

引用格式:叶钰,秦建新,胡顺石.长沙市热岛效应时空特征变化研究[J].地球信息科学学报,2017,19(4):518-527. [Ye Y, Qin J X, Hu S S. 2017. Spatial-temporal evolution of urban heat island effects in Changsha city. Journal of Geo-information Science, 19(4):518-527] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.00518

# 长沙市热岛效应时空特征变化研究

叶钰,秦建新\*,胡顺石

湖南师范大学资源与环境科学学院,长沙 410081

## Spatial-temporal Evolution of Urban Heat Island Effects in Changsha City

YE Yu, QIN Jianxin\* and HU Shunshi

College of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

**Abstract:** This study used 9 scenes of Landsat TM / ETM images from 1991-2015 in Changsha to retrieve the land surface temperature of built-area of Changsha City and extract the land use/cover types. Combined with the related data, the characteristics of temporal and spatial variation of urban heat island (UHI) effects in Changsha City and the relationship between UHI and urban land use/cover change were analyzed. The results show that the extent of UHI in Changsha increased with the expansion of built-up area, and the spatial and temporal evolution of heat island was consistent with the trend of built-up area. During 1991-1996, the UHI in the east of Changsha city developed rapidly. In 1996, the eastern heat island area increased by 53.54 km<sup>2</sup>. Then, the UHI extended to the west with the increased area of 39.88 km<sup>2</sup> as a result of the extension of city built-up area between 1996-2003. In 2003-2007, the UHI extended to the west and south rapidly, during which the heat island area increased about 33.55 km<sup>2</sup>. After 2007, the urban area and UHI of Changsha began to expand all-around. In addition, great changes have occurred in the land use/cover types of Changsha. Large area of green land was changed into building land and farmland, which greatly affected the spatial distribution of the land surface temperature (LST). Temperature difference between different land types was reduced significantly. The great capacity of heat absorption of water was obviously reflected. Construction land and bare land made great contributions to the LST.

**Key words:** urban heat island (UHI); land surface temperature (LST); spatial-temporal evolution; land use/cover change

**\*Corresponding author:** QIN Jianxin, E-mail: qjxzd@sina.com

**摘要:** 本文基于1991-2015年长沙市9景Landsat TM/ETM影像,采用单窗算法反演了长沙市建成区的地表温度,提取了土地利用/覆盖类型,并结合相关资料对长沙市热岛效应时空变化特征以及城市热环境与城市土地利用/覆盖变化之间的关系进行了分析。结果表明长沙市热岛范围随着建成区范围的扩大不断增大,并且热岛的时空演变与建成区扩大的趋势一致:1991-1996年,长沙市热岛向东发展迅速,截至1996年东部热岛面积增加达53.54 km<sup>2</sup>;1996-2003年,受城市建成区扩展影响,热岛向西部延伸,增加面积达39.88 km<sup>2</sup>;2003-2007年,建成区热岛向西部、南部加速发展,热岛增加总面积达33.55 km<sup>2</sup>;2007年

收稿日期:2016-07-22;修回日期:2016-11-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(40971038)。

作者简介:叶钰(1993-),女,硕士生,研究方向为遥感影像处理及应用、GIS应用。E-mail: louesasuke@163.com

\*通讯作者:秦建新(1969-),男,博士生导师,教授,主要从事地理信息系统应用、空间信息可视化等研究。

E-mail: qjxzd@sina.com

后,长沙市建成区与热岛范围开始向东、西、南、北4个方向全面扩展。此外,建成区土地利用/覆盖情况发生了很大的变化,大量绿地转变为建设用地和耕地,极大地影响了地表温度的空间分布,各土地类型之间的温度差异显著缩小,水体良好的吸热性能明显地体现出来,建筑用地和裸地则对地表温度的贡献显著增大。

**关键词:**城市热岛;地表温度;时空演变;土地利用/覆盖变化

## 1 引言

城市化进程对城市气候的影响造成了城市热岛效应,1818年LakeHoward发现了伦敦市中心的气温比郊区高这一现象,并提出了“城市热岛”的概念,至此城市热岛问题受到广泛的关注<sup>[1]</sup>。据有关研究表明,目前有超过50%的人口居住在城市中,而这一比例在2030年预计将达到60%<sup>[2-3]</sup>。快速的城市扩张与城市化进程导致了植被等大量自然景观被沥青、水泥等不透水面所取代,这种变化使近地表大气的热特性、辐射、粗糙度、湿度等发生了改变<sup>[4-7]</sup>,城市地表特性的变化将导致城市地表温度明显高于周边郊区<sup>[6]</sup>。随着城市范围的扩张和城市化的进一步发展,城郊气温和地表温度差异将会进一步增加,将对城市环境、气候变化以及居民生活质量产生显著的影响<sup>[4-6]</sup>。因此,由城市扩张和城市化进程导致的城市热岛效应将成为城市气候、环境和城市规划关注的热点。

国内外学者利用遥感技术对城市热岛进行了大量研究,热红外遥感等技术的发展更为城市热岛监测提供了十分强大的技术手段<sup>[8]</sup>。尽管城市热岛效应已经引起了国内外学者们的关注,但目前这方面研究仍较多集中于城市热岛的变化分析,对城市热岛的长时间序列、多因子、多时相的定量化分析则有待进一步深入<sup>[9-12]</sup>。本文以长沙市为例,利用遥感技术对长沙市建成区1991-2015年城市热岛效应进行研究,对长沙市城市热环境时空变化以及主要地表参数的变化对长沙市热岛效应的影响进行了定量分析与研究。这对了解长沙市城市热岛的构成、变化、科学规划城市及建设绿色环保生态城市具有十分重要的意义。

