

# 武汉市都市发展区地表温度季节性 空间分布与驱动力分析

葛静茹<sup>1</sup> 王海军<sup>1, 2</sup> 贺三维<sup>3</sup> 黄鑫鑫<sup>1</sup> 洪松<sup>11</sup>

(1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

2. 武汉大学 地理信息系统教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079;

3. 中南财经政法大学 公共管理学院, 湖北 武汉 430073)

**【摘要】:** 基于 2015 年武汉市都市发展区 30m 空间分辨率的 Landsat8 遥感影像反演近地表温度 (LST), 运用地统计学、地理加权回归 (GWR) 等方法, 分析都市发展区、生态绿楔以及主城区四季 LST 时空分布规律和各驱动因子的作用机制, 以期为更全面、科学地规划城市发展空间布局和缓解热岛效应提供借鉴。结果表明: (1) 与单一的普通最小二乘回归 (OLS) 相比, 线性逐步回归 (LSR) 可以寻找最优的多驱动因子组合模型, 与 LSR 拟合的结果相比, GWR 模型  $R^2$  值提高了 0.04~0.09, 且 AIC 值均明显减小; (2) LST 存在空间聚集关系, “高-高”聚集主要发生在主城区、新型城镇发展区、主要交通干线沿线等更容易造成高温聚集的人工表面, 其中夏季“高-高”聚集网格数最多且占比最大, 而“低-低”聚集四季均主要发生在各大湖泊水系; (3) 绿楔生态用地降温幅度各异, 春季降温幅度不明显, 夏季降温幅度最显著, 各绿楔生态用地降温均超过 2°C, 且在一定范围内, LST 随着与绿楔距离增大而升高, 达到一定距离时, 会随着与绿楔距离增加而趋于平缓或呈下降趋势; (4) 与前人研究相比, 景观格局对 LST 变化的解释程度整体较低, 其原因可能是快速城市化导致人工表面积增加, 相应的人工绿地也将增加, 使得城市景观格局更加零散, 导致 LST 受多种相互作用因素的影响; (5) 影响四季 LST 的驱动因子空间差异较大, 夏季土地覆盖和景观格局与冬季土地覆盖、景观格局和人为活动的回归系数均为正值, 说明高温或低温条件下这些驱动因子对全域升温作用明显。

**【关键词】:** 地表温度 空间分布 驱动力 生态绿楔

**【中图分类号】:** X87 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2021) 02-0351-10

城市热岛效应 (Urban Heat Island, UHI) 与城市化和城市土地利用密切相关<sup>[1,2]</sup>。快速的城市化进程, 促进了区域经济的快速发展, 提高了城市的人口数量, 影响着城市土地利用的方式和格局, 造成城市热环境不断恶化, 形成城市热岛效应<sup>[3,4]</sup>。热岛效应加速了城市的能源消耗, 恶化了城市的生态环境, 影响了城市的宜居性, 增加了居民的高温健康风险<sup>[5,6,7]</sup>。大量研究表明 UHI 与地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 呈线性关系<sup>[8,9]</sup>, 由于土地覆盖的空间特征、水热条件、日照条件等因素在不同季节

**作者简介:** 葛静茹 (1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市遥感、土地利用及其生态环境效应。E-mail: gjr\_0052@163.com  
王海军, E-mail: landgiswhj@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金 (41571384)

变化不同, 导致 LST 空间变化及其驱动因子存在不确定性<sup>[5,10]</sup>。因此, 认识城市 LST 四季的空间分布规律和驱动因子的作用机制, 对于优化可持续发展的城市空间布局和改善城市生态环境至关重要。

近年来, 随着卫星遥感技术的发展, 利用热红外遥感影像数据进行 LST 反演以及结合地理信息科学技术进行时空分析<sup>[11,12]</sup>, 为确定 UHI 提供了一种价格低廉、易于访问、具有更高空间分辨率和更大空间覆盖率的方法<sup>[13,14]</sup>。土地利用类型和景观格局的变化对城市热环境有着显著的影响<sup>[15,16,17]</sup>。此外, 以往的大量研究也表明, 土地利用与热岛效应具有时空异质性。樊智宇等<sup>[18]</sup>运用多元线性回归和 GWR 模型分析了武汉市夏季不透水面增温强度和热岛的时空分布规律, 表明了武汉市的热环境问题突出, 但缺乏考虑城市规划用地布局(例如, 绿色空间、生态廊道等)对热环境改善的影响。王佳等<sup>[19]</sup>基于 GWR 模型表明不同 LUCC 的温度在空间上存在较大差异, 但仅研究了土地覆盖类型单因素与 LST 的关系, 缺乏地形、人为等可能造成空间非平稳性的因素。彭建等<sup>[5]</sup>运用 OLS 和逐步回归方法, 阐明土地覆盖、景观配置以及社会经济等各驱动因子与夏、冬、过渡季节 LST 的相关性, 但未能有效解释 LST 空间分布与各驱动因子之间的时空非平稳性。综上所述, LST 分布规律在不同的季节变化不同, 且不仅受土地利用/土地覆盖及其景观配置的影响, 还受其他驱动因子影响, 例如 GDP 水平、人口密度以及距道路的距离等<sup>[5,20]</sup>。现研究较少从自然、土地覆盖、景观配置以及社会经济等驱动因子综合解释 LST 的时空演变规律, 通过建立全面的驱动因子体系, 确定 LST 的主导影响因素, 进而分析驱动因子的空间异质性与作用机制, 具有重要的科学研究意义和价值。

