

基于 Landsat8 卫星影像的地表温度反演及福州春季城市热岛效应分析

乐通潮^{1,2}, 聂森¹, 潘辉^{3*}, 李丽纯⁴

(1. 福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012; 2. 福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室, 福建 福州 350012;
3. 闽江学院, 福建 福州 350108; 4. 福建省气象科学研究所, 福建 福州 350001)

摘要:为研究福州春季城市热岛空间分布特征,利用 2018 年 3 月 11 日 Landsat8 卫星影像,运用辐射传导方程法和普适性单通道算法对研究区进行地表温度反演,采用地面气象监测站实测的气温对 2 种方法的反演精度进行比较,并统计分析不同行政区地表温度等级特征。结果表明,这 2 种方法反演的地表温度的空间分布特征基本一致,辐射传导方程法精度优于普适性单通道算法。福州存在明显的城市热岛现象,高温区及次高温区为城市热岛效应影响区域,该区域为老城区及城市扩张的城市建设区,其中高温区主要分布于福州滨海新城、闽侯县(上街镇、南屿镇、南通镇)和仓山区等新近开发的建筑物密集区和裸地,低温和次低温区主要分布于森林和水体。为缓解城市热岛现象,城市开发建设中应保持一定面积的绿地和水体。

关键词:地表温度反演;辐射传导方程法;单通道算法;城市热岛

中图分类号:S757 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)05-0154-07

Land Surface Temperature Retrieval and Urban Heat Island Effect Based on Landsat8 Image in Fuzhou City

LE Tong-chao^{1,2}, NIE Sen¹, PAN Hui^{3*}, LI Li-chun⁴

(1. Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, Fujian, China; 2. Fujian Provincial Key Lab of Forest Silviculture and Forest Product Processing & Utilization, Fuzhou 350012, Fujian, China; 3. Minjiang University, Fuzhou 350108, Fujian, China;
4. Institute of Meteorological Science of Fujian Province, Fuzhou 350001, Fujian, China)

Abstract: In order to research the spatial features of urban heat island in Fuzhou City, the land surface temperature (LST) retrieval was conducted from remote sensing Landsat8 images acquired on March 11, 2018 based on radioactive transfer equation algorithm and single channel method. The results were compared with the measured temperature of some meteorological stations in the study area. The levels of LST in different administrative districts were statistically analyzed. The research results showed that the spatial distribution features of LSTs from two algorithms were basically identical. However, the radioactive transfer equation algorithm was better than the single channel method. It was found that there existed obvious heat island effect in Fuzhou City. The areas with high and subhigh LSTs were located in old city zones and newly expanded city zones, which were dominant areas for heat island effect. In the view of administrative districts, areas with high LST were in Binhaxincheng, some townships of Minhou County (Shangjie, Nanyu, Nantong) and Cangshan. Areas with low LST were distributed in forest zones and water bodies, indicating that it is very important to maintain a certain area of green land and water body during city development to alleviate the phenomenon of urban heat island.

收稿日期:2018-10-08 修回日期:2018-12-28
基金项目:福建省社会发展引导性项目(2015Y0074);福建省科研院所专项(2016R1010-8)。
作者简介:乐通潮,男,博士,高级工程师,研究方向:林业 3S 技术应用、湿地生态等。E-mail:toncher@163.com
* 通信作者:潘辉,男,博士,教授,研究方向:森林经理、生态学等。E-mail:332088289@qq.com

Key words: land surface temperature retrieval; radioactive transfer equation algorithm; single channel method; urban heat island

近年来,城市化建设的快速发展使得城市热岛现象十分明显,被认为典型的城市气候特征之一^[1]。城市热岛是指城镇区域气温高于郊区,城区地表温度空间上犹如一个温暖的岛屿,是城市气象最典型的气候特征之一^[2],由此引起的城市高温会加重城市空气污染,影响人们的健康,阻碍生活质量的提高^[3]。然而,有关城市热岛范围的界定是城市热场空间分布研究者面临的共同问题^[4]。城市热岛范围的划分一般通过地表温度等级法,常用平均值和标准差作为阈值确定城市热场的空间分布。地表温度(land surface temperature)是地球系统水量和能量平衡的重要因素,在全球气候变化、监测和预防灾害、天气预报、城市建设等领域有着重大的意义^[5-7],也是城市热岛效应分析研究的重要指标。随着卫星影像数据在各个领域中广泛应用,遥感技术的发展迅猛,热红外遥感技术的进步,使大范围、实时、便捷地监测地表温度成为现实^[8],尤其 Landsat 系列卫星影像的广泛应用对推动遥感技术的发展起到了重要作用^[9],自 20 世纪 60 年代始,国内外学者探索遥感数据的地表反演方法,相继提出单波段法、多波段法、单波段多角度法和多波段多角度法等算法^[10-12]。由于多波段法的地表温度反演参数依赖于较多的气象资料,而单波段法需要较少的气象资料,并且只需要一个热红外波段即可反演地表温度,简单易行。2017 年长乐撤市设区并入福州,市区面积大幅增加,同时与福州市区毗邻的闽侯县部分乡镇也是城市建设密集区,这些区域连同周边的郊区整体将影响福州的热环境。本研究以福州城区及周边郊区为对象,利用 2018 年 3 月的 Landsat8 卫星遥感数据,采用辐射传导方程法和普适性单通道法对研究区的地表温度进行反演,对结果进行比较分析,探讨福州春季城市热岛效应影响区域的空间分布特征。

