

黄土高原东南部宋家店黄土剖面 L9 中地磁记录异常

汪道京^①, 王永成^②, 汉景泰^①, 端木刚^③, 单家增^①, 刘东生^①

① 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;

② 中国地质大学(北京)研究生院, 北京 100083;

③ 北京理工大学光电学院, 北京 100081

E-mail: djwang@mail.iggcas.ac.cn

2009-05-20 收稿, 2009-07-23 接受

国家自然科学基金资助项目(批准号: 40672114 和 40872112)

摘要 对黄土高原东南部三门峡地区宋家店黄土剖面 L8~S12 段详细的磁性地层学和岩石磁学研究表明: Matuyama/Brunhes (M/B)界线位于 L8 黄土层的底部, Jaramillo 极性亚时的顶、底界线分别位于 L10 的中部和 L12 的底部. 黄土和古土壤地层的磁组构保持了原生沉积组构的特点, 所记录的剩磁没有遭受到明显的后期扰动. 在 L9 黄土层中记录了 2 次地磁场异常, 认为由重磁化的可能性较小, 而磁极性漂移事件的解释更为合理. 推算它们的年龄分别与 Kamikatsura(0.886 Ma)和 Santa Rosa(0.922 Ma)地磁漂移事件接近, 相对古强度研究结果显示, 上述地磁漂移事件期间地球磁场强度减弱.

关键词

古地磁
极性事件
黄土
三门峡

地磁极性倒转是地球磁场最基本、最重要的特征之一, 研究极性转换期间地球磁场的时空变化特征有助于我们加深对地磁极性倒转机制及其演化历史的理解. 地磁漂移作为短极性事件, 它与地球外核地磁发电机的运行紧密相关^[1], 但由于可靠数据的匮乏, 其详细的发生机制仍有待进一步研究. 近 20 年来, 随着深海高分辨率地磁数据的大量获取, 人们开始意识到地磁漂移事件的频繁性和其具有的全球意义. 迄今为止, 海相沉积物中已多次发现 0.78~0.99 Ma 期间地球磁场曾发生短极性事件^[2~4], 在火山岩研究中情况也是如此, Doell 等人^[5]1966 年在研究新墨西哥州 Cerro Santa Rosa I dome 火山岩时, 首次发现了 Santa Rosa 正极性事件, 其后的一系列研究相继给出了 0.92~0.936 Ma 的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年数据^[6,7]. Maenaka^[8]1983 年在研究日本西南部 Osaka 组 Kamikatsura 凝灰岩时, 首次证实并命名了 Kamikatsura 正极性事件. 之后的众多研究者, 相继给出了在不同地区

获得的该事件 K-Ar 或 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年数据为 0.821~0.900 Ma^[9~12]. ODP 983/984 钻孔资料显示, Kamikatsura 和 Santa Rosa 事件分别对应海洋同位素阶段 MIS 21 及 MIS 25 顶部^[13~15].

中国黄土/古土壤序列是研究 2.5 Ma 以来古气候变化和地球磁场长期变化的良好介质^[16~25], 同时, 磁性地层的研究也有效确立了黄土/古土壤序列的年代框架. 尽管有学者对黄土和古土壤中是否存在显著的锁定(lock-in)和平滑(smoothing)效应, 以至对其中所记录的地球磁场信息的真实性和准确性有所质疑^[26,27], 但近来的研究表明, 部分层位黄土(如陕西灵台剖面 L1)的剩余磁性在锁定过程中受到的平滑作用不大, 并不存在显著 lock-in 效应, 能够以较精确的时间分辨率记录地球磁场的长期变化^[28,29]. 20 世纪 80~90 年代, 先后有多位学者, 在黄土高原的不同地区发现 L9 黄土层中存在厚度不一的正极性显示^[30~33], 但鉴于当时的认识和测试手段的限制, 以及

英文版见: Wang D J, Wang Y C, Han J T, et al. Geomagnetic anomalies recorded in L9 of the Songjiadian loess section in southeastern Chinese Loess Plateau. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-009-0565-9

同期火山岩和海洋地磁年龄数据的缺乏而没能进一步深入研究. 最近, Yang 等人^[34]在宝鸡黄土地层 L9 中发现 2 个短极性事件, 因其所获得的年龄数据分别与 Kamikatsura 和 Santa Rosa ⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年数据相近, 进而确认是这两个事件. 但是, Wang 等人^[35]对河南陕县 L9 黄土地层研究的结果却提出了另一种看法, 认为 L9 中的正极性显示是岩性所控制的重磁化现象而非地磁漂移事件的记录. 因此, 为了厘清 L9 黄土地层中到底记录了什么样的地球磁场信息而进行更深入的研究工作就显得十分必要.

本文通过对三门峡宋家店黄土剖面(34.7°N, 111.3°E)L8~S12 层段的土壤化程度、剩磁特征、沉积速率和磁组构的分析, 进一步探讨了 Matuyama 极性时末期 M/B~UJ/M 之间, 在 L9 黄土层中是否记录了 Kamikatsura 和 Santa Rosa 地磁漂移事件.

1 研究剖面与采样

宋家店黄土剖面位于黄土高原东南部河南省三门峡市, 紧邻黄河南岸的黄土台地, 黄土/古土壤序列出露较完整, 空间上基本呈水平展布, 剖面厚度约为 124 m, 其下的红黏土厚约 7 m, 红黏土不整合覆于一套砾石层之上. 该剖面 L9 层位堆积厚度大(达 11 m)、粉尘堆积速率高、粒度粗(细砂含量超过 10%)、风化程度低. 本次研究从 L8 顶部开始至 S12 底部共 25.9 m 厚, 在野外连续平行采集 2 套 8 cm 立方块状定向古地磁标本, 在室内加工成 2 cm×2 cm×2 cm 立方体定向样品(每一层面上保证 4 块样品), 用于岩石磁学研究 and 特征剩磁分析. 古地磁测量在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室完成.

2 黄土/古土壤系列的岩石磁学实验

对古地磁样品所含磁性矿物种类、含量的分析是判断所获古地磁数据可靠性的重要基础. 饱和等温剩磁(SIRM)是识别磁性矿物种类和粒度的重要参数, 实验中在最大强度为 2.7 T 的连续可变强磁场下确定的宋家店剖面样品的 SIRM 获得曲线表明, 无论是黄土或古土壤, 在磁场强度约为 300~350 mT 的状态下获得的 IRM 已达到 SIRM 的 90%(图 1), 这意味着低矫顽力的载磁矿物(磁铁矿或磁赤铁矿)为主要的磁性矿物. IRM 在 >350 mT 后的继续增加, 是由一些高矫顽力磁性矿物引起的, 部分样品直到使用最大场强(2.7 T)还没有达到饱和, 也指示了高矫顽力磁性矿

物(如赤铁矿或针铁矿)的存在.

