

西北太平洋热带气旋灾害空间风险评估数据集 (1980–2022) 的研发与内容

童琚玥^{1,2}, 吴旗韬^{1*}, 千庆兰²

1. 广东省科学院广州地理研究所, 广州 510070; 2. 广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006

摘要: 热带气旋是指产生于热带或副热带洋面上的气旋性涡旋, 常伴随大风、巨浪、暴雨等灾害现象, 造成巨大的人员伤亡和直接经济损失。中国是受热带气旋影响最严重的国家之一, 科学评估热带气旋的灾害风险, 对开展海洋生态环境保护、促进我国海洋经济高质量发展有重要意义。作者基于《西北太平洋热带气旋最佳路径数据集》, 结合核密度算法, 对1980–2022年间所记录的99°E–160°E, 2°N–52°N范围内的热带气旋路径数据进行分析; 得到西北太平洋海域受热带气旋灾害的影响程度, 并划分灾害风险等级; 同时测算1980–2022年间中国陆域累计受热带气旋灾害的侵扰次数, 从而得到西北太平洋热带气旋灾害空间风险评估数据集(1980–2022)。数据结果表明, 菲律宾海及中国南海海域受热带气旋灾害的影响最为严重, 具有最高的风险等级; 中国陆域地区受热带气旋侵扰的累计次数表现为由沿海向内陆地区逐渐递减的规律; 海南省受热带气旋灾害的侵扰次数最多, 其次是台湾省、广东省雷州半岛地区。本数据集内容包括: (1) 西北太平洋海域热带气旋灾害风险等级; (2) 中国陆域累计受热带气旋侵扰次数; (3) 西北太平洋热带气旋统计信息。数据集存储为.tif和.xls格式, 由3个数据文件组成, 数据量为1.15 MB(压缩为1个文件, 224 KB)。

关键词: 热带气旋灾害; 灾害风险评估; 灾害风险等级; 核密度分析; 累计灾害侵扰次数

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.04.01>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.04.01>

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.2024.01.04.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.01.04.V1>.

1 前言

当前我国针对热带气旋灾害的风险评估主要集中于损失评估、风险分区以及风险传播模型等方面^[3]; 评估方法主要分为: 基于物理模拟的风险评估方法^[4]、基于综合指标体系的

收稿日期: 2023-10-25; 修订日期: 2023-12-10; 出版日期: 2023-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(42071165)

*通讯作者: 吴旗韬, 广东省科学院广州地理研究所, wuqitao@gdas.ac.cn

数据引用方式: [1] 童琚玥, 吴旗韬, 千庆兰. 西北太平洋热带气旋灾害空间风险评估数据集(1980–2022)的研发与内容[J]. 全球变化数据学报, 2023, 7(4): 343–353. <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.04.01>.
<https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.04.01>.

[2] 童琚玥, 吴旗韬, 千庆兰. 西北太平洋热带气旋灾害空间风险评估数据集(1980–2022)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.01.04.V1>.
<https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.01.04.V1>.

风险评估方法^[5, 6]和基于数理模型驱动的风险评估方法^[7, 8]。三类方法中, 基于物理仿真模拟的风险评估由于对仿真环境和实验设备有较高要求, 通常适用于较小尺度的分析。基于综合指标的风险评估是依据区域灾害系统论, 选取致灾因子、孕灾环境和承灾体 3 方面的变量构造指标体系, 赋予相应权重进行综合风险评估。但该方法的评估效果过于依赖指标体系的合理性, 不同指标体系下的分析结果存在较大差距, 因此在评估的科学性方面存在一定争议。随着数字技术不断发展, 许多学者开始采用数理模型和机器学习相结合的方法对热带气旋灾害进行风险评估。该方法的优势在于它能够通过对大数据的综合分析处理, 避免物理模拟的局限性和指标选取的主观性。相较于其他方法, 基于数理模型的分析方法更适用于大范围、长时间尺度的热带气旋灾害风险评估。因此本数据集利用中国气象局所提供的西北太平洋热带气旋最佳路径数据集, 结合大数据分析方法来对热带气旋灾害进行空间风险评估。

2 数据集元数据简介

《西北太平洋热带气旋灾害空间风险评估数据集(1980–2022)》^[9]的名称、作者信息、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。

3 数据研发方法

3.1 数据来源

热带气旋数据来源于中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)提供的《西北太平洋热带气旋最佳路径数据集》^[10–12], 该数据集记录了 1949 年以来西北太平洋海域所生成的热带气旋最佳路径信息, 其属性包含记录点的发生日期(年/月/日/时(世界时))、强度标记、经度、纬度、中心最低气压(hPa)、2 分钟平均近中心最大风速(MSW, m/s)以及 2 分钟平均风速(m/s)^[13], 并以文本文件格式提供下载。需说明的是, 最佳路径数据记录中的强度标记参照《热带气旋等级》国家标准(GB/T 19201—2006)^[15]、以 2 分钟内的平均风速为依据划分为: 0-弱于热带低压(Tropical Depression, TD)或等级未知, 1-热带低压(Tropical Depression, TD; 10.8–17.1 m/s), 2-热带风暴(Tropical Storm, TS; 17.2–24.4 m/s), 3-强热带风暴(Severe Tropical Storm, STS; 24.5–32.6 m/s), 4-台风(Typhoon, TY; 32.7–41.4 m/s), 5-强台风(Severe Typhoon, STY; 41.5–50.9 m/s), 6-超强台风(Super Typhoon, Super TY; ≥ 51.0 m/s)和 9-变性共 8 类。路径点数据的空间可视化如图 1。

