

doi:10.3799/dqkx.2013.048

中国黄土¹⁰Be记录中的古地磁场变化

杜雅娟^{1,2}, 周卫健^{1,2,3}, 鲜 锋^{1,2}, 孔祥辉^{1,2}, 康志海^{1,2}

1. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西西安 710075

2. 西安加速器质谱中心, 陕西西安 710061

3. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西西安 710049

摘要: 因受气候因素的强烈影响, 中国黄土¹⁰Be记录无法直接用于示踪地磁场变化, 需开展信号分离研究. 针对黄土¹⁰Be示踪古地磁场的复杂性和存在的关键问题, 结合分离黄土¹⁰Be浓度所包含的气候因素和地磁场因素的数理分析方法发展历史, 分析了各种方法的优缺点. 在原有方法的基础上, 引入主成分分析法对洛川和西峰2个黄土剖面的¹⁰Be记录进行主成分提取, 进一步剔除了残差中可能存在的少量气候因素、噪声等随机信号, 定量重建了130 ka以来的大气¹⁰Be产率, 与以往方法相比较取得了更优的结果. 将主成分分析应用于复杂地质信号的分离, 将有助于解决地质或其他信号分离的难题.

关键词: 黄土; ¹⁰Be; 古地磁; 主成分分析; 磁化率; 气候分析.

中图分类号: P595; P318.4

文章编号: 1000-2383(2013)03-0482-07

收稿日期: 2012-04-05

The Paleogeomagnetic Intensity Variation from ¹⁰Be Record in Chinese Loess

DU Ya-juan^{1,2}, ZHOU Wei-jian^{1,2,3}, XIAN Feng^{1,2}, KONG Xiang-hui^{1,2}, KANG Zhi-hai^{1,2}

1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Science, Xi'an 710075, China

2. Xi'an Accelerator Mass Spectrometry Center, Xi'an 710061, China

3. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: The ¹⁰Be records in Chinese loess can't be used for tracing the paleogeomagnetic change because of the significant climate effect, so we need to do research on signal separation. The difficulties are summarized in the reconstruction of the paleogeomagnetic intensity by using the ¹⁰Be records in Chinese loess in this paper. Here we present the advantages and shortcomings in our methods used to separate climate effects and geomagnetic modulation effects from ¹⁰Be concentration. Based on these methods, principal component analysis (PCA) is used to extract the common signal of ¹⁰Be from Luochuan and Xifeng loess sections to further clear up the effect of the climate change, noise and other random signals, which we interpret as variations of the global ¹⁰Be production rate of the past 130 ka. The PCA method presented here may be facilitated to solve the difficulties in geological or other signal separation.

Key words: loess; ¹⁰Be; paleogeomagnetic intensity; principal component analysis; magnetic susceptibility; climate change.

1 中国黄土¹⁰Be示踪古地磁场变化的困难

宇宙成因核素¹⁰Be是宇宙射线高能粒子与大气圈中的氮、氧或地表岩石中的石英(SiO₂)进行散裂反应的产物(Lal and Peters, 1967), 分别被定义为

大气成因和就地成因的¹⁰Be. 大气成因¹⁰Be一般比就地成因¹⁰Be的产率高出2~3个数量级(武振坤等, 2008), 能普遍赋存于各种沉积剖面中, 因而在环境示踪研究中得到了较多关注. 相对于其他核素, ¹⁰Be半衰期较长(1.5 Ma), 具有比较稳定的地球化学行为(沈承德等, 1989; 顾兆炎等, 2000), 能够高效准确地示踪较长时期的环境事件(Lao *et al.* ,

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41023006); 国家重点基础研究发展计划项目(No. 2010CB833405); 黄土与第四纪地质国家重点实验室自主部署项目(No. LQ0704).

作者简介: 杜雅娟(1982-), 女, 助理工程师, 主要从事地质数据分析. E-mail: duyj@ieecas.cn

1993; Yang *et al.*, 2003), 因此成为环境示踪研究中普遍应用的示踪计. 由于进入大气圈的宇宙射线粒子在地磁场的屏蔽作用下发生偏转, 这决定了¹⁰Be产率与地磁场强度变化之间具有反相关关系 (Masarik and Beer, 1999), 即地磁场强时屏蔽作用强, 进入地球对流层和平流层的宇宙射线粒子流低, ¹⁰Be产率也随之降低; 反之, 地磁场弱时屏蔽作用弱, ¹⁰Be产率随之升高. 因此, 从¹⁰Be产率信息可以有效重建古地磁场强度变化历史, 这点在全球冰心、海洋沉积物¹⁰Be记录的示踪研究中已经得到充分验证 (Frank *et al.*, 1997; Wagner *et al.*, 2000; Muscheler *et al.*, 2005).

