

珠穆朗玛峰极高海拔地区表层雪化学元素浓度特征

张强弓 康世昌* 丛志远 刘勇勤

(中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 中国科学院研究生院, 北京 100049; 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000. * 联系人, E-mail: shichang.kang@itpcas.ac.cn)

摘要 对珠穆朗玛峰极高海拔地区(6500~8844 m)表层雪化学元素浓度及空间分布进行了分析. 结果表明, 表层雪中元素随海拔高度并未表现出明显的规律性变化, 这主要是由于高海拔地区的强风扰动引起表层雪的重新分布所造成; 另外局地裸露基岩的粉尘输入对表层雪中的陆源元素随海拔的分布有较大影响. 对比 1975 年同海拔样品元素浓度值发现, 2005 年样品除少数地点的个别元素外, 均低于 1975 年. 这表明因采样和测试技术手段的进步, 2005 年样品元素浓度测试的准确性更高. 与全球其他地区降水样品相比, 珠峰样品中的稀有元素与南北极及格陵兰地区雪样中的化学元素浓度大致相当, 并且其含量远远低于受人类活动影响强烈的城市地区, 说明珠峰受人类活动影响甚微, 可以作为世界偏远地区大气环境背景的代表.

关键词 珠穆朗玛峰 极高海拔 表层雪 元素

珠穆朗玛峰(以下简称珠峰)地区人类活动微弱, 是全球大气环境本底最具代表性的地区之一^[1]. 雪冰作为大气环境信息的良好载体, 是恢复气候指标、指示环境变化和追溯人类污染的良好工具. 其中, 雪冰中的重金属元素则是评价人类活动对地球大气环境影响的敏感指标, 其在极地和山地冰川地区雪冰中的含量变化已经引起了科学家的极大关注^[2-4]. 尽管近年来有较多关于珠峰地区雪冰中主要阴、阳离子浓度的报道^[5-7], 但由于重金属元素的自然本底极低(一般在 ng/g 甚至 pg/g 级别), 样品从采集到最终测试极易受到污染, 再加上珠峰地区严酷的自然条件, 该地区少有雪冰重金属元素的报道^[8,9]. 而关于珠峰极高海拔乃至峰顶的雪冰化学报道则更为罕见. 1975 年的第三次珠峰科学考察, 曾对这一地区极高海拔雪样的重金属元素做过初步研究^[9]. 但由于受当时采样的设备、方法以及测试技术手段限制, 数据的可靠性可能存在较大问题.

2005 年 5 月下旬, 中国登山队再次登顶珠峰. 在登顶的过程中, 登山队员沿攀登路线从海拔 6500 m 至 8844 m 共采集了 14 个表层雪样(0~10 cm). 本文对这些样品的主要化学元素和重金属元素进行了分析, 并对元素的空间变化及其产生原因进行了讨论.

1 材料与方法

2005 年 5 月 15~20 日, 中国登山队员在登顶测高

过程中在不同海拔采集了 14 个表层雪样品(0~10 cm). 所有样品的采集地点如图 1 所示, 在海拔 6500~7300 m 之间, 每升高 100 m 采集一个样品, 共采集 9 个样品; 其余 5 个分别在海拔 7500, 8100, 8200, 8300 和 8844.43 m(峰顶)采集. 登山期间, 未有新降雪事件发生. 表层雪采集点都离开登山路线以确保样品不受人为干扰. 采样方法如 Wake 等人^[10,11], Kang 等人^[6]所述, 用事先酸洗的 1 L 的清洁高密度聚乙烯瓶(Nalgene[®])直接采集雪样, 保证了样品不受污染. 空白样品在采样过程中经历了与样品相同的操作过程.

样品采集后, 在冷冻状态下运回中国科学院青藏高原研究所, 并保持冷冻状态直至实验分析. 所有样品的元素分析均在中国科学院大气物理研究所进行. 用超纯硝酸对样品进行 1% 酸化, 并用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-SMS, Agilent 7500a)分析了 B, Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Cs, 和 Pb 等 20 种元素. 大多数元素的空白样品浓度值均低于检测线, 对测得元素浓度和检测线以及空白样品元素浓度的评估表明, 样品在采集和运输过程中并未受到污染, 数据具有较高的可信度. $\delta^{18}\text{O}$ 在中国科学院青藏高原研究所实验室以 MAT-253 气体稳定同位素质谱仪测试, 其测量精度为 0.5‰.

