

内蒙古东乌珠穆沁旗乌拉盖高毕湖泊沉积记录的 5 万年来环境演变*

姚杜琳^{1,2,3}, 王永^{2**}, 迟振卿², 闵隆瑞², 姚培毅², 陈兴强^{1,2,4}

(1: 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

(2: 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

(3: 广西机电工业学校, 南宁 530023)

(4: 重庆市地质环境监测总站, 重庆 441000)

摘要: 中国北方季风边缘区的湖泊对环境的反应很敏感, 乌拉盖高毕是位于内蒙古高原东北部的一个已干涸的内陆封闭湖泊. 研究剖面总厚度为 405 cm, 根据取得的 9 个 AMS¹⁴C 及光释光测年数据, 建立了 51.9 ka BP 以来的年代序列. 结合岩性的变化、粒度组分分析、粒度参数(标准偏差、偏度、峰度等)及 Rb/Sr 比值特征进行了详细的分析, 恢复了乌拉盖高毕湖泊沉积记录的 5 万年来的环境演化过程. 将 0~405 cm 的剖面划分为 4 个较大的气候阶段: 51.9~44.1 ka BP (405~343 cm), 气候为干冷期, 各环境指标显示为滨湖沉积, 湖泊水位较低; 44.1~28.5 ka BP (343~130 cm), 气候为温湿期, 湖泊逐渐扩张, 湖泊水位升高; 28.5~11.38 ka BP (130~35 cm), 气候转冷, 湖面萎缩, 并在盛冰期出现砂楔, 该阶段后期湖泊干涸; 11.38 ka BP 至今 (35~0 cm), 气温回升.

关键词: 湖泊沉积; 环境演变; 粒度参数; 微量元素; 内蒙古; 乌拉盖高毕

Environmental changes during the past 50000 years recorded by Lake Wulagaigaobi sediment, Dongwuzhumuqinqi, Inner Mongolia

YAO Dulin^{1,2,3}, WANG Yong², CHI Zhenqing², MIN Longrui², YAO Peiyi² & CHEN Xingqiang^{1,2,4}

(1: *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, P. R. China*)

(2: *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, P. R. China*)

(3: *Guangxi Mech. & Elec. Industry School, Nanning 530023, P. R. China*)

(4: *Chongqing Geological Environment Monitoring Station, Chongqing 441000, P. R. China*)

Abstract: Lakes located in the monsoon marginal zone in North China are sensitive to climate change. Lake Wulagaigaobi is an enclosed lake in Inner Mongolia of China, which is in the semiarid and sub-humid ecotone on the northeast margin of the Inner Mongolia Plateau. In this paper, a sediment profile of 405 cm deep was chose. The measured data of the sediment in AMS¹⁴C and OSL age revealed that the sediment profile was deposited since 51.9 ka BP. Combined with chronological data and the analyses of sedimentary characteristics, including grain-size distribution, grain-size frequency, grain-size parameters, and trace elements, the evolutionary process and features of the lake environment were reconstructed during the past 50000 years. Results showed that there were four climate periods: 51.9~44.1 ka BP (405~343 cm), cold and dry period, a lower lake-level; 44.1~28.5 ka BP (343~130 cm), warm and wet period, the lake-level fluctuated; 28.5~11.38 ka BP (130~35 cm), cold and dry period; 11.38 ka BP~today (35~0 cm), warm and wet period.

Keywords: Sediment; environmental evolution; grain size paramters; trace element; Inner Mongolia; Lake Wulagaigaobi

湖泊沉积具有连续性好、分辨率高、信息量丰富、灵敏度高的特点^[1]. 因此, 在精确年代测定的基础上,

* 中国地质调查局项目(1212011087116, 1212010911027)资助. 2011-09-06 收稿; 2012-05-21 收修改稿. 姚杜琳, 女, 1983 年生, 硕士研究生; E-mail: 48027394@qq.com.

** 通信作者; E-mail: wangyong@cags.ac.cn.

利用湖泊沉积物多种代用指标来重建陆地古环境具有不可比拟的优势. 位于中国北方季风边缘区的内蒙古东部的很多内陆封闭湖泊, 属于气候上的过渡地带和生态系统上的脆弱地带^[2-3], 对全球气候的变化相当敏感, 是国内外很多学者的研究对象. 近年来, 许多学者对该地区的黄旗海、岱海、呼伦湖等开展了与古气候-古环境相关的研究, 并主要集中在全新世时期的环境重建^[4-7], 探讨短时间尺度的气候环境演变, 而较长时间序列的研究资料比较缺乏. 本文以内蒙古东北部的乌拉盖高毕湖泊沉积为研究对象, 主要通过对所采样剖面年代学、沉积物粒度特征与微量元素等方面的研究, 恢复了该湖泊沉积记录的 5 万年来的环境变迁.

1 区域概况

乌拉盖高毕(45°30'N, 117°33'E), 又叫索林诺尔, 位于内蒙古东乌珠穆沁旗, 于 1997 年干涸. 海拔为 823 m, 面积为 230 km², 属内流区微咸水湖(图 1). 乌拉盖高毕为一个相对封闭的湖泊, 主要靠地表径流与大气降水补给, 流域面积约为 8500 km², 主要由巴格尔郭勒和乌拉盖郭勒两条河分别由西南和东北方向注入湖中. 湖盆北部为东北—西南向分布的低山丘陵, 主要由燕山期花岗岩组成, 而乌拉盖郭勒上游大面积出露侏罗纪玄武岩、安山岩夹砂砾岩. 湖泊南部和东南部, 分布着广阔的冲积平原, 主要由新生代砂砾岩组成, 其间有低洼地及基岩残丘等地貌类型.

