

基于GIS对城市热岛效应的探究及驱动因素分析

——以大连市中心城区为例

苏展

辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年2月22日; 录用日期: 2026年2月26日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

太阳辐射对城市热环境有重要的影响。下垫面坚硬、建筑密集等特点,使其不仅具有直射和散射的短波辐射,而且还具有强烈的反射和长波辐射。城市辐射场是由各种不同类型的辐射场组成的。城市辐射环境对建筑得、失热量有很大的影响,从而对建筑能耗有很大的影响;另外,它还会对户外环境下的人体热舒适状况有很大的影响。城市辐射是城市环境保护和建筑节能的一个重要课题。本项目拟对城市下垫面对户外辐射和热环境的影响进行系统研究。采用大连市中心城区2013~2022年5期Landsat系列影像,结合地表温度、土地利用分类情况和地理加权回归模型等,探讨影响城市地表温度因素的空间异质性的分析,进而为下一步城市化建设提出有效建议。研究结果表明:① 研究区热环境呈不断上升趋势,由2013年的22.57℃上升至2022年的31.77℃,其中2019~2022年间升温幅度最大;② 研究区的土地利用分类中,建设用地逐年增加,导致城市地表温度始终居高不下而且逐年增长,城市绿地有所改善但并不明显。其对城市地表温度变化的相关性最强;③ LST与其驱动因素的GWR分析结果表明,总体而言,NDVI和土地利用分类与LST存在明显的空间相关性,即绿色植被越多,地表温度越低;建筑物覆盖程度越高,地表温度越高。而DEM与街道至海岸线的距离与LST的关系存在明显的空间异质性,需要结合其他的因素进一步做出综合考量。

关键词

城市热环境, 热岛效应, 地理加权回归分析

Research on Urban Heat Island Effect Based on GIS and Analysis of Driving Factors

—A Case Study of the Central Urban Area of Dalian

Zhan Su

School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: February 22, 2026; accepted: February 26, 2026; published: March 6, 2026

Abstract

Solar radiation has a significant impact on the urban thermal environment. The characteristics of the hard underlying surface and dense buildings not only provide direct and scattered short wave radiation, but also strong reflection and long wave radiation. The urban radiation environment has a significant impact on the heat gain and loss of buildings, thus having a significant impact on building energy consumption; In addition, it also has a significant impact on the thermal comfort of the human body in outdoor environments. Urban radiation is an important issue in urban environmental protection and building energy conservation. This project aims to conduct a systematic study on the impact of urban underlying surfaces on outdoor radiation and thermal environment. Using five Landsat series images in the central urban area of Dalian from 2013 to 2022, combined with the land surface temperature, land use classification and geographical weighted regression model, this paper discusses the analysis of spatial heterogeneity of factors affecting urban surface temperature, and then puts forward effective suggestions for the next step of urbanization. The research results indicate that: ① The thermal environment in the study area is showing a continuous upward trend, rising from 22.57°C in 2013 to 31.77°C in 2022, with the largest increase in temperature between 2019 and 2022; ② In the land use classification of the research area, construction land has been increasing year by year, resulting in consistently high and increasing urban surface temperature. Urban green space has improved but is not significant. It has the strongest correlation with changes in urban surface temperature; ③ The GWR analysis results of LST and its driving factors indicate that overall, there is a significant spatial correlation between NDVI and land use classification and LST, that is, the more green vegetation, the lower the surface temperature; The higher the building coverage, the higher the surface temperature. However, the relationship between DEM and the distance from the street to the coastline and LST has obvious spatial heterogeneity, which needs further comprehensive consideration in combination with other factors.

Keywords

Urban Thermal Environment, Heat Island Effect, GWR

Copyright © 2026 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

热岛现象是指由于人为产生的大量热量，以及建筑物、道路等较高的蓄热体，以及绿地面积的缩减而引起的“高温化”[1]。一种在市区内温度比郊外高的现象。从地表温度分布来看，近郊的气温变化不大，而远郊的市区却呈现出一片高温带，犹如一座从海平面上凸起的孤岛，因这些孤岛象征着都市中的高温地带，故又被称作“都市热岛”。热岛是由下垫面、人为热源、水、气相互作用、大气污染、绿地面积缩小、人口迁移等多种原因引起的。

全球热岛现象最严重的地区在中高纬度地区，如德国柏林市区和近郊的温度差曾经达到 13.3°C。在快速城市化的背景下，热岛现象日益突出，这无疑加剧了城市的高温。

热岛现象是由城市下垫面(大气与地面接触的界面)特征决定的。城市中存在着大量的人造结构，如水泥路面、沥青路面、各类建筑墙体等，使下垫面的热物性发生了显著变化，使下垫面的热能特性发生了显著变化[2]。

由于城市地面水分含量较低,因此,较多的热能以显热的形式进入大气,从而引起大气变暖。与此同时,城市地表对太阳光的吸收率要比自然地表高,因此可以吸收更多的太阳辐射,进而使空气得到的热量也更多,从而导致温度升高。比如夏季,当草地温度为 32°C ,树冠温度为 30°C 时,混凝土地板温度为 57°C ,沥青路面温度为 63°C ,这些热量构成了一个巨大的热源。城市中的许多建筑和道路都是由砖石、水泥和沥青等材料组成,它们的热容量和导热率都远大于自然条件下的自然下垫层,但它们对阳光的反射率低,吸收率大;所以,在白天,市区下垫层的地表温度远高于地面温度,尤其是沥青路面、屋面的温度比地面温度要高 $8^{\circ}\text{C}\sim 17^{\circ}\text{C}$ 。在这种情况下,下垫层热能传输,把周边的空气带到高空,从而提高城市的温度;在夜间,城市下垫面对近地表大气的增温作用主要表现为长波辐射。因为城市的下垫层保水率低,水汽蒸发消耗的热量更少,所以城市的潜热更大,气温也更高[3]。

19世纪初,英国气候学家路克·霍德华(Luke Howard)在《伦敦的气候》一书中[4],首先提出了“热岛效应”的气候特征理念。随着城市建设的高速发展,城市热岛效应也变得越来越明显 Oke 将城市中心区温度的高峰值于郊区温度的差值定义为“热岛强度”[5]。因为岛屿表面的温度比周围的海水要高,所以在岛屿上方,会产生一种类似于海洋热岛的气流,并在岛屿上方产生一种对流。

