

# 基于遥感信息的常州市热岛效应\*

黄凡<sup>1,2,3</sup> 李锋<sup>2\*</sup> 王如松<sup>2</sup> 黄锦楼<sup>2,3</sup> 周传斌<sup>2,3</sup> 阳文锐<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup>中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;

<sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 以常州市区为研究区域, 运用“单窗算法”对 TM 卫星第 6 波段进行解译, 得到卫星过境时常州市区的地表温度 (LST) 分布图。结果表明: 2006 年 9 月 18 日卫星过境时常州市城区地表平均温度的热岛强度为 3.81 K; 常州热岛效应的空间分布特征为“一个片区结合多个组团”, 与城市的发展格局基本一致, 表明城市化引起的土地利用/土地覆盖变化是形成热岛效应的主要原因; 城市工业用地的地表平均温度极显著高于城区, 表明工业生产消耗大量能源而产生的人为热对常州市热岛效应的形成以及热岛强度的增强具有显著影响。

**关键词** 热岛效应; 地表温度; Landsat TM; 单窗算法; 城市化

**中图分类号** X24 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2009)08-1594-06

**Heat island effect in Changzhou City based on remote sensing information.** HUANG Yifan<sup>1,2,3</sup>, LI Feng<sup>2</sup>, WANG Ruisong<sup>2</sup>, HUANG Jinlou<sup>2,3</sup>, ZHOU Chuanbin<sup>2,3</sup>, YANG Wenrui<sup>2,3</sup> (<sup>1</sup>Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016 China; <sup>2</sup>Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085 China; <sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039 China). *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1594-1599

**Abstract** To study the heat island effect in urban area of Changzhou City, a land surface temperature (LST) image was established by using mono-window algorithm to interpret the 6th band of Landsat TM. On September 18th 2006, the day the Landsat TM passed through Changzhou, the heat island intensity of the mean LST in Changzhou urban area was 3.81 K. The spatial distribution pattern of heat island effect in Changzhou could be described as a one piece area in addition to several decentralized associated groups, being consistent with the current urban development pattern, which suggested that the land use/cover change and anthropogenic heat emission induced by urbanization would be considered responsible for the formation of heat island effect. The mean LST of industrial land was significantly higher than that of non-industrial land, which indicated that the anthropogenic heat produced by industrial production had evident effects on the formation of heat island effect and the increase of heat island intensity.

**Key words** heat island effect; land surface temperature; Landsat TM; mono-window algorithm; urbanization.

以温室气体含量增加和全球气候变暖为主要特征的全球变化倍受研究者的关注。土地利用/土地覆盖变化 (LUCC) 是全球变化研究最为核心的部分 (Tumer *et al.*, 1995), 而城市化是其具体表现。城市化带来了巨大的城市环境变化, 城市热岛效应

就是其中之一。

Howard (1833) 第一次记录了城市中心温度比郊区高的现象。Manley (1958) 首次提出城市热岛效应, 是指城市温度比周边温度高的现象。由于热岛效应的影响因素众多, 监测热岛效应的方法也各有侧重, 主要包括气象数据监测、遥感解译、定点观测、运动样带以及模拟分析等方法 (金苏艺和江洪, 2008)。各国学者已经利用这些方法对城市热岛效

\* 国家自然科学基金项目 (70803050) 和中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-YW-324, KZCX2-YW-422)

\*\* 通讯作者 E-mail: lifeng@reces.ac.cn

收稿日期: 2009-12-09 接受日期: 2009-04-05

应进行了深入而广泛的研究(彭少麟等, 2005)。其中遥感定量分析法通过遥感卫星获取观测资料并进行较大尺度的分析, 与传统方法相比具有较好的时间同步性和较广的覆盖范围(胡华浪等, 2005)。Rao(1972)首次利用遥感手段研究了城市热岛效应, 随后我国学者利用亮度温度对北京、上海、沈阳等多个城市进行了热岛效应的研究(范天锡和潘钟跃, 1987; 周红妹等, 2001; 胡远满等, 2002)。利用遥感反演得到的地表温度(land surface temperature, LST)对热岛效应的研究也在不断深入(Qin & Kameli 2001; Weng 2001, 2003)。众多的研究表明, 城乡间归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)的差异可能成为影响城市热岛的主要原因(Gallo *et al.*, 1993a, 1993b; 陈云浩等, 2003)。

