104: 11~ 17

- 11 Mosser D D, Caron A W, Bourget L, et al. Role of the human heat-shock-protein Hsp70 in protection against stress-induced apoptosis. *Mol Cell Biol*, 1997, 17(9): 5 317~ 5 327
- 12 Mehlen P, Mehlen A, Godet J, et al. Hsp27 as a switch between differentiation and apoptosis in murine embryonic stem-cells. *J Biol Chem*, 1997, 272(50): 31 657~ 31 665

(1998-07-21 收稿, 1998-11-27 收修改稿)

皮纳图博火山喷发物在南极点 雪层内的记录及其意义

Jihong Cole-Dai Ellen Mosley-Thompson 秦大河^④

(Bryd Polar Research Center, The Ohio State University, Ohio, 43210. Columbus, U. S. A. ;

④中国科学院兰州冰川冻土研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室, 兰州 730000)

摘要 1991年6月菲律宾皮纳图博火山喷发, 导致大气圈火山灰气溶胶含量激增, 连同1991年8月智利哈德森火山喷发释放的火山灰一道, 导致自1991年12月起南极点降水中 SO_4^{2-} 开始增加. 激光雷达同时也观测到富含火山微尘气团的到达. 雪样中火山微粒的电镜分析结果, 以及据物质平衡观测值估算的年代等表明, 1994年12月在南极点0.1~0.9 m雪层中可将2次火山喷发事件区别开来, 估算出南极点处皮纳图博火山和哈德森火山 SO_4^{2-} 的净通量分别为 (10.9 ± 1.1) 和 $(3.2 \pm 1.1) \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$. 南半球中、高纬度地区的火山喷发在南极雪冰中的信号大于低纬地区火山的影响, 这一方法可用来推算冰芯记录的古火山活动的量级和规模.

关键词 皮纳图博 火山喷发 冰芯记录 南极

火山喷发向大气圈输入大量气体物质和火山灰, 气体的主要成分是 SO_2 , 可在几周内氧化形成 SO_4^{2-} , 并形成以此为核心的气溶胶微粒. 气溶胶在大气圈内传输、分布并滞留一段时间, 影响大气圈的光辐射通量, 因此在一定程度上影响了地球气候^[1]. 1991年6月开始喷发的菲律宾皮纳图博火山($15^\circ 08' \text{ N}$, $120^\circ 21' \text{ E}$)系本世纪最剧烈的火山喷发活动之一, 卫星监测估算约20 Mt SO_2 被喷入平流层^[2], 在20~30 km高度内形成微粒层, 并在不足1个月就向两极扩散, 到1992年年中已覆盖地球表面^[3, 4]. 南极麦克默多站和阿蒙森-斯科特站的激光雷达也观测到火山灰物质的抵达^[5, 6]. 由于大规模火山喷发物可使地球大气圈内硫化物含量剧增, 并持续数月或数年之久, 导致极地降水中 SO_4^{2-} 浓度增加^[7], 因此, 南极冰盖浅层雪内和冰芯内 SO_4^{2-} 含量的高峰值, 可作为评估现代火山和古火山的活动规律及其对气候影响的主要识别标志. 本文通过对南极点附近冰盖表层2 m雪内的冰川化学分析研究, 旨在捕捉皮纳图博火山活动记录, 并与过去百年来大规模火山喷发特征进行对比, 估算它们对大气圈环境质量的影响.

1 样品的采集、分析和结果

本文第1作者于1994年12月在距南极点约10 km、方位角分别为 110° 和 235° 处取得2支20 m长的浅粒雪(冰)芯(图1). 冰芯系在洁净条件下钻取, 保持冻结状态运往美国俄亥俄州立大学 Byrd 极地研究中心的冰库. 将冰芯顶部2 m按每0.03 m切样, 融化并分析主要阴离子(Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-)和阳离子(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})含量. 样品分析方法见文献[8].

