

青海苏干湖表层沉积物粒度分布模式 与大气粉尘记录

肖舜, 陈发虎, 强明瑞, 张家武, 周爱锋, 孙东怀

(兰州大学 西部环境教育部重点实验室 中德干旱环境联合研究中心, 兰州 730000)

摘要: 位于干旱区柴达木盆地具有年纹层的苏干湖是以地下水补给为主的内陆封闭湖泊, 其表层沉积物粒度具有多组分峰态分布特征, Weibull 函数的拟合结果发现, 其粒度分布全部具有 4 个基本组分: 超细粒组分, 众数粒径在 $1\ \mu\text{m}$ 上下; 细粒组分, 众数粒径在 $5\sim 10\ \mu\text{m}$; 粗粒组分, 众数粒径在 $50\sim 100\ \mu\text{m}$; 砂组分, 众数粒径在 $500\ \mu\text{m}$ 左右。粒度主峰出现在细粒组分或者粗粒组分。直接来自大气粉尘的冬季湖泊冰面样品及当地尘暴样品的 Weibull 函数粒度拟合也显现出了相似分布模式, 冰面样品的粒度主峰位于众数粒径在 $15\sim 20\ \mu\text{m}$ 的细粒组分, 砂组分 (众数粒径 $452.9\ \mu\text{m}$) 的出现指示出砂粒在冬半年沿冰面而进入湖泊中心。尘暴降尘样品在尘暴季节 (5 月份) 和非尘暴季节 (11 月份) 的粒度分布普遍具有 3 个组分, 缺少砂组分, 强沙尘暴事件样品则由 4 个组分组成, 粒度主峰均位于众数粒径在 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 的粗粒组分。结果显示, 苏干湖湖泊沉积能够较好记录当地大气粉尘, 砂组分与湖泊周边干旱地表经历的近地面强沙尘活动有关, 粗粒组分记录了区域性的尘暴事件, 细粒组分主要反映流域径流状况, 超细粒组分代表干旱区的大气背景粉尘和气溶胶。研究表明, 苏干湖内陆湖泊沉积客观记录了区域大气粉尘和尘暴事件, 具有重建干旱区大气粉尘变化历史的潜在优势。

关键词: 苏干湖; 干旱区; 大气粉尘; 粒度分布模式; Weibull 函数

1 引言

大气粉尘 (气溶胶) 作为地球气候系统的辐射强迫因子同温室气体一道扮演着改变地球系统能量收支平衡的重要角色^[1]。新近的研究发现干旱大陆表层粉尘物质蕴含的铁可以经过大气环流传输并沉降到大洋, 进而通过影响海洋生物初级生产力的方式能够起到调节大气 CO_2 浓度的作用, 其间引发的各种正负反馈机制将重新组织分配地球系统的能量平衡^[2-4]。尽管科学家们对有关大气粉尘在地球气候系统中的各种反馈机制的认识逐渐明朗, 但其在气候动力学中的作用是非常复杂的, 并没有被完全理解, 利用各种地质记录中的粉尘代用资料解译地质历史时期全球气候变化的机制还存在争议^[5-7]。Zhang 等^[8, 9]运用元素示踪手段对我国西北干旱、半干旱区粉尘释放、传输、沉降和源区分布的研究; Bory 等^[10]对格陵兰冰芯记录里粉尘 Sr 和 Nd 同位素组成与我国西北内陆干旱区的比较分析, 都揭示出我国西北干旱、半干旱区是全球大气粉尘释放的重要源区。因此我们有理由相信通过研究我国西北干旱区现代大气粉尘在各种地质载体中的行为及其指示意义, 将有可能重建粉尘源区大气粉尘的变化历史, 进而促进认识大气粉尘在区域和全球气候变化中的作用。

收稿日期: 2007-08-08; 修订日期: 2007-09-22

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目 (40421101); 国家博士点基金 (20060730003) 资助 [Foundation: Chinese NSFC Innovation Team Project, No.40421101; Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, No.20060730003]

作者简介: 肖舜 (1981-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 自然地理学专业, 主要从事大气粉尘与气候变化研究。

E-mail: shun.xiao@gmail.com

通讯作者: 陈发虎 教授. E-mail: fhchen@lzu.edu.cn

普遍发生于中国北方内陆干旱、半干旱区的沙尘暴作为一种高强度的粉尘释放天气过程与中纬度大气环流和沙漠分布格局密切相关,引起国内外学者和公众的广泛关注。中国黄土记录了晚新生代,特别是第四纪以来大气粉尘载荷的变化历史^[11-14]。孙东怀等^[15]的研究成功地将黄土记录的粒度组成分解为指示近距离低空和远源高空气流搬运的两个组分。冰芯记录因其位于高海拔故而对记录代表大气环境背景的细颗粒粉尘(气溶胶)有优势^[16,17],而对发生在近地面的沙尘暴,处于粉尘源区的众多湖泊将可能会成为大气粉尘记录的较理想载体。此外,湖泊沉积被认为是气候变化敏感的指示器^[18]和天然的大气降尘收集器。在近年来的湖泊沉积环境变化研究中如何理解粒度指标潜含的环境意义同样得到了众多研究者的重视^[19-21]。苏干湖地处我国西北干旱区腹地,同时也是中亚粉尘源区的重要组成部分。鉴于此,本文利用位于柴达木盆地由出露泉水直接补给的苏干湖现代表层沉积物,使用前人报道的 Weibull 分布函数^[22]建立湖泊沉积粒度的分布模式,探讨湖泊沉积物记录大气粉尘的可能性,揭示不同粒度分布组分代表的大气粉尘意义。

2 材料与方法

2.1 研究区概况与样品描述

苏干湖(38°51' N, 93°54' E)所处的花海子盆地是一个封闭内陆干旱盆地,整个盆地地势东高西低,据盆地南部马海湖钻孔资料显示自晚更新世以来苏干湖就已经封闭^[23]。深居内陆远隔海洋的自然地理环境造就了盆地内极端干旱的气候特征。研究区内冬长夏短,西北风盛行,日温差较大,盆地西部年平均气温 2.75 °C,多年平均降水量为 18.7 mm,蒸发量为 2967.2 mm,属极端干旱区。该区大风天气盛行,沙尘暴发生频率高。盆地内植被严重匮乏,除湖泊东侧分布有少量草地以外,其余均为戈壁、沙砾地和沙地。盆地内水文循环模式比较简单,发源于党河南山南坡的大哈尔腾河与发源于土尔根达坂北坡的小哈尔腾河均由冰雪融水补给,河流到达山前戈壁平原带之后,在 8~15 km 的地段内即全部渗入地下,在湖泊东部湿地草原带以泉水出露,进而汇集成苏干河等短小河流补给苏干湖。研究区人类活动微弱是讨论自然背景下粉尘演化历史的理想场所。