## 2 研究区概况及数据源

长沙市是湖南省省会,位于湖南省东北部,湘江中下游和长浏盆地的西缘。(111°53′~114°15′E, 27°51′~28°41′N)。自古以来就是中国中南部的重要城市。

本文以长沙市主要建成区及其周边区域为研究区域(图1),由于长沙市处于2景影像之间,影像条带号分别为123/40,123/41,故采用1991-2015年共18景夏季Landsat TM/ETM+影像研究长沙市热岛时空变化,各景影像具体信息见表1。本文所使用的影像数据下载自USGS网站,所有影像数据成像时间在6-9月,影像基本无云或具有少量云,尽管部分影像云含量超过10%,但在研究区域内的云量较少,因此不会对本文的研究造成严重影响。

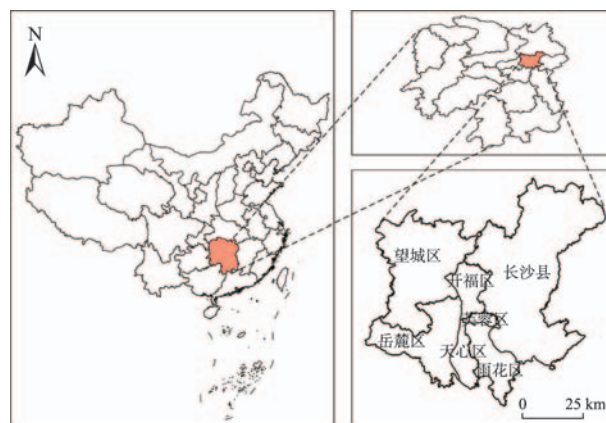


图1 研究区位置示意图

Fig 1 Location of the study area

表1 本文所使用的遥感数据

Tab.1 Remote sensing data used in this study

序号	条带号	传感器类型	成像时间	含云量/%
1	123/40 和 123/41	TM	1991-07-19	0 和 1
2	123/40 和 123/41	TM	1996-09-18	11 和 0
3	123/40 和 123/41	TM	2000-07-27	10 和 14
4	123/40 和 123/41	ETM+	2001-07-22	4 和 13
5	123/40 和 123/41	ETM+	2003-07-28	0 和 0
6	123/40 和 123/41	ETM+	2005-08-02	4 和 7
7	123/40 和 123/41	ETM+	2007-08-08	1 和 2
8	123/40 和 123/41	ETM+	2011-07-02	12 和 24
9	123/40 和 123/41	ETM+	2015-07-29	2 和 8

## 3 研究方法

### 3.1 数据预处理

由于ETM+机载扫描行校正器(SLC)故障导致2003年5月31日之后获取的影像出现数据重叠和

约25%的数据丢失,因此本研究使用国际科学数据服务平台的多影像局部自适应回归分析模型对2003年以后的数据进行了修复。修复后相对完好的70%~80%数据可用,且由于ETM+影像波段分辨率较低,热红外波段分辨率甚至达到60 m,因此修复后的影像对地表温度反演结果影响较小。对研究区域内的遥感图像进行几何校正、图像增强、镶嵌等预处理后,再利用研究区域内的矢量数据对影像数据进行图像裁剪。

3.2 地表温度反演

本次研究采用覃志豪等<sup>[13]</sup>提出的单窗算法求算地表温度(LST)。

(1)将TM6波段的DN值按式(1)所示的方程转换。

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) DN + L_{MIN} \quad (1)$$

式中:  $L_{\lambda}$  为传感器光谱辐射亮度/( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ );  $L_{MAX}$ ,  $L_{MIN}$  分别为该波段探测器可探测的最高和最低辐射亮度值,可以通过查找影像的头文件获得,对于TM影像,  $L_{MAX} = 15.303 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ,  $L_{MIN} = 1.238 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ;对于ETM+影像,  $L_{MAX} = 17.040 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ,  $L_{MIN} = 1.238 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。

(2)根据式(2)将辐射亮度换算成亮度温度值。

$$T_6 = \frac{K_2}{\ln(K_1/L + 1)} \quad (2)$$

式中:  $K_1$ 、 $K_2$  为校正计算常数,与  $L_{MAX}$  和  $L_{MIN}$  一样,均可在影像头文件中查到,对于TM数据,  $K_1 = 607.76 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ,  $K_2 = 1260.56 K$ ;对于ETM+数据,  $K_1 = 666.09 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ,  $K_2 = 1282.71 K$ ;  $L$  为辐射亮度值。

(3)根据式(3)计算地表温度。

$$T_s = \frac{1}{C} \{ a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D]T_6 - DT_a \} \quad (3)$$

式中:  $T_s$  是地表温度K;  $T_a$  和  $T_6$  分别是大气平均作用温度(K)和卫星高度上传感器探测到的像元亮度温度(K);  $a$  和  $b$  是常量,分别为-67.355351和0.458606;  $C$  和  $D$  是中间变量,  $C = \tau_6 \varepsilon_6$ ,  $D = (1 - \tau_6)[1 + \tau_6(1 - \varepsilon_6)]$ ;  $\tau_6$  和  $\varepsilon_6$  分别是热红外波段的大气透射率和地表比辐射率。 $T_a$ 、 $\tau_6$  和  $\varepsilon_6$  的确定可以参考[14]~[16]。

为了验证数据的可靠性,根据收集到的气象资料,选取长沙市内长沙站、马坡岭气象站为中心,做100 m的缓冲区,计算缓冲区内LST的平均值,并与气象站当日实测的日平均地表温度作对比,如表2所示。二者绝对误差最大不超过5℃,相对误差在

