

文章编号: 1000-0550(2011)01-0134-09

新疆巴里坤湖粒度组分分解及其环境指示意义^①

吕雁斌 赵家驹 黄伟 陶士臣 安成邦

(兰州大学西部环境教育部重点实验室 兰州 730000)

摘要 选择位于西风影响区的天山东段巴里坤湖湖泊岩芯样品,对沉积物粒度组分进行经验正交函数(EOF)分解,并探讨各分量的环境意义。结果显示,EOF1组分与沉积物粒度小于2 μm组分相关系数达0.64以上,并与代表区域有效湿度的碳酸盐氧同位素指标有很好的对应关系,故将EOF1解译为区域有效湿度的替代指标。EOF2组分与粒径为45~138 μm的颗粒相关系数大于0.65,且该粒径范围与区域降尘概率曲线的粗颗粒部分相似,可能指示区域风沙强度。通过EOF分解所得到的两个组分显示中全新世为有效湿度较低、风沙活动较强的时段,这一结果与发生在以蒙古高原北部为中心的区域中全新世干旱事件有较好的对应关系。同时,西伯利亚高压的加强所导致的西风环流和冬季风的增强为风沙活动提供了较好的动力基础,因此亚洲内陆干旱区的干旱化和风动力条件的加强很可能是导致该区域中全新世风沙活动增强的主导因素。

关键词 巴里坤湖 沉积物粒度 经验正交函数 全新世 有效湿度 风沙活动

第一作者简介 吕雁斌 男 1982年出生 博士研究生 湖泊演化与古环境重建 E-mail: yanbin.lv@gmail.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

亚洲中部干旱区对理解全球气候系统有重要作用^[1,2]。广泛分布的湖泊为理解该区域全新世气候变化提供了高分辨率的代用资料^[3]。虽然全新世区域湖泊记录的有效湿度的整体变化与季风区存在反相关关系^[4],但中、晚全新世的变化仍然较为复杂,特别是中全新世存在区域内部的非同步性变化^[5]。这种非同步性可能是由于干旱区内部受到不同的因素控制所导致的,如不同的环流系统的影响^[6],青藏高原下沉气流的影响^[7]以及下垫面的反馈因素^[8]等都可能贡献于区域气候的非同步性变化。关于季风系统是否能够深入干旱区腹地从而影响亚洲内陆干旱区的全新世气候变化的问题也存在很大的争议^[4,9-12],因而选择具有同步性变化的区域的边缘地带作为研究不同区域间气候变化的纽带是较为有效的分析方法。位于天山东段的巴里坤湖与准噶尔盆地和蒙古高原相邻,是联系两地气候变化的纽带。更重要的是,中国干旱—半干旱区的中全新世气候记录显示新疆地区与内蒙古地区存在差异^[5],因此巴里坤湖全新世的气候变化,特别是中全新世的气候特征可能为理解两地的中全新世气候变化之间的联系提供

新的思路。

湖泊沉积物粒度作为一种有效的代用指标被广泛用于古环境重建当中^[13]。湖泊沉积物粒度主要受研究点距岸的距离、湖泊环流的动力以及沉积物来源的控制^[14]。亚洲内陆干旱区是世界上最大的粉尘源区,该区域的湖泊沉积的粒度信息也记录了区域的风沙活动,因而可以通过湖泊沉积物粒度的特定组分重建区域的风沙活动历史^[15,16]。与此同时,丰富的物质来源为干旱区湖泊的解译造成了较大的困难。通过沉积物粒度概率曲线的特征来确定沉积物来源^[12]、运用现代过程研究得出有关尘暴的特征粒径来重建区域沙尘历史^[16]以及利用粒径—标准偏差法提取沉积物中的沙尘活动信息^[15]等手段都成功地应用于干旱区湖泊沉积物粒度的研究当中。既然湖泊沉积物中包含了多种信号,而这些信号都是彼此独立的,那么就可以依据在时间序列中各个信号的变化趋势不同来提取各主要信号的变化趋势。经验正交函数(EOF)分析作为统计学降维处理技术被用于生物指标的古环境解译^[12,17]以及代用指标的空间分析中^[18],特别是在海岸地貌与沉积学中具有较好的应用基础^[19,20]。其可从复杂的变量中提取出有效的变化趋势,因而对多变量的数据分析具有很好的适用性。