3.2 算法原理

本数据集以 99°E–160°E, 2°N–52°N 范围内的西北太平洋海域及中国陆域地区为研究区域, 选取 1980–2022 年间 CMA 所记录的热带气旋最佳路径数据进行西北太平洋海域及我国陆域地区的灾害风险评估。评估结果包括海域受热带气旋灾害的影响程度以及陆域受热带气旋侵扰的累计次数。数据处理过程中剔除了部分缺失记录, 并结合美国国家海洋大气局(NOAA)公布的 IBTrACS 数据集估算热带气旋记录点的影响范围(以 7 级风圈半径

| 表 1 《西北太平洋热带气旋灾害空间风险评估数据集（1980–2022）》元数据简表 | | | |
|--|---|-------|-------|
| 条目 | 描述 | | |
| 数据集名称 | 西北太平洋热带气旋灾害空间风险评估数据集（1980–2022）的研发与内容 | | |
| 数据集短名 | RiskTropCycloneNWPacific | | |
| 作者信息 | 童珺玥，广东省科学院广州地理研究所/广州大学地理科学与遥感学院， junyuetong10@163.com 吴旗韬，广东省科学院广州地理研究所，wuqitao@gdas.ac.cn 千庆兰，广州大学地理科学与遥感学院，Qianlynn@21cn.com | | |
| 地理区域 | 99°E–160°E，2°N–52°N 内的西北太平洋海域及中国陆域范围 | | |
| 数据年代 | 1980–2022 | | |
| 时间分辨率 | 年 | 空间分辨率 | 20 km |
| 数据格式 | .tif、.xls | | |
| 数据量 | 1.15 MB（压缩后 224 KB） | | |
| 数据集组成 | 数据集由 2 个栅格数据和 1 个表格数据组成；包含由 1980–2022 年热带气旋最佳路径数据集计算的西北太平洋海域热带气旋灾害风险等级、中国陆域累计受热带气旋侵扰次数和西北太平洋热带气旋统计信息 | | |
| 基金项目 | 国家自然科学基金（42071165） | | |
| 数据计算环境 | Python, ArcGIS, Microsoft Excel 2019; | | |
| 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 | 广州市越秀区先烈中路 100 号大院 1 号楼，广东省科学院广州地理研究所 | | |
| 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 ^[14] | | |
| 数据和论文检索系统 | DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS | | |

为参考)。数据处理过程主要运用 Python 和地理信息技术等大数据分析手段。

首先将研究区划分为 20 km×20 km 的空间单元以便进行运算分析。其次需根据每个热带气旋路径点的强度等级划定其影响范围。原因在于：热带气旋灾害具有时间属性，其生命周期可大致分为生成、发展、成熟和消亡期，新路径点的生成即预示着先前路径点的衰减或消亡。此外，强风半径是热带气旋的直接天气影响范围，依据中心风速可分为 12 级、10 级和 7 级风圈的半径等；通常认为 7 级风圈范围是热带气旋的风力影响范围，可造成强风和狂涛等危害。对某一空间单元来说，假设在热带气旋发展初期，其位于某个气旋轨迹点的 7 级风圈范围内而受到影响。但随着热带气旋的不断移动，当该空间单元处于上述轨迹点的风圈范围之外时，可认为其几乎没有受到热带气旋灾害的影响。如图 2 为 2000 年热带气旋“清松”（Sonamu）的轨迹数据，首先根据 7 级风圈半径设定每个热带气旋轨迹点的影响范围。在发展初期热带气旋属于热带低压（TD），随着时间的增加和轨迹的移动，又不断演变为热带风暴（TS）、强热带风暴（STS）、台风（TY）等阶段。则对于空间单元 A

