

中国极端高温热浪人口暴露数据集 (2000、2010、2020) 研发

农凯森^{1,2}, 王明浩^{1,2}, 黄耀邦^{1,2}, 孙文昊³, 初明若^{3*}

1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;
2. 北京大学未来城市研究中心, 北京 100871;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 为解决气象栅格产品与社会经济数据行政单元统计之间的尺度错位问题, 本研究整合 MERRA-2 卫星遥感再分析资料和中国人口普查数据, 研发了《中国极端高温热浪人口暴露数据集 (2000、2010、2020)》。数据集以 1990–2022 年逐日最高气温为气候基准, 采用相对阈值与绝对阈值结合的判据识别热浪事件, 分别计算热浪频次、持续天数与累积热负荷。为提高年代际表征的稳健性, 研究以中国 2000/2010/2020 三次人口普查为人口总量约束, 结合 WorldPop 高分辨率人口栅格数据刻画空间分布, 通过人口加权与区域统计将网格热浪指标映射到中国大陆 367 个行政单元, 并采用 5 年滑动平均窗口生成三个典型年份的人口暴露总量指标。精度评估表明, MERRA-2 与全国 2,400 余站点观测气温一致性极高 ($R^2>0.97$), 且在 35 个重点城市的交叉检验中, 本数据集与站点实测数据生成的热浪频次暴露的 RMSE 仅为 0.89 次, 验证了数据在行政聚合与时序重构后的可靠性。数据集以 .xlsx 与 .shp 格式发布, 共 9 个数据文件, 数据量 27.1 MB (压缩后 17.8 MB)。

关键词: 高温热浪; 人口暴露; MERRA-2; 气候风险

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2026.02.07>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.02.07>

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.2025.12.08.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2025.12.08.V1>.

1 前言

在全球气候变化加剧的宏观背景下, 极端高温事件的频率、强度及持续时间呈现显著的增强趋势, 已演变为威胁人类健康并制约社会经济可持续发展的主要自然灾害之一^[1]。特别是在中国快速城市化的进程中, 人口向城市群的高度集聚以及不透水面的急剧扩张, 显著加剧了城市热岛效应。气候变暖与快速城市化进程的双重叠加, 致使中国城市系统面

收稿日期: 2025-11-28; 修订日期: 2026-03-11; 出版日期: 2026-04-25

*通讯作者: 初明若, 中国科学院地理科学与资源研究所, chumingruo0227@igsnrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 农凯森, 王明浩, 黄耀邦等. 中国极端高温热浪人口暴露数据集 (2000、2010、2020) 研发[J]. 全球变化数据学报, 2026, 10(2): 169–179. <https://doi.org/10.3974/geodp.2026.02.07>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.02.07>.

[2] 农凯森, 王明浩, 黄耀邦等. 中国极端高温热浪人口暴露数据集 (2000、2010、2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2025. <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.12.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2025.12.08.V1>.

面临着前所未有的高温热浪暴露风险^[2,3]。

尽管学界已发布多套基于卫星遥感反演或气象站点插值的高温数据集，但在应用于气候风险管理与社会经济影响评估时，现有数据产品仍面临多重挑战。既往数据多侧重于刻画物理层面的气温强度，往往忽视了与人口分布紧密相关的暴露度量化，导致难以精准评估高温对人类-社会系统的实际冲击^[4]。与此同时，气象数据普遍采用的高分辨率栅格格式与灾害预警、医疗资源配置及社会经济统计（如 GDP、死亡率等）所依托的矢量行政单元之间，存在显著的数据格式壁垒与尺度错位。这种空间属性的不兼容不仅迫使跨学科研究需进行复杂的区域统计与空间聚合，增加了数据处理门槛，更易导致计算误差，难以直接支撑政府部门基于行政区划的决策需求。此外，受厄尔尼诺-南方涛动（El Niño-Southern Oscillation, ENSO）等大尺度气候因子影响^[5]，单一年份的数据往往包含较大的随机扰动，难以稳健地反映年代际的长期气候演变趋势^[6]。

