

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

刘 航, 申 格, 黄 青*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 城市化进程的加快, 农村人口大量涌入城市, 城市布局及局部气候改变等因素使得城市热岛效应问题日益突出, 已成为当前城市环境研究热点之一。以武汉市为例, 应用遥感技术与地理信息系统技术, 选取 2004~2015 年 5 个时相 Landsat 系列影像数据, 利用单窗算法反演地表温度, 并以此为基础进行热岛强度分级, 获取了近 10 a 武汉市城市热岛效应变化结果, 并分析了武汉市 11 个辖区城市热岛效应动态变化特征及热岛效应与土地利用变化的关系。研究结果表明: (1) 自 2007 年后, 武汉市老城区热岛面积持续减少, 而新城区热岛面积则持续增加, 呈现出以老城区为中心向新城区扩张的趋势, 至 2015 年, 新老城区热岛面积仅相差 20.74 km²; (2) 东西湖区、蔡甸区、江夏区与洪山区是近些年城市热岛面积增长较为显著的辖区, 其中江夏区的热岛面积年际变化最大, 最高值达 95.42 km²; (3) 城市热岛效应与土地利用类型的面积年际平均值拟合关系显示, 2004~2015 年, 城市热岛效应与建筑用地的 R^2 值最大, 为 0.6812, 建筑用地面积的增加是城市热岛强度面积扩张的重要影响因素。

关键词: 城市热岛效应; 单窗算法; 时空演变; Landsat 影像; 武汉市

中图分类号: P463.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8227(2017)09-1466-10

DOI: 10.11870/cjlyzyhj201709019

随着我国市场经济的快速发展, 大批农村人口进城务工, 至 2030 年, 我国城市人口百分比预计将高达 60%^[1]。城市人口迅速膨胀以及城市化的高速发展, 致使以钢筋混泥土为代表的不透水地表逐渐占据城市空间。这些建筑材料热容小、吸热快、储温强, 是地面温度上升的主要热源^[2]。20 世纪 50 年代, Manley 正式将这种现象定义为“城市热岛效应”(Urban Heat Island, UHI)^[3]。UHI 会改变生物多样性^[4]、城市气候^[5]及大气环境^[6], 并对城市的生态环境及居民的生产生活造成重大影响。因此, UHI 逐渐成为各国政府和科学领域关注的重点。

1972 年, Rao^[7]首次提出应用热红外遥感数据区分出城市, 并利用 ITOS-1 卫星数据研究

UHI。随着遥感技术的突破, 利用遥感技术反演地表温度进而研究 UHI 的方法日益增多, 国内外学者提出改进了多种地表温度反演方法, 包括单通道法、多通道法、单窗算法、分裂窗法等等^[8~14]。遥感发展初期, NOAA/AVHRR 等低空间分辨率数据^[15~18]应用广泛; 随后, ASTER 数据和 MODIS 数据常被应用于不同尺度的综合分析^[19~21]; 而质量较好、分辨率较高且数据连续性高的 Landsat 系列影像数据, 成为目前针对小区域研究, 利用率较高的热红外遥感数据^[22~23]。

城市发展初期, 北上广等一线城市发展迅速, 城市热岛效应较突出, 因此针对 UHI 的研究多集中于大城市^[21~26]。随着城市化进程加快,

收稿日期: 2016-12-27; 修回日期: 2017-03-29

基金项目: “948”项目(2016-X38) [Introduction of International Advanced Agricultural Science and Technology Program (948 Program) 2016-X38]; 中央级公益性科研院所专项资金资助项目(IARRP-2015-8) [National Nonprofit Institute Research Grant of Chinese Academy of Agricultural Sciences (IARRP-2015-8)]; 中国农业科学院科技创新工程项目[Agricultural Science and Technology Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences]

作者简介: 刘 航(1992~), 女, 硕士研究生, 主要从事农业遥感的相关研. E-mail: liuhang_2016@163.com

* 通讯作者 E-mail: huangqing@caas.cn

UHI 逐步蔓延至二线城市。武汉市素有中国“火炉”之称, 随着武汉市经济加速发展, 城市面积不断扩大, 人口快速增多, 武汉市 UHI 现象逐渐凸显。谢启娇^[27]综合地表温度多因子探讨了武汉市热岛形成的主要影响因素; 史超等^[28]利用定量遥感模拟了武汉市热场空间分布, 进而分析了热岛效应的时空演变特征; 易予晴等^[29]利用 MODIS 数据对武汉城市群夏季热岛效应特征进行了研究。但针对武汉市的 UHI 研究通常数据源时间跨度大, 且仅对 UHI 进行整体研究, 并未进一步探究市区内不同辖区 UHI 的变化特征与规律。在前人研究方法的基础上, 本文选取 5 个时相的 Landsat 系列影像数据进行地表温度反演。遥感影像均是 7 月下旬, 不同年份数据日差在 10 d 以内, 保证了数据时序性和一致性。根据温度反演结果, 分别从整个研究区和区内不同辖区两个尺度研究分析了武汉市热岛效应时空演变规律, 并讨论了武汉市热岛效应与土地利用变化的关系。本研究对认识城市化快速发展中城市热岛效应变

化规律及城市热岛效应与土地利用关系具有指导意义。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

武汉市($29^{\circ}58' \sim 31^{\circ}22'N$, $113^{\circ}41' \sim 115^{\circ}05'E$)位于江汉平原东部, 长江与汉水交汇处。地形以平原为主, 地势平坦; 属于北亚热带季风性(湿润)气候, 具有常年雨量丰沛、热量充足、四季分明等特点, 年平均气温 $15.8 \sim 17.5^{\circ}C$ 。武汉市为湖北省省会城市以及长江中游城市群的中心城市, 也是华中金融中心、交通中心及文化中心。武汉市总面积 $8494 km^2$, 包括 13 个辖区, 其中江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、武昌区、洪山区、青山区为老城区, 东西湖区、蔡甸区、江夏区、汉南区、黄陂区、新洲区为新城区^[30]。选取武汉市行政区域(除去黄陂区与新洲区)为研究区(图 1)。

