

长江源区各拉丹冬峰雪冰中微粒季节变化及其环境意义

张玉兰^{1,2}, 康世昌^{1,3}, 张强弓^{1,2}, 丛志远^{1,2}, 张拥军^{1,2}

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 分析了长江源区各拉丹冬峰冰川区不同海拔采集的 3 个雪坑 SP1、SP2 和 SP3 样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 、不溶微粒数量浓度及主要离子浓度, 以探讨本研究区域雪冰微粒含量变化及其来源。结果显示, 不同粒径微粒含量变化趋势一致, 3 个雪坑中细微粒含量分别占总微粒的 88%、78%、86%, 中微粒分别占 10%、19%、11%; 不同粒径微粒数量浓度之间的相关系数均达 0.9 以上(置信度可达 99%), 具有良好的相关性。雪冰中不溶微粒浓度同 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 一样, 具有明显的季节波动, 非季风期微粒浓度要高于季风期 2~4 倍。3 个雪坑非季风期微粒通量分别占一个年层雪冰中微粒总通量的 73.6%、92.3%、97%, 即初春季节沙尘暴对于各拉丹冬雪冰中微粒沉降贡献远大于夏、秋季节。结合 NCAR/NCEP 再分析资料, 应用 HYSPLIT_4 模式模拟的不同季节 5 d 后向气团轨迹图表明, 各拉丹冬峰冰川区雪冰中不溶性微粒可能来源于中亚、南亚和青藏高原本身, 其中影响最大的可能是青藏高原自身的沙尘源区, 同时冰川区裸露基岩对雪冰中不溶微粒含量亦有贡献。

关键词: 雪冰微粒; 季节变化; 气团轨迹图; 各拉丹冬; 青藏高原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2117-06

Microparticle Variations in Snowpits from Mt. Geladaindong in the Source Region of Yangtze River and Its Environmental Significance

ZHANG Yu-lan^{1,2}, KANG Shi-chang^{1,3}, ZHANG Qiang-gong^{1,2}, CONG Zhi-yuan^{1,2}, ZHANG Yong-jun^{1,2}

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To study the variations of microparticles and their origins, microparticles concentrations, stable oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) and major ion concentrations were analyzed in snow samples collected from Mt. Geladaindong in the source region of Yangtze River. The correlation coefficients of different size microparticles in three snowpits are above 0.9 (significant at the 99% level), respectively. Microparticle concentrations have distinct seasonal variations, about 2-4 times higher in non-monsoon season than those in monsoon season, and are consistent with variations of $\delta^{18}\text{O}$, Ca^{2+} , Mg^{2+} and SO_4^{2-} . Microparticle fluxes in non-monsoon season in three snowpits are 73.6%, 92.3% & 97% of total annual fluxes respectively. Air mass backward trajectories over Mt. Geladaindong region were analyzed using the HYSPLIT_4 model, and microparticles in Mt. Geladaindong snow were mostly influenced by dust aerosols from the northwestern Tibetan Plateau, South Asia. Coarse particles may come from the local rocks near glaciers. Research of seasonality of microparticle in snow could provide the information on modern environment processes, and is the base of further interpretation of ice core records.

Key words: microparticles; seasonal variations; air mass trajectory; Mt. Geladaindong; Tibetan Plateau

微粒是大气的重要成分之一, 冰芯中微粒记录是反映大气环境变化的直接指标。长时间序列冰芯微粒记录可以揭示区域乃至全球的古气候、古环境演化历史。雪冰中微粒研究涉及其含量、大小、形状、质量、体积及其化学成分和矿物成分。这些微粒与大规模的尘暴、火山喷发活动、生物活动以及其它能够产生微粒的现象密切相关, 因此微粒研究能够提供研究地区(如极地、高山区等)以至全球的气候和环境信息。

各拉丹冬峰冰川作用区位于唐古拉山脉西部长江沱沱河源头地区(图 1)。已有研究认为唐古拉山脉与夏季副热带高压带的最北界线一致, 其南、北两侧水汽来源存在很大差异^[1]。不同来源水汽携带的

