

福州“多进天井式”民居天井几何形态对建筑风环境的影响研究

——以琴江村“黄恩禄故居”为例

A STUDY OF THE IMPACT OF PATIO'S GEOMETRIC MORPHOLOGY ON WIND ENVIRONMENT OF THE TRADITIONAL FOLK HOUSES IN FUZHOU DISTRICT:

A Case Study of Huang Enlu's Residence in Qin Jiang Village

石峰 金伟
Shi Feng, Jin Wei

摘要/ 对福州地区的“多进天井式”民居进行实测和模拟,分析其天井的几何形态对建筑风环境的影响。以琴江村“黄恩禄故居”为例,选取与其天井几何形态相关的关键因子为控制变量,运用计算流体力学的方法对不同情况下的建筑风环境进行模拟,通过3组模型的对比分析,定量地归纳出天井几何形态特征与建筑风环境之间的关系。

关键词/ “多进天井式”民居;天井几何形态;风环境;CFD模拟

ABSTRACT/ In this study, we map and survey the multi-patio folk houses of Fuzhou, analyzing the influence of the geometric morphology of patio on the wind environment. As an example, the Huang Enlu's residence of Qin Jiang village, its width-depth ratio about geometric morphology of patio and height of cornice are chosen as control variables. CFD technology is used to simulate the wind environment of different architectural model. Through the analysis of three sets of model, we quantitative induce the relationship between the geometric morphology of patio and the wind environment of multi-patio folk houses.

KEY WORDS/ multi-patio folk houses; geometric morphology of patio; wind environment; CFD simulation

传统民居是我国建筑体系中一个重要的组成部分,其所蕴含的传统哲学、美学与自然科学思想仍然值得当代人去学习和研究。人们对建筑环境品质要求的不断提高推动了建筑科学的发展,但依赖机械设备来控制建筑环境也导致了过度的能源消耗,因此设计师们逐渐开始从传统建筑中提取生态气候设计经验,并将其运用于现代绿色建筑的设计中^[1-2]。

近年来,随着国内传统民居建筑研究的不断升温,关于传统民居气候适应性方面的研究也逐渐丰富,研究方法主要包括实测研究和计算机模拟研究,其中相关的实测研究有:谭良斌等人对黄土高原地区生土民居热环境的研究,对该设计模式在现代建筑中的再生设计进行了探讨^[3];杨志华对苏州传统居住建筑的热环境状况进行了长期的测量^[4];董志勇等人对云南边地聚落生态适应性进行了研究^[5];许东风等人对重庆传统民居空间环境对气候的适应性进行了探讨^[6]。运用计算机模拟的方法进行的研究有:林波荣等人运用CFD方法对传统四合院民居风环境进行了数值模拟,研究了不同合院形式的中国传统四合院民居在建筑设计上适宜冬季风环境的策略^[7];赵彬等人运用CFD方法对建筑群风环境进行了数值模拟仿真和优化设计^[8];林晨运用CFD方法对自然通风条件下传统民居室内外风环境进行了研究^[9]。

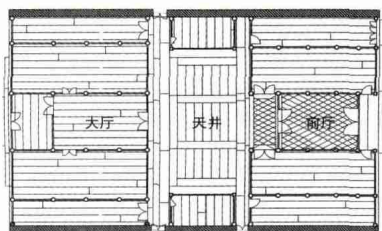
以上研究虽然阐述了相应民居在气候适应性方面的特点,但是

由于我国民居种类繁多,且散布于不同的气候区域,在气候适应性方面有着各自的不同需求,因此不同地区民居的设计策略并不具有共通性,有必要针对不同民居的气候适应性特点进行深入研究。本研究探讨福州传统的“多进天井式”民居的风环境问题,将以福州市琴江村的“黄恩禄”故居为例,运用CFD模拟与实测相结合的方法研究建筑物的风场分布,对建筑内的风环境进行分析,试图定量地归纳出天井几何形态与建筑风环境之间的关系。