1 研究区概况

研究区包括福州 6 区(鼓楼区、台江区、晋安区、仓山区、马尾区和长乐区)及闽侯县部分乡镇(荆溪镇、甘蔗街道、上街镇、竹岐乡、南屿镇、南通镇、祥谦镇、青口镇)等人口聚集区域,地理位置在 118°56′—119°44′E、25°42′—26°25′N,总面积 2 778.69 km²。该区域位于闽江下游的河口盆地,闽江从西北往东南流,在侯官处开始分汊 2 支:北支穿过福州市区至马尾港称北港;南支绕南台岛南侧,至江口接纳大樟溪后出峡兜至马尾称南港(乌龙江)。南、北港汇合

后折向东北方向流向东海。四周分布有 600~1 000 m 的鼓山、旗山、五虎山、莲花峰等丘陵山地。全年温暖湿润,年平均气温 16℃~20℃,年降水量 900~2 100 mm,降水多集中在 3—9 月。随着城市化水平的提高,福州城区范围急剧扩大,城市热岛效应越来越明显,福州已成了新 4 大“火炉”之首^[13-14]。本研究以城市建设区及其周围的郊区为例,具体位置见图 1。

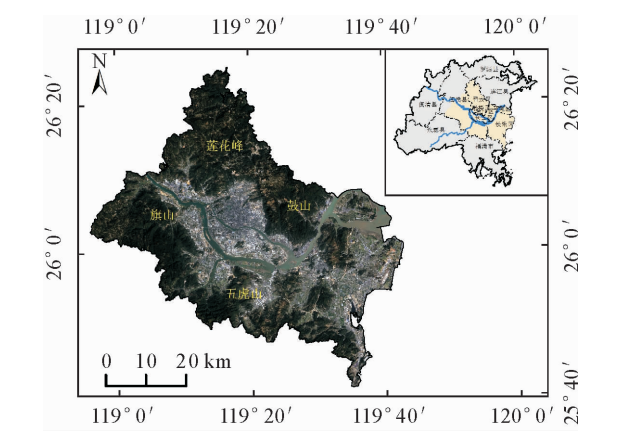


图 1 研究区位置与 Landsat 8 影像
Fig. 1 Location of the study area and Landsat 8 data

2 数据及预处理

采用 2018 年 3 月 11 日的 Landsat8 卫星遥感影像数据(行列号为 119/042),该影像无云,质量较好。该卫星是美国 NASA 于 2013 年 2 月 11 日发射,载有陆地成像仪(OLI)和热红外传感器(TIRS)^[15],其中 OLI 传感器包含 9 个波段,除了具有 Landsat7 所有光谱波段之外,还增加了深蓝波段和卷云波段。TIRS 有 2 个热红外波段,波段 10 和波段 11。Landsat8 卫星数据参数见表 1。

研究区卫星过境时的气象参数诸如温度、相对湿度、大气压强等数据,通过中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)查询。研究区的边界矢量图由全省行政区划矢量图提取。Landsat8 卫星影像数据产品 Level 1T,已进行了基于地形的几何校正,投影坐标系为 WGS84_1984 横轴墨卡托投影(UTM)50N 带。部分地面气象监测站实测气温数据由福建省气象局提供。

Landsat8 卫星影像数据的预处理包括:辐射定标,使用 ENVI 软件自带的辐射定标工具对各个波段数据进行辐射定标,将像元灰度值转换为辐射强度值;大气校正,OLI 传感器(1~7 波段)数据使用

FLAASH 模块进行大气校正, TIRS 传感器(10~11 波段)热红外数据使用 Thermal Atm Correction 工具进行热红外数据的大气校正; 研究区卫星影像数据裁剪, 利用研究区范围的矢量图生成掩模模块(Masking)来完成。上述操作均在 ENVI 5.1 支持下实现。

