

文章编号:1672-6561(2012)03-0062-08

内蒙古中部必鲁图晚更新世晚期 环境演变的沉积记录

王永¹, 周赤华², 姚培毅¹, 迟振卿¹

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 内蒙古赤峰地质矿产勘查开发院, 内蒙古 赤峰 024005)

摘要: 以内蒙古中部必鲁图厚度 250 cm 的浅井湖泊剖面为研究对象, 根据取得的 6 个光释光法测年数据, 建立晚更新世晚期 56.8 ka 以来的年代序列, 对湖泊沉积特征、粒度组成、Rb 与 Sr 含量(质量分数)之比、氧化物含量及其比值等地球化学特征进行分析, 并通过综合研究各指标的气候环境指示意义, 重建该地区晚更新世晚期以来的气候环境演变过程。结果表明: 该地区晚更新世晚期以来气候环境变化可以分为 5 个阶段。第 1 阶段, 56.8~49.5 ka, 沉积物有机质较丰富, 化学风化作用较强, 以温干偏湿气候为主; 第 2 阶段, 49.5~41.3 ka, 化学风化较弱, 水热条件较差, 气候冷干偏湿; 第 3 阶段, 41.3~20.8 ka, 气候转为暖湿, 化学风化作用最强, 为升温高降水期, 末次冰期间冰段, 间有小的冷湿、温干波动; 第 4 阶段, 20.8~8.2 ka, 各项地球化学指标均发生突变, 砂楔发育, 气候恶化, 持续干冷, 期间存在末次冰期最盛期; 第 5 阶段, 8.2~0 ka, 气候以温干为主, 晚期气候向凉干转变趋势明显。

关键词: 古气候; 环境变迁; 晚更新世; 地球化学; 末次冰期; 湖泊; 必鲁图; 内蒙古

中图分类号: P532; P534.63

文献标志码: A

Sedimentary Record of Environmental Evolution Since Late Stage of Late Pleistocene in Bilutu of Central Inner Mongolia

WANG Yong¹, ZHOU Chi-hua², YAO Pei-yi¹, CHI Zhen-qing¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Inner Mongolia Chifeng Institute of Geology and Mineral Exploration and Development, Chifeng 024005, Inner Mongolia, China)

Abstract: A lake shallow well section with the depth of 250 cm in Bilutu of central Inner Mongolia was studied. According to the six dating data of optically stimulated luminescence, the chronology for the lake sediment since the late stage of Late Pleistocene (56.8 ka) was established, and geochemical features including sedimentary characteristic, ratio of the contents (mass fractions) of Rb and Sr, content of oxide and the ratio of them were used to reconstruct the paleoenvironmental and climatic changes since the late stage of Late Pleistocene in Bilutu. The results showed that the climatic and environmental changes since the late stage of Late Pleistocene in Bilutu were divided into five stages. The first stage was from 56.8 ka to 49.5 ka, the organic matter in sedimentary deposit was rich, the chemical weathering was strong, the climate was mainly warm-dry-slightly damp; the second stage was from 49.5 ka to 41.3 ka, chemical weathering was weak, hydrothermal condition was poor, the climate was cold-dry-slightly damp; the third stage was from 41.3 ka to 20.8 ka, the climate became warm, the chemical weathering was strongest, the temperature raise and precipitation was high, the stage was interstade of last

收稿日期: 2012-03-15

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212010611703, 1212011087116)

作者简介: 王永(1968-), 男, 内蒙古四子王人, 研究员, 理学博士, E-mail: wangyong@cags.ac.cn.

glaciation with little fluctuation of cold-wet and warm-dry; the fourth stage was from 20.8 ka to 8.2 ka, all the geochemical indicators changed significantly, sand wedge developed, climate deteriorated, the stage was continually dry-cold, and there was Last Glacial Maximum(LGM); the fifth stage was from 8.2 ka to now, the climate was mainly warm-dry, the climate became to cold-dry in the late of the stage significantly.

Key words: paleoclimate; environmental change; Late Pleistocene; geochemistry; last glaciation; lake; Bilutu; Inner Mongolia

0 引言

内蒙古中部地区地处中国北方季风边缘区,属生态环境敏感带,该地区湖泊沉积可以真实地记录区域气候环境的变化过程^[1-3]。近年来,湖泊沉积记录的古气候变化研究已在相邻地区广泛开展^[4-9],不同学者通过对地处季风边缘带的内蒙古达里湖^[8]、岱海^[4,7,9]、调角海子及河北省张北县安固里^[5]等湖泊沉积物的研究,恢复了各地全新世以来的环境演变与气候变化过程,对全新世的气候变迁有了较系统的认识^[6,10-13]。总体而言,对中国北方季风边缘区湖泊沉积的古气候研究主要集中在全新世以来。

关于该地区环境演变研究,前人从地貌及沉积特征分析了晚更新世以来湖泊盆地的发育过程^[14],由于没有连续的沉积剖面,系统的环境演变研究还没有开展。而该地区气候环境演变的研究对于正确认识东亚季风的演变规律具有重要意义。同时,不同时间尺度的气候变化机制以及古气候演化的区域差异性研究一直是过去全球变化研究中的热点科学问题。笔者通过对内蒙古中部必鲁图湖泊沉积物的粒度组成、微量元素、氧化物含量及其比值等环境指标的综合分析,揭示了该地区晚更新世晚期以来湖泊的环境演变过程,探讨了本区晚更新世晚期以来的气候环境演化特征,为中国季风边缘区第四纪以来气候环境演化过程的重建提供基础资料。

