

天津市热环境时空演变及影响因素分析

国巧真^{*}, 闫兵, 杨光, 姜楠, 姚霖

天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384

摘要: 随着城市化进程加快, 城市热环境发生显著变化, 对人类活动造成很大影响。为探究天津市城市热环境时空变化及其影响因素, 基于 2005—2020 年四期 Landsat 遥感数据, 利用辐射传输方程法反演地表温度, 计算城市热岛比例指数, 用标准差椭圆法分析城市热环境发展和布局, 利用地表温度并结合土地利用分类研究城市地物覆盖类型与地表温度的响应关系, 并采用地理探测器探究高程、绿地、建筑用地和水体对地表温度变化的影响差异。结果表明: 天津市热岛足迹沿主干道由市内六区向环城四区发展, 天津城市热环境呈现先增高后降低的趋势; 由标准差椭圆分析可知, 城市热岛呈现发展主轴维持在东北—东南方向, 整体空间格局呈现放射状分布; 天津市中心城区建筑用地面积占比逐年增加, 水体面积占比逐年降低, 各类型地物平均温度排序为: 建筑用地 > 绿地 > 水体; 地理探测器分析表明: NDBI 和 NDVI 是影响地表温度变化的主要因子, NDVI 和 MNDWI 对 LST 交互作用最强, 是城市热环境驱动作用最强的因子组合。

关键词: 地表温度; Landsat; 城市热岛; 辐射传输方程法; 地理探测器

Spatio-temporal evolution of thermal environment in Tianjin City and its influencing factors

GUO Qiaozhen^{*}, YAN Bing, YANG Guang, JIANG Nan, YAO Lin

School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

Abstract: Background, aim, and scope Since the Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development plan was promoted as a national strategy in 2014, the economic system of Tianjin City has been continuously improved. Currently, Tianjin City has been promoted to a super-city, the urbanization process has entered a new development stage, and the urban thermal environment has also undergone significant changes. To understand the influence of the urban heat island effect on the city, it is vital to investigate the spatio-temporal changes of the urban heat island effect in Tianjin City, analyze the influencing factors, and give reasonable suggestions. **Materials and methods** To investigate the current potential effect of data and deeply study the change law and influencing factors of heat island in the central urban area of Tianjin City in recent years, this paper collected Landsat remote sensing image data from 2005 to 2020, conducted land surface temperature inversion, and calculated the urban heat island proportion index of 10 main urban areas of Tianjin City by employing the radiative transfer equation method. The

收稿日期: 2022-05-18; 录用日期: 2022-07-21; 网络出版: 2022-08-02

Received Date: 2022-05-18; Accepted Date: 2022-07-21; Online first: 2022-08-02

基金项目: 天津市科技计划项目 (23KPHDRC00300)

Foundation Item: Technology Research and Development Program of Tianjin, China (23KPHDRC00300)

通信作者: 国巧真, E-mail: gqiaozhen@163.com

Corresponding Author: GUO Qiaozhen, E-mail: gqiaozhen@163.com

引用格式: 国巧真, 闫兵, 杨光, 等. 2024. 天津市热环境时空演变及影响因素分析 [J]. 地球环境学报, 15(1): 129–139.

Citation: Guo Q Z, Yan B, Yang G, et al. 2024. Spatio-temporal evolution of thermal environment in Tianjin City and its influencing factors [J]. Journal of Earth Environment, 15(1): 129–139.

annual variation of the urban thermal field was demonstrated using the standard deviation ellipse method, and the local key areas of temperature anomaly were determined. Then, the response relationship between land cover type and land surface temperature was investigated through land surface temperature and land use classification. Finally, the geographical detector was employed to investigate the influence and interpretation degree of elevation, green space, built-up land, and water body on heat island change. **Results** From 2005 to 2020, the heat island footprint of downtown Tianjin developed from six districts to four suburban districts along the main road. The urban heat island ratio index increased from 0.23 in 2005 to 0.30 in 2014 and then decreased to 0.27 in 2020. Meanwhile, from 2005 to 2020, the main axis of urban heat island development was in the direction of northeast to southeast, and the deflection angle ranged from 118.97° to 129.80° . Also, both the proportion of built-up land in the central urban area and the proportion of water bodies in Tianjin City are increasing year by year. The average temperature of various types of land objects is ranked as built-up land > green space > water body. The results of geographic detector analysis suggest that NDBI and NDVI are the main factors affecting land surface temperature change, and NDVI and MNDWI are the strongest combinations of factors driving the urban thermal environment. **Discussion** The urban thermal environment in the central urban area of Tianjin exhibits a trend of first increasing and then decreasing, and the distribution direction of the heat island is obvious and gradually develops from a single-center structure to a multi-center structure. The surface temperature is jointly affected by many factors, and the comprehensive influence of two factors is greater than that of a single factor. The research indicates that the remote sensing indices NDBI and NDVI, which are closely related to urban construction and human activities, significantly affect the spatial distribution of surface temperature. This is because the built-up land has a large heat capacity, while the vegetation reduces the surface heat capacity due to its transpiration and the shielding of the surface, making the spatial differentiation of surface temperature crucial. As important components of the urban ecosystem, urban green space and water bodies play an important role in regulating the urban heat island effect. Then, the cooling efficiency of the two components in the heat island effect was quantitatively analyzed. **Conclusions** The heat island effect in Tianjin City exhibited a trend of increasing first and then decreasing. The urban heat island proportion index reached its highest value in 2014 and decreased again in 2020. The regional spatial distribution of the heat island radiates outward, and the four districts around the city are undergoing rapid urbanization, which is a key factor for the change in urban heat island spatial patterns. The results obtained by the geographic detector suggest that vegetation and water have the most significant mitigation effect on Tianjin's urban heat island. **Recommendations and perspectives** In future urban construction, the layout and planning of urban green space and water bodies should be strengthened, and the landscape pattern of blue-green space should be optimized to mitigate the influence of the urban heat island effect.