针对上述问题，本研究整合多源气象监测与长时序人口普查数据，以中国大陆地区 367 个行政单元（包括直辖市、地级市、地区、省直辖县等）为基本空间尺度，研发了《中国极端高温热浪人口暴露数据集（2000、2010、2020）》。本数据集通过时空维度的双重优化构建了严谨的数据生产逻辑，在空间维度上，研究采用行政单元化策略，将连续的栅格气象要素降维映射至地级行政多边形，打破了自然科学数据与社会科学统计数据之间的交互壁垒，实现了气象要素通过行政代码（City ID）与各类统计年鉴数据的无缝挂接；在时间维度上，为剔除年际气候噪音并精准捕捉长期趋势，研究摒弃了传统的单一年份切片法，转而采用 5 年滑动平均窗口（分别为 1998–2002 年、2008–2012 年及 2018–2022 年）来生成 2000 年、2010 年及 2020 年三个关键时间节点的特征值。

基于上述方法，本数据集系统涵盖了热浪频次（Heatwave Frequency, HWF）、持续时间长（Heatwave Duration, HWD）和累积热量（Cumulative Heatwave, HeatCum）等 3 个维度的致灾因子及相应的人口暴露风险指数。通过提供行政尺度明确、时间趋势稳健且多维指标完备的矢量化数据集，本研究旨在为区域气候适应性规划、城市防灾减灾策略制定以及公共健康政策优化提供科学、便捷且高可用的基础数据支撑。

2 数据集元数据简介

《中国极端高温热浪人口暴露数据集（2000、2010、2020）》^[7]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、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。

3 数据研发方法

3.1 数据来源

本数据集构建所需的气象数据选用 MERRA-2（Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2）再分析资料¹，提取 1990 年至 2022 年的逐日最高气温

¹ 美国国家航空航天局(NASA). MERRA 2. https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/data_access/.

表 1 《中国极端高温热浪人口暴露数据集（2000、2010、2020）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	中国极端高温热浪人口暴露数据集（2000、2010、2020）
数据集短名	EHW_PE_China_2000-2020
作者信息	农凯森, 北京大学城市与环境学院, ksnong25@stu.pku.edu.cn 王明浩, 北京大学城市与环境学院, minghaowang25@stu.pku.edu.cn 黄耀邦, 北京大学城市与环境学院, hyb2570953383@stu.pku.edu.cn 孙文昊, 中国科学院地理科学与资源研究所, sunwenhao2518@igsnr.ac.cn 初明若, 中国科学院地理科学与资源研究所, chumingruo0227@igsnr.ac.cn
地理区域	中国大陆 367 个市域单元（港澳台地区数据暂缺）
数据年代	2000/2010/2020 年
时间分辨率	年
数据格式	.xlsx、.shp
数据量	27.1 MB
数据集组成	2000 年、2010 年及 2020 年三个关键时点的人口热浪暴露频次、暴露时长及累积热负荷等
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	（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 ^[8]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

（ T_{max} ）变量。MERRA-2 凭借其时空连续性优势，能够有效弥补地基观测在空间覆盖上的不足^[9]。为确保再分析资料在中国区域的适用性，研究引入中国气象局下属 2,400 余个国家级气象站点的同期观测数据²作为地面真实值。

人口数据采用格网+普查数据结合的策略。空间分布基础源自 WorldPop 数据集³的 100-m 分辨率人口格点，该数据利用随机森林算法精确刻画了人口的空间集聚特征^[10]。人口总量控制数据则严格依据中国国家统计局发布的 2000 年（第五次）、2010 年（第六次）及 2020 年（第七次）全国人口普查分县资料⁴进行校正，以确保人口基数的法定权威性。空间底图采用 2020 年标准全国地级行政边界矢量数据⁵，包含中国大陆 367 个行政单元，所有空间数据均投影至 Albers 等积圆锥坐标系以保障几何计算精度。

² 中国气象数据观测网. <http://data.cma.cn/site/index.html>.

³ WorldPop. <https://www.worldpop.org>.

⁴ 中国国家统计局. <https://www.stats.gov.cn/sj/pcsj/>.

⁵ 国家地理信息公共服务平台. <https://www.tianditu.gov.cn/>.

