

海绵城市改造对热岛效应减缓效果的估算

王丹¹ 杨超² 郑永宏^{1, 3} 肖雪莹² 赵林¹ 陈正洪⁴¹

(1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023;

3. 武汉大学 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072;

4. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205)

【摘要】: 在气候变化背景下, 海绵城市改造热岛效应减缓效果成为人们最为关注的焦点问题之一, 准确获取海绵城市改造前、后温度数据是精准评价海绵城市改造对城市热岛减缓效果的重要前提, 气象观测站点往往距离海绵改造区具有较远的空间距离, 其数据的不适用性极大限制了评价的开展。以武汉市青山、四新示范区为研究区, 基于遥感监测、红外热成像技术, 采用设立对比区法、以空间换时间法分别从宏观和微观上估算海绵区改造前后的温度变化, 评估海绵城市建设对城市热岛效应减缓的效果。结果表明: 在宏观上, 海绵城市改造对工业区(青山示范区)热岛效应减缓有一定效果, 对原始开发程度较低地区(四新示范区)未体现出明显效果; 在微观上, 不同的改造方式、布设方式, 甚至同一材料不同颜色等均对海绵改造热岛减缓效应有影响。设立对比区法、以空间换时间法能够为评价海绵城市改造对城市热岛减缓效果估算提供新的思路, 具有很强的实用价值。

【关键词】: 城市热岛 遥感 红外热成像 海绵城市

【中图分类号】: X16 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)04-0968-08

海绵城市是一种全新的城市发展理念, 旨在应对诸如水资源、水生态、水安全、水污染等一系列水问题^[1], 其综合应用“渗、滞、蓄、净、用、排”措施, 保护和恢复城市生态功能, 缓解城市内涝, 改善城市水环境, 提升城市功能^[2~5]。在气候变化备受全球瞩目的时代, “城市热岛效应缓解程度”成为人们关注的焦点问题。然而, 多数海绵改造区域缺乏可供前后对比的气象数据, 受限于这一瓶颈, 如何评估“城市热岛效应是否因海绵城市改造而得到缓解”成为难点, 缺乏可供遵循的模式。遥感地表温度反演理论与实践的发展^[6], 为突破上述瓶颈提供了新的思路, 即可基于遥感影像数据反演海绵改造前后地表温度数据, 然而, 如何识别海绵改造前后地表温度变化是缘于宏观气候背景变化还是缘于海绵改造成为新的难点; 此外, 尽管遥感地表温度降尺度研究^[7]有了长足进展但仍然难以实现微观尺度上地表温度反演^[8], 而借助红外热成像技术^[9]、测温技术^[10]又因无海绵改造前数据而难以对比。本文以全国首批海绵城市建设试点武汉作为切入点, 提出设立对比区、以空间换时间方法分别从宏观和微观上估算海绵区改造前后的温度变化, 旨在合理评估海绵改造对城市热岛缓解程度, 研究结果可为相关研究提供理论和方法支撑。

作者简介: 王丹(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为全球气候变化及响应. E-mail: 2014301110189@whu.edu.cn

郑永宏 E-mail: zhengyh@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771227); 武汉市海绵城市建设试点热岛效应评估项目

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区分别是武汉市青山示范区和四新示范区(图 1),为亚热带季风性湿润气候,雨量充沛,城市内涝严重,夏季酷热而冬季寒冷。其中青山示范区绿地率较低,海绵城市建设主要项目为小区改造、道路改造及对现有绿地进行保护,总面积约 23km^2 ,东起工人村路、冶金大道,西至建设一路,北抵临江大道,南到和平大道,延至东湖;四新示范区开发程度较低,海绵城市建设主要项目为小区公建、市政道路等,总面积约为 15.5km^2 ,东临长江江滩,西至龙阳大道,南达三环线,北至汉新大道。



图 1 研究区概况及气象站分布

1.2 数据获取与处理

1.2.1 数据获取

本文选取了武汉青山示范区、四新示范区海绵改造前(2014 年)和改造后(2017 年)6~9 月覆盖示范区与参照区的 Landsat8 遥感影像 3 幅,数据来源为:<https://earthexplorer.usgs.gov/>;以及 MODIS 数据 21 幅,数据来源为 <https://modis.gsfc.nasa.gov/>。

