

引用格式:周洋,祝善友,华俊玮,等.南京市高温热浪时空分布研究[J].地球信息科学学报,2018,20(11):1613-1621. [Zhou Y, Zhu S Y, Hua J W, et al. Spatio-temporal distribution of high temperature heat wave in Nanjing[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(11):1613-1621.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180222

南京市高温热浪时空分布研究

周 洋¹,祝善友^{1*},华俊玮²,刘 伟¹,向嘉敏¹,丁 文³

1. 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院,南京 210044;2. 滁州市气象局,滁州 233299;3. 南京长天测绘技术有限公司,南京 211100

Spatio-temporal Distribution of High Temperature Heat Wave in Nanjing

ZHOU Yang¹, ZHU Shanyou^{1*}, HUA Junwei², LIU Yi¹, XIANG Jiamin¹, DING Wen³

1. School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Chuzhou meteorological bureau, Chuzhou 233299, China; 3. Nanjing Changtian Surveying and Technology Co, Nanjing 211100, China

Abstract: Under the background of global warming, the urban heat wave in summer has become one of the most serious meteorological disasters, which has brought tremendous impact on the health and economic development of urban residents. Taking the heat wave disaster event occurred in Nanjing from August 7 to 13, 2013 as an example, the near-surface air temperatures were estimated based on the downscaled MODIS land surface temperature using the Landsat 8 OLI image data, MODIS data products, and field-measurement meteorological data. Combined with the spatial interpolation data of the relative humidity, the hot index and the high temperature heat-wave index at the resolution of 100m were calculated, and then their spatial and temporal distribution characteristics were analyzed. The results show that during the evolution of the high temperature heat wave in Nanjing, the hot index increased firstly and then decreased with time. The hot index was highest on Aug. 11th with an average of 86.99, and it fell off to the lowest value of 85.05 on Aug. 12th; the heat wave intensity mainly concentrates on mild and moderate degrees, and its range also shows a tendency of expanding firstly and then decreasing with time. In terms of spatial distribution, the hot index is higher in northern region and central urban areas and mainly display as a moderate heat wave, while the heat index in the southern suburbs and central suburbs is lower and the heat wave is mild, and the mountain and the water areas have the lowest heat index.

Key words: Nanjing; heat waves; hot index; high temperature heat-wave index; spatial and temporal distribution

***Corresponding author:** ZHU Shanyou, E-mail: zsygzx@163.com

摘要:在全球气候变暖的背景下,城市夏季高温热浪已经成为城市最严重的气象灾害之一,给城市居民健康和经济发展带来了巨大的影响。以2013年8月7日-13日的南京高温热浪灾害事件为例,基于Landsat 8 OLI卫星遥感数据、MODIS卫星遥感数据和气象站点数据,在MODIS地表温度降尺度基础上,估算近地表气温,进而结合空气相对湿度的空间插值数据计算南京地区100 m分辨率的炎热指数和高温热浪指数,分析其时空分布特征。结果表明:在这次高温热浪演变过程中,南京炎热指

收稿日期:2018-05-07;修回日期:2018-08-22.

基金项目:国家自然科学基金项目(41571418,41401471);江苏省“青蓝工程”项目。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41571418,41401471; Project of "Blue Project" in Jiangsu Province.]

作者简介:周 洋(1994-),男,汉,江苏南京人,硕士生,主要研究方向热红外遥感与气象应用。E-mail: zhouyangnuist@163.com

*通讯作者:祝善友(1977-),男,博士,教授,主要从事热红外遥感基础理论与应用研究。E-mail: zsygzx@163.com

数呈现先升高后降低的变化趋势,8月11日炎热指数最高,平均达到86.99,12日降到最低值,平均值为85.05;高温热浪强度主要集中于轻度热浪与中度热浪,随着时间的推移,其范围也呈现先扩大后减小的趋势;在空间分布上,南京北部及中心城区的炎热指数较高,主要表现为中度热浪,而南部地区及中心城区周边郊区较低,主要为轻度热浪,山体和水域炎热指数则最低,多为无热浪。

关键词: 南京;高温热浪;炎热指数;高温热浪指数;时空分布

1 引言

在全球气候变暖和城市化进程不断加快的背景下,城市热岛效应不断加强,夏季高温热浪逐渐成为一种严重的城市气象灾害,对城市居民健康和经济发展构成严峻的挑战^[1-3]。高温天气不仅是人体心血管、呼吸系统、消化系统等疾病的重要发病诱因之一,且在极端情况下还可能会引发人体死亡;同时会造成城市水电供应紧张,给居民正常生活生产造成严重影响^[4]。因此,进行高温热浪时空分布遥感监测与研究对于减轻极端高温事件带来的影响、改善人居环境以及城市可持续发展具有重要意义。