三轴等温剩磁热退磁结果显示(图 2): 低矫顽力组分(<0.15 T)解阻温度为 580℃, 符合磁铁矿特征, 高矫顽力组分(0.4~2.7 T)最终解阻温度为 680℃, 表明赤铁矿和针铁矿的存在, 中矫顽力组分(0.15~0.4 T)曲线在 300℃左右出现拐点, 可能指示了磁赤铁矿的存在, 以上信息说明 L9 层中不同深度样品的载磁矿物并没有本质的差别, 磁性矿物应以磁铁矿为主, 并可能含有一定数量的磁赤铁矿、赤铁矿和针铁矿, 但鉴于该剖面 L9 层厚度巨大、可能有近源物质的加入, 且热退磁结果也显示有次生针铁矿的存在, 故认为宋家店剖面 L9 的岩石磁学特征与黄土高原腹地黄土的情况较为类似^[30~33], 但确有其自身特点.

由 S8, L9, L15 层样品进行的磁组构分析显示(见图 3), 磁面理(*F*)基本与水平面一致, 此剖面上各向异性度、形态因子和 AMS 椭球的其他参数变化不大. 随着深度的增加, *F* 值略有增大, 应系压实作用所致. 在整个 L9 层, 以及其上覆 S8 层、其下 L15 层的样品磁化率最大轴倾角(Inc-*K*_{max})均显示了通常<20°的正常沉积磁组构特征(图 4), 因为据前人研究^[36,37], 黄土高原地区风成黄土磁化率各向异性度主要是磁面理引起, 且面理平行沉积层面; 磁化率最小轴 *K*_{min} 垂直于沉积层面. 这表明宋家店剖面黄土/古土壤序列该段的磁组构保持了原生沉积组构的特点, 所记录的剩磁应没有受到明显的后期扰动^[36]. 从图 3 还可以看到本地冷期 Dec-*K*_{max} 主要沿着近南北方向分布, 这可能反映了磁性颗粒是由冬季盛行的西北风或北风搬运而来, 暖期古土壤样品(S8)的主导方向与 L9 相

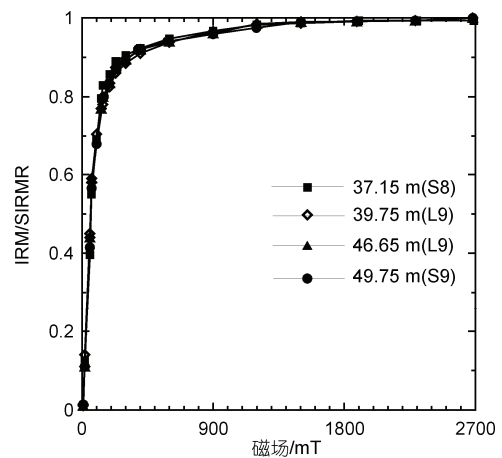


图 1 宋家店剖面黄土/古土壤样品等温剩磁获得曲线

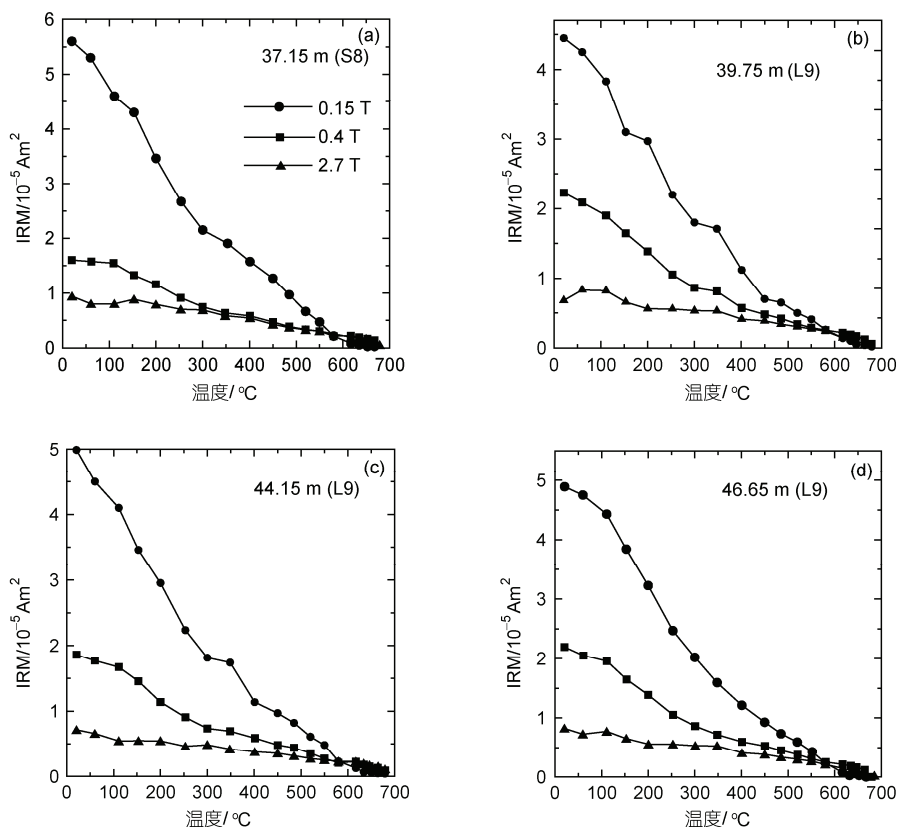


图2 宋家店剖面 S8/L9 层位样品的三轴等温剩磁退磁结果

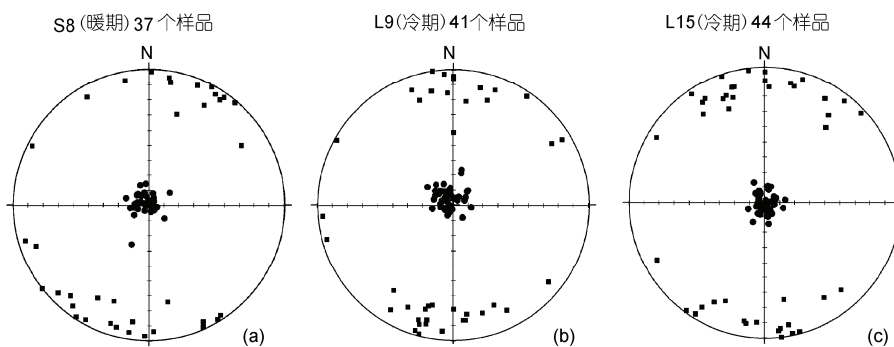


图3 宋家店黄土剖面 S8 (a), L9 (b)和 L15 (c)层位 AMS 轴的分布

■ 和 ● 分别代表磁化率最大主轴方向和最小主轴方向

比有所差异,可能与成壤作用改造有关.