微观地温数据来源于实地调研,集中在 2018 年 6~9 月期间,利用大疆 S1000 无人机携带机载热红外成像仪(Thermal Capture 640)对研究区内普通路面、透水铺装路面、普通屋顶,绿色屋顶(真草),雨水公园等设施观测地表温度,获得了 7 组对比数据。利用红外相机对青山、四新示范区内新奥依江小区、米兰小区、翰林苑小区、市残疾人康复中心等地的典型海绵工程设施以及临近非海绵设施的地表温度进行了实地对比测量。同时还结合手持式红外测温仪(Precision IR Thermometer)对相应地物进行了地表温度的点测,在新区公园、汉荣苑小区、残疾人康复中心等地点对植草沟、浅凹式绿地与普通绿地进行了 12 组对比观测,在钢城二中和桥头小学对绿色植被屋顶、人造草坪屋顶和沥青屋顶进行了 6 组实地观测,在青和居、新区公园等地对透水铺装和非透水铺装进行了 16 组实地观测。

1.2.2 数据处理

采用单通道算法^[11~14]对 2014 年 8 月 19 日,2017 年 7 月 26 日、8 月 27 日 3 个 Landsat8 遥感数据进行地表温度的反演。

(1) 计算辐射亮度与亮温

首先，对 Landsat8 数据进行辐射定标，将图像的 DN 值转变为图像的辐射亮度，计算公式如下：

$$L_n = \frac{RADIANCE_BAND_N * Q_{cal_n}(DN) + RADIANCE_ADDBANDn}{1000000} \quad (1)$$

式中： L_n 为图像的辐射亮度；DN 为遥感图像像元灰度值。

然后，计算遥感数据的亮度温度，由辐射亮度 L_n 推算物体的亮度温度，计算公式如下：

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{L_\lambda}\right)} - 273.15 \quad (2)$$

式中： T_B 为物体的亮度温度(单位：℃)； L_λ 为第 10 波段的辐射亮度， $K_1=774.89W/(m^2 * \mu m * sr)$ ； $K_2=1321.08K$ 。

(2) 计算归一化植被指数 NDVI^[15]

归一化植被指数的计算公式如下：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3)$$

式中：NDVI 为归一化差分植被指数；NIR 和 R 分别为近红外波段和红波段处的反射率，即经过预处理后 Landsat8 数据第五波段和第四波段。

(3) 计算比辐射率^[16]

利用 NDVI 阈值法计算比辐射率，首先要确定不同像元的构成比例，进而计算不同地表覆盖的比辐射率。

植被覆盖度的计算公式如下：

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad (4)$$

比辐射率的计算公式如下：

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.991 & NDVI < 0 \\ 0.966 & 0 < NDVI < 0.2 \\ 0.973 * PV + (1 - P_v) * 0.966 & 0.2 < NDVI < 0.5 \\ 0.973 & NDVI > 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

式中：NDVI_{min} 和 NDVI_{max} 是代表研究区域的最差植被覆盖和最好植被覆盖的植被指数。

(4) 基于单通道算法计算地表温度 (LST)

单通道算法进行反演地表温度的计算公式如下：

$$T_G = \frac{T_B}{1 + \lambda * \frac{T_B}{P} * \ln \varepsilon} \quad (6)$$

式中：T_G 为地表温度 (单位℃)；T_B 为物体的亮度温度 (单位℃)；λ=10.985 μm, 为第十波段的峰值波长；p=h*c/σ=1.438×10⁻² (m·k)；ε 是地表比辐射率，利用 NDVI 阈值法计算得到。

(5) 时空非局部滤波融合法 (STNLFFM)^[17]

为解决遥感产品的时空分辨率矛盾问题^[18,19]，本文采用时空非局部滤波融合方法对 MODIS 地表温度产品和 Landsat8 地表温度反演结果的时空互补信息进行融合，从而生成兼具高时间和高空间分辨率特征的遥感定量产品。

