

方永侠, 申双和, 韩莹, 等. 2011. 基于 TM 影像的不同季节北京城市热环境研究 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 487-493. Fang Yongxia, Shen Shuanghe, Han Ying, et al. 2011. A study of seasonal urban heat environment in Beijing based on TM image [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 487-493.

基于 TM 影像的不同季节北京城市热环境研究

方永侠¹ 申双和² 韩莹¹ 杨沈斌² 尹盟毅¹

¹ 陕西省咸阳市气象局, 咸阳 712000

² 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

摘要 利用 2005~2006 年 4 景北京 Landsat TM 影像, 通过热红外波段反演地表温度, 揭示不同季节城市热环境分布特征及其空间差异。分别利用遥感反演的地面温度和地面气象站观测的气温数据, 计算地表热岛强度和空气热岛强度, 并分析其季节变化, 结果表明: 城区相对近郊区, 热岛效应在夏季显著; 城区相对于乡村, 四季都存在较强的热岛效应。

关键词 Landsat TM 影像 城市热环境 热岛强度 季节特征

文章编号 1006-9585 (2011) 04-0487-07 **中图分类号** P463.3 **文献标识码** A

A Study of Seasonal Urban Heat Environment in Beijing Based on TM Image

FANG Yongxia¹, SHEN Shuanghe², HAN Ying¹, YANG Shenbin², and YIN Mengyi¹

¹ Xianyang Meteorological Office in Shanxi Province, Xianyang 712000

² College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Using seasonal land surface temperature in Beijing area from four scenes Landsat TM data during 2005 and 2006 and the land surface temperature retrieved from thermal infrared, thermal field distribution characteristic and its spatial difference of four seasons are analyzed. Then, surface heat island intensities and air heat island intensities are calculated by using LST and air temperature observed by weather stations, and their seasonality are analysed. The results show that relative to suburb area, the urban has evident heat island effect, and strong heat island effect in each season to the rural area.

Key words Landsat TM image, urban thermal environment, heat island intensity, seasonal characteristic

1 引言

城市热环境是城市空间环境在热力场中的综合表现, 通过对城市热环境的研究可以揭示城市空间结构、城市规模的发展变化, 有助于引导城

市的可持续发展, 提高人居环境质量 (陈云浩等, 2002)。北京作为政治、经济和文化中心, 随着经济建设步伐不断加快, 城市建设用地不断吞噬农田、水域、园地和林地, 城市特征下垫面逐步取代自然特征下垫面 (彭静等, 2007), 使得北京市热环境的格局发生根本性的转变, 城市热岛效应

收稿日期 2009-09-23 收到, 2011-04-23 收到修定稿

资助项目 2007 年城市气象科学研究基金 UMR200703

作者简介 方永侠, 女, 1986 年出生, 硕士, 主要研究方向为城市气候与环境遥感。E-mail: fangyx@163.com

越来越明显,其影响范围和强度都在增加。研究发现,不同土地利用类型与城市热场分布有密切关系,城市扩展和热点分布具有相似的规律,都是从市中心向外围呈辐射状蔓延,与北京市的环状城市结构相符合(江樟焰等,2006)。城市热环境的加剧势必对城市气候和环境,居民健康造成不利影响,因此对其热环境的研究显得尤为重要。

近年来,遥感技术已成为研究城市热环境的主要手段,其具有分辨率高、覆盖范围广、点位密集等优势(周红妹等,2001)。Landsat TM/ETM+数据有较高的空间分辨率和较好的时间连续性,是城市热环境研究中常用的数据源。徐涵秋和陈本清(2004)利用 Landsat 影像探讨厦门市城市热岛与城市空间发展关系;江振蓝(2007)根据彩色合成原理,对 3 个时相 TM 影像的热红外波段进行假彩色合成,利用合成图上不同的色调分析了福州市城市热环境的变化趋势;张兆明和何国金(2007)利用 3 景 TM 数据对北京市的城市扩展、植被变化与热环境演变进行了综合研究。国内在研究城市热环境方面多围绕其与城市扩张之间的关系而展开,针对城市热岛效应的季节性特征研究较少。

