

祝善友, 高牧原, 陈亭, 等. 2017. 基于 ENVI-met 模式的南京市近地表气温模拟与分析——以南京市部分区域为例 [J]. 气候与环境研究, 22 (4): 499-507. Zhu Shanyou, Gao Muyuan, Chen Ting, et al. 2017. Simulation and analysis of urban near-surface air temperature based on ENVI-met model: A case study in some areas of Nanjing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (4): 499-507, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16197.

# 基于 ENVI-met 模式的南京市近地表气温模拟与分析 ——以南京市部分区域为例

祝善友 高牧原 陈亭 张桂欣

南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044

**摘要** 城市不同下垫面与建筑物空间形态对近地表气温等微气候要素产生了重要影响。开展城市气温时空变化模拟与影响因素分析, 对于城市热环境评价与城市规划具有重要意义。论文基于高空间分辨率 Geocye-1 立体影像, 在建筑物高度、下垫面覆盖类型信息提取的基础上, 选择南京一中、光华东街、玄武湖、头陀岭 4 个区域, 采用 ENVI-met 微气候模式, 以城市基本气象站南京站的实时气象数据作为背景气象场, 模拟不同区域近地表气温的时空分布特征, 并利用区域自动气象站观测数据进行精度检验。结果表明: 在时间变化上, ENVI-met 模拟气温与实测值之间吻合程度较高; 在空间分布上, 南京一中与光华东街区域气温时空分布规律总体相似, 但城市空间形态的差异使得局部区域气温变化不同, 玄武湖区域气温由陆地中心向外围呈递减趋势, 而头陀岭地形复杂多变, 白天气温变化剧烈, 夜间空间变化较小。

**关键词** 近地表气温 ENVI-met 模式 微气候 城市空间形态 模拟

文章编号 1006-9585 (2017) 04-0499-09

中图分类号 TP79, P463.3

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16197

## Simulation and Analysis of Urban Near-Surface Air Temperature Based on ENVI-met Model: A Case Study in Some Areas of Nanjing

ZHU Shanyou, GAO Muyuan, CHEN Ting, and ZHANG Guixin

School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Different types of underlying land surface cover and various urban spatial morphologies have an important effect on micro-climate parameters. Simulating the spatio-temporal distribution of urban air temperature and analyzing its influencing factors are of great significance to evaluate urban thermal environment and urban planning. In this paper, ENVI-met micro-climate model is used to simulate the spatio-temporal distribution characteristics of surface air temperature in some areas of Nanjing, including Nanjing Middle School I, Eastern Guanghua Street, Xuanwu Lake, and Toutuoling. The distribution of buildings and their heights as well as the underlying land cover information are extracted from the high spatial resolution Geocye-1 stereoscopic images. The simulated results based on ENVI-met micro-climate model are validated using the measurements collected at Nanjing national meteorological station. It is found that the temporal changes in simulated surface air temperature are consistent with observations. For the spatial distribution characteristics, the surface air temperature distribution in the area of Nanjing Middle School I is similar to that in Eastern Guanghua Street, and the

收稿日期 2016-11-04; 网络预出版日期 2017-04-15

作者简介 祝善友, 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 主要从事热红外遥感基础理论与应用研究。E-mail: zsygzx@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41571418、41401471, 南京信息工程大学大学生创新训练计划省级重点项目 201510300050

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 41571418 and 41401471), Undergraduate Innovation Training Program of Nanjing University of Information Science and Technology (Grant 201510300050)

difference in urban spatial morphology results in the air temperature variance within local regions. For the Xuanwu Lake, the surface air temperature decreases outward from the land area in central Xuanwu Lake. The spatial variance of surface air temperature during the daytime is bigger than that in the nighttime due to the complex terrain in Toutuoling area.

**Keywords** Near-surface air temperature, ENVI-met model, Micro-climate, Urban spatial morphology, Simulation

## 1 引言

城市化进程不断加快,改变了城市近地表气温等微气候要素,产生了城市热岛等环境恶化现象(吴婕等, 2015)。探讨城市气温时空变化特征及其影响因素,分析城市建设与规划对城市微气候的影响,是城市健康可持续发展的重要基础。

有关城市气温时空变化的研究方法主要包括实地气象观测、遥感监测及计算机数值模拟三大类。实地气象观测以特定城市为研究区,在研究区内选择代表性的点、线位置,获得高时间分辨率的气温分布(Huang et al., 2008; 孙绩华等, 2015);遥感监测以其宏观性、同步性等优势特点,通过图像亮温、地表温度或气温反演参数,在诸多城市的热岛现象研究中得以广泛应用(Vogt et al., 1997; Kolokotroni and Giridharan, 2008; 王伟武等, 2009; 祝善友等, 2012; 刘勇洪和权维俊, 2014; 张海龙等, 2015)。

近年来,通过计算机数值模拟技术,以计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)为基础的城市气温等微气候要素模拟研究发展迅速。总体来看,国外利用 CFD 技术开展城市微尺度气候环境研究较早;国内起步相对较晚,但由于快速城市化进程的强烈需求而发展迅速(李磊等, 2012)。常用于室外热环境等城市微气候模拟的国外 CFD 软件包括 Phoenix、Fluent、CFX、STAR-CD 以及 ENVI-met 等(李磊等, 2012),国内自主开发的微尺度模式则主要以南京大学的小区尺度模式为代表(Fang et al., 2004; 蒋维楣等, 2007)。这些模拟软件在空间维度、影响因子考虑、计算速度、结果精度等方面各具优缺点。ENVI-met 由德国波鸿大学地理研究所 Bruse 开发,具有不同尺度的空间网格分辨率和 10 s 的时间解析率,是国内外气象、建筑规划领域学者采用最多的微气候模拟软件之一(Unger, 2004)。