2005 年 1 月,利用 GREW 现代代表样钻,沿苏干河河口至湖心方向取得苏干湖现代表层 1 cm 厚沉积样品共 18 个(图 1),根据年纹层和 ²¹⁰Pb 年代模式^[24],表层沉积速率为 0.31 mm/a,即表层样品反映了近 3 年的平均状况;同时在湖泊结冰表面采集 6 个代表入冬以来大气降尘的冰面雪

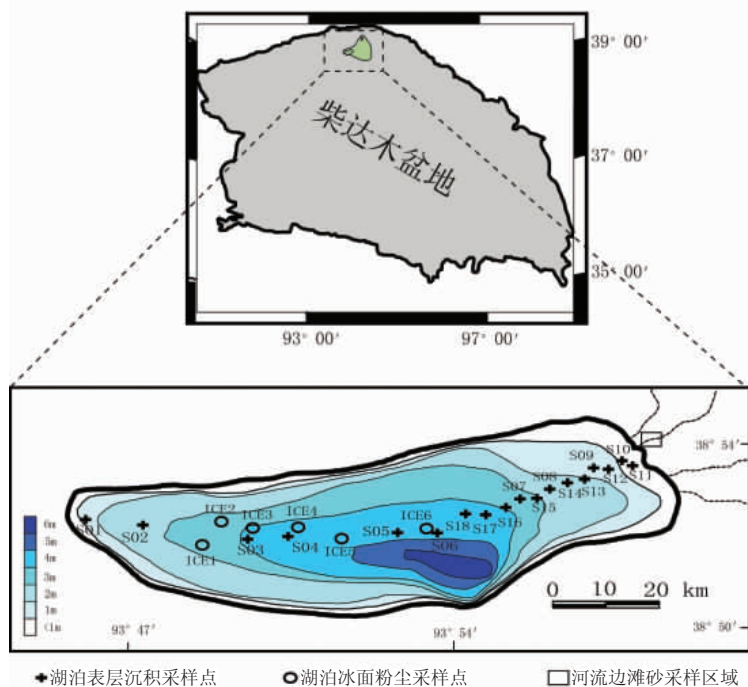


图 1 研究区位置及采样点分布图

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

样。2005 年 5 月, 在苏干河近河口补充采集现代河流边滩砂样品 4 个。从 2003 年 11 月起至 2005 年 5 月在距苏干湖 60 km 的青海冷湖气象局采集尘暴天气过程中的大气降尘样品, 具体收集方法见文献[25]。

2.2 实验方法

湖泊沉积物用四分法称取 1~3g 未经干燥的新鲜样品置于 200ml 烧杯中, 加入 10ml 浓度为 30% H_2O_2 静置 12 小时以上, 然后将样品放置在加热板上反应, 对个别有机质含量高反应剧烈的样品移入 1000 ml 离心杯中在 85℃ 下水浴加热, 对所有样品加入足量 H_2O_2 使其充分反应, 以保证去除沉积物中所含的有机质; 待反应结束后根据剩余有效样品量不同酌情加入至少 10ml 浓度为 10% 的 HCl 以去除样品中包含的碳酸盐 (湖泊自生、内生, 陆源); 经过上述化学处理方法至此, 湖泊沉积样品中的颗粒物应主要代表了输入湖泊沉积体系的陆源碎屑成分。将上述样品静置 24 小时以上, 用移液管小心导出上层清液后加入浓度为 0.05mol/L 的 $(NaPO_3)_6$ 分散剂 10ml 并用超声波振荡 10min 后以备上机测量。对有机质含量很低的尘暴降尘和冬季湖面冰雪样品的粒度前处理我们遵循鹿化煜的步骤^[26]。所有样品的粒度测试在兰州大学西部环境教育部重点实验室采用英国 MALVERN 公司生产的 MASTERSIZER 2000 型激光衍射粒度分析仪完成, 其测量范围覆盖 0.02~2000 μm , 测试重现率优于 0.5%, 准确率优于 1%。本文讨论所用样品的测试残差全部小于 1.5%。

2.3 粒度组分拟合的 Weibull 函数选择

某种沉积环境的粒度特征通常被认为与特定的搬运介质、搬运方式和一定的动力条件相联系。沉积物的颗粒大小, 一般来说符合于搬运介质的主要速率, 因此粒度频率曲线大多情况下呈单峰分布。单峰的频率曲线一般出现在只有单一动力过程且经过长距离搬运的沉积中。当频率曲线出现双峰或多峰时, 其形成的原因可以不同。譬如从具有季节韵律的湖相纹层中采集的样品, 或者从不同风速堆积而成的层状风成砂中采集的样品时, 频率曲线就可能出现多峰。沉积物在搬运过程中, 沿途如有大量新的碎屑物加入, 也能使频率曲线由单峰变为双峰^[27]。

前人的研究认为粒度分布中不同粒级的组分是由特定的搬运营力和不同的风化侵蚀机制产生的, 每个组分并不都完全服从对数正态分布形式^[28]。Weibull 分布函数能较好地反映风速 - 粒径关系^[29-31]。李振山等^[29]利用 Weibull 函数对北方典型沙漠化地区 30a 来风速资料拟合的结果表明不同时段内的风速分布效果都很好, 风速的方差较大, 且与平均风速呈正相关; 杨维军等^[30]用二参数 Weibull 分布函数对武汉地区 3 年近地层风速的拟合结果也表现出了 Weibull 分布函数在拟

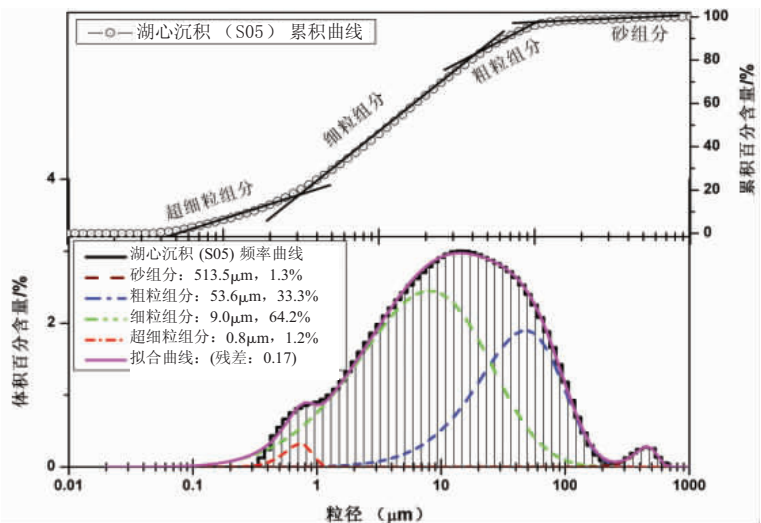


图 2 典型苏干湖表层沉积物粒度频率曲线和累积曲线对多种搬运方式的响应 (图中给出各组分的众数粒径和体积百分含量)

Fig. 2 Frequency and cumulative curves of typical surface sediments from Sugan Lake and their responses to various transportation means (The mode size and volume percentage of each component are labeled)

