引文格式：赵梓萌,孟翔晨. 天津市土地利用/覆被变化对城市热岛的影响[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 66-72. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.013

天津市土地利用/覆被变化对城市热岛的影响

赵梓萌[1]，孟翔晨[1*]
（1. 曲阜师范大学 地理与旅游学院，山东 日照 276826）

摘　要：利用1992—2020年6期Landsat LST数据计算的城市热岛比指数和中国年度土地覆盖数据，分析了天津市中心城区和环城4区的城市热岛和土地利用/覆被时空变化特征，并利用地理探测器对其影响因子进行探索。结果表明，研究期间建设用地面积增加了31.9%，耕地面积减少了26%，大部分耕地转化为建设用地，其他地类转出量变化较小；平均LST先升后降，城市热岛比指数先升后降再上升；归一化建筑指数（NDBI）和归一化植被指数（NDVI）分别与LST呈正相关和负相关。地理探测器分析结果显示：各因子对LST的影响程度为NDBI>NDVI>PD>DEM。研究结果可为缓解天津城市热岛提供依据。

关键词：土地利用/覆被；LST；城市热岛比指数；地理探测器
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0066-07

Impact of Land Use/Land Cover Change on Urban Heat Island in Tianjin City

ZHAO Zimeng[1], MENG Xiangchen[1]
(1. School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

Abstract: Taking the central urban area and the four districts around the city of Tianjin as the study area, we used Landsat image data acquired from 1992 to 2020 to analyze the spatio-temporal change characteristics of land use/land cover and urban heat island, and used Geodetector to explore the influence factors. The results showed that the construction land area increased by 31.9% and the cultivated land area decreased by 26%, with most of cultivated land converted into construction land and other types of land turned out to be insignificant but also decreased to some extent. The average land surface temperature (LST) increased and then decreased, and the urban heat island index changed to increase, decrease and increase. Normalized difference building index (NDBI) and normalized difference vegetation index (NDVI) were positively and negatively correlated with LST, respectively. The results of Geodetector showed that the influence of each factor on LST was ranked as NDBI> NDVI>PD>DEM. This research result can provide a basis for mitigating urban heat island in Tianjin City.

Key words: land use/land cover, LST, urban heat island index, Geodetector

随着全球经济的发展、城市化进程的加快，城区土地利用类型变化将影响地表温度（LST）的分布，导致中心城区的温度高于周边郊区，即城市热岛效应[1]。城市规模不断扩大、城市人口迅速增加、人为热量排放增大，导致城市热岛效应日益严重[2]，进而增加环境的热应激并影响人类健康，因此准确监测城市热岛效应对于指导城市规划具有重要意义。城市热岛效应可分为城市边界层热岛、城市冠层热岛和地表城市热岛[3]，其中地表城市热岛对于人类活动和地表覆被更敏感[3]。为量化地表热岛和土地利用/覆被变化，国内外学者针对城市热岛及其影响因素进行了相关研究，大多基于Landsat和MODIS影像数据，利用植被指数研究LST与植被的关系，利用建筑物指数研究LST与建筑物的关系，再通过构建关系模型研究城市热岛。伍明飞[4]等基于辐射方程法和2008—2019年Landsat数据获取了杭州市LST的空间分布信息，并分析了城市热岛效应的时空变化规律；李建楠[5]等对1989—2017年的遥感影像数据进行监督分类，分析了土地利用方式对城市热岛的影响；杨智威[6]等利用空间叠置和地理探测器等方法，研究了粤港澳大湾区城市热岛的影响因子，并构建了多元关系模型；Yuan F[7]等基于遥感影像数据，分析了美国明尼苏达州Twin城不透水面和植被指数对城市热岛的影响；Imhoff M L[8]等利用Landsat和MODIS遥感数据研究了美国大陆不同生态环境城市的热岛效应。目前针对LST和土地覆被类型的研究，多以植被为研究对象，对建筑物的研

收稿日期：2023-03-23。
项目来源：山东省自然科学基金资助项目（ZR2021QD055）；山东省高校优秀青年创新团队资助项目（2022KJ178）。
第一作者简介：赵梓萌（2001—），本科，主要从事遥感影像处理与分析相关工作，E-mail：zzm.2980@163.com。
通信作者：孟翔晨（1990—），博士，讲师，主要从事热红外遥感理论与应用相关工作，E-mail：xiangchenmeng@qfnu.edu.cn。