利用 ENVI-met 微气候模式模拟城市气温以及热环境,并在此基础上分析气温变化与影响因素的

典型研究如下:Ali-Toudert and Mayer (2006) 以干热地区阿尔及利亚 Ghardaia 为研究区,研究了街谷高宽比与走向对室外热环境的影响,结果表明不同走向的街谷热环境不同,南北走向热量散失更快;Ng et al. (2012) 以香港九龙半岛旺角区建筑形态为基础,模拟绿化种类、绿化率、建筑高度等各因素对城市微气候的影响,发现 33%为降低一个热负荷等级的绿化率下限。

广泛应用的 ENVI-met 微气候模式针对中高纬度寒冷气候开发,能否准确模拟不同气候条件下的城市热环境需要进行理论与实验检验,而且 ENVI-met 中无法输入较大规模城市必须考虑的人为热释放参数,同时模型在风环境、太阳辐射强度、云量、下垫面特征等参数的动态输入方面还有待于进一步加强研究。本研究拟采用微气候模式 ENVI-met,对南京市主城区街区尺度的气温时空分布进行模拟,通过实测气温数据对模拟结果进行评价,探讨微气候模式在南京城区的应用效果,进而分析不同下垫面分布与格局情况下的气温时空分布规律。

## 2 研究区域与数据

### 2.1 研究区域

江苏省南京市(31°54'N, 118°48'E)地处长江中下游,属于亚热带湿润季风气候区,素有“火炉”之称。研究中选择南京 4 个典型下垫面覆盖区域,每个区域范围为 1 km×1 km(如图 1 所示)。

南京一中位于城市中心地带秣陵路社区,下垫面分布植被、水体、水泥、沥青路面等类型,建筑物密集且高度层次分明;光华东街位于秦淮区中华门附近,包括部分光华街以及御道街,区域范围内建筑物多以居民住宅为主,建筑物高度平均,只有极个别高大建筑物;玄武湖研究区范围包括湖中孤岛及附近水面范围,中心基本无建筑物,四周被水域包围;头陀岭研究区位于中山陵风景区内,紫金山主峰之西,海拔 425 m。

### 2.2 数据

(1) Geoeye-1 立体像对数据

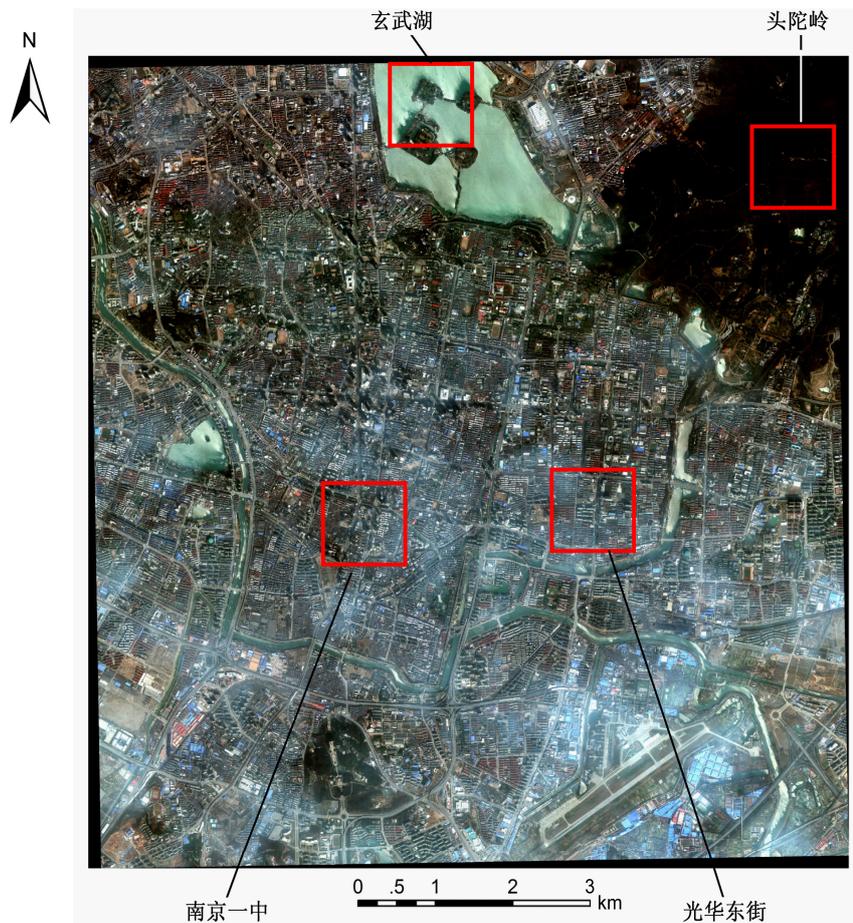


图1 研究区 Geosy-1 卫星遥感影像真彩色合成图像  
Fig. 1 True color composite Geosy-1 satellite image of the study area

选择 2011 年 3 月 13 日获取的 Geosy-1 高分辨率立体影像，提取建筑物高度与下垫面覆盖类型。Geosy-1 卫星立体像对的全色波段分辨率为 0.5 m，多光谱波段分辨率 2 m，包括蓝光、绿光、红光以及近红外 4 个波段。采用基于 RGB、HSV 颜色空间变换方法，融合原始全色、多光谱波段影像，生成 0.5 m 分辨率的图像数据。