2007-02-28 收稿, 2007-07-30 接受

国家自然科学基金(批准号: 40401054, 40121101)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2005CB422004)、科学技术部社会公益研究专项(批准号: 2005DIA3J106)、中国科学院“百人计划”项目、中国科学院知识创新项目(批准号: KZCX3-SW-339)及中国科学院院长基金资助

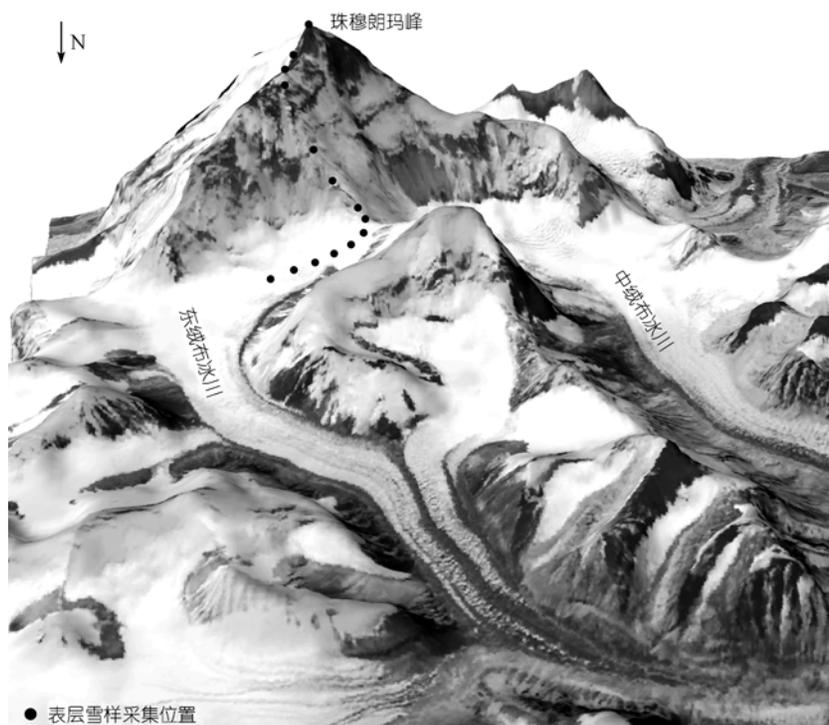


图1 样品采集地点示意图

2 结果与讨论

2.1 $\delta^{18}\text{O}$ 和元素浓度

珠峰位于青藏高原南部,喜马拉雅山中段地区,受印度季风影响显著.已有的研究^[7,12]表明该地点降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出明显的“降水量效应”,即 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈现显著的反相关关系^[13].张东启等人^[7]通过研究珠峰地区新降雪 $\delta^{18}\text{O}$ 和主要离子指出,该地区夏季风降水期通常为6月上旬到9月上旬.本研究中的14个样品采集于5月中旬,且 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -16.73‰ ,由此可判定该批样品中化学元素可代表本地区春季大气环境状况,由于春冬季降水较少,因此样品中的化学元素可能主要来源于大气干沉降.

图2给出了 $\delta^{18}\text{O}$ 以及元素含量随海拔高度变化的趋势,其中Cr, Co, Cd, Cs和Pb由于大多数样品低于检测线而未在图中给出. Ca, Na, K, Mg和Fe浓度较高,其中Ca浓度最高,在6500 m处接近 $80 \mu\text{g/g}$.稀有元素则都在几个 ng/g 级别, Cu, V和Se甚至低于 1ng/g .已有研究表明,珠峰地区春季高浓度离子(如 Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+})含量是因为亚洲春季盛行的沙尘暴带来的高粉尘通量^[5,6],因此高浓度Ca等地壳元素表明样品主要受高原春季盛行的沙尘天气^[6,14,15]或

中、南亚^[5,10]所带来的陆壳气溶胶影响.而可能来源于人类排放的重金属元素(Cr, Co, Cd, Pb等)浓度极低甚至低于检测线则表明,在春季人类排放对极高海拔的珠峰地区表层雪影响甚微.

