

WANG Wei, WANG Jiqin, JI Kaijun, CHENG Xuewu, LIN Xin, YANG Yong, LI Faquan. Detection of Tonga Volcanic Ash Using Middle and Upper Atmospheric Lidar (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(3): 729–735. CSTR:32142.14.cjss.2024-0046. DOI:10.11728/cjss2025.03.2024-0046

基于中高层大气激光雷达的汤加火山灰探测*

汪 为¹ 王积勤^{1,2} 季凯俊^{1,2} 程学武¹
林 鑫¹ 杨 勇¹ 李发泉¹

1(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 波谱与原子分子物理国家重点实验室 武汉 430071)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 采用中高层大气激光雷达在武汉 (30.5°N, 114.3°E) 上空对汤加火山灰进行探测, 分析汤加火山灰 2022 年 3 月至 7 月在武汉上空传播时的强度变化, 并对火山灰的埃指数进行了分析. 研究发现, 在 2022 年 3 月 8 日至 2022 年 4 月 7 日期间, 探测到的火山灰信号相对较弱, 从 2022 年 4 月 10 日开始, 探测到的火山灰回波信号强度突然增强, 并且该信号在随后的几个月中持续稳定维持在海拔 20~25 km 之间. 这一现象表明, 火山灰的传播在这段时间内发生了明显变化, 可能与大气的流动特征密切相关. 通过对所探测的火山灰高度进行分析, 发现火山灰在平流层中的传播呈现不均匀的层状结构, 显示火山灰在不同高度和层次之间的分布差异, 为进一步研究火山灰在大气中的传播机制和对环境的影响提供了重要的依据. 此外, 根据所获得的激光雷达数据分析结果可知, 在 2022 年 4—7 月, 探测到的火山灰高度与火山灰颗粒尺寸的相关性较弱, 这表明火山灰颗粒的运动和沉降行为可能受到多种复杂因素的影响.

关键词 激光雷达, 汤加火山灰, 气溶胶, 大气观测

中图分类号 P412.2

Detection of Tonga Volcanic Ash Using Middle and Upper Atmospheric Lidar

WANG Wei¹ WANG Jiqin^{1,2} JI Kaijun^{1,2} CHENG Xuewu¹
LIN Xin¹ YANG Yong¹ LI Faquan¹

1(State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract This study presents the first report of detecting Tonga volcanic ash over Wuhan (30.5°N, 114.3°E) using a middle and upper atmospheric lidar system. The research analyzes the intensity variations of Tonga volcanic ash as it spread over Wuhan from March to July 2022, and also examines the

* 国家自然科学基金项目 (42305152) 和科技部重点研发计划项目 (2022YFC2807201) 共同资助

2024-03-23 收到原稿, 2024-05-24 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

volcanic ash's Ångström exponent. The findings reveal that from 8 March to 7 April 2022, the detected volcanic ash signals were relatively weak. However, starting on 10 April 2022, the lidar detected a sudden increase in the strength of the volcanic ash return signals, which remained consistently strong between altitudes of 20~25 km over the following months. This phenomenon suggests a significant change in the volcanic ash's propagation during this period, which may be closely related to atmospheric flow patterns. Further analysis of the detected volcanic ash heights revealed an uneven, layered structure in the stratosphere, indicating a distinct distribution of volcanic ash at different altitudes. This provides important insights into the mechanisms of volcanic ash propagation in the atmosphere and its environmental impact. Additionally, the lidar data analysis from April to July 2022 shows a weak correlation between the detected volcanic ash altitude and the particle size. This suggests that the movement and settling behavior of volcanic ash particles are likely influenced by various complex factors, rather than being governed solely by their size.

Key words Lidar, Tonga volcanic ash, Aerosol, Atmospheric observation

0 引言

2022年1月,汤加火山喷发对该地区及其周边地区产生了重大影响。喷发释放的灰烟和气体柱状物进入大气层,高度达到了58 km^[1-3]。此外,此次喷发引发的地震震级为5.8级,导致汤加群岛遭受广泛破坏。火山喷发还引发了一场海啸,席卷沿岸地区,对房屋和基础设施造成重大破坏^[4-6]。汤加火山喷发期间释放的火山灰和气体可能以多种方式影响全球动力学和化学过程。其中一个效应是二氧化硫(SO₂)气溶胶的形成,这种气溶胶能够将太阳光反射至地球外层空间,导致地球表面温度降低的冷却效应。1991年菲律宾皮纳图博火山爆发导致地球平均表面温度降低了0.4 K^[7]。这场自然灾害的深远影响引起人们对其对全球气候、空气质量和海洋生态系统可能造成的后果的担忧。

