

孙鸿根, 韩岩松, 姜伟, 等. 1900–2023 年大型火山喷发对西北太平洋热带气旋频率的影响[J]. 海洋学报, 2024, 46(11): 1–12, doi:10.12284/hyxb2024130

Sun Honggen, Han Yansong, Jiang Wei, et al. Impacts of major volcanic activities on the frequency of Northwest Pacific tropical cyclones from 1900 to 2023[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(11): 1–12, doi:10.12284/hyxb2024130

# 1900–2023 年大型火山喷发对西北太平洋 热带气旋频率的影响

孙鸿根<sup>1</sup>, 韩岩松<sup>1</sup>, 姜伟<sup>1\*</sup>, 黄英雪<sup>1</sup>, 梁珍怡<sup>1</sup>, 余克服<sup>1,2</sup>

(1. 广西大学海洋学院 广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 广西 南宁 530004; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

**摘要:** 大型火山喷发后形成的平流层硫酸盐气溶胶层会抑制热带气旋的生成和发展, 但相关研究主要集中在大西洋, 较少涉及其他海域。西北太平洋是生成热带气旋最多的海域, 探索其气候影响因素有利于深度理解热带气旋的生成和发展机制。本文根据记录在国际最佳轨道数据库和中国气象局数据库的西北太平洋热带气旋数据, 比较了 1900–2023 年大型火山喷发前后西北太平洋海表温度和热带气旋数量的变化, 从而对大型火山喷发对西北太平洋的热带气旋活动的影响进行了讨论。通过比较火山喷发前两年和喷发后两年内热带气旋数量的变化, 发现: 在大型火山喷发后西北太平洋热带气旋生成数量显著减少。海表温度显著响应了低纬度火山的喷发, 而对于高纬度火山的喷发则没有明显反应。本研究表明, 大型火山喷发后气溶胶强迫的增加与热带气旋频次联系紧密, 但其造成的海表温度降低可能并非热带气旋减少的直接原因, 其影响机制可能与气溶胶强迫造成的热带辐合带偏移有关, 但仍需进一步探究。

**关键词:** 火山喷发; 热带气旋; 西北太平洋; 海表温度; 低纬度

中图分类号: P732

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)11-0001-12

## 1 引言

热带气旋是一种高温低压的天气系统, 是全球最具破坏力的自然灾害之一<sup>[1]</sup>, 其往往伴随着强风和强降雨天气, 引发风暴潮、洪水、泥石流等灾害, 对我国沿岸地区造成严重危害<sup>[2]</sup>。例如, 2019 年, 台风“利奇马”正面袭击浙江一带, 造成全国 1 402 万人受灾和高达 537.2 亿元人民币的损失<sup>[3]</sup>; 2023 年, 台风“杜苏芮”登陆福建地区, 造成 266.69 万人受灾和大面积的农田绝收<sup>[4]</sup>。在过去几十年里, 全球预测到的热带气旋会

持续增加并且强度会逐渐上升, 未来热带气旋对社会经济造成的实质性损害很有可能也会增加<sup>[5]</sup>, 因此, 持续关注和研究热带气旋频率的变化具有重要意义<sup>[6]</sup>。

研究表明, 热带气旋活动受人为温室气体和自然因素的影响, 而火山喷发是最重要的自然因素之一<sup>[7]</sup>。大规模的火山喷发是导致一定时间内气候系统变化的主要原因之一, 而其影响气候最重要的机制是将大量二氧化硫(SO<sub>2</sub>)注入平流层中, 与水(H<sub>2</sub>O)发生反应生成硫酸盐气溶胶<sup>[8]</sup>。位于平流层的硫酸盐气溶胶层会反向散射太阳辐射从而对地表进行冷却, 同时吸

收稿日期: 2024-06-19; 修订日期: 2024-11-04。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF0804801); 广西壮族自治区重大人才项目(GXR-1BGQ2424020); 大学生创新创业训练计划(202310593498)。

作者简介: 孙鸿根(2002—), 男, 广东省惠州市人, 主要从事海洋科学研究。E-mail: 3512335324@qq.com

\* 通信作者: 姜伟, 副教授, 主要从事海洋地质学与全球变化研究。E-mail: jianwe@gxu.edu.cn

收长波和短波辐射加热平流层下部<sup>[9]</sup>,进而对热带气旋活动产生影响。因此,进一步研究火山喷发对热带气旋活动影响的机制,对于预测未来大规模火山喷发后对热带气旋活动的连锁反应具有重要意义。过去的研究表明,在1982年埃尔奇琼火山和1991年皮纳图博火山喷发后,北大西洋热带气旋生成数量都明显减少,Evan把这种现象归因于海表温度的降低和垂直风切变的增强<sup>[10]</sup>。但这项研究只考虑了两座大型火山喷发后的气候影响,样本量太小,所得出的结论在其他火山的喷发事件上的适用性有待探究。而另一项研究则统计了过去3个世纪以来的大型火山喷发和北大西洋的热带气旋活动,发现热带气旋频次在大型火山喷发后显著减少,并且将其归因于火山喷发后形成的平流层气溶胶层对海表温度的降低<sup>[11]</sup>。目前现有的热带气旋活动研究主要集中在北大西洋,而其他热带气旋生成区域则较少受到关注<sup>[7]</sup>。

由于热带气旋数据集的差异、热带气旋在不同海域的不同表现以及对大部分区域热带气旋的记录较少,因此不同区域的热带气旋预测置信度较低<sup>[12]</sup>。西北太平洋区域是全球热带气旋最活跃的海域之一,探索西北太平洋区域热带气旋过去的变化趋势及其影响因素对于理解热带气旋的变化机制具有十分重要的意义。在西北太平洋区域,热带气旋与海表温度有着高度的相关性,杨桂山和施雅风<sup>[13]</sup>的研究表明,热带气旋发生频率高的海域的海表温度往往偏高。而与海表温度相关的厄尔尼诺现象自然也得到不少的

关注,李崇银和穆明权<sup>[14]</sup>证明了在厄尔尼诺年的热带气旋频数的年平均值少于多年平均值,而在拉尼娜年则相反。由此可见,会造成海表温度显著降低的大型火山喷发对西北太平洋海域的影响是不容忽视的。本次研究将聚焦全球大型火山喷发事件和西北太平洋的热带气旋活动,探究西北太平洋的热带气旋活动对大型火山喷发的响应及其机制。具体而言,本文将关注以下几个问题:(1)西北太平洋热带气旋生成数量是否在大型火山喷发后减少?(2)西北太平洋热带气旋活动的变化对大型火山的地理位置是否敏感?(3)西北太平洋热带气旋活动的减少是否能够归因于大型火山喷发后气溶胶辐射强迫引起的海表温度降低?

