



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

中国黄土磁性地层研究进展与展望

陈天然, 肖国桥, 林欣如, 潘卿

Progress and outlooks on magnetostratigraphy of Chinese loess

CHEN Tianran, XIAO Guoqiao, LIN Xinru, and PAN Qing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024013001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西菲律宾海盆XT06孔第四纪磁性地层与深海沉积动力过程

Magnetostratigraphy of core XT06 and Quaternary sedimentary dynamics of the deep-sea deposits in the West Philippine Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 61–74

山东黄土年代学研究进展：问题与方向

PROGRESS OF CHRONOLOGY RESEARCH FOR LOESS IN SHANDONG: PROBLEMS AND SOLUTIONS

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(2): 139–148

岁差驱动与中国黄土高原的次级气候旋回

Second-order climatic cycles in the Chinese Loess Plateau and their bearing on precession driving

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 136–159

西部黄土高原兰州黄土磁化率增强模式及其驱动机制

Magnetic susceptibility enhancement model and its driving mechanism of Lanzhou loess on the Western Loess Plateau

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 165–174

MIS13时期黄土高原东西部地区夏季风不对称演化

Unparallel MIS13 climate evolution between western and eastern Chinese Loess Plateau

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 185–192

苏北-南黄海西部第四纪长江埋藏古河道分布研究进展

Research progress on distribution of Quaternary buried paleo-Yangtze River channels in the North Jiangsu-western South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 40–54



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈天然, 肖国桥, 林欣如, 等. 中国黄土磁性地层研究进展与展望 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(2): 1-15.

CHEN Tianran, XIAO Guoqiao, LIN Xinru, et al. Progress and outlooks on magnetostratigraphy of Chinese loess[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 1-15.

中国黄土磁性地层研究进展与展望

陈天然¹, 肖国桥^{1,2}, 林欣如¹, 潘卿³

1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 流域关键带演化湖北省重点实验室, 武汉 430078

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430078

3. 中山大学大气科学学院, 行星环境与宜居性研究实验室, 珠海 519000

摘要: 中国黄土是最重要的第四纪陆相气候记录之一, 磁极性地层是建立第四纪黄土年代框架的主要方法之一。本文总结了中国黄土所记录的布容/松山 (Brunhes/Matuyama)、加拉米诺 (Jaramillo)、奥尔都维 (Olduvai) 和松山/高斯 (Matuyama/Gauss) 等几个作为主要定年依据的极性倒转界限的研究结果, 并将黄土记录的这些界限位置与深海记录进行了对比。结果发现, 不同黄土剖面所记录的各地磁极性倒转界限的位置并不一致, 其差异可超过一个黄土-古土壤旋回, 且不能用 lock-in 效应、气候和沉积速率差异、黄土地层划分差异来解释。这些地磁极性界限位置的差异指示极性界限附近的黄土可能经历了不同程度的重磁化。同时, 这些差异也导致了不同研究者基于磁极性地层所建立的轨道尺度的黄土年代标尺与深海氧同位素记录的对比存在较大分歧。未来对黄土所记录的地磁场相对古强度 (RPI) 的研究可望为识别极性倒转界限的真实位置提供依据, 并最终解决中国黄土与深海记录轨道尺度对比方案的分歧。

关键词: 黄土; 第四纪; 磁性地层; 重磁化; 地磁场相对古强度

中图分类号:P534.63

文献标识码:A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2024013001](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024013001)

Progress and outlooks on magnetostratigraphy of Chinese loess

CHEN Tianran¹, XIAO Guoqiao^{1,2}, LIN Xinru¹, PAN Qing³

1. Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

3. Planetary Environmental and Astrobiological Research Laboratory, School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519000, China

Abstract: The Chinese loess is one of the most important terrestrial records of the Quaternary climate changes. Magnetostratigraphy is one of the primary methods for establishing the chronological framework of the Quaternary loess. The measured positions of the Brunhes/Matuyama, Jaramillo, Olduvai, and Matuyama/Gauss polarity reversal boundaries in Chinese loess were summarized and compared against corresponding marine records. It was found that the positions of each polarity reversal boundary are inconsistent among different loess sections, and the difference spanned more than one loess-paleosol cycle. This discrepancy cannot be attributed to the lock-in effect, regional climate, sedimentation rate or different loess stratigraphic divisions. This may indicate that the polarity reversal boundaries recorded by loess deposits had probably experienced significant remagnetization, leading to a large discrepancy between loess geochronometer in magnetostratigraphy at orbital scale and marine oxygen isotope records by different researchers. In the future, studies shall focus more on the relative paleointensity (RPI) of loess to confirm the true position of each polarity reversal boundary and ultimately resolve the discrepancy in the comparison scheme between Chinese loess data and deep-sea sediment record.

Key words: Chinese loess; Quaternary; magnetostratigraphy; remagnetization; relative paleointensity

中国黄土高原(图 1)的黄土是与深海沉积、极地冰芯并列的记录第四纪气候和环境演化的三大信息库之一, 也是完整记录第四纪东亚季风演化最

重要的陆相沉积序列^[1-5], 并被作为国际第四纪年代地层对比的标准序列之一^[6-7]。黄土沉积之所以有如此重要的研究地位, 一方面是由于黄土沉积速率

资助项目: 国家自然科学基金“基于地磁场相对古强度构建早更新世黄土年代标尺”(42272217)

作者简介: 陈天然(1999—), 女, 硕士研究生, 从事磁性地层与第四纪环境演化研究, E-mail: tianranchen@cug.edu.cn

通讯作者: 肖国桥(1980—), 男, 博士, 副教授, 从事第四纪地质与全球变化研究, E-mail: gqxiaocug@126.com

收稿日期: 2024-01-30; 改回日期: 2024-03-07。文凤英编辑

高且连续,另一方面也与黄土的年代标尺不断向精确化发展有关。20世纪80年代,Heller和刘东生先生通过磁性地层研究首次准确确定了洛川第四纪黄土的年代^[8],并在随后的研究中建立了过去80万年黄土地层与深海氧同位素轨道尺度的对比方案^[9-10],这一年代标尺为中国黄土古气候研究走向国际前沿奠定了基础^[11]。20世纪90年代,Ding等^[12]以磁性地层界限为年龄控制点,通过对宝鸡黄土粒度的轨道调谐,首次建立了第四纪黄土的天文年代标尺。随后,鹿化煜、Heslop等学者以古地磁界限为年龄控制点相继对其他黄土剖面开展了天文调谐,并与深海氧同位素进行对比,建立了第四纪黄土新的天文年代标尺^[13-14]。2002年,Ding等^[15]基于黄土高原5个剖面的磁性地层年代框架,通过集成这些剖面的粒度数据,构建了中国黄土粒度年代标尺Chiloparts。随后,Sun等^[16]基于赵家川和灵台剖面

的磁性地层年代框架,通过石英粒径开展天文调谐,将黄土高原风尘堆积的天文年代标尺延伸至3.6 Ma。

得益于上述黄土年代标尺的建立,近年来,学者们对中国第四纪黄土记录的多方面古环境信息进行了深入探讨,取得了一系列重要成果^[4, 17-23]。尽管如此,对目前被广泛使用的三套黄土年代标尺的详细对比显示^[14-16],三者在1.5~2.6 Ma期间存在4~8万年的差别^[16]。这导致了黄土与深海氧同位素的对比存在1~2个斜率周期的误差,极大地阻碍了对该时段黄土记录的气候变化信息及机理的深入研究。

导致不同黄土年代标尺存在差异的根本原因在于,不同学者在构建年代标尺时所依赖的古地磁年龄控制点的位置在不同剖面中存在较大差异,一个著名例子是黄土记录的“布容/松山界限难题”^[24-29]。实际上,不同黄土剖面记录的加拉米诺和奥尔都维

