

引用格式: 杨若,敖祖锐,张晶,等.中小尺度下植被冠层对屋顶表面温度的调控效应分析[J].地球信息科学学报,2019,21(7):1097-1108. [ Yang R, Ao Z R, Zhang J, et al. Effect of vegetation canopy on rooftop surface temperature at city block and building scale[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(7):1097-1108. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180547

# 中小尺度下植被冠层对屋顶表面温度的调控效应分析

杨 若<sup>1,2</sup>,敖祖锐<sup>3</sup>,张 晶<sup>1,2\*</sup>,余 洁<sup>1,2</sup>

1. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100048;2. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;  
3. 中山大学地理科学与规划学院,广州 510275

## Effect of Vegetation Canopy on Rooftop Surface Temperature at City Block and Building Scale

YANG Ruo<sup>1,2</sup>, AO Zurui<sup>3</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2\*</sup>, YU Jie<sup>1,2</sup>

1. MOE Key Lab of 3D Information Acquisition and Application, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

**Abstract:** With the acceleration of urbanization, urban heat island (UHI) effect has become an increasingly serious problem, which poses a great threat to public health and urban sustainability. Vegetation can lower the air temperature by reflecting direct sunlight and through the process of evapotranspiration, and hence plays a key role in improving local thermal environments. Investigating the effect of vegetation on regulating building temperature is very useful for understanding the principle of urban heat island and mitigating the deterioration of urban thermal environment. However, most previous studies are based on remote sensing imagery, which lacks three-dimensional information on vegetation structure. Additionally, these studies are mainly carried out at the urban scale due to the limitation of spatial resolution. Therefore, it remains challenging to quantitatively investigate the effects of vegetation canopy structure on building temperature at small and medium scales. In this paper, we quantitatively investigated the relationship between the LiDAR-derived 3D vegetation structure (canopy density, CD) and the rooftop surface temperature (RST) at the city-block (medium) and individual building (small) scale. We improved the Building Thermal Functional Area model (BTFA). Considering the spatial and quantity characteristics of buildings in Santa Rosa, the optimal sizes of the small and medium thermal function areas were estimated. Then the vegetation canopy density around the buildings at two scales were calculated. The cooling capacity of CD was analyzed by nonlinear fitting model and other statistical methods. Moreover, we used spatial autoregression model to analyze the contribution of CD to lower the rooftop temperature under the interaction of various factors. Results show that the cooling effect of vegetation on buildings is closely related to the canopy density around them: the minimum threshold of 17% is required to achieve effective cooling effect, while 30% and 40% are the optimal thresholds at medium and small scales, respectively. Additionally, changes

收稿日期:2018-10-25;修回日期:2019-03-15.

基金项目:地表载荷作用下MTINSAR城市地面沉降监测及时空多尺度演化规律挖掘(41671417)。[ **Foundation item:** MTINSAR-based Urban Land Subsidence Monitoring and Spatial Temporal Multi-scale Trend Characteristic Mining with the Impact of Ground Load, No.41671417. ]

作者简介:杨 若(1993-),女,广东河源人,硕士生,研究方向为空间分析与数据挖掘。E-mail: joengjoek@gmail.com

\*通讯作者:张 晶(1966-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,研究方向为地理信息系统与应用。E-mail: zhangjing5946@sina.com

of RST vary at different scales with the same canopy density. The decrease of RST at the medium scale is on average 0.89 °C larger than that at the small scale. The findings suggest that the planning of urban green space should be considered comprehensively in different scales. Moreover, the RST changes at small and medium scales are affected by not only the vegetation structure nearby the buildings but also the overall thermal environment. The methods and results of this paper are helpful to better plan green spaces on the limited urban land resources and build a more sustainable human livable environment.

**Key words:** LiDAR; urban thermal environment; small and medium scales; canopy density; rooftop surface temperature; cooling effect; Santa Rosa

**\*Corresponding author:** ZHANG Jing, E-mail: zhangjing5946@sina.com

**摘要:**随着城市化进程的加快,城市热岛问题日益严重,对人类健康和城市可持续发展产生了巨大威胁。植被可有效遮蔽阳光直射,并通过蒸腾作用降低气温,是改善局部热环境的重要途径之一。开展植被对建筑物温度的调控效应的研究,对于理解城市热岛成因、缓解城市热环境恶化等方面都有重要意义。然而,当前研究往往是在遥感影像的基础上进行的,缺乏植被结构信息,同时,受制于有限的空间分辨率,研究大多在城市尺度下开展。在中小尺度上定量地研究植被冠层密度对建筑物温度的影响仍然具有一定挑战性。鉴于此,本文使用激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)获取的高分辨率冠层密度数据,在楼间尺度和街区尺度下开展圣罗莎市三维植被结构与单体建筑物表面温度之间定量关系的研究,分析不同尺度下植被冠层的降温特征及其在局部环境中的降温贡献。结果表明:植被对建筑物的降温作用与其周围的冠层密度有密切关系:冠层密度需达到17%才能起到有效的降温作用,其中在中小尺度上冠层密度分别高于30%和40%时,能最大限度发挥植被的温度调控功能;当冠层密度相同时,2个尺度下的温度变化显著不同:随着冠层密度的增加,街区尺度下的屋顶温度比楼间尺度下的屋顶温度平均下降了0.89 °C;中小尺度下的屋顶温度变化不仅受到其周围植被结构的影响,还与整体热环境状况有关。本文的研究思路与结果有助于在有限的城区土地资源上合理规划绿地建设,构建可持续的人类宜居环境。

**关键词:** LiDAR; 城市热环境; 中小尺度; 冠层密度; 屋顶表面温度; 调控效应; 圣罗莎市

## 1 引言

随着城市化进程的快速推进与城市人口的迅速增长,城市下垫面结构发生巨大变化,自然表面向城市用地转变,人为热排放急剧增加,城市空气质量下降,这些因素影响着城市生态系统的能量平衡,导致生态环境问题日益突出。其中,城市热环境恶化严重影响城市宜居性,成为亟需解决的重要问题之一。绿地系统作为温度冷却因素在调节城市气候、改善城市热环境方面具有重要作用,是解决上述问题的关键措施。通过设计可持续发展的人居环境来缓解城市热岛效应已得到越来越多的重视,一些有效的措施如屋顶绿化建设、在建筑物周围种植乔木和灌木为建筑物提供遮荫等等已被广泛用于实践。然而,城市地区人口高度集中,建筑物密集,“人多地少”的现实状况大大制约了绿地面积的扩展。因此,研究植被对建筑物的降温效应,在有限的土地资源上合理规划绿地建设,发挥最佳降温效益,对于降低能源消耗,改善室内外热环境,构建可持续的人类宜居环境具有重要意义。