究较少。

作为北方最大的港口城市，天津市城市迅速扩张[9]、人口[10]快速增长，不透水面不断取代城市绿地，不同用途的不透水面将排放大量热量。研究城市LST与土地利用/覆被的关系，不仅能分析城市热岛的分布特征，而且能更加深入地理解土地利用/覆被下城市热环境的空间特征[11]。本文利用Landsat遥感影像数据研究了天津市土地利用/覆被的时空演变规律及其对城市热岛的影响，分析了城市热岛的主要分布特征；并利用地理探测器探究了LST与归一化植被指数（NDVI）、归一化建筑指数（NDBI）等驱动因子之间的关系，为城市环境保护和治理提供依据。

1　研究区概况

天津市位于华北平原东北部，地理范围为38°34′~40°15′ N、116°43′~118°4′ E；主要受季风环流影响，属温带季风气候区；年均气温为12~15°C，年均降水量为550~600 mm[12]。全市共有16个区，总面积为11 966.45 km^2。截至2020年，天津市常住人口[13]达到1 386.60万人。本文选取天津市中心城区（和平区、河东区、河西区、河北区、南开区、红桥区）和东丽区、北辰区、津南区、西青区4个环城区作为研究区。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源与处理

本文采用Landsat5和Landsat8遥感影像数据集，来源于美国地质勘探局网站（https://earthexplorer.usgs.gov/）。该数据集级别均为Collection 2 Level 2，已经过几何校正和大气校正，空间分辨率为30 m，成像日期为1992-05-27、1998-05-12、2002-05-23、2011-05-16、2016-05-13、2020-05-24。数据集包括地表反射率、LST和其他辅助数据，LST数据通过辐射传输方程法反演得到[14]。地表辐射的计算公式为：

$$B(T_s)=\frac{c_1\lambda^{-5}}{\left(e^{\frac{c_2}{\lambda T_s}}-1\right)}$$

$$T_s=\frac{c_2}{\lambda_c \ln\left(1+\frac{c_1\lambda_c^{-5}}{L_s}\right)}$$

式中，$c_1=1.19\times10^{-16}$ W·m^{-2}·sr^{-1}；$c_2=1.44\times10^{4}$ μm·K；λ_c为传感器的中心波长；L_s为大气下行辐射。

土地覆盖数据来源于Yang J[15]等发布的中国年度土地覆盖数据，空间分辨率为30 m，包含1985年、1990—2021年中国逐年土地覆盖信息，总体准确率达80%。采用的DEM数据为ASTER G DEM，分辨率为30 m，来源于地理空间数据云平台。人口密度数据来源于天津市统计局第七次全国人口普查结果[16]。

2.2　研究方法

1）NDVI作为反映植被覆盖变化趋势的重要指标之一，可直观反映区域生态环境质量变化。NDVI的区间为[-1, +1]，负值表示非植被表面和水；0表示岩石或裸土等；正值表示植被覆盖，且越接近1植被覆盖度越高。

$$\mathrm{NDVI}=\left(\frac{\mathrm{NIR}-\mathrm{Red}}{\mathrm{NIR}+\mathrm{Red}}\right)$$

式中，NIR、Red分别为近红外、红光波段的地表反射率，在Landsat5中为第三和第四波段，在Landsat8中为第四和第五波段。

2）NDBI利用波段对建筑物反射性的不同来识别或分类建筑用地或不透水面。NDBI负值表示水体；0表示植被；越接近1表明建筑用地比例越高。

$$\mathrm{NDBI}=\left(\frac{\mathrm{MIR}-\mathrm{NIR}}{\mathrm{MIR}+\mathrm{NIR}}\right)$$

式中，MIR、NIR分别为中红外、近红外波段的地表反射率，在Landsat5中为第五和第四波段，在Landsat8中为第六和第五波段。

3）城市热岛比指数[17]是用来衡量城市热环境的重要指标。其值越接近1，表示热岛效应越强，越接近0，表示热岛效应越弱。

$$\mathrm{URI}=\frac{1}{100m}\sum_{i=1}^{n}w_i p_i$$

式中，m为温度归一化后的分级数；i为高于中等温度的等级；n为高于中等温度的等级数量；w_i为对应等级的数值；p为i的百分比。

4）地理探测器是由王劲峰[18]等提出的，用来探测空间分异性，揭示驱动因子的统计方法，主要由分异及因子探测、交互作用探测、风险探测和生态探测4个部分组成，本文采用前两个部分。

分异及因子探测是指探测LST的空间分异性以及驱动因子NDBI、NDVI、DEM、人口密度（PD）对LST空间分异的解释程度，计算公式为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\times\sigma_h^2}$$

式中，$h=1,2,\ldots$；L为LST或驱动因子的分层，即分类或分区；N_h、N分别为h层和全区的单元数量；σ_h^2、σ^2分别为h层和全区的Y值方差。

