

# 过渡季壁面辐射温度对人体热舒适的影响分析

宋 冰, 杨 柳, 白鲁建

(西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 文章针对西安地区过渡季室内热环境状况进行了研究, 通过实测数据分析了壁面平均温度与人体衣着量及热舒适状况之间的关系. 分析发现人体热感觉及衣着量与壁面平均温度有较大相关性, 并且随着壁面平均温度的升高人体热感觉及衣着量对壁面平均温度的敏感性降低. 当壁面平均温度达到 22.2 °C 时, 人体更易获得热舒适状态. 将人体热感觉与室内空气温度、黑球温度、壁面平均温度进行敏感性分析后发现, 在室内风速较低的情况下, 人体热感觉对壁面平均温度的敏感性均高于空气温度及黑球温度.

**关键词:** 热舒适; 壁面温度; 敏感性分析; 过渡季

中图分类号: TU111.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)03-0438-05

## Study of influence of wall radiation temperature on human thermal comfort in transition season

SONG Bing, YANG Liu, BAI Lujian

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The indoor thermal environment in Xi'an in the transition season was studied by analyzing the relationship between average temperatures of wall surface and human clothing. The data were obtained from field test. The correlation between thermal comfort, clothing and the average temperatures was obvious, and the thermal comfort and clothing reduced the sensitivity to the average temperature of wall as the temperature rises. When the average temperature of wall reached 22.2 °C, people felt more comfortable. Human thermal comfort was compared with indoor air temperature, globe temperature and average temperature of wall for analyzing the sensitivity, and when the indoor wind velocity was low, thermal comfort was more sensitive to the average temperature of wall than to others.

**Key words:** thermal comfort; wall surface temperature; sensitivity analysis; transition seasons

随着社会生活水平的提高人们对建筑室内舒适度的要求和期望不断增加. 为解决自然能源供需之间的矛盾建筑节能和绿色建筑不断被人们所接受和重视<sup>[1]</sup>. 为了能在不降低或提高现有居住舒适度的基础上减少建筑能耗需求, 20世纪60、70年代以来建筑节能技术以及人体热舒适研究逐渐成为新的热点.

早在20世纪20、30年代就有学者(如Houghten & Yagloglou)试图对热舒适区范围进行定义并开展研究<sup>[2]</sup>. 随着研究的深入和测试调研的范围逐渐扩大, 不少学者对影响人体热舒适、热感觉的因素进行研究并提出了多种用于测评室内热环境状况的指标, 如有效温度、合成温度、风冷指标以及热应力指标等等<sup>[3-4]</sup>. 20世纪70年代在众多前人研究的基础上丹麦学者Fanger通过总结和大量的实验室实测数据提出了著名的热舒适理论——PMV-PPD模型, 该模型综合考虑了影响人体热舒适的六个因素, 其中包括四个客观环境因素(空气温度、空气湿度、空气流速

以及辐射温度)和两个主观因素(新陈代谢率和服装热阻)<sup>[5]</sup>. 通过该模型可以对空调房间的人体热舒适做出准确的预测, 但随着应用范围的扩大发现该模型对于自然通风房间的人体热舒适预测存在较大偏差. 由Humphreys和de Dear为代表的学者通过研究提出了人体适应性热舒适理论<sup>[6]</sup>. 热舒适适应性理论同样也指出影响人体热感觉的因素众多, 其中客观因素与热舒适理论一致.

依据人体热舒适适应性理论, 在室内人体对周围环境有积极的应对和调节, 如穿衣和开窗等. 但主观人体的反应也是根据周围客观环境要素的变化而变化的. 城市区域内的住宅建筑通常室内风速较低, 即便在过渡季或是夏季通过开窗来改善室内舒适度, 但室内风速仍然较低. 而米纳尔德的研究表明当室内风速较低或是静风状态时辐射换热对于人体热感觉的影响要高于对流换热<sup>[3]</sup>. 近年来随着我国人体热舒适研究的深入, 不少学者对于室内辐射温度对人感觉的影响进行了探讨<sup>[7-10]</sup>. 傅俊萍

等人通过实验和数据分析发现,利用辐射供暖和辐射供冷来调节室内热环境的方式与常规空调相比,可在比较低的条件下满足人体热舒适要求,节约能源<sup>[11]</sup>.而蒯洁等人通过室内热平衡理论得出了冬季采暖地面所需的最佳供暖温度<sup>[12]</sup>.