1 研究区概况

必鲁图湖泊位于内蒙古中部锡林郭勒盟苏尼特左旗南部(图1),为一封闭性湖泊,湖面海拔约962 m。根据苏尼特左旗1971~2000年的气象数据,该地区全年降水量为150~200 mm,主要集中在夏季(5~9月)。冬季(1月)平均气温-18.7℃,夏季(7月)平均气温22℃,年平均气温为3.1℃。必鲁图湖泊流域内没有大的河流输入,仅在西南部有季节性小河补给,湖水供应主要靠大气降水,目前已干涸,成为季节性湖泊。

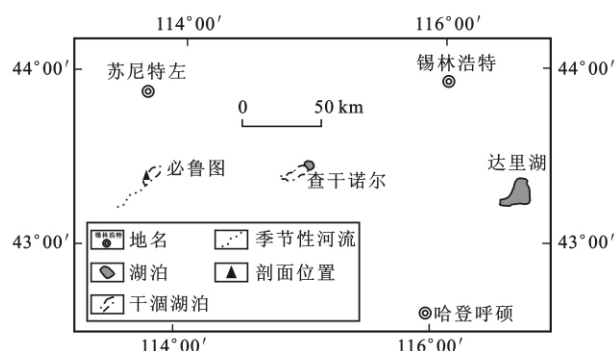


图1 必鲁图湖泊位置

Fig. 1 Location Map of Lake in Bilutu

据内蒙古苏尼特左旗1:200 000地质图,必鲁图湖泊南部为白垩纪灰绿色粉砂质黏土岩,其北侧为晚古生代花岗岩,西侧有石炭纪火山碎屑岩、中基性火山熔岩夹安山质凝灰岩,东南侧则为第三纪碎屑岩,主要是泥岩、粉砂岩和细砂岩。湖泊沉积物主要来源于周围岩石风化剥蚀后近距离搬运的产物。

2 材料与方法

在必鲁图湖泊西南部(地理位置:43°24'19.9"N,113°45'43.8"E)采用人工方式挖掘250 cm深的浅井,以5 cm间隔连续采集样品。整个浅井剖面由灰黄色粉细砂、灰绿色粉砂质黏土组成,其沉积特征自上而下可分为:0~13 cm,褐黄色粉砂质黏土;13~22 cm,灰绿色黏土质粉细砂,含细砾;22~59 cm,灰色黏土质粉砂,夹薄层粉砂质黏土;59~63 cm,灰白色钙质砂土,含细砾石,质硬;63~92 cm,灰黄色细砂,分选磨圆较好,夹灰色含细砾砂;92~185 cm,灰黄色黏土,夹薄层黏土质粉砂、细砂;185~250 cm,灰绿色黏土夹粉砂质黏土。年龄与深度的对应关系见图2。

剖面年代用光释光法(OSL)进行测量(表1),由中国地震局地质研究所新年代学实验室用细颗粒红外光释光法进行测定。根据6个OSL年龄数据,内插获得各岩性界线的年代。沉积物粒度分析使用Mastersize 2000激光粒度仪在中国科学院南京地

表 1 必鲁图湖泊沉积物 OSL 测年结果

Tab. 1 OSL Dating Results of Lake Sediment in Bilutu

样品号	岩性	埋深/m	等效剂量/ Gy	α 计数率/ ($10^3 \text{次} \cdot \text{s}^{-1}$)	$w(\text{K}_2\text{O})$ / %	实测体积 含水量/%	α 系数	剂量率/ ($\text{Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$)	年龄/ka
C30	浅灰色粉砂	0.30	24.9 ± 1.3	17.1 ± 0.3	2.0	23	0.07 ± 0.02	5.0 ± 0.5	4.9 ± 0.6
C-SX1	棕黄色中细砂	0.65	46.6 ± 1.6	13.8 ± 0.2	3.4	10	0.04 ± 0.02	5.7 ± 0.6	8.2 ± 0.8
C70	灰色细砂	0.75	77.7 ± 1.3	20.7 ± 0.3	3.3	12	0.07 ± 0.02	7.5 ± 0.8	10.4 ± 1.1
C-SX2	灰黄色中细砂	1.10	148.1 ± 3.9	14.8 ± 0.3	3.6	4	0.04 ± 0.02	6.3 ± 0.6	23.6 ± 0.2
C180	黏土质粉砂	1.80	468.6 ± 19.0	44.5 ± 0.4	2.3	22	0.07 ± 0.02	11.0 ± 1.1	42.5 ± 4.6
C245	粉砂质黏土	2.50	558.2 ± 19.4	48.2 ± 0.4	2.3	24	0.04 ± 0.02	9.8 ± 1.0	56.8 ± 6.0

