

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.024

# STEVE 气温预测模型的普适性检验 ——以广州地区为例

王 频, 孟庆林

(华南理工大学 建筑学院; 亚热带建筑科学国家重点实验室建筑节能研究中心, 广州 510640)

**摘 要:** STEVE (Screening Tool for Estate Environment Evaluation) 是一种经过回归分析得出的统计模型, 通过获得气候变量和城市形态变量, 能够对新加坡当地的气温指标进行快速预测, 但该模型的普适性并没有得到检验, 不能直接应用于新加坡以外的地区。通过 3 组检验过程, 即对介绍 STEVE 的原文献中的数据进行易地验证, 以及在广州地区进行 2 组实测实验验证, 证明 STEVE 能够较好地满足工程上的精度要求, 可以作为一种简易预测气温的工具模型应用于广州地区以及具有相似气候背景城市的规划与设计阶段。STEVE 还具有优化完善的空间, 在未来的研究工作中将继续扩展其适用范围。

**关键词:** 气温; 预测模型; 城市热岛; 城市气候; 城市规划

**中图分类号:** TU 119.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2013)04-0151-10

## Validation Tests for Air Temperature Prediction Model STEVE: An Example of Guangzhou

Wang Pin, Meng Qinglin

(School of Architecture; Building Environment and Energy Laboratory, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

**Abstract:** STEVE (Screening Tool for Estate Environment Evaluation) is a statistical model through regression analysis. It can predict the air temperature by climate and urban morphology predictors for Singapore estate, while it hasn't been proved valid in other areas. Consequently, three groups of validation tests in Guangzhou area were conducted, one using the original data in the literature and the other two using experimental data from the field measurement. It is shown that STEVE tool can meet the engineering accuracy and can be used as a simple temperature prediction model tool in urban planning and design process in Guangzhou area and other cities with similar climate conditions. Besides, the STEVE tool can be optimized further to expand its applicable scope.

**Key words:** temperature; prediction model; urban heat island; urban climate; urban planning

近年来,随着城市开发与建设的大规模展开,城市形态发生了很大变化,导致城市气候也逐年发生变化<sup>[1]</sup>;城市下垫面被重塑,改变了城市辐射能量的平衡,并减少空气对流对热量的驱散<sup>[2]</sup>,导致以热岛

效应为主的气候问题出现,不仅降低了人们的热舒适感受<sup>[3]</sup>,甚至导致热安全问题频出,更直接增加不可再生能源使用量<sup>[4]</sup>,加剧能源短缺矛盾。城市热岛的产生,源于不甚合理的城市建设。由于城市规

收稿日期:2013-01-30

基金项目:国家科技支撑计划课题(2011BAJ01B01)

作者简介:王频(1986-),女,博士生,主要从事室外热环境与城市规划研究,(E-mail)theresa1015@yahoo.cn。

孟庆林(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)694827286@qq.com。

划与设计是城市建设行为的直接依据,因此,也是城市微气候问题的最主要影响因素之一。要缓解城市热岛问题,应当在城市规划与设计阶段融入更多的微气候技术导向<sup>[5]</sup>,使城市气候成为生成方案的重要考量。

目前研究城市微气候的技术方法主要分为观测法和模拟法<sup>[6]</sup>。实地测量<sup>[7]</sup>和遥感技术是目前观测法中应用较多的技术方法,CFD(Computation Fluid Dynamics, 计算流体力学)模型则是模拟法中被普遍使用的技术方法<sup>[8]</sup>。CFD 模拟软件模拟设置过程需要一定的流体力学知识,对于规划设计人员来说在使用上存在一定难度,并且模拟计算也需要一定的时间。而另一种模拟计算方法 CTTC(Cluster Thermal Time Constant, 建筑群热时间常数)作为集总参数模型,使用建筑群热时间常数来计算空气温度随外界热量扰动的变化,以建筑群热量收支为基础,简单有效,适用于工程上的预测和评价。舒力帆等<sup>[9-10]</sup>通过对原有 CTTC 模型进行研究与改进,开发了城市居住区热环境辅助设计分析工具 DUTE1.0(Design Urban Thermal Environment)。陆莎<sup>[11]</sup>在实验中发现 DUTE 计算温度和实测温度的相对误差在 3%以内,认为利用 DUTE 模拟得到的室外 1.5 m 高处空气温度是合理有效的。因此 DUTE 适用于对一定面积区域的热岛强度和 WBGT 值进行整体计算。

由于 CFD 和 CTTC 模型存在一定的局限性,一些学者将眼光投向统计模型,试图通过回归分析等方法,建立城市气候与城市参数之间的关系,以快速有效地计算城市气候指标。这些统计模型分别对应着城市规划与设计不同尺度与阶段,如总体规划<sup>[12-14]</sup>、详细规划<sup>[15-24]</sup>、居住区详细规划<sup>[25-26]</sup>、街区设计<sup>[27-30]</sup>等。从这些统计模型来看,大多数是解释城市气候的成因,因此属于解释模型;而城市规划、设计阶段需要的统计模型,是能够在短时间之内对城市气候指标和相关系数进行预测,即预测模型<sup>[31]</sup>。目前一些 WBGT 热应力指标预测模型<sup>[32]</sup>已经过检验并可以直接使用,而准确有效的温度预测模型则相对较少。STEVE(Screening Tool for Estate Environment Evaluation)是一种经过回归分析得出的统计模型,能够对气温指标进行快速预测,有利于普遍推广,能在方案阶段构建起规划设计与城市气候之间的桥梁,但该模型的普适性并没有得到检验。因此笔者以广州地区为例,对 STEVE 模型进行普适性检验。

## 1 STEVE 模型简介

新加坡国立大学的亚洲城市可持续研究中心(Center for Sustainable Asian Cities, 简称 CSAC)在新加坡开展了从 2005 年 9 月至 2008 年 3 月、历时 2.5 a 的实地测量,得出 50 m 半径范围内日气温值的回归经验模型,即 CSAC 研发出的气温预测工具 STEVE(Screening Tool for Estate Environment Evaluation)的内核模型<sup>[33]</sup>。