该地区属于中温带半干旱型大陆气候, 地处大兴安岭西麓的典型草原地带, 受蒙古大气压与大陆低压交替影响. 年均降水量仅为 250~300 mm, 降水集中于 6—8 月份; 年平均气温为 2~3℃ 左右, 1 月平均气温为 -22.6℃, 极端最低气温为 -32.9℃; 7 月平均气温为 22.9℃, 极端最高气温为 37.4℃. 主要特点为冬季寒冷而漫长, 夏季温热而短暂, 降水少而集中, 春季风沙大, 雨量少^[8].

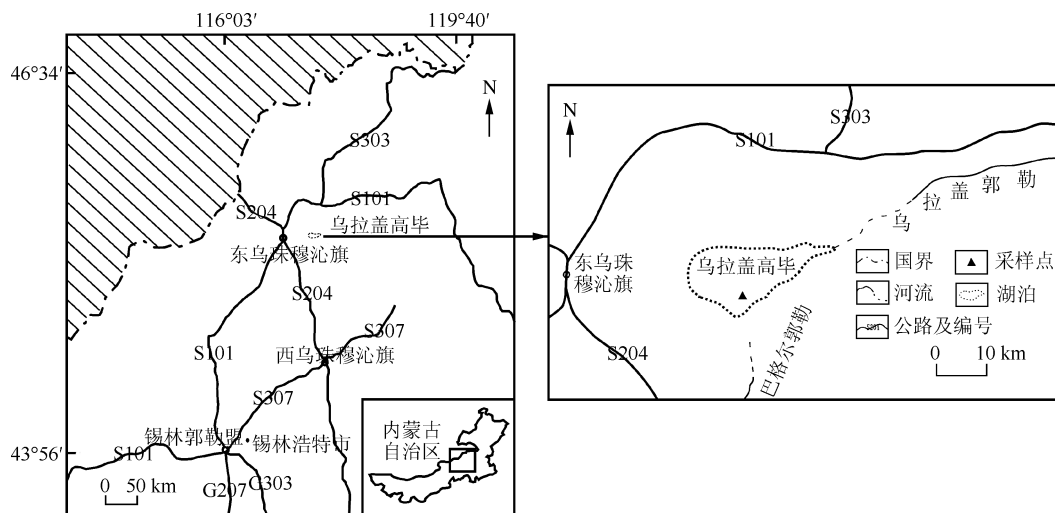


图 1 乌拉盖高毕及采样点地理位置

Fig. 1 Location of Lake Wulagaigaobi and the sampling site

2 材料与方法

在湖泊东南部人工挖掘了一个深 405 cm 的浅井为剖面. 整个剖面以 5 cm 间隔连续取样, 共计 82 组样品. 该剖面的岩性特征自上而下为:

1) 0~35 cm, 灰白色粘土层, 质地均匀, 夹黄色呈脉状分布的砂质粘土. 粘土层中零星见有砂砾石, 粒度从中细砂至细砾石, 直径最大可达 1 cm, 成分为石英.

2) 35~146 cm, 灰色粉砂质粘土, 于 50 cm 处夹黄色砂质脉状体, 近垂向延伸, 其宽为 1~10 cm, 长为 10~60 cm. 下部夹黄色薄层粉砂质粘土, 单层厚度 2~4 cm, 粉砂质粘土中仍可见砂砾石.

3) 146~200 cm, 灰黄色粘土, 夹灰白色中细砂脉, 宽约 0.5 cm. 粉砂中含黄色斑块.

- 4) 200 ~ 222 cm, 浅黄色夹灰色粘土, 质地较均匀.
- 5) 222 ~ 250 cm, 灰色粘土, 其间夹有几层不均匀细砂层, 厚度约 0.5 ~ 1.0 cm.
- 6) 250 ~ 292 cm, 浅黄色粘土, 夹少量灰色粘土.
- 7) 292 ~ 343 cm, 灰黑色粘土, 317 ~ 320 cm 为一层黑色粘土层.
- 8) 343 ~ 405 cm, 灰色粉砂质粘土, 近底部 398 ~ 400 cm 为一层浅灰色细砂, 345 cm 处发现螺, 大小约 0.3 cm.

粒度测量在中国地质大学(北京)地球科学与资源学院粒度实验室进行,使用英国 MALVERN 公司的 MasterSize 2000 激光粒度仪分析. 粒度测试样品的前处理严格按照规定进行,首先,将 1.5 g 左右的样品放入 100 ml 烧杯中,加入 10 ml 10% 的 H₂O₂ 后搅拌,静置 24 h 后去清液;然后对样品进行烘焙以去除残留的 H₂O₂;加 10 ml 10% 的 HCl 并搅拌,静置 24 h 后滤去清液. 前处理完毕后加 10 ml 10% 的偏磷酸钠 (Na(PO₃)₆) 作为分散剂,用超声波振荡后进行测量,测量范围为 0.02 ~ 2000 mm,重复测量误差小于 1%,可以保证获得完整的粒度分布曲线. ¹⁴C 测年样品在北京大学加速器质谱(AMS)实验室测定,树轮校正所用曲线为 IntCal 04^[9],所用程序为 OxCal v3.10;光释光(OSL)测年样品在国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心使用 Daybreak 2200(美国)光释光仪测定;微量元素采用等离子质谱仪(X-Series)在国家地质实验测试中心测定.