不溶微粒含量存在明显差异, Wake 等^[2]的研究发现, 各拉丹冬雪冰中微粒含量有明显的季节变化, 非季风期微粒含量高, 认为微粒含量主要受到源自中亚干旱半干旱区粉尘的影响, 这与方小敏、韩永翔等^[3,4]有关高原沙尘暴的研究有差异。此外, 不溶微粒在雪层中的浓度变化与融水、物理成冰过程密切相关。正确认识和评估雪冰中不溶微粒含量及其变化, 对全面了解长江源区的大气和生态环境意义深远。鉴于此, 2005 年 10~11 月“中国科学院各拉丹冬

收稿日期: 2007-08-14; 修订日期: 2007-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40401054); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422004); 中国科学院“百人计划”项目; 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-339)

作者简介: 张玉兰(1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为雪冰记录, E-mail: zhangyulan@itpcas.ac.cn

峰冰川学考察队”野外考察期间,在各拉丹冬峰冰川区不同海拔处共采集了 3 个雪坑样品(如图 1 所示),对其进行了不溶微粒浓度、 $\delta^{18}\text{O}$ 和主要阴、阳离子的分析,并结合 NCEP/NCAR 再分析资料,探讨了本区雪冰中微粒的季节变化及其可能来源,以期为恢复冰芯古环境记录奠定基础。

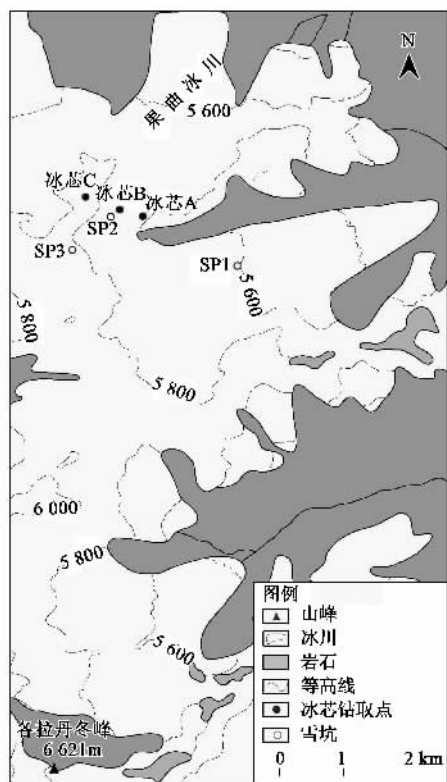


图 1 各拉丹冬峰冰川区雪坑采样点位置

Fig.1 Location map of Mt. Geladaindong and snowpit sampling sites

1 雪冰样品采集和分析

雪坑样品采集于唐古拉山脉各拉丹冬峰冰川区海拔 5 591 m (33.575°N, 91.196°E)、5 750 m (果曲冰川, 33.577°N, 91.177°E)、5 823 m (果曲冰川, 33.572°N, 91.170°E)处,分别标记为 SP1、SP2 和 SP3 (图 1)。样品采集方法是先用洁净的不锈钢铲子清理雪坑剖面,以 5 cm 等间距自剖面上部向下连续采样,置于洁净的 Whirl-Pak 塑料袋内,在大本营待其自然融化后装入清洗干净的聚乙烯塑料瓶内并在冰箱中保存。样品在传输过程中保持冷冻状态,并在 -20℃ 的冷库中储存^[2,5],直至分析前将样品在室温下融化。在采集、存贮、处理过程中,为确保样品不受污染,工作人员均需穿戴超净服、洁净口罩以及手套。

微粒含量(单位体积融水中微粒数量浓度,个/mL)在寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室用安装在 100 级超净工作台上的 256 通道 Coulter 计数器进行测试。Thompson、郭光剑等^[6,7]曾对 256-Channel Coulter Counter 工作原理及操作过程进行了详细的说明。所测结果为粒径 > 1.0 μm 的微粒,每个样品至少重复测试 3 次,并取其平均值。根据测量结果,仪器的本底为 400 ~ 800 个/mL,远低于样品的最低浓度,而且集中在 < 5 μm 的粒径范围内,对微粒测量结果的影响可以忽略不计。雪坑样品中的 $\delta^{18}\text{O}$ 是在中国科学院青藏高原研究所环境与过程实验室由 MAT-253 型气体同位素质谱仪进行分析测试,其精度为 0.2‰;主要阴、阳离子浓度 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 NH_4^{+} 、 Cl^{-} 、 NO_3^{-} 、 SO_4^{2-})在同一实验室由 DX-2500 型阴离子色谱仪和 DX-2000 型阳离子色谱仪测定,其中本研究选取的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 检测限为 2 ng/g, Mg^{2+} 离子的检测限为 1 ng/g。

