

基于遥感数据的城市热岛效应研究

杨冠群

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年11月25日; 录用日期: 2024年12月30日; 发布日期: 2025年1月6日

摘要

本研究以中分辨率成像光谱仪(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, 简称MODIS)逐日数据反演的地表温度产品为数据基础, 基于GEE平台对地表温度数据进行单位变换、逐月均值计算等处理, 采用密度分割法对地表温度进行热岛强度划分, 在季节尺度上通过对地表温度进行统计分析, 分析研究区热岛强度空间分布特征及其演变规律, 结合土地利用数据将海口市划分为建成区-近郊区-远郊区三个典型区域, 分析热岛强度的区域差异, 采用相关分析方法, 探讨了下垫面因素对热岛效应的影响。研究表明: (1) 海口市城市热岛效应2~8月逐步增强, 9~1月逐步减弱, 在8月达到最强, 在1与12月达到最低, 但在冬季城市热岛中心并不明显; (2) 海口市市区温度比近郊和远郊地区温度更高, 但差异不大(建成区与近郊区月均温度相差 0.76°C , 建成区与远郊区月均温度相差 0.22°C), 热岛中心出现在市区; (3) 海口市植被覆盖度和水体指数均与热岛效应呈正相关关系。

关键词

城市热岛, GEE平台, 地表温度, 土地覆盖类型

Study on Urban Heat Island Effect Based on Remote Sensing Data

Guanqun Yang

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Nov. 25th, 2024; accepted: Dec. 30th, 2024; published: Jan. 6th, 2025

Abstract

This study is based on the daily data inversion of surface temperature products from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and uses the GEE platform to process the surface temperature data through unit transformation and monthly mean calculation. The density segmentation method is used to divide the surface temperature into heat island intensity categories. At the

seasonal scale, statistical analysis is conducted on the surface temperature to analyze the spatial distribution characteristics and evolution laws of heat island intensity in the study area. Combined with land use data, Haikou City is divided into three typical areas: built-up area, suburban area, and outer suburban area. The regional differences in heat island intensity are analyzed, and the impact of underlying surface factors on the heat island effect is explored using relevant analysis methods. The research results show that: (1) The urban heat island effect in Haikou gradually increases from February to August, gradually decreases from September to January, reaches its strongest point in August, and reaches its lowest point in January and December, but is not significant in the urban heat island center during winter; (2) The temperature in the urban area of Haikou is higher than that in the suburban and outer suburban areas, but the difference is not significant (the monthly average temperature difference between the built-up area and the suburban area is 0.76°C, and the monthly average temperature difference between the built-up area and the outer suburban area is 0.22°C). The center of the heat island appears in the urban area; (3) The vegetation coverage and water index in Haikou City are positively correlated with the heat island effect.

Keywords

Urban Heat Island, GEE Platform, Land Surface Temperature, Types of Land Cover

Copyright © 2025 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

目前通过遥感数据反演地表温度来探究城市热岛效应,取得了显著的研究进展[1][2]。热带地区多云雨天气,不利于遥感数据的获取,因此,热带海岛城市由于受云雨等气象条件的限制,该区域高质量遥感数据十分有限,这为热带海岛城市相关研究造成一定困难。此外,热岛海岛城市,相较于内陆有其独特的自然、气候特点,例如海岛城市的气候显著受到本地常年季风的影响,常年有穿过城市冠层内街道的季风对缓解城市热岛强度起到了非常关键的作用,与此同时,晴朗天气条件下强烈的太阳辐射对城市热岛效应具有较大的增强作用[3][4]。台风多发季所带来的大量降水相较于其他季节城市热岛效应也会减弱[5]。然而,目前针对热带海岛城市的城市热岛效应研究较少,热带海岛城市热岛效应强度、时空分布规律及其影响机制有待进一步研究[6]-[8],因此,本研究以海南省典型城市为研究区,基于多源遥感数据,分析城市热岛强度及其空间分布规律和季节差异,分析下垫面因素与地表温度的关系,探讨缓解城市热岛效应的因素,为改善城市热环境提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

海口市,海南省辖地级市、省会,北部湾城市群重要节点城市,二线城市,位于北纬 19°31'~20°04',东经 110°07'~110°42',地处海南岛北部,东邻文昌,西接澄迈,南毗定安,北濒琼州海峡。全市地势平缓,分布在海拔 10 米左右的平原上。海口市辖秀英区、龙华区、琼山区、美兰区 4 个区。海口市属于热带季风海洋性气候,全年日照时间长,辐射能量大,年平均日照时数 2000 小时以上,太阳辐射量可达到 11 到 12 万卡;年平均气温 23.8°C,最高平均气温 28°C 左右,最低平均气温 18°C 左右,最热月为 8 月,最冷月为 1 月。近年来海口市城市建成区不断向外扩张,城市建筑高度与城市化发展水平也逐年上升,使得热量在城市区域内大量堆积,热岛效应进一步增强[9]。

