

张海龙, 祝善友, 高 珺, 等. 城市空间形态学参数与晴好天气下热岛强度关系. 应用气象学报, 2016, 27(2): 249-256.
doi:10.11898/1001-7313.20160213

城市空间形态学参数与晴好天气下热岛强度关系

张海龙¹⁾ 祝善友^{2)*} 高 珺³⁾ 张桂欣²⁾

¹⁾(南京信息工程大学海洋科学学院, 南京 210044)

²⁾(南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044)

³⁾(江苏省南京市浦口区气象局, 南京 211800)

摘 要

以澳大利亚阿德莱德中心城区为研究区, 基于高分辨率城市三维建筑物数据计算得到天空开阔度 (sky view factor, SVF) 与迎风面积指数 (frontal area index, FAI), 并将其与晴好天气下四季的城市热岛强度进行相关性分析。结果表明: 晴好天气下, 阿德莱德城市热岛强度 (urban heat island intensity, UHII) 在 2010—2011 年四季均呈现出夜间强、白天弱的变化特征。SVF 与 UHII 在夜间呈显著线性负相关, 白天呈线性正相关; 而 FAI 与 UHII 在四季的夜间和早晨时段呈对数关系, 白天呈线性负相关。SVF 和 FAI 对不同季节、不同时刻的城市热岛影响不同, 在不同空间尺度下的适用性也存在差异, SVF 在不同空间尺度下适用性更强。

关键词: 城市热岛强度; 三维建筑物数据; 迎风面积指数; 天空开阔度

引 言

城市热岛效应对经济发展、城市气候等有很大影响, 并影响居民生活、身体健康, 一直是研究的热点之一^[1-6]。城市化进程使建筑密度加大且高度提升, 建筑群和道路构成的街谷的几何形状和表面热力性质多样性, 使其周围的气象要素变得复杂^[7-8], 从而对城市热岛效应的形成和强度造成不同的影响。利用高空间分辨率城市三维建筑物数据可精确提取城市建筑物的三维信息, 使计算城市空间形态学参数成为可能, 其中迎风面积指数 (frontal area index, FAI) 和天空开阔度 (sky view factor, SVF) 可以较好地体现建筑物分布和高度信息。

国内外学者围绕天空开阔度和迎风面积指数与城市热岛强度 (urban heat island intensity, UHII) 之间关系开展许多研究。Gál 等^[9] 研究表明, SVF 与年平均热岛强度的相关系数为 -0.79 ; Unger^[10]

发现 SVF 与夜间时刻的热岛强度呈线性负关系, 决定系数为 0.43 ; Chen 等^[11] 研究中国香港地区街道 SVF 与高密度、高层建筑群的关系, 表明 SVF 是影响香港地区的街道冠层微气候的重要因素; Wang 等^[12] 利用城市微气候模型 ENVI-MET 模拟并分析 SVF 对 UHII 的影响表明, 夜间两者呈显著负相关。Wong 等^[13] 计算了 FAI 并用于城市热岛分析; Chen 等^[14] 计算了香港地区的建筑物迎风面积密度 (frontal area density, FAD) 和天空开阔度, 并用于模拟分析城市热岛分布和风动力图; Wong 等^[15] 基于三维建筑物数据计算不同空间尺度下 FAI 和基于 ASTER 卫星数据反演城市热岛强度, 并建立 FAI 和 UHII 的关系, 相关系数最优为 0.57 。

以上研究工作大多围绕 SVF 与夜间 UHII 相关性开展, 而 FAI 与 UHII 相关关系、FAI 和 SVF 在不同季节对 UHII 影响差异研究却相对较少。本文以澳大利亚阿德莱德中心城区为研究区, 在 SVF, FAI 和晴好天气下四季城市热岛强度计算的

2015-06-18 收到, 2015-11-02 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41401471, 41571418, 41201369), 国家级大学生创新创业训练计划项目 (201210300024), 江苏高校优势学科建设工程项目

* 通信作者, email: zsyzg@163.com

基础上,系统探讨了 SVF,FAI 对不同季节、不同时刻城市热岛强度的影响差异。本文从空间形态学角度分析建筑物对城市热岛效应的影响,以期城市规划和建设决策提供参考。

