

# Analysis of the Transfer Characteristics of the Temperature and Velocity in the Solar-Wall System by Lattice Boltzmann Method

Jingjie Ye

College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua  
Email: 597141861@qq.com

Received: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2013; revised: Apr. 8<sup>th</sup>, 2013; accepted: May 10<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Jingjie Ye. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** In this paper, the characteristics of heat transfer and air flow in the solar wall and heated room are analyzed by Lattice Boltzmann Method simulation. We studied the air flow in the porous wall and the heat transfer of the heated room under different parameters, such as velocity of the fan, porosity of the porous medium and diameter of the upper channel etc. The results show that changing parameters have a remarkable effect on temperature of the air flowing through the porous medium and the heated room. As a result, choosing the parameters properly can effectively improve the heat utilization efficiency of the porous wall and the thermal comfort of the room.

**Keywords:** Lattice Boltzmann Method; The Solar-Wall System; Heat Transfer; Porous Medium

## 用格子 Boltzmann 方法分析太阳墙系统温度和速度的传输特性

叶婧婕

浙江师范大学数理与信息工程学院物理系, 金华  
Email: 597141861@qq.com

收稿日期: 2013 年 4 月 3 日; 修回日期: 2013 年 4 月 8 日; 录用日期: 2013 年 5 月 10 日

**摘要:** 本文主要应用格子 Boltzmann 方法研究太阳墙以及采暖房的热量传递和空气流动特性。通过改变参数, 例如: 风机的速度, 多孔介质的孔隙度和上通道的直径等, 进行数值模拟, 研究在不同的参数下通过多孔介质的空气温度和流速, 以及采暖房的温度分布等问题。数值模拟结果表明: 参数的不同对流经多孔墙的空气的温度, 以及采暖房的温度分布有着显著的影响, 适当的选择参数可以有效的提高多孔墙的热利用率和房间的热舒适性。

**关键词:** 格子 Boltzmann 方法; 太阳墙系统; 热传递; 多孔介质

### 1. 引言

太阳能<sup>[1]</sup>作为一种清洁的可再生资源已经在很多领域里得到应用。例如, 太阳能电池<sup>[2]</sup>(the solar battery), 太阳能热水器<sup>[3]</sup>(the solar water heater)等。太阳

墙是太阳能在城市供暖方面的应用。太阳墙系统从最初的平板集热器<sup>[4]</sup>到特朗勃墙<sup>[5]</sup>再到被动式太阳墙<sup>[6]</sup>经历了一系列的发展。其基本结构包括蓄热墙和空气通道。蓄热墙吸收太阳辐射的热量, 给通道中的空气

加热, 热空气通过上层的空气通道流入室内, 冷空气从下通道流出。同时蓄热墙以热传导的方式向室内传递热量。本文则主要研究一种新型的含多孔介质的主动式太阳墙系统, 这种新式的太阳墙系统能起到供暖和换气的双重功效<sup>[7,8]</sup>。

本文应用格子 Boltzmann 方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)<sup>[8,9]</sup>对多孔介质太阳墙系统中作为传热媒介的空气在多孔墙内的流动与传热过程, 以及采暖房温度分布等情况进行了数值模拟。数值结果表明: 系统参数的改变对于太阳墙以及采暖房内的温度分布和速度分布情况产生了一定的影响。这些结果对优化系统模型和进一步的研究可以起到一定的指导作用。

## 2. 太阳墙系统模型

图 1 为太阳墙系统的结构示意图, 图中不同灰度代表不同的区域, 从左至右依次为: 多孔介质墙, 空气通道, 蓄热墙, 上通道(风机), 下通道以及采暖房。由于风机的抽吸作用, 空气通过多孔介质墙被加热后, 由上通道流入采暖房。同时, 冷空气从下通道流出。

## 3. 数值模拟方法: 格子 Boltzmann 方法

本文应用广义 LBE 模型(GLBE)模拟多孔介质太阳墙系统的速度场和温度场。

该模型对速度场的模拟采用一个速度分布函数的演化方程<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} f_i(r + e_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(r, t) \\ = -\frac{1}{\tau} [f_i(r, t) - f_i^{(eq)}(r, t)] + \Delta t F_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $f(r, t)$  表示  $t$  时刻, 位置为  $r$  处, 发现速度为  $e_i$