## 2 研究数据与方法

### 2.1 研究区域

西北太平洋有适宜热带气旋生成的大气和海洋条件,诸如温暖的海表和季风槽的存在<sup>[15]</sup>,全球约三分之一的热带气旋生成于此,因此,西北太平洋( $0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ )是全球生成热带气旋最多的海域(图1)<sup>[16]</sup>,如图1所示的区域是本研究统计热带气旋频次的区域范围。西北太平洋的热带气旋有80%左右发生于 $6^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 的纬度带内,且全年各月均有发生,其中70%左右的热带气旋发生于7-10月,8月份往往是发生频数最多的月份<sup>[17]</sup>。以日本气象厅的数据为例,西北太平洋发生的热带气旋,最大持续风速在17.2 m/s及以上的热带气旋,每年的频数约为25~

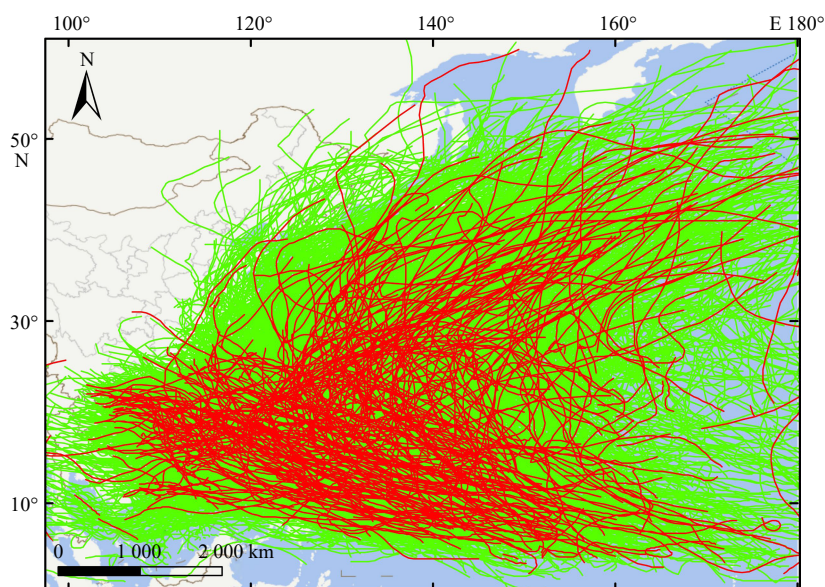


图1 1900年至2023年西北太平洋热带气旋路径

Fig. 1 Track of tropical cyclones in the Northwest Pacific from 1900 to 2023

绿色为常规气旋路径,红色为火山喷发年份气旋路径

Green lines are the normal cyclone tracks, and red ones are the volcanic eruption year cyclone tracks

30 个<sup>[17]</sup>; 而以中国气象局的数据为例, 每年的频数却有 40~50 个<sup>[18]</sup>。由此可见, 不同的数据库, 对西北太平洋热带气旋的记载都有所不同。所以, 本研究分别使用中国气象局热带气旋数据库和国际最佳气候管理路径档案数据库来确保研究结果的准确性。

## 2.2 火山数据

大型火山喷发数据来自于美国国家海洋与大气管理局(NOAA)全球重大火山喷发数据库/世界数据服务中心[NCEI/WDS, NCEI 危险火山事件结果([noaa.gov](http://noaa.gov))]。本研究将根据火山喷发所产生的平流层气溶胶层光学深度(SAOD)的大小, 来判断是否将该火山纳入研究范围, 在此本研究使用了 3 个数据库作为参考。Gao 等<sup>[19]</sup>根据格陵兰岛和南极洲的 54 个冰芯记录测量了过去 1 500 年火山喷发导致的平流层气溶胶载荷, 本研究将载荷除以 150 从而将质量转换为 SAOD<sup>[20]</sup>, 重建了新的火山强迫数据集(以下简称 GAO08)。Crowley 和 Unterman<sup>[21]</sup>从格陵兰岛和南极洲的 22 个冰芯中重建了过去 1 200 年以来的 SAOD 的数据集(以下简称 CU13)。Sato 等<sup>[22]</sup>利用地面观测与卫星观测估计了 1883 年以来的 SAOD(以下简称 ST93)。另外, 本研究还参考了其他文献中关于特定火山的 SAOD 数据: 1980 年的圣海伦斯火山喷发后热带气旋均有所减少, 但其 SAOD 数据在 3 个数据集中缺失, 因此参考了 Kennedy<sup>[23]</sup>、Michalsky 和 Stokes 等<sup>[24]</sup>的数据; 而 2022 年的汤加火山爆发的年份稍晚, 因此其 SAOD 数据主要来源于 Zhu 等<sup>[25]</sup>。表 1 为本次研究涉及的主要火山喷发事件。

本研究根据火山所在的纬度来对火山喷发进行分类, 将火山分为全部、低纬度、高纬度与未知 4 种类型。而在 1900–2023 年期间, 总共有 9 次已知大型火山喷发, 这些火山的喷发指数(VEI)均大于 5, 其中有 5 次低纬度(20°N~20°S), 4 次高纬度(南北纬 20°到极地)。另外, 有 3 次造成了较高的 SAOD 却没有相关的火山记录记载, 被归于未知的火山类别。为了评估火山活动对热带气旋造成的影响, 本研究选取了喷发后 SAOD 大于等于 0.025 的火山活动进行统计。在 SAOD 为 0.025 以下的火山活动一般对热带气旋的影响并不显著<sup>[26]</sup>, 因此未纳入大型火山的统计范围(图 2)。

此外, 本研究对一些特定的大型火山喷发需要做特定的考虑和进一步的处理。例如, 1902 年喷发的圣玛利亚火山和 2022 年喷发的汤加火山, 在喷发后 SAOD 主要集中在南半球<sup>[25]</sup>, 西北太平洋热带气旋并

表 1 1900 年至 2023 年主要火山喷发事件列表  
Table 1 List of major volcanic eruptions during 1900–2023

火山	纬度	经度	VEI	喷发月	喷发年	SAOD	喷发后第一年
圣玛利亚	北纬14.75°	西经91.55°	6	10	1902	0.025	1903
诺瓦鲁普塔	北纬58.27°	西经155.16°	6	9	1912	0.076	1913
圣托里尼	北纬36.24°	东经25.24°	5	8	1925	0.074	1925
未知					1943	0.044	1944
阿贡	南纬8.34°	东经115.51°	5	3	1963	0.110	1963
未知					1968	0.034	1968
未知					1976	0.030	1976
圣海伦斯	北纬46.20°	西经122.18°	5	5	1980	0.075	1980
埃尔奇琼	北纬17.36°	西经93.23°	5	3	1982	0.090	1982
皮纳图博	北纬15.13°	东经120.35°	6	6	1991	0.200	1991
哈德逊	南纬45.90°	西经72.97°	5	8	1991	0.200	1991
汤加	南纬20.54°	西经175.38°	5	1	2022	0.025	2022

没有显著变化; 在 1991 年喷发的大型火山是位于智利的哈德逊火山, 其喷发而出的大量气溶胶在西风的引导下向极地输送<sup>[27]</sup>, 对北半球的气候影响暂时不明朗, 并与皮纳图博火山喷发所导致的气候变化效应重叠。因此, 本研究根据 SAOD 所集中的区域, 将火山分为北半球火山和南半球火山。圣玛利亚火山虽然位置在北半球, 但其喷发后 SAOD 却集中在南半球, 因此也被划为南半球火山。因此, 北半球火山有 8 座(包括 3 次未知的喷发), 南半球火山有 4 座, 分别是圣玛利亚火山、阿贡火山、哈德逊火山和汤加火山。

