

# 基于Landsat的绍兴市热岛效应监测与分析

杨圆圆

哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2022年10月4日; 录用日期: 2022年11月6日; 发布日期: 2022年11月15日

## 摘要

地表温度是研究城市热岛效应的重要参数, 可以通过反演地表温度对城市热岛效应进行监测, 为城市体系构建科学生态的发展提供参考。本文以绍兴市越城区为研究区, 利用热红外遥感技术, 首先采用Jiménez-Muñoz J.C算法反演地表温度, 并用地面站实测数据进行精度验证, 之后对城市热岛效应进行分级评价, 最后对热场时空特征进行分析, 探讨城市热岛效应与下垫面组分间的联系。研究发现: 1) 2008~2018年越城区的热岛效应呈现出增强态势, 热岛区域范围扩张, 城区北部热岛效应明显加剧。2) 越城区冬季地表温度与NDVI、NDBI为正相关关系, 与MNDWI为负相关关系。

## 关键词

热岛效应, 土地利用类型, 热场变异

# Monitoring Analysis of Urban Heat Island Based on Landsat Data in the Main Areas of Shaoxing

Yuanyuan Yang

Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Oct. 4<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 6<sup>th</sup>, 2022; published: Nov. 15<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Urban heat island effects are studied using land surface temperature as a parameter. Providing reference for urban system construction, scientific and ecological development and monitoring of urban heat island effects, it can be employed to monitor the urban heat island effect. Research is conducted in the Yuecheng District of Shaoxing City in this paper. In order to retrieve the surface

temperature, the Jiménez-Muñoz J.C single channel algorithm is used, and the accuracy of the algorithm is verified with the measured data from the ground station. After this, the urban heat island effect is graded and evaluated. Lastly, the space-time characteristics of the heat field are analyzed to investigate the relationship between the urban heat island effect and its underlying components. As a result of the research, it was found that: 1) The heat island effect across the city of Yuecheng District showed an enhanced trend from 2008 to 2018, the regional scope of the heat island expanded, and the heat island effect in the north of the city increased significantly. 2) The land surface temperature in Yuecheng District in winter is positively correlated with NDVI and NDBI, and negatively correlated with MNDWI.

## Keywords

Urban Heat Island (UHI), Land Use/Cover Change (LUCC), Thermal Field Variation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

从人们认识到全球平均表面温度呈上升态势起,全球变暖这个课题便吸引了众多学者对其进行研究和剖析,从城市热岛形成的自然角度出发,人工热源的大量增多,能量和水的平衡过程出现失衡,气流的上升使得城市上空的大气组成发生变化[1]。目前对高空的热岛效应特征已进行了深入研究,发现晚上城市中心既是热岛又是湿气岛,在日出时则作为高温岛和干旱岛[2],城市热岛效应在夏季最小,秋季和冬季最大[3][4]。Bastiaanssen 和 Menenti [5]发现地表温度与地表反射率之间存在一定的联系,并且二人论证了不同土地类型的地表温度不同。霍金斯[6]等人提出城市热岛效应强度与土地利用/覆盖变化的模式有关,例如植被,水体和建筑物的组成及变化,他研究了植被覆盖度在计算城市热岛效应中的作用。田向军[7]指出从遥感图像中获得的各种植被指数,可用于定性和定量的评估植被覆盖度,为热岛效应的研究提供参考。Rao [8] 1972 年首次证明能够使用卫星获取的热红外数据,对产生城市热岛效应的区域进行分析。随着 3S 技术的快速发展,专家学者们使用热红外遥感影像获取地表温度、监测热环境变化、揭示城市热岛的空间分布特征的研究开始盛行。翁教授[9]将 120 米和 60 米空间分辨率的 LandsatETM+影像、TIRS 影像用于城市热岛效应的局部研究中。Jiménez-Muñoz J.C [10]等人提出一种普适性较强,适用于各类热红外波段数据的算法。针对 Landsat 8 遥感卫星的热红外波段特点,覃志豪[11]依据辐射传输方程推导出一种易于推算且精度较高的单窗算法。王乐[12]利用单窗算法,反演得到西安市主城区的地表温度,他的研究表明地表温度与土地利用类型之间存在相关关系。

