

刘勇洪, 权维俊. 2014. 北京城市高温遥感指标初探与时空格局分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (3): 332–342, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12190.
Liu Yonghong, Quan Weijun. 2014. Research on high temperature indices of Beijing city and its spatiotemporal pattern based on satellite data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (3): 332–342.

北京城市高温遥感指标初探与时空格局分析

刘勇洪 权维俊

北京市气候中心, 北京 100089

摘要 利用北京高温天气下的 NOAA18/AVHRR 卫星资料与气象台站资料, 分析了日最高气温与遥感反演的城市地表温度的关系, 初步确定了地表高温阈值并建立了高温遥感指标, 并利用 1989~2008 年(缺 2002 年)6~9 月 NOAA/AVHRR 资料开展了北京地区高温时空格局分析研究。指标初步研究表明: 北京气温高温值为 35、37、40 °C 对应的遥感地表高温值分别为 44、47、52 °C, 可以较好地适用于北京平原地区; 利用该阈值建立的地表高温强度指标 (LSHI) 对北京平原高温的监测与气象台站高温监测基本一致, 而高温比例指数指标 (LSHP) 能有效反映出城市高温空间强弱和时间差异。北京遥感地表高温空间格局分析显示: 夏季(6~8 月)旬平均遥感地表温度 ≥ 44 °C 年出现概率不超过 50%, 广泛分布于城区和平原区; 旬平均遥感地表温度 ≥ 47 °C 年出现概率不超过 40%, 集中于北京五环内; 旬平均遥感地表温度 ≥ 52 °C 年出现概率不超过 15%, 集中于城区; 6~9 月高温出现的概率高值区一般都集中于五环内, 其中旬平均遥感地表温度 ≥ 44 °C、 ≥ 47 °C、 ≥ 52 °C 的出现概率分别为 80%~100%、60%~80%、10%~40%。

关键词 高温指标 高温强度 高温比例指数 时空格局 北京

文章编号 1006-9585 (2014) 03-0332-11

中图分类号 P407.8

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12190

Research on High Temperature Indices of Beijing City and Its Spatiotemporal Pattern Based on Satellite Data

LIU Yonghong and QUAN Weijun

Beijing Municipal Climate Center, Beijing 100089

Abstract Remote sensing land surface high temperature indices of Beijing are built from NOAA18/AVHRR satellite data and meteorological station data. Based on these indices, high temperature spatiotemporal patterns were analyzed using data collected from 1989 to 2008 (lack 2002). Results show that remote sensing land surface temperatures of 44, 47, and 52 °C correspond to air temperatures of 35, 37, and 40 °C, respectively. In addition, the authors found that high temperature indices retrieved from remote sensing are most suitable for high temperature analysis of the plain areas of Beijing. The high temperature characteristics reflected by the land surface high temperature intensity index are about the same as those from weather station data. The land surface high temperature proportion index is presented as a useful tool for explaining the intensity and spatial differences of high temperature. In summer (from June to August) the probabilities of ten-day average land surface temperatures ≥ 44 °C are generally less than 50%, and are widely distributed in urban and plain area. Probabilities of ten-day average land temperatures ≥ 47 °C are generally less than 40%, and are concentrated within the five-circle regions. Probabilities of ten-day average land temperatures ≥ 52 °C are generally less than 15%, and are concentrated within urban area. Between June and September, higher probabilities of high land surface

收稿日期 2012-11-15 收到, 2013-06-24 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41175015, 北京市科技计划项目 Z111100074211010, 城市气象科学研究基金项目 IUMKY&UMRF201102, 北京市气象局“城市边界层观测分析与精细模式”创新团队

作者简介 刘勇洪, 男, 1974 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事卫星遥感应用与农业气象等的研究。E-mail: lyh7414@163.com

temperature are concentrated in the five-circle area. The probabilities of ten-day average land surface temperature being $\geq 44^{\circ}\text{C}$, $\geq 47^{\circ}\text{C}$, and $\geq 52^{\circ}\text{C}$ are 80%–100%, 60%–80%, and 10%–40%.

Keywords High temperature indices, High temperature intensity, High temperature proportion index, Spatiotemporal pattern, Beijing

1 引言

近年来,由于全球气候变化和城市热岛效应,极端高温事件日益突出,城市高温正逐渐成为一种严重的城市气象灾害(李庆祥等,2006;杨红龙等,2010),它对城市尤其是人口密集的超大城市的安全运行构成重要威胁,如2010年7月3~6日北京出现的高温热浪造成日供水量接近极限、电网负荷超纪录、中暑人数和心脑血管病人明显增加、公交车自燃等危险事件,对北京城市安全运行造成巨大压力(京华时报,2010)。在气候变暖和快速城市化的背景下,高温危害的严重性日益凸现,越来越多国内外学者对高温时空分布特征、高温指标、形成机制、高温影响评估及缓解对策进行了广泛研究和分析。例如国内众多学者基于气象资料开展了重庆、武汉、长江三角洲、北京、京津冀等大城市和城市群高温特征分析(贺懿华等,2007;张天宇等,2008;吴荣军等,2010;郑祚芳,2011;张国华等,2012)及城市高温指标的研究(黄卓等,2011;张天宇等,2011)。在高温形成机制方面,谢德寿(1994)、季崇萍等(2006)指出城市热岛效应和城市化是城市高温灾害的重要原因,郑祚芳等(2006a)、谈建国等(2008)、张旭阳等(2010)分别研究了北京、上海、西安城市热岛效应对城市高温的影响。在高温影响评估方面,张可慧等(2011)、谈建国和黄家鑫(2004)分别开展了城市高温对工业交通和人体健康的影响研究,范碧航等(2011)建立了长春市高温灾害评估指标体系。除了上述利用台站气象观测资料开展高温研究外,数值模式作为一种重要的手段也被引入高温研究中,郑祚芳等(2006b)、王秋云等(2011)、曾新民等(2011)、马红云等(2011)利用不同数值模式开展了下垫面参数对北京、江苏、华南地区及长三角城市群高温天气的影响模拟,这对城市高温的形成机制解释有重要意义。近年来,遥感作为一种具有空间分辨率高、覆盖范围广、直观定量等优点的分析手段(肖荣波等,2005),在城市热岛与城市热环境空间格局分析研究中发挥重要作用,丁金才等