1 研究区和数据

1.1 研究区

研究区为澳大利亚阿德莱德中心城区(图1),

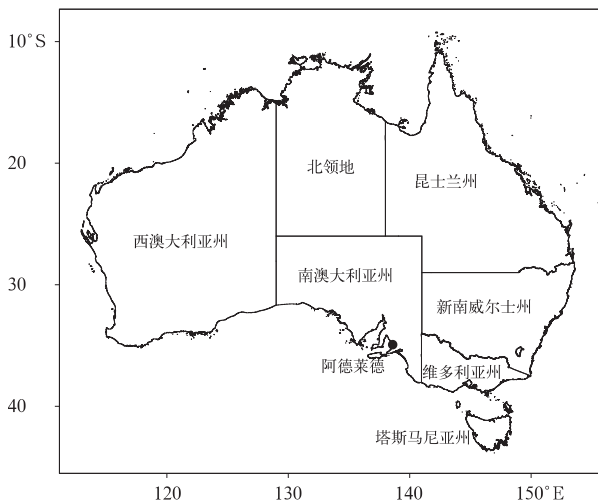


图 1 研究区分布

Fig. 1 The location of study area

一条东西横贯的北台街(North Terrace)将市区划分为南北二区,北区多为住宅区,南区多为商业区。2014 年阿德莱德城市人口为 130 万,面积为 2000 km²。阿德莱德拥有地中海式气候,冬天潮湿寒冷,夏天干燥炎热,夏天平均最高气温约为 28℃,冬天气温则降至约 15℃,年平均气温为 17.1℃。

1.2 研究数据

研究采用的数据包括 1 m×1 m 城市三维建筑物数据、城区 11 个站的鱼眼相机数据、2010 年 12 月—2011 年 10 月 19 个站的实测气温数据、阿德莱德机场气象观测站数据(34.98°S,138.52°E),包括日照时数、09:00(阿德莱德地方时,下同)和 15:00 云量、日降水量、3 h 风速和风向数据。

2 晴好天气下不同季节 UHII

根据阿德莱德机场气象观测站数据,选择无降水、09:00 和 15:00 云量均低于 3 的为样本,以城区外围绿化带 6 个站作为参考,计算城区 13 个站不同季节的每半小时热岛强度^[16],进而利用 13 个站点热岛强度的平均值作为该季节的城市热岛强度。图 2 为晴好天气下不同季节热岛强度日变化。

由图 2 可知,晴好天气下 2010—2011 年不同季节的阿德莱德热岛强度呈现出夜间强、白天弱的变

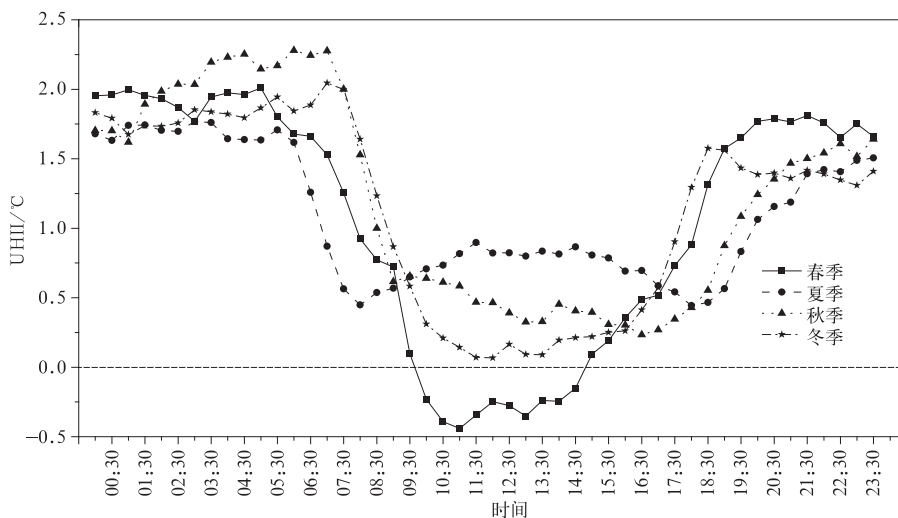


图 2 2010—2011 年晴好天气下四季的 UHII 日变化

Fig. 2 Daily changes of urban heat island intensity in different seasons under sunny weather conditions from 2010 to 2011

化特征,这与大部分城市热岛强度变化规律相似。对于春、夏、秋、冬季,夜间的 UHII 比白天分别强

1.73,0.79,1.39,1.26℃。在夜间,零点到日出的热岛强度大于日落到 23:30;UHII 在白天均小于

1.0℃,夏季最大,其次为秋、冬季,最小为春季,春季甚至出现冷岛现象。最强热岛强度在四季出现的时刻也不同,春、夏、秋、冬季分别出现在 01:00,03:00,06:00,07:00。

