

## 祁连山敦德冰心微粒变化特征 和大气环境记录

刘纯平 姚檀栋 谢树成

**摘要** 对祁连山敦德冰心总微粒含量、粒径分布以及总微粒含量、粗微粒含量与沙尘暴的关系进行了分析,结果表明,微粒主要来源于亚洲粉尘发源地和区域性源地,属于典型的陆源微粒。微粒含量和微粒粒径变化反映了沙尘暴的强度和波动历史,沙尘暴频率高时,微粒含量高,微粒粒径大,反之,微粒含量低,微粒粒径小。末次冰期以来,微粒含量变化呈减少趋势,暖期微粒含量低,冷期微粒含量高,夏季微粒含量高,冬季微粒含量低;不同粒径微粒相关性良好,反映了它们在来源、沉积和冰内变化方面具有相同之处。

**关键词** 总微粒含量;微粒粒径;沙尘暴;大气环境;敦德冰心

中图分类号:P941.71 文献标识码:A 文章编号:0256-1492(1999)-03-

0105-09

## CHARACTERISTICS OF MICROPARTICLE VARIATION AND RECORDS OF ATMOSPHERIC ENVIRONMENT IN DUNDE ICE CORE

LIU Chunping YAO Tandong XIE Shucheng

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In this paper, microparticle amount, size profile and dust storms are studied. Different sizes of microparticles, which originated from Asian dust and regional source area, have a good positive relationship, which suggests they are similar in progress of deposition and internal variation. They are typical continental microparticles. Total, small, middle and large microparticle concentrations are decreasing from LGS to present, but in the course of change, they don't show that they are linear but vibrational. Microparticle concentration is high during warm periods and spring-summer season, and it is low during cold periods and winter season. There are also good relationships between microparticles and dust storms. When frequency of dust storms is increasing, microparticle concentration is increasing and so is microparticle size, and vice versa. Because different sizes of microparticles are different in altitude, distance and time, the origin of microparticle is primarily showed in three aspects: the largest one originates from the front

of bare glacier , the middle one from local and regional mixture layer of the lower atmosphere , and the small one from atmospheric troposphere . Therefore , microparticle concentration and size varied , which reflected the intensity of winter monsoon .

**Key words** : Dundee Ice Core ; microparticle concentration ; size ; dust storms ; atmospheric environment

冰心记录具有分辨率高、保真性强、所储存的气候环境信息丰富和时间序列可选性强等独特的优势，在全球变化研究中占据相当重要的地位。特别是反映沙暴、尘暴和浮尘等环境事件的尘埃冰心记录，是目前所能达到的最详细、分辨率最高和最连续的资料系列。冰心中的微粒含量是反映陆源物质成分变化敏感的环境指标。由于微粒含量反映了尘埃频率和强度的波动历史，用它来研究环境变化是可靠的。我国西部大多数地区是沙漠和荒漠，沙暴、尘暴和浮尘事件很多，持续时间也很长。这些事件提供的微粒在青藏高原的冰心中有很好的记录。青藏高原雪坑样品微粒分析发现，微粒含量受源于中国西部干旱半干旱区亚洲粉尘的控制而呈现出北高南低的空间分布趋势。敦德冰心是一个分辨率很高的气候环境信息库，保存有各种气候环境变化的信息。敦德冰心的地理位置、气候状况以及从冰心中所得到的气候与环境信息等已经有许多研究结果发表，这些发表的研究结果大多是以 $^{18}\text{O}$ 和积累量两参数进行的，以微粒作为陆源物质成分变化的环境指标的研究很少<sup>[1]</sup>，而单独进行冰心中微粒含量研究在青藏高原冰心中还未开展。本文旨在根据敦德冰心微粒含量记录，确定其与沙尘暴的关系及气候意义，为研究西部地区荒漠化和沙漠化环境变化提供进一步可靠的证据。

## 1 敦德冰心区域环境和资料来源

敦德冰心位于中国西北部的祁连山区( $38^{\circ}06' \text{N}$ ,  $96^{\circ}24' \text{E}$ )，深受亚洲中部荒漠影响，南有中国最高的沙漠——柴达木盆地，北有戈壁沙漠，四周有浮尘、尘暴年平均日数  $> 30 \text{ d}$  的4个尘暴高值区( $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ )和浮尘高值区( $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ )

<sup>[2]</sup>(图1)，具有典型的大陆性气候特征。冰心中的微粒分析是在美国伯德极地研究中心直接用T型Coulter Counter测得，共分析样品3 585个，代表了1987年在祁连山地区提取的139.8m大冰心。从微粒计数器直接得到的记录有粒径大于 $2.0 \mu\text{m}$ 、 $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 、大于 $5.04 \mu\text{m}$ 三类， $2.5 \sim 5.04 \mu\text{m}$ 粒径的微粒是根据已有粒径的微粒含量推算出来的。依据粒径大小将微粒初步划分成总微粒( $> 2.0 \mu\text{m}$ )、细微粒( $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ )、中微粒( $2.5 \sim 5.04 \mu\text{m}$ )和粗微粒( $> 5.04 \mu\text{m}$ )四类，并根据敦德冰心以污化层为依据已建立的时间序列，对所测样品进行年代划分，其时间跨度为20000a.B.P.左右。对冰心中沉积的微粒含量(单位体积融水中的微粒数量)、粒径分布以及微粒与沙尘暴进行了分析，获得了微粒的特征、来源和大气环境变化方面的信息。

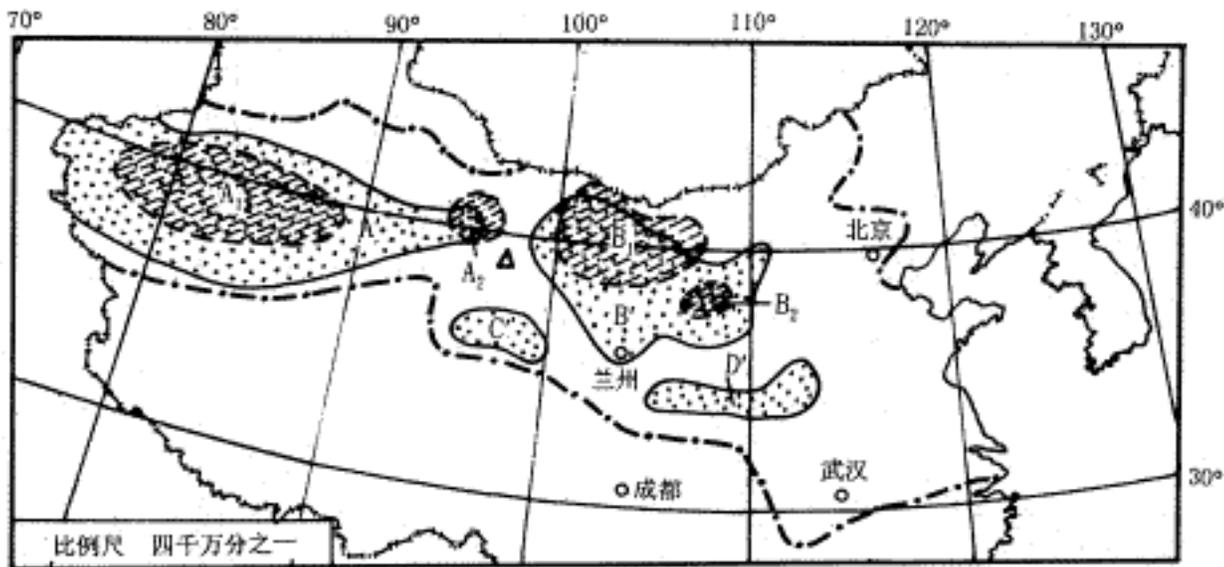


图1 敦德冰心区域环境示意图(据张德二改绘, 1982)

划点部分为浮尘区域, 划斜线部分为尘暴区域, 敦德冰心所在地, 点划线为浮尘年平均日数 > 5天的区域界限

Fig. 1 Environment of Dunde Ice Core area

Dot : floating dust ; Slant : dust storm area ; location of Dunde Ice Core ;  
Dot and dash : area with floating dust > 5 days / year

## 2 微粒变化特征

### 2.1 敦德冰心中的微粒来源

冰心中微粒的来源一般来说有被风吹刮的当地尘埃、远距离输送的陆地粉尘、超远距离输送的海盐等, 人类活动和森林火灾等也可对某些微粒有重要贡献。根据分析, 敦德冰心中任意一尺寸平均微粒含量随微粒粒径的增加而呈对数减少趋势, 表现出Junge分布形式, 因而微粒属于典型的陆源微粒<sup>[3]</sup>。青藏高原及周围山区雪冰化学研究成果<sup>[4~6]</sup>也证明青藏高原北部大气杂质主要为陆源物质, 海洋来源的很少。

