

〈红外应用〉

## 基于热红外卫星遥感的上海地区1995~2012年城市热环境监测

刘 岚, 李成范, 尹京苑, 赵俊娟

(上海大学计算机工程与科学学院, 上海 200444)

**摘要:** 利用1995~2012年的Landsat TM/ETM和MODIS热红外卫星数据,从时间、空间和城市热岛效应比率等方面对上海地区进行城市热环境进行了研究。结果表明,在时间序列上,一方面,上海地区地表亮温在季节上夏季最强,春季次之,秋冬季节较弱;另一方面,上海地区城市热环境主体逐渐从次中温区向中温区转化,城市地表亮温在总体上有升高的趋势。在空间分布上,在1995~2000年上海地区地表亮温格局主要是由中心城区决定,随着浦东、松江、闵行、嘉定等新城区的兴起,在2000年以后,逐渐形成以中心城区为主,多个中心建成区为辅的城市热环境分布格局。

**关键词:** 城市热环境; 卫星遥感数据; 热红外; 上海地区

中图分类号: TN219 文献标示码: A 文章编号: 1001-8891(2016)01-0053-06

### Monitoring of Urban Thermal Environment in Shanghai Area from 1995 to 2012 Using Thermal Satellite Remote Sensing

LIU Lan, LI Chengfan, YIN Jingyuan, ZHAO Junjuan

(School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Landsat TM/ETM and MODIS thermal infrared satellite data during 1995–2012 were used to investigate Shanghai area's urban thermal environment from time, space and urban heat island effect ratio (UHIER) aspects. The results show that: in the time series, on the one hand, the land brightness temperature of Shanghai area is the strongest, followed by spring, and then autumn and winter. On the other hand, the main body of Shanghai area's urban thermal environment has transformed from secondary-medium temperature area to medium temperature area, and urban land brightness temperature has a trend of increasing in general. In the spatial distribution, urban land brightness temperature structure is mainly dominated by urban area in 1995–2000, and the landscape pattern of land brightness temperature that one center of urban area primarily and supplemented by the multicenter built-up area is gradually formed since the rapid development of built-up area of Pudong new district, Songjiang district, Minhang district, and Jiading district in 2000.

**Key words:** urban thermal environment, satellite remote sensing data, thermal infrared, Shanghai area

## 0 引言

城市热环境是指在城市及周边地区由太阳辐射与地表温度、相对湿度和风力、气流等气象条件相互作用而形成的影响人体感官和健康的环境。近年来,随着城市化进程的加快,逐渐形成了在城市内部地区气温要比周边地区高的城市热岛效应<sup>[1-3]</sup>,在一定程度上

加剧了城市热平衡的复杂性。众多研究表明城市热环境主要受城市下垫面、大气污染、人工热源、植被覆盖、人口密度等因素的影响<sup>[2]</sup>。通过对城市热环境及其影响因子进行分析,不但有利于城市环境的可持续发展,而且还有助于提高人类的居住和生活质量<sup>[2,4]</sup>。

热红外卫星遥感技术作为一种有效的监测手段,能够全面、周期的、动态地监测到城市热环境的变化。

收稿日期: 2015-04-19; 修订日期: 2015-09-11。

作者简介: 刘岚(1982-),女,博士研究生,山东济宁人,主要研究方向为遥感与空间信息处理研究。

通讯作者: 李成范(1981-),男,河南南阳人,高级工程师,博士,硕士生导师,主要研究方向为空间信息处理。E-mail: lchf@shu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41404024, 41172303); 上海市科技发展基金项目(14231202600); 上海高校青年教师培养资助计划项目(2014-2016)。

与传统的监测方法相比，优势更加明显。目前，最常用的卫星数据有 AVHRR、Landsat TM/ETM 和 MODIS，反演方法主要有基于温度、植被指数和热力景观等<sup>[5-8]</sup>。上海作为中国经济最为发达的地区之一，仅利用单时相的热红外卫星数据来获取城市地表热场，难以准确地反演出城市热环境特征和发展趋势。此外，随着近年来城市规模的迅速扩张，城市热环境也在不断地发生变化，非常有必要对其进行具有时间序列的城市热环境特征研究。鉴于此，本文以上海地区为例，利用 1995~2012 年间的 Landsat TM/ETM 和 MODIS 热红外卫星数据对城市热环境进行监测。

