

# 甘肃黄土丘陵地区农户取暖用能需求的评价

牛叔文, 李怡欣, 丁永霞, 秦 静

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

**摘要:** 甘肃黄土丘陵地区冬季温度多处于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 农户取暖水平低。论文通过实地观测记录获取数据, 建立趋势面模型, 核算采暖期累计温差和实际用能消耗, 提出以 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室内温度为小康取暖标准。参考国家相关标准, 比较实际用能和应用节能技术下用能的热效率。结果表明, 陇东长官村和陇中河畔村农户采暖期累计温差分别为 $23\ 002\ \text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ 和 $36\ 390\ \text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ , 实际取暖能耗分别为 $926\ \text{kgce/a}$ 和 $1\ 199\ \text{kgce/a}$ 。农户取暖用能数量虽不少, 但目前只解决了小康水平下 $39.6\%$ 和 $46.6\%$ 的取暖需求。取暖用能的综合热效率只有 $17\%$ 左右。如果应用节能技术, 能耗会大幅降低, 提高综合热效率的潜力巨大。因此, 通过住房的节能改造和用能设施的改善来提高房屋的保暖性、降低单位面积的热损耗是今后解决取暖用能问题的主要方向。

**关键词:** 取暖用能; 热舒适性; 趋势面模型; 小康标准; 热效率; 黄土丘陵地区

**中图分类号:** F323.214

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3037(2011)02-0291-11

“温饱”自古以来就是人类最基本的需求。在中国文化中关于人类生存状态的表述无不与温饱相关联, 如饥寒交迫, 民攸温饱, 冷馁之苦, 衣不蔽体, 食不果腹, 等等。自旧石器时代人类钻木取火以来, 薪柴便成为人们烹煮食物、抵御寒冷、照明和防卫等用途的能源材料<sup>[1]</sup>, 这种初级形态的生物能源利用延续至今。人类栖息地从巢穴、洞穴、半地穴到房屋的变迁, 其主要动因是寻求取暖避寒。甘肃秦安大地湾遗址的考古发现, 火的利用在炊事、取暖等日常生活中的作用至关重要<sup>[2]</sup>。随着人类社会的进步, 需要更适宜的室内温度以满足舒适性的需求。

在自然条件下人类难以忍受 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的低温。在地球上的中高纬度和中高海拔地区, 冬季温度低, 不适于人类生存。因此, 改善居住环境、提高冬季室内温度, 成为人们谋求生存与发展的重要方面之一。长期以来, 中国在城市地区建立起了较为完善的供暖系统, 并给予城市居民以采暖补助。而农村居民的供暖没有纳入政府的公共支出范围, 取暖得不到保证。改革开放30多年来中国经济快速发展, 促进了城乡居民生活水平的提高, 9亿多农村人口的食物供给问题得到了较好的满足, 但能源短缺的问题依然存在, 特别是取暖用能的保证程度不高。还值得注意的是在目前我国小康建设的目标体系中, 没有取暖指标, 只有人均住房面积一项指标涉及了“温”的内容<sup>[3-4]</sup>。因此, 如何更好地满足农村居民对取暖用能的需求是我国全面建设小康社会不可回避的问题。研究农户室内温度的变化和取暖用能需求现实意义重大。

关于冬季室内取暖的研究, 国外的报道大多是针对城市住宅的。内容包括住房结构及

收稿日期: 2010-07-30; 修订日期: 2010-10-25。

基金项目: 中国国际科技合作项目(2008DFA62040)。

第一作者简介: 牛叔文(1955-), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态经济、区域发展等方面的研究。

E-mail: shuwenn@lzu.edu.cn

其建筑设计要求<sup>[5]</sup>、供暖系统调控<sup>[6]</sup>、影响室内温度的因子<sup>[7]</sup>、住房的热舒适性<sup>[5,8]</sup>。由于发达国家的城镇多以电力、天然气等清洁方便的能源为主,与我国的农村地区不具有可比性。R. J. Fuller 等<sup>[9]</sup>通过调查研究尼泊尔高海拔地区传统住房,提出了简易、低成本的措施以改善房间的热舒适性。这对我国的高海拔地区具有借鉴意义。

国内关于家庭取暖的研究主要集中在建筑设计和取暖设备及其效益等方面。陈滨等<sup>[10]</sup>调查了我国东北地区农户室内热环境以及炕和太阳能集热墙的性能,提供了有关新农村节能住宅室内热环境的基本信息。庄智等<sup>[11]</sup>评论了中国北方农村地区以炕为主的家庭主要供暖方式。赵靖等<sup>[12]</sup>提出了适用于中国北方取暖地区现有住宅建筑的热计量和改进热效率的技术路线。Y. Zhong 等<sup>[13]</sup>为中国北方取暖区域的住宅设计了改进热效率的激励机制。韩杰等<sup>[14]</sup>通过实地调查,比较分析了湖南省城市和农村住宅在自然通风条件下的热舒适性,结果表明农村居民比城市居民有更高的耐寒性。