北京全市面积 16807.8 km²,总人口超过 1650 万,城市化显著,热岛效应影响较为严重。以往的研究多利用地面观测气象数据研究热岛的季节特征,在大范围内揭示其特征有所欠缺。本文利用 Landsat TM 第 6 波段热红外数据反演北京地表温度,通过直观和统计分析北京市四季热场分布特征及其空间差异;并选择城区、近郊和乡村区域,计算地表热岛强度和空气热岛强度,对比研究两者的季节特征。为及时准确地把握北京城市热环境在不同季节的变化特征,缓解城市热环境带来的不利影响提供依据。

2 资料与方法

2.1 数据获取与处理

本文共获取了 2005~2006 年 4 景 Landsat TM 影像,时间分别为 2005 年 7 月 25 日和 11 月 14 日、2006 年 4 月 7 日和 12 月 3 日。影像数据均经过精确地理校正,并具有相同的投影坐标系统[地图投影:通用横轴墨卡托投影(Universal

Transverse Mercator, UTM);地带:50°N;基准面:世界大地坐标系(WGS-84)],其中 TM1~5 波段的空间分辨率为 30 m,第 6 波段(热红外波段)空间分辨率为 120 m。以北京市区矢量边界和北京地面气象站观测资料为辅助数据。北京市“核心区”(如图 1 所示)代表发展最快的几个行政地区,包括西城区、东城区、宣武区、崇文区、石景山区、海淀区、朝阳区和丰台区。

2.2 地表温度反演

Landsat TM 第 6 波段接收的是与地表温度高低相对应的热红外辐射强度。因此,通过其所接收到的地面各处的热辐射值(影像中以灰度值表示)可以求算出对应的地面温度。首先将 TM 热红外波段像元值 D 转变成绝对热辐射值:

$$L_{\lambda} = L_m + \frac{L_x - L_m}{255} \times D, \quad (1)$$

其中, D 为像元灰度值; L_{λ} 为地物在光谱 λ (单位: μm , 文中 λ 取波段中间值 11.5 μm) 处的热辐射值(单位: $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); L_m 和 L_x 分别是 TM 热红外波段最低、最高热辐射值, $L_m = 1.530 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $L_x = 0.124 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

假设不同地表类型的地表发射率相同,将计算得出的热辐射值转换成传感器端的有效亮温 T_B :

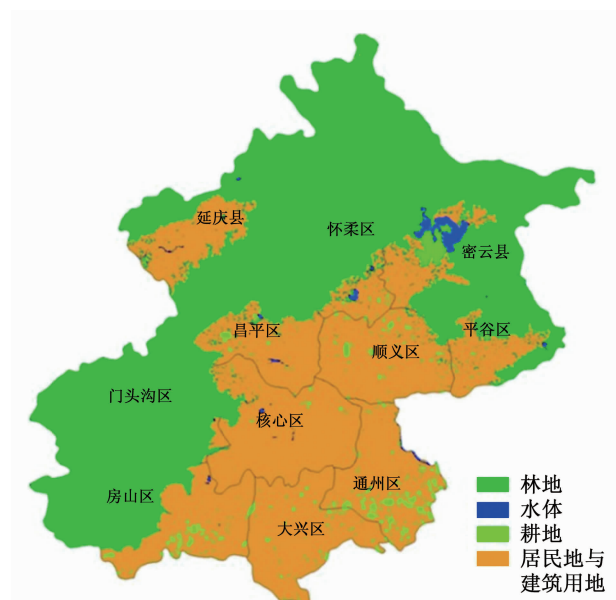


图 1 北京市地表类型覆盖

Fig. 1 Land surface covering types of Beijing

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{L_\lambda}\right)}, \quad (2)$$

