

井窖风场特征的 CFD 模拟与验证

林叶春 高维常 陈懿 陈伟 丁福章 潘文杰*

(贵州省烟草科学研究院,烟草行业山地烤烟品质与生态重点实验室,贵阳 550081)

摘要 为明确井窖内部空气受外界气流的影响及井窖维持适宜水热条件的机制,通过建立未移栽作物条件下井窖的三维数值模拟模型,利用 CFD 计算流体力学软件分析在 1.50、2.70 和 3.90 m/s 近地表风速条件下,对井窖内部空气流速和流向进行数值模拟计算,并进行试验验证。模拟试验结果表明:近地表风速设为 1.50、2.70 和 3.90 m/s 时,模拟的井窖纵切面平均空气流速分别为 0.25、0.48 和 0.72 m/s,井窖内的平均空气流速较近地表下降 81.54%~83.34%;近地表风向由右向左时,井窖内纵切面的空气呈逆时针流动。验证试验结果表明:井窖内空气流速与地表风速成线性相关,模拟方程为 $y=0.2209x-0.176(R^2=0.9253)$;近地表风速为 2.70 m/s 时,井窖内实测空气流速为 0.42 m/s,模拟值为 0.48 m/s。井窖内部空气受外界大气扰动较弱,减少热量和水分向外散失,有利于保持烟苗生长适宜的水热条件。

关键词 移栽方式;井窖;风场;空气交换;计算流体力学

中图分类号 S318;TP391.9

文章编号 1007-4333(2018)05-0117-05

文献标志码 A

CFD simulation and verification of wind field characteristic in transplanting hole

LIN Yechun, GAO Weichang, CHEN Yi, CHEN Wei, DING Fuzhang, PAN Wenjie*

(Upland Flue-cured Tobacco Quality & Ecology Key Laboratory of China Tobacco,
Guizhou Academy of Tobacco Science, Guiyang 550081, China)

Abstract In order to clarify the mechanism of suitable water and heat conditions in transplanting hole, this study analyzed the effects of the wind speed near the soil surface on air velocity in the transplanting hole. Based on the three-dimensional numerical simulation model of transplanting hole under the condition of no crops planted, CFD software was used to simulate the internal airflow in the transplanting hole at 1.50, 2.70 and 3.90 m/s, respectively. The flow velocity was verified by experimental test. The simulation results showed that the average air speed of the longitudinal section was 0.25, 0.48 and 0.72 m/s, respectively, when the wind speeds near the soil surface were 1.50, 2.70 and 3.90 m/s. In general, the average air velocity in the transplanting hole was reduced by 81.54% to 83.34%. When the wind direction near the soil surface was from right to left, the air in the vertical section of the transplanting hole was counterclockwise. The verification results showed that there was a positive linear correlation between the air velocity in the transplanting hole and the wind speed near the soil surface, and this linear fitting equation was $y = 0.2209x - 0.176 (R^2 = 0.9253)$. When the wind speed near the soil surface was 2.70 m/s, the air flow rate was 0.42 m/s by measurement and was 0.48 m/s by simulation in the transplanting hole of well-cellar style transplanting, respectively. The dispersed heat and moisture from the transplanting hole were decreased due to small atmospheric disturbances from the soil surface, which contributed to the maintenance of the suitable water and heat conditions for the growth of tobacco seedlings.

Keywords transplanting method; transplanting hole; wind field; air exchange; computational fluid dynamics

收稿日期: 2017-04-12

基金项目: 贵州省优秀青年人才培养对象专项(黔科合人字[2015]34号); 中国烟草总公司重点项目(110201402012); 贵州
省科技重大专项(黔科合重大专项字[2014]6015-3)