武汉市作为规划建设的国家中心城市之一<sup>[21]</sup>, 2018 年的城镇化率达到 80.29%<sup>[22]</sup>, 城市化进程中热环境问题突出<sup>[7,23]</sup>, 亟需解决城市建设与区域生境的协调发展问题。因此, 本文以武汉市都市发展区为研究对象, 从 Landsat8 反演得到 LST 数据, 分析都市发展区、生态绿楔以及主城区四季 LST 的空间分布格局; 利用 OLS 和逐步回归方法识别出最优解释 LST 变化的驱动因子组合模型; 以 GWR 模型为基础, 有效解释各驱动因子的时空非平稳性, 揭示驱动因子的影响机制, 以期为更加全面、科学地规划城市发展空间布局和缓解热岛效应提供借鉴。

## 1 研究区域概况

武汉市地处江汉平原东北部, 位于 113° 41' E~115° 05' E, 29° 58' N~31° 22' N, 其都市发展区包含主城区在内的东部新城、西部新城、南部新城、北部新城、西南新城、东南新城等 6 个新城组团, 以及 6 大放射型生态绿楔<sup>[24]</sup>, 总面积约为 3304.86km<sup>2</sup>, 其中主城区覆盖建成区内的江汉区、洪山区、武昌区、江岸区、汉阳区、硚口区、青山区等 7 个区(图 1, 图 2)。长江及其最大支流汉江在此交汇, 属亚热带湿润季风气候, 雨量充沛、日照充足, 四季分明, 年均降雨量约 1260mm, 且多集中在 6~8 月, 年均气温 15.8℃~17.5℃。



图 1 研究区

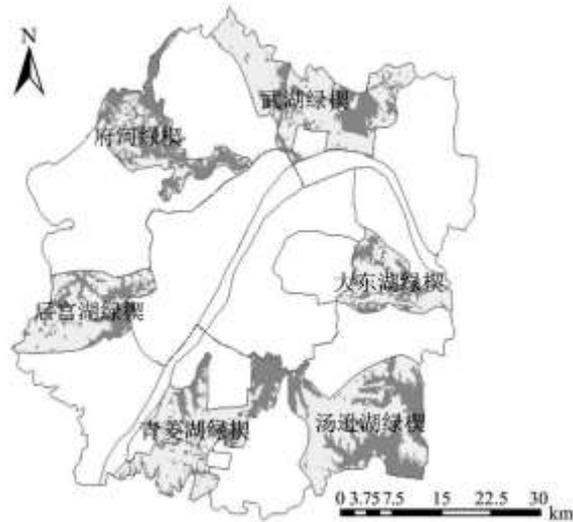


图2 武汉市生态绿楔区位图

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

采集4个不同日期(2016年3月1日、2015年7月23日、2015年10月25日和2014年1月23日)Landsat8 遥感图像(<http://earthexplorer.usgs.gov/>),使用ENVI5.1软件进行辐射校正、大气校正以及反演,得到四季的植被指数(NDVI)和LST数据。土地利用现状数据(2015年)为中国科学院资源环境科学数据中心提供的LandsatTM/ETM遥感数据源人工解译的30m×30m土地利用数据,原始土地利用分类包括耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地六类,为了突出研究重点,并参考相关文献<sup>[25-27]</sup>,将其重分类为生态用地(林地、草地、水域以及未利用地)、建设用地、农业用地(耕地)。另外,还需要的辅助数据包括现状道路数据(2015年)下载自<https://www.openstreetmap.org/>;空间分辨率为1km的人口密度、GDP数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),以及2015年研究区PM<sub>2.5</sub>。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 地表反演

本研究采用大气校正法反演地表温度,该方法主要分为图像辐射的标定、地表比辐射率、黑体辐射亮度与地表温度计算,具体的参数设置及操作流程详见有关文献<sup>[28,29]</sup>。

#### 2.2.2 驱动因素选择

影响LST的驱动因子众多,借鉴已有的综合测度指标体系<sup>[11,15,30,31]</sup>,可分为自然、土地覆盖、景观格局以及人为活动4个方面17个指标(表1)。

表1 地表温度(LST)驱动因素及表征指标

驱动因素类别	驱动因子指标
--------	--------

自然	DEM
土地覆盖	归一化植被指数 (NDVI)
	生态用地占比
	建设用地占比
	农业用地占比
景观格局	斑块大小(平均斑块面积(MPS)、最大斑块指数(LPI))
	斑块形状(平均形状指数(MSI)、景观形状指数(LSI))
	多样性(香农多样性指数(SHDI)、聚集指数(AI))
	斑块空间配置(斑块密度(PD)、边缘密度(ED))
人为活动	人口密度
	GDP
	距道路距离
	PM <sub>2.5</sub>