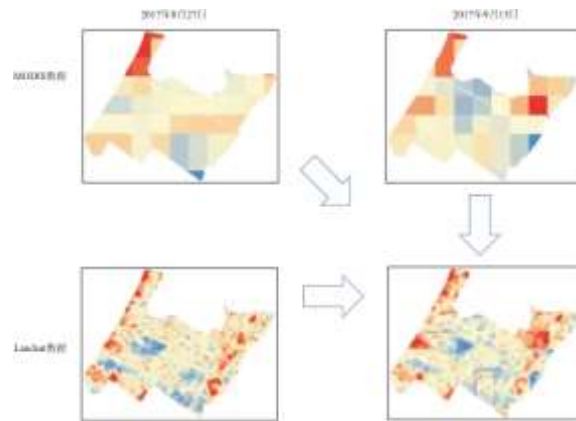


图 2 时空融合

1.3 评价方法

1.3.1 设立对比区法

由于城市的发展，基础设施建设及改造，人口、车流量、供暖制冷设备等均发生着变化，导致未经海绵改造区域的气温变化影响因素十分复杂，无法确定温度变化是否完全由海绵改造形成，进而无法直接基于某处未进行海绵改造区域作为参照区进行评估。因此，要选择合适的参照区，去除由于多种不同因素差异导致的温度变化。参照区需要一个较为稳定的环境条件，在武汉市各类下垫面中湖泊水域相对稳定，我们选取了临近研究区受人为环境影响较小的湖泊中心区域作为参照区(图 1)。

在宏观尺度上，分别计算 2017、2014 年海绵示范区与参照区温度差值，再用 2017 年的差值结果减去 2014 年差值结果，得到温度变化。温度变化小于零，说明热岛效应减缓；温度变化大于零，说明热岛效应增强。

$$T_1 = T_{\text{海绵示范区}2017} - T_{\text{参照区}2017} \quad (7)$$

$$T_2 = T_{\text{海绵示范区}2014} - T_{\text{参照区}2014} \quad (8)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (9)$$

式中： T_1 为 2017 年海绵示范区与参照区地温差值； T_2 为 2014 年海绵示范区与参照区地温差值； ΔT 代表海绵改造前后地表温度变化。

1.3.2 以空间换时间法

在微观尺度上，本文采用“以空间换时间”的方法进行对比。具体如下：用未进行海绵改造区域的下垫面代替海绵改造前的下垫面并监测其温度，同时监测海绵改造区域相同地类温度，进而对比分析。观测内容涵盖地类对比、材料对比以及颜色对比，主要涉及绿色屋顶、普通屋顶、雨水公园、建筑、透水铺装道路、普通道路、植草沟、普通绿地等。

2 结果与分析

2.1 宏观尺度热岛效应减缓效果

基于 MODIS 和 Landsat8 融合的影像计算结果表明海绵区改造前后，就 6~9 月平均地温而言，青山示范区 2017 年较 2014 年降低了 0.23℃；四新示范区 2017 年较 2014 年上升了 0.06℃。青山示范区海绵设施部分 2017 年较 2014 年降低了 0.25℃；四新示范区海绵设施部分 2017 年较 2014 年上升了 0.08℃。这说明在宏观尺度上，海绵城市改造热岛效应减缓效果不尽相同，存在区域差异。