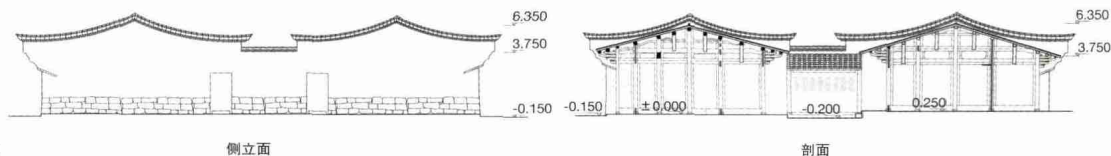
1 研究对象

福州地区属于典型的亚热带季风气候,夏季炎热,盛行东南风,历史最高气温为42.3℃,冬季气候温和,极少有零下温度出现。根据我国建筑热工设计气候分区,该地区属于夏热冬暖地区,建筑气候适应性要求以夏季防热为主,需要建筑具有较好的遮阳和自然通风性能。这些气候上的主要特征,会影响当地民居空间、平面和构造的设计,使建筑物适应其所在的环境气候。福州地区的民居类型主要包括“多进天井式”民居,“柴栏厝”木屋,“一明两暗”式,以及院落民居与土堡组合^[10]。本研究只针对“多进天井式”民居形式进行分析,这种民居主要由堂屋、游廊、耳房和天井4个部分组成而成,一般沿纵轴方向发展,根据纵深需要插入单个或多个天井,建筑主体为土木结构。

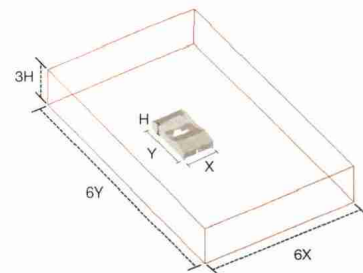
国家自然科学基金项目(51308481);福建省自然科学基金项目(2013J05082);厦门大学中央高校基本科研业务费资助项目(20720150102)
作者单位:厦门大学建筑与土木工程学院(厦门,361005)
收稿日期:2015-10-13



1 黄恩禄故居测绘



2 黄恩禄故居现状



3 建筑风环境模拟的模型设置

琴江村位于闽江下游入海口南岸的洋屿乡，建于清雍正七年（1729），是典型的清代城堡式水师兵营，四周原来筑有城墙，村中保存有大量的传统民居实例。琴江村黄恩禄故居（以下简称为黄府）是马江海战中三江水师佐领——黄恩禄的居所，是“多进天井式”民居的典型实例。黄府始建于清乾隆年间，历史风貌保存完整，东西朝向，两进五间，主体为土木结构，两侧有封火山墙，面宽 17 m，进深 28 m，屋脊高 6.5 m，檐口高 3.9 m，平面布局简单，由前屋、后屋及两侧耳房围绕天井组成，天井宽 7.2 m，深 3.6 m，四周有游廊环绕（图 1、2）。

2 CFD模拟与验证

当前研究建筑风环境的方法主要包括实测研究、风洞实验和计算机模拟研究 3 种。由于实测研究对室外天气的要求较高且周期较长，难以对影响建筑风环境的各个因素进行一一实验来得到其规律；而风洞实验则花费昂贵，难以广泛应用于实际研究中；目前比较流行的研究方法是计算机流体力学数值模拟（CFD）的方法^[7]。建筑 CFD 模拟是在计算机上以流体力学方程为基础，对建筑内部以及周围的风场和热环境进行离散求解的过程^[11]，此方法能够建立复杂的建筑模型，对众多的影响因子进行对比分析，有效降低实验的经济与时间成本。但由于受到模型建立、参数设置、模拟人员经验等因素的影响，往往会产生较大的误差^[12]，因此 CFD 模拟往往需要通过实测研究进行校正，以确定模拟的准确性，本文即采用实测和模

表1 各组模型参数

模型编号	进深面宽比例	面宽(m)	进深(m)	檐口高度(m)
PA	1.00	7.20	7.20	3.60
PB	1.50	7.20	5.40	3.60
PC	2.00	7.20	3.60	3.60
PD	2.50	9.00	3.60	3.60
PE	3.00	10.80	3.60	3.60
HB	2.00	7.20	3.60	5.10
HC	2.00	7.20	3.60	6.60

