

1.95~0.40 Ma 黄土高原东南部风成沉积记录的亚洲冷干化进程

吴翼^{*}, 朱照宇^{*}, 邱世藩, 饶志国

中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510301;

中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510640;

兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

^{*} 联系人, E-mail: zhuzy@gig.ac.cn

2012-09-14 收稿, 2013-02-06 接受, 2013-05-16 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2010CB833405)和国家自然科学基金(41102115, 40930106)资助

摘要 黄土高原东南部地区是受东亚冬季风搬运的巨厚粉尘沉积的末端区域, 亦是东亚夏季风向亚洲内陆深入的前缘区域. 本研究选择这一古气候敏感区的第四纪黄土-古土壤沉积剖面作为研究载体, 多重磁学参数的解译反演了风成沉积所记录的 1.95~0.40 Ma 间粉尘源区和沉积区的古气候演变历史. 结果表明, 参数 $HIRM/(SIRM - IRM_{100\text{ mT}})$ 沿全剖面向上的减小趋势, 可能记录了沉积物中赤铁矿矫顽力长期趋于减小, 我们认为其主要反映了间冰期沉积区和冰期粉尘源区环境的冷干化发展态势; 而常被用于反映磁性矿物粒度变化的参数 $\chi_{\text{lf}}/\chi_{\text{ARM}}$ 在此期间表现为长期的增大趋势, 体现了磁性矿物粒度趋向于增大化, 很可能反映了控制次生成壤强度的东亚夏季风同期整体变弱的趋势. 虽然其他磁学参数同时记录了古气候的区域性多段变化特点, 但沉积物中蕴含的亚洲古气候长期冷干化发展趋势具有全球性的对比意义.

关键词
黄土高原
风成沉积
赤铁矿
古气候
环境磁学

东亚风成堆积作为重要的陆相地质载体, 其蕴含的古气候古环境信息在过去近三十年的研究中被广泛深入地发掘^[1~7]. 特别是将提取到的各种古地质记录与全球范围内的沉积记录和构造事件的有效对比^[2,5~11], 为更加准确深入地解译晚新生代地球环境演化历史提供了有力的佐证.

东亚内陆地区巨厚风成沉积的起始年龄至少可以追溯至渐新世-中新世界线附近^[10,12,13], 这是亚洲内陆广阔荒漠存在的强有力证据. Hao 等人^[14,15]最近利用岩石磁学方法解译了晚中新世以来风成沉积中磁性矿物所蕴含的古环境信息, 初步得到了类似于深海氧同位素曲线长期演化趋势^[16]的框架性记录. 相较而言, Deng 等人在黄土高原北部靖边剖面^[17]和中部交道剖面^[18]的研究虽然仅涉及第四纪黄土-古土

壤地层, 但其更为系统地提取了整个第四纪内相对完整的东亚季风气候演变信息. 而本文中我们将研究地点聚焦于黄土高原的东南部, 报道蓝田盆地约 1.95~0.40 Ma 间风成堆积记录的环境磁学反演结果, 侧重探讨本区黄土沉积物对全球同期气候长期演变趋势的反映.

1 采样与实验

玉山剖面(34.23°N, 109.48°E)位于陕西省蓝田县玉山镇境内. 剖面顶部所在的黄土残塬(横岭塬)海拔高度约 905 m, 剖面底部所在沟谷面的海拔高度约 815 m. 整体出露的第四纪黄土厚度约 80 m, 其中包含午城黄土中发育的多个从 0.3~3.0 m 厚度不等的钙结核层. 从露头上部塬面到下部沟底, 我们沿一条近

引用格式: 吴翼, 朱照宇, 邱世藩, 等. 1.95~0.40 Ma 黄土高原东南部风成沉积记录的亚洲冷干化进程. 科学通报, 2013, 58: 2823~2831

英文版见: Wu Y, Zhu Z Y, Qiu S F, et al. A rock magnetic record of Asian cooling and aridification processes during 1.95~0.40 Ma in the southeastern Chinese Loess Plateau. Chin Sci Bull, 2013, 58: 3636~3644, doi: 10.1007/s11434-013-5775-5

NNW-SSE 走向的谷坡实测了一条比较完整、连续的黄土剖面, 约为 L27~L5(L+序号-黄土层, 下文中 S+序号-古土壤层)的黄土-古土壤沉积, 其中上部 L15 以来的前期研究结果可见文献[19]. L15 以下的古土壤层组合在野外一般较容易识别, 特别是在黄土高原南部. 玉山剖面下粉砂黄土层 L15 之下可以明确地识别出至少 12 条暗红色的古土壤发育带, 结合古

地磁分析结果(将在另文中详细报道), 对野外地层的描绘和划分见图 1. 采样选择在无钙结核层发育的露头中进行, 因此在图 1 岩性柱中并未标示钙结核层. 我们以 10 cm 为间距共采集了 681 个粉末样品, 实际控制剖面深度为 68.10 m.

