科学通报 2008 年 第 53 卷 第 13 期: 1576 ~ 1581
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

慕士塔格冰芯中大气粉尘记录的季节变化

邬光剑[①], 姚檀栋[①②], 徐柏青[①], 田立德[①②], 李真[②], 段克勤[②]

① 青藏高原环境变化与地表过程实验室, 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;
② 冰冻圈科学国家重点实验室, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000
E-mail: wugj@itpcas.ac.cn

2007-08-01 收稿, 2008-03-06 接受
国家重点基础研究发展计划(批准号: 2005CB422004)和国家自然科学基金(批准号: 40571038, 40121101, 40301009)资助项目

摘要 根据帕米尔东部的慕士塔格冰芯中氧同位素比值和微粒记录, 揭示了过去近 40 a 来该地区大气粉尘的季节变化特征. 研究显示, 慕士塔格冰芯中粉尘浓度的高值和较粗的粒径具有与氧同位素比值相似的变化趋势, 约有 50%~60%的高粉尘浓度样品出现在氧同位素比值的高值时段, 即夏季高温期, 而在春季和冬季出现的频率较低. 气团反轨迹追踪结果表明西亚(如伊朗-阿富汗高原)和中亚地区是慕士塔格粉尘的主要源区, 这些源区的尘暴频发期出现在夏季(5~8 月份). 而中国西部和北部的尘暴频发期出现在春季(3~5 月份), 两者在时间上存在差异. 亚洲粉尘传输路径上不同地点(如日本、北太平洋和格陵兰)的粉尘浓度出现的季节与中国西北部地区一致, 其浓度峰值出现在春季(尤其是 4 月). 亚洲干旱区的不同区域在尘暴频发季节上存在显著差异, 这将有助于深入理解其对北半球粉尘的贡献及其气候效应.

关键词
慕士塔格
冰芯
粉尘
季节变化

北半球的“粉尘带”包括了从撒哈拉沙漠向东一直延续到中国的北方沙漠和黄土高原 [1]. 亚洲粉尘源区可以从两个空间尺度来理解. 就全球尺度而言, 是指与非洲、澳洲大气粉尘有区别的; 就区域尺度而言, 又可分为分塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地以及哈萨克斯坦等的中亚沙漠、戈壁等粉尘释放区域. 这些源区在粉尘释放上的季节性分布特征是评估其气候效应的一个重要因素, 直接影响到大气粉尘对辐射平衡以及作为海洋生物的肥料供给. 中国北方和西北沙漠是亚洲粉尘的重要源区, 其每年的粉尘释放量约为 800 Tg[2]. 冰芯是过去气候记录的良好载体, 其中的粉尘记录的季节变化不仅有助于冰芯的精确定年, 而且反映了当时的大陆干旱程度和大气环流的变化. 青藏高原以及帕米尔、天山和阿尔泰山存在丰富的冰川资源, 其中很多地点可以获得高可靠性和高分辨率的冰芯, 是过去气候变化记录的良好载体. 它们毗邻亚洲粉尘源区, 冰雪中的微粒记录在反映中亚粉尘源区的环境变化方面有独特的优势. 目前, 青藏高原上的敦德 [3]、古里雅 [4]、达索普 [5]、天山 [6]等冰雪中都进行了微粒研究. 青藏高原上冰芯中微粒研究表明, 冰雪中的粉尘记录(包括成分、浓度及其季节变化)具有强烈的区域差异. 比如, 在天山 1 号冰川, 表层雪中粗微粒浓度在一年中有 2 个峰值, 分别出现在 12~3 月、6~9 月, 而总微粒只有一个峰值区, 出现在 4~8 月 [6]. 在高原北部(如马兰冰芯), 高粉尘浓度出现在春季, 与这一时期中国西北频繁的尘暴事件相对应, 而在高原南部(如达索普), 高粉尘浓度出现在非季风季节 [7]. 这些研究表明在中国西部的山地冰芯记录中, 高粉尘浓度出现的季节不是完全同时的, 而是存在区域变化的.

