

基于地理探测器的城市热岛驱动因素分析

——以武汉市为例

向炆 周志翔¹

(华中农业大学园艺林学学院/

湖北省林业信息工程技术研究中心, 湖北 武汉 430070)

【摘要】: 城市热岛是由地表特征、社会经济和气象等因素综合引起的环境问题, 具有显著的季节差异。大量的研究分析了土地覆盖类型、地表覆盖指数、景观指数等和城市热岛之间的相互关系, 忽略了气象因素以及气象因素、地表特征与社会经济之间的交互作用对城市热岛的影响。在分析武汉市不同季节热岛强度及空间自相关分析的基础上, 采用地理探测器研究了不同季节城市热岛强度的驱动因素及其交互作用和热岛风险区探测。结果表明: 武汉市各季节热岛强度在空间上呈现强烈的集聚特征。按春夏秋冬顺序, 武汉市 4 个季节热岛强度的主要驱动因素分别为地表特征、社会经济、社会经济和气象因素, 四季对应的主要驱动因子分别是土地覆盖类型、夜间灯光、夜间灯光和气压。在 11 个驱动因子的交互影响中, 四季热岛强度交互影响作用最大的分别为土地覆盖类型与夜间灯光、土地覆盖类型与 NDVI、土地覆盖类型与夜间灯光、气压与土地覆盖类型或与 NDVI。风险探测结果显示春夏秋冬平均热岛强度最高的分别为城市建成区、城市建成区、城市建成区、裸地和低植被覆盖区, 最低的分别是水体、水体、水体、植被; 四季的平均城市热岛强度随着夜间灯光的增加而增加; NDVI 子区域平均热岛强度呈现先上升后下降的趋势; 气压子区域平均热岛强度总体呈现逐步上升的趋势。这些结果揭示了热岛强度的季节变异特征, 可为缓解城市热岛效应措施的制订提供依据。

【关键词】: 城市热岛 驱动因素 空间特征 季节变异 风险探测

【中图分类号】: X87; X16 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2020) 08-1768-12

随着城市化的快速发展, 造成了景观破碎化、生态系统服务降低、大气污染和生物多样性降低等许多环境问题。城市化过程中往往伴随着土地利用的变化, 这种变化会使自然地表转变成不透水表面, 从而改变地表特性 (较低反射率和较高的显热潜热比率), 增加城市地表能量的存储^[1], 不透水表面水分难以散发太阳的能量, 从而导致城市热岛 (UHI) 效应。城市热岛效应指城区温度高于郊区温度的一种现象^[2], 是城市环境中典型问题之一^[1]。

研究者采用最小二乘法 (OSL)^[3]、时空分析^[4]、比较分析^[5]、敏感性分析^[6]等方法探讨了城市热岛与时空变量之间的相互关系, 其中最常用的是最小二乘法和 pearson 相关分析^[7]。时空变量主要包括土地利用覆盖、季节和昼夜等因素。不同的土地利用覆盖的地表特性影响热岛强度, 如植被和水体能够降低四周的温度。季节变化也会造成城市热岛强度的变化, 一方面是因为季节间太

¹作者简介: 向炆 (1995-), 男, 博士研究生, 主要从事园林生态方面研究. E-mail: 1091573805@qq.com

周志翔, E-mail: whzhouzx@mail.hzau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31870701)。

阳辐射量不同,另一方面是不同的植被有不同的季节响应。昼夜城市热岛强度会出现差异,这些差异可能来源于地表覆盖和城市形态,如高大密集的建筑群会影响城市通风,从而减弱城市降温速率。因此,分析不同季节城市热岛效应的空间特征,并探讨城市热岛效应驱动因素的季节变异是制定城市热岛效应缓解措施的依据。尽管许多研究从相关和回归分析等角度探讨分析景观格局^[8]、不透水表面^[9]、下垫面^[10]与城市热岛之间的相互关系^[11~12],但城市热岛气象驱动因素及其社会经济、地表特征、气象因子之间的交互作用仍不清楚,特别是因子间的交互影响,许多问题都是自然、社会和经济多因子交互作用的结果,分析城市热岛强度因子间的交互作用能够揭示城市热岛机制。地理探测器是一种分析空间分异的方法,适合用于变量的驱动力分析^[13]。本研究以武汉市为例,拟在武汉市不同季节空间特征自相关分析的基础上,采用地理探测器方法探讨不同季节城市热岛强度的主要驱动因素、交互作用和热岛风险区探测,以期缓解城市热岛效应的措施的制订提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

武汉市(113° 41' E~115° 05' E, 29° 58' N~31° 22' N)位于长江中下游,是华中地区的中心城市,长江经济带的主要城市之一,湖北省的省会城市,地形整体较平坦,东高西地,南高北低。气候属于亚热带季风性湿润,降雨集中。水域面积大,约占 1/4。自民国时期开始,武汉就因其夏季炎热,被称为“四大火炉”之一,中国气象局国家气候中心也于 2017 年公布了中国夏季炎热城市排名,该排名综合考虑多种因素如最高气温、平均气温、气温日较差和空气相对湿度,其中武汉市排名第六。

1.2 数据来源

(1) 遥感影像数据。

本研究选取影像时间 2013 年 5、8、10 和 12 月 Landsat-8OLI/TIRS 作为四季影像数据,条带号分别为 122039、123038 和 123039,选择影像少云,时间相近,数据来源于美国地质勘探局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。

(2) 气象数据。

气象数据主要包括月平均气温、月日照时数、月平均气压、月相对湿度和月平均风速,来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn>)。气象数据集是基于全国 824 个台站的月值资料,以 DEM 为协变量,采用 ANUSPLIN 软件的样条法(TPS, Thin Plate Spline)插值得来,插值效果较好,能在一定程度上反映气象的空间变化。

(3) 土地利用覆盖数据。

本研究选择 MODIS 三级数据集——MCD12Q1, MCD12Q1 是土地利用覆盖产品,空间分辨率 500m,共包括 5 种分类方式,选择马里兰大学分类方法,数据来源于美国国家航空航天局地球科学数据和信息系统(ESDIS)项目管理的陆地过程分布式活动档案中心(LPDAAC)(<https://lpdaac.usgs.gov/>)。