交互作用探测用于研究不同驱动因子NDBI、NDVI、DEM、PD之间的交互作用，即评估两个因子共同作用时对于LST的解释力是增加还是减弱。两个驱动因子之间的关系见表1。

表1 交互作用探测结果分类

判断标准	影响模式
$q(x_1 \cap x_2) < \min(q(x_1), q(x_2))$	非线性减弱
$\min(q(x_1), q(x_2)) < q(x_1 \cap x_2) < \max(q(x_1), q(x_2))$	单因子非线性减弱
$q(x_1 \cap x_2) > \max(q(x_1), q(x_2))$	双因子增强
$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$	独立
$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$	非线性增强

3 研究结果与分析

3.1 1992—2020年天津市土地利用/覆被变化

由图1、2可知，整个研究区包括耕地、林地、草地、水域、裸地、建设用地6种土地利用类型；建设用地面积由592.02 km²增至767.2 km²，增长了8.4%，其中2002—2011年建设用地面积增长了14.7%，2011—2020年建设用地面积增长了8.8%；耕地面积由1 287.42 km²减至730.63 km²，减少了26%，其中2002—2011年耕地面积变化幅度较大，减少了10.5%，整个研究期间大部分耕地转化为建设用地；林地、草地和裸地的面积较少，变化幅度较小但整体呈减少趋势。不透水面从城市中部逐渐扩散至北部、东部、南部和西部地区，1992—2002年不透水面面积增速较缓，从2002年开始增速加快，2020年不透水面面积已占研究区面积的60%。河东区西北方向的不透水面面积增加较多，约为该区域的10%；河西区东南方向不透水面的增加面积约为该区域的20%，中心城区基本被不透水面覆盖，环城4区的不透水面面积也都有大幅增加。

1992—2020年土地利用覆被变化总量为7 709.6 km²，

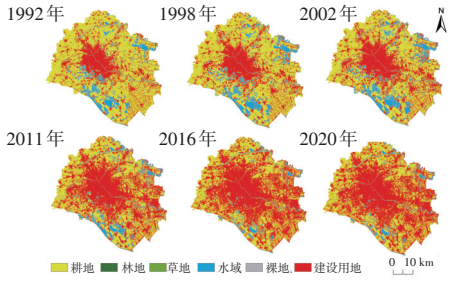
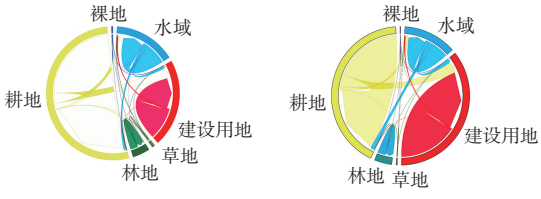


图1 1992—2020年土地覆被分类结果

审图号：津S(2017)007号



a 1992—2002年 b 2011—2020年

图2 1992—2020年土地利用/覆被转移矩阵弦图

建设用地面积持续增加，由部分耕地、水域以及少部分其他类型土地转化而来；虽然水域面积整体减少，但也由一部分耕地和少部分其他土地转化而来；耕地面积的转出量明显大于转入量，其他类型土地由于本身占地面积很少，因此转出量并不明显，但也有所减少。

3.2 土地覆被类型与LST的关系

由图3可知，6期数据LST的变化范围分别为22~52℃、16~40℃、16~53℃、17~48℃、12~45℃、17~48℃；1992—2002年平均LST上升1.9℃，2002—2020年平均LST下降3.4℃；1998—2011年平均LST上升9.3℃，2011—2016年平均LST下降4.6℃。1992—2020年各地类的LST见表2，其中裸地和草地的LST最高，水域的LST最低；耕地LST在1992—2002年上升了2.6℃，而在2002—2020年下降了6.1℃。城区建设使得城市规模不断扩大，很多耕地转化为建设用地，还有部分耕地受新建城区热岛效应影响使得LST上升。草地与耕地情况类似，1992—2020年LST上升7.1℃，这与城区建设中自然草场退化、铺设更多的人工绿化草皮有关。水域的温度变化波动较小，几乎未受到城市扩张的影响。研究结果表明，建设用地、草地等温度增幅较大的地类都与城市建筑物和城市基础设施发展有关[19]；而林地等温度增幅较小的地类则因为植被蒸腾作用使得温度变化较小。有研究表明，绿色植被覆盖往往通过吸收与反射辐射来调节潜热和显热交换以降低温度[20]。同样，不透水面和人造建筑物对于LST的提高具有很大影响[21-22]。LST的时空演变与城市土地利用/覆被变化有关，进而影响着城市热岛[23]。