表 1 Landsat8 数据参数

Table 1 Parameter comparison of Landsat8 image

传感器	波段系列	波段	波长/ μm	空间分辨率/ m
OLI	1	深蓝	0.43~0.45	30
	2	蓝	0.45~0.51	30
	3	绿	0.53~0.59	30
	4	红	0.64~0.67	30
	5	近红外	0.85~0.88	30
	6	短波红外	1.57~1.65	30
	7	短波红外	2.11~2.29	30
	8	全色	0.50~0.68	15
	9	卷云	1.36~1.38	30
TIRS	10	热红外	10.6~11.19	100
	11	热红外	11.5~12.51	100

3 地表温度反演方法

利用单一红外波段数据针对 Landsat 卫星遥感数据的地表温度反演算法具有代表性的主要有辐射传导方程法、普适性单通道算法、单窗算法等^[16], 这 3 种算法均需要实时大气参数和地表比辐射率。基于 Landsat8 卫星影像的地表温度反演算法工作流程见图 2。

3.1 辐射传导方程法

辐射传导方程法 (radioactive transfer equation, RTE) 又称大气校正法, 根据卫星热红外传感器接收到的热辐射能量的构成来推算地表温度, 卫星传感器接收到的热辐射亮度值表达即辐射传导方程。根据传感器接收时的大气探测数据、大气廓线数据来估测大气对地表热辐射的影响, 并从传感器观测的热辐射总量扣减该部分的大气影响, 从而得到地表热辐射量, 假设地表和大气对热辐射具有朗伯体性质, 即可转换获得相应的地表温度^[17]。

$$R_{\lambda} = [\epsilon \cdot P(T_s) + (1 - \epsilon)R_{\downarrow}] \cdot \tau + R_{\uparrow}$$
 (1)

式中, R_{λ} 为卫星传感器接收到的热辐射强度, ϵ 为地表比辐射率, $P(T_s)$ 为用 Planck 函数表示的黑体热辐射强度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$), T_s 为地面真实温度 (K), τ 为热红外波段在大气的透射率, R_{\downarrow} 和 R_{\uparrow} 分别为大气下行和上行辐射亮度。

由式(1)可以得到:

$$P(T_s) = \frac{R_{\lambda} - R_{\uparrow} - \tau \cdot (1 - \epsilon)R_{\downarrow}}{\tau \cdot \epsilon}$$
 (2)

τ 、 R_{\downarrow} 、 R_{\uparrow} 3 个参数可以根据实时大气剖面探测数据用通过 NASA 官网 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 的模型计算生成, 需要输入卫星过境时间、影像中心坐标、当地气压、气温、湿度等气象数据。本研究 Landsat8 卫星影像成像时间为格林尼治标准时间 2018 年 3 月 11 日 2 时 32 分, 影像中心点坐标为 25.984 5 N 和 118.909 11 E, 气压 1 112 hPa, 相对湿度 50%。计算得到 B10 波段的大气透射率 τ 为 0.91, R_{\downarrow} 为 $1.16 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, R_{\uparrow} 为 $0.67 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。

根据普朗克定律反函数, 得到地表温度:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1)}$$
 (3)

式中, K_1 、 K_2 为常数, 可由元数据 MTL 文件查询获得, Landsat8 TIRS 波段 10 的 $K_1 = 774.885 3$, $K_2 = 1 321.078 9$ 。