目前,全球范围内并没有完全统一的高温热浪定义与标准。中国采用中国气象局高温热浪定义与标准:日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 时,称为高温日,连续3 d以上的高温天气过程称为高温热浪^[5]。近年来,国内外学者对高温热浪的研究多以气象站点数据、人口统计数据和社会经济数据为基础,集中于高温热浪形成原因及其机理^[6-7]、高温热浪测度以及指标^[8-10]、高温热浪时空分布规律^[11-12]、高温热浪危害以及预防措施^[13-14]和高温热浪风险评估^[15-17]。其中,典型研究有,张曦等^[18]利用1960–2014年6–8月湖南省77个气象站逐日最高气温资料,分析研究该地区高温热浪的时空分布特征,研究结果表明湖南省大部分地区常年遭受高温热浪袭击;范碧航等^[19]利用长春市1951–2008年的气象资料,分析其高温热浪时空分布,并总结了长春市温度变化与城市人口数量、GDP及供电量之间的关系,最终建立了长春市高温灾害性天气影响及危害评估的指标体系。

常规气象观测数据具有观测精度高,准确可靠等优点,但无法获取空间连续分布的观测数据,这不利于高温热浪时空分布的研究与分析。相比而言,卫星遥感技术可以提供连续而准确的大面积观测数据,在高温热浪监测中发挥着越来越重要的作用。地表温度作为高温热浪监测的重要指标,可以利用热红外遥感数据反演,反演方法主要分为单通

道算法、多通道算法、多角度算法、多时相算法和高光谱反演算法5类^[20]。董立新等^[21]基于FY-3A/VIRR数据,反演得到逐日地表温度,对2009年一次高温天气过程进行动态监测,并分析了不同下垫面的热环境变化;辜晓青等^[22]利用地表观测数据和极轨气象卫星资料,计算出耕地高温干旱面积,实现了高温干旱的动态监测。

在利用遥感影像进行高温热浪监测研究中,由于很难同时获得高时间与高空间分辨率的遥感图像,这限制了单一遥感图像在高温热浪动态监测中的应用。同时,以往研究大多基于遥感反演的地表温度、气象站点气温插值结果来分析高温热浪,这2种来源数据并不能准确监测高温热浪的时空分布。因此,需要进一步发挥多源遥感数据在时、空分辨率互为补充方面的作用,同时需要建立地表温度与近地表气温之间的关系,获得可靠的气温空间分布结果,以定量监测高温热浪时空变化特征。基于此,本研究以南京市2013年8月的一次高温热浪过程为例,结合气象站点数据与多源遥感影像数据,获得高空间和高时间分辨率的近地表气温分布。在此基础上,本研究以炎热指数和高温热浪指数来表征高温热浪的强度,分析高温热浪的时空分布情况,从而实现高温热浪遥感监测与研究。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

本研究选择江苏省南京市作为研究区(图1)。南京市($31^{\circ}14''\sim 32^{\circ}37''\text{N}$, $118^{\circ}22''\sim 119^{\circ}14''\text{E}$)位于长江下游中部地区,全市下辖11个区,总面积6597 km²。南京属亚热带季风湿润气候,雨量充沛,年降水1200 mm,四季分明,年平均温度15.4 $^{\circ}\text{C}$,年极端气温最高39.7 $^{\circ}\text{C}$,最低-13.1 $^{\circ}\text{C}$,年平均降水量1106 mm。南京是国家区域中心城市,江苏省会城市,经济发达城市化水平高。随着经济与科技的发展,南京城市不断扩张,用地日趋紧张,城市热岛现象加剧,城市高温灾害发生频繁,从而对城市发展和居民生活带来不良影响。

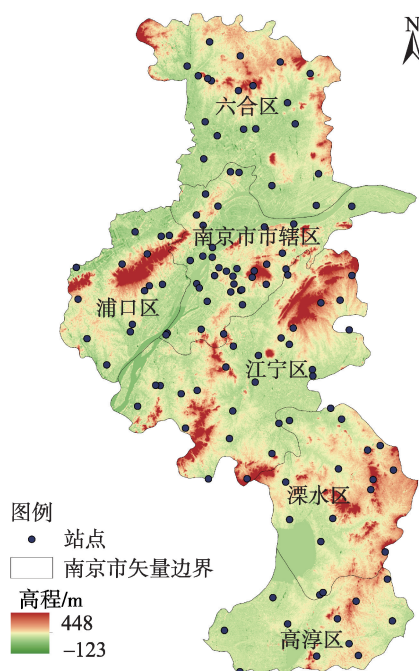


图1 南京高程及观测站点分布

Fig. 1 Elevation distribution and locations of observation sites in Nanjing

2.2 研究数据

(1)2013年8月11日 Landsat 8 卫星 OLI 传感器获取的晴空无云数据,空间分辨率为 30m,行列号为 120-038,成像区域为南京市,该数据可为低分辨率地表温度数据降尺度提供降尺度因子,由美国地质勘探局官网下载(<http://landsat.usgs.gov/>)。

(2)2013年8月7-13日每日地表温度产品 MYD11A1,空间分辨率为 1 km;每日地表反射率产品数据 MOD09GA,空间分辨率为 500 m。数据可由 NASA 官网免费下载(<https://ladsweb.modaps.eos-dis.nasa.gov/>)。