大气降水化学随海拔高度的变化特征在以往工作中已有详细讨论, Veyssyre等人^[16]研究了阿尔卑斯山Chamonix和Maurienne山谷不同海拔高度降雪中的重金属元素,发现降水中重金属元素浓度随海拔高度上升有下降趋势. Kang等人^[17]对珠峰毗邻地区希夏邦马峰5800~7000 m夏季降雪进行了研究,发现 Ca^{2+} , Mg^{2+} 等的离子浓度亦表现出随海拔高度上升而下降的趋势.然而,如图2所示,珠峰样品的元素浓度却并未表现出明显的随海拔高度上升而下降的变化.而7500 m处大多数主要元素(Ca, Mg, Fe等)的浓度较高,可能是由于受到局地裸露基岩风化剥蚀形成的风沙粉尘和飘尘注入的影响^[9].同时峰顶大多数元素也表现为较高浓度,可能是由于珠峰峰顶空间狭小,而登顶者聚集于此带来污染所致.这同时也说明峰顶样品较为洁净,人类轻微活动即可引入污染.表层雪中元素浓度随海拔高度变化的规律性不明显,是由于高海拔区强风导致的表层雪重新分布以及局地基岩风化粉尘的输入^[18].据2005年5月1

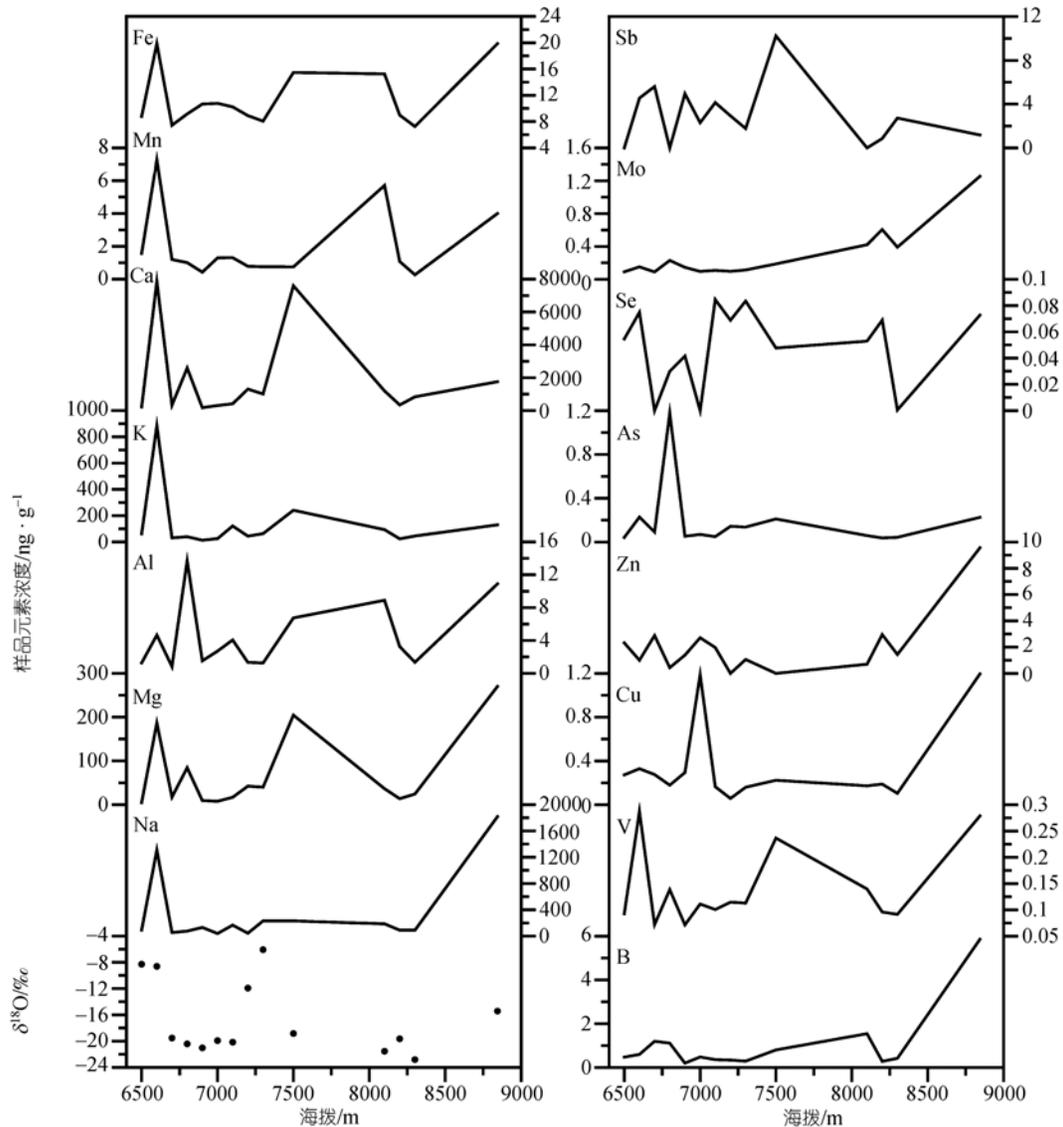


图 2 样品元素浓度随海拔高度变化图

日至 22 日气象观测资料,在这一时期内东绒布冰川垭口处(海拔 6500 m)平均风速为 7.52 m/s,而最高风速可达到 18.8 m/s^[19],野外观测珠峰极高海拔区的风速远大于东绒布冰川垭口处^[9].

2.2 化学元素浓度及对比

迄今为止,所能参考的珠峰极高海拔区的雪冰化学研究只有 1975 年中国科学院珠穆朗玛峰综合科学考察队的数据.尽管当时采样技术和分析手段较现在存在差距,我们仍尝试进行同海拔雪样元素浓度对比.如表 1 所示,2005 年样品的元素浓度除个别