综上所述, 本研究所用的火山主要有 12 座, 5 座低纬度火山, 4 座高纬度火山和 3 次未知的火山喷发事件, 其地理位置见图 3。

## 2.3 热带气旋数据

本研究使用了两个热带气旋数据集来统计火山喷发前后热带气旋数量的变化。一个是中国气象局热带气旋资料中心中的最佳路径数据集[中国气象局热带气旋资料中心|最佳路径数据集-说明([typhoon.org.cn](http://typhoon.org.cn))], 该数据集详细记录了自 1945 年以来每年西北太平洋热带气旋的最佳路径数据。台风名称、风速变化、发展状况、变性情况均记录在内, 关于西北太平洋热带气旋的数据记录非常准确和详细。但其热带气旋数据记录仅从 1945 年起, 因此其对应的火山喷发事件也是从 1945 年起的大型火山喷发事件。本研究取每个热带气旋所能发展到的最大风速来判

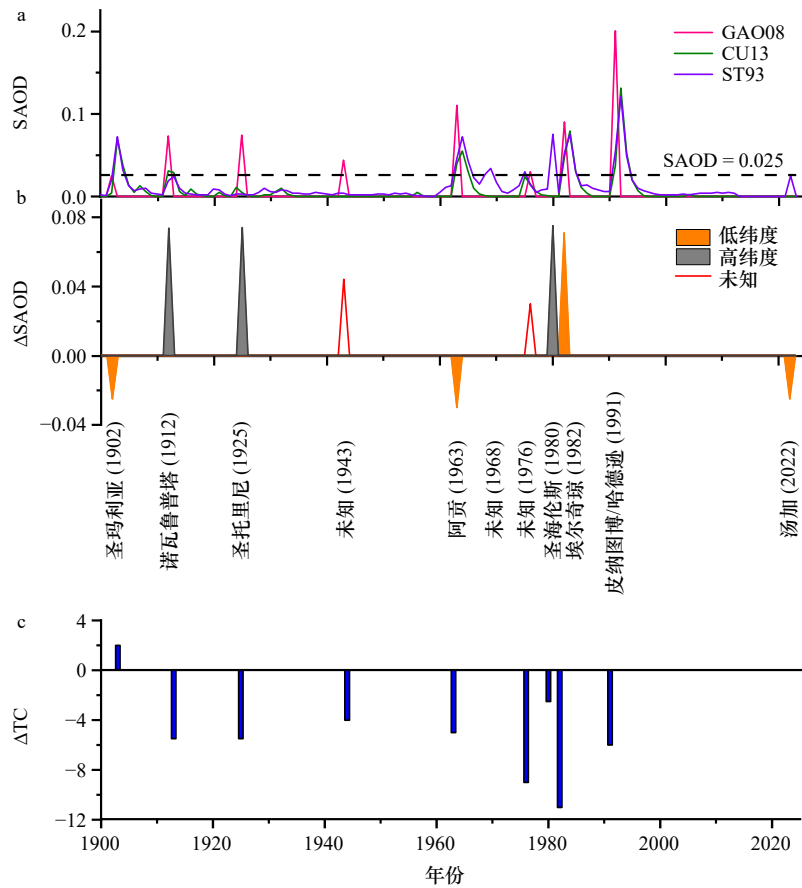


图 2 自 1900 年起火山喷发后气溶胶强迫与热带气旋频数插值 ( $\Delta TC$ )

Fig. 2 Aerosol forcing and TC anomalies after volcanic eruptions since 1900

图 a 为全球年平均平流层气溶胶光学深度 (SAOD) 变化。图 b 为北半球和南半球  $\Delta SAOD$  分布 (数据来源于 GAO08), 正值 (负值) 表示北半球相比南半球较高 (低)。图 c 为大型火山喷发后热带气旋平均差值,  $\Delta TC$  为热带气旋平均差值, 其中  $\Delta TC = (TC_y + TC_{y+1})/2 - (TC_{y-1} + TC_{y-2})$ ,  $y$  为喷发后第一个年份, 使用国际最佳路径数据集的数据计算

Figure a shows the global annual mean stratospheric

aerosol optical depth (SAOD) variation. Figure b shows the distribution of  $\Delta SAOD$  in the Northern and Southern Hemispheres (data from GAO08), where positive (negative) values indicate that the Northern Hemisphere is higher (lower) than the Southern Hemisphere. Figure c shows the mean difference of tropical cyclones after a major eruption, where  $\Delta TC$  indicates a tropical cyclone anomaly.

$\Delta TC = (TC_y + TC_{y+1})/2 - (TC_{y-1} + TC_{y-2})$  and  $y$  is the first year after the eruption, calculated using data from the International Best Track dataset

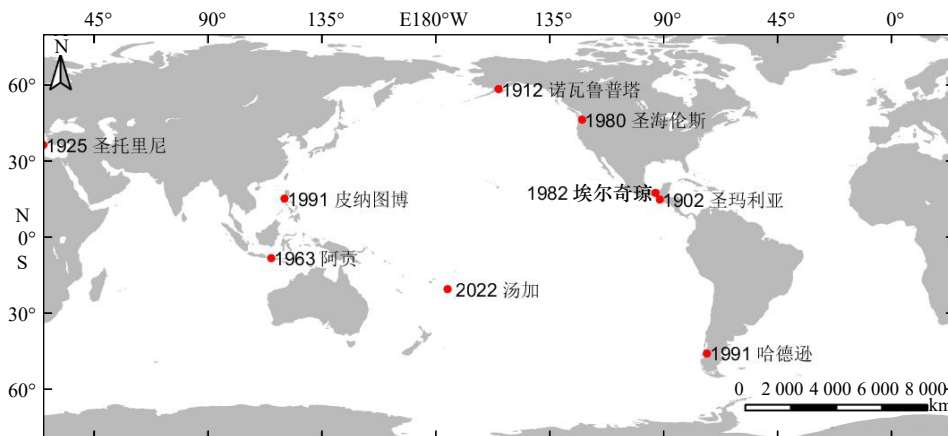


图 3 研究中所使用的火山位置

Fig. 3 The volcano locations used in the study

定为每个热带气旋的近中心最大风速。另一个是国际气候管理最佳路径档案(International Best Track Archive for Climate Stewardship, 简称 IBTrACS, 以下简称国际最佳路径数据库), 该数据集收集了世界各地的区域专业气象中心(Regional Specialized Meteorological Centers, 简称 RSMCs)的历史热带气旋最佳路径的数据<sup>[28]</sup>。该数据库致力于将不同地区的数据集合在一个数据库中, 并每年保持着从每个 RSMCs 来的热带气旋数据的更新。IBTrACS 数据以六小时为间隔, 集合了各个区域热带气旋的参数, 总共包含了 7 个不同海盆的风暴参数<sup>[29]</sup>。该数据库虽然没有中国

气象局的数据详实, 但时间跨度更长, 可以从 1900 年起, 为此, 本研究取用了该数据集中 1900 年以来西北太平洋海盆的热带气旋数据。

以上两个数据集中记录的热带气旋风速均大于 10.8 m/s。如图 4 所示, 在火山喷发后, 除超强台风级别以外的各个级别的热带气旋均有所减少。尽管超强台风级别的热带气旋频次喷发前与喷发后相差并不显著, 但为了方便统计, 本研究将超强台风级别的热带气旋也纳入统计范围中。因此, 本研究选取近中心最大持续风速大于等于 10.8 m/s 的热带气旋纳入统计范围中。

