

杨沈斌,赵小艳,申双和,等. 基于 Landsat TM/ETM+ 数据的北京城市热岛季节特征研究[J]. 大气科学学报,2010,33(4):427-435.
Yang Shen-bin,Zhao Xiao-yan,Shen Shuang-he, et al. Characteristics of urban heat island seasonal pattern in Beijing based on Landsat TM/ETM+ imagery[J]. Trans Atmos Sci,2010,33(4):427-435.

基于 Landsat TM/ETM+ 数据的北京城市热岛季节特征研究

杨沈斌^{1,2},赵小艳²,申双和^{1,2},海玉龙^{2,3},方永侠²

(1. 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,江苏 南京 210044;
2. 南京信息工程大学 应用气象学院,江苏 南京 210044;3. 北京市气象局,北京 100089)

摘要:利用1988—2006年20景Landsat TM和ETM+数据分析了北京市城市热岛的季节变化特征。通过反演地表温度,建立统一的城市和农村区域,计算了城市热岛强度,并采用多项式拟合获取了城市热岛强度的季节变化曲线;同时,分析了热岛强度季节特征与气候因子的关系。另外利用4景2005—2006年不同季节Landsat TM影像,分析了不同季节城市热岛的空间变化特征,并选择穿越北京城区的两条不同方向剖面(SE-NW和SW-NE),分析了沿剖面方向城市热岛与地表类型的关系。结果显示,北京城市热岛具有明显的季节变化特征,与总云量的季节变化关系显著。最大热岛强度出现在夏季,呈现片状发散和零星热岛并存的空间分布特征。冬季为冷岛特征,其空间分布与夏季热岛一致。春秋两季热岛强度最小,但春季热岛空间差异较大。在相同季节,城市热岛强度和空间尺度在不同剖面方向具有明显的差异,这与不同地类的空间分布有关。

关键词:城市热岛;热红外遥感;土地利用

中图分类号:TP79 文献标识码:A 文章编号:1674-7097(2010)04-0427-09

Characteristics of Urban Heat Island Seasonal Pattern in Beijing Based on Landsat TM/ETM+ Imagery

YANG Shen-bin^{1,2}, ZHAO Xiao-yan², SHEN Shuang-he^{1,2}, HAI Yu-long^{2,3}, FANG Yong-xia²

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing 210044, China;
2. School of Applied Meteorology, NUIST, Nanjing 210044, China;
3. Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China)

Abstract: Twenty Landsat TM and ETM+ images between 1988 and 2006 were used to analyze the characteristics of Urban Heat Island (UHI) seasonal pattern in Beijing. Firstly, land surface temperature (LST) was retrieved from each image and vector data corresponding to urban and rural areas were obtained by using ancillary data. Then, the UHI intensity was calculated according to the difference of average LST between urban and rural areas, based on which polynomial was fitted to retrieve the UHI seasonal pattern. The relationship between the seasonal variation of UHI and climatic factors was also studied. In addition, four scenes of Landsat TM images between 2005 and 2006 were selected to analyze the spatial pattern of UHI in different seasons, with two profiles (SE-NW and SW-NE) across the city of Beijing to study the relationship between land use types and UHI. The results show that the UHI in Beijing displays remarkable differences in seasonal patterns and has obvious relationship with the amount of clouds. The UHI intensity reaches its maximum value in summer and falls to the minimum value in both spring and autumn seasons. However, the UHI intensity is negative in winter, which is commonly re-

收稿日期:2009-06-22; 改回日期:2009-11-21

基金项目:2007年城市气象科学研究基金(UMRF200703); 国家科技支撑计划课题(2007BAC29B02); 南京信息工程大学科研启动基金(S8108176001); 2009年农业气象重点实验室开放基金项目(AMF200902)

作者简介:杨沈斌(1981—),男,江苏大丰人,博士,讲师,研究方向为应用气象、遥感应用,jaasyang@163.com.

ferred to as the Urban Cool Island (UCI). Both the UHI in summer and UCI in winter show a contiguous and scattered spatial distribution pattern, which does not appear in spring and autumn. It is also concluded that the intensity and size of UHI vary in different profiles because of different land use and land cover types.

Key words: urban heat island; thermal infrared range remote sensing; land use and land cover type

0 引言

快速的城市发展改变了原先土地利用状况,使大量植被消失,引起了局地气候环境的变化^[1]。其中,城市热环境的变化显得尤为突出。由此产生的城市与乡村温度差异被称为城市热岛现象^[2]。城市热岛能够恶化人类生存环境,增加能源耗损,并加剧空气污染^[3]。在当今全球气候变暖的背景下,城市热岛问题已引起广泛关注。

城市热岛研究通常采用两种途径:一是利用气象站点的观测数据分析城市和农村地区的空气温度差异^[4-7];另一种是利用卫星遥感获取的地表热场分布数据分析城市和农村地表温度的差异^[8-11]。气象观测数据具有连续性,能够提供不同时间尺度的温度观测数据,有利于分析城市热岛与气候环境、气候变化的关系^[12-13]。但观测站点的空间分布具有一定的局限性,不利于分析城市热场的空间分布特征。然而,卫星遥感获取的地表热辐射数据能够提供大尺度范围的地表温度空间变化信息,适用于分

析不同空间分辨率下的城市热场空间分布特征^[11,14]。但地表温度的遥测时常受到云雾天气的影响,使数据源很难保障,不利于分析随季节、年份变化的城市热岛特征^[15]。