图1 冰样采集地点及皮纳图博火山(P.V.)、哈得森火山(H.V.)、阿贡火山(A.V.)、克拉克涛火山(K.V.)及坦布拉火山(T.V.)位置示意图

同时在钻孔附近挖了1.5 m深的雪坑, 自顶部到0.9 m深处切取雪样, 融化后存入净化处理的聚乙烯瓶内, 密封、冻结状运回 Byrd 极地研究中心实验室, 再融化后用0.2 μm 滤片过滤, 干燥后用 JEOL JSM_820 型扫描电镜和 X 光能谱仪对微粒的形态和化学成分进行了分析. 美国地质调查局在皮纳图博火山喷发时采集了火山灰样品, 在中国南海海底^[9]和菲律宾吕宋岛^[10]也收集了此次喷发的火山玻璃样品. 为对比验证我们的结果起了关键作用. 将上述4组资料列入表1, 可见南极点附近雪坑雪样内火山微粒的化学成分与皮纳图博火山灰相似, 但火山灰只在0.10~0.44 m深度的雪层内发现, 估计时间为1993年初到1994年年中.

图2给出了冰芯顶部2 m深度内 SO_4^{2-} 浓度随深度(年代)变化曲线情况. 作为冰川学研究内容之一, 1992年在南极点建立了由236支花杆组成的冰面应变网, 同时亦观测冰川物质平衡. 该网系由南极点向北6个方向各延伸20 km的6条线段组成, 两相邻线段之间的夹角为 60° . 实测结果表明, 从1992~1996年, 测网内花杆实测平均纯积累量为 (0.23 ± 0.09) m雪层厚度, 由此估算出从顶部1994年12月到1991年12月3个平均年层的深度-年代关系.

表1 1993年和1994年南极点降水中的火山灰成分与皮纳图博火山灰成分的对比
(按重量百分比计, 括号内为测量标准误差)

南极总雪样本 ^{a)} h = 10		火山喷口采样 ^{b)}	皮纳图博火山灰微粒			
			中国南海海底 ^[9]		吕宋岛 ^[10]	
			1	2	3	4
SO ₂	77.35(0.62)	76.68(0.90)	77.14	77.5	76.55(0.78)	73.69(3.27)
Al ₂ O ₃	12.56(0.25)	12.87(0.41)	12.96	12.96	12.47(0.23)	13.14(1.26)
Na ₂ O	2.56(0.42)	3.02(0.38)	2.26	2.08	3.52(0.72)	2.85(0.55)
K ₂ O	3.88(0.34)	3.77(0.37)	2.77	2.67	3.07(0.24)	2.80(0.48)
CaO	1.52(0.19)	1.72(0.36)	1.15	1.15	1.20(0.04)	2.22(1.50)
MgO	0.70(0.15)	0.58(0.10)	0.22	0.20	0.10(0.02)	1.39(0.87)
FeO	1.13(0.18)	1.13(0.38)	0.81	0.79	0.75(0.03)	1.39(0.87)
TiO ₂	0.23(0.12)	0.18(0.08)	0.12	0.12	0.06(0.03)	0.16(0.13)
MnO	0.08(0.05)	0.05(0.04)	/	/	/	/
总计	100.00	100.00	97.43	97.47	97.11	97.08

a) 系指雪坑中采集的雪块, 深度见图2, n 系收集到的微粒粒数. b) 美国地质调查局 W. E. Scott 提供的样品

图2 南极点1号冰芯和2号冰芯顶部2 m内 SO₄²⁻ 浓度与深度的关系

图中斜线部分分别表示第1、第2火山信号, 水平线代表非火山源 SO₄²⁻ 浓度平均值.

0.1~0.9 m 深度上标明了雪坑雪块的采样深度区间

同时, 经过滤后的雪坑雪样内有数粒火山玻璃, 发现其物质成分与皮纳图博火山的相同(表1). 火山玻璃的层位在 0.10~0.44 m 深度内, 对应的时间估计为 1993 年年初到 1994 年年中, 这一时间域的估计也同时考虑到了气溶胶的降落略滞后于火山玻璃的时间差. 0.4 m 以下雪层内未见火山灰.

2 讨论

(1) 南极冰盖雪冰内的火山信号与非火山源 SO₄²⁻. 海洋微体生物在一定气候条件下繁殖、生长、死亡和腐败, 并向大气圈排放以 DMS(硫酸二甲脂) 为主要成分的有机硫化物, DMS 在大气中光解成 SO₄²⁻, 随气团运移并形成降水沉积到南极冰盖表面. 这一部分 SO₄²⁻ 即为海洋生物源 SO₄²⁻. 在南极冰盖内搜寻火山信号记录, 即火山喷发释放出的 SO₄²⁻ 时, 必须首先排除这一来源的 SO₄²⁻ [11]. Delmas 等人 [12] 认为, 海洋生物源 SO₄²⁻ 在南极冰盖内的可变性较

低. 也有认为海洋生物源 SO_4^{2-} 受到 El Niño 的影响^[13], Legrand 和 Feniet-Saigne 在南极冰芯中发现 MSA 和 El Niño 似有相关关系^[14]. 南极冰盖内还有一部分 SO_4^{2-} 系海盐来源. 本文认为非火山源 SO_4^{2-} 主要由海洋生物源和海盐 SO_4^{2-} 组成, 其中后者亦较稳定, 所以在理想条件下, 非火山 SO_4^{2-} 浓度随深度的变化呈连续正弦曲线分布.

