

陇西会宁地区全新世时期气候变化探讨

王琳栋, 杨太保, 何毅, 梁烨

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:以地处黄土高原西北缘的会宁陈源剖面全新世段的磁化率变化作为主要研究对象, 辅以粒度变化, 对该区全新世时期的气候变化进行了初步的探讨分析。研究发现, 会宁地区全新世时期气候变化可以分为 5 个阶段: 13.3—12.1 kaB. P. (晚更新世向全新世过渡时期)、12.1—11.3 kaB. P. (新仙女木事件时期)、11.3—8.9 kaB. P. (冷暖波动频繁时期)、8.9—4.6 kaB. P. (变暖时期)、4.6 kaB. P. 至今(现代气候时期)。与同时期全球气候变化和东亚季风边缘区气候变化对比发现, 陇西会宁地区的气候变化与二者都有良好的印证关系, 说明了该地区黄土对全新世古气候变化具有良好的敏感性。

关键词:全新世; 气候变化; 磁化率; 会宁县

中图分类号: P92; P532

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0332-06

The Preliminary Examination of Climate Change Since Holocene in the Huining, Longxi Area

WANG Lindong, YANG Taibao, HE Yi, LIANG Ye

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Selecting the loess profile since Holocene in Huining of Gansu Province, we examined the change of climate and environment by analysing magnetic susceptibility and grain size. The results indicated that the changes of climate were partitioned 5 phases since Holocene: 13.3—12.1 kaB. P. (The period of late pleistocene to Holocene), 12.1—11.3 kaB. P. (the Younger Dryas event), 11.3—8.9 kaB. P. (The fluctuation characteristics of climatic change in temperature), 8.9—4.6 kaB. P. (A period of warming), Since 4.6 KaB. P. (Modern climate period). Compared with climate change of the global and the edge area of East Asia monsoon in the same time, we found the good supportive relationship between climate change in Huining region and loess in this region, suggesting that it has a good sensitivity towards the Holocene climate change.

Keywords: holocene; climate change; susceptibility; Huining County

2009 年过去全球变化研究计划 PAGES(Past Global Changes)发布的最新科学计划和实施策略中, 其 4 个主题之一的区域气候动力学将全新世列为 3 个重点研究时段之一, 说明全新世的相关研究无疑将更加得到重视^[1]。全新世一方面为评估现代的全球变暖提供了过去气候变化的长尺度背景, 另一方面, 全新世气候变化的研究也是探索万年来的人地关系的一把钥匙^[2]。许多学者致力于全新世气候变化的研究, 目的是更好地了解古气候变化来预测未来气候的变化趋势^[3]。在我国, 几十年来对全新世气候变化的研究取得累累硕果。刘东生^[4]对黄土高原洛川、西峰、陇西的研究将全新世

分为早、中、晚 3 个不同阶段; 孙建中等^[5]通过西安地区及黄土高原其他地区的孢粉分析, 认为全新世古气候环境可以分为干冷的早全新世(10—8.5 kaB. P.)、温暖的中全新世(8.5—2.5 kaB. P.)和温度略有下降的晚全新世(2.5 kaB. P.—今); 施雅风等^[6]综合地层、孢粉、动物、考古、古土壤、古湖泊、古海岸、古冰川遗迹、冰芯和考古资料指出中国全新世大暖期(中全新世)出现于 8.5~3 kaB. P.。虽然他们同时研究了全新世的气候变化, 但对具体分期年代的划分各不相同, 这说明了全新世气候变化在不同地区、不同地质记录之间存在明显的差异性。

收稿日期: 2015-01-27

修回日期: 2015-03-02

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(41271024); 国家基础科学人才培养基金项目“兰州大学地理学基地科研训练及科研能力提高项目”(J1210065); 中央高校基本科研业务费专项资金(Lzujbky-2012-137)

第一作者: 王琳栋(1990—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向为环境演变与气候变化。E-mail: wangld2013@lzu.edu.cn