(2002)、方永侠等(2011)利用卫星热红外遥感资料开展了上海、北京城市热岛的研究,陈云浩等(2002)、宋艳瞰等(2007)、江学顶和夏北成(2007)利用卫星热红外遥感资料分别开展了上海、深圳、珠三角城市群的空间格局分析研究。为了应用热红外遥感实现气温与地表温度的空间拓展,前人开展了大量的卫星反演温度产品与地面实际观测值之间的对比分析。延昊等(2001)研究指出基于NOAA/AVHRR卫星反演得到的晴空地表温度与气温和地温的宏观变化规律是一致的,刘放等(2010)分析得出MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, 中分辨率成像光谱仪)亮温均值与地温和气温在月时间尺度上具有很好相关性,闵文彬和李跃清(2010)利用MODIS热红外资料发现四川盆地遥感反演的地温与气温差值同气象台站观测的地温与气温差值具有显著正相关关系,闫丽莉等(2012)利用NOAA/AVHRR卫星资料分析得出河北怀来地区亮温、气温及0.2 m地温三者之间呈现很好的相关性,这为利用卫星热红外遥感资料来研究城市高温(主要以最高气温来反映)提供了一种可行性。由于现行的气象观测规范一般要求气象观测环境避免遭受城市化影响,因此气象观测资料存在站点分布不均匀、城市观测点稀少、代表范围有限、确定高温位置较粗等不足,而卫星遥感相对于气象台站具有空间范围广、空间分辨率高、监测值分布均匀的优势,能有效监测基于卫星像元级的空间单元高温时空变化,并已逐渐成为开展城市热环境(城市热岛、高温热浪)监测评估业务的一种重要手段。而国内目前利用卫星遥感资料开展城市高温的研究很少,主要困难是一方面如何将遥感监测的地表高温指标与气温表征的高温指标相匹配确保两种指标定义高温过程的一致性,另一方面如何以遥感监测的地表温度来反映城市高温的强度和时空格局变化,这些都是在高温遥感监测时需要值得研究的科学问题。北京地处华北平原西北隅,三面环山,特殊的地形和大城市的特点使得北京市成为局地高温易发区,利用卫星遥感资料初步研究城市高温指标并分析城市高温区域的时空变化对对开展北京大城市高温监测评估

遥感业务具有重要意义。

2 资料与方法

气象资料：北京地区 2007~2012 年 6~9 月晴空天气下 20 个常规气象台站中单站日最高气温 $\geq 33^{\circ}\text{C}$ 日期下的日最高气温与 0 cm 最高地温资料，由北京市气候中心提供。其中“日最高气温 $\geq 33^{\circ}\text{C}$ ”条件的选择主要是考虑可以包括更多符合真实高温天气的样例（如观测站点气温超过 33°C 但又没有达到 35°C ，而局部地区气温可能超过 35°C ）。

卫星遥感资料：(1) 国家卫星气象中心接收和深加工处理的长时间序列（1989 年 1 月至 2008 年 12 月）逐日 NOAA/AVHRR L1B 数据集。该数据集空间覆盖范围为 ($10^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ}\text{E} \sim 145^{\circ}\text{E}$)，空间分辨率为 0.01° (纬度) $\times 0.01^{\circ}$ (经度)。该数据集在生成过程中进行了如下处理：多颗卫星资料的标准化定标处理、投影变换、精定位处理、轨道漂移订正及滤波处理、太阳高度角订正、红外临边变暗订正。此外，还采用了来源于国家卫星气象中心处理的云量数据（刘健和张里阳，2011），作为晴空像元识别和地表温度反演的辅助数据。数据集主要内容为：1、2 通道反射率，3、4、5 通道亮温，太阳天顶角，卫星天顶角，相对方位角。(2) 北京市气候中心的 2007~2012 年 6~9 月日最高气温 $\geq 33^{\circ}\text{C}$ 日期下对应的晴空 NOAA18/AVHRR1B 数据。

地表温度反演：NOAA18/AVHRR 1B 卫星日地表温度和 NOAA/AVHRR 旬平均地表温度数据集的生成均采用改进型的 Becker 分裂窗方法，该地表温度反演结果与国际上广泛应用的 MODIS 地表温度产品具有较好的一致性 (Quan et al., 2012)。主要处理过程如下：

(1) 选择上述 1989~2008 年逐日的 AVHRR 1B 数据集及对应的 AVHRR 云量数据为输入数据，通过云量数据将像元分为晴空像元和有云像元两类；

(2) 对晴空像元采用改进型 Becker “分裂窗” LST (Land Surface Temperature) 反演算法 (Quan et al., 2012)，生成逐日 1 km 分辨率的瞬时地表温度数据集；

(3) 对 1989~2008 年逐日地表温度数据集采用均值合成算法生成旬地表温度数据集，从而产生北京地区 1989~2008 年（缺 2002 年）共 19 年 6~

9 月的逐旬地表温度数据集；

(4) 对 2007~2012 年 6~9 月日最高气温 $\geq 33^{\circ}\text{C}$ 日期下对应的晴空 NOAA18/AVHRR1B 数据采用改进型 Becker “分裂窗” LST 反演算法 (Quan et al., 2012)，生成日 1 km 分辨率的瞬时地表温度产品。

3 遥感高温指标的建立

3.1 地表高温阈值的确定

一般情况下气温与下垫面温度的日变化呈单峰曲线且变化趋势比较一致 (邓天宏等, 2009; 李蕊等, 2011)，因此可以采用白天中午反映下垫面温度特征的 NOAA18/AVHRR 资料来分析城市高温。本文挑选的 NOAA18/AVHRR 卫星资料过境时间分布在 12:50 (北京时间, 下同) 至 14:09 之间，这与最高气温一般出现的时间约为午后 14:00 左右接近 (周淑贞等, 1997)。为消除卫星遥感图像的定位不确定性，根据北京 20 个常规气象台站的经纬度位置，确定 NOAA18/AVHRR 遥感图像上相应位置 3×3 像元范围内的平均地表温度为该台站对应的遥感地表温度。以 20 站中日最高气温 $\geq 33^{\circ}\text{C}$ 下气象台站的日最高气温、0 cm 最高地温与 NOAA18/AVHRR 卫星遥感反演的地表温度分别进行二者之间的回归分析。

建立的北京气象台站观测到的最高气温 T_h 与 0 cm 最高地温 T_{s0} 的回归关系式如下：

$$T_{s0} = 2.2557T_h - 38.137, n=209, R^2=0.3531^{**}, \quad (1)$$

其中， n 表示样本数， R^2 为决定系数， ** 表示方程通过 0.01 水平的显著性检验。建立的遥感地表温度 T_s 与 0 cm 最高地温 T_{s0} 之间的回归关系式如下：

$$T_s = 0.5807T_h + 28.288, n=209, R^2=0.0942. \quad (2)$$

由式 (1) 可知，气象台站观测的最高气温与 0 cm 最高地温有一定的正相关性，但 R^2 仅为 0.3531，表明利用 0 cm 最高地温指标来反映高温天气并不十分理想，这是由于气象台站观测的气温是周边较大范围的大气温度状况，而 0 cm 地温是监测的 $2 \times 4 \text{ m}^2$ 面积大小的局部裸露土壤表面温度，土壤温度因土壤种类、土壤含水量等差异，具有很强的局地性，造成地温与气温差异波动较大。式 (2) 表明，气象台站观测的 0 cm 最高地温与遥感观测地温相关性很小， R^2 仅为 0.0942，这是由于 NOAA 遥感观测的地表温度是卫星像元尺度 (1 km^2) 温度，在