由此看来,利用遥感技术对城市热岛分布进行研究,可以有效地揭示城市热岛的分布格局,以及同下垫面组成、城市土地利用类型、功能布局之间的空间对应关系。应用 Landsat 高精度热红外遥感影像能获得更加准确、科学、真实的土地利用数据,以研究城市热岛的效应机制,土地利用特征,分析城市空间结构格局以及对城市热岛的影响,探讨城市热岛效应与其影响因素之间的关系,有利于知晓绍兴市越城区热岛分布的情况,对提供改善城市环境方案,缓解城市热岛效应有参考价值。

本文采用 Jiménez-Muñoz J.C [10]单通道算法,利用 Landsat 影像反演得到越城区 2008 年、2018 年的地表温度,研究 2008 年~2018 年城市热岛效应发生变化的区域,以及变化区域同城市化有关的下垫面之

间的关系,利用热场变异指数,对热岛效应强度进行评价,并对热岛效应强度与土地利用/覆盖类型变化区域,进行平均温度和下垫面相关指数计算,分析二者之间的相关性,并探讨这种关系的时空分布特征。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 研究区概况

绍兴市位于华东地区,是浙江省下属的地级市之一,介于北纬 29°13'35"~30°17'30",东经 119°53'03"~121°13'38"之间,北隔钱塘江与嘉兴市相望[13],地处丘陵与平原两大地貌单元之间,独特的地形结构导致市内河道密布,湖泊众多,形成山围水绕的地形特征。

本文选取的研究区域为绍兴市越城区,是绍兴的主城区,该城区位于绍兴市内会稽山北麓。研究区地势南高北低,地形骨架为独特的倒“U”字形,因位于平原地带,境内河道交错,水网密布。当地气候为亚热带季风气候,受季风影响,四季分明,温和多雨,但由于地处中纬地带,加之其复杂的地形结构背景,境内小气候差异十分明显。

### 2.2. 数据来源

本文遥感影像数据从地理空间数据云网站获得(<http://www.gscloud.cn/>),选择 2008 年 2 月 28 日拍摄的 Landsat 5 TM 影像和 2018 年 3 月 11 日 Landsat 8 TIRS 影像。气象数据从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取,由于研究区内无地温观测站点,故选用属于绍兴市内且地理距离最邻近越城区的绍兴站(站号 58453)作为本研究的地温观测站。大气参数从 NASA 官网(<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)根据影像数据的头文件中读取的成像时间和经纬度获得。

### 2.3. 热场变异指数计算

对亮温、植被指数[14][15]、水体指数、地表比辐射率[16][17]进行计算后,利用 Jiménez-Muñoz J.C 单窗算法反演地表温度。因热岛效应监测的不同日期的遥感影像存在差异,从解译的遥感影像中,反演得到的地表温度存在一定的误差,同时若仅关注绝对的地表温度变化,缺乏科学严谨性。考虑到上述因素,本文引入热场变异指数  $HI(T)$ ,  $HI(T) = (LST - LST_{mean}) / LST_{mean}$ ,来评价城市热岛效应强度[18][19]。研究根据上述理论基础,评价热岛效应强度分级指标如下:热场变异指数小于等于 0,无热岛效应现象;0~0.005 之间,热岛效应为弱;0.005~0.01 之间,热岛效应为中;0.01~0.015 之间,热岛效应较强;0.015~0.02 之间,热岛效应为强;大于等于 0.02,热岛效应极强。

### 2.4. 下垫面信息提取

为了对城市下垫面组分进行研究,引入能体现出建筑的密度情况的归一化建筑指数(NDBI)[20]。对研究区的土地利用/覆盖类型进行提取,采用监督分类的方法进行分类。原理是先对样本进行训练,获得判别函数后进行归类,达到自动识别地物的目的。根据张欣欣[21]的研究,最大似然法的 Kappa 系数为 0.88,总体分类精度 90.32%,分类效果最好。因此本文选用最大似然模型,共分为水体、植被、建筑、耕地四种类型,其中植被类型含林地、草地,耕地类型含水田、旱地。对分类完的结果进行精度评估,结果显示 2008 年、2018 年分类的总体精度分别为 92.13%、90.49%,Kappa 系数分别为 0.91、0.89。在四类土地利用类型中,建筑和水体分类较为准确,植被和耕地在选取训练样本时,因样本近似,存在部分错分像元,但错分像元占总体像元比例较小,且本研究目的是对城市热岛效应监测,此次分类结果能够体现出研究区域土地利用类型变化,满足本研究的需求,因此可用于分析研究区域的土地利用状况。

