

火山灰静电悬浮进入电离层及其对气候的突然影响

Matthew J. Genge

摘要: 由于细灰和气溶胶对流进入平流层,大型火山爆发导致短期气候变化。然而,火山羽流也与大的净电荷有关,这也会影响其灰粒的动态。在这里,我展示了带净电荷的羽流中的灰分的静电悬浮能够将持续超过几个小时的大火山喷发直径<500nm的火山颗粒注入电离层。火山爆发期间,电离层观测到的扰动,以及1883年Krakatau(印度尼西亚)喷发后极地中层云的首次发现,都与灰烬悬浮在中间层中是一致的。超级火山喷发可能会向电离层注入大量带电灰烬,导致全球电路在 10^2 秒的时间尺度上受到干扰或崩溃。由于大气电势缓和了云的形成,大火山爆发可能通过辐射强迫对气候产生突然影响。1883年喀拉喀托火山喷发的平均气温和降水记录与对气候的突然影响一致。

引言

火山羽流是在爆炸性爆发期间形成的,通过气体和火山灰的对流上升进入大气层,并且可以在平流层内达到50公里的高度(Sparks, 1986; Bonadonna和Costa, 2013)。在如此高的高度注入火山气溶胶和灰烬导致全球扩散并由于太阳绝缘和云核的产生而导致气候变化(McCormick等, 1995; Robock, 2000)。因此,大型火山爆发会导致短期气候不稳定。

传统观点认为,火山爆发的火山灰不能注入地球大气的更高层,因为平流层的温度反转是对流上升的障碍(Sparks, 1986; Bonadonna和Costa, 2013)。因此,火山爆发不会对高层大气产生重大影响。然而,爆发性火山爆发期间火山闪电的频繁发生表明喷发柱带有显著的电荷(James等, 1998,2000; Mather和Harrison, 2006),它们可以产生非热力并影响带电的上升灰粒子。

对与爆炸性爆发相关的环境电场中潜在梯度异常的测量表明,火山爆发可能具有高达~10库仑(C)的大净电荷(James等, 1998)。对火山颗粒充电的实验表明,由于离子发射导致的压裂充电由于摩擦而超过摩擦带电(Mather和Harrison, 2006; Harrison等, 2010)。因此,充电可能发生在火山导管内和大部分碎裂发生的通风口上方的气体推力区域,尽管羽流中可能会产生一些额外的电荷(Harrison等, 2010)。尽管火山闪电的放电可能限制最大净电荷,但预计破碎和充电可能会随喷发量的增加而增加(Mather和Harrison, 2006)。

在火山喷发上观察到的净电荷表明在喷发期间发生电荷分离(Lane和Gilbert, 1992; Mather和Harrison, 2006)。模型表明灰分通常带负电,而火山气体大部分带正电(Mather和Harrison, 2006)。通过对流和风运输将灰分与气体物理分离导致大的净电荷。因此,爆发性火山爆发是有效的发电机和电荷分离器。

静电悬浮

静电悬浮是一种在电场内引起带电粒子放大的过程,对于无大气的天体如月亮(Colwell等, 2009)和小行星(Lee, 1996)很重要。带电的火山灰颗粒与具有相同极性的净电荷的羽状物之间的静电相互作用将不可避免地引起颗粒的悬浮。

使用静电力和大气气体阻力影响下的粒子运动模型评估从大羽流的上部区域释放的火山灰的迁移（参见GSA数据库1中的方法）。假定释放的灰云足够脆弱，可以忽略颗粒之间的相互作用，并且羽流内的电荷作为具有随机分布的点电荷场产生。假设在小颗粒上的饱和和表面电荷为 $-1.0 \times 10^{-5} \text{Cm}^{-2}$ ，与火山灰上的电荷测量一致（Gilbert等，1991；Mather和Harrison，2006）。粒子电荷在模型中被认为是恒定的。

颗粒的动态行为如图1所示，表明直径为50,100和500 nm的颗粒，从具有-10 C净电荷的喷发柱通过对流上升达到50 km的高度，可以在约2小时内分别达到110, 90和60公里的海拔高度。鉴于大型火山爆发发生在较长时间尺度上（例如公元1991年皮纳图博火山[菲律宾]喷发的高潮期为9小时；全球火山活动计划，1991年），悬浮颗粒有足够的时间达到最大高度，如果他们在这段时间内保持带电。