Key words: land surface temperature; Landsat; urban heat island; radiative transfer equation method; geographic detector

随着经济的发展,中国城市化进程显著加快,城市人口的聚集、建筑用地的增加导致了大量的自然表面被城市不透水面所替代。以城市热岛效应为代表的城市热环境问题逐渐成为人们日益关注的焦点(王璐瑶, 2016; Manoli et al., 2020)。将城市中心区域的温度高于周边郊区的现象定义为城市热岛(丁海勇和史恒畅, 2018)。城市热岛对城市的公共健康、空气质量、能源消耗、社会生产甚至气象环境都产生了深远的影响(林荣

平等, 2017; 潘莹等, 2018), 因此, 许多学者采用定量化研究方法展开城市热环境的研究与评价(周甜甜等, 2017; 姚远等, 2018)。

城市快速扩张的进程导致土地覆盖模式的变化, 并且是以建筑用地为主体的不透水面、植被和水体作为城市地表组成要素。不透水面通过改变城市地表热量平衡从而对城市热环境产生极大影响, 城市绿地和水体分别通过遮挡地表以及自身的蒸腾作用和水体的比热特性等方面对城市热岛

效应产生一定的缓释作用。因此这三者的变化将是影响城市地表热岛效应的重要因素。国内外学者对土地覆盖和城市热环境变化和成因机理做了大量研究。通过分析地表温度、建筑用地和植被的时空变化规律 (Hashim et al., 2022), 运用多元回归模型 (王美雅等, 2018) 和地理加权回归模型 (Guo et al., 2020) 得出不透水面、水体和植被等不同土地覆盖类型与地表温度的相关性。将景观格局与地表温度相结合, 选取地表温度、源汇景观密度、源汇景观贡献度等指数, 分析源汇景观格局对城市地表温度的贡献和效应 (高静等, 2019)。

天津市作为直辖市、国家中心城市, 也是中国北方重要的集经济、文化、交通于一体的超大城市。近年来, 随着人口增长、城市用地的扩张, 导致城市热环境及其空间分布发生变化, 城市热岛效应日益严重。为分析天津市城市热岛形成原因和演变规律, 选取 2005、2009、2014、2020 年四期 Landsat 系列遥感数据, 利用辐射传输方程法反演地表温度, 并对天津市中心城区热岛时空演变特征结合土地利用演变格局进行分析, 同时探究高程、绿地、建筑用地和水体对地表温度的影响差异, 以期为天津市未来城市规划建设和可持续发展提供理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

天津市 (116°43'—118°04'E, 38°34'—40°15'N) 地处北温带, 位于中纬度亚欧大陆东岸, 属暖温带半湿润季风性气候。天津市下辖 16 个区。从区域上划分, 可分为中心城区、环城四区、滨海新区和远郊五区。为减少影像选取过程中因时段不同而产生的色差和月份不同, 对地物识别和温度反演产生的影响。选取天津市中心城区和环城四区作为研究区域。研究区域包括和平区、河北区、河东区、河西区、南开区、红桥区、东丽区、西青区、津南区、北辰区。既包含中心建成区也包含市中心外围的过渡地带。截至 2020 年 11 月, 研究区总人口为 794.7 万人, 城市化率为 98.1% (https://stats.tj.gov.cn/tjsj_52032/tjgb/202105/t20210521_5457330.html)。

1.2 研究数据及预处理

使用 Landsat 陆地卫星系列遥感数据, 其中

Landsat 5 TM 影像获取时间分别为 2005 年 8 月和 2009 年 8 月, Landsat 8 OLI 和 TIRS 影像获取时间为 2014 年 8 月和 2020 年 8 月, 影像质量良好。地表温度反演采用辐射传输方程法, 首先进行大气校正、几何校正, 以消除成像过程中的几何畸变、噪声等影响, 然后对研究区进行掩膜裁剪。采用最邻近分类法进行土地利用分类, 将研究区分为绿地、水体、建筑用地三种类型, 并进行精度评价。

1.3 研究方法

1.3.1 地表温度反演

选用辐射传输方程法 (金点点和宫兆宁, 2018) 对四期遥感影像进行计算, 提取其温度。首先估算大气对地表热辐射的影响, 然后将这部分大气影响从卫星传感器获取的热辐射总量中减去, 得到地表热辐射强度, 再将其转化为相应的地表温度。卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 由地表辐射亮度、大气上行辐射亮度 L^\uparrow 、大气下行辐射亮度 L_\downarrow 三部分组成。 L_λ 表达式为:

$$L_\lambda = [\varepsilon \times B(T_s) + (1 - \varepsilon) \times L_\downarrow] \times \tau + L^\uparrow \quad (1)$$

式中: L_λ 、 L^\uparrow 、 L_\downarrow 分别为热红外辐射亮度、大气上行及下行辐射亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); ε 为地表比辐射率; T_s 为地表真实温度 (K); $B(T_s)$ 为黑体辐射亮度; τ 为大气在热红外波段的透过率。假设地表、大气对热辐射具有朗伯体性质, 则温度为 T 的黑体在热红外波段的辐射亮度 $B(T_s)$ 为 (李红等, 2018):

$$B(T_s) = [L_\lambda - L^\uparrow - \tau \times (1 - \varepsilon) \times L_\downarrow] \div \tau \div \varepsilon \quad (2)$$

而地面真实温度 T_s 可以用普朗克公式获得:

$$T_s = K_2 \div \ln [K_1 \div B(T_s) + 1] \quad (3)$$

$$T = T_s - 273.15 \quad (4)$$

式中: T 为地面亮温 ($^\circ\text{C}$); K_1 和 K_2 为系数常量, 对于 Landsat 5 TM 影像, $K_1 = 607.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 、 $K_2 = 1260.56 \text{ K}$, 对于 Landsat 8 TIRS 影像, 则取 $K_1 = 774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 、 $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。

