# 慕士塔格冰芯中微粒的粒度记录<sup>\*</sup>

# 邬光剑 \*\* 姚檀栋 徐柏青 李 真田立德 段克勤 汶林科

( 中国科学院青藏高原研究所环境与过程实验室,北京 100085; 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰芯与寒区环境重点实验室,兰州 730000)

摘要 通过慕士塔格海拔 6350 m 高度处冰芯中微粒的粒度和粒径分布特征的分析, 初步获得 了该支冰芯所反映的大气粉尘搬运与沉积特征. 在数量上, 细颗粒(<5 μm)占主要成分; 而在体积 分布上, 粗颗粒有重要的贡献, 而且高浓度样品的粒径 - 体积关系符合对数正态分布特征, 具有 比格陵兰冰芯样品更大的体积众数粒径和标准偏差; 但是部分低浓度样品的体积分布特殊, 不符 合这一特征. 慕士塔格冰芯的粒度记录反映了高海拔近源区粉尘的沉积特点, 与远源沉积的极地 冰芯存在差别.

关键词 慕士塔格 冰芯 微粒 粉尘 粒径分布

粒度是反映粉尘搬运动力强度的良好指标.从 干旱大陆被风搬运到遥远地区的矿物气溶胶,其直 径分布范围很广,从小于 0.5 μm 到大于 75 μm 都存 在<sup>[1]</sup>.长期以来,地质学家们用粒径大小和粒径分布 来确定沉积物中颗粒的搬运与沉积特征.在黄土研 究中,粒度被广泛用作冬季风强度的替代指标<sup>[2,3]</sup>, 并从中分离出了西风和冬季风搬运的组分,根据组 分的变化推断出过去大气环流的变化<sup>[4,5]</sup>.在深海沉 积中,风尘颗粒的粒径及其分布也被用于反映风力 强度和搬运机制<sup>[6]</sup>.在冰芯中,微粒的粒径及其分布 反映了搬运风力的强度以及粉尘源区的尘暴活 动<sup>[7-9]</sup>.冰川是保存过去大气粉尘演化历史的良好介 质.目前对极地冰芯中的微粒研究较多,而对山地冰 芯中微粒的研究较少.毗邻中亚干旱区的青藏高原 上的冰芯,是反映中亚粉尘源区环境变化和大气活 动的良好记录,微粒的粒径分布特征在反映搬运动 力和物源方面具有重要的意义.但目前对此研究还 非常薄弱.而且,山地冰芯因其特殊的自然环境,与 极地冰芯记录存在的相似和差异也需要进一步的理 解.山地冰芯在一定程度上受到了其所处区域的气候 环境的影响,但如果位于足够的高度(如超过 6000 m 的对流层上部),局地的影响就很小,冰芯记录能够

\*\* E-mail: wugj@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2004-09-29; 接受日期: 2005-08-11

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金优秀创新群体项目(批准号: 40121101)、国家自然科学基金项目(批准号: 40301009, 90102005)和中国科学院知识创新项目 (批准号: KZCX3-SW-339)共同资助

反映出大范围的大气环境状况.本文以青藏高原西 部的慕士塔格冰芯为对象,探讨该支冰芯中微粒的 粒度记录及其粒径分布特征.本文中所说的粒径,除 非特别注明,均指直径.

#### 1 实验分析

慕士塔格山(75°04′E, 38°17′N)位于帕米尔高原 东部,处于中亚粉尘源区的中心,其周围的沙漠是北 半球粉尘源区的重要组成部分,是研究大气粉尘的 理想地点(见图 1).该地区的大气环流形势和特点与 青藏高原的地理位置有密切的关系,主要受两大环 流的影响,一是北半球的西风环流,另一是南亚季风 环流,此外还有高原季风.