(3)气象数据。选取南京市 126 个自动气象站的 2013 年 8 月 7-13 日站点数据,站点分布如图 1 所示,包括气温、相对湿度以及瞬时风速等数据。

3 研究方法

本研究技术路线如图 2 所示。

3.1 MODIS 地表温度降尺度

陆地表面温度(LST)降尺度方法的初衷是克服不同传感器之间空间-时间分辨率的矛盾,以期获取高时空分辨率的 LST 产品。本文结合 Landsat

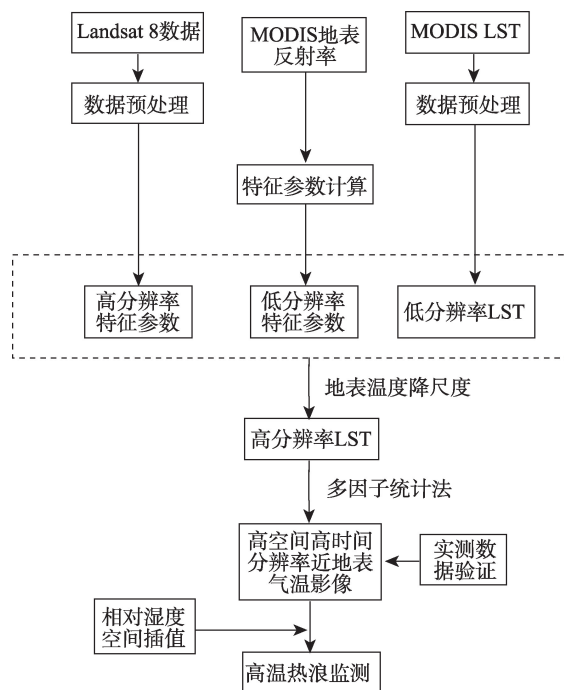


图2 研究技术路线图

Fig. 2 Schematic flow chart for the produce in this study

OLI数据,将 1000 m 分辨率的 MYD11A1/LST 产品降尺度至 100 m。LST 降尺度转换方法的本质是在高空间分辨率地表参数的辅助作用下提高原有 LST 产品的空间分辨率,其基本思想是在不同尺度下,LST 和地表参数之间的定量关系保持不变,即在低空间分辨率尺度下 LST 与地表参数间的关系模型仍能应用于高空间分辨率的 LST。获取高空间分辨率 LST(T_{HR})的模型为:

$$T_{HR} = f(S_{HR}) + \Delta T_{LR} \quad (1)$$

$$\Delta T_{LR} = T_{LR} - f(S_{LR}) \quad (2)$$

式中: S_{HR} 和 S_{LR} 分别为高空间分辨率和低空间分辨率下的地表参数; f 为高(低)空间分辨率下,地表温度 T_{HR} (T_{LR})与地表参数 S_{HR} (S_{LR})间的映射关系; ΔT_{LR} 为残差。

在降尺度过程中采用 NDBI 和 NDVI 双因子模型^[23],同时加入土壤调节植被指数 SAVI、改进的土壤调节植被指数 MSAVI、非线性植被指数 NLI 和裸土植被指数 BI,建立多因子模型进行地表温度降尺度。分别利用 Landsat 8 OLI 和 MODIS 数据计算各遥感指数^[24-26],获得降尺度因子。

利用 SPSS 中的逐步多元回归分析工具,用以确定降尺度最优模型,模型分析结果如表 1 所示。

由表 1 可看出,分别使用 NDBI、MSAVI、BI、NLI 和 NDBI、BI、NLI 这 2 组参量作为降尺度地表

表 1 地表温度降尺度逐步回归模型

Tab. 1 The stepwise regression models for downscaling of surface temperature

模型	因子	相关系数R	决定系数R ²	随机误差估算值
a	NDBI	0.823	0.677	1.24
b	NDBI, MSAVI	0.839	0.703	1.19
c	NDBI, MSAVI, BI	0.843	0.711	1.16
d	NDBI, MSAVI, BI, NLI	0.844	0.713	1.17
e	NDBI, BI, NLI	0.844	0.713	1.17

参数因子进行降尺度模拟精度最高,因此在降尺度过程中选取NDBI、BI、NLI这3种分别表征建筑物、裸土和植被的3种地表参数作为降尺度因子。

3.2 近地表气温空间估算与模拟

近地表气温遥感反演方法包括单因子统计方法、多因子统计方法、温度-植被指数法(TVX法)、地表能量平衡法和大气廓线外推法等。大气廓线外推法因大气廓线数据较难获得,温度-植被指数法在城市区域应用的精度较低,地表能量平衡方法因其复杂性实现较为困难,因此研究中使用多因子统计方法估算瞬时近地表气温空间分布。

在利用统计方法进行气象要素高精度空间化过程中,需要进行气象要素和影响因子之间的相互关系研究。利用降尺度后的MODIS地表温度结果,结合研究区DEM数据、归一化植被指数NDVI、归一化建筑物指数NDBI和地表光谱反照率albedo等遥感参数,建立近地表气温估算模型,即

$$T_a = a_0 + a_1 \times LST + a_2 \times NDVI + a_3 \times NDBI + a_4 \times albedo + a_5 \times DEM \quad (3)$$

式中: T_a 表示是遥感成像时刻的瞬时气温。DEM通过ASTER GDEM裁切和重采样得到,地表反照率albedo的计算公式如下:

$$albedo = 0.356\alpha_1 + 0.13\alpha_3 + 0.373\alpha_4 + 0.085\alpha_5 + 0.072\alpha_7 \quad (4)$$

