

文章编号: 1007-4619(2007)03-0330-10

基于 MODIS 地表温度产品的北京城市 热岛(冷岛)强度分析

王建凯, 王开存, 王普才

(中国科学院 大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘 要: 城市热岛是影响城市及其周边地区天气气候和空气质量的重要因素。利用 2000—2005 年 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer 中分辨率成像光谱仪) 分裂窗算法反演得到的 1 km 分辨率地表温度产品分析了北京的城市热岛效应, 发现白天城市热岛强度具有明显的季节变化, 夏季最大值可以达到 10℃ 以上, 冬季变为冷岛, 即城市地表温度低于乡村, 最低值可以达到 -5℃; 模拟结果表明冬季城市冷岛的存在主要是城市和乡村地表热特性(热惯量)的差异引起的。夜间热岛强度的季节变化较小, 全年稳定在 5℃ 左右。选择北京周边地区比较典型的乡村耕地、山区森林以及永定河流域来研究乡村的选择对热岛强度的影响。发现选择不同的邻近区域作为乡村时, 不仅城市热岛(冷岛)强度有较大变化, 而且热岛强度的季节变化情况也有较大差异。冬季白天北京城市冷岛增加了近地层的大气稳定度, 可能会降低城市空气污染物的扩散能力, 加剧了北京冬季的空气污染。

关键词: 城市热岛; 城市冷岛; 地表温度; 热惯量; 空气污染

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Urban Heat (or Cool) Island over Beijing from MODIS Land Surface Temperature

WANG Jian kai, WANG Kai cun, WANG Pu cai

(Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Urban heat island (UHI) is one of the main factors influencing the weather, climate and environment over the urban and its surrounding area. In the present study, MODIS land surface temperature retrievals at 1 km resolution produced by the split window algorithm during the year of 2000—2005 are used to investigate the UHI over Beijing Metropolitan. It was found that the daytime UHI demonstrates distinctive seasonal variation, with the maximum during summer being larger than 10℃ and the minimum during winter being negative, which is called urban cool island here. Numerical simulation shows that the urban cool island mainly results from the difference of the surface thermal characteristics between urban and rural area. The seasonal variation of nighttime UHI is much less, being about 5℃ throughout a year. Beijing is surrounded by mountainous area in the west, the north and the northeast, whose height reach up to 2000m (See Figure 1). In the east and south of Beijing, the elevation is close to sea level with the complexity of the underlying surface. The different rural baseline not only influences the value of UHI but its seasonal variation. Three typical areas with different land surface types are selected to study the influence on UHI. The results show that the cropland area

收稿日期: 2006-06-08; 修订日期: 2006-07-10

基金项目: 基金重大国际合作项目“中国气溶胶特性及其辐射强迫的地面观测和卫星遥感研究”(编号: 40520120071); 国家自然科学基金(编号: 40675017); 中国科学院海外杰出青年学者基金项目(编号: 2003-2-9)以及遥感科学国家重点实验室开放基金(编号: SK050012)联合资助。

作者简介: 王建凯(1977—), 男, 2003年获得南京气象学院硕士学位, 2003—2006年在中国科学院大气物理研究所攻读博士学位, 主要方向卫星红外云图仿真, 城市热岛, 城市双向反射率研究。已发表论文 4 篇。E-mail: wangjianka@126.com

near Beijing city has uniform vegetation and is suitable to be studied as rural area. The cool island during winter (Spring) maybe increase the near surface air stability and aggravate the air pollution over Beijing urban area.

Key words: urban heat island, urban cool island, land surface temperature, thermal inertia, air pollution

1 引言

城市以建筑代替了原来的土地使用状况, 引起了局地气候环境的重要变化^[1,2], 这是驱动全球气候变化的一个重要因子^[3]。城市热环境的改变是城市气候环境变化的一个重要特征^[4], 是影响城市及其周边地区天气气候和空气质量的重要因素。对比城市和乡村的温度是研究城市热环境以及人类对城市热环境影响的一个有效的手段。大量的研究发现, 城区平均温度一般明显高于乡村^[5-12], 这一现象被称为城市热岛 (Urban Heat Island, UHI)。

近年来由于人们对环境越来越关注以及北京申奥成功, “绿色奥运”的口号逐渐深入人心, 北京城市热岛作为影响城市环境的重要因素也受到越来越多的重视。国家科技部启动了“首都北京及周边地区大气、水、土环境污染机理研究”^[13], 并由此产生了对北京城市热岛较为深入的研究^[14-21]。周明煜^[14]从天气学的角度分析了北京市热岛形成和削弱机制, 并划分了不同季节的热岛强度等级。在 1981 年 1、4、7、10 月, 张景哲等^[15]在选定的北京市区和郊区 110 多个观测点 (包含了北京市二环路以外) 进行了一次大型科学实验, 进行了 64 次气温观测, 对北京城区的热岛分布做了较为详细的研究, 获得了比较准确的热岛强度分布。于淑秋^[16]利用气象台站气温资料得出, 北京市热岛强度以平均每 10 年 0.31 K 的速度增加, 也有研究认为北京城市热岛强度的每 10 年增加量是 0.22 K^[17]和 0.25 K^[18]。

以上研究主要利用气象台站的气温观测来研究城市热岛。台站观测的气温资料精度较高, 误差一般小于 0.5 K。城市气温有较长时间的积累, 给研究城市热岛强度随时间的变化情况带来了方便。然而气象台站的气温观测受气象站的分布和数量的影响。张光智和徐祥德^[20]以及王郁和胡非^[21]认为位于北京城市中心区的朝阳区观测站因为周围高大植被的影响, 观测得到的气温要低于郊区, 不具有城区代表性。Hawkins 等^[22]指出不同乡村站点的选取也会引起城市热岛强度 4℃ 的变化。另外气象站点分布不规则, 相对密度较小, 这些都给利用气温研究城市热岛强度带来一定的难度。