其中大气剖面参数可以从 NASA 提供的网站 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 获取, 输入相应的参数, 获得大气透射率以及大气上下行辐射亮度, 地表比辐射率采用 Sobrino et al. (2004) 提出的 NDVI 阈值法进行计算。

1.3.2 标准差椭圆

标准差椭圆方法是研究空间数据分布特征和

方向差异的空间计量分析方法, 主轴长度表示数据的空间分布方向及集聚离散程度, 转角角度表示空间数据变化的主导趋势方向(王宝军, 2009)。本文使用标准差椭圆法分析研究区四个时期的热环境标准差椭圆的演变, 并识别城市热岛发展方向和迁移轨迹。

1.3.3 城市热岛比例指数

本文使用了四个不同时期的遥感影像, 因无法直接比较它们之间的温度, 故需要对反演的地表温度进行归一化处理, 使其分布范围处于 0—1, 从而消除地表温度季相差异(徐涵秋, 2011)。归一化公式如下:

$$T'_i = (T_i - T_{\min}) \div (T_{\max} - T_{\min}) \quad (5)$$

式中: T'_i 表示第 i 个像元归一化之后的数值; T_i 为第 i 个像元的温度值; T_{\max} 表示研究区的最高温度值; T_{\min} 是研究区的最低温度值。再通过均值标准差法, 将相对温度划分为低温、次低温、中温、次高温、高温五个等级。其中, 次高温和高温这两个等级是构成城市热岛的主要斑块。随后利用城市热岛比例指数(Xu and Chen, 2004)比较不同年份的城市热岛的变化, 热岛比例指数的计算公式如下:

$$I = \frac{1}{100 \times m} \times \sum_i^n \omega_i \times p_i \quad (6)$$

式中: I 为城市热岛比例指数; m 为地表温度的等级划分指数; n 为城区高于郊区的温度等级; ω 为第 i 级的权重, 取等级值; p_i 为第 i 温度等级面积占研究区面积的百分比; 有研究表明当温度等级被划分为五级时, 认为次高温区和高温区能够代表城市的热岛范围(Onishi et al., 2010), 因此 $n=2$, $m=5$ 。

1.3.4 地理探测器

地理探测器是一种探测和利用空间分异的统计工具(王劲峰和徐成东, 2017)。由因子探测器、交互探测器、风险探测器和生态探测器四部分组成。通过空间异质性理论探究两个变量间的因果关系并揭示其驱动力因素。地理探测器模型表达式如下:

$$q = 1 - \left(\sum_{h=1}^L N_h \times \sigma_h^2 \right) \div N \div \sigma^2 = 1 - A_{SSW} \div B_{SST}, A_{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \times \sigma_h^2, B_{SST} = N \times \sigma^2 \quad (7)$$

式中: L 为城市热环境影响变量因子分类数; N_h 和 N 分别为层 h 和全局的单元量; A_{SSW} 和 B_{SST} 分

别为层内方差之和及全局总方差; σ_h^2 和 σ^2 分别为 h 层和全局的方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, 当 q 值越趋近于 1, 说明变量对城市热环境的影响力越强, 反之则越弱。

