

现代环境事件的冰芯记录

康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 谢树成, 段克勤 (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室, 兰州 730000)

摘要: 1997 年 9 月, 在喜马拉雅山中段希夏邦马峰北坡达索普冰川海拔 7000 m 冰雪平台钻取 14 m 冰芯一支。1990 年以来冰芯中主要离子浓度的变化表明, 现代环境事件在达索普冰川雪冰中有一定的记录。已有的证据表明 1991 年达索普冰芯中 SO_4^{2-} 浓度的最高值最大可能是由海湾战争引发的 1991 年春季科威特油井燃烧污染物所致。冰芯中陆源离子(如 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 等)记录与我国西北地区春季沙尘暴具有某些相关性, 其逐年变化趋势与新疆 13 个城市的降尘变化有一定的共性。

关键词 现代环境事件; 冰芯记录

Ice core records for present environmental events

KANG Shichang, QIN Dahe, YAO Tandong, XIE Shucheng, DUAN Keqin (Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000)

Abstract During 1997 September, a 14 m ice core was recovered from an elevation of 7000 m a.s.l. from the Dasuopu Glacier on the north-west margin of Mount Xixiabangma in the central Himalayas. The variations of major ion concentrations showed that present environmental events had been recorded in the snow of Dasuopu Glacier since 1990. Some evidences indicate that the highest value of SO_4^{2-} concentration in the core in 1991 may be caused by the pollutants from Kuwaiti oil fires during Persian Gulf War. The annual variations of crustal ions (Ca^{2+} and SO_4^{2-}) concentrations recorded in the firm core may be related to the dust storms happened in spring in northwestern China, and consistent with the variations of dust deposition in 13 cities of Xinjiang Vygur Autonomous Region.

Keywords Present environmental events; ice core records

冰芯研究是现代冰川学和全球变化研究中崛起的一个新兴分支领域。冰芯记录以分辨率高、信息量大、保真度高为特征。冰芯记录的诸多信息包括气候、环境、生物地球化学循环、火山活动、温室效应气体、ENSO、太阳活动、宇宙事件、沙漠演化重大事件等许多方面, 冰芯研究已成为检测过去全球变化、监测现代和预测未来全球变化的重要依据。我国西部中低纬高山区分布着大面积的冰川(帽), 同极地相比, 这些地区与人类居住稠密区毗邻。该地区山地冰川冰芯研究对人类活动、生物地球化学循环、干旱区演化、季风变迁等方面的记录将更优于极地冰芯。

希夏邦马峰北坡达索普冰川海拔 7000 m 处大平台的积累量较高^[1], 冰川温度较低(10 m 处冰温接近 -14°C), 并有重结晶带分布^[2]。冰川的这种高积累率和低温环境有利于气候和环境信息的存贮, 有利于高分辨率、高保真度冰芯之研究。本文拟根据该冰雪平台 14 m 冰芯中高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 和主要离子浓度变化, 揭示本区 20 世纪 90 年代冰芯记录的现代大气环境变化特征, 特别是大气环境的一些突发事件, 如海湾战争引发的油井燃烧对大气的污染以及沙尘暴的频

收稿日期 2000-04-10; 修订日期 2000-07-24

基金项目 国家 973 项目(G1999043400); 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2 - 305); 中国科学院重大项目(KZ951 - A1 - 402 和 KZ951 - A1 - 204); 国家自然科学基金(49871022); 中科院兰州冰川冻土研究所与美国俄亥俄州立大学伯德极地研究中心、新罕布什尔大学气候变化研究中心的合作研究项目资助

作者简介 康世昌(1969—) 男, 博士

发等. 本项研究也是进一步恢复深钻孔冰芯气候环境记录的基础.

1 样品采集及冰芯定年

1997 年 9 月, 在达索普冰川海拔 7000 m 冰雪平台用 PICO 钻钻取了一支 14m 的冰芯. 以 5 cm 等间距连续分割该冰芯, 得到样品共计 280 个. 冰芯样品的野外处理、运输和实验室分析已有详细的描述^[3]. 从冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 和主要离子浓度随深度(水当量)的变化中(图 1)可以看出, 主要离子浓度和 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节波动均很明显. 通过计算 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的峰值, 并参考其它离子浓度曲线 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-) 变化, 可得到该冰芯的深度/年代关系^[1,3]. 冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 和各离子逐年的季节变化细节, 并非每年都完全一致. 如 1993 年的 NO_3^- 浓度出现多峰值, 1991 年 SO_4^{2-} 浓度出现最高值等, 这些峰值可能是沙尘暴事件或其它突发事件的记录. 下文通过冰芯记录的 20 世纪 90 年代主要离子浓度的变化同现代突发事件的对比研究, 以探讨现代大气突发事件与记录之间的关系.