第一作者: 林叶春, 副研究员, 主要从事作物高效栽培研究, E-mail: linyechun@live.cn

通讯作者: 潘文杰, 研究员, 主要从事烟草栽培技术研究, E-mail: wenjiepan@163.com

贵州地处中国西南部低纬度山区,地势呈东低西高,海拔高度 150~2 900 m,山地垂直性气候特征明显。受大陆性季风影响,贵州中、西和北部地区春季常年遭遇倒春寒和春旱不利天气^[1-2],影响烟草等大田农作物的集中移栽和正常生长。2011年,贵州省开发形成了井窖式移栽技术^[3],实现了烟草等作物的适时集中移栽,明显改善了烟苗等移栽后的生长环境,有利于早生快发。采用井窖式移栽技术实现了烟苗深栽,虽减弱了井窖内太阳光合有效辐射,但增强了叶片光系统 II 活性,烟苗长势明显优于常规移栽^[4]。井窖式移栽改善了移栽初期烟苗生长环境的水热条件,促进了烟苗生长发育,是应对移栽初期不适宜环境水热条件的重要农艺措施^[5]。目前,还不清楚井窖减弱外界倒春寒和春旱等不利天气对烟苗生长影响的机理机制。

计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)是随着计算机技术发展起来的一门学科,在工程应用领域发挥了巨大作用,现已扩展到建筑、环境等众多领域^[6]。流场是指流体流动所占据的所有空间,速度场是指流体流动前沿的矢量速度分布,风场是指空气流体运动前沿的矢量风速、风向等分布。童莉等^[7]对机械通风条件下连栋温室的速度场进行了 CFD 数值模拟,获得合理的速度场分布。朱海等^[8]和袁炯炯等^[9]对福建土楼民居建筑进行了风环境模拟,可以较为全面地了解建筑物内部的空气流动和风速情况。数值模拟不仅可以分析地上建筑的风环境,也能够分析下沉式建筑内部的风场特征。唐丽等^[10]对黄土塬上的地坑院民居建筑内部进行了风环境模拟,分析了建筑物内部风速的变化特点。CFD 数值模拟可按研究对象的实际尺寸进行计算,消除了风洞试验只能进行缩尺验证的缺点^[11]。井窖能够保持其内部适宜的水分和热量环境条件,与外界大气流动存在一定的协调关系,但这种关系的协调机制尚不明确。本研究旨在对井窖的风场环境进行 CFD 数值模拟和验证,以期明确井窖内空气和外界大气流通的协调机制。

1 试验材料与方法

1.1 试验风速

贵州主要烟叶产区烤烟移栽期集中于 4 月下旬,以位于黔中的贵阳历史地表风速为参考(图 1),设定最低风速(WS_{\min})、平均风速(WS_{avg})和最大风速(WS_{\max}) 3 级试验风速。经中国气象数据网

<http://data.cma.cn> 检索,贵阳站点 4 月下旬累年(1981—2010 年)平均风速为 2.70 m/s,日平均风速 1.70~3.80 m/s(图 1)。以贵阳地面风速检索值为参考,试验中设定烤烟移栽期地表最低风速、平均风速和最大风速分别为 1.50、2.70 和 3.90 m/s。

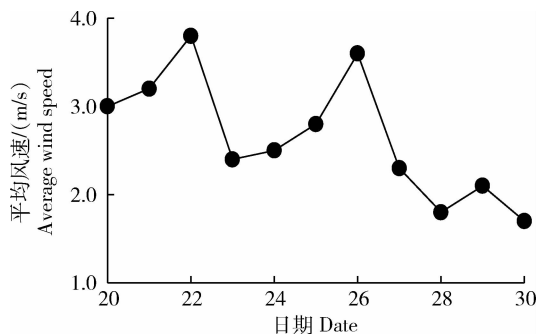


图 1 贵阳 4 月下旬日平均风速

Fig. 1 Daily average wind speed in late April

1.2 井窖结构

在农田地表,使用专门的“井窖”制作工具,从地表往土壤中打一个移栽洞,即为“井窖”(图 2)。井窖上部为圆柱形,下部为圆锥形。井窖深 20 cm,上部直径 8~10 cm。

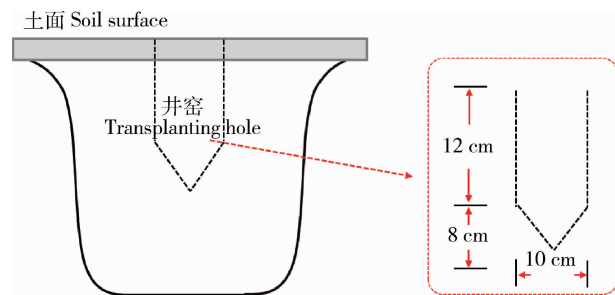


图 2 井窖结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the transplanting hole

