

文章编号: 2096-1618(2018)05-0572-07

# Kelud 火山喷发对平流层光学性质的影响

蔡宏珂, 郑泽华, 陈权亮, 冯晓

(成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:**针对2014年2月13日Kelud火山喷发,利用星载激光雷达资料计算分析了后向散射系数、退偏振率和双波长比等光学参量,并与喷发前2011~2013年和喷发后2014年3月17日的资料进行对比,以展示火山喷发对平流层光学性质的影响。结果显示,激光雷达监测数据能有效反映平流层在火山喷发前后的光学性质变化;火山喷发后平流层后向散射系数显著增大;相应高度和区域内,退偏振率小于此前3年平均,而双波长比偏大,意味着火山灰气溶胶层由球形性较好、尺度较大的气溶胶粒子组成;不同地点的相似光学性质,意味着火山灰气溶胶粒子在喷发后向南移动,进而反映出平流层物质的运动特征。

**关键词:**大气物理学与大气环境;气溶胶;Kelud火山;后向散射;退偏振率;双波长比

**中图分类号:**P421.32

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2018.05.015

## 0 引言

早在18世纪, Benjamin Franklin就提出了1783-1784年北美和欧洲发生的夏季异常低温与冰岛南部赫克拉火山爆发有关这一猜想<sup>[1]</sup>。H. H. Lamb提出火山灰尘幕指数DVI(dust veil index),已经能在一定程度上定量地阐述火山喷发对气候的影响<sup>[1]</sup>。

火山的剧烈喷发,向大气圈输送大量火山灰和H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、HCl、SO<sub>2</sub>、少量HF等气体。悬浮颗粒物和含硫气体形成平流层气溶胶,能悬浮较长时间,在随后的很长一段时间内会大大增强对太阳辐射的散射和反射,削弱到达地面的直接辐射,形成阳伞效应,达到地表降温的效果,从而影响全球气候的变化趋势。因此,火山喷发与气候冷期有着密不可分的联系。火山剧烈爆发形成的气溶胶层通过高层大气的水平输送作用,逐渐向两极扩散,最终可以覆盖全球。因此,火山活动虽具有显著的离散性、随机性,但其可以影响局地乃至全球气候<sup>[2]</sup>。

火山喷发所导致的降温作用可以将全球火山活动规律与地面温度变化趋势部分地联系起来。火山活动在一定程度上抵消温室效应对环境的升温作用,甚至于超过其对世界气候变化所产生的影响。全球观测和模拟资料同样证明了在火山剧烈喷发后的数年内,火山周围地区乃至全球都有不同程度的降温。更有研究表明,在火山活动的活跃期中,火山喷发物对全球气

候变化的贡献可能超过太阳活动和由于CO<sub>2</sub>等温室气体所导致的温室效应<sup>[3]</sup>。根据贾朋群等<sup>[4]</sup>的研究,近代以来,由于人类活动而形成的升温趋势,平均10年一次的剧烈火山活动以及若干的中小喷发所中和,从20世纪90年代末开始,全球的持续高温,则被认为是Pinatubo火山喷发后平静期与人类活动、CO<sub>2</sub>的持续积累共同作用所导致的。作为气候变化的不确定因素之一,火山活动在全球变暖背景下的气候效应得到了广泛关注。

James等<sup>[5]</sup>对可见光波段和紫外波段进行了辐射量的统计计算,以此论证了火山喷发产生的气溶胶对全球能量收支的重要性。1991年Pinatubo火山喷发有超过20Mt的SO<sub>2</sub>进入平流层,而在喷发后的第二年,中国的夏秋两季就出现了大规模的低温,长江中下游以及长江以北地区都遭受了不同程度的冷害<sup>[6]</sup>。根据周军等<sup>[7]</sup>的研究,此次火山喷发过程对全球气候的影响至少持续了6年时间,直到1997年平流层火山气溶胶才接近全部沉降。巴勒德等<sup>[8]</sup>关于Pinatubo火山喷发后全球气候变化的研究表明,由于低纬度地区的能量收入减少,导致次年年初北半球的几个主要大气活动中心(阿留申、冰岛低压,东亚、北美冷高压等)强度显著减弱,南方涛动减弱,进而对北半球降水的分布产生重要影响。

Kelud火山位于印度尼西亚爪哇岛、7°55'48"S、112°18'29"E的东爪哇省的环太平洋火山带上,2014年2月13日晚10时50分发生了一次较大规模喷发,火山灰遮天蔽日。采用星载激光雷达分析此次火山喷发导致的平流层光学性质变化,并探寻相似特征层以

收稿日期:2018-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41405031,41475037);公益性行业(气象)科研专项项目资助项目(GYHY201506013)