(4) 社会经济数据。

本文选取夜间灯光、GDP 和人口数据来表征城市社会经济水平,2013 年的 GDP 和人口数据采用栅格计算器 2010 与 2015 年 GDP 和人口的均值。夜间灯光的强弱能够较好地表征区域内城市化程度^[14]和反映人类活动广度、强度^[15],因此将夜间灯光作为热岛的社会经济驱动因子之一。夜间灯光数据来源于中国科学院资源与环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)。

(5)DEM 数据。

数字高程数据来源于中国科学院资源与环境数据云平台的 SRTM90m 数据,该数据经过多次修正,覆盖面积广,精度高(<http://www.resdc.cn>)。

1.3 研究方法

1.3.1 季节划分

武汉市是亚热带气候,参考 Peng 等^[16]年深圳地表温度季节的研究,本研究采用小提琴图划分四季温度。首先在中国气象数据网收集武汉市 1951~2017 月平均气象数据,得到 67 组数据,然后在 Origin2019 中绘制小提琴图。小提琴图能够显示数据分布和概率密度,组合了箱线图和密度分布,图中每一列的中心空点为中位数,黑色矩形范围代表四分位数范围,密度图宽代表频率。6、7、8、9 月分布紧凑,平均温度均超过了 22℃,是一年中最热的月份,因此将其定义为夏季;1、2、12 月温度最低,平均温度均小于 10℃,是一年中最冷的月份,因此将其定义为冬季;3、4、5、10、11 月温度适中,波动范围较大,将 3、4、5 月其定义为春季,10、11 月定义为秋季。

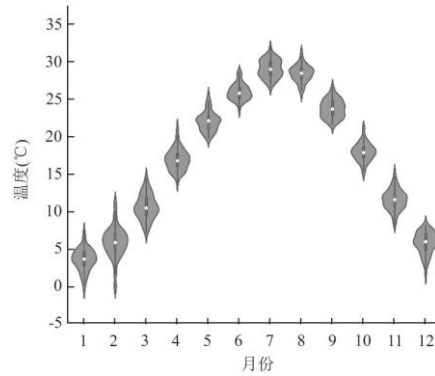


图 1 1951~2017 武汉市月平均气温的小提琴图

1.3.2 地表温度的反演

对 12 幅 landsat8 数据辐射定标和大气校正等预处理后,经过图像拼接裁剪后得到研究区域影像。地表温度反演的方法大致分为 3 类,单通道算法、多通道算法和劈窗算法,大量研究表明劈窗算法精度较高^[17~18],因此本研究选择劈窗算法进行地表温度反演^[19~20]。

1.3.3 城市热岛强度的划分

采用相对地温来将城市热岛强度划分为 5 类(表一)^[21~22],见公式(1):

$$T_R = \frac{T_i - \bar{T}}{\bar{T}} \quad (1)$$

式中: T_R 为研究区域的相对地表温度(℃); T_i 为研究区域 i 点的地表温度; $\bar{T}$ 为研究区域平均地表温度。

表 1 热岛强度分类

相对地表温度	热岛类型
$T_R < 0$	绿岛
$T_R = 0 \sim 0.1$	弱绿岛
$T_R = 0.1 \sim 0.2$	中等热岛
$T_R = 0.2 \sim 0.4$	强热岛
$T_R > 0.4$	极强热岛

1.3.4 空间自相关分析

本研究通过空间自相关来分析城市热岛强度空间特征和空间关联程度,空间自相关包括全局空间自相关和局部空间自相关。本研究选取莫兰指数 I(Global Moran' s I)来定量表征城市热岛强度的全局空间自相关性,指数范围在-1~1 之间,当指数大于 0 且 Z 值显著时,代表城市热岛强度是正空间自相关,指数越大,空间关联性越强,城市热岛强度更趋向于空间集聚,当指数小于 0 且 Z 值显著时,代表城市热岛强度是负空间自相关的,指数越小,代表空间关联性越弱,城市热岛强度更趋向于分散,指数等于 0 时,代表城市热岛强度不具有空间自相关性,呈现随机分布的特点。计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

式中:n 代表研究区域的像元个数; x_i 、 x_j 分别代表像元 i、j 的城市热岛强度; $\bar{x}$ 是研究区域所有像元的均值; w_{ij} 是像元 i、j 的空间权重矩阵;S 是标准差。

莫兰指数的显著性检验公式为:

$$Z(I) = \frac{[I - E(I)]}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (4)$$

式中:Z(I)能够判断莫兰指数的显著性;E(I)是指数的期望值;Var(I)是指数的方差。

而且,我们还采用局部莫兰指数(Local Global Moran' s I)来检验局部空间自相关,局部莫兰指数能够检验每个要素的空间

自相关, 进一步分析城市热岛强度的空间异质性和异常域:

$$I_L = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{s^2} \quad (5)$$

Z(I) 也能判断局部莫兰指数的显著性。当 I 大于 0 且 Z(I) 大于 0 并通过检验时, 属于“高一高”类型, 代表此要素和临近要素城市热岛强度较高, 是热点地区; 当 I 大于 0 且 Z(I) 小于 0 并通过检验时, 属于“低—低”类型, 代表此要素和临近要素城市热岛强度较低; 当 I 小于 0 且 Z(I) 大于 0 并通过检验时, 属于“高一低”类型, 代表该高城市热岛强度要素与邻近低城市热岛强度要素所包围; 当 I 小于 0 且 Z(I) 小于 0 并通过检验时, 属于“低—高”类型, 代表该低城市热岛强度要素与邻近高城市热岛强度要素所包围。

1.3.5 地理探测器

地理探测器是衡量空间分层异质性, 探索驱动力的统计学模型, 与传统的模型相比, 能够在不基于线性假设和变量共线性的情况下分析变量之间的相互关系, 包含 4 个组成部分, 因子探测、风险区探测、交互探测和生态探测^[23]。本研究采用因子探测、风险区探测个交互探测, 因子探测用 q 值量化分析各因子对城市热岛强度空间分异的贡献大小, 公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (6)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2$$

式中: h=1, ..., L 为因子的分区数量, 即子区域数量; N_h 和 N 分别代表子区域中的样本多少和样本总数; SSW 和 SST 分别是子区域方差之和和全区域方差; q 值范围为 [0, 1], q 值越大代表因子对热岛影响越大。