2 结果与讨论

2.1 微粒含量

微粒计数器分析得到的数据为粒径 $d > 10 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 和 $d \leq 5 \mu\text{m}$ 3 类微粒浓度,分别标记为粗微粒、中微粒和细微粒浓度。不同粒径微粒数量浓度之间的相关系数均达 0.9 以上(置信度可达 99%),具有良好的相关性。3 个雪坑 SP1、SP2、SP3 中细微粒含量分别占总微粒的 88%、78%、86%,中微粒分别占 10%、19%、11%。这说明沉积在雪冰中的粗微粒含量很少,主要以细微粒为主。不同粒径微粒含量变化可以反映大气输送微粒能力的变化^[8],沉积于高山地区雪冰中的较细微粒($d \leq 5 \mu\text{m}$)可能主要是粉尘长距离传输的结果,而较粗微粒($d > 10 \mu\text{m}$)则可能反映了近源或局地源的影响。

表 1 所示,各拉丹冬 3 个雪坑中微粒含量显著低于高原西部古里雅冰芯、慕士塔格冰川和北部的煤矿冰川、敦德冰帽,但是高于高原南部的东绒布冰川、达索普冰川和枪勇冰川。SP2 雪坑和 Wake 等^[2]在本区采集的雪坑微粒含量一致。古里雅和慕士塔格位于高原西部,处在高原“寒旱核心”区域^[9],并靠近中亚干旱区,与西风的方向一致,能够获得更多粉尘。高原北部冰川则靠近柴达木盆地边缘,冬春季节沙尘暴频发,途经上述地区的气团可携带大量的粉尘物质进行传输,因而越接近粉尘物源区的冰川表面沉降的微粒越多。高原南部冰川远离沙尘源区,故

表 1 青藏高原不同地区雪冰中微粒平均浓度

采样点	冰川名称	海拔/m	采样时间	样品数	微粒平均浓度 × 10 ³ /mL
A ^[10]	东绒布冰川(珠穆朗玛峰地区)	6 518	2002	712	$n \times 10$ (其中 $n = 1, 2, \cdots, 9$)
B ^[11]	达索普冰芯	7 000	1997		$n \times 10$ (其中 $n = 1, 2, \cdots, 9$)
C ^[2]	枪勇冰川	5 850	1992-10	16	90.3
D ^[2]	各拉丹冬	5 950	1990-07	40	165.3
E ^[2]	煤矿冰川	5 480 ~ 5 770	1990-08	12	203.5
F ^[12]	敦德冰芯	5 200	1987		3 847
G ^[13]	慕士塔格冰川	6 350	2001		288.6
H ^[13, 14]	古里雅冰芯	6 200	1992		~ 400
各拉丹冬	SP1	5 591	2005-10	9	17.26
冰川区	SP2	5 750	2005-11	14	140.25
	SP3	5 823	2005-10	18	45.93
各拉丹冬雪坑微粒含量平均值					59.06

雪冰中微粒含量相对较小,这些结果显示雪冰中微粒含量受粉尘源区传输距离的显著影响.这似乎也说明,青藏高原上粉尘浓度从北向南减少.而同处于一个区域的不同冰川微粒含量不同,则显示出区域/局地环境、地形条件对大气粉尘沉降影响的差别.