1.3 井窖 CFD 建模

采用 Solidworks 2014 软件,根据井窖的尺寸建立 3D 模型(图 3(a))。利用 ANSYS FLUENT 15.0 软件进行模型的网格化(图 3(b)),以靠近井窖端为入风口建立井窖风场(图 3(c)),进一步开展不同风速下的井窖风环境分析。为了减少网格量,提高后续模拟计算效率,选取所研究井窖纵切面的一半进行建模分析^[12]。

1.4 试验验证

盆栽条件下(图 4),通过风扇调节地表风速,经

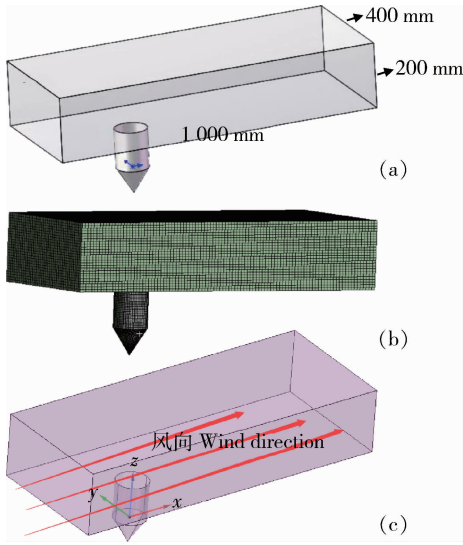


图 3 井窖风场的建立

Fig. 3 Establishment of wind speed distribution for the transplanting hole

气流腔形成稳定均匀的气流^[13]，吹送至井窖口，在井窖口和井窖内 6 cm 处设置微型风速仪，同时分别记录瞬时风速。井窖中的烟苗会增加计算模型的复杂性^[7]，本研究暂不考虑烟苗的影响。

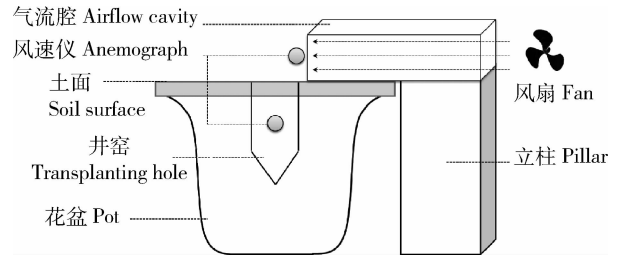


图 4 井窖内风速验证试验示意图

Fig. 4 Sketch of verification for wind speed distribution in the transplanting hole

2 结果与分析

2.1 井窖速度场模拟结果

据此，利用 ANSYS FLUENT 15.0 软件完成 3 个地表风速下井窖风场的 CFD 模拟，得出了井窖内部的风向和风速分布(图 5)。

在 3 个不同的风环境中，井窖内风向的分布不受地表风速的影响，均呈现明显的涡流现象；不同风速环境下井窖内的风场分布较为相似，但井窖内部的风速强度存在差异。在模拟风速 1.50 m/s 环境

