

引用格式:孙杰,毛智慧,王乐,等.居住区典型地物热环境的日变化及其相互影响分析[J].地球信息科学学报,2020,22(2):279-289. [ Sun J, Mao Z H, Wang L, et al. Diurnal variation and mutual influence of typical ground objects' thermal environment in residential areas[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(2):279-289. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190289

# 居住区典型地物热环境的日变化及其相互影响分析

孙杰<sup>1</sup>,毛智慧<sup>2</sup>,王乐<sup>3</sup>,邓磊<sup>1\*</sup>

1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048; 2. 中国水产科学研究院资源与环境研究中心,北京 100141;  
3. 新媒体技师学院,北京 102600

## Diurnal Variation and Mutual Influence of Typical Ground Objects' Thermal Environment in Residential Areas

SUN Jie<sup>1</sup>, MAO Zhihui<sup>2</sup>, WANG Le<sup>2</sup>, DENG Lei<sup>1\*</sup>

1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;  
2. Resource and Environment Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141, China;  
3. New Media Technical College, Beijing 102600, China

**Abstract:** Along with acceleration urbanization, the urban heat island effect is increasingly intensifying due to urban construction. In particular, the thermal environment of residential areas has a profound influence on the local micro-climate. Therefore, studying the thermal environment characteristics of residential areas is of great significance for understanding and improving the local micro-climate. To reveal the thermal environment characteristics of residential areas, this study focused on a residential area in a campus of Beijing by using thermal infrared imagery, and obtained 24 hours thermal infrared data under different weather conditions (clear sky, cloudy, overcast sky) in summer, then selected typical urban ground objects (buildings, iron sheds, asphalt roads, bare soil, trees and shrubs, etc.), and systematically analyzed the diurnal variations of objects in different regions. Finally, the interactive features of the ground objects' temperature were revealed by using a tangent method to determine the boundary ranges of the ground objects. The main results are as follows: (1) The surface temperature curve of artificial ground objects (such as buildings and iron sheds) shows continuously violent ups and downs because of the dramatic changes of solar radiation. It indicates that solar radiation is the main factor affecting the temperature change of ground objects during the daytime, with positive correlation with the temperature of ground objects. In the cloudy weather, the maximum temperature of ground objects occurs after 16:00. Cloud movement increases the temperature fluctuation of ground objects, especially in the cloudy weather. Asphalt roads have higher temperatures at night than other ground objects, and continue to radiate heat at night resulting in ambient temperature increases. Shadow could effectively reduce the amount of solar radiation absorbed by ground objects and reduce the surface temperature. Vegetation canopy thickness is negatively correlated with the temperature of ground objects. Therefore, in residential areas, increasing the vegetation canopy thickness and expanding shadow areas will improve the local micro-climate. (2) The strong

收稿日期:2019-05-31;修回日期:2019-11-18.

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0809900、2018YFC0706004)。[ **Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2018YFC0809900, 2018YFC0706004. ]

作者简介:孙杰(1994—),男,安徽阜阳人,硕士,主要从事遥感方向的研究。E-mail: 18811787078@163.com

\*通讯作者:邓磊(1976—),男,山东烟台人,教授,主要从事遥感与摄影测量方向的研究。E-mail: edenglei@139.com

temperature interaction between trees and bare soil at 06:00 and 14:00 indicates that significant heat exchange occurs throughout the day at the junction of ground objects. At 06:00, the temperature at the junction of lawn and sidewalk has a significant interaction, indicating that there is heat exchange between the lawn and the pavement from night to early morning. It helps relieve the high temperature of the road and the surrounding environment.

**Key words:** thermal infrared; thermal environment; solar radiation; urban underlying surfaces; residential area; urban heat island; Beijing

**\*Corresponding author:** DENG Lei, E-mail: edenglei@139.com

**摘要:**居住区热环境状况是影响局地微气候变化的重要因素,研究居住区地物的热环境特征,对于了解和改善微气候具有重要意义。为了更好地揭示居住区热环境特征,本研究使用热红外成像仪对北京市某校园居住区进行观测,获取了夏季不同天气状况下(晴天、阴天、多云)的24 h热红外影像数据。依据各天气数据和地物属性,系统分析了各地物日变化规律,并通过垂线法判定邻近地物的温度边界范围,进而揭示出地物间温度交互特征。结果如下:① 太阳辐射是影响地物白天温度变化的主要因素,与地物温度呈正相关性;在多云天气下,地物的最高温度滞后至16:00出现,且地物温度曲线呈现连续的“锯齿状”升降趋势,云层的大量运动是导致多云天气下的地物温度波动变化的关键因素;沥青道路在夜间的温度均高于其他地物,并且夜间持续放热,提升周围环境温度;阴影能够有效减少地物吸收的太阳辐射量,降低地物表面温度;植被的冠层厚度与地物温度呈负相关性,因此增加居住区内绿植的冠层厚度,增大区域阴影面积有助于改善局地微气候;② 树木和裸土在06:00和14:00的温度交互作用强烈,表明在地物交界处,全天持续发生显著的热量交换;而夜间至凌晨,草坪与人行道持续进行热量交换,帮助降低路面温度,缓解周围高温状况。

**关键词:**热红外;热环境;太阳辐射;城市下垫面;居住区;城市热岛;北京市

## 1 引言

Howard<sup>[1]</sup>在19世纪初首次发现了城市热岛效应,此后城市热环境问题成为众多学者的研究重点之一。城市热环境的变化特征与城市下垫面密切相关<sup>[2-4]</sup>,它是城市热岛效应形成的直接因素之一,因此研究城市下垫面的热环境变化规律,能为缓解城市热岛效应提供重要的科学依据<sup>[5-9]</sup>。而城市下垫面的温度变化是城市热环境的表征因子,研究城区地表温度的成因规律对于理解城市热环境特征,进而帮助缓解城市热岛效应具有重要意义。

关于城市下垫面温度变化的研究,国内外学者早已展开,主要从2种尺度进行分析:

(1)大尺度的城市范围温度研究,通常基于卫星遥感影像数据进行分析<sup>[10-11]</sup>;1972年RAO<sup>[12]</sup>首次采用遥感的方法对城市热岛进行分析,他利用ITOS-1热红外数据研究美国大西洋中部沿海城市的地表温度分布模式,进而探讨了城市热岛效应。之后国内外学者开始广泛利用遥感卫星数据或航拍数据对城市地区开展热环境分析, Ye等<sup>[13]</sup>利用热红外遥感数据分析了多伦多市1984—2014年的年度和季节温度变化趋势,进而揭示了研究区的城市热岛强度。Majkowska等<sup>[14]</sup>利用Landsat5和现场实测数据分析了波兹南市的城市热岛特

