

扎当冰川雪坑中不同粒径微粒元素和矿物组成特征

余光明¹, 徐建中^{1*}, 康世昌², 黄杰², 任贾文¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

摘要:为了研究雪冰中不溶性微粒的矿物和元素组成及其来源, 2009 年 5 月和 7 月在念青唐古拉山扎当冰川垭口采集了 2 个雪坑样品, 采用质子激发 X 荧光分析 (PIXE) 和 X 射线衍射定量分析方法 (XRD) 测定了不同季节粗细微粒 ($d > 10 \mu\text{m}$ 和 $0.22 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$) 的元素和矿物组成. 结果表明, 微粒矿物组成主要为石英、云母、方解石, 此 3 种矿物比重分别占粗细微粒已检测矿物的 71.5% 和 76.5%. 微粒元素组成以 Si、Al、Fe、K、Mg、Ca 等地壳元素为主, 6 种元素分别占粗细微粒所测元素浓度的 97% 和 85.1%, S、Cl、P 等元素在细微粒中也占相当的比例. 粗微粒元素组成的季节变化较小, 细微粒元素组成的季节波动则较大. 元素富集因子的研究表明, Mg、Ca、Si、K、Ca、Ti、V、Mn 等元素多来自于自然源; 在夏季风期间细微粒中 Sc、P、Cr、S、Cl 等元素有明显的富集. 气团轨迹显示夏季风期间气团主要来自南亚地区, 这些元素可能来自南亚污染物质的输入; 而非季风期间气团主要来自西亚和南亚的干旱及半干旱区. 结果表明, 扎当冰川雪坑中粗微粒可能主要源于远源或局地矿物粉尘的贡献, 细微粒化学组成受到人类污染物的干扰.

关键词:扎当冰川; 不溶性微粒; 质子激发 X 荧光 (PIXE); X 射线衍射 (XRD); 富集因子; 后向轨迹

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3264-07

Mineral and Elemental Characteristics of Microparticles with Different Size Fraction in Snowpits from Zadang Glacier

YU Guang-ming¹, XU Jian-zhong¹, KANG Shi-chang², HUANG Jie², REN Jia-wen¹

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to study the mineral and elemental composition of insoluble microparticles (IP) in snow/ice, two snowpits were collected from the Zadang Glacier in Mt. Nyainqentanglha (30.47°N, 90.65°E, 5 800 m a. s. l) in May and July, 2009, and IP samples were investigated. The measurements of mineral composition with different size fractions ($d > 10 \mu\text{m}$ and $0.22 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$) were carried out using Particle-induced X-ray emission (PIXE) and X-ray diffraction analysis (XRD). The main mineral components of both coarse and fine IP are quartz, mica and calcite, accounting for 71.5% and 76.5%, respectively. The crustal elements concentrations (e. g. Si, Al, Fe, K, Mg and Ca) are 97% and 85.1% of total coarse/fine IP, while S, Cl and P take fairly proportion in fine microparticles ($d < 10 \mu\text{m}$). Seasonal variability of mineral composition in coarse microparticles ($d > 10 \mu\text{m}$) is not obviously; However it's significantly in fine IP. Enrichment factors (EF) analysis reveals that several elements (e. g. Sc, P, Cr, S and Cl) in fine IP during monsoon season have high values which indicate these elements may be influenced by anthropogenic activities. Backward air mass trajectory analysis suggests that air masses in this region mainly originate from the South Asia areas during monsoon season, and air masses mainly come from arid/semi-arid region in the South and West Asia during non-monsoon season. Therefore, anthropogenic pollutants from the South Asia may be transported by the summer Indian monsoon to the Zadang glacier area. The coarse IP may derive from the local or remote mineral dust, and chemical compositions of fine IP interfere with anthropogenic pollutants.

Key words: Zadang Glacier; insoluble microparticle; particle-induced X-ray emission (PIXE); X-ray diffraction (XRD); enrichment factor; backward trajectory

雪冰中不溶微粒 (insoluble microparticle) 是一个重要的气候环境指标, 通常可以反映大气环流强度^[1,2]、大气气溶胶含量的变化^[3]等气候环境变化的信息. 青藏高原作为世界“第三极”, 毗邻亚洲粉尘的源区, 所处海拔高度使其上的粉尘极易扬升到西风急流区, 其自身也被认为是一个重要的粉尘源地^[4]. 雪冰微粒的研究, 不仅可以揭示粉尘来源^[5], 还能提供与人类活动相关的高分辨率大气环境变化

