

喜马拉雅山中段北坡对流层中上部大气降水化学的高程分布特征

康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 任贾文 (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; E-mail: kangsc@lzu.edu.cn)

摘要: 1997 年夏季在希夏邦马峰北坡达索普冰川区 ($28^{\circ}33' \text{N}$, $85^{\circ}44' \text{E}$) 海拔 5800 m ~ 7000 m 区间对 4 次降雪过程进行了系统的采样工作, 目的是认识全球偏远地区对流层中上部大气成分的高程分布特征。达索普冰川区夏季 4 次降水中, 局地大陆性气团降水 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间存在显著的正相关性, 而海洋性气团降水 4 种离子之间的相关性变化较大, 说明在夏季低尘埃阶段大气中各种离子的主导来源处在短期的 (如数天) 变化中。这种离子主导来源的变化同时也影响了降水中离子的高程分布特征。总体上达索普冰川区夏季降水中 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度随海拔的升高呈减小趋势, SO_4^{2-} 浓度则为增大趋势。

关键词: 喜马拉雅山北坡; 降水化学; 高程分布

中图分类号: X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)02-05-0118

Elevation Distribution of Precipitation Chemistry in Middle/ Upper Troposphere in Summer, the Northern Slope of Central Himalayas

Kang Shichang, Qin Dahe, Yao Tandong, Ren Jiawen (Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China E-mail: Kangsc@lzu.edu.cn)

Abstract: During 1997 summer, fresh snow samples were collected from four snowfall events from the elevation of 5800 to 7000 m in the Dasuopu Glacier region on the northern slope of Mt. Xixabangma ($28^{\circ}33' \text{N}$, $85^{\circ}44' \text{E}$), in order to understand the elevation distribution of the middle/upper tropospheric components in the remote region. The correlation between SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} and Mg^{2+} in precipitation differs with type of air mass, indicating the dominant sources of ions vary in short-term (e.g. several days) during summer low dust period. In general, with elevation increases, the concentrations of NO_3^- , Ca^{2+} and Mg^{2+} decreases, while SO_4^{2-} increases, which are influenced by the variation of dominant sources of ions.

Keywords: the northern slope of Himalayas; precipitation chemistry; elevation distribution

大气降水的化学特征是研究大气中物质成分变化的有效手段之一, 它能准确地反映当地大气质量的现状, 是监测人类活动对大气环境影响的可靠指标, 即判断大气圈受各种形式的工农业活动排放污染物程度的重要判据, 同时也是区分不同地区、不同气候条件下大气环境差异的重要依据, 并用以识别与区域大气循环、水汽来源和生物地球化学循环相关的各化学成分的通量差异。大气降水化学特征的研究也是冰川区恢复古气候环境记录的基础。

关于喜马拉雅山地区降水化学研究已有报

道^[1~10]。其中 Mayewski 等^[3]在喜马拉雅山南坡 Ladakh 海拔 5100 ~ 5400 m 的一次降雪过程的新雪化学成分分析, 对降水中杂质成分的高程分布进行了研究。由于早期的工作采集的降水样品较少 (如仅 1 ~ 2

基金项目: 国家 973 项目 (G1999043400); 中国科学院重大项目 (KZ951-A1-402 和 KZ951-A1-204); 国家自然科学基金项目 (49871022)

作者简介: 康世昌 (1969 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事冰川与气候环境变化研究, 现在 Climate Studies Center, Institute of Quaternary Studies Sawyer Environmental Research Laboratory, Maine University, USA.

收稿日期: 2000-06-08

次降水过程的样品), 因而此类研究, 特别是降水化学的过程分布研究缺乏系统性.

本文拟通过 1997 年夏季喜马拉雅山中段达索普冰川区 4 次降水过程的降水化学成分随海拔高度的变化特征, 认识对流层中上部大气成分的高程分布, 探讨夏季降水化学的物质来源及其代表的区域环境特征.