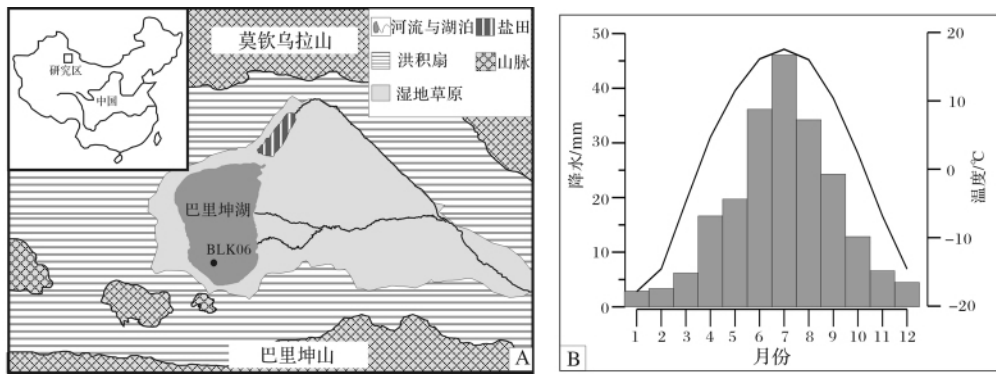


图1 研究区概况图

A. 巴里坤地区地貌图; B. 巴里坤地区年平均气温与年平均降水(1961—1999)

Fig. 1 Geology and climate information of the study area

A. Geological background of the Barkol; B. seasonal temperature and precipitation distribution of Barkol(1961—1999)

1 研究区概况

巴里坤湖(43°37'N, 92°46'E)位于天山东段,属新生代山间构造断陷形成的硫酸镁亚型盐湖,现代东亚夏季风难以到达^[21]。早第四纪以来,巴里坤湖泊的最大面积达800 km²,之后逐渐缩小到500 km²左右,现代巴里坤湖面积约为120 km²^[22]而平均水深仅为0.7~0.9 m^[23]。巴里坤地区现代年平均温度为1.1℃,平均蒸发量为1 638 mm,其远大于年平均降水量202.3 mm^[22]且年分布不均(图1)。湖泊主要受冰川融水的补给。古尔班通古特沙漠位于巴里坤西部,占地4.5万 km²,是世界第三大沙漠,为北疆地区重要的粉尘源区。巴里坤湖地区的古气候变化一直是学术研究的热点,早期的研究表明该地区的全新世气候变化以冷—干、暖—湿的“西风模式”为主要特征^[23],但湖泊蒸发盐结果并不支持冰期与雨期同步的气候^[24]。近期的研究表明巴里坤湖地区的全新世气候变化与北疆地区的湖泊记录的变化有较好的一致性,很可能受到高、低纬度气候变化信号的共同影响^[25]。特别是湖泊记录的区域风沙活动历史与冰芯记录的微粒变化有较好的相关关系^[15]。虽然前人的研究观点不尽相同,但丰富的基础资料可为本次研究的粒度解译提供较好的研究背景。

2 材料与方法

2006年3月,利用Kullenberg活塞钻获取426 cm的连续岩芯。岩芯底部336~426 cm为沙兼有不规则砾石,336 cm以上为稳定的湖相沉积物(图2)。224~336 cm:黏土夹杂白色粉末且颜色较浅;72~

244 cm:黑色黏土质湖泥,其中72~171 cm有臭鸡蛋气味的气体溢出(可能为H₂S);24~72 cm:白色粉砂兼有晶体状物质且在24~50 cm有若干白色条带;0~24 cm:粉砂质黏土。本次研究只讨论336 cm以上的湖相沉积部分。收集湖区降尘样品4个。岩芯在实验室按1 cm间距分样后,采用Thermo Savant's LyoPump系统冷冻干燥后进行粒度分析,降尘样品直接进行粒度分析。代用指标分析在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

沉积物常规¹⁴C年代测定由兰州大学常规¹⁴C年代学实验室完成,加速器¹⁴C测年(AMS)经过标准前处理流程(酸—碱—酸)后由北京大学第四纪地质与考古年代学实验室完成测试。除一个植物残体样品外,其余样品均为沉积物全有机质。岩芯的地层学和年代学的详细讨论见另文论述^[26]。

粒度分析采用英国Malvern公司生产的Master-size2000粒度仪,测量范围为0.02~2 000 μm,重复测量误差小于2%。取干燥后样品0.2~0.5 g,加双氧水加热去有机质,再加盐酸加热去碳酸盐,加蒸馏水静置12 h以上,用吸管小心吸掉上层清液,加10 ml分散剂(0.1 mol/L六偏磷酸钠),用超声20℃振荡7 mins后进粒度仪测量^[13]。

碳酸盐同位素样品的前处理流程如下:首先,将粉末样品浸泡于去离子水中一夜,然后湿筛取小于80 μm的部分用5%的次氯酸钠溶液浸泡24 h去除其中的有机质,之后用去离子水将样品洗至中性并在40℃恒温条件烘干。最后,前处理后的样品在兰州大学西部环境教育部重点实验室利用Finnigan Gas-bench II进样系统连接Finnigan MAT—253型质谱分

析仪进行分析。

由于粒度测试的所有样品的粒度分布范围为 $0.3 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$,故选取该粒度范围之内不同粒级的百分含量为 EOF 分析的对象。分析过程使用 SPSS 软件完成。

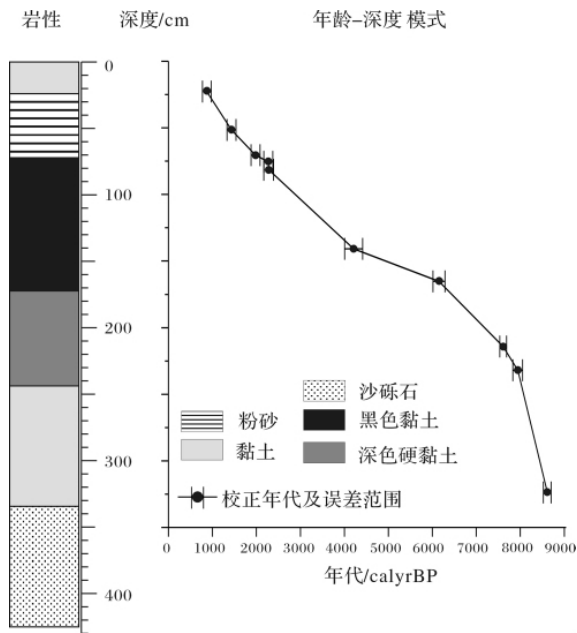


图 2 BLK06 钻孔的岩性与年龄模式^[26]

