

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2018. 01. 19

引用格式: 孙明,谢敏,丁美花,等. 2001—2015 年间广西壮族自治区防城港市热岛效应时空变化研究[J]. 国土资源遥感, 2018,30(1):135 – 143. (Sun M,Xie M,Ding M H,et al. Spatio – temporal variation of urban heat island effects in Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomos Region[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(1):135 – 143.)

2001—2015 年间广西壮族自治区防城港市热岛效应时空变化研究

孙 明¹, 谢 敏², 丁美花¹, 许文龙³, 黄思琦⁴, 高 菲⁵

(1. 广西壮族自治区气象减灾研究所/国家卫星气象中心遥感应用试验基地, 南宁 530022; 2. 广西壮族自治区气候中心, 南宁 530022; 3. 广西防城港市气象局, 防城港 538001; 4. 南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044; 5. 江苏省防汛防旱指挥部办公室, 南京 210029)

摘要: 为研究广西壮族自治区防城港市 2001—2015 年间热岛效应的时空变化规律,利用遥感监测防城港市 15 a 来城市热岛效应的演变特征。选用 2001 年、2008 年和 2015 年获取的 3 期陆地卫星 (Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI) 遥感数据,反演防城港市地表温度 (land surface temperature, LST); 设置热岛强度及热岛比例指数 2 个评价指标,从热岛强度的时空分布和面积变化、城市热岛比例指数发展特征以及城市下垫面特性对热岛效应的影响 3 个方面分析防城港市热岛效应 15 a 间的演变特征。研究结果表明: ①防城港市各区市县建成区面积均呈迅速扩张的趋势; ②城市热岛强度逐年增强,港口区强热岛区增幅最快,年均增长率达到 26. 72%; ③城市热岛比例指数逐年递增,东兴市最高,达到 0. 62; ④城市绿地和水体对城市热岛效应具有明显的降温作用,水体的作用距离和降温幅度均大于绿地,但防城港市建成区植被和水体的比例明显偏低。上述研究成果可为防城港市创建全国园林城市提供科学合理的建议。

关键词: 防城港市; 地表温度 (LST); 热岛强度; 城市热岛比例指数

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001 – 070X(2018)01 – 0135 – 09

0 引言

热岛效应是指城市城区气温高、郊区气温低的现象,在温度的空间分布上,城区像一个突兀的、温暖的孤岛^[1]。城市热岛现象是城市气候灾害之一,不仅能引起城市高温,还会增加城市的能源消耗,加剧城市中的大气污染,影响区域气候、城市水文、空气质量以及物质代谢、能量循环等诸多城市生态过程,是引发一系列生态环境问题的重要原因之一。对热岛效应的研究方法主要有常规技术和遥感技术 2 类^[2–3],常规技术一般以地面测量和空间模拟为主,数据主要来源于气象资料,通过数学和统计学方法对热岛效应进行分析。例如林学椿等^[4]用北京地区 20 个气象观测站 41 a 的年平均气温记录,研究了北京地区的大尺度气温变化及其热岛效应。

地表温度 (land surface temperature, LST) 是地—气界面长波辐射和湍流通量交换的直接驱动因子,城市地区 LST 的定量反演对于城市气候和环境监测具有特殊意义。

与常规方法相比,遥感技术具有快速、便捷、测量范围大等特点,遥感反演 LST 的常用方法主要有辐射传输方程法、单窗算法、单通道算法和劈窗算法^[5]。例如杨丽萍等^[6]利用辐射传输方程法反演了西安城区的 LST,研究 LST 的分布格局和方向特性,取得了较好的效果;薛晓娟等^[7]利用 HJ – 1B 近红外数据,采用单窗算法反演了北京市 LST,研究北京市热岛效应的年际、年内变化趋势和空间分布特征;王猛猛等^[8]利用 Landsat TM 数据,采用单通道算法反演了合肥市 LST,并对 LST 进行归一化处理,分析合肥城市热岛分布及变化;杨槐^[9]在劈窗算法的基础上,根据 Landsat8 的波段特征,提出了适

收稿日期: 2016 – 08 – 27; 修订日期: 2016 – 09 – 30

基金项目: 防城港市科学研究与技术开发计划项目“防城港市城市热岛效应研究”(编号: 防科转 14024007)、广西自然科学基金项目“基于多源数据的广西冰雪灾害监测关键技术研究”(编号: 2014GXNSFBA118214)和国家公益性行业(气象)专项重点项目“蔗糖产量预测及气象灾害监测评估技术研究”(编号: GYHY201406030)共同资助。

第一作者: 孙 明(1986 –),男,工程师,主要从事生态遥感应用研究。Email: msunies@ 163. com。

通信作者: 高 菲(1985 –),女,工程师,主要从事气候变化研究。Email: xm409680373@ 126. com。

用于 Landsat8 的劈窗算法,并对厦门市的 LST 进行了反演。单窗算法和单通道算法需要气象实测数据或同时相的 MODIS 数据进行相关反演参数计算,多数情况下,地方气象观测站均有对应于卫星过境时天气要素的实时观测数据,但在参数化过程中使用的数据仍然是标准大气廓线数据,对反演精度造成一定的影响;劈窗算法以 Landsat8 为数据源时,其第 11 波段存在的不稳定性会对反演精度产生较大影响;辐射传输方程法根据普朗克方程反演 LST,物理基础明确,在获取或模拟出较准确的大气参数时,反演精度较高,借助美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)提供的大气校正计算器,可以快速获取反演所需的各种大气参数,提高了该方法的应用范围和可操作性。国内学者对北京、上海、厦门等大城市的城市热岛效应进行了广泛研究,而对防城港的研究尚未见报道。