前人在热岛效应机理研究的深度和广度方面取得了丰厚成果, 但是, 在减轻热岛效应工程方面的研究还相对薄弱。本文利用“单窗算法”(Qin & Kameli 2001)反演得到常州市地表温度分布图像, 并以此分析了热岛效应强度、其空间分布特征以及工业区对热岛强度的影响, 以期对常州市合理设计城市冷桥系统提供理论基础。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

常州市(31°09'N—32°04'N, 119°08'E—120°12'E)辖5个市辖区, 代管2个县级市, 即天宁区、钟楼区、戚墅堰区、新北区、武进区、溧阳市、金坛市。市区面积1864 km<sup>2</sup>, 人口217万, 河网密布, 属北亚热带季风性湿润气候区。气候温和湿润, 年均气温15.4℃; 雨量丰沛, 年均降水量1071.5 mm; 日照充足, 年均日照时间2047.5 h; 无霜期长, 年均227.6 d; 常年主导风向东南偏东, 四季分明。

常州市依河而建、因河而兴, 具有悠久的沿京杭大运河发展的历史, 因此城市建成区基本沿河向西发展。伴随着常州市“一体两翼”的规划思路, 目前建成区已经想南北方向扩展。常州市热岛效应以一个中心片区结合多个组团的空间形式分布。一个片区是指处于城市中心地带的大面积建成区, 包括钟楼区、天宁区、武进区、戚墅堰区以及新北区的南部。这个片区主要沿着两条轴线发展, 一是沿着京杭运河发展, 另一条是向南北两翼扩展, 这两条轴带则是过去和现在城市的发展方向。多个组团主要指

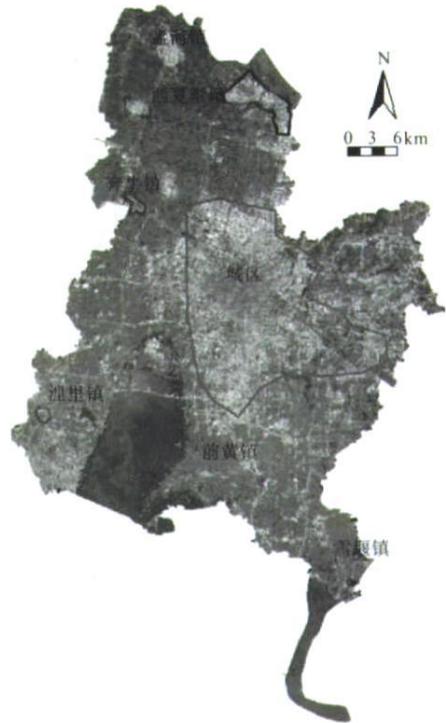


图1 研究区示意图

Fig 1 Study areas in Changzhou City

北边的孟河镇、西夏墅镇、沿江化工区, 西部的奔牛镇以及南部的湟里镇、前黄镇、雪堰镇(图1)。

### 1.2 材料选取

本实验采用从中国科学院遥感卫星地面站购得的美国陆地资源卫星(Landsat TM)于2006年9月18日9:58过境拍摄的卫星图片(WRS 119/38); “地下气象站”网站(www.wunderground.com)提供的卫星过境时的温湿度数据。遥感与地理信息系统操作软件选用ENVI 4.3和ArcGIS 9.2。

### 1.3 实验方法

采用Qin和Kameli(2001)提出的“单窗算法”, 利用现有卫片反演卫星过境时的地表温度, 获得地表温度分布图像。主要计算公式如下:

地表温度的计算公式:

$$T_s = [a \times (1 - C - D) + [b \times (1 - C - D) + C + D] \times T_6 - D \times T_a] / C \quad (1)$$

式中:  $C = \tau \times \varepsilon$ ,  $D = (1 - \tau) / [1 + \tau(1 - \varepsilon)]$ ;  $a = -67.35535$ ,  $b = 0.458608$ ,  $T_6$ 为亮度温度;  $\tau$ 为大气透射率;  $T_a$ 为大气平均作用温度。

自然地表的比辐射率计算公式:

$$\varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_s \varepsilon_s + d\varepsilon \quad (2)$$