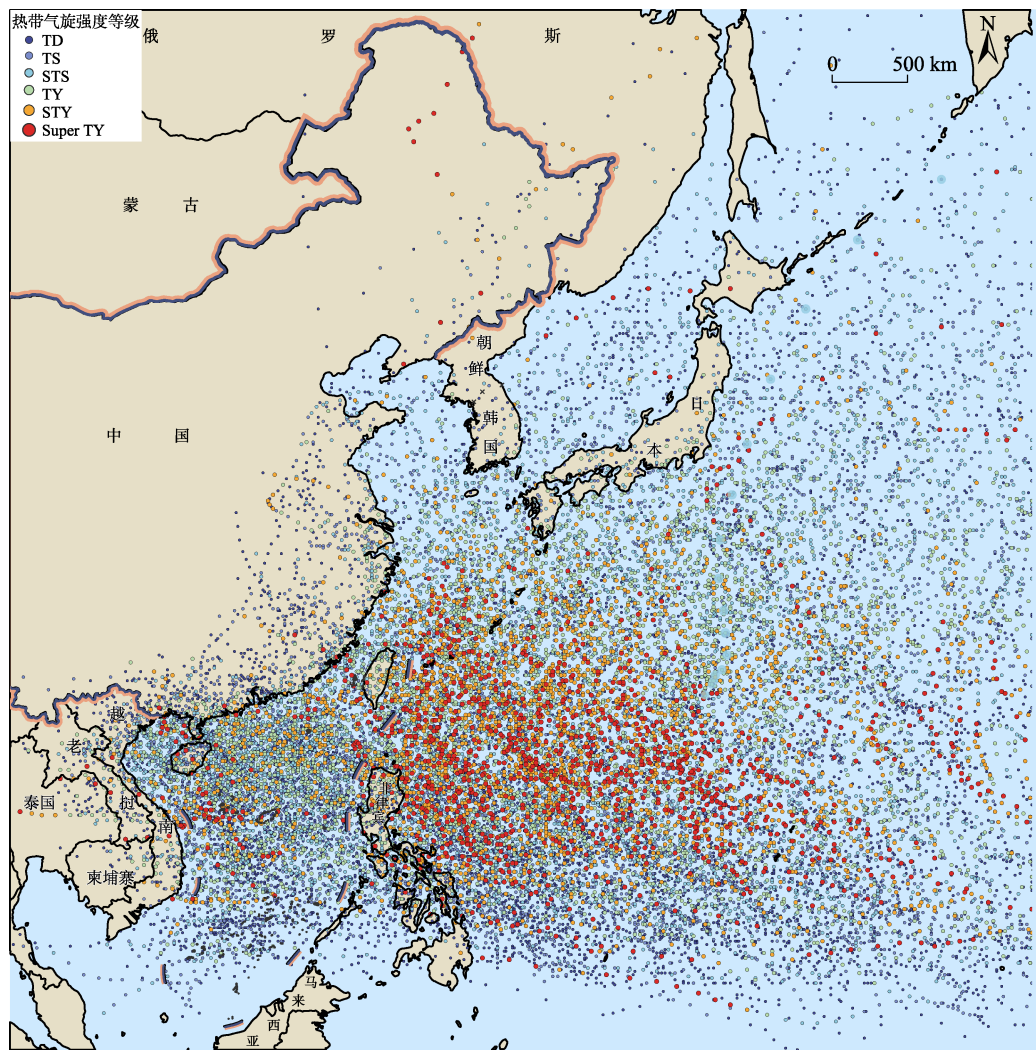


图 1 西北太平洋热带气旋最佳路径点数据（参考审图号为 GS(2016)1665 的标准地图制作）
（注：TD，热带低压；TS，热带风暴；STS，强热带风暴；
TY，台风；STY，强台风；Super TY，超强台风）

来说，仅当热带气旋轨迹移动至点 1 和点 2 时，A 落入气旋点的风场范围，认为其受到热带气旋的灾害影响，且其所受影响为点 1 与点 2 的总和叠加；但当轨迹移动至点 3 时，其影响范围并未涵盖单元 A，故认为点 3 引起的危害风险未对 A 产生影响。因此有必要对每个热带气旋路径点进行迭代，分别计算其影响范围内的灾害影响及作用次数。倘若不使用迭代算法进行计算，而是同时对所有轨迹点进行核密度表面的构建以及侵扰次数的统计，将有可能扩大灾害影响范围，进而引致重复计算空间单元所受到的灾害影响。

分别计算热带气旋在海域范围产生的影响以及在陆域地区遭受的累计侵扰次数，以期统计每个 20 km 分辨率的空间单元在 1980–2022 年间共遭受多大程度的灾害影响以及累计遭受多少次数的灾害侵扰。需说明的是，陆域地区由于存在不同地形地貌和生活生产环境，热带气旋产生的灾害风险需要结合自然地貌属性以及受灾统计数据进行分析，因此仅

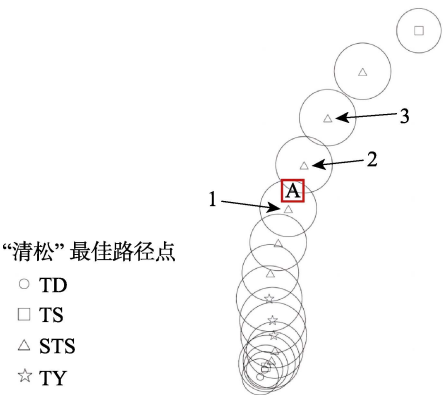


图 2 热带气旋“清松”最佳路径点数据

对陆域地区进行受侵扰次数的总和统计。

运用核密度算法，以路径点所记录的强度标记数值为赋值字段、以 7 级风圈半径为搜索半径，迭代每个记录点进行核密度分析，计算得到每个热带气旋路径点的影响情况；迭代计算完成后再叠加所有路径点核密度结果，得到基于强度等级数值的热带气旋灾害影响结果；最后对灾害影响分析结果进行分区，得到海域范围内热带气旋灾害影响的空间分布。

