气候与环境研究
Climatic and Environmental Research

基于体感温度的中国户外高温风险分布研究

杨文婷 王汶

Apparent Temperature-Based Outdoor Heat-Risk Distribution in China

YANG Wenting WANG Wen

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21055

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

1960 ~ 2018年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势

Linear Trends in Occurrence of High Temperature and Heat Waves in China for the 19602018 Period: Method and Analysis Results

气候与环境研究. 2020, 25(3): 225 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19134

2018年夏季东北极端高温事件物理机制分析

Analysis on the Mechanism of the 2018 Summer Extreme High Temperature Event in Northeast China

气候与环境研究. 2020, 25(5): 469 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19100

上海市土地利用资料优化方案对WRF模式模拟高温过程的影响

Influence of Land Use Data Optimization Schemes on WRF Model Simulations of High Temperature Processes in Shanghai

气候与环境研究. 2020, 25(4): 443 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20013

黑潮延伸体区纬向扰动海温的结构特征及其对系统变异的指示作用分析

Characteristics of the Zonal Sea Surface Temperature Perturbation and Its Role in Representing the Evolution of the Kuroshio Extension

气候与环境研究. 2018, 23(5): 551 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17074

极端高温天气对玉米产量的影响及其与大气环流和海温的关系

The Influence of Heat Stress on Maize Yield and Its Association with Atmospheric General Circulation and Sea Surface Temperature

气候与环境研究. 2017, 22(2): 134 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16119

时间尺度分离在华南夏季极端高温预测中的应用

Application of Time-Scale Decomposition Statistical Method in Climatic Prediction of Summer Extreme High-Temperature Events in South China

气候与环境研究. 2018, 23(2): 185 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16220

关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨文婷, 王汶. 2021. 基于体感温度的中国户外高温风险分布研究 [J]. 气候与环境研究, 26(6): 637−647. YANG Wenting, WANG Wen. 2021. Apparent Temperature-Based Outdoor Heat-Risk Distribution in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (6): 637−647. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21055

基于体感温度的中国户外高温风险分布研究

杨文婷　王汶

中国人民大学环境学院地理空间信息研究中心, 北京 100872

摘　要　采用 657 个气象站点 2000～2019 年气象数据和遥感数据，基于体感温度（Apparent Temperature）指数，以人体热舒适为基础综合考虑气温、湿度、风速和辐射这些气象因素来讨论中国暖季（5～10 月）的户外高温风险的分布情况，制成 1 km 分辨率的户外高温风险地图。与以温度为单一指标的高温分类结果对比，基于体感温度的高温风险区划分的更详细，更符合人的热感知，将帮助易受潜在高温风险影响的户外工作者做好自身防护。结果表明：热风险等级和天数基本符合从南向北，从东向西递减的规律。全国热风险等级最高和热风险天数最长的地区是长江中下游和广东—广西—海南地区，热风险天数可达 140 d 以上；华北地区在 100～120 d 之间，北方地区出现热风险的天数在 50～90 d 之间。其次，各省的热风险等级在 6 月、7 月、8 月达到峰值。另外，新疆吐鲁番地区、西藏南部河谷这些地区在整个暖季都面临着不同等级的热风险，属于局部热点地区。本研究充分考虑了影响户外热舒适度的几个要素，划定的风险等级和区域可以为户外工作者提供高温避险指导，使其最大程度的免受高温带来的伤害。还可以为我国不同地区制定更详细的高温补贴措施提供科学依据。

关键词　高温风险　体感温度　户外舒适度　风险划分

文章编号　1006-9585(2021)06-0637-11　　**中图分类号**　P464　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21055

Apparent Temperature-Based Outdoor Heat-Risk Distribution in China

YANG Wenting and WANG Wen

Center for Spatial Information, *School of Environment and Natural Resources*, *Renmin University of China*, *Beijing* 100872

Abstract　In the context of global climate change, the frequent occurrence of heatwave events not only affects human production activities but also threatens personal safety. From the perspective of human health, this paper uses daily meteorological data of 657 weather stations and remote sensing data from 2000 to 2019 for discussing the distribution of outdoor heat risk during the warm season (May–October) in China based on the apparent temperature index, which considers air temperature, humidity, wind speed, and radiation. Then, the 1-km resolution outdoor heat-risk distribution is mapped. When the results were compared with the results of the high-temperature classification using temperature as a single indicator, it showed that the heat-risk zones based on the apparent temperature were more detailed and consistent with human thermal perception than the risk zones delineated by temperature alone. This will help more outdoor workers who are vulnerable to potential heat risks to anticipate and make better protective measures in advance. First, the heat-risk

收稿日期　2021-03-12；**网络预出版日期**　2021-04-16

作者简介　杨文婷，女，1994 年出生，硕士研究生，研究方向为遥感与地理信息系统。E-mail: went_yang@163.com

通讯作者　王汶，E-mail: wenw@ruc.edu.cn

资助项目　教育部人文社会科学重点研究基地重大项目 17JJD910001

Funded by　Ministry of Education Focus on Humanities and Social Science Research Base, Grant Number Major Research Plan (Grant 17JJD910001)

levels follow the pattern of decreasing from south to north and east to west, as does the number of thermal-risk days. Regions with the highest heat-risk level and longest thermal-risk days include the middle−lower Yangtze River, Guangdong, Guangxi, and Hainan Provinces, with heat-risk days possibly exceeding 140. The number of days with thermal risk ranges from 100–120 days in northern China and 50–90 days in the northern areas. Second, the thermal-risk levels in all provinces peaked in June−August. Moreover, high temperatures can occur locally, and the Turpan region of Xinjiang and the valley of southern Tibet experience different levels of thermal risk throughout the warm season. This study fully considers several elements that affect outdoor thermal comfort. Assigning risk levels can provide guidance to outdoor workers on heat avoidance to decrease their suffering from heat-related injuries. It can also provide a scientific basis for developing more detailed heat subsidy measures in different regions of China.