中国黄土具有分布面积广、时间跨度大、沉积速率高和连续性好等优点, 系统地记录了第四纪乃至中新世以来亚洲内陆联系的气候变化历史、地磁极性转换以及地磁漂移信息, 是地球环境研究的理想对象 (赵国庆等, 2010). 然而由于风尘黄土中¹⁰Be沉积的复杂性, 黄土¹⁰Be即便是将其转化为通量以消除沉积速率变化的影响, 也不能像海洋和冰心中的¹⁰Be浓度曲线一样直接显示地磁场事件. 黄土中所测得的¹⁰Be记录 [¹⁰Be]_m 中既包含来自遥远的与地磁场变化无关的粉尘源区和随粉尘被强季风搬运并沉降 (尘降) 至黄土高原表面的¹⁰Be原子浓度 [¹⁰Be]_D, 又包含来自尘降地上空受地磁场调制新鲜产生的、被降水带到黄土高原表面的¹⁰Be原子浓度 [¹⁰Be]_p (详见表1符号定义), 而黄土高原季风降雨和粉尘尘降的极度不均匀性完全掩盖了¹⁰Be记录中地磁场变化的调制信息 (周卫健等, 2007). 因此, 黄土¹⁰Be示踪地磁场变化的研究必须给予信号分离的研究.

表1 文中符号定义
Table 1 Nomenclature

符号	说明
[¹⁰ Be] _m	黄土测量 ¹⁰ Be浓度
[¹⁰ Be] _D	¹⁰ Be浓度粉尘组分
[¹⁰ Be] _p	¹⁰ Be浓度降雨组分
SUS _m	黄土磁化率测量值
SUS _D	尘降磁化率估计值
SUS _p	成壤磁化率
Φ _D	粉尘通量
Pr	¹⁰ Be产率

2 数理分析方法研究历史

为解决这一关键问题, 周卫健等 (2007) 根据洛

川黄土剖面¹⁰Be浓度与磁化率的高度相似性 ($R=0.94, R=0.95$) (图1), 提出将磁化率作为黄土¹⁰Be浓度中受气候因素 (降水因素 P 和降尘 Φ_D) 影响部分的代用指标, 从而分离出受地磁场调制和气候变化影响的¹⁰Be信号的创新思路, 并先后探索了4种实现这种分离的近似方法: LGM法、恒定值法、平均值概念以及气候修正因子法 (鲜锋, 2007; 周卫健等, 2007, 2010; 赵国庆等, 2010).

2.1 不同方法的优缺点分析

130 ka以来黄土¹⁰Be浓度和磁化率 SUS_m (气候代用指标) 的相关系数很高, 说明¹⁰Be浓度中的气候因素影响占绝大部分, 因此上述4种方法可以将¹⁰Be浓度 (或¹⁰Be浓度降雨组分)、磁化率 SUS_m (或成壤磁化率) 以及地磁场强度的二元线性回归简化为¹⁰Be浓度 (或¹⁰Be浓度降雨组分) 和磁化率 SUS_m (或成壤磁化率) 之间的一元线性回归. 但是在具体的计算分析过程中, 以上方法各有优缺点:

(1) LGM方法: 假设在末次冰期极盛期 (LGM) 降水极少, ¹⁰Be主要来源于尘降, 在黄土磁化率和粉尘通量的一元回归中将成壤磁化率 SUS_p 近似视为0. 事实上, 即使在末次冰期盛期最干冷的时段, 降雨绝不可能绝对为0. 因此在计算过程中会放大尘降磁化率 SUS_D 和尘降¹⁰Be浓度, 导致在计算 SUS_p 和¹⁰Be降雨组分残差时出现较大的负值. 但因为之后会进行归一化计算, 所以并不会影响到最后的结果. 另一方面, 用LGM时段得到的回归方程运用到130 ka时段时, 会带来拓展区间的误差.

(2) 恒定值法: 这种方法通过剩磁矫顽力与磁化率的对应关系 (Evans and Heller, 1994, 2001) 确定尘降磁化率 SUS_D 恒定为 $25 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 从而确定尘降 [¹⁰Be]_D 浓度恒定为 $136.4 \times 10^6 \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1}$. 事实上, 即使在130 ka以来它们的值也是变化的, 只是 SUS_D 和 [¹⁰Be]_D 在该时间段的小幅波动已经不足以掩盖地磁场信号. 因此该方法从计算上更易理解.

(3) 平均值概念: 将¹⁰Be浓度作为一个整体和气候代用指标磁化率 SUS_m 进行回归, 从计算过程来讲相对简便, 但是回归直线应对应平均地磁场条件, 这一点难以从数学角度给予论证.

