

曹广真,侯鹏,毛显强. 北京市城市化对地表温度时空特征的影响[J]. 气象,2010,36(3):19-26.

北京市城市化对地表温度时空特征的影响^{*1}

曹广真¹ 侯 鹏² 毛显强³

1 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081

2 北京师范大学资源学院, 北京 100875

3 北京师范大学环境学院, 北京 100875

提 要: 分别采用常规气象数据和遥感资料, 结合城市化发展总体水平不同的三大板块, 分析北京市城市化对地表温度时空变化特征的影响。(1) 将北京市 1978—2006 年常规气象站点的陆表温度(Land Surface Temperature, LST)观测资料与三大板块结合, 分析城市化对 LST 年、季、白天、夜间、最大值和最小值的影响。发现 1978—2006 年期间, 北京市三大板块 LST 均值总体上均呈上升趋势, 且大多数情况下, 第一板块的 > 第二板块的 > 第三板块的。(2) 采用北京市 2001 年和 2006 年全年的 EOS MODIS MOD 13 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)产品以及 MOD11 白天/夜间 LST 产品, 分析城市化过程中下垫面变化对 LST 的影响。总体上, 北京市 2006 年较 2001 年 NDVI 减少的比例为 51.3%, 白天 LST 升高的比例为 73.74%, 夜间 LST 升高的比例高达 90.92%。(3) 北京市 2006 年与 2001 年 NDVI 的差值以及白天、夜间 LST 的差值的联合分类结果表明, 第一和第二板块均表现出 2006 年较 2001 年 NDVI 减少、白天 LST 增加的类别所占的百分比最大, 分别占 54.29% 和 40.95%, 而且均大于其在第三板块中所占的比例 34%, 而三个板块中 NDVI 增加、白天 LST 减少的百分比与 NDVI 减少、白天 LST 增加的百分比之和均超过了 50%。第一、第二和第三板块中 2006 年较 2001 年 NDVI 减少、夜间 LST 增加的类别所占百分比分别为 51.67%、44.2% 和 42.46%。这些数据定量地说明了城市化过程中下垫面变化对白天、夜间 LST 的影响。

关键词: 城市化, 地表温度, 常规气象数据, 遥感资料

Impacts of Urbanization on Temporal and Spatial Characteristics of Land Surface Temperature in Beijing

CAO Guangzhen¹ HOU Peng² MAO Xianqiang³

1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites of China

Meteorological Administration (LRCVES/CMA), National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

2 Resources School, Beijing Normal University, Beijing 100875

3 Environmental School, Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract: By dividing Beijing into three plates indicating different urbanization levels according to the urbanization degrees, effects of Beijing urbanization on land surface temperature (LST) are analyzed with routine meteorological data and remote sensing products. (1) Impacts of urbanization on such features of LST as mean value of year, season, day, night, maximum and minimum are analyzed with the combination of meteorological data and the three plates. The results present that LST in three plates is all increasing from 1978 to 2006. In most conditions, mean LST calculated from the first plat is the biggest, and this from the third plat is smallest. (2) MOD13 and MOD11 products of 2001 and 2006 are used to study the effect of change in surface on LST during urbanization of Beijing. The results show that NDVI in 2006 is decreased by 51.3% compared to this in 2001 while day LST is increased by 73.74% and night LST is increased by 90.92%. (3) According to NDVI difference and day/night LST difference between 2006 and

* 国家自然科学基金“京津唐都市圈城市化过程中下垫面变化及其局地气候效应研究”(40701020)、国家重点基础研究发展计划 973 课题“城市生命体生态特征及演变机理研究”(2005CB724204)资助

2008 年 3 月 12 日收稿; 2009 年 10 月 22 日收修定稿

第一作者: 曹广真, 主要研究方向为多源遥感数据融合方法与应用、城市遥感. Email: caogz@cma.gov.cn

2001 in Beijing, nine classes are extracted to present the change of LST with the change of NDVI. The classification result of NDVI difference and day LST difference shows that the percentages of the class presenting NDVI decreased while day LST increased in the three plates are 54.29%, 40.95% and 34% respectively. And the summary of the percentages of NDVI increased while day LST decreased and NDVI decreased while day LST increased is bigger than 50% in all three plates. The classification result of NDVI difference and night LST difference shows that the percentages of the class presenting NDVI decreased while night LST increased in the three plates are 51.67%, 44.2% and 42.46%, which well explains the impact of surface change on LST during urbanization.