2.2 微粒含量与离子浓度的关系

由不同粒径微粒之间的相关系数可知其具有良好的相关性,在曲线变化上表现为趋势一致(图 2).图 2 也显示 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度和微粒含量变化趋势极为相似,在高微粒含量期离子浓度显著增大,

而低微粒含量期离子浓度偏低.对青藏高原不同地区雪冰化学时空变化的研究发现^[15~18],高浓度的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 出现在微粒含量较高的雪层中,并对应于春季中亚地区沙尘暴活动期. Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 主要来源于陆源粉尘物质^[19],是陆源尘埃的指示剂,也是通过冰芯记录研究环境变化的代用指标. SO_4^{2-} 是大气气溶胶的重要组成部分之一,粉尘对 SO_x (硫氧化物)有吸附和催化作用,故冰芯中 SO_4^{2-} 含量与粉尘记录显著相关^[20].各拉丹冬峰冰川区雪坑中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度显著高于南极冰盖^[21]和格陵兰中部^[22].这主要因为全球主要的粉尘源区集中在北半

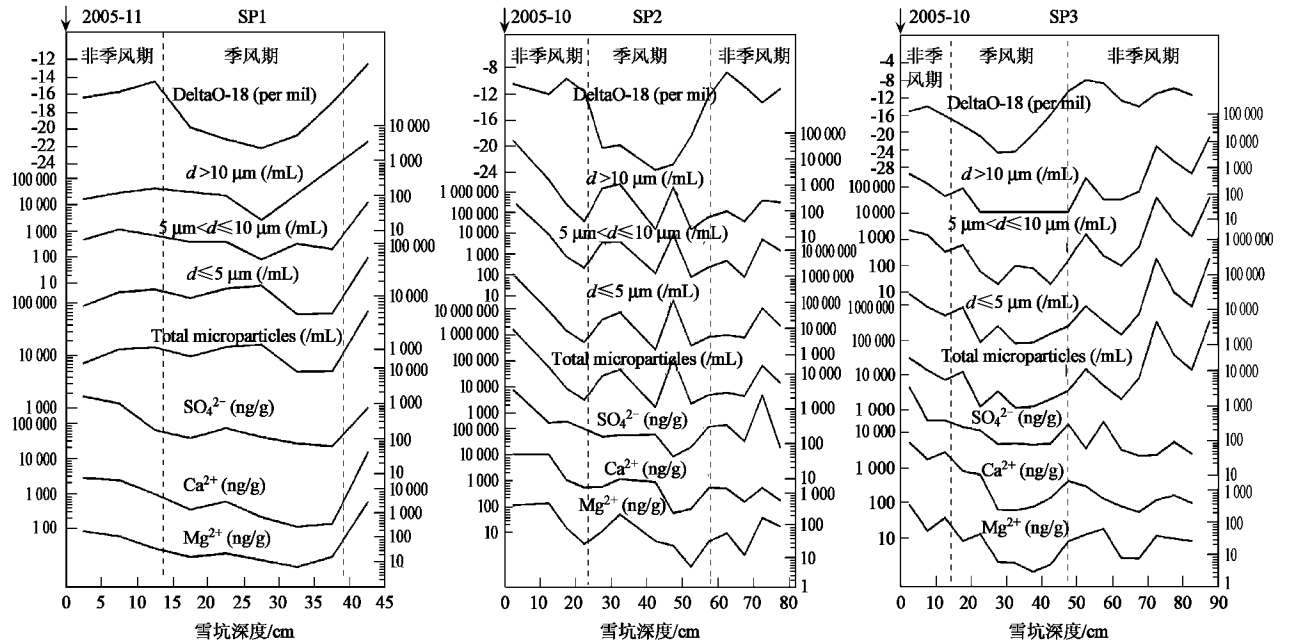


图 2 雪坑中不同粒径微粒含量随深度的变化曲线及与 $\delta^{18}O$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 离子浓度的对比

Fig. 2 Depth profiles of microparticle concentrations for snow samples recovered from SP1, SP2 and SP3, and comparisons of $\delta^{18}O$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} with different granularity concentrations

球中高纬地区,致使山地冰芯中的粉尘含量要高于两极,而且在粒径上也比极地冰芯粗。

2.3 微粒浓度的季节变化

冰芯研究中,氧同位素比率不仅是气温的一种代用指标,而且其季节变化也是冰芯年层划分的依据之一^[23]。雪坑上部记录的是秋末冬初季节降水, $\delta^{18}\text{O}$ 值处于上升趋势,而在夏季风期间为低值,季风期与非季风期各拉丹冬雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录存在非常明显的季节转变。依据氧同位素的季节变化,将微粒含量变化划分为季风期和非季风期(图2)。雪坑中微粒含量具有明显的季节变化,表现为季风期浓度低、非季风期浓度较高。出现这种差异的原因可能主要与印度夏季风期间,强烈的降水对大气有“清洗作用”,稀释了大气中的粉尘含量;而同时非季风期多为高原的沙尘频发期,季风期沙尘活动则明显减弱。