通信作者: 杨太保(1962—), 男, 山西运城人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事自然地理环境变化研究。E-mail: yangtb@lzu.edu.cn

近年来,对全新世气候变化的研究主要是通过石笋氧同位素和湖泊沉积进行的,对全新世黄土的关注程度较低,这主要是因为较难寻到保存完好的全新世黄土沉积序列,并且相对于石笋和湖泊沉积,黄土的分辨率较低。但是,黄土高原自东南向西北其沉积厚度和分辨率均随气候环境变化而不同^[7]。陈塬剖面地处黄土高原西北缘区,六盘山以西,是季风区与西风区的过渡地带^[8],该剖面保存完好、具有较高的分辨率,对古气候反应敏感。本文将陈塬剖面作为研究对象,以磁化率曲线为主要研究指标,辅以粒度曲线,初步探讨分析全新世时期会宁地区的气候变化。

1 研究区概况

陈塬黄土剖面位于黄土高原西北缘会宁县境内(36°10′44.27″N,105°14′15.22″E),北部有腾格里沙漠。该地区多以变质岩和花岗岩为基底,上覆第三系红土和第四系黄土。平均海拔 2 025 m,地势由东南向西北倾斜,总体南高北低。该区干旱少雨,属东南季风气候西北部边缘区。在植被区划上属温带草原区域,植物种类相当贫乏,主要为禾草草原,以耐旱的多年生根茎禾本科草类为主,植物有明显的旱生形态。陈塬剖面位于会宁县北部,此地多川、塬地,为梁峁顶面残塬和河流切割成的沟谷地阶地貌,且源面坡度平缓,塬缘到谷底切割较深,坡面高且陡,塬面为塬地,沟谷为沟坝地。陈塬剖面黄土沉积连续无间断,沉积较快,其作为黄土高原西部典型的黄土剖面,是研究过去气候和环境演变的较理想的剖面。

2 样品采集与试验方法

2.1 样品采集

陈塬剖面全新世段沉积约 2.2 m。该段属天然露头,为了减少自然风化作用和动植物残体对测试结果的干扰,首先揭去了表层 1~2 m 的沉积物,然后对剖面从上到下以 2 cm 为间距进行采样,共采集样品 150 个。对陈塬剖面全新世段描述如下:(1) 0~0.8 m,浅黄色栗钙土,块状结构,质地疏松,有节理发育,有植物根系,有虫孔,颗粒较粗;(2) 0.8~1.4 m,褐土,疏松,有植物根系,有孔洞;(3) 1.4~2.6 m,粗粉砂,垂直节理发育,广泛发育碳酸钙结核,其中 2.1~2.2 m 见蜗牛壳。

2.2 试验方法

样品首先放置在实验室自然风干。磁化率的测量使用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型测量仪。样品用 2 mm 筛剔除较大颗粒,然后装入 2 mm ×

2 mm × 2 mm 塑料盒中,称重。测量开始前先将仪器放置在远离磁场的地方开机在低频(0.47 khz)上预热半小时,每个样品调转不同方向测量 3 次,最后取其平均值,求得其低频磁化率,重复上述步骤,测量每个样品的高频磁化率(4.7 khz)。粒度采用英国 Malvern Instrument 公司生产的 Mastersize 2000 激光粒度仪来完成,该仪器测试范围为 0.02~2 000 μm,试验误差小于 1%。测量前对样品进行预处理:首先用双氧水去除有机质,再用盐酸除掉碳酸盐,静置 12 h 后去掉上层澄清液体,加入六偏磷酸钠溶液,然后使用粒度仪进行测量。以上试验均在兰州大学资源环境学院综合地化与粒度分析实验室完成。