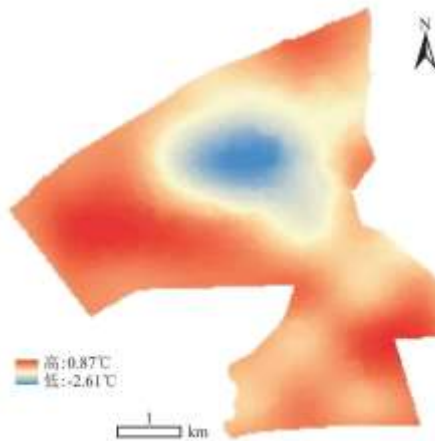


图 3 青山示范区 6~9 月地表温度变化

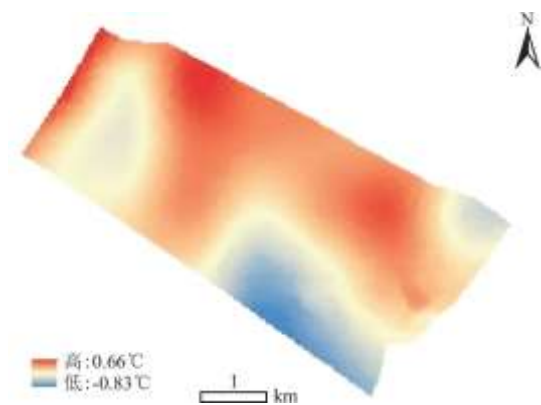


图 4 四新示范区 6~9 月地表温度变化

2.2 微观尺度热岛效应减缓效果

2.2.1 无人机测量结果

结果表明，改造后的真草坪绿色屋顶表面温度低于普通屋顶的表面温度，绿色屋顶改造对地温有一定的降温效果。雨水公园本身含水量大、植被丰富，表面温度也明显低于周边建筑。而透水铺装的道路设施比普通道路设施表面温度并没有明显降低，甚至有所升高，且两种道路相对植被覆盖区均具有较高的表面温度。

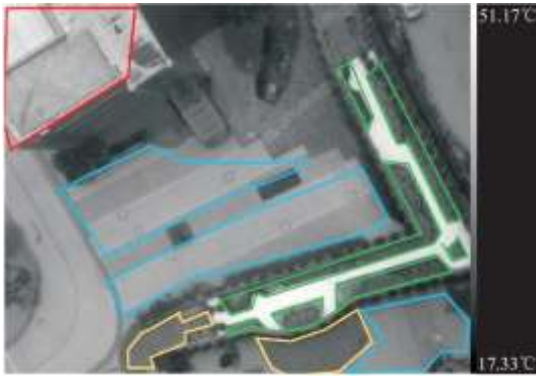


图 5 普通硬质、植被改造屋顶、普通大理石与透水铺装路面地表温度

表 1 不同地表覆盖类型的地表温度

区域颜色	温度(℃)	地表覆盖类型
红色	39.2	普通硬质屋顶
绿色	27.7	植被改造屋顶
黄色	28.7	普通大理石路面

蓝色	34.5	透水铺装路面
----	------	--------

2.2.2 红外热成像法测量结果

实测热成像结果显示，青色透水铺装路面的地表温度高于光滑大理石路面和瓷砖路面，红色透水铺装路面的地表温度也要高于瓷砖地面；红色透水铺装路面的地表温度与水泥路面的温度接近；青色透水铺装路面的地表温度要低于糙面大理石。上述实测结果表明，在热岛效应减缓方面，透水砖与其它普通材料相比并不优越，大多不如瓷砖、光面大理石等材料的降温效果好，可能原因是瓷砖和大理石材料可以反射更多太阳辐射，而吸收相对较少。

对比不同颜色的透水铺装地表实测温度，发现透水砖颜色对地表温度影响较显著。在临江港湾小区的实地拍摄结果显示，红色透水铺装路面的温度为 35.4℃，青色透水铺装路面的温度为 36.8℃；同样在米兰小区，红色透水铺装路面的温度为 31.3℃，青色透水铺装路面的温度为 31.9℃，这表明红色透水砖的热岛减缓效应要优于青色透水砖。在市残疾人康复中心的实地拍摄结果显示，黑色透水铺装路面的温度为 32℃，灰色透水铺装路面的温度为 30.8℃，灰色透水砖的热岛减缓效应要优于黑色透水砖。