STEVE 的预测公式为:

$$T_{\min} = 4.061 + 0.839 \text{ Ref } T_{\min} + 0.004 \text{ PAVE} - 0.193 \text{ GnPR} - 0.029 \text{ HBDG} + 1.339 \times 10^{-6} \text{ WALL};$$

$$(R^2 = 0.86) \quad (1)$$

$$T_{\text{avg}} = 2.347 + 0.904 \text{ Ref } T_{\text{avg}} + 5.786 \times 10^{-5} \text{ SOLAR}_{\text{total}} + 0.007 \text{ PAVE} - 0.06 \text{ GnPR} - 0.015 \text{ HBDG} + 1.311 \times 10^{-5} \text{ WALL} + 0.633 \text{ SVF};$$

$$(R^2 = 0.91) \quad (2)$$

$$T_{\max} = 7.542 + 0.684 \text{ Ref } T_{\max} + 0.003 \text{ SOLAR}_{\max} + 0.005 \text{ PAVE} - 0.016 \text{ HBDG} + 6.777 \times 10^{-6} \text{ WALL} + 1.467 \text{ SVF} + 1.466 \text{ ALB};$$

$$(R^2 = 0.54) \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $T_{\min}$ 、 $T_{\text{avg}}$ 、 $T_{\max}$ 分别为预测日最低气温、平均气温、最高气温,℃;Ref  $T_{\min}$ 为日最低气温,℃;PAVE为铺地面积比例,%;GnPR为绿色容积率;HBDG为平均高度建筑面积比,1/m;WALL为墙体总面积, $\text{m}^2$ ;Ref  $T_{\text{avg}}$ 为日平均气温,℃;SOLAR<sub>total</sub>为日太阳辐射最大值, $\text{W}/\text{m}^2$ ;SVF为天空角系数;Ref  $T_{\max}$ 为日最高气温,℃;SOLAR<sub>max</sub>为日太阳辐射总量, $\text{W}/\text{m}^2$ ;ALB为表面平均反射率。从式(1)~(3)可以看出:模型的自变量分为 2 大类:1)预测日气象站气候变量,包括 Ref  $T_{\min}$ 、Ref  $T_{\text{avg}}$ 、Ref  $T_{\max}$ 、SOLAR<sub>total</sub>和 SOLAR<sub>max</sub>;2)预测点 50 m 半径范围内的形态变量,包括 PAVE、HBDG、WALL、GnPR、SVF 和 ALB。

由于城市气温的影响因素众多,并且其间关系复杂,当简化成线性模型时,只适用于一定面积范围内(50 m 半径);此外,该预测模型忽视风速和人为排热等因素对气温的影响,因此,只适用于晴朗无风的夏季情况。

STEVE 模型计算简捷,并且具有一定的准确性,如果得到推广,将建立起规划设计与热环境研究的桥梁,有利于营造出良好的室外热环境,降低热岛强度。由于该模型的基础回归数据均在新加坡完成,因此需要在其他地区进行校验。

新加坡地处热带,太阳辐射强度大,受纬度位置和海陆位置影响,年温差和日温差都比较小,年平均温度在 24~31℃之间。新加坡全年的气候特征与中国建筑热工分区中的湿热地区、以及中国建筑气

候区划图(GB 50178—93)中Ⅲ区和Ⅳ区(即亚热带地区)的夏季气候特征较为相似:这些地区的夏季平均气温为 26~30 °C,平均最高气温为 30~38 °C,沿海地区日温差不大,太阳辐射强度较大。由于 STEVE 模型已经在新加坡当地得到验证,可以推断,该模型也可应用于与新加坡全年气候特征相似、中国上述地区夏季时段的日气温值预测。广州是典型的湿热地区南亚热带城市,笔者以广州地区为例,运用 DUTE 软件与实测数据,分别对 STEVE 模型在广州的适用性进行检验。

## 2 检验方法

笔者采用的检验方法包括:第 1 组检验介绍 STEVE 的原文献中的数据进行易地验证,第 2、3 组检验在广州地区进行实测实验验证;然后采用式(4)计算其误差,进而进行定量评价:

$$\Delta = (T_1 - T_2) \times 100\% / T_1 \quad (4)$$

式中: $T_1$ 、 $T_2$  分别为进行误差计算的 2 组气温数据。

在第 1 组检验中  $T_1$ 、 $T_2$  分别为 DUTE 计算结果和 STEVE 计算结果;在第 2、3 组检验中  $T_1$ 、 $T_2$  分别为实测结果和 STEVE 计算结果。

### 2.1 第 1 组检验

第 1 组检验选择 Wong 等<sup>[34]</sup>对 STEVE 进行参数化研究时的 base case、case 1、case 5、case 6、case 7、case 8、case 10、case 12 等工况及其气温计算结果为基础,假设这 8 个工况从新加坡“转移”至广州,并采用广州夏季典型气象日 7 月 21 日气象站数据的气候变量替换新加坡当地的气候变量,得到 8 种工况在广州和新加坡 2 地的气候变量差值。由于 STEVE 计算结果由气候变量和形态变量生成,而后者并没有变化,因此气候变量差值便是 STEVE 计算结果差值(见表 1),即得到 8 种工况在广州的气温计算结果。与此同时,用 DUTE 对 8 种工况进行计算(见图 1),便可以将 STEVE 与 DUTE 的计算结果进行比较。

