



过去2000年北半球不同纬度温度对火山活动的响应

孙炜毅¹, 刘健^{1,2,3*}, 高超超⁴, 陈敏⁵

1. 南京师范大学地理科学学院, 虚拟地理环境教育部重点实验室/江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点/江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;
2. 南京师范大学数学科学学院, 江苏省大规模复杂系统数值模拟重点实验室, 南京 210023;
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋-气候-同位素模拟开放工作室, 青岛 266237;
4. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058;
5. 江苏省测绘工程院, 南京 210013

* 联系人, E-mail: jliu@njnu.edu.cn

2020-08-20 收稿, 2020-11-15 修回, 2020-11-17 接受, 2020-11-23 网络版发表

国家自然科学基金(41971108)、国家重点基础研究发展计划(2016YFA0600401)和江苏省高校优势学科建设项目(164320H116)资助

摘要 火山活动是影响气候变率的重要外强迫因子, 研究火山喷发对气候的影响有助于提高对温度变化的提前预警, 也对未来地球工程计划具有指示意义. 然而, 目前仍不清楚不同纬度的火山喷发影响北半球不同纬度温度变化的特征、敏感性和影响机理. 本研究基于通用地球系统模式完成了涵盖过去2000年的火山活动敏感性试验, 并挑选出大于5 Tg的21个北半球火山(NHV)、31个热带火山(TRV)和18个南半球火山(SHV)喷发事件, 分别探究了这三类火山喷发对北半球低、中和高纬度温度变化的影响. 研究发现: TRV的总喷发强度是NHV和SHV的1.9和3.3倍, 喷发后对各纬度的降温影响最强. 然而, 换算为相同喷发强度下, 在火山喷发后第1~24月, TRV和NHV对北半球低纬度降温效率相近(约 $-1^{\circ}\text{C}/100\text{ Tg}$), 而SHV贡献相对较弱; NHV对北半球中、高纬度降温效率最强(-1.9 和 $-2.3^{\circ}\text{C}/100\text{ Tg}$), 约是TRV的2倍, 而SHV则没有显著影响. 具体的影响机理是: 不同纬度的火山喷发均通过阻挡大气顶层短波辐射的直接作用造成北半球低、中纬度的降温. 在高纬度地区, NHV和TRV在第1~24月通过减弱短波辐射造成地表降温, 引起海冰扩张, 从而触发海冰-反照率正反馈机制加强夏、秋季降温; 而在第25~48月火山气溶胶大量衰退, 高纬度降温则来自于中高纬度海洋向北热输送的减少这一间接作用使海冰-反照率机制得以维持的影响, 且海洋向北热输送的减弱对NHV更为敏感, 约为TRV的2倍.

关键词 火山活动, 地球系统模式, 温度变化, 敏感性, 影响机理

随着全球持续变暖, 北半球极端气候事件发生更加频繁, 尤其是高温热浪事件在欧洲、中国和北美洲等区域频繁出现^[1-3], 而影响热浪事件的首要因素就是地表平均温度的增加. 同时, 北半球不同纬度的增温幅度并不相同, 在高纬地区增温甚至达到了全球平均增温的两倍以上^[4], 从而加速格陵兰冰盖融化. 自然外强迫(火山活动、太阳辐射等)是引起气候波动的重要因

素^[4]. 火山喷发使 SO_2 达到平流层, 与 H_2O 发生化学反应形成硫酸盐气溶胶, 再通过阻挡太阳辐射导致地表气温降低^[5]. 20世纪最强的火山喷发(Pinatubo)发生在1991年, 在喷发后的第一个夏季全球地表温度降低了约 0.6°C ^[6]; 1815年Tambora火山喷发后, 北半球中高纬度地区夏季温度显著降低, 被称为“无夏至年”^[7]. 因此, 研究火山喷发对北半球温度的影响对应当前全球变

引用格式: 孙炜毅, 刘健, 高超超, 等. 过去2000年北半球不同纬度温度对火山活动的响应. 科学通报, 2021, 66: 3194-3204

Sun W Y, Liu J, Gao C C, et al. Response of temperature in different latitudes of the Northern Hemisphere to volcanic eruptions during the past 2000 years (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3194-3204, doi: [10.1360/TB-2020-1045](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1045)

暖有着重要的科学意义,同时可为未来火山喷发后北半球温度的预测及地球工程计划的实施提供借鉴,对北半球各国防灾减灾具有重要的现实意义。

在过去2000年中,火山喷发量级超过1991年Pinatubo火山发生的次数,为27次^[8]。同时,喷发的地点不仅局限于热带地区,也包含了北半球火山喷发^[9]及南半球火山喷发事件^[10],而仅通过器测资料来分析火山喷发对北半球温度的影响机理,会忽略量级大的火山及南、北半球火山喷发的作用。幸运的是,在过去2000年中有大量气候代用指标,研究人员通过历史文献、树轮、石笋、冰芯和湖泊沉积等方式重建出北半球地表温度^[11~13]。D'Arrigo等人^[14]对比过去400年重建的火山序列及热带、北半球高纬度温度重建资料发现,强热带火山喷发显著影响了热带降温及海气相互作用,且对高纬度地区降温作用很强,约有4~6年的持续降温;而高纬度火山喷发对热带温度变化影响较弱,主要导致高纬度地区降温。Sigl等人^[8]研究了过去2500年最强的19次热带火山和5次北半球火山,并对比欧洲地区温度重建序列发现,两类火山都能导致欧洲的显著降温。

上述重建结果在很大程度上帮助我们更好地理解大火山事件下北半球温度的变化情况,然而还存在以下问题:目前涵盖过去2000年时段的北半球温度重建资料的时间分辨率以年、十年甚至更粗的分辨率为主,难以逐月观察温度变化情况^[12,13,15];大部分重建资料集中在过去1000年以来,且主要集中在分布在北美洲西部、中国、格林兰岛、欧洲等区域^[16~22],在北半球其他地区分布非常稀疏,这使得研究结果局限于区域化;此外,重建结果主要为温度资料,近期美国国家海洋和大气管理局(NOAA)利用数据同化的方法开展了过去千年再分析(Last Millennium Reanalysis, LMR)资料计划^[23,24],生成了年分辨率的海平面气压、位势高度、海温等变量,但目前依旧无法生成大气环流、辐射通量、海冰等变量,资料的不足使得我们难以充分理解火山爆发对温度的影响机理。

近期,借助气候模拟资料围绕不同纬度火山喷发对气候影响的工作有了较多进展。在模拟的热带火山喷发情景下,全球季风区降水会受到抑制^[25],北半球火山喷发则会抑制北半球季风降水^[25,26],使热带辐合带(intertropical convergence zone, ITCZ)向南推移^[27],并加强南半球季风降水,而南半球火山喷发的影响与北半球火山正好相反^[28]。同时,热带火山和北半球火山喷发会提高厄尔尼诺出现的几率^[29~32],而南半球火山对

厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)没有明显的影响^[29,32]。然而,这些模拟工作主要关注的是不同纬度火山对热带气候变率(季风、ENSO、ITCZ)的影响,缺乏对北半球不同纬度带温度影响的研究。也有一些工作分析了少数特大火山对极地地区冰盖变化的影响^[33,34],认为经向热输送起到关键的作用,但仍不清楚高纬度温度变化对不同纬度、不同强度火山喷发响应的敏感性及机理过程。上述研究大多基于通用地球系统模式(Community Earth System Model, CESM)的过去千年集成试验(CESM-LME)^[35]、古气候模拟比较计划3(PMIP3)^[36]等试验结果,仅考虑过去1000或1500年以来的火山事件,而对第1~500年火山活动的模拟仍是空白。为此,我们基于CESM开展含有更多不同纬度、不同强度火山喷发事件的过去2000年火山活动敏感性试验,来全面探究不同纬度火山喷发对北半球低、中、高纬度地区温度变化的影响及机理。

1 模拟试验设计与重建资料

1.1 模式介绍

本研究所选用的模式为CESM1,该模式是IPCC第五次和第六次评估报告中采用的主要模式之一,先前的许多工作验证了该模式对北半球温度模拟的可靠性^[37~39]。由于长时间积分试验需要消耗大量计算资源、占用大量内存,因此选择了CESM低分辨率版本,大气模式(CAM4)的分辨率为T31,约为 $3.75^{\circ} \times 3.75^{\circ}$,包含26个垂直分层。而海洋模式(POP2)经度和纬度分别有100和116个网格点,包含60个垂直分层。

1.2 模拟试验设计与火山强迫资料构建

控制试验的设计参数参考耦合模式比较计划5/6(CMIP5/6)及PMIP3/4^[36],将边界条件及外强迫固定在1850年。先前的工作分析了控制试验的大气层顶层能量趋势变化^[37],在试验积分的第1~300年,大气层顶层能量没有达到平衡,之后很快达到平衡。我们在第401年开始继续运行至第2400年,将后2000年结果作为控制试验结果。前期工作已将控制试验模拟的全球地表温度和降水的气候态与观测/再分析资料进行对比,验证了控制试验模拟结果的合理性^[37]。

当前用于驱动模式的火山强迫资料时间长度最长达到过去1500年(IVI2)^[10],而Sigl等人^[8]最新重建的火山序列包含了公元1~500年。我们采用与构建IVI2强迫

资料相同的参数化方法^[10], 利用平流层气溶胶传输参数化方案^[40]计算水平方向上平流层低层气溶胶的纬度分布和时间变化, 同时根据雷达观测到的1991年Pinatubo火山喷发后气溶胶的垂直分布, 假设每次历史时期火山气溶胶的垂直分布与Pinatubo火山相同并对历史时期火山气溶胶进行了垂直方向的插值^[10]. 利用上述方法我们将Sigl等人^[8]的第1~500年火山序列进行了时空拓展, 再与IVI2的第501~2000年进行拼接, 得到了过去2000年火山强迫资料(图1), 而在第495~510年之间没有火山喷发, 并且对第1~500和第501~2000年火山序列的时空拓展方法相同, 因此可以保持火山强迫资料在时间上的连续性. 考虑以控制试验达到积分平衡状态的最后一年作为初始场进行积分, 然后在新构建的过去2000年随时间变化的火山活动强迫下积分运行2000年, 得到一个过去2000年火山活动试验. 前期开展了基于Gao等人^[10]重建方法重建的火山外强迫对气候影响的模拟研究工作, 验证了CESM模拟的历史时期火山喷发对全球温度^[39]、全球季风^[25]、ENSO^[29-31]变化影响的合理性.

由于重建资料很难反映火山喷发所在季节, 因此大部分火山假定在春季喷发^[10], 研究中只选择春季(3~6月)喷发的火山事件. 根据火山气溶胶的经向分布, 将火山划分为北半球火山(NHV)、南半球火山(SHV)和热带火山(TRV). 为了辨识火山的气候效应, 挑选出强度大于5 Tg的强火山事件, 最终得到过去2000年强火山喷发的总次数为70次, 分别是北半球火山21次、南半球火山18次和热带火山31次. 三类火山在喷发当年平流层气溶胶开始增多并向极地扩散, 之后停留在极地平流层的平均气溶胶含量不超过25 kg/km². 热带火山的平均强度为43.53 Tg, 分别是北半球和南半球火山的约1.9和3.3倍.

1.3 气候重建与同化资料

本研究收集了全球变化计划中过去2000年时段的重建资料^[12](PAGES 2k). 为了对比火山喷发后北半球不同纬度地表温度的变化, 重建资料的时间分辨率必须达到年分辨率, 集成的1~2000年北极地区年平均重建资料可以用来反映高纬度温度变化(60°~90°N). 而在中纬度地区重建资料集中分布在亚洲和北美洲, 集成的亚洲年平均温度重建资料包含时段800~1989年, 基于亚洲重建资料可以表示一部分中纬度温度变化信号, 而北美洲温度集成资料的时间分辨率在10年以上^[12].

为此, 收集了NOAA基于数据同化方法得到的同化资料LMR^[23,24], 利用LMR地表温度资料在火山喷发后的中纬度(30°~60°N)平均结果来分析中纬度温度变化. 重建资料的三类火山年划分上参考前期工作^[29,30], 用最新的Sigl等人^[8]重建的火山序列作为依据, 选出过去2000年中最强的北半球火山21次、南半球火山18次和热带火山31次. 这是因为Gao等人^[10]重建的火山强迫在某些中小强度火山定年上存在一定的偏差^[8]. 在热带地区, 地表温度的重建资料相对于中高纬度来说非常稀疏且时间长度很短, 大部分都不足400年, 因此, 在该地区引用了由D'Arrigo等人^[14]重建的过去400年热带地区温度变化资料.

2 结果

2.1 三类火山喷发后北半球不同纬度温度逐月变化

图2为重建和同化资料反映的火山喷发后1~4年及模拟的第1~48月北半球不同纬度平均地表温度变化. 模拟的TRV造成第1~48月的北半球低纬平均温度变化为-0.33°C(图2(d)), 大于D'Arrigo等人^[14]基于重建资料发现的-0.17°C, 这可能与他们收集的重建资料大多位于热带海岸线地区接近海表温度以及选择的火山事件强度偏弱有关. 模拟的SHV降温影响最弱, 仅在喷发当年出现降温, TRV、NHV和SHV对北半球低纬度地区的降温效率(每100 Tg火山气溶胶总量下第1~24月的平均温度变化)分别为-1.0、-0.9和-0.7°C/100 Tg(图3(a)), TRV降温效率相对较高但三者效率差异不大.