本项研究的目的是基于实地观测数据,建立模拟温度变化的数学模型,对黄土丘陵地区农户冬季取暖用能加以模拟分析,提出一个适应农户小康建设要求的取暖用能指标,并估算通过节能技术的应用提高取暖热效率的潜力,弥补国内在这方面研究的不足。据此提出改进农村能源建设的政策建议,为加强农村公共服务、改善民生提供科学依据。

## 1 研究区域概况

甘肃黄土丘陵地区属中纬度、中海拔地带,气候温和,四季分明。冬季气温多在 0℃ 以下,取暖期一般需要 5 个多月。取暖方式以火炉和炕为主,主要使用煤、秸秆、薪草、畜粪等。由于农业开发历史久远,人类长期的垦殖活动以及对燃料的需求,植被日趋退化,土壤侵蚀严重,土地瘠薄,经济社会的发展受到很大制约。农民人均年纯收入低,生活仍较贫困。

多年来,为改变贫困落后面貌,这里坚持不懈地兴修基本农田、推广农业新技术、增加对土地的投入,农业生产能力提高,到上世纪末基本解决了食物短缺问题。同时,国家在这一地区实施了水土保持、小流域治理、退耕还林、天然林保护等工程措施来恢复当地的植被,投入巨大,但成效有限,其中的缘由是农户生活能源短缺,植被难以得到有效保护<sup>[15]</sup>。尽管电、煤、石油液化气等商品能源有了较多的利用,太阳能、沼气等新能源也在开发应用,但不少农户至今仍使用较多的生物质能。能源利用中存在使用方式简单、效率低下、温室气体排放量大和使用不够清洁方便的问题。目前,这一地区取暖用能占家庭生活用能的 50% 以上,农户在用能顺序上一般将炊事用能放在优先位置,因此取暖用能的保障程度低,影响了居民生活水平的改善和生态建设的成效<sup>[15-16]</sup>。

此次研究分别在陇东和陇中黄土丘陵地区各选取了一个村进行观测,定时记录室内外的温度变化。相关情况如表 1 所示。

表 1 2008 年两个观测村的相关情况

Table 1 Relative situations of the two villages in 2008

| 地区           | 经纬度                  | 海拔/m  | 年平均气温/℃ | 降水量/mm | 农民年人均纯收入/元 | 室内取暖方式 | 主要燃料  | 辅助燃料  |
|--------------|----------------------|-------|---------|--------|------------|--------|-------|-------|
| 陇东宁县<br>长官村  | 35°29'N,<br>107°44'E | 1 265 | 10.3    | 433    | 2 385      | 火炉、炕   | 煤炭    | 秸秆、薪柴 |
| 陇中安定<br>区河畔村 | 35°42'N,<br>104°56'E | 1 742 | 7.6     | 380    | 2 153      | 火炉、炕   | 秸秆、煤炭 | 驴粪、薪草 |

## 2 研究思路与方法

### 2.1 研究思路

定点观测农户室内、外温度数据。建立数学模型,模拟温度的日变化及整个取暖期的变化过程。假设室内、外温差主要为取暖加热的结果,即室内温度高于室外温度的部分是燃料消耗所产生的热量补偿的作用。基于累积温差和实际取暖用能的数量,可计算出农户要享受到一个合理的室内舒适温度——小康水平的室内温度标准时,所需要的热量或燃料数量。在一定的收入水平下,农户的支付意愿和支付能力决定了取暖状况。通过比较实际取暖用能数量和应用节能技术时较为理想的用能数量之差,可以估算提高取暖用能热效率的潜力,为改善农户的取暖状况提供有益的信息。

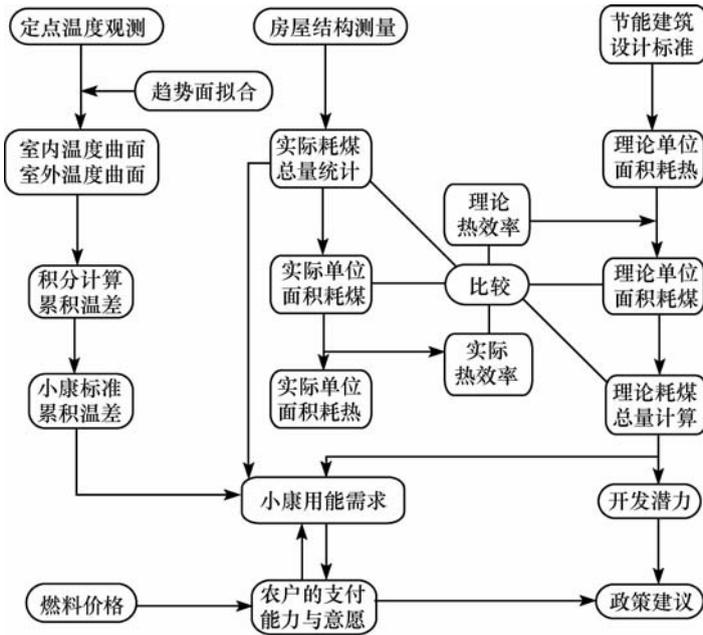


图1 研究方法流程

Fig.1 Flow chart of the research method

### 2.2 方法设计

#### 2.2.1 资料获取

在宁县长官村和安定区河畔村各随机选取3户房屋结构相近的农户进行观测。观测期从2008-10-01至2009-03-31,共6个月182d,覆盖了整个取暖期。在每天9:00和21:00观测室内、外温度,同时每半月进行一次温度日变化的观测,每3h观测一次,共12d。另外,利用GPS获取2个村的海拔和经纬度,实地测量6户的住房结构、大小及门窗尺寸,记录各户取暖用能方式、燃料种类和数量,较为全面地掌握与取暖用能相关的信息。