合风速上良好的特性；但孟庆珍等^[31]用包括 Weibull 分布在内的 4 种统计分布函数拟合成都 1933-1997 年间地面风速年极大值的渐进分布，比较结果表明 Gumbel 分布和对数正态分布拟合效果最好。

一般来讲，组成粒度累积曲线的每个直线段通常被解释为与特定的搬运方式（悬移、跃移、推移）相联系^[32]，通过试验苏干湖表层沉积物粒度频率曲线的 Weibull 函数拟合结果可以看出（图 2），粒度频率曲线的各个组分能更直观地显示出粒度与沉积物搬运方式间的这种联系。同时考虑到 Weibull 分布具有自由度较大和可塑性较强，并且可以通过改变形状参数近似正态、对数正态、指数等分布的优越性能，本文分析所用结果均由 Weibull 函数拟合得到。

3 样品 Weibull 拟合结果分析

3.1 湖泊表层沉积物

苏干湖表层沉积物的粒径分布范围为 0.31~1782.50 μm ，频率曲线表现出多峰分布的特征（图 3），主峰波动在 9.0~60.0 μm 之间，对应的百分含量在 41.2%~75.2%，5~100 μm 显现出一个百分含量较低的次级组分与百分含量较高的主峰间逐渐明显而相对平缓的过渡趋势，并且所有样品的频率曲线在 1 μm 上下和 100~1000 μm 范围存在百分含量为 0.9%~15.4% 的微弱隆起。从苏干湖西侧采样点 S01 到东侧河口附近采样点 S10 样品主峰由粗粒端向细粒端的移动，意味着搬运介质动力的衰减或者指示了湖泊沉积物不同的物质来源。Weibull 函数拟合结果表明，湖泊沉积全部可以被分解成 4 个组分，这样的结果从沉积动力学的角度考虑显然是反映出了多于一种的搬运方式或由短距离搬运导致的动力分选过程。超细粒组分的众数粒径和百分含量变化在这组样品中都比较稳定，众数粒径在 1 μm 上下，百分含量仅占 0.9%~3.8%。细粒组分和粗粒组分的众数粒径分别为 6.6~9.9 μm 和 53.6~82.5 μm ，百分含量为 19.6%~75.2% 和 13.9%~61.9%。细粒组分和粗粒组分百分含量此消彼长的相对变化在这组样品里主导了整个频率曲线的形态。从湖泊西侧粗粒组分百分含量明显

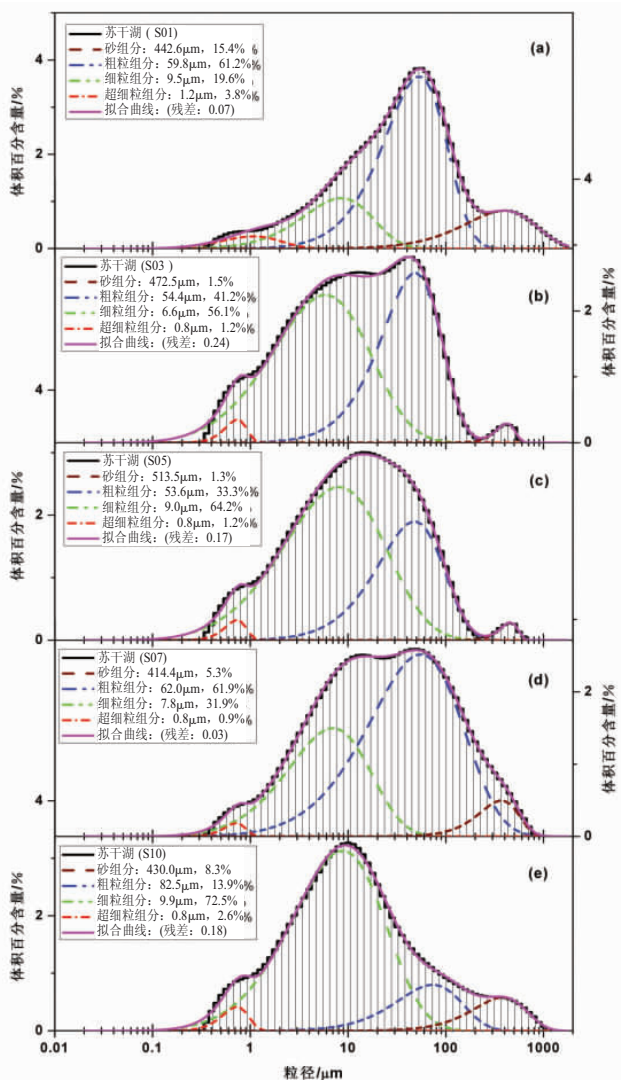


图 3 苏干湖现代表层沉积的粒度分布 (a-e, 从西向东, 图 1) 及其 Weibull 函数拟合结果 (图例与图 2 相同)

Fig. 3 Grain size distribution of modern surface sediments from Sugan Lake (a-e, west to east) and their Weibull function fitting results (The legend is the same as in Fig. 2.)

占优势到湖泊中间粗粒组分和细粒组分百分含量的接近相持状态, 再到湖泊东侧的细粒组分含量占有优势, 粗粒组分百分含量逐渐减少, 细粒组分百分含量逐渐增加, 说明了风力挟持粉尘颗粒从西到东的依次沉降似乎主控着粗粒组分的变化, 而细粒组分可以用颗粒物通过河流水动力搬运方式介入湖泊沉积来解释。结合对花海子盆地的野外实地考察发现该区三面环山西侧开口且地势较低, 据苏干湖 60 km 冷湖气象局获取的器测资料显示该区常年盛行风向为 WNW, 可以作为上述分析的一个佐证。砂组分的众数粒径波动在 414.4~513.5 μm 的范围内, 百分含量为 1.3%~15.4%。S01 (接近干旱地表) 和 S10 (河口附近) 砂组分的百分含量较靠近湖泊中间采样点为高, 暗示出风力搬运地表粉尘和河流携带颗粒物都可能成为湖泊沉积的物质来源, 而 S05 (湖心沉积) 砂组分众数粒径最粗 (513.5 μm) 说明粗颗粒另有途径进入湖心沉积体系。

3.2 冰面雪样

冰面雪样代表了湖泊自封冻以来冰面所捕获到的大气降尘和湖泊周围干旱地表近地面搬运的粉尘。该类沉积与尘暴降尘同属风力搬运沉积, 但粒度分布和尘暴降尘存在差异 (图 4), 原因在于冰封期间冰面接收到的大气粉尘是多次尘暴过程和 非尘暴天气降尘的混合, 同时强风可以把近地表的更粗颗粒带入冰面。冰面雪样的粒度频率曲线全部显示出多峰分布特征, 主峰位于 10~20 μm , 呈细偏态分布, 另在 1 μm 左右和大于 100 μm 的位置存在隆起, ICE3 样品 100 μm 附近发现有一不明显隆起。经过 weibull 函数拟合后的结果显示, ICE3 被分解成四个组分, ICE6 被分解为三个组分。超细粒组分和细粒组分的粒度特征稳定, 众数粒径分别为 1.1~1.2 μm 和 16.7~17.8 μm , 百分含量为 6.1%~6.4% 和 61.6%~68.7%; 粗粒组分众数粒径为 72.4~169.7 μm , 百分含量为 24.9%~30.4%; 砂组分众数粒径为 452.9 μm , 百分含量为 1.9%。ICE3 的采样点距离苏干湖西岸最近, ICE6 接近湖心位置, 这样

