

引用格式:樊智宇,詹庆明,刘慧民,等.武汉市夏季城市热岛与不透水面增温强度时空分布[J].地球信息科学学报,2019,21(2):226-235. [ Fan Z Y, Zhan Q M, Liu H M, et al. Spatial-temporal distribution of urban heat island and the heating effect of impervious surface in summer in Wuhan[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(2):226-235. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180495

# 武汉市夏季城市热岛与不透水面增温强度时空分布

樊智宇<sup>1,2,3</sup>,詹庆明<sup>1,2,3,4\*</sup>,刘慧民<sup>1,2,3</sup>,杨晨<sup>1,2,3</sup>,夏宇<sup>4</sup>

1. 武汉大学城市设计学院,武汉 430072;2. 武汉大学数字城市研究中心,武汉 430072;3. 地球空间信息技术协同创新中心,武汉 430079;4. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉 430079

## Spatial-temporal Distribution of Urban Heat Island and the Heating Effect of Impervious Surface in Summer in Wuhan

FAN Zhiyu<sup>1,2,3</sup>, ZHAN Qingming<sup>1,2,3,4\*</sup>, LIU Huimin<sup>1,2,3</sup>, YANG Chen<sup>1,2,3</sup>, XIA Yu<sup>4</sup>

1. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Digital City Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China; 4. The State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** With the advancement of urbanization, natural land cover has been continuously replaced by impervious surface which resulted in the phenomenon of Urban Heat Island (UHI). UHI can lead to serious negative effects on urban ecology and residents' health, so is of great significance to study the corresponding spatial pattern and dynamic change. Based on 3 summer Landsat images acquired in 2001, 2007 and 2016 of Wuhan, this paper retrieved Land Surface Temperature (LST) using Radiative Transfer Function (RTF) method and verified the results by MOD11A1 which is the daily LST product of MODIS. Furthermore, LST grade and UHI ratio index (URI) were calculated to analyze the corresponding spatial-temporal variation. We also explored the relationship between LST and impervious surface. Globally, the multiple linear regression method was applied to compare the heating effect of impervious surface with the cooling effect of vegetation and water. Locally, we used Geographically Weighted Regression (GWR) to analyze the spatial-temporal variation of the heating effect of impervious surface combined with topographic data. The results indicated that: ① RTF method is suitable for retrieving LST in the study area. URI of Wuhan ascended from 0.42 in 2001 to 0.54 in 2007, and then descended to 0.51 in 2016. However, the areas with high temperature are still expanding; ② The multiple linear regression achieved a desirable fitting accuracy with  $R^2$  being 0.910 because it covered the impact of 3 land cover types on LST simultaneously. Overall, the heating effect caused by impervious surface in Wuhan is stronger than the cooling effect caused by vegetation, but weaker than the cooling effect caused by water; ③ From 2001 to 2016, the distribution of areas with high heating effect of impervious surface showed a trend from "single center" to "multi-center". The original single center which is located in the center of city expanded to multiple center areas covering the districts near the Third Ring Road such as Hanyang Zhuankou Industrial Area, Qingshan Industrial Area, Yangluo Open Economic Zone and Dongxihu District. Therefore, the UHI

收稿日期:2018-09-29;修回日期:2018-11-23.

基金项目:国家自然科学基金项目(51878515,51378399,41331175). [ **Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.51878515, 51378399, 41331175. ]

作者简介:樊智宇(1996-),男,江苏抚州人,硕士生,主要从事城市遥感与城市大数据分析的研究. E-mail: zhiyufan@whu.edu.cn

\*通讯作者:詹庆明(1964-),男,福建永安人,博士,教授,主要从事城乡规划信息化与管理的研究. E-mail: qmzhan@whu.edu.cn

phenomenon in Wuhan is still serious in summer. The heating effect of impervious surface is intensifying in suburb areas. So urban planners should pay more attention to these areas to mitigate the heat stress.

**Key words:** Wuhan; heat island effect; thermal retrieve; impervious surface; multiple linear regression; Geographically Weighted Regression (GWR)

**\*Corresponding author:** ZHAN Qingming, E-mail: qmzhan@whu.edu.cn

**摘要:**城市化的不断发展使自然地表不断被不透水面所取代,城市地表温度高于乡村,形成了显著的热岛效应。城市热岛给城市生态发展与人类健康带来了严重的负面影响,对其空间模式与背后形成机制的研究意义重大。本文以武汉市为例,基于2001、2007和2016年夏季Landsat系列影像使用辐射传导方程法反演了城市地表温度,并采用MOD11A1数据进行了验证;同时,计算了不同时期的城市温度等级和热岛比例指数,分析了城市热岛的时空变化。此外,为了探究热岛效应形成的主要原因,即不透水面与热环境的关系,全局角度使用多元线性回归分析对比了其增温效果与植被水体降温效果的强弱,空间局部角度采用地理加权回归结合地形数据得到了其增温强度的时空变化。结果表明:①辐射传导方程法适用于实验中研究区的反演;武汉市城市热岛比例指数先增后减,但温度等级高的地区仍在不断扩张;②多元线性回归可以准确地反映不同地表覆盖对地表温度的影响, $R^2$ 值为0.910,总体上武汉市不透水面的增温效果强于植被的降温效果,并弱于水体的降温效果;③2001–2016年不透水面增温强度较高区域的分布呈现“单中心”到“多中心”的变化趋势,由单一集中于中心城区变为了分散集中于三环线附近的汉阳沌口工业区、青山工业区、阳逻开发区和东西湖区等地区。综上所述,武汉市夏季热环境问题仍然较为严重,城市外部地区的不透水面增温强度正在逐渐增大,规划治理应当给予这些地区更多的关注。