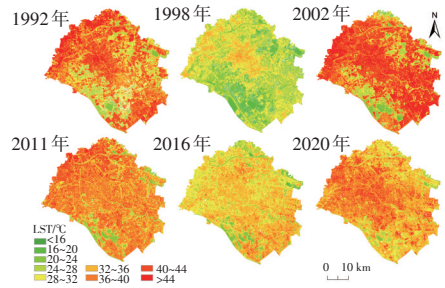


图3 1992—2020年LST分布图

审图号：津S(2017)007号

表2 1992—2020年各地类LST数值/℃

地类	1992年	1998年	2002年	2011年	2016年	2020年
耕地	37.0	26.7	39.6	36.8	31.2	33.5
林地	32.3	24.9	32.4	28.7	25.4	28.6
草地	35.4	30.1	33.3	42.0	37.4	42.5
水域	27.6	24.4	27.7	26.5	23.5	27.1
裸地	41.1	27.9	41.7	33.9	31.9	38.6
建设用地	39.5	27.8	41.4	37.2	32.7	37.0

3.3　城市热岛比指数结果

首先对研究区LST进行归一化处理，采用均值—标准差的分级方法[24]（表3）将LST分为极高温区、较高温区、高温区、中温区、低温区、较低温区和极低温区7级，分级结果见图4。温度范围为7级，根据URI计算公式，m=7，5、6和7级主要分布在中心城区，因此n=3，i_1=5、i_2=6、i_3=7，以1992年为例，则有：$URI_{1992}=\frac{1}{100\times7}(5\times21.34+6\times14.82+7\times0.49)=0.284$。

表3　温度分级划分标准

温度范围	温度分区
$LST\leqslant T_{mean}-2std$	极低温区
$T_{mean}-2std<LST<T_{mean}-std$	低温区
$T_{mean}-std<LST\leqslant T_{mean}-0.5std$	较低温区
$T_{mean}-0.5std<LST\leqslant T_{mean}+0.5std$	中温区
$T_{mean}+0.5std<LST\leqslant T_{mean}+std$	较高温区
$T_{mean}+std<LST\leqslant T_{mean}+2std$	高温区
$LST>T_{mean}+2std$	极高温区

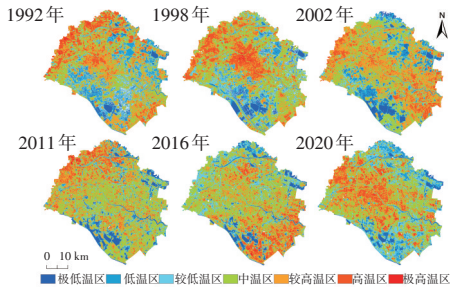


图4　1992—2020年LST分级图

审图号：津S(2017)007号

由图4可知，城市热岛的面积随着城市的建设发展逐步扩大，由中心城区逐渐向外扩散，以西北地区和东南地区最为明显；1992年城市热岛主要分布在中心城区和北辰区东北部地区，呈片状分布；1998年城市热岛面积以中心城区为中心向外扩张，热岛效应更加明显；2002年城市热岛主要分布在中心城区、北辰区西部、东丽区南部和津南区东部地区，在原有高温地区的基础上，出现了由点状变为片状的高温区；2011年、2016年中心城区城市热岛减弱，环城4区城市热岛效应增强；2020年城市热岛效应再次以中心城区为中心向外扩散。由URI变化点线图（图5）可知，1992年URI为0.284，2002年上升至0.296，2020年又降至0.255，表明城市热岛效应经历了先增强后减弱的过程。

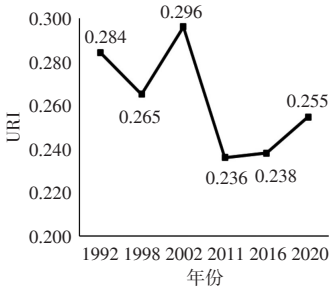


图5　URI变化点线图

总体来看，城市热岛问题较突出的区域主要分布在密集居住区、繁华商业区、农业园区和工业园区等。1992年较高温区、高温区和极高温区的面积占比为36.65%，2002年比1992年增加了2.6%，这主要是由于该期间居住区和商业区建设逐渐密集，环城区中又有很多新建成的工业用地，导致城市热岛效应增强，热岛中心分散转移；而2020年比2002年减少了7.12%，这主要源于政府加强环境治理，取缔和整治了很多工业园区，较高温区大幅减少，城市热岛效应得到有效缓解和改善。