Fig. 2 Lithology and age-depth mode of the Core BLK06

3 结果与讨论

3.1 湖泊自生碳酸盐同位素

巴里坤 BLK06 孔的矿物含量指示沉积物以文石和方解石为主,代表了碳酸盐以湖泊自生碳酸盐为主^[24, 25]。对于内陆封闭湖泊而言,其自生碳酸盐氧同位素主要指示流域的有效湿度^[27],中国干旱区的湖泊自生碳酸盐氧同位素也支持区域有效湿度为主的解释^[28, 29]。BLK06 钻孔氧同位素变化范围为 $-9.7\text{‰} \sim 0.3\text{‰}$,如此大的变幅表明蒸发量/降水量作用在序列的氧同位素变化起主导作用,温度以及年平均降水同位素变率不可能造成如此大的氧同位素变化^[11]。实际上,降水量/蒸发量的作用指示了区域有效湿度的变化,因此 BLK06 钻孔的湖泊自生碳酸盐氧同位素可以用于指示湖泊有效湿度。

3.2 沉积物降尘与湖泊沉积物粒度

巴里坤 BLK06 钻孔以及降尘样品的沉积物粒度的三角图(图 3)显示湖泊沉积物的粒度组分与降尘样品的粒度组成不同。降尘样品中沙组分含量较湖相沉积物高,且其概率分布曲线为双峰分布,众数分

别为 $13.2\ \mu\text{m}$ 和 $61.2\ \mu\text{m}$ (图 4)。850 百帕流场分析结果显示巴里坤位于古尔班通古特沙漠的下风向^[30]。古尔班通古特沙漠样品粒度概率分布曲线呈单峰为主的分布,峰值位于约 $100 \sim 300\ \mu\text{m}$ 之间^[12]。风力搬运并沉积到沙漠周围地区的物质颗粒应小于源区物质的颗粒,如沙漠北部的乌伦古湖的降尘样品的概率累计曲线峰值的众数约 $70\ \mu\text{m}$ ^[12]。因此,巴里坤降尘样品中粒度较大部分的峰值主要来源于古尔班通古特沙漠。黄土粉尘研究显示黄土沉积物中较细部分的峰值主要反映高空西风环流的粉尘本底^[31]。塔克拉玛干沙漠作为西风带重要的粉尘源区为高空西风环流提供较细的粉尘^[32],而其恰好被西北太平洋的沉积物粒度所记录^[33]。巴里坤降尘样品粒度概率分布曲线所指示的较为显著的细粒组分应当指示区域粉尘的背景。

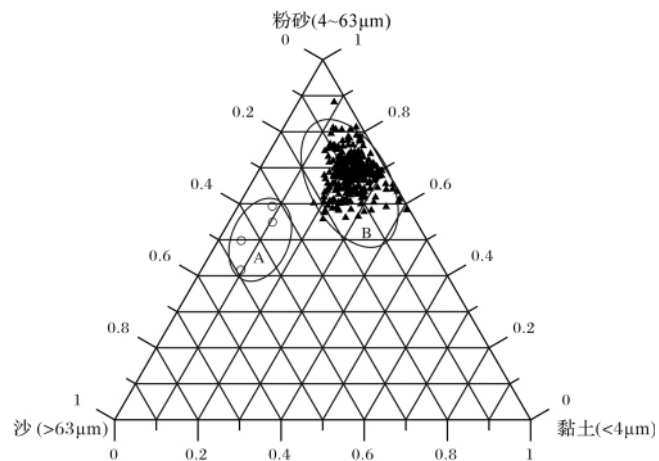


图 3 巴里坤湖 BLK06 钻孔以及区域降尘样品的三角图

A. 白色圆圈为降尘样品; B. 黑色实心三角为湖泊钻孔样品

Fig. 3 Ternary diagram

A. Open circle is the dust sample; B. Solid triangle is the lacustrine samples of the Core BLK06

湖泊沉积物粒度样品显示有两种主要的概率分布(图 4),类型 A 占沉积物总数的 69.9%,其为单峰分布且其众数约 $10\ \mu\text{m}$,指示其物源单一,为稳定的湖泊沉积物。而类型 B 占沉积物总数的 30.1%,为双峰分布,众数分别约为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $60\ \mu\text{m}$,指示其物源并不单一。通过与典型的湖泊沉积物 A 以及降尘样品 C 的曲线对比可以发现,样品 B 中既包括了较细的湖相沉积信息,也包括了降尘中较粗物质的信息。由此可见,巴里坤湖沉积物粒度符合干旱区湖泊粒度组分复杂的性质,适合用于不同组分的提取。

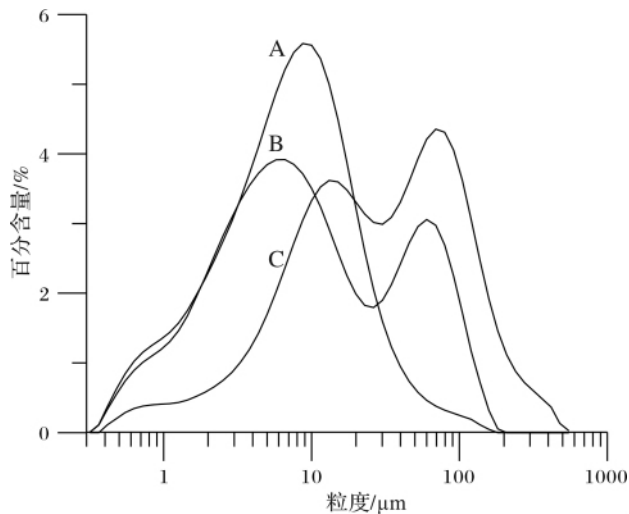


图4 巴里坤沉积物与降尘样品的粒度概率曲线。

A和B为BLK06钻孔样品,C为降尘样品

Fig. 4 Grain-size probability curve of the Lake sediment and dust sample.