地点的少数元素外,大部分元素均低于 1975 年.有些元素如 Al 和 Zn 的浓度甚至相差 2 个数量级.元素浓度平均值的对比显示,2005 年样品的平均浓度均比 1975 年低(Sb 例外).值得注意的是,1975 年样品 Pb 含量在 7000 m 以上均大于 10 ng/g,而 2005 年样品在多个采样点并未检出 Pb,即使可以检测出的,其含量也大大低于 1975 年.同时上文提及,大多数样品中 Cr, Co, Cd 和 Cs 等元素低于检测线.这都表明由于 2005 年样品的采集及分析手段更为先进,对痕量元素的检测准确性要高于 1975 年,这为建立珠

峰高海拔地区大气环境本底提供了良好的依据。

为了进一步认识表层雪中元素浓度的环境意义,我们选取了其他地区大气降水元素含量与珠峰表层雪化学元素含量进行对比(表 2)。选取的地区包括南极Asuka站表层雪 [20], 北极Atqasuk站降雪 [21], 格陵兰中部地区雪坑 [22](1991~1995), 绒布冰川 6500 m 垭口雪坑 [8], 阿尔卑斯山Chamonix山谷不同海拔新雪 [16]以及代表人类活动强烈干扰的城市雅典的降水 [23]。

主要元素Na, Ca, K和Mg在珠峰和南北极相差较大, 珠峰的Ca含量远高于北极Atqasuk站, 主要是由于受到了珠峰地区局地粉尘输入的影响。而Atqasuk站Na和Mg含量高于珠峰是因为海盐的输入所造成 [23]。对于其他元素如V, Mn, Cu, Zn, As, 珠峰则与南北极, 及格陵兰地区含量相当, 而远不及人类活动强烈的大城市雅典(特别是Cu和Zn), 这表明珠峰极高海拔地区受到人类活动的影响甚微, 可作为全球偏远地区大气环境本底的代表。样品中Cu和Zn含量稍高于

