DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2025.05.007
CSTR: 32220.14.gk202505007

基于高分五号的地表温度反演方法与应用

贾志扬[1,2,3]，张文豪[1,2,3*]，占玉林[4]，张丽丽[5]，
付雅帅[1,2,3]，马 宇[1,2,3]，邴芳飞[1,2,3]

（1 北华航天工业学院遥感信息工程学院，河北 廊坊 065000；
2 河北省航天遥感信息处理与应用协同创新中心，河北 廊坊 065000；
3 北华航天工业学院遥感应用研究所，河北 廊坊 065000；
4 中国科学院空天信息创新研究院遥感卫星应用国家工程实验室，北京 100094；
5 中科空间信息（廊坊）研究院，河北 廊坊 065001）

摘 要： 地表温度是城市环境监测、地热异常勘探、全球气候变化等研究中的重要参量。高分五号（GF-5）卫星的全谱段光谱成像仪在热红外波段具有40 m的高空间分辨率成像能力，能够提供精细的地表温度空间分布和变化信息。本文采用双通道和四通道两种劈窗算法对GF-5数据进行反演得到天津市2019年3月的地表温度，并通过同一时间的高级星载热发射和反射辐射仪（ASTER）地表温度产品对反演结果进行精度评价。结果表明，双通道劈窗算法的地表温度最优均方根误差为1.19 K，四通道劈窗算法的地表温度均方根误差为2.31 K，不同通道组合的对比结果表明双通道劈窗算法B9/B10组合反演精度最高。此外，为验证GF-5高分辨率热红外数据在热岛效应监测方面的应用能力，针对鸭淀水库区域开展了GF-5与ASTER地表温度结果和热岛效应对比分析，结果表明GF-5的高分辨率地表温度数据能够在城市热环境监测及城市规划中发挥重要作用。

关 键 词： 高分五号；热红外；地表温度；劈窗算法；城市热岛效应
中 图 分 类 号： P237, TP79 **文 献 标 识 码：** A **文章编号：** 1673-6141(2025)05-637-015

Surface temperature retrieval methods and applications based on Chinese Gaofen-5 satellite

JIA Zhiyang[1,2,3], *ZHANG Wenhao*[1,2,3*], *ZHAN Yulin*[4], *ZHANG Lili*[5],
FU Yashuai[1,2,3], *MA Yu*[1,2,3], *BING Fangfei*[1,2,3]

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China;
2 Heibei Space Remote Sensing Information Processing and Application of Collaborative Innovation Center, Langfang 065000, China;
3 Institute of Remote Sensing Applications, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China;

基金项目： 高分辨率对地观测系统重大专项（30-Y30F06-9003-20/22），国家自然科学基金（41907192），国家科技重大专项（67-Y50G04-9001-22/23），河北省自然科学基金（D2020409003，D2022103002），河北省高等学校科学技术研究项目（ZD2021303），河北省全职引进高端人才科研项目（2020HBQZYC002），北华航天工业学院博士科研启动基金（BKY-2021-31），2023年省级在读研究生创新能力培养资助项目（CXZZSS2023166），北华航天工业学院研究生创新资助项目（YKY-2022-54）
作者简介： 贾志扬（1999- ），河北唐山人，硕士研究生，主要从事地表温度反演方面的研究。E-mail: jzy92641@163.com
导师简介： 张文豪（1986- ），博士，副教授，硕士生导师，主要从事大气环境与地表温度方面的研究。E-mail: zhangwh@radi.ac.cn
收稿日期： 2022-12-14；**修改日期：** 2023-02-21
*通信作者。

4 National Engineering Laboratory for Satellite Remote Sensing Applications, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
5 Zhongke Langfang Institute of Spatial Information Applications, Langfang 065001, China)

Abstract: Surface temperature is a crucial parameter in the studies of urban environmental monitoring, geothermal anomalies, global climate change, and other topics. The full-spectrum spectral imager on board Gaofen-5 (GF-5) satellite has a high spatial resolution imaging capability of 40 m in the thermal infrared band, which can offer detailed information on the spatial distribution and variation of surface temperature. In this paper, two split-window algorithms, two-channel and four-channel, are used to invert GF-5 data to obtain the surface temperature of Tianjin, China, in March 2019, and the accuracy of the inversion results is evaluated using ASTER surface temperature product at the same time. The results show that the optimal root-mean-square error of the two-channel split-window algorithm for surface temperature is 1.19 K, while that of the four-channel split-window algorithm is 2.31 K. And the comparison of different channel combinations shows that the B9/B10 combination of the two-channel split-window algorithm has the highest inversion accuracy. In addition, to verify the application capability of GF-5 high-resolution thermal infrared data in monitoring the heat island effect, a comparative analysis of GF-5 and ASTER surface temperature and heat island effect is conducted in the region surrounding Yadian Reservoir of Tianjin. The results show that the high-resolution surface temperature data of GF-5 can play an important role in urban thermal environment monitoring and urban planning.

Key words: Gaofen-5; thermal infrared; land surface temperature; split-window algorithm; urban heat island effect

0 引 言

地表温度 (LST) 是城市热岛监测、地表热资源勘探、全球极端气候监测的关键参量，受到地表能量平衡、大气状态、地表热特性和地下介质影响[1,2]。地表温度空间分布及变化信息在城市热岛分析中扮演着极其重要的角色[3-7]，地表温度信息的精确获取决定了城市热岛监测的能力。目前，常见的地表温度卫星遥感反演方法主要有：单通道算法 (SC)[8-10]、劈窗算法 (SW)[11-20]和温度与发射率分离算法 (TES)[21-24]。

高分五号 (GF-5) 的全谱段光谱成像仪 (VIMS) 在热红外波段具有较高的空间分辨率[25]，在 GF-5 卫星发射前，研究人员基于模拟的 GF-5 热红外光谱数据开展了地表温度反演研究。陈媛媛[17]将 116 条大气廓线 TIGR (Thermodynamic initial guess retrieval)、冷热大气的地表温度范围、地物发射率及 GF-5 VIMS 设计指标输入到 MODTRAN，获得 GF-5 VIMS 模拟数据集。在此基础上分析了地表发射率对地表温度反演结果的影响，并利用最小二乘法得到不同水汽含量条件下双通道劈窗算法最优系数，降低了因发射率不准确引起的反演误差，得到适用于 GF-5 VIMS 载荷设计指标的双通道劈窗算法，算法均方根误差为 0.7 K。Ye 等[18]选择了 946 条 TIGR 大气廓线，获得 GF-5 VIMS 模拟数据集，利用该数据集分析不同水汽含量对于地表温度反演精度的影响，得到不同水汽含量下的四通道劈窗算法最佳系数，降低了因地域和季节变化导致大气水汽含量差异带来的误差，得到适用于 GF-5 VIMS 载荷设计指标的四通道劈窗算法。并将高级星载热发射和反