运用迭代思想，以 7 级风圈半径划定每个记录点的影响范围，认为处于该范围内的空间单元受到一次热带气旋侵扰；将陆域范围内每个空间单元受到的侵扰次数进行加和统计，则得到 1980–2022 年间每个空间单元所受到的累计侵扰次数。

3.3 技术路线

热带气旋灾害风险评估数据集的建立流程如图 3，研究数据的处理过程包括：①数据预处理；②数据集运算（可视化热带气旋路径点、西北太平洋海域热带气旋灾害风险等级、中国陆域累计受热带气旋侵扰次数）；③数据精度验证三部分。

（1）数据预处理

首先利用 Python 进行无效记录剔除、数据格式校正、属性信息归类等数据预处理工作。其次，依据经纬度坐标将文本格式数据转化为可在 ArcGIS 中进行处理的 shp 格式点数据。根据其强度标记进行赋值，删除弱于 TD 或等级未知的路径点；对处于变性状态的路径点，根据其中心最大风速赋予相应强度标记值，最终得到如表 2 的热带气旋路径点赋值表。

此外，由于 CMA 记录的热带气旋属性信息未包含风圈半径，但算法处理过程中需要根据风圈半径大小来划定气旋点的影响范围，因此结合美国国家海洋大气局（NOAA）所记录的 IBTrACS（International Best Track Archive for Climate Stewardship）数据集测算不同强度等级下的平均风圈半径，以此作为路径记录点的影响范围。其统计结果如表 3。

最后，依据不同强度等级，以不同颜色表征最佳路径点数据，实现 1980–2022 年间热带气旋最佳路径数据的可视化。

（2）数据集运算

西北太平洋海域热带气旋灾害风险等级：依次迭代各路径点，以赋值为权重字段在 7 级风圈半径范围内进行核密度插值以创建空间分辨率为 20 km 的连续栅格表面。接着将上

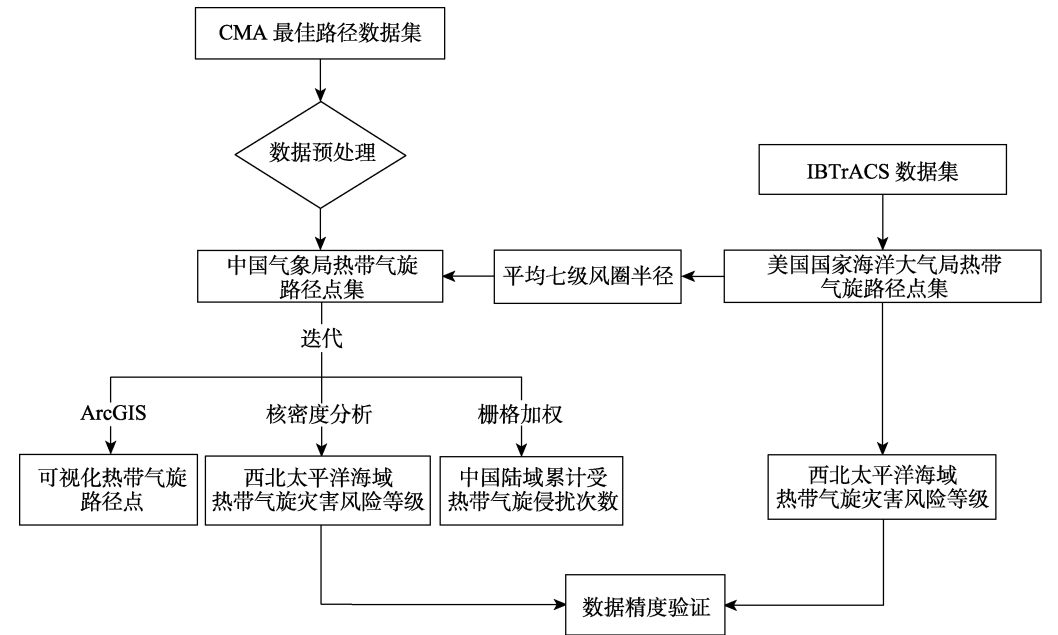


图 3 西北太平洋热带气旋灾害空间风险评估数据集技术流程图

表 2 热带气旋路径点赋值表

| 热带气旋强度等级 | 2 分钟平均风速（m/s） | 赋值 |
|----------------|---------------|----|
| 热带低压（TD） | 10.8–7.1 | 1 |
| 热带风暴（TS） | 17.2–24.4 | 2 |
| 强热带风暴（STS） | 24.5–32.6 | 3 |
| 台风（TY） | 32.7–41.4 | 4 |
| 强台风（STY） | 41.5–50.9 | 5 |
| 超强台风（Super TY） | ≥51.0 | 6 |