(4) 气候校正因子法: 该方法不计算残差, 而是尝试利用比例校正将原始的¹⁰Be浓度校正到同一气候条件下, 以达到剔除气候因素的影响. 方法中虽不用涉及¹⁰Be尘降组分如何确定分离, 但同平均值概念一样, 气候校正因子的定义难以从数学角度给予

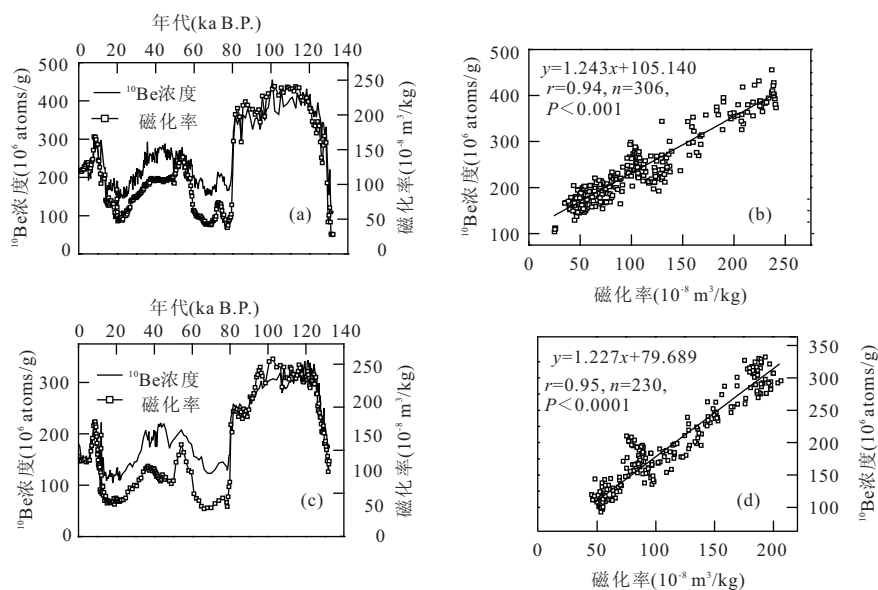


图 1 130 ka 以来洛川(a,b)和西峰(c,d)剖面 ^{10}Be 浓度和黄土磁化率高度相似

Fig. 1 High similarity between ^{10}Be concentration and magnetic susceptibility from Luochuan and Xifeng sections in the past 130 ka

a. 洛川剖面黄土磁化率及 ^{10}Be 浓度; b. 洛川剖面 ^{10}Be 浓度与磁化率高度线性相关; c. 西峰剖面黄土磁化率及 ^{10}Be 浓度; d. 西峰剖面 ^{10}Be 浓度与磁化率高度线性相关

论证.

2.2 不同方法的结果分析

4种方法重建的 ^{10}Be 产率曲线如图2所示,其清晰地表明,除了气候修正因子法重建的产率幅度较其他方法有所差异,几种方法的结果几乎一致,任意2条曲线的相关系数均在0.9以上.

同时这也表明,在黄土 ^{10}Be 浓度和磁化率高度相关关系下,虽然不同方法的前提有差异,但基于线性回归——残差的数理分析方法结果却是异曲同工的.综上所述,目前所发展的数理分析方法均基于线性回归模型建立,从结果的角度均实现了 ^{10}Be 示踪古地磁场变化的目的.在重建结果几乎一致的情况下,恒定值法更易于理解.

3 黄土 ^{10}Be 记录的主成分分析法

值得指出的是,由于笔者拥有2个黄土剖面的 ^{10}Be 数据,相当于同一变量的2种指标,那么是否可以应用主成分分析的方法,通过提取2个剖面的不同主分量来实现信号的分离呢?基于此思路笔者进行了如下尝试.

3.1 主成分分析的原理

主成分分析是一种降维或把多个指标化为少数几个综合指标的一种统计分析方法(周利兵等,

2010).综合后的新指标成为原来指标的主成分或主分量.具体步骤为:(1)由样本数据阵求出样本协方差阵 S ;(2)求出 S 的按大小顺序排列的特征根 P_i ($i=1, 2, \dots, m$)及其贡献率和累积贡献率;(3)求出样本协方差阵对于特征根 P_i 的正规化特征向量 q_i ($i=1, 2, \dots, m$);(4)求出累积贡献率达到85%以上的前 K 个主成分;(5)对主成分按实际意义进行分析与解释(刘多森和曾志远,1987;裴鑫德,1991;张佳华等,1997).