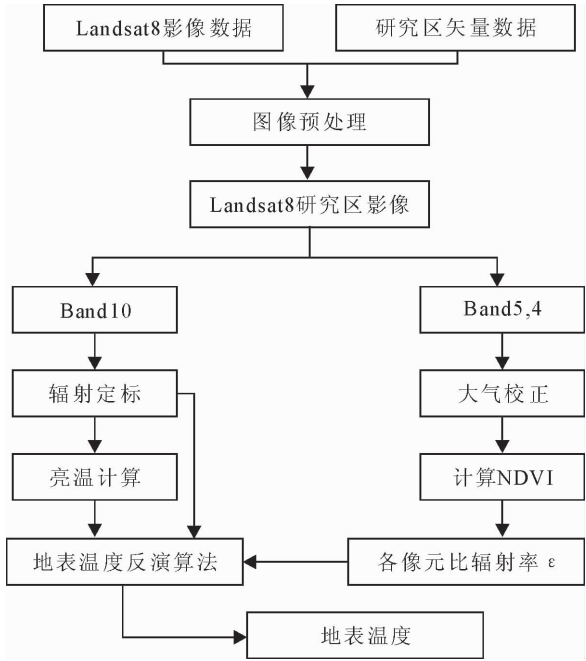


图 2 地表温度反演工作流程

Fig. 2 The flow chart of land surface temperature retrieval

3.2 普适性单通道算法

普适性单通道算法 (single channel method, SCM) 适用于单波段热红外波段的卫星遥感影像数据的地表温度反演算法, 是 J. C. Jimnez-Munoz 等^[11]在 2003 年提出。利用 Landsat TM/ETM 的热红外波段, 只需要地表比辐射率和大气水汽含量 2 个参数即可反演地表温度, Jimnez Munoz 于 2014 年增加了 Landsat8 卫星影像数据的大气参数^[18]。计算公式如下:

$$T_s = \gamma[\epsilon^{-1} \cdot (\varphi_1 \cdot R_{\text{sensor}} + \varphi_2) + \varphi_3] + \delta$$
 (4)

式中, R_{sensor} 是卫星传感器测得的辐射强度 ($W \cdot m^{-2}$)

• $\text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), $\gamma, \delta, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 是中间变量, 分别由以下公式计算:

$$\gamma = 1 / [c_2 \cdot R_{\text{sensor}} \cdot \left(\lambda^4 \cdot \frac{R_{\text{sensor}}}{c_1} + \frac{1}{\lambda} \right) / T_{\text{sensor}}^2] \quad (5)$$

$$\delta = T_{\text{sensor}} - \gamma \cdot R_{\text{sensor}} \quad (6)$$

$$\varphi_1 = 0.040\,19\omega^2 + 0.029\,16\omega + 1.015\,23 \quad (7)$$

$$\varphi_2 = -0.383\,33\omega^2 - 1.502\,94\omega + 0.203\,24 \quad (8)$$

$$\varphi_3 = 0.009\,18\omega^2 + 1.360\,72\omega - 0.275\,14 \quad (9)$$

式中, c_1, c_2 是 Plank 函数的常量; $c_1 = 1.191\,04 \times 10^8 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$, $c_2 = 1.438\,77 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$; T_{sensor} 是卫星传感器探测到的像元亮度温度(K); ω 是大气水汽含量, 估计大气水汽含量为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$; λ 是有效作用波长, Landsat 8 波段 10 的有效作用波长为 $10.9 \mu\text{m}$ 。

3.3 地表比辐射率计算

地表比辐射率是指物体在温度 T 。混合模型认为地表由 3 种特征地物构成: 水体、城镇建设区和植被, Landsat8 卫星 OLI 传感器影像的波段 5(近红外波段)和波段 4(红波段)计算 NDVI 值, 根据不同的特征地物的 NDVI 阈值进行地表分类并赋值比辐射率。

- 1) 当 $\text{NDVI} \leq -0.35$, 认为像元是水体, 比辐射率取 0.992;
- 2) 当 $-0.35 < \text{NDVI} \leq 0$, 认为像元是由城镇建设区覆盖比辐射率取 0.9731;
- 3) 当 $0 < \text{NDVI} \leq 0.4$, 认为像元是植被和城镇建设区构成的混合像元, 地表比辐射率:

$$\epsilon = 0.004 \cdot P_v + 0.984\,4 \quad (10)$$

$$P_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_s}{\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s} \quad (11)$$

式中, P_v 为植被覆盖度, $\text{NDVI}_v, \text{NDVI}_s$ 分别为植被和裸地的 NDVI 值。

- 4) 当 $\text{NDVI} > 0.4$, 认为像元由植被构成, 比辐射率取 0.984 4。

4 结果与分析

利用 Landsat8 卫星数据(热波段采用第 10 波段)运用辐射传导方程法、普适性单通道算法分别得到福州城区地表温度的反演结果, 采用地面监测站实测温度进行检验, 分析福州热环境空间分布格局。

由图 3、图 4 可知, 辐射传导方程法和普适性单通道算法反演的地表温度空间分布状况大致相同, 只是变化的范围略微差异。地表温度依次为: 城市建设区 > 裸地 > 耕地 > 林地 > 水体。研究区的地表温度由城区中心地带向外缘逐渐降低, 其中城市中心区的地表温度明显比周边地带高, 有明显的城市

热岛效应, 水体温度最低呈现“冷岛”效应。由表 2 可知, 普适性单通道算法反演的地表温度比辐射传导方程法数值大些, 最低温大 2.3°C , 最高温大 2°C , 平均温大 2.7°C 。