近年来,国内外学者对不同类型的下垫面结构

与城市热环境之间的关系做了大量研究,深入探讨了城市公园、绿地、不透水表面、裸土、水体等土地利用类型的温度差异,尤其是植被与地表温度的关系<sup>[1-5]</sup>。Weng等<sup>[1]</sup>利用美国印第安纳波利斯城市夏季的Landsat ETM+数据,研究了植被覆盖和地表温度之间的关系,结果表明地表温度与植被指数之间存在较强的负相关。Chen等<sup>[2]</sup>使用夜间灯光数据反演北京市城市化水平,并与植被指数和地表温度进行相关性分析,结果显示地表温度的空间分布与灯光数据DN值和植被指数密切相关,快速的城市化导致植被指数下降和地表温度增加。这些研究证明了植被作为冷却因素对地表温度的负向推动作用,加深对城市热岛形成机制的认识,并提出了有效的城市热岛缓解措施,但是依然存在不足:① 这些研究大多是基于遥感影像提取的植被指数开展的,而传统遥感影像中的辐射信息易受天气条件、阴影遮挡的影响,存在一定的不确定性;② 遥感影像只能提供二维位置信息,缺乏对植被结构参数信息的描述;③ 受遥感影像空间分辨率的限制,以往国内外城市热环境和城市绿地相关研究都在较大范围上开展(1 km~几百米尺度),缺少小尺度的细节信息。

针对上述问题,有部分学者通过野外实测,有计划地选取采样点,对小尺度区域例如居住小区进行实测研究<sup>[6-8]</sup>。汪丹<sup>[7]</sup>选取北京市的一个社区,调研社区内植物现状,计算单位面积内植物绿量,与实测温度数据进行非线性拟合,发现植物的降温能力与单位面积植物绿量大小显著相关,降温能力随着绿量增长而提高但是不会无限增长,当绿量超过 $5\text{ m}^3/\text{m}^2$ 后,降温速度趋于平缓。李英汉等<sup>[8]</sup>采用绿化三维量,与实测气温数据进行回归分析,研究深圳市居住小区植物绿量对气温的调控作用,在此基础上,通过不同绿化结构与温度的相关性分析,发现乔木是植物降温的主要影响因子。这类研究弥补了小尺度区域和三维植被数据在城市热环境研究中的空白,但是主要是基于部分采样点和人工实测数据开展,费时费力,而且难以在大范围内展开,无法进行覆盖全面的城市动态监测。

激光雷达技术借助激光传感器可快速、高效、精确地获取高精度、高分辨率的空间三维信息,具有其他遥感技术所不可比拟的优势<sup>[9-11]</sup>。LiDAR被广泛应用于植被结构参数反演,如Hudak等<sup>[12]</sup>利用LiDAR数据精确提取植被冠层高度;Riano等<sup>[13]</sup>发现LiDAR提取的叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)与人工观测值有较好的相关性( $R^2 > 0.8$ );Korhonen等<sup>[14]</sup>探讨了LiDAR离散回波数据反演冠层密度、冠层覆盖度、LAI等参数的可行性;Chen等<sup>[15]</sup>利用LiDAR数据对三维城市景观格局进行综合分析,结果表明基于三维景观模型的垂直景观格局能更好地反映建筑物和树木的空间结构和分布。从LiDAR数据中准确估算植被结构参数对于了解城区绿地组成和空间格局具有重要意义。然而,很少有研究探讨这些植被参数与城区温度之间的关系。

鉴于此,本文利用LiDAR数据结合高分辨率温度影像探讨了植被结构与局部温度之间的关系。选取冠层密度作为代表性植被结构参数,在楼间尺度和街区尺度下开展三维植被结构与单体建筑物表面温度之间的定量关系研究,分析不同尺度下植被冠层的降温特征及其在局部环境中的降温贡献,以期在有限的城市土地资源上发挥植被调控温度的最大效益。

## 2 研究区概况与数据源

### 2.1 研究区概况

目前已有的许多研究主要在世界各地的主要

城市开展并取得丰富成果,如伦敦、洛杉矶、北京、巴黎、东京等,而世界上大部分规模较小的城市,其关注度不如大都市,在经济转型和城市功能结构调整的政策背景下这些小城市成为大都市的转接门户,承接大都市的部分功能,成为生态环境敏感区域。同时随着城市扩张与人口增长,一些周边小城市成为了大都市的房产市场,对环境有更高的要求。鉴于此,本文选取美国西海岸重要的金融中心——旧金山湾区的圣罗莎市作为研究对象。圣罗莎市位于加州索诺玛县的中部,中心经纬度为 $122^{\circ}40'29.3''\text{W}$ , $38^{\circ}27'9.4''\text{N}$ ,距旧金山金门大桥约70 km,是北湾区的政治、医疗、经济、服务和贸易中心。圣罗莎市地处圣罗莎平原(图1),主城区覆盖面积 $105.14\text{ km}^2$ ,平均高程81.26 m,东北部地势较高,东南部伸入加州著名的红酒之乡索诺玛谷,西部位于俄罗斯河谷盆地,地势低平。属于暖夏型地中海气候,冬季凉爽湿润,夏季炎热干燥。

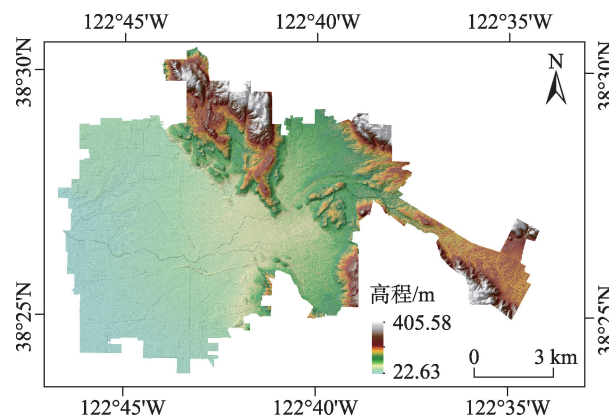


图1 美国加州圣罗莎市地形示意

Fig. 1 DEM map of Santa Rosa, California, USA

### 2.2 数据源与预处理

#### 2.2.1 Landsat-8影像及预处理

结合LiDAR数据获取时间和卫星过境时天气情况,选择2013年10月16日的Landsat-8影像(影像ID: LC80450332013289LGN01),卫星过境时间为18时53分,影像使用WGS1984椭球体和基准面,投影为UTM坐标系,数据来源于美国USGS数据中心(<https://glovis.usgs.gov/>)。Landsat-8上搭载OLI和TIRS 2个主要的传感器,本文使用OLI的多光谱影像(空间分辨率30 m)和TIRS的热红外影像(空间分辨率100 m)进行相关光谱指数(NDVI等)提取和地表温度反演。由于观测条件以及大气作用等因素影响,影像中难免存在一定的辐射误差,因此



