扩扩色勒冰芯污化层记录的青藏高原西部过去 100 年来大气粉尘的变化特征

旦增卓嘎^{①③}, 姚檀栋^{①②}, 姚平^{①*}, 德吉^①, 徐柏青^{①②}, 赵华标^{①②}, 朱美林^①

① 中国科学院青藏高原研究所环境与地表过程重点实验室, 北京 100101;

② 中国科学院青藏高原地球科学卓越中心, 北京 100101;

③ 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: yaoping@itpcas.ac.cn

2015-11-24 收稿, 2016-02-06 修回, 2016-02-29 接受, 2016-04-22 网络版发表

国家自然科学基金(41190081, 41125003, 41371089, 41371083, 41501077)资助

摘要 冰芯粉尘记录是重建大气粉尘特征的良好指标. 本文利用慕士塔格山扩扩色勒冰芯污化层重建青藏高原西部近百年来大气环境变化特征. 研究发现, 污化层等级和污化层厚度比率两个指标与该冰芯 Ca^{2+} 离子具有较好的一致性, 说明其可以作为陆源粉尘的良好指标, 为快速获取冰芯大气环境特征提供新手段. 污化层比率与中亚粉尘源区和青藏高原北缘粉尘源区的现代沙尘观测记录具有较好的一致性, 说明其能够反映近期沙尘事件的变化趋势, 冰芯粉尘可能来源于两个源区的共同输入. 该地区沙尘天气在1900~2010年间的发生频率呈现逐渐减少的趋势, 其原因可能与粉尘源区因降水增多而引起的沙尘事件减少、西风增强引起的局地降水增多, 以及青藏高原地面风速减少等方面因素共同作用有关.

关键词 扩扩色勒冰芯, 污化层, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , 大气粉尘

作为对流层大气气溶胶的主要组成成分, 粉尘在进入大气层后随大气环流进行越洋和跨大陆传输, 通过影响大气辐射、大气化学及云和降水过程, 改变地、水、气系统内部的辐射能量平衡和水循环, 对全球气候和环境变化产生巨大影响^[1~3]. 中亚干旱区广泛分布的沙漠和戈壁是全球主要的陆源粉尘源区之一, 仅中国西北沙漠地区每年的粉尘释放量就可达800 Tg, 占全球沙尘总量的50%以上, 经过长距离输送可沉降于北太平洋和北极地区^[4,5]. 因此对该地区粉尘传输机制及其对全球气候变化的影响和响应具有重要意义.

青藏高原位于亚洲干旱区中心, 高寒气候下广泛发育的冰川保存了沉降在其中的大气粉尘, 为获

取高分辨率、高保真度的大气环境信息提供了可能^[6]. 不溶微粒作为大气粉尘在冰川中的主要表现形式, 且由于其具有稳定的物理和化学性质, 沉降后不再发生变化, 被认为是反映过去大气粉尘变化最直接的指标^[7,8]. 近年来在青藏高原冰芯研究中发挥重要作用. 首先, 不溶微粒浓度显著的季节变化方式被用于敦德^[9]和普若岗日^[10]等冰芯的年层划分主要指标; 其次, 在粉尘来源分析和环境重建方面也取得一系列进展, 如敦德冰芯不溶微粒主要来自于周围中远距离干旱、半干旱地区, 且暖期微粒含量低, 冷期微粒含量高^[11]; 古里雅冰芯粉尘主要来自于中国西北部的塔克拉玛干沙漠和青藏高原自身, 并且除记录末次间冰期以来大气粉尘含量的变化外, 还反映出

引用格式: 旦增卓嘎, 姚檀栋, 姚平, 等. 扩扩色勒冰芯污化层记录的青藏高原西部过去 100 年来大气粉尘的变化特征. 科学通报, 2016, 61: 1695–1705

Tenzin D, Yao T D, Yao P, et al. Variation of atmospheric dust over the past 100 years recorded by visible dusty layers of the Kuokuosele ice core, western Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1695–1705, doi: 10.1360/N972015-01309

中亚粉尘传输起始阶段与极地最终沉降地区冰芯记录的差异^[12]；慕士塔格冰芯微粒浓度具有明显季节变化，并且能够反映该地区及源区过去几十年来的大气粉尘变化^[13,14]；各拉丹冬冰芯过去500年的不溶微粒浓度与源区的降水量呈反相关关系，且与西风环流和冬季北大西洋涛动呈正相关^[15]；达索普冰芯不溶微粒含量与净积累量之间不存在任何相关性，说明其来源为西南亚至北非地区，近500年来达索普冰芯中粉尘含量增加，反映其源区干旱程度加重^[16]。此外，近年来，青藏高原雪中不溶微粒的元素地球化学特征也逐渐引起注意，如普若岗日冰芯不溶微粒Na和K等元素显示出与源区气候环境的演变具有较好一致性的特点^[17]；青藏高原不同地区的雪冰样品的Sr-Nd同位素组成^[18,19]和稀土元素(REEs)^[20]的分析则在其源地区分方面取得了进展。

冰芯粉尘除可进行微观分析之外，沉积在冰芯中的微粒在一定条件下可以形成肉眼可见的污化层(Visible Dust Layer, VDL)，利用该指标可以在获取冰芯的第一时间，不经任何样品处理和实验室分析等步骤，快速地获取冰芯年龄、大气环境等信息，已在青藏高原冰芯定年研究中发挥作用，如敦德冰芯^[9]、古里雅冰芯^[21]等。此外，在米兰冰芯中，污化层厚度占年层厚度比率这一指标也显示出对大气粉尘的良好指示能力^[22]，并显示沙尘天气在温湿气候时期发生频率较低，而冷干气候时期发生频率较高的特征^[23]。