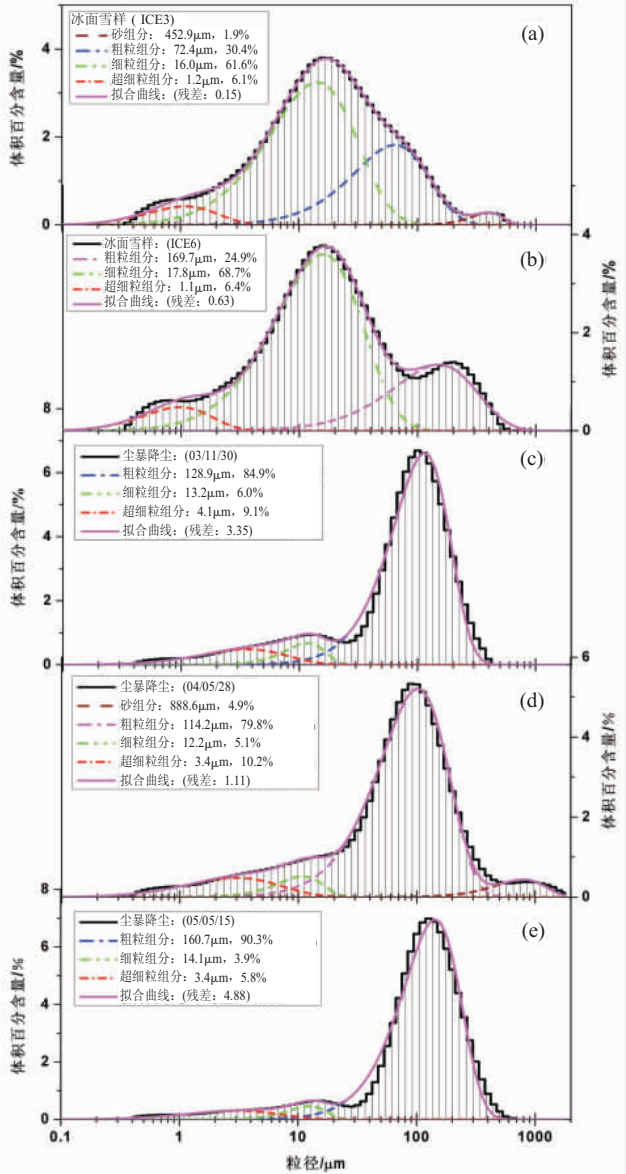


图 4 冬季苏干湖冰面粉尘 (a、b) 及非尘暴季节 (c) 和尘暴季节 (d、e) 尘暴降尘的粒度分布及其 Weibull 函数拟合结果 (图例与图 2 相同)

Fig. 4 Grain size distribution of winter dust trapped in lake ice (a, b), dust samples from non-dust storm period (c) and dust storm period (d, e) with their Weibull function fitting results (The legend is the same as in Fig. 2.)

以来距离粉尘物源最近的 ICE3 位置最容易接收到来自湖泊周围干旱裸地的粉尘物质而在粒度频率曲线上表现出粗颗粒含量较多；同时，冰面雪样细粒组分和超细粒组分与尘暴降尘众数粒径基本一致、含量较尘暴降尘明显高出的特征表明了细粒和超细粒组分粉尘颗粒由于其比表面积大一旦被冬季湖泊冰面捕获将很难逃逸最终沉入湖底。

3.3 尘暴降尘

单次大气尘暴降尘样品的粒度分布十分相似，表现出由一个位于 100~200 μm 的主峰和百分含量很低的细颗粒端组成，呈粗偏态分布 (图 4)，唯有 2004 年 5 月 28 日的尘暴降尘在大约 1000 μm 略微表现出一定含量的隆起。Weibull 分离组分研究表明，尘暴降尘可以被分解为 3~4 个组分。粗粒组分 (主峰) 的众数粒径变化于 114.2~160.7 μm ，含量高达 79.8%~90.3%，而其他组分的含量都普遍偏低 (3.9%~10.2%)。从大气动力学的角度来看，3~4 个组分反映了不同粒级的粉尘对尘暴过程中不稳定风场强度的响应。2004 年 5 月 28 日的尘暴降尘与 2003 年 11 月 30 日和 2005 年 5 月 15 日的尘暴降尘相比在最粗粒级的砂组分，显然指示了当天当次尘暴天气过程强劲的风动力条件。需要说明的是，按照拟合参差最小的原则，Weibull 函数不仅可以把 0~30 μm 的细颗粒端拟合为超细粒组分和细粒组分，还可以将粗粒组分再细分为部分重叠而又相互独立的两个组分，不过，超细粒组分和细粒组分在冬季湖泊冰面粉尘和湖泊沉积物里都普遍存在，并且粒级分布与尘暴降尘在这两个组分上大体相当具有可比性，然而如果将尘暴降尘的粗粒组分拟合成 2 个子组分后是否可以从大气动力学的角度与风动力条件相联系，值得商榷，有待更深入对 Weibull 函数与风动力过程的研究，因此本文暂且没有对尘暴降尘样品的粗粒组分做进一步的分离，这也就是为什么尘暴降尘的拟合残差要比其他样品略高的原因。

3.4 苏干河河口表层沉积物

采自于苏干河河口附近位置的河流边滩砂粒径分布范围为 0.35~632.46 μm ，主峰在 90.7 μm ，体积百分含量为 57.5%，呈粗偏态分布 (图 5)。虽然河流边滩砂与河床砂粒度分布非常相似^[22]，并且较河流悬移质 (通常为小于 100 μm 或 74 μm) 的粒度分布主峰偏粗^[27, 33]，但并不影响苏干河边滩砂细粒端粒度分布包含有可入湖悬移质的信息，实际上，经过 Weibull 函数拟合后的边滩砂粒度频率曲线在细粒端可以被分解成百分含量较低的 2 个组分，于是可以认为苏干河边滩砂属于悬移质粒径的组分代表了有可能通过河流搬运途径带入湖泊沉积体系的颗粒物大小范围。Weibull 函数拟合的结果显示，苏干河边滩砂粒度分布被分解为 4 个组分，这与现代西峰河流边滩砂粒度被分解成众数粒径分别为 9.0 μm 和 236.8 μm 的 2 个组分的结果不太一致。苏干河与西峰现代河流边滩砂在细粒组分上有非常好的一致性，揭示出河流搬运沉积的特点；苏干河边滩砂粗粒组分分选良好百分含量相对较高的特点也暗示出其水动力搬运的成因，而主峰众数粒径偏细的特征

