

基于航空热红外高光谱 TASI 数据的城市热岛强度

孙秀波, 郭常来, 代雅建, 李旭光, 赵岩, 崔健*

SUN Xiubo, GUO Changlai, DAI Yajian, LI Xuguang, ZHAO Yan, CUI Jian*

中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China

摘要: 基于航空热红外高光谱 TASI 数据开展城市热岛强度研究, 通过建立热红外高光谱发射率的经验关系, 对分离方法 (TES) 中 MMD 模块予以改进, 建立针对 TASI 数据的温度反演模型, 利用该模型完成了 1500 km² 锦州市 TASI 数据处理和温度反演工作, 开展城市热岛的空间分布、范围及强度研究。结果表明, TASI 数据反演温度与实测温度的平均绝对误差为 0.81 K, 平均相对误差为 0.25%, 提取的城市热异常范围准确, 能够为城市热岛研究提供一定的决策支持; 城市热岛强度与不透水面呈正相关关系, 与植被覆盖呈负相关关系; 城市热岛强度与土地利用覆盖类型有较大相关性, 现代居民区和商业区强度高于城中村和城乡结合部建筑, 农用地城市热岛强度最低。

关键词: 航空热红外高光谱; 温度反演; 城市热岛强度; 锦州市

中图分类号: P627; TU984.11⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)10-1707-06

Sun X B, Guo C L, Dai Y J, Li X G, Zhao Y, Cui J. Urban heat island effect based on aerial thermal infrared hyperspectral TASI Data. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1707-1712

Abstract: The research on the urban heat island effect based on aerial thermal infrared hyperspectral TASI data was conducted. By establishing the empirical relationship of thermal infrared hyperspectral emissivity, the MMD module in the separation method (TES) was improved, and a temperature inversion model for TASI data was established. Using this model, TASI data processing and temperature inversion in the 1500 km² area of Jinzhou City were completed, and the spatial distribution, range and intensity of urban heat islands were studied. The results show that the average absolute error between the inversion temperature and the measured temperature of the TASI data is 0.81 K, and the average relative error is 0.25%. The extracted range of urban thermal anomalies is accurate, which can provide certain decision support for the research of urban heat islands. The intensity of urban heat islands shows a positive correlation with the permeable surface and a negative correlation with the vegetation cover. It has a greater correlation with the type of used land cover. The urban heat island intensity of modern residential and commercial areas is higher than that of urban villages and rural-urban fringe buildings, and the urban heat island intensity of agricultural land is the lowest.

Key words: aviation thermal infrared hyperspectral; temperature inversion; urban heat island intensity; Jinzhou City

在城市化迅速推进过程中, 由于大量建筑道路集中构建, 废热高强度排放等原因引起下垫面性质及结构发生改变, 使城市显示出“高温孤岛”的现象^[1-3] 称之为城市热岛效应。伴随着经济社会的快速发展和城市膨胀, 由城市热岛效应带来的生态环境

问题日趋严重, 全球气候变暖降低了生存质量, 城市热岛强度问题及其变化值得高度关注和持续监测^[4-6]。传统城市热岛效应研究, 一是多基于气象站点的监测数据, 以点插值为面数据, 具有片面性; 二是伴随着遥感技术的兴起, 国内外学者基于

收稿日期: 2020-06-07; 修订日期: 2021-08-25

资助项目: 中国地质调查局项目《辽西凌河地区综合地质调查》(编号: DD20189711)

作者简介: 孙秀波 (1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水工环地质调查与研究。E-mail: hljsunxb@126.com

* 通信作者: 崔健 (1980-), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事水工环地质调查与研究。E-mail: spidercj@126.com

多光谱及中低分辨率遥感数据,开展了热岛效应的相关研究^[7-8],但其成图比例尺精度低,同时缺乏地面同步测量温度定标数据作为验证,使温度反演准确度不高;三是基于遥感航空热红外影像开展城市热岛效应相关研究,其光谱分辨率较低,难以满足热岛效应分析精度和准确度日益提高的需求。