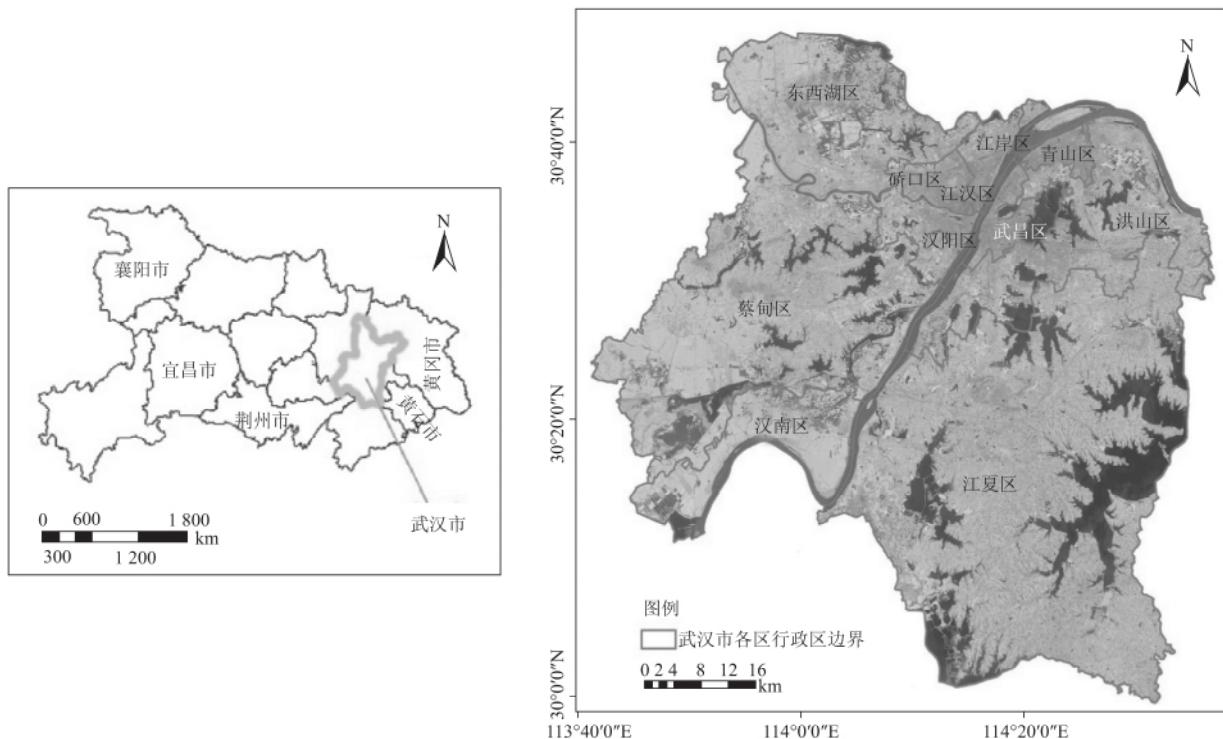


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of Study Area

1.2 数据来源及处理

根据成像时间一致性与高质量影像的要求, 选取武汉市 7 月份的 Landsat-5 TM、Landsat-7 ETM⁺以及 Landsat-8 OLI/TIRS 影像数据作为研究

数据, 数据详细信息如表 1。研究数据均来源于 U. S. Geological Survey (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) 官方网站。为真实反映地物状况, 消除太阳高度、地形、大气以及传感器本身的光电系统等因

素引起的影像数据重叠、辐射亮度失真等问题，需预先对影像进行辐射定标、大气校正、条带去除等预处理工作，本研究采用 ENVI 5.1 对影像进行预处理工作，数据分析利用 ARCGIS 10.1、IBM SPSS Statistic 21 软件完成。

表 1 研究所用遥感数据信息

Tab. 1 Remote Sensing Data Used in the Study

| 传感器 | 时间 | 云量(%) |
|----------------------------|------------|-------|
| Landsat-5 TM | 2004-07-22 | 0.00 |
| Landsat-5 TM | 2007-07-31 | 0.10 |
| Landsat-7 ETM ⁺ | 2010-07-31 | 22.95 |
| Landsat-7 ETM ⁺ | 2015-07-29 | 0.15 |
| Landsat-8 OLI/TIRS | 2013-07-31 | 1.22 |

武汉市行政区划矢量数据与气象站点数据为辅助数据。武汉市行政区划矢量数据用于研究区分区；气象站站点数据用于反演的温度验证，来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

2 研究方法

2.1 地表温度反演

2.1.1 辐射亮度温度计算

亮度温度是在卫星高度上传感器探测波段范围内，普朗克黑体辐射函数与传感器响应函数乘积分得到的辐射值。采用 Planck 函数^[31]计算像元亮度温度：

$$T_i = K_2 / \ln(K_1 / L_{(\lambda)} + 1) \quad (1)$$

式中： T_i 为亮度温度(单位：K)； K_1 与 K_2 为定标常数。对于 Landsat-5 TM 的热红外 ch6， K_1 与 K_2 分别取值 $607.76 \text{ w m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ， 1260.56 K ；Landsat-7 ETM⁺的热红外 ch6， K_1 与 K_2 分别取值 $666.09 \text{ w m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ， 1282.71 K ；Landsat-8 OLI/TIRS 热红外 ch10， K_1 与 K_2 分别取值 $774.89 \text{ w m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ， 1321.08 K ； $L_{(\lambda)}$ 为传感器所接收到的辐射强度(单位： $\text{w m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)，公式如下：

$$L_{(\lambda)} = L_{\min(\lambda)} + (L_{\max(\lambda)} - L_{\min(\lambda)}) Q_{dn} / Q_{max} \quad (2)$$

式中： Q_{max} 为最大 DN 值，即 $Q_{max} = 255$ ； Q_{dn} 为影像数据的象元灰度值； $L_{\max(\lambda)}$ 与 $L_{\min(\lambda)}$ 传感器所接收到的最大和最小辐射度。当 $Q_{dn} = 255$ 时和 $Q_{dn} = 0$ 时，即可分别得出 $L_{\max(\lambda)}$ 和 $L_{\min(\lambda)}$ 的值。

2.1.2 植被覆盖度计算

归一化植被指数(Normalized Difference Vege-

tation Index，NDVI) 为植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子，计算公式如下^[32]：

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R) \quad (3)$$

式中： ρ_{NIR} 与 ρ_R 分别表示影像的近红外波段与可见光红波段的反射率。

植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage，FVC) 可反应某地植被所占面积与分布情况，本文选用张仁华^[33]提出的基于植被指数计算植被覆盖度的公式：

$$FVC = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s) \quad (4)$$

式中： $NDVI_v$ 与 $NDVI_s$ 分别为纯植被与纯土壤植被指数，即若影像中有明显的茂密植被区域，则此区域的平均 $NDVI$ 值则作为 $NDVI_v$ 的取值；反之，若有明显的裸土区，则 $NDVI_s$ 取该区域的平均 $NDVI$ 值进行估计。当 $NDVI > NDVI_v$ 时，取 $FVC = 1$ ；当 $NDVI < NDVI_s$ 时，取 $FVC = 0$ 。

