

# 城市居民区植被降温效率分析与最佳降温效率 阈值确定

孙嘉欣, 冯莉, 张泉, 周亚男, 冯海蓉

河海大学 地理与遥感学院, 南京 211100

**摘要:** 目前城市植被降温效率的研究大多基于大尺度卫星遥感数据来开展, 缺少微尺度下植被降温效率的精细研究。因此, 本研究以南京市江宁区典型居民区植被为研究对象, 利用无人机可见光数据进行居民区绿地精细分类, 在此基础上建立区域绿地容积率RGPR (Regional Green Plot Ratio) 指标, 基于逐小时无人机热红外数据, 提出一种改进的植被降温效率计算方法—区域植被降温效率RCE (Regional Cooling Efficiency) 计算方法, 并利用该方法计算居民区植被降温效率, 探究不同局地气候分区(LCZ)下居民区地表温度与区域绿地容积率指标的响应关系、降温效率时空变化并进一步确定不同居民区绿地容积率的最佳降温效率阈值。结果表明: (1) 居民区植被降温效率日变化曲线整体呈现“山峰”形态, RCE随地表温度增强而增大。在观测时间段内, RCE最小值出现在8:00 (均 $<1.0^{\circ}\text{C}$ ), 最大值出现在午后14:00 (均 $>1.4^{\circ}\text{C}$ ), 局地气候分区水平下, 紧凑型居民区的RCE高于开阔型居民区, 而在开阔型居民区类型中, RCE随着区域内建筑平均高度的增加而降低。(2) 紧凑型的局地气候分区下, RGPR越高, 植被所带来降温效果越强; 而开阔型居民区, 无论建筑高低, 植被降温效率存在一定的RGPR阈值, 当RGPR达到一定阈值后, RGPR对地表温度的降温效率达到最大强度。本研究可为城市居民区绿地规划、改善城市微热环境提供科学依据。

**关键词:** 城市居民区, 微热环境, 区域植被降温效率(RCE), 局地气候分区, 区域绿地容积率, 无人机热红外, 降温效率阈值, 城市居民区绿地规划

中图分类号: P423/TU985/P2

引用格式: 孙嘉欣, 冯莉, 张泉, 周亚男, 冯海蓉. 2024. 城市居民区植被降温效率分析与最佳降温效率阈值确定. 遥感学报, 28(8): 1899–1913

Sun J X, Feng L, Zhang X, Zhou Y N and Feng H R. 2024. Analysis of cooling efficiency of vegetation in urban residential areas and determination of optimal cooling efficiency threshold. National Remote Sensing Bulletin, 28(8): 1899–1913 [DOI: 10.11834/jrs.20243487]

## 1 引言

城市热环境作为城市环境的重要组成部分, 近年来一直备受关注 (Oke, 1995; Voogt 和 Oke, 2003; 陈云浩等, 2004)。热岛效应及热浪问题导致城市热舒适度降低, 进而影响了城市居民的生活质量 (Scurlock 等, 2002)。随着对生活舒适度、身体健康、安全程度等要求的进一步提高, 人们不断通过空间设施优化来改善城市居民生活质量 (Chen 等, 2023)。城市绿地是城市中具有生态、游憩和景观等功能的重要空间载体, 在保障城市

生态环境质量和提升宜居品质等方面发挥着重要作用。作为影响城市热舒适度的重要因子之一 (Li 和 Liu, 2020), 城市绿地通过遮阴和蒸发散热来减少入射辐射带走热量, 起到降温作用, 进而缓解城市热岛及其对人类健康、能源消耗和城市基础设施的不利影响。居住区内部的道路绿地、组团绿地、宅间绿地、公建配套绿地等是城市居民居所周边的“最后一寸绿”, 对居民的身心健康起着至关重要的作用。

随着卫星遥感技术的发展, 许多学者利用遥感宏观、快速、动态的特点, 研究植被对城市热

收稿日期: 2023-11-28; 预印本: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42077431)

第一作者简介: 孙嘉欣, 研究方向为城市遥感。E-mail: sunjiaxin@hhu.edu.cn

通信作者简介: 冯莉, 研究方向为城市遥感。E-mail: fly@hhu.edu.cn

岛的影响。已有研究相继证实了城市绿地对城市热岛有明显的缓解作用 (Declet-Barreto 等, 2013; Gallo 等, 1995; Rotem-Mindali 等, 2015)。绿地的降温作用则主要取决于植物种群、郁闭度、叶面积指数、冠层面积等植被生理特征以及绿地周长、面积、形状指数和破碎度等景观格局特征 (栾庆祖 等, 2014; Kong 等, 2017; Milošević 等, 2017; Zhang 等, 2013; Rahman 等, 2020)。随着城市植被降温效果研究的深入推进, 越来越多的研究发现种植植被的降温措施并非始终高效, 城市规划过程中土地和其他自然资源的有限性要求要更加准确地刻画绿地、树木的降温效率, 从而达到最佳的投入产出比。为了更好地衡量绿地植被的降温效果, Zhou 等 (2017) 提出了降温效率 CE (Cooling Efficiency) 的概念, 即单位植被丰富度 (如 1% 植被覆盖度) 带来的 LST 降低值。目前针对不同城市开展的植被降温效率研究证明了植被降温效率异质性主要受到 LAI 等植被生理特性、城市反照率等人为管理相关变量以及温度、湿度、短波辐射等气象要素的驱动 (Wang 等, 2020; Zhao 等, 2023)。

由于卫星遥感影像在时间分辨率和空间分辨率上均存在不足之处, 想要进一步开展精细尺度城市热环境研究, 必须解决时空分辨率问题, 基于此, 无人机搭载不同传感器以其灵活性特点可以提供更高分辨率的图像和数据。同时, 相比于卫星遥感数据获取的地表温度, 利用低空无人机遥感平台搭载的热红外成像仪获取地表温度, 既可削弱大气吸收作用对地表温度反演精度的影响, 又可获取高分辨率的地表温度数据。田慧慧等 (2019) 利用无人机搭载热红外成像仪获取数据定量描述了不同下垫面地表温度的精细特征。Feng 等 (2022) 结合无人机获取的热红外数据与三温模型定量分析了乔木、灌木和草地等不同植被类型在不同季节的蒸散率昼夜变化特征。综上, 无人机搭载热红外成像仪已经成为城市微热环境研究的重要数据来源。

城市快速扩张过程中, 由于建筑在水平地面和垂直空间分布具有不均匀性, 建筑的空间形态会对地表温度产生复杂影响 (Qiao 等, 2020)。为了综合考虑城市形态对城市局地气候的影响, Stewart 和 Oke (2012) 提出了局地气候分区 LCZ (Local Climate Zone) 的方法, 将城市区域划分为

10 种建筑类型和 7 种土地覆盖类型, 为城市热环境研究提供了新思路。局地气候分区中建筑类型主要反映了建筑密度 (紧凑型/开阔型) 和建筑物高度 (高层/中层/低层) 2 种建筑结构特征 (莫男和韩杰, 2023)。

当前植被降温效率研究中, 多数研究主要利用卫星遥感数据在多城市开展大尺度研究, 而缺少微尺度下居民区内部区域植被降温效率的研究。同时植被丰富度指标仍然以植被覆盖率为主, 缺少能够区分不同植被类型, 体现植被生理性能的定量指标。因此, 从居民区微尺度角度出发, 选择能体现不同植被生理特性的绿地指标, 定量分析居民区不同类型绿地的降温效率尤为关键。因此, 本研究以南京市江宁区代表不同局地气候分区的典型居民区绿地为研究对象, 基于居民区乔灌草绿地类型建立区域绿地容积率指标, 并通过无人机获取热红外数据计算夏季不同类型居民区绿地表面降温效率, 探究不同类型居民区地表温度与区域绿地容积率指标的响应关系、降温效应时空变化特征并进一步确定居民区绿地容积率的最佳降温效率阈值, 以期城市居民区绿地降温效应的研究和改善城市微热环境提供依据。

## 2 研究区与数据源

### 2.1 研究区概况

本文选取南京市江宁区代表不同局地气候的 4 种居民区作为研究对象 (图 1)。南京市江宁区位于江苏省南京市中南部, 分布于  $31^{\circ}37'N-32^{\circ}07'N$ ,  $118^{\circ}28'E-119^{\circ}06'E$ , 属亚热带季风气候, 四季分明, 雨水充沛, 春秋短、冬夏长, 气温年较差大。江宁区作为南京市最大的市辖区, 是南京主城八区之一, 其面积占南京市总面积的四分之一, 常住人口数量已达到 196.99 万。江宁区已建成的多种 LCZ 建筑群中, 城市居民区主要分布于开阔型建筑区域, 少部分分布于紧凑中层建筑区域, 而紧凑高层建筑以商业办公区为主, 紧凑低层建筑分布较少, 因此, 本文分别选择代表紧凑中层 (LCZ2) 建筑群新光花园 ( $0.030 \text{ km}^2$ )、开阔高层 (LCZ4) 建筑群科嘉花园 ( $0.053 \text{ km}^2$ )、开阔中层 (LCZ5) 建筑群江南文枢苑 ( $0.076 \text{ km}^2$ ) 以及开阔低层 (LCZ6) 建筑群山水华门 ( $0.057 \text{ km}^2$ ) 4 种居民区作为研究对象。