征。周甜甜等<sup>[15]</sup>使用MOD11A2遥感数据对青岛市2001—2012年416幅影像进行时空分析,以UHIER指数为划分标准,运用相关分析、空间叠加分析及景观格局指数分析等方法,探讨了青岛市城市热岛在日、季及年际等时间尺度的变化规律和空间分布特征。基于遥感数据的大尺度城市温度特征分析,其优点是研究范围广,地物丰富多样,但数据量较大,细节分析较少,且时间分辨率较低,对于揭示高时间分辨率上连续的地物温度变化特征较困难。

(2)聚焦于小尺度区域上的城市下垫面温度特征,一般通过气象站点和实测温度的方式,分析和探究小区域内景观地物的温度变化规律<sup>[16-17]</sup>。Yang等<sup>[18]</sup>选择了研究区内几种典型地物,通过手持测温仪器测量地物温度,得到各地物24 h温度数据,并揭示出小区微气候的变化特征。Toraldo等<sup>[19]</sup>连续测量了5种城市道路类型一年的环境条件和路面温度,结果表明空气湿度和风速对路面温度无显著影响,而浅色路面可以有效缓解城市热岛现象。杨雅君等<sup>[20]</sup>利用热像仪和气象站点数据,分析了6种城市下垫面不同季节的温度变化趋势,揭示了太阳辐射与相对湿度对下垫面温度的显著影响,且局部微气候特征与人工地物之间存在密切相关性。

利用气象站和测温仪进行的小区尺度上的研究,可以在连续时间内观测局地微气候变化,但受

限于气象站点较少,观测点不够密集,一般难以精确地分析小区内的热环境特征和微气候影响。热红外成像仪可以将所测物体的红外辐射转换成热图像记录下来,其优势在于操作简便,性能稳定,并且可以获得高时空分辨率的热红外影像数据<sup>[21]</sup>,因此被广泛应用于小区域尺度的温度测量。但当前利用热红外对小区尺度的研究都仅在单一的天气状况(晴天)下进行分析,未能考虑到在多种复杂天气状况下的地物温度变化状况,并且对于地物在空间上的温度交互特征也鲜有研究进行探讨。

针对上述研究的不足,本文从以下几个方面进行评价:① 本研究首次利用热红外成像仪,在多种复杂天气状况下(晴天、阴天、多云)对不同地物的温度日变化特征进行系统的分析。② 本研究从空间维度上系统的分析了地物交界处的温度交互特征,揭示了小区范围内的热环境空间变化特征。希望分析结果能够对改善城市热岛效应以及局地微气候的研究,提供有意义的科学依据和参考。

## 2 研究区概况、数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

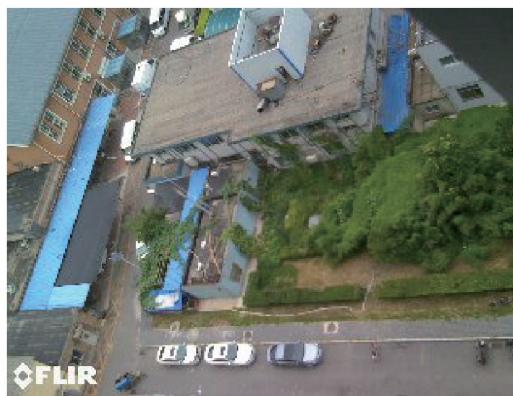
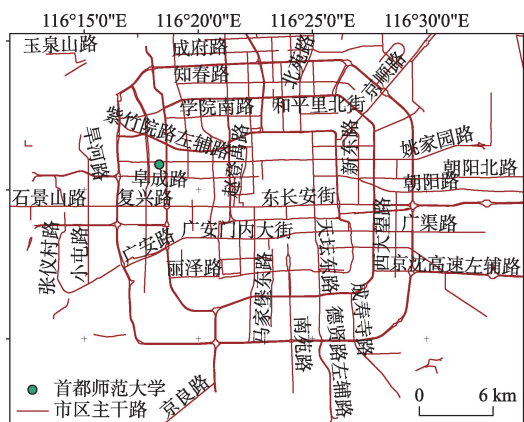
北京市地处华北平原北部,背靠燕山,毗邻天津市和河北省,气候类型为典型的北温带半湿润大陆性季风气候。受季风气候影响,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促,太阳辐射较强。全年平均气温14℃,夏季均温约26℃。

本次实验区域位于北京市首都师范大学本部校区内(图1),校区位于海淀区三环路附近,地属城

市中心,本部校区面积约33.7 km<sup>2</sup>。学校景观为典型的的城市景观类型,包括树木、灌木、裸土、人工草坪、沥青道路、混凝土建筑、铁制屋棚等常见的城市地物,地物类型复杂多样,具有典型代表性,适合开展实验研究。

### 2.2 数据获取与处理

由于夏季太阳高度角大,地表温度较高,城市热环境特征表现尤为明显,因此本次实验选定在2018年7月(夏季)进行。为了分析不同天气条件下的热环境特征,研究选择在3种天气状况下(7月20日多云、7月26日晴天、7月27日阴天)对研究区进行观测,且3个实验日的全天风速均小于3 m/s,对地物温度的影响较小<sup>[22]</sup>。实验使用热红外相机对研究区进行整体拍摄,以此避免因地物拍摄时间不同造成的实验误差。拍摄仪器为FLIR T440热红外成像仪,此外为防止拍摄时镜头晃动导致的像素偏移,使用三脚架固定仪器。实验自上午09:00开始,每15 min拍摄1次,周期为24 h,每种天气状况拍摄1个周期,共拍摄3个周期。实验获取热红外影像共290余幅,应用FLIR Tools软件(FLIR公司自主研发),将原始热红外数据转换成亮温数据,并对其进行分析。需明确的是,经处理后的热红外数据为地物的亮温数据<sup>[23]</sup>,而非实际地物的表面温度。由于各地物比辐射率的不同且受多方因素影响<sup>[24-25]</sup>,地物亮温与实际温度存在一定差异。鉴于此次实验主要针对不同地物的温度特征进行相对性分析,而实验涉及的地物比辐射率均较高且差异较小,故未将亮温修正为地物实际温度而直接使



(a) 地理位置

(b) 实地拍摄的研究区彩色影像

图1 研究区地理位置与影像

Fig. 1 Geographical location and image of the study area

用<sup>[21]</sup>,本文中出现的温度均代表地物亮温。表1为热像仪的具体参数说明。

表1 FLIR T440 热像仪参数  
Tab. 1 Parameter setting of the FLIR T440 thermal imaging camcorder