的资料^[6]. 目前中纬度青藏高原冰芯 (如敦德、古里雅、达索普、珠峰冰芯等) 和雪坑中不溶微粒已开展了大量的工作, 这些研究多是对微粒全样进行分

收稿日期: 2010-12-14; 修订日期: 2011-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40901043); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题项目 (SKLCS-ZZ-2008-01)

作者简介: 余光明 (1986 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雪冰化学, E-mail: ygm19870803@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jz xu@lzb.ac.cn

析测试,由于部分微粒(主要为粗颗粒)来源于局地环境,影响了其包含信息的分析.此外,以往的研究多关注于微粒浓度和粒径分布等参数,缺乏微粒的矿物学研究.念青唐古拉山脉位于青藏高原东南部,现代冰川十分发育.李潮流等^[7]研究认为该区扎当冰川区气溶胶代表了青藏高原对流层中上部大气的本底状况.全面了解该地区雪冰微粒的组成和变化对于认识青藏高原现代环境过程有重要意义,鉴于此,本研究利用2009年在念青唐古拉山地区采集的2个雪坑样品,分析了雪坑中不同粒径微粒的矿物和元素组成,讨论了微粒矿物和元素特征以及季节的差异,通过富集因子和后向轨迹分析探讨了粗细微粒的来源,以期为后续的冰芯研究提供依据.

1 样品采集与实验分析

1.1 样品采集

扎当冰川位于念青唐古拉山主峰东北坡,属于大陆型冰川.冰川区降水主要来自夏季西南季风和局地对流云系,降水主要集中在夏、秋季,冬、春两季降水量相对较少^[8].雪坑采样点位于扎当冰川垭口(图1)(30°28'N,90°39'E,5 800 m a. s. l),处于冰川积累区.2009年5月和7月在冰川垭口处各采集1个雪坑,分别记为ZD1(采样间隔为10 cm)和ZD2(采样间隔为5 cm),共取得45个样品.采样所需的工具及样品瓶先用 Milli-Q18 Ω m 去离子水清洗干净;清洗后晾干密封保存,采样时取出使用.采样时取样者身穿洁净服迎风取样,先用洁净的聚乙烯铲子清理雪坑剖面,然后沿雪坑剖面自上而下间隔10 cm(或5 cm)连续取样.取样结束后将样品瓶装入聚乙烯袋中密封,冻结状态下运抵实验室,低温保存直至样品前处理.样品前处理、运输以及实验过程中均严格控制以避免可能的污染.

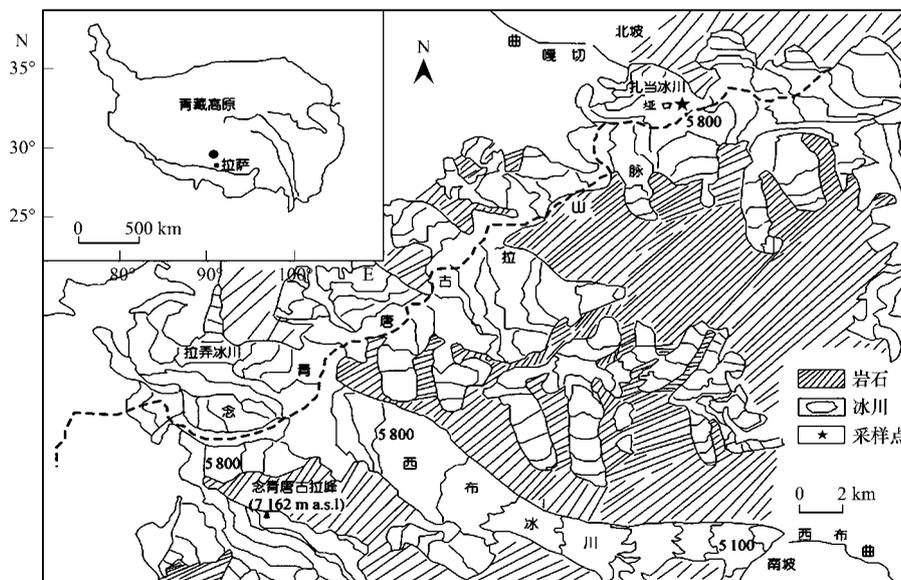


图1 扎当雪坑采样点位置

Fig.1 Location map of the snowpits sampling site

1.2 实验分析

实验前,将样品在室温状态下融化,于100级超净工作台内依次通过孔径10 μ m和0.22 μ m的聚碳酸酯膜过滤.每个雪坑各得到6个滤膜,其中粒径 $d > 10 \mu$ m和粒径 0.22μ m $< d < 10 \mu$ m的微粒样品各3个(以下将 $d > 10 \mu$ m和 0.22μ m $< d < 10 \mu$ m的微粒分别称为细微粒和粗微粒).过滤后的滤膜置于100级超净工作台室温自然晾干后,用剪刀小心的将每个滤膜剪成均匀的3份,其中2份分别用