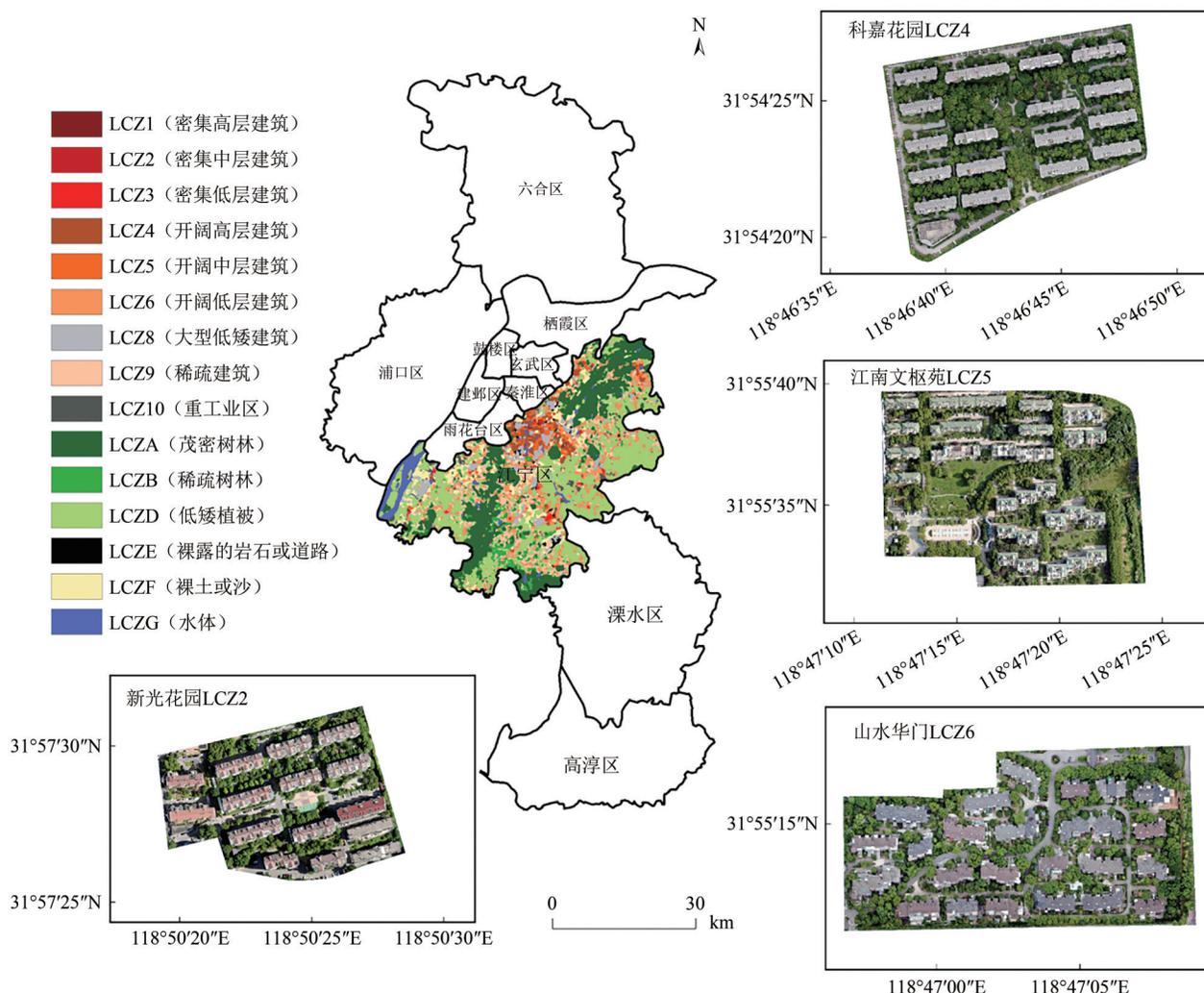


图1 研究区LCZ分区及正射影像图

Fig. 1 LCZ zoning and digital orthophoto map of the study area

## 2.2 数据源

本文数据源主要包含无人机可见光与热红外影像数据、实测地表温度数据、以及辅助数据3部分。

(1) 无人机数据获取及预处理。本研究利用大疆经纬M300 RTK四旋翼无人机搭载禅思H20T可见光与热红外混合传感器云台相机(图2(a)), 获取研究区真彩色影像及热红外影像数据。选择2023年7—8月4个晴天无云天气的8:00—18:00对研究区进行逐小时观测。无人机起飞前根据具体需求设置飞行参数, 并进行航线规划, 由于高温状况下温度变化较快, 为减少温度变化过快带来的误差, 在保证空间分辨率的前提下, 将无人机飞行高度设置为180 m, 航向和旁向重叠度设置为80%, 将单次飞行时间控制在10 min以内, 整个飞

行任务在RTK模式下进行。为减少无人机由于飞行高度过高带来的温度误差, 使用800 mm×800 mm黑板(图2(b))对无人机获取的热红外镜头进行温度校正, 在每次起飞降落前利用热红外镜头获取黑板温度, 同时通过黑板的温度传感器记录黑板表面实际温度, 利用两次黑板实际温度与热红外镜头获取温差均值对热红外数据进行校正。

无人机飞行结束后, 利用Pix4Dmapper对数据进行拼接预处理, 获取各研究区完整的数字正射影像DOM(Digital Orthophoto Map)、数字表面模型DSM(Digital Surface Model)以及热红外影像。在ArcMap中通过手动选取可见光以及热红外影像中具有明显标志的地物进行影像地理配准, 并使用栅格计算器进行影像温度校正。



图2 无人机搭载热红外成像仪及温度校正黑板

Fig. 2 UAV equipped with infrared thermal imager and temperature corrected blackboard

表1 无人机观测数据

Table 1 UAV observation data

观测日期	居民区名称	天气状况	观测次数	观测时间 间隔/h
2023-07-18	科嘉花园	晴天无云	11	1
2023-07-27	新光花园	晴天无云	11	1
2023-08-08	山水华门	晴天无云	11	1
2023-08-10	江南文枢苑	晴天无云	11	1

(2) 实测温度数据。为验证黑板校正后无人机热红外数据精度，使用 RAYTEK 红外辐射温度计在局地气候为开阔高层的科嘉花园居民区进行地表温度实地测量。在研究区内选择代表不同地物类型的 14 个点进行实地观测，考虑到不同时间段的校正温差的差异性，分别在上午 8:00 和 9:00 对 14 个点进行无人机观测与实地测量，利用每次黑板校正后的无人机热红外数据与实测数据进行验证。

(3) 辅助数据。辅助数据为南京市 LCZ 分区的地理分布图以及研究区建筑矢量数据。2018 年南京市 LCZ 分区的地理分布图 (图 1) 是以 4 景重采样的 Landsat 8 影像和 LCZ 训练样本作为输入数据，在自动化地学分析系统 (SAGA) 中基于 WUDAPT 算法生成的空间分辨率为 100 m 的 LCZ 图 (Dong 等, 2022)，建筑数据来自水经注地图下载器 (<http://www.rivermap.cn/>[2023-11-28]) 的矢量建筑轮廓数据。结合筑高度属性数据与 LCZ 分区结果进行研究区选择。

### 3 研究方法

本研究通过以下 3 个步骤计算和分析不同类型居民区绿地降温效率日变化特征，首先利用实测

温度数据对无人机热红外数据进行精度验证，然后通过量化各研究区植被区域绿地容积率计算区域植被降温效率，最后，通过回归统计分析方法确定不同居民区区域绿容积率降温效率阈值。

#### 3.1 热红外温度数据精度验证

在局地气候分区类型为开阔高层的居民区科嘉花园进行精度验证，使用 RAYTEK 红外辐射温度计分别在上午 8:00 和 9:00 实测小区内代表不同类型地物的 28 个点的地表温度进行，将测温枪实测温度与经过黑板校正后的无人机热红外成像温度进行无截距线性回归分析，回归结果如图 3 所示，校正后的热红外温度与实测温度线性回归系数为 1.01，拟合决定系数  $R^2$  为 0.99，拟合程度较高。因此，利用黑板校正后的无人机热成像系统获取的温度准确性较高，可以作为研究区地表温度数据来源。

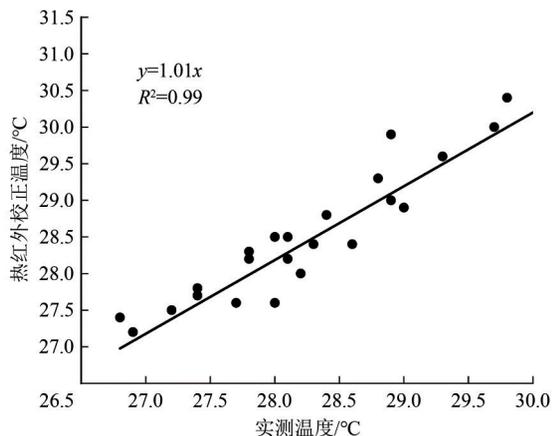


图3 热红外校正温度验证结果

Fig. 3 Verification results of corrected thermal infrared temperature

### 3.2 居民区绿地降温效率计算

(1) 居民区地物分类。本研究利用基于规则的面向对象分割方法对研究区的地物进行分类。首先对无人机可见光影像进行色彩空间转换，并将可见光影像与DSM、植被指数进行特征融合。其中DSM图像表示真实的地面起伏情况，植被指数用来提取研究区内植被信息。目前大多数植被指数往往利用红光与近红外波段来构建，而无人机搭载的传感器以可见光波段居多，当前已有的多种可见光植被指数中，可见光波段差异植被指数VDVI (Visible-band Difference Vegetation Index) 作为综合利用可见光红、绿、蓝3个波段的新型植被指数，其植被提取精度高于过绿指数EXG (Excess Green)、归一化绿红差值指数NGRDI (Normalized Green-Red Difference Index)、归一化绿蓝差值指数NGBDI (Normalized Green-Blue Difference Index) 和绿红比值指数RGRI (Red-Green Ratio Index) 以及绿光波段等其他可见光波段植被指数(汪小钦等, 2015)。因此，本文选取VDVI作为提取植被信息的指数，具体计算公式如下：

$$VDVI = \frac{2 \times \rho_{\text{green}} - (\rho_{\text{red}} + \rho_{\text{blue}})}{2 \times \rho_{\text{green}} + (\rho_{\text{red}} + \rho_{\text{blue}})} \quad (1)$$