在北半球中纬度地区, 亚洲温度重建资料显示TRV引起的1~4年降温幅度最强, 达到约-0.17°C(图2(a)), 而NHV的降温幅度不足TRV的一半, 同化资料反映的三类火山影响中纬度降温幅度均比重建的亚洲温度要弱(图2(b)), 但TRV依然有着最明显的降温幅度. 模拟的TRV中纬度地区降温影响也最强(图2(e)), 达到了-0.34°C, 但其高于重建资料和同化资料显示的降温强度, 同时, 模拟结果还高估了NHV对中纬度降温的影响. 模拟的TRV对中纬度地区降温效率为-1.0°C/100 Tg, 明显小于NHV的降温效率-1.9°C/100 Tg(图3(b)). 此外, 模拟的SHV对中纬度降温几乎没有影响, 这与同化资料结果一致, 而亚洲温度重建资料则表现出明显的2~3年降温. 我们发现在Sigl等人^[8]重建的这18次SHV中, 有5次喷发后1~3年出现了新的北半球或热带强火山喷发, 有3次喷发前2~4年存在热带或北半球火

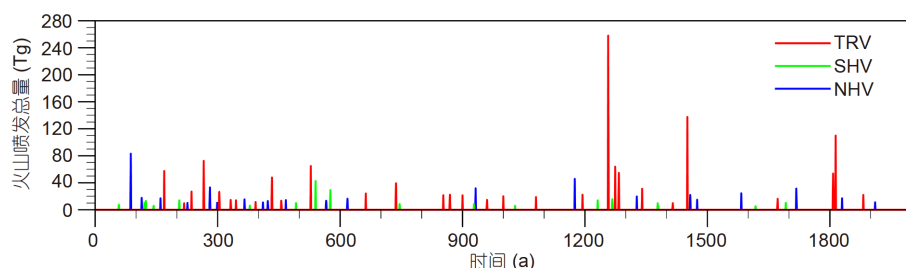


图 1 过去2000年火山气溶胶外强迫序列。火山喷发总量超过5 Tg共有70次, 红色代表31次热带火山(TRV), 蓝色为21次北半球火山(NHV), 绿色为18次南半球火山(SHV)。其中, 1~500年火山强迫来自Sigl等人^[8], 501~2000年火山强迫来自Gao等人^[10]

Figure 1 Volcanic forcing during the last 2000 years. There are 70 volcanic eruption events with the amount exceeding 5 Tg. Red lines represent 31 TRV, blue lines denote 21 NHV, and green lines denote 18 SHV. The volcanic forcing in 1–500 years comes from Sigl et al.^[8], while it in 501–2000 years comes from Gao et al.^[10]

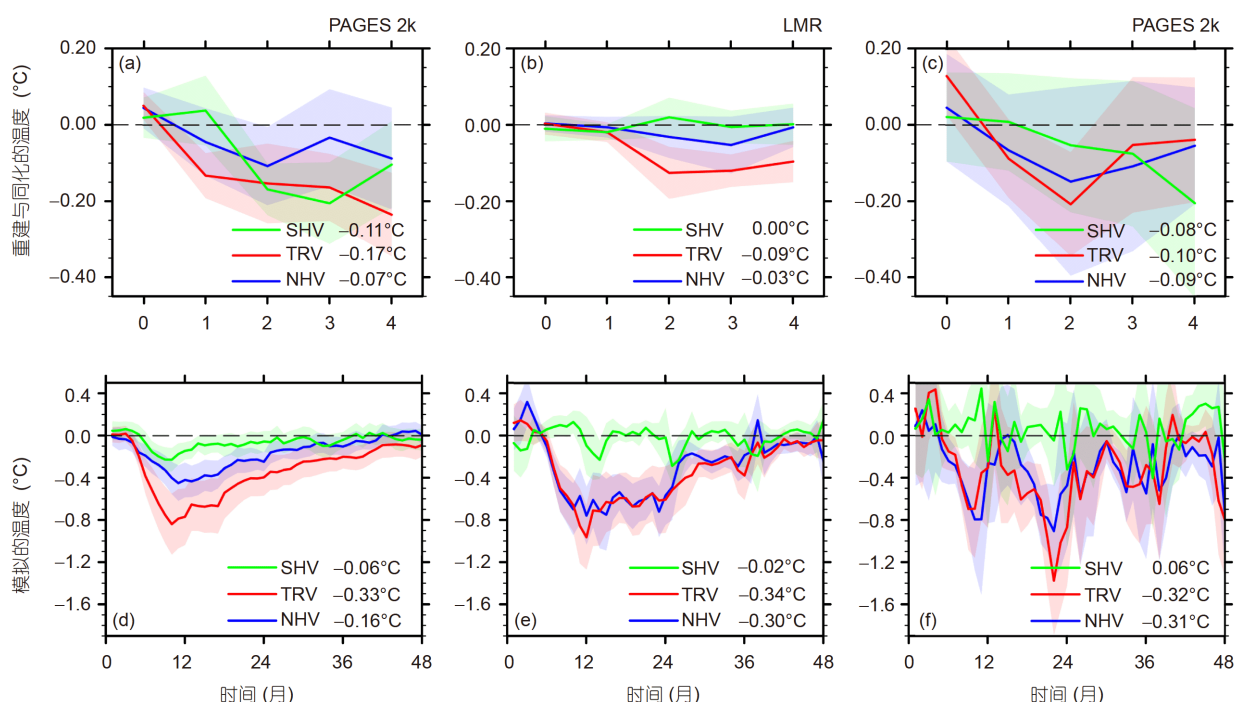


图 2 过去2000年三类火山喷发后北半球不同纬度的地表温度变化。亚洲(a)、北半球中纬度(30°~60°N)(b)、北半球高纬度(60°~90°N)(c)温度变化, “1”代表火山喷发当年。(a), (c) PAGES 2k重建资料^[12]; (b) 同化资料^[23,24]。(a)~(c)中三类火山年份根据Sigl等人^[8]重建的火山序列划分。模拟的火山喷发后1~48月北半球低纬度地区(0°~30°N)(d)、中纬度(e)和高纬度(f)地区平均地表温度逐月变化(相对于火山喷发前15年逐月平均), 阴影为95%置信区间(2倍标准误差)。红色代表热带火山喷发结果, 蓝色为北半球火山喷发结果, 绿色为南半球火山喷发结果, 右下角温度变化值为1~48月的平均变化

Figure 2 Anomalies of surface temperature at different latitudes in the Northern Hemisphere after three types of volcanic eruptions during the past 2000 years. The monthly temperature anomalies over Asia (a), mid latitudes (30°–60°N) (b), and high latitudes (60°–90°N) (c), respectively. Year 1 denotes the eruption year. (a), (c) The results from PAGES 2k^[12]; (b) the results from LMR^[23,24]. Three types of volcanoes in (a–c) are divided according to the volcanic reconstruction by Sigl et al.^[8]. The monthly temperature anomalies over the low latitudes (0°–30°N) (d), mid latitudes (e), and high latitudes (f) in the Northern Hemisphere, respectively (relative to the average of 15 years before the eruption). Shadings represent the 95% confidence level (twice the standard error of the mean). Red, blue, and green lines represent the results from TRV, NHV, and SHV, respectively. The temperature change in the lower right corner is the average change from 1 to 48 months