Salikhov等^[1]研究了汤加洪加火山爆发后大气压力、大地电流和电离层信号多普勒频移的变化。通过对探测的兰姆波的参量计算,研究发现汤加洪加火山爆发时向大气中转移的能量约估计为2000 Mt TNT当量。Pradipta等^[2]分析了汤加火山爆发对电离层扰动的影响,研究发现电离层扰动具有方位各向异性的速度剖面,近场电离层扰动的速度剖面与汤加海啸非常相似,表明水波与大气波之间存在耦合。在远场,扰动以接近300 m·s⁻¹的速度传播,绕地球至少3天。Madonia等^[8]采集了地中海上空电离层的数据,证实了电离层扰动的存在及其与对流层扰动的密切关系。Taha等^[9]研究发现,在汤加火山爆发后的两

周内,大部分注入的物质在20~30 km高度内在全球范围内循环,虽然主要的气溶胶层仍被困在热带管道中,但是到2022年4月,小部分气溶胶层已经到达北半球和南半球两极。Solovieva等^[10]对汤加火山爆发后的极低频(VLF)信号的异常变化进行分析,结果表明,VLF信号相位和振幅变化的加剧是由大气兰姆波和火山爆发后传播的海啸穿过无线电路径引起的。此外,Rajesh等^[11]研究发现,在汤加火山爆发产生的扰动和地磁风暴恢复的共同作用下,热层变化产生了罕见的极性膨胀共轭等离子体气泡,该研究还发现火山引起的扰动引发了超级等离子体气泡活动。

尽管目前已经有许多关于电离层扰动^[12]、大气波动^[13-15]、火山灰演变和传输^[9]的研究工作,但是采用中高层大气激光雷达对汤加火山灰在北半球尤其是中国中部地区传播特性的研究尚未见报道。本文基于中高层大气激光雷达在武汉上空对汤加火山灰的探测,分析汤加火山灰在2022年3—7月在武汉上空传播时的强度变化,并对火山灰的颗粒尺寸进行分析。

1 激光雷达系统

研究使用的实验装置如图1所示。Nd:YAG激光器(Continuum, 9030)产生1064 nm激光束,激光束经倍频晶体倍频后,生成532 nm的激光。532 nm激光束的一部分通过1:10的扩束器扩束后垂直射向天空;另一部分用于泵浦染料激光器(NarroScan),以产生589 nm的激光光束。589 nm的激光光束同样通过1:10的光束器扩束后,垂直指向天空。532 nm和

589 nm 脉冲激光光束的能量分别约为 200 mJ 和 30 mJ. 激光光束的发散角均约为 0.5 mrad, 重复频率为 30 Hz. 此外, 使用口径为 1000 mm、焦距为 2100 mm 的望远镜对回波信号进行采集, 望远镜的视场角约为 1 mrad. 为实现单台望远镜对这两种回波信号的同时采集, 采用了焦面分光的结构^[16]. 望远镜采集的 532 nm 和 589 nm 的光信号分别通过对应通道的滤光器后, 利用光电倍增管 (PMT, Hamamatsu H7421) 进行检测, 将光信号转化为电信号, 并采用高速采集卡 (MCS8) 对电信号进行采集. 此外, 为了实现白天探测, 采用了波长计反馈调节稳频的方式, 将 589 nm 的激光光束稳定在 Na 原子共振荧光波长处.

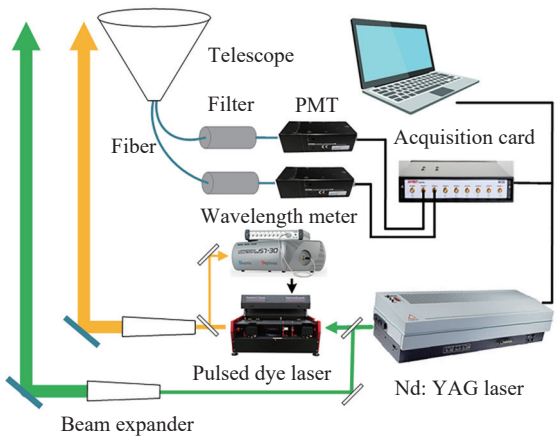


图 1 激光雷达系统结构

Fig. 1 Structural diagram of Lidar system

所采用的 Na 原子滤光器的透射谱形如图 2 所示. 激光雷达系统的各硬件参量列于表 1.

