

文章编号: 1000-0550(2009) 04-0691-06

青藏高原北部可可西里地区近 4000 年来尘暴事件初探¹

——来自库赛湖沉积物粒度的证据

王永波¹ 刘兴起¹ 张恩楼¹ 羊向东¹ 姚波^{1,2}

(¹ 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室 南京 210008;

² 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 通过分析库赛湖近 4000 年来湖相沉积物粒度组成特征, 对比人工俘获风成物粒度特征, 表明库赛湖沉积物中粗颗粒组分 (> 64 μm) 主要由风力搬运作用进入湖泊沉积, 记录了该地区尘暴事件历史。重建的尘暴事件序列表明: 2 500~ 800 cal aBP 时段为该地区近 4 000 年来尘暴事件高频发生的阶段, 4 000~ 2 500 cal aBP 和 800 cal aBP 以来的时段尘暴事件发生频率较低; 近千年来尘暴事件主要发生于小冰期内的 3 次降温时段。与贵州董歌洞石笋氧同位素对比分析表明, 库赛湖地区近 4 000 年来气候变化受亚洲季风的影响, 尘暴事件多发生于夏季风较弱的气候干冷时段。

关键词 库赛湖 粒度特征 尘暴事件 亚洲季风 青藏高原北部

第一作者简介 王永波 男 1983 年出生 硕士 湖泊沉积与环境演变 E-mail: yongbowang@hotmail.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

大气粉尘不仅可以指示气候变化, 也可能是全球气候系统变化的驱动因素之一^[1]。全球粉尘源区主要分布在有大沙漠的北非、北美、澳大利亚和中亚地区, 我国西部干旱—半干旱地区在中亚地区粉尘输出中具有重要地位^[2~5]。

黄土记录中的尘暴事件已经得到广泛和深入的研究^[6~8], 但其主要集中在千年和百年尺度上。利用现代器测资料和历史文献记录仅仅能对近数十至数百年来尘暴事件进行研究^[5, 7, 9]。湖泊沉积物, 尤其干旱—半干旱地区封闭湖泊, 由于其接受单一流域内物质和沉降的风尘物质, 记录区域气候和湖泊自身演化的历史, 可用来重建沉积历史过程中的尘暴事件或风沙活动, 往往能够提供较长时间尺度高分辨率的记录^[10~12]; 而湖泊沉积物的粒度组成可将不同动力机制下的沉积物加以区分, 通常被认为是历史时期干旱和风沙状况的重要指标^[11~14]。

青藏高原地区由于其较高的尘暴发生频率, 且粉尘容易被扬升到西风急流区, 也是主要的粉尘源地之一^[15]。库赛湖位于青藏高原北部可可西里自然保护区, 受人类活动影响较小, 能够敏感地反映地质历史时期气候的自然变迁状况。本文将对库赛湖沉积岩芯(长 637 cm)的粒度指标进行高分辨率的分析,

重建该地区近 4000 年来的尘暴事件记录, 并同相关记录进行对比, 探讨青藏高原北部百年—千年尺度的气候环境特点及演化趋势。

1 研究区域概况、样品采集与测试分析

库赛湖(35°30′~ 35°50′N, 92°30′~ 93°15′E)位于青藏高原北部可可西里地区(图 1)。流域南、北部出露上三叠统深灰、灰黑色砂质板岩, 出露岩体断面清晰可见; 东部为第四系上更新统冲积、洪积和冰水堆积砂砾层, 并分布一些湖泊退缩后残留的小湖^[16]。湖区属青南高寒草原半干旱气候, 年均气温变化在 0~2.0℃, 年降水量变化在 100~150 mm。湖泊周围植被以典型的高寒草原为主, 湖东南角分布有一些盐化草甸。库赛湖海拔高度为 4 475 m, 湖西北—东南向长 42.5 km, 最大宽 13.0 km, 平均宽 5.98 km, 湖泊面积 254.4 km²。湖泊集水面积 3700 km², 补给系数 13.1, 主要依靠源于大雪峰(5 863 m)的库赛河补给。湖水 pH 值 8.3 矿化度 28.54 g/L, 属硫酸镁亚型微咸水湖^[17, 18]。