仪器	FLIR T440
红外分辨率/像素	320×240
波长范围/ $\mu\text{m}$	7.5~13
视场角(FOV)/ $^{\circ}$	45
测量温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	-20~1200
最小焦距/m	0.4
发射率	0.95
热灵敏度/ $^{\circ}\text{C}$	<0.045

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 日变化分析方法

考虑到研究区内地物类型复杂,本文选择了实验区内分布广泛且常见的多种城市地物(建筑物房顶、铁制屋棚、瓦片、沥青道路、人行道、树木、人工草坪、灌木丛和裸土)作为实验分析对象。其中,人工草坪与人行道将作为具有空间特征的研究对象进行具体分析。研究根据实地考察和影像

目视解译,找到实验区内地物的匀质区域,并截取了部分区域作为各地物的感兴趣区域(ROI),同时以ROI内各像元的温度均值作为该地物某一时刻的温度值(图2)。

为了使分析更具有针对性,将所选地物进一步划分为人工地物(建筑物房顶、铁制屋棚、沥青道路等)和自然地物(树木、裸土、灌木、人工草坪等)两大类型。基于实验处理数据,对不同天气条件下的不同地物类型进行系统性分析。此外,研究计算了时间标准差,对地物温度进行日稳定性分析。

### 2.3.2 交互影响分析方法

地物之间持续发生着热量交换,且不同类型地物之间的热量交换尤为明显。对于地物热量交换特征的研究,一般通过地物间的温度变化趋势进行分析。鉴于研究区内地物分布复杂的特点,本研究选择几种相互邻接的地物(图3),分析他们之间的温度交互影响效应,以揭示其热量交互特征。

研究主要采用以下2种分析方法对相邻地物的热量交互影响能力进行评价:①比较地物交界处的温度与地物内部温度的差值差异;②分析地物的温度交界宽度变化。温度交界宽度具体是指在相邻

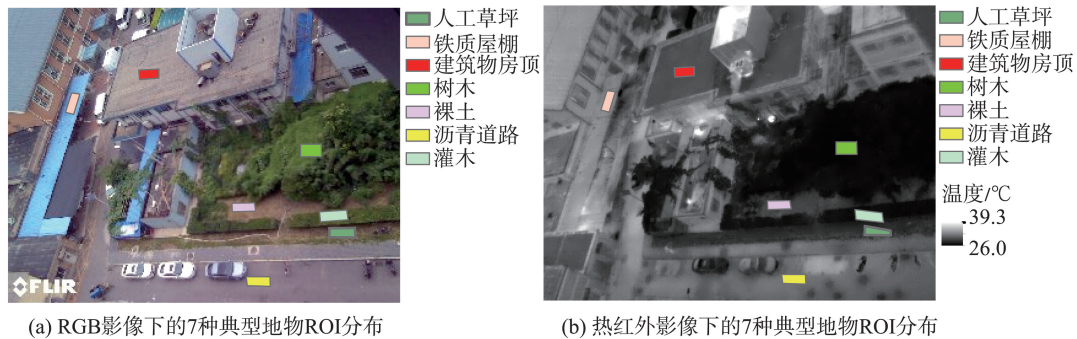


图2 研究区7种典型地物的ROI分布

Fig. 2 ROI distribution of seven typical ground objects in the study area

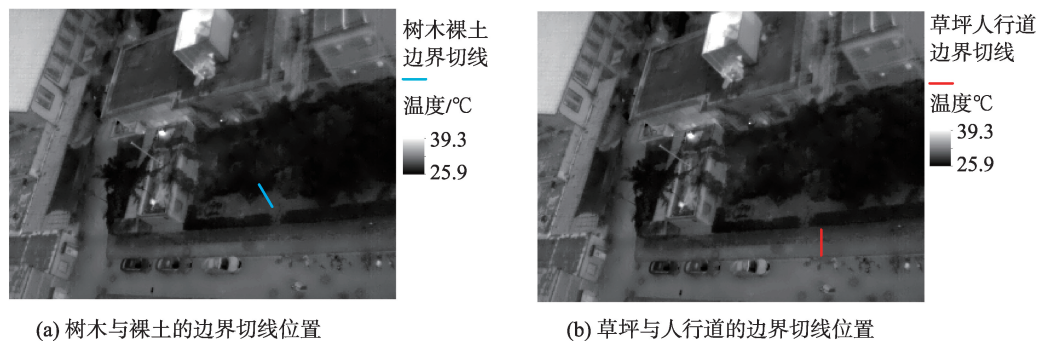


图3 2组地物的边界切线位置分布

Fig. 3 Boundary tangent positions of the two groups of ground objects

地物交界处,温度差异较小的连续像元的数量。当地物交界处温度与地物内部温度的差值较大,且温度边界的宽度较小时,表明此刻相邻的2种地物温度相互影响效应较小,反之亦然。

研究选定干扰因素最少的晴天热红外影像作为实验数据集,并选择2个典型时间切片(14:00和06:00),研究树木与裸土、草坪与人行道的温度边界宽度变化,以探究其热量交换特征。如图3(b),选定人工草坪与人行道之间较平直的边界,以边界为基准作垂线,垂线经过草坪内部、草坪与人行道的交界和人行道内部,再依次提取出垂线所经过的像元值,并对垂线上相邻2个点的像元求差值,绘制成温度图进行分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 观测角度的影响

本次实验由于拍摄地点的限制,造成了热像仪侧面摄取影像。相较于正面拍摄,侧面拍摄会改变地物的拍摄角度和拍摄距离,从而增加实验的误差。为了探究侧面拍摄对地物温度的影响,本研究从热红外影像中(晴天14:00),分别选择瓦片顶部和建筑物顶部的3个不同角度的匀质区域(图4),将每个区域的像元均值作为此区域的表面温度值进行对比分析(表2)。

从图4可以看出,实验选择的同种地物,其各角度ROI的像素个数、朝向、材质均一致,各ROI像元

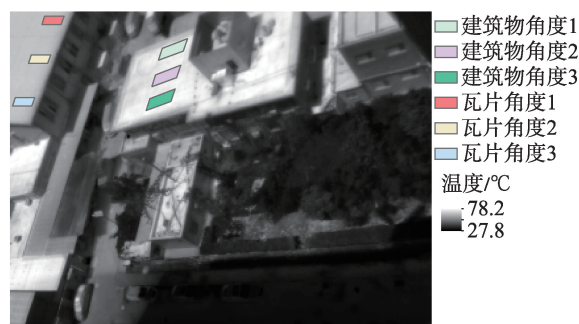


图4 晴天14:00的地物各角度ROI分布

Fig. 4 ROI distribution at various angles of a typical ground object at 14:00 in a clear day

