图2 欧亚、北美、太平洋和菲律宾
板块在这里交汇

图3 日本海东缘的地震带

致谢 本文得到国家攀登项目“现代地壳运动与地球动力学研究”(编号: 970231003)和国家重点基础研究发展规划“大陆强震机理和预测”(编号: 95-13-03-02)资助项目。

参 考 文 献

- 1 NASA/GSFC, Crustal Dynamics Project Preprint 1985, No. 51
- 2 朱文耀, 程宗颐, 熊永清, 等. 利用 GPS 技术监测中国大陆地壳运动的初步结果. 中国科学, D 辑, 1997, 27(5): 385~ 389
- 3 朱文耀, 程宗颐, 姜国俊. 利用 GPS 技术监测中国大陆地壳运动的初步结果. 天文学进展, 1997, 15(4): 373~ 376
- 4 日本建设省国土地理院. 地震とその予知. 平成9年3月

(1998-08-08 收稿, 1999-03-08 收修稿稿)

Upper Jaramillo 极性转换与短极性事件期间 地球磁场变化特征

郭 斌 朱日祥 丁仲礼^④ 孙继敏^④

(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101; ④中国科学院地质研究所, 北京 100029)

摘要 对黄土高原靖边郭家梁剖面黄土层 L10 和 L11 以及古土壤层 S10 进行了详细的岩石磁学和古地磁学研究, 结果表明: () Jaramillo 极性亚时内存在一持续时间约为 8.5ka 的短极性事件; () 短极性事件和 Upper Jaramillo (UJ) 极性转换期间虚地磁极(VGP)的移动轨迹存在一定的差异, 短极性事件从正极性到负极性($N \rightarrow R$)转换期间 VGP 沿美洲大陆移动, 从负极性到正极性($R \rightarrow N$)转换期间 VGP 移动具环太平洋的特点, 而 UJ 期间 VGP 集中于澳大利亚西北。

关键词 Upper Jaramillo 短极性事件 黄土 靖边

对极性转换和短极性事件期间地球磁场变化特征的研究, 是探索地球磁场倒转的主要途

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-14-1540>

径之一. 尽管沉积岩记录的极性转换期间 VGP 主要沿美洲及其共轭经度带移动^[1], 但其是否真正反映了地球磁场的内在特征还存在一定的争议, 采样点的不均匀和地球磁场强度降低期间沉积过程, 对剩磁矢量的平滑作用可能是造成这一结果的 2 个主要原因^[2, 3]. 最近几年来采样点分布的改善支持优选经度带的结果^[4]. 此外, 火山岩记录的极性转换期间 VGP 也不存在经度优选性, 主要集中于澳大利亚和南美, 或者是在全球范围内随机分布^[5, 6]. 因此尽可能多地获得高质量的各种岩石记录的极性转换期间地球磁场的变化, 对探讨转换场的内在特征有着重要的意义. Jaramillo 正极性亚时内的短极性事件最先是由 Pillans 等人^[7]在研究新西兰 Wanganu 盆地海相沉积物的磁性地层时发现的, 但他们没有给出该极性事件确切的持续时间; 黄土高原渭南郭和兰州九州台剖面也记录了该极性事件^[8, 9], 且在兰州九州台剖面获得了 Jaramillo 极性亚时内短极性事件 $N \rightarrow R$ 极性转换过程较为详细的地球磁场变化特征^[10]. 然而由于获得记录的有限性, 还不能肯定该极性事件是否为一全球性的事件, 其持续时间和 $R \rightarrow N$ 极性转换过程也都需进一步研究以便得到详细的转换场记录, 为检验上述极性转换期间 VGP 经度优选性假设. 本文报道陕西靖边郭家梁黄土/古土壤序列 L10~L11 记录的 UJ 极性转换和短极性事件期间高分辨率地球磁场变化特征, 并对极性转换期间 VGP 的移动轨迹提出了一些新的看法.

1 地层与采样

靖边郭家梁剖面位于陕西省靖边县郭家梁, 张宗祜等人^[11]首次对靖边郭家梁剖面作了地层划分. 该剖面地层结构与洛川和渭南等剖面具有可对比性, 第四纪黄土/古土壤可划分为 37 个旋回, 厚度约 237m, 下覆红粘土厚度 23m. 剖面位于黄土高原北部边缘, 毗邻沙漠, 平均沉积速率高, 成壤作用较弱, 是研究极性转换期间地球磁场形态学较为理想的介质. 根据中国黄土/古土壤磁性地层研究结果^[12, 13]. 本次研究选择未经扰动的黄土/古土壤层从 L10 顶部开始至 L11 底部, 共 600cm 的厚度范围内连续采集大块定向 $30\text{cm} \times 8\text{cm} \times 8\text{cm}$ 的古地磁标本. 在室内将大块标本先加工成截面积为 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$, 垂直厚度为 30cm 的定向岩芯 3 套, 然后再加工成 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 的定向样品, 两套用于方向变化研究, 一套用于地球磁场相对古强度测定.