从宋家店黄土剖面 L8~S12 粒度曲线(图 5)可以看出:无论是中值粒径(Md),还是 $<2 \mu m$ 或 $>63 \mu m$ 组分均随冷期和暖期的交替而呈有规律的变化.由于中值粒径通常被作为风力强弱的指标^[38], $<2 \mu m$ 的黏粒组分可以指示成土作用的强弱,而 $>63 \mu m$ 的细

砂组分由于很难被悬浮搬运^[39],一般作为粉尘源区和搬运风高度的指标.对应 L9 期间, $<2 \mu m$ 的黏粒组分除 45.5 m 左右有一较小峰值外,平均含量不到 10%,基本属于全段的低值,指示成土作用很弱.而 Md (平均 20 μm 左右)和 $>63 \mu m$ 组分(平均 12%左右)都呈现全段中的相对高值,其中 $>63 \mu m$ 组分含量甚

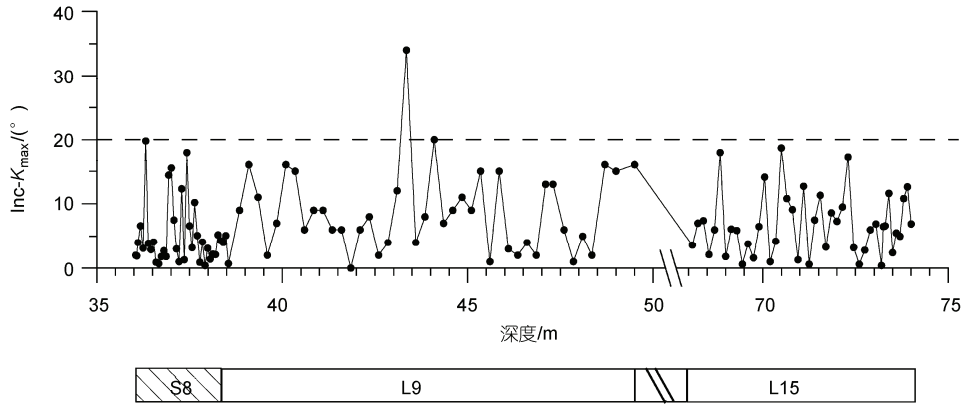


图4 宋家店黄土剖面 S8, L9 和 L15 层样品磁化率最大轴倾角随深度变化图
此深度计数起自剖面顶部

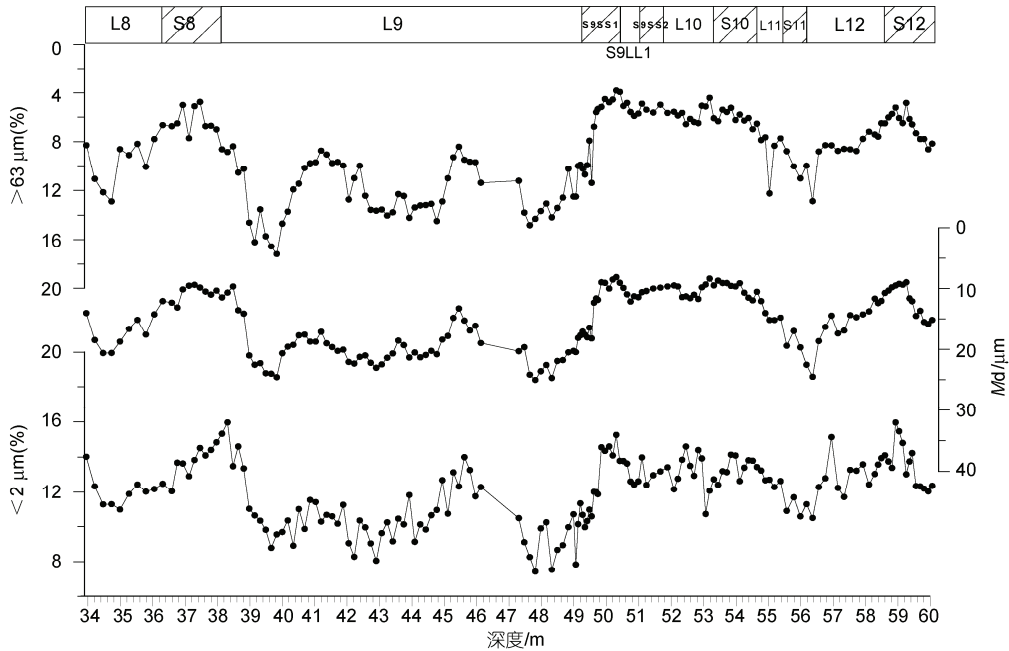


图5 宋家店黄土剖面 L8~S12 层粒度曲线随深度变化图

至高于黄土高原中北部地区^[40], 指示搬运粉尘风力的加强并携带一些近源粗颗粒组分加入. 这很可能是宋家店剖面 L9 层厚度巨大的根本原因.

3 古地磁结果

使用 MMTD60 热退磁仪进行样品热退磁, 剩磁测量使用 2G-775R 超导磁力仪, 全部实验在零磁空间进行. 首先, 对所有样品均测量了低场磁化率 (Bartington MS2, 470 Hz) 和天然剩磁 (NRM), 然后对其进行逐步热退磁 (热退磁温度从室温至 585℃ 共 15

步, 退磁间隔在 10~50℃ 之间). 结果表明, 样品天然剩磁方向与现代地球磁场方向基本一致, 部分样品呈单一剩磁分量 (图 6(a), (b)), 部分退磁样品 (图 6(c), (d)) 可以分离出 2 个温度区间的剩磁分量, 出现的温度区间分别为 0~100(200)℃ 和 200~580℃. 后者在 200~300℃ 后可分离出稳定的特征剩磁 (ChRM) 组分, 并在退磁投影图上趋于原点. 部分样品剩磁强度在 100~150℃ 之间有较明显的降低 (图 6(c')), 结合前面三轴等温剩磁热退磁结果认为: 特征剩磁分量主要由磁铁矿携带. 为进一步检验实验结果可靠性, 我们对