了解平流层大气运动特征。

## 1 资料与方法介绍

星载激光雷达 CALIOP (cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization) 是搭载在 CALIPSO (cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observation) 卫星上的双波长 Mie 散射正交偏振激光雷达, 测量 1064 nm 后向散射信号和 532 nm 后向散射信号正交偏振成分, 提供云和气溶胶高分辨率垂直廓线<sup>[9-10]</sup>。文中选取 CALIOP 的 Level-1B 级数据产品中双波长衰减后向散射系数, 其各高度层内的分辨率如表 1 所示。

表 1 CALIOP 的 Level-1B 产品分辨率

| 高度/km       | 水平分辨率/km | 垂直分辨率/m |         |
|-------------|----------|---------|---------|
|             |          | 532 nm  | 1064 nm |
| 30.1 ~ 40.0 | 5        | 300     | N/A     |
| 20.2 ~ 30.1 | 5/3      | 180     | 180     |
| 8.3 ~ 20.2  | 1        | 180     | 60      |
| -0.5 ~ 8.3  | 1/3      | 30      | 60      |
| -2.0 ~ -0.5 | 1/3      | 300     | 300     |

考虑背景噪声和卫星飞行轨迹的因素, 选取 Kelud 火山喷发前三年至喷发后两个月 (2011 年至 2014 年 4 月) 夜间的观测资料。由于白天太阳辐射底噪的干扰造成信噪比较低<sup>[11]</sup>, 而在夜间高信噪比下, CALIOP 的工作状况较好<sup>[12]</sup>, 所以文中只选取夜间观测资料。

退偏振率, 定义为 532 nm 后向散射信号正交分量与水平分量之比,  $\delta = \frac{\beta_{532\perp}}{\beta_{532\parallel}}$ 。由于散射粒子的非对称性, 导致其后向散射失去偏振态, 发生退偏振现象, 导致正交偏振分量的出现。因此, 可以通过退偏振率的大小来描述散射体的粒子形状。通常来说, 散射粒子的非球形程度越明显, 其退偏振率就越大。沙尘气溶胶通常大于 0.1<sup>[13-17]</sup>, 剧烈沙尘暴的气溶胶的退偏振率甚至可以达到 0.4 左右<sup>[18]</sup>, 人工活动排放的气溶胶和生物质燃烧产生的烟尘气溶胶通常退偏振率较小 (0.03 ~ 0.11)<sup>[13-16]</sup>。卷云的退偏振率在 0.2 至 0.5 变化<sup>[19]</sup>, 最高可达 0.6<sup>[20]</sup>。

双波长比, 定义为散射粒子对 1064 nm 和 532 nm 波长信号的后向散射系数之比,  $\chi = \frac{\beta_{1064}}{\beta_{532}}$ , 其数值通常在 0 ~ 2<sup>[21]</sup>。发射波长越短, 对细粒子的敏感程度越高, 反之则敏感度下降。因此, 双波长比可以表征散射粒子的尺度特征。

## 2 Kelud 火山喷发的光学特征

Kelud 火山位于 7°55'48"S、112°18'29"E, CALIOP 激光雷达当日探测、喷发前 2011-2013 年探测以及喷发后 2014 年 3 月 17 日的探测资料均选用距离最近的轨道上的数据产品, 如图 1 所示。CALIOP 探测得到的后向散射信号如图 2 和图 3 所示。

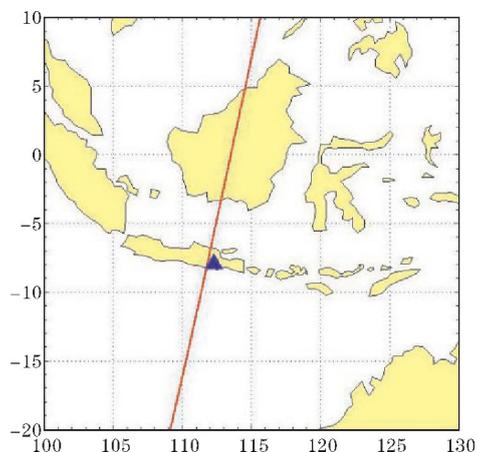


图 1 CALIPSO 运行轨道及 Kelud 火山位置

图 2 和图 3 分别是 CALIOP 所测 2014 年 2 月 13 日 532 nm 和 1064 nm 激光信号垂直剖面图。后向散射受散射粒子数量、尺度等因素影响, 云、气溶胶等特征层的后向散射系数明显大于大气分子所形成的背景。两个波长的后向散射系数 (图 2a 和图 3a) 均显示, 在 7.6°S ~ 8.3°S 上空 21 ~ 25 km 高度 (图中白色虚线框) 存在水平带状的强回波区, 而在 16 ~ 19 km 高度上也存在着一层强回波区, 与 21 ~ 25 km 回波带呈明显的上下分层结构, 但对应白色方框区域以下, 存在明显的中断。

