

珠穆朗玛峰东绒布冰川 37.4m 冰芯主要离子记录的气候环境

崔晓庆, 任贾文, 王晓香

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈与环境联合重点实验室, 甘肃兰州, 730000)

摘要: 2002年9月, 在珠穆朗玛峰东侧东绒布冰川海拔6450m惹普拉垭口钻取的一支37.4米的冰芯。通过对该冰芯714个样品的主要离子浓度的季节及年际变化分析, 认识珠穆朗玛峰地区大气环境在季节及年际尺度上的变化特征。结果表明, 海盐离子 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 可反映印度夏季风强弱变化; 陆源离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 表现为春季的峰值和夏季的低值, 前者对应于中亚及我国西北干旱、半干旱区的春季沙尘暴频发期; 20世纪60年代末期至90年代初期, NO_3^- 离子浓度一直维持在较高的水平, NO_3^- 离子在近年来的浓度高值可能与20世纪中叶以来印度等地区工农业迅速发展, 大量消耗化石燃料和农业化肥有关; NH_4^+ 浓度在20世纪40年代以来的大幅度上升可能是世界大战后, 社会趋于稳定, 南亚地区农业迅速发展而大量使用化学肥料的结果。

关键词: 珠穆朗玛峰冰芯; 离子记录; 东绒布冰川

1 引言

我国中低纬度的高山区分布着大面积的山地冰川(帽), 与南、北极的冰川相比, 它纬度低、海拔高、毗邻人类居住稠密区, 对研究人类活动对气候环境变化的影响具有更强的指示意义。中低纬高分辨率的山地冰芯研究不仅对极地冰芯研究是一个补充, 而且对人类活动、生物地球化学循环、干旱区演化、季风变迁等方面的记录具有自己的优势。研究表明, 青藏高原在气候变化中不仅是一个“敏感区”, 还可能是一个“启动器”^[1], 同时青藏高原历史气候记录时间也相对较短。

位于青藏高原南部边缘的喜马拉雅山是重要的气候分界线, 以南地区主要受印度季风的影响, 以北地区则主要受大陆性气候控制^[2]。本文通过珠穆朗玛峰北坡的东绒布冰芯记录来认识该地区50年来(1953-2002年)的气候环境变化特征。

2 样品的采集与分析

2002年9月份在珠穆朗玛峰北坡的东绒布冰川海拔6450的惹普拉垭口钻取的37.4米的冰芯。冰芯在冷冻状态下被运回到中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的低温冷库存放。在低温、洁净的环境下对冰芯每5cm长度进行连续切样, 用不锈钢刀片将其外表一薄层刮去后分成份, 一份用来做阴阳离子的分析测试, 一份做 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量, 一份做微粒分析测试, 另一份作为备用样品。

本文作者所作的是阴阳离子的测定。主要阴阳离子的分析测试均在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈与环境联合重点实验室进行, 测试仪器为美国戴安公司生产的DX-300型离子色谱仪, 其检测限可达ng/g。

色谱条件为阳离子: CS12分析柱, 阳离子自身抑制器, 400ul样品管15mMMS淋洗液, 甲基磺酸选择的是瑞士Fluka公司的优级纯试剂, 其他标准物钠、氨、钾、镁和钙是国家标准物质中心的一级标准物, 每15min注一个样品进行分析。