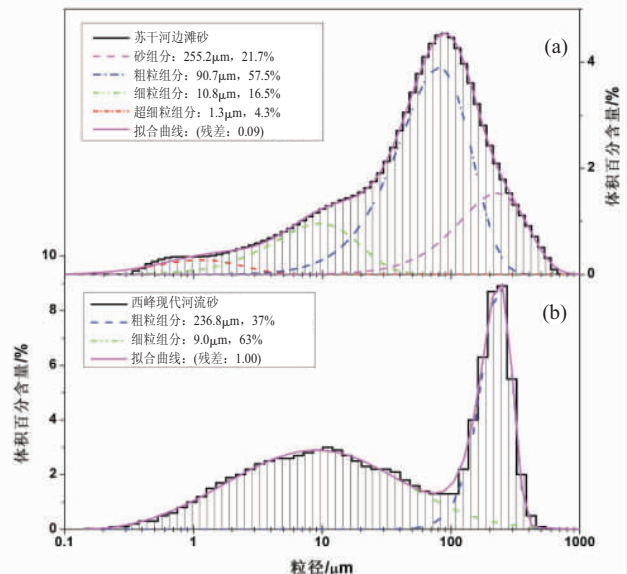


图 5 苏干河与西峰现代典型河流沉积物的粒度分布及其 Weibull 函数拟合结果 (图例与图 2 相同)

Fig. 5 Grain size distribution of typical river sediments from Sugan River and Xifeng with their Weibull function fitting results

(The legend is the same as in Fig. 2.)

说明了苏干河水动力弱携沙能力有限。本研究区内干旱的地表和强烈的风沙活动使得河流相沉积物中不可避免地包含有风积粉尘的组分。苏干河边滩砂超细粒组分的存在表明了大气粉尘沉降在细粒端对河流相沉积环境的二次改造,而苏干河边滩砂粒级最粗的砂组分由于其存在于河流相沉积环境而又分选很差,我们推测这与多年来苏干湖东侧河流补给区遭受沙尘颗粒的改造密切相关。

4 讨论

为了查明现代过程苏干湖底层沉积物不同粒级组分中大气粉尘颗粒的可能贡献,示踪出湖心粒度组分的可能来源,我们对研究区内有可能通过大气或河流搬运沉积并最终影响到湖泊沉积物粒度组成的两类大气粉尘样品(尘暴降尘、冬季湖泊冰面雪样)和一个河流沉积样品与苏干湖现代表层沉积物的粒度分布特征进行比较(图6)。比较所用粒度频率曲线均以尽可能包含最多粒度组分信息为原则。

(1) 利用 weibull 函数进行组分拟合的结果表明:苏干湖表层沉积物砂组分的众数粒径变化在 414.4–513.5 μm , 平均值为 463.9 μm , 这里所选的湖心 S05 砂组分众数粒径为 513.5 μm 。简单计算不难发现尘暴降尘在砂组分上众数粒径高出苏干湖湖心表层沉积约 1.7 倍,而与此同时可以代表尘暴粉尘释放主体的粗粒组分粉尘粒径又低于湖心表层沉积近 4.5 倍,这就暗示出直接通过尘暴吹扬粉尘使砂组分颗粒进入湖泊沉积体系的可能性很小。而冰面雪样中存在众数粒径为 452.9 μm 的砂组分与湖心表层沉积砂组分粒级最为接近,可见冬季由湖泊周边干旱地表提供的粉尘通过近地面短距离方式到达湖泊冰面而被捕获后待开春冰雪消融将粗颗粒沉降于湖底的途径应该是现代过程中湖底砂组分的主要来源,这种输入粉尘的方式显然预示着比尘暴天气收集到的降尘更为局地的风沙活动,于是可以认为湖心表层沉积的砂组分与湖泊周边近地面强沙尘活动有关。

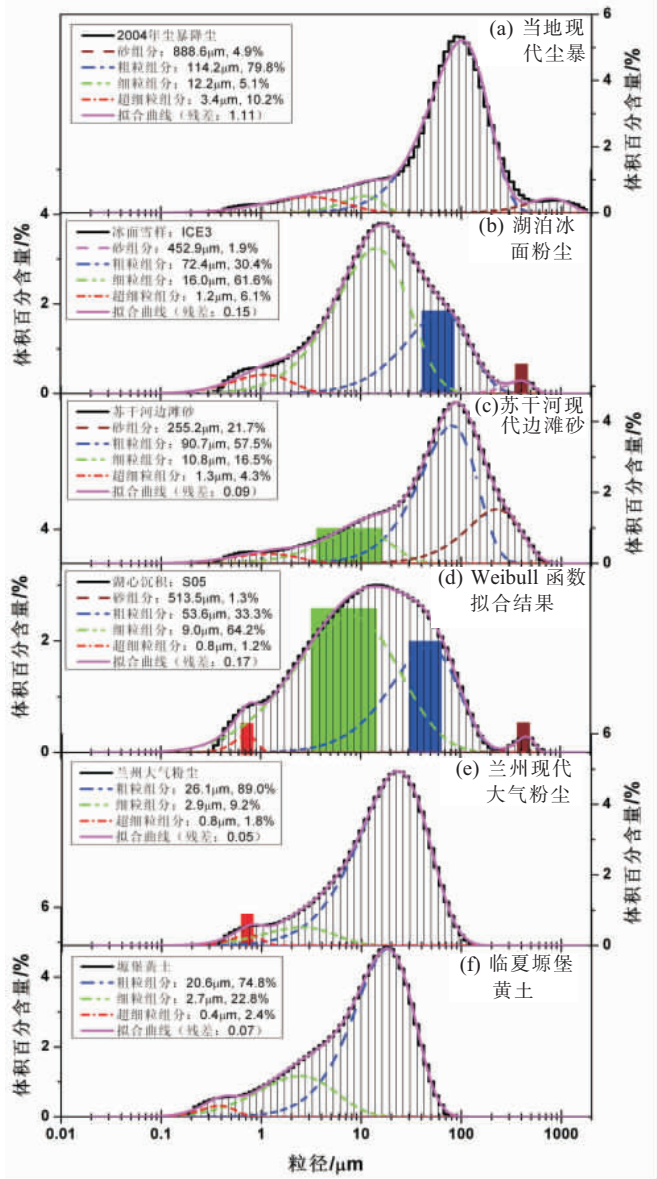


图 6 苏干湖表层沉积物与其他沉积的粒度分布比较
Fig. 6 Comparison of grain size distribution and Weibull function fitting results of Sugan Lake surface sediments with those of dust samples from dust storms, dust trapped in lake ice, river sediments, atmospheric dust in Lanzhou city and loess samples from Yuanbao Loess section