式中， $\rho_{\text{green}}$ 、 $\rho_{\text{red}}$ 、 $\rho_{\text{blue}}$  分别表示绿、红、蓝3种波段的反射率。

基于Canny边缘检测算法，综合利用图像几何信息、结构信息、光谱信息、高程信息以及植被指数对研究区进行尺度分割，分割阈值为55，基于Full Lambda Schedule算法迭代合并邻近小斑块，合并阈值设为90。利用ENVI5.3完成影像的尺度分割，基于尺度分割结果通过阈值法构建分类规则将研究区的地物分为建筑、草地、灌木、乔木、道路及其他5种类型。首先根据不同地物的光谱特征、植被指数区分植被与非植被，然后利用高程信息对非植被类型中建筑与道路，植被类型中的乔木、灌木、草地进行地物分类。光谱特征以及高程信息分类阈值根据各研究区典型地物样本特征统计得到，而植被指数阈值通过最大类间方差(OTSU)最优阈值分割算法计算得到，最终实现各研究区内地物类型的分类。

(2) 区域绿地容积率计算。本研究使用的区域绿地容积率采用基于不同类型植被叶面积指数(LAI) 统计分布特征构建的新度量指标——绿地容

积率GPR (Green Plot Ratio)，绿地容积率最早由Ong (2003) 提出，定义为地块绿化的平均叶面积指数，与植被覆盖度等二维植被指数相比，绿色容积率数值能够直观地反映绿地内植物覆盖情况和植物群落层次结构丰富程度，较高的GPR数值表示绿地中植物具有较高的密度和较丰富的立面层次，更能直观表达城市三维绿量的强度(姚崇怀和李德玺, 2015)，计算公式如下：

$$GPR = \frac{LA}{S} \quad (2)$$

式中，LA为特定区域内叶面积总量(绿量)，S为该地区土地总面积。

基于Scurlock (2002) 对不同生物群落叶面积指数的实测统计，Wang和Yang (2006) 将草地、灌木和乔木的合理绿容积率分别估算为1、3、6。本文根据各研究区内的乔灌草类型，结合不同植被类型的合理绿容积率在区块尺度计算区域绿地容积率RGPR (Regional Green Plot Ratio)，具体公式如下(3)：

$$RGPR = \frac{\left( \sum_g \text{area}_g + 3 \sum_s \text{area}_s + 6 \sum_t \text{area}_t \right)}{\text{area}_{\text{all}}} \quad (3)$$

式中， $\text{area}_g$  为区域草地面积， $\text{area}_s$  为区域灌木面积， $\text{area}_t$  为区域乔木面积， $\text{area}_{\text{all}}$  为区域内去除建筑占地外区域总面积。

(3) 绿地降温效率计算。本文应用OLS最小二乘原理在区块尺度上计算观测时间内逐小时的区域绿地容积率(RGPR)与平均地表温度(LST)之间关系。考虑到植被降温效率需要多样本回归统计取得，因此需要对各研究区进行区域分割来获取线性回归统计样本，同时各研究区内建筑物高度较高，表面温度远高于其他地物地表温度。因此，为了能够准确统计区域绿地容积率与地表温度关系，具体计算过程如下：

考虑到分割尺度过小会导致区块内地物分割过于细碎，从而削弱区域绿地容积率与地表温度的拟合回归效果，而分割尺度过大会导致缺少足够样本进行回归分析。因此，对不同分割尺度进行测试得出按照50 m×50 m尺度分割的区块面积拟合效果较好，最终选择将各研究区按照50 m×50 m尺度进行区块分割。其次，为减少建筑表面高温对地表温度的影响，剔除了地表温度数据中建筑表面温度，同时，绿地容积率计算也相应剔除建

筑区域面积。最后，在区块尺度上计算观测时间内逐小时的区域绿地容积率（RGPR）与平均地表温度（LST）之间线性回归关系，并将斜率的负值表示区域植被降温效率 RCE（Regional Cooling Efficiency），具体计算公式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} LST_j(t) = \frac{\sum_{i=1}^n LST_i(t)}{n} \\ RGPR_j = \frac{\left( \sum_g \text{area}_{(g,j)} + 3 \sum_s \text{area}_{(s,j)} + 6 \sum_t \text{area}_{(t,j)} \right)}{\text{area}_{(\text{all},j)}} \\ RCE(t) = -\frac{\Delta LST_j(t)}{\Delta RGPR_j} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中， $j$ 为研究区分割区块位置， $i$ 为各区块内像元位置， $n$ 为各区块像元的个数， $LST_i(t)$ 为 $t$ 时间点下 $i$ 像元处的地表温度， $LST_j(t)$ 为 $t$ 时间点下 $j$ 区块所有像元的地表平均温度， $\Delta LST_j(t)$ 为 $t$ 时间点下各区块地表平均温度变化量， $RGPR_j$ 为 $j$ 区块的区域绿地容积率， $\Delta RGPR_j$ 为各区块区域绿地容积率变化量， $RCE(t)$ 为 $t$ 时间点下各研究区区块地表温度负变化与区域绿地容积率变化的比值，通过简单线性关系斜率推导出，具体表示单位绿地容积率带来的地表温度降低值。

### 3.3 区域绿地容积率阈值分析

目前，回归分析已被证明是阈值识别的有效方法（Peng 等，2017），而在各种回归分析方法中，三次多项式回归分析能够较好反应驱动因子对因变量的影响，被广泛应用于量化生态效应的

阈值识别上（Ma 等，2021）。本文使用三次多项式回归拟合的方法来确定不同类型居民区区域绿地容积率阈值。弹性系数（elasticity coefficient）是指每增加1单位的植被绿地容积率所带来的地表温度的变化值（Ma 等，2021）。该值可表示绿地容积率对地表温度的影响强度与效率，弹性系数通过对研究区区域绿地容积率与地表温度的三次多项式微分取得，具体表示为区域植被的降温速率，而弹性系数的拐点为阈值所在点，此时区域植被的降温效率达到最大，弹性系数具体计算如下：

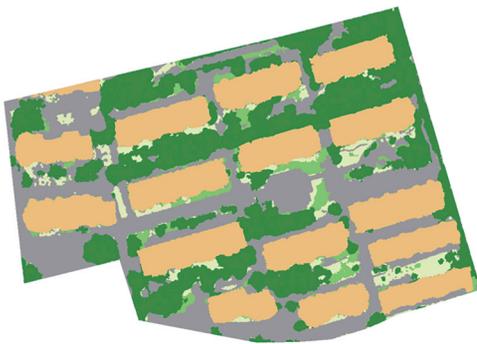
$$E = \frac{d(f(RGPR))}{d(RGPR)} \quad (5)$$

式中， $E$ 为弹性系数， $f(RGPR)$ 为区域绿地容积率与地表温度的三次多项式拟合函数。

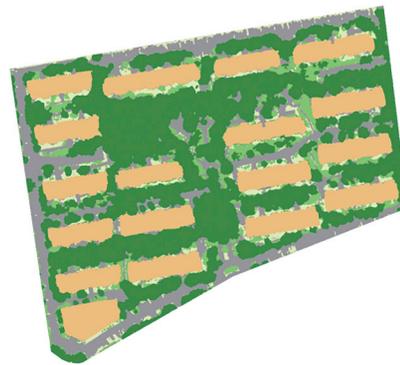
## 4 结果与分析

### 4.1 居民区乔灌木绿地容积率与地表温度关系

(1) 不同居民区乔灌木分类结果。本研究利用基于规则的面向对象分类方法对各研究区地物进行分类，将分类结果与同时段获取的高分辨率可见光影像进行叠加，进行人工修正，最终分类结果如图4所示。利用无人机可见光影像通过随机采样法建立500个随机验证样本点对各研究区分类结果进行精度验证，通过建立混淆矩阵分别计算各研究区分类结果的总体精度、Kappa系数（表2），最终得到各研究区总体分类精度均在89%以上，Kappa系数均大于0.88，分类结果符合精度要求。