表 3 不同强度等级热带气旋的平均 7 级风圈半径

| 热带气旋强度等级 | 2 分钟平均风速（m/s） | 平均 7 级风圈半径（km） |
|----------------|---------------|----------------|
| 热带低压（TD） | 10.8–17.1 | 180 |
| 热带风暴（TS） | 17.2–24.4 | 220 |
| 强热带风暴（STS） | 24.5–32.6 | 280 |
| 台风（TY） | 32.7–41.4 | 325 |
| 强台风（STY） | 41.5–50.9 | 362 |
| 超强台风（Super TY） | ≥51.0 | 376 |

述创建的赋值栅格表面进行逐一叠加，最终得到西北太平洋海域热带气旋灾害风险评估结果；进一步利用自然断点法对评估结果进行等级划分。其值越高，说明该区域在历史时期内所受到热带气旋的影响越严重。

中国陆域累计受热带气旋侵扰次数：首先以 7 级风圈半径为热带气旋的影响范围，依次迭代热带气旋路径点以创建每个气旋路径点的影响范围缓冲区，缓冲区内的空间单位视为受到 1 次热带气旋侵扰；其次将缓冲区转换为空间分辨率为 20 km、像元值为 1 的栅格

图层；接着对上述创建的栅格图层进行加和并提取中国陆域范围，即得到中国陆域累计受热带气旋侵扰次数。其值越高说明该区域在历史时期内受到越多次数的热带气旋影响。

（3）数据精度验证

热带气旋灾害风险评估数据集的核心价值在于有效区分空间风险的差异，因此空间单元处于何种风险等级是评估数据集精度和科学性的关键。因此采用来自 CMA 和 NOAA 两种不同数据源的最佳路径记录进行热带气旋灾害的空间风险评估，比较二者评估结果的相关性以及高低数值的分布趋势。通过计算两种结果的皮尔森相关系数，判断二者分析结果间是否具有相关性；并进一步通过相关系数的正负来检验两种结果的相对趋势，即判断两种结果间是否具有相对一致的高低分布情况，进而验证了风险等级空间分区的准确性。

4 数据结果与验证

4.1 数据组成

本数据集由三个数据文件组成，分别为“西北太平洋热带气旋统计信息”、“西北太平洋海域热带气旋灾害风险等级”和“中国陆域累计受热带气旋侵扰次数”。数据的研究范围为 99°E–160°E，2°N–52°N 范围内的西北太平洋海域及我国陆域地区，空间坐标系为 WGS 1984 墨卡托投影。数据存储为.tif 格式和 Excel 表格。TIF 格式数据是目前最常用的地理信息数据存储格式之一，推荐使用 ArcGIS、QGIS 等地理信息系统软件直接进行读取。

4.2 数据结果

4.2.1 西北太平洋热带气旋统计信息

据统计，1980–2022 年间西北太平洋海域共记录 1,259 个热带气旋活动。各年份统计信息如图 4，包含该年发生热带气旋个数以及该年所监测的热带气旋点 2 分钟平均近中心最大风速（m/s）的最大值。

