

文章编号: 1008-2786-(2018)3-452-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000341

基于 Landsat8 的重庆主城区城市热岛效应研究

李 军^{1,2,3}, 赵 彤¹, 朱 维¹, 罗玉岚¹

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 重庆市高校 GIS 应用研究重点实验室, 重庆 401331;

3. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘 要: 重庆作为长江上游重要的经济发展中心城市, 随着城市化的加剧, 城市热岛效应已引起了广泛关注。本文利用了 2014 年夏季 Landsat8 影像和劈窗算法, 根据研究区夏季大气含水量高的特点, 订正了大气透过率参数, 实现了重庆主城区地表温度的遥感反演, 并与卫星过境时间接近的 4 个气象站点的实测 0 cm 土壤温度对反演结果进行比较。基于遥感反演的地表温度结果分析了主城区城市热岛效应的空间分布格局及其与不同土地利用类型之间的关系。结果表明: (1) 基于 Landsat8 影像和劈窗算法的遥感反演地表温度在重庆主城区是可行的, 平均误差为 1.1℃; (2) 受不同土地利用和“两江四山夹三槽”特殊地形等因素的影响, 重庆主城区的城市热岛强度呈现出显著的空间分布差异, 较强热岛以上区域约占总面积的 11.55%, 其中, 建设用地区域明显高于其他土地利用类型, 约占总面积的 9.11%, 无热岛和弱热岛区域分别占总面积的 62.66% 和 19.98%, 主要为耕地和林地。

关键词: 地表温度; Landsat8; 城市热岛效应; 劈窗算法

中图分类号: P237; TP79

文献标志码: A

城市热岛效应 (Urban Heat Island Effect, 简称 UHIE) 是二十世纪六十年代以来陆续所发现的一个较普遍的地区性气候现象, 逐渐成为城市气候研究的热点^[1-2]。随着我国经济的高速发展和城市化进程的不断加速, 城市热岛效应及其对区域气候系统的影响, 越来越受到广泛重视。

近几十年, 国内外学者主要利用历史气象资料、数理模拟、布点观测和遥感反演等四种方法研究城市热岛效应。前三种方法很难真实和有效的反映区域 UHIE 的空间分布, 而遥感反演作为重要的现代对地观测手段, 具有覆盖范围广、成图效果直观、动态性好和成本低等优点, 已逐渐成为 UHIE 的主要研究方法, 即通过热红外遥感数据反演城市地表温度, 再利用地表温度分析城市热岛效应^[3]。目前, 地表温度的遥感反演算法主要有单通道算法、劈窗

算法和多波段算法。其中, 单通道算法需要实时的大气剖面数据, 且适用于只有一个热红外段的遥感数据, 如果缺乏实时大气剖面数据, 可将标准大气数据和实时地面气象资料结合使用。劈窗算法适用于有两个热红外段的遥感数据。多波段算法适用于有多个热红外段的遥感数据, 但由于所需参数多且运算复杂, 反演难度大, 较少被使用, 且算法还在不断发展中。上述算法中, 劈窗算法是一种精度较高的代表性算法^[4-7], 最初是针对 NOAA/AVHRR 数据的第 4 和 5 热红外波段提出的, 之后, 随着 EOS/MODIS 数据的免费发布, 其第 31 和 32 波段范围接近 NOAA/AVHRR 数据的第 4 和 5 波段范围, 也适用于劈窗算法。但是, 这两种数据源的空间分辨率均较低, 往往不能满足城市地表温度反演精细和准确的要求。随着 2013 年 2 月 Landsat8 的成功发射,

收稿日期 (Received date): 2017-06-19; **改回日期 (Accepted date):** 2018-06-14

基金项目 (Foundation item): 重庆市前沿与应用基础研究计划一般项目 (csc2015jcyjA0332); 重庆市社会民生科技创新专项项目 (csc2015shmszx00010); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-TZ-18)。[Chongqing Frontier and Applied Basic Research Program (csc2015jcyjA0332); Social Science and Technology Innovation Project of Chongqing (csc2015shmszx00010); Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (KZZD-EW-TZ-18)]

作者简介 (Biography): 李军 (1974-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 农业遥感和地理信息系统应用研究。[LI Jun (1974-), Ph. D., associate professor, research on agricultural remote sensing, geographic information system and its application] E-mail: junli@cqnu.edu.cn

其第 10 和 11 热红外波段数据的空间分辨率达到了 100 m,而且,与 MODIS 的第 31 和 32 个波段的宽度和中心波长基本一致。近年来,一些学者已利用 Landsat8 数据进行了城市热岛效应的研究^[9-17]。例如,徐涵秋等对比研究了基于 Landsat8 OLI/TIRS 影像的多种算法,发现利用单通道算法优于其他算法^[13];宋挺、邓睿等分别基于 Landsat8 数据和劈窗算法反演了无锡、重庆主城的地表温度及其城市热岛效应^[14-15];黎良财、陈云分别基于 Landsat8 OLI/TIRS 数据和单窗算法研究了柳州和厦门市的热岛效应^[16-17]。

重庆作为长江上游重要的经济发展中心城市自直辖以来,经济发展迅速,人口向主城区聚集,主城区建设用地不断扩张,热环境问题较突出,例如,2001 年 6—8 月的持续高温,2006 年的夏季高温特大干旱等,由此给人居环境带来的影响日益受到关注。

本文利用了 Landsat8 的 2 个热红外波段数据和 Offer Rozenstein 等提出的劈窗算法进行了改进,对重庆主城区夏季地表温度进行反演,并根据结果对其热岛效应强度等级进行定量分析,对于改善重庆主城区人居环境、制定相应的城市规划和改善人居环境质量等具有一定的参考价值。