对东亚地区的大气粉尘性质的研究比较深入 [2,8~11], 但对中亚和西亚地区的大气粉尘的研究则相对较少. 帕米尔地区冰雪中粉尘的化学组成同南极和北极相似, 表明该地区是可以作为全球本底气溶胶的区域之一 [12], 而且塔吉克斯坦的黄土沉积与中国黄土在过去 1.77 Ma以来的气候记录上也存在相当

的可对比性，尽管它们具有不同的物质来源 [13]. 因此，该地区是研究大气粉尘的一个理想地点. 这里我们详细报道慕士塔格高海拔冰芯中的微粒记录，探讨帕米尔地区大气粉尘的季节变化特征.

1 样品与分析

2001~2003 年夏季，在帕米尔东部的慕士塔格(38°17′N, 75°06′E)冰川积累区内，我们在不同海拔高度钻取了数支冰芯. 本文研究的是 2002 年在 6350 m 处钻取的 44.3 m的冰芯和在 7010 m处钻取的 54.5 m 的Core 3 冰芯上部 33.68 m的记录. 慕士塔格周围的自然环境特征、样品分割以及实验分析过程等在我们过去的工作中都有详细的说明 [14,15]，这里不再赘述. 慕士塔格冰芯钻取的位置较高而且冰川温度很低，粒雪沉降后的融化作用微弱，有利于保存过去的气候记录.

冰芯中气候替代指标的指示意义和定年是解释气候记录的基础. 慕士塔格位于亚洲内部，常年盛行的西风为控制性环流，基本不受印度季风的影响. 根据 2002 和 2003 年夏季的现代过程观测表明，慕士塔格地区降水集中在 6~9 月，降水中的氧同位素比值主要受温度的控制，高值出现在夏季，而低值出现在冬季 [15]. 这使得可以利用氧同位素的周期性变化来进行年层的划分. 尽管慕士塔格地区的降水集中在夏季，但冬季依然有足够的降雪，使得氧同位素的谷值保存在记录之中. 我们对慕士塔格 7010 m的Core 5 冰芯进行了放射性β活化度测量，发现在剖面的 15.2~16.6 m和在 39~40 m处出现峰值，分别对应于 1963 年大气核试验和 1987 年的切尔诺贝利核事故 [16]. 根据这两个β活化度参考层位以及氧同位素曲线的周期性变化，我们给出了慕士塔格 7010 m处Core 5 冰芯的定年结果 [15]，其中本文研究的Core 3 冰芯通过与Core 5 冰芯的氧同位素曲线对比得出，时段为 1970~2003 年(见图 1). 同样, 6350 m处冰芯也根据氧同位素的变化而定年，其时段为 1957~2000 年. 尽管受局地环境的影响(海拔高度、迎风坡与背风坡、阳坡与阴坡等)使得 6350 m冰芯和 7010 m冰芯在氧同位素曲线上存在一定的差异，但这 3 支冰芯中氧同位素比值的年均值与 60 km以外的塔什库尔干的年均温度的变化趋势(1956~2000 年)基本一致，表明我们的定年是可靠的.