Figure 1. The structure diagram of the solar-wall system  
图 1. 太阳墙系统结构示意图

的粒子的概率。  $\Delta t$  是时间步长。  $\tau$  是弛豫时间。  $f_i^{(eq)}$  是局部平衡态分布函数(EDF)表达式为:

$$f_i^{(eq)} = \rho \omega_i \left( 1 + \frac{c_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{uu : (c_i c_i - c_s^2 I)}{2 \varepsilon c_s^4} \right) \quad (2)$$

这里  $\omega_i$  和  $c_s$  为权重系数和格子声速, 是独立于模型的参数。其中,  $c = \Delta x / \Delta t$ ,  $\Delta x$  为空间步长,  $c_s = c / \sqrt{3}$ , 权重系数分别为  $\omega_0 = 4/9, \omega_{1-4} = 1/9, \omega_{5-8} = 1/36$ 。

在公式(1)中出现的作用力项是流体介质阻力和外力的总和, 表示为:

$$F_i = \omega_i \rho \left( 1 - \frac{1}{2\tau} \right) \left[ \frac{c_i \cdot F}{c_s^2} + \frac{uF : (e_i e_i - c_s^2 I)}{2c_s^4} \right] \quad (3)$$

流体的平均密度和速度与分布函数的关系为:

$$\rho = \sum_i f_i, \quad u = \frac{v}{c_0 + \sqrt{c_0^2 + c_1 |v|}} \quad (4)$$

其中  $c_0, c_1$  和  $v$  分别由下列公式给出:

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{1}{2} \left( 1 + \varepsilon \frac{\Delta t v}{2K} \right), \quad c_1 = \varepsilon \frac{\Delta t F_\varepsilon}{2\sqrt{K}}, \\ \rho v &= \sum_i e_i f_i + \frac{\Delta t}{2} \varepsilon \rho G \end{aligned} \quad (5)$$

温度场的模拟采用一个温度分布函数<sup>[11]</sup>, 其演化方程如下:

$$T_i(r + e_i \Delta t, t + \Delta t) - T_i(r, t) = -\frac{1}{\tau_T} [T(r, t) - T_i^{(eq)}(r, t)] \quad (6)$$

其中  $T_i$  是温度的离散分布函数,  $\tau_T$  是温度场的弛豫时间,  $T_i^{(eq)}$  是温度场的平衡态分布函数:

$$T_i^{(eq)} = \frac{T}{4} \left( \sigma + 2 \frac{e_i \cdot u}{c^2} \right) \quad (7)$$

宏观温度由温度分布函数给出:

$$T = \sum_{i=1}^4 T_i \quad (8)$$

方程(1)(6)通过 Chapman-Enskog 展开可得到相应的宏观方程。GLBE 模型是一个统一的 LBE 模型: 在多孔介质区域, 平衡态分布函数中的孔隙度为介质的孔隙度; 在自由区域, 孔隙度为 1。GLBE 模型变成标准的 D2Q9 模型。广义的 N-S 方程也退化为标准

的不可压缩流体的 Navier-Stokes(N-S)方程。

计算采取的边界条件表示为：结构模型的上下和右边界，以及蓄热墙边界考虑成绝热的固体边界，即  $u = v = 0.0, \partial T / \partial x = 0.0$ 。结构模型的左边界应用 LBM 的非平衡外推边界条件。系统的变量为多孔墙的孔隙度  $\varepsilon$ ，风机的速度  $U$  和上通道的直径  $L$ 。其他参数设定为：多孔墙的温度  $T_0 = 5$ ，瑞利数  $Ra = 1 \times 10^6$ ，普朗特数  $Pr = 1.0$ ，达西数  $Da = 1 \times 10^{-6}$ 。作为定性研究，本文采用格子单位。

#### 4. 数值结果与分析

图 2 是太阳墙内的流线图，风机位置如图 1 所示，速度  $U = 500$ 。从图中我们可以清楚地看出空气的流动过程。空气从外界流入多孔墙，经过风机的抽吸作用进入采暖房，置换出采暖房的空气，并从下通道流出，形成循环风，对采暖房起到加热和换气的作