Keywords High temperature risk, Apparent temperature, Outdoor thermal comfort, Risk classification

1 引言

气候变化已经成为影响人类与自然系统平衡的主要因素之一（武夕琳等, 2019），由气候变化导致的极端高温热浪事件的发生频率、持续时间和强度很可能也会不断增加（陈曦等, 2020）。Gover（1938）研究了美国不同地区 6 月、7 月、8 月高温与死亡率的关系，为热伤害相关的研究奠定基础。此后，关于高温风险的研究大多选择以温度作为单一变量去描述高温情况（贺山峰等, 2010; Cowan et al., 2014; 张嘉仪和钱诚, 2020）。国内以 35°C 作为高温天气的阈值，但高温是一个连续天气过程（谈建国, 2008），对人的影响有滞后性，因此不能仅以 35°C 为标准（胡莉梭, 2016）。因此，也有不少学者利用百分位指数法（Hu et al., 2017, 沈皓俊等, 2018），将最高气温的 90% 分位数作为高温的阈值，以此来评估高温特征。随着遥感技术的发展，有学者融合气象数据和遥感数据，对城市高温风险进行评估（何苗等, 2017; 周洋等, 2018）。以上研究或未考虑到其他气象因素对高温风险的影响或从某个城市抗风险角度出发，未考虑到人体热感受。但对于户外人群（户外工作者、运动员等）来说，高温风险分级、分布和时长对于户外人群的生命健康至关重要。处于户外热环境的人群会受到多种气象因素的综合作用，湿球黑球指数（Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT）（Yaglou and Minard, 1957）是最早综合考虑温度、湿度、风速和辐射的热舒适模型，但该模型中辐射（即黑球温度）的数值需要仪器测量，由于辐射是一个动态的变量，在计算中常不考虑辐射这项因素。国内外后续的研究使用其简化的模型（Watts et al., 2018; 陈曦等, 2020）忽略辐射的影响。处于户外热环境中的人群不可避免的会受到气温、湿度、风速和辐射的影响。总体来说，在暖季，气温、湿度、辐射都对人体的热感受增加热应力，而风会提高人体的热舒适，降低热风险。

因此，本文基于前人的研究基础，选择一种基于人体热量平衡的体感温度模型，综合温度、湿度、风速和辐射模拟体感温度，对中国高温风险进行热等级划分。利用 21 世纪初 20 年（2000～2019 年）暖季（5 月 1 日至 10 月 31 日）的日值数据，经过空间克里金插值计算，分析中国高温空间的变化特征。综合气象数据和遥感数据对不同时期的体感温度进行热风险等级划分，利用 ArcGIS 等软件将结果制成 1 km 空间分辨率的地图，精细表现各地的高温风险差异，再利用重分类及像元统计等方法，估计各地具有热风险的天数。本文结果能为政府相关部门、企业和户外工作者制定更有效地防暑措施、提供高温预警服务、保护人身安全、财产安全提供科学的依据。

2 数据与方法

2.1 数据

本文采用气象站点数据，中国行政区矢量数据，遥感数据。气象数据是从中国气象数据网上下载的 2000～2019 年 20 年的日值气温（平均气温和最高气温）、平均地表温度、相对湿度和风速数据。经过筛选，剔除数据缺失和质量控制码不符的气象站，一共选用 657 个站点，利用 python 对 20 年的日值数据进行均值运算，得到多年平均日值数据。利用 ArcGIS 根据站点经纬度进行可视化后，站点的分布如图 1 所示。

遥感数据包括数字高程模型（Digital Elevation

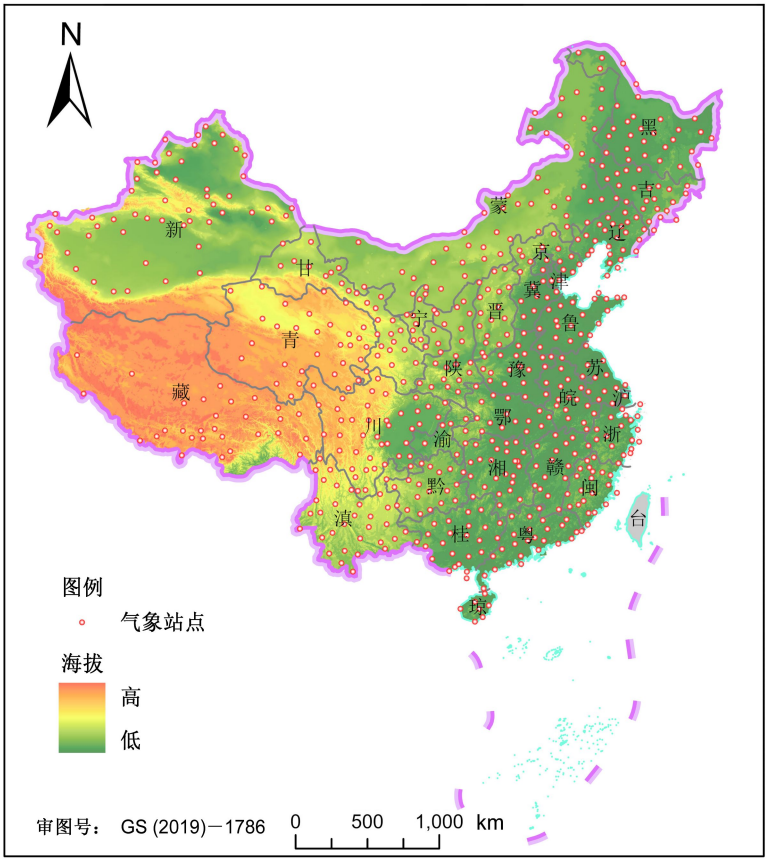

图 1　中国气象站点分布

Fig. 1　Distribution of weather stations in China

Model, DEM）数据和辐射数据。中国 DEM 数据来自资源与环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=123[2021-03-11]），该数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘（Shuttle Radar Topography Mission, SRTM）数据，经过重采样，具有较好的精度。

辐射数据为全球陆表特征参量（The Global Land Surface Satellite, GLASS）日间净辐射产品（Jiang et al., 2016）（http://www.glass.umd.edu/[2021-03-11]），空间范围为全球，时间范围为 2000～2018 年，产品以 HDF-EOS 形式存储，空间分辨率为 5 km，时间分辨率为 1 d，产品单位 W/m²，有效值范围−300～600。

2.2　方法

本文将研究时间 5 月 1 日至 10 月 31 日定义为暖季。利用 ArcGIS 的重采样工具，将经过克里金插值后的气象数据统一为分辨率 1 km 的栅格数据，以精细化地表现局部地区的具体气候情况。在时间尺度上，本文利用天和侯（5 d）两种时间尺度，分别对应单要素的高温特征和基于体感温度的高温特征，但为了结果更清楚，将天尺度和侯尺度结果利用重分类、和叠加操作，最终结果以月尺度呈现。

2.2.1　气象数据插值

气象参数与地形有着密切的联系，其中高程对气象参数的影响最为显著。气象参数的空间插值方法为克里金插值，对插值后的结果以地形因子来修正，可以提高气象要素的空间化精度（李军, 2006）。

（1）温度插值

先将温度统一在 1000 m 的虚拟的海平面上，再利用 DEM 数据和虚拟海平面的温度，在 ArcMap 中利用栅格计算器计算出经过 DEM 校正之后的温度：

$$T = T_1 + A（E_i - E_k），\qquad（1）$$

其中，T 为某一海拔处的温度，T_1 为站点温度，E_i 为 i 点的海拔高度，E_k 为 k 点的海拔高度，A 为平均环境温度垂直递减率，取常数 0.0065°C/m（潘耀忠等, 2004）。计算虚拟海平面温度时，E_i 为气象站点高度，E_k 为 1000 m 的虚拟海平面高度，T 为虚拟海平面的温度。经过空间插值之后，在