## 1 研究区概况和数据源

上海市地处长江和东海的交汇处，属于亚热带季风气候区，受副热带高压控制，四季分明。上海作为全国规模最大的经济、金融中心，下辖一个中心城区及若干个区域中心城区，分别包括嘉定区、青浦区、宝山区、浦东新区、奉贤区、松江区、金山区、南汇区、闵行区、崇明县等，总面积约为 6340.5 km<sup>2</sup>。随着改革开放和浦东新区开发，由于其特殊的地理位置，在城市规模快速扩张的同时，逐渐形成了特殊的城市热环境。

本研究的数据源包括 MODIS 和 Landsat TM/ETM 卫星。MODIS 具有 36 个波段，其中 20~36 波段为红外和热红外波段，最大地面分辨率约为 250 m。Landsat TM 具有 7 个波段，其中第 6 波段为热红外波段，地面分辨率为 120 m。与 TM 传感器相比，ETM 不但将热红外波段分辨率提高到 60 m，而且新增加了一个分辨率为 15 m 的全色波段。在本文中，MODIS 的成像时间为 2010 年 9 月 1 日、2011 年 8 月 30 日、2012 年 7 月 25 日，Landsat TM/ETM 的成像时间为 1995 年 9 月 13 日、2000 年 8 月 1 日、2003 年 9 月 27 日、2008 年 8 月 7 日。

## 2 基本原理和方法

### 2.1 城市地表亮温的反演

城市热环境往往通过地表亮温场来表示。利用热红外卫星数据反演城市热环境的方法较多，其中单窗算法<sup>[9]</sup>由于其具有一定的精度、算法简单、易于实现等优点而被广泛采用。

首先，需要将热红外卫星数据的亮度值转化为辐射亮度：

$$L = L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min}) \times BV / 255 \quad (1)$$

式中： $L_{\max}$  和  $L_{\min}$  分别为传感器所探测到的最大和最小辐射亮度， $L_{\max} = 1.56 \text{ W/sr}\cdot\text{m}^2$ ， $L_{\min} = 0.1238$

$\text{W/sr}\cdot\text{m}^2$ ，BV 为热红外波段的亮度值。

其次，城市地表亮温反演的具体过程为<sup>[9]</sup>：

$$T_s = \{a(1-C-D) + [b(1-C-D) + C + D]T - DT_a\} / C \quad (2)$$

式中： $T_s$  代表地面真实温度； $T$  为传感器测得的亮度温度， $T = K_1 / \ln(K_2 / L + 1)$ ， $K_1 = 1260.56 \text{ W/m}^2\cdot\text{ster}\cdot\mu\text{m}$ ， $K_2 = 607.76 \text{ K}$ ； $T_a$  为等效大气平均温度； $a$  和  $b$  分别为回归系数， $a = -67.355351$ ， $b = 0.458606$ ， $C$  和  $D$  分别为中间变量， $C = \tau\varepsilon$ ， $D = (1-\tau)[1 + \pi(1-\varepsilon)]$ （ $\tau$  为大气透射率， $\varepsilon$  为地表发射率）。

等效大气平均温度  $T_a$  的公式为：

$$T_a = 17.9769 + 0.91715 \times T_0 \quad (3)$$

式中： $T_0$  为近地表大气温度，单位为 K。根据上海地区实际气象条件和相关文献<sup>[10]</sup>，本文中将每年的 7~9 月份统称为夏季。由于本文主要是针对上海地区夏季城市热环境进行反演，研究中对不同年份夏季（7~9 月）的近地表大气温度  $T_0$  均选取为 312.15753。

大气透射率  $\tau$  的公式为：

$$\tau = \begin{cases} 0.974290 - 0.08007\omega & (\text{if } 0.4 < \omega < 1.6) \\ 1.031412 - 0.11536\omega & (\text{if } 1.6 < \omega < 3.0) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\omega$  为大气中的水汽含量，单位为 g/cm<sup>3</sup>。针对上海地区夏季城市热环境而言，研究中对不同年份夏季（7~9 月）的水汽含量  $\omega$  均选取为 1.0。

地表比辐射率  $\varepsilon$  的公式为：

$$\varepsilon = 0.9625 + 0.0614P - 0.0461P \times P \quad (5)$$

式中： $P$  为植被覆盖度。针对上海地区夏季城市热环境而言，此时植被覆盖对城市热环境有着明显的降温作用，且在不同年份之间是不同的。根据上海地区实际情况，研究中 1995、2000、2003、2008、2010、2011 和 2012 年夏季有植被覆盖地区的  $\varepsilon$  分别取 0.91、0.90、0.94、0.92、0.96、0.96 和 0.93，没有植被覆盖地区的  $\varepsilon$  分别取 0.85、0.81、0.88、0.86、0.89、0.89 和 0.87。