#### 2.2.2 建立计量累积温差的模型

设  $x_i$  为一日内温度的时间变化,  $y_j$  为观测期内温度的日期变化,  $z_{ij}$  为实际观测温度。温度变化的趋势值拟合值为  $\hat{Z}_i(x_i, y_j)$ , 则有:

$$z_{ij}(x_i, y_j) = \hat{Z}_i(x_i, y_j) + \varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \tag{1}$$

将式(1)用多项式展开,可用最小二乘方法求得 $\hat{Z}_i$ ,建立趋势面模型。可分别得到室内、外温度拟合值曲面。在 $x_i, y_j$ 和 $z_{ij}$ 三维空间中温度变化为一个曲顶柱体,其基面为 $z_{ij}$ 值最小时的坐标平面( $\min z_{ij}(x_i, y_j)$ ),顶面为拟合的趋势面。这个曲顶柱体由趋势面至基面的垂直空间范围构成,其体积可用趋势面模型的二重积分来表达,如式(2):

$$T = \iint_D \hat{Z}(x, y) dx dy \quad (2)$$

由于室内与室外温度不同,两个柱体体积之差即实际温度补偿量,则有:

$$\Delta T_1 = T_{\text{indoor}} - T_{\text{outdoor}} \quad (3)$$

式中: $\Delta T_1$ 为累积温差( $h \cdot ^\circ C$ ), $T_{\text{indoor}}$ 为室内温度曲顶柱体体积, $T_{\text{outdoor}}$ 为室外温度曲顶柱体体积。

### 2.2.3 农村小康生活水平取暖用能标准及其估算

周中仁等在研究中国北方农村小康家庭能源消费结构演变时认为,取暖用能消费是北方农村生活水平的一个重要指标<sup>[17]</sup>,但他们并没有给出和论证这个指标。在国家《民用建筑节能设计标准 JGJ26—95》<sup>[18]</sup>(以下简称《设计标准》)中,将 $18^\circ C$ 作为“室内基准温度”。国家于2003年颁布实施的《室内空气质量标准》<sup>[19]</sup>规定,冬季采暖期的室内温度为 $16 \sim 24^\circ C$ 。鉴于研究区域农户收入水平较低的实际,笔者认为,取低线 $16^\circ C$ 作为农村小康取暖用能的室内温度标准是可行的,即可满足初步热舒适性的需要,同时农户的经济负担不致过重。

室内温度由 $T_{\text{outdoor}}$ 增加到 $T_{\text{indoor}}$ ,需要消耗一定数量的燃料。根据用能的记录,可将实际消耗的燃料 $W_1$ 折合为标准煤(kgce):

$$W_1 = \sum_{i=1}^n w_i e_i \quad (4)$$

式中, $w_i$ 为第 $i$ 种取暖用具所消耗的燃料, $e_i$ 为第 $i$ 种燃料折标煤系数。

在房屋结构、用能方式和燃料使用比例不变的情况下,小康水平的用能可以通过下式估算出来:

$$\Delta T_2 = T_{16} - T_{\text{outdoor}} \quad (5)$$

$$W_2 = \frac{\Delta T_2 \cdot W_1}{\Delta T_1} \quad (6)$$

式中: $T_{16}$ 是室内温度为 $16^\circ C$ 时的柱体体积, $\Delta T_2$ 为室内外累积温差( $h \cdot ^\circ C$ ), $W_2$ 为小康水平下燃料消耗数量(kgce)。

### 2.2.4 取暖用能成本与农户支出的关联分析

基于燃料的市场价格可以核算农户取暖用能的成本,进而计算其占农民纯收入的比例。在农民收入不变的情况下,室内温度要达到 $16^\circ C$ 以上,取暖用能的成本会相应增加。

### 2.2.5 室内热量损失与热效率分析

改善室内热舒适性的途径有三个方面的:一是增加用能数量,主要取决于农民收入;二是改善房屋保暖性;三是提高用能设施的热效率。从后两个途径解决问题需要分析房屋的热量损失和用能设施的热效率。

当室内温度高于室外时,热量会通过墙体、门、窗和屋顶等围护结构的热扩散过程不断流失。需要不断消耗燃料才能保持一定的室温。根据《设计标准》,单位建筑面积通过围护

结构的传热耗热量可用下式计算:

$$q_H = (t_i - t_e) \sum_{i=1}^m \varepsilon K F_i / A_i \tag{7}$$

式中: $q_H$  为单位建筑面积的热量损失( $W/m^2$ ), $t_i$  为采暖期平均室内温度( $^{\circ}C$ ), $t_e$  为采暖期平均室外温度( $^{\circ}C$ ), $K$  为传热系数( $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ), $\varepsilon$  为围护结构传热系数的修正系数, $F_i$  为围护结构的面积( $m^2$ ), $A_i$  为建筑面积( $m^2$ )。