其中 K_1 、 K_2 为定标系数。针对 TM 影像有： $K_1 = 607.76 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ， $K_2 = 1260.56 \text{ K}$ 。最后应用 Artis and Camahan (1982) 提到的绝对表面温度表达式，针对不同地表类型将所获取的相对黑体的辐射亮温值 T_B 转换为地表温度 T_s (单位： $^{\circ}\text{C}$)：

$$T_s = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda \times \frac{T_B}{\rho}\right) \ln \epsilon} - 273.5, \quad (3)$$

其中，常数 $\rho = h \times c / \sigma'$ ， ρ 取 $1.438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ，光速 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，斯忒藩—玻耳兹曼常数 $\sigma = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ， ϵ 为地表发射率。Sobrino et al. (2004) 利用归一化植被指数 (Normalized Differential Vegetation Index, NDVI) 的范围决定不同地表的发射率取值，当归一化植被指数值 $V_{\text{NDVI}} > 0.5$ 时， ϵ 主要为植被发射率，取 0.95；当 $V_{\text{NDVI}} < 0.2$ 时， ϵ 主要为土壤发射率，取 0.92；当 $0.2 \leq V_{\text{NDVI}} \leq 0.5$ 时，

$$\epsilon = 0.95P_V + 0.92(1 - P_V), \quad (4)$$

$$P_V = \left(\frac{V_{\text{NDVI}} - V_{\text{NDVI-min}}}{V_{\text{NDVI-max}} - V_{\text{NDVI-min}}} \right)^2, \quad (5)$$

其中 P_V 为植被覆盖率； $V_{\text{NDVI-max}} = 0.5$ ， $V_{\text{NDVI-min}} = 0.2$ 。

3 结果分析

3.1 不同季节城市热场的空间分析

为了探讨北京市热环境的季节变化特征，本文选取 2005～2006 年 4 景 Landsat TM 影像，2006 年 4 月 7 日、2005 年 7 月 25 日、2005 年 11

月 14 日和 2006 年 12 月 3 日的 4 景 TM 影像分别处在春季 (3～5 月)、夏季 (6～8 月)、秋季 (9～11 月)、冬季 (12 月至次年 2 月)。对反演得到的地表温度图进行密度分割 (图中白色为云遮挡的部分，已剔除)，并叠加上北京市行政边界矢量图，得到北京市热场的季节图 (见图 1)。同时，按不同季节分别统计北京核心区和其余 10 个区的平均地表温度 (见表 1)，结合图 2，分析北京城市热场的季节变化，主要有以下几个方面特征：

总体来看，北京四季的城市热岛效应差异较为明显 (如图 2 所示)，山区多为低温区，城区和各区城镇中心温度较高。从北京春季热场分布 (见图 2a) 可以看出，春季地表平均温度为 17.02°C ，南北、东西地区温度差异明显，地表温度呈现由城区向郊区递减，由东向西、由南向北递减的分布特征。高温区主要在核心区的人口密集、经济繁荣的商业区、居民区及工厂密集的昌平东部、顺义、平谷西南部、怀柔 and 密云的城镇；而耕地面积较大的通州区和大兴区，地表温度在 $20 \sim 28^{\circ}\text{C}$ 之间；低温区主要在延庆、怀柔、密云、门头沟、房山等远郊区，地表温度在 $8 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 之间。从表 1 中春季各区地表温度统计来看，北部山区的延庆、怀柔及密云温度比南部平原的近郊区通州或大兴温度低 $5 \sim 7^{\circ}\text{C}$ ，门头沟比通州低 10°C ，可见春季地表温度空间差异明显。

由北京夏季热场分布 (见图 2b) 可以看出，夏季地表平均温度为 23.87°C ，具有明显的城市“热岛效应”特征。高温区在核心城区及其周边近郊，分布较集中，在 $25 \sim 32^{\circ}\text{C}$ 之间；地表温度以核心城区为中心向周边呈辐射状降低，低温区主要在西北及西南山区和水体，在 $22 \sim 24^{\circ}\text{C}$ 之间。郊区有零星小范围的热点，为各区城镇中心。从

表 1 不同季节北京各辖区平均地表温度

Table 1 Average land surface temperature in each district of Beijing in four seasons