### 2.2 城市热岛效应比率的计算

同一地区不同时期所获取的太阳辐射能量不同，即使同一天都可能完全相同。为了有效地减小不同时期地表亮温之间的差异，本文中分别引入热岛效应比率和平均城市热岛效应比率<sup>[11]</sup>。

城市热岛效应比率的公式为：

$$R_i = \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (6)$$

式中： $R_i$  为城市热岛效应比率； $T_i$  为地表亮温； $T_{\min}$  为最低的地表亮温； $T_{\max}$  为最高的地表亮温。

平均城市热岛效应比率的公式为：

$$\bar{R}_i = \frac{R_i \times S_i}{\sum S_i} \quad (7)$$

式中:  $\bar{R}_i$  为平均城市热岛效应比率;  $S_i$  为研究区面积。

### 3 上海地区城市热环境分析

#### 3.1 季节特征分析

研究区雨量适中, 四季分明。结合研究区的实际情况和季节对城市生活影响程度, 将全年划分为与研究区实际情况相符合的季节分布, 分别为春季为4~6月, 夏季为7~9月, 秋季为10~12月, 冬季为1~3月。为了更好地体现出研究区的不同季节特征, 本文以2010年和2011年为例, 分别根据季节划分标准, 对不同季节中包含月份的地表亮温进行归一化处理, 具体过程是将每一季节的3个月份的地表亮温相加并取平均值, 并划分为5级, 分别为低温区(I, 280~286 K)、次中温区(II, 286~292 K)、中温区(III, 292~298 K)、次高温区(IV, 298~304 K)、极端高温区(V, 304~310 K), 结果如图1和图2所示。

一般来说, 上海地表亮温中夏季最强, 春季次之, 秋冬季节相对较弱。在夏季, 最大的城市地表亮温区域为中心城区和北部的宝山、嘉定, 以及南部的松江、闵行等地, 并呈现出多个高温中心存在的态势。春季最大的城市地表亮温区域为中心城区以及北部地区, 且连片出现。这在图1和图2中都得到了很好的验证。从图1和图2中看出, 2010年和2011年上海地区夏

季地表亮温最高、其次是春季, 秋冬季节要明显的弱于夏春季节。此外, 秋季上海地区经常出现30℃以上的高温天气, 甚至是出现“秋老虎”天气, 因此也常形成较高的地表亮温。这在图1和图2中体现的非常明显, 2010年和2011年的秋季地表亮温强度(图1d和2d)要高于冬季地表亮温强度(图1(a)和图2(a))。

#### 3.2 年际特征分析

由式(6)可得到上海地区城市热岛效应比率。为了便于进行对比和分析, 根据研究区实际情况, 将上海地区城市热岛效应比率划分为5个等级: 0.0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1.0, 分别对应于城市的地表亮温等级中的低温区、次中温区、中温区、次高温区和极端高温区。结果如表1所示。

从表1中看出, 对于IV和V级热场而言, 在2000年增加到最大, 两者占到总面积的22.59%, 随后开始下降, 到2003年为最低值, 约为3.94%, 随后再次开始逐渐升高。有关数据表明, 上海的城市建成区面积从1995年开始快速扩张, 面积由700 km<sup>2</sup>迅速增加到2008年的1000 km<sup>2</sup>; 绿地在1995年仅为49.5 km<sup>2</sup>, 且缓慢增长。从2000年开始迅速增长到2003年的290 km<sup>2</sup>, 随后又开始缓慢增加。从绿地变化趋势来看, 其面积变化与IV和V级热场变化相一致, 这表明绿地的快速扩张大大降低了上海的城市热场现象。