### 2.2.3 驱动力分析

为了定量的解释城市化快速发展时各驱动因子对 LST 的空间非平稳性，基于传统 OLS 模型扩展的地理加权回归 (GWR) 模型，将空间坐标纳入到扩展模型中，能够有效的估计因子参数。其计算公式为：

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中： $Y_i$  为观测值； $(u_i, v_i)$  为第  $i$  个点的空间坐标； $\beta_0(u_i, v_i)$  为  $i$  点的回归常数，即连续函数  $\beta_0(u, v)$  在点  $(u_i, v_i)$  的值。相关学者认为热环境最适合研究的空间尺度介于 500~650m 之间<sup>[32]</sup>，因此本研究选择以 500m×500m 的网格为基本空间单元，以各单元 LST 平均值及各驱动因子为基本分析数据。所有统计分析均在 ArcGIS10.2 和 SPSS19.0 软件进行。

## 3 结果与分析

### 3.1 LST 季节性变化的空间分布

武汉都市发展区四季 LST 最高气温、最低气温和平均气温有差异，且差异较为显著。春季 LST 最高为 19.31℃，平均为 17.80℃，最低为 14.11℃；夏季 LST 最高为 41.73℃，平均为 36.03℃，最低为 27.75℃；秋季 LST 最高为 28.16℃，平均为 26.56℃，最低为 23.81℃；冬季 LST 最高为 14.14℃，平均为 12.33℃，最低为 11.40℃。其中，夏季比春季、秋季、冬季最高温高 22.42℃、13.57℃、27.59℃，均温高 18.23℃、9.47℃、23.70℃，最低温高 13.64℃、3.94℃、16.35℃。

如图 3 所示，研究区不同季节的低温区和高温区 LST 空间分布格局差异较大。除冬季贯穿武汉都市发展区的沿江区域没有显示出低温聚集，其他三季低温区主要集中在各大湖泊水系，说明水域具有良好的降温效果。春季高温聚集区主要位于武钢工业集团、贯穿江汉区与东西湖区的解放大道沿线以及东风大道沿线范围内，其局部 Moran' sI 的测算结果表明，共有 2597 个网格表现出显著的空间自相关性，“高-高”、“低-低”类型的网格分别为 882、1685 个；夏季高温聚集区主要位于武汉市 7 大主城区、江夏区与大桥新区部分、东西湖区大部分、东风大道沿线以及巨龙大道沿线范围内，其局部 Moran' sI 的测算结果显示，共有 3759 个网格表现出显著的空间自相关性，“高-高”、“低-低”类型的网格分别为 2055、1666 个；秋季高温聚集区主要位于武钢工业集团、光谷商业圈、东西湖区及其邻近的三环线范围以及东风大道沿线范围内，其局部 Moran' sI 共有 2461 个网格表现出显著的空间自相关性，“高-高”、“低-低”类型的网格分别为 1006、1442 个；冬季高温聚集区在图上分布较为分散，主要零星分布在武钢工业集团、位于金港新区的京珠高速沿线、沌口大道沿线等，分析其局部 Moran' sI 共有 2356 个网格表现出显著的空间自相关性，“高-高”、“低-低”类型的网格分别为 818、1516 个。总之，四个季节的高温区主要分布在主城区、新型城镇发展区、主要交通干线沿线范围等被人工表面高度覆盖的地区，说明人工地表更容易造成高温聚集，其中夏季“高-高”聚集网格数最多且占比最大，表明夏季高温聚集现象更为明显。