于质子诱发X射线荧光分析(PIXE)和X射线衍射分析(XRD).PIXE分析在北京师范大学低能物理研究所 2×117 MV串列加速器上测试,得到了Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe共14种元素的浓度.XRD分析由北京大学科技园微构分析测试中心使用Dmax 12 kW粉末衍射仪测试,实验条件为:X射线:CuK α (0.154 18 nm);管电压:40 kV;管电流:100 mA;石墨弯晶单色器;扫描方式: $\theta/2\theta$ 扫描;扫描速度: $8^\circ(2\theta)/分$;采数步宽: $0.02^\circ(2\theta)$.

2 结果与讨论

2.1 雪坑季节划分

研究表明^[9], 青藏高原南部地区降水主要受西南季风控制, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ “降水量效应”比较显著, 具体表现为季风期降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 处于低值, 非季风期 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高; 雪冰微粒浓度在冬春干旱季节也呈现高值, 夏季季风期表现为低值的特点^[10,11]. 本研究主要依据 $\delta^{18}\text{O}$ 和微粒数量浓度季节变化特点, 并参考雪坑特征剖面(如污化层等)和主要离子含量(如 Ca^{2+} , Mg^{2+})对2个雪坑进行季节的确定, 划分出季风期和非季风期(图2).

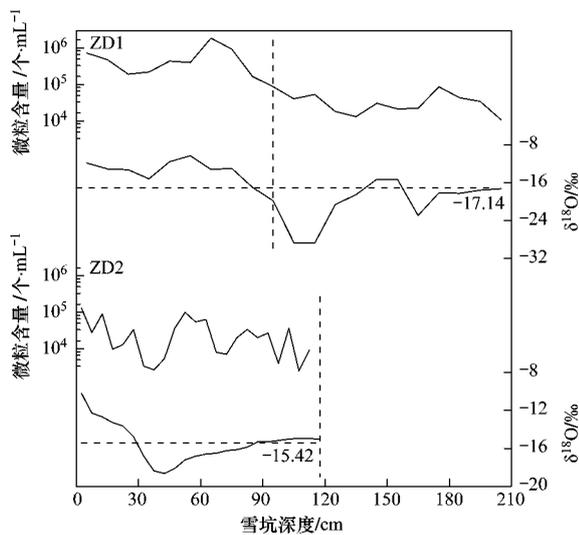


图2 $\delta^{18}\text{O}$ 和微粒数量浓度随深度变化曲线

Fig. 2 Depth profiles of $\delta^{18}\text{O}$ and microparticle concentrations in snow samples recovered from ZD1, ZD2

ZD1 雪坑 95 cm 以上深度的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-11.86\text{‰} \sim -19.8\text{‰}$, 平均值为 -13.85‰ , 较雪坑

$\delta^{18}\text{O}$ 平均值 -17.14‰ 为高, 微粒含量波动较大并且非常高(平均约为 $552\,975\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$); 95 cm 深度以下, $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-15.31\text{‰} \sim -28.69\text{‰}$, 平均值 -20.13‰ , 微粒含量与上部差别很大, 并且随深度变化较小(平均约为 $32\,261\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$), 把95 cm 左右深度划定为该雪坑中季风期和非季风期降水大致的分界线.

ZD2 雪坑 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 $-10.2\text{‰} \sim -18.65\text{‰}$, 平均值为 -15.42‰ ; 雪坑微粒数目(平均约为 $34\,175\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$)较低, 这与ZD1雪坑中95 cm 以下深度的微粒数量处于同一水平上. 相应地, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子含量也与ZD1雪坑下部相差不多. 同时在此雪坑中没有发现如ZD1雪坑存在的春季污化层, 因此认为ZD2雪坑可能主要为当年夏季降水.

2.2 微粒元素组成特征

PIXE 元素分析具有灵敏度高、多元素同时分析的特点, 是一种无损分析技术. 在环境科学、生物医学、考古学、地质学和材料科学中都有着广泛应用. PIXE 方法在雪冰微粒研究中已有一些尝试性应用^[12,13].