因此,本文选择北京市作为研究区,通过收集 1988—2006 年 20 景 Landsat TM 和 ETM+ 影像数据,分析北京市城市热岛的季节变化特征。同时,为了减少因城市发展带来较大土地利用变化的影响,选择其中 2005—2006 年 4 景影像分析了不同季节城市热岛的空间分布特征,以及与不同地表类型的关系。

1 研究区概况

北京市位于中国华北平原的西北边缘,背靠太行山余脉和燕山山脉,面对辽阔的华北平原。北京市是中国的政治、文化和经济中心,面积约 16 800 km²,总人口超过 1 650 万,是仅次于上海的中国第 2 大城市,包含 16 区、2 县(图 1)。北京市的气候属于温带季风气候,四季分明,夏季高温多雨,冬季寒

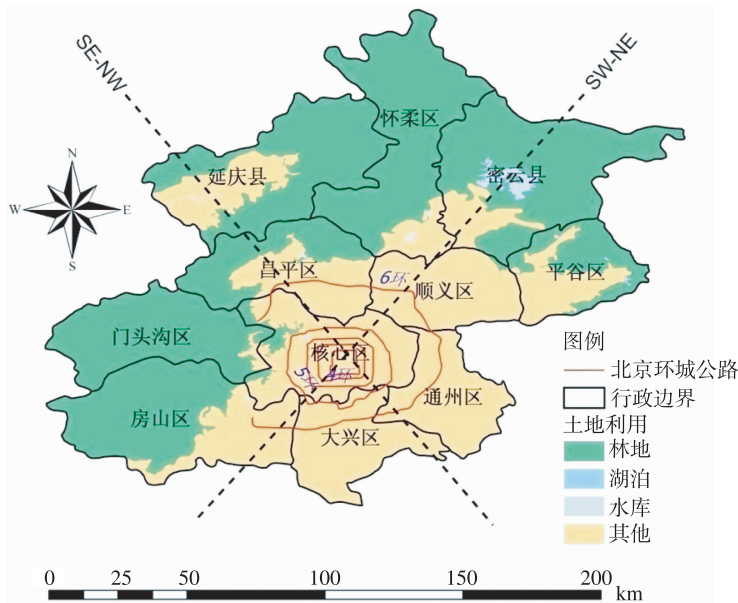


图 1 研究区概况(图中“核心区”代表发展最快的几个行政地区,包括西城区、东城区、玄武区、崇文区、石景山区、海淀区、朝阳区和丰台区;SW-NE 和 SE-NW 为穿越北京市区的剖面线)

Fig. 1 A map of the area in the study with SW-NE and SE-NW profiles (transaction lines). Key Urban District (KUD) represents several centralized fast-developing districts, namely Xicheng, Dongcheng, Xuanwu, Chongwen, Shijingshan, Haidian, Chaoyang and Fengtai

冷干燥,年平均气温为 $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月(1月)平均气温为 $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,最热月(7月)平均气温为 $25.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着气候变暖,北京近 40 a 的气温增温率接近 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ^[16]。

在改革开放(1978年)后,北京经历了快速的城市发展。随着多条环城公路的建设(图1),北京市区的发展呈现环状发展模式,侵占了周边大量的农田和林地。根据统计,北京市在1980年、1990年和2000年的农田面积占总面积分别为37%、35%和31%^[17]。由于城市化进程加速,具有弱透水性质的混凝土、柏油等城市地表介质迅速替代了原先的植被或土壤,使得城市与农村的温度差异逐渐增大。宋艳玲和张尚印^[18]利用气象数据分析了近40 a 北京城市热岛发展,发现1978—2000年北京市区与郊区温差达到 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}$,比20世纪60年代的温差高出约 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时还发现,1961—2000年间冬季市区与郊区温差最大,约 $1.11\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季和春季最小,约 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。类似的报道还见于郑祚芳等^[19]和 Liu 等^[20]。而在基于陆面温度的城市热岛方面,王建凯等^[9]和 Tran 等^[10]均使用 MODIS 地表温度产品分析了北京热岛强度的变化,发现最大热岛强度在夏季出现,范围在 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,而冬季为冷岛,即农村陆面温度高于城区,强度范围在 $1.5\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;Zhang 等^[21]利用 MODIS 数据,分析了北京城市热岛日变化和季节变化特征,结果显示夜间城市热岛比白天热岛效应更加明显,与城市和农村的陆面环境差异有着密切关系。然而,由于研究方法、数据来源和研究区域选择的差异,北京城市热岛强度的分析结果不同。例如于淑秋等^[22]利用气温资料得出,

北京热岛强度以平均 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 的速度增加,也有研究认为增加速度为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ^[23] 和 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ^[16];而 Liu 等^[20]根据气象资料发现北京城市热岛效应最强出现在冬季,最弱出现在夏季。

2 资料与方法

2.1 影像数据

本文共获取了1988—2006年20景Landsat卫星数据,其中6景为Landsat TM数据,14景为Landsat ETM+数据,如表1所示。影像数据均经过精确地理校正,并具有相同的投影坐标系(地图投影:UTM;地带: 50°N ;基准面:WGS-84),其中波段1~5和7的空间分辨率为30 m,Landsat TM第6波段(热红外波段)空间分辨率为120 m,ETM+第6波段为60 m。