必须对影像进行辐射校正。本文利用 ENVI 5.3 软件对 OLI 影像进行辐射定标和大气校正处理,以提高光谱指数提取精度。

### 2.2.2 机载 LiDAR 衍生数据及预处理

与传统遥感手段相比,LiDAR 技术的主要突破在于它能获取高精度的地物高程信息(Z坐标),为地物的三维空间分布研究提供了新的视角。研究区的机载 LiDAR 数据来源于 Sonoma County Vegetation Mapping & LiDAR Program (<http://sonomaveg-map.org/>),由马里兰大学提供。该数据集由 Leica ALS50 和 Leica ALS70 传感器组成的 LiDAR 系统于 2013 年 9 月 28 日至 11 月 26 日期间获取,系统飞行高度约 900 m,视场角 30°,平均点密度 10.14 pts/m<sup>2</sup>,采用 NAD83 坐标系统。经质量评估、分类、插值等处理后生成一系列数据产品:1 m 分辨率的 DEM、DSM、CHM(Canopy Height Model)、冠层密度(Canopy Density, CD)和高精度建筑物轮廓数据(Building Footprints)。由 DEM 和 DSM 生成 NDSM, NDSM 和 CHM 作差减去被树冠遮挡的部分,生成 BHM(Building Height Model),最后结合建筑物轮廓面,根据建筑物高度和占地面积去除非建筑物噪声,即可得到精确的建筑物高度数据。由于 LiDAR 衍生数据产品均采用 NAD83 坐标系统,而 Landsat-8 影像采用 WGS84 坐标系统,需进行配准,以消除二者之间的系统偏差。本文通过人工选取同名点,结合 Burse-Wolf 七参数模型进行配准。

## 3 技术流程及主要模型

本文使用 Landsat-8 热红外影像反演地表温度,结合 LiDAR 数据提取的植被结构参数和建筑物高度数据,利用 Morabito 等<sup>[16]</sup>提出的建筑物热影响区(Building Thermal Functional Area, BTFA)框架分析不同尺度下冠层密度对中心建筑物热状态的影响,技术路线如图 2 所示。

### 3.1 圣罗莎市地表温度反演

Landsat-8 TIRS 具有 2 个热红外波段,理论上可以使用劈窗算法反演像元平均温度,然而由于波段 11 存在定标的不确定性,USGS 不建议使用劈窗算法进行温度反演<sup>[17]</sup>,因此本文使用 Qin 和 Karnieli<sup>[18]</sup>提出的单窗算法反演地表温度。该算法的计算公式如下:

$$T_s = [a(1 - C - D) + (b(1 - C - D) + C + D)T_{10} - DT_a]/C \quad (1)$$

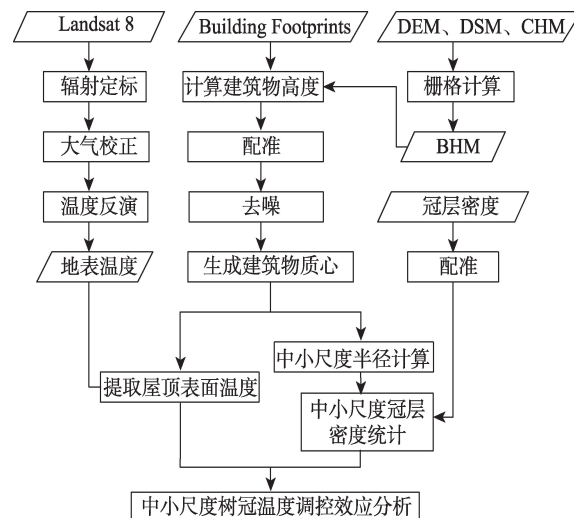


图2 总体技术路线

Fig. 2 Research flowchart of the methods

$$C = \varepsilon \tau \quad (2)$$

$$D = (1 - \tau)[1 + \tau(1 - \varepsilon)] \quad (3)$$

式中:  $T_s$  为像元平均温度/K;  $a$  和  $b$  为常量, 分别为 -67.355351 和 0.458606;  $\varepsilon$  为地表比辐射率;  $\tau$  为大气透过率;  $C$  和  $D$  为中间变量, 由  $\varepsilon$  和  $\tau$  计算;  $T_a$  为大气平均作用温度;  $T_{10}$  为波段 10 的亮度温度/K, 根据普朗克公式计算:

$$T_{10} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{10}} + 1\right)} \quad (4)$$

对于 TIRS 数据, 取  $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$ ,  $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ ,  $L_{10}$  为波段 10 的辐射亮度, 通过辐射定标获得。

结合式(1)~式(4), 可以看出利用单窗算法反演像元平均温度需要 3 个输入参数: 大气透过率、大气平均作用温度和地表比辐射率。然而, 由于观测条件限制, 在实际应用中往往难以直接对卫星掠过时的大气和辐射参数进行测定。因此, 常采用经验公式或辐射传输模型对这些参数进行估算。本文采用 NASA 提供的大气校正参数计算器, 基于 MODTRAN 辐射传输模型估算大气透过率<sup>[19]</sup>; 同时, 查询美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发布的近地面气温, 根据  $T_a$  与近地面气温之间的线性关系估算  $T_a$ ; 最后, 选择基于 NDVI 的图像分类法计算地表比辐射率<sup>[18]</sup>。

### 3.2 建筑热影响区模型

Morabito 等<sup>[16]</sup>在研究不透水面对建筑物周边温度的影响时, 以辐射传递过程为基础, 提出了 Build-



ing Thermal Functional Area(BTFA)框架,该框架假设建筑物周围存在一个热场功能区,区域内的属性特征(不透水面密度)会改变辐射平衡进而成比例地影响建筑物的热状态。定义一个圆心为建筑物物质心、面积为1 ha的圆对这个区域具体化,输入圆心的建筑物温度和区域内的不透水面密度,即可定量评价二者之间的相互作用。该研究框架对小尺度下关于建筑物的微气候特征研究具有一定的借鉴意义。本文应用该研究框架设计了以植被冠层密度为属性特征的建筑热影响区模型并作了以下修改:

(1)提取建筑物物质心处的温度值,表示屋顶表面温度<sup>[20]</sup>(Rooftop Surface Temperature, RST)。

(2)圆域半径由定义改为计算,从研究区内建筑物的位置特征和数量特征考虑,计算2个适用于本研究区的中小尺度大小。

(3)区域内部的属性特征由不透水面密度改为植被冠层密度。

以上为模型的3个输入参数,其中,圆域半径决定了建筑物热影响区的尺度大小,是模型中的关键参数。为了从不同尺度评估冠层密度对屋顶温度的影响,本文使用以下方法评估各尺度下的热影响区半径:

(1)在小尺度上,主要考虑建筑物的空间点分布形成的结构模式对屋顶温度的影响,因此引用点模式分析中的G函数计算合适的BTFA半径。首先找出所有建筑物点的最邻近点并计算它们的距离,将所有距离按从小到大排序,以10 m为间隔统计每段距离内的建筑物数量,然后计算累计频率,作出G函数累计频率图(图3)。从图中可以看出,在 $d=50$  m处,G函数出现一个类似拐点,在拐点之前累计频率增加迅速,这段距离内包含了约98%的数据,此后随着距离增大G函数的斜率逐渐趋向于0。由于98%的建筑物最邻近距离在50 m以内,因此将该距离阈值作为小尺度下的BTFA半径。

(2)在中尺度上,主要考虑社区或街区的冠层密度对中心建筑物温度的影响,以及附近的城市公园或绿地对社区或街区热环境变化的作用,因此使用核密度估计方法计算合适的BTFA半径。核密度估计是一种估计随机变量的概率密度函数的非参数方式,基于有限的样本对总体进行推断,生成一个描述集聚程度的连续的平滑估计面。核密度带宽(搜索半径)越大,概化程度越高;反之,核密度带宽越小,则越能保留更多细节。在ArcGIS 10.4中经过多次实验,综合考虑绿地和建筑物的空间分

