

柴达木盆地东部尕斯库勒湖短钻岩芯记录的过去近 400 a 区域环境变化*

陈 豆, 马雪洋, 张玉枝, 阳亚平, 张家武**

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 干旱区湖泊沉积可以有效记录区域湿度变化及粉尘活动历史, 位于柴达木盆地德令哈南部的咸水封闭湖泊尕斯库勒湖具有恢复区域环境变化的潜力. 该地区的长序列环境演变研究已开展了较多的工作, 但缺乏短尺度、高分辨率的近代以来的环境变化湖泊记录. 通过对尕斯库勒湖深水短钻岩芯放射性核素 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的年代测定和沉积物各指标分析, 认为尕斯库勒湖沉积物碳酸盐含量可以反映区域湿度变化; 而粗颗粒组分 ($>66.9\ \mu\text{m}$) 主要由风力搬运入湖, 其含量可以指示区域粉尘活动历史. 区域近 400 a 的环境变化可划分为 3 个阶段: 1633—1750 AD; 各指标出现大幅度波动, 表现出该时期气候环境的不稳定和干湿交替, 其中 1650—1720 AD 的变化波动尤为显著, 这与太阳活动进入 Maunder 极小期存在一定的联系. 1750—1950 AD; 区域气候环境无明显波动, 碳酸盐含量逐渐降低, 湿度增加. 1950—2010 AD; 各指标变动剧烈, 区域虽降水增多, 但由于蒸发加强, 湿度降低; 1974 AD 以后粗颗粒组分含量急剧上升, 表现出高强度尘暴事件.

关键词: 尕斯库勒湖; 碳酸盐; 湿度; 粉尘活动; 柴达木盆地

Environmental changes during the past 400 years documented by a short core from Lake Gahai, eastern Qaidam Basin

CHEN Dou, MA Xueyang, ZHANG Yuzhi, YANG Yaping & ZHANG Jiawu

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

Abstract: Lake sediments in arid area can record the change of regional humidity and dust history. Lake Gahai, a saline and hydrologically-closed lake in the south of Delingha, Qinghai Province, has the potential for reconstructing the local environmental change. Although many long-term environment evolution researches have been carried out in this area, short time-scale and high-resolution records from lake sediments are still lacking. Here we present a nearly 400-year record from a short core taken from Lake Gahai. The chronology of the short core was established by ^{210}Pb and ^{137}Cs analysis. Carbonate content, magnetic susceptibility and grain size were analysed. The variation of carbonate content can be used to indicate the change of local humidity and the coarser fraction ($>66.9\ \mu\text{m}$) was mainly transported by winds, reflecting the dust storm events. The environmental change during the past 400 years can be divided into 3 stages. 1633—1750 AD; large fluctuations of proxies indicated an unstable dry and wet climate environment, especially during the 1650—1720 AD, and this obvious change was related to the solar activity. 1750—1950 AD; the decrease of carbonate content reflected an increasing local humidity. 1950—2010 AD; strengthened evaporation led to a low humidity although the regional precipitation increased. After 1974 AD, strong dust storm events were recorded by the coarser grain fraction.

Keywords: Lake Gahai; carbonate content; humidity; dust activity; Qaidam Basin

青藏高原东北部柴达木盆地位于中纬度西风 and 亚洲夏季风交汇带, 区域内封闭湖泊对于气候变化响应敏感^[1], 利用该区湖泊沉积记录恢复区域古气候、古环境是认识该区过去环境变化历史的重要手段^[2]. 盆地内东部德令哈附近的几个湖泊 (如尕斯库勒湖、克鲁克湖和托素湖) 近年来得到关注, 如利用该区克鲁克湖岩芯沉积物孢粉^[3]、同位素^[4]及长链烯酮^[5]等指标恢复了区域全新世气候环境的变化. 尕斯库勒湖内部目前仅有个

* 国家自然科学基金项目(41271220, 41102112)和中央高校基本科研业务费(lzujbky-2013-k18)联合资助. 2014-08-11 收稿; 2014-10-28 收修改稿. 陈豆(1990~), 女, 硕士研究生; E-mail: dchen2012@lzu.edu.cn.

** 通信作者; E-mail: jwzhang@lzu.edu.cn.

别较长序列环境变化的研究, He 等^[6-7]通过沉积物中有机地化指标重建了青藏高原北部温度和湿度的变化; 湖泊北岸陆地上的钻孔初步揭示了粒度、碳酸盐含量等指标的环境意义^[8-10]. 目前已有尕海 2 个短钻岩芯沉积物与气候环境的研究, 其中 Zhao 等^[11]发现过去几十年该湖沉积物碳酸盐含量和德令哈地区湿度变化有很好的对应关系, 具有恢复区域湿度变化的潜力. 另一短钻岩芯沉积物中介形虫壳体同位素与区域湿度变化也有较好的对应关系^[12], 表明该湖沉积物在恢复区域干湿变化方面值得深入研究. 但这 2 个短钻岩芯均位于尕海水深 6 m 左右的浅水区, 且长度均为 20 cm 左右, 为过去 100 多年或几十年的沉积, 仍缺乏可与区域树轮^[13-15]、冰芯^[16]对比的稍长时段高分辨率的湖泊沉积记录. 本文利用在尕海西部深水区 (10 m) 获得的 50 cm 短钻沉积物的磁化率、碳酸盐和粒度等指标探讨该地区过去 400 a 以来的环境变化.