均值在理想情况下理应是相等的。但在表2中显示,随着ROI位置与拍摄点之间角度的增大,温度值逐渐减小,表明拍摄角度与温度值呈负相关性。其原因可能是,在水平方向上,ROI与拍摄点角度的增大导致两者之间的拍摄距离增大,从而增加了被大气颗粒、水汽吸收的概率,致使其温度值下降<sup>[21]</sup>。从表2数值上看,建筑物的各ROI温度差值最大仅为0.21 °C,而瓦片的最大温差值是0.54 °C,说明本次实验的侧面拍摄造成的温度误差较小,对地物温度的影响较小,并且本文着重分析地物温度的相对性特征,综合上述,热像仪侧面拍摄所造成的温度偏差在合理范围之内。

#### 3.2 日变化特征分析

##### 3.2.1 3种天气状况下的地物特征分析

从各地物温度曲线上看(图5),6种地物在3种天气状况下的温度日变化规律基本一致,都呈现先升后降的单峰形态。在白昼期间,人工地物(建筑物房顶、铁制屋棚、沥青道路)的表面温度均高于自然地物(裸土、灌木、树木),其中建筑物房顶表面温度最高,晴天状态下的温度高达75 °C,说明人工地物尤其是建筑物房顶,能够吸收大量太阳辐射并转换成热能释放,影响和提升周围环境温度。在图5的21:00—次日7:00,沥青道路的表面温度普遍高于其他地物,表明沥青道路在夜间向外释放大量热能,提高了周围环境温度。而灌木和树木的温度曲线趋势平缓,温度变化幅度最小,其中树木的温差在5~12 °C之间,远低于建筑物房顶的27~48 °C的温差区间,原因是植物的蒸腾作用能够有效调节其自身及周围环境的温度,保持温度平衡。在图5(b)的3:00—03:15,6种地物温度曲线呈现“断崖式”下降。结合实际情况可知,在3:00—3:15曾出现短暂性降雨,导致研究区内水汽增加,进而提高了区域内的相对湿度,并迅速降低了地物的表面温度。这表明相对湿度与研究区内的地物温度呈负相关性。

从3种天气状态上分析,在白昼期间晴天地物的温度普遍高于阴天和多云天气,这是由于晴天接收的太阳辐射量高于其他2种天气,说明太阳辐射

表2 不同角度ROI温度值统计

Tab. 2 Temperature value statistics of ROI at different angles

名称	建筑物角度1	建筑物角度2	建筑物角度3	瓦片角度1	瓦片角度2	瓦片角度3
温度均值/°C	75.47	75.47	75.68	68.18	68.55	68.72

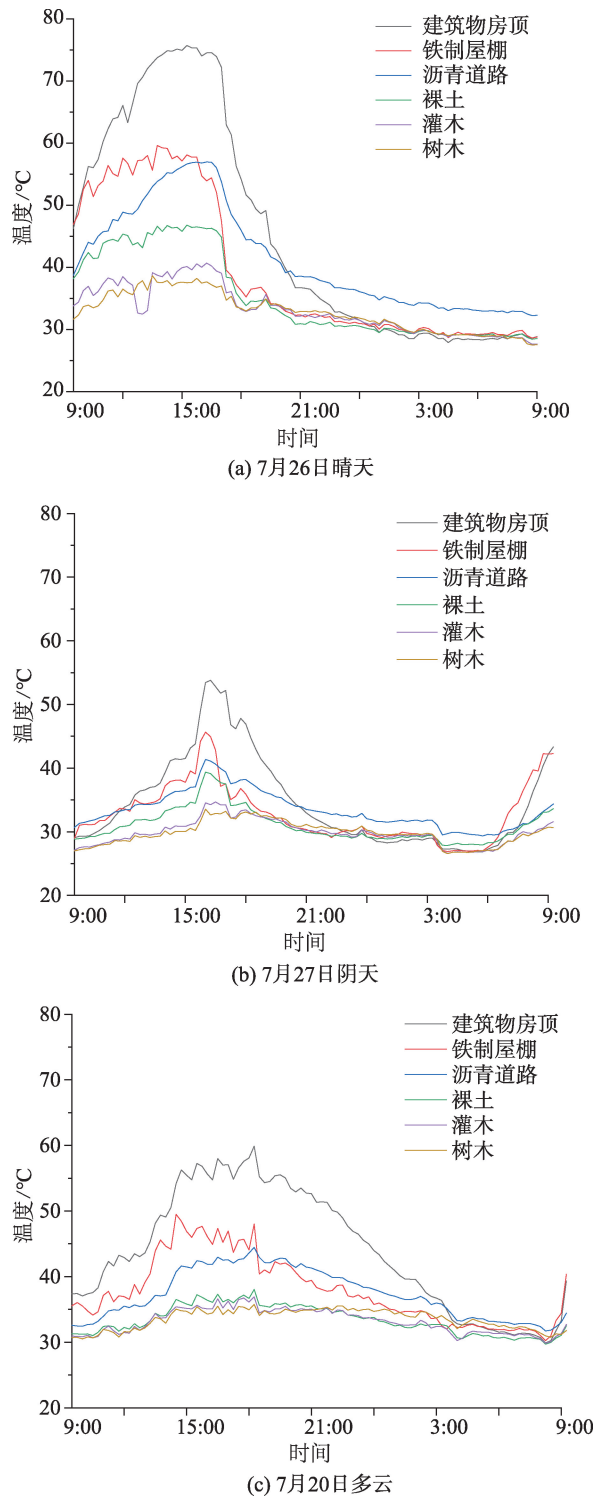


图5 不同天气状况下的地物24 h温度变化特征  
Fig. 5 Characteristics of 24-hour temperature variations of ground objects under different weather conditions

是影响地物温度变化的主要因素,它与地物温度呈正相关性。阴天的高温持续时间最短,约2 h(15:30—17:30),多云天气的高温持续时间最长,约4 h(14:00—16:00)。鉴于多云天气中地物复杂的温度