2 分析与讨论

图 3 给出了 2022 年 4 月 10 日 11:30 UT–12:30 UT 期间分别采用 532 nm 和 589 nm 激光束获得的以 30 km 归一化后的回波信号, 其中蓝线是 532 nm 通道的回波信号, 黄线是 589 nm 通道的回波信号, 该回波信号的时间分辨率为 1 h, 高度分辨率为 96 m. 从图 3 可以看出, 在海拔高度 24.3 km 附近, 这两种波长的激光光束均探测到较强的后向散射信号.

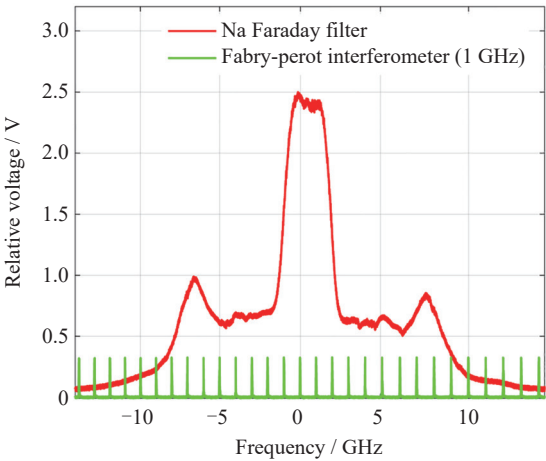


图 2 Na 原子滤光器透射谱形

Fig. 2 Transmission spectrum of Na Faraday filter

表 1 激光雷达系统各参量
Table 1 Key parameters of the system

Detection species		Parameters	
Laser wavelength/nm	589		532
Laser energy/mJ	约30		约200
Beam divergence/mrad	约0.5		约0.5
Repetition rate/Hz	30		30
Telescope diameter/mm	约1000		约1000
Telescope focal length/mm	2100		2100
Field of view/mrad	约1		约1
Detector	Photon counts		Photon counts
filter bandwidth	4 pm		1 nm
Time resolution/s	900		900
Range resolution/m	96		96

为了研究该异常回波信号持续的时间,对2022年4月10日11:00 UT至2022年4月12日00:00 UT获得的15~30 km全天时回波信号进行分析,获得的异常信号强度分布如图4所示.从图4可以看出,该信号持续时间较长,并且稳定分布在海拔20~25 km的范围,厚度约为0.4~3 km.

为了验证该激光雷达的结果,对美国臭氧测绘和

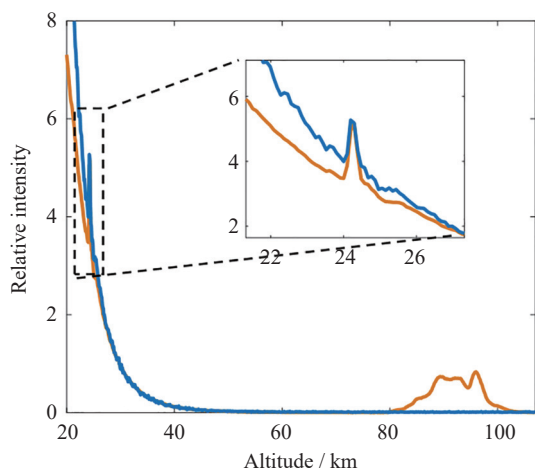


图3 2022年4月10日11:30 UT—12:30 UT期间获得的532 nm和589 nm激光束以30 km归一化后的回波信号(分别用蓝线和黄线表示)

Fig. 3 Echo signals of 532 nm and 589 nm normalized to 30 km obtained from 11:30 UT to 12:30 UT on 10 April 2022 (represented by blue lines and yellow lines, respectively)

