

基于 MODIS 数据的重庆市 城市热岛效应时空分析

潘莹 崔林林 刘昌脉 陈龙 张岭峰

(成都信息工程大学 资源环境学院, 成都 610225)

【摘要】: 随着全球城市化的加速发展,城市热岛现象愈发突出。在重庆市城市化进程中遭遇特大高温灾害的背景下,基于 MODIS 数据和气象数据,得到重庆市热场强度和强度指数时间序列数据。采用定性和定量分析手段,分析重庆市城市热岛效应的时空变化特征,揭示地表温度与下垫面之间的关系。结果表明:重庆市 1951—2016 年的年平均气温呈显著上升趋势($P < 0.01$);重庆市主城区 2001—2016 年城市热岛面积和强度呈显著增大趋势;城市热岛与环境要素关系密切,归一化植被指数与地表温度呈显著负相关,这说明植被对热场具有调节作用,地表温度与平均气温呈正相关,说明地表对大气具有加热的作用;城市用地、水体、裸地或无植被区域的平均地表温度高于其他下垫面。本研究结果可为重庆市城市规划和生态城市建设提供依据。

【关键词】: 城市热岛 重庆 地表温度 热场强度

城市环境问题是当今世界面临的人口、资源与环境三大问题的重要内容之一。城市热岛是城市环境问题的重要研究方向。由于城市化进程的加快,城市建筑群、柏油路和水泥路面等不透水面比郊区的土壤和植被具有更大的热容量和吸热率,同时蒸发耗热减少,使得城区存储较多的热量,并向周围和大气中辐射,造成同一时间城区气温普遍高于周围郊区的现象(高温城区处于低温郊区的包围之中),称为城市热岛效应(Streutker, 2003)。城市热岛效应是在不同气候和人类活动影响下形成的特殊小气候,是城市生态环境失调引起的一种城市环境问题(贾宝全等, 2013),已成为城市生态环境的一大公害,严重影响城市居民的正常生活与健康(Steenefeldetal., 2011;Astrometal., 2016)。儿童和老人对高温非常敏感(Kovatsetal., 2008),在中低纬度地区的夏季,热岛效应使原来就比较高的气温更高,加剧了城市高温出现的频率和高温灾害,这导致疾病和死亡增加。温度升高加大了城市居民电量的消费,极端的高温对城区居民的健康亦构成较大威胁,也加快了大气中光化学反应的速率,加重了城市大气污染(李晓敏等, 2015)。因此,深入研究城市热岛的演变过程及其影响因素,对于探讨城市热岛的形成机制,以及城市热灾害预警和经济发展、城市规划和城市的绿化建设都具有重要的理论与现实意义。目前城市热岛的研究方法主要包括有气象站观测法(Memonetal., 2009)、定点现场观测法、移动样带观测法(Huangetal., 2008)以及数值模拟法(Zehnedetal., 2002)和遥感监测法。其中,热红外遥感是目前环境监测采用的最为广泛的方法(Rao, 1972;Wengetal., 2009),它具有时间序列长、覆盖面积宽、可长时间在时空上进行连续监测等优点。城市热岛遥感监测体系正在不断完善。陈云浩(2002)等利用 TM6 数据,基于热力景观生态学和 GIS 技术,首次创建了一系列研究城市热环境格局的方法并建立了一套有效地评价指标体系。叶彩华(2011)等基于 MODIS 地表温度产品,通过热岛强度、热场强度指数和热岛比例指数 3 个指标有效地监测北京市热岛的强弱与变化。基于 Aqua/MODIS 数据对全球多个城市一年中白天 LST 超过 20°C 时段内的地表城市热岛研究表明,白天全球普遍存在地表城市冷岛的现象,而夜间通常都存在城市热岛现象(Clintonetal., 2013)。重庆市白天云层通常较厚,地表温度产品会出现较多的空值,而夜间的地表温度产品空值较少,质量较好。为此,本文基于重庆市夜间地表温度对重庆市城市热岛效应开展研究。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

重庆(105° 11' E—110° 11' E、28° 10' N—32° 13' N)地处长江、嘉陵江和乌江河谷,西部是青藏高原大地形,南靠云贵高原,东面、北面有大巴山和秦岭为屏障,地形闭塞,气流不畅,热量不易于外界交换,夏季风盛行时,低层偏南气流沿山地下滑到河谷地带,容易出现下沉增温,焚风效应明显。重庆特殊的地理位置和地形地貌使重庆称为长江流域三大“火炉”之一(刘毅,2006)。又因其地形以丘陵、山地为主,地势起伏较大,在其四周有巫山、大巴山、大娄山和武陵山的环绕,因而别称“山城”。重庆市东西向长达 470km,南北向宽达 450km,其辖区总面积为 $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$,管辖着 21 个区、13 个县、4 个自治县。重庆主城区(面积为 $5.5 \times 10^3 \text{ km}^2$)包括渝中区、江北区、南岸区、九龙坡区、沙坪坝区、大渡口区、渝北区、巴南区、北碚区,俗称主城九区。重庆地区属于亚热带季风性湿润气候,气候温和,但夏季尤为炎热,其日最高温度几乎都在 35℃ 及以上。

1.2 数据来源

本文选取的数据包括遥感数据和气象数据。其中,遥感数据有 2001、2006、2011 和 2016 年 1、4、7、10 月的地表温度 8 天合成的分辨率为 1km 的 MOD11A2 遥感影像产品,获取行列号为 h27v05、h27v06 共计 128 景影像;2006 和 2016 年 1、4、7、10 月的分辨率为 500m,覆盖面积为全国的 NDVI 月产品;2001 和 2006 年分辨率为 500m 的土地利用覆被数据 MCD12Q1,获取行列号为 h27v05、h27v06 共 4 景影像。其中,MOD11A2 和 NDVI 数据是在地理空间数据云网站上获取的(<http://www.gscloud.cn/sources>),MCD12Q1 则是从 NASA 官网上获取的(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)。

气象数据包括 1951—2016 年重庆市每个月的月平均气温、平均最高气温、平均最低气温以及 2006 年重庆市每天的日平均气温、平均最高气温、平均最低气温。数据下载网站为中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/data/index.html>)。

1.3 研究方法

本文利用 MODIS 产品中的土地利用数据、NDVI 和地表温度数据,对重庆市进行城市热岛的时空分析和热环境成因分析。在空间上,对城市的热场强度等级进行划分,分析出热环境的城郊变化;时间上,分析城市热环境的年变化特征。同时,对热环境的成因研究了热环境与下垫面特征的关系以及热环境与气象要素的关系。最后开展重庆市城市热岛效应的时空分析。