风险区探测能够通过 t 检验来判断解释子区域之间的城市热岛强度是否存在显著差异, 公式如下:

$$t_{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

式中: Y_h 是子区域 h 的变量均值; n_h 为子区域 h 的样本数量; Var 表示方差。

交互探测是判断各个因子之间的交互作用, 即计算两因子交互时的 q 值, 交互关系分为 5 类, 包括非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强。

2 结果与分析

2.1 武汉市不同季节的地表温度与热岛强度

通过劈窗算法得到武汉市 2013 年春季(5 月)、夏季(8 月)、秋季(10 月)和冬季(12 月)的地表温度(表 2)。可以看出,以 5 月为代表的春季,月平均地表温度为 34.03℃,标准差为 3.22;以 8 月为代表的夏季,月平均地表温度为 36.85℃,标准差为 3.30;以 10 月为代表的秋季,月平均地表温度为 32.21℃,标准差为 2.42;以 12 月为代表的冬季,月平均地表温度为 14.79℃,标准差为 1.21。基于自然断点法分类进一步在空间上显示了四季地表温度的空间变化(图 2~图 5)。

各季热岛强度具有变化规律(图 6)。从春季至冬季,绿岛强度比例呈现先上升后下降的趋势,从春季上升到夏季达到峰值后逐渐降低,冬季达到最低。这可能与植被的季节变异有关,春季部分植物叶子并未完全展开,植被的冷岛强度未达到峰值,夏季植物叶子完全展开,植被的冷岛强度能力达到最大值。秋季到冬季,随着落叶植物的凋零,植被的冷岛强度能力达到最低。弱绿岛强度比例呈现先下降后上升的趋势;中等强度比例呈现逐渐降低的趋势;强热岛强度则呈现先降低后上升的趋势;极强热岛强度比例不足百分之一。

表 2 武汉市不同季节地表温度的统计特征

季节	像元平均值(℃)	标准差
春季(5 月)	34.03	3.22
夏季(8 月)	36.85	3.30
秋季(10 月)	32.21	2.42
冬季(12 月)	14.79	1.21

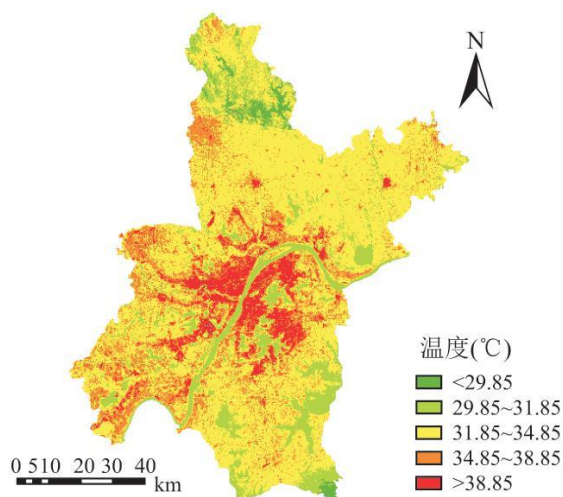


图 2 武汉市春季(5 月)地表温度

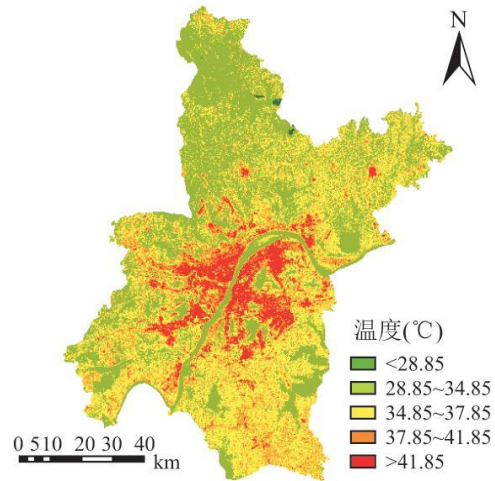


图 3 武汉市夏季(8 月)地表温度

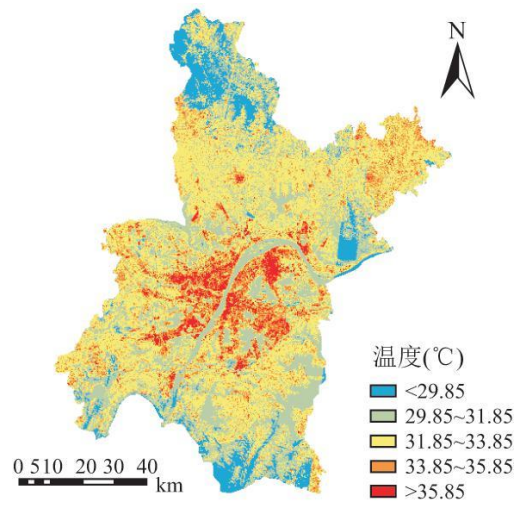


图 4 武汉市秋季(10 月)地表温度

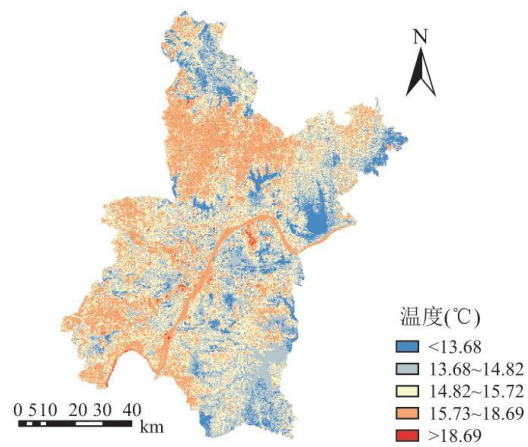


图 5 武汉市冬季(12 月)地表温度

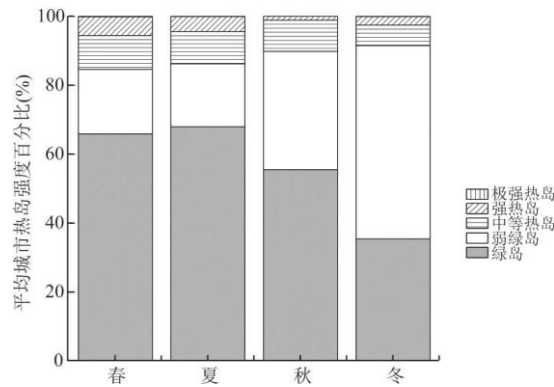


图6 武汉市(2013年)不同季节热岛强度的柱状堆积图

2.2 武汉市不同季节城市热岛强度的空间自相关分析

2.2.1 热岛强度的全局空间自相关分析

武汉四季城市热岛强度的Moran' sI均为正值且p值小于0.001,说明武汉市四季城市热岛强度呈现显著的空间正相关关系,空间上呈集聚特征(表3)。其中,夏季城市热岛强度空间集聚的特征最为显著,其次是春季,秋季和冬季空间集聚性相对较弱。