$^{\circ}\text{C}$

	延庆	怀柔	密云	门头沟	房山	平谷	昌平	顺义	通州	大兴	核心区	北京
春季	13.90	14.50	15.53	9.79	17.85	17.49	17.16	20.55	19.79	20.99	19.69	17.02
夏季	22.68	21.26	22.64	22.78	23.86	23.53	24.27	24.86	25.14	25.24	26.26	23.87
秋季	4.50	5.20	6.65	6.82	8.28	7.94	7.99	9.23	8.94	10.29	9.06	7.72
冬季	-3.02	-2.78	-1.37	-1.25	0.02	0.30	1.07	1.68	1.02	0.87	0.74	-0.24

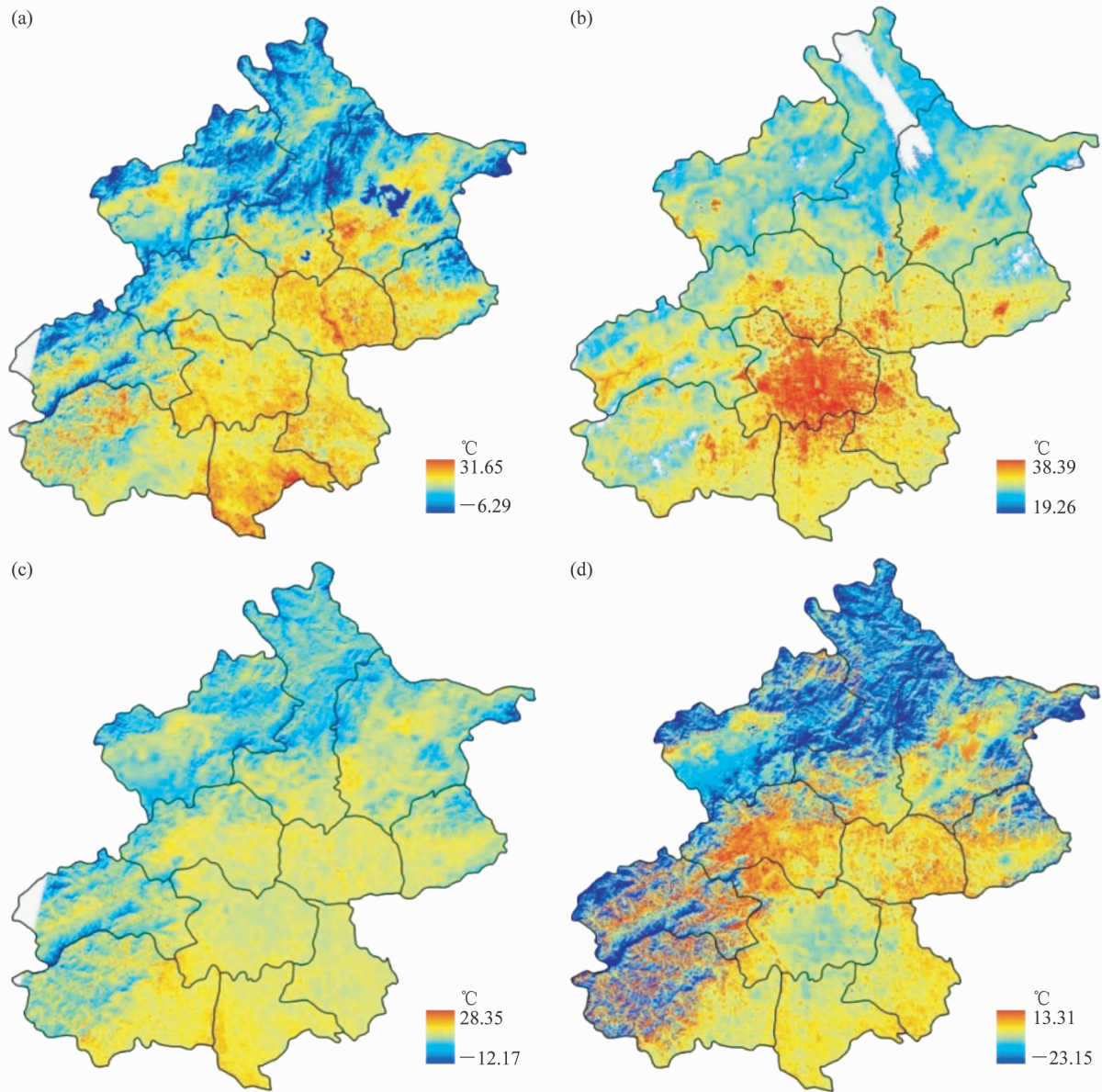


图2 地表温度在不同季节的空间分布: (a) 2006年春季; (b) 2005年夏季; (c) 2005年秋季; (d) 2006年冬季

Fig. 2 Spatial distributions of land surface temperature: (a) Spring in 2006; (b) summer in 2005; (c) autumn in 2005; (d) winter in 2006

表1中夏季各区地表温度统计来看,远郊延庆、怀柔及密云比核心区温度低 $3.6\sim 5^{\circ}\text{C}$,比近郊区顺义、通州及大兴温度低 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。

由北京秋季热场分布(见图2c)可以看出,秋季地表平均温度为 7.72°C 。热场分布特征与春季相似,但在房山东南部热场有所增强,而核心区热场强度略有减弱。高温区地表温度在 $10\sim 14^{\circ}\text{C}$ 之间,低温区地表温度在 $-4\sim 7^{\circ}\text{C}$ 之间。热场南北差异明显,大兴及房山区温度比核心区高 1.4°C ,比顺义区高 1.2°C ,这主要是因为大兴及

