

教学组团夏季室外热环境特征与计算模型验证

李琼, 孟庆林, 赵立华

(华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要:对湿热地区典型教学组团的夏季室外热环境进行了33 h昼夜连续实测。根据气象参数,行人高度上温度、湿度、风速和湿球黑球温度(WBGT)分布以及典型地表温度等的测试结果,得到湿热地区教学组团夏季室外热环境的主要特征。测试结果表明,组团内的天井、架空、透水砖可有效降低夏季白天行人高度处的空气温度及WBGT,一些建筑设计手法对组团夏季白天室外热舒适的改善效果依次为:架空>天井>透水砖路面>不透水砖路面>混凝土路面。夜间,各测点的热舒适性基本一致。将测试结果对组团室外风速和WBGT现有计算模型进行验证研究。研究表明,数学公式计算值的相对误差均不超过6%,与实测统计值相吻合。

关键词:湿热地区;教学建筑;室外热环境;温度;湿度

中图分类号: TU111.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)03-0112-07

Analysis on Summer Thermal Environment Characteristic of a Teaching Building Cluster and Validation of Its Calculation Model

LI Qiong, MENG Qing-lin, ZHAO Li-hua

(State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract: A 33-hour field test of outdoor thermal environment was carried out in a typical teaching building cluster located in the hot and humid zone in summer. From the experiment results of local climate data, air temperature, humidity, wind velocity and wet bulb globe temperature (WBGT) at the pedestrian-level, and the typical ground surface temperature, the main characteristics of summer outdoor thermal environment of teaching building cluster in hot and humid zone are obtained. The results show that the patio, overhead and porous pavement can reduce the pedestrian air temperature and WBGT effectively at summer daytime. And the function of the following design methods to improve the outdoor thermal comfort at the summer daytime has the order like overhead > patio > porous pavement > imporous pavement > concrete road. The WBGT at all measuring points at nighttime are almost the same. The test results are further used to verify the existing mathematical models of outdoor velocity and WBGT. The results show that the relative errors are within 6%. Then, the calculation values are in good agreement with the experimental values.

Key words: hot and humid zone; teaching building; outdoor thermal environment; temperature; humidity

由于常年处于热湿气候的控制之下,“湿热地区”城市热岛效应十分普遍^[1]。随着生活水平的不

收稿日期:2010-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008127,50720165805);国家国际科技合作计划资助项目(2011DFA91210);广东省自然科学基金资助项目(10451064101005823,8251064101000006);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100172120006);华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室资助课题(2011ZC20);华南理工大学中央高校基本科研业务费资助项目(2009ZM0088,2009ZZ0067);华南理工大学自然科学基金资助项目(x2jzE5090660)

作者简介:李琼(1980-),女,博士,主要从事建筑环境与节能研究,(E-mail)arliqiong@scut.edu.cn.

断提高,如何减轻城市热岛效应,改善城市热环境质量已成为人们的迫切需要,也是建筑技术科学领域的一个热点研究问题^[2-4]。

现场实测是研究城市热环境的重要手段,多年来已有学者对建筑群周边热环境进行了大量综合测试研究^[5-7],但鉴于实测成本的昂贵、现场条件的限制,中国目前关于建筑组团周边热环境的大规模现场实测较少,尤其是24 h以上的连续测试更是鲜有报道。Giridharan 等人对香港的3个典型居住小区在典型夏日白天时段15:00—18:00和夜间时段18:00—20:00的室外热环境进行了对比测试,主要分析设计参数如建筑表面反射率、建筑密度、天空视角因子和海拔对夜间热岛强度的影响,发现由于白天的蓄热,夜间的城市热岛强度要高于白天,且设计参数的改变对夜间的影响更大,特别是反射率^[8]。刘淑丽等人在典型夏日的9:00—20:00,测试了重庆大学B区学生宿舍楼群外“峡谷域”、“死水域”和“建筑风道”3种建筑布局下的风场、空气温湿度及相应地点地表温度变化情况^[9]。华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室也进行了一系列相关的研究^[10-11]。上述测试都是集中在典型夏日的某一个时段进行,并且测试的参数相对较少。赵炎对重庆某小区进行了微气候的全面测试,揭示了此类小区夏季热环境的主要特征^[12],但也仅获得了3个夏日9:00—21:00时段的数据。