2 结果与分析

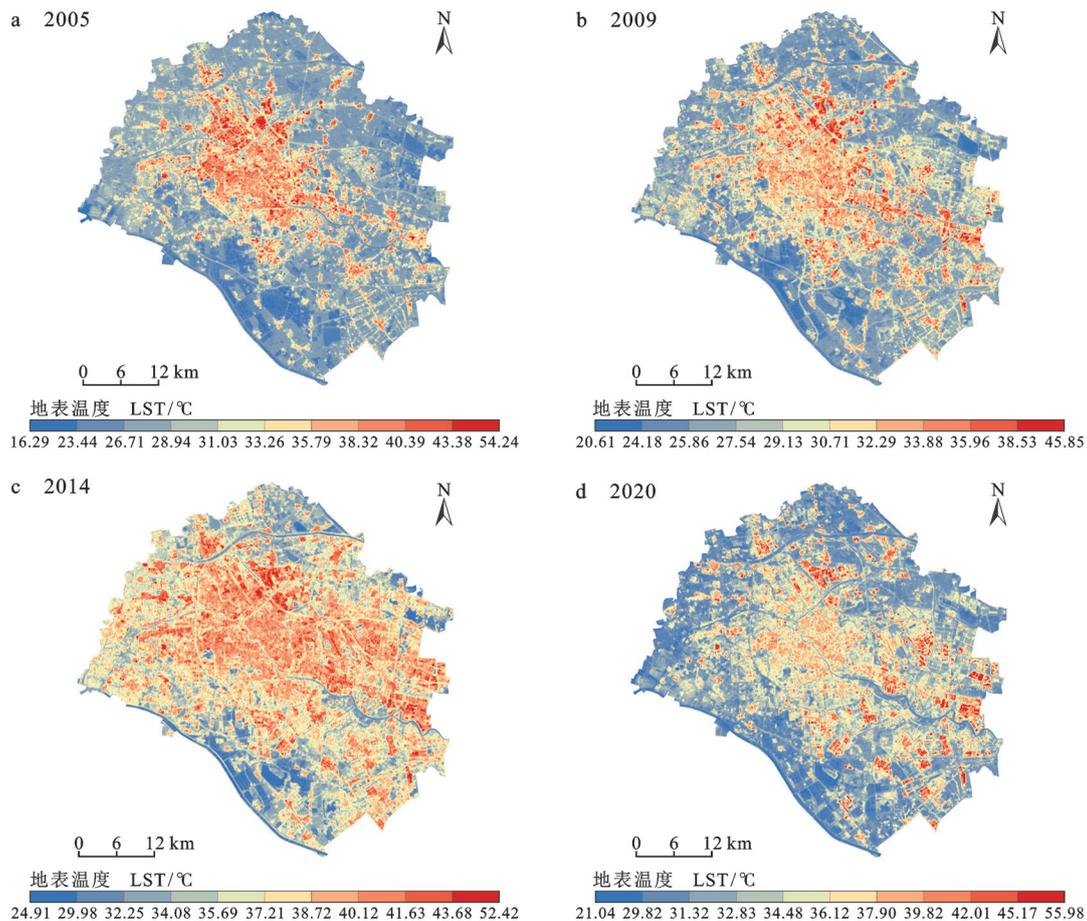
2.1 城市热环境时空演变分析

根据公式(1)—(4), 对四个时期的遥感影像进行地表温度反演, 经裁剪后得到 2005、2009、2014、2020 年四期的地表温度(图 1)。由图 1 可知: 天津市中心区域的地表温度明显比周边地区温度高, 形成鲜明的对比, 具有明显的城市热岛效应。天津市城市地表热环境的高温区域主要集中在发展时间早、基础设施比较完善的市内六区以及位于东丽区的包括众多钢材厂在内的重工业区, 而市内六区外围的其他城区包括一些河流湖泊等区域的地表温度则相对较低。城市热环境空间分布是以市内六区为核心呈发散状向外扩展, 地表热场的影响范围不断扩大。2005—2014 年, 地表平均温度从 30.70℃ 升高到 36.33℃, 与 2014 年相比, 2020 年中心城区的地表温度呈现出明显的下降趋势, 地表平均温度由 2014 年的 36.33℃ 下降为 2020 年的 34.00℃, 城市热岛效应得到初步缓解。为进一步分析不同时期城市热环境空间分布的变化特点, 将反演得到的地表温度进行归一化处理, 并根据城市热岛比例指数法将地表温度划分为低温区、次低温区、中温区、次高温区、高温区五个等级。最终得到 2005—2020 年天津市中心城区温度等级分布(图 2)。

在中心城区温度等级分布图的基础上, 通过计算得到城区的热岛强度等级划分情况(图 3)和表 1。综合图 2、图 3 及表 1, 2005—2020 年, 天津市热环境空间布局特征随着城市化进程发生变化, 不同温度等级分布情况的年际差异变化也比较明显, 研究区各温度等级的总面积约为 2083 km²。2005—2020 年, 高温等级的区域始终占据约 1/6 的研究区面积, 只有 2009 年高温区面积比 2005 年有所增加, 其余年间变化不明显。中温区和次低温区约占研究区总面积的 1/2, 在全区一直占据着优势地位。2005—2020 年次低温区和中温区所占据的面积最大。2005—2020 年次低温区域整体分布上呈现明显的下降趋势, 面积占比下降了 11.51%, 2005—2014 年次低温区逐年下降, 但到 2020 年, 面积占比又从 12.58% 增至

20.54%。中温区面积 2005—2009 年有所下降, 其余年间则表现出小幅度的上下波动变化。而低温区和次高温区的变化趋势一致, 2005—2014 年, 区域面积逐年增加, 在 2014 年达到峰值后, 其面积占比开始减小。由图 2 可知: 天津市中心城区基本都处于热岛状态, 温差界限在逐渐外扩, 成

碎块化的热岛区域也逐渐合并, 城市热岛现象明显。高温区主要分布于市内六区, 位于东丽区沿海河建立的工业园区, 以及包括天津钢铁集团有限公司在内的十几家重工业企业厂区属地。低温区主要在鸭淀水库、独流减河、环城四区所包含的大片农田区域以及一些市内河流及运河等。



地图矢量文件来源于天津市地理信息公共服务平台 (<https://tianjin.tianditu.gov.cn/>), 审图号: 津 S(2023)006 号。

