

一带一路区域 1989–2018 年高温热浪数据集的研发

殷 聪^{1,2}, 杨 飞^{1,3*}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘 要: 高温热浪严重影响人类生产和生活, 为一带一路区域国家的发展带来了很大的风险和不确定性, 准确可靠的高温热浪数据是进一步研究该区域高温热浪时空分布规律和灾害风险的重要基础。在本研究中, 我们以 NOAA 的 2,833 个气象站点的逐日监测数据为数据源, 综合气温、湿度和风速, 基于 Humidex 指数计算体感温度, 并采用基于高程校正的方法进行插值, 生产 1989–2018 年的逐日体感温度数据集。并基于体感温度数据, 采用绝对温度阈值和相对温度阈值组合的方法生产 1989–2018 年的逐年高温热浪数据集。该数据集的空间分辨率为 0.1°, 为.tif 格式, 总数据量 233 GB, 共计 99,925 条。数据集包括逐日体感温度数据集和逐年高温热浪数据集两个部分, 逐日体感温度数据集包括日平均体感温度、日最低体感温度和日最高体感温度三个子数据集, 各文件以相应的 8 位日期命名; 逐年高温热浪数据集包括 5 个子数据集, 分别是基于气候学相对温度阈值 (CRTT) 和绝对温度阈值 (ATT) 组合的两个子数据集、基于逐年相对温度阈值 (ARTT) 和 ATT 组合的两个子数据集以及基于 ATT 的一个子数据集, 各子数据集包括高温热浪的频次、持续时间和强度等共十个属性。

关键词: 高温热浪; 体感温度; 一带一路; 1989–2018

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.02.02>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2021.02.02>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.08.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2020.09.08.V1>

1 前言

近年来, 全球高温热浪事件的频次呈现上升的趋势, 造成了严重的人员伤亡和财产损失。2003 年, 西欧发生了严重的高温热浪, 温度达到 1500 年以来的最高水平^[1], 导致约 7 万人死亡^[2], 使谷物产量比上年同期减少了 2,300 多万吨^[3]; 2010 年, 俄罗斯的一次高温热浪夺去了大约 5.4 万人的生命^[4,5]; 2009 年, 澳大利亚东南部的高温热浪造成 374 人死亡,

收稿日期: 2020-12-21; 修订日期: 2021-05-04; 出版日期: 2021-06-25

基金项目: 中国工程院 (CKCEST-2020-2-4); 中国科学院 (XDA20030302)

*通讯作者: 杨飞, 中国科学院地理科学与资源研究所, yangfei@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 殷聪, 杨飞. 一带一路区域 1989–2018 年高温热浪数据集的研发[J]. 全球变化数据学报, 2021, 5(2): 120–129. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.02.02>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2021.02.02>.

[2] 殷聪, 杨飞. 一带一路区域高温热浪数据集 (1989–2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2020.09.08.V1>.

并引发了灾难性的森林火灾^[6]；2015 年，印度遭受了一次强烈的高温热浪袭击，导致全国 2,500 多人死亡^[7]。高温热浪是指持续多天的高温天气，全球变暖将持续加强高温热浪的频次、持续时间和强度^[8]。耦合气候模型结果表明：在 21 世纪下半叶，高温热浪将变得更加频繁、持续时间更长、更加强烈^[9,10]。

一带一路倡议涉及 3 个大洲，8 个地区，超过 66 个国家和地区以及约 44 亿人口^[11]，受气象灾害影响严重，1995–2015 年间，全球受气象灾害影响最严重的 10 个国家中，一带一路区域国家就占了 7 个^[12]，此外，一带一路沿线绝大多数国家是发展中国家，抵御自然灾害的能力不容乐观，是全球自然灾害最频繁、损失最严重的地区之一^[13]。高温热浪灾害为一带一路倡议的深入推进带来了极大的风险和不确定性，深入研究该区域高温热浪的时空分布规律，可以为政府、居民、企业和游客等提供信息和决策支持，在政府防灾减灾和发展规划、居民生活、企业投资选址和游客旅游计划中发挥指导性作用，服务于一带一路建设。本研究以气象站点数据为数据源，首先生成了逐日体感温度数据集，然后采用组合阈值的方法生产了逐年高温热浪数据集。

2 数据集元数据简介

《一带一路区域高温热浪数据集（1989–2018）》^[14]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《一带一路区域高温热浪数据集（1989–2018）》元数据简表