1 研究区概况和数据源

1.1 研究区概况

本文的研究区为重庆主城区,地处 $106^{\circ}14'E \sim 106^{\circ}53'E$ 和 $29^{\circ}19'N \sim 29^{\circ}57'N$ 之间,面积为 5473 km^2 ,包括渝中区、江北区、南岸区、九龙坡区、沙坪坝区、大渡口区、北碚区、渝北区和巴南区 9 个区,又称主城九区。重庆主城区呈现“一城五片、多中心组团式”的空间结构(图 1)。据《重庆市统计年鉴(2015 年)》:2014 年重庆主城区的人口总数为 643.69 万人,占重庆市人口总数的 19%,然而,面积仅占全市的 6.6%,人口非常密集,每平方公里约为 1176 人;而且,自 1997 年直辖以来,全市人口从 3042.92 万人增加到 3375.20 万人(2014 年),增加了 332.28 万人,其中,主城区增加了 115.91 万人,是人口增加非常多的区域,人口向主城区集聚趋势非常明显。

重庆主城区属于山地城市,地处四川盆地,两江交汇之处,气候属于亚热带季风性湿润气候,年均气温在 18°C 左右,夏季炎热。日照时数为 $1000 \sim 1200$ 小时,降雨量在 $1000 \sim 1600 \text{ mm}$ 之间,年均相对湿度在 70% 以上。

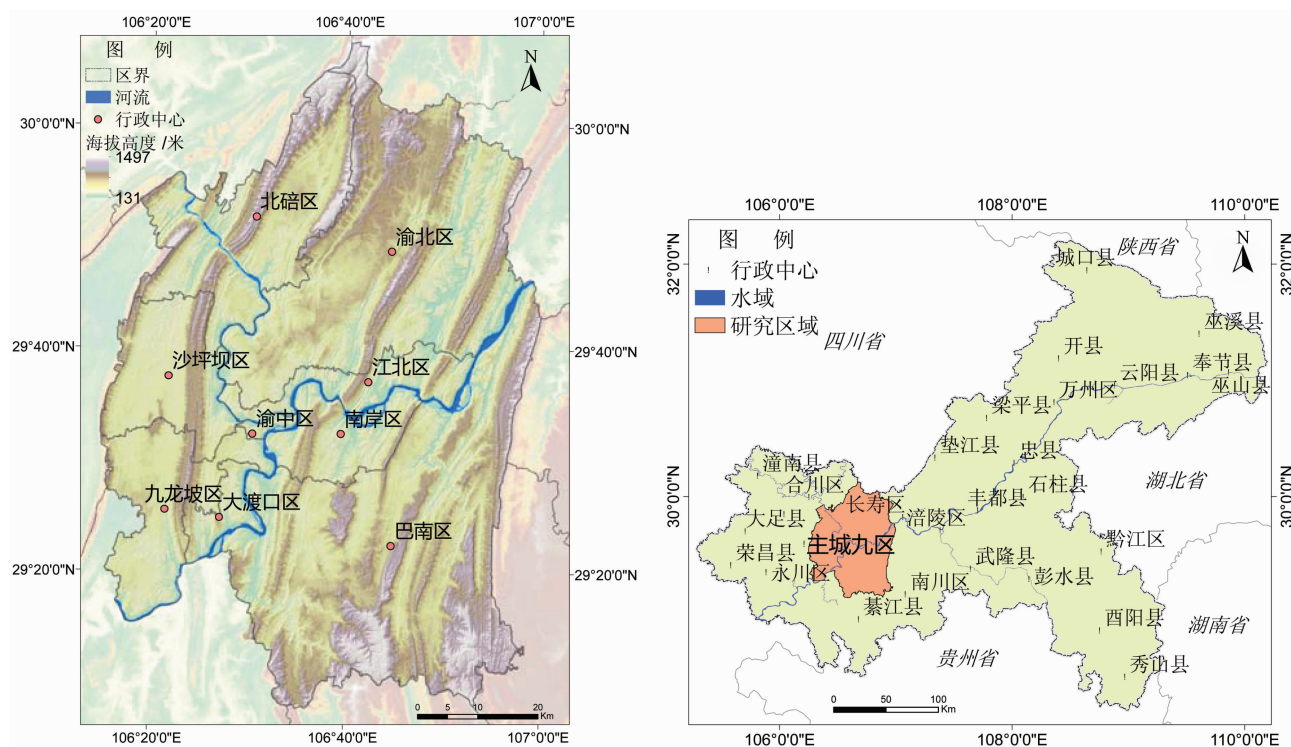


图 1 重庆主城区的地理位置
Fig. 1 Geographical location of urban district of Chongqing

1.2 数据源

1.2.1 遥感数据

(1)选取 2014 年 7 月 30 日和 8 月 6 日的 4 景晴朗少云条件下覆盖重庆主城区的 Landsat8 OLI/TIRS 影像数据(表 1),来自美国地质调查局(USGS),级别为 Level 1T(L1T),已做过辐射校正和几何校正,地图投影为 UTM,坐标系统为 WGS84,由于 USGS 在数据分发前已将 TIRS 的 2 个热红外波段重采样到 30 m 以匹配 OLI 传感器的多光谱波段,本文的 Landsat8 影像空间分辨率统一为 30 m。