根据慕士塔格 7010 m 处 Core 5 冰芯的深度、密度以及定年结果，我们估算出在此高度 1955~2003 年

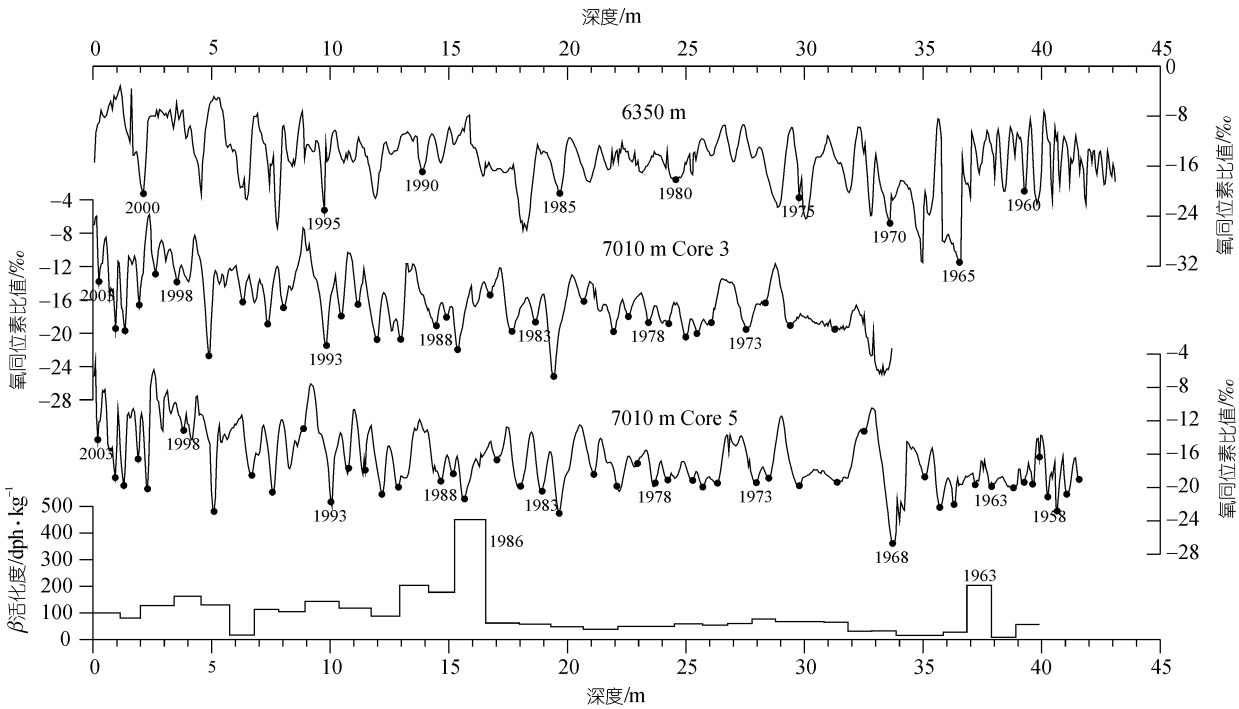


图 1 慕士塔格 3 支冰芯的氧同位素比值记录、β活化度及其定年结果

图中的黑点为年层划分界线. 其中 6350 和 7010 m冰芯资料分别来自文献 [14, 15]

间的平均年积累量为 605 mm(水当量), 尽管塔什库尔干气象站的年均降水量只有 69.3 mm. 现代气象观测表明, 在慕士塔格和公格尔山区, 降水量随海拔的升高而增加. 如 1980 年, 海拔为 1288.7 m的喀什的降水量为 53.9 mm, 而海拔为 3500 m的亚高孜的降水量增加到 375.2 mm[17]. 其他研究者根据降水与高度的关系估算出在慕士塔格海拔 6000 m处的降水量为 689 mm, 而在 7000 m处为 1067 mm[18]. 在与慕士塔格邻近的共产主义峰(现更名为Somoni峰), 海拔 5400~6000 m处的积累量可达 940 mm, 6100 m处的平均年积累量为 1080, 6900 m处为 1340 mm, 而 7200 m处也达到了 700 mm[19]. 这些研究表明帕米尔地区山体效应对降水的影响是显著的, 高海拔处的降水量可以成倍增加, 达到数百毫米以上. 慕士塔格冰芯的高积累量有利于详细记录大气成分的季节变化特征. 本文依据氧同位素比值所划分的季节时段, 利用统计方法来探讨慕士塔格冰芯中高粉尘浓度样品在季节上的变化特征.