条目	描述
数据集名称	一带一路区域高温热浪数据集（1989–2018）
数据集短名	HeatWave_Belt&Road_1989-2018
作者信息	殷聪 ABA-9865-2020, 中国科学院地理科学与资源研究所, yinc.18s@igsrr.ac.cn 杨飞, 中国科学院地理科学与资源研究所, yangfei@igsrr.ac.cn
地理区域	一带一路区域
数据年代	1989–2018
时间分辨率	1 年
数据格式	.tif
数据量	233 GB
空间分辨率	0.1°
数据集组成	逐日体感温度数据、逐年高温热浪数据（高温热浪频次、持续时间、强度等）
基金项目	中国工程院-联合国教科文组织二类中心建设“防灾减灾分中心”专题“防灾减灾知识服务”（CKCEST-2020-2-4）；中国科学院（XDA20030302）
数据计算环境	Python
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[15]

3 数据研发方法

本研究以气象站点数据为数据源,综合气温、湿度和风速计算体感温度,并采用基于高程校正的方法进行插值,生产逐日体感温度数据集,最后采用组合阈值的方法生产逐年高温热浪数据集。

3.1 算法原理

3.1.1 基于高程校正的插值方法

在本研究中,我们使用了 NOAA 的 2,833 个气象站点的监测数据作为数据源¹。由于气象站点在研究区内离散分布,因此首先需要进行插值。此外,由于研究区范围较大,必须考虑温度的垂直变化,因此,我们采用了基于高程校正的插值方法^[16-19]。依据该方法,温度随着海拔的上升呈线性下降的趋势(0.006,5 °C/m)。该方法包括三个步骤:首先,将观测温度修正到零海拔,即在观测温度的基础上按照 0.006,5 °C/m 加上由于高于零海拔而降低的温度;其次,基于修正后的温度使用克里金方法进行插值;最后,将插值温度修正到真实海拔,即在插值温度的基础上按照 0.006,5 °C/m 减去由于高于零海拔而降低的温度。

3.1.2 体感温度

高温热浪对人类健康的不利影响已经被广泛研究和报道^[20-22]。人体对外界环境的冷热感受受到气温、风速、湿度和太阳辐射等因素的综合影响^[23,24],基于数据的可获得性和计算方法,我们重点考虑了气温、风速和湿度。显然,体感温度能够比气温更准确地反映人体的冷热感受。Humidex 指数计算简单、可解释性强^[25],在人体舒适度评价中得到越来越广泛的应用^[23,26]。该指数考虑了气温和露点温度,其计算方法如下:

$$AT = T_a + 0.5555 \times \left(6.11 \times e^{5417.753 \times \left(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{T_d + 273.15} \right)} - 10 \right) \quad (1)$$

式中, AT 为体感温度(°C), T_a 为气温(°C), T_d 为露点温度(°C)。

3.1.3 高温热浪组合阈值

不同地区定义高温热浪的标准不同^[27-29]。例如,世界气象组织将日最高气温超过 32 °C,并且持续 3 天以上的天气过程称为高温热浪^[22]。中国大部分地区采用 35 °C 作为高温阈值,因此,对整个区域采用相同的高温热浪阈值是不合理的^[30]。在高温热浪组合阈值(Combined Heat Wave Threshold, CHWT)方法中,我们使用相对温度阈值(Relative Temperature Threshold, RTT)和绝对温度阈值(Absolute Temperature Threshold, ATT)的组合来定义高温热浪。

气候学相对温度阈值(Climatological Relative Temperature Threshold, CRTT):当某一位置的温度高于长期历史温度时,发生高温热浪的可能性增加。因此,对于每一个日期,

¹ NOAA. <https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/access/>。

我们对 1989–2018 年各格网的体感温度进行排序，然后选取不同百分位对应的温度作为 RTT 来判断高温热浪，并将其定义为 CRTT。CHWT 允许设置不同的百分位阈值，以适应不同的高温热浪标准。

逐年相对温度阈值（Annual Relative Temperature Threshold, ARTT）：当某日温度在当年的逐日温度序列中处于较高水平时，也反映了高温热浪发生的可能性。因此，对于每一年，我们对每个格网的逐日体感温度进行排序，并选取不同的百分位阈值来定义 RTT，即 ARTT。