近些年随着大量气象和环境卫星的发射, 卫星遥感反演地表温度为研究城市热岛强度带来有利条件^[19,23]。遥感反演的地表温度资料具有高的空间分辨率, 能够反映热环境的空间分布, 弥补了气象台站稀疏分布对城市热岛研究的影响。相对于气温, 地表温度受大尺度气团运动的影响也较小, 更适合于度量由于人为影响而产生城市热岛现象。白天, 通过地表对大气的加热产生对流, 消除夜间近地面逆温层, 形成混合层, 使城市排放的空气污染物扩散稀释, 在这方面来说, 利用地表温度表示的热岛强度更能直接地表示热岛强度对城市空气污染的影响。同时也应该认识到地表温度与气温是两个不同的概念。虽然二者的差异在夜间较小, 但是白天城市地表温度与其上空的气温差异较大, 晴朗的夏季中午城市地表温度与气温的差异可以达到 20℃^[24] (地气温度之差是近地面大气稳定性和地面对大气加热能力的指示因子)。

以往的研究表明, 城市对地表热环境的影响主要表现为城市温度高于乡村, 即热岛效应。我们利用 2000—2005 年 Terra 每天两次 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 中分辨率成像光谱仪) 的数据和 2002—2005 年 Aqua 每天两次的 MODIS 数据反演得到的 1 km 分辨率地表温度, 研究北京城区与远郊区地表温度的差异及其季节变化特征, 发现在冬季或春季存在比较明显的冷岛效应, 即城市温度低于乡村。

另外以往对北京城市热岛的分析研究中, 一般是利用位于城市和乡村观测站的气温之差来度量城市热岛强度, 很少研究不同乡村的选择对城市热岛强度的影响。我们选择北京周边不同地区作为乡村来研究不同乡村的选取对城市热岛的影响。

2 资料

MODIS 是搭载在美国宇航局对地观测系统 (Earth Observation System, EOS) 系列卫星 Aqua 和 Terra 上的重要仪器。MODIS 在 0.4—14.4 μm 波谱范围内共有 36 个通道, 其中包括 2 个 250 m 分辨率的可见光通道, 5 个 500 m 分辨率可见和近红外的通道。Aqua 在下午 13:30 左右过境和在夜间 1:30 左

右过境,此时地表温度分别接近日最高值和最低值,Terra在上午 10 30左右和晚上 22 30左右过境,分别处于地表升温 and 降温过程。对于北京地区来讲,每天有 4 次观测。比较适合于研究城市热岛强度及其日变化情况。

地表温度是 MODIS 资料业务化反演产品之一。MODIS 陆地地表温度组利用两种方法反演全球陆地地表温度:分裂窗算法^[25]和 MODIS 白天/夜间陆地地表温度算法^[26]。相对于 MODIS 白天/夜间陆地地表温度算法,分裂窗算法反演得到的地表温度精度较高,具有较好的稳定性^[27],它利用了大气窗区两个热红外通道 MODIS 通道 31 (10.78—11.28 μm)和 32 (11.77—12.27 μm)的地表比辐射率^[28]和这两个通道的亮温作为输入条件进行地面温度的反演,对普通意义上的分裂窗算法进行了改进,具有较高的精度^[25]。MODIS 白天/夜间陆地地表温度算法对残留云污染以及迭代初值敏感,这些将会在 MODIS 第 5 版的资料处理中给予考虑,相应的地表温度产品质量也将得到提高^[27]。大量的研究表明,MODIS 分裂窗算法反演得到的地表温度达到了 1K(1 σ)的精度^[27,29—31]。另外,分裂窗算法反演得到的地表温度的分辨率保持了原观测的分辨率,空间分辨率较高(1 km)。产品中同时给出了 MODIS 第 31 和 32 通道的发射率。

本文使用了分裂窗算法反演的第 4 版 1 km 分辨率 2000—2005 年连续的 8 天平均 LST 产品(Terra 从 2000 年 1 月至 2005 年末,Aqua 从 2002 年 7 月至 2005 年末)。此资料可以从 NASA 提供的相

关网站直接下载。MODIS 第 4 版地表温度资料以 HDF 格式存储,地图投影为正弦投影,对资料采用等经纬度投影后,它的分辨率为 0.01°,完全可以满足研究城市及周边区域的需要。

3 结 果

3.1 乡村的选取对热岛强度的影响

城市热岛强度定义为城市中心区温度与郊区的温度差值^[32]。用来表征由于城市结构造所成的城市区域温度高于乡村的程度。在某些时段会出现城市区域温度低于乡村的情况,即 $\Delta T < 0$,我们在此称之为城市冷岛。一般选取城市建筑和人口较为密集的围绕市中心区域,此区域较为容易判断和选取。郊区的选择是决定热岛强度分析的关键因素。由于城市区域的不规则性,城市的边缘地区有可能具有与城市相似的地表结构,这些地区本身就具有一定的热岛效应,如果以这些地区作为城市的郊区,则所分析的城区温度强度在一定程度上会被减弱。

从图 1(a)可以看出,北京西部、北部和东北部环山,东部和南部为平原。图 1(b)给出了研究区域内的地表覆盖状况,图中色标代表不同的地物类型:0 水体、1 常绿针叶林、2 常绿阔叶林、3 落叶针叶林、4 落叶阔叶林、5 混交林、6 密闭灌木区、7 稀疏灌木区、8 木质草原、9 稀树草原、10 草原、11 永久湿地、12 耕地、13 城市、14 耕地草地混合区、15 冰雪、16 荒地。从图中可以看出,山区主要是森林,混交林,灌木覆盖(以后统称为森林),山谷内平原主要是耕地。