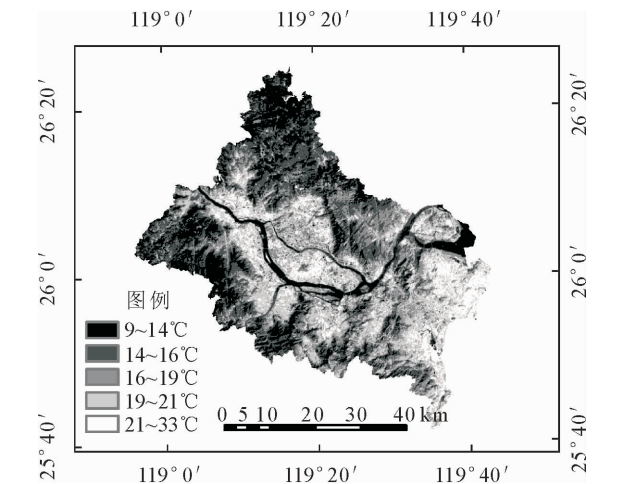


图 3 福州城区辐射传导方程法地表温度影像
Fig. 3 Land surface temperature image based on radioactive transfer equation in Fuzhou city

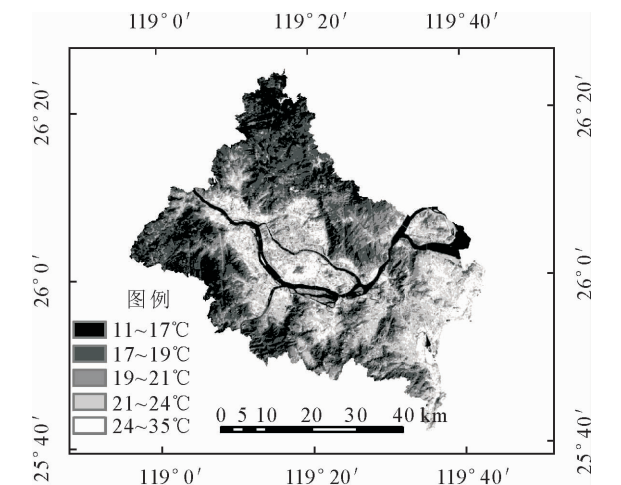


图 4 福州城区普适性单通道算法地表温度影像
Fig. 4 Land surface temperature image based on single channel method in Fuzhou city

为研究不同地表温度反演算法对不同的土地覆盖类型的差异, 利用决策树法提取同幅 Landsat8 影像的城市建设区、自然地表(植被裸地混合, 主要包括林地、耕地等)和水体 3 种土地覆盖类型对反演的温度影像进行掩膜和统计分析。辐射传导方程法反演的地表温度影像中, 水体像元的平均温度为 14.6°C , 城市建设区像元的平均温度为 19.5°C , 自然地表像元的平均温度为 16.8°C ; 普适性单通道算法反演的地表温度影像中, 水体像元的平均温度为 16.5°C , 城市建设区像元的平均温度为 23.6°C , 自然地表像元的平均温度为 19.2°C 。普适性单通道

算法反演的地表温度影像不同土地覆盖类型的平均温度比辐射传导方程法大了1.9℃~4.4℃。

表 2 研究区各地表温度反演算法的温度范围、均值和标准差

Table 2 Temperature range, mean value and Stdev of different algorithms in the study area ℃				
反演算法	最大值	最小值	平均值	标准差
RTE 法	32.8	8.9	17.0	2.8
SCM 法	34.8	11.2	19.7	3.1