**关键词:**武汉市;热岛效应;热红外反演;不透水面;多元线性回归;地理加权回归

## 1 引言

近年来,城市化的不断发展给人类文明带来进步的同时也引发了许多生态环境问题。城市的扩张使下垫面结构和类型发生了巨大变化,许多植被、水体等自然地表被建筑、道路等热容量大、反照率小的不透水面所取代<sup>[1-2]</sup>。在不透水面大量分布的情况下,城市热环境不断恶化,地表温度不断上升,形成了城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)<sup>[3-4]</sup>。作为城市气候的主要特征,热岛效应一直是城市生态研究的重点问题之一<sup>[5]</sup>,其表征的城市高温不仅加剧了空气污染的形成,影响了居民的身体健康,还极大地增加了夏季能源的消耗,导致全球变暖问题更加显著<sup>[6-8]</sup>。因此研究城市热岛和明晰不透水面对地表温度的影响对于优化人居环境与提升城市品质有重要的意义。

随着对地观测技术的发展,基于遥感影像进行热岛效应等城市热环境问题的研究受到了广泛关注<sup>[9]</sup>。利用遥感影像进行大范围的地表温度反演可以对城市热岛问题进行定量分析,探究时间变化与空间分布的特点<sup>[10-11]</sup>。目前使用较多的反演方法包括辐射传导方程法(大气校正法)、单窗算法和劈窗算法等<sup>[12-15]</sup>,其中辐射传导方程法因为适用于任何热红外波段而被广泛使用<sup>[16]</sup>。另外,通过遥感影像还可以对城市土地覆盖进行分类,识别不透水面,进而分析城市热环境问题出现的原因<sup>[17-19]</sup>。

针对城市热岛与不透水面关系问题的研究,有的学者从全局尺度进行定量分析,探究了不透水面增温的影响<sup>[20-21]</sup>,但无法反映其空间差异;还有的学者从局部角度研究了不透水面与地表温度关系的空间非平稳性<sup>[10-11,22]</sup>,但研究尺度较大且没有结合多时相与其他空间数据,不能很好地反映城市特别是大城市内部不透水面对城市地表温度影响的时空变化。因此,本文基于武汉市夏季多时相Landsat系列影像采用辐射传导方程法反演并对城市热岛进行分析,同时使用支持向量机方法对土地覆盖进行监督分类提取不透水面;针对城市热岛与不透水面关系的研究,全局角度使用多元线性回归比较不透水面增温效果与植被水体降温效果的强弱,空间局部角度采用地理加权回归(Geographically Weight Regression, GWR)辅助以地形数据分析武汉市不透水面增温强度的时空变化。这一研究将揭示武汉市夏季热岛和不透水面增温强度的时空分布规律,为武汉市建设国家中心城市的生态规划、用地合理布局等提供实践和理论依据。

## 2 研究区概况与数据源

### 2.1 研究区概况

武汉市(113°41'E–115°05'E, 29°58'N–31°22'N)位于江汉平原东部,由武昌、汉口、汉阳三镇组成。

气候上,武汉地处北亚热带季风区,雨量充沛,热量丰富,春秋季较短,夏热冬冷。地形上,总体为平原地形,市区内有少量丘陵,大部分地区海拔高程在50 m以下。从2001–2016年武汉市人口增长率达到41%,目前人口城镇化率也已突破80%大关,城市化过程剧烈,不透水面扩张显著。与此同时,武汉市素有“火炉”之称,夏季最高气温经常在35℃以上,部分地区地表温度甚至高于55℃,热环境问题十分突出。因此,该城市是研究不透水面与城市热岛关系的理想选择。

2.2 数据源

2.2.1 Landsat 系列数据

本文使用2001年7月22日的Landsat7 ETM+影像、2007年7月31日的Landsat5 TM影像和2016年7月23日的Landsat8 OLI/TIRS影像进行实验。影像成像时间都为7月下旬,不同年份日期间隔不超过10 d,能够代表各年份夏季热环境状况;同时气象条件相近,便于进行比较,具体信息如表1所示。所有影像均获取于美国地质调查局官网(<http://glovis.usgs.gov>)。

所有影像在ENVI 5.3中进行几何校正、辐射定标、大气校正和影像裁剪等预处理工作;使用监督分类器支持向量机采用目视解译的方式将影像分为不透水面、植被、水体和裸土4类。所有分类的精度和Kappa系数均达标,其中2001年7月22日影像分类总精度94.66%,Kappa系数0.95;2007年7月31日影像分类总精度91.22%,Kappa系数0.92;2016年7月23日影像分类总精度92.28%,Kappa系数0.93。

2.2.2 地形数据

已有学者的研究表明,地形数据对地表温度有很大影响<sup>[23–24]</sup>。因此在进行地理加权回归分析时,可以将地形数据作为辅助加入自变量中用以反映空间差异。实验采用SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数字高程模型数据(Digital Elevation

Model, DEM)、SRTM坡向数据和SRTM坡度数据等地形数据。所有地形数据获取于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。