(2) 苏干湖表层沉积粗粒组分的众数粒径变化在 53.6~82.5 μm , 平均值为 68.1 μm , 湖心粗粒组分众数粒径为 53.6 μm 。冰面粉尘与边滩砂的粗粒组分分别含有众数粒径为 72.4 μm 和 90.7 μm 的组分, 与湖泊沉积在该组分上最为接近, 如果说湖心沉积在粗粒组分上的众数粒径要降低到 53.6 μm 的水平, 那么显然冰面粉尘对湖心沉积的影响要远大于河流沉积粗粒组分, 因此可以认为湖心记录到的粗粒组分与冬季大风条件下湖泊冰面接受的风尘粉尘关系更为密切。同时我们也注意到, 虽然尘暴降尘的粗粒组分众数粒径大出湖泊表层沉积约 2 倍, 但尘暴降尘在此组分百分含量异常高的特征却不能被忽略, 仍有极大可能在尘暴发生的大风天气情况下进入湖泊沉积。湖泊沉积 S01 的粒度组分分布形式类似尘暴降尘, 粗粒组分含量高、分选好, 而细粒和超细粒组分含量高于尘暴降尘应该是由冬季湖泊冰面易于捕获比表面积大的细粒、超细粒粉尘引起的, 就粗粒组分而言, 其他湖泊表层沉积物 (S03、S05) 也都呈现出了相似特征, 不过更多含量细粒组分的介入明显改变了频率曲线整体的形态。因而我们认为粗粒组分很可能记录了区域性的尘暴事件。

(3) 湖泊细粒组分众数粒径变化在 6.6~9.9 μm 之间, 平均值为 8.3 μm , 湖心记录到的细粒组分众数粒径为 9.0 μm 。冰面雪样该组分众数粒径平均为 16.9 μm , 尘暴降尘平均为 13.2 μm , 苏干河边滩砂细粒组分众数粒径为 10.8 μm , 最接近湖心沉积。Pye 的研究揭示出大气中能长距离搬运的物质几乎都是小于 10 μm 的颗粒^[34], 李军等^[33]的研究显示长江口悬浮体的粒度主要集中于 1~10 μm , 可见风动力和水动力都有可能搬运小于 10 μm 的细粒组分, 就本研究而言冰面雪样提供粉尘的数量明显受到季节性的限制, 而尘暴降尘则受到发生频次的制约, 唯有河流搬运的颗粒物可以常年最大限度的为湖泊沉积提供细粒组分。另外, 靠近苏干河口的 S10 砂组分含量较高, 暗示出了较强的搬运介质动力, 但粗粒组分的特征明显有别于风力搬运沉积的尘暴降尘和湖泊西侧的 S01, 没有表现出像尘暴降尘那样粗粒组分含量高、分选好的大风天气降尘特征, 就此也看出河流搬运的颗粒物在 S10 细粒组分 (主峰) 上起到了重要作用。因而流域内直接补给苏干湖的短小河流来水的增加将导致丰富的细粒组分供给苏干湖沉积, 于是我们初步认为湖泊沉积的细粒组分更大程度上反映了流域径流状况。

(4) 湖泊表层沉积粒度中超细粒组分除靠近西侧的 S01 为 1.2 μm 外, 其余均为 0.8 μm 。湖泊沉积物当中的超细颗粒通常被认为与化学或生物成因有关, 一方面是由于干旱的粉尘源区在地质历史时期就经历过长期的风蚀作用, 地表的细颗粒严重缺失, 大部分被搬运并沉积到如今的黄土高原地区^[8, 9, 35-39]甚至西北太平洋区域^[40-42], 另一方面湖泊水体中的化学和生物过程复杂多样^[43], 容易形成极细颗粒。冰面粉尘 (ICE3) 含有众数粒径为 1.2 μm 的超细粒组分, 这也就不难解释湖泊西侧 S01 超细粒组分粉尘的来源, 但湖泊沉积里更具普遍性的众数粒径为 0.8 μm 的超细粒组分并没有得到很好的解释。为了能从更大的空间尺度上探究超细粒组分的环境意义, 我们把苏干湖现代湖心表层沉积物粒度同能够代表兰州上空大气粉尘的新鲜降雪样品和临夏塬堡黄土粒度组分进行了比较, 结果发现, 兰州上空大气粉尘的超细粒组分众数粒径也恰为 0.8 μm , 而临夏塬堡黄土的超细粒组分众数粒径为 0.4 μm , 与孙东怀报道^[44]的黄土高原黄土和古壤中普遍存在平均粒径大致为 0.4 μm 超细粒组分结果一致。如果说中国北方广泛分布的黄土记录的超细粒组分与成壤作用有关, 这也就支持了众数粒径为 0.8 μm 的超细粒组分应当是形成风成黄土的大气粉尘本底值, 并且前人的研究也认为能够经历上千公里长距离搬运的粉尘绝大部分是小于 2 μm 的颗粒^[34]。而临夏塬堡黄土超细粒组分在全样中的含量仅为 2.4%, 比黄土/古土壤大致 5%~6% 要低, 应与夏季风强度密切相关。此外, 源区尘暴降尘普遍存在 3 个组分 (超细粒、细粒, 粗粒) 与中国黄土的三峰分布特征高度相似^[15, 44], 临夏塬堡黄土中粒度分布较源区尘暴降尘整体偏细和细粒组分含量增高, 暗示出了粉尘由源区释放、传

输、沉降于黄土高原的过程, 兰州地区上空大气粉尘粒度同样类似的分布形式佐证了这一传输机制。而由中国黄土超细粒组分含量少于源区粉尘的结果来看, 超细粒组分将在更大的空间尺度上参与物质能量的传输交换。可见, 超细粒组分所表征的粒径范围是整个中国北方干旱区大气粉尘(气溶胶)的本底值。

5 结论

地处西北内陆干旱区的苏干湖位于柴达木盆地北缘, 该区地表植被匮乏, 沙尘物质丰富, 大风天气盛行, 粉尘释放过程强烈, 是中亚粉尘源区的重要组成部分, 即便是由泉水汇集而成直接补给苏干湖的河流相沉积体系中也必然包含有风沙组分。本文利用 Weibull 函数拟合粒度频率曲线的方法, 将采自于现代不同沉积环境可以分别代表通过风力和河流搬运粉尘进入湖泊沉积体系样品的粒度与苏干湖表层沉积物粒度组成进行比较, 结果表明: 苏干湖表层沉积物的砂组分主要在冬季经由近地面推移、跃移的方式将湖泊周边干旱地表的粉尘颗粒搬运至湖泊冰面待来年春季冰雪消融后沉入湖底, 该组分因而与冬季经历的近地面强沙尘活动密切相关。拟合得到的湖泊沉积粗粒组分的众数粒径与尘暴降尘不尽相同, 但粒径分布范围大体一致, 尘暴降尘的粗粒组分百分含量异常突出, 是尘暴降尘粒度分布的特征组分, 湖泊沉积的这一组分也就记录了区域性的尘暴活动强度。尽管风力和水力都有可能搬运小于 $10\ \mu\text{m}$ 的细粒组分, 但毕竟冬季冰面和尘暴降尘所能提供的粉尘明显受到季节和频次的限制, 经常性的河流携带颗粒输入湖泊沉积应该是该组分物质的主要来源, 因此细粒组分更大程度上反映了流域径流状况。与黄土记录中的超细粒组分众数粒径相比, 苏干湖沉积中发现的超细粒组分略粗, 但与兰州地区大气粉尘众数粒径相当一致, 故而苏干湖表层沉积的超细粒组分有可能代表了中国北方干旱区大气粉尘的本底值。