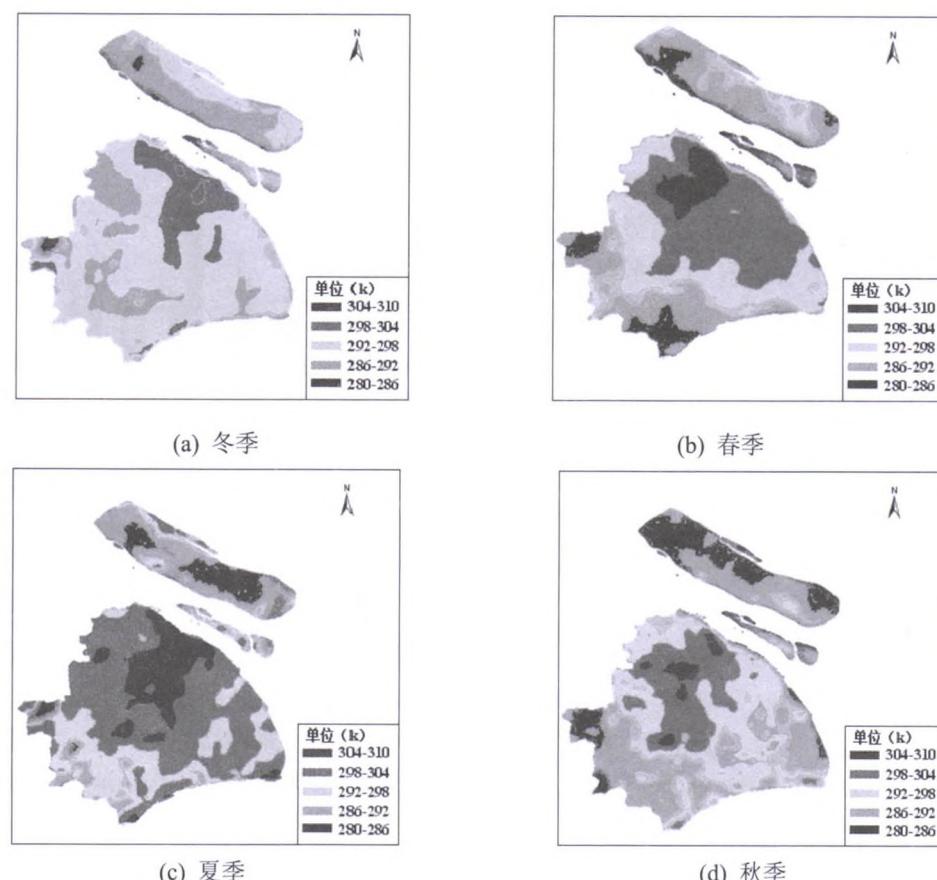


图1 上海地区2010年城市热岛的季节分布特征

Fig.1 Seasonal distribution of LBT fields in 2010

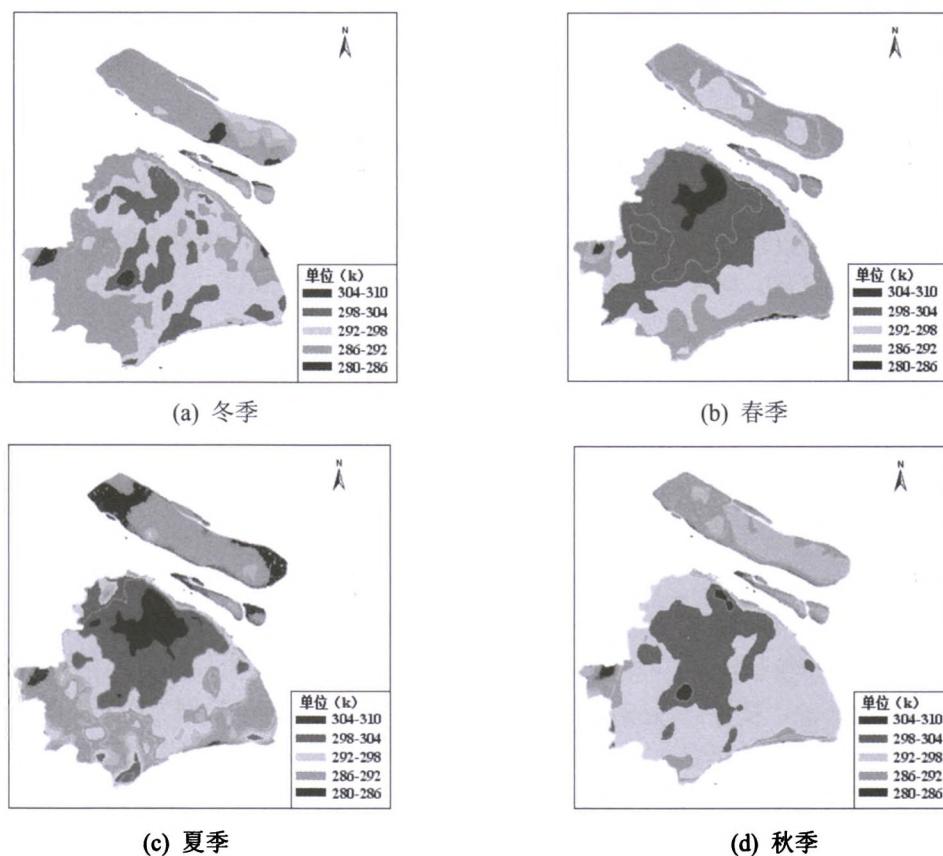


图2 上海地区2011年城市热岛的季节分布特征

II级热场在1995~2003年间的最低值在2000年，面积比1995年减少了17.23%，最高值为2003年的40.55%，随后再次持续下降。而III级热场的年际变化特征恰好相反。两者占到总面积的75.08%~90.11%。这表明II和III级热场是上海城市热环境的主体。近年来，随着城市建成区的扩张，城市热场逐渐由II级向III级热场转化，亦即在城市化背景下，上海地区地表亮温有升高的趋势。此外，I级低温区的面积基本上变化不大，且主要分布在上海的远郊区和临近海边的崇明县附近。

表1 1995~2012年上海市城市热岛效应比率面积分布

Table 1 The area distribution of UHIER from 1995 to 2012

城市热岛 效应比率	面积比例/%				
	1995	2000	2003	2008	2012
I 0.00~0.20	1.51	2.34	5.95	2.28	2.04
II 0.20~0.40	37.88	20.65	40.55	16.32	10.36
III 0.40~0.60	40.46	54.43	49.56	66.25	74.45
IV 0.60~0.80	18.82	20.38	2.92	13.96	11.92
V 0.80~1.00	1.33	2.21	1.02	1.19	1.23