3.2 算法原理

(1) 高温热浪事件定义

高温热浪事件的识别采用相对阈值与绝对阈值相结合的方法^[11]。本研究在网格尺度基于逐日最高气温 T_{max} 识别热浪日与热浪事件。为保证跨气候区可比性并捕捉季节性变化，我们在基准期 1990–2022 年内按日历日构建相对阈值，以每个网格像元 i 的每个日历日 d 为中心，采用 $[d-7, d+7]$ 的 15 天滑动窗口汇集基准期内多年 T_{max} 样本，计算该样本集合的第 90 百分位数 $P90_{i,d}$ 作为该日历日阈值。随后，在目标年份序列中，当某日满足 $T_{max}(i, t) > P90_{i,d(t)}$ 且 $T_{max}(i, t) > 32^\circ\text{C}$ ^[12]，并处于暖季月份（北半球为 5–9 月）时，该日被判定为候选热浪日^[13]。连续不少于 3 天的候选热浪日构成一次热浪事件，仅属于事件的日期被纳入热浪统计（即持续天数 < 3 的孤立高温段不计入事件与持续天数）^[14]。

基于上述定义，本研究在网格尺度上计算了 3 个维度的热浪特征指标：（1）年度热浪频次（HWF），定义为年内发生热浪事件的总次数；（2）年度热浪持续总天数（HWD），即年内所有热浪事件持续天数的总和；（3）年度累积暴露热量（HeatCum），定义为对热浪日累积超过相对阈值的温度量，具体计算方法如下：

$$HeatCum = \sum_{t \in HWdays(i, t)} [T_{max}(i, t) - P90_{i,d(t)}] \quad (1)$$

式中， $HWdays(i, t)$ 为网格 i 在年份 y 中属于热浪事件的所有日期集合， t 为该热浪事件集合中的某一天。

(2) 基于人口加权的热浪特征值计算

针对气象栅格与行政管理单元的尺度差异，利用区域统计与人口加权算法实现空间降维映射^[3]。进一步将网格指标聚合到地级市尺度，并采用 WorldPop 网格人口作为权重，得到地级市 c 在年份 y 的人口加权热浪水平：

$$HW_{c,y} = \sum_{i \in c} HW_{i,y} \times \frac{Pop_{i,y}^{WorldPop}}{Pop_{c,y}^{WorldPop}} \quad (2)$$

式中， $Pop_{c,y}^{WorldPop}$ 为地级市 c 在 y 年的范围内所有像元的总人口（万人）； $Pop_{i,y}^{WorldPop}$ 为地级市内单个像元的人口（万人）； $HW_{i,y} \in \{HWF_{i,y}, HWD_{i,y}, HeatCum_{i,y}\}$ ，分别代表了每个网格的年度热浪频次、热量持续总天数和累积暴露热量的集合； $HW_{c,y}$ 旨在刻画行政单元内常住人口平均经历的热浪频次、持续性与累积热暴露强度。

(3) 典型年份人口热浪暴露总量构建

为剔除 ENSO 等大尺度气候因子引发的年际震荡噪音，稳健捕捉年代际气候趋势，研究并未采用单一年份切片法，而是应用 5 年滑动平均窗口进行时序重构^[5]。具体而言，分别以 2000 年（1998–2002 年）、2010 年（2008–2012 年）及 2020 年（2018–2022 年）为中心节点，计算各窗口期内上述 3 类热浪指标的算术平均值，生成代表该年代际典型气候特征的基础热浪数据。

$$H\bar{W}_{c,T} = \frac{1}{5} \sum_{y=T-2}^{T+2} HW_{c,y} \quad (3)$$

式中， T 为选取的典型年份，即 2000、2010 和 2020 年。本研究进一步将平滑处理后的典型年份热浪水平 $\bar{HWF}_{c,T}$ 与各行政单元的普查人口 $Pop_{i,y}^{CEN}$ 相乘，得到最终发布的人口热浪暴露数据：

$$Exposure_{c,T}^{HWF} = \bar{HWF}_{c,T} \times Pop_{i,y}^{CEN}$$
$$Exposure_{c,T}^{HWD} = \bar{HWD}_{c,T} \times Pop_{i,y}^{CEN} \tag{4}$$

$$Exposure_{c,T}^{HEATCum} = \bar{HeatCum}_{c,T} \times Pop_{i,y}^{CEN}$$

式中， $Exposure_{c,T}^{HWF}$ ， $Exposure_{c,T}^{HWD}$ ， $Exposure_{c,T}^{HEATCum}$ ，分别代表人口热浪暴露频次（百万人·次）、人口热浪暴露时长（百万人·天）、人口累积热负荷暴露度（百万人·℃）。数据集构建的技术路线参见图 1。