在我国北方地区采暖一般开始于11月15日左右,但是不少住户在采暖开始前由于室内温度较低通过其他耗能方式如空调来使室内达到热舒适状态,亦或是采取多穿衣的方式来应对室内偏冷环境,这些方式对于建筑节能以及现代生活需求带来一定影响.而目前国内还鲜有人通过现场实测分析的方法来研究过渡季节壁面温度对人体热感觉的影响.因此,有必要对过渡季人体热舒适需求进行研究分析,以对住宅建筑的节能设计和过渡季有效的节能指导措施提供理论基础.

## 1 研究对象及研究方法

### 1.1 研究样本

研究所用样本房的选取应具有代表性,并充分考虑到建筑的构造形式、年代以及通风采光和供暖形式等因素.鉴于此本文选取了西安市区典型六层砖混结构-民居为研究样本,室内采暖形式为暖气片辐射采暖,建筑面积90 m<sup>2</sup>.

于2012年10月15日至11月8日以及2013年3月16日至3月31日在所选取样本房进行测试研究,测试期间共回收960份有效问卷,测试过程中的受访人群以22~33岁的青年为主.在样本选择时充分考虑了身高、体重年龄等影响因素,并均匀分布于分析样本中.

### 1.2 现场研究方法

现场测试研究以2~3人为一组.测试时间段为每天的8:00至19:00,期间以2 h为间隔共划分为五个时间段,每个时间段进行一次室内环境参数测量和热舒适主观问卷的填写.

#### 1.2.1 室内外环境参数测试

室外环境参数测试包括空气温湿度、黑球温度以及风速,仪器记录时间间隔为10 min.室内环境参数测试包括空气温湿度、黑球温度、风速以及壁面温度,记录时间间隔为10 min.其中部分环境参数由测试者进行读取并填入主观问卷中.

测量采用的仪器有:TR-72U双通道温湿度电子记录仪、1221型室内热舒适度数据记录仪、Testo微风仪、壁面温度巡检仪,其精度和响应时间均满足ASHRAE 55-2004和ISO 7726-2002标准要求.

#### 1.2.2 热舒适主观问卷调查

调查问卷的内容包括:(1)受访人员的性别、体重、身高以及衣着情况等基本信息;(2)房间开窗以及正在使用电器类用具情况的描述等;(3)受访者对室内环境的热环境、湿环境以及通风的主观感受,其中人体热感觉采用ASHRAE的7级指标表示(-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3).

### 1.3 相关参数的选取

在数据的处理前期工作中对新陈代谢率以及衣服热阻的参数进行了处理,其中受访者的新陈代谢率依据GB/T 18049-2000《中等热环境PMV和PPD指数的测定及热舒适条件的规定》中的规定:坐姿、轻微活动者所具有的新陈代谢水平为1.2 met,立姿、轻度活动(从事轻体力作业)为1.6 met,立姿、中度活动(家务劳动)的新陈代谢水平为2.0 met<sup>[13]</sup>.考虑到本次测试中的受访者在填写问卷过程中基本均为坐姿并且填写前5 min运动状态均为静坐或是看电视,因而新陈代谢率定为1.3 met.

衣服热阻按照GB/T 18049-2000中的方法,依据主观问卷计算出受试者所穿单件服装的热阻值,进而估算出整套服装的热阻.

## 2 数据统计分析方法

通过对测试期间服装热阻统计分析后发现(如图1所示):秋季服装热阻主要集中在0.8~1.0 clo范围内,均值为0.9 clo;春季服装热阻主要集中在0.7~0.8 clo范围内,均值为0.8 clo.因此春秋服装热阻代表值分别定为0.8 clo和0.9 clo.