进一步计算3个雪坑季风期和非季风期微粒的平均浓度显示(图3),非季风期微粒浓度高出季风期约2~4倍。同时,雪坑SP1、SP2、SP3非季风期微粒通量分别占一个年层雪冰中微粒总通量的73.6%、92.3%、97%,即初春季节沙尘暴对于各拉丹冬雪冰中微粒沉降贡献远大于夏、秋季节。而夏季

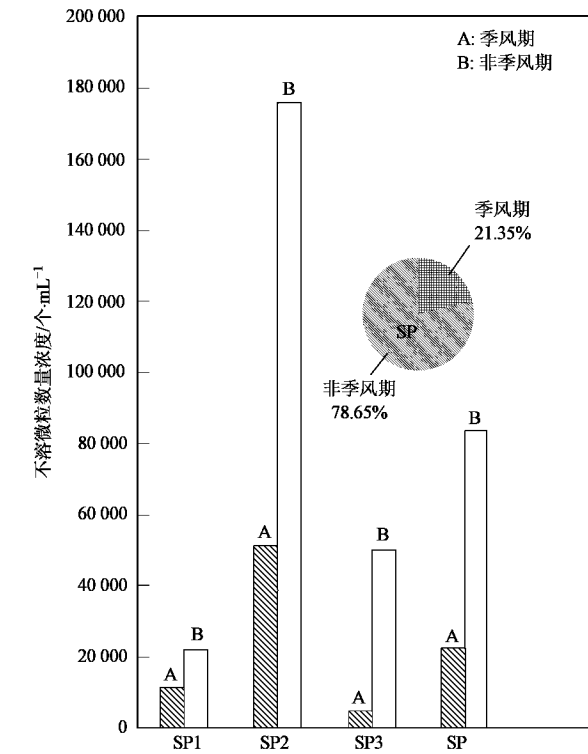


图3 雪坑中不溶微粒数量浓度不同季节(季风期和非季风期)的比较

Fig.3 Comparisons of microparticle concentrations between monsoon and non-monsoon snow from three snow pits samples collected on Mt. Geladaindong

风期间大量的降水对大气气溶胶起到“淋洗作用”,故大气中粉尘含量较低。

2.4 雪冰中微粒的可能来源分析

利用 NCAR/NCEP 再分析资料,应用 HYSPLIT_4 模式模拟了研究区冬、夏季各月5d内的后向气团轨迹图。该模式通常用来跟踪气团移动的路径,借以反映大气环流形势,HYSPLIT_4 资料采用全球再分析格点每日资料(GLOBAL REANALYSIS, 见 http://www.cdc.noaa.gov/climate_diagnostics_center/)。

冬季型(12月、1月、2月)的模式结果[图4(a)~4(c)]表明,各拉丹冬峰冰川区冬半年主要以西风为主,受西风急流的控制。气团经过伊朗、阿富汗、巴基斯坦、印度西北部和高原西部等地区,到达各拉丹冬冰川区。印度和巴基斯坦交界处为南亚最大的沙漠——塔尔沙漠,高原北部毗邻塔克拉玛干沙漠和柴达木盆地,高原西部本身也是干旱半干旱区,当气团经过上述地区时,可能携带该地区的粉尘物质,并在传输过程中发生干湿沉降。

研究证明不同粒径微粒传输距离不同,并且一般认为极细粒径微粒在大气中滞留时间长,甚至可以进入平流层参与全球范围大气环流。而粗微粒属于近源传输,其滞留时间和传输距离都比较短。近来的研究发现,青藏高原本身可能是一个重要的沙尘源区,沙尘暴主要发生在12月~翌年4月,大体上以羌塘高原为中心向东南逐渐减少^[3,4]。图4显示,冬季气团运行轨迹大致横扫羌塘高原这一“寒旱核心”。气团经过本区后,将携带大量粉尘继续向东传输,在冰川区发生沉降。这可能是导致非季风期微粒含量和离子浓度出现高值的主要原因。