3.4　NDVI与LST的关系

NDVI是反映地表植被覆盖状况的指标，被广泛用于研究植被与LST的关系[25]。利用ArcGIS计算研究区域6期NDVI，为避免水体对结果的影响，对水体进行掩膜处理。经统计，6期数据的平均NDVI分别为0.12、0.16、0.10、0.10、0.15、0.18，其中建设用地的NDVI最低。结合图4和NDVI计算结果，二者在空间分布上存在一致性，即NDVI高值区的LST低，NDVI低值区的LST高。1992—2020年NDVI值呈先降后升的趋势，这与研究区建设用地扩张和生态环境治理有关[19,26-27]。

为验证NDVI与LST的关系，对二者建立一元回归方程。图6中横坐标为NDVI数值，纵坐标为LST数值，可以看出，1992—2020年NDVI与LST均呈负相关关系；在相同植被覆盖的情况下，LST波动存在一定趋势，随着植被覆盖的增加，温度逐渐降低。

3.5　NDBI与LST的关系

NDBI源于对NDVI的深入探讨，可反映建筑物的密集程度，也是研究城市热岛的主要指标之一[20]。经统计，6期数据计算得到的平均NDBI分别为−0.04、−0.05、0、0.01、−0.03、−0.05，可以看

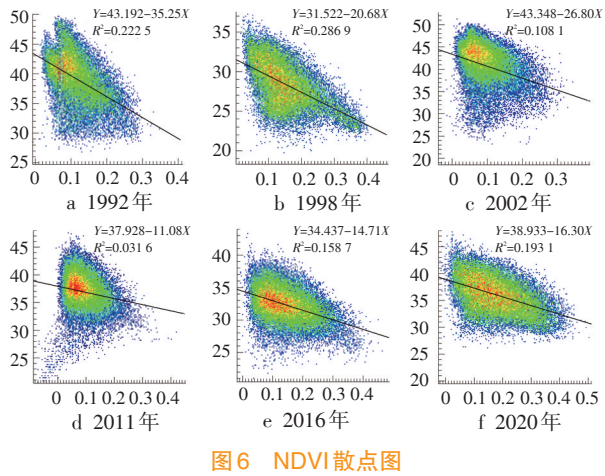


图6　NDVI散点图

出，NDBI值整体偏高，虽然数值波动较小，但呈现出先升后降的趋势。其原因在于，研究期间植被先减少再增多以及建筑物的不断扩张，这与已有研究结果类似[28-30]。为验证NDBI与LST的关系，对二者建立一元回归方程。图7中横坐标为NDBI数值，纵坐标为LST数值，6期数据的相关系数较大。随着NDBI的上升，LST逐渐上升，1992—2020年NDBI与LST存在明显的正相关关系。

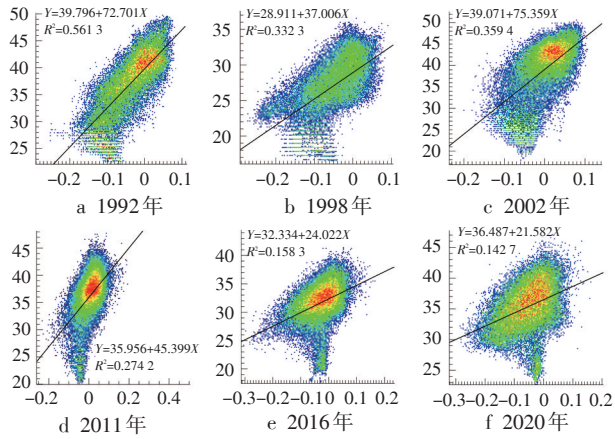


图7 NDBI散点图

3.6 LST驱动因子分析

本文利用ArcGIS将研究区的矢量数据按照400 m×400 m的网格进行划分，共11 789个网格；再利用提取分析工具中的多值提取至点工具提取每个网格的NDBI、NDVI、DEM、PD；最后采用自然间断点法将4个驱动因子重新分为5个类别。采用分异及因子探测分析4个驱动因子对LST的影响，结果见表4，可以看出，各驱动因子对LST的影响程度依次为NDBI> NDVI> PD> DEM，且4个驱动因子对于LST的影响都是显著的（p <0.05）。