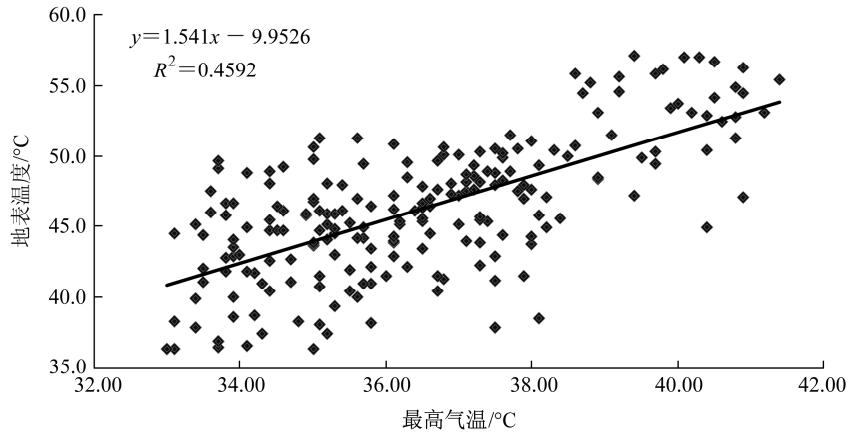


图 1 北京气象台站最高气温与 NOAA18/AVHRR 卫星遥感地表温度关系

Fig. 1 Relation of maximum air temperature from weather station data and land surface temperature from NOAA18/AVHRR satellite data in Beijing

这个尺度下大部分像元是混合像元，对于非均匀下垫面，不同像元内的组分组成是不同的，而气象观测的地温只是像元内土壤组分温度，因此二者观测值差异很大。

北京气象台站观测到的最高气温 T_h 与遥感监测的地表温度 T_s 的关系如图 1 所示，二者建立的回归关系式如下：

$$T_s = 1.541T_h - 9.9526, n=209, R^2 = 0.4592^{**}. \quad (3)$$

从图 1 和式 (3) 可知， T_s 与 T_h 具有明显的正相关关系，回归关系式的 R^2 为 0.4592，明显高于 T_h 与 0 cm 最高地温 T_{s0} 的 R^2 (0.3531)，表明遥感地表高温在区域尺度上 (1 km^2 以上) 能更好地反映最高气温分布状况，因此可由该回归关系式来初步确定 NOAA 遥感高温指标。

3.2 地表高温强度

依据北京市气象局 2011 年 9 月发布的《北京市气象灾害预警信号与防御指南》，北京高温预警阈值主要划分为 $T_h \geq 35^\circ\text{C}$ 、 $T_h \geq 37^\circ\text{C}$ 、 $T_h \geq 40^\circ\text{C}$ 等 3 个级别，依据式 (3) 可估算出 T_h 为 35、37、40 °C 时对应的 T_s 分别为 44、47、52 °C。因此以 44、47、52 °C 作为 NOAA18/AVHRR 遥感地表高温的阈值指标。

为确定该遥感高温阈值监测高温与气象台站监测高温是否具有一致性，在这里定义一个遥感高温指标——地表高温强度 (LSHI, Land Surface High Temperature Intensity)，并与其对应的日最高气温强度 (HATI, High Air Temperature Intensity) 进行高温监测结果比较。把 LSHI 划分为 3 个等级，如下：

(1) 轻度高温：地表温度在 44~47 °C，对应

最高气温在 35~37 °C；

(2) 中度高温：地表温度在 47~52 °C，对应最高气温在 37~40 °C；

(3) 重度高温：地表温度 > 52 °C，对应最高气温 > 40 °C。

如图 2 所示为 2010 年 7 月 3 日和 2010 年 7 月 5 日的 LSHI 及对应的 HATI 空间分布图。可以看出：2010 年 7 月 3 日遥感监测的 LSHI 显示整个北京平原地区和怀柔中北部山区都处于中度高温区域 (图 2a)，气象台站监测的 HATI 则显示整个北京平原地区和大部分山区都处于中度高温区域，而怀柔中北部山区处于重度高温区域 (所处的汤河口台站最高气温达 40.9 °C，图 2b)，两者在平原地区基本一致，而山区存在较大差异。2010 年 7 月 5 日遥感监测的 LSHI 显示大部分北京平原地区处于重度高温区域 (图 2c)，而气象台站监测的 HATI 则显示绝大部分北京平原地区笼罩在重度高温，大部分山区则处于中度高温区域 (图 2d)，两者仍是在平原地区基本一致，而山区存在明显差异。另外，7 月 3 日和 7 月 5 日在怀柔中北部山区遥感监测的 LSHI 和气象台站监测的 HATI 都能显示出其与周围高温的差异，虽然监测的强度不一致，但仍能显示出在这个地区遥感监测结果与气象台站监测的高温有相对较好的一致性。

这些结果显示：本文初步得到的遥感高温阈值 44、47、52 °C 可以较好地适用于北京平原地区，而对大部分山区则效果不理想，这很可能是受山区复杂地形相互遮蔽及海拔影响致使局地温度差异变化大的影响，从而使得在卫星像元尺度 (1 km^2) 上山区地温与气温不具有一致性。但由于本文主要