Key words: urbanization, land surface temperature(LST), routine meteorological data, remote sensing products

引 言

随着城市化程度的不断提高,城市发展引发了人口密度增加、下垫面属性改变、大气污染物显著、城市热异常等一系列问题。许多研究已发现城市温度与乡村具有不同的特点。英国人 Lake Howard 于 1833 年第一次对伦敦城市中心的温度比郊区高的现象进行文字记载^[1], Manley 于 1958 年首次提出城市热岛(Urban Heat Island, UHI)的概念^[2]。城市热岛效应是城市气候异常特征之一,主要是由于城市化过程导致城市下垫面热力学属性和粗糙度发生显著变化进而改变区域辐射平衡和气候环流,加之人工废热排放共同作用而形成的“高温孤岛”现象。

地面气象观测资料最早被应用于城市化对气温的影响和城市热岛效应的研究领域,通常是通过对比分析城市与郊区的长时间序列气温数据进行的。对国际主要城市热异常研究发现,德国柏林热岛强度 13.0 °C、加拿大温哥华 11 °C、中国北京 9 °C^[3-4]、中国上海 6.9 °C^[4]、美国亚特兰大 12 °C^[5]、中国广州 7.2 °C^[6],城市化对城市温度的影响令人震惊。Hanson 研究显示城市与郊区平均温度的年代际差异为 0.015 °C^[7],而 Gallo 等则发现城区和郊区平均增温速率有 0.026 °C/10 a 的差别^[8]。对美国 50 个大城市 1951—2000 年城区及郊区的气温变化趋势分析发现,1951—2000 年期间大城市区域的热岛效应增强了 60%,且大城市区域年代际的平均增温速率比其邻近的郊区高 30%^[9]。对中国近 50 年的年平均气温研究发现,城市热岛效应对年平均温度的影响主要包括三个方面,即年平均温度值升高、年际间温度差异下降和气候趋势的改变,全国热岛的平均强度不到 0.06 °C,与全球 0.05 °C 接近^[10];从 20 世纪的 70 年代到 90 年代,热岛强度以 0.1 °C/10 a 的速度上升^[11],珠江三角洲城市群热岛强度由

1983 年前的 0.1 °C 上升到 1993 年的 0.5 °C^[12];还有研究估计城市化和土地利用性质的改变会使热岛以每个世纪 0.27 °C 增加幅度上升^[13]。北京市气温特征研究表明,城市化带来的热岛效应是导致局地增暖的主要因子,且占总增暖比重的 47.5%~61.2%^[14],近 40 年热岛强度的增温率为 0.13 °C/10 a^[15],而且城区与郊区温度是同位相升降,郊区温度一直低于城区^[16],城区平均升温幅度为 0.43 °C/10 a,郊区升温幅度为 0.21 °C/10 a^[17]。

遥感的迅速发展和日趋成熟,基于遥感技术提取相关的下垫面类型、地表温度和植被覆盖等信息,可以更好地探讨城市化发展与城市热岛效应变化之间的关系^[18-19]。多数研究结果表明,在天气晴朗、无风或微风的情况下,城市热场空间分布及其发展主要取决于城市格局和下垫面性质,如土地利用类型^[18-19]、绿地^[21-22]、NDVI^[19,21,24]、植被覆盖度等^[25-26,28]。国外早在 20 世纪 70 年代就开始利用遥感数据进行城市地表热量特征的研究^[30-32],1981 年,Landsberg 在研究中得出了城市化导致的下垫面变化对区域天气和气候有着十分显著影响的结论^[33]。Voogt 和 Oke 在对气候研究中利用红外遥感信息的不同方法进行总结分析后,建议在对城市热场的研究中需要尽可能地利用下垫面信息,以实现气候影响的定量分析^[34]。一些工作者利用城市与郊区之间归一化植被指数 NDVI 的差值作为城市化所导致的下垫面属性的变化,探讨其对城市和郊区的温度的影响^[35-39]。

基于常规观测资料、遥感数据的方法各有优缺,常规观测资料只能获取点尺度的信息,但该资料时间序列较长;遥感数据虽然可以获取面尺度上的信息,但资料的累积时间有限。本文在分析 1978—2006 年北京市城市化和 LST 变化总体特征的基础上,结合城市化发展总体水平不同的三大板块,分别基于常规资料和多源遥感数据探讨城市化对 LST 时空变化特征的影响,为城市的合理发展和气候变

暖背景下 LST 的监测、评价与缓解提供重要的参考信息。

1 1978—2006 年北京市城市化和地表温度变化特征

1.1 1978—2006 年北京市城市化发展特征

1978 年改革开放以来,北京市得到迅速发展,城市化水平不断提高。2004 年末,北京市人口、空间、经济和社会的城市化水平分别达到 98.8%、82.3%、80%、75.3%,城市化总体水平达到了 83.6%^[40]。人口由 1978 年的 871.5 万人增至 2006 年的 1581 万人,平均每年增加 24.47 万人^[41];城市建成区面积由 1978 年的 232.13 km² 增至 2006 年的 1254 km²,平均每年增加 35.24 km²^[42-43];人均 GDP 由 1978 年的 1290 万元增至 2006 年的 49505 万元^[43-44],平均每年增加 1662.59 万元。