布情况和数量,选择300 m作为中尺度的BTFA半径。最终确定的中小尺度BTFA模型如图4所示。

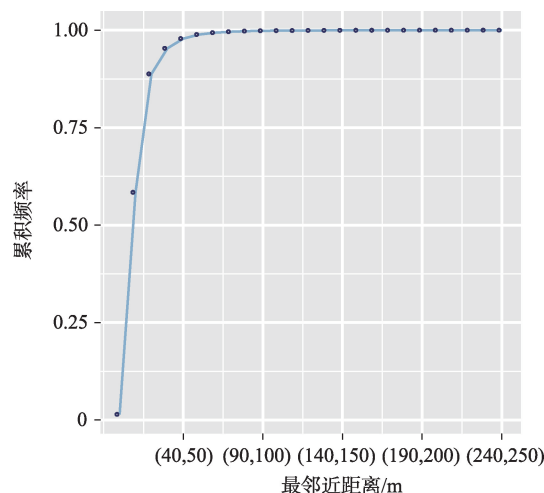


图3 建筑点距离分布G函数曲线

Fig. 3 Result of the G-function method for distance between buildings



图4 BTFA模型示意

Fig. 4 Building thermal functional area (BTFA) model

### 3.3 非线性拟合模型

应用R语言作出两个尺度冠层密度与屋顶表面温度的散点图,观察散点图的趋势,进行对数、负指数和多项式非线性拟合实验,最后,根据模型拟合优度 $R^2$ 选择二次多项式曲线分别对2个尺度进行非线性拟合,对2个尺度的植被冠层降温能力进行探讨。拟合模型一般式为:

$$RST_i = \beta_0 + \beta_1 CD_i + \beta_2 CD_i^2 + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中: $\beta_0$ 是截距, $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 分别为冠层密度一次项和二

次项的回归系数,  $\varepsilon_i$  是正态分布的随机误差项。

### 3.4 空间自回归模型

空间统计学认为回归分析等全局方法忽略了地理问题的空间效应<sup>[21]</sup>, 不能对空间模式进行有效的描述, 为了更准确地定量评价树冠的降温贡献, 本文将不同尺度下建筑物周围的冠层密度作为自变量, 屋顶表面温度作为因变量, 利用空间自回归模型进行了回归分析, 并与传统的最小二乘线性回归模型 (Ordinary Least Square, OLS) 进行了对比, 评估了各模型的适用性。

空间自回归模型的一般形式如下:

$$RST_i = \alpha + \rho W_1 + \beta CD_i + \lambda W_2 + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中:  $RST_i$  表示第  $i$  个建筑物的屋顶表面温度;  $\alpha$  是常数项;  $CD_i$  表示第  $i$  个建筑物周围的冠层密度;  $\beta$  是冠层密度的回归系数;  $\varepsilon_i$  是随机变量;  $W_1$  和  $W_2$  是空间权重矩阵, 这里使用  $K$  最邻近权重矩阵,  $K=4$ ;  $\rho$  和  $\lambda$  分别为空间滞后和空间误差的回归系数, 反映屋顶表面温度受相邻建筑物热状态的影响方向和影响程度。

对空间权重矩阵施加限定, 可以导出 2 个不同形式的空间自回归模型。一个是空间滞后模型 (Spatial Lag Model, SLM), 设  $W_2=0$ , 模型导出如下:

$$RST_i = \alpha + \rho W_1 + \beta CD_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

式(7)在最小二乘线性回归模型 (OLS) 的基础上增加了一个邻域的  $RST$  平均值 (即空间滞后) 作为额外的解释变量, 并假定观测  $RST$  值不仅受到冠层密度的影响, 还与相邻区域的  $RST$  值有关。

另一个是空间误差模型 (Spatial Error Model, SEM), 设  $W_1=0$ , 模型导出如下:

$$RST_i = \alpha + \beta CD_i + \lambda W_2 + \varepsilon_i \quad (8)$$

与空间滞后模型不同, 空间误差模型认为当数据存在观测误差, 或建模中考虑的自变量不具有足够的代表性时, 模型的误差项将表现出空间自相关性。本文使用 Anselin<sup>[22]</sup> 提出的拉格朗日乘子统计量 LM 检验空间滞后或误差项的依赖性, 并以此评价空间滞后模型与空间误差模型的适用性。如果 LM-lag 比 LM-error 显著, 说明选择空间滞后模型更适用于当前情况, 反之, 则说明空间误差模型效果更好, 如果二者均显著, 再比较二者的稳健性检验结果 Robust LM-lag 和 Robust LM-error, 判断标准与 LM-lag 和 LM-error 相同。考虑到 LM 统计量和 Robust LM 均存在显著性的可能, 也可以使用模型的整体评价指标进行选择, 自然对数似然函数值

(Log-likelihood, LogL) 越大表示所估计的参数使模型最为合理, 赤池信息准则值 (Akaike information criterion, AIC) 越小表示模型拟合效果越好。

本文的统计分析在开源 R 语言环境中, 使用特定的空间数据处理包执行。

## 4 结果及分析

### 4.1 圣罗莎市地表温度空间分布特征

研究区地表温度范围在 19.00 ~ 38.39 °C 之间, 平均地表温度为 29.19 °C, 标准差为 2.26。按均值 ± 一个标准差将温度分区, 其中一级温度区为小于均值与标准差之差的数据, 二级温度区为大于一级温度区且小于均值的数据, 以此类推, 划分四级温度区: 低温区、次低温区、次高温区和高温区 (图 5)。研究区土地利用类型、植被覆盖度和冠层密度分析结果如图 6~图 8 所示。如图 8 所示, 温度空间分布与冠层密度的分布是一致的, 高温区分布在不透水面覆盖和植被稀疏冠层密度低的地区, 而东北部和东南部为低矮山地, 植被茂密, 冠层密度高, 并且东部有 3 个湖泊 (Fountaingrove Lake, Lake Ralphine, Spring Lake) (图 6), 地表温度明显低于其他地区。以往研究得出相对于 NDVI、RVI、GVI、MSAVI, 植被覆盖度与地表温度具有较好的负相关性<sup>[5]</sup>, 所以本文选择植被覆盖度与冠层密度进行比较。对比温度区空间分布 (图 5) 与植被覆盖度 (图 7) 和冠层密度 (图 8), 植被覆盖度与温度空间分布上的关联性不如冠层密度的强烈, 结果显示植被覆盖度很高的地区如东南部索诺玛谷, 地表温度并没有呈现低温特征, 温度反而较高。而图 8 显示这一地区的冠

