,引发哮喘、支气管炎、心血管等疾病
CO	燃料燃烧、吸烟	与血液中血红蛋白结合,引起中毒
CO_2	燃料燃烧、吸烟、人员	高浓度时造成呼吸不畅、头晕目眩
SO_2	燃料燃烧、吸烟	引起结膜炎、支气管炎、哮喘、肺气肿
NO_x	燃料燃烧、吸烟	作用于呼吸道深细部支气管及肺泡引起肺水肿,还可进入血液
TVOC	燃料燃烧、吸烟、家禽牲畜散发	引起中枢神经、呼吸、生殖系统异常,损伤DNA,有致癌、致突变作用
NH_3	粪便、人体散发、牲畜散发	对皮肤组织、上呼吸道有腐蚀作用,使人流泪、咳嗽、呼吸困难

2 冬季农宅室内污染物测试结果与分析

2.1 污染物测试样本选择及测试仪器

于2012—2013年冬季对严寒地区代表性城市哈尔滨市附近两个村10户典型农宅的室内空气污染物进行了测试,其基本信息如表2所示.

表2 农宅基本信息

编号	房间面积/ m^2	采暖方式	燃料形式
1	21	土暖气、火炕	秸秆、煤
2	21	土暖气、火炕	秸秆、煤
3	22	土暖气、火炕	煤
4	24	土暖气、地炕	稻草、煤
5	15	土暖气、火炕	秸秆、煤
6	15	土暖气、火炕	秸秆、煤
7	40	土暖气、火炕	秸秆、煤
8	34	土暖气、火炕	秸秆、煤
9	22	土暖气、火炕、火墙	秸秆、煤
10	8	土暖气、火炕	秸秆、煤

由表2可知,大多数农宅冬季采用火炕和土暖气采暖,秸秆和煤是农宅室内主要的燃料形式.根据农宅室内污染物的来源及危害,选择 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO、 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、TVOC和 NH_3 作为测试参数.

本次现场测试的仪器为:TSI 8532 粉尘测试仪,测量参数为 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ;TEL7001型 CO_2 检测仪;GT901、MIC系列便携式气体检测仪,采用

空气品质的15种室内污染物,包括 SO_2 、 NO_2 、CO、 CO_2 、 NH_3 、 O_3 、HCHO、苯 C_6H_6 、甲苯 C_7H_8 、二甲苯 C_8H_{10} 、苯并芘B(a)P、可吸入颗粒物 PM_{10} 、总挥发性有机化合物TVOC、氡 ^{222}Rn 和菌落总数.

根据室内空气质量标准规定的室内污染物的种类,分析农宅室内污染物实际来源,将严寒地区农宅室内污染物以及来源和危害总结如表1所示.

电化学或PID原理,其测量范围、分辨率等与农宅室内空气污染物的特点相对应.测试仪器参数见表3.

表3 室内空气污染物测试仪器及主要参数

序号	参数	仪器	量程/ ($mg \cdot m^{-3}$)	分辨率/ ($mg \cdot m^{-3}$)
1	$PM_{2.5}$ 、 PM_{10}	TSI8532 粉尘仪	0.01~150	0.001
2	CO_2	Tel 7001 CO_2 分析仪	39.3~1 964.3	1.960
3	CO	GT901 CO 检测仪	0~1250	0.125
4	SO_2	GT901 SO_2 检测仪	0~285.7	0.030
5	NO_x	GT901 NO_x 检测仪	0~200	0.020
6	NH_3	MIC 氨气检测仪	0~80.65	0.008
7	TVOC	GT901 TVOC 检测仪	0~12	0.012

2.2 标准值的单位转换

在我国室内空气质量标准中^[7,12],大多数污染物的含量以质量浓度的形式表示.而现场测试采用的测试仪器大都以体积浓度ppm作为单位,因此需要进行单位之间的转换.表4给出了将污染物体积浓度转换为质量浓度的转换系数.