阴离子: AS11分析柱, 250ul样品管, 1.5MNaOH淋洗液, NaOH选择的是瑞士

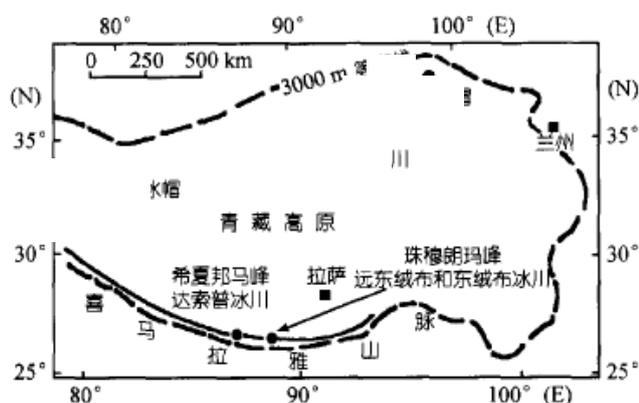


图1 青藏高原冰芯钻取点位置

Fluka 公司的优级纯试剂, 氯、硫酸和硝酸标准无选择的是国家标准物质中心的一级标准物, 每 13min 注一个样品进行分析。

3 结果与讨论

冰芯中记录的阴、阳离子是反应过去气候与环境变化的可靠指标, 搞清阴离子和阳离子的来源、传输、沉积以及冰内的次生变化机制, 可以恢复过去气候与环境的变化, 这对研究冰川来说有着十分重要的意义。本文根据青藏高原地区东绒布冰川冰芯中主要阴离子和阳离子的变化, 探讨珠峰地区的气候与环境变化。

通过 714 个样品的主要离子浓度变化图, 可见 714 个样品的主要离子浓度具有一致的变化特征, 即阴离子浓度排序为: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, 阳离子的浓度排序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 与它们在地壳中含量大小顺序相似, 说明他们主要受陆地来源的控制。所有样品的 Cl^-/Na^+ 平均值为 2.54, 大于水温为 25°C , 含盐度为 35% 的海洋水体中的 Cl^- 与 Na^+ 的浓度的比值 1.80, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的平均值为 0.82 大于海水中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的比值 0.12, 说明东绒布冰芯化学成分主要来源于陆地尘埃。离子浓度的变化曲线显示出强烈的周期性变化, 高值是低值的大约 3-10 倍, 反映了明显的季节变化的特征。珠穆朗玛峰地区海拔高, 又是季风演替的前沿, 大气环境特殊, 冰芯中矿物成分来源不仅仅是大气降水的水汽起源地输入的, 而且有空气中的悬浮粉尘和随风迁移的地表区域性岩矿风化物的输入。东绒布冰川冰芯中 NO_3^- 在阴离子中浓度最高, 而青藏高原北部和中部地区的降水中却是 SO_4^{2-} 浓度最高, 这表明不同地区物质来源对两种离子的贡献量有差异。