山喷发, 因此, 重建资料反映的降温(图2(a))可能会受到连续火山喷发的叠加效应所影响。

重建资料显示, TRV和NHV喷发后1~4年造成北极

地区温度下降约–0.10和–0.09°C, 两者引起的降温幅度相当(图2(c))。模拟的TRV和NHV造成高纬度第1~48月的平均降温分别为–0.32和–0.31°C, 且两者降温强度也

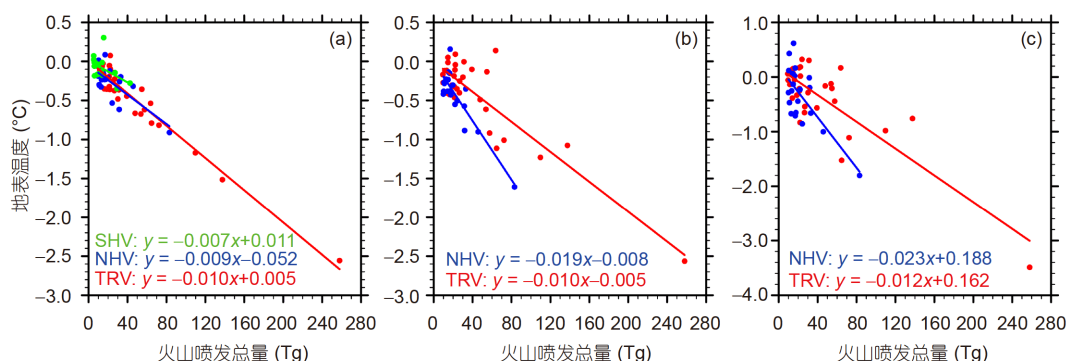


图3 过去2000年三类火山喷发后北半球不同纬度的1~24月平均地表温度变化与喷发强度的回归分析。(a~c)分别代表北半球低纬度(a)、中纬度(b)和高纬度(c)地区。红色代表热带火山喷发结果,蓝色为北半球火山喷发结果,绿色为南半球火山喷发结果。南半球火山喷发仅对低纬度温度变化有影响,因此在(b)和(c)中不显示南半球火山。回归分析拟合度均达到95%置信度

Figure 3 Regression analysis of mean surface temperature change and eruption intensity in Northern Hemisphere from 1 to 24 months after three types of volcanic eruptions in the past 2000. The results over the low latitudes (a), mid latitudes (b), and high latitudes (c) in the Northern Hemisphere. Red, blue, and green lines represent the results from TRV, NHV, and SHV, respectively. The SHV only affects the temperature variation in low latitudes, so the SHV is not shown in (b) and (c). The fitting degrees of regression analysis reach 95% confidence

相当(图2(f)),其强度大于重建的北极温度变化(图2(c)),但小于Sigl等人^[8]通过欧洲树轮资料反演的温度变化 -0.43 和 -0.37°C ,也可能与他们选择的重建资料指示的是夏季温度有关。与北半球低、中纬度温度逐月平缓变化不同,模拟的高纬度地区温度变化的季节性波动很强(图2(f)),TRV和NHV造成的降温主要出现在每年8~12月,而在1~4月则无明显降温,甚至出现了少量增温现象,这与基于观测和重建资料显示的火山喷发后欧洲冬季增暖效应较为一致^[41,42]。模拟的TRV对高纬度地区降温效率为 $-1.2^{\circ}\text{C}/100\text{ Tg}$,稍强于其对中低纬度的降温效率,但明显小于NHV对高纬度地区的降温效率 $-2.3^{\circ}\text{C}/100\text{ Tg}$ (图3(c))。

总体来说,模拟结果与重建/同化资料反映的火山喷发后温度变化情况较为一致,它们都反映了历史时期的强热带火山喷发对中低纬度降温的强度有着最强的影响,而在高纬度地区的强北半球火山引起的降温幅度与强热带火山非常相似。

2.2 不同纬度温度变化的原因

火山喷发的直接作用是通过将硫酸盐气溶胶注入平流层,从而减少太阳短波辐射到达地球表面,引起温度降低^[5]。因此,首先比较地表温度与大气顶层净短波辐射(FSNTOA)在三类火山喷发后的变化关系(图4)。NHV、TRV和SHV情景下低纬度地区FSNTOA在喷发当年秋季末达到最强,之后迅速减弱,温度的变化与之相似,且在三类火山影响下第1~48月北半球低纬度的

平均温度和FSNTOA逐月时间相关系数分别为0.51、0.65和0.71,均达到95%置信度。在中纬度地区,SHV喷发后由于气溶胶不再向中高纬扩散,因此FSNTOA与温度一样无明显变化,而在NHV和TRV影响下,FSNTOA和温度的变化依然非常同步,时间相关系数为0.76和0.68,均达到95%置信度。这说明在北半球中、低纬度,火山喷发后火山的直接作用——气溶胶阻挡短波辐射的机制主导了当地温度的逐月变化。

在NHV和TRV喷发当年,高纬度地区降温的出现要比热带地区晚1~2月,FSNTOA仅在夏季减少,且幅度比中低纬度弱很多,但是最大降温的幅度甚至强于中低纬度。通过同期相关分析发现,高纬度区域平均的温度和FSNTOA的相关系数为0.23和0.22,均不显著,尤其在第25~48月相关系数为 -0.09 和 -0.02 。而通过第1~24月FSNTOA超前温度2个月的相关分析发现,两者相关系数达到了0.81和0.69(达到95%置信度),但在第25~48月的超前相关系数为0.14和0.10,依然不显著。这意味着在NHV和TRV喷发当年至第一年,北半球高纬度温度降温滞后于大气顶层短波辐射变化2个月,但在第25~48月,降温并不受短波辐射影响。

通过比较高纬度地区海冰扩张面积(sea ice extent, SIE)变化发现, NHV和TRV喷发后高纬度SIE均出现了扩张(图5(a)),扩张季节出现在夏、秋季,与Zanchettin等人^[34]的研究结果一致。而高纬度SIE对NHV喷发更为敏感,平均每100 Tg的NHV会造成第1~48月内平均高纬SIE扩张约 $0.66 \times 10^7\text{ km}^2$,明显大于TRV造成的