(2)选取与上述遥感数据过境时间接近的 MODIS 水汽含量数据产品(MOD05_L2)用于计算大气透过率。

(3)重庆主城区 1:10 万土地覆被数据:来源于国家地球系统科学数据共享平台发布的 2015 年中国 1:10 万土地覆被数据产品,空间分辨率为 30 m。

表 1 重庆主城区 Landsat8 OLI/TIRS 影像数据信息

Tab. 1 Information of Landsat8 OLI/TIRS data in urban district of Chongqing

传感器	成像时间(北京时间)	备注
Landsat8 OLI/TIRS	2014 年 7 月 30 日 11:20	条带号:127/39 30°18' E, 107°39' N
	2014 年 7 月 30 日 11:20	条带号:127/40 28°52' E, 107°17' N
	2014 年 8 月 6 日 11:27	条带号:128/39 30°18' E, 106°6' N
	2014 年 8 月 6 日 11:27	条带号:128/40 28°52' E, 105°44' N

1.2.2 0 cm 土壤温度观测数据

选取重庆市气象科学研究所提供的主城区内 4 个气象站点(北碚、渝北、沙坪坝和巴南气象站,地理位置如图 2 所示)的 0 cm 土壤表层温度观测数据(按照《中国气象局地面气象观测规范》中相应的观测要求得到,观测仪器为铂电阻地温传感器的玻璃液体地温表),由于观测时间频次为小时,因此,选取了与本文采用的 Landsat8 数据的过境时间最接近的北京时间 11 点整和 12 点整的观测数据对反演的地表温度进行比较和验证分析。

2 研究方法

首先,利用 Landsat8 OLI/TIRS 数据和 MODIS 水汽含量产品数据(MOD05_L2)分别进行亮温、地



图 2 重庆主城区 4 个气象站点的地理位置

Fig. 2 Geographical location of four meteorological stations in urban district of Chongqing

表比辐射率和大气透过率的计算,然后,利用 Offer Rozenstein 等提出的劈窗算法反演地表温度。在反演结果的基础上,利用 0 cm 土壤温度观测值对反演结果进行对比分析,最后,对反演结果进行热岛效应的分级与评价。下面对劈窗算法中的具体参数做如下说明:

本文采用的劈窗算法是由 Offer Rozenstein 和覃志豪等基于 Landsat8 数据特点提出的^[18],其基本原理可用公式(1)表示:

$$T_s = A_0 + A_1 * T_{10} + A_2 * T_{11} \tag{1}$$

其中, T_s 为地表温度(K), T_{10} 和 T_{11} 分别为 Landsat8 第 10 和 11 波段的亮温(K)。三个参数 A_0 、 A_1 和 A_2 由大气透过率和地表比辐射率等因子确定,见如下公式(2):

$$\begin{cases} A_0 = E_1 a_{10} - E_2 a_{11} \\ A_1 = 1 + A + E_1 b_{10} \\ A_2 = -A - E_2 b_{11} \end{cases} \tag{2}$$

其中,参数 A 、 E_1 、 E_2 可利用如下公式(3)得到:

$$\begin{cases} A = D_0/E_0 \\ E_1 = D_{11}(1 - C_{10} - D_{10})/E_0 \\ E_2 = D_{10}(1 - C_{11} - D_{11})/E_0 \end{cases} \tag{3}$$

其中,参数 E_0 、 C_{10} 、 C_{11} 、 D_{10} 和 D_{11} 为地表比辐射

率和大气透过率的估算函数,可利用如下公式(4)得到:

$$\begin{cases} E_0 = D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11} \\ C_i = \varepsilon_i \tau_i(\theta) \\ D_i = (1 - \varepsilon_i \tau_i(\theta))(1 + (1 - \varepsilon_i) \tau_i(\theta)) \end{cases} \quad (4)$$

其中, i 表示 Landsat8 第 10 或 11 波段, ε 为地表比辐射率, $\tau(\theta)$ 为大气透过率。

参数 a_{10} 、 a_{11} 、 b_{10} 和 b_{11} 可根据如下公式(5)进行拟合得到,由于差别不大,根据研究区特点和前人的研究成果(利用 Planck 辐射函数和 TRIS 波谱响应函数以及 Landsat8 的第 10 和 11 波段的中心波长进行线性拟合,详见文献[9]),在地表温度 $0^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内,取 $a_{10} = -66.303$, $a_{11} = -70.86$, $b_{10} = 0.4463$, $b_{11} = 0.4826$ [9]。

$$\begin{cases} B_\lambda(T) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \\ L_i = B_i(T) / \left(\frac{\partial B_i(T)}{\partial T} \right) = a_i + b_i T_i \end{cases} \quad (5)$$

其中, $B_\lambda(T)$ 为辐射强度,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{um}^{-1}$, h 为普朗克常数,等于 $6.626076 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$, c 为光速,等于 $2.99792458 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, k 为玻尔兹曼常数,等于 $1.3806505 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$, e 为自然对数的底,等于 2.718, λ 为波长,单位为 um 。

下面对劈窗算法中的亮温、地表比辐射率和大气透过率三个重要参数的计算过程进行说明:

(1) 亮温

亮温是辐射出与观测物体相等辐射能量的黑体温度。将影像 DN 值定标为热辐射强度之后,可用 Planck 函数方程求解出亮温,见公式(6):

$$T_i = \frac{K_{12}}{\ln\left(\frac{K_{11}}{l_i} + 1\right)} \quad (6)$$

其中, T_i 为亮温(K), l_i 为 Landsat8 第 i 波段的辐射亮度值。 K_{11} 和 K_{12} 为常量,可从数据头文件中获取。对于 TIRS10: $K_{101} = 774.89 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{um}^{-1}$, $K_{102} = 1321.08 \text{K}$; 对于 TIRS11: $K_{111} = 480.89 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{um}^{-1}$, $K_{112} = 1201.14 \text{K}$ 。