绝对温度阈值（ATT）：当温度达到 RTT 时，并不一定发生高温热浪（如冬季）。因此，我们也设置了一个绝对温度阈值来避免这种情况。在本研究中，我们使用 RTT 和 ATT 的不同的组合来定义高温阈值，将达到高温阈值和持续时间阈值（Duration Threshold, DT）的天气过程称为高温热浪。

3.2 技术路线

数据集研发的主要过程是：首先，下载 NOAA 逐日气象站点监测数据，该数据包括气温、风速、湿度等多个维度的观测记录，并进行缺失值和异常值处理；其次，使用基于高程校正的插值方法将气象站点监测数据插值为气象格网数据；然后，基于 Humidex 指数计算逐日体感温度格网数据；最后，采用基于阈值组合的方法生产一带一路区域逐年高温热浪数据集，主要包括高温热浪的频次、持续时间和强度等属性特征。技术路线如图 1 所示。

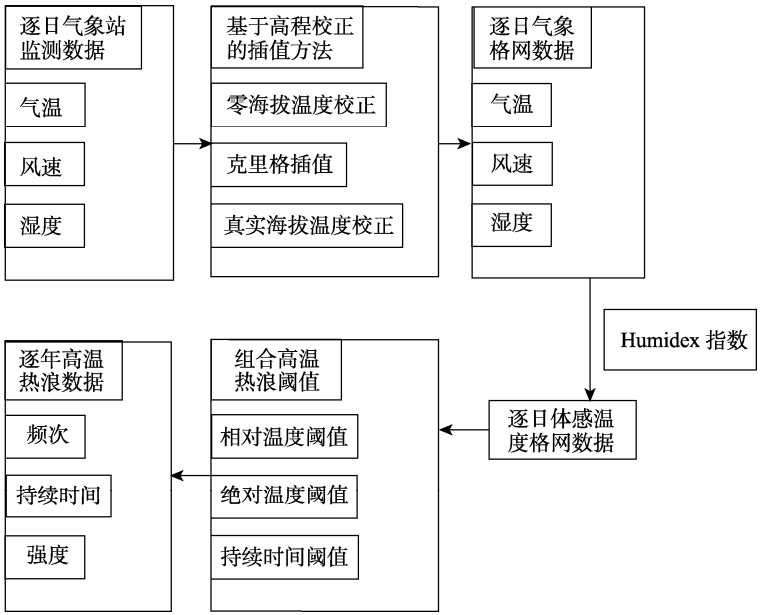


图 1 数据集研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

一带一路区域 1989–2018 年高温热浪数据集包括逐日体感温度数据集和逐年高温热浪数据集两个部分。逐日体感温度数据集包括日平均体感温度（HTMEAN）、日最低体感温度（HTMIN）和日最高体感温度（HTMAX）三个子数据集，各文件以相应的 8 位日期命名；逐年高温热浪数据集包括 5 个子数据集，分别是基于 CRTT 和 ATT 组合的两个子数据集、基于 ARTT 和 ATT 组合的两个子数据集以及基于 ATT 的一个子数据集，各子数据集包括高温热浪的频次、持续时间和强度等共 10 个属性（表 2）。

表 2 数据集文件表

文件夹名称	数据内容	命名方式	数据说明	数据格式	数据数量	数据量
HTMEAN_YYYY_1(2)	YYYY 年上（下）半年逐日平均体感温度	YYYYMMDD	平均体感温度	.tif	10,975 条	74.8 GB
HTMIN_YYYY_1(2)	YYYY 年上（下）半年逐日最低体感温度	YYYYMMDD	最低体感温度	.tif	10,975 条	74.7 GB
HTMAX_YYYY_1(2)	YYYY 年上（下）半年逐日最高体感温度	YYYYMMDD	最高体感温度	.tif	10,975 条	74.7 GB
HW_HTMEAN_CRTT_90_29_3	基于 HTMEAN, CRTT=90, ATT=29, DT=3	YYYY_freq	高温热浪频次	.tif	1,500 条	9.25 GB
HW_HTMEAN_CRTT_95_29_3	基于 HTMEAN, CRTT=95, ATT=29, DT=3	YYYY_dura	高温热浪总持续时间			
		YYYY_dmean	高温热浪平均持续时间			
		YYYY_dmin	高温热浪最长持续时间			
HW_HTMEAN_ARTT_80_29_3	基于 HTMEAN, ARTT=80, ATT=29, DT=3	YYYY_dmax	高温热浪最短持续时间			
		YYYY_tmean	高温热浪平均体感温度			
		YYYY_tmin	高温热浪最低体感温度			
HW_HTMEAN_ARTT_85_29_3	基于 HTMEAN, ARTT=85, ATT=29, DT=3	YYYY_tmax	高温热浪最高体感温度			
		YYYY_start	首次高温热浪开始时间			
HW_HTMEAN_ATT_29_3	基于 HTMEAN, ATT=29, DT=3	YYYY_end	末次高温热浪结束时间			