由于燃料的热量难以全部利用,考虑到综合热效率可以根据  $q_H$  计算采暖期单位面积耗煤量的指标:

$$q_c = q_H \cdot p \cdot 24 / H_e \cdot \eta \tag{8}$$

式中: $q_c$  为单位面积的耗煤量(标准煤, $kg/m^2$ ), $p$  为采暖期天数, $H_e$  为标准煤热值( $8\ 140\ W \cdot h/kg$ ), $\eta$  为热效率( $\%$ )。

用式(7)和(8)计算出的  $q_H$  和  $q_c$  可视为实施节能技术后的理论值。将实际耗煤量代入式(8)也可以计算出实际的综合热效率  $\eta$ 。

### 3 结果分析

#### 3.1 室内、外观测温度的变化

在宁县长官村和安定区河畔村的温度观测表明,3 户资料的一致性高,取平均值可代表当地室内外温度的变化。从 2008-10-01 至次年 03-31,9:00 和 21:00 温度在 1 月最低,两头较高,182 d 中呈正“U”型曲线。从一日 24 h 来看,记录温度下午 15:00 最高,凌晨 6:00 最低,一日内的温度变化呈倒“U”型曲线。虽然温度变化具随机性,但 2 个“U”型变化趋势明显。长官村的室外温度变化参见图 2,室内由于加热后温度变化较为平缓。河畔村的温度变化类似。

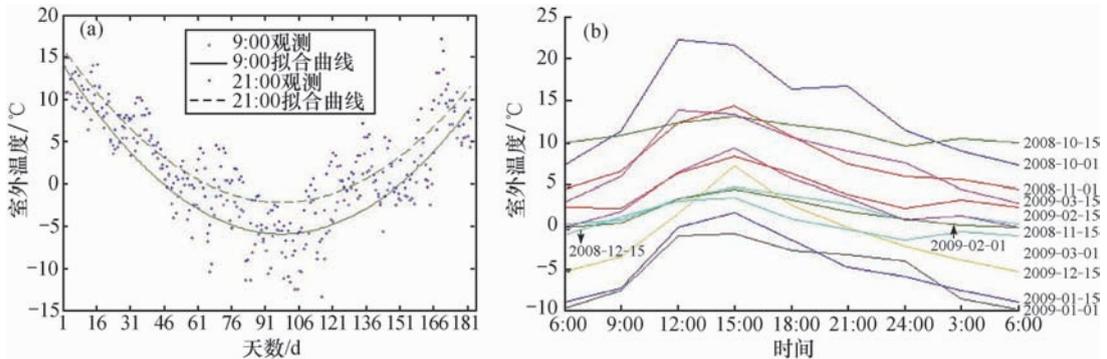


图2 陇东长官村室外温度的变化

Fig. 2 Outdoor temperature change in heating period of Zhangguan Village

长官村和河畔村观测到的室外最低温度分别为  $-15\ ^{\circ}C$  和  $-19\ ^{\circ}C$ ,室内最低温度  $-1\ ^{\circ}C$  和  $-2.3\ ^{\circ}C$ ,室内温度低于  $5\ ^{\circ}C$  的日子有 40 d 和 26 d 之多。这表明农户取暖水平低,远未达到热舒适性的要求。

#### 3.2 温度变化的趋势面模拟和温差累积

利用 MATLAB7.0 对观测温度资料进行趋势面拟合,二次面模型的效果好。这是因为温度在观测期和一日内的变化都为“U”型之故,结果如表 2 所示。MATLAB 绘制的曲面图可旋转,能够从不同侧面清晰地表现温度变化的过程。2 个村室内外温度变化如图 3 所示。

表 2 2 个观测村温度变化的趋势面模型

Table 2 Trend surface models about temperature change of the two villages

| 地区  | 模型表达式  | $R^2$   | $F_{0.01}$ | $F$    |
|-----|--|---------|------------|--------|
| 长官村 | $T_{\text{indoor}} = 11.513 0 + 0.605 4x - 0.185 4y - 0.022 1x^2 + 0.000 2x \cdot y + 0.000 9y^2$  | 0.650 5 | 4.29       | 168.62 |
|     | $T_{\text{outdoor}} = 12.112 0 + 0.911 8x - 0.394 2y - 0.038 2x^2 + 0.000 4x \cdot y + 0.002 0y^2$ | 0.724 9 | 4.29       | 238.74 |
| 河畔村 | $T_{\text{indoor}} = 13.269 0 + 0.574 0x - 0.200 4y - 0.021 6x^2 - 0.000 1x \cdot y + 0.001 0y^2$  | 0.558 0 | 4.29       | 114.39 |
|     | $T_{\text{outdoor}} = 7.606 1 + 1.529 4x - 0.425 1y - 0.064 9x^2 + 0.001 2x \cdot y + 0.002 1y^2$  | 0.677 8 | 4.29       | 190.55 |