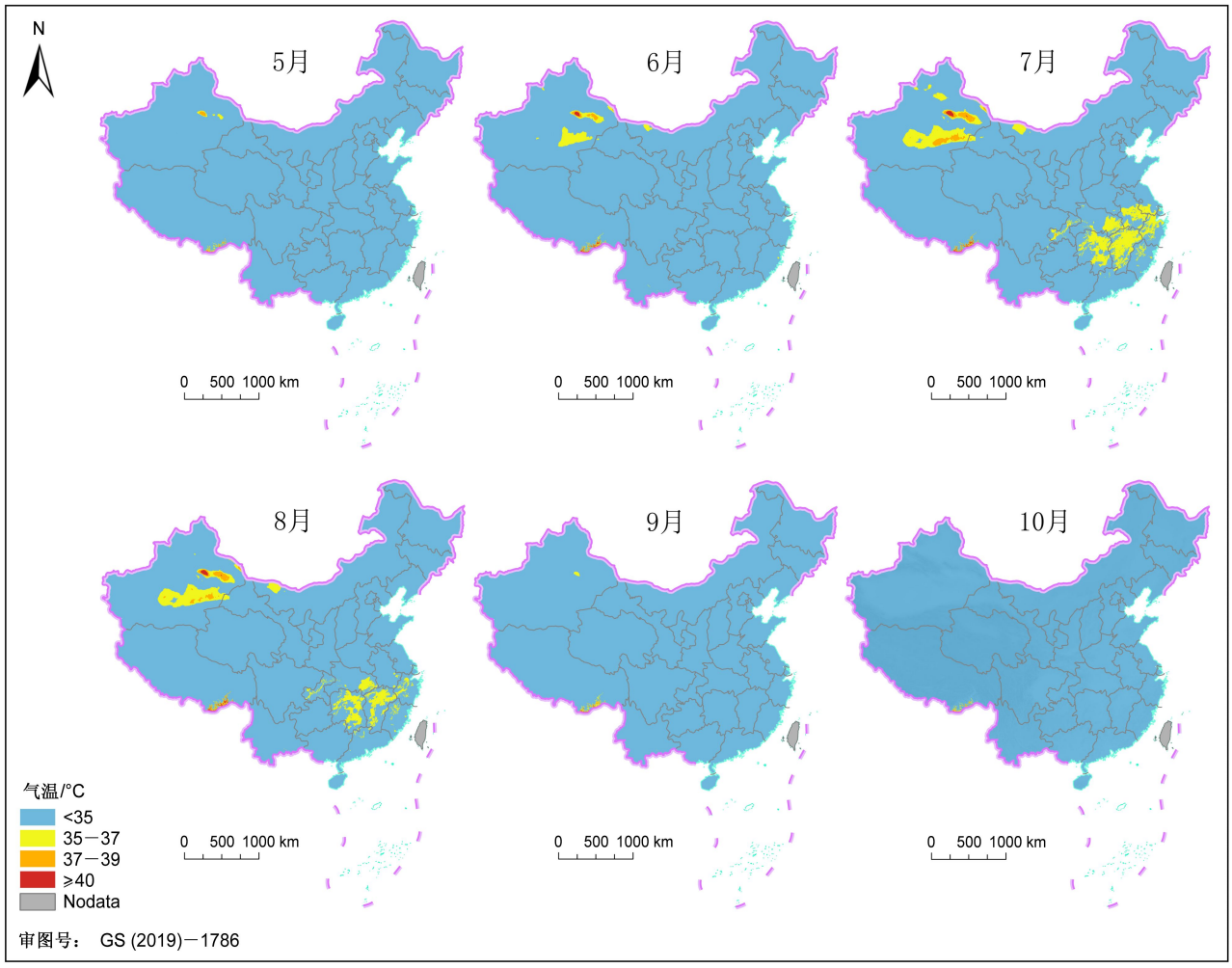

图 2 2000～2019 年中国最高气温大于 35°C 空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of maximum temperatures above 35°C in China during 2000–2019

ArcGIS 的栅格计算器中再利用此公式，计算基于 DEM 的温度，此时 E_i 为 DEM 的数值，E_k 为 1000 m，T 为经过 DEM 校正之后的温度。

（2）相对湿度插值

同理，对相对湿度插值时需要考虑温度和高程的影响，某一高程的相对湿度可以由以下公式计算（王汶和鲁旭, 2009）：

$$r = r_0 \times 10^{\frac{7.5t_0}{237.3+t_0} - \frac{7.5t_z}{237.3+t_z} - \beta_z}, \quad (2)$$

其中，r_0 为地表相对湿度；t_0 为地表温度（单位：°C），t_z 为高度 z 处的温度（单位：°C）；β_z 为常数，自由大气中取 β_z=1/5000 m^{-1}。

（3）风速插值

不同的下垫面可以得出不同的垂直高度与风速的变量方程，在实际应用中，一般采用沿袭已久的经验指数公式（史同广等, 2007）：

$$u = u_1[z/z_1]^m, \quad (3)$$

其中，u、u_1 分别为距地面高度 z、z_1 处的风速，m 为风随高度变化指数，其取值由下垫面特征确定，一般介于 1/2～1/8 之间。

2.2.2 体感温度计算

体感温度（Apparent Temperature, AT）是由美国生物气象学家 Steadman（1984）提出的，它以人体热量平衡为基础，也被称为视温度。Steadman 于 1971 年提出气温低于 0°C 时的风寒指数（Wind-chill），之后又于 1979 年提出了气温高于 25°C 时的热阻指数（Thermal-resistance）（Steadman, 1979a, 1979b），在此研究基础上提出了适用于更大温度区间的普适模型，也就是体感温度模型（Steadman, 1984）。 Steadman 在不同环境下通过实验与调查得到可供室内、室外有遮蔽、室外无遮蔽下广泛适用的 AT 模型，并讨论了不同条件下辐射、风速、

湿度对体感温度的影响。在气温−40～50°C 范围内进行人体试验并通过统计分析模拟了体感温度的简化计算模型。他利用 AT 模型评估了澳大利亚夏季中午室外的体感舒适程度（Steadman, 1994），提出了人体对周围环境实际感受的热量指标，指标为客观环境变量：温度、湿度、风速、辐射，实现了体感温度的空间变化，且 AT 值的单位为°C，与国内温度通用单位一致，便于理解。

$$\mathrm{AT} = T_a + 0.348e - 0.70v + 0.70\frac{Q}{v+10} - 4.25, \quad (4)$$

其中，T_a 为干球温度（单位：°C），v 为风速（单位：m/s），Q 为净辐射（单位：W/m^2），水汽压（单位：hPa）

$$e = \frac{r_h}{100} \cdot 6.105\mathrm{e}^{\frac{17.27T_a}{237.7+T_a}}, \quad (5)$$