1 研究区概况

尕海 (37°08'N, 97°31'E, 海拔 2848 m) 位于青海省海西蒙古族藏族自治州德令哈市境内 (图 1), 隶属巴音河流域. 巴音河是柴达木盆地第四大内陆河, 发源于祁连山支脉野牛脊山, 源头海拔 5000 m. 尕海呈椭圆形, 总面积为 32 km², 平均水深为 8 m, 最大水深为 15 m^[17]. 湖区位于西风环流带内, 亚洲季风气候和西风气候的交汇处^[18]. 1971—2000 年间该区年均温度为 4℃, 降水量为 160 mm, 降水季节性明显, 主要集中在下半年 (5—8 月), 潜在蒸发量达 2000 mm^[11], 属于典型的荒漠半荒漠干旱气候; 寒冷、干旱、风大是该气候的主要特征^[9]. 湖盆为新生代沉降盆地, 盆内冲积、湖积粉砂黏土和含沙淤泥覆盖, 边缘为冲积、洪积平原, 形成砂砾石、平坦戈壁沉积, 接近湖滨为盐碱沼泽沉积^[19].

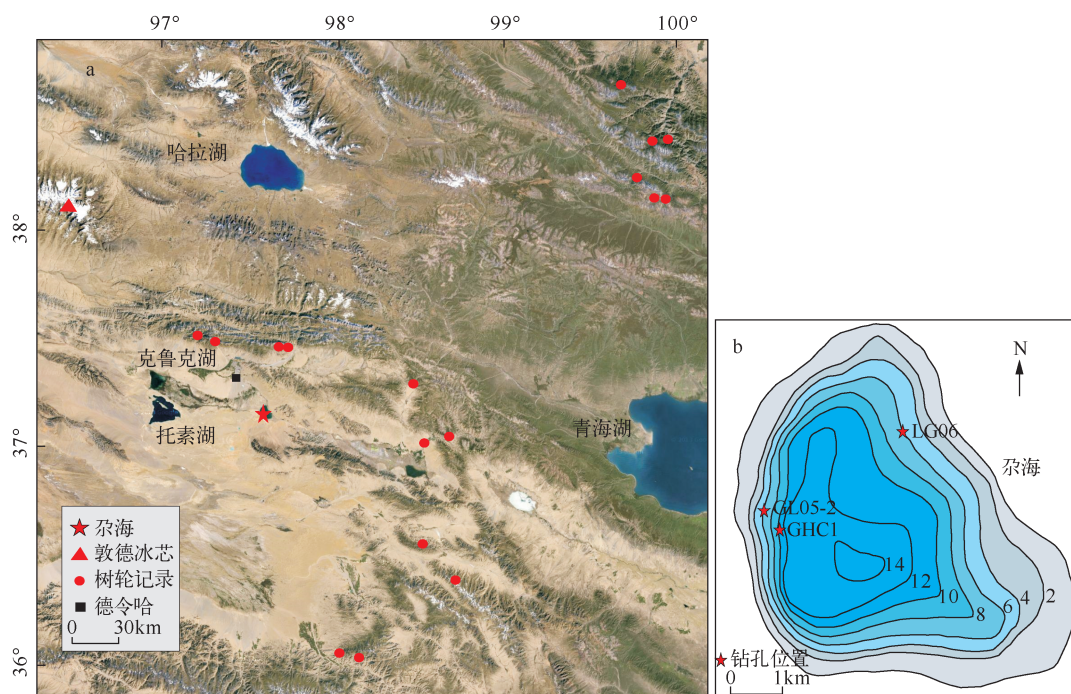


图 1 尕海研究点及区域古气候记录对比点 (a), 尕海水深图^[20] 及本文钻孔位置 (b) (GL05-2 和 LG06 为已报道的 2 个短钻岩芯位置^[11-12])

Fig. 1 Locations of core site and compared paleoclimatic sites in the study area of Lake Gahai (a), bathymetry map of Lake Gahai^[20] and the core site (b) (GL05-2 and LG06 are the locations of two previously published short cores^[11-12])

2 方法

2.1 样品采集

2012 年 7 月利用重力短钻在尕斯库勒湖西部水深 10 m 处获取 1 根 50 cm 的沉积岩芯(GHC1),现场对岩芯进行 1 cm 间隔采样.整个岩芯岩性变化不明显,为黑色粉砂质黏土.样品装入自封袋后运回实验室,冷冻干燥后待分析.

2.2 样品分析

定年测试时,先将 3~4 g 冷冻干燥后的样品装入特制透明塑料试管(直径 \times 高=14.5 mm \times 40 mm)中,密封 20 d 以上,以求 ^{226}Ra - ^{222}Rn 达到长期的放射性准平衡状态^[21].使用堪培拉(CANBERRA)欧洲系统测量公司生产的 GCW3523 型高纯锗(HPGe)伽马能谱仪测定样品中的 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 及 ^{226}Ra 比活度.测量完成后使用 Genie-2000 Gamma Option 谱分析软件分析数据.

碳酸盐含量测定样品为湖泊沉积物过 360 目筛后的细粒部分,可将其作为湖相沉积物自生碳酸盐,从而基本排除风尘输入碎屑及河流搬运碳酸盐的影响.测定使用容量法,测定前要进行 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L HCl 标准溶液的配制及标定.滴定时,用万分位天平称取 0.1 g 左右样品放于 250 ml 锥形瓶中,加入 10 ml 盐酸溶液以及 2~3 滴酚酞指示剂,摇匀使碳酸盐反应完全后用 0.1 mol/L NaOH 溶液滴定.每隔 10 个样品,滴定 1 个分析纯碳酸钙(约 0.1 g)样品,作为检验实验误差的标准.

使用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪进行沉积物样品粒度指标测试,前处理方法采用湖泊沉积物标准处理方法^[22].称取少量冷冻干燥过的样品(约 0.25 g)放入 100 ml 烧杯中,加入 10 ml 10% 的双氧水(H_2O_2)后置予电热板上加热煮沸以去除样品中的有机质,再加入 10 ml 10% 的稀 HCl 除去碳酸盐及有机质胶结物,同时用蒸馏水冲洗反应的泡沫带至烧杯壁上的沉积物,充分反应后取下烧杯,将烧杯注满蒸馏水.静置 24 h 后抽去蒸馏水,测试前加 10 ml 浓度为 0.1 mol/L 六偏磷酸钠($(\text{NaPO}_3)_6$)分散剂.