2 黄土/古土壤序列的岩石磁学

对古地磁样品所含磁性矿物种类、含量的分析是获得可靠古地磁数据的重要基础. 饱和等温剩磁(SIRM)是识别磁性矿物种类和粒度的重要参数, 在最大强度为 2.7T 的连续可变强磁场(H)下确定的靖边剖面 SIRM 获得曲线表明, 无论是古土壤还是黄土, 在磁场强度大约为 300~350mT 状态下获得的等温剩磁(IRM)已达到 SIRM 的 90% (图 1(a)), 黄土的 SIRM 的剩磁矫顽力(H_{rc}) 大约为 66mT (图 1(b)), 而古土壤的 H_{rc} 约为 40mT (图 1(b)). 这表明黄土高原北部地区黄土/古土壤的主要载磁矿物仍为磁铁矿, 与黄土高原西部和南部地区黄土/古土壤序列的主要载磁矿物^[14, 15]基本一致, 二者矫顽力的差别说明黄土中高矫顽力矿物相对含量可能要多于古土壤.

识别磁性矿物种类的三轴饱和磁化实验表明, 靖边剖面黄土层 L10 和 L11 以及古土壤层 S10 的低矫顽力分量解阻温度为 580℃左右, 磁性载体主要为磁铁矿; 中矫顽力分量解阻温度谱相对复杂; 高矫顽力分量的解阻温度为 670℃, 即磁性载体为赤铁矿. 这说明黄土高原北部地区黄土/古土壤序列的载磁矿物仍为磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿(图 2).

图1 SIRM 获得曲线(a)和 IRM 矫顽力谱曲线(b)

●, ★代表古土壤样品, +, ×, ▲代表黄土样品

图2 三轴饱和和等温退磁曲线

■, ▲, ●分别代表高、中、低矫顽力分量

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-14-1540>

3 古地磁结果

古地磁测量是在中国科学院地球物理研究所古地磁实验室完成的. 热退磁仪为英国 Magnetic Measurement 公司生产的 MMTD600 型全自动热退磁仪. 剩磁测量是用 2G 超导岩石磁力仪完成的, 整个实验在零磁空间中进行. 对每一套样品均首先测量了低场磁化率和天然剩磁(NRM). 值得注意的是, 天然剩磁结果并不完全与现今地球磁场方向一致, 部分样品仍为其沉积时地球磁场的方向, 这表明在黄土高原北部地区成壤作用相对较弱. 热退磁温度从130~685℃共13步. 当加热温度高于300℃时, 次生粘滞剩磁可被完全清除并分离出稳定的单一剩磁组分, 在退磁投影图上趋于原点, 代表了样品原生剩磁的矢量方向(图3), 特征剩磁是由至少5个测试数据点, 利用最小二乘法确定的.

图3 部分样品剩磁矢量正交投影图与逐步热退磁曲线

●和○别代表剩磁方向在水平面和垂直面上的投影

图4是特征剩磁(磁偏角(DEC)、磁倾角(INC)、VGP纬度(PLAT)、相对强度(RI))和磁化率(SUS)随深度的变化曲线. 从图中可以看到, 靖边黄土剖面记录的地球磁场变化可分为4个极性稳定阶段和3个极性转换阶段. 在第1阶段, 对应于600~415cm, VGP纬度表现为稳定的正极性时; 在对应于415~385cm之间的第2阶段, VGP纬度在几次快速的变化后由正变为负; 从385~335cm, VGP纬度保持较稳定的负极性; 在对应于335~215cm的第4阶段, VGP纬度变

化频繁,表现为一极性过渡期;其后在 215~85cm 之间, VGP 纬度变为相对稳定的正极性;随后在 85~20cm 之间, VGP 纬度逐渐过渡为负极性;最后,在第 7 阶段,从 20cm 到采样顶面, VGP 纬度表现为稳定的负极性. 整个极性转换的深度对应于 415~20cm 之间,总厚度 395cm.