### (2) 建筑物高度实测数据

使用 Vertex 激光测距仪的激光测量方式，随机测量秣陵路社区和安品街社区内的 45 栋建筑物的高度，用于验证遥感影像提取建筑物高度的精度，测量时保持仪器与目标建筑物之间水平距离在 20 m 以内，对每栋建筑物测量 3 次，取平均值作为最终高度，以减小偶然误差。Vertex 激光测距仪测量高度时，100 m 水平距离以内测量精度为 0.4 m，大于 100 m 距离时测量精度为 1 m，能够满足实验要求。

### (3) 气象数据

选择城市基本气象站南京站数据作为研究区微气候模拟背景气象数据，南京一中、光华东街、玄武湖、头陀岭 4 个区域自动站观测数据作为验证数据，用以验证气温模拟精度。气象数据包括每个整点时刻的气温、湿度、2 min 平均风速、风向、湿度等，应用之前进行了数据质量控制处理。

## 3 研究方法

论文采用如图 2 所示的技术路线，主要研究方法简介如下。

### 3.1 建筑物高度提取

研究中采用立体像对和单幅遥感影像阴影两种方法分别提取 4 个研究区内的建筑物高度，并利用 Vertex 激光测距仪实测数据进行对比验证，结果表明立体像对提取建筑物高度的方法更为精确，均方根误

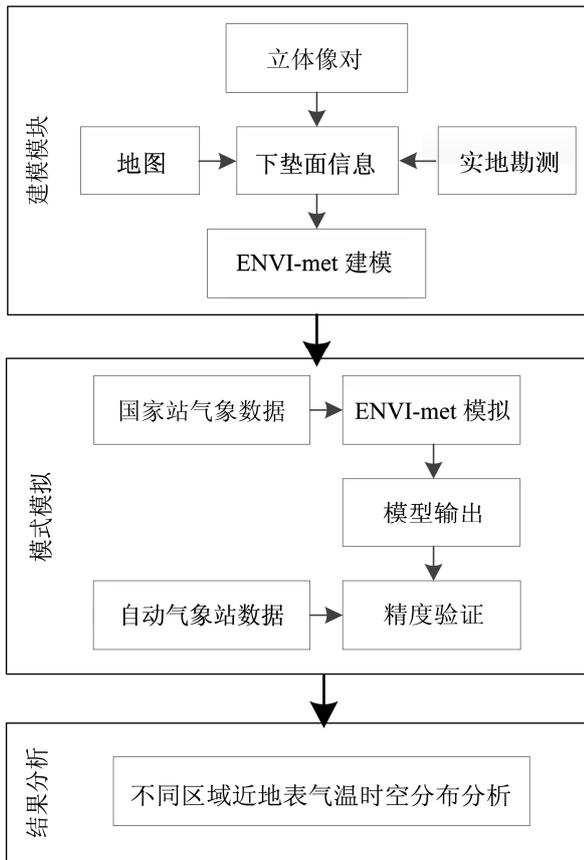


图2 论文研究技术路线

Fig. 2 Flowchart of the research technique

差在 2.8 m 以内,能够快速准确地获取大范围建筑物高度,详细方法与结果可参考文献(陈亭等, 2016)。

### 3.2 下垫面信息提取

高分辨率遥感影像上能够清晰看到建筑物角点、道路、植被分布及水体走向。采用目视解译方法,根据全色波段与多光谱波段融合数据,获取研究区内的建筑物、道路、植被、水体信息。

### 3.3 ENVI-met 微气候模式模拟

为了确保不同研究区模拟结果的可比性,每个模拟区域大小设为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ,网格数为  $100 \times 100 \times 30$ ,网格水平、垂直方向空间分辨率设置为 10 m,进行 24 h 时间尺度的微气候模拟。

根据南京气候特点,夏季持续时间长且高温高湿,对室外热环境影响大,因此选取夏季作为研究时段。根据收集的城市基本气象站南京站气象数据,选取具有代表性的典型气象日。统计 2014 年夏季气温平均值在一天中的变化,发现 7 月 26 日逐时气温与平均气温随时间变化趋势具有典型代表性。模拟起始时间为 2014 年 7 月 26 日 08:00 (北京时间,下

同),模拟总时长 24 h,初始气象数据来源于国家气象站的观测结果。主模型区域外设置 5 个嵌套网格,其中主模型区域为真实的下垫面类型与分布,嵌套区域内不能布置建筑,但可以定义最多 2 种地表类型来模拟周围环境,因此模拟南京一中、光华东街区域时,嵌套区域定义为沥青路面及混凝土路面交替排列,模拟头陀岭、玄武湖区域时,嵌套区域分别定义为林地与水体。模拟过程启用简单强迫功能以提高模拟精度,输入逐小时气温湿度数据修正模型运行参数,边界模型为强迫式。

## 4 结果与讨论

### 4.1 ENVI-met 模拟精度分析

ENVI-met 微气候模式较好地模拟出了 4 个气象站点的气温时间变化规律(见图 3),模拟气温与实测气温变化曲线吻合程度较高,两者之间的相关系数分别为 0.93、0.92、0.92、0.91,而均方根误差分别为  $0.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.51\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据图 3,在南京一中、光华东街两个城市区域,由于 ENVI-met 模拟中没有涉及材料热容性能,存在着对建筑材料热稳定性、环境热辐射等方面计算不足的缺陷(Ali-Toudert and Mayer, 2006),使得城市区域、白天时段的模拟气温总体低于实测值,而下垫面均一简单、以自然景观为主的玄武湖、头陀岭区域模拟值与实测值更为接近。与凌晨时段 02:00 至 06:00 的气温实测值相比,ENVI-met 模拟气温持续下降(图 3a、3b、3c),而日出后的模拟气温上升缓慢。根据图 3d,海拔高度较高且不同位置高程发生变化的头陀岭区域,夜间时段的实测气温表现出了降温速度快的规律,而 ENVI-met 模拟中无法准确表达地形变化,模拟气温与实测数据之间差异较大。作为一种数值模拟方法,ENVI-met 微气候模拟过程中无法考虑环境影响的偶然性,如局地风场、人为热释放的变化等,使得模拟气温的变化振幅相对较小,而且模拟结果无法准确刻画实测数据能够表达的拐点变化特征。