教学楼是公共建筑的一个重要类型,受到众多学者的关注,但是普遍来说对教室室内热环境的测试研究较多^[13-14],而对教学楼周边热环境的实测研究却并不多见。针对这一问题,该文对湿热地区典型教学组团夏季室外热环境进行了昼夜连续观测,并在测试的基础上,进一步与组团室外风速和湿球黑球温度(WBGT)的现有回归计算公式进行比较研究,以验证计算模型的准确性,并揭示这类建筑组团的室外热环境在夏季全天不同时段分布特征,为城市生态规划设计提供指引。

1 实测环境与过程

1.1 测试环境概况

测试在广州市华南理工大学西区教学楼组团进行。该组团总占地面积近2.6万m²,建筑密度30%,绿化率10%,容积率约为1.9,北面延至滑冰场,南面延至西五学生宿舍前,主要包括第31、32、33、34号教学楼,变电所及水电中心。其中,变电所及水电中心为3层建筑,31号教学楼为7层,32号教学楼为5层,33及34号教学楼均为6层。各栋建

筑迎着广州夏季主导风向(SE)呈行列式布局,错落有致,建筑间距在10 m以上,其间有大面积空地,种植有少量灌木及草坪。第31号教学楼前为小广场,配有中心小花园。32号教学楼底部0~4 m内架空,作为自行车棚。32、33号教学楼之间以及33、34号教学楼之间的连廊底部也多处架空,形成通透开敞的半室外空间。整个测试区域的路面包括不透水砖路面、透水砖路面及混凝土路面。测试区域地形图与实景图如图1和图2所示。

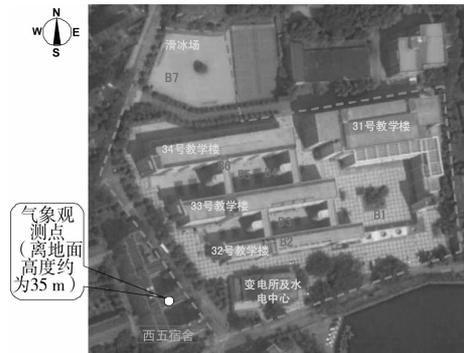
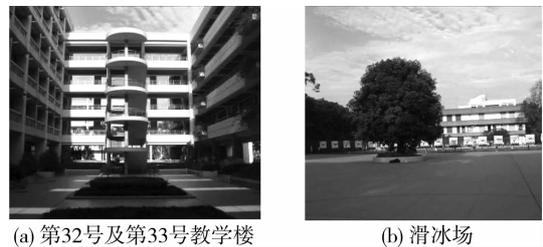


图1 测试场地及测点布置



(a) 第32号及第33号教学楼

(b) 滑冰场

图2 测试区实景

1.2 测试参数

测试从2008年8月14日9:00一直持续到8月15日18:00,共33 h,测试参数主要包括当地气象参数,1.5 m行人高度处的空气温湿度、风速、黑球温度及WBGT,典型地表温度等。实测所用到的仪器详见文献^[15]。其中,除1.5 m行人高度处的风速、黑球温度及WBGT采用人工读数记录之外,其它参数均由测量仪器自动记录。