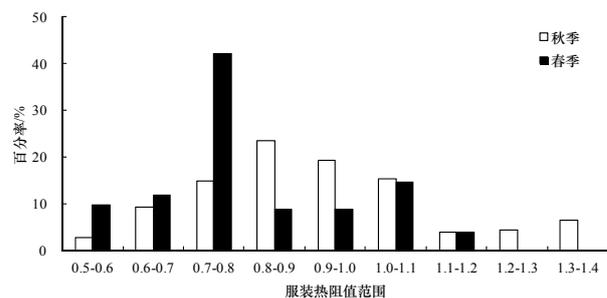


图1 服装热阻统计图

Fig.1 Statistics of the thermal resistance from human clothing

利用Excel对数据进行筛选.筛选后数据依据温度频率法<sup>[14]</sup>分别选取壁面温度和室内操作温度为基准,利用Excel以0.5 °C为间隔进行分组平均,然后提取每组均值利用SPSS数理统计软件进行相关性分析.在分析前,将现场测得的室内空气温度、相对湿度、代谢率、服装热阻以及利用温湿度算得

的饱和蒸汽压等参数代入基于Matlab所编写的程序,得到相应的预测平均热感觉投票值PMV和预测不满意百分比PPD.

对测试期间各壁面测点的温度值及各壁面面积求得加权平均值,将与各主观问卷填写时刻对应的壁面温度加权平均值定位此刻壁面平均温度<sup>[15]</sup>.

### 3 数据分析

#### 3.1 室内外环境参数

测试期间室内外温度变化范围为: 11.7~22.3 °C与6.3~25.6 °C(秋季); 17.1~27.1 °C与9.1~32.0 °C(春季). 室内相对湿度变化范围是: 22%~52.4 %(秋季); 20%~38%(春季). 室内风速均值为0.05 m/s, 风速主观感觉为无风. 测试期间为过渡季节, 各房间均为不采暖房间.

#### 3.2 热中性温度与人体热舒适分析

操作温度( $t_{op}$ )是一种综合考虑了室内空气温度和平均辐射温度的合成温度,它包括了对人体热感觉影响最为主要的环境参数指标,因而用来评价和描述人体热感觉更为准确. 而中性温度则是在实测过程中大多数人群热感觉为中性时的室内操作温度,在此本文采用操作温度作为室内热环境状况的评价指标,并对春秋季节的人体中性温度分别进行了求解. 如图2所示,采用温度频率法分别对春秋季节的实测平均热感觉投票值和预测平均热感觉投票值(PMV)进行了回归分析. 通过回归分析分别得到春秋季节实测平均热感觉投票值与室内操作温度( $t_{op}$ )的线性回归方程:

$$\text{春季} \quad \text{MTS} = 0.15t_{op} - 3.141 \quad (1)$$

$$\text{秋季} \quad \text{MTS} = 0.075t_{op} - 1.604 \quad (2)$$

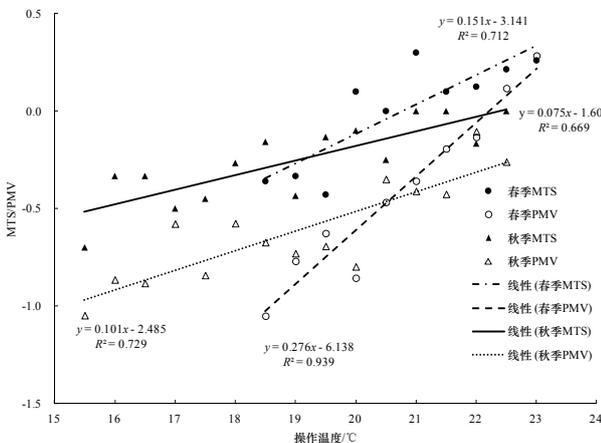


图2 过渡季人体中性温度

Fig.2 The neutral temperature of human body in transition seasons

将式(1)、(2)中的MTS等于0可以得到在人体热中性感觉下的室内操作温度分别为20.8 °C(春季)、21.3 °C(秋季),采用同样的方法可以得到预测中性温度分别为22.2 °C(春季)、24.6 °C(秋季). 通过结果可以看出在春秋季节居民的实测中性温度均比预测值偏低,这反映了人体对地域气候的适应性. 其中春季的中性温度低于秋季,这是由于春秋季节分别是由冬至夏以及由夏至冬的过渡过程,受到冬夏季环境的影响因而秋季人们更倾向于温暖的环境而在春季则更倾向于偏凉的室内环境.