特征,研究从3个时间尺度(15、30和60 min)对多云天气下的地物进行分析,从图5(a)可知,晴天的最高温度出现在14:00左右,而图6(b)中多云天气的最高温度在16:00左右,相较于晴天滞后时间达2 h。原因是在多云天气下深厚的云层增强了大气逆辐射作用,造成了地物二次吸收辐射,而在16:00前地物接收的热量大于所释放的,使得地物温度持续攀升,直至16:00地物热量收支达到平衡,温度达到最高。而从图5(c)和图6可知,当多云天气的时间分辨率依次提高时,地物在白昼期间的温度波动会逐渐增大,而在以15 min为间隔的最高分辨率下(图5(c)),地物温度曲线呈现出连续的“锯齿状”升降趋势。其中以人工地物的温度波动最为剧烈。说明在多云天气状况下,云层的大量运动造成研究区内交替出现阴影,由于阴影的无规律出现,使得地物接收的太阳辐射量波动增大,进而导致了人工地物温度曲线波动异常。

### 3.2.2 同类型地物差异分析

对于同类型地物的分析,本文将地物类型划分为人工地物(建筑物顶部)和自然地物(树木、灌木、人工草坪)2类,并选择在晴天条件下进行差异性分析。实验选取影像中3栋建筑物顶部的匀质区域作为ROI,顶部均为混凝土材质(图7(a)),并计算出每个ROI内像元均值作为这一时刻ROI的温度值。

由图7(b)可知,建筑物1和3顶部曲线趋势大致相同,而从图2(a)中可以看出,建筑物1顶部为灰白色,建筑物2、3顶部颜色均呈深灰色。建筑物1和3顶部颜色虽不同,但温度曲线相似,表明颜色对建筑物温度变化的影响较小。建筑物2顶部在11:00—18:00的温度低于建筑物1和3顶部,温差高达15.2°C。经调研发现,建筑物2顶部使用了深灰色隔热涂料,这在较大程度上抑制了物体表面温度的上升。在白昼期间,自然地物间的温度差异也较大,其中人工草坪的温度最高,灌木和树木次之,人工草坪与树木的温差最高可达6.5°C。从曲线的平滑度上看,人工草坪的温度曲线波动较大,而树木的温度曲线较平滑。其原因可能与植物冠层厚度有关,树木的冠层最厚,蒸腾作用最强,因此降温效果最好。而人工草坪冠层最薄,易受周围人工地物的影响,所以其曲线波动较大,温度最高。

### 3.2.3 地物稳定性分析

本文采用黄良美等<sup>[29]</sup>的时间标准差计算方法,对6种典型地物的温度日稳定性进行分析。时间标准差能够反映出地物温度的稳定性情况,标准差越

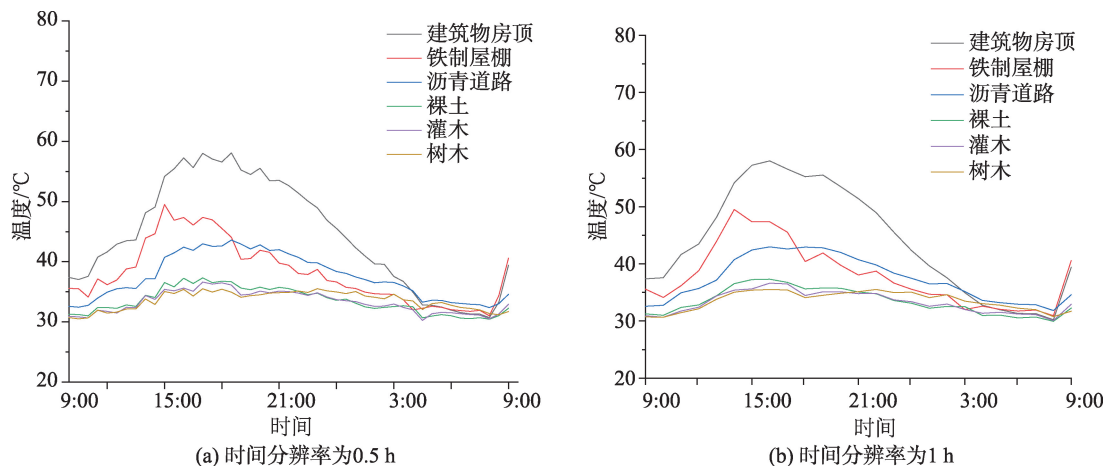
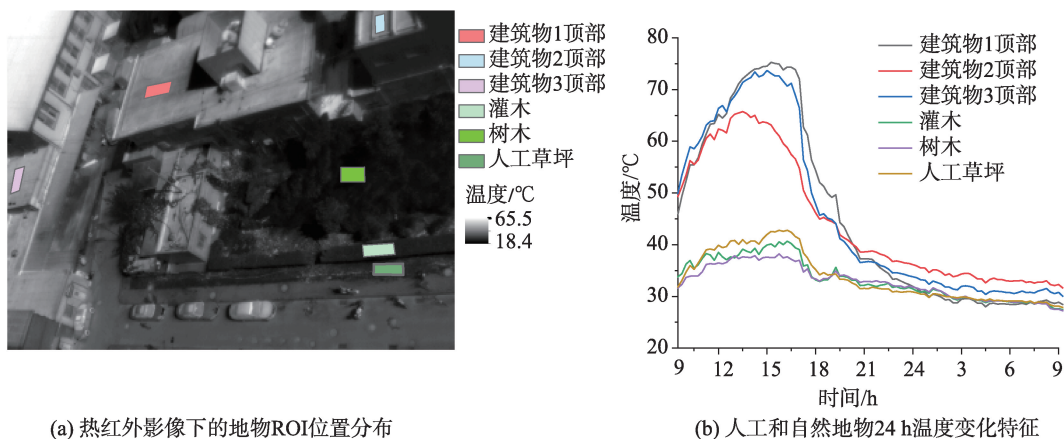


图6 多云天气中不同时间分辨率下的地物24 h温度变化特征

Fig. 6 Characteristics of 24-hour temperature variations of ground objects at different time resolutions in cloudy



(a) 热红外影像下的地物ROI位置分布

(b) 人工和自然地物24 h温度变化特征

图7 人工和自然地物的温度差异分析

Fig. 7 Temperature difference analysis of artificial and natural ground objects

小,表明物体全天温度变化越稳定。如图8所示,晴天条件下的地物日标准差最大,地物温度波动最大,稳定性最差。阴天状态下的地物日标准差最低,稳定性最好。从地物类型上看,自然地物(树木、灌木、裸土)的标准差较小,稳定性较好。而人工地物中建筑物房顶的标准差最大,达到18.1,说明建筑物房顶的温度日变化波动最大,稳定性最差,易受外部因素的影响。

