

基于遥感的北京城市高温热浪风险评估

何苗, 徐永明, 李宁, 白琳

南京信息工程大学地理与遥感学院, 江苏 南京 210044

摘要: 在全球变暖及快速城市化的背景下, 高温热浪对城市居民健康及社会经济的影响越来越大, 成为城市面临的最重要的气象灾害之一。利用多源卫星遥感数据对北京市开展了高温热浪风险评估的研究。基于 Landsat/TM 遥感数据、DMSP/OLS 夜间灯光遥感数据和社会统计数据提取地表温度作为高温热浪危险性评估因子, 提取植被指数、建筑指数、人口密度、人均可支配收入、老年人口比重、建筑工人比重、空调拥有率作为脆弱性评估因子, 通过加权平均风险评估模型计算得到北京市高温热浪风险指数。结果表明, 北京市高温风险分布具有显著的空间差异性。总体而言, 北部地区风险低于南部地区, 西部地区风险低于东部地区。高风险区域主要集中在六环内的中心城区和近郊区, 以二环为中心向四周呈环状递减趋势, 形成了最大的风险覆盖区, 并在各区的主城区形成了多个风险次中心; 远郊区的高温风险普遍较低, 风险最低的 3 个区依次是密云区、门头沟区和怀柔区, 高风险面积比例均不足 10%。除了中心城区及各区的主城区之外, 延庆区西南部的延怀盆地、密云河谷一带、平谷东部的部分平原地区风险等级也比较高。就人口分布最为密集的平原、平坝地区而言, 西城区和东城区的高温风险最高, 平均风险指数分别达到 0.57 和 0.56, 其次是石景山区、丰台区、海淀区和朝阳区, 平均风险指数也均在 0.4 以上。文章提出了一种基于卫星遥感进行城市高温热浪风险评估的方法, 获取了高分辨率的北京市高温热浪风险空间分布信息, 为城市有效应对高温风险提供了科学参考。

关键词: 北京; 高温热浪; 风险评估; 遥感; 人口空间化

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.04.013

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2017) 04-0635-08

引用格式: 何苗, 徐永明, 李宁, 白琳. 2017. 基于遥感的北京城市高温热浪风险评估[J]. 生态环境学报, 26(4): 635-642.

HE Miao, XU Yongming, LI Ning, BAI Lin. 2017. Assessing heat wave risk in Beijing by remote sensing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 26(4): 635-642.

在全球变暖背景下, 近 20 年热浪的发生频率、强度和持续时间均呈现加强态势, 在全球的影响范围也逐渐扩大 (Russo et al., 2014)。改革开放以来, 中国经历了快速城市化的过程, 30 多年来城镇人口翻了 4 倍 (国家统计局, 2013), 城市化水平也由 17.92% 提高到 52.2% (刘玉红, 2014)。城市化进程改变了土地覆盖-利用类型, 地表反照率和热容量随之发生改变, 导致大量太阳辐射贮存在城市人工建筑物中 (彭保发等, 2013); 城市不透水面积增加减弱了蒸散发作用, 使得城市热量收入大于支出 (王文杰等, 2006); 此外, 中高大建筑物之间形成的“城市谷”阻碍了高温气流向外疏散, 导致人类生产生活所产生的热量大量聚集 (Van et al., 1993)。多种因素作用下城市地区温度高于四周, 加剧了城市面临的高温热浪风险。高温热浪对人体健康具有不可忽视的影响, 研究表明热浪与发热、中暑、心脑血管疾病等的发病率存在相关关系 (田颖等, 2013), 1995 年芝加哥 (Whitman et al., 1997)

和 2003 年巴黎 (Robine et al., 2008) 的高温热浪都导致了大量超额死亡, 2009—2011 年北京发生的 5 起高温热浪事件均使循环系统疾病急诊就诊人数增加 (郑山等, 2016)。高温热浪对环境和社会经济方面的影响也不可小觑, 热低压在城市长期覆盖, 大量烟尘、汽车尾气等污染物随热气流上升并悬浮在空中, 容易产生雾霾、酸雨等恶劣天气; 高温天气加快光化学反应速度, 使近地面大气中臭氧浓度增加, 影响人体健康 (李志乾等, 2009), 在人口集中的城市地区这种负面影响更为明显。每年热浪期间, 北京市关于公交车自燃、电网负荷超记录、日供水量接近极限等事件的报道都相当频繁, 引起了社会各界的广泛关注。对高温热浪进行风险评估能够为高温风险灾害预报预警机制的建立提供可靠的参考依据, 降低灾害带来的不利影响。

国外已有许多学者从热浪特点、影响、风险评估等角度对城市高温灾害进行了研究 (Russo et al., 2014; Zampieri et al., 2016; Semenza et al., 1996)。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41201369); 高分辨率对地观测系统重大专项

作者简介: 何苗 (1992 年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感。E-mail: hemiao@126.com