2001年7~8月,在海拔 6350 m处钻取了一支厚 度为 43.1 m 的冰(粒雪)芯,同时还在钻孔附近采集了 1.2 m 厚度的雪坑样品(取样间隔为 5 cm).冰芯的分 样间隔为 4~6 cm,具有较高的分辨率,能够反映出季 节性的变化特征.氧同位素和微粒测量在冰芯与寒 区环境重点实验室完成.微粒测量采用国际上通用 的 Coulter 原理,所用仪器为 Beckman 公司的 Multisizer 3型 Coulter 计数器,测得的微粒粒径为等 体积球体的直径.根据 Coulter 原理,微粒粒径的测 量范围是仪器小孔管孔径的 2%~60%.考虑到慕士塔 格冰芯中存在较粗的样品,需要选择较大孔径的小 孔管, 否则容易导致小孔管堵塞. 在实验中, 我们选 取了直径为 50 μm的小孔管, 测量的粒径范围为 1~ 30 μm, 测量通道(粒级)设定为 300 个(对数等间距), 测量结果为每个通道内的微粒数目, 并由此计数出 微粒的平均粒径、单位体积(水当量)中的数量浓度和 质量浓度. 由于微粒浓度太高, 所有样品在测量前进 行了 2~20 倍的稀释, 稀释剂为该型仪器配套的 ISOTON II电解液. 根据测量结果, 仪器的本底为 400~800 个/mL, 远低于最低浓度的样品, 而且集中 在<5 μm的粒径范围内, 对微粒测量结果的贡献非常 微弱, 因此本底可以忽略不计. 在计算质量时, 大气 中粉尘颗粒的平均密度取为 2.6 g/cm<sup>3[10]</sup>.

#### 2 粒径变化特征

根据测量结果, 细颗粒(1~5 μm)在数量上占据绝 对优势, 不论是高浓度的样品还是低浓度的样品都 是如此; 而且, <1 μm 的极细颗粒数量更大, 虽然它 们已在仪器的测量范围之外. 在 1~5 μm 的粒径范围 内, 基本上所有的测量通道都出现计数. 而在某些较 粗的通道中(如>10 μm), 颗粒出现的计数有可能为零, 而且通道越粗出现零计数的可能性就越大, 说明粗 颗粒随粒径的增加而减少. 为了减少测量结果的不 确定性, 排除偶尔出现的极粗颗粒对体积分布的影 响, 只选择 1~15 μm 的颗粒进行平均粒径、数量浓度



图 1 慕士塔格冰芯位置及其周围的粉尘源区(黑点为慕士塔格)

和质量浓度的计算. 微粒的粒径可以用平均数量粒径(mean number diameter, MND)和平均质量粒径(mean mass diameter, MMD)来表示<sup>[7]</sup>, 前者是不同粒级微粒的数量加权平均的结果, 而后者不同粒级微粒的质量加权平均的结果. 由于质量与粒径的3次方成正比, 粗颗粒在质量分布上具有更大的权重, 使得 MMD 大于 MND. 但二者之间也存在明显的线性相关. 在慕士塔格冰芯中, 二者的相关系数达到了 0.91; 而在雪坑样品中, 相关系数则达到了 0.93. 在慕士塔格冰芯中, 样品 M-10-3 具有最大平均数量粒径和质量粒径, 分别为 2.54 和 3.96 μm; 样品 M-29-5-1 具有最小平均数量和质量粒径, 分别为 1.58 和 1.80 μm. 对整个冰芯而言, 微粒平均数量粒径的平均值为 1.88 μm, 而平均质量粒径的平均值为 2.60 μm.

在距离粉尘源区的遥远的沉积地点,如格陵兰 冰芯中,微粒的平均质量粒径对尘暴活动的反映更 为敏感,因为尘暴时有大量的粗颗粒被抬升到较高 的高度并作长距离的搬运,而平均数量粒径则主要 反映了搬运风力的强度<sup>[7]</sup>.对中低纬的山地冰芯而言, 强烈的局地湍流也可能将部分近源的粗颗粒搬运到 较高的高度.从慕士塔格冰芯的粒度记录可以看出, 平均数量粒径和平均质量粒径具有很好的相关性(图 2).平均质量粒径的波动要较平均数量粒径的波动更 为频繁,而且变化幅度也更大,其原因应当是样品中 粗颗粒组分对平均质量粒径的贡献较为明显.