21世纪以来,我国城市人口密集、产业密集、交通拥堵、空气污染等问题日益突出,加之城市建筑以石、混凝土为主,其比热容小、导热性强,加之建筑自身对风力的阻隔或削弱,使得其年平均气温较近郊高出 2°C 以上,使得整个城市就像是一座小岛,由此产生了“热岛”现象。

2015年2月,国际上首次采用城区与农村两个站点的温度差异作为热岛的衡量指标,并通过与多年来的“春节黄金周”与“春节”前后四个月的热岛效应进行比较,检验并定量评估人口流动对“春运”的影响。通过对哈尔滨市的调查,发现从1992~2006年间的几个月的平均年月周热岛效应显著地低于年前和年后的四个月的平均值:从日均气温的城乡差异来看,热岛效应较年月前后和年月前后四个月平均年月热岛效应的平均值要低 0.65°C ,相对来说,春节当周的城市热岛强度比它前后四周的值下降43%;从日最高气温的城乡差异来看,春节黄金周市区热岛效应与年前年后四个星期的平均水平相比,只有 0.31°C 的下降,但是由于热岛效应在白天比较微弱,所以其变化幅度为48%;春节黄金周期间,以日最低气温的城乡差异作为热岛效应的指标,其热岛效应在夜晚表现得更为显著,与之相比,春节黄金周前后周边地区的气温降低了 1.14°C ,但其相对变动幅度达到71%[6]。

综上,本文通过 Landsat8 影像结合土地分类,以及海岸线距离等因素,研究大连市中心城区:中山区、西岗区、沙河口区和甘井子区(含大连高新区代管的凌水街道和龙王塘街道)的热岛效应主要影响因素,并提出合理的防治方案。

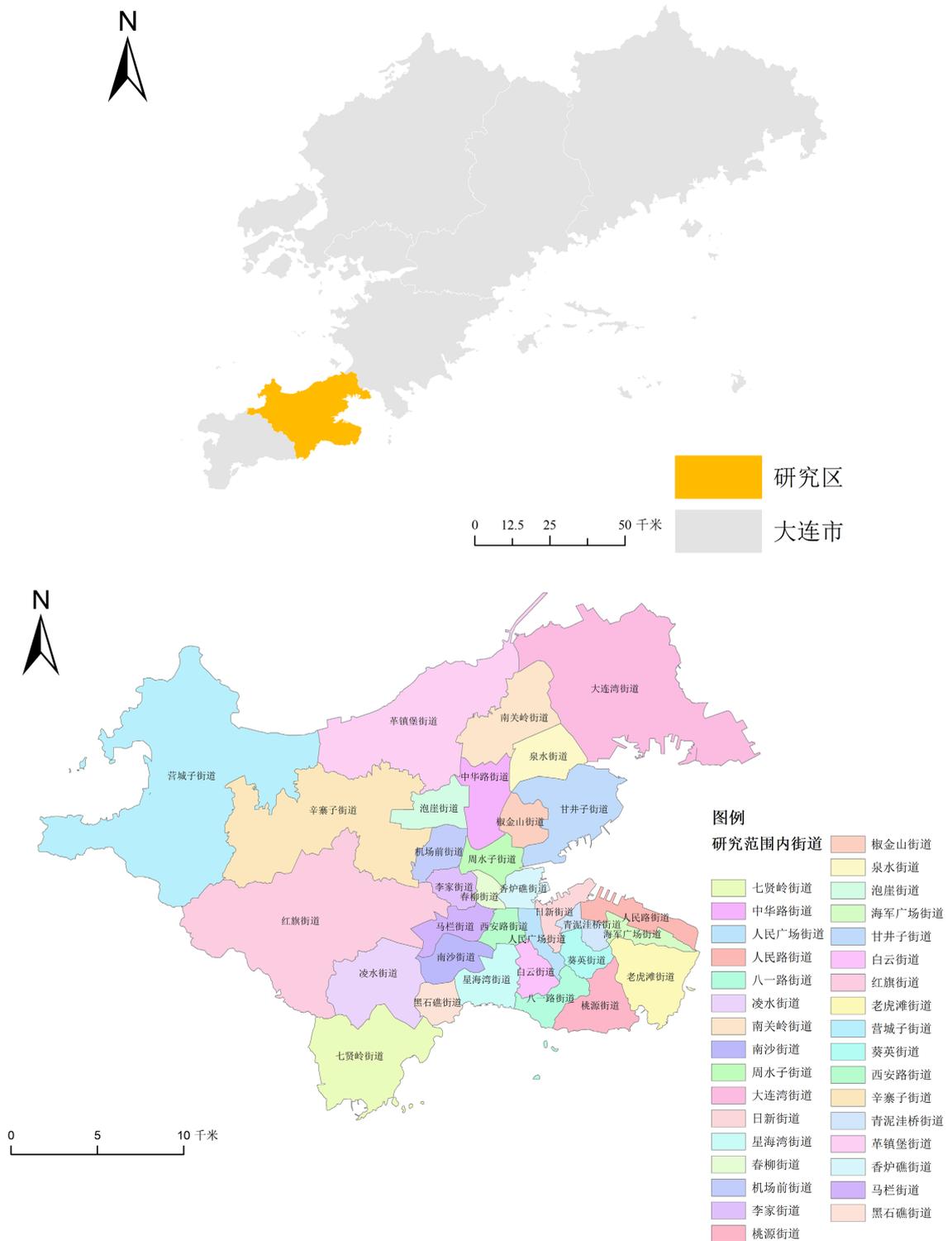
2. 数据概况

2.1. 研究区概况

本文的研究范围:大连市内四区中山区、西岗区、沙河口区、甘井子区(含大连高新区代管的凌水街道和龙王塘街道)(如图1)。沙河口区是大连市的一个辖区,位于大连市西部,总面积 49.83 平方千米(其中山林面积 6.4 平方千米),海岸线长 8 千米。总人口 61 万人(2003年)。甘井子区海岸线 148.68 公里,其中陆岸线为 139.6 公里,按海区分,黄海海区 76 公里;渤海区 636 公里,地质结构为基岩岸与砂岸各半。海岸线长度为 9.08 公里。中山区位于大连市区的东部,东、南、北三面临海,西部与西岗区接壤,中心位置位于东经 121.64511° ,北纬 38.91864° 。中山区陆地面积 47.41 平方千米,海域面积 1443 平方千米,海岸线和岛岸线总长 42.53 千米。西岗区位于大连市中心西侧,有明显的海洋性向大陆性过渡的海洋气候特征。