为验证地表温度反演结果的精度，将反演得到的结果与气象台站的历史实测数据进行对比，见表 1。由于卫星与地面观测站点之间在空间尺度上存在差异，精度验证后认为该反演结果属于合理误差范围内，同时本研究的主要目的是热岛效应的时空变化，该反演结果能够满足分析研究区的城市热岛效应的需求。

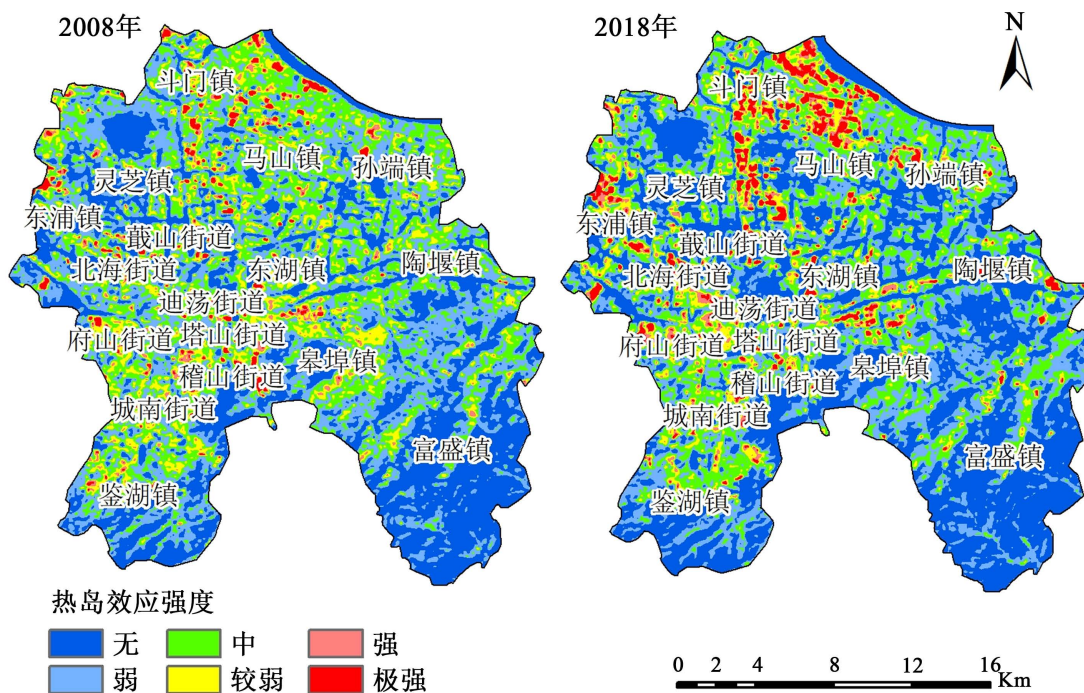
**Table 1.** The inversion results in 2008 and 2018 were compared with the measured of the site  
**表 1.** 2008 年、2018 年反演结果与站点实测值误差对比

日期	实测值	LST	绝对误差	相对误差
2008.2.28	283.790 K	281.771 K	2.019 K	0.71%
2018.3.11	288.705 K	287.322 K	1.383 K	0.48%

### 3. 热场变异分析

#### 3.1. 热岛效应的时空变化

2.3 节中，我们引入了热场变异指数，来评价城市热岛效应强度。热场变异指数是利用均值和方差构建的一种相对性评价指标，通过确定一个阈值范围，对热岛效应强度进行评价。图 1 为越城区 2008 年、2018 年的城市热岛区域分布图。