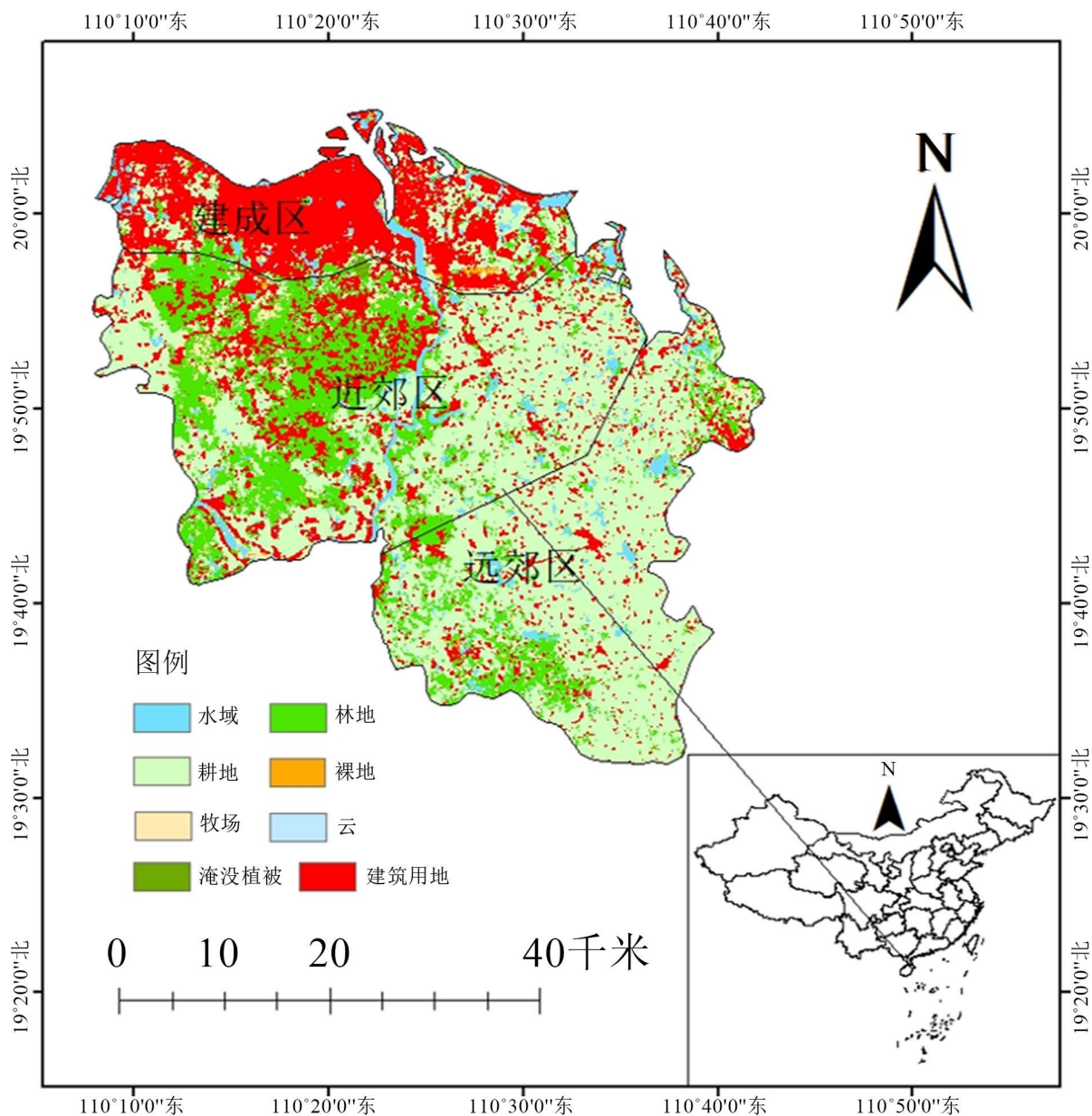


Figure 1. Distribution of study area and land use status map in 2022

图 1. 研究区分布与 2022 年土地利用现状图

2.2. 数据来源及处理

2.2.1. 地表温度数据

本研究使用 MODIS 地表温度产品(MODIS/061/MOD11A2), MODIS/061/MOD11A2 为 L1B 级 8 天合成产品, 空间分辨率为 1KM。L1B 级产品的最新算法在反射响应速度、扫描角度与红外波段的光学串扰等方面进行调整, 产品精度进一步提升, 保证数据的一致性与相对稳定性。本研究基于谷歌地球引擎(GEE)平台获取覆盖海口市 2022 年 12 月至 2023 年 11 月的逐日地表温度产品数据。

基于 GEE 平台, 集成掩膜提取算法, 使用海口市行政区划图提取海口区域范围的 MODIS 数据。集成像元矫正算法, 对 MODIS 地表温度数据进行一点的矫正。另外, 采用转换公式(式 1)将 MODIS 温度

产品的单位由开尔文转化为摄氏度

$$C = 0.02 * K - 273.15 \tag{1}$$

式中， C 为单位转换后的地表温度； K 为 MODIS11A1 数据集的像元值。

由于本研究是在季节尺度上进行研究的，因此，基于 GEE 平台，通过集成统计算法，进一步计算获得逐月地表温度数据。

2.2.2. 下垫面因素

本研究通过植被覆盖度来探究植被对海口市热岛效应的相关关系，本文采用 NDVI 数据来表征植被覆盖度。本研究基于 GEE 平台，利用 MODIS 地表反射率数据，反演获取 NDVI 数据，NDVI 的计算公式(2)为：

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \tag{2}$$

NIR 为近红外波段的反射值， R 为红光波段的反射值。

本研究采用归一化水指数来探究水域对城市热岛效应的影响，与 NDVI 相比，NDWI 指数能及时地响应，可以很好地反映区域温度过高的热岛效应。该指数也是基于 GEE 平台，利用 MODIS 地表反射率数据反演获取，NDWI 是基于绿波段与近红外波段的归一化比值指数，表达式(式 3)为：

$$NDWI = (G - NIR) / (G + NIR) \tag{3}$$

式中， G 为绿色波段； NIR 为近红外波段的反射值。

接着，利用获取到的反演数据，通过集成统计来计算研究区逐月下垫面指数数据，并与通过 GEE 平台获取到的逐月地表温度数据进行线性相关分析。

2.2.3. 土地利用数据

本研究所使用的空间分辨率为 10 m 的土地利用类型数据，是基于 Sentinel-2 卫星所获取的影像数据进行土地利用分类，通过目视判别法与分析 Sentinel-2 卫星的各个波段的波长的方法，结合研究区实地资料及照片，判断遥感影像上实地地物类别。基于判断的地物类别，利用监督分类对研究区地物进行地类划分，从而获得土地利用类型数据。

基于各类判别方法所获取到的地物类别包括，水域、林地、淹没植被、耕地、建筑区、裸地、云与牧场。见图 1。

2.3. 热岛强度分级

Table 1. Heat island intensity classification
表 1. 热岛强度等级划分

		范围
1	低温	$T < 22^{\circ}\text{C}$
2	中温	$22^{\circ}\text{C} \leq T < 28^{\circ}\text{C}$
3	中高温	$28^{\circ}\text{C} \leq T < 34^{\circ}\text{C}$
4	高温	$T \geq 34^{\circ}\text{C}$

注： T 为地表温度。

基于得到的以季节为尺度的月均地表温度数据进行热岛等级划分[10]，本研究采用密度分割法划分研究区热岛等级。将得到地表温度产品数据进行统计分析得到年均温度，即为均值，利用月均地表温度