4.2 数据结果

图 2 展示了一带一路区域 2018 年 6 天的平均体感温度。1 月 1 日（图 2a），东南亚、南亚和阿拉伯半岛的体感温度达到了 20℃ 以上，印度尼西亚的极端体感温度达到了 40℃ 以上。中国东部和欧洲的大部分区域体感温度在 0℃ 左右，亚欧大陆腹地的体感温度在 -10℃ 到 -20℃ 之间，俄罗斯远东地区出现了 -40℃ 以下的极端体感温度。3 月 1 日（图 2b），随着太阳直射位置的北移，北回归线附近的区域体感温度继续上升，而亚欧大陆北部的低温区域面积扩大。西伯利亚东部的极端低温区域西移，欧洲的体感温度降低至 -10℃ 左右。5 月 1 日（图 2c），高温区域向北扩张，北纬 30° 以南的区域体感温度普遍达到了 30℃ 以上，亚欧大陆中部的大部分区域体感温度在 0℃ 左右，极端低温上升到了 -25℃。7 月 1 日（图 2d），高温区域面积达到了六个日期中的最大值，极端最高气温出

现在印巴边境, 达到了 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 亚欧大陆腹地体感温度达到了 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。9 月 1 日 (图 2e), 体感温度整体开始降低, 高温区域向南回缩, 但在印度和巴基斯坦境内出现了 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的极端体感温度。11 月 1 日 (图 2f), 体感温度继续呈现降低的趋势, 高温区域局限在北回归线以内。