3 空间形态学参数与 UHII 关系分析

3.1 SVF 与 UHII 相关性分析

SVF 定义为地表表面接收(或发射)的辐射量与整个半球发射(或接受)的辐射量之比^[17],用于衡量某特定位置的辐射传输能量被阻挡的程度。本文利用 Oke^[18]提出的一种常见的几何排列计算 SVF,依据已有成果,设置最佳搜索半径为 200 m 和方位角间距为 1°计算 SVF。利用鱼眼技术得出的天空开阔度检验 SVF 计算精度,两者相关系数为 0.97, Oke^[18]方法的均方根误差为 0.13,这表明基于三维建筑物数据计算的 SVF 具有较高精度。

晴好天气下,不同季节的 SVF 与 UHII 线性相关系数随时间变化如图 3 所示。由图 3 可知,不同季节 SVF 与 UHII 线性关系随时间变化相似。从日落到日出,呈显著线性负相关(达到 0.05 显著性水平);日出后,SVF 和 UHII 相关性迅速变弱,并逐渐由负相关转变为正相关。白天 SVF 与 UHII 呈线性正相关,春、秋、冬季相关系数大于夏季,且不同季节相关性最大值出现的时刻不同。

SVF 较小的位置,长波辐射能量被建筑物阻挡多而导致散热小,同时,密集的建筑物削减了风速,限制了感热通过大气对流和平流的损耗,使街道上的热量不容易散失^[19],因此,夜间 UHII 与 SVF 呈负相关。日出后,街道接收能量以太阳光短波辐射为主,不同地点建筑物阻挡太阳短波辐射到达地面的能量不同。SVF 越小,短波辐射能量阻挡越多,UHII 越低。

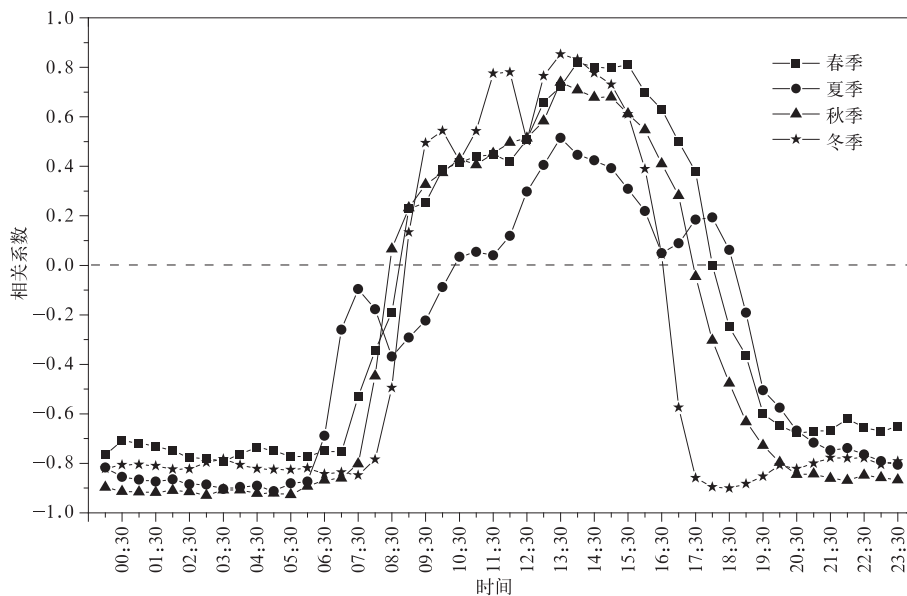


图 3 2010—2011 年晴好天气下四季 SVF 与 UHII 的线性相关系数

Fig. 3 The linear correlation between SVF and UHII under sunny weather conditions in different seasons from 2010 to 2011

3.2 FAI 与 UHII 相关分析

建筑物迎风面积指数是在特定风向上,建筑物迎风方向总面积与研究平面面积之比^[20-21]。在 200 m 空间尺度下,计算 2010—2011 年四季不同时刻 FAI,并分析其对城市热岛强度的影响。不同时刻的 FAI 与 UHII 关系在四季呈现规律基本一致,

在夜间 UHII 随 FAI 增大而增大,但不是呈简单的线性增加。FAI 较小时,UHII 增加较快,当 FAI 增加到一定值后,UHII 增加变慢,这说明对数关系更适合表达 FAI 变化对夜间与早晨热岛效应强度的影响。白天两者呈线性负相关。