数据计算标准差，得到均值为 28℃，标准差为 3。以 6 摄氏度为区将热岛强度划分为 4 个等级。具体划分如表 1 所示。

2.4. 典型区域划分

通过查询土地利用类型分类表，来提取土地利用类型图中各土地利用类型，通过得到的信息将被建筑用地覆盖率超过 80%的区域划分为建成区，郊区根据主要土地利用类型的种类来划分成近郊区和远郊区。依据杜能农业区位论原理，建成区向外依次为自由式农业、林业、轮作式农业、谷草式农业、三圃式农业、畜牧业这样的同心圆结构。基于研究区土地利用类型分类图将大部分被林地覆盖的区域划为近郊区，以耕地和牧场为主的区域划分为远郊区。

2.5. 统计分析

基于 GEE 平台获取的地表温度产品数据，对其进行以季节为尺度的均值计算，统计计算每个月的地表温度均值与极大值极小值像元，对基于 Sentinel-2 卫星获得的土地利用类型数据所划分的各个典型区域以及对利用密度分割法划分的各个热岛强度等级也进行均值与极值的统计计算，计算各个区域的地表温度均值与极大极小值。基于 GEE 平台 MODIS 地表反射率数据反演获得的 NDVI 与 NDWI 下垫面因素，统计计算均值，与地表温度均值进行相关回归分析，探究下垫面因素与城市热岛效应的关系。

3. 结果分析

3.1. 热岛效应的季节变化特征

通过 2023 年海口市土地利用数据可以发现，研究区北部属于海口市市区，并且位于沿海地区，因此温度变化迅速且波动较大。研究区东部存在着红树林保护区，因此温度变化较为稳定。南部地区存在着大范围的农场和耕地，西部地区主要是以林地为主。

通过对 2022 年 12 月~2023 年 11 月研究区地表温度数据的处理和统计分析，得到研究区各月份城市热岛效应强度等级的分布图，见图 2。为了更直观的分析海口市区域范围地表温度的分布状况，分别统计了各个月的最高温、最低温，还有不同热岛强度的均温，见表 2。

Table 2. The average intensity of each heat island grade in Haikou City in each month (°C)
表 2. 海口市各月份各热岛等级强度均值(°C)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
低温	18.28	18.52			16.11					18.93	15.83	19.50
中温	23.15	25.84	26.35	24.95	24.74	26.46	26.70	26.18		25.48	25.05	23.97
中高温	28.42	27.82	29.22	30.48	30.12	31.18	31.07	31.01	31.22	28.73	27.70	27.39
高温				34.59	34.79	35.22	34.60	35.75	35.11			
max	28.99	31.21	33.86	36.27	37.57	38.35	39.15	42.85	37.44	32.79	32.39	27.56
min	12.63	16.60	23.09	24.95	9.17	25.26	26.18	25.05	27.57	16.59	7.55	18.83
mean	23.10	26.68	29.00	30.53	28.85	32.06	31.17	32.12	31.49	27.00	25.81	24.00

海口市 10 月、11 月、12 月和 1 月迎来大范围的低温区(由于海口地处热带地区，属于热带季风气候，因此城市热岛等级的低温区是相较于热带地区的低温)，其中以 12 月以及 1 月最为强烈，平均温度分别为 24℃和 23.1℃。海口市区域最低温出现于 11 月，最高温度出现于 8 月，分别为 7.55℃和 42.85℃。2 月~8 月逐渐出现大范围的中高温及以上区域，研究区平均温度由 26.68℃逐步攀升至 32.12℃，其中 6 月，

8月出现大范围高温区，8月高温区域面积达到最大，而6月与8月高温区的平均温度分别为35.22℃和35.75℃。8月过后，温度开始逐步减弱，9月平均温度较8月下降了0.63℃，之后平均温度以每个月超过1℃的跌幅逐步降低。各月份地表平均温度最大最小值的差值都在10℃以上，最大达到了28.4℃，平均差值为15.41℃。

高温区主要集中在海口市建成区，近郊区和远郊区在6月之后逐渐转为中高温区域。中高温热岛面积相对浮动较小，且在3月~9月长时间占据热岛面积60%以上。建成区全年存在相较于近郊区和远郊区的大范围高温区。