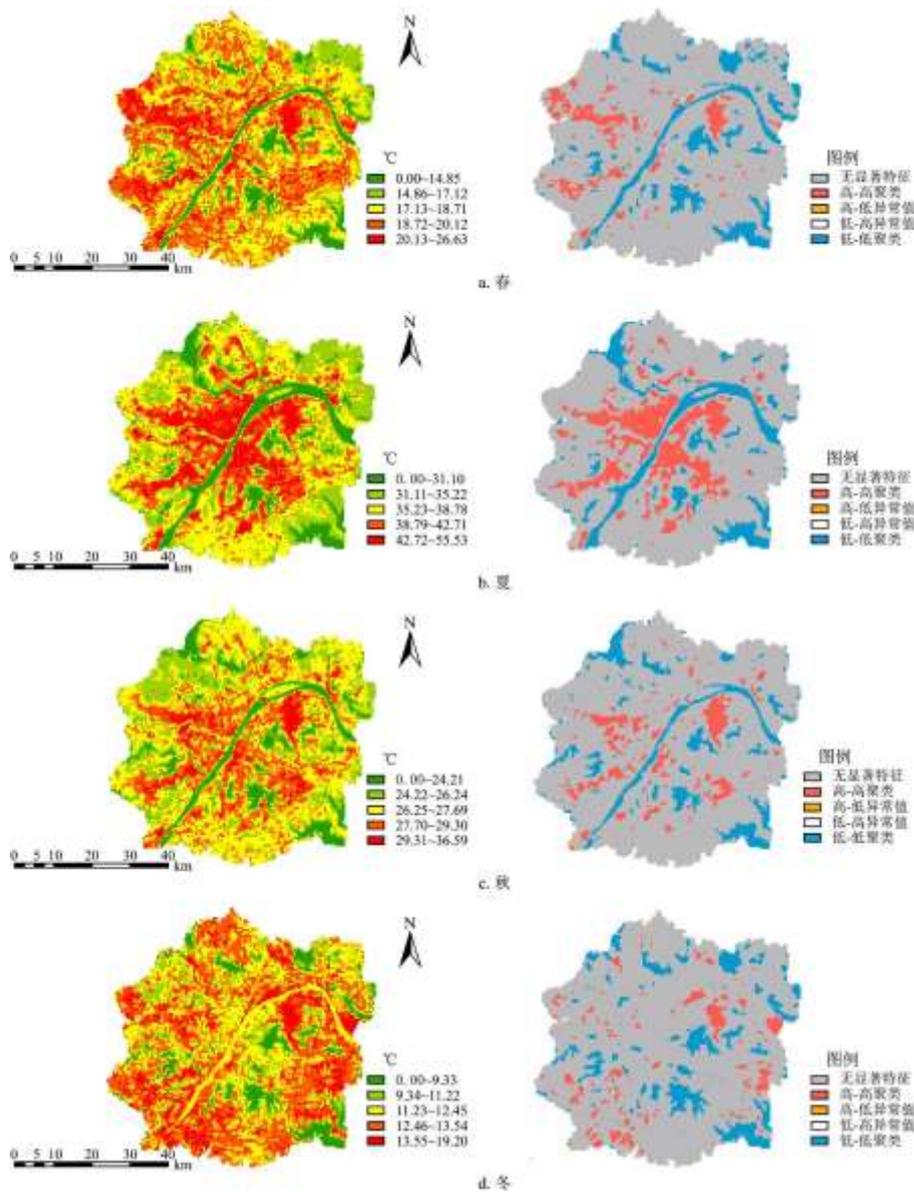


图 3 四季 LST 的空间网格分布(500m×500m)及局部空间自相关特征

### 3.2 四季生态绿楔降温效应

分析武汉市城市规划绿楔(图 2)中生态用地的四季降温幅度表明(表 2),各绿楔生态用地降温幅度各异,春季降温幅度不明显;夏季各绿楔生态用地降温均超过 2℃,其中,青菱湖绿楔生态用地降温最为明显,降幅为 2.96℃;秋冬两季除府河绿楔生态用地降温均超过 1℃,汤逊湖绿楔、后宫湖绿楔以及青菱湖绿楔降温效果显著。

本文通过研究区六大绿楔及其缓冲区内的 LST,计算其内部及各个缓冲带的平均 LST 值。采用差值进行研究,以随距离增大温度的变化量来表征降温范围及降温程度。其中,温差值为各缓冲带温度减去其对应的绿楔平均温度。对各缓冲带 LST 差值随距离变化的规律绘制曲线,四季六大绿楔降温曲线如图 4。除大东湖绿楔与府河绿楔外,四季各生态绿楔在一定缓冲范围内,LST 差值会随缓冲范围增加出现一定程度的增大,达到一定缓冲距离时,LST 随着与绿楔距离增加而趋于平缓或呈下降趋势,这与以往相关学者的研究结果一致<sup>[33,34]</sup>。总之,通过研究生态绿楔缓冲区辐射降温范围,一方面得到武汉市城市规划用地布局对热环境改善效果明显,另一方面可研究不同区域的降温效果以分析降温作用的差异性,更加精确地进行区域用地布局的优化,以缓解城市热岛效应,改善区域生态环境问题。

表 2 四季六大绿楔生态用地降温幅度(℃)

季节	区域	平均温度	生态用地温度	降温幅度
春	武湖绿楔	17.67	17.21	0.46
	大东湖绿楔	17.75	18.05	-0.30
	汤逊湖绿楔	16.90	17.45	-0.55
	后宫湖绿楔	18.00	17.94	0.06
	府河绿楔	17.99	17.94	0.05
	青菱湖绿楔	18.05	17.98	0.07
夏	武湖绿楔	35.86	33.64	2.22
	大东湖绿楔	35.53	33.22	2.31
	汤逊湖绿楔	33.60	31.20	2.40
	后宫湖绿楔	35.84	33.12	2.72
	府河绿楔	34.06	31.98	2.08
	青菱湖绿楔	36.27	33.31	2.96
秋	武湖绿楔	26.73	25.64	1.09
	大东湖绿楔	26.28	24.98	1.30
	汤逊湖绿楔	25.92	24.24	1.68

冬	后宫湖绿楔	25.99	24.34	1.65
	府河绿楔	25.43	24.78	0.65
	青菱湖绿楔	26.76	25.09	1.67
	武湖绿楔	17.68	15.99	1.69
	大东湖绿楔	17.76	16.39	1.37
	汤逊湖绿楔	16.90	15.00	1.90
春	后宫湖绿楔	18.00	16.00	2.00
	府河绿楔	18.00	17.40	0.60
	青菱湖绿楔	18.05	16.07	1.98
	武湖绿楔	17.68	15.99	1.69
	大东湖绿楔	17.76	16.39	1.37
	汤逊湖绿楔	16.90	15.00	1.90