东绒布冰川 6500 m雪坑样品的平均(2004 年夏到2005 年秋雪冰样品的平均), 说明春季沙尘盛行的天气对该地区的影响。需要指出的是, 阿尔卑斯Chamonix山谷新雪样品元素含量普遍低于珠峰样品, 主要是因为Chamonix山谷新雪采集于降雪结束后短期内, 还未充分受到大气干沉降影响所致 [16], 这也表明降雪后大气气溶胶干沉降对雪冰元素含量影响较大。

3 结论

珠峰极高海拔地区表层雪化学元素浓度未出现显著的随海拔高度变化的特征, 主要归因于极高海拔区强风对雪的重新分布以及局地裸露基岩的粉尘输入的影响。峰顶痕量元素含量较高, 可能与登山者

表 1 2005 年珠峰高海拔样品与 1975 年样品元素含量对比(单位: $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^{a)}

	7000 m		7500 m		8100 m		8844 m		平均值	
	1975	2005	1975	2005	1975	2005	1975	2005	1975	2005
Na	665	38.38	705	230.4	745	186.2	92	476.9	551.75	233
Ca	17300	307.2	7000	7601	21750	1194	3705	1756	12438	2715
K	264	25.24	580	241	770	93.52	84	130.1	424.5	122.5
Mg	391.5	7.852	3250	204.4	4940	36.52	238	270	2204	129.7
Al	56.3	2.706	700	6.745	950	8.893	86	10.89	448	7.31
Cu	1.6	1.188	16.5	0.224	23.7	0.173	5.8	1.196	11.9	0.695
Fe	4	10.77	710	15.47	800	15.25	1425	19.86	734.75	15.34
Mn	0.9	1.297	36	0.75	34.9	5.708	8.4	3.999	20.05	2.94
Zn	4.1	2.717	4658	<D.L.	13900	0.701	35	9.567	4649	3.25
As	0.7	0.069	0.7	0.21	4.8	0.059	0.1	0.226	1.575	0.141
Sb	0.5	2.302	0.1	10.23	0.4	<D.L.	<D.L.	1.184	0.25	3.429
Pb	0.3	0.006	60	0.02	24.7	<D.L.	17.2	0.026	25.55	0.013

a) <D.L.为低于检测下限

表 2 珠峰极高海拔样品元素浓度与世界其他地区降水元素浓度的对比(单位: $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)

	珠峰		北极降雪	南极新雪	格陵兰雪坑	绒布冰川雪坑	阿尔卑斯高海拔新雪	雅典降水
	表层雪平均	标准差						
Na	324.8	538.0	1720	0.2~80				
K	129.7	225.3	140	<180				
Ca	1852	2582	270					
Mg	68.42	86.49	360	<200				
Al	4.46	4.09	158	0.05~6	7.3		29.11	5.87
Fe	11.48	4.34	93	33.1			4.88	
V	0.139	0.073	0.35				0.154	
Mn	1.958	2.133	3.32	<0.5			0.41	3.61
Cu	0.343	0.367		<0.7	4.65	0.044	0.08	154
Zn	2.032	2.390	1.4	<0.5	51	1.3	0.34	33.5
As	0.183	0.295	0.11					0.84
Sb	2.95	2.82			0.9			

活动有关,表明珠峰峰顶雪的清洁和易受污染性.对比 1975 年同海拔样品元素浓度值表明,2005 年样品除少数地点的个别元素外,均低于 1975 年.表明因采样和测试技术手段的进步,使得对 2005 年样品元素浓度测试的准确性更高,为建立珠峰极高海拔地区大气环境本底提供了良好的依据.与世界其他地区雪冰样品相比,珠峰极高海拔地区表层雪痕量化学元素浓度值大致与南北极及偏远地区相当,远低于人类活动强烈的大城市,说明珠峰受到人类活动影响甚微,可以作为全球偏远地区大气环境本底的代表.

致谢 感谢 2005 年中国科学院珠穆朗玛峰第四次综合科学考察的所有队员,特别感谢 2005 年中国登山测绘队采集样品,高登义教授协助进行样品的实验室分析.