### 4.2 不同区域气温时空分布模拟与分析

利用 ENVI-met 微气候模式分别模拟 4 个研究区域在 2014 年 7 月 26 日的 14:00、22:00 的气温空间分布。以南京一中区域为例,分析了两个时刻的气温时空分布差异,而考虑到夜间热岛现象多发且强度较大,其它 3 个区域只对比分析了夜间 22:00 的

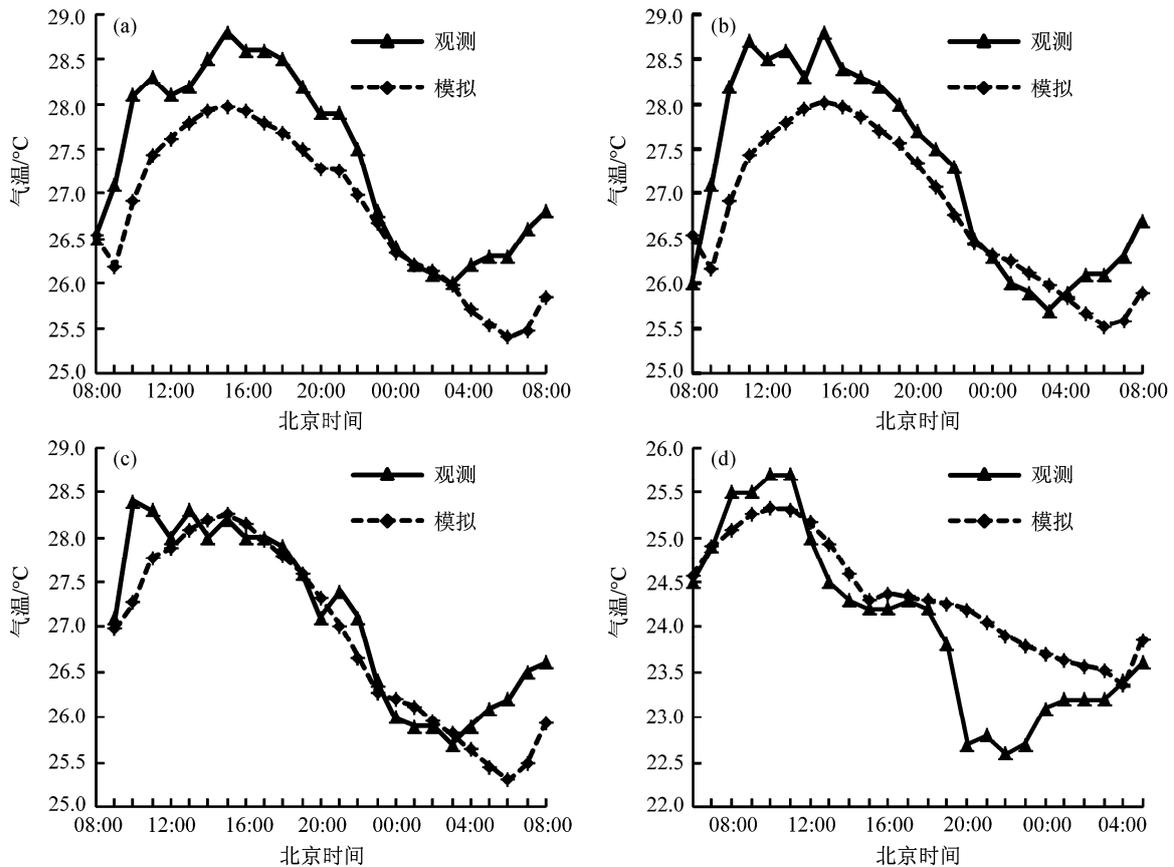


图3 2014年7月26日(a)南京一中、(b)光华东街、(c)玄武湖、(d)头陀岭实测与模拟的气温对比

Fig. 3 Comparisons between observed and simulated air temperature at (a) Nanjing Middle School I, (b) eastern Guanghua street, (c) Xuanwu Lake, and (d) Toutuoling stations on 26 Jul 2014

气温分布状况。

### (1) 南京一中区域

根据图 4a, 在 14:00, 气温随空间变化差异较大, 东部气温整体高于西部, 高温出现在东部道路上方。气流受建筑物阻挡而绕流经过的区域气温较高(图中白圈区域), 低温出现在西部建筑物密集区域(图中红圈区域), 空旷区域气温明显高于建筑物密集区域, 水面上方气温较低, 道路上方气温略高于周围区域。受风的影响作用, 东西向街道气温高于南北向街道。随着太阳高度角增大, 白天地面温度逐渐升高, 热量主要来自于太阳短波辐射。不同地面接收到的太阳直射辐射差异较大, 空旷位置接收到的直射辐射大, 地面升温快, 而建筑物遮挡的近地面气温则相对较低。水体、绿化带通过水分蒸发、植被蒸腾作用带走热量, 起到了一定的降温效果, 但由于其面积小且分布离散, 降温效果不明显。

