

# 16 ka 以来黄土高原东亚夏季风变化的环境磁学记录

梁 潇<sup>1,2</sup>, 杨萍果<sup>1</sup>, 姚 娇<sup>2</sup>, 张 鹏<sup>2</sup>, 张建辉<sup>2</sup>, 孙鹏飞<sup>3</sup>, 敖 红<sup>2</sup>

(1. 山西师范大学生命科学学院, 临汾 041004; 2. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质  
国家重点实验室, 西安 710061; 3. 河北工程大学地球科学与工程学院, 邯郸 056038)

**摘要:** 末次冰消期以来的气候变化是第四纪古气候研究的重要内容。本文对黄土高原西部和平镇剖面 16 ka 以来的黄土沉积序列(厚度为 3.5 m)进行了高分辨率环境磁学研究。结果表明: 该黄土序列的磁性颗粒主要由细颗粒磁铁矿主导。其磁化率和频率磁化率具有相同的变化特征, 与黄土高原中部和东部的黄土磁化率变化机制一致, 即黄土高原西部和平镇黄土的磁化率和频率磁化率仍然受成土作用形成的细颗粒磁铁矿控制, 因此其磁化率和频率磁化率仍然可以反映季风降雨的变化特征, 并且其反映的 16 ka 以来季风降雨变化与南方石笋氧同位素记录的季风变化特征一致。通过详细的海陆综合对比, 本文认为 16 ka 至 11 ka 间东亚季风降雨的变化受到北半球太阳辐射和北半球区域温度的共同影响, 而 11 ka 之后的夏季风降雨减少主要受太阳辐射降低的影响。

**关键词:** 环境磁学; 黄土沉积序列; 末次冰消期; 东亚季风

DOI: 10.11821/dlxb202103004

## 1 引言

第四纪气候变化是古气候研究的重要方向, 它对人类生活和社会发展具有重要影响<sup>[1]</sup>。中国北方的黄土高原(33°N~41°N、100°E~114°E, 面积约 40 万 km<sup>2</sup>) 沉积了连续完整的晚渐新世至上新世风成红粘土和第四纪风尘黄土序列, 记录了中国北方 25000 ka 以来详细的环境演化历史, 为研究过去气候环境演化及其动力学机制提供了理想载体<sup>[2-7]</sup>。20 世纪 80 年代以来, 国内外学者对中国黄土高原开展了大量研究, 尤其是第四纪黄土已成为与深海沉积物和极地冰芯并列的过去全球气候变化研究的三大支柱之一<sup>[8]</sup>。与极地冰芯和深海岩芯不同, 黄土高原位于人类过去和现在正在居住的陆相地表, 其气候环境变化, 尤其是全新世的变化对预测人类活动影响下的中国北方气候在全球持续变化背景下的未来变化趋势至关重要<sup>[9]</sup>。以往对黄土高原开展的研究主要集中在六盘山以东的黄土高原地区, 而对六盘山以西的黄土开展高分辨率古气候研究相对薄弱<sup>[4, 10]</sup>。黄土高原西部的黄土序列具有比黄土高原中部和东部的黄土序列更高的沉积速率<sup>[11]</sup>, 是进行高分辨古气候研究的良好材料。

环境磁学是一门综合性的交叉学科<sup>[12]</sup>, 磁性矿物的形成、搬运、沉积过程都会受到气候和环境过程的控制, 因而沉积物的岩石磁学性质可作为环境和气候变化过程的有效

收稿日期: 2020-01-06; 修订日期: 2020-12-06

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDB-SSW-DQC021) [Foundation: Key Research Program of Frontier Sciences of Chinese Academy of Sciences, No.QYZDB-SSW-DQC021]

作者简介: 梁潇(1995-), 女, 山西襄汾人, 硕士生, 环境磁学及古环境方向。E-mail: liangsosou@126.com

通讯作者: 杨萍果(1974-), 女, 山西襄汾人, 教授, 主要从事环境磁学、土壤生态及空间变异性等研究。

E-mail: lfypg@126.com

代用指标<sup>[13-14]</sup>。20世纪80年代以来,环境磁学在中国黄土—古土壤序列的古气候研究方面具有长足深远的意义<sup>[15]</sup>,特别是发现第四纪黄土—古土壤序列的磁化率所代表的气候变化与深海沉积物氧同位素结果能很好对比<sup>[16]</sup>,有力地推动了中国第四纪和过去全球变化研究的发展,将中国黄土古气候和环境磁学推向国际全球古气候变化研究的前沿。本文选择黄土高原西部兰州地区的晚更新世至全新世的黄土序列开展高分辨率环境磁学研究,探讨16 ka以来东亚季风的演化特征及其动力学机制。