1.3 测点布置

测试区域共设置了1个气象观测点及9个地面观测点,平面分布如图1所示。各测点测量参数和所处位置如表1所示。

气象观测点所观测的气象参数,代表了测试区域所处的大气边界层内的主要气象特征,对局地微气候起主要作用,因此将作为分析的基准值以比较不同测

点的差别。广州夏季的主导风向为东南风,因此气象观测点选在教学楼组团上风向 9 层高的西五学生宿舍

舍的屋顶上空,这栋建筑也是测试场地附近最高的建筑。当地气象参数由小型自动气象站测得。

表 1 测点位置与测量参数说明

编号	1.5 m 高处 温湿度	1.5 m 高处 风速	1.5 m 高处黑球温度 及 WBGT	地表 温度	气象 参数	测点位置及下垫面性质说明
B1	✓	✓	✓	✓		31 号教学楼前广场,无遮阳不透水砖路面
B2	✓	✓	✓			32 号教学楼架空层内,不透水砖路面
B3	✓	✓	✓			32、33 号教学楼之间小天井内,不透水砖路面
B4	✓	✓	✓			33、34 号教学楼之间空地上,不透水砖路面
B5	✓					33、34 号教学楼之间灌木丛中
B6	✓					33、34 号教学楼之间连廊的架空层内,不透水砖路面
B7	✓	✓	✓	✓		滑冰场内,无遮阳混凝土路面
B8	✓	✓	✓	✓		人行道,透水砖路面,小部分树荫下
B9	✓	✓	✓			西五宿舍东南侧的十字路口,透水砖路面,小部分树荫下
气象观测点					✓	西五学生宿舍屋顶上方的高台上,距地标高约 35 m

2 实测结果与分析

2.1 参考气象参数测试结果

当地气象参数测量结果如图 3—5 所示。测试期间天气晴朗,无降雨,温度高,湿度大,属于典型湿热天气。干球温度平均值为 32.2°C ,8 月 14 日 16:00 最大,约为 36.2°C ,8 月 15 日 6:00 最低,约为 27.8°C ;相对湿度的变化趋势与干球温度相反,在测试期间的平均值约为 60%,8 月 14 日 16:00 为最低值 39%,8 月 15 日 6:00 达最大值 77%;测试的第 1 天(8 月 14 日)太阳辐射较为强烈,最大太阳辐射强度为 $937\text{ W}/\text{m}^2$,出现在中午 12:30,并且上、下午的辐射量基本对称分布,测试的第 2 天(8 月 15 日)太阳辐射较第 1 天弱,太阳辐射最强烈的时刻也是中午 12:30,最大太阳辐射强度为 $732\text{ W}/\text{m}^2$;测试的 2 天里,太阳辐射强度在午后都波动较大,8 月 14 日从午后 13:00 到 13:30,太阳辐射强度变化幅度为 $570\text{ W}/\text{m}^2$,8 月 15 日从午后 12:30 到 13:00,太阳辐射强度变化幅度为 $425\text{ W}/\text{m}^2$,这种午后时晴时阴的现象在湿热地区夏季是非常普遍的,并且常伴随着阵雨;8 月 14 日 19:00 到 8 月 15 日 6:00 之间是夜间时段,太阳辐射强度为 0;测试期间平均风速约为 $1.59\text{ m}/\text{s}$,最大风速出现在 8 月 14 日 9:00,为 $3\text{ m}/\text{s}$,最小风速出现在 8 月 15 日 6:00,为 $0.5\text{ m}/\text{s}$,并且夜间(8 月 14 日 19:00—8 月 15 日 6:00)的风速明显较低,夜间风速平均值为 $1.33\text{ m}/\text{s}$,低于整个