总计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

### 3.3 空间特征分析

根据上海的实际情况，将城市热岛效应比率0.6~

0.8（次高温区）和0.8~1.0（极端高温区）统称为上海城市热环境的相对高温区。参考相关统计数据，分别统计相对高温区域和建成区面积<sup>[11-12]</sup>，结果如图3所示。

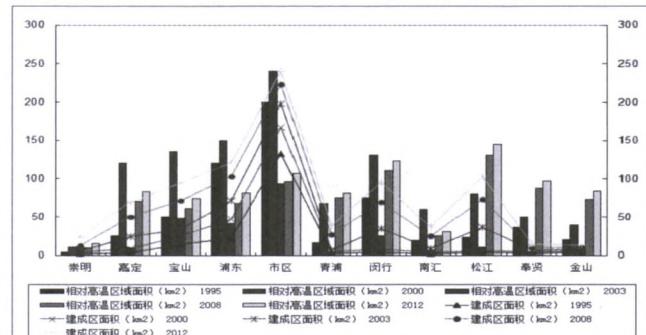


图3 相对高温区和建成区面积

Fig.3 The relatively high temperature area and built-up area of Shanghai area

由图3可知，从时间上来看，1995年上海中心城区的相对高温区面积最大，其次是浦东新区和闵行、宝山，其他行政区则较小；到2000年，各个行政区的相对高温区面积均不同程度的大幅增加，此时上海中心城区依然最大，其次是浦东新区、宝山、嘉定和闵行；随后各个行政区的相对高温区面积逐渐减小，到2003年，依然是上海市区、宝山、浦东新区的面积最大；从2008年开始，松江、闵行、嘉定等的相

对高温区面积逐渐超过传统的上海中心城区、浦东新区和宝山等地。

从建成区面积来看,1995年上海中心城区的面积占有绝对优势,浦东新区开发也刚刚起步,其他行政区的建成区面积都较小;到2000年,浦东新区开发已见成效,具有地理优势的宝山开发也已经初具规模;此后,随着城市化的快速推进,嘉定、闵行、松江等建成区面积迅速扩张,大大改善了上海市的建成区分布格局,使得最初的绝对中心式分布逐渐开始向中心式为主、多个副中心为辅的格局转变。经分析,这主要是由于相关城市规划政策的实施,使得建成区分布逐渐向多中心、多核的方向扩展,并引起城市相对高温区域开始向外离散扩展。

