

蒙古北部 Gun Nuur 湖记录的全新世气候突发事件

汪卫国 冯兆东 李心清 张虎才 马玉贞 安成邦 郭兰兰

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000. E-mail: wangwgg@hotmail.com)

摘要 对从蒙古北部 Gun Nuur 湖取得的 7.44 m 长的连续岩芯样品进行了环境磁学、有机质含量和有机 $\delta^{13}\text{C}$ 分析, 以获取全新世环境变化的信息. 6 个加速器(AMS) ^{14}C 年代数据可靠地控制了该岩芯的年代序列. 研究发现蒙古北部全新世气候存在冷(凉)湿-暖干的波动, 并发生多次气候突发事件. 较为显著的突发事件的年代分别为: 1750, 2800, 4000, 5200, 7200 和 9200 aBP (^{14}C 年龄). 这些事件在该地区表现为气候向冷湿的快速转变, 可以和北大西洋地区的气候突发事件相对应, 说明全新世北大西洋高纬地区的气候变化可能通过对西风的影响与蒙古北部的气候变化密切相关. 西风的强度和位置的变化将改变西伯利亚-蒙古高压(冬季风)的强度, 并进而影响着中国的气候变化.

关键词 蒙古高原 全新世 Gun Nuur 湖 气候突发事件

千年、百年尺度的气候快速变化是全球变化研究的热点之一, 因为它有可能为我们提供未来气候变化的线索. 格陵兰冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示全新世气候超常稳定^[1]. 然而, O'Brein 等人^[2]通过对格陵兰冰芯中可溶杂质的分析, 揭示了格陵兰冰盖上的大气环流存在系列千年尺度的波动. 之后, 其他许多地方也报道了全新世气候的不稳定性^[3-9]. Bond 等人^[3]对高纬度北大西洋深海沉积物的研究表明, 全新世气候的波动周期和末次冰期的波动周期大致相同, 并认为这个大约 1.5 ka 的气候波动周期很可能受太阳活动周期的控制^[10], 只不过由于缺乏北美大冰盖对气候变化的放大作用, 全新世气候波动的幅度被大大地减弱了. Visbeck^[11]在阐述北大西洋涛动(NAO)的作用时指出: 北大西洋涛动主导着北半球高纬度地区冬季的大气变化, 它不仅影响着北大西洋周围地区, 也对绕中纬度的西风急流产生影响. 北半球中纬度西风急流影响着蒙古高原地区, 而蒙古北部的气候环境变化控制着西伯利亚-蒙古高压(冬季风)的强度, 进而对中国的气候产生影响^[12].

如果上述观点正确, 那么北大西洋地区全新世的突发气候事件也应该在蒙古高原被记录下来. 然而, 尽管末次冰期的 Dansgaard-Oeschger 和 Heinrich 事件在蒙古高原北部的贝加尔湖沉积中被记录^[13], 并且, 对俄罗斯贝加尔湖及蒙古境内的湖泊沉积、沙-黄土-古土壤沉积序列的研究表明, 蒙古高原北部全新世气候存在不稳定性. 但是, 前人在该地区及邻近地区的研究^[14-20]都没有提及可以和北大西洋深海沉积记录对比的具有(1470 ± 500) aBP 周期的^[3]全新世

气候突发事件, 这可能与下列因素有关: (1) 所研究的湖泊沉积速率太低或采样间距较大而影响了研究的分辨率; (2) 选择的代用指标对气候突发事件不敏感; (3) 测年材料、方法和精度存在问题. 这也可能意味着和高纬度北大西洋地区相关的全新世气候突发事件在蒙古高原没有发生. 搞清这一问题, 对于探讨全新世气候突发事件的形成机理和气候变化过程是十分重要的.

为此, 我们选择了蒙古北部的 Gun Nuur 湖作为研究对象. 该湖泊位于贝加尔湖以南约 100 km 处, 这里也是西伯利亚-蒙古高压的核心区. 由于该湖沉积速率明显高于贝加尔湖, 其沉积应更详细地记录了西伯利亚-蒙古高压及其冬季风变化有关的气候变化. 本文介绍了蒙古北部全新世气候变化的时间序列, 以揭示全新世的突发气候事件, 并增加对全球全新世气候不稳定性理解.

1 样品采集和处理

Gun Nuur 湖(50°15'N, 106°37'E)为一封闭的丘间微咸-淡水小湖泊, 目前最大水深为 5 m, 湖底平坦. 该地区现今年降水量为 300 ~ 400 mm, 植被为森林-干草原. 从该地区向南, 随着降水的减少, 植被带过渡为干草原和荒漠(戈壁). 由戈壁再向南进入到中国境内的内蒙古和黄土高原, 受夏季风的影响, 降水增加, 植被带又由荒漠向草原过渡. 由此可见, 降水对整个蒙古高原植被分布的控制作用是十分突出的.