2006 年 6 月, 利用奥地利产 UWITEC 水上平台, 在库赛湖中部(35°43′18.4″N, 92°55′11.8″E)水深

¹ 国家重点基础研究发展规划项目(973 计划)子课题(批准号: 2005CB422002)资助。

收稿日期: 2008-09-02 收修修改稿日期: 2008-10-29

14.5 m 处, 采得芯长 637 cm 的连续岩芯 (KS-2006) 和短柱样各 1 根 (图 1)。短柱样于现场以 0.5 cm 间隔分样, 用于 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 测年。将 KS-2006 岩芯返回实验室后, 以 1 cm 的间隔进行分样。整个岩芯岩性较为一致, 以粉砂为主, 除表层 20 cm 沉积物由于含水量较大层次不明显外, 整个岩芯呈交互状分布的明暗层理条带。

岩芯样品以 2 cm 间隔进行了粒度测定, 共计 320 个样品。取 0.5 g 左右样品置于 50 ml 烧杯中, 加入 10% 的 H_2O_2 溶液 10 ml 后搅拌; 静置 12 小时后加入 10% 的 HCl 溶液 10 ml 静置 12 小时; 加入 10%

的 $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 溶液 10 ml 超声波振荡后进行测量。测量在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室进行, 测量仪器为英国产 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪, 测量范围为 0.02~2000 μm , 测量重复误差小于 1%。

钻孔年代序列由经过 ^{137}Cs ^{210}Pb 校正后的 7 个 AMS ^{14}C 年龄建立 (表 1), 利用日历年龄对各层位年代进行内插和外推, 经外推岩芯底部年龄为 3907 cal aBP, 整个钻孔沉积速率为 0.07~0.24 cm/a 平均沉积速率为 0.16 cm/a^[19]。

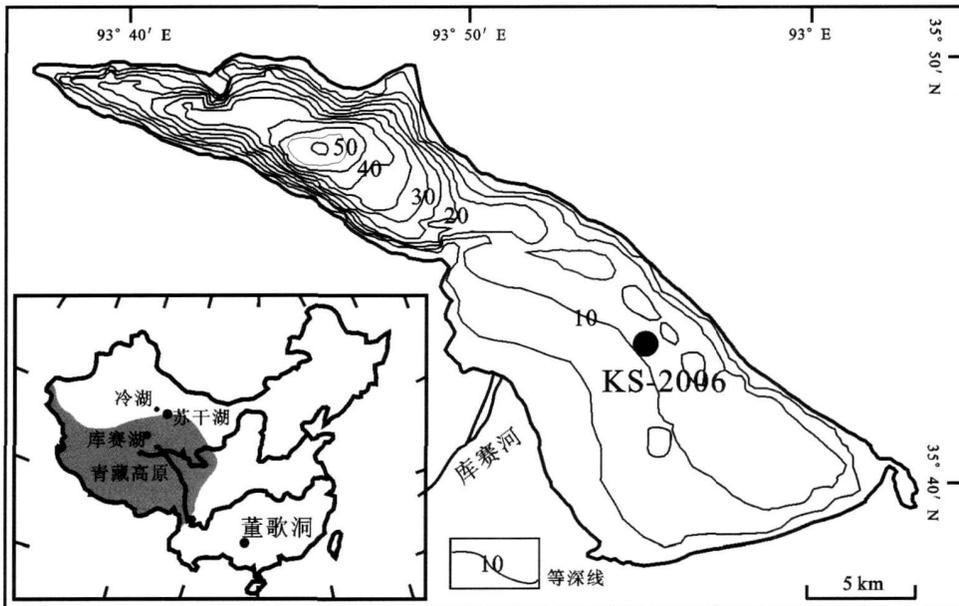


图 1 库赛湖等深线及采样点位置图

Fig. 1 The location of sampling point and depth contours of Kusai Lake

表 1 库赛湖 KS-2006 孔 AMS ^{14}C 年龄测定结果

Table 1 AMS ^{14}C results for KS-2006 Core

样品编号	深度 /cm	AMS ^{14}C 年代 / ^{14}C aBP	碳库校正年代 / ^{14}C aBP	日历年代 /cal aBP	平均值 /cal aBP
k sl-1 82	82	3670 ± 35	270 ± 35	285~319	302
k sl-1 102	102	3855 ± 30	455 ± 30	500~522	511
k sl-2 26	201	4580 ± 35	1180 ± 35	1061~1146	1104
k sl-2 126	301	5235 ± 35	1835 ± 35	1729~1817	1773
k sl-3 下 64	500	6275 ± 45	2875 ± 45	2955~3065	3010
k sl-4 70	603	6630 ± 40	3230 ± 40	3392~3477	3435
k sl-4 100	633	6955 ± 40	3555 ± 40	3825~3904	3865