表4 单位转换系数

测试参数	转换系数
SO_2	2.86
NO_x	2.04 ^[13]
CO	1.25
NH_3	0.81
CO_2	1.964
TVOC	1.2 ^[14]

2.3 测试结果分析与主要污染物测试指标

由于农民一般在卧室内停留时间较长,且卧室面积一般为 20 m^2 ,故在卧室中央设置1个测点;测点的高度与人的呼吸区高度一致,距地面高

表5 冬季农宅室内污染物测试结果

测试值	质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)							
	PM _{2.5}	PM ₁₀	CO	CO ₂	SO ₂	NO _x	NH ₃	TVOC
平均值	0.369	0.414	15.86	2 677.3	1.83	0.49	0.02	0.35
标准差	0.323	0.399	17.40	649.0	0.13	0.17	0.06	0.34
最大值	1.963	2.570	123.38	6 945.8	2.62	1.41	0.24	2.02
标准值	0.075	0.150	10.00	1 964.3	0.50	0.30	0.20	0.60

将测试结果与转换后的污染物标准限值进行比较,农宅室内污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、CO₂、CO、SO₂ 和 NO_x 超标率分别为 93%、75%、62%、23%、99% 和 64%;超标倍数分别为 3.9、1.8、0.4、0.6、2.6 和 0.6.可见我国严寒地区农宅室内 PM_{2.5}、PM₁₀、CO₂、CO、SO₂ 和 NO_x 污染严重.

NH₃ 和 TVOC 的平均质量浓度均未超标,其超标率与其他污染物相比也较小.说明严寒地区冬季农宅室内 NH₃ 和 TVOC 污染较轻.

燃料燃烧是影响农宅室内空气品质的主要因素,固体燃料特别是秸秆等生物质燃料的燃烧会释放大量的污染物,致使 PM₁₀、PM_{2.5}、CO₂、CO、NO_x 和 SO₂ 污染比较严重.由于农村住宅室内装修较少,TVOC 和 NH₃ 主要来源于室外家禽、牲畜及粪便.而较低的室外温度不利于 TVOC 和 NH₃ 的挥发,因而 TVOC 和 NH₃ 质量浓度处于较低水平,在绝大多数样本中均未超标.

PM_{2.5}、PM₁₀ 的平均质量浓度分别为 0.369、0.414 mg/m^3 .由此可见,PM_{2.5}(粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$) 的质量浓度占 PM₁₀(粒径小于 $10 \mu\text{m}$) 的质量浓度的比例超过 89%.由于小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的粒子会直接进入支气管对人体健康影响更大,因此村镇住宅内 PM_{2.5} 污染严重,应引起人们足够的重视.

综上所述,PM_{2.5}、PM₁₀、CO、CO₂、SO₂ 和 NO_x 是我国严寒地区农宅室内主要的污染物,应作为冬季农宅室内污染物测试指标.

3 相关性分析

3.1 PM_{2.5}与CO相关性分析

在严寒地区冬季农宅室内污染物的排放与燃料不完全燃烧有关.PM_{2.5} 和 CO 质量浓度存在较强的线性相关关系^[5].对室内 PM_{2.5} 与 CO 质量浓度进行线性拟合,结果如图1所示.

由图1可知,室内 PM_{2.5} 及 CO 质量浓度的线

性回归方程可以表示为

$$y = 0.0077x + 0.247. \quad (1)$$

式中: y 为 PM_{2.5} 质量浓度, mg/m^3 ; x 为 CO 质量浓度, mg/m^3 .

由 $R = 0.70, n = 40$ 计算 $F = 36.5, F \geq F_{0.995}(1, 38) \approx 8.83$ ^[6].可见,PM_{2.5} 与 CO 相关性显著,PM_{2.5} 的质量浓度可以通过 CO 的质量浓度预测得到.

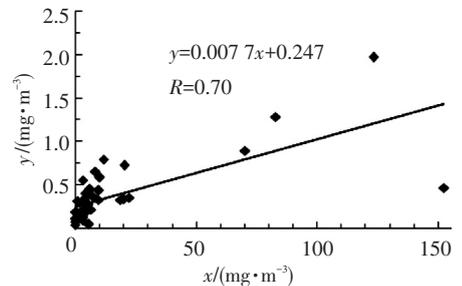


图1 PM_{2.5}和CO质量浓度的线性拟合曲线

3.2 PM₁₀与PM_{2.5}相关性分析

将 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 线性拟合,结果见图2.由图2可知,室内 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 质量浓度的线性回归方程为

$$y = 1.230x - 0.041. \quad (2)$$

式中: y 为 PM₁₀ 质量浓度, mg/m^3 ; x 为 PM_{2.5} 质量浓度, mg/m^3 .