2002 年, 我们在 Gun Nuur 湖用活塞钻成功地钻取了 7.44 m 长的连续湖芯. 为保证钻取样芯的完整

性,在湖中心部位相距 3 m 处钻取了两根样芯,在 10m 外钻取了 1 根样芯作为备份.为进一步保证岩芯的连续性,在钻取 3 根岩芯时,用了不同长度的取样管.这样,每根岩芯取样管接头处被污染或缺失的部分可由另 1 根岩芯的相应沉积部位进行弥补或剔除.将样芯运至乌兰巴托,剖开取样管后,通过岩芯的沉积标志层(如纹泥和样芯颜色变化)的对比,从而得到完整的沉积序列.

岩芯以 1 cm 间距进行分样.将样品用烘箱在 40℃ 的控制温度下烘干后,对样品进行了环境磁学、有机质含量和有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)分析,并分别以 2, 4 和 7~8 cm 的间距进行.样品的岩石磁学分析根据 Maher 等人^[21]的步骤进行:先用 Bartington MS2 磁化率仪进行磁化率的测量,再利用 ASC IM10-30 脉冲磁力仪在 1T 和反向 100mT 的磁场作用下对样品进行磁化,并利用 Agico JR-5A 旋转磁力仪测量剩磁.将 1T 磁场作用下的剩磁作为饱和等温剩磁(SIRM),反向 100mT 磁场作用下的剩磁记作“IRM_{-100mT}”.剩磁比(S-Ratio)和 HIRM(hard isothermal remanent magnetization)分别由 $-\text{IRM}_{-100\text{mT}}/\text{SIRM}$ 和 $[\text{IRM}_{-100\text{mT}} + \text{SIRM}]/2$ 计算得出^[22~24].有机 $\delta^{13}\text{C}$ 分析的步骤如下:烘干的岩芯样品经研磨后用稀盐酸处理,然后用蒸馏水反复冲洗,在 100℃ 左右的烘箱中再次烘干,处理后的沉积物在 800℃ 左右的氧气中燃烧,有机质分解生成的 CO_2 在真空系统中收集,然后用 Delta Plus 质谱仪分析.有机碳同位素结果用 $\delta^{13}\text{C} = (\text{R}_{\text{样}} - \text{R}_{\text{标}}) / \text{R}_{\text{标}} \times 1000\text{‰}$ (PDB)表示.样品有机质含量的测定采用常规的重铬酸钾-硫酸氧化滴定法.测年样品不等间隔地在岩芯的中心部位采集,并送往美国 Beta 实验室(beta analytic inc)用加速器方法测定.

2 分析结果

AMS ^{14}C 测年结果见表 1. Gun Nuur 湖岩芯最底部的 ^{14}C 年代为 9.5 kaBP (10690 ~ 10760 aBP(cal)),显示该岩芯为全新世以来的沉积.各样品的年代利用实测 ^{14}C 年代数据线性内插获得,2cm 间距的环境磁学分析所代表的时间分辨率为 15 ~ 30 年.本文虽然列出了按 Stuiver 等人^[25]提供的方法进行校正的日历年龄(见表 1),但由于前人的研究大多采用 ^{14}C 年龄,因此,除特别说明外,本文引用年代均为 ^{14}C 年龄.

Gun Nuur 湖岩芯环境磁学指标随深度和年代的变化见图 1 和图 2.根据样品磁化率值的变化可将岩

表 1 Gun Nuur 湖岩芯测年数据^{a)}

样品号	实验室编号	深度 /cm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	^{14}C 年龄 /aBP	校正年龄 (1 σ)/aBP
GN3	Beta-171822	64~65	-23.1	1900 ± 40	1880~1820
GN8	Beta-171823	151~152	-24.1	2530 ± 40	2580~2510
GN12	Beta-171824	240~242	-21.0	3250 ± 40	3480~3440
GN16	Beta-171825	342~344	-22.7	4910 ± 40	5660~5600
GN18	Beta-171826	391~392	-20.9	5820 ± 50	6670~6560
GN34	Beta-171827	743~744	-26.8	9500 ± 50	10760~10690