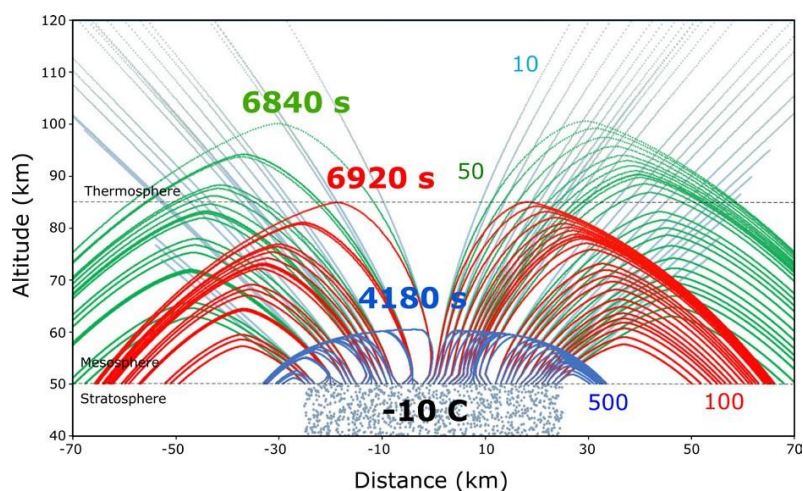


图 1 模拟的 50 千米直径火山岩羽流上（具有随机分布的电荷和-10C 的净电荷）直径为 100 纳米，50 纳米和 10 纳米的火山颗粒的轨迹。粒子的饱和表面电荷为 $-1.0 \times 10^{-5} \text{C m}^{-2}$ 。10nm 粒子（灰色）的数据点间距表示速度。平流层中的灰点表示羽流内的点电荷。粗体字显示达到峰值高度的时间

然而，由于与大气中的正离子的相互作用，会发生火山颗粒的电荷松弛，并且会限制悬浮。基于气体动力学理论，电荷弛豫时间估计为 100-1000 秒，假设电荷转移效率高（Mather 和 Harrison，2006；Harrison 等，2010）。在大爆炸性喷发中产生的火山灰通常是硅质的，并且由具有从属硅酸盐晶体碎片的玻璃支配；两者都是绝缘体（石英和玻璃的体积电阻率，例如，分别为 10^{12} - 10^{14} 和 $10^4 \Omega \text{ m}$ ；Telford 等，1990），并且由于电荷有限，可能比导体具有更长的电荷弛豫时间移动性。为了研究电荷弛豫的大小，作为与石英的类似物，在聚碳酸酯上测量电荷的衰减。使用聚碳酸酯是因为它可以通过摩擦电技术带负电，并且具有与石英相似的电阻率（参见数据库）。在 $\sim 10^9 \text{m}^{-3}$ 的正离子密度和 $\sim 70\%$ 的湿度下测量的电荷半衰期为 7000s（图 2）。因此，火山粒子的电荷半衰期可能足够长以允许悬浮进入中间层，特别是在正离子密度低的情况下 $<70 \text{ km}$ 的高度（ 10^7m^{-3} ；Arnold 和 Krankowsky，1979；Fig 3）。然而，一旦它们到达电离层(D-层 $> 80 \text{ km}$)，由于大气离子密度为 $\sim 10^{10} \text{m}^{-3}$ （Arnold 和 Krankowsky，1979），粒子的电荷显著损失将会发生。晶体碎片的较长电荷半衰期也可导致它们比玻璃颗粒更快地悬浮到更高的高度。

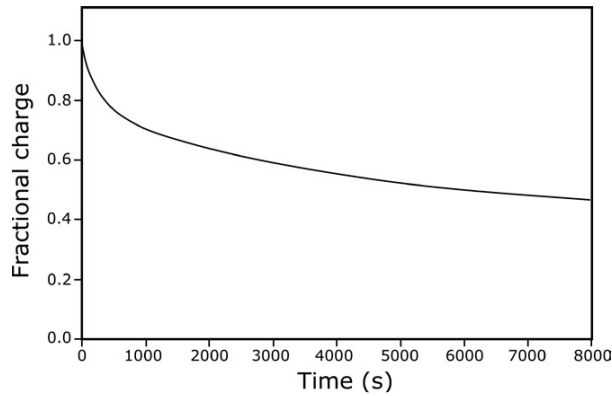


图 2 在聚碳酸酯盘上测量的分数电荷与火山粒子上的电荷弛豫类似。在大气正离子密度为 $\sim 10\text{m}^{-3}$ 下进行测量

其他因素也可能会影响静电悬浮。从羽流中分离出的带正电荷的气体可能会影响颗粒的轨迹；然而，由于这种气体不能通过对流进入平流层，它可能会横向散布。因此，在火山喷发的边缘附近可能限制灰烬悬浮；然而，考虑到 1991 年皮纳图博火山喷发直径约为 200 公里（Holasek 等，1996），并且 630 Ma 黄石羽流长达 1000 公里（Mastin et al., 2014），不太可能显著影响羽流上部区域大部分灰烬的悬浮。电离层净电荷通常较低（Arnold 和 Krankowsky, 1979），不太可能影响悬浮。