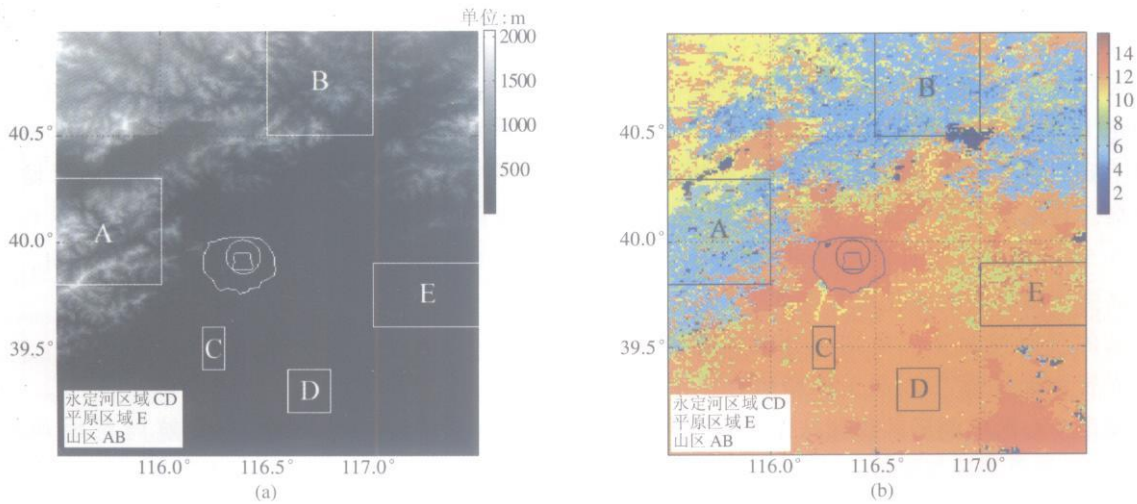


图 1 (a) 北京地区海拔高度图; (b) 北京地区地表分类图
(图中心部分, 不规则闭合曲线分别为北京市二环公路和五环公路)

Fig 1 (a) The topography of the Beijing region (b) Land cover types over the Beijing region

(The Positions of the second and fifth round city roads of Beijing city from GPS global position system measurements are also shown)

图 2 为 Landsat TM 30m 分辨率的可见光照片。图 2 中北京城区 (暗色) 区域比较明显, 我们取绿色圆环以内的区域代表北京城市区域。为了研究郊区的选取对城市热岛强度的影响, 本文共选取了 5 个区域作为郊区的待选, 这 5 个区包含了北京市区及其周围典型的地表覆盖, 见表 1, 并在图 1 (b) 中标出。其中包含了两块为永定河流域。在研究中我们发现, 这两个区域反照率较高, 植被覆盖度低, 特别是春季^[33]。选取乡村耕地区域作为郊区, 主要是由于在该区域内城市类型的下垫面面积较少 (有村庄和城镇) 同时选取了足够大的区域来进行平均可

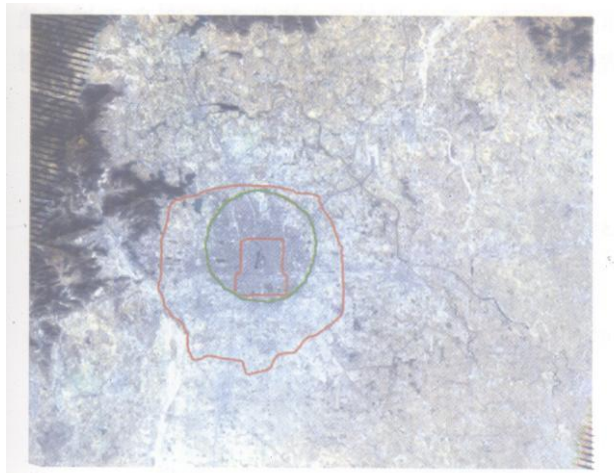


图 2 Landsat 7 高分辨率北京地区可见光图像
(不规则闭合曲线分别为北京市二环路和五环路,
两曲线之间的圆圈为文中选取的城区范围)
Fig 2 Landsat 7 image over Beijing
(The positions of the second and fifth round city roads of Beijing city
was plotted. And the range of Beijing city selected in
this paper was plotted too)

以降低误差。

表 1 显示不同的乡村的选择, 不仅对城市热岛 (冷岛) 强度有较大影响, 还会对热岛的季节变化有较大的影响。如图 1, 森林由于主要位于西北部山区, 海拔较高, 最高点海拔超过了 2000m, 受空气随高度垂直递减 (干绝热递减率, 即每上升 100m 气温下降约 0.6℃) 和森林的影响, 此地区的地表温度最低, 所得到的北京热岛强度最大。春季永定河区域植被覆盖度较低^[34], 当选择永定河流域为对照乡村时, 春季热岛强度为较大的负值, 即冷岛。表 1 同时还表明, 除海拔较高的山区外, 无论选择哪一种地表作为对照乡村, 冬季的热岛强度均为负, 即为冷岛。北京市气象局在 1986 年在北京城区的前门和郊区的丰台对气温进行了气温的加密观测, 取得了 1 月, 4 月, 7 月, 10 月平均的每小时一次的平均气温观测, 发现夜间城区 (前门) 比郊区 (丰台) 气温高, 但是在中午附近, 1 月和 10 月都出现了郊区 (丰台) 气温高于城区 (前门) 的情况^[35]。

定义城市热岛强度的目的是表征由于城市建筑等人类的影响所引起的城市气候环境变化。对于山区海拔较高, 温度明显低于同纬度平原, 不符合做热岛强度分析的要求。在永定河流域除夏季外多为裸露沙土地, 所以在太阳辐射的作用下升温较快。从年平均地表温度图上看, 永定河流域地表温度较高, 与城市接近。从季节平均来看, 除夏季外, 其他季节与城市基本相同。用这个区域来表征城市气候的变化并不合适。另外, 永定河区域并不是北京周边郊区的代表性区域。最终选取了距离北京有一段距离的同海拔平原区作为北京的城市郊区。平原区从年

表 1 选择不同区域作为郊区时的北京市白天 5 年的四季平均热岛强度
Table 1 The daytime seasonal averaged urban heat island calculated using different rural baseline /℃

		平原区 E	山区 A	山区 B	永定河区 C	永定河区 D
	纬度 (°N)	39.6—39.9	39.8—40.3	40.5—41	39.4—39.6	39.2—39.4
	经度 (°E)	117—117.5	115.5—116	116.5—117	116.2—116.3	116.6—116.8
春季	Aqua (13.30)	1.4	4.8	5.2	−0.4	−3.8
	Terra (10.30)	1.2	3.6	4.3	−1.2	−3.9
夏季	Aqua (13.30)	5.7	9.9	9.7	4.6	5.5
	Terra (10.30)	4.8	7.9	8.4	4.5	3.9
秋季	Aqua (13.30)	2.6	5.3	5.5	1.6	2.0
	Terra (10.30)	1.8	4.6	4.9	1.3	1.4
冬季	Aqua (13.30)	−1.9	1.8	2.5	−0.2	−1.8
	Terra (10.30)	−1.5	1.9	3.0	−0.6	−1.3