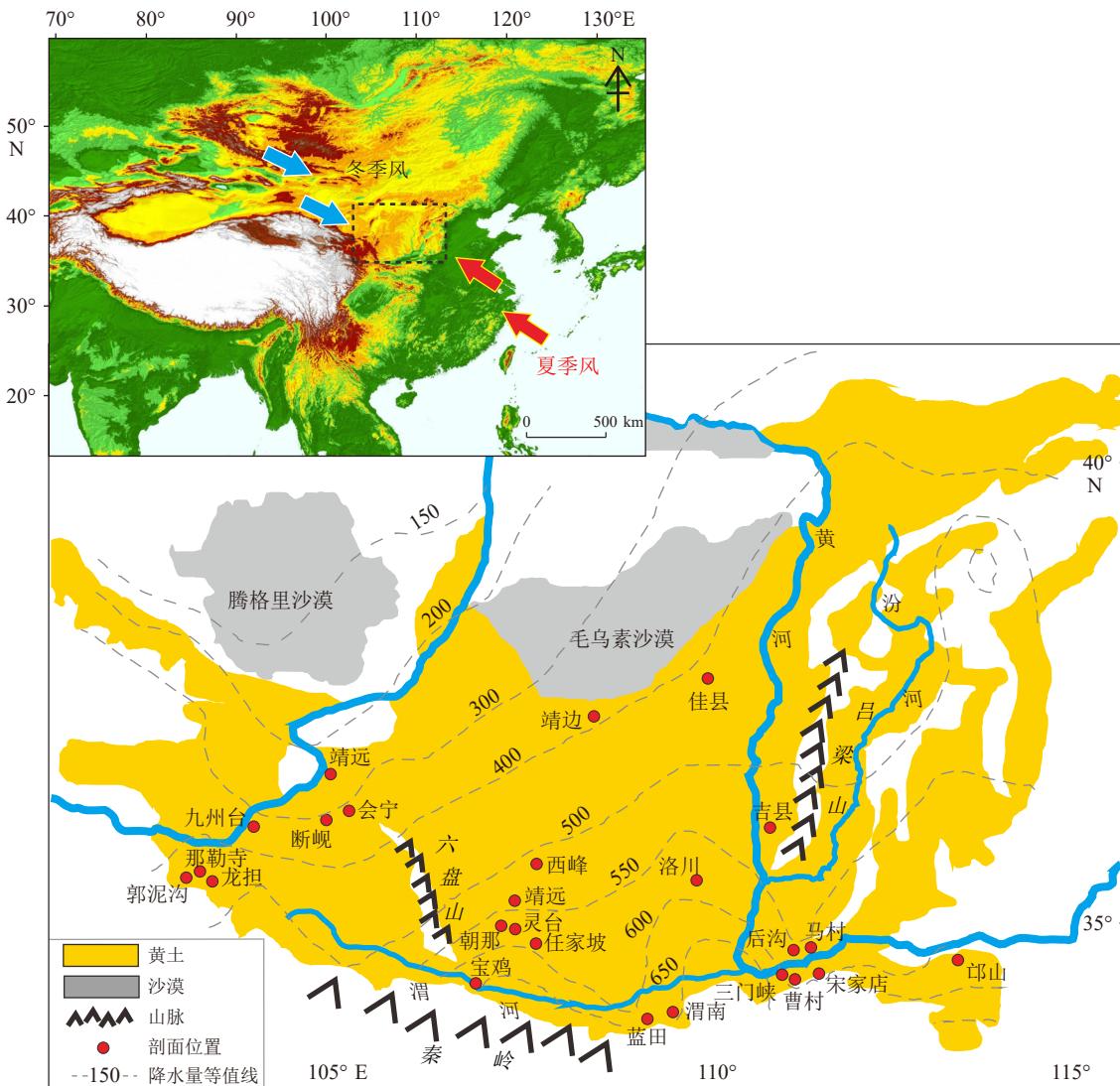


图1 黄土高原分布示意图

Fig.1 A schematic map of the Chinese Loess Plateau

极性亚时的顶底界限以及松山/高斯界限的位置也同样存在较大差异^[27, 30-31], 但对这些极性倒转界限的关注明显少于布容/松山界限。对黄土所记录的所有主要极性倒转界限的综合对比有利于解决布容/松山界限难题。本文依据近年来公开发表的高分辨率黄土磁性地层研究结果, 对黄土高原不同剖面所记录的第四纪时期的几个主要地磁极性倒转界限的位置进行了对比和总结, 在此基础上, 进一步探讨了同一地磁极性界限在不同剖面中存在位置差异的原因, 并对未来探究地磁极性倒转界限在中国黄土中的真实位置的研究进行了展望。

1 中国黄土记录的主要地磁极性倒转界限位置

1.1 布容/松山极性倒转界限

布容/松山极性倒转发生在 0.773 Ma^[6], 是距今最近的一次地磁场倒转, 被广泛记录在各种地质档案中, 是第四纪地层对比和定年的重要标志。本文总结了黄土高原目前已发表的包含布容/松山极性倒转界限的 18 个高分辨率的磁性地层研究剖面, 并与深海记录进行了对比^[32-33], 这些剖面包括硤山^[34]、吉县^[34]、后沟^[35]、邙山^[36]、宋家店^[37]、三门峡^[38]、渭南^[39]、蓝田^[17]、宝鸡^[40]、洛川^[30]、灵台^[16, 41]、西峰^[26]、朝那^[42]、靖边^[43]、会宁^[44]、九州台^[45]、靖远^[46]、断崖^[47]剖面, 位置见图 1。根据东亚夏季风在黄土高原由东南向西北减弱的规律^[48], 将所有黄土剖面分为东部(图 2 c-k)、中部(图 2 l-p)和西部(图 2 q-t)3 个区域。详细的磁性地层研究揭示出实测布容/松山界限通常位于黄土层 L8 中, 但在三门峡、洛川剖面中, 布容/松山界限位于 S8 上部, 在蓝田、靖远剖面中, 其位于 S7 中。由此可见, 实测的布容/松山界限可能受到了某种因素的影响。布容/松山界限在不同剖面中的位置差异, 直接导致了黄土与深海氧同位素记录的对比产生了 S7 对应 MIS19 还是 S8 对应 MIS19 的分歧^[24-26, 28, 49]。

学者们对这种不一致性提出了不同观点。一些研究者认为, 中国黄土存在较大的 lock-in 深度, 导致布容/松山界限下移了 1.5~3 m^[14, 24, 49], 但另一些研究者依据黄土中发现的极性漂移事件^[39-40, 50], 认为中国黄土的 lock-in 深度可能小于 50 cm^[28], 并据此认为布容/松山界限位置与深海不同是由于之前的海、陆气候指标对应方案错误^[25, 28], 或是由于海、陆气候之间存在相位差, 大陆气候比深海氧同

位素更早地响应了全球气候变化^[51]。最近的一些研究认为, 中国黄土记录的剩磁并不稳定^[34, 38, 52-53], 布容/松山界限下移是由于受到了后期重磁化的影响^[31]。Wang 等^[34]对黄土高原边缘 4 个黄土剖面的布容/松山界限开展了高分辨率的磁性地层和详细的岩石磁学研究, 发现这些剖面的剩磁记录十分复杂且不稳定, 可能受到了重磁化的影响。Zhou 等^[26]依据宇宙核素¹⁰Be 的峰值存在于 S7 中, 认为真实的布容/松山界限位于古土壤层 S7 中部。依据¹⁰Be 峰值所确定的真实布容/松山界限位置^[26], 通过磁化率与深海氧同位素曲线的对比发现, 尽管所有剖面的实测布容/松山界限位置各不相同, 但均对应于地磁场强度的低值期(图 2), 暗示着这期间堆积的黄土可能受到了重磁化的影响。由于地磁场倒转时期地磁场强度处于低谷^[54-58], 导致该时期沉积的黄土所记录的特征剩磁不稳定, 易受到后期正极性的重磁化作用而导致布容/松山界限发生一定程度的下移。尽管不同剖面的气候条件和沉积速率均存在差异, 但其实测界限位置始终位于这一低值范围之内(图 2)。由此可见, 尽管大部分实测的布容/松山界限偏离了其真实界限位置, 但仍能够反映出这一极性倒转的大致位置。

对比不同气候区的剖面可以发现, 布容/松山界限在较湿润的东部地区与相对干旱的中西部区域类似, 例如布容/松山界限在宋家店和断崖剖面均位于 L8(图 2 g, t)、在蓝田与靖远剖面中均位于 S7(图 2 j, s)、在三门峡与洛川剖面中均位于 S8(图 2 h, l), 这表明气候差异不是导致布容/松山界限位置差异的主要原因。黄土高原西部由于靠近沙漠边缘, 沉积速率显著高于中东部地区, 西部黄土记录的布容/松山界限位于 L8 中下部, 如会宁、九州台、断崖剖面, 其位置仍与中东部地区相似, 这表明沉积速率也不是导致布容/松山界限位置差异的主要因素。对比¹⁰Be 峰值所确定的真实布容/松山界限位置(S7 中部)^[26]与各剖面的实测界限可以发现, 不同剖面实测的极性倒转界限相对真实界限存在 0~9 m 的下移(图 2), 且在沉积速率高的西部干旱区的剖面中下移量往往更大, 显然这不可能是 lock-in 效应能够达到的深度, 因此进一步印证了实测布容/松山界限的下移是由于极性倒转时期地磁场强度低, 该时期沉积的黄土受到了重磁化影响。

1.2 加拉米诺正极性亚时界限

加拉米诺正极性亚时是发生在布容期之前的一个重要的正极性时期, 是第四纪磁性地层定年重

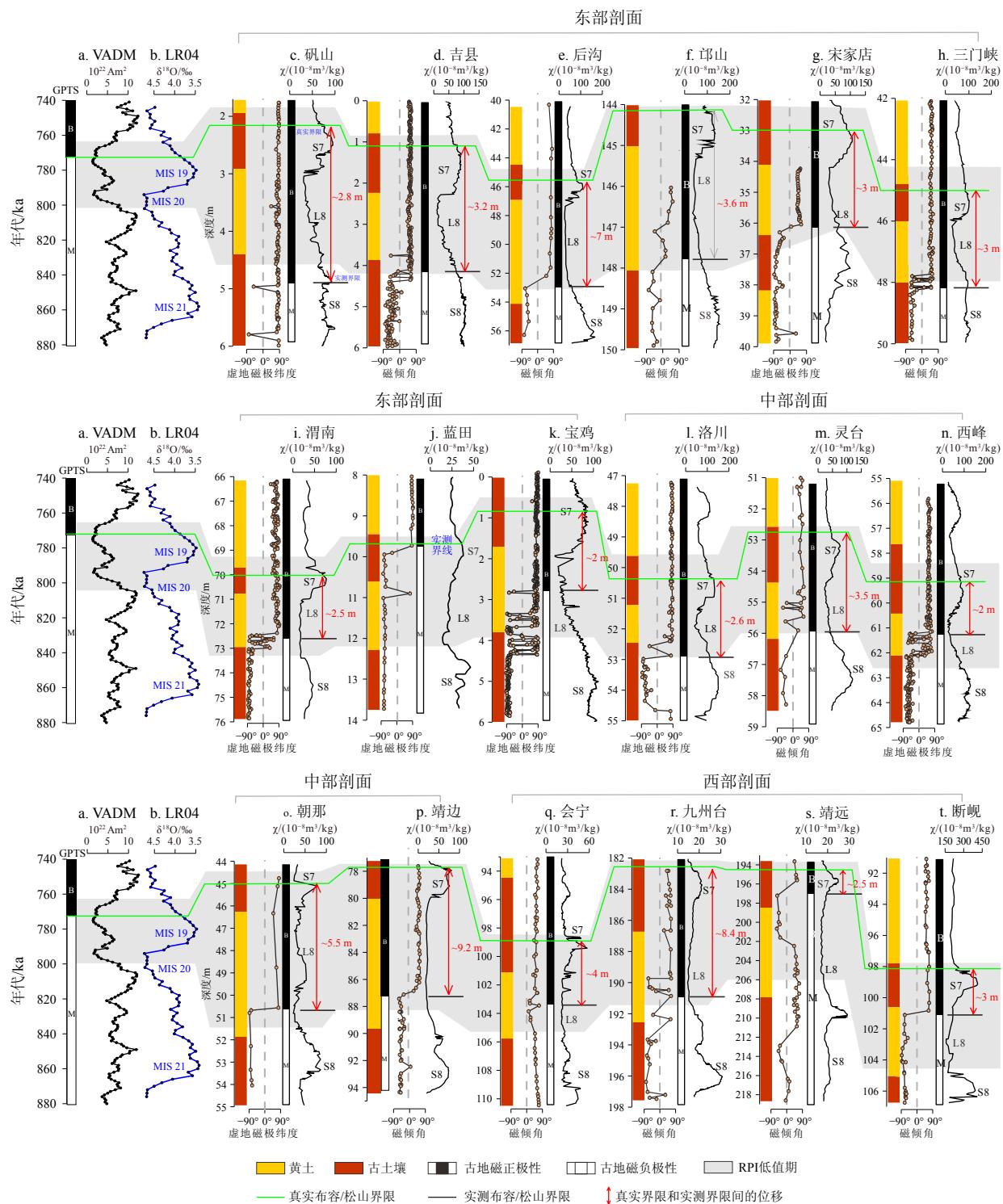


图 2 黄土高原不同剖面实测的布容/松山界限位置

a: PISO-1500 相对古强度曲线^[32], b: 深海氧同位素曲线 LR04^[33], c: 砚山剖面^[34], d: 吉县剖面^[34], e: 后沟剖面^[35], f: 邛山剖面^[36], g: 宋家店剖面^[37], h: 三门峡剖面^[38], i: 渭南剖面^[39], j: 蓝田剖面^[17], k: 宝鸡剖面^[40], l: 洛川剖面^[30], m: 灵台剖面^[16, 41], n: 西峰剖面^[26], o: 朝那剖面^[42], p: 靖边剖面^[43], q: 会宁剖面^[44], r: 九州台剖面^[45], s: 靖远剖面^[46], t: 断峴剖面^[47]。