从图 3 可以看出、微粒的平均粒径表现出了明显 的季节性变化. 与氧同位素比值所反映的温度变化 特征相对比、在总体趋势上、二者的峰值与峰值相对 应,谷值与谷值相对应,表明了尘暴和强风大都发生 在高温季节内,甚至发生在最高温度时段(如1995年); 而在低温的冬季、尽管尘暴发生的几率降低、但仍然 存在. 大多数微粒峰值发生在氧同位素升高的时段, 时间上相当于春末夏初. 但是, 在氧同位素的高值时 段内、氧同位素比值(温度)的变化不大、而微粒粒径 则有明显的波动,即使在氧同位素记录变化相对较 小的时段(如 1987 年), 微粒粒径的变化也非常明显; 而且, 微粒粒径的峰值多于氧同位素的峰值, 表明了 强粉尘和强风力事件较温度变化更为频繁、多以突 发事件的形式出现. 在某些年份(如 1999, 1998 和 1985年等)出现了两个甚至多个粒径峰值、说明一年 之内存在过多次强风和/或强尘暴时期, 氧同位素比 值与粒径在变化幅度上并没有显示出明显的系统性 关联.此外、粉尘的沉积方式(如干沉积和湿沉积的 比例)也会影响到冰芯中的微粒记录.

根据有限的资料,中亚地区塔什干和比什凯克 的扬尘和尘暴主要发生在 4~10 月份,与上述粒径峰 值发生的时段相对应,也与微粒浓度(图中未显示)的 峰值相对应.根据现代气象资料,中国北方沙尘暴主 要发生在 3~5 月,尤其是以4月最为频繁;冬季次之,



(a) 慕士塔格冰芯样品; (b) 6350 m 雪坑样品



图 3 慕士塔格冰芯中微粒的平均粒径(经过 5 点平滑)与氧同位素记录 图中的\*为年层单位

夏、秋季较少<sup>[11]</sup>.对古里雅冰芯上部 5 m进行了主要 离子的分析,发现青藏高原西北部的大气环境中,高 粉尘浓度主要形成于 2~5 月份,与中国西部春末夏初 的尘暴频发期一致<sup>[12]</sup>.慕士塔格冰芯记录表明了中 亚地区的尘暴发生时间基本上与中国西北地区大体 上相似.

黄土中粒径组分的变化可以用来反映搬运动力 的空间变化特征<sup>[4]</sup>,具有重要的气候指示意义.从大 气环流形式来看,中国西北部地区受蒙古高压的影 响明显,因此冬季风对粉尘堆积有重要的贡献.常年 存在的高空西风是粉尘搬运的重要动力,对慕士塔 格而言,中亚地区的粉尘有可能主要是通过西风搬 运过来的.此外,南亚季风也可能将南亚地区的一些 粉尘搬运到慕士塔格.

# 3 体积-粒径的分布特征

根据大气和冰芯中粉尘研究的经验, 微粒的体积-粒径分布符合对数正态分布特征<sup>[13,7]</sup>, 其拟合公

式为:

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}\ln d} = a \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - \ln d_m}{\ln \sigma}\right)^2\right],$$

其中,  $a = \frac{V_{\text{total}}}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma}$ , d为粒径范围,  $V_{\text{total}}$ 为该粒径范 围内对数分布的总体积,  $\sigma$ 为对数正态分布的标准偏 差,  $d_m$ 为体积众数粒径. 有 68%的对数正态分布体积 处于 [exp(ln $\mu$ -ln $\sigma$ ), exp(ln $\mu$ +ln $\sigma$ )]的范围内. 公式 中的自然对数也可换为常用对数, 直径d也可以换成 半径r. 之所以采用Ind而不直接采用d, 纯粹是为了应 用时的便利. 因为微粒的粒径范围较广, 采用对数坐 标轴可以获得更为直观的结果. 也有人采用质量-粒 径分布<sup>[14]</sup>. 由于体积与质量呈线性相关, 因此二者实 质上是一致的.

实际测量结果显示,某些粗粒级(测量通道)中并 不存在颗粒,即该粒级颗粒对总体积的贡献为零;但 在拟合过程中,体积分布是假设为连续分布的.这可 能将产生很大的误差,降低拟合结果与实际测量值 的相关性.特别是低浓度的样品中,粗颗粒的偶尔出现将对总体积和体积粒径分布产生明显的影响.这里,我们仅以污化层中的一些具有高浓度和高质量的样品进行体积-粒径关系的对数正态分布的拟合. 拟合之前,将它们的测量结果从300个通道合并为50 个通道.限于篇幅,这里只给出两个极高浓度样品的 拟合结果(图 4).