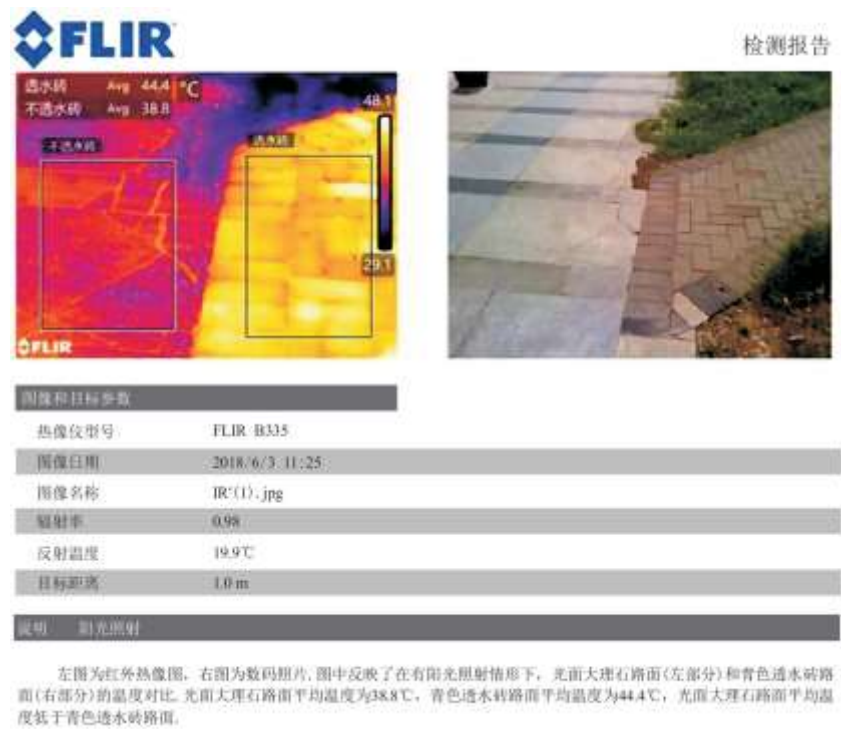


图6 大理石与青色透水砖路面 FLIR 检测报告

2.2.3 点位地表温度实测结果

点位地表温度实测结果显示，干燥区植草沟的地温与普通绿地温度接近，而湿润区植草沟的地温要略高于普通绿地；浅凹式绿地的地温大多低于普通绿地；沥青屋顶地温最高，塑料绿色屋顶次之，绿色植被屋顶最低；透水铺装与水泥路面的地温差异不明显；青色透水砖的地温最高，红色透水砖次之，黄色透水砖地温最低。

上述实测结果表明，在地表实测尺度上，与未改造的非海绵工程设施相比，植草沟的热岛缓解效应不明显；浅凹式绿地有

一定的热岛缓解功能；而绿色植被屋顶可以显著缓解城市热岛效应；透水铺装路面没有明显的热岛缓解效应，其主要功能仍在透水性上；在不同颜色透水砖的对比上，黄色透水砖的热岛缓解效应相对好一些，红色透水砖次之。

3 讨论

3.1 海绵城市建设能否减缓热岛效应

就 6~9 月平均地温而言，在剔除环境温度变化影响后，海绵区改造前后，宏观上，建设海绵城市对工业区(青山示范区)热岛效应减缓有一定效果，对原始开发程度较低地区(四新示范区)未体现出明显效果。为什么两个示范区热岛减缓的情况不一致？通过调研我们发现青山示范区是由工业区进行改造^[20]，而四新示范区在改造前开发程度相对较低，这就造成了两个示范区本底值的差异，导致了改造效果的差异。此外，从整个示范区的宏观角度上，海绵改造是否能减缓热岛效应与实际海绵改造工程面积占示范区面积的比例有密切关系，特别是新增绿地面积更为重要^[21]。我们认为：当较大面积进行绿地建设时，会有较为显著的热岛效应减缓，这种减缓效应对于工业区等更为明显，而对于原始开发程度较低区域效果不明显。值得注意的是，“设立对比区法”会由于遥感数据本身存在的计算误差使得宏观上的评估具有一定的不确定性。

3.2 如何增强海绵城市建设的热岛减缓效应

在微观上，不同改造方式对热岛效应减缓的效果产生影响。绿色屋顶、雨水公园等对热岛减缓有一定效果，这可能缘于其蒸腾作用降低了温度^[22]。透水砖不如瓷砖、光面大理石等材料的降温效果好，可能原因是瓷砖和大理石材料可以反射更多太阳辐射，而吸收太阳辐射相对较少。透水砖的地温高于光面大理石，而低于糙面大理石，在必须要用到透水砖的区域可通过对透水砖的改造使其表面尽量变得光滑来增加反射率以达到降温效果。

同种地物类型不同布设方式可能会造成不同的结果，如浅凹式绿地在城市热岛缓解效应方面要优于普通绿地，可能是由于浅凹式绿地对雨水的积蓄与下渗，或是蒸发降温作用；同种地物类型不同颜色的热岛减缓程度也有所区别，如黄色透水砖的热岛减缓效应最佳，红色透水砖次之，青色透水砖最差，这可能缘于不同颜色对太阳辐射的吸收、反射能力存在差异^[21]。