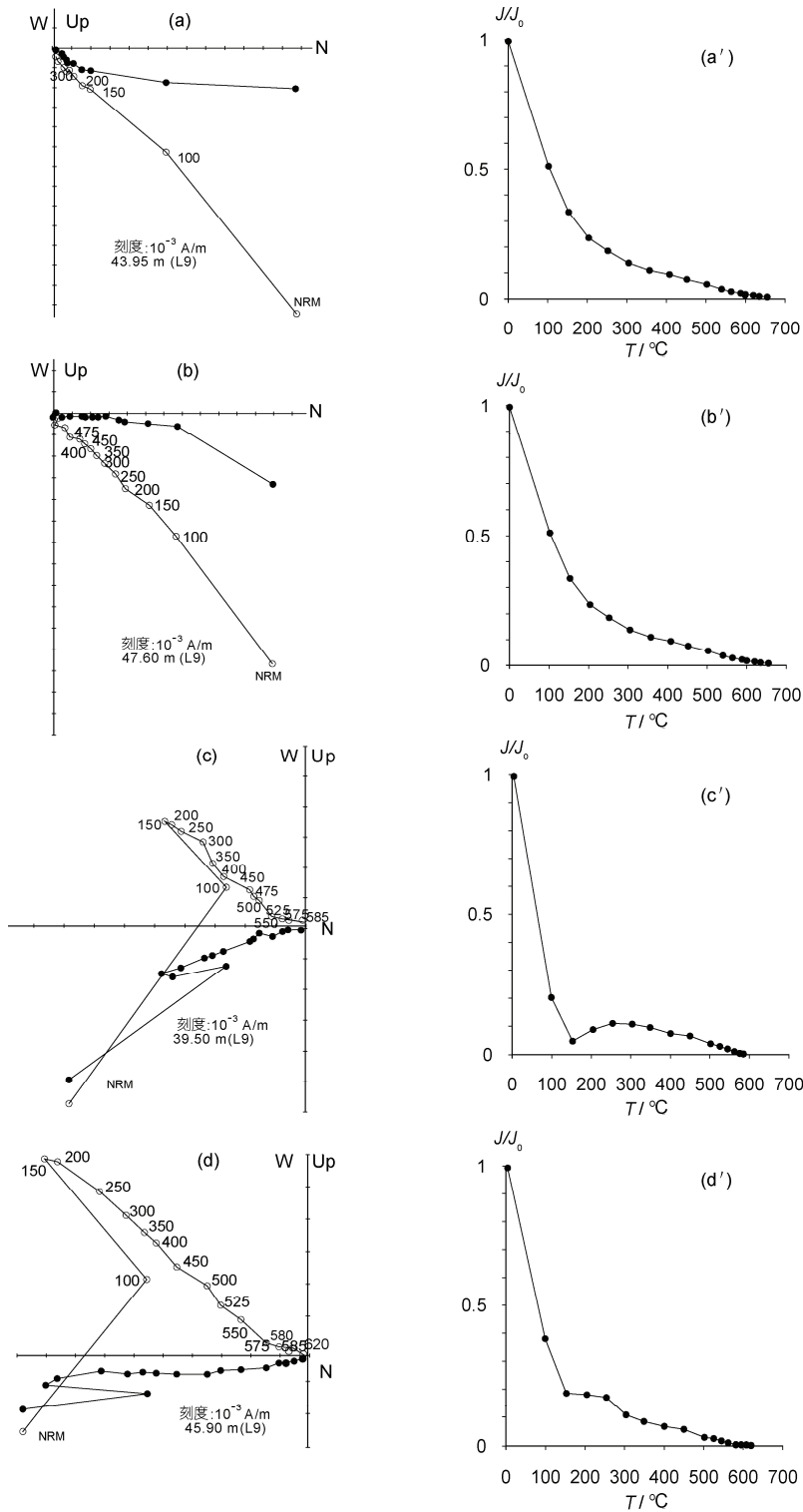


图6 L9中代表性样品热退磁过程中剩磁矢量图((a)~(d))及剩磁衰减图((a')~(d'))
●和○分别代表剩磁方向在水平面和垂直面上的投影

同一个采样面的 2 组平行样品进行了逐步热退磁热实验, 利用主向量分析确定了特征剩磁, 2 组平行样

均对应古强度的低值, 强度变化方式为渐变, 在两次剩磁异常段之间相对古强度值逐步上升。

品的实验结果一致性很好, 这说明所得古地磁记录应该是可信的。

根据地层中样品点的 ChRM 方向和虚地磁极(VGP)纬度(图 7), 可以清楚地界定出 M-B 界线位于 L8 的底部, UJ-M 界线位于 L10 中部, J-M 界线位于 L12 的底部, 这与以往的研究结果相吻合^[41]。在 L9 层中对应深度分别为 42.25~45.15 m 和 46.10~48.00 m 处记录了两次地磁异常, 因该剩磁异常符合下列检验标准^[28]: (1) 采样剖面没有明显的沉积间断和沉积物变形(如倾斜、挤压或翻转); (2) 样品在野外原地独立定向; (3) 具有正常的剩磁组构, 磁倾角与 K_{\max} -Inc 缺乏相关性; (4) 有稳定的特征剩磁组分, 可以认为异常反映了地磁场的变化。但鉴于引起剩磁异常的原因尚未完全确定, 存在重磁化的可能, 故对上述剩磁异常暂称之为 SJD 1 和 SJD 2(图 7 中灰色区域)。深海钻孔高分辨率相对古强度数据显示地磁场强度在磁极倒转和地磁漂移事件期间呈现急剧下降^[42,43], 对黄土中记录的地磁倒转研究也印证了上述结果^[44,45], 由于磁性矿物及粒径均一性程度较高的沉积物适合相对古强度研究^[46,47], 而完整记录两次剩磁异常 L9 黄土的磁性均一性程度符合上述特点(图 1, 2), 故研究中尝试选用低场磁化率 χ 为归一化参数, 以 NRM_{300}/χ 作为相对古强度变化的替代性指标(图 7(e)), 结果显示 B/M 界限、M/J 界限及两个剩磁异常段