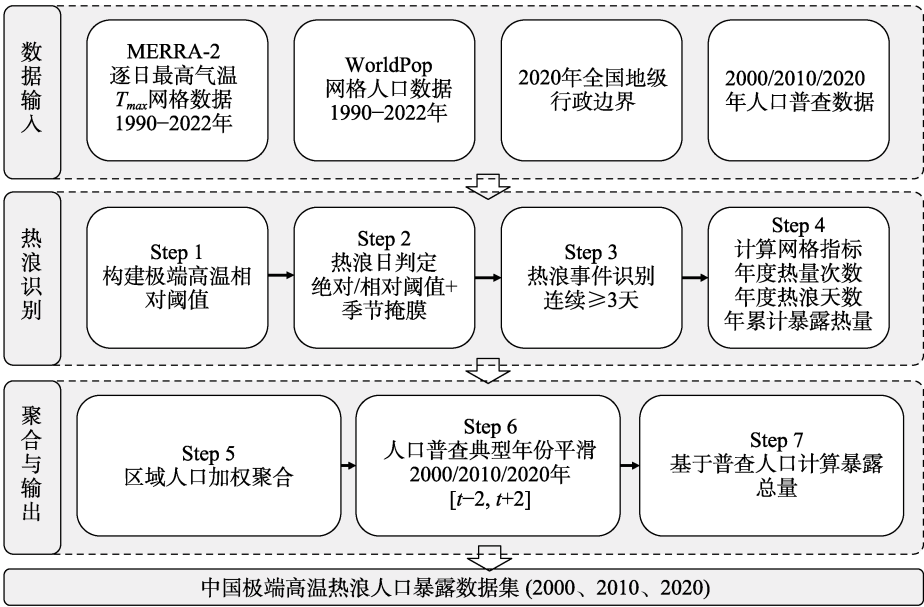


图 1 数据集研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

本数据集包括：（1）367 个地级行政单元名录；（2）2000/2010/2020 三个典型年份的人口热浪暴露频次、暴露时长与累积热负荷暴露度统计表（单位为百万人·次/百万人·天/百万人·℃）；（3）上述暴露指标的地级市空间分布数据（矢量格式）。数据集存储格式为 .xlsx 和 .shp。矢量格式数据属性表缩写见表 2。

表 2 《中国极端高温热浪人口暴露数据集（2000、2010、2020）》矢量格式数据属性表缩写

英文缩写	指标含义
PV_ID	Province_ID
PV_Name	Province_Name
PV_Type	Province_Type
E_PV_Name	English_Province_Name
PV_T_E_N	Province_Type_English_Name
Cities_ID	Cities_ID
City_Name	City_Name
E_C_name	English_city_name
PEHWF_2000	Population_Exposure_to_Heatwave_Frequency_2000
PEHWD_2000	Population_Exposure_to_Heatwave_Duration_2000
PECH_2000	Population_Exposure_to_Cumulative_Heat_2000
PEHWF_2010	Population_Exposure_to_Heatwave_Frequency_2010
PEHWD_2010	Population_Exposure_to_Heatwave_Duration_2010
PECH_2010	Population_Exposure_to_Cumulative_Heat_2010
PEHWF_2020	Population_Exposure_to_Heatwave_Frequency_2020
PEHWD_2020	Population_Exposure_to_Heatwave_Duration_2020
PECH_2020	Population_Exposure_to_Cumulative_Heat_2020

4.2 数据结果分析

基于 2000 年、2010 年及 2020 年 3 个时间节点的统计分析显示，中国地级单元的人口热浪暴露风险在过去 20 年间呈现出先减缓、后激增的非线性波动上升趋势，且 2020 年的各项指标均达到历史峰值（图 2）。

从人口热浪暴露频次来看，2000 年全国地级单元的平均暴露量约为 15.6 百万人·次；2010 年出现短暂回落，均值降至 14.8 百万人·次；而到 2020 年，该指标显著跃升至 25.2 百万人·次，较 2010 年增长了约 70%。箱线图的分布形态显示，2020 年的数据离散度显著增大，表明城市间面临的热浪频次冲击差异正在扩大。

人口热浪暴露时长与累积热负荷暴露呈现出更为剧烈的增长态势。以持续时长（HWD）为例，2000 年和 2010 年的平均暴露量分别维持在 63.5 百万人·天和 55.2 百万人·天左右，而 2020 年该指标均值突破 110 百万人·天。此外，这一趋势在累积热负荷（HeatCum）上表现得更为明显，2020 年的平均人口累积热暴露度达到 162.8 百万人·℃，远高于 2000 年（92.5 百万人·℃）和 2010 年（73.6 百万人·℃）的水平。这表明，近年来中国城市人口面临的热浪风险不仅体现在发生次数的增加，更体现为持续时间的延长和强度的剧增。