优越的地理位置和良好的气候条件,为大连市中心城区经济发展与社会建设提供了强有力的基础。

正因为城市化的不断推进，如果不加以调控，就会形成城市热岛。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2884 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Location of the study area and street locations

图 1. 研究区地理位置和街道位置

2.2. 数据来源

本文选取了地理空间数据云下从 2013 年、2015 年、2017 年、2019 年和 2022 年这五年的卫星图像中，选取了植物生长比较旺盛的 5 月份到 8 月份 Landsat 8 OLI 影像，来计算当年的夏季地表温度，路径/行列号为 120/33，云量小于 5%，为了降低因为海洋气候造成的误差，在 ENVI5.31 环境中进行了辐射定标和大气修正[7]。大连行政区划数据摘自《大连年鉴》，本研究采用的地理坐标系为 CGS_WGS_1984，投影坐标系采用的是 WGS_1984_UTM_Zone_51N。依据中国土地资源分类体系标准，结合土地利用实际情况、将大连市中心城区的土地利用情况大致分为了耕地、林地、建设用地、裸地以及水体 5 种类型。然后利用 ArcMap10.2 软件对其进行了分析。

3. 研究方法

本研究综合应用遥感数据和地理回归模型分析大连市中心四城区的城市热岛现象。首先将获取的遥感影像数据做了辐射定标和大气校正的预处理，经过投影变换、镶嵌、裁剪等。矢量数据获取来源为大连市行政边界的 shape file 文件。

3.1. 反演地表温度

本文选取了覃志豪等的单窗演算法结合了 ENVI 软件反演地表温度。该算法所需的主要公式为：

$$T_s = \frac{a \times (1 - c - d) + (b \times (1 - c - d) + C + D) \times T_6 - D \times T_a}{C} \quad (1)$$

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

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

其中： T_s 为地表真实温度，单位使用的是开尔文 K ； a 、 b 为常量分别为-67.355351 和 0.458606； T_6 为亮度温度值，可以用普朗克公式的反函数获取； T_a 为大气平均作用温度； ε 为地表比辐射率； τ 为大气透过率， C 和 D 为中间变量。大气平均作用温度 T_a 与近地面气温 T_0 (一般距离地面 2 m)存在以下线性关系：

$$T_a = 16.0110 + 0.92621 \times T_0 \quad (\text{中纬度夏季}) \quad (4)$$

其中 T_a 为大气平均作用温度， T_0 是遥感图像获取时当地的气温。

$$T_6 = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1\right)} \quad (5)$$

K_1 、 K_2 是卫星发射前的预设常量[8]，具体值如表 1：

Table 1. Predefined constants for satellites

表 1. 各卫星预设常量

	K1	K2
Landsat5 TM (band6)	607.76	1260.56
Landsat7 ETM+ (band6)	666.09	1260.56
Landsat8 TIRS (band10)	774.89	1321.08
Landsat8 TIRS (band11)	480.89	1201.14

$B(T_a)$ 为地表辐射强度。从 NASA 网站中获取了大气向上辐亮度 Lu 、向下辐射亮度 Ld 和大气透射率

τ 。在给定地表比辐射率的情况下，可以算出该影像的热红外波段的辐射亮度 $B(T_s)$ ，进而通过公式(5)计算辐射亮温(LST)。

3.2. 土地利用分类

本项目以我国《土地利用现状分类》(GB/T 21010-2017)为依据，针对研究区土地利用类型的集中特征，将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、建筑用地、水体、裸地等 5 种类型，将其遥感影像作为训练样本。在此基础上，使用监督分类法，获取 2013~2022 年区域土地利用类型分布图。结果表明，该方法的分类准确率和 Kappa 系数分别为 84.09%和 83.5%。实验结果表明，本文所运用的分类器对 Landsat8 卫星遥感影像具有较好的分类效果，能够显著地提高其自动分类准确率。基于最大似然法的遥感图像分类模型是正确的和有效的，能应用于遥感图像自动分类中[9]。

3.3. 海岸线的获取

海岸线提取是指通过遥感影像数据，自动或半自动地提取海岸线的方法。海岸线提取有助于海洋环境监测、海岸带资源开发和海上安全管理等领域的研究。常用的海岸线提取方法包括阈值法、边缘检测法、水域边缘法、基于颜色特征的方法和基于高程数据的方法等。其中阈值法是最简单的方法，通过设置阈值将海水和陆地分割开来，从而提取海岸线。边缘检测法可以通过检测图像亮度或色彩变化的边缘来得到海岸线。水域边缘法则是将水域边缘和陆地分开，得到海岸线。基于颜色特征的方法则是利用海水和陆地的颜色差异来提取海岸线。基于高程数据的方法则是利用高程数据的变化来提取海岸线。本文采用的是通过设置阈值将水体和陆地分开从而提取的海岸线(见图 2)。

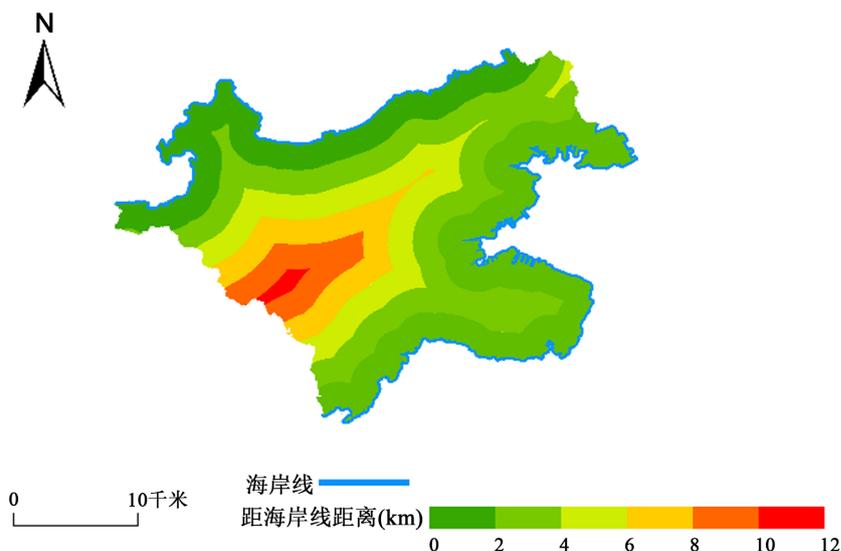


Figure 2. Coastline and its area of influence
图 2. 海岸线及其影响范围

3.4. 地理加权回归模型

地理加权回归模型(Geographically weighted regression model, 以下简称 GWR)是基于局域回归分析和变参数的思路，以曲线拟合、平滑等局部加权回归的非参数方法为理论基础，将数据的空间位置嵌入回归参数中，利用局部加权最小二乘方法进行逐点参数估计，从而研究随空间变化的回归关系。即不同因素在不同空间下对于地表温度的影响程度[10][11]。