进入 21 世纪以来,防城港市城镇化进程迅猛发展,建成区规模逐年扩大,由城镇化引起的下垫面条件变化对气象环境造成的影响逐渐显现,城市热岛效应逐年加重,对城市生态环境产生非常严重的影响。为此,本文利用 3 期陆地卫星遥感影像(Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI),采用辐射传输方程法反演防城港市 LST;设置热岛强度和热岛比例指数 2 个评价指标,监测 2001—2015 年防城港市建成区的变化情况、城市热岛的变化规律及分布特征;分析城市下垫面因子对城市热岛效应的影响。研究成果可为防城港市创建全国园林城市提供科学合理的建议,为减轻城市发展给生态环境带来的影响提供技术支持。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

防城港市地处广西壮族自治区南部,位于 E107°28′~108°36′,N21°36′~22°22′之间,包括二区、一市、一县(即防城区和港口区、东兴市及上思县)。全市山地和丘陵面积占 80% 以上,地势中间高,向东南和西北倾斜^[10]。气候属于典型的亚热带海洋性湿润季风气候。2008 年,国家提出把广西北部湾经济区建设成为重要国际区域经济合作区,防城港市的经济和城市建设得到快速发展,大量工业园区、港口、码头以及商业地产开发,大大改变了城市下垫面结构,在硬化路面增多的同时,绿地和城市水体等城市冷源却占比降低。气象台站观测资料也显示,防城港市城区与郊区间的温度差逐年加大,表明防城港市的城市热岛效应越来越显著。防城港

市的城市建成区如图 1 所示。

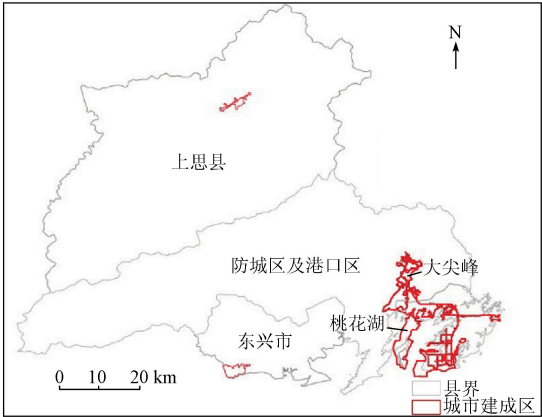


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Sketch map for location of research region

1.2 数据源

受防城港气候特征的影响,全年中能够获取高质量卫星遥感影像的时间主要集中在 10—12 月。由于前文所提到的政策性原因,2008 年是防城港市经济和城市建设的重要节点,为此,本文将 2008 年作为时间拐点,选取防城港市 2001 年 11 月 17 日(Landsat5 TM)、2008 年 11 月 20 日(Landsat5 TM)和 2015 年 10 月 23 日(Landsat8 OLI)获取的 3 个时相的陆地卫星遥感影像作为数据源,其热红外波段数据均已插值到 30 m 空间分辨率。影像的光谱信息丰富、纹理结构清晰,能较好地反映土地利用各地类特征;城市建成区及近郊等重要区域无云雾遮盖,影像质量较好。利用 ENVI5.1 软件对原始卫星影像进行了辐射校正和大气校正,为 LST 反演和城市热岛效应分析提供了可靠的基础数据。

2 研究方法

2.1 城市建成区范围提取

城市建筑用地的土地利用类型比较复杂,电磁波反射光谱异质性较大,单纯利用原始多光谱信息提取建筑用地,往往很难达到理想的效果。徐涵秋等^[11-12]提出用基于规则的谱间差异和逻辑判别的建筑用地指数(index-based build-up index, IBI)提取建筑用地信息,获得了较高的提取精度,即

$$IBI = \frac{NDBI - (SAVI + MNDWI)/2}{NDBI + (SAVI + MNDWI)/2}, \quad (1)$$

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR}, \quad (2)$$

$$SAVI = \frac{(NIR - Red)(1 + l)}{NIR + Red + l}, \quad (3)$$

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}, \quad (4)$$

式中： $NDBI$ 为归一化差值建筑指数 (normalized difference build-up index)； $SAVI$ 为土壤调节植被指数 (soil adjusted vegetation index)； $MNDWI$ 为改进的归一化差值水体指数 (modified normalized difference water index)； $Green$ 、 Red 、 NIR 和 MIR 分别为绿、红、近红外和中红外波段的灰度值。由于引入了土壤调节因子 l ， $SAVI$ 被认为最适合研究低植被覆盖区，其探测植被覆盖率的下限可低至 15%；由于城市建成区及其周边存在各种裸土信息，植被覆盖率较低，因此将 $SAVI$ 作为增强建筑用地信息的植被指数更为合适， l 值取 0.5 时可将土壤亮度差异减到最小，最大限度地突出植被信息^[13]。

建筑用地的 $NDBI$ 大于其 $SAVI$ 和 $MNDWI$ ；植被和水体分别在 $SAVI$ 和 $MNDWI$ 获得最大值。通过式(1)的计算，能够扩大卫星影像中建筑用地与植被和水体的反差，增强建筑用地信息，从而达到提取城市建成区的目的。

城市建成区不只包含建筑用地，还包括城市中的绿地、公园、湖泊等功能区域，需要将建筑用地范围内所包含的绿地、水体等信息与建筑用地进行类别合并，得到相应的城市建成区范围。