射辐射仪 (ASTER) 数据进行光谱转换得到GF-5 VIMS模拟数据进行地表温度反演，利用3个野外站点进行验证分析，均方根误差分别为0.45、0.81、0.58 K。Zhao等[20]选择了380条TIGR大气廓线、10种气溶胶，生成了GF-5 VIMS模拟数据集，分析了夜间重沙尘气溶胶对于地表温度的影响，提出了一种夜间重沙尘气溶胶条件下进行地表温度反演的方法，一定程度上降低了气溶胶对反演结果的影响，反演结果均方根误差为1.94 K。Yang等[23,24]选择了4948条白天和4188条夜晚的Seebor大气廓线，得到了GF-5 VIMS模拟数据集，分析了大气水汽对于地表温度的影响，提出一种适用于GF-5 VIMS载荷设计指标的WVSTES (Water vapor scaling temperature and emissivity separation) 算法。将11景ASTER热红外波段数据，采用光谱转换的方法模拟GF-5 VIMS数据进行地表温度反演，与实测数据验证分析，均方根误差为1.70 K。Ren等[26]利用与Ye类似的方法，获得了GF-5 VIMS模拟数据集，并利用最小二乘法得到TES算法的最佳系数，用于从MSI图像中反演LST和发射率，然后提出了一种结合TES和SW的混合算法来改进反演结果，降低了仪器噪声、减少了大气校正误差的影响。并将ASTER数据光谱转换生成GF-5 VIMS模拟数据进行地表温度反演，经过与实测数据验证分析，地表温度误差小于1 K。由于GF-5发射前无法获取在轨观测数据，上述研究仅限于利用GF-5 VIMS模拟数据，缺少基于GF-5在轨观测数据的应用效果评价。在GF-5卫星发射后，有部分学者基于GF-5 VIMS在轨观测数据开展了地表温度反演研究。Meng等[19]选择了SeeBor大气廓线和GF-5 VIMS光谱响应函数，得到了GF-5 VIMS模拟数据集。基于该数据集进行线性回归得到适用于GF-5 VIMS数据的国家海洋和大气管理局 (NOAA) 算法的系数。同时对GF-5 VIMS在轨观测数据进行地表温度反演，反演结果的均方根误差为1.61 K。

当前GF-5 VIMS地表温度研究面临的主要问题是地表温度反演方法多采用基于MODTRAN获取的模拟数据，该方法能够较为准确地模拟载荷设计指标对应的光谱，但是对于GF-5 VIMS发射后的实际光谱难以精确模拟，且仅侧重于光谱模拟，难以进行空间分辨率的模拟。此外，在基于GF-5 VIMS在轨观测数据的地表温度反演研究中，依然缺少在城市热岛精细监测中的应用研究。

我国的城市化发展正在从粗放扩展式转向集约内涵式，更加注重城市人居环境的舒适程度，因此利用高分辨率数据监测城市热岛对于更好地指导城市规划具有重要意义[27-29]。目前城市热岛的分析研究常采用MODIS (1 km)、Landsat8 (100 m)、ASTER (90 m) 等热红外遥感数据，但这些数据的空间分辨率较低，在小尺度的城市热岛研究中，难以精细表达城市热岛与复杂城市环境的物理结构和表面性质之间的关系，难以满足现有的城市热环境监测需求。因此，本文基于GF-5 VIMS在轨观测数据，采用双通道和四通道两种劈窗算法，反演了2019年3月天津局部地区的地表温度，并利用ASTER地表温度产品，对地表温度结果进行精度评价，并将最优算法结果应用于天津地区的城市热岛分析中，展现了GF-5 VIMS数据的应用潜力。

1　研究区概况及数据源

1.1　研究区概况

天津市是中国的4大直辖市之一，位于华北平原东北部地区，是中国北方重要的经济中心和超大型城市。该区域属于受季风影响的夏热湿润大陆性气候，四季特征明显。2019年年平均气温13.9 ℃，7月是当年最热月份，最高温度达到39.7 ℃[30]。2019年常住人口1561.83万人，城镇化率为83.48%[30]。其经济的快速发展、常住人口逐渐增加、城建区不断扩张以及大量的农田及自然景观被覆盖，呈现出显著的城市热岛效应。

1.2 卫星数据

1.2.1 GF-5 VIMS 在轨观测数据

GF-5 是中国高分辨率对地观测系统重大专项中一颗重要的极轨卫星，于 2018 年 5 月 9 日发射。本文采用 GF-5 VIMS 在轨观测数据 (下文简称 GF-5 VIMS 数据)，GF-5 VIMS 载荷共有 12 个波段，其中 4 个热红外波段 (B9-B12) 空间分辨率为 40 m，中心波长分别为 B9：8200 (8010～8390 nm)；B10：8630 (8420～8830 nm)；B11：10800 (10300～11300 nm) 和 B12：11950 (11400～12500 nm)，4 个波段的光谱响应函数如图 1 所示。可见光、近红外和短波红外波段的空间分辨率为 20 m。

本文使用的 GF-5 VIMS 数据成像时间为 2019 年 3 月 11 日 13：11：03，该数据覆盖天津市中心城区，如图 2 所示。数据来源于中国资源卫星应用中心 (https：//data.cresda.cn)。

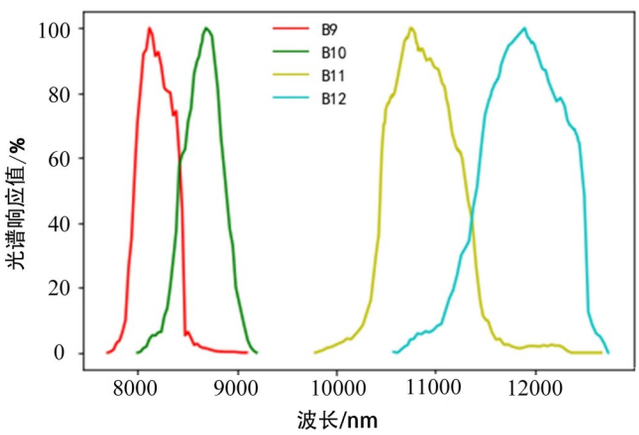

图 1 GF-5 4 个热红外波段的光谱响应函数

Fig. 1 Spectral response function of the four thermal infrared bands of GF-5

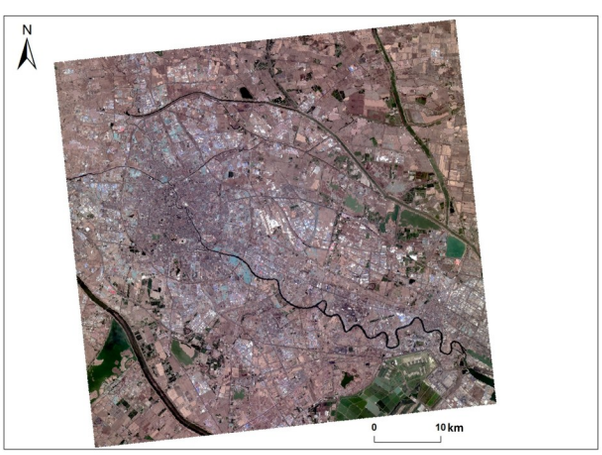

图 2 研究区 GF-5 真彩色影像图

Fig. 2 GF-5 true color image of the study area

1.2.2 ASTER 地表温度产品

本文采用 ASTER 的地表温度产品 (AST_08)[21]，该产品由喷气推进实验室 (JPL) 基于 ASTER 数据利用 TES 算法生产。其空间分辨率为 90 m，绝对精度为 1～4 K，相对精度为 0.3 K。成像时间为 2019 年 3 月 11 日 13：05：25。