TASI 高光谱热红外遥感数据量大、光谱信息丰富、空间分辨率高,能够较精细地分析地表热异常。目前基于航空热红外高光谱 TASI 数据对矿物蚀变信息提取有部分研究^[9-11],但尚无基于 TASI 数据对城市热岛强度的相关研究。本文以锦州为例,基于 TASI 数据反演地表温度,解释城市下垫面热信息的分布和结构特征,定量分析了城市热岛的空间分布和强度。

1 研究区概况

锦州位于辽宁省西南部,“辽西走廊”东端,南临渤海,北依松岭山脉,是连接华北和东北两大区域的交通枢纽。近年,随着锦州城市化进程的加快,建筑成群、道路拓宽使城市不透水面积大量增加,各类工厂废热的高强度排放,引起下垫面性质及结构发生改变,城市生态出现一系列的环境问

题,其中城市热岛效应逐渐成为影响城市发展的主要关注点。通过开展锦州市 1500 km² 的 TASI 数据处理和温度反演工作(图 1),研究锦州市的城市热岛强度及分布特征,为改善城市环境质量提供数据支撑。

2 数据获取和精度分析

2.1 数据获取

本次研究基于 TASI(Thermal Airborne Hyperspectral Imager)热红外航空成像光谱仪的高光谱数据,TASI 波段带宽 8~11.5 μm,连续成像 32 个波段,相对飞行高度 3000 m,空间分辨率 3.75 m。

黎明前地物曲线坡度小,近于均衡状态,温度相对恒定,分析城市的热岛效应最有利,本次锦州市及外围区域的温度反演选择早上 8 点左右的航空热红外高光谱数据 TASI 数据。黎明后大气均衡打破,沙、草、林、水等变暖,午后达到最高峰,地物温度差异较大,易于形成较大温度梯度,进行地物分类与解译,本次锦州市郊区及海滩选择中午 1 点左右的航空热红外高光谱数据 TASI 数据。