2.2 地表比辐射率计算

本文采用覃志豪等^[14]提出的地表比辐射率估算方法，估算自然表面混合像元尺度上的地表比辐射率，即

$$\varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_m \varepsilon_m + d_e \quad , \quad (5)$$

$$P_v = \frac{(NDVI - NDVI_s)}{(NDVI_v - NDVI_s)} \quad , \quad (6)$$

式中： ε 为地表比辐射率； P_v 为植被覆盖率； R_v 为植被的温度比率； ε_v 为植被辐射率； R_m 为建筑表面的温度比率； ε_m 为建筑物辐射率； d_e 为自然表面的几何分布与内部反射效应而引起的发射率比例； $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ 分别为植被和裸土的 $NDVI$ 值。 R_v 和 R_m 的计算公式分别为

$$R_v = 0.933\ 2 + 0.058\ 5 P_v \quad , \quad (7)$$

$$R_m = 0.988\ 6 + 0.128\ 7 P_v \quad 。 \quad (8)$$

对于 TM 数据， ε_v 和 ε_m 可根据覃志豪等^[14]提供的经验值，分别取值 0.986 和 0.972；对于 Landsat8 OLI 数据， ε_v 和 ε_m 分别取 0.982 和 0.967^[15]； d_e 的取值根据植被覆盖度的组成决定，即

$$d_e = \begin{cases} 0.003\ 8 P_v & P_v < 0.5 \\ 0.003\ 8(1 - P_v) & P_v > 0.5 \end{cases} \quad 。 \quad (9)$$

万方数据

2.3 地表温度反演

遥感技术的飞速发展为快速获取 LST 提供了新的途径，目前使用较多的 LST 反演方法主要有辐射传输方程法、劈窗算法、单通道算法和多通道算法^[16-19]。本文采用辐射传输方程法^[20-22]反演 LST，即

$$L_{sensor} = \varepsilon \tau B(T_s) + (1 - \varepsilon) \tau L_{atm} \downarrow + L_{atm} \uparrow \quad , \quad (10)$$

式中： L_{sensor} 为传感器接收到的热红外光谱辐射亮度， $Wm^{-2}sr^{-1}um^{-1}$ ； T_s 为地表温度，K； $B(T_s)$ 为普朗克黑体光谱辐亮度， $Wm^{-2}sr^{-1}um^{-1}$ ； $L_{atm} \downarrow$ 和 $L_{atm} \uparrow$ 分别为大气下行辐射亮度和大气上行辐射亮度； τ 为大气透射率。

通过上述公式，可以推算出温度为 T 的黑体在热红外波段的辐射亮度 $B(T_s)$ ，即

$$B(T_s) = [L_{sensor} - L_{atm} \uparrow - \tau(1 - \varepsilon) L_{atm} \downarrow] / (\tau \varepsilon) \quad 。 \quad (11)$$

地表温度 T_s 可以用普朗克公式的函数获取，即

$$T_s = K_2 / \ln \left[\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right] \quad , \quad (12)$$

式中：对于 TM 数据， $K_1 = 607.76\ Wm^{-2}sr^{-1}um^{-1}$ ， $K_2 = 1\ 260.56\ K$ ；对于 TIRS Band10 数据， $K_1 = 774.89\ Wm^{-2}sr^{-1}um^{-1}$ ， $K_2 = 1\ 321.08\ K$ ； τ 、 $L_{atm} \uparrow$ 和 $L_{atm} \downarrow$ 这 3 个参数可从 NASA 官网 (<http://atm-corr.gsfc.nasa.gov>) 获取。

通过输入影像的成像时间及中心经纬度等信息，即可得到相应的大气参数(表 1)。所选数据当日大气透射率均较高，反演结果的温度分布趋势与气象站的实际观测结果较为一致，表明反演结果具有一定的参考价值。

表 1 LST 反演的大气参数
Tab.1 Atmospheric parameters of land surface temperature inversion

成像日期	τ	$L_{atm} \uparrow$	$L_{atm} \downarrow$
20011117	0.86	1.00	1.66
20081120	0.70	2.08	3.24
20151023	0.67	2.82	4.42

2.4 热岛强度计算

地表城市热岛强度 (surface urban heatisland intensity, UHI)^[23] 定义为城市城区 LST 与郊区乡村 LST 之差，可反映城乡温差的程度。其计算公式为

$$UHI_i = T_i - \frac{1}{n} \sum T_{crop} \quad , \quad (13)$$

式中： UHI_i 为图像中第个 i 像元所对应的热岛强度；

T_i 为城区 LST; n 为郊区农田内的有效像元数; T_{crop} 为郊区农田内的 LST。

UHI 的关键在于郊区范围的确定。Peng 等^[24]的研究表明,热岛效应最小影响区域为城区面积的 150%,因而要确定郊区范围首先要确定城市建成区,在此基础上构建城区面积的 150% 作为城市边缘区(即城市郊区)。根据实验结果分析,参照文献^[23]的划分标准,将 UHI 分为 4 个等级(表 2)。

表 2 防城港市热岛强度等级划分

Tab.2 Grade division of heat island intensity in Fangchenggang City

等级	UHI /℃	等级定义
1	[-1.0,1.0)	无热岛
2	[1.0,3.0)	弱热岛
3	[3.0,5.0)	较强热岛
4	≥5.0	强热岛

2.5 热岛比例指数计算

城市热岛比例指数(urban – heat – island ratio

index,URI)^[25]是一个定量指标,可用于比较不同时期、不同地区的热岛强度大小,具有热岛指示意义。其计算公式为

$$URI = \frac{1}{100m} \sum_i^n w_i p_i \quad , \quad (14)$$

式中: m 为热岛强度等级数; i 为城区温度高于郊区温度等级序号; n 为城区温度高于郊区温度的等级数; w_i 为第 i 级的权重; p_i 为第 i 级值所占百分比。一般 URI 值域为 $[0,1]$,该值越大,热岛现象越严重。

