

湖南师范大学

硕士学位论文

塔克拉玛干沙漠对流层中上部大气尘埃变化趋势及其成因分析

姓名：李永能

申请学位级别：硕士

专业：自然地理学

指导教师：韩建康;谢自楚

20081001

摘 要

冰川是环境作用的结果，冰芯中保存了小量的大气沉降物，这些大气沉降物记录了当时的环境变化状况。通过对冰芯的研究，就可以反映出一个时间段的环境变化。钻自于西昆仑山崇测冰帽海拔6530m的一支长为18.7m的冰芯，该冰芯提供了近百年间的尘埃沉积记录。冰芯记录覆盖的90a间尘埃表现出持续下降的总趋势，这段时期大体可分为3个阶段，即1930年之前，1930-1960年和1960年之后，尘埃浓度的降低是量级上的。几个突出的尘埃阶段出现在1900年代早期、1910年代、1920年代后期和1940年代早期，它们分别以约 2.5×10^6 粒·mL⁻¹、 2.7×10^6 粒·mL⁻¹、 2.5×10^6 粒·mL⁻¹和 1.5×10^6 粒·mL⁻¹的高浓度为特征，而1970年代则表现出相对较低的浓度(5×10^5 粒·mL⁻¹)。就年份来看，突出的高尘埃浓度分别出现于1906年，1915年，1919年和1943年。根据微粒的粒径资料来分析，局地输入的尘埃分量约占总值的17%，剔除后可以得到中、大尺度范围的大气尘埃沉积通量。根据后60a资料建立的通量平均值为 $913 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，大气尘埃随时间的变化是每10a下降速率为 $-124 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，它可反映出塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量在近半个多世纪以来的变化趋势。

从机制上分析塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量在近半个多世纪以来的变化趋势：全球气温的升高，导致海洋蒸发量的增加，大气中水汽增加，同时环流得到加强，输送到内陆的水汽增加，从而使降水增加；塔克拉玛干荒漠周边低海拔地区降水的增加，导致植被增加和土壤含水量的增加。从而，这两方面就阻碍了沙尘暴的发生；随着沙尘暴的减少，加上空气湿度的加大和降水的增多，对

空气的洗刷就相应地加强，使能上升到六七千米以上高空的尘埃就更少；所以塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的凝结核在近半个多世纪以来呈现出明显下降的趋势。

关键词：冰芯记录；尘埃沉积；对流层中上部；大气尘埃通量；持续下降

Abstract

Glacier is the result of environment. Ice core contains small amounts of atmospheric fall-out, and the atmospheric fall-out records the change of environment. By analyzing the ice core, it discloses the change of the environment at that time. An ice core of 18.7m long from Chongce Ice Cap(at an elevation of 6350m), West Kunlun Mts. China, showed an overall decrease in magnitude of the total particle content for about 100years from the beginning of the 20 century. Three phases could be identified approximately: before 1930(going back to 1903), 1931—1960, and 1961—1992. The conspicuous periods include the early 1900s, 1910s, late 1920s and early 1940s, of which the dust level was much higher, and the early 1970s, of which the dust level was relatively low. The dust deposit rate at the altitude was built up for the past 60 years. The mean is $1106\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ with the maximum and minimum of 3462 and $77\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$, respectively.

Analyzing the volume distribution of micro particles obtained from size measurement, it is estimated that contribution of the local component is 17% of the total dust input. The rest could be taken as long range transportation, i.e, the deposit of atmospheric dust burden in meso large scale. Thus, the changing trend of dust flux at the troposphere altitude over the southern Taklimakan Desert is known. The calculated deposited dust flux for the 60 years before 1992 is $913\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ in average, with a decreasing rate of $-120\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ in a decade. This could be a

representative of the regional record of the mid upper troposphere dust burden in temporal tendency.

Through mechanism analysis, we find the mechanism: global warming results in precipitation increment in arid area. Precipitation increase should result in dust-storm decrease. Then dust-storm decrease cause dust flux decrease at Mid-Troposphere altitude. So this causes cloud condensation nuclei number decrease at Mid-Troposphere altitude.

Key words: ice core record; dust deposition; middle upper troposphere; dust flux; persisting declination

湖南师范大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：李永能

2008年11月20日

湖南师范大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属湖南师范大学。同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南师范大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密□，在_____年解密后适用本授权书。
- 2、不保密□。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：李永能

日期：2008年11月20日

导师签名：谢自英

日期：2008年11月20日

1. 引言

1.1 塔克拉玛干沙漠的地理位置及其周边环境简介

塔克拉玛干沙漠属于中纬地区，地处中亚，位于我国新疆维吾尔自治区南部的塔里木盆地之中，塔里木盆地的周边为天山，昆仑山和阿尔金山所包围，东西长 1400km，南北宽约 550km，面积 56 万平方千米，为我国最大的内陆盆地。塔里木盆地内分布着我国最大的荒漠—塔克拉玛干荒漠（面积 33.76 万 km²，37°N -41°N，78°E -88°E），荒漠地势南高北低。占中国沙漠总面积的 47.2%，见（图 1-1）大沙漠东西绵延 1000km，南北宽约 400km，是我国最大的沙漠。沙漠内部植被稀少，多为流动沙丘。

由于塔里木盆地是大型封闭性山间盆地。天山、昆仑山阻隔印度洋和西太平洋暖湿气流的进入，降水量小，气候变化大。夏季炎热少雨；冬季气候异常寒冷；春季多风；平均每月大风 4~5 次。

塔里木盆地降水量北部一般在 50mm~70mm，南部一般在 15mm~30mm，降水稀少，蒸发强烈，空气十分干燥，沙漠东部盛行东北风。由于该地区位于我国的第二级阶梯上，平均海拔在 1000 米以上，又属于干旱区，终年降水稀少，降水季节主要集中在五至八月份，蒸发强盛。西昆仑山位于塔克拉玛干沙漠南缘，海拔在 6000 米以上，山上终年积雪。崇测冰帽位于西昆仑山南侧，全长约 7km，末端高度约 5800m，平衡线高度 5930m。

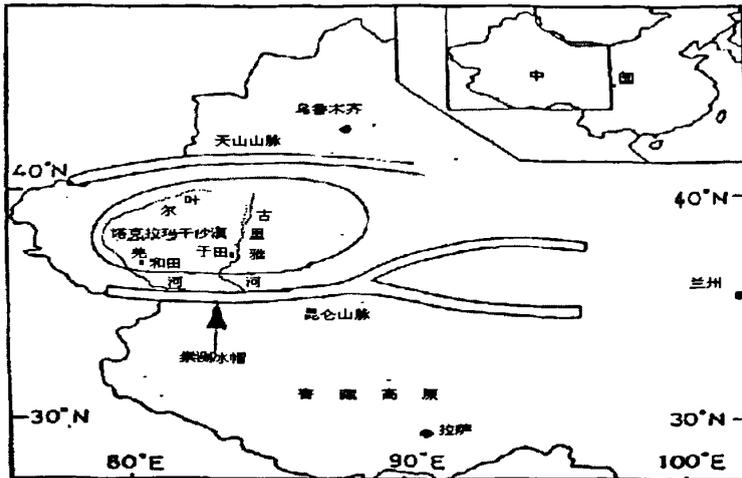


图1-1: 塔克拉玛干沙漠的地理位置及其周边环境

1.2 研究动态

国内外与本论文选题相关的研究有：李江风教授主编的《塔克拉玛干沙漠和周边山区天气气候》，讲述了塔克拉玛干沙漠和周边山区的天气气候形成机理，天气气候特征、规律，以及气候资源和变化，此书偏重于写塔克拉玛干沙漠气候。王旭等的《南疆沙尘暴气候特征分析》根据新疆地面气象记录月报表，整理出1961-1999年39年来南疆42个气象观测站的沙尘天气现象资料并进行统计分析，给出南疆地区沙尘暴的时空分布特征。钱云等的《沙尘气溶胶与气候变化》沙尘气溶胶通过吸收和散射太阳辐射与长波辐射影响地球辐射收支和能量平衡，从而影响气候变化。另一方面，气候变化，土地利用、沙漠化和城市化等人类活动都可能导致大气中矿物沙尘气溶胶的改变。沙尘气溶胶在全球及区域尺度气候和环境变化中起着十分重要的作用。袁玉江的《塔克拉玛干地区近40a来的冷暖变化》利用塔克拉玛干地区、周围山区及相邻地区的48个气象站近40年的温度资料，分析塔克拉玛干地区年与四季冷暖变化的阶段、周期、趋势，比较与其周围山区及相邻地区的相关性，探讨与欧亚环流指数的关系。袁玉江等的《塔克拉玛干地区近40a来的干湿变化》利用塔克拉玛干、周围山区及相

邻地区的48个气象站近40年的降水资料,分析塔克拉玛干地区年与四季干湿变化的阶段与周期,并与周围山区及相邻地区进行相关性分析。马志福等的《塔克拉玛干沙漠地区温压湿分布规律研究》根据塔克拉玛干沙漠周围近20个气象站36年冬季、夏季平均气温、气压、相对湿度和塔克拉玛干沙漠地区6个短期观测站近10年的有关气象资料,对该地区冬、夏季平均温度、相对湿度和气压分布规律进行了系统研究。杨莲梅的《塔克拉玛干地区气候变化对全球变暖的响应》从地面水汽压、平均风速、湿润指数、相对湿度和气压的角度分析在全球变暖的情况下,塔克拉玛干地区气候的年和季节变化特征。何清等的《新疆40a来的气温、降水和沙尘天气变化》根据1961—2001年新疆代表北疆的8个气象站、天山山区的8个气象站、南疆的8个气象站的实测资料,分析了40年来新疆气温、降水、沙尘暴、扬沙、浮尘年际变化特征。李栋梁等的《中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望》揭示了西北地区气候由暖干转向暖湿的事实。施雅风等的《西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨》提出全球大幅度变暖,水循环加快,增强降水和蒸发。在20世纪变暖背景下,变干趋势结束转向变湿,降水量的增加将超越变暖导致的潜在蒸发的增加,出现世纪性的径流增加与湖泊的扩张。胡汝骥等的《新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响》提出新疆气候由暖干向暖湿转变。冯文等的《夏季区域西风指数对中国西北地区水汽场特征影响的对比分析》指出西风年际变化对西北地区的风场辐合的影响是我国西北地区水汽场年际变化的主要原因。龚道溢等的《冬季西风指数的变率及其与北半球温度变化的关系研究》得出近30年来,伴随全球加速变暖,西风指数也持续加强。王旭的《新疆对流层中上部水汽输送特征研究》使用3年逐日逐时GMS-5水汽图像资料,经过增强处理后,对新疆地区对流层中上部的水汽输送过程进行了初步分析,发现对流层中上部进入新疆的水汽输送通道主要有西南、西部和西北3个通道,新疆对

流层中上部水汽主要来自西风。胡汝骥等的《新疆水资源对气候变化的响应》提出20世纪80年代后期,新疆降水增加20%~30%。王绍武等的《中国西部年降量的气候变化》提出多雨主要发生在气候剧烈变暖的20世纪最后30年。王宁练的《青藏高原北部马兰冰芯记录所揭示的近200年来沙尘天气发生频率变化趋势》通过对青藏高原北部马兰冰芯污化层状况的分析,提出该冰芯中污化层厚度比率是沙尘天气发生频率的良好指标,并揭示出近在200年来马兰冰芯中污化层厚度比率呈降低趋势,指示了这一时期沙尘天气发生频率呈减少趋势,并指出大气尘埃含量与气候变化之间关系具有重要意义。施雅风等的《中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估》自小冰期盛时以来,西部高山区平均升温1.3K,冰川的萎缩量相当于现代冰川面积的20%,预估2030,2070和2100年升温值分别为0.4~1.2, 1.2~2.7和2.1~4.0K,届时冰川面积将分别减少12%, 28%和45%,其不确定性至21世纪末介于30%~67%。