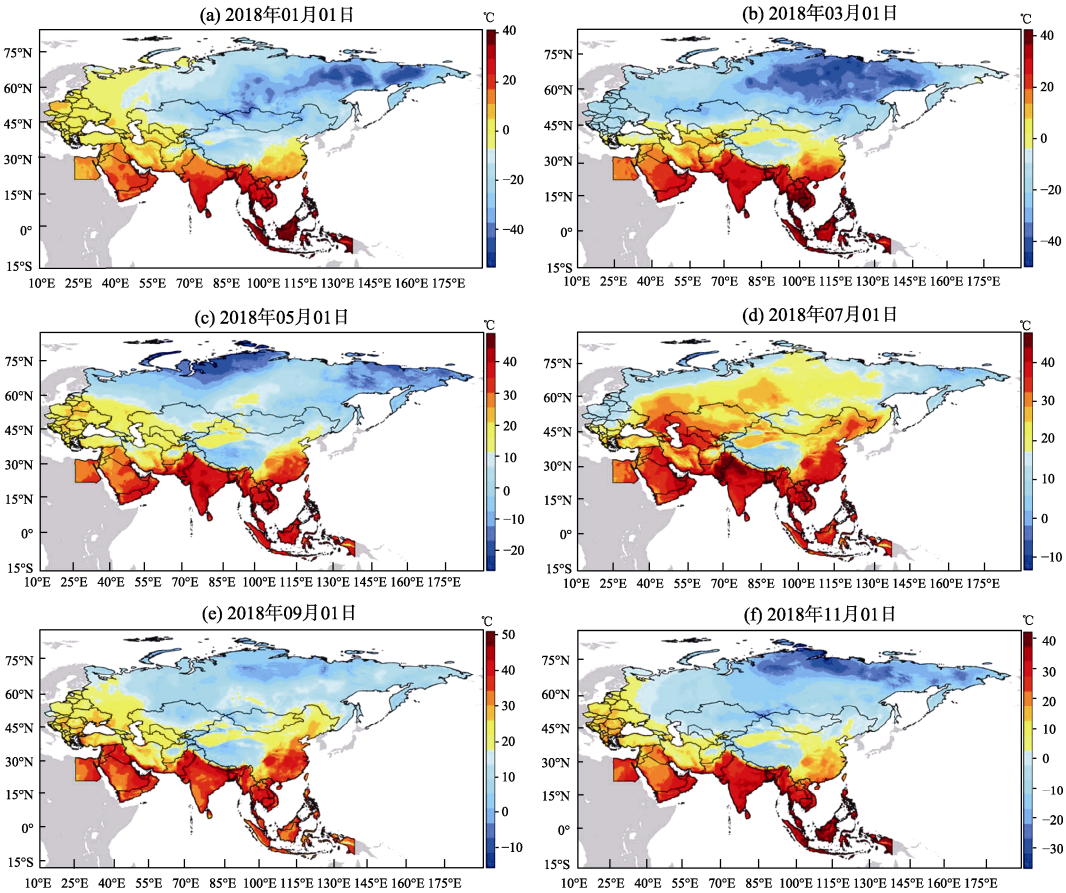


图 2 日平均体感温度

基于 $\text{ARTT}=80$, $\text{ATT}=29$, $\text{DT}=3$, 图 3 展示了 2018 年一带一路区域高温热浪的主要属性。2018 年中国东南沿海、东南亚北部、南亚北部和阿拉伯半岛部分地区的高温热浪频次最高, 到达了 8 次以上。除青藏高原外, 北纬 45° 以南区域的高温热浪频次普遍在 4–6 次, 其他区域则没有检测到高温热浪 (图 3a)。中国东部、南亚和西亚的高温热浪持续时间最长, 达到了 40 天以上, 这些区域的单次最长高温热浪持续时间也较长 (图 3b, c)。中国东部的极端体感温度达到了 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 南亚则达到了 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上 (图 3d)。综合图 3e 和图 3f 来看, 一带一路区域南部的首次高温热浪开始时间更早, 而末次高温热浪结束时间更晚, 而北部则相反。具体来说, 中国南部、南亚和阿拉伯半岛的首次高温热浪开始日期在第 120 天左右, 而末次高温热浪的结束日期在第 250 天左右。

4.3 数据结果验证

基于 $ARTT=80$, $ATT=29$, $DT=3$, 图 4 选取 2010 年俄罗斯西部的高温热浪事件将本研究的结果与 Raei 等人^[31]的工作进行了对比。根据本研究的结果, 2010 年, 俄罗斯西部共检测到了 3–5 次高温热浪(图 4a1), 高温热浪的总持续时间为 25–40 天, 持续时间最长的一次高温热浪为 20–30 天。莫斯科附近的高温热浪总持续时间达到了 40 天, 其中最长的一次高温热浪持续了 30 天(图 4b1, 4c1)。俄罗斯西部的极端体感温度为 34–38 °C(图 4d1), 首次高温热浪发生在第 170–200 天, 末次高温热浪结束在第 220–240 天(图 4e1, 4f1)。Raei 等建立了不同时间窗口逐日气温的概率分布函数, 并利用不同百分位阈值对应的温度来定义高温热浪。基于 21 天的时间窗口, 第 90 个百分位数和 3 天的持续时间, 图 3 展示了 Raei 等人的计算结果。与本研究结果相比, 高温热浪频次和总持续时间数值接近, 但空间分布差异较大, 高值区域较为离散(图 4a2, 4b2), 在莫斯科附近检测到了持续时间最长的高温热浪, 达到了 10–12 天(图 4c2, 4d2)。极端体感温度、首次高温热浪开始日期和末次高温热浪结束日期的空间分布则难以解释: 首先, 在发生高温热浪的地区气温低于 0 °C 是不合理的; 其次, 对于俄罗斯西部, 在第 300 天后仍检测到大面积的高温热浪也不符合实际(图