### 2.2 不同粒径的微粒含量变化

敦德冰心记录了末次冰期以来的气候环境变化信息, 从末次冰期到全新世, 微粒含量有三个明显的变化阶段(图2), 不同阶段微粒含量有明显的变化。就整个时间尺度而言, 微粒含量呈减少趋势, 末次冰期与全新世的转换是显著的, 但从高微粒含量到低微粒含量的变化是渐变的, 存在一个大约4 000 a左右的渐变期。微粒含量的这一变化可以反映限制大气输送微粒能力的气候环境的明显改变。由表1可以看出, 2.0~2.5  $\mu\text{m}$ 粒径和2.5~5.04  $\mu\text{m}$ 粒径的微粒相关性最大, 系数高达0.97。不同粒径微粒间具有良好的相关性, 反映了它们在来源、沉积和冰内变化方面具有相同之处。

粒径	细微粒	中微粒	粗微粒
细微粒	1.00	0.97	0.83
中微粒	0.97	1.00	0.90
粗微粒	0.83	0.90	1.00

表1 不同粒径微粒相关性(显著水平 $P < 0.05$ )  
Table 1. Relations of the microparticles ( $P < 0.05$ )

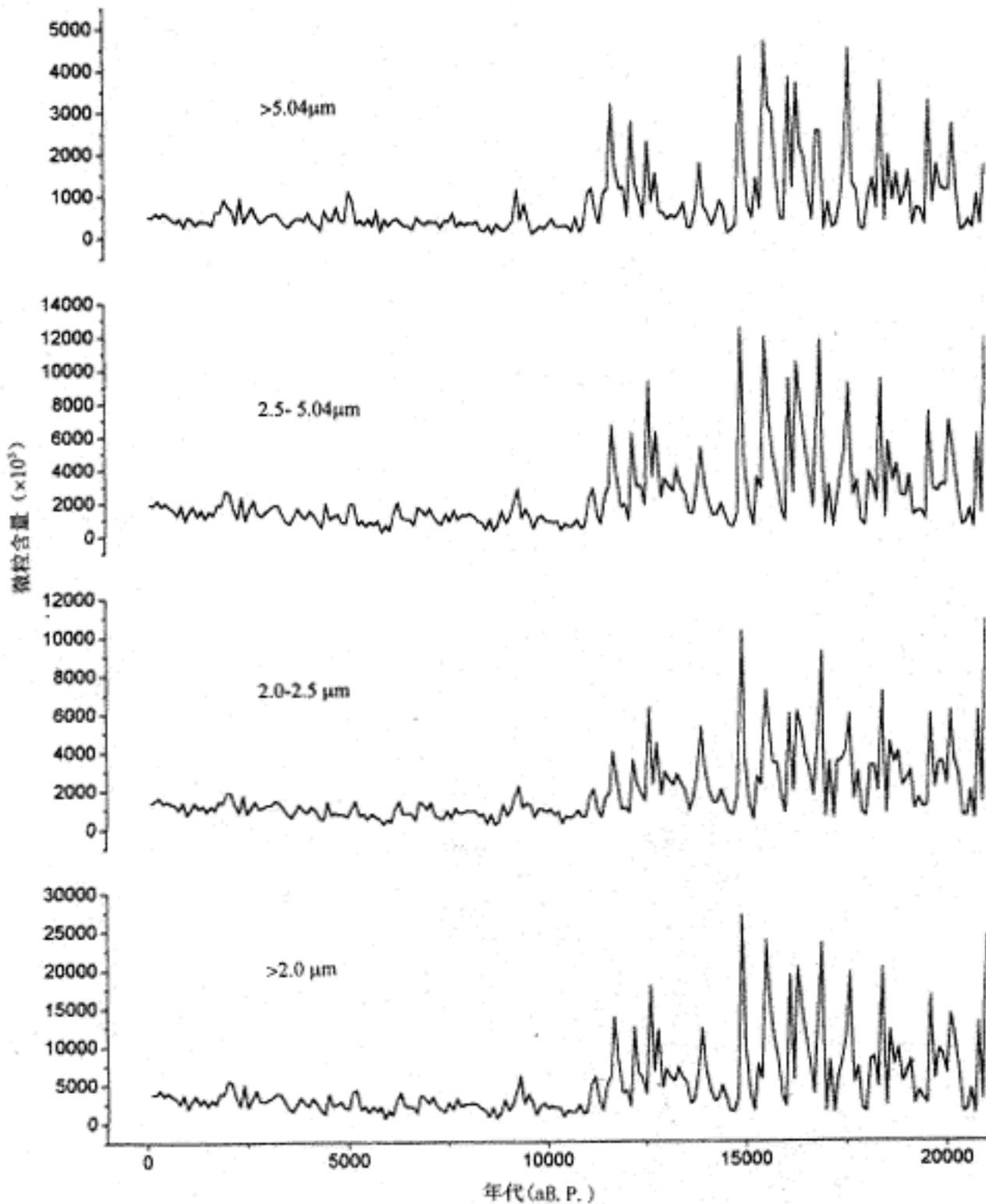


图2 不同粒径微粒含量变化曲线  