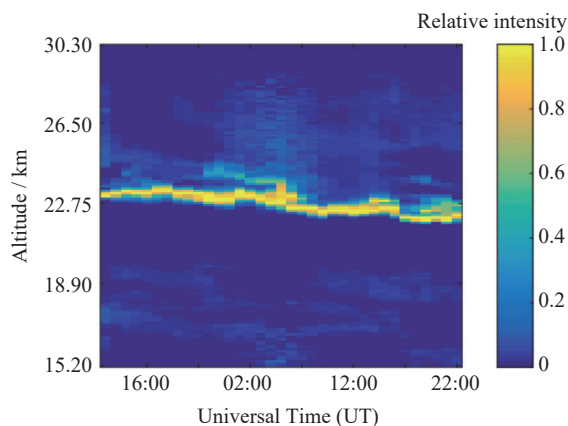


图4 2022年4月10日11:00 UT至2022年4月12日00:00 UT获得的15~30 km异常回波信号强度分布

Fig. 4 Distribution map of abnormal echo signal intensity from 15 km to 30 km obtained from 11:00 UT on 10 April 2022 to 00:00 UT on 12 April 2022

剖面仪(The Ozone Mapping and Profiler Suite, OMPS)在4月10—12日采集的气溶胶数据进行对比,结果如图5所示,其同样在20~25 km附近观测到较强的气溶胶信号,与本文激光雷达的数据符合.

结合当前汤加火山喷发及火山灰在全球的分布特性可知,该异常气溶胶信号与Taha等^[9]分析的汤加火山灰在全球的分布相符,因而可以判定该异常信号的产生原因是汤加火山灰爆发.

此外,对2022年3—7月夜间的激光雷达数据进行了分析.研究发现,在2022年3月8日夜间,回波信号光子数的对数与海拔高度基本呈线性分布,如图6所示.在4月10日,回波信号强度在海拔高度

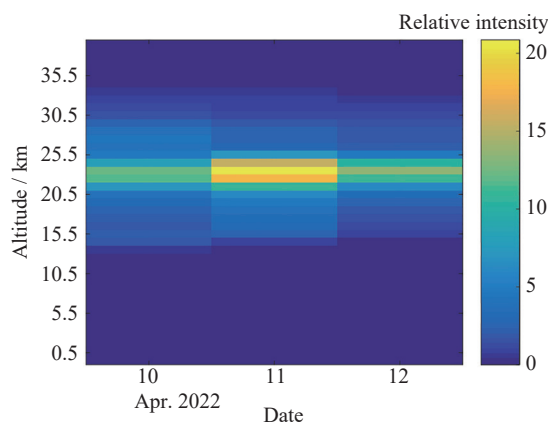


图5 2022年4月10—12日OMPS采集的气溶胶数据

Fig. 5 Aerosol data collected by OMPS from 10 to 12 April 2022

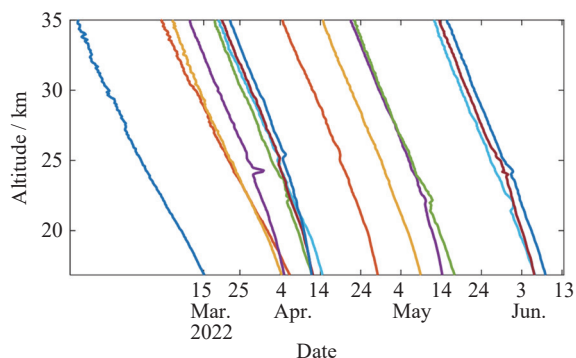


图6 时间、海拔高度与回波信号强度的对数关系(时间分辨率60 min,高度分辨率96 m)

Fig. 6 Logarithmic relationship between altitude at different time and echo signal strength, with a time resolution of 60 min and an altitude resolution of 96 m

24 km 附近存在较强的后向散射. 此外, 在 4 月 10 日至 6 月 17 日均探测到了较为异常的后向散射信号.

从图 6 中还可以看出, 随着时间的推移, 探测到的火山灰回波信号所处的峰值高度也在发生变化. 4 月 10 日, 火山灰回波信号峰值的海拔高度约为 24 km, 且强度较大; 4 月 13 日, 火山灰回波信号峰值所处的海拔高度呈现下降的趋势, 且强度减弱; 4 月 19 日, 火山灰回波信号峰值所处的海拔高度在 26 km 附近. 该现象表明, 汤加火山灰在平流层中的传播呈现不均匀的层状结构.

为了定性反映所探测的火山灰颗粒大小, 采用后向散射相关埃指数 (Ångström exponent) 对回波信号进行分析, 该指数可通过测量的消光系数随波长变化的数值计算得出, 其定义如下^[17,18]:

$$\overset{\circ}{A} = -\frac{\ln(K_1/K_2)}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)}. \quad (1)$$

其中, K_1 和 K_2 分别是波长为 λ_1 和 λ_2 的消光系数.