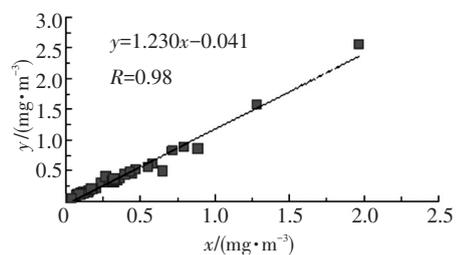


图2 PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度的线性拟合曲线

由 $R = 0.98, n = 40$ 计算 $F = 912, F \geq F_{0.995}(1, 38) \approx 8.83$.可见,PM₁₀ 与 PM_{2.5} 相关性非

常显著,PM₁₀质量浓度可以通过PM_{2.5}质量浓度预测得到。

3.3 SO₂与CO₂相关性分析

由于燃料燃烧时会同时释放CO₂、SO₂等,对SO₂和CO₂的质量浓度进行线性相关性分析,结果如图3所示。

由图3可知,SO₂与CO₂质量浓度的线性回归方程可以表示为

$$y = 0.0002x + 1.364. \quad (3)$$

式中: y 为SO₂质量浓度,mg/m³; x 为CO₂质量浓度,mg/m³。

由 $R = 0.58, n = 40$ 计算 $F = 19.3, F \geq F_{0.995}(1, 38) \approx 8.83$,相关性显著。在测试条件受限时,可以通过CO₂质量浓度粗略地估计SO₂的质量浓度。

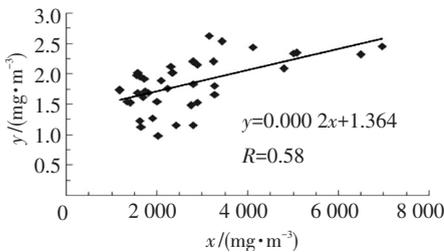


图3 SO₂和CO₂质量浓度的线性拟合曲线

3.4 NO_x与SO₂相关性分析

对室内NO_x和SO₂的质量浓度进行相关性分析,结果如图4所示。

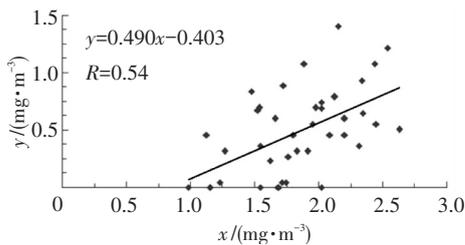


图4 NO_x和SO₂质量浓度的线性拟合曲线

由图4可知,NO_x与SO₂的质量浓度线性方程为

$$y = 0.490x - 0.403. \quad (4)$$

式中: y 为NO_x质量浓度,mg/m³; x 为SO₂质量浓度,mg/m³。

由 $R = 0.54, n = 40$ 计算 $F = 15.6, F \geq F_{0.995}(1, 38) \approx 8.18$,相关性显著。在测试条件受限时,可以通过SO₂质量浓度估计NO_x的质量浓度。

4 室内污染物简易测试方法

4.1 测试参数选择

由前面分析可知,严寒地区农宅室内主要污染物有PM_{2.5}、PM₁₀、CO₂、CO、SO₂和NO_x。PM_{2.5}和

PM₁₀测试仪器比较昂贵、且笨重、不便于携带,给农村现场测试带来了不便;而CO测试仪器简单、便携,且应用比较普遍。根据测试条件及简化程度不同,提出以下两种不同的测试方法。方法1根据室内污染物相关关系分析可知,农宅室内PM_{2.5}与CO、PM₁₀与PM_{2.5}的质量浓度相关关系显著,PM_{2.5}、PM₁₀的质量浓度可以通过CO的质量浓度由式(1)、(2)预测得到,采用该方法,需要测试CO、CO₂、SO₂和NO_x的质量浓度。方法2根据相关关系分析结果,表明室内SO₂与CO₂、NO_x与SO₂的质量浓度线性相关。

当现场无SO₂和NO_x测试仪器时,可通过式(3)由CO₂质量浓度得到SO₂质量浓度。NO_x的质量浓度可通过(4)由SO₂质量浓度预测得到。采用该方法需要测试CO₂和CO的质量浓度。

4.2 测点布置和测试仪器

测点应设在人员经常活动的卧室或客厅,测点布置依据文献[7],测点高度与人体呼吸区的高度一致。

室内空气品质的测试标准规定:采用称重法、化学分析法、气相色谱法等测试室内污染物。但上述测试分析方法操作复杂、设备昂贵、不便携带,无法实现实时监测^[15]。

由于通用方法操作繁琐,很多学者开始寻求室内污染物的快速检测方法,并通过与通用方法对比验证了快速检测方法的准确性^[16]。基于电化学、红外线、PID等原理的测试仪器便于携带、操作简单,在进行室内空气品质检测尤其是现场测试时,在精度允许的情况下可以采用便携式测试仪器。为了保证测试结果的准确性,在测试前应标准仪器校准。