与文献[19]中的实验方法基本相同, 主要磁学参数计算方式如下^[21,22]:

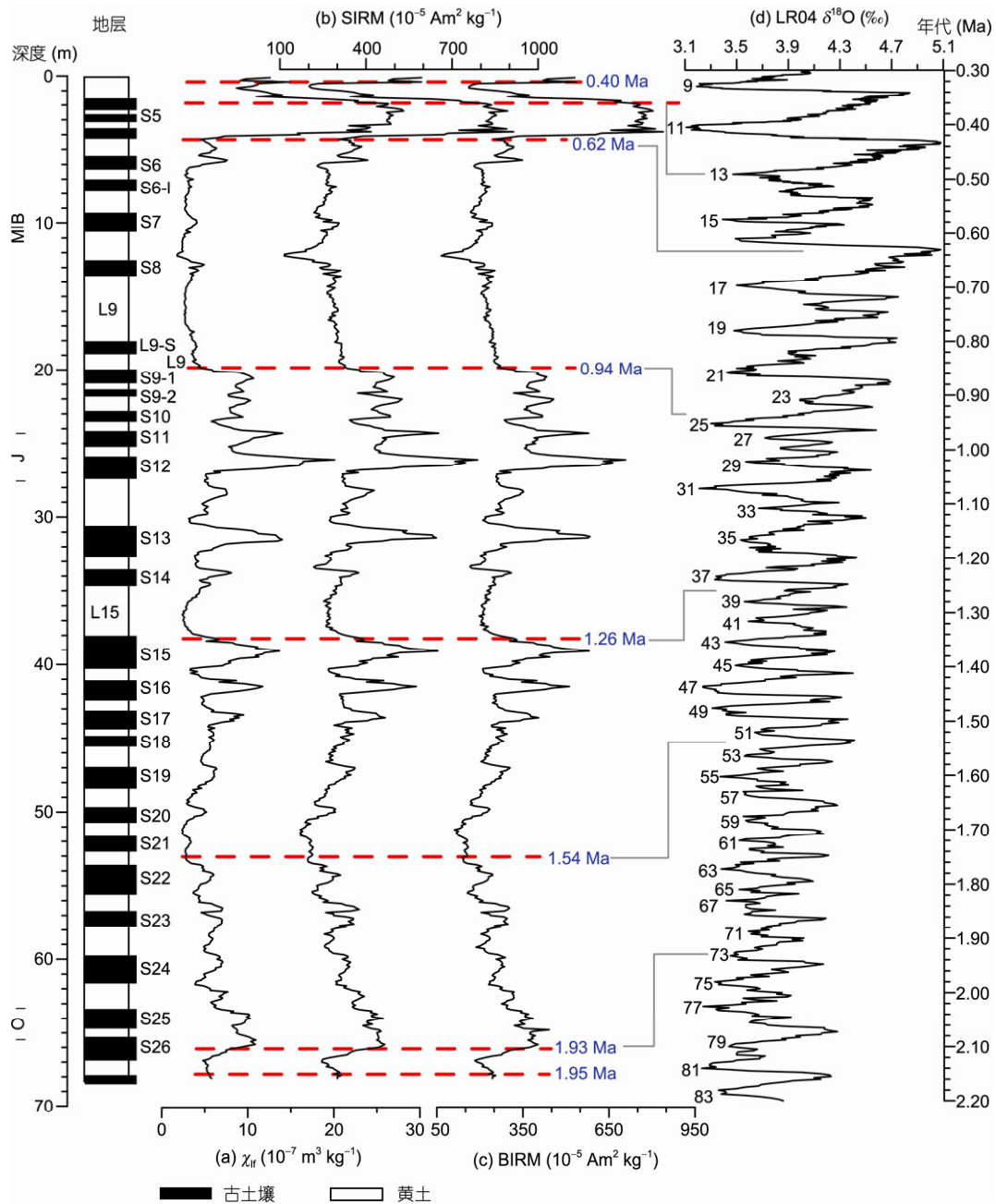


图 1 玉山剖面地层序列和部分磁学参数变化特征及与深海氧同位素曲线的对比

“LR04”深海氧同位素曲线^[20]上标注的奇数对应氧同位素记录的暖期阶段. 其中 38.8 m 以上的部分磁学参数在文献[19]中进行过讨论

$\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$, $BIRM = -IRM_{-300\text{ mT}}$,
 $HIRM = 0.5 \times (SIRM + IRM_{-300\text{ mT}})$, $S\text{-ratio} = BIRM/SIRM$.
 其中, χ_{lf} 和 χ_{hf} 分别是在 0.47 和 4.7 kHz 下测得的磁化率, $IRM_{-300\text{ mT}}$ 表示在 1000 mT 磁场中获得饱和等温剩磁(SIRM)后, 再反向施加 300 mT 磁场获得. 图 2 中 $IRM_{100\text{ mT}}$ 为正向 100 mT 磁场下获得的等温剩磁(IRM). 剖面下部样品(38.80 m 以下)分别在 20, 50,

100, 1000 mT 以及反向的 300 mT 下获得 IRM. S-ratio 和 HIRM 常被用于评估反铁磁性矿物(特别是赤铁矿)的相对/绝对含量^[21,22]. SIRM 则反映了部分亚铁磁性矿物(磁铁矿/磁赤铁矿)和不完整的反铁磁性矿物的贡献^[21], 而且 SIRM 更大程度上是受次生形成的亚铁磁性颗粒影响^[17]. 由于 1000 mT 磁场条件远不能使针铁矿达到饱和^[23], 因此上述参数中涉及到的反铁