Fig.2 Variations of different-sized microparticle content

### 2.3 微粒组成

微粒质量-粒径分布是反映微粒组成的另一项重要特征指标。冰川内单位体积(每毫升)水溶液中,直径为 $D$ 的微粒平均质量 $M(D)$ (直径为 $D$ 的微粒平均质量浓度),可以通过公式: $M(D)=D^3 N(D)/6$ 计算出来。假设微粒为近似球形,式中 $\rho=2.6\text{gcm}^{-3}$ 为陆源风尘微粒的密度值[7], $N(D)$ 代表直径为 $D$ 的微粒平均含量。由此得到冰内微粒质量和粒径呈对数正态分布曲线(图3)。

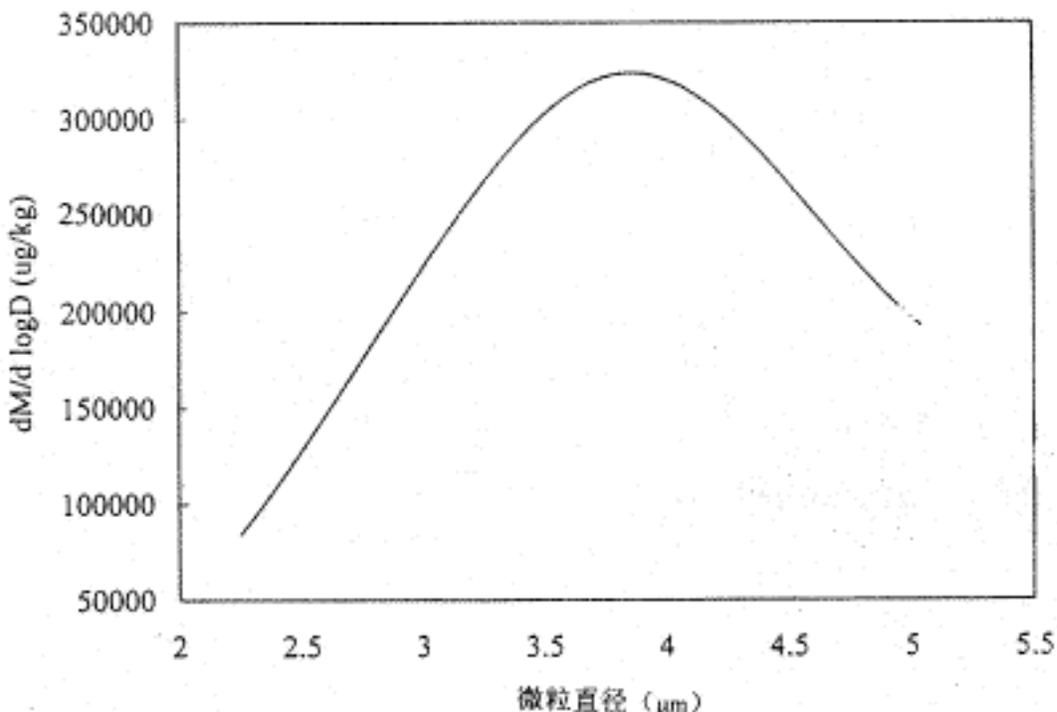


图3 不同粒径微粒质量随微粒直径变化曲线

Fig . 3 Changes of microparticle mass with diameter

2.5 ~ 5.04  $\mu\text{m}$ 微粒的平均质量浓度占总质量平均浓度的很大比例,经分析为53.8%。微粒含量组成也以2.5 ~ 5.04  $\mu\text{m}$ 粒径为主,占46%,说明敦德冰心沉积的微粒主要以中微粒为主。