Fig.2 The measured Brunhes/Matuyama boundary recorded in Chinese loess

a: Virtual axial dipole moment VADM: from PISO-1500^[32], b: Benthic $\delta^{18}\text{O}$ records from LR04^[33], c: Fanshan^[34], d: Jixian^[34], e: Hougou^[35], f: Mangshan^[36], g: Songjiadian^[37], h: Sanmenxia^[38], i: Weinan^[39], j: Lanian^[17], k: Baoji^[40], l: Luochuan^[30], m: Lingta^[16, 41], n: Xifeng^[26], o: Chaona^[42], p: Jingbian^[43], q: Huining^[44], r: Jiuzhoutai^[45], s: Jingyuan^[46], t: Duanxian^[47].

要的年龄控制点。目前, 通过火山岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年和深海氧同位素天文轨道调谐得到的加拉米诺正极性亚时起止年代分别为 1.071 和 0.99 Ma^[33, 59-60]。与布容/松山界限由负极性向正极性转变相比, 加拉米诺的底界和顶界分别记录了地磁场由负极性向正极性的转变和由正极性向负极性转变的情况。加之布容期的影响, 这些界限附近的地层经历了沉积后多次不同方向的地磁场的影响。因此, 加拉米诺的顶底界限较布容/松山界限受到的后期影响更为复杂, 但在黄土的研究中关注较少。

本文总结了黄土高原 16 个包含加拉米诺极性

亚时的剖面的磁性地层研究结果, 其中包括马村^[31]、后沟^[31]、曹村^[61]、宋家店^[37]、渭南^[39]、蓝田^[17]、宝鸡^[41, 62]、洛川^[30]、灵台^[63-64]、西峰^[16, 65]、朝那^[42]、靖边^[43, 66]、会宁^[44]、九州台^[45]、靖远^[46]、断岘^[47]剖面, 位置见图 1。如图 3 所示, 这些剖面所记录的加拉米诺顶、底界限位置同样存在不一致的现象, 加拉米诺顶界通常位于 L10—S11 之间的黄土层或古土壤层中; 底界位置出入较大, 多数剖面位于 S12 或 L13, 宝鸡、会宁、断岘剖面位于 S11, 位置相较于其他剖面偏高, 而马村和后沟剖面中位于 L14, 位置相较于其他剖面显著偏低。实测的加拉米诺极性亚

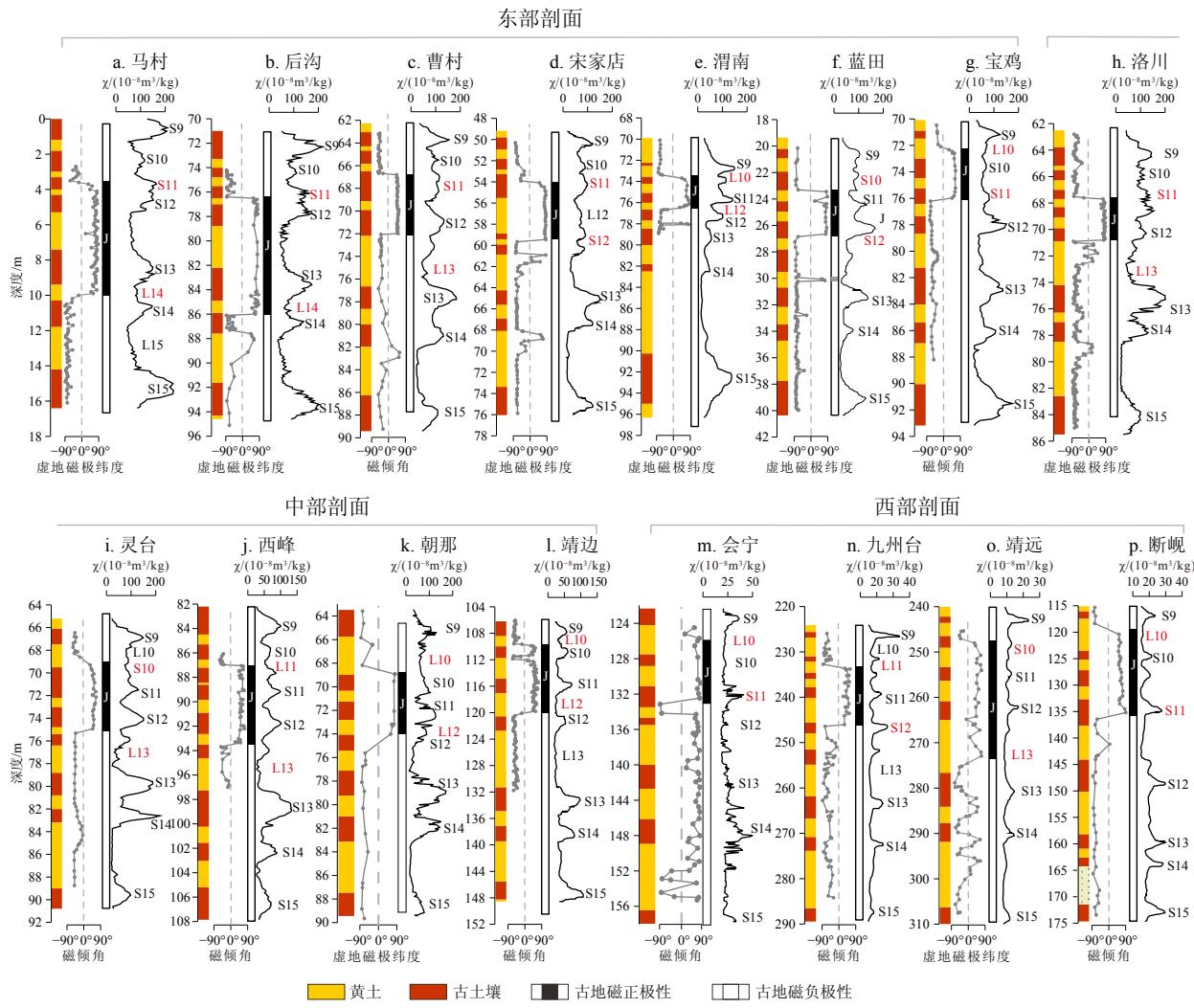


图 3 黄土高原不同剖面实测的加拉米诺极性亚时顶底界线的位置

a: 马村剖面^[31], b: 后沟剖面^[31], c: 曹村剖面^[61], d: 宋家店剖面^[37], e: 渭南剖面^[39], f: 蓝田剖面^[17], g: 宝鸡剖面^[41, 62], h: 洛川剖面^[30], i: 灵台剖面^[63-64], j: 西峰剖面^[16, 65], k: 朝那剖面^[42], l: 靖边剖面^[43, 66], m: 会宁剖面^[44], n: 九州台剖面^[45], o: 靖远剖面^[46], p: 断岘剖面^[47]。红色字体代表加拉米诺界限在剖面中的实测位置。

Fig.3 The measured Jaramillo normal subchron recorded in Chinese loess

a: Macun^[31], b: Hougou^[31], c: Caocun^[61], d: Songjiadian^[37], e: Weinan^[39], f: Lantian^[17], g: Baoji^[41, 62], h: Luochuan^[30], i: Lingtai^[63-64], j: Xifeng^[16, 65], k: Chaona^[42], l: Jingbian^[43, 66], m: Huining^[44], n: Jiuzhouhoutai^[45], o: Jingyuan^[46], p: Duanxian^[47]. The measured Jaramillo boundaries located in loess or paleosol are represented by red font.

时的顶、底界限在不同剖面中各不相同,存在超过一个黄土-古土壤旋回的差异,显然实测界限偏离了真实的界限位置。

对于这种不一致现象,一些研究者认为是由于对该段黄土和古土壤的地层单元划分方案不一致造成的^[27, 67-68]。但是,对于 S9 和 L15 的划分是十分明确的,S13 和 S14 的磁化率峰值特征极易识别,图 3 中各剖面该段地层的磁化率曲线也可进行良好对比,因此,对于实测的加拉米诺顶、底界限的差异不能用地层划分方案的差异来解释。Rolph^[69]通过兰州黄土的古地磁研究,发现该剖面记录的加拉米诺稳定性极差,认为加拉米诺在黄土中的顶底界限并不可靠。Guo 等^[66]发现加拉米诺顶界包含多次短期极性倒转,推测是剩磁延迟记录的表现,但这种情况只出现在所研究的靖边剖面中,其他剖面没有类似的情况。最近,Pan 等^[31]通过黄土磁化率和 RPI 指标与深海氧同位素及 RPI 的对比,将加拉米诺顶底界限在黄土中的真实位置分别确定在 S11 顶部和 S13 中部,并发现不同黄土剖面的实测加拉米诺顶、底界位置相对理论界限存在不同程度的上移或下移。界限发生上移的现象不能够用 lock-in 效应来解释,因为 lock-in 效应只能解释实测界限相对真实界限下移的情况。他们认为,由于加拉米诺时期存在多个地磁场强度减弱的时段,导致这些时段沉积的黄土的剩磁并不稳定,后期的重磁化作用导致了不同剖面加拉米诺的顶、底界限偏离了其真实位置^[31]。