本研究所用扩扩色勒冰芯取自位于青藏高原西部东帕米尔高原的慕士塔格山地区，冰体具有明显的肉眼可见的、污化程度不一的冰层，因此本文尝试对污化层进行更为细致的鉴别和污化层占年层厚度比率的计算，并通过与粉尘可溶性化学成分代表 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子的对比分析，从定性和定量两个角度分析冰芯污化层这一记录的环境意义，分析其可能的粉尘来源；结合该冰芯的温度与降水记录重建该地区过去100年来大气环境变化特征，并对其变化的可能因素进行探讨。本研究将在探析冰芯污化层指标的环境意义和快速利用获取冰芯中大气环境信息等方面提供新的手段。

1 数据来源与分析方法

1.1 区域概况与样品采集

慕士塔格山(75°06'E, 38°17'N)位于东帕米尔高

原，山体呈穹隆状，被巨大的裂谷所分割，其主峰海拔7546 m，与公格尔峰和公格尔九别峰并称东帕米尔高原三大高峰。慕士塔格山位于亚洲大陆内部，以东为塔克拉玛干沙漠，以西和以北为狭义的中亚干旱区，以南为巴基斯坦和印度的塔尔沙漠(图1)。本区降水主要来自高空西风带气流和极地冷湿气流的相互作用，局地环流对当地降水也有重要的影响^[24]。巨大山体和高亢地势不仅形成了本区的低温环境，而且通过其对过往高空水汽的拦截，在山体的迎风坡和高海拔区形成的降水为慕士塔格山冰川的发育提供有利条件。扩扩色勒冰川位于慕士塔格山西南坡，冰川朝向为东南，雪线海拔为5440 m，冰川10 m处冰层温度为-8.8℃，属极大陆型冰川^[25]。

2012年6~7月，中国科学院青藏高原研究所冰芯科考队在扩扩色勒冰川积累区钻取了两根冰芯，分别是长度170 m的Core-1(38°11.572'N, 75°10.965'E, 海拔5700 m, 图1)和长度188 m的Core-2(38°11.373'N, 75°10.671'E, 海拔5637 m)冰芯。本文研究对象为Core-1上部的52 m冰芯，以下简称为扩扩色勒冰芯。

1.2 实验方法

野外工作完成后，冰芯在低温条件下运回中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈重点实验室低温实验室，由3名研究人员分别在室外自然光和室内蓝色背景强光灯照射条件下对冰芯的污化状况及其肉眼可见的物理特征进行独立观察，对冰体的透明度、污化层状况、气泡含量及其形状等特征、污化层特征及厚度等进行描述和记录，最后将3人的描述结果进行对比，并对有争议的观测记录重新观测和讨论，得到最终结果，详细实验方法可参考文献[26]。依据由弱至强的污化程度将扩扩色勒冰芯污化层分为6个等级，依次为：极弱污化层、微弱污化层、弱污化层、中度污化层、强污化层和极强污化层，并用1~6的数字代表。污化层等级指标(L_{VDL})的划分标准及特征如表1所示，各等级污化层典型照片如图2所示。

描述工作完成后，首先将冰芯纵向切割为4份，取其中一份以5 cm间隔横向切割，然后在-5℃的低温超净实验室用洁净的不锈钢刀片将每个样品1~1.5 cm厚的外层削下用作 β 活化度测试，内层冰样放入用超纯水洗净并晾干的聚乙烯塑料瓶中密封保存用于可溶性无机离子测试。处理完毕的样品都以冷冻状

图1 扩扩色勒Core-1冰芯钻取位置及相邻沙漠

Figure 1 Map shows the drilling site of the Kuokuosele ice core (Core-1) and adjacent deserts

表1 扩扩色勒冰芯污化层等级划分及主要特征

Table 1 Classification of visible dust layer in the Kuokuosel ice core

污化层等级	污化层名称	特征
1	极弱污化层	冰体透明, 肉眼可见极少数(通常不易发现, 且少于10颗)极细小黄褐色、棕色沙尘颗粒散布其中
2	微弱污化层	冰体透明, 肉眼可见零星散布少数(通常可识别, 且数量较1级为多)极细小黄褐色、棕色沙尘颗粒
3	弱污化层	冰体呈弱暗黄色, 含较少的肉眼可见的细小黄褐色、棕色沙尘颗粒, 未形成明显的条带状
4	中度污化层	冰体呈明显暗黄色, 含大量肉眼可见的细小黄褐色、棕色沙尘颗粒, 且呈明显的条带状
5	强污化层	冰体呈明显褐色, 含大量肉眼可见的大小不等的黄褐色、棕色沙尘颗粒, 呈明显条带状, 且厚度超过1 cm
6	极强污化层	冰体呈暗黄色或暗褐色, 含有细小黄褐色、棕色沙尘颗粒, 且多凝聚成直径约为1~2 mm的团块状

态保存于-20℃的冷库中。冰芯阴、阳离子样品测试在中国科学院青藏高原研究所环境与地表过程实验室进行阳离子(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} 和 Ca^{2+})和阴离子(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})分别由Dionex ICS-2000型和Dionex ICS-2500型离子色谱仪测定。阳离子分析条件为: CS12A分析柱, CG12A保护柱, CSRS-ULTRA 4-mm抑制器, 25 μL 进样环, 20 mmol/L MSA淋洗液。阴离子分析条件为: AS11分析柱, AG11保护柱, ASRS-

ULTRA II 4-mm抑制器, 0.5 mL进样环, 22.5 mmol/L KOH淋洗液。检测限为1 ppb(1 ppb=1 ng/g, 余同), 质量控制方法为每天进行空白样品和同等级浓度的混合标样检测, 每6天对25, 50, 250和1000 ng/g梯度浓度的标样进行检测, 校正曲线的 R^2 大于0.99。每天取出部分样品置于室温下自然融化后, 立刻进行分析测试, 所有操作均严格控制以避免可能的污染。本文所用扩扩色勒冰芯上部共1009个样品的 Ca^{2+} 和

图2 扩扩色勒冰芯污化层等级划分(1, 极弱污化层; 2, 微弱污化层; 3, 弱污化层; 4, 中度污化层; 5, 强污化层; 6, 极强污化层)

Figure 2 Classification of visible dusty layer in the Kuokuuosele ice core (Numbers stand for different levels: 1, tiny; 2, little weak; 3, weak; 4, moderate; 5, strong; 6, very strong)

SO_4^{2-} 浓度数据.