#### 2.4 微粒含量的变化特征

微粒含量的季节变化特征是夏季降水微粒含量高,冬季降水微粒含量低;长期变化特征是暖期微粒含量低,冷期微粒含量高。在冰心中出现污化层,其微粒含量高于其它层段。根据污化层出现的春夏季节、雪沉积的时间序列和图4可以发现,微粒季节性变化是明显的。每一年中基本上都有一个微粒含量峰值出现,存在以年为周期的变化特征。冰心污化层出现在春夏季节,所以微粒含量峰值也出现于从春初到夏末的雪层中,这与敦德冰心所在地区气候环境密不可分。每年3~8月,大量的杂质通过沙暴、浮尘和大风输送而来,冬季由于处于盛行高压的控制之下,减少了风力作用将周围物质输送到敦德冰心的机会。微粒含量和 $^{18}\text{O}$ 值的对比[8]发现,微粒含量的高值期大致对应着 $^{18}\text{O}$ 值的低值期,微粒含量与 $^{18}\text{O}$ 值具有负相关的特点(图5)。

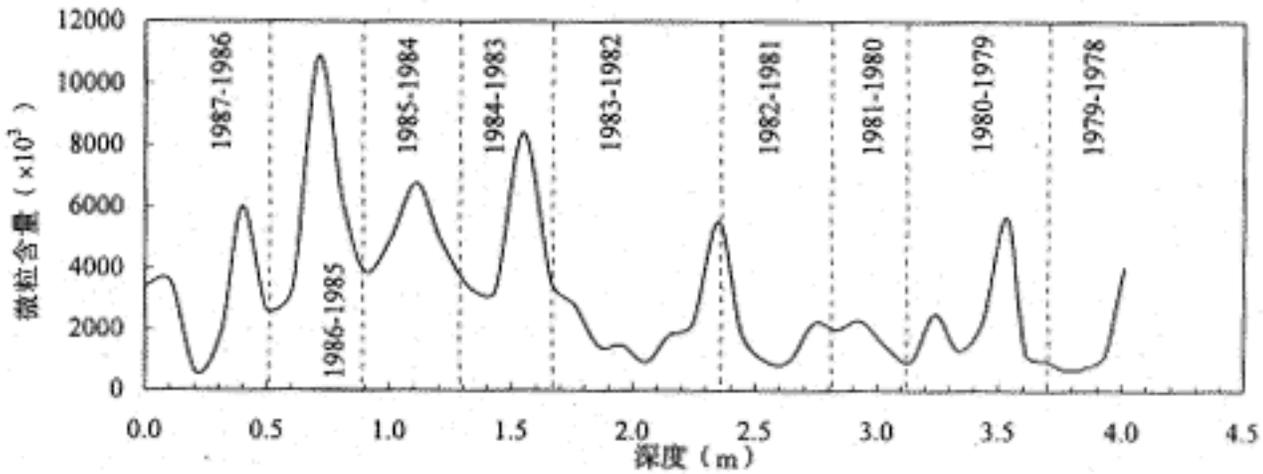


图4 总微粒含量随深度变化曲线

Fig.4 Changes of total microparticle contents with depth

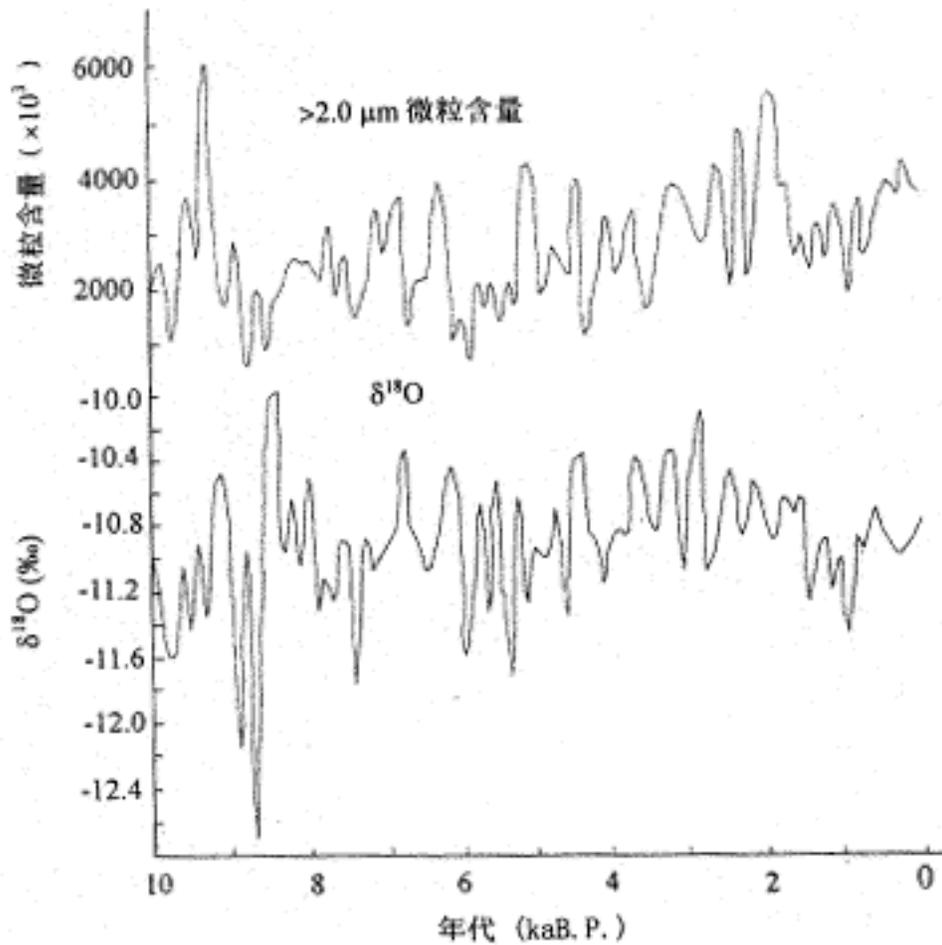


图5 距今10 ka来总微粒含量与  $^{18}\text{O}$ 值的对比

Fig . 5 Correlation between total microparticle contents and  $^{18}\text{O}$  value

### 3 微粒变化与沙尘暴的关系

沙尘暴灾害性天气的出现，离不开强劲的风力、丰富的沙尘源和不稳定空气诸因素的结合。其中风是沙尘暴发生的动力条件，沙是物质基础，不稳定空气则促进沙尘卷入