A and B is the lake sediment sample , C is the dust sample

3.3 沉积物粒度 EOF 分解及其环境意义

通过 EOF 分解得出前 4 个组分对粒度整体变化的贡献率达到 81.7% ,且每个组分均通过 0.1 的信度检验 ,指示沉积物粒度的变化受多种因素的影响。其中前两个组分的累计贡献率为 56.8% ,是沉积物粒度变化的主要组成部分 ,因此本研究对 EOF 分解的 EOF1 组分和 EOF2 组分的环境意义进行讨论。

EOF 分解的结果显示 EOF1 代表整体变量的 34.2% (表 2) ,其与细颗粒组分特别是小于 2 μm 部分相关性达 0.64 以上。因此 ,EOF1 指示了超细粒组分以及部分细颗粒组分的变化。黄土中的超细粒组分(小于 1 μm) 主要与黄土的成壤作用有关 ,而在成壤作用较弱的干旱区的大气降尘中并没有这一组分^[34]。因此 ,这一组分应当反映了湖泊沉积物信号 ,指示湖泊水体和水动力状况。在干旱区 ,由于降水时间分布的不均性 ,导致在降水过程中容易形成坡面湍流 ,其有利于携带大量的细颗粒物 ,最后汇入湖泊之中 ,这一过程是干旱区湖泊细颗粒物沉积的重要途径(强明瑞 ,个人交流)。对降水十分敏感的内陆干旱区而言 ,降水量的变化反映了流域有效湿度的变化 ,因此可以将 EOF1 组分解译为流域有效湿度。另外 ,巴里坤湖泊沉积物粒度 EOF1 的全新世演化序列与湖泊自生碳酸盐氧同位素结果有较好的一致性(图 5) ,证明 EOF1 组分作为湖泊有效湿度替代指标的可靠性。

EOF2 分量与粒级为 45 ~ 138 μm 的颗粒相关系数大于 0.65 呈显著正相关关系 ,而与 8 ~ 20 μm 的颗粒相关系数小于 -0.69 呈显著的负相关关系。湖泊沉积物中 45 ~ 138 μm 组分的最高含量小于 32.7% ,大部分样品的这一组分含量约为 10% ,揭示这一组分并不是湖泊沉积物的主体部分。而巴里坤现代降尘的粒度概率分布曲线显示降尘的较粗部分的峰值落在这一粒级区间。苏干湖的尘暴研究显示大于 63 μm 的沙组分主要由风力搬运入湖 ,其百分含量可以用于重建区域的尘暴历史^[16] ,而利用粒级一标准偏差法得到的巴里坤地区风沙活动敏感组分为 45 ~ 180 μm ^[15]。由此可见 ,粒级为 45 ~ 138 μm 的部分与巴里坤地区风沙活动密切相关。与此同时 ,湖泊沉积物中 8 ~ 20 μm 组分平均含量约 40% ,表明该组分仍然以湖泊沉积为主 ,而现代降尘样品中指示区域粉尘背景信息的众数为 13.2 μm 的次峰 ,这两者构成了 EOF2 负相关关系的主体部分。一般而言 ,当区域风沙活动较强时 ,粗颗粒的风沙组分的增加会使得背景粉尘的相对含量减少 ,同时也是降水较少、湖泊沉积物主体较少的时期 ,因而与 BLK06 钻孔沉积物粒度 EOF2 组分呈反相关关系的 8 ~ 20 μm 组分也从另外一个侧面指示了区域的风沙活动。

表 1 经验正交函数的特征值及组分贡献率

Table 1 Feature of the empirical orthogonal function and the contribution of each component

组分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
EOF1	20.2	34.2	34.2
EOF2	13.3	22.6	56.8
EOF3	7.8	13.1	69.9
EOF4	6.9	11.8	81.7

通过 EOF 分解所得到的全新世以来区域风沙活动的变化与 BLK1 钻孔利用粒度一标准偏差法计算的区域风沙活动^[15] 变化趋势相同(图 5) ,两者都指示中全新世为区域风沙活动最为强盛的时期 ,该结果与敦德冰芯^[35] 和古里雅冰芯^[36] 记录的尘暴信息一致^[15]。而西北太平洋记录的亚洲内陆干旱区的粉尘信息也指示了 6 000 年为 30 000 年以来粉尘通量最大的时期^[33] ,该结果同样指示了亚洲内陆地区的风沙活动在中全新世达到最强盛的时期。由此可见 ,BLK06 钻孔粒度分解的 EOF2 组分可以作为区域风沙活动的代用指标。

3.4 基于 EOF 分解的全新世气候变化

通过 EOF 的第一组分和第二组分的综合分析, BLK06 钻孔所记录的全新世气候变化大致可以分为三个主要的阶段: 阶段 III (约 8.6 ~ 6.6 cal. ka B. P.) , EOF1 组分和 EOF2 组分的变率较小, 表明该阶段的气候相对稳定, 湖区有效湿度适中、区域风沙活动较弱。阶段 II (约 6.6 ~ 3.0 cal. ka B. P.) , 该阶段 EOF1 组分和 EOF2 组分分别为全序列的最低值和最高值, 指示该时段区域气候总体以有效湿度较低, 风沙活动强烈为特征。根据两组分的变化趋势不同, 可将该阶段分为三个亚阶段, 其中亚阶段 II 3 (约 6.6 ~ 4.5 cal. ka B. P.) 和亚阶段 II 1 (约 3.8 ~ 3 cal. ka B. P.) 为两次有效湿度的低值阶段, 与之对应的是 EOF2 组分所代表的风沙活动增强。而亚阶段 II 2 (约 4.5 ~ 3.8 cal. ka B. P.) EOF1 组分有明显的增高, 且与 EOF2 组分的明显降低有较好的对应, 但 EOF1 组分在 2.5 cal. ka B. P. 左右的明显增加并没有在 EOF2 组分中有明显的变化。该现象表明两组分所指示的气候变化信号有所不同。EOF1 组分记录的高频变化较明显, 可能受局地的气候和水文变化影响较大。而 EOF2 组分所反映的低频变化趋势较