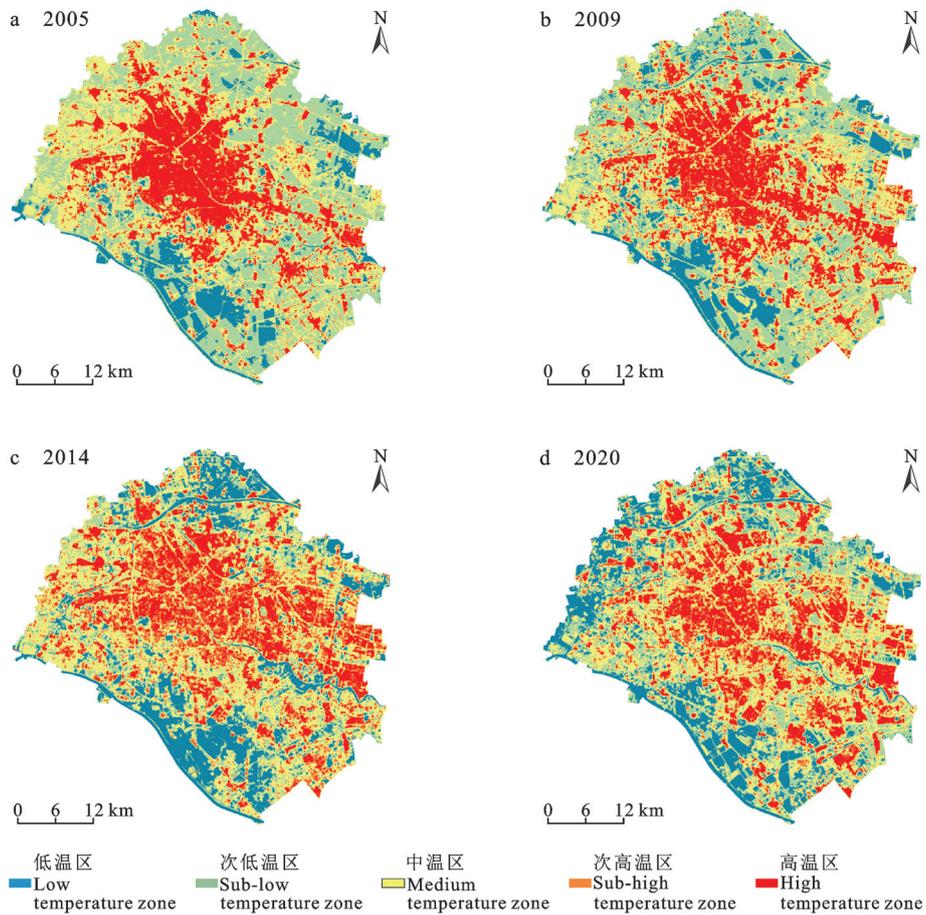
图 1 2005—2020 年热岛区域分布图

Fig. 1 Regional distribution map of heat island from 2005 to 2020

2.2 城市热岛时空演变特征

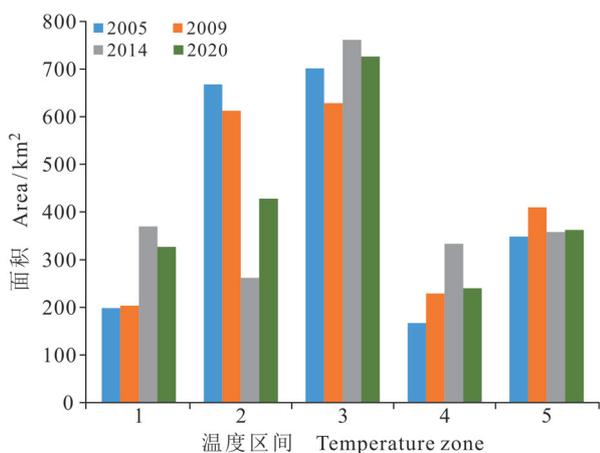
利用标准差椭圆法分析 2005—2020 年天津市中心城区热岛范围的变化趋势和空间分布, 城市热岛的空间扩张特征如图 4 所示。为更详细地了解城市热岛效应的变化趋势, 通过标准差椭圆法获得城市热岛空间分布格局的标准差椭圆参数 (表 2)。从图 4 和表 2 可以看出: 标准差椭圆主要涵盖市内六区和环城四区的一部分, 并且其质心全部位于河东区境内, 城市热岛呈东北至东南方向分布, 其

旋转角度的变化范围在 118.97° — 129.80° 。其中, 2005—2009 年, 标准差椭圆的分布范围和重心持续向东南方向移动, 2014—2020 年, 标准差椭圆的分布和重心整体向东南方向移动, 2005—2014 年椭圆长短半轴的差值逐年增长, 说明城市热岛分布的方向性十分明显。2005—2020 年标准差椭圆的长半轴先从 17.22 km 增长到 19.48 km, 然后缩减到 18.86 km; 短半轴 2005—2020 年的变化范围在 10.53—12.21 km。



地图矢量文件来源于天津市地理信息公共服务平台 (<https://tianjin.tianditu.gov.cn/>)，审图号：津 S(2023)006 号。

图 2 2005—2020 年温度等级分布图
Fig. 2 Temperature grade distribution map from 2005 to 2020



1: 低温区; 2: 次低温区; 3: 中温区; 4: 次高温区; 5: 高温区。
1: low temperature zone; 2: sub-low temperature zone; 3: medium temperature zone; 4: sub-high temperature zone; 5: high temperature zone.

图 3 热岛强度等级划分
Fig. 3 Classification of heat island intensity levels

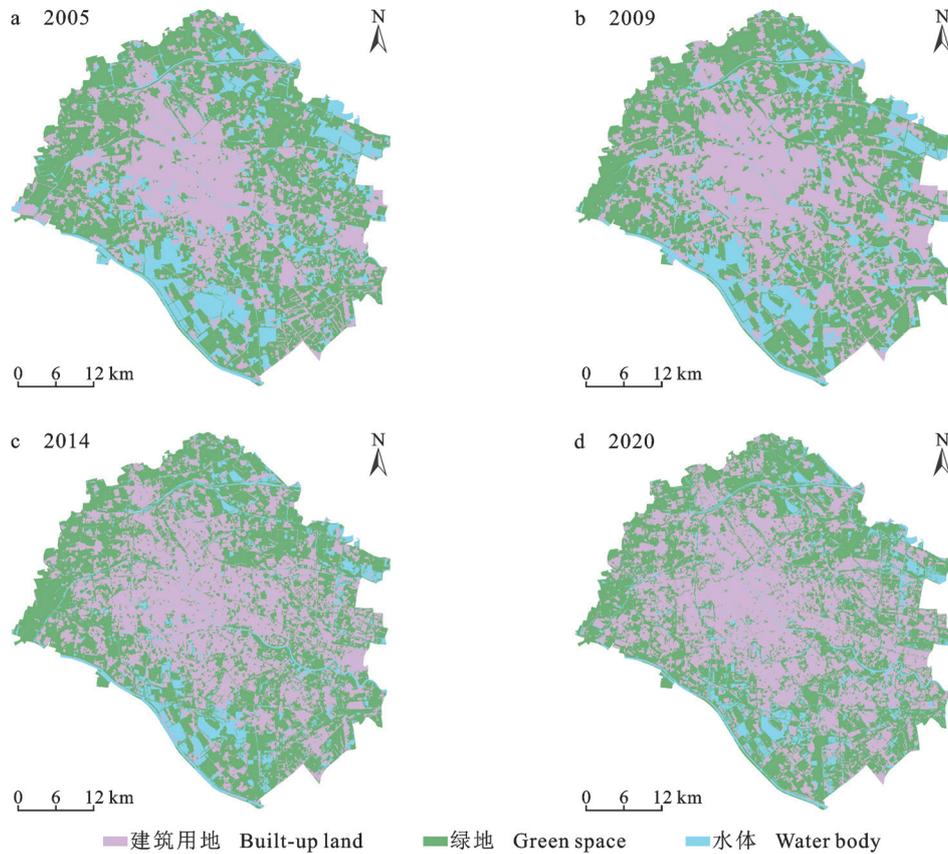
由此可见，天津市城市热岛空间布局在东西方向和南北方向上均呈现先向外扩展然后再略微收缩的状态。热岛区域呈放射状向外扩散蔓延。城市热环境空间分布以市内六区为核心向外扩展，地表热场的影响范围不断扩大。市内六区发展相对较早，城市建设趋于饱和，对城市热岛足迹的影响不大，而环城四区正处于城市化进程中，对城市有积极的热贡献，是影响中心城区热岛空间格局演变的关键因素。