2 结果

2.1 冰芯定年

扩扩色勒冰芯定年首先以20世纪核爆炸试验保留在冰芯的 β 活化度峰值确定1954和1963年的深度. 慕士塔格地区降水和冰芯氧稳定同位素比率 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现出夏季高值、冬季低值的特点^[27,24], 因此以扩扩色勒冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化特征对该冰芯上部52 m进行了年层划分, 然后以污化层个数为指标进行年层划分, 二者所得结果一致, 最终获得扩扩色勒冰芯Core-1冰芯上部52 m的沉积年代为1900~2010年, 误差为 ± 1 a, 详细定年论证见文献[25].

2.2 污化层等级

根据上述污化层等级划分标准, 扩扩色勒冰芯上部52 m共含181个污化层(为保证记录的连续性, 如一段冰芯的底部和下一段冰芯的顶部有连续污化层, 在统计时记为2个, 在进行后期计算时进行累加), 其中极弱污化层10个、微弱污化层48个、弱污化层44个、中等污化层60个、强污化层12个、极强污化层7个, 图3为污化层等级随深度变化曲线.

2.3 污化层厚度比率

对污化层观测结果进行定量分析, 引入污化层

图3 扩扩色勒冰芯污化层等级(L_{VDL})随深度的变化(a)以及厚度比率(R_{VDL})随时间的变化(b). 阶梯线为污化层厚度比率 5 a 平均值序列, 虚线为线性趋势线

Figure 3 Level profile of visible dusty layers (L_{VDL}) versus depth (a) and reconstructed record of the thickness ratio of visible dirty layers (R_{VDL}) in recent 100 years (b) in the Kuokuuosele ice core. Stepped line shows 5 years average data; dotted line shows the long term trend

厚度比率这一指标, 即通过衡量污化层厚度占冰芯全年积累量厚度的比率来反映沙尘天气发生的频率. 该指标曾在位于青藏高原北部的马兰冰芯中用以重建该地区过去千年来大气环境变化, 显示出它具有作为大气环境指标的潜力^[22,23]. 由于本研究只选取扩扩色勒冰芯上部52 m进行研究, 在此深度以上年层挤压变薄现象不显著, 因此直接以冰层厚度进行计算(即未将目前冰层厚度还原为原始冰层厚度). 同时, 为减小因定年误差而来带来的不确定性, 本研究以5 a为单位时段, 即用每5 a内污化层的累积厚度与该时段冰层厚度进行计算, 表达式为

$$R_{\text{VDL}} = \frac{\sum_i^{i+4} H_{\text{VDL}i}}{\sum_i^{i+4} H_i}, \quad (i = 1900, 1901, \dots, 2006), \quad (1)$$

式中, R_{VDL} 为污化层厚度比率, i 为年份, H_{VDL} 为年污化层厚度, H 为年冰层厚度.

图3所示为根据上述公式计算得到扩扩色勒1900~2010年污化层厚度比率5 a平均值曲线. 从图中可以看出, 过去100年来扩扩色勒冰芯中污化层厚度比率的平均值为19.33%; 最高值为49.57%, 出现在1915~1920年; 最低值为6.53%, 出现在2000~2005年. R_{VDL} 显示出明显的阶段性变化, 其中1900~1915, 1920~1930, 1990~2010年为3个显著的低值时段(R_{VDL} 约为10%), 1915~1920年为极高值时段, 1930~1990年为一个长达60 a的较高值时段. 从总体趋势来看, 过

去100年来 R_{VDL} 呈现明显的下降趋势。

3 讨论

3.1 污化层等级与 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的对比

为探讨扩扩色勒冰芯污化层描述方法的准确性与可行性, 将其与 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度进行对比。冰芯中 Ca^{2+} 通常被认为陆地粉尘来源在雪冰中沉降而成^[28,29]。在青藏高原冰芯中, Ca^{2+} 通常是可溶离子中的主要阳离子, 被视为中、低纬干旱区周边山地冰芯中反映大气成分和环境变化的指标, 具有良好的代表性和敏感性^[30]。在慕士塔格地区, 冰芯中 Ca^{2+} 可能来源于狭义的中亚干旱区^[14], 且在一定程度上能够反映西风环流的强弱变化^[31]。冰芯中 SO_4^{2-} 的来源相对较为复杂, 包括大气粉尘、火山喷发、水体蒸发、海洋浮游生物排放以及人类活动排放等^[32]。在青藏高原北部冰芯中, 由于远离海洋气团影响, 雪冰中的 SO_4^{2-} 主要为大气粉尘^[33]。在慕士塔格地区, 冰芯中 SO_4^{2-} 不仅与 Ca^{2+} 共同反映出陆源离子的变化特征, 还显示出20世纪70年代中期之后受到人类活动排放的影响^[31]。

图4为扩扩色勒冰芯污化层强度与 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子浓度随深度变化曲线的对比。从图中可以看出: 首先, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的峰值在污化层等级中都有体现, 如

图中红色阴影部分, 即约5, 16, 22, 37和46 m深处; 而 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度较低时, 污化层等级也多为较弱的级别, 如图中蓝色阴影部分, 即约3和28 m深处, 这说明本研究中所设定的污化层等级能够较好地反映离子浓度的起伏变化。其次, 污化层强度变化趋势与 Ca^{2+} 浓度更为相似, 主要表现在约46 m深处 Ca^{2+} 呈现较为显著的高浓度水平, 而 SO_4^{2-} 则保持在平均浓度水平, 这说明污化层等级指标与 Ca^{2+} 为代表的陆源粉尘指标具有更好的一致性。这种对比说明利用肉眼识别扩扩色勒冰芯污化层并以此建立的等级划分体系具有可操作性和科学性。