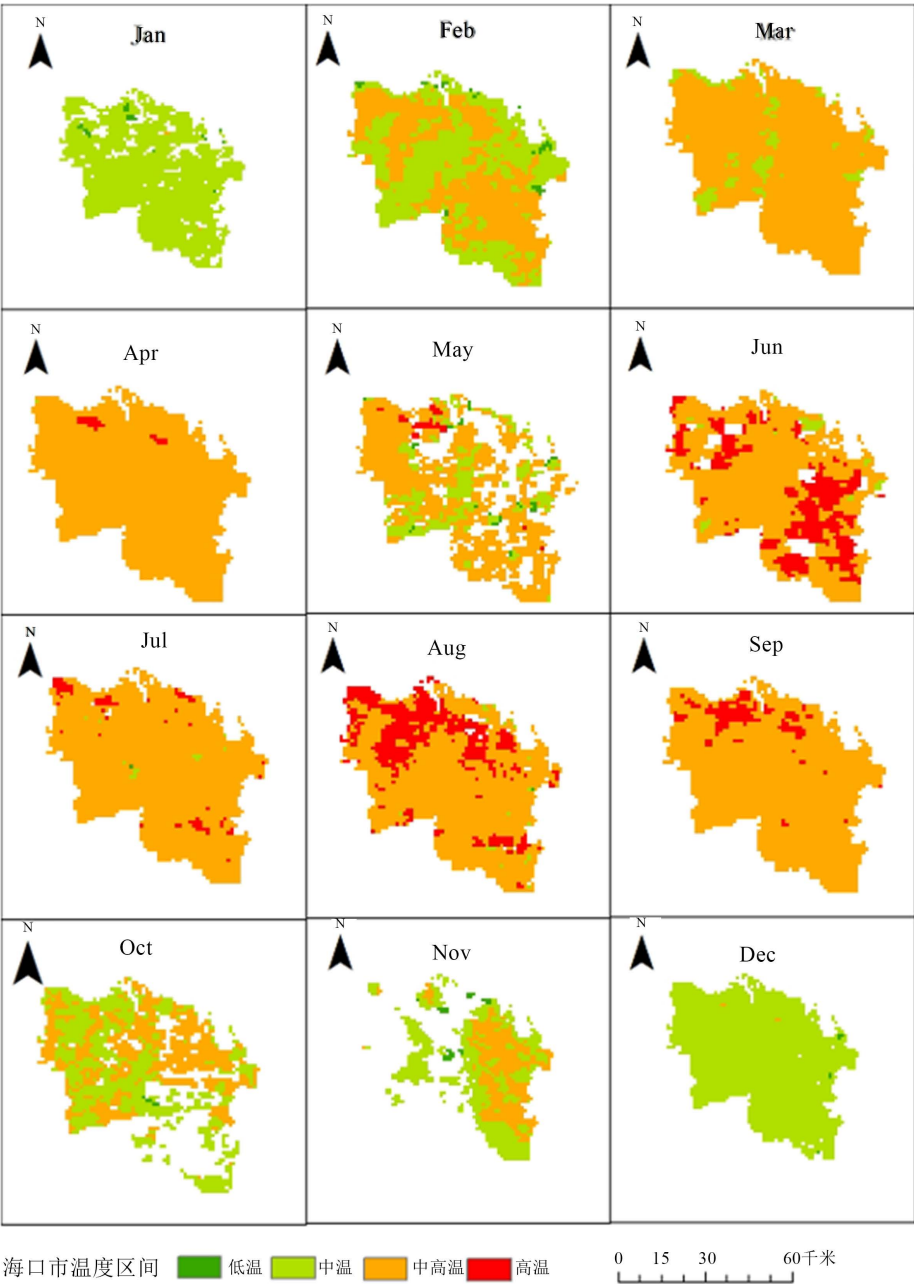


Figure 2. Grade distribution of urban heat island effect in Haikou City from December 2021 to November 2022
图 2. 海口市 2021 年 12 月至 2022 年 11 月城市热岛效应等级分布

通过统计得到海口市月平均温度变化图见图 3。自 9 月起, 温度开始呈现下降趋势, 在 1 月达到最低后, 温度开始渐渐提升。通过查询资料得知, 2023 年 5 月海口多阴雨天气, 并且月初受冷空气影响, 温度仅为 20~23℃。因此导致 5 月份月均温相较于上个月下降了 1.68℃。在 7 月, 温度也出现了小幅度的下降, 这是由于海口地区夏季多发台风天气, 并且通过查阅资料, 2023 年 7 月出现了长时间的雷雨天气, 受云雾影响, 7 月研究区范围受太阳光辐射时间减少, 因此温度出现小幅度下降。

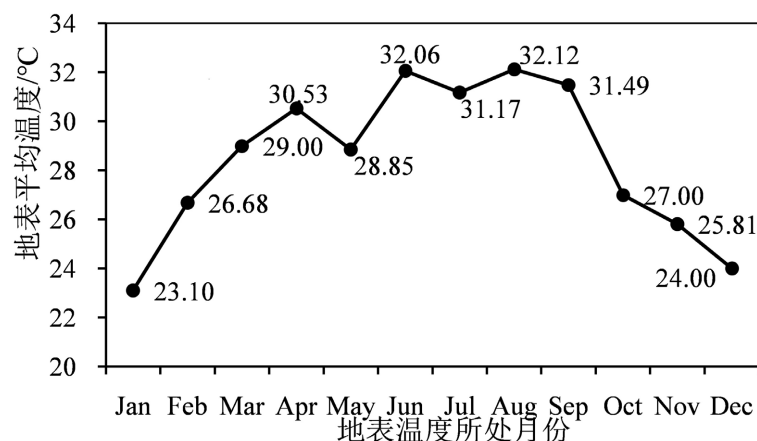


Figure 3. Variation of monthly average temperature in Haikou City

图 3. 海口市月平均温度变化图

3.2. 热岛效应的区域变化

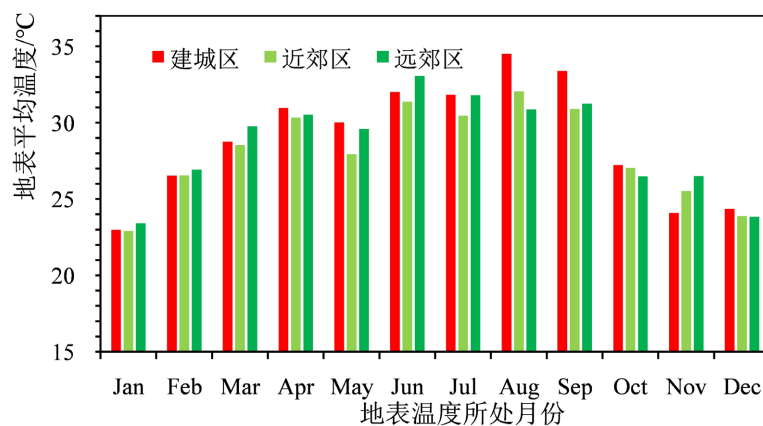


Figure 4. The temperature contrast map of Haikou City

图 4. 海口市各区域温度对比图

对于 2023 年海口市土地利用数据提取的建成区, 近郊区, 远郊区, 通过统计分析各区域范围内的地表温度数据, 得到温度对比图, 见图 4, 图 5。各区域每月均温差异见表 3, 8 月和 9 月, 建成区与远郊区的温度差异最大, 8 月建成区和远郊区相差 3.66℃, 9 月相差 2.13℃, 同样也是在 8 月和 9 月, 建成区与近郊区温度差异达到最大, 分别为 2.47℃和 2.49℃。5 月~9 月建成区与近郊区开始出现明显温度差距, 而 1 月、2 月、3 月、4 月、10 月和 12 月各区域温度基本相似, 并无太大差别, 而远郊区在 1 月、2 月、4 月、5 月、7 月、12 月同建成区的温差并不太大。但是在 11 月, 出现建成区温度明显低于远郊区温度的现象, 而且近郊区温度也大于建成区温度, 并相较于其他月份有较大差距。

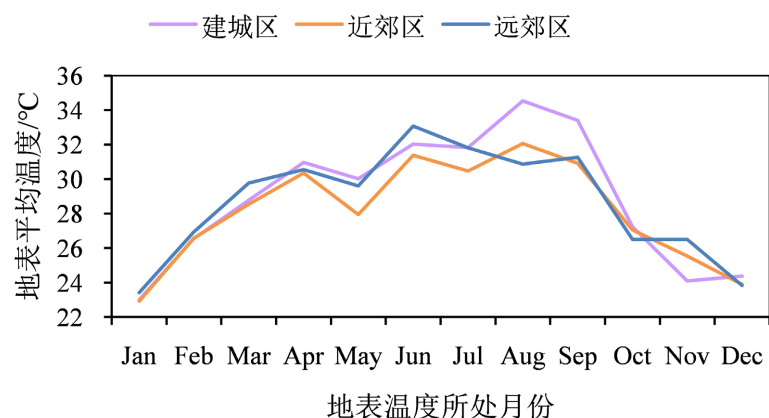


Figure 5. Monthly average temperature changes in Haikou City

图 5. 海口市各区域月平均温度变化图

由于各区域的主要土地利用类型性质差异较大,使得近郊区的温度变化范围相较于建成区和远郊区更小。建成区月均最高温度为 34.53℃,位于 8 月,最低温为 22.91℃,位于 1 月;近郊区月均最高温度为 32.06℃,位于 8 月,最低温为 22.91℃,位于 1 月;远郊区月均最高温度为 33.08℃,位于 6 月,最低温为 23.42℃,位于 1 月。