2.2 TASI 数据的温度与发射率分离

ASTER TES 算法是利用热红外高光谱或多光

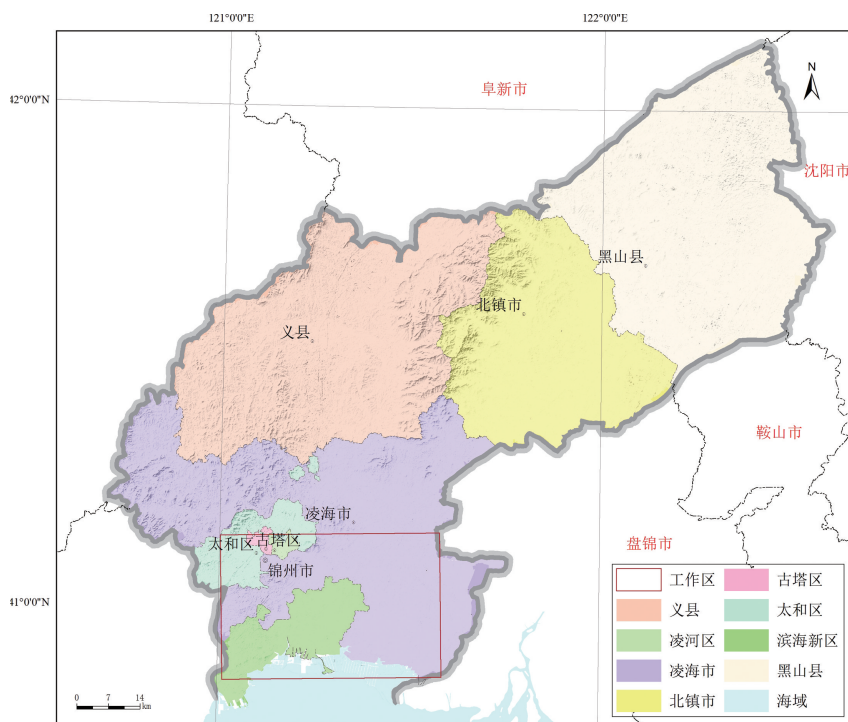


图 1 锦州市热岛强度研究区位置图

Fig. 1 Location of heat island intensity study area in Jinzhou City

谱一个时相的观测来同时求取温度和发射率的波谱,是 ASTER 温度产品现今最普遍的反演方法^[12-14]。基于 TASI 数据的温度与发射率分离算法优化,集成 NEM(Normalized Emissivity Method),RAT(RATIO Algorithm),MMD(Maximum Minimum Difference)3 个模块的优点,在充分利用已有 ASTER TES 算法优势的前提下(保留 NEM、RAT 模块),基于 TASI 光谱数据特点及其 32 个波段信息重新构建 TES 发射率的经验关系,运用 Aster 和 MODIS 波谱库中提供的 274 条光谱曲线,将它们统一转换成发射率曲线,旨在充分利用 TASI 内在的波段之间的关系特性及矿物发射波谱特征,提高拟合精度并获取 TASI 数据发射率和温度信息。

2.3 地面查证和精度分析

2.3.1 精度评价模型

运用地面同步实测温度数据进行精度分析(图 2),采用了平均差值及差值标准差 2 个指标,平均差值及差值标准差越小,说明精度越高(图 3)。

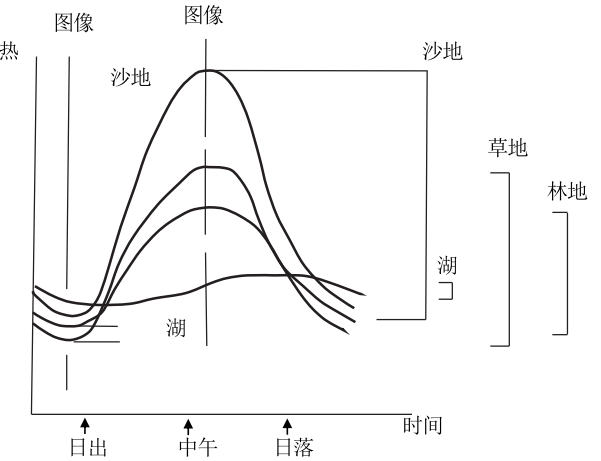
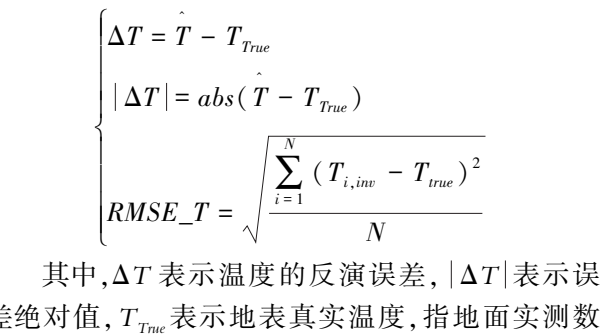