式中:albedo对应的是短波地表光谱反照率,其中 α_1 、 α_3 、 α_4 、 α_5 、 α_7 分别对应Landsat 8 OLI数据的第2、4、5、6和7波段。

考虑到MODIS影像过境时间为13时30分(北京时间),因此本研究对每日13时和14时的气温观测数据作平均,用以建模和验证。针对研究区126个自动气象站点,选取其中的82个站点用于建模,剩余44个气象站点数据用于验证气温估算精度。

3.3 相对湿度空间插值

研究中选择气温和相对湿度作为影响因子分

析高温热浪的时空分布,因此需要获得相对湿度的空间分布结果,由于气象站点观测数据是离散分布的,当需要获取区域内连续的气象参数时,可通过空间插值方法实现。在地统计插值方法中,克里金插值方法是理论体系最为完善的一种插值方法。克里金插值(Kriging)又称为空间自协方差最佳插值法,是一种空间局部插值法,以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计。根据MODIS影像成像时刻,对13时和14时的相对湿度数据作平均,获取13:30的相对湿度,进而选取82个站点进行普通克里金插值,剩余44个气象站点数据用于验证插值精度。

3.4 高温热浪表征指标

本研究选取黄卓等^[9]提出的炎热指数和热浪指数为指标,分析南京市高温热浪的时空分布特征。

(1)炎热指数。该指标综合考虑了气温和相对湿度2个气象参数,可用于解释高温天气中空气湿度较高产生的闷热感对人体舒适度的影响程度。炎热指数计算公式如式(5)所示。

$$ET = 1.8T_a - 0.55(1.8T_a - 26) \times (1 - RH) + 32 \quad (5)$$

式中: T_a 为近地表气温/℃; RH 为空气相对湿度/%。

(2)热浪指数。热浪指数作为评价高温炎热天气的一个综合性气象指标,在炎热指数的基础上考虑到了高温热浪灾害在持续过程中的累积效应,计算公式如式(6)所示。

$$H_i = 1.2(E_T - E'_T) + 0.35 \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{nd_i} \times (E_{T_i} - E'_T) + 0.15 \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{nd_i} + 1 \quad (6)$$

式中: E_T 为该日期下的炎热指数; E'_T 炎热指数的临界值; nd_i 为热浪开始时距离当日的日期数; E_{T_i} 表示为当日之前对应的每一日天气炎热指数; N 为整个高温热浪过程的持续时间。根据热浪指数,可对高温热浪进行分析,分级标准如表2所示^[9]。

表2 热浪分级标准

Tab. 2 Grading standards of heat waves

	无热浪	轻度热浪	中度热浪	重度热浪
热浪指数	$H_i < 2.8$	$2.8 \leq H_i < 6.5$	$6.5 \leq H_i < 10.5$	$H_i \geq 10.5$

4 结果与讨论

4.1 近地表气温估算结果分析

利用南京市区域内去除异常值后43个气象站点气温数据验证多因子统计方法估算近地表气温空间分布的精度,选取本次高温热浪过程开始(8月7日)、中间(8月11日)和结束(8月13日)3个时间段分析近地表气温估算精度。图3为43个气象站点实测气温值与估算气温值的估算误差。

由图3可看出,3个时间段的估算与实测气温误差绝大多数位于 $-2\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,其中每一日均有38个站点误差在 $-2\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,个别站点误差在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,误差较大的站点出现在下垫面结构复杂的中心城区位置,地表覆盖几乎为不透水面,建筑群密布、高度不一,城市景观破碎,地表覆盖高度异质^[27],受周边环境及下垫面结构的影响,这些站点的气温估算误差较大。3个时间段近地表气温估算的均方根误差(RMSE)分别为1.35、1.38和1.33 $^{\circ}\text{C}$,不同日期的近地表气温估算误差较为一致,总体精度能够非常好地满足高温热浪监测需要。

4.2 相对湿度空间插值结果及验证

本研究提取每一天对应验证站点的相对湿度

插值结果与气象站点数据进行对比验证,计算其平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE),如表3所示。

由表3可以看出,相对湿度的插值的平均误差在 $-0.4\%\sim 1.9\%$ 之间,平均为0.58%;平均绝对误差在 $3.32\%\sim 4.71\%$ 之间,平均为4.13%;均方根误差在 $4.25\%\sim 5.65\%$ 之间,平均为5.01%,说明普通克里金插值方法总体精度较高,其插值结果可以代表区域内相对湿度的空间分布。

4.3 南京高温热浪时空分布分析

利用式(5)、(6),综合近地表气温和相对湿度数据计算每天13:30的炎热指数(图4)和高温热浪分区(图5),分析南京地区高温热浪时空分布特征。

根据图4,南京市炎热指数总体呈先升高后降低的趋势,在11日达到最高值,每日的炎热指数平均值分别为85.81、86.10、86.69、86.51、86.99、85.05和85.69。其中12日的炎热指数相对较低,虽然12日气温与其他日期接近,但相对湿度相对较低,综合考虑了气温和相对湿度的炎热指数较小。

在空间上,南京北部地区和中部地区炎热指数较高,且多集中于长江沿岸及中心城区,而南京南部地区炎热指数较低,主要原因是南京中部及北部地区,位于长江沿岸,交通发达,人口众多,建筑密集,城市化水平高,热岛强度更大,因而这些地区气温更高,炎热指数更大;在北部与中部地区,炎热指数又呈现以中心城区为中心,向四周(农村及郊区)