2 沉积物粒度特征

根据沉积物机械分选的原理^[20], 在没有“外源”物质 (如冰碛物、粉尘等) 加入的体系中, 内陆封闭湖

泊沉积物的粒度是由湖水的水动力能量控制的, 粗颗粒主要沉积在浅水近岸带, 向湖心逐渐变细, 除非浊流或底流将其搬运至深水区, 粒度将呈正态分布, 沉积物粒度的峰态与偏态特征为沉积物的来源分析提

供了条件; 进入湖泊沉积的颗粒物通常可以由河流和 (或) 风力搬运而来, 沉积物粒度的频率曲线特征是判断沉积作用形式的重要手段之一, 频率曲线的峰态变化能够反映沉积作用形式的变化^[21]。

库赛湖 KS-2006 孔位于库赛湖湖心地带, 沉积物岩芯中未见浊流或其他密度流沉积夹层, 沉积物颗粒分布于 0.3 μm 至 1 000 μm 之间。沉积物的粒度频率曲线具有两种形态 (图 2): 分别表现三峰 (图 2C) 和四峰 (图 2D) 特征, 它们各占样品总量的 50% 左右。其中类型 C 和 D 均具有很大比例的粉砂组分和较小比例的超细粘土组分, 这两类样品的粉砂组分的粒径变化范围在 4.37~8.71 μm 之间, 超细粘土组分的粒径为 0.5 μm。前人研究表明^[21], 湖泊沉积物中超细粘土级的颗粒主要由生物或化学作用形成的, 粉砂级的颗粒则是由径流搬运作用形成的。

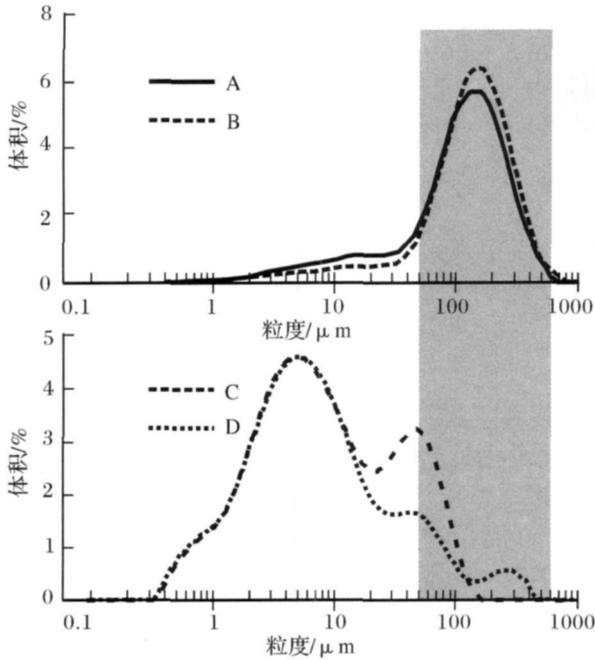


图 2 库赛湖沉积物 (D, D) 及冷湖气象站降尘 (A, B)^[12] 粒度频率分布曲线

Fig 2 Grain size distribution of lacustrine sediments in Kusai Lake and airborne dust from Lenghu Meteorological Station

同时, 两种类型的样品中均含有一定比例的粗粉砂或砂级粒径的颗粒 (变化于 34.7~91.2 μm), 而且 D 类型样品中还出现少量的峰值在 275.4~478.6 μm 之间的粗砂级组分。柴达木盆地是青海沙尘暴频发的地区之一, 对位于该盆地冷湖地区俘获的现代风成物的粒径研究表明, 这些风成物的粒径主要为粗砂级 (100 μm) 组分 (图 2A, B)^[12, 22]。库赛湖沉积物