退偏振率和双波长比反映了散射粒子本身的微物理性质。下层 (约 18 km 高度) 强回波区范围很宽, 回波强度很强, 其下部退偏振率 (图 2d 红色虚线框外) 较大 (大于 0.5), 这些观测结果都符合卷云的典型特征。下层强回波区的中断 (图 2d 红色虚线框内), 处于上层强回波区的正下方, 应视为该云层被火山喷发物质冲破而形成的断层。上层强回波区反映了火山剧烈喷发影响高度达到 25 km。双波长比表现出与退偏振率相似的分布特征 (图 3a), 下层卷云双波长比典型值在 1.2 左右, 大于上层火山喷发物。散乱的退偏振率 (图 2d) 和双波长比 (图 3b) 大值与后向散射系数上下两个特征层无对应关系, 是由信号噪声所导致的。

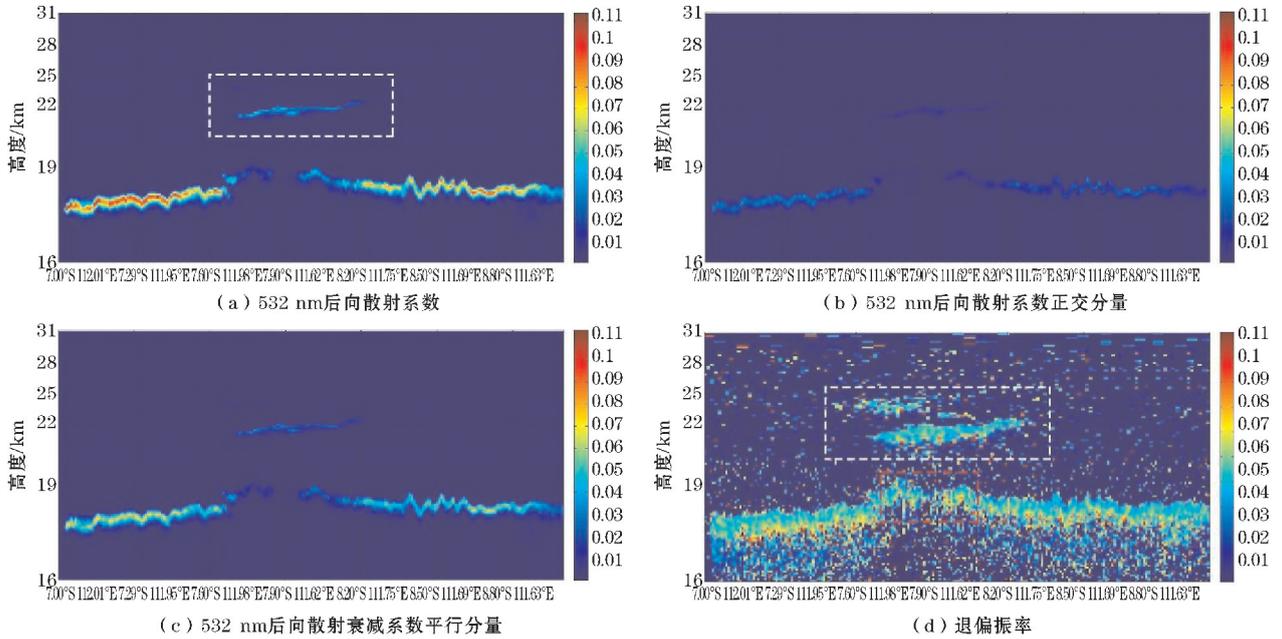


图2 2014年2月13日CALIOP所测532 nm信号

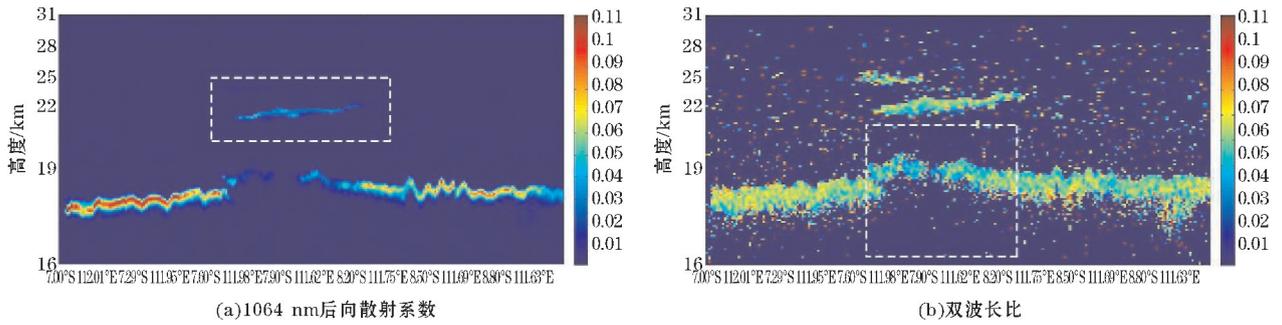


图3 2014年2月13日CALIOP所测1064 nm信号

后向散射系数的垂直平均廓线和水平平均廓线更清晰地反映出特征层的高度和位置。卷云层高度在17~19 km,而22 km高度上下的特征层即为火山气溶

胶层(图4a)。在20~28 km高度层内,后向散射系数的水平平均结果(图4b)显示,7.45°S~8.50°S为火山气溶胶层的水平分布范围。

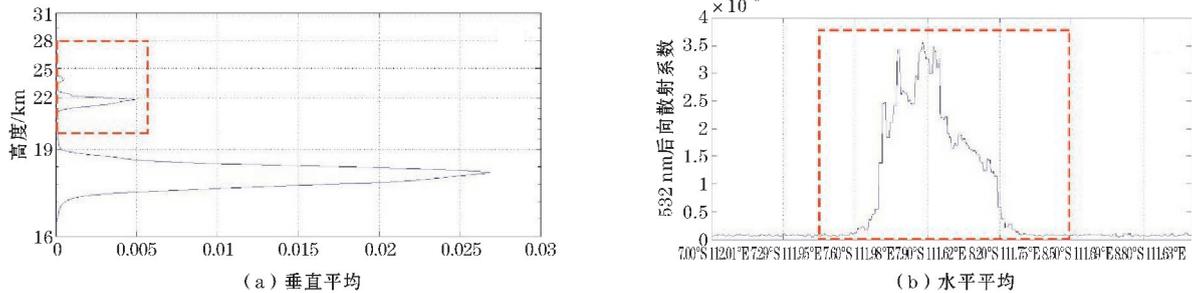


图4 2014年2月13日532 nm后向散射系数廓线

### 3 Kelud 火山喷发与喷发前光学性质的对比

通过与当地喷发前三年平均情况的比较,Kelud火

山喷发气溶胶的光学性质可以得到进一步展示。对比研究的区域确定为7.45°S~8.50°S上空20~28 km高度层内(图4红色方框),三年观测选取的数据产品所在轨道均与2014年2月13日观测轨道重合。