测试期间的风速平均值;从风向分布来看,整个测试期间以偏南的风向为主。

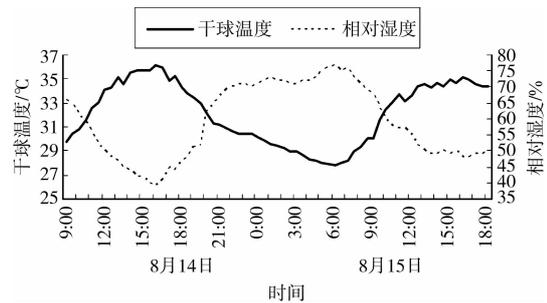


图 3 气象观测点空气干球温度和相对湿度

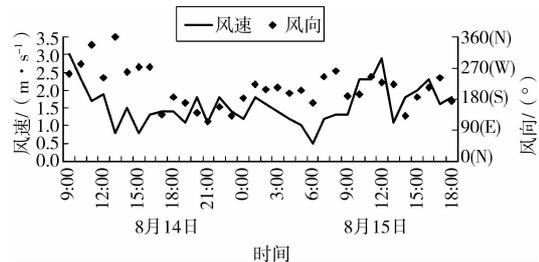


图 4 气象观测点风速和风向

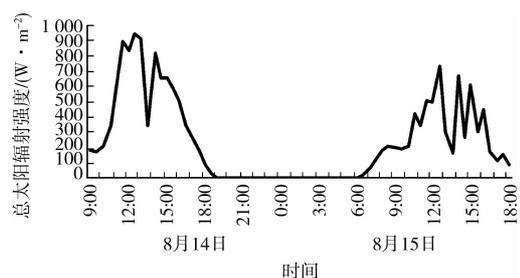


图 5 气象观测点太阳辐射强度

2.2 行人高处空气温度

教学楼区各测点在离地 1.5 m 高处的干球温度与气象温度逐时对比如图 6 所示。各测点在下午 16:00 左右温度最高,早上 6:00 左右温度最低。夜间各测点的温度相差很小,白天差异明显。白天,部分测点的空气温度从高到低普遍存在如下排序:滑冰场混凝土路面上空(测点 B7)温度>教学楼间不透水砖路面上空(测点 B4)温度>人行道小部分树荫下透水砖路面上空(测点 B8)温度>西五宿舍附近十字路口、小部分树荫下透水砖路面上空(测点 B9)温度>教学楼天井内不透水砖路面上空(测点 B3)温度>教学楼间连廊的架空层内不透水砖路面上空(测点 B6)温度>教学楼间灌木丛上空(测点 B5)温度>32 号教学楼首层架空层内不透水砖路面上空(测点 B2)温度。由此可见,在湿热地区建筑设计中常用的手法如遮阳、架空、天井、透水砖及绿化对室外空气温度的降低作用是非常显著的。

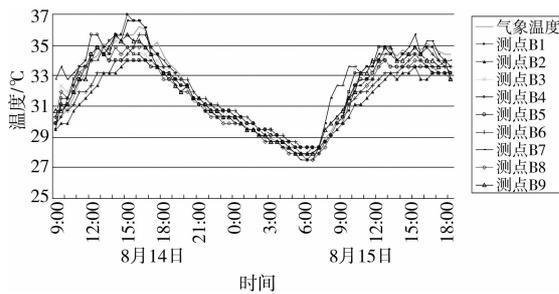


图 6 典型测点 1.5 m 高处温度逐时分布

2.3 行人高处空气湿度

由空气温度和相对湿度的测试结果,可求解出绝对湿度。典型测点在离地 1.5 m 高处的绝对湿度逐时对比如图 7 所示。由图 7 可见,各测点在离地 1.5 m 高处的绝对湿度逐时变化趋势与气象绝对湿度相吻合。透水砖路面上空的测点 B8 在离地 1.5 m 高处的绝对湿度普遍比其它测点高,这主要是因为该测点处在树荫下,并在教学楼组团所有测点中最靠近马路,在测试期间,马路上经常有洒水。

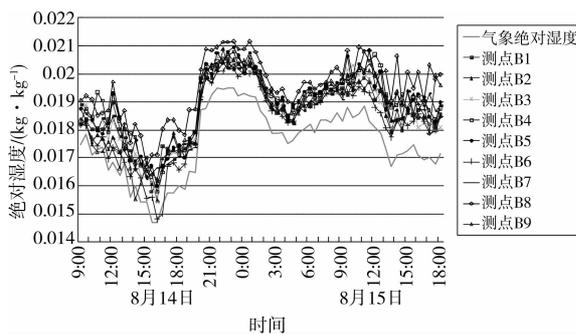


图 7 典型测点 1.5 m 高处绝对湿度逐时分布

2.4 行人高处风速

典型测点在离地 1.5 m 高处的风速逐时对比如图 8 所示。可见,各测点的风速变化都很复杂,并无统一规律可循,且各测点的风速波动幅度普遍比较大。位于 31 号教学楼前广场上的测点 B1,位于 32 号教学楼架空层内的测点 B2 及位于滑冰场内的测点 B7 最大风速接近 2 m/s。