根据图 4b, 在 22:00, 气温差异整体不大, 最大差值为 1.24 °C, 与 14:00 不同, 西部气温高于东

部气温。建筑物外围与建筑物之间的气温稍高(白圈区域), 建筑物附近绿化覆盖区比周边区域气温低(灰圈区域), 而水体区域比周围绿化带气温高, 日间气温较高的黄圈区域, 夜晚依然偏高。在夜间, 地物长波辐射释放热量, 气温迅速降低, 各区域气温差异逐渐减小, 建筑密集区域天空开阔度小, 地面热量散失被周边建筑物遮挡, 热量散失慢, 因此建筑物密集的西部区域气温较高。水泥、沥青路面散热快, 但白天吸热多, 热量积聚, 夜晚气温依然比周围区域高。

### (2) 光华东街区域

光华东街区域的下垫面类型与南京一中相似, 不同的是光华东街街区内建筑物形态以板状为主, 列整齐、高度均一, 而南京一中附近的建筑物形态以塔状为主, 建筑物分布不均, 高度差距大。图 5 给出了光华东街 2014 年 7 月 26 日 22:00 气温空间分布模拟结果。

根据图 5, 在 22:00, 该区域气温分布总体与南

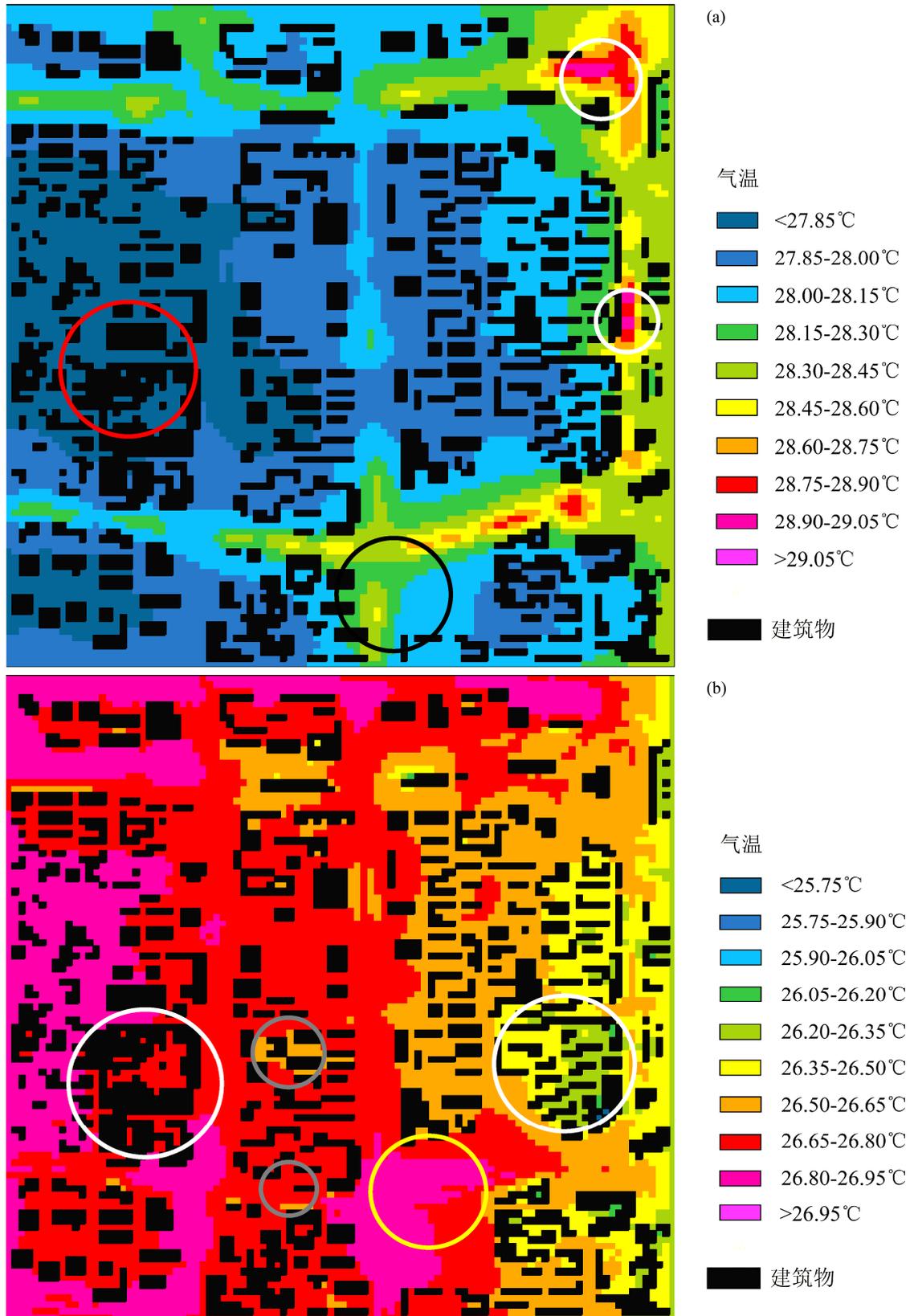


图4 南京一中 2014 年 7 月 26 日 (a) 14:00、(b) 22:00 模拟的气温空间分布

Fig. 4 Simulated air temperature in the area of Nanjing Middle School I at (a) 1400 LST and (b) 2200 LST on 26 Jul 2014