### 3.3 交互影响特征分析

#### 3.3.1 树木和裸土之间的温度交互影响分析

图3(a)是树木与裸土的边界垂线图,从图中红线内共提取出29个像元温度,并对提取的像元温度值进行统计分析(图8)。

如图9(a)所示,在14:00像元点1—12之间,温

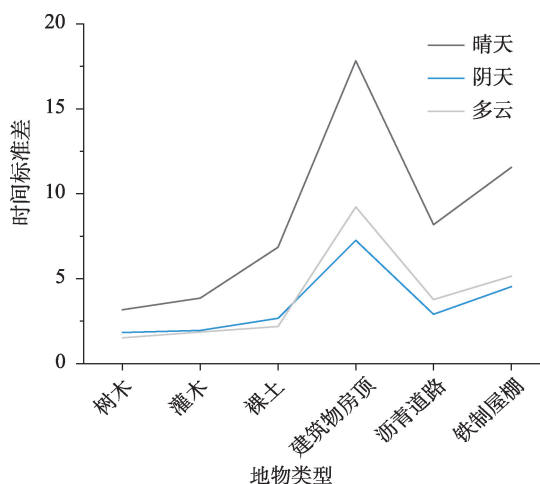


图8 不同天气状况下的地物时间标准差特征

Fig. 8 Time standard deviations of ground objects under different weather conditions

度曲线的变化趋势较小,像元点12—18的曲线斜率明显增大,由此判定树木和裸土的边界宽度为像元点12—18,共7个像元。由图9(b)可知,相邻2个像元温差值最高为 $3.5^{\circ}\text{C}$ ,且在像元点12—18内的温差值均高于地物内部的温差值。综上分析,虽然在14:00裸土和树木2种地物的温差值差异较大,温度上升明显,但其边界较宽,说明地物交界处的热量交互范围延伸较广,也进一步表明裸土和树木在14:00温度交互影响较强。

从图9(c)可看出,像元点11—16的像元温度依序升高,表明像元点11—16为地物边界范围,由图9(d)可得,从像元点11起,温差值出现正值,且差值逐渐增大,像元点13—17的温差值大于两地物的内部温差值,说明交界处温度逐步递增,温差最高达 $0.24^{\circ}\text{C}$ 。上述表明,6:00裸土和树木的热量交换较明显,温度相互影响较强

### 3.3.2 草坪和人行道之间的温度交互影响分析

实验从图3(b)草坪与人行道的垂线中共获取

21个像元温度值,统计分析得到(图10(c)),14:00像元点1—9的温度值逐渐下降,而从像元点10起曲线斜率迅速提升直至像元点14。再从图10(b)上看,点11—13的温差值均大于两地物内部的温差值,且最大温差值达到 $3.4^{\circ}\text{C}$ ,综上判定像元点10—13为草坪和人行道的边界。由于草坪和人行道的边界宽度较小(4个像元),且边界两端温差较大,表明在14:00草坪和人行道的温度相互影响程度较小,热量交换能力不显著。

图10(c)显示了6:00草坪和人行道的温度交互特征,像元点1—7的温度曲线与坐标横轴近似平行。从图10(d)上看,像元点7之前的像元点温差值均小于 $0.05^{\circ}\text{C}$ ,说明此区间内的像元温度差异极小,可忽略不计。而从图10(c)可知,像元点7—13的曲线斜率逐渐增大。在图10(d)中,像元点8—13的温差值远高于两地物内部的温差值,说明草坪和人行道的边界宽度为像元点8—13的6个像元,边界宽度较大,且温差最大仅 $1^{\circ}\text{C}$ 。上述说明,6:00草坪和人行道的温度相互影响较大,热量交互效应明显。

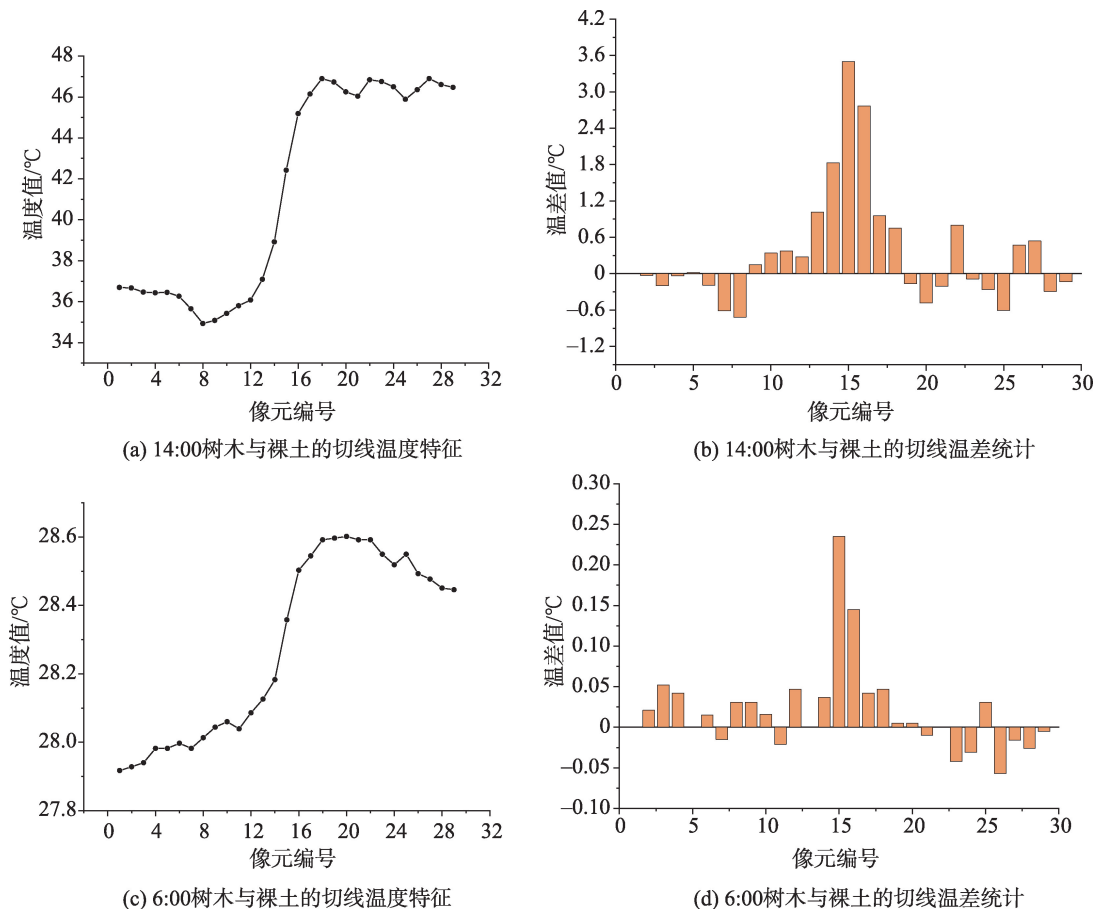


图9 树木与裸土在14:00和6:00的温度交互特征

Fig. 9 Temperature interaction characteristics of trees and bare soils at 14:00 and 6:00