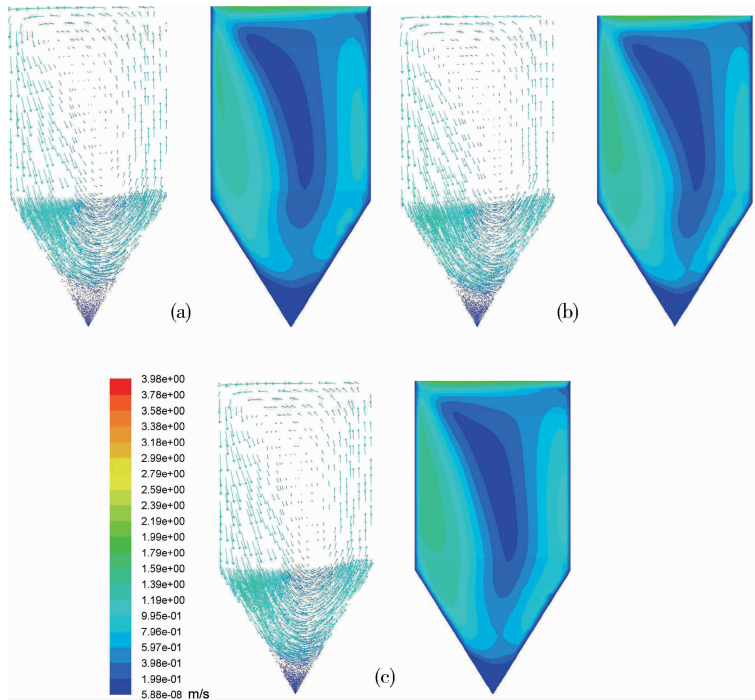


图 5 模拟地表风速 1.5(a)、2.7(b)和 3.9 m/s(c)下井窖内的风向与风速分布(左图为风向,右图为风速)

Fig. 5 Wind direction and wind speed distribution of the transplanting hole with 1.5 (a), 2.7 (b) and 3.9 m/s (c) of the surface wind speed (Wind direction and wind speed distribution are on the left and right, respectively)

条件下(图 5(a)), 井窖内部的模拟平均风速为 0.25 m/s, 井窖内风速减弱 83.34%; 在 2.70 m/s 模拟风环境条件下(图 5(b)), 井窖内部的模拟平均风速为 0.48 m/s, 井窖内风速减弱 82.23%; 在 3.90 m/s 模拟风环境条件下(图 5(c)), 井窖内部的模拟平均风速为 0.72 m/s, 井窖内风速减弱 81.54%。

2.2 井窖风速验证

为验证井窖内风场 CFD 仿真模拟的可靠性, 在盆栽条件下开展地表风对井窖内空气流动风速影响的验证试验。经气流腔在地表设置一系列稳定风速, 同时测定井窖口附近地表风速和井窖内 6 cm 的风速。井窖内的风速强度与地表风速成线性正相关关系(图 6), 关系式为 $y=0.2209x-0.176$ ($R^2=0.9253$)。当地表风速为 2.70 m/s 时, 井窖内模拟风速为 0.48 m/s, 实测风速为 0.42 m/s, 可见模拟与实测数据间契合较好。综合模拟与实测结果, 井窖内平均风速较地表下降率超过 80%, 明显减弱地表大气流动的影响, 减少井窖内水分和热量向地表的散失, 有利于维持稳定的水热环境。

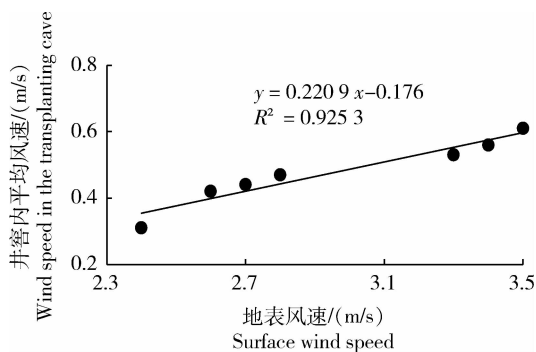


图 6 地表和井窖内实测风速的关系

Fig. 6 Correlation between wind speed near soil surface with measured wind speed in the transplanting hole

3 结论与讨论

在黄土高原风沙较大的春季, 下沉式建筑地坑院对恶劣的自然条件起到了屏障的作用^[14]。李恩等^[15]对分布于黄土高原地区的地坑院民居建筑进行了水热环境分析, 研究表明: 下沉式庭院内部与地面间的空气环流较弱, 没有形成强烈的气流环路, 减少了水分和热量的外逸通路, 从而使庭院内气温稳定且空气相对湿度保持较高水平。为了分析地坑院