其中，r_h 为相对湿度。

户外体感温度会受到多方面的影响，气温直接影响人体对热环境的判断；同时湿度、风速和辐射的变化，会在同样的气温条件下，对体感温度产生不同的结果（Giannopoulou et al., 2014）。当前研究多讨论湿度和温度的综合响应，这两项也是影响体感温度最主要的因素（Ballester et al., 1997）。在正常情况，当人体所处环境温度高于自身皮肤温度时，向外散失热量的过程受阻，而感觉到热。外界温度越高，人体热的感觉越强，受到的热风险越高。湿度通常与气温结合对人体产生综合影响，在温度较高的环境中，人体依需要依靠蒸发和散热来维持自身的热平衡，较高的空气湿度会阻碍排汗过程，导致人体热量平衡受到破坏而热感加剧，高温高湿的热环境会造成较高的热风险。

风速和辐射这两项因素对人体的舒适度也有着直接的影响，在高温环境中，风有效提高了人与环境之间的热量交换的速率，降低人体不适感，所以风在高温环境中对于降低热风险是积极因素。在户外的人群无法避免太阳辐射，辐射在任何天气条件下，对于人体的热舒适性都非常重要（Nikolopoulou and Lykoudis, 2006）。Zacharias et al.（2001）研究了太阳辐射对热舒适的影响，间接证明了高温时太阳辐射会增加人体的热量负荷。此外，过多的暴露在太阳辐射下会造成裸露皮肤发红甚至灼伤，长期暴露会增加皮肤癌的患病风险（Lucas et al., 2006）。在计算户外热风险时，不能忽视辐射的影响。

2.2.3　热风险分级

表 1 定义了不同的 AT 值区间对应的热感觉分级。AT 值是以摄氏度（°C）为单位的温度“真实值”，能够直观地表达温度与热感受之间的对应关系。本文还参考前人对于热舒适指数的分级（Blazejczyk et al., 2012）以及应用 Steadman 的热指数（Heat Index）来预测全球变暖情景下热应力对印度不同区域的影响（Koteswara Rao et al., 2020）。综合以上研究，本文将热风险分级如表 1 所示。

表 1　AT 值及热风险分级表

Table 1　Value of apparent temperature and thermal risk classification

AT值/°C	热感觉	风险等级	健康问题
≤13	微冷	无热风险	
13～18	凉爽		
18～26	舒适		
26～32	温暖	低热风险	从事体力活动易产生疲劳感
32～38	较热	中热风险	长时间暴露在阳光下和/或进行体力活动可能会出现中暑。
38～46	热	较高热风险	长时间从事体力活动可能会出现肌肉痉挛或热衰竭。
46～54	酷热	高热风险	易出现中暑、肌肉痉挛和/或热衰竭。
≥54	难以承受	极高热风险	极易热衰竭甚至猝死

3　结果

3.1　单要素下中国高温特征

根据《防暑降温措施管理办法》（http://www.nhc.gov.cn/zyjks/zcwj2/201207/3cda5ca273484f0b994733bccc819aac.shtml[2012-02-26]）中的规定，本文将单要素下的高温等级分为四级（如表 2 所示）。

表 2　高温等级分级表

Table 2　High temperature rating scale

温度/°C	等级	工作时间
＜35	0	正常
35～37	1	换班轮休等方式，缩短劳动者连续作业时间
37～40	2	劳动者室外露天作业时间累计不得超过6 h，气温最高时段3 h内不得安排室外露天作业
≥40	3	停止当日室外露天作业

在 ArcGIS 中利用重分类工具，将最高气温分类为 4 个等级，利用模糊叠加工具，进行模糊或的叠加运算，将分类后的栅格图像叠加，最终制作成各月大于 35°C 的空间分布（如图 2 所示）。从图中可以看出，以温度为指标评价中国的高温风险，

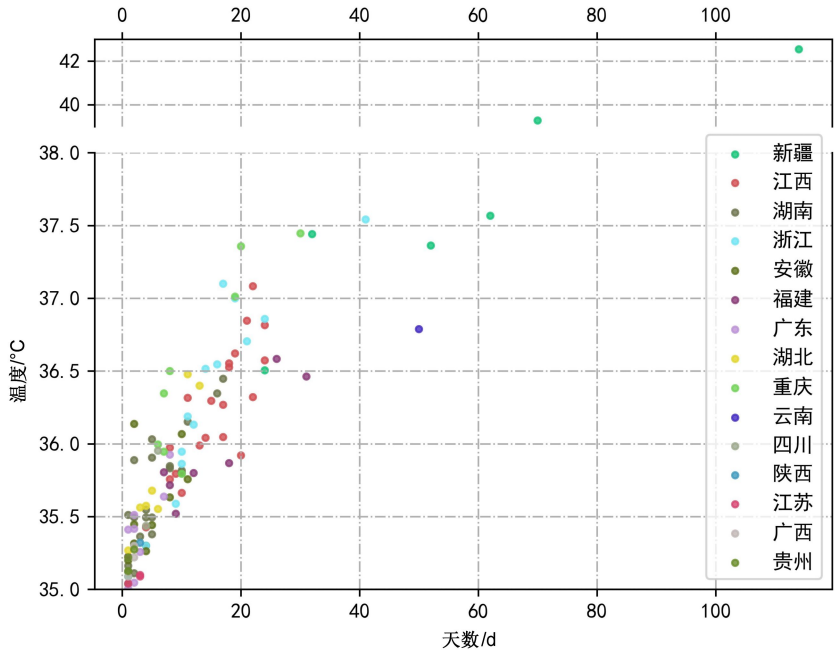

图 3 2000～2019 年中国气温高于 35°C 的天数

Fig. 3 Days of the temperature above 35°C in China during 2000−2019

新疆东疆地区热天气开始最早，持续最久。在 6～8 月，在新疆、内蒙古西部沙漠地区、湖南—湖北、四川—重庆、西藏南部谷地和东南沿海区域有高温天气的情况，常被人认为高温高湿的广东—广西—海南地区却无明显高温天气。

为了明确各地的高温天气，本文利用 python 工具将日最高气温大于 35°C 的站点绘制成散点图（图 3），和图 2 的高温空间分布图相互佐证。图 3 所示为 657 个气象站点中，气温高于 35°C 的气象站能达到的最高温度和天数。一共有 15 个省份有大于 35°C 的站点，大部分气象站的温度集中在 35～37°C，高温日数在 0～20 d 之内。从 5 月 1 日至 10 月 31 日共计 184 天中，新疆吐鲁番地区的气象站点最高温度能达到 42°C 以上，高温日数能达到近 120 d。新疆地区的高温气象站以温度高，高温日数多为主要特征。江西、湖南和浙江这三个省份高温站点的数量多，但温度主要集中在 35.5～37°C，高温日数为 10～20 d 左右。

3.2 体感温度模型下中国高温特征

本文对平均温度、相对湿度、风速进行插值之后，根据公式（4）得出中国暖季的 AT 值。利用 ArcGIS 的重分类、叠加等工具，将 AT 值分级为更容易理解和区分的分级。