根据前人的数理分析方法研究历史,中国黄土 ^{10}Be 记录可视为受气候因素(降水和降尘)以及地磁场调制2个部分.如果对洛川和西峰2个剖面的黄土 ^{10}Be 数据进行主成分分析,可以得到2个主分量的时间序列,而这2个时间序列有可能分别代表了气候因素和地磁场因素.因此,运用主成分分析的方法有可能实现 ^{10}Be 信号的分离(Yu *et al.*, 2009; Christl *et al.*, 2010).

3.2 结果与讨论

由于主成分分析的前提条件是标准化数据,因此笔者将洛川和西峰的数据首先插值处理成间隔为1 ka的分辨率,并同时标准化得到2个输入序列,然后通过主成分分析得到2个按方差贡献排序的主成分PC1和PC2,最后将其投影在时间轴上,则分别对应时间序列第1主成份(EOF1)和第2主

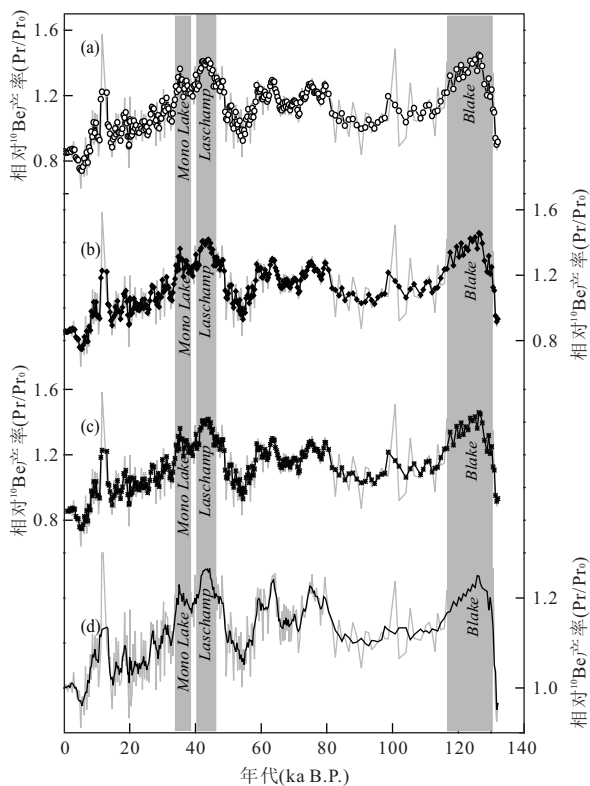


图 2 130 ka 以来洛川黄土¹⁰Be 记录的古地磁场漂移事件序列对比

Fig. 2 Comparison of sequence about the past 130 ka reconstructed paleogeomagnetic field from loess ¹⁰Be record of Luochuan

a. LGM 法重建相对产率结果; b. 恒定值法重建相对产率结果; c. 平均值法重建相对产率结果; d. 气候修正因子法重建相对产率结果

成份(EOF2). 具体分析中主要采用以下 2 种方案.

方案 A: 对 2 个剖面的¹⁰Be 记录直接运用主成分分析. 主成分 1 的方差贡献为 97.72%, 主成分 2 的方差贡献为 2.28%, 它们对应的时间序列分别为 EOF1、EOF2(图 3).

从图 3 可以看出 EOF1 和黄土磁化率曲线非常相似并且方差贡献非常大, 也许可以代表¹⁰Be 中包含的气候因素, 但从 EOF2 序列来看并未能显示出地磁场事件且方差贡献很小, 可能仅仅代表了误差量或噪声等随机信号, 因此方案 A 不成功. 这是由于 2 个输入的主成分分析只能得到 2 个主成分, 而需要分离的变量是地磁场调制的部分, 方差贡献较之气候因素组分很小, 因此会淹没在其他随机信号中, 无法实现分离及解释其对应的实际物理意义. 由此笔者考虑主成分分析作为一种纯数学分解分离信号时, 需取方差贡献大的变量来研究.