(2) 地表比辐射率

地表比辐射率是物体与黑体在同温度和波长下的辐射出射度的比值,从 Landsat8 像元尺度,将地表结构视为水体、植被、建筑和裸土 4 种类型组成,利用覃志豪等基于植被覆盖度分自然表面(植被和裸

土的混合像元)和城镇地表(植被和建筑的混合像元)提出的经验公式(7)和(8)计算得到^[20]:

$$\text{自然表面: } \varepsilon_i = P_v R_v \varepsilon_{iv} + (1 - P_v) R_s \varepsilon_{is} + d\varepsilon \quad (7)$$

$$\text{城镇表面: } \varepsilon_i = P_v R_v \varepsilon_{iv} + (1 - P_v) R_m \varepsilon_{im} + d\varepsilon \quad (8)$$

其中, ε_i 为第 i 波段(Landsat8 的第 10 和 11 波段)的地表反射率, P_v 为植被覆盖度, R_v 、 R_s 、 R_m 分别为植被、裸土和建筑表面的温度比, ε_{iv} 为第 i 波段混合像元中植被的地表比辐射率, ε_{is} 为第 i 波段混合像元中裸土的地表比辐射率, ε_{im} 为第 i 波段混合像元中建筑的地表比辐射率, $d\varepsilon$ 为热辐射校正项。

参数 R_v 、 R_s 和 R_m 可用覃志豪等提出的经验公式(9)得到^[20]:

$$\begin{cases} R_v = 0.9332 + 0.0585 P_v \\ R_s = 0.9902 + 0.1068 P_v \\ R_m = 0.9886 + 0.1287 P_v \end{cases} \quad (9)$$

植被覆盖度(P_v)可用公式(10)表示为:

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right]^2 \quad (10)$$

其中, $NDVI$ 为归一化植被指数, $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ 分别为植被和裸土的 $NDVI$,本文取 $NDVI$ 累计百分比的 95% 和 5% 对植被覆盖度进行近似估计。

参数 ε_{iv} 、 ε_{is} 和 ε_{im} 可根据 ASTER 提供的常用地物地表比辐射率光谱库(<http://speclib.jpl.nasa.gov>)和 Landsat 8 数据特点确定,对于第 10 波段, $\varepsilon_{10v} = 0.987$, $\varepsilon_{10s} = 0.968$, $\varepsilon_{10m} = 0.965$, 对于第 11 波段, $\varepsilon_{11v} = 0.990$, $\varepsilon_{11s} = 0.978$, $\varepsilon_{11m} = 0.975$ 。

参数 $d\varepsilon$,在地表相对较平整(地形平坦)的区域,一般可取 0;在地表起伏较大的区域,可根据植被的构成比例估算^[21]:

$$\begin{cases} \text{当 } P_v = 0 \text{ 或 } 1 \text{ 时, } d\varepsilon = 0 \\ \text{当 } 0 < P_v \leq 0.5 \text{ 时, } d\varepsilon = 0.003796 P_v \\ \text{当 } 1 > P_v > 0.5 \text{ 时, } d\varepsilon = 0.003796 (1 - P_v) \\ \text{当 } P_v = 0.5 \text{ 时, } d\varepsilon = 0.001898 \end{cases} \quad (11)$$

注意:对于第 10 波段,利用公式(9)计算得到的 $\varepsilon_i > \varepsilon_{10v}$ 时,则取 ε_{10v} ,如果 $\varepsilon_i < \varepsilon_{10s}$ 时,则取 ε_{10s} ; 对于第 11 波段,利用公式(9)计算得到的 $\varepsilon_i > \varepsilon_{11v}$ 时,则取 ε_{11v} ,如果 $\varepsilon_i < \varepsilon_{11s}$ 时,则取 ε_{11s} 。

水体地表比辐射率的确定,借鉴了有关研究成

果^[14],对于 Landsat8 第 10 波段, $\varepsilon_{10w}=0.997$,对于第 11 波段, $\varepsilon_{11w}=0.993$ 。

(3)大气透过率

大气透过率是遥感反演地表温度的重要参数之一,对地表温度的反演精度影响较大。由于水汽含量是影响大气透过率的主要因素,本文根据重庆主城区夏季水汽含量高的特点,利用与 Landsat8 数据同一天的 MERRA 数据(大气再分析资料),提取了温度、湿度、气压、水汽含量等大气廓线参数,通过 MODTRAN 大气辐射软件(自定义大气模式)模拟大气透过率与水汽含量的关系(按照水汽含量在 $0.1 \sim 3.0 \text{ g/cm}^2$ 和 $3.0 \sim 5.6 \text{ g/cm}^2$ 进行分段拟合,由于重庆主城区夏季的水汽含量普遍在 $3 \sim 6 \text{ g/cm}^2$ 之间,仅取水汽含量在 $3.0 \sim 5.6 \text{ g/cm}^2$ 之间的拟合公式,见表 2),再利用 MODIS 水汽含量产品(MOD05_L2)得到研究区的大气透过率空间分布数据。

表 2 大气透过率与大气水汽含量之间的关系

Tab.2 Relationship between atmospheric transmittance and water vapor content

时间	波段	关系方程 (Y 为大气透过率, X 为水汽含量)	R^2
2014 年 7 月 30 日	10	$Y=0.003X^2-0.154X+1.111$	0.999
	11	$Y=0.011X^2-0.220X+1.114$	0.999
2014 年 8 月 6 日	10	$Y=0.002X^2-0.138X+1.094$	0.999
	11	$Y=0.009X^2-0.202X+1.099$	0.999