1.3 奥尔都维正极性亚时的顶底界限

奥尔都维正极性亚时位于松山反极性时中,是加拉米诺正极性亚时之前的一个正极性亚时。最近,Channell 等^[54]基于 U1308 孔深海氧同位素记录得到奥尔都维极性亚时的精确起止年龄分别为 1.925 和 1.78 Ma。奥尔都维底界经历了奥尔都维、加拉米诺和布容 3 个正极性期以及 1.78~1.071、0.99~0.773 Ma 两个负极性期的影响,奥尔都维顶界经历了加拉米诺、布容正极性期和 1.78~1.071、0.99~0.773 Ma 负极性期的影响。对奥尔都维顶、底界开展研究可进一步验证上文对加拉米诺顶、底界限及布容/松山界限偏离其真实位置的解释。

黄土高原东部的曹村^[61]、蓝田^[17]、宝鸡^[62,70]剖面,中部的洛川^[30]、灵台^[43]、任家坡^[64]、朝那^[42]剖面,西部的会宁^[44]、九州台^[45]、龙担^[71]剖面都报道了奥尔都维极性亚时的高分辨率的磁性地层研究结果。如图 4 所示,奥尔都维顶、底界限位置在各剖

面中并不一致,奥尔都维在大多数剖面中被保存在 L25—S26,但曹村剖面的奥尔都维位于 L23—L26,位置相较于其他剖面偏高,而在洛川剖面位于 S25—L29,在龙担剖面位于 L26—L29,位置相较于其他剖面显著偏低。由于古土壤层 S26 是非常明显的标志层,通常与 S25 一起表现为特征明显的磁化率双峰,如灵台、任家坡、朝那等剖面(图 4)。尽管个别剖面的地层划分可能与其他剖面确有差异,但基于各剖面磁化率曲线的对比,可以排除地层划分差异引起的奥尔都维位置差异的可能性。对比不同气候区的各个剖面,我们发现奥尔都维边界在更为湿润的东部与更为干旱的中西部类似,例如蓝田与九州台剖面(图 4b, i)、宝鸡与会宁剖面(图 4c, h),这表明气候差异对奥尔都维边界位置的影响也可以忽略。黄土高原西部的沉积速率显著高于中东部地区,奥尔都维厚度可达 19~23 m,如九州台、龙担剖面,但位置仍然与中东部地区相似,这一现象指示沉积速率也不是造成奥尔都维位置差异的主要原因。可见,奥尔都维顶底界限的实测位置也偏离了其真实位置。

对于黄土记录的奥尔都维倒转界限的差异,朱日祥等^[68]认为产生位置差异主要是由地层划分方案不同所造成的。刘维明等^[30]认为黄土剩磁不存在显著的 lock-in 效应,对极性倒转界限的记录没有太大影响。Yang 等^[72]对宝鸡周边的两个平行剖面研究发现,奥尔都维顶界 L25 附近存在短时间内的多次正反极性倒转,Spasov 等^[73]随即在灵台剖面发现了相似情况,并认为此现象并非地磁场真实变化的反映,黄土记录的奥尔都维极性倒转边界并不可靠。我们猜测,奥尔都维顶底界限的实测位置可能与加拉米诺类似,也受到了后期重磁化的影响。目前,尚缺乏对奥尔都维顶底界限真实位置的详细研究。

1.4 松山/高斯极性倒转界限

松山/高斯极性倒转界限是第四纪极具年代和气候意义的地磁倒转边界,它十分靠近第四纪底界,是划分第四纪底界的重要依据之一^[6]。Cande 和 Kent^[74]依据海底磁异常条带的宽度计算,得到松山/高斯极性倒转发生在 2.581 Ma。随后,学者们通过肯尼亚湖泊沉积物的⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年得到松山/高斯界限的年龄为 2.589 Ma^[75]。Lisiecki 和 Raymo^[33]将松山/高斯界限的年龄修订为 2.608 Ma,位于深海记录的 MIS104。Ohno 等^[76]依据 U1314 孔的高分辨率磁性地层研究,得到其年龄为 2.587 Ma,位于 MIS103。最近,Channell 等^[54]基于 U1308 孔的 RPI

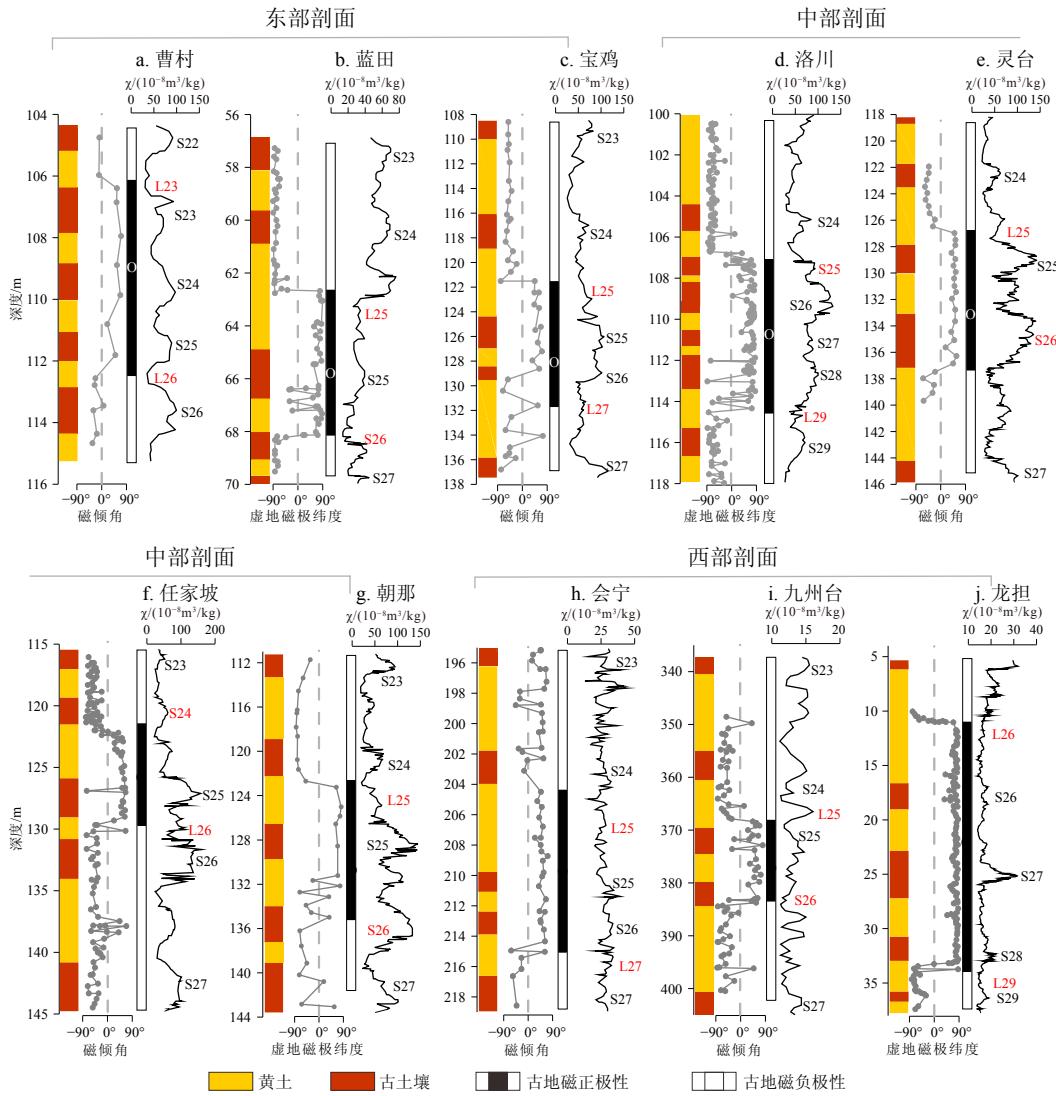


图 4 黄土高原不同剖面实测的奥尔都维极性亚时顶底界线的位置

a: 曹村剖面^[61], b: 蓝田剖面^[17], c: 宝鸡剖面^[62,70], d: 洛川剖面^[30], e: 灵台剖面^[43], f: 任家坡^[64], g: 朝那剖面^[42], h: 会宁剖面^[44], i: 九州台剖面^[45], j: 龙担剖面^[71]。红色字体代表奥尔都维界限在剖面中的实测位置。

Fig.4 The measured Olduvai normal subchron recorded in Chinese loess

a: Caocun^[61], b: Lantian^[17], c: Baoji^[62,70], d: Luochuan^[30], e: Lingtai^[43], f: Renjiapo^[64], g: Chaona^[42], h: Huining^[44], i: Jiuzhoutai^[45], j: Longdan^[71]. The measured Olduvai boundaries located in loess or paleosol are represented in red font.

序列认为, 松山/高斯极性倒转发生在 2.595 Ma, 位于 MIS104, 尽管其 RPI 的最低值对应 2.58 Ma。由此可见, 目前对于这一界限在深海记录中的确切位置仍未取得一致认识。目前, 2.595 Ma 这一年龄已被纳入全球第四纪年代地层对比表^[6], 但可以预见, 随着未来更多高分辨率的深海钻孔的研究, 这一年龄还会进一步修订。

在黄土中, 松山/高斯界限位于第四纪黄土和下伏三趾马红土(或称为红黏土)的分界附近, 靠近第四纪黄土的底部。早期, Heller 和刘东生^[8]根据洛川剖面的磁性地层结果, 认为松山/高斯界限位于红黏土顶部。随后, Liu 等^[77]在西峰剖面得到相似的

结果, 并依据当时的地磁极性年表推测黄土底界年龄约为 2.4 Ma。孙建中等^[78]根据刘家坡剖面的古地磁结果, 发现松山/高斯界限位于第四纪黄土中, 大约位于黄土与红黏土界限之上 6.1 m 处, 他们据此推算黄土底界年龄约为 2.66 Ma。由此可见, 松山/高斯界限在黄土中的位置涉及到第四纪黄土开始堆积的时间。而中国黄土作为国际第四纪陆相标准地层序列之一^[6,79], 其底界年代具有十分重要的地层学意义。