2.1.3 地表辐射温度计算

亮度温度包括了大气和地表对热辐射传导的影响，需通过校正亮度温度的大气透射率和地表比辐射率等参数，得到地表真实温度。文中采用 Qin^[31] 的单窗算法反演地表真实温度：

$$T_s = \{ [a_6(1 - C_6 - D_6) + b_6(1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6] T_i - D_6 T_a \} / C_6 \quad (5)$$

$$C_6 = \tau \varepsilon \quad (6)$$

$$D_6 = (1 - \tau) [1 + \tau(1 - \varepsilon)] \quad (7)$$

式中：根据实验证明，温度变化范围在 $0 \sim 70^\circ\text{C}$ ， $a_6 = -67.3553$ ， $b_6 = 0.458608$ ； T_i 是像元亮度温度； T_a 是大气平均温度，可根据地面附近(高程为 2 m 左右)的平均气温来估计，通常情况下，可选取研究区域气象站点的平均气温值作为该值^[11]； τ 是大气透射率； ε 是地表比辐射率。地表比辐射率与地表构成，尤其是与归一化植被指数密切相关，当 $NDVI > 0.70$ 时，取 $\varepsilon = 0.990$ ；当 $NDVI < 0.05$ 时，取 $\varepsilon = 0.973$ ；当介于 $0.05 \sim 0.70$ 之间时，按以下公式计算地表比辐射率：

$$\varepsilon = 0.004FVC + 0.986 \quad (8)$$

大气透射率通常根据地面附近大气水分含量或湿度来估计：

$$\tau = 0.974 - 0.08\omega, 0.4 \leq \omega \leq 1.6 \quad (9)$$

取经验值 $\omega = 1.0$ ，计算得到 $\tau = 0.894$ 。

2.2 热岛强度等级划分

仅从地表温度所反映的热场分布不足以说明武汉市城市热岛效应的演变特征，因此引入热岛

强度指数。热岛强度是热岛效应指示指标, 本文采用王宏博等^[23]所运用的热岛强度指数来表示热岛强度。公式如下:

$$T_R = (T_j - T_b) / T_b \quad (10)$$

式中: T_R 为热岛强度指数; T_j 为研究区第 j 点地表温度; T_b 为研究区的平均地表温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)。

根据计算出的相对地温与常用热岛强度对应划分等级, 主要分为绿岛、弱绿岛、较强热岛、强热岛与极强热岛 5 个等级; 在栅格影像信息中统计各时相与各等级的热岛强度面积, 并对热岛强度指数进行重新分类, 利用 Arcgis10.1 将两年的分级结果进行差值运算。

3 结果与分析

3.1 武汉市地表温度反演结果与分析

2004~2015 年武汉市地表温度反演结果(图 2)显示, 2007 年较 2004 年, 老城区相对高温区面积明显减少, 新城区温度大幅下降; 2010 年, 老城区相对高温区面积仍在递减, 但新城区的温度有所上升; 2013 年研究区整体温度大幅上升, 老城区及江夏区西南部相对高温区面积增多; 至 2015 年, 相对高温区面积显著减少, 但仍集中于老城区。整体而言, 2004~2015 年, 研究区的相对高温区呈现出以老城区为中心, 向新城区扩张的趋势。

就武汉市 11 个辖区近 10 a 地面温度状况而言, 青山区、江岸区、江汉区、汉阳区东北部、武昌区西南部、洪山区西南部及蔡甸区东北部, 一直属于相对高温控制区域; 2013 年, 江夏区中南部、汉南区东部以及东西湖区南部等相对温度明显升高, 且青山区东南部及蔡甸区东北部出现高温控制区; 东西湖区、蔡甸区、汉南区及江夏区温度呈波动变化, 而东西湖区的温度在近几年有持续升高的趋势。

3.2 武汉市热岛强度分级结果及分析

为比较不同年份武汉市热岛效应特征, 本文引入热岛强度指数对不同年份地表温度进行换算, 并对分级结果进行面积统计, 定量分析武汉市热岛效应时空演变规律, 结果如图 3、表 2 所示。将较强热岛、强热岛、极强热岛统称为热岛区域, 5 个时相的热岛面积分别为 255.97、509.16、446.65、538.12、516.89 km^2 , 其中

2013 年面积最大。2004~2015 年武汉市热岛面积总体呈增加趋势, 平均增长速率为 $23.72 \text{ km}^2/\text{a}$ 。2004~2007 年武汉市热岛面积增长 253.22 km^2 , 增长速率达到 $84.41 \text{ km}^2/\text{a}$, 是近 10 a 武汉市热岛效应扩张最强、最快的时期。与 2013 年相比, 2015 年武汉市热岛面积有所减少。就热岛强度而言, 各年份武汉市热岛强度均以较强热岛为主, 较强热岛面积占热岛面积的百分比均大于 85%, 其中 2013 年比值最高达 96%。强热岛中 2015 年所占比值最大, 热岛强度也明显加剧; 同期, 青山区东部、蔡甸区东北部及江夏区北部出现了极强热岛区域, 总面积为 0.82 km^2 。青山区东部近 10 a 热岛强度整体不变, 属于热岛效应长年控制区域, 与青山区的工业发展有关。

3.3 武汉市热岛效应时空演变

为更清晰把握武汉市热岛效应时空分布特征, 将武汉市行政区划矢量数据和武汉市 2004~2015 年热岛强度空间分布进行叠加分析, 得到武汉市 11 个辖区 2004~2015 年的热岛效应情况, 结果见图 4。从时相角度可见, 2004 年江夏区、武昌区、洪山区 3 个辖区对武汉市的热岛效应贡献最大, 热岛面积比值达到全年的 47%; 2007 年江夏区和洪山区的热岛面积明显多于其他辖区; 2010 年, 除东西湖区、蔡甸区、汉南区外, 其他辖区热岛面积都出现了小幅度的减少; 2013 年由于江夏区、洪山区热岛面积显著增加, 导致该年度热岛面积达到最大值; 2015 年大部分辖区热岛效应现象减弱, 但东西湖区热岛面积却大幅上升。从辖区热岛情况可见, 江夏区、洪山区热岛面积年际变化较大, 江夏区热岛面积近 10 a 差值最高达 95.42 km^2 ; 年际变化最小为江汉区, 近 10 a 热岛面积变幅最高仅 7.33 km^2 ; 新城区较老城区的年际变化总体更突出。自 2007 年起, 武昌区与江汉区的热岛面积持续减少, 东西湖区、蔡甸区、江夏区与洪山区等辖区热岛面积波动增加。