表2 反演结果验证

Tab.2 The verification of retrieval

站名	区站号	经度/°E	纬度/°N	年份	实测温度/℃	LST/℃	绝对误差/℃	相对误差
长沙	57687	112.92	28.22	1991	29.5	31.03	1.53	0.05
马坡岭	57679	113.08	28.2		29.9	30.88	0.98	0.03
长沙	57687	112.92	28.22	1996	26.4	29.19	2.79	0.11
马坡岭	57679	113.08	28.2		26.20	27.26	1.06	0.04
长沙	57687	112.92	28.22	2000	30.2	28.94	-1.26	-0.04
马坡岭	57679	113.08	28.2		20.5	28.26	-2.24	-0.07
长沙	57687	112.92	28.22	2001	30.5	31.83	1.33	0.04
马坡岭	57679	113.08	28.2		30.9	30.73	-0.17	-0.01
长沙	57687	112.92	28.22	2003	31.8	35.66	3.86	0.12
马坡岭	57679	113.08	28.2		31.6	34.17	2.57	0.08
长沙	57687	112.92	28.22	2005	27.3	30.41	3.11	0.11
马坡岭	57679	113.08	28.2		27.5	28.72	1.22	0.04
长沙	57687	112.92	28.22	2007	29.6	31.86	2.26	0.08
马坡岭	57679	113.08	28.2		29.5	30.58	1.08	0.04
长沙	57687	112.92	28.22	2011	30.5	30.97	0.47	0.02
马坡岭	57679	113.08	28.2		30.5	29.93	-0.57	-0.02
长沙	57687	112.92	28.22	2015	26.2	30.86	4.66	0.18
马坡岭	57679	113.08	28.2		26.2	30.37	4.17	0.16

1%~18%之间波动,且大部分都小于10%,反演精度满足本文要求,基本可以代表长沙市地表实际温度。

尽管研究范围内的各影像获取时间均为夏季,但由于时间跨度大,直接比较地表温度仍会有较大的差别,故采用归一化的方法将地表温度分布范围统一到0和1之间,进一步消除不同成像时期带来的影响(图2)。其归一化公式如式(4)所示<sup>[17]</sup>。

$$N_i = \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (4)$$

式中:  $N_i$  表示第  $i$  个像元归一化后的值,  $T_i$  为第  $i$  个像元的地表温度值,  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  分别为地表温度的最

大、最小值。利用密度分割方法将归一化后的地表温度划分成低温、较低温、次中温、中温、次高温、高温和极高温7个等级,如表3所示。

## 4 结果分析

### 4.1 长沙市热岛时空变化特征分析

根据图2的地表温度空间分布情况可以看出,长沙市城区地表温度明显高于周边郊区,并形成岛状的高温区域,界线清晰,热岛现象十分明显,证明城市热岛效应确实存在。各温度区呈不规则