2 结果

慕士塔格 7010 m 处冰芯中微粒的质量浓度变化范围是 133~63075 μg·kg^{-1}, 而 6350 m 处冰芯为 307~238905 μg·kg^{-1}, 在各自的记录曲线上均表现出了相当显著的变化. 不仅氧同位素比值记录, 大气粉尘记录同样表现出了可以清晰地划分的季节变化特征. 微粒浓度和微粒粒径与氧同位素存在相似的变化趋势, 在氧同位素比值的高值层位, 也是微粒浓度高值和更粗粒径出现的层位(图 2). 微粒与氧同位素比值的关系表明, 帕米尔地区在夏季具有更高的大气粉尘载荷和更大的风力.

由于具有较高的积累量, 我们可以对每个年层单位进行更细的划分. 根据氧同位素比值记录, 我们将其划分为 3 个时段: 增加时段、峰值时段和降低/谷值时段, 分别对应于春季、夏季和冬季. 需要指出, 氧同位素比值阶段的划分是相对的, 因为其年际变化存在明显的差异. 为了从冰芯记录中提取出尘暴事件的信息, 这里, 我们设定 7010 m 冰芯中, 微粒的质量浓度超过>10000 μg·kg^{-1} 为尘暴事件(图 3). 考虑到山地冰雪中的粉尘浓度随高度的降低而增加, 对 6350 m 冰芯, 我们选用质量浓度>15000 μg·kg^{-1} 作为反映尘暴事件的标准.

慕士塔格冰芯中高浓度的样品大都以单个事件的形式出现, 也可以连续出现(如 1973, 1988 年). 统计结果表明, 在春季、夏季和冬季, 慕士塔格 7010 m 处冰芯中, 微粒的浓度峰值(>10000 μg·kg^{-1})出现的频