a) 由美国佛罗里达州迈阿密市的 Beta 实验室(Beta Analytic Inc)用 AMS 方法测定

芯分为不同的沉积段:低值段,磁化率值小于 $2.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$;中值段,磁化率值介于 $(2.5 \sim 5) \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$;高值段,磁化率值介于 $(5 \sim 7.5) \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$;而极高值段的磁化率值大于 $7.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$.整个岩芯的磁化率随深度的变化明显:除了最底部的 24 cm ($> 9.3 \text{ kaBP}$)磁化率值极高外,整个岩芯以 310 cm 为界分为两段,岩芯上段的磁化率值整体高于下段.在岩芯下段,570 ~ 720 cm (9.3 ~ 7.7 kaBP)和 310 ~ 380 cm (5.6 ~ 4.4 kaBP)为低值段,这两段的磁化率曲线平缓;而 380 ~ 570 cm (7.7 ~ 5.6 kaBP)为中值段,且该段磁化率值波动较大,其中 525 cm(约 7.21 kaBP)附近处为最低值.在岩芯上段,有 4 个相对高值段:即磁化率为高值的 270 ~ 310 cm (4.4 ~ 3.7 kaBP);中值段 200 ~ 240 cm (3.25 ~ 2.9 kaBP);高值段 60 ~ 125 cm (1.9 ~ 2.3 kaBP)和顶部的 30 cm.夹于其间的为相对磁化率低值段(240 ~ 270, 152 ~ 200 和 30 ~ 60 cm).其他的岩石磁学参数如饱和等温剩磁(SIRM), HIRM, S-Ratio 和磁化率值呈正相关性(见图 1).

岩芯有机质在年代上也可以分为两段:9.5 ~ 6.1 kaBP 的有机质含量较低($< 15\%$),从 6.1 kaBP 向上,有机质含量增高($> 15\%$).其中 5.6 ~ 4.5 和 3.7 ~ 3.3 kaBP 两个时间段的有机质含量最高.有机 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-33.5\text{‰} \sim -17.4\text{‰}$ 之间波动,平均值为 -25.84‰ .有机 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势也基本和磁化率的变化趋势呈反相关系,并表现出缓慢小幅波动增加和快速减小,具明显的旋回特征(见图 2).

3 讨论与结论

3.1 代用指标的气候环境意义

岩石磁学已广泛而且成功地应用于湖相沉积物的古气候和古环境变化的研究中.磁化率是湖相沉积研究中最常用的磁学参数,它常常与相应的地球化学、孢粉学特征等相一致^[26,27],说明磁化率在古

