

研究论文

层式通风——高温空调下的出路

林 章, 周天泰, 曾志宽

(香港城市大学建筑科技学部, 建筑能源与环境科技室, 香港特别行政区)

摘要: 节能减排是当前全球性的呼声。作为回应, 东亚区域的若干个政府都提倡采用更高的夏季空调温度。要推广高温空调, 就必须使公众相信, 这样做不会降低室内环境品质, 尤其是不会降低热舒适性。要实施高温空调, 就必须筛选出在这样的非常规工况下性能良好的通风系统。因其在较高室温下的良好性能, 本文以数间香港办公室为例, 介绍并分析一种新型通风系统——层式通风。实验和模拟计算的结果显示, 如果送风速度, 送风量和送、排风口的设计正确, 层式通风具有热舒适性好(具体表现为头脚温差小)、能耗低、特别是呼吸区空气品质好的特点。下一步的工作将对上述优点进行定量研究。

关键词: 高温空调; 层式通风; 气流组织; 热舒适性; 室内空气品质

中图分类号: TU 831.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) S2-235-07

Ventilation system for higher room temperature setting

LIN Zhang, CHOW Tin Tai, TSANG Chee-fon

(Building Energy & Environmental Technology Research Unit, Division of Building Science and Technology, City University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China)

Abstract: There is worldwide plea to reduce carbon dioxide emission. In response to such a call, several governments in the East Asia recently required to adopt higher room temperatures in summer. To promote such an idea, the public need to be convinced that such practice would not sacrifice indoor environmental quality, especially thermal comfort of the occupants. To implement such a measure, suitable ventilation system (s) to work under the unconventional conditions should be identified. Stratum ventilation is introduced to demonstrate its feasibility in coping for the higher room temperatures. A case study, a typical office in Hong Kong, is used to illustrate the performance of this new ventilation mode. Experimental and computational results show that with properly designed supplied air velocity and volume, locations of supply and exhaust, the proposed system has the potential to maintain better thermal comfort with a smaller temperature difference between the head and foot level, lower energy consumption, and better indoor air quality (IAQ) in the breathing zone. Much further work is needed to determine if the benefits are significant.

Key words: elevated indoor temperature; stratum ventilation; flow pattern; thermal comfort; indoor air quality

2008-10-14 收到初稿, 2008-11-21 收到修改稿。

联系人及第一作者: 林章 (1961-), 男, 博士, 讲师。

基金项目: 香港城市大学建筑科技学部研究资助金。

Received date: 2008-10-14.

Corresponding author: Dr. LIN Zhang. E-mail: bsjzl@cityu.edu.hk

Foundation item: supported by the Division of Building Science and Technology Research Grant, City University of Hong Kong.

引 言

气候变化的迹象在地球上不难找寻。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 将人类活动与全球变暖联系在一起^[1]。国际有共识要实现二氧化碳的减排 (京都议定书等)。降低空调系统的能耗就是对减排的贡献。东亚地区的有关部门就此采取了积极的措施。香港特别行政区政府机电工程署做出空调温度必须设定于最宜温度以免浪费能源。一般而言, 理想的夏季空调设定温度应为 25.5℃^[2], 国家发改委倡导夏季空调 26℃^[3]。日本内阁环境省 (MoE) 鼓励将夏季办公室空调温度设定在 28℃^[4]。上述行政措施看来符合可持续发展的原则, 但在实施前仍需回答下面两个问题:

(1) 提高空调室温的做法是否降低室内空气品质, 特别是热舒适性?

(2) 高温空调应采用何种通风方式才合适?