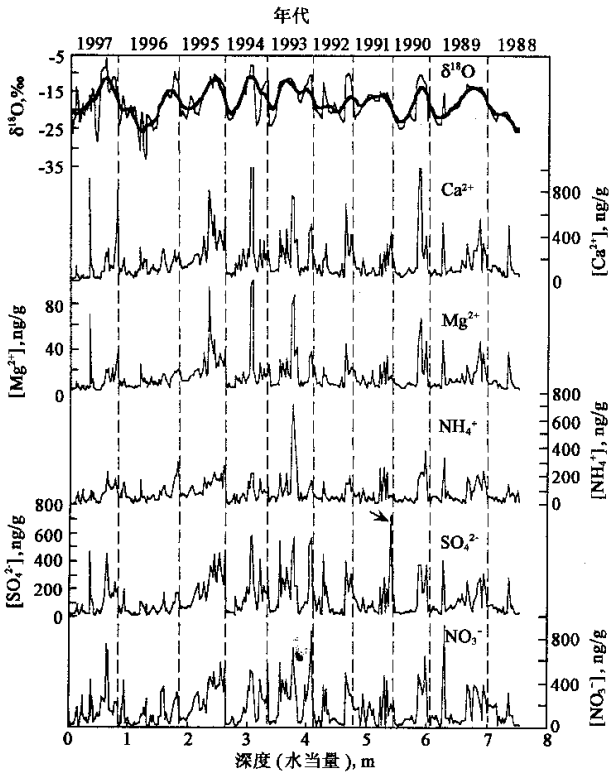


图 1 达索普浅孔冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 和主要离子浓度随深度(水当量)的分布

Fig.1 Profiles of $\delta^{18}\text{O}$ and major ion concentrations with depth (water equivalent) in Dasuopu ice core

2 冰芯记录的海湾战争污染物

冰芯中 SO_4^{2-} 浓度的变化在 1991 年出现最高值(图 1, 箭头标记), 达到 730.7ppb, 而 SO_4^{2-} 浓度在整个冰芯剖面上最低值仅为 6.1ppb, 平均值为 122.9ppb(其标准偏差为 132.2). SO_4^{2-} 浓

度在 1991 年的最高值是其平均值的 6 倍 ,是其最小值的 120 倍 ,如此巨大的差异必然是有关事件的结果 .

1990 – 1991 年的海湾战争 ,使科威特 263 座油井燃烧 ,仅 1991 年 5—6 月每天燃烧约 460 万桶原油^[4] . 同时还有几十口油井原油泄漏 ,使约 10 亿桶原油损失 ,占科威特原油储量的 1.5 %—2 % . 科威特的原油产量在全球范围内占有较大比重^[5] . 海湾战争油井燃烧产生的烟尘向外扩散 ,如喀喇昆仑山脉出现由烟尘沉降产生的黑雪^[6] ,在日本^[7]、巴基斯坦^[8]和距科威特 15000km 的夏威夷岛^[9]等地均观测到油井燃烧产生的污染物 ,甚至在距科威特约 20000km 的美国怀俄明州上空 8 – 11km 的气溶胶中也有发现^[10] .

笔者认为达索普冰芯 1991 年春季 SO_4^{2-} 浓度峰值记录与海湾战争引起的科威特油井燃烧造成的大气污染关系密切 . 理由为 (1)1991 年春季油井燃烧造成的烟尘气溶胶主要由西风急流流经两条路径自西向东传输 ,一条绕过青藏高原北部的北支西风急流途经中国北部、日本和太平洋到达美国怀俄明州上空^[11] ,另一条绕过青藏高原南部的南支西风急流途经喜马拉雅山地区、中国南部和太平洋到达夏威夷岛^[12] (2)本支冰芯的有机质检测表明 ,来自石油残余物的姥鲛烷、植烷、烷基环乙烷、藿烷和甾烷系列以及部分正构烷烃在 1990—1992 年的平均含量高于 1997 年^[13] ,其比值见表 1 .

表 2 为科威特油井燃烧烟尘的主要化学组成 . 烟尘中的气体成分 SO_2 高出 NO_x 约 1 – 2 个数量级 , SO_4^{2-} 浓度亦较高^[4,14] . 油井燃烧烟尘中 SO_4^{2-} 浓度也远高于世界上其它污染较严重城市气溶胶中 SO_4^{2-} 浓度^[6] . 因此在达索普冰芯内只有 SO_4^{2-} 记录显著地反映了油井燃烧造成大气的污染 .