空气湿度单独情况下不会影响人体的热感受，但在不同温度下对人体有不同的作用。当人体处于适宜的气温环境时，湿度变化对体感的影响并不明显，而当人体处于极端气温和极端湿度同时出现的环境中时，会产生明显的不舒适感觉。在温度较高的环境中，人体依需要依靠蒸发和散热来维持自身的热平衡，较高的空气湿度会阻碍排汗过程，导致人体热量平衡受到破坏而热感加剧。由图 4 可以看出，受季风气候影响，中国南方地区湿度明显高于北方，高湿度在高温夏季造成闷热体感，结合热风险等级图也可以看出南方的热风险等级普遍比北方高，也会面临更长时间的热风险。

图 5 是风速插值结果，在空间分布上，平均风速的分布与地域有较高相关性。我国北部地区风速较大，尤其在青藏高原、内蒙古和甘肃走廊地区常年大风。 华北平原、四川盆地和两广地区风速较小。在高温环境中，风能加快汗液的蒸发，加速人体与外界空气的热量交换，提升人体舒适感，所以在高温环境中风对于降低热风险是积极因素。

依据户外舒适度模型，本文综合各类气象要素计算出侯（5 d）AT 值，经过像元统计中的众数运算，模拟出中国暖季月度户外热风险分布。由表 1 所示的分级标准，将低风险至极高风险区域在图 6 中标出。相比单指数的高温特征，利用舒适度模型计算的结果更具有普适性。5 月开始，华北、华东、中南，东南地区已处于中热风险区，广东、广西南部，海南是高热风险区，从这段时期开始，户外工

作的人群都面临着中暑的风险。7 月，全国除青藏高原以外均有热风险，纬度从北到南，风险等级递增。其中，江西北部，湖南湖北交界地带，上海地区均处于极高热风险区，这段时期长时间户外工作热应力极强，具有极高的危险性。到 10 月，广东、广西、海南，云南南部，藏南谷地较高的热风险，江西、福建、浙江、上海这几个地区为中热风险，依然要注意户外防高温伤害。

综合的气象要素的体感温度指标比单要素指标能反映出更多的信息，帮助更多容易受到潜在热风险伤害的户外工作者提前预判，做出更好的防护。

图 7a 所示是中国热风险等级的分布图，对月尺度的体感温度数据进行平均值运算，并将结果按照表 1 的分级方法显示。该图所示海南、两广和江西是高热风险明显的省份，对应图 7b 显示这四省部分地区热风险的天数为 161～180 d，其余地区普遍在 131～160 d 之间。在这四地工作的人们热应力极大，尤其对于户外工作者，可能会受到更多的热不舒适感，应该做好防暑措施。值得注意的是，两湖、江苏和上海也有部分地区热风险天数在 131～140 d 之间，防暑压力也很大。较高热风险地区的省份多集中在东南部，热风险天数在 101～140 d 之间，河南、山东、河北均是人口大省，户外活动需要注意防暑。中风险区多在西北、东北纬度较高和者黄土高原、云贵高原等海拔较高的省份。对应的天数在 61～100 d 之间。这些省份虽然热风险等级较低，但局部地区也会出现高热点，比如新疆的吐鲁番地区，辽宁渤海湾地区等，这些地方如果防御不当，也会导致严重后果。低风险地区主要分布在内蒙古—甘肃—宁夏这三个省份，出现热风险的天数在 60 d 以下。此外，西藏南部谷地由于海拔较低，有一部分的热带气候区。西藏由于整体温度不高，因此没有出台高温补贴政策，对于这些局部热点地区，希望当地政府和企业能够为出台政策，保护劳动者的人身安全。