明显很可能指示大区域的风沙变化。阶段 I (3.0 cal. ka B. P. 以来), EOF1 组分整体较高且相对稳定, 而 EOF2 逐渐减小, 指示区域晚全新世气候相对稳定, 风沙活动较弱。

3.5 区域气候记录对比与讨论

巴里坤湖粒度记录的约 6 ~ 3 cal. ka B. P. 区域有效湿度整体偏低、风沙活动增强的信号有较好的区域一致性。新疆北部阿勒泰地区的乌伦古湖的介形虫壳体氧同位素指示约 5.3 ~ 1.3 cal. ka B. P. 为整个剖面最干燥的阶段^[28], 其孢粉记录也显示了 7.7 ~ 3.6 cal. ka B. P. 的气候向温暖偏干的转型^[37]。事实上, 中全新世的干旱事件在蒙古高原北部地区有较广泛的记录。Shaamar^[38] 和 Khyaraany^[39] 的黄土序列记录了沙为主的中全新世沉积, 表明这一时段的气候较为干旱。Telmen^[40, 41]、Gun Nuur^[42]、Khubsugul^[43] 以及蒙古西北部的 Dood Nuur 和 Hovsgol Nuur^[44] 高分辨率的湖泊记录也同时指示了中全新世的干旱事件。不仅如此, 中国的内蒙古西部的湖泊^[45, 46] 和泥炭^[47] 资料也支持中全新世存在干旱事件, 但是其他记录并不支持这一干旱事件在内蒙古地区的一致性。定西的黄土剖面、Baahar Nuur 的湖泊记录和临近的黄土

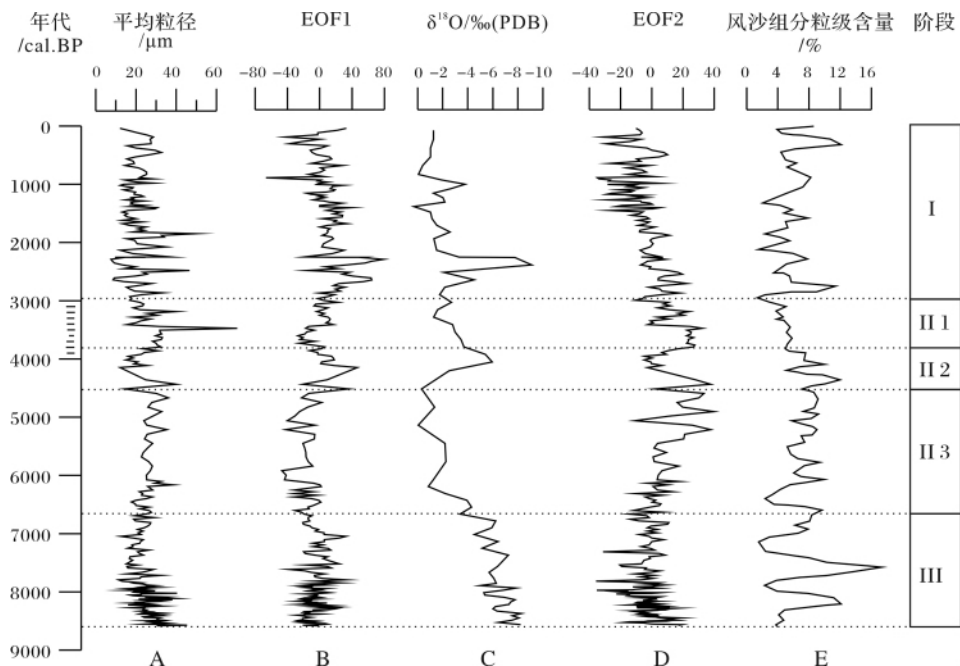


图 5 BLK06 钻孔代用指标结果及对比

A. BLK06 钻孔的平均粒径 B. BLK06 钻孔粒度 EOF1 组分 C. BLK06 钻孔的碳酸盐氧同位素
D. BLK06 钻孔粒度 EOF2 组分 E. BLK1 剖面风沙组分粒级含量^[15]

Fig. 5 Proxy results of BLK06 and comparison

A. Mean grain-size of Core BLK06 B. EOF1 component of Core BLK06 C. Oxygen isotope of carbonate from Core BLK06 D. EOF2 component of Core BLK06 E. Sandstorm component contents from Section BLK1

高原西部^[38]以及内蒙古东部的岱海^[48]的全新世气候重建则反映了中全新世为降水丰沛而气候湿润的时期。由此可见,蒙古高原南北部的中全新世气候存在差异^[38],北部的蒙古国古环境记录主要指示了中全新世的干旱气候事件,虽然不同地区记录的干旱时段有所差异^[49]。南部区域的记录并不一致,反映了干旱事件的影响在该区域逐渐减弱。与此同时,新疆地区除沙漠地区外其他湖泊基本上记录了在7~5 ka B. P. 的湿润气候^[5],也表明了蒙古高原中全新世的干旱气候事件并没有影响到整个新疆地区。而巴里坤湖和乌伦古湖毗邻蒙古高原,同时也记录了此次干旱气候事件,说明蒙古高原中全新世的干旱气候事件的影响范围至少可以向西扩展到到新疆的东部和北部。