表 1 达索普冰芯 1989 – 1992 年有机质平均含量与 1997 年之比值^[13]

有机质	正构烷烃				姥鲛烷	C_{23} 环己烷	C_{23} 三环萜	C_{30} 藿烷	C_{27} 甾烷	C_{29} 甾烷
	nC_{29}	nC_{20}	nC_{17}	CPI						
比值	3.00	1.72	1.43	1.18/1.46	2.46	2.76	1.69	3.14	1.56	1.15

表 2 科威特油井燃烧烟尘的化学组成 (单位 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[4,14]

烟尘类型	采样地点	采样时间 (1991)	样 品 数	气体					离子	
				CO_2	CO	CH_4	SO_2	NO_x	SO_4^{2-}	Σ_{salt}
超级复合型 烟尘	科威特城下 风口 160km	5 月 28 日	4	10313 ± 2565	67 ± 39	20 ± 11	215 ± 132	4 ± 2	16.5 ± 11.4	50.5 ± 43.5
复合型烟尘	Great Burgan	6 月 12 日	5	29143 ± 16132	264 ± 184	99 ± 87	423 ± 241	25 ± 12	68.0 ± 50.0	287 ± 227
黑烟尘	Minagish	6 月 9 日	1	8571	9	12	340	6	6.4	5.7
白烟尘	Umm-Qudair	6 月 9 日	1	11786	53	16	306	10	30.2	136
单个火坑 烟尘	Minagish	6 月 12 日	1	15536	106	12.9	1316	16	90.0	0.8

注 : $\Sigma_{\text{salt}} = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Cl}^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$

诚然,1991 年 6 月开始喷发的菲律宾皮纳图博火山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 被输入平流层^[15],在 20—30 km 高度内形成微粒层并向全球扩散,到 1992 年中期已覆盖地球表面^[16]。对于达索普冰芯 1991 年春季的 SO_4^{2-} 浓度峰值,可能与皮纳图博火山喷发物关系不密切,主要原因是当时的大气环流形式不一定能够把火山喷发物输送到喜马拉雅山地区。如前所述,该时段在喜马拉雅山地区主要盛行西风,冰芯中的物质应主要是由西风急流带来的。即使皮纳图博火山喷发物由高层平流层输送到喜马拉雅山,则已经历数月,而此时已是喜马拉雅山地区的季风时间(高降水时段),由于强季风降水对大气环境的不断“清洗”过程^[17],冰芯记录未必能反映出由火山喷发导致的大气中 SO_4^{2-} 浓度高值。

综上所述,海湾战争期间引起的 1991 年春季科威特油井燃烧污染物导致 1991 年达索普冰芯中 SO_4^{2-} 浓度的显著峰值,其证据比皮纳图博火山喷发物的证据更为充足。因此,1991 年冰芯中 SO_4^{2-} 浓度峰值最大可能是反映了油井燃烧污染物而非火山喷发物。

3 冰芯记录与 20 世纪 90 年代我国西北地区降尘事件

研究表明^[1,3],达索普浅孔冰芯中尘埃来源离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等)浓度的季节变化,其春季出现的高值反映了亚洲干旱半干旱区春季的沙尘暴事件。尽管春季雪层中陆源离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 等)的浓度较高,但这些高值之间仍有差异(图 1),如 1993 年和 1995 年这种高值延续时间较长,而 1994 年 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 又出现极高值。1991—1995 年达索普冰芯中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度的年平均变化趋势见图 2。其中 1993、1994 和 1995 年陆源离子浓度明显高于其它年份,表明这上述 3 年大气中输入达索普冰川的陆源物质较多。1991—1995 年新疆维吾尔自治区 13 个城市的降尘变化^[18]与达索普冰芯记录的陆源离子 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度变化具有一定的相似(图 2),即 1993 年和 1995 年呈现相对高值。因此,我国西北地区反映沙尘暴强度的降尘数量与达索普冰川的雪冰记录具有一定的对应关系。