建成区和近郊区的温度都是在 9 月开始呈现出下降趋势,2 月开始呈现上升趋势,但是在远郊区范围内,地表温度在 6 月达到最高,并开始出现下降趋势,并且在 9 月出现小幅温度回升。

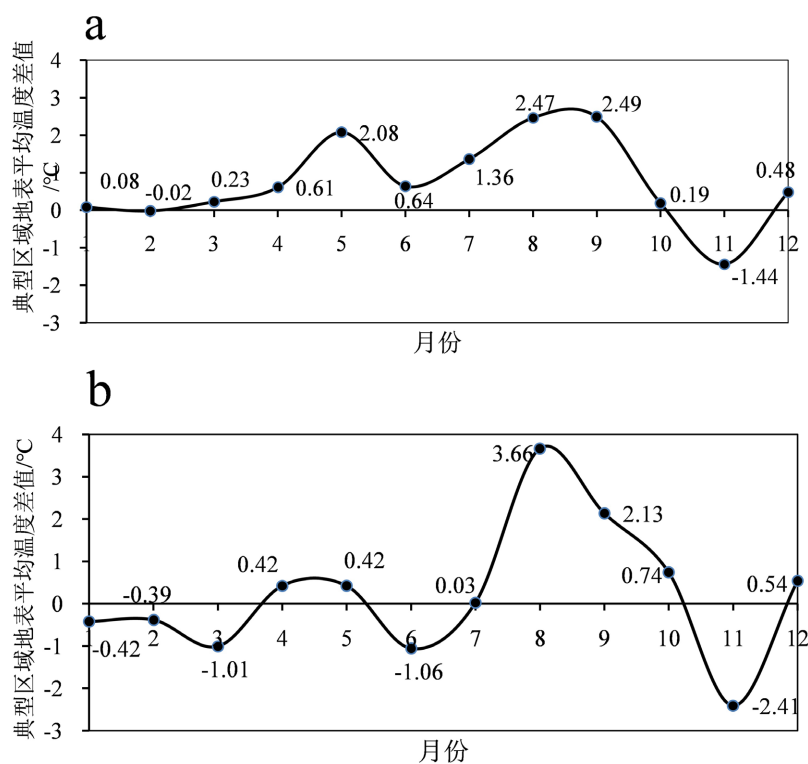


Figure 6. Variation of temperature difference between built-up area and near and far suburbs (a: built-up area and near suburbs, b: built-up area and far suburbs)

图 6. 建成区与近、远郊区温度差异变化(a: 建成区与近郊区, b: 建成区与远郊区)

Table 3. Average temperature and temperature difference table of each region**表 3.** 各区域均温及温度差异表

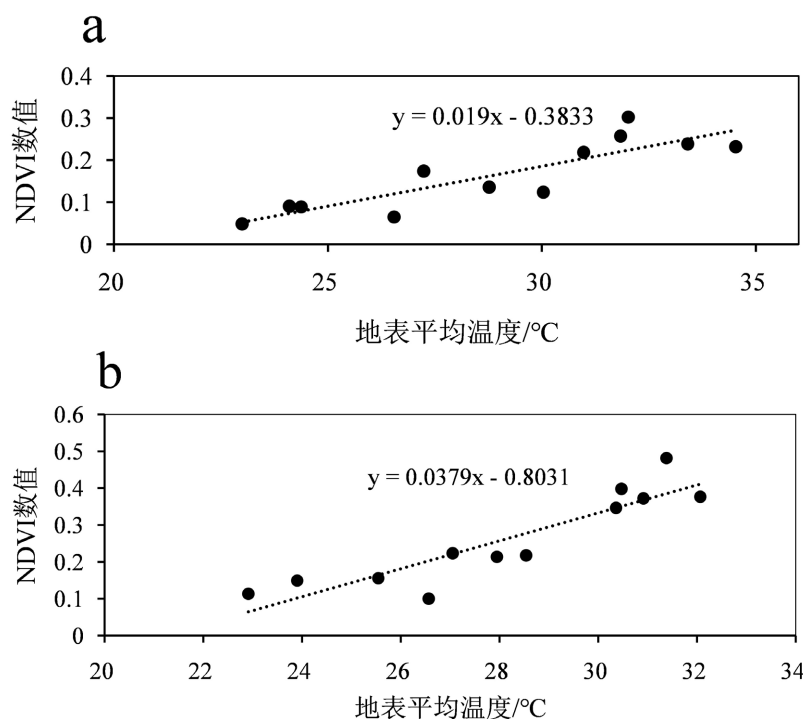
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
建城区	22.99	26.54	28.77	30.97	30.03	32.02	31.83	34.53	33.40	27.24	24.10	24.37
近郊区	22.91	26.56	28.54	30.35	27.95	31.38	30.47	32.06	30.91	27.05	25.54	23.90
远郊区	23.42	26.93	29.77	30.54	29.61	33.08	31.81	30.87	31.27	26.50	26.51	23.84
建远差异	-0.42	-0.39	-1.01	0.42	0.42	-1.06	0.03	3.66	2.13	0.74	-2.41	0.54
建近差异	0.08	-0.02	0.23	0.61	2.08	0.64	1.36	2.47	2.49	0.19	-1.44	0.48

3.3. 下垫面对热岛效应时空分布的影响

3.3.1. NDVI 对热岛效应的影响

植被在全球生态系统中扮演着重要的角色，利用遥感影像来获取植被信息，成为研究气候及生态变化的重要方向。NDVI 数据与植被的许多参数密切相关，是监测地面植被变化的一个重要指标。通过对所获取的 MODIS 数据进行 NDVI 指数的计算，来研究归一化植被指数(NDVI)与城市热岛效应之间的关系。归一化植被指数，可使植被从水和土中分离出来，能客观地反映植被覆盖量的变化，是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子。NDVI 是基于影像近红外波段和红色波段的反射率的值得到的。