拟相结合的研究方法对民居的风环境进行量化分析。

本研究所采用的 CFD 模拟软件为 Phoenics，该软件能够准确模拟环境中的压力场温度场以及风场。

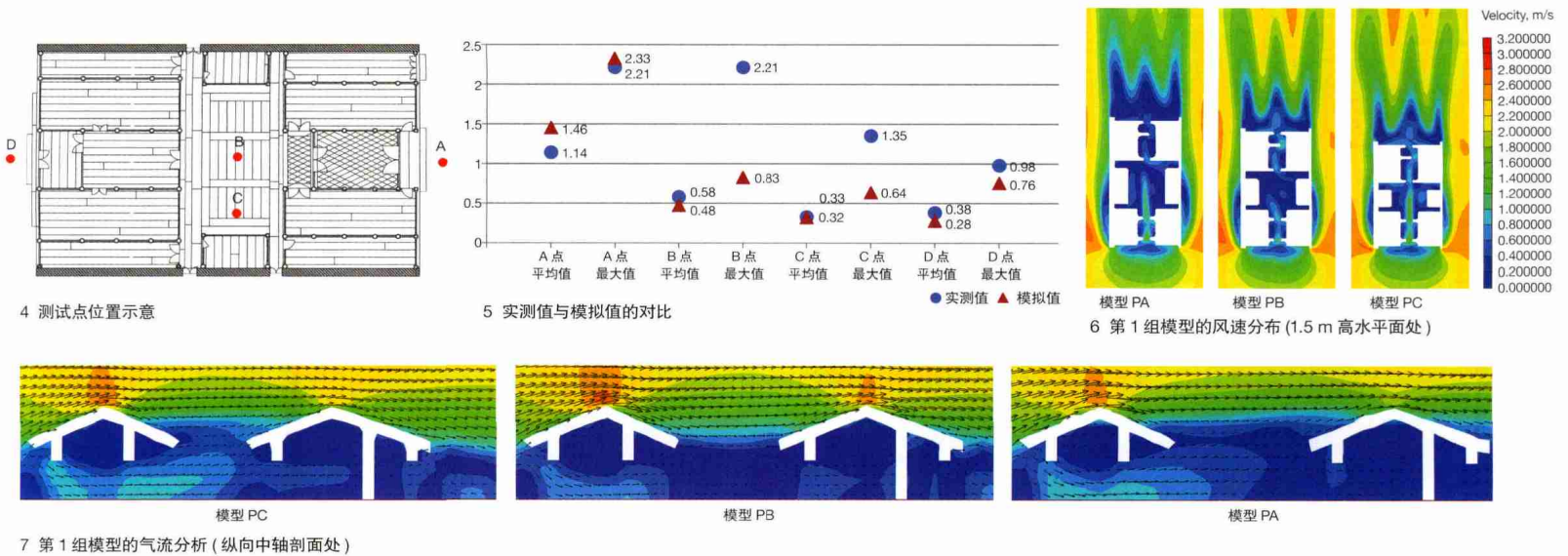
2.1 模拟的步骤

本研究中的 CFD 模拟包括两个步骤：第 1 步模拟通过实测数据与模拟数据的比对，校验模拟中的湍流模型及所设参数的可信度；第 2 步模拟以第 1 步所验证的 CFD 模型为依据，通过改变天井几何形态的影响因子，进行多次的模拟和比较，探讨天井几何形态对建筑风环境的影响。

2.2 模型与参数设置

第 1 步模拟中的模拟对象为黄府及其周边的 30 m 范围内的建筑物。模拟边界横向长度为建筑群横向长度的 6 倍，竖向长度为建筑群竖向长度的 6 倍，计算区域高度为主要建筑物高度的 3 倍。模拟所设初始风场为梯度风场，所设初始风速为实测风速，即 10 m 高度处 3.4 m/s 的偏南风 and 5.5 m/s 的偏南风，两者分别代表实测所得实际平均风速与实际最大风速。依据实际情况，场地周边是低层建筑物为主的郊区，根据日本建筑协会 AIJ 建议的 5 种不同的地况分类，本研究所采用地面粗糙指数 α 设定为 0.2^[13]。模拟采用雷诺平均纳维——斯托克斯方程及 k- 闭合模式 (RANS equations with k- turbulence closure) 描述湍流。由于网格生成质量对计算精度与稳定性影响很大^[14]，而在这一步的模拟中存在两种不同等级尺度的模型，因此网格设置时适当缩小外部模拟范围，减少网格数，有效提高模拟的运算效率以及准确性，模拟所用网格数为 $340 \times 397 \times 45$ 。模拟结果显示，在平均风速和最大风速下，得到的模拟流量分别为 $1.508 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、 $1.116 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，计算流量的误差率分别为 0.2% 和 0.4%，模拟结果能够满足计算流体力学中对质量守恒定律的误差要求，可见本次模拟中的网格设定是可行的。