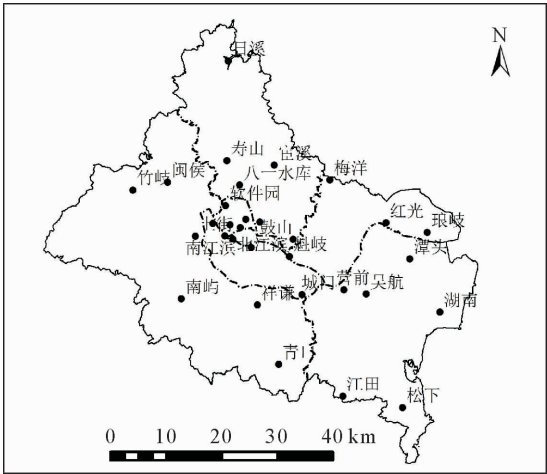


图 5 监测站位置

Fig. 5 Location of monitoring sites

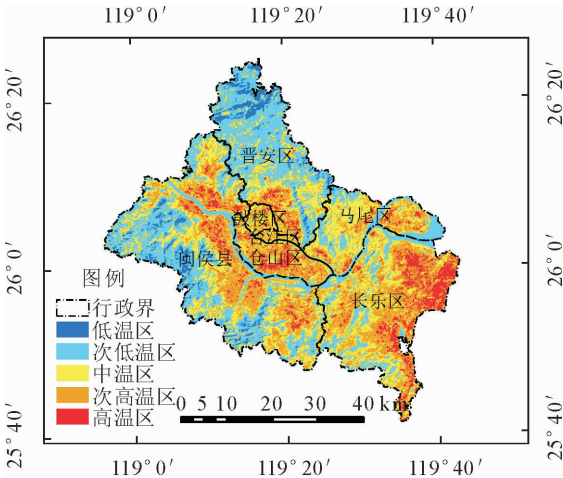


图 6 福州城区地表温度分级图

Fig. 6 Rating image of land surface temperature in Fuzhou City

为进一步分析辐射传导方程法和普适性单通道算法反演地表温度与地面监测站实测数据的比较,查询研究区 2018 年 3 月 11 日 10 时部分地面气象监测站的实测温度,地面气象监测站的位置见图 5,实测温度与反演地表温度见表 3。由表 3 可以看出,辐射传导法反演的地表温度值与地面气象监测站实测的气温更加接近,最大误差为 2.1,平均误差为 0.5,均方根误差为 0.6;普适性单通道算法反演的地表温度与实测气温相比,最大误差为 6.1,平均

误差 3.2,均方根误差为 1.0。因此,对于 Landsat8 TRIS 波段 10 这 2 种反演算法来说,辐射传导方程法精度更高,具有更大的优势。

表 3 不同地表温度反演结果与监测站实测温度对比

Table 3 Comparison between the land surface temperature retrieval results and the measured temperature of some monitoring stations ℃					
地面气象监测站	实测温度	RTE 法	SCM 法	RTE 法误差	SCM 误差
八一水库	18.5	18.6	21.1	0.1	2.6
省实小	19.6	19.1	21.5	-0.5	1.9
师大附中	18	19.4	21.8	1.4	3.8
建新	19.3	19.0	23.1	-0.3	3.8
软件园	18.3	19.4	21.6	1.1	3.3
晋安	18.4	18.7	22.7	0.3	4.3
茶园	18.9	19.1	21.5	0.2	2.6
福州	17.7	17.8	20.1	0.1	2.4
南江滨	17.7	18.4	20.6	0.7	2.9
鼓山	13.9	13.0	15.1	-0.9	1.2
红光	15.3	16.5	20.6	1.2	5.3
梅洋	11.7	12.1	14.6	0.4	2.9
琅岐	14.1	15.7	17.3	1.6	3.2
日溪	17.2	17.4	19.4	0.2	2.2
城门	17.5	17.7	19.8	0.2	2.3
寿山	14.7	15.3	17.8	0.6	3.1
官溪	14.7	15.0	17.5	0.3	2.8
北江滨	19.3	19.3	21.4	0.0	2.1
魁岐	18.2	18.6	22.7	0.4	4.5
湖南	15	16.3	18.4	1.3	3.4
潭头	13.8	15.9	19.9	2.1	6.1
营前	17.5	17.8	19.8	0.3	2.3
江田	14	14.8	17.3	0.8	3.3
松下	12.9	13.8	16.3	0.9	3.4
吴航	16.9	17.6	20.2	0.7	3.3
青口	17.4	17.6	20.1	0.2	2.7
祥谦	15.9	16.3	18.4	0.4	2.5
南屿	16.8	17.9	20.0	1.1	3.2
上街	17.7	18.0	22.1	0.3	4.4
竹岐	17.2	17.7	20.3	0.5	3.1
闽侯	18.3	19.0	23.1	0.7	4.8
平均绝对误差				0.5	3.2
均方根误差				0.6	1.0

为进一步分析研究区春季城市热岛的分布特征,采用辐射传导方程法反演的地表温度影像运用稳健统计法进行温度等级分类,分为高温区、次高温区、中温区、次低温区、低温区^[9],各等级由以下公式确定:

$$L=\overline{T}\pm a\cdot F$$

(12)

式中, L 为温度等级阈值, \overline{T} 为研究区地表温度平均值, F 为地表温度方差, a 为方差的倍数,取值为 0.5、1.5。由表 2 得到 $\overline{T}=17,F=2.8$,因此,研究

区地表温度分级阈值见表 4。

由图 6 和表 5 可知,研究区中城市建设区主要为高温区和次高温区,占 33.6%,为城市热岛效应影响区域,其中高温区占 6.7%,主要分布于长乐区的福州滨海新城、闽侯县(上街大学城、南屿镇、南通镇)和仓山区等新近开发建设区,该区域植被和水体分布较少,建筑物和裸地所占比例较高,建筑用地的扩张造成了城市热岛区沿其扩张方向面积增加^[19]。鼓楼区、台江区等老城区高温区的比例较低,但次高