作为世界上最重要的粉尘源区,亚洲内陆干旱区的干旱化可以为大范围区域的风沙活动以及尘暴的发生提供丰富的物源。本文所解译的全新世区域风沙活动最强的时段为中全新世,这与薛积彬和钟巍在巴里坤湖风沙活动重建中的研究结论^[15]有较好的对应关系,证明巴里坤湖记录全新世风沙活动的一致性。不仅如此,古里雅冰芯的微粒浓度在中全新世有所增高^[36],可推断出青藏高原西北部和新疆东部中全新世的风沙活动强烈。腾格里沙漠西北缘的青土湖的记录也显示在5~2.5 cal. ka B. P. 风沙活动逐渐增强并且在7.5 cal. ka B. P. 时出现了强风沙事件^[50],表明中全新世的强风沙气候在中国西北干旱区有较为一致的记录。风成沉积的石英中的氧同位素以及电子自选共振信号强度信号表明亚洲内陆的粉尘可在以日本和韩国为代表的西北太平洋地区沉积^[51~53],而西北太平洋的海洋记录中提取的通过西风环流所带入的亚洲内陆干旱区的粉尘信号显示在约6 ka B. P. 粉尘沉积通量达到最大,指示了中全新世粉尘源地的干旱化过程^[33]。西北太平洋的粉尘记录不仅对位于粉尘源区的巴里坤湖所记录的中全新世风沙活动增强有较好的响应,同时也支持以蒙古高原北部为中心的中全新世干旱事件。因此,区域的干旱化以及风沙活动的增强可能是以蒙古高原北部为中心的地区中全新气候的主要特征。

西风环流和冬季风的盛行都可以导致干旱区的粉尘在以日本和韩国为代表的下风向区域沉积^[54]。冬季风的强弱受到西伯利亚—蒙古高压的控制^[55]。另外,当北半球较冷的时候会导致西风环流的加强,从而增加亚洲内陆干旱区的粉尘向大气的输送^[56]。

虽然目前干旱区的资料并不能成功地将两种环流系统所导致的风沙活动所区分开,但冰期时盛行冬季风,蒙古高压和西伯利亚高压较强,那么西伯利亚高压的变化就决定了干旱区风沙活动的动力基础。GISP2 冰芯记录的 K 离子所指示的西伯利亚高压在5 cal. ka B. P. 和3 cal. ka B. P. 时段有两次明显的加强^[57],这与干旱区中全新世的风沙活动增强也有较好的联系。因此,西伯利亚高压的强弱对中全新世以蒙古高原北部为中心的地区的气候变化有着重要贡献。

4 结论

巴里坤湖 BLK06 钻孔的全新世沉积物粒度 EOF 分解表明 EOF1 和 EOF2 组分能够反映粒度的整体变化趋势。EOF1 组分与小于 2 μm 的粒级百分含量有较好的正相关关系并与指示区域有效湿度的湖泊自生碳酸盐氧同位素有较好的一致性,说明粒度的 EOF1 组分可以指示流域有效湿度。EOF2 组分与现代降尘中较粗粒级部分(45~138 μm) 呈良好的正相关关系,并且与巴里坤湖另一钻孔利用粒度标准偏差法计算的区域风沙活动历史有较好的对应关系,因此代表了区域风沙活动强度。巴里坤湖记录的中全新世有效湿度降低以及风沙活动增强与蒙古高原北部为中心的中全新世干旱事件有较好的对应关系,反映了区域性变化,同时西伯利亚高压的变化可能对该区域的气候变化有一定的贡献。

参考文献(References)

- 1 Duce R A, Tindale N W. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36 (8): 1715-1726
- 2 Husar R B, Tratt D M, Schichtel B A, et al. Asian dust events of April 1998 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 18317-18330
- 3 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998 [Wang Sumin, Dou Hongshen. A Survey of the Lakes in China[M]. Beijing: Science Press, 1998]
- 4 Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27 (3-4): 351-364
- 5 An C B, Feng Z D, Barton L. Dry or humid? Mid-Holocene humidity changes in arid and semi-arid China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 351-361
- 6 Tian L D, Yao T D, MacClune K, et al. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D10112