粒度频率曲线中较粗粒级组分 (第三峰和第四峰) 与冷湖地区收集的现代风成物粒度分布具有较好的一致性; 同时, 前人的研究也表明^[12, 13], 在降水缺乏的干旱半干旱地区, 地表径流不发育, 粗颗粒物 (> 64 μm) 很难被地表径流搬运到湖泊中部位置 (距岸 2~10 km) 沉积。因此, 我们认为库赛湖沉积物中粗颗粒物 (> 64 μm) 是由风力作用搬运带入湖泊沉积的, 记录了该地区历史时期的尘暴事件。

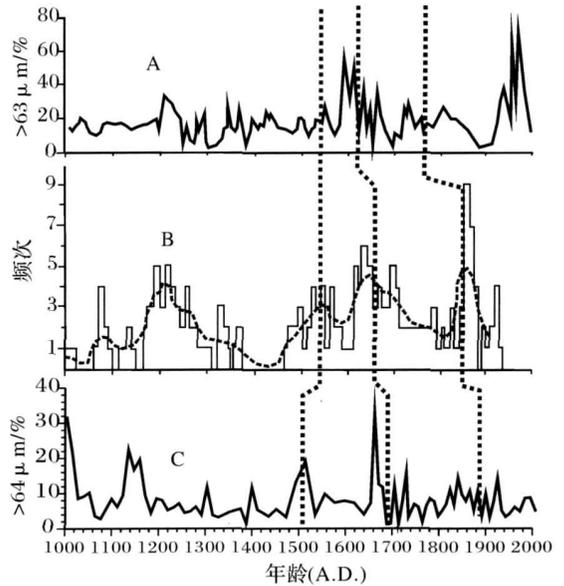


图 3 近千年来利用粒度资料重建的尘暴演化历史和利用历史文献资料重建的降尘变化历史 (A 苏干湖^[12]; B 历史资料^[9]; C 库赛湖)

Fig 3 Reconstructed dust storm history based on grain-size data from Sugan Lake (A) and Kusai Lake (C), and dust fall evolution inferred from historical records (B)

3 尘暴事件记录

近 4000 年来库赛湖沉积物中粗颗粒组分 (> 64 μm) 含量波动较大 (如图 4A), 最高含量近 40%, 最低只有 2% 左右, 剧烈的粗颗粒含量变化反映了尘暴事件具有一定的突发性。对库赛湖近 4000 年来沉积物粒度特征分析结果表明: 在 4 000~2 500 cal aBP 阶段, 库赛湖沉积物中粗颗粒组分含量较低, 仅在 2 700 cal aBP 前后、3 200 cal aBP 前后、3 400 cal aBP 前后和 3 700 cal aBP 前后 4 个位置出现峰值, 表明该时段为尘暴事件发生较少时期; 2 500 cal aBP 之后至 800 cal aBP, 沉积物中粗颗粒整体增高, 峰值出现频率也有所增加, 进入一个尘暴事件的高发时期, 以 1 600

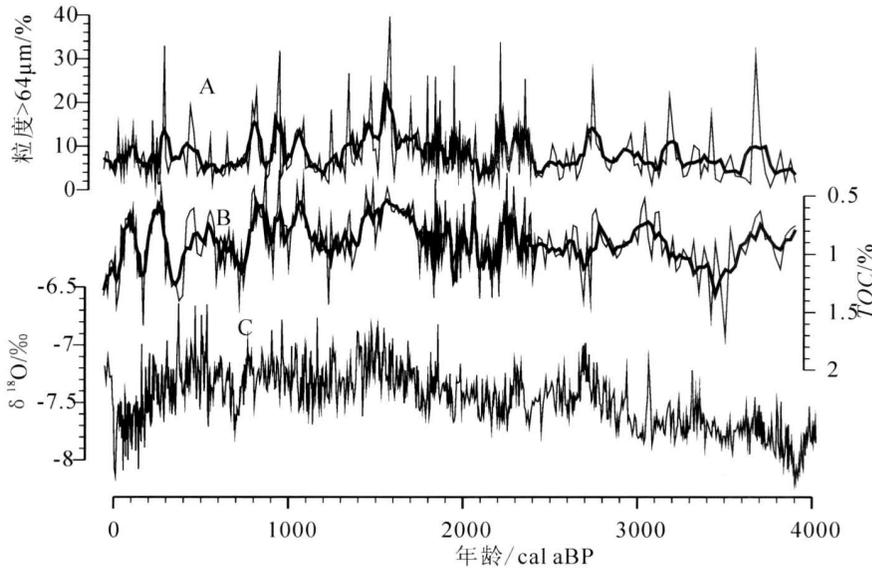


图 4 近 4000 年来库赛湖沉积物粒度 ($> 64\mu\text{m}$) (A)、TOC (B)^[19]和董歌洞石笋氧同位素 (C)^[24]变化曲线