植被覆盖度在一般情况下是与 LST 成负相关关系。见图 6，表 4。建成区与 NDVI 的关系图，近郊区与 NDVI 的关系图，远郊区与 NDVI 的关系图，海口市与 NDVI 的关系图，见图 7。建成区的 NDVI 数值远小于近郊区和远郊区。海口市地表温度与 NDVI 数值呈一定的正相关关系，不仅是海口市，每个研究区域的地表温度与 NDVI 都呈现出一定的正相关关系，即随着植被覆盖量的增加，海口市研究区各区域的地表温度也随之升高，城市热岛效应逐渐增强。



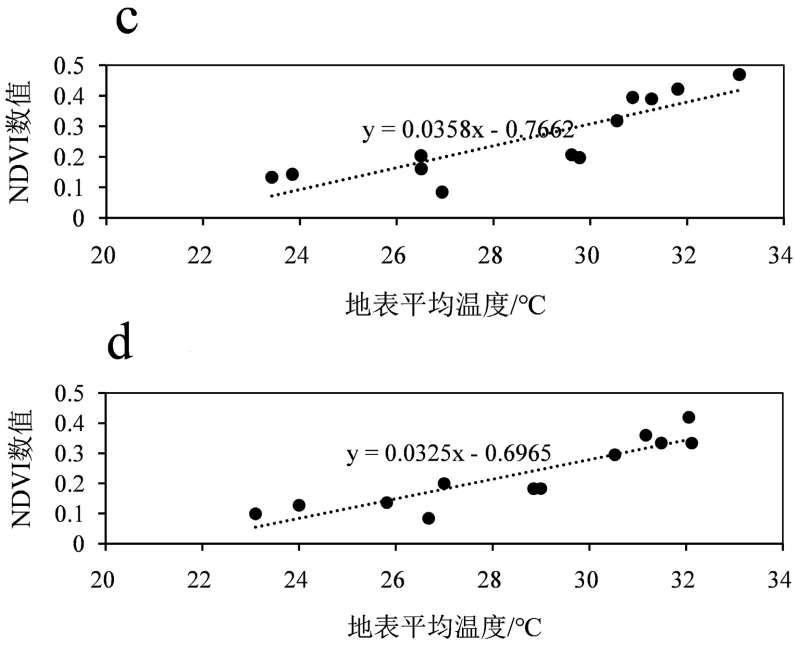


Figure 7. The relationship between NDVI and temperature in typical regions and Haikou City (a: built-up area, b: near suburbs, c: far suburbs, d: Haikou City)
图 7. 各典型区域以及海口市 NDVI 与温度关系图(a: 建成区, b: 近郊区, c: 远郊区, d: 海口市)

Table 4. NDVI numerical table of each typical area
表 4. 各典型区域 NDVI 数值表

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
建成区 NDVI	0.05	0.07	0.14	0.22	0.12	0.30	0.26	0.23	0.24	0.17	0.09	0.09
近郊区 NDVI	0.11	0.10	0.22	0.35	0.21	0.48	0.40	0.38	0.37	0.22	0.16	0.15
远郊区 NDVI	0.13	0.08	0.20	0.32	0.21	0.47	0.42	0.39	0.39	0.20	0.16	0.14
全区 NDVI	0.10	0.08	0.18	0.29	0.18	0.42	0.36	0.33	0.33	0.20	0.14	0.13

3.3.2. NDWI 对热岛效应的影响

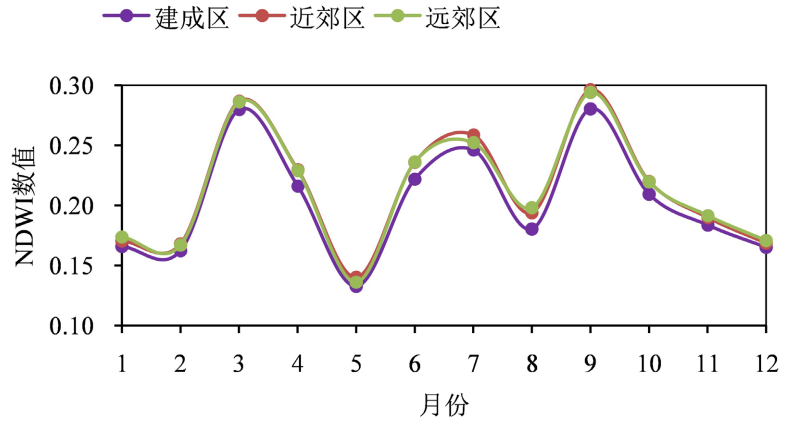


Figure 8. NDWI contrast map of each region
图 8. 各区域 NDWI 对比图

通过对各区域的水体指数进行对比,可以看出建成区的 NDWI 最小,而近郊区和远郊区并无太大差异,见图 8,建成区与近郊区的差值的均值为 0.1,而建成区与远郊区的差值的均值为 0.09,近郊区 NDWI 相对较高。建成区 NDWI 最高为 0.28,最小为 0.133;近郊区 NDWI 最高为 0.296,最小为 0.14;远郊区 NDWI 最高为 0.294,最小为 0.136。通过将海口市每月平均温度与海口市 NDWI 进行散点图对比,可以发现 NDWI 与海口市地表温度呈一定的正相关关系,见图 9。但在正常情况下 NDWI 应对温度有抑制作用。

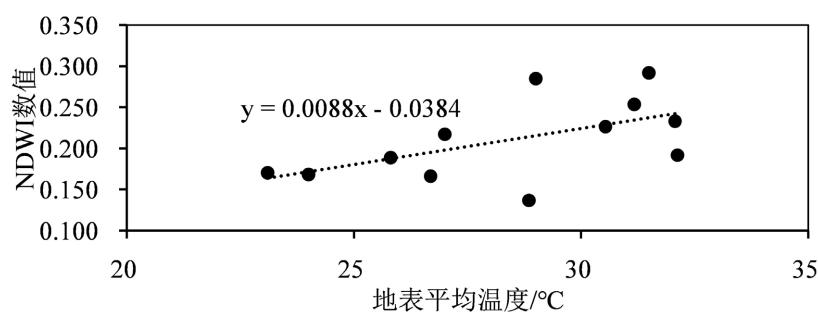


Figure 9. The relationship between NDWI and land surface temperature in the study area
图 9. 研究区 NDWI 与地表温度关系