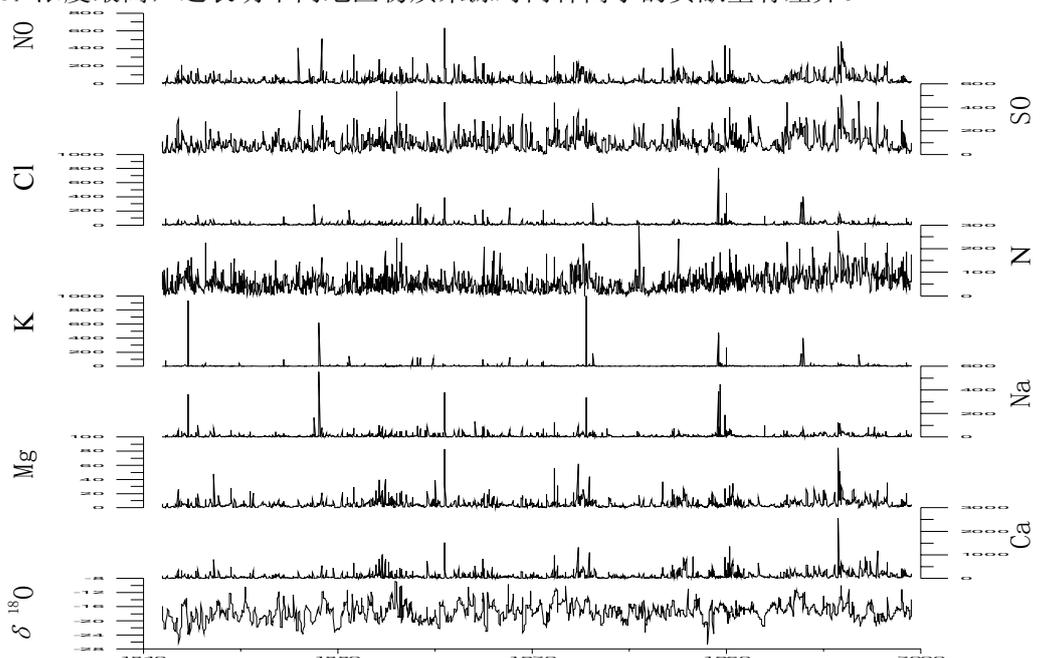


图2 珠穆朗玛峰东绒布冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 和主要离子浓度剖面及冰芯时间序列结果 (离子浓度/ppb)

3.1 东绒布冰芯 NO_3^- 季节及年际变化特征

作为碳循环之外的第二个主要的生物循环, 氮循环越来越受到科学家的关注。喜马拉雅山处于中低纬度, 青藏高原的南部边缘, 基于此处对流层大气系统的复杂性, NO_x 和 HNO_3 等来源的多元性, 不利于研究氮在大气中的循环。 NO_3^- 又是氮循环研究的重点。科学家对南极雪冰中 NO_3^- 做了很多有意义的研究, 但是目前关于南极雪冰中 NO_3^- 的来源问题还存在很多争议。

东绒布冰芯中记录的 NO_3^- 虽然也有其复杂的来源、传输路径、沉积过程以及沉积后变化, 但是, 像南极雪冰中的 NO_3^- 记录一样, 仍然能够反映其浓度的季节变化^[3, 4]。图3是东

绒布冰芯记录的 NO_3^- 浓度变化时间序列, NO_3^- 表现出高频的季节变化特征, 存在春季的峰值和夏季的低值。表 1 中显示, NO_3^- 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 具有显著的相关性, 相关系数均在 0.75 (显著性水平 $\alpha = 0.01$) 以上, 说明 NO_3^- 的主要来源与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 一样, 均来自中亚干旱、半干旱区。盛文坤等^[5], 王宁练等^[6]对古里雅冰芯中的 NO_3^- 的研究发现, 太阳活动、平流层 N_2O 的氧化和陆源气团是古里雅冰芯中 NO_3^- 的主要来源, 人类活动对这一地区降水中 NO_3^- 浓度的影响不大。但珠穆朗玛峰东绒布冰川的地理位置条件和大气环流因素与古里雅冰帽有很大的差异, 夏季, 东绒布冰川受印度季风的影响, 处于印度季风的下风向, NO_3^- 在近年来的增长趋势是否与 20 世纪中叶以来印度等地区工农业迅速发展, 大量消耗化石燃料和农业化肥有关, 还有待于对这一地区 NO_3^- 来源的进一步研究。