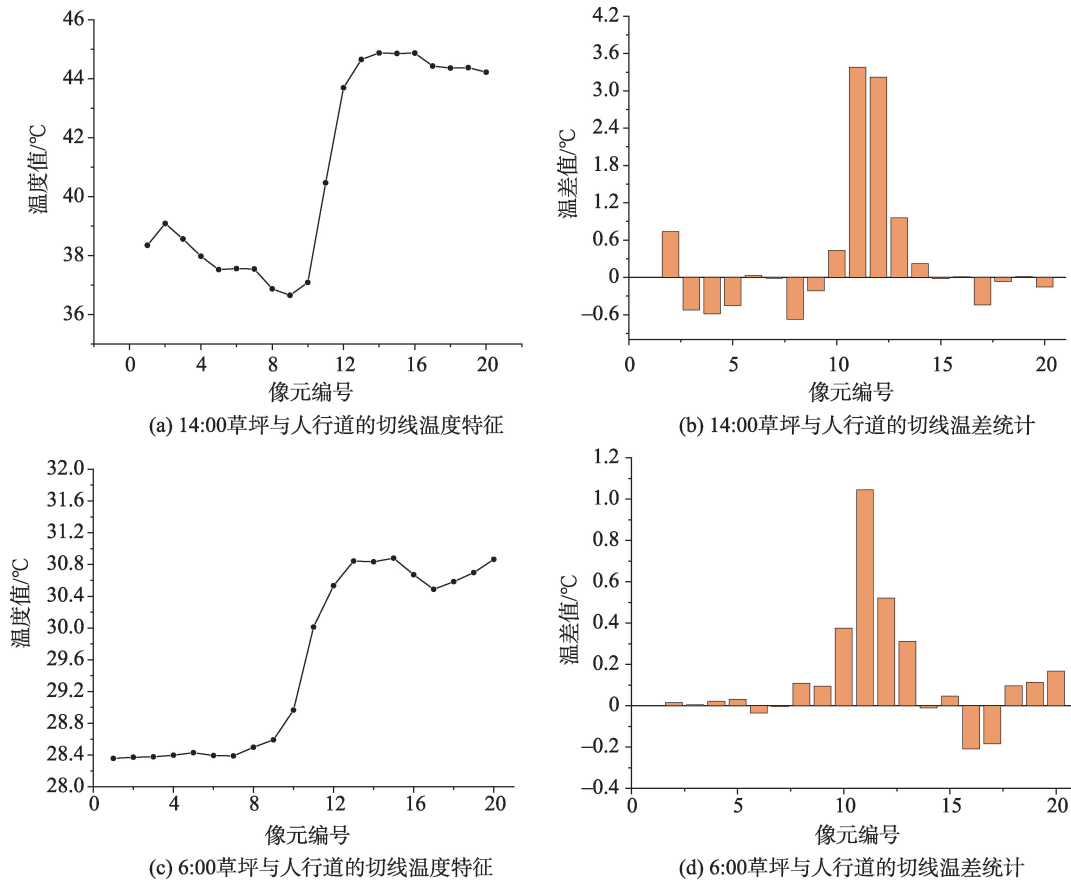


图10 草坪与人行道在14:00和6:00时的温度交互特征

Fig. 10 Temperature interaction characteristics of lawns and sidewalks at 14:00 and 6:00

## 4 结论与讨论

本研究利用热红外成像仪获取了夏季不同天气条件(晴天、阴天、多云)下的24 h热红外影像数据,对影像内几种典型地物进行系统分析,总结了不同地物表面温度的日变化规律;并通过分析相邻地物(树木和裸土、草坪和人行道)的温度边界变化,揭示了地物在空间上的热量交互影响特征。结论如下:

(1)3种天气状态中多云天气的地物温度特征最为复杂。其中在多云天气下,地物日高温持续时间最长(约4 h),并且由于云层的增多加大了大气逆辐射作用,导致地物的最高温度时间滞后至16:00左右出现。当依次提高多云天气的时间分辨率发现,地物的温度波动会逐渐增大。在15 min的时间分辨率下,地物温度曲线出现连续“锯齿状”升降趋势,以人工地物的温度波动最为剧烈。上述结果表明云层的大量运动是导致多云天气下的地物温度波动变化的关键因素之一。

(2)在人工地物中,建筑物房顶对研究区白天温度变化具有显著影响。太阳辐射是研究区地物温度升高的直接影响因素,与地物温度呈正相关性,相对湿度与地物温度呈负相关关系;杨等<sup>[20]</sup>利用热红外成像仪对不同季节的城市下垫面进行分析,结果显示沥青道路全年的白昼温度均较高,对大气加热作用较强,这与本研究中沥青道路在白昼期间的温度特征相似。而本研究进一步发现沥青道路在3种天气状态下的夜间温度均高于其他地物,并且在夜晚大量放热,提升周围环境温度。在自然地物中,植物的蒸腾作用能有效降低自身及周围环境温度。此外,植被的冠层厚度对周围环境温度有显著性影响,植被冠层越厚,其降低自身和周围环境温度就越显著。

(3)本研究中建筑物房顶在3种天气下的白昼温度均高于所有地物温度。而吴志丰等<sup>[21]</sup>利用热像仪计算显热释放量来表征地表温度的变化,结果显示建筑物墙面温度低于其他人工地物。造成两种研究结果差别的原因是2个研究中的建筑物ROI

与太阳光线的夹角不同。本研究中所选地物 ROI 包括建筑物房顶均与地面平行,其与太阳光线的夹角较大,接收的热量较多。而吴志丰等<sup>[21]</sup>中仅有建筑物墙面与地面垂直,其与太阳光线的夹角最小,使得建筑物墙面的温度低于其他人工地物。

(4)采用时间标准差分析地物的温度日稳定性,结果表明晴天状态下的地物标准差最大,地物温度日稳定性最差。而从地物类型上看,建筑物房顶的在3种天气下的时间标准差均最大,日稳定性最差,易受外部因素的影响,而树木的标准差最小,温度日稳定性最优。