对于松山/高斯界限在中国黄土中的位置, 我们搜集了黄土高原目前已发表的包含松山/高斯界限的 12 个剖面的磁性地层研究结果(图 5), 包括曹

村^[61]、渭南^[80-81]、蓝田^[82]、宝鸡^[83]、灵台^[43]、任家坡^[64]、西峰^[82]、泾川^[84]、佳县^[85]、朝那^[42]、那勒寺^[86]、郭泥沟^[86]剖面,各剖面位置见图1。松山/高斯界限在大多数剖面中被保存在L33中部,但在曹村、灵台、郭泥沟剖面中位于L33顶部,位置相较于其他剖面偏高,而泾川剖面的松山/高斯界限位于红黏土顶部,位置显著偏低。这些差异直接影响了黄土底界年代的判定及黄土年代标尺的建立。对比各剖面的地层划分方案,发现松山/高斯界限所在地层的命名无差异。不同气候区的剖面显示,位于东部较湿润地区的曹村剖面与位于西部干旱地区的郭泥沟剖面记录的松山/高斯界限位置类似(图5a, l),而东

部的渭南、蓝田剖面(图5b, c)与中部的任家坡、佳县剖面(图5f, i)记录的界限位置也无太大差异,这表明气候差异对松山/高斯界限位置无明显影响。而西部具有高沉积速率的剖面记录的松山/高斯界限位置仍然与中东部相似,说明沉积速率对极性界限位置差异也无明显影响。因此,势必有其他因素影响松山/高斯界限的实测位置。

对此,岳乐平^[87]认为应该从地层和古气候角度理解,松山/高斯界限位于典型的黄土-红黏土过渡带,对该过渡带的理解不同将决定该界限的位置。此外,局部地质环境或气候差异造成红黏土堆积时间的不同,使得松山/高斯界限可能落在黄土中,也

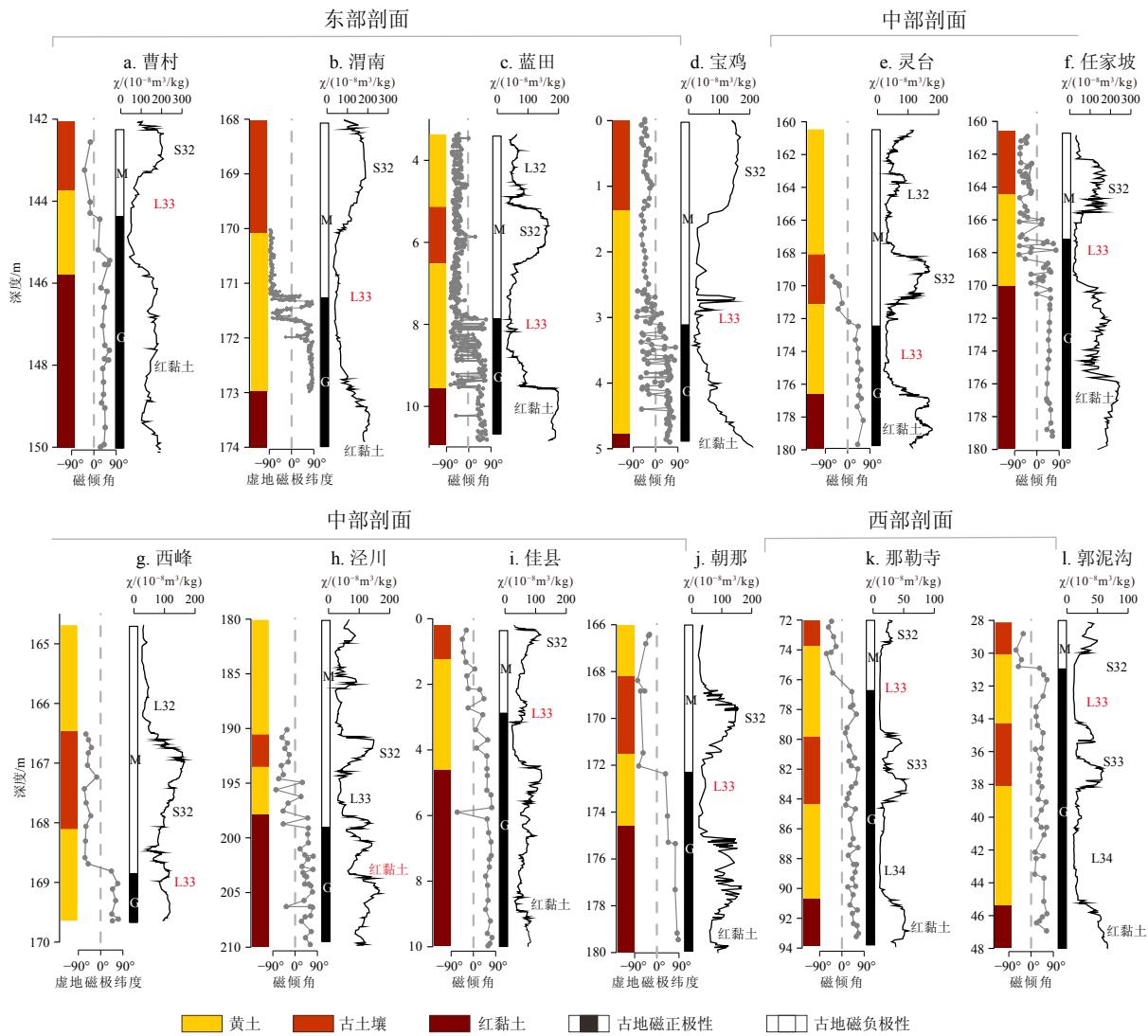


图5 黄土高原不同剖面实测的松山/高斯界限位置

a: 曹村剖面^[61], b: 渭南剖面^[80-81], c: 蓝田剖面^[82], d: 宝鸡剖面^[83], e: 灵台剖面^[43], f: 任家坡剖面^[64], g: 西峰剖面^[82], h: 泾川剖面^[84], i: 佳县剖面^[85], j: 朝那剖面^[42], k: 那勒寺剖面^[86], l: 郭泥沟剖面^[86]。红色字体代表松山/高斯界限在剖面中的实测位置。

Fig.5 The measured Matuyama/Gauss boundary recorded in Chinese loess

a: Caocun^[61], b: Weinan^[80-81], c: Lantian^[82], d: Baoji^[83], e: Lingtai^[43], f: Renjiapo^[64], g: Xifeng^[82], h: Jingchuan^[84], i: Jiaxian^[85], j: Chaoma^[42], k: Nalesi^[86], l: Guonigou^[86]. The measured Matuyama/Gauss boundary located in loess or paleosol are represented by red font.

可能落在红黏土中。谢兴俊等^[88]则认为是由同一剖面前后地层划分方案不一致造成的, 特别是洛川、西峰剖面经历了多次地层划分, 很容易出现同一地层有不同名称的现象, 导致松山/高斯界限出现在不同层位。Yang 等^[83]在宝鸡附近的两个剖面中发现松山/高斯倒转期间记录了 13 次高频极性倒转, 这一现象未在其他黄土剖面和深海记录中发现^[54, 76], 表明黄土记录的高频极性倒转可能不真实。最近, Zhou 等^[82]通过蓝田和西峰剖面的¹⁰Be 浓度峰值, 认为真实的松山/高斯界限位于古土壤层 S32, 这比以上所有剖面的实测界限都靠上。这意味着, 黄土记录的松山/高斯界限也受到了重磁化作用, 导致实测极性界限位置较真实位置下移。

基于对黄土中几个主要极性界限位置的综合分析, 我们已排除 lock-in 效应、气候和沉积速率差异、黄土地层划分差异对黄土所记录的极性界限位置的影响, 并通过极性界限的实测位置与真实位置的偏差推测极性界限附近的黄土很可能受到了重磁化的影响, 并且重磁化机制可以合理解释极性界限相对真实界限发生上移和下移的现象。未来对黄土的重磁化过程和机制的研究还需加强, 特别是要加强黄土剩磁获取机制以及影响重磁化因素的实验模拟研究, 目前已有一些相关探索^[53, 89], 并取得了重要进展。

2 中国黄土和深海氧同位素对比方案的分歧

自 20 世纪 80 年代 Heller 和刘东生^[9]首次将中国黄土磁化率记录和深海氧同位素记录进行对比以来, 相继出现了多套海陆对比方案。在进行海陆对比时, 学者们通常以研究剖面的实测古地磁界限为年龄控制点, 将其与深海氧同位素记录直接关联^[14-15, 90]。由上文可知, 不同剖面记录的同一古地磁界限存在差异, 特别是加拉米诺和奥尔都维的实测边界差异极大, 这导致不同学者根据不同黄土剖面实测的古地磁界限位置所提出的海陆对比方案之间存在较大分歧。这些年代学上的分歧严重影响了中国黄土作为国际第四纪陆相标准地层的权威性。具体而言, 这些对比方案的分歧包括:

2.1 S4—S9 段海-陆对比的分歧

黄土中的布容/松山倒转界限包含于 S4—S9 段。深海记录显示, 布容/松山倒转界限位于 MIS19。研究者们对于黄土记录的布容/松山倒转界限的位

置持不同观点, 一些学者认为黄土剩磁获取存在 lock-in 效应或重磁化, 导致实测的布容/松山界限下移, 因此根据磁化率曲线与深海氧同位素的相似性将 S7 对应 MIS19, S4—S9 段对应 MIS11—25^[14, 24, 26, 49, 91]。另有研究者认为 lock-in 效应导致的下移深度不大^[25], 或是 L8 和 S8 之间存在的不准确气候界限造成界限位置混乱, 实测的布容/松山界限没有发生显著下移, 故仍将 S8 对应 MIS19^[28]。

2.2 S10—S16 段海-陆对比的分歧

加拉米诺正极性亚时被记录在黄土中的 S10—S16 段内。深海记录显示, 加拉米诺底界对应 MIS31, 顶界对应 MIS28, 持续约 80 ka^[33, 92]。前人将 S12 与 MIS31 对应^[14, 16, 93-95], 或将 S11 对应 MIS31^[45], L12 顶部对应 MIS31^[15], 这均是依据实测的加拉米诺底界位置确定的。但实测位置在不同剖面中并不一致, 这也是导致该段地层与深海氧同位素对比出现不同方案的主要原因。Pan 等^[31]根据黄土磁化率的变化特征及 RPI 证据, 将 S13 和 S14 分别与 MIS31 和 MIS33 对应, S11 和 S12 分别与 MIS28 和 MIS29 的峰值对应, 制定出一套不以古地磁实测界限为年龄控制点的海陆对比方案。