热场强度。采用 MODIS 地表温度产品(LST)表示热场分布,LST 是反映热场最直接、最重要的定量指标(张佳华等,2010)。白天重庆上空云层较厚,其地表温度数据的空值较多,而夜间的热岛强度也较稳定(陈云浩等,2014),所以本文基于夜间地表温度开展重庆市热场分布的相关研究。由于影像获取时间和环境不同,地表温度不能进行直接比较,但热场的相对强弱分布不会受其他因素影响,因此,为了分析地表热环境的相对时空变化,对地表温度进行城市地表热场等级划分(莫新宇等,2013)。

本研究选用均值-标准差法来划分地表热场,此方法是对地表温度均值和标准差的倍数组合对地表温度进行分级,实现对城市热环境的界定。标准差是对地表温度偏离平均温度的反映,较常用的等间距密度分割法,更能反映城市热岛分级特征(白杨等,2013)。基于以上理论,以 μ (均值)、 0.5std (标准差)、 1std 为分割点将重庆市地表热场划分为 5 级。为分析热岛情况,将高温区和中高温区作为热岛范围。

热场强度指数。虽然热场强度能够有效反映出城市热岛的水平分布,但为了更好地监测重庆的热环境,本文引入了热场强度指数。热场强度指数能对图像热场分布的相对高温、低温范围及位置做出判断,具有热场指示意义,热场强度定义为热场的归一化,其表达式为:

$$H_i = \frac{BT_i - BT_{\min}}{BT_{\max} - BT_{\min}} \quad (1)$$

式中： H_i 为第 i 个像元对应的热场强度指数， BT_i 为第 i 个像元的地表温度， BT_{\min} 为图像范围内最低地表温度， BT_{\max} 为图像范围内最高地表温度， H_i 为 0~1，其值越大，高温现象越明显。其中 BT_{\min} 和 BT_{\max} 分别为图像的频率累积直方图上的 0.05%和 99.95%处的值，这不仅可以去除异常值，而且还能保证图像的高温区域和低温区域，可以更合理地研究重庆市的热环境。根据张佳华等(2010)的研究，对大量图像进行分析，将其热场强度指数分为 5 个等级。

环境评估方法。地表温度产品表示城市的热环境状况，通过 NDVI 可以反映下垫面的植被状况。Gallo 等(1993)研究表明，植被指数和地表辐射温度一样，都与城乡气温之间存在着明显的线性关系。由于山区的 LST 受到海拔、阴影等因素影响，对重庆市的热环境评估可以采用 2006、2016 年春、夏、秋、冬季节合成的 LST 与 NDVI 数据去除山区等影响，并提取时空一致的 LST 与 NDVI 值，制作 NDVI-LST 散点图，对散点拟合进行线性回归分析，判断其相关的正负性；同时求得散点图两个变量的判定系数(即相关系数的平方)，用以解释变量 NDVI 对因变量 LST 的联合的影响程度。

城市的气温会与地表进行能量传递，所以地表温度与气温存在着某种关系。本文利用 2006 和 2016 年地表温度及重庆市的奉节、梁平、万州、沙坪坝、涪陵、酉阳 6 个地面气象站平均气温资料，提取了同一时间下的气象站点处的 LST，制作 LST-平均气温散点图，并对散点图进行线性回归分析，判断其相关的正负性；同时求得散点图两个变量的判定系数(即相关系数的平方)，用以解释变量 LST 对因变量平均气温的联合的影响程度。

下垫面类型的不同导致其吸收或释放相同的能量引起的地表温度的变化不同，这对城市热环境有一定的影响。本文提取了 2001 年和 2006 年 4 个季节不同下垫面类型的平均地表温度，拟通过传统统计方法，研究重庆市各类下垫面地表温度的季节性变化。

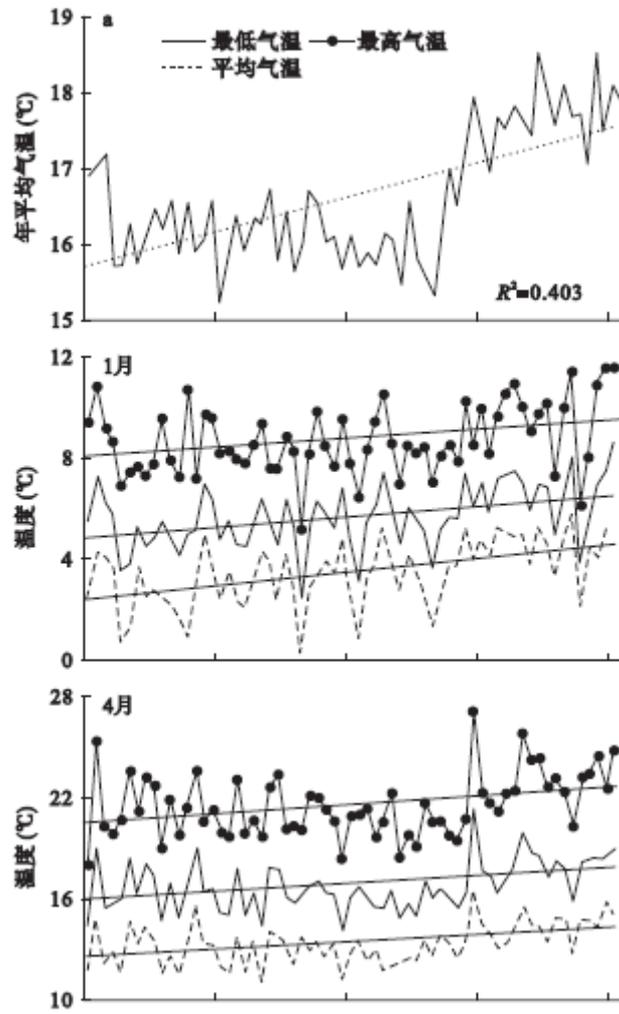
2 结果与分析

2.1 热环境时空特征

2.1.1 重庆市气候特征

重庆市 1951—2016 年年平均气温最低的是 1967 年的 15.26℃，年平均气温最高的是 2013 年的 18.54℃，次之是 2006 年的 18.49℃。1951—2016 年，重庆市年平均气温最大温差为 3.28℃。由图 1a 可知：重庆市年平均气温虽有波动，但整体呈显著上升趋势($P < 0.01$)。自 1995 年起，重庆市的年平均气温明显比往年偏高，但这与全球气候变暖相比，具有一定的滞后性(何泽能等, 2008)。