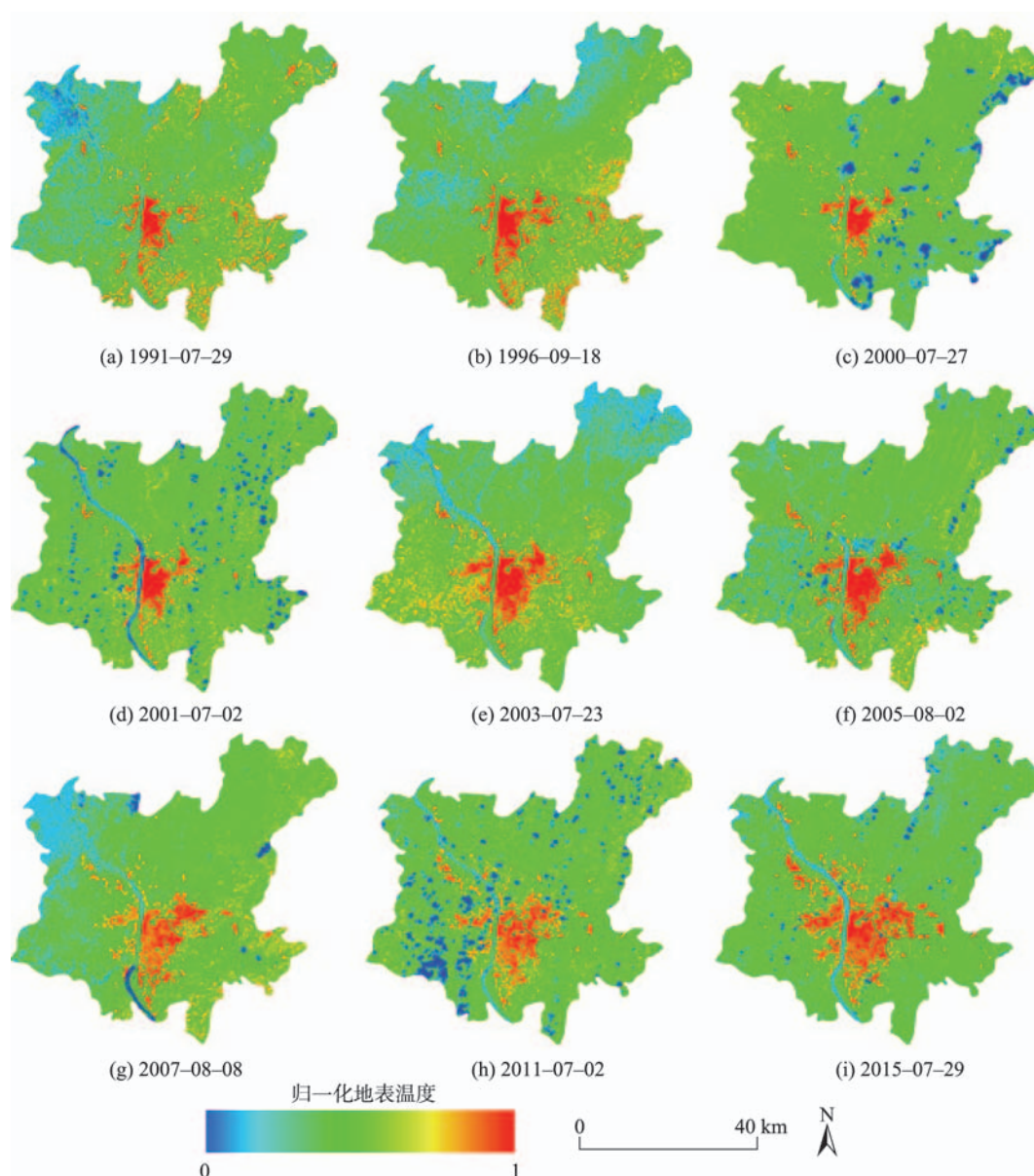


图2 1991-2015长沙市建成区地表温度分布情况

Fig. 2 LST distribution for Changsha from 1991 to 2015

表3 地表温度等级划分  
Tab.3 The range of different LST intervals

温度等级	区间	范围
#7	极高温区	$T_s > (T_a + 2S_d)$
#6	高温区	$(T_a + S_d) < T_s \leq (T_a + 2S_d)$
#5	次高温区	$(T_a + S_d/2) < T_s \leq (T_a + S_d)$
#4	中温区	$(T_a - S_d/2) \leq T_s \leq (T_a + S_d/2)$
#3	次中温区	$(T_a - S_d) \leq T_s \leq (T_a - S_d/2)$
#2	次低温区	$(T_a - 2S_d) \leq T_s \leq (T_a - S_d)$
#1	低温区	$T_s < (T_a - 2S_d)$

注： $T_s$  表示地表温度； $T_a$  表示地表温度平均值； $S_d$  是标准差

的环状分布,表现出温度由低到高或由高到低逐渐变化的规律性<sup>[18]</sup>。长沙城市热岛的空间分布与扩展和城市建成区的轮廓基本一致,并随着城市的发展向外扩张<sup>[18]</sup>;城市高温区基本集中在工商业

集中和人口密集的城市中心地区,并呈现出地表温度从城市中心向郊区逐渐降低的热岛的空间分布格局。

总的来说,长沙市热岛效应空间分布情况随时间的推移和城市发展具有以下4个明显特征:

(1)1991-1996年城市东部热岛效应加速显现

20世纪90年代初期,长沙城市规模比较小,城市强高温区主要集中在湘江东部建筑和人口密集的旧城区以及湘江西岸岳麓山风景区下南北向的一小片人口密集区。1992年长沙市经济开发区坐落于长沙县,大量林地和耕地逐渐被开发成建设用地,相较于1991年,长沙市东部1996年新增加热岛面积约53.54 km<sup>2</sup>(图3(a))。1991-1996年,长沙市建成区热岛沿浏阳河向东快速发展,位于东北部的长沙县也开始出现大范围的热岛区,且有与长沙市

