

引用格式: 冯叶涵, 陈亮, 贺晓冬. 基于百度街景的SVF计算及其在城市热岛研究中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(11): 1998-2012. [Feng Y H, Chen L, He X D. Sky view factor calculation based on Baidu street view images and its application in urban heat island study [J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(11): 1998-2012.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2021.200747

基于百度街景的SVF计算及其在城市热岛研究中的应用

冯叶涵^{1,2}, 陈亮^{1,2*}, 贺晓冬^{3,4}

1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241; 2. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241;
3. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021; 4. 清华海峡研究院, 厦门 361006

Sky View Factor Calculation based on Baidu Street View Images and Its Application in Urban Heat Island Study

FENG Yehan^{1,2}, CHEN Liang^{1,2*}, HE Xiaodong^{3,4}

1. Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China; 4. Cross-strait Tsinghua Research Institute, Xiamen 361006, China

Abstract: The Sky View Factor (SVF) is one of the most important indicators to characterize urban radiation fluxes and urban thermal environment. Therefore, it is a key morphological parameter to study the Urban Heat Island (UHI) effect. Studies have shown that SVF has a strong relationship with UHI intensity. Nevertheless, the relationships found can be contradictory. This is primarily due to the fact that the cases studied are often in different regions with different climatic conditions. In addition, the influences of trees are sometimes ignored due to the lack of vegetation data or the limitation of calculating methods. How to calculate SVF quickly and accurately is important to urban climate research. SVF is typically calculated by four types of methods: fisheye photo methods, 3D GIS methods, GPS methods, and street view image methods. Compared with the other types of methods, calculating SVF using street view images has many advantages, such as widely available data, low cost, high efficiency, and the ability to consider the influences of trees and other obstacles. On the one hand, street view images provide the possibility for fast and accurate calculation of SVF in large-scale areas. On the other hand, the street view image method is still at its developing stage and more work needs to be done to verify its application in various urban environments. In this study, we proposed an automatic SVF calculation method

收稿日期 2020-12-09; 修回日期: 2021-03-28.

基金项目 国家自然科学基金项目(41805089); 上海市自然科学基金资助项目(18ZR1410700); 上海市城市更新及其空间优化技术重点实验室开放课题资助(201830207); 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室主任基金(KLGIS2019C01); 河北省省级科技计划资助(18964201H)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41805089; Natural Science Foundation of Shanghai, No.18ZR1410700; Open Projects Fund of Key Laboratory of Shanghai Urban Renewal and Spatial Optimization Technology, No.201830207; Director's Fund of Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University, No. KLGIS2019C01; S&T Program of Hebei, No.18964201H.]

作者简介 冯叶涵(1997—), 女, 重庆人, 硕士生, 主要从事城市气候、遥感研究。E-mail: 51193901040@stu.ecnu.edu.cn

***通讯作者** 陈亮(1982—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副研究员, 主要从事城市气候研究。E-mail: lchen@geo.ecnu.edu.cn

using street view images and deep learning algorithms, and then applied the method to the UHI study in the city center of Shanghai. Baidu static panoramas and Deeplabv3+ were used to detect sky range while MATLAB code was written to calculate SVF. A Landsat-8 OLI / TIRS image was also used to retrieve land surface temperature at street level in the study area. Based on the Local Climate Zones (LCZ) scheme, we combined large-scale SVF value with the land use and building morphology to examine the relationship between SVF and UHI intensity. The results showed that Deeplabv3+ can detect the sky and non-sky range effectively in different scenarios ($MIOU=91.64\%$). The SVF calculated using the proposed method was in good agreement with that calculated using fish-eye photos ($R^2=0.8869$). The LCZ scheme provides new insights for the relationship between SVF and UHI. For LCZ5 and LCZ1, the highest correlation coefficients were 0.68 and -0.79, respectively. The proposed method was shown to be applicable in high-density and complex urban environments. In addition, the calculation of large-scale continuous SVF provides the possibility for zonal understandings of the UHI effect based on the LCZ scheme.

Key words: sky view factor; Baidu street view; image segmentation; deep learning; local climate zones; urban heat island; street canyon; Shanghai

***Corresponding author:** CHEN Liang, E-mail: lchen@geo.ecnu.edu.cn

摘要 SVF(Sky View Factor)是描述城市辐射和城市热环境的有效指标之一,是研究城市热岛的重要几何参数,如何快速准确地计算大规模的SVF对城市形态和城市气候研究具有重要意义。已有研究发现,SVF与热岛强度具有强烈关系,但以往研究存在争论和局限性。本研究采用百度全景静态图,基于深度学习,使用Deeplabv3+模型对天空范围进行探测,提出一种SVF自动计算方法,并用该方法计算上海市中心城区的SVF分布。本研究引入局地气候分区(Local Climate Zones, LCZ),将大规模、精确的SVF结合每个地块具体的土地利用和建筑情况进一步用于SVF与热岛强度的关系研究。实验结果表明,在不同场景下,Deeplabv3+模型都能对天空范围进行有效探测($MIOU=91.64\%$);本文方法计算的SVF与鱼眼照片计算的SVF具有令人满意的一致性($R^2=0.8869$);在不同区域,SVF与热岛强度的关系不同,对于LCZ5开敞中层建筑,最高相关系数为0.68,对于LCZ1紧凑高层建筑,最高相关系数为-0.79。本文SVF计算方法在上海市中心城区的成功应用,验证了在中国高密度和复杂的城市环境中使用街景图像计算大规模SVF的可行性,此外本文基于区域化研究思想进一步研究了SVF与城市热岛的关系,弥补了以往此类研究的不足。

关键词 天空可视因子;百度街景;图像分割;深度学习;局地气候分区;城市热岛;街道峡谷;上海市

1 引言

SVF(Sky View Factor),又称天空可视因子,是指平面接收的辐射与整个半球环境发射的辐射之比,简单来说,SVF反映了人们在城市中可以看到天空范围比例。SVF是一个无量纲的参数,其值在0~1之间,0表示天空完全遮挡,1表示天空完全开阔^[1-2]。SVF作为城市辐射平衡的有效指标,它是研究城市气候、城市热岛影响以及城市热舒适度的重要几何参数^[3-6]。如何快速精确地计算SVF,对于理解城市形态与城市气候之间的关系具有重要意义。

目前,主要的SVF计算方法包括鱼眼照片方法、三维模拟方法、GPS方法、街景图像方法等。传统的鱼眼照片方法虽然可以提供精确、直接的SVF计算结果,但是对时间成本和人力成本要求较高,

同时受天气和人为影响大^[7-8]。三维模拟方法可以计算大空间尺度的连续SVF分布,但是三维城市建筑数据通常难以获取,而对树木和其它障碍物的建模则更加困难^[9-10]。GPS方法实现了实时测量,易与GIS平台结合,但是该方法的计算精度不高,尤其是在郊区偏差较大^[11-12]。

近年来,随着空间定位科学的发展和大数据技术的广泛应用,街景图像已经可以覆盖世界上大部分城市地区^[13]。通过使用街景图像,可以在有街景图像的任何位置构建人工合成鱼眼图像,这为计算SVF提供了新的思路。相较于之前的SVF计算方法,基于街景图像的SVF计算方法以其数据易获取、低成本、高效、可以考虑树冠和其它障碍物影响等优势,为快速精确地计算大规模区域的SVF提供了可能性。国内外研究人员围绕“利用街景图像计算SVF”这一主题开展了一定的研究。Carrasco等^[14]

最先使用谷歌街景估计SVF和太阳辐射,结果表明估计的SVF值在可接受的精度范围内。Liang等^[15]、Gong等^[16]使用谷歌街景,结合深度学习网络计算SVF,用以表征城市的街道峡谷特征和SVF空间分布。Ariane等^[17]使用谷歌街景,结合Sobel Filter和Flood Fill算法识别天空范围,计算了全球15个城市的SVF分布,丰富了全球城市冠层参数(Urban Canopy Parameters, UCPs)数据库。这些研究表明了使用街景图像计算大规模SVF的巨大潜力,甚至可以覆盖全球范围。但是,目前的研究主要集中在街道特征简单的城市,它们大多具有相对简单的建筑几何特征和街道网络结构。实际上中国的大部分城市,其街道特征复杂,建筑物高度、密度差异巨大,天空被更多路牌、电线、路灯、树冠遮挡,天空环境也更加复杂。因此,如何有效应对中国城市复杂的街道和天空环境仍然是亟待解决的问题。