如上文所述,操作温度是一种将空气温度和辐射温度综合考虑的合成指标,而空气温度与辐射温度对人体热平衡的影响方式以及影响程度均不相同. 因而本文将在后面的章节中深入探讨和分析过渡季节不同的室内环境参数以及衣着对人体热感觉的影响程度.

#### 3.3 服装热阻与壁面温度

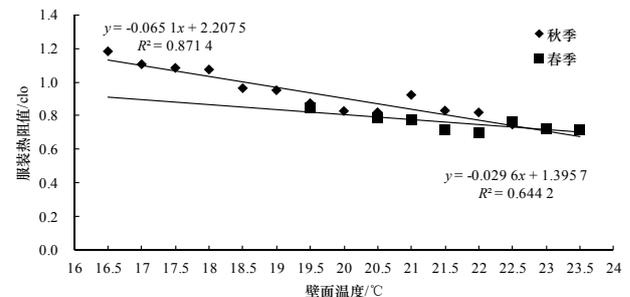


图3 壁面温度与服装热阻分析图

Fig.3 The correlation analysis between temperature of wall surface and thermal resistance of human clothing

从图3可以看出,壁面平均温度对衣着量有较大影响,两者有着较好的相关性. 随着壁面平均温度的降低衣着量也逐渐增加,这是由于测试期间壁面平均温度整体偏低导致对人体冷辐射量较大,间接影响着人体衣着量的大小. 通过春秋季节数据对比分析发现,壁面平均温度越低人体对冷辐射的敏感性越大,衣着量与壁面平均温度的相关性也就越好.

#### 3.4 人体热感觉与壁面温度

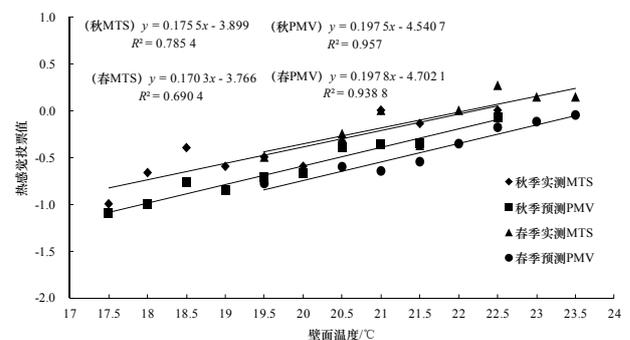


图4 壁面温度与人体热感觉分析图

Fig.4 The correlation analysis between wall temperature and thermal sensation

依据人体热平衡方程可知, 正常比例散热中辐射散热约占45%~50%, 占据人体散热比例中的大部分<sup>[16]</sup>. 而在室内对人体辐射传热量有较大影响的是壁面温度. 图4分别将春秋过渡季的实测MTS及预测PMV值与相应的壁面平均温度进行线性回归分析. 分析发现在室内风速偏低的情况下(<0.05 m/s)

人体热感觉与壁面平均温度有较大相关性, 随着壁面平均温度的升高人体热感觉逐步趋于中性. 对比春秋季节实测MTS与壁面平均温度的回归曲线发现随着壁面平均温度的升高, 人体热感觉对壁面平均温度的敏感性逐渐降低. 通过线性相关分析可以得到以下公式(见表1).