3.2 污化层厚度比率与 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 记录的对比

为探讨扩扩色勒冰芯污化层厚度比率是否能够从定量分析的角度指示大气粉尘变化, 将其与同时段 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子5 a平均值进行对比。如图5所示, 过去100年以来扩扩色勒冰芯中污化层厚度比率与 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度总体上呈现在波动逐渐下降的趋势, 但在波动幅度和相位方面存在差异, 本研究将其分为3种情况进行讨论。第1种情况如图中红色阴影所示, 1910~1915和1925~1940年间, R_{VDL} , Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 都为高值, 且 R_{VDL} 显著高于相邻时段; 第2种情况如图中黄色阴影所示, 1960~1985和1995~2005年, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 都显示出明显的波动变化, 而 R_{VDL} 虽能捕捉这

图4 扩扩色勒冰芯污化层强度(a)、 Ca^{2+} (b)和 SO_4^{2-} (c)浓度随深度的变化

Figure 4 Comparison of L_{VDL} (a), concentration of calcium (b) and sulfate (c) versus depth of the Kuokuosele ice core

图5 扩扩色勒冰芯 1900~2010 年污化层厚度比率(a)与 Ca^{2+} (b)和 SO_4^{2-} (c)浓度变化. 红色阴影为第1种情况, 黄色阴影为第2种情况, 灰色阴影为第3种情况; 黑色曲线为进行傅立叶滤波后的低频波动趋势线

Figure 5 Comparison of thickness ratio of visible dusty layers records of the ratio of fouling layer thickness (a), concentration of calcium (b) and sulfate (c) of the Kuokuosele ice core from 1900 to 2010. Red shadow represents the first situation, yellow shadow represents the second situation and gray shadow represents the third situation. Black line represents the trend line of low frequency after a Fourier transformation

一变化趋势,但在数值变化范围上较小.以上两种情况说明 R_{VDL} 在一定程度上能够反映沙尘事件的发生及强度,而在精度方面则逊于基于高分辨率分样间距的实验分析数据.第3种情况如图中灰色阴影所示,1950~1955年, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度为低值,而 R_{VDL} 为高值,与离子记录呈相反位相.结合图3可知,该年代位于约30 m深度, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 从28~29 m左右的低值区缓慢过渡到峰值,而污化层等级则从1级(极弱污化层)直接升到4级(中等污化层),其原因一方面可能也是由于污化层厚度和离子浓度的侧重点不同而导致,另一方面这种现象是否暗示该时段大气粉尘沉积环境是否与其他时段有显著差异,则尚未可知.

图5中还显示出对3条曲线进行傅立叶滤波得到的低频波动趋势, R_{VDL} 与离子波动曲线虽在幅度上有差别,然而也准确地捕捉到以1920和1970年为中心的2个波峰,以1950和2000年为中心的2个波谷.另外,从位相上看 R_{VDL} 与 Ca^{2+} 更为一致,相关性分析也显示 R_{VDL} 与 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的相关系数分别为0.28和0.17,虽然二者都没有通过显著性检验,然而在数值上仍是前者高.这也再次论证了扩扩色勒冰芯可视污化

层主要指示了陆源自然来源的大气沙尘环境变化.

3.3 污化层记录与现代观测记录的对比和可能源区分析

冰芯粉尘的来源是重要分析方面.气候资料 and 现代降水同位素研究都显示慕士塔格山常年受中纬度西风环流带控制^[24].早期研究显示,慕士塔格冰芯微粒浓度的峰值主要出现在夏季,通过对比可能源区沙尘事件的发生季节,推断其主要来源为中亚粉尘源区,较少部分来自于中国西北粉尘源区^[14],该地区气溶胶光学厚度在夏季较高的现象也证实了这一点^[34].另外该地区雪冰稀土元素(REEs)组成显示局地冰碛物和地表土壤的贡献较少,亚洲沙漠的贡献最大^[20].除这一源区之外,慕士塔格雪冰粉尘中Sr-Nd同位素值还表现出与青藏高原北缘沙漠一致的现象,这说明该粉尘源区也对慕士塔格地区冰芯粉尘有一定贡献^[18].

扩扩色勒冰芯与慕士塔格冰芯同属慕士塔格山冰川群,大气环流背景一致,因此我们选择伊朗西部^[35]、土库曼斯坦卡拉库姆沙漠西部的Darvaza和北部的Dashoguz^[36]作为中亚粉尘源区的代表站点,塔克拉玛干沙漠西北部的新疆巴楚县^[37]、南疆和新疆^[38]三地作为青藏高原北缘粉尘源区的代表站点,将其沙尘天气观测记录与扩扩色勒冰芯污化层记录进行对比,分析污化层对沙尘事件的指示性和可能的源区.

如图6所示,1935~1960年,土库曼斯坦Darvaza和Dashoguz站2条观测记录,扩扩色勒冰芯与前者较为一致而与后者区别较大,考虑到2站之间也存在较为明显的差异,这可能由他们处于沙漠位置不同,且由于在源区附近,故差异较大,这需要收集更多的站点资料进行研究.1960~1985年是观测记录重叠最多的时段,该时期扩扩色勒冰芯 R_{VDL} 和中亚和新疆观测记录都表现为沙尘频发期,在波动范围方面与南疆、新疆、伊朗西部和Dashoguz站更为接近,说明青藏高原北缘和中亚粉尘源区在该时期都有贡献.1985~2000年,冰芯与沙尘观测记录都为持续减少趋势,并且冰芯记录在1985~1990年之间的突然降低与新疆地区沙尘事件1987年突变点非常吻合^[39].2000~2010年,新疆巴楚站呈持续减少趋势,伊朗西部站与冰芯记录呈略微升高趋势,初步推测该时段中亚粉尘源区的贡献更大,然而该论断尚需更多观测记录进行论证.