磁化率测试时将称重的已干燥样品装入 2 cm \times 2 cm \times 2 cm 的磁学专用盒并压实,使用英国 Bartington 公司生产的 MS2 磁化率仪测量高频(4.7 kHz)磁化率(χ_{hf})和低频(0.47 kHz)磁化率(χ_{lf}).以上实验均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成.

3 结果与分析

3.1 年代序列的确立

尕斯库勒湖短钻岩芯 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度变化范围为 0~275 Bq/kg,从顶部往下呈递减趋势,至 25 cm 处为 0(图 2a).通过计算 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 并采用 CRS 模式建立了岩芯顶部 24 cm 的沉积速率和年代(图 2b).不同方法的对比是获取准确计年结果的重要保证,因此岩芯同时选用 ^{137}Cs 时标法作为定年的对比. ^{137}Cs 比活度处于 0~80.3 Bq/kg 之间,并仅于 8 cm 处达到最大蓄积峰,该处 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 计年为 1986 AD,正好与前苏联切尔诺贝利电站核泄漏事故时间对应,因此 8 cm 处 ^{137}Cs 峰值应对应于 1986 年.Zhao 等^[11]于 2005 年在 GHC1 孔以北约 700 m 水深 6.4 m 处钻取一短钻(GL05-2),运用 CIC 模式和 ^{137}Cs 时标法定年时,将该钻孔 9 cm 处的 ^{137}Cs 峰值确定为 1986 年核泄漏事故造成.这与 GHC1 钻孔出现 ^{137}Cs 峰值的深度接近.本文与 Zhao 等^[11]的 ^{137}Cs 峰值年代(1986 年)相同,但与 Li 等^[12]尕斯库勒湖东部短钻(LG06)的 ^{137}Cs 峰值年代(定为 1963 年)不同.GHC1 孔 ^{210}Pb 年代与 ^{137}Cs 结果的印证进一步确认 ^{210}Pb 年代的可行性.

岩芯上部 24 cm 平均沉积速率为 2.05 mm/a.由尕斯库勒湖 GHC1 孔年代-深度图可知,沉积速率可以 GHC1-18 为分界点,在前 17 cm(1950 年左右)沉积速率较大,约 3.2 mm/a(图 2b),可能是因为 1950 年以后,湖区周围开始大规模地开垦土地而出现水土流失,一定数量的侵蚀物质被带入湖中,沉积速率增加.其后 18~24 cm 沉积速率为 1 mm/a.GHC1 孔沉积物含水量和孔隙度变化不大,岩性一致,压实作用很小,故暂用 18~24 cm 沉积速率来推算沉积岩芯的年代序列.同时,尕斯库勒湖其他钻孔研究结果^[7]也表明,其顶部 2 m 平均沉积速率约为 1 mm/a.故最终确定钻孔底部年龄为 1633 AD,GHC1 孔为过去 380 年来的沉积.岩芯 1~17 cm 每个样品年代分辨率约 3 a,18~50 cm 为 10 a.

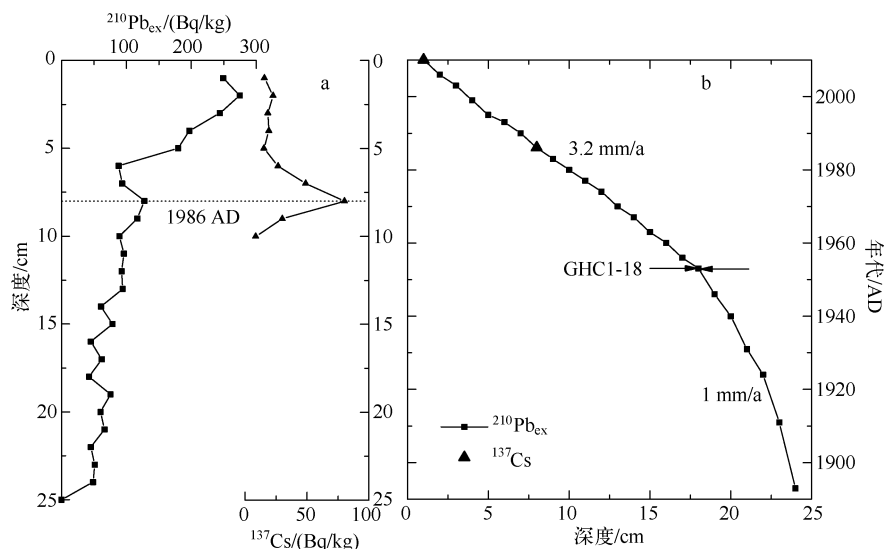


图2 尕海 GHCI 孔 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 ^{137}Cs 比活度 (a) 和年代-深度模式 (b)

Fig. 2 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs activity of core GHCI (a) and age-depth model (b) of core GHCI from Lake Gahai

3.2 尕海沉积物磁化率、碳酸盐变化特征及其环境指示意义

湖泊沉积物的矿物磁性特征一般都与特定的源区及其作用过程有关,磁性矿物的来源主要包括自生磁性矿物和外源磁性矿物,但可以认为湖泊沉积物中外源磁性矿物占绝对优势^[23]. 尕海沉积物样品的磁化率在 1633—1680 AD 之间变动幅度大(图 3),1680—1950 AD 逐渐上升,1950 AD 以后波动剧烈;磁化率介于 $4.61 \times 10^{-8} \sim 9.65 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,平均值为 $6.62 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. 尕海 GHCI 孔磁化率不仅低于湿润区的泥炭、沼泽以及湖泊^[24-25],而且低于同处于干旱半干旱区的青海湖和岱海^[26]. 这主要与湖区周围的母源物质、湖泊水化学条件、湖盆面积和形态以及受其控制形成的沉积物类型有关. 尕海目前没有常年性的河流输入,2002 年测得矿化度为 90.6 g/L ^[19],是 2005 年岱海矿化度(4.4 g/L ^[27])的 20 倍,是同一流域托素湖的矿化度的 3 倍(30.2 g/L ^[28]). 因此尕海径流输入磁性颗粒浓度低,且沉积物中的碳酸盐含量要比岱海高得多,而仅碳酸盐就可以大大稀释沉积物中磁性矿物的浓度.