3 结果与分析

3.1 城市扩张情况

利用 IBI 提取防城港市建筑用地信息,通过选取合适的阈值,得到防城港市不同时期、不同地区的城市建成区范围(图 2)。

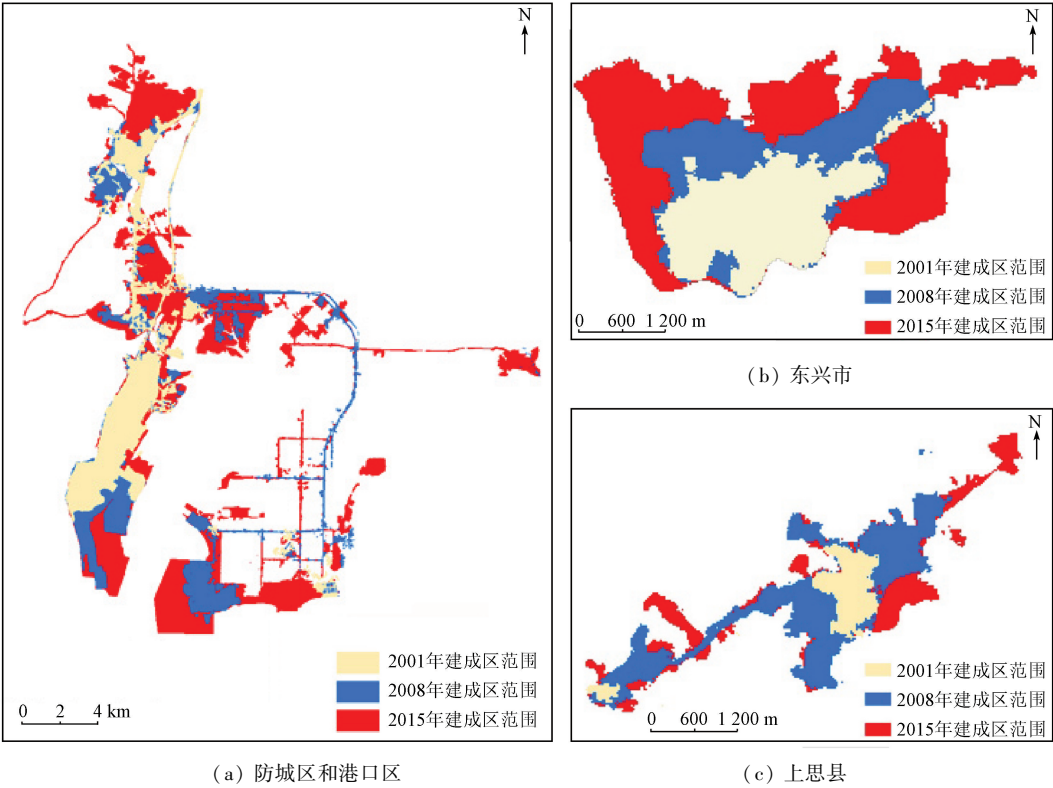


图 2 2001—2015 年防城港市不同地区建成区分布

Fig.2 Distribution of built – up area in different districts of Fangchenggang City from 2001 to 2015

根据图 2 进行统计,结果表明:防城城区及港口区建成区 2001 年面积为 33.39 km²,2008 年面积为 54.15 km²,2015 年面积为 114.78 km²,15 a 间增加了 81.39 km²,年均增长率为 9.2%;建成区扩张主要在沿海滩涂区域,包括围海造陆、兴建工业园区等。东兴市建成区面积 2001 年为 3.6 km²,2008 年为 6.15 km²,2015 年为 12.13 km²,2008—2015 年增

长比较迅速,年均增长率为 9.1%;其扩展为典型的圈层式。上思县建成区面积 2001 年为 1.11 km²,2008 年为 4.80 km²,2015 年为 5.94 km²,2015 年建成区面积约为 2001 年的 5.3 倍。其中,2001—2008 年间建成区面积迅速扩张,年均增长率为 23.3%;2008—2015 年间增速放缓,年均增长率降低到 3.1%。

3.2 热岛强度分布特点及发展趋势

3.2.1 防城区和港口区

图 3 为 2001 年,2008 年和 2015 年防城区和港

口区热岛强度空间分布图,从中可以看出 15 a 来防城区及港口区的城镇化发展历程。

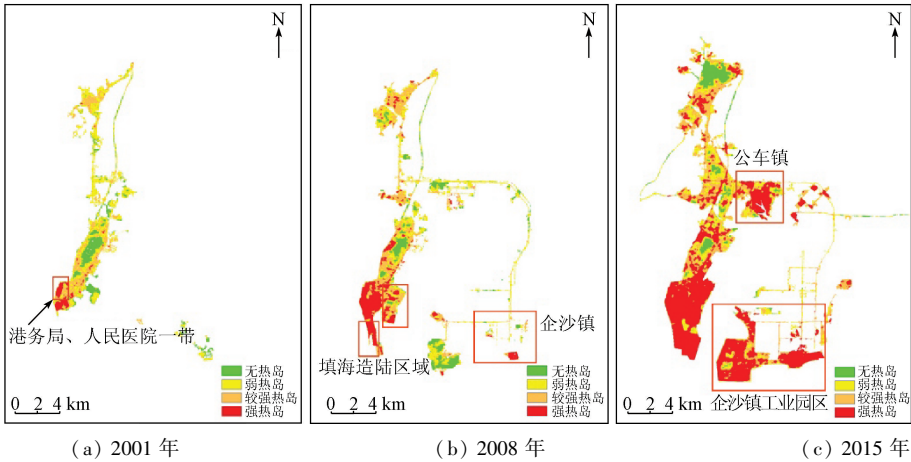


图 3 2001—2015 年防城区和港口区热岛强度空间分布图

Fig.3 Distribution of heat island intensity in Fangcheng and Gangkou districts from 2001 to 2015