城镇地表的比辐射率计算公式:

$$\varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_m \varepsilon_m + d\varepsilon \quad (3)$$

表 1 大气透射率估算公式

Tab 1 Estimation of atmospheric transmittance

大气属性	水分含量 ( $g \cdot cm^{-2}$ )	大气透射率估计方程
高气温	0.4~1.6	$\tau = 0.974290 - 0.08007w$
	1.6~3.0	$\tau = 1.031412 - 0.11536w$
低气温	0.4~1.6	$\tau = 0.982007 - 0.09611w$
	1.6~3.0	$\tau = 1.053710 - 0.14142w$

式中:  $\epsilon_v$  为植被地表辐射率;  $R_v$  为植被地表温度比率;  $R_m$  为城镇地表温度比率;  $\epsilon_m$  为城镇地表辐射率。

像元植被覆盖度计算公式:

$$P_v = [(NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s)]^2 \quad (4)$$

大气平均作用温度计算公式:

$$T_a = 25.9396 + 0.88045T_0 \quad (5)$$

式中:  $NDVI_s$  为裸土的  $NDVI$  值, 一般取  $0.05 NDVI_v$ , 为茂密健康植被的  $NDVI$  值, 一般值为  $0.7$ ; 当  $NDVI$  值  $> 0.7$  时, 认为该地区完全被植被覆盖, 即  $P_v = 1$ ; 同样, 当  $NDVI < 0.05$  时, 认为该区为完全裸土覆盖,  $P_v = 0$ ;  $T_0$  为卫星过境时近地表温度。

大气透射率可以通过表 1 提供的公式估算。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表辐射率的确定

**2.1.1 像元植被覆盖度 ( $P_v$ ) 的确定**  $NDVI$  的数值越大, 地表越接近完全植被覆盖;  $NDVI$  数值越小, 地表越接近于裸土。而不同比例的植被叶冠和裸土组成的混合像元构成了自然地表属性 (覃志豪等, 2004), 因此植被占混合像元的比例 (像元植被覆盖度  $P_v$ ) 可以由地表的  $NDVI$  通过式 (4) 求出。由植被的  $NDVI$  图像经  $ENVI$  中的波段计算器运算处理, 得到常州市的像元植被覆盖度 (图 2)。由图 2 可以看出, 常州市的北部和南部植被覆盖率高, 东、西部次之, 而城市中心地带的植被覆盖率较小。

**2.1.2 不同用地类型温度比率  $R_i$  的确定** 地表植被覆盖不同, 其温度比率也有差异, 地表温度比率相对于植被覆盖的曲线基本能够反映地表温度比率与像元内植被比例的关系。以 2.1.1 节得到的  $P_v$  图像为基础, 根据式 (6)、(7)、(8), 分别得到各地块植被温度比率、裸土温度比率以及建筑表面温度比率。

植被的温度比率:

$$R_v = 0.9332 + 0.0585P_v \quad (6)$$

裸土的温度比率:

$$R_s = 0.9902 + 0.1068P_v \quad (7)$$

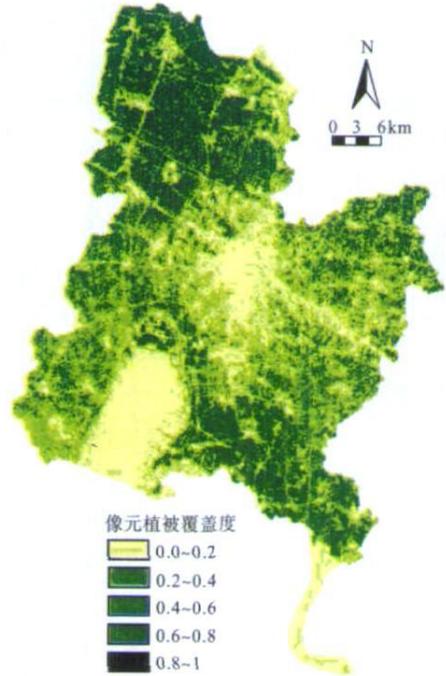


图 2 常州市像元植被覆盖度

Fig 2 Pixel vegetation coverage in Changzhou

建筑表面的温度比率:

$$R_m = 0.9886 + 0.1287P_v \quad (8)$$

**2.1.3 地表比辐射率的确定** 从 TM 影像的分辨率看来, 地表辐射率的差别主要由水面、城镇地表、自然地表 3 种用地类型的物质结构决定 (覃志豪等, 2004)。如图 3 所示, 城镇地表是不包括城市绿地在内的城市与农村的建设用地; 自然地表包括各种天然或人为形成的具有一定量植被覆盖的林地、农田等。针对 TM 的这种特性, 首先将遥感影像监督分类, 得到一幅由水面、自然地表与城镇地表组成的栅格图像, 结合, 利用式 (2)、(3) 分别计算自然地表和城镇地表的比辐射率 (图 4)。水面的比辐射率为  $0.995$ 。

### 2.2 卫星过境时大气参数的确定

**2.2.1 大气平均作用温度  $T_a$  的确定** 整个常州市区处于相同的大气控制之下, 可用相同的大气参数来计算。大气平均作用温度主要由 2 个因素决定: 大气剖面气温分布和大气状态 (覃志豪等, 2003)。通过近地表温度  $T_0$  与大气平均作用温度  $T_a$  的线性关系 (式 (5)), 可以直接计算大气平均作用温度 (此处借鉴美国 1976 年平均大气模型):

卫星过境时  $T_0 = 24^\circ C$ , 代入式 (5) 得到大气平均作用温度  $T_a = 287.43325 K$ 。

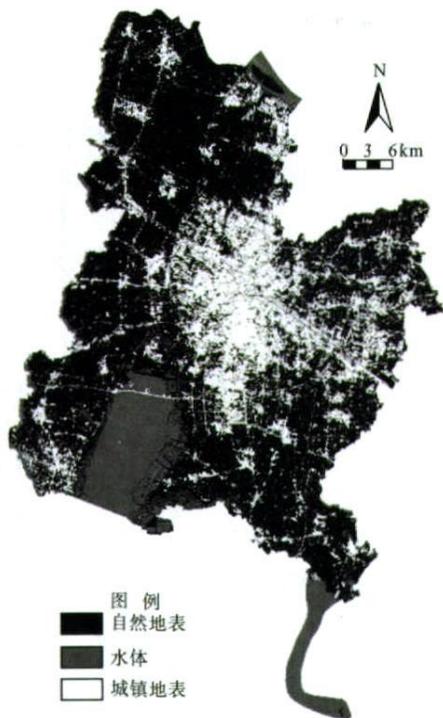


图3 常州市土地利用类型  
Fig.3 Land use of Changzhou City

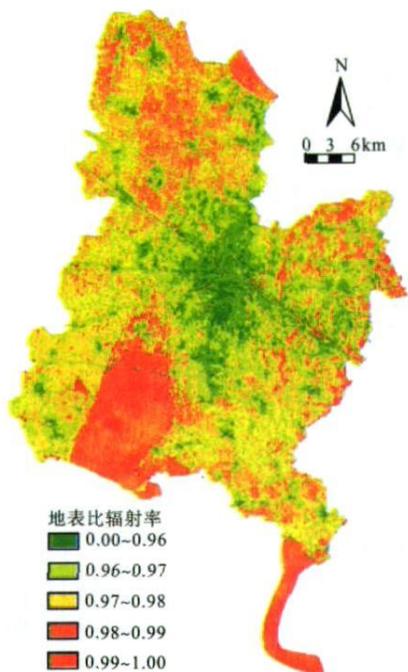


图4 常州市地表比辐射率  
Fig.4 Land surface emissivity ratio in Changzhou

2.2.2 大气透射率的确定 大气透射率在大气能量传导中作用极大(覃志豪等, 2003), 因此大气透射率是遥感反演地表温度的重要参数。大气透射率的变化主要取决于大气水分含量的变化, 可由大