用。图 3 为太阳墙内的等温图。从图中的等温线看出，太阳墙的顶部，速度越大的地方温度越高。底部的空白区域说明，在太阳墙的底部，从室内流向室外的空气温度较低。

图 4 表示风机的速度对多孔墙内空气的温度和速度分布的影响。如图所示，风机的速度分别取：500，1000，1500，2000，3000，4000。图 4(a)中，上通道 ( $H > 220$ ) 和下通道 ( $H < 30$ ) 的位置，空气温度随着风机速度的增加而明显升高，但速度增加到一定程度

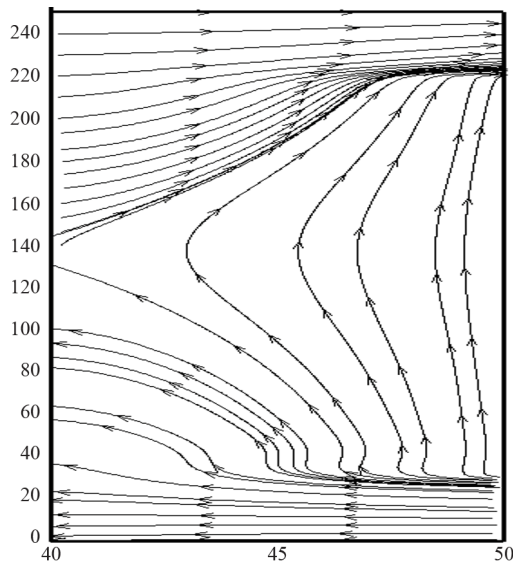


Figure 2. The streamlines in the solar wall  
图 2. 太阳墙内的流线图

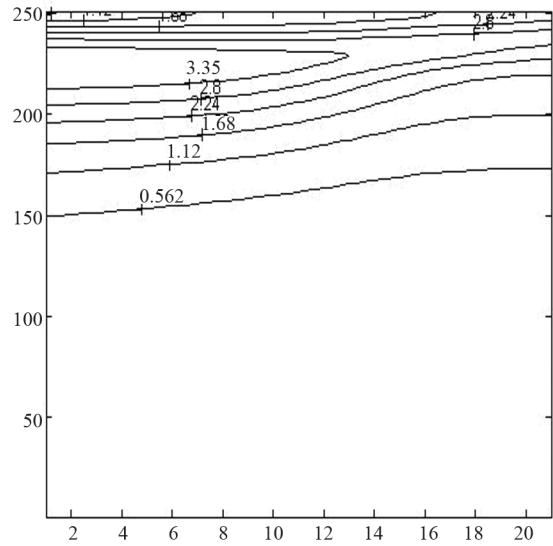
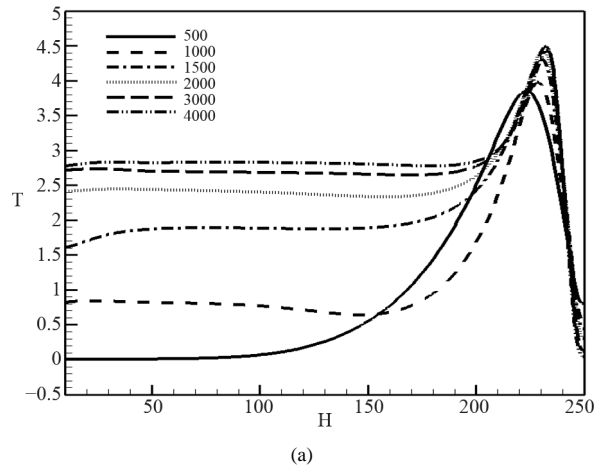
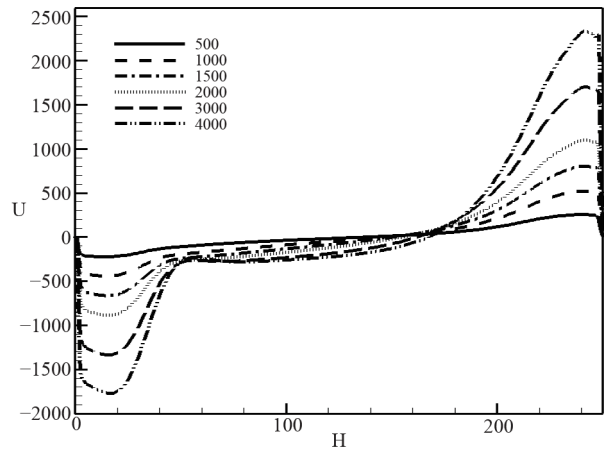