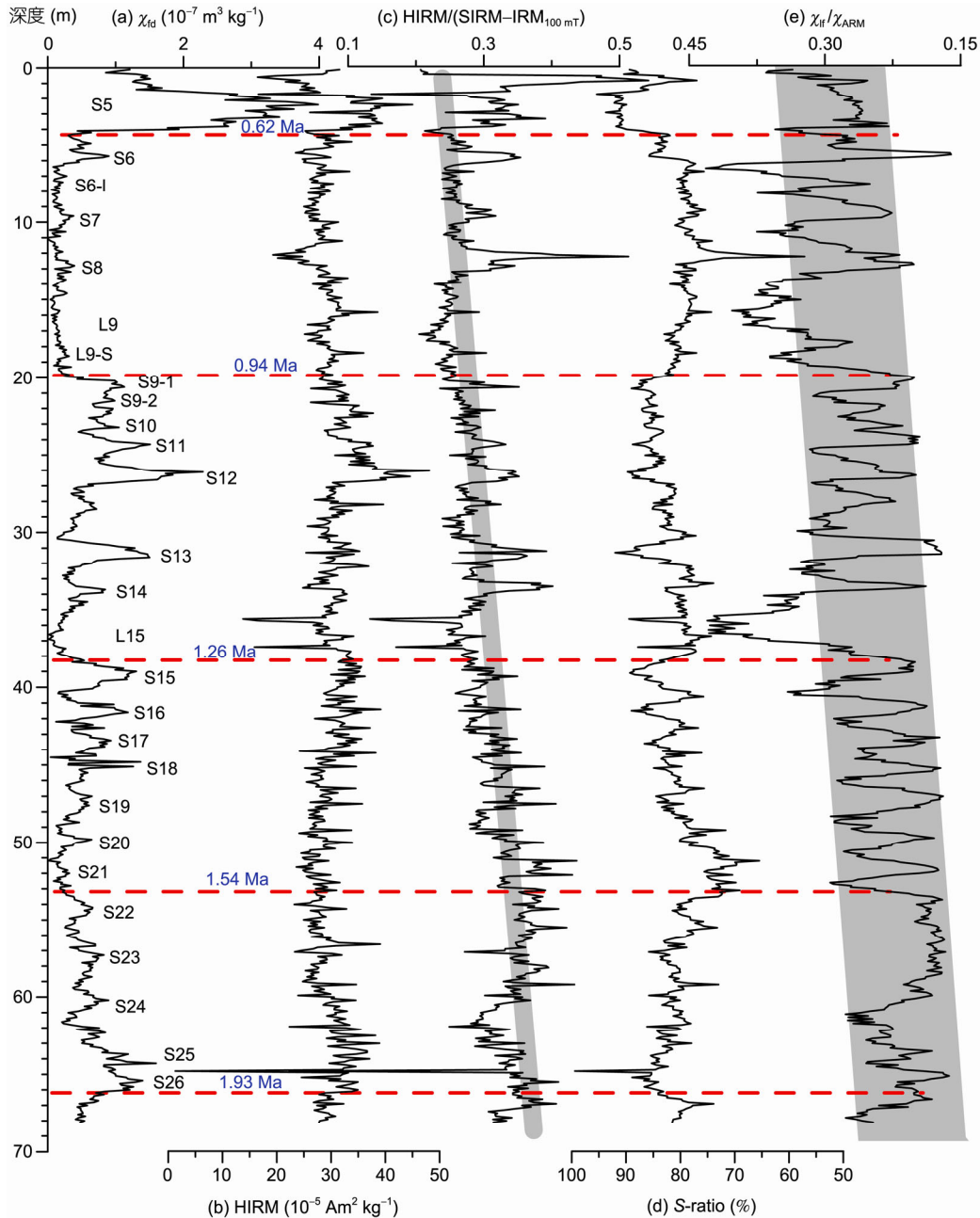


图 2 玉山黄土-古土壤序列部分磁学参数的变化特征

图中以灰色指示曲线整体的变化趋势. 其中 38.8 m 以上的部分磁学参数在文献[19]中进行过讨论

磁性矿物信息是以赤铁矿占主导. 参数 $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 的指示意义在讨论部分阐述.

2 结果

来自 18 个黄土和古土壤层位的样品在 300 mT 磁场下的 $IRM/SIRM$ 都超过了 80%, 其中来自 S5 的样品达到了 95.99%(图 3). 在超过 300 mT 的磁场作用下, 黄土样品相较古土壤样品的曲线整体更为倾斜(图 3(a), (c)), 而且黄土样品整体较古土壤样品的剩磁矫顽力偏大(图 3(b), (d)). 结合之前的热磁曲线结果^[19], 表明玉山剖面黄土和古土壤中载磁矿物主体为亚铁磁性的磁铁矿与磁赤铁矿和反铁磁性的赤

铁矿与针铁矿. 图 4 Day 氏投影图显示 12 个样品都分布在准单畴(PSD)区间, 表明磁性颗粒的平均粒径分布范围比较稳定, 但黄土和古土壤样品投影似乎呈现出分类集中, 这表明冰期黄土和间冰期古土壤样品的磁性颗粒粒度有可能存在统计意义上的差别, 类似的特征可见于靖边剖面^[17]、交道剖面^[18]等.