2.3 磁化率与气温、降水量模型

中国黄土高原在低降水量、高蒸发量的干旱氧化成壤条件下,利于亚铁磁性矿物的生成,其磁化率与古气候的关系呈正相关^[9]。黄土—古土壤磁化率的变化不仅与成土作用过程中碳酸盐的淋失、孔隙度的变化、“就地”形成的新的强磁性矿物有关,而且在一定程度上还与有机组分有重要关系^[10]。总之,作为黄土—古土壤序列古气候研究的一个代用指标,磁化率值的高低变化反映了土壤成壤作用的强弱变化,而影响成壤作用的主要因素是当地当时的气温和降水量变化。吕厚远等^[11]在对黄土—古土壤序列磁化率的大量研究的基础上建立了磁化率变化与气温以及降水之间的统计关系,并利用这种关系进一步建立了磁化率与温度之间的四次回归方程,恢复了不同区域古温度与古降水的变化,他们发现在黄土高原磁化率随年均温和降水量的增加而增加,而长江流域则呈现了相反的趋势,地处干旱区的新疆地区则变化复杂。顾静等^[12]则依据上述四次回归方程,通过测定和对比关中黄土剖面的磁化率数据,对该区全新世气候要素进行了计算,结果认为古温度值应加上 1.5℃ 的校正值才与实际值相符,而古降水量值可以作为当时的降水量考虑。本文利用该磁化率与温度四次回归方程和磁化率与降水量的四次方程,对陈塬剖面全新世段古温度、降水量进行计算,研究该地区全新世以来的水热变化。磁化率与温度、降水量四次回归方程如下:

$$y_1 = -2.3731 + 0.21567x - 1.1053 \times 10^{-3}x^2 + 2.7069 \times 10^{-6}x^3 - 2.6525 \times 10^{-9}x^4 \quad (1)$$

$$y_2 = -22.7060 + 11.5540x - 6.7166 \times 10^{-2}x^2 + 1.8684 \times 10^{-4}x^3 - 1.9264 \times 10^{-7}x^4 \quad (2)$$

式中: y_1 ——年均温; y_2 ——年均降水量; x ——磁化率值。

2.4 磁化率年龄模型

Kukla 等^[13]建立了“磁化率年龄模型”,使获得研究剖面精确系统的高分辨率定年成为了可能。陈一萌等^[14]验证了磁化率年龄模型使用于全新世剖面地层年代的测定基本是可靠实用的。其公式如下:

$$T_m = T_0 + (T_1 - T_0) \left(\frac{\sum_{i=1}^m a_i s_i}{\sum_{i=1}^n a_i s_i} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中: T_m ——所求某一层位(i)的年龄; T_0, T_1 ——两控制点的年龄(T_0 是已经标定的较年轻的年龄, T_1 是已经标定的较老的 n 层的年龄); n ——两个年龄控制点之间的总层位; m ——所求某一层位年龄以前的总层位; a ——某一层位的厚度; s ——某一层位的质量磁化率值。

本文选用李家塬剖面、白草塬剖面作为参考,二者均位于黄土高原的西北边缘地带,李家塬剖面距离陈塬剖面仅几千米,白草塬剖面距离陈塬剖面约 20 km,且二者在全新世时期黄土沉积厚度分别为 2.8 m 和 2.2 m,与本剖面基本一致,年龄数据也应当基本一致。对李家塬剖面进行的热释光测年得出 S_0/L_1 的分界年龄约为 11~10 ka,而白草塬所采黄土剖面底界年龄约为 13 ka,其中全新世黄土底界年龄约为 11.5 ka^[3]。本文根据磁化率年龄模型,对陈塬剖面每 0.5 m 作为一个控制点,采用内插法计算土层年龄(表 1)。

表 1 陈塬剖面控制点年龄

点	深度/m	年龄/kaB. P.
CY ₁	0	0
CY ₂	0.5	3.29
CY ₃	1.0	6.49
CY ₄	1.5	8.96
CY ₅	2.0	11.01
CY ₆	2.5	13.00
CY ₇	2.6	13.31

3 结果与分析

3.1 试验结果

由于使用低频磁化率计算温度较为合适,故本文使用低频磁化率数据作为研究对象。陈塬剖面低频质量磁化率在 $(23.30 \sim 45.67) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 范围内变化,最大值约为最小值的 1.96 倍,平均值为 $33.11 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。频率磁化率所占比例最大值为 8.84%,最小值为 -5.71%,平均值为 2.76%,所含负值除测量误差外,可能是成壤过程中所含超顺磁颗粒所致。从