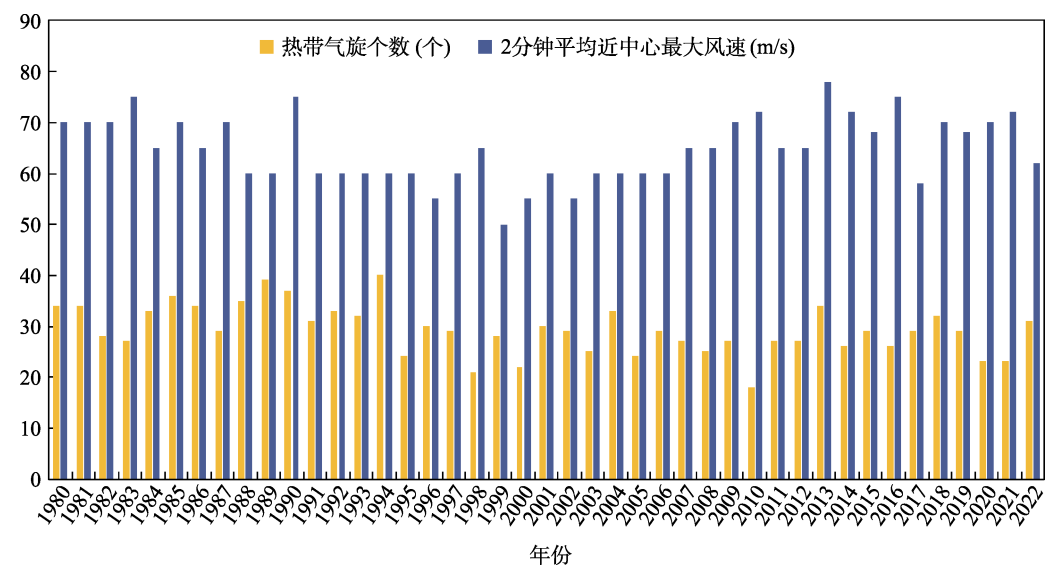


图 4 1980–2022 年西北太平洋热带气旋统计信息（根据《西北太平洋热带气旋最佳路径数据集》，自行统计记录。注：个别缺失记录未纳入统计）

4.2.2 热带气旋灾害风险评估的空间分布情况

从核密度分析结果来看，灾害等级高值区主要位于西菲律宾海盆至马里亚海沟的菲律宾海区域及我国南海海域，且呈现出由菲律宾海域向外围太平洋海域逐渐递减的影响趋势。需说明的是，核密度分析可指定输出栅格中的值的含义，分为密度（输出值表示为该空间单元每单位面积的密度值）和预期计数（输出值表示该空间单元的密度值）两种。本数据集选择输出预期计数进行核密度分析，因此图中每个栅格单元的值即代表该 20 km×20 km 的空间单元在 1980–2022 年间受热带气旋灾害影响的密度强度，分析结果的单位为得分/平方千米（根据上述栅格单元赋值情况，得分的赋值为 1–6）。

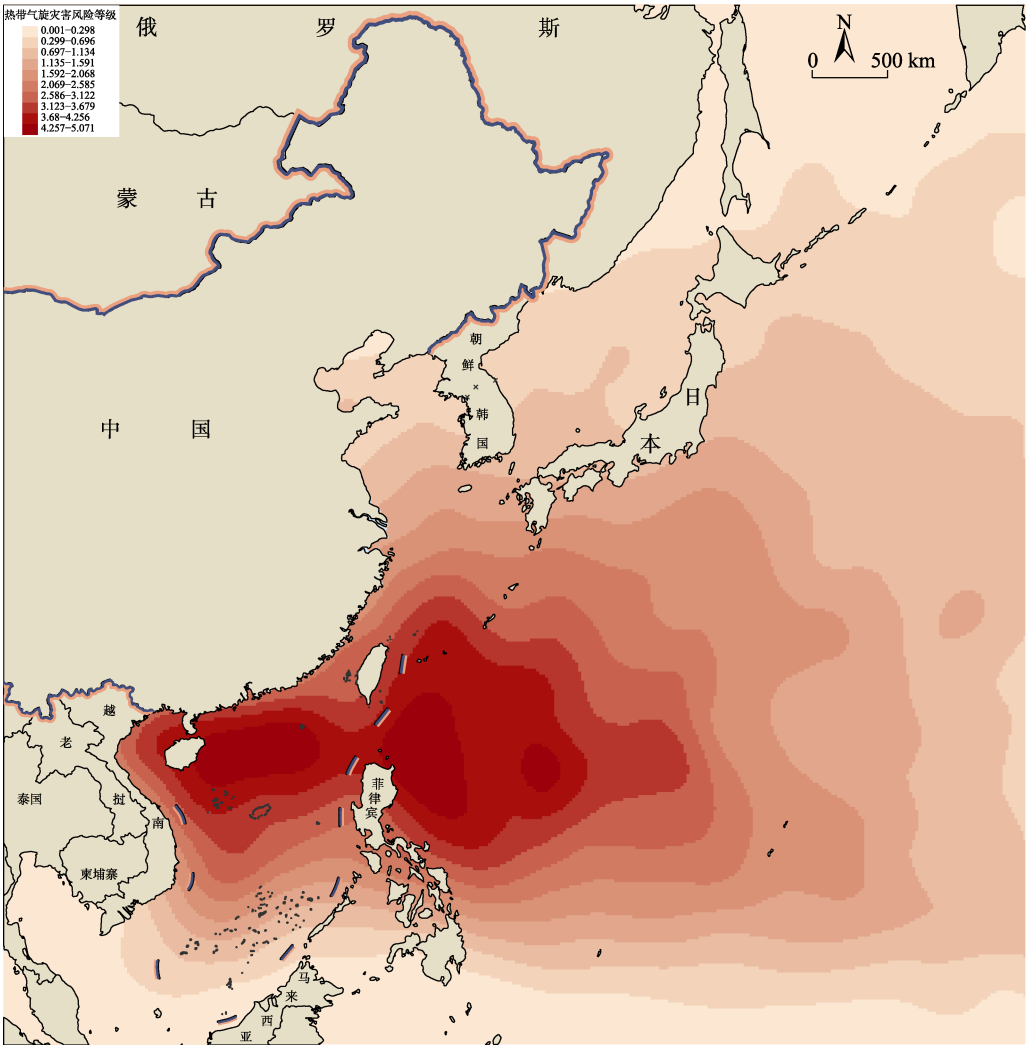


图 5 西北太平洋海域热带气旋灾害风险等级（参考审图号为 GS(2016)1665 的标准地图制作）

4.2.3 中国陆域累计受热带气旋侵扰次数

从我国陆域受灾次数来看，我国陆域地区受热带气旋灾害的侵扰次数呈现由东南沿海向内陆地区逐渐减少的层级结构。首先是海南省、广东省雷州半岛地区在 1980–2022 年间

受到超过 150 次热带气旋侵扰，对生产生活尤其是海上养殖作业产生极大影响。其次，台湾省和广东粤西沿海地区受到超过 125 次的热带气旋灾害侵扰；广东省中南部沿海地区和广西南部地区均受到超过 100 次的热带气旋灾害影响。此外，福建省沿海地区及浙南地区也是受灾害侵扰的重点地区，热带气旋对其渔业养殖和海洋开发造成了严重的生态破坏和经济损失。