SVF作为城市几何形态的重要指标,与热岛强度具有强烈关系,但前人的研究结果存在一些争论。Oke^[18]在20世纪80年代使用物理模型实验的方法得出结论,认为SVF与热岛强度呈一定线性关系。Upmanis^[19]则认为由于日照与SVF之间的相反作用,SVF与城市热环境无显著关系。Unger等^[20]认为SVF与热岛强度有很强的相关性,但不是简单的线性关系,不同区域结果不同。张海龙等^[21]基于3D建筑物数据计算SVF,并用于Adelaide的城市热岛应用研究,发现白天SVF与热岛强度呈正相关($R=0.4\sim0.6$),夜间SVF与热岛强度呈负相关($R=-0.8$)。Chen等^[10]选取香港某一典型区域研究SVF与城市热岛的关系,发现白天SVF与城市内部温差成反比:在100 m半径范围内,SVF下降0.15可能导致1℃的温度升高($R^2=0.6802$)。王成刚等^[22]结合夏季北京地区Landsat卫星资料和数字高程资料分析得到SVF与气温呈明显的负相关关系($R=-0.6$)。Shata等^[23]对埃及一所大学校园内的18个点进行了研究,以探讨SVF与热环境的相关性,选择了夏季、冬季不同的两天,初步考虑了SVF在不同季节中的变化对结果的影响,实验结果表明:在夏季,SVF与平均气温呈显著负相关($R=-0.57$);在冬季,SVF与平均气温没有显著关系。Guo等^[24]以重庆市为例,初步考虑了不同区域SVF与地表温度的关系,研究结果表明在白天SVF与地表温度之间存在显著正相关关系。研究人员在不同时间、不同区域有时会得到完全相反的结论。在以往的此类

研究中,研究人员大多仅在特定区域内选用少量观测点采样,测量SVF与城市热岛强度,并试图由此推广得到整个城市区域的结论。但实际上,少量点的观测结果不具有稳定性,在整个城市的空间尺度上,城市中的建筑几何形态和街道结构更是具有很大的差异。SVF与热岛强度之间的关系是比较复杂的,有一定的规律可循,但城市中不同区域可能会呈现出不同的趋势,因此需要结合不同区域的实际情况进行具体分析。此外,树木是影响SVF的重要因素,通常采用的基于城市3D数据估算SVF的方法对于树冠的精确建模较为困难并且工作量巨大,因此大多没有考虑树木的影响。

综上所述,目前使用街景图像计算SVF的标准工作流程还在探索阶段,需要做大量工作来验证该方法的可行性,进而推动城市形态与城市气候的研究,同时SVF与城市热岛的关系研究存在一定争论和局限性。因此,本文提出一种研究方法,使用百度全景静态图作为数据源,结合深度学习,应用Deeplabv3+模型对复杂的天空场景进行分割,旨在提出一种快速、精确、自动的SVF计算方法,通过实地拍摄鱼眼照片,检验该方法的准确性,并应用该方法计算上海市中心城区的SVF,探索在中国高密度和复杂的城市环境中使用街景图像计算大规模SVF的可行性;本研究还提出了一种基于局地气候分区(Local Climate Zones, LCZ)的区域化方法,用于探讨SVF与城市热岛强度的关系。

2 研究方法

本研究的总体技术路线如图1所示。

2.1 天空范围探测

基于街景图像计算SVF,其精度取决于能否从图像中尽可能准确地探测出天空范围,这涉及到图像分割技术,这也是传统基于鱼眼照片计算SVF过程中最耗时的部分。Deeplabv3+是Deeplab系列的最新版本,它沿用了之前模型的空洞卷积算法、空洞空间卷积池化金字塔(Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP),将Deeplabv3作为encoder,添加decoder得到新的模型。与之前提出的语义分割模型相比,Deeplabv3+在尽量减少空间细节丢失的基础上增加感受野(Receptive Field),让每个卷积输出都包含较大范围的信息,并且使用

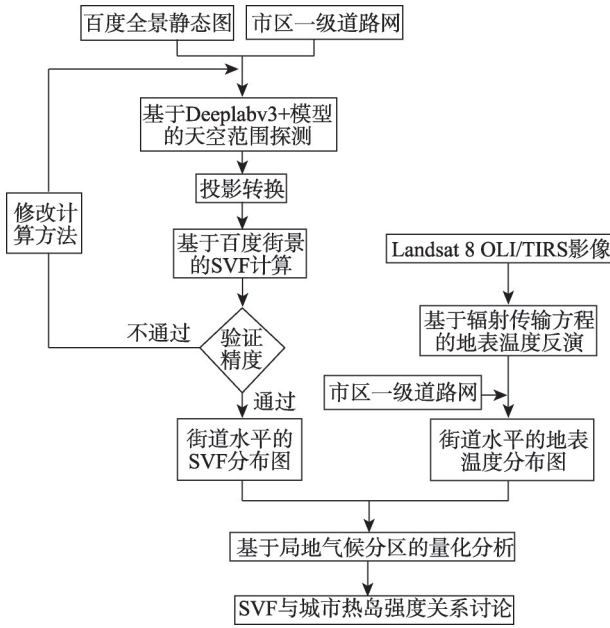


图 1 技术路线

Fig. 1 Flow chart of the research method

改进的 ASPP 模块实现多尺度特征提取, 获得了更丰富的全局和局部特征, 同时引入深度可分离卷积, 既保持了性能, 又大大减少计算量。健壮的 encoder-decoder 结构可以更好恢复物体的边缘信息^[25-28]。Deeplabv3+ 无论是在速度还是精度上都树立了新的技术水平, 在 Cityscape 上取得了 82.1% 的高精度 (Cityscape 是一个用于城市市场语义分割的数据集, 它记录了 50 个城市在不同季节的街道场景)。因此, 本研究输入数据集为百度全景静态图, 使用 Deeplabv3+ 模型实现天空范围探测, 输出的分类包含两类 (天空和非天空), 输出的分割结果与输入图像的尺寸相同。本研究的设备采用配置了 E5-2650v4 CPU 和 Tesla K80 GPU 加速器的计算机。

2.2 投影转换

全景静态图像是等距投影的矩形图像, 由于 SVF 的计算基于具有等角投影的鱼眼图像, 因此要将平面直角坐标下的全景静态图像转换到极坐标^[29]。这里需要说明的是, 虽然极坐标中的点应该使用半径与角度表示, 但是由于极坐标图像的展示还是在平面直角坐标系下, 所以在进行构造极坐标图像的时候, 其最终生成的图像仍然使用平面直角坐标系表示。通过构造鱼眼图像上的像素 (x_f, y_f) 和全景图像上 (x_p, y_p) 之间的关系来实现这种投影转换, 转换关系如下:

$$\begin{cases} x_f = \frac{W_p}{2\pi} + \frac{R \cdot y_p}{H_p} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot x_p}{W_p}\right) \\ y_f = \frac{W_p}{2\pi} + \frac{R \cdot y_p}{H_p} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot x_p}{W_p}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x_f, y_f) 为鱼眼图像上的像素, (x_p, y_p) 为全景图像上的像素, W_p 和 H_p 分别是全景静态图像的宽和高; $R = W_p/2\pi$ 是鱼眼图像的半径, 假设鱼眼图像的中心坐标为 (R, R) 。根据转换公式合成鱼眼图像步骤如下: 首先, 根据全景静态图像的宽和高, 确定鱼眼图像的半径 R , 初始化一张像素值全为 0 的鱼眼图像; 然后从全景静态图像的起始点开始, 根据投影转换公式, 确定像素在极坐标系下的位置, 并将像素值赋给鱼眼图像对应位置的像素; 遍历全景静态图像的每一个像素, 对每个像素重复此过程, 直到完全构造出人工合成鱼眼图像。以上步骤通过 Python3.7 和 OpenCV 库实现。图 2 展示了投影转换的结果。