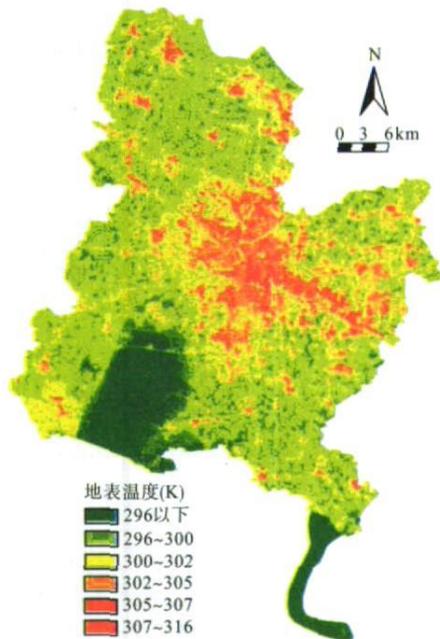


图5 常州市地表温度(K)  
Fig 5 Land surface temperature in Changzhou

气水分含量估测大气透射率。通过近地表的水分含量  $w(0)$  来确定大气总水分含量:

$$w = w(0) / R_w(0) \tag{9}$$

式中:  $w$  为大气的总水分含量,  $w(0)$  为近地表的水分含量,  $R_w(0)$  为地面附近的空气水分含量占大气水分总含量的比率(本文取美国 1976 年平均大气模型,  $R_w(0) = 0.402058$ )。

卫星过境时的相对湿度为 69%, 通过公式  $w_0 = RH \times F$  ( $RH$  为相对湿度,  $F = 21.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  为 24 °C 时饱和水蒸气密度) 转化为近地表的含水量  $w(0) = 7.452 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 代入式 (9) 得到大气的总水分含量  $w = w(0) / R_w(0) = 1.853 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。由表 (1), 得大气透射率  $\tau = 1.031412 - 0.11536v = 0.8176$

### 2.3 地表温度的计算

将以上步骤中计算得到的地表比辐射率、大气透射率、平均大气作用温度以及 TM 6 的亮度温度代入式 (1), 计算得出常州市地表温度(图 5)。

### 2.4 常州市热岛效应的强度

热岛效应强度是指城区温度与郊区温度的差异, 温差越大则热岛效应的强度越强。本实验采用城区平均地表温度与郊区平均地表温度的差值来衡量常州市的热岛效应强度。如图 1 所示, 分别统计城区与郊区的平均地表温度, 得到常州市地表温度的热岛强度为 3.81 K(表 2)。

表 2 主要地区地表温度属性与热岛强度 (K)  
Tab 2 Characteristics of LST and UHI intensity of main regions

地名	最低温度	最高温度	平均温度	热岛强度
城区	292	316	302.92	3.81
全市工业区	292	315	303.66	4.55
郊区	290	314	299.11	0
孟河镇	298	310	304.24	5.13
西夏墅镇	298	312	303.14	4.03
沿江化工区	296	312	302.99	3.88
奔牛镇	298	311	303.60	4.49
湟里镇	298	309	303.01	3.90
前黄镇	296	307	301.74	2.63
雪堰镇	298	309	304.22	5.11

## 2.5 常州市热岛效应的空间分布特征

表 2 为常州市热岛效应中心片区与各个组团的地表温度属性以及热岛强度。从表 2 可见,热岛效应的空间分布与城市的发展格局是一致的。由此可推断,城市化进程是形成热岛效应的主要原因。其作用原理基本可以归纳为以下几点:

1) 下垫面类型的改变导致城市热场发生变化。首先,城市化改变了原有的土地利用类型,同时也改变了地表的植被覆盖比例与比辐射率,这是导致热场变化的主要原因。其次,城市化过程中自然地表面转化为人工建筑地表,城市下垫面颜色较深,对太阳辐射的吸收率比郊区绿地大,加之其热容量小、导热率大,所以在相同的太阳辐射条件下,城市下垫面温度上升更多、更快。第三,城市参差不齐的建筑物,不仅使城市的墙壁与墙壁、墙壁与地面之间多次反复吸收热量,同时也阻碍了城区与郊区之间的空气流动。

2) 城市化造成人为热排放增加和大气污染。随着城市的快速发展,机动车辆、工厂车间、空调运转、居民烹饪及建筑物向外散发的热量可以形成明显的城市热岛效应 (Fan & Sailor, 2005)。人为热的排放往往伴随着大量煤灰、粉尘及各种污染气体,其中较多的是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ 、CFC 等温室气体,形成了覆盖在城市上空的“尘罩”与“气罩”,加重了城市热岛效应。