3 结果与讨论

3.1 年代序列

分别在剖面深度 10、50、215、317 cm 处取 ¹⁴C 样品 4 个,70、150、250、355、405 cm 处取光释光样品 5 个. ¹⁴C 测年材料除 317 cm 处为草根以外,其余均为沉积物中的有机质. 测年结果见表 1,根据测年数据获得沉积剖面深度和年龄的关系(图 2).

表 1 内蒙古乌拉盖高毕剖面 AMS¹⁴C 及光释光测年数据
Tab. 1 AMS¹⁴C and optical stimulated luminescence dating of Lake Wulagaigaobi, Inner Mongolia

样品编号	深度/cm	测年材料	测年方法	年龄/a BP	日历年龄 2σ(95.4%)/aBP
BA09634	10	沉积物	AMS ¹⁴ C	1765 ± 40	1685 ± 57
BA09635	50	沉积物	AMS ¹⁴ C	11385 ± 60	13281 ± 132
09G-279	70	沉积物	OSL	22300 ± 1700	—
09G-280	150	沉积物	OSL	30600 ± 1400	—
BA09636	215	沉积物	AMS ¹⁴ C	33775 ± 105	39485 ± 1031
09G-281	250	沉积物	OSL	36800 ± 1800	—
BA09637	317	草根	AMS ¹⁴ C	35880 ± 160	41283 ± 235
09G-282	355	沉积物	OSL	45100 ± 2600	—
09G-283	405	沉积物	OSL	51900 ± 3000	—

采样剖面位于乌拉盖高毕南部近岸边,沉积速率较低. 整个剖面的沉积速率可以分为 3 段: 0 ~ 70 cm 沉积速率较低,平均为 38.7 mm/ka;70 ~ 250 cm 沉积速率最高,平均为 124.1 mm/ka;250 ~ 405 cm 沉积速率平均为 102.6 mm/ka(图 2). 各岩性界面的年龄根据各段沉积速率分别通过计算获得. 根据测年数据采用分段线性内插的方法获得 35、130、343 cm 的年龄分别为 11.38、28.5、44.1 ka BP.

3.2 各种代用指标的气候环境指示意义

3.2.1 粒度 沉积物的粒度分析是分析沉积环境

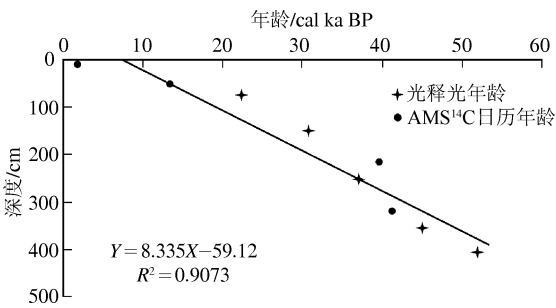


图 2 内蒙古乌拉盖高毕剖面年龄-深度线性关系
Fig. 2 Age-depth variation of Lake Wulagaigaobi profile, Inner Mongolia

的重要手段,同时也是恢复古环境-古气候最首要的指标之一.已有研究表明,从湖岸到湖心,随着水深的逐渐增加,其水动力的强度由强变弱,湖岸到湖心的湖泊沉积物依次呈现为砾石、砂、粉砂及粘土.在长时间尺度上,粗/细粒沉积物分别指示较低/高的湖面^[10].在同一个垂直剖面,粗粒沉积物对应近湖岸的地方,水动力强度较强,显示期间的湖水较浅;反之,较细粒沉积物则对应靠近湖心的地方,水动力强度较弱,显示期间的湖水较深^[11].本文在进行粒度分析时,按 Udden-Wentworth 粒度分级标准^[12],将沉积物主要分为砂($62.5 \sim 2000 \mu\text{m}$)、粉砂($3.9 \sim 62.5 \mu\text{m}$)、粘土($<3.9 \mu\text{m}$),结果见图 3.