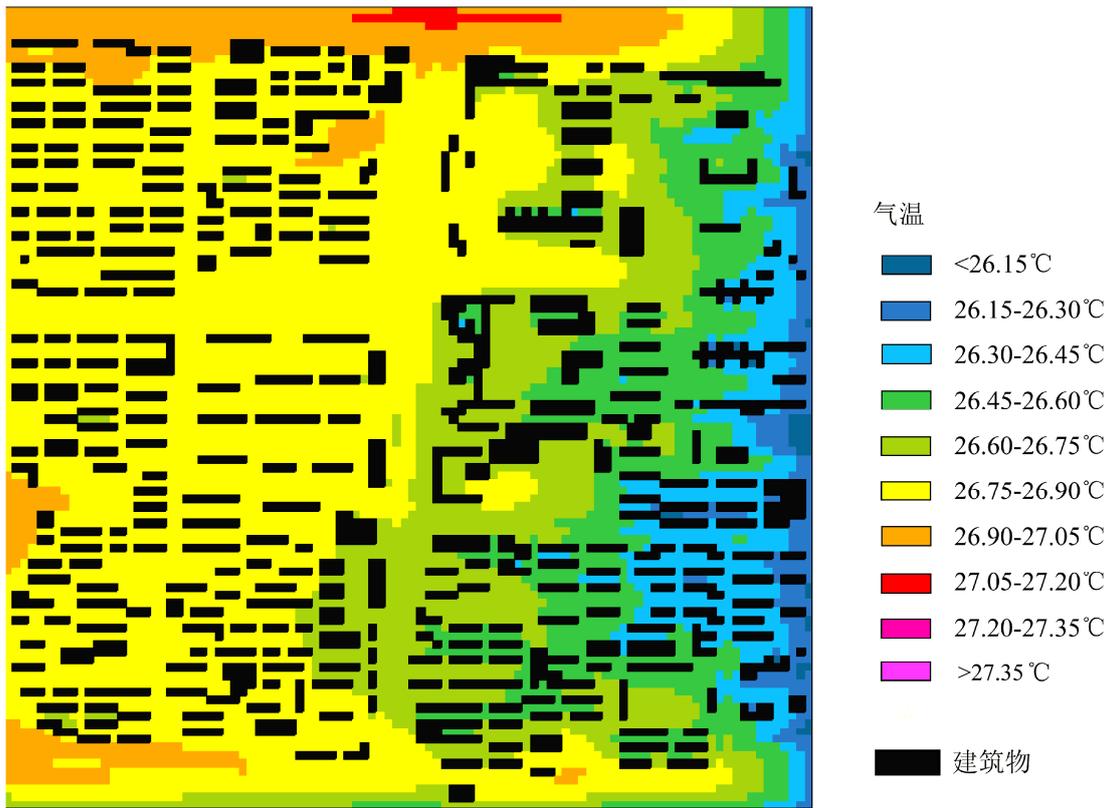


图5 南京光华东街 2014 年 7 月 26 日 22:00 模拟的气温空间分布  
Fig. 5 Simulated air temperature in the area of East Guanghua Street at 2200 LST 26 Jul 2014

京一中区域类似，西部气温高于东部，但由于建筑物密集排列紧凑，各个位置的天空开阔度小，热量散失慢，整体气温差异比南京一中区域小，气温最大差异为 0.99 °C。

### (3) 玄武湖区域

玄武湖区域下垫面类型与南京一中、光华东街街区差异大，下垫面类型中水体、林地、建筑物面积比例分别为 75%、15%、10%，区域内建筑物稀少且低矮。图 6 给出了玄武湖区域 2014 年 7 月 26 日 22:00 气温空间分布模拟结果。

根据图 6，在 22:00，气温呈现出从小岛到外围逐渐降低的趋势，湖面上气温自东向西递增，陆地上空气温明显高于水面，最高温与最低温之间的差值为 1.2 °C，气温随空间分布变化显著。由于陆地热惯量比水面高，夜间陆地很快冷却，水面降温速度慢。该区域中陆地面积小，植被建筑数量少，整个区域通风效果好，较少形成背风涡流区，热量蒸散传递快，较大面积湖水的热物理特性对区域气温变化产生较大影响。

### (4) 头陀岭区域

头陀岭区域海拔 300 m 左右，树木覆盖率

高，几乎无建筑物，道路稀疏，地形变化大。2014 年 7 月 26 日 22:00 气温空间分布模拟结果如图 7 所示。

在 22:00，在离地面 310 m 高度处，气温普遍较低，高温出现在山体周围，气温分布呈现从中心向四周逐渐递减的趋势，最高温与最低温之间的差值仅为 0.12 °C，整个区域气温基本一致。夜间山区空气降温速度快，植被为主的下垫面对气温变化产生的影响较小。

## 5 结论

以江苏省南京市中心 4 个典型区域为研究区，采用高分辨率立体像对提取建筑物高度、分布、地表覆盖等下垫面信息，构建研究区三维模型，以城市基本气象站南京站测得的气温、风速、风向等数据作为微气候模式 ENVI-met 的背景气象条件，模拟不同区域的气温空间分布，并结合自动气象站实测气温数据进行精度验证，进而分析不同区域气温时空变化差异。通过研究，得出如下结论：