全剖面 681 个样品的磁化率(图 1(a), 2(a))、等温剩磁(图 1(b), (c))以及磁性颗粒粒度参数曲线(图 2(e))都较清晰地反映出冰期堆积的黄土和间冰期发育的古土壤的差异. 前 4 条曲线(χ_{if} , χ_{fd} , $SIRM$, $BIRM$)的峰和谷在细节上对应较好, 在剖面上的演化趋势也比较一致. 相较而言, 反映磁性矿物粒度变化的参数

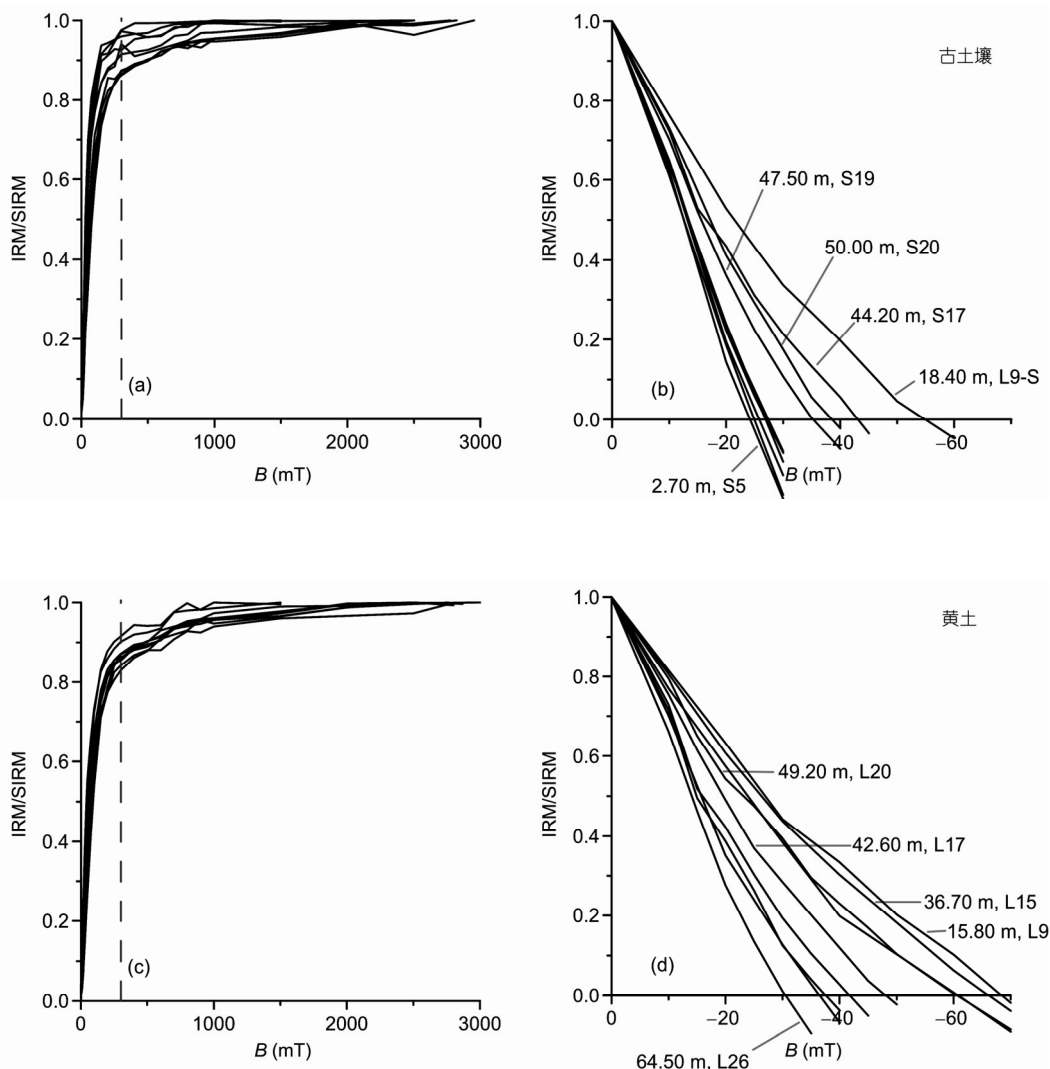


图 3 古土壤层((a), (b))和黄土层((c), (d))样品的等温剩磁获得曲线和剩磁矫顽力曲线 (a)和(c)中虚线对应 300 mT 磁场时的等温剩磁获得情况, 此处正向磁场最高为 1500~3000 mT

χ_{if}/χ_{ARM} (图 2(e))则更加清晰地表现出冰期和间冰期的旋回变化,特别是在下粉砂层 L15 前后两段(L22~S15 和 S14~S9-1),而 L15 和 S9-1~S6 中黄土层的取值明显要高于其他黄土层。

HIRM 和 *S*-ratio 以及本文用到的比值参数 $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 的曲线上能够识别出冰期和间冰期记录的相对变化,但明显不如另外几个参数的曲线清晰,曲线的平滑程度也不如其他几条,但在表现变化趋势上有比较一致的转折点,比如在 L22, L15, L9 等(图 2). $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 与 HIRM 在玉山剖面中并无清晰的相关性,而且随着 HIRM 变化, $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 的取值变化幅度并不大(图 5(b)). 但我们仍然很容易识别出 $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 有沿全剖面向上整体减小的趋势(图 2(c)),与 χ_{if}/χ_{ARM} 的变化方式类似。

3 讨论

3.1 $HIRM/(SIRM - IRM_{100\text{ mT}})$ 和 χ_{if}/χ_{ARM} 表现的长期演化趋势的含义

Liu 等人^[26]最近基于合成铝-赤铁矿/针铁矿样品的磁学特征分析对 *S*-ratio 和 HIRM 的指示意义进行评估,其研究表明磁性矿物晶格中存在的铝替代会导致剩磁矫顽力的大幅变化,而这种差异会造成 *S*-ratio 和 HIRM 这类量化参数的多解性. 为此,他们提出用 *L*-ratio ($IRM_{AF@300\text{ mT}}/IRM_{AF@100\text{ mT}}$, 分母和分子表示 1000 mT 磁场下获得的 IRM 分别经过峰值