高空。显而易见，沙尘暴是当地特定的地理条件和生态环境等因素相结合的产物。沉积在冰心中的微粒物质是在一定的干燥程度、风力强度等条件下从源区扬起后，在空气中进行分选而沉降的。沙尘暴的发生，不仅增加了冰心中总微粒含量，同时也使沉积物中的微粒粒径增大。粗微粒含量的变化可以间接反映微粒粒径的变化。因此冰心中总微粒含量和粗微粒含量变化可以揭示环境变化信息。

尘暴频率<sup>[9]</sup>和总微粒含量、粗微粒含量基本上成正相关的，尘暴频率增加，总微粒含量和粗微粒含量都有不同程度的增加。由于尘暴的发生是在强风的作用下产生的，搬运沙尘的能量较强，因而粗微粒粒径的含量增加，反之亦然。尘暴频率和微粒含量有正相关的特点，尘暴频率增加，微粒含量也随之增加，反之亦然。15世纪到17世纪，这种正相关的特点是显著的，18世纪以后，这种正相关的关系不如以前。主要存在两方面的原因，其一是整个区域内气象台站的建立，同等程度沙尘暴事件的记载比以前详细；其二是距现代越近，各种因素对微粒的影响程度越大，以前主要受自然因素的影响，而在现代人为因素有很大的影响，使得尘暴频率与微粒含量变化的关系不如以前。众所周知，我国西北地区干旱少雨，大风频繁，冷热剧变，寒潮过境时不稳定空气在对流层底部形成强对流天气等均为沙尘暴、浮尘事件的发生提供了条件。沙尘暴、浮尘事件为大气输送微粒提供了充足的能量，致使微粒沉积的粒径和含量发生相应的变化，当然，微粒含量和粒径变化并不只受沙尘暴、浮尘事件的影响，它还受到其它因素的影响，但冰心中的微粒含量和粒径变化肯定记载了沙尘暴、浮尘事件。用敦德冰心中的微粒含量和粒径变化来研究尘暴、沙尘暴和浮尘事件是可靠的。

#### 4 敦德冰心中的大气环境记录

冰心记录受形成时期气候、环境条件的控制，冰心中的微粒、<sup>18</sup>O和各种化学成分被赋予了特定环境、气候条件的指示意义。因而这些记录因子从不同侧面反映了整个形成过程中的环境气候特征，相互之间也必然存在联系。