由图 3 可知,强热岛区主要分布在市区及工业开发区,弱热岛区主要分布在水体和森林覆盖率较高的地区。UHI 的发展特征为由南向北发展,自西向东扩张。2001 年,防城区和港口区城市建成区主要包括防城区及港口区友谊路和建港路周边开发区域,港口区未大面积开发,强热岛区域主要集中在港口区港务局及市人民医院附近,城市其他区域以弱热岛为主。2008 年,强热岛区域主要分布在港口区西南沿海一带,并逐渐向企沙镇一带扩张,局部出现强热岛区域;防城区变化不大,仍然以弱热岛为主,局部小范围出现较强热岛。2015 年,港口区外海填海面积大幅扩张,东部企沙镇建成大面积的工业园区,扩建了大量连接园区及码头的公路网络;强热岛区域遍及港口区主要建成区,企沙镇及公车镇都出现强热岛;防城区小部分区域出现较强热岛。

对比 2001—2015 年 3 期 UHI 可知,防城港市城市主要向南以及向东发展,城市热岛发展趋势与城市开发建设同步,强热岛区域随着城市新开发区域面积的扩大而大幅扩张;防城区城市热岛效应变化缓慢,由于防城区为老城区,多年来城市改、扩建幅度较小,因而其城市热岛效应表现为缓慢增加的趋势。通过统计 3 期影像中的强热岛及较强热岛的面积可知,较强热岛区面积分别为 10.17 km²,19.74 km²和 36.68 km²,年均增长率为 9.60%;强热岛区面积分别为 1.94 km²,10.53 km²和 53.42 km²,年均增长率为 26.72%。

3.2.2 东兴市

东兴市的城市热岛呈圈层式向外围发展,具体如图 4 所示。

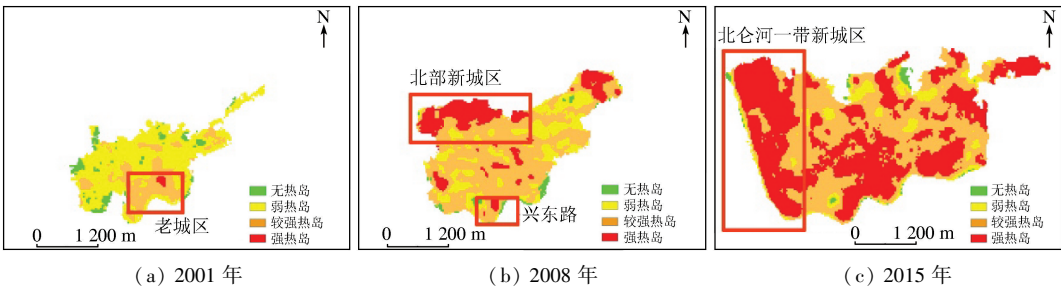


图 4 2001—2015 年东兴市热岛强度空间分布

Fig.4 Distribution of heat island intensity in Dongxing City from 2001 to 2015

城市热岛随着城市范围的扩张而扩大,强热岛区域均分布在新建城区范围内,老城区的发展趋势与防城区类似,热岛增加趋势比较缓慢。2001 年,东兴市热岛区域主要分布在解放路一带老城区,外围区域均无热岛效应;2008 年,城市的外围往东部

和北部发展,兴东路附近出现了较强热岛,局部出现小范围强热岛,城区大部分地区为弱热岛和较强热岛;2015 年,东兴市建成区面积大幅扩张,市区大部分区域呈现较强热岛,强热岛区沿着北仑河分布,均为新建城区。通过对 3 期影像中强热岛区面积统计,

其面积分别为0.03 km²、1.15 km²和5.88 km²。2008—2015 年间,东兴市的城市强烈热岛区域大幅增加,这与东兴市的城市发展趋势一致。

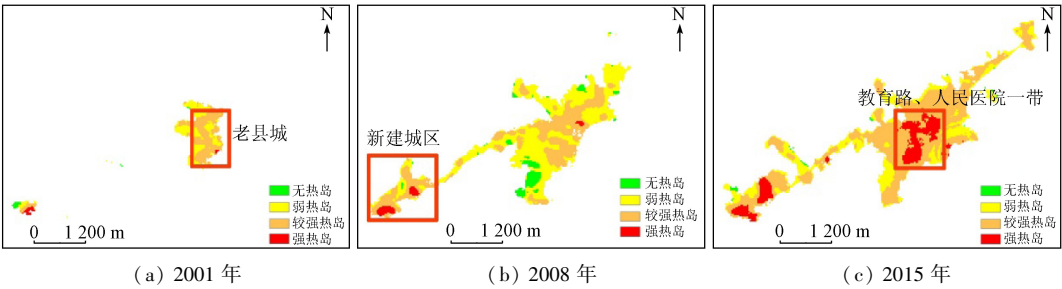


图 5 2001—2015 年上思县热岛强度空间分布

2001 年,上思县主要以弱热岛及较强热岛区域为主,城市建成区以老县城为主;2008 年,城市沿着团结路向西南方向及南部扩张,城市热岛效应仍然不是很显著,大部分区域仍然为弱热岛效应;2015 年,上思县城大部分区域都出现热岛效应,其中教育路及县人民医院附近出现强烈热岛,以县城为中心,外围出现大面积较强热岛区域,无热岛区域面积大幅度缩小。从面积统计上看,强烈热岛区域面积从2001 年的0.03 km²发展到2015 年的0.77 km²,面积扩大了约25.7 倍。