**Figure 1.** Intensity distribution maps of heat island effect in 2008 and 2018

**图 1.** 2008 年、2018 年热岛效应强度分布图

从图 1 中可以看出，2008 年越城区整体热岛效应并不算太强，热岛的主要分布形态为点状或破碎分离的块状，热岛效应为较强及以上强度区域主要集中分布在以塔山街道为中心区域向四周扩散，另一部分主要集中在斗门镇、马山镇北部和东浦镇西北方向，2018 年越城区热岛效应强度为较强及以上区域面积有所增加，范围外扩，且产生热岛效应的区域有一定的向北偏移。选取热岛效应强度等级较高的八个乡镇街道，将 2008~2018 年强度为较强、强、极强的热岛区域作为主要热岛区进行面积统计，结果显示：



2008年,越城区强度为较强、强、极强的区域较少,其中府山街道部分区域为较强级别,热岛面积为27.93km<sup>2</sup>,斗门镇部分区域级别为强,面积为21.56 km<sup>2</sup>。较2008年相比,2018年斗门镇、马山镇的热岛效应级别为较强、极强的区域明显扩大,斗门镇强度为较强及以上的热岛面积分别为66.74 km<sup>2</sup>、34.66 km<sup>2</sup>、55.44 km<sup>2</sup>,马山镇对应的热岛面积分别为42.93 km<sup>2</sup>、22.56 km<sup>2</sup>、30.60 km<sup>2</sup>。城南街道总体的主要热岛区面积变化虽然不大,但与2008年相比,热岛效应级别为强和极强的区域面积也有所增加,从6.07 km<sup>2</sup>、2.11 km<sup>2</sup>增长为8.38 km<sup>2</sup>、4.29 km<sup>2</sup>。

结合图1和统计结果,可以看出历经十年的经济、社会快速发展,越城区的热岛效应呈现增强的态势,主要热岛区域的整体趋势为从中心老城区向南北两翼发展。总体来说,2008年城市热岛区主要集中在老城区周围,到2018年时随着城市扩张、工业园区建造发展等,主要热岛区域以斗门镇、马山镇为中心,其次以府山街道、城南街道、北海街道为中心,东浦镇因与柯桥区相邻,呈小的团块状热岛形态。

### 3.2. 热岛效应与下垫面组分的关系

3.1节中结果显示,热岛效应强度较大区域,往往集中在某一区域,这其中是否与土地利用类型发生变化的区域存在一定的重合。因为土地利用的变化是人类生产生活最直观的体现,为了研究人类活动对地表温度的影响,有必要利用土地覆盖信息研究温度的变化。本研究计算每种土地利用/覆盖类型的平均温度,以此分析他们之间的关系。结果如表2所示:

**Table 2.** Temperature calculation of each land use type in 2008 and 2018 (°C)

**表 2.** 2008、2018 年各土地利用类型温度计算(°C)

	年份	水体(°C)	植被(°C)	建筑(°C)	耕地(°C)
平均值	2008	9.12	10.02	13.14	12.78
	2018	17.88	19.57	22.26	21.33

表2显示,不论2008年还是2018年,土地利用类型为建筑的地温是所有类型中最高的,其次是耕地,随后是植被,水体温度最低。这是因为建筑土地利用类型多由不透水面组成,热容较小、热传导率大,吸收太阳辐射后,温度迅速升高并向周围扩散。水体因热容大,受到太阳辐射照射后,升温相对较慢,热传导的过程也较为迟缓,所以水体的温度是四种类型中最低的。另外,城市发展到2018年时,越城区建筑类型面积增加,耕地面积减少,建筑用地大多由耕地转变而来,增加的建筑用地主要集中在孙端镇、陶堰镇、皋埠镇和东湖镇,小部分集中在西北方向镜湖区域及南隅一角的鉴湖镇。并且近年来,国家推行退耕还林政策,截至2018年越城区植被类型有所增加,集中在富盛镇和鉴湖镇南部。在土地利用类型发生转变的过程中,与转变对应的土地利用类型温度会随之发生改变,表明土地利用类型的变化会引起地表温度的变化。

为了进一步探寻城市的热场与土地利用类型的关系,下面将对城市的下垫面组分进行分析。塔山街道、北海街道、府山街道、斗门镇下垫面类型主要为建筑,故选择一条大致穿越城区的剖面线,获取剖面线上的温度和下垫面指数,同时选取一条尽可能多的穿过水域的剖面线作为对比。因城市发展形态并非完全对称,最后大致选取东北-西南向剖面线:依次穿过斗门镇、戛山街道、塔山街道、城南街道、鉴湖镇;东南-西北向剖面线:依次穿过陶堰镇、东湖镇、马山镇、斗门镇、灵芝镇,途中穿过白塔洋、袍江洋泾湖公园、镜湖三片水域,利用两条剖面线寻找地表温度与下垫面组成之间的联系。