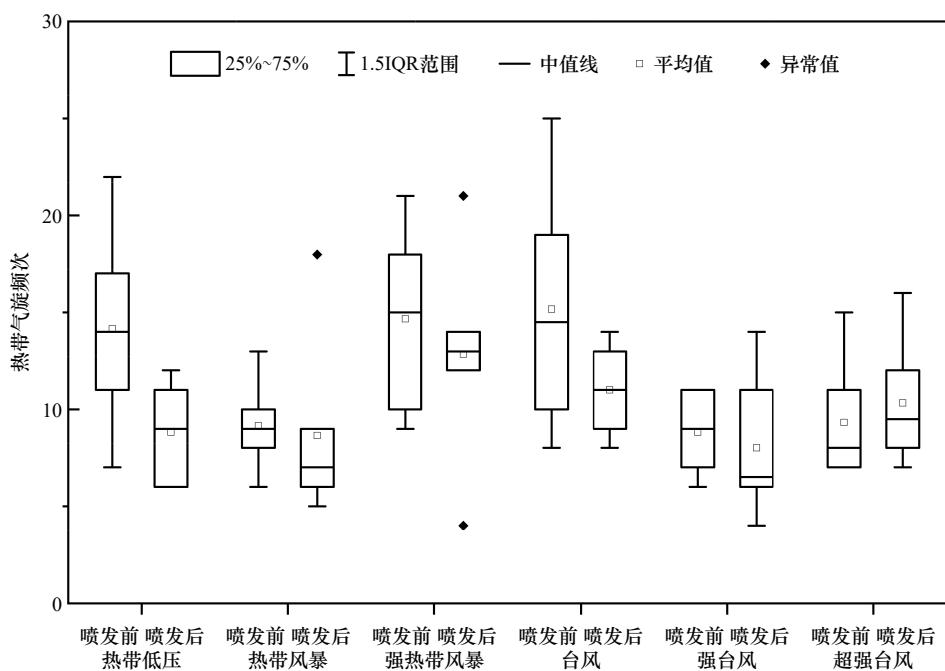


图 4 火山喷发后各级别热带气旋频次变化

Fig. 4 Changes in the frequency of all classes of tropical cyclones after volcanic eruption

## 2.4 数据分析

为了确定喷发后第一年, 即热带气旋活动受到火山喷发影响的第一年, 本研究考虑了热带气旋形成机制对火山活动的响应时间。埃尔奇琼火山和皮纳图博火山喷发后对流层的变暖和海表温度的降低与平流层气溶胶层的增加相吻合<sup>[10]</sup>, 而在平流层气溶胶衰减至热带气旋生成机制不再受到影响的程度时, 即可认为平流层气溶胶层恢复到喷发前水平<sup>[9]</sup>。西北太平洋热带气旋的频发月份是 7 月到 10 月<sup>[16]</sup>, 而这些月份若在大型火山喷发后的月份内, 受火山喷发的平流层气溶胶影响, 热带气旋生成数量显著减少, 则将这一年视作火山喷发后的第一年(假设一座大型火山喷发月份在 7 月之前, 在喷发后热带气旋数量减少, 则将其喷发年份视作火山喷发后的第一年)。

为了比较火山喷发前后的热带气旋数量变化, 本研究尝试比较了火山喷发前的数个年份与喷发后的数个年份的热带气旋生成数量, 最终确定将火山喷发前两年与火山喷发后两年的热带气旋数量进行统计。所有大型火山在喷发后第一年内热带气旋数量都有减少; 而在喷发后第三年, 热带气旋数量已经恢复到喷发前的水平。如图 5, 相比较喷发前 1 年与喷发后 1 年、喷发前 3 年与喷发后 3 年, 喷发后两年与喷发前两年的比较最为显著。另外, 在 Zuo 等<sup>[30]</sup>的研究中, 在火山喷发后两年内存在西太平洋变冷、东太平洋变暖的类似厄尔尼诺的现象, 而在第三年开始西太平洋开始变暖, 转为类似拉尼娜的模式。因此, 选择喷发前两年与喷发后两年作对比是最适宜的。

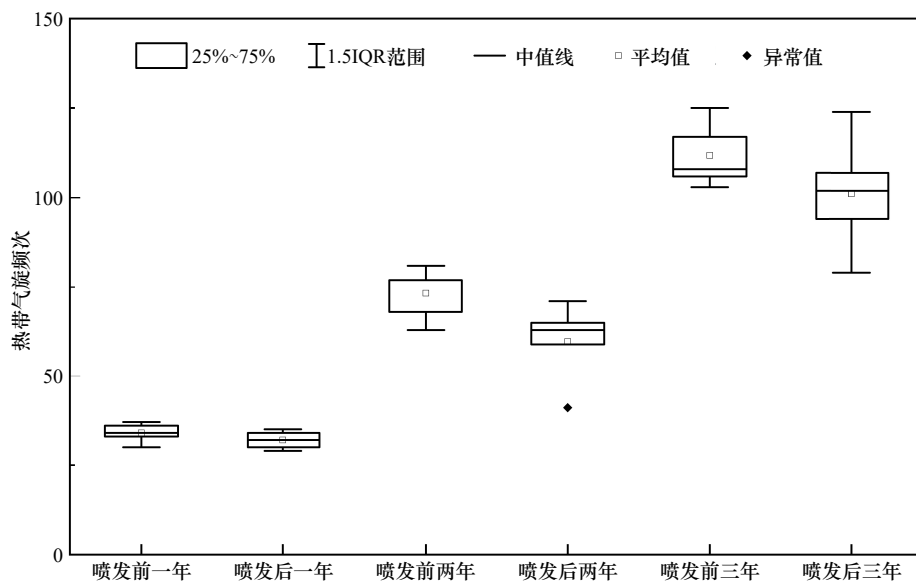


图5 火山喷发前后不同年份热带气旋频次变化

Fig. 5 Variation of tropical cyclone frequency in different years before and after volcanic eruption

### 3 结果

#### 3.1 热带气旋数量的变化

图6和图7显示了自1900年以来和自1945年以来大型火山喷发前两年与喷发后两年的西北太平洋热带气旋的数量分布。无论是中国气象局的数据还是国际最佳路径数据集的数据,都显示在大型火山喷发后,西北太平洋热带气旋的生成数量显著减少。国际最佳路径数据库中,减少程度为6个;而中国气象局的数据库中,减少程度为13个,并且高纬度火山与

低纬度火山喷发后热带气旋的减少程度相当,都在10~12个之间。该结果证明了火山活动后热带气旋的减少与火山的所处纬度位置无关,与Guevara-Murua等<sup>[11]</sup>在北大西洋的研究结果吻合。

#### 3.2 平流层气溶胶光学深度在南半球的情况

如表2,1902年的圣玛利亚火山、1963年的阿贡火山、1991年的哈德逊火山、2022年的汤加火山,喷发后所增加的SAOD主要停留在南半球。值得注意的是阿贡火山,阿贡火山喷发后虽然大部分气溶胶层集中在南半球,但在北半球的SAOD也高达0.04,同