Figure 3. The isothermal map in the solar wall  
图 3. 太阳墙的等温图



(a)



(b)

Figure 4. Temperature distribution and velocity distribution of the porous wall along vertical direction at different fan's speeds  
图 4. 不同风机速度时多孔墙内沿竖直方向的温度分布和速度分布

(2000 以上)后, 空气温度升高的幅度逐渐减小。风机速度的增加, 使流入室内的空气温度升高, 从下通道流出的空气的温度也升高。热的空气随空气循环重新流入室内可以减少热量的流失。图 4(b)中显示多孔墙的底部到顶部空气速度的方向从负到正, 上下通道处速度最大, 并随着风机速度的增加而不断升高。

图 5 表示孔隙度对多孔墙内垂直方向的温度分布的影响。不同的孔隙度对多孔介质内空气的温度分布影响并不明显, 可能的原因是我们建立的多孔墙模型过于简化, 单独改变孔隙度不足以体现多孔墙对内部温度分布等的影响, 可以从添加热源项或考虑蓄热墙的储热作用方面进一步的优化建立的模型。图 6 表示多孔墙的温度不同时, 空气通道的温度分布情况, 很自然地, 多孔墙的温度越高, 通道里的空气温度越高,

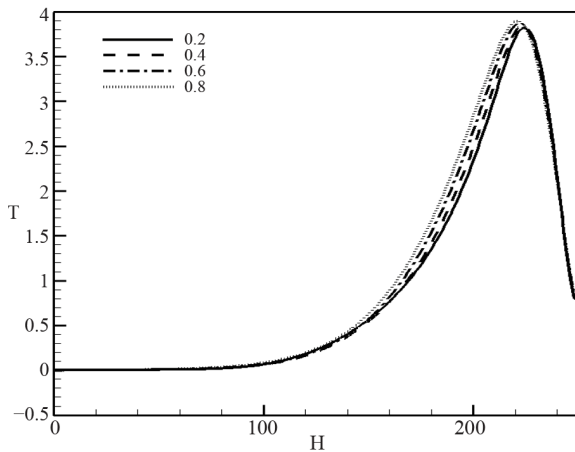


Figure 5. Temperature distribution of the porous wall along vertical direction at different porosity  
图 5. 不同孔隙度时多孔墙内沿垂直方向的温度分布

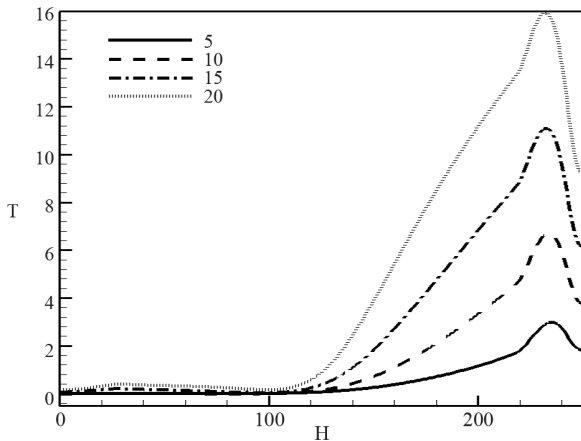


Figure 6. Temperature distribution of the air channel along vertical direction at different temperature of boundary  
图 6. 不同的温度边界下空气通道沿垂直方向的温度分布

即多孔墙的集热性能越好对系统温度的提升越有好处。图 7 显示上通道的直径对于空气通道内垂直方向的温度分布存在影响, 上通道的直径越大, 空气的温度越高。流入室内的空气温度升高, 从下通道流出的空气的温度也相应的升高。流出的热空气由于浮升力的作用上升, 从上通道流入室内, 减少热量的损失。