*通信作者: 徐永明, E-mail: xym30@263.com

收稿日期: 2016-12-28

在关于热浪综合风险评估的研究中, Dousset et al. (2003) 建立多种热指标, 构建 logistic 风险评估模型对巴黎地区的热浪影响进行了估算; Krüger et al. (2013) 基于城市结构、热特性和人口状况建立了热敏感指标, 对德国 Dresden 市进行了高温风险评估; Inostroza et al. (2016) 利用地理信息系统、遥感和统计数据构建以空间暴露性、敏感性、适应性为基础的危险性风险评估指标对圣地亚哥市进行城市内部风险预测, 取得了良好的效果。相比于国外, 国内对高温热浪的研究侧重于以气象数据为基础研究高温热浪的内涵与特征、机理等(胡峰等, 2010; 黄慧琳等, 2012)。但是, 气象数据站点数目有限, 不能精细反映城市内部高温分布的空间差异, 并且未考虑人口分布密度以及不同人群对于高温的承受能力。也有部分学者运用社会统计资料和气象资料开展了高温风险综合评估, 但是由于数据、技术等因素的限制, 通常以城市为单元开展定性研究, 不能量化反映城市内部高温热浪风险的空间分布特征(宋晨阳等, 2016)。遥感数据在获取空间信息上的优势使其成为研究城市热环境的重要工具, 为高温热浪灾害研究提供了新的思路。本文结合多源遥感数据和社会统计数据, 提取了北京市高温热浪危险性评估因子和脆弱性评估因子, 对北京市高温热浪风险进行评估, 旨在揭示北京市高温热浪风险的空间分布特征, 为有效应对城市高温风险提供科学参考。

1 研究区及研究数据

1.1 研究区概况

北京市位于北纬 39°28′~40°05′, 东经 115°25′~117°30′之间, 共有 16 个市辖区。西部、北部和东北部被太行山脉和燕山山脉环绕, 东南部是北京小平原。处于暖温带半湿润大陆性季风气候区, 夏季炎热漫长。夏季市中心商务区平均温度 28.8 °C 左右, 且内部温度差异明显(张本志等, 2013)。作为中国的政治、经济、文化中心, 北京经历了快速的城市化进程。城镇人口于改革开放前的 479 万人迅速增长到 1 740 万人(国家统计局北京调查总队, 2016), 年均增长率达到 4.3%, 截至 2011 年北京城镇化率已超过 86%, 随着城市的扩张和人口的增加, 北京市的城市热岛效应越来越强烈(季崇萍等, 2006), 导致其高温热浪风险的危害进一步扩大。

1.2 数据源及其处理

本文选用的主要遥感数据为 Landsat/TM 数据和 DMSP/OLS 数据。Landsat/TM 数据为 2011 年 7 月 26 日成像的上下两景相邻的 Landsat5/TM 影像, 其 WRS 轨道号分别为 123-32 和 123-33, 多光谱波段空间分辨率 30 m, 热红外波段空间分辨率 120 m。对

TM 影像进行几何校正和镶嵌处理, 并利用 6S 辐射传输模型对 1~5、7 波段进行大气校正, 得到地表真实反射率。DMSP/OLS 数据为 2011 年的 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据, 由 DMSP/F18-Block5D-3 号卫星提供。从该数据中筛选出一年内无日光、无月光、无极光且噪声小的像元, 取可见光波段的均值合成, 空间分辨率为 0.008 333°。所有遥感数据统一采用基于 WGS84 基准面的 UTM 投影(50 分带), 并根据北京市行政边界进行掩膜处理。社会统计资料包括北京市各区县的常住人口、年末总人口、65 岁及以上老年人口、城镇居民人均可支配收入、建筑施工企业年末从业人员、城镇居民家庭每百户耐用消费品拥有量中的空调器拥有量, 所有数据均来自《北京区域统计年鉴 2012》(北京市统计局国家统计局北京调查总队, 2013)。

2 研究方法

2.1 高温热浪危险性因子

危险性因子指来自系统外部的、对系统造成威胁的因素, 极端炎热的气温无疑是受灾的城市系统中最大的威胁。多项研究表明北京市气温与遥感反演的地表温度之间存在线性相关关系(韩秀珍等, 2012; 刘勇洪等, 2014), 因而可以将地表温度作为北京市高温评价的主要遥感指标。

2.1.1 地表温度

Landsat 官方网站提供的定标公式可以将原始数据各波段的 DN 值转换为辐射亮度 L :

$$L = G \times DN + B \quad (1)$$

式中, G 为增益系数, B 为偏移系数, 转换后辐射亮度单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ (其中, sr 为球面度)。

再由热红外波段的辐射亮度经普朗克公式计算得到亮度温度:

$$T_6 = K_2 / \ln(1 + K_1 / L_6) \quad (2)$$

式中, T_6 为亮度温度(单位为 K), 常量 $K_1 = 607.76 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, $K_2 = 1\ 260.56 K$ 。

亮度温度值受到大气和地表对热辐射传导的影响, 不能够准确反映地表的真实温度, 需要进一步计算。利用普适性单通道算法(Jiménez et al., 2003)获取地表温度信息:

$$T_s = \gamma \left[\varepsilon^{-1} \cdot (\psi_1 \cdot L_\lambda + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (3)$$

$$\gamma = \left\{ \frac{c_2 L_\lambda}{T_\lambda^2} \left(\frac{\lambda^4}{c_1} L_\lambda + \lambda^{-1} \right) \right\}^{-1} \quad (4)$$

$$\delta = -\gamma \cdot L_\lambda + T_\lambda \quad (5)$$

式中, T_s 为陆面温度(单位: K), ε 为地表比辐射率, T_λ 为传感器的亮度温度(单位: K), L_λ

为传感器接收到的辐亮度（单位： $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}$ ）， λ 为传感器有效波长（单位： μm ）， C_1 和 C_2 为常数（ $C_1=1.19\ 104\times 10^8\ \text{W}\cdot\mu\text{m}^4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ， $C_2=14\ 387.685\ \mu\text{m}\cdot\text{K}$ ）， Ψ_1 、 Ψ_2 、 Ψ_3 为大气函数，与大气的水汽含量 W 有关，单位： $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