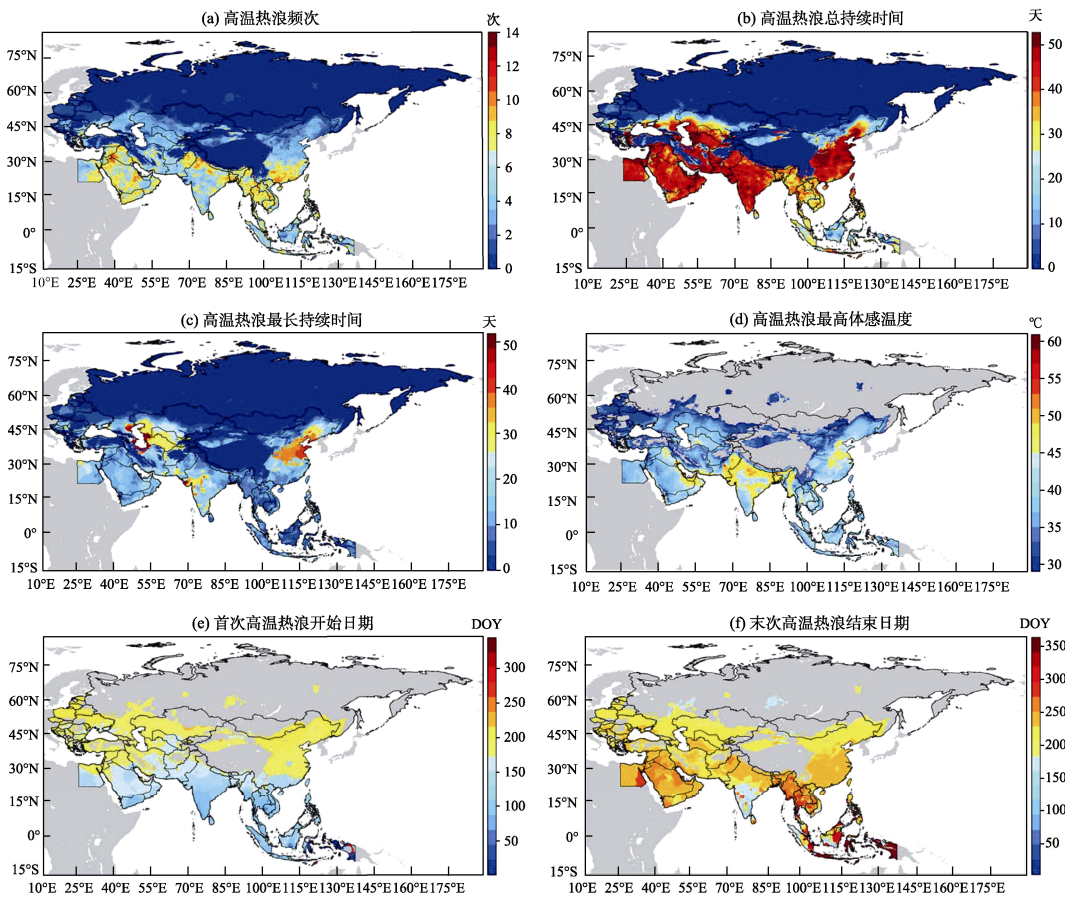


图 3 2018 年高温热浪 ($ARTT=80$, $ATT=29$, $DT=3$)