图 6 近 50 年来扩扩色勒冰芯中污化层厚度比率(R_{VDL})(a)与新疆巴楚县沙尘暴日数^[37](b)、南疆沙尘天气日数^[38](c)、新疆沙尘天气日数^[38](d)、伊朗西部沙尘天气频率标准化值^[35](e)、土库曼斯坦 Darvaza^[36](f)和 Dashoguz^[36](g)沙尘天气频率的比较

Figure 6 Comparison of thickness ratio of visible dusty layers (R_{VDL}) records of the Kuokuosele ice core(a), observed dust-storm days in Bachu^[37] (b), sand and dust days in southern Xinjiang^[38] (c) and whole Xinjiang^[38] (d), standardized frequency of sand and dust days in west Iran^[35] (e), frequency of sand and dust days in Darvaza^[36] (f) and Dashoguz^[36] (g) in Turkmenistan

表2所示为扩扩色勒冰芯 R_{VDL} 与各观测记录相关系数。总体而言,冰芯记录与新疆境内记录的相关性较好,而与中亚粉尘源区较差,然而考虑到前者多为综合多站点的平均曲线,而后者都为单站记录,因此以二者结果进行对比并不公平,该分析仅能论证冰芯粉尘与新疆境内沙漠相关,却不能证明与中亚地区无关,需要通过不溶微粒等更精密的研究才可进

行深入分析。另外,不容忽视的一点是,南疆与伊朗西部、新疆与Dashoguz也显示出较高的相关性,这说明新疆境内沙尘事件本身也与中亚的粉尘释放有关。

3.4 污化层记录的青藏高原西部过去100年大气粉尘变化特征

根据上述分析,我们获得了以扩扩色勒冰芯污化层厚度比率为沙尘事件发生频率替代指标的青藏高原西部大气粉尘变化记录(图7)。1900~2010年,该地区沙尘天气的发生频率呈现逐渐减少的趋势,其中1910~1915年为沙尘天气发生频率最高的时段,1925~1985年为发生较多的时段,1900~1910, 1915~1925, 1985~2010年为沙尘天气发生较少的时段。这种变化模式与该冰芯的 Ca^{2+} 具有很好的一致性,与 SO_4^{2-} 也具有较好的一致性,三者共同反映了慕士塔格地区过去100多年来大气粉尘含量减少的趋势。在慕士塔格冰芯中, Ca^{2+} 与扩扩色勒冰芯沙尘记录变化一致,而 SO_4^{2-} 则不同。从图7中可以看出,慕士塔格冰芯中 SO_4^{2-} 成升高趋势,且中亚等地人类活动排放导致了自20世纪70年代以来浓度的显著增加^[31]。山地冰川中 SO_4^{2-} 的一大来源是陆源粉尘,由人类活动排放产生的 SO_4^{2-} 信号有可能会因大量的粉尘沉降而掩盖^[40],而准确捕捉这一信息还需要结合冰芯粉尘的浓度、化学组成进行深入研究。

研究发现,扩扩色勒年平均 $\delta^{18}O$ 能够指示该地区温度变化,并且在1900~2010年间呈现明显的升高趋势^[25],这与慕士塔格地区前期降水和冰芯稳定同位素研究结果一致^[24,27]。此外,扩扩色勒冰芯积累量在整个时期并未显示出明显的升高或降低趋势,而从数值方面来看,则可分为两个明显不同的时段,其中1915~1960年,积累量高于全时段平均水平,但趋势无明显变化;1960~2010年前半段多低于平均水平,然而整体呈现逐渐升高的趋势^[25]。慕士塔格冰芯积

表 2 扩扩色勒冰芯 R_{VDL} 与新疆和中亚沙尘观测记录相关性分析^{a)}

Table 2 Correlation effector between R_{VDL} of the Kuokuosele ice core and observed dust records from Xinjiang and central Asia

	扩扩色勒冰芯	巴楚县	南疆	新疆	伊朗西部	Dvravza
巴楚县	0.83					
南疆	0.88	0.81				
新疆	0.93	0.84	0.84			
伊朗西部	-0.07	-0.14	0.78	0.53		
Dvravza	0.33	0.58	0.57	0.20	-0.02	
Dashoguz	0.31	0.35	0.33	0.79	-0.22	-0.06

a) 粗体字为通过95%显著性水平检验,其余为未通过

图7 1900~2010年扩扩色勒冰芯污化层比率(R_{VDL})(a), Ca^{2+} 浓度(b), SO_4^{2-} 浓度(c), 年平均 $\delta^{18}O$ (d)和年净积累量(e)变化曲线与慕士塔格冰芯 Ca^{2+} 浓度(f), SO_4^{2-} 浓度(g), $\delta^{18}O$ (h)和年净积累量(i)对比(浅灰色线为年值, 颜色填充曲线为5 a滑动平均值, 黑色直线为趋势线)

Figure 7 Comparison of R_{VDL} (a), concentration of Ca^{2+} (b) and SO_4^{2-} (c), annual $\delta^{18}O$ (d) and net accumulation (e) of the Kuokusele ice core and concentration of Ca^{2+} (f) and SO_4^{2-} (g), annual $\delta^{18}O$ (h) and net accumulation (i) of the Muztagh Ata ice core (Light dark lines, colored lines and black straight lines stand for annul values, 5-year moving average values and trend lines, respectively)

累量由于缺乏2000年后的资料, 目前显示出减少趋势^[41]。综合上述分析, 慕士塔格地区过去100年来的气候与环境整体情况表现为: 气温持续升高, 降水在1960年以前较多, 1960年以来由少增多, 沙尘事件发生的频率逐渐减少。