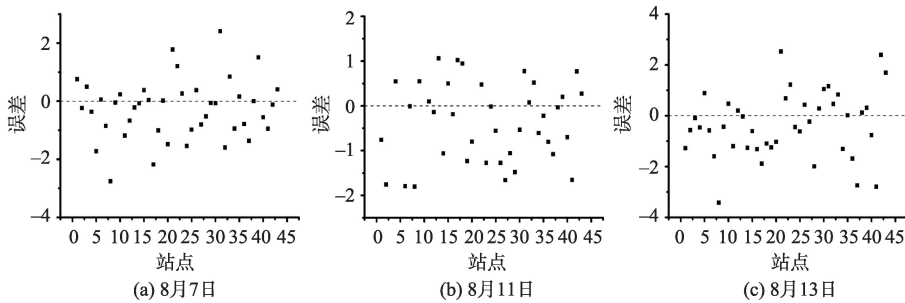


图3 气温估算误差散点分布

Fig. 3 Error distribution of the air temperature retrievals

表3 相对湿度插值结果误差统计(%)

Tab. 3 Error statistics of the spatial interpolation of the relative humidity

	8月7日	8月8日	8月9日	8月10日	8月11日	8月12日	8月13日
ME	1.90	0.89	1.37	-0.30	-0.35	-0.40	0.95
MAE	4.21	4.56	3.86	4.31	3.93	3.32	4.71
RMSE	5.03	5.51	4.64	5.35	4.61	4.25	5.65