注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物的含量(质量分数, 后文同)。

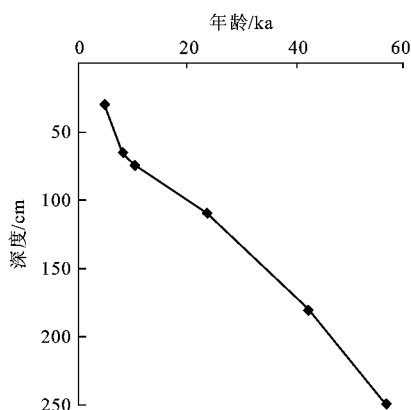


图 2 必鲁图湖泊沉积年龄与深度的对应关系

Fig. 2 Relationship Between Age and Depth for Lake Sedimentary in Bilutu

理与湖泊研究所进行,按照 Udden-Wentworth 标准对沉积物进行粒级(D)划分^[15],将沉积物主要分为中粗砂($D > 125 \mu\text{m}$)、细砂($62.5 \sim 125 \mu\text{m}$)、粉砂($3.9 \sim 62.5 \mu\text{m}$)和黏土($D < 3.9 \mu\text{m}$),为了表现更细粒组分的变化,将黏土又细分出小于 $2.0 \mu\text{m}$ 的粒级。常量及微量元素分析采用 X-荧光光谱仪、等离子质谱仪在国家地质实验测试中心完成。

3 结果与讨论

3.1 粒度组成

湖泊沉积物的粒度分布特征与流域内降水量、湖面高度及采样位置等密切相关,是沉积物搬运距离及沉积环境的直接反映,因而是恢复湖泊古环境演变的有效手段之一^[8,16-18]。研究表明,由于沉积物粒度大小受湖水物理能量的控制,因而能够反映水动力搬运条件强弱的变化^[7],进而代表了湖泊水位的高低。同时,不同时间尺度、不同类型湖泊沉积物粒度指示的环境意义不同^[18],湖泊沉积物粒度组成在环境解释上存在多解性。因此,利用粒度指标重建湖泊沉积记录的古气候古环境演变过程,需要

与其他指标相结合进行综合分析^[8,17-18]。

必鲁图剖面的粒度组成以黏土和粉砂为主,其中黏土的平均含量为 45.7%,粉砂为 44.0%;砂仅为 11.3%,中值粒径(M_z)与粗颗粒组分($D > 125 \mu\text{m}$)变化趋势一致。根据不同粒级的含量变化,整个剖面自下而上可以分为 3 段(图 3):80~250 cm,粉砂与黏土含量高值段,含量平均大于 95%,在 105~115 cm 深度黏土及粉砂含量急剧降低,仅为 3.6%,而中粗砂含量明显增加,该段下部 186~227 cm 深度粒度小于 $2.0 \mu\text{m}$ 的颗粒相对较低;59~80 cm,砂粒含量高值段,而粉砂和黏土含量为低值;0~59 cm,粉砂含量最高值段,黏土含量也较高,砂粒含量为低值段,其中 16~30 cm 深度黏土及粉砂含量显著降低,细砂含量也较低,而中粗砂含量明显增加。

3.2 地球化学特征

内陆封闭湖泊沉积物的地球化学特征(如 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$)记录了流域经历受到古气温、降水变化制约的化学风化过程^[9,19]。同时地球化学元素的迁移和积聚受到气候环境变化的影响^[20-25],因而沉积物地球化学特征可以揭示沉积时期的气候环境演化过程^[26-28]。

湖泊沉积物中,地球化学元素的迁移、聚集等变化主要受到气候环境因素的制约。因此,地球化学元素指标在反映气候环境演化过程中有着重要意义^[20-21,23-26,29-31]。干旱半干旱气候条件下,降水量减少,生物地球化学作用和沉积作用相应减弱,各种元素在湖泊中的含量也相对降低,但不同性质的元素分布规律不一致。化学风化受湿度和气温控制,在干旱条件下,化学风化弱,以机械搬运为主,惰性组分相对富集,如 Fe、Al、Ti、Ni、Co、Cr 等元素含量呈现低值,而 Na、K、Ba、Sr 等元素出现高值,表明气候相对干旱;反之,则气候相对潮湿。气温高时,生物光合作用强,CO₂ 被吸收,因而导致 CaCO₃ 沉淀,同时温度高时,蒸发作用相对强烈,也可导致 CaCO₃ 沉