GWR 模型的结构如下:

$$y_i = \sum_{j=1}^k x_{ij} \beta_{b_{\omega_j}}(u_i, v_i) + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中: y_i 表示被解释变量, u_i, v_i 表示位置在 i 处的中心点坐标; b_{ω_j} 表示在第 j 个变量回归系数所使用的带宽, $\beta_{b_{\omega_j}}$ 表示 i 处第 j 个变量的回归系数[12] [13]。

GWR 本质上是多元线性回归, 且 LST 驱动因素的多元复杂性和相关性, 因此在回归分析之前需要解决多重共线性问题; 方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)检验是最简洁的变量筛选方法[14]。本研究通过使用 $VIF < 7.5$ 原则筛选变量来解决多重共线性问题。

变量的选取:

综合研究区数据的可获取性, 本文利用 2020 年大连市区县数据进行实证研究。数据来源于 2020 年《大连统计年鉴》。

1) 待解释变量。地表温度(LST)作为本研究的待解释变量, 采用反演的地表温度, 利用 ArcGIS 10.2 软件值提取至点的工具, 将平均温度(°C)插值到大连市中心四城区的各个街道中心点。

2) 解释变量。由于影响温度高低的因素较多, 本研究选取了植被归一化指数(NDVI)代替植被覆盖度, 以及土地利用类型、海拔高度和各街道与海岸线的距离, 对地表温度的空间异质性进行回归分析。

4. 结果与分析

4.1. 城市热环境的时空演变分析

本研究采用单窗演算法, 得到 2013~2022 年间大连市中心四城区平均地表温度专题图, 如图 3 所示。

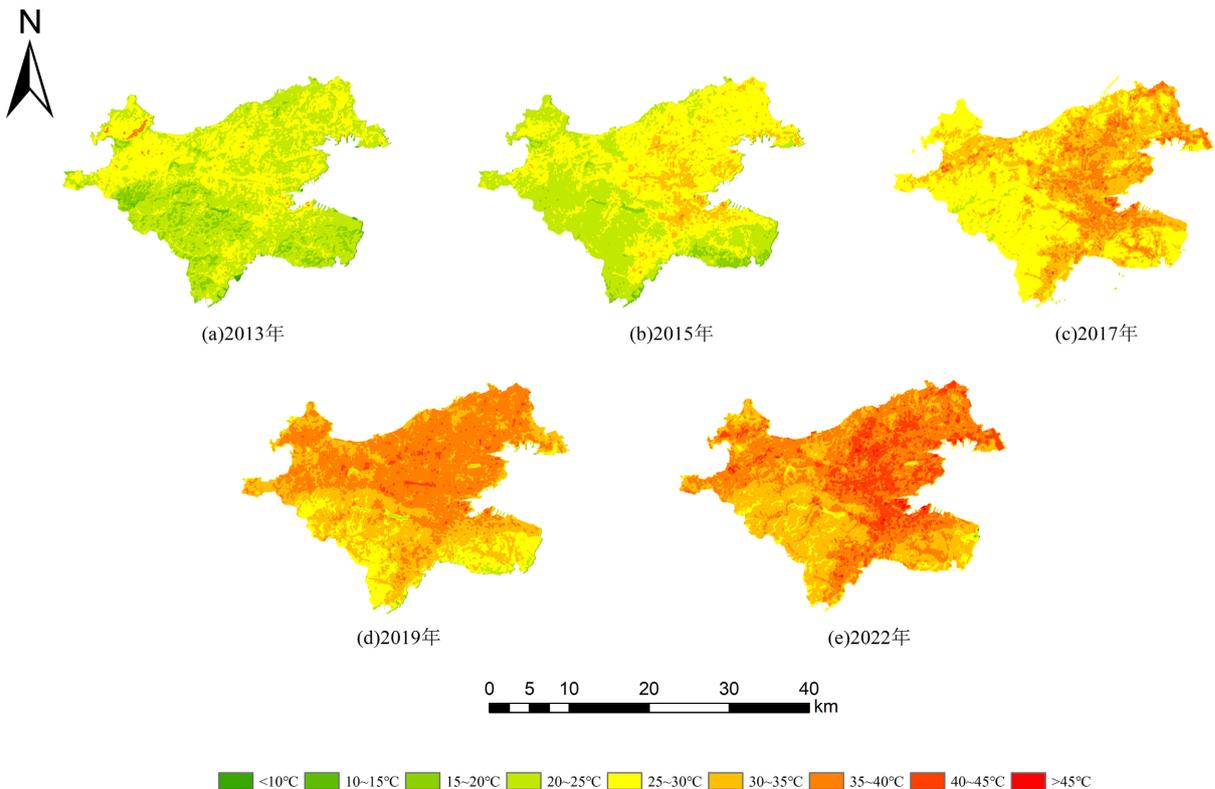


Figure 3. Mean land surface temperature of the study area from 2013 to 2022

图 3. 研究区平均地表温度(2013~2022 年)

① 在不断推进的城镇化过程中,研究区内地表气温在 2013~2022 年里呈现出显著的升高,夏季气温从 2013 年的 20.36°C 升高到 2022 年的 37.56°C , 而低于 25°C 的地区则在不断下降。② 沙河口区东部、西岗区东部、中山区和甘井子区东部区域,在研究区东部城市建设区内,小范围的绿色空间正逐步被城市建设所吞噬;研究区东南为典型的丘陵地貌,在甘井子区地西南部,城镇建设区呈包围、渗入式分布。③ 研究区城市用地呈逐步扩大的趋势,在 30°C 以上面积不断增加,甘井子区的东部和西岗区和沙河口区的部分商业区甚至出现了 40°C 以上的变化。④ 2017~2022 年,研究区气温有明显上升, 35°C 以上的地区明显增加,并呈现出向四面八方扩散的趋势。总体而言,研究区各个城市在经历了较长的时间序列演变后,其高温区呈现出相互联系的趋势,而低温区则逐步消失。