2.3 土地利用时空演变

基于面向对象分类中的最邻近分类法分别对研究区影像数据进行多尺度分割、配置特征空间以及影像分类。经精度评价得到其总体分类精度分别为 89.1%、95.2%、91.7%、93.3%，分类结果符合精度要求。最终得到 2005—2020 年土地利用格局及变化情况，如图 5 所示。

温。绿地和水体作为城市热环境的汇，对城市热环境作负贡献。建筑用地的温度标准差最大，是

由于建筑用地的热容量小且导热性能差，导致地表温度升降趋势显著，温差较大。



地图矢量文件来源于天津市地理信息公共服务平台 (<https://tianjin.tianditu.gov.cn/>)，审图号：津 S(2023)006 号。

图 5 土地利用格局图
Fig. 5 Land use pattern map

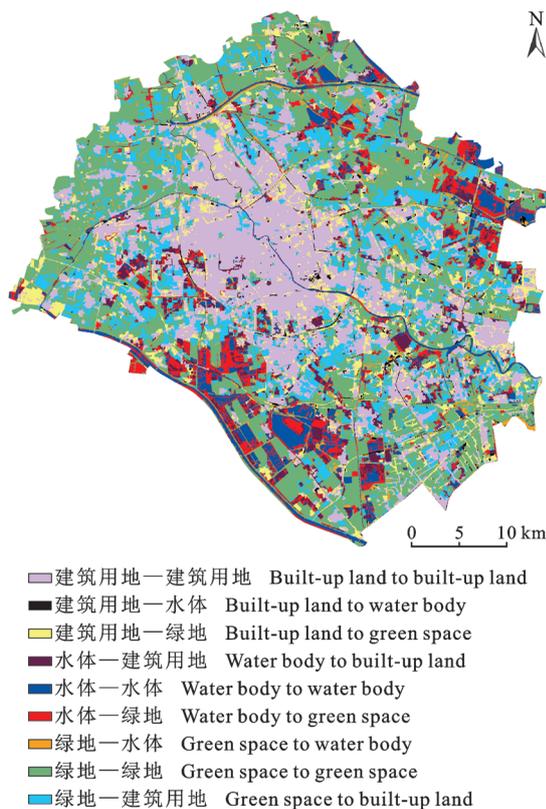
2.5 影响因子获取与分析

城市下垫面的变化、城市植被及绿化、城市规模以及城市发展状况都会对城市热环境产生影响 (刘雪梅等, 2019)。项小云等 (2021) 研究湿地对城市热岛效应的影响, 发现建设用地是城市中主要的热源, 而由水域和沼泽构成的地表表现出强烈的冷岛效应; 梁洪武等 (2022) 运用地理探测器探究城市地表温度的影响因素, 得到各影响因素对地表温度的解释力, 并且以上因素两两间的交互作用均为双因子增强; Liu et al. (2021) 利用地理探测器探究珠江三角洲 LST 的空间分布和主要驱动因素, 得出 LST 是多种因素共同影响的结果, 并且两因素之间的综合影响大于单因素影响。本文利用地理探测器软件分析天津市城市热岛效应驱动因素, 以 2020 年为研究对象, 基

于以上学者的研究, 并结合研究区现状, 选取三种典型城市下垫面属性因子 (NDVI、NDBI、MNDWI) 以及高程数据作为自变量, 分别表征城市绿地、建设用地、水体和高程与城市地表温度间的关系。将上述四个变量栅格采用自然间断法分成五类, 在研究区生成 500 m 空间格网点, 对自变量栅格和地表温度进行采样提取, 导入地理探测器模型进行因子探测和交互探测。

由因子探测结果可知: 2020 年各驱动因子的 P 值均为 0, 表明其对城市地表温度的空间分异特征影响显著, 各驱动因子对地表温度的解释程度排序依次为: NDBI (0.421) > NDVI (0.411) > MNDWI (0.257) > DEM (0.007), 其中, 与城市建设和人类活动密切相关的指数 NDBI、NDVI 对地表温度空间分布的影响程度相对较大, 是影

响地表温度变化的主控因子, 与地表温度和城市热环境的空间分布有紧密联系。原因可能是夏季温度高, 植被生长茂盛, 而城市建设用地增强了地表热通量使地表温度迅速上升, 植被因其自身的蒸腾作用以及对地表的遮挡导致地表热容量减弱, 地表升温效果缓慢, 因而导致地表温度的空间分异性显著。而 MNDWI 和 DEM 对地表温度分布的影响很小。可能是由于天津市中心城区水域的数量和地区高程差异不明显所导致。



地图矢量文件来源于天津市地理信息公共服务平台 (https://tianjin.tianditu.gov.cn/), 审图号: 津 S(2023)006 号。

图 6 2005—2020 年土地利用覆盖变化图
Fig. 6 Map of land use and cover change from 2005 to 2020