12 个样品全部进行了 PIXE 测试, 并对 6 个粗微粒样品和 6 个细微粒样品的微粒元素浓度分别进行算术平均, 得到各元素百分比组成(表1). 可以看出, 粗细微粒元素都以地壳元素(如 Mg、Al、Si、K、Fe、Ca 等)为主, 与纳木错站气溶胶样品元素组成大体相同^[14], 以上 6 种元素分别占粗细微粒所测元素浓度的 97% 和 85.1%, 浓度大小顺序为: $\text{Si} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca}$; Sc、Ti、V、Cr、Mn 等微量元素所占的份额都很小, 同主要元素浓度相差 1 或 2 个数量级.

表1 微粒的元素组成(数值为所测元素的比重)/%

Table 1 Elemental composition of microparticles in snowpits/%

元素	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe
粗微粒	4.96	17.2	48.9	0.674	0.341	0.141	8.27	2.40	0.024 5	1.48	0.077 6	0.026 3	0.250	15.2
SD	2.46	2.06	1.71	0.932	0.191	0.207	0.593	0.956	0.024 6	0.372	0.023 2	0.007 48	0.074 1	3.30
细微粒	7.42	18.3	41.4	5.99	6.04	1.45	7.51	1.41	0.231	0.826	0.026 2	0.157	0.122	9.17
SD	4.17	9.05	9.15	7.11	9.90	1.24	3.15	0.866	0.383	0.502	0.0285	0.317	0.072 7	2.20

粗微粒样品在季风期和非季风期元素组成基本一致(图3). 细微粒元素组成则不尽如此, 元素组成除了仍以地壳元素为主, 季风期细微粒中某些微量元素的比重和波动都较粗微粒大, 特别是 S、Cl、P 元素, 季风期间细微粒中 S、Cl、P 分别占季风期所测元素的 8.72%、2.03% 和 8.62%, 表明显示季风

期和非季风期细微粒来源可能存在差异.

2.3 微粒矿物学特征

XRD 是物相分析的主要手段之一, 能快速准确地进行物相定性并能够进行定量计算. 所有 12 个微粒样品也进行了 XRD 分析, 从 XRD 图谱得到了不同粒径微粒的矿物组成信息(图4). 从已检测出的