1.3　辅助数据

1.3.1　ASTER 地物光谱曲线库

为了支持ASTER应用，JPL、约翰·霍普金斯大学 (JHU) 和美国地质调查局 (USGS) 建立了ASTER地物光谱曲线库，可以从http://speclib.jpl.nasa.gov获取。该光谱库包含了9大类地物共6139个光谱数据，其波长范围为400～15400 nm，光谱分辨率为40 nm。本文选取ASTER地物光谱曲线库中69种裸土光谱曲线和65种植被光谱曲线，用于计算裸土和植被的发射率。

1.3.2　土地覆盖类型数据集

土地覆盖类型数据集 (LULC)[31]是Esri公司基于Sentinel-2 A/B卫星数据解译而成，时间跨度为2017－2021年，每年一期。数据集包括9个类别：水体、林地、湿地、耕地、建成区、裸地、雪/冰、云层、牧场/公园草坪。本文研究区所覆盖的土地覆盖类型为水体、林地、湿地、耕地、建成区、裸地、公园草坪共7种。

2　数据处理及地表温度反演算法

图3展示了本文的研究方法，主要分为地表温度反演和城市热岛分析两大部分。首先获取GF-5 VIMS数据、GF-5热红外光谱响应函数、ASTER光谱库等原始数据，同时对数据进行2.1节中所述的处理，并利用双通道和四通道两种劈窗算法得到GF-5地表温度反演结果，通过与AST_08地表温度产品进行精度评价得出最优结果。最后，结合GF-5地表温度结果、AST_08地表温度产品及土地覆盖类型数据，开展研究区地表温度空间分布和城市热岛分析。

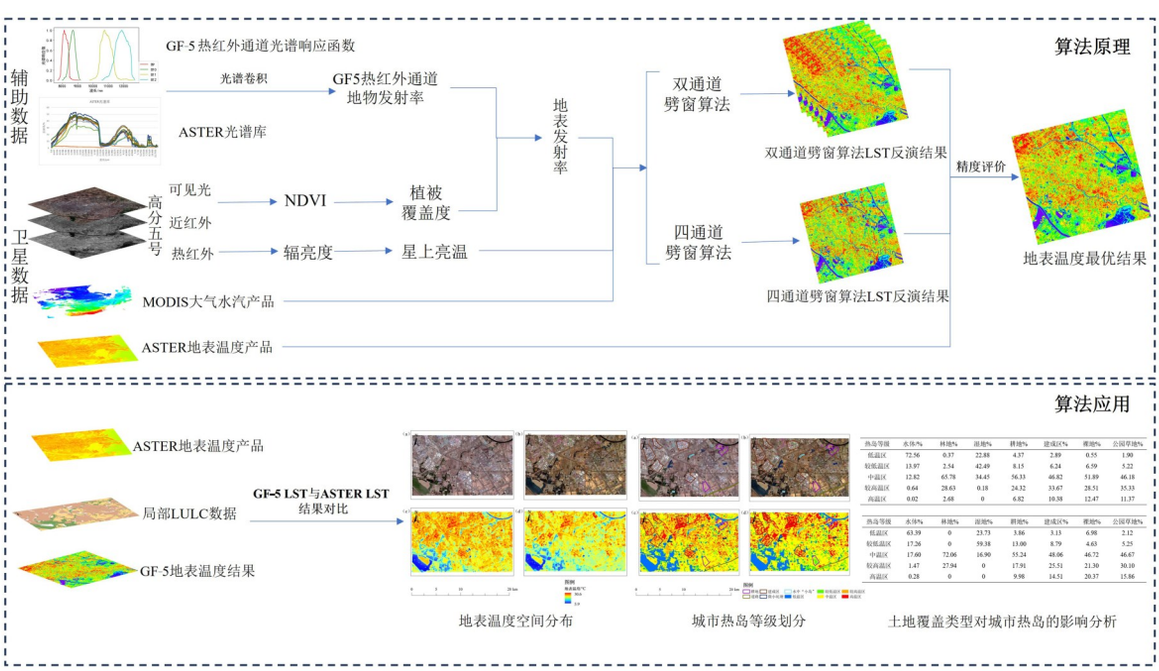

图 3　研究方法流程图

Fig. 3　Flow chart of research methodology

2.1　数据处理

GF-5 VIMS数据进行正射校正，同时将红外和近红外波段重采样至40 m空间分辨率，以确保计算的NDVI与热红外波段数据空间分辨率一致。同时，为确保GF-5 VIMS热红外数据的辐射精度，本文使用交

叉辐射定标的方法获取GF-5 VIMS数据的定标系数。选择与GF-5 VIMS波段设置最为接近的ASTER作为定标基准影像，经过交叉辐射定标获得GF-5 VIMS热红外数据的交叉定标系数(见表1)。

表1 GF-5热红外通道的交叉辐射定标系数值

Table 1 Cross-radiation calibration coefficient values for the thermal infrared channel of GF-5

Band	Gain	Offset
B9	0.00416	−0.35832
B10	0.00309	−0.79400
B11	0.01921	−63.32577
B12	0.02359	−65.13184

2.1.1 计算星上亮温

利用表1中的定标系数对GF-5 VIMS数据进行辐射定标，表达式为

$$L_\lambda = F_{\text{gain}} L_{\text{DN}} + F_{\text{offset}}, \tag{1}$$

式中L_λ是辐射亮度值，F_{gain}和F_{offset}是辐射定标系数，L_{DN}是GF-5影像的原始像素值。

根据普朗克函数推导得出星上亮温计算公式为

$$T_{\text{s}} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}+1\right)}, \tag{2}$$

式中K_1和K_2为特定传感器定标系数(见表2)，表达式分别为

$$K_1 = \frac{c_1}{\lambda^5}, \tag{3}$$

$$K_2 = \frac{c_2}{\lambda}, \tag{4}$$

式中c_1、c_2均为常量，分别为1.19104×10^8 ω·μm^4·m^{-2}·sr^{-1}，14387.7 μm·K；λ为传感器热红外波段的有效波长。

表2 GF-5热红外通道的K_1、K_2系数值

Table 2 K_1 and K_2 coefficient values for each thermal infrared channel of GF-5

Band	K_1	K_2
B9	3229.31	1756.42
B10	2448.72	1661.86
B11	774.41	1320.08
B12	504.19	1211.50

2.1.2 计算地表发射率

本文将GF-5 VIMS热红外波段光谱响应函数与ASTER光谱库中的裸土和植被地物光谱曲线进行光谱卷积，从而获得对应热红外波段的反射率数据。根据发射率和反射率之和等于1可计算并统计每个热红外波段下两种典型地物发射率的均值，并作为对应热红外波段的地物发射率。利用NDVI阈值法[32]计算不同热红外波段下地物对应地表发射率数据，如式(5)所示。通常健康茂盛的植被NDVI值均在0.7以上，裸土的NDVI值约为0.03～0.06[33]，因此将NDVI > 0.7的区域视为纯植被覆盖区域，将NDVI < 0.05的区域视为