假设火山灰颗粒具有相对均匀的尺寸和形状, 且光学特性在波长 532 nm 和 589 nm 处变化较小, 消光系数和后向散射系数之间存在近似的正比关系, 后向散射相关埃指数可以表示为^[19]

$$\overset{\circ}{A} = -\frac{\ln[\beta_\alpha(\lambda = 589)/\beta_\alpha(\lambda = 532)]}{\ln(589/532)}. \quad (2)$$

其中, $\beta_\alpha(\lambda = 589)$ 和 $\beta_\alpha(\lambda = 532)$ 分别代表激光波长 589 nm 和 532 nm 激光光束产生的火山灰后向散射系数.

其次, 由于在火山灰所处的高度附近, 既有火山灰回波信号也有大气瑞利散射回波信号, 为了消除激光能量差异、大气瑞利散射系数以及大气透射率变化对火山灰颗粒后向散射系数的影响, 首先将原始回波数据以 30 km 的信号进行归一化. 其次, 对 20~30 km 的大气瑞利回波信号进行剔除, 以获得火山灰颗粒后向散射的回波信号.

根据后向散射激光雷达方程, 后向散射系数与回波信号成正比, 因此, 在计算火山灰颗粒埃指数过程中, 直接采用火山灰颗粒回波信号近似作为后向散射系数的相对值进行计算.

对 2022 年 4 月 10 日 12:00 UT—18:00 UT 探测的火山灰后向散射相关埃指数进行分析, 计算得到的火山灰信号峰值处埃指数如图 7 所示. 由于气溶胶后向散射粒子的散射截面与激光波长大小有关, 因此埃

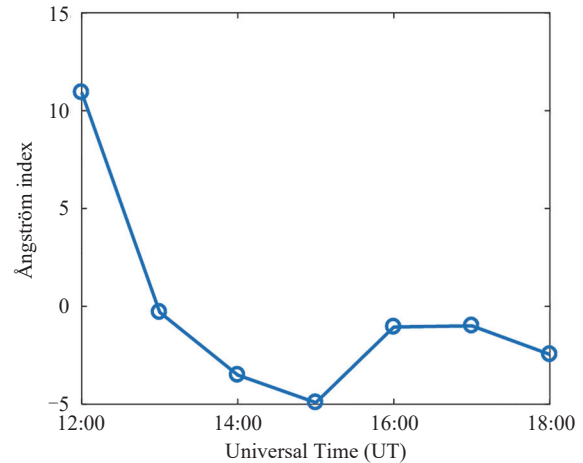


图 7 2022 年 4 月 10 日 12:00 UT—18:00 UT 探测的火山灰后向散射埃指数

Fig. 7 Detected volcanic ash backscatter correlation Ångström exponent from 12:00 UT to 18:00 UT on 10 April 2022

指数能够定性反映粒子的大小. 一般来说, 埃指数越大, 则粒子半径越小. 此外, 当埃指数为正时, 表示颗粒物对短波长的光更具吸收能力, 而对长波长的光更具散射能力; 当埃指数为零时, 表示颗粒物均匀地吸收和散射所有波长的光; 当埃指数为负时, 表示颗粒物对短波长的光更具散射能力, 而对长波长的光更具吸收能力.

从图 7 中可以看出, 在 2022 年 4 月 10 日 12:00 UT, 探测到的火山灰颗粒相对较小, 且对短波长的光更具吸收能力, 而对长波长的光更具散射能力; 在 2022 年 4 月 10 日 13:00 UT—18:00 UT, 探测到的火山灰颗粒相对较大, 且对短波长的光更具散射能力, 而对长波长的光更具吸收能力.

选取 2022 年 4—7 月探测的火山灰回波信号峰值处的平均埃指数进行分析, 结果如图 8 所示, 从图 8 可以看出, 所获得的火山灰颗粒物对短波长的光更具吸收能力, 而对长波长的光更具散射能力.

为研究火山灰高度与颗粒尺寸的关系, 绘制了如图 9 所示的火山灰埃指数与火山灰峰值海拔高度的关系, 并采用最小二乘法进行拟合, 所获得的拟合函数斜率为 -0.78, 相关系数为 -0.36. 该结果表明, 根据所获得的激光雷达数据分析, 在 2022 年 4—7 月内, 所探测的火山灰高度与火山灰颗粒尺寸的相关性较弱.