根据以上分析,夜间与早晨采用对数关系、白天

采用线性关系计算出 FAI 与 UHII 在四季各个时刻的决定系数(图 4)。由图 4 可知,夏、秋、冬季的 FAI 与夜间热岛强度的决定系数基本上大于 0.68 (除夏季 22:00 为 0.52),甚至很多时刻大于 0.8,明显大于春季的 FAI 与 UHII 决定系数(0.6 左右)。四季夜间及早晨时刻 FAI 与 UHII 相关性均达到

0.05 显著性水平,白天除了春季 14:00 左右,春、夏、秋季 FAI 与 UHII 决定系数均小于 0.3,线性负相关不显著,冬季决定系数比其他 3 个季节略高,尤其是 14:00 的决定系数为 0.73,说明 FAI 与 UHII 在冬季午后呈显著的线性负相关。

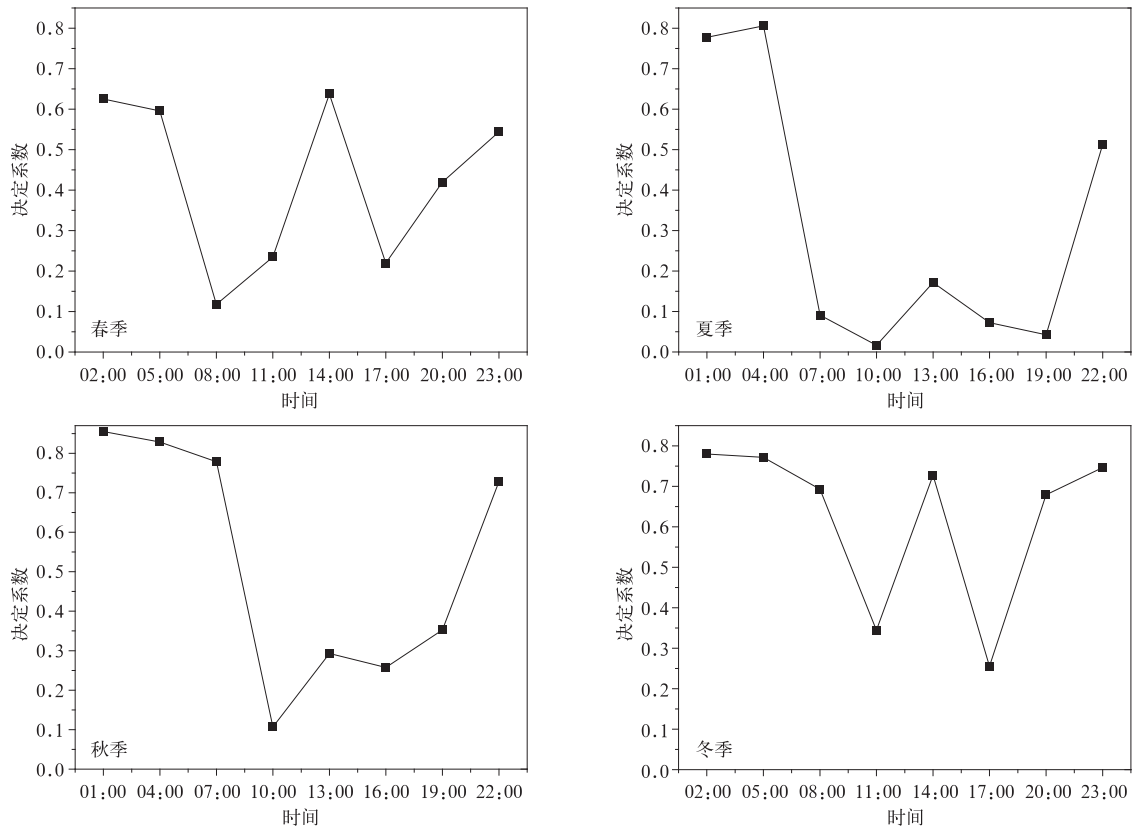


图 4 2010—2011 年不同季节的 FAI 与 UHII 相关分布

Fig. 4 Correlation between FAI and UHII in different seasons from 2010 to 2011

3.3 SVF, FAI 与 UHII 关系的适用性

为分析 SVF, FAI 与 UHII 关系在不同空间尺度下的适用性,分别在 100, 200, 300 m 3 种空间尺度下计算 SVF 和 FAI, 并与 UHII 建立相关关系。图 5 和图 6 展示了 SVF 与 UHII, FAI 与 UHII 相关性在不同空间尺度下差异。