(a) 新光花园  
(a) Xinguanghuayuan



(b) 科嘉花园  
(b) Kejiahuyuan

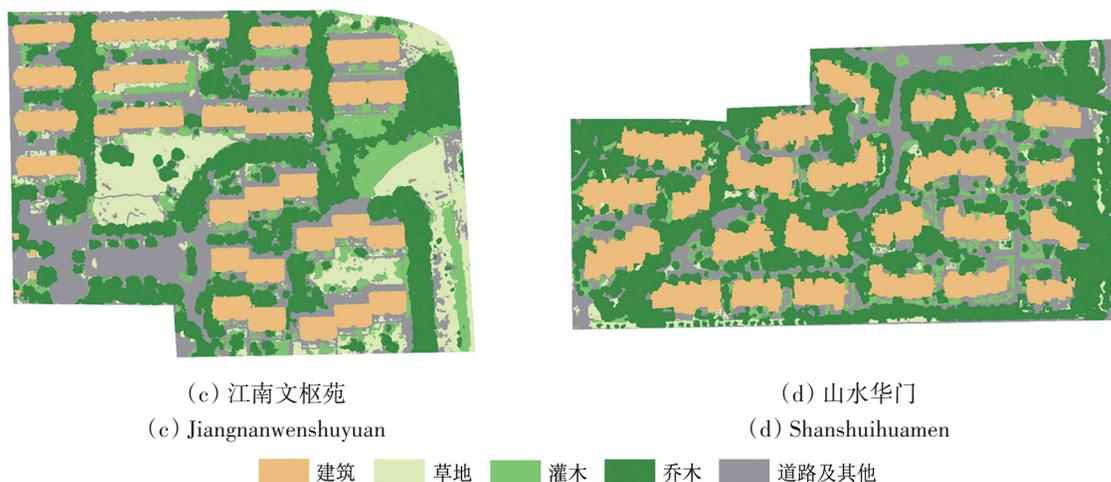


图4 地物分类结果

Fig. 4 Results of feature classification

表2 不同居民区各地物类型分类精度

Table 2 Classification accuracy for each object type

居民区名称	总体精度/%	Kappa 系数
新光花园	89	0.88
科嘉花园	92	0.90
江南文枢苑	92	0.91
山水华门	90	0.88

(2) 不同居民区地表温度时空分布。图5为经过黑板校正后 8:00 (图5 (a))、12:00 (图5 (b))、16:00 (图5 (c)) 时刻各研究区地表温度分布图, 图6为 8:00—18:00 各研究区不同地表覆盖类型下 LST 逐小时平均温度统计结果。可见各研究区在不同时间点、不同地物覆盖类型下地表温度差异较为明显, 具体而言: 同一地物类型在不同时刻的 LST 呈现同一趋势, 即 8:00—11:00 地表温度逐渐上升; 而在上午 11:00 以后地表温度总体呈现波动上升趋势; 最终在午后 13:00—14:00 地表温度达到最高 (图6)。3 个研究区中, 新光花园 (图6 (a)) 与科嘉花园 (图6 (b)) 在下午 13:00 地表温度均值达到最高, 分别为 44.44 °C 和 35.92 °C; 而江南文枢苑 (图6 (c)) 与山水华门 (图6 (d)) 则在 14:00 地表温度均值达到最高, 分别为 47.73 °C 和 43.81 °C; 15:00 以后各研究区地表温度均值呈现下降趋势 (图6)。不同地物覆盖类型的地表平均温度排序为: 道路>草地>灌木>乔木, 在相同时间点, 道路表现出最高的地表温度, 而乔木则表现出最低的地表温度。同时随着太阳辐射的增强,

植被覆盖地区和不透水路面地区之间的地表温度差异逐渐扩大 (图6)。此外, 乔木覆盖区域和不透水路面覆盖区域之间的地表温度差异最为显著, 尤其是在高温和高太阳辐射条件下更为明显, 而灌木和草地与不透水路面之间的地表温度差异相对较小 (图6)。这表明, 乔木比灌木与草地表现出更强的降温效果, 主要由于乔木较草地与低矮灌木相比绿量更为丰富, 叶片的蒸腾作用更强 (Smith 等, 2023)。

#### 4.2 区域植被降温效率日变化及空间异质性分析

根据各研究区逐小时植被降温效率回归系数 (图7) 可以看到, 各研究区  $R^2$  为 0.18—0.88, 江南文枢苑的  $R^2$  均值最小, 为 0.42, 山水华门的  $R^2$  均值最大, 达到 0.77。同时, 各研究区的  $R^2$  最小值时间点均出现在上午 8:00 或下午 18:00, 这表明较高的太阳辐射条件下植被降温效率相关性更高。

各居民区的区域植被降温效率 (RCE) 日变化曲线整体呈现山峰形态 (图8), 可见所有居民区在上午 8:00 达到最小值, 且最小值均在 1.0 °C 以下, 其中: 山水华门的 RCE 最大, 达到 0.84 °C (图8 (d)), 而科嘉花园的 RCE 最小, 为 0.32 °C (图8 (b)); 随着太阳辐射增强, RCE 逐渐升高, 在午后 14:00 达到最大, 且最大值均在 1.40 °C 以上, 其中, 新光花园的 RCE 最大达到 2.49 °C (图8 (a)), 而科嘉花园的 RCE 最小仅有 1.49 °C (图8 (b))。

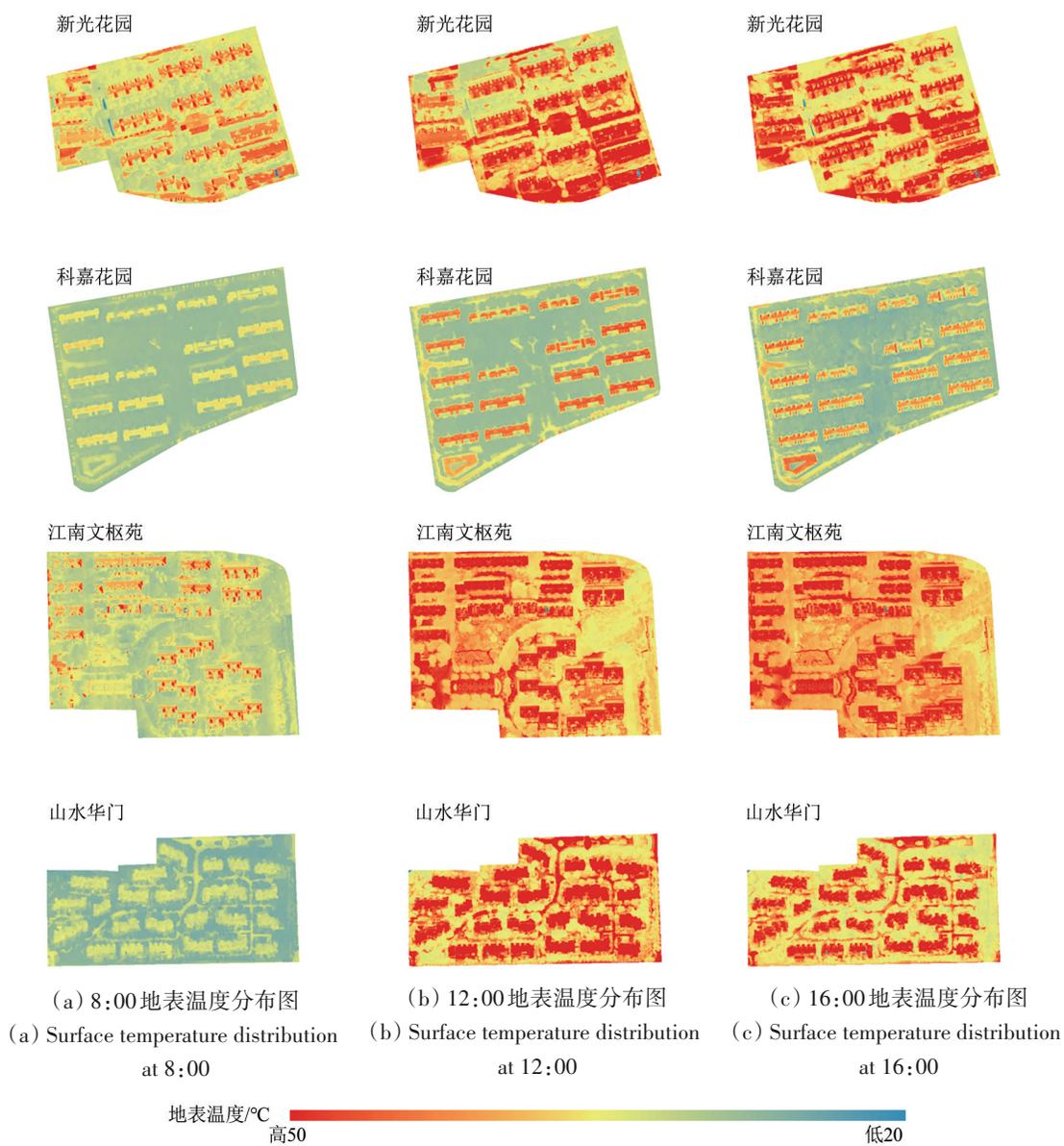
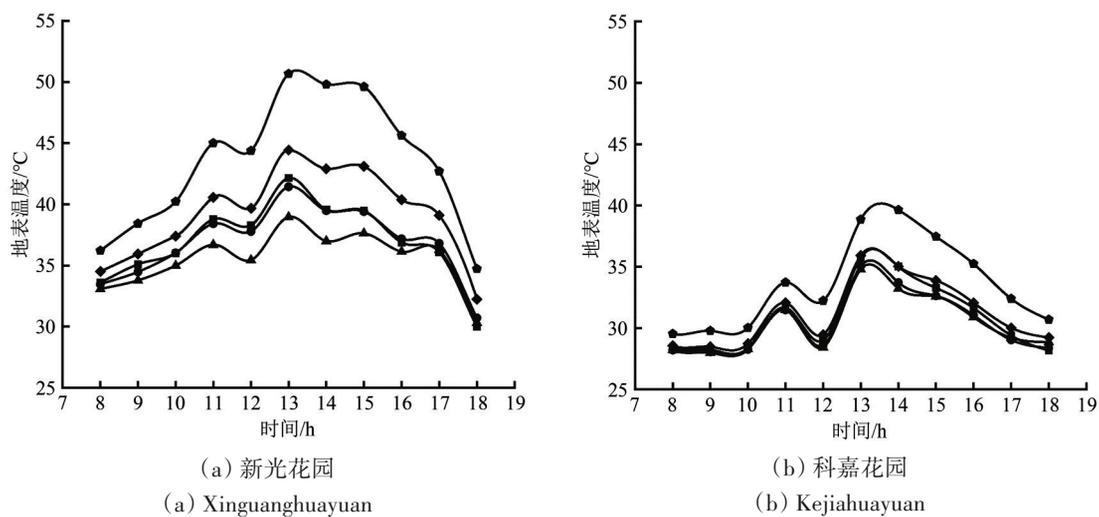


