

冰岩芯微粒分析：古环境的一种标志*

L.G.汤普森(Thompson)

(美国·俄亥俄州立大学极地研究所)

引言

大气中的微粒有好几种来源：(1)风从沙漠刮起的尘土；(2)火山爆发所喷出的火山灰；(3)风从海洋中刮起的海盐；(4)动植物遗体腐烂所产生的萜烯；(5)来自宇宙的微尘；(6)近数百年来燃烧散发出的烟油、烟尘、硫酸盐及硝酸盐等。

通过干空气的吹刮、降雨、降水和冲刷过程，一些微粒就被搬运和沉积在冰川和冰盖上。冰岩芯研究的目的就在于发现这样一种记录，解释微粒浓度与粒径分配随时间的变化。它有两个主要的研究对象：(1)把冰岩芯中微粒浓度与粒径变化作为大气浊度的标志，把 $\delta^{18}\text{O}$ 等作为古气温的标志，从而确定大气浊度与气候的关系。(2)根据微粒浓度的季节变化去估算冰岩芯的时间尺度。

历史

分析冰岩芯中微粒浓度的基本程序是由马歇尔在1962年建立^[1]并由贝德等在1965年大大改进的^[2]。泰勒与格里奥兹1964年在俄亥俄州立大学极地研究所改进了无尘室分析技术^[3]。在漠密顿的报告中(1967, 1969)^[4,5]，谈到了这种设施与技术的发展情况。汤普森在1973年与1977年报道了俄亥俄州立大学实验设施的发展情况^[6,7]。在1973年，每周平均只能分析40个样品。在1983年，每天能测定120多个样品。所以，在这一段时间里，样品分析的数量与质量都有了很大的提高。

实验室设备

取自冰川的样品的微粒测定工作是在100级无尘室进行的。在无尘实验室内装有三套多频道微粒计数器。两套是Coulter TA II°型计数器和一套Hiac 320型计数器。Coulter TA II°型计数器可测出微粒总浓度以及直径从 $0.5\mu\text{m}$ 到 $12\mu\text{m}$ 的十六个粒径范围的粒级分配。而Hiac 320型计数器则可测定直径为 $2.0\mu\text{m}$ 到 $90\mu\text{m}$ 的12个粒级的级配。有一套多孔Milli Q-3系统与Milli Q-2净水系统，提供大量稳定的高质量过滤和消离子净水以

*本文是L.G.汤普森博士为本刊写的专文，由邱国庆同志约稿，并代译为中文；全文最后由高仁恩先生校核。

供分析之用。实验室工作人员必须穿适当的无尘工作服,测定冰岩芯微粒工作就得到了理想的工作条件。Coulter TA II°型计数器与屋内微型计算机相联接以便于收集与整理数据。每天大约可分析120个样品。

用一台蔡斯显微镜和S₄₋₁₀剑桥电子扫描显微镜和OrtecX射线散射系统来鉴定分析各单独颗粒。

四个深孔冰岩芯微粒研究的总结

迄今为止,已经对四个钻孔的冰岩芯进行微粒分析。这些钻孔至少都包括末次冰期(相当于晚威斯康星冰期,即玉木冰期)和冰后期的冰岩芯。对这些冰岩芯也都分析了¹⁸O/¹⁶O比率($\delta^{18}\text{O}$),而这正是反映冰期与冰后期古气候变化的标志。这四个钻孔的位置是:罗斯冰障的J-9(416米)(莫丝莉-汤普森与汤普森,1982)[8];南极的伯尔德孔(2164米)(汤普森等,1975;爱泼斯坦等,1970)[9,10];格陵兰世纪营地(Camp Century)(1387米)(汤普森,1977;丹斯加阿特等,1971)[11,12],以及南极的多姆C冰穹孔(905米)(别赖阿特等,1982,汤普森等,1981)[13,14](图1)。

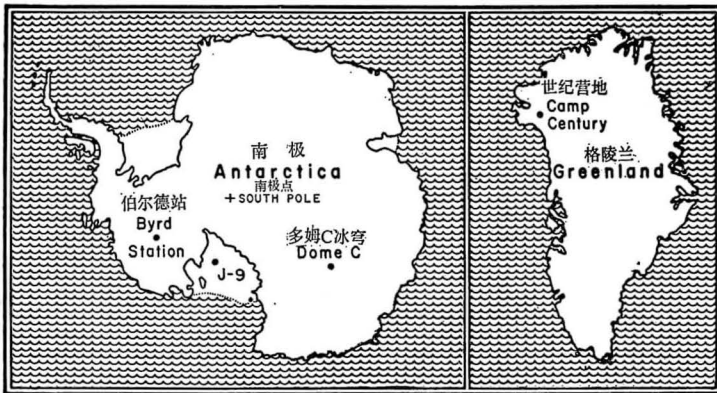


图1 J-9、伯尔德站、世纪营地和多姆C冰穹钻孔位置

Fig.1. Location of the J-9, Byrd Station, Camp Century and Dome C ice core drill sites