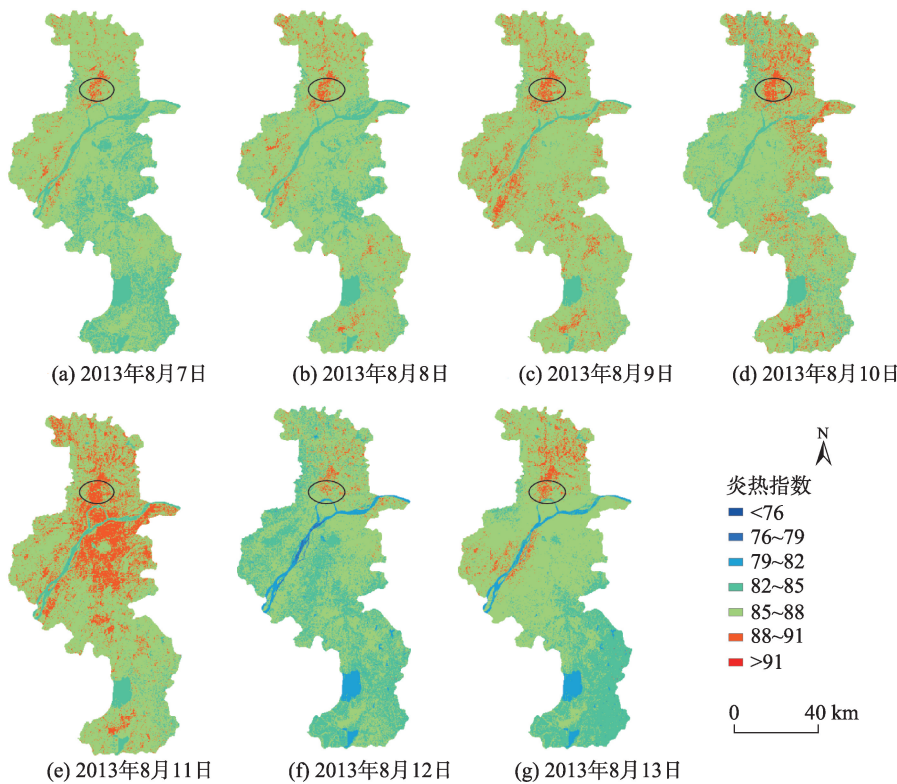


图4 南京市8月7日至8月13日炎热指数分布图

Fig. 4 The distributions of hot index in Nanjing from August 7 to 13

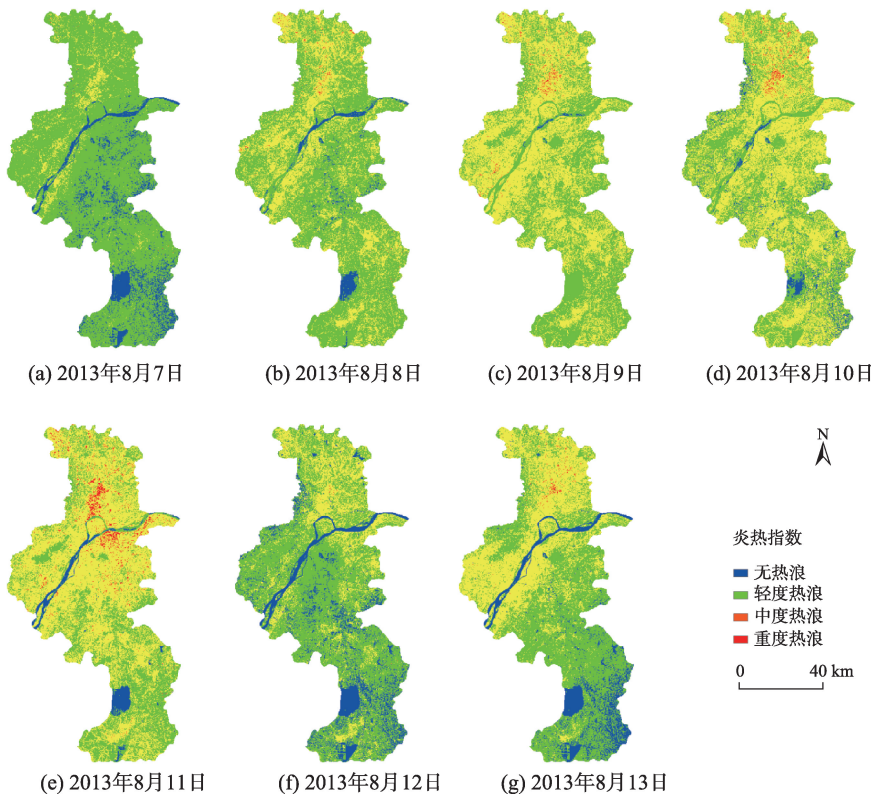


图5 南京市8月7日至8月13日高温热浪分区

Fig. 5 Division distributions of high temperature heat-wave in Nanjing from August 7 to 13

辐射降低的趋势,城区山体以及公园(如紫金山、玄武湖)等地炎热指数低于中心城区,水体则最低。根据图4,位于南京北部郊区的六合化工园区(图4圈中区域)炎热指数始终处于高值,且明显高于中心城区,主要原因是由于化工园区人口众多,空气污染严重,废热排放量大;而这几天中心城区的空气相对湿度低于六合化工园区,炎热指数低于化工园区。

对比图4、5可知,在时间变化上,南京热浪强度与炎热指数具有相同的变化趋势,高温热浪程度主要集中于轻度和中度,随着热浪过程的持续,热浪程度逐渐增强,中度热浪区域逐渐扩大,至11日达到顶峰,部分区域出现重度热浪,随后热浪强度开始减弱。由图5中热浪强度空间分布的变化可知,南京北部及中部地区热浪强度较强,南部地区热浪强度较弱。长江沿岸及各区县中心城区热浪强度较强,多为轻度热浪和中度热浪,六合化工园区及市中心长江沿岸区域出现了重度热浪;南京郊区则主要为轻度热浪,水体区域无热浪。

为了研究不同地表类型高温热浪的时间分布特征,本研究选取具有代表性的典型区域:商业区(新街口)、山体区(中山陵)、水体区(石臼湖)、城市居住区(瑞金北村小区)及乡村居住区(马鞍),提取对应位置的炎热指数、气温和相对湿度,分析不同典型区域的高温热浪变化特征,如图6所示。

由图6知,无论何种地表类型,其高温强度均遵循着先增强后减弱的过程,主要原因是高温热浪是一个持续性过程,具有过程累积效应,不同性质的人为活动通过交互协同作用使得高温热浪在时空尺度上产生累积的环境效应。城市中人为活动密集,不同的人为活动(工业生产、交通和新陈代谢

等)释放的人为热和地表吸收的热量大于自然疏散的热量,高温就会在空间、时间上产生累积现象,这种累积效应使高温强度不断增强。

在上述典型区域中,瑞金北村是城市中心的居住区,新街口属于商业中心区,气温较高,炎热指数相对最高;马鞍属于郊区与农村居住区,人口密集程度较低,虽然近地表气温较低,但相对湿度比其他地区大,其炎热指数与中心城区和商业区相近;石臼湖和中山陵作为自然景区,炎热指数相对更低,尤其水体始终处于最低值。

造成上述现象的主要原因是,南京地处中纬度地区,受太平洋副热带高压影响,属于亚热带季风湿润气候,夏季炎热湿润,气压稳定,风力微弱,7-8月极端最高气温有时高达40℃,易发生高温热浪灾害事件。南京城市化水平高,城市区域人口众多,建筑密集,下垫面复杂,其导热率和热容量大,增加了城市太阳辐射的吸收与热量的存储;城市下垫面不透水面积较大,水分少,城市潜热输送较小,感热输送较大,城市近地表气温高于周围郊区及农村地区;同时城市热岛效应也是造成高温热浪的重要原因^[28]。

由此可见,城市化水平和热岛强度是引发高温热浪灾害的重要人为因素,为减少高温灾害的发生,需要采取一定措施,如大力发展城市绿化,增加绿地面积,改进城市地表材料,减少不透水性材料的铺装,改善能源结构,减少人为热排放等,降低城市化和城市热岛对高温的影响。高温热浪作为一种严重的城市气象灾害,高温热浪的精细化预告以及高温热浪风险评估和区划,是减轻高温热浪灾害的前提与基础。