获取了1992—2003年DMSP/OLS夜间灯光平均强度数据产品(DMSP/OLS nighttime lights data),分辨率为1 km,像元值在0到63之间。其中,像元值越大,代表城市化水平越高,而像元值越低,代表所处区域主要为农村^[24-25];当像元值为0时,则主要反映林地或湖泊区域。辅助数据还包括北京市区矢量边界(<http://sedac.ciesin.org/china/econ/ybook/ybk90sources.html>),1:100 000北京市2004年土地利用专题图、SRTM数字高程(DEM)数据(90 m分辨率)和1980—2006年社会和经济统计数据。另外,还获取了1977—2006年北京市20个常规气象地面观测站资料,包括最高温度、最低温度、降水、风速和云量等。

表1 获取的 Landsat TM/ETM+ 影像数据

Table 1 Landsat TM/ETM+ images

获取时间	传感器	(云量,质量)	获取时间	传感器	(云量,质量)
1988-12-25 ¹⁾	TM 5	(0%, 9)	2002-03-19 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)
1995-04-09 ¹⁾	TM 5	(0%, 9)	2002-05-22 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)
1999-07-01 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)	2002-10-13 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)
1999-08-02 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)	2002-11-14 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)
2000-04-30 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)	2003-01-17 ¹⁾	ETM+	(1%, 9)
2000-05-16 ¹⁾	ETM+	(5%, 9)	2003-02-18 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)
2001-05-19 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)	2005-07-25	TM 5	(0%, 9)
2001-06-04 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)	2005-11-14	TM 5	(0%, 9)
2001-09-24 ¹⁾	ETM+	(10%, 9)	2006-04-07	TM 5	(0%, 9)
2002-02-15 ¹⁾	ETM+	(0%, 9)	2006-12-03	TM 5	(0%, 9)

注:1)从 <http://glovis.usgs.gov/> 免费获取的 Landsat 数据。

2.2 地表温度反演

分别利用 Landsat TM 热红外波段和 Landsat ETM+ 低通道热红外波段 (10.40 ~ 12.50 μm) 反演地表温度。首先将热红外波段像元强度值 D_n 转变为绝对热辐射值

$$L_\lambda = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{255} \times D_n + L_{\min} \quad (1)$$

式中: L_λ 为地物在光谱 λ (μm) 处的热辐射值 ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}$), 文中 λ 取波段中间值 11.5 μm ; L_{\max} 和 L_{\min} 分别对应 Landsat TM 和 Landsat ETM+ 热红外波段最高和最低热辐射值 ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}$), 取值见表 2。假设统一的地表发射率, 将计算得出的热辐射值转换成传感器端有效亮温 T_B (K):

$$T_B = \frac{k_2}{\ln\left[\frac{k_1}{L_\lambda} + 1\right]} \quad (2)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为定标系数, 针对不同传感器取值见表 2。最后, 针对不同地表类型将获取的相对黑体的辐射亮温值 T_B 转换为地表温度值 S_t ($^{\circ}\text{C}$):

$$S_t = \frac{T_B}{1 + \left[\lambda \times \frac{T_B}{\rho}\right] \ln \varepsilon} - 273.15 \quad (3)$$

式中: $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$; ε 为地表发射率。参考文献[26], 选用植被指数 NDVI 建立决定不同地表类型 ε 值的判别条件, 即

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{soil}}, \text{ 当 } V_{\text{NDVI}} < 0.2; \quad (4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon, \text{ 当 } V_{\text{NDVI}} > 0.5; \quad (5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{veg}} P_v + \varepsilon_{\text{soil}} (1 - P_v), \text{ 当 } 0.2 \leq V_{\text{NDVI}} \leq 0.5 \quad (6)$$

式中: $\varepsilon_{\text{soil}}$ 为土壤发射率, 取 0.92; ε_{veg} 为植被发射率, 取 0.95; P_v 为植被覆盖率, 由公式(7)获得:

$$P_v = \left[\frac{V_{\text{NDVI}} - V_{\text{NDVI}_{\min}}}{V_{\text{NDVI}_{\max}} - V_{\text{NDVI}_{\min}}} \right]^2 \quad (7)$$

其中: $V_{\text{NDVI}_{\min}} = 0.2$; $V_{\text{NDVI}_{\max}} = 0.5$ 。

表 2 地表温度反演中参数值设定

Table 2 Parameter values defined in land surface temperature retrieving

参数	Landsat TM 5	Landsat ETM+
$L_{\max}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m})$	0.124	0
$L_{\min}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m})$	1.530	1.704
$k_1/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m})$	607.76	666.09
k_2/K	1 260.56	1 282.71

2.3 城市热岛强度计算

城市热岛强度定义为城市区域与农村地区的温度差值^[2]。因此, 城市和农村区域的选择成为分析热岛强度大小的一个关键因素。王建凯等^[9]曾选择不同乡村区域比较城市热岛强度的差异。结果显示, 选择不同乡村区域, 不仅城市热岛强度有较大变化, 而且热岛强度的季节变化也有较大差异。因此, 选择统一、具有代表性的城市和农村区域有利于本文中多时相城市热岛强度的对比和分析。

针对上述问题, 本文忽略城市化进程中新城对城市热岛的影响, 并假设农田的减少仅在早期农田区域上产生。因此, 选择 1992 年 DMSP/OLS 夜间灯光数据提取北京市城市区域; 选用 2003 年 DMSP/OLS 夜间灯光数据, 结合 DEM 数据和 2004 年土地利用数据, 提取农村区域。随后, 将提取的城市区域和农村区域转换为矢量边界数据, 叠加在由 Landsat TM 和 ETM+ 热红外波段反演得到的地表温度影像上, 计算了对应时相上城市区域和农村区域的平均地表温度, 分别记作 T_u 和 T_r 。因此, 城市热岛强度为 $I_{\text{UHI}} = T_u - T_r$ 。提取城市和农村区域的具体步骤如下:

(1) 提取水体区域。从 2004 年土地利用图中提取水体区域, 建立矢量边界数据, 用于从城市和农村区域中剔除水体。

(2) 提取城市区域。由于缺乏多年的北京土地利用数据, 本文采用经验阈值确定城市区域。参考文献[27]中提取的北京市 1992 年城区面积, 采用试错法反推了基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的经验阈值。最后确定阈值为 38, 即选择 1992 年 DMSP/OLS 夜间灯光数据像元值介于 38 和 63 (包括 38 和 63) 之间的区域为城市区域。在 ArcGIS 9.0 软件中使用 Erase 工具将水体区域从城市区域中剔除, 最终获得城市区域矢量数据, 如图 2 所示。

(3) 提取农村区域。同样采用经验阈值确定研究区农村区域。首先将 DEM 数据重采样为 1 km 分辨率, 并与 2003 年 DMSP/OLS 夜间灯光数据叠加。从 2004 年土地利用图中选择耕地, 对应到 DMSP/OLS 夜间灯光数据中。由于分辨率较低和混合像元问题, 发现耕地区域在灯光数据中的值域为 5 ~ 11。其中, 离城市区域越近, 耕地区域的灯光数值越大。从灯光数据中提取出数值介于 5 和 11 之间的临时区域。尽管大多数林地在灯光数据中的强度值为 0, 但为了去除零散林地, 将临时区域中 DEM 值大于 100 m 的区域剔除。值得注意的是, 由

于整个延庆县的平均海拔在450 m以上,因此,对延庆县单独提取了农村区域,灯光数值同样选择在5和11之间。将提取的农村区域转为矢量边界数据,同样运用Erase工具将水体从农村区域中剔除,最终获得农村区域矢量数据,如图2所示。

便于对北京市各区县城市区域和农村区域地表温度和城市热岛强度的统计分析,利用各区县边界矢量数据,在ArcGIS 9.0软件中运用工具Intersect对获取的城市区域和农村区域进行切割。

2.4 不同季节城市热岛的空间分析

从获取影像中选择2005—2006年4景Landsat TM影像,利用反演得到的地表温度分析了城市热岛在不同季节的空间分布特征。4景影像分别处在春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月至次年2月)4个季节。另外,选择穿越北京市核心区与城郊的两条不同方向剖面,如图1所示。剖面分别为西南—东北和东南—西北两个方向,标记为SW-NE和SE-NW。剖面经过的地类有林地、湖泊、农田和城镇等。将剖面叠加在4景影像上,提取了沿线地表温度,制作地表温度变化曲线,并与2004年土地利用数据对应,分析了地表温度与不同地类的关系。

3 结果与讨论

3.1 城市热岛强度的季节特征

将多年不同时相的北京城市热岛强度计算值按

月份组织起来,并取对应月份的平均值进行多项式拟合,描绘了北京市城市热岛强度的季节变化特征,如图3所示。从图中可以看出,北京市的最大城市热岛强度出现在夏季,平均强度值在 $4.54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,其中,在1999年8月2日达到最大值 $5.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。北京市城市热岛强度在冬季均为负值,平均强度为 $-2.03\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中,最低值 $-3.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出现在2002年2月15日。在春、秋两季,北京市城市热岛强度分别呈现出快速增加和迅速减小的变化趋势,其变化幅度在春季达到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,在秋季稍小,约为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

对于同一月份,不同年份的城市热岛强度存在一定的差异。其中,2006年4月7日与1995年4月9日的热岛强度差异最大达到 $1.90\text{ }^{\circ}\text{C}$;其次为2003年2月18日和2002年2月15日的 $0.83\text{ }^{\circ}\text{C}$;最小差异出现在2005年11月14日和2002年11月14日之间,约为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而夏季各时相城市热岛强度差异平均在 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。由于受到影像数据的限制,从上述数值看,城市热岛强度在不同年份间未呈现出明显的变化特征。

城市热岛强度的季节性变化特征与土地利用状况、地物热特性、季节性地表植被覆盖,以及气候因子等有着密切的联系^[3,5]。在与气候因子的关系方面,图4给出了城市热岛强度拟合曲线与各月份平均总云量、风速的相关关系。经过统计,城市热岛强度的季节变化与总云量具有高度显著的相关关系(确定系数为0.77, P 值小于0.001),说明云量作为