内小环境的形成原因, 唐丽等^[10]利用 PHOENICS 软件对地坑院整体进行了风环境模拟分析; 风环境模拟结果表明: 地面模拟风速为 3.30 m/s, 由地面向地坑院心, 风速自上而下逐渐减弱, 院内距地面 1.10 m 处风速为 0.01~1.90 m/s, 而院心处风速为 0.20 m/s 左右。而童丽萍等^[16]通过实际测量地坑院院心和地面风速, 结果显示: 测量期间地面风速为 0.00~5.02 m/s, 平均风速为 1.08 m/s; 地坑院院心风速为 0.03~1.50 m/s, 平均风速为 0.40 m/s。土楼^[8-9]和四合院^[17]封闭式民居建筑也能形成地坑院式的内部风环境, 能够明显减弱外部空气环流的影响。

本研究利用 ANSYS FLUENT 软件对井窖进行了风环境模拟, 当近地表风速设为 1.50、2.70 和 3.90 m/s 时, 模拟的井窖纵切面平均空气流速分别为 0.25、0.48 和 0.72 m/s, 井窖内的平均空气流速较地表下降 81.54%~83.34%。验证试验表明, 井窖内空气流速与地表风速成线性正相关关系; 当近地表风速为 2.70 m/s 时, 井窖内实测空气流速为 0.42 m/s, 而模拟值为 0.48 m/s; 井窖内部的风环境模拟值与实际测量值较为一致。井窖拥有与地坑院、土楼和四合院等建筑类似的结构, 可以模拟分析井窖内部风场特征。井窖式移栽技术的井窖结构明显削弱地表大气流动的影响, 减少井窖内部水热的外逸, 维持较为稳定的水热环境, 为作物移栽后提供较为适宜的生长环境。本研究对井窖内部进行了风环境模拟和实际风速测量分析, 即便如此, 还需进一步在大田生产条件下开展井窖风环境研究。

参考文献 References

- [1] 李勇, 杨晓光, 代姝玮, 王文峰. 气候变化背景下贵州省倒春寒灾害时空演变特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2099-2108
Li Y, Yang X G, Dai S W, Wang W F. Spatiotemporal evolution characteristics of late spring cold in Guizhou Province under global climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2099-2108 (in Chinese)
- [2] 严小冬, 宋燕, 吴战平, 田鹏举. 基于 GEV 干旱指数的贵州春旱时空变化及预测模型探析[J]. 云南大学学报, 2016, 38(2): 256-266
Yan X D, Song Y, Wu Z P, Tian P J. A study on temporal and spatial variation and forecast model of spring drought in Guizhou Province based on GEV drought index[J]. *Journal of Yunnan University*, 2016, 38(2): 256-266 (in Chinese)
- [3] 罗会斌, 龙鹏臻, 马键, 田劲松, 艾永峰, 鲁廷军, 罗长远. 烤烟井