4.2. 土地利用类型的演变及地表温度的影响

图 4 对五种土地利用类型进行分析,2013 年以来,耕地、林地和建筑用地占很大的空间,水体和裸地很小。其中,研究区西北部的耕地从 2013 到 2017 年明显增加,但是从 2017 年开始到 2022 年逐渐有一部分转化为建设用地,说明其城市化建设的脚步逐渐加快。东南部西岗区和中山区的林地在 2013 年到 2022 年之间也有明显的缩减。结合地表温度反演情况,植被覆盖面积有逐年减小的趋势,但 2022 年有所好转,说明大连市在城市化进程上也注意到了生态和绿地保护。裸地以及建设用地面积的增多导致地表温度的增加,各个土地利用类型的温度值都在呈逐年上升的趋势,说明城市热岛现象在逐年增强。

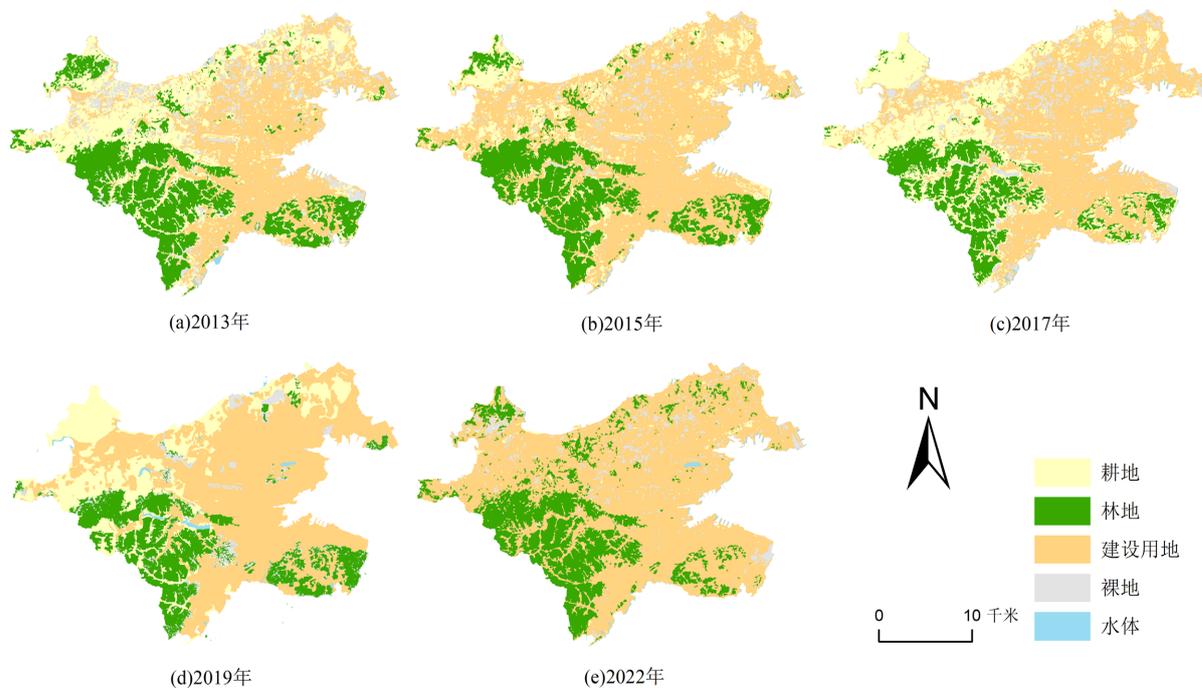


Figure 4. Land use classification in the central urban area of Dalian from 2013 to 2022

图 4. 2013~2022 年大连市中心城区土地利用分类情况

4.3. 海拔因素对 LST 的影响分析

本研究采用分辨率为 30 m 的 2022 年高程数据(见图 5),红色部分代表了丘陵地带,海拔较高,结合图 2,该地区有植被覆盖,且地表温度相对其他地方低。而绿色为低海拔地区,该地区温度较于其他地区最高。

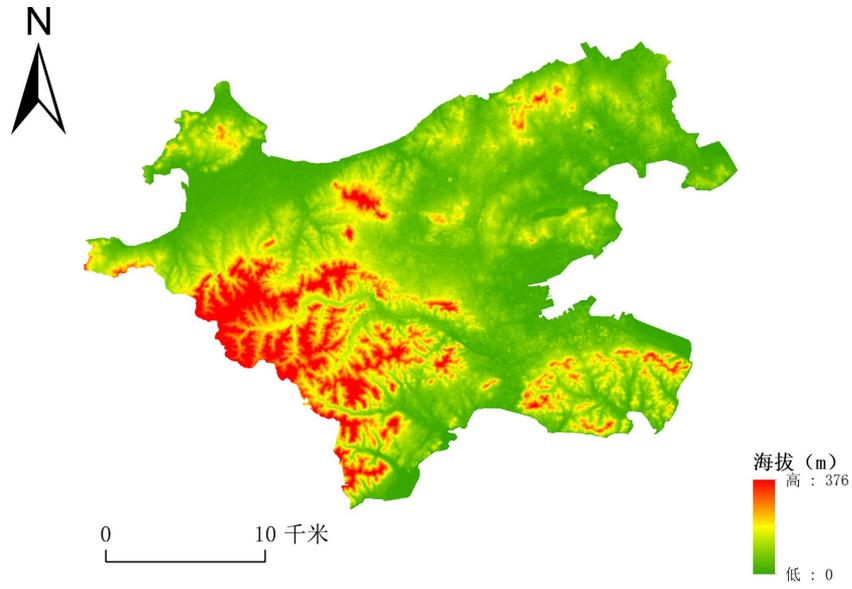


Figure 5. Elevation map of the study area
图 5. 研究区高程图

4.4. 距海岸线距离因素对 LST 的影响分析

本研究针对海岸线影响范围利用 ArcGIS 软件做了欧氏距离，以 1000 米为单位缓冲到 10 km，结合图 6，距离海岸线越远的区域地表温度越高，存在海拔高度等的影响因素，目前只能说明到海岸线距离和地表温度具有相关性。