作为第一个问题的答案, 已有许多较高室温下热舒适性研究的文献。Zhang 等^[5]发现, 在中性至偏暖的条件下, 人们对空气流动的不满普遍存在: 对空气流动不足的抱怨多于对空气流动过头的抱怨。在一座目标建筑中, 约有一半的人要求增加空气流动而只有 4% 的人要求减少空气流动。当在工作场所空气流动低时, 上述比例关系也成立。而 0.2 m·s⁻¹ 是 ASHRAE 和 ISO 事实上的热环境标准。限制空气流动以使吹风感严格地处于 5% 以内其实也有风险。该风险就是由于空气流动不足而引起的更严重的不舒适感。许多实验和现场调研证明, 在偏暖的条件下, 空气流动的热舒适性具有偿作用。在夏季, 空气流动的水平应该提高^[6-15]。当人们在热感觉等级处于热中性或以上 (偏暖) 时, 大多数人要求更大的空气流动。这在以前的一些现场调研也曾得到相同的结论^[16]。所有上述条件都偏离了传统的夏季热舒适标准。相对于背面而言, 人体的侧面对空前流动的敏感度低得多^[17], 正面可能也低^[10]。围绕人体的热对流层将污染物从地板和人体表面输送到呼吸区。此种热对流层典型的气流速度是 0.15 m·s⁻¹。较高的空气流动会打破这一对流层, 因而改进人们所感受的空气品质。另一方面, 人们的自然通风和室外微风经历, 使之将感受到的空气流动与空气品质的改善联系起来。

从上述两方面来说, 只考虑温度、不考虑空气流动对感受空气品质的影响将会事倍功半^[5]。在偏暖的环境中, 呼吸区的风速为 1 m·s⁻¹ 是可以接受的。反之, 在该环境下空气不动是不可接受的^[6]。Humphreys 等^[18]指出感受空气品质主要受热感觉的影响, 感受空气品质在热中性时高于在其他状况下, 特别是高于偏热时。所以, 偏热环境下空气流动增加人体散热, 因而增加热舒适性, 进而提高感受空气品质。增强室内空气流动一般比增加空调冷量能效更高^[12]。对热中性至偏热条件下 (23℃ 以上), 放宽目前对吹风感的限制将提供节能的机会, 而这种机会目前只局限于个人控制的通风设备。使用者能自行控制空气流动当然好, 但实际上仍有诸多限制^[19]。上述多个的现场调研揭示: 存在着这么一个温度和风速区- 在这个区间内对大的面积进行强制通风不会引起明显的吹风感^[5]。综上所述, 必须找出适合于高温空调的通风系统。这样的系统应能在工作区内实现较传统为高, 但仍处于文献建议的合理范围内的温度和空气流动。气流最好是来自人体的正面或侧面的水平流。

要回答第二个问题, 必须对现有的通风方式进行筛选。应用于空调房间的常规通风方式一般可分为 3 类, 即混合通风、置换通风和工位/个人通风。

混合通风是一种仍然广泛应用的传统的通风方式。其送风口装在天花板上, 不能实现水平送风。送风口和人员距离远, 要在工作区达到要求的风速, 就必须有相当大的风量, 这样风机的功率消耗也就相应地加大。即使采用了大风量, 工作区的水平气流也未必能够实现。

置换通风的气流是热驱动的, 所以用水平气流打破围绕人体的上升热气流层是与置换通风的工作原理背道而驰的。Wyon 等^[20]用人体模型进行了一系列置换通风下的热舒适性的实验。他们发现台面上的热舒适性较好; 主要的问题在台面下的腿部和脚踝。这说明置换通风常常过度地冷却地面附近, 而那里并没有热源。这样既导致了热不舒适, 也造成了浪费。

工位/个人通风系统的能源效益和呼吸区的空气品质俱佳, 并能满足高温空调的要求。该系统靠喷嘴对着使用者送风。由于近距离送风, 吹风感难以避免。一方面, 针对各种房间布置配备喷嘴和风管或不易实现, 或费用太高。如果重新划分隔墙、

更新装修或家具的事经常发生就更是如此。另一方面，特定的空间（例如商场）内的某些人员未必在固定的位置停留。以上问题都限制了工位/个人通风系统的应用。

由本文作者近年提出的层式通风也满足高温空调的要求^[21]，层式通风的概念如图 1 所示。

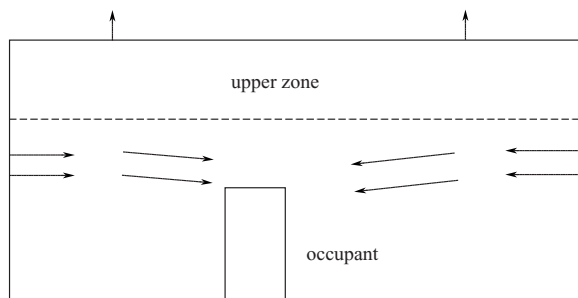


图 1 层式通风示意图

Fig. 1 Conceptual diagram of stratum ventilation

1 方 法

高温空调建议采用层式通风方式。本文的目的是确定层式通风在较高的温度和风速条件下是否可行。研究室内气流和污染物的传输有两种途径：实验与计算机模拟。直接的测量值是最真实的数据但耗资费时。现已进行了数个探索性的实验。