1.2 1978—2006 年北京市地表温度变化特征

图 1 显示了北京市 20 个常规气象站点观测资料所得的年平均 LST 距平时间序列。可以看出 29 年来,北京市平均 LST 呈明显的升高趋势,年平均距平的变化幅度为 -1.10~0.79 °C。1985 年为历史最冷年,年平均地温为 11.77 °C,2006 年为历史最暖年,年平均温度为 13.67 °C。随着气候变暖和城市化的加速,北京市 LST 的年际变化非常显著。从地温的线性趋势可以看出,29 年来 LST 升高约 1 °C,地温变率约为 0.34 °C/10 a。5 年滑动平均变化表现为:1978—1996 年为冷期,1997—2006 年为持续暖期。20 世纪 80 年代平均 LST 为 12.65 °C,而 90 年代 LST 为 13.03 °C,年代际 LST 逐渐升高。

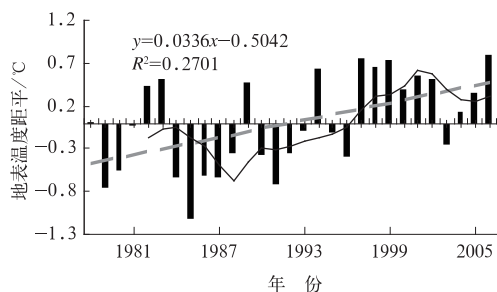


图 1 1978—2006 年期间北京市平均 LST 距平时间序列

(曲线为 5 年滑动平均线,虚线为线性趋势线)
Fig. 1 The time series of the annual mean LST anomaly in Beijing from 1978 to 2006
(The curve line is the sliding mean in 5 a, the dashed line is the linear trend)

可见,近 29 年来北京市 LST 是不断升高的^[45]。

2 基于常规气象资料的城市化对地表温度的影响

2.1 数据源及分析方法

根据城市化总体水平(综合考虑了人口城市化水平、空间城市化水平、经济城市化水平和社会城市化水平)的差异,北京市 18 个区县被划分为三大板块,分别代表高、中、低不同的城市化程度^[14]。第一板块包括东城区、西城区、崇文区、宣武区、朝阳区、丰台区、石景山区、海淀区 8 个区县,实现程度为 70%~85%;第二板块包括门头沟区、顺义区、昌平区、大兴区、怀柔区 5 个区县,实现程度为 65%~69%;第三板块包括房山区、通州区、平谷区、密云县、延庆县 5 个区县,实现程度为 59%~64%。

为分析北京市不同城市化水平对 LST 时间变化的影响,充分利用常规气象站点资料时间积累长的特点,分别选用各板块内部常规气象站 4 时次(02 时、08 时、14 时、20 时)的 LST 观测资料,对其 1978—2006 年年、季、白天、夜间、最大和最小 LST 的年平均值特征进行了计算与对比。各板块所包含的区县以及其中的气象站点分布如图 2 所示,其中,不同颜色的面状区域代表不同的板块,而小圆圈代表气象站点。

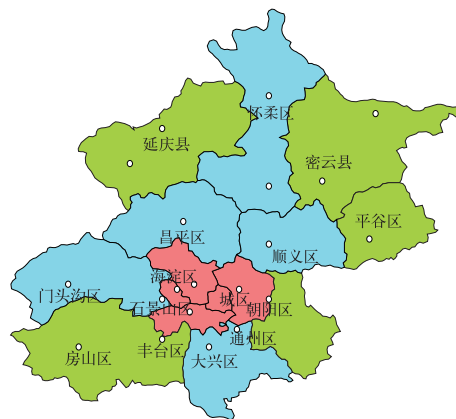


图 2 北京市不同城市板块及常规气象站点分布示意图

Fig. 2 The three plates and meteorological station locations of BeijingSS

利用各板块内气象站 LST 的观测资料,计算各台站 4 时次观测值的均值作为该台站观测的日均值,4 时次观测值的最小值作为日最小值,最大值作为日最大值,02 时和 20 时观测值的均值作为日夜

间均值,08 时和 14 时观测值的均值作为日白天均值,并将各台站计算结果的均值作为该板块对应参数的结果,然后在日均值结果的基础上,计算各参数年、季、白天、夜间、最大和最小 LST 的年均值,其中春、夏、秋、冬分别以 4 月、7 月、10 月和 1 月表示。

2.2 不同城市化水平板块的地表温度对比分析

图 3~图 6 分别显示了三大板块年、白天、夜间、春季、夏季、秋季、冬季、最大和最小 LST 的均值,可以看出,不论采用哪种标准统计,LST 均值总

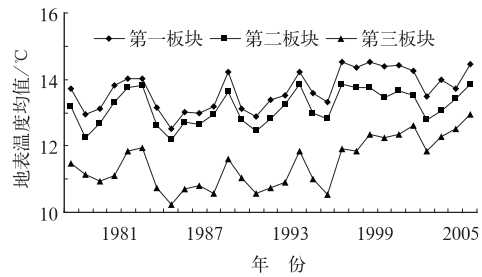


图 3 三板块 1978—2006 年 LST 年平均值
Fig. 3 The annual mean LST from 1978 to 2006 in the three plates