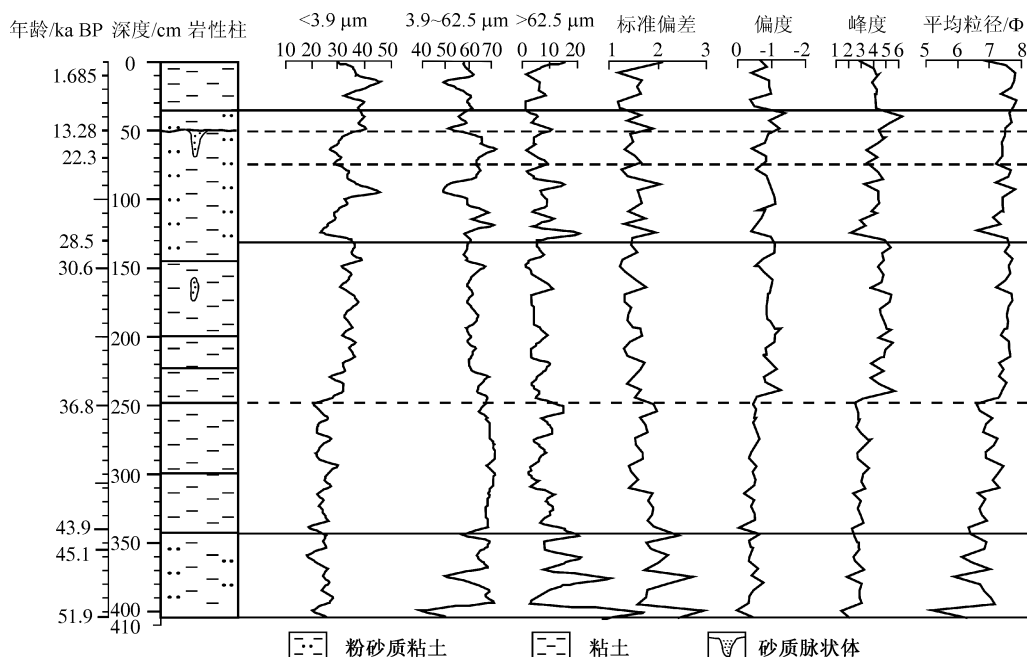


图 3 乌拉盖高毕沉积物粒度分布

Fig. 3 Grain size distribution of sediment in Lake Wulagaigaobi

整个剖面的粒度组成以粘土和粉砂为主,其中粉砂平均含量为 62.99%;粘土平均含量为 30.16%;砂平均含量仅为 6.85%.

粘土含量的变化大致可以分为四部分:0~50 cm 粘土含量是整个剖面中最高的;50~100 cm 段,总体含量比上一段减少,波动较大;100~250 cm 粘土含量又开始增多,变化幅度不大;250 cm 往下至剖面底部粘土平均含量最低,且变化幅度不大.

粉砂的含量与粘土的含量变化基本呈负相关.

砂的含量在顶部 0~5 cm 处稍微偏高.往下一直到 343 cm 处,除了在 130 cm 处有短暂的增加以外,基本上含量都是在 5% 左右,且波动不大.从 343 cm 往下至剖面底部,砂粒含量大幅上升且波动很大,最高值在 400 cm 处达到 42%.

用各粒级体积百分比作成的频率曲线是判别沉积水动力条件的一个很重要的指标,频率曲线的峰态变化可以作为沉积作用形式变化的依据^[13].为此,我们对沉积物的粒度频率曲线特征进行了分析(图 4).粒度参数及其组合特征也是判别沉积水动力条件及沉积环境的重要参考依据,每一个粒度参数都以一定的数值定量表示碎屑物质的粒度特征^[14].主要参数有平均粒径 M_z 、标准偏差 σ_1 、偏度 SK_1 和峰度 K_g .本文沉积物的粒度参数是根据 McManus 的矩法公式^[15],然后通过 Excel 软件计算得出^[16](图 3).

整个剖面沉积物的粒度频率曲线以单峰正态为主,占样品数的 80% 以上.自上而下,频率曲线的变化大体上是从 a→b→c(图 4).三条曲线的众数主要集中在粉砂这个粒级,峰形两端的粘土及砂的含量都较低.整个剖面沉积物平均粒径在 5~8Φ 之间,变化幅度较小;标准偏差变化范围在 1.2~2.9 之间,分选较差;偏

度 SK_1 在 $0 \sim -1.5$ 之间,均为负偏态,沉积物以细粒为主;峰度是用来衡量粒度频率曲线尖锐程度的,也就是度量粒度分布的中部与两尾端的展形之比,其大小反映了沉积环境对沉积物的改造作用,其数值在 $1.4 \sim 6.3$ 之间,变化幅度比较大.这些特征说明流水作用是该剖面沉积物来源的主要动力.

以 250 cm 为界,剖面按粒度特征大致可分为两段,期间还可以划分出次级阶段(图 3).上段($0 \sim 250$ cm)平均粒径在 $7 \sim 8 \Phi$ 之间波动,粒度频率曲线表现为 a 型,按福克(1966)偏度分级,基本表现为很负偏态^[17].下段($250 \sim 405$ cm),平均粒径从 7Φ 逐渐波动到 5Φ ,说明 250 cm 以上的湖泊水动力强度要低于 250 cm 以下,尤其是 $343 \sim 405$ cm 波动幅度为整个剖面最大; $250 \sim 405$ cm 表现为负偏态,说明下半部的粒度要相对偏粗一点,这与平均粒径变化也是相对应的.从 250 cm 处往下分选变得更差,尤其是 340 cm 开始波动很大(图 4),可见沉积物的来源不再单一,应该有其他作用参与沉积从而带来了新物源的加入.其中频率曲线 c 有较明显的主次峰形,说明有其他作用参与了搬运

沉积过程,研究区地处北方季风边缘区,推测可能是风力作用影响,但是流水作用仍占主导.

3.2.2 元素及其比值 地层中各种化学元素的赋存、分布、迁移和配比规律,由于元素的来源及本身的物理、化学性质的差异而在地层中具有不同特性.除此之外,还因各元素在风化、迁移和沉积过程中受到的气候环境变化而产生出不同的地球化学行为差异^[18].本文主要对样品中的微量元素(V、Cr、Co、Ni、Zn、Rb、Sr、Zr、Cd、Cs、Pb)以及放射性元素(Th 和 U)进行测试,并分析其环境意义.