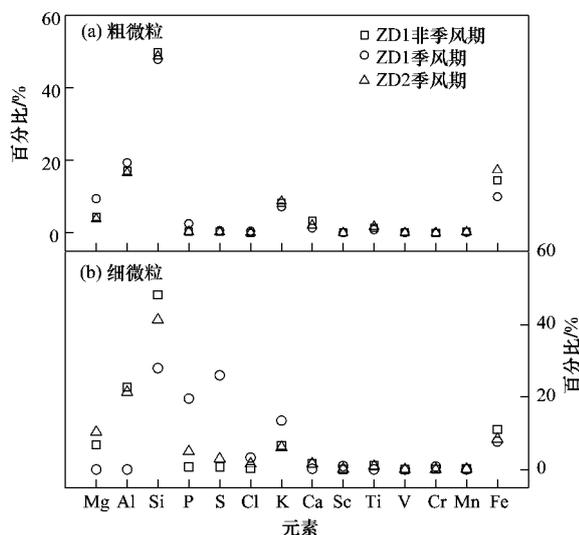


图3 不同季节微粒元素组成的变化

Fig. 3 Seasonal variation of microparticles composition

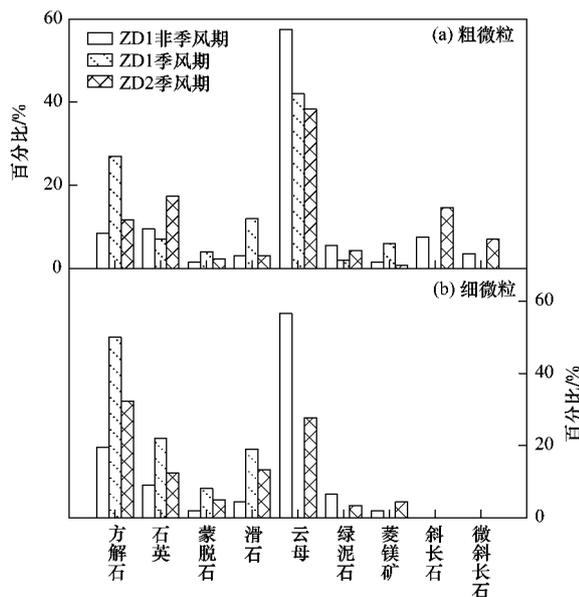


图4 微粒矿物组成

Fig. 4 Mineral composition of microparticles

矿物种类看,微粒矿物以硅酸盐矿物为主.石英、云母、方解石是组成微粒的主要矿物,此3种矿物分别占粗细微粒已检测矿物的71.5%和76.5%.石英在自然界分布比较广泛,抗风化能力较强.微粒中石英的含量相对较为稳定,在每个样品中都能够检测到,变化范围6%~27%,平均12.9%.方解石在季风期含量明显比非季风期要高;云母在微粒中占有很大一部分,主要来自于母岩的风化产物,粗微粒中云母占有相当大的比重,而ZD1雪坑夏季季风期间细微粒中没有检测出云母.此外,蒙脱石、滑石等矿物

在微粒中也占有一定比例.

从已检测出的物种数量看,非季风期较季风期多;粗微粒所检测出的矿物种类较细微粒为多.长石类矿物(斜长石、微斜长石)在粗微粒中占有一定比例,在细微粒所有6个样品中均没有检出,可能反映了粗细微粒源地的差异.

2.4 微粒来源分析

2.4.1 富集因子

富集因子方法(enrichment factors, EF)是环境元素来源鉴别常用的方法之一.为探讨雪冰微粒中元素的来源,运用富集因子方法对PIXE元素数据进行了分析.微粒中元素富集因子可表示为:

$$EF = \frac{(c_s/c_R)_{\text{微粒}}}{(c_s/c_R)_{\text{地壳}}} \quad (1)$$

式中, $(c_s/c_R)_{\text{微粒}}$ 表示微粒中待考查元素 c_s 与参比元素 c_R 的相对浓度, $(c_s/c_R)_{\text{地壳}}$ 为地壳中待考查元素 c_s 与参比元素 c_R 丰度的比值, EF 为待评价元素的富集因子值.参比元素要选择稳定性强、来源单一、数据质量高的元素,一般选择 Al、Fe、Si 等为参考元素.微粒元素数据中 Fe 在所有样品中均检出,相关分析表明 Fe 元素与其他元素之间相关较好, Fe 的浓度水平在各样品中比较稳定,故本研究选择 Fe 为参考元素.采用 Wedepohl^[15] 报道的上地壳数据(UCC)来计算富集因子, EF > 10 则说明该元素除了地壳尘外存在其它来源; EF > 100 则表示该元素高度富集.

图5给出了测定元素相对上地壳元素 Fe 的富集因子.可以看出,非季风期间粗微粒中除 Sc 的 EF (16.5) > 10 外,其余元素富集因子均在 0.1~3 之间,而细微粒元素 EF 则全部在 0.1~8 之间.季风期粗微粒元素的 EF 值也基本处于 1~10 之间,细微粒元素 P、S、Cl、Sc、Cr 等元素 EF 都高于 10,在 ZD1 雪坑表现的更为明显, Sc、P、S 的 EF 分别达到 556、118 和 109.

粗微粒元素的 EF 在季风期和非季风期基本上在 0.1~10 之间,表明粗微粒可能来源于自然源;粗微粒在季风期和非季风期元素和矿物组成大致相同,显示粗微粒元素来源比较一致.相比之下,细微粒来源则相对比较复杂.非季风期间元素 EF 均低于 10,表明主要源于自然源.夏季季风期间细微粒元素 P、S、Cl、Sc、Cr 等元素 EF 都高于 10,表明这些元素可能与人类活动关系密切或者具有其它自然源.