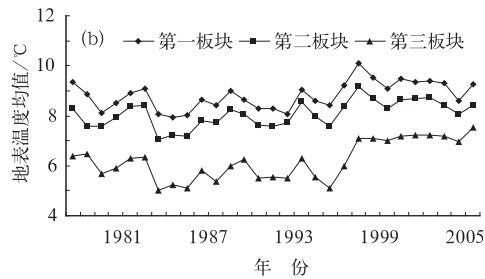
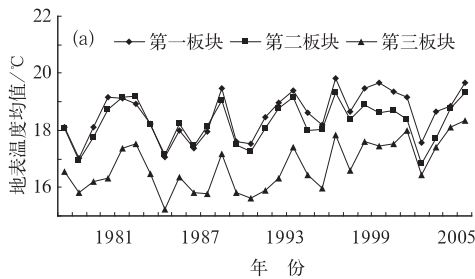


图 4 三板块 1978—2006 年 LST 昼(a)夜(b)均值
Fig. 4 The annual mean day LST (a) and the annual mean night LST (b) from 1978 to 2006 in the three plates

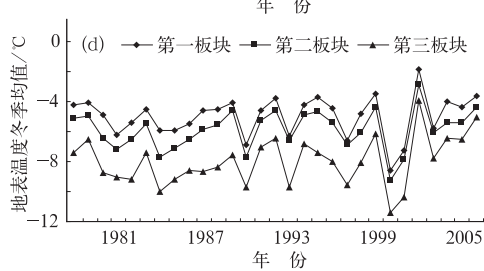
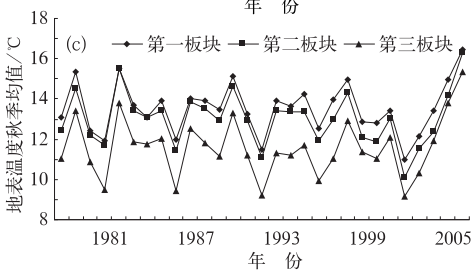
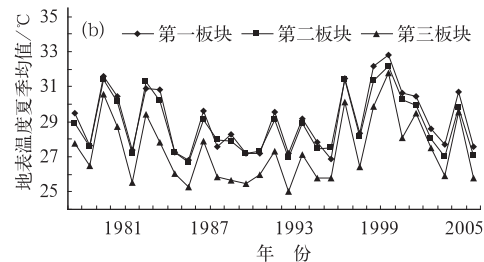
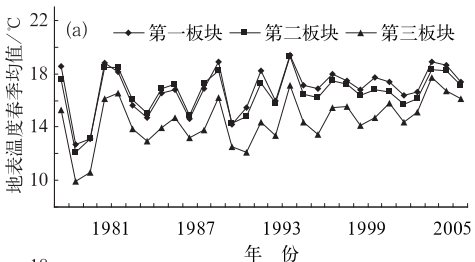


图 5 三板块 1978—2006 年 LST 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)及冬季(d)平均值
Fig. 5 The mean LST in spring (a) and summer (b) autumn (c) and winter (d) from 1978 to 2006 in the three plates

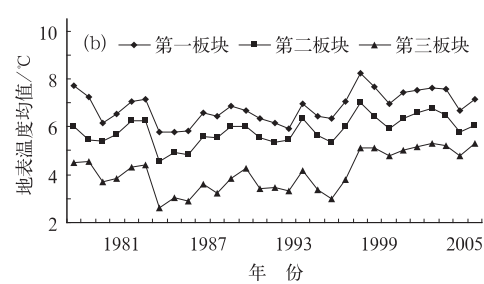
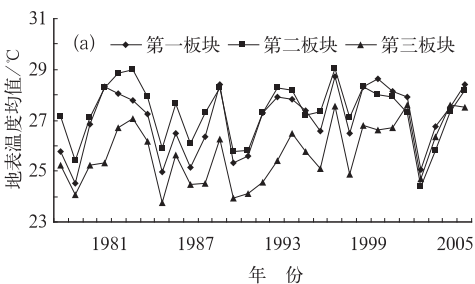


图 6 三板块 1978—2006 年 LST 最大值(a)及最小值(b)均值
Fig. 6 The mean maximum LST (a) and the mean minimum LST (b) from 1978 to 2006 in the three plates

体上均呈上升趋势。大多数情况下,第一板块 LST 的均值>第二板块,第二板块的>第三板块的,三个板块的升降趋势在同一统计标准下相差不大,该特征在 1981—2002 年期间表现的尤其明显。

从图 1 可以看出,第一二板块之间 LST 年均值差别较小,与第三板块 LST 年均值之间的差别较大。从 1997 年开始,由于城市化水平差距逐渐变小,三个板块之间的 LST 差别明显减小。图 4 中 LST 的昼夜统计看出,随着城市化进程的加剧,扩大了长短波辐射在昼夜的影响差异,三个板块的 LST 差异在夜间表现得更为明显,特别是第一、二板块。图 5 的 LST 季相统计看出,第一、二与第三板块之间的差异在春季、冬季表现得较为明显;第一、二板块之间的差异冬季表现更加明显。图 5 中 LST 的最值统计看出,最小值能够较好地表现三个板块之间的差异。