图 4 部分典型高浓度样品体积的对数正态分布及其拟 合结果

50 个通道. 黑点表示测量值, 曲线为拟合值. M-9-3 拟合结果:  $\frac{dV}{d \ln d} =$ 30622365 × exp $\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - \ln 7.79}{\ln 1.65}\right)^2\right]$ ,  $R^2 = 0.915$ ; M-10-3 拟合结果:  $\frac{dV}{d \ln d} = 77854006 \times exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - \ln 9.37}{\ln 1.68}\right)^2\right]$ ,  $R^2 = 0.889$ 

对部分样品在不同通道下的拟合结果表明,测 量通道的变化对体积-粒径分布的影响并不重要,因 为决定分布特征的标准偏差和体积众数粒径在不同 通道数量下的变化并不大,基本一致,因此拟合曲线 的特征也就是一致的.变化最大的是决定系数 *R*<sup>2</sup> 这 一项,通道越少,决定系数*R*<sup>2</sup> 越高;通道越多,决定 系数越低.这与拟合数据的多少有关.

格陵兰的GRIP和NGRIP冰芯中,体积众数粒径 与质量浓度有明显的正相关关系<sup>[7,15]</sup>,说明微粒总量 增加时,粗颗粒组分也相应增加.根据慕士塔格冰芯 中部分高浓度样品的拟合结果和总质量的对比,可 以发现随着微粒总质量的增加,体积众数粒径有增 加的趋势,而标准偏差则有降低的趋势;但它们与总 质量的相关性都非常低,而且趋势也并不明显.上述 样品中,标准偏差大都在 2 μm 左右,说明这些高浓 度样品的分选程度相差不是太大.此外,极粗颗粒组 分(>15 μm)对总质量的贡献比较复杂,并没有表现出 随总质量的变化而系统变化的趋势.在一些高浓度 样品中,>15 μm 的颗粒对总质量的贡献很小,有的 甚至并不存在.尽管我们只挑选了部分高质量浓度 的样品进行拟合而没有用其他低浓度的样品,这些 特征仍然表明了山地冰芯中微粒体积分布不同于极 地冰芯.

# 4 与其他冰芯记录的对比

从平均粒径来看, 慕士塔格冰芯中的平均数量 粒径为 1.58~2.54 µm. 而GISP2 冰芯在末次冰盛期时, 其平均粒径不过在 1.18~1.32 µm之间<sup>[16]</sup>. 说明慕士塔 格冰芯中的现代条件下微粒的平均粒径远比格陵兰 在末次冰盛期时的微粒还要粗, 尽管二者具有相同 的粉尘源区<sup>[16~17]</sup>.

冰芯中大多数微粒的体积-粒径分布服从对数正 态特征, 而且基本上只有一个众数值. 这在GRIP和 GISP2 冰芯、EPICA Dome C冰芯、Penny冰芯中已经 得到证实, 计算值与实际测量结果也较为符合. 在格 陵兰GRIP冰芯中众数粒径为2 um左右<sup>[8]</sup>,在GISP2 冰芯中为 2~3 µm<sup>[7]</sup>, 而在NGRIP为 1~2 µm<sup>[15]</sup>. 在对 数正态分布的拟合结果中、慕士塔格的体积众数粒 径和标准偏差与格陵兰都有差异. 就众数粒径来看, 慕士塔格冰芯中高质量浓度的样品为数个微米 (3.34~9.37 μm), 明显要比格陵兰(约 2 μm)的粗. 亚 极地的Penny冰芯中的粒径分布较格陵兰粗、因为其 粉尘来源可能包括了邻近的地区、全新世时其体积 众数粒径可以高达 6.7 μm<sup>[9]</sup>. 根据南极洲EPICA Dome C的微粒测量结果(图 5),不论是全新世还是末 次冰盛期、微粒的体积众数粒径也是 2 µm<sup>[18]</sup>. 从体 积分布来看、慕士塔格冰芯也比GISP2 和GRIP冰芯 具有更大的体积众数粒径和更大的标准偏差(标准



图 5 南极洲 EPICA Dome C 和格陵兰 GISP2 冰芯中微粒的体积分布

偏差范围为 1.55~3.16 μm), 说明慕士塔格冰芯中粒 径分布范围更广, 而且粗颗粒对总体积的贡献也更 大. 但是, 由于许多低浓度的样品具有特殊的体积分 布, 不能进行对数正态分布去拟合, 因此, 这里不深 入讨论低浓度样品的体积-粒径变化特征.