从每条剖面线上获取对应指数的值,利用SPSS 22对剖面线上各类指数进行相关分析,地表温度与各指数拟合方程统计见表3:

**Table 3.** The exponential regression equation is obtained for the profile line  
**表 3.** 剖面线获取指数回归方程

年份	剖面方向	指数类型	回归方程	相关系数
2008	东北 - 西南	NDVI	$T = 285.169 + 5.186NDVI$	$R = 0.370^{***}$
		NDBI	$T = 284.498 + 13.373NDBI$	$R = 0.501^{***}$
	东南 - 西北	MNDWI	$T = 284.757 - 6.841MNDWI$	$R = -0.591^{***}$
		MNDWI	$T = 283.678 - 7.990MNDWI$	$R = -0.867^{***}$
2018	东北 - 西南	NDVI	$T = 297.037 + 3.572NDVI$	$R = 0.375^{***}$
		NDBI	$T = 295.779 + 11.969NDBI$	$R = 0.551^{***}$
	东南 - 西北	MNDWI	$T = 294.202 - 3.282MNDWI$	$R = -0.331^{***}$
		MNDWI	$T = 292.250 - 4.683MNDWI$	$R = -0.749^{***}$

注：相关系数右上角星号(\*\*\*)表示  $p < 0.001$ 。

根据以上剖面线获取的指数变化和对应的拟合方程，对各指数进行分析：

#### 1) 地表温度与植被指数

可以看出，不论是东北 - 西南向剖面线还是东南 - 西北向剖面线，地表温度与 NDVI 表现出大致相同趋势，东北 - 西南向剖面线由于末段延伸到山区林地，趋势发生改变。地表温度大致以塔山街道为中心分别向东北、西南两翼升高，NDVI 值在城区部分总体变化不大，末段升高(大致位于鉴湖镇)，东南 - 西北向剖面线受到水体影响，水域周围会生长一部分植物，稍高于另一剖面线方向的 NDVI 值。回归方程显示出地表温度与 NDVI 为正相关关系，NDVI 的值增加，地表温度会随之升高，但已有的研究表明，地表温度与植被指数具有一般为负相关关系[22][23]，经查阅文献，冯晓刚[24]的研究指出，冬季在城区中地表温度与植被指数呈现正相关关系，植被在冬季对城区起到保温的作用，由于本次研究区域选择的图像获取时间为冬末春初，故呈现出正相关关系。

结果表明，越城区地表温度与植被指数为正相关关系，从 2008 年到 2018 年，NDVI 每升高 0.1，对地表的保温作用减弱，由原来的  $0.51^{\circ}\text{C}$  减弱到  $0.35^{\circ}\text{C}$ ，表明随着环境的不断改变，植被对热岛效应的影响是有限的，还需探索其他的解决途径。

#### 2) 地表温度与建筑指数

两个方向的剖面线上，地表温度与 NDBI 呈现出正向趋势，NDBI 值升高，地表温度随之升高，由于东北 - 西南向剖面线主要穿过城区，NDBI 值变化和波动较小，基本稳定在一个阈值，东南 - 西北向剖面线穿过水体的区域，地表温度和 NDBI 出现明显的低值，东北 - 西南向 NDBI 值总体大于东南 - 西北向，这与之前体现出的温度趋势相同，主要穿过城区的剖面线温度稍高。

回归方程结果表明，越城区地表温度与建筑指数呈现正相关关系，2008 年 NDBI 每增加 0.1，地表温度将上升约  $1.33^{\circ}\text{C}$ ，2018 年 NDBI 每增加 0.1，地表温度将上升约  $1.19^{\circ}\text{C}$ ，虽然十年来随着城市建筑密度的增加，温度与 NDBI 之间相关性增强了，但温度随 NDBI 上升的趋势降低了。