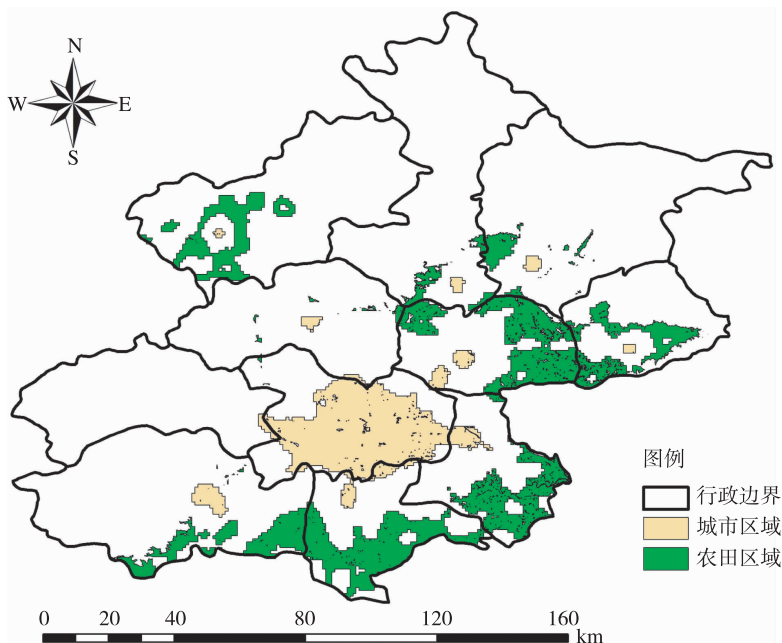


图2 用于城市热岛分析的城市和农田区域

Fig.2 The urban area and agricultural land used for urban heat island(UHI) analysis

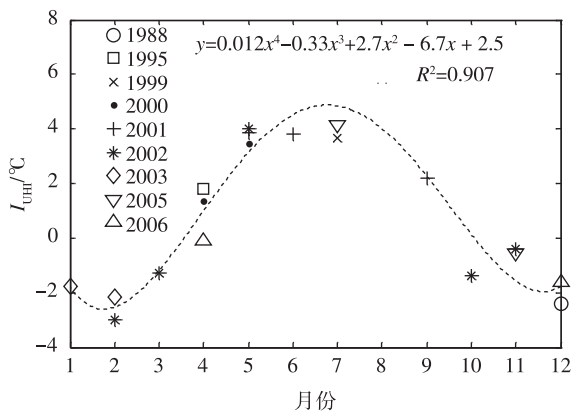


图3 北京市城市热岛的季节特征(虚线为城市热岛强度的拟合曲线)

Fig. 3 Seasonal pattern of urban heat island in Beijing (Dashed line indicates the curve fitted line of the UHI intensity)

一个气候因子对城市热岛形成有着重要的作用。例如,夏季云量的增多不利于城市区域的地表热释放,使更多的能量用来加热大气和地表。另外,具有弱透水性的城市地表和农村区域的土壤具有不同的热特性(如热惯量),使得城市地表在夏季的增温率要高于农村土壤,而农田又具有较高的植被覆盖度和土壤含水量,通过潜热蒸发释放了大量存储在土壤和冠层中的热量,扩大了城区与农村地表温度的差异。与此相反,冬季平均云量最少,城市区域地表热释放效率提高,然而此时农村区域地面裸露,土壤较为干燥,蒸发量减少,其升温速率明显高于城区地表,因此,形成了城区地表温度低于农村区域的现象。但是,从城市热岛强度的绝对值看,冬季城区和农村的地表温度差异明显低于夏季两者的差异。

从图4可以看出,城市热岛强度的季节变化与风速不具有显著的相关关系(P 值大于0.05)。其中,平均风速最大出现在春季的4月,而平均风速最小出现在夏季8月。有报道^[28]认为,在稳定的气象条件下,城市热岛强度最大,在有风的条件下强度最小。其中,王喜全等^[29]认为,风速对城市热岛形成具有决定性的影响,特别当风速为3级(3.4~5.4 m/s)以上时,北京的城市热岛基本上消失。而在冬季,城市热岛强度经常出现较大的波动性,与城郊地面风向突变和风速的阵性有密切联系。另外,城市内风场变化受到多种因素的影响,风速、风向可能表现出一些不确定性和不稳定性,是造成城市热岛强度季节变化与风速不具有显著相关关系的另一个重要原因^[21]。

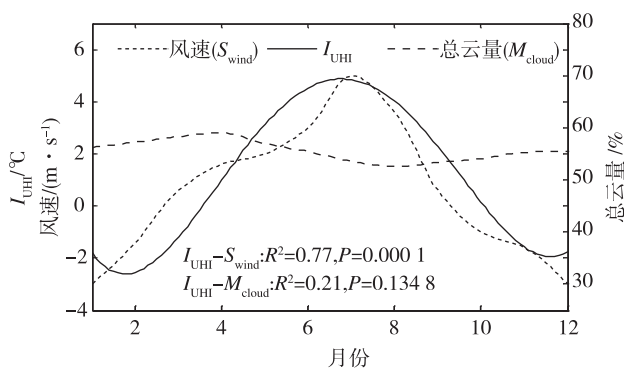


图4 城市热岛强度与总云量、平均风速的季节变化关系

Fig. 4 Relationship between seasonal variations of urban heat island intensity and overall cloud cover as well as average wind speed

3.2 不同季节城市热岛强度的空间变化

图5显示了2005—2006年不同季节北京地表温度的空间分布。从图中可以看出,不同季节的地表温度呈现出不同的分布特征。图5a为夏季地表温度的分布。从图中发现,城市区域的温度明显高于周边林地和农村区域,呈现出片状发散和零星热岛共存的空间分布特征。其中,最大热岛区域包裹核心区,以及位于相邻几个行政区的部分区域。一些工矿用地呈现出小范围片状的热岛特征,如房山区的中部区域;同样,在顺义区的国际首都机场位置也具有明显的片状热岛特征。零星热岛则主要分布在农村区域,与村庄位置吻合。

