

# 西北村镇单体建筑室内空气质量研究\*

刁荣丹<sup>1,2,3</sup>, 李金平<sup>1,2,3</sup>, 冯 荣<sup>1,2,3</sup>, 李修真<sup>1,2,3</sup>

(1.甘肃省生物质能与太阳能互供能系统重点实验室,兰州 730050;

2.兰州理工大学 西部能源与环境研究中心,兰州 730050;

3.西北低碳城镇支撑技术协同创新中心,兰州 730050)

**摘要:** 基于西北村镇传统单体建筑能源利用率低、室内空气质量差的现状,将传统建筑的供能系统改为冬季主要由太阳能热水系统为室内供暖且为住户提供生活热水,并对建筑室内空气质量进行试验测试,测试结果得到室内SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO含量的1h平均值,TVOC含量的8h平均值,CO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>含量的日平均值、室内风速和室内空气相对湿度在试验周期内都符合GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》的相关规定,室内温度平均值在太阳能热水系统供暖期间符合GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》的相关规定,经综合指数对室内空气质量进行评价,得出太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑空气质量级别属于Ⅰ级,空气质量评价结果为未污染。

**关键词:** 建筑室内环境; 室内空气质量等级; 综合指数评价; 西北村镇单体建筑; 太阳能热水系统  
中图分类号: TU241.91; TU83 文献标志码: A 文章编号: 1673-7237(2016)05-0043-06

## Indoor Air Quality Evaluation of Individual Building in Northwest Villages and Small Towns

DIAO Rong-dan<sup>1,2,3</sup>, LI Jin-ping<sup>1,2,3</sup>, FENG Rong<sup>1,2,3</sup>, LI Xiu-zhen<sup>1,2,3</sup>

(1.Biomass Energy and Solar Energy Complementary Power System Key Laboratory in Gansu, Lanzhou 730050, China;

2.Western China Energy and Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3.Northwest Low-Carbon Urban Support Technology Collaborative Innovation Center, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Aiming at the situation of low energy utilization and poor indoor air quality in winter of traditional buildings of northwestern villages and small towns, original heating by boiler was replaced to mainly by solar hot water system for indoor heating in winter and for households' domestic hot water. Indoor air quality of the individual building with solar energy hot water system in northwest villages and small towns was tested. Results show that, average value contents of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO of one hour, average value contents of TVOC of eight hours, daily maximum value contents of CO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub>, indoor air velocity and air relative humidity are all in line with the GB/T 18883—2002 "Indoor air quality standard". At the same time, average indoor temperature is in line with the GB/T 50824—2013 "Design standard for energy efficiency of rural residential buildings". Then indoor air quality of individual building in northwest villages and small towns is evaluated by using the comprehensive index, it is concluded that indoor air quality rating of the building is level I, air quality evaluation results is no pollution.

**Key words:** building indoor environment; indoor air quality level; comprehensive index; individual building in northwest villages and small towns; solar hot water system

## 0 引言

随着生活水平的提高,人们对居住环境的要求也

收稿日期: 2015-09-21; 修回日期: 2015-10-17

\* 基金项目: 国家“863”计划课题(2014AA052801); 甘肃省杰出青年科学基金项目(1210RJDA016); 兰州理工大学“红柳杰出人才计划”(Q201101); 甘肃省建设科技攻关项目(JK2010-29); 甘肃省教育厅项目(0803-06)

普遍提高,室内空气质量问题是现代社会面临的新的环境问题,它的产生和发展与社会经济和生活水平息息相关<sup>[1-2]</sup>;目前,国内外关于室内空气质量的研究工作主要集中于城市住宅以及办公楼等公共建筑,而对于村镇单体建筑室内空气质量的试验测试和深入研究极少,改良措施尤为欠缺。西北村镇传统建筑冬季

室内污染源主要来自于煤的燃烧,煤在燃烧时对居住者的健康造成极大损害<sup>[3]</sup>。国内外对室内空气质量的研究方法主要有理论计算<sup>[4-6]</sup>、试验研究<sup>[7-20]</sup>以及数值模拟<sup>[21-24]</sup>等,其中最常用的方法就是试验研究。将室内空气质量进行分析评价,为改善室内空气质量以及评估室内环境综合质量提供了科学依据。当前,室内空气质量评价方法主要分为量化监测和主观调查,其中量化监测是指直接用室内污染物指标来评价室内空气质量的方法,其主要评价方法有动态模式法、综合指数法<sup>[25-27]</sup>。