1.3 本文研究的内容

本文研究的内容:冰川是环境作用的结果,冰芯中保存了小量的大气沉降物,这些大气沉降物记录了当时的环境变化状况。通过对冰芯的研究,就可以反映出一个时间段的环境变化。钻自于西昆仑山崇测冰帽海拔6530m的一支长为18.7m的冰芯,该冰芯提供了近百年间的尘埃沉积记录。冰芯记录覆盖的90a间尘埃表现出持续下降的总趋势,这段时期大体可分为3个阶段,即1930年之前,1930-1960年和1960年之后,尘埃浓度的降低是量级上的。几个突出的尘埃阶段出现在1900年代早期、1910年代、1920年代后期和1940年代早期,它们分别以约 2.5×10^6 粒 \cdot mL $^{-1}$ 、 2.7×10^6 粒 \cdot mL $^{-1}$ 、 2.5×10^6 粒 \cdot mL $^{-1}$ 和 1.5×10^6 粒 \cdot mL $^{-1}$ 的高浓度为特征,而1970年代则表现出相对较低的浓度(5×10^5 粒 \cdot mL $^{-1}$)。就年份来看,突出的高尘埃浓度分别出现于1906年,1915

年, 1919年和1943年。根据微粒的粒径资料来分析, 局地输入的尘埃分量约占总值的17%, 剔除后可以得到中、大尺度范围的大气尘埃沉积通量。根据后60a资料建立的通量平均值为 $913\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 大气尘埃随时间的变化是每10a下降速率为 $-124\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, 它可反映出塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量在近半个多世纪以来的变化趋势。

从机制上分析塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量在近半个多世纪以来的变化趋势: 全球气温的升高, 导致海洋蒸发量的增加, 大气中水汽增加, 同时环流得到加强, 输送到内陆的水汽增加, 从而使降水增加; 塔克拉玛干荒漠周边低海拔地区降水的增加, 导致植被增加和土壤含水量的增加。从而, 这两方面就阻碍了沙尘暴的发生; 随着沙尘暴的减少, 加上空气湿度的加大和降水的增多, 对空气的洗刷就相应地加强, 使能上升到六七千米以上高空的尘埃就更少; 所以塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的凝结核在近半个多世纪以来呈现出明显下降的趋势。

2. 资料与方法

2.1 资料的选取和整理

2.1.1 资料简介

本文所选的资料主要是由国家气象中心气候资料室提供的塔克拉玛干沙漠周边的降水、气温和春季沙尘暴的资料，塔克拉玛干沙漠周边地区水文观测站的水文资料和中日合作项目所得的崇测冰芯的资料。

①塔克拉玛干沙漠周边地区12个站（和田、于田、且末、民丰、皮山、莎车、若羌、巴楚、喀什、库尔勒、库车和阿克苏）1954—1992年逐月降水、气温和春季沙尘暴资料。

②塔克拉玛干沙漠周边河流的水文资料。

③西昆仑山崇测冰芯记录1902—1992年尘埃年通量和年积累量的资料。

2.1.2 崇测冰川资料简介

① 冰帽、钻点特征和冰芯钻探

崇测冰帽位于中国西昆仑山南侧，全长约7km，末端高度约5800m，平衡线高度5930m，两处突出的穹顶海拔分别为6532m和6374m。雷达测厚显示，冰川主线冰厚在100至150m之间变化。主流线上的年物质平衡值在 $200\text{kg}-500\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ ，且净积累值在过去30年间出现下降的趋势。综合分析表明，崇测冰帽深受塔克拉玛干沙漠（面积 $33.76\text{万}\text{km}^2$ ， $37^{\circ}\text{N}-41^{\circ}\text{N}$ ， $78^{\circ}\text{E}-88^{\circ}\text{E}$ ）的影响，该沙漠位于我国最大的全封闭性内陆盆地塔里木盆地中心，占中国沙漠总面积的47.2

%，被公认为中亚沙尘的主源区之一。因冰帽发育于沙漠南缘山区，处于大气尘埃的主要输运和沉降区内，故为对流层中高层长期尘埃变化记录的良好载体。B1—B13作为主要观测面，曾在1987年进行过连续的雪坑剖面研究。综合气象观测结果的分析表明，崇测冰帽是一条以夏季补充为主大陆型冰川。降雪主要发生在5月下旬至9月上旬的暖季。对同年在B13钻取的浅层出现裂隙，记录的连续性遭到破坏。

崇测冰帽海拔6532m的主冰穹（图2-1）顶部平坦，且位于冰分水岭处。1992年9月20日至10月4日，使用机械钻机在这里钻取了长度在16m至48.2m之间的6支冰芯：其中最深一支到达基岩。冰芯钻出以后，将0.3-0.5m长的冰芯段密封包装在聚乙烯筒袋内，置于冷冻冰箱中进行运输，随后保存在温度为-20℃的低温室。钻探结束后，在钻孔中吊放一组探头进行温度测量。观测到的连续负温剖面表明，钻点从表层到基岩全部深度都由冷雪(冰)组成，这显然有利于良好气候和环境记录所必需的冰芯替代指标原始沉积状态的保存。

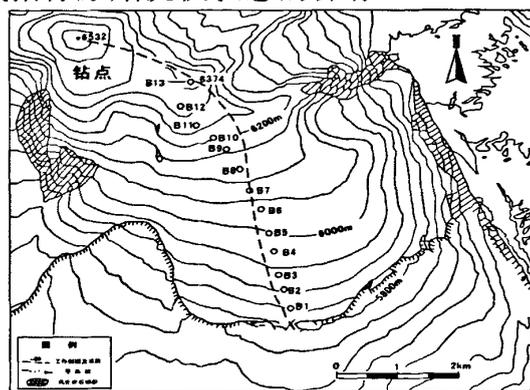


图 2-1 崇测冰帽及钻点位置和地形

②冰芯物理和化学性质测定

A.层位观测

仪器检测开始前，在低温室使用光盒进行直观层位观察。冰芯表面不清晰时使用酒精布进行擦拭，有利于看到细节。所有观察到的现象如气泡尺寸和形状、晶体颗粒大小以及投射光在相邻结构间的变化，均记录在一卷10cm宽的米格纸上，形成1:1的冰芯层位图。

冰芯层位中最突出的现象是与粒雪交替出现的冰层、冰透镜体和冰腺,层位观测中对这些标志着曾经发生过融化—冻结现象的冰层薄厚特别进行了记载。我们发现,虽然崇测冰芯中频繁出现雪冰夹层,但始终没有发现厚于5cm的冰层。统计表明,冰层厚度总量小于冰芯总长度10%。如认定在年层中该比例同样适合,则可判定融化造成的渗浸穿透年层的概率很小,可以忽略。

B. 积累率和密度实测

1987年野外工作时,曾在崇测冰帽顶部插下一根测杆,以求该点的净积累率。从1987年的8月26日至1992年10月4日约5年间,积雪表面增长高度为93.6cm,年均增量18.7cm。

为测量密度,冰芯被截为3-5cm厚的小段,密度值由实测体积和重量得出。

根据密度资料计算可得,1987-1992年年平均积累率为7.3cm w.e(水当量),而按照我们的取样办法,平均每个年层可以得到5个左右的样品。

积累量的计算结果使我们看到,崇测冰帽主冰穹年纯积累率远低于 $200\text{kgm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 这是应用稳定氧同位素对冰芯实行定年的最低标准,使之有可能难以提供借以定年的理想资料。后来的检测结果证实了这一判断。

C. 仪器检测

完成密度测量后,便转向为仪器检测备样。使用一把丙酮和纯净水不断擦拭的切刀,将小段冰芯表面剔除。由于外表可能已遭化学污染,仅用于稳定同位素比率 $d^{18}\text{O}$ 的检测。清洁的中心部分用于进行主要离子、PH值和微粒分析。这几种分析样量提取后的余量一般不足检测 ^3H 的样量要求,于是将相邻几个样品余量混合起来作为新的样品,以达到50mL的标准。

与本研究有关的主要阳离子(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+),使用具备火

焰雾化器的SeikoSAS7500原子吸收光度计检测浓度。微粒浓度则通过Coulter Counter Multisizer II分析,其给出的结果可以揭示微粒在32个不同尺寸频道的颗粒分布。我们测出的微粒直径覆盖范围在 $0.66\mu\text{m}$ 与 $21.4\mu\text{m}$ 之间。样品的 ^3H 含量使用液体闪烁光度计确定。所有这些测试工作在日本长冈雪冰防灾实验研究所实验室进行。

③分析

微粒在极地冰川定年中之所以能够得以成功运用,主要得益于长途输运过程中的沉降分选,即使极地上空气溶胶中的不可溶尘埃杂质在成分上得以充分混合,也使颗粒的粒径尺寸上基本降低到 $10\mu\text{m}$ 以下。这部分漂浮的尘埃能够表现半球以至更大范围大气尘埃年复一年起伏的特征。而且极地上空的寒冷环境,又使尘埃微粒在常温下因吸水性能差而被排斥在凝结核之外的性质发生改变。其中粒径较小,特别是小于 $2\mu\text{m}$ 的具有矿物结晶形态的部分则极易在低温影响下被“激活”而成为“结晶冰核”。它们与周围的过饱和水汽结合形成冰晶,并吸收更多的水汽物质降落下来,造成微粒物质的有效“湿沉积”。崇测冰帽冰芯没有出现可用肉眼直接观察到的污化面,且仪器检测到的微粒尺寸75%以上都落在 $0.66\mu\text{m}$ — $1.33\mu\text{m}$ 的微粒尺寸区间,表明冰芯中的绝大部分微粒是远距离输运来的物质。其形成机制应该与极地地区基本一致,所不同的仅在于来到高海拔山地冰川上的这些物质,可能更多的是接受了垂直方向上的重力分选作用。由于较少受到局地输入颗粒“噪音”的影响,这部分颗粒的浓度变化会更有利于提示中等尺度环境、甚至更大范围的大气尘埃变化,在冰芯中印记下我国西北地区突出的大气尘埃季节变化特点,从而有利于定年。

a.对比层位标记的微粒断代

图2-2给出该区间微粒浓度对应于深度的变化。表层至93.6cm的深度是1987到1992年5年中积累的物质。在剖面上可以看到3个峰值,但都位于0.4m深度以下。而在上部的0.3m中,因极为松散的雪层影响冰芯

质量,共有0.19m冰芯缺失。因此有理由假定,在0—0.4m深度区间可能缺失了两个峰值,其长度约为两年积累的物质。

事实上,每个年层出现一个微粒峰值对于崇测地区是合理的假定。我们知道,我国西部大气尘埃年内分布极不均匀,高峰期位于2月中旬至5月下旬,而最高峰发生在4月中旬至5月下旬这一段时间。有鉴于此,同时考虑到夏季是西昆仑山的主要降水季节,夏季降水中的微粒含量理应较低。相对而言在其它季节、特别是在春季积累的雪层中微粒含量应当较高。据此我们计数了实测剖面上颗粒总量峰谷值的循环变化。到6.75m共数29个年层。若最顶部从1992年算起,该层物质应积累于1963年。