Fig 4 Coarse grain component content(A), TOC(B) or lacustrine sediments from Kusai Lake and oxygen isotope evolution of Dongge Cave during the past 4000 years

cal aBP 前后最为显著, 其次为 800~1100 cal aBP 和 2200~2400 cal aBP 两个时段, 尘暴事件发生频率较高; 800 cal aBP 后进入中世纪暖期和小冰期阶段以来, 沉积物中粗颗粒组分含量有所降低, 高含量的峰值出现频率明显减少, 仅在 300 cal aBP 位置出现一个高峰, 记录了一次显著的尘暴事件。

Zhang 利用历史文献资料重建了我国近 1700 年来降尘事件频率曲线, 其中以近 1000 年来资料较为丰富 (图 3B)^[19]; 强明瑞等利用湖相沉积物中粗颗粒组分 ($> 64\mu\text{m}$) 含量重建了柴达木盆地内苏干湖地区近 1000 年来的尘暴演化历史 (图 3A)^[12]。将利用近千年来库赛湖沉积物中粗颗粒组分 ($> 64\mu\text{m}$) 重建的尘暴事件记录 (图 3C) 与两者对比发现: 三者对 1700 A. D. 前后的尘暴事件的高值段均保存了良好的记录, 对 1500 A. D. 前后的尘暴事件也均有所响应, 在 1800~1900 A. D. 时段也呈现出不同幅度的尘暴事件记录, 三个尘暴事件多期在时间上与小冰期阶段的三次降温事件一致^[23], 表明干冷的气候环境更利于尘暴事件的发生, 1700 A. D. 前后的尘暴高发期则指示了小冰期最盛期的极度干冷环境; 然而, 在苏干湖和文献资料记录中 1200 A. D. 前后的尘暴高发时段, 库赛湖沉积物中粗颗粒组分含量处于平稳的低值状态, 该时段库赛湖地区正处于中世纪暖期 (MWP) 的气候适宜阶段^[19], 暖湿的气候环境形成了

区域内良好的植被, 增加了地表湿度, 一定程度上抑制了尘暴事件的发生, 20 世纪以来该地区尘暴事件也有所减少某种程度上也反应了该地区气候转优。

4 综合对比分析

对洞穴堆积物 (石笋) 的研究表明, 贵州荔波董歌洞石笋中氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 资料记录了亚洲季风的变化, 石笋氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 含量负偏时, 表明夏季风增强, 相反, 石笋氧同位素值正偏时, 表明夏季风减弱^[24, 25]; 对库赛湖 KS-2006 孔沉积物中总有机碳含量的研究也表明, 对于干旱一半干旱地区的内陆封闭湖泊, 沉积物中 TOC 含量敏感的记录了历史时期气候干湿变化^[19]。由图 4 中可以发现, 库赛湖地区尘暴事件的发生频率与沉积物中 TOC 含量 (图 4 中曲线 B) 以及董歌洞石笋中氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ (图 4 中曲线 C) 具有相似的演化趋势。4000~2500 cal aBP, 石笋氧同位素值相对偏负, 夏季风较强, 沉积物中较高的 TOC 含量也指示了相对湿润的气候环境, 区域植被覆盖率增加以及地表湿度增大降低了尘暴事件发生的频率, 仅在季风相当较弱的几个干旱时段爆发。2500~800 cal aBP, 石笋氧同位素值偏正, 夏季风强度有所减弱, 冬季风增强, TOC 含量降低, 气候转干, 缺少植被覆盖的干旱地表为尘暴的发生提供了大量颗粒来源, 在冬季风的作用下被风力搬运进入湖泊沉