地表状况、气象条件以及风力状况是决定沉降地冰芯中粉尘含量多少的主要因素。主要模式是西风增强、中亚地区极端降水增加, 沙尘事件频率减少。在地表状况方面, 位于中亚粉尘源区的伊朗南部是伊朗高原沙尘事件发生频率最高的地区, 1950年以来该地

区沙尘天气发生频率呈现降低的趋势^[35], 青藏高原北缘沙漠和整个青藏高原自1960年以来沙尘天气的发生频率也呈现逐渐减少趋势^[42,38], 大气粉尘在来源方面的共同减少。气象条件方面, 在全球及区域气温都逐渐升高的背景下, 自1950年以来伊朗降水呈增加趋势^[43], 青藏高原北缘的降水和径流量也显著增加, 并引起蒸发量和干旱指数的总体下降^[44,38], 慕士塔格地区冰川也在这种气候背景下表现为正物质平衡状态, 其原因可能与西风增强有关^[45,46]。此外, 研究显示1960~1990年以来, 青藏高原地表风速降低了约 $-0.006 \pm 0.002 \text{ ms}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ^[47], 这一原因已经被发现是青藏高原同期沙尘事件减少的重要原因之一^[47]。综合上述分析, 扩扩色勒冰芯记录的去100年来大气粉尘的减少趋势可能与粉尘源区因降水增多而引起的沙尘事件减少、西风增强引起的局地降水增多、以及青藏高原地面风速减少等方面因素共同作用有关。

4 结论

本文通过对扩扩色勒冰芯污化层进行描述, 并通过与冰芯 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度进行对比, 衡量污化层等级和污化层厚度比率两个指标对大气粉尘特征的指示意义, 辨析其可能来源, 进而重建青藏高原西部近百年来大气环境变化特征, 得到以下结论。

(1) 青藏高原西部扩扩色勒冰芯污化层等级和污化层厚度比率两个指标与该冰芯 Ca^{2+} 具有较好的一致性, 说明本研究所使用的人工识别可见污化层的实验方法具有可靠性和准确性, 且可以作为陆源粉尘的良好指标, 为快速获取山地冰芯大气环境特征方面提供新手段。

(2) 扩扩色勒冰芯污化层比率与中亚粉尘源区和青藏高原北缘粉尘源区的现代沙尘观测记录具有较好的一致性, 说明其能够反映近期沙尘事件的变化趋势, 冰芯粉尘物质可能来源于两个源区的共同输入。

(3) 1900~2010年, 该地区沙尘天气的发生频率呈现逐渐减少的趋势, 最近20年是沙尘天气发生最少的时段, 与利用冰芯 $\delta^{18}O$ 和净积累量重建的气温和降水记录共同显示出该地区来气温持续升高, 降水在1960年以前较多, 1960年以来由少增多, 沙尘事件发生的频率逐渐减少的气候与环境特征。冰芯粉尘含量的减少趋势可能与粉尘源区因降水增多而引起的沙尘事件减少、西风增强引起的局地降水增多, 以及青藏高原地面风速减少等方面因素共同作用有关。

致谢 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沈永平研究员提供了新疆沙尘气象数据, 中国科学院青藏高原研究所邬光剑研究员在冰芯粉尘来源分析方面给出了建议, 三位审稿人为提高本文的科学性与逻辑性提出了建设性的意见和建议, Dr. Binod Dawadi帮助修改了英文摘要, 在此一并表示衷心地感谢。