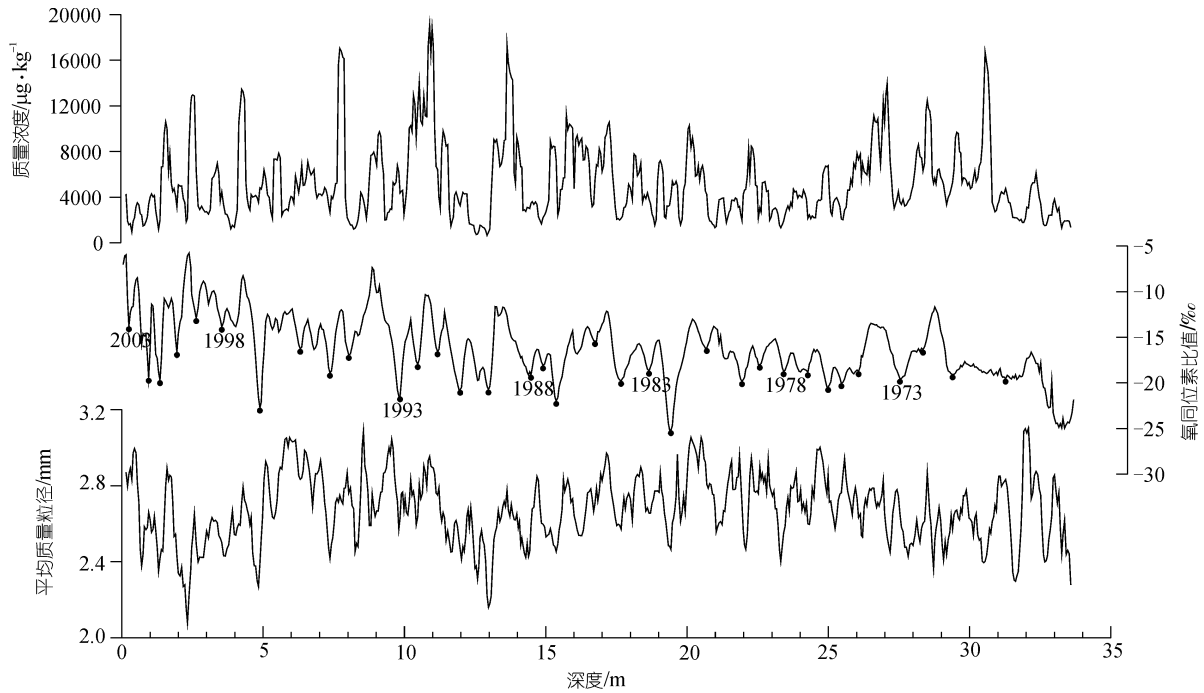


图 2 慕士塔格 7010 m 处 Core 3 冰芯的微粒浓度和粒度(经过 5 点平均)与氧同位素记录

图中的黑点为年层划分界线

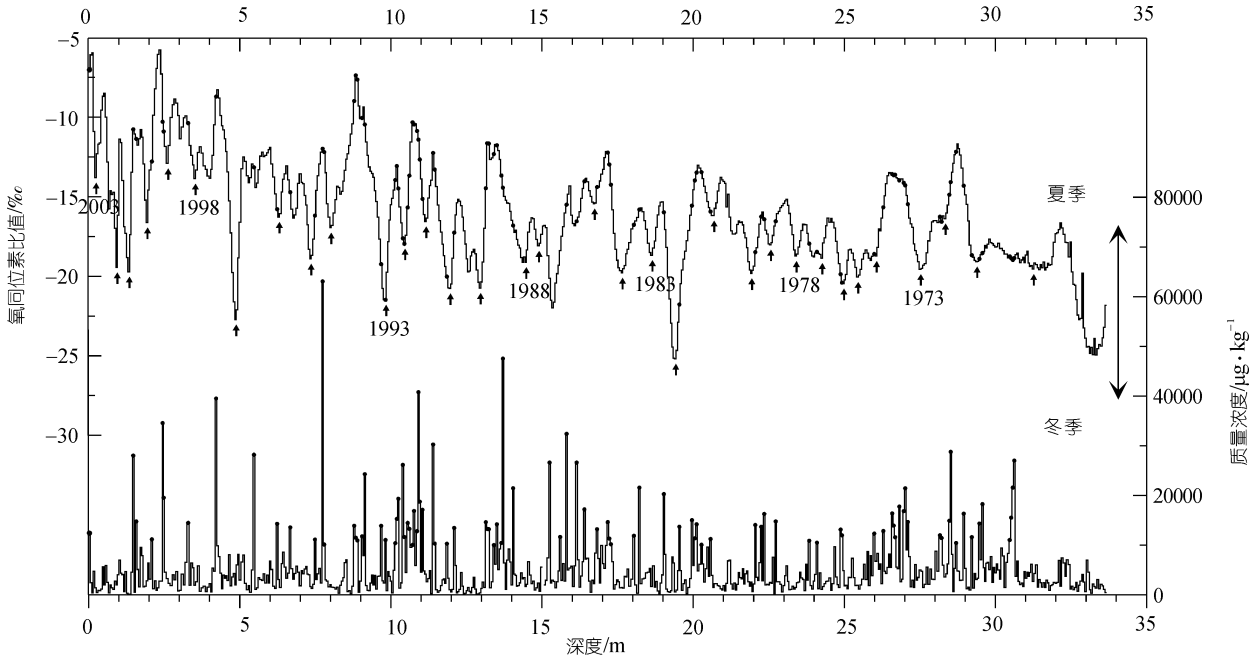


图 3　慕士塔格 7010 m 处 Core 3 冰芯中微粒浓度与氧同位素比值记录

图中的黑点为质量浓度>10000 μg·kg^{-1}的样品，箭头为年层划分界线

率分别为 19%, 46%, 35%，而在 6350 m 处冰芯中，微粒的浓度峰值(>15000 μg·kg^{-1})的出现频率分别为 16%, 62%, 22%(表 1). 随着这一粉尘浓度标准的改变，统计结果也可能会随之改变：随着浓度标准的提高，更强的尘暴事件在冬季发生的频率将减少，而出现在夏季的频率增加. 由于缺乏野外的观测，对帕米尔地区大气粉尘的干湿沉降过程及其各自的贡献未能作进一步的讨论，而这一过程在某种程度上可能会影响到微粒在冰雪中的记录的解释. 有理由认为，既然在降水集中的夏季仍具有较高的粉尘浓度，那么大气中粉尘的载荷应当更高. 慕士塔格冰芯的结果表明过去 40 a 来尘暴事件主要发生在夏季.

3　讨论

粉尘的源区、搬运路径、成分及其时空分布是评估其气候影响的基本要素. 大气粉尘在季节上的差异对其气候效应有着重要的制约，直接影响到太阳辐射的散射和吸收以及对海洋生物的“铁肥料”的供给. 即使在亚洲干旱区，其粉尘释放量以及对远源地区的贡献也存在着区域差异. 来自格陵兰NorthGRIP冰芯钻孔附近的现代降雪样品记录表明，该地点春季时粉尘主要来自塔克拉马干沙漠，夏季到冬季时则主要来自腾格里沙漠和毛乌素沙漠 [20]. 这就需要我们对亚洲干旱区不同区域的大气粉尘的性质要有全面和深入的了解，才能深入认识其对气候变化的影响和响应.

对东亚地区的尘暴频发季节和大气粉尘浓度的季节变化的研究比较深入. 大量的研究文献表明该地区尘暴以及大气粉尘的峰值基本出现在春季(3~5月)，并在 4 月份出现最高值，如中国北方典型的强沙尘暴事件 [8]、日本中部Tateyama山表面雪样中的粉尘浓度 [9]北太平洋的大气粉尘浓度 [10]和格陵兰NorthGRIP附近的雪坑中粉尘浓度 [11]. 青藏高原北部