因唐古拉山一线位于青藏高原中部,是夏季风影响的北缘,同时也受到大陆性气候的影响。Xiao等^[24]认为高原南部向北传输的西南季风过程和从高原北部向南传输的陆地扬尘天气过程,空间上在唐古拉山一线达到准平衡。夏季型(6~8月)空气轨迹图[图4(e)~4(g)]上表现为气团运行方向有2个明显的路径,即西南季风气团和北部大陆气团,但南支占据优势。各拉丹冬峰冰川区从3月份开始随着太阳高度角增加,地面感热加强,西风急流北撤。到5月底和6月初,青藏高压形成,使得冬半年一直存在的南支西风急流从高原南侧北撤到30°N以北地区,这种环流形势的突然变化导致印度季风的暴发。印度季风即西南季风携带大量暖湿气流爬上高原,向北推进,到达高原腹地唐古拉山一线;而从高原北部向南传输的大陆性气团亦可能携带粉尘在此沉

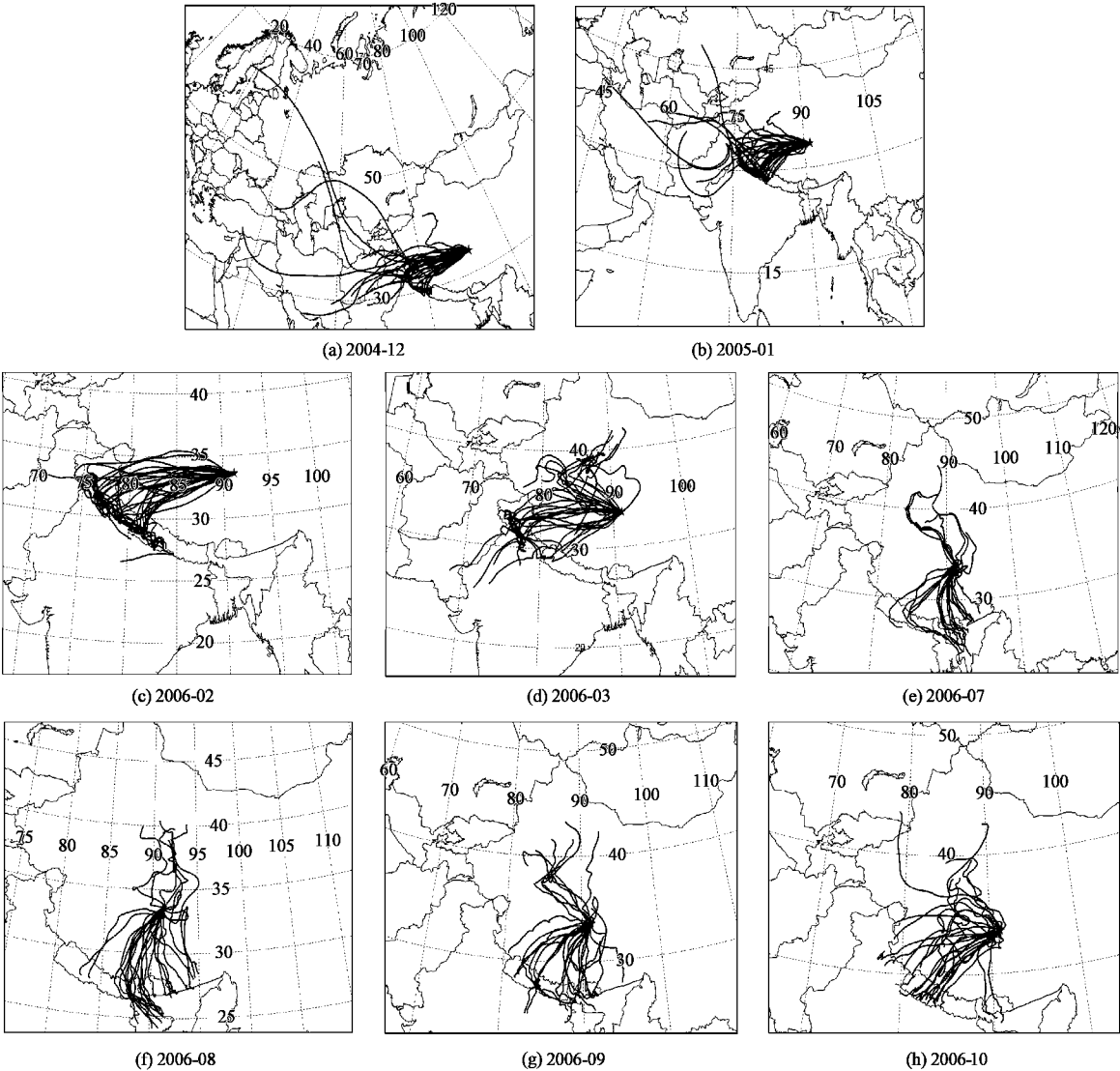


图 4 各拉丹冬冰川区雪坑 SP1(海拔:5 591 m;经纬度:33.58°N, 91.20°E)地面点之上 200 m 高空 2004 年冬季和 2005 年夏季各月空气轨迹

Fig.4 Air mass backward trajectories in the Mt.Geladaindong region (SP1, Alt 5 591 m, Lat 33.58°N, Lon 91.20°E) above ground level of 200 m during non-monsoon season of 2004 and monsoon season of 2005

降.研究认为,高原北部大气气溶胶主要为陆源物质^[16],而高原南部大气气溶胶有相当一部分来自海洋^[19],但海盐气溶胶对各拉丹冬峰微粒含量的影响程度到底如何,有待进一步细致研究.