3 基于遥感资料的城市化下垫面变化及其对地表温度的影响

3.1 数据源及分析方法

为了分析城市化过程中下垫面变化及其对 LST 空间分布特征的影响,利用遥感面上观测的优势,选用不同时相的遥感资料进行。并以 NDVI 代表下垫面的基本属性特征,地表温度分别考虑对应年份白天、夜间的变化特征。

实验中采用了北京市 2001 年和 2006 年全年的 EOS MODIS 的 MOD13 植被指数产品以及 MOD11 白天、夜间地表温度产品。其中,MOD13 为 16 天合成,空间分辨率为 250 m;MOD11 为 8 天合成,空间分辨率为 1 km。首先利用各参数每年的合成产品得到其年均值;然后为了实现 NDVI 与 LST 数据之间的空间匹配,以 LST 产品为参考,对 NDVI 产品进行了重采样,使两者的空间分辨率均为 1 km;随后计算了各参数 2006 年和 2001 年之间的差值。

3.2 城市化过程中 NDVI 及 LST 的变化特征

图 7 显示了 2006 年与 2001 年北京市年均 NDVI 的差值图像,其中, $\Delta NDVI > 0$ 的像素数占 48.7%, $\Delta NDVI < 0$ 的占 51.3%, $\Delta NDVI$ 的最小值为 -0.28,最大值为 0.41,平均值为 -0.0026,标准差为 0.04。因此,总体上看,北京市 2006 年与 2001 年 NDVI 有较大差别,而且存在一定的空间差异。从表 1 中三板块 2006 年与 2001 年 $\Delta NDVI$ 均

值可以看出,第一和第二板块 2006 年植被指数较 2001 年均减少 0.006,而第三板块增加 0.0004;三板块 2006 年与 2001 年 $\Delta NDVI$ 的标准差比较接近,显示出第一板块的略大于第二和第三板块的特征。

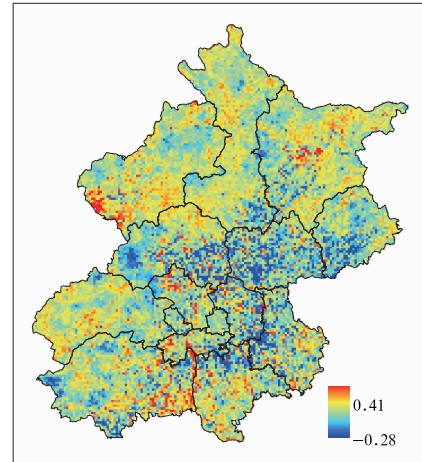


图 7 2006 年与 2001 年北京市年均 NDVI 差值图像

Fig. 7 Difference of annual mean NDVI in Beijing between 2006 and 2001

图 8 显示了 2006 年与 2001 年北京市年均白天 LST 的差值图像,其中, $\Delta LST > 0$ 的像素数占 73.74%, $\Delta LST < 0$ 的占 26.26%, ΔLST 的最小值为 -4.1℃,最大值为 10.5℃,平均值为 1.22℃,标准差为 1.68。因此,北京市 2006 年白天平均 LST 比 2001 年总体上是升高了(升高的比例比降低的多达 47.48%),且存在一定的空间差异。从表 1 中三板块 2006 年与 2001 年白天 ΔLST 均值可以看出,第一板块的>第二板块的>第三板块的,而标准差则呈第二板块的>第三板块的>第一板块的。

图 8b 显示了 2006 年与 2001 年北京市年均夜间 LST 的差值图像,其中, $\Delta LST > 0$ 的像素数占 90.92%, $\Delta LST = 0$ 的占 0.78%, $\Delta LST < 0$ 的占 8.3%, ΔLST 的最小值为 -2.68℃,最大值为 4.7℃,平均值为 0.87℃,标准差为 0.62。因此,北京市大部分地区 2006 年夜间平均 LST 比 2001 年升高了(升高的比降低的多达 82.62%),且存在一定的空间差异。从图 8b 可以看出,除密云县的中部和顺义区的北部存在面积较大的降温区外,其他区域大多表现出不同程度的增温特征。从表 1 中三板块 2006 年与 2001 年夜间 ΔLST 均值可以看出,第一板块的>第三板块的>第二板块的,而标准差则呈第一板块的>第三板块的>第二板块的。