1991 年皮纳图博火山喷发前系全球火山活动低潮期^[3], 对应南极点的雪层深度在 0.9 m 以下, 故在此深度之下可视为未受火山活动影响. 若将两孔内火山和非火山源 SO_4^{2-} 浓度平均, 两孔内的差值分别为 (1.01 ± 0.11) 和 $(1.05 \pm 0.09) \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$ (误差可信度达 95%).

图 2 可见, 两支冰芯内的 SO_4^{2-} 浓度从约 0.9 m 向上部递增, 直到 0.1 m 处 SO_4^{2-} 均保持较高浓度, 对应时间为 1991 年年末到 1994 年年中, 与皮纳图博火山喷发物在南极大气圈中滞留时间吻合. 可见 SO_4^{2-} 高浓度代表了南极地区大气和降水受到火山喷发物质影响的阶段. 图中还可以看到 0.65 m 处存在一个 SO_4^{2-} 低值, 从而将上述火山信号分为两个, 其中 0.65~0.90 m 段窄, 称为第 1 火山信号, 0.05~0.10 m 段较宽, 为第 2 火山信号. 由于物质积累速率并非年年相等, 因此必然有定年的误差, 本文定年最大误差估计为 40%.

(2) 哈德森火山信号. 1991 年 8 月, 南美洲智利哈德森火山 ($45^\circ 55' \text{S}$, $73^\circ 00' \text{W}$) 喷发, 约 1 500 kt SO_2 被排放到大气圈内^[15], 为皮纳图博排放量的 8%. 哈德森火山距南极洲较近, 其喷发后物质立即南移^[16], 设在南极洲的激光雷达在 1992 年 9~10 月份观测到含哈德森火山喷发物的云团抵达^[6]. 哈德森微粒云团高度较低, 而皮纳图博的位于平流层内, 位置较高. 估计最迟到 1991 年年底, 哈德森的微粒已降到南极冰盖表面, 而位置较高的皮纳图博火山喷发物则在 1992 年年中以后才开始逐渐沉降到南极冰面. 同时, 由于哈德森火山喷发量大大低于皮纳图博的, 故在雪层中的信号强度也相应较弱. 因此, 这里将第 1 火山信号解释为哈德森火山信号, 第 2 信号则属皮纳图博火山.

雪块样品中发现的火山玻璃微粒也与以上解释吻合. 仅在 1993 年初和 1994 年的雪块中发现了与皮纳图博火山喷发物成分相同的物质 (雪块 1 和 2, 图 2), 在其他雪块中未见到, 间接说明第 1 火山信号与皮纳图博火山喷发物关系较小, 或解释为 2 次火山喷发物在南极点沉降重合期很短.

(3) 皮纳图博火山喷发 SO_4^{2-} 通量估算. SO_4^{2-} 的通量系浓度与代表时间的样品长度 (以水当量计) 的乘积, 而火山喷发的净通量则为总通量与非火山源通量之差. 按此方法, 非火山源 SO_4^{2-} 通量为 0.9 m 以下 (0.9~2 m) 所有样品 SO_4^{2-} 平均值与水当量的乘积. 而皮纳图博火山源 SO_4^{2-} 通量则为其浓度的平均值与第 2 信号的雪层厚度 (水当量) 的乘积, 第 2 火山信号在 1 号和 2 号冰芯内的深度区间分别为 0.1~0.65 和 0.15~0.65 m (见图 2).