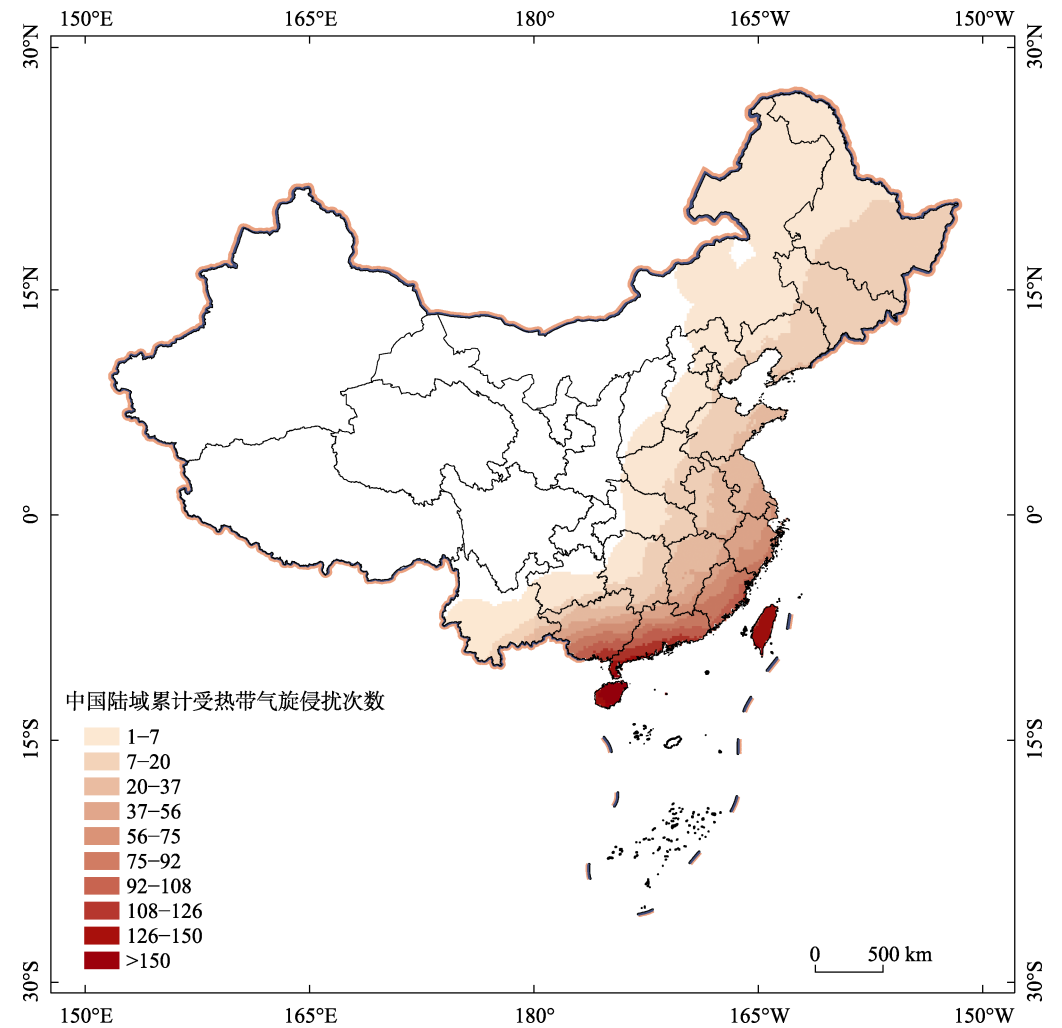


图 6 中国陆域累计受热带气旋侵扰次数（参考审图号为 GS(2023)2767 的标准地图制作）

4.3 数据验证

美国国家海洋大气局所提供的 IBTrACS 最佳路径数据集将全球各个热带气旋监测机构所发表的最佳路径数据进行整合，对来源于美国国家海洋大气局和中国气象局的两种热带气旋数据进行相同的核密度空间分析，测度二者所计算出的风险等级空间分布情况，从数据相关性和相对变化趋势来对比二者分析结果的差异，进而对本文数据集的准确性进行评估。

首先对 IBTrACS 数据集进行数据预处理、核密度分析、统计分析等,得到基于 IBTrACS 数据集的热带气旋灾害等级空间分布;其次结合 CMA 数据集的风险等级空间评估结果,对二者的分析结果进行栅格数值的对比分析。通过计算两者的皮尔逊相关系数发现,二者的相关系数达 0.995,即两种数据间具有极高的正相关性;同时,相关系数的正值也表明两种数据源所分析的灾害等级空间变化趋势具有一致性。

表 4 中国气象局和美国国家海洋大气局的热带气旋灾害影响等级相关性分析

| | 中国气象局 | 美国国家海洋大气局 |
|-----------|-------|-----------|
| 中国气象局 | 1 | 0.995 |
| 美国国家海洋大气局 | 0.995 | 1 |