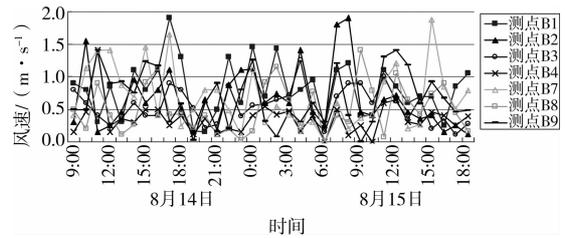


图 8 典型测点 1.5 m 高处风速逐时分布

2.5 行人高处湿球黑球温度

典型测点在离地 1.5 m 高处的 WBGT 逐时对比如图 9 所示。太阳辐射最强烈时刻(8 月 14 日 12:30)过后约 0.5 h(8 月 14 日 13:00),各点的 WBGT 值呈现出较大差异,排序如下:滑冰场无遮阳混凝土路面上空(测点 B7)的 WBGT>33、34 号教学楼间不透水砖路面上空(测点 B4)的 WBGT>31 号教学楼前无遮阳广场的不透水砖路面上空(测点 B1)的 WBGT>人行道小部分树荫下透水砖路面上空(测点 B8)的 WBGT>西五宿舍东南侧十字路口,小部分树荫下透水砖路面上空(测点 B9)的 WBGT>32、33 号教学楼之间小天井内、不透水砖路面上空(测点 B3)的 WBGT>32 号教学楼架空层内、不透水砖路面上空(测点 B2)的 WBGT。整体来看,教学楼组团在所有白天测试时刻,滑冰场无遮阳混凝土路面上空的测点 B7 热舒适性最差,32 号教学楼架空层内的测点 B2 热舒适性最好。建筑细节设计手法对夏季白天室外热舒适的改善效果依次为:架空>天井>透水砖路面>不透水砖路面>混凝土路面。而对于夜间,各测点的热舒适性相差不大。

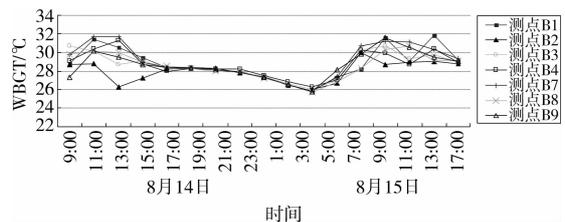


图 9 典型测点 1.5 m 高处 WBGT 逐时分布

2.6 地表温度

测试中选取了滑冰场无树荫混凝土路面、31 号教学楼前广场无树荫不透水砖路面、人行道小部分树荫下透水砖路面这 3 种典型下垫面进行地表温度的测量,测试结果如图 10 所示。

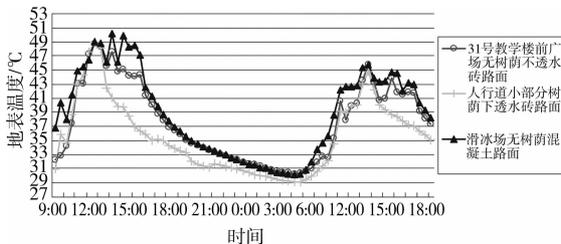


图 10 典型地表温度比较

从图 10 可见,整个测试期间,滑冰场无树荫混凝土路面表面温度普遍最高,在测试日 15:00 左右可达最高表面温度约 50.2℃;小部分树荫下透水砖路面的表面温度普遍最低。但在夜间 1:00—6:30 之间,出现不透水砖路面的表面温度比混凝土路面的表面温度略高的情况。

不透水砖路面和透水砖路面相比,在夏季白天 9:00—13:00 之间,两者的表面温度相差不大;从 13:00 开始,不透水砖路面的表面温度比透水砖路面的表面温度越来越大,到午后 16:30 左右,两者达到最大偏差,最大偏差可达 8℃;16:30—次日 9:00,不透水砖路面的表面温度仍然比透水砖路面的表面温度高,但两者的偏差随时间推移呈越来越小的趋势。

3 组团室外风速模型验证

由于组团布局、建筑密度、容积率、首层架空、建筑迎风面积比对组团室外风场有重要的影响,李琼采用 CFD 对 1 664 个典型样本进行计算,经过回归分析得出如下数学模型^[16]:

$$R_{ave} = -0.002X + 0.002Y + 0.002H - 1.893K + 0.703 \quad (1)$$

式中: R_{ave} 为组团室外 1.5 m 高处任一风向下的平均风速比; X 为建筑密度,%; Y 为首层架空率,%; H 为建筑群平均高度,m; K 为建筑迎风面积比。