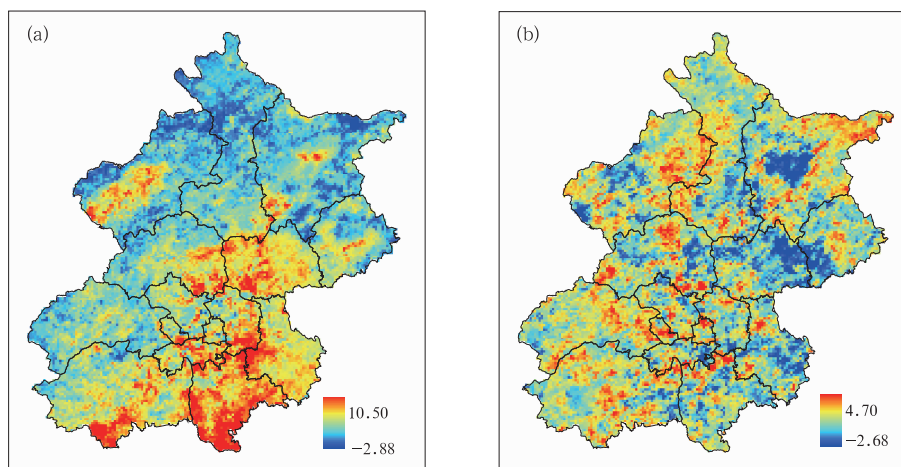


图 8 2006 年与 2001 年北京市年均昼(a)夜(b)LST 差值图像
Fig. 8 Difference of annual mean day (a) and night (b) LST in Beijing between 2006 and 2001

表 1 三板块 ΔNDVI 、白天 ΔLST 、夜间 ΔLST 的均值、标准差特征

Table 1 The mean and standard deviation values of ΔNDVI , day ΔLST and night ΔLST in the three plates

| | ΔNDVI | | 白天 ΔLST | | 夜间 ΔLST | |
|------|---------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| 第一板块 | -0.006 | 0.05 | 2.15 | 1.52 | 0.92 | 0.65 |
| 第二板块 | -0.006 | 0.04 | 1.35 | 1.75 | 0.85 | 0.60 |
| 第三板块 | 0.0004 | 0.04 | 1.03 | 1.59 | 0.88 | 0.64 |

3.3 ΔNDVI 与 ΔLST 联合分类

根据 2006 年与 2001 年 NDVI 的差值以及白天、夜间 LST 的差值对北京市进行分类,直观表示出城市化对 LST 空间分布的影响。分类结果如图 9 所示,分类依据及不同板块中各类所占的百分比如表 2 所示,其中所占百分比通过对应区域内的目标类别像元数除以总像元数计算。

从图 9a 和表 2 可以看出,第一和第二板块均表

现出 2006 年较 2001 年 NDVI 减少、白天 LST 增加类别所占的百分比最大,分别占 54.29% 和 40.95%,而且均大于其在第三板块中所占的比例 34%,说明城市化引起的下垫面植被的变化导致白天 LST 的增加比较明显;其次是 NDVI 增加、白天 LST 也增加的类别,在三个板块中分别占 40.47%、33.61% 和占 35.49%,可能是虽然植被覆盖增加了,但增加的幅度尚未达到抑制白天 LST 增加的程度。

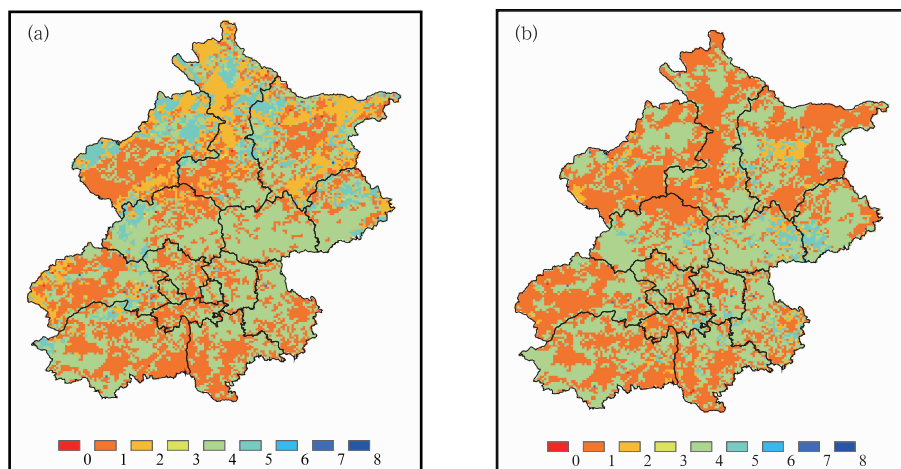


图 9 ΔNDVI 与白天(a)及夜间(b) ΔLST 联合分类结果
Fig. 9 Union classification result of ΔNDVI and day (a) and night (b) ΔLST

从图 9b 和表 2 可以看出,第一板块中 2006 年较 2001 年 NDVI 减少、夜间 LST 增加的类别所占百分比最大,高达 51.67%,其次是 NDVI 增加、夜间 LST 也增加的类别,占 40.61%。第二和第三板块均表现出 2006 年较 2001 年 NDVI 增加、夜间 LST 增加的类别所占的百分比最大,分别占 47.3%

和 47.51%,而且均大于其在第一板块中所占的比例,其次是 NDVI 减少、夜间 LST 增加的类别,在两板块中分别占 44.2%和 42.46%;而 NDVI 增加、夜间 LST 减少的类别在三个板块中分别占 2.91%、2.92%和 4.66%,说明城市化过程中下垫面变化对夜间 LST 的影响。