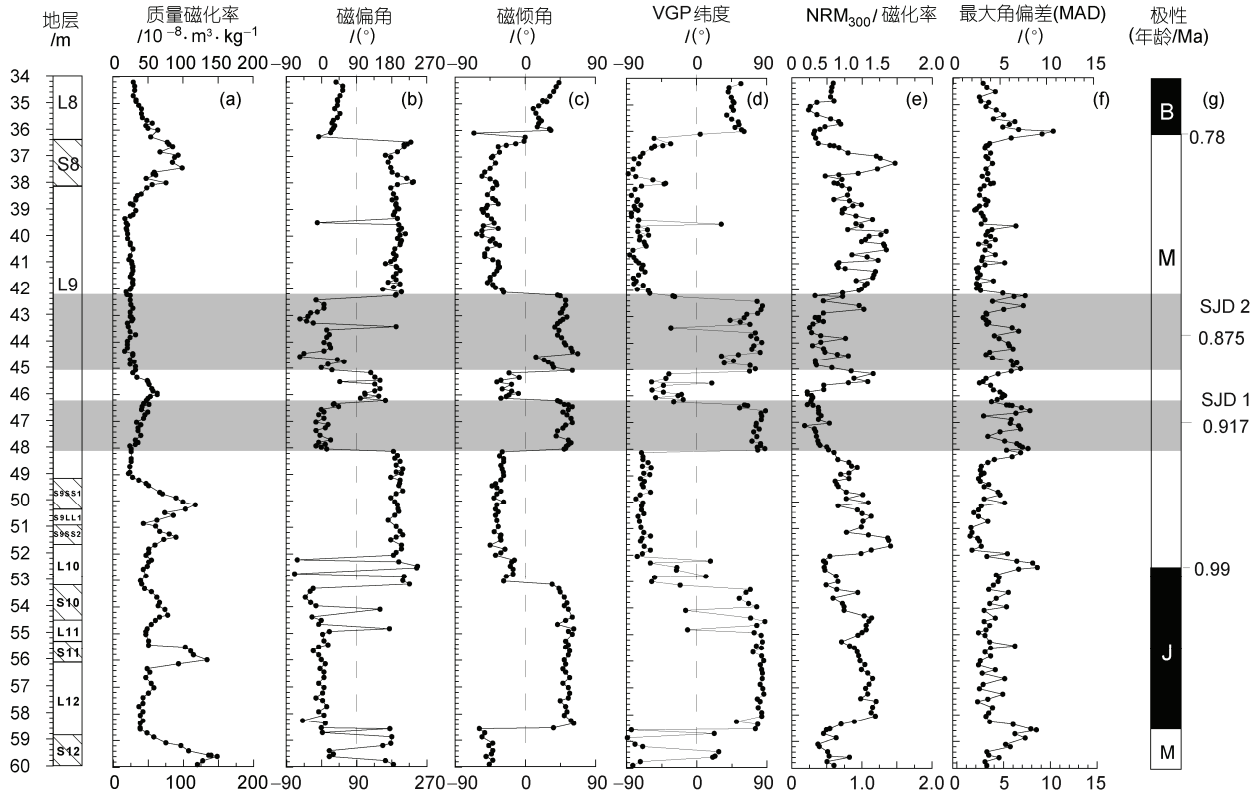


图 7 三门峡宋家店剖面 MB-J/M 段古地磁实验结果

(a) 磁化率; (b), (c) 特征剩磁的偏角和倾角; (d) 虚地磁极(VGP)纬度; (e) 相对古强度变化曲线; (f) 最大角偏差(MAD)值; (g) 地磁极性柱^[60]; 灰色区域为剩磁异常区

4 地磁异常记录的成因讨论

中国黄土-古土壤序列中相续有一些地磁漂移事件被发现和确认^[25,28,29,34,46,48~53], 所涉时段也以 Brunhes 期及 Matuyama 中末期为主, 但研究程度较高的还属 Brunhes 末期黄土层中所记载的 Mono Lake, Laschamp 和 Black 等地磁漂移事件^[22,25,28,46,50]. 究其原因, 一方面是由于末次冰期和间冰期黄土层磁化率及粒度指标与氧同位素阶段能够清晰地对比和划分, 减少了年代争议, 另一方面, 得益于绝对年龄测试手段(如热释光 TL、铀系测年 ²³⁰Th)^[28,54]的有力支持, 提高了定年精度, 从而使黄土沉积速率相对较高易于记录短时间尺度地磁事件的优势得以发挥. 然而, 对于黄土-古土壤序列其他时段的地层, 这种优势却受到诸多制约, 体现在: 绝对年龄测试手段的精度误差显著加大, 辅助定年功能的缺失; 源于磁化率及粒度与氧同位素比对而建立的天文时间标尺所确定的层位时间精度可靠性仍需进一步检验; 以及黄土剩磁 lock-in 效应的评估等等. 因此, 在确定

Matuyama 末期和 Brunhes 早期黄土层中所记录极性事件的年代时, 常使用地磁倒转边界年龄控制点之间数值内插的方法进行推测^[34,46,55]. 无疑这种替代方法计算起来相对简单, 但必须对地层样品所记录剩磁异常做出审慎评估.

近来, Yang 等人^[34]在宝鸡黄土地层 L9 中发现 2 个短极性事件, 因其所获得的年龄数据分别与 Kamikatsura 和 Santa Rosa ⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年数据相近, 进而确认是这两个事件. 但是, Wang 等人^[35]对河南陕县 L9 黄土地层研究的结果认为 L9 中的正极性显示是岩性所控制的重磁化现象引起而非地磁漂移事件的记录. 其依据为: (1) 陕县 L9 层整段除中间薄层外均显示正极性, 沉积厚度对应时间与 Kamikatsura 和 Santa Rosa 持续时间不符; (2) 陕县位于夏季风强活动区, S8 期间降水较充沛, 雨水下渗透发 L9 中部分低矫顽力磁性颗粒在随后的布容正极性时进行重新排列并记录了现代磁场方向. 针对这一结论, 我们在分析重磁化成因可能性的同时也注意到了以下事实: (1) 黄

土高原许多地区(兰州、西峰、洛川、宝鸡、蓝田、渭南、三门峡)L9层中有正极性显示的记录^[30~34,46],只是记录该事件的地层厚度或层内位置上略有差异,如兰州九洲台、宝鸡、三门峡宋家店剖面该显示位于L9层中部;洛川、西峰、蓝田等剖面则位于上部或顶部,L9全段为正极性的仅为陕县剖面一例^[35].若以S8期间降水充沛雨水下渗诱发其下L9层中粗颗粒间磁性矿物在随后的布容正极性时发生旋转而重新排列为由,则很难解释为什么在三门峡宋家店、兰州九洲台、宝鸡剖面中处于土壤溶液最为饱和且对应粒度几乎全层最粗(图5)的L9顶部没有发生磁性矿物的旋转进而重新排列,更难解释的是宋家店L9中2异常段中间的层位,其粒度同样很粗、质地同样疏松,却没有被重磁化。(2)黄土的堆积速率因不同的风力条件、地点、地形和物源在不同的时段内可能差异巨大。(3)Kamikatsura和Santa Rosa地磁漂移事件的记录已在世界不同地区不同岩相中相继被发现和研究^[3,6,7,9,13,14,34,46],且其测年数据又恰好对应L9黄土沉积期(L9层的形成和持续时间,已有大量的前人工作,集中在865~952 ka BP之间^[38,56]),所以L9黄土层记录上述事件不无可能.基于以上分析,我们倾向认为宋家店剖面L9中的两磁性异常段用地磁漂移解释似乎更为合理.