3 地表温度的反演结果及其精度验证

3.1 地表温度的反演结果

将上述参数应用到 Offer Rozenstein 的劈窗算法,并将两天的连续数据拼接得到了重庆主城区 2014 年夏季地表温度的反演结果,如图 3 所示。

从图 3 可以看出:重庆主城区 2014 年夏季的地表温度随着不同土地利用类型和特殊地形等呈现显著的空间分布差异,主城区内建设用地集中的区域普遍温度较高,例如,重庆火车北站-人和立交-观音桥商圈一带,较集中且成片分布,地表温度在 48°C 以上;而受主城区“两江四山夹三槽”特殊地形的影响,“四山”(缙云山、中梁山、铜锣山、明月山)的海拔较高区域以及“两江”(嘉陵江和长江)水体的温

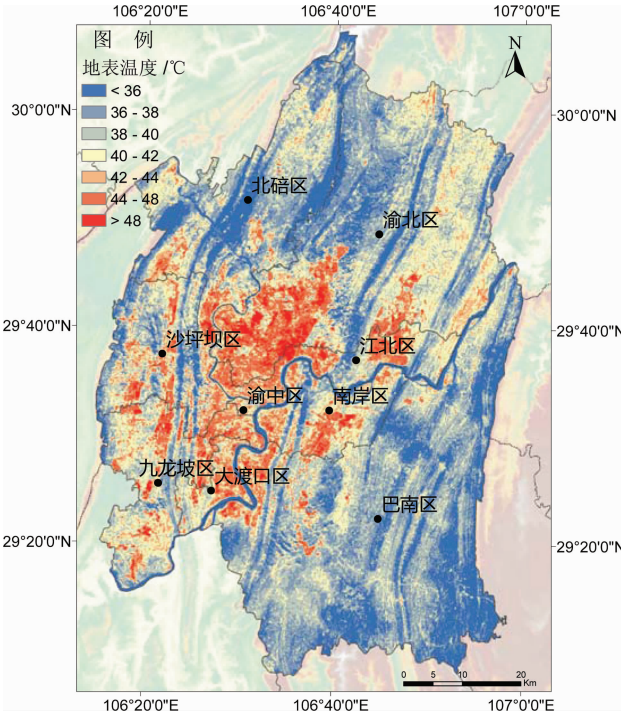


图 3 重庆主城区 2014 年夏季地表温度的反演结果

Fig.3 Retrieved land surface temperature in urban district of Chongqing

度明显较低,普遍均在 36°C 以下;其次为被平行岭谷分割的植被覆盖较多的丘陵区域,主要包括:主城区内的公园绿地、郊区林地、农田、自然绿地等,它们的地表温度大多在 $38^\circ\text{C} \sim 44^\circ\text{C}$ 之间。

为了进一步了解主城九区以及不同土地利用类型的地表温度差异,利用 ArcGIS 的空间分析功能,对反演后的地表温度数据分类统计,结果见表 3。

表 3 地表温度反演结果的空间统计结果

Tab.3 Spatial statistics of land surface temperature retrieval

主城九区	地表温度 平均值/ $^\circ\text{C}$	土地利用类型	地表温度 平均值/ $^\circ\text{C}$
渝中区	40.42	建筑用地	43.36
江北区	41.33	耕地	38.88
南岸区	40.37	林地	37.52
九龙坡区	40.99	草地	39.08
沙坪坝区	40.06	湿地	35.77
大渡口区	41.14	其他	40.47
北碚区	38.48		
渝北区	39.81		
巴南区	37.66		

从表 3 可以看出:主城九区之间的平均地表温度最高相差了 3.67℃,其中,大渡口区的平均地表温度最高,为 41.14℃,巴南区的平均地表温度最低,为 37.66℃;对于不同土地利用类型的地表温度而言,建设用地的地表温度最高,为 43.36℃,湿地的地表温度最低,为 35.52℃。

3.2 地表温度反演结果的验证

为了分析地表温度反演结果的精度,将主城区 4 个气象站点的位置信息与地表温度反演结果的空间数据进行叠加,提取出相应位置像元的地表温度值,并与卫星过境时刻临近的 0 cm 土壤温度观测值进行比较,其中,0 cm 土壤温度数据在空间分布上是点状数据(矢量数据的一种),而遥感反演的地表温度数据是栅格数据,两者均为空间数据,但在空间尺度上具有较大差异,尽管如此,借鉴目前在遥感反演地表温度结果的验证时普遍所采用的方法,即和地面实测资料进行对比,对比结果见表 4。

表 4 地表温度的反演结果与 0 cm 土壤温度的对比
Tab.4 Comparison of retrieved land surface temperature and 0 cm soil temperature

日期	站点号	站名	T/℃	T'/℃	ΔS/℃
2014 年 7 月 30 日 11:20	57513	渝北	51.3	53.8	2.5
	57518	巴南	49.9	51.9	2.0
2014 年 8 月 6 日 11:27	57511	北碚	54.0	54.4	0.4
	57513	渝北	51.4	52.6	1.2
	57516	沙坪坝	60.3	59.6	-0.7
	57518	巴南	41.2	42.9	1.7
平均值			51.4	52.5	1.1

表 4 的说明如下:①由于 0 cm 土壤温度观测数据是逐小时的,与卫星过境时间接近的时间是 11 点和 12 点,T 是将 11 点和 12 点的实测数据利用线性插值法得到卫星在过境时刻的估计 0 cm 土壤温度;②T'是遥感反演的地表温度;③ΔS = T' - T,是反演的地表温度与估算 0 cm 土壤温度的差值。