2.4.2 气团来源分析

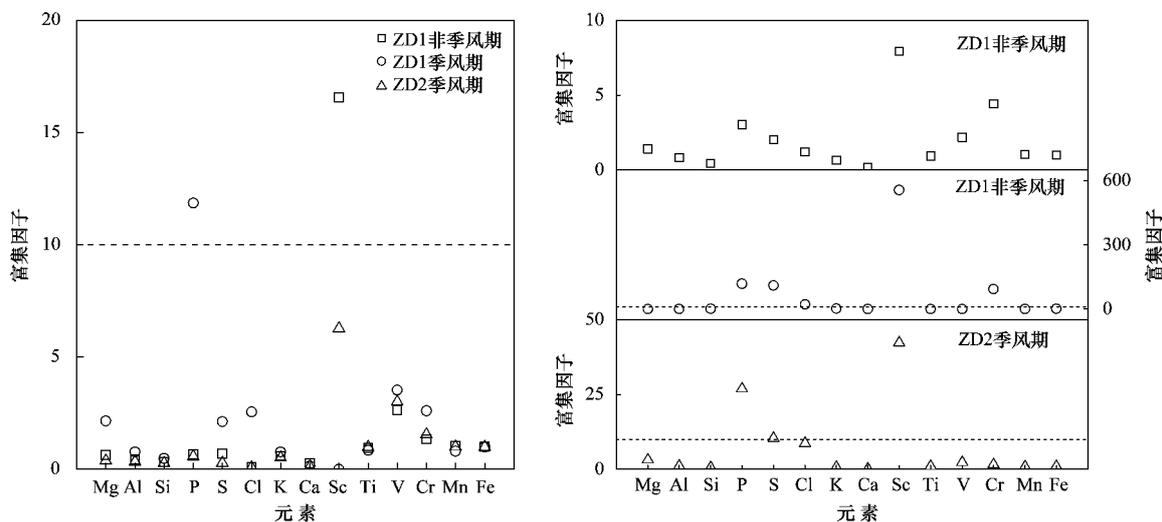


图5 不同粒径微粒元素的富集因子

Fig.5 Element enrichment factors (EFs) of insoluble microparticles with different size

为了进一步探讨雪坑中微粒潜在的来源,利用 NOAA Air Resources Laboratory 提供的 HYSPLIT 轨迹模型计算了采样点附近气团轨迹,高度取距地面 1 000 m,时间 120 h,分别计算出季风期(2008 年

7~9 月)和非季风期(2008 年 11 月~2009 年 2 月)之间每日 00:00、06:00、12:00、18:00(UTC)4 条轨迹.使用 HYSPLIT-4 软件对得到的轨迹进行了聚类分析,结果如图 6 所示.

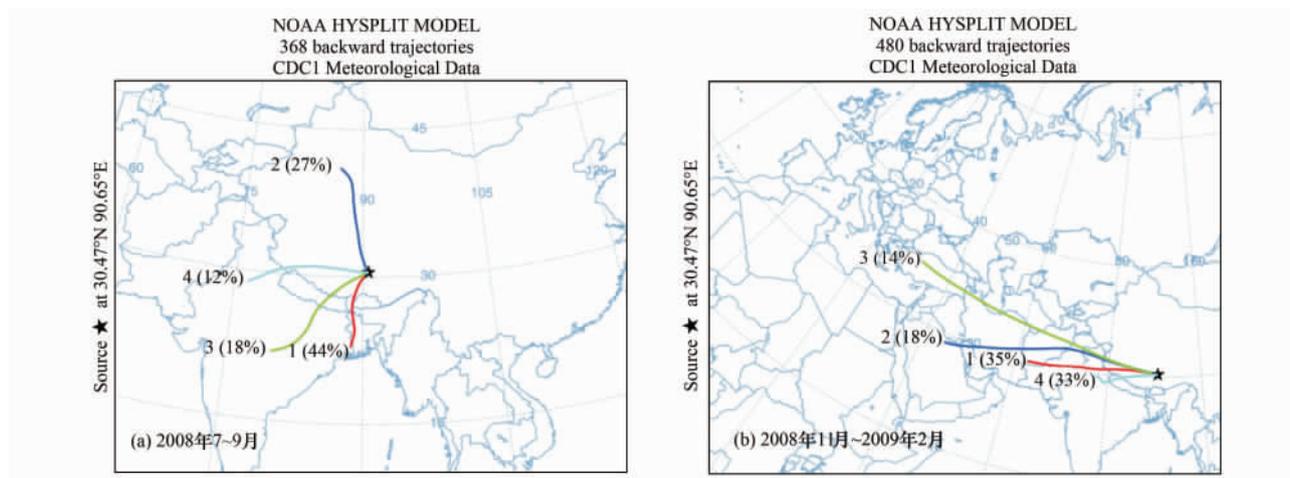


图6 聚类之后采样点 2008~2009 年间典型季风期和非季风期的空气轨迹

Fig.6 Air mass backward trajectories in the Zadang glacier region during typical monsoon and non-monsoon season (2008-2009) after using cluster analysis

典型的非季风时期(2008 年 11 月~2009 年 2 月)模式结果表明[图 6(a)],扎当冰川区采样点这一时期主要以西风为主.到达扎当冰川区气团主要来自中东、西亚和南亚等地区,从图 6 可以看出,这些地区基本上是典型的干旱、半干旱的地区,当气团经过上述地区时,可能携带该地区的粉尘物质,输送并沉降 to 采样点附近地区,因此这些地区都是非

季风期间微粒的潜在来源.