平均温度和季节平均温度来看,属于植被覆盖度高,分布较为均匀的地区,而且在此区域内城镇较少,能够反映同纬度地区平原的气候特征,进而能真实反映出北京城市的热岛强度。

3.2 城市热岛(冷岛)强度以及季节变化

图 3 给出了 2000—2005 年北京地区地表温度的季节平均。图中蓝色不规则闭合曲线分别为北京市二环路和五环路,黑色曲线和方框为选取的城市区域和乡村区域。城市热岛(冷岛)的分析选取平原区作为郊区。

春季(3—5月)(图 3(a)),北京城区及永定河区域植被较少,地面温度较高,而平原地区以农田为

主,地表植被覆盖较好(例如春小麦)。北京城区及永定河区域地表温度接近。在北京二环路以北有较大面积的绿化区,植被覆盖较好,其热岛强度很低,近似为 0°。

夏季(6—8月)(图 3(b)),北京城区的热岛强度和热岛面积都增至最大值,城市热岛范围超出五环路,通州区和石景山区都有较高的热岛强度。

秋季(9—11月)(图 3(c)),北京城区的热岛强度和热岛面积减小。

冬季(12月至次年 2月)(图 3(d)),北京城区呈现冷岛效应,这是由于冬季白天,郊区地面裸露土壤较为干燥,蒸发量较小,其升温速度高于城区地表。另一方面原因是城区污染物对太阳辐射有散射

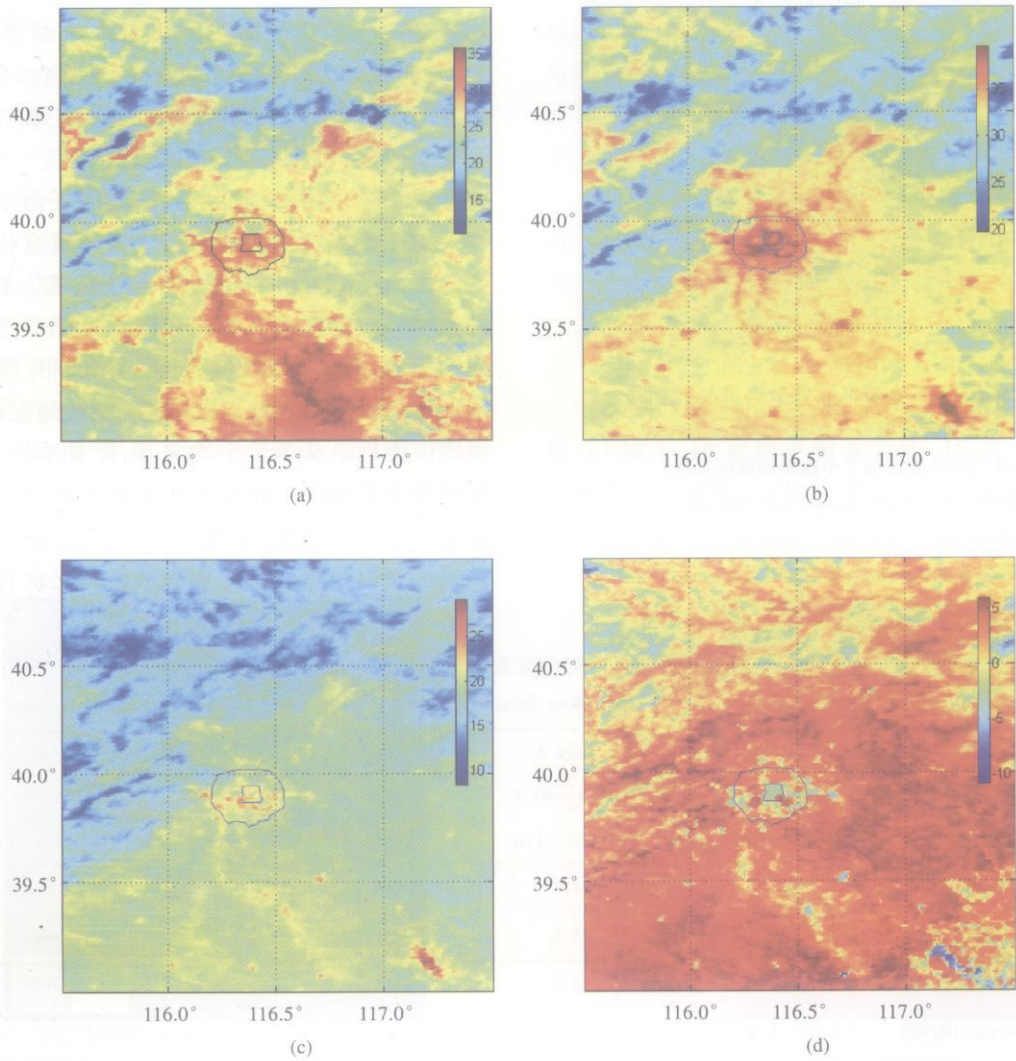


图 3 2000—2005 年北京地区白天(10:30)地表温度的季节平均
(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig 3 The daytime seasonal averaged land surface temperature during 2000—2005 over Beijing region using the data collected by Terra (at about 10:30 Beijing Time)