将实测结果整理计算得到评价区域内 1.5 m 高处的平均风速比,并与公式(1)计算得到的值,进行对比,如表 2 所示。限于篇幅,表 2 仅给出有代表性的 7 组数据。从表 2 可见,数学公式计算值与实测统计值相对误差不超过 6%,吻合性较高。该测试工作进一步验证了组团室外风速的经验公式。

表 2 单风向向下平均风速比的实测统计值和数学公式预测值对比

时刻	风向	实测统计值	简化公式预测值	相对误差绝对值/%
2008年8月14日13:00	N	0.417	0.442	6.00
2008年8月14日11:00	NNW	0.402	0.389	3.23
2008年8月14日15:00	W	0.632	0.604	4.43
2008年8月14日16:00	W	0.619	0.604	2.42
2008年8月15日1:00	SW	0.668	0.637	4.64
2008年8月15日12:00	SW	0.674	0.637	5.48
2008年8月15日13:00	SW	0.654	0.637	2.60

4 组团室外 WBGT 模型对比研究

WBGT 可综合反应环境的热安全性和热舒适性,已被选为室外热环境的重要评价指标。迄今,学者对 WBGT 指标的关联式进行过广泛研究,并得到一些关联式,如表 3 所示。其中: T_a 为空气干球温度,℃; T_{mr} 为长波辐射温度,℃; RH 为相对湿度,%; V 为风速,m/s; SR 为总太阳辐射照度, W/m^2 ,当观测点位于光照区时, SR 为太阳直射辐射和太阳散射辐射之和,当观测点位于阴影区时, SR 为太阳散射辐射照度。

表 3 WBGT 的计算模型

模型编号	提出作者	WBGT 回归表达式
1	Moran 等人 ^[17]	$0.63T_a - 0.03RH + 0.002SR + 0.0054 \cdot (T_a \times RH) - 0.073(0.1 + SR)^{-1}$
2	董靓 ^[18]	$(0.8288T_a + 0.0613T_{mr} + 7.3771 \times 10^{-3}SR + 13.8297RH - 8.7284)V^{-0.0551}$
3	林波荣 ^[19]	$-4.871 + 0.814T_a + 12.305RH - 1.071V + 0.0498T_{mr} + 6.85 \times 10^{-3}SR$
4	张磊等人 ^[20]	$1.157T_a + 17.425RH + 2.407 \times 10^{-3}SR - 20.550$

表 3 中模型 1 是 Moran 等人^[17]基于以色列的实测数据回归拟合而成,模型 2 和模型 3 是相应作者^[18-19]针对 WBGT 定义式中的黑球温度、自然湿球温度建立热平衡方程,通过求解热平衡方程式推导而来,模型 4 是张磊等人^[20]基于广州地区的实测数据回归拟合而成。根据该文的实测结果,对上述 4 个模型进行评价。测点 B1 处 WBGT 的测量值与模型 1—4 的计算值进行比较,如图 11 所示。各个模型的计算误差如图 12 所示。

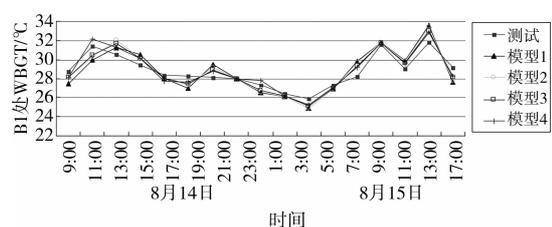


图 11 B1 测点 WBGT 测量值与不同计算模型比较

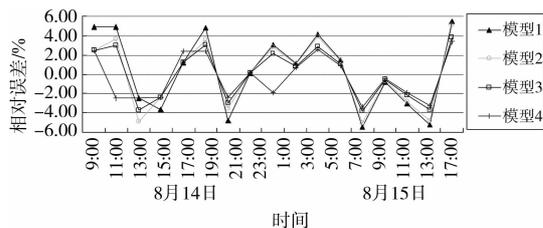


图 12 B1 测点不同模型 WBGT 计算相对误差

限于篇幅,其它测点 B2、B3、B4、B7、B8 和 B9 的计算值不一列出,仅给出各模型计算值与测量值的平均相对误差绝对值 MRE ,如表 4 所示。表中, MRE 的计算方法如式(2)所示。