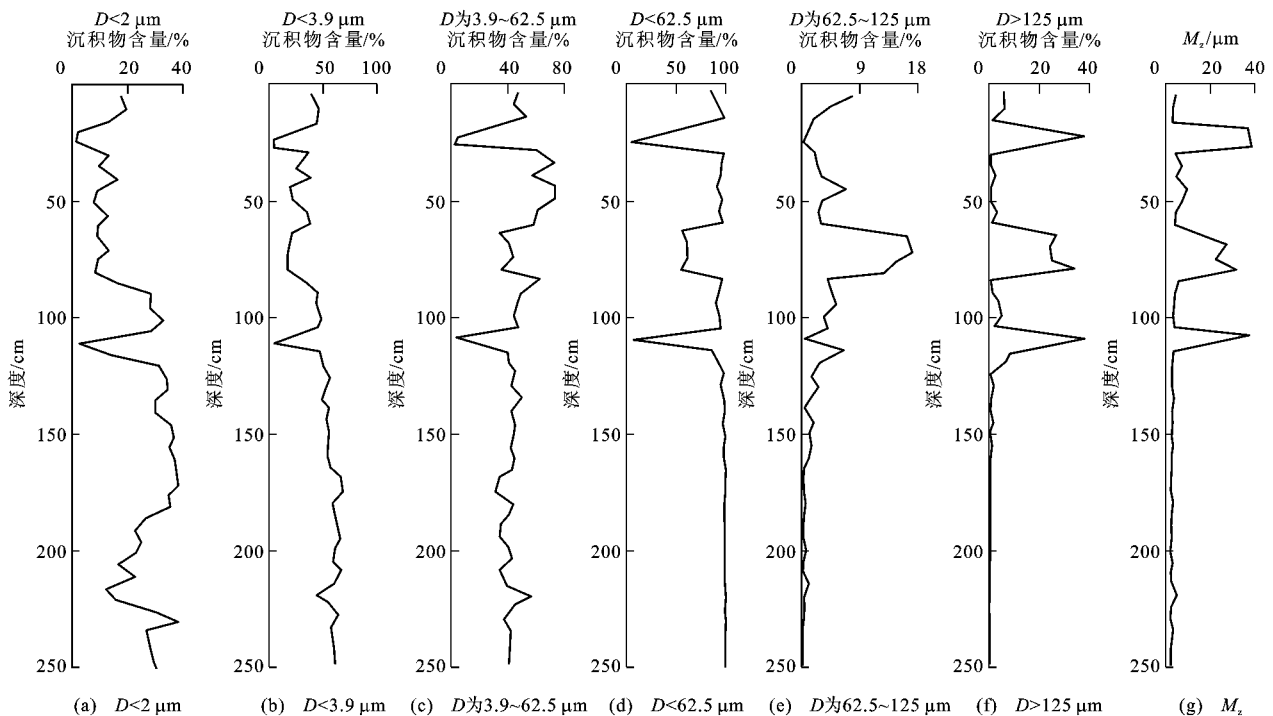


图3 必鲁图湖泊沉积物粒度组成

Fig. 3 Grain Size Composition of Lake Sediment in Bilutu

淀^[25],因此CaO、MgO含量等可以反映气温的高低变化。元素C含量可以间接反映沉积时期生物量及湿度的变化,因而在一定程度上反映气候的变化。

湖泊沉积物元素地球化学特征及其比值,已成为反映古气候波动的有效指标^[32-33]。沉积物中 $(w(\text{CaO}) + w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O}))/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 反映了活动组分与惰性组分之间的关系^[32],比值越高,进入湖泊的活动组分越多,物源区的风化作用越强,水热条件好;反之,风化作用减弱,水热条件越差。Sr的化学性质与Ca相似,化学风化作用中极易淋失,Rb与K相似,很容易富集在风化产物中,而Zr却很稳定。因此, $w(\text{Zr})/w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 常用来表示沉积物粗细颗粒相对含量及化学风化的强弱。Sr含量低, $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 、 $w(\text{Zr})/w(\text{Rb})$ 高,说明化学风化作用较弱; $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 低,指示较强的化学风化作用^[9,19,33]。

必鲁图剖面中SiO₂含量与K₂O、Na₂O含量变化趋势一致,而与CaO、MgO、MnO含量反相关。SiO₂含量变化较大,为24.0%~75.3%,平均为38.1%;Al₂O₃含量为7.41%~14.92%,平均为9.9%;CaO为2.82%~19.65%,平均为13.2%;MgO为1.65%~12.01%,平均为8.6%;Fe₂O₃为1.10%~4.66%,平均为3.0%;K₂O为1.77%~2.93%,平均为2.3%;Na₂O为1.59%~2.97%,平

均为1.9%;TiO₂为0.32%~0.57%,平均为0.4%。微量元素Rb、Zr含量变化趋势一致,而Sr、V、Ni、Pb、Cr等含量变化趋势一致。

整个剖面地球化学元素的含量可以分为5段(图4、5):219~250 cm, SiO₂、Al₂O₃、TiO₂含量与K₂O、Na₂O含量为最低值段, SiO₂含量平均仅为19.2%, CaO、MgO、MnO含量为高值段, CaO含量平均15.9%, Zr、V、Sr、Ni、Rb含量为低值段,而Zn、Co、Cu含量为较高值段;175~219 cm, SiO₂、Al₂O₃、TiO₂含量与K₂O、Na₂O含量以及Rb、Cr、Cu、Zn含量为高值段,而CaO、MgO、MnO含量以及Sr、Pb、Cr含量为低值段;92~175 cm, CaO、MgO含量均为最高值段,平均分别为16.3%和11.2%, MnO、FeO含量以及Sr、Zn、Co含量也较高;63~92 cm, SiO₂含量与K₂O、Na₂O含量以及Rb、Zr含量显著增加,其中SiO₂含量达到剖面的最高值,平均为61.8%,而CaO、MgO、MnO含量以及Sr、Cd、Cr含量达到剖面最低值;0~63 cm, SiO₂、MnO、K₂O含量较高,且有逐渐增加趋势, TiO₂、Al₂O₃含量以及V、Co、Ni、Pb含量均达到剖面最高值。