3 研究方法

3.1 辐射传导方程法

影像地表温度反演采用辐射传导方程法进行,其根据实时的大气探测数据去除大气对辐射传输的影响,从而获得真实的地面辐射数据。算法认为传感器接收到的热红外辐射亮度值 $L_\lambda$ 由大气向上辐射亮度 $L_u$ 、大气向下辐射亮度 $L_d$ 以及卫星传感器接收地面的真实辐射组成<sup>[14]</sup>。具体关系式如式(1)所示。

$$L_\lambda = [\varepsilon L_T + (1 - \varepsilon)L_d]\tau + L_u \tag{1}$$

式中: $\varepsilon$ 为地表比辐射率,具体地物的比辐射率与相关计算见文献[25]; $L_T$ 表示温度为 $T(K)$ 的黑体在热红外波段的辐射亮度; $\tau$ 是大气透射率,其与 $L_u$ 及 $L_d$ 可以在网站<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov>查询获得。在利用式(1)求出 $L_T$ 的基础上,进一步通过式(2)得到地表温度 $T_s$ 。各卫星的相关参数如表2所示。另外,为了验证该算法在研究区反演的准确性,将结果与MODIS地表温度产品进行了对比,具体分析见第4.1节。

$$T_s = K_2 / \ln[1 + K_1 / L_T] \tag{2}$$

3.2 线性回归分析

线性回归分析是求解相关关系中运用最广泛的一种方法,形式如式(3)所示。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k + \varepsilon \tag{3}$$

式中: $Y$ 为因变量; $X_1, X_2, \cdots, X_k$ 为自变量; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_k$ 为回归系数; $\varepsilon$ 为误差项。回归的基本任务是通过一系列的因变量和自变量求解回归系数,建立因变量与自变量之间的关系模型。

已有研究表明,不透水面对地表温度有增加作

表1 影像相关信息  
Tab. 1 Related information of images

卫星	影像日期	成像时间	气象温度/℃	相对湿度/%	气压/kpa	风向	风速/ mph
Landsat7	2001-07-22	10:56AM	34	63	100.2	SW	13
Landsat5	2007-07-31	10:49AM	35	67	100.2	SW	9
Landsat8	2016-07-23	10:45AM	35	59	100.2	SSW	13

注:影像成像时点的相关气象信息均来自于<https://www.wunderground.com>网站。



表2 辐射传导方程法相关参数  
Tab. 2 Parameters of radiative transfer  
equation-based method

卫星	$K_1/(W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m))$	$K_2/K$
Ladnsat5	607.76	1260.56
Ladnsat7	666.09	1282.71
Ladnsat8	774.89	1321.08

用,植被和水体对地表温度有降低作用,它们与地表温度的关系可以用线性回归表达,其中的回归系数可以直观地表示3种地物对地表温度的影响程度<sup>[26-27]</sup>。当建立单个地类覆盖率与地表温度的一元线性回归方程时,会出现一些问题:如某区域植被在覆盖率较小时,对应的地表温度可能由于不透水面覆盖率较大变得很高,也可能由于水体覆盖率较大变得很低,导致线性回归难以解释变量间的关系,故将植被、水体和不透水面三者覆盖率进行多元回归是更稳健的选择。就研究尺度而言,Wang等<sup>[28]</sup>以武汉市为例论述了地表温度在现象层面,以及其与地表覆盖关系的机制层面最佳作用尺度均为500~650 m,故实验研究尺度确定为500 m。

因此,为了更可靠地从全局角度比较不透水面增温效果与植被水体降温效果的强弱,本文以2016年7月23日影像为例,根据分类结果计算500 m尺度下植被、水体和不透水面的覆盖率,建立三者与地表温度的多元线性回归模型。另外,实验还分别建立了三者与地表温度的一元线性回归模型用作对比。具体结果分析见第4.2节。

### 3.3 地理加权回归

传统的线性回归是全局回归方法,只能反映系数在区域整体上的平均拟合,不能反映空间局部上的变化。武汉市作为一个市域面积8000 km<sup>2</sup>以上的全国中心城市,城市内部不同区域环境复杂,考虑不透面对地表温度影响的空间异质性将有利于城市规划更加细化和明确的治理热岛效应。因此,本文将进一步在500 m尺度下使用局部回归方法——地理加权回归来研究武汉市不透水面增温强度的时空变化。

地理加权回归结合了空间分析的原理,将传统线性回归在空间展开,考虑了地理位置变化造成的变量间关系改变<sup>[29-31]</sup>。GWR通过建立空间范围内每一个对象处的局部线性回归方程来拟合自变量与因变量之间的关系,可以很好地解释其随着地理

位置变化而变化的“空间非平稳性”。

与传统的线性回归方法类似,GWR的形式也是因变量由几个自变量线性组合加上拟合误差的表达,如式(4)所示。

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中:  $(u_i, v_i)$  表示空间点的坐标;  $\beta_0(u_i, v_i)$  为斜距;  $\beta_k(u_i, v_i)$  为空间点  $i$  处第  $k$  个解释变量的回归系数;  $\varepsilon_i$  为误差项。回归系数估计是GWR中最重要的一部分,如式(5)所示。

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \quad (5)$$

式中:  $W(u_i, v_i)$  是空间点  $i$  处观测数据的空间加权矩阵,表示了观测点周围对象对观测点的影响。一般而言,离观测点越近权值越大,反之越小。空间加权矩阵通过空间权重函数计算得到,常见的空间权重函数包括高斯函数、双重平方函数等,实验使用高斯函数作为权重核函数。