在南极西部的伯尔德孔已经发现:大量微粒层次的出现是与低温时期直接相互关联的($\delta^{18}\text{O}$ 的低值反映了当时的低温条件),接近威斯康星冰期之末,微粒浓度最高。用光学显微镜和扫描电子显微镜鉴定单个颗粒以及用X射线能量散射系统作元素分析,表明该处在晚冰期冰岩芯火山玻璃质含量超过了它上面的全新世的冰岩芯(Thompson, 1977)[11]。这些结果与高和威廉逊的结果一致[15];他们在1971年报道说,主要在晚威斯康星期的冰川冰发现了25层灰层(平均粒径 $50\mu\text{m}$)和2000个以上的微尘层(平均粒径 $5\mu\text{m}$)。在世纪营地钻孔中,也发现在末次冰期之末的冰岩芯中有大量微粒,并且发现这些含大量微粒层次的出现与当时的低温直接有关。这里冰岩芯中的微粒主要是粘土矿物(汤普森,1977;库迈,1977)[11,16]。我们最近在南极东部的多姆C冰穹冰岩芯(图2)以及罗斯冰障J-9的冰岩芯分析都表明:末次冰期形成的冰岩芯的 $\delta^{18}\text{O}$

的负值很大, 而微粒含量显著地高。图 3 表示了由威斯康星冰岩芯到全新世冰岩芯典型的微粒浓度变化。取自 106.7—107.5 米深处的冰岩芯形成于全新世, 而 525.5 至 576.3 米的冰岩芯形成于威斯康星期。后者不但微粒背景值较高, 而且样品间微粒浓度变化也很大。

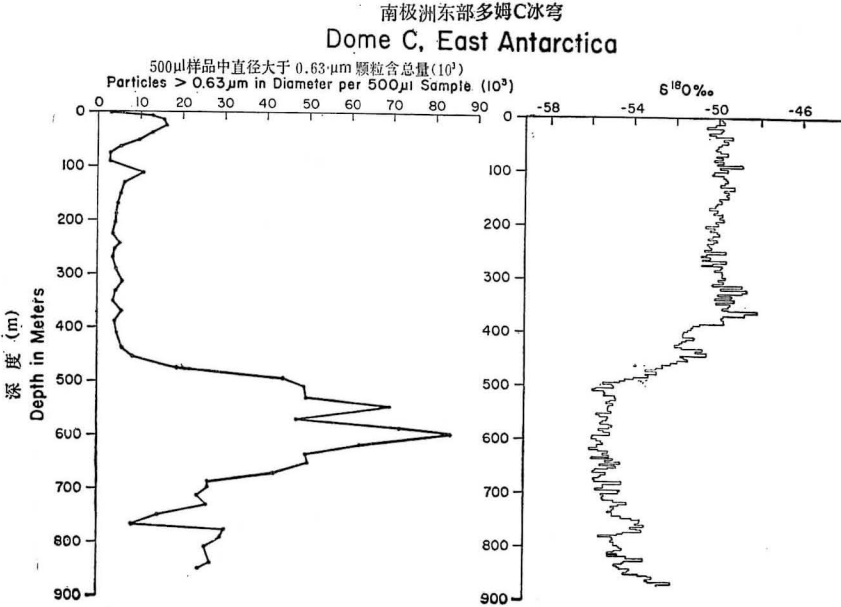


图 2 多姆C冰穹孔51个段落的平均微粒浓度。右面的 $\delta^{18}\text{O}$ 测值(洛里亚斯等, 1979)显示高微粒浓度与 $\delta^{18}\text{O}$ 高负值时间上的密切关系。晚威斯康星期冰岩芯微粒大量增加这一情况对所有四个深孔分析资料来说是典型的

Fig.2. Average concentration of microparticles for 51 sections of the Dome C core are presented. The $\delta^{18}\text{O}$ measurements plotted on the right (Lorius et al., 1979) illustrate the strong temporal correlation between high particle concentrations and more negative $\delta^{18}\text{O}$ measurements. The large increase in particles in Late Wisconsin ice is typical of all four deep cores analyzed