表 1　慕士塔格冰芯中高粉尘浓度发生次数(频率)的统计结果

δ^{18}O 时段(季节)	7010 m 冰芯(1970~2002 年)			6350 m 冰芯(1957~2000 年)	
	>10000 μg·kg^{-1}	>15000 μg·kg^{-1}	>20000 μg·kg^{-1}	>15000 μg·kg^{-1}	>20000 μg·kg^{-1}
增加(春季)	18 (19%)	11 (31%)	6 (30%)	15 (16%)	10 (17%)
峰值(夏季)	43 (46%)	18 (52%)	10 (50%)	56 (62%)	39 (66%)
降低/谷值(冬季)	33 (35%)	6 (17%)	4 (20%)	20 (22%)	10 (17%)
总计	94 (100%)	35 (100%)	20 (100%)	91 (100%)	59 (100%)

的马兰冰芯也表明, 其污化层主要形成于春季层位, 这表明高原北部地区春季大气尘埃含量要比其他季节的明显偏高 [7].

尽管慕士塔格邻近塔克拉玛干沙漠西部, 但是其大气粉尘物质并非主要来自该沙漠. 塔克拉玛干沙漠西部的地表风向为西北风, 而高空则为常年西风, 这使得塔克拉玛干沙漠的粉尘被风吹扬后向东搬运并主要堆积在昆仑山的北麓 [21]. 根据 7 月和 1 月 500 hPa的平均大气流场, 帕米尔地区都是高空西风占主导. 2004 年 6 月至 2006 年 4 月, 以每周为间隔的气团的反轨迹(back-trajectory)追踪模式(前推 72 或 120 h)也显示, 慕士塔格地区的气团主要来自西亚(如伊朗-阿富汗高原)和中亚, 有少部分来自南部的巴基斯坦和印度北部, 而来自东部的塔克拉玛干沙漠的气团只有一次. 因此, 慕士塔格冰芯中的粉尘主要来自中亚和伊朗-阿富汗或者更西的地区, 而来自塔克拉玛干沙漠的贡献较少. 当然, 粉尘物质的具体源区是一个十分复杂的问题, 需要依靠粉尘的地球化学特征来确定.