纯裸土覆盖区域，其余为两者混合区域。具体表达式分别为

$$\varepsilon_{\lambda}=\begin{cases}\varepsilon_{\lambda\mathrm{s}}, & T_{\mathrm{NDVI}}<0.05\\ \varepsilon_{\lambda\mathrm{v}}P_{\mathrm{v}}+\varepsilon_{\lambda\mathrm{s}}(1-P_{\mathrm{v}}), & 0.05\leqslant T_{\mathrm{NDVI}}<0.7\\ \varepsilon_{\lambda\mathrm{v}}P_{\mathrm{v}}, & T_{\mathrm{NDVI}}\geqslant 0.7\end{cases}, \tag{5}$$

$$P_{\mathrm{v}}=\left[\frac{T_{\mathrm{NDVI}}-T_{\mathrm{NDVI_{min}}}}{T_{\mathrm{NDVI_{max}}}-T_{\mathrm{NDVI_{min}}}}\right]^2, \tag{6}$$

式中 ε_{λ}、$\varepsilon_{\lambda\mathrm{s}}$ 和 $\varepsilon_{\lambda\mathrm{v}}$ 分别表示 GF-5 VIMS 热红外波段地表发射率、裸土和植被的地表发射率，T_{NDVI} 表示像元的 NDVI 值；P_{v} 代表植被覆盖度，T_{NDVImin} 表示区域 NDVI 最小值，T_{NDVImax} 表示区域 NDVI 最大值。

2.1.3　计算大气水汽含量

本文利用 MODIS 大气水汽产品 MOD05 获取大气水汽含量，如图 4 所示，用于地表温度反演。MOD05 空间分辨率为 5 km，产品成像时间为 2019 年 3 月 11 日 11：05：00。对 MOD05 产品原始数据进行重投影，并统计研究区范围内的大气水汽均值，将均值 (0.58 g/cm^2) 作为地表温度反演的水汽含量输入参数。

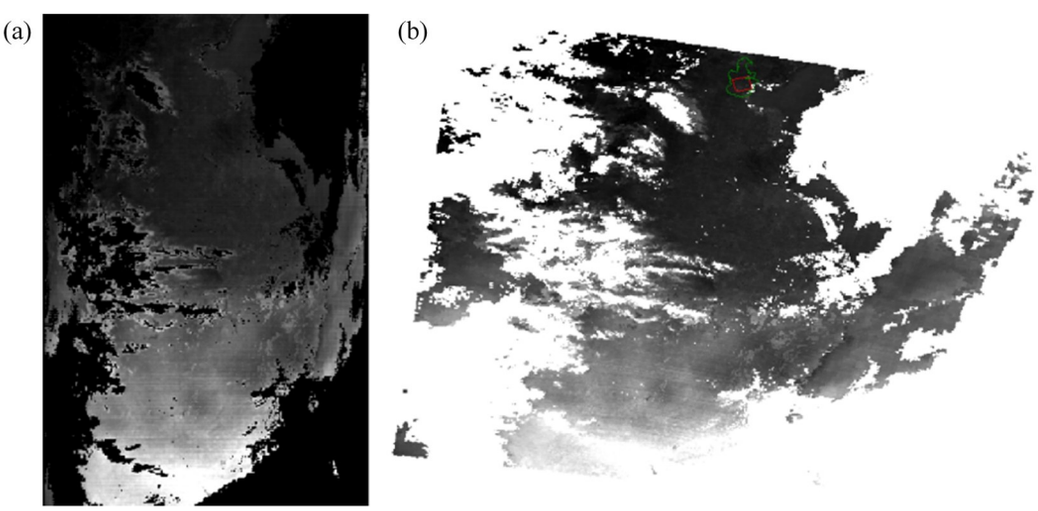

图 4　MODIS 大气水汽产品。(a) 处理前; (b) 处理后

Fig. 4　Atmosphere water vapor products from MODIS. (a) Before treatment; (b) after treatment

2.2　地表温度反演算法

2.2.1　双通道劈窗算法

双通道劈窗算法[17]原理是基于大气吸收引起的辐亮度衰减与两个不同波长处辐亮度差成正比，以此来校正大气影响，通常使用位于 10～12 μm 大气窗口的两个热红外波段。本文在传统双通道劈窗算法基础上，结合 GF-5 VIMS 光谱特征对应的地表发射率与地表温度的关系，形成适用于 GF-5 VIMS 数据的双通道劈窗算法［公式 (7)］。将 GF-5 VIMS 4 个热红外通道两两组合，得出 6 种双通道组合方式 (B9/B10、B9/B11、B9/B12、B10/B11、B10/B12、B11/B12) 来反演地表温度。

$$T_{\mathrm{s}}=\begin{cases}T_1+A(T_1-T_2)^2+B(T_1-T_2)+\left[C_{\mathrm{m1}}(1-\varepsilon)+C_{\mathrm{m2}}\Delta\varepsilon\right]w+C_{\mathrm{m3}}(1-\varepsilon)+C_{\mathrm{m4}}\Delta\varepsilon+C_{\mathrm{m5}} & ,w\leqslant 1\ \mathrm{g/cm^2}\\ \dfrac{T_1+A(T_1-T_2)^2+B(T_1-T_2)+\left[C_{\mathrm{n1}}(1-\varepsilon)+C_{\mathrm{n2}}\Delta\varepsilon\right]w^2+\left[C_{\mathrm{n3}}(1-\varepsilon)+C_{\mathrm{n4}}\Delta\varepsilon\right]w+C_{\mathrm{n5}}(1-\varepsilon)+C_{\mathrm{n6}}\Delta\varepsilon+C_{\mathrm{n7}}}{1-\left[C_{\mathrm{n8}}(1-\varepsilon)+C_{\mathrm{n9}}\Delta\varepsilon\right]w} & ,w>1\ \mathrm{g/cm^2}\end{cases}, \tag{7}$$

式中 T_s 表示地表温度，T_1 和 T_2 分别表示双通道组合中较短波长和较长波长的星上亮温；ε 和 $\Delta\varepsilon$ 分别表示双通道组合中的平均发射率和差值发射率；w 表示大气水汽含量。A、B、C 表示算法的系数和常量，具体数值如表3所示。

表3 公式 (7) 中的系数和常量

Table 3 The coefficients and constants in Eq.(7)

Eq. ($w \leqslant 1$ g·cm^{-2})		Eq. ($w > 1$ g·cm^{-2})	
A	0.28	A	0.28
B	1.45	B	1.45
C_{m1}	16.36	C_{n1}	0.41
C_{m2}	−33.00	C_{n2}	0.55
C_{m3}	37.90	C_{n3}	−80.85
C_{m4}	−92.00	C_{n4}	234.50
C_{m5}	5.18	C_{n5}	71.90
		C_{n6}	−163.00
		C_{n7}	0.09
		C_{n8}	0.23
		C_{n9}	−0.69