由此可知,上海中心城区、浦东新区、宝山、闵行、松江等不但建成区面积较大,而且相对高温区面积也较大,同时也是形成上海城市热环境的重要部分。可以预见,这一趋势在一定时期内还将进一步持续下去。

### 3.4 中心城区的平均城市热岛效应比率分析

表2是上海地区和中心城区的平均城市热岛效应比率,图4是上海地区和中心城区的建成区面积和绿化覆盖率变化情况<sup>[10-12]</sup>。

在表2中,总体上中心城区的平均城市热岛效应比率要大于上海地区的平均城市热岛效应比率,这是因为中心城区的城市化水平要明显的大于全上海地区的水平;在1995~2000年间,中心城区和上海地区的平均城市热岛效应比率都是逐渐增大到2000年的0.72和0.49,随后中心城区的平均城市热岛效应比率则是逐渐递减,而上海地区的平均城市热岛效应比率则是递减到2003年的0.32后开始逐渐增加。这表明最初集中在中心城市的相对高温区逐渐向郊区和外围的中心扩散。据分析,这很可能与中心城区从2000年开始实施大规模绿化有关。

表2 上海地区和中心城区的平均城市热岛效应比率

Table 2 Average UHIER of urban area and Shanghai area

	1995	2000	2003	2008	2012
中心城区	0.63	0.72	0.55	0.51	0.50
上海地区	0.42	0.49	0.32	0.46	0.48

由图4可知,从时间上来看,1995~2000年中心城区的绿化覆盖率仅增长0.84%,而2000~2003、2003~2008、2008~2012年的绿化覆盖增长率分别为4.32%、5.20%和3.54%。此外,整个上海地区的绿化覆盖率也在不断地提高。绿化面积的大量增加有效地缓解了上海中心城区的城市热岛状况。

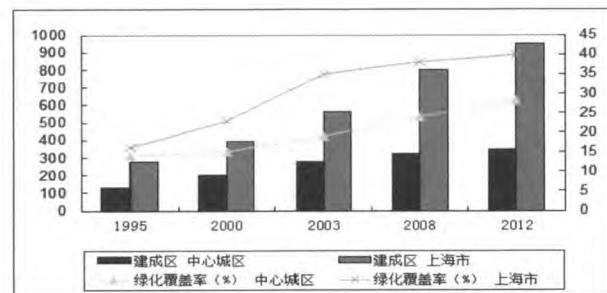


图4 上海市和中心城区的建成区面积和绿化覆盖率

Fig.4 Built-up area and green coverage ration of Shanghai area and urban area

从建成区面积来看,1995~2000年间中心城区的建成区面积占到上海地区总建成区面积的50%以上,其城市化水平也要远高于全市平均水平。此时,中心城区在1995和2000年的平均城市热岛效应比率分别为0.36和0.31。随着浦东新区、闵行等地的开发,中心城区建成区占总建成区面积的比重逐渐减小到2012年的36.31%。与此同时,中心城区的平均城市热岛效应比率逐渐下降,上海地区的平均城市热岛效应比率逐渐增加,二者之间的差异也在不断的缩小。

综合城市建成区面积和平均城市热岛效应比率来看,1995~2000年间的上海地区城市热岛特征主要取决于中心城区;此后,城市化水平的提高和浦东新区等地的开发,逐渐形成了多中心的建成区结构,使得中心城区对上海地区热环境的支配力不断减小,其他建成区的支配力则不断增大,最终形成了中心城区为主、其他建成区为辅的城市热环境格局。

### 3.5 上海中心城区城市热环境形成因素分析

上海中心城区是上海地区城市热环境的主体部分。近年来,随着中心城区大规模绿化和合理的城市规划,使得相对高温区虽然有下降的趋势,但是仍然占有较大的比例。这是因为中心城区不但人口稠密,而且还存在着大量老式住宅、新兴的新式住宅和工业园区等。据统计中心城区内部的建筑容积率高达1.9以上,再加上大量采用水泥、玻璃等高反照度的建筑材料,这些都增大了中心城区的城市热环境。

针对上海中心城区,相对高温区域主要是由城市建筑和人为热所造成的。但是对于不同地区,其相对高温区的形成因素又有所不同。如黄浦、虹口和闸北南部的相对高温区主要是由高度密集的人口聚居区与老式建筑所造成,闸北和普陀北部、长宁、徐汇以及宝山主要是由大量分布的工业造成,而杨浦和浦东的相对高温区则受到城市居民日常生活影响和工业生产释放废热的双重影响。此外,对于中心城区的非相对高温区,主要是受市区的公园、绿地、黄浦江、苏州河等生态因子的稀释作用,形成温度较低的城市