表3 四季城市热岛强度全局空间自相关显著性检索表

指数	春季	夏季	秋季	冬季
Moran' sI	0.69	0.73	0.63	0.62
Zscores	119.95	127.16	108.95	107.65
Pvalue	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

2.2.2 热岛强度的局部空间自相关分析

四季城市热岛强度局部空间自相关结果反映了城市热岛强度在空间上的集聚特征(图7~图10)。其中,春季“高一高”类型,即高城市热岛强度集聚区,主要集中在武汉市区城市建成区和部分农区,零星分布各区城区和部分农区,如在东西湖区西北的农区、汉南区与蔡甸区交汇的农区、新洲区城区、黄陂区的城区和南部的农区、蔡甸区东北方向的农区、江夏区城区和西北部农区等,无明显大范围的“低—低”类型,即低城市热岛强度集聚区;夏季“高一高”类型,即高城市热岛强度集聚区,主要分布在武汉市四环线内城市建成区和部分农区,无明显大范围的“低—低”类型,即低城市热岛强度集聚区;秋季“高一高”类型,即高城市热岛强度集聚区,主要分布在武汉市四环线内城市建成区和部分农区,“低—低”类型分布在武汉外环线黄陂区北部的植被区和农区,新洲区东南部植被和水体区,蔡甸区西南部的植被区和水体区,江夏区西南、南、东南部植被和水体区以及零星分布在各区域农区,冬季“高一高”类型,即高城市热岛强度集聚区,主要分布于黄陂区西、中、东部,汉南区南部,蔡甸区中部,东西湖区西部以及长江,“低—低”类型主要分布于黄陂区北部和小部分南部,蔡甸区东北部,江夏区北、南部,新洲区东南、南部,市区南部等。

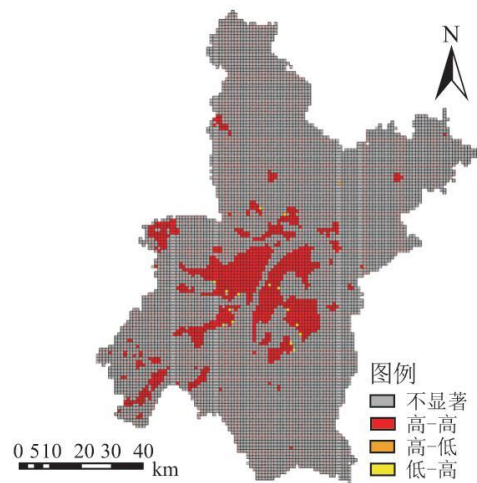


图 7 春季城市热岛强度局部空间自相关分布图

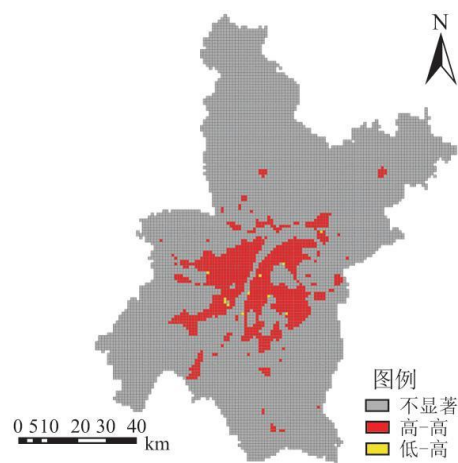


图 8 夏季城市热岛强度局部空间自相关分布图

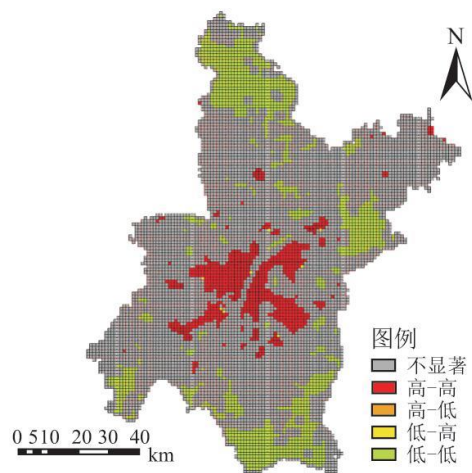


图 9 秋季城市热岛强度局部空间自相关分布图

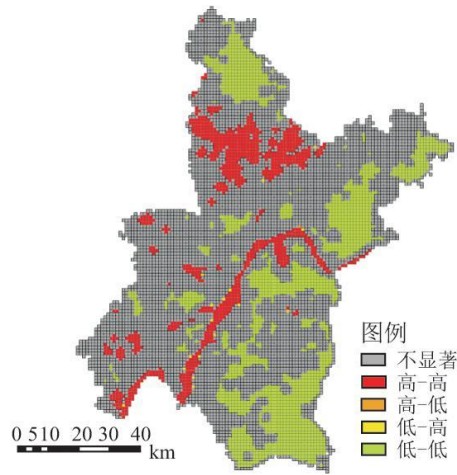


图 10 冬季城市热岛强度局部空间自相关分布图

2.3 武汉市不同季节城市热岛强度的主要驱动因素及其交互作用

地理探测器的因子必须是类别而非数值,采用自然断点法进行分级。MCD12Q1 土地利用数据采用马里兰大学分类并进行合并为 5 类,包含水体、植被、农田、城市区和裸地或植被覆盖区,夜间灯光、人口、GDP、DEM、月日照时数、月平均气温、月平均气压和月平均 NDVI 均采用自然断点法划分为 5 类,由于数据的范围,将月相对湿度和月平均风速根据自然断点法划分为 2 类。