2.3 S20—S28 段海-陆对比的分歧

包含奥尔都维正极性亚时的 S20—S28 段海陆对比方案同样存在分歧。深海记录显示, 奥尔都维底界对应 MIS73, 顶界对应 MIS63, 持续约 145 ka^[54]。值得注意的是, 这一方案不同于目前仍被广泛使用的 LR04 方案^[33]。在现有的黄土与深海对比方案中, 一些研究者将实测奥尔都维顶界 L25 与 MIS63 对应, 实测奥尔都维底界 S26 或 L27 对应 MIS71 或 MIS73^[15-16, 45, 90]。根据上文, 奥尔都维顶界可能出现在 L23—L26, 奥尔都维底界也可能出现在 L26、S26、L27 以及 L29。因此, 实测的奥尔都维顶、底界位置不宜作为黄土磁化率与深海记录对比的年龄控制点。值得注意的是, 在深海氧同位素记录中, 关于奥尔都维底界对应 MIS71 还是 MIS73 的问题仍有争议^[6, 54], 这也会带来黄土与深海氧同位素对比的不确定性。

2.4 S29—L33 段海-陆对比的分歧

在国际第四纪划分方案中, 深海氧同位素 MIS103 被视作第四纪的底界, 而深海记录的松山/高斯界限位于氧同位素 MIS104 中^[6]。松山/高斯界限所在的 S29—L33 段的海陆对比方案也存在分歧。在

以往的对比方案中,一些学者依据黄土和红黏土的界限,将黄土最底部的地层 L33 或 S32 对应 MIS103—104,即使松山/高斯界限并未出现在其中^[14, 16]。而在对黄土的磁性地层定年中,实测的松山/高斯界限有时位于黄土层 L33 中^[42-43, 61, 64, 80, 82-83, 85-86],也有时位于红黏土中^[84],若以实测松山/高斯界限为海陆对比依据,将导致两种不同的黄土与深海对比方案。因此,确定松山/高斯界限在黄土中的真实位置对标定第四纪的底界年龄有重要意义。当然,由于目前松山/高斯界限在深海记录中的确切位置也存在分歧^[33, 54, 76],若能在黄土磁性地层研究中确定其位置,也是对国际第四纪下限位置研究的重要贡献。最近,我国学者已取得这方面的重要进展^[82]。

3 地磁场相对古强度是揭示黄土极性倒转界限真实位置的独立指标

上述研究表明,第四纪黄土记录的几个主要极性界限的实测极性倒转位置在不同黄土剖面中存在差异,这很可能是由于倒转界限附近的黄土受到了后期重磁化的影响。这意味着,不宜通过黄土的古地磁记录开展地磁场倒转过程、倒转路径等地磁场行为研究。由于不同黄土剖面实测的极性倒转界限往往偏离了其真实位置,这将直接影响轨道尺度的黄土年代标尺的可靠性,也导致了黄土与深海氧同位素记录对比方案的不确定性,并制约了对黄土记录的古气候事件的精确年代、东亚季风的周期特征及驱动机制等问题的深入研究。根据上文分析可以看出,确定这些极性倒转界限在黄土剖面中的真实位置是解决这些问题的关键。

研究表明,在地磁极性倒转时期,地磁场强度会发生显著减弱^[54-58]。因此,地磁场相对古强度(RPI)变化序列中的极小值能够十分准确地反映出极性倒转界限和极性漂移事件的真实位置,并且其变化序列中的极大/小值点还可作为独立的年龄控制点,与已有精准年代标尺的全球 RPI 标准序列对比就可以获得沉积序列的年龄框架^[32, 57-58, 96-97]。值得注意的是,地磁场强度减弱会减小对宇宙高能粒子的屏蔽作用,¹⁰Be、³⁶Cl、¹⁴C 等宇宙成因核素的产率在此期间会显著增加,故而这些核素的浓度也可作为 RPI 重建的指标,用于揭示极性倒转界限的真实位置^[26, 56, 98-102]。

对 RPI 的重建始于深海记录,研究者们基于大量深海钻孔 RPI 重建结果的集成,获得了一系列不同时间尺度的全球地磁场相对古强度变化的标准序

列,如 Sint-200^[103]、Sint-800^[58]、NAPIS-75^[104]、SAPIS^[105]、Sint-2000^[57]、PISO-1500^[32]、NARPI-2200^[54]、EPAPIS-3Ma^[106] 等。这些序列能够清晰地记录极性倒转界限和地磁漂移事件,是独立的 RPI 年代标尺。目前,基于高分辨率的深海 RPI、磁性地层和氧同位素的综合研究,研究者们已将第四纪主要的地磁极性界限年代进行了修订。其中,奥尔都维的底界年代被修订为 1.925 Ma^[54-55]。同时,基于 U1308 孔高分辨率的 RPI 及氧同位素集成曲线 LR04 序列的对比,已获得该孔 3.15 Ma 以来高分辨率的 RPI 年代序列和极性倒转及极性漂移事件的年代^[54-55]。最近,国际地层委员会已将 2.2 Ma 以来的 RPI 集成曲线及修订的第四纪地磁极性界限年代纳入了全球第四纪年代地层对比表,与深海氧同位素集成曲线 LR04 一同作为第四纪年代对比的国际标准曲线^[6-7]。

建立可靠的 RPI 需排除外部气候因素、沉积扰动以及样品自身磁性矿物种类、粒度及浓度的影响^[97, 107-108]。大量岩石磁学证据表明,黄土的 NRM 主要由磁铁矿携带,磁性矿物多为假单畴颗粒^[80, 107, 109],符合研究要求。对于重磁化发生的原因,普遍认为是由于粗颗粒的磁性颗粒在沉积后进行重新排列而打乱了原始剩磁方向^[38],此过程磁性颗粒既没有溶解也没有增加,对剩磁强度没有影响。因此,黄土适用于地磁场相对古强度研究。

中国学者已在黄土 RPI 序列重建领域取得了重要进展,学者们根据黄土 RPI 变化特征识别出极性倒转界限和短期漂移事件的真实位置,并利用 RPI 构建了黄土精确年代标尺。Zhu 等^[110]率先对西峰剖面布容/松山界限附近的地层开展 RPI 重建工作,发现极性倒转期间黄土 RPI 处于低值期; Pan 等^[107]进而系统地研究了重建黄土 RPI 的方法并验证了其可行性。近年来,学者们相继对多个剖面的布容/松山、加拉米诺、松山/高斯等极性倒转时期附近的 RPI 开展了研究,发现这些时期的黄土 RPI 值都较低^[31, 52, 80, 109, 111],与深海记录一致。一些学者通过分析黄土 RPI 变化特征,成功建立了晚第四纪黄土的年代标尺^[112-113]。Pan 等^[31]将在三门峡马村剖面重建的 RPI 与 PISO-1500 曲线和¹⁰Be/⁷Be 浓度曲线进行对比,确定出了加拉米诺边界在黄土中的真实位置。

总之,前人已通过深海 RPI 序列构建起精确的 RPI 年代标尺,现有研究也验证了黄土 RPI 记录地磁场倒转的可靠性以及与深海 RPI 的可对比性。这为进一步通过 RPI 确定极性倒转界限在中国黄土中的真实位置提供了基础。未来需加强黄土 RPI

和宇宙成因核素及磁极性地层学和气候地层的综合研究。黄土中¹⁰Be 浓度的高值与 RPI 低值对应, 二者交叉验证, 可共同确定黄土中地磁极性倒转界限的真实位置。再结合黄土气候地层与深海记录的对比、黄土磁极性地层实测界限位置与真实位置的对比, 可进一步揭示黄土所记录的各个极性界限的重磁化深度和剩磁获取机制。在气候地层学研究中, 使用由黄土 RPI 确定的古地磁界限的真实位置作为年龄控制点, 开展轨道调谐, 可消除不同学者基于磁极性地层定年的差异, 构建更精确的黄土年代标尺, 有望最终解决黄土和深海氧同位素对比的分歧。

4 结论

中国黄土记录的布容/松山、加拉米诺、奥尔都维和松山/高斯极性倒转界限实测位置在不同剖面中并不一致, 表明黄土所记录的这些界限的位置并不对应理论上的真实位置。不同剖面之间的位置差异不能用 lock-in 效应、气候差异、黄土地层划分和沉积速率差异来解释, 指示其很可能受后期重磁化的影响。这导致了不同学者基于实测的极性倒转界限所构建的轨道尺度黄土年代标尺存在较大分歧, 也导致了黄土与深海氧同位素记录的对比存在不确定性, 进而制约了对黄土记录的古气候信息的深入发掘和对相关机制的探讨。解决这些问题的关键在于确定极性倒转界限在黄土剖面中的真实位置。黄土相对古强度 (RPI) 可指示地磁场的倒转, 且不受重磁化的影响, 有望准确揭示极性倒转界限的真实位置, 构建更为精准的黄土年代标尺, 为进一步深入探讨东亚季风演化历史和动力机制奠定基础, 并最终解决中国黄土与深海记录轨道尺度对比方案的分歧。

参考文献 (References)

- [1] An Z S. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1-5): 171-187.
- [2] An Z S. Late Cenozoic Climate Change in Asia: Loess, Monsoon and Monsoon-Arid Environment Evolution[M]. Dordrecht: Springer, 2014: 1-582.
- [3] Guo Z T, Biscaye P, Wei L Y, et al. Summer monsoon variations over the last 1.2 Ma from the weathering of loess-soil sequences in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(12): 1751-1754.
- [4] Hao Q Z, Wang L, Oldfield F, et al. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400, 000-year minima in insolation variability[J]. *Nature*, 2012, 490(7420): 393-396.
- [5] Liu T, Ding Z L. Chinese loess and the paleomonsoon[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1998, 26: 111-145.
- [6] Cohen K M, Gibbard P L. Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years, version 2019 QI-500[J]. *Quaternary International*, 2019, 500: 20-31.
- [7] Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. Geologic Time Scale 2020[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020: 1-1357.
- [8] Heller F, Tung-sheng L. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China[J]. *Nature*, 1982, 300(5891): 431-433.
- [9] Heller F, Tungsheng L. Magnetism of Chinese loess deposits[J]. *Geophysical Journal International*, 1984, 77(1): 125-141.
- [10] Kukla G, Heller F, Ming L X, et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility[J]. *Geology*, 1988, 16(9): 811-814.
- [11] Hovan S A, Rea D K, Pisias N G, et al. A direct link between the China loess and marine δ¹⁸O records: aeolian flux to the north Pacific[J]. *Nature*, 1989, 340(6231): 296-298.
- [12] Ding Z, Yu Z, Rutter N W, et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13(1): 39-70.
- [13] Lu H U, Liu X D, Zhang F Q, et al. Astronomical calibration of loess-paleosol deposits at Luochuan, central Chinese Loess Plateau[J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 154(3): 237-246.
- [14] Heslop D, Langereis C G, Dekkers M J. A new astronomical timescale for the loess deposits of Northern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 184(1): 125-139.
- [15] 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 δ¹⁸O record[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 1033.
- [16] Sun Y B, Clemens S C, An Z S, et al. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1-2): 33-48.
- [17] Zhu Z Y, Dennell R, Huang W W, et al. Hominin occupation of the Chinese Loess Plateau since about 2.1 million years ago[J]. *Nature*, 2018, 559(7715): 608-612.
- [18] Ao H, Rohling E J, Stringer C, et al. Two-stage mid-Brunhes climate transition and mid-Pleistocene human diversification[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 210: 103354.
- [19] Beck J W, Zhou W J, Li C, et al. A 550, 000-year record of East Asian monsoon rainfall from ¹⁰Be in loess[J]. *Science*, 2018, 360(6391): 877-881.
- [20] Han Y M, An Z S, Marlon J R, et al. Asian inland wildfires driven by glacial-interglacial climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(10): 5184-5189.
- [21] Sun Y B, McManus J F, Clemens S C, et al. Persistent orbital influence on millennial climate variability through the Pleistocene[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(11): 812-818.
- [22] Sun Y B, Clemens S C, Morrill C, et al. Influence of Atlantic meridi-