表 4 不同计算模型的 MRE

模型编号	1	2	3	4
$MRE/\%$	5.34	4.22	3.95	2.89

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{WBGT - WBGT_i}{WBGT} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中: $WBGT$ 为测试值, $WBGT_i$ 为计算值, N 为测试总数。

从图 11 可见,各模型计算值与实测值存在一些偏差,但比较接近。从图 12 和表 4 可知,各模型的计算误差均在 6%以内,计算误差较小。其中,模型 4 较其它 3 个模型的计算误差稍微小一些,更为接近实测值。这是因为模型 4 的统计数据来源与该文的测试地点比较接近。该文的测试工作进一步验证了组团室外 WBGT 现有的几个回归计算模型的准确性。

5 结 论

对湿热地区某教学组团的夏季室外热环境进行了 33 h 连续实测工作,根据气象参数、行人高度上各个测点的温度、湿度、风速和 WBGT 分布以及典型地表温度等测试结果,得到湿热地区典型教学组团夏季室外热环境的主要特征。进而将实测数据与组团室外风速简化计算模型和组团室外 WBGT 的现有 4 种回归计算模型进行对比研究。研究发现李琼提出的组团室外风速经验公式的计算值与实测统计值相对误差均不超过 6%,具有较高的计算准确性。研究还表明,组团室外 WBGT 回归计算公式的计算值与实测统计值相吻合,其中,模型 4 的平均相对误差绝对值仅为 2.89%。建筑组团室外风速和 WBGT 的相关计算模型得到了进一步验证。

致谢:在实测场地土地利用现状的前期勘测调研和实验方案的制定过程中,得到了湖北省武汉市江夏区国土资源和规划局李维同志的热心帮助,表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] YAMTRAI PAT N, KHEDARI J, HIRUNLABH J. Thermal comfort standards for air conditioned buildings in hot and humid Thailand considering additional factors of acclimatization and education level[J]. Solar Energy, 2005, 78(4): 504-517.
- [2] ROTH M. Review of urban climate research in (sub) tropical regions [J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(14): 1859-1873.
- [3] MIKE DAVIES, PHILIP STEADMAN, TADJ ORESZCZYN. Strategies for the modification of the urban climate and the consequent impact on building energy use [J]. Energy Policy, 2008, 36(12): 4548-4551.
- [4] AHED MEMON RIZWAN, LEUNG Y C DENNIS, CHUNHO LIU. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(1): 120-128.
- [5] BONAN G B. The microclimates of a suburban Colorado (USA) landscape and implications for planning and design [J]. Landscape and Urban Planning, 2000, 49(3/4): 97-114.
- [6] 吉田伸治, 村上周三, 成田健一, 等. 団地キャニオン空間内における夏期の屋外温熱環境実測[C]//日本建築学会計画系論文集, 第 552 号, 2002: 69-76.
- [7] BOURBIA F, BOUCHERIBA F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine)[J]. Renewable Energy, 2010, 35(2): 343-347.
- [8] GIRIDHARAN R, LAU S S Y, GANESAN S. Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong [J]. Energy and Buildings, 2005, 37(9): 964-971.
- [9] 刘淑丽. 山地城镇室外热环境的测试与评价[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [10] 陈卓伦, 赵立华, 孟庆林, 等. 广州典型住宅小区微气候实测与分析[J]. 建筑学报, 2008, (11): 24-27. CHEN ZHUO-LUN, ZHAO LI-HUA, MENG QING-LIN, et al. Field measurement and analysis of the microclimate in typical residential quarter of Guangzhou [J]. Architectural Journal, 2008, (11): 24-27.
- [11] YANG XIAOSHAN, ZHAO LIHUA, MENG QINGLIN. Effects of different underlying surface on surface-air temperature distribution in Guangzhou[C]//Proceedings of the Fifth International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings and the Third International Conference on Built Environment and Public Health (EERB-BEPH), May 29-31, 2009, Guilin, P. R. China.
- [12] 赵炎. 住宅小区室外热环境的实测与模拟[D]. 重庆:

- 重庆大学, 2008.
- [13] RUEY-LUNG HWANG, TZU-PING LIN, NAI-JUNG KUO. Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(1): 53-62.
- [14] STEFANO PAOLO CORGNATI, ROBERTA ANSALDI, MARCO FILIPPI. Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: Assessment through objective and subjective approaches[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(4): 785-792.
- [15] 李琼, 孟庆林, 赵立华, 等. 湿热地区典型居住小区室外微气候的现场实测[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(S1): 75-80.
- LI QIONG, MENG QING-LIN, ZHAO LI-HUA, et al. Field measurement on the outdoor microclimate within a residential building block in hot and humid zone[J]. *Journal of Civil Architecture & Environmental Engineering*, 2010, 32(S1): 75-80.
- [16] 李琼. 湿热地区规划设计因子对组团微气候的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [17] MORAN D S, PANDOLF K B, SHAPIRO Y, et al. An environment stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT)[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2001 (26): 427-431.
- [18] 董靓. 街谷夏季热环境研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1991.
- [19] 林波荣. 绿化对室外热环境影响的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [20] 张磊, 孟庆林, 赵立华, 等. 室外热环境评价指标湿球黑球温度简化计算方法[J]. *重庆建筑大学学报*, 2008, 30(5):108-111.
- ZHANG LEI, MENG QING-LIN, ZHAO LI-HUA, et al. A simplified method to calculate the wet bulb globe temperature [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2008, 30(5):108-111.

(编辑 胡英奎)

(上接第73页)

- [7] 桂洲. 泰州森北大桥钻孔桩深水钢护筒设计与施工[J]. *西部探矿工程*, 2003(1):145-147.
- GUI ZHOU. Design and construction for deep water steel cylinders of the bored piles of Senbei bridge in Taizhou[J]. *West-china Exploration Engineering*, 2003 (1):145-147.
- [8] 左明福. 深水大直径钻孔灌注桩若干问题刍议[J]. *中国港湾建设*, 2006, 5:33-35.
- ZUO MING-FU. Discussion on large diameter bored piles in deep waters[J]. *China Harbour Engineering*, 2006, 5:33-35.
- [9] University of Rhode Island Transportation Center. Field study of composite piles in the marine environment, Urite Project No. 536153[R]. July 2005.
- [10] The montana department of transportation. Steel pipe pile/concrete pile cap bridge support system[R]. July 2009.
- [11] 美国各州公路和运输工作者协会. 美国公路桥梁设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [12] 严国敏. 日本大芝桥的设计与施工[J]. *国外桥梁*, 1997 (4):19-24.
- YAN GUO-MIN. Japanese Chicago bridge design and construction[J]. *Foreign Bridges*, 1997(4):19-24.
- [13] 黄亮生, 冯向宇. 钢护筒参与桩身受力的构造处理和计算分析[J]. *结构工程师*, 2005, 21(4):52-55.
- HUANG LIANG-SHENG, FENG XIANG-YU. Structural treatment and analysis of combined piles for super-long-span bridges[J]. *Structural Engineers*, 2005, 21(4):52-55.
- [14] 叶万灵, 时蓓玲. 桩的水平承载力实用非线性计算方法-NL法[J]. *岩土力学*, 2000, 21(2):97-101.
- YE WAN-LING, CHI PEI-LING. A practical non-linear calculation method of piles lateral bearing capacity-NL method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(2):97-101.
- [15] 韩理安. 水平承载桩的计算[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004.
- [16] 中华人民共和国行业标准. JTJ254-98 港口工程桩基规范局部修订(桩的水平承载力设计)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [17] 钟善桐. 钢管混凝土的刚度分析[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999, (3):13-18.
- ZHONG SHAN-TONG. Analysis of rigidity for concrete filled steel tube[J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1999(3):13-18.
- [18] 张忠苗, 张广兴, 吴庆勇, 等. 钻孔桩泥皮土与桩间土性状试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(6):695-699.
- ZHANG ZHONG-MIAO, ZHANG GUANG-XING, WU QING-YONG, et al. Studies on characteristics of mudcake and soil between bored piles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6):695-699.

(编辑 王秀玲)