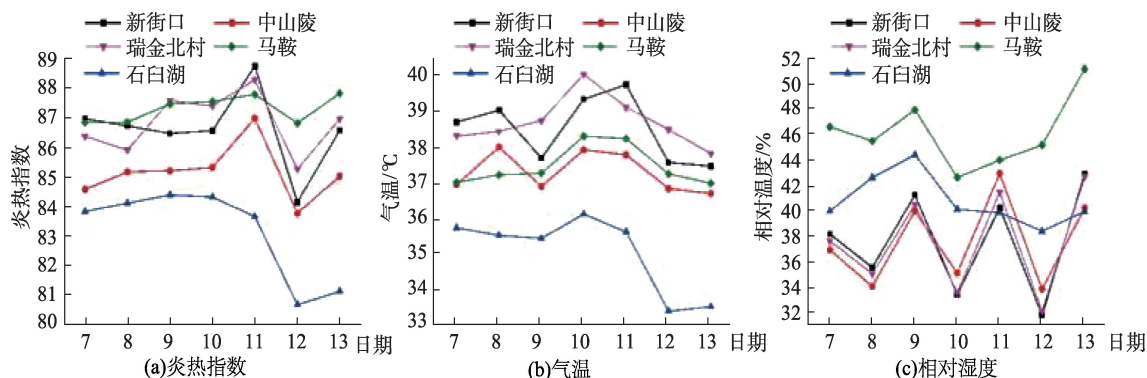


图6 典型区域炎热指数、气温和相对湿度时间变化图

Fig. 6 Time series of the hot index, temperature, and relative humidity in the selected typical areas

5 结论

结合 Landsat 8 OLI 和 MOD09GA 地表反射率数据,本研究对 MYD11A1 地表温度产品进行降尺度处理,以获取高时空分辨率的南京市地表温度分布结果。在此基础上,采用多因子统计方法获取南京市近地表气温时空分布,进而结合空间插值的近地面相对湿度分布,深入分析了南京高温热浪时空分布特征。主要结论如下:

(1)研究充分发挥了多源遥感数据在时、空分辨率互为补充的作用,通过降尺度、近地表气温估算等遥感手段和空间插值方法,准确表征了研究区高温热浪的时空分布与变化特点。

(2)在8月7-13日的高温热浪事件中,南京炎热指数呈现先升高后降低的趋势,11日达到最高值;其热浪指数也呈现同样的趋势,轻度热浪和中度热浪范围逐渐扩大,在11日达到最大后开始缩小直至热浪事件结束。

(3)南京高温热浪空间分布整体表现为中心城区炎热指数高,热浪等级强,郊区城镇虽然气温低,但相对湿度高,炎热指数也较高;农村地区炎热指数低,热浪等级弱,炎热指数最低的区域则为水域以及山体区域。城市化水平和城市热岛强度是影响高温热浪时空分布的主要人为因素,城市地表性质增加了太阳辐射吸收和热量存储,城市生产生活产生大量人为热,不断加热城市近地表气温,使高温热浪强度不断增强。

(4)在高温热浪遥感监测研究过程中,只考虑了温度和相对湿度影响,除此以外,高温热浪也与风环境、城市热岛效应和地形等因素存在联系,在后续研究中,将进一步开展综合多因子的高温热浪监测与影响分析研究。

参考文献(References):

- [1] 王遵娅,丁一汇,何金海,等.近50年来中国气候变化特征的再分析[J].气象学报,2004,62(2):228-236. [Wang Z Y, Ding Y H, He J H, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years[J]. Journal of Meteorology, 2004,62(2):228-236.]
- [2] Huang J, Wang R, Shi Y. Urban climate change: A comprehensive ecological analysis of the thermo-effects of major Chinese cities[J]. Ecological Complexity, 2010,7(2):188-197.
- [3] 张尚印,张德宽,徐祥德,等.长江中下游夏季高温灾害机理及预测[J].大气科学学报,2005,28(6):840-846. [Zhang S Y, Zhang D K, Xu X D, et al. Study on the mechanism and forecasting method of Higu temperature disaster in summer in the large cities of the Yangtze River Basin [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2005,28(6): 840-846.]
- [4] Smargiassi A, Goldberg M S, Plante C, et al. Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands[J]. Journal of Epidemiology & Community Health, 2009,63(8):659-664.
- [5] 中国气象局.高温科普五:什么是高温热浪[R].北京:中国气象报社,2011. [China Meteorological Administration. High temperature science five: What is high temperature heat wave[R]. Beijing: China Meteorological News, 2011.]
- [6] 张尚印,张海东,徐祥德,等.我国东部三市夏季高温气候特征及原因分析[J].高原气象,2005,24(5):829-835. [Zhang S Y, Zhang D K, Xu X D, et al. Climatic character and cause analysis of summer high temperature in main cities of east china[J]. Plateau Meteorology, 2005,24(5):829-835.]
- [7] 杨辉,李崇银.2003年夏季中国江南异常高温的分析研究[J].气候与环境研究,2005,10(1):80-85. [Yang H, Li C Y. Diagnostic study of serious high temperature over south china in 2003 summer[J]. Climatic and Environmental Research, 2005,10(1):80-85.]
- [8] 唐云辉,阳华.重庆市高温分类与指标及其发生规律研究[J].西南农业大学学报,2003,25(1):88-91. [Tang Y H, Yang H. The research of chongqing's high temperature classification index and its regularity[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2003,25(1):88-91.]
- [9] 黄卓,陈辉,田华.高温热浪指标研究[J].气象,2011,37(3):345-351. [Huang Z, Chen H, Tian H. Research on the heat wave index[J]. Meteorological Monthly, 2011,37(3): 345-351.]
- [10] Yagtu C P. A method for improving the effective temperature index[J]. ASHVE Trans, 1947,53:307-309.
- [11] 康晋闽,杨贤栋.福建省高温热浪时空分布特征[J].农技服务,2016,33(3):153-154. [Kang J M, Yang X D. Spatio-temporal distribution of high temperature heat wave in fujian[J]. Agricultural Technology Service, 2016, 33(3):153-154.]
- [12] 贾佳,胡泽勇.中国不同等级高温热浪的时空分布特征及趋势[J].地球科学进展,2017,32(5):546-559. [Jia J, Hu Z Y. Spatial and temporal features and trend of different level heat waves over China[J]. Advances in Earth Science, 2017,32(5):546-559.]
- [13] 谢德寿.城市高温灾害及其预防[J].灾害学,1994(3):29-33.

