

# 老年人与非老年人自然通风住宅热适应模型对比研究

郭 飞\*, 张鹤子

(大连理工大学 建筑与艺术学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** ASHRAE、EN15251 标准推荐热适应模型作为自然通风建筑热环境评价与设计的依据,但并没有考虑老年人生理机能下降可能引起的差异.对寒冷地区大连 119 名老年人和 106 名非老年人自然通风住宅热适应模型进行对比研究,结果表明:自然通风条件下老年人更喜欢偏冷的热环境,老年人的热中性温度为 21.33 °C,低于非老年人的 22.99 °C;80% 的老年人可接受的操作温度范围为 16.07~22.78 °C,低于 80% 非老年人的 18.91~24.59 °C;这个结果可能与老年人衣着量更大有关.老年人与非老年人春秋季节首选的热适应措施均是增减衣物,夏季则是开窗通风;但是老年人更倾向不使用空调和采暖设备,并且对室内热环境和自然通风的满意率更低.老年人作为需要特殊关注的弱势群体,应用热适应模型进行老年人居住热环境设计时应充分考虑其生理特点;增加热环境的可调节性、加强自然通风对提升热环境满意度有较大的潜力.

**关键词:** 老年人;热适应模型;自然通风住宅;大连

**中图分类号:** TU111.19      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7511/dllgxb201602006

## 0 引 言

Fanger 于 1968 年提出的 PMV 热舒适模型将影响人体热舒适的众多参数进行明确量的描述,在建筑热环境评价和设计领域得到广泛使用,并为国际标准化委员会(ISO 7730 标准)和美国采暖、制冷与空调工程师协会(ASHRAE Standard 55 标准)所采纳<sup>[1-4]</sup>.然而 PMV 热舒适模型是在人工气候室得出的,描述的是人体处于稳定的环境参数下、空调房间内的热舒适状态.实际上人常处在不稳定的热环境当中,如自然通风的房间、室外环境等,热环境参数处在不断的动态变化中.国内外许多非空调环境、自然通风建筑的调研结果均证实了 PMV 在动态热环境中应用具有较大的局限性<sup>[5-9]</sup>.

Nicol 等<sup>[10]</sup>、de Dear 等<sup>[11]</sup>提出的热适应模型更加准确科学地描述了自然通风建筑内的人体热舒适指标.热适应模型包括物理层面(环境参数)、生理层面(人体参数)、心理层面(人的期望、适应)3 个层面的因素,认为居住者会积极主动地

创造其偏爱的热环境,当热环境偏离最佳热舒适度时,人们会倾向于采取措施(增减衣物、改变活动状态等)来恢复舒适状态.热适应模型提供的舒适温度和可接受温度范围较稳态模型宽,不仅可以大大减少空调的使用时间和范围以节约能源,还可以保持适当自然刺激,对人的健康有利,因此 ASHRAE、EN15251 标准已将其采纳推荐用于设计过程.

不少研究指出,老年人在面对同样的热环境或者温度变化刺激时,与非老年人在生理反应、热满意度等很多方面都有所不同:例如 Ohnaka 等的研究发现,在暴露于寒冷之后老年人的热期望温度明显高于年轻人<sup>[12]</sup>;Schellen 等发现老年人在稳定热环境下更喜欢高一些的温度<sup>[13]</sup>;Taylor 等则发现老年人需要更强的热刺激才能引起同样的行为反馈<sup>[14]</sup>;Hashiguchi 等的研究表明,老年人在 15 °C 低温时出现了血压升高的现象<sup>[15]</sup>.虽然这些研究着重探讨的是老年人在不同热环境下的生理机能反应,但也说明由于新陈代谢能力的下降,老年人热适应模型应当是不同的.

还有一些研究结果表明通风建筑中老年人与青年人的热中性温度和热期望温度并不一致;例如 Natsume 等在老年人和青年人的对比研究中发现,老年人对热的敏感度降低,其热期望温度的波动幅度比青年人明显更大<sup>[16]</sup>;Hwang 等对台湾 60 岁以上老年人调研的结果表明,对于 80% 的老年人,可接受的夏季操作温度范围(23.2~27.1℃)比青年人的温度范围(23.0~28.6℃)偏低<sup>[17-18]</sup>.