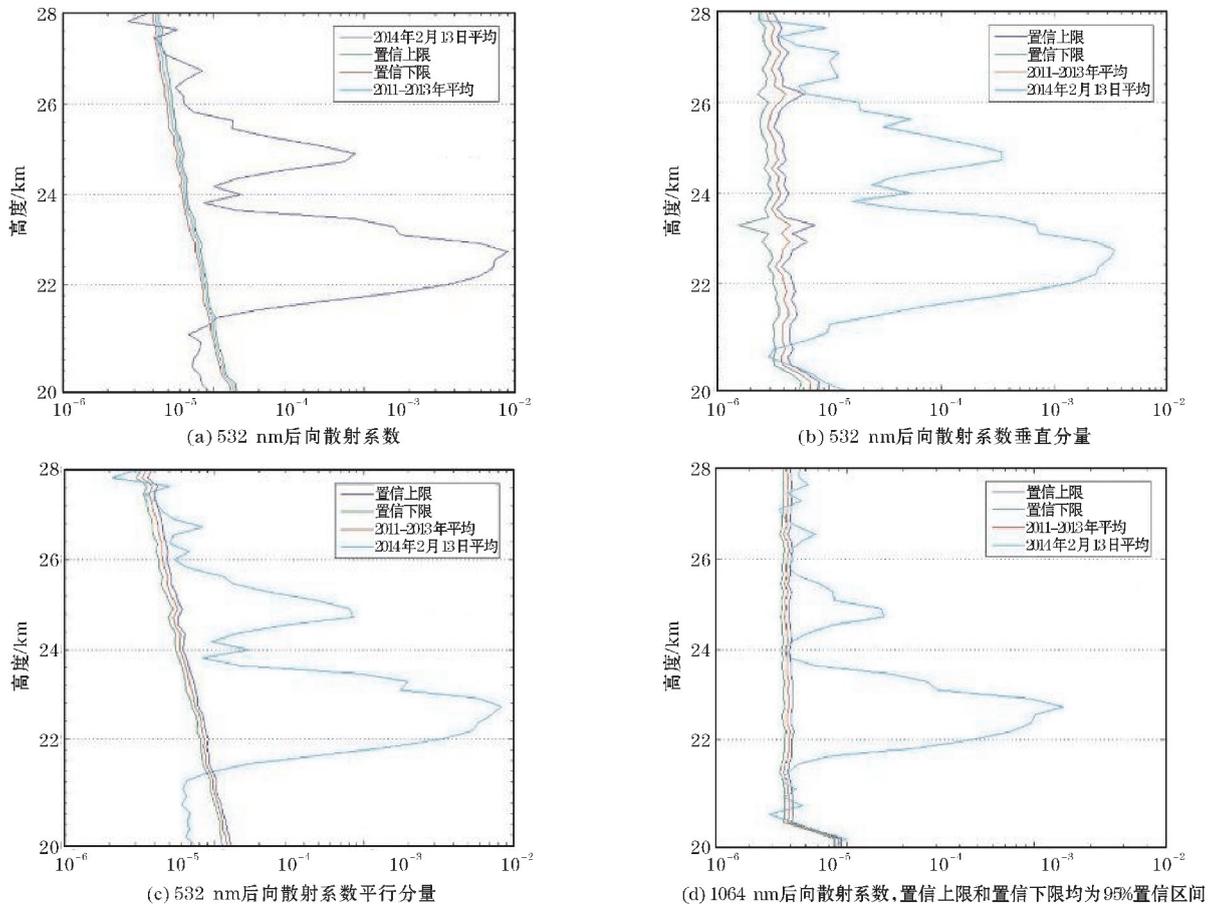


图 5 2014 年 2 月 13 日火山喷发个例与 2011-2013 年平均垂直廓线对比

图 5 中,后向散射系数垂直廓线的 99% 置信区间范围很小,反映出平流层气溶胶背景稳定且干洁。个例当日的气溶胶后向散射系数均远大于 3 年平均及其置信上限,表明 Kelud 火上猛烈喷发向平流层输入大量气溶胶。后向散射系数廓线都呈双峰结构,在 21 ~ 24 km 高度上为主要的火山气溶胶层,而在 24 ~

26 km 高度上也存在着一层相对较弱的火山气溶胶层,这可能是由于 Kelud 火山当日多次喷发所导致的。在 21 km 高度以下,后向散射系数很小,与 3 年平均持平,甚至小于 3 年的置信下限,这可能是由于火山喷发的冲刷作用导致该区域的异常干净。

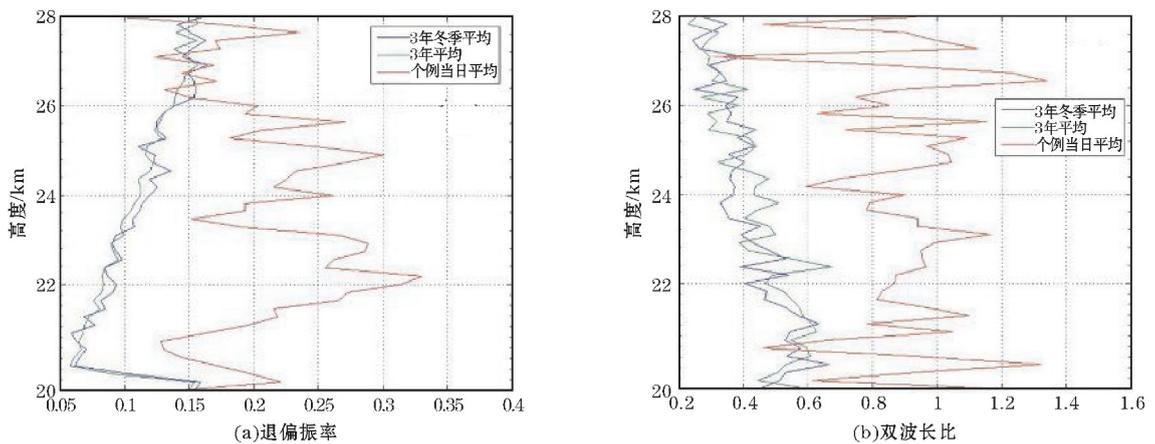


图 6 2014 年 2 月 13 日火山喷发个例与 2011-2013 年平均垂直廓线对比

图 6 中,2011 ~ 2013 年的年平均和冬季(12 月、1 月、2 月)平均曲线相似,无明显偏差,可以认为研究区域内气溶胶粒子性质不受季节变化的影响。火山喷发

当日退偏振率也显著大于 3 年平均,约在 0.15 ~ 0.33。22 km 和 25 km 上下双峰结构与后向散射系数廓线相似,这两个高度反映出火山喷发物的退偏振率可高达

0.25 ~ 0.33。个例与多年平均在22 km高度处差异最显著,这个高度上富集火山喷发物,其粒子的非对称性明显大于平流层背景。双波长比三年平均值较小,约在0.2 ~ 0.6,且随高度上升而减小;而2014年2月13日双波长比廓线波动较大,受火山喷发物影响,21 ~ 25 km高度上特征层的双波长比大于三年平均。但在特征层外,双波长比显著大于三年平均,这与1064 nm探测稀薄大气时的低信噪比有关<sup>[22]</sup>。