图5 不同区域3个不同时刻地表温度分布图  
Fig. 5 Distribution of surface temperature at three moments



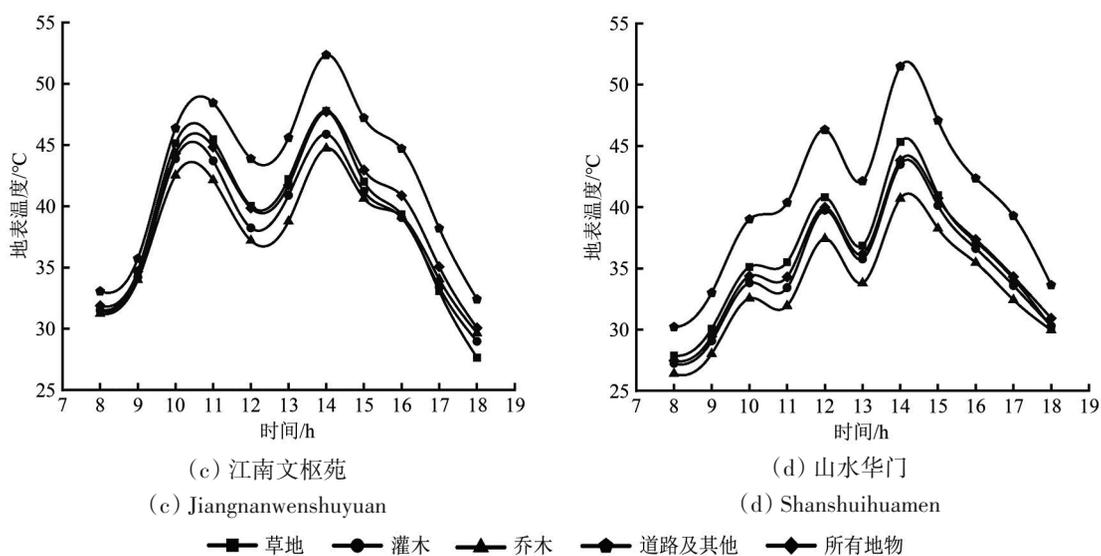


图6 各地物覆盖类型的平均地表温度逐小时变化曲线  
Fig. 6 Hourly daily variation curve of average surface temperature for each type of material cover

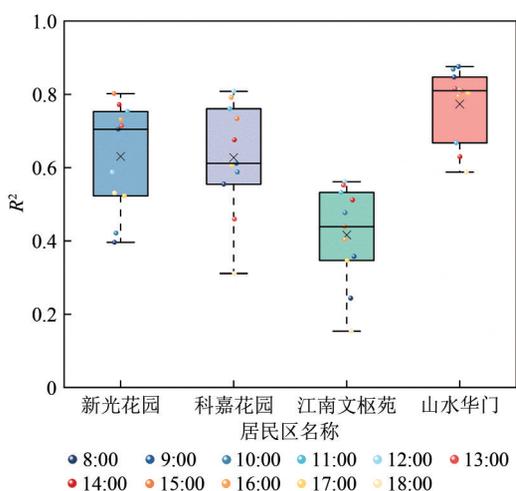


图7 各居民区降温效率回归系数箱型图  
Fig. 7 Box plots of regression coefficients of region cooling efficiency for each residential area

在RCE逐小时的变化中，不同时间段曲线变化的差异受到的影响因素不同。具体而言，早上8:00，由于距离日出时间较短，加之居民区建筑物的遮挡作用，地表无法及时接收太阳辐射使得植被降温效率较低，随着太阳辐射增强，植物蒸腾作用加强，植被降温效率也随之增加，由于地表不断吸收太阳辐射并向外进行长波辐射，最终在14:00植被的降温效率达到顶峰，而午后随着太阳辐射不断减弱，植被降温效率也随之降低(图8)。Zhang等(2013)对公园植被降温效果的研究也曾得到一致结论。

而在局地气候分区水平下，紧凑型居民区植

被降温效率比开阔型居民区高，通过对各居民区建筑、植被统计(表3)发现，紧凑型居民区(新光花园)植被覆盖率远低于开阔类型居民区(科嘉花园、江南文枢苑、山水华门)的植被覆盖度，位于紧凑中层区域的新光花园植被覆盖率仅占37.7%，而其他位于开阔型区域的3个居民区植被覆盖率均高于50%。然而，植被覆盖率最低的紧凑型居民区新光花园的乔木种植比例高达77.8%，仅次于乔木种植率最高的开阔低层类型的山水华门，这也表明了植被类型和种植策略在城市居民区气温调节中的重要性(Wang等, 2022; Zhou等, 2017)。同时，由于密集的建筑布局更容易产生高温，因此，在密集的建筑布局与乔木种植比率使得紧凑型居民区有较高植被降温效率可能；而同为开阔型居民区，平均建筑高度较高的居民区区域植被降温效率要强于平均高度较低的居民区。这可能是由于高层建筑会产生明显的“破风效应”，即高层建筑对于主导风的阻挡导致其方向的改变，在建筑外立面形成空气涡流(Yang等, 2019; 林中立和徐涵秋, 2022)。“破风效应”会增大高层建筑周边区域风速形成“峡谷效应”，降低区域地表环境以及叶片温度，进而促进植物叶片气孔关闭，减少区域内植被的蒸腾作用(Wang和Xu, 2021; Wang等, 2019; Cheng等, 2022)，因此，植被降温效率会随环境温度降低而减弱，最终呈现出建筑高度越高，植被降温效率越低现象。

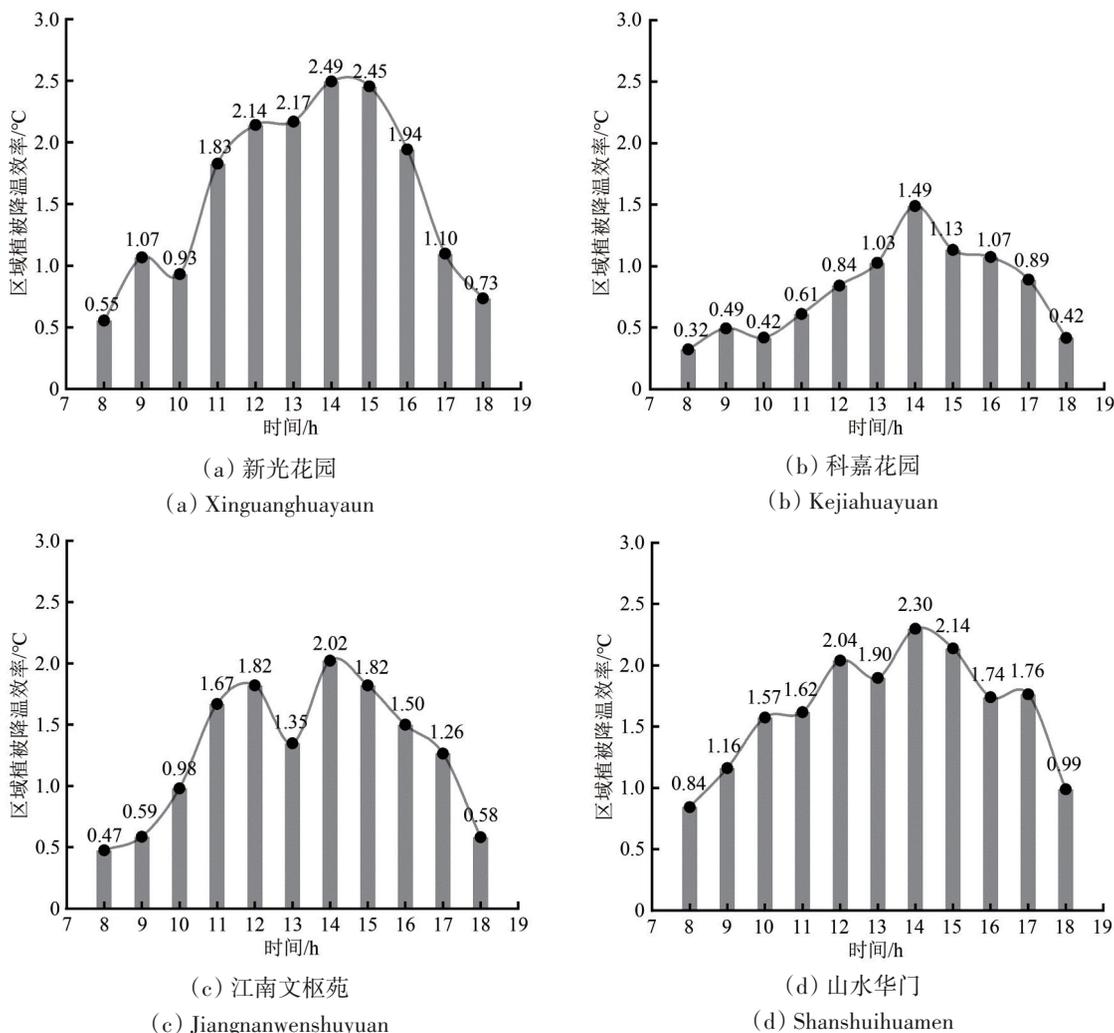


图8 RCE逐小时日变化曲线

Fig. 8 Hourly daily variation curve of RCE

表3 各研究区环境指标统计

Table 3 Statistics on environmental indicators by study area

居民区	植被覆盖率/%	草地比例/%	灌木比例/%	乔木比例/%	建筑平均高度/m	建筑密度	日平均LST/°C
新光花园	37.7	12.5	9.7	77.8	27.8	0.33	39.11
科嘉花园	54.6	9.1	13.9	77.0	24.17	0.27	31.2
江南文枢院	55.0	24.5	19.3	56.2	19.76	0.21	39.45
山水华门	53.2	4.0	12.2	83.8	9.12	0.29	35.35