中国人口热浪暴露风险呈现出显著的东南高、西北低的空间分异规律，且高风险区域随时间推移呈现出由面状扩散向城市群集聚的演变特征（图 3）。在 2000 年，热浪暴露的高值区主要集中在黄淮海平原（京津冀、河南、山东）以及长江中下游地区。其中，华北地区在人口热浪暴露的 3 个维度都较为突出，而长江流域则在 HWD 和 HeatCum 上表现出较高风险。此时，高风险区域在东部地区连片分布，覆盖范围较广。2010 年，全国大部分

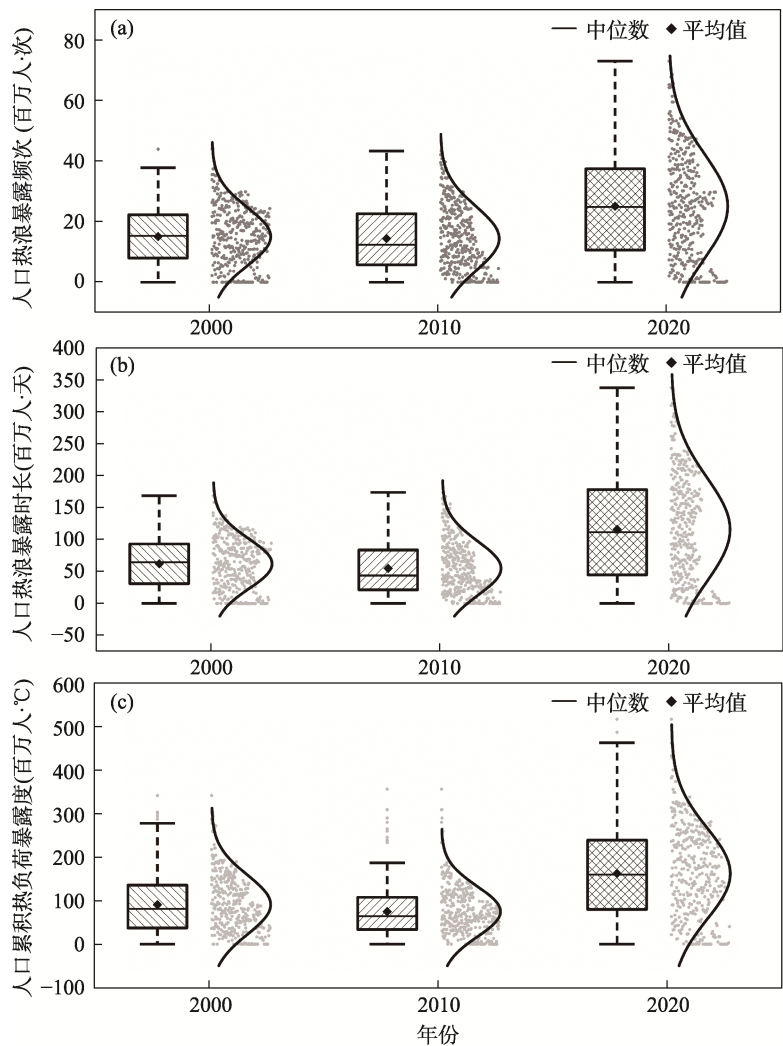


图 2 中国人口热浪暴露风险的时间演变特征图

地区的热浪暴露风险经历了“缓和期”。华北及华东大部分区域高暴露风险区范围显著收缩。仅在部分南方沿海城市及成渝地区保留了中等强度的暴露风险，这与该时段箱线图中观测到的数值回落相吻合。2020 年，热浪暴露风险中心发生了显著的南移与强化。长江中下游平原、江南丘陵及华南沿海地区成为重灾区。广东、广西、湖南、江西及福建等省份的大部分地级市 HWD 暴露度普遍超过 100 百万人·天（图 3），HeatCum 指标在这些区域达到极值。长江中游地区、珠三角城市群及成渝城市群由于人口高度密集与极端高温的双重叠加，成为暴露风险的绝对高地。相比之下，华北平原虽然在 2020 年仍有一定风险，但其相对强度已明显弱于南方地区。

综上所述，2000–2020 年间，中国人口热浪暴露风险在经历 2010 年的短暂低谷后，于 2020 年迎来爆发式增长，且风险重心呈现出向人口稠密的南方湿热地区及核心城市群转移的态势，揭示了气候变化与人口聚集效应对暴露风险的复合驱动作用。