图4 特征剩磁随深度变化曲线

4 黄土/古土壤记录快速地磁变化的能力

研究极性转换期间地球磁场变化特征的一个前提是:所测定的样品可记录当时地球磁场的信息. 海相沉积物具有连续性的特点,但沉积速率相对较低,且 Lock-in 效应和 Smoothing 效应较强;火山岩剩余磁性不存在 Lock-in 和 Smoothing 效应,但不具备连续性. 中国黄土/古土壤序列是基本连续的^[16],其输送与沉积速率主要由冬季风控制,这种气候模式在同一黄土或古土壤沉积期间基本保持不变^[17],沉积剩磁机理相对简单,因此有可能是研究极性转换期间地球磁场变化的良好介质. 然而对于黄土/古土壤 Lock-in 效应的深度和 Smoothing 效应的时间尺度目前还存在着一定的争议. 地球磁场长期变化具有百年量级的时间尺度,因此,为了研究黄土/古土壤序列记录极性转换期间地球磁场快速变化的能力,我们首先研究了黄土/古土壤序列能否记录地球磁场长期变化. 全球近 5Ma 以来熔岩流的古地磁结果表明,地球磁场 VGP 散角随纬度的增高而变大,这反映了地球磁场固有的特征^[18]. 因此从某一给定地点沉积物中获得的古地磁数据,只有在其 VGP 散角超过或落在理论 VGP 散角 95% 置信区间内时,所得古地磁数据才可能是可靠的,反之,则可能受到了 Smoothing 效应或其他后期改造的影响^[19]. 本项研究表明,靖边剖面 L10 中 72 个样品对应的 VGP 散角为 23°, S10 中 46 个样品对应的 VGP 散角为 16.2°,均超过采样点 15.4°的理论 VGP 散角(表 1),表明在黄土高原北部边

缘,无论是黄土还是古土壤,均能记录百年量级的地球磁场变化.

表1 靖边剖面 L10, S10 的 VGP 散角结果(排除 VGP 纬度低于 50° 的样品)

地层单元	样品数	磁偏角/(°)	磁倾角/(°)	$\alpha_{95}/(^{\circ})$	k	方向角偏差/(°)
L10	72	1.4	49.8	4.5	15	20.9
S10	46	-2.9	54.4	4.3	25.1	19.2
地层单元	样品数	经度/(°)	纬度/(°)	$A_{95}/(^{\circ})$	k	VGP 散角/(°)
L10	72	277.6	83.2	4.9	12.8	23
S10	46	333.1	86.6	5.0	18.3	16.2

5 讨论与结论

5.1 短极性事件

对 Jaramillo 正极性亚时内是否存在一稳定的负极性事件,目前还存在一定的争议. 本次的研究结果表明,靖边黄土剖面在深度 385~ 335cm 记录的地磁事件不可能属于 UJ 极性转换,而很可能是 Jaramillo 极性亚时内的一次地磁漂移事件. 在此将从极性转换的持续时间、地层对比和地球磁场古强度记录等几个方面加以说明.

(1) 根据中国黄土/古土壤序列的时间标尺^[16],黄土层 L10 和古土壤层 S10 的沉积时间间隔分别为 23 和 17ka. 靖边黄土/古土壤序列黄土层 L10 和古土壤层 S10 的厚度分别为 3.05 和 1.1m(图 4(f)),据此可得 L10 和 S10 的平均沉积速率为 13.3 和 5.9cm/ka. 本次研究获得的极性转换过程开始于 S10 的中下部,结束于 L10 的顶部. 假定这一地磁变化全部为 UJ 极性转换的话,那么,由 L10 和 S10 的沉积速率可知,UJ 与方向变化相联系的持续时间是 28.3ka. 这一结果与目前从深海沉积物和火山岩以及中国黄土沉积物获得的结果存在很大的差异. 反之,如果将古土壤 S10 记录的对应于 415~ 215cm 的地球磁场负极性时确定为一个短极性事件的话,则 UJ 极性转换开始于 85cm 处,结束于 20cm 处,整个极性转换持续的时间约为 4.9ka,与目前已获得的 UJ 极性转换持续的时间基本一致^[20, 21, 4]. 在此情况下,对应于 385~ 335cm 的稳定负极性时的持续时间为 8.5ka,对应于 415~ 385cm 的短极性事件 $N \rightarrow R$ 转换的持续时间为 5.1ka,对应于 335~ 210cm 的短极性事件 $R \rightarrow N$ 转换的持续时间为 9.8ka.