## 5 讨论与结论

根据微粒测量以及拟合结果,这里对慕士塔格 冰芯中的微粒粒径分布特征作一些初步探讨.

以前的研究表明,风尘物质在搬运距离超过 1000~2000 km之后,其平均粒径与搬运风力相称而 基本保持不变<sup>[19-21]</sup>,这种颗粒被称为均衡颗粒.对起 源于中亚干旱区的大气粉尘而言,均衡颗粒的体积 分布的众数直径在北太平洋的深海风尘沉积中是 2 µm<sup>[6]</sup>,格陵兰冰芯和南极EPICA Dome C冰芯中体 积众数粒径一般在 2 µm左右.中国黄土粒径的双峰 分布中,由高空西风搬运的细粒组分的众数粒径为 2~6 µm,与上述记录有一定的相似之处<sup>[4]</sup>.当然,均 衡颗粒并不是不变的,其粒径也将随大气环境的变 化而变化,比如全新世和LGM时就可能存在差别. 对粒径而言,搬运过程中的分选是一个重要的影响 因素.在长距离的搬运中,粉尘的粒径将发生变化, 重力分选将使更粗的颗粒优先沉降下来,使得距离 源区越远,粉尘的粒径就越小,分选程度也高,而且 体积分布更接近对数正态分布.这是干旱区周边山 地冰芯中微粒粒径分布与极地冰芯不一致的重要原 因. 慕士塔格毗邻粉尘源区, 搬运过程中的分选远远 弱于遥远的格陵兰, 因此在粒径分布上与之不同是 显而易见的.

从慕士塔格冰芯微粒的粒度记录来看、显然没 有达到均衡颗粒,表现为分选较差(标准偏差较大), 对高浓度高质量样品而言、粗颗粒的离散出现也是 存在的、但是中微粒(5~10 um)数量较多、对总体积 的贡献显著、在总体上仍明显地表现出对数正态分 布的特征、拟合结果也相当吻合. 在祁连山的敦德冰 芯中、微粒的粒径和质量呈对数正态分布、而且中微 粒(2.5~5.04 µm)在质量上占主要成分<sup>[22]</sup>. 需要指出的 是,对数正态分布是大气中微粒粒径的体积-粒径 关系常用的表达方法、但并不是必然的或是最佳的 表示方法. 慕士塔格冰芯中部分质量高浓度的样品 (如污化层中的样品)也可以用正态(高斯)分布去拟合, 而且也可以获得较高的相关系数(R<sup>2</sup>>0.8). 即使在高 浓度的M-10-3和M-9-3样品的拟合结果中,体积分布 不是严格地对称的、可以看到细颗粒组分明显存在 一个拖尾,具有一定的偏度,这一现象在极地冰芯中 也是存在的,如GRIP<sup>[8]</sup>和EPICA Dome C<sup>[18]</sup>冰芯中的 某些样品.实际上,已经有研究指出了大气和冰芯中 微粒体积分布的复杂性、如从撒哈拉吹往加那利 群岛和波多黎各的大气气溶胶<sup>111</sup>、有些冰雪样品存在 两个体积众数粒径<sup>19</sup>,而有些几乎呈直线分布<sup>[14]</sup>,有 的也可以用Weibull函数去拟合<sup>[18]</sup> 对慕士塔格冰芯 中的低浓度的样品而言,其体积-粒径的分布并不符 合典型的对数正态特征,其原因主要在于少数甚至 个别粗和极粗的颗粒在体积总量中所占的比重较大, 而且中微粒对总体积的贡献不突出. 如在编号为 M-7-2-3的样品中(深度为 584.1~589.1 cm), 一个粗微 粒(直径为 16.15 µm, 数量上占 1/1928)的质量就占了 总质量的 26.18%. 而在样品M-10-1-4(深度为 855.2~ 860.23 cm)中, 一个粗微粒(直径 15.63 µm, 数量上占 1/1310)就占了总体积的 30.44%. 虽然不能完全排除 部分粗颗粒是测量过程中的污染、但这些粗颗粒在 冰芯中的确是存在的. 这样的样品显然不符合正态 分布规律, 拟合后得出的结果并不令人满意. 而且, 即使排除掉个别极粗的颗粒、部分样品的体积也不 符合对数正态分布特征,有的甚至大致呈直线分布, 与喀喇昆仑山Hispar冰川和喜马拉雅山东部的 Ngozumpa冰川中的部分样品相似<sup>[14]</sup>.山地冰芯中微 粒体积分布的特殊性可能与特殊的物质来源和搬运 沉积过程有关.