(a) Spring (b) Summer (c) Autumn (d) Winter

和吸收作用, 很大程度削弱了到达地表的太阳辐射^[34-36]。

图 4 给出了夜间北京地表温度图。城市中心区

的热岛比较明显, 城市的轮廓比较明显。相对白天的地表温度状况, 夜间乡村地区的地表温度受地表状况的影响要小得多, 没有出现永定河流域的高温区。

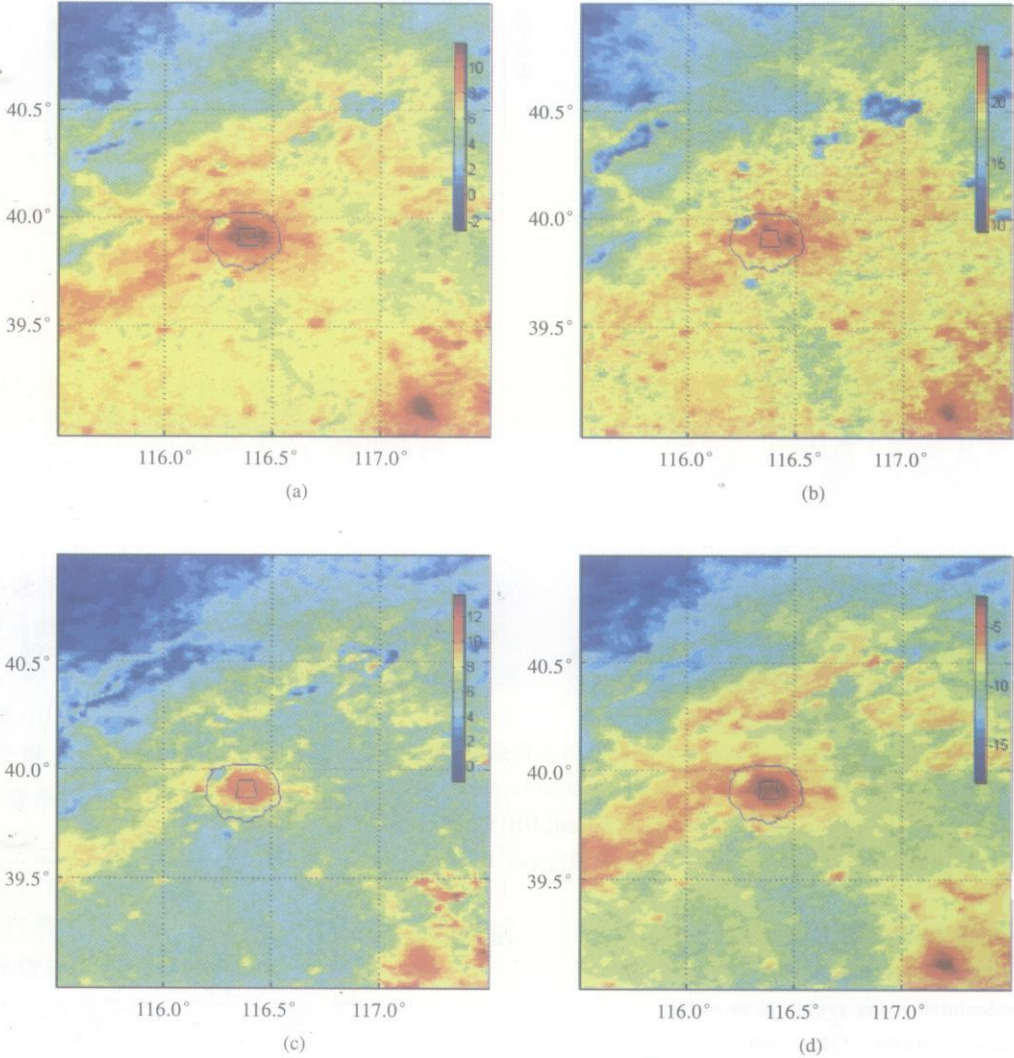


图 4 2000—2005 年北京地区夜间 (22—30) 地表温度的季节平均
(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig 4 Nighttime seasonal averaged land surface temperature during 2000—2005 over Beijing region using the data collected by Terra MODIS at about 22—30 Beijing Time
(a) Spring (b) Summer (c) Autumn (d) Winter

图 5 给出了 2000—2005 年北京白天和夜间热岛 (冷岛) 强度的时间序列。可以看出白天热岛强度的季节变化非常大, 夏季的最大值与冬季的最小值有 15℃ 左右的变化区间。相对来说夜间热岛强度的季节变化要小的多。表 1 和表 2 给出了热岛强度的季节平均状况。

3.3 城市冷岛形成机制分析

城市热岛研究已经有很长时间的历史, 有很多

有关城市热岛形成的原因被提出。Okada^[37]对利用气温表征的城市热岛现象的形成原因进行了总结, 指出城市热岛的形成原因主要有以下 5 种: (1) 地表热特性的差异及其产生的地表热储存和热释放; (2) 城市地表冠层导致的太阳光多次反射, 使地表对太阳辐射的反照率降低, 吸收率增加; (3) 城市冠层的多次反射吸收, 是城市地表热释放效率降低, 主要表现在比辐射率上; (4) 因城市的弱透水性, 用于潜热蒸发的能量城市要比乡村少的多, 更多的能量