本文基于以上研究基础,对西北村镇传统建筑的供能系统进行改造,对太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑的室内空气质量进行试验测试,通过计算综合指数对室内空气质量进行评价,得出太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑的室内空气质量等级。

## 1 建筑与供能系统

### 1.1 太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑简介

西北村镇单体建筑位于甘肃省武威市民勤县张麻新村,建筑为南北朝向,砖混结构,外部尺寸为 $12.02\text{ m}\times 9.74\text{ m}\times 3.30\text{ m}$ ,建筑面积为 $117.07\text{ m}^2$ ;建筑内部结构分为3间卧室、1间客厅、1间厨房、一间卫生间与门厅;东北角卧室尺寸为 $3.00\text{ m}\times 3.36\text{ m}$ ,面积为 $10.08\text{ m}^2$ ;西北角卧室尺寸为 $3.00\text{ m}\times 3.30\text{ m}$ ,面积为 $9.90\text{ m}^2$ ;西南角卧室尺寸为 $3.00\text{ m}\times 3.60\text{ m}$ ,面积为 $10.80\text{ m}^2$ ;东南角厨房尺寸为 $3.00\text{ m}\times 3.60\text{ m}$ ,面积为 $10.80\text{ m}^2$ ;客厅尺寸为 $4.80\text{ m}\times 3.60\text{ m}$ ,面积为 $17.28\text{ m}^2$ ;卫生间尺寸为 $1.56\text{ m}\times 2.11\text{ m}$ ,面积为 $3.29\text{ m}^2$ ;门厅尺寸为 $3.74\text{ m}\times 3.23\text{ m}$ ,面积为 $12.08\text{ m}^2$ ;建筑东北角卧室与西北角卧室的北墙中间均有一扇窗,西南角卧室、厨房、客厅的南墙均有一扇窗,窗户均为双层玻璃窗,尺寸为 $1.70\text{ m}\times 1.43\text{ m}$ ;3间卧室、厨房和卫生间的门高度均为 $2.04\text{ m}$ ,除卫生间的门为玻璃门外,3间卧室与厨房的门都是木门,客厅门为铝合金框玻璃门,高度为 $2.31\text{ m}$ ,门厅门为常见的防盗门,高度为 $2.75\text{ m}$ 。建筑示意图如图1所示。

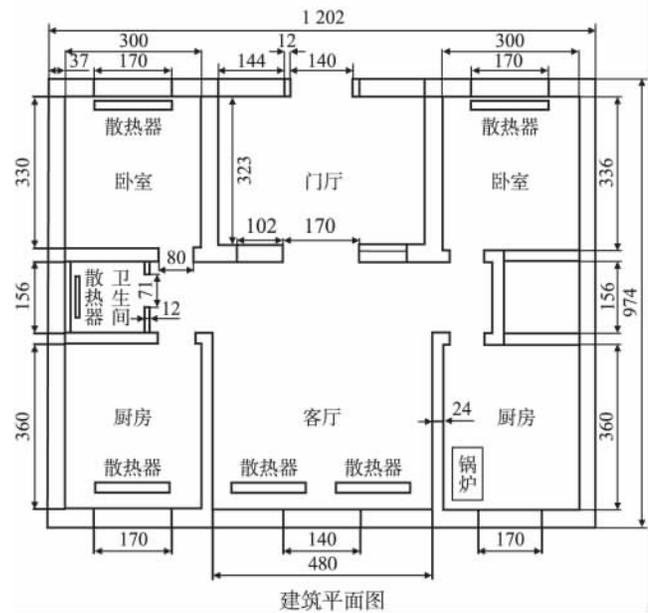
### 1.2 太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑供能系统简介