房山多为耕地,在11月地上无庄稼覆盖、多裸土,温度较高。

由北京冬季热场分布(见图2d)可以看出,冬季地表平均温度为 -0.24°C ,热场分布特征与夏季相反,呈现明显的“冷岛效应”。核心区温度较低,地表温度在 $-2\sim 1^{\circ}\text{C}$ 之间;高温区在昌平和顺义区,地表温度在 $2\sim 6^{\circ}\text{C}$ 之间。冬季海淀、石景山、昌平和顺义区比其它区地表温度高,可能与这些地区工厂多(有首都钢铁厂、电热厂等强热源),人为热排放较多有关。

3.2 不同季节热岛强度分析

热岛强度 (Heat Island Intensity, 本文简写 I) 可以用城郊气温差或者地表温差来表示, 差值越大表示热岛发展愈强, 而且其强度与风速、云量和天气形势等有密切关系 (周淑贞和束炯, 1994)。为了进一步分析城市热岛的季节特征, 这里以核心区作为城区, 挑选有代表性的地区表示乡村和近郊。用怀柔、密云、延庆和门头沟四区代表乡村, 该地区以林地和耕地等自然景观居多, 且受城市化发展影响较小; 顺义、昌平、通州和大兴四区代表近郊区, 该地区的工厂和商业街区较多且受一定的城市化影响。利用遥感影像反演的地表温度计算城区与近郊区地表温度差 (I_g) 和城区与乡村地表温差 (I_g'); 同时, 选择与遥感影像同时时间的地面观测气温数据分别计算城区与近郊区气温差 (I_a) 和城区与乡村气温差 (I_a')。

由图 3 可见, 利用城区与近郊区地表温度计算的热岛强度 I_g 有季节性差异, 夏季较强, 达 1.38°C , 即与近郊区相比, 夏季的城市热岛效应较显著, 春季较弱, 仅为 0.07°C ; 秋、冬季为负值, 即在秋、冬季近郊地表温度略大于城区, 表现为“冷岛效应”; 冬季“冷岛效应”较明显, 城区比近郊区地表温度低 0.42°C , 秋季“冷岛效应”较弱, 强度仅为 0.05°C 。而利用城区与近郊区气温计算的热岛强度 I_a 在春季较大, 为 0.66°C , 夏、秋、冬季分别为 -0.04 、 -0.18 、 -0.91°C , 表现为不同程度的“冷岛效应”, 其中冬季