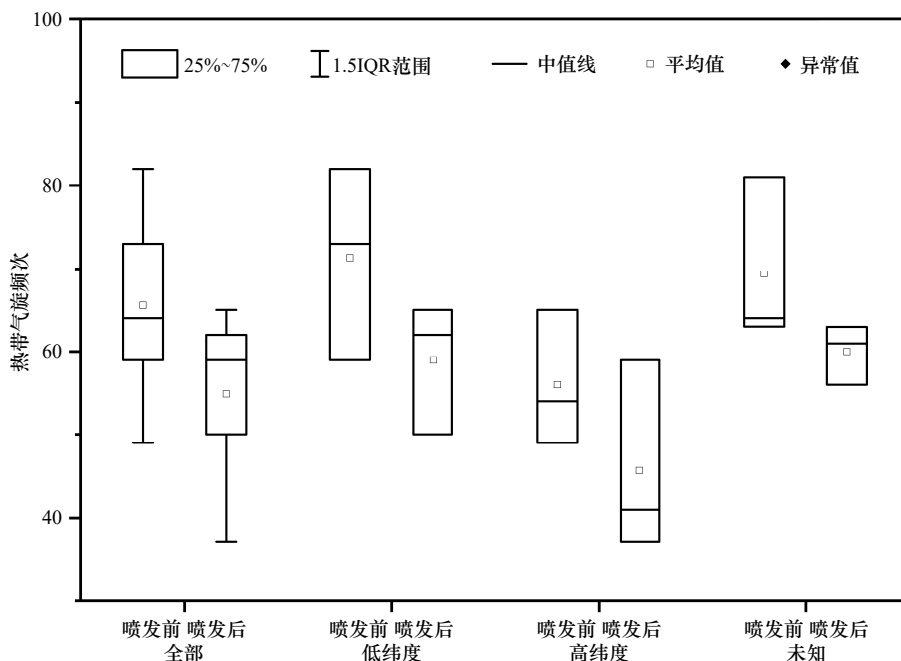


图6 国际最佳路径数据库热带气旋变化箱式图(IQR:四分位距)

Fig. 6 IBTrACS Database box chart of tropical cyclone changes (IQR: interquartile range)

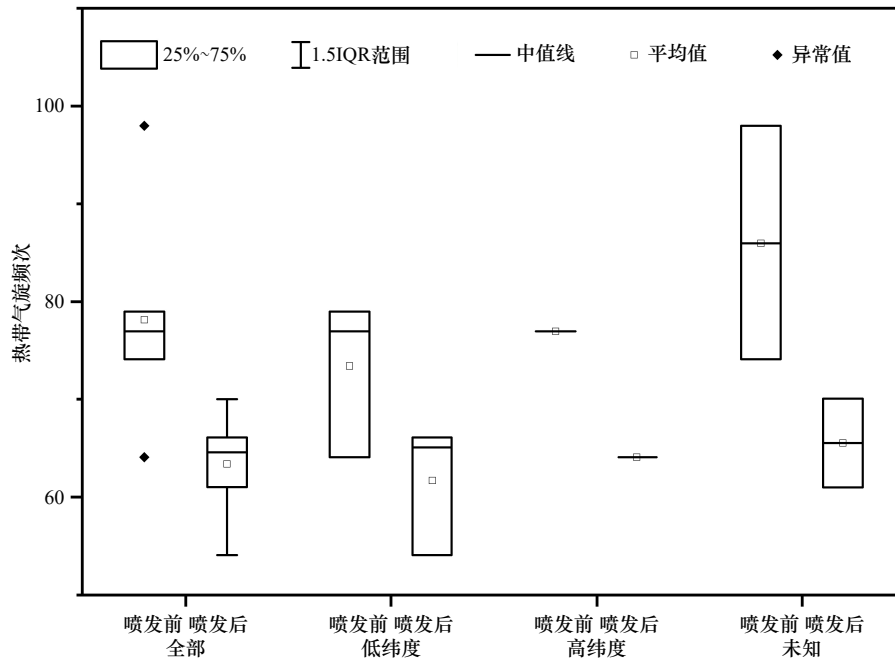


图 7 中国气象局数据库热带气旋变化箱式图

Fig. 7 China Meteorological Administration database box chart of tropical cyclone changes

表 2 南半球火山 SAOD 集中情况与喷发后热带气旋变化

Table 2 SAOD concentrations and post-eruption tropical cyclones in Southern Hemisphere volcanoes

火山名称	北半球 SAOD	南半球 SAOD	喷发前热带气旋数量	喷发后热带气旋数量
圣玛利亚	0	0.025	28	32
阿贡	0.04	0.07	77	65
汤加	0	0.025	46	46

样可以对西北太平洋的热带气旋造成影响。而哈德逊火山, 因为其与皮纳图博火山在同一年份喷发, 所以造成的影响暂且不明朗, 但其喷出的气溶胶物质都在西风的作用下往极地运输<sup>[27]</sup>, 很有可能同圣玛利亚火山与汤加火山一样, 对西北太平洋的气候没有产生显著影响。圣玛利亚火山和汤加火山在喷发后 SAOD 几乎都停留在南半球, 西北太平洋热带气旋数目也没有因为这两座火山的喷发而减少, 因此, 可以归因于 SAOD 集中在南半球且深度不够, 不能够对西北太平洋的气候条件产生显著影响。也就是说, 西北太平洋热带气旋对北半球 SAOD 比对南半球的 SAOD 更加敏感。

## 4 讨论与总结

### 4.1 海表温度的时空变化

本研究根据哈德利海冰和海表温度中心 (HadISST1, <http://www.metoffice.com>) 数据库<sup>[31]</sup>, 统计了在

西北太平洋海域 ( $0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ ) 大型火山喷发前两年与后两年的平均海表温度数据。如图 8 所示, 低纬度大型火山喷发后热带气旋数量的减少与海表温度的减少相吻合。而海表温度是热带气旋形成的重要因素之一<sup>[32]</sup>, 在前人的研究中也被认为是大型火山喷发影响热带气旋变化的可能机制<sup>[10]</sup>。如图 9 所示, 海表温度的变化与 SAOD 的变化是互相吻合的, 海表温度是火山喷发影响热带气旋生成的重要因素之一。海表温度是海气相互作用系统中最为关键的要素之一, 在热带气旋活动的研究中受到广泛的关注<sup>[33-34]</sup>。一般认为, 海表温度达到  $26^{\circ}\text{C}$  是热带气旋生成的必要条件, 说明了海表温度对热带气旋活动的重要性<sup>[35-36]</sup>。前人的研究得出, 西北太平洋和印度洋的强热带气旋数量与海表温度呈正相关关系<sup>[37]</sup>。而本研究数据表明, 低纬度大型火山喷发后两年西北太平洋的海表温度均有所降低, 与之对应的, 是几乎所有大型火山喷发后两年热带气旋生成数量均有所降低。而高纬度火山喷发后两年内热带气旋也有减少的趋势, 但如图 8 所示, 海表温度没有对高纬度火山喷发做出响应。在关于高纬度火山的研究中, Oman 等<sup>[38]</sup>提出高纬度火山通过在夏季减少高纬度地区的短波辐射, 减少云量, 形成较弱的季风环流。因此, 高纬度火山通过季风环流可能会对热带气旋的形成造成影响。

在大型火山喷发后, 西北太平洋热带气旋显著减少, 但海表温度的变化并不剧烈, 几乎都处于  $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$  的变化范围内。这可能归结于, 越来越强的温