钱正安等^[19]对我国 1952—1994 年西北地区发生的沙尘暴作了分级和统计,西北地区

1990—1994 年中 1993 和 1994 年为沙尘暴发生强度最大、范围最广的年份。沙尘暴是亚洲干旱半干旱区春季常见的一种灾害性天气,也是春季大气气溶胶的主要来源^[20],每年沙尘暴输入大气圈的沙尘量为 10^6 — 10^7 t。沙尘暴覆盖的范围可达 10^6 — 10^7 km^2 ^[21]。以“93·5·5 黑风”沙尘暴为例,其范围波及新疆、甘肃、内蒙和宁夏等四省区,横扫五大沙漠,有些地区出现 300—700m 的沙暴壁^[22]。对石咀山和北京两地沙尘暴期间气溶胶化学离子浓度的分析表明^[22](表 3), Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度在沙尘暴气溶胶中占主导地位,与冰芯主要离子浓度记录一致,而且在沙尘暴发生前和结束后的离子浓度远低于沙尘暴盛行阶段。

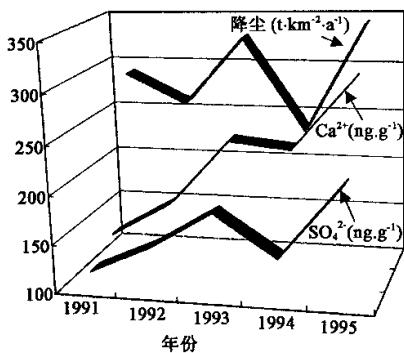


图 2 1991—1995 年新疆维吾尔自治区降尘变化与达索普浅孔冰芯 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度记录对比

Fig. 2 Comparison of variations between the dust deposition in Xinjiang Vygur Autonomous Region and Ca^{2+} and SO_4^{2-} concentrations recorded in Dasuopu ice core

表 3 “1993·5·5 黑风”气溶胶的化学离子浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[22]
Table 3 Ion concentrations of aerosol in “1993-05-05 Black Wind”

时段	石 咀 山			北 京		
	前	期间	结束	前	期间	结束
Ca ²⁺	13.17	310.38	3.84	4.12	59.38	10.19
SO ₄ ²⁻	12.09	334.35	7.56	3.14	33.30	8.57
NH ₄ ⁺	0.13	8.2	0.68	0.15	—	0.10
NO ₃ ⁻	1.78	2.52	0.54	1.26	5.79	2.77
Mg ²⁺	1.52	17.91	0.78	0.51	5.12	0.93

注 表中“—”表示在检测线之下；“前”为沙尘暴发生之前；“期间”为沙尘暴发生阶段；“结束”为沙尘暴结束之后

总之 20 世纪 90 年代以来反映沙尘暴强弱的新疆维吾尔自治区 13 个城市降尘趋势与达索普冰芯记录的陆源离子浓度的年际变化具有一定的相似性,但非完全对应,表明达索普冰川的雪冰中仅在一定程度上记录了我国西北地区沙尘暴的年际变化.如 1993 年我国西北地区大范围的特强沙尘暴为例,冰芯中陆源离子浓度高值与其对应,特别是“93·5·5 黑风”中气溶胶离子浓度也与雪冰记录一致.但是有两个问题需要说明:一是我国西北地区的每一次沙尘暴事件造成的大气中高尘埃含量不一定均能传输到喜马拉雅山中部地区,在一定程度上依赖于沙尘暴物质自北向南输送的有利天气条件,因为沙尘暴物质一般自西向东或自西北向东南方向传输^[23];二是喜马拉雅山冰芯中尘埃物质记录同时受西南亚地区春季沙尘暴的影响^[24],冬春季南支西风急流有可能携带来西南亚干旱区的尘埃物质;由于青藏高原西南部也是沙尘暴多发区,每年约有 10—20 d 为沙尘暴天气^[25],因而还应考虑高原南部区域性沙尘暴的影响.

致谢 样品采集得到 1997 希夏邦马冰芯科学考察队所有队员的帮助,样品分析由李凤霞和 Sallie Whitlow 完成,作者表示衷心的感谢.

参考文献：

[1] 康世昌,秦大河,姚檀栋,等. 喜马拉雅山中段达索普粒雪芯中夏季风和尘埃信号记录研究[J]. 科学通报, 1999, 44 (20): 2230—2235

[2] 姚檀栋,蒲健辰,王宁练,等. 中国境内又一种新成冰作用的发现[J]. 科学通报, 1998, 43(1): 94—97

[3] 康世昌,秦大河,姚檀栋,等. 希夏邦马峰冰川粒雪中环境季节变化记录研究[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 55—65

[4] Ferek R J, Hobbs P V, Herring J A, *et al.* Chemical composition of emissions from the Kuwait oil fires[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D13): 14483—14489