对建筑供能系统进行改造,将原有的由锅炉供暖改为主要由太阳能热水流经室内散热器为室内供暖,生活热水也改为由太阳能热水器提供。改造后的建筑供能系统如图2所示。

建筑供能系统主要分为置于屋顶的太阳能热水器、室内的散热器和辅助锅炉。位于屋顶的太阳能热水系统主要由7组太阳能热水器组成,其中为室内供暖的



建筑实物图



建筑平面图

图1 西北村镇单体建筑示意图

Fig.1 Schematic diagram of individual building of northwestern villages and small towns



图2 建筑供能系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of building energy supply system

是6组40支管的真空玻璃管太阳能热水器,型号均为 $\phi 58\text{ mm}\times 1\ 800\text{ mm}$ ,采光面积为 $5.02\text{ m}^2$ ,保温层厚度为 $55\sim 65\text{ mm}$ ,水容量 $314\text{ kg}$ 。剩下1组提供生活

热水的是 18 支管的真空玻璃管太阳能热水器,型号为  $\phi 58 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm}$ , 采光面积为  $2.24 \text{ m}^2$ , 保温层厚度为  $55 \sim 65 \text{ mm}$ , 水容量  $150 \text{ kg}$ 。根据 GB 50015—2003《建筑给排水设计规范》<sup>[29]</sup>取热水用水定额为  $40 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ ; 一家按照 3 口人计算, 每天需要热水的量为  $120 \text{ kg}$ , 则太阳能热水系统可以满足一户普通住户的日常生活热水需求。

将建筑原有的冬季由锅炉供暖改为主要由太阳能热水流经室内散热器为室内供暖。室内散热器为钢铝复合散热器, 东北角卧室与西北角卧室北墙中间各有一组, 西南角卧室南墙中间有一组, 客厅南墙有两组, 单组尺寸为  $2.30 \text{ m} \times 0.08 \text{ m} \times 0.63 \text{ m}$ , 卫生间西墙有一组, 尺寸为  $0.80 \text{ m} \times 0.08 \text{ m} \times 0.63 \text{ m}$ 。锅炉置于厨房西南角。室内供暖系统原理如图 3 所示。

如图 3 所示, 供暖时根据贮热水箱内水温选择供暖热源, 当天气晴朗时, 太阳能热水器集取足够的太阳能, 加热贮热水箱中的水, 贮热水箱中的热水通过供暖管路进入室内散热器为室内供暖, 此时关闭阀门(太阳能/锅炉供暖切换阀), 热水由供暖循环水泵驱动, 从贮热水箱由接口(太阳能热水器组热水进口)经水泵由下而上进入散热器为室内供暖, 散热之后由接口(太阳能热水器组回水口)返回至贮热水箱; 当连续雨雪天, 没有足够的太阳能热水, 贮热水箱内水温降低至不能满足供暖要求时, 此时开启阀门(太阳能/锅炉供暖切换阀), 关闭供暖循环水泵, 室内锅炉作为补充热源加热

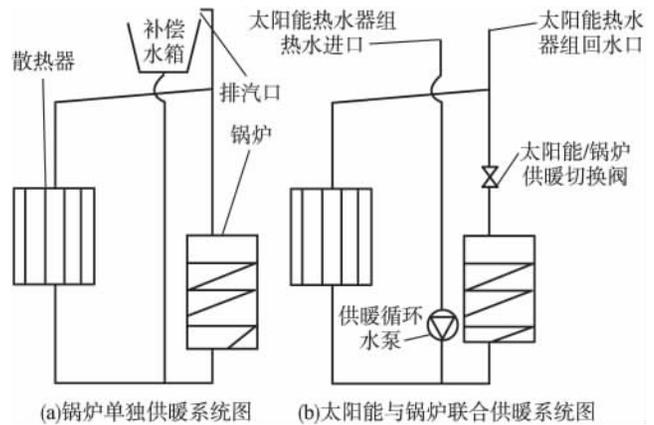


图 3 供暖系统原理图

Fig.3 Principle diagram of the heating system

循环水通过供暖管路进入室内散热器为室内供暖。

## 2 试验方法

### 2.1 选点要求<sup>[29]</sup>

(1) 采样点数量: 卧室、厨房、客厅分别测试室内空气含量, 每间房间的面积都小于  $50 \text{ m}^2$ , 为了测试结果更加精准, 每间房间选 5 个测点, 即房间四角加几何中心;