5 讨论和总结

本数据集基于中国气象局热带气旋资料中心发布的 CMA 最佳路径数据集,运用 GIS、Python 等大数据分析方法,结合热带气旋灾害生命周期、移动轨迹等属性特性,分析了 1980–2022 年间热带气旋对西北太平洋海域及中国陆域所造成的灾害影响。数据结果表明:(1)西北太平洋海域范围内,菲律宾海及中国南海受热带气旋灾害的影响最为严重,具有最高的风险等级;(2)中国陆域受热带气旋灾害的累计侵扰次数表现为由东南沿海向西北内陆逐步递减的空间分布,海南、台湾省及广东省雷州半岛在 1980–2022 年间受热带气旋灾害的侵扰次数最多。此外,本数据集利用美国国家海洋大气局所记录的 IBTrACS 数据集作为对照数据,对同时段同区域内产生的热带气旋灾害进行空间分析。其分析结果与本数据的皮尔逊相关系数为 0.995,表明本数据集的分析结果具稳健性。

与以往分析热带气旋灾害影响的数据集相比,本数据集考虑了更长时间尺度的热带气旋样本,同时以强度标记等级为赋值依据,以平均七级风圈半径作为影响范围来评估热带气旋灾害的空间风险分布,能够更加准确地识别出各地区受灾风险,进而有助于制定相关防灾减灾措施。本数据集的应用场景主要包括:(1)可服务于深远海养殖和捕捞的灾害风险评估:如应用于深远海养殖,通过分析空间单元的历史受灾情况以判断其潜在的受灾风险,进而合理划定养殖范围、规划养殖品类,通过规避高风险区域的养殖活动,有效提高了深远海养殖的生产效益;如应用于现代化海洋牧场建设的灾害风险评估,通过提供海域范围的历史受灾情况,定量评价区域受灾等级,为现代化海洋牧场的建设选址提供科学参考依据,实现现代化海洋牧场的可持续发展。(2)可服务于海上航运的航线布局、海上风电和海上油气的选址规划:如在布局船舶的航道路线时,可依据海域范围的灾害风险等级,合理规避气旋灾害影响的高等级地区;如在进行海上油田的作业范围选址时,应根据灾害风险等级、充分考虑可能形成的灾害破坏,制定相应的生产模式以减少热带气旋灾害对油气田生产造成的损失。(3)可服务于海上应急活动的风险预警、海洋环境监测等,为建立海洋环境监测预警信息平台提供科学的数据支撑;对开展海洋生态环境保护、促进海洋经济高质量发展有重要意义。(4)可服务于沿海城市的发展规划,沿海城市可根据市域范围内各区域的受侵扰次数,合理划定城市的空间功能分区、规划产业布局等。

作者分工:童珺玥收集和处理数据并撰写数据论文;吴旗韬设计了数据集的算法,并指导了本文的写作;千庆兰为数据验证提供了思路。

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] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发“十四五”国家应急体系规划的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2022(6): 30–48.
- [2] 朱海铭, 林广发, 张明锋等. 基于灾害风险普查知识库的台风灾害链知识图谱构建[J/OL]. 灾害学, 2023. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1097.p.20230802.1805.008.html>.
- [3] 汪路, 卢莹, 赵海坤. 热带气旋灾害时空特征分析与评估模型构建[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 187–194.
- [4] 孙熊雄. 基于机器学习的重力式深水网箱受灾风险评估分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [5] 朱婧, 陆逸, 李国平等. 基于县级分辨率的福建省热带气旋灾害风险评估[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 204–209.
- [6] 魏章进, 马华铃, 唐丹玲. 基于改进熵值法的热带气旋灾害风险趋势评估[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 7–11.
- [7] 林沛延, 林陪晖, 王俊等. 基于机器学习方法的浙江省热带气旋灾害风险评估和动态风险预报[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(4): 13–24.
- [8] 包文轩, 宫阿都, 徐溱等. 基于区域灾害系统论的广东省热带气旋灾害风险评估——以“山竹”热带气旋为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 94–103.
- [9] 童珺玥, 吴旗韬, 千庆兰. 西北太平洋热带气旋灾害空间风险评估数据集(1980–2022)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.01.04.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.01.04.V1>.
- [10] Yang, M. Q., Chen, G. M., Zhang, X. P., *et al.* Verification on typhoons forecasts over the Western North Pacific and the South China Sea in 2021 [J]. *Meteorological Monthly*, 2023, 49(8): 1005–1019.
- [11] Lu, X. Q., Yu, H., Ying, M., *et al.* Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 690–699.
- [12] 陈国民, 杨梦琪, 张喜平等. 2020年西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定[J]. 气象, 2022, 48(4): 516–525.
- [13] 王晓霞. 基于多源卫星数据的热带气旋定位方法比较研究[D]. 北京: 国家海洋环境预报中心, 2020.
- [14] 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).
- [15] 中国气象局国家气象中心. 热带气旋等级(GB/T 19201—2006)[S]. 北京: 全国标准信息公共服务平台, 2006.