表4 分异及因子探测结果

驱动因子	q	p	q排序
NDBI	0.203	0	1
NDVI	0.178	0	2
DEM	0.008	0	4
PD	0.079	0	3

为更好地研究各驱动因子与LST的关系，对两两因子进行交互作用探测，以探究驱动因子的交互作用对于LST的解释力。由表5可知，每对交互因子的q值均大于单因子，说明各因子之间的交互作用可增强LST，主要的影响模式是双因子增强和非线性增强。当DEM叠加在NDBI、NDVI、PD上时是双因子增强，其中DEM与NDBI交互作用时，对LST的影响最大；当NDBI叠加在NDVI、PD上时是非线性增强，其中NDBI与PD交互作用时，对LST的影响较大。

1992—2020年URI呈先升后降再升的趋势，其原因可归纳为：

表5 交互作用检测

$x_1 \cap x_2$	$p(x_1)$	$p(x_2)$	$p(x_1 \cap x_2)$	交互结果	影响模式
DEM ∩ NDBI	0.008	0.203	0.215	$p(x_1 \cap x_2) > \max(p(x_1), p(x_2))$	双因子增强
DEM ∩ NDVI	0.008	0.178	0.188	$p(x_1 \cap x_3) > \max(p(x_1), p(x_3))$	双因子增强
DEM ∩PD	0.008	0.079	0.088	$p(x_1 \cap x_4) > \max(p(x_1), p(x_4))$	双因子增强
NDBI∩ NDVI	0.203	0.178	0.226	$p(x_2 \cap x_3) > p(x_2) + p(x_3)$	非线性增强
NDBI ∩PD	0.203	0.079	0.274	$p(x_2 \cap x_4) > p(x_2) + p(x_4)$	非线性增强
NDVI ∩PD	0.178	0.079	0.235	$p(x_3 \cap x_4) > p(x_3) + p(x_4)$	非线性增强

1）社会经济因素。1992—2020年天津市经济快速发展，GDP从411亿元增至14 008亿元，人口数量由920.41万人增至1 386.6万人，增长了50.7%。1992—2002年全市基础设施投资达到196.4亿元，完善的基础设施极大地增强了城市的载体功能，和平路商业街、鼓楼的如期竣工使商业建设得到快速发展。截至2002年拆除869.3万m²的危陋房屋[31]，中心城区新建住宅达到4 487万m²，住宅建设快速发展，因此1992—2002年中心城区热岛面积向外扩大较为明显。同时，天津市的电子、通信、钢铁、化工、石化等产业也在该期间占据主导地位[32]，为天津工业力量提供了强有力的支持，如津南区的小站、八里台工业园，东丽区建设经济开发区产品涉及电子、生物技术、机械、化工等行业，北辰区的北辰科技园、北仓工业园[33]，西青区的西青经济开发区等，这些都是导致环城4区温度较高、热岛效应由点扩散到面的原因。2002—2016年环城4区的产业园区继续发展、扩张，温度高于中心城区，热岛分散转移至环城4区。相关研究表明，该期间环城4区建设用地比例增幅最大，其中北辰区、东丽区保持其原有工业用地优势继续增长，津南区工业用地比例增幅超过150%[19]。环城4区在中心城区的功能辐射影响下，吸引了一定外地人口，城镇居民点优势也相对显著，其中东丽区、西青区和津南区该类用地面积增长最多[19]。2018—2020年天津市整合了114个工业园区，取缔132个工业园区，其中环城区取缔92个工业园区；同时开展对“散乱污”的治理[26]，环城区生

态环境得到治理，热岛中心转移回中心城区。

2）政策因素。政府的规划会对城市热岛产生很大影响。随着改革开放的深入，天津成为14个沿海开放城市之一。2006年国家批复了《天津市城市总体规划（2005—2020年）》[34]，提出将天津逐渐发展为北方经济中心以及生态中心，给天津带来了一个发展建设的黄金时期。“十三五”期间，天津市政府集中排查并分类整顿了多个先进制造业企业、钢铁企业，并在2018年出台了《天津市工业园区（集聚区）围城问题治理工作实施方案》[27]，取缔了多个工业园区，优化产业结构，促进产业转型，发展高端产业，使得生态环境水平大幅提高。

4　结　语

本文基于1992—2020年6期Landsat LST数据分析了天津市中心城区和环城4区的LST、城市热岛的时空演变情况，并结合中国年度土地覆盖数据分析了对应地区土地利用/覆被的时空变化特征。为了更好地量化地表热岛和土地利用/覆被变化，利用最小二乘法分析了NDVI、NDBI与LST的关系；并利用地理探测器进一步分析了LST的驱动因子。

1）天津市中心城区和环城4区的建设用地面积由592.02 km^2增至767.2 km^2，而耕地面积则减少了26%，大部分耕地转变为建设用地，其他地类转出量不明显，但也有所减少。