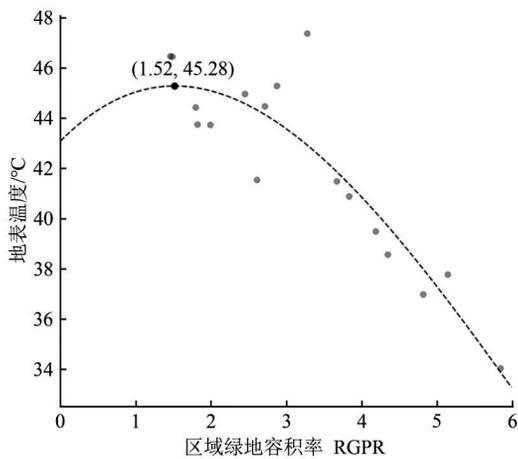
4.3 局地气候分区下降温效率阈值

为进一步确定局地气候分区下各类型居民区植被降温效率对应的区域绿地容积率阈值，本研究将下午14:00平均地表温度与区域绿地容积率进行了三次多项式拟合，并利用弹性系数拐点确定区域绿地容积率对各类型居民区降温效率的响应阈值。图9为14:00地表平均温度与区域绿地容积率间的非线性拟合关系及弹性系数曲线。随着区域绿地容积率(RGPR)的增加，对应的地表平均

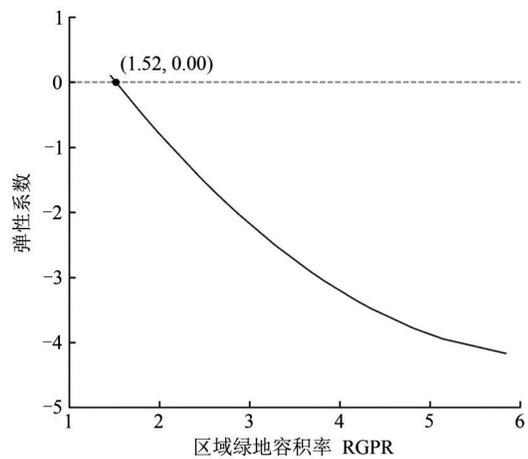
温度曲线呈现下降趋势，但不同类型居民区区域绿地容积率对于地表温度仍表现出不同的响应关系。具体表现为，紧凑中层代表的新光花园随着RGPR增加地表温度呈现下降趋势(图9(a))，同时其降温速率不断增加(图9(b))，因此，在紧凑中层类型的局地气候分区下，RGPR越高，植被所带来降温效果越强，即在紧凑中层类型的居民区内，建议尽可能选择高叶面积指数植被进行种植以实现最强降温效果；而在开阔建筑类型的居

民区, 对于平均建筑高度较高的科嘉花园, 随着 RGPR 增加, 地表温度有上升趋势, 当 RGPR 达到 1.26 时, 地表温度开始出现下降趋势 (图 9 (c)), 其降温效果逐渐加强, 当 RGPR 达到 3.09 的阈值时, RGPR 对地表温度的降温效率达到了最大强度 (图 9 (d)); 山水华门的弹性系数曲线也表现出了相同的趋势, 随着 RGPR 增加, 地表温度逐渐上升, 当 RGPR 达到 3.05 时, 地表温度开始下降 (图 9 (g)), 同时降温效果不断增强, 最终在 4.44 阈值处降温效率达到最大强度 (图 9 (h)); 区别于上述两种居民区, 随着 RGPR 增加, 江南文枢苑

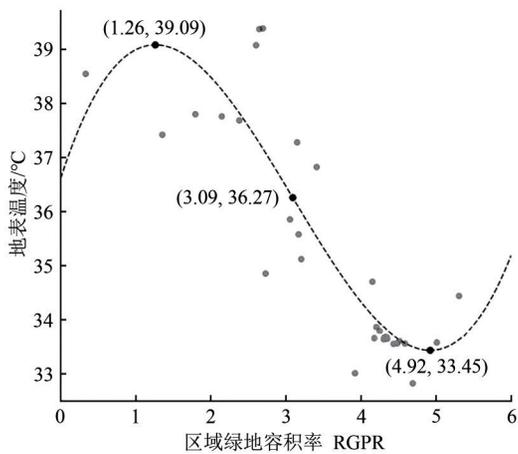
的平均地表温度虽然也呈现下降趋势 (图 9 (e)), 但植被降温效率逐渐减弱, 当 RGPR 达到 3.97 时, 降温效率达到最小 (图 9 (f)), 这可能是由于该研究区的南侧存在大面积水体, 对该区域的环境产生了一定的干扰, 因此仅利用弹性系数统计方法很难确定江南文枢苑的最佳绿地容积率阈值。因此, 在开阔型居民区植被降温效率存在相应的阈值使得植被的降温效率发挥最大, 而植被降温阈值的存在也在先前不少研究中得到证实 (李英汉 等, 2011; 汪丹, 2017)。



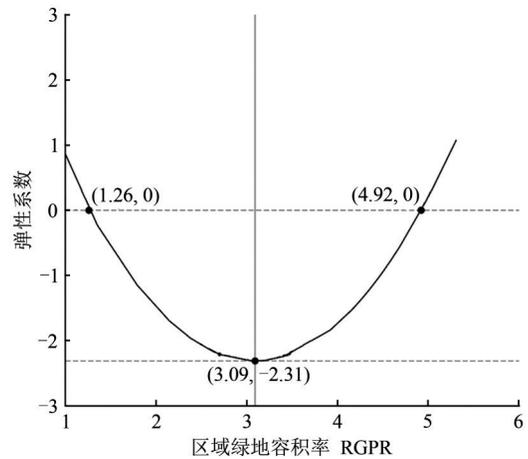
(a) 新光花园 RGPR 与 LST 三次多项式拟合曲线  
(a) RGPR and LST cubic polynomial fitting curves of Xinguanghuayuan



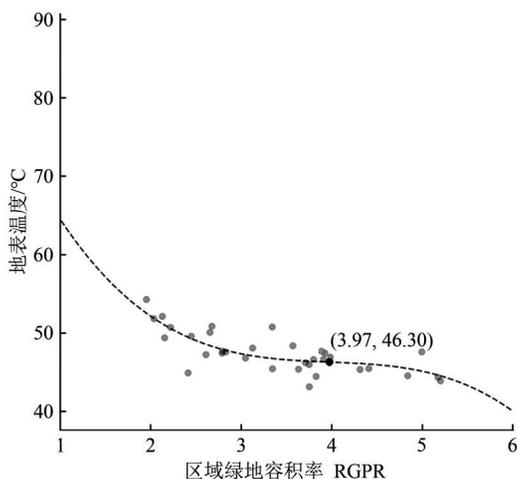
(b) 新光花园弹性系数曲线  
(b) Elasticity coefficient curve of Xinguanghuayuan



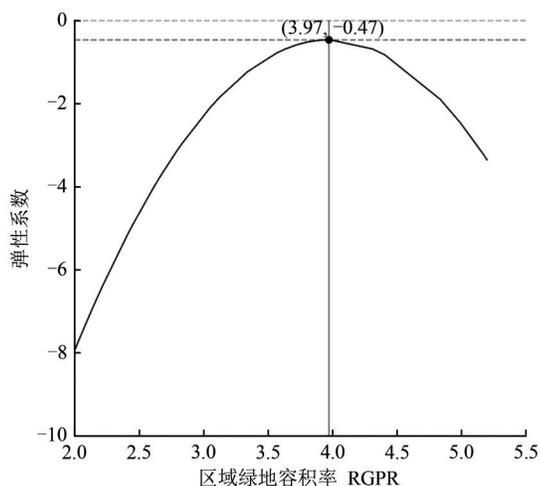
(c) 科嘉花园 RGPR 与 LST 三次多项式拟合曲线  
(c) RGPR and LST cubic polynomial fitting curves of Kejiaguayuan