- onal overturning circulation on the East Asian winter monsoon[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(1): 46-49.
- [23] Lu H X, Liu W G, Yang H, et al. 800-kyr land temperature variations modulated by vegetation changes on Chinese Loess Plateau[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1958.
- [24] 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[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 168(1-2): 117-130.
- [25] Liu Q S, Roberts A P, Rohling E J, et al. Post-depositional remanent magnetization lock-in and the location of the Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal boundary in marine and Chinese loess sequences[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 275(1-2): 102-110.
- [26] Zhou W J, Beck J W, Kong X H, et al. Timing of the Brunhes-Matuyama magnetic polarity reversal in Chinese loess using ^{10}Be [J]. *Geology*, 2014, 42(6): 467-470.
- [27] Liu Q S, Jin C S, Hu P X, et al. Magnetostratigraphy of Chinese loess-paleosol sequences[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 139-167.
- [28] Jin C S, Liu Q S, Xu D K, et al. A new correlation between Chinese loess and deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ records since the middle Pleistocene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 506: 441-454.
- [29] 强小科, 徐新文, 陈艇, 等. 黄土高原黄土序列松山-布容地磁极性倒转界线空间分布特征与影响因素探讨 [J]. *第四纪研究*, 2016, 36(5): 1125-1138. [QIANG Xiaoke, XU Xinwen, CHEN Ting, et al. Spatial characteristics and influencing factors of Matuyama-Brunhes polarity reversal boundary (MBB) in eolian sequences from the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(5): 1125-1138.]
- [30] 刘维明, 张立原, 孙继敏. 高分辨率洛川剖面黄土磁性地层学 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(4): 888-894. [LIU Weiming, ZHANG Liyuan, SUN Jimin. High resolution magnetostratigraphy of the Luochuan loess-paleosol sequence in the central Chinese Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(4): 888-894.]
- [31] Pan Q, Xiao G Q, Zhao Q Y, et al. The Jaramillo subchron in Chinese loess-paleosol sequences[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 572: 110423.
- [32] Channell J E T, Xuan C, Hodell D A. Stacking paleointensity and oxygen isotope data for the last 1.5 Myr (PISO-1500)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 283(1-4): 14-23.
- [33] Lisicki L E, Raymo M E. A Pliocene - Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1): PA1003.
- [34] Wang X S, Løvlie R, Chen Y, et al. The Matuyama-Brunhes polarity reversal in four Chinese loess records: high-fidelity recording of geomagnetic field behavior or a less than reliable chronostratigraphic marker?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 101: 61-76.
- [35] Xiao G Q, Pan Q, Zhao Q Y, et al. Early Pleistocene integration of the Yellow River II: evidence from the Plio-Pleistocene sedimentary record of the Fenwei Basin[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 577: 110550.
- [36] Zheng H B, Huang X T, Ji J L, et al. Ultra-high rates of loess sedimentation at Zhengzhou since Stage 7: implication for the Yellow River erosion of the Sanmen Gorge[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3-4): 131-142.
- [37] 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[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(6): 520-529.
- [38] Wang X S, Løvlie R, Yang Z Y, et al. Remagnetization of Quaternary eolian deposits: a case study from SE Chinese Loess Plateau[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(6): Q06H18.
- [39] Pan Y X, Zhu R X, Liu Q S, et al. Geomagnetic episodes of the last 1.2 Myr recorded in Chinese loess[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(8): 1282.
- [40] Yang T S, Hyodo M, Yang Z Y, et al. Multiple rapid polarity swings during the Matuyama-Brunhes transition from two high-resolution loess-paleosol records[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B5): B05101.
- [41] Meng X Q, Liu L W, Wang X T, et al. Mineralogical evidence of reduced East Asian summer monsoon rainfall on the Chinese loess plateau during the early Pleistocene interglacials[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 486: 61-69.
- [42] Song Y G, Fang X M, Li J J, et al. The Late Cenozoic uplift of the Liupan Shan, China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44(1): 176-184.
- [43] Ding Z L, Sun J M, Liu D S. Stepwise advance of the Mu Us Desert since late Pliocene: evidence from a red clay-loess record[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(13): 1211-1214.
- [44] Niu Y N, Fan Y X, Qiao Y S, et al. Chronostratigraphy of a loess-paleosol sequence in the western Chinese Loess Plateau based on ESR dating and magnetostratigraphy[J]. *Quaternary International*, 2022, 637: 1-11.
- [45] Zhang J, Li J J, Guo B H, et al. Magnetostratigraphic age and monsoonal evolution recorded by the thickest Quaternary loess deposit of the Lanzhou region, western Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 139: 17-29.
- [46] Sun Y B, Yin Q Z, Crucifix M, et al. Diverse manifestations of the mid-Pleistocene climate transition[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 352.
- [47] 杨东, 方小敏, 董光荣, 等. 1.8 Ma BP 以来陇西断层黄土剖面沉积特征及其反映的腾格里沙漠演化 [J]. *中国沙漠*, 2006, 26(1): 6-13. [YANG Dong, FANG Xiaomin, DONG Guangrong, et al. Loess deposit characteristic in Duanxian section of Longxi Basin and its reflected evolution of Tengger Desert at north of China since last 1.8 Ma[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(1): 6-13.]
- [48] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times[J]. *Nature*, 2001, 411(6833): 62-66.
- [49] Spassov S, Heller F, Evans M E, et al. A lock-in model for the complex Matuyama-Brunhes boundary record of the loess/palaeosol sequence at Lingtai (Central Chinese Loess Plateau)[J]. *Geophysical Journal International*, 2003, 155(2): 350-366.
- [50] Sun Y B, Qiang X K, Liu Q S, et al. Timing and lock-in effect of the

- Laschamp geomagnetic excursion in Chinese Loess[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(11): 4952-4961.
- [51] Zhu R X, Pan Y X, Guo B, et al. A recording phase lag between ocean and continent climate changes: constrained by the Matuyama/Brunhes polarity boundary[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(19): 1593-1599.
- [52] Jin C S, Liu Q S. Reliability of the natural remanent magnetization recorded in Chinese loess[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B4): B04103.
- [53] Løvlie R, Wang R H, Wang X S. In situ remagnetization experiments of loess on the Chinese Loess Plateau: evidence for localized post-depositional remanent magnetization[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(12): Q12015.
- [54] Channell J E T, Hodell D A, Curtis J H. Relative paleointensity (RPI) and oxygen isotope stratigraphy at IODP Site U1308: North Atlantic RPI stack for 1.2-2.2 Ma (NARPI-2200) and age of the Olduvai Subchron[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 131: 1-19.
- [55] Channell J E T, Singer B S, Jicha B R. Timing of Quaternary geomagnetic reversals and excursions in volcanic and sedimentary archives[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 228: 106114.
- [56] Valet J P, Bassinot F, Simon Q, et al. Constraining the age of the last geomagnetic reversal from geochemical and magnetic analyses of Atlantic, Indian, and Pacific Ocean sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 506: 323-331.
- [57] Valet J P, Meynadier L, Guyodo Y. Geomagnetic dipole strength and reversal rate over the past two million years[J]. *Nature*, 2005, 435(7043): 802-805.
- [58] Guyodo Y, Valet J P. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr[J]. *Nature*, 1999, 399(6733): 249-252.
- [59] Izett G A, Obradovich J D. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints for the Jaramillo Normal Subchron and the Matuyama - Brunhes geomagnetic boundary[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B2): 2925-2934.
- [60] 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]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B1): 679-693.
- [61] 赵志中, 吴锡浩, 蒋复初, 等. 三门峡地区黄土与古季风 [J]. *地质力学学报*, 2000, 6(4): 19-26,66. [ZHAO Zhizhong, WU Xihao, JIANG Fuchu, et al. The loess stratigraphy in Sanmenxia area[J]. *Journal of Geomechanics*, 2000, 6(4): 19-26,66.]
- [62] Rutter N, Ding Z L, Evans M E, et al. Magnetostratigraphy of the Baoji loess-paleosol section in the north-central China Loess Plateau[J]. *Quaternary International*, 1990, 7-8: 97-102.
- [63] Ding Z L, Sun J M, Yang S L, et al. Preliminary magnetostratigraphy of a thick eolian red clay-loess sequence at Lingtai, the Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(8): 1225-1228.
- [64] Sun D H, Shaw J, An Z S, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2 Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(1): 85-88.
- [65] Li T, Liu F, Abels H A, et al. Continued obliquity pacing of East Asian summer precipitation after the mid-Pleistocene transition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 457: 181-190.
- [66] Guo B, Zhu R X, Florindo F, et al. A short, reverse polarity interval within the Jaramillo subchron: evidence from the Jingbian section, northern Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B6): 2124.
- [67] Jin C S, Liu Q S. Remagnetization mechanism and a new age model for L9 in Chinese loess[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, 187(3-4): 261-275.
- [68] 朱日祥, 岳乐平, 白立新. 中国第四纪古地磁学研究进展 [J]. *第四纪研究*, 1995, 15(2): 162-173. [ZHU Rixiang, YUE Leping, BAI Lixin. Progress of quaternary paleomagnetism in China[J]. *Quaternary Sciences*, 1995, 15(2): 162-173.]
- [69] Rolph T C. The Matuyama-Jaramillo R-N transition recorded in a loess section near Lanzhou, P. R. China[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1993, 45(4): 301-318.
- [70] Yang S L, Ding Z L. Drastic climatic shift at \sim 2.8 Ma as recorded in eolian deposits of China and its implications for redefining the Pliocene-Pleistocene boundary[J]. *Quaternary International*, 2010, 219 (1-2): 37-44.
- [71] 刘平, 张崧, 韩家懋, 等. 甘肃龙担早第四纪黄土堆积古地磁年代研究 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 796-805. [LIU Ping, ZHANG Song, HAN Jiamao, et al. Paleomagnetic chronology of Quaternary stratigraphy of the Longdan section in Gansu Province of China[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 796-805.]
- [72] Yang T S, Hyodo M, Yang Z Y, et al. Latest Olduvai short-lived reversal episodes recorded in Chinese loess[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B5): B05103.
- [73] Spassov S, Hus J, Heller F, et al. The termination of the Olduvai Subchron at Lingtai, Chinese Loess Plateau: geomagnetic field behavior or complex remanence acquisition?[M]//Petrovský E, Ivers D, Harinarayana T, et al. The Earth's Magnetic Interior. Dordrecht: Springer, 2011: 235-245.
- [74] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B4): 6093-6095.
- [75] Deino A L, Kingston J D, Glen J M, et al. Precessional forcing of lacustrine sedimentation in the late Cenozoic Chemeron Basin, Central Kenya Rift, and calibration of the Gauss/Matuyama boundary[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 247(1-2): 41-60.
- [76] Ohno M, Hayashi T, Komatsu F, et al. A detailed paleomagnetic record between 2.1 and 2.75 Ma at IODP Site U1314 in the North Atlantic: geomagnetic excursions and the Gauss-Matuyama transition[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(5): Q12Z39.
- [77] Liu X M, Liu T, Xu T C, et al. The Chinese loess in Xifeng, I. The primary study on magnetostratigraphy of a loess profile in Xifeng area, Gansu province[J]. *Geophysical Journal International*, 1988, 92(2): 345-348.
- [78] 孙建中, 赵景波, 孙秀英, 等. 黄土, 还要更老些 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(1): 105-112. [SUN Jianzhong, ZHAO Jingbo,