注:模型中,  $x$  以 h 为单位,  $y$  以 d 为单位,  $T$  以  $^{\circ}\text{C}$  为单位。

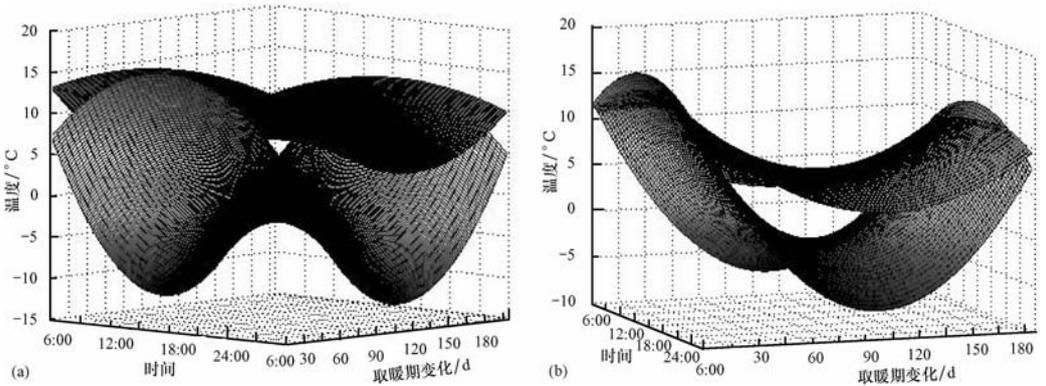


图 3 长官村(a)和河畔村(b)室内外温度变化的三维图

Fig. 3 3D figure of indoor and outdoor temperature change in Zhangguan Village (a) and Hepan Village (b)

根据实地调查,大多数农户在日平均室外温度  $10^{\circ}\text{C}$  以下时开始烧炕,  $5^{\circ}\text{C}$  以下时开始生火炉。据此,宁县长官村的取暖期 157 d,安定区河畔村的取暖期 168 d(表 3)。这比《设计标准》中规定的相邻城市的采暖期长 30 d 左右。

表 3 采暖期的确定

Table 3 Heating period of the two villages

| 地区  | 取暖方式    | 开始日期  | 结束日期  | 天数/d | 气温范围                    |
|-----|---------|-------|-------|------|-------------------------|
| 长官村 | 烧炕(电褥子) | 10-20 | 03-25 | 157  | $10^{\circ}\text{C}$ 以下 |
|     | 生火炉     | 11-07 | 03-05 | 119  | $5^{\circ}\text{C}$ 以下  |
| 河畔村 | 烧炕(电褥子) | 10-13 | 03-29 | 168  | $10^{\circ}\text{C}$ 以下 |
|     | 生火炉     | 10-29 | 03-13 | 135  | $5^{\circ}\text{C}$ 以下  |

注:在《设计标准》中,兰州、平凉、天水 3 市的采暖期分别为 132、137 和 116 d。

根据式(3), 2 个村在取暖期的累计温差分别为:

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{\text{长官村}} &= T_{\text{indoor}} - T_{\text{outdoor}} \\
 &= \int_{20}^{176} \int_0^{24} (11.513 + 0.605 4x - 0.185 4y - 0.022 1x^2 + 0.000 2x \cdot y + 0.000 9y^2) dx dy \\
 &\quad - \int_{20}^{176} \int_0^{24} (12.112 + 0.911 8x - 0.394 2y - 0.038 2x^2 + 0.000 4x \cdot y + 0.002 y^2) dx dy \\
 &= 23 002
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{\text{河畔村}} &= T_{\text{indoor}} - T_{\text{outdoor}} \\
 &= \int_{13}^{180} \int_0^{24} (13.269 + 0.574x - 0.2004y - 0.0216x^2 - 0.0001x \cdot y + 0.001y^2) dx dy \\
 &\quad - \int_{13}^{180} \int_0^{24} (7.6061 + 1.5294x - 0.4251y - 0.0649x^2 + 0.0012x \cdot y + 0.0021y^2) dx dy \\
 &= 36390 \quad (10)
 \end{aligned}$$

曲面模拟表现了室内外温度变化的趋势,可见,长官村和河畔村室内外累积温差分别为 23 002 h·℃ 和 36 390 h·℃,整个取暖期平均温差分别是 6.1℃ 和 9.0℃,即通过取暖用能增加室内温度的幅度。目前的取暖仅仅是维持基本生存的御寒,与 16℃ 的热舒适性要求仍有较大差距(表 4)。

表 4 实际观测值与拟合值的比较(单位:℃)

Table 4 Comparison of the observation values and the fitting values

| 地区  | 实际观测的最低温 |      | 模拟的最低温 |      | 模拟的平均温 |      | 累积温差<br>(h·℃) | 平均温差/℃ |
|-----|----------|------|--------|------|--------|------|---------------|--------|
|     | 室外       | 室内   | 室外     | 室内   | 室外     | 室内   |               |        |
| 长官村 | -15      | -1.0 | -7.38  | 1.79 | 0.68   | 6.82 | 23 002        | 6.1    |
| 河畔村 | -19      | -2.3 | -13.7  | 2.9  | -0.6   | 8.42 | 36 390        | 9.0    |