[5] Husain T. Extinguishing of Kuwaiti oil fires—Challenges technology and success[J]. Atmospheric Environment, 1994a, 28(13): 2139—2147

[6] 不破敬一郎. 地球环境手册(全浩译)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1995. 516

[7] Okada K, Ikegami M, Uchino O, *et al.* Kuwait soot over Japan[J]. Nature, 1992, 355: 120

[8] Limaye S S, Suomi V E, Velden C, *et al.* Satellite observation of smoke from oil fires in Kuwait[J]. Science, 1991, 252: 1536—1539

[9] Lowenthal D H, Borys R D, Chow J C, *et al.* Evidence for long - range transport of aerosol from the Kuwait oil fires to Hawaii[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D13): 14573—14580

[10] Deshler T, Hofmann D J. Measurements of unusual aerosol layers in the upper troposphere over Laramie, Wyoming, In the spring of 1991: Evidence for long - range transport from the oil fires in Kuwait[J]. Geophysical Research Letters, 1992, 19(4): 385—388

- [11] Sheridan P J , Schnell R C , Hofmann D J , *et al.* Electron microscope studies of aerosol layers with likely Kuwaiti origins over Laramie, Wyoming during spring 1991 [J]. *Geophysical Research Letters* , 1992 , 19 (4) : 389—392
- [12] Bodhaine B A , Harris J M , Ogren J A , *et al.* Aerosol optical properties at mauna loa observatory : Long - range transport from Kuwait ? [J]. *Geophysical Research Letters* , 1992 , 19 (6) : 581—584
- [13] Xie Shucheng , Yao Tandong , Kang Shichang , *et al.* Climatic and environmental implications from organic matter in Dasuopu glacier in Xixiabangma in Qinghai - Tibetan Plateau [J]. *Science in China (Series D)* , 1999 , 42 (4) : 383—391
- [14] Laursen K K , Ferek R J , Hobbs P V. Emission factors particles elemental carbon and trace gases from the Kuwait oil fires [J]. *Journal of Geophysical Research* , 1992 , 97 (D13) : 14491—14497
- [15] Krueger A J , Walter L S , Bhartia P K , *et al.* Volcanic sulfur dioxide measurements from the total ozone mapping spectrometer instruments [J]. *Journal of Geophysical Research* , 1995 , 100 : 14057—14076
- [16] Trepte C R , Veiga R E , McCormick M P. The poleward dispersal of Mt. Pinatubo volcanic aerosol [J]. *Journal of Geophysical research* , 1993 , 98 : 18563—18573
- [17] 康世昌 , 秦大河 , 姚檀栋 . 希夏邦马峰北坡地区夏末降水化学特征探讨 [J]. *环境科学学报* , 2000 , 20 (5) : 574—578
- [18] 新疆维吾尔自治区环境保护局 . 新疆维吾尔自治区环境质量报告书 (1991 - 1995 年度) [M]. 1996 , 104—125
- [19] 钱正安 , 贺慧霞 , 瞿章 , 等 . 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征 [A]. 见 : 方宗义等编 . 中国沙尘暴研究 [C]. 北京 : 气象出版社 . 1997 . 1—10
- [20] Duce R A , Unni C K , Ray B J , *et al.* Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropic North Pacific temporal variability [J]. *Science* , 1980 , 209 : 1522—1524
- [21] Iwasaka Y , Minoura H , Nagaya K. The transport and spatial scale of Asian dust storm clouds : a case study of the dust storm event of April 1979 [J]. *Tellus* , 1983 , 25B : 189—196
- [22] 杨东贞 , 于晓岚 , 颜 鹏 , 等 . '93.5.5 黑风 " 沙尘气溶胶的分析 [A]. 见 : 方宗义等编著 . 中国沙尘暴研究 [C], 北京 : 气象出版社 . 1997 . 103—110
- [23] 徐起运 , 胡敬松 . 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征分析 [A]. 见 : 方宗义等编 . 中国沙尘暴研究 [C]. 北京 : 气象出版社 . 1997 . 11—15
- [24] 朱福康 , 章文茜 , 徐祥德 . 沙尘暴——一种强灾害性天气 [A]. 见 : 方宗义等编著 . 中国沙尘暴研究 [C], 北京 : 气象出版社 . 1997 . 147—154
- [25] 梁凤荣 . 青藏高原沙尘暴天气的气候分析 [A]. 见 : 方宗义等编著 . 中国沙尘暴研究 [C]. 北京 : 气象出版社 . 1997 . 16—21