2.2.2 四通道劈窗算法

四通道劈窗算法[18]是在广义双通道劈窗算法[13]基础上的改进，通过增加相邻热红外通道亮度温差的二次项，进一步提高了湿热大气条件下地表温度的反演精度。四通道劈窗算法公式为

$$\begin{aligned} T_s = {} & b_0 + \left(b_1 + b_2\frac{1-\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{12}} + b_3\frac{1-\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{12}^{\,2}}\right)\left(\frac{T_1+T_2}{2}\right) + \left(b_4 + b_5\frac{1-\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{12}} + b_6\frac{1-\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{12}^{\,2}}\right)\left(\frac{T_1-T_2}{2}\right) + \\ & \left(b_7 + b_8\frac{1-\varepsilon_{34}}{\varepsilon_{34}} + b_9\frac{1-\varepsilon_{34}}{\varepsilon_{34}^{\,2}}\right)\left(\frac{T_3+T_4}{2}\right) + \left(b_{10} + b_{11}\frac{1-\varepsilon_{34}}{\varepsilon_{34}} + b_{12}\frac{1-\varepsilon_{34}}{\varepsilon_{34}^{\,2}}\right)\left(\frac{T_3-T_4}{2}\right) + \\ & b_{13}(T_1-T_2)^2 + b_{14}(T_3-T_4)^2, \end{aligned} \tag{8}$$

式中 T_1、T_2、T_3、T_4 分别表示GF-5卫星B9、B10、B11和B12的星上亮温；b_i ($i = 0, 1, \ldots, 14$)为不同大气水汽含量范围下的回归系数和常量；ε_{12}、ε_{34}、$\Delta\varepsilon_{12}$、$\Delta\varepsilon_{34}$ 分别表示GF-5卫星B9、B10、B11、B12这4个波段间的平均发射率和差值发射率，具体计算方式为：$\varepsilon_{12}=(\varepsilon_9+\varepsilon_{10})/2$、$\varepsilon_{34}=(\varepsilon_{11}+\varepsilon_{12})/2$、$\Delta\varepsilon_{12}=\varepsilon_9-\varepsilon_{10}$、$\Delta\varepsilon_{34}=\varepsilon_{11}-\varepsilon_{12}$，系数和常量如表4所示。

3 精度评价

根据2.2节中介绍的两种劈窗算法反演得到GF-5 VIMS地表温度结果，并将该结果 (空间分辨率40 m) 重采样至90 m。然后，利用同一天临近时刻且无云覆盖区域的AST_08地表温度产品进行精度评价 (共574.10 km^2，70876个像元)。本文采用皮尔逊相关系数 (Pearson's r) 和均方根误差 (RMSE) 来评价精度。图5表示GF-5 VIMS双通道劈窗算法与AST_08地表温度产品的精度评价结果，图6表示GF-5 VIMS四通道劈窗算法与AST_08地表温度产品的精度评价结果。

从图5中可以看出，B9/B10组合的双通道劈窗算法优于其他组合，RMSE为1.19 K，Pearson's r为0.92。从图6中可以看出，四通道劈窗算法的反演精度为RMSE为2.31 K，Pearson's r为0.85。GF-5 VIMS数据反

表 4　公式 (8) 中的系数和常量

Table 4　The coefficients and constants in Eq.(8)

w/(g·cm^{-2})	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	
[0, 2.5]	5.14	−0.65	−0.06	−0.01	−0.10	0.93	2.01	1.63
	0.26	−0.28	2.98	4.80	−25.33	−0.05	0.31	
[2.0, 3.5]	6.29	0.63	0.05	0.05	−1.34	−2.87	0.38	0.35
	0.09	−0.21	5.17	−0.23	−4.69	−0.01	−0.04	
[3.0, 4.5]	−10.35	1.21	0.05	0.05	−0.94	−5.72	−1.25	−0.17
	0.06	−0.10	5.77	−2.36	−10.10	0.00	−0.08	
[4.0, 5.5]	−28.01	1.74	0.05	0.04	−0.76	−6.22	−0.42	−0.63
	0.04	−0.04	5.48	−2.58	−11.00	−0.01	−0.05	
[5.0, 6.3]	−19.94	2.20	0.04	0.05	−3.24	−8.75	−2.53	−1.13
	0.03	0.02	4.94	−5.17	−8.78	−0.08	−0.09	
[0, 6.3]	5.93	−0.03	0.02	0.06	−2.13	1.13	4.73	1.01
	0.15	−0.13	1.53	−1.08	−19.17	−0.05	0.34	

演结果与AST_08地表温度产品基本吻合，能够较好地反映GF-5成像区域的地表温度情况。B9/B10组合的双通道劈窗算法的精度最高，后续分析将采用该组合反演的结果。

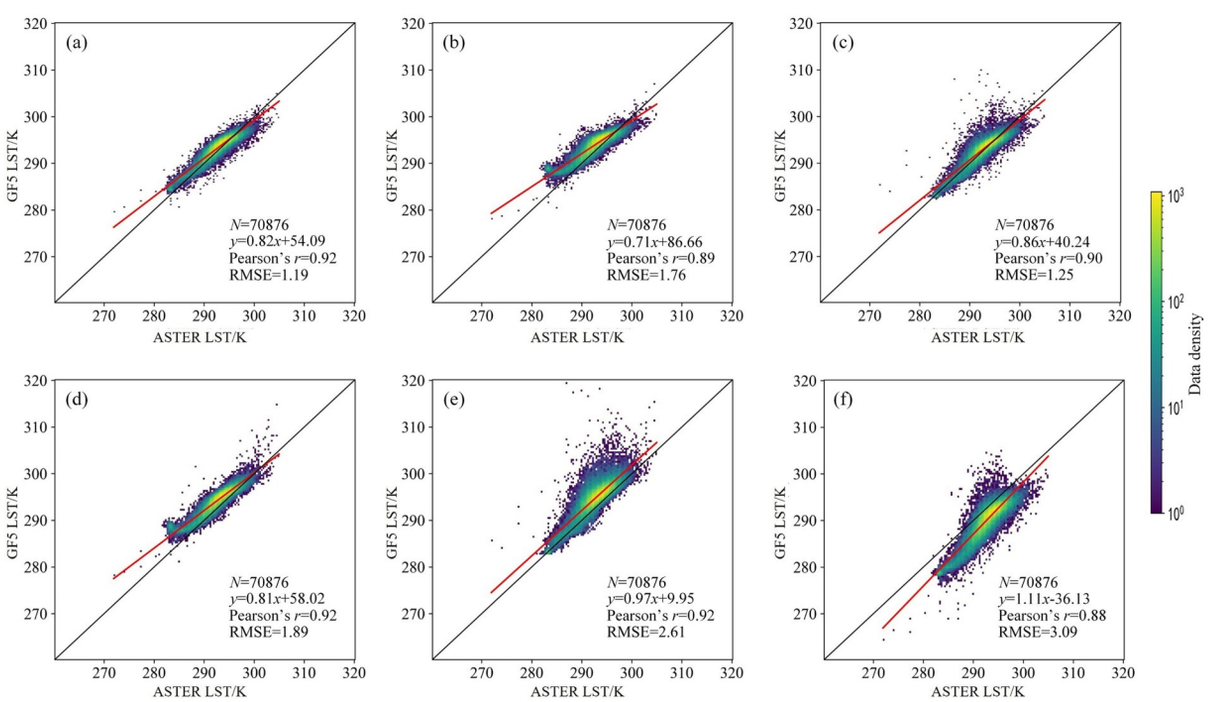

图 5　双通道劈窗算法反演结果与AST_08地表温度产品对比图。

(a) B9/B10; (b) B9/B11; (c) B9/B12; (d) B10/B11; (e) B10/B12; (f) B11/B12

Fig. 5　Comparison of two-channel split-window algorithm inversion results with AST_08 surface temperature product.