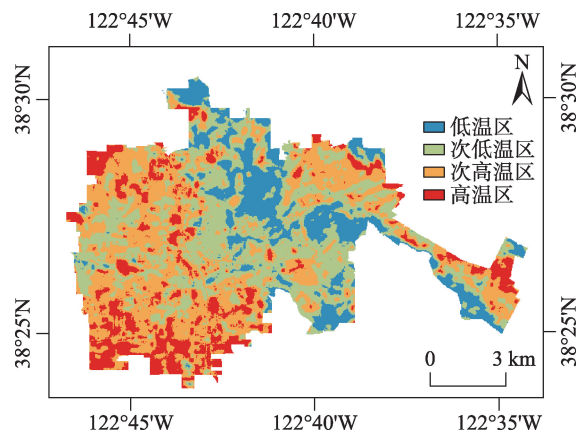


图 5 2013 年 10 月圣罗莎市地表温度等级划分

Fig. 5 Spatial distribution of land surface temperature zones of Santa Rosa in October 2013



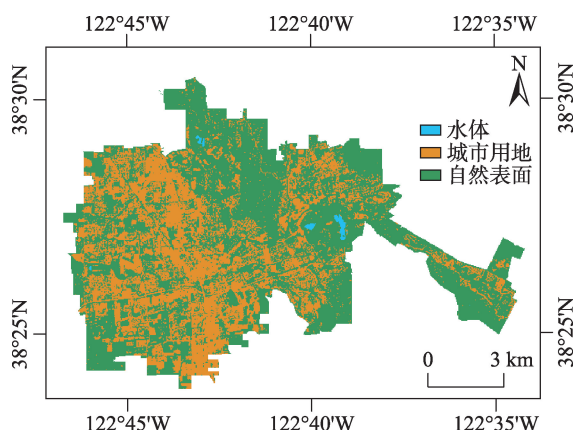


图6 2013年10月圣罗莎市土地利用类型(监督分类结果)

Fig. 6 Land use map of Santa Rosa in October 2013 (The result of supervised classification)

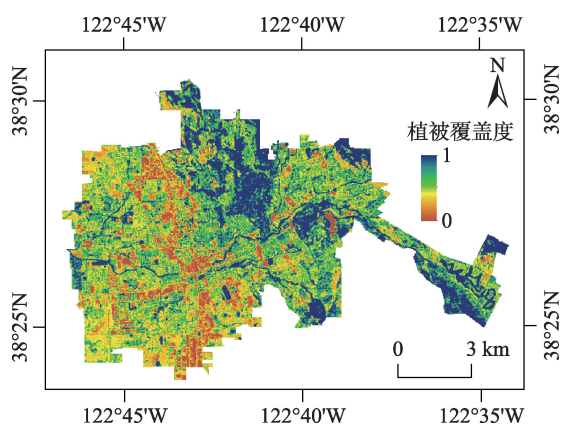


图7 2013年10月圣罗莎市植被覆盖度图像

Fig. 7 Fractional vegetation cover map of Santa Rosa in October 2013

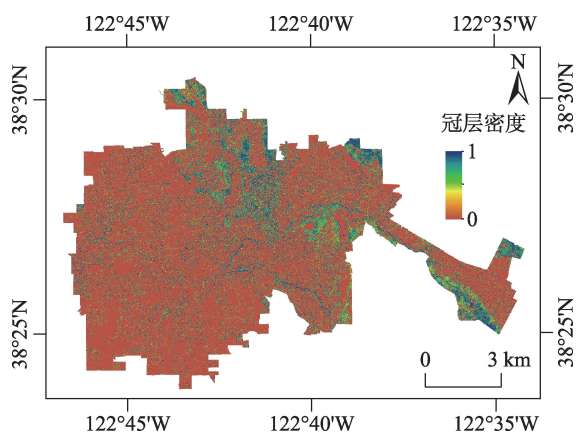


图8 2013年秋季圣罗莎市冠层密度图像

Fig. 8 Canopy density image of Santa Rosa in fall of 2013

层密度较低,符合地表温度的高温特征。此处为Oakmont高尔夫俱乐部,虽然植被覆盖度很高但是植被类型以草本为主,结构单一,地表温度反而较高<sup>[23]</sup>。高大

茂盛的乔木如同天然阳伞可以为建筑物提供遮荫,减少建筑物可吸收的太阳辐射,同时乔木还能吸收城市不透水面的长波辐射,降低低层大气的保温作用,以乔木为主的混合绿地类型已被证实为对降温最有效的绿地结构<sup>[8,24-25]</sup>。这说明基于遥感影像提取的植被指数的局限性,不易区分植物种类和绿地结构,而冠层密度作为真三维植被结构参数可以有效克服以上缺点,在城市热环境研究中具有独特优势。

## 4.2 中小尺度树冠降温能力分析

圣罗莎市共有建筑物55 936个,根据温度区划分(低温区、次低温区、次高温区、高温区)对总体进行限定距离(30 m)的分层随机抽样以避免由于建筑物之间距离太近而出现温度像元与建筑物质心一对多的情况。抽取总体的10%,即样本容量5594个,进行定量分析。

### 4.2.1 冠层密度最低阈值

经统计,楼间尺度的BTFA(BTFA<sub>R<sub>50</sub></sub>)内部冠层密度在0~0.67范围内,相应地,街区尺度的BTFA(BTFA<sub>R<sub>300</sub></sub>)内部冠层密度在0.02~0.69范围内,根据冠层密度对2个尺度的屋顶表面温度进行四等分,低冠层密度: $CD < 17\%$ ;适中的冠层密度: $17\% \leq CD < 34\%$ ;较高的冠层密度: $34\% \leq CD < 51\%$ ;高冠层密度: $CD \geq 51\%$ 。以这种方式,计算4个温度区的建筑物数量分别在4个冠层密度分组中的占比。

BTFA<sub>R<sub>50</sub></sub>和BTFA<sub>R<sub>300</sub></sub>的分组统计,如图9和图10显示,在 $CD < 17\%$ 时,位于高温区和次高温区的建筑物数量占总体的主要部分(在BTFA<sub>R<sub>50</sub></sub>和BTFA<sub>R<sub>300</sub></sub>中分别为78.9%和82.8%),而低温区和次低温区的建筑物数量很少,说明低于17%的冠层密度不能起到降温的作用。随着冠层密度的增加,情况发生实质性改变,位于高温区和次高温区的建筑物数量逐渐减少,从第2个冠层密度分组中已观察到建筑物大部分位于低温区和次低温区,这时,植被已初步具备调节温度的能力,对周围的热环境改善起到积极作用,但是调节作用有限,仍有部分高温区的建筑物存在。在高冠层密度覆盖的情况下(第3和第4分组),观察到次高温区和高温区的建筑物数量非常少或者完全没有。结果表明,为了缓解城市热岛,改善热环境,区域内的绿化量需达到一定阈值,才能有效发挥积极作用。

### 4.2.2 冠层密度最佳阈值与降温程度比较

BTFA<sub>R<sub>50</sub></sub>和BTFA<sub>R<sub>300</sub></sub>的二项式模型拟合优度 $R^2$ 分别为0.580和0.584,拟合结果如图11和图12所