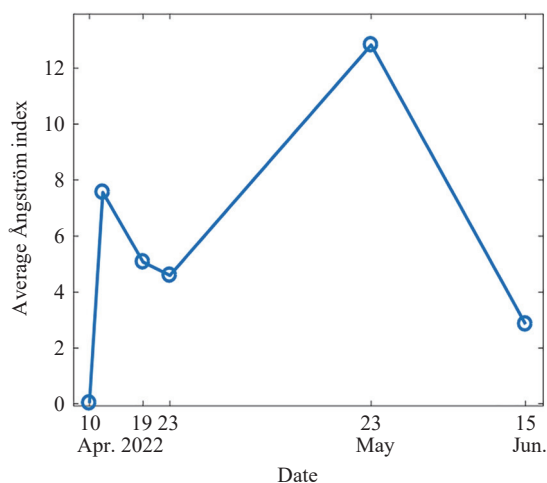


图8 2022年4月10日至6月15日探测的气溶胶后向散射相关埃指数

Fig. 8 Aerosol backscatter correlation Ångström exponent detected from 10 April to 15 June 2022

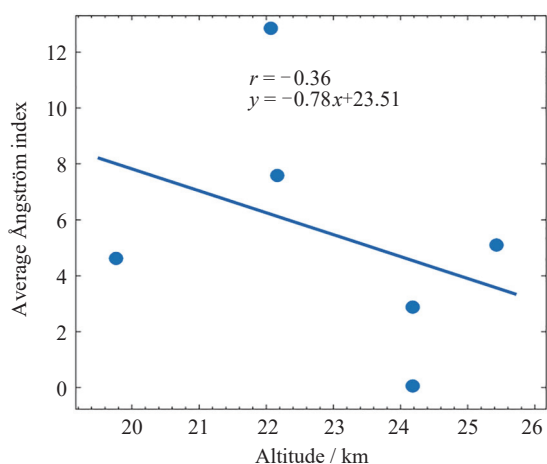


图9 火山灰高度与后向散射埃指数的关系

Fig. 9 Relationship between volcanic ash height and backscatter Ångström exponent

3 结论

通过采用双波长 (532 nm 和 589 nm) 激光发射装置和口径为 1 m 的望远镜, 并结合单光子探测技术, 对武汉上空的汤加火山灰进行了探测, 并对其颗粒尺寸进行详细分析. 研究结果表明, 火山灰的持续存在海拔高度约为 20~25 km, 揭示了火山灰在大气中的传播和悬浮特征. 特别是在 2022 年 4 月 10 日探测过程中, 所得到的火山灰回波信号强度最为显著, 表明在此时火山灰浓度可能达到一个峰值. 这对于理

解火山灰的动态变化及其对大气环境的潜在影响具有重要参考价值.

进一步分析表明, 火山灰在大气中的传播呈现明显的不均匀层状结构, 这种层状结构可能与大气中的风速、温度及湿度等因素密切相关, 显示了火山灰在不同高度和层次之间的分布差异. 通过这种层次化的传播模式, 火山灰可能对气候和环境产生长时间的影响, 特别是在全球气候变暖的背景下, 火山灰可能成为影响大气成分和气候变化的重要因素之一.

此外, 对 2022 年 4 月至 7 月期间激光雷达数据的分析结果表明, 所探测到的火山灰高度与颗粒尺寸之间相关性较弱. 尽管火山灰的颗粒尺寸是其影响力的重要因素之一, 但是研究发现, 火山灰的高度分布与颗粒尺寸的关系并不显著, 这表明在不同海拔高度上, 火山灰颗粒的运动和沉降行为可能受到多种复杂因素的影响, 包括大气垂直风场和火山灰颗粒的物理特性等. 这一结果可为后续研究提供重要依据.

致谢 本成果使用了国家重大科技基础设施子午工程的科学数据.