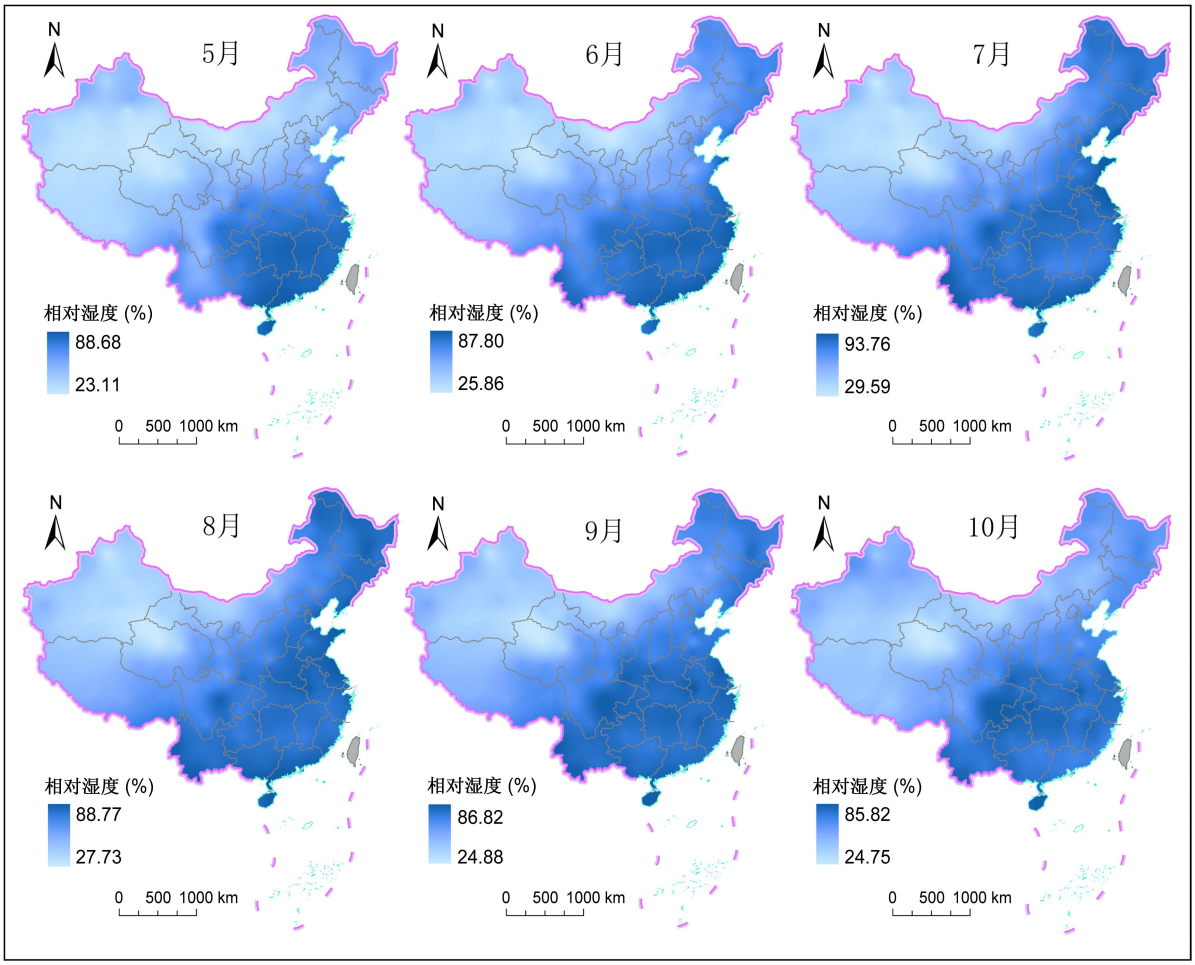

图 4　2000～2019 年中国相对湿度分布

Fig. 4　Distributions of relative humidity in China during 2000−2019

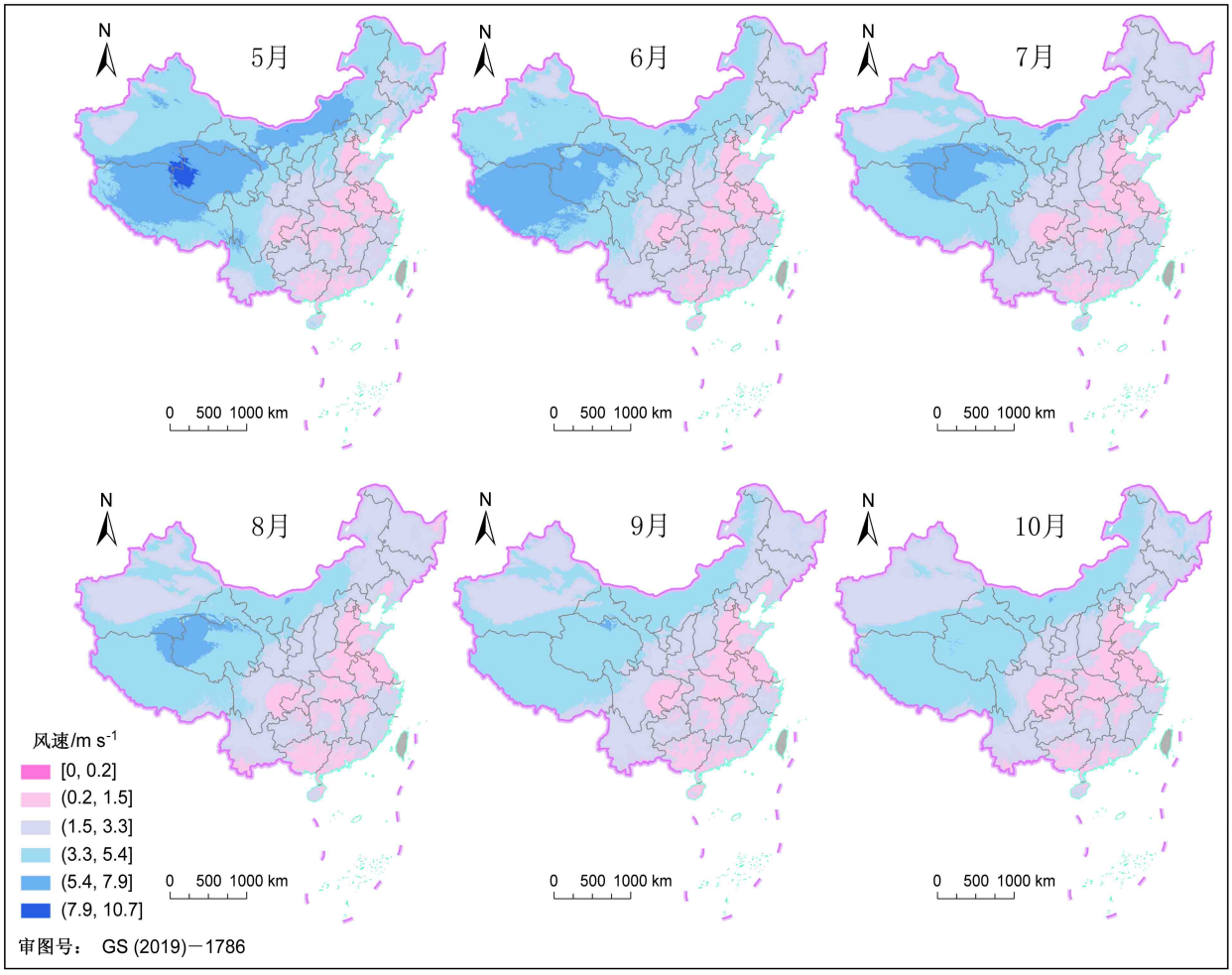

图 5 2000～2019 年中国风速分布

Fig. 5 Distributions of wind speed in China during 2000−2019

4 讨论与结论

本文通过单指数和体感温度指数两种方式来说明中国暖季的高温分布情况。单指数将日最高气温高于 35°C 的天气视为高温天气，而体感温度是各项气象要素的综合指标，这种模型可以采用瞬时的温度来计算实时的体感温度，但是本文评估的是中国暖季的热风险情况，从宏观角度出发，利用平均温度更能体现长期的气候条件，计算出的热风险更具有普适性。 结果表明：

（1）单指数下我国高温天气集中于新疆东部和长江中下游省份，时间上高温天气集中在 6 月、7 月、8 月。这种方法没有体现出常年某些湿度较高或者辐射较强地区的高温情况，如海南，两广地区。

（2）在 AT 模型下，我国暖季面临的热风险开始时间早，5 月初京津冀、华东、西南、东南地区开始出现中热风险区；整个暖季全国 80% 以上的区域都会出现中热及以上的热风险区；热风险持续时间长，一直到十月下旬。6 月、7 月、8 月各省风险等级都较高，户外工作者在这三个月里需要更多的防暑措施来避免受到高温的伤害。此外，在 5 月、9 月、10 月中，也要注意区域性的高温现象，如新疆吐鲁番地区和西南藏南谷地。

（3）总体上，不同的地区热风险持续时间不同，普遍来讲符合从南向北，风险等级和持续时间依次降低。热风险等级最高和天数最长的地区为海南、两广、长江中下游省份，暖季面临热风险的总天数会达到 170 d 以上。东北和西北地区普遍处于中低热风险区，热风险天数大多在 70 d 以下，局部地区如新疆东部、辽宁沿海地区会有超过 100 天的区域。我国平均热风险天数达到 60 d，说明在暖