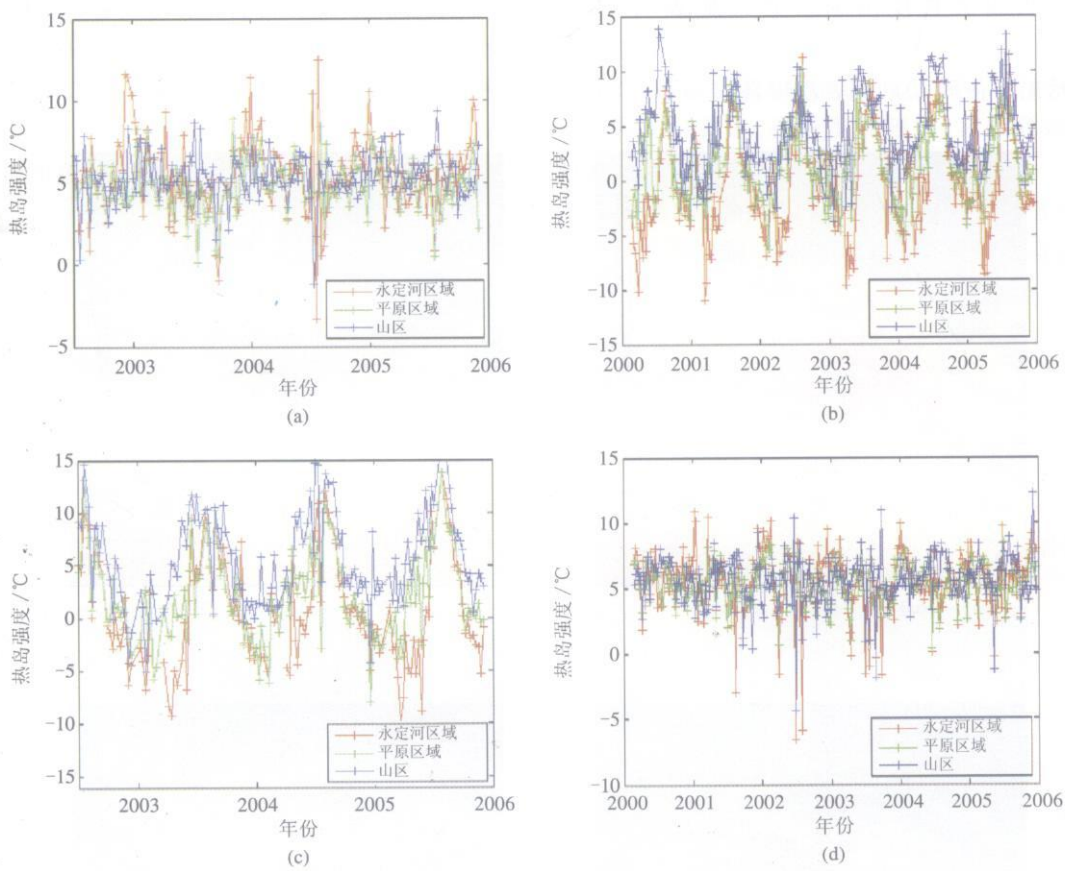


图 5 北京 Aqua 和 Terra 卫星观测白天和夜间热岛 (冷岛) 强度的时间序列图

(a) Aqua 夜间 (1: 30); (b) Terra 白天 (10: 30); (c) Aqua 白天 (13: 30); (d) Terra 夜间 (22: 30)

Fig. 5 The time series of Urban Heat Island (UHI) calculated using different rural baseline

(a) Aqua night (at about 1: 30); (b) Terra day (at about 10: 30); (c) Aqua day (at about 13: 30); (d) Terra night (at about 22: 30)

表 2 2000—2005 年夜间城市热岛强度的季节平均

Table 2 Nighttime seasonal averaged urban heat island calculated using cropland as rural baseline during 2000—2005 /°C

热岛强度	春季	夏季	秋季	冬季
Aqua (01:30)	5.1	4.3	4.7	5.7
Terra (22:30)	5.5	4.9	5.1	6.0

用来加热大气和地表; (5) 人为热源。Wang 等^[38]指出地表热特性的城乡差异在太阳热辐射的季节变化驱动下产生了白天城市热岛, 夜间热岛强度主要受人为热源的控制, 所以季节变化较小。地表能量平衡在感热和潜热的能量分配对白天热岛形成也起着重要作用, 冠层的多次反射对地表长波辐射发射率的影响导致的城乡差异很小, 几乎可以忽略不计。

在这里我们仅仅给出冬季和春季冷岛的形成原因给出模拟结果。影响地表温度变化的热特性可以

用热惯量表示^[39-40]:

$$P = \sqrt{\rho \cdot c \cdot K} \tag{1}$$

式中, K 是热传导率 ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$), ρ 为密度 (kg m^{-3}), c 为比热 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) 热惯量的单位是 $\text{W s}^{1/2} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ 。土壤的热惯量取值范围^[41]为 500—2500 $\text{W s}^{1/2} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ 之间, 植被的热惯量取值范围为 2000—3000 $\text{W s}^{1/2} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$, 混凝土和砖的热惯量分别为 1400 $\text{W s}^{1/2} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ 和 1300 $\text{W s}^{1/2} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ 。

地表温度的日变化可以用公式近似模拟^[42]:

$$\delta T(t) = J(t) \frac{\sin[\omega t - (\pi/4)]}{\omega^{1/2} \cdot P} \tag{2}$$

式中, $\delta T(t) = T(t) - T_m$, $\omega = 2\pi / (24 \times 60 \times 60) \text{ s}^{-1}$, t 为时间 (s), P 为热惯量, $J(t)$ 地表短波净辐射。

在模拟过程中取乡村和城市的地表短波净辐射相等的近似条件。图 6 为北京城市和乡村 (土壤) 冬季地表温度日变化的模拟结果, 其中乡村 (土壤) 和城市 (混凝土) 的热惯量分别取为 882 和 1428 $\text{W s}^{1/2} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ 。结果表明在夜间, 城市地表温

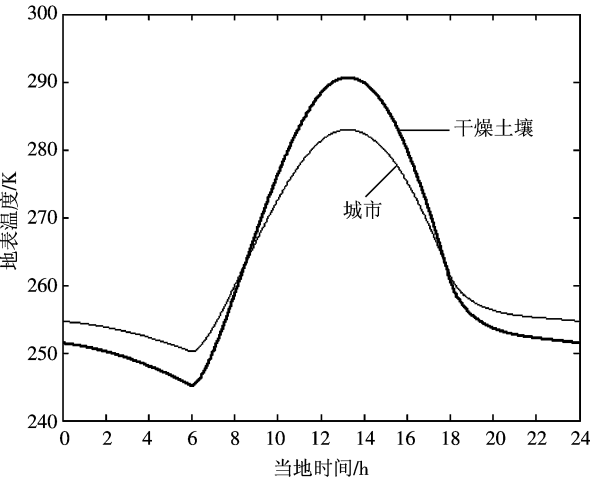


图 6 由 (2) 式模拟的冬季城市与郊区地表温度
Fig 6 The simulated and surface temperature over urban and rural area using equation (2)

度比乡村高 3K。白天, 城市为冷岛效应, 在 14:00 (北京时间) 最强, 与 Aqua 过境时间接近。从表 1 可以看出, 当地时间 13:30 的城市冷岛效应强于 10:30。另外, 从 (2) 式也可以看出, 随着土壤湿度降低, 其热惯量减小, 在短波净辐射不变的情况下, 白天冷岛强度就会增强。永定河地区春季植被盖度仍然很低, 因为春季降水很少, 土壤湿度也逐渐降低, 这样在春季选定永定河区域作为乡村, 城市的冷岛效应更为明显。而在夏季, 乡村的地表植被覆盖要优于城市, 乡村热惯量大于城市, 在一定程度上导致了城市的热岛效应。

需要注意的是以上模拟过程没有考虑城市人为热源的影响。另外, 公式 (2) 忽略了地气潜热通量, 上述模拟仅仅适用于地气潜热交换很小的情况, 这一要求在本文在冬季或永定河地区春季是满足, 此时地表植被盖度很低, 土壤含水量小。

3.4 城市热岛 (冷岛) 与空气污染的关系

城市人为排放的污染在大气中的扩散和稀释作用主要可以分成两类: 水平扩散和垂直扩散。影响水平扩散的主要因子为水平风速, 由于北京三面环山, 山的阻挡是北京冬季水平风速很小, 因此污染物的水平扩散效果不明显。污染物的垂直扩散强度主要决定于空气垂直对流的强度, 它主要依赖地表对大气的加热。