图 1b、c、d、e 分别为重庆市 1951—2016 年来 1、4、7、10 月各站台的平均气温、平均最高气温、平均最低气温的变化趋势。以年为尺度来看，1951—2016 年重庆市的平均气温、平均最高气温、平均最低气温均有上升趋势。平均气温在 4 个月的增暖幅度大体相近，但 10 月的增暖幅度最大，达到 1.96℃；其中增暖幅度最小的是在 7 月，为 1.72℃。平均最高气温在 4 月增暖幅度最大，达到 2.16℃；在 1 月增暖幅度最小，为 1.47℃。平均最低气温在 1 月增暖幅度最大，达到 2.34℃；在 7 月的增暖幅度最小，为 1.72℃。



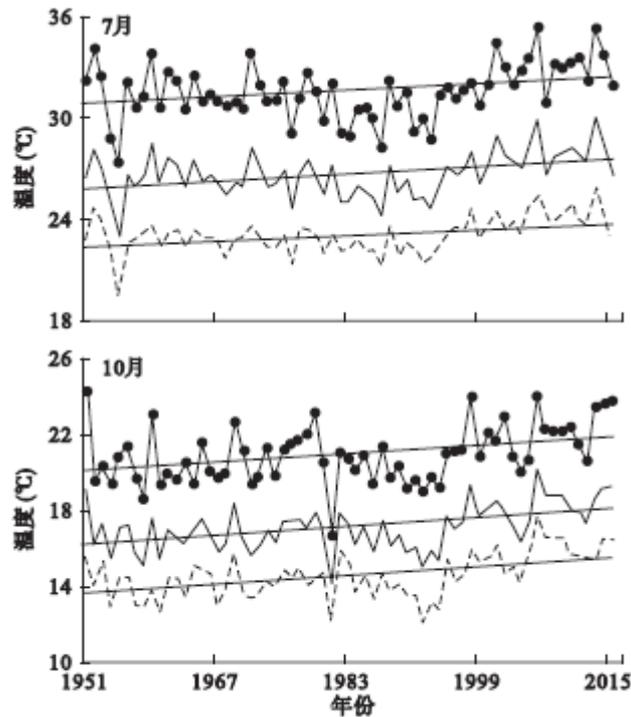


图1 重庆市 1951—2016 年气温变化趋势

以月为尺度来看, 1951—2016 年, 1 月的平均最低气温的增暖幅度最大, 为 2.34℃; 平均最高气温增暖幅度最小, 为 1.47℃; 平均气温增暖幅度为 1.87℃。4 月的平均最高气温的增暖幅度最大, 为 2.16℃; 平均最低气温增暖幅度最小, 为 1.87℃; 平均气温增暖幅度为 1.93℃。7 月的平均最高气温增暖幅度最大, 为 1.93℃; 平均最低气温与平均气温增暖幅度一致, 为 1.72℃。10 月的平均最低气温的增暖幅度最大, 为 2.15℃; 平均气温增暖幅度最小, 为 1.96℃; 平均最高气温增暖幅度为 2.05℃。

2006 年重庆市发生百年一遇的特大高温伏旱, 图 2 是 2006 年重庆市各站台平均气温变化趋势图。2006 年全年平均气温超过 27℃ 的有 72d, 最高气温超过 27℃ 的有 144d, 并在第 227 天时达到 2006 年的最高气温 41.18℃; 最高气温高于 35℃ 的天数共计 50d, 这 50d 主要处于在 6 月末到 9 月初, 说明重庆市 2006 年中有 1/7 的时间遭受高温灾害。

2.1.2 重庆市热场强度

由图 3 可知, 重庆市春季的热岛范围集中在 2006 年; 夏季在 2001 年的中高温区在 2006 年逐渐演变成为高温区, 2006 年的部分中高温区在 2011 年也逐渐演变为高温区, 热岛效应更加明显, 强度也逐渐增加, 这与王艳姣(2008)等的研究结果相似; 到 2016 年此演变有所缓解; 秋季变化与夏季的热岛变化基本一致。重庆市的热岛效应范围主要分布在主城区和长江流域, 这与何泽能(2008)等的研究结果一致, 特别是 2011 年的冬季, 主城区与长江流域处的高温区尤为明显。

由表 3 可以看出, 高温区的占比介于 6%~15%, 说明存在热岛效应, 但并不十分明显。中高温区比高温区有所增加, 且幅度较大。若将热岛区定义为高温区和中高温区, 那么重庆市的热岛面积约占重庆市面积的 35%, 大部分地区位于中温区, 而中低温区和低温区所占比例相对较少; 分析重庆市 2001—2016 年的热岛区面积, 总体呈上升趋势, 这与何泽能等(2017)研究结果一致。标准差在冬季达到最小, 这说明冬季地表温度的变化相较于其他季节较稳定。