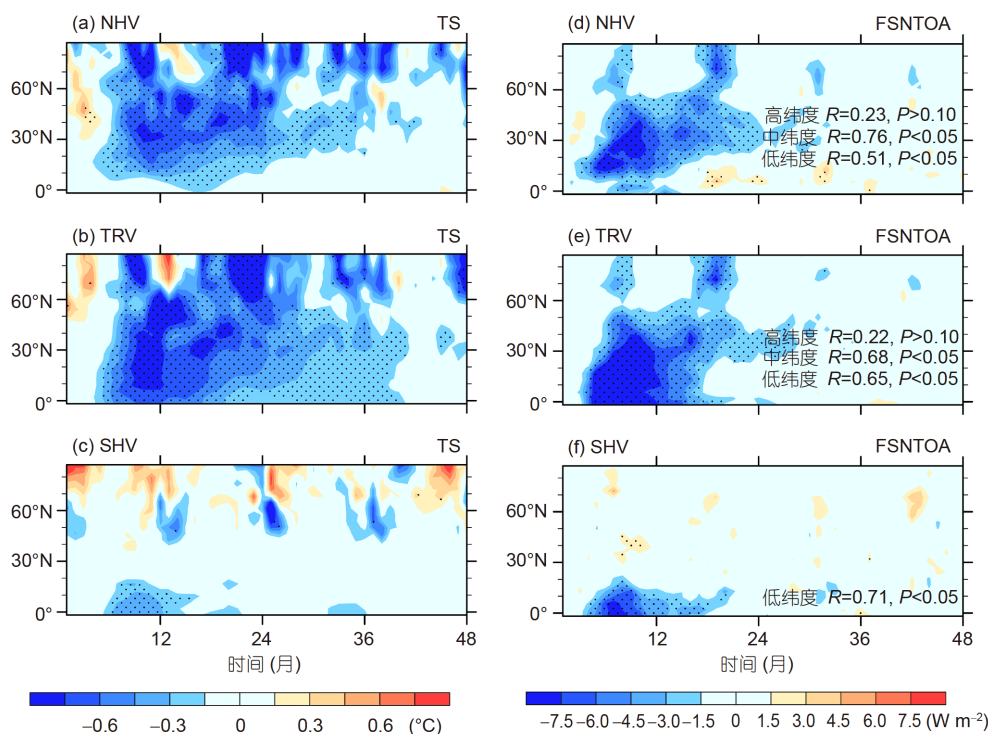


图 4 过去2000年三类火山喷发后北半球地表温度(TS, (a)~(c))与大气顶层净短波辐射(FSNTOA, (d)~(f))的纬度-时间距平演变(相对于火山喷发前15年逐月平均)。 (a), (d) 北半球火山喷发结果; (b), (e) 热带火山喷发结果; (c), (f) 南半球火山喷发结果。 R 为低、中、高纬度平均FSNTOA变化与地表温度变化在1~48月的时间相关系数。打点区域表示结果超过95%置信度(双侧 t 检验)

Figure 4 The latitude-temporal evolution of surface temperature (TS, (a)~(c)) and net shortwave radiation at the top of atmosphere (FSNTOA, (d)~(f)) in the northern hemisphere after three types of volcanic eruptions in the past 2000 (relative to the average of 15 years before the eruption). (a), (d) Results from NHV; (b), (e) results from TRV; (c), (f) results from SHV. R is the time correlation coefficient between the mean anomaly FSNTOA and anomaly TS in low, middle and high latitudes from 1 to 48 months. Dots indicate the results exceeding 95 confidence level (two-tailed Student's t test).

$0.21 \times 10^7 \text{ km}^2$ 的海冰扩张(图5(b))。SIE与高纬度地区温度(图2(f))的逐月相关系数分别为-0.62和-0.51(达到95%置信度), 这意味着NHV和TRV喷发后SIE变化造成了地表温度的变化。

在第1~24月, SIE扩张是由于火山气溶胶阻挡夏季北极地区短波辐射引起温度降低, 减弱夏季海冰融化, 从而加强SIE。这导致了挪威海、巴伦支海、戴维斯海峡和波弗特海地区反照率的增强(图6(a), (c))。同时异常的海冰扩张阻隔了北极地区大气向海洋的热量传输(图6(e), (g)), 减缓了海冰融化并造成地表温度降低^[43]。这引起了海冰-反照率正反馈机制, 加强了夏季和秋季北极地区的海冰扩张。

而在第25~48月, 高纬度SIE依然出现了加强, 但是火山气溶胶在极地大量衰退, 其直接作用不再显著。我们查看了 $50^\circ \sim 70^\circ \text{N}$ 区域的海洋向北热输送(ocean heat transport, OHT)变化情况(图5(c)), 发现在过去2000年TRV喷发当年年末OHT开始出现下降趋势, 在第25~48

月OHT减少明显, 这与先前的针对热带特大火山的模拟研究结果一致^[33,34]。同时还发现这种OHT的减少并不是仅存在于特大热带火山中, 平均每100 Tg的热带火山造成第25~48月平均OHT变化 -0.021 PW (图5(d))。在NHV情景下第24月后OHT才出现明显减弱, 在第25~48月中OHT减少情况与TRV中结果相似, 但NHV影响第25~48月平均OHT变化的敏感性为 $-0.044 \text{ PW}/100 \text{ Tg}$, 明显强于TRV对OHT的影响, 这说明OHT的减弱对北半球火山喷发更为敏感。

平流层中火山气溶胶在第25~48月已大量衰退且对高纬度温度影响不显著。此时, OHT的减弱影响了北极地区温度的持续降低, 进而减弱25~48月夏季和秋季的海冰融化。而异常的海冰扩张导致反照率增强(图6(b), (d)), 进一步地降低地表温度, 同时海冰阻隔了大气向海洋的热量输送(图6(f), (h))。这也会减缓海冰的融化并持续降低地表温度, 而温度的降低会继续引起上述海冰-反照率正反馈机制。需要说明的是, 在第25~48月的

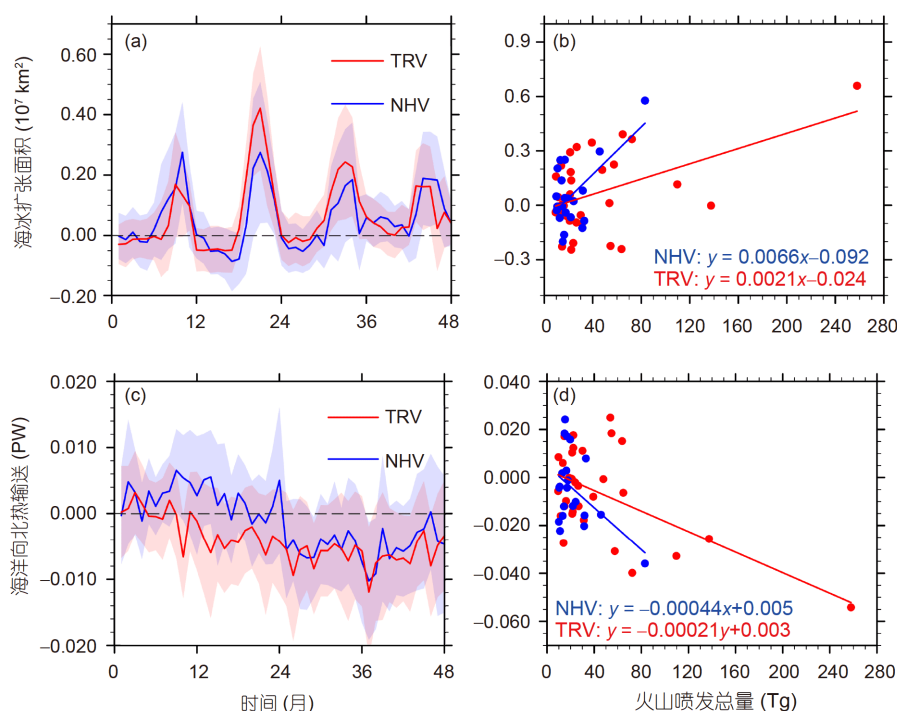


图 5 过去2000年北半球火山和热带火山喷发后高纬地区海冰扩张面积(SIE)和 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 区域平均海洋向北热输送(OHT)变化。(a) 海冰扩张面积变化的时间序列; (b) 1~48月平均海冰扩张面积变化与喷发强度的回归分析; (c) OHT变化的时间序列; (d) 25~48月平均OHT变化与喷发强度的回归分析。红色代表热带火山喷发结果, 蓝色为北半球火山喷发结果, (a)和(c)中阴影为95%置信区间(2倍标准误差), 回归分析拟合度均达到95%置信度