图5b和5c分别对应秋季和春季的热岛分布。从图中看出,林地在两季节均显示出较低的地表温度,呈现较深的蓝色。秋季城市区域的温度与周边农村区域地表温度相当。但由于影像时相处在晚秋,对于该时期的北京,地表温度开始呈现出轻微的冷岛现象。在图5c中,春季农村区域的地表温度区域性差异较大。其中,北京市东部几个区县的农村区域显示出较高的地表温度。城市区域也显示出较大的温度差异。其中,核心区的地表温度差异超过 9°C 。根据分析,农村区域较大的温度差异主要是由于春季农业生产活动的地区性差异较大。而城市区域的温度差异主要是在逐渐增暖的季节里由地表热特性(柏油、混凝土、砖瓦等)决定的地表增温差异所致。

图5d显示了冬季城市热岛的分布特征。昌平区和顺义区农村区域的地表温度较高,平均达到 3.26°C ,而核心区地表温度平均值为 -0.21°C ,呈现出较强的冷岛特征。与夏季城市热岛的空间分布

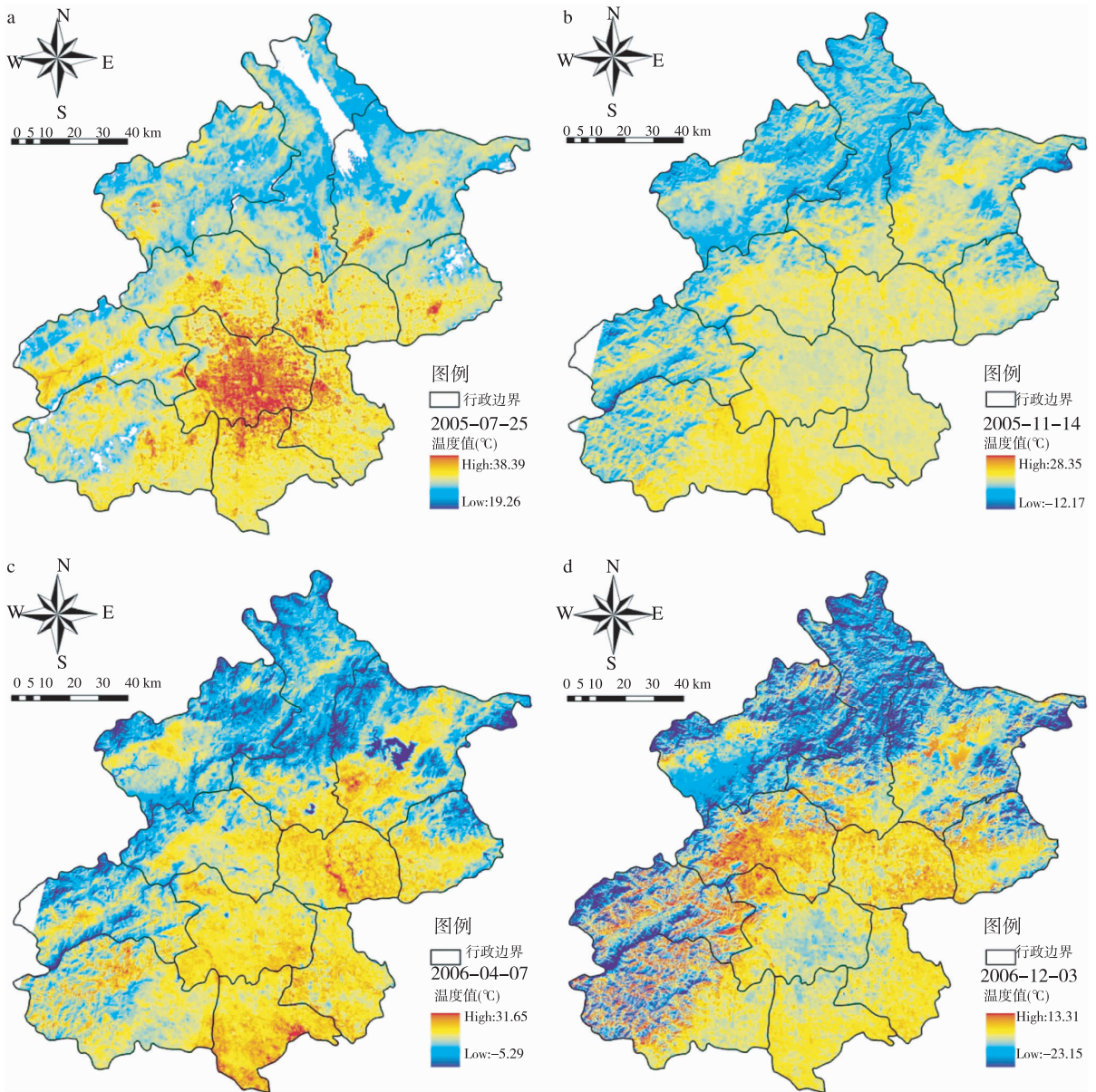


图 5 地表温度在不同季节的空间分布 a. 2005 年夏季; b. 2005 年秋季; c. 2006 年春季; d. 2006 年冬季

Fig. 5 Spatial distribution of land surface temperature in (a) summer of 2005, (b) autumn of 2005, (c) spring of 2006 and (d) winter of 2006

特征相比,北京冬季冷岛空间分布同样存在片状和零星冷岛共存的现象,且空间位置大体一致。

3.3 不同季节城市热岛与地表类型的关系

图 6 显示了在不同季节沿剖面方向地表温度的空间变化及其与地表类型的关系。从图 6a 和 6b 可以看出,沿剖面方向,夏季和冬季的地表温度起伏较大,城市区域与周边农村温度差异明显。例如,在城市化度最高的核心区,地表温度剖面在夏季出现明显突起,而在冬季出现一定的凹陷。城镇在夏季通常具有最高的地表温度,其次是裸地、农田和林地,水体则温度最低。在冬季,城市区域温度普遍低于