据上述方法, 将估算结果列入表 2, 可见哈德森火山喷发的 SO_4^{2-} 总量较小, 但在南极点雪样中的 SO_4^{2-} 净通量却达皮纳图博的 1/3, 说明南半球中、高纬度的火山喷发对南极雪冰内火山信号强弱的影响明显大于低纬度地区火山. 表 2 还可看到, 2 支冰芯内的 SO_4^{2-} 净通量几无差别, 进一步说明南极点的火山信号并无很明显的空间差别. 将皮纳图博与近百年来的几个低纬地区大型火山喷发相比, 可看到其与 1963 年的阿贡 (Agung)、1883 年的克拉克涛 (Krakatoa) 火山喷发强度相当, 但仅为 1815 年的坦布拉 (Tambora) 的 15%.

表2 沉降到南极点1号和2号冰芯内的1991年皮纳图博和哈德森火山喷发的 SO_4^{2-} 净通量表, 附有已知的近期低纬地区3次火山喷发在南极雪冰中 SO_4^{2-} 的净通量^[8](表中量纲均为 $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$)

	1号冰芯	2号冰芯
皮纳图博火山(第2火山信号)	10.9 ± 1.2	10.9 ± 2.9
哈德森火山(第1火山信号)	2.9	3.6
阿贡(1963)	9.1	
克拉克涛(1883)	8.9	
坦布拉(1815)	70	

致谢 美国 Nebraska 大学 PICO 负责钻取冰芯, 美国地质调查局 W. E. Scott 提供了皮纳图博火山灰样品, 作者表示感谢. 本工作为美国国家自然科学基金会(编号: OPP-9321478, OPP-9526725)、中国科学院(编号: KZ951_A1_05)和国家科委科技攻关计划(编号: 98-927)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Rampino M R, Self S. Historical eruptions of Tambora (1815), Krakatau (1883), and Agung (1963), their stratospheric aerosols and climatic impact. *Quaternary Research*, 1982, 18: 127~ 143
- 2 Krueger A J, Walter L S, Bhartia P K, et al. Volcanic sulfur dioxide measurements from the total ozone mapping spectrometer instruments. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 14 057~ 14 076
- 3 Hitchman M H, McKay M, Trepte C R. A climatology of stratospheric aerosol. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 20 689~ 20 700
- 4 Trepte C R, Veiga R E, McCormick M P. The poleward dispersal of Mt. Pinatubo volcanic aerosol. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 18 563~ 18 573
- 5 Cacciani M, Girolamo P D, di Sarra A, et al. Volcanic aerosol layers observed at South Pole, September 1991-June 1992. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20: 807~ 810
- 6 Deshler T, Johnson B J, Rozier W R. Changes in the character of the polar stratospheric clouds over Antarctica in 1992 due to the Pinatubo volcanic aerosol. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21: 73~ 276
- 7 Hammer C U. Past volcanism revealed by Greenland ice sheet impurities. *Nature*, 1977: 270: 482~ 486
- 8 Dai J, Thompson L G, Mosley-Thompson E. A 485-year record of atmospheric chloride, nitrate and sulfate: results of chemical analysis of ice cores from Dyer Plateau, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 1995, 21: 182~ 188
- 9 Wiesner M G, Wang Y, Zheng L. Fallout of volcanic ash to the deep South China Sea induced by the 1991 eruption of Mount Pinatubo (Philippines). *Geology*, 1995, 23: 885~ 888
- 10 Pallister J S, Hobbitt R P, Reyers A G. A basalt trigger for the 1991 eruptions of Pinatubo volcano. *Nature*, 1992, 356: 426~ 428
- 11 Cole Dai J, Mosley-Thompson E, Thompson L G. Annually resolved Southern Hemisphere volcanic history from two Antarctic ice cores. *Journal of Geophysical Research Letters*, 1997
- 12 Delmas R J, Kirchner S, Palais J M, et al. 1000 years of explosive volcanism recorded at the South Pole. *Tellus*, 1992, 44B: 335~ 350
- 13 Dibb J E, Whitlow S I. Recent climate anomalies and their impact on snow chemistry at South Pole, 1987~ 1994. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23: 1 115~ 1 118
- 14 Legrand M, Feniet-Saigne C. Methanesulfonic acid in south polar snow layers: a record of strong El Niño. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18: 187~ 190
- 15 Doiron S D, Bluth G J S, Schnetzler C G, et al. Transport of Cerro Hudson SO_2 clouds. *EOS Transactions of American Geophysical Union*, 1991, 72: 489
- 16 Schoeberl M R, Doiron S D, Lait L R, et al. A simulation of the Cerro Hudson cloud. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 2 949~ 2 955

(1998-02-20 收稿, 1998-07-17 收修改稿)