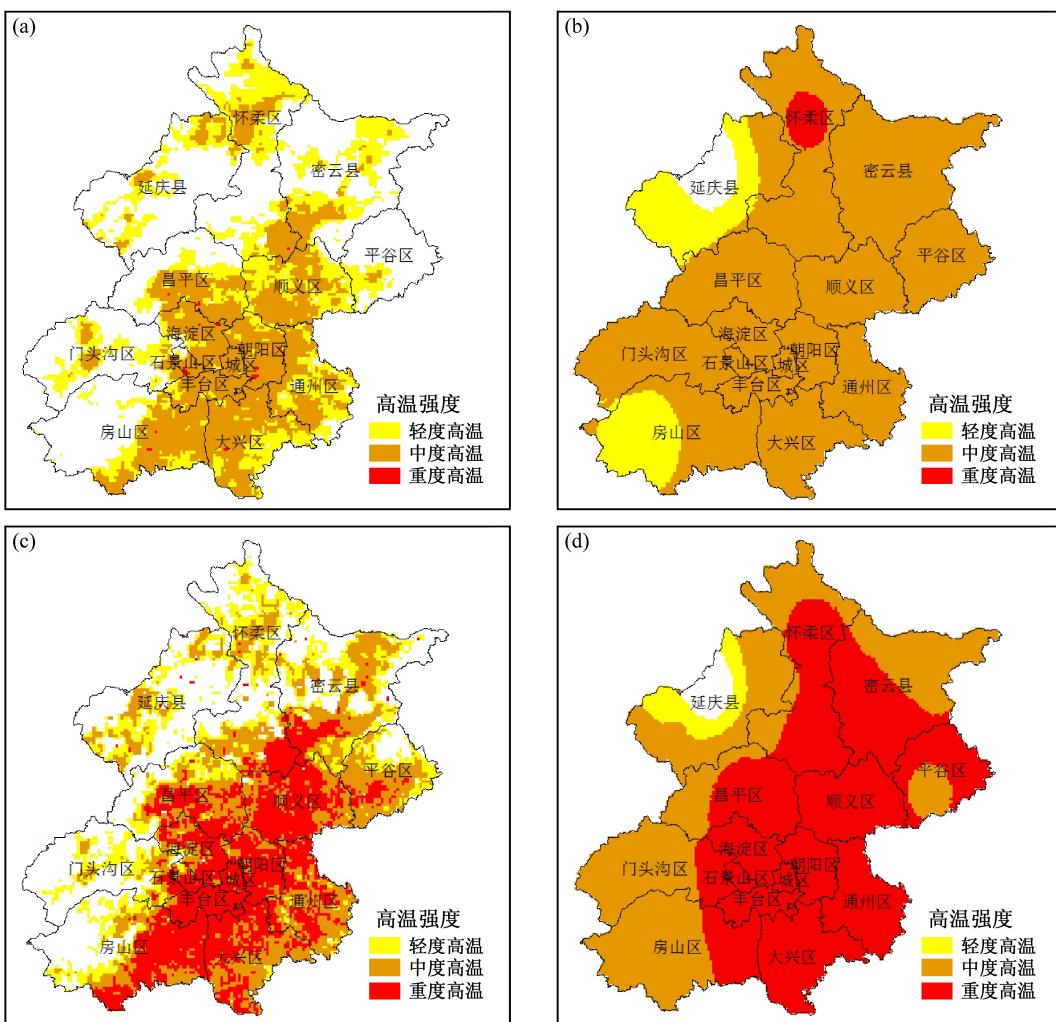


图 2 北京地区 (a、c) NOAA18/AVHRR 卫星遥感监测的 LSHI 及对应的 (b、d) 气象台站监测的 HATI: (a、b) 2010 年 7 月 3 日; (c、d) 2010 年 7 月 5 日

Fig. 2 (a, c) LSHI (Land Surface High Temperature Intensity) from NOAA18/AVHRR satellite data and the corresponding (b, d) HATI (High Air Temperature Intensity) from weather station data in Beijing: (a, b) 3 Jul 2010; (c, d) 5 Jul 2010

关注的高温区域集中于北京城市平原地区，因此仍可利用 LSHI 来有效监测北京城市高温。

3.3 地表高温比例指数

为了更有效地比较各空间单元之间的高温差异，参考叶彩华等（2011）研究结果，定义地表高温比例指数（LSPH，Land Surface High Temperature Proportion Index）为：

$$LSPH = \frac{1}{100m} \sum_i^n w_i p_i, \quad (4)$$

其中， m 为地表温度等级数，从低到高划分为 7 级，即 $m=7$; n 为 LSHI 等级数，即 $n=3$; i 为高温等级序号； w_i 为权重，取级别值； p_i 为该等级所占面积百分比；LSPH 一般取值在 0~1，值越大，高温现象越明显，值为 1 时，表明该区域均为重度高温，

值为 0 时，表明该区域没有高温出现。

LSPH 综合了高温强度和高温面积的影响，是一个反映时空变化的高温综合指标。如图 3 所示为 2010 年 7 月 3 日和 2010 年 7 月 5 日北京各区县 LSPH，可以看出：2010 年 7 月 3 日城六区及东部平原区 LSPH 在 0.69~0.86（图 3a），高温现象明显，到了 2010 年 7 月 5 日，各区县 LSPH 较 7 月 3 日明显增加，城六区及东部平原区 LSPH 均在 0.80 以上（图 3b），其中朝阳、丰台、城区 0.97 以上，接近极大值 1.0，显示这些区域几乎全为重度高温所覆盖，这与北京 7 月 5 日北京观象台最高气温达 40.6 °C、突破 1951 年以来历史极值的罕见高温天气相吻合。此外，LSPH 也能反映空间单元的高温差异变化，如图 3a 所示 2010 年 7 月 3 日的平谷区

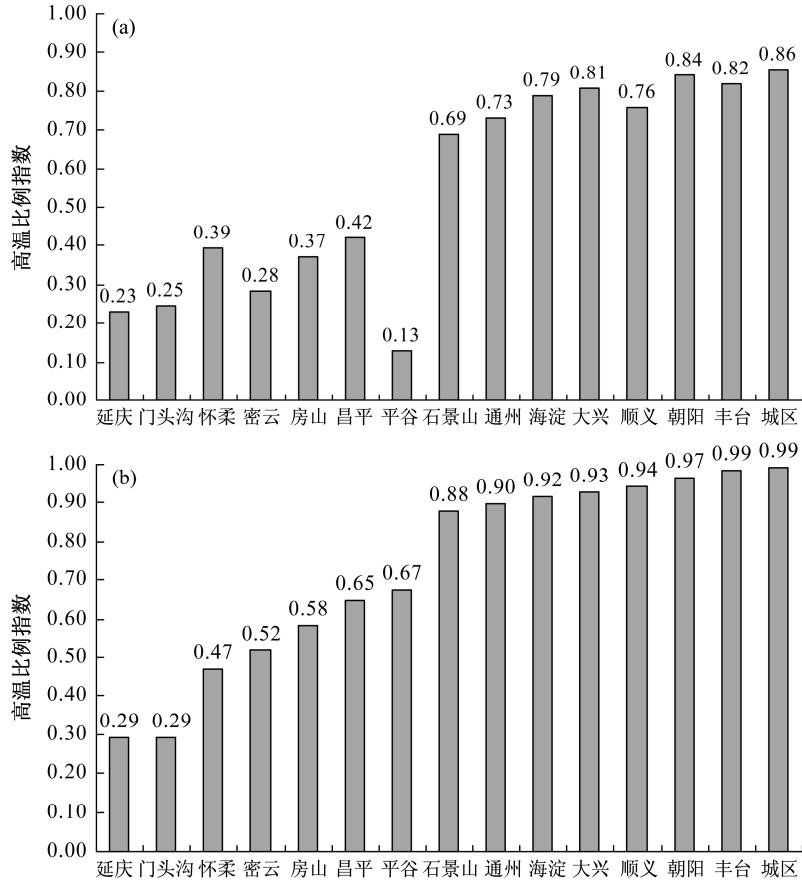


图 3 北京地区各区县 LSHP: (a) 2010 年 7 月 3 日 14:09; (b) 2010 年 7 月 5 日 13:48

Fig. 3 LSHP (Land Surface High Temperature Proportion Index) of different areas in Beijing: (a) 1409 LST 3 Jul 2010; (b) 1348 LST 5 Jul 2010