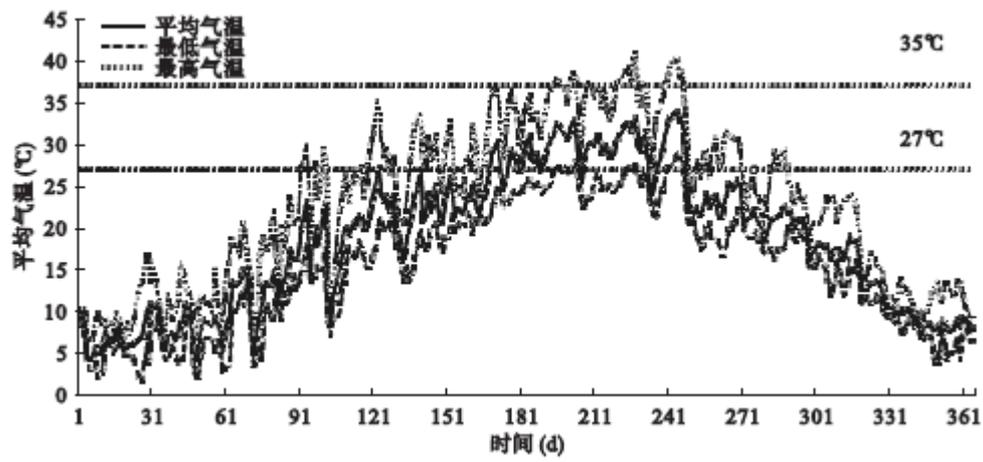
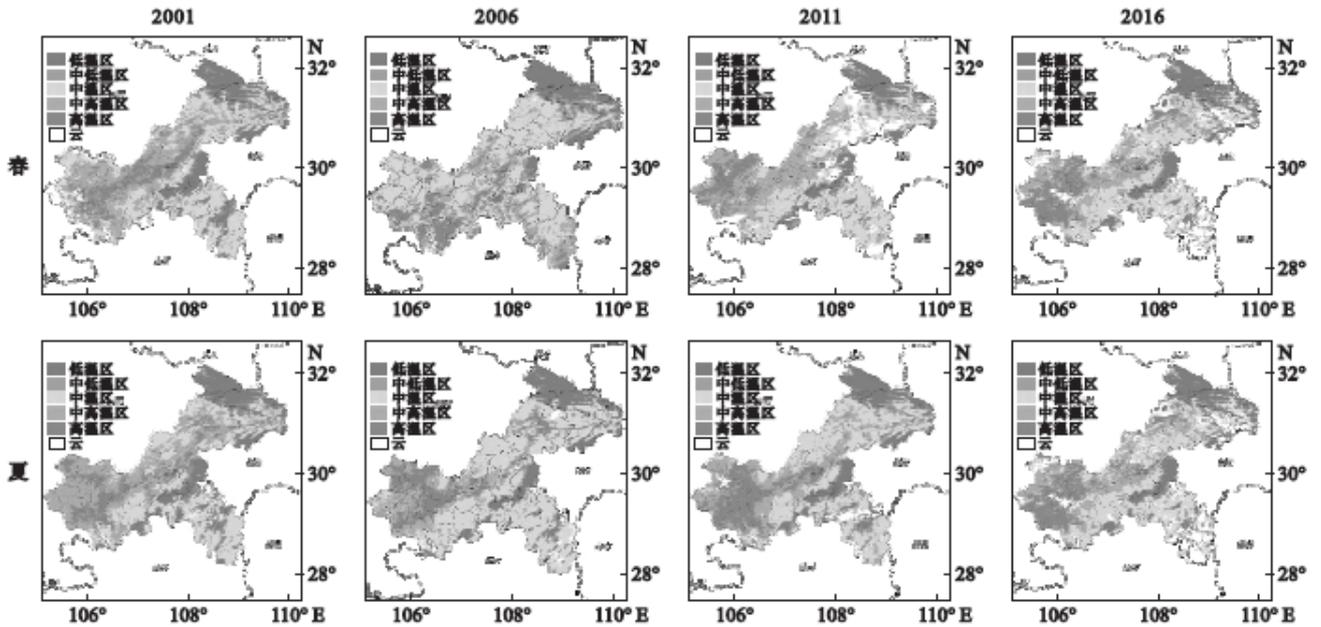


图2 重庆市 2006 年各站台平均气温变化趋势图



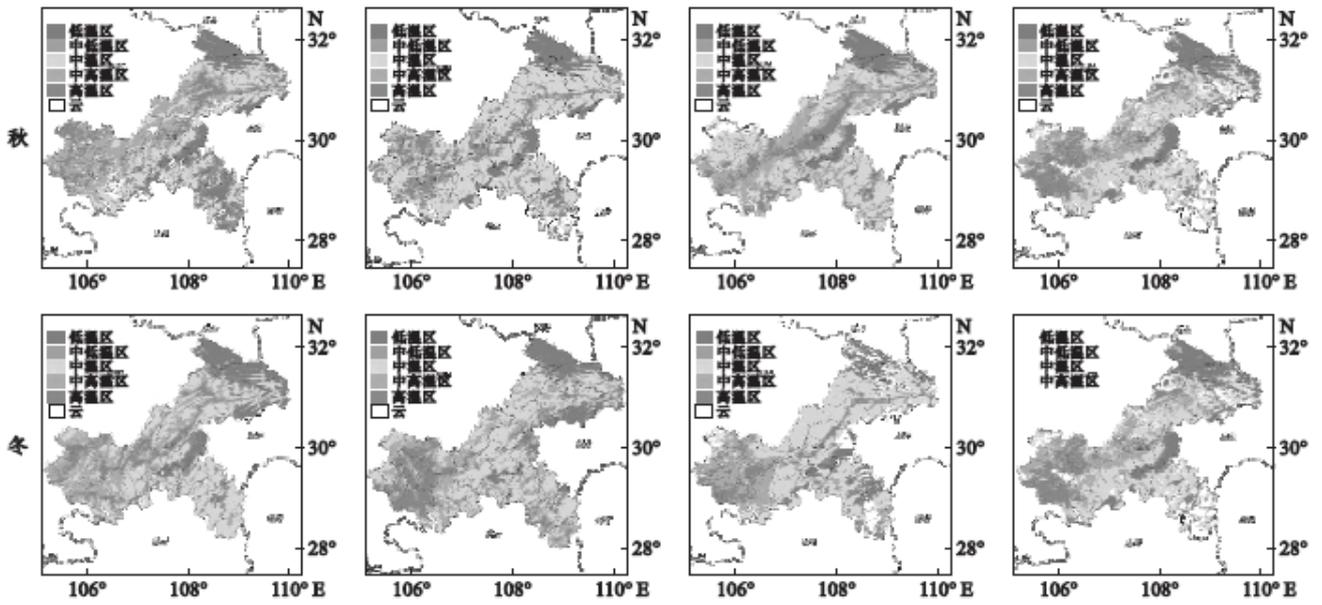


图3 重庆市2001、2006、2011、2016年四季热场分级

2.1.3 重庆市热场强度指数

利用ENVI基于公式1对2001、2006、2011和2016年7月的热场数据进行统计及归一化处理得到四年7月的热场强度指数。由图4可以看出,7月重庆市大部分区域都处于较高温区域,并且2006年重庆市高温区域较2001年高温区域有所增加,且增加集中在重庆市主城区;2011年相较于2006年高温区域和较高温区域有所减少;2016年重庆市主城区的高温区域相较于2011年有所减少,但重庆市2016年重庆市开县的较高温区域相较于往年有所增加。总体来说,2016年的重庆市较高温区域比2011年重庆市较高温区域面积更大。

2.2 城市热岛与环境要素的关系

2.2.1 热场与NDVI的相关性

由图5可知,NDVI与地表温度基本上是呈负相关,即NDVI越大,地表温度越低;NDVI越小,地表温度越高;这与杨春华(2014)等的研究结果一致。总体来说,重庆市的NDVI和地表温度的相关性不高,但夏季的相关性比春秋高。同时,比较各季节的NDVI值的分布可知,重庆市一年四季的NDVI都较高,这与重庆市的经纬度有关,四季并不分明。夏季,重庆市的NDVI值大部分都分布在0.8~1,NDVI值越高对应的地表温度则越低,这说明植被对重庆市的城市热场具有调节作用,这与崔耀平(2015)等的研究结果类似。