由图 5 可知,在冬季夜间,空间尺度为 100 m 的 SVF 与 UHII 相关性略低,其他季节不同空间尺度下 SVF 与 UHII 相关性基本相同,相关关系稳定性较高。而 FAI 与 UHII 关系在不同空间尺度下差异较大(图 6)。夜间当空间尺度为 200 m 和 300 m 时,不同季节的 FAI 与 UHII 相关性差别不大;空间尺度为 100 m 时,明显低于空间尺度为 200 m 和 300 m 时的相关性,部分时段甚至无明显相关性。

白天 FAI 与 UHII 相关性在不同空间尺度下差异较大。总体来说,对于 FAI 与 UHII 相关性研究而言,200 m 为最佳空间尺度。相对于 SVF 与 UHII 相关性,FAI 与 UHII 相关关系随空间尺度变化幅度更大。

3.4 SVF, FAI 与 UHII 相关性差异分析

采用相关分析方法比较空间尺度 200 m 下空间形态学参数 SVF, FAI 与 UHII 关系的强弱(图 7)。由图 7 可知,春、夏、冬季的白天时段,两者的影响差异很小,在秋季午后,SVF 与 UHII 的线性正相关性显著(达到 0.05 显著性水平),而 FAI 与 UHII 线性负相关性不显著,这说明 SVF 比 FAI 更适合用于解释秋季白天的 UHII 变化。在夏季和秋季夜间,SVF, FAI 对 UHII 的影响差异不大,但在

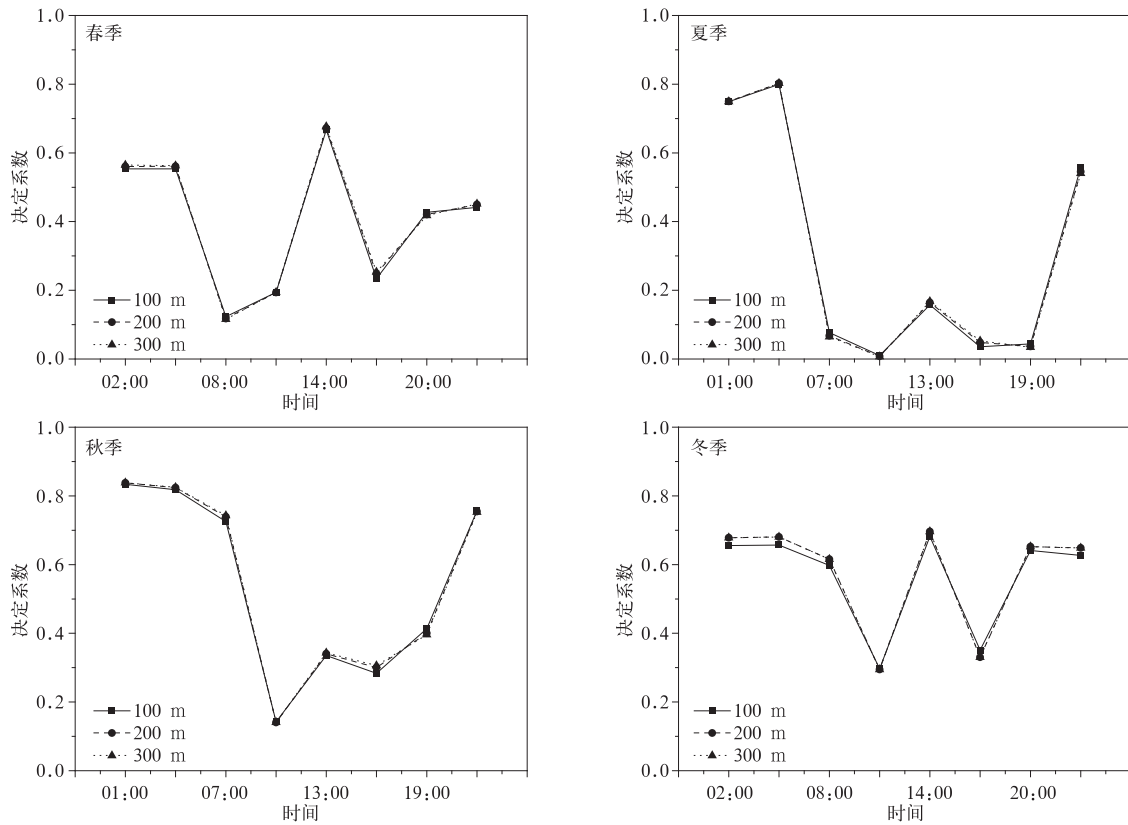


图 5 不同空间尺度下 SVF 与 UHII 相关性的差异
Fig. 5 Correlation between SVF and UHII with different spatial scales