大气中天然生成氚 ^3H 。在平流层和氧发生发应时,它便直接被结合在水分子中,但是作为自然界的氚背景值在1951年之前很低,约为 $0.1-1\text{BqL}^{-1}$ 。随着美国爆炸全世界第一颗热核炸弹,人类造氚时代开始,使大气平流层中的氚的含量曾出现几个数量级的增长。上世纪50年代和60年代的大气核武器实验将大量放射性物质释放到大气平流层,扩散到地球上的大部分地区,这就造就了冰川中一系列可供定年参考的层位。图3以阴影给出崇测冰帽5—8m深度 ^3H 的检测结果,可以看出在6.5-6.75m处出现一个宽幅 ^3H 高峰区。因为已知北半球1963年为一 ^3H 峰值年,该高峰区应定于该年(如星状标志所示)。而它正是凭借微粒浓度变化记数出的最后一个峰值所对应的深度。

微粒定年结果与 ^3H 参考层位的吻合,证明应用这一方法为崇测冰帽顶部冰芯定年是正确的选择。

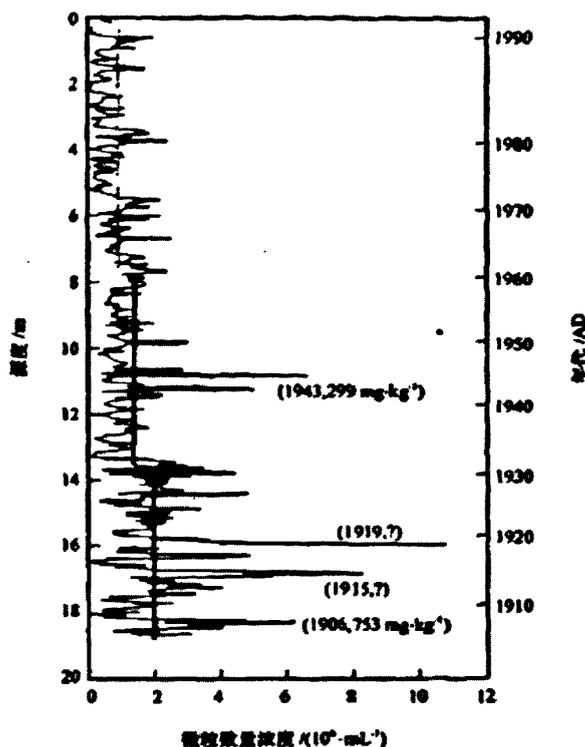


图2-2 对应于年代的冰芯微粒数量浓度变化

Fig2-2 Number concentration of micro-particles against age of the core

b. 对照 Ca^{2+} 剖面的微粒断代

通常，内陆地区冰川积雪中很高的 Ca^{2+} 含量被认为是陆源成因。这是因为不溶于水的 CaCO_3 很容易在存在二氧化碳和水的情况下发生反应，生成可溶的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ：



因此，在中低纬冰川上高 Ca^{2+} 浓度常常与不可溶微粒高含量同时出现。从图2-2中 Ca^{2+} 与微粒浓度近乎同步的变化预期崇测冰芯会显示出二者很高的正相关关系。但计算结果表明，它们关系并不十分理想 ($r=0.77$)。按样品逐个比照，发现尽管非夏季沉积积雪中 Ca^{2+} 含量一般也表现出高值，但峰值并不与微粒一一对应，表现出一个样品峰值“位差”的情况屡屡出现。对照取样记录，我们发现“位差”大多出现在冰层或有冰腺、冰透镜体的样品中，而在仅由粒雪组成的样品中，

这种“位差”现象基本没有出现。究其原委，可能还在于冰芯层位中由冰层等现象记录的冰川表面融化及融水的渗浸—冻结作用。本组的一项专门研究表明，融水在积雪中发生渗浸—冻结时，由于融化状态下的不可溶颗粒的重力作用和融水重新冻结时的化学离子排斥作用，固态颗粒和离子在垂直方向反向位移，使固态颗粒更加集中在冰层的底部，而离子则更多分布于上端。由于崇测冰帽表层仅存在轻微融化， Ca^{2+} 离子和固态颗粒重新定位时离开原始位置的迁移相对较小，所以表现出的“位差”也很小。于是在应用微粒和 Ca^{2+} 离子浓度变化计数崇测冰芯1963年以下年层时，我们更加注重二者峰谷值在区间上的数量对应，而没有强调其形态上的一对一比照，取得了较好的吻合。重复计数实验表明，到冰芯最底层18.70m对应的1902年，定年最大误差小于2年。

2.1.3 资料选取和整理

表1: 和田与其它站点的相关系数

	阿克苏	库车	库尔勒	喀什	巴楚	若羌	莎车	皮山	民丰	且末	于田
和田降水	0.36	0.30	0.32	0.52	0.61	0.29	0.62	0.76	0.77	0.26	0.67
和田气温	0.27	0.27	0.57	0.17	0	0.64	0.88	0.94	0.83	0.76	0.70
和田春季沙尘	0.42	0.53	0.08	0.55	0.48	0.57	0.64	0.59	0.56	0.64	0.70

研究之前，为了减少低海拔地区站点，提取有代表性的站点。我们把12个站点气候因子（气温、降水和春季沙尘暴）分别两两进行了相关分析，发现和田累计相关系数最高，特别在与皮山、民丰和于田的相关系数较高（见表1），说明和田地区的气候因子能代表塔克拉玛干荒漠周边地区的气候变化。

本文是研究塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量半个多世纪以来的变化趋势及其引起这种变化的因素分析。为了使研

究效果最好，我们对高海拔地区的冰川资料和低海拔地区的气候因子（气温和降水）进行先期比对，发现与低海拔夏半年（5-10月）的资料有相对比较好的关系。所以在气温和降水方面，本文选取和田夏半年（5-10月）的资料来分析。由于沙尘暴资料缺乏，只有春季的资料，同时比对也发现春季沙尘暴与冰芯记录关系较好。所以关于沙尘资料选取的是春季沙尘暴资料。年限是1954-1992年，共39年。

关于水汽通量的计算：

整层水汽输送矢量：

$$\vec{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^p q(u, v) dp \quad (2-1)$$

其中水汽通量 Q ， U ， V 分别为纬向风和经向风分量， P_s 为地表面气压， P 取为300hPa， q 为比湿， g 为重力加速度。整层积分时，地形以下等压面的值不作梯形累加，地形处的值由其以上最接近的标准等压面的值代替。单位为 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ 。

区域西风指数计算方法：

$$WI = \sum_k u_{500hpa} / k \quad (2-2)$$

其中 K 为（35°~45°N，50°~80°E）范围内计算西风风速的格点总数。

所以，把NCEP/NCAR再分析资料通过公式（2-1）求得多年平均夏季（5-10月）水汽通量。通过公式（2-2）求得1954-1992年夏季（5-10月）区域西风指数。

2.2 主要方法简介

2.2.1 崇测冰芯微粒浓度定年法简介

对冰芯进行准确的定年是冰芯研究的基础。关于冰芯的定年方法

很多，在特殊的地方，我们要采用特殊的方法。在对崇测冰芯进行定年时，尝试过很多方法，但都有不足之处。应用稳定氧同位素方法对崇测冰帽冰芯定年，但由于冰芯钻点积累量低于保持稳定同位素季节变化信号的下界标准， $d^{18}O$ 测定剖面变化无法用于判断年层。采用污化面（层）对崇测冰芯进行定年，但由于崇测冰帽置身于岩土风化物质包围之中的山地冰川，接受到的较大规模的尘埃输入常常与大风的出现密切相关，呈现出完全随机的状态，某年层内包含数个污化层或完全不包含污化层的概率很高；大气尘埃在沉降到冰面后，很容易受到表层融化冻结过程的改造，使原始尘埃分布发生迁移或浓缩，以至混淆年间原始沉积，并且崇测冰帽冰芯没有出现可用肉眼直接观察到的污化面，从而影响对崇测冰芯的准确定年。在对崇测冰芯进行定年时，依据粒径在 $0.66-1.33\mu m$ 之间的不可溶尘埃微粒的浓度垂向分布，并结合阳离子 Ca^{2+} 的浓度剖面变化，实现了对崇测冰帽冰芯浅层的断代。辅助的定年参数包括：钻点表层5年的实测净积累率和大气核试验的地层标志。综合各种技巧定年，崇测冰帽该次采集的冰芯覆盖的记录年代为1902-1992，最底部累积误差在 ± 2 年。

2.2.2 物质之间的内在联系研究法

世界是物质的，物质是普遍联系的，这种联系是有规律的。因此，我们在探寻物质之间的规律性时，就应该运用联系的方法。本文在分析塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量在近半个多世纪以来的变化趋势时，从机制上分析了其形成的原因。运用联系的方法，从该区域的气温，西风指数，降水量，沙尘暴，冰川积累等方面进行了研究，终于发现了它们之间的内在的、本质的联系。最后从系统论的角度揭示了塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量在近半个多世纪以来的变化趋势的真正原因。

2.2.3 相关性分析方法

本文用Pearson相关系数来定量描述尘埃粒子(0.66~1.33 μm)的沉降通量与冰川年积累量之间线性相关的程度。设有两个变量 X_1, X_2, \dots, X_n ; y_1, y_2, \dots, y_n 。此时相关系数的计算公式为:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

相关系数 r 的取值在-1.0~+1.0之间。当 $r > 0$ 时,表明两变量呈正相关,越接近1.0,正相关越显著;当 $r < 0$ 时,表明两变量呈负相关,越接近-1.0,负相关越显著;当 $r = 0$ 时,则表示两变量相互独立。

采用上式求得的相关系数须进行统计检验,以此来判断两变量是否存在显著相关关系。

2.2.4 主要的计算方法

A.小波分析

a. Morlet小波

本文采用Morlet小波,作为基函数进行小波变换。Morlet小波的形式为:

$$\theta(t) = e^{ict} \left(e^{\frac{t^2}{2}} - \sqrt{2} e^{-\frac{c^2}{4}} e^{-t^2} \right) \quad (2-3)$$

当 c 取较大值时,上式中第二项远小于第一项,省略第二项。本文取 $c=5.4$ 。其子小波为:

$$\theta_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \theta\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (b \in \mathbb{R}, a \in \mathbb{R}, a \neq 0) \quad (2-4)$$

b.小波变换

若 $\theta_{a,b}$ 是(2-4)式给出的子小波。对于时间序列 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$,其

连续小波变换定义为：

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_a^{+a} f(t) \bar{\theta}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2-5)$$

式中 $\bar{\theta}(t)$ 为 $\theta(t)$ 的复共轭复数： $w_f(a,b)$ 称小波（变换）系数。实际工作中，时间序列常常是离散的，如 $f(k\Delta t)(k=1, 2, \dots, n; \Delta t$ 为取样时间间隔)，则（2-5）式的离散形式为：

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Delta t \sum_{k=1}^n f(k\Delta t) \bar{\theta}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (2-6)$$

$w_f(a,b)$ 能同时反映时域参数 b 和频域参数 a 的特征，它是时间序列 $f(t)$ 或如 $f(k\Delta t)$ 通过单位脉冲响应的滤波器的输出。当 a 较小时，对频域的分辨率低，对时域的分辨率高；当 a 增大时，反之。因此，小波变换能实现窗口的大小固定，形状可变的时频局部化。