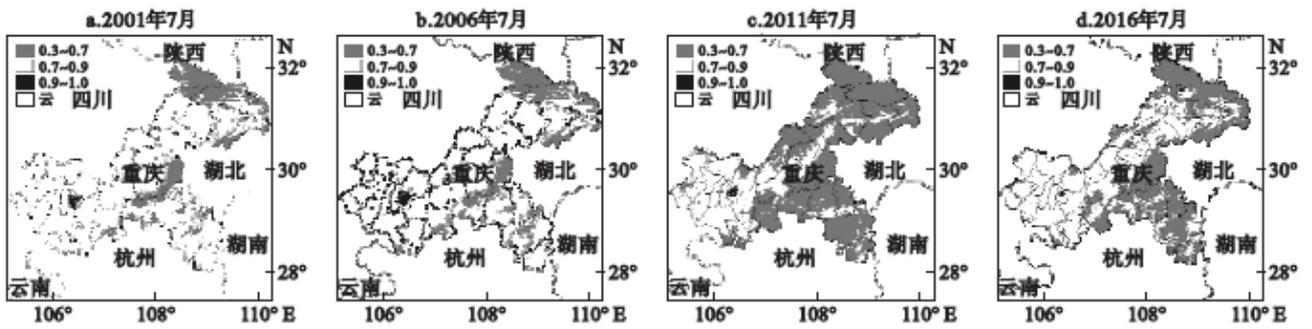
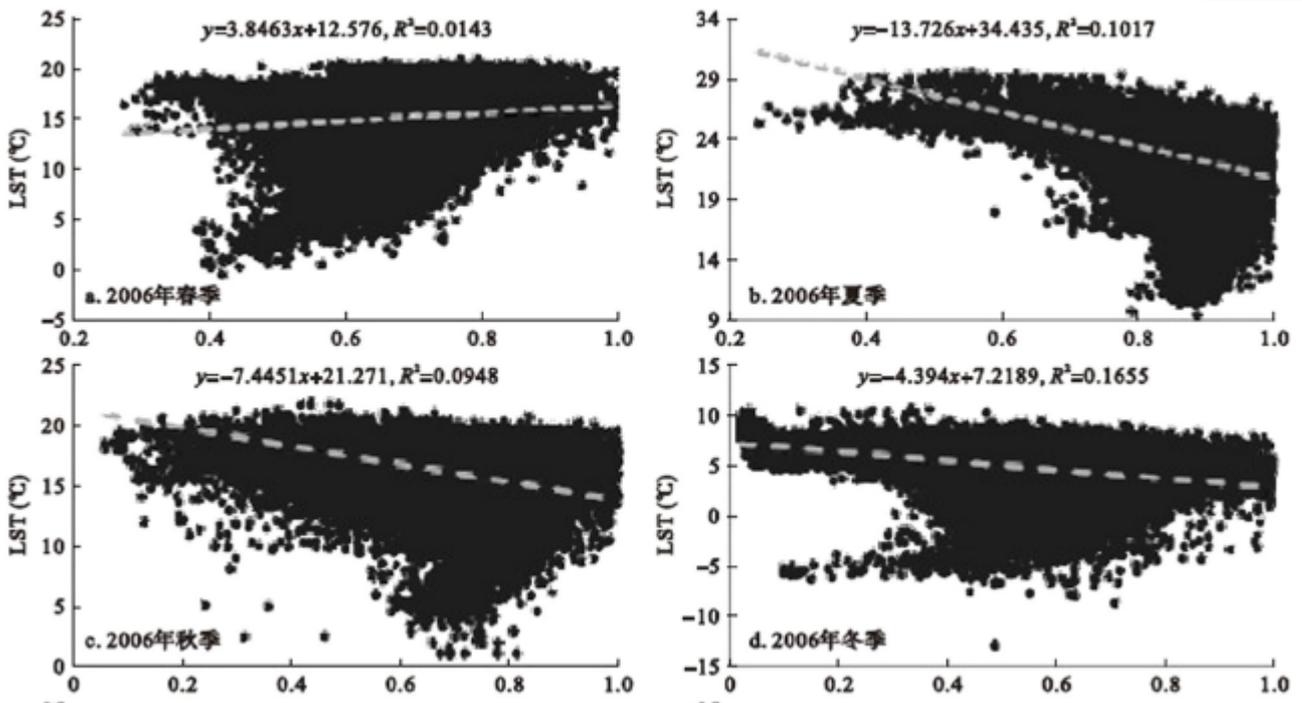


图4 重庆市2001、2006、2011、2016年热场强度指数

2.2.2 地表温度与平均气温相关性

利用2006和2016年的MODIS地表温度产品以及重庆市的奉节、梁平、万州、沙坪坝、涪陵、酉阳6个地面气象站平均气温资料,选取4、7、10、1月分别代表春、夏、秋、冬,对LST和平均气温做线性回归,得到如图14重庆市2006年春、夏、秋、冬LST与平均气温相关关系图。