湖泊沉积物中自生碳酸盐含量主要是湖泊中生物活动或物理化学作用的结果,其含量高低的变化,一般反映湖泊的盐度变化,从而能够间接指示区域气候干湿的变化^[29-32]. 当湖区降水增加或蒸发较弱时,因淡水注入,湖水淡化,碳酸盐含量降低;反之升高. 尕海 GHCI 孔碳酸盐(图 3)平均含量为 18.7%,最大值为 29.0%,最小值为 11.5%,变化趋势与磁化率相反;与中值粒径变化一致,即当碳酸盐含量低时,沉积物粒径变细,中值粒径减小,粗粒组分含量减少. 指示了当区域气候湿润时,湖水淡化,湖泊沉积碳酸盐含量降低,同时湖区土壤湿度大,植被覆盖增加,土壤侵蚀减弱,随径流入湖的沉积物颗粒变细,风沙活动扬起的粗颗粒减少,带进湖区的粗粒物质也就会减少(见 3.3 节).

3.3 尕海沉积物粒度特征及其指示的区域风力强度

粒度组成是表述碎屑类沉积物特征的重要指标之一,可以追溯沉积物形成的力学性质、物质来源、输送介质和沉积环境等. GHCI 孔粒度分布曲线主要表现为单峰和双峰(图 4a、b、c),单峰反映了较为单一、比较稳定的水动力沉积环境;双峰形态则反映出两类不同动力机制沉积物的混合^[33]. “粒度-标准偏差”是一种能够有效指示沉积物粒度敏感组分的方法,通过计算可获得每个粒度组分标准偏差随粒度变化的情况. 此方法已经成功地应用于海洋沉积^[34-35]、风成沉积^[36-37]以及湖泊沉积^[38]等研究中. 明显的峰值出现在 $11.9 \mu\text{m}$ 以及 $66.9 \mu\text{m}$ 的位置,表示处于此粒度范围的颗粒在整个钻孔中表现出巨大波动特征,而 $30 \mu\text{m}$ 处的谷值对应的颗粒波动较小(图 4d). 依据曲线上的突变点,将沉积物粒径分为 4 个组分:超细粒组分

(<1.3 μm)、细粒组分(1.3 ~ 30 μm)、粗粒组分(30 ~ 266 μm)和超粗粒组分(>266 μm)。GHC1 钻孔岩芯剖面粒度组成以 1.3 ~ 30 μm 的细粒组分为主,平均粒径为 22.3 μm 。本文将主要探讨 >66.9 μm 的颗粒组分所指示的环境意义。

对柴达木盆地内苏干湖沉积物粒度的研究显示^[39], >63 μm 组分可以指示研究区尘暴事件或者风沙活动的演化历史。同样,通过对盆地内尕斯库勒湖沉积物分析及对现代过程的连续跟踪研究认为^[40]:该湖沉积物中粗颗粒组分最先是被强风搬运来的,而且冬季风力要强于夏季;其砂粒组分(>63 μm)可以作为该区域指示风沙活动的代用指标。对新疆巴里坤湖沉积物的分析^[41]认为,在干旱-半干旱地区的湖泊记录中,粗颗粒(>60 μm 或 >100 μm)组分在一定程度上能够反映地质历史时期沙尘活动。Deckker 等^[42]在研究澳大利亚北部的 Carpentaria 湖沉积物记录的风尘活动时,选取 >60 μm 组分用来指示风沙活动过程,认为径流是不能将 >60 μm 的颗粒输送到距湖岸 60 km 的钻孔位置,只有强风携带才能使粗颗粒在湖心沉积。实际上在我国干旱区,湖泊冬季结冰后,冰面通常能发现大量粗颗粒沙,其随风力搬运、跃移至湖泊,随冰的融化这些粗颗粒沉积在湖底。因此湖泊沉积物中粗颗粒包含直接入湖和冰面捕获两个部分。

尕斯库勒湖为西北内陆干旱区封闭湖泊,一方面无常年性地表径流输入,湖水主要依靠大气降水和地下潜水补给,径流输入的粗颗粒物极少。另一方面其所处的柴达木盆地是我国强烈遭受风蚀的地区之一^[43],当发生尘暴时风中携带的粗颗粒物在湖面上方直接沉降或被冰捕获后沉积在湖泊内。风力带动形成的潮流也可能将岸边的粗颗粒物运送到钻孔位置,但由于钻孔位置距岸边 1 km 且水位较深,所以水动力对沉积物粗颗粒组分贡献不大。粒度组分在 66.9 μm 处存在峰值(图 4d),说明该粒级范围可能是沉积物来源的一个转变点,综合前人研究结果与尕斯库勒湖自身特点,本文认为尕斯库勒湖沉积物 >66.9 μm 的粗颗粒组分可指示当地近 400 年来风力强弱的变化。即当粗颗粒组分含量增加时,表明区域内风力强度大,有尘暴活动;反之则风力弱。