(a) B9/B10; (b) B9/B11; (c) B9/B12; (d) B10/B11; (e) B10/B12; (f) B11/B12

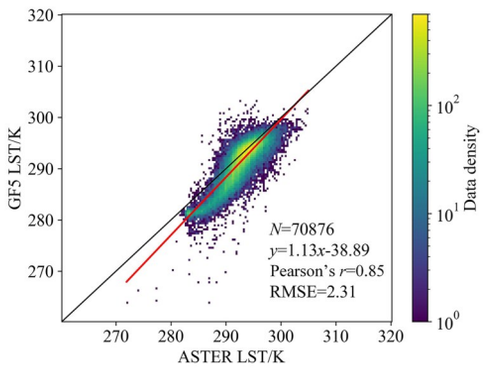

图 6 四通道劈窗算法反演结果与 AST_08 反演结果对比图

Fig. 6 Comparison of the inversion results of the four-channel splitting algorithm with AST_08 surface temperature product

4 算法应用

为了验证 GF-5 高分辨率热红外数据对热岛效应监测的应用能力，选取土地覆盖类型较为丰富的鸭淀水库区域，进行地表温度空间分布、城市热岛等级划分及相关分析研究。同时为直观表达地表温度空间分布情况，采用摄氏度作为温度单位。

4.1 鸭淀水库区域地表温度分布情况

图 7 展示了 GF-5、AST_08 彩色影像和对应的地表温度结果。从图 7 可以看出，与 AST_08 地表温度相比，GF-5 地表温度可以展现同一水域不同空间位置的温度变化，同时可以看到水域内的水中“小岛”或道路

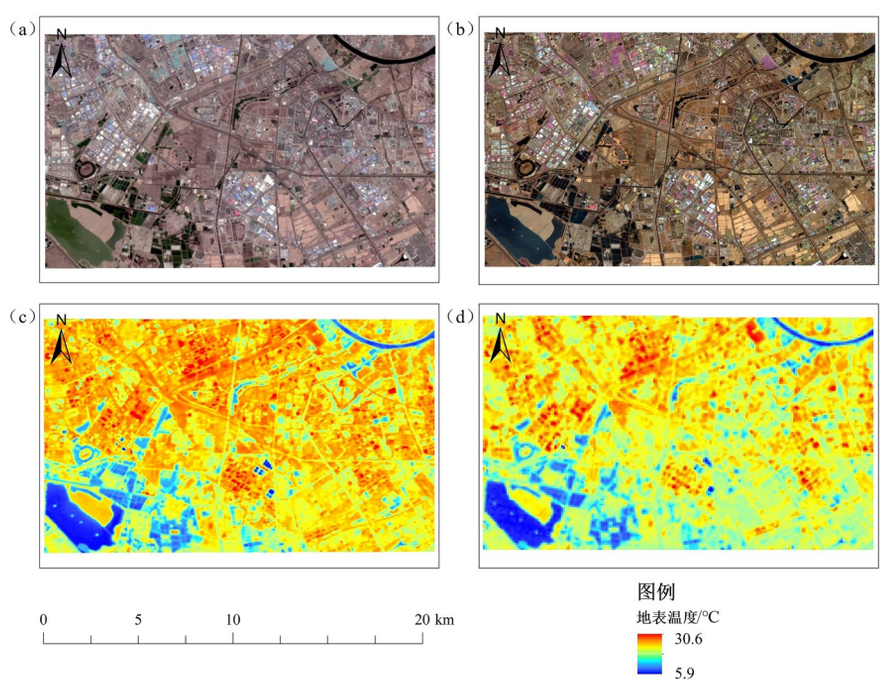

图 7 AST_08 与 GF-5 地表温度反演结果对比。(a) GF-5 真彩色影像图 (20 m); (b) ASTER 假彩色影像图 (15 m); (c) GF-5 地表温度反演结果 (40 m); (d) ASTER 地表温度产品 (90 m)

Fig. 7 Fine-scale comparison of surface temperature inversion results of AST_08 and GF-5. (a) GF-5 true color image (20 m); (b) ASTER false color image (15 m); (c) GF-5 LST retrieval results (40 m); (d) ASTER LST product (90 m)

等微小地物的地表温度情况，有助于分析非水体部分对于所在水域地表温度的影响情况。在建成区土地覆盖类型中，GF-5 地表温度可以看出路网的分布，建筑密集区域可以区分建筑之间的差异，因此GF-5 地表温度具有对建成区内部的温度空间分布精细表达的能力，有助于分析建成区的内部结构差异，并对城区规划建设有重要意义。同样，对于耕地土地覆盖类型而言，更加精细空间尺度下的地表温度能够更详细地展示整片耕地中温度变化趋势，对于指导农业种植生产具有积极的作用。

4.2　鸭淀水库区域城市热岛等级划分

为了充分展示鸭淀水库区域地表温度空间分布特征及研究区热岛效应，本文利用标准差法[34]将地表温度分为5个等级。划分等级及标准如表5所示。其中 T_s 表示鸭淀水库区域地表温度，T_m 表示鸭淀水库区域地表温度的平均值，s 表示标准差。热岛等级空间分布情况如图8所示。

表 5　热岛等级分级标准及占比情况

Table 5　Hot island hierarchical standards and corresponding proportion

温度等级	划分标准	GF-5 所占比例/%	AST_08 所占比例/%
低温区	$T_s \leqslant T_m - s$	13.39	12.03
较低温区	$T_m - s < T_s \leqslant T_m - 0.5s$	7.80	10.91
中温区	$T_m - 0.5s < T_s \leqslant T_m + 0.5s$	44.16	45.31
较高温区	$T_m + 0.5s < T_s \leqslant T_m + s$	26.62	20.36
高温区	$T_s > T_m + s$	8.03	11.39