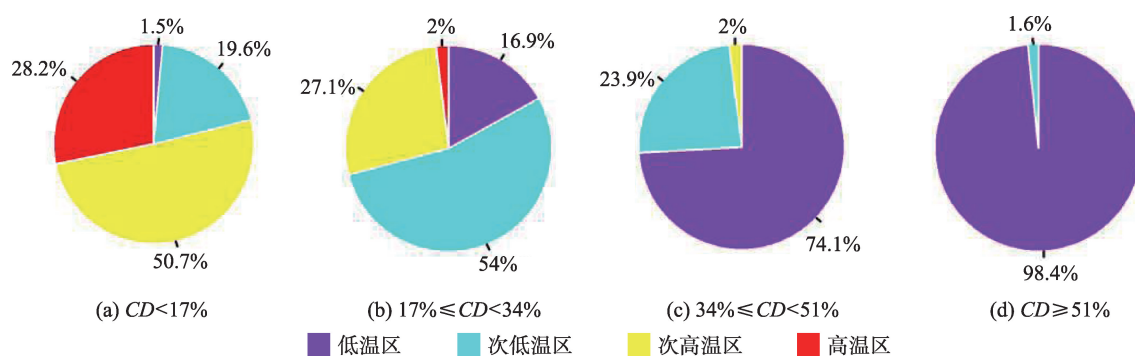


图9 BTFA\_R<sub>50</sub>的4个温度区中建筑物数量在各自冠层密度分组中的比例

Fig. 9 Building frequencies for each canopy density quartile observed in different temperature zones of BTFA\_R<sub>50</sub>

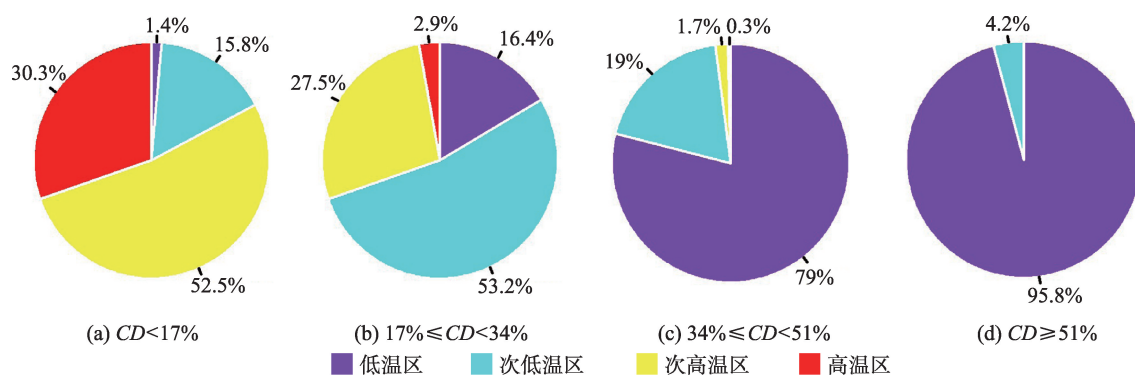


图10 BTFA\_R<sub>300</sub>的4个温度区中建筑物数量在各自冠层密度分组中的比例

Fig. 10 Building frequencies for each canopy density quartile observed in different temperature zones of BTFA\_R<sub>300</sub>

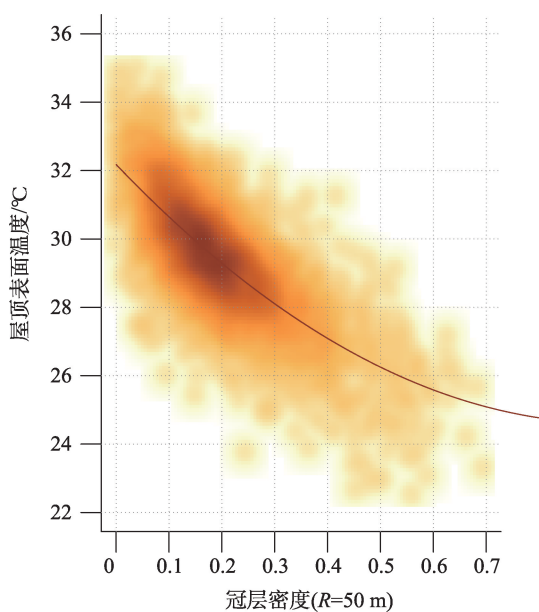


图11 BTFA\_R<sub>50</sub>冠层密度与屋顶表面温度的高密度散点图与非线性拟合

Fig. 11 Smoothed scatter plot and nonlinear curve fitting of CD & RST in BTFA\_R<sub>50</sub>

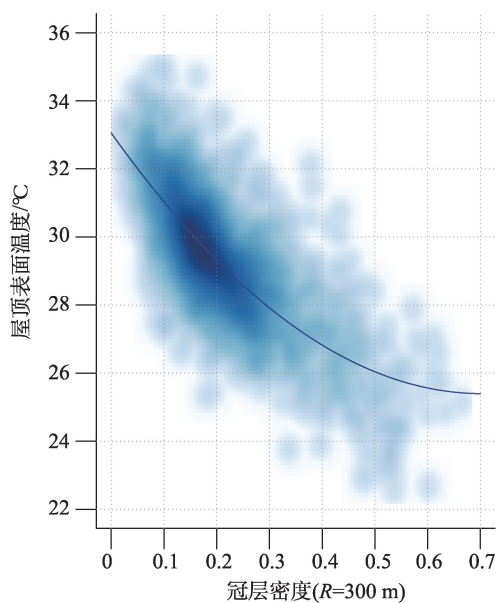


图12 BTFA\_R<sub>300</sub>冠层密度与屋顶表面温度的高密度散点图与非线性拟合

Fig. 12 Smoothed scatter plot and nonlinear curve fitting of CD & RST in BTFA\_R<sub>300</sub>

示,观察曲线的变化趋势,在区间内是单调递减的,但其下降趋势会随着冠层密度的增大而减缓,并且当冠层密度达到一定程度时会接近其降温能力的极限。图 11 显示冠层密度从 0 增加到 0.4 时,曲线下降较快,当冠层密度大于 0.4 时,曲线趋于平缓,并且当冠层密度从 0 增加到 0.4 时,温度下降了 5.41 ℃(表 1),据此推断,在楼间尺度上,周围的冠层密度达到 40% 时降温效果最佳。图 12 显示冠层密度在 0 到 0.3 之间时,曲线下降较快,当冠层密度大于 0.3 时,曲线趋于平缓,并且当冠层密度从 0 增加到 0.3 时,温差已经达到 5.44 ℃(表 1),与楼间尺度上冠层密度 40% 时的温差相近,据此推断,在街区尺度上,周围的冠层密度达到 30% 时已经起到最佳的降温效果。因此,在楼间尺度上冠层密度达到 40%、在街区尺度上冠层密度达到 30% 时,分别达到各自尺度上的降温能力最优值。结合上一步探索性分析的结果,这一发现为科学合理规划城市建筑区域的绿地资源提供了有益借鉴。

利用回归模型的点预测功能,比较两个尺度下不同的冠层密度对屋顶表面温度的降温能力。表 1 显示,在所有冠层密度区间上,街区尺度的降温程度

表 1 2 个尺度在不同冠层密度区间的降温程度比较

Tab. 1 Comparison of cooling amplitude between two scales in different canopy density intervals (℃)