文中所用Morlet小波函数是一个周期函数并经一个Gaussian函数平滑而得的。所以，它的伸缩尺度 a 与傅里叶分析中的周期 T 有一一对应关系。

$$T = \left[\frac{4p}{c + \sqrt{2+c^2}} \right] a = 1.144a \quad (2-7)$$

这使得对计算结果的解释更简明了。

Morlet小波为复数小波，实部表示不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方面的信息。不同时间尺度下的小波系数，可以反映系统在该时间尺度下变化特征：正的小波系数对应于偏多期，负的小波系数对应于偏少期，小波系数为零对应着突变点，小波系数绝对值越大，表明该时间尺度变化越显著。

c.小波方差

将时间域上的关于 a 的所有小波系数的平方积分，即为小波方差。

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (2-8)$$

小波方差随尺度 a 变化过程称小波方差图。它反映了波动的能量随尺度的分布，故可以确定一个时间序列中存在的主要时间尺度，即主周期。

d. 资料预处理及计算方法

在文中函数 $f(t)$ 即为降水距平，文中Morlet小波变换边界处理方法如下：

原资料序列为 $f(1), f(2), \dots, f(39)$ 。其中 $f(1)$ 对应于1954年资料， $f(39)$ 对应于1992年资料，其余依次类推，然后周期性地向两边延伸。

向前延伸39点：

$$f(-i) = f(i+1) \quad (i=0, 1, 2, \dots, 39) \quad (2-9)$$

向后延伸39点：

$$f(i+54) = f(55-i) \quad (i=0, 1, 2, \dots, 39) \quad (2-10)$$

这样资料序列就变为 $f(-38), f(-37), \dots, f(78)$ 。

B. 交叉小波分析

交叉小波变换为新型的信号分析技术，用以诊断两个气候时间序列之间的时频对应关系。

如果两个时间序列分别是 $f(t)$ 和 $g(t)$ 。通过公式(2-6)计算得到 $W_f(a, b)$ 和 $W_g(a, b)$ 。小波交叉谱：

$$C_{fg} = \int \overline{W_f(a, b)} W_g(a, b) dt \quad (2-11)$$

并有

$$VAR(f) = \frac{1}{C_\psi} \int p_f^w(s) ds = \frac{1}{C_\psi} \iint |W_f(s, t)|^2 ds dt \quad (2-12)$$

$$COV(f, g) = \frac{1}{C_\psi} \int C_{fg}(s) ds = \frac{1}{C_\psi} \iint \overline{W_f(s, t)} W_g(s, t) ds dt \quad (2-13)$$

显然，交叉小波变换 $\overline{W_f(a, b)} W_g(a, b)$ 就是信号 $f(t)$ ， $g(t)$ 协方差的时间尺度分解，它在时间轴上的积分即为小波交叉谱。通常人们称 $\overline{W_f(a, b)} W_g(a, b)$ 为信号 $f(t)$ ， $g(t)$ 的交叉小波变换，在交叉小波变换系数

较大的区域，表明在时频尺度上，这两个函数具有较好的相关关系。

C.功率谱分析

通过计算样本落后自相关系数 $r(\tau)(\tau = 0, 1, 2, \dots, m)$, m 为最大步长，或最大落后时间长度。

求粗谱估计，利用近似积分中的梯形公式，最后公式可写成

$$S_l = \frac{1}{m} \left[r(0) + 2 \sum_{\tau=1}^{m-1} r(\tau) \cos \frac{\pi l}{m} \tau + r(m) \cos l\pi \right] \quad (2-14)$$

计算平滑功率谱，为消除粗谱估计的抽样误差，还要对粗谱估计处理，作为功率谱最后估计。平滑后公式：

$$S_l = \frac{B_l}{m} \left[r(0) + \sum_{\tau=1}^{m-1} r(\tau) \left(1 + \cos \frac{\pi l}{m} \right) \cos \frac{l\pi\tau}{m} \right] \quad (2-15)$$

式中 $l = 0, 1, \dots, m$. 其中 $B_l = \begin{cases} l & l=0, m \\ 0.5l & l=0, m \end{cases}$

作谱图，以波数 l 为横轴，平滑功率谱密度估计值 s_l 为纵坐标作图。波数 l 与周期系数为

$$\begin{cases} W = \frac{\pi l}{m} \\ T_l = \frac{2m}{l} \end{cases} \quad (2-16)$$

D.交叉谱分析

交叉谱分析是揭露两个时间序列在不同频率上相互关系的一种分析方法。

设存在两个时间函数 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ ，它们的交叉积，即协方差是反映它们的交叉能量，表示为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t)x_2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F_2(\omega)F_1(-\omega)d\omega \quad (2-17)$$

式中 $F_1(\omega)$ 及 $F_2(\omega)$ 分别为 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 的复谱。那么类似单个函数功率谱定义，定义两个时间函数交叉谱为

$$S_{12} = F_2(\omega)F_1(\omega) \quad (2-18)$$

当 $x_1(t) = x_2(t)$ 时，(2-18) 式与功率谱定义相同，交叉谱是复谱，可写为实部与虚部的形式为

$$S_{12}(\omega) = P_{12}(\omega) - iQ_{12}(\omega) \quad (2-19)$$

称实部谱为协谱，虚部谱为正交谱。

两时间序列的凝聚谱是

$$R_{11}^2(\omega) = \frac{P_{12}^2(\omega) + Q_{12}^2(\omega)}{P_{11}(\omega)P_{22}(\omega)} \quad (2-20)$$

凝聚谱反映两个时间函数在 ω 频率上的相关密切程度。 $P_{11}(\omega)$ 和 $P_{22}(\omega)$ 是每个时间序列的功率谱。

对于凝聚谱的检验，可以两个时间函数振动的凝聚期望为0的原则下，使用统计量

$$F = \frac{(\nu - 1)R_{12}^2}{1 - R_{12}^2} \quad (2-21)$$

进行检验，F 遵从分子自由度为2，分母自由度为2($\nu - 1$)的F分布。

$\nu = (2n - \frac{m}{2}) / m$ ， n 是时间长度， m 是最大落后长度。

3. 塔克拉玛干沙漠对流层中上部大气尘埃变化趋势

3.1 塔克拉玛干沙漠对流层中上部大气尘埃研究的介绍

沙漠及周边地区的风蚀沙尘是半球以至更大范围大气尘埃的重要来源。为了从数量上对此做出评价,不少工作曾致力于风蚀尘埃的运输和沉积过程的调查。对中亚沙尘暴的实地追踪指出,极强的上升气流可以把粒径 $2\sim 32\mu\text{m}$ 的尘埃颗粒抬升至 $2000\sim 3000\text{m}$ 的高空,但经过约 $1\ 000\text{km}$ 的运距,其中的75%便已降落下来。对撒哈拉大沙漠沙尘的专门跟踪表明,暴风卷起的细小尘埃颗粒完全可能上升到 6000m 以上的对流层中上部。Schutzetal在北美和撒哈拉沙漠所采的样品则证实,经过持续沉降的作用和充分混合,沙漠地区上空尘埃气溶胶颗粒以粒径 $<10\mu\text{m}$ 的为主,正是这部分颗粒、特别是粒径 $<5\mu\text{m}$ 的那些微细颗粒能够保持长途运输的动能,因而也最有半球或全球范围的意义。因此,要探求某沙漠地区对高层大气以至全球整体尘埃气溶胶的贡献,更多的注意力应该集中在高空的微小颗粒,而最理想的途径则是在较长时段对微粒尘埃数量变化进行跟踪研究。

位于我国新疆南部,面积 337600km^2 的塔克拉玛干沙漠($37^\circ\text{N}\sim 41^\circ\text{N}$, $78^\circ\text{E}\sim 88^\circ\text{E}$)是公认的中亚地区重要沙尘源地之一。而发育于该沙漠周边地区海拔在 4000m (北端)至 6000m (南端)之间的高山冰川,皆在尘埃的主要运输和沉降区内,是记录对流层中上部长期尘埃变化的良好载体。但并非任一冰川都能提供理想的大气相关记录,其原因在于其置身的山地环境,会带来大量的局地尘埃混入而对代表大尺度范围的大气尘埃冰芯记录造成“噪音”。因此,尽管在我国高海拔山区建立的冰芯气候和环境记录一般对尘埃信号均有所报道,但从大气层尘埃角度出发,定量探讨其时间变化、特别是按年率说明近代趋势的

文献还很少。

本文要讨论的西昆仑山崇测冰帽位于塔克拉玛干沙漠南缘(图1-1),冰芯钻点为海拔6530m的冰穹。高起的独立地形,使这里的冰芯保持“洁净”,全冰芯没有出现可以直接用肉眼观察到的、通常由局地输入粗颗粒物组成的污化面。而仪器检测出的微粒尺寸,基本位于 $10\mu\text{m}$ 以下的区间,表明冰芯有可能为大气尘埃变化调查提供样本。为此,我们在对该冰芯准确定年的基础之上,研究冰芯记录的近百年间尘埃沉积浓度变化,并通过对粒径季节性变化的特征解析,确定并剔除局地尘埃输入分量,建立1992年前60a的大气尘埃沉积通量记录。在可比时间尺度上讨论南疆地区与冰芯记录尘埃趋势的一致性,从机制上探讨“源”和“汇”的内在联系,从而说明冰芯记录对高海拔地区大气尘埃特征的时间趋势代表性。

3.2 冰芯检测和定年

崇测冰帽全长7km,上游为两座相邻的冰穹(图2-1)。海拔为6530m的主峰冰穹顶部平坦,位于冰分水岭处。1992年9月20日至10月4日用电动机械钻机在这里钻取了长度在16~48.2m之间的6支冰芯,其中最长的一支抵达基岩。

一支18.70m的冰芯用于本文研究。从冰芯上切下的小段样品,外层用于 d^{18}O 的检测,而内部则用于主要阴、阳离子, pH值和微粒浓度的分析。在余量较少的情况下,几个样品的所剩常常混合在一起,以达到测试 ^3H 时50mL的样量要求。微粒浓度由微粒计数仪(Coulter Counter Multisizer II)确定,检测提供在不同尺寸谱道的微粒数量和粒径分布。由于使用 $30\mu\text{m}$ 的测柱,粒径在 $0.66\sim 21.4\mu\text{m}$ 的微粒分布均可获得。

通常, d^{18}O 的测定结果被用于冰芯定年。但是,崇测冰帽主峰冰穹年积累量过低,小于 $200\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 这一保持 d^{18}O 季节特征的下限标

准，剖面无法显现确定的季节变化，不能作为定年标准。所幸，冰芯中粒径在 $0.66\sim 1.33\mu\text{m}$ 区间的微粒浓度剖面，显示出清晰的季节变化韵律。以此为基础，借助于与陆源尘埃在化学性质上紧密结合的 Ca^{2+} 剖面，已对冰芯成功地进行了定年。此结果得到 ^3H 检测剖面记录的1962年—1963年核爆参考层位的交叉检验，截至冰芯钻探的1992年，18.7m冰芯覆盖记录90a(图2-2)，定年误差 $<2\text{a}$ 。对应冰芯深度的基准年代结果如表2。

表2 对应冰芯深度的基准年代

Table2 The normal years of different depths

深度 / m	年代 / AD	深度 / m	年代 / AD
0.47	1990	11.48	1940
3.34	1980	13.59	1930
5.45	1970	15.84	1920
7.43	1960	17.66	1910
9.46	1950	18.66	1903

3.3 微粒浓度及分析

3.3.1 相邻钻点不可溶颗粒特征的强烈反差

1987年我们曾在海拔6374 m的次峰B13(图2-1)钻取了一支10.30m长的冰芯，提供了约30a记录的这支冰芯，包含了8层肉眼可以观察到的、富含粗颗粒物质的污化面。而在本文将要重点讨论的记录年代达90a的主峰冰穹冰芯中，却没有发现一层污化面。

两冰穹直线距离不过2km，高差为200m左右，是什么造成了如此强烈的反差，虽然地理位置的差别可能引起冰芯中不可溶杂质含量上的差异，但是仔细分析起来，微气象条件的制约可能是主因。从图2可以看出，在两个冰穹之间存在一块洼地，由此形成马鞍型地形。野外考察中我们发现，沿该鞍状地形的洼地走向盛行以NE~SW为主的