为进一步分析各辖区热岛效应变化情况, 对各辖区热岛面积增长量与增长速率进行统计, 结果如图 5 所示。2004~2015 年, 除武昌区、江汉区热岛面积增长量与增速为负以外, 其余辖区均成上升态势; 东西湖区、蔡甸区、江夏区与洪山区是武汉市近 10 a 来热岛面积增长最显著的几个辖区, 其中江夏区 10 a 间增长了 73.62 km^2 , 增长速率达 $6.69 \text{ km}^2/\text{a}$, 是热岛效应扩张面积最大、

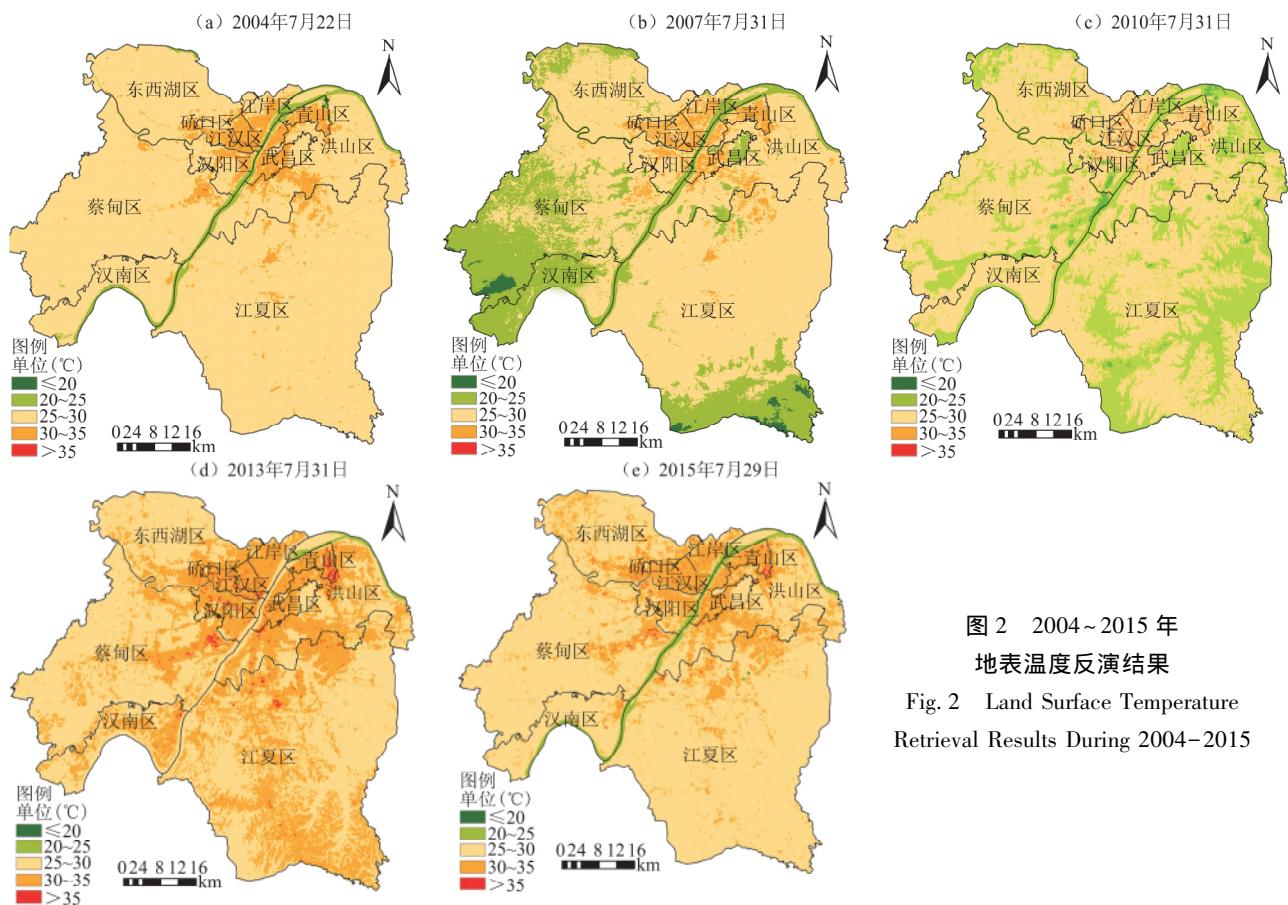


图2 2004~2015年地表温度反演结果

Fig. 2 Land Surface Temperature Retrieval Results During 2004–2015

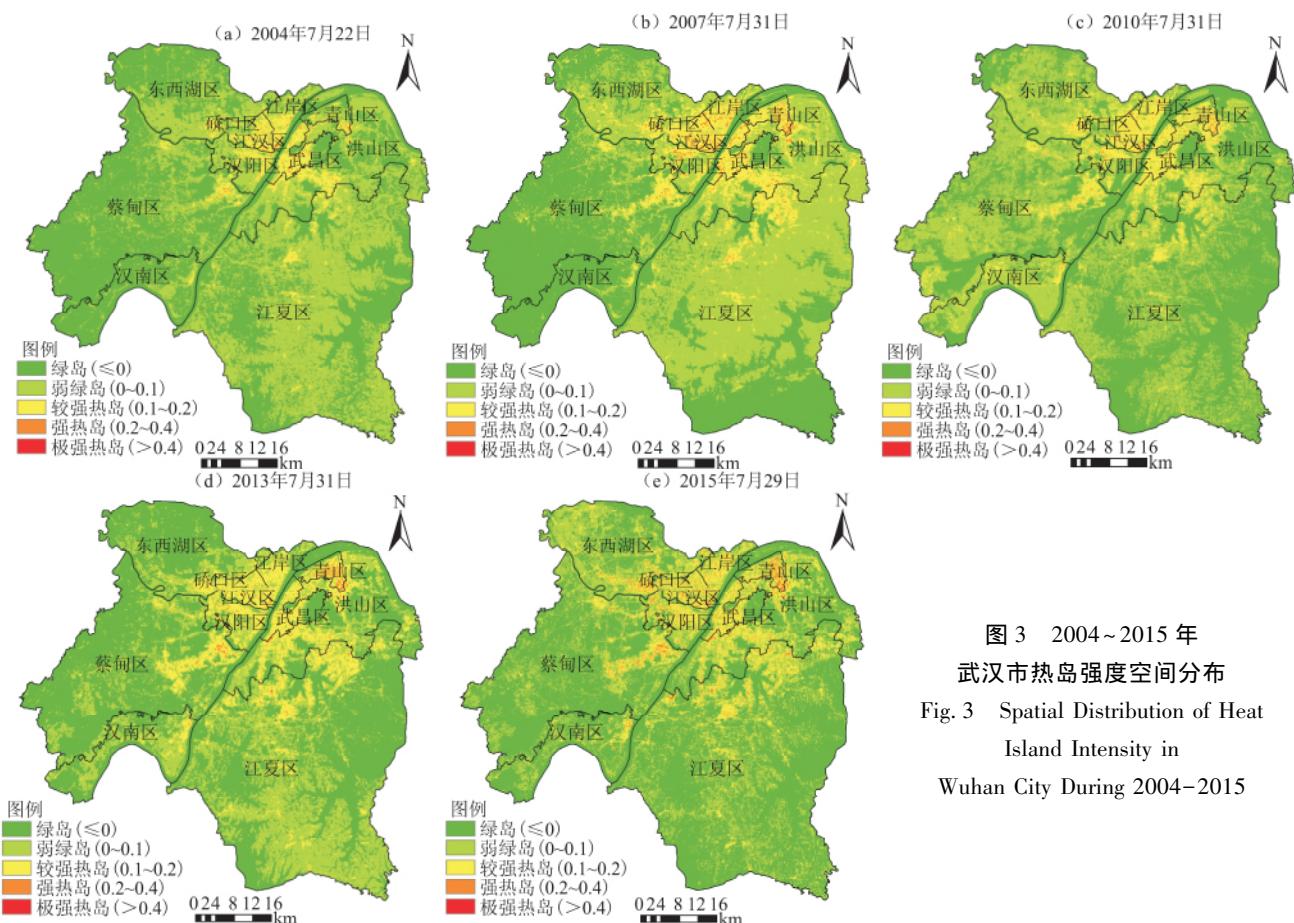


图3 2004~2015年武汉市热岛强度空间分布

Fig. 3 Spatial Distribution of Heat Island Intensity in Wuhan City During 2004–2015

表 2 2004~2015 年武汉市热岛强度等级划分及面积统计

Tab. 2 Classification of Heat Island Intensity and Counted Area in Wuhan City During 2004~2015

| 强度 指数 | 热岛 等级 | 面积(km ²) | | | | |
|----------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | 2004 年 | 2007 年 | 2010 年 | 2013 年 | 2015 年 |
| ≤0 | 绿岛 | 2 340.18 | 2 218.06 | 2 355.41 | 2 683.5 | 2 887.91 |
| 0.0~0.1 | 弱绿岛 | 2 256.92 | 2 125.85 | 2 051.01 | 1 631.45 | 1 448.27 |
| 0.1~0.2 | 较强热岛 | 242.56 | 468.13 | 426.74 | 517.09 | 453.46 |
| 0.2~0.4 | 强热岛 | 13.41 | 41.03 | 19.91 | 21.03 | 62.61 |