- SUN Xiuying, et al. Loess is even older[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7(1): 105-112.]
- [79] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stepwise expansion of desert environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(1-2): 45-55.
- [80] 朱日祥, 郭斌, 丁仲礼, 等. Gauss-Matuyama 极性转换期间地球磁场方向和强度变化特征 [J]. *地球物理学报*, 2000, 43(5): 621-634. [ZHU Rixiang, GUO Bin, DING Zhongli, et al. Gauss-Matuyama polarity transition obtained from a loess section at Weinan, North-Central China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(5): 621-634.]
- [81] Ding Z L, Rutter N W, Liu T. The onset of extensive loess deposition around the G/M boundary in China and its palaeoclimatic implications[J]. *Quaternary International*, 1997, 40: 53-60.
- [82] Zhou W J, Kong X H, Du Y J, et al. ^{10}Be indicator for the Matuyama - Gauss magnetic polarity reversal from Chinese Loess[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(8): e2022GL102486.
- [83] Yang T S, Hyodo M, Yang Z Y, et al. High-frequency polarity swings during the Gauss-Matuyama reversal from Baoji loess sediment[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(8): 1929-1943.
- [84] 杨石岭, 侯圣山, 王旭, 等. 渭河晚第三纪红粘土的磁性地层及其与灵台剖面的对比 [J]. *第四纪研究*, 2000, 20(5): 423-434. [YANG Shiling, HOU Shengshan, WANG Xu, et al. Completeness and continuity of the Late Tertiary red clay sequence in Northern China: evidence from the correlation of magnetostratigraphy and pedostratigraphy between Jingchuan and Lingtai[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(5): 423-434.]
- [85] 丁仲礼, 孙继敏, 朱日祥, 等. 黄土高原红粘土成因及上新世北方干旱化问题 [J]. *第四纪研究*, 1997, 17(2): 147-157. [DING Zhongli, SUN Jimin, ZHU Rixiang, et al. Eolian origin of the red clay deposits in the Loess Plateau and implications for Pliocene climatic changes[J]. *Quaternary Sciences*, 1997, 17(2): 147-157.]
- [86] Zan J B, Fang X M, Zhang W L, et al. A new record of late Pliocene-early Pleistocene aeolian loess-red clay deposits from the western Chinese Loess Plateau and its palaeoenvironmental implications[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 186: 17-26.
- [87] 岳乐平. 中国黄土与红色粘土记录的地磁极性界限及地质意义 [J]. *地球物理学报*, 1995, 38(3): 311-320. [YUE Leping. Palaeomagnetic polarity boundary were recorded in Chinese loess and red clay, and geological significance[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1995, 38(3): 311-320.]
- [88] 谢兴俊, 周卫健, 鲜锋, 等. 中国黄土中松山-高斯极性倒转事件记录的空间对比 [J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2014, 53(2): 121-130. [XIE Xingjun, ZHOU Weijian, XIAN Feng, et al. The spatial discrepancy records of Matuyama-Gauss polarity reversal in Chinese loess[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, 53(2): 121-130.]
- [89] Zhao X, Roberts A P. How does Chinese loess become magnetized? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 292(1-2): 112-122.
- [90] Deng C L, Shaw J, Liu Q S, et al. Mineral magnetic variation of the Jingbian loess/paleosol sequence in the northern Loess Plateau of China: implications for Quaternary development of Asian aridification and cooling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241 (1-2): 248-259.
- [91] Tauxe L, Herbert T, Shackleton N J, et al. Astronomical calibration of the Matuyama-Brunhes boundary: consequences for magnetic remanence acquisition in marine carbonates and the Asian loess sequences[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 140(1-4): 133-146.
- [92] Head M J, Gibbard P L. Early-Middle Pleistocene transitions: linking terrestrial and marine realms[J]. *Quaternary International*, 2015, 389: 7-46.
- [93] Wang X S, Yang Z Y, Løvlie R, et al. A magnetostratigraphic reassessment of correlation between Chinese loess and marine oxygen isotope records over the last 1.1 Ma[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 159(1-2): 109-117.
- [94] Sun J M. Long-term fluvial archives in the Fen Wei Graben, central China, and their bearing on the tectonic history of the India-Asia collision system during the Quaternary[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10-11): 1279-1286.
- [95] Liu T, Ding Z L, Rutter N. Comparison of Milankovitch periods between continental loess and deep sea records over the last 2.5 Ma[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(10-11): 1205-1212.
- [96] Cai S H, Jin G Y, Tauxe L, et al. Archaeointensity results spanning the past 6 kiloyears from eastern China and implications for extreme behaviors of the geomagnetic field[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(1): 39-44.
- [97] Tauxe L. Sedimentary records of relative paleointensity of the geomagnetic field: theory and practice[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(3): 319-354.
- [98] Cheng H, Edwards R L, Southon J, et al. Atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ changes during the last glacial period from Hulu Cave[J]. *Science*, 2018, 362(6420): 1293-1297.
- [99] Zhou W J, Xian F, Beck J W, et al. Reconstruction of 130-kyr relative geomagnetic intensities from ^{10}Be in two Chinese loess sections[J]. *Radiocarbon*, 2010, 52(1): 129-147.
- [100] Xian F, An Z S, Wu Z K, et al. A simple model for reconstructing geomagnetic field intensity with ^{10}Be production rate and its application in Loess studies[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2008, 51(6): 855-861.
- [101] Raisbeck G M, Yiou F, Cattani O, et al. ^{10}Be evidence for the Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal in the EPICA Dome C ice core[J]. *Nature*, 2006, 444(7115): 82-84.
- [102] Baumgartner S, Beer J, Masarik J, et al. Geomagnetic modulation of the ^{36}Cl flux in the GRIP ice core, Greenland[J]. *Science*, 1998, 279(5355): 1330-1332.
- [103] Guyodo Y, Valet J P. Relative variations in geomagnetic intensity from sedimentary records: the past 200, 000 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 143(1-4): 23-36.
- [104] Laj C, Kissel C, Mazaad A, et al. North Atlantic palaeointensity stack since 75ka (NAPIS-75) and the duration of the Laschamp event[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical,*

- Physical and Engineering Sciences, 2000, 358(1768): 1009-1025.
- [105] Stoner J S, Laj C, Channell J E T, et al. South Atlantic and North Atlantic geomagnetic paleointensity stacks (0-80 ka): implications for inter-hemispheric correlation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(10): 1141-1151.
- [106] Yamazaki T, Oda H. A geomagnetic paleointensity stack between 0.8 and 3.0 Ma from equatorial Pacific sediment cores[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(11): Q11H20.
- [107] Pan Y X, Zhu R X, Shaw J, et al. Can relative paleointensities be determined from the normalized magnetization of the wind-blown loess of China?[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106(B9): 19221-19232.
- [108] Kent D V. Apparent correlation of palaeomagnetic intensity and climatic records in deep-sea sediments[J]. *Nature*, 1982, 299(5883): 538-539.
- [109] Jin C S, Liu Q S, Larrasoña J C. A precursor to the Matuyama-Brunhes reversal in Chinese loess and its palaeomagnetic and stratigraphic significance[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 190(2): 829-842.
- [110] Zhu R X, Ding Z L, Wu H N, et al. Details of magnetic polarity transition recorded in Chinese loess[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1993, 45(4): 289-299.
- [111] Wu Y, Zhu Z Y, Qiu S F, et al. Magnetic stratigraphy constraints on the Matuyama-Brunhes boundary recorded in a loess section at the southern margin of Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 204(2): 1072-1085.
- [112] Li G H, Xia D S, Appel E, et al. Characteristics of a relative paleointensity record from loess deposits in arid central Asia and chronological implications[J]. *Quaternary Geochronology*, 2020, 55: 101034.
- [113] Liu Q S, Banerjee S K, Jackson M J, et al. Inter-profile correlation of the Chinese loess/paleosol sequences during Marine Oxygen Isotope Stage 5 and indications of pedogenesis[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(1-2): 195-210.