从表 4 可以看出,气象站点估算的平均实测 0 cm 土壤温度为 51.4℃,而相应位置通过遥感反演的地表温度平均值为 52.5℃,比估算的实测值约高 1.1℃,反演精度可以接受。对照各气象站点地表温度的遥感反演值与估算实测值发现:遥感反演值普遍大于估算实测值,可能与重庆主城区夏季的

水汽含量较高有关,这与宋挺等在基于 Landsat8 数据的地表温度反演算法对比研究中结果是一致的^[12]。

4 热岛强度的计算及其与下垫面的关系

通过城市热场变异指数(Heat Index, HI)定量分析城市热岛效应强度的大小,城市热场变异指数的计算公式如下:

$$HI(T) = \frac{T - T_{mean}}{T_{mean}}$$

(11)

其中,HI(T)是热场变异指数,T 是某点的地表温度,T_{mean}是区域的平均地表温度。

根据前人关于热场变异指数的等级划分^[22],采用阈值法将热场变异指数分为 6 级(表 5)。

表 5 热岛效应评价指标的阈值划分
Tab.5 Threshold division of heat island effect evaluation index

热场变异指数	热岛效应强度等级
≤0	无热岛效应
0 ~ 0.005	弱热岛效应
0.005 ~ 0.01	中热岛效应
0.01 ~ 0.015	较强热岛效应
0.015 ~ 0.02	强热岛效应
≥0.02	极强热岛效应

根据热岛效应评价指标体系,利用 ArcGIS 的空间分析功能对上述地表温度的遥感反演结果提取热场变异指数,并进行分类,得到重庆主城区 2014 年夏季热岛强度的空间分布(图 4)。

从图 4 可以看出,重庆主城区热岛强度的空间分布呈现明显的差异性,其中,“四山”等植被覆盖多的区域基本无热岛效应,较强热岛等级以上的区域大多是受人类活动影响较大的城镇区域,其中,极强热岛主要集中在地表温度高的 8 个区域,分别是:①火车北站 - 人和立交 - 观音桥商圈 - 江北华新街,②翠云 - 回兴 - 江北国际机场,③茶园新区 - 长生桥镇,④建胜镇 - 大渡口工业产业园,⑤含谷、白市驿镇一带,⑥大学城的虎溪、曾家镇一带,⑦沙坪坝区的井口镇以北一带,⑧江北的鱼嘴和龙兴镇一带。其中,渝北的重庆火车北站 - 人和立交 - 观音

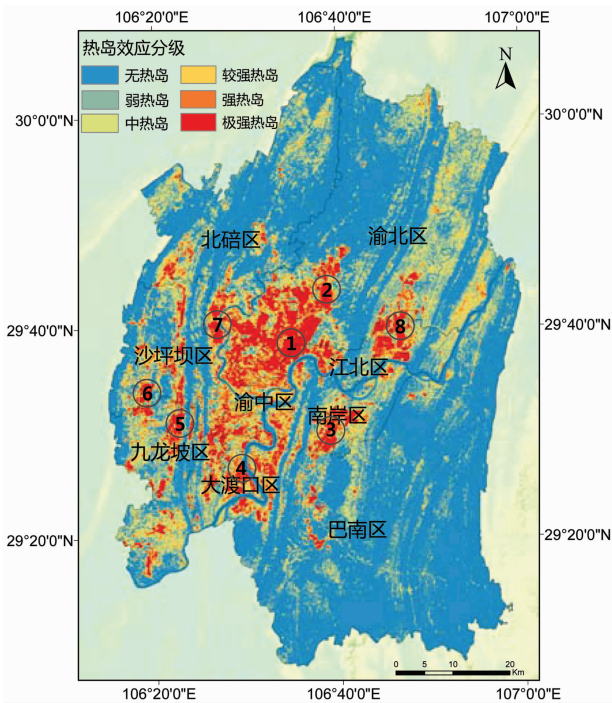


图 4 重庆主城区 2014 年夏季热岛效应等级的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of urban heat island intensity grades in urban district of Chongqing

桥商圈－华新街一带分布较广。

为了进一步分析不同下垫面的城市热岛强度差异,本文结合 2014 年重庆主城区的土地利用类型数据,利用 ArcGIS 对栅格数据的分区统计工具统计了 6 种不同的土地利用类型上城市热岛强度等级所占的面积比,结果见表 6。

表 6 不同土地利用类型的城市热岛强度等级所占的面积比 (单位: %)
Tab.6 Area ratio of urban heat island intensity grades in different landuse types (unit: %)

	无热岛	弱热岛	中热岛	较强岛	强热岛	极强岛
建筑用地	2.30	2.62	1.84	1.39	2.05	5.67
耕地	33.06	13.10	3.40	1.14	0.65	0.25
林地	24.87	3.92	0.55	0.10	0.03	0.10
草地	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
湿地	2.37	0.14	0.03	0.00	0.00	0.00
其他	0.06	0.11	0.07	0.06	0.03	0.03
合计	62.66	19.89	5.90	2.74	2.76	6.05

从表 6 可以看出,受主城区特殊地形和植被分

布特点的影响,无热岛区域仍然占了研究区的多数面积,为总面积的 62.66%,其他区域均有一定程度的热岛效应,其中,较强热岛以上区域占总面积的 11.55%,主要来自建设用地,约占总面积的 9.11%,这是由于这些区域植被覆盖少、透水性差、热容量小、热量容易集聚、升温快。此外,还有一少部分强热岛和极强热岛出现在耕地、林地表面,原因可能在于城镇化建设过程中,有配套的城市林地和受建设用地影响较大的部分耕地存在,而且,土地利用数据的解译精度也会对结果造成一定的影响。