### 3.3 农户小康水平下用能核算

根据观测农户实际用能的资料,长官村取暖用能折合标煤 926 kgce,河畔村取暖用能折合标煤 1 199 kgce(表 5)。按照 16℃ 的室内温度计算,分别需要补偿 58 028 h·℃ 和 78 062 h·℃,所需燃料折合标煤 2 336.1 kgce 和 2 572 kgce,但当前只解决了 39.6% 和 46.6% 的取暖要求。

表 5 观测户主卧室取暖用能统计

Table 5 Statistics of energy consumption for household heating

| 项目        | 煤   | 秸秆    | 驴粪    | 合计    |
|-----------|-----|-------|-------|-------|
| 单价/(元/kg) | 0.7 | 0.286 | 0.357 | -     |
| 长官村       |     |       |       |       |
| 实物量/kg    | 857 | 628   | -     | -     |
| 折合标煤/kgce | 612 | 314   | -     | 926   |
| 河畔村       |     |       |       |       |
| 实物量/kg    | 815 | 168   | 1 010 | -     |
| 折合标煤/kgce | 582 | 84    | 533   | 1 199 |

注:煤单价取 2008 年冬的市价,秸秆、驴粪单价参照文献[15]给出。

需要说明的是,4 口之家一般有 2 个卧室,主卧室取暖较多,烧炕又生火炉,而另一个卧室面积小,只烧炕或短期生火炉。这里给出的实际用能资料只是主卧室的能耗,另一个卧室的能耗一般只是主卧室能耗的 1/3 ~ 1/4。

### 3.4 农户取暖用能的支付能力

2008 年冬,煤炭市价上涨至 600 ~ 800 元/t,这对于人均年收入不足 2 400 元的农户来说,是一笔数目较大的支出。购买 857 kg 和 815 kg 煤炭,需支付 600 元和 570.5 元(按 700 元/t 计),分别占 4 口之家总收入的 6.3% 和 6.6%。因此农户不得不尽量少用煤炭。作物秸秆、牲畜粪便等生物能源虽成本较低,但来源有限、清洁性差,烧炉子不方便,只能用来烧炕。

室内温度要达到 16 °C 以上,在取暖用能结构不变的情况下,长官村和河畔村农户支付的煤炭成本将增加到 1 513.7 元和 1 223.9 元,分别占 4 口之家总收入的 15.9% 和 14.2%。显然是农户力不能及的。

### 3.5 房屋的耗热量和取暖用能的热效率

用式(7)计算房屋热损失时, $t_i$  取模拟的室内平均温 16 °C, $t_e$  为模拟的室外平均温(°C), $K$  和  $\varepsilon$  根据《设计标准》中与研究区邻近地区(兰州、西安、天水、平凉)的值给出, $F_i$  和  $A_i$  为实测面积( $m^2$ )。观测的房屋都为传统样式的砖木结构,宁县长官村 3 户平均房屋面积 30.1  $m^2$ ,安定区河畔村 3 户平均房屋面积 21.2  $m^2$ 。

在《设计标准》中,建筑设计较多地应用了节能技术。同时,室外管网输送和锅炉运行的综合热效率为 61.2%<sup>[18]</sup>。以此标准计算,长官村和河畔村单位面积的理论耗热量分别为 11.7 和 19.1  $W/m^2$ ,相应的耗煤量分别为 8.82 和 15.52  $kgce/m^2$ ,总耗标煤应为 265.5 和 329.08  $kgce$ ,仅是实际总耗标煤量的 28.7% 和 27.4%。而要达到 16 °C 的室温,只需耗标煤 664  $kg$  和 602.72  $kg$ ,还低于当前取暖水平下的实际耗煤量(表 6)。

表 6 农户房屋热量损失的计算结果

Table 6 Amounts of heat loss of houses

| 地区  | $t_i$ | $t_e$ | 理论 $q_H$<br>/( $W/m^2$ ) | 理论 $q_c$<br>/( $kg/m^2$ ) | 理论总耗煤<br>/kgce | 实际总耗煤<br>/kgce | 实际 $q_c$<br>/( $kg/m^2$ ) | 实际 $q_H$<br>/( $W/m^2$ ) | 实际 $\eta$<br>/% |
|-----|-------|-------|--------------------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|-----------------|
| 长官村 | 6.82  | 0.68  | 11.7                     | 8.82                      | 265.50         | 926            | 30.76                     | 40.67                    | 17.6            |
|     | 16    | 0.68  | 29.1                     | 22.06                     | 663.97         | 2 336.1        | 77.6                      | 102.6                    | 17.4            |
| 河畔村 | 8.42  | -0.60 | 19.1                     | 15.52                     | 329.02         | 1 199          | 56.6                      | 74.83                    | 16.8            |
|     | 16    | -0.60 | 35.2                     | 28.43                     | 602.72         | 2 572          | 121.3                     | 160.37                   | 14.3            |