- 7 Sato T, Kimura F. Impact of diabatic heating over the Tibetan Plateau on subsidence over northeast Asian arid region [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32 (5): L05809
- 8 Mason J A, Lu H, Zhou Y, *et al.* Dune mobility and aridity at the desert margin of northern China at a time of peak monsoon strength [J]. *Geology*, 2009, 37 (10): 947-950
- 9 Rhodes T E, Gasse F O, Ruifen L, *et al.* A Late Pleistocene-Holocene lacustrine record from Lake Manas, Junggar (northern Xinjiang, western China) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 120: 102-121
- 10 Morrill C, Overpeck J T, Cole J E. A synthesis of abrupt changes in the Asian summer monsoon since the last deglaciation [J]. *Holocene*, 2003, 13 (4): 465-476
- 11 Mischke S, W nemann B. The Holocene salinity history of Bosten Lake (Xinjiang, China) inferred from ostracod species assemblages and shell chemistry: Possible palaeoclimatic implications [J]. *Quaternary International*, 2006, 154-155: 100-112
- 12 Liu X Q, Herzsuh U, Shen J, *et al.* Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China [J]. *Quaternary Research*, 2008, 70 (3): 412-425
- 13 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 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233 (3-4): 467-479
- 14 Lerman A. *Lake: Chemistry, Geology, Physics* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978
- 15 薛积彬, 钟巍. 干旱区湖泊沉积物粒度组分记录的区域沙尘活动历史: 以新疆巴里坤湖为例 [J]. *沉积学报*, 2008, 26 (4): 647-654 [Xue Jibin, Zhong Wei. Variations in dust event reflected by grain-size component of lacustrine records in droughty Area: a case study on Barkol Lake, Xinjiang, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26 (4): 647-654]
- 16 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 Suga Lake sediments, north Qaidam Basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (6): 915-922]
- 17 Zhao Y, Yu Z, Chen F, *et al.* Holocene vegetation and climate history at Hurlig Lake in the Qaidam Basin, northwest China [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2007, 145 (3-4): 275-288
- 18 Yu S Y, Richard D R, Steven M C. Determining the spatial and temporal patterns of climate changes in China's western interior during the last 15ka from lacustrine oxygen isotope records [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2009, 24 (3): 237-247
- 19 Vincent L, Dolan R, Hayden B, *et al.* Systematic variations in barrier-island topography [J]. *Journal of Geology*, 1976, 84 (5): 583-594
- 20 Clinton D, Winant D, Charles E. Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975
- 21 高由喜. 东亚季风的若干问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1962 [Gao Youxi. *Some Problems on East-Asian Monsoon* [M]. Beijing: Science Press, 1962]
- 22 Ma Z, Wang Z, Liu J, *et al.* U-series chronology of sediments associated with Late Quaternary fluctuations, Balikun Lake, northwestern China [J]. *Quaternary International*, 2004, 121 (1): 89-98
- 23 韩淑媿, 董光荣. 巴里坤湖全新世环境演变的初步研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 10 (3): 247-260 [Han Shutu, Dong Guangrong. Preliminary study of Holocene environmental evolution in the Balikun Lake [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10 (3): 247-260]
- 24 顾兆炎, 赵惠敏, 王振海, 等. 末次间冰期以来新疆巴里坤湖蒸发盐的沉积环境记录 [J]. *第四纪研究*, 1998, 4: 328-334 [Gu Zhaoyan, Zhao Huimin, Wang Zhenhai, *et al.* Evaporation salt records of environmental response to climate change in Barkol Lake Basin, northwestern China [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 4: 328-334]
- 25 薛积彬, 钟巍. 新疆巴里坤湖全新世环境记录及区域对比研究 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28 (4): 610-620 [Xue Jibin, Zhong Wei. Holocene climate change recorded by lacustrine sediments in Barkol lake and its regional comparison [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28 (4): 610-620].
- 26 陶士臣, 安成邦, 陈发虎, 等. 花粉记录的新疆巴里坤湖 16.7kyr BP 以来的植被与环境 [J]. *科学通报*, 2010, 55 (11): 1026-1035 [Tao S C, An C B, Chen F H, *et al.* Pollen-inferred vegetation and environmental changes since 16.7 ka BP at Balikun Lake, Xinjiang [J]. *Chinese Science Bulletin* 2010, 55 (22): 2449-2457]
- 27 Leng M J, Marshall J D. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23 (7-8): 811-831
- 28 蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起, 等. 乌伦古湖介形组合及其壳体同位素记录的全新世气候环境变化 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27 (3): 382-391 [Jiang Qinfeng, Shen Ji, Liu Xingqi, *et al.* Holocene climate reconstruction of Ulungur Lake (Xinjiang, China) inferred from ostracod species assemblages and stable isotopes [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27 (3): 382-391]
- 29 强明瑞, 陈发虎, 张家武, 等. 2ka 来苏干湖沉积碳酸盐稳定同位素记录的气候变化 [J]. *科学通报*, 2005, 50 (13): 1385-1393 [Qiang Mingrui, Chen Fahu, Zhang Jiawu, *et al.* Climatic changes documented by stable isotopes of sedimentary carbonate in Lake Sugan, northeastern Tibetan Plateau of China, since 2 kaBP [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (17): 1930-1939]
- 30 汤绪, 钱维宏, 梁萍. 东亚夏季风边缘带的气候特征 [J]. *高原气象*, 2006, 25 (3): 375-381 [Tang Xu, Qian Weihong, Liang Ping. Climatic features of boundary belt for East Asian summer monsoon [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25 (3): 375-381]
- 31 孙东怀, 鹿化煜, Rea D, 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义 [J]. *沉积学报*, 2000, 18 (3): 327-335 [Sun Donghuai, Lu Huayu, Rea D, *et al.* Bimodal grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*