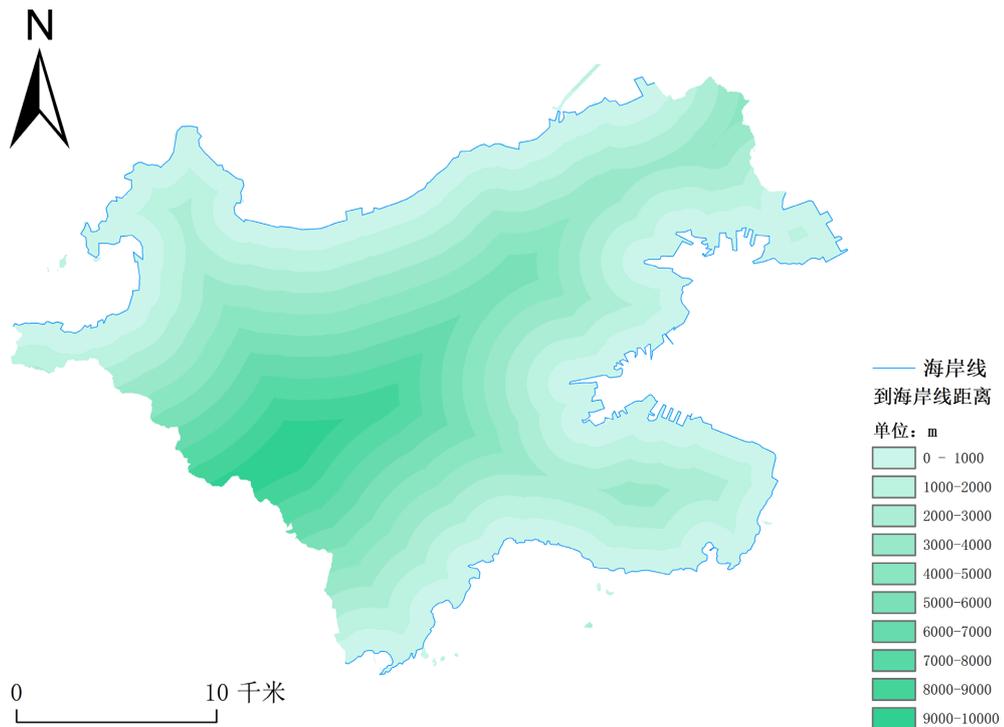


Figure 6. Distance to the coastline
图 6. 距海岸线距离

4.5. LST 驱动因素的空间异质性探究

基于上述对于 LST 影响因素的分析, 对于空间异质性的探究, 本文将各个解释变量量化出来。将中心城区的各个街道中心点的温度、海拔、到海岸线距离、和 NDVI 指数计算出来, 如表 2 所示。

Table 2. Indicators for streets in the study area

表 2. 研究区内街道各指标

街道乡镇名	所属区	温度/°C	海拔/m	距离/m	NDVI	Land use
八一路街道	西岗区	28.23155785	93	1494.59021	0.786046505	林地
春柳街道	沙河口区	38.40237808	26	2280.789307	0.357622921	建设
大连湾街道	甘井子区	33.37250519	50	2732.635986	0.116043836	建设
海军广场街道	中山区	31.67761803	40	1499.399902	0.090650044	建设
黑石礁街道	沙河口区	32.58829117	35	1138.419922	0.630482137	建设
机场前街道	甘井子区	34.13194656	32	4754.219238	0.519067109	建设
椒金山街道	甘井子区	29.4141674	86	2532.11377	0.710349679	林地
日新街道	西岗区	38.42524338	24	750	0.068500541	建设
营城子街道	甘井子区	30.93006516	17	2160	0.671150267	建设
白云街道	西岗区	28.58891296	148	2353.040527	0.80050379	林地
甘井子街道	甘井子区	32.82235718	51	1739.223999	0.753012061	建设
红旗街道	甘井子区	26.55965233	120	9381.177734	0.732721686	林地
老虎滩街道	中山区	27.1453228	87	1784.432739	0.755454063	林地
革镇堡街道	甘井子区	29.60753441	49	1986.579956	0.35007298	建设
葵英街道	中山区	34.22695541	84	3167.238525	0.403338403	建设
李家街道	沙河口区	35.17107773	59	3923.123779	0.384469688	建设
凌水街道	甘井子区	28.59130478	76	3996.76123	0.795932412	耕地
香炉礁街道	西岗区	35.09619522	13	823.7717896	0.421397388	建设
星海湾街道	沙河口区	36.17355347	19	1355.322876	0.225413397	建设
马栏街道	沙河口区	36.12537384	22	4438.783691	0.384849638	建设
南关岭街道	甘井子区	34.42034149	72	3681.086914	0.24210526	建设
泡崖街道	甘井子区	33.80057907	59	6012.586914	0.259405941	建设
七贤岭街道	甘井子区	33.19664383	14	1979.090698	0.247869074	建设
青泥洼桥街道	中山区	35.90899277	54	1663.309937	0.289009511	建设
桃源街道	中山区	31.11733627	42	1500.299927	0.200845659	建设
周水子街道	甘井子区	31.4575386	17	1660.873291	0.636548936	建设
南沙街道	沙河口区	29.24593544	76	2609.310303	0.755051732	林地
泉水街道	甘井子区	30.45577431	10	2283.549805	0.487353712	建设
人民广场街道	西岗区	35.63854218	43	1985.673706	0.277692318	建设
人民路街道	中山区	35.68719101	10	657.951355	0.246385366	建设

续表

辛寨子街道	甘井子区	28.16648102	96	5343.032715	0.632251203	建设
西安路街道	沙河口区	34.74935913	21	2248.999756	0.614430666	建设
中华路街道	甘井子区	37.21414566	71	4429.446777	0.313443303	建设

4.5.1. 全局 OLS 模型参数估计结果分析

利用传统线性回归模型，一般建立在最小二乘法(OLS)基础上检验地表温度与各解释变量之间的关系 [15] [16]，见表 3。

Table 3. OLS regression results

表 3. OLS 回归结果

解释变量	回归系数	标准误差	t	显著性 p	VIF
海拔	-0.020	0.017	-1.164	0.155	2.145
到海距离	0.000	0.000	-0.015	0.982	1.302
NDVI	-5.511	2.320	-2.375	0.017	1.815
Land use	0.806	0.510	1.581	0.044	2.434

本研究将影响 LST 的驱动因素划为了四种：土地利用分类、海拔高度、与海岸线距离以及植被覆盖度(本文采用的是植被归一化指数 NDVI)。为方便计算，将土地利用类型赋值：耕地为 1、林地为 2、建设用地为 5。在 ArcGIS 软件中利用空间自相关检查了待解释变量的 z 得分为 2.19，则随机产生此聚类模式的可能性小于 5%， R^2 为 0.533345，VIF 都小于 7.15，四种解释变量通过了共线性检验。在显著性 $p \leq 0.05$ 的检验下，NDVI 和 Land use 分别为 0.017 和 0.044，都通过了显著性检验，说明二者显著性强，与地表温度变化的相关性强。