表 1 STEVE 在新加坡与广州气候变量对比

| 在新加坡计算日气象数据   | 在广州计算日气象数据  | 气候变量在两地的差值   |
|---|---|--|
| $T_{\min} = 27.24 \text{ } ^\circ\text{C}$              | $T_{\min} = 26.10 \text{ } ^\circ\text{C}$              | $\Delta T_{\min} = 0.956 \text{ } ^\circ\text{C}$              |
| $T_{\text{avg}} = 28.97 \text{ } ^\circ\text{C}$        | $T_{\text{avg}} = 28.21 \text{ } ^\circ\text{C}$        | $\Delta T_{\text{avg}} = 0.771 \text{ } ^\circ\text{C}$        |
| $T_{\max} = 31.14 \text{ } ^\circ\text{C}$              | $T_{\max} = 31.10 \text{ } ^\circ\text{C}$              | $\Delta T_{\max} = 0.04 \text{ } ^\circ\text{C}$               |
| $\text{SOLAR}_{\text{total}} = 5\,058.39 \text{ W/m}^2$ | $\text{SOLAR}_{\text{total}} = 3\,555.55 \text{ W/m}^2$ | $\Delta \text{SOLAR}_{\text{total}} = 1\,502.84 \text{ W/m}^2$ |
| $\text{SOLAR}_{\max} = 764 \text{ W/m}^2$               | $\text{SOLAR}_{\max} = 466.67 \text{ W/m}^2$            | $\Delta \text{SOLAR}_{\max} = 297.33 \text{ W/m}^2$            |

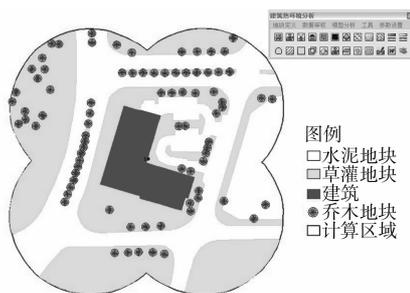


图 1 DUTE 计算界面

### 2.2 第 2、3 组检验

在第 2、3 组检验时,分别选择 2 处实验地点实测气温:华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室新楼(以下简称为华工)(图 2)和广州大学城广州大学生活区 2 个小区(以下简称为广大)(图 3)。华工实验于 2012 年 7 月 4 日—7 月 5 日进行,持续 24 h 以上,实测当天多云转晴,有零星小雨;广大实验于 2012 年 8 月 20 日下午进行,主要关注午后的高温时段,实测当天天气多云转晴。图 4 是 2 d 的全天气象数据比较。



图 2 华工实验地点



图 3 广大实验地点

华工实验共 6 个测点(图 5),广大实验分 A、B 2 组共 7 个测点,其中 A 组位于教师公寓小区内,B 组位于学生宿舍小区内(图 6)。表 2~3 是对各测点的具体说明。

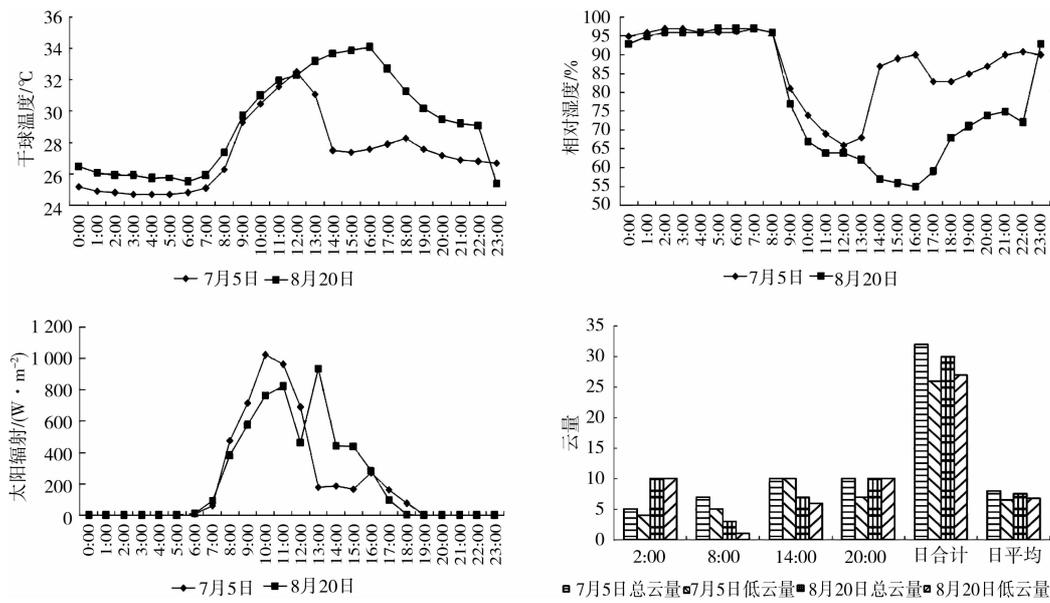


图 4 2012 年 7 月 5 日与 8 月 20 日气象数据比较

表 2 华工实验测点名称及说明

| 测点编号   | 01          | 02                    | 03    | 04    | 05          | 06    |
|--------|-------------|-----------------------|-------|-------|-------------|-------|
| 测点周边情况 |             |                       |       |       |             |       |
| 下垫面性质  | 水泥地, 靠近建筑墙体 | 下水道井盖、水泥地和浅色植草砖, 靠近草地 | 浅色植草砖 | 浅色植草砖 | 浅色植草砖, 靠近草地 | 浅色植草砖 |

表 3 广大实验测点名称及说明

| 测点名称   | A1                 | A2                 | A3                       | B1                    | B2                    | B3        | B4                             |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|--------------------------------|
| 测点周边情况 |                    |                    |                          |                       |                       |           |                                |
| 下垫面性质  | 住宅楼北侧组团绿地上, 靠近组团道路 | 住宅区中央位置, 下垫面为浅灰色铺砖 | 住宅区东侧景观水体边, 下垫面为草地、卵石和水体 | 宿舍区西北侧道路上, 下垫面为红色铺砖地面 | 宿舍区西南侧道路上, 下垫面为红色铺砖地面 | 宿舍区东北侧草地上 | 宿舍区东南侧道路上, 靠近组团绿地处, 下垫面为红色铺砖地面 |

实验的地面测量仪器为 HOBO 温湿度自记仪, 温度测量范围为  $-30 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 测量精度为  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度测量范围为  $0 \sim 100\%$ , 测量精度为  $3\%$ 。HOBO 温湿度自记仪的数据采集频率设置为  $1\text{ min}$ 。为了尽量保证地面测点温湿度记录仪器所记录的空气温湿度不受其他因素干扰, 实验需采用防辐射装