苗曼倩^[43]对夜间城市热岛效应对污染物扩散规律进行了数值模拟研究, 指出热岛效应使近地面源所造成的地面污染物的浓度减小, 这种减小以城

市热岛中心最为明显, 数量是无热岛效应时地面浓度的一半, 并指出其原因是城市热岛改变了大气层结稳定度, 使城市湍流扩散交换增强。又由于逆温层高度 (其下为城市夜间混合层) 增高扩大了污染物垂直扩散范围; 对地面源来说, 更多的污染物向上扩散稀释, 地面浓度减小。

这种解释也可以应用到北京城市的白天的状况。白天地表对大气的加热是近地面逆温层的破坏和混合层发展的主要原动力, 城市混合层的发展会带来城市空气污染物的扩散稀释。地表温度与气温之差可以表示层结稳定度以及湍流交换能力的大小。冬季冷岛的存在, 即城市地表温度低于郊区乡村的温度, 表明城市对大气的加热要小于乡村, 城市污染物的垂直扩散能力较低。这就造成了北京城市空气污染物的积累, 加剧了近地面空气污染。同时由于城市上空污染物对太阳辐射的吸收形成的逆温层的存在^[34], 较低的地表加热使得污染很难穿过逆温层, 加剧了污染物的积累。

污染物的吸收和散射作用有效地降低了达到城市上空的太阳辐射, 这是形成冬季白天城市冷岛的一个重要原因。冷岛同时又加剧了城市空气污染物的积累, 这就形成了一个恶性循环。

4 结 论

本文利用 2000—2005 年的 6 年 MODIS 1 km 分辨率的地表温度产品, 分析了北京市热岛强度的季节变化特征和分布特征。

结果发现白天热岛强度的季节变化较大, 夏季最强, 冬季为冷岛 (热岛强度为负值), 全年的热岛强度的有 20℃ 的变化区间。夜间热岛强度季节变化不明显。

不同乡村的选取会给热岛强度计算带来较大的偏差。当选择平原耕地, 山区森林, 和永定河流域作为乡村时, 热岛强度的会有 4℃ 的差异。通过对比发现东部平原区有覆盖较好的植被状况, 同时城镇较少, 海拔高度与北京相当, 能够代表北京郊区乡村。但, 除海拔较高的山区外, 不论选择哪一区域作为乡村地区, 冬季白天的冷岛现象都十分明显。

利用热惯量对地表温度进行了模拟, 结果表明冬季冷岛效应可以用城乡地表热特性的差异来解释。冬季, 北京城市重度空气污染的形成是多方面的, 比如更多的污染物 (采暖) 排放, 天气形式 (多高

气压控制)等因素,本文的研究表明城乡热环境的对比(冷岛)降低了近地面空气不稳定性,加重了近地面的空气污染。

参 考 文 献 (References)

- [1] Zhou S Z, Shu J. Urban Climatology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1994. [周淑贞,束炯.城市气候学[M].北京:气象出版社,1994.]
- [2] Xu X D, Tang X, Xu D H, et al. Urbanization Environmental Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002. [徐祥德,汤绪,徐大海等.城市化环境气象学引论[M].北京:气象出版社,2002.]
- [3] Roger A, Pielke Sr. Land Use and Climate Change [J]. Science, 2005, 310: 1625—1626.
- [4] Beijing Meteorological Bureau Reference Room. Urban Climate of Beijing [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1992. [北京市气象局气候资料室.北京城市气候[M].北京:气象出版社,1992.]
- [5] Tan H, Daisuke U, Shiro O, et al. Assessment with Satellite Data of the Urban Heat Island Effects in Asian Mega Cities [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006, 8: 34—48.
- [6] Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y. Daytime Urban Heat Island Effect in High-rise and High-density Residential Developments in Hong Kong [J]. Energy and Buildings, 2004, 36: 525—534.
- [7] William D S, Cynthia R, Lily P. Mitigation of the Heat Island Effect in Urban New Jersey [J]. Environmental Hazard, 2005, 6: 39—49.
- [8] Giridharan R, Lau S S Y, Ganesan S. Nocturnal Heat Island Effect in Urban Residential Developments of Hong Kong [J]. Energy and Buildings, 2005, 37: 964—971.
- [9] David R. Satellite measured Growth of the Urban Heat Island of Houston, Texas [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85: 282—289.
- [10] Hadass S, Eyal B D, Arich B. Spatial Distribution and Microscale Characteristics of the Urban Heat Island in Tel-Aviv, Israel [J]. Landscape and Urban Planning, 2000, 48: 1—8.
- [11] Alexander V L, Jorge E G, Amos W. Urban Heat Island Effect Analysis for San Juan, Puerto Rico [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 1731—1741.
- [12] Robert B, Lin Q L. Urban Heat Islands and Summer-time Convective Thunderstorms in Atlanta: Three Case Studies [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 507—516.
- [13] Xu X D, Zhou X J, Shi X H, et al. Special Issue on The Theory of Pollution and Controlling of Atmospheric Water and Soil Environment over the Capital Beijing and its Surrounding Area atmosphere [J]. Science in China (Series D), 2005, 48 (Supp.): 1—295. [徐祥德,周秀骥,施晓晖等.首都北京及周边地区大气、水、土壤环境污染机理与调控原理-大气部分专辑[J].中国科学 D 辑,2005,48(增刊):1—295.]
- [14] Zhou M Y, Qu S H, Li Y Y, et al. Heat Island in the Beijing Region and its Circulation Characters [J]. Journal of Environmental Science, 1980, 1(5): 12—18. [周明煜,曲绍厚,李玉英等.北京地区热岛和热岛环流特征[J].环境科学,1980,1(5):12—18.]
- [15] Zhang J Z, Liu J H, Zhou Y X, et al. Some Patterns of the Island in Beijing [J]. Acta Geographica Sinica, 1984, 12: 428—435. [张景哲,刘继韩,周一星等.北京城市热岛的几种类型[J].地理学报,1984,12:428—435.]
- [16] Yu S Q, Bian L G, Lin X C. The Relation between Urbanization and the Change of Beijing UHI [J]. Science in China (Series D), 2005, 35 (Supp.): 97—106. [于淑秋,卞林根,林学椿.北京城市热岛“尺度”变化与城市发展[J].中国科学 D 辑,2005,35(增刊):97—106.]
- [17] Ji C P, Liu W D, Xuan C Y. Impact of Urban Growth on Heat Island in Beijing [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49 (1): 69—77. [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.]
- [18] Lin X C, Yu S Q. Interdecadal Changes of Temperature in the Beijing Region and its Heat Island Effect [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48 (1): 39—45. [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.]
- [19] Zhang J H, Hou Y Y, Li G C, et al. Diurnal and Seasonal Variation of Urban Heat Island over Beijing Urban and Surrounding Region Using Satellite Remote Sensing and the Analysis of its Impact Factors [J]. Science in China (Series D), 2005, 48 (Supp.): 187—194. [张佳华,侯英雨,李贵才等.北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因素分析[J].中国科学 D 辑,2005,48(增刊):187—194.]
- [20] Zhang G Z, Xu X D, Wang J Z, et al. The Features and Variation of Urban Heat Island in Beijing and Vicinity [J]. Applied Meteorology, 2002, 13 (Supp.): 43—49. [张光智,徐祥德,王继志等.北京及周边城区城市尺度热岛特征及其演变[J].应用气象学报,2002,13(增刊):43—49.]
- [21] Wang Y, Hu F. Variations of the Urban Heat Island in Summer of the Recent 10 Years over Beijing and Environment Effect [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49 (1): 61—68. [王郁,胡非.近 10 年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应分析研究[J].地球物理学报,2006,49(1):61—68.]
- [22] Hawkins T W, Brazel A J, Stefanov W L, et al. The Role of Rural Variability in Urban Heat Island Determination for Phoenix, Arizona [J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43: 476—487.
- [23] Yan H, Deng L T. Character Analysis of Heat Island in Shanghai City Using Remote Sensing Parameters [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2004, 20 (5): 579—585. [延昊,邓莲堂.利用遥感地表参数分析上海市的热岛效应及治理对策[J].热带气象学报,2004,20(5):579—585.]
- [24] Stull B R. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Kluwer Academic Publishers, 1988. [Stull B R 著,杨长新译.