### 3.3 影响四季 LST 的主导因素

OLS 和 LSR 分析表明,土地覆盖和人为活动对各季节 LST 变化的解释程度均高于其它因子。通过 OLS 分析得到土地覆盖各驱动因子都与各季节的 LST 呈极显著相关( $P < 0.05$ ),说明土地覆盖能较好地解释研究区的 LST 变化,且人为活动各季节的人口密度、GDP 和距道路距离均与 LST 高度相关。具体上,春季土地覆盖类别中生态用地占比解释程度最高( $R^2=0.61$ ),其次是建设用地占比( $R^2=0.40$ )与 NDVI ( $R^2=0.41$ );夏季土地覆盖类别中建设用地占比解释程度( $R^2=0.70$ )略高于生态用地占比的解释程度( $R^2=0.62$ ),人为活动中 GDP ( $R^2=0.33$ )与距道路距离( $R^2=0.37$ )的解释程度在四个季节中最大;秋季建设用地占比( $R^2=0.53$ )与生态用地占比( $R^2=0.59$ )均表现出较大的解释程度;冬季生态用地占比( $R^2=0.46$ )与 NDVI ( $R^2=0.44$ )解释程度较高,人为活动各驱动因子以及建设用地占比在四季中解释程度最低。通过 LSR 结果显示,相较于 OLS 得到的  $R^2$  值均有所提升。春、夏、秋、冬四季土地覆盖  $R^2$  值分别为 0.65、0.77、0.66、0.54,人为活动  $R^2$  值分别为 0.27、0.44、0.32 和 0.18,即随着研究区平均气温的升高,土地覆盖、人为活动因素的解释程度增加,说明在高温条件下,土地覆盖可解释更多的 LST 变化,以及人工放热对 LST 变化的影响较强,这与之前学者的相关研究不完全一致<sup>[5]</sup>。

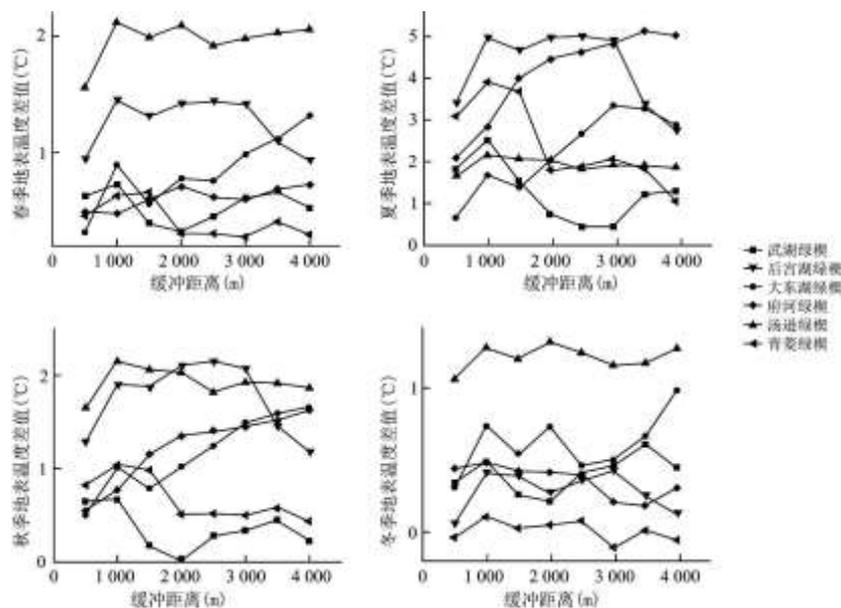


图 4 四季绿楔缓冲带降温曲线图

本文用 DEM 来表征研究区的自然驱动因素,结果表明 DEM 对四个季节的 LST 均有显著影响(解释了 15%以上的 LST 变化)。OLS 回归结果表明,四季景观格局大部分指标与 LST 显著相关,但整体  $R^2$  值较低,最大值仅为 0.12,说明景观格局其对 LST 的影响较弱。在夏季,景观多样性指标与 LST 不存在显著相关,其余 3 类各有一个因子与 LST 显著相关,其中 MPS、LSI、PD 通过回归的显著性检验,MPS、LSI 进入逐步回归方程。LSR 结果显示,景观格局对四季 LST 变化的  $R^2$  值分别为 0.14、0.06、0.09 和 0.10,表现为研究区气温较低,景观格局对 LST 的影响相对明显,说明当气温较高时,其它驱动因子对 LST 的影响显著高于景观格局。总之,虽然 LSR 模型提高了景观格局指数对 LST 的解释程度,但与以往的研究相比<sup>[30,31]</sup>,本研究中景观格局因子对 LST 变化的解释较低,其原因可能是快速城市化导致人工表面积的增加,相应的人工绿地也将增加,使得城市景观格局更加零散,导致 LST 受多种相互作用因素的影响。