将实际单位耗煤量代入式(8),计算出实际的综合热效率只有 17% 左右(表 6),与《设计标准》的热效率有很大差距。这就形成了一个矛盾的现象:农户用能数量不少,但取暖水平低下。表面上似乎是燃料不足,实际上是用能粗放、效率低下。究其原因,其一是农户的住房结构在保暖性上与《设计标准》相去甚远,且分散供暖,热损失量大;其二是用能设施为火炉和炕,不像工业锅炉那样可以高温燃烧,燃料的燃烧不充分,特别是传统的土炕热效率低下<sup>[20]</sup>。热效率低限制了农户取暖水平的提高,同时也是未来开发潜力之所在。另一方面,农户单位面积耗煤量较大,是因为取暖期较长。《设计标准》中与研究区邻近的城市采暖期为 130 d 左右,而农户取暖期平均高出 1 个月左右。

虽然,农户单位面积耗标煤的值较高,但人均取暖面积小,总的取暖用能大致略高于城镇居民。同时,秸秆等生物质能成本低,取暖用能的支出也较低。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

基于在黄土丘陵区两个村的定点观测,运用趋势面分析方法模拟出室内、外温度变化的趋势,二次曲面拟合的效果良好。通过对曲面的积分计算出采暖期的累积温差:长官村为 23 002  $h \cdot ^\circ C$ ,河畔村为 36 390  $h \cdot ^\circ C$ ,可视为室内取暖加热的结果。

实际调查资料表明,长官村与河畔村农户主卧室取暖消耗燃料折合标煤分别为 926  $kgce$  和 1 199  $kgce$ ,单位面积耗煤 30.76  $kgce/m^2$  和 56.6  $kgce/m^2$ ,高于《设计标准》的水平,但仅解

决了小康水平下 39.6% 和 46.6% 的取暖要求,2 个村室内温度低于 5℃ 的日子仍有 40 d 和 26 d 之多。这表明农户取暖用能数量虽不少,但取暖水平低,远未达到热舒适性的要求。

在现有的用能条件下,要使主卧室温度达到 16℃ 的小康标准,2 个村的农户分别需要消耗 2 336.1 kgce 和 2 572 kgce。达此目的,农民的取暖用能成本将增加一倍以上。

参照《设计标准》计算,2 个村农户主卧室实现现有取暖水平需要耗煤 265.5 kgce 和 329.02 kgce。而要达到 16℃ 的室温,需要耗煤 663.97 kgce 和 602.75 kgce,还低于现有取暖水平下实际的燃料消耗。取暖用能的综合热效率只有 17% 左右。这就说明,应用节能技术提高综合热效率的潜力较大。目前农户取暖水平低下的主要原因不在于能源短缺,而在于用能粗放和效率低下。现有的能源贫困不如说是技术贫困。推进用能技术的进步,现有能源消耗即可基本满足小康水平的取暖用能需求。

## 4.2 讨论

在黄土丘陵地区,取暖用能与房屋建筑、用能技术、农户收入、生态保护和温室气体减排等多个方面相关联,是一个较为复杂的问题。本文基于定点观测和模拟分析来研究,虽得出了一些有益的认识,但样本有限,结论是初步的,需要通过进一步的工作来深化和验证。

农户用能结构与方式是在自然、社会、经济等多种条件的综合作用下形成的,节能技术进步并非一蹴而就。虽然简单地扩大燃料的使用有助于农户改善用能状况,然而这会加大农户的经济负担,增加温室气体排放。因此,笔者认为通过住房的节能改造和用能设施的改善来提高房屋的保暖性、降低单位面积的热损耗是满足农户热舒适性需求的较好选择。简言之,节能增效是今后提高取暖水平的主要方向。

笔者建议,将室温 16℃ 作为一项重要内容纳入农村小康建设的指标体系中来,将农村居民的供暖问题纳入政府的公共支出范围加以安排。在西部大开发和新农村建设中,增加对节能技术开发和应用的资金投入,推广“吊炕”<sup>[11]</sup>、太阳能集热墙和暖房,使用节能建筑材料等,在不增加或少增加燃料消耗的情况下,满足农民对“温”的需求。

## 参考文献 (References):

- [1] Alfred W crosby. Children of the Sun: A History of Humanity's Unappeasable Appetite for Energy [M]. W. W. Norton & Co Inc, 2006: 32.
- [2] 郎树德. 大地湾遗址房屋遗存的初步研究[J]. 考古与文物, 2002(5): 15-17. [LANG Shu-de. A preliminary study of the house ruins of Dadiwan Site. *Archaeology and Cultural Relic*, 2002(5): 15-17.]
- [3] 陈友华. 全面小康社会建设评价指标体系研究[J]. 社会学研究, 2004(1): 90-98. [CHEN You-hua. The study on establishing assessment indicator system about construction of the well-to-do society. *Sociological Research*, 2004(1): 90-98.]
- [4] 胡小平. 中国西部农村全面小康指标体系研究[M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2006. [HU Xiao-ping. The Study on Indicator System about Well-off Society in Rural Areas in Western China. Chengdu: Southwestern University of Finance Press, 2006.]
- [5] Manuel Correia Guedes, Luí's Matias, Carlos Pina Santos. Thermal comfort criteria and building design: Field work in Portugal [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(11): 2357-2361.
- [6] Peeters L, Van der Veken J, Hens H, et al. Control of heating systems in residential buildings: Current practice [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(8): 1446-1455.
- [7] Tadj Oreszczyn, Sung H Hong, Ian Ridley, et al. Determinants of winter indoor temperatures in low income households in English [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(3): 245-2525.
- [8] Sung H Hong, Jan Gilbertson, Tadj Oreszczyn, et al. A field of thermal comfort in low-income dwellings in England before and after energy efficient refurbishment [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(6): 1228-1236.