图 2 地物热惯量的不同时段表现
Fig. 2 Geothermal inertia performance in different times

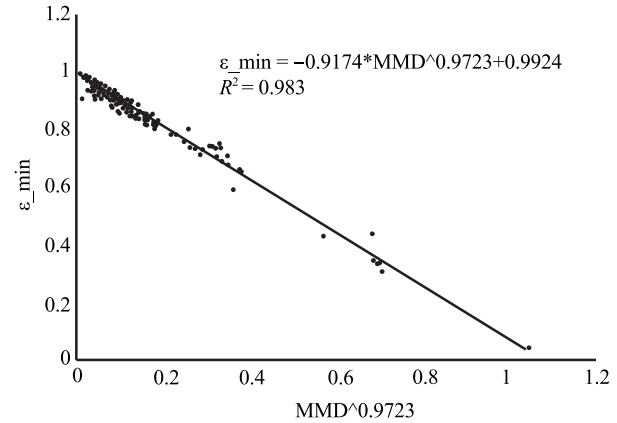


图 3 min 与 MMD 的指数关系
Fig. 3 Exponential relationship between min and MMD

据。 $RMSE_T$ 表示温度的均方根误差; $T_{i,inv}$ 表示温度的反演值。

2.3.2 温度反演精度分析

在进行温度反演精度分析前,应首先将红外测温仪测量的红外温度进行黑体定标。根据地面同步试验中测点的经纬度坐标找到对应的机载热红外数据反演的温度值,并与地面同步实验获取的温度值比较,统计结果见表 1。

表 1 温度反演结果与实测结果比较

Table 1 Comparison of temperature inversion results and measured results

点号	实测温度 /℃	反演温度 /℃	反演误差 /℃	相对误差	地物类型
1-1	4.3	3.8	0.5	0.15%	砂石地
1-2	4.4	5.1	0.7	0.21%	草甸地
2-1	1.1	1.9	0.8	0.25%	水泥广场
2-2	4.6	5.4	0.8	0.24%	植被
3-1	2.4	2.9	0.5	0.15%	裸土
3-2	3.4	5.1	1.7	0.52%	玉米地秸秆
4-1	1.7	2.4	0.7	0.21%	砂石地
4-2	2.9	3.1	0.2	0.06%	草地
5-1	4.2	3.8	0.4	0.12%	大豆地
6-1	6.7	5.8	0.9	0.27%	水泥地
7-1	3.4	2.9	0.4	0.12%	裸土
8-1	3.1	4.0	0.9	0.27%	裸土
10-1	4.2	3.0	1.2	0.36%	大豆地裸土
11-1	2.1	1.9	0.2	0.06%	主干道柏油路
11-2	2.6	2.9	0.3	0.09%	玉米地裸土
11-3	6.3	6.2	0.1	0.03%	主干道柏油路
12-1	2.4	2.1	0.3	0.09%	大豆地裸土
14-1	8.3	9.5	1.2	0.36%	主干道柏油路
14-2	3.8	4.1	0.3	0.09%	养殖场水体
15-2	6.1	9.3	3.2	0.97%	主道旁土壤
16-1	6.9	9.2	2.3	0.69%	滩涂
均差			0.81	0.25%	

温度反演结果与实测结果对比分析:误差从 0.2℃到 3.2℃,平均绝对误差为 0.81℃,相对误差为 0.25%。其中主干道柏油路面的温度反演精度最高,为 0.1℃;主道旁土壤的温度反演误差较高,为 3.2℃。分析认为虽然同为土壤介质,但裸土性质较单一、较宽阔,所以反演精度较高,而道路旁土壤受城市建筑、绿化乔木等混合像元影响,因此其反演精度较低。

3 热岛强度分析

锦州市典型地物包括人工建筑、道路、植被、土壤、地表水、海水等,其中水体具有比热大、热惯量大、对红外几乎全吸收、自身辐射发射率高、内部以热对流方式传递温度等特点,导致水体表面温度整体较均一、昼夜温度变化慢且幅度小。白天水体热容量较大,升温较慢,同周边土壤及岩石相比温度较低(图 4);夜晚水体热储能力强,热量散失慢,同周边土壤及岩石相比温度较高(图 5)。

绿色林地(树):辐射温度较高,夜间图像具暖标记,白天接收阳光照射有温度变化,因其水分蒸腾作用导致叶的温度降低,升温不明显,植被较周围土壤温度低;个别针叶林因为其树冠针叶丛束的合成发射率较高。