表 2 $\Delta NDVI$ 及 ΔLST 联合分类依据及结果

Table 2 The classification conditions and results by union $\Delta NDVI$ and ΔLST

| $\Delta NDVI$ | ΔLST | 分类结果 | $(\Delta NDVI - \text{白天 } \Delta LST) / \%$ | | | $(\Delta NDVI - \text{夜间 } \Delta LST) / \%$ | | |
|---------------|--------------|------|--|-------|-------|--|------|-------|
| | | | 第一板块 | 第二板块 | 第三板块 | 第一板块 | 第二板块 | 第三板块 |
| >0 | =0 | 0 | 0.07 | 0.92 | 1.31 | 0.07 | 0.77 | 1.24 |
| >0 | >0 | 1 | 40.47 | 33.61 | 35.49 | 40.61 | 47.3 | 47.51 |
| >0 | <0 | 2 | 2.48 | 14.97 | 16.1 | 2.91 | 2.92 | 4.66 |
| <0 | =0 | 3 | 0.14 | 0.29 | 0.14 | 0.21 | 0.17 | 0.13 |
| <0 | >0 | 4 | 54.29 | 40.95 | 34 | 51.67 | 44.2 | 42.46 |
| <0 | <0 | 5 | 2.55 | 9.1 | 12.85 | 4.46 | 4.48 | 3.9 |
| =0 | =0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.14 | 0 |
| =0 | >0 | 7 | 0 | 0.1 | 0.06 | 0.07 | 0.01 | 0.1 |
| =0 | <0 | 8 | 0 | 0.06 | 0.05 | 0 | 0.01 | 0 |

4 结 论

在分析北京市城市化和 LST 变化总体特征的基础上,本文分别采用常规数据和遥感资料,并结合代表不同城市化程度的三大板块,分析北京市城市化对 LST 时空变化特征的影响,得出如下主要结论:

(1) 1978—2006 年,北京市城市化水平不断提高,LST 总体呈上升趋势。1978—2006 年,北京市城市化发展总体水平不同的三大板块的年、白天、夜间、春季、夏季、秋季、冬季、最大和最小 LST 均值均表现出总体上升的趋势。且大多数情况下,第一板块 LST 的均值>第二板块的>第三板块的。

(2) 总体上,北京市 2006 年较 2001 年 NDVI 减少的比例为 51.3%,而白天 LST 升高的比例为 73.74%,夜间 LST 升高的比例高达 90.92%。第一和第二板块均表现出 2006 年较 2001 年 NDVI 减少、白天 LST 增加的类别所占的百分比最大,分别占 54.29%和 40.95%,而且均大于其在第三板块中所占的比例 34%,其次是 NDVI 增加、白天 LST 也增加的类别,在三个板块中分别占 40.47%、33.61%和占 35.49%,而三个板块中 NDVI 增加、白天 LST 减少的百分比与 NDVI 减少、白天 LST 增加的百分比之和均超过了 50%。

第一板块中 2006 年较 2001 年 NDVI 减少、夜间 LST 增加的类别所占百分比最大,高达 51.67%,

其次是 NDVI 增加、夜间 LST 也增加的类别,占 40.61%。第二和第三板块均表现出 2006 年较 2001 年 NDVI 增加、夜间 LST 增加的类别所占的百分比最大,分别占 47.3%和 47.51%,而且均大于其在第一板块中所占的比例,其次是 NDVI 减少、夜间 LST 增加的类别,在两板块中分别占 44.2%和 42.46%,这些数据定量地说明了北京市城市化过程中下垫面变化对白天、夜间 LST 的影响。

参考文献

- [1] Howard L. Climate of London. Deduced from Metrological Observations[M]. 3rd edition. London: Harvey and Dorton Press, 1,1833: 348.
- [2] Mnaley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84: 70-72.
- [3] 窦建奇. 关于城市“热岛效应”的思考[J]. 武汉城市建设学院学报, 2001, 18(3-4): 76-78.
- [4] 申绍杰. 城市热岛问题与城市设计[J]. 中外建筑, 2003, 5: 20-22.
- [5] AMERICAN F. Executive summaries from selected urban ecosystem analyses[J]. Atmospheric Environment, 1996, 36: 5831-5840.
- [6] 杨士弘. 城市生态环境研究[M]. 广州: 中山大学出版社, 1991: 64.
- [7] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. A closer look at United States and global surface temperature change[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106: 23 947-23 963.
- [8] Gallo K, Owen T, Easterling D, et al. Temperature trends of the U. S. Historical Climatology Network based on satellite-designat-