参考文献

- Alpert P, Kaufman Y, Shay-El Y, et al. Quantification of dust-forced heating of the lower troposphere. *Nature*, 1998, 395: 367–370
- Kaufman Y, Tanré D, Dubovik O, et al. Absorption of sunlight by dust as inferred from satellite and ground-based remote sensing. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 1479–1482
- Kinne S, Poeschel R. Aerosol radiative forcing for Asian continental outflow. *Atmos Environ*, 2001, 35: 5019–5028
- Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. *J Geophys Res: Atmos* (1984–2012), 1997, 102: 28041–28047
- 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: 2–1–2–31
- Yao T D. Ice core study of the Tibetan Plateau (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 1998, 20: 233–237 [姚檀栋. 青藏高原冰芯研究. 冰川冻土, 1998, 20: 233–237]
- Yao T D, Jiao K Q, Huang C L, et al. Environmental records in ice cores and their spatial coupling features (in Chinese). *Quat Sci*, 1995, (1): 23–31 [姚檀栋, 焦克勤, 皇翠兰, 等. 冰芯所记录的环境变化及空间耦合特征. 第四纪研究, 1995, (1): 23–31]
- Wu G J, Yao T D. Progress in studies on insoluble microparticle in ice cores (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2005, 27: 528–538 [邬光剑, 姚檀栋. 冰芯中不溶微粒的研究进展. 冰川冻土, 2005, 27: 528–538]
- Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau. *Science*, 1989, 246: 474–477
- Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Holocene climate variability archived in the Puruogangri ice cap on the central Tibetan Plateau. *Anna Glaciol*, 2006, 43: 61–69
- Liu C P, Yao T D, Thompson L G, et al. Microparticle concentration within the Dunde ice core and its relation to dust storm and climate since the little ice age (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 1999, 21: 9–14 [刘纯平, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 敦德冰芯中微粒含量与沙尘暴及气候的关系. 冰川冻土, 1999, 21: 9–14]
- Wu G J, Yao T D, Thompson L G, et al. Comparison of Guliya ice core between Vostok and GISP2 ice cores microparticle records over the last glacier cycle. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 607–611 [邬光剑, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 末次间冰期以来古里雅冰芯微粒记录与极地冰芯的对比. 科学通报, 2004, 49: 475–479]
- Wu G J, Yao T D, Xu B Q, et al. Microparticle granularity records in the Muztagata ice core (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2006, 36: 9–16 [邬光剑, 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: 9–16]
- Wu G J, Yao T D, Xu B Q, et al. Seasonal variations of atmospheric dust records in the Muztagata ice core. *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 2506–2512 [邬光剑, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 慕士塔格冰芯中大气粉尘记录的季节变化. 科学通报, 2008, 53: 1576–1581]
- Zhang Y, Kang S, Zhang Q, et al. A 500 year atmospheric dust deposition retrieved from a Mt. Geladaindong ice core in the central Tibetan Plateau. *Atmos Res*, 2015, 166: 1–9
- Wang N L, Yao T D, Thompson L G, et al. Increase in dust concentration in the Dasuopu ice core from the middle Himalayas and drying trend in South and West Asia and North Africa over the last 500 years (in Chinese). *Quat Sci*, 2012, 32: 53–58 [王宁练, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 近 500 年来喜马拉雅山达索普冰芯中尘埃含量变化与西, 南亚及北非干旱化趋势. 第四纪研究, 2012, 32: 53–58]
- Li J L, Hu N G, Xu B Q, et al. Geochemical characteristics of the insoluble microparticles in Purog Kangri ice core: implications on climate and environment change (in Chinese). *Geochimica*, 2009, 38: 361–368 [李久乐, 胡能高, 徐柏青, 等. 普若岗日冰芯中不溶微粒元素地球化学特征对气候环境的指示意义. 地球化学, 2009, 38: 361–368]
- Xu J, Yu G, Kang S, et al. Sr-Nd isotope evidence for modern aeolian dust sources in mountain glaciers of western China. *J Glaciol*, 2012, 58: 859–865
- Xu J Z, Hou S G, Chen F K, et al. Tracing the sources of particles in the East Rongbuk ice core from Mt. Qomolangma. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 1781–1785 [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. 科学通报, 2009, 54: 1756–1760]
- Wu G, Zhang C, Zhang X, et al. The environmental implications for dust in high-alpine snow and ice cores in Asian mountains. *Glob Planet Change*, 2015, 124: 22–29
- Yao T, Jiao K, Tian L, et al. Climatic variations since the Little Ice Age recorded in the Guliya Ice Core. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1996, 39: 587–596
- Wang N L. Decrease trend of dust event frequency over the past 200 years recorded in the Malan ice core from the northern Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 2005, 50: 2866–2871 [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: 724–729]

- 23 Wang N L, Yao T D, Pu J C, et al. Climatic and environmental changes over the last millennium recorded in the Malan ice core from the northern Tibetan Plateau. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2006, 49: 1079–1089 [王宁练, 姚檀栋, 蒲建辰, 等. 青藏高原北部马兰冰芯记录的近千年来气候环境变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36: 723–732]
- 24 Yu W S, Yao T D, Tian L D, et al. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in summer precipitation and temperature and moisture trajectories at Muztagata, western China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2006, 49: 27–35 [余武生, 姚檀栋, 田立德, 等. 慕士塔格地区夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度及水汽输送的关系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36: 23–30]
- 25 Deji. Comparison of climate change history during the past 100 a by stable isotopes records in Kuokuosele and Zuoqiupu ice cores (in Chinese). Masters Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014 [德吉. 过去 100 年来扩扩色勒与左求普冰芯稳定同位素记录的气候变化对比研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2014]
- 26 Yao P. Records of climate change in the Tanggula ice core in the central Tibetan Plateau over the past 2000 years (in Chinese). Doctoral Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014 [姚平. 青藏高原中部唐古拉冰芯记录的去 2000 年气候变化. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2014]
- 27 Tian L, Yao T, 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: 10.1029/2005jd006249
- 28 Mayewski P A, Meeker L D, Morrison M, et al. Greenland ice core “signal” characteristics: An expanded view of climate change. *J Geophys Res: Atmos* (1984–2012), 1993, 98: 12839–12847
- 29 De Angelis M, Steffensen J P, Legrand M, et al. Primary aerosol (sea salt and soil dust) deposited in Greenland ice during the last climatic cycle: Comparison with east Antarctic records. *J Geophys Res: Oceans* (1978–2012), 1997, 102: 26681–26698
- 30 Yao T D, Wu G J, Pu J C, et al. Relationships between Ca^{2+} concentration and variations of atmospheric dust in the Guliya ice core (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 888–892 [姚檀栋, 郭光剑, 蒲建辰, 等. 古里雅冰芯中钙离子与大气粉尘变化关系. *科学通报*, 2004, 49: 888–892]
- 31 Zhao H, Xu B, Yao T, et al. Records of sulfate and nitrate in an ice core from Mount Muztagata, Central Asia. *J Geophys Res*, 2011, 116: D13304, doi: 10.1029/2010JD015735
- 32 Li Z Q, Yao T D. Study of NO_3^- and SO_4^{2-} in atmospheric aerosol (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 1995, 10: 289–295 [李忠勤, 姚檀栋. 大气气溶胶中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 研究. *地球科学进展*, 1995, 10: 289–295]
- 33 Li Z Q, Yao T D, Xie Z C. Records of modern atmospheric environment in the Guliya ice core on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1994, 39: 2200–2201 [李忠勤, 姚檀栋, 谢自楚, 等. 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: 2200–2201]
- 34 Yan N, Wu G, Zhang X, et al. Variation of aerosol optical properties from AERONET observation at Mt. Muztagh Ata, Eastern Pamirs. *Atmos Res*, 2015, 153: 480–488
- 35 Sarrafa B S, Rasoulb A A, Mohammadi G H. Long-term annual variation and trend of dusty days in the west of Iran. *Int J Rev Life Sci*, 2015, 5: 1230–1237
- 36 Orlovsky L, Orlovsky N, Durdyyev A. Dust storms in Turkmenistan. *J Arid Environ*, 2005, 60: 83–97
- 37 Abudoukerimu Abasi, Naerpatiman MaiMaitireyimu, Naerbiya Tuniyazi, et al. Analysis on changing trend of dust weather in Bachhu during 1961–2010 (in Chinese). *Desert Oasis Meteorol*, 2015, 9: 36–40 [阿布都克日木·阿巴司, 努尔帕提曼·买买提热依木, 努尔比亚·吐尼亚孜, 等. 巴楚县 1961~2010 年沙尘天气的变化趋势分析. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9: 36–40]
- 38 He Q, Yang Q, Li H J. Variations of air temperature, precipitation and sand-dust weather in Xinjiang in past 40 years (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2003, 25: 423–427 [何清, 杨青, 李红军. 新疆 40 年来气温、降水和沙尘天气变化. *冰川冻土*, 2003, 25: 423–427]
- 39 Li H J, Li J, He Q. Study on sandstorm trend and abrupt change in Xinjiang (in Chinese). *J Desert Res*, 2008, 28: 915–919 [李红军, 李军, 何清. 新疆沙尘暴的趋势和突变研究. *中国沙漠*, 2008, 28: 915–919]
- 40 Kang S, Zhang Q, Kaspari S, et al. Spatial and seasonal variations of elemental composition in Mt. Everest (Qomolangma) snow/firn. *Atmos Environ*, 2007, 41: 7208–7218
- 41 Duan K Q, Yao T D, Wang N L, et al. Records of precipitation in the Muztag Ata ice core and its climate significance to glacier water resources. *J Glaciol Geocryol*, 2007, 29: 680–684 [段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 慕士塔格冰芯降水记录及其对冰川水资源的气候意义. *冰川冻土*, 2007, 29: 680–684]
- 42 Kang L, Huang J, Chen S, et al. Long-term trends of dust events over Tibetan Plateau during 1961–2010. *Atmos Environ*, 2016, 125: 188–198
- 43 Modarres R, Sarhadi A. Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. *J Geophys Res*, 2009, 114, doi: 10.1029/2008JD010707
- 44 Jiang F Q, Hu R J. Climate change and flood & drought disasters in Xinjiang during recent 50 years (in Chinese). *J Desert Res*, 2004, 24: 35–40 [姜逢清, 胡汝骥. 近 50 年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化. *中国沙漠*, 2004, 24: 35–40]
- 45 Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Clim Change*, 2012, 2: 663–667
- 46 Han Y, Fang X, Kang S, et al. Shifts of dust source regions over central Asia and the Tibetan Plateau: Connections with the Arctic oscillation and the westerly jet. *Atmos Environ*, 2008, 42: 2358–2368
- 47 Lin C, Yang K, Qin J, et al. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960. *J Clim*, 2013, 26: 2891–2903