(2) 采样点位置: 避开窗口、门口, 距离墙壁  $0.8 \text{ m}$ ;

(3) 采样点高度: 与人体呼吸带的高度一致, 相对高度取  $1.5 \text{ m}$ 。

### 2.2 测试仪器

测试仪器参数如表 1 所示。

表 1 测试仪器

Table 1 Parameters of test instrument

仪器名称	规格型号	参数
温湿度传感器	STH-TW2-RHHT10AP2SO	量程: $-50 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , $0 \sim 100\% \text{ RH}$ 精度: A 级( $\pm 0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ ), $2\% \text{ RH}$
风速传感器	YGC-RMFS-24V-V	量程: $0 \sim 5 \text{ m/s}$ , 精度: $\pm(0.3+0.03 \text{ V}) \text{ m/s}$
二氧化硫检测仪	GT901-SO <sub>2</sub>	量程: $0 \sim 20 \text{ ppm}$ , 精度: $0.01 \text{ ppm}$
一氧化碳检测仪	GT901-CO	量程: $0 \sim 100 \text{ ppm}$ , 精度: $0.1 \text{ ppm}$
二氧化氮检测仪	GT901-NO <sub>2</sub>	量程: $0 \sim 10 \text{ ppm}$ , 精度: $0.01 \text{ ppm}$
可吸入颗粒物检测仪	M9	量程: $0 \sim 500 \text{ } \mu\text{g}$ , 精度: $1 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$
总挥发性有机物检测仪	TVOC	量程: $0 \sim 10 \text{ ppm}$ , 精度: $0.1 \text{ ppm}$
二氧化碳检测仪	TEL7001	量程: $0 \sim 10000 \text{ ppm}$ , 精度: $\pm 5\%$
温、湿度传感器	STH-TW2-RHHT10AP2SO	量程: $-50 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , $0 \sim 100\% \text{ RH}$ 精度: A 级( $\pm 0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ ), $2\% \text{ RH}$
风速传感器	YGC-RMFS-24V-V	量程: $0 \sim 5 \text{ m/s}$ , 精度: $\pm(0.3+0.03 \text{ V}) \text{ m/s}$
数据采集仪	34972A	
采集仪模块	34901A	采集测试数据

### 2.3 试验时间及频率

试验时间从 2014 年 12 月 12 日到 2015 年 3 月 3 日, 实时测试室内温度、空气相对湿度和风速, 室内  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{TVOC}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  的含量按照 GB/T 18883—

2002《室内空气质量标准》<sup>[29]</sup>每天 7:00—24:00 分时段进行采样测试, 测试时选择在不开门窗、无人活动时采样。

### 2.4 试验天气与太阳能供暖时间

试验期间多云天气占 7 d(2014 年 12 月 26 日,

2015年1月4日 2015年1月6日 2015年1月31日, 2015年2月1日 2015年2月2日 2015年2月3日), 全天无太阳;小雪天气占6d(2015年1月17日 2015年2月6日 2015年2月23日 2015年2月24日 2015年2月25日 2015年2月26日),全天无太阳;所以这13d是全天锅炉供暖;试验期间其余时间天气晴朗,由太阳能热水系统为室内供暖。

按照西北村镇传统建筑冬季的供暖习惯,试验期间太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑白天室内不供暖,这是由于一方面白天人在室内的时间不多(工作时不再室内),另一方面白天人处在室内时(午饭)室外日照辐射较强,环境温度较高,室内温度也较高,所以此时不需要为室内供暖。白天太阳能热水系统集取足够的太阳辐射,将太阳能热水器中的水加热,下午太阳下山、室内温度降低且人在室内感觉到冷,试验测得室内所有房间的平均温度降低至10℃(16:30左右)时,开启供暖循环泵,使用太阳能热水为室内供暖,直到住户晚上休息时(23:30-24:00)停止为室内供暖。

### 3 室内空气质量试验

#### 3.1 试验结果

根据 GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》<sup>[29]</sup>记录建筑每日室内温度、空气相对湿度及风速,室内SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、TVOC、CO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>的含量,将结果进行处理,得出室内温度、空气相对湿度及风速的日平均值,室内SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO含量的1h平均值,TVOC含量的8h平均值,CO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>含量的日平均值。