(2) 中国黄土/古土壤序列的磁性地层研究表明,UJ 极性转换记录在黄土层 L10 内^[12, 13],靖边黄土/古土壤序列与黄土高原南部渭南,洛川等剖面具有可对比性. 因此认为本次研究所获得的对应于 85~ 20cm 的 $N \rightarrow R$ 极性转换为 UJ,而记录在 415~ 215cm 之间的地球磁场变化为一短极性事件,这一结果与迄今为止所报道的 Jaramillo 极性亚时内的短极性事件可以很好地对应^[7~ 10]. 黄土高原西北兰州黄土/古土壤序列记录的该极性事件 $N \rightarrow R$ 转换与方向变化相连续的时间为 4.4ka^[10],与本次研究获得的 5.1ka 持续时间的结果基本一致. 记录在渭南黄土/古土壤序列 S10 的极性漂移没有靖边和兰州剖面记录的结果详细,表现为地球磁场倾角发生倒转,偏角保持稳定,且仅记录在 S10 内^[9]. 而在靖边剖面,黄土层 L10 记录了完整的短极性事件 $R \rightarrow N$ 转换,这可能是由于黄土高原南北部地区气候变化局部差异、土壤化强弱以及沉积速率的差异造成的.

(3) 相对古强度的测定进一步证实了,对应于深度 415~ 215cm 的地球磁场负极性时为一个短极性事件. 选择磁化率和 ARM(300 °C) 进行相对强度的归一化校正. 结果表明两种方法获得的相对强度变化曲线完全一致,图 4 给出了经 ARM(300 °C) 归一化校正后的地球磁场强度

变化曲线. 在对应于深度 415~ 215cm 之间的整个短极性事件期间, 地球磁场强度明显降低, 短极性事件期间对应于深度 385~ 335cm 之间的稳定负极性时阶段, 地球磁场强度略有升高, 在短极性事件结束后, 地球磁场强度迅速升高, 这一结果与从火山岩记录中获得的短极性事件期间地球磁场强度的结果完全一致^[22].

5.2 UJ 极性转换期间 VGP 移动轨迹

图 5(a) 是对应于深度 85~ 20cm 的 UJ 极性转换期间 $N \rightarrow R$ 的 VGP 移动轨迹, VGP 首先在地理北极附近摆动, 然后在非洲大陆作数次摆动后到达地理南极, 从地理南极再次经非洲大陆返回地理北极, 其后快速移动到澳大利亚, 并集中在澳大利亚西北形成 VGP 簇. 从全球范围内分布的最近 10Ma 以来 5 个熔岩序列获得的转换场记录也显示了类似的特征, 即 VGPs 集中于澳大利亚和南美附近, 在极性转换期间可能存在一个亚稳定状态的倾斜的偶极子场^[5]. 这 2 个 VGPs 集中区对应于核幔边界产生的现今非偶极子场垂向分量相对增高的地区, 表明极性倒转与现代地磁场之间可能存在着一一定的相关性^[23].

图 5 短极性事件和 Upper Jaramillo 极性转换期间 VGP 移动路径

5.3 短极性事件 $N \rightarrow R$ 转换期间 VGP 移动轨迹

对应于深度 415~ 385cm 的短极性事件 $N \rightarrow R$ 极性转换期间, VGP 移动轨迹主要经过南美和非洲, 首先在地理北极附近摆动, 然后迅速通过赤道经南美到达地理南极, 在南美和南极间几次快速摆动后变为非洲与南极间的快速移动, VGP 然后再经非洲返回地理北极, 最后从地理北极经美洲移动到地理南极(图 5(b)). 由于过渡 VGP 比较少, 因此很难评价该极性转换期间 VGP 表现为经度优选性还是聚集成簇.

5.4 短极性事件 $R \rightarrow N$ 转换期间 VGP 移动轨迹

记录在深度 33~ 2155cm 之间的短极性事件 $R \rightarrow N$ 极性转换阶段, VGP 移动轨迹主要集中于环太平洋地区, 即过美洲、太平洋东海岸与太平洋西海岸和澳大利亚两个转换 VGP 优选经度带(图 5(c)), 这一结果可能与地震波在下地幔传播速度的异常区有关^[1]. 进一步证实了极性转换期间 VGP 环太平洋分布的特点, 与渭南黄土/古土壤序列记录的 B/M 和 UJ 极性转换期间 VGP 移动轨迹^[4]相一致.

上述同一剖面获得的短极性事件 $N \rightarrow R$ 和 $R \rightarrow N$ 极性转换以及 UJ 的 $N \rightarrow R$ 极性转换期间 VGP 移动路径存在一定的差异. 综合考虑靖边剖面记录的极性转换期间 VGP 移动轨迹, 我们认为, 在极性转换期间 VGP 移动轨迹不是一种简单的模型, 迄今为止所报道的 VGP 移动轨迹可能

仅反映了极性转换期间地球磁场变化的局部特征. 一个完整的极性转换可能包括了上述所有的变化特征,也可能是其中的某一种或某两种,极性转换期间偶极子场的衰减而导致非轴向偶极子场或非偶极子场强度的相对增加可能是形成上述结果的原因,这一点有待于进一步研究.