积, 沉积物中粗颗粒组分出现峰值。800 cal aBP 以来, 石笋氧同位素呈现出明显的负偏趋势, 夏季风强度有所增加, 为库赛湖地区带来较多的降水, TOC 含量升高, 植被的覆盖和地表湿度的增大抑制了尘暴事件发生的频率, 只是在小冰期内相对干冷的 3 次降温事件过程中有所体现。由此可见, 青藏高原北部可可西里的库赛湖地区, 近 4000 年来气候变化可以受到夏季风的影响, 4000~1600 cal aBP 时段内尘暴事件发生的频率随夏季风强度的减弱而增加, 自 1600 cal aBP 以来, 随着夏季风强度的增大, 尘暴事件发生的频率降低。

5 结论

对青藏高原北部可可西里库赛湖地区近 4000 年来湖相沉积物粒度组成特征分析结果表明, 沉积物中粗颗粒组分 ($> 64 \mu\text{m}$) 主要由风力搬运作用进入湖泊沉积, 记录了该地区近 4000 年来的尘暴事件历史。重建的尘暴事件序列表明: 2500~800 cal aBP 时段为该地区近 4000 年来尘暴事件高频发生的阶段, 4000~2500 cal aBP 和 800 cal aBP 以来的时段尘暴事件发生频率较低; 近千年来的尘暴事件主要发生于小冰期内的 3 次降温时段 (1500A. D.、1700A. D. 和 1800~1900A. D.)。与贵州董歌洞石笋氧同位素对比分析表明, 库赛湖地区近 4000 年来气候变化可以受亚洲季风的影响, 尘暴事件多发生于夏季风较弱的气候干冷时段。

致谢 中国科学院青海盐湖研究所杨波高级工程师、中国科学院南京地理与湖泊所王荣硕士参与野外采样工作, 在此表示感谢!

参考文献 (References)

- 1 Yung Y L, Lee T, Wang C H, *et al*. Dust: A diagnostic of the hydrologic cycle during the Last Glacial Maximum [J]. *Science*, 1996, 271: 962-963
- 2 Pettke T, Halliday A N, Hall C M, *et al*. Dust production and deposition in Asia and the north Pacific Ocean over the past 12 Myr [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 178(3-4): 197-413
- 3 An Z S, Kukla G, Porter S C *et al*. Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 1991, 18(2): 125-132
- 4 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土沉积 [J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 29-40 [Zhang Xiaoye. Source distribution, emission, transport, deposition of Asian dust and loess accumulation [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(1): 29-40]
- 5 赵强, 周余萍. 青海沙尘暴分布特征及其与大风天气的关系 [J]. 青海气象, 2002, 3: 12-16 [Zhao Qiang, Zhou Yeping. Distribution characteristics of dust storm in Qinghai and its relation to gale weather [J]. *Qinghai Meteorology*, 2002, 3: 12-16]
- 6 An Z S, Xiao J L. Study on the eolian dust flux over the Loess Plateau: An example [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(9): 1627-1631
- 7 Zhang D. Analysis of dust rain in the historic times of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28: 361-366
- 8 戴雪荣, 李吉均, 俞立中, 等. 末次间冰期甘肃沙尘暴演化历史的黄土记录分析 [J]. 地理学报, 1999, 54(5): 444-453 [Dai Xuerong, Li Jijun, Yu Lizhong, *et al*. The evolution of Dust Storms since last Interglacial in Gansu as reconstructed from loess record [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(5): 444-453]
- 9 Zhang D. Synoptic-climatic studies of dust fall in China since historic time [J]. *Scientia Sinica (Series B)*, 1984, 27(8): 825-836
- 10 Street-Perrott F A, Holmes J A, Waller M P, *et al*. Drought and dust deposition in the west African Sahel: A 5500-year record from Kajemman Oasis, Northeastern Nigeria [J]. *The Holocene*, 2000, 10(3): 293-302
- 11 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 [J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 193-198 [Jin Zhangdong, Wang Sumin, Shen Ji, *et al*. Dust-storm events in Dahai Lake Area, Inner Mongolia during the past 400 years: Evidence from grain-size analysis of lake sediments [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(3): 193-198]
- 12 强明瑞, 陈发虎, 周爱锋, 等. 苏干湖沉积物粒度组成记录尘暴事件的初步研究 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 915-922 [Qiang Mingrui, Chen Fahu, Zhou Aifeng, *et al*. Preliminary study on dust storm events documented by grain size component of Sugan Lake sediments, North Qaidam Basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 915-922]
- 13 Deckker P D, Corregge T, Head J. Late Pleistocene record of cyclic eolian activity from tropical Australia suggesting the Younger Dryas is not an unusual climatic event [J]. *Geology*, 1991, 19(6): 602-605
- 14 Xiao J L, Inouchi Y, Kumai H, *et al*. Eolian quartz flux to Lake Biwa, Central Japan, over the past 145000 years [J]. *Quaternary Research*, 1997, 48(1): 48-57
- 15 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 [J]. 科学通报, 2004, 49(11): 1084-1090 [Fang Xiaomin, Han Yongxiang, Ma Jinhui, *et al*. Dust storms and loess accumulation on the Tibetan Plateau: A case study of dust event on 4 March 2003 in Lhasa [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(9): 953-960]
- 16 张以菲, 郑祥身主编. 青海可可西里地区地质演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1996, 9-15 [Zhang Yifei, Zheng Xiangshen, *et al*. Geological Evolution in Kekexili Area, Qinghai Province [M]. Beijing: Science Press, 1996, 9-15]
- 17 李炳元主编. 青海可可西里地区自然环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1996, 1-15 [Li Bingyuan. Natural Environment in Kekexili Area, Qinghai Province [M]. Beijing: Science Press, 1996, 1-15]
- 18 王苏民, 窦鸿身主编. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998, 482 [Wang Sumin, Dou Hongshen. Lakes in China [M]. Beijing: Science Press, 1998, 482]