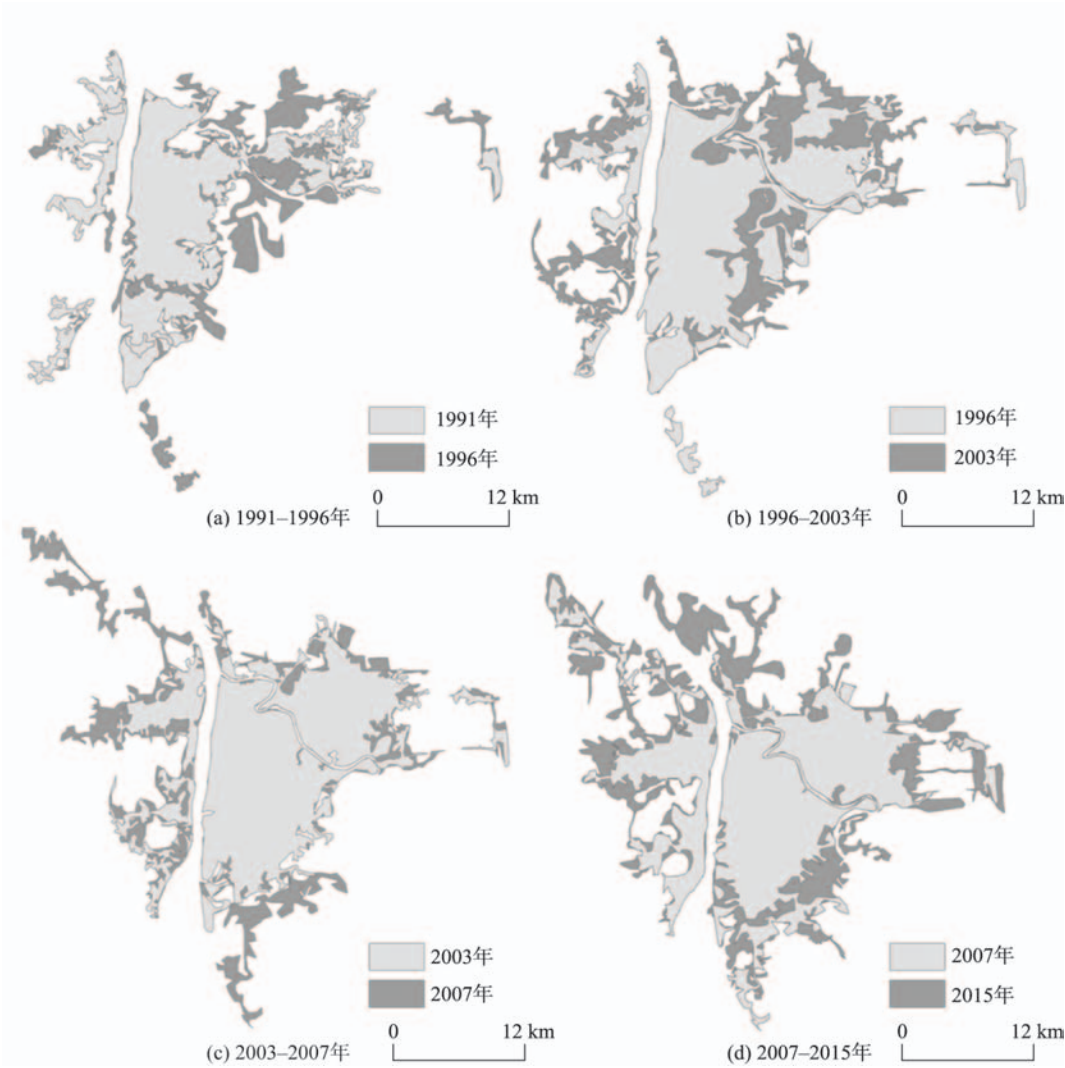


图3 1991-2015年长沙市热岛各阶段分布情况对比  
Fig.3 Comparison of the distribution of UHI in Changsha during 1991-2015

旧城区的热岛区相连接的趋势。

#### (2) 1996–2003年城市西部热岛效应延伸

2000–2003年,长沙市开启了较大规模的城市建设,城市热岛效应向城市各个方向开始加速扩展。落户于岳麓区的长沙高新技术开发区开启大规模建设,使岳麓大道、319国道及湘江西岸原有的老城区的高温区连成一片,增加面积约为39.88 km<sup>2</sup> (图3(b))。此外,长沙市区的外环以及西部和北部开始出现沿高速发展的线状高温区,并有沿线继续发展的趋势,主要原因是随着长沙绕城高速北段和西段的修建以及长益高速和京珠高速(京港澳高速)长沙段的建成,高速周边居住人口逐渐增多,并形成了一定的人口和建筑密集区,从而导致了线状高温区的出现。

#### (3) 2003–2007年加速发展的西、南部热岛

2003–2007年,湖南省开始大规模建设资源节约型和环境友好型长株潭城市群,长沙市南部城区发展迅速,大面积的裸地和植被覆盖区被建筑物和不透水面所取代,导致热岛扩展速度明显变快,与2003年相比高温区和中温区总面积增加约33.55 km<sup>2</sup> (图3(c))。此外,沿湘江往西北望城区方向也不断有新的高温区域出现;湘江西岸岳麓区热岛则以新市政府和高新技术开发区为中心呈面状加速向四周延伸,并有与望城区高温区连成片的趋势。同时,老城区建筑密集的区域开始向周边城区疏散,聚集的区域强高温中心开始出现向周边分散的趋势,城市强高温区较往年减少。

#### (4) 2007–2015年全面发展的长沙城区与热岛

2011–2015年,长沙市东、西、南、北4个方向高温区范围继续扩展,东部热岛以黄花机场为中心向外扩展。湘江以西国家级高新技术产业开发区麓谷工业园的迅速发展和长沙高铁南路的建成运营,带动了长沙城区西北部与南部的迅速发展以及两地中、高温区的进一步扩大,岳麓区热岛与望城区热岛基本连成片,南部大面积低温区和较低温区发

展成为中温区和高温区,北部热岛扩展则相对缓慢,热岛区与非热岛区基本以捞刀河为界(图3(d))。研究区强热岛相对于2007年持续减少,这与中、高温区温度差异的缩小和区域热岛中心的分散一定的关系<sup>[19–20]</sup>。

### 4.2 土地利用/覆盖变化对长沙市热岛强度影响分析

不同下垫面覆盖类型的地表温度有很大差异,对城市热岛强度贡献也不同<sup>[21]</sup>。为了研究长沙市热岛强度与土地利用/覆盖变化的关系,结合长沙市国土资源局的土地利用数据,将土地利用/覆盖类型与地表温度分布情况进行叠加分析,得到1991、2007和2015年间的土地利用/覆盖变化转移情况(表4、图4)和各土地利用/覆盖类型的地表温度情况(表5)。可以看出,2015年各土地利用/覆盖类型的温度均比1991年高,证明随着城市的发展及土地利用类型的变化,城市热岛效应明显增强。

从表4和图4可以发现,1991–2015年长沙市土地利用/覆盖类型发生了明显的变化,变化面积最大的是耕地,截至2015年,耕地总面积增加602.32 km<sup>2</sup>,变化比例达56.2%,其次是林地和建设用地,约503.26 km<sup>2</sup>林地转变为其他类型用地,建设用地则在24年间增加488.95 km<sup>2</sup>,变化比例达181.85%。其中,1991–2007年土地利用/覆盖类型比2007–2015年变化更剧烈。从图4可知,截至2007年,耕地面积急剧增加433.24 km<sup>2</sup>,建设用地则增加了328.22 km<sup>2</sup>,林地和水体在1991–2007年则分别减少了458.07 km<sup>2</sup>和109.44 km<sup>2</sup>。而在2007–2015年土地利用/覆盖类型的变化比1991–2007年小了很多,林地减少速度明显放缓,其次是耕地,水体面积更是少许增加。值得注意的是,2007–2015年裸地及其他用地减少面积比1991–2007年裸地及其他用地减少面积要多近二分之一,这与2005年以后湖南省深化对土地的集约节约利用,加大对裸地及其他土地类型的利用政策有关。