3.3 必鲁图晚更新世晚期的环境演变

根据地球化学指标的变化,结合沉积物岩性特征、粒度组成,将必鲁图晚更新世晚期以来的气候环境演化大致划分为5个阶段(图6)。

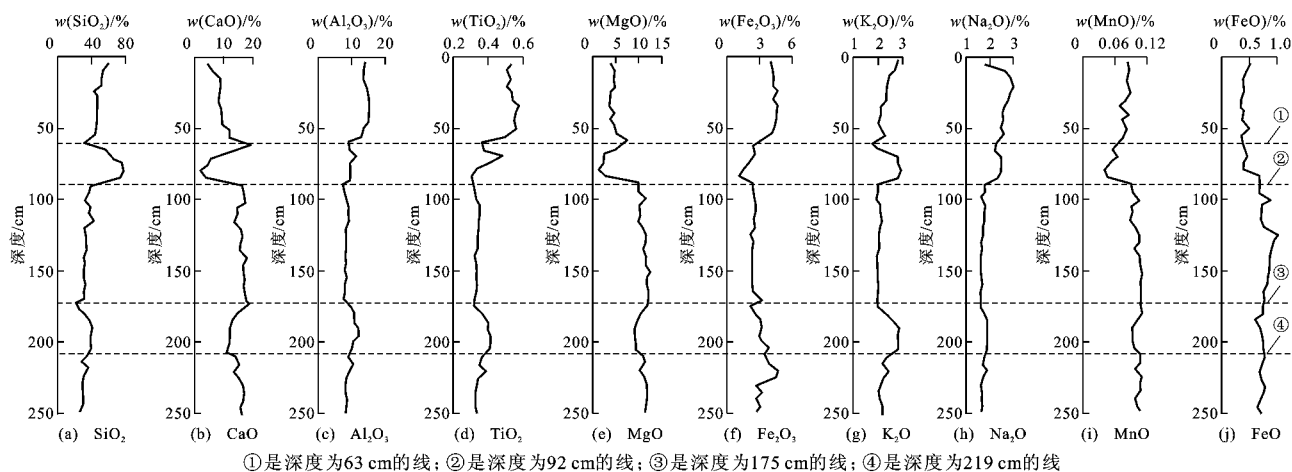


图4 必鲁图湖泊沉积物氧化物含量

Fig. 4 Oxide Contents of Lake Sediment in Bilutu

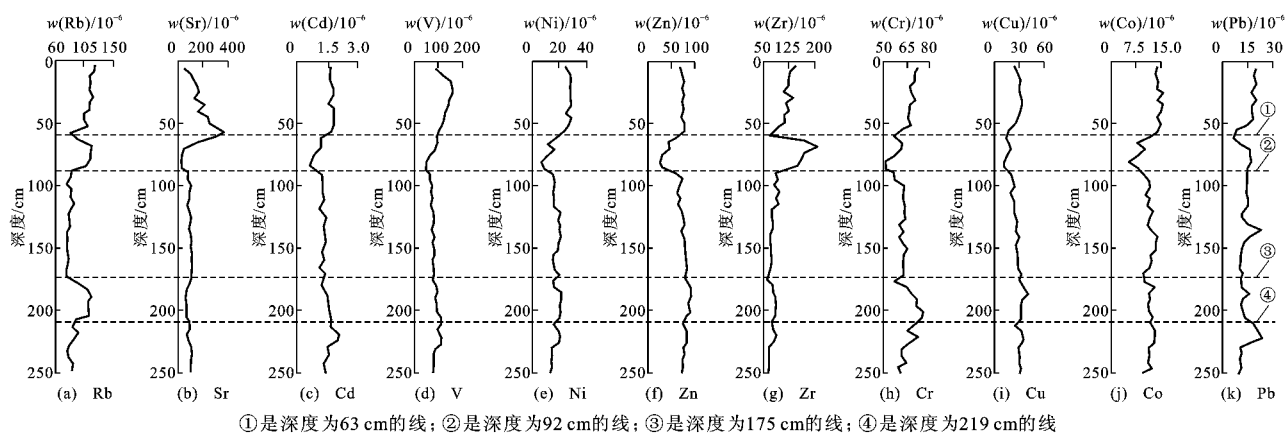


图5 必鲁图湖泊沉积物微量元素特征

Fig. 5 Trace Element Composition of Lake Sediment in Bilutu

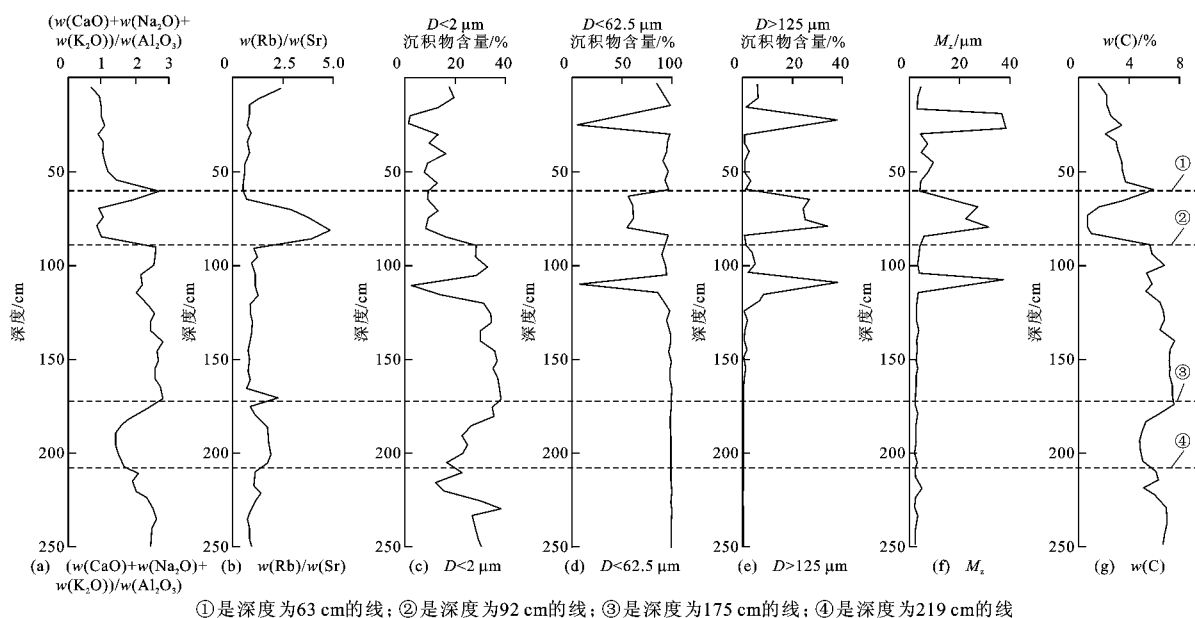


图6 必鲁图晚更新世以来环境演变

Fig. 6 Environmental Evolution Since Late Pleistocene in Bilutu

第1阶段,56.8~49.5 ka(219~250 cm 深处):温干气候期,该段为灰绿色粉砂质黏土,粒度较细,为浅湖相沉积环境,C 含量高,指示有机质较丰富;CaO 含量较大,反映较高的温度;较低的 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 说明该期化学风化较强,为温干偏湿气候。

第2阶段,49.5~41.3 ka(175~219 cm 深处):冷干气候期,该段岩性为灰绿色粉砂、黄色细砂,粒度较粗,表明气候环境发生变化;CaO、MgO 含量及 C 含量为相对低值区, $(w(\text{CaO}) + w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O}))/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 基本保持低值,反映湖区水热条件差; $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 相对较高,反映化学风化较弱,代表了冷干的气候环境,指示温度降低,表明该地区进入冷期。这一冷期可能是 Hinrich5 事件^[34](约 50 ka 开始的短暂气候寒冷时期)在该地区的反映。

第3阶段,41.3~20.8 ka(92~175 cm 深处):暖湿气候期,该段为灰绿色黏土层,粒度细,反映较深水沉积环境,指示偏湿气候; $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 为最低值段,而 C、CaO、MgO 含量为最高值段, Al_2O_3 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 含量为较低值段,指示该期气温偏高,化学风化最强,为高温大降水期,时间上与末次冰期间冰段一致,半干旱—半湿润环境。30.3 ka(120 cm 深处)开始有一短暂干冷期。