方案 B: 剔除¹⁰Be 记录中的气候因素再进行主成分分析. 中国黄土¹⁰Be 记录之所以难以示踪古地

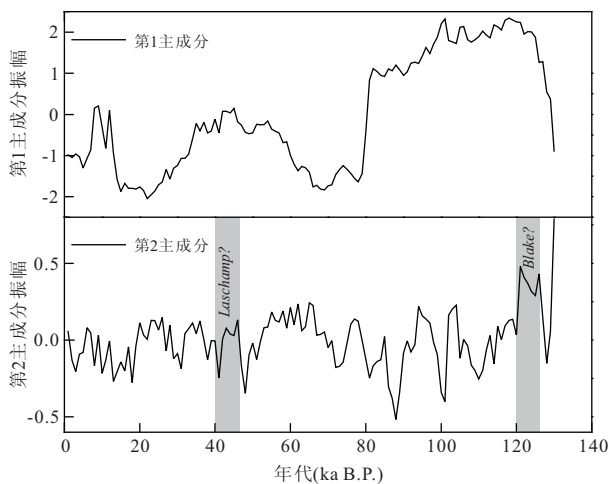


图 3 方案 A 主成分分析第 1、2 主成分对应的时间序列

Fig. 3 Time series of the 1st, 2nd principal component of method A

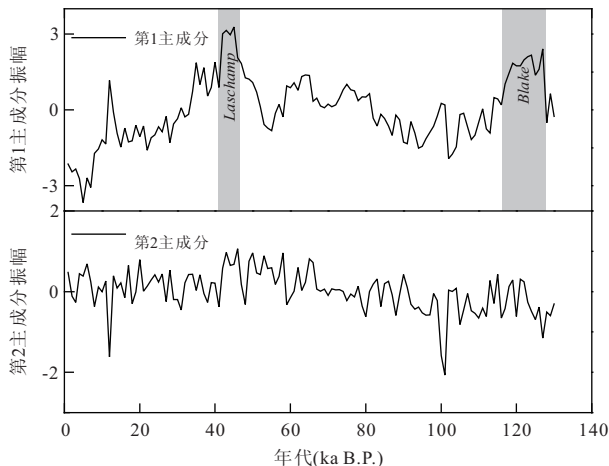


图 4 方案 B 主成分分析第 1、2 主成分对应的时间序列

Fig. 4 Time series of the 1st, 2nd principal component of method B

磁场记录, 前人的研究认为主要是由于降雨和粉尘尘降的复杂气候因素掩盖了地磁场调制信号, 而这种强物理机制可能导致主成分分析仅能分离出方差贡献很大的气候指标, 而无法获得方差贡献小的地磁场指标, 这一点从方案 A 的结果也可以得到证实. 因此在方案 B 中, 笔者考虑首先仍利用¹⁰Be 记录和黄土磁化率(气候代用指标)的高度相似性进行线性回归, 那么残差中将可能包含绝大部分的地磁场因素和很小部分的气候因素及其他随机因素, 即地磁场因素将占最大的方差贡献. 在该前提下, 通过主成分分析方法, 提取出方差贡献最大的第 1 主成分对应的时间序列, 即可作为包含了地磁场调制信号的黄土¹⁰Be 记录. 经计算, 主成分 1 的方差贡献为

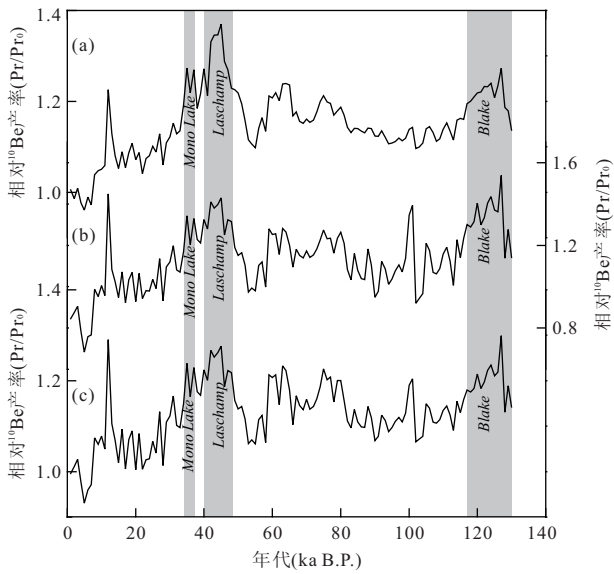


图 5 主成分分析、恒定值及气候修正因子重建 ^{10}Be 产率结果对比

Fig. 5 Comparison of sequence about the past 130 ka reconstructed production rate from loess ^{10}Be record by using PCA, uniform distribution method and MVC-scaling method