置, 减少太阳辐射对空气温湿度测量值的影响。实测中所用的防辐射装置为直径为  $5\text{ cm}$  的不锈钢防辐射筒, 外面包铝箔以反射太阳辐射。HOBO 温湿度自记仪放置于防辐射筒内, 筒管两端开敞以保证管内空气的流通。防辐射筒由三角架支撑固定, 保证 HOBO 温湿度自记仪在离地  $1.5\text{ m}$  高度处(图 7)。

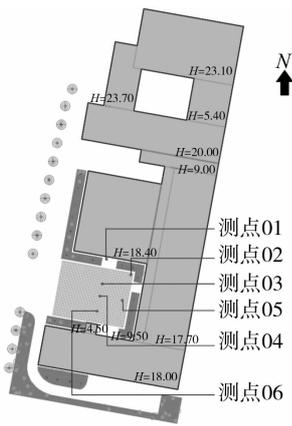


图5 华工实验测点



图6 广大实验地点



图7 实验仪器及安置方法

### 3 检验结果与分析

#### 3.1 第1组检验

对 STEVE 和 DUTE 的典型计算日计算结果 (见图 8) 进行对比分析 (见表 4), 可以看出, 两者对日气温值的计算结果变化趋势基本一致 (见图 9), 而 DUTE 计算结果的最低、最高气温和平均气温均高于 STEVE 的计算结果 (见图 10)。

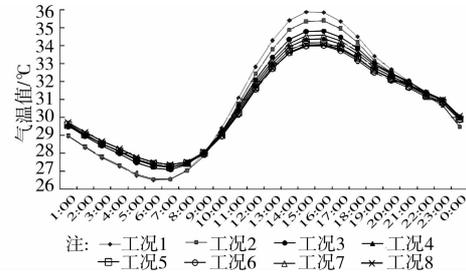


图8 DUTE 计算结果

表4 8种工况的 STEVE 与 DUTE 计算结果对比

| 工况 | 工况描述                                   | 计算气温值  | STEVE(新加坡) | STEVE(广州) | DUTE  | 工况示意图 |
|----|--|--------|------------|-----------|-------|-------|
| 1  | 绿积量=1.45                               | 最小值/°C | 26.79      | 25.83     | 26.51 |       |
|    |  | 平均值/°C | 29.56      | 28.79     | 30.89 |       |
|    |  | 最大值/°C | 32.83      | 31.91     | 35.88 |       |
| 2  | 绿积量=1                                  | 最小值/°C | 26.9       | 25.94     | 26.57 |       |
|    |  | 平均值/°C | 29.4       | 28.63     | 30.71 |       |
|    |  | 最大值/°C | 32.5       | 31.58     | 35.37 |       |
| 3  | 绿积量=1.45;<br>周边建筑高度=15 m;<br>周边建筑数量=11 | 最小值/°C | 26.8       | 25.84     | 27.08 |       |
|    |  | 平均值/°C | 29.4       | 28.63     | 30.81 |       |
|    |  | 最大值/°C | 32.4       | 31.48     | 34.82 |       |
| 4  | 绿积量=1.45;<br>周边建筑高度=30 m;<br>周边建筑数量=11 | 最小值/°C | 26.8       | 25.84     | 27.21 |       |
|    |  | 平均值/°C | 29.3       | 28.53     | 30.69 |       |
|    |  | 最大值/°C | 32.2       | 31.28     | 34.38 |       |
| 5  | 绿积量=1.45;<br>周边建筑高度=45 m;<br>周边建筑数量=11 | 最小值/°C | 26.7       | 25.74     | 27.23 |       |
|    |  | 平均值/°C | 29.2       | 28.43     | 30.6  |       |
|    |  | 最大值/°C | 32         | 31.08     | 34.17 |       |
| 6  | 绿积量=1.45;<br>周边建筑高度=60 m;<br>周边建筑数量=11 | 最小值/°C | 26.8       | 25.84     | 27.25 |       |
|    |  | 平均值/°C | 29.2       | 28.43     | 30.53 |       |
|    |  | 最大值/°C | 31.9       | 30.98     | 33.99 |       |

续表 4

| 工况 | 工况描述                                   | 计算气温值 | STEVE(新加坡) | STEVE(广州) | DUTE  | 工况示意图 |
|----|--|-------|------------|-----------|-------|-------|
| 7  | 绿积量=1.45;<br>周边建筑高度=15 m;<br>周边建筑数量=14 | 最小值/℃ | 26.9       | 25.94     | 27.2  |       |
|    |  | 平均值/℃ | 29.6       | 28.83     | 30.78 |       |
|    |  | 最大值/℃ | 32.7       | 31.78     | 34.58 |       |
| 8  | 绿积量=1.45;<br>周边建筑高度=30 m;<br>周边建筑数量=14 | 最小值/℃ | 26.8       | 25.84     | 27.35 |       |
|    |  | 平均值/℃ | 29.5       | 28.73     | 30.64 |       |
|    |  | 最大值/℃ | 32.4       | 31.48     | 34.07 |       |

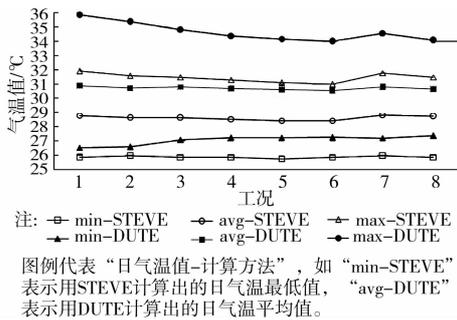


图 9 8 种工况的 STEVE 与 DUTE 计算结果比较

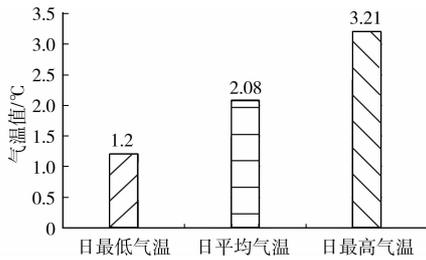


图 10 STEVE 与 DUTE 计算结果差值的平均值

造成这种现象的原因可能有:1)对参照文献中的计算区域模型进行再建模过程中的误差,而导致

DUTE 对该模型模拟时产生二次误差;2)DUTE 模拟结果是区域内的气温值,而 STEVE 计算结果是区域中央点的气温值,只有在计算区域半径小至一定程度时两者方可等同,而 50 m 半径可能并未达到足够小的要求;3)DUTE 模拟结果本身存在一定的误差。