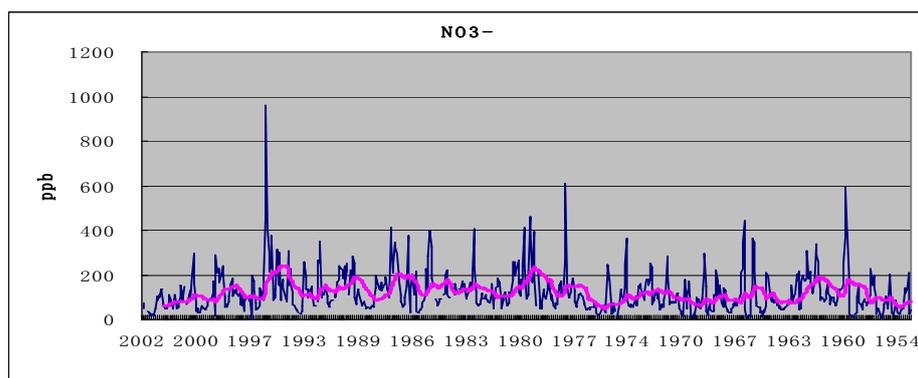


图 3 冰心中 NO_3^- 离子的变化图

3.2 冰芯中 NH_4^+ 离子记录对人类活动的响应

大气中氨的主要来源是陆地生物圈和土壤过程以及偶然性的大量排放(如野火、与人类活动有关的生物质燃烧等)。在欧洲, 与人类活动有关的排放是 NH_4^+ 的主要来源, NH_4^+ 通过细菌分解家畜粪便、农业肥料遗失等途径进入大气^[7]。模式计算表明, 在北欧 NH_3 主要通过干沉降的方式在距源区 1KM 的范围内从空气中清除^[8], 基本不会被输送到更远的地区, 但是当 NH_3 转化成 NH_4^+ 后, NH_4^+ 进入云滴或是附着在大气气溶胶颗粒上, 有更长的生命周期(数天), 随大气环流, 能够被输送到数百千米以外的地方, 主要随降水以湿沉降的方式从空气中清除。有研究指出, 喜马拉雅山雪中记录的 NH_4^+ 与富含农业和生物源 NH_4^+ 的季风水汽有着密切的联系^[9]。在季风携带水汽到达我们的打钻点之前, 穿过覆盖有耕地、森林或植被的地表, 它们释放出的 NH_3 被季风携带到下风向。季风经过的南亚农业区的牲畜畜养、农业施肥和木柴燃烧(家庭主要燃料), 对季风下风向降水中的 NH_4^+ 浓度也有一定贡献。对东绒布冰芯中的 NH_4^+ 记录已经做过一定的研究指出, 20 世纪 40 年代以前, NH_4^+ 浓度变化平缓, 维持在较低的水平, 40 年代到 80 年代, NH_4^+ 浓度呈持续上升趋势。1935—1939 年 NH_4^+ 平均浓度(25.1ppb) 仅是 1985—1989 年(95.7ppb) 的 1/4。喜马拉雅山地区因为靠近人类活动区, 它所记录的 NH_4^+ 浓度背景值要高于其他地区, 20 世纪 40 年代以来, 东绒布冰芯中记录的 NH_4^+ 浓度的迅速升高, 可能是世界大战后, 社会趋于稳定, 南亚地区(主要为印度)的农业迅速发展而大量使用化学肥料的结果。

表 1 显示, Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 的相关系数在置信度为 99%上分别为 0.71、0.48、0.42, 其中, K^+ 与 Na^+ 的相关系数达到了 0.71 (显著性水平 $\alpha = 0.01$), 表明它们具有显著的正相关关系, 具有基本相同的来源。 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 主要来源于印度夏季风带来的降水, 但是, 由于青藏高原本身拥有的众多盐湖, 通过青藏高原自身的蒸发传输, 内部的众多盐湖也是 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 的一个来源。该冰芯 714 个样品的 Cl^-/Na^+ 的平均值是 2.54, 大于标准海水 Cl^-/Na^+ 的比值 1.8, 说明东绒布冰芯中 Cl^- 和 Na^+ 主要来源于海洋, 也有较大的其他来源物质。

青藏高原众多的盐湖和西部干旱环境中存在的大量富含 Na^+ 离子的盐类沉积,也对 Na^+ 来源有一定贡献。与其他离子相比, Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 的季节变化特征没有它们明显,一般来说 Na^+ 浓度的在冬末春初出现高值,夏末出现一低值,而其他季节的波动较小;而 Cl^- 除了夏末的较小的低值外,其它季节的变化都不大。原因可能是与珠穆朗玛峰地区受海洋性降水气团的影响有关,而来自青藏高原内部本身的水气气团从高原的中部到南缘的影响逐渐减弱有关,青藏高原本身的水汽气团主要是来自青藏高原上众多的湖泊的蒸发,这些湖泊对海盐离子的影响对东绒布冰芯中也有一定的影响。