第4阶段,20.8~8.2 ka(63~92 cm 深处):干冷气候期,该段沉积物以灰黄色中细砂为主,粒度最粗,分选很好,具有风成砂的特征。从沉积特征及岩性组合看,该阶段湖泊沉积存在缺失,直至上部钙质层发育时期,湖水开始有短暂的扩张,总体处于湖滨环境,风成砂发育。该期 CaO、MgO、C 含量为最低值段; $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 为最高值段,反映该期化学风化最弱。该阶段各项地球化学指标均发生突变,为持续的干冷期,表明该地区进入冰期,时代上与末次冰期最盛期^[35-36]一致。

第5阶段,8.2~0 ka(0~63 cm 深处):暖干气候期,该段以中细粒砂为主,夹砾石,粒度粗;CaO、MgO、C 含量均有逐渐降低趋势,而 SiO_2 、 Al_2O_3 含量较高, $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 等趋向于升高,指示湿度降低;2.4 ka(15 cm 深处)开始, $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 增高显著,而 C、CaO 含量降低明显,反映当时干旱程度加剧,气温下降; $(w(\text{CaO}) + w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O}))/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 持续降低,指示了湖区风化作用较弱,水热条件差。各指标反映该期总体为温干的气候环境,晚期有向凉干转变的趋势。

4 结 语

(1)内蒙古必鲁图湖泊沉积物氧化物含量及 Rb 与 Sr 含量之比等地球化学指标的变化表明,由于气候环境条件的改变使得湖泊流域水热条件发生变化,明显影响着沉积物的风化程度。冰期气候干冷,以物理风化为主,化学风化弱,而间冰期气候暖湿,以化学风化为主,物理风化比较弱。湖泊沉积物的地球化学特征真实记录了该地区晚更新世晚期以来的气候环境演变历史。

(2)晚更新世(约 56.8 ka)以来,内蒙古中部地区的气候环境变化经历了 5 个主要阶段。第 2 阶段和第 4 阶段的冷期分别与全球气候变化的冷期相对应,特别是第 4 阶段气候环境的突变可以与末次冰期最盛期进行对比,这说明内蒙古中部地区末次冰期以来的气候变化与全球及中国其他地区具有较好的一致性,区域性气候变化受全球气候变化的影响。

参考文献:

References:

- [1] 徐 袁,钱维宏.东亚季风边缘活动带研究综述[J].地理学报,2003,58(增):138-146.
XU Yuan, QIAN Wei-hong. Research on East Asian Summer Monsoon: a Review [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(S): 138-146.
- [2] 曹建廷,沈 吉,王苏民,等.内蒙古岱海地区小冰期气候演化特征的地球化学记录[J].地球化学,2001,30(3):231-235.
CAO Jian-ting, SHEN Ji, WANG Su-min, et al. Geochemical Record for the Characteristics of Climate Change During the Little Ice Age in Daihai Lake, Nei Mongol [J]. Geochimica, 2001, 30(3): 231-235.
- [3] 乌云格日勒,刘清泗.岱海湖心沉积物分析及其 600 年来环境演变[J].地理学报,1998,53(增):76-82.
WUYUNGERILE, LIU Qing-si. Sediment Analysis of the Central Drilling Section in Daihai Lake and Its Environmental Evolution for the Past 600 Years [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(S): 76-82.
- [4] XIAO J L, XU Q H, NAKAMURA T, et al. Holocene Vegetation Variation in the Daihai Lake Region of North-central China: a Direct Indication of the Asian Monsoon Climatic History [J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(14/15): 1669-1679.
- [5] WANG H Y, LIU H Y, ZHU J L, et al. Holocene Environmental Changes as Recorded by Mineral Magnetism of Sediments from Angulinur Lake, Southeastern

- Inner Mongolia Plateau, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2010, 285(1/2): 30-49.
- [6] ZHAO Y, YU Z C. Vegetation Response to Holocene Climate Change in East Asian Monsoon-margin Region [J]. *Earth Science Reviews*, 2012, 113(1/2): 1-10.
- [7] 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(1): 93-95.
- SUN Qian-li, ZHOU Jie, XIAO Ju-le. Grain-size Characteristics of Lake Daihai Sediments and Its Palaeoenvironment Significance[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(1): 93-95.
- [8] WANG H Y, LIU H Y, CUI H T, et al. Terminal Pleistocene/Holocene Palaeoenvironmental Changes Revealed by Mineral-magnetism Measurements of Lake Sediments for Dali Nor Area, Southeastern Inner Mongolia Plateau, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 170(1/2): 115-132.
- [9] 金章东, 王苏民, 沈吉, 等. 内陆湖泊流域的化学风化及气候变化——以内蒙古岱海为例[J]. *地质论评*, 2001, 47(1): 42-46.
- JIN Zhang-dong, WANG Su-min, SHEN Ji, et al. Chemical Weathering and Paleoclimatic Change in Watershed Recorded in Lake Sediments—a Case Study of the Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 2001, 47(1): 42-46.
- [10] WANG H Y, LIU H Y, ZHAO F J, et al. Early- and Mid-Holocene Palaeoenvironments as Revealed by Mineral Magnetic, Geochemical and Palynological Data of Sediments from Bai Nuur and Ulan Nuur, Southeastern Inner Mongolia Plateau, China[J]. *Quaternary International*, 2012, 250(1): 100-118.
- [11] YIN Y, LIU H Y, HE S Y, et al. Patterns of Local and Regional Grain Size Distribution and Their Application to Holocene Climate Reconstruction in Semi-arid Inner Mongolia, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 307(1/2): 168-176.
- [12] ZHAI D Y, XIAO J L, ZHOU L, et al. Holocene East Asian Monsoon Variation Inferred from Species Assemblage and Shell Chemistry of the Ostracodes from Hulun Lake, Inner Mongolia[J]. *Quaternary Research*, 2011, 75(3): 512-522.
- [13] ZHANG C J, ZHANG W Y, FENG Z D, et al. Holocene Hydrological and Climatic Change on the Northern Mongolian Plateau Based on Multi-proxy Records from Lake Gun Nuur [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 323/324/325(1): 75-86.
- [14] 李龙吟, 田明中, 迟振卿, 等. 内蒙古必鲁图湖盆晚更新世以来的地层与环境演变[J]. *现代地质*, 1995, 9(2): 184-188.
- LI Long-yin, TIAN Ming-zhong, CHI Zhen-qing, et al. Study on Strata and Environmental Evolution of Bilutu Lake Basin Since Late Pleistocene in Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 1995, 9(2): 184-188.
- [15] WENTWORTH C K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [16] 孙永传, 李惠生. 碎屑岩沉积相和沉积环境[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- SUN Yong-chuan, LI Hui-sheng. *Sedimentary Facies and Depositional Environment of Detrital Rocks* [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1986.
- [17] 陈敬安, 万国江, 唐德贵, 等. 洱海近代气候变化的沉积物粒度与同位素记录[J]. *自然科学进展*, 2000, 10(3): 253-259.
- CHEN Jing-an, WAN Guo-jiang, TANG De-gui, et al. Recent Climatic Changes Recorded by Sediment Grain Sizes and Isotopes in Erhai Lake[J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(3): 253-259.
- [18] 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例[J]. *中国科学: D 辑*, 2003, 33(6): 563-568.
- CHEN Jing-an, WAN Guo-jiang, ZHANG Feng, et al. Environmental Records of Lacustrine Sediments in Different Time Scales—Taking Sediment Grain Size as an Example[J]. *Science in China: Series D*, 2003, 33(6): 563-568.
- [19] 金章东, 沈吉, 王苏民, 等. 早全新世降温事件的湖泊沉积证据[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(1): 11-18.
- JIN Zhang-dong, SHEN Ji, WANG Su-min, et al. Evidence for Early Holocene Cold Event from Lake Sediments[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(1): 11-18.
- [20] 靳鹤龄, 苏志珠, 孙忠. 浑善达克沙地全新世中晚期地层化学元素特征及其气候变化[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 366-371.
- JIN He-ling, SU Zhi-zhu, SUN Zhong. Characters of Chemical Elements in Strata of Middle and Late Holocene in Hunshandake Desert and the Indicating Climatic Changes[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(4): 366-371.
- [21] 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 等. 220 ka BP 来萨拉乌苏河流域地质剖面地球化学特征及其对全球气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(6): 861-868.
- JIN He-ling, LI Ming-qi, SU Zhi-zhu, et al. Geochemical