2.3.1 武汉市城市热岛的主要驱动因素

如表 4 所示,采用因子探测来分析 11 个驱动因子对各季节城市热岛强度的影响(q 值)。在春季(5 月),11 个潜在驱动因子对城市热岛强度的解释从大到小为:土地覆盖类型(0.3228)>夜间灯光(0.3190)>人口(0.2413)>GDP(0.2293)>NDVI(0.1884)>气压(0.1047)>日照时数(0.1055)>相对湿度(0.0819)>DEM(0.0589)>风速(0.0496)>气温(0.0337)。土地覆盖类型对春季热岛强度影响最大,其次是夜间灯光和人口。相较于气象因子,地表特征、社会经济对春季热岛强度影响较大。

在夏季(8 月),11 个潜在驱动因子对城市热岛强度的解释从大到小为:夜间灯光(0.3761)>NDVI(0.2953)>土地覆盖类型(0.2896)>人口(0.2450)>GDP(0.2313)>日照时数(0.2180)>气温(0.0954)>风速(0.0861)>DEM(0.0740)>相对湿度(0.0227)>气压(0.0040)。夜间灯光对夏季热岛强度影响最大,其次是 NDVI 和人口。和气象因子相比,社会经济和地表特征对夏季热岛强度影响较大。

在秋季(10 月),11 个潜在驱动因子对城市热岛强度的解释从大到小为:夜间灯光(0.2912)>土地覆盖类型(0.2873)>NDVI(0.1757)>人口(0.1634)>GDP(0.1611)>气温(0.1509)>DEM(0.1324)>气压(0.0626)>日照时数(0.0624)>相对湿度(0.0292)>风速(0.0077)。夜间灯光对秋季热岛强度影响较大,其次是土地覆盖类型和 NDVI。相较于气象因素,社会经济和地表特征对秋季热岛强度影响较大。

在冬季(12 月),11 个潜在驱动因子对城市热岛强度的解释从大到小为:气压(0.1601)>土地覆盖类型(0.0906)>NDVI(0.0695)>日照时数(0.0541)>气温(0.0506)>夜间灯光(0.0488)>DEM(0.0373)>风速(0.0182)>相对湿度(0.0166)>人口(0.0077)>GDP(0.0075)。气压对冬季热岛强度影响较大,其次是土地覆盖类型和 NDVI。和春、夏和秋季相比,气象因素(气压)成为冬季城市热岛强度主要影响因子。

2.3.2 武汉市热岛强度驱动因素间的交互作用

采用交互探测检验了 11 个城市热岛强度驱动因子之间 (55 对) 的相互作用。结果显示, 每对因子的交互 q 值大于两个因子的 q 值, 城市热岛强度驱动因子之间的相互作用关系是相互增强。

春季热岛强度交互探测结果显示 (表 5), 土地覆盖类型与夜间灯光的交互 q 值 (0.50) 最大, 说明土地覆盖类型与夜间灯光的交互作用对春季热岛强度的影响最大。其次是, 土地覆盖类型与 NDVI 的交互 q 值 (0.45) 和土地覆盖类型与人口的交互 q 值 (0.43)。

表 4 热岛强度驱动因素地理探测分析表

因子类别	指标	春季 q 值	夏季 q 值	秋季 q 值	冬季 q 值
社会经济	夜间灯光	0.3190**	0.3759**	0.2912**	0.0488**
	人口	0.2413**	0.2449**	0.1634**	0.0077**
	GDP	0.2293**	0.2313**	0.1611**	0.0075**
地表特征	DEM	0.0589**	0.0730**	0.1324**	0.0373**
	NDVI	0.1884**	0.2955**	0.1757**	0.0695**
	土地覆盖类型	0.3228**	0.2892**	0.2873**	0.0906**
气象	气温	0.0337**	0.0941**	0.1509**	0.0506**
	气压	0.1047**	0.0034**	0.0626**	0.1601**
	日照时数	0.1055**	0.2175**	0.0624**	0.0541**
	相对湿度	0.0819**	0.0220**	0.0292**	0.0166**
	风速	0.0496**	0.0864**	0.0077**	0.0182**

表 5 春季热岛强度驱动因子交互分析

因子类别	夜间灯光	人口	GDP	DEM	NDVI	土地覆盖类型	气温	气压	日照时数	相对湿度	风速
夜间灯光											
人口	0.38 ^B										
GDP	0.37 ^B	0.26 ^B									
DEM	0.34 ^B	0.27 ^B	0.26 ^B								
NDVI	0.40 ^B	0.33 ^B	0.31 ^B	0.23 ^B							
土地覆盖类型	0.50 ^B	0.43 ^B	0.41 ^B	0.37 ^B	0.45 ^B						

气温	0.36 ^N	0.27 ^B	0.27 ^N	0.07 ^B	0.22 ^N	0.36 ^N					
气压	0.38 ^B	0.32 ^B	0.31 ^B	0.17 ^N	0.30 ^N	0.39 ^B	0.12 ^B				
日照时数	0.34 ^B	0.28 ^B	0.27 ^B	0.12 ^B	0.26 ^B	0.40 ^B	0.13 ^B	0.24 ^N			
相对湿度	0.33 ^B	0.27 ^B	0.26 ^B	0.10 ^B	0.23 ^B	0.40 ^B	0.09 ^B	0.21 ^N	0.12 ^B		
风速	0.32 ^B	0.26 ^B	0.25 ^B	0.13 ^N	0.28 ^N	0.34 ^B	0.10 ^N	0.11 ^B	0.20 ^N	0.19 ^N	

夏季热岛强度交互探测结果显示(表 6), 土地覆盖类型与 NDVI 的交互 q 值(0.54)最大, 说明土地覆盖类型与 NDVI 的交互作用对夏季热岛强度的影响最大, 其次是土地覆盖类型与夜间灯光的交互 q 值(0.52)和土地覆盖类型与日照时数交互 q 值(0.46)。