截至 2014 年底,中国 60 岁以上的老年人超过 2.12 亿人,占总人口的 15.5%,是世界上唯一一个老年人数过亿的国家<sup>[19]</sup>.目前社会对老年人居住问题越来越重视,各类养老设施在不断增加,但是老年人居住空间在质量和数量上,与飞速发展的商品住房相比都显得十分薄弱.van Hoof 等指出,大部分的老年人都希望有一个居家型养老场所,适宜、舒适的住宅是适应这种需求的最佳居所;然而经过 40 年应用,热舒适模型应当能够扩展以考虑老年人等特殊人群的需求<sup>[20-21]</sup>.因此老年人的居住空间的热舒适指标需要特殊的关注,

并以此为基础实现精心设计.

本文以寒冷地区大连为例,研究了自然通风建筑中老年人与非老年人热适应模型的异同,可为老年人居住热环境的设计提供重要依据.

### 1 研究方法

本研究采用的是主观问卷调查、现场热环境数据调查同时进行,通过大量现场数据回归分析大多数人热感觉满意率的研究方法.研究自 2012 年 1 月至 2014 年 5 月共历时 2 年 4 个月.为了具有广泛的代表性,调查样本覆盖了大连市 7 个不同行政区,包括 21 个居住区、3 个养老院和 10 个农宅 3 种不同住宅类型.这些样本尽量覆盖各种类型的外环境、楼层、户型、居室朝向等影响居住热舒适的因素.样本也对调查对象经济收入情况有所考虑,包括单身小公寓、经济适用房、中高档住宅、农宅、高级养老院和经济型养老院多种不同类型(图 1).

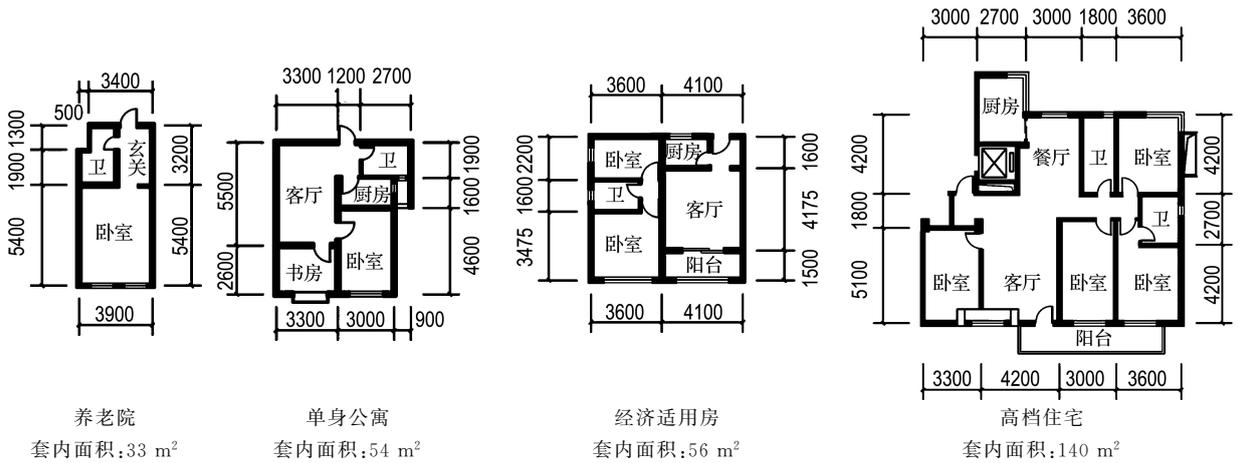


图 1 典型调研住宅样本户型图  
Fig. 1 Typical examples of apartment layout

大连实行集中供暖的时间是每年 11 月 5 日至次年 4 月 5 日,因此本文现场调研的时间自当年的 4 月 6 日起至 11 月 4 日.由于大连夏天气候温和,调研结果表明大连地区拥有空调的住宅数量比例是 8.9%,且夏季启用空调的时间大多数不超过 40 h,可以认为绝大多数的住宅样本在此期间处于自然通风、自由运行的状态,调研对象收入情况对热环境情况影响并不显著.

调研对象共 225 人,本地的居住时间平均为 24.6 a,已经完全适应了本地的气候条件,他们的

热经验和热期望基本相同(表 1).为了避免心理情况或其他不确定因素的影响,在进行调查之前,同被调查对象做了沟通,排除了心理不稳定的样本.