3.3 热岛比例指数发展趋势

对反演的防城港市不同时期 LST 进行归一化处理,然后分为 5 个等级,分别为低温[0,0.2)、中温[0.2,0.4)、正常[0.4,0.6)、高温[0.6,0.8)和特高温[0.8,1.0]。统计不同等级 LST 的面积,选取高温和特高温 2 个等级代表城市热岛范围,则其权重分别为 4 和 5。利用式(14) 计算得到不同时期、不同区域的 URI(图 6)。

从图 6 可以看出,URI 逐年递增,表明防城港市整体城市热岛效应呈逐年增加的趋势。其中,东兴市的 URI 最高,2008—2015 年增幅最大,2015 年已经达到0.62,表明东兴市的城市热岛现象已经非常

3.2.3 上思县

图 5 为 2001—2015 年上思县热岛强度空间分布图。

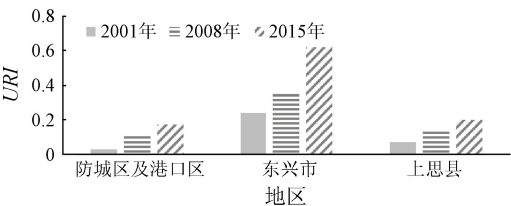


图 6 2001—2015 年防城港市热岛比例指数示意图
Fig. 6 Diagram of urban - heat - island ratio index in Fangchenggang City from 2001 to 2015

明显;防城区和港口区的 URI 在 2001—2008 年有一个跃升(这与港口开发有关),2008—2015 年则呈缓慢递增趋势;上思县与港口区的变化趋势相似,2008 年以前 URI 增速较快,2008 年以后则缓慢增加。

3.4 热岛效应与城市下垫面的关系

热岛效应与城市下垫面特征密切相关。在城市建成区内,与热岛效应密切相关的地表参数主要有建筑用地、水体和植被。利用 2015 年获取的遥感影像,分别计算 IBI,NDVI 及 MNDWI,将 3 种指数分别归一化到[0,1];然后在整个研究区内均匀选取样本点,利用 SPSS 软件,采用多种函数(线性、幂、指数、对数及多项式等)对样点进行拟合,得出 LST 与各种指数之间的最佳拟合方程(图 7)。

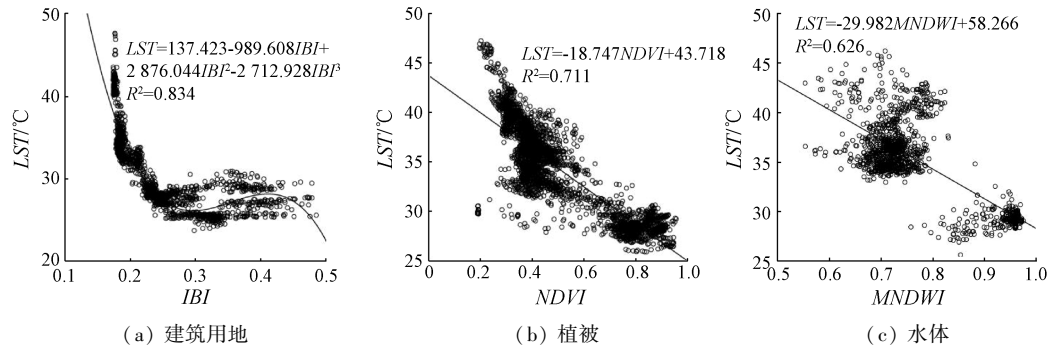


图 7 建筑用地、植被及水体与 LST 散点图

Fig. 7 Scatter diagrams between urban land, vegetation, water and LST

分析图 7(a)可知,建筑用地密度越高的地区,其 *IBI* 越低;本文研究区的 *IBI* 主要分布在 0.17 ~ 0.20 之间。从 *LST* 与 *IBI* 的散点图(图 7(a))可以看出,*IBI* 与 *LST* 呈反比关系,*IBI* 越低,建筑密度越高,其 *LST* 越高,表明城镇建筑对城市热岛效应具有明显的增温作用。根据 *IBI* 与 *LST* 的拟合方程,可定量分析 *IBI* 与 *LST* 之间的关系,建筑用地比例高的地区温度升高比建筑用地比例低的地区要快。

分析图 7(b),(c)可知,*LST* 与 *NDVI* 及 *MNDWI* 呈反比关系,*NDVI* 越高、植被覆盖越好的地区,其 *LST* 越会相应地降低;*MNDWI* 越高、含水量越多的地区,其 *LST* 越低;表明植被和水体对城市热岛效应具有明显的降温作用。从图 7 中的拟合方程可以看出,*NDVI* 和 *MNDWI* 与 *LST* 的拟合方程的斜率分别为 -18.747 和 -29.982,说明水体对 *LST* 的影响程度高于植被。

为了定量研究城市绿地和水体对城市热岛效应的影响,选取港口区的桃花湖公园水体和防城区的大尖峰绿地,每隔 30 m 建立一个缓冲带,统计不同距离缓冲带内的温度(表 3)。

表 3 城市绿地和水体不同距离缓冲带内的 *LST* 及温度差
Tab.3 *LST* and temperature difference in different buffers of green land and water body