武汉市内存在许多大面积自然湖泊,这些区域的不透水面覆盖率基本为0。如果不考虑这一因素进行回归将导致湖泊处不透水面覆盖率的回归系数极大,影响模型的准确性。因此,本文将以不透水面覆盖率、水体覆盖率和空间地形数据作为自变量,地表温度作为因变量,采用地理加权回归研究武汉市不透水面增温强度的时空分布特点。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 辐射传导方程法反演及热岛分析

根据辐射传导方程法的原理,本文对3幅影像(2001-07-22日、2007-07-31、2016-07-23)进行了反演,并将结果重采样与MOD11A1数据进行比较。MOD11A1(MODIS每日地表温度产品)为Terra卫星获取的地表温度产品,获取来源为NASA官网(<https://lpdaac.usgs.gov>)。Terra卫星的过境时间为每天10:30 AM,与实验所用Landsat影像的成像时间相近,因此可以将MOD11A1产品用于验证辐射传导方程法反演结果的准确性。MOD11A1产品的像元值需经过转换才能变为地表温度值,公式如式(6)所示<sup>[32]</sup>。表3展示了对比的结果。

$$LST_{\text{mod11A1}} = DN \times 0.02 - 273.15 \quad (6)$$

从表3可看出,3幅影像反演结果的统计值都要大于MOD11A1产品,最小值的差值分别为

表3 Landsat影像反演结果与MOD11A1产品统计值对比

Tab. 3 Statistical values comparison of Landsat images' retrieval results and MOD11A1 (°C)

数据	2001年7月22日			2007年7月31日			2016年7月23日		
	最小温度	最大温度	平均温度	最小温度	最大温度	平均温度	最小温度	最大温度	平均温度
MOD11A1	28.39	48.57	37.54	25.55	44.45	34.77	25.29	46.10	36.22
Landsat影像反演	28.84	54.29	39.06	25.74	47.87	35.20	25.92	52.96	37.26

0.45、0.19、0.63℃,最大值的差值分别为5.72、3.42、6.86℃,平均值差值分别为1.52、0.43、1.04℃。最大值受到某些热源区域如工业区的影响差距较大,但是反映研究区总体情况的平均值的差值很小且最小值的差值也较小,因此可以认为使用辐射传导方程法反演地表温度适用于本次实验。

本文基于反演得到的地表温度数据计算了每幅影像的相对地温,计算公式如式(7)所示<sup>[33]</sup>。

$$H=(T_s-T_r)/T_r \tag{7}$$

式中:  $H$  表示相对地温;  $T_s$  表示研究区内各网格点的地表温度;  $T_r$  表示研究区的平均地表温度。采用密度分割的方法对相对地温分级,共分为低温区、次低温区、较低温区、中温区、较高温区、高温区和极高温区7个温度等级。3幅影像的温度等级划分结果如图1所示。另外,计算了3幅影像的城市热岛比例指数<sup>[34]</sup>。城市热岛比例指数是通过计算城市建成区不同温度等级面积的比例,并赋予权重来表示城市热岛效应程度的一个指标,值越大说明热岛效应程度越大,可以科学地比较不同年份之间的城市热岛变化<sup>[35]</sup>。本文中不同年份的建成区根据各年影像并结合Liu等<sup>[36]</sup>发布的多时相高分辨率全球城市地表覆盖数据绘制得到。城市热岛比例指数公式如式(8)所示。

$$URI=\frac{1}{100\text{ m}}\sum_{i=1}^n w_i p_i \tag{8}$$

式中:  $m$  为划分的等级数,本文取值7;  $n$  为城区高

于郊区的温度等级数,本文取值3;  $i$  为城区高于郊区的第  $i$  个温度等级;  $w$  为权重值;取第  $i$  级的级值;  $p$  为第  $i$  级所占城区面积的百分比。

2001、2007和2016年城市热岛比例指数的计算结果分别为0.42、0.54、0.51,说明武汉市总体热岛效应程度先增加后减少。结合温度等级的时空分布,2001–2016年,以高温区为代表的城市热岛分布范围在不断扩大,从最开始集中于武昌、汉口、青山等中心城区和工业区,到最后延伸至城市周边的汉阳、江夏、光谷高新区等地。对于武昌、汉口等中心城区,在2007年时有大量高温区集聚分布,到2016年已大为减少,取而代之的是更多的中温区和较高温区;工业区中存在大量极高温区,一直是城市中热岛效应最为显著的区域,例如青山和沌口等地;一些城市新发展区(如江夏、汉南、东西湖区、光谷高新区等)自2007年开始也出现了集中连片的高温区,热岛效应不断增强。因此,武汉市工业区和城市周边新发展区的热环境情况不容乐观,但中心城区的热岛效应已经有所缓解,总体上城市热岛效应程度在2007年时最强,到2016年有所减弱。

4.2 地表温度与地表覆盖回归分析

不透水面覆盖率、水体覆盖率和植被覆盖率与地表温度的多元线性回归模型及三者分别与地表温度的一元线性回归模型如表4所示,3个一元回归模型的可视化如图2所示。从表4结果可以很明