计算流体力学（CFD）技术也被采用。由于目前计算机的性能和容量有限，CFD 技术只能使用紊流模型来求解流动的问题。因为紊流模型并非普遍适用，导致其计算结果的不确定性。因此，CFD 模型必须经由实验数据校验^[22]。

本文使用一个基于 RNG $k-\epsilon$ 模型和壁面函数的 CFD 模型^[23]。该模型在混合通风和置换通风工况下进行了校验。该模型也曾进行了数百个个案的计算，包括办公室、教室、商场、车间和公交总站等。送风方式包括地板送风和天花板送风。在相同的内部布置和相似的边界条件下，层式通风的工况介于混合通风和置换通风之间。该模型最近也完成

了水平送风的层式通风的校验^[24]。该模型在 CFD 商业软件 CFX 的基础上建立。就对流项而言，CFX 默认有限体积元法和迎风差分格式^[25]。

受限于篇幅，本文仅以一个案例，揭示高温空调下层式通风的性能。风速、气流风险（PD）、预测不满意百分数（PPD）是被广泛采用的热舒适性指标^[20,26]。这两个参数都决定于热和气流的边界条件，包括房间大小和形状、通风量与风温、热源情况等。

一个典型的车间单元被用来作为例子。该单元的布置见图 2，主要参数见表 1。车间单元的东南西北四面墙上各有 1 个条缝送风口，送风口的中心均距地面 1.2 m，该车间共有 8 人，西墙上开有一扇长的玻璃窗。

受限于人工环境室的尺寸，用图 2 所示的车间单元做实验是不切实际的。实验用的是如图 3 所示的一个单间。实验的结果同时也用于进一步校验本文所用的 CFD 模型。

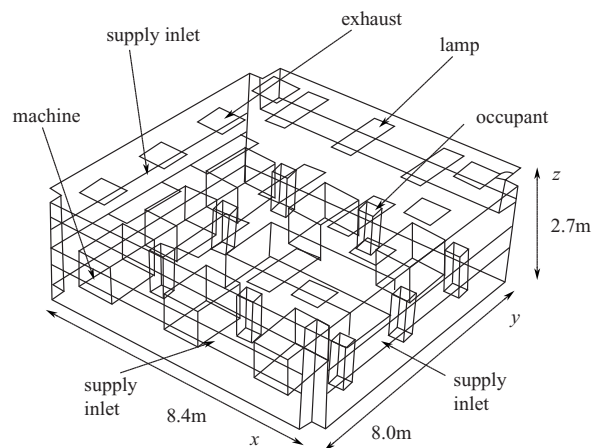


图 2 典型车间单元的布置

Fig. 2 Layout of typical workshop

2 结果和讨论

2.1 气流组织形式

本系统采用低速送风（ $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）以避免吹

表 1 典型车间单元的主要参数

Table 1 Major parameters for typical workshop

No. of occupant	West wall /W	Window /W	Lamps /W	Machines /W	Air circulation / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Fresh air intake / $\text{L} \cdot \text{person}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
8	900	3,168	90×9	33,600	5.97	10

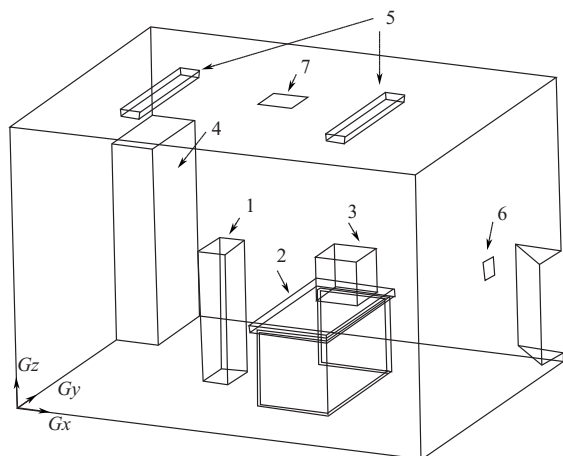


图 3 单间的布置

Fig. 3 Layout of individual office

1—occupant; 2—table; 3—computer; 4—file cabinet;
5—lamp; 6—air supply; 7—air exhaust