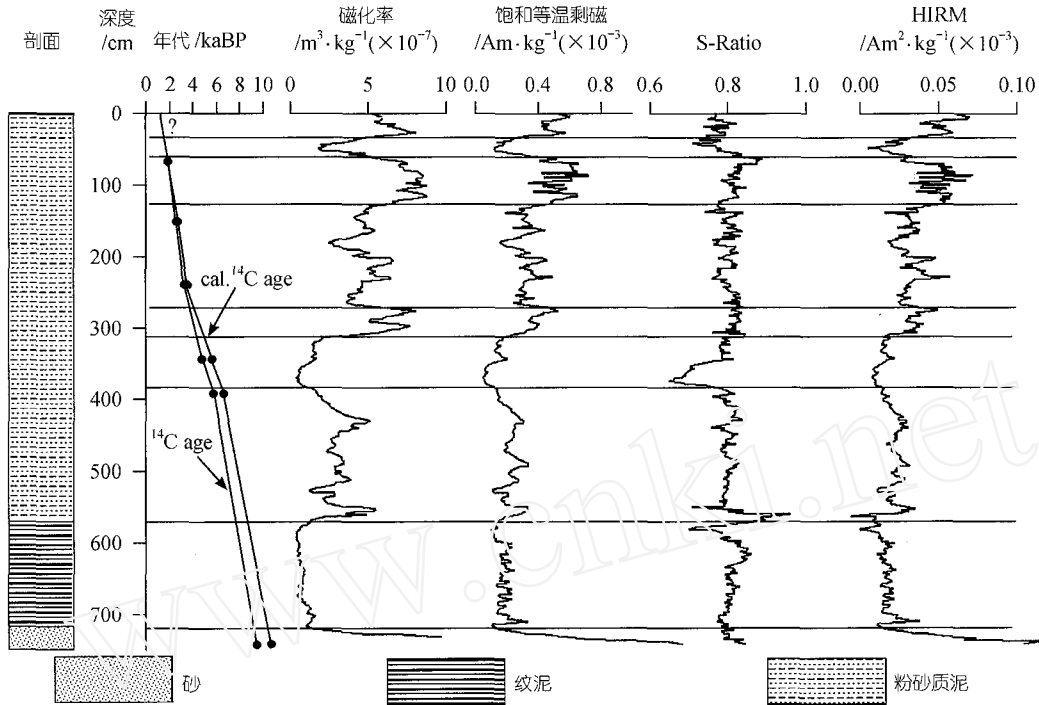


图 1 Gun Nuur 湖芯岩性、年代和环境磁学代用指标随深度的变化

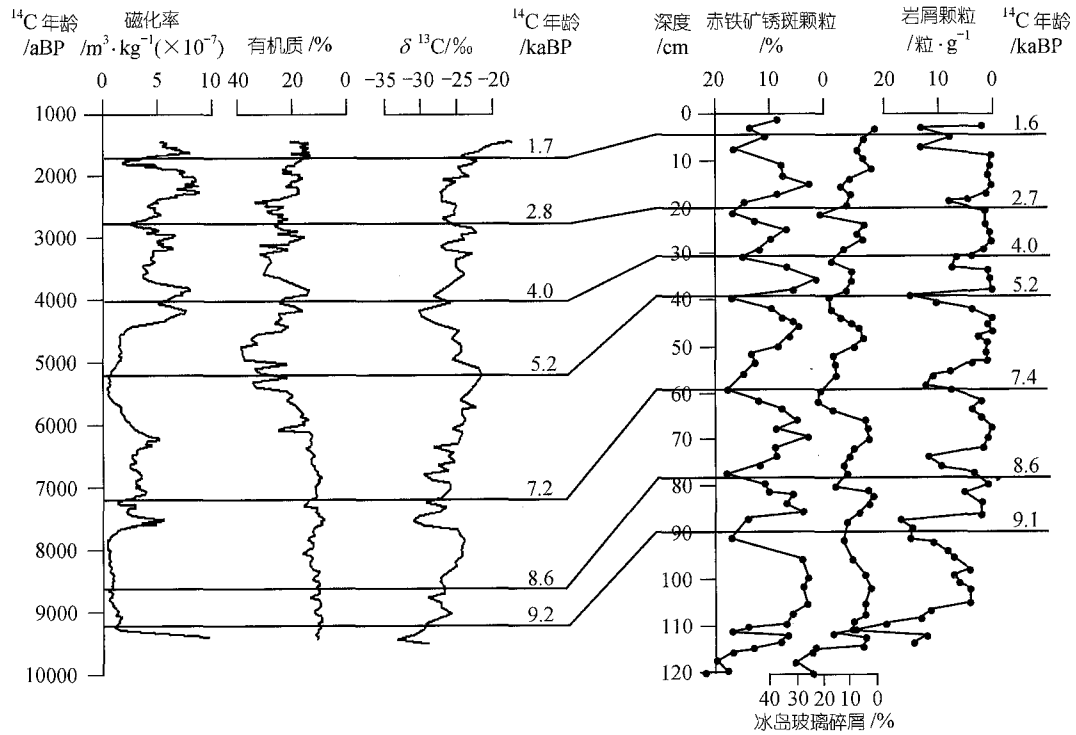


图 2 Gun Nuur 湖岩芯磁化率、有机质、有机 $\delta^{13}C$ 随年代的变化及其反映的突发气候事件和高纬度北大西洋浮冰碎屑事件^[3]的对比

气候和古环境研究中非常有用。通常,磁化率和 SIRM 反映了磁性矿物含量的变化^[26,28]。磁化率和 SRIM 的高值与流域内磁性矿物输入湖泊的量增加有关,或与流域内有机质的输入量降低、湖泊生产力的下降以及有机质不易保存而对磁性矿物不产生稀释作用等有关^[26,28]。此外,沉积后的氧化还原作用对磁性矿物的改变也是不容忽视的因素之一^[29]。在沉积后的铁氧化物还原阶段,碎屑成因的亚铁磁性矿物按粒级先小后大的顺序有选择性地被溶解^[30],而这种还原溶解作用对斜交反铁磁性矿物颗粒(如赤铁矿)影响甚微^[31]。S-Ratio 反映了样品中亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物的比值,而 HIRM 则反映了反铁磁性矿物的含量^[22,23,32]。

Gun Nuur 湖岩芯样品的岩石磁学指标的相互关系表明:磁化率和 SIRM 高值对应于亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物的含量同时增高,但反铁磁性矿物的相对含量降低,反之亦然。样品磁滞回线的特征与磁性矿物的种类及磁颗粒大小有关^[26]。Gun Nuur 湖岩芯不同磁化率值样品的磁滞回线特征显示(图 3),所有样品中磁性矿物以亚铁磁性矿物为主,磁晶粒度以多畴为主;磁化率为低值的样品,反铁磁性矿物成分的含量相对增加。这说明了沉积物沉积后磁性矿物的还原溶解作用是存在的。

Gun Nuur 湖岩芯样品的磁化率和有机质含量的关系如下:除了 570 cm (7.7 kaBP)以下的沉积外,磁化率和有机质呈负相关性。湖泊沉积物有机质的含量可以间接的被视为植被覆盖度和生物量的指标^[33]。如前所述,研究区地处亚洲内陆,植被带的变化明显受控于降水(或有效土壤湿度)。因此,有机质含量也反映了土壤湿度的变化,这点可以从蒙古北部的沙-黄土-古土壤序列中反映出来^[18]。磁化率值随气候变化的机制可能与下列因素有关:(1)在冷湿期可能的还原条件下,细颗粒的亚铁磁性矿物会首先溶解,造成沉积物磁性减弱,磁化率、SIRM 和 S-Ratio 比值下降;(2)气候湿润时期,地表植被盖度增加,风蚀和流水侵蚀作用减弱,输入湖泊的磁性矿物(亚铁磁性和反铁磁性)颗粒减少,造成磁化率值的降低,反之,湖泊沉积物中磁性矿物含量增加;(3)有机质含量增加对磁性矿物含量的稀释作用使磁化率、SIRM 和 S-Ratio 比值下降。