2.3 SVF 计算方法

有多种方法可以基于鱼眼图像计算 SVF, Steyn^[7]提出的等角投影是最常用的方法。将投影图像分成多个等宽的同心环, 然后将所有代表天空的环形部分相加, 得出 SVF 为:

$$SVF = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sin\left[\frac{\pi\left(i - \frac{1}{2}\right)}{2n}\right] \cos\left[\frac{\pi\left(i - \frac{1}{2}\right)}{2n}\right] \alpha_i \quad (2)$$

式中: n 是环的总数; i 表示第 i 个环; α_i 是第 i 个环中天空的角度宽度。

Johnson 和 Watson^[1]后来提出了 Steyn 方法的改进版本 (式 (2)), 即当 n 足够大时 ($n > 36$), 将 $\sin(\pi/2n)$ 近似于 $\pi/2n$ 。

$$SVF = \frac{1}{2\pi} \sin \frac{\pi}{2n} \sum_{i=1}^n \sin\left[\frac{\pi(2i-1)}{2n}\right] \left(\frac{p_i}{t_i}\right) \quad (3)$$

式中: n 为环的总数, i 为环的序号; (p_i/t_i) 是第 i 个环中天空像素与该环总像素的个数之比。

当 n 足够大时, 其近似值的影响可以忽略不计, 所以 Chapman 等^[8]对式 (3) 进一步改进:

$$SVF = \frac{\pi}{2n} \sum_{i=1}^n \sin\left[\frac{\pi(2i-1)}{2n}\right] \left(\frac{p_i}{t_i}\right) \quad (4)$$

本研究采用式 (4) 计算 SVF, 式中 n 为环的总数, i 为环的序号, (p_i/t_i) 是第 i 个环中天空像素与该环总像素的个数之比。该计算步骤通过编写 MATLAB 程序实现: 首先, 输入图像是经过图像分割后

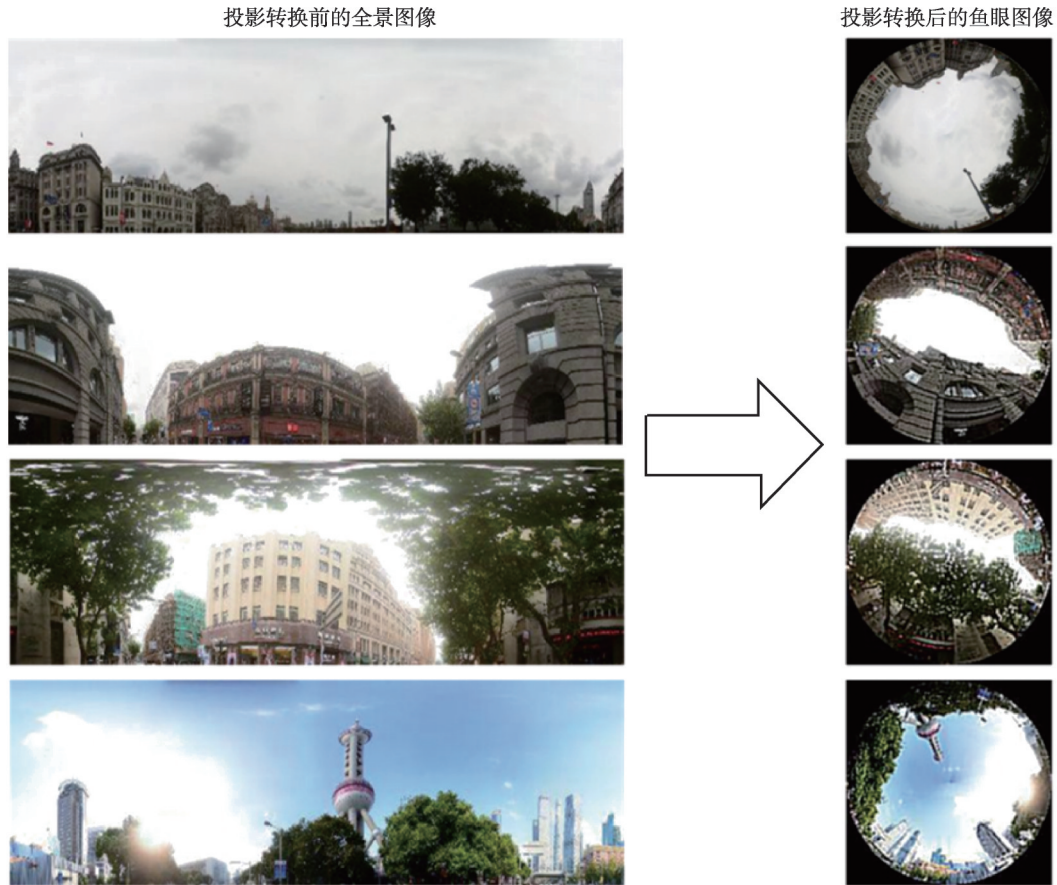


图2 投影转换结果

Fig. 2 Results of projection transformation

的人工合成鱼眼二值图像;然后,将人造鱼眼图像从中心开始分为等宽的 n 个同心环(本论文取 $n=40$);遍历每一个圆环,计算每个环中天空像素与该环总像素的比例;最后,SVF根据式(4),由每个圆环的天空像素比例相加得到。

2.4 地表温度的反演

本文使用无云的夜间 Landsat-8 OLI/TIRS 影像,基于辐射传输方程反演地表温度^[30-31],得到街道水平的连续地表温度。该算法认为卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_i 由3个部分组成:大气向上辐射亮度 L_u ;地面的真实辐射亮度经过大气层之后到达卫星传感器的能量;大气向下辐射亮度 L_d ,具体关系如下:

$$L_i = [\varepsilon L_r + (1 - \varepsilon) L_d] \tau + L_u \quad (5)$$

式中: L_i 是传感器接收到的热红外辐射亮度值, ε 为地表比辐射率, L_r 表示温度为 $T(K)$ 的黑体在热红外波段的辐射亮度, τ 为大气透过率, L_u 和 L_d 分别是大气向上辐射亮度和大气向下辐射亮度。其中 τ , L_u 和

L_d 可以通过 NASA 网站估算 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)。地表温度反演的具体流程可见文献[30]—[31]。

2.5 局地气候分区

局地气候分区(Local Climate Zones, LCZ)根据城市形态的物理特征,建立了标准化和量化的描述方法,包含10种建成景观类型和7种自然覆盖类型^[32]。LCZ采用地表特征分类的方法进一步量化了城市形态与城市热岛之间的关系^[33-34]。

本文基于区域化研究思想,将研究区域分为若干个等面积地块($1500 \text{ m} \times 1500 \text{ m}$),根据 WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) 提出的 LCZ 分类框架^[35],参考谷歌地图和百度街景,将每个地块中占比最大的 LCZ 类型确定为该地块的 LCZ 类型,结合每个地块具体的土地利用和建筑情况,进一步研究 SVF 与城市热岛的关系。LCZ 建成景观类型、类型样例和类型特征如表1所示,其它 LCZ 类型及特征可见文献[32]。