中亚以及伊朗-阿富汗地区的地表景观以荒漠、荒漠草原以及高山荒漠为主, 属于地中海式气候, 降水主要集中在 11 月至次年的 5 月, 而 6~9 月降水较少甚至无降水. 里海及咸海地区的尘暴开始于 5 月并延续至 8 月, 在 6~7 月为频发期 [1]. 土库曼斯坦的尘暴记录显示, 最大尘暴频率出现在 5~8 月, 约占全年的 62%[22]. 根据吉尔吉斯斯坦伊塞克湖的现代大气监测, 当地的气溶胶光学厚度具有明显的季节变化, 高值时段为 5~9 月, 并在 7 月达到峰值 [23]. 在伊朗-阿富汗地区, 夏季持续出现的大风沙尘天气被称为“十二旬风(wind of 120 days)”[24]. 现代气象记录表明了中亚及伊朗高原地区的沙尘天气集中出现在夏季. 中亚及伊朗-阿富汗的这种夏季高温少雨的气候使得表土易于被风吹扬到高空并作长距离的搬运. 这与慕士塔格冰芯中的粉尘记录一致. 同时, 根据慕士塔格 2003 年夏季降水事件的水汽追踪的结果, 在该地区, 夏季降水主要受西风控制 [25]. 这表明了夹杂在这些水汽团中的粉尘物质是由西风带来的. 而在慕士塔格, 降水集中出现在夏季, 正好可以加强湿沉降作用使得搬运过来的粉尘物质降落到冰川上.

不同的气候条件和地理环境是尘暴频发期存在差异的根本原因. 慕士塔格冰芯记录表明了中亚以及伊朗-阿富汗地区的尘暴事件的频发期为夏季, 尤其是 7~8 月份. 这与东亚地区的尘暴频发期(3~5 月份)明显地存在季节上的差异. 现在已经观测到了更西的撒哈拉沙漠的粉尘可以向东被远距离搬运到美洲大陆西部 [26], 中亚及伊朗-阿富汗地区也完全可能贡献于北太平洋甚至更远的地区. 但这一源区的粉尘释放量远远低于东亚地区(有研究估计仅中国沙漠该地区的粉尘释放量约为全球总量的一半 [2]), 而且夏季正好是东亚地区的多雨季节, 降水使得大气中的粉尘被淋洗, 能够被搬运到北太平洋粉尘总量是很小的.

4 结论

慕士塔格冰芯详细记录了帕米尔东部地区氧同位素比值和大气粉尘的季节变化. 慕士塔格冰芯高积累量能够详细地反映季节性的变化特征. 记录显示, 过去 40 a 来高粉尘浓度和更粗的微粒粒径主要出现在夏季, 夏季的尘暴事件约占全年的 50%~60%, 而在春季和冬季出现的频率较低. 而且更强的尘暴事件在冬季发生的频率更少, 而出现在夏季的频率增加. 而这一尘暴频发期明显滞后于亚洲东部以及北太平洋和格陵兰粉尘的高粉尘浓度季节(3~5 月). 我们的研究表明了亚洲干旱区的不同区域在尘暴频发期存在显著的季节差异, 这将有助于深入理解其对北半球粉尘的对气候的影响.