为 100 和 300 mT 的交变场退磁后的剩磁)或替代参数 $HIRM/[0.5 \times (SIRM + IRM_{100\text{ mT}})]$ 的稳定性来衡量 *S*-ratio 和 HIRM 作为反铁磁性矿物含量指标的有效性. 该研究认为,即使在较强的亚铁磁性信号背景下,当 *L*-ratio 相对稳定时, HIRM 可以明确反映反铁磁性矿物含量, *L*-ratio 若波动较大则指示与沉积物源变化相关的反铁磁性矿物矫顽力的显著变化. 本文用到的参数 $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 可视为 Liu 等人^[26]提出的 $HIRM/[0.5 \times (SIRM + IRM_{100\text{ mT}})]$ 或 *L*-ratio 的等价替代参数,对全剖面弱磁性的反铁磁性矿物矫顽力变化

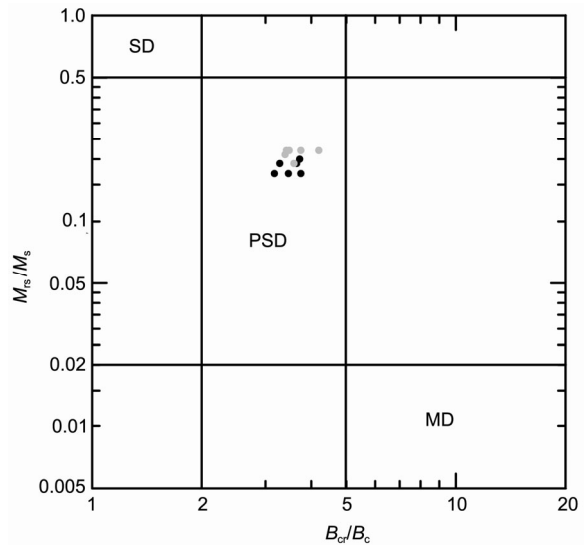


图 4 黄土(灰色)和古土壤(黑色)样品的 Day 图投影
根据文献[24,25]绘制; SD, 单畴; PSD, 准单畴; MD, 多畴

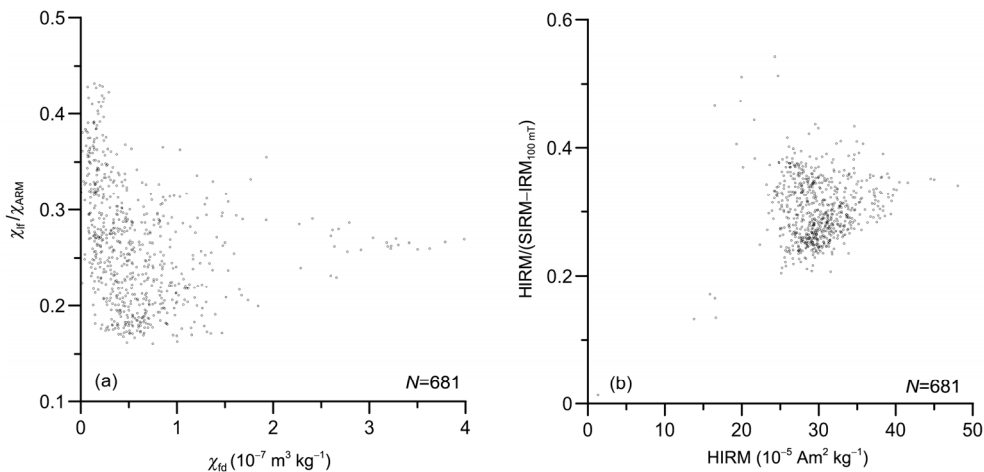


图 5 样品部分磁学参数的相关性

(a) χ_{if}/χ_{ARM} vs. χ_{id} ; (b) $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ vs. HIRM

进行评估. 其中, HIRM 相当于 $IRM_{AF@300\text{ mT}}$, ($SIRM-IRM_{100\text{ mT}}$) 相当于 $IRM_{AF@100\text{ mT}}$.

图 5(b) 显示参数 $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 变化范围并不显著, 这表明粉尘来源可能相对稳定, 同时也表明了 S -ratio 和 HIRM 在本剖面中仍适用于常规的对以赤铁矿为主的反铁磁性矿物含量的解释^[26]. 古土壤层相较黄土层出现更明显的波动(图 2(c)), 则体现了成壤过程产生的赤铁矿的影响, 这与邻近毛乌素沙漠的靖边剖面相似, 特别是表现在反映靖边剖面记录的长期冷干化气候进程的参数 $SIRM_{100\text{ mT}}/SIRM_{30\text{ mT}}$ 和 $SIRM_{100\text{ mT}}/SIRM_{60\text{ mT}}$ 曲线上^[17]. 但是, 我们仍然可以从图 2(c) 中分辨出 $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 沿剖面向上的整体减小趋势, 而且这一长期性的演化特征在 HIRM 和 S -ratio 曲线上(图 2(b), (d)) 无法识别, 表明此处应不是由磁性矿物含量变化引起. 赤铁矿矫顽力的变化主要由于与其形成时环境变迁相关的矿物粒度改变造成, 且不太可能是受矿物晶格缺陷的影响, 因为后者的影响应难以产生相对一致的长期演变趋势.