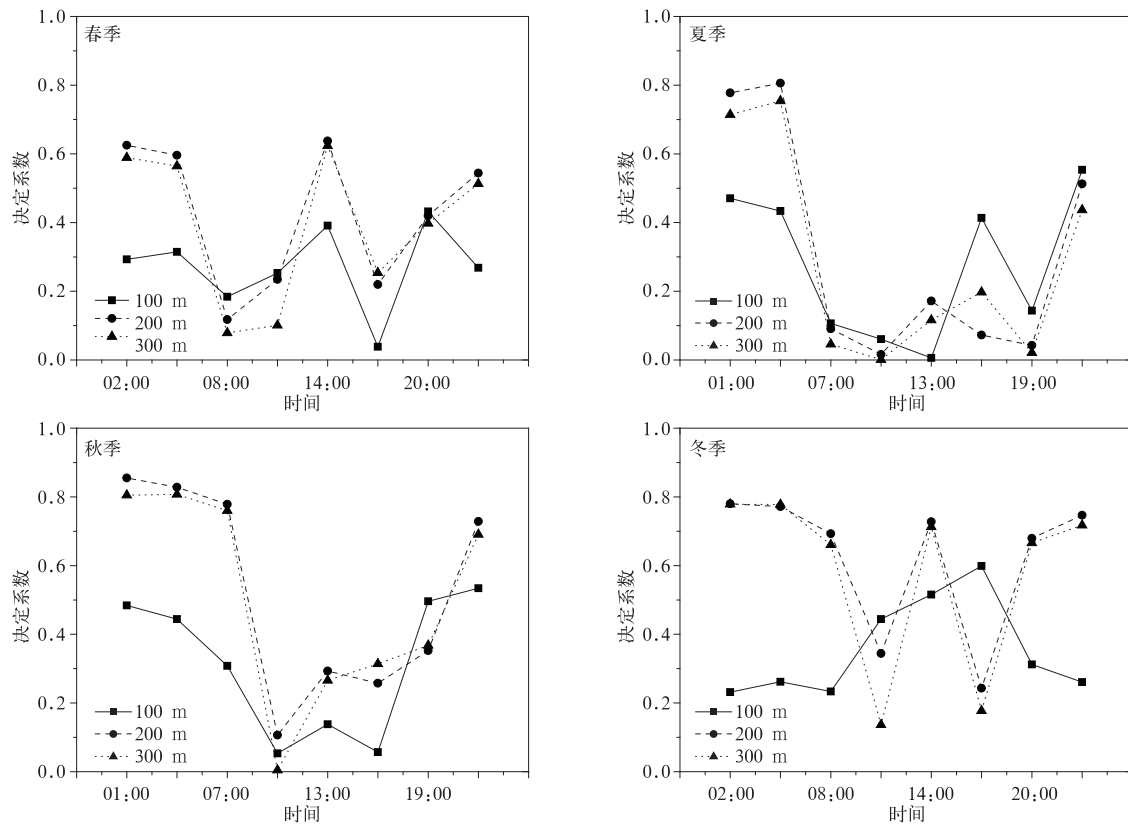


图 6 不同空间尺度下 FAI 与 UHII 相关性的差异
Fig. 6 Correlation between FAI and UHII with different spatial scales