表 5 描述了各工况的相对误差情况。其中,日最高气温计算误差相对其他 2 项计算结果误差较大,这可能与人为排热有关:当夏季午后空气温度达到峰值时,为使室内维持一定的舒适度,空调启用率升高,空调排热量也相应增加,而 STEVE 和 DUTE 均忽略了这一部分人为排热,造成计算结果不确定性变大。由于 STEVE 没有考虑风速这一影响因素,因此也会加大 STEVE 计算结果的误差。此外,STEVE 计算结果是 50 m 半径范围区域中央的气温值,而各工况中计算区域中央点均毗邻建筑物,由于受到周边建筑物与树荫遮挡,中央点气温相对较低;另一方面,DUTE 计算的是区域中包括开敞绿地、硬质道路等下垫面形式在内的平均气温值,计算结果较高,这也是造成 STEVE 与 DUTE 计算结果差值偏大的原因之一。

表 5 各工况 STEVE 和 DUTE 对日气温值的相对误差

| 工况  | $T_{\min-STEVE}/$<br>℃ | $T_{\min-DUTE}/$<br>℃ | 相对误差 $\Delta_{\min}/$<br>% | $T_{\text{avg-STEVE}}/$<br>℃ | $T_{\text{avg-DUTE}}/$<br>℃ | 相对误差 $\Delta_{\text{avg}}/$<br>% | $T_{\max-STEVE}/$<br>℃ | $T_{\max-DUTE}/$<br>℃ | 相对误差 $\Delta_{\max}/$<br>% |
|-----|------------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 1   | 25.83                  | 26.51                 | 2.57                       | 28.79                        | 30.89                       | 6.80                             | 31.91                  | 35.88                 | 11.06                      |
| 2   | 25.94                  | 26.57                 | 2.37                       | 28.63                        | 30.71                       | 6.78                             | 31.58                  | 35.37                 | 10.71                      |
| 3   | 25.84                  | 27.08                 | 4.57                       | 28.63                        | 30.81                       | 7.08                             | 31.48                  | 34.82                 | 9.59                       |
| 4   | 25.84                  | 27.21                 | 5.02                       | 28.53                        | 30.69                       | 7.04                             | 31.28                  | 34.38                 | 9.01                       |
| 5   | 25.74                  | 27.23                 | 5.46                       | 28.43                        | 30.6                        | 7.10                             | 31.08                  | 34.17                 | 9.04                       |
| 6   | 25.84                  | 27.25                 | 5.16                       | 28.43                        | 30.53                       | 6.88                             | 30.98                  | 33.99                 | 8.85                       |
| 7   | 25.94                  | 27.2                  | 4.62                       | 28.83                        | 30.78                       | 6.34                             | 31.78                  | 34.58                 | 8.10                       |
| 8   | 25.84                  | 27.35                 | 5.51                       | 28.73                        | 30.64                       | 6.24                             | 31.48                  | 34.07                 | 7.60                       |
| 平均值 | 25.85                  | 27.05                 | 4.42                       | 28.62                        | 30.71                       | 6.78                             | 31.45                  | 34.66                 | 9.26                       |

### 3.2 第 2、3 组检验

3.2.1 华工实验 尽管温湿度自记仪每隔 1 min 记录 1 次数据,但为了清晰地表示各测点的温湿度状况,温湿度变化曲线给出的是 7 月 5 日当天每 0.5 h 的平均值。

温度逐时变化趋势和各测点日最高、最低、平均温度值分别见图 11、12。从图中可以看出,各测点空气温度变化趋势基本相同。在接近 6:00 时,各测点出现了当日的最低气温,而随着日间太阳辐射的逐渐增强,各测点的气温也逐渐攀升,在午后分别达到当日的最高气温。与以往实测经验有所不同的是,各测点在 9:00—11:00 期间气温出现波动较明显的状况,而在 12:30 以后气温并没有继续上升,而是开始出现回落。出现这种情况的原因在于,7 月 5 日当天在上午时段属于多云间晴天气,空气温度也受到影响,而午后偶下小雨,直接导致空气温度开始下降。从各测点空气温度变化趋势来看,其波动趋势基本一致,气温平均值、极值与其出现的时间也基本相同。

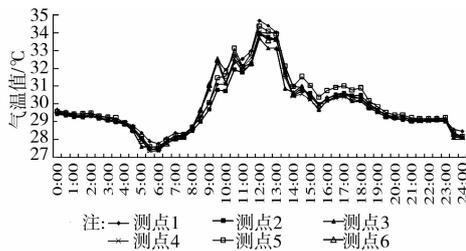


图 11 各测点 7 月 5 日温度变化曲线

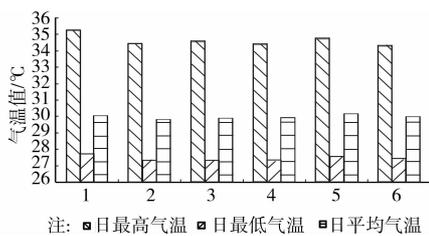


图 12 各测点 7 月 5 日温度极值与平均值

湿度逐时变化趋势见图 13。从图 13 可以看出,各测点相对湿度变化趋势与空气温度变化趋势相反,早晨 5:00—6:00 期间湿度很高,随着太阳辐射的增强,12:00 过后相对湿度降至最低,接着由于下雨的缘故,湿度开始上升,到夜间 23:00 左右空气湿度和早晨 5:00 左右基本持平。