鉴于SJD 1和SJD 2被完全记录在上粉砂层L9中,而L9作为第四纪极端冰期气候条件下粉尘堆积的产物,对应一种荒漠-半荒漠景观^[57],且以粗粒度著称.与其他黄土层相比,L9层沉积粒度粗、厚度大即粉尘堆积速率高、风化程度低,属典型的弱风化黄土^[58].近来的研究表明,弱风化黄土所对应的Lock-in效应并不明显^[28],天然剩磁的锁定深度也较小^[59].由于宋家店剖面L9层的厚度(11 m)甚至大于其以西的许多地区如黄土高原中部洛川剖面L9层(7.5 m)和灵台L9层(10 m)的厚度^[16],因此,推测宋家店剖面L9层受化学剩磁改造作用或低沉积速率引起的剩磁“smoothing”作用的影响较小.

根据UJ-M和M-B边界在剖面中的位置和界限年龄^[60],可得出此段黄土的平均堆积速率为8.04 cm/ka,由前述两个短极性事件在L9层中厚度的中间点位置,计算出SJD1短极性事件的中间点年龄为0.917 Ma;SJD 2短极性事件的中间点年龄为0.875 Ma,两者之间间隔着一个完全的地磁反转带(负极性),分别对应着层中位置45.15和46.10 m,持续时间为12 ka

(图7).如果用Ding等人^[38]的轨道调谐时间标尺,给出L9层的顶底时间分别为0.865和0.943 Ma,由L9层厚度推算出的该时段粉尘堆积速率为14.1 cm/ka,并得出SJD 1,SJD 2短极性事件的中间点年龄分别为0.930和0.899 Ma,中间间隔7 ka.以上两组数据是目前黄土研究程度下对深部黄土沉积时段定年所能提供的精度数据,尽管由于统计方法的不同,两者在漂移事件中间点年龄估算上存在约0.013 Ma(SJD1)和0.024 Ma(SJD2)左右的差距,但这并不影响推测数据与同期海相沉积物及火山岩中记录的地磁漂移事件的年龄对比.所以认为,0.917和0.875 Ma是对SJD 1和SJD2短极性事件比较好的中间点年龄估计值.

近年来,海相沉积物中已多次发现0.78~0.99 Ma期间地球磁场曾发生短极性事件^[2~4],在火山岩研究中情况也是如此,Singer等人^[6,7]在研究Cerro Santa Rosa I熔岩丘时给出了Santa Rosa地磁漂移事件0.922~0.936 Ma的测年结果,随后的许多研究也证实了该事件类似的年龄数据^[3,13];Maenaka^[8]给出Kamikatsura正极性事件的年龄为0.8 Ma,之后的火山岩工作将此事件的年龄修正为(0.886±0.003) Ma^[6],最新的ODP980-984钻孔资料显示其年龄为0.85 Ma^[3,4],并指出Kamikatsura和Santa Rosa事件分别对应海洋同位素阶段MIS 21及MIS 25顶部^[13~15](图8);

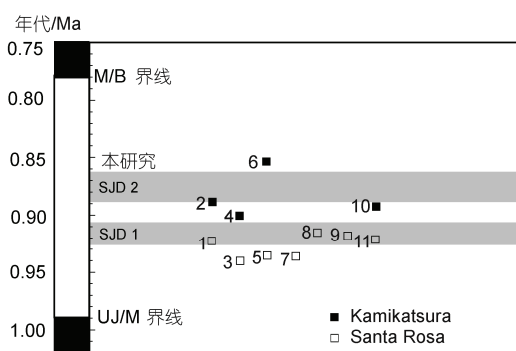


图8 Kamikatsura和Santa Rosa事件年代研究资料对比图 图中■和□分别代表Kamikatsura和Santa Rosa事件既往研究的年龄数据,磁极边界年龄引自Cande和Kent^[60]灰色带是本次研究的年龄推测范围,其中(1) Santa Rosa事件年龄数据(0.922±0.024) Ma, Singer等人^[6]; (2) Kamikatsura事件年龄数据(0.886±0.003) Ma, Singer等人^[6]; (3) Santa Rosa事件年龄数据(0.936±0.008) Ma, Singer等人^[7]; (4) Kamikatsura事件年龄数据(0.899±0.006) Ma, Singer等人^[7]; (5) Santa Rosa事件年龄数据0.932 Ma, Channell等人^[3]; (6) Kamikatsura事件年龄数据0.85 Ma, Takatsugi等人^[9]; (7) Santa Rosa事件年龄数据0.932 Ma, Horng等人^[13,14]; (8) Santa Rosa事件年龄数据(0.915±0.008) Ma, Spell等人^[61]; (9) Santa Rosa事件年龄数据0.913 Ma, Pan等人^[46]; (10) Kamikatsura事件年龄数据0.89 Ma, Yang等人^[34]; (11) Santa Rosa事件年龄数据0.92 Ma, Yang等人^[34]

由于上述事件的年龄数据源于不同区域及不同的岩相地层, 无疑说明 Kamikatsura 和 Santa Rosa 事件具有全球性和被记录的普遍性. 鉴于本次研究中所获得的 SJD 1 的推测年龄 0.917 Ma 与 Santa Rosa 事件 0.922~0.936 Ma 的推测年龄非常接近, SJD2 0.875 Ma 的推测年龄与 Kamikatsura 事件 0.85~0.899 Ma 的推测年龄非常接近. 所以, 三门峡宋家店黄土/古土壤序列 L9 层位中记录的两次地磁漂移极性事件 SJD 1 和 SJD 2 应是 Santa Rosa 和 Kamikatsura 事件在陆相黄土地层中的记录.