#### 3) 地表温度与改进水体指数

两个方向的剖面线上，地表温度与 MNDWI 呈现出明显的相反趋势，即两者的关系为负相关关系。在主要穿过水体的东南 - 西北向剖面上，依次经过白塔洋、袍江洋泾湖公园、镜湖三处水体时，温度的变化非常明显，会出现与之对应的短暂的平台值。从剖面线结果和剖面线示意图对比可以看出，越城区的水体分布较广，大致分布于中北部的街道乡镇(灵芝镇、东湖镇、陶堰镇、巖山街道)，结合图 2，上述

几个乡镇街道的地表温度相对较低,表明 MNDWI 的值越高,对地表的降温效果越好。

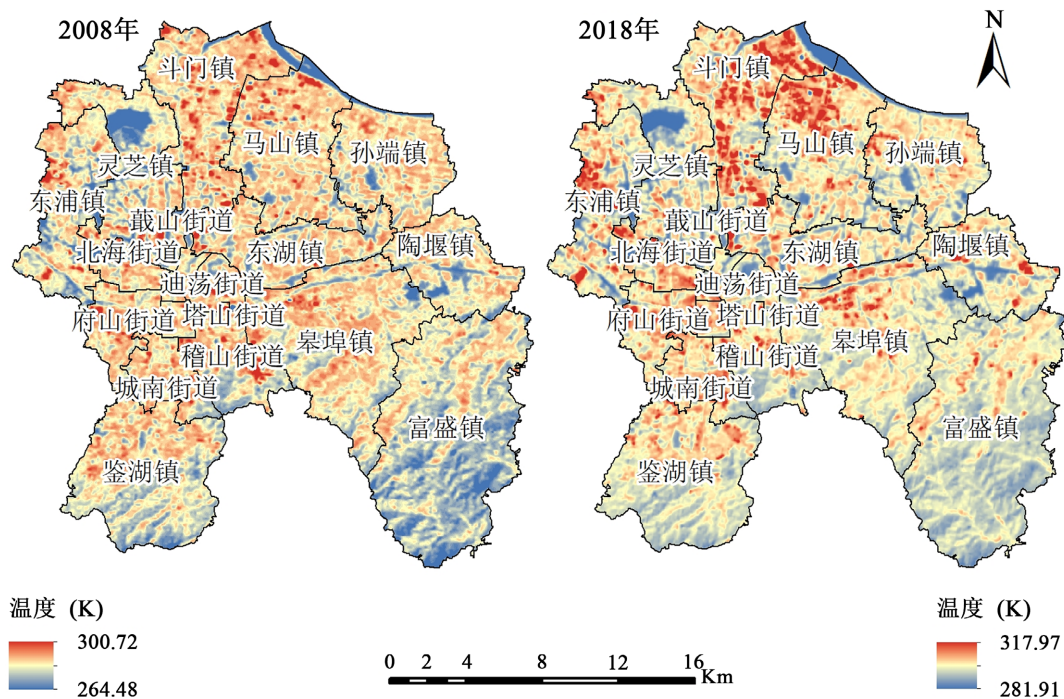


Figure 2. Retrieved surface temperature results of Yuancheng District in 2008 and 2018

图 2. 2008 年、2018 年越城区地表反演温度结果

回归方程中,东南-西北向剖面线的相关性较东北-西南向剖面线显著,三种指数中,水体指数的相关性是最高的,说明在越城区内,地表温度受水体的影响较大,是降低地表温度的重要切入点。

#### 4. 结论

本文所有分析均基于遥感影像的解译,采用 J.C 算法反演越城区 2008、2018 年地表温度,对热场进行指数分级评价,利用多时相遥感影像,从地表温度与土地利用类型变化、下垫面指数的相关性,对越城区城市热岛效应的时空变化特征进行分析,得出以下结论:

1) 历经十年的经济与社会快速发展,越城区的热岛效应呈现出增强的态势,热岛的区域范围扩大,城区北部热岛效应明显加剧。总体来说,2008 年城市热岛区主要集中在老城区周围,到 2018 年时形成两大主要热岛区域,一是北部以斗门镇、马山镇为中心,二是中部以府山街道、城南街道、北海街道为中心,东浦镇因与柯桥区相邻,表现为小的团块状热岛形态。