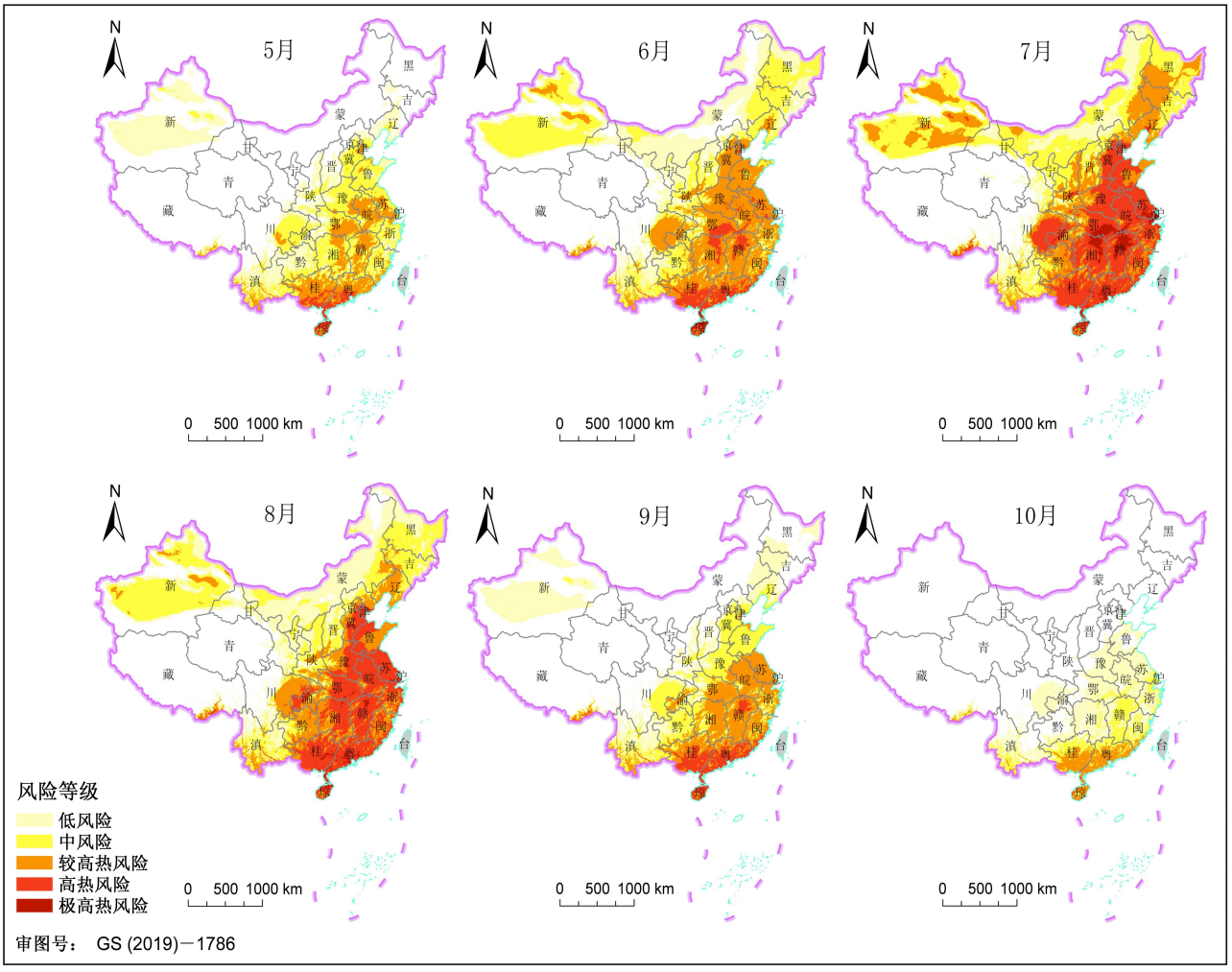

图 6　2000～2019 年中国体感温度下 5～10 月热风险等级分布

Fig. 6　Distributions of thermal-risk level based on AT from May to Oct in China during 2000−2019

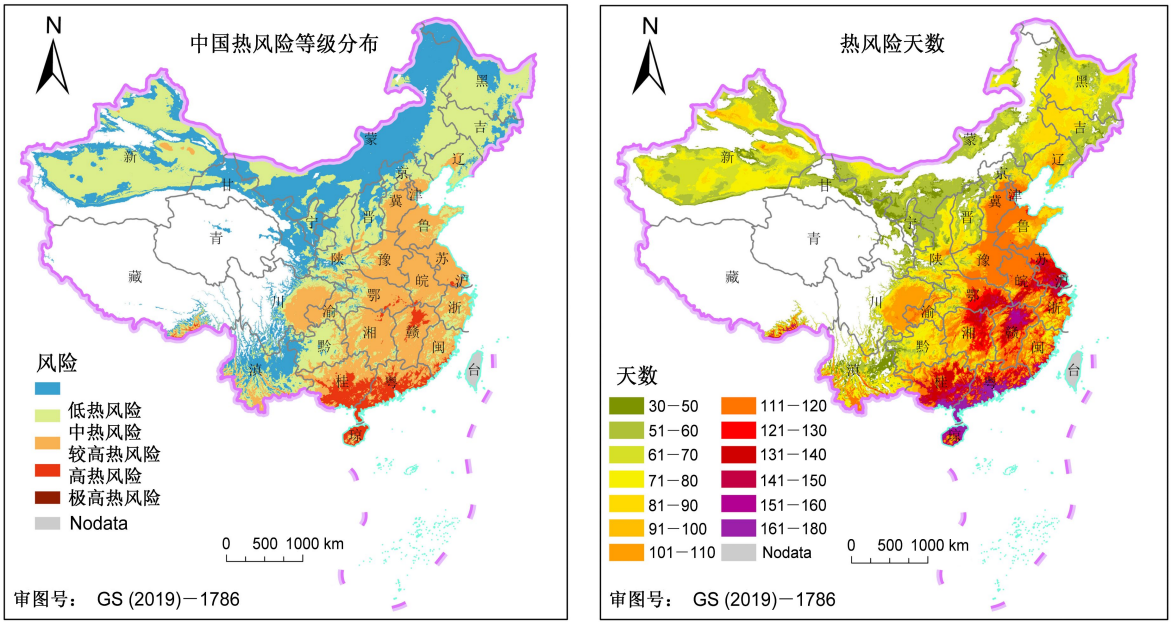

图 7　2000～2019 年中国（a）热风险等级及（b）热风险天数分布

Fig. 7　Distributions of (a) thermal-risk levels and (b) thermal-risk days in China during 2000−2019

季，户外的人群受到的热应力平均为 2 个月，无论从政府、企业还是个人来看，防暑压力都比较大。

当前各国都日益重视气候变化对人体健康影响，热风险的空间划分能给各地户外工作者及政府提供避险参考，也能基于此进行经济上的评估。在今后的研究中，我们也将考虑更多我国南北气候的差异性，致力于综合更多的因素（如气溶胶、PM2.5 等污染物）客观考虑户外人群面临的高温风险。也将研究的空间尺度缩小到地级市的行政区中，时间尺度缩小至天，能够为当地政府制定更有利于当地发展的防暑措施提供建议。

致谢 感谢中国气象数据网和国家科技资源共享服务平台国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn）提供数据支撑。

参考文献（References）

Ballester F, Corella D, Pérez-Hoyos S, et al. 1997. Mortality as a function of temperature. A study in Valencia, Spain, 1991−1993 [J]. International Journal of Epidemiology, 26(3): 551−561. doi:10.1093/ije/26.3.551

Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G, et al. 2012. Comparison of UTCI to selected thermal indices [J]. International Journal of Biometeorology, 56(3): 515−535. doi:10.1007/s00484-011-0453-2