夏季季风期间的空气轨迹计算结果显示[图 6(b)],气团运行方向存在 2 个明显的路径,即西南季风气团和北部大陆性气团,但南支明显占据优势地位.来自高原内部及北部的大陆性气团经过的地区接近或处于干旱、半干旱区的沙尘源区.这一地区人烟稀少,人为污染源很少,大气气溶胶主要为陆

源粉尘物质. 相比之下, 大部分来自印度次大陆和孟加拉湾的气团途经南亚工业排放区. 南亚地区空气污染已经引起了人们广泛的关注^[16]. 研究表明, 来自南亚地区的大气污染物完全有能力通过西南夏季风或者山谷风穿越喜马拉雅山, 从而进入青藏高原^[17]. 纳木错地区^[14]和扎当冰川气溶胶中^[7]均检测到来自南亚地区的重金属污染物.

季风期细微粒中 Cl、S 等元素 EF > 10, 而同期粗微粒中这些元素 EF 较小, 说明细微粒中这些元素除来自自然的扬尘、土壤, 还存在其他的显著来源. 扎当冰川位于世界海拔最高的咸水湖——纳木错湖的附近, 盐湖和海盐气溶胶的输入可能是夏季风期间冰雪中 Cl 富集的因素, 此外, 青藏高原广泛分布各类富含氯化物的盐渍土也可能是其富集的原因. 尽管氯盐和硫酸盐可能在样品溶解过滤过程中流失, 但本研究即溶即过滤, 不排除一定的残留物. 大气颗粒物中 S 主要来自硫化物的气固转化过程, 在颗粒物中以硫酸盐的形式存在. 人类活动释放的 SO₂ 会为大气粉尘所吸收并产生化学反应, 生成硫酸盐矿物^[18], 南亚地区国家(印度、孟加拉国等)有着较大硫化物排放量^[19], Arndt 等^[20]认为尼泊尔 60% 硫沉降来自印度, 而 1985 ~ 2005 年印度 SO₂ 排放量从 2.39 Tg 增长到 4.8 Tg^[21]. 季风期间水汽主要来自印度洋, 因此细微粒中 Cl、S 元素富集最大的可能是它们相当部分来自于长距离传输途中粉尘与沿途污染源排放的污染气溶胶混合的结果. 夏季, 陆地生物源(如孢粉)的排放会引起颗粒物中 P 元素一定程度的富集^[22], 藏东南地区植被及森林覆盖率较高, 季风携带的气团首先经过这些覆盖有耕地、森林或植被的地表的地区才到达样品采集点; 另外海盐气溶胶^[23]和人类活动等也是颗粒物中磷的来源. Cr 除了来自土壤粉尘自然源外, 人为源主要有钢铁冶炼、水泥生产以及煤和石油燃烧等^[24]. 一般认为 Sc 是比较稳定的元素之一, 但即使在粗微粒中 Sc 也有较高的富集因子, 念青唐古拉地区铅锌矿资源比较丰富, 稀土元素 Sc 等常是铅锌矿伴生组分之一, 此外城市地区大气颗粒物来源解析表明, Sc 的富集与燃煤等人为活动有联系^[25], 因此夏季细微粒的 Sc 富集可能反映了局地粉尘和远源污染物混合的贡献. 由此推断夏季风发生的 6 ~ 9 月份细微粒中富集较多的 Cl、P、Cr、S、Sc 等元素可能与南亚地区人类活动有关, 其中 Cl、P 还可能与海盐(湖盐)气溶胶或生物源排放的贡献有关.

3 结论

(1) 微粒矿物组成以石英、云母、方解石等硅酸盐矿物为主, 非季风期检出的种类较季风期多. 微粒元素组成以 Si、Al、Fe、K、Mg、Ca 等地壳元素为主, 占粗细微粒所测元素浓度的 97% 和 85.1%, S、Cl、P 等元素在细微粒中也占相当的比例; 粗微粒元素组成的季节变化较小, 细微粒元素组成的季节波动则较大.

(2) 元素富集因子分析表明, 微粒中 Mg、Ca、Si、K、Ca、Ti、V、Mn 等元素主要来自于自然源. 细微粒中 Sc、Cr、S 等元素夏季风期间高度富集, 气团轨迹显示这一时期气团来自南亚地区, 细微粒中元素的富集可能与南亚地区的人为污染物的输入有关. 而非季风期间气团主要来自一些西亚和南亚的干旱半干旱地区.