表1 LCZ建成景观类型、类型样例和类型特征^[32]
Tab. 1 Types, examples and characteristics of LCZ^[32]

| 建成景观类型 | 样例 | 类型特征 | 建成景观类型 | 样例 | 类型特征 |
|-------------|---|--|-------------|--|---|
| LCZ1 紧凑高层建筑 |  | 10层以上的密集高层建筑,少或无树木,地表覆盖多为硬质铺装,建筑材料为混凝土、钢材、石头和玻璃 | LCZ6 开敞低层建筑 |  | 1~3层开敞分布的低层建筑,地表覆盖多为可透水地面(低矮植被、树木),建筑材料为混凝土、钢材、石头和玻璃 |
| LCZ2 紧凑中层建筑 |  | 3~9层的密集中层建筑,少或无树木,地表覆盖多为硬质铺装,建筑材料为砖石、瓦片和混凝土 | LCZ7 轻质低层建筑 |  | 密集混合的单层建筑,几乎无树木,地表覆盖为夯实的土质路面,建筑材料为轻质建筑材质(木头、茅草和波纹状板材) |
| LCZ3 紧凑低层建筑 |  | 1~3层的密集低层建筑,少或无树木,地表覆盖多为硬质铺装,建筑材料为石头、砖、瓦片和混凝土 | LCZ8 大型低层建筑 |  | 1~3层开敞分布的低层大型建筑,几乎无树木,地表覆盖为不透水表面,建筑材料为钢材、混凝土、金属和石头 |
| LCZ4 开敞高层建筑 |  | 10层以上的低密度高层建筑,地表覆盖多为可透水地面(低矮植被、树木),建筑材料为混凝土、钢材、石头和玻璃 | LCZ9 零散建筑 |  | 自然环境中零散的中、小型建筑,地表覆盖为大量可透水面(低矮的植被、树木) |
| LCZ5 开敞中层建筑 |  | 3~9层的低密度中层建筑,地表覆盖多为可透水地面(低矮植被、树木),建筑材料为混凝土、钢材、石头和玻璃 | LCZ10 工业厂房 |  | 中低层工业建筑,几乎无树木,地表覆盖为不透水表面或夯实的土质路面,建筑材质为金属、钢材和混凝土 |

3 实验区概况与数据来源

3.1 实验区概况

上海位于中国华东地区,界于120°52′E—122°12′E, 30°40′N—31°53′N之间,是中国最大的经济中心,也是世界上人口最密集,建筑最密集的城市之一。土地面积6340.5 km²,2018年常住人口2423.78万人。上海属亚热带季风性气候,四季分明,日照充分,雨量充沛。该地区的地形相对平坦,平均海拔高出海平面约4 m。在过去的半个世纪中,上海经历了快速的城市化进程,直到2014年,上海城市建成区总面积已扩大到3124 km²,接近建成区土地阈值的60%。由于城市土地面积有限,特别是在高密度城市中,规划人员需要提高容积率以最大程度地利用城市土地,因此在上海中心城区,主要以20层以上的高层建筑为主,分布在狭窄的街道

两侧,呈现出一种城市街道峡谷特征。另一方面,由于近年来对城市生态环境的重视,上海城市绿化得到了显著改善,城区绿化率不断提高,城市环境呈现出紧致、高密度与高异质性共存的特征^[36]。在本研究中,选择上海市部分中心城区作为研究区域,如图3所示,位于121°25′E—121°30′E, 31°11′N—31°15′N,东西相距8.74 km,南北相距10.11 km,土地面积71.54 km²。

3.2 数据来源

3.2.1 街景图像的获取

目前,街景图像的主要提供商包括谷歌、百度和腾讯,街景图像可以通过API获取。在中国范围内,百度街景覆盖了中国大部分的城市地区,此外,百度提供水平方向最大视场角为360°,垂直方向最大视场角为180°的全景静态图,省去了研究人员进行全景拼接处理的过程^[37]。图像尺寸一定程度上

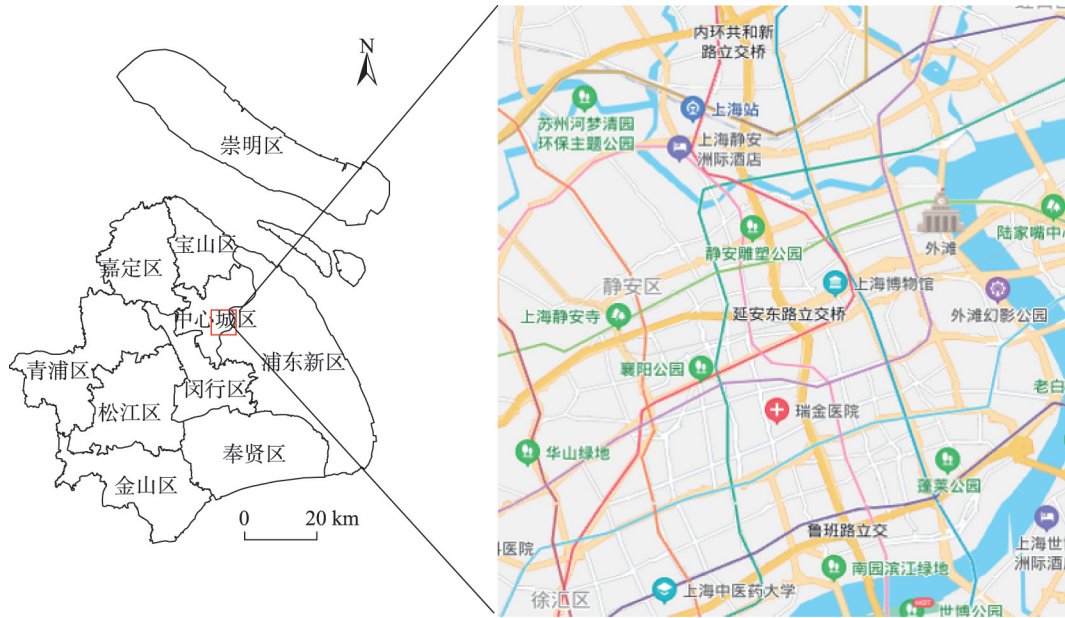


图3 上海市中心城区研究区域示意

Fig. 3 Study area of Shanghai downtown

会影响处理的精度和速度,Zeng等^[38]采用了百度街景图像作为数据源,对比了7种百度全景静态图的尺寸对结果的影响,最后认为图像大小为600像素(px)×300像素(px)时,在处理精度和速度上表现良好。因此,本研究通过百度API^[39],设置视场、图像大小、经纬度位置等获取上海市的全景静态图像。下为一条访问全景静态图像的URL:

<http://api.map.baidu.com/panorama/v2?ak=E4805d16520de693a3fe707cdc962045&width=600&height=300&location=121.497641,31.240424&fov=360>

包含的信息有图像尺寸600 px×300 px,位置121.497 641, 31.240 424,水平视场(Field of View, FOV)为360°。图4展示了获取的百度全景静态图示例,观察原始图像时发现,百度街景的采集车也



图4 2017年9月上海市百度全景静态图示例

Fig. 4 Example of the retrieved Baidu static panorama in Shanghai in September 2017

在图像中,而大多数采集车为白色,与天空的主要特征相似,且本研究主要关注的是天空范围,所以本研究只保留图像上半部分的天空区域,以保证分割精度和加快图像处理速度。图像按照上述技术指标处理后,大小为600 px×150 px。

3.2.2 道路网及采样点

图5展示了中国上海市中心城区的市区一级道路网,并以一个小区域为例,观察采样点,沿着道路网,以50 m间隔进行采样。对于每个采样点,通过百度API请求访问全景静态图像。上海市中心城区的百度全景静态图像采集时间为2017年9月,研究区域内共获取10 526张图像,剔除空

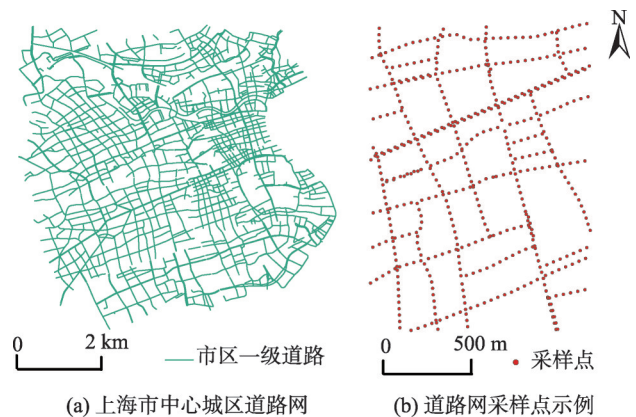


图5 上海市中心城区道路网及采样点示例

Fig. 5 Road network and sampling points in Shanghai downtown

值和隧道里的图像后,有 10 438 张图像用于后续处理和计算。

3.2.3 鱼眼照片的获取

鱼眼照片方法通过使用鱼眼镜头实地拍摄鱼眼照片,从而计算SVF,其能够尽可能记录真实场景,包含树冠、其他遮挡物(如电线、电灯、路牌)等详细信息,提供最精确的SVF计算结果,将鱼眼照片方法的结果作为参考值以验证SVF计算结果的准确性在以往的研究中得到广泛使用^[10,16,38],是公认有效的验证方法。为了验证本文SVF计算方法的有效性,我们在上海市中心城区选取了一块典型区域,采样点沿市区一级道路间隔50 m分布,用鱼眼镜头实地拍摄了25个采样点的鱼眼照片。鱼眼照片是使用装有鱼眼镜头的相机拍摄的,因为拍摄街景图像的摄像机安装在车顶,离地大约2 m,所以为了尽可能接近街景图像拍摄时的高度,实验中采用了一个三脚架,将鱼眼相机固定在离地2 m拍摄。图6展示了拍摄鱼眼照片的区域和采样点,同时展示了鱼眼镜头照片和由街景图像构造的人工合成鱼眼照片的直观对比。