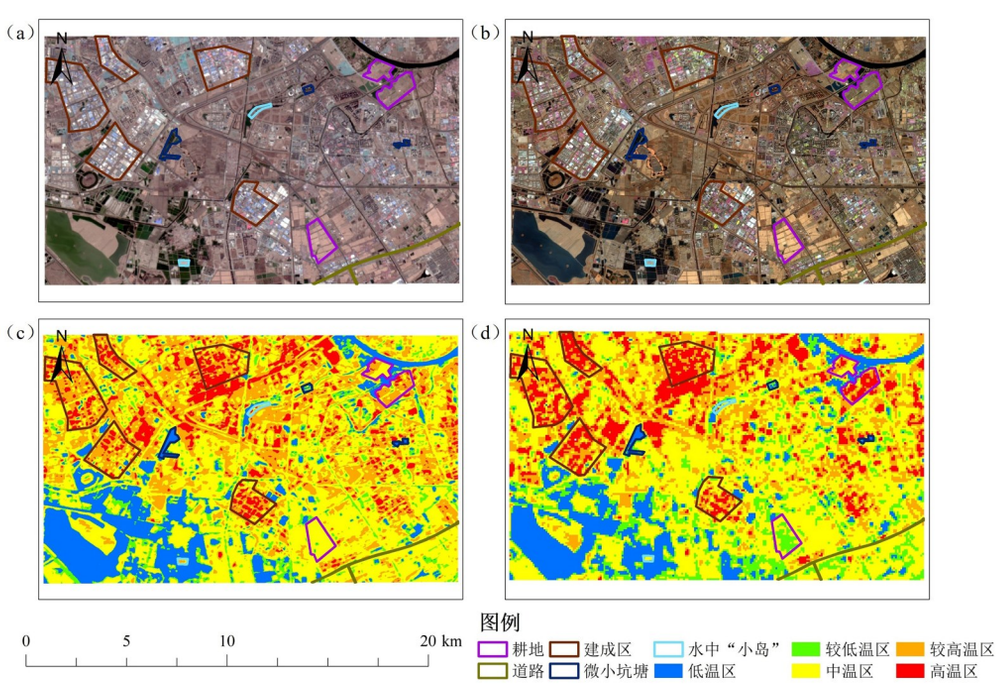

图 8　AST_08 与 GF-5 城市热岛等级对比。(a) GF-5 真彩色影像图 (20 m); (b) ASTER 假彩色影像图 (15 m); (c) GF-5 城市热岛分级; (d) ASTER 城市热岛分级

Fig. 8　Comparison of AST_08 and GF-5 urban heat island rating. (a) GF-5 true color image (20 m); (b) ASTER false color image (15 m); (c) GF-5 urban heat island grading; (d) ASTER urban heat island grading

从表5和图8可以看出，鸭淀水库区域呈现出较为明显的城市热岛效应，建成区的增温效果明显，水体对于城市热岛具有明显的降温效应，GF-5结果中不同温区之间的边界更明显。但是GF-5结果与AST_08结果在较低温区、较高温区及高温区的比例相差较大，均在3%以上。这主要是由于AST_08空间分辨率较低，无法将水中“小岛”或微小坑塘等微小地物类型的地表温度准确识别划分，造成温度混合像元相对增多，导致同一土地覆盖类型内部温度变化无法得到精细表达。

4.3 鸭淀水库区域土地覆盖类型对城市热岛的影响分析

鸭淀水库区域土地覆盖类型如图9所示，综合划分5个热岛温度等级和土地覆盖类型数据，统计各类地物在热岛温度等级内的所占比例，如表6 (GF-5) 和表7 (AST_08) 所示。

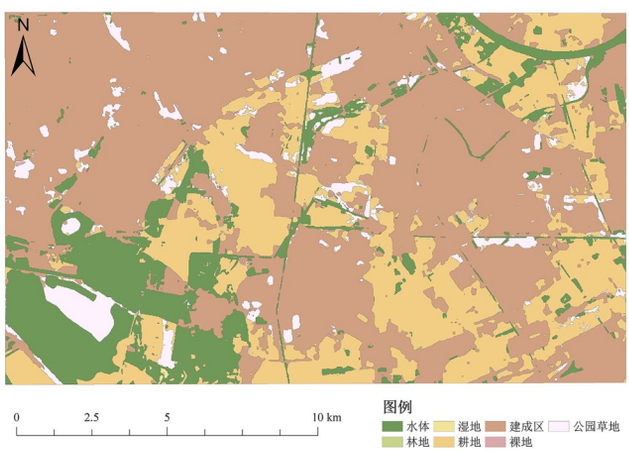

图 9 鸭淀水库区域土地覆盖类型

Fig. 9 Land cover category in the Yadian Reservoir area

表 6 各类地物在不同热岛温度等级所占比例 (GF-5)

Table 6 The proportion of each type of feature in different heat island temperature classes (GF-5)

热岛等级	水体/%	林地/%	湿地/%	耕地/%	建成区/%	裸地/%	公园草地/%
低温区	72.56	0.37	22.88	4.37	2.89	0.55	1.90
较低温区	13.97	2.54	42.49	8.15	6.24	6.59	5.22
中温区	12.82	65.78	34.45	56.33	46.82	51.89	46.18
较高温区	0.64	28.63	0.18	24.32	33.67	28.51	35.33
高温区	0.02	2.68	0	6.82	10.38	12.47	11.37

表 7 各类地物在不同热岛温度等级所占比例 (AST_08)

Table 7 The proportion of each type of feature in different heat island temperature classes (AST_08)

热岛等级	水体/%	林地/%	湿地/%	耕地/%	建成区/%	裸地/%	公园草地/%
低温区	63.39	0	23.73	3.86	3.13	6.98	2.12
较低温区	17.26	0	59.38	13.00	8.79	4.63	5.25
中温区	17.60	72.06	16.90	55.24	48.06	46.72	46.67
较高温区	1.47	27.94	0	17.91	25.51	21.30	30.10
高温区	0.28	0	0	9.98	14.51	20.37	15.86

从表6、7的统计数据可以看出，对鸭淀水库地区城市热岛贡献最大的3种土地覆盖类型均为建成区、裸地及公园草地，贡献率均在90% 以上。水体和湿地低温和较低温区占比均在70% 以上，因此水体和湿地对城市热岛有降温作用。由于成像时间为3月11日，该区域内的林地、耕地与公园草地并未完全处于绿色植被覆盖情况，其实际的土地覆盖表现出裸地的特征，因此林地、耕地与公园草地会出现异常的增温效应。两表的差异在于林地、建成区、裸地之间的温区占比。林地区域3月中旬的树木尚未发芽，温区会表现为裸地或较少植被覆盖情况。因为GF-5空间分辨率较高，林区内部信息表达较为详细，所以林地在低温、较低温区有2.91% 的占比，展现了林地作为植被覆盖区域对城市热岛应有的降温作用。建成区内地物类型较为丰富，由于AST_08空间分辨率相对较低，造成温度混合像元较多，导致AST_08结果中建成区的高温区占比相较于GF-5结果偏高 (高4.13%)，较高温区占比偏低 (低8.16%)，这在一定程度上也展示了建成区范围内的其他要素 (道路、绿化、水池)对周围房屋温度产生一定的增温或抑制作用。裸地研究区范围内的裸地多与坑塘水体相邻，造成在低空间分辨率下温度混合像元增多，导致AST_08会有11.61% 的低温、较低温区占比。

5　结　论

目前已有两颗GF-5卫星 (01A、02星) 在轨运行，且积累了大量的观测数据，为GF-5应用奠定了数据基础。本文采用两种适用于GF-5 VIMS的劈窗算法反演地表温度，利用AST_08地表温度产品进行精度评价，选择反演精度较高的算法结果，结合土地覆盖类型对研究区进行热岛效应分析，展现了GF-5 VIMS数据获取地表温度能力和城市热环境监测的应用潜力。

研究结果表明，交叉辐射定标后的GF-5 VIMS数据的劈窗算法反演最佳波段组合为B9/B10，RMSE为1.19 K，Pearson's *r* 为0.92，能够较为准确地监测和分析城市热岛效应的空间分布及产生原因。同时，基于GF-5 VIMS数据反演的地表温度比AST_08地表温度产品更能够展现地表真实细节，能够详细地反映不同土地覆盖类型对于地表温度的影响，有助于城市热岛精细监测，为我国城市规划建设决策提供数据支持。

参考文献:

[1] Zhao E, Gao C, Jiang X, *et al*. Land surface temperature retrieval from AMSR-E passive microwave data [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): A940.