LSHP 最小, 仅为 0.13, 高温强度明显小于周边的密云县, 而到了 2010 年 7 月 5 日平谷区的 LSHP 达 0.67, 高于密云县, 这是由于 7 月 3 日的平谷区高温强度和范围在本行政区域所占比例很小, 明显小于其他区县(如图 2a 所示), 使得平谷区估算的 LSHP 最小; 而到了 7 月 5 日, 平谷区高温强度和范围在本行政区域所占比例明显增加(如图 2c 所示), 超过周围的密云地区, 使得 LSHP 明显增加。以上结果分析表明高温比例指数 LSHP 可有效反映城市高温空间分布差异及时间变化。

4 北京城市地表高温时空格局分析

由于遥感日地表温度资料受云及其阴影影响比较大难以分析, 而通过旬平均地表温度合成基本上可以消除这种影响, 在这里以旬晴空地表温度资料来分析北京城市多年地表高温时空格局。

4.1 地表高温逐旬出现概率时空格局分析

根据前面确定的遥感高温阈值指标, 利用

1989~2008 年(缺 2002 年, 共 19 年资料)6~8 月的 NOAA/AVHRR 旬平均地表温度数据集, 分析了北京夏季(6~8 月)各旬(共 9 旬)旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 47^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 52^{\circ}\text{C}$ 高温出现概率的时空变化状况, 出现概率定义为 P , 计算公式如下:

$$P_{iT_0} = \frac{m_{iT_0}}{N_i} \times 100\%, \quad (5)$$

其中, P_{iT_0} 为第 i 旬($i=1, 2, \dots, 9$)旬平均 $T_s \geq T_0$ (T_0 分别为 44、47 和 52 °C)出现的高温概率, N_i 指该旬统计年数, 本文采用了 19 年的资料, 因此各旬的 $N_i=19$, m_{iT_0} 指总的统计年数 N_i 里第 i 旬的旬平均 $T_s \geq T_0$ 出现的年数。主要分析结果如下:

(1) 旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 概率时空分析

各旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 年出现概率不超过 50%。在时空分布上, 旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 高温概率的高值区(40%~50%)主要分布于 6 月、7 月上旬和下旬, 而又以 6 月中旬、下旬和 7 月上旬在城区和平原区都有广泛分布, 7 月下旬则主要集中于城区, 6 月上旬则集中于永定河谷一带。到了 8 月下旬, 旬平

均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 高温出现概率降至 20% 以下，且主要集中于五环区域。这与王迎春（2003）得出的“北京夏季最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的高温天气主要分布在 6 月和 7 月，且主要集中于 6 月中旬到 7 月上旬”结论基本一致。

（2）旬平均 $T_s \geq 47^{\circ}\text{C}$ 概率时空分析

各旬平均 $T_s \geq 47^{\circ}\text{C}$ 年出现概率不超过 40%。在时空分布上，旬平均 $T_s \geq 47^{\circ}\text{C}$ 高温概率的高值区（30%~40%）主要分布于 7 月上旬和下旬，且主要集中于五环区域。8 月中旬以后，旬平均 $T_s \geq 47^{\circ}\text{C}$ 高温出现概率降至 20% 以下，且主要集中于城区。

（3）旬平均 $T_s \geq 52^{\circ}\text{C}$ 概率时空分析

各旬平均 $T_s \geq 52^{\circ}\text{C}$ 年出现概率很低，不超过 15%，主要发生在 6 月到 7 月。在时空分布上，旬平均 $T_s \geq 52^{\circ}\text{C}$ 高温概率的相对高值区（10%~15%）主要分布于 7 月中旬和下旬，主要集中于城区。

以上结果分析表明，在夏季不同时段，北京城区较其它地区更容易出现高温，其次为五环区域。

4.2 地表高温 6~9 月出现概率分析

根据前面确定的遥感高温阈值指标，利用 1989~2008 年（缺 2002 年）6~9 月的 NOAA/AVHRR 各旬平均地表温度数据集，先对逐年 6~9 月各旬（共 12 旬）地表温度数据采用最大值合成法生成逐年 6~9 月最大旬地表温度数据，然后对生成的 19 年最大旬地表温度数据，分别进行旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 47^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 52^{\circ}\text{C}$ 在 6~9 月期间出现的高温概率计算，高温出现概率定义为 Q ，计算公式如下：

$$Q_{T_0} = \frac{m_{T_0}}{N} \times 100\%, \quad (6)$$

其中， Q_{T_0} 指 6~9 月旬平均 $T_s \geq T_0$ (T_0 分别为 44、47 和 52°C) 出现的高温概率； N 指统计总年数，本文采用了 19 年的资料，因此 $N=19$ ； m_{T_0} 指总的统计年数 N 里 6~9 月最大旬平均 $T_s \geq T_0$ 出现的年数。计算结果如图 4 所示，其中图中空值区域表示该地分别出现旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 47^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 52^{\circ}\text{C}$ 的概率为 0。

由图 4 可知，北京旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 47^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 52^{\circ}\text{C}$ 的概率高值区一般都集中于五环内，各高值区旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 47^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 52^{\circ}\text{C}$ 出现概率分别为 80%~100%、60%~80% 和 20%~40%，

各高温出现概率的具体分布区域如下：

（1）旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 高温概率分析。很容易出现（出现概率 $\geq 80\%$ ）：朝阳中部和南部、城区南部、海淀中东部、丰台中部及北部、首都机场、通州城区、大兴城区和房山城区；经常出现（概率 $\geq 60\%$ ）：大部分平原地区及延庆平坝南部地区。

（2）旬平均 $T_s \geq 47^{\circ}\text{C}$ 高温概率分析。经常出现（出现概率 $\geq 60\%$ ）：五环内区域、通州城区、顺义城区、大兴城区和房山城区。

（3）旬平均 $T_s \geq 52^{\circ}\text{C}$ 高温概率分析。较少出现（出现概率在 10%~40%）：五环内局部城区及永定河谷和密云河谷一带局部地区。全市大部分地区出现概率小于 20%，延庆盆地偶尔也会出现（概率在 10% 以下），这是由于河谷地带和延庆盆地在夏季某些时段植被覆盖普遍较低、且土壤构成以砂壤为主，容易受太阳辐射增温较快的缘故。另外图 4c 显示代表北京天气状况的国家观象台站（位于大兴区北部）旬平均 $T_s \geq 52^{\circ}\text{C}$ 高温出现概率小于 10%，这与王迎春（2003）得出的观象台 50 年内 40°C 以上高温天气（对应本文 $T_s \geq 52^{\circ}\text{C}$ ）只有 4 d，概率小于 10% 的结论基本一致。