湖泊沉积物主要来源于物源区及流域内岩石/沉积物风化搬运的产物,其地球化学元素的迁移、聚集等变化受气候环境因素的制约,不同气候条件下形成的沉积物具有不同的地球化学特征,因而沉积物的地球化学元素具有气候环境指示意义^[19-21].一般认为,在干冷气候条件下,由于化学风化过程减弱,机械搬运为主,从而使 Cr、V、Co、Ni 等活动性低的元素含量在侵蚀区增加,沉积区降低;在暖湿气候条件下,水呈酸性反应,化学风化增强使 Zn、Ti、Mn、Cr、Co、Ni、V 等元素的迁移能力增大,剥蚀地区因受淋滤,浓度降低,而在沉积区浓度相对较高^[22].也就是说,湖泊沉积物中微量元素 Cr、V、Co、Ni、Zn 等含量降低揭示的是相对干冷的气候环境,反之,这些元素含量增加则指示相对温湿的气候环境.

Rb 和 Sr 是比较典型的分散元素,在自然界中它们很少形成自己的独立矿物,而是以类质同象的形式分布在含钾和钙的矿物中.其中 Rb 的离子半径和 K 的相近,所以主要分散在含 K 的矿物中,如白云母、黑云母和钾长石;而 Sr 的离子半径和 Ca 相近,则主要分散在含 Ca 的矿物中,如斜长石、角闪石、碳酸盐等^[22-25].富 Rb 的矿物比富 Sr 的矿物要稳定,因此,随着风化作用的加强, Sr 的活动性比 Rb 要强.同时,还因为 Rb 的离子半径较大,表面势能较高,在风化过程时 Rb 容易被带负电荷的粘土所吸附,从而富集在粘土等细粒级的沉积物中^[22]. Sr 的离子半径较小,在淋溶作用中更易以游离 Sr 的形式被地表水带走,从而富集于湖泊沉积物中^[18,23].也就是说,在湖泊沉积物中 Rb/Sr 比值与风化强度(即淋溶强度)负相关, Rb/Sr 比值低则表明该沉积阶段的气候偏温湿, Rb/Sr 比值高则表明该沉积阶段的气候相对要干冷^[19,26].

放射性元素 Th 与 U 的化学特征对比性较强, Th 是比较活泼的亲石元素,而 U 是活泼的亲氧元素. U 主要有 U^{6+} 、 U^{4+} 两种形式,并在自然条件下相互转化,且易被粘土吸附.一般沉积物越细 U 含量越高,同时 U 含量与有机质含量呈正相关^[18,27].而 Th 仅以 Th^{4+} 存在. U 在还原条件下, U^{4+} 可与 Th^{4+} 、 Zr^{4+} 等置换;在氧化条件下, U^{4+} 则变为 U^{6+} 与 Th^{4+} 分离.因 U 易氧化为较易溶解的 $(UO_2)^{2+}$,故在表生环境中易被迁移^[27].也就是说,氧化作用影响 Th/U 比值的变化,氧化作用弱则 Th/U 比值变小,氧化作用强则 Th/U 比值变大.而氧化作用的强弱又和当时的气候和环境变化相关,一般认为,温湿的气候环境比干冷的气候环境下氧化作

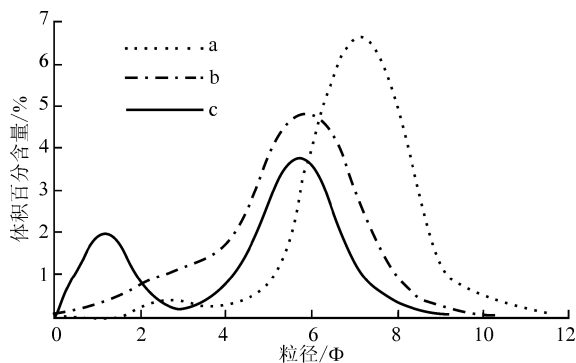


图4 乌拉盖高毕沉积物粒度频率曲线

Fig. 4 Grain size frequency curves of sediment in Lake Wulagaigaobi

用强^[28,30]. 因此, Th/U 比值高则对应较温湿的气候, 反之则对应相对较干冷的气候.

Th/U、Rb/Sr 比值受物源区岩石化学成分及气候环境条件的影响, 对于同一源区来源的沉积物, 其地球化学特征可以作为有效的环境指标^[26-31].

3.3 乌拉盖高毕 5 万年来的气候环境演化特征

根据乌拉盖高毕剖面的沉积特征、粒度分析以及微量元素的变化, 该剖面记录的 5 万年以来环境变化可以划分为四个阶段.

第一阶段: 51.9—44.1 ka BP (405 ~ 343 cm)

末次冰期的第一副冰期晚期, 气候寒冷, 湖面萎缩期. 该段岩性为灰色粉砂质粘土, $>62.5 \mu\text{m}$ 的颗粒含量最大, 平均粒径显示出该段的粒度偏粗. 标准偏差平均值为 2.07, 达到了剖面中的最高值, 可见其分选是整个剖面中最差的. 同时, 峰度也是最低的, 频率曲线表现为 c 曲线, 为主次峰形. 且该阶段各粒级组分的波动都比较大, 由此可以推断出当时水动力条件相对比较强且不稳, 而且在 345 cm 处发现有少许螺化石, 应该是近岸、滨岸的沉积环境形成的. 从微量元素的情况来看, Cr、V、Co、Ni、Zn 等元素的含量基本为剖面最低; Rb/Sr 比值较高, 平均值为 0.30 (图 5), 说明当时的环境比较干冷, 使得 Sr 被淋溶带入湖泊的含量少; 该段 U 值含量较高, 可能与近源岩石类型 (花岗岩) 相关, 干冷气候条件下以机械风化为主, 湖泊中主要接收近源花岗岩风化产物的沉积, 而花岗岩中 U 含量比较高^[18], 因而 Th/U 比值在这一段呈现出最低值, 说明该阶段氧化作用比较弱.