秋季热岛强度交互探测结果显示(表 7), 土地覆盖类型与夜间灯光的交互 q 值(0.48)最大, 说明土地覆盖类型与夜间灯光的交互作用对秋季热岛强度的影响最大, 其次是土地覆盖类型与 NDVI 的交互 q 值(0.44)和土地覆盖类型与气温的交互 q 值(0.40)。

冬季热岛强度交互探测结果显示(表 8), 气压与土地覆盖类型和气压与 NDVI 的交互 q 值(0.25)最大, 说明气压与土地覆盖类型、NDVI 的交互作用对冬季热岛强度的影响最大, 其次是气压与日照时数的交互 q 值(0.23)。

2.3.3 热岛强度因子的风险区域(亚分区)

结合因子探测的结果, 选择土地覆盖类型、夜间灯光、NDVI 和气压, 采用风险探测分析驱动因子子区域之中的风险区域。计算土地覆盖类型子区域中的平均热岛强度。春、夏、秋、冬平均热岛强度最高的分别为城市建成区(0.1638)、城市建成区(0.1595)、城市建成区(0.1032)、裸地和低植被覆盖区(0.0495); 春、夏、秋、冬平均热岛强度最低的分别是水体(-0.0791)、水体(-0.0593)、水体(-0.0656)、植被(-0.0374)(图 11)。

采用自然断点法将夜间灯光划分为 5 类。夜间灯光能够表征城市化发展的水平和人类的密集活动。除冬季外, 其它季节平均城市热岛强度随着夜间灯光的增加也在增加, 冬季平均热岛强度呈现先上升后下降的趋势(图 12)。春夏秋季较高的城市热岛强度发生在夜间灯光值较高的区域。

表 6 夏季热岛强度驱动因子交互分析

因子类别	夜间灯光	人口	GDP	DEM	NDVI	土地覆盖类型	气温	气压	日照时数	相对湿度	风速
夜间灯光											
人口	0.42 ^B										
GDP	0.41 ^B	0.26 ^B									
DEM	0.41 ^B	0.29 ^B	0.28 ^B								
NDVI	0.45 ^B	0.40 ^B	0.39 ^B	0.33 ^B							
土地覆盖类型	0.52 ^B	0.40 ^B	0.38 ^B	0.35 ^B	0.54 ^B						

气温	0.40 ^B	0.28 ^B	0.27 ^B	0.11 ^B	0.31 ^B	0.36 ^B					
气压	0.41 ^N	0.27 ^N	0.26 ^N	0.12 ^N	0.35 ^N	0.32 ^N	0.12 ^N				
日照时数	0.44 ^B	0.36 ^B	0.35 ^B	0.23 ^B	0.37 ^B	0.46 ^B	0.25 ^B	0.28 ^N			
相对湿度	0.38 ^B	0.25 ^B	0.24 ^B	0.10 ^N	0.31 ^B	0.30 ^B	0.10 ^B	0.03 ^N	0.23 ^B		
风速	0.40 ^B	0.31 ^B	0.30 ^B	0.14 ^B	0.33 ^B	0.34 ^B	0.14 ^B	0.12 ^N	0.23 ^B	0.10 ^B	

表 7 秋季热岛强度驱动因子交互分析

因子类别	夜间灯光	人口	GDP	DEM	NDVI	土地覆盖类型	气温	气压	日照时数	相对湿度	风速
夜间灯光											
人口	0.32 ^B										
GDP	0.32 ^B	0.18 ^B									
DEM	0.35 ^B	0.27 ^B	0.27 ^B								
NDVI	0.39 ^B	0.27 ^B	0.26 ^B	0.27 ^B							
土地覆盖类型	0.48 ^B	0.39 ^B	0.38 ^B	0.38 ^B	0.44 ^B						
气温	0.34 ^B	0.25 ^B	0.25 ^B	0.20 ^B	0.28 ^B	0.40 ^B					
气压	0.32 ^B	0.22 ^B	0.21 ^B	0.21 ^N	0.27 ^N	0.34 ^B	0.24 ^N				
日照时数	0.33 ^B	0.22 ^B	0.22 ^B	0.19 ^B	0.26 ^N	0.39 ^N	0.22 ^N	0.23 ^N			
相对湿度	0.31 ^B	0.17 ^B	0.17 ^B	0.14 ^B	0.19 ^B	0.36 ^N	0.16 ^B	0.14 ^N	0.13 ^N		
风速	0.32 ^N	0.19 ^N	0.18 ^N	0.19 ^N	0.21 ^N	0.33 ^N	0.19 ^N	0.16 ^N	0.07 ^B	0.13 ^N	

表 8 冬季热岛强度驱动因子交互分析

因子类别	夜间灯光	人口	GDP	DEM	NDVI	土地覆盖类型	气温	气压	日照时数	相对湿度	风速
夜间灯光											
人口	0.06 ^N										
GDP	0.06 ^B	0.02 ^N									
DEM	0.08 ^B	0.05 ^N	0.05 ^N								
NDVI	0.16 ^N	0.13 ^N	0.10 ^N	0.10 ^B							

土地覆盖类型	0.18 ^N	0.14 ^N	0.12 ^N	0.10 ^B	0.14 ^B						
气温	0.12 ^N	0.06 ^N	0.06 ^B	0.10 ^N	0.12 ^N	0.13 ^B					
气压	0.21 ^N	0.17 ^N	0.16 ^B	0.19 ^B	0.25 ^N	0.25 ^B	0.21 ^B				
日照时数	0.10 ^N	0.06 ^N	0.06 ^N	0.16 ^N	0.14 ^N	0.16 ^N	0.12 ^N	0.23 ^N			
相对湿度	0.09 ^N	0.03 ^N	0.03 ^N	0.08 ^N	0.11 ^N	0.13 ^N	0.06 ^B	0.19 ^N	0.11 ^N		
风速	0.06 ^B	0.03 ^B	0.03 ^B	0.04 ^B	0.08 ^B	0.10 ^B	0.07 ^B	0.16 ^B	0.07 ^N	0.04 ^N	