局地气流, 宛若一道天然屏障, 它有效地阻挡了大量尺寸较大、散布在近地层粗颗粒物向高地的搬运。对于分别位于冰川次峰东、南两个方向(图2-1), 堆积了大量风化物质的裸露基岩, 这种作用可能更为突出。当夏季消融将风化物质从积雪下暴露出来时, 强劲的风可以将它们轻易地送到毗邻的次峰, 但由于盛行风的屏障作用, 抵达主峰的难度大大增加。加上促进表面尘埃物质聚集的表层积雪融化冻结过程在较低海拔更易发生, 就更加大了二者在污化面上显现的差异。

3.3.2 尘埃浓度剖面 and 尘埃沉积量计算

图2-2显示在18.7m冰芯中检测出的90a间微粒总浓度剖面, 高于平均背景值($\approx 0.5 \times 10^5 \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$)两个量级以上的高浓度区间显示出介于 $1 \times 10^6 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$ 至 $5 \times 10^6 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$ 之间的若干峰值。但从时间序列来看, 浓度表现出总体下降的趋势, 粗略划分出3个阶段: 1930年以前(至1903年) 平均约为 $2.1 \times 10^6 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$; 1931-1960年为 $1.1 \times 10^6 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$; 后30a(1959年—1992年)为 $7.0 \times 10^5 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。几个明显的变化区间出现在1900年代早期, 1910年代, 1920年代后期和1940年代早期, 它们分别以约 $2.5 \times 10^6 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $2.7 \times 10^6 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $2.5 \times 10^6 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $1.5 \times 10^6 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的高浓度为特征, 而1970年代则表现出相对较低的浓度($5 \times 10^5 \cdot \text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$)。就年份来看, 突出的高尘埃浓度出现于1906, 1915, 1919和1943年。

微粒计数仪给出的粒径谱道分布实际表明微粒的体积分布, 使用同时测出的微粒总数量分布, 便能够计算出测样的重量浓度(W)。由于在实验中对每个测样获得2个平均粒径(D1和D2), 在颗粒球形假设前提下我们使用下式计算:

$$W = N \cdot \rho \cdot 4\pi [(D1+D2)/(2 \cdot 2)]^3 / 3 \quad (3-1)$$

(3-1)式中: N为该样的总浓度($\text{粒} \cdot \text{mL}^{-1}$); D1和D2以 μm 为单位; ρ 为尘埃比重($\rho = 2 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); W为重量浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。结果中的最大值为

955mg·kg⁻¹，出现在18.39m深度，对应于1905年；最小值为1 mg·kg⁻¹，出现在6.69m处，对应1963年。由于1909—1930年间平均粒径资料的缺失，数量浓度剖面上看到的几个高峰值没有显示出相应的重量浓度值。计算中可以看出，数量浓度和重量浓度显示的变化有时会显示出一定的差异，这可能主要是受到各样品所含近源输入粗颗粒物多少的影响。

应用图3-1右轴显示的年代划分，各年尘埃年沉积量(λ)可以通过下式标出：

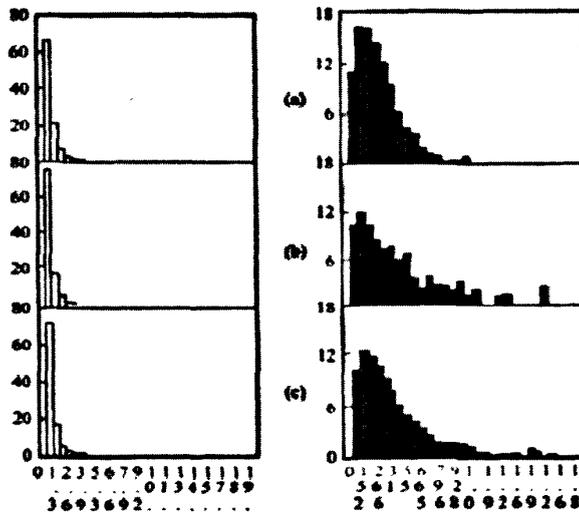
$$\lambda = \sum SW_i \cdot h_i \quad (3-2)$$

式中： i 为年层中的测样排序； h_i 为相应的厚度。图3-2所示为1992年以前60a间崇测冰芯记录的尘埃年沉积量(以 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 为单位)的时间变化序列，计算得到60a间的年沉积量平均值为 $1106\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。该值显然应该被看作下界，因为积雪的风蚀一定会使降雪积累量小于实际降水量。

3.3.3 远程尘埃分量和大气尘埃年沉积通量

如前所述，崇测冰帽主峰冰雪记录中反映的主要应该是远程，即中等尺度范围(地区性)或者说是更大范围输入的尘埃。但是冰川周围地区也不可避免地会向冰川表层输入颗粒物，应该将这部分局地输入的尘埃从总量中剔除，以对大气分量进行更精确的估算。仔细分析微粒计数仪给出的两组数据，即微粒数量和粒径在 $0.66\sim 21.2\mu\text{m}$ 之间各谱道的分布，发现所有测样在数量分布上无明显差异，基本集中在 $<5.3\mu\text{m}$ 的狭窄区间(图3-1左栏)；而冬季和夏季(准确说应该是冷季和暖季)测样在粒径分布(图3-1右栏)上表现出显著区别。从典型测样微粒百分比分布图可以看出，尽管二者的峰值都位于 $1.32\sim 1.98\mu\text{m}$ 的区间，且左端部分分布十分相似，但是在 $<5.30\mu\text{m}$ 区间上，冬季测样数值却明显高于夏季测样。引人注目的是，在 $5.30\sim 5.96\mu\text{m}$ 区间二者

开始出现反转。在 $> 6.63\mu\text{m}$ 的区间夏季测样完全占据上风,在 $>10.0\mu\text{m}$ 的区间还表现出在冬季测样中空缺的较粗颗粒的零散分布。这些现象启示我们: 1)崇测冰帽主峰常年持续接受粒径 $<5.30\mu\text{m}$ 的尘埃沉积,其中更以 $1.32\sim 1.98\mu\text{m}$ 之间的颗粒为主; 2)钻点冬季接受的尘埃沉积粒径基本 $<10\mu\text{m}$,它们应该是由长距离输入的尘埃组成,因为局地的风化物质这时正被积雪所覆盖; 3)当夏季积雪融化时,钻点能够得到少量来自当地的尘埃补充,其粒径主要位于 $>6.63\mu\text{m}$;粗大颗粒物质尽管数量稀少,分布零散,但因占据较大的体积,对重量分布常会发生举足轻重的影响。



粗颗粒物分量在总沉积量中的比例加以估算。

由于在不分季节的分布中，粒径 $>6.63\mu\text{m}$ 的微粒所占的总百分比为20.22%；而在冬季测样中它们只占9.8，样品总数为8个，约为总数量的1/3，因此有：

$$D_{\text{大颗粒局地输入量}} = 20.22\% \times 2/3 - 9.8\% / 3 \approx 7\% \quad (3-3)$$

$$D_{\text{长距离输入分量}} = 100\% - 17\% = 83\% \quad (3-4)$$

显然，局地大颗粒输入量应该被视为该量的上界，因为剔除冬季影响时使用的是冬季样品而不是总量的相应值。

采用式(3-4)计算得出的长距离输送值正是大气分量，亦即大气通量沉积在尘埃总量中所占的百分比。假定该比例适于资料完整的1930年后的整个阶段，可得到另一组数据：大气尘埃沉积的平均重量浓度为 $4.15 \sim 125\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；西昆仑山地区海拔6000m以上高空尘埃大气平均年沉积通量为 $913\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

3.3.4 大气尘埃的历史趋势

根据冰芯记录中的尘埃年沉积量绘出图5，展现了1992年以前约60 a间的尘埃沉积量的变化趋势。尽管其间呈现出高低起伏变化，但是总体下降的趋势亦很明显。趋势线表明，每10a下降梯度为 $-150\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。假定冰芯记录与大气状况趋势一致，则其中大气尘埃含量的每10a下降速率约为 $-124\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

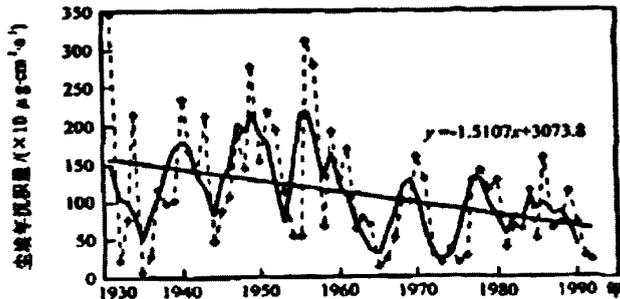


图3-2 1992年之前约60 a间尘埃年沉积量的变化

Fig3-2 Dust deposit rate for the past 60 years before 1992

该研究的结果与王宁练的《青藏高原北部马兰冰芯记录所揭示的近200年来沙尘天气发生频率变化趋势》的结果基本一致.马兰冰帽(35°50'N,90°40'E)位于青藏高原北部的昆仑山,最高海拔高程为6056m.马兰冰芯距离中国沙尘天气的多发地塔克拉玛干沙漠较近,而且位于其下风方向.从而马兰冰川与崇测冰川具有相似的地理位置和相同的气候条件.王宁练对马兰冰芯的研究结果揭示出近200年来马兰冰芯中污化层厚度比率呈降低趋势,指示了这一时期沙尘天气发生频率呈减少趋势。这就进一步验证了崇测冰芯的研究结果。

4. 塔克拉玛干沙漠对流层中上部大气尘埃 变化趋势的形成原因

塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量在近半个多世纪以来呈现出明显的下降趋势，是受多种因素综合作用的结果。以下便从该地区的水汽来源，大气环流，北半球气温与西风指数的关系，降水量与沙尘暴的关系，沙尘暴与冰芯中的尘埃记录的关系，冰芯中的尘埃记录与积累量之间的关系等方面依次来分析影响塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量在近半个多世纪以来呈现出明显下降趋势的真正原因。

4.1 水汽来源

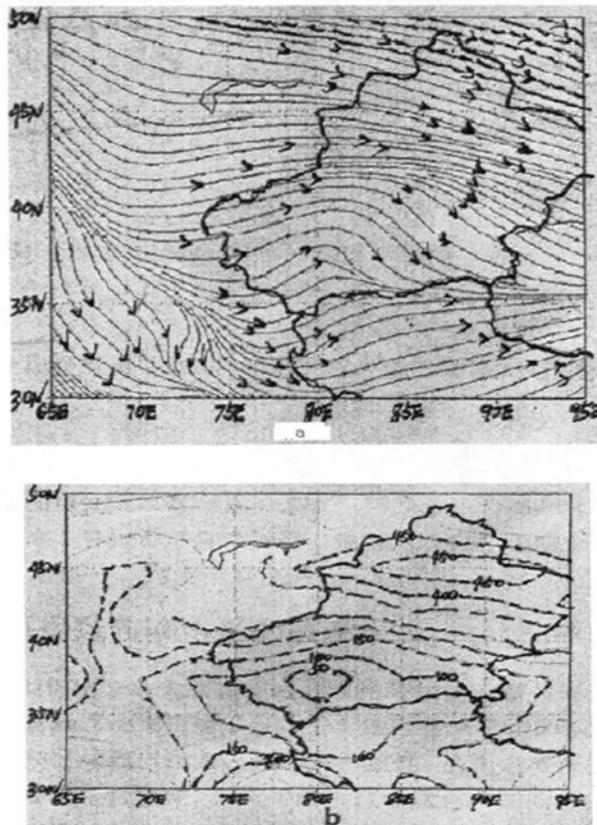


图4-1多年平均5-10月整层大气水汽输送流场(a)和水汽输送通量场(b)