| >0.4 | 极强热岛 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.82 |
| — | 热岛区域 | 255.97 | 509.16 | 446.65 | 538.12 | 516.89 |

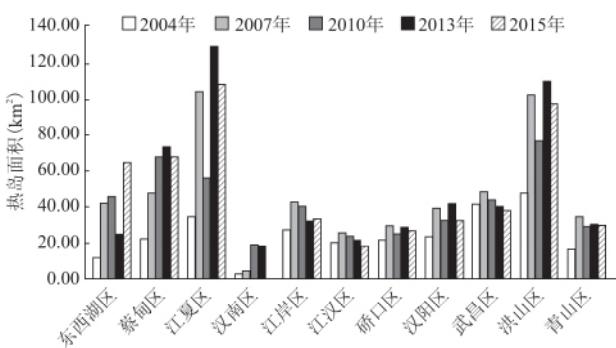


图 4 2004~2015 年武汉市 11 个辖区热岛面积年际变化

Fig. 4 Inter-Annual Variability of Heat Island Area in 11 Main Districts of Wuhan City During 2004~2015

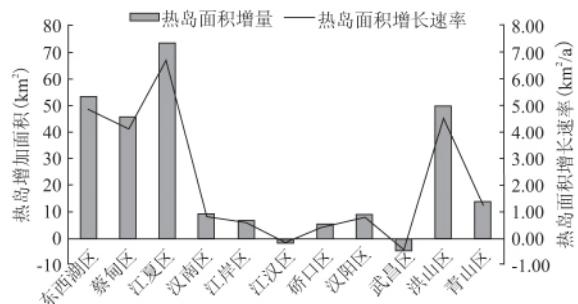


图 5 2004~2015 年武汉市 11 个辖区热岛面积增长量与热岛面积增长速率

Fig. 5 Quantity and Speed of the Heat Island Area Growth in 11 Main Districts of Wuhan City During 2004~2015

速度最快的辖区；增长量较大的辖区中 75% 为新城区，老城区中仅洪山区在近 10 a 间的增长量最大，为 49.97 km²，洪山区虽属于老城区，但其位于老城区外围、面积广阔，早期热岛效应主要集中于西部地区。

为了更好表征武汉市热岛效应时空变化特征，对 2004~2015 年武汉市热岛强度分级结果进行差值运算，得到不同年份之间热岛强度时空变化情况，结果如图 6 所示。2004~2007 年，青山

区、江岸区、汉阳区等老城区各辖区的热岛面积增加；2007~2010 年，蔡甸区、汉南区及洪山区部分区域热岛面积明显增加，而部分老城区热岛面积有所减少；至 2013 年，热岛区逐渐向新城区扩张，以蔡甸区东北部和江夏区北部最为明显；2015 年，东西湖区热岛面积逐渐向外围延伸，其余辖区呈减少趋势。综上分析可见，2004~2015 年武汉市热岛效应现象呈现以老城区为中心逐渐向新城区扩张的态势，热岛面积总体为先增后减的波动变化。

图 7 反映了 2004~2015 年武汉市新老城区热岛面积年际变化情况，2007 年以前，新老城区热岛面积均成上升态势；随后老城区热岛面积波动减少，而新城区热岛面积持续增加；且至 2015 年新老城区热岛强度面积几乎持平，但老城区的热岛面积仍高出 20.74 km²。这与武汉市热岛效应以老城区为中心圆周式向新城区扩张的态势相吻合。