3.2.4 Landsat-8 OLI/TIRS影像

随着遥感技术的发展,热红外遥感技术的应用能够有效克服气象观测数据的局限性,并能够提供有效直观的地表温度空间分布,这使得热红外遥感技术在大范围热岛效应研究中发挥着突出优势。为了进一步研究 SVF 与城市热岛的关系,本文使用无云的夜间 Landsat-8 OLI/TIRS 影像,基于辐射传输方程反演地表温度,得到研究区范围内街道水平的连续地表温度。大面积连续的 SVF 和地表温度将有助于区域化研究。本研究的数据信息如表 2 所示。

4 实验结果及分析

4.1 不同场景下的SVF计算结果

在以往基于鱼眼图像计算 *SIF* 的过程中,受制于拍摄图像时的天气条件,只有当天空处于阴天无云的条件下,才能计算出精确的 *SIF*。但是全景静态图是在不同的天气条件下拍摄的,场景更加复杂,表3展示了6种场景下的 *SIF* 计算结果。从结果来看,在开阔无云、开阔多云、蓝天白云、大树冠

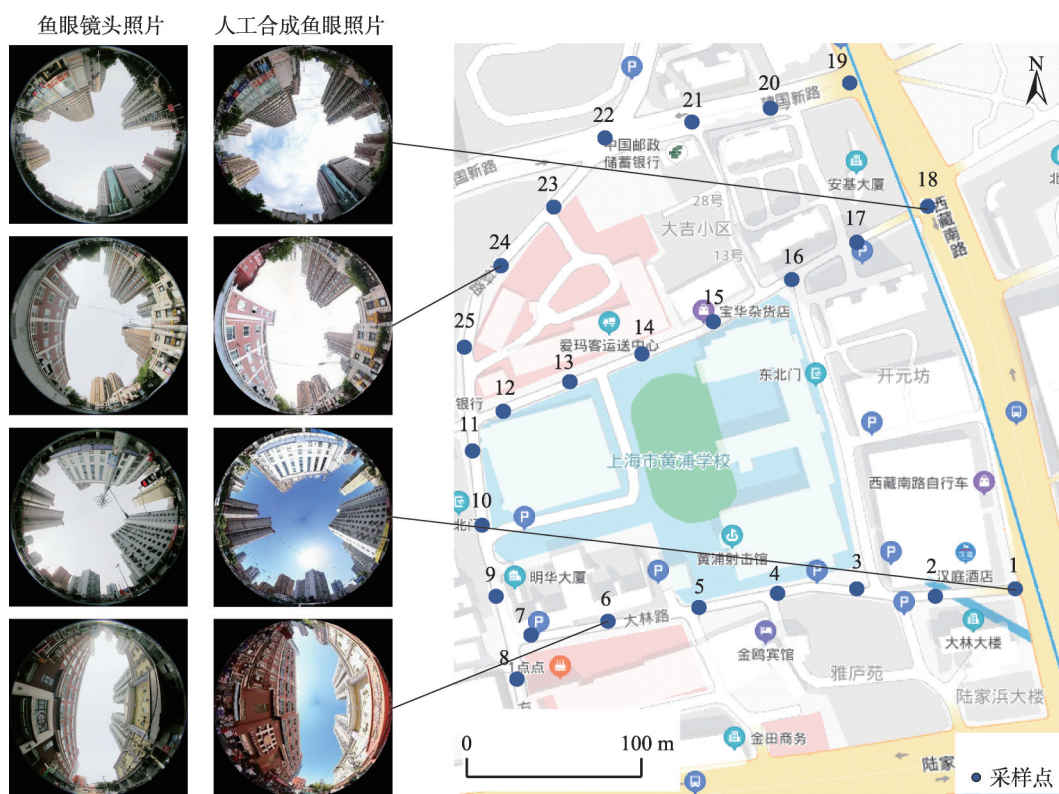




















图6 拍摄鱼眼照片的区域和采样点分布

Fig. 6 Map of the study site and positions of the sampling points

表2 数据信息
Tab. 2 Information of data

| 数据名称 | 数据来源 | 数据时间 | 数据说明 |
|------------------------|---|----------|---|
| 百度全景静态图 | 百度地图开放平台 ^[39] (http://lbsyun.baidu.com/index.php?title=viewstatic) | 2017年9月 | 水平视场角360°,垂直视场角180°,图像大小为600 px×300 px,研究区内有10 438张图像用于后续处理和计算 |
| 道路网 | 百度地图开放平台 ^[39] (http://lbsyun.baidu.com/index.php?title=webapi/roadinfo) | 2019年11月 | 上海市中心城区的市区一级道路网,百度全景静态图采样点沿道路网以50 m间隔分布 |
| 鱼眼照片 | 鱼眼镜头实地拍摄 | 2020年6月 | 使用装有鱼眼镜头(Nikon Fisheye Converter FC-E8 0.21)的相机(Nikon coolpix 4500)拍摄,鱼眼相机固定在离地2 m,用于本文SVF计算方法的验证 |
| Landsat- 8 OLI/TIRS 影像 | 地理空间数据云 ^[40] (http://www.gscloud.cn) | 2017年8月 | 采集时间为2017年8月25日02:24:49,云量0.4,行列号38/118,中心经纬度121.939 35,31.742 15,用于地表温度的反演 |

表3 不同场景下的SVF计算结果
Tab. 3 SVF calculation results in different scenarios

| 场景 | 原始图像 | 天空范围探测结果 | 投影转换 | SVF |
|-------|---|--|---|-------|
| 开阔无云 |  |  |  | 0.347 |
| 开阔多云 |  |  |  | 0.606 |
| 蓝天白云 |  |  |  | 0.638 |
| 大树冠遮挡 |  |  |  | 0.395 |
| 桥梁遮挡 |  |  |  | 0.310 |
| 过度曝光 |  |  |  | 0.556 |

遮挡、桥梁遮挡的天空条件下,天空的分割效果都很理想(MIOU在本研究数据集上达91.64%,处理10 438张图像花费12 min),这样计算的SVF结果更加精确;在过度曝光时,由于在晴天太阳光线强烈,导致图像质量因过度曝光而严重受损,影响了天空的分割效果,在一些呈现高亮特征的建筑物区域有天空和非天空范围的误判。但是,过度曝光的图像在所有图像中占比很小,不到1%,因此对于最后大规模SVF计算结果的影响非常有限。

4.2 SVF计算结果检验

为了验证本文SVF计算方法的有效性,我们用2种方法计算SVF值,作进一步比较:一种是鱼眼照片天空范围手动探测——实地拍摄鱼眼照片通过SVF计算工具BMSky-view得到SVF值^[41](标准值);另一种是人工鱼眼照片天空范围自动探测——人工合成鱼眼照片通过本论文提出的SVF计算方法得到SVF值(实验值)。图7展示了由2种方法计算SVF值的比较结果。