### 3.4 驱动因子空间分异分析

对每一季节通过显著性检验 ( $p < 0.05$ ) 的驱动因子,进行 LSR 分析,结果见图 5。其中,春季有 10 个因子列入 LSR 模型,其  $R^2$  为 0.4549,AIC 值为-35825;夏季有 8 个因子列入 LSR 模型,其  $R^2$  为 0.6215,AIC 值为-29236;秋季有 10 个因子列入 LSR 模型,其  $R^2$  为 0.4525,AIC 值为-27915;冬季有 9 个因子列入逐步回归模型,其  $R^2$  为 0.3044,AIC 值为-25752。LSR 结果得到的每个季节  $R^2$  较高,其中夏季  $R^2$  值最高,表明模型可从四个季节有效解释 LST 的变化,且在夏季模型的拟合效果最优。

GWR 模型可显示各类驱动因子对 LST 影响存在的空间非平稳性,探索各驱动因子在不同空间位置上对 LST 影响程度存在的差异性。由于 AIC 值越小,说明模型可以用较少的变量解释更多的 LST 变化,因此 AIC 值最小的模型被确定为每个季节的最优模型,实验结果显示 GWR 模型相较 LSR 模型拟合效果更好, $R^2$  值提高了 0.04~0.09,且 AIC 值均明显减小(图 5)。同时 GWR 拟合的结果揭示四季 LST 在空间上存在较大差异,具体的各季驱动因子系数空间分布如图 6 所示。在春季 GWR 模型拟合的自然参数、土地覆盖、景观格局和人为活动的回归系数分别在-0.088~0.176、0.01~0.128、-0.037~0.028、-0.022~0.074。其中,土地覆盖回归系数在空间范围内均为正值,且高值区多分布在洪山区、张家湾街道以及沌口街、硚口区汉江大道沿线和南湖以南青山区部分区域;自然因素回归系数空间范围差异值最大为 0.264;景观格局回归系数高值区多分布在东湖风景区与沙湖连线范围、汤逊湖以及主城区北部部分地区;人为活动回归系数高值区则多分布在贯穿洪山、汉阳、硚口以及沌口街所在的横向范围以及北部沿武汉火车站铁路干线的狭长地带。在秋季各类驱动因素对 LST 变化的影响能力在空间也存在非平稳性,回归系数分别在-0.078~0.311、-0.006~0.066、-0.47~0.028、-0.083~0.070。其中,秋季自然因素回归系数空间范围差异值最大为 0.389;土地覆盖回归系数高值区主要分布在江汉区、汉阳区、硚口区、民族大道附近以及武钢集团以北部分地区;景观格局回归系数高值区主要分布在武钢集团、后湖大道以北三环线以内以及东湖新技术开发区;人为活动回归系数高值区多分布在汉阳区、硚口区、后湖大道以北三环线以内以及武汉火车站铁路干线范围内。总之,春秋两季的数据表明,自然因素回归系数差异值最大,原因可能是武汉市有丰富的地形地貌且空间分布差异大,土地覆盖回归系数高值区主要分布在建设用地占比较高的区域,人为活动回归系数高值区则主要分布在社会经济比较发达的范围,而景观格局回归系数高值区没有明显的规律可循。夏、冬两季的各类驱动因子 GWR 模型回归系数在空间上差异仍较大,其中,夏季土地覆盖和景观格局与冬季土地覆盖、景观格局和人为活动的回归系数均为正值,说明高温或低温条件下这些驱动因子对全域升温作用明显,但在空间上没有规律可循,表明在这两季驱动因子的作用机制更为复杂。