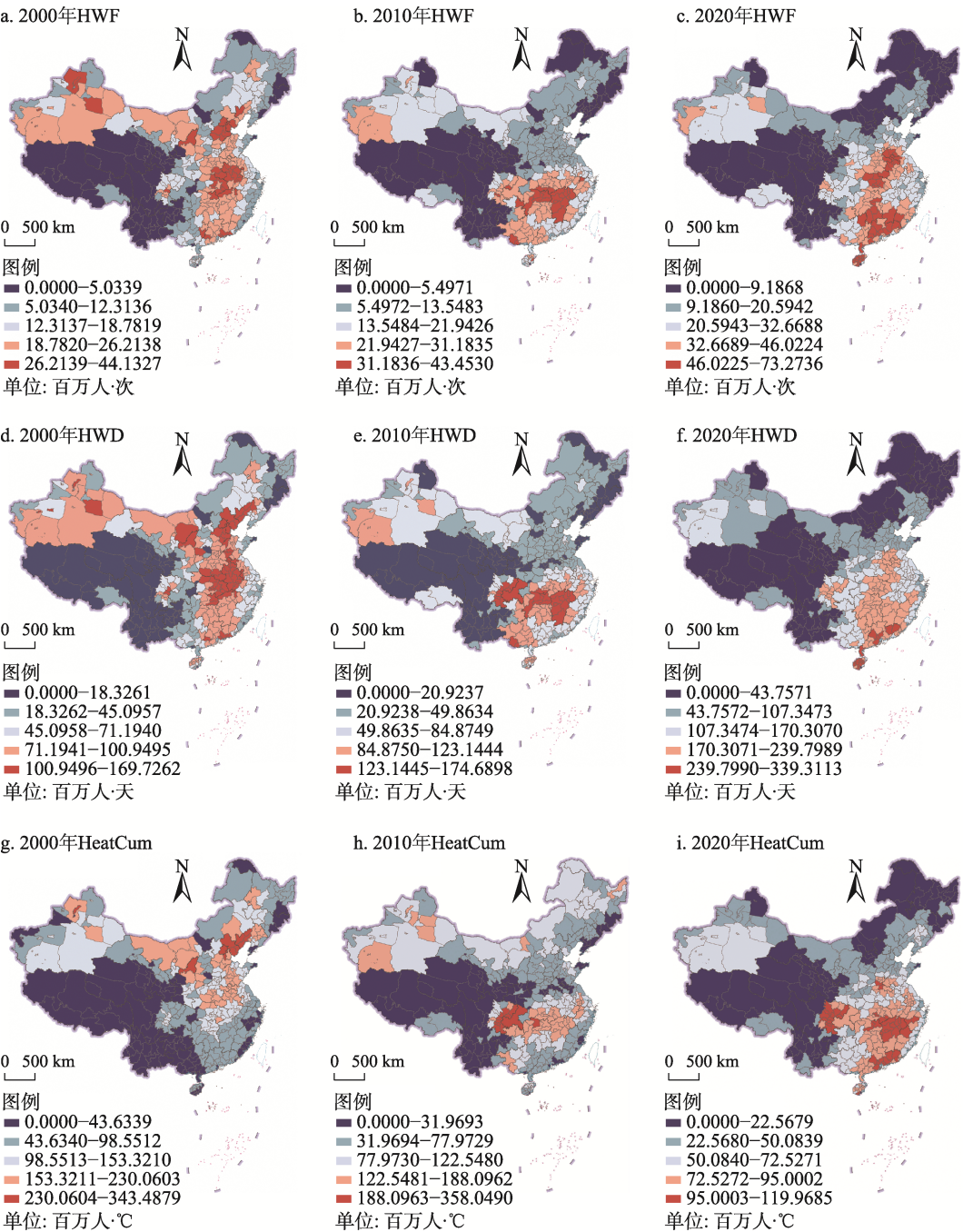


图 3 中国人口热浪暴露风险的时空演变特征图
(参照审图号 GS(2023)2763 的标准地图制作, 底图无修改)

4.3 数据结果验证

数据质量评估包含源数据验证与结果验证两个阶段。首先, 基于 363 万个样本点的对比显示, MERRA-2 再分析资料与中国地面站点观测气温具有极高的一致性($R^2>0.97$, RMSE