散射粒子退偏振率和双波长比的分布频次也反映

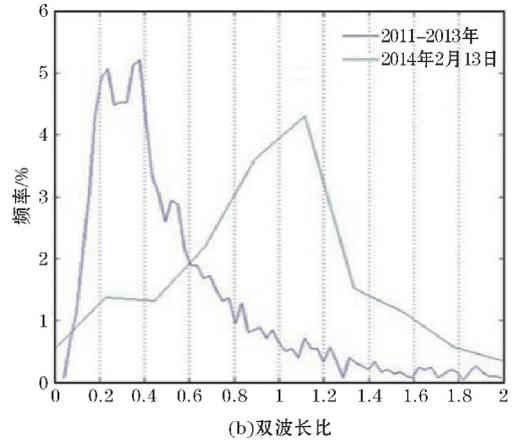
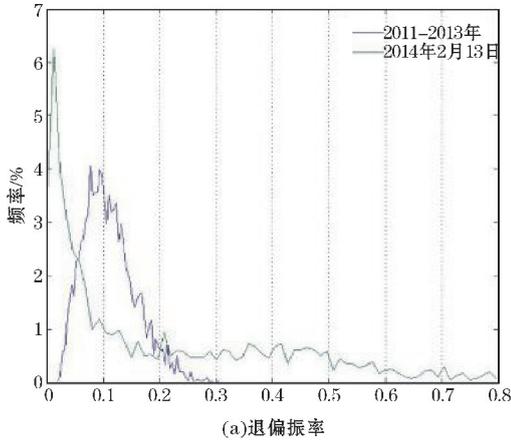


图7 散射粒子光学性质概率密度分布对比

#### 4 Kelud 火山喷发后相似散射层特征

CALIPSO 卫星轨道向西退行,每隔 16 天轨道重

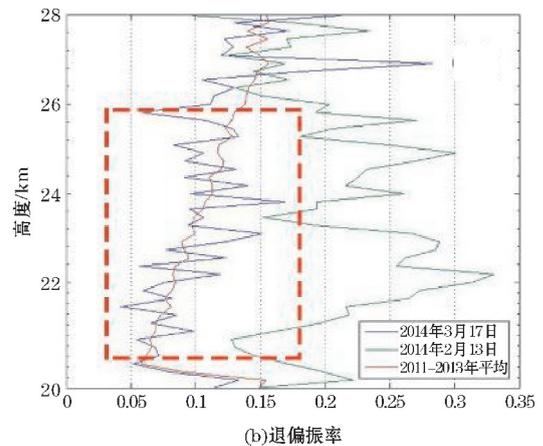
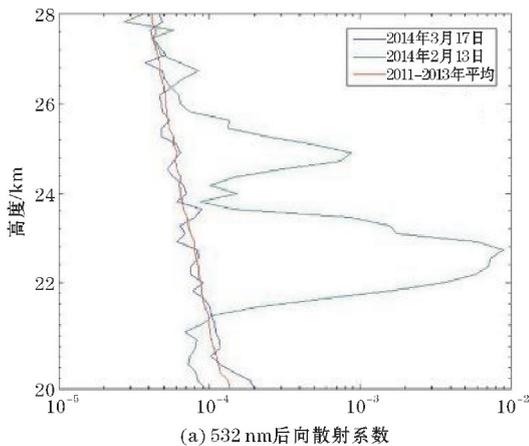


图8 7.45°S ~ 8.50°S 区域内

两次观测结果(图8)对照显示出,在喷发后的一个月,火山附近区域上空的平流层后向散射系数和退偏振率已回归多年平均水平,表明火山喷发物已被输送到其他区域。

沿两条重合轨道在20 ~ 28 km高度上的532 nm后向散射系数水平廓线显示,2月13日 Kelud 火山附近

出火山喷发物与平流层气溶胶背景的差异,如图7所示。退偏振率和双波长比都呈单峰分布。火山喷发个例中,退偏振率在小于0.05和大于0.25两个区间内,出现频次明显高于三年平均,反映出对平流层气溶胶背景的冲刷作用和火山喷发物的输入(图7a)。火山喷发前3年,双波长比呈正偏态分布,峰值在0.2 ~ 0.4,谱型较尖锐,粒子集中度较高;个例当日的双波长比偏度较小,大致以1.15为峰值呈对称分布,进一步反映出火山喷发物的粒子尺度要大于平流层气溶胶背景。