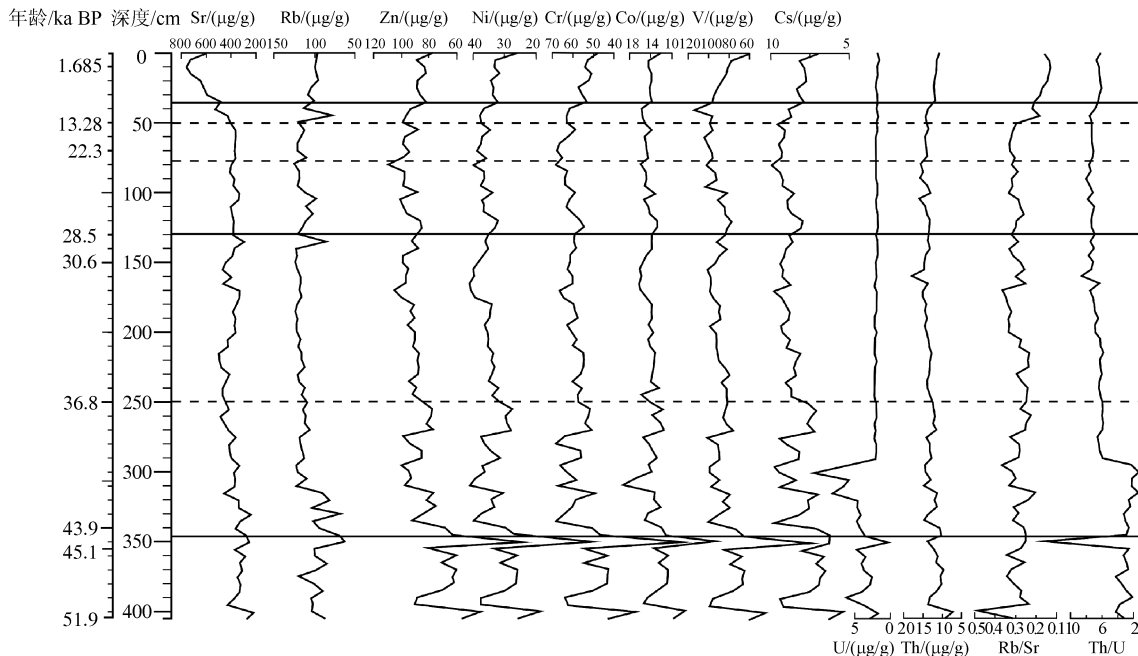


图 5 乌拉盖高毕剖面化学元素含量曲线

Fig. 5 Graph of chemical element content in Lake Wulagaigaobi

第二阶段: 44.1—28.5 ka BP (343 ~ 130 cm)

这段时期是末次冰期第一副间冰期, 气候相对而言比上一个阶段要温湿, 湖面开始扩张. 岩性主要以粉砂为主. 这一阶段 Rb/Sr 的平均比值为 0.28, 比上一阶段数值降低, 对应较温湿的气候环境. 从粒度特征及微量元素的变化情况又可以将这个阶段分为 2 个亚阶段:

① 44.1—36.8 ka BP (343 ~ 250 cm), 较温湿期, 湖面相对扩张期. 该段下半段 (343 ~ 292 cm) 为灰黑色粘土, 上半段 (292 ~ 250 cm) 是浅黄色粘土. 从粒度组分上看, 这个层段砂的含量明显较上一个层段减少, 且比较稳定; 粘土的含量虽然没有显著的变化, 但是粉砂的含量在整个剖面最高, 平均为 68.64%, 且变化幅度

最小,可见该层段的水动力条件弱而平稳,反映出湖泊水位较深。平均粒径比上段偏细,标准偏差也骤减,表明分选较之上阶段要好。各粒度组分的变化都不太大,且下半部沉积物的颜色呈灰黑色,表明有机质含量较高,进而说明此阶段的湖水环境比较稳定,此时的气候较为湿润。下半段U含量的高值可能与该段较高的有机质含量相关^[18,28]。从微量元素来看,Cr、V、Co、Ni、Zn等元素的含量有所增加,Sr的含量也增加,Rb/Sr比值比上阶段要有所降低,说明风化作用比较强,气候较温湿,从而淋溶后进入湖泊的Sr含量增多。

② 36.8—28.5 ka BP(250~130 cm),温湿期,湖面继续扩张。该段岩性的颜色呈灰黄或浅黄色。粘土含量增加,粉砂含量相对开始减少,但总的来说还是以粉砂为主,砂的含量也有微量的减少。平均粒径在7~8Φ之间波动,明显可以看出粒度变细。而且,标准偏差数值进一步变小,可见分选比上一个层位更好。峰度显著增加,其平均值为整个剖面中最高的。偏态由负偏态转变为很负偏态。Cr、V、Co、Ni、Zn等微量元素含量也有所增加,但幅度不大。Sr的含量继续增加,Rb/Sr比值也随之降低(图5),风化作用较强,气候温湿。推断该阶段的气候比上一个阶段更加湿润,湖泊水位继续升高。

第三阶段:28.5—11.38 ka BP(130~35 cm)