人工铺设区(街道、停车场):白天比周围区域温度高,且夜里散热较慢,仍比周围温度高。

海边滩涂和河道湿地:昼夜较干燥地面冷,这是因为水分蒸发时的冷却效果。

城市水域热污染监测,工厂向河道排放的污水,在热红外图像上为一白色羽毛状条带,自排放口向下游延伸并向两侧扩展、温度逐渐降低的带状热污染带。羽流的影像显示,由羽根到羽尖,色调由浅变深,由羽流的中轴向外,色调也由浅变深。密度分割结果表明,热污染带出水口温度最高,温度梯度大,温度由 19℃快速降到 15℃,热交换作用强烈。但热污水进入主河道后,由于温度已经比较低,温度梯度小,热交换作用微弱,在较长的距离内温度才由 15℃逐渐降至 12℃,热水羽流的形状较明显。

锦州城市扩展对生态环境的一个显著影响就是城市的“热岛效应”,快速城市化进程改变了地表下垫面的理化性质。原本土壤、草地、水体等比热大的自然表面被水泥、沥青等比热小的表面代替,

这不仅改变了反射和吸收面的性质,还改变了近地面层的热交换和地面的粗糙度,使大气的物理状况受到影响。近年锦州市城市化进程加快,城镇面积不断扩展,道路不断拓宽,人工不透水铺面和吸热表面积增加,地面的保水能力下降,调节气候的作用相应减弱。与外围的凌海市相比,锦州市城市热岛范围更广泛、强度加大(图 6)。锦州市西北面的石化区、东面的建材厂等、南面的采矿区都呈现不同的热力景象,使锦州市的热岛区域结构复杂,区域“热岛效应”更严重。

分析本次锦州市反演温度分布图,可以确认锦州市的城市热岛分布特征,形成等温线闭合状态的高温区。统计数据显示,城区及外围凌晨时段热岛强度小于 5℃占 79.28%,5~8℃占 17.67%,8~12℃占 2.18%,大于 12℃的占 0.87%(图 7),热岛强度较高处为地表水体分布区;南部区域中午时段热岛强度小于 5℃的占 19.91%,5~8℃占 56.49%,8~12℃占 0.11%,大于 12℃占 23.48%(图 8),热岛强度较低处为地表水体,较高处为土壤及岩石分布区。

4 结 论

本文基于航空热红外高光谱 TASI 数据开展城市热岛强度及城市河道热污染环境监测研究,提取的热岛效应范围准确性高,取得了较理想的效果,为热红外高光谱遥感技术在城市环境监测的推广应用提供了实例。

(1)建立针对 TASI 数据的温度反演模型,其城市热岛反演温度与实测数据相比误差从 0.2 K 到 3.2 K,平均绝对误差为 0.81℃,提取的城市热异常范围准确度高,能够为城市热岛研究提供一定的决策支持。

(2)反演温度分布图显示,锦州现已形成等温线闭合状态的高温区,同外围凌海市相比,锦州热岛范围及强度较大。同时其西北部石化区、东面建材厂、南面采矿区都呈现不同的热力景象,使得锦州市的热岛区域结构复杂,锦州区域热岛强度较为严重。

(3)区域城市热岛强度时空差异明显,中午时段土壤及岩体介质热岛强度较高,凌晨时段水体热岛强度较高;同时,城市热岛强度与不透水面呈正相关关系,与植被覆盖面积成负相关关系,不透水面