周边的农田。林地由于山体阴阳面差异,产生较大的温度波动。类似的现象也见于春秋两季(图 6c 和 6d)。例如,延庆县和密云县林地的温度变化远远大于城镇和农田。另外,在春秋两季,城市区域与周边农村区域的地表温度起伏平缓,差异最小,说明该时期城市热岛现象不够明显。

在相同季节,地表温度沿不同剖面方向呈现出不同的空间变化,使城市热岛的强度和尺度在不同方向上也产生一定的差异。这主要与不同地表类型的空间分布有关。例如,沿 SE-NW 剖面,冬季昌平区出现了大片裸地区域,加剧了昌平区城镇与周边

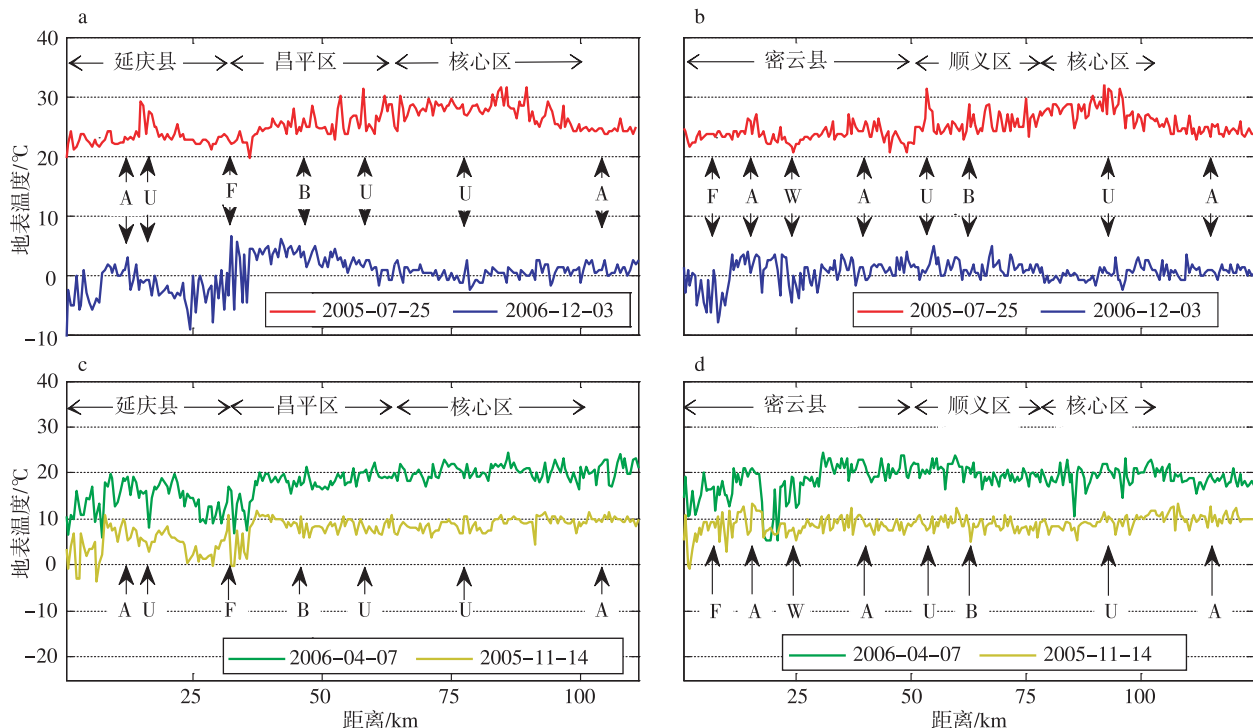


图 6 沿不同剖线的地表温度变化(A、F、B、U、W 分别代表农田、林地、裸地、城镇、水域) a、c. 沿剖面 SE-NW; b、d. 沿剖面 SW-NE

Fig. 6 Variation of land surface temperature along different profiles (A: agricultural land; F: forest land; B: barren land; U: urban area; W: waters). (a) and (c) along the SE-NW profile; (b) and (d) along the SW-NE profile

地区的温度差异;而延庆县城包围在大片林地和农田中,在夏季显示出明显的小区域热岛特征。与此相比,沿 SW-NE 剖面方向,由于分布了较多的林地、水体、和农田,冬季冷岛的尺度和强度要小的多,而且夏季热岛也主要显现在顺义区和核心区范围。

4 结论

本文利用 20 景 Landsat TM 和 ETM+ 影像分析了北京市城市热岛的季节变化特征。通过反演地表温度,选择统一、具有代表性的城市和农村区域,计算了多年不同季节的城市热岛强度,并利用多项式拟合获取了城市热岛强度的季节变化曲线。结果显示,北京市城市热岛强度具有明显的季节变化特征,最大热岛强度出现在夏季,平均强度超过 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;春秋两季城市热岛特征不够明显,强度最小,而冬季为明显的冷岛特征,最大强度低于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

北京城市热岛的季节特征受到多种因素的影响,如季节性地表植被覆盖、地表热特性、土地利用状况以及气候因子等。本文利用 1977—2006 年气候数据分析了城市热岛季节特征与总云量、平均风速的关系。结果显示,热岛强度与季节性总云量变化有着显著的相关关系,而与平均风速的季节变化