4.5.2. 地理加权回归模型(GWR)与空间自相关模型(OLS)结果对比

基于 GWR 的相关分析，可以得到结果，如表 4。对比 GWR 模型与 OLS 模型运算结果可知(表 4)，GWR 模型的决定系数 R^2 和调整后的决定系数分别为 0.5919 和 0.533446，高于 OLS 的决定系数与调整决定系数，因此 GWR 模型拟合效果优于 OLS。GWR 的 AICc 值为 157.345，两个模型 AICc 值相差为 0.003，表明 GWR 可以更好地拟合观测数据[17]。另外，GWR 估计的标准误差(Sigma)为 2.262 也小于 OLS 的 3.332，运用 GWR 模型测算结果明显比 OLS 更准确，局部估计的 GWR 模型比基于全局的 OLS 模型有更好的适用性。

Table 4. Comparison of OLS and GWR results

表 4. OLS 和 GWR 结果对比

模型	R^2	调整 R^2	AICc	Sigma
OLS	0.5917	0.533445	157.342	3.332
GWR	0.5919	0.533446	157.345	2.262

4.5.3. 影响因素的空间异质性分析

利用 Arcgis10.2 软件对 GWR 模型中各解释变量地回归系数进行空间可视化，得到各解释变量系数的空间分布，进而分析影响因素空间作用差异及强弱，结果如图 7。

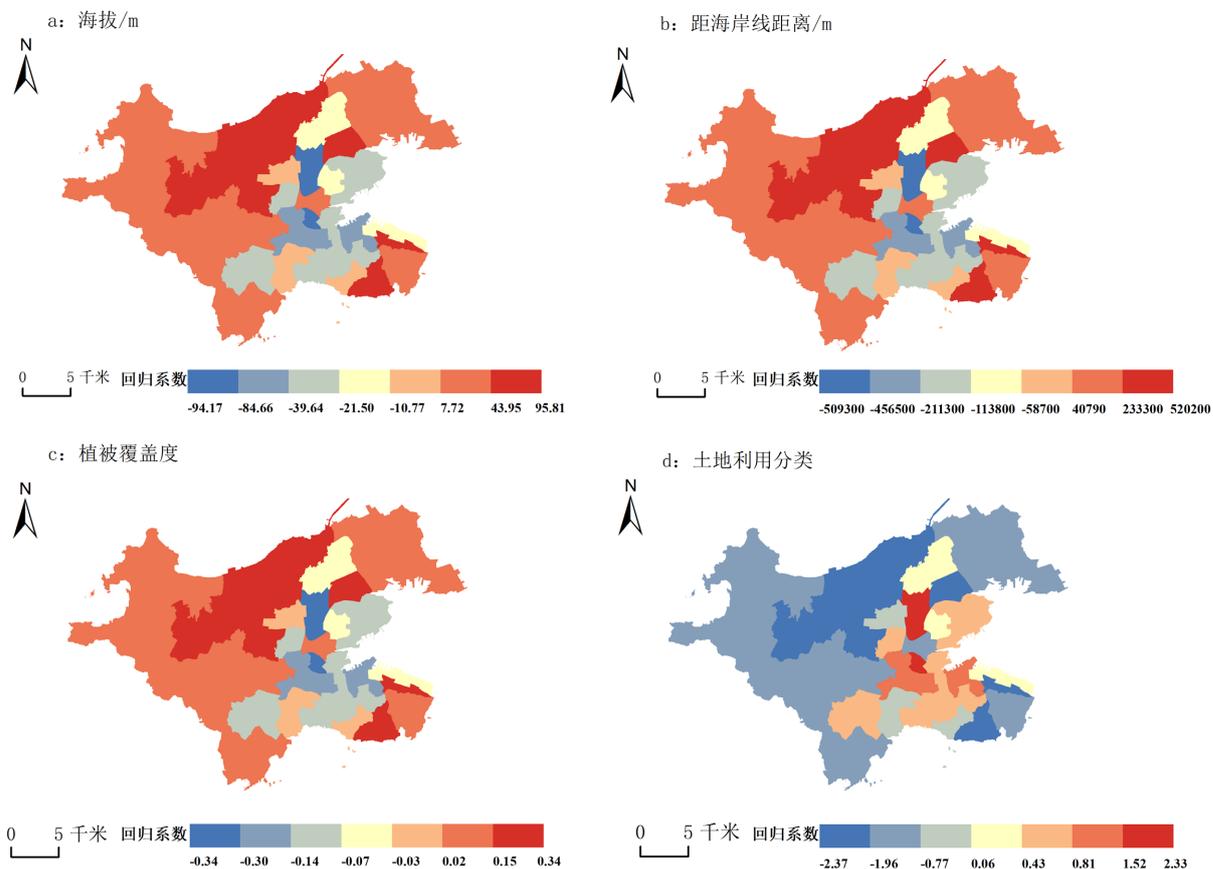


Figure 7. Spatial distribution of regression coefficients for explanatory variables

图 7. 各解释变量回归系数空间分布

各驱动因素的回归系数如图 7 所示，可以看出各驱动因素与 LST 之间关系的空间异质性。在地表覆盖因素中，NDVI、海拔高度与 LST 主要呈现负相关关系，即植被覆盖面积越大，海拔高度越高，地表温度越低。而土地利用规划情况与 LST 之间的关系以正相关为主，建设用地(赋值为 5)的地表温度更高，而林地和耕地(赋值为 2 和 1)的地表温度更低。其他两个影响因素对 LST 的影响空间异质性都不明显，在研究区中心区域，NDVI、海拔高度与 LST 呈现负相关关系，而在郊区山地区域，NDVI、海拔高度与 LST 呈现正相关关系。土地分类与 LST 主要呈现负相关关系，而在中心的部分区域，土地分类与 LST 呈现正相关关系。所以，植被覆盖度和土地利用的分类与 LST 的关系具有明显的空间异质性。那么造成该空间异质性的原因，值得进行进一步的探究[18] [19]。

5. 结论与讨论

5.1. 结论

地表温度是体现城市热岛现象的主要决定因素[20] [21]。本研究基于大连市中心城区 2013~2022 年 5 期遥感影像，探讨大连市中心城区 LST 在不同年份的空间分布特征；进而利用 GWR 模型探讨地表覆盖特征、海拔、各街道至岸线距离和土地利用类型对 LST 和城市热岛现象的影响，得出以下主要结论：