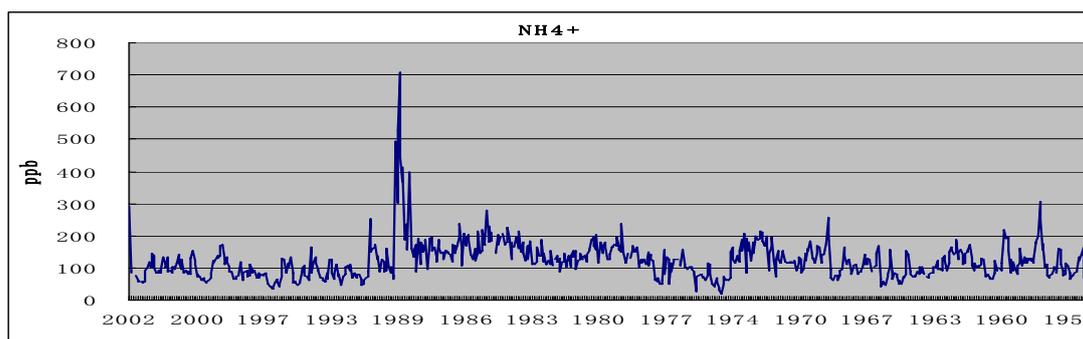


图 4 冰心中 NH_4^+ 离子浓度变化图

3.3 东绒布冰芯记录的各化学离子的相关性研究

表 1 东绒布冰芯主要离子浓度的相关系数表 (N=714,)

	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Na^+	1.00	0.07	0.71**	0.58**	0.54**	0.48**	0.25**	0.24**
NH_4^+		1.00	-0.10	0.28**	0.12*	0.07	0.29**	0.12*
K^+			1.00	0.49**	0.51**	0.42**	0.12*	0.19**
Mg^{2+}				1.00	0.77**	0.29**	0.54**	0.43**
Ca^{2+}					1.00	0.25**	0.46**	0.41**
Cl^-						1.00	0.23**	0.48**
NO_3^-							1.00	0.57**
SO_4^{2-}								1.00

注: *表示在 95%置信度水平上显著相关; **表示在 99%置信度水平上显著相关

相关分析表明 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 3种离子之间有很好的正相关关系,说明这三种离子的来源一致。高亚洲雪冰化学研究证实(姚檀栋等,1995),这3种离子的主要来源是中亚干旱半干旱区的尘埃物质,另外,青藏高原本身也是这3种离子的一个重要来源。这里以上述3种离子作为大气尘埃的指标,探讨珠穆朗玛峰地区雪冰中记录的对流层中上部现代大气尘埃的季节变化。图中所示 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度的季节变化,最高值和最低值分别出现在春季和夏末。其中 Ca^{2+} 浓度的最高值是1837.87 ppb是最低值94.15ppb的20倍,而 Mg^{2+} 的最高值是90.17 ppb是最低值2.26ppb的40倍。离子浓度季节变化的标准偏差表明,各离子浓度在春季变幅较大而夏季较小。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 在东绒布冰芯中表现出的春季高值,与中亚地区春季的沙尘暴事件相一致,即每年的2月中旬至5月下旬为沙尘暴活动盛期,而最强期一般发生在4月底和5月初(钱正安等,1997)。研究表明,中亚干旱半干旱区是北半球大气尘埃的主要来源区。青藏高原雪冰和大气气溶胶化学特征的空间分布研究表明,高原雪冰和气溶胶中的化学成份主要受中亚干旱半干旱区尘埃输入的影响。在珠穆朗玛峰地区,春季在一定的天气条件下,如青藏高原盛行的近

地面西北风的持续作用或平流层的输送下, 来自中亚干旱半干旱区的大量尘埃由北向南传输到该地区并在高海拔的冰川上沉积下来, 形成了冰芯中的春季陆源离子及粉尘浓度的峰值。另外, 西南亚地区的沙尘暴也多发生在春季如阿富汗喀布尔的沙尘暴在 4 月份最多, 西南亚沙尘暴物质也有可能在南支西风急流的输送下沉积到本地区的高海拔冰川上。冰芯中的陆源离子, 除了与春季沙尘暴对应的高浓度外, 其他季节其浓度相对较低, 特别在夏末呈现最低值, 这表明珠穆朗玛峰地区夏末大气中尘埃含量很低, 大气比较“洁净”。这主要有两个原因: 一是夏季中亚和西南亚地区沙尘暴事件很少发生; 二是夏季在印度季风的影响下较大的降水量对大气中的尘埃物质不断的进行“冲洗”, 对大气环境起了清洁的作用, 所以夏季各离子浓度相对较低。