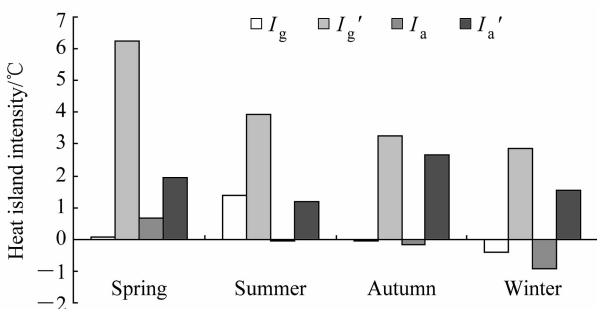


图 3 地表热岛强度 (城区与近郊区地表温差 I_g 、城区与乡村地表温差 I_g') 与空气热岛强度 (城区与近郊区气温差 I_a 、城区与乡村气温差 I_a') 季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of land surface heat island intensity (the land surface temperature difference between urban and suburbs I_g and between urban and country I_g') and air heat island intensity (the air temperature difference between urban and suburbs I_a and between urban and country I_a')

“冷岛效应”强度较大。秋、冬季产生“冷岛效应”的原因可能是近郊耕地面积大, 而北方耕地在秋、冬季几乎是无植被覆盖的裸地, 白天吸热多、增温快, 在卫星过境时 (为北京时间 10:30 左右) 温度较高。

利用城区与乡村地表温度计算的热岛强度 I_g' 春季最强, 达 6.26°C ; 夏、秋季次之, 分别为 3.92°C 和 3.27°C ; 冬季最弱, 为 2.85°C 。而利用城区与乡村气温计算的热岛强度 I_a' 秋季较大, 强度达 2.67°C ; 春、冬季次之, 分别为 1.93°C 和 1.56°C , 夏季最小, 为 1.19°C 。 I_a' 与 I_g' 四季均有显著差异, 强度差在 $1.3\sim 3.5^\circ\text{C}$ 之间, 这主要是数据不同引起的, 但仍可以得出城区相对于乡村四季都存在强热岛效应的结论。而这种强热岛效应主要是由城区和乡村的下垫面热特性的差异造成的。与水泥、沥青等城市下垫面相比, 乡村下垫面 (如耕地、林地和草地等) 热容量、热惯量和热导率小, 植被覆盖度和土壤含水量较高, 因此地表温度和气温低。城市下垫面多为不透水面, 比乡村的自然地表能吸收更多的太阳辐射, 为城市热岛的形成奠定了能量基础; 同时用于蒸发消耗的热量少、地表粗糙度大, 共同造成城市地表温度和气温比乡村高。

从上述分析可以看出, 遥感影像所反映的热岛强度特征与地面气温反映的热岛强度特征有所不同, 主要是由于温度观测仪器原理和观测方式不同, 地表温度由遥感传感器远距离探测, 气温由地面气象仪器观测, 地表温度一般比气温高; 另外, 天气状况和下垫面也有一定影响。研究某一地区热岛特征时, 选择不同的资料和城、郊区域, 得出的结果不尽相同 (于淑秋等, 2005; 王喜全等, 2006)。但不可否认, 地面气象站气温计算的热岛强度具有个别性, 是单点的热岛强度特征; 而遥感反演的温度是整个地区的, 能从宏观上反映热岛强度的平均状态, 更具有代表性。

3.3 不同下垫面热场的季节特征

城市热岛形成的主要原因是城市化效应造成的对原有辐射平衡的改变。除了局地天气形势的影响, 伴随城市化的人为因素更能够影响城市热岛效应。在人为因素中除了人为热的过量排放以及大气污染, 以城市下垫面性质的改变最为重要 (徐祥德和汤绪, 2002)。这里研究不同下垫面温