距离/m	桃花湖公园水体		大尖峰绿地	
	<i>LST</i> /℃	温度差/℃	<i>LST</i> /℃	温度差/℃
30	30.99	2.49	31.70	1.90
60	33.21	2.22	33.50	1.80
90	34.62	1.41	33.80	0.30
120	35.87	1.25	34.06	0.26
150	36.68	0.81	34.02	-0.04
180	36.80	0.12	34.01	-0.01
210	36.43	-0.37	—	—
240	36.21	-0.22	—	—

从表 3 中的统计结果可以看出,在桃花湖公园附近 180 m 距离内,温度差都是正值,温度差最大可达 2.49 ℃;随着距离的加大,温度差呈下降趋势,水体对城市热岛效应的影响逐渐减弱。在大尖峰附近 120 m 距离内,温度差都是正值,温度差最大可达到 1.9 ℃;距离越远,温度差越小。与城市绿地相比,水体对城市热岛效应的影响距离更远,对周围热场分布的改善作用更加显著。

4 结论

1)防城港快速的城镇化进程使得城市建成区范围大幅扩张,城市热岛效应日益严重。对 3 期陆地卫星遥感影像的分析研究表明,与 2001 年相比,2015 年防城港市各区、市、县的建成区面积均显著增加:防城区及港口区的建成区面积为 2001 年的 3.4 倍;东兴市的建成区面积为 2001 年的 3.3 倍;

上思县的建成区面积为 2001 年的 5.4 倍。快速城镇化的进程使得城市建筑用地面积大量增加,而植被和水体所占比重迅速降低。

2)2001—2015 年间,防城港市各区、市、县的城市热岛强度均呈现逐年递增的趋势。其中,防城区和港口区强热岛区年均增长 37.3%;东兴市强热岛区面积年均增长 9.7%;上思县强热岛区面积增加虽不显著,但较强热岛面积从 2001 年的 0.03 km² 发展到 2015 年的 1.48 km²,面积显著增加。

3)2001—2015 年间,防城港市不同区、市、县的 *URI* 均呈逐年递增的趋势,表明防城港市城市热岛效应逐年加重。其中,东兴市的 *URI* 最高,年均增幅最大。

4)城市下垫面对热岛效应的影响主要表现为:城市热岛效应与城市用地呈正比关系,城镇化程度越高,建筑密度越大,地表增温越快;城市热岛效应与城市绿地和水体呈反比关系,城市植被覆盖度越高,水体越多,对周边城市热场的降温作用越明显。其中,水体对城市热场的作用距离和降温效应均明显好于绿地。

参考文献(References):

[1] 沈立新,鲍淳松.关于城市热岛问题的综述[J].浙江林业科技,2000,20(3):89-92.
Shen L X, Bao C S. Summary on urban heat island[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2000, 20(3): 89-92.

[2] 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. doi:10.6046/gtzyyg.2011.03.18.
Chen J, Yang X Y. A study of remote sensing monitoring of urban thermal environment based on ASTER data[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2011, 23(3): 100-105. doi:10.6046/gtzyyg.2011.03.18.

[3] 杨可明,周玉洁,齐建伟,等.城市不透水面及地表温度的遥感估算[J].国土资源遥感,2014,26(2):134-139. doi:10.6046/gtzyyg.2014.02.22.
Yang K M, Zhou Y J, Qi J W, et al. Remote sensing estimating of urban impervious surface area and land surface temperature[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(2): 134-139. doi:10.6046/gtzyyg.2014.02.22.

[4] 林学椿,于淑秋.北京地区气温的年代际变化和热岛效应[J].地球物理学报,2005,48(1):39-45.
Lin X C, Yu S Q. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and its heat island effect[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 39-45.

[5] 王艳慧,肖瑶.北京市 1989-2010 年地表温度时空分异特征分析[J].国土资源遥感,2014,26(3):146-152. doi:10.6046/gtzyyg.2014.03.24.
Wang Y H, Xiao Y. A temporal-spatial variation analysis of land surface temperature in Beijing[J]. Remote Sensing for Land and