交互探测器用于识别各影响因子两两交互对因变量的空间分层异质性解释程度的增强或减弱作用 (丁倩和张弛, 2021)。如表 4 所示: 相较单因子影响力, 双因子的交互作用均加强了对地表温度空间分异的解释力。其中, NDVI 和 MNDWI 这对因子对 LST 交互作用最强 ($q=0.497$), 表明绿地和水体对天津城市热岛具有显著的缓解作用, 也最能解释地表温度的空间分异性, 这与杜晋苗等 (2015) 的研究一致。结合图 2 和图 5, 绿地和水体聚集的区域地表温度明显降低, 同时这两

个因素的变化与城市热岛足迹变化同步化程度较高。NDBI 与 MNDWI 交互作用对地表温度的影响排在第二位 ($q=0.489$)。由于天津市内水体较少, 因此其影响因素主要源于城市化进程的加快, 大量建筑取代自然表面使得城市热岛效应增强。DEM 和 MNDWI 之间的交互解释力 ($q=0.264$) 最小, 说明高程和水体的综合作用对地表温度的影响最弱。

表 3 2005—2020 年土地利用类型与地表温度变化统计
Tab. 3 Statistics of land use types and land surface temperature change from 2005 to 2020

		2005		
土地利用类型	Land use	平均温度	标准差	面积占比
		Average	Standard	Area
		temperature/°C	deviation/°C	ratio/%
绿地	Green space	28.93	1.82	48.25
水体	Water body	26.97	2.09	17.40
建筑用地	Built-up land	34.69	3.82	34.35
		2009		
土地利用类型	Land use	平均温度	标准差	面积占比
		Average	Standard	Area
		temperature/°C	deviation/°C	ratio/%
绿地	Green space	25.62	1.69	46.06
水体	Water body	23.97	1.50	14.34
建筑用地	Built-up land	29.78	2.55	39.60
		2014		
土地利用类型	Land use	平均温度	标准差	面积占比
		Average	Standard	Area
		temperature/°C	deviation/°C	ratio/%
绿地	Green space	35.19	2.58	48.41
水体	Water body	31.04	2.79	9.99
建筑用地	Built-up land	38.93	2.44	41.60
		2020		
土地利用类型	Land use	平均温度	标准差	面积占比
		Average	Standard	Area
		temperature/°C	deviation/°C	ratio/%
绿地	Green space	31.86	2.11	45.19
水体	Water body	30.81	2.18	9.29
建筑用地	Built-up land	36.78	3.15	45.52

表 4 多因子交互探测结果
Tab. 4 Multi-factor interactive detection results

	DEM	NDVI	NDBI	MNDWI
DEM	0.007			
NDVI	0.414	0.411		
NDBI	0.427	0.484	0.421	
MNDWI	0.264	0.497	0.489	0.257

3 结论

(1) 2005—2020 年, 天津市中心城区热岛足迹沿主干道由市内六区向环城四区发展, 次低温区和中温区是中心城区热岛的主体部分, 占区域总面积的 1/2 以上, 城市热岛比例指数先升后降, 说明天津中心城区城市热环境呈现先增高后降低的趋势。

(2) 根据标准差椭圆分析, 2005—2020 年, 城市热岛发展主轴维持在东北—东南方向, 天津中心城区热岛整体空间格局呈放射状分布, 偏转角度范围在 118.97°—129.80°, 2005—2014 年热岛方向东北方向发展, 而 2014—2020 年, 城市热岛转向东南方向, 其原因是津南区城市化进程加快导致热岛重心转移。整体来看, 城市热岛扩张方向与城市建设的变化息息相关。

(3) 2005—2020 年, 城市绿地面积变化幅度不大; 水体面积占比下降了 8.11%, 建筑用地面积占比由 2005 年的 34.35% 上升到 2020 年的 45.52%, 结合地表温度反演结果可以发现: 2005—2020 年, 绿地和水体的平均温度均低于研究区平均温度, 建筑用地的平均温度与之相反。2005—2020 年, 绿地和水体的地表温度标准差相对较小, 二者的温度值更稳定。而建筑用地的地表温度标准差最大, 表现为地表温度升降趋势显著, 温差较大。

(4) 根据地理探测器分析的结果, NDBI 和 NDVI 是影响地表温度变化的主要因子, NDVI 和 MNDWI 这对因子对 LST 交互作用最强, 是城市热环境驱动作用最强的因子组合, 说明蓝绿空间面向城市热环境具有显著改善作用。在未来的城市化建设中, 应强化对城市绿地和水体的布置和规划、优化蓝绿空间景观格局。

参考文献

丁海勇, 史恒畅. 2018. 基于 Landsat 数据的城市热岛变化分析——以南京市为例 [J]. *安全与环境学报*, 18(5): 2033–2044. [Ding H Y, Shi H C. 2018. Detection and changing analysis of the urban heat islands based on the Landsat data—by taking Nanjing City as a case study sample [J]. *Journal of Safety and Environment*, 18(5): 2033–2044.]

丁倩, 张弛. 2021. 基于地理探测器的中国陆地生态系统土壤有机碳空间异质性影响因子分析 [J]. *生态环境*

学报, 30(1): 19–28. [Ding Q, Zhang C. 2021. Influential factors analysis for spatial heterogeneity of soil organic carbon in Chinese terrestrial ecosystem with geographical detector [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 30(1): 19–28.]

杜晋苗, 孙艳玲, 马振兴, 等. 2015. 基于 Landsat 8 的天津地区夏季城市热岛区分布特征研究 [J]. *天津师范大学学报 (自然科学版)*, 35(4): 41–47. [Du J M, Sun Y L, Ma Z X, et al. 2015. Distribution characteristics research of summer urban heat island in Tianjin based on Landsat-8 data [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 35(4): 41–47.]