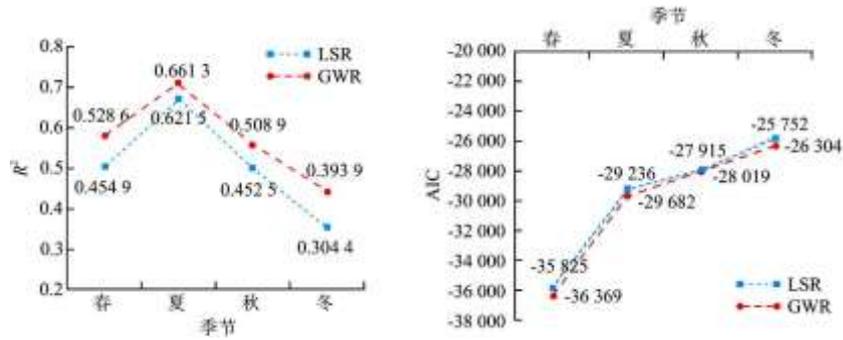


图5 四季模型结果对比

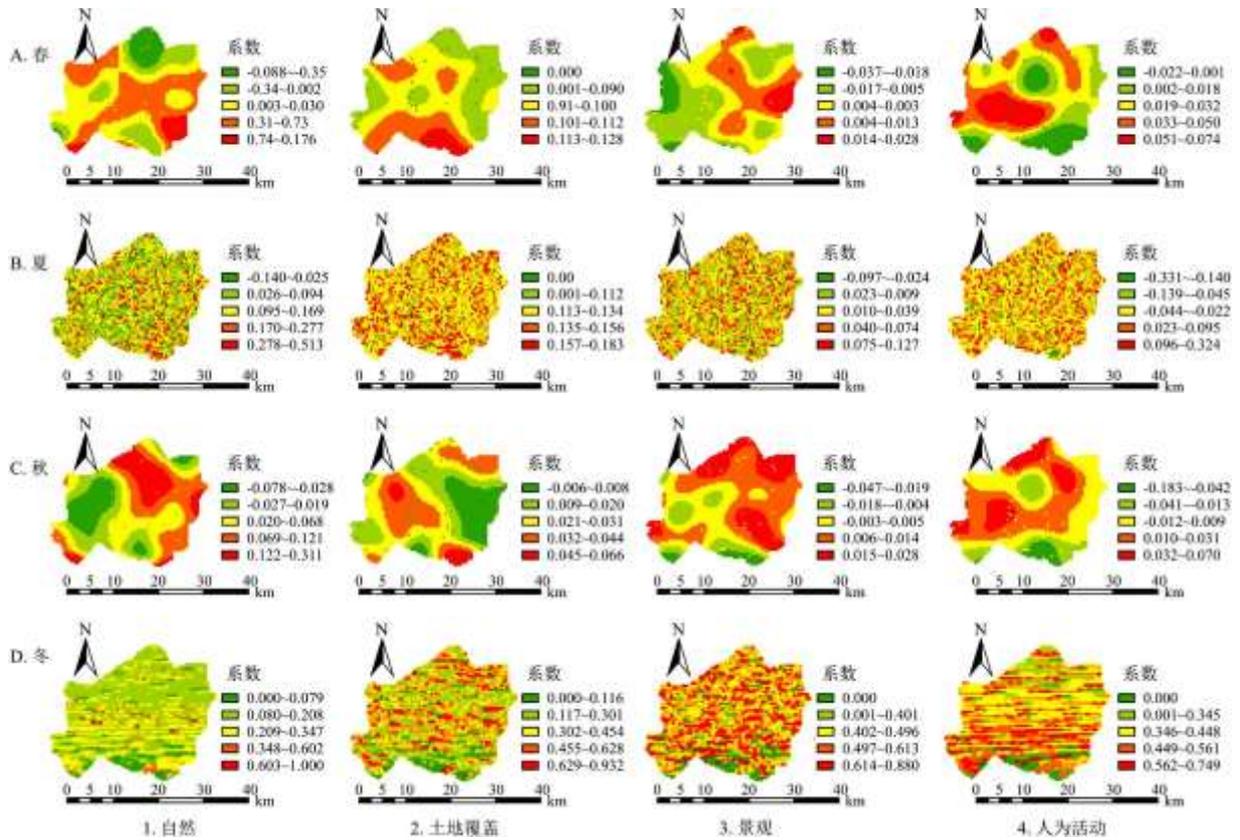


图6 武汉市主城区 LST 驱动因子系数空间布局

## 4 结论

本文以武汉市都市发展区为例，通过反演近地表温度(LST)，运用普通最小二乘回归(OLS)、线性逐步回归(LSR)、地理加权回归(GWR)等方法，选取自然、土地覆盖、景观格局和人为活动等多驱动因子，分析都市发展区、生态绿楔以及主城区四季 LST 时空分布规律和各驱动因子的作用机制。主要结论如下：

(1)LST 存在空间聚集关系，“高-高”聚集主要发生在主城区、新型城镇发展区、主要交通干线沿线等更容易造成高温聚集的人工表面，其中夏季“高-高”聚集类型网格数最多且占比最大，而“低-低”聚集四季均主要发生在各大湖泊水系；(2)绿楔生态用地降温幅度各异，春季降温幅度不明显，夏季降温幅度最显著，各绿楔生态用地降温均超过 2℃，且在一定范围内，LST

随着与绿楔距离增大而升高,达到一定距离时,会随着与绿楔距离增加而趋于平缓或呈下降趋势;(3)随着研究区平均气温的升高,土地覆盖、人为活动因素的 LSR 解释程度增加,景观格局的解释程度降低,说明在气温较高时,土地利用结构和社会经济活动对 LST 变化的影响较强,其它驱动因子对 LST 的影响显著高于景观格局;(4)与前人研究相比<sup>[29,30]</sup>,景观格局对 LST 变化的解释程度整体较低,其原因可能是快速城市化导致人工表面积的增加,相应的人工绿地也将增加,使得城市景观格局更加零散,导致 LST 受多种相互作用因素的影响;(5)影响四季 LST 的驱动因子空间差异较大,夏季土地覆盖和景观格局与冬季土地覆盖、景观格局和人为活动的回归系数均为正值,说明高温和低温条件下这些驱动因子对全域升温作用明显。

研究成果可以为优化可持续发展的城市空间布局提供科学的决策参考,为协调城市与生态环境的和谐发展提供有益的启示。但还有诸多不足有待研究,如未能做到全面分析多个驱动因子之间的相互作用;以及由于受数据采集的限制,未能考虑能源消耗、不同空间尺度以及长期数据集等对 LST 有显著影响的因素。