而 3 月和 10 月分别是青藏高原环流形势冬季型和夏季型发生转换的时间[图 4(d)和 4(h)].各拉丹冬峰冰川区在 3 月份受南支西风急流的控制减弱,来自高原北部及新疆南部的气团增多.10 月份与之相反,气团轨迹逐渐转变为西风急流控制,源自高原本身沙尘源区的粉尘传输加强.此外,冰雪中粗微粒也可能来自研究区冰川周围的裸露基岩.总之,各拉丹冬峰雪冰中微粒可能来自南亚、中亚和高原本身以及局地冰川区裸露的基岩.

3 结论

- (1) 各拉丹冬峰冰川区雪冰中不同粒径微粒含量具有良好的相关性,且雪冰中微粒浓度同 $\delta^{18}\text{O}$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度变化趋势一致,这反映了雪冰中微粒在来源上具有的一致性.各拉丹冬 3 个雪坑中微粒含量显著低于高原西部古里雅冰芯、慕士塔格冰川和北部的煤矿冰川、敦德冰帽,但是高于高原南部的东绒布冰川、达索普冰川和枪勇冰川,说明雪冰中微粒含量距离受粉尘源区远近的影响.
- (2) 雪冰中微粒含量存在明显的季节变化,非季风期微粒含量高于季风期 2 ~ 4 倍.同时,雪坑 SP1、SP2、SP3 非季风期微粒通量分别占一个年层雪

冰中微粒总通量的 73.6%、92.3%、97%，即初春季节沙尘暴对于各拉丹冬雪冰中微粒沉降贡献远大于夏、秋季节。

(3) 结合 NCAR/NCEP 再分析资料, HYSPLIT_4 模式模拟的本区 5d 后向空气轨迹图, 发现各拉丹冬峰冰川区主要受到 3 个方向气团影响, 较细微粒可能受南亚塔尔沙漠、中亚干旱区和高原西部影响较大, 而冰川区裸露基岩可能对较粗微粒贡献大。造成雪冰中微粒含量出现高值的主要因素是非季风期青藏高原面上沙尘暴频发, 加之经过中亚和南亚干旱区的强劲西风输送, 致使雪冰中不溶性微粒的干湿沉降增加。

(4) 鉴于各拉丹冬峰冰川区气象资料缺乏的事实, 通过季节尺度雪冰微粒记录变化研究揭示现代环境过程, 为长时间序列冰芯研究提供依据。而结合雪冰不溶性微粒的矿物成分、形状以及化学元素组成来量化不同来源气团对于本区粉尘沉积的贡献, 是未来工作的重点。