风感。图 4 给出了靠近坐着的使用者处的实测竖向风速图。计算结果显示气流进入房间后逐渐失去动量，并因重力而逐渐下沉。靠近送风口，风速所具有的动量在呼吸区形成了一层较新鲜的空气。远离风口，气流更多地受对流支配。但送风气流在逐渐下沉的过程中还是渗透到了房间中心的呼吸区（图 5）。在外墙和窗附近，空气受热，产生对流作用。类似的作用并未出现在其他三面内隔墙附近，因为邻室温度相同。

工作区的风速不高，在 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。但外墙附近的风速更高，在 $0.3 \sim 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围。外墙内侧的气流快速地上升至天花板下。最高的风速出现在玻璃窗的内侧，平均达到 $0.4 \sim 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此处热源的热流最强。

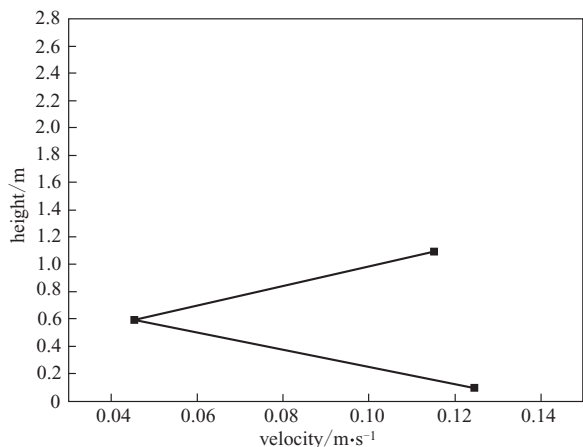
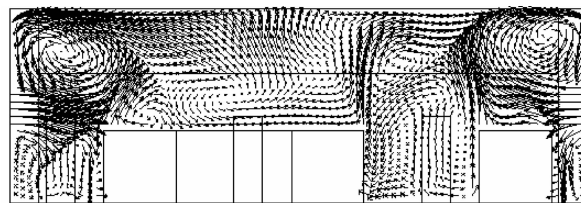
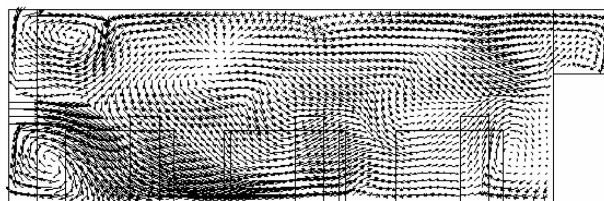


图 4 近人处实测竖向风速图

Fig. 4 Measured vertical velocity profile next to occupant



(a) $x=4.5\text{m}$



(b) $y=5.6\text{m}$

图 5 计算的气流组织形式

Fig. 5 Computed airflow pattern

2.2 温度分布

图 6 给出了靠近坐着的使用者处的实测竖向温度图。计算结果如图 7 所示，除送风口外，水平方向上的温度变化很小，从而避免了因温差引起的吹风感。地面和送风口附近的温度为 23°C ，而房间中心的温度是 26°C ，送风温度是 20°C 。由于包括室外热传递、办公室设备和人员在内的各种热源，空气温度在距送风口一定距离外就上升，因而地面附近的温度高于送风温度。产热设备附近的温度更高。但因为温度刚过 30°C 且操作工位并不太靠近，并不影响热舒适性。因温差很小，由温度分层而引起的热辐射微乎其微。工作区内机器附近的温度最高，比平均室温高 3°C 。工作区内的温度梯度保持在 ISO 1984^[27] 和 ASHRAE 1992^[28] 规定的范围之内。