2）URI值呈先升后降再上升的趋势，这与天津市人口增长以及城市化建设过程中的相关规划有关。

3）NDBI、NDVI对LST的影响较大，其中NDBI的q值为0.203，NDVI的q值为0.178，说明建设用地与植被等土地利用/覆被类型对LST的变化具有很大影响。PD、DEM对LST的影响程度较小，但各因子间的交互作用对于LST起到了增强作用。

综上所述，城市的土地利用/覆被类型对于城市LST具有重要影响。随着城市化进程的加快，城市热岛效应也在不断变化，这可能与许多原因有关，如天气、物候条件、人类活动，城市发展规划建设等。为缓解城市热岛现象，应提高城市绿化水平，增加城市绿地面积，对河道进行改造拓宽等，减少机动车尾气排放，对城市的农业园、工业园、科技园等进行治理与整合取缔，提高城市生态环境水平。

参考文献

[1] 彭保发，石忆邵，王贺封，等. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律:以上海市为例[J]. 地理学报，2013，68(11):1 461-1 471

[2] 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

[3] 谢苗苗，王仰麟，付梅臣. 城市LST热岛影响因素研究进展[J]. 地理科学进展，2011，30(1):35-41

[4] 伍明飞，林杰. 基于Landsat影像的杭州市主城区LST和热岛效应研究[J]. 科学技术与工程，2022，22(24):10 812-10 817

[5] 李建楠，张宝林，赵俊灵，等. 呼和浩特市城市化进程及其热岛效应影响因素探讨[J]. 环境科学导刊，2018，37(2):1-7

[6] 杨智威，陈颖彪，吴志峰，等. 粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模[J]. 资源科学，2019，41(6):1 154-1 166

[7] Yuan F，Bauer M E. Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery[J]. Remote Sensing of Environment，2007，106(3):375-386

[8] Imhoff M L，Zhang P，Wolfe R E，et al. Remote Sensing of the Urban Heat Island Effect Across Biomes in the Continental USA-science Direct[J]. Remote Sensing of Environment，2010，114(3):504-513

[9] 谢佳榕，刘璇，王洋，等. 基于遥感影像的天津市土地利用时空变化研究[J]. 测绘与空间地理信息，2021，44(2):83-85

[10] 苟春兵. 天津人口增长特征和未来趋势展望[J]. 城市，2011(8):73-75

[11] 季青，贺伶俐，余明，等. 基于Landsat ETM+数据的福州市土地利用/覆被与城市热岛的关系研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版)，2009，25(6):106-113

[12] 王铁，黎贞发. 基于MODIS数据的LST反演:以天津地区为例[J]. 中国农业气象，2009，30(增刊1):137-139

[13] 中华人民共和国国家统计局. 第七次人口普查数据[EB/OL]. (2021-05-11)[2023-02-22]. http://www. stats. gov. cn/

[14] Malakar N K，Hulley G C，Hook S J，et al. An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation[J]. IEEE Transactions on Geoence and Remote Sensing，2018(26): 5 717-5 735

[15] Yang J，Huang X. The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data，2021，13(8):3 907-3 925

[16] 天津市统计局. 第七次人口普查数据[EB/OL]. (2021-05-21)[2023-02-22]. https://stats. tj. gov. cn/

[17] Xu H Q，Chen B Q. Remote Sensing of the Urban Heat Island and Its Changes in Xiamen City of SE China[J]. Journal of Environmental Sciences，2004，16(2):276-281

[18] 王劲峰，徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报，2017，72(1):116-134

[19] 王睿，洪再生. 天津市半城市化地区建设用地时空分异特征及形成机制[J]. 城市发展研究，2017，24(9):15-21

[20] Kamali M E,Hashemi H,Berndtsson R,et al. Impact of Spatiotemporal Land-use and Land-cover Changes on Surface Urban Heat Islands in a Semiarid Region Using Landsat Data[J]. International Journal of Digital Earth, 2021, 14(2): 250-270

[21] Frazer L. Paving Paradise: The Peril of Impervious Surfaces[J]. Environmental Health Perspectives, 2005, 113(7): 456-462

[22] 梁珂,任秀波,张洋,等. 珠三角城市群城市热岛与地表覆盖时空变化分析[J]. 地理空间信息,2022,20(9):36-40

[23] Silva S J, Da R M. Spatiotemporal Impact of Land Use/Land Cover Changes on Urban Heat Islands: A Case Study of Pago Do Lumiar, Brazil[J]. Building and Environment, 2018,136(5):279-292

[24] 程晨,蔡喆,闫维,等. 基于Landsat TM/ETM+的天津城区及滨海新区热岛效应时空变化研究[J]. 自然资源学报,2010,25(10):1 727-1 737