冠层密度区间	降温程度 (BTFA_R <sub>50</sub> )	降温程度 (BTFA_R <sub>300</sub> )	温差
0~10%	-1.68	-2.18	0.50
0~20%	-3.15	-3.99	0.84
0~30%	-4.39	-5.44	1.05
0~40%	-5.41	-6.52	1.11
0~50%	-6.20	-7.24	1.04
0~60%	-6.78	-7.59	0.81

表 2 BTFA\_R<sub>50</sub>和 BTFA\_R<sub>300</sub>的 OLS、SLM、SEM 模型估计与检验结果对比

Tab. 2 Comparison of the statistics of OLS, SLM, and SEM models between two scales

	BTFA_R <sub>50</sub>			BTFA_R <sub>300</sub>		
	OLS	SLM	SEM	OLS	SLM	SEM
Intercept	31.85***	8.97***	30.60***	32.27***	8.48***	31.88***
Canopy density	-12.52***	-4.92***	-6.12***	-14.19***	-4.34***	-12.37***
Spatial lag( $\rho$ )		0.73***			0.74***	
Spatial error( $\lambda$ )			0.83***			0.76***
R <sup>2</sup>	0.57	0.87	0.88	0.56	0.84	0.85
LogL	-8290.86	-5492.41	-5730.16	-8341.49	-6087.24	-6132.52
AIC	16 585.7	10 993	11 468	16 687	12 182	12 273

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示 0.001、0.01、0.05 的显著性水平。

均高于楼间尺度上的降温程度,平均温差 0.89 ℃。说明当冠层密度相同时,不同尺度的面积单元对中心点建筑物温度的影响不同,较大尺度的面积单元对中心点建筑物温度的改善作用更显著。这主要是由于在相同的冠层密度下,较大尺度的面积单元中冠层的覆盖面积更大,植被的光合作用和蒸发蒸腾作用更强烈,改善了周围空气质量,降低近地面大气的保温作用,改变了辐射传输过程,减少城市可吸收的短波辐射,也有利于地面长波向外辐射,从而使整体热环境状况得以改善。这支持了前人研究中的结论:城市公园和绿地作为降温元素,对温度的影响可以超越自身空间范围延伸到数百米外的建筑区域<sup>[26]</sup>。

### 4.3 树冠降温贡献分析

对建筑物屋顶温度与 2 个尺度下的冠层密度分别进行 OLS、SLM 和 SEM 回归统计,结果如表 2 所示。

表 2 中可以看出,与 SLM 和 SEM 相比 OLS 模型的拟合效果较差,只能解释约 57% 和 56% 的 RST 变异性。其原因可能是 OLS 要求模型残差在空间上是独立的,然而城区热环境往往具有空间上的连续性和相关性,因此应用 OLS 模型评估植被冠层的降温贡献存在一定缺陷。对 OLS 模型的残差做空间依赖性检验(表 3),发现 2 个尺度下 OLS 模型残差的 Moran's I 分别为 0.63 和 0.68 且均在 0.001 水平下显著,表明 OLS 模型的残差存在显著的空间依赖性,并不能满足 OLS 的适用条件。而 SLM 和 SEM 模型引入空间自相关项,有利于更好地描述变量之间的空间模式,拟合效果大大优于 OLS 模型,这充分说明了在城区热环境相关研究中考虑空间自相关的必要性。

对比 SLM 和 SEM 模型统计结果(表 2)可以发

表3 OLS模型空间依赖性检验  
Tab. 3 Diagnostics for spatial dependence  
of the OLS model

统计量	统计值 (BTFA_R <sub>50</sub> )	统计值 (BTFA_R <sub>300</sub> )
Moran's I (error)	0.63***	0.68***
LM-lag	4591.10***	4800.10***
LM-error	4000.10***	4707.90***
Robust LM-lag	823.70***	137.70***
Robust LM-error	232.73***	45.55***

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示0.001、0.01、0.05的显著性水平。

现,SLM的空间滞后项回归系数和SEM的空间误差项回归系数均在0.001显著性水平下,说明相邻地区建筑物热状态对该点建筑物的温度变化具有显著的正向影响。尽管拉格朗日检验的各项统计值均通过0.001水平下的显著性检验,但在不同尺度下,SLM的自然对数似然函数值LogL均大于相应的SEM的值,并且SLM的AIC值均小于相应的SEM的值,说明SLM模型的拟合效果更好,更适用于评价植被对城区热环境的降温作用。同时,在楼间尺度和街区尺度上,SEM的冠层密度回归系数远小于SLM的冠层密度回归系数,这说明SEM对于植被冠层的降温作用存在一定程度的高估。这对其它城区热环境模型研究具有一定的参考价值。

SLM模型统计结果表明:① BTFA\_R<sub>50</sub>和BTFA\_R<sub>300</sub>的冠层密度系数分别为-4.92和-4.34,均通过0.001的显著性水平,即在楼间尺度和街区尺度上,冠层密度每变化1个单位,将使屋顶表面温度分别变化-4.92和-4.34个单位,说明在建筑物周围种植冠层稠密的乔木是有效的降温手段;② BTFA\_R<sub>50</sub>和BTFA\_R<sub>300</sub>的空间滞后系数分别为0.73和0.74,均通过0.001水平的显著性检验,说明两个尺度上的屋顶表面温度变化不仅受到周围植被冠层密度的影响,还与相邻地区的建筑物热状态有关,即受到周围热环境状况的影响;③ 由于城区温度变化是环境中众多因素联合作用的结果,仅采用单变量作为影响因素难免存在一定偏差<sup>[27-28]</sup>。同时,由于城市环境的复杂性,考虑所有影响因素是不切实际的。本文充分权衡模型的全面性和复杂度,着重考虑冠层三维结构对温度的影响,将其它因素概括为一个整体,作为自相关项纳入回归模型,有效解决了上述问题,对于其它空间变量间关系分析研究具有一定的借鉴意义。

5 结论与展望

当前城市热环境研究大多基于遥感影像开展,受影像分辨率限制,难以精确描述地物细节;同时,影像中缺乏三维结构信息,因此在中小尺度上定量研究冠层结构对建筑物温度的影响仍然具有一定挑战性。针对此问题,本文使用机载LiDAR获取的三维植被冠层数据,分别从较大范围的街区尺度和精细的楼间尺度下探讨了圣罗莎市屋顶温度与冠层结构参数之间的定量关系,分析了不同尺度下植被冠层的降温能力,并对树冠的降温贡献进行了评估。主要研究结论如下:

(1)植被对建筑物的温度调控作用与建筑物周围一定范围内的冠层密度有显著关系:当冠层密度达到17%时,能对温度变化起到初步的负向推动作用;当冠层密度在楼间尺度下高于40%、在街区尺度下高于30%时,能最大限度发挥植被的温度调控功能,达到降温最优效果。

(2)当冠层密度相同时,植被冠层在两个尺度上表现出不同的降温能力:随着冠层密度的增加,屋顶温度差异在街区尺度上要高于楼间尺度,平均温差0.89℃,因此在中小尺度上规划配置绿地资源时应综合考虑二者分布。