图4-1(a)为多年平均5~10月整层大气水汽输送流场,由图4-1(a)可看出水汽的输送方向。就多年平均情况而言,塔克拉玛干沙漠周边地区主要是来自西风带的水汽输送。图4-1(b)多年平均5~10月整层大气水汽输送通量场,在青藏高原的西北部从巴基斯坦到我国南疆有一条水汽输送的低值带,其中在我国南疆地区有一个低值中心。这样,在青藏高原北部和北侧就连成了大范围的水汽输送的低值带。由此往北,由于西风带和北方水汽输送,北疆、内蒙古和蒙古国为相对的水汽输送高值区,并且向东延伸。还有理论上讲,全球气温升高,海洋上蒸发加大,水汽输送量应该加大。

4.2 北半球气温与西风指数的关系

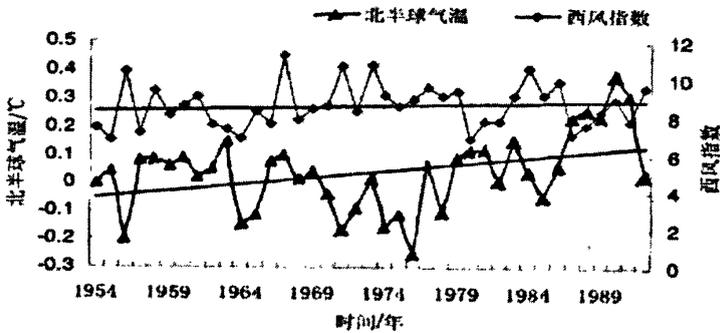


图4-2 1954-1992年夏半年(5-10月)北半球气温与西风指数时间序列及均势

图4-2是1954-1992年夏半年(5-10月)北半球气温和区域西风指数时间序列及其趋势。由图可知北半球气温升高,西风指数也升高。这说明在全球变暖的趋势下,气温升高,导致全球环流加强。现有的研究也说明全球加速变暖,西风指数确实也持续加强,与文中结论一致。

4.3 西风指数与降水量的关系

参考文献指出全球大副度变暖,水循环加快,增强降水和蒸发。西风指数的加强,水汽输送加大,对于内陆干旱地区带来更多的水汽。图4-3可看出和田地区降水量和区域西风指数在趋势有一致性。从图

中可得出在全球变暖的背景下，西风指数有加强的趋势。西风带的水汽输送为中国西北大部分地区提供了基本的水汽来源，西风变化对其水汽输送通量变化有直接的作用，进而对塔克拉玛干荒漠周边地区的降水产生影响。

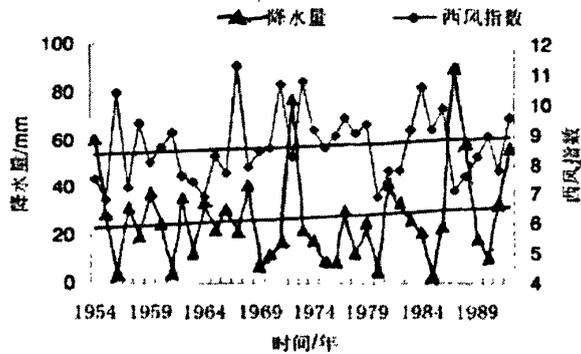


图 4-3 1954-1992 年夏半年(5-10 月)和田地区降水量和区域西风指数时间序列及趋势线

塔克拉玛干沙漠周边的气象观测站多年的观测结果也进一步验证了以上的结果。

和田观测站和于田观测站是塔克拉玛干沙漠中的两个非常重要观测站。图4-4是根据和田观测站所测的1942年至1993年的降水绘制的年平均降水示意图；图4-5则是根据于田观测站测得的1956年至1992年的降水绘制的年平均降水示意图。

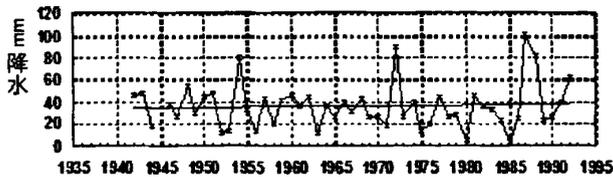


图4-4 和田1942年至1993年的年平均降水图示
波浪线为年平均降水的平滑线
直线为逐年降水变化趋势线

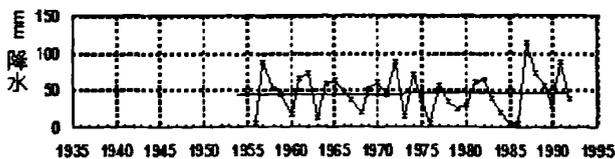


图4-5 于田观测站1956年至1992年的年平均降水量
波浪线为年平均降水的平滑曲线
直线为逐年降水的变化趋势线

从两个观测站的降水资料可以得出所研究区域的年平均降水量是在逐年增加，其变化趋势是上升的。这个结果与所有其它对这个区域进行研究的成果是相一致的。由此可以看出该区域的气候变化总体趋势是由暖干向暖湿方向发展。

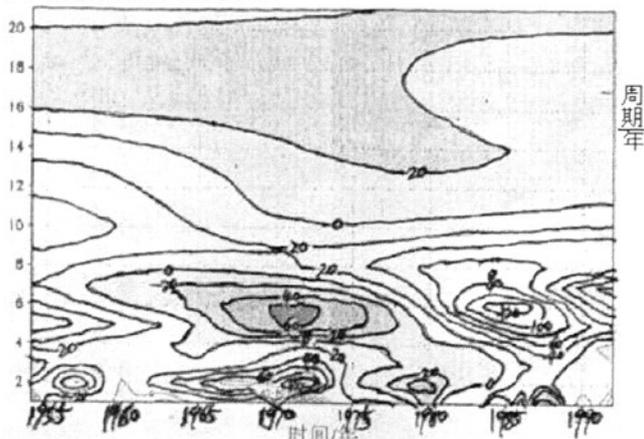


图4-6 1954-1992年西风指数和田地区夏半年(5-10)降水的交叉小波变换

图4-6反映了西风指数和田地区夏半年(6-10月)降水的相关变化。对应2-4a周期尺度的振荡，1975-1985年，两列信号显出正相关关系，振荡中心的强度在80年代初较大；在4-8a周期尺度的振荡，1960-1980年两列信号显出正相关关系；在14-21a周期尺度的振荡，全时域上两列信号显出正相关关系。

图4-7是交叉小波功率谱，从图中可看出：通过交叉小波功率谱分析得到2a、3.5a准5a和准18a的主周期尺度。现在剔除小周期的干扰，选取大周期10-20a尺度，看看西风指数与和田地区夏半年(5-10月)降水在大周期尺度上的详细关系，从交叉小波变换图上看呈正相关。通过对夏半年(5-10月)西风指数与和田地区降水分别进行小波分解，得到在准18a周期尺度的小波系数变化过程图，发现存在很好的正相关(见图4-8)。从中证明，西风加强与减弱对降水的多少有直接影响。

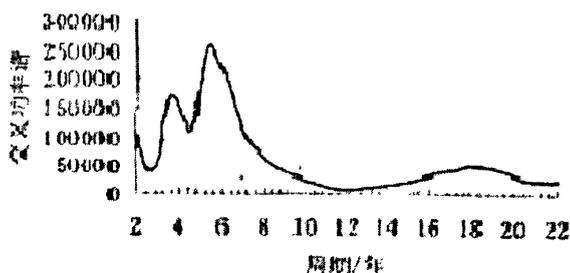


图4-7 夏半年(5-10月)西风指数与和田地区降水的交叉小波功率谱

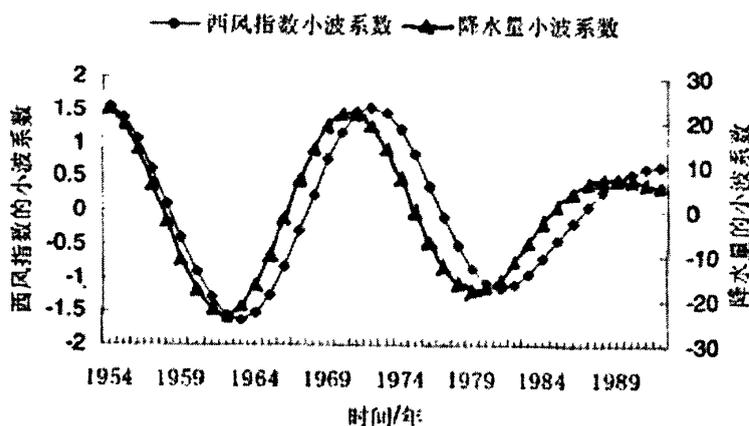


图4-8 西风指数和降水量小波系数变化过程图

4.4 降水量与沙尘暴的关系

新疆塔克拉玛干荒漠地区的降水量增加,有许多参考文献可以证明。关于沙尘暴变化,从前半部分的论述可得,新疆塔克拉玛干荒漠地区对流层中上部的凝结核在近半个多世纪以来呈现出下降的趋势。

对于降水量与沙尘暴之间的关系,参考文献指出新疆沙尘暴以春季沙尘暴为主,夏半年降水集中了全年降水的大部分,由于资料所限,用同年和田地区春季沙尘暴和夏半年降水的资料进行比较,分别对它们作周期分析。结果是夏半年降水存在2a、准5.5a和准16a的主周期。发现和地区夏半年降水与春季沙尘暴在周期上相似。说明存在降水增加导致沙尘暴减少的机制,即降水量大,从植被增加和土壤含水量增加两方面阻碍了沙尘暴的发生。

4.5 沙尘暴与冰芯中的尘埃记录的关系

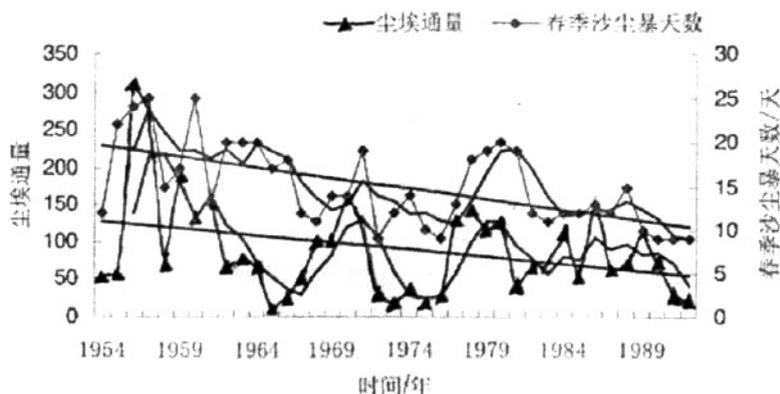


图4-9 和田地区春季沙尘暴天数和尘埃通量和趋势图(直线为三年平滑)

图4-9表明和田地区的沙尘暴天数与冰芯中的尘埃记录有一致的趋势，两者相关系数达到0.51。经过三年平滑，发现两者平滑线很相似，存在某种尺度周期，所以，对它们进行交叉小波分析，得到它们之间详细的相关关系。