5 结论

三门峡宋家店剖面 L9 黄土层具有较高的粉尘堆积速率, 受成壤作用影响较小, 没有遭受明显的后期扰动, 记录了 SJD 1 和 SJD 2 短极性事件. 综合各种年龄模式, 推算出 SJD 1 和 SJD 2 短极性事件对应的中间点年龄分别为 0.917 和 0.875Ma, 二者之间间隔约 12 ka. 结合近年来深海及火山岩地磁年龄数据, 我们认为它们分别对应 Santa Rosa 和 Kamikatsura 地磁漂移事件.

参考文献

- Gubbins D. The distinction between geomagnetic excursions and reversals. *Geophys J Int*, 1999, 137: F1—F3, doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00810.x
- Channell J, Kleiven H F. Geomagnetic palaeointensities and astrochronological ages for the Matuyama-Brunhes boundary and the boundaries of the Jaramillo Subchron: Palaeomagnetic and oxygen isotope records from ODP Site 983. *Philos Trans Roy Soc London*, 2000, 358: 1027—1047
- Channell J, Mazaud A, Sullivan P, et al. Geomagnetic excursions and paleointensities in the 0.9—2.15 Ma interval of the Matuyama Chron at ODP Site 983 and 984(Iceland Basin). *J Geophys Res*, 2002, 107, doi: 10.1029/2001JB000491
- Channell J, Guyodo Y. The Matuyama Chronozone at ODP Site 982(Rockall Bank): Evidence for decimeterscale magnetization lock-in depths. *AGU Geophysical Monograph Seminar*, 145: Timescales of the Geomagnetic Field. Washington DC: American Geophysical Union, 2004. 205—219
- Doell R R, Dalrymple G B. Geomagnetic polarity epochs: A new polarity event and the age of the Brunhes-Matuyama boundary. *Science*, 1966, 152: 1060—1061, doi: 10.1126/science.152.3725.1060
- Singer B S, Hoffman K A, Chauvin A, et al. Dating transitionally magnetized lavas of the late Matuyama Chron: Toward a new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ timescale of reversals and events. *J Geophys Res*, 1999, 104: 679—693, doi: 10.1029/1998JB900016
- Singer B, Brown L L. The Santa Rosa event: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and paleomagnetic results from the Valles rhyolite near Jaramillo Creek, Jemez Mountains, New Mexico. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 197: 51—64, doi: 10.1016/0012-821X(01)00592-2
- Maenaka K. Magnetostratigraphic study of the Osaka group, with special reference to the existence of pre and past-Jaramillo episodes in the late Matuyama polarity Epoch. *Mem Hanazono Univ*, 1983, 14: 1—65
- Takatsugi K O, Hyodo M. A geomagnetic excursion during the late Matuyama Chron, the Osaka group, southwest Japan. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 136: 511—524, doi: 10.1016/0012-821X(95)00175-1
- Singer B, Hildreth W, Vincze Y. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for early deglaciation of the central Chilean Andes. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 1663—1666, doi: 10.1029/1999GL011065
- Coe R S, Singer B S, Pringle M S, et al. Matuyama-Brunhes reversal and Kamikatsura event on Maui: Paleomagnetic directions, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and implications. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 222: 667—684, doi: 10.1016/j.epsl.2004.03.003
- Quidelleur X, Carlut J, Gillot P Y, et al. Evolution of the geomagnetic field prior to the Matuyama-Brunhes transition: Radiometric dating of a 820 ka excursion at La Palma. *Geophys J Int*, 2002, 151: F6—F10, doi: 10.1046/j.1365-246X.2002.01841.x
- Horng C S, Lee M Y, Pälike H, et al. Astronomically calibrated ages for geomagnetic reversals within the Matuyama Chron. *Earth Planet Space*, 2002, 54: 679—690
- Horng C S, Roberts A P, Liang W T. Astronomically tuned record of relative geomagnetic paleointensity from the western Philippine Sea. *J Geophys Res*, 2003, 108: 2059, doi: 10.1029/2001JB001698
- Channell J, Labs J, Raymo M E. The Réunion Subchronozone at ODP Site 981 (Feni Drift, North Atlantic). *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 215: 1—12, doi: 10.1016/S0012-821X(03)00435-7
- Liu T S. *Loess and the Environment*. Beijing: China Ocean Press, 1985. 1—251
- Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. *Nature*, 1990, 346: 737—739, doi: 10.1038/346737a0
- Maher B A, Thompson R. Mineral magnetic record of the Chinese loess and Paleosol. *Geology*, 1991, 19: 3—6, doi: 10.1130/0091-7613(1991)019<0003: MMROTC>2.3.CO;2