致谢: 感谢中国科学院纳木错多圈层综合观测研究站工作人员在野外采样工作中的帮助.

参考文献:

- [1] Thompson L G, Yao T, Mosley-Thompson E, *et al.* A high-resolution millennial record of the South Asian monsoon from Himalayan ice cores [J]. *Science*, 2000, **289** (5486): 1916-1920.
- [2] Xu J, Hou S, Qin D, *et al.* A 108.83m ice-core record of atmospheric dust deposition at Mt. Qomolangma (Everest), Central Himalaya [J]. *Quaternary Research*, 2010, **73** (1): 33-38.
- [3] Ram M, Gayley R I. Insoluble particles in polar ice: identification and measurement of the insoluble background aerosol [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, **21** (6): 437-440.
- [4] 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.
- [5] 徐建中, 侯书贵, 陈福坤, 等. 珠穆朗玛峰东绒布冰芯微粒来源示踪 [J]. *科学通报*, 2009, **54** (12): 1756-1760.
- [6] Kaspari S, Mayewski P A, Handley M, *et al.* A high-resolution record of atmospheric dust composition and variability since AD1650 from a Mount Everest ice core [J]. *Journal of Climate*, 2009, **22** (14): 3910-3925.
- [7] 李潮流, 康世昌, 丛志远. 青藏高原念青唐古拉峰冰川区夏季风期间大气气溶胶元素特征 [J]. *科学通报*, 2007, **52** (17): 2057-2063.
- [8] 游庆龙, 康世昌, 田克明, 等. 青藏高原念青唐古拉峰地区气候特征初步分析 [J]. *山地学报*, 2007, **25** (4): 497-504.
- [9] Tian L, Masson-Dedelle V, Stievenard M, *et al.* Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes [J]. *Journal of*

- Geophysical Research, 2001, **106**(D22): 28081-28088.
- [10] Zhang Y, Kang S, Zhang Q, *et al.* Seasonal and spatial variability of microparticles in snowpits on the Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science, 2010, **7**(1):15-25.
- [11] Wake C P, Mayewski P A, Li Z, *et al.* Modern eolian dust deposition in central Asia [J]. Tellus, 1994, **46B**(3): 220-223.
- [12] Marino F, Calzolari G, Caporali S, *et al.* PIXE and PIGE techniques for the analysis of Antarctic ice dust and continental sediments [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2008, **266**(10):2396-2400.
- [13] Ruth U, Barbante C, Bigler M, *et al.* Proxies and measurement techniques for mineral dust in Antarctic ice cores [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(15):5675-5681.
- [14] Cong Z, Kang S, Liu X, *et al.* Elemental composition of aerosol in the Nam Co region, Tibetan Plateau, during summer monsoon season [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(6):1180-1187.
- [15] Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, **59**(7):1217-1232.
- [16] Engling G, Gelencser A. Atmospheric brown clouds: from local air pollution to climate change [J]. Elements, 2010, **6**(4): 223-228.
- [17] Decesari S, Facchini M C, Carbone C, *et al.* Chemical composition of PM₁₀ and PM₁ at the high-altitude Himalayan station Nepal Climate Observatory-Pyramid (NCO-P) (5079m a. s. l.) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(10):4583-4596.
- [18] Mori I, Nishikawa M, Iwasaka Y. Chemical reaction during the coagulation of ammonium sulphate and mineral particles in the atmosphere [J]. Science of the Total Environment, 1998, **224**(1-3): 87-91.
- [19] Arndt R L, Carmichael G R, Streets D G, *et al.* Sulfur dioxide emissions and sectorial contributions to sulfur deposition in Asia [J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(10):1553-1572.
- [20] Arndt R L, Carmichael G R, Roorda J M. Seasonal source-receptor relationships in Asia [J]. Atmospheric Environment, 1998, **32**(8):1397-1406.
- [21] Garg A, Shukla P R, Kapshe M. The sectoral trends of multigas emissions inventory of India [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(24): 4608-4620.
- [22] Graham B, Guyon P, Maenhaut W, *et al.* Composition and diurnal variability of the natural Amazonian aerosol [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D24):D14208. 1-13.
- [23] Graham W F, Piotrowicz S R, Duce R A. The sea as a source of atmospheric phosphorus [J]. Marine Chemistry, 1979, **7**(4): 325-342.
- [24] Johnson J, Schewel L, Graedel T E. The contemporary anthropogenic chromium cycle [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(22):7060-7069.
- [25] 杨丽萍, 陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(4):499-502.