湖泊沉积物有机 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化与气候的变化有关^[34-36]。根据吴敬禄等人^[37]的研究,随着纬度和海

拔的升高,C4 植物对 $\delta^{13}\text{C}$ 的贡献减少或缺失,湖泊沉积物的有机 $\delta^{13}\text{C}$ 高值一般对应于冷期。地处高纬度的 Gun Nuur 湖,已超越了 C4 植物的界限^[16,38],该湖的 $\delta^{13}\text{C}$ 值除顶部个别值较大外,其余全部在 C3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围内。位于 Gun Nuur 湖以北约 100 km 的贝加尔湖的资料显示:末次盛冰期和冰消期的有机 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于全新世 $\delta^{13}\text{C}$ 值;尽管作者没有特别提到,但是全新世有机 $\delta^{13}\text{C}$ 值和温度呈负相关性^[13,15]。这和吴敬禄等人^[37]的结论相一致。

3.2 分析结果的解释

对 Gun Nuur 湖代用指标气候环境意义的上述解释和前人对该地区和邻近地区的研究结果相吻合。例如, Gun Nuur 湖岩芯 570 ~ 720 cm (9.3 ~ 7.7 kaBP) 和 310 ~ 380 cm (5.6 ~ 4.4 kaBP) 的磁化率低值段,似乎相位于 Gun Nuur 湖以西 100 km 的 Shaamar 风积-土壤剖面的两层最明显的全新世古土壤层相对应,这两层古土壤的 ^{14}C 年龄为 8300 ± 100 和 (4780 ± 80) aBP。而岩芯 380 ~ 570 cm (7.7 ~ 5.6 kaBP) 的磁化率中值段,可以和夹于这两层古土壤之间的反映气候恶化的风成沙沉积对应^[18,39]。值得注意的是: Gun Nuur 湖岩芯最底部 24 cm 为粗砂沉积,其粒度特征和蒙古高原北部风积剖面中的风成砂相似,可能反映了 9.3 kaBP Gun Nuur 湖泊是干枯的。岩芯 570 ~ 720 cm (9.3 ~ 7.7 kaBP) 的磁化率和有机质含量的相关性不如上部岩芯显著,这可能与该段极高的碳酸钙含量(最大可达 70%)稀释了磁性矿物有关。该段沉积时为全新世气候转暖期,该时期北方森林的界限大举向北迁移^[40],但和中全新世大暖期相比,气温仍较低。而且该段(570~720 cm)为纹层沉积,说明当时湖水较深^[16],也间接反映了温湿的气候环境。

310 ~ 380 cm 的有机质含量是整个岩芯中最高的。该段和 Shaamar 风积-古土壤序列中 ^{14}C 年龄为 (4780 ± 80) aBP 的古土壤层相对应^[18],说明该段沉积时蒙古北部植被发育较好。邻近的贝加尔湖硅藻资料反映了该时期为相对冷期^[14]。Gun Nuur 湖有机 $\delta^{13}\text{C}$ 资料显示该时期为一冷(或凉)湿期,在年代上和北半球普遍存在一次时间较长、变化幅度较大的气候变冷事件相一致^[41-45]。

岩芯 310 cm 以上沉积段的磁化率和有机质、有机 $\delta^{13}\text{C}$ 呈明显的负相关性,说明了磁化率相对低值对应于相对冷(凉)湿期。根据这些指标,相对的冷(凉)湿期为: 30 ~ 60 (1650 ~ 1900 aBP), 125 ~ 200 (2300 ~