STEVE 输入变量包括 2 类:预测日气象站气候变量和预测点 50 m 半径范围内的形态变量。表 6~7 列举了这些变量的值,因此,用 STEVE 模型可以计算出气温的极值和平均值。

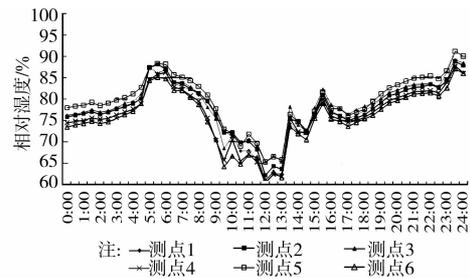


图 13 各测点 7 月 5 日相对湿度变化曲线

表 6 预测日气象站气候变量

| Ref $T_{min}$ /<br>°C | Ref $T_{avg}$ /<br>°C | Ref $T_{max}$ /<br>°C | SOLAR <sub>total</sub> /<br>( $W \cdot m^{-2}$ ) | SOLAR <sub>max</sub> /<br>( $W \cdot m^{-2}$ ) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|
| 24.7                  | 27.25                 | 32.5                  | 4 998  | 1 025  |

表 7 预测点 50 m 半径范围内的形态变量

| 测点编号 | PAVE/<br>% | HBDG/<br>$m^{-1}$ | WALL/<br>$m^2$ | GnPR | SVF  | ALB  |
|------|------------|-------------------|----------------|------|------|------|
| 1    | 41.8       | 0.086             | 6 192.1        | 0.28 | 0.44 | 0.15 |
| 2    | 29.1       | 0.072             | 6 588.2        | 0.21 | 0.47 | 0.15 |
| 3    | 43.5       | 0.067             | 6 005.2        | 0.36 | 0.62 | 0.15 |
| 4    | 51.0       | 0.068             | 5 812.0        | 0.76 | 0.64 | 0.15 |
| 5    | 50.1       | 0.068             | 5 845.9        | 0.35 | 0.60 | 0.15 |
| 6    | 54.0       | 0.070             | 5 055.0        | 0.44 | 0.61 | 0.15 |

对 STEVE 计算结果和实测数据进行对比分析(见图 14),从图 14 可以看出,两者对日气温值的计算结果变化趋势基本一致,并与前文的结论一致,即 STEVE 模型的计算结果偏小。

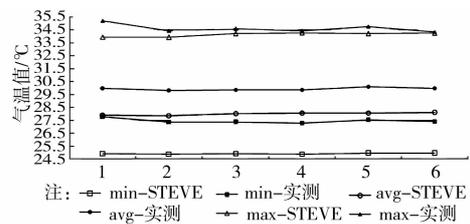


图 14 6 个测点的 STEVE 计算值与实测值计算结果比较

采用百分误差对结果进行定量评价(见表 8),从表 8 可以看出,不同于 4.1 节中 STEVE 与 DUTE 计算结果的比较为某点气温值与平均气温值的比较,由于 STEVE 计算结果与实测实验结果均为同一点的气温值,因此日最高气温计算误差大大减小。日最低气温计算误差相对其他 2 项计算结果误差较大,这可能与实测当天天气状况有关:早晨时

分是一天当中出现最低温度的时候,而 7 月 4 日晚上至 7 月 5 日早晨为阴天,云层较厚,云量较大,因此影响地面长波辐射,进而阻碍了近地面的散热状况,导致实测日最低气温相对较高,也间接造成实测日平均气温与计算结果的差值。可以推测,在晴朗

天气状况下,STEVE 能满足一般简易预测气温的要求,如第 1 组检验结果,已基本能满足精度要求。在今后对模型进行完善优化时,建议在预测日平均气温和日最低气温时,加入云量这一表达天气状况的气候变量,使模型预测结果更为精确。

表 8 各测点 STEVE 计算值和实测值对日气温值的相对误差

| 测点  | 计算 $T_{min}/$<br>°C | 实测 $T_{min}/$<br>°C | 相对误差 $\Delta_{min}/$<br>% | 计算 $T_{avg}/$<br>°C | 实测 $T_{avg}/$<br>°C | 相对误差 $\Delta_{avg}/$<br>% | 计算 $T_{max}/$<br>°C | 实测 $T_{max}/$<br>°C | 相对误差 $\Delta_{max}/$<br>% |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|
| 1   | 24.90               | 27.75               | 10.26                     | 27.90               | 29.99               | 6.96                      | 33.96               | 35.24               | 3.61                      |
| 2   | 24.87               | 27.36               | 9.11                      | 27.84               | 29.83               | 6.66                      | 33.95               | 34.47               | 1.51                      |
| 3   | 24.90               | 27.33               | 8.92                      | 28.02               | 29.87               | 6.19                      | 34.23               | 34.60               | 1.05                      |
| 4   | 24.85               | 27.28               | 8.93                      | 28.06               | 29.87               | 6.05                      | 34.30               | 34.44               | 0.41                      |
| 5   | 24.92               | 27.51               | 9.39                      | 28.06               | 30.11               | 6.82                      | 34.24               | 34.78               | 1.57                      |
| 6   | 24.92               | 27.41               | 9.07                      | 28.07               | 29.99               | 6.38                      | 34.27               | 34.36               | 0.28                      |
| 平均值 | 24.89               | 27.44               | 9.28                      | 27.99               | 29.94               | 6.51                      | 34.16               | 34.65               | 1.41                      |