[25] Chun B , Guldmann J M. Spatial Statistical Analysis and Simulation of the Urban Heat Island in High-density Central Cities[J]. Landscape and Urban Planning , 2014 , 125:76-88

[26] 高洋,郝吉明,田金平,等. 新时代天津市工业园区绿色发展策略研究[J]. 中国环境管理,2022,14(4):61-68

[27] 武自然. 治理工业园区(集聚区)围城问题 天津将整合撤销提升300多个工业园[J]. 山东国资,2018(8):88

[28] Chen X,Zhang Y. Impacts of Urban Surface Characteristics on Spatiotemporal Pattern of Land Surface Temperature in Kunming of China[J]. Sustainable Cities and Society,2017, 32:87-99

[29] Guha S,Govil H. Dynamic Analysis and Ecological Evaluation of Urban Heat Islands in Raipur City, India[J]. Journal of Applied Remote Sensing,2017,11(3):15-17

[30] Abel B, Tesfaye K. Monitoring Land Surface Temperature in Bahir Dar City and Its Surrounding Using Landsat Images[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science,2020,23(3):371-386

[31] 何邕健,李楠,董晓玉. 1990年以来天津市中心城区居住空间结构演变[J]. 城市问题,2006(6):65-69

[32] 郑建峰. 交通流与区域空间联系的关系研究 [D]. 西安:长安大学,2006

[33] 王学斌. 天津市发展都市型工业园的建议[J]. 经营与管理,2005(12):47

[34] 张峻屹. 全面落实科学发展观 建设北方经济中心:解读《天津市城市总体规划(2005—2020年)》[J]. 天津经济,2006(9):4-8

(上接第56页)

1）将高速线阵相机和激光设备模块化安装在运动巡检设备中，利用输水隧洞停水检测的窗口期采集隧洞的内部影像，可为后续病害识别提供数据基础。

2）设备原型实验显示，本文系统能有效获取弱光环境下的影像数据，且在2 500~6 000 mm物距范围内可通过影像拼接得到完整的环境数据，图像光斑均匀度也在合理范围内，完全试用于隧道环境的数据采集工作。

3）将本文系统应用于某水利工程输水隧洞病害检测中，并与高清相机拍摄的图片进行比对。结果表明，本文系统在输水隧洞检病害识别中具有较高准确性。

本文系统在输水隧洞停水期间进行了测试并取得了较好的效果，但在未来研究中还需进一步完善照明系统，通过提升光照亮度和范围来提升数据质量；同时可考虑引入AI，在采集的海量影像和点云数据中进行病害智能化检测；还可将车载平台替换为无人驾驶汽车，进一步精确控制速度和减小安全风险。

参考文献

[1] 李婷. 基于深度卷积神经网络的水工隧洞表面缺陷检测[D]. 绵阳:西南科技大学,2020

[2] 张伟,赵前程,王峥. 引滦入津输水隧洞重点病害综合治理技术与实践[J]. 海河水利,2020(5):35-37

[3] 黄会宝,谢辉,马芳平,等. 引水隧洞表观缺陷智能检测与规律分析[J]. 中国农村水利水电,2023(8):259-264

[4] 吕颖钊. 序列影像三维信息模型技术在隧道巡检中的应用[J]. 交通科学与工程,2018,34(4):53-57

[5] 李德仁. 摄影测量与遥感的现状及发展趋势[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000(1):1-6

[6] 来记桃,李乾德. 长大引水隧洞长期运行安全检测技术体系研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(6):162-170

[7] 姜卫平,王锴华,李昭,等. GNSS坐标时间序列分析理论与方法及展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):2 112-2 123

[8] 程为彬,陈烛姣,张夷非,等. IMU姿态误差均衡校正模型与验证[J]. 仪器仪表学报,2021,42(9):202-213

[9] 刘轩然. 基于面阵相机的隧道裂缝图像采集与检测技术[D]. 北京:北京交通大学,2018

[10] 董宇,李洪平. 油管图像识别系统的设计与实现[J]. 地理空间信息,2017,15(3):66-68

[11] 张提升,王冠,陈起金,等. GNSS/MEMS IMU车载组合导航中IMU比例因子误差的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学,2024,44(2):134-137

[12] 陶毅峰,江金光,方伟. 基于GRU循环神经网络辅助的组合导航算法[J]. 计算机工程与设计,2021,42(2):370-376

[13] 韩建鹏,孙颖宏,张鹏,等. IMU/DGPS辅助航空摄影测量直接定位及其精度分析[J]. 地理空间信息,2021,19(1):65-67