表 1 调研对象基本情况统计

Tab. 1 The basic information statistics of research objects

年龄组	总人数	男	女	平均年龄	平均居住时间/a
老年	119	52	67	74.2	24.6
非老年	106	51	55	36.6	

按照世界卫生组织的年龄划分标准,44岁以下为青年人;45~59岁为中年人;60岁以上为老年人<sup>[22]</sup>.本研究据此将受试者按年龄分成老年和非老年两组.老年组有119人,所有调研对象身体健康状况良好,具有生活自理能力,能够与调查人员正常交流;最高年龄101岁,平均年龄74.2岁.非老年组106人,最低年龄22岁,平均年龄36.6岁.

调研问卷共发出1 529份,收回有效问卷1 273份.主观问卷调查和热环境测试同时进行.为确保调研结果的准确性,由调查人员协助受试者在静坐20 min以后开始填写对当时热环境的主观问卷.主观问卷内容参照的是ASHRAE Standard 55推荐的热环境满意度问卷,内容包括受试者基本情况,如性别、年龄、身高、体重、本地居住时间、衣着和活动状态;适应室内热环境的措施,如开窗、电风扇使用状况、空调拥有情况和启

闭时间等;湿度感觉和满意度,如干燥、潮湿、尚可;室内热环境、风环境满意度等,热感觉投票值(TSV)根据ASHRAE的七级分度指标表示,对应的PMV指标分别为-3、-2、-1、0、1、2和3;住宅的基本情况,如地址、楼层、朝向、户型、围护结构信息等.

现场热环境测试采用Metrel热舒适仪,测量的参数包括现场温湿度、风速和黑球温度等.仪器经过计量标定,精度要求和反应时间均满足ISO 7726和ASHRAE Standard 55的标准.测点布置在房间中部,尽量靠近受试者,以准确体现受试环境.

## 2 调研结果

### 2.1 服装热阻与热环境参数统计

非老年与老年组的测试基本同步进行,两组获取的热环境参数范围基本一致(表2).

表2 现场热环境参数统计分析

Tab.2 The statistical analysis of field thermal environment parameters

类别	服装热阻/clo	操作温度 $t_o/^\circ\text{C}$	相对湿度 $\varphi/\%$	风速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	PMV	PPD/ $\%$	
非老年组	平均值	0.32	26.20	68.20	0.18	0.23	24.70
	标准偏差	0.19	3.12	13.84	0.16	0.99	19.71
	最大值	1.20	30.10	91.10	0.96	1.70	98.60
	最小值	0.07	12.20	32.80	0	-2.90	5.00
老年组	平均值	0.41	25.51	73.16	0.23	0.10	16.14
	标准偏差	0.32	3.59	13.36	0.19	0.74	11.89
	最大值	1.63	29.70	92.50	1.20	1.40	93.40
	最小值	0.04	13.80	22.00	0	-2.50	5.00

依据ISO 7730标准对受试者的服装热阻进行计算,其中非老年组平均值为0.32 clo,老年组平均值为0.41 clo(1 clo=0.155 K·m<sup>2</sup>/W).通常春秋衣着为长袖或外套、长裤或牛仔裤及厚袜;夏季衣着为短袖或薄长袖、短裤或薄长裤、薄袜和凉鞋.座椅的附加热阻为0.10 clo.受试者新陈代谢产热率为1.2 met.

非老年组TSV为0的占到样本总数的47.2%;在-1、0、1的占到样本总数的82.3%,选择对热环境可接受的占比83.7%.该结果表明,非老年组大多数人对室内热环境是满意的.

老年组TSV为0的占到样本总数的42.9%;在-1、0、1的占到样本总数的63.6%,选择对热环境可接受的占比90.2%.

上述结果表明,老年人对热环境感到满意的人数(TSV为-1、0、1)比非老年人低18.7%,但

是他们认为热环境可以接受的比例反而高6.5%,表明老年人对热环境的忍受能力比非老年人高.