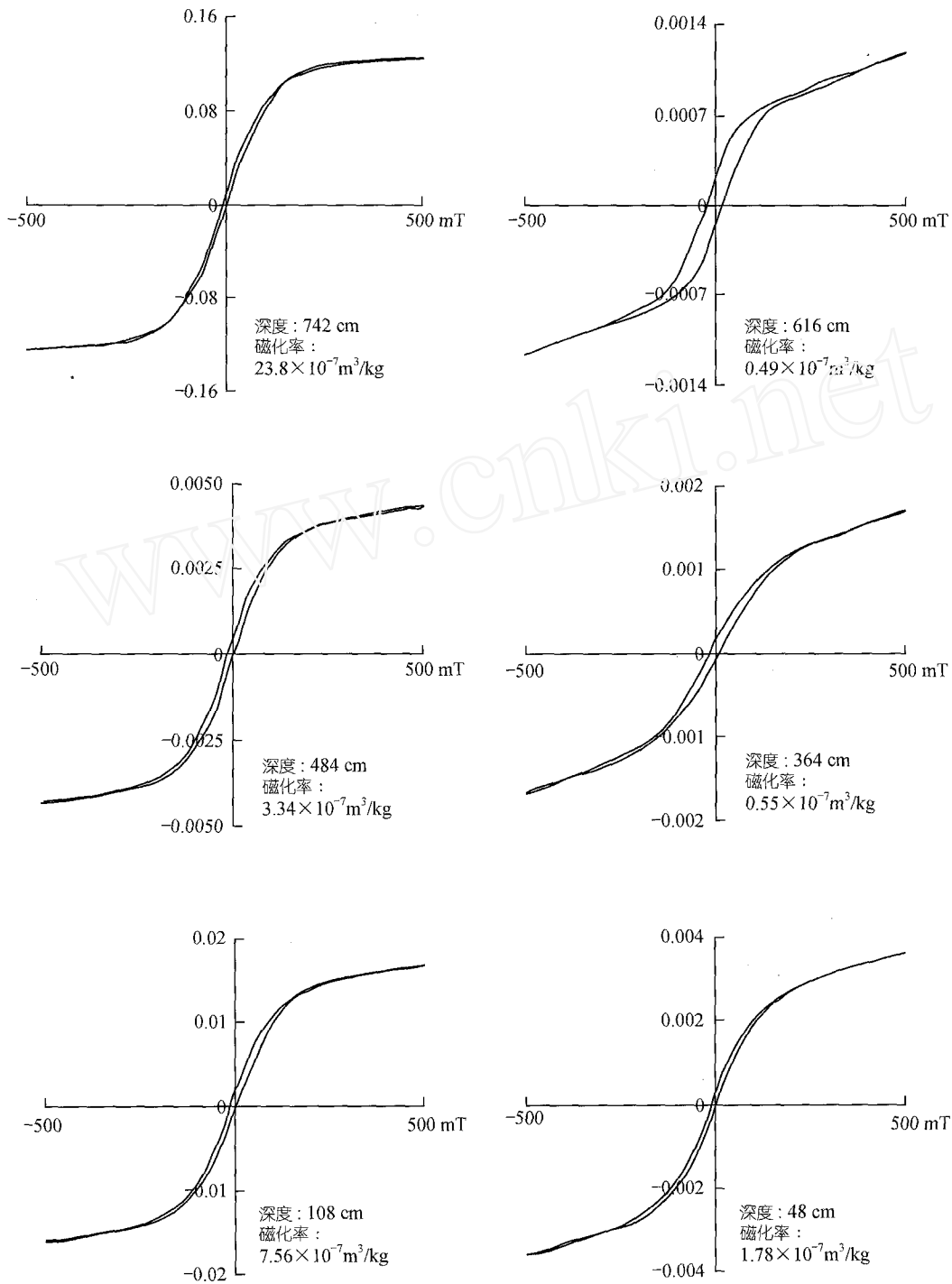


图 3 Gun Nuur 湖不同磁化率值样品的磁滞回线特征(纵坐标单位为 emu)

2900 aBP)和 240 ~ 270 cm (3250 ~ 3700 aBP). 310 cm 以上岩芯上部的有机质含量整体较高, 说明植被发育较好. 这可能与晚全新世随着地球轨道的变化, 太阳入射辐射降低, 该地区温度下降, 有效湿度加大有

关^[16]. 总之, 岩芯中高磁化率值对应于暖干气候, 而低磁化率值对应于冷(或凉)湿气候. 蒙古高原北部全新世的这种水热组合, 有别于受夏季风影响的蒙古高原南部和黄土高原地区.

3.3 突发气候事件

由可靠年代控制的 Gun Nuur 湖全新世层序也记录了气候突发事件, 这些气候突发事件是叠加于全新世长期气候变化之上的. 由磁化率和有机质所反映的较显著事件发生的年代分别为: 1.75, 2.8, 4, 5.2, 7.2 和 9.2 kaBP. 这些突发气候事件可以和北大西洋全新世突发气候事件对比^[3](见图 2), 也可以和若尔盖高原泥炭记录的全新世气候事件对比^[46], 可能反映了北大西洋地区、蒙古高原北部和青藏高原气候变化的内在联系.