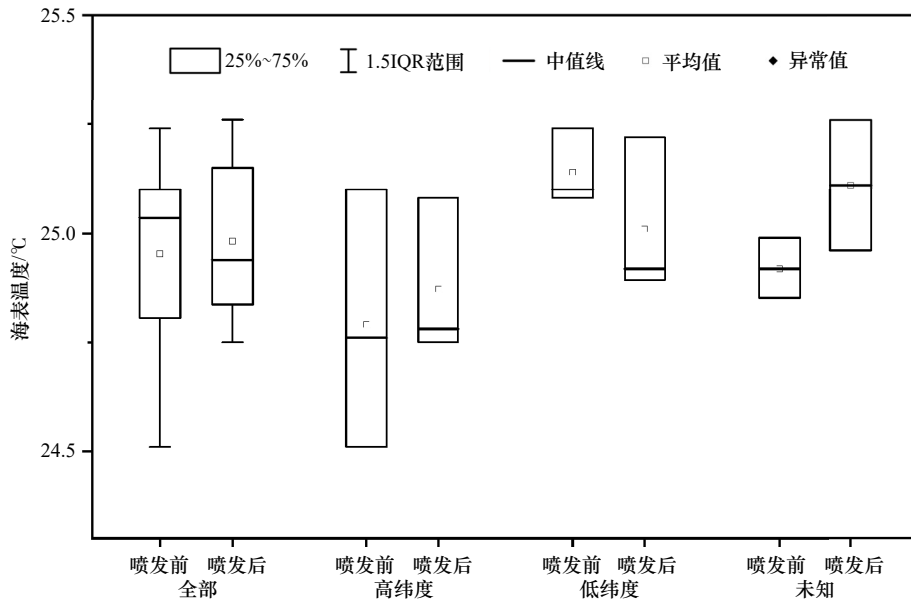


图 8 火山喷发前后海表温度变化箱式图

Fig. 8 Box chart of sea surface temperature changes before and after volcanic eruption

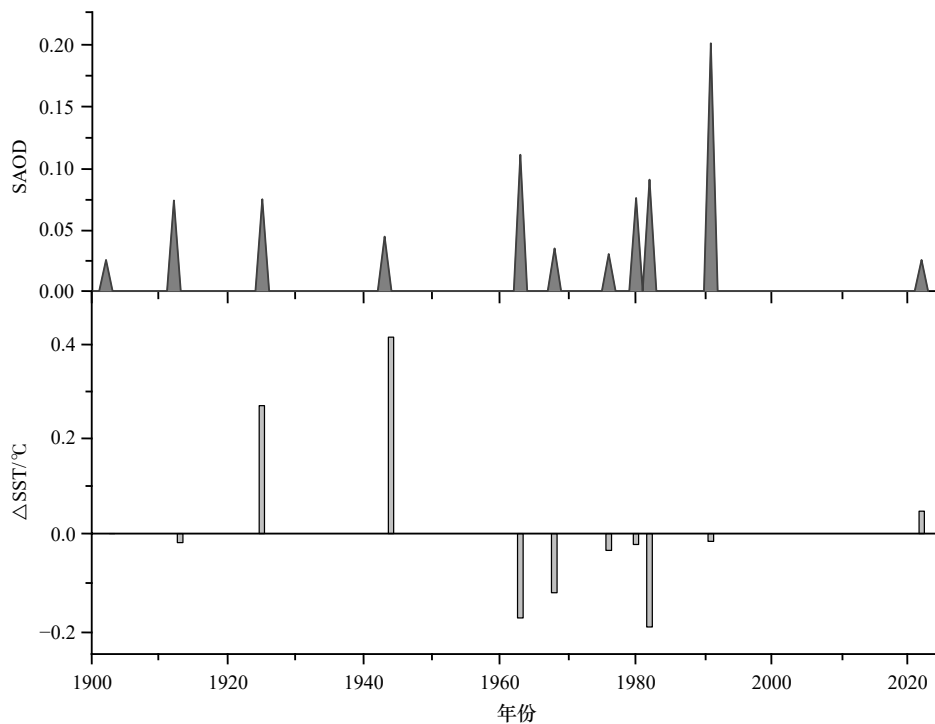


图 9 SAOD 与 SST 关系

Fig. 9 Relationship between SAOD and sea surface temperature

$\Delta$ SST 表示海表温度异常,  $\Delta$ SST = (SST<sub>y+1</sub>+SST<sub>y</sub>)/2-(SST<sub>y-1</sub>+SST<sub>y-2</sub>), y 表示喷发后第一年

$\Delta$ SST indicates abnormal sea surface temperature,  $\Delta$ SST = (SST<sub>y+1</sub>+SST<sub>y</sub>)/2-(SST<sub>y-1</sub>+SST<sub>y-2</sub>), and y is the first year after the eruption

室效应导致的全球温度的上升。自 20 世纪中叶开始, 全球的海表温度正在持续升高<sup>[31]</sup>, 西北太平洋的海温也呈显著增长的趋势<sup>[39]</sup>。这样的变暖趋势是由化石燃料产生的 CO<sub>2</sub> 和其他人为的温室气体造成的, 而 1963 年的阿贡火山喷发、1982 年的埃尔奇琼火山喷发以及 1991 年的皮纳图博火山喷发也仅仅是暂时中

断了这样的变暖趋势<sup>[40]</sup>。过去的研究表明, 厄尔尼诺现象还与火山喷发有关<sup>[41-42]</sup>, 而西北太平洋的海表温度尤其受厄尔尼诺现象的影响。在北半球中, 低纬度火山和高纬度火山喷发后, 均有利于类似厄尔尼诺的效应出现, 即西太平洋海温降低, 而东太平洋海温变暖, 但在南半球火山喷发后这样的效应较弱<sup>[43]</sup>。而在

所有的火山喷发后两年,海温模式则转变为类似拉尼娜的状态<sup>[30]</sup>。

#### 4.2 热带气旋的时空变化

通过将大型火山喷发前两年和大型火山喷发后两年的热带气旋数据进行比较,本研究发现在大型火山喷发后热带气旋数量减少。但是,若将特定的火山喷发详细讨论的话,也可以得出一些新的结论。例如,同样是低纬度大型火山的埃尔奇琼火山和皮纳图博火山喷发后,两者对热带气旋的影响也有所不同。埃尔奇琼火山喷发后,所造成的 SAOD 远比皮纳图博火山低,而热带气旋的响应却比皮纳图博火山更加强烈,这可能与同一年发生的强烈厄尔尼诺事件有关<sup>[44]</sup>。在热带地区,厄尔尼诺事件伴随海洋上层热含量的强烈变化,这使得该类事件成为影响热带气旋形成的重要因素<sup>[45]</sup>。Guo 和 Tan<sup>[46]</sup> 的研究表明,当厄尔尼诺事件发生时,西北太平洋海洋上层温度降低且对流层变得更为干燥,这些环境条件的变化均不利于热带气旋的形成。

那么,大型火山喷发对西北太平洋热带气旋的显著影响是否通过控制厄尔尼诺事件来实现?在 Gergis 和 Fowler<sup>[47]</sup> 的研究中,1690–1871 年的火山喷发后在没有出现厄尔尼诺现象的时期内,热带气旋数量依旧减少。即使是 20 世纪最大的喷发事件皮纳图博火山的喷发也仅仅增加了 50% 发生厄尔尼诺事件的可能性<sup>[48]</sup>,也没有引发如 1982 年那般强烈的厄尔尼诺事件。这些研究都证明了热带气旋变化和大型火山喷发的直接联系,但是对于埃尔奇琼火山喷发后热带气旋的变化,没有办法将其从厄尔尼诺–南方涛动信号中剥离出来。