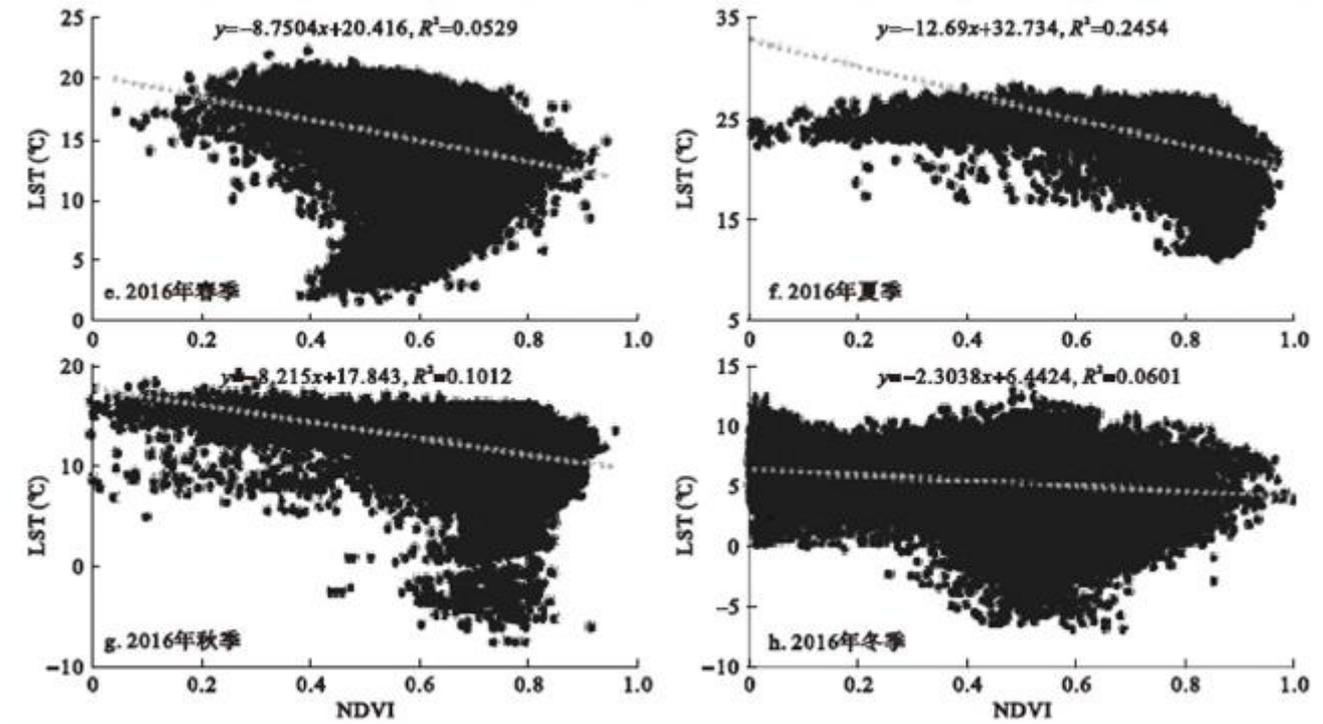


图5 重庆市 2006、2016 年春、夏、秋、冬 LST 与 NDVI 相关关系(图中 y 代表 LST, x 代表 NDVI)

由图 6 可知,重庆市 LST 与平均气温呈正相关,即平均气温随地表温度的增加而增加,地表会对大气起到加热的作用,这与刘毅(2009)的研究结果一致。2006 年夏季与秋季 LST 与平均气温的相关性较高,而 2006 年春季与冬季 LST 与平均气温的相关性较低;说明夏季地表对大气的加热作用较明显。2006 年夏季和秋季的 R^2 分别为 0.743、0.877;夏季地表温度每升高 1°C ,平均气温相应增加 0.61°C ;秋季地表温度每增加 1°C ,平均相应增加 1.15°C ;而春季和冬季 LST 与平均气温相关性较低,春季和冬季的 R^2 分别为 0.239、0.108;春季地表温度每升高 1°C ,平均气温相应增加 0.35°C ;冬季地表温度每升高 1°C ,平均气温相应增加 0.03°C 。2016 年春季和夏季的 R^2 分别为 0.766 和 0.846;春季地表温度每升高 1°C ,平均气温相应增加 0.45°C ;夏季地表温度每增加 1°C ,平均气温相应增加 0.67°C ;而秋季和冬季的 R^2 分别为 0.001 和 0.550;秋季地表温度每增加 1°C ,平均气温相应增加 0.04°C ;冬季地表温度每升高 1°C ,平均气温相应增加 1.22°C 。

2.2.3 地表温度与土地类型的关系

由图 7 可知重庆市以长江作为下垫面类型的分界线,长江以西,下垫面主要受人类活动所影响,土地类型以农用地、城市用地为主。长江以东,下垫面的类型主要受海拔影响,东部地貌以山地为主要地貌,土地类型以林地和草原为主。土地类型的分布与地表温度分布的空间格局具有相似之处,地表温度基本上也是以长江为温度分界线且地表温度呈现东高西低的空间分布。