第 2 步模拟中对建筑模型进行理想化处理，略去了黄府周边的建筑物，对黄府建筑单体进行模拟，模型如图 3 所示。该步模拟中的计算参数设定套用了第一步中的相关设置，模拟区域的大小根据模拟对象做同比例调整。



为了探讨天井的几何形态对建筑风场的影响,在模拟研究中对黄府的天井几何形态进行变形,对比分析不同天井几何形态下的建筑风环境情况。本研究选取了天井的面宽进深比和檐口高度两个影响因子,相对应的参数设置如下:天井的面宽进深比分为 5 个等级,天井的檐口高度分为 3 个等级,总共包含 7 个不同的分析模型,用 PA 到 HC 等不同的编号表示,用于模拟不同的天井形态特征(表 1)。

2.3 实测试验

本研究采取现场实测的方法来验证 CFD 模型设置的准确性。通过现场实测可以准确地描述和确定实际风环境的特点,将实测风环境与模拟结果进行比对,校正模拟结果,提高其可信度。实地测试的时间为 2015 年 9 月 30 日,测试时段为 15:30-17:00,主要测试了黄府内外高度 1.5 m 处(人体站姿头部位置)的风速值。测点位置如图 4 所示,测点 A 位于黄府西侧街道中央,用于确定黄府外部环境的风场特征;测点 B 位于天井正中央,用于确定天井处的主导风向与风速;测试点 C 位于天井一角,用于进行风速变化较小处的对比;测试点 D 位于黄府后部门口,用于确定黄府出风口处的风速。实测时的环境主导风向为偏南风 2~3 级,在研究中分别取实测的平均风速和最大风速作为模拟的初始风速,通过两种工况的对比来提高测试的准确性。平均风速由各个测试点连续监测风速 5 min,每秒测得一个风速后,取所有数据的平均值;最大风速取相同测试时段内的风速最大值。

图 5 为各测点实测值与模拟值的对比结果,可知由本研究的模拟模型和参数设置所得到的风环境模拟结果与实测所得结果相近,其 $R^2=0.720$,表明模拟结果与实测结果具有很强的相关性。

表2 第1组模型的风速特征值

模型编号	面宽进深比	天井中心风速 (m/s)	天井最大风速 (m/s)	天井平均风速 (m/s)	大厅平均风速 (m/s)
PA	1.0	0.82	1.20	0.41	0.52
PB	1.5	0.39	0.81	0.32	0.68
PC	2.0	1.20	1.26	0.55	0.82

3 结果与分析

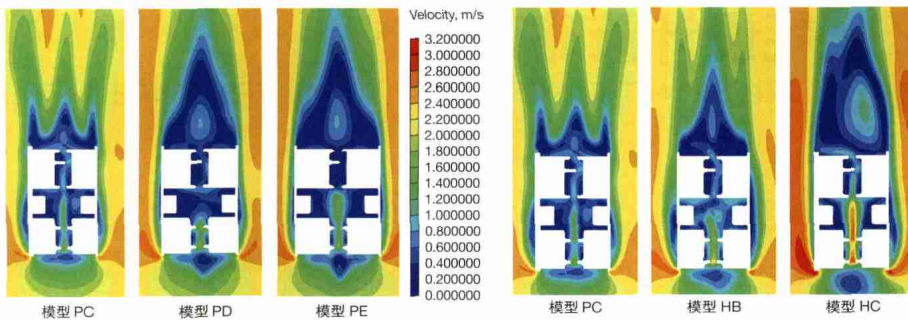
本研究对 7 个模型进行了风环境模拟,通过改变天井的面宽进深比和天井两侧建筑物的檐口高度两个影响因子,对比分析不同几何形态的天井对建筑风环境的影响,以量化的方法得到关于天井空间形态的设计策略。7 个模型分为 3 组进行对比:第 1 组模型 PA、PB、PC 对比分析不同的天井进深情况下建筑的风环境情况;第 2 组模型 PC、PD、PE 对比分析天井面宽对建筑风环境的影响;第 3 组模型 PA、PB、HC 用于对比分析天井两侧建筑物檐口高度的影响。