陈曦, 李宁, 黄承芳, 等. 2020. 综合湿度和温度影响的中国未来热浪预估 [J]. 地理科学进展, 39(1): 36−44. Chen Xi, Li Ning, Huang Chengfang, et al. 2020. Projection of heatwaves by the combined impact of humidity and temperature in China [J]. Progress in Geography (in Chinese), 39(1): 36−44. doi:10.18306/dlkxjz.2020.01.004

Cowan T, Purich A, Perkins S, et al. 2014. More frequent, longer, and hotter heat waves for Australia in the twenty-first century [J]. J. Climate, 27(15): 5851−5871. doi:10.1175/JCLI-D-14-00092.1

Giannopoulou K, Livada I, Santamouris M, et al. 2014. The influence of air temperature and humidity on human thermal comfort over the greater Athens area [J]. Sustainable Cities and Society, 10: 184−194. doi:10.1016/j.scs.2013.09.004

Gover M. 1938. Mortality during periods of excessive temperature [J]. Public Health Reports (1896−1970), 53(27): 1122−1143. doi:10.2307/4582590

贺山峰, 戴尔阜, 葛全胜, 等. 2010. 中国高温致灾危险性时空格局预估 [J]. 自然灾害学报, 19(2): 91−97. He Shanfeng, Dai Erfu, Ge Quansheng, et al. 2010. Pre-estimation of spatiotemporal pattern of extreme heat hazard in China [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 19(2): 91−97. doi:10.13577/j.jnd.2010.0215

何苗, 徐永明, 李宁, 等. 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, et al. 2017. Assessing heat wave risk in Beijing by remote sensing [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 26(4): 635−642. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.04.013

胡莉梭. 2016. 中国及北半球极端高温的时空变化特征及其与大气环流的联系 [D]. 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文, 116pp. Hu Lisuo. 2016. Spatial and temporal features of summer extreme temperature over China and Northern Hemisphere and links with atmospheric circulation [D]. M. S. thesis (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 116pp.

Hu L S, Huang G, Qu X. 2017. Spatial and temporal features of summer extreme temperature over China during 1960–2013 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 128(3–4): 821–833. doi:10.1007/s00704-016-1741-x

Jiang B, Liang S L, Ma H, et al. 2016. GLASS daytime all-wave net radiation product: Algorithm development and preliminary validation [J]. Remote Sensing, 8(3): 222. doi:10.3390/rs8030222

Koteswara Rao K, Lakshmi Kumar T V, Kulkarni A, et al. 2020. Projections of heat stress and associated work performance over India in response to global warming [J]. Scientific Reports, 10(1): 16675. doi:10.1038/s41598-020-73245-3

李军. 2006. 基于 GIS 的气候要素空间分布研究和中国植被净第一性生产力的计算 [D]. 浙江大学博士学位论文, 168pp. Li Jun. 2006. Study on the spatial distribution of climatic variables based on GIS technology and calculating net primary productivity in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Zhejiang University, 168pp.

Lucas R, McMichael T, Smith W, et al. 2006. Solar Ultraviolet Radiation: Global Burden of Disease from Solar Ultraviolet Radiation [M]. Geneva: World Health Organization.

Nikolopoulou M, Lykoudis S. 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries [J]. Building and Environment, 41(11): 1455−1470. doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.031

潘耀忠, 龚道溢, 邓磊, 等. 2004. 基于 DEM 的中国陆地多年平均温度插值方法 [J]. 地理学报, 59(3): 366−374. Pan Yaozhong, Gong Daoyi, Deng Lei, et al. 2004. Smart distance searching-based and DEM-informed interpolation of surface air temperature in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 59(3): 366−374. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2004.03.006

沈皓俊, 游庆龙, 王朋岭, 等. 2018. 1961～2014 年中国高温热浪变化特征分析 [J]. 气象科学, 38(1): 28−36. Shen Haojun, You Qinglong, Wang Pengling, et al. 2018. Analysis on heat waves variation features in China during 1961−2014 [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 38(1): 28−36. doi:10.3969/2017jms.0026

史同广, 闫业超, 王林林, 等. 2007. 基于 DEM 的大尺度季风风速空间分布模拟研究 [J]. 地理与地理信息科学, 23(2): 26−29. Shi Tongguang, Yan Yechao, Wang Linlin, et al. 2007. Large-scale wind speed simulation based on DEM [J]. Geography and Geo-Information Science (in Chinese), 23(2): 26−29. doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2007.02.006

Steadman R G. 1979a. The assessment of sultriness. Part I: A temperature−humidity index based on human physiology and clothing science [J]. Journal of Applied Meteorology and

Climatology, 18(7): 861−873. doi:10.1175/1520-0450(1979)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2

Steadman R G. 1979b. The assessment of sultriness. Part II: Effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature [J]. Journal of Applied Meteorology, 18(7): 874−885. doi:10.1175/1520-0450(1979)018<0874:TAOSPI>2.0.CO;2

Steadman R G. 1984. A universal scale of apparent temperature [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 23(12): 1674−1687. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2

Steadman R G. 1994. Norms of apparent temperature in Australia [J]. Aust. Meteor. Mag., 43(1): 1−16.

谈建国. 2008. 气候变暖、城市热岛与高温热浪及其健康影响研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 168pp. Tan Jianguo. 2008. Global warming, urban heat island, heat wave and human health [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 168pp.

王汶, 鲁旭. 2009. 基于 GIS 的人居环境气候舒适度评价——以河南省为例 [J]. 遥感信息, (2): 104−109. Wang Wen, Lu Xu. 2009. The comfortable degree evaluation of human settlements based on GIS—A case of Henan Province [J]. Remote Sensing Information (in Chinese), (2): 104−109. doi:10.3969/j.issn.1000-3177.2009.02.021

Watts N, Amann M, Arnell N, et al. 2018. The 2018 report of the *Lancet* Countdown on health and climate change: Shaping the health of nations for centuries to come [J]. The Lancet, 392(10163): 2479−2514. doi:10.1016/S0140-6736(18)32594-7

武夕琳, 刘庆生, 刘高焕, 等. 2019. 高温热浪风险评估研究综述 [J]. 地球信息科学学报, 21(7): 1029−1039. Wu Xilin, Liu Qingsheng, Liu Gaohuan, et al. 2019. Risk assessment of heat waves: A review [J]. Journal of Geo-information Science (in Chinese), 21(7): 1029−1039. doi:10.12082/dqxxkx.2019.180544

Yaglou C P, Minard D. 1957. Control of heat casualties at military training centers [J]. A. M. A. Archives of Industrial Health, 16(4): 302−316.

Zacharias J, Stathopoulos T, Wu H Q. 2001. Microclimate and downtown open space activity [J]. Environment and Behavior, 33(2): 296−315. doi:10.1177/0013916501332008

张嘉仪, 钱诚. 2020. 1960～2018 年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势 [J]. 气候与环境研究, 25(3): 225−239. Zhang Jiayi, Qian Cheng. 2020. Linear trends in occurrence of high temperature and heat waves in China for the 1960–2018 period: Method and analysis results [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(3): 225−239. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19134

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