- [9] Fuller R J, Zahnd A, Thakuri S. Improving comfort levels in a traditional high altitude Nepali house [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(3): 479-489.
- [10] Chen B, Zhuang Z, Chen X, *et al.* Field survey on indoor thermal environment of rural residences with coupled Chinese kang and passive solar collecting wall heating in Northeast China [J]. *Solar Energy*, 2007, 81(6): 781-790.
- [11] Zhuang Zhi, Li Yuguo, Chen Bin. Thermal storage performance analysis on Chinese kang [J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41(4): 452-459.
- [12] Zhao Jing, Zhu Neng, Wu Yong. Technology line and case analysis of heat metering and energy efficiency retrofit of existing residential buildings in northern heating areas of China [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(6): 2106-2112.
- [13] Zhong Y, Cai W G, Wu Y, *et al.* Incentive mechanism design for the residential building energy efficiency improvement of heating zones in North China [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(6): 2119-2123.
- [14] Han Jie, Yang Wei, Zhou Jin, *et al.* A comparative analysis of urban and rural residential thermal comfort under natural ventilation environment [J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41(2): 139-145.
- [15] 李国柱, 牛叔文, 杨振, 等. 陇中黄土丘陵地区农村生活能源结构转换的生态经济效益评估[J]. 自然资源学报, 2008, 23(1): 15-24. [LI Guo-zhu, NIU Shu-wen, YANG Zhen, *et al.* The analysis on environmental and economic costs of rural household energy consumption in loess hilly region of Gansu Province. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(1): 15-24.]
- [16] 牛叔文, 王志锋, 李国柱, 等. 陇中黄土丘陵地区农村生活能源资源潜力的估算和利用结构分析——以通渭县李店乡祁咀村为例[J]. 资源科学, 2007, 29(3): 105-110. [NIU Shu-wen, WANG Zhi-fen, LI Guo-zhu, *et al.* Estimation of sources potential and analyze of use on rural household energy in loess hilly region of Gansu Province: A case study in Qizui Village of Tongwei County. *Resources Science*, 2007, 29(3): 105-110.]
- [17] 周中仁, 王效华, 陈群, 等. 北方农村小康家庭能源消费结构演变研究——以山东省桓台县为例[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 192-197. [ZHOU Zhong-ren, WANG Xiao-hua, CHEN Qun, *et al.* Evolvement of well-off rural household energy consumption structure in northern China: A case study in Huantai County of Shandong Province. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(3): 192-197]
- [18] 中国建筑科学研究院. 民用建筑节能设计标准: 采暖居住建筑部分(JGJ26—95)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. [China Academy of Building Research. Energy-saving Design Standards for Civil Construction; Part of Residential Heating(JGJ26—95). Beijing: China Building Industry Press, 1998.]
- [19] 中华人民共和国国家标准(GB/T 18883—2002). 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003. [National Standard of the People's Republic of China(GB/T 18883—2002). Indoor Air Quality Standard. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.]
- [20] Zhuang Zhi, Li Yuguo, Chen Bin, *et al.* Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China—A review [J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41(1): 111-119.

## Assessment on Energy Demand for Rural Household Heating in Loess Hilly Region, Gansu Province

NIU Shu-wen, LI Yi-xin, DING Yong-xia, QIN Jing

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The winter temperatures are almost below zero degree Celsius in loess hilly area of Gansu Province, where rural households could not obtain enough heat to comfort farmers through heating. In this research, we obtained the data of temperature change and energy consumption through observation and record in two villages of the region, set up trend surface models and calculated accumulated temperature differences in the heating period. We proposed indoor temperature of 16°C as a well-off living standard of rural household heating. According to relevant national standards, we compared the thermal efficiencies between actual energy consumption and theoretic consumption under energy-saving technology used. The results are as follows: accumulated temperature differences of Zhangguan Village and Hepan Village in heating period are 23002 h · °C and 36390 h · °C, and actual energy consumption are 926 kgce/a and 1199 kgce/a respectively, which only meet 39.6% and 46.6% demands of household heating under the well-off standard. Integrated thermal efficiency of energy consumption for household heating is only about 17%. If energy-saving technology was applied, both actual energy consumption and that under 16°C would be substantially reduced. Therefore, the potential for improving integrated thermal efficiency is enormous. We consider that raising heat retention of houses and reducing heat loss per unit area through houses' energy saving reconstruction and improving heating appliance are the main direction to solve household heating issues.

**Key words:** energy for household heating; thermal comfort; trend surface model; well-off living standard; thermal efficiency; loess hilly area