3.4 武汉市热岛效应与土地利用类型的关系

土地利用类型的变化可反映城市化进程，为便于城市热岛源汇的进一步研究，采用支持向量机分类方法将 2004~2015 年武汉市 11 个辖区土地利用类型分为建筑用地、绿地、耕地和水域 4 类。其中建筑用地包括居民区、商业区、道路及生产生活设施等；绿地主要为林地、草地及绿化用地；水域包括河流与城市中的湖泊。训练样本来自原始影像，同时基于高分辨率国产高分一号影像数据，选取验证样本点，对 2015 年武汉市土地利用类型分类结果进行验证。验证结果显示，总体分类精度达到 90% 以上，其中建筑用地制图精度为 98.31%，用户精度为 86.82%，分类结果满足后续分析要求。

利用武汉市土地利用类型分区统计结果，可定量分析武汉市各辖区城市热岛效应与土地利用类型的关系。近 10 a 武汉市土地利用类型呈现出城市建筑用地持续增加，绿地面积先减后增，耕地面积波动递减以及水域面积先增后减的趋势。其中建筑用地面积以 11.14 km²/a 的速率增长；耕地减少了 96.16 km²。以东西湖区、蔡甸区、江夏区及汉南区为代表的新城区，呈现出建筑用地面积整体呈直线增长态势；而老城区整体年际变化较为平稳(图 8)。近 10 a 江夏区以总增长量 437.22 km² 及 39.75 km²/a 的年度增长率成为建筑用地扩张最显著的辖区；蔡甸区和东西湖区亦

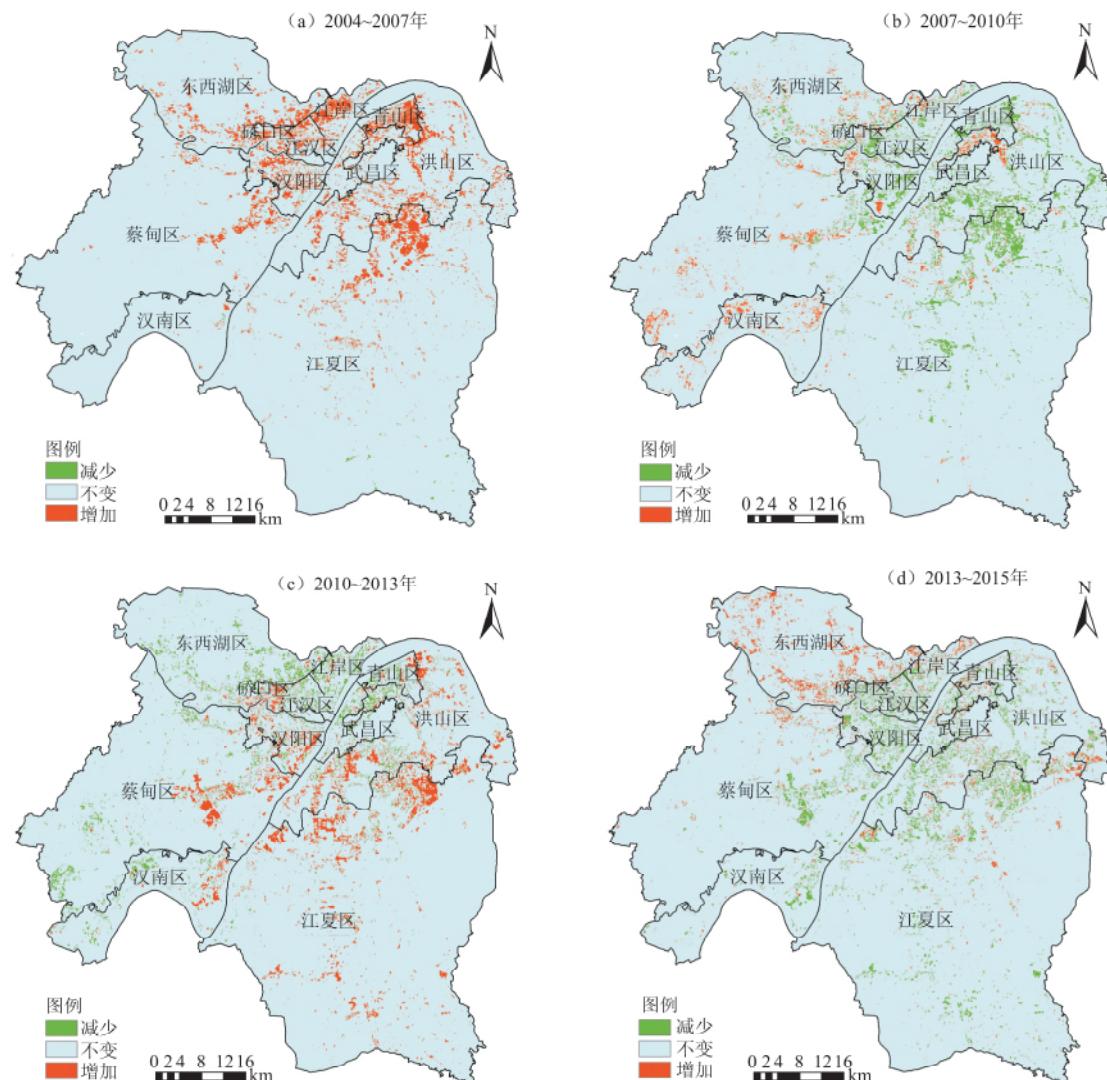


图 6 2004~2015 年武汉市热岛效应时空分布

Fig. 6 Spatio-Temporal Variation of the Heat Island in Wuhan City During 2004–2015

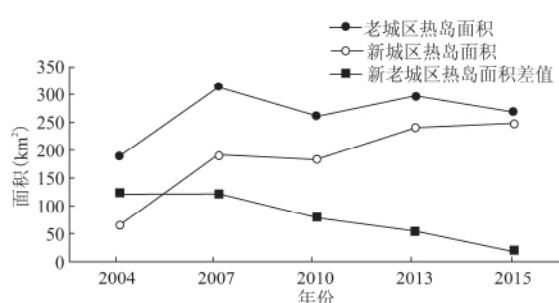


图 7 2004~2015 年武汉市新老城区热岛面积年际变化

Fig. 7 Inter-Annual Change of Heat Island Area in Old and Down in Wuhan City During 2004–2015