- [Xie D S. The hazard of megatherm and its preventive measures[J]. *Journal of Catastrophology*, 1994(3):29-33.]
- [14] 李莎莎,翟国方.城市高温灾害研究[A].“中国视角的风险分析和危机反应”——中国灾害防御协会风险分析专业委员会第四届年会论文集[C].中国灾害防御协会风险分析专业委员会,2010:8. [Li S S, Zhai G F. A literature review on urban heat calamity[A]. “Risk Analysis and Crisis Response of Chinese Perspective” Proceedings of the Fourth Annual Conference of China Disaster Prevention Association Risk Analysis and Professional Committee[C]. China Disaster Prevention Association Risk Analysis and Professional Committee, 2010:8.]
- [15] Johnson D P, Tanforth A, Ulla V, et al. Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data[J]. *Applied Geography*, 2012,35(1):23-31.
- [16] Fussler H M. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research[J]. *Global Environmental Change*, 2007,17(2):155-167.
- [17] Dousset B, Gourmelon F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and land cover[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003,58(1-2):43-54.
- [18] 范碧航,李宁,张继权,等.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*,2011,26(4):93-97. [Fan B H, Li N, Zhang J Q, et al. Impact analysis and hazard assessment of urban disastrous high temperature weather: A case study on Changchun city[J]. *Journal of Catastrophology*, 2011,26(4):93-97.]
- [19] 张曦,黎鑫.湖南省夏季高温热浪时空分布特征及其成因[J].*气候与环境研究*,2017,22(6):747-756. [Zhang X, Ni X. Spatial-temporal characteristics and causes of summer heat waves in Hunan province[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2017,22(6):747-756.]
- [20] 李召良,段四波,唐伯惠,等.热红外地表温度遥感反演方法研究进展[J].*遥感学报*,2016,20(5):899-920. [Li Z N, Duan S B, Tang B H, et al. Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016,20(5):899-920.]
- [21] 董立新,杨虎,张鹏,等. FY-3A陆表温度反演及高温天气过程动态监测[J].*应用气象学报*,2012,23(2):214-222. [Dong L X, Yang H, Zhang P, et al. Retrieval of land surface temperature and dynamic monitoring of a high temperature weather process based on FY-3A/VIRR data[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2012,23(2):214-222.]
- [22] 辜晓青,王怀清,聂秋生,等.利用极轨气象卫星资料动态监测2003年江西夏季高温干旱[J].*江西气象科技*,2005(2):41-43. [Gu X Q, Wang H Q, Nie Q S, et al. Using NOAA-AVHRR data to dynamic monitor high temperature and drought of Jiangxi province in summer[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2005(2):41-43.]
- [23] 王祎婷,谢东辉,李亚惠.光谱指数趋势面的城市地表温度降尺度转换[J].*遥感学报*,2014,18(6):1169-1181. [Wang Y T, Xie D H, Li Y H. Downscaling remotely sensed land surface temperature over urban areas using trend surface of spectral index[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014,18(6):1169-1181.]
- [24] 李喆,胡蝶,赵登忠,等.宽波段遥感植被指数研究进展综述[J].*长江科学院院报*,2015,32(1):125-130. [Li Z, Hu D, Zhao D Z, et al. Research advance of broadband vegetation index using remotely sensed images[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015,32(1):125-130.]
- [25] 肖凡,朱明雅.归一化遥感指数的应用发展研究[J].*农村经济与科技*,2016,27(1):47-48. [Xiao F, Zhu M Y. Research on application and development of normalized remote sensing index[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2016,27(1):47-48.]
- [26] 吴志杰,赵书河.基于TM图像的“增强的指数型建筑用地指数”研究[J].*国土资源遥感*,2012,24(2):50-55. [Wu Z J, Zhao S H. A study of enhanced index-based built-up index based on Landsat TM imagery[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2012,24(2):50-55.]
- [27] 王薇.城市高度异质下垫面监测及热环境分析[D].上海:华东师范大学,2016. [Wang W. Underlying surface monitoring and thermal environment analysis in highly heterogeneous urban areas[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.]
- [28] 郑祚芳,范水勇,王迎春.城市热岛效应对北京夏季高温的影响[J].*应用气象学报*,2006(S1):48-53. [Zheng Z F, Fan S Y, Wang Y C. Effects of urban heat island on summer high temperatures in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006(S1):48-53.]