粉尘沉积在冰期和间冰期的气候条件不同, 在沉积区次生形成的赤铁矿含量必然存在差别, 但 $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 曲线显示其在黄土和古土壤中的差值远不如 χ_{if} 等对比强烈, 这与黄土层中大量存在的碎屑成因赤铁矿有关^[27]. 由于赤铁矿的显色特性, 野外剖面中肉眼所观察到风成沉积物的颜色变化, 特别是与古土壤层相关的暗红色或红棕色的时间或空间尺度的变化并不能简单地与赤铁矿含量差异相关联^[28]. 黄土古土壤中所含的反铁磁性矿物以赤铁矿占主导^[29], 特别是在弱风化的黄土层中, 由原生碎屑成因的赤铁矿主导^[30]. 相比之下, 古土壤层中次生成壤过程形成的赤铁矿应占据主导. 结合地球化学特征分析, Bloemendal 和 Liu^[31] 推测认为 HIRM 的峰值指示洛川剖面 S1 和 S5 以及段家坡剖面 S13, S14 和 S15 都有次生赤铁矿生成. 即使在贴近毛乌素沙漠的靖边剖面, 古土壤层中的赤铁矿亦被认为是次生成因的占据了主导, 而黄土层中的赤铁矿以碎屑成因来源为主^[17]. 靖边剖面由于其特殊的地理位置, 冰期时沉积物经历的成壤作用可能极其微弱, 因此黄土层中次生形成的赤铁矿几乎可以忽略. 而在黄土高原自北向南的大断面上, 由于气候的纬向梯度变化, 磁学参数记录的黄土和古土壤层的差异似乎在弱化. 这一特征在 SIRM 曲线对靖边剖

面^[17]、洛川剖面^[31]和段家坡剖面^[31]的表现上比较明显, 后两者曲线上峰-谷旋回的振荡幅度显然在缩小, 这与冰期气候的冷干程度同期向南减弱有关. 与段家坡剖面邻近的玉山剖面地理位置趋于东南, 即使在冰期黄土沉积时期也可能受到夏季风影响, 发生一定程度的成壤作用, 从而产生少量的赤铁矿. 我们推测, 剖面黄土层中赤铁矿次生成壤过程形成的比例可能仍然较少, 以原生碎屑成因的占主导. 玉山剖面古土壤和黄土中赤铁矿矫顽力的这种长期变化特征分别指示了间冰期沉积区和冰期物源区气候条件长期而缓慢的变化. 古土壤层和黄土层事实上尚有相对明显的起伏变化, 但分别观察 $HIRM/(SIRM-IRM_{100\text{ mT}})$ 在间冰期古土壤和冰期黄土的序列, 均沿剖面向上呈现出减小的长尺度变化趋势, 虽然存在部分时段不同的演变方式(主要以 L25, L22, L15 和 S5 的出现为转折), 表明气候在整体向着更冷更干的方向发展, 这反映了亚洲内陆荒漠区整体环境对晚新生代全球冰量增加^[16,20]的区域响应.

相较而言, χ_{if}/χ_{ARM} 不仅较其他参数更明确地反映出冰期和间冰期的差异, 且与图 2(c) 表现出类似的长期趋势, 这与全球深海氧同位素集成曲线上 $\delta^{18}\text{O}$ 取值增加的长期变化趋势^[20] 是一致的(图 1(d)). 由于本研究选择的剖面位于来自于大洋的暖湿的东亚夏季风向亚洲内陆深入的前缘地带, 因此在冰期和间冰期的转换中有对比强烈的峰-谷交替出现. 与黄土高原中部交道剖面^[18](见其 Figure 6) 不同的是, χ_{if}/χ_{ARM} 在玉山剖面的冰期和间冰期差异表现得更显著, 这可能与间冰期暖湿条件下区域间的气候不同有关, 而这种不同可能主要受控于夏季风对黄土高原地区的纬向梯度影响^[27]. χ_{if}/χ_{ARM} 的变化源于两种竞争性的因素^[18,32], 其一是与夏季风强度相关的次生成壤过程中超顺磁(SP)颗粒的产生, 其二是与冬季风强度相关的碎屑成因的 PSD/MD 磁铁矿颗粒的产生. 图 5(a) 中 χ_{if}/χ_{ARM} 与 χ_{fd} 呈现相对明显的负相关关系, 这表明 χ_{if}/χ_{ARM} 沿全剖面向上趋于增加可能更大程度上体现了夏季风强度在 1.95~0.40 Ma 间渐趋弱化的背景趋势. 来自于粉尘源区碎屑成因的粗颗粒磁铁矿的输入会导致 χ_{if} 增加, 而在弱化的夏季风影响下, 沉积区次生成壤过程中形成的磁铁矿含量相对减少造成 χ_{ARM} 减小, 二者的叠加效应表现为 χ_{if}/χ_{ARM} 的增加趋势, 即磁性矿物粒度的增大趋势. 晚新生代北半球冰量趋于增加, 伴随全球海平面的下降, 温度降低会

导致水汽蒸发变弱,虽然可能出现季节性降水量增多的趋势,受此直接影响的东亚夏季风会表现为强度整体减弱^[33]。除已有的可以借鉴对比的环境磁学研究^[14,15,17,18,34,35]外,来自于黄土剖面的非磁学证据也清晰表明第四纪气候长期变化的趋势,譬如,洛川剖面^[36]和泾川剖面^[37]的锶同位素变化记录。Ao 等人^[38,39]最近在邻近黄土高原的泥河湾盆地河湖相沉积物中成功提取出更新世以来气候加剧干旱化的信息,这也间接证明了东亚陆相沉积载体对同期全球古气候演替的反演潜力。