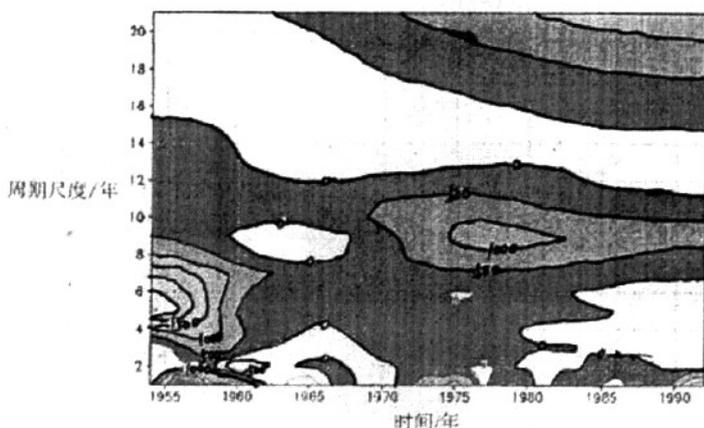


图4-10 1954—1992年和田地区春季沙尘暴天数和尘埃通量的交叉小波变换

图4-10反映了和田地区春季沙尘暴天数和尘埃通量的相关变化。对应2~4a周期尺度的振荡，1957~1971年，1980~1992年，两列信号显出负相关关系；在8~10a周期尺度的振荡，1960~1968年两列信号显出负相关关系；在12~16a周期尺度的振荡，全时域上两列信号

显出负相关关系。除上述以外，其他周期尺度和时域都呈现正相关。

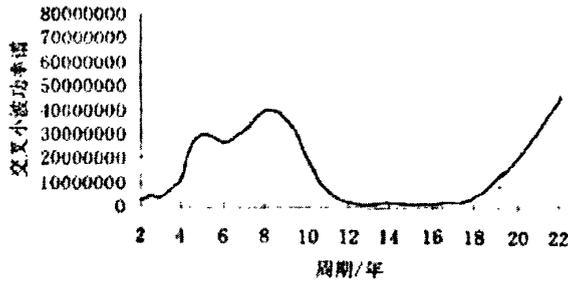


图4-11 1954—1992年和田地区春季沙尘暴天数和尘埃通量的交叉小波功率谱

从图4-11中可看出：通过交叉小波功率谱分析得到2.6a、准5.5a、8a和准22a的主周期尺度。我们发现除了主周期尺度中在整个时域都有一点负相关外，其余部分都正相关。所以说低海拔和田地区春季（3-5月）沙尘暴和高海拔冰芯中尘埃通量在机制上存在联系，低海拔和田地区春季沙尘暴把细小尘埃带到六七千米高空，形成塔克拉玛干荒漠周边高空的沙尘性气溶胶，参考文献表明整个中国西部大气尘埃年内分布极不均匀，高峰期位于2月中旬至5月下旬，而最高峰发生在4月中旬至5月下旬这一段时间。有鉴于此，同时考虑到夏季是西昆仑山的主要降水季节，然后通过降水沉积到冰川上。综上所述，可知这种尘埃来自低海拔的塔克拉玛干地区。

4.6 冰芯中的尘埃记录与积累量之间的关系

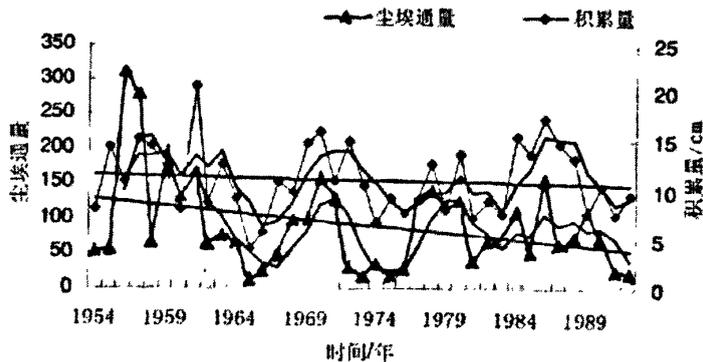


图4-12 1954—1999年崇测冰芯中的尘埃通量和积累量及趋势线(曲线为三年平滑)

图4-12表明冰芯中的尘埃记录与积累量有一致的趋势，两者相关系数达到0.43。经过三年平滑，发现两者平滑线很相似，存在一定尺度周期变化。

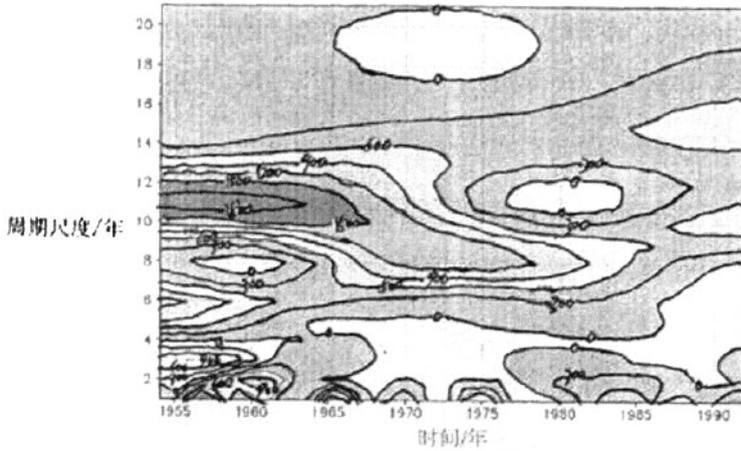


图4-13 1954—1999年崇测冰芯中的尘埃通量和积累量的交叉小波变换

图4-13反映了1954-1999年崇测冰芯中的尘埃通量和积累量的相关变化。对应2~4a周期尺度的振荡，1954~1963年，1964~1977年，1984~1990年，两列信号显出负相关关系；在6~8a周期尺度上，1958~1963年呈负相关；在12~14a周期尺度的振荡，1976~1985年两列信号显出负相关关系；在16~20a周期尺度的振荡，1965~1978年两列信号显出负相关关系。除上述以外，其它周期尺度和时域都呈现正相关。

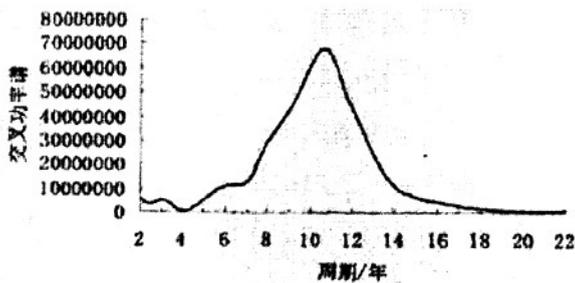


图4-14 1954—1999年崇测冰芯中的尘埃通量和积累量的交叉小波功率谱

从图4-14中可看出：通过交叉小波功率分析得到2a、3a和准11a的主周期尺度。其实，图4-10通过三年平滑，留下的是准11a周期。从交叉小波变换图上可看出，呈正相关的处于绝对优势。所以尘埃记录与积累量相一致。在机理上讲尘埃记录与积累量是有关系的，在崇测冰帽上的尘埃主要通过降水沉降到冰川上，尘埃在降水过程中充当凝结核，以湿沉积的方式沉降。

5. 讨论和结论

施雅风等在分析近期我国西北地区气候的变化特征时指出，在全球气候变暖的背景下，新疆以塔克拉玛干沙漠为中心的干旱、半干旱地区沙尘天气出现了明显的下降趋势。

从塔克拉玛干沙漠对流层中上部大气尘埃呈现明显下降趋势的形成原因分析可得以下结论：

第一、属于内陆干旱区的塔克拉玛干沙漠，水汽来源主要是来自西风带的水汽输送。

第二、随着全球变暖，西风指数升高。从而得出了塔克拉玛干荒漠周边大气环流确实得到加强。

第三、西风指数升高，与塔克拉玛干荒漠周边低海拔地区降水增加在趋势上和周期上有一致性。说明西风加强，从而使伴随西风而来的水汽量增加了，进而造成内陆地区降水增加。

第四、降水的增多，塔克拉玛干荒漠周边低海拔地区的沙尘暴减少。说明存在降水增加导致沙尘暴减少的机制，即降水量增大，从植被增加和土壤含水量增加两方面就阻碍了沙尘暴的发生。

第五、沙尘暴减少，塔克拉玛干荒漠周边高海拔地区冰芯中尘埃记录就减少。通过分析两者存在主要尺度上大部分存在正相关，所以说在于塔克拉玛干荒漠周边低海拔地区春季沙尘暴和高海拔冰芯中尘埃通量在机制上存在联系，塔克拉玛干荒漠低海拔地区春季沙尘暴把细小尘埃带到六七千米高空，形成塔克拉玛干荒漠周边高空的沙尘气溶胶，有文献表明整个中国西部大气尘埃年内分布极不均匀，高峰期位于2月中旬至5月下旬，而最高峰发生在4月中旬至5月下旬这一段时间。有鉴于此，同时考虑到夏季是西昆仑山的主要降水季节，然后通过降水沉积到冰川上。综上所述，可知这种尘埃主要是来自于低海

拔的塔克拉玛干地区。

第六、塔克拉玛干荒漠周边高海拔地区冰芯中尘埃记录与积累量同时减少。通过分析两者存在主要尺度上有很高的正相关，在机理上讲尘埃记录与积累量是有关系的，在崇测冰帽上的尘埃主要通过降水沉降到冰川上，尘埃在降水过程中充当凝结核，以湿沉积的方式沉降。所以尘埃记录与积累量相一致。

机理阐述：由于全球气候变暖，由海洋蒸发并传输到大陆的水汽增加，干旱和半干旱地区不仅获得了较多的降水，而且得到更多的来自高山冰川融水的灌溉。这种逐渐变得“暖湿”的环境无疑促进了植被发育，缓解了沙漠化的进程。加上大风天气减少，沙尘暴日数下降，覆盖和影响范围缩小，使沙漠和干旱地区作为大气尘埃“源”的功能大打折扣。需要强调的是，上述结论基本是根据干旱、半干旱地区周边的观测资料得出的，或者说它们是在低海拔地区的观察分析结果。而本文通过对海拔6530m的冰芯分析，给出的则是具有中等尺度范围(地区性)、以至更大尺度范围意义的对流层中上部大气尘埃的连续大气尘埃资料。二者除了数据趋势上的一致，还启发我们思考它们在机制上的有机联系(图5-1)。事实上，被卷入并飘浮在天空的尘埃会进一步受到“暖湿”气候的“剥夺”，其一是天空增多的水汽会增加尘埃的重量，促使颗粒向地面回落；其二是增多的降雨会将浮尘从云中、云下清除掉。在变弱的风力作用下，只能会使可能上升到上一层大气的尘埃颗粒进一步减少。最终造成对流层中上部能够参与湿沉积过程尘埃总量显现总体下降的趋势。

从另一重意义上讲，位于对流层中上部的大气尘埃记录与干旱地区的一致性，也间接表明“源”和“汇”的内在关系，尽管其中的联系并不是那么直接、那么简单。

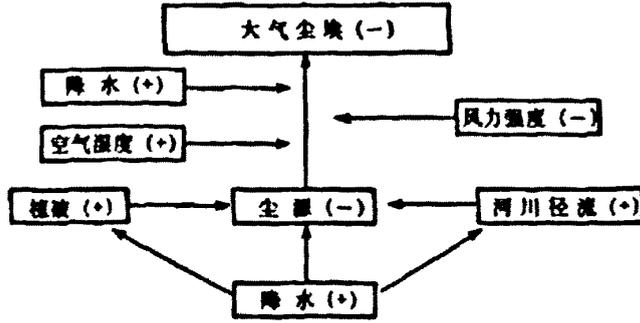


图5-1 降水增多引起大气中尘埃减少的关系图

Fig5-1 The relationship between the increasing precipitation and the decreasing atmospheric dust burden