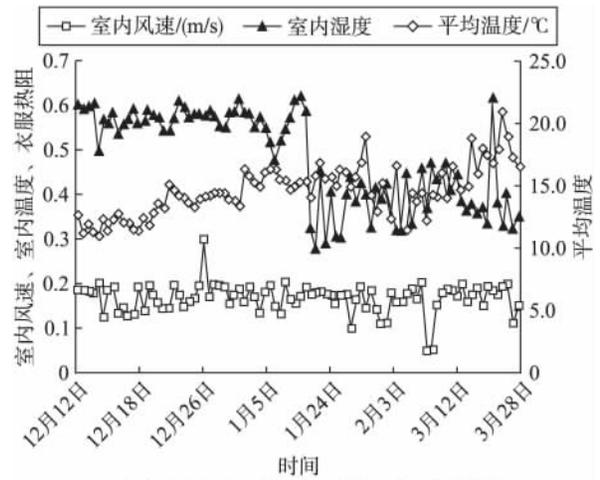
GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》<sup>[29]</sup>中SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、TVOC、PM<sub>10</sub>的单位为mg/m<sup>3</sup>,测量仪器的测试单位为ppm,二者的换算关系为<sup>[30]</sup>:

$$\text{mg/m}^3 = \frac{M}{22.4} \text{ ppm} \quad (1)$$

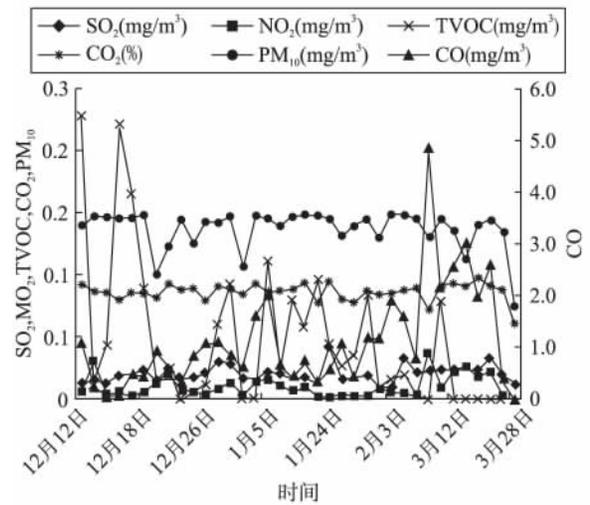
式中:M为气体摩尔质量,g/mol。

太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑的室内空气质量测试结果如图4所示。

从图4可以得出:室内SO<sub>2</sub>含量的1h平均值在试验周期内都小于GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》<sup>[29]</sup>中规定的标准值0.50 mg/m<sup>3</sup>;NO<sub>2</sub>含量的1h平均值在试验周期内都小于标准值0.24 mg/m<sup>3</sup>;CO含量的1h平均值在试验周期内都小于标准值10 mg/m<sup>3</sup>;TVOC含量的8h平均值在试验周期内都小于标准值0.60 mg/m<sup>3</sup>;CO<sub>2</sub>含量的日平均值在试验周期内都小于标准值0.10 mg/m<sup>3</sup>;PM<sub>10</sub>含量的日平均值在试验周期内都小于标准值0.15 mg/m<sup>3</sup>;室内风速在试验周期内都小于标准值0.20 m/s;室内空气相对湿度在试验周期内都在标准范围30%~60%内;室内温度平均值在太



(a)室内风速、室内湿度、平均温度试验结果



(b)室内SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、TVOC、CO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、CO含量试验结果

图4 建筑室内空气质量试验结果

Fig.4 Indoor air quality of the building

阳能热水系统供暖期间符合GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》<sup>[31]</sup>的相关规定。

#### 3.2 等级评价

综合指数评价法是用污染物浓度与标准浓度的相对数值,简单直观地描述各种污染物对空气污染的强度,表示污染物对空气污染程度的数值,称为空气质量指数,或者叫做空气污染指数(API(Air Pollution Index)),常用的指数评价模式如表2所示<sup>[32]</sup>。