Variation of atmospheric dust over the past 100 years recorded by visible dusty layers of the Kuokuosele ice core, western Tibetan Plateau

Tenzin Drolkar^{1,3}, YAO TanDong^{1,2}, YAO Ping¹, Deji¹, XU BaiQing^{1,2}, ZHAO HuaBiao^{1,2} & ZHU MeiLin¹

¹ State Key Laboratory of Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Atmospheric dust plays a significant role on regional and global climate change through modifying the radiative balance via changing solar radion, altering the microphysical precipitation process and so on. However, many uncertainties of their climatic effects exist due to obvious regional distribution and short transportation system. The large desert and semi-desert area of Asia, makes this region as one of most severe global dust sources and effecting globally. Glaciers distributed in the Tibetan Plateau contain substantial dust deposition which provide an opportunity to reconstruct past continental aridity and atmospheric circulation. As microparticles, visible dust layers also show excellent potential on environmental exploration. Additionally, their visible external appearances benefit researchers acquiring both dating and environmental coding as soon as they get the cores. The Kuokuosele ice core was retrieved in 2012 from the Muztagh Ata Mts. in the eastern Pamir Plateau circumfused by Asian arid regions and deserts. Due to its proximity to the dust sources, the ice core contained clear visible dust layers clearly observed under natural light and floodlight in the cold room by three independent researchers before any sampling process. Two indicators including level (L_{VDL}) and thickness ratio (R_{VDL}) of visible dust layers were examined and calculated. Meanwhile, concentrations of Ca^{2+} and SO_4^{2-} were analyzed in order to evaluate the accuracy of observations by naked eyes. The top 52 m ice core was dating to the period of 1900–2012 with ± 1 uncertainty via identifying stratigraphic markers of beta activity and counting seasonal cycles of $\delta^{18}O$ and dust layers. The current ice core contains 181 visible dust layers and can be classified to five different levels. Moreover, five-year average R_{VDL} spanned the whole era showed a decreasing trend, and illustrated vivid low values in 1900–1915, 1920–1930, 1990–2010 and high values in 1915–1920. The visible dust layers were then compared with Ca^{2+} and SO_4^{2-} records. To begin with, simultaneous variation was found between L_{VDL} and two ions. Moreover, R_{VDL} in recent decades was positively correlated with observed records of arid areas of central Asia and northern Tibetan Plateau, suggesting that both sources continuously distributing the for dust deposition in this ice core. Therefore, visible dust layers of the Kuokuosele ice core could be seen as credible excellent medium for study of atmospheric dust deposition, and thus provided an unique opportunity to acquire the enviromental information. In Summary, the entire record of thickness ratio of visible dusty layers in the Kuokuosle ice core revealed a decreasing trend of atmospheric dust over the past 100 year, accompanied by an increasing trend of tempreture expressed by ice-core $\delta^{18}O$ and a varied precipitation pattern. Increasing precipitation in the possible source area and the local region caused by the strength of Westerlies might be related to this trend, in addition to this, decreasing wind speeds in the past cannot be ignored.

Kuokuosele ice core, visible dusty layers, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , atmospheric dust

doi: 10.1360/N972015-01309