4.3 检测时间

文献[17]中规定污染物检测时间:一氧化碳检测时间为8h均值;二氧化硫检测时间为24h均值;PM_{2.5}和PM₁₀都为24h均值。可见,一般以24h的平均质量浓度值作为标准限值。我国室内空气质量标准^[7]中规定CO、SO₂和NO_x取1h的平均体积浓度、CO₂、PM_{2.5}和PM₁₀都取24h的平均体积浓度作为限值。

燃料燃烧、人员活动、通风状况等是影响农村住宅室内空气品质的主要因素,室内污染物呈现周期性波动,尤其是燃料燃烧对室内污染物的质量浓度值影响较大。建议采取上一次生火开始至下一次生火前作为一个周期(一般为8h),取一个周期内的加权平均值作为限定值。

当研究室内居民一般的暴露水平时,可以在

用火前后两个小时之内取样.由于这期间室内污染物质量浓度变化较小,采样时间可以取 15 min.当研究用火期间的室内居民暴露水平及污染物的峰值时,可在用火期间连续取样 1~2 h.

5 结 论

1) 严寒地区农宅室内 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 、 CO_2 、 SO_2 和 NO_x 污染严重,超标率分别为 93%、75%、23%、62%、99% 和 64%,是室内主要的污染物. $PM_{2.5}$ 的质量浓度占 PM_{10} 的质量浓度 89% 以上,说明农宅室内 $PM_{2.5}$ 污染严重,应引起足够的重视.

2) 严寒地区农宅室内污染物 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的质量浓度, $PM_{2.5}$ 与 CO 的质量浓度之间皆显著线性相关. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度可通过 CO 的质量浓度进行预测.室内污染物 SO_2 与 CO_2 、 NO_x 与 SO_2 的质量浓度之间皆线性相关, SO_2 和 NO_x 的质量浓度可通过 CO_2 的质量浓度进行预测.

3) 通过室内污染物间的相关性分析,提出了严寒地区冬季农宅室内空气品质主要检测指标和简易测试方法.

参考文献

- [1] FULLERTON D G, SEMPLE S, KALAMBO F, et al. Biomass fuel use and indoor air pollution in homes in Malawi [J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2009, 66: 777-783.
- [2] SEMPLE S, GARDEN C, COGGINS M, et al. Contribution of solid fuel, gas combustion, or tobacco smoke to indoor air pollutant concentrations in Irish and Scottish homes [J]. *Indoor Air*, 2012, 22: 212-223.
- [3] ZHANG J, SMITH K R. Indoor air pollution from household fuel combustion in China: a review [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 65-83.
- [4] FISCHER S, KOSHLAND C. Daily and peak 1 h indoor air pollution and driving factors in a rural Chinese village [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41 (9): 3121-3126.
- [5] 刘丛林. 东北地区农村住宅室内空气质量研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [6] 郭建斌, 魏泉源, 魏秀英, 等. 农户室内污染物浓度相关性分析 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22 (增1): 243-247.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18883—2002. 室内空气质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [8] BAUMGARTNER J, SCHAUER J J, EZZATI M, et al. Indoor air pollution and blood pressure in adult women living in rural China [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119(10): 1390-1395.
- [9] 张颖, 赵彬, 李先庭. 室内颗粒物的来源和特点研究 [J]. *暖通空调*, 2005, 35(9): 30-36.
- [10] LIN S, JONES R, PANTEA C, et al. Impact of NO_x emissions reduction policy on hospitalizations for respiratory disease in New York State [J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2013, 23, 73-80.
- [11] YUAN B, LIU Y, SHAO M, et al. Biomass burning contributions to ambient VOCs species at a receptor site in the Pearl River Delta (PRD), China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(12): 4577-4582.
- [12] 国家环境保护局. GB 3095—1996. 环境质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [13] 黄亚军. 简论废气氮氧化物 (NO_x) 浓度单位 ppm 与 mg/m^3 的换算系数关系 [J]. *四川环境*, 2010, 29 (1): 24-25, 46.
- [14] 吴晓艳, 王金良. 嘉兴市住宅建筑室内 TVOC 的实测与分析 [J]. *洁净与空调技术*, 2009 (1): 50-53.
- [15] 邓桂昌. 室内便携式智能空气品质检测仪的研究与设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [16] 马天. 室内空气主要污染物甲醛的快速检测方法研究 [D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [17] ASHRAE standard 62.1-2007. Ventilation for acceptable indoor air quality [S]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2007.

(编辑 魏希柱)