普适性单通道算法所需的地表比辐射率数据采用混合像元法（Sobrino et al., 2004；覃志豪等，2004）进行计算；大气水汽含量从 Landsat/TM 成像当天的 MODIS 水汽产品（MOD05）中提取。根据普适性单通道算法计算得到北京市 2011 年 7 月 26 日的地表温度空间分布图并将热力学温度转换为摄氏温度（图 1）。

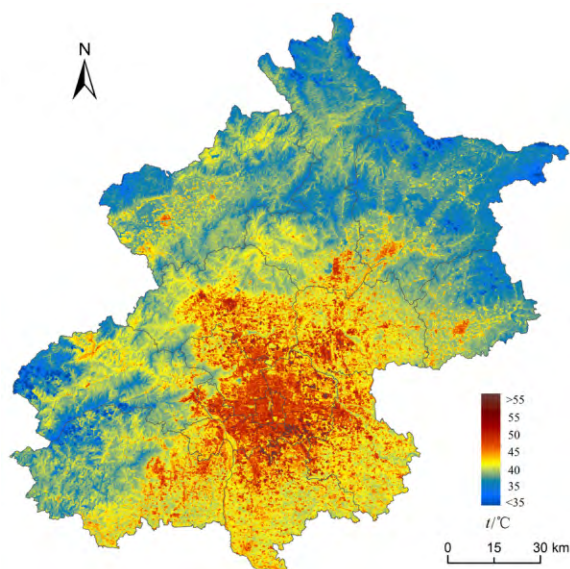


图 1 2011 年 7 月 26 日北京市地表温度分布图

Fig. 1 Map of land surface temperature in Beijing on July 26th of 2011

2.2 高温热浪脆弱性因子

脆弱性因子指系统内部承受风险的能力，选择人口密度作为最重要的脆弱性评估指标。辅以植被指数、建筑指数、老年人口比重、建筑工人比重、人均可支配收入、空调拥有率作为次要脆弱性评估指标综合评价系统脆弱性。

2.2.1 下垫面因子

下垫面信息与人类活动密切相关，与高温风险有着不可分割的联系。城市绿地在改善城市热环境的过程中具有明显作用（栾庆祖等，2014）；城市不透水面积与地表温度之间存在正相关关系（买买提江·买提尼亚孜等，2015；徐永明等，2013）。归一化植被指数（NDVI）是公认的植被覆盖度最佳指示因子，随后又有人参考 NDVI 建立了能够反映建筑物信息的归一化建筑指数 NDBI（查勇等，2004）。NDVI 值越大，植被覆盖度越高，植物生长状况越好；NDBI 值越大，建筑物越多，建筑越

密集。因此，选取 NDVI 和 NDBI 作为下垫面相关指数。

$$\text{NDVI}=(\text{NIR}-R)/(\text{NIR}+R) \quad (6)$$

NIR 表示近红外波段， R 表示红波段。

$$\text{NDBI}=(\text{MIR}-\text{NIR})/(\text{MIR}+\text{NIR}) \quad (7)$$

MIR 表示中红外波段，NIR 表示近红外波段。

2.2.2 人口密度空间化

人口作为高温热浪灾害的承灾体，其空间差异对于高温热浪风险评估具有重要影响。北京市统计年鉴提供的人口数据以区县为统计单元，无法反映精细尺度上的人口分布差异。本研究基于 DMSP 夜间灯光遥感数据和 Landsat 陆地遥感数据提取北京市人口密度进行空间化处理，获得人口密度空间分布图作为高温热浪风险评估的主要脆弱性因子。

研究表明夜间灯光值、土地覆盖类型均与人口分布具有密切联系（曹丽琴等，2009；吕安民等，2005）。本文结合遥感夜光数据和土地覆盖数据进行人口空间化。以北京市 TM 影像的所有 7 个波段、DEM 高程信息和空间纹理信息等作为分类特征，根据 Google Earth 选取训练区，通过 CART 算法建立分类决策树，得到北京市土地覆盖分类图，包含建筑、水体、农业用地、林地共 4 类地物。考虑到北京市平原和山区面积比重都很大，而地形对于土地覆盖类型和人口分布有着显著影响，因此区分平原和山区分别建立模型进行人口空间化处理。

平原地区人对地物的改造远远强于地物对人的影响，各个地物类型都在较大程度上体现着人类活动的影响，因此可以根据地表覆盖类型预测人口分布情况。选取建筑、水体、农业用地和林地对应的各区县灯光总值为自变量，与区县人口进行回归分析，构建多元线性回归模型。回归模型的常量设为零，即假设无数据区无人口分布，模型如下：

$$y_k=\left(\sum_{i=1}^4\beta_ix_i\right)_k \quad (8)$$

式中， y 表示统计年鉴的第 k 个区县的人口， x_i 表示特定区县第 i 种地物类型（ $i=1、2、3$ 和 4 分别代表建筑、水体、农业用地和林地）对应的灯光总量值，该值是地物面积与对应灯光亮度均值的乘积。

山区人口分布受到地形的限制，只有村落附近的地物与人类活动有关系。这是多种地物类型相互作用的复杂关系。以林地为例：一方面，人们开垦林地以获取农田，农田面积越多林地面积就会越少；另一方面，大面积的林地阻碍村落与外界的交流，一定程度上限制村落规模的扩展。当混合像元中只有林地时，可以认为林地对人口不会产生影

响,但当混合像元内有农田、林地、居民点时,林地对村落发展的复杂作用就会凸显出来。由于存在这种综合影响,引入 x_1x_3/x_4 代替上述模型中的 x_4 ,作为与林地相关的自变量。同理,引入 $x_1x_2x_3$ 代替 x_2 作为与水体相关的自变量,建立适用于山区的人口分布模型。