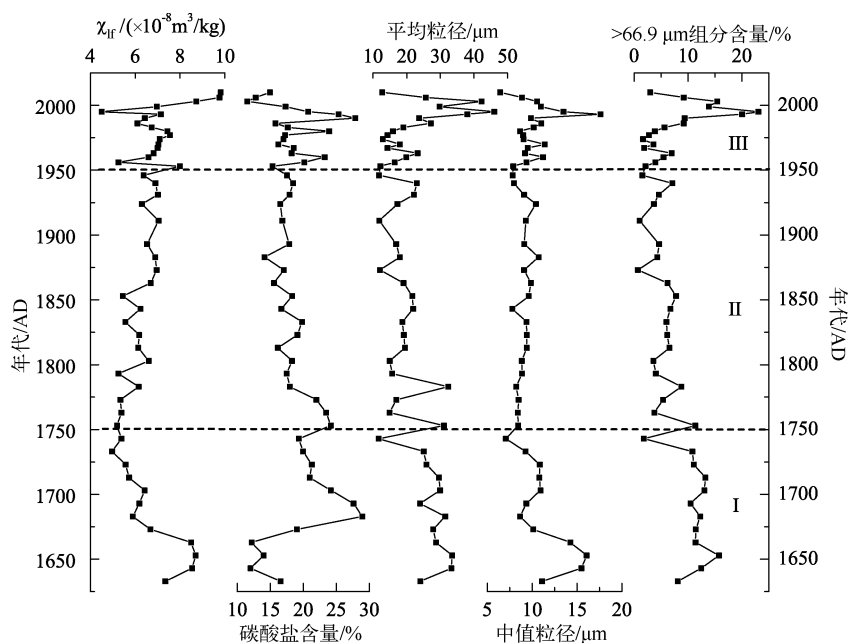


图 3 尕斯库勒湖 GHC1 孔磁化率、碳酸盐含量及粒度分布

Fig. 3 Distribution of magnetic susceptibility, carbonate content and grain size of core GHC1 from Lake Gahai

4 讨论

4.1 尕斯库勒湖近 400 a 气候环境的变化

根据磁化率、碳酸盐和粒度的曲线波动情况,将剖面划分为 3 个阶段(图 3):

I 阶段(50 ~ 38 cm, 约 1633—1750 AD): 该阶段气候特征总体表现为干湿波动, 不稳定; 区域风力强劲. 1633—1653 AD: 磁化率升高, 碳酸盐含量降低, $>66.9\ \mu\text{m}$ 粗颗粒组分含量增大; 反映该时期区域降水相对增多, 湿度增大, 风力增强. 1653—1683 AD, 磁化率降低, 碳酸盐含量显著上升; 表明在这段期间湖区干旱, 蒸发较前期增大, 湖水中 Ca^{2+} 出现饱和状态, 结晶沉淀. 1683—1750 AD, 区域干旱逐渐缓解; 风力强度也有所减弱. 1650—1720 AD, 气候环境较大的波动在我国其他地方也都有不同程度的体现(具体见 4.2 节).

II 阶段(38 ~ 19 cm, 约 1750—1950 AD): 该阶段各指标变化较稳定, 气候变化波动不大, 湖区湿度逐渐增大. 粗细粒径组分含量变化小, 粗粒组分含量低, 风力强度相对较弱; 同时, 该段粒度的频率曲线都是单峰型仅峰值存在不同(图 4b), 表明该段沉积物多为同种营力作用下形成, 只是同一种营力动力强度存在差异, 出现强弱的变化过程.

III 阶段(19 ~ 1 cm, 约 1950—2010 AD): 该阶段各指标变动剧烈, 磁化率与碳酸盐含量、平均粒径变化趋势相反. 区域虽降水增多但由于蒸发加强, 湿度降低; 出现高强度尘暴事件. 结合气象资料^[11], 在 1956—2000 AD 期间, 德令哈地区年平均气温上升 3°C , 降水量从 1956 AD 的 60 mm 波动增加到 2000 AD 的 200 mm, 然而由于区域温度升高、蒸发加剧, 有效湿度却存在降低趋势, 碳酸盐平均含量比 II 阶段高, 区域环境表现为暖干. 1974 AD 以后粗粒组分含量激增, 记录高强度的尘暴事件. 同时该时期人类活动活跃, 对区域环境也产生

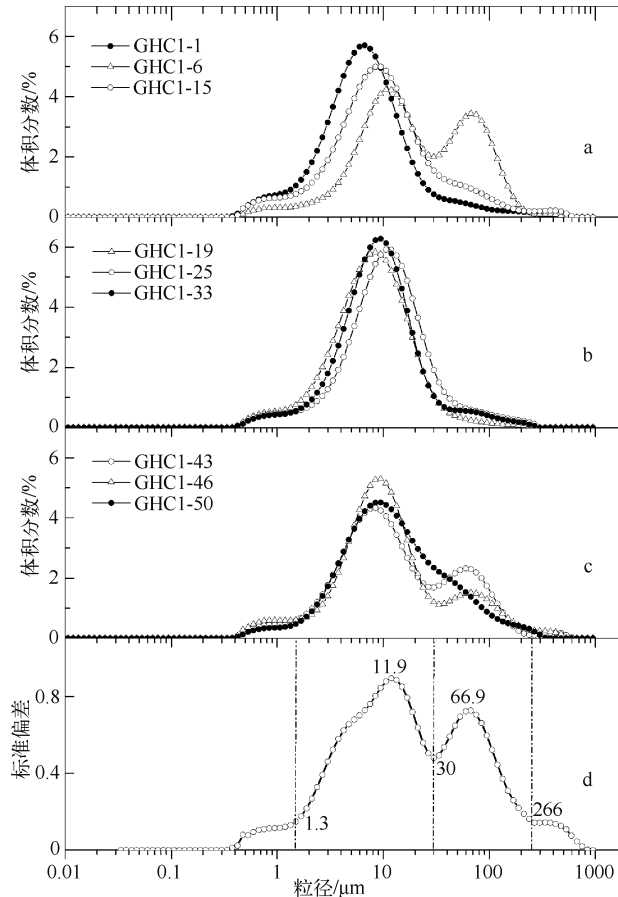


图 4 尕斯库勒湖 GHC1 孔沉积物代表性粒度分布频率曲线(a、b、c) 及粒级-标准偏差变化曲线(d)

Fig. 4 Typical grain-size frequency distributions(a, b, c) and variation curve of grain-size and standard deviation(d) of core GHC1 from Lake Gahai

一定影响.