5 结论

本文利用重庆主城区在 2014 年夏季(7 月 30 日和 8 月 6 日)的 Landsat8 OLI/TIRS 数据,采用 Offer Rozenstein 劈窗算法进行了地表温度反演,其中,根据研究区的地形和气候特点,调整了地表比辐射率和大气透过率等重要参数的获取方法,其次,利用主城区内 4 个气象站点观测的与卫星过境时刻相近的 0 cm 土壤温度数据对反演结果进行了验证,最后,利用地表温度的反演结果计算了热场变异指数,提取了不同等级的热岛强度,并分析了重庆主城区热岛效应的空间分布格局以及不同土地利用类型对城市热岛效应的影响,得到如下结论:

- (1) 利用 Landsat8 数据和调整参数后的 Offer Rozenstein 劈窗算法反演重庆主城区的地表温度是可行的,由于夏季水汽含量较高的影响导致反演结果比实测温度略偏高 1.1℃;受不同土地利用类型和“两江四山夹三槽”特殊地形等因素的影响,重庆主城区的地表温度呈现出显著的空间分布差异,建设用地集中的区域普遍温度较高,在 42℃ 以上,“四山”海拔较高区域以及“两江”水体的温度较低,均在 36℃ 以下,其次为被平行岭谷分割的植被覆盖较多的丘陵区域,大多在 38℃~44℃ 之间。此外,主城九区之间平均地表温度最高相差 3.67℃,其中,大渡口区最高(41.14℃),巴南区最低(37.66℃)。
- (2) 与地表温度的空间分布类似,重庆主城区热岛强度空间分布也呈现明显的差异性,极强和强热岛主要分布在如下区域:① 火车北站－人和立交－观音桥商圈－江北华新街,② 翠云－回兴－江北国际机场,③ 茶园新区－长生桥镇,④ 建胜镇－大渡口工业产业园,⑤ 含谷、白市驿镇一带,⑥ 大学城

的虎溪、曾家镇一带,⑦沙坪坝区的井口镇以北一带,⑧江北的鱼嘴和龙兴镇一带。其中,渝北的重庆火车北站-人和立交-观音桥商圈-华新街一带分布较广。较强热岛和中热岛区域大多也是受人类活动影响较大的城镇区域;主城区内的公园绿地、郊区林地、农田、自然绿地等区域呈现无热岛和弱热岛效应。

(3)针对不同土地利用类型而言,重庆主城区热岛效应空间分布特征表现为:较强热岛以上区域约占总面积的 11.55%,其中,建设用地明显高于其他土地利用类型,约占总面积的 9.11%;而无热岛和弱热岛依然为多数区域,分别占总面积的 62.66% 和 19.98%,主要为耕地和林地。

6 讨论

本文针对重庆主城区夏季高湿热的特点,引入 MERRA 大气再分析资料估算大气透过率,并结合劈窗算法估算了城市地表温度及其热岛效应,取得了较好的结果,但依然还存在一些问题:

(1)目前,由于 Landsat8 TIRS 11 波段的定标参数不稳定,导致基于 Landsat8 热红外数据和劈窗算法估算地表温度的结果也不稳定,尚待完善,下一步研究将考虑在重庆主城区基于 Landsat8 数据采用多种遥感反演方法进行对比分析。

(2)大气透过率和地表比辐射率是遥感反演地表温度的两个重要敏感参数,在夏季大气含水量较高的山地城市环境下,大气透过率和地表比辐射率等参数的敏感性分析以及如何提高它们的估算准确度仍有待进一步研究。

(3)在遥感反演地表温度结果的验证方面,相对应的地面实测数据无论是在时间尺度上还是空间尺度上常常都是不足的,如何选择有代表性的站点且能够进行充分有效的验证仍然是一个值得研究的难点问题。

致谢:感谢重庆市气象科学研究所提供的主城区内 4 个气象站点 0 cm 土壤温度观测数据。

参考文献 (References)

- [1] LANDSBERG H E. The Urban Climate[M]. New York: Academic Press, 1981: 28-30.
- [2] 周淑贞,束炯.城市气候学[M].北京:气象出版社,1994: 245-346 [ZHOU Shuzhen, Su Jiong. Urban Climatology[M]. Beijing:

China Meteorological Press, 1994: 245-346]

- [3] 祝善友,张桂欣,尹球,等.地表温度热红外遥感反演的研究现状及其发展趋势[J].遥感技术与应用,2006,21(5):420-425 [ZHU Shanyou, ZHANG Jiaxin, YIN Qiu, et al. Actualities and development trends of the study on land surface temperature retrieving from thermal infrared remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(5): 420-425]
- [4] TANG Bohui, BI Yuyun, LI Zhaoliang, et al. Generalized split-window algorithm for estimate of land surface temperature from Chinese geostationary FengYun meteorological satellite (FY-2C) data[J]. Sensors, 2008, 8(2): 933-951
- [5] LI Zhaoliang, TANG Bohui, WU Hua, et al. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 14-37
- [6] 寿亦章,张大林.城市热岛效应的研究进展与展望[J].气象学报,2012,70(3):338-353 [SHOU Yixuan, ZHANG Dalin. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 338-353]
- [7] 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 Hanchu. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 3890-3901]
- [8] 毛克彪,覃志豪,宫鹏,等.劈窗算法 LST 精度评价和参数敏感性分析[J].中国矿业大学学报,2005,34(3):318-322 [MAO Kebiao, QIN Zhihao, GONG Peng, et al. The evaluation of split-window algorithm and the analysis of parameter sensitivity[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(3): 318-322]
- [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 Huai. Research of split window algorithm for retrieval of land surface temperature from Landsat8[J]. Journal of Geomatics, 2014, 39(4): 73-77]
- [10] 胡德勇,乔琨,王兴玲,等.单窗算法结合 Landsat8 热红外数据反演地表温度[J].遥感学报,2015,19(6):964-976 [HU Deyong, QIAO Kun, WANG Xinling, et al. Land surface temperature retrieval from Landsat8 thermal infrared data using mono-window algorithm[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(6): 964-976]
- [11] 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 Dalin, KUANG Honghai, CAO Xiaofeng, 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]
- [12] 李瑶,潘竟虎.基于 Landsat8 劈窗算法与混合光谱分解的城市热岛空间格局分析——以兰州市中心城区为例[J].干旱区地理,2015,38(1):111-119 [LI Yao, PAN Jinghu. Spatial pattern on urban heat environment using split window algorithm and spectral mixture analysis based on Landsat 8 images: a case of