3.2 多重磁学参数的分段变化意义

不同的古气候替代参数反演得到的结果常常更多表现为阶段性的演化模式,而且发生重要变化的时间节点可能有较明显的差异,这些差异部分受区域性控制因素影响更明显。玉山剖面其他磁学参数(χ_{if} , SIRM, BIRM, χ_{fd} , HIRM, S-ratio)显著表现的特征是分段性地变化趋势,反映了次一级的区域性气候更替方向,主要的转折点发生于约 1.54, 1.26, 0.94 和 0.62 Ma (图 1 和 2)。这些曲线并不是阶段性地单调递增或递减,但在 L22(1.54 Ma 附近)、L15(约 1.26 Ma)和 L9~L6 (0.94~0.62 Ma)之间皆一致表现为低值。L22 附近出现的低值体现在曲线的长期变化形态上,是 S26~S15 这一段的凹谷部分,在其他典型剖面中尚未发现记录类似的特征。而后两段(L15 与 L9~L6)则与上、下两个粉砂质黄土层的堆积关系密切,可能与青藏高原生长的脉动事件影响粉尘的风化形成和传输途径有关^[17~19,40~42]。L9~L6 这一段的磁学性质表明,从 L9 沉积开始后约 0.32 Ma 间粉尘沉积区的环境整体稳定且表现为相对冷干的气候状态。HIRM/(SIRM-IRM_{100 mT})(图 2(c))和 χ_{if}/χ_{ARM} (图 2(e))除了在 L15, L9 和 S5 与其他曲线一致表现出现转折节点,二者在 L25 附近的谷/峰也很明显,事实上这一转折点在 χ_{if} , χ_{fd} 和 HIRM 上都略有体现,表明 L25 沉积时期似乎是自 1.93 Ma 以来的一次气候恶化的极盛期。这一黄

土沉积期似乎在黄土高原其他地区也有相关表现,譬如在南部的灵台、宝鸡和东部蒲县剖面,粒度记录均指示了一段持续期相对更长冷干更甚的冰期气候^[5],在洛川和段家坡的磁学记录上^[31]多个参数也记录到了一段明显的低谷。

需要特别指出的是,类似于上粉砂层 L9,即使其在野外观察和常规实验分析中多被认为是明显的干旱冰期气候下的堆积物,也可能记录了丰富的冷-暖和干-湿气候变化细节^[43]。就本剖面现有的结果与其他典型剖面记录的明显差别来看,可能正好反映了秦岭山前黄土沉积记录对区域新构造变动和植被变化影响的响应^[19]。利用常规的磁化率和石英粒度集成分析黄土高原中南部赵家川和灵台剖面的季风变化历史则重点突出了第四纪内 1.25 Ma(~L15)这一关键转折期^[6],与 1.2 Ma 左右北部靖边剖面沉积学证据反演的沙漠南侵事件^[44]似可相互印证,但却难以在古植被演替中找到明显的痕迹^[33,45]。这些重建结果相同或相异的部分与研究剖面年代框架的建立和替代参数的制约机制必然有显著关系,但不同区域内沉积背景的特殊性也常常是不可忽视的影响因子。玉山剖面所在的蓝田盆地贴近秦岭北麓,相较于其他区域,邻区山体生长的脉动事件在盆地内的沉积和成壤记录中可能产生明显的放大作用,这在一定程度上会掩盖全球性气候进程的区域记录响应。

4 结论

与沉积物中原生和次生双重来源赤铁矿的矫顽力变化关联的参数 HIRM/(SIRM-IRM_{100 mT})和与次生成壤强度关联的参数 χ_{if}/χ_{ARM} 的长期变化趋势很可能共同反映了玉山剖面对 1.95~0.40 Ma 间全球冷干化进程的记录。而在长期变化背景下,多重磁学曲线也反演出次一级的区域性古气候演化方向,这些重要趋势转变的时间节点分别是约 1.54 Ma (L22), 1.26 Ma (L15), 0.94 Ma (L9)和 0.62 Ma (L6)。

参考文献

- 1 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985
- 2 Kukla G, Heller F, Liu X M, et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, 1988, 16: 811-814
- 3 Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. *Nature*, 1990, 346: 737-739
- 4 Liu T S, Ding Z L. Chinese loess and paleomonsoon. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 111-145