度的季节变化,先采用支持向量机的监督分类方法对遥感影像进行土地覆盖类型分类(见图1),主要分为建筑用地、耕地、林地和水体4类;然后分别统计4类地表类型在不同季节的平均地表温度(见图4)。

从图4可见,不同下垫面温度季节变化明显,夏季地表温度最大,冬季最小。同一季节一般是建筑用地温度较高,耕地和林地次之,水体较小。水体与建筑用地的温差在春、夏季较大,分别为 10.6°C 和 7.8°C ;在秋、冬季较小,分别为 6.3°C 和 2.3°C 。水体有较大的热容量,因此在较热季节有降温作用,较冷季节有保温作用。建筑用地多在工业区和人口密集的商业区,不透水性比例大;城市排水系统通畅,雨水渗入地面少,蒸发需要的潜热小;同时建筑用地具有较小的热容量和较大的导热率,这种差异使得建筑用地表面升温比耕地、林地和水体快。在春、秋、冬季,耕地表面温度稍高于建筑用地,明显高于林地和水体,而在夏季耕地表面温度低于建筑用地,稍高于林地和水体。这是由于在春、秋、冬季耕地作物覆盖少,土地裸露较多,因而温度较高,而夏季耕地植被覆盖大,蒸腾消耗热量,引起地表能量重新分配,从而降低地表温度。

土地利用类型的空间分布决定城市热场的总体布局。各种地表类型的热学特征、土壤湿度、植被覆盖度不同,加上人为热从不同程度影响着地表温度,因此不同地表类型的温度有差异,对城市热岛贡献的大小也迥异。以建筑用地为主的工业和商业区温度高,对热岛贡献大,水体和绿地的温度低,能减弱城市热岛的强度。但不同城市由于其性质、规模和城市空间布局等不同,其工业用地对城市热岛形成的贡献不同。据此可以

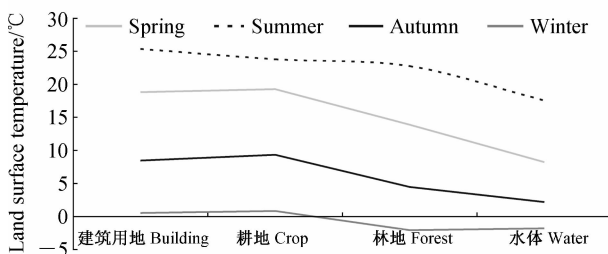


图4 不同下垫面地表温度的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of average land surface temperature in different land use types

通过减少人为热的排放、控制建筑和人口密度、合理规划城区布局、增加城区水域面积和提高城市植被覆盖度等措施,来缓解北京城市热岛对人们生活、生产环境的影响。

4 结论与讨论

利用北京市2005~2006年4景Landsat TM影像,通过热红外波段反演地表温度,分析北京四季热场分布特征、空间差异及其形成原因。结果表明:北京市热场的季节特征明显。春季热场在南北向、东西向差异明显,出现多个大范围强热中心,主要在核心区、顺义、通州等区;夏季城市“热岛效应”显著,核心区为最强的热场中心,但在各区域城镇也出现了零星热点;秋、冬季节出现“冷岛效应”,秋季南部比北部地区温度高,强热场中心南移;冬季北部比南部地区温度高,热场中心北移且有较强的“冷岛效应”。北京城市热场的季节特征受到多种因素的影响,如季节性的地表植被覆盖、地表特性、土地利用状况以及气候因子,所以城市热场在不同季节表现出不同的分布规律。

此外,反演地表温度时虽然考虑了大气和辐射的多重影响,但是由于城市下垫面的异常复杂性,比如辐射率的估算以及卫星过境时刻实时探空数据(如大气含水量等参数)的难以获取,使得地表温度的精确反演存在着难以克服的困难。但城市热岛强度是城区相对郊区的温度差值,在相同的大气背景下,城市下垫面的影响可能会更大。