1 样品采集和分析

1997 年夏季在希夏邦马峰北坡达索普冰川区(28° 33' N, 85° 44' E) 海拔 5800 m ~ 7000 m 区间对 4 次降雪过程的样品沿登山路进行采集(图 1, 表 1). 新雪样品在降雪结束后 12h 内用预先清洗干净的塑料袋直接采集, 待样品在塑料袋内自然融化后装入预先清洗干净的聚乙烯塑料瓶内. 样品的主要阴、阳离子在美国新罕布什尔大学气候变化中心由 DX-2010 离子色谱仪进行了分析测定, 详细方法已有描述^[11]. 样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 在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由 MAT-252 气体同位素质谱仪进行了分析测试, 其精度为 0.5 ‰.

2 结果与讨论

2.1 降水来源与降水主要离子之间的相关分析

达索普冰川区 4 次降水事件的来源及 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征通过降水当时的 500hpa 天气形势图已有较为细致的研究^[12]. 分析结果表明, 降水事件 1、2、3 为海洋性气团降水, 降水事件 4 为局地大陆性气团降水, 并且局地大陆性气团降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于海洋性气团降水

表 1 达索普冰川区 4 次降水过程的样品采集, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值及降水气团性质

Table 1 Precipitation sampling, mean $\delta^{18}\text{O}$ values and air mass feature of four precipitation events from Dasuopu Glacier region					
降水事件	降水时段	采样区间/ m	样品数	$\delta^{18}\text{O}$ 平均值/ ‰	降水气团性质
1	09-03 T10:00 ~ 09-04 T2:00	5800 ~ 7000	17	- 17.67	海洋性气团
2	09-04 T23:00 ~ 09-05 T5:00	5860 ~ 7000	19	- 20.78	海洋性气团
3	09-09 T8:00 ~ 10:00	5860 ~ 6940	19	- 22.73	海洋性气团
4	09-19 T20:00 ~ 09-20 T6:00	5800 ~ 7000	21	- 12.26	局地大陆性气团

(表 1). 对 4 次降水事件中各主要离子浓度进行了相关分析(表 2). 4 次降水事件的主要离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 浓度随海拔的变化特征见图 2. 表 3 对主要离子浓度的平均值(标准偏差)和离子浓度随海拔变化进行了统计.

具有较高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的降水事件 4 为局地大陆性气团降水(表 1), 而表 2d 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间相关性很好, 表明降水事件 4 中上述 4 种离子来源

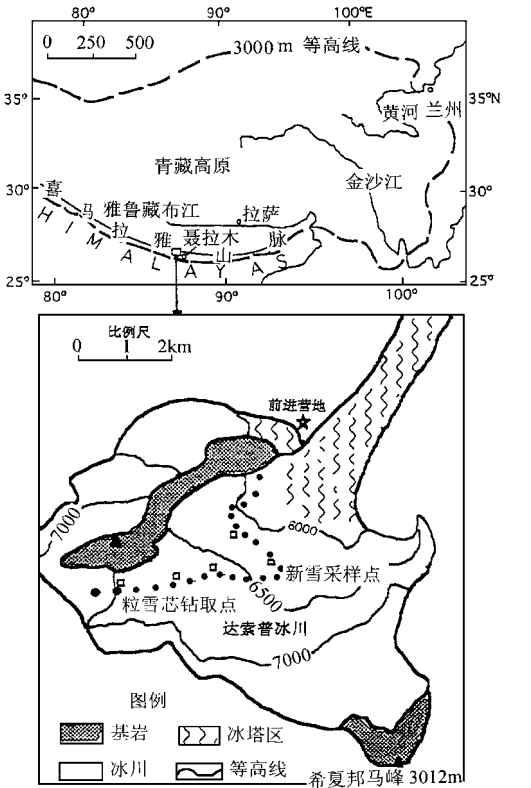


图 1 喜马拉雅山中段达索普冰川区降水样品采集点位置

Fig.1 Sites of precipitation sampling in the high elevation of the Dasuopu Glacier

基本一致,即来自局地的陆源尘埃.这与达索普粒雪芯中尘埃物质记录的研究一致^[13].对于海洋性气团降水(表 2a, b, c), 上述 4 种离子间的相关性不显著.如 SO_4^{2-} 在降水事件 1 中与其它离子相关性不明显,在降水事件 2 中与 Mg^{2+} 相关性很好,降水事件 3 中又与 Ca^{2+} 相关,而在降水事件 4 中同时与其它 3 种离子相关性很好.因而对海洋性气团降水,降水化学成分一方面反映了水汽源地的特征,同时又反映了形成降水