大气粉尘粒径的完全分布包括 3 个体积众数粒 径, 即半径为 1~10 µm颗粒(来源于土壤的气溶胶)、 半径为 10~100 μm的颗粒(土壤母质的粒径分布、只 有在大气粉尘负载极高时出现)和半径为 0.02~0.5 μm 的颗粒(与土壤无关,为本底气溶胶)<sup>[13]</sup>.粉尘的粒径 分布不仅与搬运风力有关,而且与物质来源也有关. 利用粉尘的粒径分布特征,可以为探讨粉尘的物质 来源提供一定的佐证. 如西太平洋沉积中不同的众 数粒径反映了不同的搬运动力<sup>[23]</sup>,红黏土和黄土在 体积分布上的相似表明它们具有相同的来源<sup>[24]</sup>.中 国黄土作为典型的风尘沉积物,其粒度分布由分布 峰度较高、分选较好的粗粒组分和分布峰度较低、分 选较差的细粒组分叠加而成、前者代表了冬季风盛 行季节近距离低空搬运的粉尘物质、其粒度指示了 东亚冬季风所主导的近地面气流的强度. 细粒组分 可能主要为常态存在的、由高空气流搬运的远源尘、 代表了黄土高原原始粉尘的本底、它的粒度特征与 北太平洋西风带粉尘相似<sup>[4,5]</sup>. 与黄土不同的是, 东 亚冬季风基本上不影响慕士塔格, 因此冰芯中粗颗 粒的搬运机制与黄土是不同的.

慕士塔格冰芯中、 微粒的测量范围没有包括本 底气溶胶,但从体积分布趋势来看, <1 μm 的颗粒对 总体积的贡献是很小的,尽管其数量很大.土壤母质 范围内的颗粒(10~100 um 粒级),相当于黄土中的粗 组分,也是很少出现在冰芯样品中.整支冰芯中、微 粒的主体是来源于土壤的气溶胶(1~10 μm 粒级, 相 当于黄土中的细粒组分)以及极细的本底气溶胶(位于 测量下限之外). 这种与黄土中细粒组分相似的粒度 特征可能表明慕士塔格冰芯中的细微粒和部分中微 粒主要是由高空西风搬运的, 而且很可能来自远源 地区、特别是那些<1 μm 的颗粒. 对于较粗的颗粒, 远源的贡献应当很小, 而以近源为主. 在敦德冰芯中, 微粒粒径也反映出了近源的和中远距离的两个源 区<sup>[22]</sup>. 慕士塔格位于中国的最西部. 粉尘的来源与中 国西北干旱区关系不是太大,其粉尘的主要源区可能 是狭义的中亚地区, 如萨雷-耶西克阿特劳沙漠、克 孜勒库姆沙漠、卡拉库姆沙漠、里海等.除了塔里木 盆地的塔克拉玛干沙漠外、中国的其他沙漠可能对 慕士塔格冰芯中粉尘不存在贡献(见图 1). 因此, 慕 士塔格冰芯与中国西部粉尘记录(包括其他冰芯和现 代气象资料)可能存在一定的差别. 当然这一问题还 有待更多的资料来作进一步的分析, 对粉尘的来源 也需要更深入的研究(如矿物组分分析)才能作出更为 可靠的判断.

粉尘粒径将随着高度的增加而变细,而且其中 的粗颗粒组分也将急剧减少.对慕士塔格冰芯而言, 在 6350 m 的高度,测量结果表明直径小于 1 μm 的颗 粒最多(已经处于仪器的测量下限之外),这显示高空 西风搬运的粉尘中,细颗粒和超细颗粒在数量上占 绝对优势;但是,由于慕士塔格位于亚洲内部,毗邻 粉尘源区,强尘暴或局地湍流仍能将一些较粗颗粒 (包括直径超过 20 μm 的颗粒)搬运至 6350 m 以上的 高度,从而对体积(质量)分布产生重要的影响.微粒 具有范围更广的粒径分布,尤其是更粗颗粒的存在, 是中低纬地区山地冰芯的一个重要特征.