4.2 区域对比

将本文的湿度代用指标碳酸盐含量(图5a)与利用祁连圆柏树木年轮重建的德令哈地区年降水量^[13](图5b)进行对比,发现两者变化趋势相反. I 阶段的降水量为区域近400 a 来最低值,青藏高原年均温^[44](图5c)自1660 AD 开始上升,且至1750 AD 都呈现高温,而此阶段碳酸盐含量在3个阶段中最高,同时反映出区域湿度低,较干旱;II 阶段中1750—1880 AD 处于小冰期后期,高原温度较低,区域降水缓慢增加,碳酸盐含量逐渐下降,湿度增大. 敦德冰芯微粒含量的多少,反映气候不同类型组合:气候干旱时期,微粒含量相对较高;气候湿润时期,微粒浓度相对较低(图5d). 将本文的碳酸盐含量(图5a)与可用来反映气候干湿的敦德冰芯微粒浓度^[45](图5d)进行对比,发现两者变化趋势一致. 即当碳酸盐含量降低时,冰芯中微粒浓度

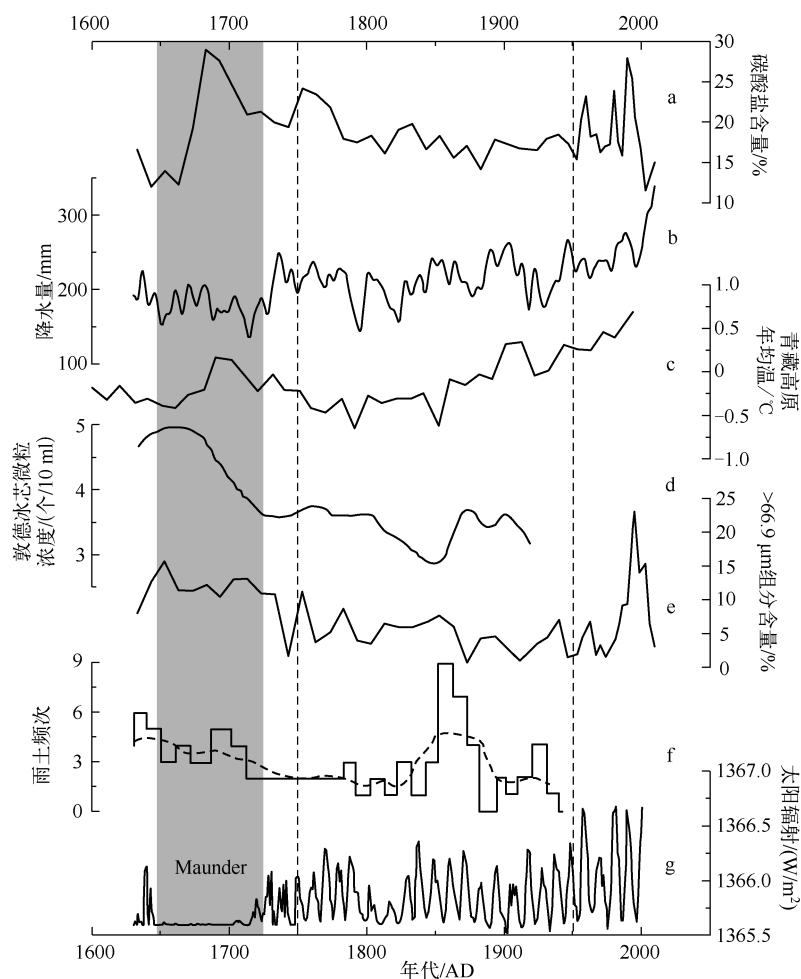


图5 区域对比(a: 尕斯库勒湖碳酸盐含量, b: 德令哈降水量^[13], c: 青藏高原年均温^[44], d: 敦德冰芯微粒浓度^[45], e: 尕斯库勒湖 >66.9 μm 组分, f: 中国历史雨土频数^[46], g: 太阳辐射^[55])
Fig.5 Regional comparison(a: Carbonate content of Lake Gahai, b: Precipitation of Delingha^[13], c: Annual temperature of Tibet Plateau^[44], d: Microparticle concentration in Dunde ice core^[45], e: >66.9 μm , f: Dust fall frequency over past 400 years^[46], g: Total solar irradiance^[55])

也随之下降,对应区域降水增多,湿度升高.特别是在1680—1740 AD及1810—1860 AD,两次微粒的主要减少期对应明显的碳酸盐含量的降低,说明区域湿度增加.由于不同海拔对湿度的影响存在差异,故岩芯碳酸盐含量与树轮及冰芯微粒含量进行比对时出现差异.但就其整体所反映的变化趋势而言,本文利用碳酸盐含量所恢复区域湿度的变化比较可靠.

Zhang^[46]利用历史文献资料重建我国近1700 a降尘频数曲线(图5f),认为近1000 a“雨土”频发期大约有5个.其中在1610—1700 AD期间降尘事件的高频次与尕斯库勒湖>66.9 μm 组分(图5e)记录的强风力时期具有可比性,两个记录均显示出该时段为风力强度大、高频降尘时期.然而在1800—1890 AD期间,历史资料记录该时段为降尘频发期,在尕斯库勒湖沉积物中却没有突出显示,同区域的苏干湖同样也仅表现出非常弱的尘暴过程(图略),严明瑞等^[39]认为这与不同的粉尘源区有关,同时这种差异也受到观测站点和人工记录的影响^[38,47].尕斯库勒湖沉积记录了20世纪后半期高强度尘暴事件,这与现代气象记录符合.