陈塬剖面磁化率变化曲线来看,磁化率在黄土沉积的不同阶段有明显的高低变化,黄土层磁化率明显低于古土壤层,这与黄土高原黄土—古土壤磁化率变化特征相同。此外,黄土层磁化率呈现高频大幅震荡的过程,而古土壤层磁化率变化的幅度相对较小,并且从现代土壤层向黄土层过渡时,磁化率值突然下降且幅度很大,而在黄土层向古土壤层过渡时,磁化率值缓慢升高后来回波动。全新世低频磁化率数据中,高值段在上半段,最大值为 $45.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,出现在 0.68 m 处,高值段平均值 $41.54 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$;低值段在下半段,最小值为 $23.30 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,出现在 2.16 m 处,低值段平均值 $25.44 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

3.2 会宁地区全新世时期水热变化

运用磁化率与气温、降水量模型和陈塬剖面全新世段磁化率数据进行计算,如图 1 所示,温度变化范围为 $2.08 \sim 5.42^\circ\text{C}$,最大值约为最小值的 2.61 倍,平均值为 3.61°C ;其中高值段出现在上半段,平均值为 4.86°C ,低值段出现在下半段,平均值为 2.45°C 。降水量变化范围为 $212.32 \sim 381.85 \text{ mm}$,最大值约为最小值的 1.80 倍,平均值为 290.32 mm ;其中高值段出现在上半段,平均值为 353.99 mm ,低值段出现在下半段,平均值为 231.20 mm 。

为验证上述根据磁化率数值计算的气温、降水量与现在气候条件下的水热的偏差,本文收集了会宁县气象站 1951—2008 年的气象数据,计算得出现代会宁地区年均温为 6.49°C ,年均降水量为 370 mm 。与陈塬剖面 0 m 处磁化率计算得出的数据相比,年均温偏大 1.72°C ,年降水量偏大 20.5 mm 。这表明计算得出的降水量数据误差不大。实际使用时,可在计算得出的结果上再加上求得的差值,以确保与当时情况相符。

3.3 全新世气候变化

Bond 等^[15]在对格陵兰冰芯的研究中认为在全新世早期发生了一次气温骤降的短暂事件,一般认为始于 $(12.88 \pm 0.26) \text{ kaB. P.}$,终于 $(11.64 \pm 0.25) \text{ kaB. P.}$,是末次冰消期过程中气候非线性反馈的结果^[16],被称为新仙女木事件(YD 事件)。YD 事件之后,全球才真正意义上进入全新世时期。

前人研究认为全新世气候变化可以分为 3 个阶段:早全新世变暖期($10.0 \sim 8.5 \text{ kaB. P.}$)、中全新世大暖期($8.5 \sim 3.0 \text{ kaB. P.}$)和晚全新世变冷期(3 000 kaB. P. 以来)^[2,6]。将陈塬剖面全新世段磁化率曲线、粒度曲线与贵州荔波董哥洞石笋沉积^[17]进行对

比(图 2), 发现二者有很好的一致性, 因同处于东亚季风区内, 二者相互印证可阐释全新世时期东亚季风

区气候变化的一般过程, 我们据此对全新世气候变化进行了讨论:

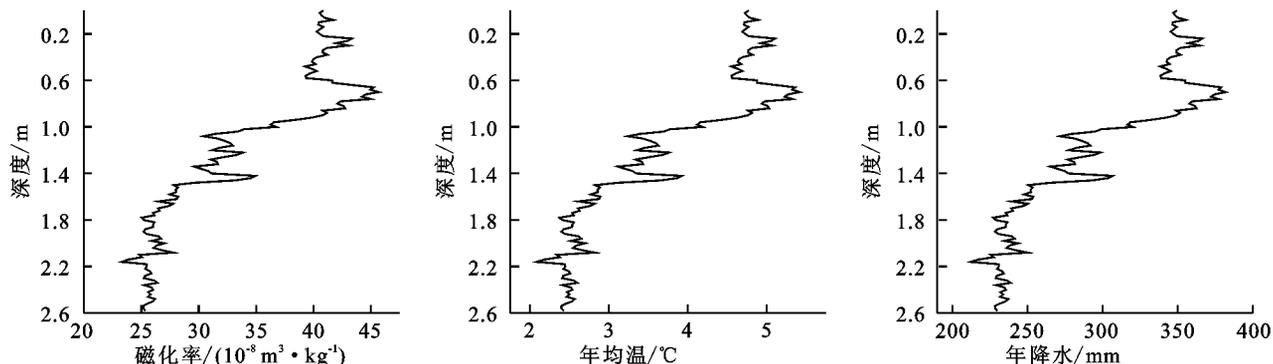


图 1 全新世时期会宁地区磁化率、年均温、年降水量曲线

I (13.3—12.1 kaB. P.) 为晚更新世向全新世过渡时期。该时期磁化率值处于全剖面的低值段且变化幅度不大, 而同时期荔波董哥洞石笋氧同位素处于高值, 反映了气候环境仍处于末次冰盛期后的寒冷气候中。在陈源剖面年均温、年降水量曲线(图 1)里则具体表现为温度在 4.12~4.32℃ 范围内波动, 降水量在 248.80~259.29 mm 范围内波动, 说明了自然环境在该时期寒冷状态下的稳定性。

II (12.1—11.3 kaB. P.) 为新仙女木事件时期。这一时期磁化率曲线突变至最低值, 年均温最低值 3.80℃, 年降水量最低值 232.82 mm(图 1), 均为剖面最低值。近 20 年来, 南欧、北美、南阿尔卑斯山、太平洋和极地等地区的孢粉、冰碛物、冰芯等都记录了 YD 时期的气候剧变。全球各地的记录均可与北大西洋地区的进行对比, 从而表明 YD 事件是全球性的^[15]。董哥洞石笋记录新仙女木事件开始于 12760 年, 结束于 11350 年^[17], 这与陈源剖面的地质记录基本吻合, 并与近年来世界各地研究所得新仙女木事件持续时间约千年左右的结果相一致^[16]。

III (11.3—8.9 kaB. P.) 为冷暖波动频繁时期。从磁化率曲线上可以看到这一时期的曲线波动剧烈, 锯齿状明显, 说明气候波动频繁, 但仍处于低值范围, 年均温在 (4.37±0.2)℃ 内变化, 年降水量在 (261.92±12)mm 内变化(图 1), 均佐证了此时会宁地区气候在一个小范围的低值区间剧烈波动, 气候环境仍然延续了之前的恶劣状态。这一时期粒度曲线显示有 3 个极大值(图 2 中 A 区域), 而董哥洞石笋相同位置同样出现了 3 个变大的锯齿, 表明该时段有 3 次明显的冷事件, 通过磁化率年龄模型计算其时间, 分别为 9.48, 9.64, 9.81 kaB. P., 与 Bond 等^[15]研究的格陵兰冰芯全新世冷事件进行对比, 我们认为上述 3 个冷事件中的 9.48, 9.81 kaB. P. 对应格陵兰冰芯中的 9.4, 10.3 kaB. P. 冷事件(事件 6 和事件 7)。至于在陈源剖面中发现而格陵兰冰芯并未记载的 9.64 kaB. P. 冷事件, 我们试图做出如下两种解释: (1) 格陵兰冰芯很好地记录了全球性的冷暖事件, 而陈源剖面的磁化率、粒度曲线仅反映了区域性的冷暖事件, 是全球性的气候事件与本地域气候事件的叠加, 因此 9.64 kaB. P. 冷事件可能是区域性的冷事件, 这反映了局地气候变化与全球气候变化的差异性; (2) 记录末次冰期以来的全球气候变化有两套模式, 反映了全球气候系统的两套连通机制: 一套是以格陵兰冰芯记录为代表, 通过冰量变化—大气圈波动—粉尘—水气波动, 从而引起气候系统的不稳定性加剧; 另一套是以苏禄海、南极冰心记录为代表, 通过冰量变化—海面变化传达气候变化信息^[18]。中国黄土位于北半球中纬地区, 其粒度变化是对两种模式的叠加响应, 因此我们推断陈源剖面中的 9.64 kaB. P. 冷事件可能是对高纬冰心记录的响应, 具体是哪一种原因这还需继续研究进行验证。