以上结果分析表明，北京几乎每年都会出现高温天气，局部地区一定会出现（概率 100%），但重度高温天气出现很少，大部分地区出现概率小于 20%。

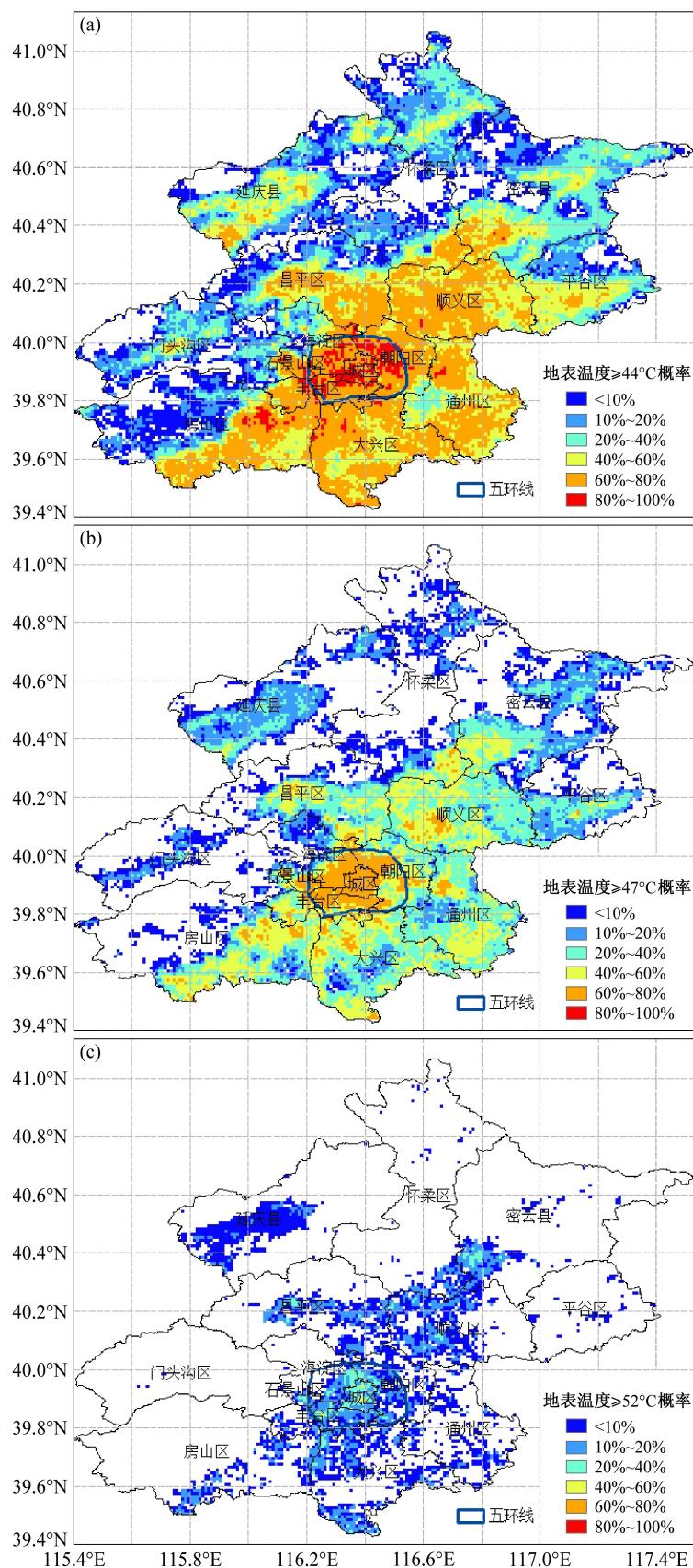
5 结论与讨论

通过对北京地区遥感地表温度与气温资料的分析，建立了北京城市遥感高温阈值和一系列高温指标，并进行了应用分析。在高温阈值指标建立基础上，利用多年卫星遥感资料开展了北京城市高温出现概率的时空格局分析，主要结论如下：

（1）气温值为 35 、 37 、 40°C 时对应的遥感地表温度初步确定为 44 、 47 、 52°C ，以此为基础建立的地表高温强度 LSHI 指标能较好地适用于北京平原地区，而山区适用性较差；

（2）地表高温比例指数 LSHP 能有效监测城市各不同区域的高温空间强弱和时间差异；

（3）对北京城市地表高温逐旬出现概率时空分析表明：夏季（6~8 月）旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 年出现概率不超过 50%，广泛分布于城区和平原；旬平均 $T_s \geq 47^{\circ}\text{C}$ 年出现概率不超过 40%，集中于五环内区

图4 北京地区旬平均 T_s (a) $\geq 44^{\circ}\text{C}$ 、(b) $\geq 47^{\circ}\text{C}$ 和 (c) $\geq 52^{\circ}\text{C}$ 在 6~9 月出现概率分布:Fig. 4 Probability distribution of ten-day mean land surface temperature T_s (a) $\geq 44^{\circ}\text{C}$, (b) $\geq 47^{\circ}\text{C}$, and (c) $\geq 52^{\circ}\text{C}$ from June to September in Beijing

域；旬平均 $T_s \geq 52^{\circ}\text{C}$ 年出现概率不超过15%，集中于城区；城区和五环区域更容易出现高温；

(4) 对北京城市地表高温在6~9月出现概率分析表明：旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 47^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 52^{\circ}\text{C}$ 的概率高值区一般都集中于五环内，各高值区旬平均 $T_s \geq 44^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 47^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 52^{\circ}\text{C}$ 出现概率分别为80%~100%、60%~80%和20%~40%；北京几乎每年都会出现高温天气，局部地区一定会出现（概率100%），但重度高温天气出现很少，全市大部分地区出现概率小于20%。

文中所确定的遥感地温指标和分析结论有一定的不确定性，主要体现在：(1) 卫星过境时间与最高气温出现时间的不匹配。所选择的卫星资料过境时间虽然接近14:00，但每天卫星过境的时间不一样，最高气温的时间也不一样，本文没有进行二者之间的时间订正（即遥感地表温度订正到气象资料最高气温出现的时间），这会造成二者关系的不确定性，这也是未来需要研究的重点；(2) 空间尺度的影响。本文所确定的遥感地温指标均是基于1 km分辨率NOAA卫星资料的，而且相应的气温在城市区域是否能反映周围1 km范围状况还不得而知，这也会造成二者关系的不确定性，因此未来开展观测尺度的研究是改进遥感高温指标的另一个重点内容；(3) 其他因素：下垫面类型和局地环境都很可能影响到遥感监测的高温时空变化的不确定性，例如文中分析出延庆盆地和河谷地带有时也会出现 $T_s \geq 52^{\circ}\text{C}$ 高温而实际上相应气温很可能达不到 40°C ，主要原因就是受下垫面的影响，还有如图2中怀柔中北部无论卫星资料还是气象观测资料都显示出一个与周边环境差异较大的高温区域，但二者确定的高温等级还存在差异，因此在利用遥感资料分析具体地区高温时空变化时还需要多考虑这些因素的不确定性。