最后,分别利用遥感反演的地面温度和地面气象站观测的气温数据,计算两类热岛强度。结果表明:相对近郊区,城区的热岛效应除了在夏季显著,其他季节强度较弱;而相对于乡村,城区四季都存在较强的热岛效应。城市热岛强度因选择的郊区距城区的远近而有显著差异,这表明北京城市化对城市热岛效应的影响较为明显。

参考文献 (References)

- Artis D A, Camahan W H. 1982. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas [J]. Remote Sens. Environ., 12

- (4): 313-329.
- 陈云浩, 史培军, 李晓兵. 2002. 基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究 [J]. 测绘学报, 31 (2): 139-144. Chen Yunhao, Shi Peijun, Li Xiaobing. 2002. Research on spatial thermal environment in Shanghai city based on remote sensing and GIS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica (in Chinese), 31 (2): 139-144.
- 江樟焰, 陈云浩, 李京. 2006. 基于 Landsat TM 数据的北京城市热岛研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 31 (2): 120-123. Jiang Zhangyan, Chen Yunhao, Li Jing. 2006. Heat island effect of Beijing based on landsat TM data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese), 31 (2): 120-123.
- 江振蓝. 2007. 基于多时相遥感影像的福州市热环境监测 [J]. 闽江学院学报, 28 (5): 103-106. Jiang Zhenlan. 2007. Monitoring of Fuzhou's heat environment on basis of multi-temporal RS information [J]. Journal of Minjiang University (in Chinese), 28 (5): 103-106.
- 彭静, 刘伟东, 龙步菊, 等. 2007. 北京城市热岛的时空变化分析 [J]. 地球物理学进展, 22 (6): 1942-1947. Peng Jing, Liu Weidong, Long Buju, et al. 2007. A study of the urban heat island of Beijing based on remote sensing images [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 22 (6): 1942-1947.
- Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Paolini L. 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5 [J]. Remote Sens. Environ., 90 (4): 434.
- 王喜全, 王自发, 郭虎. 2006. 北京“城市热岛”效应现状及特征 [J]. 气候与环境研究, 11 (5): 627-636. Wang Xiquan, Wang Zifa, Guo Hu. 2006. The study of the urban heat island in Beijing city [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (5): 627-636.
- 徐涵秋, 陈本清. 2004. 城市热岛与城市空间发展的关系探讨——以厦门市为例 [J]. 城市发展研究, 11 (2): 65-70. Xu Hanyu, Chen Benqing. 2004. A study on urban heat island and its spatial relationship with urban expansion: Xiamen, SE China [J]. Urban Ecology and the Environment (in Chinese), 11 (2): 65-70.
- 徐祥德, 汤绪. 2002. 城市化环境气象学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 13-17. Xu Xiangde, Tang Xu. 2002. An Introduction of Urbanization Environmental Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 13-17.
- 于淑秋, 卞林根, 林学椿. 2005. 北京城市热岛“尺度”变化与城市发展 [J]. 中国科学 (D 辑), 35 (增刊 I): 97-106. Yu Shuqiu, Bian Linggen, Lin Xuechun. 2005. Beijing urban heat island “scale” change and urban development [J]. Science in China (Ser. D) (in Chinese), 35 (Suppl.): 97-106.
- 周红妹, 周成虎, 葛伟强, 等. 2001. 基于遥感和 GIS 的城市热场分布规律研究 [J]. 地理学报, 56 (2): 189-197. Zhou Hongmei, Zhou Chenghu, Ge Weiqiang, et al. 2001. The surveying on thermal distribution in urban based on GIS and remote sensing [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 56 (2): 189-197.
- 周淑贞, 束炯. 1994. 城市气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 244-254. Zhou Shuzhen, Shu Jiong. 1994. The Urban Climate [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 244-254.
- 张兆明, 何国金. 2007. 北京市 TM 图像城市扩张与热环境演变分析 [J]. 地球信息科学, 9 (5): 83-88. Zhang Zhaoming, He Guojin. 2007. A study on the urban growth and thermal environmental changes of Beijing city based on TM imagery data [J]. Geo-Information Science (in Chinese), 9 (5): 83-88.