表1 线性回归方程  
Tab.1 Regression equation

类别	R <sup>2</sup>	回归方程	中性壁面温度值/°C
秋季实测MTS	0.785 4	y=0.175 5x-3.899	22.2
秋季预测PMV	0.957	y=0.197 5x-4.540 7	23.1
春季实测MTS	0.690 4	y=0.170 3x-3.766	22.1
春季预测PMV	0.938 8	y=0.197 8x-4.7021	23.8

将上述方程y值归零可以算得人体达到舒适状态时壁面平均温度值. 计算结果如上表所示, 春秋季节预测值高出实测值平均为1.3 °C, 由于PMV计算模型是依据国外热舒适模型来建立的, 不同人群对地方气候有一定的适应性, 因此预测值一般高于实测值. 有计算结果可以看出, 在壁面平均温度达到22.2 °C时处于房间中的人体更易获得热舒适状态. 但该地区过渡季节室内壁面平均温度均值仅为19 °C, 壁面平均温度值偏低, 这使得处于室内活动量较少的人体易于感到冷不舒适, 倾向于采用其他耗能方式来达到舒适状态. 因此提高居住建筑墙体的保温蓄热性能对节能意义重大, 而且其他学者通过研究也发现在冬季室内采暖时采用房间壁面辐射采暖更易于使室内达到舒适状态.

通过与3.2节中求得的春秋季节人体中性温度对比可以看出, 在过渡季节人体对于室内壁面温度的需求要高于对室内整体环境的空气温度, 这说明在过渡季节比室内空气温度偏高的壁面温度更易于使人体感到舒适.

3.5 人体热舒适影响因子敏感性分析

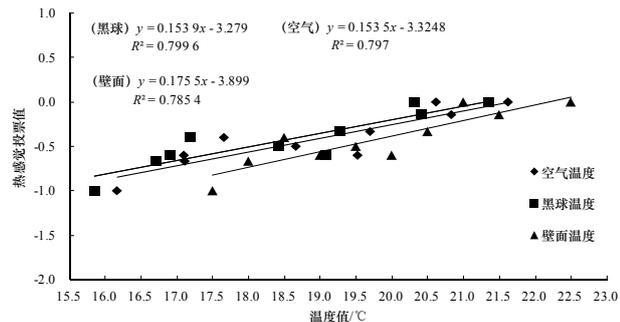


图5 各参数敏感性分析图(秋季)  
Fig.5 Sensitivity analysis(Autumn)

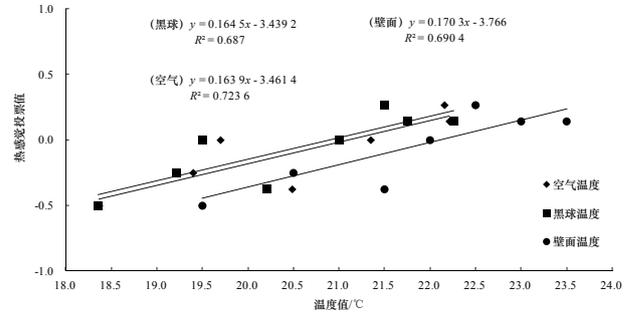


图6 各参数敏感性分析(春季)

Fig.6 Sensitivity analysis(Spring)

黑球温度是一种依据气温、气流、辐射热而表示体感的人体热舒适模型, 它与空气温度一起均可作为简单的室内热环境评价指标<sup>[17]</sup>. 文中将空气温度、黑球温度、壁面平均温度三个参数分别于实测平均热感觉值进行相关性分析, 如图5、6所示. 分析发现, 春秋季节中人体热感觉对壁面平均温度的敏感性均高于空气温度和黑球温度的. 这说明在我国北方过渡季室内开窗时间少、室内风速较低的情况下, 壁面平均温度与人体的辐射换热量要高于空气温度与人体的换热量, 对人体热感觉的影响也较大.

4 结论

- (1) 西安地区春秋过渡季节室内人体服装热阻均值分别为0.8 clo和0.9 clo.
- (2) 室内壁面平均温度与人体服装热阻有一定的相关性, 壁面平均温度越低人体对冷辐射的敏感性越大, 衣着量与壁面平均温度的相关性也就越好.
- (3) 在过渡季关窗室内风速较低的情况下, 人体热感觉与壁面平均温度有较大的相关性. 随着壁面平均温度的升高人体热感觉趋于中性, 人体热感觉对壁面平均温度的敏感性也逐渐降低. 通过计算