热环境。

#### 4 结论

本文利用热红外卫星数据对上海地区1995~2012年间的城市热环境分别从时间、空间和城市热岛效应比率等方面对上海地区进行城市热环境进行了研究,取得以下结论:

1) 从上海地区城市热岛效应比率的年际变化来看,次中温区和中温区是上海地区城市热环境的主体部分,占到总面积的75.08%~90.11%。近年来,城市热场逐渐由次中温区向中温区转化,这表明上海地区的城市地表亮温有升高的趋势。

2) 从上海城市热岛效应比率的空间分布来看,近年来随着快速城市化,上海地区城市热环境逐渐由中心城区占支配地位开始向以中心城区为主、多个中心建成区为辅的格局转变。

3) 上海地区中心城区的相对高温区主要是由密集的建筑群和工业、居民日常生活等产生的人为热造成的,中心城区内部的公园、绿地、河流等对城市热环境的稀释作用非常明显。

在获取上述部分有益的结论的同时,本研究仍然存在一些问题还未解决。例如,上海地区城市热环境特征不但与上海地区特定的城市经济和社会关系密切,而且还与当地所处的大气候环境和包括地表植被覆盖、土地利用结构等在内的城市规划因素密切相关。因此,在今后的研究中,还非常有必要尝试利用统计学方法对影响城市热环境的不同因素进行定量化分析和探讨。

#### 参考文献:

- [1] Chen X L, Zhao H M, Li P X, et al.. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**(2):133-146.
- [2] Yuan F, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **106**(3):375-386.
- [3] LI Chengfan, SHEN di, DONG Jiang-shan, et al. Monitoring of urban heat island in Shanghai, China, from 1981 to 2010 with satellite data[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, **7**(10): 3961-3971.
- [4] 李金萍, 刘自强, 余英, 等. 基于NOAA卫星图像信息的大气辐射校正方法研究[J]. 红外技术, 2008, **30**(6): 316-320.  
LI Jinping, LIU Ziqiang, YU Ying, et al. A research on atmospheric radiation correction method based on NOAA satellite image information[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(6): 316-320.
- [5] 李成范, 尹京苑, 董江山, 等. 基于热红外卫星遥感的火山灰云监测研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(8): 487-491.  
LI Chengfan, YIN Jingyuan, DONG Jiangshan, et al. Detecting of volcanic Ash cloud based on thermal infrared satellite remote sensing[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(8): 487-491.
- [6] 王寒栋. 基于红外热像的喷雾吸收特性及其可视化试验研究[J]. 红外技术, 2010, **32**(6): 356-361.  
WANG Handong. IR Thermography based experimental research on the characteristics and visualization of spray absorber[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(6): 356-361.
- [7] 高文广, 孙继银, 刘浩. 基于数据库的红外辐射大气传输仿真模型[J]. 红外技术, 2010, **32**(6): 333-336.  
GAO Wenguang, SUN Ji-in, LIU Hao. The simulation models of atmospheric infrared emission based on database[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(6): 333-336.
- [8] Srivastava PK, Majumdar TJ, Bhattacharya AK. Study of land surface temperature and spectral emissivity using multi-sensor satellite data[J]. *Journal of Earth System Science*, 2010, **119**(1): 67-74.
- [9] Qin Z H, Kermeli 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.
- [10] 尹球, 祝善友, 巩彩兰. 城市白天地面亮温与下垫面类型关系的遥感分析—以上海为例[J]. 红外与毫米波学报, 2009, **28**(2): 134-137.  
YIN Qiu, ZHU ShanYou, GONG CaiLan. Remote sensing analysis of the relationships between daytime ground bright temperature and land-use types of city—with shanghai as an example[J]. *J. Infrared Millim.Waves*, 2009, **28**(2):134-137.
- [11] LI J J, WANG X R, WANG X J, et al. Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the Shanghai metropolitan area, China[J]. *Ecological Complexity*, 2009, **6**(4): 413-420.
- [12] 邓莲堂, 束炯, 李朝颐. 上海城市热岛的变化特征分析[J]. 热带气象学报, 2001, **17**(3): 273-280.  
DENG Liantang, SHU Jiong, LI Chaoyi. Character analysis of shanghai urban heat island[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2001, **17**(3): 273-280.