采暖是为了室内更舒适, 现在我们来查看室内温度分布的情况。图 8 为风机置于顶部时室内温度的扩散情况, 可以看出温度从顶部扩散到底部, 分布比较均匀。而图 9 为风机处于底部时室内温度的扩散情况, 图中数据显示, 温度集中在采暖房的左侧, 右侧的温度偏低。出现这种情况的原因是: 热的空气从底层进入室内, 由于浮升力的原因上升。顶部有导出空气的

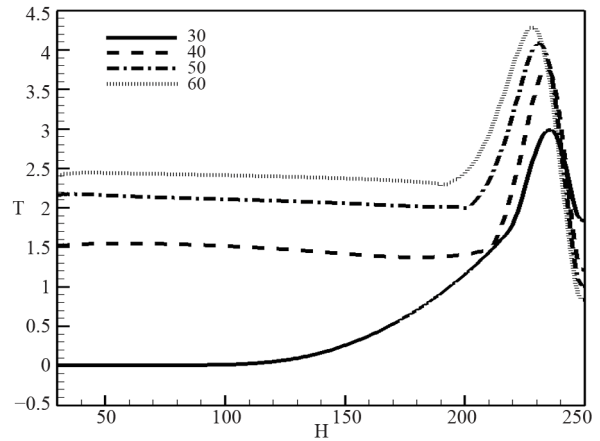


Figure 7. Temperature distribution of the air channel along vertical direction at different diameter of the upper channel  
图 7. 不同上通道的直径时空气通道沿垂直方向的温度分布

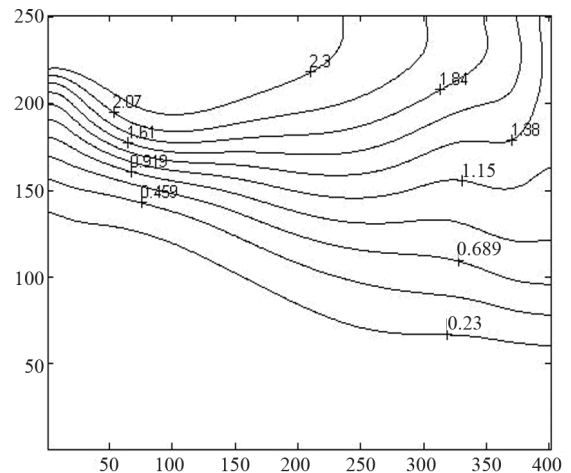


Figure 8. The isothermal map of the heated room when the fan is placed at the top  
图 8. 风机安装在顶部, 采暖房的等温图

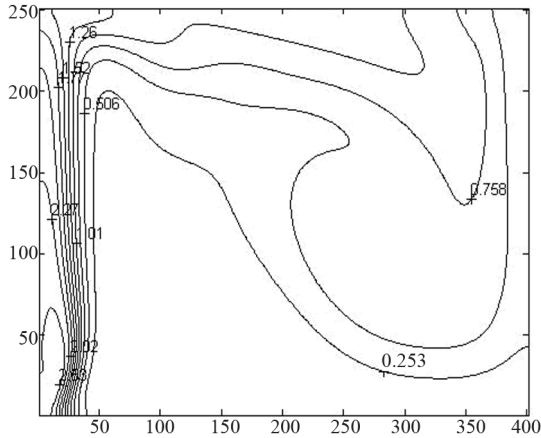


Figure 9. The isothermal map of the heated room when the fan is placed at the bottom  
图 9. 风机安装在底部, 采暖房的等温图

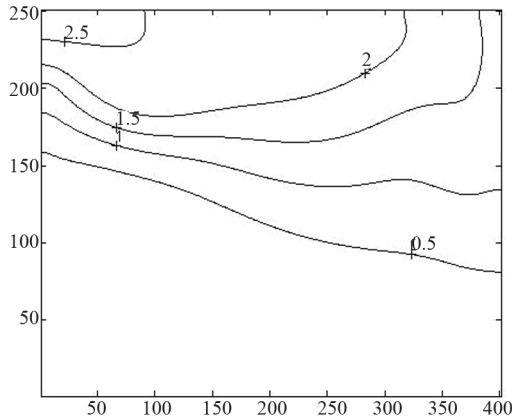
通道, 会有热的空气直接从顶部离开, 对室内加热的效果很差。因此这种将风机至于底部的设计方式是不合理的。