- 边界层气象学导论[M]. 北京: 气象出版社, 1988.]
- [25] Wan Z, Dozier J. A Generalized Split-window Algorithm for Retrieving Land-surface Temperature from Space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**: 892—905.
- [26] Wan Z, Li Z L. A Physics-Based Algorithm for Retrieving Land-surface Emissivity and Temperature from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**: 980—996.
- [27] Wang K, Wan Z, Liu J, et al. Evaluation and Improvement of the MODIS Land Surface Temperature/Emissivity Products Using Ground-based Measurements at a Semi-desert Site on the Western Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, in press.
- [28] Snyder W C, Wan Z. BRDF Models to Predict Spectral Reflectance and Emissivity in the Thermal Infrared[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**: 214—225.
- [29] Wan Z, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Quality Assessment and Validation of the MODIS Global Land Surface Temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(1): 261—274.
- [30] Wang K, Liu J, Wan Z, et al. Preliminary Accuracy Assessment of MODIS Land Surface Temperature Products at a Semi-desert Site[J]. *SPEIJ*, 2005, **5832**: 452—460.
- [31] Wan Z, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Validation of the Land Surface Temperature Products Retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 163—180.
- [32] Oke T R. City Size and the Urban Heat Island[J]. *Atmospheric Environment*, 1976, **7**: 769—779.
- [33] Yang J, Chen H B, Wang K C, et al. The Temporal and Spatial Distribution of Surface Albedo over Beijing Region Using MODIS and its Variation[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007(accepted). [杨娟, 陈洪滨, 王开存等. 利用 MODIS 卫星资料分析北京地区地表反照率时空分布及变化特征[J]. *遥感技术与应用*, 已接受, 2007.]
- [34] Xu X D, Bian L G, Ding G A, et al. The Theory and Technology for Urban Atmospheric Environment Observation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. [徐祥德, 卞林根, 丁国安等. 城市大气环境观测工程技术与原理[M]. 北京: 气象出版社, 2003.]
- [35] Beijing Meteorological Bureau Reference Room. Urban Climate of Beijing[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1992. [北京市气象局气候资料室. 北京城市气候[M]. 北京: 气象出版社, 1992.]
- [36] Wang X, Bian L G, Lu C G. A Study of Characteristic Parameters of Atmosphere Boundary Layer over Beijing in Urban and Suburban Area in Autumn[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, **8**(4): 475—484. [王欣, 卞林根, 谌昌贵. 北京市秋季城区和郊区大气边界层参数观测分析[J]. *气候与环境研究*, 2003, **8**(4): 475—484.]
- [37] Oke T R. Boundary Layer Climates[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
- [38] Wang K, Wang J, Wang P C, et al. Different Influences of Urbanization on Surface Characteristics from MODIS: A Case Study for Beijing Metropolitan[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006.
- [39] Zhang R H. A Thermal Inertia Model for Soil Moisture and its Application[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, **36**(12): 924—927. [张仁华. 土壤含水量的热惯量模型及其应用[J]. *科学通报*, 1991, **36**(12): 924—927.]
- [40] Zhang R H, Sun X M, Zhu Z L, et al. A Remote Sensing Model for Monitoring Soil Evaporation Based on Thermal Inertia and its Validation in Shapotou Area of Gansu Province[J]. *Science in China(Series D)*, 2002, **32**(12): 1041—1050. [张仁华, 孙晓敏, 朱治林等. 以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感信息模型及在甘肃沙坡头地区的验证[J]. *中国科学(D)*, 2002, **32**(12): 1041—1050.]
- [41] Sobrino J A, Kharraz M H. Combining Afternoon and Morning NOAA Satellites for Thermal Inertia Estimation: Algorithm and Its Testing with Hydrologic Atmospheric Pilot Experiments at the Daq[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(D8): 9445—9453.
- [42] Miao M Q. Numerical Simulation of the UHI Effects on the Pollutant Dispersion[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1990, **14**(2): 207—214. [苗曼倩. 城市热岛效应对污染物扩散规律影响的数值模拟[J]. *大气科学*, 1990, **14**(2): 207—214.]