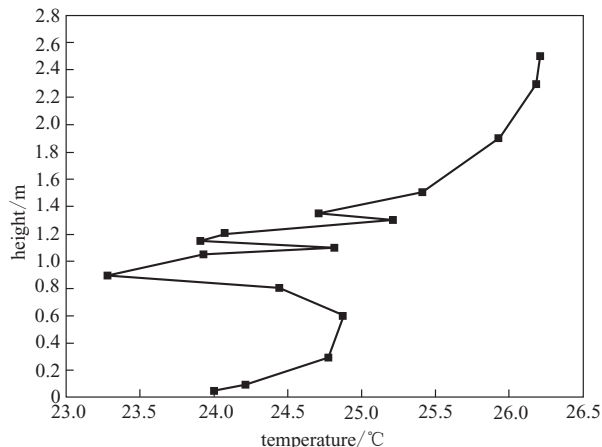
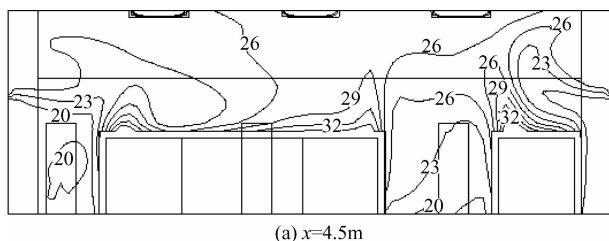
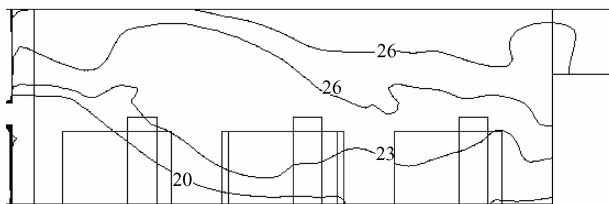


图 6 近人处实测竖向温度图

Fig. 6 Computed vertical temperature profile next to occupant



(a) $x=4.5\text{m}$



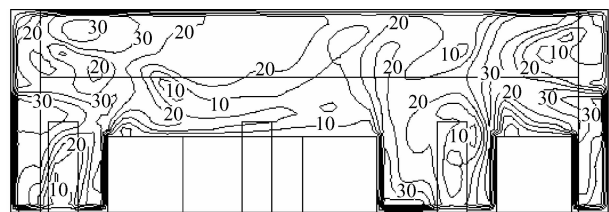
(b) $y=5.6\text{m}$

图 7 温度计算值

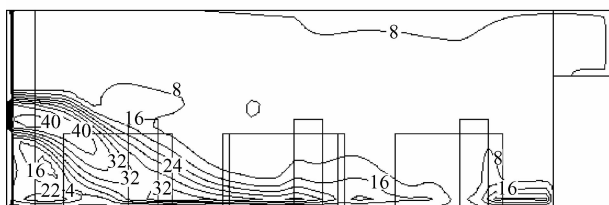
Fig. 7 Computed temperatures

2.3 气流风险

如图 8 所示，在距送风口 1 m 范围内的气流风险 (PD) 值较高，约为 30%~40%。气流风险主要是由设备产热所导致的自然对流引起的。在机器附近的 PD 值较高，约为 20%~30%。室内的其他人员可能停留的地方，PD 值大约在 10% 以内。ISO 7730 推荐的 PD 值是 15%。



(a) $x=4.5\text{m}$



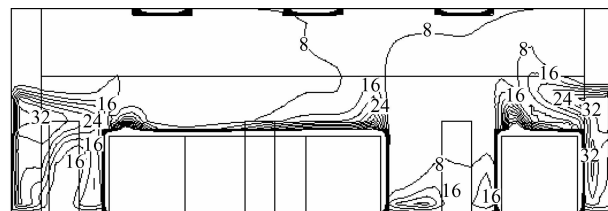
(b) $y=5.6\text{m}$

图 8 PD 指数 (%)

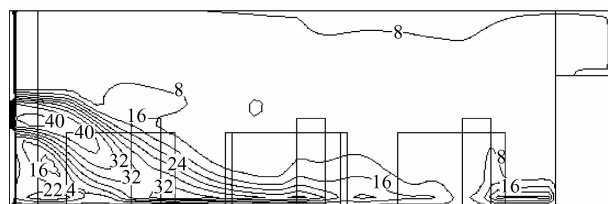
Fig. 8 PD index (%)