参考文献

1 Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. Rev Geophys, 2002, 40 [doi]

2 Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. J Geophys Res, 1997, 102: 28041—28047[doi]

3 Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Holocene-late Pleistocene climate ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau. Science, 1989, 246: 474—477[doi]

4 Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a qinghai-tibetan ice core. Science,

1997, 276: 1821—1825[doi]
5 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. Science, 2000, 289: 1916—1919[doi]
6 尤晓妮, 李忠勤, 王飞腾, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川不溶微粒的季节变化特征. 地球科学进展, 2006, 26(11): 1164—1170
7 王宁练, Thompson L G, Davis M E. 近 1000 年来青藏高原南部和北部大气尘埃载荷变化的冰芯记录. 第四纪研究, 2006, 26(5): 752—761
8 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954~2002). 科学通报, 2003, 48(1): 1224—1228
9 Osada K, Kido M, Iida H, et al. Seasonal variation of free tropospheric aerosol particles at Mt. Tateyama, central Japan. J Geophys Res, 2003, 108 [doi]
10 Prospero J M, Savoie D L, Arimoto R. Long-term record of nss-sulfate and nitrate in aerosols on Midway Island, 1981~2000: Evidence of increased (now decreasing?) anthropogenic emissions from Asia. J Geophys Res, 2003, 108, D1, 4019, doi:10.1029/2001JD001524
11 Bory A J M, Biscaye P E, Svensson A, et al. Seasonal variability in the origin of recent atmospheric mineral dust at NorthGRIP, Greenland. Earth Planet Sci Lett, 2002, 196: 123—134[doi]
12 Hinkley T, Pertsiger F, Zavjalova L. The modern atmospheric background dust load: Recognition in central Asian snowpack, and compositional constraints. Geophys Res Lett, 1997, 24(13): 1607—1610[doi]
13 Ding Z L, Ranov V, Yang S L, et al. The loess record in southern Tajikistan and correlation with Chinese loess. Earth Planet Sci Lett, 2002, 200: 387—400[doi]
14 郜光剑, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 慕士塔格冰芯中微粒的粒度记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(1): 9—16
15 Tian L D, Yao T D, Li Z, et al. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs. J Geophys Res, 2006, 111 [doi]
16 田立德, 姚檀栋, 郜光剑, 等. 慕士塔格海拔 7010 米冰芯中记录到的切尔诺贝利核泄漏事件. 科学通报, 2006, 51(20): 2453—2456
17 苏珍, 刘时银, 王志超. 慕士塔格和公格尔山的现代冰川. 自然资源学报, 1989, 4(3): 241—246
18 罗祥瑞, 董光荣. 帕米尔地区冰川分布规律. 见: 中国冰川目录Ⅳ: 帕米尔地区. 北京: 科学出版社, 1988. 39—54
19 Kotlyakov V M, Krenke A N. Investigations of the hydrological conditions of alpine regions by glaciological methods. IAHS, 1982, 138: 31—42
20 Bory A J M, Biscaye P E, Grousset F E. Two distinct seasonal Asian source regions for mineral dust deposited in the Greenland (NorthGRIP). Geophys Res Lett, 2003, 30(4): [doi]
21 Sun J M. Source regions and formation of the loess sediments on the high mountain regions of Northwestern China. Quat Res, 2002, 58: 341—351[doi]
22 Orlovsky L, Orlovsky N, Durdyev A. Dust storms in Turkmenistan. J Arid Environ, 2005, 60: 83—97[doi]
23 Semenov V K, Smirnov A, Aref'ev V N, et al. Aerosol optical depth over the mountainous region in central Asia (Issyk-Kul Lake, Kyrgyzstan). Geophys Res Lett, 2005, 32[doi]
24 Agrawala S, Barlow M, Cullen H, et al. The Drought and Humanitarian Crisis in Central and Southwest Asia: A Climate Perspective. IRI Special Report, 2001, No. 01—11
25 余武生, 姚檀栋, 田立德, 等. 慕士塔格地区夏季降水中$\delta^{18}O$ 与温度及水汽输送的关系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(1): 23—30
26 McKendry I G, Strawbridge K B, O'Neill N T, et al. Trans-Pacific transport of Saharan dust to western North America: A case study. J Geophys Res, 2007, 112 [doi]