致谢: 张科硕士协助粒度实验分析, 青海省冷湖行政委员会气象局协助收集尘暴降尘样品。在此致以诚挚谢意。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007, 29-30. 131-132; 153-180.
- [2] Martin J H. Glacial-interglacial CO_2 change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, 1990, 5: 1-13.
- [3] Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E et al. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 1996, 383: 495-501.
- [4] Jickells T D, An Z S, Andersen K K et al. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 2005, 308: 67-71.
- [5] Yung Y L, Lee T, Wang C H et al. Dust: A diagnostic of the hydrologic cycle during the Last Glacial Maximum. *Science*, 1996, 271: 962-963.
- [6] Overpeck J, Rind D, Lacs A et al. Possible role of dust-induced regional warming in abrupt climate change during the last glacial period. *Nature*, 1996, 384: 447-449.
- [7] Maher B A, Dennis P F. Evidence against dust-mediated control of glacial-interglacial changes in atmospheric CO_2 . *Nature*, 2001, 411: 176-180.
- [8] Zhang Xiaoye, Zhang Guangyu, Zhu Guanghua et al. Elemental tracers for Chinese source dust. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(5): 423-430. [张小曳, 张光宇, 朱光华 等. 中国源区粉尘的元素示踪. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(5): 423-430.]
- [9] Zhang Xiaoye. Source distributions, emission, transport, deposition of Asian dust and loess accumulation. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(1): 29-40. [张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土沉积. *第四纪研究*, 2001, 21(1): 29-40.]

- [10] Bory A J-M, Biscaye P E, Grousset F E. Two distinct seasonal Asian source regions for mineral dust deposited in Greenland (North GRIP). *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(4): 1167-1170.
- [11] Prins M A, Vriend M, Nugteren G et al. Late Quaternary aeolian dust input variability on the Chinese Loess Plateau: inferences from unmixing of loess grain-size records. *Quaternary Science Review*, 2007, 26:230-242.
- [12] Wu Haibin, Chen Fahu, Wang Jianmin. Temporal and spatial variations of the Loess accumulation rate and its significance on the Loess Plateau during Quaternary. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 147-156. [吴海斌, 陈发虎, 王建民. 黄土高原第四纪粉尘沉积速率的时空变化及其意义. *沉积学报*, 1998, 16(1): 147-156.]
- [13] Sun Youbin, An Zhisheng. History and variability of Asian interior aridity recorded by eolian flux in the Chinese Loess Plateau during the past 7 Ma. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(9): 769-779. [孙有斌, 安芷生. 最近 7Ma 黄土高原风尘通量记录的亚洲内陆干旱化的历史和变率. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(9): 769-776.]
- [14] Cao Junji, Zhang Xiaoye, An Zhisheng et al. Variations of dust flux in the Loess Plateau during 6.5~2.2Ma: implications for East Asian winter monsoon evolution and Asian aridity. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 97-101. [曹军骥, 张小曳, 安芷生等. 最近 6.5~2.2Ma 黄土高原粉尘通量变化及其指示的东亚冬季风演化和亚洲干旱化. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 97-101.]
- [15] Sun Donghuai, Lu Huayu, Rea D K et al. Bimode grain-size distribution of Chinese Loess and its paleoclimate implication. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 327-335. [孙东怀, 鹿化煜, Rea D K 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义. *沉积学报*, 2000, 18(3): 327-335.]
- [16] Yao Tandong, Wu Guangjian, Pu Jianchen et al. Relationship between calcium and atmospheric dust recorded in Guliya ice core. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(9): 888-892. [姚檀栋, 邬光剑, 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(9): 888-892.]
- [17] Wang Ninglian, Thompson L G, Davis M E. Variations of atmospheric dust loading in the southern and northern Tibetan Plateau over the last millennium recorded in ice cores. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 752-761. [王宁练, Thompson L G, Davis M E. 近 1000 年来青藏高原南部和北部大气尘埃载荷变化的冰芯记录. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 752-761.]
- [18] Chen Jing'an, Wan Guojiang. Sediment particle size distribution and its environmental significance in Lake Erhai, Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 1999, 19(2): 175-182. [陈敬安, 万国江. 云南洱海沉积物粒度组成及其环境意义辨识. *矿物学报*, 1999, 19(2): 175-182.]
- [19] Xiao J L, Inouchi Y, Kumai H et al. Eolian quarts flux to Lake Biwa, Central Japan, over the past 145000 years. *Quaternary Research*, 1997, 48(1): 48-57.
- [20] Peng Y J, Xiao J L, Nakamura T et al. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 467-479.
- [21] Jin Zhangdong, Wang Sumin, Shen Ji et al. Dust-storm events in Daihai Lake area, Inner Mongolia during the past 400 years: Evidence from grain size analysis of lake sediments. *Journal of Lake Science*, 2000, 12(3): 193-198. [金章东, 王苏民, 沈吉等. 岱海地区近 400 年来的“尘暴”事件: 来自岱海沉积物粒度的证据. *湖泊科学*, 2000, 12(3): 193-198.]
- [22] Sun Donghuai, An Zhisheng, Su Ruixia et al. Mathematical approach to sedimentary component partitioning of polymodal sediments and its applications. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(3): 269-276. [孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用. *自然科学进展*, 2001, 11(3): 269-276.]
- [23] Liu Shuqin, Zhang Fasheng. *Sedimentation Environment and Salinization in the Mahai Basin in the Qaidam Basin of China*. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 12-14. [刘淑琴, 张发胜. 柴达木马海盆地沉积环境和成盐作用. 北京: 地质出版社, 1992. 12-14.]
- [24] Zhou Aifeng, Chen Fahu, Qiang Mingrui et al. The discovery of annually laminated sediments (varves) from shallow Suga Lake in inland arid China and their paleoclimatic significance. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(7): 941-948. [周爱锋, 陈发虎, 强明瑞等. 内陆干旱区柴达木盆地苏干湖年纹层的发现及其意义. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(7): 941-948.]
- [25] Qiang Mingrui, Xiao Shun, Zhang Jiawu et al. Impact of wind velocity on dustfall during dust storm events in northern Qaidam Basin, China. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(2): 290-295. [强明瑞, 肖舜, 张家武等. 柴达木盆地北部风速对尘暴事件降尘的影响. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 290-295.]
- [26] Lu Huayu, An Zhisheng. An experimental study on the impacts on measurement of the grain size of loess sediment from pretreatment. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(23): 96-101. [鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究. *科学通报*, 1997, 42(23): 96-101.]
- [27] Ren Mingda, Wang Nailiang. *Introduction to Modern Depositional Environments*. Beijing: Science Press, 1985. 13-14; 80. [任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论. 北京: 科学出版社, 1985. 13-14; 80.]