## 2 研究区概况及实验材料

### 2.1 研究区域

黄土高原位于东亚夏季风降雨影响的西北边缘区,因此对季风降雨异常敏感。受夏季风的影响,黄土高原地区年平均降雨量从东南部的~600 mm向西北方向逐渐较少到约~200 mm(图1)。黄土高原的风成堆积厚度从东南到西北逐渐变厚,粒度逐渐变粗,反映出黄土堆积主要受到冬季风控制。古土壤层的发育主要受夏季风降雨影响,强度从东南到西北逐渐减弱<sup>[4, 17-18]</sup>。

本文选取黄土高原西部兰州地区的和平镇黄土剖面(36°00′43″N, 103°58′30″E)开展研究(图1)。该区为干旱—半干旱温带大陆性气候,年均温为6.7℃,年平均降雨量为350 mm,蒸发量1450 mm<sup>[19]</sup>。剖面厚度为3.5 m,剖面上部为质地紧密、颜色发黑的特征性土壤层(黑垆土 $S_0$ ),该层土壤受风化影响较大;剖面下部为质地疏松均一的灰黄色粉砂质黄土。本文采集了整个 $S_0$ 古土壤层(2.6 m)和黄土层 $L_1$ 上部的0.9 m开展研究。将剖面明显风化的表土移除后,从耕作层底部开始以1 cm间隔采集散样350件。在实验室内40℃条件下将样品烘干,装入磁学专用样品盒进行磁化率测试。

### 2.2 实验方法

采用捷克AGICO公司生产的AGICO MFK1 FA旋转型卡帕桥多频磁化率仪对所有样品进行低频(976 Hz)磁化率( $\chi_{lf}$ )和低频(15616 Hz)磁化率( $\chi_{hf}$ )测试,并计算频率磁化率( $\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$ )。根据磁化率变化特征选取代表性样品进行详细的岩石磁学实验。磁化强度( $J$ )随温度变化曲线( $J-T$ )采用美国Quantum Design公司生产的MPMS3超导磁性测量系统测量,样品用量约0.15 g,测试温度范围为300~1000 K,为了避免在加热过程中样品被氧化,整个实验在氦气环境下进行。低温磁性测量也是在MPMS3超导磁性测量系统上完成。本文测量了极低温(1.8 K左右)饱和等温剩磁在零场中的升温曲线。将样品在零场中从室温降到1.8 K,施加一个强度为5 T的外场,使得样品获得饱和剩磁(Saturated Isothermal Remanence, SIRM),然后撤销外场,测量在零场中从1.8 K升温到400 K过程中饱和剩磁的变化特征。此外,利用MicroMagTM 3900 VSM型振动磁力仪测试了样品的磁滞回线和FORC(First Order Reversal Curve)图,测量所加最大磁场为1 T,测量间隔为5 mT,在去除顺磁性影响后,得出饱和磁化强度( $M_s$ )、饱和剩磁( $M_{rs}$ )和矫顽力值( $H_c$ )。上述所有实验均在中国科学院地球环境研究所环境磁学实验室完成。

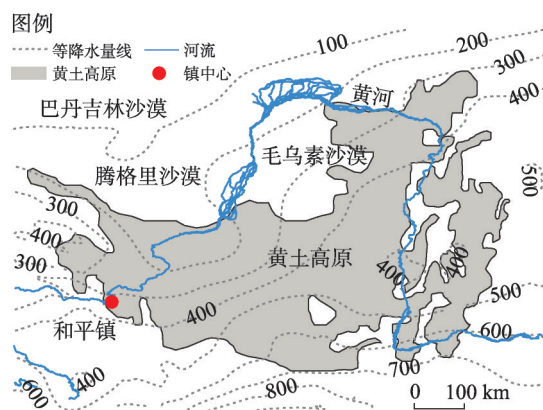


图1 黄土高原和平镇位置图

Fig. 1 Chinese Loess Plateau and the location of Hepingzhen

## 3 结果

### 3.1 岩石磁学

磁化强度与磁性矿物的种类和含量有关,与磁性矿物颗粒的大小无关。 $J$ - $T$ 曲线通过磁性矿物在加热和冷却过程中磁化强度随温度变化的特征来识别磁性矿物的种类。和平镇黄土剖面代表性样品的 $J$ - $T$ 曲线测试结果如图2所示。所有样品的冷却曲线均高于加热曲线,表明样品在加热过程有新的亚铁磁性矿物的产生<sup>[13, 20]</sup>。 $\sim 400$  °C前磁化强度的逐渐降低与黄土沉积物中磁赤铁矿的分解有关<sup>[21]</sup>。当加热到 $\sim 580$  °C,磁化强度均显著降低并出现明显的转折,指示磁铁矿是该剖面黄土样品磁化强度最主要的贡献者。由于赤铁矿的饱和磁化强度比磁铁矿低3个数量级<sup>[22]</sup>,因此赤铁矿在 $J$ - $T$ 曲线上的特征通常会被磁铁矿的信号所掩盖<sup>[23]</sup>,因此难以显示出来。