- ed land use/land cover[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12: 1344-1348.
- [9] Brian Stone Jr. Urban and rural temperature trends in proximity to large US cities, 1951-2000[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(13):1801-1807.
- [10] Li Q, Zhang H, Liu X, et al. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 79(3-4): 165-174.
- [11] Wang W C, Zeng Z, Karl T R. Urban heat island in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17: 2377-2380.
- [12] 曾侠, 钱光明, 潘蔚娟. 珠江三角洲城市群城市热岛效应初步研究[J]. *气象*, 2004, 30(10): 12-16.
- [13] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. *Nature*, 2003, 423: 528-531.
- [14] 郑祚芳, 郑艳, 李青春. 近 30 年来城市化进程对北京区域气温的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4):26-29.
- [15] 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.
- [16] 张光智, 徐祥德, 王继志, 等. 北京及周边地区城市尺度热岛特征及其演变[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(suppl):43-50.
- [17] 宋艳玲, 张尚印. 北京市近 40 年城市热岛效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 126-129.
- [18] 宫阿都, 陈云浩, 李京, 等. 北京市城市热岛与土地利用/覆盖变化的关系研究[J]. *中国图象图形学报*, 2007, 12(8): 1476-1782.
- [19] 张兆明, 何国金, 王威, 等. 基于遥感技术的北京市热岛研究[J]. *环境保护科学*, 32(6):1-3.
- [20] 张月维, 何全军, 赵晓利, 等. 2005 年 7 月珠三角地表温度场的遥感监测分析[J]. *气象*, 2006, 32(9):23-27.
- [21] 田平, 田光明, 王飞儿, 等. 基于 TM 影像的城市热岛效应和植被覆盖指数关系研究[J]. *科技通报*, 2006, 22(5): 78-82.
- [22] 李延明, 郭佳, 冯久莹. 城市绿色空间及对城市热岛效应的影响[J]. *城市环境与城市生态*, 2004, 17(1):1-4.
- [23] 徐军昶, 王勇. 基于卫星遥感的“城市热岛”分析[J]. *气象*, 2006, 32(6): 71-74.
- [24] 田振坤, 黄妙芬, 刘良云, 等. 使用单窗算法研究北京城区热岛效应[J]. *遥感信息*, 2006, 21-24.
- [25] 程承旗, 吴宁, 郭仕德, 等. 城市热岛强度与植被覆盖关系研究的理论技术路线和北京案例分析[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(3):172-174.
- [26] 王文杰, 申文明, 刘晓曼, 等. 基于遥感的北京市城市化发展与城市热岛效应变化关系研究 [J]. *中国科学研究*, 2006, 19(2):44-48.
- [27] 张春桂. 用 MODIS 植被指数研究福州城区空间扩展变化[J]. *气象*, 2006, 32(10):20-26.
- [28] 张小飞, 王仰麟, 吴健生, 等. 城市地域地表温度-植被覆盖定量关系分析-以深圳市为例[J]. *地理研究*, 2006, 25(3):369-377.
- [29] 肖荣波, 欧阳志云, 张兆明, 等. 城市热岛效应监测方法研究进展[J]. *气象*, 2005, 31(11):3-6.
- [30] Carlson T N, Augustine J A, Boland F E. Potential application of satellite temperature measurements in the analysis of land use over urban areas [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1977, 58(12):1301-1303.
- [31] Matson M, McClain E P, McGinnis D F, et al. Satellite detection of urban heat islands [J]. *Monthly Weather Review*, 1978, 106: 1725-1734.
- [32] Price J. Assessment of the urban heat island effect through the use of a satellite data[J]. *Monthly Weather Review*, 1979, 107: 1554-1557.
- [33] Landsberg H E. *The Urban Climate*[M]. New York: Academic Press, 1981.
- [34] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86:370-384.
- [35] Gallo K P, Owen T W. Satellite-based adjustments for the urban island temperature bias [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38: 806-813.
- [36] Gallo K P, Owen T W. A sampling strategy for satellite sensor-based assessments of the urban heat-island bias[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(17):1935-1939.
- [37] Gallo K, Adegoke J O, Owen T W, et al. Satellite-based detection of global urban heat-island temperature influence[J]. *Journal of Geophysical Research*, 107(D24):4776.
- [38] 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.
- [39] Weng Q, Lu D, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 467-483.
- [40] <http://www.bjkw.gov.cn/n1143/n1240/n1465/n2216/n3710709/3711264.html>. 北京城市化进程评价研究.
- [41] 北京市统计局. *北京统计年鉴 2007*[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [42] 牟风云, 张增祥, 迟耀斌, 等. 基于多源遥感数据的北京市 1973-2005 年间城市建成区的动态监测与驱动力分析[J]. *遥感学报*, 2007(2): 257-268.
- [43] 成刚, 袁佩琦, 陈瑾. 北京市人均 GDP 的时间序列分析及预测[J]. *生产力研究* 2007(3):83-84.
- [44] <http://www.beijing2008.cn/77/18/article214011877.shtml>. 06 北京市人均 GDP 49505 元 属上中等国家和地区中间水平.
- [45] 曹广真, 毛显强, 李贵才, 等. 北京市地表温度的变化及驱动力分析[C]. *中国气象年会 2007 年年会论文集*. 2007: 296.