### 2.2 热中性温度

热中性温度是指热感觉为不冷也不热时的操作温度,即TSV=0时的操作温度.热中性温度可以通过线性回归的方法得到:本研究以 $\Delta t_o=0.4^\circ\text{C}$ 为一个区间,以该区间操作温度平均值 $t_o$ 为自变量,以受试者在该操作温度区间内热感觉投票值的平均值为因变量,通过SPSS一元线性回归分析得到两者之间的关系式:TSV=a+bt<sub>o</sub>;令TSV=0,可计算出热中性温度.

非老年组热中性温度回归方程为

$$TSV = -4.437 + 0.193t_o; R^2 = 0.722 \quad (1)$$

老年组热中性温度回归方程为

$$TSV = -4.736 + 0.222t_o; R^2 = 0.790 \quad (2)$$

根据式(1)和(2),非老年人热中性温度为22.99

℃,比现场平均操作温度 26.20 ℃低 3.21 ℃.老年人热中性温度为 21.33 ℃,比现场平均操作温度 25.51 ℃低 4.18 ℃.老年人热中性温度比非老年人低 1.66 ℃.通过图 2 可以看出,老年人的热感觉投票值曲线斜率比非老年人,即在同样的操作温度下老年人比非老年人感觉更热一些.

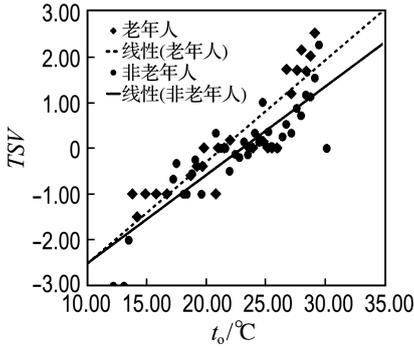


图 2 操作温度与平均热感觉投票值的回归曲线  
Fig. 2 The regression curve of operating temperature and mean thermal sensation vote

### 2.3 可接受操作温度范围

根据 ASHRAE 确定的热舒适原则,可接受温度范围是指 80% 的人感觉满意的操作温度值,即大多数人认可的热舒适环境.可接受温度范围的确定有两种方法:一是通过主观问卷调研直接确定;二是通过主观问卷调研和热环境测试结果的拟合回归分析确定.拟合回归分析的方法是:当 TSV 为 -1、0、1 时,认为此时的操作温度是可接受的,为 -3、-2、2、3 时的操作温度是不可接受的;通过分区间计算操作温度下的可接受百分率 ( $P_{sv}$ , percentage of satisfied vote),与该区间操作温度平均值做回归分析,可得到两者之间的关系方程.根据方程可计算出 80% 人群的可接受操作温度范围.

非老年组可接受操作温度范围回归方程为

$$P_{sv} = -3.850 + 0.435t_o - 0.010t_o^2; \quad (3)$$

$$R^2 = 0.547$$

老年组可接受操作温度范围回归方程为

$$P_{sv} = -3.958 + 0.505t_o - 0.013t_o^2; \quad (4)$$

$$R^2 = 0.692$$

根据式(3)和(4),80%非老年人可接受操作温度范围是 18.91~24.59 ℃,最低与最高温度之差是 5.68 ℃;80%老年人可接受操作温度范围是 16.07~22.78 ℃,最低与最高温度之差是 6.71 ℃.两组之间关系与热中性温度类似:老年人的可

接受操作温度范围整体向偏冷的方向移动,最低和最高温度分别低 2.84 ℃和 1.81 ℃(图 3).

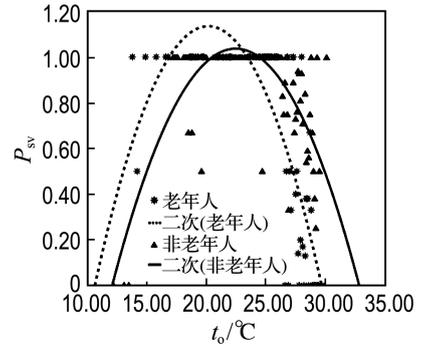


图 3 操作温度与可接受百分率的回归曲线  
Fig. 3 The regression curve of operating temperature and percentage of satisfied vote

### 2.4 热适应措施

由于大连春秋室内温度波动大,在适应性措施方面首选的是增减衣物,非老年组 68%、老年组 82% 的人选择其作为改善热舒适的措施.老年组春秋的平均服装热阻 0.50 clo,比非老年组 0.45 clo 要高.老年组在春秋普遍倾向选择“少减多增”,即温度升时少减衣物,温度降时多增衣物;而非老年组更倾向于“多减少增”,即温度升时多减衣物,温度降时少增衣物.非老年组还更倾向于选择使用电采暖设备,有 18.0% 的人将其作为首选措施,而老年组选择使用的只有 4.5%.