发生在北大西洋 8.6 kaBP 的突发事件在 Gun Nuur 湖岩芯的记录中表现不明显, 而 Gun Nuur 湖岩芯 9.2 kaBP 事件可能对应于北大西洋的 9.1 kaBP 事件. Gun Nuur 湖岩芯 7.2 kaBP 事件在 VM-29 钻孔中的峰值年代为 7.4 kaBP, 而在 VM-28 钻孔中则为 7.2 kaBP. 该 7.2 kaBP (即 8.2 kaBP(cal)) 的突发气候事件是全新世自 Younger Dryas 事件以来最明显的一次降温事件^[47]. 在 Gun Nuur 湖岩芯中, 该事件表现为气候由暖干快速向冷(凉)湿的转变. Gun Nuur 湖岩芯 5.2 kaBP 事件磁化率反映不明显, 但有机质却为高值, 反映了一个较冷的气候时期. Gun Nuur 湖岩芯 2.8 和 1.75 kaBP 事件的年代和北大西洋的对应事件的年代分别相差 100 年和 150 年, 和其他突发事件相比, Gun Nuur 湖 1.75 kaBP 事件和北大西洋的相应事件的年代误差相对较大, 这可能与 Gun Nuur 湖岩芯顶部 60 cm 没有年代数据, 其沉积年代是根据下部的 ¹⁴C 年代推算得出的有关系. 考虑到年代学的不确定性(基于 6 个 AMS ¹⁴C 年代), 我们认为 Gun Nuur 湖岩芯记录的突发气候事件和北大西洋地区记录的突发气候事件在年代上可以对比.

通过对蒙古北部 Gun Nuur 湖岩芯样品的分析, 揭示蒙古高原北部全新世气候是不稳定的, 表现为冷(凉)湿-暖干的气候组合, 这和中国西北地区的气候模式相一致^[48]. 此外, Gun Nuur 湖岩芯资料记录了可以和北大西洋地区对比的突发气候事件, 说明了北大西洋涛动通过西风强度的变化影响着西伯利亚和蒙古北部的气候^[11].

致谢 P. Khosbayar, T. Narantsetseg 参加了野外工作, 张俊华女士在有机质分析中提供帮助. 环境磁学、有机质和碳酸钙分析在西部环境教育部重点实验室完成, 作者表示感谢. 本工作受国家杰出青年基金项目(批准号: 40025105)资助.

参 考 文 献

- 1 GRIP members. Climate instability during the interglacial period recorded in GRIP ice core. *Nature*, 1993, 364: 203~207
- 2 O'Brien S R, Mayevoski P A, Meeker L D, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. *Science*, 1995, 270: 1962~1964
- 3 Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, 278: 1257~1266
- 4 Bianchi G G, McCave I N. Holocene periodicity in north Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. *Nature*, 1999, 397: 515~517
- 5 Enzel Y, Ely L L, Mishra S, et al. High-resolution Holocene environmental changes in the Thar Desert, northwestern India. *Science*, 1999, 284: 125~128
- 6 Luckge A, Doose-Rolinski H, Khan A A, et al. Monsoonal variability in the northeastern Arabian Sea during the past 5000 years: geochemical evidence from laminated sediment. *Paleogeography Paleoclimatology Paleocology*, 2001, 167: 273~286
- 7 McDermott F, Matthey D P, Hawkesworth C. Centennial-scale Holocene climate variability revealed by a high-resolution speleothem $\delta^{18}\text{O}$ record from SW Ireland. *Science*, 2001, 294: 1328~1331
- 8 Wurster C M, Patterson W P. Late Holocene climate change for the eastern interior United States: evidence from high-resolution $\delta^{18}\text{O}$ value of maritil otoliths. *Paleogeography Paleoclimatology Paleocology*, 2001, 170: 81~100
- 9 Baker P A, Seltzer G O, Fritz S C, et al. The History of South American tropical precipitation for the past 25,000 years. *Science*, 2001, 291: 640~643
- 10 Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, 294: 2130~2136
- 11 Visbeck M. The ocean's role in Atlantic climate variability. *Science*, 2002, 297: 2223~2224
- 12 Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last Glaciation. *Nature*, 1995, 375: 305~308
- 13 Prokopenko A A, Karabanov E B, Williams D F, et al. The detailed record of climate events during the past 75000 yrs BP from the Lake Baikal drill core BDP-93-2. *Quaternary International*, 2001, 80/81: 59~68
- 14 Karabanov E B, Prokopenko A A, Williams D F, et al. A new record of Holocene climate change from the bottom sediments of Lake Baikal. *Palaogeography Palaoclimatology Palaecology*, 2000, 156: 211~224
- 15 Horiuchi K, Minoura K, Hoshino K, et al. Palaeoenvironmental history of Lake Baikal during the last 23000 years. *Palaogeography Palaoclimatology Palaecology*, 2000, 157: 95~108
- 16 Peck J A, Khosbayar P, Fowell S J, et al. Mid to Late Holocene