从图7的结果可以看到,二者的拟合优度 R^2 达0.8869,均方根误差为0.026。SVF的计算结果是否精确,关键在于尽可能精确地确定出天空范围,从4.1的结果中,天空范围自动探测在不同场景下都表现出好的效果,因此计算出的SVF值与天空范围手动探测计算的SVF值表现出很好的一致性,其微小差异可能来自于二方面:①由于拍摄街景照片和鱼眼照片的时间不同导致植被状况不同;②城市发展导致建筑物变化。总的来说,通过和鱼眼照片对比,验证了本研究提出的SVF计算方法的准确性,因此可以在高密度和复杂的城市环境中使用该方法快速计算大规模区域的SVF值。

4.3 SVF在城市热岛强度计算中的应用

4.3.1 上海市中心城区SVF和地表温度空间分布

在本研究中,我们使用基于百度街景和深度学习的SVF自动计算方法,得到上海市中心城区沿道路的连续SVF分布图,计算的SVF考虑了树木的影响;使用无云的夜间Landsat-8 OLI/TIRS影像,基于辐射传输方程反演地表温度,得到研究区范围内街道水平的连续地表温度。上海市中心城区的SVF和地表温度如图8所示。从SVF分布图可以看到,研究区SVF在0.03~0.79之间,西南部有很大一部分SVF为低值,对应的是徐汇区,分析其原因,一方面因为上海是中国最发达的城市,中央商务区有许多高于20层的摩天大楼,并且分布在狭长的街道两侧;另一方面,因为路边的行道树较多,树冠对天空有遮挡。相反,在研究区北部和东部,SVF值高,这

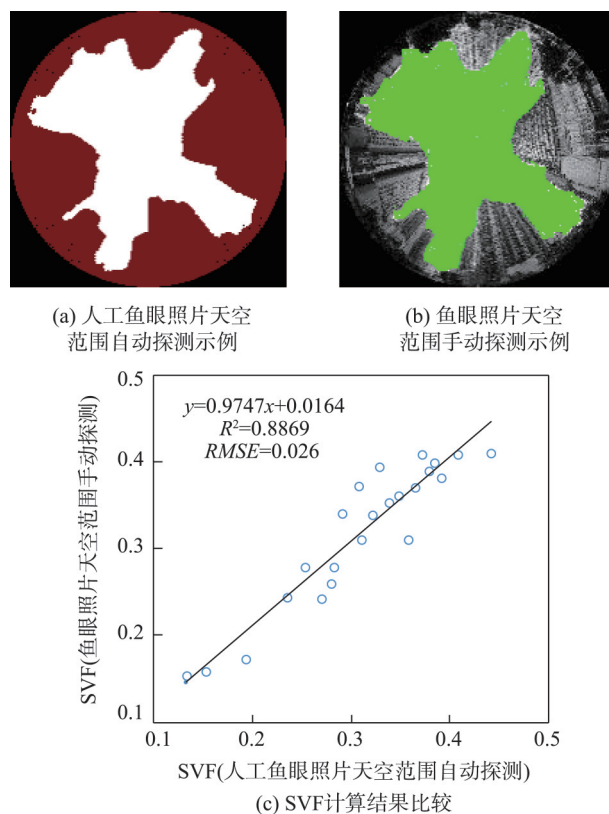


图7 2种SVF计算方法结果比较

Fig. 7 Comparison of two SVF calculation methods

些地区对应江边和公园,比如外滩、静安雕塑公园、复兴公园,其天空视野更加开阔。从地表温度分布图可以看到,研究区地表温度在28.16~45.41℃之间,地表温度高值主要集中在东部的一块区域,该区域对应的是南京东路商业中心,整体来看,中央

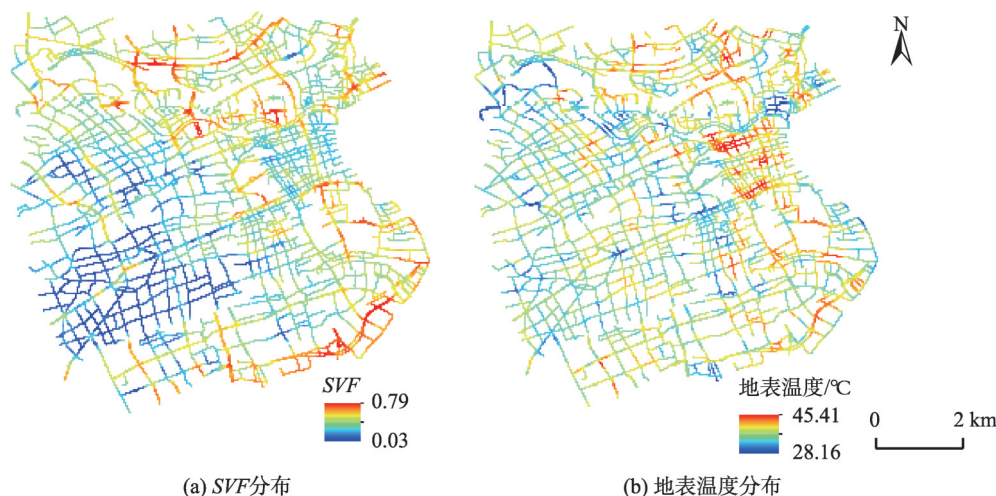


图8 上海市中心城区SVF分布和地表温度分布

Fig. 8 SVF distribution and land surface temperature distribution in Shanghai downtown

商务区的地表温度比江边、公园高,由遥感反演得到的地表温度空间分布特征符合实际情况。

4.3.2 基于局地气候分区的量化分析

本文引入局地气候分区,结合每个地块具体的土地利用和建筑情况,进一步研究SVF与城市热岛的关系,结果如图9所示。

从图9(c)局地气候分区图可以看出,上海市中心城区的LCZ类型有LCZ1紧凑高层建筑、LCZ2紧凑中层建筑、LCZ3紧凑低层建筑、LCZ4开敞高层建筑、LCZ5开敞中层建筑,其中以LCZ1紧凑高层建筑和LCZ5开敞中层建筑为主。

本文用温差来反映城市热岛强度,计算公式为:

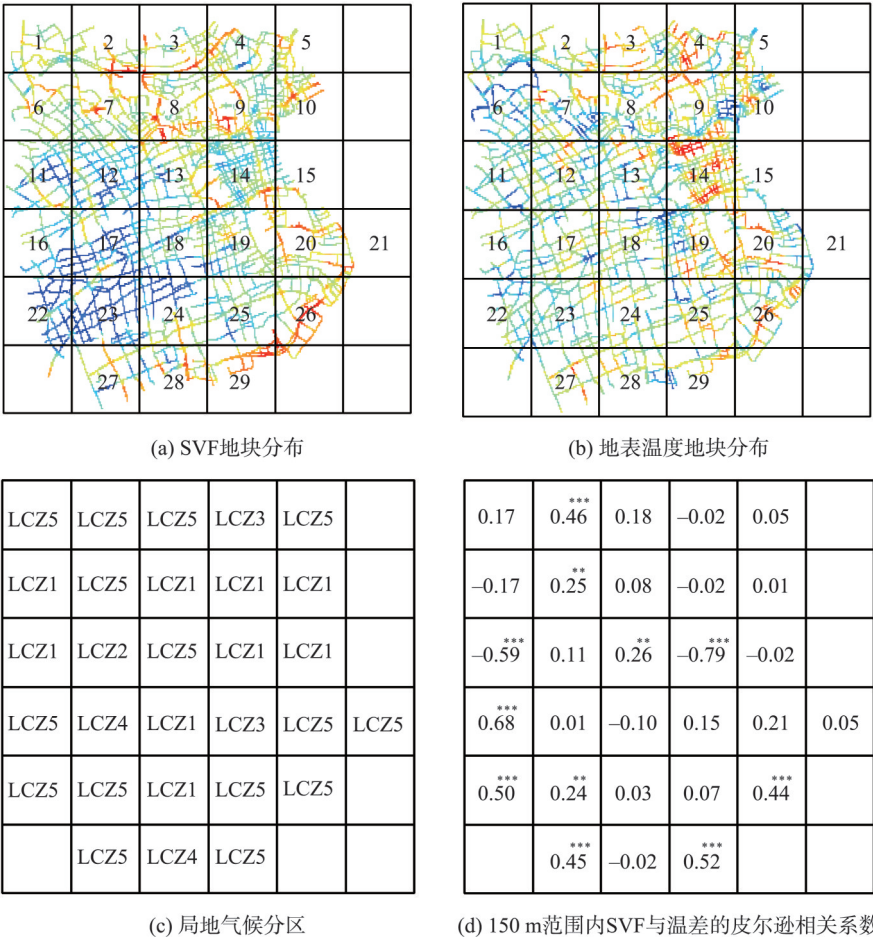
$$\Delta T = T - T_{\min} \quad (6)$$

式中: ΔT 为温差; T 为某一点的地表温度; T_{\min} 为研究范围内的最低地表温度。Unger^[20]的研究结果表

明,SVF和温度差异的面积平均值具有比点和点更紧密的相关性。Chen等^[10]的研究结果表明,SVF的搜索半径适用范围为100~150 m。所以本文计算150 m范围内的SVF和温差面积平均值。如图9(d)所示,展示了每个地块SVF与温差的皮尔逊相关系数,“*”表示该地块的皮尔逊相关系数通过了相应置信水平下的假设检验。从结果可以看到,SVF与温差之间的关系是复杂的,有显著正相关,也有显著负相关,不同区域得到的结果不同,下文将结合每个地块的LCZ类型进一步分析。

4.3.3 SVF与城市热岛强度关系讨论

在本文中,我们重点关注相关系数通过了99%置信水平的地块。结合图9(c)和图9(d)我们发现,SVF和温差呈显著正相关的地块类型都是LCZ5开敞中层建筑,最高相关系数为0.68,对应的SVF与温差的面积平均值关系如图10(a)所示,SVF与温差



注:***p<0.01;**p<0.05;*p<0.1。

图9 基于局地气候分区的量化分析
Fig. 9 Quantitative analysis based on local climate zones

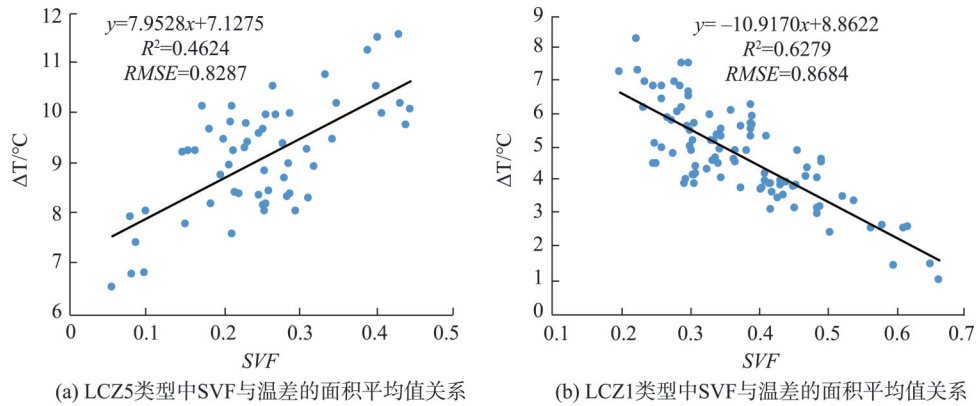


图10 150 m范围内SVF与温差的面积平均值关系

Fig. 10 The relationship between SVF and ΔT within 150 m

的面积平均值的定量关系式表示为:

$$\Delta T = 7.9528SVF + 7.1275 \quad (7)$$

该式拟合优度为 0.4624, 均方根误差为 0.8287, 通过了 95% 置信水平下的检验。研究结果表明在 150 m 范围内, SVF 减小 0.12, 其附近温差可能会减小 1 °C。分析其原因, LCZ5 开敞中层建筑的特征是 3~9 层的低密度中层建筑, 建筑之间有许多植被、树木, 由于街道两旁树木对天空的遮挡作用, 其 SVF 低, 此时, SVF 的大小主要受树木的影响, 需要考虑树木的降温作用^[42], 主要表现为树木的蒸发作用和光合作用会吸收热量, 此外, 树冠在白天会阻挡一部分太阳辐射, 因此地表温度会相对低。

同时, 可以发现 SVF 和温差呈显著负相关的地块类型都是 LCZ1 紧凑高层建筑, 最高相关系数为 -0.79, 对应的 SVF 与温差的面积平均值关系如图 10 (b) 所示, SVF 与温差的面积平均值的定量关系式表示为:

$$\Delta T = -10.9170SVF + 8.8622 \quad (8)$$

该式拟合优度为 0.6279, 均方根误差为 0.8684, 通过了 95% 置信水平下的检验。研究结果表明在 150 m 范围内, SVF 减小 0.09, 其附近温差可能会增加 1 °C。分析其原因, LCZ1 紧凑高层建筑的特征是 10 层以上的密集高层建筑, 建筑之间无树木或少树木, 其 SVF 大小主要受建筑密度和高度的影响。当 SVF 越低时, 高层建筑物越密集, 多为中央商务区, 狭窄的街道和高楼形成了深深的城市街道峡谷。一方面, 在白天时, 这部分区域因为大量的人类活动和车辆排放, 储存了更多的热量; 另一

方面, 在夜晚时, 原本地面与天空之间的热量交换被建筑物遮挡, 地面长波辐射在建筑物之间经过多次反射, 一部分被建筑物吸收, 一部分又反射回地面, 使得地面散失的热量大大减少, 同时, 密集的高层建筑物限制了空气和风的流通, 使得地表的热量不容易散失。

由于上海高楼层、高密度与高异质性共存的城市特征, 对于不同的地块类型, SVF 与城市热岛之间的关系是复杂的。对于 LCZ1 紧凑高层建筑、LCZ5 开敞中层建筑, 它们影响城市热岛的因素较为单一和显著, LCZ1 紧凑高层建筑主要受建筑密度和高度的影响, LCZ5 开敞中层建筑主要受树木调节作用的影响, 因此在这 2 个类型中, SVF 与城市热岛的关系最为明显。对于其他地块类型, 如 LCZ3 紧凑低层建筑、LCZ4 开敞高层建筑, 影响城市热岛的因素是复杂的, 甚至有相反作用, 所以在这些类型中, SVF 与城市热岛的关系并不明显。

5 结论与讨论

5.1 结论

SVF 作为城市辐射平衡的有效指标, 它是研究城市热岛的重要几何参数。如何快速精确地计算 SVF, 对于城市形态和城市气候的研究具有重要意义。本文以百度全景静态图作为数据源, 结合深度学习, 使用 Deeplabv3+ 模型实现天空和非天空范围的自动探测, 通过投影转换构造人工鱼眼图像, 使用 Chapman 提出的公式, 对上海市中心城区的 SVF 进行了计算, 同时使用无云的夜间 Landsat-8 OLI/

TIRS影像,基于辐射传输方程反演地表温度,得到研究区范围内街道水平的连续地表温度。最后引入LCZ分类框架,结合每个地块具体的土地利用和建筑情况,进一步研究SVF与城市热岛的关系,得出了以下结论:

(1) Deeplabv3+模型在不同场景下都能够对天空和非天空范围进行有效分割($MIOU=91.64\%$),为SVF的精确计算提供了基础;

(2) 鱼眼照片天空范围手动探测计算的SVF和人工鱼眼照片天空范围自动探测计算的SVF结果表现出好的一致性($R^2=0.8869$, $RMSE=0.026$),验证了本研究SVF计算方法的有效性;

(3) 在不同区域,SVF与城市热岛强度的关系不同。对于LCZ5开敞中层建筑,由于街道两旁树木对天空的遮挡,其SVF低,此时,SVF的大小主要受树木的影响,需要考虑树木对城市热岛的降温作用,SVF与城市热岛呈显著正相关,最高相关系数为0.68;对于LCZ1紧凑高层建筑,建筑之间无树木或少树木,其SVF大小主要受建筑密度和高度的影响,SVF与城市热岛呈显著负相关,最高相关系数为-0.79。