参考文献

- [1] SALIKHOV N, SHEPETOV A, PAK G, *et al.* Disturbances of Doppler frequency shift of ionospheric signal and of telluric current caused by atmospheric waves from explosive eruption of Hunga Tonga Volcano on January 15, 2022[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(2): 245
- [2] PRADIPTA R, CARTER B A, CURRIE J L, *et al.* On the propagation of traveling ionospheric disturbances From the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano eruption and their possible connection with Tsunami waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(6): e2022GL101925
- [3] DOLGIKH G I, DOLGIKH S G, OVCHARENKO V V. Atmospheric and deformation disturbances caused by the Hunga-Tonga-Hunga-Ha'apai Volcano[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2022, **505**(2): 575-577
- [4] DENAMIEL C, VASYLKEVYCH S, ŽAGAR N, *et al.* Destructive potential of planetary Meteotsunami waves beyond the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano eruption[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2023, **104**(1): E178-E191
- [5] RAMÍREZ-HERRERA M T, COCA O, VARGAS-ESPINOSA V. Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano eruption, Tonga[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2022, **179**(4): 1117-1137
- [6] GAVRILOV B G, POKLAD Y V, RYAKHOVSKY I A, *et al.* Global electromagnetic disturbances caused by the

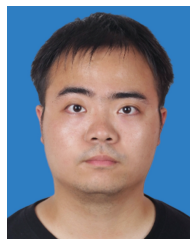
- eruption of the Tonga Volcano on 15 January 2022[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(23): e2022JD037411
- [7] THOMPSON D W J, WALLACE J M, JONES D, *et al.* Identifying signatures of natural climate variability in time series of global-mean surface temperature: methodology and insights[J]. *Journal of Climate*, 2009, **22**(22): 6120-6141
- [8] MADONIA P, BONACCORSO A, BONFORTE A, *et al.* Propagation of perturbations in the lower and upper atmosphere over the central Mediterranean, driven by the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano explosion[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(1): 65
- [9] TAHA G, LOUGHMAN R, COLARCO R, *et al.* Tracking the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai aerosol cloud in the upper and middle stratosphere using space-based observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(19): e2022GL100091
- [10] SOLOVIEVA M S, SHALIMOV S L. Disturbances in the Lower Ionosphere after the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Ha'apai Volcano on January 15, 2022, Recorded by the Subionospheric VLF Radio Signals[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2022, **507**(2): 1080-1084
- [11] RAJESH K, LIN C C H, LIN J T, *et al.* Extreme poleward expanding super plasma bubbles over Asia-Pacific region triggered by Tonga volcano eruption during the recovery-phase of geomagnetic storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(15): e2022GL099798
- [12] LIN J T, RAJESH P K, LIN C C H, *et al.* Rapid conjugate appearance of the Giant Ionospheric lamb wave signatures in the Northern hemisphere After Hunga-Tonga Volcano eruptions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(8): e2022GL098222
- [13] LIU X, XU J Y, YUE J, *et al.* Strong gravity waves associated with Tonga volcano eruption revealed by SABER observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(10): e2022GL098339
- [14] KULICHKOV S N, CHUNCHUZOV I P, POPOV O E, *et al.* Acoustic-gravity lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and Tsunami[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2022, **179**(5): 1533-1548
- [15] DOLGIKH G, DOLGIKH S, OVCHARENKO V. Initiation of infrasonic geosphere waves caused by explosive eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, **10**(8): 10611
- [16] CHENG Xuewu, SONG Juan, LI Faquan, *et al.* Dual-wavelength high altitude detecting Lidar technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(5): 601-606 (程学武, 宋娟, 李发泉, 等. 双波长高空探测激光雷达技术 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 601-606)
- [17] NAKAMAE K, UCHINO O, MORINO I, *et al.* Lidar observation of the 2011 Puyehue-Cordón Caulle volcanic aerosols at Lauder, New Zealand[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(22): 12099-12108
- [18] JUNG C H, KIM Y P. Simplified analytic model to estimate the ångström exponent in a Junge Aerosol size distribution[J]. *Environmental Engineering Science*, 2010, **27**(9): 789-795
- [19] ZHUANG J, YI F. Nabro aerosol evolution observed jointly by lidars at a mid-latitude site and CALIPSO[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **140**: 106-116

作者简介



汪 为 男, 1994 年出生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为中高层大气探测激光雷达、原子分子光谱, 主持国家级项目 2 项, 发表论文 20 余篇。

E-mail: wangwei@apm.ac.cn



林 鑫 (通信作者) 1987 年出生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为激光雷达、原子分子光谱、激光光谱和原子滤光技术研究及应用。主持和参与了多项国家级课题和科学工程工作, 发表论文 10 余篇, 获得发明专利 20 余项。

E-mail: linxin@apm.ac.cn