4. 讨论

北部沿海地区相较于内陆地区首先受到冷空气侵袭,更早进入低温范围,但是由于海陆热力性质不同,温度的下降幅度比内陆地区要小,并且北部地区为建成区,城市人工建筑物,各类水泥建筑物和城市柏油道路吸热率大和比热容小,使得城市地区升温快,并向四周和大气中大量辐散,造成全年大部分时间建成区地表温度高于郊区温度,海口市市区成为热岛中心,并向外辐散,受城市热岛效应的影响,温度会高于内陆地区。冷空气消退后,城市下垫面相较于郊区对太阳辐射有较强的吸收作用,因此温度回升迅速。

研究区东部地区由于存在红树林保护区,并且红树林主要生长于陆地与海洋交界带的滩涂浅滩,是陆地向海洋过渡的特殊生态系统,红树林和滩涂、海水对太阳辐射的叠加吸收,使得温度的下降和上升比北部地区和西部地区更加缓慢。中西部地区以林地为主,大部分位于近郊区内,FVC (Fractional Vegetation Cover)与 LST (Land Surface Temperature)整体上呈负相关关系,农田区域出现显著负相关,而林地相关性最低,因此近郊区温度是所有区域内最低的。南部区域由于存在大范围的农场和耕地,与林地相比,耕地白天对地表有增温效应,夜晚有降温效应,总体上,全天有增温效应。农场主要种植荔枝、圣女果、菠萝、番石榴等经济作物,另外耕地翻耕后对太阳辐射的吸收率变高,使得土壤温度上升,而灌溉会导致土壤中的水分蒸发,蒸发过程需要消耗热量,当水分蒸发时,热量向外辐散,因此导致耕地的表面温度相对较高温度上升较为显著。

而海口市研究区中西部地位为近郊区,北部为建成区,而南部为远郊区,因此造成近郊区温度明显低于建成区和远郊区。由于建成区和远郊区自身下垫面的因素,这两个区域在除 8、9 月外的月份,温度差异并不大,并且大部分时间建成区温度还高于远郊区温度。

对于 3.1 的像元缺失现象和 3.1、3.2 的温度异常下降现象,5、10、11 月出现的大范围像元缺失情况,通过查询天气可以得知,由于当时云雨天气较多,云雾遮挡造成的信息缺失可以归结为两个方面,首先,云雾遮挡了遥感传感器对地面物体的观测,导致遥感影像中某些区域无法获得有用的信息。其次,云雾散射和吸收了光线,使得遥感影像的亮度和对比度下降,从而降低了图像中地物的辨识度。这两个方面

的共同作用下，云雾遮挡造成了遥感影像中的信息缺失。而大量的云雨天气造成到达地表的太阳辐射的量减少，地物吸收太阳辐射后向外辐射的自身热辐射量也减少，才会造成海口市5月平均温度低于4月和6月的情况。通过查询资料，得知2022年11月阴雨天气多达15天，占50%，而且还出现了连续7天的降雨，由于建成区本身下垫面的性质，导致建成区热岛效应强度大大降低，建成区温度明显低于近郊区和远郊区。

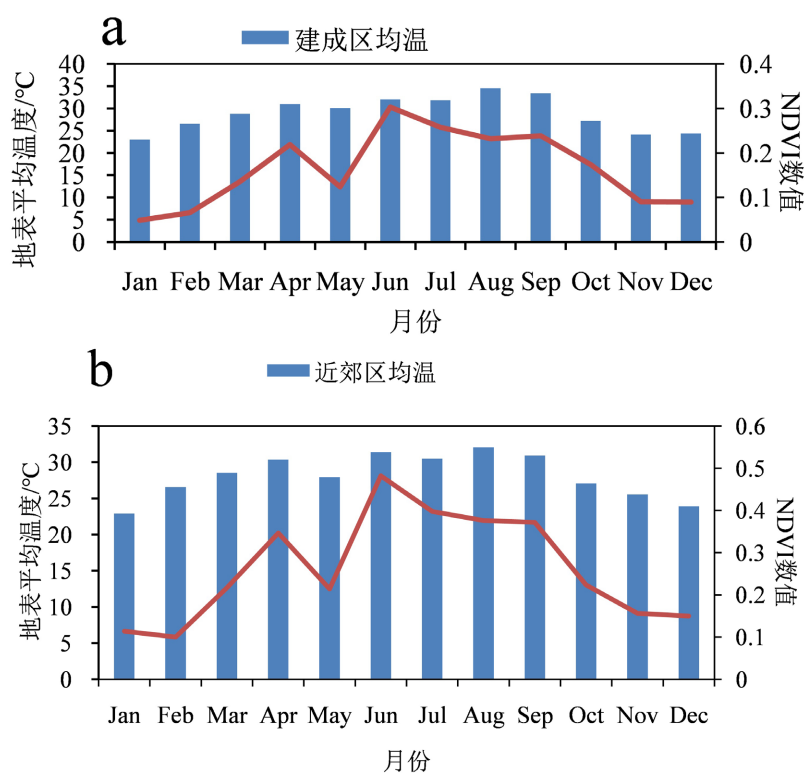
一般情况下，NDVI与LST是呈负相关关系的，NDVI与植被覆盖度的关系可以通过像元二分模型来描述，利用该模型中，NDVI的值可以通过公式4与植被覆盖度(FVC)相关联：

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (4)$$

其中， $NDVI_{soil}$ 是完全无植被覆盖区域的NDVI值， $NDVI_{veg}$ 是完全被植被覆盖区域的NDVI值。

因此，NDVI越大，FVC也越大，从而该呈现出LST越低的现象。但3.3出现的植被指数与地表温度呈一定正相关关系的现象，并不符合一般情况下NDVI与LST的相关关系。通过对比分析每个月各区域各自的NDVI与LST的关系作出图表，见图10，可能的原因是，海口市由于位于热带地区，全年长时间的日照使得植被覆盖度高的地区所能吸收热量超出限度，但长时间的光照也使得植被长势愈发良好，因此在温度上升2~8月份，光照时间增加，太阳辐射也增强，使得植被也随之发育成长，NDVI也变高，但由于到达地面的太阳辐射远远超出了地表植物所能缓解的量，因此NDVI和LST呈现出一定的正相关关系。