- 19 王永波, 刘兴起, 羊向东, 等. 可可西里库赛湖揭示的青藏高原北部近 4000年来的干湿变化 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 605-612 [Wang Yongbo, Liu Xingqi, Yang Xiangdong *et al.* A 4000-Year humidity variability recorded in sediment of Kusai Lake in Kekexili area, Northern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(5): 605-612]
- 20 Lem an A. *Lake Chemistry, Geology, Physics* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978, 79-83
- 21 Sun D H, Blom edal J, Rea D K, *et al.* Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 263-277
- 22 Xiao S, Chen F H, Qiang M R *et al.* Distribution pattern of grain size in surface sediments from Sugan Lake and its potential in recording aeolian dust in arid China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62: 1153-1164
- 23 王苏民, 刘健, 周静. 我国小冰期盛期的气候环境 [J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 369-376 [Wang Sumin, Liu Jian, Zhou Jing. The climate of Little Ice Age Maximum in China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(4): 369-376]
- 24 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* The Holocene Asian monsoon: Links to solar change and North Atlantic climate [J]. *Science*, 2005, 308: 854-857
- 25 Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, *et al.* A high-resolution absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 71-86

Dust-storm Events in Kekexili Area, Northern Tibetan Plateau During the Past 4000 Years: Evidence from Grain-size Analysis of Lacustrine Sediments in Kusai Lake

WANG Yong-bo¹ LIU Xing-qi¹ ZHANG En-lou¹ YANG Xiang-dong¹ YAO Bo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Lake and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract Based on the analyses of grain-size characteristics for lacustrine sediments in Kusai lake, compared with grain-size characteristics of trapped aeolian dust, the results indicate that the coarse grain component (> 64 μm) are carried by wind action, recording the dust-storm history of this area. The reconstructed dust-storm sequence show: 2 500~ 800 cal aBP was the period with the highest frequency for dust-storm events, while during 4 000~ 2 500 cal aBP and 800~ 0 cal aBP the frequency were lower correspondingly, and the dust-storm events in the past 1 000 years were concentrated in the three cooling events stages of LIA. Comparative analysis with oxygen isotope records from Dongge Cave reveals that the climatic evolution of Kusai Lake area can be effected by the Asian Monsoon during the past 4 000 years, and the dust-storm events occurred frequently during the cold-dry climate due to the decreased Summer Asian Monsoon.

Key words Kusai Lake, grain-size characteristics, dust-storm events, Asian Monsoon, Northern Tibetan Plateau