表4 1991年和2015年土地利用/覆盖转移矩阵(km<sup>2</sup>)

Tab.4 The transfer matrix of land covers in 1991 and 2015(km<sup>2</sup>)

2015年	1991年					合计
	林地	耕地	水体	建设用地	裸地及其他	
林地	890.48	103.78	10.25	19.29	130.64	1154.44
耕地	486.81	715.78	86.92	111.05	273.54	1674.10
水体	10.59	12.16	122.84	6.33	3.55	155.47
建筑用地	223.66	202.00	36.85	122.06	173.26	757.83
裸地及其他	46.16	38.06	4.96	10.15	28.86	128.19

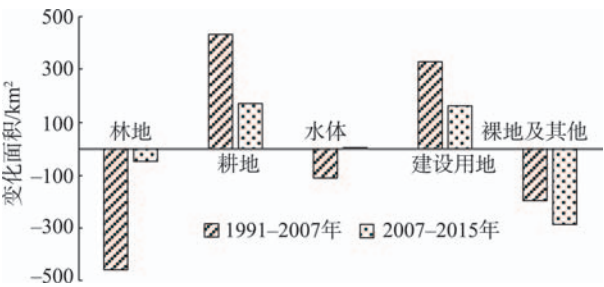


图4 1991-2015年各土地利用/覆盖类型面积变化情况(km<sup>2</sup>)

Fig.4 The changes of land use/cover type area from 1991 to 2015

表5 各土地利用/覆盖类型的地表温度特征  
Tab.5 Average normalized LST (mean±S.D) associated with land covers

土地类型	归一化温度		
	1991年	2007年	2015年
林地	0.22±0.05	0.37±0.03	0.40±0.04
耕地	0.22±0.05	0.36±0.03	0.40±0.02
水体	0.18±0.05	0.34±0.05	0.35±0.03
建设用地	0.33±0.11	0.41±0.06	0.48±0.10
裸地及其他	0.26±0.06	0.40±0.07	0.47±0.06

结合表5可看出,建设用地的地表平均温度最高,其次是裸地及其他用地;水体的温度始终最低,其次是林地和耕地。这是由于建设用地下垫面主要由砖石水泥、混凝土等不透水面构成,热传导率

和热扩散率较大,具有较强的太阳辐射吸收能力;且城市建筑物密集,不利于城市内部的空气流通,导致地表温度很高。裸地及其它用地植被覆盖度低,比热容较低且导热性好,因此在接收太阳辐射之后温度上升较快。水体比热容大,热传导率小,因此温度最低。林地和耕地植被的蒸腾作用可以减少土壤中的热量,因此地表温度也比较低。城区林地、水体以及未利用地大幅度减少,取而代之的是大量的房屋、工厂、道路等建设用地和耕地,使城市下垫面性质发生了显著变化,这些变化造成了地表热特征在时空尺度上的改变,导致了热岛效应。这与长沙市的快速发展和经济水平的不断提高有着密切关系。

为了更深入地研究土地覆盖变化与城市热岛格局时空变化之间的关系,利用ArcGIS从长沙市中心城区以1 km为间距向外生成1~18 km范围内的18个环形缓冲区,并对这18个环形缓冲区内的土地覆盖面积比重以及归一化温度均值进行统计,绘制成随缓冲区距离变化的曲线图(图5)。

由图5可看出,1991年长沙市建设用地主要集中在6 km以内的中心城区,总体上随距离呈单调下降趋势,6 km之外以耕地和林地为主,另外裸地及其他用地也占了一部分。2007年建设用地由中心城区向外大幅度上升,裸地及其他用地也有所增加,而林地及耕地比重则在距中心城区11 km以内

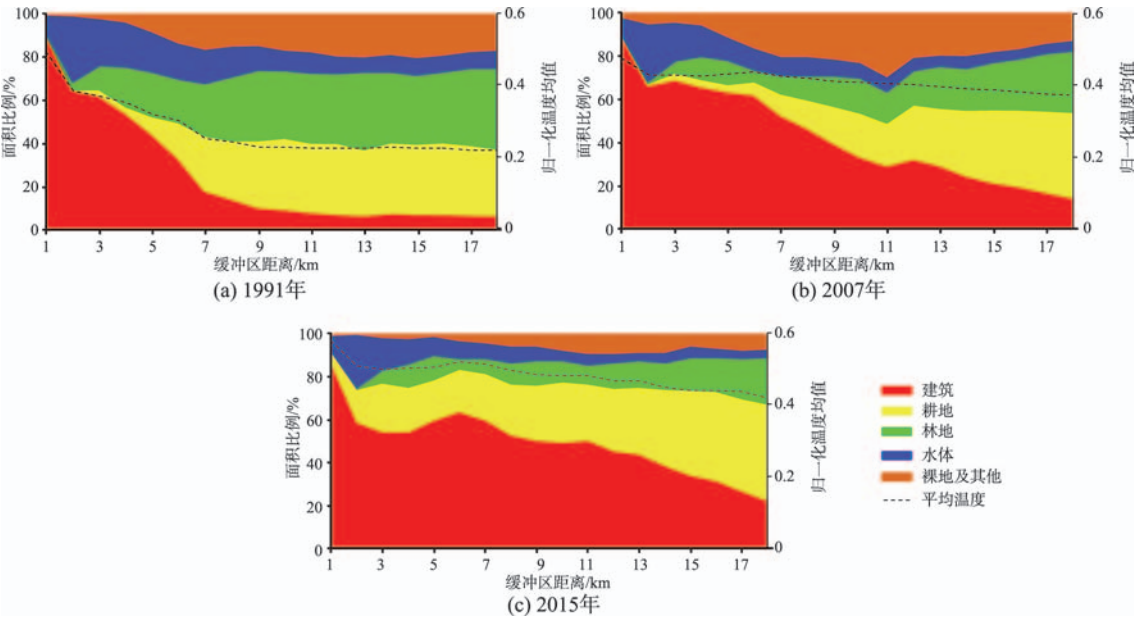


图5 各土地覆盖类型面积比重及归一化平均温度随距离变化情况

Fig.5 Variations of the land cover proportion and the average normalized LST with distance