根据重建结果,德令哈气候环境在1650—1720 AD经历了一个明显的干旱—湿润转变过程,这次突变在我国其他地区也有不同程度的表现,揭示该时期气候状态在大尺度上的不稳定性.严中伟等^[48]将这种大范围的气候突变称为非局地性跃变事件.在祁连山中部1000多年的降水重建中,显示出1641年该区发生降水突变^[49],该结果同样也得到历史记载的验证^[50-51],《西北灾荒史》中记载1649年甘州地区发生水灾.通过对黄河中游地区500多年旱涝历史^[52]的检验判别,揭示在17世纪中期(1638—1664 AD)该区发生旱—涝的跃变;在东部6个区域近1000多年的干湿序列重建中^[53],发现其中的5个区域在1644年发生干湿跃变;青藏高原东北部,青海湖在小冰期中的1620—1680 AD阶段,各项指标出现高低值变化,气候环境冷湿,相对湿度增加^[54].

德令哈气候环境在1650—1720 AD发生的转变恰好与太阳活动进入Maunder极小期较为一致^[55](图5g),说明该区短尺度气候环境变化与太阳活动有关.1650 AD左右太阳活动进入Maunder极小期^[56],尕斯库勒湖碳酸盐含量也在1660 AD左右迅速升高,区域湿度下降;然而碳酸盐含量在1685 AD左右达到顶峰之后便逐渐降低,显示区域湿度开始回升,这比Maunder极小期结束时间早约25 a.对比之下,树轮重建的降水变化与Maunder极小期更为一致,表现在1710 AD左右区域降水开始增加.

5 结论

本文通过对尕斯库勒湖沉积物磁化率、碳酸盐及粒度的分析得出以下结论:

1) 1633—1750 AD:区域风力强劲,气候环境变化波动大、不稳定,多次出现干湿交替.1750—1950 AD,区域湿度逐渐增大.1950—2010 AD,总体表现为暖干,1974 AD以后出现高强度尘暴事件;人类活动对区域环境变化产生影响.

2) 德令哈地区在1650—1720 AD期间发生干湿环境的转变,与太阳活动进入Maunder极小期较为一致,说明太阳活动的变化可能是导致该区短尺度气候环境变化的原因之一.

总之,尕斯库勒湖沉积岩芯较好地记录了该区近400 a来的干湿交替和粉尘活动历史,是重建区域环境变化的良好载体.尽管如此,本文仍受到短钻岩芯底部没有绝对定年控制的限制,底部年龄可能存在误差,待将来有绝对定年后进一步提高年代精度.

致谢:兰州大学李晖参加湖泊岩芯的钻探,特此致谢.

6 参考文献

- [1] 吴敬禄,沈吉,王苏民等.新疆艾比湖地区湖泊沉积记录的早全新世气候环境特征.中国科学:D辑:地球科学, 2003, 33(6): 569-575.
- [2] 王苏民.湖泊沉积的信息原理与研究趋势.北京:海洋出版社,1993:22-31.
- [3] Zhao Y, Yu ZC, Chen FH et al. Holocene vegetation and climate history at Hurlig Lake in the Qaidam Basin, northwest China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2007, 145: 275-288.
- [4] Zhao C, Yu ZC, Zhao Y et al. Holocene millennial-scale climate variations documented by multiple lake-level proxies in sediment cores from Hurlig Lake, Northwest China. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 44: 995-1008.
- [5] Zhao C, Liu ZH, Eelco JR et al. Holocene temperature fluctuations in the northern Tibetan Plateau. *Quaternary Research*,