致谢 在野外工作期间得到了杨革联博士的帮助,潘永信和刘青松博士为本文提出了宝贵的建议,作者在此表示感谢. 本工作为国家自然科学基金(批准号:49454005)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Laj C, Mazaud A, Weeks R. Geomagnetic reversal paths. *Nature*, 1991, 351: 447
- 2 McFadden P L, Barton C E, Merrill R T. Do virtual geomagnetic pole follow preferred paths during geomagnetic reversals? *Nature*, 1993, 361: 342~ 344
- 3 Langereis C G, Van Hoof A A M, Rochette P. Longitudinal confinement of geomagnetic reversal paths as a possible sedimentary artefact. *Nature*, 1992, 358: 226~ 230
- 4 Zhu R X, Laj C, Mazaud A. The Matuyama-Brunhes and Upper Jaramillo transitions recorded in a loess section at Weinan, North central China. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 125: 143~ 158
- 5 Hoffman K A. Dipolar reversal states of the geomagnetic field and core-mantle dynamics. *Nature*, 1992, 359: 789~ 794
- 6 Prevot M, Camps P. Absence of preferred longitude sectors for poles from volcanic records of geomagnetic polarity reversal. *Nature*, 1993, 366: 53~ 56
- 7 Pillian B J, Roberts A P, Wilson G S, et al. Magnetostratigraphic, lithostratigraphic and tephrostratigraphic constraints on lower and middle Pleistocene sea-level changes, Wanganui Basin, New Zealand. *Earth planet Sci Lett*, 1994, 121: 81~ 98
- 8 Rolph T C. The Matuyama-Jaramillo R-N transition recorded in a loess section near Lanzhou, P R China. *J Geomag Geoelectr*, 1993, 45: 301~ 318
- 9 朱日祥, 吴汉宁, Laj C, 等. Upper Jaramillo 极性转换期间地球磁场变化特征. *地球物理学报*, 1995, 38: 25~ 33
- 10 McIntosh G, Rolph T C, Shaw J et al. A detailed recorded of normal-reversed polarity transition obtained from a thick loess sequence at Jiuzhoutai, near Lanzhou, China. *Geophys J Int*, 1996, 127: 651~ 664
- 11 张宗祜, 张之一, 王云生. 中国黄土, 北京: 地质出版社, 1989. 33
- 12 Heller F, Evans M E. Loess magnetism. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 211~ 244
- 13 朱日祥, 岳乐平, 白立新. 中国第四纪古地磁学研究进展. *第四纪研究*, 1995(2): 162~ 173
- 14 Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature*, 1982, 300: 431~ 433
- 15 Liu X M, Shaw J, Liu T S et al. Magnetic mineralogy of Chinese loess and its significance. *Geophys J Inter*, 1992, 108: 301~ 308
- 16 Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, et al. Towards an orbital time scale for Chinese Loess deposits. *Quarter Sci Rev*, 1994, 13: 39
- 17 An Z, Kukla S, Porter, S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of Central China during the last 13 000 years. *Quarter Res*, 1991, 36: 29~ 36
- 18 McFadden P L, Merrill R T, McElhinny M W, et al. Reversals of the earth's magnetic field and temporal variations of the dynamo families. *J Geophys Res*, 1991, 96: 3 923~ 3 933
- 19 朱日祥, 郭斌, 潘永信, 等. 甘肃灵台黄土剖面记录地球磁场长期变化的可靠性探析. *中国科学, D辑*, 1999(待发表)
- 20 Opdyke N D, Kent D V, Lowrie W. Details of magnetic polarity transition recorded in high deposition rate deep-sea core. *Earth Planet Sci Lett*, 1973, 20: 315~ 324
- 21 Clement B M, Kent D V. Geomagnetic polarity transitions recorded from five hydraulic piston core sites in the North Atlantic. *Initial Rep Deep Sea Drill Proj*, 1986, 94: 831~ 852
- 22 Prevot M, Mankinen E A, Coe R S. et al. The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition 2 Field intensity and discuss of reversal models. *J Geophys Res*, 1985, 90: 10417~ 10488
- 23 Gubbins D, Kelly P. Persistent patterns in the geomagnetic field during last 2.5 Ma. *Nature*, 1993, 365: 829~ 832

(1998-09-29 收稿, 1999-01-20 收修改稿)