- Features of a Profile in Salawusu River Valley and Their Response to Global Climate Changes Since 220 ka BP [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(6): 861-868.
- [22] 苏志珠,董光荣,李小强,等. 晚冰期以来毛乌素沙漠环境特征的湖沼相沉积记录[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(2): 104-109.
- SU Zhi-zhu, DONG Guang-rong, LI Xiao-qiang, et al. The Lake-swamp Sediment Records on the Environmental Characteristics of Mu Us Desert Since the Late Glacial Epoch [J]. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(2): 104-109.
- [23] 王苏民,吉磊,羊向东,等. 内蒙古扎赉诺尔湖泊沉积物中的新仙女木事件记录[J]. *科学通报*, 1994, 39(4): 348-351.
- WANG Su-min, JI Lei, YANG Xiang-dong, et al. The Record of Younger Dryas Event in Lake Sediments from Jalai Nur, Inner Mongolia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(4): 348-351.
- [24] GOFF J R, CHAGUE-GOFF C. A Late Holocene Record of Environmental Changes from Coastal Wetlands: Abel Tasman National Park, New Zealand [J]. *Quaternary International*, 1999, 56(1): 39-51.
- [25] LANDMANN G, ABU QUDAIR G M, SHAWABKEH K, et al. Geochemistry of the Lisan and Damya Formations in Jordan, and Implications for Palaeoclimate [J]. *Quaternary International*, 2002, 89(1): 45-57.
- [26] 谭红兵,于升松. 我国湖泊沉积环境演变研究中元素地球化学的应用现状及发展方向[J]. *盐湖研究*, 1999, 7(3): 58-65.
- TAN Hong-bing, YU Sheng-song. Present Situation and Future Development of Elemental Geochemistry in the Study of Lake Sediments' Evolution [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 1999, 7(3): 58-65.
- [27] 陈敬安,万国江,陈振楼,等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. *地球化学*, 1999, 28(6): 562-570.
- CHEN Jing-an, WAN Guo-jiang, CHEN Zhen-lou, et al. Chemical Elements in Sediments of Lake Erhai and Palaeoclimate Evolution [J]. *Geochimica*, 1999, 28(6): 562-570.
- [28] 吴艳宏,李世杰,夏威岚. 可可西里苟仁错湖泊沉积物元素地球化学特征及其环境意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(3): 64-68.
- WU Yan-hong, LI Shi-jie, XIA Wei-lan. Element Geochemistry of Lake Sediment from Gourenco Lake, Kekexili, Qinghai-Xizang Plateau and Its Significance for Climate Variation [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(3): 64-68.
- [29] RUSSELL J M, JOHNSON T C. A High-resolution Geochemical Record from Lake Edward, Uganda Congo and the Timing and Causes of Tropical African Drought During the Late Holocene [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(12/13): 1375-1389.
- [30] LI H C, BISCHOFF J L, KU T L, et al. Climate and Hydrology of the Last Interglaciation (MIS 5) in Owens Basin, California: Isotopic and Geochemical Evidence from Core OL-92 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(1/2): 49-63.
- [31] 张小龙,徐柏青,李久乐,等. 青藏高原西南部塔若错湖泊沉积物记录的近300年来气候环境变化[J]. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(1): 79-90.
- ZHANG Xiao-long, XU Bai-qing, LI Jiu-le, et al. Climatic and Environmental Changes over the Past About 300 Years Recorded by Lake Sediments in Taro Co, Southwestern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(1): 79-90.
- [32] DINGLE R V, LAVELLE M. Late Cretaceous-Cenozoic Climatic Variations of the Northern Antarctic Peninsula: New Geochemical Evidence and Review [J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 1998, 141(3/4): 215-232.
- [33] DYPVİK H, HARRIS N B. Geochemical Facies Analysis of Fine-grained Siliciclastics Using Th/U, Zr/Rb and (Zr + Rb)/Sr Ratios [J]. *Chemical Geology*, 2001, 181(1/2): 131-146.
- [34] HENRICH H. Origin and Consequences of Cyclic Ice Rafting in the Northeast Atlantic Ocean During the Past 130 000 Years [J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(2): 142-152.
- [35] WILLIAMS G E. History of the Earth's Obliquity [J]. *Earth Science Reviews*, 1993, 34(1): 1-45.
- [36] GROOTES P M, STUIVER M, WHITE J W C, et al. Comparison of Oxygen Isotope Records from the GISP2 and GRIP Greenland Ice Cores [J]. *Nature*, 1993, 366: 552-554.