(1) ENVI-met 微气候模式可以较好地模拟 4 个典型下垫面上方的近地表气温，模拟气温与实测

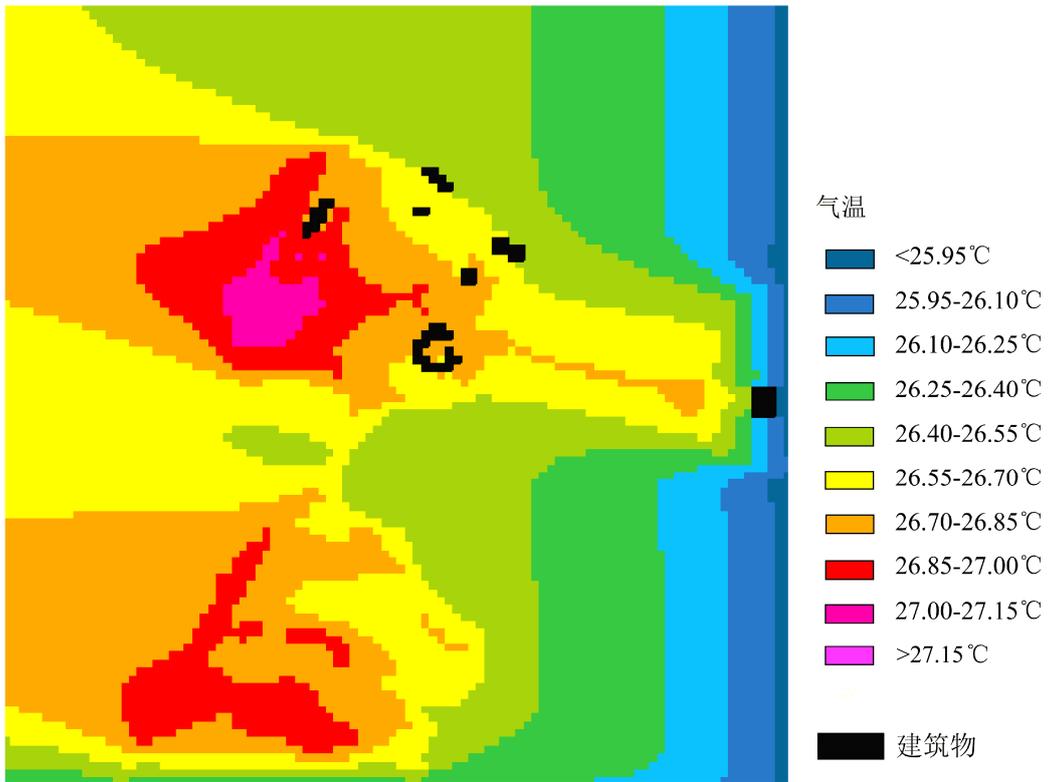


图6 2014年7月26日22:00模拟的玄武湖气温空间分布  
Fig. 6 Simulated air temperature in the area of Xuanwu Lake at 2200 LST 26 Jul 2014

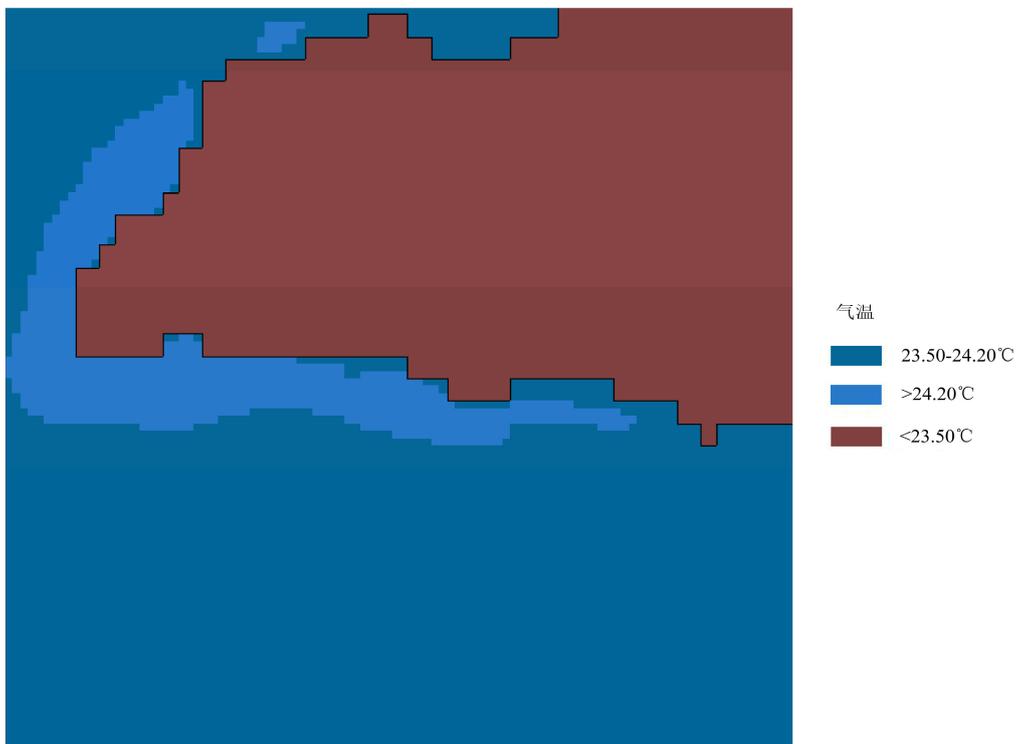


图7 同图6, 但为头陀岭  
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for Toutuoling

值之间的相关系数都在 0.9 以上, 较好地反映了气温随时间的变化特征。

(2) 逐日气温空间分布与变化的影响因素主要包括太阳辐射、空气流动、下垫面空间形态等。日间主要与地表吸收的太阳短波辐射有关, 而夜间建筑物对地表长波辐射散发热量的阻碍作用使得不同位置气温存在着明显差异, 顺风与横风方向的气温时空分布与变化差异较大。