本文将提出的SVF计算方法成功应用于上海市中心城区,验证了在中国高密度和复杂的城市环境中使用街景图像计算大规模SVF的可行性;随着我国城镇化水平的不断提高,将会涌现出越来越多的大型城市,具有高楼层高密度的城市形态,可以预见,本研究提出的计算方法将具有更广泛的适用性。大规模SVF的有效计算,有助于城市气候研究和气候适应性城市规划的实践。本文引入LCZ分类框架,基于区域化研究思想,结合每个地块具体的土地利用和建筑情况,进一步研究SVF与城市热岛的关系,弥补了以往此类研究的不足。

5.2 讨论

此外需要指出的是:

(1) 城市热岛成因复杂,本文仅探讨了城市形态这一重要的影响因素,在后续的研究工作中将考虑其他影响因素,如植被降温增湿的效应,以及进一步探讨SVF这一重要城市形态指标在影响和决定城市气候现象与过程中的作用;

(2) 引入LCZ分类能够更好说明在高密度和高异质性共存的城市环境中SVF与城市热岛的关系,值得提出的是LCZ的准确分类是非常重要的,在后

续研究中我们将精细化LCZ类型,进一步探讨不同LCZ类型中SVF与城市热岛的关系。

致谢:本研究得到华东师范大学公共创新服务平台(001)支持,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] Johnson G T, Watson I D. The determination of view-factors in urban canyons[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984,23(2):329-335.
- [2] Watson I D, Johnson G T. Graphical estimation of sky view-factors in urban environment[J]. International Journal of Climatology, 1987,7(2):193-197.
- [3] Yang J, Wong M S, Menenti M, et al. Study of the geometry effect on land surface temperature retrieval in urban environment[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2015,109:77-87.
- [4] Yang J, Wong M S, Menenti M, et al. Modeling the effective emissivity of the urban canopy using sky view factor [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2015,105:211-219.
- [5] Yang J, Wong M S, et al. Development of an improved urban emissivity model based on sky view factor for retrieving effective emissivity and surface temperature over urban areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2016,122:30-40.
- [6] Yang X, Li Y. The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature[J]. Building & Environment, 2015, 90:146-156.
- [7] Steyn D G. The calculation of view factors from fisheye-lens photographs: Research note[J]. Atmosphere, 1980,18 (3):254-258.
- [8] Chapman L, Thornes J E, Bradley A V. Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2001,69(1-2):81-89.
- [9] Gal T, Lindberg F, Unger J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2009,95(1-2):111-123.
- [10] 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.
- [11] Chapman L, Thornes J E, Bradley A V. Sky-view factor approximation using GPS receivers[J]. *International Journal of Climatology*, 2002,22(5):615-621.
- [12] Chapman L, Thornes J E. Real-time sky-view factor calculation and approximation[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2004,21(5):730-741.
- [13] Anguelov D, Dulong C, Filip D, et al. Google Street View: capturing the world at street level[J]. *Computer*, 2010,43(6):32-38.
- [14] Carrasco-Hernandez R, Smedley A R D, Webb A R. Using urban canyon geometries obtained from Google Street View for atmospheric studies: potential applications in the calculation of street level total shortwave irradiances[J]. *Energy & Buildings*, 2015,86:340-348.
- [15] Liang J, Gong J, Sun J, et al. Automatic sky view factor estimation from street view photographs: A big data approach[J]. *Remote Sensing*, 2017,9(5):1-17.
- [16] Gong F Y, Zeng Z C, Zhang F, et al. Mapping sky, tree, and building view factors of street canyons in a high-density urban environment[J]. *Building & Environment*, 2018,134:155-167.
- [17] Middel A, Lukaszczuk J, Maciejewski R, et al. Sky View Factor footprints for urban climate modeling[J]. *Urban Climate*, 2018,25:120-134.
- [18] Oke T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations [J]. *Journal of Climatology*, 1981,1(3):237-254.
- [19] Upmanis H. The influence of sky-view factor and land-use on city temperatures[J]. *Influence of Parks on local climate*. Earth Sciences Centre, Goteborg University, Paper, 1999,3:1-15.
- [20] Unger J. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database[J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2009,36(1-3):59-80.
- [21] 张海龙,祝善友,王明江,等.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*, 2015,30(5):899-907. [Zhang H L, Zhu S Y, Wang M J, et al. 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*, 2015,30(5): 899-907.]
- [22] 王成刚,魏夏璐,严家德,等.气象探测环境等级评估方法及应用[J]. *应用气象学报*, 2019,30(1):117-128. [Wang C G, Wei X L, Yan J D, et al. Grade evaluation of detection environment of meteorological stations in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019,30(1): 117-128.]
- [23] Shata R O, Mahmoud A H, Fahmy M. Correlating the sky view factor with the pedestrian thermal environment in a hot arid university campus plaza[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2):468.
- [24] Guo J M, Han G F, Xie Y S, et al. Exploring the relationships between urban spatial form factors and land surface temperature in mountainous area: a case study in Chongqing city, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61:102286.
- [25] Chen L C, Papandreou G, Kokkinos I, et al. Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected CRFs[J]. *Computer Science*, 2014(4):357-361.
- [26] Chen L C, Papandreou G, Kokkinos I, et al. DeepLab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018,40(4):834-848.
- [27] Chen L C, Papandreou G, Schroff F, et al. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation. *arXiv: 1706.05587*, 2017.
- [28] Chen L C, Zhu Y K, Papandreou G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. *arXiv:1802.02611*, 2018.
- [29] Li X J, Ratti C, Seiferling I. Quantifying the shade provision of street trees in urban landscape: A case study in Boston, USA, using Google Street View[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018,169:81-91.
- [30] Wu Z, Zhang Y. Spatial variation of urban thermal environment and its relation to green space patterns: implication to sustainable landscape planning[J]. *Sustainability*, 2018,10(7):2249-2260.
- [31] 樊智宇,詹庆明,刘慧民,等.武汉市夏季城市热岛与不透水面增温强度时空分布[J]. *地球信息科学学报*, 2019,21(2):226-235. [Fan Z Y, Zhan Q M, Liu H M, et al. Spatial-temporal distribution of urban heat island and the heating effect of impervious surface in summer in Wuhan [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019,21(2):226-235.]
- [32] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012,93(12):1879-1900.
- [33] 林中立,徐涵秋.基于 LCZ 的城市热岛强度研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017,19(5):713-722. [Lin Z L, Xu H Q. A study of urban heat island intensity based on local cli-

- mate zones[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(5):713-722.]
- [34] Chen X L, Xu Y, Yang J X, et al. Remote sensing of urban thermal environments within local climate zones: a case study of two high-density subtropical Chinese cities[J]. Urban Climate, 2020,31:100568.
- [35] Wang R, Ren C, Xu Y, et al. Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: a case study of Hong Kong[J]. Urban Climate, 2018, 24:567-576.
- [36] Chen L, Jiang R, Xiang W N. Surface heat island in Shanghai and its relationship with urban development from 1989 to 2013[J]. Advances in Meteorology, 2016:1-15.
- [37] Middel A, Lukasczyk J, Maciejewski R. Sky view factors from synthetic fisheye photos for thermal comfort routing: A case study in Phoenix, Arizona[J]. Urban Planning, 2017,2(1):19-30.
- [38] Zeng L, Lu J, Li W, et al. A fast approach for large-scale sky view factor estimation using street view images[J]. Building & Environment, 2018,135:74-84.
- [39] 百度地图开放平台[EB/OL].(<http://lbsyun.baidu.com>). [Baidu map open platform[EB/OL].(<http://lbsyun.baidu.com>).]
- [40] 地理空间数据云[EB/OL].(<http://www.gscloud.cn>). [Geospatial data cloud[EB/OL].(<http://www.gscloud.cn>).]
- [41] Rzepa M, Siedlecki M, Gromek B. Practical application new software BMSky-view to calculate the sky view factor in the center of Łódź[J]. Annales - Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B, 2006,61:400-410.
- [42] 张好,徐涵秋,李乐,等.成都市热岛效应与城市空间发展关系分析[J].地球信息科学学报,2014,16(1):70-78. [Zhang H, Xu H Q, Li L, et al. Analysis of the relationship between urban heat island effect and urban expansion in Chengdu, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2014,16(1):70-78.]