a. 主成分分析黄土 ^{10}Be 相对产率; b. 恒定值法黄土 ^{10}Be 相对产率;
c. 气候修正因子法黄土 ^{10}Be 相对产率

86.84%，主成分 2 的方差贡献为 13.16%，它们对应的时间序列分别为 EOF1、EOF2 如图 4 所示。

从图 4 可以看出，EOF1 可以反映出地磁场调制作用下的 ^{10}Be 记录，例如 41 ka 及 120 ka 附近的峰值分别对应 Laschamp 和 Blake 事件。而 EOF2 对应的方差贡献小，其时间序列可能和残余气候的因素、误差量或者噪声等随机变量相关。因此，方案 B 可行。笔者选取 SINT-2000 地磁场曲线作为参考值，对 EOF1 序列进行归一化校正获得大气 ^{10}Be 产率曲线，其结果和恒定值及气候修正因子法对比如图 5。相比恒定值法和气候修正因子法，主成分分析得到的 Laschamp 和 Blake 事件的 ^{10}Be 产率峰值更为明显，整体曲线效果更好，这可能和主成分分析再次剔除残余气候因素及随机信号有关。用其重建的地磁场曲线成功地示踪了 Laschamp、Mono Lake 和 Blake 3 个全球性的古地磁场漂移事件，可与全球典型地磁场强度曲线 (Valet *et al.*, 2005; Yamazaki and Kanamatsu, 2007) 进行良好的对比 (图 6)。需要指出的是，文中最后采用的主成分分析是对去除气候因素的残差序列进行的。最后得到的主成分是 2 个黄土剖面 ^{10}Be 地磁场调制的公共部分，相当于 2 个黄土剖面结果的集成。

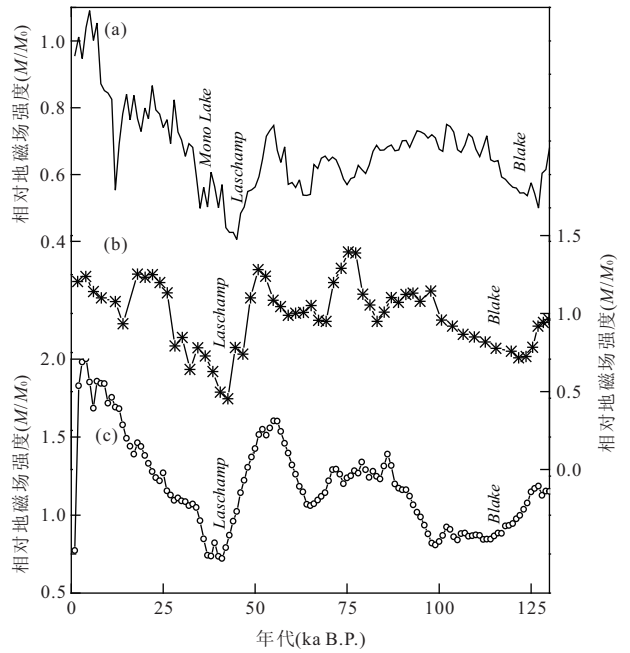


图 6 130 ka 以来洛川和西峰黄土 ^{10}Be 重建的地磁场强度变化序列与全球不同区域记录的综合对比

Fig. 6 Comparison of sequence about the past 130 ka reconstructed paleogeomagnetic intensity from loess ^{10}Be record of Luochuan and Xifeng in China and record of global area

a. 主成分分析黄土 ^{10}Be 重建结果; b. 北太平洋海洋沉积物地磁场曲线; c. SINT-2000 地磁场曲线

4 结论

自数理统计方法被引入古气候研究以来，运用多种数学方法来定量恢复古环境已经成为古环境研究的一个发展趋势 (潘安定等, 2008)。但由于气候变化机制的复杂性，对于包含多种复杂气候因素的古气候记录指标，定量重建古环境变化历史存在一定难度和局限。中国黄土 ^{10}Be 示踪古地磁场变化的数理分析方法均基于线性回归的概念，4 种方法都成功地解决了示踪古地磁漂移事件和重建全球古地磁场相对强度变化史的科学难题。本文在原有方法的基础上，尝试应用主成分分析的方法进行古地磁场信号的提取，得到以下几点认识：

(1) 用 ^{10}Be 信号示踪古地磁场变化的几种方法，虽然都利用了 ^{10}Be 浓度和气候代用指标的高度相关性进行线性回归分析，可能并不能完全剔除 ^{10}Be 信号中的气候因素，是一种数学近似，但是绝大部分气候因素的去，已经保证了计算结果的有效性。

(2) 在重建结果近乎相同的情况下，恒定值法更易于理解。但对于更长时间尺度，由于粉尘通量的变

化以及尘降磁化率的不确定性,该方法并不一定适用;平均值概念涉及到回归直线应对应平均地磁场条件,其严格的数学论证暂无法实现;气候修正因子法试图通过气候校正来进一步剔除残差中的气候因素,但其校正因子的定义亦较难理解。

(3)由于¹⁰Be记录中强气候因素的主导,如果直接应用主成分分析则无法甄别出地磁场信号。但在剔除大部分气候因素的前提下,主成分分析就可以成功获得地磁场调制的大气¹⁰Be产率。这说明,在利用主成分分析提取代表某种指标的信号时,该指标应占有绝对大的方差贡献率,否则就会淹没于误差量、噪声等随机变量中,无法解释其物理意义。文中主成分分析中的A、B方案就恰恰说明了该问题。