#### 参考文献:

- [1]HUANG Q, HUANG J, YANG X, et al. Quantifying the seasonal contribution of coupling urban land use types on Urban Heat Island using Land Contribution Index: A case study in Wuhan, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 44: 666-675.
- [2]ZHAO Z Q, HE B J, LI L G, et al. Profile and concentric zonal analysis of relationships between land use/land cover and land surface temperature: Case study of Shenyang, China[J]. *Energy and Buildings*, 155:282-295.
- [3]杨英宝, 苏伟忠, 江南, 等. 南京市热岛效应变化时空特征及其与土地利用变化的关系[J]. *地理研究*, 2007, 26(5): 877-886.
- [4]任春艳, 吴殿廷, 董锁成. 西北地区城市化对城市气候环境的影响[J]. *地理研究*, 2006, 25(2): 233-241.
- [5]PENG J, JIA J L, LIU Y X, et al. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215:255-267.
- [6]彭少麟, 周凯, 叶有华, 等. 城市热岛效应研究进展[J]. *生态环境*, 2005, 14(4): 574-579.
- [7]高静, 龚健, 李靖业. “源-汇”景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1770-1782.
- [8]MAHATO S, PAL S. Influence of land surface parameters on the spatio-seasonal land surface temperature regime in rural West Bengal, India[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(1): 172-189.
- [9]ZHU W B, LÜ A F, JIA S F, et al. Retrievals of all-weather daytime air temperature from MODIS products[J]. *Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal*, 2017, 189:152-163.
- [10]AYANLADE A. Seasonality in the daytime and night-time intensity of land surface temperature in a tropical city area[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558:415-424.
- [11]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 and Urban Planning*, 2013, 114:1-8.

- 
- [12]GUO G H,WU Z F,CHEN Y B,et al.Complex mechanisms linking land surface temperature to greenspace spatial patterns:Evidence from four southeastern Chinese cities. [J].The Science of the Total Environment,2019,674:77-87.
- [13]谢启姣,刘进华,胡道华,等.武汉城市扩张对热场时空演变的影响[J].地理研究,2016,35(7):1259-1272.
- [14]董磊磊,潘竟虎,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.
- [15]谢苗苗,王仰麟,付梅臣.城市地表温度热岛影响因素研究进展[J].地理科学进展,2011,30(1):35-41.
- [16]崔耀平,刘纪远,张学珍,等.京津唐城市群土地利用变化的区域增温效应模拟[J].生态学报,2015,35(4):993-1003.
- [17]牟雪洁,赵昕奕.珠三角地区地表温度与土地利用类型关系[J].地理研究,2012,31(9):1589-1597.
- [18]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.
- [19]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.
- [20]HU D,MENG Q Y,ZHANG L L,et al.Spatial quantitative analysis of the potential driving factors of land surface temperature in different “Centers” of polycentric cities:A case study in Tianjin,China[J].Science of the Total Environment,2020,706:135244.
- [21]杨建新,龚健,高静,等.国家中心城市土地利用变化稳定性和系统性特征——以武汉市为例[J].资源科学,2019,41(4):701-716.
- [22]湖北省统计局.湖北统计年鉴2019[J].湖北:中国统计出版社,2019.
- [23]黄亚平,卢有朋,单卓然,等.武汉市主城区热岛空间格局及其影响因素研究[J].城市规划,2019,43(4):41-47,52.
- [24]武汉市自然资源和规划局.武汉首个绿楔保护规划亮相[DB/OL].(2014-09-04)[2014-09-04].<http://gtghj.wuhan.gov.cn/pc-134-60493.html>.
- [25]喻锋,李晓波,张丽君,等.中国生态用地研究:内涵、分类与时空格局[J].生态学报,2015,35(14):4931-4943.
- [26]石龙宇,黄云凤,崔胜辉,等.半城市化地区土地适宜性评价方法及应用——以厦门市集美区为例[J].中国土地科学,2010(5):55-59,65.
- [27]刘巧芹,赵华甫,吴克宁,等.基于用地竞争力的潜在土地利用冲突识别研究——以北京大兴区为例[J].资源科学,2014,36(8):1579-1589.
- [28]邓书斌.ENVI 遥感图像处理方法[M].北京:高等教育出版,2014.

---

[29]匡文慧. 城市地表热环境遥感分析与生态调控[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

[30]DU S, XIONG Z, WANG Y C, et al. Quantifying the multilevel effects of landscape composition and configuration on land surface temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 178:84-92.

[31]CHEN A, YAO L, SUN R, et al. How many metrics are required to identify the effects of the landscape pattern on land surface temperature?[J]. Ecological Indicators, 2014, 45:424-433.

[32]王炯. 城市地表热环境动态分析及优化策略建议[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.

[33]伍卉. 基于 GIS 技术的合肥市城市绿地缓解热岛效应作用研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.

[34]景高莉. 城市冷岛对周边热环境的降温规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.