由于海表温度的不剧烈变化,可能印证了厄尔尼诺事件并非是火山喷发影响热带气旋的主要机制。Camargo 和 Polvani<sup>[49]</sup> 对全球范围内有利于热带气旋生成的环境指标进行了统计和比较,发现并没有确切的证据表明,火山喷发后全球范围内热带气旋活动会减少。Pausata 和 Camargo<sup>[50]</sup> 的研究表明,大型火山喷发后气溶胶强迫导致南北半球不对称冷却,影响热带辐合带的偏移,改变了有利于生成热带气旋的动力条件,例如垂直风切变的正异常,从而影响了热带气旋的生成。因此,大型火山喷发造成的气溶胶胁迫是西北太平洋海域热带气旋频次降低的主要因素,但其影

响机制可能并非是海表温的降低,而可能与热带辐合带的偏移有关。

## 5 结论与展望

总体而言,大型火山喷发将大量  $\text{SO}_2$  注入平流层,形成硫酸盐气溶胶层,通过将部分太阳辐射反射回太空对地表进行冷却,进而影响气候系统<sup>[9]</sup>。过往的研究认为火山气溶胶层对太阳辐射的反射和吸收导致了海表温度冷却,从而使热带气旋生成数量减少<sup>[11]</sup>。本研究部分支持这一假设,即大型火山喷发后,热带气旋数量有减少的趋势,并且可以归因于火山气溶胶辐射强迫的变化,但对于海表温度降低所起的作用并不完全支持。本次研究的结果如下:

(1) 通过将大型火山喷发前两年与喷发后两年内的热带气旋数量进行比较,发现在大型火山喷发后,生成于西北太平洋的热带气旋有减少的趋势。国际最佳路径数据库中,减少程度为 6 个;而中国气象局的数据库中,减少程度为 13 个。无论是高纬度火山还是低纬度火山喷发后热带气旋的减少程度均在 10~12 个,与火山所处的纬度位置无关。

(2) 西北太平洋热带气旋对 SAOD 集中在南半球的情况并没有显著响应,而对北半球的 SAOD 的响应更加敏感。

(3) 通过将火山喷发后热带气旋减少与海表温度异常进行对比,表明低纬度大型火山喷发后海表温度有所降低,而高纬度火山喷发后海表温度并未发生显著变化。此外,在大型火山喷发后,西北太平洋海表温度并没有发生明显降低,可能难以作为热带气旋减少的直接原因。然而,由大型火山喷发后气溶胶强迫所造成的热带辐合带偏移,可能改变了西北太平洋的动力条件,从而抑制了热带气旋活动,此猜测有待验证。

大型火山喷发后,西北太平洋热带气旋形成的条件变得不利,热带气旋活动对大型火山活动的响应机制还有许多的不确定性有待探究。例如,西北太平洋热带气旋是否对南半球火山是否有着不同的响应?火山活动与厄尔尼诺事件的关联性?西北太平洋热带气旋对气溶胶辐射强迫的响应是否更加敏感和强烈?热带气旋活动的改变是否确实由于热带辐合带的偏移?这些问题都需要在日后的研究中予以重视。

#### 参考文献:

- [1] 端义宏,余晖,伍荣生. 热带气旋强度变化研究进展 [J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 636–645.  
Duan Yihong, Yu Hui, Wu Rongsheng. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,

- 2005, 63(5): 636–645.
- [2] 赵鹏国, 银燕, 肖辉, 等. 气溶胶对热带气旋强度及电过程影响的数值模拟研究 [J]. *气象科学*, 2016, 36(1): 1–9.  
Zhao Pengguo, Yin Yan, Xiao Hui, et al. Numerical simulation of the effects of aerosol on the intensity and electrification of tropical cyclone[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2016, 36(1): 1–9.
- [3] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布 2019 年 8 月全国自然灾害基本情况 [EB/OL]. (2019–09–04)[2024-11-04]. [https://www.mem.gov.cn/xw/bndt/201909/t20190904\\_336230.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/bndt/201909/t20190904_336230.shtml).  
Ministry of Emergency Management of the People’s Republic of China. Basic information on natural disasters in August 2019[EB/OL]. (2019–09–04)[2024-11-04]. [https://www.mem.gov.cn/xw/bndt/201909/t20190904\\_336230.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/bndt/201909/t20190904_336230.shtml).
- [4] 何祖谋. 台风“杜苏芮”共造成我省 266.69 万人受灾 [N]. *福建日报*, 2023–08–01(002).  
He Zumou. Typhoon “Doksuri” caused a total of 2, 666, 900 people in our province affected[N]. *Fujian Daily*, 2023–08–01(002).
- [5] Bhatia K T, Vecchi G A, Knutson T R, et al. Recent increases in tropical cyclone intensification rates[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 635.
- [6] Mei Wei, Xie Shangping. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 753–757.
- [7] Yan Qing, Zhang Zhongshi, Wang Huijun. Divergent responses of tropical cyclone genesis factors to strong volcanic eruptions at different latitudes[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50(5): 2121–2136.
- [8] Schneider D P, Ammann C M, Otto-Bliesner B L, et al. Climate response to large, high-latitude and low-latitude volcanic eruptions in the Community Climate System Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D15): D15101.
- [9] Robock A. Volcanic eruptions and climate[J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 191–219.
- [10] Evan A T. Atlantic hurricane activity following two major volcanic eruptions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D6): D06101.
- [11] Guevara-Murua A, Hendy E J, Rust A C, et al. Consistent decrease in North Atlantic Tropical Cyclone frequency following major volcanic eruptions in the last three centuries[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(21): 9425–9432.
- [12] Christensen J H, Kanikicharla K K, Aldrian E, et al. Climate phenomena and their relevance for future regional climate change[M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1217–1308.
- [13] 杨桂山, 施雅风. 西北太平洋热带气旋频数的变化及与海表温度的相关研究 [J]. *地理学报*, 1999, 54(1): 22–29.  
Yang Guishan, Shi Yafeng. Changes in the frequencies of tropical cyclones and their relationships to sea surface temperature in the northwestern pacific[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(1): 22–29.
- [14] 李崇银, 穆明权. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常 [J]. *大气科学*, 1999, 23(5): 513–521.  
Li Chongyin, Mu Mingquan. El Niño occurrence and sub-struface ocean temperature anomalies in the pacific warm pool[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 23(5): 513–521.
- [15] Gray W M. Hurricanes: their formation, structure and likely role in the tropical circulation[M]//Shaw D B. *Meteorology Over the Tropical Oceans*. Bracknell: Royal Meteorological Society, 1979: 155–218.
- [16] Matsuura T, Yumoto M, Iizuka S. A mechanism of interdecadal variability of tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 21(2): 105–117.
- [17] 杨亚新. 近 70 年来西北太平洋热带气旋发生源地和频数的气候特征 [J]. *江苏航运职业技术学院学报*, 2023, 22(1): 20–24.  
Yang Yaxin. Climatic characteristics of the source and frequency of tropical cyclones in the Northwest Pacific Ocean over the past 70 years[J]. *Journal of Jiangsu Shipping College*, 2023, 22(1): 20–24.
- [18] 炎利军, 黄先香, 于玉斌, 等. 近 58 年西北太平洋热带气旋频数的气候变化特征 [J]. *气象研究与应用*, 2007, 28(S2): 63–64, 77.  
Yan Lijun, Huang Xianxiang, Yu Yubin, et al. Climate change characteristics of tropical cyclone frequency in the Northwest Pacific Ocean in recent 58 years[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2007, 28(S2): 63–64, 77.
- [19] Gao Chaochao, Robock A, Ammann C. Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: an improved ice core-based index for climate models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D23): D23111.
- [20] Stothers R B. The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath[J]. *Science*, 1984, 224(4654): 1191–1198.
- [21] Crowley T J, Unterman M B. Technical details concerning development of a 1200 yr proxy index for global volcanism[J]. *Earth System Science Data*, 2013, 5(1): 187–197.
- [22] Sato M, Hansen J E, McCormick M P, et al. Stratospheric aerosol optical depths, 1850–1990[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98(D12): 22987–22994.
- [23] Kennedy B. Underestimated volcanic hazard of Santorini[J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17(4): 278–279.
- [24] Michalsky J J, Stokes G M. Mt. St. Helens’ aerosols: some tropospheric and stratospheric effects[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1983, 22(4): 640–648.
- [25] Zhu Yunqian, Bardeen C G, Tilmes S, et al. Perturbations in stratospheric aerosol evolution due to the water-rich plume of the 2022 Hunga-Tonga eruption[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 248.
- [26] Chiacchio M, Pausata F S R, Messori G, et al. On the links between meteorological variables, aerosols, and tropical cyclone frequency in