发现,过渡季壁面平均温度达到22.2℃时人体更易达到热舒适状态。

(4) 在我国寒冷地区过渡季期间,适当提高墙体保温及蓄热性能以及在采暖期壁面辐射采暖方式更易于使室内热环境达到舒适状态。

(5) 在过渡季关窗室内风速较低的情况下,人体热感觉对壁面平均温度的敏感性均高于空气温度和黑球温度。

#### 参考文献 References

- [1] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 30-40.  
JIANG Yi. Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures[J]. HV&AC, 2005, 35(5): 30-40.
- [2] HOUGHTEN F C, YAGLOGLOU C P. Determination of comfort zone[J]. Trans. ASHVE, 1923, 29: 361.
- [3] 麦金泰尔 D A. 室内气候[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.  
MCINTYRE D A. Indoor climate[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1998.
- [4] GIVONI B. 人·气候·建筑[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.  
GIVONI B. Men & climate & building[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1982.
- [5] ASHRAE. ASHRAE handbook-fundamentals[M]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2013.
- [6] BRAGER Gail S, de DEAR Richard J, 陈慧梅, 等. 建筑环境热适应文献综述[J]. 暖通空调, 2011, 41(7): 35-50.  
BRAGER Gail S, de DEAR Richard J, CHEN Huimei, et al. Thermal adaptation in the built environment: A literature review[J]. HV&AC, 2011, 41(7): 35-50.
- [7] 闫琳. 影响人体热感觉的因素的敏感性分析[J]. 安徽机电学院学报, 1998, 13(3): 12-15.  
YAN Lin. Sensitivity analysis on the factors affecting human thermal sensation[J]. Journal of Anhui Institute of Mechanical and Electrical Engineering, 1998, 13(3): 12-15.
- [8] 张兴隆, 董炳戌, 马勇, 等. 黑球温度对房间热舒适性的影响分析[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(5): 79-81.  
ZHANG Xinglong, DONG Bingxu, MA Yong, et al. Studying about the influence of indoor bubble globe temperature to room thermal comfortable[J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(5): 79-81.
- [9] 罗渊, 徐文华. 平均辐射温度对睡眠环境人体热舒适的影响[J]. 制冷技术, 2010, 4: 52-56.  
LUO Yuan, XU Wenhua. Influence of mean radiation temperature on thermal comfort in sleeping environment[J]. Refrigeration Technology, 2010, 4: 52-56.
- [10] 王昭俊, 何亚男. 冷辐射不均匀环境中人体热反应评价模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(12): 53-56.  
WANG Zhaojun, HE Yanan. Evaluation model for thermal responses in asymmetrical cold radiation environments[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(12): 53-56.
- [11] 傅俊萍, 马小余, 陈彦霖. 辐射壁作用下的室内热环境及人体热舒适研究[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(3): 86-88.  
FU Junping, MA Xiaoyu, CHEN Yanling. Research on indoor thermal environment and human thermal comfort under the action of radiation plate[J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(3): 86-88.
- [12] 蒯洁, 陈超, 伍品, 等. 低温辐射供暖地板表面温度与人体热舒适性关系的理论研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(10): 137-141.  
LIN Jie, CHEN Chao, WU Pin, et al. Theoretical study of relationship between human thermal comfort and panel surface temperature in low temperature radiant heating system[J]. HV&AC, 2009, 39(10): 137-141.
- [13] 国家质量技术监督局. 中等热环境PMV和PPD指数的测定及热舒适条件的规定: GB/T 18049-2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.  
State Bureau of Quality Technical Supervision. Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort: GB/T 18049-2000[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [14] DEAR D R J, FOUNTAIN M E. Field experiments on occupant comfort and office thermal environments in a hot-humid climate[J]. ASHRAE Trans, 1994, 100(2): 457-475.
- [15] 杨柳. 建筑气候学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 58.  
YANG Liu. Bio-climate architecture[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 58.
- [16] 刘加平. 建筑物理[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 14.  
LIU Jiaping. Architectural physics[M]. 3rd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2000: 14.
- [17] 刘加平, 杨柳. 室内热环境设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 11.  
LIU Jiaping, YANG Liu. Indoor environment design[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005: 11.

(编辑 桂智刚)