(3) 一中街区与光华东街街区气温时空分布规律相似, 白天道路气温较高、水体及建筑物阴影区气温较低, 夜间建筑密集的区域天空开阔度小, 地面热量散失被周边建筑物遮挡, 热量散失慢气温较高。玄武湖区域气温由陆地中心向外围递减。头陀岭平均气温比其他区域低 2 °C 左右, 夜间山体周围气温稍高于外围气温, 但不同位置气温差异较小。

(4) 根据 4 个不同区域的模拟效果进行分析, ENVI-met 模拟过程中存在的主要问题包括建筑材料热稳定性、环境热辐射因素考虑不足, 需要进一步在三维建模时提高对地形起伏状况的表达, 同时提高与热环境有关的风场分布模拟精度。

### 参考文献 (References)

- Ali-Toudert F, Mayer H. 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate [J]. *Building and Environment*, 41 (2): 94–108, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.01.013.
- 陈亭, 祝善友, 张桂欣, 等. 2016. 高分辨率遥感影像阴影与立体像对提取建筑物高度比较研究 [J]. *地球信息科学学报*, 18 (9): 1267–1275.
- Chen Ting, Zhu Shanyou, Zhang Guixin, et al. 2016. A comparative study on building height extraction based on the shadow information in high resolution remote sensing image and stereo images [J]. *Journal of Geo-Information Science (in Chinese)*, 18 (9): 1267–1275, doi: 10.3724/SP.J.1047.2016.01267.
- Fang X Y, Jiang W M, Miao S G, et al. 2004. The multi-scale numerical modeling system for research on the relationship between urban planning and meteorological environment [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21 (1): 103–112, doi: 10.1007/BF02915684.
- Huang L M, Li J L, Zhao D H, et al. 2008. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China [J]. *Building and Environment*, 43 (1): 7–17, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.025.
- 蒋维楣, 王咏薇, 刘罡, 等. 2007. 多尺度城市边界层数值模式系统 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 43 (3): 221–237.
- Jiang Weimei, Wang Yongwei, Liu Gang, et al. 2007. Multi-scale urban boundary layer modelling system [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 43 (3): 221–237.
- Kolokotroni M, Giridharan R. 2008. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer [J]. *Solar Energy*, 82 (11): 986–998, doi: 10.1016/j.solener.2008.05.004.
- 李磊, 胡非, 刘京. 2012. CFD 在我国城市气候环境微尺度问题中的应用 [C]// 中国气象学会 2012 城市气象论坛论文集. 深圳: 中国气象学会, 18–23.
- Li Lei, Hu Fei, Liu Jing. 2012. Application of CFD in micro-scale urban climate environment in our country [C]// *Urban Meteorology Forum 2012 (in Chinese)*. Shenzhen: Chinese Meteorological Society, 18–23.
- 刘勇洪, 权维俊. 2014. 北京城市高温遥感指标初探与时空格局分析 [J]. *气候与环境研究*, 19 (3): 332–342.
- Liu Yonghong, Quan Weijun. 2014. Research on high temperature indices of Beijing city and its spatiotemporal pattern based on satellite data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19 (3): 332–342, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12190.
- Ng E, Chen L, Wang Y N, et al. 2012. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong [J]. *Building and Environment*, 47: 256–271, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.014.
- 孙绩华, 冯健武, 段玮. 2015. 昆明城市热岛效应变化特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 20 (6): 645–653.
- Sun Jihua, Feng Jianwu, Duan Wei. 2015. Change in the urban heat island effect in Kunming [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 20 (6): 645–653, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15072.
- Unger J. 2004. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: Review and new approach [J]. *Climate Research*, 27: 253–264, doi: 10.3354/cr027253.
- Vogt J V, Viau A A, Paquet F. 1997. Mapping regional air temperature fields using satellite-derived surface skin temperatures [J]. *International Journal of Climatology*, 17 (14): 1559–1579, doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(19971130)17:14<1559::AID-JOC211>3.0.CO;2-5.
- 王伟武, 李国梁, 薛瑾. 2009. 杭州城市热岛空间分布及缓减对策 [J]. *自然灾害学报*, 18 (6): 14–20.
- Wang Weiwu, Li Guoliang, Xue Jin. 2009. Spatial distribution of urban heat island in Hangzhou and its mitigation countermeasures [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 18 (6): 14–20, doi: 10.3969/j.issn.1004-4574.2009.06.003.
- 吴婕, 徐影, 师宇. 2015. 华南地区城市化对区域气候变化的影响 [J]. *气候与环境研究*, 20 (6): 654–662.
- Wu Jie, Xu Ying, Shi Yu. 2015. Urbanization effects on local climate change in South China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 20 (6): 654–662, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14228.
- 张海龙, 祝善友, 王明江, 等. 2015. 基于 3D 建筑物数据的天空开阔度估算及其城市热岛应用研究——以 Adelaide 为例 [J]. *遥感技术与应用*, 30 (5): 899–907.
- Zhang Hailong, Zhu Shanyou, Wang Mingjiang, et al. 2015. Sky view factor estimation based on 3D urban building data and its application in urban heat island——Illustrated by the case of Adelaide [J]. *Remote Sensing Technology and Application (in Chinese)*, 30 (5): 899–907, doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.5.0899.
- 祝善友, 张桂欣, 刘莹. 2012. 苏州下垫面格局演变及其局地热环境效应 [J]. *地理科学*, 32 (7): 859–865.
- Zhu Shanyou, Zhang Guixin, Liu Ying. 2012. Change of underlying surface pattern and its local thermal environment effect in Suzhou city [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 32 (7): 859–865, doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.07.859.