- 5 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. *Paleocenography*, 2002, 17: 1033, doi: 10.1029/2001PA000725
- 6 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. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 33–48
- 7 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究, 2007, 27: 193–209
- 8 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
- 9 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. *Nature*, 2001, 411: 62–66
- 10 Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159–163
- 11 Nie J S, King J W, Fang X M. Correlation between the magnetic susceptibility record of the Chinese aeolian sequences the marine benthic oxygen isotope record. *Geochem Geophys Geosyst*, 2008, 9: Q12026
- 12 强小科, 安芷生, 宋友桂, 等. 晚新生代以来中国黄土高原风成红黏土序列的发现: 亚洲内陆干旱化起源的新记录. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 1479–1488
- 13 Sun J M, Ye J, Wu W Y, et al. Late Oligocene-Miocene mid-latitude aridification and wind patterns in the Asian interior. *Geology*, 2010, 38: 515–518
- 14 Hao Q Z, Oldfield F, Bloemendal J, et al. The magnetic properties of loess and paleosol samples from the Chinese Loess Plateau spanning the last 22 million years. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2008, 260: 389–404
- 15 Hao Q Z, Oldfield F, Bloemendal J, et al. The record of changing hematite and goethite accumulation over the past 22 Myr on the Chinese Loess Plateau from magnetic measurements and diffuse reflectance spectroscopy. *J Geophys Res*, 2009, 114: B12101
- 16 Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 2001, 292: 686–693
- 17 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. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 241: 248–259
- 18 Deng C L, Vidic N J, Versub K L, et al. Mineral magnetic variation of the Jiaodao Chinese loess/paleosol sequence and its bearing on long-term climatic variability. *J Geophys Res*, 2005, 101: B03103
- 19 吴翼, 朱照宇, 饶志国, 等. 蓝田玉山第四纪中后期黄土-古土壤序列环境磁学研究. 科学通报, 2010, 55: 2214–2225
- 20 Lisiecki L, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleocenography*, 2005, 20: PA1003
- 21 Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: Allen and Unwin, 1986. 1–227
- 22 Evans M E, Heller F. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. San Diego: Academic Press, 2003. 1–299
- 23 Rochette P, Mathe P E, Esteban L, et al. Non-saturation of the defedct moment of goethite and fine-grained hematite up to 57 Tesla. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L22309
- 24 Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Phys Earth Planet Inter*, 1977, 13: 260–267
- 25 Dunlop D J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c): 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J Geophys Res*, 2002, 107: 2056
- 26 Liu Q S, Roberts A P, Torrent J, et al. What do the HIRM and S-ratio really measure in environmental magnetism? *Geochem Geophys Geosyst*, 2007, 8: Q09011
- 27 Bloemendal J, Liu X M, Sun Y B, et al. An assessment of magnetic and geochemical indicators of weathering and pedogenesis at two contrasting sites on the Chinese Loess Plateau. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2008, 257: 152–168
- 28 Balsam W, Ji J F, Chen J. Climatic interpretation of the Luochuan and Lingtai loess sections, China, based on changing iron oxide mineralogy and magnetic susceptibility. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 223: 335–348
- 29 Liu Q S, Torrent J, Maher B A, et al. Quantifying grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess and its significance for pedogenesis. *J Geophys Res*, 2005, 110: B11102
- 30 Evans M E, Heller F. Magnetic enhancement and palaeoclimate: A study of a loess/paleosol couplet across the Loess Plateau of China. *Geophys J Int*, 1994, 117: 257–264
- 31 Bloemendal J, Liu X M. Rock magnetism and geochemistry of two plio-pleistocene Chinese loess-paleosol sequences—Implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 226: 149–166
- 32 Deng C L. Paleomagnetic and mineral magnetic investigation of the Baicaoyuan loess-paleosol sequence of the western Chinese Loess Plateau over the last glacial-interglacial cycle and its geological implications. *Geochem Geophys Geosyst*, 2008, 9: Q04034

- 33 Sun J M, Lu T Y, Zhang Z Q, et al. Stepwise expansions of C₄ biomass and enhanced seasonal precipitation and regional aridity during the Quaternary on the southern Chinese Loess Plateau. *Quat Sci Rev*, 2012, 34: 57–65
- 34 王喜生, 杨振宇, Løvlie R, 等. 黄土高原东南缘黄土-古土壤序列的环境磁学结果及其古气候意义. *科学通报*, 2006, 51: 1575–1582
- 35 Nie J S, Song Y G, King J W, et al. HIRM variations in the Chinese red-clay sequence: Insights into pedogenesis in the dust source area. *J Asian Earth Sci*, 2010, 38: 96–104
- 36 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近 2.5 Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 37: 136–145
- 37 Sun J M. Nd and Sr isotopic variations in Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: Implications for provenance change. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 240: 454–466
- 38 Ao H, Dekkers M J, Deng C L, et al. Palaeoclimatic significance of the Xiantai fluvio-lacustrine sequence in the Nihewan Basin (North China), based on rock magnetic properties and clay mineralogy. *Geophys J Int*, 2009, 177: 913–924
- 39 Ao H. Mineral-magnetic signal of long-term climatic variation in Pleistocene fluvio-lacustrine sediments, Nihewan Basin (North China). *J Asian Earth Sci*, 2010, 39: 692–700
- 40 Sun J M, Liu T S. Stratigraphic evidence for the uplift of the Tibetan Plateau between ~1.1 and ~0.9 Ma ago. *Quat Res*, 2000, 54: 309–320
- 41 安芷生, 张培震, 王二七, 等. 中新世以来我国季风-干旱环境演化与青藏高原的生长. *第四纪研究*, 2006, 26: 678–693
- 42 Liu D L, Fang X M, Song C H, et al. Stratigraphic and paleomagnetic evidence of mid-Pleistocene rapid deformation and uplift of the NE Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 2010, 486: 108–119
- 43 Wu B, Wu N Q. Terrestrial mollusk records from Xifeng and Luochuan L9 loess strata and their implications for paleoclimatic evolution in the Chinese Loess Plateau during marine Oxygen Isotope Stage 24–22. *Clim Past*, 2011, 7: 349–359
- 44 Ding Z L, Debryshire 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. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 237: 45–55
- 45 Wu F L, Fang X M, Ma Y Z, et al. Plio-Quaternary stepwise drying of Asia: Evidence from a 3-Ma pollen record from the Chinese Loess Plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 257: 160–169