(4)将主成分分析引入之后,无需考虑回归直线是否对应于平均地磁场条件,只需关注残差可能包含的地磁场信号、少量的气候因素及其他随机信号。通过提取2个黄土剖面中方差贡献较大的共有信号,实现了大气¹⁰Be产率的重建。相比之前的其他方法,改进后的曲线趋势更好,方法本身的原理也更易于理解。

(5)相比以前取2个剖面各自重建的¹⁰Be产率取平均进行合成的方法,主成分分析直接提取出两者的共同部分,在反映全球古地磁场变化一致性方面似乎更有说服力。主成分分析目前在多变量系统的降维中应用广泛,本文将其用于复杂地质信号的分离,相信对于类似研究应是一种很好的思路。

References

- Christl, M., Lippold, J., Steinhilber, F., et al., 2010. Reconstruction of Global ¹⁰Be Production over the Past 250 ka from Highly Accumulating Atlantic Drift Sediments. *Quaternary Science Reviews*, 29(19): 2663–2672. doi: 10.1016/j.quascirev.2010.06.017
- Evans, M. E., Heller, F., 1994. Magnetic Enhancement and Paleoclimate: Study of a Loess/Paleosol Couplet across the Loess Plateau of China. *Geophysical Journal International*, 117(1): 257–264. doi: 10.1111/j.1365-246X.1994.tb03316.x
- Evans, M. E., Heller, F., 2001. Magnetism of Loess/Paleosol Sequences: Recent Developments. *Earth-Science Reviews*, 54(1–3): 129–144. doi: 10.1016/S0012-8252(01)00044-7
- Frank, M., Schwarz, B., Baumann, S., et al., 1997. A 200 kyr Record of Cosmogenic Radionuclide Production Rate and Geomagnetic Field Intensity from ¹⁰Be in Globally Stacked Deep-Sea Sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 149(1–4): 121–129. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00070-8
- Gu, Z. Y., Lal, D., Guo, Z. T., et al., 2000. Geochemistry of Cosmogenic ¹⁰Be in Loess-Paleosol Sequences and Red Clay in the Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 20(5): 409–422 (in Chinese with English abstract).
- Lal, D., Peters, B., 1967. Cosmic Ray Produced Radioactivity on the Earth. In: Fluegge, S., Sitte, K., eds., *Handbuch der Physik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 551–612.
- Lao, Y., Anderson, R. F., Broecker, W. S., et al., 1993. Particulate Fluxes of ²³⁰Th, ²³¹Pa, and ¹⁰Be in the North-eastern Pacific Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(1): 205–217. doi: 10.1016/0016-7037(93)90479-G
- Liu, D. S., Zeng, Z. Y., 1987. *Mathematics Methods and Modeling of Soil and Environmental Research*. Agricultural Press, Beijing, 115–120 (in Chinese).
- Masarik, J., Beer, J., 1999. Simulation of Particle Fluxes and Cosmogenic Nuclide Production in the Earth's Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 104(D10): 12099–12111. doi: 10.1029/1998JD200091
- Muscheler, R., Beer, J., Kubik, P. W., et al., 2005. Geomagnetic Field Intensity during the Last 60 000 Years Based on ¹⁰Be and ³⁶Cl from the Summit Ice Cores and ¹⁴C. *Quaternary Science Reviews*, 24(16–17): 1849–1860. doi: 10.1016/j.quascirev.2005.01.012
- Pan, A. D., Chen, B. S., Liu, H. P., et al., 2008. Numerical Techniques of Spore-Pollen Data Analysis on Paleoclimate Reconstruction. *Tropical Geography*, 28(6): 493–497 (in Chinese with English abstract).
- Pei, X. D., 1991. *Multivariate Statistical Analysis and Application*. Beijing Agricultural University Press, Beijing, 196–203 (in Chinese).
- Shen, C. D., Liu, D. S., Beer, J., et al., 1989. ¹⁰Be and the Deposits and Evolution of Loess. *Science in China (Series B)*, 7: 744–751 (in Chinese).
- Valet, J. P., Meynadier, L., Guyodo, Y., 2005. Geomagnetic Dipole Strength and Reversal Rate over the Past Two Million Years. *Nature*, 435(7043): 802–805. doi: 10.1038/nature03674
- Wagner, G., Masarik, J., Beer, J., et al., 2000. Reconstruction of the Geomagnetic Field between 20 and 60 kyr BP from Cosmogenic Radionuclides in the GRIP Ice Core. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 172(1–4): 597–604. doi: 10.1016/S0168-