表2 指数值计算公式  
Table 2 Formula of index value

	类型	公式
单因子指数	普通型	$I_i = \frac{C_i}{C_{si}}$
	最大值	$I_{\max} = \max(I_1, I_2, \dots, I_n)$
算数平均值		$I_p = \frac{1}{n} \sum I_i$
多因子指数	综合指数	$I = \sqrt{\frac{(\max I_i)^2 + \left(\frac{1}{n} \sum I_i\right)^2}{2}}$

普通单因子模式表示某个污染物浓度与其标准值之间的差距,可用于计算超标倍数、超标范围、超标率等指标,判定环境质量的优劣。 $C_i$ 为第*i*个污染物浓度实测值,mg/m<sup>3</sup>; $C_{ij}$ 为第*i*个污染物浓度标准值,mg/m<sup>3</sup>; $\max I_i$ 为单因子指数最大值; $n$ 为评价因子个数。

(1)分指数:

$$I_i = \frac{C_i}{C_{ij}} \quad (2)$$

式中: $C_i$ 为第*i*个污染物浓度实测值,mg/m<sup>3</sup>;

$C_{ij}$ 为第*i*个污染物浓度标准值,mg/m<sup>3</sup>。

用普通型单因子模式分别计算6种污染物的因子的分指数,计算结果如图5所示。

由图5的计算结果得出室内空气中SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、TVOC、CO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>的含量没有超标的,分指数 $I_i$ 的范围为0.006~0.997,空气中SO<sub>2</sub>的分指数最大值为0.088,最小值为0.021,平均值为0.041,NO<sub>2</sub>的分指数最大值为0.154,最小值为0.010,平均值为0.043,CO的分指数最大值为0.483,最小值为0.012,平均值为0.115;TVOC的分指数最大值为0.383,最小值为0.006,平均值为0.077,CO<sub>2</sub>的分指数最大值为0.987,最小值为0.617,平均值为0.869,PM<sub>10</sub>的分指数最大值为0.997,最小值为0.499,平均值为0.919。

(2)首要污染物:最大单因子指数 $I_{\max} = \max(I_1, I_2, \dots, I_n) = 0.997$ ,室内空气中主要污染物为PM<sub>10</sub>。

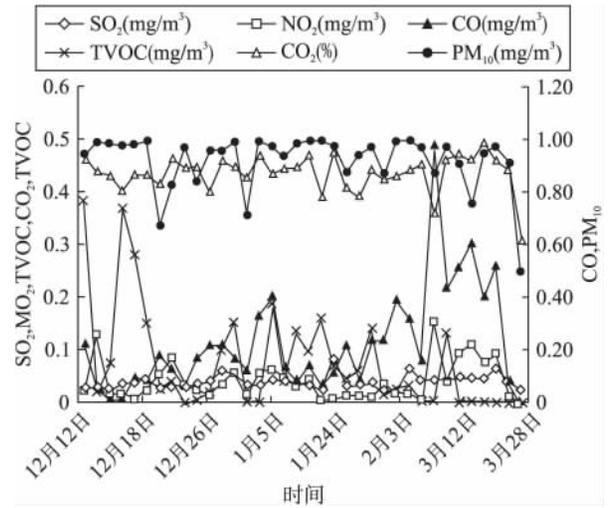


图5 分指数计算结果

Fig.5 Calculation results of subindex

(3)根据室内各评价因子的实测数据,利用表2公式计算各指数值,然后进行室内空气品质综合评价等级划分。

按照污染物浓度超标倍数、超标污染物的种数,以及不同污染物浓度对应的环境影响程度等,将室内空气质量指数范围进行客观分段,分指数及综合指数在0.5以下是清洁环境,可获得室内人员最大的接受率;若达到1.0可认为是轻度污染;达到2.0及以上则判为重度污染,室内空气质量等级按综合指数分为5级见表3<sup>[33]</sup>。