Figure 5 Changes of sea ice extent (SIE) and oceanic northward heat transport (OHT) in the Arctic after NHV and TRV in the past 2000. (a) Time series of SIE change; (b) regression analysis of SIE and eruption intensity from 1 to 48 months; (c) time series of OHT change; (d) regression analysis of OHT and eruption intensity from 25 to 48 months. Red and blue lines represent the results from TRV and NHV, respectively. Shadings in (a) and (c) represent the 95% confidence level (twice the standard error of the mean). The fitting degrees of regression analysis reach 95% confidence

海冰扩张异常、反照率增强和地表净辐射通量降低要弱于第1~24月的强度。这是由于在第25~48月OHT对北极地区夏季降温的贡献要小于第1~24月火山外强迫对北极地区夏季降温的直接作用(图2(f)和4(d), (e))。

3 结论与讨论

本研究利用通用地球系统模式CESM完成了涵盖完整的过去2000年的火山活动敏感性试验, 探讨了大于5 Tg的北半球火山(NHV)、热带火山(TRV)和南半球火山(SHV)爆发后北半球低、中、高纬度地区温度变化特征及成因机制, 主要结论如下。

(1) 过去2000年强度超过5 Tg的火山共有70次, 按不同的喷发纬度可以将它们划分为21次NHV、31次TRV和18次SHV, TRV喷发的火山气溶胶总强度分别是NHV和SHV的1.9和3.3倍, 喷发后对北半球各纬度降温影响最强。

(2) 换算为相同喷发强度下, 火山喷发后第1~24月

TRV和NHV对北半球低纬度降温效率相近(约 $-1^{\circ}\text{C}/100 \text{ Tg}$), SHV贡献相对较弱; NHV对北半球中、高纬度降温效率最强(-1.9 和 $-2.3^{\circ}\text{C}/100 \text{ Tg}$), 约是TRV的2倍, 而SHV则没有显著影响。

(3) 火山喷发通过气溶胶阻挡大气顶层短波辐射的直接作用造成北半球低、中纬度的第1~48月温度变化。在高纬度地区, NHV和TRV在第1~24月通过减弱短波辐射造成地表降温, 从而使海冰扩张, 触发海冰-反照率正反馈机制, 造成夏、秋季降温; 而在第25~48月火山的直接作用大幅减弱, 高纬度降温则来自于中高纬度海洋向北热输送的减少这一间接作用使海冰-反照率机制得以维持, 且NHV造成海洋向北热输送减弱的效率约为TRV的2倍。

目前本研究分析了北半球不同纬度温度变化对3种火山喷发的响应, 但工作还存在以下方面的不足。

(1) 模拟的火山喷发对北半球不同纬度的降温有所高估, 这也是CMIP5/PMIP3大多数模式的共同问

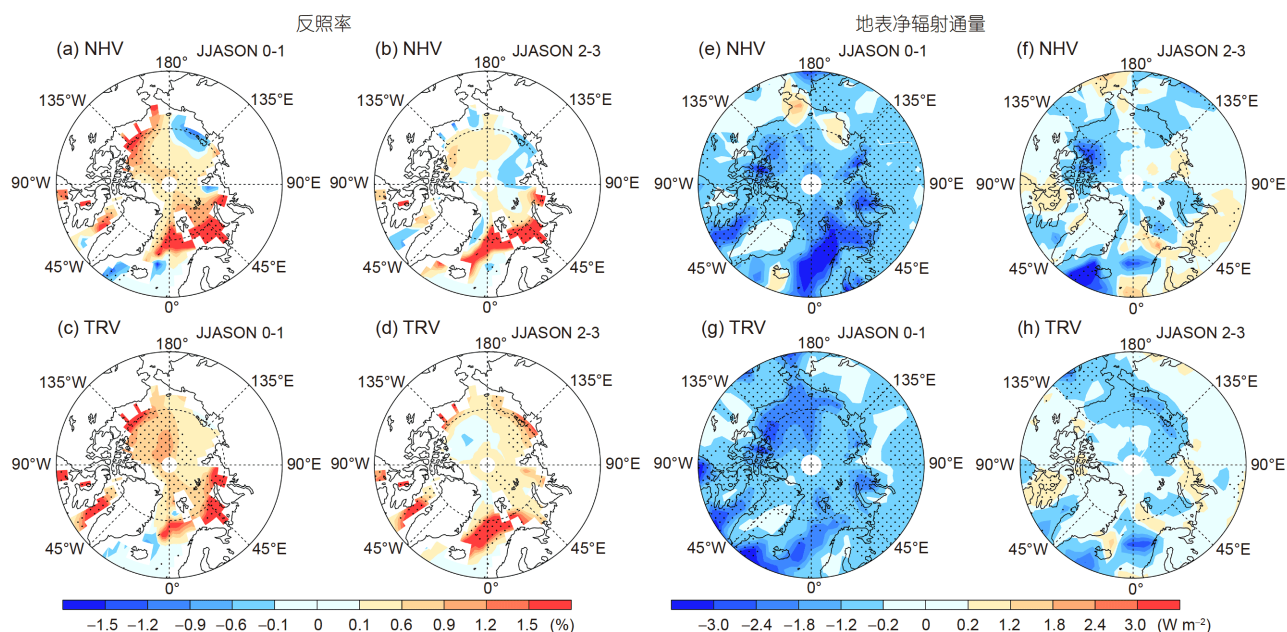


图6 过去2000年北半球火山和热带火山喷发后北极地区反照率(a)~(d)和向下地表净辐射通量(e)~(h)变化。(a) 北半球火山喷发当年和第1年6~11月平均结果;(b) 北半球火山喷发第2和第3年6~11月平均结果;(c) 热带火山喷发当年和第1年6~11月平均结果;(d) 热带火山喷发第2和第3年6~11月平均结果。(e)~(h)与(a)~(d)相似,只不过显示的是向下地表净辐射通量。打点区域表示结果超过95%置信度(双侧 t 检验)

Figure 6 Changes of albedo and downward surface heat flux in the Arctic after NHV and TRV in the past 2000. (a) Averaged results in Jun–Nov of year 0 and 1 after NHV; (b) averaged results in Jun–Nov of year 2 and 3 after NHV; (c) averaged results in Jun–Nov of year 0 and 1 after TRV; (d) averaged results in Jun–Nov of year 2 and 3 after TRV. (e)–(h) Same as (a)–(d), but for the downward surface heat flux. Dots indicate the results exceeding 95 confidence level (two-tailed Student's t test)