有明显扩张，增长面积分别为 372.65 km^2 和 185.18 km^2 ；在老城区中，洪山区的建筑用地面积增长最为明显，达到 147.05 km^2 。

至 2015 年，除江夏区绿地面积增长 57.45 km^2 ，

其余辖区均减少，其中汉南区、汉阳区及硚口区减少超过 50%，汉阳区最高达 77%。武汉市耕地持续减少，各辖区耕地面积下降率均高于 50%，其中汉南区、江岸区、硚口区及青山区的下降率均高于 70%；青山区作为老工业区，耕地面积下降了 91.9%。武汉湖泊众多，但在城市化进程过程中，围湖造地的现象导致湖泊萎缩，东西湖区、蔡甸区、江夏区及汉南区的水域面积变化波动最明显，且 2010~2015 年水域面积持续下降。

为进一步揭示武汉市热岛效应与各类土地利用类型的关系，对 2004~2015 年武汉市 11 个辖区热岛面积与土地利用类型面积进行拟合分析，得到武汉市热岛面积与土地利用类型面积的年际平均值的拟合关系结果（图 9）。结果显示，2004~

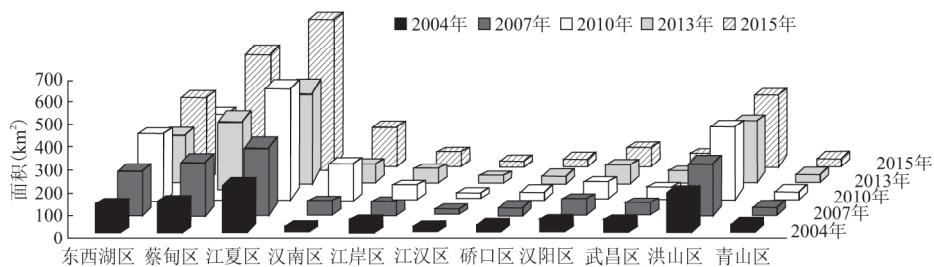


图 8 2004~2015 年武汉市 11 个辖区建筑用地面积年际变化

Fig. 8 Inter-Annual Change of Building Land Area in 11 Main Districts of Wuhan City During 2004–2015

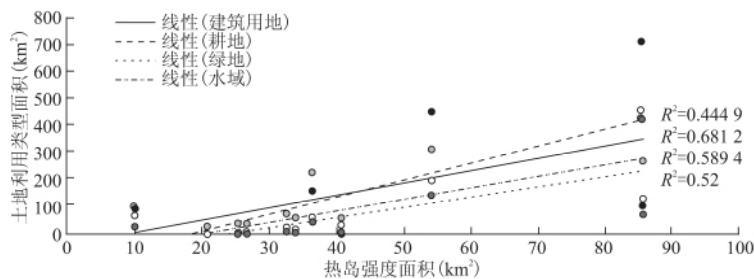


图 9 2004~2015 年武汉市热岛与土地利用类型的面积年际平均值拟合关系

Fig. 9 Annual Average Fitting Relationship between Heat Island Area and Each Land Type's Area in Wuhan City During 2004–2015

2015 年，武汉市热岛效应与建筑用地的 R^2 值最大，为 0.6812；热岛面积与水域的 R^2 值居第二位，而与耕地面积的拟合相对最差；说明建筑用地增加是热岛面积增加的主导因素。

4 结论与讨论

本文基于多时相 Landsat 系列遥感影像，利用单窗算法反演地表温度，并引入热岛强度指数综合分析了武汉市 2004~2015 年夏季城市热岛效应时空演变特征及其与土地利用变化的关系，通过分析得出：

(1) 近 10 a 武汉市热岛效应呈现出从老城区向新城区圆周式扩张的趋势，新老城区的热岛面积逐年递减，但老城区总体热岛面积仍高于新城区，因此武汉市热岛效应的主要影响区域仍是老城区。

(2) 10 a 间武汉市热岛类型以较强热岛为主，且热岛面积总体呈增加趋势，2004~2007 年是热岛效应扩张最强、最快的时期；2015 年较 2013 年的热岛面积减少，热岛效应得到一定缓解。

(3) 各辖区内部热岛效应呈现出从靠近城中心区域往外围扩张的规律，新城区中江夏区热岛面积增长最多、扩张速率最快；老城区中洪山区

热岛效应逐渐加剧。

(4) 近 10 a 武汉市建筑用地面积大范围扩张，且建筑用地面积的增加成为热岛效应加剧的重要影响因素，一定程度上反映了城市化发展对热岛效应的贡献。

本文仅利用单窗算法反演了武汉市地表温度，缺乏与其他方法的对比试验分析；同时在土地利用分类精度验证方面，缺少实地辅助验证数据，下一步工作需要在精度验证及城市热岛效应驱动力等方面进行进一步深入研究。

参考文献：

- [1] ZHOU W, HUANG G, CADENASSO M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2011, 102(1): 54–63.
- [2] 陈颖峰, 王玉宽, 傅斌, 等. 基于 MODIS 地面温度数据的成都市热岛时空变化 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1): 156–162.
- 【CHEN Y F, WANG Y K, FU B, et al. Spatiotemporal variations of urban heat island in Chengdu City using MODIS land surface temperature data [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 156–162.】
- [3] MANLEY G. On the frequency of snowfall in metropolitan England [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,