合,因2014年3月1日 CALIOP 激光雷达设备维护,未开展观测,因此选取32天后3月17日观测资料与2月13日对照。又因 CALIPSO 轨道倾角大,为98.2°,重合轨道能近似反映南北方向的变化。

地区和3月17日26.92°S ~ 26.94°S地区,分别出现明显的强回波区,这意味着火山喷发物层可能已被向南输送。后向散射系数极大值从 $3.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 下降到 $1.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ ,可能与扩散、沉降、化学转化等过程有关。

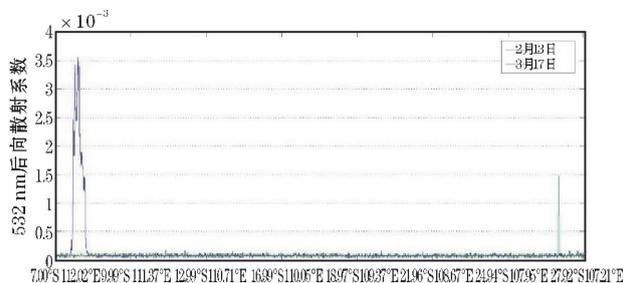


图 9 沿 CALIOP 轨道 20 ~ 30 km 高度内  
532 nm 后向散射系数水平廓线

3 月 17 日 26.5 °S ~ 27.5 °S 区域上空 21 ~ 28 km 高度层内,退偏振率的分布频率也显示出与 2 月 13 日相似的特征,而与喷发前三年平均显著不同。对比图 7(a) 和图 10 所示,两次观测的谱型相似,呈正偏态分布,峰值在 0.01 ~ 0.02,大于 0.25 的散射粒子比例高于喷发前三年平均。3 月 17 日观测中,小于 0.05 的散射粒子比例高于喷发当日,而大于 0.25 的散射粒子比例则较低,意味着火山喷发物输送过程中的扩散作用。

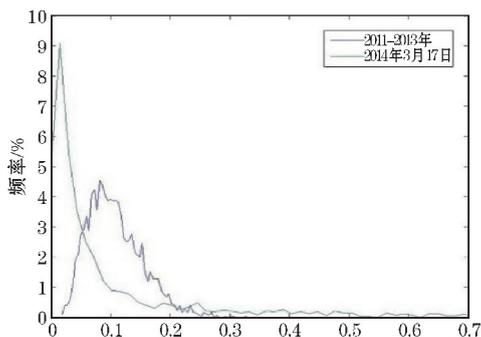


图 10 26.5 °S ~ 27.5 °S 区域上空 21 ~ 28 km  
高度层内退偏振率频率分布

## 5 结论与展望

文中利用星载激光雷达 CALIOP 观测资料,对 2014 年 2 月 13 日 Kelud 火山喷发所形成的平流层气溶胶层光学性质进行分析;同喷发前的 3 年平均进行比较,展示火山喷发对平流层光学性质的影响;同 32 天后不同地点的观测资料进行比较,探寻火山喷发物的输送特征。得到以下主要结论:

(1) 激光雷达观测到,当日在 21 ~ 25 km 高度处存在后向散射系数异常增大的水平带状强回波区,其下方卷云回波区出现对应的断层,表明此次火山喷发冲破卷云,喷发物直接注入平流层。喷发当日向后散射系数与喷发前三年平均值相比较,确定了受火山喷发影响的高度和区域。

(2) 该高度和区域内散射粒子的微物理性质也表现出与当地平流层气溶胶背景的显著差异。退偏振率呈正偏态分布,峰值约为 0.02,退偏振率大于 0.25 的散

射粒子比例明显高于喷发前 3 年平均;双波长比主要集中在 0.5 ~ 1.3,峰值约为 1.15,大于喷发前 3 年平均。这表明火山喷发物主要由尺度较大的非球形粒子组成。

(3) 在火山喷发 32 天后,沿重合轨道向南约 20 个纬度,CALIOP 观测到相同高度范围内存在具有相似特征的散射粒子层。退偏振率与喷发当日的谱型相似,意味着该散射粒子层可能是火山喷发物向南输送所致;后向散射强度弱于喷发当日,意味着在输送过程中可能伴随扩散、沉降或化学转化。