由于季风环流的影响，研究区域天气形势有明显的差别，冬季受蒙古高压控制，夏季大陆热低压发展，蒙古高压衰退，为大陆热低压控制。蒙古高压和大陆热低压相互耦合，使得这一区域盛行西北-东南风(即冬季风)，这也是敦德冰心风吹雪的方向。冬季风变化可以用冰心中合适的气候指标来表示。首先，微粒是由风力搬运的，其中冬季风在搬运粉尘过程中具有重要作用，而冬季风强度变化将受高纬地区冰盖大小变化所控制<sup>[10]</sup>。可以想见，当高纬度地区冰盖扩大时，由于大量冷空气注入中纬度地区，蒙古高压得到加强，冬季风的强度将得以加强。反映在冰心沉积中则某个地区沉积的微粒粒径将随冬季风的增强而变粗，同时冬季风增强将导致我国内陆地区沙漠面积扩大，使粉尘来源区的面积增大，风蚀作用增强。因此冬季风增强时期往往是微粒含量增加时期<sup>[11]</sup>。根据这样的分析，我们可以选择微粒粒径变化和微粒含量变化来代表冬季风的强弱波动。由于冬季风运行途径主要为干燥寒冷的大陆内部，从而使气候具有干冷的特征。冬季风增强，冰心记录中微粒含量增加，<sup>18</sup>O值减低，降水减少，微粒的搬运增强，微粒粒径变粗；冬季风减弱，冰心记录中微粒含量减少，<sup>18</sup>O值增高，降水增加，微粒搬运减弱，微粒粒径变细。受东南季风的影响，降水集中于夏季，使得冰川的消融期和积累期在时间上重合。整个山体暴露在强风中，加上每年3~8月大风“尘暴”期间大量粉尘的干沉积，微粒含量有明显的季节性变化。

敦德冰心微粒直径均大于2.0 μm，是一种粗型微粒。在风暴作用下，不同粒径的微粒扬尘高度和输送距离不同，粒径越大，滞空时间越短，传播距离越近。粉沙可以被带

入1500m以上的高空，粘粒可悬浮于整个对流层中<sup>[12]</sup>。村山等人用二维传输模式研究<sup>[13]</sup>，认为粒径大于150 μm微粒不能飞到高空，而粒径小于40 μm的微粒可以上升到4000m高空，并在离源地数百公里的下风向地区沉降。另外，粒径12 μm的微粒可被输送到3000km以外的地区，粒径小于12 μm的微粒可传输到7000km以外的地区，粒径7 μm的微粒传输到10000km以外的地区。从微粒的粒径与输送距离的关系，可以确定敦德冰心所在区域既受青藏高原东北部的黄土高原、沙漠等地层的表面物质的影响，又受包括塔克拉玛干沙漠、库木库勒沙漠、古尔班通古特沙漠和柴达木、吐鲁番盆地中的沙漠以及巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠的大部分干旱-半干旱区亚洲粉尘发源地物质的影响。大气环境在每年的高粉尘季节和其它季节的差异十分悬殊。高粉尘季节，大气中各种成分陡然增加，反映在敦德冰心中则为微粒含量大幅度上升，微粒粒度减低，低粉尘季节，大气比较洁净，微粒含量也比较低，微粒粒度增加。高微粒含量出现在春夏季节，与本区“尘暴”频发季节(即高粉尘季节)相一致。从而证实了敦德冰心中的微粒是亚洲粉尘和区域性物质的注入。敦德冰心雪冰化学分析<sup>[1]</sup>离子浓度强碱性和高NaCl浓度表明，冰心中微粒的沉降来源于周围的沙漠和盐沉积，整个冰心中主要的阴、阳离子浓度比率的一致性表明微粒的起源在过去2万多年来没有变化，末次冰心中微粒沉积的增加，可能是高纬度大陆冰川扩张、风力加强的结果。高浓度的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(18.9 μeq/kg)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(4.2 μeq/kg)、Cl<sup>-</sup>(32.5 μeq/kg)均出现在以粗型微粒层为背景的雪层之中，由每年2~5月“沙暴”期间的亚洲粉尘裹挟而来。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup>的比值(0.58)远大于海水中的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup>的比值(0.14)，说明青藏高原盐湖及盐湖蒸发岩中富含Na、Mg、Ca等元素的硫酸盐、氯化物是敦德冰心陆源物质的补给，敦德冰心中具有十分高的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>含量便来自于盐矿风尘物。因而，雪冰化学分析进一步证实了敦德冰心周围干旱—半干旱脆弱生态环境对微粒沉积的贡献。