2) 热岛效应强度级别较高的区域较为集中,主要热岛区域的土地利用类型基本为建筑类型。越城区冬季地表温度与植被指数、建筑指数存在正相关关系,与水体指数存在负相关关系,表明下垫面的组成状况会对地表温度产生影响,土地利用类型的转变,会造成热场环境的改变,影响城市的热岛效应强度。

#### 参考文献

- [1] Howard, L. (1833) *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis, and at Various Places around It*. The University of Wisconsin-Madison, Madison.
- [2] Deosthali, V. (2000) Impact of Rapid Urban Growth on Heat and Moisture Islands in Pune City, India. *Atmospheric Environment*, **34**, 2745-2754. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00370-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00370-2)

- [3] Kim, Y.H. and Baik, J.J. (2002) Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **41**, 651-659. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2)
- [4] 钟保舜. 深圳的城市热岛效应[J]. 气象, 1996(5), 23-24.
- [5] Bastiaanssen, W.G.M. and Menenti, M. (1990) Mapping of Evaporation in the Western Desert of Egypt with Remote Sensing Techniques. *Symposium on Land Drainage for Salinity Control in Arid and Semi-Arid Regions*, Cairo, 25 February-2 March 1990, 110-112.
- [6] Hawkins, T.W., Brazel, A.J., Stefanov, W.L., Biglerd, W. and Saffelle, E.M. (2004) The Role of Rural Variability in Urban Heat Island Determination for Phoenix, Arizona. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **43**, 476-486. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0476:TRORVI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0476:TRORVI>2.0.CO;2)
- [7] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 1998, 13(4): 327-333.
- [8] Rao, P.K. (1972) Remote Sensing of Urban Heat Islands from an Environmental Satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **53**, 647-648.
- [9] Owen, T.W., Carlson, T.N. and Gillies, R.R. (1998) An Assessment of Satellite Remotely-Sensed Land Cover Parameters in Quantitatively Describing the Climatic Effect of Urbanization. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 1663-1681. <https://doi.org/10.1080/014311698215171>
- [10] Jiménez-Muñoz, J.C. and Sobrino, J.A. (2003) A Generalized Single-Channel Method for Retrieving Land Surface Temperature from Remote Sensing Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **108**, Article No. 4688. <https://doi.org/10.1029/2003JD003480>
- [11] 覃志豪, Li, W., Zhang, M., 等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003(2): 37-43.
- [12] 王乐. 基于 RS 的西安市地表温度反演及城市热环境研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [13] 绍兴市人民政府. 自然地理[EB/OL]. <http://www.sx.gov.cn/col/col1461898/index.html>, 2022-07-09.
- [14] Sobrino, J.A. and Raissouni, N. (2000) Toward Remote Sensing Methods for Land Cover Dynamic Monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, **21**, 353-366. <https://doi.org/10.1080/014311600210876>
- [15] Valor, E. and Caselles, V. (1996) Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. *Remote Sensing of Environment*, **57**, 167-184. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9)
- [16] Van de Griend, A.A. and Owe, M. (1993) On the Relationship between Thermal Emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for Natural Surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, **14**, 1119-1131. <https://doi.org/10.1080/01431169308904400>
- [17] Carlson, T.N. and Ripley, D.A. (1997) On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*, **62**, 241-252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- [18] 武鹏飞, 王茂军, 张学霞. 基于归一化建筑指数的北京市城市热岛效应分布特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1325-1331.
- [19] 夏翥, 李云梅, 王桥, 王彦飞, 金鑫, 徐恩惠. 无锡市城市扩张与热岛响应的遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(5): 677-683.
- [20] 查勇, 倪绍祥, 杨山. 一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J]. 遥感学报, 2003, 7(1): 37-40.
- [21] 张欣欣. 基于低空遥感影像的区域热环境定量分析与评价[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [22] 武鹏飞, 王茂军, 张学霞. 北京市植被绿度与城市热岛效应关系研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 54-60.
- [23] 王娟, 蔺银鼎, 刘清丽. 城市绿地在减弱热岛效应中的作用[J]. 草原与草坪, 2006(6): 57-60.
- [24] 冯晓刚. 城市热岛效应演变与成因遥感研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2011.