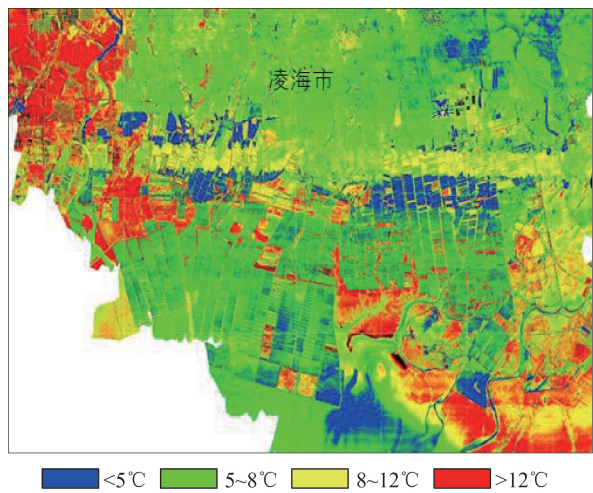


图 4 锦州郊区及海滩中午温度反演

Fig. 4 Inversion of noon temperature in suburbs and beaches

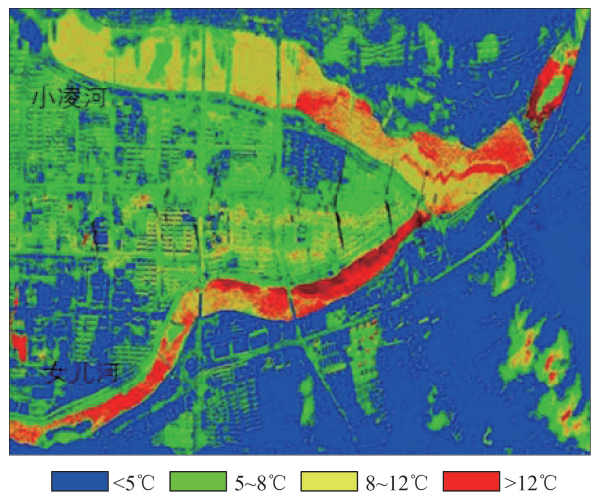


图 5 锦州生活区域河道温度分布

Fig. 5 Distribution of river temperature in living area, Jinzhou City

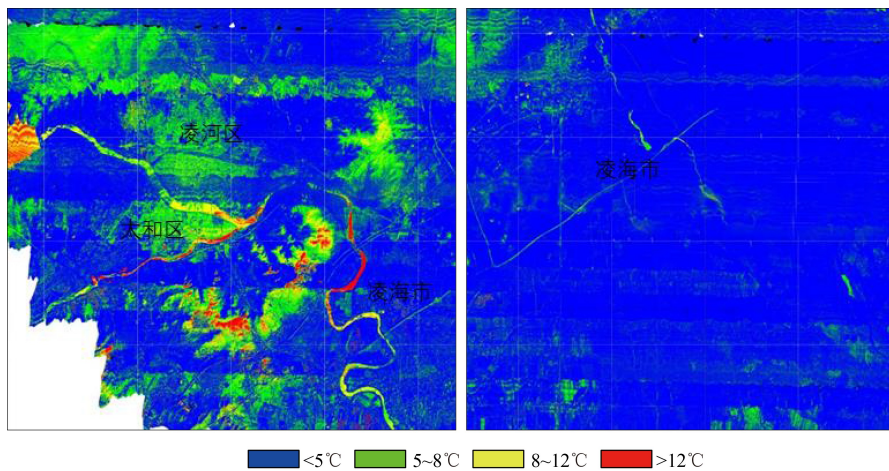


图 6 锦州城区及外围凌晨温度反演对比

Fig. 6 Inversion comparison of early morning temperature in Jinzhou City and its periphery

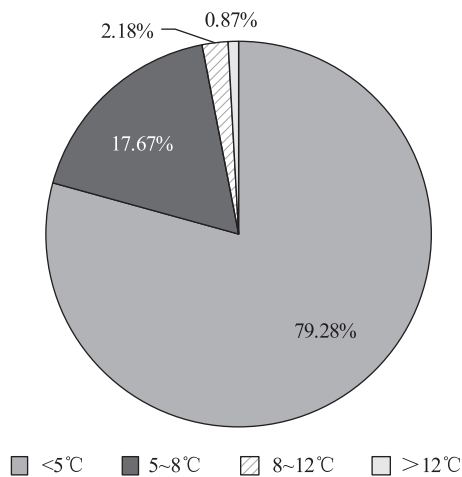


图 7 城区及外围凌晨时段热岛强度对比

Fig. 7 Intensity of heat islands in the urban area and surrounding areas during the early morning hours