2.4 预测不满意百分数

如图 9 所示，车间的预测不满意百分数 (PPD) 为 8%~40%。最高值在车间左侧靠窗处。这是由于窗的热负荷引起的对流加上风口的作用。PPD 值普遍在 8 左右。距风口 1 m 范围内的 PPD 值可达 32%~40%，主要在头部和胸部的高度。ISO 7730 推荐的 PPD 值是 15%。



(a) $x=4.5\text{m}$



(b) $y=5.6\text{m}$

图 9 PPD 指数 (%)

Fig. 9 PPD index (%)

2.5 二氧化碳浓度分布

二氧化碳浓度分布用来衡量通风的有效性。图 10 和图 11 分别给出实测和计算的结果。在使用区内，二氧化碳浓度介于 $740 \sim 800 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间，符合香港《办公室及公众场所室内空气质素检定计划指南》中关于“卓越级”的规定。相对均匀的二氧化碳浓度分布亦说明新风能被送达车间的中心处。

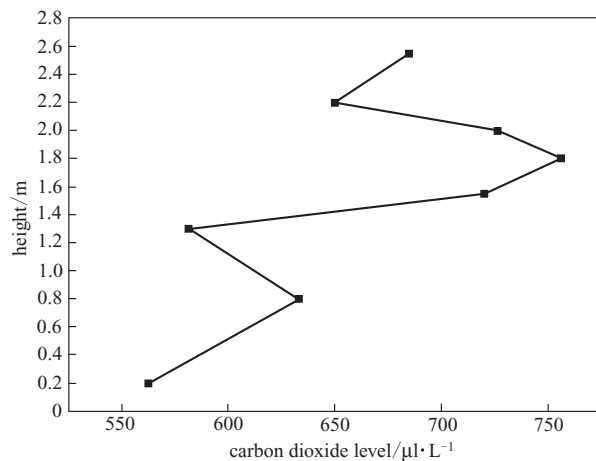


图 10 近人处实测竖向二氧化碳浓度图

Fig. 10 Measured vertical CO_2 concentration profile next to occupant

3 结 论

经个案研究，在高温空调的条件下，层式通风能有效地满足室内热舒适性和空气品质的要求。计算的预测不满意百分数和气流风险（应该指出的

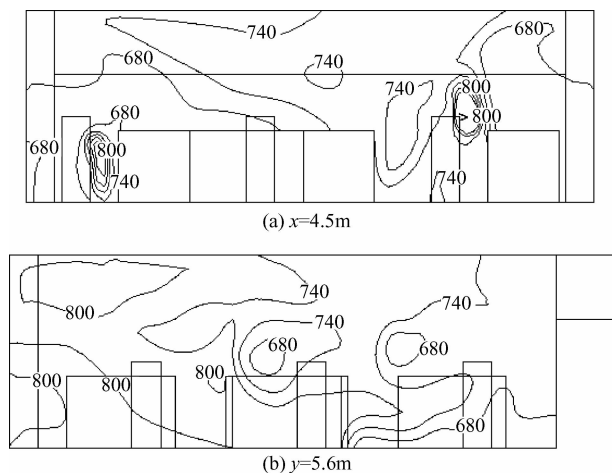


图 11 二氧化碳计算值

Fig. 11 Computed CO₂ levels

是, 本文用来计算 PD 和 PPD 的公式是基于传统的低温空调的。在高温条件下, 风速所导致的热不舒适度显著下降), 在案例中的车间单元的大部分地方一般能满足要求。层式通风能够在不过分冷却房间下部的前提下, 有效驱散二氧化碳。初步结果表明, 该通风方式颇具潜力。对层式通风的研究还处在早期阶段, 需要对诸如温度、风速、送风口位置等参数及其影响进行进一步的研究以确定此通风方式的最佳设计与配置。