图 10 表示将风机安装在顶部, 单独改变风机的

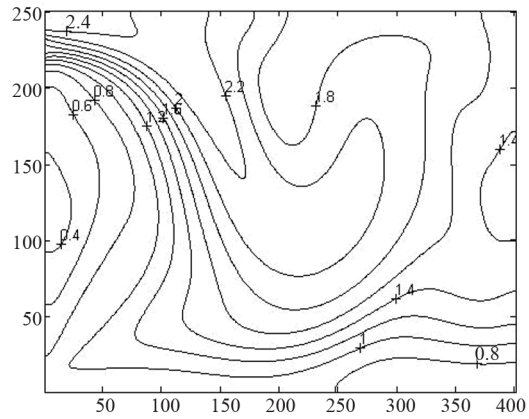
速度。在不同的速度下产生不同的温度分布。在一定的范围内( $U \leq 2000$ )风机的速度越大, 采暖房的温度越高, 温度扩散的越均匀。当速度超过范围时, 室内温度没有显著的变化。从图 4(a)中可以更明显的看出当  $U > 2000$  时, 提高速度对温度分布的影响不大。此外, 当风速增加时, 室内空气流动也将明显, 这不利于人体的舒适感, 而且也更耗能, 所以, 综合考虑多方面的影响, 风机速度有一个最佳值。

### 5. 结论

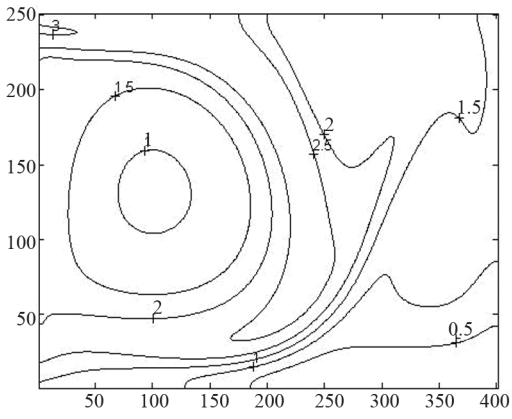
本文应用耦合双分布函数模型模拟含有多孔介质墙的太阳墙系统, 根据模拟的结果, 我们可以得出以下的结论: 1) 单独增加多孔墙的温度或上通道的直径可以提高流入采暖房的空气温度。2) 孔隙度的变化对多孔墙内空气温度的变化影响不大。3) 在一定范围内提高风机的速度( $U < 2000$ )可以明显提高流入空气的平均温度, 继续提高速度, 空气温度升高的幅度逐