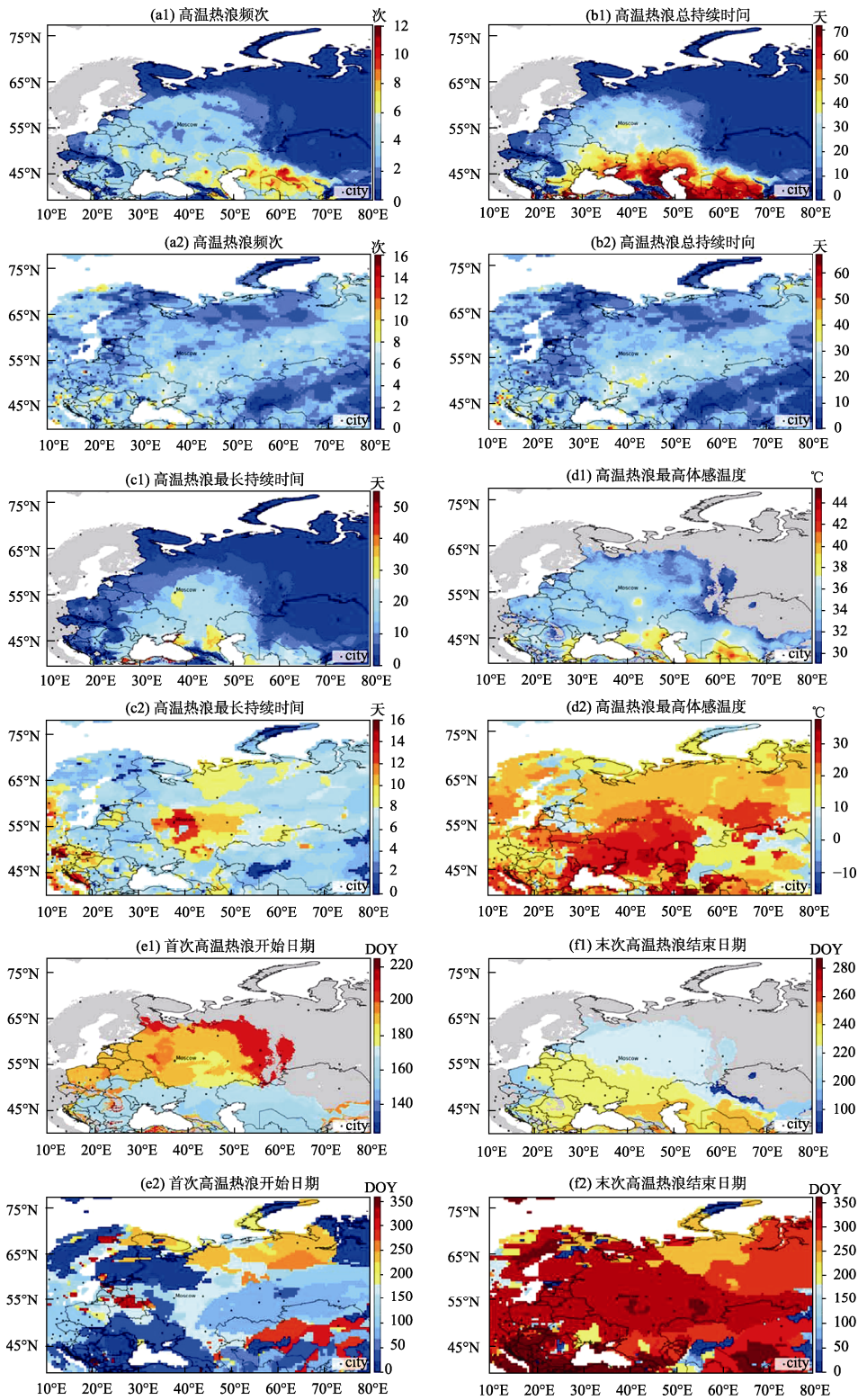


图 4 本研究计算结果与 Raei 等人工作的对比：2010 年俄罗斯西部的高温热浪事件

4e2, 4f2)。总体而言,本研究的结果与现有的研究基本一致,但具有更好的可解释性和更高的空间分辨率。

5 讨论和总结

本研究基于体感温度开发了一带一路区域 1989–2018 年的高温热浪数据集,主要的创新和改进有:(1)相对于气温,采用体感温度能更准确地反映人体对外界环境的真实感受。因此,基于体感温度生产的高温热浪数据集也更加准确、可靠;(2)本研究采用了绝对温度阈值和相对温度阈值组合的方法来计算高温热浪,使得高温热浪阈值更能符合各地不同时期的实际情况。此外,可以通过调整各阈值的不同组合,以满足各种不同的使用需要;(3)本研究开发的数据集具有更高的空间分辨率,可以展示更多的细节。