3.1 天井进深对建筑风环境的影响

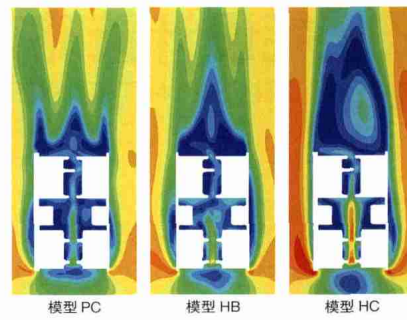
图 6 为第 1 组模型在 1.5 m 高度的风速分布情况,可见 3 个模型的风场分布较为相似,仅在风速大小上略有区别。表 2 为 3 个模型的风速特征值,可知模型 PC 的各项风速值都大于其他两个模型,在本组中模型 PC 的天井形态最有利于建筑的整体通风。随着天井进深的增加,大厅内的风速逐渐减小,但天井内的风速则先减小后增大,并未呈线性规律变化,这主要是由来自建筑前厅的气流与天井上方的气流共同影响的结果,如图 7 所示:由于模型 PC 的天井进深较小,天井上方的气流不易进入天井内,因此建筑内的风环境主要受到来自前厅的气流影响;模型 PB 中随着天井进深增加,天井上方气流对天井内的风环境影响变大,与来自前厅的气流共同作用,在天井内形成了一个较大的涡流,减弱了天井和大厅内的风速;模型 PA 中随着天井进深的进一步增加,天井内的涡流减小,并移至大厅的屋檐下,导致天井内的平均风速变大,同时屋檐下的涡流对气流的阻碍导致大厅内风速减弱。

3.2 天井面宽对建筑风环境的影响

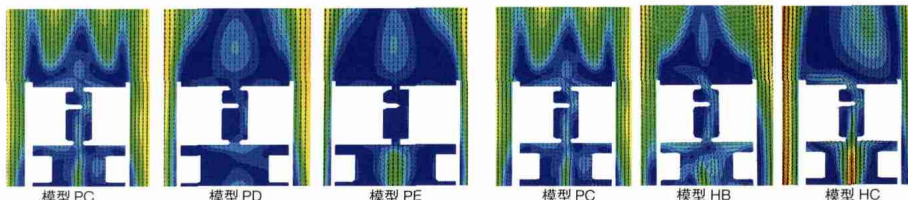
图 8 为第 2 组模型在 1.5 m 高度的风速分布,表 3 为 3 个模型的风速特征值,可见模型 PE 的天井中心风速、最大风速和平均风速都大于模型 PC 和 PD,但大厅平均风速在 3 个模型中最小。通过分析天井及大厅周边的气流情况(图 9)可以发现:在天井的面宽进深比超过 2:1 之后(建筑的面宽随之增加),在建筑物的背风面因气体收缩形成负压区,产生了大面积的风影区,并随之出现了涡流,



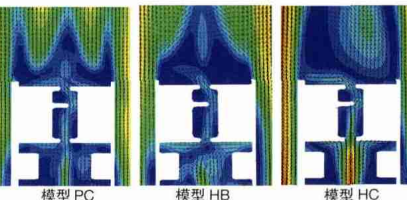
8 第 2 组模型的风速分布 (1.5 m 高水平面处)



10 第 3 组模型的风速分布 (1.5 m 高水平面处)



9 第 2 组模型的气流分析 (1.5 m 高水平面处)



11 第 3 组模型的气流分析 (1.5 m 高水平面处)

在真实的建筑环境中,风影区会影响后面建筑的通风效果;同时,由于涡流的影响,出现了从建筑背风面向大厅内的倒灌气流,使大厅内的风速降低,通风效果变差。另外,3个模型天井内的风速随着天井面宽的增加而先减小后增大,与3.1节中3个模型的变化规律类似,同样是由于在前厅气流、天井上方气流的作用下,天井内产生了涡流,并由于倒灌气流的存在导致天井内气流变化更加复杂。

3.3 檐口高度对建筑风环境的影响

图10所示为第3组模型在1.5m高度水平面处的风速分布,表4为3个模型的风速特征值。3个模型建筑内的风场分布特点相似,风速随着天井两侧建筑檐口高度的增加而变大,模型HC的各项风速值均为该组模型的最大值。随着檐口高度的增加,建筑背风面的风影区范围增长迅速,在实际环境中会对后面的建筑产生较大的影响;同时,风影区内部也出现了涡流,但由于来自天井内的气流较强,因此没有出现由建筑背风面向大厅内气流倒灌的现象(图11)。