末次冰期冰中微粒浓度增大的原因, 大概在于当时大气含尘量增大, 或者在于当时年纯积累量减小, 或者二者均起作用。在向全新世过渡的过程中, 每一个孔的岩芯的微粒浓度都迅速减小。多姆C冰穹孔的岩芯中, 微粒级配表明, 某些段落只含有直径小于 $2\ \mu\text{m}$ 的很细的微粒, 而其它一些段落则具有双峰型级配: 大量小于 $2\ \mu\text{m}$ 的细颗粒和较少量的直径为 40 至 $80\ \mu\text{m}$ 的大碎片。这些大直径的颗粒肯定是火山玻璃质的, 人们认为它是来自南极当地的火山作用。

对各岩芯段落都用光学显微镜随机鉴定 350 粒微粒, 并按照形态、颜色和光泽进行分类。每个钻孔都鉴定 5000 粒以上。然后, 按照目视分组情况, 取一定数量的微粒进行元素分析: 对伯尔德孔分析了 105 粒, 格陵兰孔分析了 97 粒, 多姆C冰穹孔分析了 187 粒。对每一颗粒中存在的各元素所占的重量百分比按照 Ward Hygroup 算法系统 (Ward, 1963) [14] 作了客观比较。Hygroup 可求出组际变量的最大值与组内变量的最小值。伯尔德孔所分析的各段落中可以根据 Hygroup 来区别全新世与威斯康星冰期之间颗粒成分

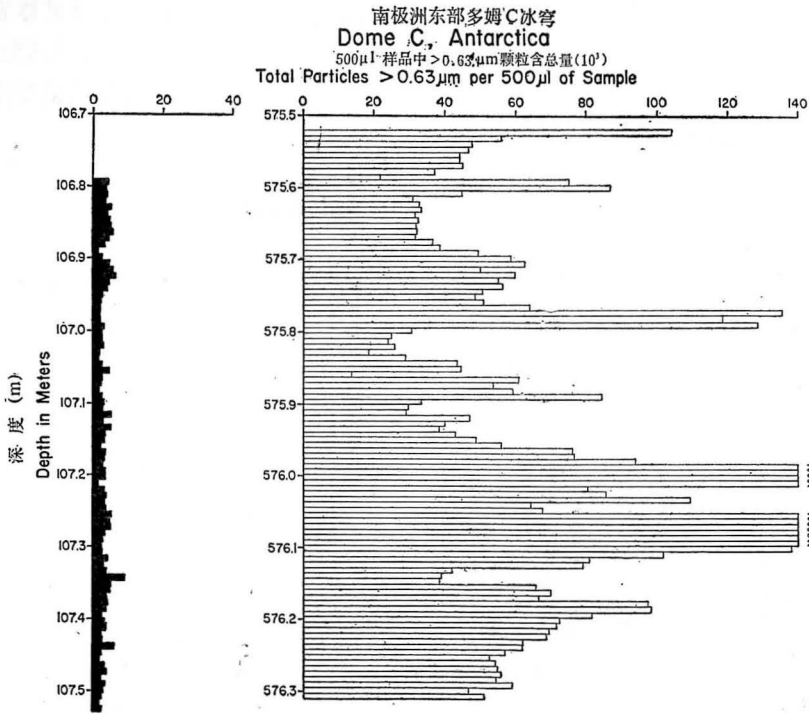


图3 106.7—107.5米冰岩芯代表全新世冰中的典型微粒变化情况。525.5至576.3米冰岩芯取自威斯康星期的冰，并代表晚威斯康星期冰中的典型的微粒变化情况

Fig.3. Ice core section 106.7-107.5 meters represents the typical microparticle variations found in Holocene ice. Ice core section 525.5 to 576.3 meters is from the Wisconsin portion of the core and represents typical microparticle variations found in Late Wisconsin ice

的差别。威斯康星期的冰是以Si、K颗粒含量很高为特点的。在多姆C冰穹孔冰岩芯所分析的微粒中，全新世与威斯康星期冰岩芯微粒化学成分只有少许的差别。在最大的一组微粒中含有以下的元素，其含量按以下顺序递减：Si>Al>Fe>K>Na>Ca。在格陵兰岩芯颗粒的Hygroup运算结果中没能从成分中找出任何地层划分标志。颗粒最大组合含有以下元素，其含量按以下顺序递减：Si>Al>Fe>K>Ca。