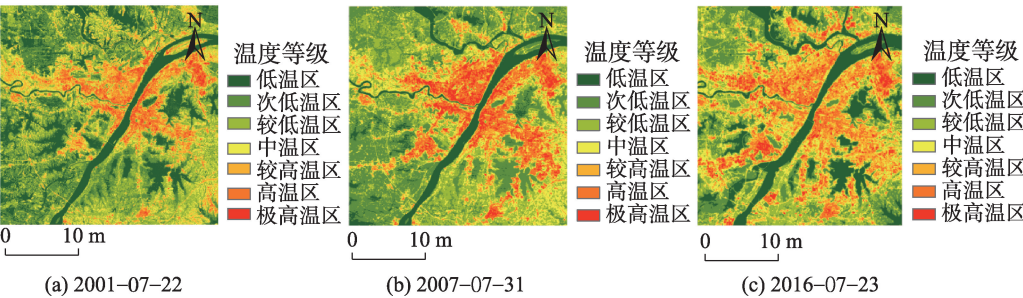


图1 武汉市城市地表温度等级  
Fig. 1 Urban land surface temperature grades in Wuhan

表4 回归模型建立结果  
Tab. 4 The results of regression models

模型名称	回归公式	类型	拟合系数 $R^2$
不透水面-地表温度	$Y = 32.09 + 11.90 X_1^*$	一元回归	0.812
水体-地表温度	$Y = 38.48 - 9.81 X_2^*$	一元回归	0.607
植被-地表温度	$Y = 39.82 - 6.09 X_3^*$	一元回归	0.166
不透水面、水体、植被-地表温度	$Y = 38.64 + 5.05 X_1 - 9.89 X_2 - 4.70 X_3^*$	多元回归	0.910

注: \*表示回归方程通过了1%的显著性检验; Y代表地表温度;  $X_1$ 代表不透水面覆盖率;  $X_2$ 代表水体覆盖率;  $X_3$ 代表植被覆盖率。

显的看到,单将水体或是植被的覆盖率与地表温度进行一元线性回归,拟合系数  $R^2$  值不是很高,特别是植被-地表温度模型,  $R^2$  值只有 0.166; 观察图 2 可发现,当植被覆盖率较小时温度高和温度低的点都分布较多,使线性回归不能很好地解释植被覆盖率与地表温度之间的关系。不透水面覆盖率单独与地表温度进行线性回归分析的  $R^2$  值为 0.812,说明不透水面覆盖率与地表温度的线性关系较为明显。3类地物覆盖率与地表温度建立多元线性回归模型的  $R^2$  值为 0.910,与3个一元线性回归模型相比有显著提高,可以合理地解释全局上3类地物对地表温度的影响。

另外,从多元线性回归模型建立的结果发现,总体上武汉市不透水面的增温效果小于水体的降温效果并大于植被的降温效果。不透水面覆盖率前的回归系数为 5.05,水体覆盖率前的回归系数为 -9.89,植被覆盖率前的回归系数为 -4.70。因此,理想来看,如果区域有 10%的不透水面转为植被,地表温度将下降 1℃左右;如果区域有 10%的不透水面转为水体,地表温度将下降 1.5℃左右。

#### 4.3 不透水面增温强度时空分析

本文采用地理加权回归模型(GWR)进一步分析了武汉市不透水面增温强度的时空变化,得到不同年份不透水面覆盖率与地表温度的空间局部回归

方程。其中,不透水面覆盖率的系数代表了某区域不透水面对地表温度的影响程度,值越大说明增加同样面积的不透水面地表温度增加越多,即不透水面增温强度越大。模型的全局  $R^2$  值和  $R^2$  Adjusted 值如表 5 所示,各局部回归方程拟合系数  $R^2$  值的统计结果如图 3 所示。为了便于时间上的比较,本文使用自然间断法对不透水面增温强度进行分级以反映相对大小,结果如图 4(见第 233 页)所示。

所有 GWR 全局拟合系数  $R^2$  值和  $R^2$  Adjusted 值全部大于 0.9;且从局部拟合系数  $R^2$  的统计图看,大部分值集中在 0.7 到 1 的区间,说明上述 GWR 分析效果较好,拟合不透水面覆盖率与地表温度的关系较为理想。

2001 年 7 月 22 日的结果中,不透水面增温强度较大的区域主要集中在武昌汉口的中心城区,基本和不透水面覆盖率高的区域吻合。汉口三环线以外区域的不透水面增温强度也较大,经过影像判读发现该地区当时存在大量大棚用地以及施工建筑用地,辐射率较高,导致该地区不透水面增温强度以及地表温度较高。以这些地区为中心,越往外不透水面增温强度越弱,同时东西方向的增温强度递减速度慢于南北方向的递减速度,整个不透水面增温强度较高的区域呈现南北方向为短轴的椭圆形分布,这与当时武汉市着力建设东西部新城有关。

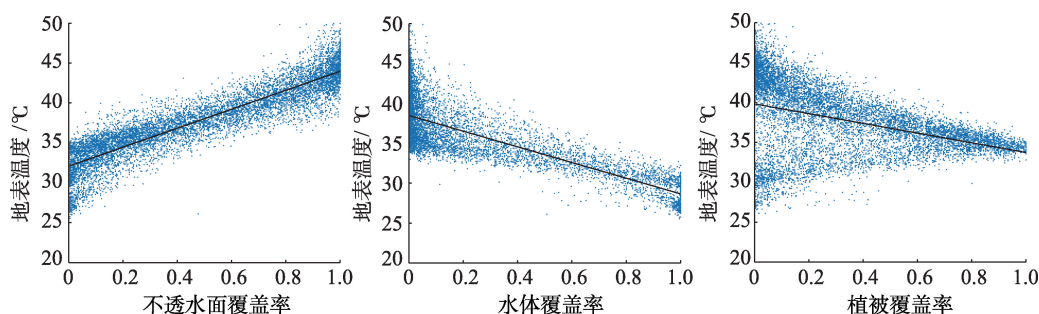


图2 不透水面、水体和植被与地表温度回归模型

Fig. 2 Impervious surface-land, water-land and vegetation-land surface temperature regression model