综上所述，利用遥感来确定高温指标从而开展高温的监测和评估还有众多不确定性，虽然本文建立的遥感地表温度与最高气温的关系在现阶段还并不十分令人满意，但毕竟是向遥感监测高温的研究和业务化的可能应用前进了一步，还需要更深入地不断研究改进和完善，使遥感监测城市高温更符合实际，更便于向业务化方向发展。

致谢 对提供帮助的中国气象局城市气象研究所扈海波副研究员表示衷心感谢。

参考文献 (References)

- 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 2002. 上海城市热环境的空间格局分析 [J]. 地理科学, 22 (3): 317~323. Chen Yunhao, Li Xiaobing, Shi Peijun, et al. 2002. Study on spatial pattern of urban heat environment in Shanghai city [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 22 (3): 317~323.
- 邓天宏, 王国安, 焦建丽, 等. 2009. 草温、0 cm地温、气温间变化规律分析 [J]. 气象与环境科学, 32 (4): 47~50. Deng Tianhong, Wang Guoan, Jiao Jianli, et al. 2009. Change analysis of grass temperature, ground temperature, and air temperature [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 32 (4): 47~50.
- 丁金才, 张志凯, 奚红, 等. 2002. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究 [J]. 大气科学, 26 (3): 412~420. Ding Jincai, Zhang Zhikai, Xi Hong, et al. 2002. A Study of the high temperature distribution and the heat island effect in the summer of the Shanghai area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 412~420.
- 范碧航, 李宁, 张继权, 等. 2011. 城市高温灾害性天气影响分析与危害评估——以长春市为例 [J]. 灾害学, 26 (4): 93~97. Fan Bihang, Li Ning, Zhang Jiquan, et al. 2011. Impact analysis and hazard assessment of urban disastrous high temperature weather—A case study on Changchun city [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 26 (4): 93~97.
- 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.
- 黄卓, 陈辉, 田华. 2011. 高温热浪指标研究 [J]. 气象, 37 (3): 345~351. Huang Zhuo, Chen Hui, Tian Hua. 2011. Research on the heat wave index [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (3): 345~351.
- 贺懿华, 谌伟, 李才媛, 等. 2007. 武汉市盛夏高温气候特征和成因及预报 [J]. 气象科技, 35 (6): 809~813. He Yihua, Cheng Wei, Li Caiyuan, et al. 2007. Climatic characteristics, causes and prediction of mid-summer high-temperature in Wuhan [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 35 (6): 809~813.
- 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 [J]. 地球物理学报, 49 (1): 69~77. Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. 2006. Impact of urban growth on the heat island in Beijing [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (1): 69~77.
- 京华时报. 2010. 城区日供水量接近极限[N]. http://epaper.jinghua.cn/html/2010-07/07/content_566269.htm [2010-07-07]. Jinghua Time. 2010. Water supply got on the edge of extremes (in Chinese) [N]. http://epaper.jinghua.cn/html/2010-07/07/content_566269.htm [2010-07-07].
- 江学顶, 夏北成. 2007. 珠江三角洲城市群热环境空间格局动态[J]. 生态学报, 27 (4): 1461~1470. Jiang Xueding, Xia Beicheng. 2007. Spatial characteristics and dynamic simulations of urban heat environment of cities in Pearl River delta [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 27 (4): 1461~1470.
- 李庆祥, 李伟, 鞠晓慧. 2006. 1998年以来中国气温持续极端偏暖的事实 [J]. 科技导报, 24 (4): 37~40. Li Qingxiang, Li Wei, Ju Xiaohui. 2006. Analysis on the persistent extreme warm period over China since 1998 [J].