3) 城市规划的不合理性是导致热岛效应增强的原因之一。街道走向设计或几何形状不合理,密不通风,风速小热量不易散发,温室气体也难于迅速扩散,导致局部气温过高。常州的城市扩张首先沿着京杭大运河发展,随后向南北两翼扩展,虽然天然的河道和湿地为常州市缓解了热岛效应,但是在城市发展过程中没能在各组团之间建设有效的绿色隔离带来疏导和隔离热源,最终导致了热场的聚集效应。

## 2.6 城市工业用地的地表温度与城区地表温度

对城市工业用地的地表温度和城区的地表温度进行  $u$  检验,结果得到  $P < 0.01$ 。统计结果显示,城市工业用地的平均地表温度极显著高于城区 (温差 0.74 K)。由于工业区与城区的地表覆盖类似,其地表比辐射率与地表温度比率等指标处于相同水平,而在相同地表属性的基础上工业用地的地表平均温度极显著高于城区的现象主要是由工业厂房大量排放的人为热造成的。首先,工业区的能量、物质代谢强度高,利用效率低,导致了大量的能量以人为热的形式排放到大气当中,促成了较强热岛效应的形成;另外,企业经营者为了追求利润最大化将厂区范围内的每寸土地都加以利用,这直接导致了工业区范围内绿色植被的覆盖率较少、水面比例不足,进而增加了热岛效应强度。

## 3 讨论

### 3.1 热岛强度

本实验采用遥感解译的方法提取地表温度属性,并以郊区的地表温度平均值为参照,确定常州市中心片区、各组团以及工业区的热岛效应强度,有利于了解热岛效应的空间分布特征,为城市冷桥系统的规划奠定了一定的基础。

由于 Landsat 卫星过境时间为 9:58 此时地表接受太阳辐射的时间比较短,各种地物的温差还不是很显著,所以城乡温度相差不大,城市的热岛效应强度还是处于较低水平。另外,常州地处江南水乡,水网密布,这些交错的河流湖泊吸收了一定的热量并形成了城市的生态廊道,在一定程度上起到了减缓热岛强度的作用。在 14:00 左右常州市的地表温度升至最高,热岛效应强度也将随之增大,届时各地区的热岛效应强度可能会有所增大。

### 3.2 热岛效应的空间分布与城市化

城市化以经济发展为基础,通过人口增长和城市空间扩张实现 (黄金川和方创琳, 2003)。城市的空间扩张直接作用于自然生态系统,导致水、土壤、气候、生物和生物地球化学循环等生态服务主体受到不同程度的破坏 (王如松等, 2004),随之而来的则是城市生态系统对人类胁迫的响应,其中热岛效应是生态系统对城市化的响应之一。这主要是因为城市化带来的下垫面改变导致了地表植被覆盖减少、地表比辐射率升高和热容量降低,进而导致地表温度升高。季崇萍等 (2006)、肖容波等 (2007)、周红妹等 (2008) 对北京和上海的研究表明,城市扩展与热岛扩展趋势具有空间一致性。

在下垫面属性相同或类似的情况下,人为热的排放成为决定热岛强度的主导因子。胡远满等(2002)对沈阳市的热岛效应研究表明,工业用地的热岛强度高于其他用地类型。各种用地类型的热岛强度从高到低依次为:工业区、非工业建筑区、全市平均、非建成区、绿地、水域。杨英宝等(2006)对南京市热岛效应的空间分布的研究显示,南京市热岛效应的分布中心区集中在商业区、工业区以及居住用地、工业用地、商业用地和交通用地混杂分布的区域。由于工厂企业物质、能量代谢强度高、利用效率低以及低植被覆盖等特征,工业区的热岛强度显著高于城区的现象普遍存在。

### 3.3 城市冷桥系统的布局

城市冷桥系统由城市建成区外围的开敞空间(林地、农田、水域等)、城市风道和城市内部的公园、绿地、水系等生态基础设施构成。城市风道是指由城市道路、绿色廊道、水系等构成的有利于气体交换与污染物扩散的空气流动通道。城市冷桥系统的合理布局有利于城市内部污染物与热量的扩散,有利于引入城市周边洁净、低温的空气,从而达到降温排污的效果。王如松和徐洪喜(2004)以景观生态学理论为学科指导,对城市冷桥系统进行了初步研究。随后2005年,武汉市规划部门联合华中科技大学进行了“城市建筑规划布局与气候关系研究”,结果表明,武汉市的城市道路走向应与城市主导风向一致,以便让江风、湖风顺利进城,达到降温效果。同时划定大东湖、武湖等6大生态水系为城市“风源”。广州、西安等城市也在积极的规划城市冷桥系统以期达到降温的效果。