表5 GWR全局拟合系数结果  
Tab. 5 Global fitting coefficients of GWR

拟合系数	2001-07-22	2007-07-31	2016-07-23
$R^2$	0.918	0.915	0.929
$R^2_{Adjusted}$	0.917	0.914	0.928

2007年7月31日的结果中,不透水面增温强度以城市中心最高,向外辐射递减的“单中心”分布模式更加明显。与2001年的结果相比,不透水面覆盖率高的地区向南北方向进一步扩展,增温强度较高区域的分布也更为集中和规整,呈现类似于圆形的分布。另外,随着原先东西部新城的完工,武汉市东西部不透水面的增温强度相对之前有所下降。在中心城区,不透水面增温强度最高的区域大多分布在汉口地区,武昌地区虽然不透水面覆盖率仍然较高但是其回归系数较前一时期的相对等级有所减弱。同时,汉阳和江夏等城市外围地区的回归系数较2001年的相对等级更高。

2016年7月23日的结果中,不透水面增温强度的分布与之前的“单中心”模式相比有了很大的差别;强度较高的区域分散集中在三环线附近的汉阳沌口工业区、青山工业区、阳逻开发区和东西湖区等地,形成了“多中心”分布的模式。与之相应,城市不透水面不断延伸,许多城市外围区域不透水面覆盖率越来越高,呈现块状分散分布。武昌汉口中心城区的不透水面覆盖率依然很高,但是回归系数相对等级在继续下降。

总的来看,武汉市中心城区的不透水面增温强度在不断减弱,城市周边新发展区域的不透水面增温强度在不断增加;强度较高区域的分布由原来单一集中于中心城区的“单中心”模式变为了分散集中于三环线附近地区的“多中心”模式,包围着中心城区。因此,武汉市在进行城市生态治理时应该结

合不透水面覆盖率变化的趋势与特点,从局部尺度出发,重点考虑这些“多中心”地区与中心城区的生态空间协同发展。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

本文利用辐射传导方程反演了武汉市2001、2007和2016年的地表温度,并在此基础上进行了热岛分析。对不透水面增温效果的分析,全局上使用多元线性回归分析比较了不透水面增温效果与植被水体降温效果的强弱,空间局部上采用GWR对3个时期的不透水面增温强度进行了时空分析。得出了以下结论:

(1)辐射传导方程法适用于实验中研究区的反演;武汉市城市热岛比例指数先增后减,中心城区的热岛效应已经有所缓解;但温度等级高的地区仍在不断扩张,工业区和城市周边新发展区的热环境情况不容乐观,总体上城市热岛效应在2007年时最强,到2016年有所减弱。

(2)总体上武汉市不透水面的增温效果强于植被的降温效果并弱于水体的降温效果;理想来看,如果区域有10%的不透水面转为植被,地表温度将下降1℃左右;如果区域有10%的不透水面转为水体,地表温度将下降1.5℃左右。

(3)不透水面增温强度较高的区域由单一集中于武昌汉口中心城区的“单中心”模式变为分散集中于汉阳沌口工业区、青山工业区、阳逻开发区和东西湖区等三环线附近地区的“多中心”模式。这些“多中心”的不透水面增温强度大于中心城区,将成为城市生态治理重点。另外,不透水面增温强度的变化一定程度上也可反映城市扩张的趋势和特点。