=2.03 ℃)，奠定了可靠的物理计算基础（图 4）。为评估行政单元数据集的精度，研究选取全国 35 个重点城市的站点实测数据进行交叉检验。结果表明，尽管受“点-面”尺度上空间平滑效应的影响，导致年度热浪频次（HWF）的决定系数（ R^2 ）为 0.62，但其均方根误差（RMSE）仅为 0.89 次。这证实了本数据集在经历时空重构与行政聚合后，在数值量级上依然保持了极高的保真度，能够精准且稳健地表征区域尺度的热浪演变特征（图 5）。此外，本数据集反映的中国人口热浪暴露风险的时空特征与 Tian^[15]、Wang^[16]、沈皓俊^[17]等学者的研究相一致。

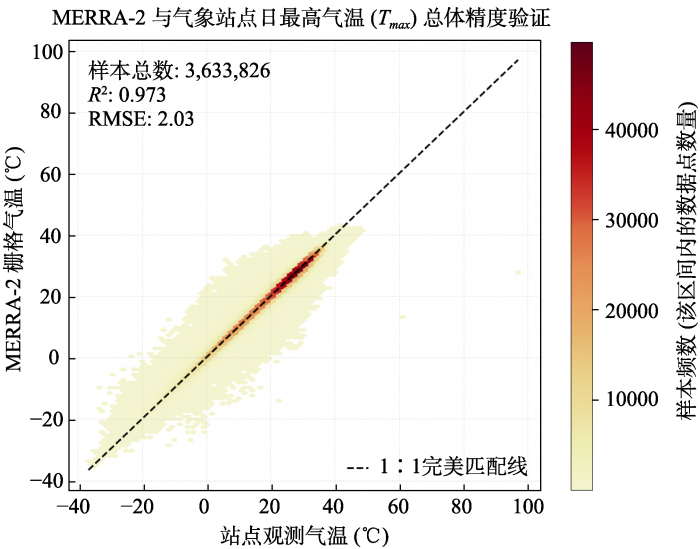


图 4 MERRA-2 再分析资料日最高气温数据与地面气象站点实测数据的精度评估图

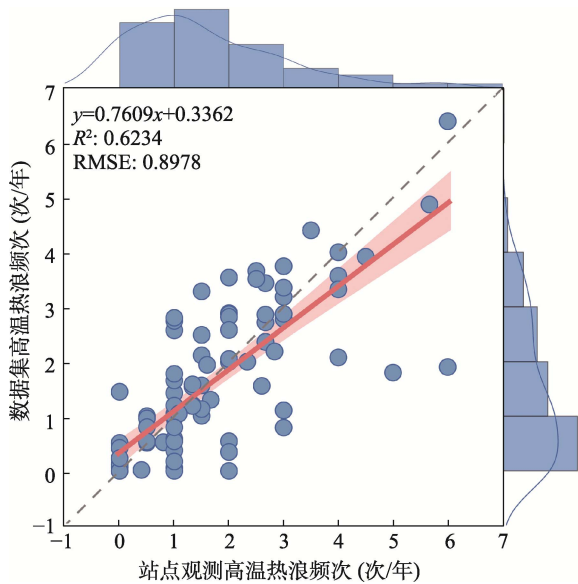


图 5 本数据集热浪暴露频次与地面气象站点实测热浪暴露频次的精度验证图

5 讨论和总结

本研究构建的《中国极端高温热浪人口暴露数据集（2000、2010、2020）》，其核心价值在于提出了一套从自然物理场向社会经济单元映射的标准化数据生产方案。

在构建逻辑上，本数据集有效解决了气候变化研究中长期存在的“时空尺度双重错位”问题。在时间维度上，传统的单一年份数据极易受 ENSO 或季风系统的随机扰动影响，导致结论的不确定性。本研究采用的 5 年滑动窗口平滑策略，实质上是一种低通滤波过程，它在保留年代际气候变化信号的同时，有效剔除年际随机噪音，从而为长时序的趋势分析提供了更为稳健的基准。在空间维度上，本研究将连续的栅格气象数据聚合至离散的地级行政单元，并引入高精度的人口权重，这不仅消除了单纯基于物理气象指标的评估偏差，更实现了从“致灾因子强度”向“载体体实际暴露风险”的视角转变。此外，本数据集填补了中宏观尺度下多维热浪风险数据的空白。相比于仅提供单一气温指标的传统数据集，本数据集涵盖了频次、持续时间及累积热负荷量等过程性指标。这种多维度的刻画对于理解热浪的复合致灾机制至关重要——例如，频次的增加考验城市应急响应的频率，而持续时间的延长则直接关联居民的超额死亡率与能源保供压力。