[2] Zheng X, Li Z L, Nerry, *et al*. A new thermal infrared channel configuration for accurate land surface temperature retrieval from satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111216.

[3] Lambin E F, Ehrlich D. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover changes analysis [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(3): 463-487.

[4] Chen J, Yang X Y. A study of remote sensing monitoring of urban thermal environment based on ASTER data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011, 23(3): 100-105.
陈 健, 杨旭媛. 基于ASTER数据的城市热环境遥感监测研究 [J]. 国土资源遥感, 2011, 23(3): 100-105.

[5] Weng Q H. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 34-49.

[6] Song X B, Huang H, Guo J, *et al*. Research on the impact of urban morphology on thermal environment in summer: A case of Tianjin central city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(11): 2165-2174.
宋鑫博, 黄 鹤, 郭 军, 等. 城市形态对夏季热环境影响研究: 以天津中心城区为例 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2165-2174.

[7] Li Z, Hu X. Evolution of heat island pattern and its relationship with NDVI in Chengdu [J]. *Environmental Ecology*, 2022, 4 (Sup1): 71-75.
李 喆, 胡 瑄. 成都市热岛格局演变及其与NDVI的关系 [J]. 环境生态学, 2022, 4(Sup1): 71-75.

[8] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2003, 108(D22): 4688.

[9] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3719-3746.

[10] Li H, Liu Q, Zhong B, *et al*. A single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from HJ-1B/IRS data based on a parametric model [C]. *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, July 25-30, 2010, Honolulu, Hawaii, USA. IEEE, 2010: 2448-2451.

[11] Becker F, Li Z L. Towards a local split window method over land surfaces [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(3): 369-393.

[12] Sobrino J A, LI Z L, Stoll M P, *et al*. Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(11): 2089-2114.

[13] Wan Z M, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 892-905.

[14] Sun D, Pinker R T. Retrieval of surface temperature from the MSG-SEVIRI observations: Part I. methodology [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(23): 5255-5272.

[15] Du C, Ren H, Qin Q, *et al*. A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 647-665.

[16] Liu C, Li H, Du Y M, *et al*. Practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from Himawari 8 AHI data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(5): 702-714.
刘 超, 历 华, 杜永明, 等. Himawari 8 AHI 数据地表温度反演的实用劈窗算法 [J]. 遥感学报, 2017, 21(5): 702-714.

[17] Chen Y Y. *Algorithm Development for Retrieving Surface Temperaturefrom Thermal Infrared Data Onboard the Chinese Gaofen-5 Satellite* [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
陈媛媛. 高分五号热红外数据地表温度反演算法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.

[18] Ye X, Ren H, Liu R, *et al*. Land surface temperature estimate from Chinese Gaofen-5 satellite data using split-window algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(10): 5877-5888.

[19] Meng X C, Cheng J, Zhou S G. Retrieving land surface temperature from high spatial resolution thermal infrared data of Chinese Gaofen-5 [C]. *IGARSS 2019 -2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, July 28-August 2, 2019, Yokohama, Japan. IEEE, 2019: 6448-6451

[20] Zhao E Y, Gao C X, Yao Y Y. New land surface temperature retrieval algorithm for heavy aerosol loading during nighttime from Gaofen-5 satellite data [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2583-2599.

[21] Gillespie A, 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.

[22] Wang H S, Xiao Q, Li H, *et al*. Temperature and emissivity separation algorithm for TASI airborne thermal hyperspectral data [C]. *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control*, September 9-11, 2011, Ningbo, China.

ICECC, 2011: 1075-1078.

[23] Yang Y K, Li H, Du Y M, *et al*. A temperature and emissivity separation algorithm for Chinese Gaofen-5 satellite data [C]. *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, July 22-27, 2018, Valencia, Spain. IEEE, 2018: 2543-2546.

[24] Yang Y K, Li H, Sun L, *et al*. Land surface temperature and emissivity separation from GF-5 visual and infrared multispectral imager data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(6): 1132-1146.
杨以坤, 历 华, 孙 林, 等. 高分五号全谱段光谱成像仪地表温度与发射率反演 [J]. 遥感学报, 2019, 23(6): 1132-1146.

[25] Zhao S H, Liu S H, Wu D, *et al*. Potential application analysis of GF-5 satellite in ecology and environment fields [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 115-120.
赵少华, 刘思含, 吴 迪, 等. "高分五号"卫星生态环境领域应用前景 [J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 115-120.

[26] Ren H, Ye X, Liu R, *et al*. Improving land Surface temperature and emissivity retrieval from the Chinese Gaofen-5 satellite using a hybrid algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(2):1080-1090.

[27] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 370-384.

[28] Liu L, Zhang Y Z. Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(7): 1535-1552.

[29] Yusuf Y A, Pradhan B, Idrees M O. Spatio-temporal assessment of urban heat island effects in Kuala Lumpur Metropolitan City using landsat images [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2014, 42(4): 829-837.

[30] Tianjin Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Tianjin. *Tianjin Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 天津统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.

[31] Karra K, Kontgis C, Statman-Weil Z, *et al*. Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning [C]. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. July 11-16, 2021, Brussels, Belgium. IEEE, 2021: 4704-4707.

[32] Wang D Z, Li R J, Gao M F, *et al*. Land surface temperature retrieval and validation of GF-5 satellite [J]. *China Agricultural Informatics*, 2020, 32(2): 27-35.
王殿中, 李任君, 高懋芳, 等. “高分五号”卫星地表温度反演与验证 [J]. 中国农业信息, 2020, 32(2): 27-35.

[33] 覃志豪, 李文娟, 徐 斌, 等. 利用Landsat TM6反演地表温度所需地表辐射率参数的估计方法 [C]. 第十四届全国遥感技术学术交流会论文选集, 青岛, 2003: 138-146.

[34] Yu D, Zhou W J, Tan J, *et al*. Temporal and spatial variation characteristics of land surface temperature in Dongting Lake Region, Hunan Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1799-1805.
余 德, 周卫军, 谭 洁, 等. 洞庭湖区地表温度反演及其时空变化特征 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1799-1805.