将 30 m 分辨率的 Landsat 像元和 1 000 m 分辨率的 DMSP 夜间灯光数据利用最近邻法统一重采样到 25 m,在 40×40 子区域里,统计每个 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 空间格网内每种地物类型的平均灯光亮度值及其面积。为实现去除夜光影像低值区背景噪音的影响和因地制宜的应用模型,采用阈值法对数据进行处理。经多次反复试验后判定平均高程小于 100 m,或高程大于 100 m 且城镇像元较多的区域为平原地区的混合像元;高程大于 100 m 且林地较多的区域为山区混合像元;默认纯林地、水体、农田像元内人口数量为 0。分别针对平原和山区建立人口空间化模型,并将模型应用于 1 km 分辨率 DMSP 夜光遥感数据和土地覆盖比重数据,得到 1 km 分辨率人口分布图。

DMSP 夜光数据存在容易过饱和的缺陷,因此在灯光密集的城市中心区域,模型所得的人口密度小于实际人口密度,需要进行修正。根据北京市 1 km 人口空间分布图统计每个区县的人口总数,并与统计资料进行对比,以评估人口空间化的精度。模拟结果的平均绝对误差 MAE 为 40.31 万人,决定系数 R^2 为 0.79。结果表明,模拟结果与统计资料之间吻合度较好。

最后,为了使所提取的各个区的人口数与实际人口数趋于一致,分别计算遥感反演人口结果中各个区的人口总数,根据每个区的人口统计数进行修正。假设同一区县内每个格网的模拟误差相同,那么真实值 y 与模拟值 y_k 之间存在如下线性关系(黄杰等, 2015):

$$y = m \times y_k \quad (9)$$

式中,修正系数 m 为各区县统计总人数与模拟总人数的比值。

对人口分布图进行修正后,得到最终的北京市 1 km 分辨率人口分布图(如图 2)。

2.2.3 其他脆弱性因子

居民的收入情况作为区域经济发展水平的体现形式之一,是高温风险评估的重要经济因子。前人研究表明,经济发展水平与夜间灯光值之间存在较强相关性(苏泳娴, 2015; 何洋等, 2014; 王琪等, 2013; 柴子为等, 2015)。以北京市各区夜光均值为自变量,人均可支配收入为因变量建立多元回归模型,该模型决定系数 R^2 为 0.73,表明模型模

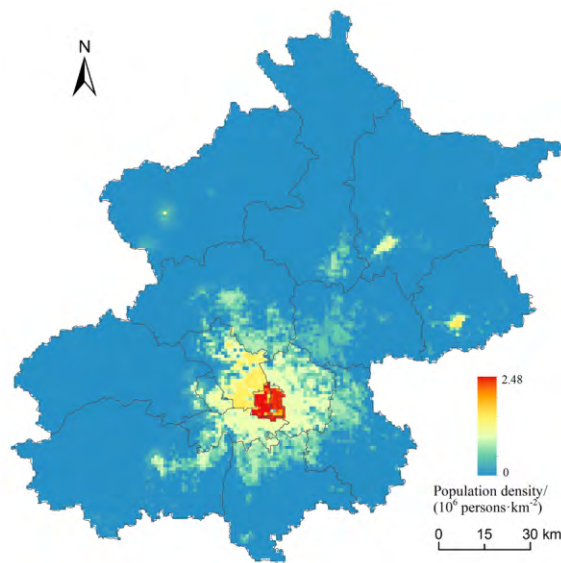


图2 北京市人口密度空间分布图(修正后)

Fig. 2 Map of population density in Beijing (after modification)

拟结果比较准确,依据该模型获得北京市人均可支配收入空间分布图。

建筑工人比重指的是建筑施工企业年末从业人员与年末总人口的比值,烈日下在室外工作的人员比室内工作人员更易遭受高温侵害,室外工作人口比例越高城市受到的危害越大。空调平均拥有率采用的是城镇居民家庭每百户耐用消费品拥有量的抽样调查结果,空调能很好地缓解热浪对人体的影响,英国高温灾害期间因空调的大量使用而减少了死亡人数(谢盼等, 2015)。相对于年轻人,65岁及以上的老年人由于身体调节功能衰弱等原因,更容易受到高温热浪的影响,研究表明高温对65岁以上就诊人数的影响大于65岁以下就诊人数(郑山等, 2016)。由于建筑工人比重、空调平均拥有率、老年人口比重这些数据缺乏合理有效的空间化方法,因此只能假设整个区内数值相同,再基于GIS对矢量数据进行栅格化处理。

2.3 高温热浪风险评估模型

在运用评估模型计算北京市高温热浪风险指数之前,为了避免评估指标量纲不一致,对所有评估因子进行归一化处理,值域范围统一到[0, 1]。各因子中地表温度、建筑指数、人口分布、老年人口比重、建筑工人比重与高温风险呈正相关关系,植被指数、人均可支配收入、空调拥有量与高温风险呈负相关关系。

利用加权平均模型计算危险性指数,公式如下:

$$H = a_1 H_1 \quad (10)$$

式中, H 表示高温危险性指数, H_1 表示地表温度, a_1 表示各危险性因子的权重(表1)。

表 1 因子权重

Table1 The weight of assessment factors

Coefficient	a_1	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
Weight	1	-0.1	0.1	0.4	-0.1	0.1	0.1	-0.1

同理，利用加权平均模型计算脆弱性指数，公式如下：

$$V = \sum_{i=1}^7 b_i V_i \quad (11)$$

其中， V 表示高温脆弱性指数， V_1 表示植被指数， V_2 表示建筑指数， V_3 表示人口密度， V_4 表示人均可支配收入， V_5 表示老年人口比重， V_6 表示建筑工人比重， V_7 表示空调拥有率， b_i 表示各脆弱性因子的权重（表 1）。