### 3.4 不足之处

虽然TM数据相对于MODIS数据、ASTER数据已经是高分辨率影像,但是90m的分辨率仍不足以反映城市热效应的细部纹理,另外TM数据时间连续性差的特点使得利用TM数据进行热岛效应时空特征分析存在一定的难度。加之遥感数据的空间误差,遥感方法监测城市热岛效应可能影响实验数据的准确性。另外,本次研究虽然得出了常州热岛效应的空间分布特征,但没有对城市冷桥系统的具体布局进行深入研究。因此,在今后的工作中应尽量减少实验中的误差,并针对城市冷桥系统的规划提出可行性建议。

### 参考文献

陈云浩,李京,李晓兵. 2003. 城市空间热环境. 北京: 科学出版社.  
范天锡,潘钟跃. 1987. 北京地区城市热岛特征的卫星遥

- 感. 气象, 13(10): 29-32  
 胡华浪,陈云浩,宫阿都. 2005. 城市热岛的遥感研究进展. 国土资源遥感, (3): 5-13  
 胡远满,徐崇刚,布仁仓,等. 2002. RS与GIS在城市热岛效应研究中的应用. 环境保护科学, 28(2): 1-3  
 黄金川,方创琳. 2003. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. 地理研究, 22(2): 211-220  
 季崇萍,刘伟东,轩春怡. 2006. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. 地球物理学报, 49(1): 69-77  
 金苏艺,江洪. 2008. 基于遥感手段的城市热岛效应研究. 安徽农业科学, 36(5): 2141-2142, 2146  
 彭少麟,周凯,叶有华,等. 2005. 城市热岛效应研究进展. 生态环境, 14(4): 574-579  
 覃志豪, LiW J Zhang MH, 等. 2003. 单窗算法的大气参数估计方法. 国土资源遥感, (2): 37-43  
 覃志豪,李文娟,徐斌,等. 2004. 陆地卫星TM 6波段范围内地表比辐射率的估计. 国土资源遥感, (3): 28-41  
 王如松,胡聘,王祥荣,等. 2004. 城市生态服务. 北京: 气象出版社.  
 王如松,徐洪喜. 2004. 扬州生态市建设规划方法研究. 北京: 中国科学技术出版社.  
 肖容波,欧阳志云,李伟峰,等. 2007. 城市热岛时空特征及其影响因素. 气象科学, 27(2): 230-236  
 杨英宝,苏伟忠,江南. 2006. 南京市热岛效应时空特征的遥感分析. 遥感技术与应用, 21(6): 488-492  
 周红妹,高阳,葛伟强,等. 2008. 城市扩展与热岛空间分布变化关系研究——以上海市为例. 生态环境, 17(1): 163-168  
 周红妹,周成虎,葛伟强. 2001. 基于遥感和GIS的城市热场分布规律研究. 地理学报, 56(2): 189-197  
 Fan HL, Sailor D J. 2005. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: A comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment*, 39: 73-84  
 Galb KP, McNab AL, Karl TR, et al. 1993a. The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 2223-2230  
 Galb KP, McNab AL, Karl TR, et al. 1993b. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *Journal of Applied Meteorology*, 32: 899-908  
 Howard L. 1833. Climate of London Deduced from Meteorological Observations (3rd ed.). London: Harvey and Dolton Press  
 Manley G. 1958. On the frequency of snow fall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84: 70-72  
 Qin Z, Karnieli A. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 3719-3746  
 Rao PK. 1972. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53: 647-648  
 Turner II BL, Skole D, Sanderson S et al. 1995. Land-use and land-cover change science/research plan. CBP Report No. 35 and HDP Report No. 7  
 Weng Q. 2001. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 1999-2014  
 Weng Q. 2003. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69: 555-566

作者简介 黄一凡,男,1984年生,硕士研究生。主要从事城市热岛效应、城市人口承载力以及生态城市建设研究。  
E-mail huangyifan2005@hotmail.com  
责任编辑 刘丽娟