#### 参考文献

- Maring H, Savoie D L, Izaguirre M A, et al. Mineral dust aerosol size distribution change during atmospheric transport. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D19), doi: 10.1029/2002JD002536
- 2 Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. Nature, 1995, 375: 305~308[DOI]
- 3 Derbyshire E, Kemp R A, Meng X M. Variations in loess and palaeosol properties as indicators of palaeoclimatic gradients across the Loess Plateau of Northern China. Quaternary Science Reviews, 1995, 14: 681~697[DOI]
- 4 孙东怀,安芷生,苏瑞侠,等.最近 2.6 Ma 中国北方风流与西 风环流演变的风尘沉积记录.中国科学,D辑,2003,33(6):497~ 504
- 5 Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. Sedimentary Geology, 2002, 152: 263~277[DOI]
- 6 Rea D K, Hovan S A. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediment: Lessons from the North Pacific. Paleoceanography, 1995, 10(2): 251~ 258[DOI]
- 7 Zielinski G A, Mershon G R. Paleoenvironmental implications of the insoluble microparticle record in the GISP2 (Greenland) ice core during the rapidly changing climate of the Pleistocene-Holocene transition. Geological Society of American Bulletin, 1997, 109(5): 547~559[DOI]
- 8 Steffensen J P. The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(C12): 26755~26763[DOI]
- 9 Zdanowicz C M, Zielinski G A, Wake C P. characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow on the Penny Ice Cap, Baffin Island, Arctic Canada. Tellus, 1998, 50(B): 506~520[DOI]
- 10 Sugimae A. Elemental constituents of atmospheric particulates and particle density. Nature, 1984, 307: 145~147[DOI]
- 11 周自江,章国材.中国北方的典型强沙尘暴事件(1954~2002年). 科学通报,2003,48(11):1224~1228[PDF]

- 李忠勤,姚檀栋,谢自楚.青藏高原古里雅冰芯中的现代大气环 境记录.科学通报,1994,39(23):2200~2201
- 13 Patterson E M, Gillette D A. Commonalities in measured size distributions for aerosols having a soil-derived component. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(15): 2074~2082
- 14 Wake C P, Mayewski P A, Li Z, et al. Modern eolian dust deposition in central Asia. Tellus, 1994, 46(B): 220~233[DOI]
- 15 Ruth U, Wagenbach D, Steffensen J P, et al. Continuous record of microparticle concentration and size distribution in the central Greenland NGRIP ice core during the last glacial period. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D3): doi10.1029/2002JD002376
- 16 Biscaye P E, Grousset F E, Revel M, et al. Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (C12): 26765~26781[DOI]
- 17 Bory A J-M, Biscaye P E, Sevensson A, et al. Seasonal variability in the origin of recent atmospheric mineral dust at NorthGRIP, Greenland. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 196: 123~ 134[DOI]
- 18 Delmonte B, Petit J R, Maggi V. Glacial to Holocene implications of the new 27000-year dust record from the EPICA Dome C (East Antarctica) ice core. Climate Dynamics, 2002, 18: 647~660[DOI]
- 19 Janecek T R, Rea D K. Quaternary fluctuations in the Northern hemisphere trade winds and westerlies. Quaternary Research, 1985, 24: 150~163[DOI]
- 20 Rea D K, Leinen M, Janecek T R. Geological approach to the long-term history of atmospheric circulation. Science, 1985, 227: 721~725
- 21 Chuey J M, Rea D K, Pisias N G. Late Pleistocene paleoclimatology of the central equatorial Pacific: a quantitative record of eolian and carbonate deposition. Quaternary Research, 1987, 28: 323~ 339[DOI]
- 22 刘纯平,姚檀栋,谢树成.祁连山敦德冰芯微粒变化特征和大气 环境记录.海洋地质与第四纪地质,1999,19(3):105~113
- 23 孙有斌, 高 抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的 初步分析. 科学通报, 2003, 43(1): 83~86[PDF]
- 24 Yang S L, Ding Z L. Comparison of particle size characteristics of the Tertiary 'red clay' and Pleistocene loess in the Chinese Loess Plateau: implications for origin and sources of the 'red clay'. Sedimentary, 2004, 51: 77~93[DOI]