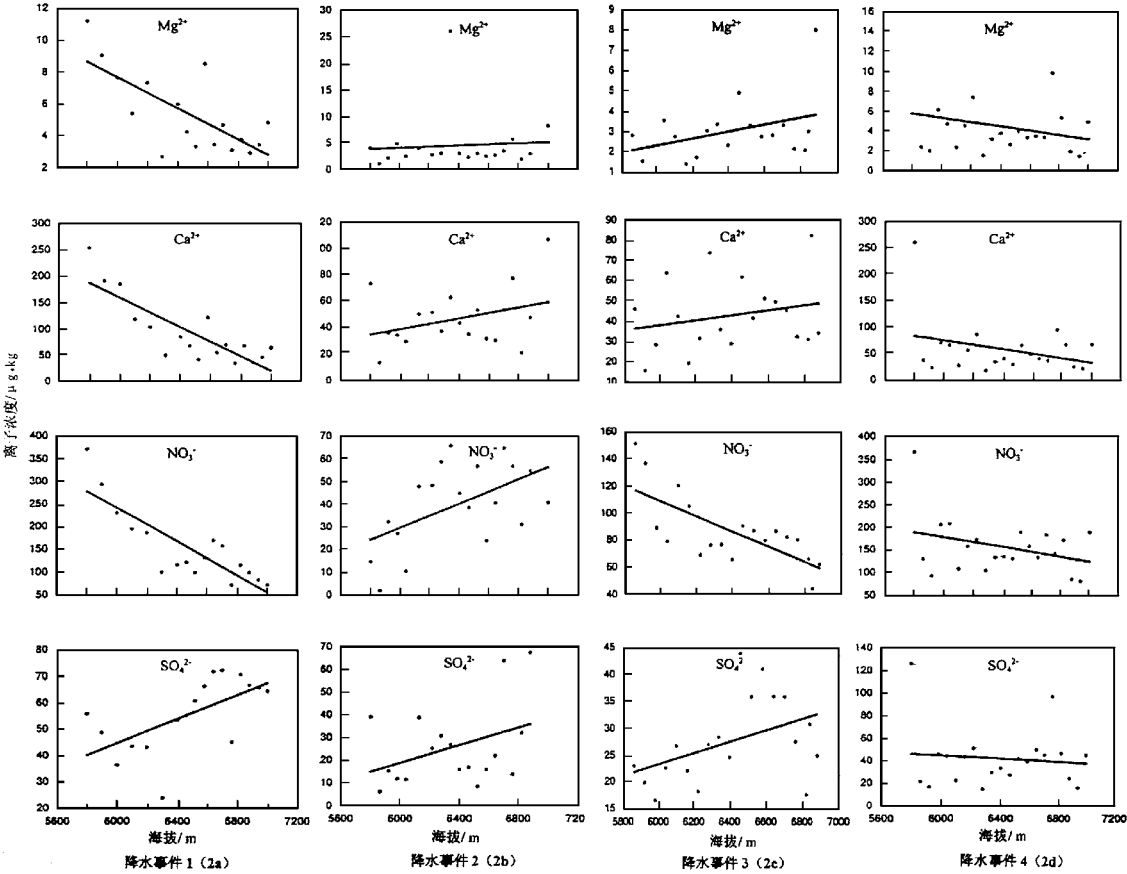


图 2 达索普冰川区 1997 年夏季 4 次降水事件的主要离子浓度随海拔的分布

Fig.2 The elevation distribution of major ion concentrations in the four precipitation events during September, 1997, in the Dasoupu Glacier

表 2 达索普冰川区 1997 年夏季 4 次降水事件的降水中主要离子浓度间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between major ion concentrations in four precipitation events in the Dasoupu Glacier region, 1997

离子	降水事件 1 (2a)			降水事件 2 (2b)			降水事件 3 (2c)			降水事件 4 (2d)		
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻
Ca ²⁺	0.94 ¹⁾			0.42			0.28			0.96 ¹⁾		
NO ₃ ⁻	0.83 ¹⁾	0.93 ¹⁾		0.40	0.41		0.28	0.33		0.84 ¹⁾	0.90 ¹⁾	
SO ₄ ²⁻	0.14	0.26	0.19	0.97 ¹⁾	0.22	0.36	0.33	0.52 ²⁾	0.14	0.96 ¹⁾	0.91 ¹⁾	0.80 ¹⁾

1) 相关系数的置信度为 99 %; 2) 相关系数的置信度为 95 %.