在夏季感觉到室内过热时,非老年组和老年组首选的热适应措施首先均是开窗通风,非老年组和老年组选择比例分别是 54% 和 62%.其次是减少衣物,非老年组和老年组分别有 24% 和 18% 选择此项措施.但是其后的热适应措施则有所不同,非老年组有更多的人会选择空调等设备降温措施,占比 13%;而老年组更喜欢选择使用扇子、卧床休息等,占比 10%,选择空调的仅占 4%.这说明尽管老年人在面临同样的高温时感觉更热,但是他们耐热能力更强,更多采取自然降温措施,例如更好的室内自然通风或者改变自身衣着、行为状态来适应热环境,而不是使用设备进行物理降温.

## 3 结论

(1)大连自然通风住宅室内温度在 12.2~30.1 ℃.老年人对热环境的满意率是 63.6%,低于非老年人的 83.7%;老年人对热环境认为可接受的比例是 90.2%,高于非老年人的比例 83.7%.

(2)自然通风条件下老年人比较喜欢呆在偏冷一些的环境中;老年人热中性温度是 21.33℃,比非老年人热中性温度 22.99℃低 1.66℃.80%老年人可接受操作温度范围是 16.07~22.78℃,低于 80%非老年人可接受操作温度范围 18.91~24.59℃.这个结果可能与老年人衣着量更大有一定的关联.

(3)春秋季节首选的热适应措施是增减衣物,老年人服装热阻平均值比非老年人高,老年人在温度较低时倾向于多穿衣物.春秋低温时,选择使用采暖设备的非老年人比例比老年人高.

(4)夏季感到炎热时首选的热适应措施是开窗自然通风,老年人对室内热环境和室内自然通风满意率都比非老年人低.这个结果表明改善热环境和自然通风对老年人夏季室内热舒适具有更重要的意义.

热适应模型能够描述不同地区和人群的热环境需求和热适应措施,反映了真实的建筑环境中大多数人的适应能力,适用范围比 PMV 模型要宽泛,自提出之后得到广泛接受.由于老年人生理的特殊性,老年人的居住热环境应用热适应模型时应当充分考虑老年人的特点,尽可能具备充分的自主可控性和可调节性,才能更好地满足他们的需求.

## 参考文献:

- [1] Doherty T J, Arens E. Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models [J]. *ASHRAE Transactions*, 1988, **94**:1371-1385.
- [2] Brager G S, de Dear R J. Thermal adaptation in the built environment; a literature review [J]. *Energy and Buildings*, 1998, **27**(1):83-96.
- [3] The American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers. Thermal environment conditions for human occupancy; ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 [S]. Atlanta:ASHRAE, 2004.
- [4] European Committee for Standardization. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; EN15251-2007 (E) [S]. Brussels:CEN, 2007.
- [5] 夏一哉,赵荣义,江亿.北京市住宅环境热舒适研究[J]. *暖通空调*, 1999, **29**(2):3-7.  
XIA Yi-zai, ZHAO Rong-yi, JIANG Yi. Thermal comfort in naturally ventilated houses in Beijing [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 1999, **29**(2):3-7. (in Chinese)
- [6] 欧阳沁,戴威,周翔,等.自然通风环境下的热舒适分析[J]. *暖通空调*, 2005, **35**(8):16-19.  
OUYANG Qin, DAI Wei, ZHOU Xiang, et al. Thermal comfort analysis in natural ventilation environment [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2005, **35**(8):16-19. (in Chinese)
- [7] Ole Fanger P, Toftum J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates [J]. *Energy and Buildings*, 2002, **34**(6):533-536.
- [8] Chan D W T, Burnett J, de Dear R J, et al. Large-scale survey of thermal comfort in office premises in Hong Kong [J]. *ASHRAE Transactions*, 1998, **104**(Pt 1B):182-201.
- [9] Busch J F. Tale of two populations; thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand [J]. *Energy and Buildings*, 1992, **18**(3-4):235-249.
- [10] Nicol J F, Humphreys M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2002, **34**(6):563-572.
- [11] de Dear R, Brager G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [J]. *ASHRAE Transactions*, 1998, **104**(Pt 1A):145-167.
- [12] Ohnaka Tadakatsu, Tochihiro Yutaka, Tsuzuki Kazuyo, et al. Preferred temperature of the elderly after cold and heat exposures determined by individual self-selection of air temperature [J]. *Journal of Thermal Biology*, 1993, **18**(5-6):349-353.
- [13] Schellen L, van Marken Lichtenbelt W D, Loomans M G L C, et al. Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition [J]. *Indoor Air*, 2010, **20**(4):273-283.
- [14] Taylor N A, Allsopp N K, Parkes D G. Preferred room temperature of young vs aged males: the influence of thermal sensation, thermal comfort, and affect [J]. *The Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 1995, **50**(4):M216-M221.
- [15] Hashiguchi Nobuko, Tochihiro Yutaka, Ohnaka Tadakatsu, et al. Physiological and subjective