致谢: 本研究样品由 2005 年中国科学院各拉丹冬野外考察队采集, 在此对所有的科考队员表示感谢; 曲冬梅工程师进行了所有样品离子浓度的室内分析工作, 徐建中测定了样品的微粒含量, 谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系及水汽循环[J]. 中国科学(D 辑), 2001, **31**(3): 214-220.
- [2] Wake C P, Mayewski P A, Li Z Q, *et al.* Modern eolian dust deposition in central Asia [J]. Tellus B, 1994, **46B**: 220-233.
- [3] 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[J]. 科学通报, 2004, **49**(11): 1084-1090.
- [4] 韩永翔, 奚晓霞, 宋连春, 等. 青藏高原沙尘及其可能的气候意义[J]. 中国沙漠, 2004, **24**(5): 588-592.
- [5] Kang S C, Kreut K J, Mayewski P A, *et al.* Staple-isotopic composition of precipitation over the northern slope of the central Himalaya [J]. Journal of Glaciology, 2002, **48**(163): 519-526.
- [6] Thompson L G. Microparticles, Ice Sheets and Climate [R]. Institute of Polar Studies, Report64, 1977.
- [7] 邬光剑, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 慕士塔格冰芯中微粒的粒度记录[J]. 中国科学 D 辑, 2006, **36**(1): 9-16.
- [8] 刘纯平, 姚檀栋, 谢树成. 祁连山敦德冰心微粒变化特征和

- 大气环境记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, **9**(3): 105-113.
- [9] 郑度, 李炳元. 青藏高原地理环境研究进展[J]. 地理科学, 1999, **19**(4): 295-302.
- [10] Xu J Z, Hou S G, Qin D H, *et al.* Dust storm activity over the Tibetan Plateau recorded by a shallow ice core from the north slope of Mt. Qomolangma (Everest), Tibet-Himal region [J]. Geophys Res Lett, 2007, **34**, L17504, doi: 10.1029/2007GL030853.
- [11] Thompson L G, Yao T D, Mosley-Thompson E, *et al.* A high-resolution millennial record of the south Asian monsoon from Himalayan ice cores[J]. Science, 2000, **289**: 1916-1919.
- [12] 刘纯平, 姚檀栋, Thompson L G, *et al.* 敦德冰芯中微粒含量与沙尘暴及气候的关系[J]. 冰川冻土, 1999, **21**(1): 9-14.
- [13] 邬光剑. 慕士塔格和古里雅冰芯中微粒记录研究[R]. 兰州: 中国科学院寒区与旱区环境与工程研究所, 博士后出站报告, 2004. 67, 89.
- [14] 邬光剑, 姚檀栋, Thompson L G, *et al.* 末次冰期以来古里雅冰芯微粒记录与极地冰芯的对比[J]. 科学通报, 2004, **49**(5): 475-479.
- [15] 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**(21): 2010-2015.
- [16] 李忠勤, 姚檀栋, 谢自楚. 大气气溶胶中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 研究[J]. 地球科学进展, 1995, **10**(3): 289-295.
- [17] 段克勤, 姚檀栋, 蒲建辰, 等. 达索普浅孔冰心中记录的现代环境过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, **18**(1): 65-70.
- [18] 康世昌. 喜马拉雅山中段北坡雪冰现代过程和冰芯气候环境记录研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 博士学位论文, 1999.
- [19] 姚檀栋, 邬光剑, 蒲建辰, 等. 古里雅冰芯中钙离子与大气粉尘变化关系[J]. 科学通报, 2004, **49**(9): 888-892.
- [20] 李忠勤, 吕功煊, 刘保中, 等. 冰芯粉尘微粒的 X 射线光电子能谱-扫描电镜研究——粉尘对冰芯 SO_4^{2-} 记录的影响[J]. 科学通报, 1999, **44**(7): 772-775.
- [21] 秦大河, 任贾文. 南极冰川学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 116, 120, 121.
- [22] Dibb J E, Whitlow S I, Arsenault M. Seasonal variations in the soluble ion content of snow at Summit, Greenland: Constraints from three years of daily surface snow samples [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(24): 5007-5019.
- [23] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [24] Xiao C D, Kang S C, Qin D H, *et al.* Transport of atmospheric impurities over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau as shown by snow chemistry [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, **20**(3): 231-239.