时的局地大气化学特征,故降水的离子之间相关性变化大,关系较复杂.再以 NO₃⁻ 为例,降水事件 1 中与 Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 相关性强,说明在短期(数天)内局地大气中 NO₃⁻ 的主要来源与 Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 一致,可能为局地尘埃来源,而降水事件 2、3 中却与其它离子的相关不显著,说明 NO₃⁻ 的其它来源占主导地位,如可能来自

平流层或生物源等.总之,达索普冰川区夏末降水中,随着降水气团性质的不同,降水中离子浓度表现出的相关性也不同.局地大陆性气团降水中主要离子之间显著相关,说明其来源基本一致;而海洋性气团降水中离子之间的相关性较差,说明它们的来源具有较大的差异.

表 3 达索普冰川区 1997 年夏季 4 次降水事件主要离子浓度平均值 (± 为标准偏差 , 单位 : $\mu\text{k}/\text{kg}$) 及离子浓度随海拔升高的变化 (相关系数 $R \geq 0.46$ 的置信度为 95 %)

Table 3 Mean values (± represents standard deviation , Units : $\mu\text{k}/\text{kg}$) and variations of major ion concentrations along with elevation increasing in the four precipitation events during 1997 summer in the Dasuopu Glacier (The correlation coefficient $R \geq 0.46$ is significant at the level of 95 %)

降水事件	1	2	3	4	总体趋势
	5.4 ± 2.5	4.5 ± 5.4	3.0 ± 3.3	4.5 ± 3.3	
Mg^{2+}	减小显著 ($R = 0.73$)	不明显	有增大趋势 ($R = 0.40$)	有减小趋势 ($R = 0.24$)	减小
	94.3 ± 6.25	46.7 ± 22.1	43.1 ± 17.7	58.2 ± 51.2	
Ca^{2+}	减小显著 ($R = 0.83$)	有增大趋势 ($R = 0.34$)	有增大趋势 ($R = 0.23$)	有减小趋势 ($R = 0.30$)	减小
	154.4 ± 81.8	40.1 ± 18.4	86.9 ± 25.9	156.9 ± 61.6	
NO_3^-	减小显著 ($R = 0.84$)	增大 ($R = 0.53$)	减小显著 ($R = 0.72$)	有减小趋势 ($R = 0.33$)	减小
	55.7 ± 13.8	25.8 ± 17.6	27.5 ± 7.9	42.3 ± 26.4	
SO_4^{2-}	增大显著 ($R = 0.62$)	有增大趋势 ($R = 0.38$)	增大 ($R = 0.44$)	不明显	增大

2.2 主要离子浓度随海拔的变化特征

降水事件 1 中 (图 2a , 表 3) 离子浓度平均值均较高 , Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 浓度随海拔升高而显著降低 , 而 SO_4^{2-} 浓度则随海拔升高而升高 . 降水事件 2 中 , SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Ca^{2+} 浓度随海拔升高有增大趋势 , 而 Mg^{2+} 浓度变化不明显 (图 2b) . 降水事件 3 中 , NO_3^- 浓度与海拔之间呈显著负相关 , 而其它离子浓度随海拔的升高有增大的趋势 (图 2c) . 降水事件 4 中 , Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 NO_3^- 浓度却呈现降低趋势 , 而 SO_4^{2-} 浓度变化不明显 (图 2d) .