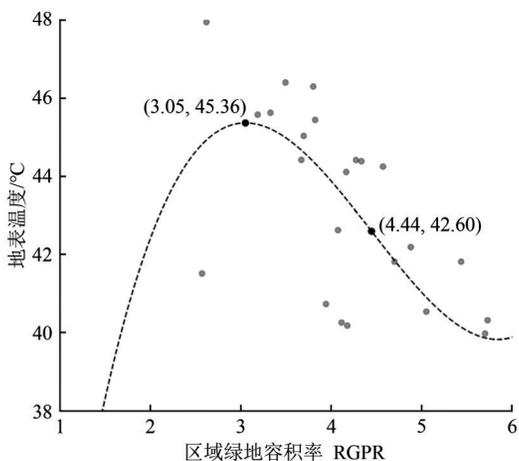
(d) 科嘉花园弹性系数曲线  
(d) Elasticity coefficient curve of Kejiaguayuan



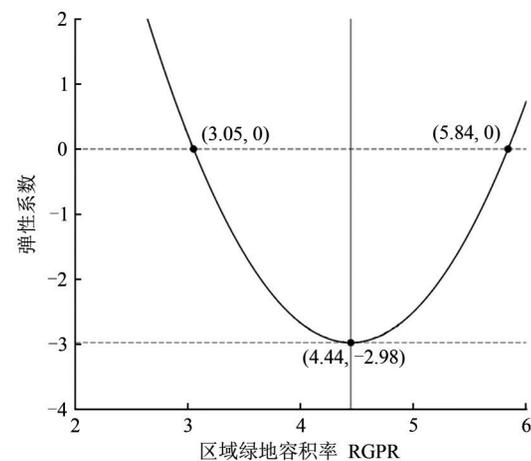
(e) 江南文枢苑RGPR与LST三次多项式拟合曲线  
(e) RGPR and LST cubic polynomial fitting curves of Jiangnanwenshuyuan



(f) 江南文枢苑弹性系数曲线  
(f) Elasticity coefficient curve of Jiangnanwenshuyuan



(g) 山水华门RGPR与LST三次多项式拟合曲线  
(g) RGPR and LST cubic polynomial fitting curves of Shanshuihuamen



(h) 山水华门弹性系数曲线  
(h) Elasticity coefficient curve of Shanshuihuamen

图9 14时RGPR与LST三次多项式拟合及弹性系数曲线

Fig. 9 Fitting of RGPR and LST cubic polynomial and it's elastic coefficient curve at 14

## 5 结论

本研究以南京市江宁区代表不同局地气候分区的4个典型居民区作为研究对象，基于无人机获取的逐小时高分辨率可见光、热红外数据和利用测温仪获取的实测温度数据，从居民区局地气候角度出发，探究了不同类型居民区地表温度与区域绿容容积率指标的响应关系、降温效率逐时变化特征及差异性并进一步确定了不同居民区绿容容积率的最佳降温效率阈值，主要结论如下：

(1) 区域植被降温效率计算：本文基于逐小时无人机热红外数据，提出一种改进的植被降温效率计算方法—区域降温效率方法，利用该方法

从居民区植被叶面积指数出发，构建了区域绿容容积率 (RGPR)，并计算了不同局地气候分区下居民区的区域植被降温效率 (RCE)，证明了利用无人机数据在微尺度下计算区域植被降温效率的可行性。

(2) 区域植被降温效率特征：各类型居民区植被降温效率日变化曲线整体呈现山峰形态，观测时间段内，区域植被降温效率 (RCE) 最小值出现在8:00，且最小值均在1.0 °C以下，随着太阳辐射增强以及地表温度升高，RCE逐渐升高，在午后14:00达到最大，且最大值均在1.4 °C以上。在局地气候分区水平下，紧凑型居民区RCE比开阔型居民区高，而在开阔型居民区类型中，高层

建筑区 RCE 要低于低层建筑区。

(3) 区域植被降温效率阈值: 紧凑中层类型的局地气候分区下, 区域绿地容积率 (RGPR) 越高, 植被所带来降温效果越强, 因此, 建议在紧凑中层类型的居民区尽可能选择高叶面积指数植被进行种植以实现最强降温效果; 而在开阔型居民区, 无论建筑高低, 植被降温效率均存在一定的 RGPR 阈值, 即当 RGPR 达到一定阈值时, RGPR 对地表温度的降温效率达到了最大强度, 开阔高层建筑科嘉花园的 RGPR 阈值为 3.09, 低层建筑类型山水华门的 RGPR 阈值为 4.44。因此, 开阔型居民可根据最佳降温效率的 RGPR 阈值进行来进行植被种植规划。

总体而言, 本研究从城市居民区微尺度出发, 对基于城市尺度的植被降温效率计算方法进行改进, 针对高分辨率无人机数据在居民区微尺度计算区域植被降温效率, 探究了局地气候分区水平下不同类型居民区地表温度与区域绿容积率指标的响应关系、降温效率时空变化特征以及不同居民区绿地容积率的最佳降温效率阈值, 试图为城市居民区绿地降温效应的研究提供新的思路, 为改善城市热环境和提升城市可持续性提供更具体、科学的理论指导与支持。

## 6 展 望

本研究从微尺度出发对不同类型居民区地表温度与区域绿地容积率指标的响应关系、降温效率逐时变化特征以及不同居民区绿地容积率的最佳降温效率阈值进行了探讨, 但仍存在以下不足:

首先由于获取数据有限, 本研究仅选择了 4 种局地气候分区下典型居民区来探究 8:00—18:00 时间段的区域植被降温效率, 虽得出了一定的规律, 但研究区数量相对较少, 同时缺少了其他时段观测, 未来将继续增加研究区来提高研究的广度与普适性; 区域绿地容积率指标构建方面, 目前仅结合研究区乔灌草分类结果与乔灌草的合理绿地容积率构建了区域绿地容积率指标, 虽不能完全体现植被的叶面积指数, 但该方法构建指标仍具有一定的合理性, 后续将考虑结合植被高度等信息构建更加精细的绿地容积率; 另外, 本研究在居民区区块尺度进行了植被降温效率的研究。考虑到分割尺度对研究结果的影响, 我们进行了实验测试, 最终确定了 50 m 的最佳分割尺度。然而,

分割尺度的选择仍存在一定的不确定性。尺度的选择对于地表温度与绿地容积率的拟合回归效果至关重要。过小的尺度可能导致地物分割过于细碎, 从而削弱了回归效果, 而过大的尺度可能导致样本不足以进行有效的回归分析。在未来的研究中, 我们将进一步优化分割尺度的选择, 以提高研究的可靠性和精度; 在热环境评价指标上, 本研究采用具有空间连续性优势的地表温度作为居民区热环境评价指标进行分析, 而人类感受的实际温度是空气温度。因此, 可能会由于地表温度对地表覆盖的敏感性存在对植被潜在降温能力的高估问题; 最后, 气象因素、LAI 等植被的生理特性以及人为管理等因素都可能对植被降温效率产生不同程度的影响, 而本文未对不同时段、不同局地气候分区下引起 RCE 差异性的影响因素进行细致分析。针对上述问题, 未来将结合气象数据, 引入数值计算模拟等方法进一步对植被降温效率影响因素深入探讨分析。

## 参考文献 (References)

- Chen Y H, Li J and Li X B. 2004. Analysis of urban spatial thermal environment based on remote sensing pattern: progress simulation and effect. Beijing: Science Press (陈云浩, 李京, 李晓兵. 2004. 城市空间热环境遥感分析: 格局、过程、模拟与影响. 北京: 科学出版社)
- Chen Y H, Wu G H, Chen Y and Xia Z L. 2023. Spatial location optimization of fire stations with traffic status and urban functional areas. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 16(2): 771-788 [DOI: 10.1007/s12061-023-09502-5]
- Cheng X Y, Peng J, Dong J Q, Liu Y X and Wang Y L. 2022. Non-linear effects of meteorological variables on cooling efficiency of African urban trees. *Environment International*, 169: 107489 [DOI: 10.1016/J.ENVINT.2022.107489]
- Declat-Barreto J, Brazel A J, Martin C A, Chow W T L and Harlan S L. 2013. Creating the park cool island in an inner-city neighborhood: heat mitigation strategy for Phoenix, AZ. *Urban Ecosystems*, 16(3): 617-635 [DOI: 10.1007/s11252-012-0278-8]
- Dong P, Jiang S D, Zhan W F, Wang C L, Miao S Q, Du H L, Li J F, Wang S S and Jiang L. 2022. Diurnally continuous dynamics of surface urban heat island intensities of local climate zones with spatiotemporally enhanced satellite-derived land surface temperatures. *Building and Environment*, 218: 109105 [DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109105]
- Feng L, Liu Y X, Zhou Y N and Yang S Q. 2022. A UAV-derived thermal infrared remote sensing three-temperature model and estimation of various vegetation evapotranspiration in urban micro-environments. *Urban Forestry and Urban Greening*, 69: 127495 [DOI:

- 10.1016/j.ufug.2022.127495]
- Gallo K P, Tarpley J D, Mcnab A L and Karl T R. 1995. Assessment of urban heat islands: a satellite perspective. *Atmospheric Research*, 37(1/3): 37-43 [DOI: 10.1016/0169-8095(94)00066-M]
- Kong L, Lau K K L, Yuan C, Chen Y, Xu Y, Ren C and Ng E. 2017. Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, 31: 12-25 [DOI: 10.1016/j.scs.2017.01.018]
- Li J W and Liu N Y. 2020. The perception, optimization strategies and prospects of outdoor thermal comfort in China: a review. *Building and Environment*, 170: 106614 [DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106614]
- Li Y H, Wang J J, Li G C and Zeng H. 2011. Research of the vegetation's cooling effect in city's residential quarter. *Acta Ecologica Sinica*, 31(3): 830-838 (李英汉, 王俊坚, 李贵才, 曾辉. 2011. 居住区植物绿量与其气温调控效应的关系. *生态学报*, 31(3): 830-838)
- Lin Z L and Xu H Q. 2022. A study of urban thermal environmental of fuzhou based on "Local Climate Zones" *Journal of Geo-information Science*, 24(1): 189-200 (林中立, 徐涵秋. 2022. 基于局地气候分区体系的福州城市热环境研究. *地球信息科学学报*, 24(1): 189-200) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2022.210669]
- Luan Q Z, Ye C H, Liu Y H, Li S Y and Gao Y H. 2014. Effect of urban green land on thermal environment of surroundings based on remote sensing: a case study in Beijing, China. *Ecology and Environmental Sciences*, 23(2): 252-261 (栾庆祖, 叶彩华, 刘勇洪, 李书严, 高燕虎. 2014. 城市绿地对周边热环境影响遥感研究——以北京为例. *生态环境学报*, 23(2): 252-261) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.02.011]
- Ma S, Wang L J, Jiang J, Chu L and Zhang J C. 2021. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change and vegetation coverage change in the Qinghai-Tibet Plateau ecological shelter. *Journal of Cleaner Production*, 318: 128592 [DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128592]
- Milošević D D, Bajšanski I V and Savić S M. 2017. Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways. *Urban Forestry and Urban Greening*, 23: 113-124 [DOI: 10.1016/j.ufug.2017.03.011]
- Mo N and Han J. 2023. Research progress of local climate zone theory. *Building Science*, 39(4): 252-262, 285 (莫男, 韩杰. 2023. 局地气候分区(LCZ)理论研究进展. *建筑科学*, 39(4): 252-262, 285) [DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2023.04.31]
- Oke T R. 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. *Wind Climate in Cities*, 277: 81-107 [DOI: 10.1007/978-94-017-3686-2\_5]
- Ong B L. 2003. Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 63(4): 197-211 [DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00191-3]
- Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N and Wu J S. 2017. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 607-608: 706-714 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.218]
- Qiao Z, Liu L, Qin Y W, Xu X L, Wang B W and Liu Z J. 2020. The impact of urban renewal on land surface temperature changes: a case study in the main city of Guangzhou, China. *Remote Sensing*, 12(5): 794 [DOI: 10.3390/rs12050794]
- Rahman M A, Stratopoulos L M F, Moser-Reischl A, Zölch T, Häberle K H, Rötzer T, Pretzsch H and Pauleit S. 2020. Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis. *Building and Environment*, 170: 106606 [DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106606]
- Rotem-Mindali O, Michael Y, Helman D and Lensky I M. 2015. The role of local land-use on the urban heat island effect of Tel Aviv as assessed from satellite remote sensing. *Applied Geography*, 56: 145-153 [DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.11.023]
- Scurlock J M O, Asner G P and Gower S T. 2002. Worldwide historical estimates of leaf area index, 1932-2000. *ORNL/TM-2001/268*. Oak Ridge National Laboratory, 34 [DOI: 10.2172/814100]
- Smith I A, Fabian M P and Hutrya L R. 2023. Urban green space and albedo impacts on surface temperature across seven United States cities. *Science of the Total Environment*, 857: 159663 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159663]
- Stewart I D and Oke T R. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12): 1879-1900 [DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1]
- Tian H H, Feng L, Zhao M M, Guo S and Dong J W. 2019. Analysis of meticulous features of urban surface temperature based on UAV thermal thermography. *Remote Sensing Technology and Application*, 34(3): 553-563 (田慧慧, 冯莉, 赵瑞瑞, 郭松, 董继伟. 2019. 无人机热红外城市地表温度精细特征研究. *遥感技术与应用*, 34(3): 553-563) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.3.0553]
- Voogt J A and Oke T R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of Environment*, 86(3): 370-384 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8]
- Wang C H, Wang Z H, Wang C Y and Myint S W. 2019. Environmental cooling provided by urban trees under extreme heat and cold waves in U.S. cities. *Remote Sensing of Environment*, 227: 28-43 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.024]
- Wang D. 2017. Study on Green Quantity Distribution and Its Thermal Environment Impact in High Density Community. Beijing: North China University of Technology (汪丹. 高密度社区绿量分布及其热环境影响研究. 北京: 北方工业大学)
- Wang J, Zhou W Q and Jiao M. 2022. Location matters: planting urban trees in the right places improves cooling. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20(3): 147-151 [DOI: 10.1002/fee.2455]
- Wang J, Zhou W Q, Jiao M, Zheng Z, Ren T and Zhang Q M. 2020. Significant effects of ecological context on urban trees' cooling efficiency. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159: 78-89 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.001]
- Wang M Y and Xu H Q. 2021. The impact of building height on urban thermal environment in summer: a case study of Chinese megacities. *PLoS One*, 16(4): e0247786 [DOI: 10.1371/journal.pone.0247786]
- Wang W L and Yang X. 2006. Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. *Chinese Landscape Architecture*, 22(9): 82-87 (王文礼, 杨星. 2006. 绿色容积率: 建筑和城市规划的一种生态量度. *中国园林*, 22(9): 82-87) [DOI: 10.3969/

- j.issn.1000-6664.2006.09.018]
- Wang X Q, Wang M M, Wang S Q and Wu Y D. 2015. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(5): 152-159 [汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 吴云东. 2015. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取. *农业工程学报*, 31(5): 152-159] [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.05.022]
- Yang J, Jin S H, Xiao X M, Jin C, Xia J H, Li X M and Wang S J. 2019. Local climate zone ventilation and urban land surface temperatures: towards a performance-based and wind-sensitive planning proposal in megacities. *Sustainable Cities and Society*, 47: 101487 [DOI: 10.1016/j.scs.2019.101487]
- Yao C H and Li D X. 2015. Study on the Green Volume Ratio (GVR) and its calculating mechanism. *Chinese Landscape Architecture*, 31(9): 5-11 (姚崇怀, 李德玺. 2015. 绿容积率及其确定机制. *中国园林*, 31(9): 5-11) [DOI: CNKI:SUN:ZGYL.0.2015-09-002]
- Zhang Z, Lv Y M and Pan H T. 2013. Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks. *Urban Forestry and Urban Greening*, 12(3): 323-329 [DOI: 10.1016/j.ufug.2013.03.010]
- Zhao J C, Zhao X, Wu D H, Meili N and Fatichi S. 2023. Satellite-based evidence highlights a considerable increase of urban tree cooling benefits from 2000 to 2015. *Global Change Biology*, 29(11): 3085-3097 [ DOI: 10.1111/gcb.16667]
- Zhou W Q, Wang J and Cadenasso M L. 2017. Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: a comparative study. *Remote Sensing of Environment*, 195: 1-12 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.043]

## Analysis of cooling efficiency of vegetation in urban residential areas and determination of optimal cooling efficiency threshold

SUN Jiaxin, FENG Li, ZHANG Xiao, ZHOU Yanan, FENG Hairong

*College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 211100, China*

**Abstract:** Most previous studies on the cooling efficiency of urban vegetation are based on large-scale satellite remote sensing data, which leaves a gap in fine-scale investigations at the micro-level. Therefore, this study took the vegetation of typical residential areas in Jiangning District of Nanjing City as the research object. Visible light data from Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) were used to obtain the fine classification of residential green space, and the Regional Green Plot Ratio (RGPR) index was constructed.

We proposed an improved calculating method of vegetation cooling efficiency, that is, Regional Cooling Efficiency (RCE). RCE is based on hour-by-hour UAV thermal infrared data. We applied this method to calculate the cooling efficiency of vegetation in residential areas. This way enabled us to investigate the response relationship between the surface temperature of different local climate zones in residential areas and the RGPR indicator. The optimal thresholds of cooling efficiency for different RGPRs in residential areas could also be determined.

Results showed that (1) the daily variation curve of the cooling efficiency of vegetation in the residential area exhibited a "peak" pattern, and the RCE increased with the improvement in solar radiation. During the observation period, the minimum value of RCE appeared at 8:00 a.m. (all lower than 1.0 °C), and the maximum value appeared at 14:00 p.m. (all higher than 1.4 °C). At the level of local climate zone, the RCE of compact residential areas was higher than that of open residential areas. In the case of open residential areas, the RCE decreased with the increase in the average height of the buildings in the area. (2) Under compact local climate zone, the higher RGPR meant a stronger cooling effect brought by vegetation. Meanwhile, in open residential areas, regardless of the height of the building, a certain RGPR threshold was observed for the cooling efficiency of vegetation. When the RGPR reached a certain threshold, the cooling efficiency of the RGPR on surface temperatures reached its maximum intensity.

Overall, this study proposes a method for calculating the cooling efficiency of vegetation in residential areas at the micro-scale for high-resolution UAV data. The cooling efficiency of vegetation and the optimal cooling efficiency thresholds for different types of residential areas at the level of localized climate zones are investigated. This study can help improve the urban thermal environment and provide more specific and scientific theoretical guidance and support for enhancing urban sustainability.

**Key words:** urban residential areas, microthermal environment, Regional Cooling Efficiency (RCE), local climate zone, regional green plot ratio (RGPR), UAV thermal infrared remote sensing, cooling efficiency threshold, green space planning in urban residential areas

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 42077431)