一般认为,从26.5 ka BP左右开始进入晚更新世的盛冰期,全球冰盖范围扩大,海平面处于低位^[32]。从乌拉盖高毕湖泊沉积来看,盛冰期应该是从28.5 ka BP开始的。该阶段Rb/Sr的平均比值为0.31,比上一阶段高,说明气候开始转冷。从粒度组分来看依然是粉砂为主,粘土含量骤减,除了在95 cm左右有一次较高的反弹以外。同时粉砂的含量也相对减少,砂的含量比上一个亚阶段上升了2%,平均粒径的曲线上也可以看出其粒度变大。粒度参数的变化最为明显地表现在峰度的值显著变小,峰度值越小,则反映频率曲线越平缓;另外,偏度值也在增大。以上可以表明湖面开始降低,逐渐进入浅水沉积阶段。

70 cm和50 cm处的光释光数据和日历年龄分别为22.3 ka BP和13.28 ka BP,表明沉积速率大幅度降低。从晚更新世环境变化来看,22—15 ka BP正处在盛冰期的鼎盛期^[32-33]。从粒度组成来看,该段粘土含量明显减少,粉砂含量出现峰值。Cr、Ni、Co、Zn等元素的含量稍有降低,而Sr为明显低值段,Rb/Sr比值较高,平均值达到0.32(图5)。同时,此段沉积物中夹有近垂向分布的黄色砂质脉状体。根据沉积特征推断,黄色砂质脉状体应该为这个期间所形成的冰楔或冰裂楔,可能是湖泊在此期间出现过干涸而形成。同时期,在贺兰山、河西走廊、鄂尔多斯、大同等地均发现砂楔的发育^[34-40]。广泛分布于东北地区的猛犸象动物群在该时期北移^[41]。

该段晚期(50~35 cm),粘土含量增加,而粉砂含量减少;Cr、Ni、V、Co、Zn等元素的含量有所增加,Sr也开始增加,Rb/Sr比值逐渐降低(图5),表明气候条件开始转暖湿,进入末次冰消期。

第四阶段:11.38 ka BP至今(35~0 cm)

这段时间湖泊进入了全新世的沉积时期^[33]。岩性为灰白色粘土,质地均匀。在粒度曲线上可以看到,粘土的含量达到了最高值,粉砂和砂的含量均有降低。标准偏差的曲线为剖面中的最低谷,表明分选相对较好,平均粒径达到了7.4Φ,也是整个剖面相对比较高的,偏度和峰度的曲线变化也反映出该层段粒度偏细。反映在这个时期水动力条件比较弱,沉积物分选较好,颗粒较细。可以推断湖面在全新世时期又开始回升。但由于剖面位于湖泊边缘,沉积速率比较低。该阶段较低的Th/U比值可能是在弱的水动力条件下,远源的沉积搬运较少,而近源与花岗岩相关的风化产物相对较多导致U含量增高所致。另外从元素含量曲线上来看,Sr的含量最高,且Rb/Sr的比值在这个时期也几乎最低(图5),表明由于受到较强的淋溶作用,带入较多的Sr到湖泊沉积所致,代表较温湿气候期。

4 结论

通过对乌拉盖高毕剖面沉积特征、粒度组成和粒度参数的分析,结合微量元素含量的分布变化,得出以下结论:

1) 乌拉盖高毕405 cm的剖面记录了从末次冰期第一副冰期晚期到全新世将近50 ka BP的环境演变过程。该剖面的粒度组成以粘土和粉砂为主,且粉砂的平均含量占到了62.99%,平均粒径在5~8Φ之间,总体反映该湖泊的沉积是相当缓慢的。频率曲线主要为单峰,少部分层段表现为双峰;偏度主要表现为很负偏态和负偏态,湖泊沉积物以细粒为主。可以认为,该湖泊水动力条件比较弱而单一。

2) 粒度特征与化学元素相结合, 将 405 cm 的剖面划分 4 个比较大的气候阶段: 51.9—44.1 ka BP (405 ~ 343 cm), 干冷期, 湖泊水位较低; 44.1—28.5 ka BP (343 ~ 130 cm), 温湿期, 湖泊水位升高; 28.5—11.38 ka BP (130 ~ 35 cm), 气候转冷, 湖面萎缩; 11.38 ka BP 至今 (35 ~ 0 cm), 气候回升, 进入全新世。表明乌拉盖高毕 5 万年以来的环境经历湖面由浅变深, 再由深变浅, 最后由浅变深这样的轮回。现今湖泊的干涸主要是由于在乌拉盖河上游建造的水库导致其水源被截流。