(1) 陆源阳离子浓度随海拔的变化 在达索普冰川区 4 次降水事件中 , 以陆源为主导的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度主要表现为明显的随海拔升高而降低 (降水事件 1 , 4) , 这反映了大气中陆源气溶胶随海拔的分布特征 . 在达索普冰川区随海拔的降低裸露基岩面积扩大 , 即局地尘埃物质来源增多 , 表现为降水中陆源 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度随海拔降低而升高 , 这与西昆仑山古里雅冰帽降雪中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度随海拔的变化一致^[14] . 同时 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度在部分降水事件中也表现出随海拔升高而增大的趋势 (如降水事件 3) , 这可能与 2 种离子的海洋来源有关 . 野外考察期间 , 在达索普冰川海拔 7000 m 处观测到夏季西南季风携带而来的海洋性气团有可能翻越喜马拉雅山的部分垭口而形成降水^[10] . 在这种情形下 , 由于水汽在较高海拔首先凝结形成降水 , 因而降水的离子浓度较高 , 整体上随海拔的下降离子浓度降低 . 因此 , 对于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 如果降水当时的大气中二者的主导来源为局地陆源时 , 其浓度随海拔

升高而下降趋势明显 ; 当降水气团中二者的海洋来源占一定比重时 , 下降趋势不明显 , 甚至出现相反的关系 (即随海拔升高而浓度有增大趋势) .

(2) NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度随海拔的变化 降水中 NO_3^- 浓度随海拔升高而明显降低的趋势 (降水事件 1 、 3) 可能与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的情形雷同 , 即降水当时的大气中 NO_3^- 的主导来源为陆源 , 主要受陆源气溶胶的海拔分布影响 . 由于 NO_3^- 的海洋来源可忽略不计 , NO_3^- 浓度在降水事件 4 中随海拔升高而增大的现象则与海盐气溶胶的影响无关 , 在南北极地区也观测到同样现象^[15-16] . 已有研究表明^[17-18] , NO_x 和 OH 在大气中形成 HNO_3 时扮演了重要角色 , 而北半球对流层中 NO_x 来源包括化石燃料的燃烧 , 高纬度和高海拔地区的光电作用 , 土壤释放物以及平流层输入等 , 而且 NO_x 一般在对流层上部或平流层下部传输^[16,19,20] , 最主要的是 OH 随海拔的升高而增大^[18] , 因而大气中的 NO_3^- 在没有或很少有局地陆源尘埃的影响下 , 其浓度也表现出随海拔升高而增大的趋势 .

降水中 SO_4^{2-} 浓度随海拔升高而增大的趋势相当明显 (降水事件 4 除外) . 尽管前期的研究结果表明春季在达索普冰川区 SO_4^{2-} 主要来源于中亚干旱半干旱的尘埃物质 , 但在夏季风盛行的低尘埃阶段^[7,13,21] , 大气中的 SO_4^{2-} 来源可能与春季迥然不同 . 占主导地位的是 SO_4^{2-} 来源 , 其一是大气中 SO_x 的氧化作用 , 研究表明达索普冰川区人类活动排放的污染物主要来源于喜马拉雅山南部地区 (如印度大陆等)^[22] , 在这种情形下

SO_x 经由西南季风传输并经历大气中的氧化过程形成 SO_4^{2-} 时, SO_4^{2-} 随海拔的分布特征则与 NO_3^- 的情形相似; 其二当 SO_4^{2-} 的来源以海盐气溶胶为主导时, SO_4^{2-} 随海拔的变化则同 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的变化一致。

此外, 在喜马拉雅山南坡印度 Nun Kun 地区对一次降雪过程的离子浓度随海拔的变化研究表明^[3], 在同一次降水过程中, 位于较高海拔处的长距离传输的冷性气团降水, 其离子浓度较低, 而较低海拔的暖性气团降水中离子浓度较高, 而且离子浓度在 2 种气团之间有一突变过程。特例是 NO_3^- , 随着海拔升高其浓度增大, 反映了大气的原始值, 气团性质对其影响不大。达索普冰川区夏末的各次降水过程中, 气团性质有可能也发生改变^[12], 但不同气团之间是否有较明确的分层界限还需进一步研究, 因为不同降水中主要离子浓度变化没有明显的突变界限。

3 结论

达索普冰川区夏末降水中, 各种离子之间的相关性随降水气团性质的不同而不同。局地大陆性气团降水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间存在显著的正相关性, 而海洋性气团降水 4 种离子之间的相关性变化较大, 说明在夏季低尘埃阶段大气中各种离子的主导来源处在短期的(如数天)变化中。整体上达索普冰川区夏末降水中 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度随海拔的升高呈减小趋势, SO_4^{2-} 浓度则为增大趋势。这些变化趋势是大气中各种离子主导来源的影响所致。同时在达索普冰川区这一全球偏远地区对流层中上部, 夏季风期间降水中主要离子的高程分布特征表明, 由于受大气陆源尘埃的影响相当小, 大气中各种成分的高程分布反映了夏季对流层中上部大气的真实状况, 这是对大气化学研究的一个有益补充。