静电悬浮的气候效应

虽然具有大净电荷的火山羽流可能通过电荷分离引起电离层电位的变化，但静电悬浮会将负电荷带入电离层，从而降低大气中的正离子密度。在几次火山爆发期间观察到了电离层电流的全球尺度扰动，证明了火山爆发对电离层的影响（Lastovicka, 2003; de Ragone 等，2004）。虽然这种扰动已经被解释为重力波的结果（Lastovicka, 2003; de Ragone 等，2004），但它们也可以解释为悬浮粒子加入负电荷的结果。电离层对电荷变化的响应时间模型表明，全球平衡发生在 10^2 秒（Jánsky 和 Pasko, 2014），表明大型火山爆发的静电效应是立即的。

通过爆发性火山爆发对电离层扰动的观测表明，它们随喷发量级而变化（de Ragone 等，2004），与羽流净电荷的增加和向电离层注入较大质量的电荷载体一致。最大的火山爆发，例如 630 Ma 喷发的黄石火山口，比 1991 年的皮纳图博火山喷发的爆发量高出几个数量级（Holasek 等，1996; Mastin 等，2014），预计会喷出更大量的灰尘进入高层大气。500 吨饱和和 200nm 直径火山灰的总电荷相当于 $5 \times 10^5 \text{C}$ 的全球电路中存储的总电荷（Rycroft 等，2000）（电离层形成的电容器系统）如果添加到电离层可能会导致大气电势全球崩溃。超级火山羽流的质量约为 10^{11} 吨（Mastin 等，2014），因此 500 吨悬浮颗粒占总质量的极小部分。然而，估算悬浮灰的质量是复杂的，因为它可能取决于羽流上部区域的动力学，其中相互静电相互作用是重要的，并且取决于电荷产生，分离和耗散的机制，这些影响当地电荷分配。带电灰分的悬浮也导致电荷的损失，因此需要通过碎裂来继续产生电荷并通过从电火花中除去气体来进行电荷分离以使得能够悬浮大量的电荷。但是，这些机制应该在爆发性爆发期间继续运作。因此，大爆炸性喷发可能对全球电路产生重大影响。

大气电势由于其对云微物理的影响而缓和云的形成,特别是通过垂直离子电流流动形成云核,生长云核的电离和液滴充电(Harrison 和 Ambaum, 2009)。已经证明电势会影响云底的高度(Harrison 和 Ambaum, 2013)。因此,大气电场的显著破坏以及电离层的短响应时间可能会在超级火山喷发期间干扰云的形成,从而导致全球云层覆盖和降水减少。这与由于高气溶胶负荷导致的火山羽流附近的降水增加形成对比。全球抑制云的形成可能会增加大气中的 H₂O 含量,因此在超级火山喷发后,在电离层的恢复期和正常云形成的恢复期,可能会导致云层覆盖和降水增加。因此,火山灰的静电悬浮可能导致全球气候的短期变化,这种变化不同于平流层气溶胶引起的变化。

1883 年喀拉喀托火山喷发

1883 年 8 月 26 日 Krakatau (印度尼西亚) 爆发后的气温数据来自欧洲, 北美, 俄罗斯和澳大利亚的 47 个站点, 如图 4 所示。这些站点的平均最高和最低温度在 1883 年 8 月 22 日开始下降, 在 Krakatau 恢复活动后, 直至 9 月 12 日结束, 当时平均温度比前 8 年的平均温度低 4° C。没有一个站或地理位置受限的站点对低平均温度负责。从喀拉喀托火山喷发前后的降水频率来看, 8 月 22 日至 8 月 27 日期间, 记录降水的气象站数量最少, 总共 138 个站点。在伦敦皇家学会关于火山喷发的报告中记录了在喀拉喀托火山喷发后日落和日出时不寻常的光学现象, 并记录了平流层气溶胶在不同地点的到来(Symons, 1888)。该报告记录了 1883 年 11 月 9 日英国萨里的气溶胶产生的第一次不寻常的黄昏余辉。平均温度的下降因此发生在欧洲平流层气溶胶之前。