(3)空间滞后系数在楼间尺度和街区尺度上分别高达0.73和0.74,周围建筑物热状态的正向溢出效应明显,即中小尺度下的建筑物温度变化不仅与其周围的冠层密度相关,还受到周围整体热环境状况的影响,这说明了在研究地理问题时考虑变量间空间效应的必要性。

本文研究思路与方法对于合理规划城区绿地资源建设具有一定参考价值,有利于发挥植被调控温度的最佳作用。需要指出的是,本文研究成果主要适用于与圣罗莎市具有相近气候类型和城市三维结构特征(低层独立式建筑为主)的城市区域,今后的研究拟考虑在不同的气候类型和城市三维结构的城市中开展,将更多的因素纳入BTFA框架,如屋顶特征(材料、坡度、坡向等)和社会经济数据等,以进一步完善相关研究。此外,本文使用的植被冠层数据是从土地利用和土地覆盖角度划分的植被类别,没有具体区分植被类型,未来可进一步分析不同的乔灌木类型及其结构特征与温度的关系,通过合理的群落结构设计,更好地发挥绿地调控温度的生态服务功能。



## 参考文献 (References):

- [1] Weng Q H, Lu D S, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,89(4):467-483.
- [2] Chen W, Zhang Y, Pengwang C Y, et al. Evaluation of urbanization dynamics and its impacts on surface heat islands: A case study of Beijing, China[J]. *Remote Sensing*, 2017,9(5):453-468.
- [3] Myint S W, Brazel A J, Quattrochi D A. The impact of distinct anthropogenic and vegetation features on urban warming[J]. *Landscape Ecology*, 2013,28(5):959-978.
- [4] Zhou W Q, Qian Y G, Li X M, et al. Relationships between land cover and the surface urban heat island: Seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution of land cover data on predicting land surface temperatures[J]. *Landscape Ecology*, 2014,29(1):153-167.
- [5] 马伟,赵珍梅,刘翔,等.植被指数与地表温度定量关系遥感分析——以北京市 TM 数据为例[J].*国土资源遥感*, 2010,22(4):108-112. [ Ma W, Zhao Z M, Liu X, et al. A quantitative analysis of the relationship between vegetation indices and land surface temperature based on remote sensing: A case study of tm data for beijing[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2010,22(4):108-112. ]
- [6] 林波荣.绿化绿化对室外热环境影响的研究[D].北京:清华大学,2004. [ Lin B R. Studies of greening's effects on outdoor thermal environment[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. ]
- [7] 汪丹. 高密度社区绿量分布及其热环境影响研究[D].北京:北方工业大学,2017. [ Wang D. Studay on green quantity distribution and its thermal environment impact in hight density community[D]. Beijing: North China University of Technology, 2017. ]
- [8] 李英汉,王俊坚,李贵才,等.居住区植物绿量与其气温调控效应的关系[J].*生态学报*,2011,31(3):830-838. [ Li Y H, Wang J J, Li G C, et al. Research of the vegetation's cooling effect in city's residential quarter[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,31(3):830-838. ]
- [9] 李丹,岳彩荣.激光雷达在森林参数反演中的应用[J].*测绘与空间地理信息*,2011,34(6):54-58. [ Li D, Yue C R. The application of LiDAR in inversion of the forest parameters[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2011,34(6):54-58. ]
- [10] Nelson R, Krabill W, Maclean G. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984,15(3):201-212.
- [11] 李丹,庞勇,岳彩荣,等.基于 TLS 的单木胸径和树高提取研究[J].*北京林业大学学报*,2012,34(4):79-86. [ Li D, Pang Y, Yue C R, et al. Extraction of individual tree DBH and height based on terrestrial laser scanner data[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012,34(4):79-86. ]
- [12] Hudak A T, Lefsky M A, Cohen W B, et al. Integration of LiDAR and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,82(2-3):397-416.
- [13] Riano D, Valladares F, Condés S, et al. Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004,124(3-4):269-275.
- [14] Korhonen L, Korpela I, Heiskanen J, et al. Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(4):1065-1080.
- [15] Chen Z Y, Xu B, Devereux B. Urban landscape pattern analysis based on 3D landscape models[J]. *Applied Geography*, 2014,55:82-91.
- [16] Morabito M, Crisci A, Georgiadis T, et al. Urban imperviousness effects on summer surface temperatures nearby residential buildings in different urban zones of Parma[J]. *Remote Sensing*, 2017,10(1):26-42.
- [17] 胡德勇,乔琨,王兴玲,等.单窗算法结合 Landsat8 热红外数据反演地表温度[J].*遥感学报*,2015,19(6):964-976. [ Hu D Y, Qiao K, Wang X L, et al. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared data using moto-window algorithm[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015,19(6):964-976. ]
- [18] Qin Z H, Kamieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18):3719-3746.
- [19] Barsi J A, Barker J L, Schott J R, et al. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band Earth-sensing instrument[C]. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*. 2003.
- [20] Zhao Q S, Myint S W, Wentz E, et al. Rooftop surface temperature analysis in an urban residential environment [J]. *Remote Sensing*, 2015,7(9):12135-12159.
- [21] 芦蕊,马廷.中国市级人口增长的多因素空间建模分析[J].*地球信息科学学报*,2018,20(7):939-946. [ Lu R, Ma T. Spatially modeling of multiple factors for city-level population growth in China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(7):939-946. ]
- [22] Anselin L, Spatial econometrics: Methods and models[J]. *Economic Geography*, 1988,65(2):160-162.
- [23] 程好好,曾辉,汪自书,等.城市绿地类型及格局特征与地

- 表温度的关系——以深圳特区为例[J].北京大学学报(自然科学版),2009,45(3):495-501. [Chen H H, Zeng H, Wang Z S, et al. Relationships between the types, pattern characteristics of urban green space and land surface temperature: A case study in Shenzhen special economic zone [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009,45(3):495-501. ]
- [24] 高凯,秦俊,胡永红.城市居住区景观绿化格局改善热环境变化的遥感监测分析[J].生态环境学报,2012,21(3):464-469. [Gao K, Qin J, Hu Y H. Plant landscape patterns improvement of the thermal environment based on remote sensing in the urban residential areas[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012,21(3):464-469. ]
- [25] Zhao Q S, Wentz E A, Murray A T. Tree shade coverage optimization in an urban residential environment[J]. *Building & Environment*, 2017,115:269-280.
- [26] Dimoudi A, Nikolopoulou M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits[J]. *Energy & Buildings*, 2003,35(1):69-76.
- [27] 林荣平,祁新华,叶士琳,等.沿海河谷盆地城市热岛时空特征及驱动机制[J].生态学报,2017,37(1):294-304. [Lin R P, Qi X H, Ye S L, et al. Spatial-temporal characteristics of urban heat islands and driving mechanisms in a coastal valley-basin city: A case study of Fuzhou city[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(1):294-304. ]
- [28] 王美雅,徐涵秋.中国大城市的城市组成对城市热岛强度的影响研究[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1787-1798. [Wang M Y, Xu H Q. Analyzing the influence of urban forms on surface urban heat islands intensity in Chinese mega cities[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(12):1787-1798. ]