关系不够显著,说明云量作为一个气候因子对城市热岛形成有着重要的作用。

最后,本文选择 4 景 2005—2006 年不同季节的 Landsat TM 影像,探讨了不同季节城市热岛的空间变化特征。同时选择穿越北京核心区和城郊不同方向的两条剖面(SE-NW 和 SW-NE 剖面),分析了热岛空间变化与地表类型的关系。结果显示,北京市城市热岛在夏季呈现出片状发散和零星热岛共存的空间分布特征,其中最大热岛区域包裹核心区和周边的部分地区,零星热岛主要对应村庄位置。冬季的城市冷岛也具有相似的空间分布特征。然而,在深秋季节,北京地表已经出现轻微的冷岛特性。春季的城市热岛出现较大的空间差异,这主要与春季农业生产活动的地区性差异较大,以及城市区域地表热特性差异有关。在相同季节下,沿不同剖面方向,城市热岛的强度与空间尺度随空间变化而变化,这主要与不同地类的空间分布有关。

然而,值得注意的是,20 景 Landsat TM 和 ETM+ 影像均是在白天获取。因此,上述研究结论主要反映影像获取时段的城市热岛特征,与通过热红外遥感在夜间观测到的城市热岛特征具有明显差异^[9,21]。由此可见,城市热岛现象是复杂多变的,将

地面观测资料与卫星遥感资料结合起来分析城市热岛特征、探讨城市热岛效应与气候变化的关系是今后深入研究的重要方法。

参考文献:

- [1] 周淑贞, 束炯. 城市气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [2] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1982, 108(455): 1-24.
- [3] Rizwan A M, Dennis Y C L, Liu C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island [J]. *J Environ Sci*, 2008, 20: 120-128.
- [4] Fast J D, Torcolini J C, Redman R. Pseudovertical temperature profiles and the urban heat island measured by a temperature data-logger network in Phoenix, Arizona [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 44(1): 3-13.
- [5] Cynthia R, William D S, Lily P, et al. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey [J]. *Environ Hazards*, 2005, 6: 51-62.
- [6] 李兴荣, 胡非, 舒文军. 北京春季城市热岛特征及强热岛影响因素[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(1): 129-134.
- [7] Morris C J G, Simmonds I, Plummer N. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city [J]. *J Appl Meteor*, 2001, 40(2): 169-182.
- [8] Gallo K P, Mcnab A L, Karl T R, et al. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect [J]. *J Appl Meteor*, 1993, 32(5): 899-908.
- [9] 王建凯, 王开存, 王普才. 基于 MODIS 地表温度产品的北京城市热岛(冷岛)强度分析[J]. *遥感学报*, 2007, 11(3): 330-339.
- [10] Tran H, Daisuke U, Shiro O, et al. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities [J]. *Int J Appl Earth Observ Geoinform*, 2006, 8(1): 34-48.
- [11] Streutker D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas [J]. *Remote Sens Environ*, 2003, 85(3): 282-289.
- [12] Huang L M, Li J L, Zhao D H, et al. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China [J]. *Build Environ*, 2008, 43(1): 7-17.
- [13] Lin C Y, Chen F, Huang J C, et al. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan [J]. *Atmos Environ*, 2008, 42(22): 5635-5649.
- [14] Weng Q H. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect [J]. *Photogramm Eng Rem Sens*, 2003, 69(5): 555-566.
- [15] Rajasekar U, Weng Q H. Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: A case study of Indianapolis [J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2009, 64(1): 86-96.
- [16] 林学椿, 于淑秋. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应 [J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 39-45.
- [17] 王鹏飞, 鲁奇, 傅桦, 等. 1980 年以来北京农用地时空演变与驱动力 [J]. *地理学报*, 2005, 60(6): 953-964.
- [18] 宋艳玲, 张尚印. 北京近 40 年城市热岛效应研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 126-129.
- [19] 郑祚芳, 刘伟东, 王迎春. 北京地区城市热岛的时空分布特征 [J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(5): 694-699.
- [20] Liu W, Ji C, Zhong J, et al. Temporal characteristics of the Beijing urban heat island [J]. *Theor Appl Climat*, 2007, 87(4): 1434-4483.
- [21] Zhang J H, Hou Y Y, Li G C, et al. The diurnal and seasonal characteristics of urban heat island variation in Beijing city and surrounding areas and impacts based on remote sensing satellite data [J]. *Sci Chin Ser B*, 2005, 48(Sup 2): 220-229.
- [22] 于淑秋, 卞林根, 林学椿. 北京城市热岛“尺度”变化与城市发展 [C]//中国气象学会 2006 年年会. 2005.
- [23] 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69-77.
- [24] 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究 [J]. *遥感学报*, 2003, 7(3): 168-175.
- [25] Du Y, Xie Z Q, Zeng Y, et al. Impact of urban expansion on regional temperature change in the Yangtze River Delta [J]. *J Geog Sci*, 2007, 17(4): 387-398.
- [26] Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, 90(4): 434-440.
- [27] He C Y, Shi P J, Li J Q, et al. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance-calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery and statistical data [J]. *Chin Sci Bull*, 2006, 51(13): 1614-1620.
- [28] 任王玉, 任国玉, 张爱英. 风速对中国城市热岛强度的影响 [C]//地理学与生态文明建设——中国地理学会 2008 年学术年会论文摘要集. 2008.
- [29] 王喜全, 王自发, 郭虎. 北京“城市热岛”效应现状及特征 [J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(5): 627-636.

(责任编辑: 倪东鸿)