运用专家打分法分别给各个脆弱性因子权重和危险性因子权重赋值（表 1）：

在危险性和脆弱性指数的基础上，计算高温风险指数 R ，公式如下：

$$R=0.5V+0.5H \quad (12)$$

3 结果与分析

获取北京市各项高温热浪危险性因子和脆弱性因子之后，基于加权平均法评估模型计算北京市高温热浪风险指数，并等比例的将风险等级划分为 5 级，即高风险、较高风险、中等风险、较低风险和低风险。如图 3 所示，北京市各区内部风险空间分布差异较为显著：风险最高的区域大多位于平原，尤其是六环以内的大部分地区，这部分地区建筑物密集，热岛效应强烈，人口压力大，面临的高温风险较高。除了中心城区外，各区主城区的风险均高于周边，形成多个次风险中心，体现了明显的

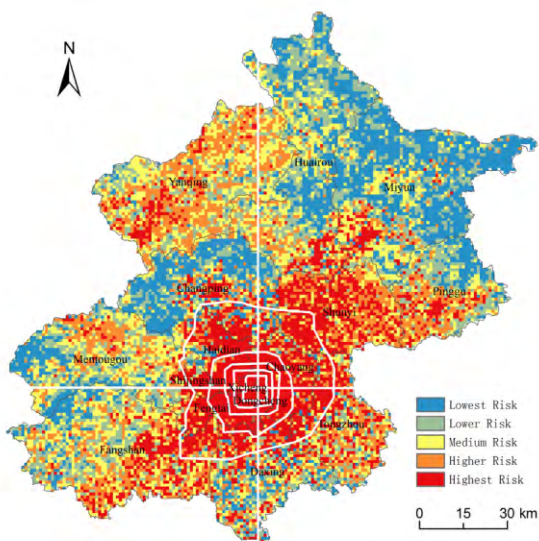


图 3 北京市高温热浪风险等级图

Fig. 3 Map of heat wave risk in Beijing city

城市热岛效应。除了中心城区以及各区的市区之外，延庆区西南部的延怀盆地、密云河谷一带、平谷东部的部分平原地区风险等级也比较高。河谷地带和延庆盆地夏季植被覆盖率较低、土壤构成以比热较小的砂壤为主，太阳辐射作用下温度快速升高使高温危险性增加。同时这些地区经济比较落后，高温脆弱性较高，因此面临的高温热浪灾害风险较高。风险最低的区域位于北京北部、东北部和西南部，这些地区以林地为主，温度比较低，人口密度也很低，因此高温脆弱性和危险性均较小。另外需要注意的是，延庆区由于海拔相对较高，高温危险性较低，但是由于其经济发展水平相对滞后，生活条件相对于北京市其他地区有较大差距。从社会统计数据来看，延庆区人均收入、家庭空调拥有量明显低于其他区县，而老年人口比重则高于大部分区县，这使得该地区脆弱性指数比较高，故其体现出了较高的高温热浪风险。

以天安门为中心沿南北、东西方向分别做剖面线（如图 4 所示），统计沿线的风险等级以反映北京城市高温热浪风险的区域差异。从两条剖面线来看，北京北部风险低于南部，西部风险低于东部；南部最高风险比北部最低风险高 35.9%，东部最高风险比西部最低风险高 37.7%。该现象主要受到地形的影响，北京西部、北部和东北部被太行山脉和燕山山脉环绕，海拔高、坡度大且植被覆盖度高，所以温度比较低。此外，这部分山区人口密度远低于平原地区，故高温热浪风险较低。北京小平原以北剖面线波动平稳，表示北部风险较低的区域，其风险强度的空间差异往往较小。北京小平原及其以南地区的高风险区，人口密度分布呈现中心城区高度集中的趋势，说明城市发展已处于成熟阶段（田永中等，2004），城市基础设施、城市绿地等建设较为完善，在居民区内建设公园等城市绿地有效缓解了城市人口面临的高温风险，使得高风险区临近位置风险差异较明显，剖面线波动较明显。

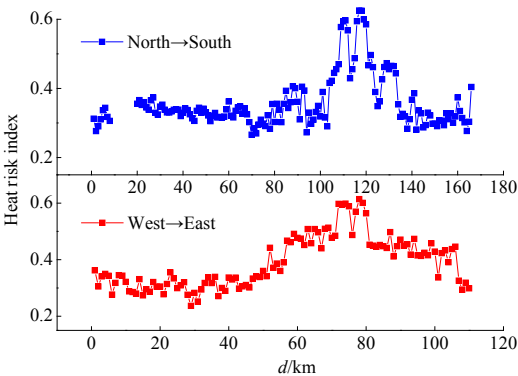


图 4 不同方向高温风险指数变化曲线图

Fig. 4 Variations of heat risk index in different directions

六环内的区域既是高温区又是人口密集区,在这两个主要影响因子的作用下,六环内高温风险极高。虽然六环内大部分地区均体现出高风险的特征,但是其平均风险指数仍然有着明显差异。分别对二环至六环内各环的平均高温风险指数进行统计,结果见图5。从图中可见,二环以内区域的高温热浪风险最大,平均高温风险指标达到0.57,并且从二环至六环呈现明显的递减趋势。北京市“单中心+环线”的城市布局使得城市人口和城市资源在中心聚集(贺晓冬等,2014),人口密度和人均可支配收入呈现环状递减的趋势,而且距离中心城区越远,人口密度和人均可支配收入衰减越快。北京四环内呈全封闭或半封闭的城市发展布局,缺少通风廊道,通风不畅使热量在城市内部聚集,四环内大部分区域承受着巨大的热压力,呈现辐射状蔓延(张兆明等,2007)。四环以外区域植被覆盖度逐渐增加,而建筑密度逐渐降低,缓解了四至六环的高温压力。此外,社会统计资料表明,位于六环内的东城区、西城区、朝阳区、丰台区、石景山区、海淀区以及昌平、顺义、通州、大兴、房山区的部分地区,在建筑工人比重、空调拥有率等指标方面差别不大,但二环以内的老城区的老年人口比重远高于其他区域,达到13.63%,这也是二环内高温风险明显高于其他区域的重要原因。以上因素共同决定了高温热浪风险从二环至六环逐渐递减的空间分布特征。