的范围下降迅速,但总体上耕地仍保持了一定的比重。2015年裸地及林地面积持续减少,耕地在中心城区以及郊外所占比重都有所回升并有增大的趋势。建设用地则不仅仅局限于长沙市中心城区及周边地区,在远离中心城区的地区也保持了一定的比重,这一分布特征与长沙市城市的扩展模式有密切联系。

图5给出了缓冲区内归一化温度均值随距离变化的情况。对照图5(a)、(b)、(c)可发现,1991年地表温度随与中心城区距离的增加持续降低,变化明显,到了9km以外林地和耕地比重较大的范围则比较平稳。而2007年和2015年温度曲线总体都要高出1991年,随距离的增长下降趋势也比较缓慢,可以发现温度随距离的变化情况与水体、建筑、林地和耕地面积比重的变化高度相关,这与表5的数据结果相吻合:在中心城区,建设用地面积对地表温度的贡献十分巨大,水体、林地等对缓解热岛效应起了很大作用;但在远离中心城区的环形区域,水体面积所占比重微小,林地面积也下降到一定比重,而建设用地面积大幅度上升,因此水体及林地等对热岛的缓解作用也变得十分微弱。

为了衡量各土地利用类型对地表温度的贡献,计算1991、2007和2015年3期数据每一温度区间的土地利用/覆盖类型面积比例(表6)。由表6可看出,在高温区,建设用地和裸地及其他占比最大,随着温度的下降,二者所占比例明显减少,水体、林地和耕地的比重逐渐增大,说明建设用地和裸地等对地表温度有很大的贡献。对比1991–2015年相同温度范围内不同的土地利用/覆盖类型可发现,各种土地利用类型的面积组成比也发生了很大的变化。1991年低温区林地面积占19.38%,耕地面积占76.60%,水体面积占3.81%;2015年则变成林地面积占22.15%,耕地面积占24.44%,水体面积占48.61%。反观高温区各类土地覆盖类型,1991年建

筑用地面积占32.85%,裸地及未利用地面积占39.33%,耕地面积占21.1%;到2015年则逐渐变成建筑用地面积占74.62%,裸地及其他用地面积占12.78%,耕地面积占10.86%。对1991至2015年地表温度进行统计(表5)发现,1991年研究区内归一化平均温度为0.22,而2015年研究区归一化平均温度增长为0.42,证明长沙市建成区热岛强度在1991–2015年间有所增强。综合表5可以分析,导致这种情况的原因很大部分在于1991年,建筑用地面积较小,林地、耕地占研究区面积较大,研究区内平均温度较低,但各土地类型之间温度差异较大。1991–2015年,由于城市的扩张,大量林地、未利用地和水体被开垦为耕地和建设用地,林地和水体面积不断减少,因此2015年研究区地表平均温度虽然较1991年要高,但是各土地类型之间的温度差异较1991年而言变小,水体良好的吸热性能逐渐显现出来,才会出现1991年低温区水体比例很小,而在2015年低温区水体占比达到48.61%的情况。耕地在2期的低、中温区甚至高温区都分别占据很大比例,这与长沙市的地理位置和耕地类型有一定的关系:长沙市地处长江南岸,是典型的亚热带季风性气候,大部分耕地都是水田,小部分是旱地,水田含水量高,比热容较大,而旱地比热容较小,从而导致耕地在低、中、高温区都占据有部分比例,并且低、中温区耕地比例明显比高温区所占比例要大。而林地在2期的低温区和中温区都分别占据很大比例,进一步说明水体、林地、耕地这3种土地类型可以显著降低地表温度,并且水体的作用明显大于林地和耕地。这种降温作用对于控制和分割城市热岛效应的空间分布具有重要的实际意义,因此,合理的规划水体、林地和耕地有助于缓解城市热岛效应<sup>[20–22]</sup>。

## 5 结语

本文采用1991–2015年的TM/ETM+影像对长

表6 1991和2015年各温度等级区不同土地利用/覆盖面积比例(%)

Tab.6 The transfer matrix of land covers from 1991 to 2015(%)

土地类型	低温区			中温区			高温区		
	1991年	2007年	2015年	1991年	2007年	2015年	1991年	2007年	2015年
林地	19.38	26.89	22.15	56.79	35.81	37.88	2.62	3.89	1.56
耕地	76.60	49.06	24.44	28.06	53.42	55.37	21.10	10.25	10.86
水体	3.81	20.20	48.61	5.80	4.81	1.30	4.11	0.15	0.18
建设用地	0.03	3.21	4.79	0.74	2.30	4.42	32.85	59.45	74.62
裸地及其他	0.18	0.64	0.01	8.65	3.66	1.03	39.33	26.27	12.78