References

- [1] Pachauri R K. IPCC Director-General. The IPCC Fourth Assessment Working Group Reports: Key findings [R]. United Nations Headquarters, New York, 2007
- [2] 香港特别行政区政府室内空气质量素管理小组。《办公室及公众场所室内空气质量素检定计划指南》. 2003
- [3] 国家发展和改革委员会。《公民节约行为公约》[EB/OL]. [2005-12-23]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/t20051223_54462.htm
- [4] Ministry of the Environment (MoE), Cabinet of Japan. "National Campaign to Fight Global Warming" [EB/OL]. [2005-04-28]. <http://www.env.go.jp/en/press/2005/0428b.html>
- [5] Zhang H, Arens E, Fard S A, Huizenga C, Paliaga G, Brager G, Zagreus L. Air movement preferences observed in office buildings. *International Journal of Biometeorology*, 2007, **9** (5): 349-360
- [6] Rohles F, Woods J E, Nevins R G. The effect of air movement and temperature on the thermal sensations of sedentary man. *ASHRAE Transactions*, 1974, **80** (1): 101-119
- [7] Tanabe S, Kimura K. Thermal comfort requirements under hot and humid conditions//Proceedings of the First ASHRAE Far East Conference on Air Conditioning in Hot Climates.

- Singapore: ASHRAE, 1989: 3-21
- [8] Scheatzle D, *et al.* Expanding the summer comfort envelope with ceiling fans in hot, arid climates. *ASHRAE Transactions*, 1989, **95** (1): 269-280
- [9] Fountain M E. Laboratory studies of the effect of air movement on thermal comfort: a comparison and discussion of methods. *ASHRAE Transactions*, 1991, **97** (1): 863-873
- [10] Mayer E. New measurements of the convective heat transfer coefficients: influences of turbulence, mean air velocity and geometry of human body//Proceedings of Roomvent 1992. Lyngby, Denmark: Danish Association of HVAC Engineers (DANVAK), 1992, **3**: 263-276
- [11] Fountain M E, Arens E A, de Dear R, Bauman F, Miura K. Locally controlled air movement preference in warm isothermal environments. *ASHRAE Transactions*, 1994, **100**: 937-952
- [12] Arens E. Assessment of indoor environments//Proceedings of Roomvent 2007. Keynote-lectures, Helsinki, Finland, 2007: 1-14
- [13] Nicol F. Building research and the sustainability of the built environment in the tropics. *Energy and Buildings*, 2004, **36** (7): 628-637
- [14] Zhao R, Sun S, Ding R. Energy and environment of residential buildings in China. *Energy and Buildings*, 2004, **36** (12): 1281-1286
- [15] Li L. The improvement of summer thermal environment of ventilated-room of Xiamen in China//Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Beijing, 2005: 199-203
- [16] Toftum J. Air movement -good or bad? *Indoor Air*, 2004, **14** (s7): 40-45
- [17] Toftum J, Zhou G, Melikov A. Effect of airflow direction on human perception of draught//Proceedings of CLIMA 2000 Conference. Brussels, Belgium: International Network for Information on Ventilation and Energy Performance, 1997: Paper 366
- [18] Humphreys M A, Nicol J F. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in everyday thermal environments. *Energy and Buildings*, 2002, **34** (6): 667-684
- [19] Zhang H, Arens E, Kim D E, Buchberger E, Bauman F, Huizenga C. Comfort, perceived air quality, and work performance in a low-power task-ambient conditioning system//International Symposium on the Interaction between Human and Building Environment. Korea: Yonsei University, 2008
- [20] Wyon D P, Sandberg M. Thermal manikin prediction of discomfort due to displacement ventilation. *ASHRAE Transactions*, 1990, **96** (1): 67-75
- [21] Lin Z, Chow T T, Tsang C F. Stratum ventilation? A conceptual introduction//Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Beijing, 2005: 3260-3264
- [22] Yuan X, Chen Q, Glicksman L R, Hu Y, Yang X. Measurements and computations of room airflow with displacement ventilation. *ASHRAE Transactions*, 1999, **105** (1): 340-352

- [23] Lin Z, Chow T T, Wang Q, Fong KF, Chan L S. Validation of CFD model for research into displacement ventilation. *Architectural Science Review*, 2005, **48** (4): 305-316
- [24] Lin Z, Chow T T, Tsang C F. Validation of CFD model for research into stratum ventilation. *International Journal of Ventilation*, 2006, **5** (3): 345-363
- [25] AEA Technology. CFX-4.3 Environment User Manual, Vol. 1—4. 1999
- [26] Fanger P O, Christensen N K. Chart for prediction of draught. *Australian Refrigeration, Air Conditioning and Heating*, 1986, **40** (7): 46
- [27] ISO 7730. Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva, Switzerland: International Standards Organisation, 1994
- [28] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-1992-Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1992