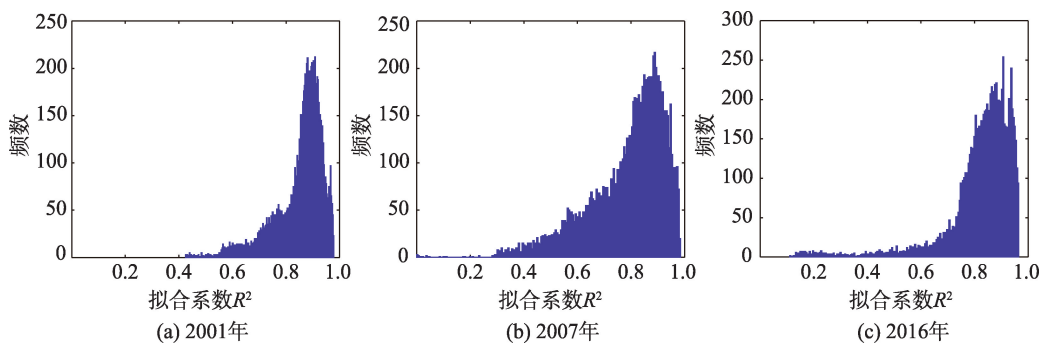


图3 局部拟合系数统计结果

Fig. 3 Statistical results of local fitting coefficients

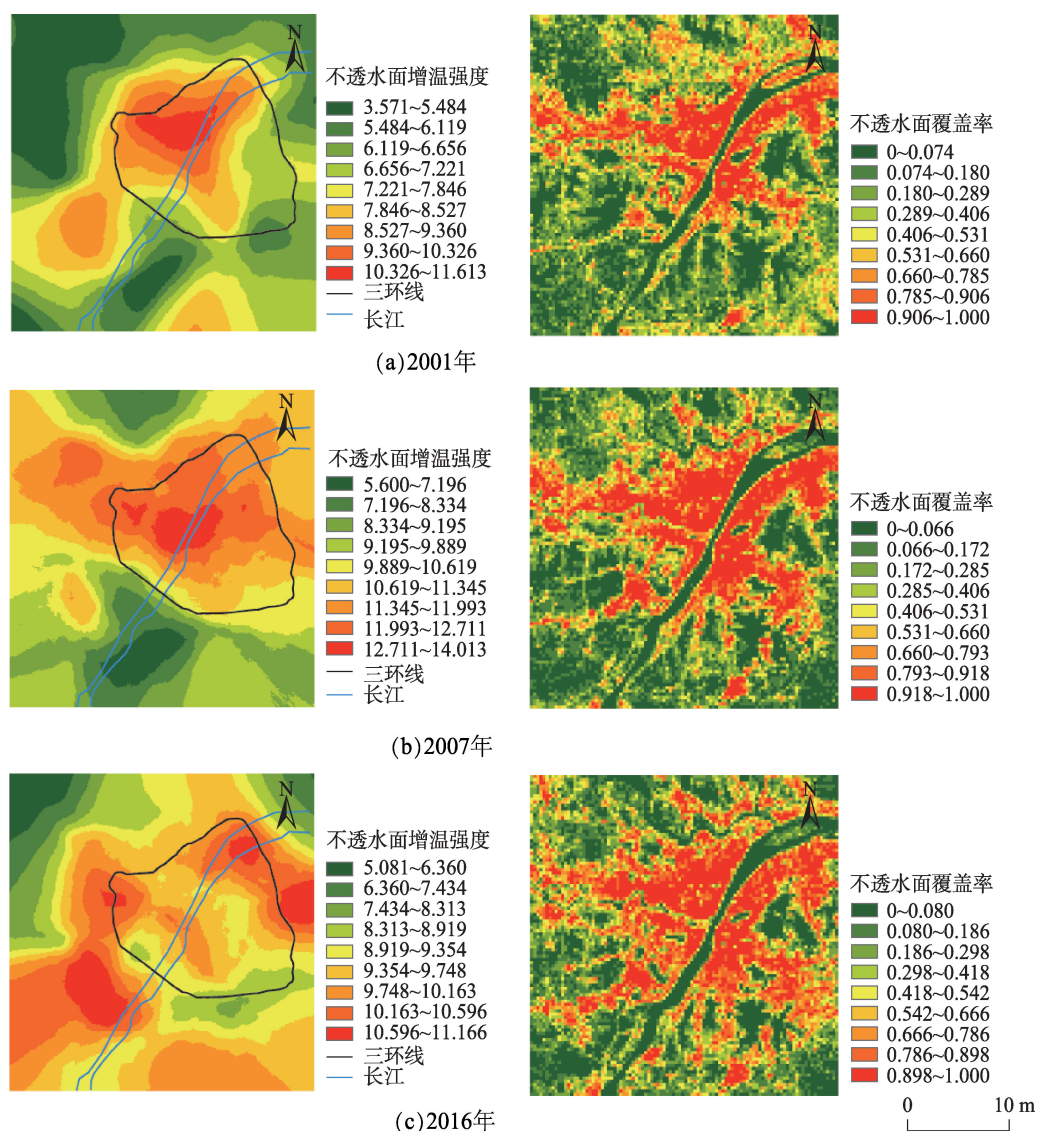


图4 不透水面增温强度与不透水面覆盖率分级

Fig. 4 Grades of temperature increasing intensity of impervious surface and impervious surface coverage rate

## 5.2 讨论

本研究反映了武汉市城市热岛以及不透水面增温强度的时空演变,可看出武汉市的热环境问题仍然突出,特别是城市外围地区的发展对地表温度造成了巨大的影响,使城市热岛不断扩张,热环境问题进一步恶化。不透水面增温强度由“单中心”到“多中心”的变化也意味着单从城市尺度下提出概念性的规划策略已经不能很好地缓解武汉市城市热岛现象,面对这些“多中心”的出现,武汉市应该从局部尺度出发对不同区域进行空间协同规划,实现中心城区与城市外围区域的可持续协调发展。

所以,深入到这些“多中心”区域细化分析不同类别不透面对温度的影响和建立一套标准来评

价其带来的正面社会效益与负面生态环境效应是今后的研究重点之一。另外,本文在局部尺度下的研究只考虑了地形等空间要素,未来的研究中还应该结合气象、水文等要素,进一步将武汉市规划治理落实到不同区域,为城市热环境的改善提供决策支持。

## 参考文献(References):

- [1] 潘涛,张弛,杜国明,等.城乡不透水面增长格局及地表温度的响应特征研究[J].地球信息科学学报,2016,18(1): 134-142. [Pan T, Zhang C, Du G M, et al. Pattern of impervious surface change and its effect on land surface temperature in urban and rural areas[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(1):134-142. ]