- 2013, **80**:55-65.
- [6] He YX, Liu WG, Zhao C *et al.* Solar influenced late Holocene temperature changes on the northern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(9):1053-1059.
- [7] He YX, Zhao C, Wang Z *et al.* Late Holocene coupled moisture and temperature changes on the northern Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2013, **80**:47-57.
- [8] 陈 忠,马海州,曹广超. 尕斯库勒湖 DG03 孔碳酸盐含量及其环境意义. 盐湖研究,2007,**15** (2):6-11.
- [9] 陈 忠,马海州,曹广超等. 尕斯库勒湖地区晚冰期以来沉积记录的气候环境演变. 海洋地质与第四纪地质,2007,**27** (1):131-138.
- [10] 陈碧珊,潘安定,张元芳. 柴达木盆地尕斯库勒湖沉积物粒度特征及其古气候意义. 海洋地质与第四纪地质,2010,**30** (2):111-119.
- [11] Zhao Y, Yu ZC, Chen FH *et al.* Sensitive response of desert vegetation to moisture change based on a near-annual resolution pollen record from Gahai Lake in the Qaidam Basin, northwest China. *Global and Planetary Change*, 2008, **62**:107-114.
- [12] Li XZ, Liu WG, Xu LM. Stable oxygen isotope of ostracods in recent sediments of Lake Gahai in the Qaidam Basin, northwest China: The implications for paleoclimatic reconstruction. *Global and Planetary Change*, 2012, **94/95**:13-19.
- [13] Yang B, Qin C, Wang JL *et al.* A 3500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014:2903-2908.
- [14] 邵雪梅,黄 磊,刘洪滨等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化. 中国科学: D 辑:地球科学,2004,**34** (2):145-153.
- [15] 王文志,刘晓宏,徐国保等. 柴达木盆地树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在过去 1000 年湿度变化. 科学通报,2013,**58**:3458-3463.
- [16] Tian L, Yao TD, Schuster PF *et al.* Oxygen-18 concentration in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D9):4293-4302.
- [17] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志. 北京:科学出版社,1998:434.
- [18] 郭小燕. 季风边缘区尕斯库勒湖记录的全新世气候变化[学位论文]. 兰州:兰州大学,2012.
- [19] 郑喜玉,张明刚,徐 昶. 中国盐湖志. 北京:科学出版社,2002:173-174.
- [20] 赵 艳. 柴达木盆地湖泊孢粉记录的生态与气候解释:不同海拔地区的湿度变化差异. 第四纪研究,2010,**30** (6):1088-1096.
- [21] Hamilton TF, Ballestra S, Baxter MS *et al.* Radiometric investigations of Kara Sea sediments and preliminary radiological assessment related to dumping of radioactive wastes in the Arctic Seas. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1994, **25** (1/2):113-134.
- [22] Peng YJ, Xiao JL, 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.
- [23] Thompson R, Oldfield F. Environmental magnetism. London: Allen & Unwin, 1986.
- [24] 黄 润,朱 诚,王升堂. 天堂寨泥炭地层的磁化率、Rb/Sr 值及反映的古气候意义. 地理科学,2007,**27** (3):85-89.
- [25] 王心源,吴 立,张广胜等. 安徽巢湖全新世湖泊沉积物磁化率与粒度组合的变化特征及其环境意义. 地理科学,2008,**28** (4):548-553.
- [26] 吴瑞金. 湖泊沉积物的磁化率、频率磁化率及其古气候意义——以青海湖、岱海近代沉积为例. 湖泊科学,1993,**5** (2):128-135.
- [27] 孙占东,姜加虎,黄 群. 近 50 年岱海流域气候与湖泊水文变化分析. 水资源保护,2005,**21** (5):16-26.
- [28] 刘秀菊. 柴达木盆地晚全新世湖泊孢粉记录与气候变化[学位论文]. 兰州:兰州大学,2007.
- [29] 吴敬禄,王苏民,潘红玺等. 青藏高原东部 RM 孔 140 ka 以来湖泊碳酸盐同位素记录的古气候特征. 中国科学: D 辑:地球科学,1997,**27** (3):255-259.
- [30] 李世杰,区荣康,朱照宇等. 24 万年以来西昆仑山甜水海湖岩芯碳酸盐含量与气候演化. 湖泊科学,1998,**10** (2):58-65.
- [31] 曹建廷,徐爱霞,王苏民等. 内蒙岱海湖岩芯碳酸盐含量变化与气候环境演化. 海洋湖沼通报,1999,**4**:21-26.
- [32] 张恩楼,沈 吉,王苏民等. 青海湖近 900 年来气候环境演化的湖泊沉积记录. 湖泊科学,2002,**14** (1):32-38.
- [33] 金章东,王苏民,沈 吉等. 岱海地区近 400 年来的“尘暴”时间——来自岱海沉积物粒度的证据. 湖泊科学,2000,

- 12(3):193-198.
- [34] 孙有斌,高 抒,李 军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析. 科学通报,2003,48(1):83-86.
- [35] Boulay S, Colin C, Trentesaux A *et al.* Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediments on the South China Sea (ODP site 1144). *Proceedings of the Ocean Drilling Program (Scientific Results)*, 2002, 184:1-21.
- [36] 徐树建,潘保田,高红山等. 末次间冰期-冰期旋回黄土环境敏感粒度组分的提取及意义. 土壤学报,2006,43(2):183-189.
- [37] Qiang MR, Chen FH, Wang ZT *et al.* Aeolian deposits at the southeastern margin of the Tengger Desert (China): Implications for surface wind strength in the Asian dust source area over the past 20,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 286:66-80.
- [38] Chen FH, Qiang MR, Zhou AF *et al.* A 2000-year dust storm record from Lake Sugan in the dust source area of arid China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118:2149-2160.
- [39] 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. 第四纪研究,2006,26(6):915-922.
- [40] Qiang MR, Liu YY, Jin YX *et al.* Holocene record of eolian activity from Genggahai Lake, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41:589-595.
- [41] 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. 沉积学报,2008,26(4):647-654.
- [42] Deckker PD, Corrie T, Head J. Late Pleistocene record of cyclical eolian activity from tropical Australia suggesting the Younger Dryas is not unusual climatic event. *Geology*, 1991, 19(6):602-605.
- [43] 武光和,胡双熙,张志良等. 柴达木盆地. 兰州大学学报,1985,21(专辑):20-28.
- [44] Ge Q, Hao Z, Zheng J *et al.* Temperature changes over the past 2000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere. *Climate of the Past*, 2013, 9(3):1153-1160.
- [45] 刘纯平,姚檀栋,Thompson LG 等. 敦德冰芯中微粒含量与沙尘暴气候的关系. 冰川冻土,1999,21(1):9-14.
- [46] Zhang DE. Synoptic-climatic studies of dust fall in China since historic times. *Scientia Sinica (Series B)*, 1984,27(8):825-836.
- [47] Yang MX, Yao TD, Wang HJ. Microparticle content records of the Dunde ice core and dust storms in northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27:223-229.
- [48] 严中伟,李兆元,王晓春. 历史上 10 年-100 年尺度气候跃变的分析. 大气科学,1993,17(6):663-672.
- [49] 康兴成,程国栋,陈发虎等. 祁连山中部公元 904 年以来树木年轮记录的旱涝变化. 冰川冻土,2003,25(5):518-525.
- [50] 袁 林. 西北灾荒史. 兰州:甘肃人民出版社,1994:323-951.
- [51] 《甘肃水旱灾害》编委会. 甘肃水旱灾害. 郑州:黄河水利出版社,1996:59-405.
- [52] 于淑秋,林学椿. 黄河中游地区近 522 年旱涝突变. 应用气象学报,1996,7(1):89-95.
- [53] 张德二,刘传志,江剑民. 中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析. 第四纪研究,1997,17(1):1-11.
- [54] 沈 吉,张恩楼,夏威夷. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. 第四纪研究,2001,21(6):508-513.
- [55] Lean J. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(16):2425-2428.
- [56] McCracken KG, McDonald FB. A phenomenological study of the long-term cosmic ray modulation, 850—1958 AD. *Geophysics Research*, 2004, 109:A12103.