温区超过 50%,低温区和次低温区的比例均低于 10%,该区域分布有西湖、左海等水体以及行道树绿化带、小区绿化带和山体公园等一定程度缓解了城市热岛效应;由于周边山区较大面积森林分布的影响,晋安区和闽侯县低温区和次低温区比例分别为 64%和 41.6%。低温区主要为高山森林覆盖区,受海拔和森林的影响,气温比平原的城市建设区低不少,次低温区主要为水体和森林分布。

表 4 研究区地表温度等级划分					℃
Table 4 The grade of land surface temperature in the study area					
低温	次低温	中温	次高温	高温	
$a\leqslant-1.5$	$-1.5<a\leqslant-0.5$	$-0.5<a\leqslant0.5$	$0.5<a\leqslant1.5$	$a>1.5$	
8.9~12.8	12.8~15.6	15.6~18.4	18.4~21.2	21.2~32.8	

表 5 不同行政区地表温度分级统计							km ²
Table 5 The summary grade of land surface temperature based on different districts							
区域	高温区	次高温区	中温区	次低温区	低温区	总计	
鼓楼区	1.40	18.68	14.11	1.19		35.37	
台江区	0.41	8.71	6.86	1.24		17.21	
仓山区	21.79	74.23	31.04	19.50	0.02	146.58	
马尾区	11.53	69.49	123.59	80.11	1.44	286.16	
晋安区	11.90	50.04	136.60	300.28	52.62	551.43	
长乐区	95.36	278.96	211.65	102.19	0.56	688.72	
闽侯县	45.16	247.26	322.68	386.26	51.86	1 053.21	
总 计	187.54	747.36	846.52	890.77	106.49	2 778.69	

5 结论与讨论

本研究运用了辐射传导方程法和普适性单通道算法,利用 Landsat8 卫星遥感数据反演了福州城区地表温度,并对采用部分地面气象监测站的实测气温对 2 种方法的反演结果进行验证,对不同的土地覆盖类型的地表温度进行了分析,还对研究区的反演的地表温度影像进行温度等级分类,按不同行政区划进行统计分析。研究表明,2 种方法反演得到的福州城区地表温度在空间分布趋势上基本一致,均表现为城市建设区比周边的郊区温度高,虽然影像的时相为春季,仍存在明显的“城市热岛”效应,而水体和高海拔森林温度较低,呈“冷岛”效应,但 2 种方法反演结果的变化范围有差异,普适性单通道算法反演的地表温度比辐射传导方程法数值大些,最低温大 2.3℃,最高温大 2℃,平均温大 2.7℃;取城市建设区、自然地表和水体 3 种土地覆盖类型对反演的温度影像的平均值进行统计分析,普适性单通道算法反演的地表温度影像不同土地覆盖类型的平均温度比辐射传导方程法大了 1.9℃~4.4℃;辐射传导法反演的地表温度值比普适性单通道算法更加

接近地面气象监测站实测的气温值,认为辐射传导方程法对于 Landsat8 TRIS 波段 10 的地表温度反演具有优势;反演地表温度影像中高温区主要分布于福州滨海新城、闽侯县(上街镇、南屿镇、南通镇)和仓山区等新近开发的建筑物密集区和裸地区域,鼓楼区、台江区等老城区次高温区比例超过 50%,近年来城市园林部门加大了城市道路绿化和串珠公园绿地建设,对城市热岛效应有一定程度的缓解。植被密集分布的森林以及水体是低温和次低温主要分布区。

为了改善城市热岛效应可以采取以下措施:增加城区水域面积。城市规划及建设中,原有的池塘、湖体等自然水体应该尽量保留,结合海绵城市理念,可在人口密集的商贸区、居住小区、交通枢纽附近修造人工湖、喷泉、观赏池等水体,充分利用江河湖海的风降温增湿特点,在沿岸留出足够的空间,让风和水汽能顺利进入城市。增大城建区绿化覆盖面。大量增加行道树和公园,同时在混凝土建筑物外墙、阳台、屋顶、立交和边坡等发展立体绿化,营造良好的城市绿色生态空间。倡导居民环保生活理念。比如尽量选择乘坐公交车、骑自行车、步行等绿色出行方

式,夏季使用空调不过分追求低温,购买家电选择低能耗的环保产品等。当然,由于本研究选择的卫星影像数据是3月11日成像,属于福州的春季,地表温度整体比夏季的温度低了不少,对于城市热岛空间分布特征的研究还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 陈云浩,李京,李晓兵. 城市空间热环境[M]. 北京:科学出版社,2003.