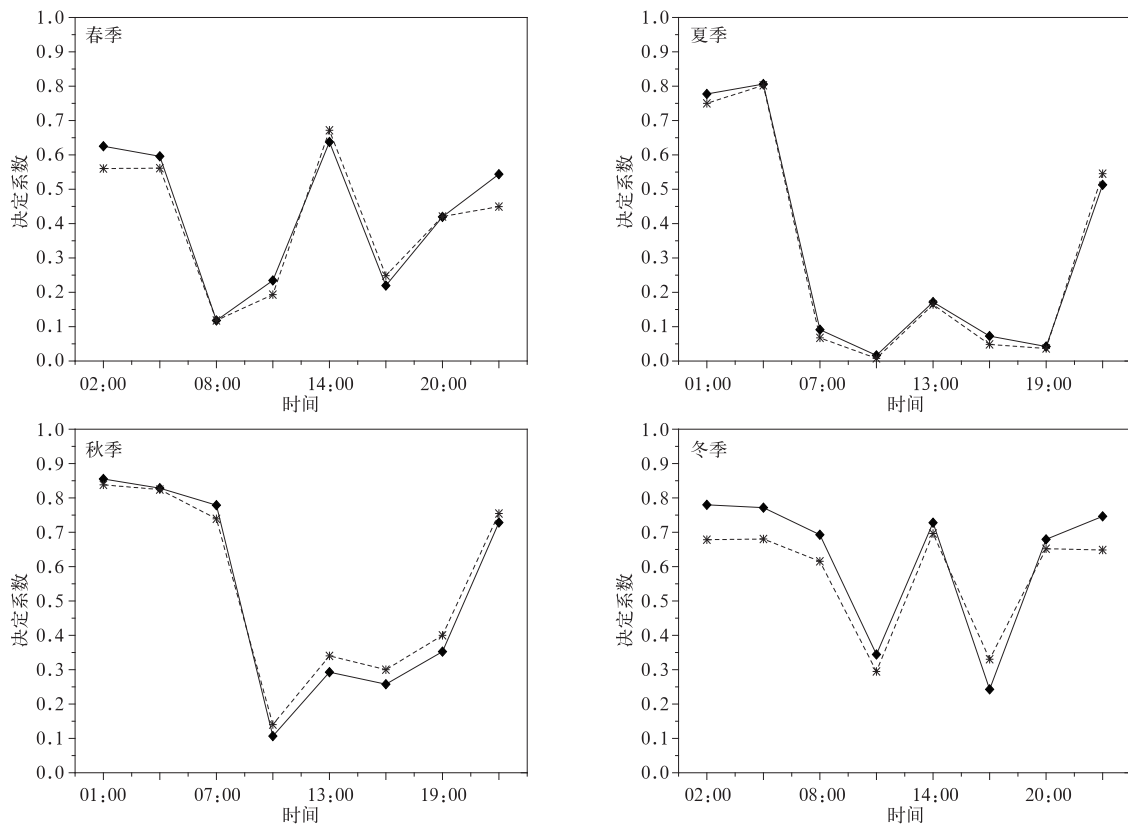


图7 2010—2011年晴天天气下不同季节FAI与UHII相关性(实线)及SVF与UHII相关性(虚线)

Fig. 7 Correlations between FAI and UHII (the solid line) with SVF and UHII (the dotted line) in different seasons of under sunny weather from 2010 to 2011

春季和冬季,FAI与UHII决定系数大于SVF,差值约为0.10,表明在200 m空间尺度下,FAI比SVF更适合作为解释春、冬季UHII变化的空间形态学指标。

4 结论

1) 晴天天气下,阿德莱德城市热岛强度在四季均呈夜间强、白天弱的规律。在夜间,热岛强度春、秋季最大,冬季次之,夏季最小。UHII在白天均小于 1.0°C ,夏季最大,最小为春季。

2) SVF和UHII在四季夜间呈显著线性负相关,春季、秋季和冬季中午到午后线性正相关显著,而夏季白天所有时刻均不显著。FAI与UHII在夜间呈显著对数关系,白天呈线性负相关。仅春季和冬季的正午呈显著线性负相关,其他时刻不显著。

3) 在200 m的空间尺度下,夜间春季和冬季FAI与UHII相关性强于SVF与UHII,夏季和秋季差异较小。白天秋季SVF与UHII相关性略强

于FAI与UHII,其他季节影响差异小。

4) 在不同城市空间尺度下,空间形态学参数SVF与UHII关系的适用性高于FAI。对于四季白天和夜间,SVF与UHII相关性在不同空间尺度下基本相同。空间尺度为200 m和300 m时,夜间FAI与UHII相关性差异不大,但明显高于空间尺度为100 m时。白天两者相关性在不同空间尺度下差异较大。

致谢:感谢澳大利亚 Flinders 大学环境学院关华德博士、Simon Benger 博士在论文研究数据及方法等方面给予的帮助。

参考文献

- [1] 杨星卫,周红妹,楼萌. 卫星资料在上海浦东新区热力场分析中的应用. 应用气象学报,1994,5(3):369-373.
- [2] 张光智,徐祥德,王继志,等. 北京及周边地区城市尺度热岛特征及其演变. 应用气象学报,2002,13(特刊D):44-50.
- [3] 田武文,黄祖英,胡春娟. 西安市气候变暖与城市热岛效应问题研究. 应用气象学报,2006,17(4):438-440.
- [4] 祝善友,张桂欣,刘莹. 苏州下垫面格局演变及其局地热环境效应. 地理科学,2012,32(7):859-865.