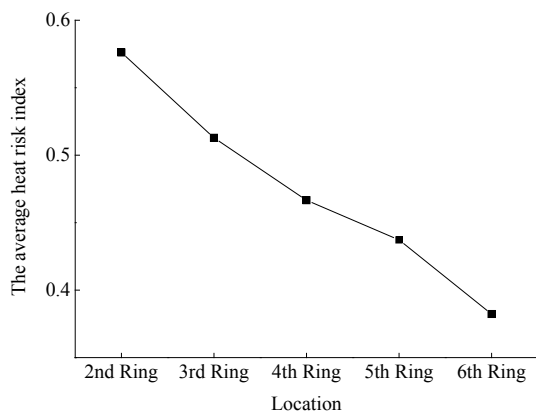


图5 二环至六环平均高温风险指数变化

Fig. 5 Variations of the average heat risk index from 2nd Ring road to 6th Ring road

对北京市各区各高温热浪风险等级面积比例进行统计(图6),结果表明,西城区高风险面积比重达到100%,东城区达到97.5%,远远高于其他各区,东城区和西城区是北京的老城区,是老年人口比重最大的区域,建筑老旧,老居民区规划不合理使得高温不易疏散。朝阳、海淀、丰台、石景山

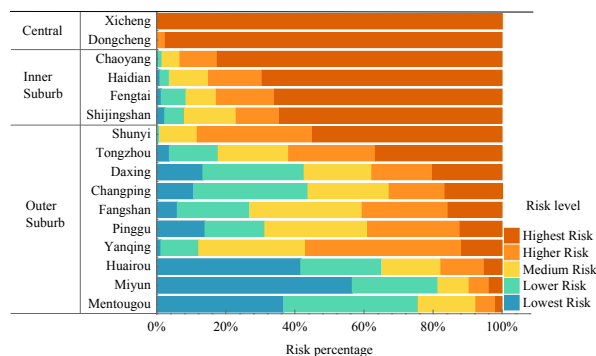


图6 北京市各区高温风险等级面积比例

Fig. 6 The area proportions of different heat risk levels of each district in Beijing

这4个区本身位于三至六环之间的高温区域,加之北京城市功能拓展区的城市定位,是城市商业、地产业、服务业的发展先导;由于北京存在严重的“职住分离”现象,城市功能拓展区交通压力大,人口流动性强,综合风险非常高,各区高风险面积比例均在60%以上。顺义区作为北京重点发展的新城之一,也是承接中心城区、近郊区人口、职能疏散和新的产业集聚的主要地区之一(北京市规划和国土资源管理委员会,2005),面临的高温压力相当大,高风险面积比例超过50%,较高风险比例超过30%,明显高于其他远郊区,成为远郊区中面临风险最大的区域。门头沟、密云、怀柔这几个区在职能上以发展生态服务型经济为主,生态环境比较好,而且人口密度低,因此所面临的高温热浪风险比较低,区县内70%以上的区域面临中等及其以下的高温风险。

从图2来看,北京市人口主要分布在平原、平坝地区,山区人口密度非常低。前文分区县的统计分析所体现出的是各区县整体风险水平,而没能反映人口密集的平原、平坝地区风险状况。考虑到这一点,以高程低于550 m,坡度低于10%为阈值提取了各区县平原、平坝地区的平均风险指数(如图7)。西城区和东城区仍然是平原、平坝地区平均风险最高的区域,平均风险指数分别达到0.57和0.56。其次为石景山、丰台、海淀、朝阳四个区,其平原、平坝地区平均风险指数均高于0.4。其余各区平原、平坝地区的平均风险指数均在0.4以下,其中密云最低,平均风险指数仅为0.32。与图6相比,虽然各个区高温风险排序较相似,但是区域之间差距较小,各区的平原、平坝地区均体现了较高的风险指数。

4 结论

选取北京市作为研究区域,利用遥感数据和社

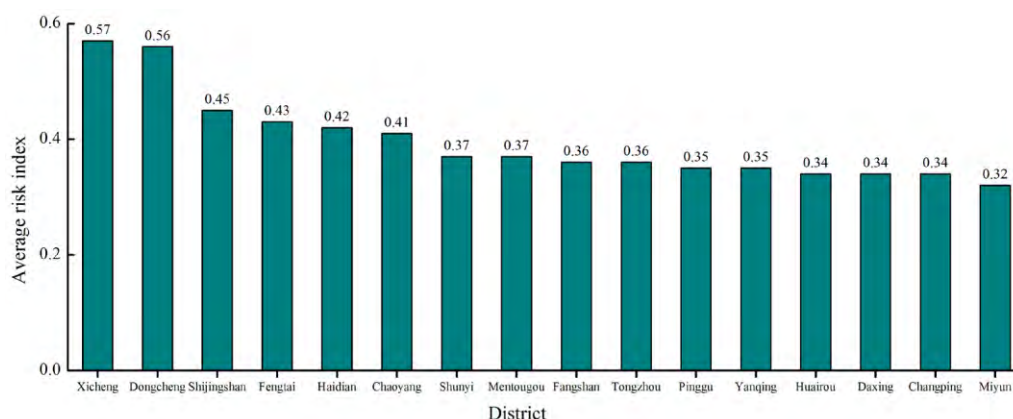


图7 北京市各区平原地区平均高温热浪风险指数

Fig. 7 The average heat wave risk index in the plain of each district in Beijing

会经济数据提取了高温热浪风险评估指标,通过风险评估模型对北京市高温热浪风险进行定量评估,得到以下结论:

(1) 基于 Landsat/TM 遥感数据计算的地表温度具有空间异质性高、可视性强、结果准确的特点,弥补了传统观测资料空间密度不足的缺陷,可以很好地表征高温热浪危险性的空间分布特征;基于夜光遥感数据提取的人口、收入等空间化社会经济数据,能够有效克服目前中国缺乏详细社会经济统计资料的困难,可为城市高温热浪风险评估研究提供新的思路。

(2) 整体而言,北京市高温热浪风险具有明显的空间差异,南部风险高于北部,东部风险高于西部;受人类活动的影响,南部风险的空间异质性高于北部,东西方向空间异质性差异不明显。

(3) 北京市二环以内的核心城区(西城区、东城区)高温热浪风险最高,高风险区面积比重分别达到 100%和 97.5%,从二环至六环,高温热浪风险呈现明显的下降趋势。除主城区之外,还以各辖区城区为中心形成了多个大小不一的次高风险中心,其中石景山区、丰台区、海淀区和朝阳区高温风险比较高,而密云、门头沟、怀柔的高温风险相对较低。就人口密度比较大的平原、平坝地区而言,东城区和西城区具有最高的高温风险指数,但与其他各区之间的差异较小,各区的平原、平坝地区均体现了较高的风险。

利用热红外遥感和夜光遥感数据能够获取城市温度场、人口密度等高温热浪评估指标的详细空间分布信息,在一定程度上克服了气象站点偏少以及社会经济资料不够详细的困难,为高温热浪风险评估提供了新的思路。但是,目前还存在一些问题,比如热红外遥感反演的地表温度与人体健康的关系不如近地表气温密切,DMSP 夜光遥感数据在中心城区自身易饱和的缺陷会影响人口空间化精度

等等。利用遥感手段进行城市高温热浪风险评估尚处于探索阶段,有待未来进一步研究。

参考文献:

- DOUSSET B, GOURMELON F. 2003. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and land cover [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(1-2): 43-54.
- INOSTROZA L, PALME M, DE LA BARRERA F. 2016. A Heat Vulnerability Index: Spatial Patterns of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity for Santiago de Chile [J]. *PLOS ONE*, 11(9): e0162464.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, SOBRINO J A. 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(D22): 4688.
- KRÜGER T, HELD F, HOECHSTETTER S, et al. 2013. A new heat sensitivity index for settlement areas [J]. *Urban Climate*, 6: 63-81.
- ROBINE J M, CHEUNG S L K, ROY S L, et al. 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003 [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 331(2): 171-178.
- RUSSO S, DOSIO A, GRAVERSEN R G, et al. 2014. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119(22): 12500-12512.
- SEMENZA J C, RUBIN C H, FALTER K, et al. 1996. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago [J]. *New England Journal of Medicine*, 335(2): 84-90.
- SOBRINO J A, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, AND PAOLINI L. 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5 [J]. *Remote Sensing of the Environment*, 90(04): 434-446.
- VAN DE GRIEND A A, OWE M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized Difference vegetation index for natural surfaces [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6): 1119-1131.
- WHITMAN S, GOOD G, DONOGHUE E R, et al. 1997. Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave [J]. *American Journal of Public Health*, 87(9): 1515-8.
- ZAMPIERI M, RUSSO S, DI S S, et al. 2016. Global assessment of heat wave magnitudes from 1901 to 2010 and implications for the river discharge of the Alps [J]. *Science of the Total Environment*, 571: 1330-1339.
- 北京市规划和国土资源管理委员会. 2005. 北京市总体规划[EB/OL]. [2005-04-15]. http://www.bjghw.gov.cn/web/static/catalogs/catalog_233/233.html.
- 北京市统计局国家统计局北京调查总队. 2013. 北京区域统计年鉴 2012[M]. 北京: 同心出版社.
- 曹丽琴, 李平湘, 张良培. 2009. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的城市人口估算——以湖北省各县市为例[J]. *遥感信息*, (1): 83-87.