583X(00)00285—8

- Wu, Z. K., Zhou, W. J., Liu, M., et al., 2008. BeO Preparation and AMS Measurement Result for Loess Samples. *Nuclear Techniques*, 31(6): 427—432 (in Chinese).
- Xian, F., 2007. The Study of the Data Analysis for the Past 80 ka Paleogeomagnetic Field Intensity Tracing and Paleoprecipitation Reconstruction from ^{10}Be in Loess of China (Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. L., Kusakabe, M., Southon, J. R., 2003. ^{10}Be Profiles in the East China Sea and the Okinawa Trough. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(2): 339—351. doi: 10.116/S0967-0645(02)00458-7
- Yamazaki, T., Kanamatsu, T., 2007. A Relative Paleointensity Record of the Geomagnetic Field since 1.6 Ma from the North Pacific. *Earth, Planets, and Space*, 59(7): 785—794.
- Yu, S. Y., Ricketts, R. D., Colman, S. M., 2009. Determining the Spatial and Temporal Patterns of Climate Changes in China's Western Interior during the Last 15 ka from Lacustrine Oxygen Isotope Records. *Journal of Quaternary Science*, 24(3): 237—247. doi: 10.1002/jqs.1229
- Zhang, J. H., Kong, Z. C., Du, N. Q., 1997. Reanalysis of Principal Component Analysis to Resume Past Vegetation and Environment-Taking Fenzhuang Profile in Beijing as an Example. *Scientia Geographica Sinica*, 17(4): 316—322.
- Zhao, G. Q., Zhou W. J., Wu Z. K., et al., 2010. Progress of Tracing Paleogeomagnetic Field from Cosmogenic Nuclide ^{10}Be in Loess of China. *Advances in Earth Science*, 25(9): 927—933 (in Chinese).
- Zhou, W. J., Chen M. B., Xian, F., et al., 2007. The Mean Value Concept in Mono-Linear Regression of Multi-Variables and Its Application to Trace Studies in Geosciences. *Science in China (Series D)*, 50(12): 1828—1834. doi:10.1007/s11430-007-0123-8
- Zhou, W. J., Kong, X. H., Xian, F., et al., 2010. Preliminary Study on the Reconstruction of the Paleogeomagnetic Intensities by ^{10}Be in Chinese Loess. *Journal of Earth Environment*, 1(1): 20—27 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. B., Jiang, Z. Q., Wu, Q. X., 2010. Principal Component Analysis and Cluster Analysis of Trace Elements in Plant Nitraria Leaf from Qinghai Region. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38(13): 6649—6650, 6652 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 顾兆炎, Lal, D., 郭正堂, 等, 2000. 黄土高原黄土和红粘土 ^{10}Be 地球化学特征. 第四纪研究, 20(5): 409—422.
- 刘多森, 曾志远, 1987. 土壤和环境研究中的数学方法与建模. 北京: 农业出版社, 115—120.
- 潘安定, 陈碧姝, 刘会平, 等, 2008. 孢粉学定量重建古气候方法探讨. 热带地理, 28(6): 493—497.
- 裴鑫德, 1991. 多元统计分析及其应用. 北京: 北京农业大学出版社, 196—203.
- 沈承德, 刘东生, Beer, J., 等, 1989. ^{10}Be 与黄土的堆积演化. 中国科学(B辑), 7: 744—751.
- 武振坤, 周卫健, 刘敏, 等, 2008. 黄土样品的 BeO 制备及 AMS 测量. 核技术, 31(6): 427—432.
- 鲜锋, 2007. 运用黄土 ^{10}Be 记录重建最近 80 ka 古地磁场强度和季风降水的数理方法(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 张佳华, 孔昭宸, 杜乃秋, 1997. 主成分分析对恢复过去植被和环境作用的再分析: 以北京坟庄剖面为例. 地理科学, 17(4): 316—322.
- 赵国庆, 周卫健, 武振坤, 等, 2010. 黄土中宇宙成因核素 ^{10}Be 示踪古地磁场变化研究进展. 地球科学进展, 25(9): 927—933.
- 周卫健, 陈茂柏, 鲜锋, 等, 2007. 多变量线性回归的平均值概念及其在地学研究中的应用. 中国科学(D辑), 37(10): 1392—1399.
- 周卫健, 孔祥辉, 鲜锋, 等, 2010. 中国黄土 ^{10}Be 重建古地磁场变化史的初步研究. 地球环境学报, 1(1): 20—27.
- 周利兵, 姜紫勤, 吴启勋, 2010. 青海地区白刺叶中微量元素的主成分分析与聚类分析. 安徽农业科学, 38(13): 6649—6650, 6652.