根据微粒确定冰岩芯的年代

马歇尔(1962)^[1]，认识到南极伯尔德钻孔冰样的颗粒浓度的韵律变化，并提出可从这些韵律变化来检测年层。哈密尔顿与朗威1967年对比了格陵兰世纪营地孔700年前形成的冰样颗粒浓度和 $\delta^{18}O$ 随深度的变化，并指出在冬天与早春格陵兰每单位体积降雪中所含颗粒多于一年中的其它月份^[18]。从这些早期的研究工作中人们已用微粒浓度来表示季节性沉积韵律和提供大致的时间尺度。哈默(1977)及哈默等(1978)曾用每年的微粒峰值来确定格陵兰冰岩芯的年代^[19,20]。汤普森(1973, 1977)，汤普森等(1981)，莫丝莉-汤普森和汤普森(1982)用微粒含量年变化来试验性地确定南极地区伯

尔德孔、多姆C冰穹孔和南极孔冰岩芯的年代〔6、14、8〕。最近,我们还发现微粒定年代的技术可用于研究热带冰川,例如秘鲁南部的奎尔卡亚冰帽(汤普森等,1979;汤普森,1980;汤普森等,手稿)〔21、22〕。这种方法和其它冰岩芯年代学方法一样,与其它独立的年代学方法,诸如氧同位素法及总 β 放射性测定等配合起来,取得了良好的效果。

结 论

微粒研究所取得的主要结论可以总结如下:

(1)在四个深孔冰岩芯分析中,靠近晚威斯康星末期时平均颗粒浓度增加300到1200%。由于这些记录来自南北半球,它们标志着晚威斯康星冰期大气浊度比全新世高。

(2)末次冰期颗粒浓度显示出很大的变化幅度,并显示出大气的环境与颗粒含量的急剧变化。

(3)由威斯康星冰期到全新世的变化是很突然的。在格陵兰的世纪营地孔中,从晚冰期到冰后期,在不到100年时间内,岩芯中很高的微粒浓度值一下子降到很低值。在南极东部的多姆C冰穹孔,同样根据颗粒浓度资料,这一过渡则发生在不到一千年时间内。

(4)颗粒含量的年变化可用来估计格陵兰、南极以及非极地地区冰川冰岩芯的时间范围。由于南极地区年积累量很低并有可能缺失某些年份的年层,因此要精确确定南极地区冰岩芯的年代,还很成问题。

(5)伯尔德、世纪营地和多姆C冰穹这几个钻孔冰岩芯的元素成分表明微粒是多来源的。微粒的来源取决于不同的地点和微粒沉积时不同的气象条件,这些钻孔中所得到的微粒数据表明,冰盖与冰帽中沉积了数量不等的微粒。尽管信息各异。这些数量上的差别是由于积累速度不同、地点不一和成岩过程的差别造成的。当很好地确定了微粒标志层以后,这些标志层就可以提供时间地层层次来确定各岩芯的时间关系。最重要的是,冰化学与微粒浓度及粒径级配可一道用来推断古风向。

未 来 研 究 方 向

现在看来,最值得提出的研究方向是:

(1)建立近一千年来各纬度上详细的气候记录。从最近秘鲁奎尔卡亚冰帽的研究成果看来,这个研究方向是可能的。

(2)应用粒径级配去识别微粒的一般来源及古风向。

(3)研究微粒移动与沉积过程。

(4)研究成岩作用对所保存的各层次的影响。

(5)应用扫描电子显微镜、X射线能量散射系统以及大颗粒的微量分析法使微粒化学分析更为定量化。

致谢:作者在工作中得到美国科学基金会极地研究计划部门以及气候动态室的支持,谨此向他们致谢。

参 考 文 献

- [1] Marshall, E. W., 1962, The stratigraphic distribution of particulate matter in the firn at Byrd Station, Antarctica; In *Antarctic Research*, Amer. Geophys. Union, Geophys. Monogr. No. 7, PP.185-196.
- [2] Bader, H., Hamilton, W.L. and Brown, P. L., 1965, Measurements of natural particulate fallout onto high polar ice sheets, Part I: Laboratory techniques and first results: U.S. Army Material Command, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, *Res. Rept.* 139, P.86.
- [3] Taylor, L. D. and Gliozzi, J., 1964, Distribution of particulate matter in a firn core from Eights Station, Antarctica; In *Antarctic Research Series*. Vol. 2, Amer. Geophys. Union, Wash. D. C., PP.267-277.
- [4] Hamilton, W.L., 1967, Measurement of natural particulate fallout onto high polar ice sheets: Part II: Antarctic and Greenland cores; U. S. Army Material Command, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, *Res. Rept.* 139, P.39.
- [5] Hamilton, W.L., 1969, Microparticle deposition on polar ice sheets: Ohio State Univ. Res. Foundation, *Inst. Polar Studies Rept. No.* 29, P.77.
- [6] Thompson, L.G., 1973, Analysis of the concentration of microparticles in an ice core from Byrd Station, Antarctica. The Ohio State University Research Foundation, Institute of Polar Studies, *Report* 46, P.43.
- [7] Thompson L.G., 1977, Microparticles, Ice sheets and Climate. The Ohio State University, Institute of Polar Studies, *Report* 64, P.48.
- [8] Mosley-Thompson, E. and L.G. Thompson, 1982, 900 years of microparticle deposition at the South Pole, *Quaternary Research*, 17(1), PP. 1-13.
- [9] Thompson, L.G., W.L. Hamilton and C. Bull, 1975, Climatological implications of microparticle concentrations in ice core from "Byrd" Station, Western Antarctica. *Journal of Glaciology*, 14(72), PP.433-444.
- [10] Epstein, S., Sharp, R.P. and Gow, A.J., 1970, Antarctic Ice Sheet; Stable isotope analyses of Byrd Station cores and interhemispheric climatic implications; *Science*, Vol.168, PP.1570-1572.
- [11] Thompson, L.C., 1977, Variations in microparticle concentration, size distribution and elemental constituents found in the Camp Century, Greenland, and the Byrd Station, Antarctica, deep ice cores. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice*. Proceedings of the Grenoble Symposium, 1975. IAHS-AISH Publication No.188, PP.351-364.
- [12] Dansgaard, W., S.J. Johnsen, H.G. Clausen and C.C. Langway, Jr., 1971. Climatic record revealed by Camp Century Ice Core. Turekian K.K., ed. *Late Cenozoic Glacial Ages*. Yale University Press, New Haven, Conn., PP.37-56.
- [13] Briat, M., A. Royer, J. R. Petit and C. Lorius. 1982, Late glacial input of Eolian continental dust in the Dome C ice Core; Additional evidence from individual microparticle analysis. *Annals of Glaciology*, 3, PP.27-31.
- [14] Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson and J.R. Petit, 1981, Glaciological interpretation of microparticle concentrations from the French 905-m Dome C, Antarctica core. *Sea Level, Ice and Climate Change* (Proceedings of the Canberra Symposium, December 1979). IAHS Publ. No.131, PP. 227-237.
- [15] Gow, A.J., and Williamson, T., 1971, Volcanic ash in the Antarctic ice sheet and its possible climatic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 13, No. 1, PP.210-218.

- [16] Kumai, M. 1977, Electron microscope analysis of aerosols in snow and deep cores from Greenland. *Isotopes and impurities in snow and ice*. Proceedings of the Grenoble Symposium, 1975. IAAS-AISH Publ, No. 118, PP.341-350.
- [17] Ward, J.H.(1963), Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal American Statistical Association*, Vol. 58, PP.236-243.
- [18] Hamiton, W.L. and Langway, C.C., Jr., 1967, A correlation of microparticle concentrations with oxygen isotope ratios in 700-year-old Greenland ice, *Earth & Planetary Sci. Letters*, Vol. 3, PP.363-366.
- [19] Hammer, C.U. 1977, Dating of Greenland ice cores by microparticle concentration analysis. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice*. Proceedings of the Grenoble Symposium, 1975. IAHS-AISH Publication No. 188, PP.351-364.
- [20] Hammer, C.U., H.B. Clausen, W. Dansgaard, N. Gundestrup, S.J. Johnsen and N. Reeh. 1978. Dating of Greenland ice Cores by flow models, isotopes, volcanic debris, and continental dust. *Journal of Glaciology*, Vol. 20, No. 82, PP. 3-26.
- [21] Thompson, L.C., S. Hastenrath and B. Morales Arnao, 1979, Climate ice core records from the tropical Quelccaya Ice Cap., *Science*, 203, PP.1240-1243.
- [22] Thompson, L.G., 1980, Glaciological investigations of the tropical Quelccaya Ice Cap. *Journal of Glaciology*, Vol. 25, No. 91, PP.69-84.

(本文于1983年6月30日收到)