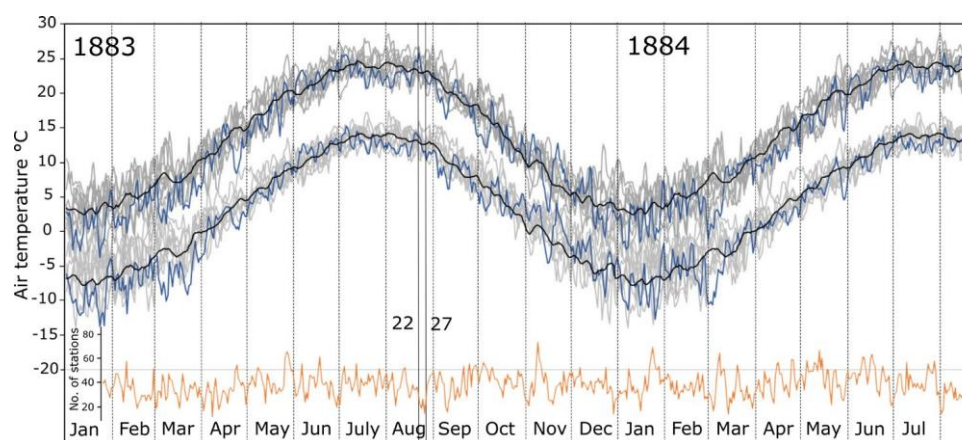


图 4 1883 年北美, 欧洲, 俄罗斯和澳大利亚 47 个站点测量的平均最高和最低日气温 (蓝线)。喀拉喀托[印度尼西亚]火山爆发发生在 1883 年 8 月 22 日至 27 日之间。黑线显示 1875-1882 的平均日平均温度, 使用移动平均线在 5 天内平滑。灰线表示 1875-1882 的 47 个站的平均日平均温度范围。平均气温从 1883 年 8 月 22 日至 9 月 12 日减少。橙色曲线显示记录降水的气象站数 (136 个)。这在 1883 年 8 月 22 日至 8 月 27 日之间降至最低 (间隔用实线垂直线表示)。数据来自美国国家海洋和大气管理局气候数据库

(<https://www.ncdc.noaa.gov>)

然而, 如果全球电路的变化缓和了云的形成, 那么全球分布的站点的气温将低于平均水

平。特别是降雨频率的降低也与喷发期间云形成的抑制一致。这种影响可能很复杂，因为它们取决于特定位置的主要天气条件，云层覆盖已经很高或低湿度抑制云层形成的影响很小。考虑到在如此短的时间尺度上天气数据的固有变化，低平均温度和降水与喷发的一致性悬浮灰的预测效果一致，但不是确凿的证据。1883年喀拉喀托火山爆发的火山爆发力指数(VEI)为6级但产生了异常强烈的压力波(Self, 1992)，因此可能无法代表其他这种规模的火山的爆发。

然而，存在1883年Krakatau火山爆发将火山粒子静电悬浮到中间层的间接证据。极地中层云(PMCs;夜光云)是在1885年火山喷发后首次发现的(Jesse, 1885);然而，与火山爆发的因果关系已被驳回，因为人们认为没有机制将火山粒子注入中间层(Austin, 1983)。然而，对PMC发现统计数据的分析(Thomas和Olivero, 2001)显示了它们在1885年和1887年之间的存在跳动，这与通过静电悬浮将火山灰注入中间层一致。有趣的是，英国皇家学会关于喀拉喀托的报告详细描述了1883年9月9日在萨里日落时的一次观察，该观察与PMC的描述非常相似，并且可能表明中间层内存在火山灰：“这种情况的显著特征[天气]是伟大的卷云上方的圆形积云升高，[彩虹]颜色肯定不常见。”(西蒙斯, 1888年, 第159页)。

可用于评估1815年Tambora(印度尼西亚;Raible等, 2016)的大型VEI7喷发的静电悬浮效应的可靠天气数据很少。但是，在欧洲(Wheeler和Demarée, 2006)，在4月下旬火山喷发结束后，1815年5月和6月的月份显著潮湿。然而，欧洲的非季节性天气与Tambora喷发的硫酸盐气溶胶无关，该喷发直到1816年初才到达该地区(Clausen和Hammer, 1988)，但可以通过悬浮火山灰导致的云层的抑制和随后的恢复来解释。此外，历史学家还注意到欧洲的潮湿天气是滑铁卢战役中拿破仑波拿巴战败的一个因素(Wheeler和Demarée, 2006)。

结 论

在大型火山羽流上灰尘的静电悬浮是爆炸性爆发期间产生的高净电荷的不可避免的后果。这里的模拟结果表明，在火山喷发期间，直径<500 nm的火山灰可以在中间层达到高海拔，并且必然会向电离层输送电荷。与超级火山羽流的质量相比，输送相当于存储在全球电路中的电荷所需的火山灰的质量是微不足道的。大气电势的显著中断可能会对云的形成以及气候产生突然的全球影响。可以预期效果的大小随喷发量级而变化。1883年喀拉喀托火山喷发的数据表明，VEI6喷发只会产生轻微的影响；然而，与大陆级羽流相关的超级火山喷发和持续时间延长可能会产生明显的直接影响。

Genge M J. Electrostatic levitation of volcanic ash into the ionosphere and its abrupt effect on climate[J]. *Geology*, 2018, 46(10): 835-838. (DOI: [10.1130/G45092.1](https://doi.org/10.1130/G45092.1))

翻译: [赵必强](#) (中科院地质与地球所)