表3 室内空气质量等级

Table 3 Grades of indoor air quality

综合指数	级别	评价	对人体健康的影响
$X \leq 0.5$		清洁	适宜于人类生活
$0.5 < X \leq 1.0$		未污染	环境污染物均不超标,人类生活正常
$1.0 < X \leq 1.5$		轻污染	至少有1个环境污染物超标,除了敏感者外,一般不会发生急性中毒
$1.5 < X \leq 2.0$		中污染	一般有2~3个环境污染物超标,人群健康明显受害,敏感者受害严重
$> 2.0$		重污染	一般有3~4个环境污染物超标,人群健康受害严重,敏感者可能死亡

综合指数,先计算出最大指数与算术平均指数:

(a)最大指数:

$$I_{\max} = \max(I_1, I_2, \dots, I_n) = 0.997 \quad (3)$$

式中: $I_i$ 为污染物因子的分指数;

$n$ 为评价因子个数;

$I_{\max} = 0.997$ ,室内空气质量级别属于 级。

(b)算术平均指数:

$$I_p = \frac{1}{n} \sum I_i \quad (4)$$

经计算得 $I_p = 0.354$ ,室内空气质量级别属于 级。

(c)综合指数:

$$I = \sqrt{\frac{(\max I_i)^2 + \left(\frac{1}{n} \sum I_i\right)^2}{2}} \quad (5)$$

经计算得 $I = 0.747$ ,室内空气质量级别属于 级。

综上,所以太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑室内空气质量级别属于 级,空气质量评价结果为未污染。

#### 4 结论

基于西北村镇传统单体建筑能源利用率低、室内空气质量差的现状,将传统建筑的供能系统改为冬季主要由太阳能热水系统为室内供暖且为住户提供生

活热水,并对建筑室内空气质量进行试验测试,测试结果得到:太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑的室内空气质量符合 GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》及 GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》的相关规定,经综合指数对室内空气质量进行评价,得出太阳能热水系统供能的西北村镇单体建筑空气质量级别属于Ⅱ级,空气质量评价结果为未污染。