高静, 龚健, 李靖业. 2019. “源-汇”景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例 [J]. *地理科学进展*, 38(11): 1770–1782. [Gao J, Gong J, Li J Y. 2019. Effects of source and sink landscape pattern on land surface temperature: an urban heat island study in Wuhan City [J]. *Progress in Geography*, 38(11): 1770–1782.]

金点点, 宫兆宁. 2018. 基于 Landsat 系列数据地表温度反演算法对比分析——以齐齐哈尔市辖区为例 [J]. *遥感技术与应用*, 33(5): 830–841. [Jin D D, Gong Z N. 2018. Algorithms comparison of land surface temperature retrieval from Landsat series data: a case study in Qiqihar, China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 33(5): 830–841.]

李红, 高犄, 解韩玮. 2018. 昆明市主城区热环境及其影响因素的时空演化特征 [J]. *生态环境学报*, 27(10): 1916–1924. [Li H, Gao H, Xie H W. 2018. Spatial and temporal evolution of thermal environment and its influencing factors in urban area of Kunming City [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 27(10): 1916–1924.]

梁洪武, 阿里木江·卡斯木, 赵禾苗, 等. 2022. 基于地理探测器的乌鲁木齐市主城区地表温度及其影响因素 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 58(3): 356–363, 371. [Liang H W, Kasimu Alimujiang, Zhao H M, et al. 2022. The surface temperature and its influencing factors in the main urban area of Urumqi City based on the geodetector [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 58(3): 356–363, 371.]

林荣平, 祁新华, 叶士琳. 2017. 沿海河谷盆地城市热岛时空特征及驱动机制 [J]. *生态学报*, 37(1): 294–304. [Lin R P, Qi X H, Ye S L. 2017. Spatial-temporal characteristics of urban heat islands and driving mechanisms in a coastal valley-basin city: a case study of Fuzhou City [J]. *Acta*

- Ecologica Sinica*, 37(1): 294–304.]
- 刘雪梅, 高小红, 贾伟. 2019. 基于遥感影像的近 30 年西宁市热岛效应时空变化 [J]. *地球环境学报*, 10(2): 166–176. [Liu X M, Gao X H, Jia W. 2019. Spatio-temporal change of urban heat island effect in Xining from Landsat image [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(2): 166–176.]
- 潘莹, 崔林林, 刘昌脉, 等. 2018. 基于 MODIS 数据的重庆市城市热岛效应时空分析 [J]. *生态学杂志*, 37(12): 3736–3745. [Pan Y, Cui L L, Liu C M, et al. 2018. Spatiotemporal distribution of urban heat island effect based on MODIS data in Chongqing, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 37(12): 3736–3745.]
- 王宝军. 2009. 基于标准差椭圆法 SEM 图像颗粒定向研究原理与方法 [J]. *岩土工程学报*, 31(7): 1082–1087. [Wang B J. 2009. Theories and methods for soil grain orientation distribution in SEM by standard deviational ellipse [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31(7): 1082–1087.]
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 72(1): 116–134. [Wang J F, Xu C D. 2017. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116–134.]
- 王璐瑶. 2016. 武汉土地利用对城市热环境的影响研究 [D]. 武汉: 华中师范大学. [Wang L Y. 2016. Analysis on the influence of land use on city thermal environment [D]. Wuhan: Central China Normal University.]
- 王美雅, 徐涵秋, 李霞, 等. 2018. 不透水面时空变化及其对城市热环境影响的定量分析——以福州市建成区为例 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 26(6): 1316–1326. [Wang M Y, Xu H Q, Li X, et al. 2018. Analysis on spatiotemporal variation of urban impervious surface and its influence on urban thermal environment: Fuzhou City, China [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 26(6): 1316–1326.]
- 项小云, 杜嘉, 宋开山, 等. 2021. 湿地对福州市热岛效应影响遥感分析 [J]. *地球环境学报*, 12(4): 411–424. [Xiang X Y, Du J, Song K S, et al. 2021. The impact of wetland on heat island effect using remote sensing technology in Fuzhou [J]. *Journal of Earth Environment*, 12(4): 411–424.]
- 徐涵秋. 2011. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析 [J]. *生态学报*, 31(14): 3890–3901. [Xu H Q. 2011. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(14): 3890–3901.]
- 姚远, 陈曦, 钱静. 2018. 城市地表热环境研究进展 [J]. *生态学报*, 38(3): 1134–1147. [Yao Y, Chen X, Qian J. 2018. Research progress on the thermal environment of the urban surfaces [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3): 1134–1147.]
- 周甜甜, 廉丽姝, 李宝富, 等. 2017. 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*, 8(2): 157–168. [Zhou T T, Lian L S, Li B F, et al. 2017. The change of spatial-temporal characteristics of Qingdao urban heat island based on remote sensing [J]. *Journal of Earth Environment*, 8(2): 157–168.]
- Guo A D, Yang J, Sun W, et al. 2020. Impact of urban morphology and landscape characteristics on spatiotemporal heterogeneity of land surface temperature [J]. *Sustainable Cities and Society*, 63: 102443. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102443.
- Hashim B M, Al Maliki A, Sultan M A, et al. 2022. Effect of land use land cover changes on land surface temperature during 1984–2020: a case study of Baghdad City using Landsat image [J]. *Natural Hazards*, 112(2): 1223–1246.
- Liu W X, Meng Q Y, Allam M, et al. 2021. Driving factors of land surface temperature in urban agglomerations: a case study in the Pearl River Delta, China [J]. *Remote Sensing*, 13(15): 2858. DOI: 10.3390/rs13152858.
- Manoli G, Fatichi S, Bou-Zeid E, et al. 2020. Seasonal hysteresis of surface urban heat islands [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(13): 7082–7089.
- Onishi A, Cao X, Ito T, et al. 2010. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9(4): 323–332.
- Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 434–440.
- Xu H Q, Chen B Q. 2004. Remote sensing of the urban heat island and its changes in Xiamen City of SE China [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 16(2): 276–281.