参 考 文 献

- Jenkins M, James D. Chemical composition of fresh snow on Mount Everest. *J Geophys Res*, 1987(D9): 10999—11002
- 孙俊英,秦大河,任贾文. 雪中重金属的研究进展. *冰川冻土*, 1996, 18(3): 284—288
- 秦大河,姚檀栋. 冰芯与寒区环境开放实验室的回顾与展望. *冰川冻土*, 2000, 22(3): 261—269
- 秦大河,任贾文,康世昌. 中国南极冰川学研究 10a 回顾与展望. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 376—383
- Kang S C, Mayewski P A, Qin D H, et al. Glaciochemical records from a Mt. Everest ice core: Relationship to atmospheric circulation over Asia. *Atmos Environ*, 2002, 36 (21): 3351—3361[DOI]
- Kang S C, Mayewski P A, Qin D H, et al. Seasonal differences in snow chemistry from the vicinity of Mt. Everest, central Himalayas. *Atmos Environ*, 2004, 38(18): 2819—2829[DOI]
- 张东启,秦大河,候书贵. 珠穆朗玛峰地区新降雪和雪坑样品的化学特征研究. *兰州大学学报*, 2002, 38(4): 119—124
- 段建平,任贾文,秦翔,等. 珠穆朗玛峰地区雪中重金属浓度与季节变化. *地理学报*, 2007, 62(1): 22—29
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 珠穆朗玛峰科学考察报告(1975)气象与环境. 北京: 科学出版社, 1980. 21—35
- Wake C P, Dibb J E, Mayewski P A, et al. The Chemical-Composition of Aerosols over the Eastern Himalayas and Tibetan Plateau During Low Dust Periods. *Atmos Environ*, 1994, 28(4): 695—704[DOI]
- Wake C P, Mayewski P A, Xie Z C, et al. Regional distribution of monsoon and desert dust signals recorded in asian glaciers. *Geophys Res Lett*, 1993, 20 (14): 1411—1414
- Qin D H, Mayewski P A, Wake C P. Evidence for recent climate change from ice cores in the Himalayas. *Ann Glaciol*, 2000, 31: 153—158
- Dansgaard W. Stable isotope in precipitation. *Tellus*, 1964, 14(4): 436—468
- 方小敏,韩永翔,马金辉,等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积: 以 2003-03-04 拉萨沙尘天气过程为例. *科学通报*, 2004, 49(11): 1084—1090
- 宋连春,韩永翔,张强,等. 中国沙尘暴时空变化特征及日本、韩国黄沙的源地研究. *大气科学*, 2004, 28(6):820—827
- Veysseyre A, Moutard K, Ferrari C, et al. Heavy metals in fresh snow collected at different altitudes in the Chamonix and Maurienne valleys, French Alps: Initial results. *Atmos Environ*, 2001, 35(2): 415—425[DOI]
- Kang S C, Qin D H, Mayewski P A, et al. Chemical composition of fresh snow on Xixabangma peak, central Himalaya, during the summer monsoon season. *J Glaciol*, 2002, 48(161): 337—339
- Warneck P. *Chemistry of the Natural Atmosphere*. San Diego, California: Academic Press, 1988
- Xie A H, Ren J W, Qin X, et al. Meteorological features at 6523 m of Mt. Qomolangma (Everest) between 1 May and 22 July 2005. *J Mountain Sci*, 2006, 3(3): 181—190[DOI]
- Ikegawa M, Kimura M, Honda K, et al. Geographical variations of major and trace elements in East Antarctica. *Atmos Environ*, 1999, 33(9): 1457—1467[DOI]
- Douglas T A, Sturm M. Arctic haze, mercury and the chemical composition of snow across northwestern Alaska. *Atmos Environ*, 2004, 38(6): 805—820[DOI]
- Barbante C, Boutron C, Morel C, et al. Seasonal variations of heavy metals in central Greenland snow deposited from 1991 to 1995. *J Environ Monitor*, 2003, 5(2): 328—335[DOI]
- Kanellopoulou E A. Determination of heavy metals in wet deposition of Athens. *GLOB NEST: Int J*, 2001, 3(1): 45—50