- individual ocean basins[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(2): 802–822.
- [27] Evangelista H, Castagna A, Correia A, et al. The 1991 explosive Hudson volcanic eruption as a geochronological marker for the Northern Antarctic Peninsula[J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2022, 94(S1): e20210810.
- [28] Knapp K R, Kruk M C, Levinson D H, et al. The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS) unifying tropical cyclone data[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(3): 363–376.
- [29] Knapp K R, Kossin J P. New global tropical cyclone data set from ISCCP B1 geostationary satellite observations[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007, 1(1): 013505.
- [30] Zuo Meng, Man Wenmin, Zhou Tianjun, et al. Different impacts of northern, tropical, and southern volcanic eruptions on the tropical Pacific SST in the last millennium[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(17): 6729–6744.
- [31] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14): 4407.
- [32] Gray W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms[J]. *Monthly Weather Review*, 1968, 96(10): 669–700.
- [33] Vecchi G A, Soden B J. Effect of remote sea surface temperature change on tropical cyclone potential intensity[J]. *Nature*, 2007, 450(7172): 1066–1070.
- [34] Zheng Z W. Unusual warming in the coastal region of northern South China Sea and its impact on the sudden intensification of tropical cyclone Tembin (2012)[J]. *Advances in Meteorology*, 2014, 2014(1): 250752.
- [35] Vincent E M, Lengaigne M, Menkes C E, et al. Interannual variability of the South Pacific Convergence Zone and implications for tropical cyclone genesis[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(9): 1881–1896.
- [36] Holland G J. The maximum potential intensity of tropical cyclones[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54(21): 2519–2541.
- [37] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. *Science*, 2005, 309(5742): 1844–1846.
- [38] Oman L, Robock A, Stenchikov G, et al. Climatic response to high-latitude volcanic eruptions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D13): D13103.
- [39] Wu Zhiyuan, Jiang Changbo, Conde M, et al. The long-term spatiotemporal variability of sea surface temperature in the northwest Pacific and China offshore[J]. *Ocean Science*, 2020, 16(1): 83–97.
- [40] Hegerl G C, Crowley T J, Baum S K, et al. Detection of volcanic, solar and greenhouse gas signals in paleo-reconstructions of Northern Hemispheric temperature[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(5): 1242.
- [41] Robock A, Taylor K E, Stenchikov G L, et al. GCM evaluation of a mechanism for El Niño triggering by the El Chichón ash cloud[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(17): 2369–2372.
- [42] Handler P. Possible association of stratospheric aerosols and El Niño type events[J]. *Geophysical Research Letters*, 1984, 11(11): 1121–1124.
- [43] Stevenson S, Fasullo J T, Otto-Bliesner B L, et al. Role of eruption season in reconciling model and proxy responses to tropical volcanism[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(8): 1822–1826.
- [44] Quinn W H, Neal V T, Antunez De Mayolo S E. El Niño occurrences over the past four and a half centuries[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C13): 14449–14461.
- [45] Guo Yipeng, Tan Zhemin. Westward migration of tropical cyclone rapid-intensification over the Northwestern Pacific during short duration El Niño[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1507.
- [46] Guo Yipeng, Tan Zhemin. Influence of different ENSO types on tropical cyclone rapid intensification over the western North Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(11): e2020JD033059.
- [47] Gergis J L, Fowler A M. A history of ENSO events since A. D. 1525: implications for future climate change[J]. *Climatic Change*, 2009, 92(3): 343–387.
- [48] Emile-Geay J, Seager R, Cane M A, et al. Volcanoes and ENSO over the past millennium[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(13): 3134–3148.
- [49] Camargo S J, Polvani L M. Little evidence of reduced global tropical cyclone activity following recent volcanic eruptions[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2019, 2(1): 14.
- [50] Pausata F S R, Camargo S J. Tropical cyclone activity affected by volcanically induced ITCZ shifts[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(16): 7732–7737.

## Impacts of major volcanic activities on the frequency of Northwest Pacific tropical cyclones from 1900 to 2023

Sun Honggen<sup>1</sup>, Han Yansong<sup>1</sup>, Jiang Wei<sup>1</sup>, Huang Yingxue<sup>1</sup>, Liang Zhenyi<sup>1</sup>, Yu Kefu<sup>1,2</sup>

(1. *Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China*; 2. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China*)

**Abstract:** The stratospheric sulfate aerosol layer formed after large volcanic eruptions can inhibit the formation and development of tropical cyclones. But relevant studies mainly focus on the Atlantic Ocean, and few involve other sea areas. The Northwest Pacific Ocean is the area where most tropical cyclones are generated. Exploring the climate influencing factors is helpful for us to deeply understand the generation and development mechanism of tropical cyclones. Based on the data of tropical cyclones in the Northwest Pacific Ocean recorded in the International Optimum Orbit Database and the China Meteorological Administration database, the changes of sea surface temperature and the number of tropical cyclones in the Northwest Pacific Ocean before and after major volcanic eruptions during 1900–2023 are compared, and the effects of major volcanic eruptions on tropical cyclones in the Northwest Pacific Ocean are discussed. By comparing the number of tropical cyclones two years before the eruption and two years after the eruption, we found that the number of tropical cyclones in the Northwest Pacific decreased significantly after a major eruption. The sea surface temperature significantly responds to low-latitude volcanic eruptions, but does not significantly respond to high-latitude volcanic eruptions. Our study shows that the increase of aerosol forcing after large volcanic eruptions is closely related to the frequency of tropical cyclones, but the decrease of sea surface temperature caused by it may not be the direct cause of the decrease of tropical cyclones, and its mechanism may be related to the migration of the intertropical convergence zone caused by aerosol forcing, which still needs further investigation.

**Key words:** volcanic eruption; tropical cyclone; Northwest Pacific; sea surface temperature; low latitude