- [28] Rogers J J-W, Schubert C. Size distributions of sedimentary populations. *Science*, 1963, 141: 801-802.
- [29] Li Zhenshan, Zhang Qifeng, Bao Huijuan. Wind-velocity variation in recent 30 years in three typical desertified counties of North China. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(1): 20-26. [李振山, 张琦峰, 包慧娟. 我国北方典型沙漠化地区近 30a 风速变化特征. *中国沙漠*, 2006, 26(1): 20-26.]
- [30] Yang Weijun, Wang Bin. Fitting to wind velocity of surface layer using two-parameter Weibull distribution function and its application. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1999, 10(1): 118-122. [杨维军, 王斌. 二参数 Weibull 分布函数对近地层风速的拟合及应用. *应用气象学报*, 1999, 10(1): 118-122.]
- [31] Meng Qingzhen, Du Jian. Comparison of fitting results of four distribution functions to asymptotic distribution of yearly maximum surface wind speed over Chengdu. *Journal of Chengdu Institute of Meteorology*, 2001, 16(02): 97-104. [孟庆珍, 杜健. 成都地面风速年极值的 4 种分布函数拟合结果的比较. *成都信息工程学院学报*, 2001, 16(02): 97-104.]
- [32] The Geology Team of Chengdu College of Geology. *Sediment Grain Size Analysis and Its Application*. Beijing: Geological Publishing House, 1978. 55-66. [成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用. 北京: 地质出版社, 1978. 55-66.]
- [33] Li Jun, Gao Shu, Zeng Zhigang et al. Particle-size characteristics and seasonal variability of suspended particulate matters in the Changjiang River Estuary. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(5): 499-510. [李军, 高抒, 曾志刚等. 长江口悬浮体粒度特征及其季节性差异. *海洋与湖沼*, 2003, 34(5): 499-510.]
- [34] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits*. Beijing: China Ocean Press, 1991. 1-2. [肯尼思·派伊著. 台益阳, 张选阳译. 风蚀粉尘及粉尘沉积物. 北京: 海洋出版社, 1991. 1-2.]
- [35] Liu Tungsheng. *The Loess Deposits in China*. Beijing: Science Press, 1965. 1-244. [刘东生. 中国的黄土堆积. 北京: 科学出版社, 1965. 1-244.]
- [36] Liu Tungsheng. *Loess and the Environment*. Beijing: Science Press, 1985. 1-238.
- [37] An Z S, Kukla G, Porter S C et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 1991, 18: 125-132.
- [38] Sun Jimin. Provenance, forming mechanism and transport of loess in China. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 175-183. [孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 175-183.]
- [39] Fang Xiaomin, Han Yongxiang, Ma Jinhui et al. Characteristics of dust weather and loess deposition in the Qinghai-Tibetan Plateau: A case study on the process of dust events on March 4, 2003. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(11): 1084-1090. [方小敏, 韩永翔, 马金辉等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积: 以 2003-03-04 拉萨沙尘天气过程为例. *科学通报*, 2004, 49(11): 1084-1090.]
- [40] Zhang Xiaoye. Review on sources and transport of Loess materials on the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 181-186. [张小曳. 有关中国黄土高原黄土物质的源区及其输送方式的再评述. *第四纪研究*, 2007, 27(2): 181-186.]
- [41] Rea D K, Leinen M, Janecek T R. Geological approach to the long-term history of atmospheric circulation. *Science*, 1985, 277: 721-725.
- [42] Hovan S A, Rea D K, Pias N G et al. A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}\text{O}$ records: Aeolian flux to the North Pacific. *Nature*, 1989, 340: 296-298.
- [43] Lerman A (ed.). *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. Beijing: Geological Publishing House, 1989. 184-187. [A·莱尔曼主编. 王苏民等译. 史惠泉, 朱季文等校. 湖泊的化学地质学和物理学. 北京: 地质出版社, 1989. 184-187.]
- [44] Sun Donghuai. Super-fine grain size components in Chinese Loess and their palaeoclimatic implication. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 928-936. [孙东怀. 黄土粒度分布中的超细粒组分及其成因. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 928-936.]

Distribution Pattern of Grain Size in Surface Sediments from Sugan Lake and Its Potential in Recording Aeolian Dust in Arid China

XIAO Shun, CHEN Fahu, QIANG Mingrui,
ZHANG Jiawu, ZHOU Aifeng, SUN Donghuai

(Center for Arid Environment and Paleoclimate Research (CAEP), Key Laboratory of Western China's Environment Systems, MOE, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Sediments from inland enclosed lakes in arid regions of northwestern China provide ideal documents in reconstructing high-resolution history of aeolian dust and aerosols. Sugan Lake in northern Qaidam Basin on the Tibetan Plateau is an enclosed shallow lake mainly fed by groundwater, in which annually laminated varves are well preserved since mid- and late Holocene. Surface sediments from Sugan Lake were collected and analyzed for grain size. Frequency curves of samples indicated multi-components in the surface sediments. Weibull function fitting employed to the grain size distribution suggested that there are four components from clay to sand in the surface sediments characterized by their respective modes. Super-fine component has mode size around 1 μm , fine-grained component has mode of 5-10 μm , coarse-grained component has mode of 50-100 μm , and the mode of sand component is about 500 μm . The main components in the surface sediments appear in fine or coarse grains. Particles trapped in the lake ice in winter and dust storms during the same period present the similar distribution pattern in grain size. The main component of aeolian dust from lake ice is composed of particles sized between 15 and 20 μm , and sand component (with mode size of 452.9 μm) appeared, indicating that sand particles were transported to Sugan Lake during the winter. Dust samples from dust storm period (May) or non-dust storm period (November) prevalently consist of three components without sand grains. During strong dust storm events, however, four components including sand are identified, the main component of which still has a size of 100-200 μm . Our results show that the sand component of the surface sediments in Sugan Lake has been transported by ambient strong dust storm activities; the coarse grains have most likely recorded the regional dust storm events; fine component seems to have indicated the intensity of water supply in the basin; super-fine component as extensively deposited in the Chinese loess, may have represented the background level of atmospheric dust and aerosols in the arid region of northwestern China. Therefore, the sediments from Sugan Lake have documented the regional aeolian dust and dust-storm events and have the potential in reconstructing the history of aeolian dust activities.

Key words: Sugan Lake; arid region; aeolian dust; grain size distribution pattern; Weibull function