- Lanzhou city[J]. *Arid Land Geography*, 2015, **38**(1): 111 – 119]
- [13] 徐涵秋. 新型 Landsat8 卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. *地球物理学报*, 2015, **58**(3): 741 – 747 [XU Hanqiu. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat8 satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, **58**(3): 741 – 747]
- [14] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. 基于 Landsat-8 数据和劈窗算法的地表温度反演及城市热岛效应研究[J]. *环境监控与预警*, 2014, **6**(5): 4 – 10 [SONG Ting, DUAN Zheng, LIU Junzhi, et al. Land surface temperature retrieval from Landsat8 data using split-window algorithm and its application on the study of urban heat island effect [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2014, **6**(5): 4 – 10]
- [15] 邓睿, 胡日查, 刘亮, 等. 基于 Landsat8 OLI/TIRS 数据的重庆市不透水面与城市热环境关系研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2017, **36**(1): 68 – 76 [DENG Rui, HU Richa, Liu Liang, et al. Study on the relationship between the impervious surface and the urban thermal environment in Chongqing based on Landsat8 OLI/TIRS image [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2017, **36**(1): 68 – 76]
- [16] 黎良财, Deng-sheng LU, 张晓丽, 等. 基于 Landsat8 卫星影像的重工业城市热岛效应研究——以柳州市为例[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, **35**(7): 74 – 80 [LI Liangcai, LU D S, ZHANG Xiaoli, et al. Study on urban heat island effect of heavy industries based on Landsat8 satellite imagery — A case study in Liuzhou city[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, **35**(7): 74 – 80]
- [17] 陈云. 基于 Landsat8 的城市热岛效应研究初探——以厦门市为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2014, **37**(2): 123 – 128 [CHEN Yun. A preliminary study on the urban heat island effect based on Landsat8: case of Xiamen city [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014, **37**(2): 123 – 128]
- [18] ROZENSTEIN O, QIN Z H, DERIMIAN Y, et al. Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm[J]. *Sensor*, 2014, **14**: 5768 – 5780
- [19] QIN Z H, DALL O G, KARNIELI A, et al. 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*, 2001b, **106**(D19): 22655 – 22670
- [20] 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(3): 28 – 32 [QIN Zhihao, LI Wenjuan, XU Bin, et al. Estimation of land surface emissivity for the spectral range of Landsat TM6 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2004(3): 27 – 32]
- [21] SOBRINO J A, JIMNEZ MUNOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 434 – 440
- [22] 张勇, 余涛, 顺行发, 等. CBERS-02 IRMSS 热红外数据地表温度反演及其在城市热岛效应定量化分析中的应用[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(5): 789 – 797 [ZHANG Yong, YU Tao, SHUN Xingfa, et al. Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(5): 789 – 797]

Urban Heat Island Effect Based on Landsat8 Image in Urban Districts of Chongqing, China

LI Jun^{1,2,3}, ZHAO Tong¹, ZHU Wei¹, LUO Yulan¹

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

2. Key Laboratory of GIS Application of Chongqing, Chongqing 401331, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Earth

Surface Processes and Environmental Remote Sensing in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

Abstract: As an important economic center city on the upper reaches of the Yangtze River in western China, Chongqing is also rapidly urbanizing. The effect of urbanization on the urban thermal environment has attracted increasing research attention for its significant relationship to local habitat comfort. In order to study on urban heat island effect in Chongqing in recent years, the land surface temperature in urban districts of Chongqing was firstly retrieved by using split-window algorithm and Landsat8 data on July 30, and August 6, 2014. Moreover, according to the characteristics of high atmospheric water content in summer in urban districts of Chongqing, the atmospheric transmittance were adjusted. The retrieved land surface temperatures were compared with the 0 cm soil temperatures

observed by 4 meteorological stations. Then the spatial distribution of the urban heat island effect in urban districts of Chongqing and its quantificational relation with land use were analyzed. Results showed that: (1) the scheme proposed in our work to retrieve land surface temperature from Landsat8 data in urban districts of Chongqing was acceptable. The mean bias of the retrieved land surface temperature was 1.1°C . (2) Influenced by landuse, special terrain topography like “two rivers, four mountains with three slots” and etc. , the spatial distribution of heat island intensity in urban districts of Chongqing showed significant differences. The strong heat island zone was occupied over 11.55% and it was mainly distributed in the built-up area, occupied 9.11%. No heat island and weak heat island mainly appeared in the cultivated land and forest, occupied 62.66% and 19.98% respectively.

Key words: land surface temperature; Landsat8; urban heat island effect; split-window algorithm