3.2.2 广大实验 整理实测结果可以看出,7 个测点的最高温度出现时间集中在 14:30—15:30 之间,这与相关文献得出的结论也基本吻合。因此研究集中在这个时间段内各测点的气温状况(见图 15)。其中,A1 测点周边有建筑物遮挡,所在组团绿地的蒸发降温作用导致午后气温上升不明显;A2 测点的铺砖地面表现出一定的蓄热增温能力,因此从 15:00 左右气温开始攀升,并于半小时内超过 A3 和 B3 测点的气温值;A3 和 B3 测点由于所在位置较为开阔,遮挡较少,直接接收太阳辐射量比较大,午后气温值一直居高不下;B2 和 B4 测点周边有建筑和树荫遮挡,气温值相对较低,B2 测点始终为各测点中气温最小值。可以看出,各个测点由于下垫面形式和影响参数各不相同,气温值及其变化趋势也有所不同,温度差最长达 2.5°C,最大气温值及其出现时间均有一定差异。

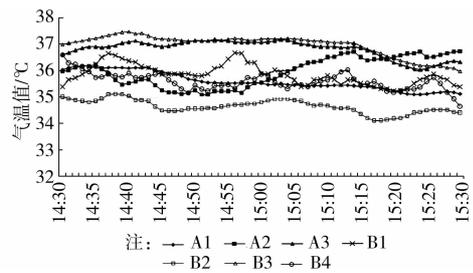


图 15 各测点 8 月 20 日高温时段温度变化曲线

表 9~10 列举了各测点气候变量与形态变量的值,可以用 STEVE 算出气温极值,并采用百分误差对结果进行定量评价(见表 11),从表 11 可以看出,各测点最高气温相对误差为 0~6.45%,平均相对误差为 3.85%。

表 9 预测日气象站气候变量

| Ref $T_{max}/$<br>°C | SOLAR $_{max}/(W \cdot m^{-2})$ |
|----------------------|---------------------------------|
| 34.1                 | 938                             |

表 10 预测点 50 m 半径范围内的形态变量

| 测点编号 | PAVE/% | HBDG/ $m^{-1}$ | WALL/ $m^2$ | GnPR | SVF  | ALB  |
|------|--------|----------------|-------------|------|------|------|
| A1   | 14.2   | 0.020          | 7 676.675 6 | 2.85 | 0.72 | 0.20 |
| A2   | 24.9   | 0.016          | 8 782.635 4 | 2.24 | 0.71 | 0.15 |
| A3   | 18.1   | 0.031          | 4 798.936 3 | 2.64 | 0.84 | 0.20 |
| B1   | 46.9   | 0.012          | 9 173.299 8 | 1.52 | 0.64 | 0.15 |
| B2   | 44.1   | 0.014          | 8 022.457 8 | 1.78 | 0.65 | 0.15 |
| B3   | 35.1   | 0.010          | 9 317.385 0 | 2.24 | 0.58 | 0.20 |
| B4   | 32.8   | 0.012          | 8 188.105 8 | 2.23 | 0.70 | 0.15 |

表 11 各测点 STEVE 计算值和实测值对日最高气温的相对误差

| 测点编号 | 计算 $T_{\max}/^{\circ}\text{C}$ | 实测 $T_{\max}/^{\circ}\text{C}$ | 相对误差 $\Delta/\%$ |
|------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|
| A1   | 35.15                          | 36.20                          | 2.89             |
| A2   | 35.13                          | 36.74                          | 4.40             |
| A3   | 35.33                          | 37.18                          | 4.97             |
| B1   | 35.14                          | 36.69                          | 4.23             |
| B2   | 35.13                          | 35.13                          | 0.00             |
| B3   | 35.06                          | 37.48                          | 6.45             |
| B4   | 35.15                          | 36.61                          | 3.99             |
| 平均值  | 35.15                          | 36.57                          | 3.85             |

从图 16 可以看出,各测点的 STEVE 计算结果比较一致,而实测值普遍高于 STEVE 计算结果,除 B2 测点外,计算值与实测值相差 1~2.5 $^{\circ}\text{C}$ 。出现这种现象的原因有:夏季高温时段住宅小区大量使用空调、风扇等电器,建筑物排热量较大,直接与大气进行显热和潜热交换,导致接近建筑物的测点气温实际测量值相对于没有考虑人为热影响的 STEVE 模型较高。其中,A 类测点位于教师公寓内,夏季空调使用率大,排热量大,空气升温明显;B 类测点位于学生宿舍区,人口密度大,排热量也较大,再加上天空角系数也比较小(见表 10),形态封闭与通风能力弱导致热量不断积蓄、气温上升。B3 测点是一个典型的例子。而 B2 测点实测气温值较低的原因可能是该测点靠近宿舍区向南侧路面的开口处,通风能力相对较强,有利于对热量的驱散。因此,在今后对模型进行完善优化时,建议在预测日最高气温时适当加入人为排热量与通风能力的考虑,使模型预测结果更为精确。

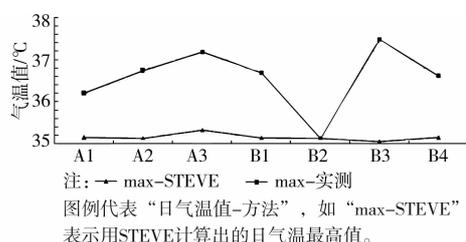


图 16 各测点的 STEVE 计算值与实测值对日最高气温的比较

总体而言,STEVE 计算结果与实测值差值较小,能够较好地满足精度要求,可以作为一种简易预测日最高气温的工具模型。

## 4 结 论

由于新加坡全年的气候特征与中国湿热地区的夏季气候特征较为相似,而 STEVE 模型已经在新

加坡当地得到验证,因此推断 STEVE 模型也可应用于与新加坡全年气候特征相似的中国湿热地区夏季时段的日气温值预测。经过 3 组检验可以看出,STEVE 模型确实可以对包括广州在内的中国湿热地区的夏季日气温值进行相对有效的预测,STEVE 的普适性得到了检验,可以作为湿热地区夏季城市微气候研究的一种气温简易预测工具模型。

在后续研究工作中,可以对 STEVE 进行更进一步的完善:如扩展形态变量的种类和数量,加入人为排热量的考虑,或者加入更多预测日气象数据的气候变量,如云量、风速等,使模型不仅能够在晴朗无风的情况下使用,还可以应用于阴天、有风等天气状况下的人口密集区域的气温预测,增加 STEVE 模型的适用范围。