IV (8.9—4.6 kaB. P.) 为变暖时期。与前一时期相比, 磁化率曲线(图 2)急剧变大, 同一时间段粒度明

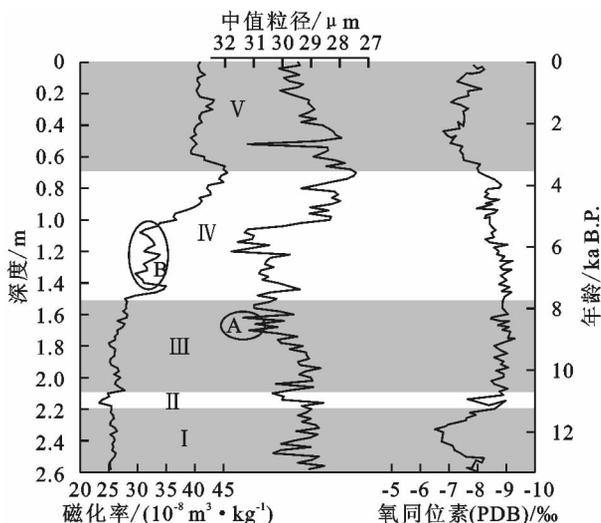


图 2 全新世时期会宁地区磁化率、粒度与董哥洞石笋对比关系

显降低,纵观整个全新世时期的磁化率曲线,该时段明显处于高值,表明该时段气候明显变暖,具体表现为年均温平均值 5.86°C ,年降水量平均值 338.03 mm (图1),分别增长了 1.49°C 和 76.11 mm 。这一时期应相当于前人研究认为的全新世大暖期,我国研究者提出大暖期开始于 $10-7.5\text{ kaB.P.}$,终止于 $5-2\text{ kaB.P.}$,施雅风等^[6]根据前人研究提出大暖期起迄时间为 $8.5-3\text{ kaB.P.}$,陈源剖面与其大致相当。

同时我们注意到,磁化率值在初期明显地增加后,磁化率值表现出峰谷交错的情况,使该时段曲线与前后相比出现明显的不连贯(图2中B区域),为了研究这一特殊情况的出现,我们将陈源剖面的磁化率、粒度曲线与古里雅冰芯^[19]、阿拉善高原湖泊沉积孢粉含量^[19]及东亚季风边缘区干湿曲线^[20]进行对比(图3),发现在这一时段均记录有明显的干冷现象。陈发虎等^[19]综合前人研究认为中全新世干旱至少发生在内蒙古高原—鄂尔多斯高原的现代夏季风边缘区的相当大范围内,甚至在黄土高原南部也有记载,并根据放射性碳的测年结果,推算中全新世干旱开始于 $7\ 000\text{ cal kaB.P.}$,结束于 $5\ 000\text{ cal kaB.P.}$, $6\ 000\text{ cal kaB.P.}$ 气候最干燥,这与陈源剖面磁化率、粒度曲线的表现一致,说明当时出现了夏季风的衰退,表现了中全新世时期气候在整体增暖过程中的不稳定性。