- climate change in north central Mongolia as recorded in the sediments of Lake Telmen. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2002, 183: 135~153
- 17 Dorofeyuk N I, Tarasov P E. Vegetation and lake levels in Northern Mongolia in the last 12500 years as indicated by data of pollen and diatom analyses. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 1998, 6: 70~83
- 18 Feng Z D. Gobi dynamics in the Northern Mongolia Plateau during the past 20000+ yr: preliminary results. *Quaternary International*, 2001, 76/77: 77~83
- 19 Grunert J, Lehmkuhl F, Walther M. Paleoclimatic evolution of the Uvs Nuur basin and adjacent areas (West Mongolia). *Quaternary International*, 2000, 65/66: 171~192
- 20 Tarasov P, Dorofeyuk N, Metel'tseva. Holocene vegetation and climate changes in Hotoon-Nur basin, northwest Mongolia. *Boreas*, 2000, 29: 117~126
- 21 Maher B A, Thompson R, Hounslow M W. Introduction. In: Maher B A, Thompson R, eds. *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 1~48
- 22 Robinson S G. The late Pleistocene palaeoclimatic record of North Atlantic deep-sea sediments revealed by mineral-magnetic measurements. *Phys Earth Planet Inter*, 1986, 42: 22~47
- 23 Hesse P P. Mineral magnetic 'tracing' of aeolian dust in southwest Pacific sediments. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1997, 131: 327~353
- 24 Sohlenius G. Mineral magnetic properties of Late Weichselian-Holocene sediments from the northwestern Baltic Proper. *Boreas*, 1996, 25: 79~88
- 25 Stuiver M, Rimer P J, Bard E, et al. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24000-0 cal. BP. *Radiocarbon*, 1998, 40: 1041~1083
- 26 Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: Allen & Unwin, 1986
- 27 Dearing J A. Holocene environmental change from magnetic proxies in lake sediments. In: Maher B A, Thompson R, eds. *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 231~278
- 28 Wang H Y, Liu H Y, Cui H T, et al. Terminal Pleistocene/Holocene palaeoenvironment changes revealed by mineral-magnetism measurements of lake sediments for Dali Nor area, Southeastern Inner Mongolia Plateau, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2001, 170: 115~132
- 29 刘建. 磁性矿物还原成岩作用述评. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(4): 103~107
- 30 Karlin R, Levi S. Diagenesis of magnetic minerals in recent hemipelagic sediments. *Nature*, 1983, 303: 327~330
- 31 Robinson S G, Sahota J T S, Oldfield F. Early diagenesis in North Atlantic abyssal plain sediments characterized by rock-magnetic and geochemical indices. *Marine Geology*, 2000, 163: 77~107
- 32 Bolemendal H, Lamb B, King J W. Paleoenvironmental implications of rock-magnetic Properties of Late Quaternary sediment cores from the eastern equatorial Atlantic. *Paleoceanography*, 1988, 3: 61~87
- 33 Gasse F, Arnold M, Fontes J C, et al. A 13000 year climate record from western Tibet. *Nature*, 1991, 353: 742~745
- 34 Talbot M R, Livingstone D A. Hydrogen index and carbon isotopes of lacustrine organic matter as lake level indicators. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1989, 70: 121~137
- 35 Stuiver M, Yang I C, Denton G H, et al. Climate versus changes in ^{13}C content of the organic component of lake sediments during the late quaternary. *Quaternary Research*, 1975, 5: 251~262
- 36 Aravena P, Warner B G, MacDonald G M, et al. Carbon isotope composition of lake sediments in relation to lake productivity and radiocarbon dating. *Quaternary Research*, 1992, 37: 333~345
- 37 吴敬禄, 王苏民, 沈吉. 湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 所揭示的环境气候信息. *湖泊科学*, 1996, 8(2): 113~118
- 38 Ehleringer J R. Photosynthesis and photorespiration: biochemistry, physiology, and ecological implications. *Hortscience*, 1979, 14: 217~222
- 39 冯兆东, 陈发虎, 张虎才, 等. 末次冰期-间冰期蒙古高原与黄土高原对全球变化的重要贡献. *中国沙漠*, 2000, 20(2): 171~177
- 40 MacDnald G M, Velichko A A, Kremenetski C V, et al. Holocene treeline history and climate change across Northern Eurasia. *Quaternary Research*, 2000, 53: 302~311
- 41 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. *中国科学, B辑*, 1992, (12): 1300~1308
- 42 Zhang H C, Ma Y Z, Li J J, et al. A Holocene climatic record from arid Northwestern china. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2000, 162: 389~401
- 43 刘嘉麒, 倪云燕, 储国强. 第四纪的主要气候事件. *第四纪研究*, 2001, 21(3): 239~248
- 44 王开发. 全新世温暖期中低温事件的研究. *第四纪研究*, 1990, (2): 169~174
- 45 黄春长. 西北欧全新世中期的 Elm Decline 研究新进展. *地球科学进展*, 1996, 11(5): 487~492
- 46 周卫建, 卢雪峰, 武振坤, 等. 若尔盖高原全新世气候变化的泥炭记录与加速器放射性碳测年. *科学通报*, 2001, 46(12): 1040~1044
- 47 Alley R, Mayewski P, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: a prominent, widespread event 8200 years ago. *Geology*, 1997, 25 (6): 483~486
- 48 李吉均. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式. *第四纪研究*, 1990, (3): 197~204

(2003-08-11 收稿, 2003-10-20 收修改稿)