4 结论

(1) 东绒布冰芯中的海盐离子 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 的分析表明, Cl^- 离子主要来源于海洋性的印度夏季风降水的海盐离子, Na^+ 主要来源于海洋性的印度夏季风降水, 并且伴有来自青藏高原的内陆盐湖和其他的陆地粉尘来源。 Na^+ 和 Cl^- 可以反映印度季风的强度。 K^+ 的来源具有明显的不同于海洋性冰川的来源的特征, 这与珠穆朗玛峰地区广发分布的硅酸盐矿物, 再加上本地区的较强的寒冬风化作用和局地气象条件有关, 可以看出, 局地地表风化物对东绒布冰川有很大的贡献量。

(2) 对于冰芯中 NO_3^- 的研究表明, 人类活动对这珠穆朗玛峰地区降水中 NO_3^- 浓度的影响不是很大。我们可以以该冰心中记录的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的多年平均浓度作为青藏高原南部对流层中上部 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的浓度的本底值。但是由于珠穆朗玛峰东绒布冰川的特殊地理位置条件和大气环流因素, 使得东绒布冰川区在夏季受印度季风的影响, 处于印度季风的下风向, NO_3^- 在近年来的增长趋势可能与 20 世纪中期以来印度等地区工农业迅速发展, 大量消耗化石燃料和农业化肥有关, 这有待于进一步的研究。

(3) 大气中氨的主要来源是陆地生物体的燃烧、化肥的使用、微生物的分解、农业生产活动和工业生产排放气体等。东绒布冰芯明显的记录了人类活动的影响。主要表现在青藏高原和南亚地区的农业生产活动中 NH_4^+ 的大量排放和工业生产加强的环境污染。因此东绒布冰芯中的 NH_4^+ 可以指示人类活动的影响程度。

参考文献:

- [1] 姚檀栋, 谢自楚, 武筱舸, 等. 敦德冰帽中的小冰期气候记录[J]. 中国科学, B 辑, 1990, (11): 1196-1201
- [2] 任美镠, 包浩生. 中国自然区域与开发整治[C]. 北京: 科学出版社, 1992, 435-438.
- [3] 张东启, 秦大河, 侯书贵等. 珠穆朗玛峰东绒布 80.36m 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的气候意义[J]. 中国科学(D辑). 2003. 33 (3): 264-270.
- [4] Mulvaney R, Wagenbach D, Wolff E W. Postdepositional change in snow pack nitrate from observation of year round near-surface snow in coastal Antarctica[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103 (D9): 11021-11031.
- [5] 盛文坤, 姚檀栋, 李月芳 等. 古里雅冰帽硝酸根离子的来源分析[J]. 科学通报. 1996, 18(4): 353-359.
- [6] 王宁练, 姚檀栋, L. G. Thompson. 青藏高原古里雅冰芯中 NO_3^- 浓度与太阳活动[J]. 科学通报. 1998, 43(3): 309-312.
- [7] Buijsman, E., Maas, H. F. M., Asman, W. A. H., 1987. Anthropogenic NH_3 emissions in Europe[J]. Atmospheric Environment 21(5): 1009-1022
- [8] Asman, W. A. H., van Jaarsveld, J. A., 1992. A variable-resolution transport model applied for NH_3 in Europe[J]. Atmospheric Environment 26A, 445-464.
- [9] Shrestha, A. B., Wake, C. P., Dibb, J. E., Chemical composition of aerosol and snow in the high Himalaya during the summer monsoon season. Atmospheric Environment. 1997. 31(17): 2815-2826.