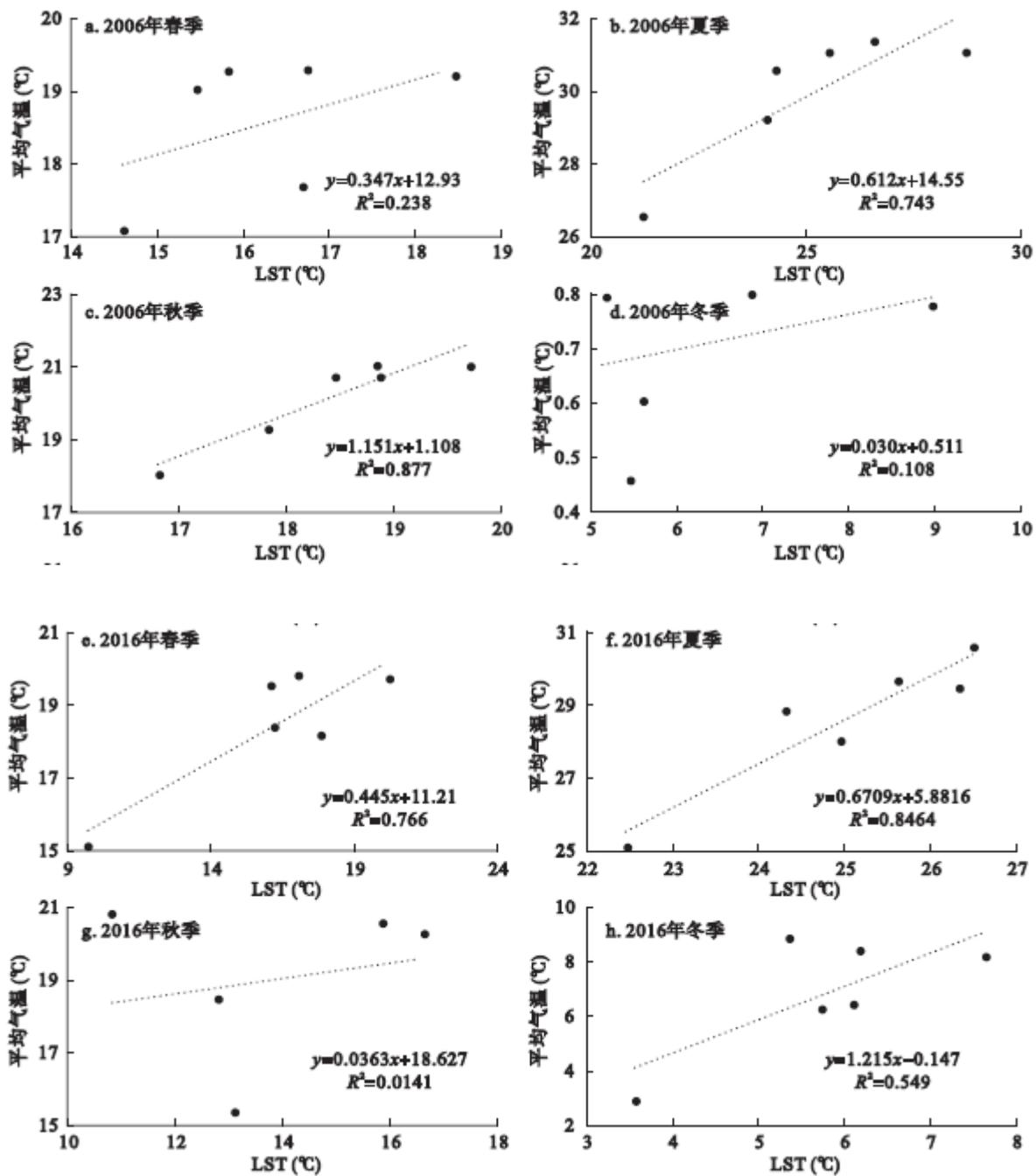


图6 重庆市 2006、2016 年春、夏、秋、冬 LST 与平均气温相关关系(图中 y 代表平均气温, x 代表 LST)

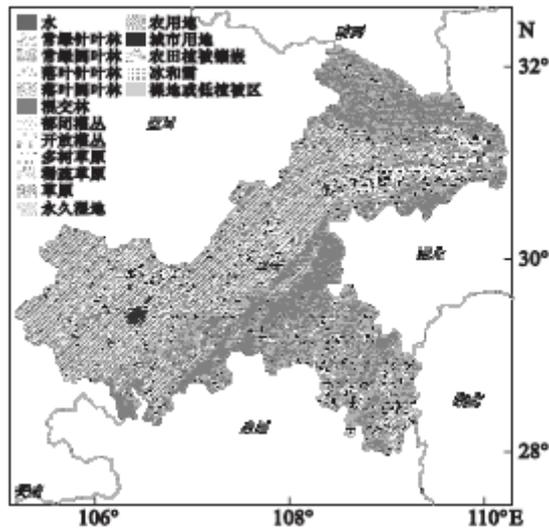
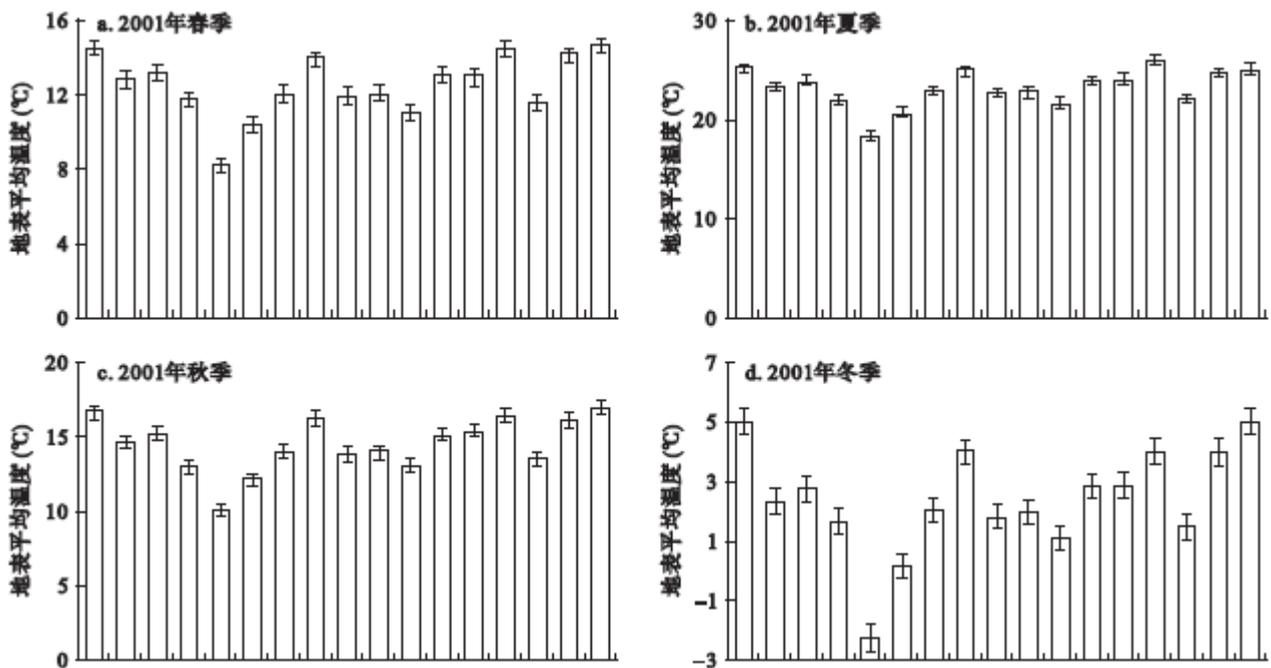


图7 重庆市2006年土地分类图

由图8可知,各下垫面类型之间的相对温度差值在季节上变化不大,具有一定的稳定性和规律性。相较于2001年的水、开放灌丛、永久湿地、城市用地、冰和雪、裸地或植被区的夜间地表温度,2006年的都相对较高。其中,夏季的城市用地的平均地表温度是所有地物类型中最高,这也说明了夏季的城市热岛效应相较于春、秋、冬季更明显。同一季节中,2001年和2006年各下垫面类型的平均地表温度相似,但2001年春季各地物的平均地表温度较2006年相对较低;2001年冬季的各地物的平均地表温度也相对2006年较低。