因此，在进行海绵城市改造过程中，既要关注不同地类在热岛效应减缓效果上的差异，又要关注不同材料、不同颜色造成的热岛效应减缓效果差异。科学进行地类、材料、颜色的确定，从而实现最优的热岛效应减缓效果。与“设立对比区法”相比，“以空间换时间法”在评估海绵改造城市热岛效应减缓效果方面具有相对优势，是最为值得推荐的方法。

4 结论

本文提出了设立对比区、以空间换时间的方法分别从宏观、微观上评估海绵城市改造对热岛效应减缓效果，具体结论如下：

(1)宏观上，建设海绵城市对工业区(青山示范区)热岛效应减缓有一定效果，对原始开发程度较低地区(四新示范区)未体现出明显效果；

(2)微观上，不同的改造方式、布设方式，甚至同一材料不同颜色等均对海绵建设热岛减缓效应有影响。

我们提出的方法为评估海绵改造城市热岛效应减缓效果提供了可供借鉴的思路，具有很强的实用价值。

参考文献：

-
- [1]尚志海, 丘世钧. 当代全球变化下城市洪涝灾害的动力机制[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1):100-105.
- [2]DAI L P, VAN R HFMW, DRIESSEN P J, et al. Governance of the sponge city programme in China with Wuhan as a case study[J]. International Journal of Water Resources Development, 2018, 34(4):578-596.
- [3]HUA J Z, CHEN Z B, WANG H T, et al. The enlightenment on urban ecological construction by research progress of Sponge City in China based on literature analysis[J]. Asian Agricultural Research, 2017, 9(5):78-89.
- [4]XIA J, ZHANG Y Y, XIONG L H, et al. Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China[J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(4):652-658.
- [5]俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39(6):26-36.
- [6]宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat 8 数据地表温度反演算法对比[J]. 遥感学报, 2015, 19(3):451-464.
- [7]全金玲, 占文凤, 陈云浩, 等. 遥感地表温度降尺度方法比较——性能对比及适应性评价[J]. 遥感学报, 2013, 17(2):361-387.
- [8]孟翔晨, 历华, 杜永明, 等. Landsat 8 地表温度反演及验证——以黑河流域为例[J]. 遥感学报, 2018, 22(5):857-871.
- [9]晏敏, 彭楚武, 颜永红, 等. 红外测温原理及误差分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2004, 31(5):110-112.
- [10]常蓉. 地表温度测定方法概述[J]. 山西农业科学, 2015, 43(10):1384-1388.
- [11]JIMENEZ-MUNOZ 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 Letters, 2014, 11(10):1840-1843.
- [12]YU X L, GUO X L, WU Z C. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS——Comparison between radiative transfer equation——Based method, split window algorithm and single channel method[J]. Remote Sensing, 2014, 6(10):9829-9852.
- [13]徐涵秋, 林中立, 潘卫华. 单通道算法地表温度反演的若干问题讨论——以 Landsat 系列数据为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(4):487-492.
- [14]胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 等. 单窗算法结合 Landsat 8 热红外数据反演地表温度[J]. 遥感学报, 2015, 19(6):964-976.
- [15]陈朝晖, 朱江, 徐兴奎. 利用归一化植被指数研究植被分类、面积估算和不确定性分析的进展[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(4):687-696.
- [16]金一谔. 自然表面的比辐射率与表面温度[J]. 气象学报, 1989, 47(1):92-96.
- [17]刘慧琴, 吴鹏海, 沈焕锋, 等. 一种基于非局部滤波的遥感时空信息融合方法[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(4):27-32.

-
- [18]黄波, 赵涌泉. 多源卫星遥感影像时空融合研究的现状及展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10):1492-1499.
- [19]董世元, 张文娟, 许君一. 基于权重滤波的时空融合算法对比分析[J]. 北京测绘, 2019, 33(4):375-381.
- [20]李建林. 武汉市青山区转型发展研究[J]. 长江论坛, 2013(5):41-45.
- [21]谢启姣, 段吕晗, 汪正祥. 夏季城市景观格局对热场空间分布的影响——以武汉为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8):1735-1744.
- [22]张彪, 高吉喜, 谢高地, 等. 北京城市绿地的蒸腾降温功能及其经济价值评估[J]. 生态学报, 2012, 32(24):7698-7705.