通过选取典型高温热浪事件与其他研究成果进行对比,本数据集展示的结果更合理、细节更丰富、规律更科学。本数据集可以为高温热浪相关的研究提供数据支撑。

作者分工: 杨飞完成了数据集研发总体设计;殷聪采集和处理了基于体感温度的一带一路区域 1989–2018 年高温热浪数据集;殷聪设计了模型和算法;殷聪做了数据验证;殷聪撰写了数据论文。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., *et al.* European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500 [J]. *Science*, 2004, 303(5663): 1499–1503.
- [2] Coumou, D., Rahmstorf, S. A decade of weather extremes [J]. *Nature climate change*, 2012, 2(7): 491.
- [3] De Bono, A., Giuliani, G., Kluser, S., *et al.* Impacts of summer 2003 heat wave in Europe [J]. *Environment Alert Bulletin*, 2004, 35(1/2): 19–24.
- [4] Gutterman, S. Heat, smoke sent Russia deaths soaring in 2010: govt [N]. *Healthcare & Pharma*, 2010.
- [5] McMichael, A. J., Lindgren, E. Climate change: present and future risks to health, and necessary responses [J]. *Journal of internal medicine*, 2011, 270(5): 401–413.
- [6] Carnie, J. January 2009 Heatwave in Victoria: an assessment of health impacts [R]. Victorian Government Department of Human Services, Melbourne, 2009.
- [7] Mazdiyasn, O., Aghakouchak, A., Davis, S. J., *et al.* Increasing probability of mortality during Indian heat waves [J]. *Science Advances*, 2017, 3: e1700066.
- [8] 闫慧敏, 陈伟娜, 杨方兴等. 过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征 [J]. *地理研究*, 2014, 33(1): 13–22.
- [9] Meehl, G. A., Tebaldi, C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century [J]. *Science*, 2004, 305(5686): 994–997.
- [10] Perkins-Kirkpatrick, S., Alexander, L., Nairn, J. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(20): L20714.
- [11] Peng, C., Regmi, A. D., Qiang, Z., *et al.* Natural hazards and disaster risk in One Belt One Road Corridors [C]. *Proceedings of the Workshop on World Landslide Forum*, 2017.
- [12] 崔鹏, 苏凤环. 国产高分辨率卫星在“一带一路”自然灾害风险管理中的应用[J]. *卫星应用*, 2016, 10:

- 8–11.
- [13] 毛星竹, 刘建红, 李同昇等. “一带一路”沿线国家自然灾害时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 1–8.
- [14] 殷聪, 杨飞. 一带一路区域高温热浪数据集 (1989–2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.08.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2020.09.08.V1>.
- [15] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [16] 李萌, 王秀丽, 丁媛媛. 几种逐日气温插值方法的比较[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(25): 8670–8674.
- [17] Chen, D. H., Chen, Z., Wang, S. Y., *et al.* Study on spatial interpolation of the average temperature in the Yili River Valley based on DEM [J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2011, 31(7): 1925–1929.
- [18] Zhao, J., Fei, L., Fu, H., *et al.* A DEM-based partition adjustment for the interpolation of annual cumulative temperature in China [C]. Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering, 2007.
- [19] Pan, Y., He, C., Zhang, Q., *et al.* Smart distance searching and DEM-informed interpolation of surface air temperature of climatology in China [C]. Proceedings of the IGARSS 2004 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004.
- [20] Khanjani, N., Bahrapour, A. Temperature and cardiovascular and respiratory mortality in desert climate: a case study of Kerman, Iran [J]. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2013, 10(1): 11.
- [21] Lowe, D., Ebi, K. L., Forsberg, B. Heatwave early warning systems and adaptation advice to reduce human health consequences of heatwaves [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(12): 4623–48.
- [22] Wang, Y., Nordio, F., Nairn, J., *et al.* Accounting for adaptation and intensity in projecting heat wave-related mortality [J]. *Environmental Research*, 2018, 161: 464–471.
- [23] Li, N., Xu, Y. M., He, M., *et al.* Retrieval of apparent temperature in Beijing based on remote sensing [J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2018, 27(6): 1113–1121.
- [24] Hodder, S. G., Parsons, K. The effects of solar radiation on thermal comfort [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2007, 51(3): 233–50.
- [25] Masterson, J., Richardson, F. A. Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity, Environment Canada [Z]. Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Ontario, Canada, 1979.
- [26] Francesca Romana, D. A. A., Boris Igor, P., Giuseppe, R. Thermal environment assessment reliability using temperature—humidity indices [J]. *Industrial Health*, 2011, 49(1): 95–106.
- [27] Bobb, J. F., Dominici, F., Peng, R. D. A Bayesian model averaging approach for estimating the relative risk of mortality associated with heat waves in 105 U. S. cities [J]. *Biometrics*, 2011, 67(4): 1605–1616.
- [28] Roetzel, A., Tsangrassoulis, A., Dietrich, U., *et al.* A review of occupant control on natural ventilation [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 1001–1013.
- [29] Zuo, J., Pullen, S., Palmer, J., *et al.* Impacts of heat waves and corresponding measures: a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 92: 1–12.
- [30] Chen, Y., Li, Y. An Inter-comparison of three heat wave types in China during 1961–2010: observed basic features and linear trends [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 45619.
- [31] Raei, E., Nikoo, M. R., Aghakouchak, A., *et al.* Data descriptor: GHWR, a multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox [J]. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 180206.