样品的低温磁学结果表明,从1.8 K升温至400 K过程中,样品的饱和剩磁呈逐渐降低趋势,并在 $\sim 125$  K显示出加速降低的特征,这对应磁铁矿在 $\sim 125$  K的Verwey Transition<sup>[24]</sup>(图3)。因此,与样品的 $J$ - $T$ 曲线测试结果一致,样品的低温磁学结果表明和平镇黄土的磁性由磁铁矿主导。

FORC图对样品中磁性矿物的粒度反映灵敏<sup>[25]</sup>。在FORC中 $H_c$ 反映磁性颗粒间相互作用, $H_c$ 越大颗粒间相互作用越剧烈, $H_c$ 反映样品矫顽力,峰值处的矫顽力通常在一定程度上反映是样品中磁性矿物平均矫顽力<sup>[25]</sup>。和平镇黄土剖面FORC图(图4)内部沿 $H_c$ 轴分布闭合等值线,其最大矫顽力值约为15 mT,指示样品中存在单畴颗粒(Single Domain, SD)。外部等值线沿 $H_c$ 轴的垂直分布均大于40 mT,与假单畴(Pseudo-single

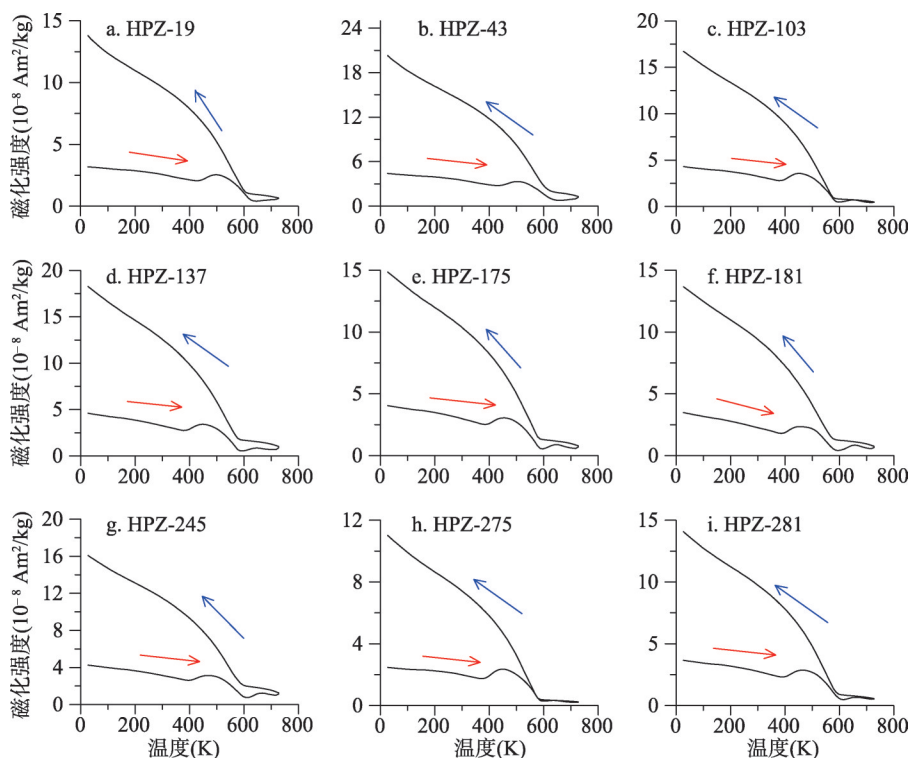


图2 和平镇黄土剖面代表性样品磁化强度随温度变化曲线

Fig. 2  $J$ - $T$  curves for selected samples from the Hepingzhen loess section

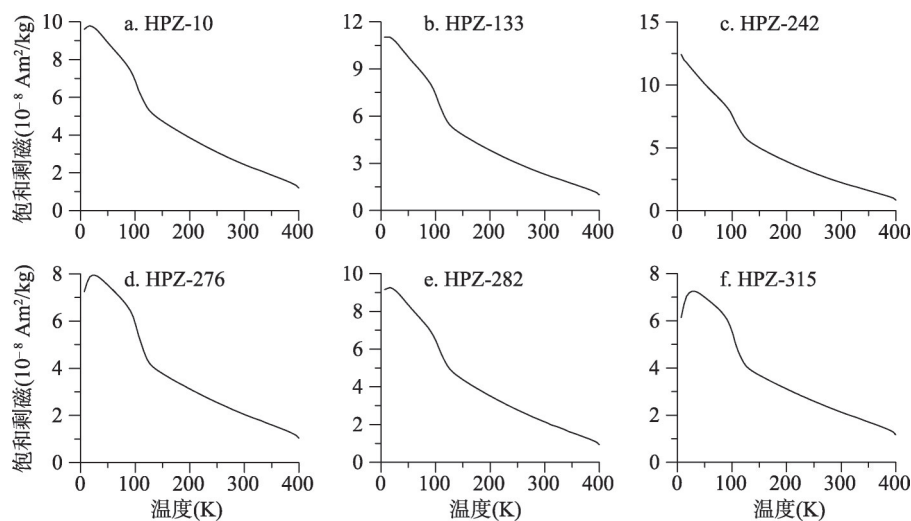


图3 和平镇黄土剖面代表性样品饱和剩磁随温度变化曲线