NDWI也应对热岛效应有抑制作用，但实际情况是NDWI随着温度的上升而增加。出现这种情况的原因可能与NDVI相似，由于地处热带，全年照射到地表地太阳辐射总量远远高于内陆地区，已超过水体所能抑制的限度，而温度升高也伴随着强降水的出现，因此出现了随着温度的升高，NDWI也随之增加的情况。



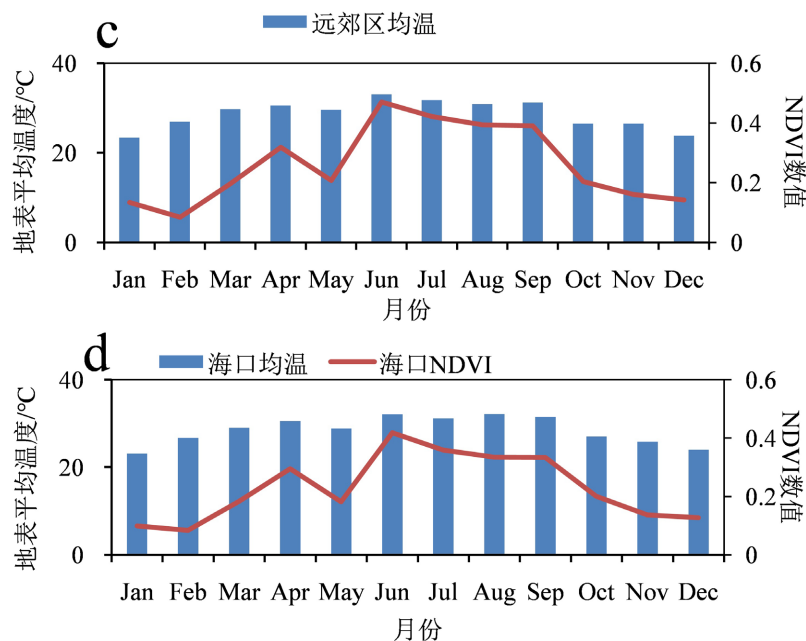


Figure 10. Comparison of surface temperature and NDVI in each region (a: built-up area, b: suburban area, c: outer suburban area, d: Haikou City)

图 10. 各区域地表温度与 NDVI 对比图(a: 建成区, b: 近郊区, c: 远郊区, d: 海口市)

5. 结语

相较于传统遥感数据源, 如 Landsat 系列的热红外波段分辨率, MODIS 数据虽然在小尺度城区地物热场分布研究上存在分辨率较低的局限性, 但本研究通过谷歌地球引擎(GEE)平台进行高效的数据处理, 包括单位变换和逐月均值计算, 提高了数据处理的精度。本研究利用 2022 年 12 月~2023 年 11 月的基于 GEE 平台的 MODIS 地表温度产品数据统计计算了海口市行政区划范围内的地表温度并据此进行了热岛强度分级划分。得出结论如下:

(1) 海口区域城市热岛效应强度在 2 月~8 月逐步增强, 9 月~1 月逐步减弱, 主要表现在地表平均温度在 2~8 月逐步上升, 在 9~1 月逐步下降。城市热岛强度在 8 月达到最强, 平均温度为 32.12℃, 最高温达到 42.85℃。高温区域主要集中在建成区, 从 4 月开始到 9 月, 建成区一直存在高温区。在 1 月和 12 月研究区被中低温区所覆盖, 平均温度达到最低, 且在冬季热岛中心并不明显。

(2) 建成区温度相较于近郊区和远郊区温度更高, 在以季节为尺度的大部分时间内建成区与近郊区和远郊区的平均温度差值都为正值, 但差异不大, 近郊区与建成区的平均温度差值为 0.76℃, 远郊区与近郊区的平均温度差值为 0.26℃, 由此可以判断研究区城市热岛中心位于建成区。

(3) 研究区地表温度与 NDVI 表现出一种正相关关系, 随着温度的上升, NDVI 也逐步增加, 但建成区地表温度要高于近郊区和远郊区, 建成区 NDVI 相较于近、远郊区更小, 建成区 NDVI 与近郊区的平均差值为 0.1, 与远郊区的平均差值也为 0.1, 研究区植被覆盖度对城市热岛效应的缓解作用较小。NDWI 也与研究区地表温度呈一种正相关关系, 建成区 NDWI 也小于近、远郊区, 建成区与近郊区的 NDWI 差值为 0.1, 与远郊区的 NDWI 差值为 0.09, 研究区地表水含量对城市热岛效应的缓解作用较小。

参考文献

- [1] 王靖岚, 杨绍平, 师维娟, 等. 基于遥感的常德市海绵城市示范区热岛效应监测研究[J]. 四川水利, 2023, 44(2):

- 36-42.
- [2] 陈兴鹄, 温新龙, 郭磊. 基于 Landsat8 卫星影像的南昌城市热岛效应研究[J]. 江西农业学报, 2017, 29(3): 103-108.
 - [3] 张华平, 毛志芳. 利用遥感影像对南昌市热岛效应的评价研究[J]. 江西测绘, 2023(1): 12-14.
 - [4] Lai, Y., et al. (2022) Thermal Regulation of Coastal Urban Forest Based on ENVI-Met Model—A Case Study in Qinhuangdao, China. *Sustainability*, **14**, Article No. 7337. <https://doi.org/10.3390/su14127337>
 - [5] 郑培鑫, 邓帆, 李志远, 等. 近 20 年太原城市群热岛演变遥感研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2024, 47(2): 452-463.
 - [6] 邸俊楠, 苏涛, 雷波, 等. 基于“源-汇”景观格局的城市热岛效应及影响因素分析——以合肥市为例[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 6039-6050.
 - [7] 杨朝斌, 张亨, 胡长涛, 等. 蓝绿空间冷岛效应时空变化及其影响因素——以苏州市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(3): 677-688.
 - [8] 熊鹰, 章芳. 基于多源数据的长沙市人居环境效应及其影响因素分析[J]. 地理学报, 2020, 75(11): 2443-2458.
 - [9] 李璇琼, 梁延龙. 成都热岛效应研究在公园城市建设中的应用[J]. 地理空间信息, 2023, 21(5): 54-58.
 - [10] 肖寅, 宋轲欣, 姜丽菲, 等. 基于 FY-3C/VIRR 地表温度数据的上海市热岛效应时空特征分析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 116-122.