4 结语

本文通过改变天井的面宽进深比和天井檐口高度两个影响因素,以黄府院落为原型,建立了7个分析模型进行风环境模拟,对比分析了天井几何形态对建筑风环境的影响,得出的主要结论如下:

- 1) 对于单天井的“多进天井式”民居而言,天井的面宽进深比为2:1时,建筑物的整体通风效果较佳,风影区面积也最小,因此在7个分析模型中模型PC的风环境最为理想。
- 2) 增加天井两侧建筑的檐口高度有助于提高建筑物的整体通风效果,但同时也加大了建筑背风面风影区的面积,对建筑后部的风环境造成不利影响,因此在确定檐口高度时,应该充分考虑建筑所处的周边环境。
- 3) 在确定天井形态时应避免在建筑物背风面形成大面积的风影区。增加檐口高度、增加天井面宽比加大天井进深更容易导致风影区的形成;当面宽进深比接近2:1时,风影区面积最小。
- 4) 黄府中天井的实际比例接近2:1,与本研究结论中的最佳天

表3 第2组模型的风速特征值

模型编号	面宽进深比	天井中心风速(m/s)	天井最大风速(m/s)	天井平均风速(m/s)	大厅平均风速(m/s)
PC	2.0	1.20	1.26	0.55	0.82
PD	2.5	0.41	0.89	0.31	0.28
PE	3.0	1.50	1.61	0.63	0.18

表4 第3组模型的风速特征值

模型编号	檐口高度	天井中心风速(m/s)	天井最大风速(m/s)	天井平均风速(m/s)	大厅平均风速(m/s)
PC	3.6	1.20	1.26	0.55	0.82
HB	5.1	1.83	1.94	0.92	0.87
HC	6.6	2.55	2.61	1.42	0.98

井形态相吻合。

在漫长的历史进程中,传统民居经过长期的演化,形成了对其所处气候环境的适应性,积累了大量的生态经验,但由于缺乏深入的研究,这些经验并未得到充分的认识和应用。随着传统民居的逐渐衰落,这些宝贵的经验亟待保护与发掘。本研究通过对“多进天井式”民居中天井几何形态与建筑风环境的关系进行研究,得出了上述结论,作为参考可用于建筑庭院空间的设计中。[1]

参考文献

- [1] V Olgyay, A Olgyay. Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism[M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1963.
- [2] Givoni B. Climate considerations in building and urban design[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [3] 谭良斌. 西部乡村生土民居再生设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学建筑学院, 2008.
- [4] 杨志华. 与气候相适宜的建筑节能_对传统民居的节能启示[J]. 华中建筑, 2006(9): 56-59.
- [5] 董志勇, 李晓丹. 传统边地聚落生态适应性研究及启示解读云南和顺乡[J]. 新建筑, 2005(4): 22-25.
- [6] 许东风, 魏宏扬. 重庆传统民居空间环境对气候的适应性[J]. 室内设计, 2002(1): 36-41.
- [7] 林波荣, 王鹏, 赵彬, 等. 传统四合院民居风环境的数值研究模拟[J]. 建筑学报, 2002(5): 47-48.
- [8] 赵彬, 李先庭, 林波荣, 等. 建筑群风环境的数值模拟仿真优化设计[J]. 城市规划汇刊, 2002(2): 57-61.
- [9] 林晨. 自然通风条件下传统民居室内外风环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学建筑学院, 2006.
- [10] 戴志坚. 闽台民居建筑的渊源与形态[M]. 北京: 人民出版社, 2013: 67-68.
- [11] 村上周三. CFD与建筑环境设计[M]. 朱清宇, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 29-30.
- [12] Boulard T, Haxaire R, Lamrani M A, et al. Characterization and modeling of the fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74: 135-144.
- [13] 王卫国, 徐敏, 蒋维媚. 建筑物附近气流特征及湍流扩散的模拟实验[J]. 空气动力学学报, 1999(1): 87-92.
- [14] Francisco D M, Diege L V, Antonio J A. Measurement and simulation of climate inside Almeria: type greenhouse Using computational fluid dynamics[J]. Agricultural and forest Meteorology, 2004, 125: 33-51.

图表来源
本文图表均为作者绘制拍摄。