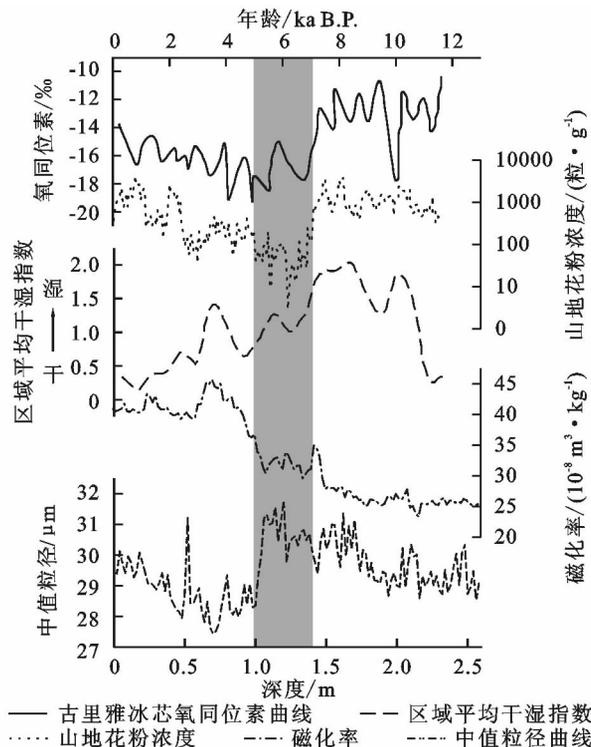


图3 全新世古里雅冰芯、阿拉善高原湖泊沉积孢粉含量、东亚季风边缘区干湿指数与会宁地区磁化率、粒度对比关系

V (4.6 kaB.P. 至今)为现代气候时期。这一时期磁化率曲线在初期的下降后呈现较平滑的趋势,粒度曲线呈现持续增大的趋势,年均温基本在 $6.54 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 内变化,年降水量在 $373.00 \pm 12\text{ mm}$ 内变化(图1),从这一时期开始会宁地区现代气候格局逐步形成,经过初期的降温后气温降水量走势已与现代区别不大。这与吴文祥等^[21]研究认为 4 kaB.P. 前后中国季风区气候环境发生转变,形成我国南涝北旱的气候格局,现代气候基本形成的观点一致。

我们认为该时段初期磁化率的急剧下降对应的是北大西洋冰芯记录的 4.2 kaB.P. 冷事件, Bond等^[15]称其为全新世时期最强的一次冷事件,是一次全球性的降温事件^[22-23],在中国,也有许多证据如敦德冰芯表明此时北半球发生了广域性的降温^[21]。这一次地急剧降温事件对我国影响巨大,在对我国古文化的研究中发现, 4 kaB.P. 前后是中国新石器文化发展过程中的一个里程碑式的质变点^[24-26],这一时期出现了文化断层,活跃在甘青地区的古文化由新石器时代的马家窑文化变成了铜石并用时代的齐家文化。在对甘青地区古文化变迁的具体研究中发现,会宁地区北部的腾格里沙漠在 4 kaB.P. 前后大大南侵,活动范围显著扩大,陈源剖面位于甘青地区范围内,其所指示的 4 kaB.P. 左右的磁化率突然下降、粒度峰值现象,不仅解释了 4.2 kaB.P. 冷事件,同时有力地佐证了前人关于 4 kaB.P. 前后该地区气候发生恶劣突变,导致中华文明进程加快的论断^[21,24]。

前文已经提到中国全新世气候变化可分为3个阶段,总体上经历了从新仙女木事件后逐渐变暖,达到一个较高值并持续一段时期后再逐渐降温的过程。会宁地区全新世时期磁化率、粒度曲线的变化与前人基本一致,并在此基础对区域性的气候变化也有明显的响应。

4 结论

(1) 根据磁化率与温度、降水量的四次回归方程计算出的会宁地区全新世年均温、年降水量数据分别存在 1.72°C 和 20.5 mm 的误差,实际使用时需在计算结果的基础上加上误差值作为实际值。

(2) 全新世时期会宁地区的气候变化可以分为5个阶段,分别为: $13.3-12.1\text{ kaB.P.}$ (晚更新世向全新世过渡时期)、 $12.1-11.3\text{ kaB.P.}$ (新仙女木事件时期)、 $11.3-8.9\text{ kaB.P.}$ (冷暖波动频繁时期)、 $8.9-4.6\text{ kaB.P.}$ (变暖时期)、 4.6 kaB.P. 至今(现