## 参考文献:

- [1]卢楠.建筑室内典型化学污染物的散发规律及评价研究[D].天津:天津大学,2010.
- LU Nan.The research of characteristics and evaluation of typical air chemistry pollution in buildings[D].Tianjin:Tianjin University,2010.(in Chinese)
- [2]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.
- XIE Dong-dong.Study on indoor air quality at rural houses in severe cold region[J].Harbin:Harbin Institute of Technology,2013.(in Chinese)
- [3]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.
- LIU Cong-lin.Research on indoor air at rural residential house quality in northeast[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2007.(in Chinese)
- [4]Sarbu I,Sebarchievici C.Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings[J].Energy and Buildings,2013,60:410-419.
- [5]Li Y,Miao Y,Bao J H.CFD simulation research on residential indoor air quality[J].Science of the Total Environment,2014,472:1137-1144.
- [6]Persily A K,Musser A,Emmerich S J,et al.Simulations of indoor air quality and ventilation impacts of demand controlled ventilation in commercial and institutional buildings[D].Gaithersburg:National Institute of Standards and Technology,2003.
- [7]Smith K R.Indoor air pollution in developing countries:recommendation for research[J].Indoor Air,2002(12):198-207.
- [8]Jonathan E,Smith S K R,Peabody J W.An assessment of programs to promote improved household stoves in China[J].Energy for Sustainable Development,2004,8(3):33-52.
- [9]Green D,Smith K R.The implications of graduation:why developing nations will never produce more green house gases than developed countries[J].Energy and Development,2002,28(1):15-40.
- [10]Johnson R,Sehmid J,Seiferi R.Assessment of indoor air quality in interior Alaskan homes[J].Cold Regions Engineering,2002,(12):218-228.
- [11]Elkilani A,Bouhanna W.Estimation of optimum requirements for indoor air quality and energy consumption in some residences in Kuwait[J].Environment International,2001,(27):443-447.
- [12]Pereira L D,Raimondo D,Corgnati S P.Assessment of indoor air quality and thermal comfort in Portuguese secondary classrooms:Methodology and results[J].Building and Environment,2014,81:69-80.
- [13]Corgnati S P,Ansaldi R,Fillipi M.Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons:assessment through objective and subjective approaches[J].Building Environment,2009,44(4):785-792.
- [14]ASHRAE.ANSI/ASHRAE Standard 55d thermal environmental conditions for human occupancy[C]//Atlanta:American Society of Heating,Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,2010.
- [15]Olesen B W,Parsons K C.Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730[J].Energy and buildings,2002,34(6):537-548.
- [16]Redlich C A,Sparer J,Cullen M R.Sick-building syndrome[J].The Lancet,1997,349(9057):1013-1016.
- [17]Huizenga C,Abbaszadeh S,Zagreus L,et al.Air quality and thermal comfort in office buildings:results of a large indoor environmental quality survey[J].Center for the Built Environment,2006,5(12):23-26.
- [18]Jurelionis A,Isevičius E.CFD predictions of indoor air movement induced by cold window surfaces[J].Journal of Civil Engineering and Management,2008,14(1):29-38.
- [19]Parikh J,Balakrishnan K,Laxmi V,et al.Exposure from cooking with biofuels:pollution monitoring and analysis for rural Tamil Nadu,India[J].Energy,2001,26(10):949-962.
- [20]Green C F.Assessment and modeling of indoor air quality[D].Ohio:University of Cincinnati,2002.
- [21]Pennise,David M.Greenhouse gas,indoor air pollution,and wood use implications of the charcoal fuel cycle[D].Berkeley:University of California,2003.
- [22]Hussein T,Hameri K,Heikkinen M S A,et al.Indoor and outdoor particle size characterization at a family house in Espoo-Finland[J].Atmospheric Environment,2005,39(20):3697-3709.
- [23]Heinzerling D,Schiavon S,Webster T,et al.Indoor environmental quality assessment models:A literature review and a proposed weighting and classification scheme[J].Building and Environment,2013,70:210-222.
- [24]Atthajariyakul S,Leephakpreeda T.Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort,air quality and efficient energy usage[J].Energy Buildings,2004,36(7):720-733.
- [25]汤晓芸.民用建筑室内空气质量分析与评价[D].上海:东华大学,2005:3.
- Tang Xiaoyun.Analysis and evaluation of indoor air quality of civil building[D].Shanghai:Donghua University,2005:3.(in Chinese)
- [26]戴萍.建筑室内空气品质分析与评价[D].大庆:大庆石油学院,2003:33.
- Dai Ping.Analysis and evaluation of building indoor air quality[D].Daqing:Daqing Petroleum Institute,2003:33.(in Chinese)
- [27]王东梅.室内空气品质评价系统研究[D].成都:西南交通大学,2004:7.
- Wang Dongmei.Research on indoor air quality evaluation system [D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2004:7.(in Chinese)
- [28]GB 50015—2003,建筑给排水设计规范[S].
- [29]GB/T 18883—2002,室内空气质量标准[S].
- [30]鲁传宏,赵望新,陈卫团,等.ppm与mg/m<sup>3</sup>换算关系探讨[J].中国卫生检验杂志,2008,1(13):1-11.
- LU Chuan-hong,Zhao Wangxin,Chen Weituan,et al.ppm and mg/m<sup>3</sup> conversion explore the relationship[J].Chinese Journal of Health Laboratory Technology,2003,1(13):1-11.(in Chinese)
- [31]GB/T 50824—2013,农村居住建筑节能设计标准[S].
- [32]朱赤晖.室内环境的舒适性评价与灰色理论分析研究[D].湖南:湖南大学,2012:46.
- ZHU Chihui.Reasearch on Comfort Evaluation and Grey Theory Analysis of Indoor Environment[D].Hunan:Hunan University,2012.(in Chinese)
- [33]李新,陈朝镇.分级型指数模式在室内空气质量评价中的应用[J].绵阳师范学院学报,2009,5(28):113-116.(in Chinese)
- LI Xin,Chen Chaozhen.Type classification index model application in indoor air quality evaluation[J].Journal of Mianyang Normal University,2009,5(28):113-116.(in Chinese)

作者简介:刁荣丹(1986),女,天津人,博士研究生,主要从事绿色建筑与建筑节能方面的研究(diaorongdan@126.com)。

通讯作者:李金平(1977),男,宁夏中宁人,工学博士,教授,博导,主要从事先进可再生能源系统方面的研究(lijinpings\_77@163.com)。