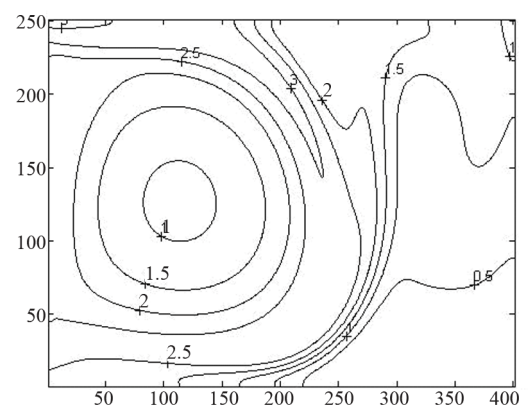
(a)  $u = 500$



(b)  $u = 1000$



(c)  $u = 1500$



(d)  $u = 2000$

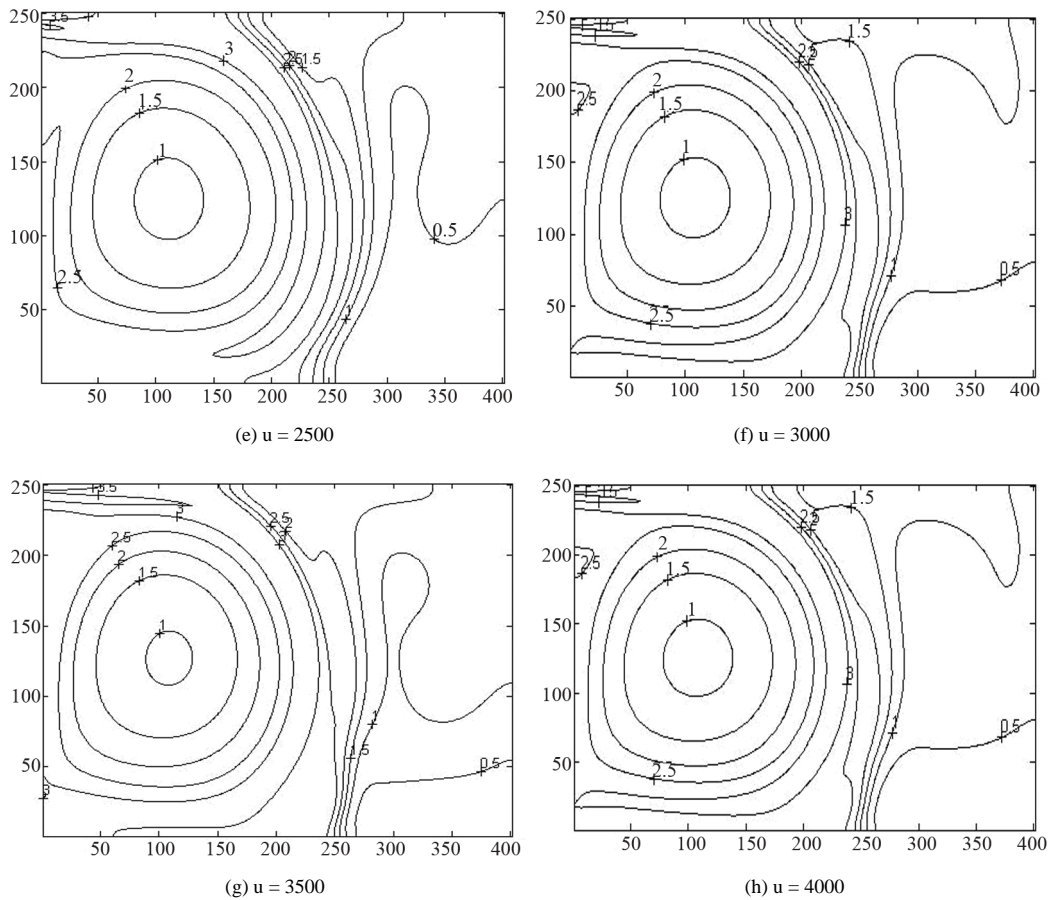


Figure 10. The isothermal map of the heated room at different fan's speeds  
图 10. 在不同的风机速度下采暖房的等温图

渐减小。4) 考虑风机的位置对室内空气温度分布的影响,发现风机位于顶部比底部的设计更有利于热量的扩散。

### 参考文献 (References)

- [1] 郭奎. 太阳能集热墙系统热性能的研究[D]. 北京建筑工程学院, 2008.
- [2] 倪萌, M. K. Leung, K. Sumathy. 太阳能电池研究的进展[J]. 可再生能源, 2004, 114(2): 9-11.
- [3] 李舒宏, 武文彬, 张小松等. 太阳能热泵热水装置实验研究与应用分析[J]. 南大学学报(自然科学版), 2005, 35(1): 82-85.
- [4] 李戩洪, 江晴. 一种高效平板太阳能集热器实验研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(2): 131-135.
- [5] 杨昭, 徐晓丽. 特朗勃壁温度场分析[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 568-570.
- [6] 陈威, 刘伟. 太阳能集热组合墙系统的耦合传热与流动分析[J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 882-886.
- [7] 孟世荣, 陈滨. 集热蓄热式太阳能建筑的能耗模拟研究[J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(4): 16-21.
- [8] S. Chen, G. D. Doolen. Lattice Boltzmann method for fluid flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998, 30: 329-364.
- [9] 郭照立, 郑楚光. 格子 Boltzmann 方法的原理和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 35-43.
- [10] Z. L. Guo, T. S. Zhao. Lattice Boltzmann model for incompressible flows through porous media. Physical Review E, 2002, 66(3): Article ID: 036304.
- [11] Z. L. Guo, B. C. Shi and C. G. Zheng. A coupled lattice BGK model for the Boussinesq equations. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2002, 39(4): 325-342.