(1) 大连市目前的热岛问题比较严重，地面温度高于 33℃的地区，几乎遍及了整个区域。各区的平均地表温度由低到高的排序为：中山区、西岗区、沙河口区、甘井子区。研究区的地表温度的空间分布呈现出明显的随时间变化特征，2022 年城市热岛效应明显强于 2013 年，说明热岛区(>30℃)集中分布于

沙河口区、西岗区和中山区, 其中 2022 年高温区面积多于往年高温区面积。

(2) 研究区的土地利用分类中, 建设用地逐年增加, 导致城市地表温度始终居高不下而且逐年增长, 城市绿地有所改善但并不明显。其对城市地表温度变化的相关性最强。

(3) LST 与其驱动因素的 GWR 分析结果表明, 总体而言, 地表温度在空间分布上具有明显的不均匀性和复杂性, 在不同位置上存在的空间异质性不同。其中, 以 NDVI、海拔高度、和到海岸线的距离为指标, 城市地表温度在大部分地区存在明显的空间相关性, 即在大部分地区城市绿地越多、海拔越高、距海位置越近, 地表温度越低; 其他部分受其影响均不明显。而以土地利用类型为指标, LST 的空间异质性在绝大部分地区较为明显, 即在东部和南部的中心地区建设用地越多, 地表温度受其影响越明显, 地表温度越高。而在四周及其他位置, 地表温度受用地类型影响不明显。

5.2. 讨论

由于各影响因素对下垫面温度及热岛的影响程度存在较大差异, 故可根据各影响因素的空间异质性, 采取针对性的调控措施。例如研究区东南部, 即沙河口区、西岗区以及中山区, 地表植被覆盖过少, 城市热环境温度过高, 表明该地区可以适当增加绿化范围, 制定合理的城市化发展战略。也可以采取人工降雨、路面洒水等措施来降低地表温度[22]。

由于数据的获取有局限性, 目前, 我们只是选择了其中的一些关键因子, 并将其作为模型的一种, 今后还可以引入更多的因子, 以更好地研究其空间异质性。此外, 城市的空气污染[23]也是造成这一现象的主要因素之一。在城市中, 汽车、工业、生活等都会产生大量的 NO_x 、 CO_2 和烟尘。由于其高密度和大量的气溶胶颗粒, 会对下垫面的热辐射起到一定的保温和温室效应, 进而导致大气温度的进一步升高。同时, 季节性变化也是影响城市地表温度的一个重要因素。在后续的研究中可以增加这两个解释变量, 可以从时空两方面研究 LST 影响因素的空间异质性, 为不同的区域的大气状况和季节变化条件下对城市热岛效应提出有理有据的规划建议[24]。

参考文献

- [1] 王治钧. 给城市降降温[J]. 知识就是力量, 2023(3): 48-51.
- [2] 李文珍. 沥青路面不饱和聚酯降温涂料的研发[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [3] 杨立稳. 屋顶绿化对顶层室内温度和能耗的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2015.
- [4] 韩世明. 南昌市红谷滩新区居住绿地的生态效应研究[D]: [硕士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2017.
- [5] Oke, T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*. Great Britain at the University Press.
- [6] 孙雨萌, 张育庆. 城市热环境空间格局及影响因素分析——以大连市金州区为例[J]. 国土与自然资源研究, 2022(1): 77-79.
- [7] 王郁, 胡非. 近 10 年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究[J]. 地球物理学报, 2006(1): 61-68.
- [8] 高平. 保护生存环境 善待美好家园——谈热岛效应与节能减排[J]. 科学咨询(科技·管理), 2012(9): 67-68.
- [9] 王楠, 王权明. 城市绿地对缓解沿海城市热环境效应研究——以大连市中心城区为例[J]. 绿色科技, 2022, 24(24): 122-128.
- [10] 陈书林, 瞿佳明. 基于最大似然法的南京市土地利用类型分类研究[J]. 商, 2016(22): 110.
- [11] 杨辰丛海. 基于遥感应用的福州市城市热环境及其相关关系分析[J]. 福建轻纺, 2021(8): 34-38.
- [12] 吴瑶. 不同类型红松林的空间分布格局及异质性研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [13] 张琦, 曹蔚宁, 延书宁. 旅游发展对城乡收入差距影响的空间异质性——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR) [J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2022, 22(5): 112-123.
- [14] Chen, X., Li, F., Zhang, J., Zhou, W., Wang, X. and Fu, H. (2020) Spatiotemporal Mapping and Multiple Driving Forces Identifying of $\text{PM}_{2.5}$ Variation and Its Joint Management Strategies across China. *Journal of Cleaner Production*, **250**,

Article ID: 119534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119534>

- [15] Zhi, Y., Shan, L., Ke, L. and Yang, R. (2020) Analysis of Land Surface Temperature Driving Factors and Spatial Heterogeneity Research Based on Geographically Weighted Regression Model. *Complexity*, 2020, Article ID: 2862917. <https://doi.org/10.1155/2020/2862917>
- [16] 郭丽宁, 常蕊, 杨杰, 李惠. lncRNA OVAAL、miR-335、TRIM14 在子宫内膜癌中表达及与临床特征相关性研究[J]. 河北医科大学学报, 2023, 44(1): 68-73+111.
- [17] 李梦航, 阙翔, 刘金福, 苏少强, 丁晓婷. 中国城市 PM_{2.5} 影响因素的空间异质性分析[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2021, 37(1): 37-41.
- [18] Fotheringham, A.S., Brunson, C. and Charlton, M. (2003) Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships. John Wiley and Sons.
- [19] 刘坤坤. 基于遥感和 GIS 的中小城市热环境效应及缓解方法研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [20] 李星明, 张靖, 李雪柔, 刘妍, 卢盈宇. 大连市城市绿地缓解热岛效应研究[J]. 天津农业科学, 2017, 23(5): 102-105.
- [21] 雍赟. 兰州市大气污染现状、成因及治理法律对策[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [22] 刘际超, 李国庆. 浅谈城市热岛效应的危害和改善方法[C]//中国环境科学学会. 2010 中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 428-431.
- [23] 侯浩然, 丁凤, 黎勤生. 近 20 年来福州城市热环境变化遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3): 385-395.
- [24] 王骏飞. 西(安)咸(阳)新区城市地表温度遥感反演及其变化研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2015.