致谢: 中国科学院南京地理与湖泊研究所刘兴起研究员为本文提供了修改建议, 深表感谢。

5 参考文献

- [1] 吉磊. 中国过去 2000 年湖泊沉积记录的高分辨率研究: 现状与问题. 地球科学进展, 1995, **10**(2): 169-175.
- [2] 张家武. 季风边缘地区全新世高分辨率湖泊与黄土沉积记录研究[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2001: 1-2.
- [3] 刘清泗, 武羨慧. 中国北方农牧交错带人类生存环境的过去、现在和未来. 北京地质, 1996, (1): 10-18.
- [4] 孙千里, 周杰, 沈吉等. 北方环境敏感带岱海湖泊沉积所记录的全新世中期环境特征. 中国科学: D 辑, 2006, **36**(9): 838-849.
- [5] 王永, 姚培毅, 迟振卿等. 内蒙古黄旗海全新世中晚期环境演变的沉积记录. 矿物岩石地球化学通报, 2010, **29**(2): 149-156.
- [6] Wen Ruilin, Xiao Jule, Chang Zhigang *et al.* Holocene climate changes in the mid-high latitude monsoon margin reflected by the pollen record from Hulun Lake, northeastern Inner Mongolia. *Quaternary Research*, 2010, **73**: 293-303.
- [7] 金章东, 王苏民, 沈吉等. 全新世岱海流域化学风化及其对气候事件的响应. 地球化学, 2004, **33**(1): 29-36.
- [8] 李朝生, 梁存柱, 王炜等. 内蒙古乌拉盖地区景观破碎化与土地利用对策的研究. 干旱区资源与环境, 1999, **13**(1): 65-72.
- [9] Reimer PJ, Baillie MGL, Bard E *et al.* IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0—26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 2004, **46**: 1029-1058.
- [10] 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. 中国科学: D 辑, 2003, **33**(6): 563-568.
- [11] Sly PG. Sedimentary processes in lakes. In: Lerman A ed. *Lakes: chemistry, geology, physics*. New York: Springer-Verlag, 1978: 65-90.
- [12] Wentworth CK. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J Geology*, 1922, **30**: 377-392.
- [13] 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: 44-54.
- [14] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学. 北京: 石油工业出版社, 2001: 59-62.
- [15] McManns J. Grain size determination and interpretation. In: Tucker M ed. *Techniques in sedimentology*. Oxford: Wiley-Blackwell, 1988: 63-85.
- [16] 黄思静. 用 Excel 计算沉积物粒度分布参数. 成都理工学院学报, 1999, **26**(2): 196-198.
- [17] 朱筱敏. 沉积岩石学. 北京: 石油出版社, 2008.
- [18] 刘英俊, 王鹤年, 曹励明等. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1984.
- [19] 金章东, 王苏民, 沈吉等. 小冰期弱化学风化的湖泊沉积记录. 中国科学: D 辑, 2001, **31**(3): 221-225.
- [20] 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. 盐湖研究, 1999, **7**(3): 58-65.
- [21] 陈敬安, 万国江. 洱海沉积物化学元素与古气候演化. 地球化学, 1999, **25**(5): 562-570.
- [22] 陈骏, 仇纲, 鹿化煜等. 最近 130 ka 黄土高原夏季风变迁的 Rb 和 Sr 地球化学证据. 科学通报, 1996, **41**(21): 1963-1966.
- [23] Goldich SS, Gast PW. Effect of weathering on the Rb-Sr and K-Ar ages of biotite from the Morton Gneiss, Minnesota. *Earth and Planetary Science Letters*, 1966, (1): 372-375.
- [24] 陈骏, 安芷生, 汪永进等. 最近 800 ka 洛川黄土剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁. 中国科学: D 辑, 1998, **28**(6): 498-504.
- [25] Chen J, An Z, Head J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130000 years and their implications for monsoon paleoclimatology. *Quaternary Research*, 1999, **51**(3): 215-219.
- [26] 金章东, 张恩楼. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值的古气候含义. 科学技术与工程, 2002, **2**(3): 20-22.

- [27] 夏训诚,赵元杰,王富葆等. 罗布泊湖心区近地表层微量元素分布及其环境意义. 干旱区资源与环境,2008,22(10):137-141.
- [28] Jones B, David AC Manning. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994,111:111-129.
- [29] Eusterhues K, Hartmut H, Jürgen S. Geochemical response on redox fluctuations in Holocene lake sediments, Lake Steisslingen, Southern Germany. *Chemical Geology*,2005,222:1-22.
- [30] Dypvik H, Harris NB. Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclastics using Th/U, Zr/Rb and (Zr + Rb)/Sr ratios. *Chemical Geology*, 2001, 181:131-146.
- [31] Dasch EJ. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969,33: 1521-1552.
- [32] Clark PU, Dyke AS, Shakun JD. The last glacial maximum. *Science*, 2009,325: 710-714.
- [33] 徐 馨,沈志达. 全新世环境——最近一万多年来环境变迁. 贵州:贵州人民出版社,1990:2-3.
- [34] 单鹏飞. 腾格里沙漠东北缘末次冰期冰楔的首次发现及其意义. 科学通报,1996,41(2):160-163.
- [35] 单鹏飞. 贺兰山西侧紫泥湖地区晚更新世以来冰缘地貌过程与环境变化. 地质论评,1997,43(4):428-433.
- [36] 王乃昂,王 涛,高顺尉等. 河西走廊末次冰期芒硝和砂楔与古气候重建. 地学前缘,2000,7(增刊):59-66.
- [37] 董光荣,高尚玉,李保生等. 鄂尔多斯高原晚更新世以来的古冰缘现象及其气候地层学意义. 地理研究,1985,4(1):1-13.
- [38] 崔之久,赵 亮,Vandenbergh J 等. 山西大同、内蒙古鄂尔多斯冰楔、砂楔群的发现及其环境意义. 冰川冻土,2002,24(6):709-716.
- [39] 杨景春,孙建中,李树德等. 大同盆地古冰楔(砂楔)和晚更新世自然环境. 地理科学,1983,3(4):339-344.
- [40] 崔之久,谢又予. 论我国东北、华北晚更新世晚期多年冻土南界与冰缘环境. 地质学报,1984,2:165-177.
- [41] 张虎才. 我国东北地区晚更新世中晚期环境变化与猛犸象-披毛犀动物群绝灭研究综述. 地球科学进展,2009,24(5):49-60.