- Resources, 2014, 26(3): 146 – 152. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2014. 03. 24.
- [6] 杨丽萍, 孔金玲, 郭玉芳, 等. 西安城区地表温度的遥感反演与时空演变分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(3): 388 – 396.
- Yang L P, Kong J L, Guo Y F, et al. Inversion and temporal – spatial evolution analysis of land surface temperature in urban Xi'an based on remote sensing data[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, 51(3): 388 – 396.
- [7] 薛晓娟, 孟庆岩, 王春梅, 等. 北京市热岛效应时空变化的 HJ – 1B 监测分析[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(4): 474 – 480.
- Xue X J, Men Q Y, Wang C M, et al. Monitoring spatio – temporal changes of heat island effect in Beijing based on HJ – 1B[J]. Journal of Geo – Information Science, 2012, 14(4): 474 – 480.
- [8] 王猛猛, 周志民, 张兆明, 等. 基于 TM 数据的合肥市城市热岛效应研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(33): 80 – 85.
- Wang M M, Zhou Z M, Zhang Z M, et al. Research on the urban heat island effect of Hefei based on Landsat TM data[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(33): 80 – 85.
- [9] 杨 槐. 从 Landsat8 影像反演地表温度的劈窗算法研究[J]. 测绘地理信息, 2014, 39(4): 73 – 77.
- Yang H. Research of split – window algorithm for retrieval of land surface temperature from Landsat8 [J]. Journal of Geomatics, 2014, 39(4): 73 – 77.
- [10] 袁 飞. GIS 在城市景观规划设计的应用——以广西防城港市为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- Yuan F. Application of GIS to Urban Landscape Design: A case of Fangchenggang City, Guangxi [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [11] 徐涵秋. 一种基于指数的新型遥感建筑用地指数及其生态环境意义[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 301 – 308.
- Xu H Q. A new index – based built – up index (IBI) and its eco – environmental significance [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(3): 301 – 308.
- [12] 徐涵秋, 杜丽萍. 遥感建筑用地信息的快速提取[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(4): 574 – 578.
- Xu H Q, Du L P. Fast extraction of built – up land information from remote sensing imagery[J]. Journal of Geo – Information Science, 2010, 12(4): 574 – 578.
- [13] Huete A R. A Soil – adjusted vegetation index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295 – 309.
- [14] 覃志豪, 李文娟, 徐 斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004, 16(3): 28 – 32, 36, 41. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2004. 03. 07.
- Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6 [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2004, 16(3): 28 – 32, 36, 41. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2004. 03. 07.
- [15] 蒋大林, 匡鸿海, 曹晓峰, 等. 基于 Landsat8 的地表温度反演算法研究——以滇池流域为例[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(3): 448 – 454.
- Jiang D L, Kuang H H, Cao X F, et al. Study of land surface temperature retrieval based on Landsat8 – with the sample of Dianchi Lake basin [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(3): 448 – 454.
- [16] 管菁菁, 查良松. 合肥市城市热环境的空间变化及其驱动力分析[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2012, 35(1): 56 – 62.
- Guan J J, Zha L S. Analysis of space change and its driving force of urban thermal environment of Hefei [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2012, 35(1): 56 – 62.
- [17] 毛克彪, 施建成, 覃志豪, 等. 一个针对 ASTER 数据同时反演地表温度和比辐射率的四通道算法[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 593 – 599.
- Mao K B, Shi J C, Qin Z H, et al. A four – channel algorithm for retrieving land surface temperature and emissivity from ASTER data [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(4): 593 – 599.
- [18] 吴志刚, 江 滔, 樊艳磊, 等. 基于 Landsat8 数据的地表温度反演及分析研究——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.
- [19] 李柏延, 任志远, 李瑞宗, 等. 西安市地表温度反演及城市热岛强度量化研究[J]. 资源科学, 2014, 36(12): 2631 – 2636.
- Li B Y, Ren Z Y, Li R Z, et al. Urban heat island intensity quantitative inversion and city land surface temperatures in Xi'an [J]. Resources Science, 2014, 36(12): 2631 – 2636.
- [20] Qin Z H, Dall' Olmo G, Karnieli A. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA – advanced very high resolution radiometer data [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (D19): 22655 – 22670.
- [21] Franc G B, Cracknell A P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA – 11 AVHRR data in north – eastern Brazil [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(8): 1695 – 1712.
- [22] 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演地表温度的方法[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 12 – 17.
- Mao K B, Tang H J, Zhou Q B, et al. Retrieving land surface temperature from MODIS data by using radiance transfer equation [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2007, 43(4): 12 – 17.
- [23] 叶彩华, 刘勇洪, 刘伟东, 等. 城市地表热环境遥感监测指标研究及应用[J]. 气象科技, 2011, 39(1): 95 – 101.
- Ye C H, Liu Y H, Liu W D, et al. Research on urban surface heat environment monitoring indexes and its application [J]. Meteorological Science and Technology, 2011, 39(1): 95 – 101.
- [24] Peng S S, Piao S L, Ciais P, et al. Surface urban heat island across 419 global big cities [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 696 – 703.
- [25] 徐涵秋, 陈本清. 不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(3): 129 – 133.
- Xu H Q, Chen B Q. An image processing technique for the study of urban heat island changes using different seasonal remote sensing data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(3): 129 – 133.

Spatio – temporal variation of urban heat island effects in Fangchenggang City , Guangxi Zhuang Autonomous Region

SUN Ming¹, XIE Min², DING Meihua¹, XU Wenlong³, HUANG Siqu⁴, GAO Fei⁵

(1. *Guangxi Meteorological Disaster Mitigation Institute/Remote Sensing Application and Validation Base of National Satellite Meteorological Center, Nanning 530022,China*; 2. *Guangxi Climate Center, Nanning 530022,China*; 3. *Fangchenggang Meteorological Bureau, Fangchenggang 538001, China*; 4. *School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information & Technology, Nanjing 210044, China*; 5. *Flood Control and Drought Relief Office of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China*)

Abstract: To study the spatio – temporal variation of urban heat island effects in Fangchenggang City from 2001 to 2015, the authors used the remote sensing methods to monitor the variation characteristics of urban heat island effects in Fangchenggang City for a period of 15 years. The land surface temperature (LST) was retrieved using remote sensing images (Landsat5 TM and Landsat8 OLI) acquired in three periods of 2001, 2008 and 2015. Then, both urban heat island intensity and urban – heat – island ratio index were constructed to analyze the evolution characteristics of heat island effect in the past 15 years from three aspects: the space – time distribution and area variation of heat island intensity, the development characteristics of urban – heat – island ratio index and the influence of underlying surface condition on heat island effect. Some conclusions have been reached: ① Urban area exhibits a trend of rapid expansion in the study area. ② The urban heat island intensity increases year by year, especially in Gangkou District, where annual growth rate reaches 26.72%. ③ The urban – heat – island ratio index is rising year by year in all districts, among which, Dongxing reaches the highest value of 0.62. ④ Cooling effects are obviously for both urban green space and water body, but the operating distance and cooling amplitude of water body are larger than those of green space. However, the proportion of urban vegetation and water of the study area is markedly low. The research results may provide scientific and reasonable proposals for Fangchenggang government’s aim of reaching the goal of creating a national garden city.

Keywords: Fangchenggang; land surface temperature (LST); heat island intensity; urban – heat – island ratio index

(责任编辑: 张 仙)