- 1958, 84(359): 70-72.
- [4] KNAPP S, KUHN I, STOLLE J, et al. Changes in the functional composition of a central European urban flora over three centuries[J]. *Perspectives in Plant Ecology Evolution & Systematics*, 2010, 12(3): 235-244.
- [5] DIXON P G, MOTE T L. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, 42(9): 1273-1284.
- [6] LO C P, QUATTROCHI D A. Land-use and land-cover change, urban heat island phenomenon, and health implications[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(9): 1053-1063.
- [7] RAO P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1972, 53: 647-648.
- [8] WLOCZYK C, RICHTER R, BORG E, et al. Sea and lake surface temperature retrieval from Landsat thermal data in northern Germany[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(12): 2489-2502.
- [9] MCMILLIN L M. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption[J]. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 1975, 80(36): 5113-5117.
- [10] WAN Z, LI Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1997, 35(4): 980-996.
- [11] 覃志豪, ZHANG M H, AMON K, 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, AMON K, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466.】
- [12] 白洁, 刘绍民, 廉光. 针对TM/ETM⁺遥感数据的地表温度反演与验证[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 148-154.
【BAI J, LIU S M, HU G. Inversion and verification of land surface temperature with remote sensing TM/ETM⁺ data [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(9): 148-154.】
- [13] 夏浪, 麦克彪, 马莹, 等. 基于可见光红外成像辐射仪数据的地表温度反演[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(8): 109-116.
【XIA L, MAO K B, MA Y, et al. Retrieval land surface temperature from visible infrared imager radiometer suite data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(8): 109-116.】
- [14] CHEN A, SUN R, CHEN L. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [15] CARLSON T N, AUGUSTINE J A, BOLAND F E. Potential application of satellite temperature measurements in the analysis of land use over urban areas[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 58: 1301-1303.
- [16] MASTON M, MCCLAIN E P, MCGINNIS D F, et al. Satellite detection of urban heat islands[J]. *Monthly Weather Review*, 1978, 106(12): 1725-1734.
- [17] JR R C B, BRAZEL S W. High-resolution surface temperature patterns in a complex urban terrain[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1988, 54(9): 1289-1293.
- [18] 吴文斌, 杨桂霞. 用NOAA图像监测冬小麦长势的方法研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2001, 22(2): 58-62.
【WU W B, YANG G X. A study of method of monitoring the wheat growth by using NOAA image[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2001, 22(2): 58-62.】
- [19] KE Y E, QIN Z H. A study of urban heat island in summer of Nanjing based on MODIS data[J]. *Remote Sensing Technology & Application*, 2006, 21(5): 426-431.
- [20] 张莉, 吴文斌, 左丽君, 等. 基于EOS/MODIS数据的南方水稻面积提取技术[J]. *中国农业资源与区划*, 2011, 32(4): 39-44.
【ZHANG L, WU W B, ZUO L X, et al. Extracting planting area of paddy rice in southern China by using EOS/MODIS data [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2011, 32(4): 39-44.】
- [21] 葛伟强, 周红妹, 杨何群. 基于MODIS数据的近8年长三角城市群热岛特征及演变分析[J]. *气象*, 2010, 36(11): 77-81.
【GE W Q, ZHOU H M, YANG H Q. Characteristics analysis on heat island effect in Yangtze Delta urban agglomerations in recent 8 years by MODIS data [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(11): 77-81.】
- [22] XIE Q, ZHOU Z. Impact of urbanization on urban heat island effect based on tm imagery in Wuhan, China[J]. *Environmental Engineering & Management Journal*, 2015, 14(3): 647-655.
- [23] 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.】
- [24] 何全军, 吴志军, 张月维. 利用MODIS热红外数据进行广州市夏季热场分析[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(5): 501-505.
【HE Q J, WU Z J, ZHANG Y W. A study of thermal field in summer of Guangzhou by MODIS Thermal Infrared data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(5): 501-505.】
- [25] 王郁, 胡非. 近10年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 61-68.
【WANG Y, HU F. Variations of the urban heat island in sum-

- mer of the recent 10 years over Beijing and its environment effect [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 61–68.】
- [26] 唐 曦, 束 焰, 乐 群. 基于遥感的上海城市热岛效应与植被的关系研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2008, 2008(1): 119–128.】
【TANG X, SHU J, LE Q. Relationship between vegetation and urban heat-island effect in Shanghai[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2008, 2008(1): 119–128.】
- [27] 谢启姣. 武汉城市热岛特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 462–469.】
【XIE Q J. Analysis on characteristics and influencing factors of urban heat island effect in Wuhan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(3): 462–469.】
- [28] 史 超, 王学平, 程 诚. 基于定量遥感的武汉城市热岛强度时空格局演变分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2014(12): 113–117.】
【SHI C, WANG X P, CHENG Y. Analysis on spatial and temporal variation of the urban heat island intensity based on quantitative remote sensing in Wuhan City[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014(12): 113–117.】
- [29] 易予晴, 龙腾飞, 焦伟利, 等. 武汉城市群夏季热岛特征及演变[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1279–1285.】
【YI Y Q, LONG T F, JIAO W L, et al. Characteristics and evolution of the summer heat island effect in Wuhan City group [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8): 1279–1285.】
- [30] YANG Z, CHEN Y Y, DING Q, et al. Study on urban heat island effect based on normalized difference vegetated index: a case study of Wuhan city [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13(3): 574–581.】
- [31] QIN Z, KARNIEL A, BERLINER P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3719–3746.】
- [32] 丁娅萍, 张学霞, 陈仲新. 植被盖度与地表亮温关系的遥感监测分析——以北京市昌平区为例[J]. 中国农业资源与区划, 2011, 32(5): 8–15.】
【DING Y P, ZHANG X X, CHEN Z X. A study on the relationship between vegetation coverage and land surface brightness temperature by remote sensing[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2011, 32(5): 8–15.】
- [33] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础[M]. 北京: 科学出版社, 1996.】
【ZHANG R H. Experimental remote sensing model and ground base[M]. Beijing: Science Press, 1996.】

EVOLUTION OF URBAN HEAT ISLAND EFFECT AND ITS RELATIONSHIP WITH LAND USE CHANGE IN WUHAN CITY IN RECENT 10 YEARS

LIU Hang, SHEN Ge, HUANG Qing

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: With the speeding up of urbanization, urban population is increasing constantly since the rural people get more chances to work in urban area. There was a huge change of urban structure and topoclimate, so the study on the urban heat island effect has become one of the hottest fields globally. This study focus on Wuhan city as an example, by integrating five time phase Landsat image data from 2004 to 2015, using RS and GIS technologies and the mono-window algorithm with inverting calculation, generating land surface temperature (LST) data and the urban heat island intensity data in recent 10 years, and analyzed the characteristics of the spatiotemporal variation of urban heat island effect in Wuhan city in 11 main districts and the relationship between heat island intensity and the change of land-use type. The results indicated that: (1) the urban heat island intensity decreased continually in the old town, but increased all the time in the new town of Wuhan city after 2007, and the urban heat island area differential between the old and new town was getting smaller, with only 20.74 km² gaps in 2015. (2) The urban heat island area of Dong Xihu district, Cai Dian district, Jiang Xia district and Hong Shan district increased more dramatically than other jurisdictions in Wuhan city in recent years. The inter-annual variability of the heat island area in Jiang Xia district was the largest and the peak value was 95.42 km². (3) The results of fitting relationship between heat island area and land-use type area in Wuhan city from 2004 to 2015 showed that the R² value between the urban heat island and building land arrived the maximum 0.681. The increase of the building land area was an important factor for the heat island area rise in Wuhan city.

Key words: heat island intensity; mono-window algorithm; spatiotemporal variation; Landsat image; Wuhan city