- [5] 石涛,杨元建,马菊,等. 基于 MODIS 的安徽省代表城市热岛效应时空特征. *应用气象学报*,2013,24(4):484-494.
- [6] Zhao L, Lee X, Smith R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat island. *Nature*, 2014, 511: 216-219.
- [7] 桑建国,刘辉志,王保民,等. 街谷环流和热力结构的数值模拟. *应用气象学报*,2002,13(特刊 D):69-81.
- [8] 徐祥德,丁国安,卞林根. 北京城市大气环境污染机理与调控原理. *应用气象学报*,2006,17(6):815-826.
- [9] Gál T, Lindberg F, Unger J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: Comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 95: 111-123.
- [10] Unger J. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *International Journal of Environment and Pollution*, 2009, 36: 59-80.
- [11] 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. *International Journal of Climatology*, 2010, 32: 121-136.
- [12] Wang Y P, Akbari H. Effect of sky view factor on outdoor temperature and comfort in Montreal. *Environment Engineering Science*, 2014, 31(6): 273-287.
- [13] Wong M S, Nichol J E, To P H, et al. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. *Building and Environment*, 2010, 45: 1880-1889.
- [14] Chen L, Ng E. Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 2011, 13: 586-594.
- [15] Wong M S, Nichol J E. Spatial variability of frontal area index and its relationship with urban heat island intensity. *Int J Remote Sens*, 2013, 34(3): 885-896.
- [16] Unger J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: Review and new approach. *Climate Research*, 2004, 27: 253-264.
- [17] Watson I D, Johnson G T. Graphical estimation of sky view factors in urban environment. *J Climatology*, 1987, 7: 193-197.
- [18] Oke T R. *Boundary Layer Climates*. London and New York: Routledge, 1987: 405-410.
- [19] 王迎春,郑大玮,李青春. 城市气象灾害. 北京:气象出版社, 2009: 42-51.
- [20] Burian S J, Velugubantla S P, Brown M J. *Morphological Analyses using 3D Building Databases*: Phoenix, Arizona. Los Alamos National Laboratory, 2002.
- [21] Grimmond C S B, Oke T R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J Applied Meteor*, 1999, 34: 1262-1292.

The Relationship Between Urban Spatial Morphology Parameters and Urban Heat Island Intensity Under Fine Weather Condition

Zhang Hailong¹⁾ Zhu Shanyou²⁾ Gao Yang³⁾ Zhang Guixin²⁾

¹⁾ (School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

²⁾ (School of Geography & Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

³⁾ (Pukou Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 211800)

Abstract

Urban heat island(UHI) phenomenon has a significant negative impact on economic development, urban climate, human life and health. An important cause for UHI is that intense buildings block the radiative transfer and exchange between urban canopies. Building distribution patterns and heights, which affect the formation and intensity of urban heat island, can be described with urban morphological parameters including frontal area index(FAI) and sky view factor(SVF).

With high spatial resolution, 3D building data of Adelaide central city, Australia, SVF and FAI are estimated and their relationships with urban heat island intensity(UHII) under fine weather conditions are analyzed. Sky view factor is a commonly-used morphological parameter that describes the degree to which the sky is obscured by building block. Compared with sky view factor calculated from fish-eye photos, SVF is very consistent with the former, with the correlation coefficient of 0.97, which can be used to analyze the change of urban heat island intensity in different seasons. Frontal area index is calculated by weighted average method of all seasons with observations of wind speed and direction in Adelaide airport. Relationships between SVF and UHII, FAI and UHII in different times of various seasons and their influences are analyzed.

A high negative linear relationship is found between SVF and UHII at night time under fine weather conditions, and significant positive linear relationship is found during daytime, especially in the afternoon of spring, autumn and winter. A logarithmic relationship is found between FAI and UHII appears at night and morning time, while at daytime they are linearly related. The applicability of the correlation between SVF and UHII at different search radius is higher than that of FAI. At the scale of 200 m, at night time of spring and winter, the correlation of FAI and UHII is greater than that of SVF and UHII, while the correlation between SVF and UHII is greater at daytime of autumn. For the other moments, there are little difference between correlation of FAI to UHII and that of SVF to UHII.

Key words: urban heat island intensity; 3D building data; frontal area index; sky view factor