后续研究将进一步确认火山喷发物的输送特征,并探讨火山气溶胶对辐射的影响。

致谢:感谢成都信息工程学院科研基金(KYTZ201504、J201519)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] Lamb, H. H. Volcanic Dust in the Atmosphere with a Chronology and Assessment of Its Meteorological Significance[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1970, 266(1178): 425-533.
- [2] 曲维政, 刘应辰, 黄菲, 等. 平流层火山气溶胶时空传播规律及其气候效应[J]. 应用气象学报, 2010(5): 627-631.
- [3] 曲维政, 黄菲, 赵进平, 等. 火山活动对北半球平流层气候异常变化的影响[J]. 地球物理学进展, 2006(2): 650-659.
- [4] 贾朋群, 石广玉. 近 50 年火山喷发和太阳活动对我国气候影响的研究[J]. 高原气象, 2001(3): 225-233.
- [5] Pollack J B, Toon O B, Sagan C, et al. Volcanic explosions and climatic change: A theoretical assessment[J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 81(6): 1071-1083.
- [6] 徐群. 皮纳图博火山云对 1992 年大范围气候的影响[J]. 应用气象学报, 1995(1): 35-42.
- [7] 周军, 岳古明, 戚福第, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. 量子电子学报, 1998(2): 140-148.
- [8] 巴勒德, 吴池胜. 皮纳图博火山喷发对气候影响的数值试验[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1997(6): 103-108.
- [9] Hunt W H, Winker D M, Vaughan M A, et al. CALIPSO Lidar Description and Performance Assessment[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(7): 1214-1228.
- [10] Winker D M, Hunt W, Hostetler C. Status and

- Performance of the CALIOP Lidar [J]. *Laser Radar Techniques for Atmospheric Sensing*, 2004, 5575: 8–15.
- [11] Kim S W, Berthier S, Raut J C, et al. Validation of Aerosol and Cloud Layer Structures from the Space-Borne Lidar CALIOP Using a Ground-Based Lidar in Seoul, Korea [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(13): 3705–3720.
- [12] Mamouri R E, Amiridis V, Papayannis A, et al. Validation of CALIPSO Space-Borne-Derived Attenuated Backscatter Coefficient Profiles Using a Ground-Based Lidar in Athens, Greece [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, 2(2): 513–522.
- [13] Murayama T, Muller D, Wada K, et al. Characterization of Asian Dust and Siberian Smoke with Multiwavelength Raman Lidar Over Tokyo, Japan in Spring 2003 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31.
- [14] Mckendry I, Strawbridge K, Karumudi M L, et al. Californian Forest Fire Plumes Over Southwestern British Columbia: Lidar, Sunphotometry, and Mountaintop Chemistry Observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(2): 465–477.
- [15] Chiang C W, Chen W N, Liang W A, et al. Optical Properties of Tropospheric Aerosols Based On Measurements of Lidar, Sun-Photometer, and Visibility at Chung-Li (25°N, 121°E) [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(19): 4128–4137.
- [16] 蔡宏珂, 周任君, 傅云飞, 等. CALIOP 对一次秸秆焚烧后气溶胶光学特性的探测分析 [J]. *气候与环境研究*, 2011, 16(4): 469–477.
- [17] Huang J P, Minnis P, Yi Y H, et al. Summer Dust Aerosols Detected from CALIPSO Over the Tibetan Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18): 5.
- [18] 刘东, 戚福弟, 金传佳, 等. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测 [J]. *大气科学*, 2003(6): 1093–1100.
- [19] Wang Z Z, Chi R L, Bo L, et al. Depolarization Properties of Cirrus Clouds from Polarization Lidar Measurements Over Hefei in Spring [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(4): 235–237.
- [20] Liou K N, Lahore H. Laser Sensing of Cloud Composition-Backscattered Depolarization Technique [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1974, 13(2): 257–263.
- [21] Liu Z Y, Omar A H, Hu Y X, et al. CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document Part 3: Scene Classification Algorithms. 2005.
- [22] Tao Z M, McCormick M P, Wu D, et al. Measurements of Cirrus Cloud Backscatter Color Ratio with a Two-Wavelength Lidar [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1478–1485.

## The Lidar Observation for Stratospheric Optical Features Influenced by Kelud Eruption

CAI Hong-ke, ZHENG Ze-hua, CHEN Quan-liang, FENG Xiao

(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** The cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization (CALIOP) remote sensing data has been used in the paper to analyze the eruption of Kelud (February 13, 2014), and it has also been compared with the 3-year statistics during 2011–2013 and the observation in March 17 after eruption, showing the sudden increase in the stratospheric aerosol content after injection and its subsequent decline. Calculation results show that the optical properties of the stratospheric aerosol layer can be reflected effectively by laser radar monitoring data before and after the eruption. The backscattering coefficient of the stratosphere is greatly increased after the volcanic eruption. The depolarization ratio is less than the previous 3-year average in the corresponding heights and areas, while the dual wavelength ratio is larger, which means that the volcanic ash aerosol layer is formed by aerosol particles that are in better spherical shape and larger size. Similar optical properties of different locations mean that the volcanic ash aerosol particles move southward after eruption, and movement characteristics of the stratospheric substance can be reflected then.

**Keywords:** atmospheric physics and atmospheric environment; aerosol; Kelud volcano; attenuated backscatter; depolarization ratio; color ratio