参考文献:

- 王鼎新, 李洪珍, 丁国安等. 珠穆朗玛峰地区大气环境本底初步探讨. 见: 珠穆朗玛峰地区科学考察报告(1975), 气象与环境. 北京: 科学出版社, 1980, 171~188.
- 王平, 皇翠兰, 刘子东. 西藏希夏邦马峰地区雪冰化学特征. 环境科学, 1988, 9(1): 23~26.
- Mayewski P A, Lyons W B, Ahmad N. Chemical composition of a high altitude fresh snowfall in the Ladakh Himalayas. Geophysical Research Letters, 1983, 10: 105~108.
- Mayewski P A. Snow chemistry from Xixabangma Peak, Tibet. Journal of Glaciology, 1986, 33: 542~543.
- Wake C P, Mayewski P A, Spencer M J. A review of central Asian glacioclimatic data. Annals of Glaciology, 1990, 14: 301~306.
- Wake C P, Mayewski P A, Li Z. Modern eolian dust deposition in central Asia. 1994a, Tellus, 46B: 220~233.
- Wake C P, Dibb J, Mayewski P A et al. The chemical composition of aerosols over eastern Himalaya and Tibetan Plateau during low dust periods. Atmospheric Environment, 1994b, 28: 695~704.
- Shrestha A B, Wake C, Dibb J. Chemical composition of aerosol and snow in the high Himalaya during the summer monsoon season. Atmospheric Environment, 1997, 31(17): 2815~2826.
- 秦翔, 姚檀栋, 王晓香, 皇翠兰. 希夏邦马峰北坡冰川区冰、雪的化学特征. 环境科学, 1999, 20(2): 1~6.
- 田立德, 姚檀栋, 张寅生, 蒲健辰. 希夏邦马夏季降水中水化学特征. 环境科学, 1998, 19(6): 1~5.
- Buck C F, Mayewski P A. Determination of major ions in snow and ice cores by ions chromatography. Journal of Chromatography, 1992, 594: 225~228.
- 康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 段克勤. 希夏邦马峰达索普冰川高海拔区夏季风期间大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征. 山地学报, 2000, 18(1): 1~6.
- 康世昌, 秦大河, 姚檀栋, Cameron P Wake, Paul Mayewski. 希夏邦马峰达索普粒雪芯中夏季风和尘埃信号记录研究. 科学通报, 1999, 44(22): 2230~2235.
- 李月芳, 姚檀栋, 皇翠兰等. 古里雅冰帽中化学成分的空间变化. 冰川冻土, 1993, 15(9): 467~472.
- Mulvaney R, Wolff E W. Spatial variability of the major chemistry of the Antarctic ice sheet. Annals of Glaciology, 1994, 20: 440~447.
- Yang Q, Mayewski P A, Whitlow S et al. Global perspective of nitrate flux in ice cores. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 5113~5121.
- Logan J A. Nitrogen Oxides in the troposphere: Global and regional budgets. Journal of Geophysical Research, 1983, 88: 10,785~10,807.
- Warneck P. Chemistry of the natural atmosphere. Academic San. Diego, Calif., 1988. 757.
- Mayewski P A, Spencer M J, Twickler M S et al. A glacioclimatic survey of the Summit region, Greenland. Annals of Glaciology, 1990, 14: 186~190.
- Finkel R C, Langway C C, Clausen H B. Changes in precipitation chemistry at Dye3, Greenland. Journal of Geophysical Research, 1986, 91: 9849~9855.
- 康世昌, 秦大河, 姚檀栋, Cameron P. Wake. 希夏邦马峰冰川粒雪中环境季节变化记录研究. 地理学报, 2000, 55(1): 55~65.
- 谢树成, 姚檀栋, 康世昌, 段克勤, 徐柏青. 青藏高原希夏邦马峰地区雪冰有机质的气候与环境意义. 中国科学(D 辑), 1999, 29(5): 457~465.