题^[44,45]。可能与Gao等人^[10]火山强迫偏强有关,以及缺乏对历史火山喷发的具体位置、季节以及气溶胶注入高度的考虑^[31,46],亦或是模式本身参数化方案的不确定性。

(2) 缺乏分析火山喷发造成的气候系统内部变率的位相变化对温度的反馈作用,但由于本研究火山活动敏感性试验只做了一个,难以判断火山喷发后气候系统内部变率的位相变化。

(3) 机理过程仅是从单模式模拟结果中得出,今后还需要进一步使用PMIP4^[36]多模式结果加以分析火山对气候影响的敏感性,以减小研究结果的不确定性。

尽管本研究结论存在一定的不确定性,但对理解过去2000年火山喷发的对北半球各纬度温度变化的特征、敏感性及成因机制具有一定参考价值,同时有助于今后不同纬度火山喷发对北半球气候变化影响的提前预警,也对未来地球工程计划制定具有指示意义。

参考文献

- Wang J, Chen Y, Tett S F B, et al. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes. *Nat Commun*, 2020, 11: 528
- Zhou C, Chen D, Wang K, et al. Conditional attribution of the 2018 summer extreme heat over northeast China: Roles of urbanization, global warming, and warming-induced circulation changes. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2020, 13: 571–576
- Loughnan M. Heatwaves are silent killers. *Geodate*, 2014, 37: 1–10
- Wang S W. The global warming controversy (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1529–1531 [王绍武. 全球气候变暖的争议. *科学通报*, 2010, 55: 1529–1531]
- Robock A. Volcanic eruptions and climate. *Rev Geophys*, 2000, 38: 191–219
- Man W, Zhou T, Jungclaus J H. Effects of large volcanic eruptions on global summer climate and East Asian monsoon changes during the last millennium: Analysis of MPI-ESM simulations. *J Clim*, 2014, 27: 7394–7409
- Luterbacher J, Pfister C. The year without a summer. *Nat Geosci*, 2015, 8: 246–248

- 8 Sigl M, Winstrup M, McConnell J R, et al. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2500 years. *Nature*, 2015, 523: 543–549
- 9 Schmidt A, Thordarson T, Oman L, et al. Climatic impact of the long-lasting 1783 Laki eruption: Inapplicability of mass-independent sulfur isotopic composition measurements. *J Geophys Res*, 2012, 177: D23116
- 10 Gao C, Robock A, Ammann C. Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based index for climate models. *J Geophys Res*, 2008, 113: D23111
- 11 Ge Q S, Liu J, Fang X Q, et al. General characteristics of temperature change and centennial warm periods during the past 2000 years (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2013, 68: 579–592 [葛全胜, 刘健, 方修琦, 等. 过去2000年冷暖变化的基本特征与主要暖期. *地理学报*, 2013, 68: 579–592]
- 12 PAGES 2k Consortium. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nat Geosci*, 2013, 6: 339–346
- 13 PAGES 2k Consortium. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era. *Sci Data*, 2017, 4: 170088
- 14 D'Arrigo R, Wilson R, Tudhope A. The impact of volcanic forcing on tropical temperatures during the past four centuries. *Nat Geosci*, 2009, 2: 51–56
- 15 Shi F, Yang B, Mairesse A, et al. Northern Hemisphere temperature reconstruction during the last millennium using multiple annual proxies. *Clim Res*, 2013, 56: 231–244
- 16 Ljungqvist F C, Zhang Q, Brattström G, et al. Centennial-scale temperature change in last millennium simulations and proxy-based reconstructions. *J Clim*, 2019, 32: 2441–2482
- 17 Zhang H, Werner J P, García-Bustamante E, et al. East Asian warm season temperature variations over the past two millennia. *Sci Rep*, 2018, 8: 7702
- 18 Luterbacher J, Werner J P, Smerdon J E, et al. European summer temperatures since Roman times. *Environ Res Lett*, 2016, 11: 024001
- 19 Ge Q S, Hua Z, Zheng J Y, et al. Forcing and impacts of warm periods in the past 2000 years (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 1727–1734 [葛全胜, 华中, 郑景云, 等. 过去2000年全球典型暖期的形成机制及其影响. *科学通报*, 2015, 60: 1727–1734]
- 20 Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 383–464
- 21 Ljungqvist F C. Temperature proxy records covering the last two millennia: A tabular and visual overview. *Geogr Ann Ser A-Phys Geogr*, 2009, 91: 11–29
- 22 Ljungqvist F C. A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical northern hemisphere during the last two millennia. *Geogr Ann Ser A-Phys Geogr*, 2010, 92: 339–351
- 23 Tardif R, Hakim G J, Perkins W A, et al. Last Millennium Reanalysis with an expanded proxy database and seasonal proxy modeling. *Clim Past*, 2019, 15: 1251–1273
- 24 Anderson D, Tardif R, Horlick K, et al. Additions to the Last Millennium Reanalysis multi-proxy database. *Data Sci J*, 2019, 18: 1–11
- 25 Liu F, Chai J, Wang B, et al. Global monsoon precipitation responses to large volcanic eruptions. *Sci Rep*, 2016, 6: 24331
- 26 Zuo M, Zhou T, Man W. Hydroclimate responses over global monsoon regions following volcanic eruptions at different latitudes. *J Clim*, 2019, 32: 4367–4385
- 27 Colose C M, LeGrande A N, Vuille M. Hemispherically asymmetric volcanic forcing of tropical hydroclimate during the last millennium. *Earth Syst Dynam*, 2016, 7: 681–696
- 28 Fasullo J, Otto-Bliesner B, Stevenson S. The influence of volcanic aerosol meridional structure on monsoon responses over the Last Millennium. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 12350–12359
- 29 Liu F, Li J, Wang B, et al. Divergent El Niño responses to volcanic eruptions at different latitudes over the past millennium. *Clim Dyn*, 2017, 50: 3799–3812
- 30 Sun W, Liu J, Wang B, et al. A “La Niña-like” state occurring in the second year after large tropical volcanic eruptions during the past 1500 years. *Clim Dyn*, 2019, 52: 7495–7509
- 31 Sun W, Wang B, Liu J, et al. How northern high-latitude volcanic eruptions in different seasons affect ENSO. *J Clim*, 2019, 32: 3245–3262
- 32 Stevenson S, Otto-Bliesner B, Fasullo J, et al. “El Niño like” hydroclimate responses to Last Millennium volcanic eruptions. *J Clim*, 2016, 29: 2097–2921
- 33 Slawinska J, Robock A. Impact of volcanic eruptions on decadal to centennial fluctuations of Arctic sea ice extent during the last millennium and on initiation of the Little Ice Age. *J Clim*, 2018, 31: 2145–2167
- 34 Zanchettin D, Bothe O, Timmreck C, et al. Inter-hemispheric asymmetry in the sea-ice response to volcanic forcing simulated by MPI-ESM (COSMOS-Mill). *Earth Syst Dynam*, 2014, 5: 223–242
- 35 Otto-Bliesner B L, Brady E C, Fasullo J, et al. Climate variability and change since 850 CE: An ensemble approach with the Community Earth System Model. *Bull Am Meteorol Soc*, 2016, 97: 735–754
- 36 Jungclaus J, Bard E, Baroni M, et al. The PMIP4 contribution to CMIP6-Part 3: The last millennium, scientific objective, and experimental design for the PMIP4 past 1000 simulations. *Geosci Model Dev*, 2017, 10: 4005–4033