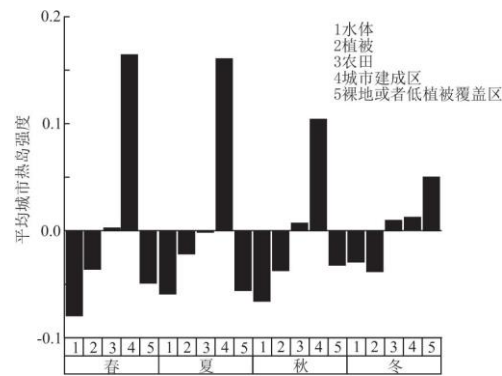


图 11 不同季节各土地覆盖类型的平均城市热岛强度

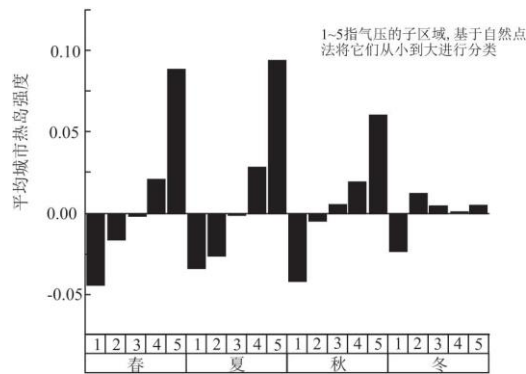


图 12 不同季节夜间灯光子区域平均热岛强度

采用自然断点法将 NDVI 划分为 5 类。四季 NDVI 子区域平均城市热岛强度呈现先上升,后下降的趋势(图 13)。

采用自然断点法将气压划分为 5 类。四季气压子区域平均城市热岛强度总体呈现逐步上升的趋势(图 14)。

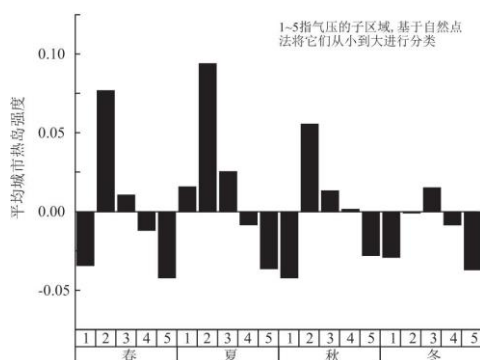


图 13 不同季节 NDVI 子区域平均城市热岛强度

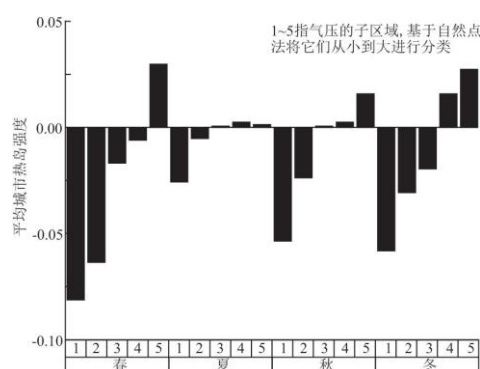


图 14 不同季节气压子区域平均城市热岛强度

3 讨论

各驱动因子对城市热岛的影响存在季节变异(图 15)。社会经济(夜间灯光、人口和 GDP)随着温度的降低,对城市热岛强度的影响力也在逐渐降低,其四季影响力变化规律呈现先上升后下降的趋势,从春季上升到夏季达到最高,然后下降到冬季达到最低。地表特征表现出类似的现象,总体来说,其影响城市热岛强度的能力逐渐降低。具体来说,DEM 对城市热岛强度的影响力从春季上升到秋季至最大值,下降到冬季达到最低值;NDVI 对城市热岛强度的影响力从春季上升到夏季达到最高,下降到冬季达到最低;土地覆盖类型对城市热岛强度的影响力则是从春季至冬季逐渐降低。各气象因子影响力季节变化规律存在明显的差异。具体来说,气温因子对城市热岛强度的影响力从春季上升到秋季,然后逐渐下降;气压从春季下降到夏季达到最低值,然后上升到冬季达到最高值;日照时数从春季上升到夏季达到最大,然后下降到冬季达到最小。相对湿度则是呈现先下降,后上升,再下降的变化规律;风速从春季上升到夏季达到最大,秋季下降到最低,然后逐渐上升。

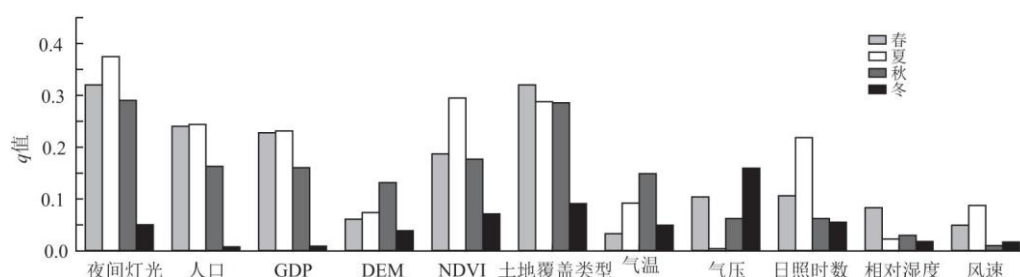


图 15 各驱动因子 q 值的季节变异

4 结论

先前研究主要集中于土地覆盖^[24]、人口^[25]、景观指数^[26]、不透水表面^[27]、城市发展^[28]、植被指数^[29]、城市景观形态^[30]与城市热岛的相互关系,结果指出土地覆盖是解释城市热岛的关键变量,而且植被能缓解城市热岛,但是忽略了气象以及社会经济、地表特征、气象任意两者之间的交互作用与城市热岛之间的相互关系。本研究基于地理探测器量化了社会经济、地表特征、气象及其交互作用对热岛的影响。结果显示综合社会经济、地表特征和气象因素以及相互作用推动了武汉市热岛强度差异的格局。在春、夏、秋季,社会经济和地表特征及其交互作用是影响城市热岛强度的主要因素,而在冬季,气象因素中的气压、日照时数和气温对热岛强度的解释均大于社会经济因素,气象因素及其与地表特征之间的交互是影响城市热岛强度的主要因素。有趣的是,Peng 等^[16]采用最小二乘法(OSL)和逐步回归分析指出天津春、秋季城市热岛主要的影响因素为 NDVI,夏季城市热岛主要的影响因素为 NDBI,冬季城市热岛主要的影响因素为建设用地比例,而社会经济如人口、GDP 等因素贡献相对较低,这与我们的研究结果不大一致,可能与社会经济不平衡性或者更大尺度的因素有关如气候带等,有待未来研究进一步解释。