总之，敦德冰心微粒含量是由几种不同来源物质的影响所决定的，而不同来源物质的影响程度则取决于雪积累区位置与大气混合高度之间的关系以及地方风条件，其中有重要影响的是：(1)代表大陆上空自由对流层的物质(有时受从高海拔入侵的大量沙漠土壤尘埃的干扰)，这种来源的物质粒径比较小，就敦德冰心微粒粒径而言主要是细微粒；(2)起源于大气下部混合层的当地或区域物质，这种来源的物质因为距沉积地点比较近，粒径一般比较大，大多中微粒可能来源于此；(3)来源于冰川附近的物质(最多的是来源于冰前裸露土壤区的粗粒矿物质)，由于距离沉积地点最近，粗微粒大多来源于此。

## 5 结语

综上所述，敦德冰心的大气环境记录在微粒含量和微粒粒径中有明显的体现，微粒含量和微粒粒径的变化可以揭示出：(1)敦德冰心所在区域冬季风的强弱变化。冬季风加强，微粒含量增加，微粒粒径变粗；冬季风减弱，微粒含量减少，微粒粒径变细。(2)微粒含量在高粉尘季节和低粉尘季节有明显的变化，高粉尘季节微粒含量高，低粉尘季节微粒含量低。(3)不同粒径微粒的扬尘高度、滞空时间和传输距离的不同，可以证实微粒的潜在源区为亚洲粉尘发源地和区域性粉尘源区，并可从已有的雪冰化学分析中得到进一步的证实。(4)总微粒含量和粗微粒含量变化与沙尘暴有很大联系。沙尘暴频率高时，总微粒含量高，粗微粒含量高，沙尘暴频率低时，总微粒含量低，粗微粒含

量低，即总微粒含量和粗微粒含量与沙尘暴有正相关关系。

第一作者简介：刘纯平，女，1972年出生，理学硕士，自然地理专业。

李忠勤.青藏高原冰川的气溶胶记录研究.中国科学院兰州冰川冻土研究所博士论文.1994

作者单位：中国科学院 兰州冰川冻土研究所寒区与环境开放实验室，兰州73000

## 参考文献

- 1 Thompson L G , Thompson E M , Davis M E et al . Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau . Science , 1989 , 246 : 474 ~ 477
- 2 张德二.我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析.中国科学(B) , 1984 , 278 ~ 288
- 3 Junge C E . Air chemistry and radioactivity . New York : Academic Press . 1963
- 4 姚檀栋 , 盛文坤 , 杨志红.青藏高原的冰雪化学研究.见：姚檀栋等编.青藏高原冰川气候与环境.北京：科学出版社 , 1993.8 ~ 15
- 5 姚檀栋 , 秦大河 , 皇翠兰 等.古里雅冰心中的主要阳离子与小冰期以来的环境变化.见：青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究学术论文年刊(1994).北京：科学出版社 , 1995.1 ~ 10
- 6 李忠勤 , 姚檀栋 , 皇翠兰 等.古里雅冰帽中的化学物质沉积特征和现代大气环境记录.见：青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究学术论文年刊(1994).北京：科学出版社 , 1995.11 ~ 20
- 7 Pye K . Aeolian dust and dust deposits . London : Academic Press , 1987
- 8 姚檀栋 , 施雅风.祁连山敦德冰心中的全新世高温期.见：高亚洲浅冰心与气候环境变化研究.1996 , 271 ~ 273
- 9 夏训诚 , 杨根生 等.中国西北地区沙尘暴灾害及防治.中国环境科学出版社 , 1996.5 ~ 6
- 10 丁仲礼 , 余志伟 , 刘东生.黄土研究新进展(三)时间标尺.第四纪研究 , 1991 , 336 ~ 348
- 11 姚檀栋 , 焦克勤 , 皇翠兰 等.冰心所记录的环境变化及空间耦合特征.第四纪研究 , 1995 , (1) : 84 ~ 93
- 12 张宁 , 黄维 , 陆荫 等.沙尘暴降尘在甘肃的沉降状况研究.中国沙漠 , 1998 , (1) : 32 ~ 37
- 13 村三信彦 , 根元修.输送されぬ黄砂ユアロソルの粒径について.见：日本气象学会秋季讲演予稿集.1984

收稿日期：1998-08-31

周立君编辑