- 19 Banerjee S K, Hunt C P, Liu X M. Separation of local signals from the regional paleomonsoon record of the Chinese Loess Plateau: A rock-magnetic approach. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 843—846, doi: 10.1029/1993/93GL00908
- 20 Florindo F, Zhu R X, Guo B, et al. Magnetic proxy climate results from the Duanjiapo loess section, southernmost extremity of the Chinese Loess Plateau. *J Geophys Res*, 1999, 104: 645—659, doi: 10.1029/1998JB900001
- 21 Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature*, 1982, 300: 431—433, doi: 10.1038/300431a0
- 22 Zhu R X, Zhou L P, Laj C, et al. The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess. *Geophys Res Lett*, 1994, 21: 697—700, doi: 10.1029/94GL00532
- 23 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, doi: 10.1016/0012-821X(94)90212-7
- 24 朱日祥, 潘永信, 郭斌, 等. 海陆气候变化记录相滞后: 松山-布容极性转换约束. *科学通报*, 1998, 43: 1131—1135
- 25 Fang X M, Li J J, Van der Voo R, et al. A record of the Blake event during the last interglacial paleosol in the western Loess Plateau of China. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 146: 73—82, doi: 10.1016/S0012-821X(96)00222-1
- 26 周力平, Shackleton N J, Dodonov A E. 欧亚黄土中古地磁极性界线的地层学解释. *科学通报*, 2000, 20: 196—202
- 27 Zhou L P, Shackleton N J. Misleading positions of geomagnetic reversal boundaries in Eurasian loess and implications for correlation between continental and marine sedimentary sequences. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 168: 117—130, doi: 10.1016/S0012-821X(99)00052-7
- 28 朱日祥, 刘青松, 潘永信, 等. 马兰黄土剩磁不存在显著 Lock-in 效应: 来自 Laschamp 地磁漂移的证据. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36: 430—437, doi: 10.1007/s11430-006-0960-x
- 29 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: 地球科学*, 2000, 30: 324—330
- 30 岳乐平, 屈红军, 杨永利, 等. 兰州九洲台黄土剖面古地磁研究. *西北大学学报*, 1992, 22: 87—94
- 31 岳乐平. 中国黄土与红色黏土记录的地磁极性界限及地质意义. *地球物理学报*, 1995, 38: 311—320
- 32 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, 12: 162—173
- 33 Zhu R X, Tschu K K. *Studies on Paleomagnetism and Reversals of Geomagnetic Field in China*. Beijing: Science Press, 2001
- 34 Yang T S, Hyodo M, Yang Z Y, et al. Evidence for the kamikatsura and Santa Rosa excursions recorded in eolian deposits from the southern Chinese Loess Plateau. *J Geophys Res*, 2004, 109: B12105, doi: 10.1029/2004JB002966
- 35 Wang X S, Løvlie R, Yang Z Y, et al. Remagnetization of Quaternary eolian deposits: A case study from SE Chinese Loess Plateau. *Geochim Geophys Geosyst*, 2005, 6: Q06H18, doi: 10.1029/2004GC000901
- 36 Zhu R X, Liu Q S, Jackson M J. Paleoenvironmental significance of the magnetic fabrics in Chinese loess-paleosols since the last interglacial (<130 ka). *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 221: 55—69, doi: 10.1016/S0012-821X(04)00103-7
- 37 Hus J J. The magnetic fabric of some loess-paleosol deposits. *Phys Chem Earth*, 2003, 28: 689—699, doi: 10.1016/S1474-7065(03)00128-1
- 38 Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 2002, 17: 501—521, doi: 10.1029/2001PA000725
- 39 Pye K A. *Eolian Dust and Dust Deposits*. London: Academic Press, 1987. 1—265
- 40 Lu H Y, Zhang F Q, Liu X D, et al. Periodicities of palaeoclimatic variations recorded by loess-paleosol sequences in China. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 1891—1900, doi: 10.1016/j.quascirev.2004.06.005
- 41 Rutter N W, Ding Z L, Evans M E, et al. Magnetostratigraphy of the Baoji loess-paleosol section in the north-central China Loess Plateau. *Quat Int*, 1990, 7: 97—102, doi: 10.1016/1040-6182(90)90043-4
- 42 Guyodo Y, Richter C, Valet J P. Paleointensity record from Pleistocene sediments (1.4–0 Ma) of the California Margin. *J Geophys Res*, 1999, 104: 2953—2964, doi: 10.1029/1999JB900163
- 43 Kok Y S, Tauxe L. A relative paleointensity stack from Ontong-Java Plateau sediments for the Matuyama. *J Geophys Res*, 1999, 104: 25401—25413, doi: 10.1029/1999JB900186
- 44 Zhu R X, Laj C, Mazaud A. The Matuyama-Brunhes and Upper Jaramillo transitions recorded in a loess section at Weinan, northcentral China. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 125: 143—158, doi: 10.1016/0012-821X(94)90212-7
- 45 McIntosh G, Rolph T C, Shaw J, et al. A detailed record of a normal-reversed-polarity transition obtained from a thick loess sequence at Jiuzhuotai, near Lanzhou, China. *Geophys J Int*, 1996, 127: 651—664, doi: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb04045.x
- 46 Pan Y X, Zhu R X, Liu Q S, et al. Geomagnetic episodes of the last 1.2 Myr recorded in Chinese loess. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 1282, doi: 10.1029/2001GL014024
- 47 葛淑兰, 石学法, 张伟滨. 地磁场相对强度研究方法. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27: 65—70
- 48 Yang T S, Hyodo M, Yang Z Y, et al. Two geomagnetic excursions during the Brunhes chron recorded in Chinese loess-paleosol sediments. *Geophys J Int*, 2007, 171: 104—114, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03522.x
- 49 Yang T S, Hyodo M, Yang Z Y, et al. Early and middle Matuyama geomagnetic excursions recorded in the Chinese loess-paleosol sedi-

- ments. *Earth Planet Space*, 2007, 59: 825—840
- 50 Zhu R X, Pan Y X, Liu Q S. Geomagnetic excursions recorded in Chinese loess in the last 70,000 years. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 505—508, doi: 10.1029/1999GL900019
- 51 Zheng H, Rolph T, Shaw J, et al. A detailed palaeomagnetic record for the Last Interglacial period. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 133: 339—351, doi: 10.1016/0012-821X(95)00089-U
- 52 Zheng H, An Z, Shaw J. New contribution to Chinese Plio-pleistocene magnetostratigraphy. *Phys Earth Planet Inter*, 1992, 70: 146—153, doi: 10.1016/0031-9201(92)90177-W
- 53 Heslop D, Shaw J, Bloemendal J, et al. Sub-millennial scale variations in east Asian monsoon systems recorded by dust deposits from the north-western Chinese Loess Plateau. *Phys Chem Earth: Solid Earth Geod*, 1999, 24: 785—792, doi: 10.1016/S1464-1895(99)00115-5
- 54 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294: 2345 doi: 10.1126/science.1064618
- 55 Zhu R X, Potts R, Xie F, et al. New evidence on the earliest human presence at high northern latitudes in northeast Asia. *Nature*, 2004, 431: 559—562, doi: 10.1038/nature02829
- 56 Heslop D, Langereis C G, Dekkers M J. A new astronomical timescale for the loess deposits of Northern China. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 184: 125—139, doi: 10.1016/S0012-821X(00)00324-1
- 57 Guo Z T, Liu T S, Fedoroff N, et al. Climate extremes in Loess of China coupled with the strength of deep-water formation in the North Atlantic. *Glob Planet Change*, 1998, 18: 113—128, doi: 10.1016/S0921-8181(98)00010-1
- 58 孙继敏, 刘东生. 洛川黄土地层的再划分及其 L9、L15 古环境意义的新解释. *第四纪研究*, 2002, 22: 406—412
- 59 杨天水, 李惠娣, 傅建利, 等. 宝鸡古土壤层 S7 和黄土层 L8 的天然剩磁锁定深层初探. *第四纪研究*, 2007, 7: 972—982
- 60 Cande S C, Kent D V. Revised Calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J Geophys Res*, 1995, 100: 6093—6095, doi: 10.1029/94JB03098
- 61 Spell T L, McDougall I. Revisions to the age of the Brunhes/Matuyama boundary and the Pleistocene geomagnetic polarity timescale. *Geophys Res Lett*, 1992, 19: 1182—1184