- [2] 唐菲,徐涵秋.城市不透水面与地表温度定量关系的遥感分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2013,43(6):1987-1996. [ Tang F, Xu H Q. Quantitative relationship between impervious surface and land surface temperature based on remote sensing technology[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013,43(6):1987-1996. ]
- [3] Weng Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(10):1999-2014.
- [4] 侯浩然,丁凤,黎勤生.近20年来福州城市热环境变化遥感分析[J].地球信息科学学报,2018,20(3):385-395. [ Hou H R, Ding F, Li Q S. Remote sensing analysis of changes of urban thermal environment of Fuzhou city in China in the past 20 years[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(3):385-395. ]
- [5] 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,等.城市热岛的生态环境效应[J].生态学报,2005,25(8):2055-2060. [ Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, et al. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(8): 2055-2060. ]
- [6] Peng J, Xie P, Liu Y, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region[J]. Remote Sensing of Environment, 2016,173:145-155.
- [7] Kolokotroni M, Zhang Y, Watkins R. The London Heat Island and building cooling design[J]. Solar Energy, 2007, 81(1):102-110.
- [8] Liu H, Zhan Q, Yang C, et al. The multi-timescale temporal patterns and dynamics of land surface temperature using Ensemble Empirical Mode Decomposition[J]. The Science of the total environment, 2018,652:243-255.
- [9] Weng Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,117(2):34-49.
- [10] 董磊磊,潘竞虎,王卫国,等.基于遥感和GWR的兰州中心城区夏季热场格局及与土地覆盖的关系[J].土壤, 2018,50(2):404-413. [ Dong L L, Pan J H, Wang W G, et al. Spatiotemporal pattern of summer thermal field and its relationship with land cover in Lanzhou based on RS and GWR[J]. Soils, 2018,50(2):404-413. ]
- [11] 王佳,钱雨果,韩立建,等.基于GWR模型的土地覆盖与地表温度的关系——以京津唐城市群为例[J].应用生态学报, 2016,27(7):2128-2136. [ Wang J, Han Y G, Han L J, et al. Relationship between land surface temperature and land cover types based on GWR model: A case of Beijing-Tianjin-Tangshan urban agglomeration, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(7):2128-2136. ]
- [12] 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(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(4): 12-17. ]
- [13] 覃志豪,Zhang M H, Karnieli A,等.用陆地卫星TM6数据演算地表温度的单窗算法[J].地理学报,2001,56(4):456-466. [ Qin Z H, Zhang M H, Karnieli A, et al. Mono-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM6 data[J]. Acta Geographica Sinica, 2001,56(4):456-466. ]
- [14] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,90(4):434-440.
- [15] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003,108(D22):1-9.
- [16] Yu X, Guo X, Wu Z. 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.
- [17] Su Y F, Foody G M, Cheng K S. Spatial non-stationarity in the relationships between land cover and surface temperature in an urban heat island and its impacts on thermally sensitive populations[J]. Landscape & Urban Planning, 2012,107(2):172-180.
- [18] Li S, Zhao Z, Miaomiao X, et al. Investigating spatial non-stationary and scale-dependent relationships between urban surface temperature and environmental factors using geographically weighted regression[J]. Environmental Modelling & Software, 2010,25(12):1789-1800.
- [19] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017,577:349.
- [20] 徐涵秋.城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析[J].生态学报,2009,29(5):2456-2462. [ Xu H Q. Quantitative analysis on the relationship of urban impervious surface with other components of the urban ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica 2009,29(5):2456-2462. ]
- [21] Xian G, Crane M. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 2006,104(2):147-156.

- [22] 赵梓淇,李丽光,王宏博,等.沈阳市区土地利用类型与地表温度关系研究[J].气象与环境学报,2016,32(6):102-108. [ Zhao Z Q, Li L G, Wang H B, et al. Study on the relationships between land use and land surface temperature in Shenyang urban districts[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016,32(6):102-108. ]
- [23] Kustas W P, Norman J M, Anderson M C, et al. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship [J]. Remote Sensing of Environment, 2003,85(4):429-440.
- [24] Florinsky I V, Kulagina T B, Meshalkina J L. Influence of topography on landscape radiation temperature distribution[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994,15 (16):3147-3153.
- [25] 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. [ Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2004,16(3):28-32. ]
- [26] Li J, Song C, Cao L, et al. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(12): 3249-3263.
- [27] Li X, Zhou W, Ouyang Z. Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: What are the effects of spatial resolution[J]. Landscape & Urban Planning, 2013,114(8):1-8.
- [28] Wang J, Zhan Q, Guo H, et al. Characterizing the spatial dynamics of land surface temperature- impervious surface fraction relationship[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2016,45:55-65.
- [29] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: A natural evolution of the expansion method for spatial data analysis[J]. Environment & Planning A, 1998,30(11):1905-1927.
- [30] Brunsdon C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically weighted regression-modelling spatial non-stationarity [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1998,47(3): 431-443.
- [31] 覃文忠.地理加权回归基本理论与应用研究[D].上海:同济大学,2007. [ Qin W Z. The Basic theoretics and application research on geographically weighted regression [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. ]
- [32] Miliareis G C. An unstandardized selective variance reduction script for elevation, latitude and longitude decorrelation stretch of multi-temporal LST imagery[J]. Modeling Earth Systems & Environment. 2016,2(1):41.
- [33] 王宏博,李丽光,赵梓淇,等.基于 TM/ETM+数据的沈阳市各区城市热岛特征[J].生态学杂志,2015,34(1):219-226. [ Wang H B, Li L G, Zhao Z Q, et al. Urban heat island variation of each district in Shenyang based on TM / ETM+ data[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(1): 219-226. ]
- [34] Xu H Q, Chen B Q. Remote sensing of the urban heat island and its changes in Xiamen City of SE China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004,16(2):276-281.
- [35] 张好,徐涵秋,李乐,等.成都市热岛效应与城市空间发展关系分析[J].地球信息科学学报,2014,16(1):70-78. [ Zhang H, Xu H Q, Li L, et al. Analysis of the Relationship between urban heat island effect and urban expansion in Chengdu, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2014,16(1):70-78. ]
- [36] Liu X, Hu G, Chen Y, et al. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform[J]. Remote Sensing of Environment, 2018,209:227-239.