作为一套融合了自然地理与人文地理属性的基础数据，本数据集旨在打破自然科学与社会科学之间的数据壁垒，服务于公共卫生与流行病学研究，支撑气候适应性城市规划，辅助社会经济系统的脆弱性评估等领域。当前数据集仍存一定局限，如地级尺度掩盖了区域内部异质性，单一气温指标未考量湿热效应，且仅覆盖历史时期。未来研究将致力于下沉空间分辨率至县级，进一步考虑体感温度等复合指标，并拓展对未来气候情景的风险预估。

作者分工：农凯森对数据集的开发做了总体设计；农凯森、王明浩采集和处理了数据；农凯森、初明若设计了模型和算法；农凯森、黄耀邦做了数据验证；农凯森主笔撰写了数据论文，王明浩、黄耀邦、孙文昊对论文进行了补充，初明若对论文进行了全面审核。

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] Jay, O., Capon, A., Berry, P., *et al.* Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities [J]. *The Lancet*, 2021, 398(10301): 709–724.
- [2] Gao, S. J., Chen, Y. H., Chen, D. L., *et al.* Urbanization-induced warming amplifies population exposure to compound heatwaves but narrows exposure inequality between global North and South cities [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2024, 7(1): 154.
- [3] Stalhandske, Z., Ruiter, M. C. D., Chambers, J., *et al.* Global assessment of population exposure to multiple climate-related hazards from 2003 to 2021: a retrospective analysis [J]. *The Lancet Planetary Health*, 2025, 9(8): 11.

- [4] Yin, J. B., Gentine, P., Slater, L., *et al.* Future socio-ecosystem productivity threatened by compound drought-heatwave events [J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6(3): 259–272.
- [5] Wang, J., Li, M. C., Liu, Y. J., *et al.* Large-scale climatic drivers for warm-season compound drought and heatwave frequency over North China [J]. *Atmospheric Research*, 2023, 288: 106727.
- [6] Liu, J. H., Chen, J., Yin, J. B., *et al.* Time of emergence of record-shattering compound heatwave-extreme precipitation events and their socio-economic exposures [J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(16): e2025GL116884.
- [7] 农凯森, 王明浩, 黄耀邦等. 中国极端高温热浪人口暴露数据集(2000、2010、2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2025. <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.12.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2025.12.08.V1>.
- [8] 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).
- [9] Urraca, R., Cappucci, F., Lanconelli, C., *et al.* Assessing discrepancies in global aerosol trends from satellites, models and reanalysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2025, 328: 114827.
- [10] Martin, G. K., Rojas-Rueda, D., Fong, K. C., *et al.* A health impact assessment of progress towards urban nature targets in the 96 C40 cities [J]. *The Lancet Planetary Health*, 2025, 9(4): e284–e293.
- [11] Xie, W. X., Zhou, B. T., You, Q. L., *et al.* Observed changes in heat waves with different severities in China during 1961–2015 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 141(3): 1529–1540.
- [12] Yin, C., Yang, Y. P., Chen, X. N., *et al.* Changes in global heat waves and its socioeconomic exposure in a warmer future [J]. *Climate Risk Management*, 2022, 38: 100459.
- [13] Cai, F. Y., Liu, C. H., Gerten, D., *et al.* Sketching the spatial disparities in heatwave trends by changing atmospheric teleconnections in the Northern Hemisphere [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 8012.
- [14] Li, X. F., Zhao, L., Wang, S., *et al.* Unstable permafrost regions experience more severe heatwaves in a warming climate [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2025, 8(1): 147.
- [15] Tian, P., Zhang, F. Q., Yan, Y. Y., *et al.* Spatial inequalities in global population exposure to extreme heats and heatwaves [J]. *Applied Geography*, 2025, 174: 103474.
- [16] Wang, C. C., Ren, Z. B., Guo, Y. J., *et al.* Assessing urban population exposure risk to extreme heat: patterns, trends, and implications for climate resilience in China (2000–2020) [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 103: 105260.
- [17] Shen, H. J., You, Q. L., Wang, P. L., *et al.* Analysis on heat waves variation features in China during 1961–2014 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2018, 38(1): 28–36.