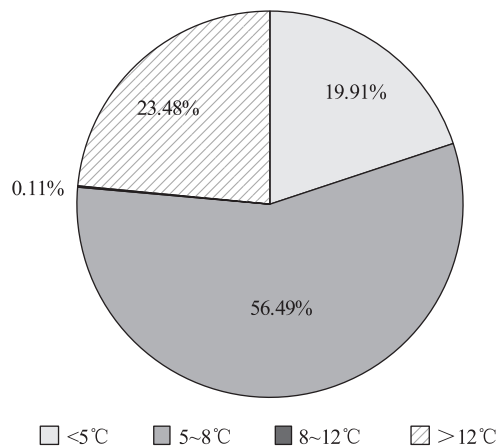


图 8 南部区域中午时段热岛强度对比

Fig. 8 Intensity of heat islands in the southern region at noon

占比高及植被覆盖度低的地区,其热岛强度较高。分析认为,城市不透水面面积的增加、建筑物的扩建、城市植被面积减小、工业热污水排放及尾矿堆积区中含硫化物废石氧化反应产生大量热等引起局部地表温度的升高,成为锦州城市热岛强度较高的主要原因。

参考文献

- [1] 杨敏,杨贵军,王艳杰,等.北京城市热岛效应时空变化遥感分析[J].国土资源遥感,2018,30(3): 213-223.
- [2] Gau RA, Eichenbaum M K, Simonovic S P. Analysis and modelling of surface Urban Heat Island in 20 Canadian cities under climate and land-cover change[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 206: 145-157.
- [3] 谢敏,孙明,蔡建初,等.滨海城市化地区热岛效应的遥感分析研究:以防城港为例[J].气象研究与应用,2018,39(3): 66-71.
- [4] 佟光臣,林杰,陈杭,等.基于多时相遥感数据的常州市城市热景观变化特征[J].水土保持研究,2017,24(1): 207-212.
- [5] 王刚,张秋平,肖荣波,等.秋冬季节广州城市绿地对热岛效应的调控作用差异分析[J].中山大学学报(自然科学版),2018,57(5): 38-48.
- [6] 程志刚,李炬,周明煜,等.北京中央商务区(CBD)城市热岛效应的研究[J].气候与环境研究,2018,23(6): 633-644.
- [7] 李学敏,文力,王丽璇.基于 Landsat 遥感数据的城市热岛效应及影响因素—以襄阳市为例[J].湖北农业科学,2019,58(16): 41-48.
- [8] 夏天,黎璇,何东进,等.福建平潭岛填海活动热岛效应的时空变异[J].森林与环境学报,2019,39(5): 540-547.
- [9] 吴泽群,田淑芳.基于 TASI 发射率数据的层状硅酸盐蚀变矿物提取识别[J].国土资源信息化,2015, (2): 32-37.
- [10] 高海东,胡宝群,吕古贤,等.山东玲珑金矿 50 号脉三维构造蚀变岩地球化学特征及深部预测[J].地质通报,2020,39(11): 1793-1806.
- [11] 李娜,董新丰,甘甫平,等.高光谱遥感技术在基岩区区域地质调查填图中的应用[J].地质通报,2021,40(1): 13-21.
- [12] 牛海威,李名松,汪冰,等.甘肃花牛山金矿区热红外高光谱遥感特征分析与找矿预测[J].矿产与地质,2017,31(2): 371-377,388.
- [13] 郭帮杰,张杰林,武鼎,等.航空高光谱遥感在花岗岩型锡矿勘查中的应用研究[J].铀矿地质,2017,33(4): 241-245.
- [14] Gillespie A R, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1113-1126.