沙市城市扩展造成的城市热岛效应和热岛的空间格局、强度,以及随时间的变化的长沙市土地利用/覆盖情况对城市地表温度的影响进行了定量的评价和研究。研究表明:20世纪90年代初期,长沙市热岛主要集中在湘江以东的中心城区和老城区,1991-2015年长沙市建成区以较快的速度大幅增长。在所研究的24年间,长沙市城市扩展对长沙市城市热岛效应造成了很大的影响:1991-1996年,长沙市热岛范围向东部长沙县扩展,随着河西岳麓区的人口经济发展,2000之后长沙市建成区迅速向西扩展,西部高温区范围也快速增加;2003年之后城市热岛逐渐向南扩张,至此,长沙市城市热岛范围已经随着城市建成区的发展向东、南、西、北4个方向快速扩大,城市高温区面积则随着建成区的变大逐渐减小,中温区面积增加,造成这种现象的原因很可能是随着城市的发展和土地利用的变化,城市地表温度逐渐升高,研究区内高低温差异逐渐减小。进一步对长沙市地表温度与主要土地覆盖/利用类型之间的关系进行定量分析表明,不同的下垫面覆盖类型的地表温度有很大差异,对城市热岛强度贡献不同。1991-2015年,研究区内大量林地、水体和未利用地转变成建设用地和耕地,对地表温度的贡献巨大,这与长沙城市的快速发展和经济水平的不断提高有密切关系。

由于受天气因素的影响,本文只收集到1991-2015年部分年份的夏季影像,在后续研究中,将收集不同年份、不同传感器的影像,进一步分析城市热环境与城市建成区的时间和空间变化关系,以便为缓解和控制城市热岛提供有效的科学依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈云浩,李晓兵,史培军,等.上海城市热环境的空间格局分析[J].地理科学,2002,22(3):317-322. [Chen Y H, Li X B, Shi P J, et al. Study on spatial pattern of urban heat environment in Shanghai city[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002,22(3):317-322.]
- [2] Zhou W, Huang G, Cadenasso ML. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes[J]. Landscape and urban planning, 2011,102(1):54-63.
- [3] 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.
- [4] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. Nature, 2003,423(6939):528-531.
- [5] 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.
- [6] Zhou L, Dickinson RE, Tian Y, et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004,101(26):9540-9544.
- [7] 历华,柳钦火,邹杰.基于MODIS数据的长株潭地区NDBI和NDVI与地表温度关系研究[J].地理科学,2009,29(2):262-267. [Li H, Liu Q H, Zou J. Relationships of LST to NDBI and NDVI in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan area based on MODIS data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009,29(2):262-267.]
- [8] 孙天纵,周坚华.城市遥感[M].上海:上海科学技术文献出版社,1995. [Sun T Z, Zhou J H. Urban Remote Sensing[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1995.]
- [9] 张伟,蒋锦刚,朱玉碧.基于空间统计特征的城市热环境时空演化[J].应用生态学报,2015,26(6):1840-1846. [Zhang W, Jiang J G, Zhu Y B. Spatial-temporal evolution of urban thermal environment based on spatial statistical features[J]. Chinese journal of applied ecology, 2015, 26(6):1840-1846.]
- [10] 白杨,王晓云,姜海梅,等.城市热岛效应研究进展[J].气象与环境学报,2013,29(2):101-106. [Bai Y, Wang X Y, Jiang H M, et al. Progress of urban heat island effect[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013,29(2): 101-106.]
- [11] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use - land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective[J]. Global & Planetary Change, 2000,25(1):49-65.]
- [12] 乔治,田光进.北京市热环境时空分异与区划[J].遥感学报,2014,18(3):715-734. [Qiao Z, Tian G J. Spatio-temporal diversity and regionalization of the urban thermal environment in Beijing[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(3):715-734.]
- [13] 覃志豪, Minghua Z, 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(4):456-466. [Qin Z H, Minghua Z, Karnieli A, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. Acta Geographica Sinica, 2001,4:456-466.]
- [14] Qin Z, Karnieli 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, 2010,22

- (18): 3719-3746.
- [15] 覃志豪, Wenjuan L, Minghua Z, 等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003(2): 37-43. [ Qin Z H, Wenjuan L, Minghua Z, et al. Estimating of the essential atmospheric parameters of mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat TM6[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2003, 2: 37-43. ]
- [16] Chander G, Markham B. Revised Landsat - 5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(11): 2674-2677.
- [17] 徐涵秋, 陈本清. 不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法[J]. 遥感技术与应用, 2003(3): 129-333. [ Xu H Q, Chen B Q. An image processing technique for the study of urban heat island changes using different seasonal remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology And Application, 2006, 3: 125-131. ]
- [18] 历华, 曾永年, 柳钦火. 基于遥感的长沙市城市热岛与土地利用/覆盖变化研究[J]. 国土资源遥感, 2008, 78(4): 47-52. [ Li H, Zeng Y N, Liu Q H. A remote sensing image-based study of the relationship between urban heat island and land use/cover changes in changsha city[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2008, 78(4): 47-52. ]
- [19] Ghobadi Y, Pradhan B, Shafri HZM, et al. Assessment of spatial relationship between land surface temperature and landuse/cover retrieval from multi-temporal remote sensing data in South Karkheh Sub-basin, Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 8(1): 525-537.
- [20] Liu K, Su H, Zhang L, et al. Analysis of the urban heat island effect in Shijiazhuang, China using satellite and airborne data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(4): 4804-4833.
- [21] 张建明, 王鹏龙, 马宁, 等. 河谷地形下兰州市城市热岛效应的时空演变研究[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1530-1537. [ Zhang J M, Wang P L, Ma N, et al. Spatial-temporal evolution of urban heat island effect in basin valley: A case study of lanzhou city[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(12): 1530-1537. ]
- [22] 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): 1580-1597. [ Mou X J, Zhao X Y. Study on the relationship between surface temperature and land use in Pearl River Delta[J]. Geographical Research, 2012, 31(9): 1580-1597. ]