[2] 池秀兰,余明. 基于 Landsat TM/ETM+遥感数据的福州热环境研究[J]. 亚热带资源与环境学报,2011,6(1):56-65.
CHI X L, YU M. On the simulation of thermal environment in Fuzhou by retrieving land surface temperature from Landsat TM/ETM+data[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment,2011,6(1):56-65. (in Chinese)

[3] 张晓莉,赵鹏祥,高凌寒,等. 基于 Landsat 影像的西安市主要城区热岛效应分析[J]. 西北林学院学报,2016,31(3):183-190.
ZHANG X L, ZHAO P X, GAO L H, *et al.* Analysis of heat island effect based on landsat images in Xining City[J],2016,31(3):183-190. (in Chinese)

[4] 陈松林,王天星. 等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J]. 地球信息科学学报,2009,11(2):145-150.
CHEN S L, WANG T X. Comparison analyses of equal interval method and mean-standard deviation method used to delimitate urban heat island [J]. Journal of Geo-Information Science, 2009,11(2):145-150. (in Chinese)

[5] 徐希孺,柳钦火,陈家宜. 遥感陆面湿度[J]. 北京大学学报:自然科学版,1998,34(2/3):248-253.

[6] 吴志刚,江滔,樊艳磊,等. 基于 Landsat8 数据的地表温反演及分析研究——以武汉市为例[J]. 工程地球物理学报,2016,13(1):135-142.
WU Z G, JIANG T, FAN Y L, *et al.* Land surface temperature retrieval and result analysis based on Landsat8 data in Wuhan City[J], Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(1):135-142. (in Chinese)

[7] 谭桂容,蔡哲,徐永明. 基于 Landsat 影像的南京地区热岛效应[J]. 安徽农业科学,2009,37(13):6050-6052.

[8] 刘建华. 遥感技术在土地变更调查中的应用研究[J]. 工程地球物理学报,2014,11(6):901-904.
LIU J H. The application of remote sensing technology to land change survey[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014,11(6):901-904. (in Chinese)

[9] 杨伟志,赵鹏祥,薛大庆,等. 基于 Landsat-8 影像的西安市南北山森林生物量估测模型研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):33-37.
YANG W Z, ZHAO P X, XUE D Q, *et al.* Estimation of forest biomass model of north and south mountains based on Landsat-8 remote sensing image data in Xining[J]. Journal of North-

west Forestry University,2016,31(2):33-37. (in Chinese)

[10] 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,2001,22:3719-3746.

[11] JIMENEZ-MUNOZ J C, SOBRINO J A. A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. Journal of Geophysics Research, 2003,108:4688-4697.

[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] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析[J]. 生态学报,2011,31(14):3890-3901.
Xu H Q. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(14):3890-3901. (in Chinese)

[14] 王琳,徐涵秋. 快速城市化下福州市的热环境变迁[J]. 同济大学学报:自然科学版,2017,45(9):1336-1344.
WANG L, XU H Q. Thermal environment change of Fuzhou City with rapid urbanization[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2017,45(9):1336-1344. (in Chinese)

[15] USGS. Landsat data continuity mission (LDCM)-Landsat8 [EB/OL]. [2014-5-4] <http://landsat.usgs.gov/LDCM-Landsat8.php>.

[16] 丁凤,徐涵秋. 基于 Landsat TM 的 3 种地表温度反演算法比较分析[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2008,24(1):91-96.
DING F, XU H Q. Comparison of three algorithms for retrieving land surface temperature from Landsat TM thermal infrared band[J]. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition,2008,24(1):91-96. (in Chinese)

[17] 游绚,晏路明. 基于 ETM+影像辐射传导方程算法的地表温度反演[J]. 科技情报开发与经济,2009,19(27):134-136.
YOU X, YAN L M. Retrieving land surface temperature from the ETM + image radioactive transfer equation [J]. SCI-TECH Information Development & Economy,2009,19(27):134-136. (in Chinese)

[18] JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, SOBRINO J A, SKOKOVIC D, *et al.* Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data [J]. IEEE. Geoscience and Remote Sensing,2014,11(10):1840-1843.

[19] 苏娜,包玉. 基于单窗算法的汉中市近 20 年城市热岛效应时空特征[J]. 西北林学院学报,2018,33(4):183-192.
SU Y, BAO Y. Spatial-Temporal characteristics of urban heat island effect in Hanzhong City in recent 20 years based on mono-window algorithm[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(4):183-192. (in Chinese)