- 窖式小苗移栽技术研究与应用[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(8): 101-107
- Luo H B, Long P Z, Ma J, Tian J S, Ai Y F, Lu T J, Luo C Y. Research and application of tobacco plantlet transplanting in well cellar[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, 40(8): 101-107 (in Chinese)
- [4] 林叶春, 陈伟, 陈懿, 高维常, 丁福章, 李洪勋, 梁贵林, 潘文杰. 井窖式移栽对烟苗生长和光合特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 120-126
- Lin Y C, Chen W, Chen Y, Gao W C, Ding F Z, Li H X, Liang G L, Pan W J. Effects of well-cellar style transplanting on growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco seedlings [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4): 120-126 (in Chinese)
- [5] 林叶春, 陈伟, 丁福章, 高维常, 陈懿, 李洪勋, 梁贵林, 潘文杰. 移栽方式对烟苗生长环境水热和叶片水势的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 91-95
- Lin Y C, Chen W, Ding F Z, Gao W C, Chen Y, Li H X, Liang G L, Pan W J. Effects of different transplanting methods on hydrothermal condition and leaf water potential of tobacco seedlings at early transplanting stage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(5): 91-95 (in Chinese)
- [6] 姚征, 陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(2): 137-144
- Yao Z, Chen K M. Review on the commercial CFD softwares [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2002, 24(2): 137-144 (in Chinese)
- [7] 童莉, 张政, 陈忠购, 张天柱. 机械通风条件下连栋温室速度场和温度场的 CFD 数值模拟[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(6): 33-37
- Tong L, Zhang Z, Chen Z G, Zhang T Z. Simulation of mechanical ventilation for Huabei-type multispan plastic greenhouse[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(6): 33-37 (in Chinese)
- [8] 朱海, 彭兴黔, 高志飞, 杨蓉, 刘春艳. 低矮异型建筑风环境的数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2010(s2): 187-192
- Zhu H, Peng X Q, Gao Z F, Yang R, Liu C Y. Numerical simulation of wind environment around low-rise specially shaper buildings [J]. *Journal of Building Structures*, 2010 (s2): 187-192 (in Chinese)
- [9] 袁炯炯, 冉茂宇, 黄源成. 福建圆形土楼民居空间原型风环境模拟研究[J]. 厦门理工学院学报, 2011, 19(2): 45-48
- Yuan J J, Ran M Y, Huang Y C. Investigation of wind environment of space prototype about the circular earth houses in Fujian [J]. *Journal of Xiamen University of Technology*, 2011, 19(2): 45-48 (in Chinese)
- [10] 唐丽, 黄丽. 基于 Revit Architecture 的地坑院信息模型研究应用初探[J]. 华中建筑, 2015(6): 50-53
- Tang L, Huang L. The research and application of the information model of pit hospital based on BIM technology [J]. *Huazhong Architecture*, 2015(6): 50-53 (in Chinese)
- [11] 沈国辉, 姚旦, 楼文娟, 邢月龙, 潘峰, 郭勇. 单山和双山风场特征的 CFD 数值模拟[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(1): 37-44
- Shen G H, Yao D, Lou W J, Xing Y L, Pan F, Guo Y. Investigation of the wind field characteristics on isolated hill and two adjacent hills using CFD numerical simulation [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2016, 43(1): 37-44 (in Chinese)
- [12] 宋伟, 倪龙, 姚杨. 单井循环地下水源热泵换热特性 CFD 模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 201-206
- Song W, Ni L, Yao Y. CFD simulation and verification of heat exchanger characteristic for single well cycling groundwater heat pump [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24): 201-206 (in Chinese)
- [13] 师建芳, 吴中华, 刘清, 娄正, 赵玉强, 朱明. 不同进风方案下隧道烘干窖热风流场 CFD 模拟和优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 315-321
- Shi J F, Wu Z H, Liu Q, Lou Z, Zhao Y Q, Zhu M. CFD simulation and optimization of airflow field in industrial tunnel dryer with different blowing designs [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14): 315-321 (in Chinese)
- [14] 卫国芳, 王英杰. 从建筑学角度探讨豫西民居地坑院的成因[J]. 河南城建学院学报, 2011, 20(1): 14-17
- Wei G F, Wang Y J. Cause of formation of silo-cave of folk dwelling in western Henan from angel of architecture [J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2011, 20(1): 14-17 (in Chinese)
- [15] 李恩, 何梅, 杨柳. 下沉式窖居夏季室内热环境[J]. 工业建筑, 2007, 37(s1): 47-49
- Li E, He M, Yang L. Summer internal space thermal environment of sinking cave dwelling [J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(s1): 47-49 (in Chinese)
- [16] 童丽萍, 许春霞. 生土地坑窖冬季室内外热环境监测与对比分析[J]. 建筑科学, 2016, 32(2): 10-17
- Tong L P, Xu C X. Monitoring and comparative analysis of indoor and outdoor thermal environment of sunken cave dwelling in winter [J]. *Building Science*, 2016, 32(2): 10-17 (in Chinese)
- [17] 林波荣, 王鹏, 赵彬, 朱颖心. 传统四合院民居风环境的数值模拟研究[J]. 建筑学报, 2002, 49(5): 47-48
- Lin B R, Wang P, Zhao B, Zhu Y X. Numerical simulation of wind environment in traditional quadrangle dwellings [J]. *Architectural Journal*, 2002, 49(5): 47-48 (in Chinese)