- ca, 2000, 18 (3): 327-335]
- 32 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 [J]. 第四纪研究, 2004, 24 (2): 175-183 [Sun Jimin. Provenance, forming mechanism and transport of loess in China [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24 (2): 175-183]
- 33 Rea D K, Leinen M. Asian aridity and the zonal westerlies: Late Pleistocene and Holocene record of eolian deposition in the northwest Pacific Ocean [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1988, 66 (1-2): 1-8
- 34 孙东怀. 黄土粒度分布中的超细粒组分及其成因 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (6): 928-936 [Sun Donghui. Super-fine grain size components in Chinese loess and their palaeoclimatic implication [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26 (6): 928-936]
- 35 刘纯平, 姚檀栋, 谢树成. 祁连山敦德冰芯为例变化特征和大气环境记录 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19 (3): 105-113 [Liu Chunping, Yao Tandong, Xie Shucheng. Characteristics of microparticle variation and records of atmospheric environment in Dunde ice core [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19 (3): 105-113]
- 36 邬光剑, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 末次冰期以来古里雅冰芯微粒记录与极地冰芯的对比 [J]. 科学通报, 2004, 49 (5): 475-479 [Wu Guangjian, Yao Tandong, Thompson L G, et al. Microparticle record in the Guliya ice core and its comparison with polar records since the last interglacial [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (5): 607-611]
- 37 肖霞云, 蒋庆丰, 刘兴起, 等. 新疆乌伦古湖全新世以来高分辨率的孢粉记录与环境变迁 [J]. 微体古生物学报, 2006, 23 (1): 77-86 [Xiao Xiayun, Jiang Qinfeng, Liu Xingqi, et al. High resolution sporopollen record and environmental change since Holocene in the Wulungu Lake, Xinjiang [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2006, 23 (1): 77-86]
- 38 Feng Z D, Wang W G, Guo L L, et al. Lacustrine and eolian records of Holocene climate changes in the Mongolian Plateau: preliminary results [J]. Quaternary International, 2005, 136 (1): 25-32
- 39 Feng Z D. Gobi dynamics in the Northern Mongolian Plateau during the past 20000yr: preliminary results [J]. Quaternary International, 2001, (76-77): 77-83
- 40 Peck J A, Khosbayan P, Fowell S J, et al. Mid to Late Holocene climate change in north central Mongolia as recorded in the sediments of Lake Telmen [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 183 (1-2): 135-153
- 41 Fowell S J, Hansen B C S, Peck J A, et al. Mid to Late Holocene climate evolution of the lake Telmen basin, north central Mongolia, based on palynological data [J]. Quaternary Research, 2003, 59 (3): 353-363
- 42 Wang W G, Feng Z D, Lee X Q, et al. Holocene abrupt climate shifts recorded in Gun Nuur lake core, northern Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (5): 520-526
- 43 Fedotov A P, Chebykin E P, Yu S M, et al. Changes in the volume and salinity of Lake Khubsugul (Mongolia) in response to global climate changes in the upper Pleistocene and the Holocene [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 209 (1-4): 245-257
- 44 Grunert J, Lehmkuhl F, Walther M. Paleoclimatic evolution of the Uvs Nuur basin and adjacent areas (Western Mongolia) [J]. Quaternary International, 2000, (65-66): 171-92
- 45 Chen C T A, Lan H C, Lou J Y, et al. The Dry Holocene megathermal in Inner Mongolia [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 193 (2): 181-200
- 46 Chen F H, Wu W, Holmes J, et al. A mid-Holocene drought interval as evidenced by lake desiccation in the Alashan Plateau, Inner Mongolia China [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (14): 1401-1410.
- 47 Li X Q, Zhou W J, An Z S, et al. The vegetation and monsoon variations at the desert-loess transition belt at Midian in northern China for the last 13 ka [J]. The Holocene, 2003, 13 (5): 779-784
- 48 孙千里, 肖举乐. 岱海沉积记录的季风/干旱过渡区全新世适宜期特征 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (5): 781-790 [Sun Qianli, Xiao Jule. Characteristics of the Holocene optimum in the monsoon/arid transition belt recorded by core sediments of Daihai Lake, north China [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26 (5): 781-790]
- 49 An C B, Chen F H, Barton L. Holocene environmental changes in Mongolia: A review [J]. Global and Planetary Change, 2008, 63 (4): 283-289
- 50 隆浩, 王乃昂, 马海州, 等. 腾格里沙漠西北缘湖泊沉积记录的区域风沙特征 [J]. 沉积学报, 2007, 25 (4): 626-631 [Long Hao, Wang Nai-ang, Ma Haizhou, et al. Eolian activity and environment evolution history recorded by the Qingtu Lake, NW Tengger Desert [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25 (4): 626-631]
- 51 Mizota C, Endo H, Um K, et al. The eolian origin of silty mantle in sedimentary soils from Korea and Japan [J]. Geoderma, 1991, 49 (1-2): 153-164
- 52 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
- 53 Ono Y, Naruse T, Ikeya M, et al. Origin and derived courses of eolian dust quartz deposited during marine isotope stage 2 in East Asia, suggested by ESR signal intensity [J]. Global and Planetary Change, 1998, 18 (3-4): 129-135
- 54 Lim J, Matsumoto E. Estimation of aeolian dust flux on Cheju Island, Korea, during the Mid-to Late Holocene [J]. Quaternary International, 2008, 176-177: 104-111
- 55 Ding Z L, Nat R, Han J M, et al. A coupled environmental system formed at about 2.5 Ma in East Asia [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1992, 94 (1-4): 223-242
- 56 Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997, 102 (D23): 28041-28047
- 57 Mayewski P A, Rohling E E, Curt Stager J, et al. Holocene climate variability [J]. Quaternary Research, 2004, 62 (3): 243-255

Decomposition of the Grain-size Component and Its Climate Implication from Lake Barkol , Xinjiang

LÜ Yan-bin ZHAO Jia-ju HUANG Wei TAO Shi-chen AN Cheng-bang

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems , MOE , Lanzhou University , Lanzhou 730000)

Abstract A 426 cm core from Lake Barkol , eastern Tian Shan , provides the evidence of Holocene climate in West-erly dominated Asia. Here , we present a grain-size component series decomposed by empirical orthogonal function and the chronology is based on radio carbon dating. The results show that the EOF1 component has a high correlation coef-ficient (0.64) with the volume percentage of the component less than 2 μm , furthermore it is similar to the evolution pattern of oxygen isotope from carbonate which is a proxy indicating the regional effective moisture , so the EOF1 com-ponent is an indicator of the effective moisture in the region. Modern dust grain-size analysis from Barkol shows a peak percentage around 61.2 μm . Coincidentally , the EOF2 component has a high positive correlation coefficient with the grain-size ranging from 45 to 138 μm , which suggests that the EOF2 indicates the regional dust activity. EOF results suggested that the effective moisture was low and the dust activity was strong in mid-Holocene , which was consistent with the mid-Holocene arid interval occurred in the northern Mongolia Plateau. The enhanced Siberia high intensified the Westerly circulation and winter monsoon , and which could be the main reason for the arid and dusty mid-Holocene climate in the research region.

Key words Lake Barkol; grain-size; empirical orthogonal function; Holocene; effective moisture; dust activity