综上所述，崇测冰帽冰芯向我们展示了过去近百年期间尘埃沉积的年代记录，剔除当地输入的部分，得到中长尺度范围的大气尘埃沉积通量。它可反映塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部的大气尘埃通量半个多世纪以来变化趋势。

冰芯记录覆盖的90a表现出尘埃持续下降的总趋势，大体可以分为3个阶段，即1930年之前，1930-1960年和1960年之后。尘埃浓度的降低是量级上的，尽管其间不乏起伏，也表现出一些较为突出的阶段。根据后60a资料建立的大气尘埃沉积通量，其平均值为 $913\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，大气尘埃含量的每10a下降速率为 $-124\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

参考文献

- [1] 李江风.塔克拉玛干沙漠和周边山区天气气候.北京:科学出版社, 2003.1-380.
- [2] 王旭, 马禹, 陈洪武等.南疆沙尘暴气候特征分析.中国沙漠, 2003, 23(2):147-151.
- [3] 袁玉江, 何清, 李江风等.塔克拉玛干地区近40年来的冷暖变化.中国沙漠, 1998, 18(2):118-122.
- [4] 袁玉江, 李江风, 叶玮.塔克拉玛干地区近40年来的干湿变化.干旱区地理, 1998, 21(1):18-24.
- [5] 马志福, 谭芳, 侯勤东.塔克拉玛干沙漠地区温压湿分布规律研究.中国沙漠, 2000, 20(3):289-292.
- [6] 杨莲梅.塔克拉玛干地区气候变化对全球变暖的响应.中国沙漠, 2003, 23(5):497-502.
- [7] 王旭, 王铁, 马禹.新疆对流层中上部水汽输送特征研究.新疆气象, 2001, 24(2):1-3.
- [8] 施雅风, 刘时银.中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估.科学通报, 2000, 45(4):434-438.
- [9] 钱云, 符淙斌, 王淑瑜.沙尘气溶胶与气候变化.地球科学进展, 1999, 14(4):391-394.
- [10] 何清, 杨青, 李红军.新疆40a来的气温、降水和沙尘天气变化.冰川冻土, 2003, 25(4):423-427.
- [11] 胡汝骥, 马虹, 樊自立, 等.新疆水资源对气候变化的响应.自然资源学报, 2002, 17(1):22-27.
- [12] 王绍武, 蔡静宁, 慕巧珍, 等.中国西部年降水量的气候变化.自然资源学报, 2002, 17(4):415-422.
- [13] 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 等.中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望.冰川冻土, 2003, 25(2):135-142.
- [14] 王宁练.青藏高原北部马兰冰芯记录所揭示的近200年来沙尘天气发生频率变化趋势.科学通报, 2006, 51(6):724-729.
- [15] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨.冰川冻土, 2002, 24(3):219-226.
- [16] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等.新疆气候由向暖湿转变的信号及影响.干旱区地理, 2002, 25(3):194-200.
- [17] 冯文, 王可丽, 江灏.夏季区域西风指数对中国西北地区水汽场特征影响的对比分析.高原气象, 2004, 23(2):271-275.
- [18] 龚道溢, 王绍武.冬季西风环流指数的变率及其与北半球温度变化的关系研究.热带气象学报, 2002, 18(2):104-110.
- [19] 李永能, 杨阳, 韩建康, 谢自楚, 中尾正义, 东久美子.西昆仑山冰芯记录指示的塔克

- 拉玛干沙漠南缘对流层中上部近百年大气尘埃变化趋势.冰川冻土, 2006, 28(6): 873-878.
- [20] 刘时银(1996), 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 自然地理学冰川学.高亚洲冰川物质平衡与冰川变化研究.中国科学院博士论文.
- [21] 施雅风主编.中国冰川与环境[M].北京: 科学出版社, 2000: 131
- [22] Oerlemsn J. Quantifying global warming from the of glaciers. Science, 1994, 264: 243~ 245.
- [23] 王宁练, 姚檀栋, 20世纪全球变暖的冰冻圈证据, 地球科学进展, 2001, 16(1): 98-105.
- [24] 施雅风, 刘时银.中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估.科学通报, 2000, 45(4): 434-438.
- [25] 张寅生, 康尔泗.能量平衡与冰面微气[A].施雅风.中国冰川与环境[C].北京:科学出版社, 2000.78-100.
- [26] 段克勤, 姚檀栋, 蒲健辰, 孙维贞. 喜马拉雅山达索普冰川积累量变化及其对青藏高原温度的响应, 冰川冻土, 2001, 23(2):119~ 125.
- [27] 沈永平, 王顺德塔里木盆地冰川及水资源变化研究新进展.冰川冻土, 2002, 24(6):
- [28] Llibouty, L.(1973) Multivariate statistical analysis of glacier annual balances. J. Glaciology, 13(69), 317-392.
- [29] 韩建康, 中尾正义, 东久美子, 张万昌, 和田熏, 朱丰年.西昆仑山崇测冰帽(6532m a. s. 1.)粒雪/冰芯的微细颗粒定年.
- [30] Ageta, Y, W. J. Zhang and M. Nakawo. 1989. Mass balance studies on Chongce Ice Cap in the West Kunlun Mountains. Bulletin of Glacier Research, 6, 43-50.
- [31] 马晓波, 施雅风, 沈永平, 杨保.西北地区近代及历史时期气候变化趋势分析.冰川冻土, 2003, 25(6): 672-675.
- [32] Qin Yu, Zhao Chunsheng. 秦瑜, 赵春生. 大气化学基础[M].北京: 气象出版社, 2003. 95—128.
- [33] 谢力, 温刚, 符淙斌.中国植被覆盖季节变化和空间分布对气候的响应——多年平均结果.气象学报, 2002, 60(2):181-188.
- [34] Yu Yaxun, Wang Jinsong, Li Qingyan. Spatial and Temporal Distribution of Water Vapor and Its Variation Trend in Atmosphere over Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 149—156. 俞亚勋, 王劲松, 李青燕.西北地区空气中水汽时空分布及变化趋势分析.冰川冻土, 2003, 25(4): 149—156.
- [35] 施雅风主编.中国冰川与环境[M].北京: 科学出版社, 2000: 131.
- [36] 董飞, 刘大有, 贺大良.风沙运动的研究进展和发展趋势.力学进展, 1995, 25(3)
- [37] Qin Yu, Zhao Chunsheng. 秦瑜, 赵春生.大气化学基础[M].北京: 气象出版社, 2003.95—128

- [38] Zhang Jiabao, Climate Change in Xinjiang [Z].Urumqi, Xinjiang, 2002, Manuscript.[张家宝, 新疆气候变化[Z].新疆乌鲁木齐, 2002, 待刊稿本]
- [39] 俞亚勋, 王劲松, 李青燕.西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析.冰川冻土, 2003, 25(2):149 ~ 156.
- [40] 钱正安, 宋敏红, 李万元.近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J].中国沙漠, 2002, 22(2):106-111.
- [41] 赵光平, 王连喜, 杨淑萍.宁夏区域性强沙尘暴短期预报系统[J].中国沙漠, 2001, 21(2):175-181.
- [42] 刘志丽, 马建文, 张仁健, 王志刚, 哈斯巴干, 李启青.利用遥感综合分析西风引导气流与地形对沙尘运移路径的影响.中国沙漠, 2004, 24, (3): 330 ~ 334.
- [43] 专家发现土地荒漠化并非沙尘暴形成罪魁祸首, 北京科技报, 2004-8-9
- [44] You Laiguang, Ma Peimin, Chen Junhan.et al.A case study of the aerosol characteristics in the lower troposphere during a dust storm event[J].Quarterly Journal of Applied Meteorology,1991,2(1):13-21.[游来光,马培民,陈君寒,等.沙尘暴天气下大气中沙尘粒子空间分布特点及其微结构[J].应用气象学报,1991,2(1):13-21.]
- [45] Calson T N, Prespero J M. The large scale movement of Sahara air outbreaks over the north equatorial Atlantic [J].J. A.M. 1972, 11:283-297.
- [46] Schutz L, Sebert M. Mineral aerosols and source identification [J].J. Aerosol Sci., 1987, 18(1):1-10.
- [47] Thompson L G, Thompson E M, Davis M E, et al. Holocene-late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai Tibetan Plateau[J].Science,1989,246,474-477.
- [48] Yao Tandong, Shi Yafeng,Thompson L G,et al.The Holocene climatic changes in Mt. Qilian as recorded in Dunde ice core [M]// Shi Yafeng, Kong Zhaochen. The Climatic and Environment in China during the Holocene Megathermal. Beijing: Ocean Press,1992:206-211.[姚檀栋,施雅风,Thompson L G,等.祁连山敦德冰芯记录的全新世气候变化[M]//施雅风,孔昭宸.中国全新世大暖期气候与环境.北京:海洋出版社,1992:206-211.]
- [49] Kang Shichang, Qin Dahe, Yao Tandong, et al. Monsoon and dust signals recorded in Dasuopu Glacier, Tibetan Plateau [J] Journal of Glaciology,2000,46(153): 222-226.
- [50] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B et al. Stable isotope glaciology[J].Meddelelserom Granland,1973,197(2):1-53.
- [51] Han Jiankang, Nakawo M, Goto-Azuma K, et al. Dating of a shallow ice core from Chongce Ice Cap using microparticle content[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2005,27(6): 846-852.[韩建康,中尾正义,东久美子,等.基于微粒变化对崇测冰帽浅层冰芯的定年结果

- [J].冰川冻土,2005,27(6):846-852.]
- [52] Nakawo M, Goto Azuma K, Han Jiankang. Decreasing trend of precipitation in the last 30 years at a mountain site near the Taklamakan Desert, western China [J]. RIKEN Review, 1994, 5:11-12.
- [53] Wagenbach D, Klaus G. The mineral dust record in a high altitude Alpine glacier (Colle Gnifetti, Swiss Alps) [M] Leinen M, Sarnt hein M. Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport. Kluwer Academic Publishers, 1989: 543-564.
- [54] Davidson C I. Mechanisms of wet and dry deposition of atmospheric contaminants to snow surfaces [M] // Oeschger H, Langway J r. C C. The Environmental Records in Glaciers and Ice Sheets. New York: John Wiley and Sons, 1989: 29-51.
- [55] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm dry to warm humid in North west China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3):219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3):219-226.]

附 录

读研期间发表的论文

1. 第一作者，西昆仑山冰芯记录指示的塔克拉玛干沙漠南缘对流层中上部近百年大气尘埃变化趋势. 冰川冻土, 2006, 12
2. 第二作者, Persisting Declination of Middle-Upper Troposphere Dust Burden for About 100 Years over the South of Taklimakan Desert. Journal of Arid Environment, 2008, 6

致 谢

“光阴似箭，岁月如梭”，三年的研究生生活一转眼就过去了，回想三年的风风雨雨，心中感慨万分。

首先，感谢导师韩建康、谢自楚教授在学习上对我的细心教导，生活上给我无微不至的关怀，尤其是在我论文选题、资料收集、论文撰写、修改直至最后定稿的过程中，更是倾注了韩老师的心血。导师丰富的学识、严谨求实的学术态度、精益求精的钻研精神、孜孜不倦的工作作风和敏锐的分析能力使我受益匪浅；乐观向上、豁达大度、平易近人的生活风格也使我十分难忘。在资料的收集和论文的撰写过程中还得到了谢自楚教授、韩建康教授和韩广教授的指导。专业课的学习则有赖于谢自楚教授、章新平教授、彭渤教授、韩广教授、周学军教授等的教导。

师恩难忘，友情也难忘。最后要感谢刘业祥、杨阳、周宰根等师兄师弟在学习和生活上给我点点滴滴的帮助。真诚感谢所有帮助过的老师和同学们！