(5)空间维度上,树木和裸土在6:00和14:00时刻,边界范围增大,表明树木和裸土在边界处的温度交互作用较强烈。草坪和人行道在6:00时的边界范围增大,说明夜间至凌晨,草坪和人行道的温度交互效应显著。草丛吸收了人工地物的部分热量,有效降低了周围环境温度,因此在居住区内增加绿色植被面积,能够帮助调节小区内温度,提高居民舒适度。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Howard L. Climate of London deduced from meteorological observation[J]. Harvey and Darton, 1833,1(3):1-24.
- [ 2 ] 叶丽梅,江志红,霍飞.南京地区下垫面变化对城市热岛效应影响的数值模拟[J].大气科学学报,2014,37(5):642-652. [ Ye L M, Jiang Z H, Huo F. Numerical simulation of the impact of land cover change on the urban heat island effect in Nanjing[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014,37(5):642-652. ]
- [ 3 ] Saito I, Ishihara O, Katayama T. Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area [J]. Energy and Buildings, 1991,15/16:493-498.
- [ 4 ] Peng J, Xie P, Liu Y, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region[J]. Remote Sensing of Environment, 2016,173:145-155.
- [ 5 ] 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,等.城市热岛的生态环境效应[J].生态学报,2005,25(8):2055-2060. [ Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, et al. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(8):2055-2060. ]
- [ 6 ] 白杨,王晓云,姜海梅,等.城市热岛效应研究进展[J].气象与环境学报,2013,29(2):101-106. [ Bai Y, Wang X Y, Jiang H M, et al. Progress of urban heat island effect[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013,29(2): 101-106. ]
- [ 7 ] 李海峰,李永树,卢正,等.河流廊道景观的热环境效应分析[J].地理与地理信息科学,2015,31(4):51-54. [ Li H F, Li Y S, Lu Z, et al. Analysis on the thermal environment effect of river corridor landscape[J]. Geography and Geo-Information Science, 2015,31(4):51-54. ]
- [ 8 ] Wang J, Huang B, Fu D, et al. Spatiotemporal variation in surface urban heat island intensity and associated determinants across major Chinese cities[J]. Remote Sensing, 2015,7(4):3670-3689.
- [ 9 ] 寿亦萱,张大林.城市热岛效应的研究进展与展望[J].气象学报,2012,70(3):338-353. [ Shou Y X, Zhang D L. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012,70(3):338-353. ]
- [10] 刘宇鹏,杨波,陈崇.基于遥感的长沙市城市热岛效应时空分析[J].遥感信息,2011(6):73-78. [ Liu Y P, Yang B, Chen C. Temporal and spatial analysis of urban heat island in Changsha based on remote sensing data[J]. Remote Sensing Information, 2011(6):73-78. ]
- [11] 闫峰,覃志豪,李茂松,等.基于MODIS数据的上海市热岛效应研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2007,32(7):576-580. [ Yan F, Qin Z H, Li M S, et al. On urban heat island of Shanghai city from MODIS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007,32(7):576-580. ]
- [12] Rao P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1972,53:647-648.
- [13] Ye C, Wang M J, Li J. Derivation of the characteristics of the surface urban heat island in the greater Toronto area using thermal infrared remote sensing[J]. Remote Sensing Letters, 2017,8(7):637-646.
- [14] Majkowska A, Kolendowicz L, Pórolniczak, et al. The urban heat island in the city of Poznań as derived from Landsat 5 TM[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017,128(3-4):769-783.
- [15] 周甜甜,廉丽姝,李宝富,等.基于遥感的青岛市城市热岛时空变化特征[J].地球环境学报,2017,8(2):157-168. [ Zhou T T, Lian L S, Li B F, et al. The change of spatial-temporal characteristics of Qingdao urban heat island based on remote sensing[J]. Journal of Earth Environment, 2017,8(2):157-168. ]
- [16] Liu L, Zhang Y Z. Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong[J]. Remote Sensing, 2011,3(12):1535-1552.
- [17] 商茹,李嘉乐,李薇,等.北京城市绿地不同下垫面对环境微气候影响研究[J].中国农学通报,2019,35(22):77-83. [ Shang R, Li J L, Li W, et al. Different underlying surfac-

- es of urban green space in Beijing: Effects on environmental microclimate[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019,35(22):77-83. ]
- [18] Yang X, Zhao L. Diurnal thermal behavior of pavements, vegetation, and water pond in a hot-humid city[J]. *Buildings*, 2016,6:1-12.
- [19] Toraldo E, Mariani E, Alberti S, et al. Experimental investigation into the thermal behavior of wearing courses for road pavements due to environmental conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2015,98:846-852.
- [20] 杨雅君,邹振东,赵文利,等. 6种城市下垫面热环境效应对比研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017,53(5): 881-889. [ Yang Y J, Zou Z D, Zhao W L, et al. Comparative study on the thermal environment effect of six urban underlying surfaces[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017,53(5):881-889. ]
- [21] 吴志丰,王业宁,孔繁花,等.基于热红外影像数据的典型居住区常见地表类型热特征分析[J]. *生态学报*, 2016,36(17):5421-5431. [ Wu Z F, Wang Y N, Kong F H, et al. Analysis of the thermal characteristics of selected urban surfaces in a typical residential area based on infrared thermography[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016,36(17): 5421-5431. ]
- [22] 邹晓泉,钟珂,张红婴,等.风速风向对上海地区建筑物南墙冬季太阳辐射得热的影响[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2017,43(1):102-108. [ Zou X Q, Zhong K, Zhang H Y, et al. Influences of wind velocity and direction on solar energy gain of building south walls in winter in Shanghai[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2017,43(1):102-108. ]
- [23] 孟鹏燕,徐元进,陈曦.地形对热红外数据反演林地表面温度的影响[J]. *地理与地理信息科学*, 2015,31(1):32-36. [ Meng P Y, Xu Y J, Chen X. Study on topology consistency processes for vector data overlay analysis[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015,31(1):32-36. ]
- [24] 何文英,陈洪滨,宣越健,等.几种地表微波比辐射率变化特征的地面观测[J]. *地球物理学进展*, 2010,25(6):1983-1993. [ He W Y, Chen H B, Xuan Y J, et al. Field measurements of the surface microwave emissivity for different surface types[J]. *Progress in Geophysics*, 2010,25(6): 1983-1993. ]
- [25] 徐静,王新生,高守杰,等.地物比辐射率数据分析[J]. *遥感技术与应用*, 2013,28(5):815-823. [ Xu J, Wang X S, Gao S J, et al. Analysis of surface features emissivity data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013,28(5): 815-823. ]
- [26] 黄良美,黄海霞,项东云,等.南京市四种下垫面气温日变化规律及城市热岛效应[J]. *生态环境学报*, 2007,16(5): 1411-1420. [ Huang L M, Huang H X, Xiang D Y, et al. The diurnal change of air temperature in four types of land cover and urban heat island effect in Nanjing, China [J]. *Ecology and Environment*, 2007,16(5):1411-1420. ]