此外,使用风险探测揭示了城市热岛的高风险区域。与先前的研究结果一致^[31,32],水体和植被的城市热岛强度较低,城市建成区和农田热岛强度相对较高,植被通过蒸腾作用和枝叶遮挡降低地表温度,水体则是通过吸收周围环境中的热量,蒸发散热,降低温度。夜间灯光风险区探测结果显示,除冬季外,城市热岛强度随着夜间灯光的增加而增加,这可能是因为春、夏、秋季夜间灯光对城市热岛强度影响较大,而在冬季社会经济和地表特征对热岛强度的影响相对较弱。NDVI 风险区探测结果显示,四季 NDVI 子区域平均城市热岛强度并非单调下降,而是呈现先上升,后下降的趋势,这可能说明了依靠城区有限的植被是远远不够的,应该采用多种策略缓解城市热岛,例如城市屋顶和垂直绿化的推广、城区多采用高反射率材料、绿色城市策略、增强城市通风、环境管理等方法。四季气压子区域平均城市热岛强度总体呈现逐步上升的趋势,即高气压区域为高城市热岛强度区域,这为监测城市热岛提供一条思路。

参考文献:

- [1]LI H D,MEIER F,LEE X,et al.Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin[J].Science of the Total Environment,2018,636:818-828.
- [2]OKE T R,VOOGT J A.Thermal remote sensing of urban climates[J].Remote Sensing of Environment,2003,86(3):370-384.
- [3]CHEN W,ZHANG Y,PENGWANG C Y,et al.Evaluation of urbanization dynamics and its impacts on surface heat islands:A case study of Beijing,China[J].Remote Sensing,2017,9(5).
- [4]DEILAMI K,KAMRUZZAMAN M,LIU Y.Urban heat island effect:A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures[J].International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2018, 67: 30-42.
- [5]LI X,ZHOU Y,ASRAR G R,et al.The surface urban heat island response to urban expansion:A panel analysis for the conterminous United States [J].Science of the Total Environment,2017,605-606:426.
- [6]BUYANTUYEV A,WU J G.Urban heat islands and landscape heterogeneity:linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns [J].Landscape Ecology,2010,25(1):17-33.

-
- [7]DEILAMI K ,KAMRUZZAMAN M .Modelling the urban heat island effect of smart growth policy scenarios in Brisbane[J].Land Use Policy,2017,64:38-55.
- [8]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.
- [9]周玄德,郭华东,孜比布拉·司马义.城市扩张过程中不透水面空间格局演变及其对地表温度的影响——以乌鲁木齐市为例[J].生态学报,2018,38(20):7336-7347.
- [10]崔林林,李国胜,戢冬建.成都市热岛效应及其与下垫面的关系[J].生态学杂志,2018,37(5):1518-1526.
- [11]杨朝斌,何兴元,张树文,等.基于 Landsat8 的城市热岛效应与地表因子关系研究——以长春市为例[J].干旱区资源与环境,2016,30(12):110-115.
- [12]刘航,申格,黄青.近 10 a 武汉市城市热岛效应演变及其与土地利用变化的关系[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1466-1475.
- [13]WANG J F ,HU Y .Environmental health risk detection with GeogDetector[J].Environmental Modelling & Software,2012,33:114-115.
- [14]何春阳,李景刚,等.基于夜间灯光数据的环渤海地区城市化过程[J].地理学报,2005(3):409-417.
- [15]吴健生,刘浩,彭建,等.中国城市体系等级结构及其空间格局——基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的实证[J].地理学报,2014,69(6):759-770.
- [16]PENG J ,JIA JL ,LIU YX ,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.
- [17]朱贞榕,程朋根,桂新,等.地表温度反演的算法综述[J].测绘与空间地理信息,2016,39(5):70-75.
- [18]姚远,陈曦,钱静.城市地表热环境研究进展[J].生态学报,2018,38(3):1134-1147.
- [19]REN H ,DU C ,LIU R ,et al.Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 thermal infrared images:Water vapor estimate from L8[J].Journal of Geophysical Research Atmospheres,2015,120(5):1723-1738.
- [20]DU C ,REN H ,QIN Q ,et al.A practical split-window algorithm or estimating land surface temperature from Landsat 8 data[J],Remote Sensing,2015,7,647-665.
- [21]李柏延,任志远,李瑞宗,等.西安市地表温度反演及城市热岛强度定量化研究[J].资源科学,2014,36(12):2631-2636.
- [22]王宏博,李丽光,赵梓淇,蔡福,武晋雯,许申来,姜鹏.基于 TM/ETM~+数据的沈阳市各区城市热岛特征[J].生态学报,2015,34(1):219-226.

-
- [23]王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [24]宫阿都,陈云浩,李京,等.北京市城市热岛与土地利用/覆盖变化的关系研究[J].中国图象图形学报,2007(8):1476-1482.
- [25]JUAN W,BO H,FU D J,et al.Spatiotemporal variation in surface urban heat island intensity and associated determinants across Major,Chinese Cities[J].Remote Sensing,2015,7(4):3670-3689.
- [26]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.
- [27]HENITS L,MUCSI L,LISKA C M,et al.Monitoring the changes in impervious surface ratio and urban heat island intensity between 1987 and 2011 in Szeged,Hungary[J].Environmental Monitoring and Assessment,2017,189(2):86.
- [28]刘玲,吴坤悌,黄光瑞,等.合肥城市发展对热岛强度的影响[J].长江流域资源与环境,2008,17(S1):88-93.
- [29]王伟,申双和,赵小艳,等.两种植被指数与地表温度定量关系的比较研究——以南京市为例[J].长江流域资源与环境,2011,20(4):439-444.
- [30]尹昌应,石忆邵,王贺封,等.城市地表形态对热环境的影响——以上海市为例[J].长江流域资源与环境,2015,24(1):97-105.
- [31]胡泽银,王世杰,白晓永,等.贵州省地表温度的遥感反演评价及时空分异规律[J].生态学杂志,2018,37(9):2794-2807.
- [32]丁海勇,李往华.基于 TVX 方法的南京市城区时空格局与地表温度的研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):735-744.