代气候时期)。

(3) 从整个全新世这一地质年代看,陇西会宁地区的陈源剖面能够很好地与贵州荔波董哥洞石笋氧同位素记录的全新世古气候变化进行对比,是很好地记录全新世古气候变化的良好载体。同时陈源剖面处于东亚季风边缘区,对气候变化反应敏感,其记录的陇西会宁地区全新世古气候的变化不仅能很好地揭示全新世全球气候变化,而且对东亚季风边缘区的区域气候变化也有良好的响应。

参考文献:

- [1] PAGES Scientific Steering Committee. Science Plan and Implementation Strategy[R]. Stockholm: IGBP Secretariat, 2009.
- [2] 侯光良,方修琦. 中国全新世气温变化特征[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1075-1080.
- [3] 赵国永,刘秀铭,吕滨,等. 全新世黄土记录的古气候演化及磁化率和粒度参数灵敏性探讨[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 777-784.
- [4] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [5] 孙建中,赵景波. 黄土高原第四纪[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [6] 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[J]. 中国科学: B 辑, 1992, 22(12): 1300-1308.
- [7] 徐双,李飞雪,刘爱利,等. 典型黄土地貌高程空间变异性研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 1-6.
- [8] 赵玉,穆兴民,蒋冲. 兰州地区 500 余年来旱涝变化规律分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 132-141.
- [9] 刘秀铭,夏敦胜,刘东生,等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 210-220.
- [10] 孙继敏,丁仲礼. 浅议中国黄土磁化率的物理意义[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(4): 88-93.
- [11] 吕厚远,韩家懋. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. 中国科学: B 辑, 1994, 24(12): 1290-1297.
- [12] 顾静,庞奖励. 关中地区全新世黄土磁化率与气候要素关系研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 100-104.
- [13] Kukla G, Heller F, Ming L X, et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility[J]. Geology, 1988, 16(9): 811-814.
- [14] 陈一萌,冯兆东,宫辉力. 对黄土磁化率,粒度年龄模型的检验[J]. 自然科学进展, 2007, 17(6): 764-769.
- [15] Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates[J]. science, 1997, 278(5341): 1257-1266.
- [16] 陆钧,陈木宏. 新生代主要全球气候事件研究进展[J]. 热带海洋学报, 2007, 25(6): 72-79.
- [17] 张美良,程海,林玉石,等. 贵州荔波 1.5 万年以来石笋高分辨率古气候环境记录[J]. 地球化学, 2004, 33(1): 65-74.
- [18] 熊尚发,丁仲礼. 末次冰期中国黄土古气候记录与高纬冰心及热带海洋记录对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(1): 71-76.
- [19] 陈发虎,吴薇,朱艳,等. 阿拉善高原中全新世干旱事件的湖泊记录研究[J]. 科学通报: 中文版, 2004, 49(1): 1-9.
- [20] 郭超,马玉贞,胡彩莉,等. 中国内陆区湖泊沉积所反映的全新世干湿变化[J]. 地理科学进展, 2014, 33(6): 786-798.
- [21] 吴文祥,刘东生. 4000aB. P. 前后东亚季风变迁与中原周围地区新石器文化的衰落[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 278-284.
- [22] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene[J]. Science, 2001, 294(5549): 2130-2136.
- [23] 王绍武. 4. 2kaBP 事件[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(3): 142-144.
- [24] 吴文祥,刘东生. 4000aB. P. 前后降温事件与中华文明的诞生[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 443-451.
- [25] 许宏. “连续”中的“断裂”: 关于中国文明与早期国家形成过程的思考[J]. 文物, 2001(2): 21-23.
- [26] 俞伟超. 良渚文化与龙山文化衰变的奥秘[J]. 文物天地, 1992(3): 9-11.