- responses in the elderly when using floor heating and air conditioning systems [J]. **Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science**, 2004, **23**(6):205-213.
- [16] Natsume Keiko, Ogawa Tokuo, Sugenoja Junichi, *et al.* Preferred ambient temperature for old and young men in summer and winter [J]. **International Journal of Biometeorology**, 1992, **36**(1):1-4.
- [17] Hwang R L, Lin T P, Cheng M J, *et al.* Patient thermal comfort requirement for hospital environments in Taiwan [J]. **Building and Environment**, 2007, **42**(8):2980-2987.
- [18] Hwang R L, Chen C P. Field study on behaviors and adaptation of elderly people and their thermal comfort requirements in residential environments [J]. **Indoor Air**, 2010, **20**(3):235-245.
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 2014年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2015-02-26). [http://www. stats. gov. cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226\\_685799. html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226_685799.html).
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical bulletin of the national economic and social development in 2014 [EB/OL]. (2015-02-26). [http://www. stats. gov. cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226\\_685799. html](http://www. stats. gov. cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226_685799. html). (in Chinese)
- [20] van Hoof J, Hensen J L M. Thermal comfort and older adults [J]. **Gerontechnology**, 2006, **4**(4):223-228.
- [21] van Hoof J. Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? [J]. **Indoor Air**, 2008, **18**(3):182-201.
- [22] World Health Organization. Definition of an older or elderly person [R/OL]. (2012-01-01). <http://www. who. int/healthinfo/survey/ageingdefnolder/en/>.

## Comparative research on thermal adaptive model of elderly people and non-elderly people in naturally ventilated house

GUO Fei\*, ZHANG He-zi

( School of Architecture and Fine Art, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Standards ASHRAE and EN15251 recommend that thermal adaptive model can be taken as the basis for evaluating and designing the thermal environment of buildings with natural ventilation, but they do not consider the possible differences caused by the dropping physiological function of the elderly people. Comparative research on naturally ventilated house thermal adaptive model for 119 elderly people and 106 non-elderly people in Dalian (a cold area) is carried out and the results show that in natural ventilation the elderly people like the colder thermal environment than the non-elderly people for the thermal neutral temperature of the elderly people is 21.33 °C and the thermal neutral temperature of the non-elderly people is 22.99 °C; the acceptable operative temperature of 80% of the elderly people ranges from 16.07 °C to 22.78 °C, and that of 80% of the non-elderly people ranges from 18.91 °C to 24.59 °C. This result could be related to the higher clothing insulation of elderly people. The preferred thermal adaptive measure of the elderly and the non-elderly people in springs and falls is to increase or decrease the clothes, and the thermal adaptive measure in summer is to ventilate the room. However, the elderly people prefer not to use air conditioners and heating equipment, and have lower satisfaction of indoor thermal environment and natural ventilation. As the disadvantaged group which needs special care, the thermal environmental design of the elderly people's residences using thermal adaptive model should take their physiological characteristics into full consideration, and increasing the adjustability of the thermal environment and strengthening the natural ventilation may greatly improve the satisfaction of thermal environment.

**Key words:** elderly people; thermal adaptive model; naturally ventilated house; Dalian