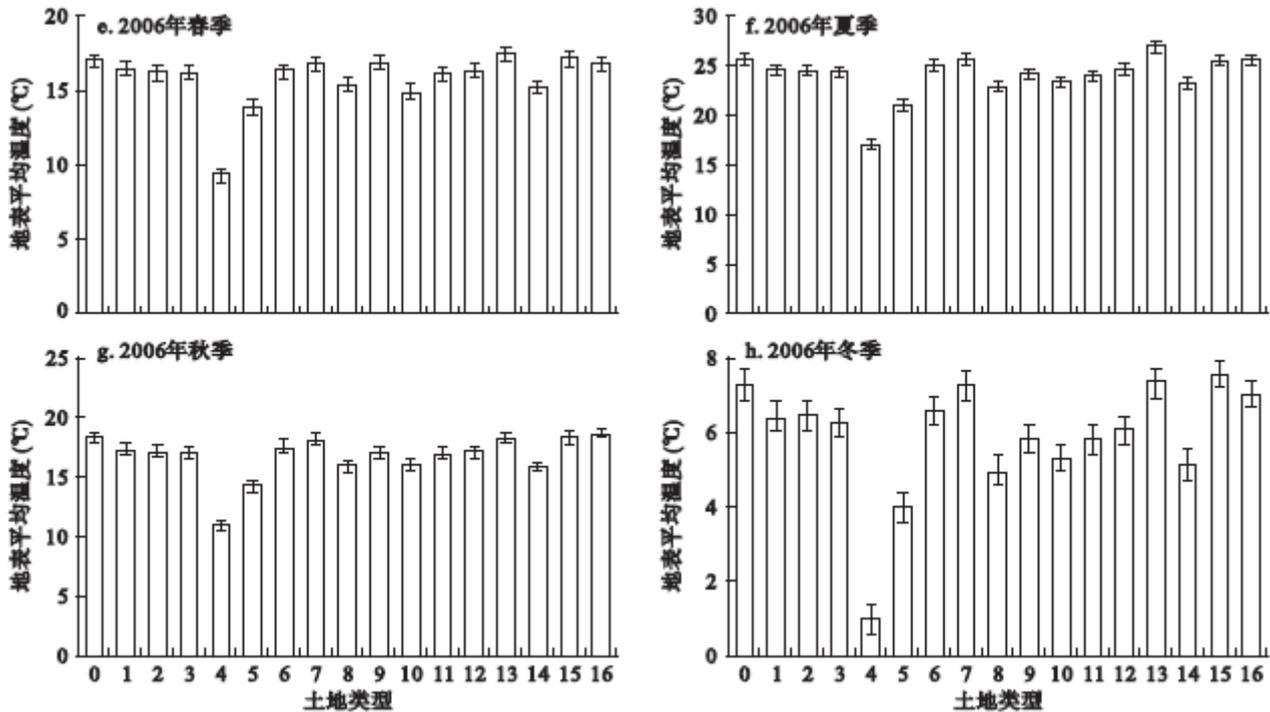


图8 重庆市 2001、2006 年各土地类型的平均地表温度

0. 水, 1. 常绿针叶林, 2. 常绿阔叶林, 3. 落叶针叶林, 4. 落叶阔叶林, 5. 混交林, 6. 郁闭灌丛, 7. 开放灌丛, 8. 多树草原, 9. 稀树草原, 10. 草原, 11. 永久湿地, 12. 作物, 13. 城市和建成区, 14. 农田植被的镶嵌, 15. 雪和冰, 16. 裸地或低植被区。

3 结论

重庆市近 66 年的平均气温呈显著上升趋势, 且 1 月月均最低气温增幅最大, 而月均最高气温增幅最小。

重庆市热岛效应明显, 特别是夏季和冬季。热岛效应在时间上有越来越严重的趋势, 2001—2011 年夏季热场强度的中高温区逐渐演变为高温区, 使得区域热岛效应更加突出。地表对大气有加热作用, 而城市植被对热岛效应有调节作用。

重庆地处长江和嘉陵江两江汇合处, 境内也有其他多条河流, 水汽来源充沛, 空气湿度大; 重庆位于四川盆地东南缘, 周围高山屏峙, 地形崎岖, 风速小、风力弱, 但相对温度较高, 使得该区域多云雾, 有雾都之称。热红外遥感数据的应用受到当地气候的限制, 而被动微波数据由于波长较长, 受云雾影响较小。本文用的 MODIS 地表温度产品数据属于热红外遥感数据产品, 所以分析过程中常常遇到区域数据缺失的情况, 从而影响热岛效应的分析。未来可以通过被动微波遥感数据的应用解决这一问题。

参考文献:

- [1] 白杨, 孟浩, 王敏, 等. 2013. 上海市城市热岛景观格局演变特征研究. 环境科学与技术, 36(3):196-201.
- [2] 陈云浩, 史培军, 李晓兵. 2002. 基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究. 测绘学报, 31(2):139-144.
- [3] 陈云浩, 周纪, 宫阿都, 等. 2014. 城市空间热环境遥感——空间形态与热辐射方向性的模拟. 北京: 科学出版社.

-
- [4] 崔耀平, 刘纪远, 秦耀辰, 等. 2015. 北京城市扩展对热岛效应的影响. 生态学杂志, 34(12):3485-3493.
- [5] 何泽能, 高阳华, 杨世琦, 等. 2017. 重庆市城市热岛效应变化特征及减缓措施. 高原山地气象研究, 37(4):48-52.
- [6] 何泽能, 李永华, 陈志军, 等. 2008. 重庆市 2006 年夏季城市热岛分析. 热带气象学报, 24(5):527-532.
- [7] 何泽能, 左雄, 白莹莹, 等. 2013. 重庆市城市高温变化特征分析及对策初探. 高原气象, 32(6):1803-1811.
- [8] 贾宝全, 邱尔发. 2013. 基于 TM 卫星遥感影像的西安市城市热岛效应变化分析. 干旱区研究, 30(2):347-355.
- [9] 李晓敏, 曾胜兰. 2015. 成都、重庆城市热岛效应特征对比. 气象科技, 43(5):888-897.
- [10] 刘毅, 刘德, 黎中菊, 等. 2009. 2006 年川渝高温伏旱论文集//刘毅. 2006 年重庆特大高温伏旱成因分析. 北京:气象出版社:1-11.
- [11] 莫新宇, 祝善友, 张磊. 2013. 苏州土地利用及热岛效应的时空变化. 地理空间信息, 11(1):61-63.
- [12] 王艳姣, 张培群, 董文杰, 等. 2008. 基于 MODIS 数据的重庆市地表热环境效应研究. 环境科学研究, 21(3):98-103.
- [13] 杨春华, 雷波, 王业春, 等. 2014. 基于 TM 的重庆市主城区热岛效应及其影响因子分析. 应用基础与工程科学学报, 22(2):227-238.
- [14] 叶彩华, 刘勇洪, 刘伟东, 等. 2011. 城市地表热环境遥感监测指标研究及应用. 气象科技, 39(1):95-101.
- [15] 张佳华. 2010. 城市热环境遥感. 北京:气象出版社.