- 查勇, 倪绍祥, 杨山. 2003. 一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J]. 遥感学报, 7(1): 37-40, 82.
- 柴子为, 王帅磊, 乔纪纲. 2015. 基于夜间灯光数据的珠三角地区镇级 GDP 估算[J]. 热带地理, 35(3): 379-385.
- 国家统计局. 2013. 中国统计摘要 2013[M]. 北京: 中国统计出版社.
- 国家统计局北京调查总队. 2016. 人口: 常住人口(1978—2015年)[EB/OL]. [2016-9-29]. http://www.bjstats.gov.cn/tjsj/cysj/201511/t20151109_311727.html.
- 韩秀珍, 李三妹, 窦芳丽. 2012. 气象卫星遥感地表温度推算近地地表气温方法研究[J]. 气象学报, 70(5): 1107-1118.
- 何洋, 程辉, 唐亮. 2014. DMSP/OLS 数据的我国省级经济发展水平研究[J]. 地理空间信息, 12(2): 79-82.
- 贺晓冬, 苗世光, 窦晶晶, 等. 2014. 北京市气候图系统的初步建立[J]. 南京大学学报: 自然科学, 50(6): 759-771.
- 胡峰, 卢振礼. 2010. 1951—2000 年山东省高温气象灾害的变化趋势和风险特征分析[J]. 中国农学通报, 26(19): 354-358.
- 黄慧琳, 缪启龙, 潘文卓, 等. 2012. 杭州市高温致灾因子危险性风险区[J]. 气象与减灾研究, 35(2): 51-56.
- 黄杰, 闫庆武, 刘永伟, 等. 2015. 基于 DMSP/OLS 与土地利用的江苏省人口数据空间化研究[J]. 长江流域资源与环境, 24(5): 735-741.
- 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.
- 李志乾, 巩彩兰, 胡勇, 等. 2009. 城市热岛遥感研究进展[J]. 遥感信息, (4): 100-105.
- 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.
- 刘玉红. 2014. 我国城镇化发展的新动向[EB/OL]. [2014-12-15]. <http://www.sic.gov.cn/News/4613880.htm>
- 栾庆祖, 叶彩华, 刘勇洪, 等. 2015. 城市绿地对周边热环境影响遥感研究——以北京为例[J]. 生态环境学报, 23(2): 252-261.
- 吕安民, 李成名, 林宗坚, 等. 2005. 基于遥感影像的城市人口密度模型[J]. 地理学报, 60(1): 158-164.
- 买买提江·买提尼亚孜, 阿里木江·卡斯木. 2015. 干旱区典型城市下垫面特征及其与地表热环境的关系研究[J]. 生态环境学报, 24(11): 1865-1871.
- 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等. 2013. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例[J]. 地理学报, 68(11): 1461-1471.
- 宋晨阳, 王峰, 张韧, 等. 2016. 气候变化背景下我国城市高温热浪的风险分析与评估[J]. 灾害学, 31(1): 202-206.
- 苏泳娴. 2015. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的中国能源消费碳排放研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所).
- 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 2004. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 16(3): 28-32.
- 田颖, 张书余, 罗斌, 等. 2013. 热浪对人体健康影响的研究进展[J]. 气象科技进展, 3(2): 49-54.
- 田永中, 陈述彭, 岳天祥, 等. 2004. 基于土地利用的中国人口密度模拟[J]. 地理学报, 59(2): 283-292.
- 王琪, 袁涛, 郑新奇. 2013. 基于夜间灯光数据的中国省域 GDP 总量分析[J]. 城市发展研究, (7): 44-48.
- 王文杰, 申文明, 刘晓曼, 等. 2006. 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]. 环境科学研究, 19(2): 44-48.
- 谢盼, 王仰麟, 彭建, 等. 2015. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价: 研究进展与框架[J]. 地理科学进展, 34(2): 165-174.
- 徐永明, 刘勇洪. 2013. 基于 TM 影像的北京市热环境及其与不透水面的关系研究[J]. 生态环境学报, 22(4): 639-643.
- 张本志, 任国玉, 张子曰, 等. 2013. 北京中心商务区夏季近地面气温时空分布特征[J]. 气象与环境学报, 29(5): 26-34.
- 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.
- 郑山, 王敏珍, 尚可政, 等. 2016. 高温热浪对北京 3 所医院循环系统疾病日急诊人数影响的病例-交叉研究[J]. 卫生研究, 45(2): 246-251.

Assessing Heat Wave Risk in Beijing by Remote Sensing

HE Miao, XU Yongming, LI Ning, BAI Lin

School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: With global warming and rapid urbanization, heat wave has become one of the most significant climatic stressors in urban areas, which exerts greater influences on human health, society and economy. In this paper, the heat wave risk in Beijing City was assessed based on multi-source satellite remote sensing data. The land surface temperature (LST), normalized difference vegetation index (NDVI) and normalized difference building index (NDBI) were calculated from Landsat/TM data. The population density, per capita disposable income, ownership of air conditioning, percentage of population above 65 years old and percentage of construction workers were derived from DMSP/OLS night light data and socio-economic data. LST was considered as the hazard factor, and the other variables including NDVI, NDBI, population density, per capita disposable income, ownership of air conditioning, percentage of population above 65 years old and percentage of construction workers were considered as vulnerability factors. Then the heat wave risk index in Beijing was calculated from the hazard, vulnerability factors by a weighted average model. According to the risk index map, the heat wave risk in Beijing was assessed. The results indicated an obvious spatial variability of heat risk. Generally, the northern area showed lower heat risk than southern area, and the western area showed lower risk than the eastern area. High-risk regions were mainly concentrated in the metropolitan area and suburban districts within the 6rd Ring Road, which exhibited a radially decreasing trend from the center to the suburbs. There were also several sporadic high risk regions located in the urban areas of rural districts. Among these rural districts, Miyun, Mentougou, Huairou districts were characterized by the lowest heat risks, whose proportions of the high risk area were less than 10%. In addition to the urban areas, Yanhuai Basin, Miyun River Valley and some plain areas in the eastern Pinggu also showed relatively high risk. As for the densely populated plain and flatland areas, the central districts (Dongcheng District and Xicheng District) exhibited the highest heat risk indices of 0.57 and 0.56 respectively, followed by inner suburb districts (Shijingshan, Fengtai, Haidian and Chaoyang districts). The outer suburb districts showed relative lower heat wave risk indices, which were above 0.4. This article proposed a framework for assessing the heat stress risk in Beijing at the pixel level by remote sensing, which provide a scientific reference for heat wave adaptation strategies and mitigation plans.

Key words: Beijing; heat wave; risk assessment; remote sensing; population spatialization