## 参考文献:

- [1] Benzerzour M, Masson V, Groleau D, et al. Simulation of the urban climate variations in connection with the transformations of the city of Nantes since the 17th century [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(8): 1545-1557.
- [2] Smith C, Levermore G. Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(12): 4558-4562.
- [3] Leung Y, Yip K, Yeung K. Relationship between thermal index and mortality in Hong Kong [J]. *Meteorological Applications*, 2008, 15(3):399-409.
- [4] Davies M, Steadman P, Oreszczyn T. Strategies for the modification of the urban climate and the consequent impact on building energy use [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(12):4548-4551.
- [5] 叶祖达,刘京,王静懿. 建立低碳城市规划实施手段:从城市热岛效应模型分解控规指标[J]. *城市规划学刊*, 2010(6):39-45.  
Ye Z D, Liu J, Wang J Y. Developing implementation tools for low carbon urban planning: from models of urban heat island effect to zoning plans [J]. *Urban Planning Forum*, 2010(6):39-45.
- [6] Mirzaei P A, Haghghat F. Approaches to study urban heat island-abilities and limitations [J]. *Building and environment*, 2010, 45(10):2192-2201.
- [7] 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 Z L, Zhao L H, Meng Q L, et al. Microclimate measurement and analysis of a typical residential in Guangzhou [J]. *Architectural Journal*, 2008, 11:24-27.
- [8] Ooka R. Recent development of assessment tools for urban climate and heat-island investigation especially based on experiences in Japan [J]. *International Journal*

- of Climatology, 2007, 27(14): 1919-1930.
- [9] 舒力帆. 基于热时间常数的室外热环境评价方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [10] 陈佳明. 基于集总参数法的居住区热环境计算程序开发[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [11] 陆莎. 基于集总参数法的室外热环境设计方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [12] 赵志敏. 城市化进程对城市热岛效应因子的对比分析[J]. 中国环境监测, 2009, 24(6):77-79.
- [13] 刘玲, 吴坤梯, 黄光瑞, 等. 合肥城市发展对热岛强度的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(A01):88-93.  
Liu L, Wu K T, Huang G R, et al. The influence of Hefei city development on heat island intensity [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(A01):88-93.
- [14] 何萍, 陈辉, 李宏波, 等. 云南高原楚雄市热岛效应因子的灰色分析[J]. 地理科学进展, 2009(1):25-32.  
He P, Chen H, Li H B, et al. Grey analysis of the urban heat island effect factors of the medium-sized city of Chuxiong on Yunnan Plateau [J]. Progress in Geography, 2009(1):25-32.
- [15] 刘鹏. 基于用地类型的重庆城市热岛特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [16] Bottyán Z, Kircsi A, Szegedi S, et al. The relationship between built-up areas and the spatial development of the mean maximum urban heat island in Debrecen, Hungary [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(3):405-418.
- [17] Bottyán Z, Unger J. A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2003, 75(3):233-243.
- [18] Unger J. Modelling of the annual mean maximum urban heat island using 2D and 3D surface parameters [J]. Climate Research, 2006, 30(3):215-226.
- [19] Balázs B, Unger J, Gál T, et al. Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modelling, verification and extension [J]. Meteorological Applications, 2009, 16(3):275-287.
- [20] Hart M A, Sailor D J. Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 95(3):397-406.
- [21] 赵彩君, 傅国斌. 城市规划指标和气候指标关系研究——以北京为例[J]. 北京园林, 2011, 27(1):21-29.  
Zhao C J, Fu G B. The relationship research of urban planning index and climatic index: Beijing as an example [J]. Beijing Landscape, 2011, 27(1):21-29.
- [22] Zhao C, Fu G, Liu X, et al. Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China [J]. Building and Environment, 2011, 46(5):1174-1183.
- [23] 田喆, 朱能, 刘俊杰. 城市气温与其人为影响因素的关系[J]. 天津大学学报, 2006, 38(9):830-833.  
Tian Z, Zhu N, Liu J J. Relationship between heat island effect and artificial factors [J]. Journal of Tianjin University, 2006, 38(9):830-833.
- [24] Deb C, Ramachandraiah A. A simple technique to classify urban locations with respect to human thermal comfort: Proposing the HXG scale [J]. Building and Environment, 2011, 46(6):1321-1328.
- [25] Kubota T, Miura M, Tominaga Y, et al. Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods [J]. Building and Environment, 2008, 43(10):1699-1708.
- [26] 李琼. 湿热地区组团规划设计对室外微气候的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [27] Chen L, Ng E, An X, et al. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach [J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(1):121-136.
- [28] Murphy D J, Hall M H, Hall C A S, et al. The relationship between land cover and the urban heat island in northeastern Puerto Rico [J]. International Journal of Climatology, 2010, 31(8):1222-1239.
- [29] Shashua-Bar L, Tzafir Y, Hoffman M E. Thermal effects of building geometry and spacing on the urban canopy layer microclimate in a hot-humid climate in summer [J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(13):1729-1742.
- [30] Shashua-Bar L, Hoffman M E, Tzafir Y. Integrated thermal effects of generic built forms and vegetation on the UCL microclimate [J]. Building and Environment, 2006, 41(3):343-354.
- [31] Hjort J, Suomi J, Käyhkö J. Spatial prediction of urban-rural temperatures using statistical methods [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 106(1/2): 139-152.
- [32] Pérez-Alonso J, Callejón-Ferre Á J, Carreño-Ortega Á, et al. Approach to the evaluation of the thermal work environment in the greenhouse-construction industry of SE Spain [J]. Building and Environment, 2011, 46(8):1725-1734.
- [33] Jusuf S K, Wong N. Development of empirical models for an estate level air temperature prediction in Singapore [C]//Proceeding of Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, Barkley, California, USA, 2009.
- [34] Wong N H, Jusuf S K, Syafii N I, et al. Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption [J]. Solar Energy, 2011, 85(1):57-71.