- Science & Technology Review (in Chinese), 24 (4): 37–40.
- 李蕊, 牛生杰, 汪玲玲, 等. 2011. 三种下垫面温度对比观测及结冰气象条件分析 [J]. 气象, 37 (3): 325–333. Li Rui, Niu Shengjie, Wang Lingling, et al. 2011. Comparison of three kinds of underlying surface temperatures and analysis of the road icing meteorological conditions [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (3): 325–333.
- 刘放, 吕弋培, 江利明, 等. 2010. MODIS 亮温与气温及地温的相关性分析 [J]. 地震地质, 32 (1): 127–136. Liu Fang, Lv Gepei, Jiang Liming, et al. 2010. Correlation analysis between MODIS brightness temperature and surface temperature provided by meteorological station [J]. Seismology and Geology (in Chinese), 32 (1): 127–136.
- 刘健, 张里阳. 2011. 气象卫星高空间分辨率数据的云量计算与检验[J]. 应用气象学报, 22 (1): 35–45. Liu Jian, Zhang Liyang. 2011. Calculation and validation method of cloud amount by high spatial resolution satellite data [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 22 (1): 35–45.
- 马红云, 宋洁, 郭品文, 等. 2011. 基于 MODIS 数据的土地覆盖资料对长三角城市群区域夏季高温模拟的影响评估 [J]. 气象科学, 31 (4): 460–465. Ma Hongyun, Song Jie, Guo Pinwen, et al. 2011. Modeling the effects of MODIS land cover data on summer heat wave over the Yangtze River delta [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31 (4): 460–465.
- 闵文彬, 李跃清. 2010. 利用MODIS反演四川盆地地表温度与地面同步气温、地温观测值的相关性试验 [J]. 气象, 36 (6): 101–104. Min Wenbing, Li Yueqing. 2010. Experiment of correlations between synchronized air temperature, soil temperature and land surface temperature retrieved from MODIS [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (6): 101–104.
- Quan W J, Chen H B, Han X Z, et al. 2012. A modified Becker's split-window approach for retrieving land surface temperature from AVHRR and VIRR [J]. Acta Meteorologica Sinica, 26 (2): 229–240.
- 宋艳敏, 余世孝, 李楠. 2007. 深圳特区表面温度空间分异特征 [J]. 生态学报, 27 (4): 1489–1498. Song Yantun, Yu Shixiao, Li Nan. 2007. Spatial structure of the surface temperature in Shenzhen, China [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 27 (4): 1489–1498.
- 谈建国, 黄家鑫. 2004. 热浪对人体健康的影响及其研究方法 [J]. 气候与环境研究, 9 (4): 680–686. Tan Jianguo, Huang Jiaxin. 2004. The impacts of heat waves on human health and its research methods [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (4): 680–686.
- 谈建国, 郑有飞, 彭丽, 等. 2008. 城市热岛对上海夏季高温热浪的影响 [J]. 高原气象, 27 (增刊): 144–149. Tan Jianguo, Zheng Youfei, Peng Li, et al. 2008. Effect of urban heat island on heat waves in summer of Shanghai [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (suppl.): 144–149.
- 王秋云, 严明良, 包云轩, 等. 2011. 基于不同陆面参数化方案的高温天气数值模拟 [J]. 气象科技, 39 (5): 537–544. Wang Qiuyun, Yan Mingliang, Bao Yunxuan, et al. 2011. Numerical simulation of a high temperature weather process based on different land surface schemes [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 39 (5): 537–544.
- 王迎春, 葛国庆, 陶祖钰. 2003. 北京夏季高温闷热天气的气候特征和 2008 夏季奥运会 [J]. 气象, 29 (9): 23–27. Wang Yingchun, Ge Guoqing, Tao Zuyu. 2003. Climatic characteristics of estival muggy weather in Beijing related to 2008 Olympics [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (9): 23–27.
- 吴荣军, 郑有飞, 刘建军, 等. 2010. 长江三角洲主要城市高温灾害的趋势分析 [J]. 自然灾害学报, 19 (5): 56–63. Wu Rongjun, Zheng Youfei, Liu Jianjun, et al. 2010. Trend analysis of high temperature disaster in large cities of the Yangtze River delta [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 19 (5): 56–63.
- 肖荣波, 欧阳志云, 张兆明, 等. 2005. 城市热岛效应监测方法研究进展 [J]. 气象, 31 (11): 3–6. Xiao Rongbo, Ouyang Zhiyun, Zhang Zhaoming, et al. 2005. Advances in methodology of urban heat island [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (11): 3–6.
- 谢德寿. 1994. 城市高温灾害及其预防 [J]. 灾害学, 9(3): 29–33. Xie Deshou. 1994. The hazard of megatherm and its preventive measures [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 9 (3): 29–33.
- 延昊, 王长耀, 牛铮, 等. 2001. 利用遥感和常规资料对比研究中国地面温度变化 [J]. 气候与环境研究, 6 (4): 448–455. Yan Hao, Wang Changyao, Niu Zheng, et al. 2001. Comparative studies of China temperature change by using remote sensing and traditional data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (4): 448–455.
- 闫丽莉, 屈春燕, 温少妍, 等. 2012. 卫星热红外亮温、气温及地温观测的年变变化对比研究 [J]. 地震学报, 34 (2): 257–266. Yan Lili, Qu Chunyan, Wen Shaoyan, et al. 2012. A comparison study on annual variation of thermal infrared brightness temperature and land temperature from meteorological stations [J]. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 34 (2): 257–266.
- 杨红龙, 许吟隆, 陶生才, 等. 2010. 高温热浪脆弱性与适应性研究进展 [J]. 科技导报, 28 (19): 98–102. Yang Honglong, Xu Yinlong, Tao Shengcui, et al. 2010. Vulnerability to heat waves and adaptation: A summary [J]. Science and Technology Review (in Chinese), 28 (19): 98–102.
- 叶彩华, 刘勇洪, 刘伟东, 等. 2011. 城市地表热环境遥感监测指标研究及应用 [J]. 气象科技, 2011, 39 (1): 95–101. Liu Yonghong, Ye Caihua, Liu Weidong, et al. 2011. Research on urban surface heat environment monitoring indexes and its application [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 39 (1): 95–101.
- 曾新民, 吴志皇, 熊仕焱, 等. 2011. WRF 模式短期高温天气模拟对陆面方案的敏感性 [J]. 中国科学: 地球科学, 41 (9): 1375–1384. Zeng Xinmin, Wu Zhihuang, Xiong Shiyi, et al. 2011. Sensitivity of simulation of short period high temperature weather using WRF model on land surface schemes [J]. Scientia Sinica (Terrae) (in Chinese), 41 (9): 1375–1384.
- 张国华, 张江涛, 金晓青, 等. 2012. 京津冀城市高温的气候特征及城市化效应 [J]. 生态环境学报, 21 (3): 455–463. Zhang Guohua, Zhang Jiangtao, Jin Xiaoqing, et al. 2012. Climate characteristics and effects of urbanization of the urban high temperature of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 21 (3): 455–463.
- 张可慧, 李正涛, 刘剑锋, 等. 2011. 河北地区高温热浪时空特征及其对工业、交通的影响研究 [J]. 地理与地理信息科学, 27 (6): 90–95. Zhang Kehui, Li Zhengtao, Liu Jianfeng, et al. 2011. Temporal-spatial feature analysis on the high-temperature and heatwaves in Hebei and its influence on industry and transportation [J]. Geography and Geo-Information Science (in Chinese), 27 (6): 90–95.

- 张天宇, 程炳岩, 刘晓冉, 等. 2008. 重庆极端高温的变化特征及其对区域性增暖的响应 [J]. 气象, 34 (2): 8–13. Zhang Tianyu, Cheng Bingyan, Liu Xiaoran, et al. 2008. Variability of extreme high temperature and response to regional warming over Chongqing [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (2): 8–13.
- 张天宇, 程炳岩, 唐红玉, 等. 2011. 重庆极端高温指标的对比及其与区域性增暖的关系 [J]. 热带气象学报, 27 (4): 585–593. Zhang Tianyu, Cheng Bingyan, Tang Hongyu, et al. 2011. Classification of extreme high temperature indices and their relationship with regional warming in Chongqing [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 27 (4): 585–593.
- 张旭阳, 宁海文, 杜继稳, 等. 2010. 西安城市热岛效应对夏季高温的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 24 (1): 95–101. Zhang Xuyang, Ning Haiwen, Du Jiwen, et al. 2010. The impact of urban heat island effect on high temperature in summer in Xi'an [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 24 (1): 95–101.
- 郑祚芳. 2011. 北京极端气温变化特征及其对城市化的响应 [J]. 地理科学, 31 (4): 459–463. Zheng Zuofang. Characteristics of extreme temperature variation and their response to urbanization in Beijing [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 31 (4): 459–463.
- 郑祚芳, 范水勇, 王迎春. 2006a. 城市热岛效应对北京夏季高温的影响 [J]. 应用气象学报, 17 (增刊): 48–53. Zheng Zuofang, Fan Shuiyong, Wang Yingchun. 2006a. Effects of urban heat island on summer high temperatures in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (suppl.): 48–53.
- 郑祚芳, 王迎春, 刘伟东. 2006b. 地形及城市下垫面对北京夏季高温影响的数值研究 [J]. 热带气象学报, 22 (6): 672–676. Zheng Zuofang, Wang Yingchun, Liu Weidong. 2006b. Numerical simulation study for the effects of terrain and landuse to summer heat wave in Beijing [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (6): 672–676.
- 周淑贞, 张如一, 张超. 1997. 气象与气候学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 50–51. Zhou Shuzhen, Zhang Ruyi, Zhang Chao. 1997. Meteorology and Climatology (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 50–51.