- 37 Wang Z, Li Y, Liu B, et al. Global climate internal variability in a 2000-year control simulation with Community Earth System Model (CESM). *Chin Geogr Sci*, 2015, 25: 263–273
- 38 Wei T, Dong W J, Wu B Y, et al. Influence of recent carbon emissions on the attribution of responsibility for climate change (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 674–680 [魏婷, 董文杰, 武炳义, 等. 近期碳排放趋势对气候变化历史责任归因的影响. 科学通报, 2015, 60: 674–680]
- 39 Liu B, Liu J, Wang Z Y. Inter-hemispheric comparison of characteristics and causes of climate change during the Medieval Warm Period based on CESM simulation (in Chinese). *Geogr Res*, 2016, 35: 1659–1671 [刘斌, 刘健, 王志远. 中世纪暖期南北半球气候变化特征与成因的模拟对比. 地理研究, 2016, 35: 1659–1671]
- 40 Grieser J, Schonwiese C. Parameterization of spatiotemporal patterns of volcanic aerosol induced stratospheric optical depth and its climate radiative forcing. *Atmosfera*, 1999, 12: 111–133
- 41 Zanchettin D, Timmreck C, Bothe O, et al. Delayed winter warming: A robust decadal response to strong tropical volcanic eruptions? *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 204–209
- 42 Xing C, Liu F, Wang B, et al. Boreal winter surface air temperature responses to large tropical volcanic eruptions in CMIP5 Models. *J Clim*, 2020, 33: 2407–2426
- 43 Deser C, Tomas R, Alexander M, et al. The seasonal atmospheric response to projected Arctic sea ice loss in the late twenty-first century. *J Clim*, 2010, 23: 333–351
- 44 Zanchettin D, Khodri M, Timmreck C, et al. The Model Intercomparison Project on the climatic response to Volcanic forcing (VolMIP): Experimental design and forcing input data for CMIP6. *Geosci Model Dev*, 2016, 9: 2701–2719
- 45 Marotzke J, Forster P M. Forcing, feedback and internal variability in global temperature trends. *Nature*, 2015, 517: 565–570
- 46 Toohey M, Krüger K, Schmidt H, et al. Disproportionately strong climate forcing from extratropical explosive volcanic eruptions. *Nat Geosci*, 2019, 12: 100–107

Summary for “过去2000年北半球不同纬度温度对火山活动的响应”

Response of temperature in different latitudes of the Northern Hemisphere to volcanic eruptions during the past 2000 years

Weiyi Sun¹, Jian Liu^{1,2,3*}, Chaochao Gao⁴ & Min Chen⁵

¹ Key Laboratory for Virtual Geographic Environment, Ministry of Education; State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution of Jiangsu Province; Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application; School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

² Jiangsu Provincial Key Laboratory for Numerical Simulation of Large Scale Complex Systems, School of Mathematical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

³ Open Studio for the Simulation of Ocean-Climate-Isotope, National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;

⁴ College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

⁵ Jiangsu Provincial Surveying and Mapping Engineering Institute, Nanjing 210013, China

* Corresponding author, E-mail: jliu@njnu.edu.cn

Volcanic activity is an important external forcing affecting climate variability. The largest volcanic eruption to have occurred during the last 100 years was the Pinatubo eruption in 1991, which caused a drop in the global mean surface temperature by 0.5°C. Some proxies suggest that a particularly cold summer occurred in Europe and North America one year after the Tambora eruption in 1815. This period has often been referred to as the “year without a summer”, which resulted in agricultural failure and consequent famine. However, it is estimated that volcanic eruptions at strengths exceeding that of the 1991 Pinatubo eruption have occurred on 27 occasions during the last 2000 years. While reconstructed temperature data provide an important basis for the empiric study of the climate effect of volcanic eruptions, they have an irregular spatial distribution and do not reveal the mechanisms behind the effects. Recent modeling results have focused on the impact of super-strong volcanic eruptions over the last millennium on the Arctic region, but it is still unclear about the characteristics, sensitivity, and mechanism of volcanic eruptions affecting the monthly temperature changes across different latitudes of the Northern Hemisphere (NH) during the past 2000 years.

This study conducted a volcanic experiment over the past 2000 years. Volcanic forcing during 501–2000 A.D. was based on the Ice-core Volcanic Index 2. Stratospheric transport parameterization was used to produce the spatiotemporal distribution of monthly mean volcanic forcing during 1–500 A.D. The study assumed that the vertical distribution of volcanic aerosols in each historical eruption event was the same as that of the Pinatubo eruption, and was set according to the vertical distribution of volcanic aerosols observed by radar during the Pinatubo eruption in 1991. Most of the volcanic eruptions occurred in spring (March to June) since the reconstructed data had insufficient resolution to reflect the season of an eruption. The 2000-year volcanic forcing for the volcanic experiment was generated by splicing the two periods of volcanic forcing. NH volcanoes (NHV), tropical volcanoes (TRV) and Southern Hemisphere volcanoes (SHV) numbering 21, 31, and 18, respectively were chosen based on the meridional distribution of volcanic aerosols, and their effects on temperature changes in the NH at low, mid, and high latitudes were investigated.

The average TRV intensity was approximately 1.9 times and 3.3 times those of NHV and SHV, respectively, and TRV had the strongest cooling effect at all latitudes. However, when considering the same intensity of volcanic eruption, TRV and NHV showed similar cooling efficiencies at low latitudes in the NH, whereas the contribution of SHV was relatively weak. Cooling over mid and high latitudes of the NH was about twice as sensitive to NHV compared to TRV, whereas SHV had no significant effect. Volcanic eruptions directly resulted in cooling over the low and mid latitudes by the blocking of shortwave radiation at the top of atmosphere by volcanic aerosols. NHV and TRV resulted in sea ice expansion in the Arctic region by reducing shortwave radiation during months 1–24, thereby inducing the sea ice albedo positive feedback mechanism, which resulted in summer and autumn cooling. Volcanic aerosols were largely reduced during months 25–48. Cooling of the Arctic resulted from a decline in northward ocean heat transport over the mid and high latitudes, which maintained the sea ice albedo feedback mechanism. The reduction in ocean heat transport was twice as sensitive to NHV than to TRV under the same volcanic intensity.

The results of this study can be used as a reference for the prediction of climate change in the NH after volcanic eruptions and future geoengineering projects. This study also has important practical significance for disaster prevention and mitigation.

volcanic activity, Community Earth System Model, temperature changes, sensitivity, mechanism

doi: [10.1360/TB-2020-1045](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1045)