Fig. 3 Low-temperature saturated isothermal remanence variability for selected samples from the Hepingzhen loess section

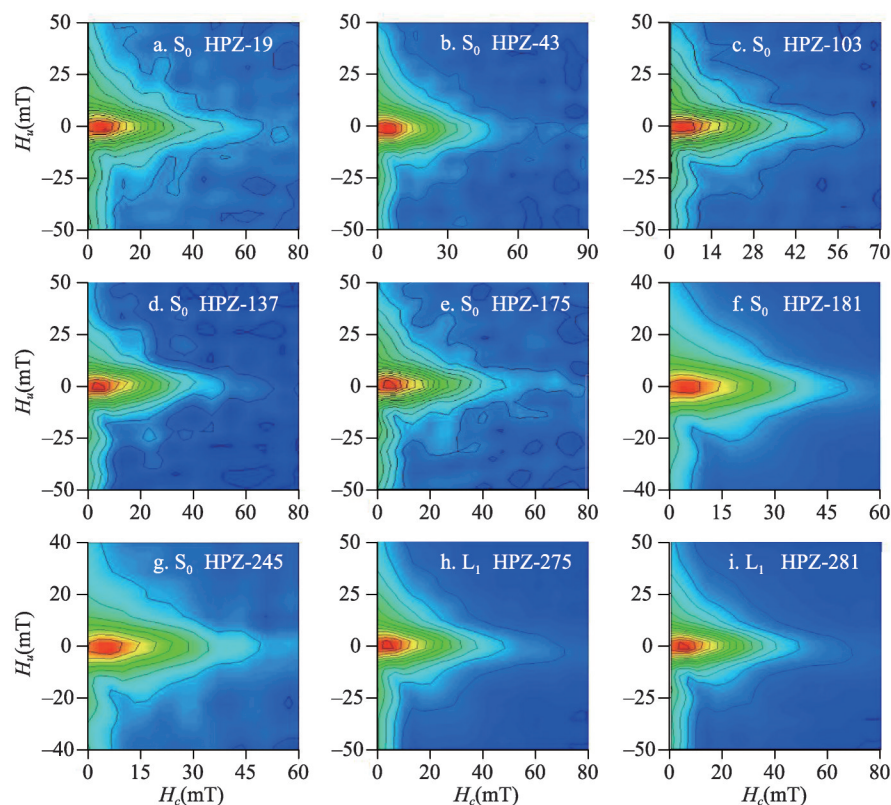


图4 和平镇黄土剖面代表性样品的FORC图

Fig. 4 First order reversal curve (FORC) diagrams for selected samples from the Hepingzhen loess section

Domain, PSD) 磁铁矿特征一致<sup>[25-26]</sup>。FORC图左下部等值线紧靠 $H_c$ 轴并与 $H_c$ 轴近似平行, 指示样品中含有超顺磁颗粒(Super Paramagnetic, SP)<sup>[25]</sup>。因此FORC图表明和平镇黄土的磁性由SP、SD和PSD磁铁矿颗粒主导。



磁滞特征可以提供亚铁磁性矿物矫顽力和磁畴状态的信息,能够较好的指示磁性矿物的种类<sup>[27]</sup>。和平镇黄土剖面代表性样品的磁滞回线测试结果如图5。所有样品磁滞回线在400 mT以前均已闭合,饱和磁化强度不超过 $100 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ,与样品磁性特征由磁铁矿主导是一致的<sup>[20]</sup>。以上多参数岩石磁学结果表明,和平镇剖面黄土的磁性特征由SP、SD和PSD磁铁矿颗粒主导。

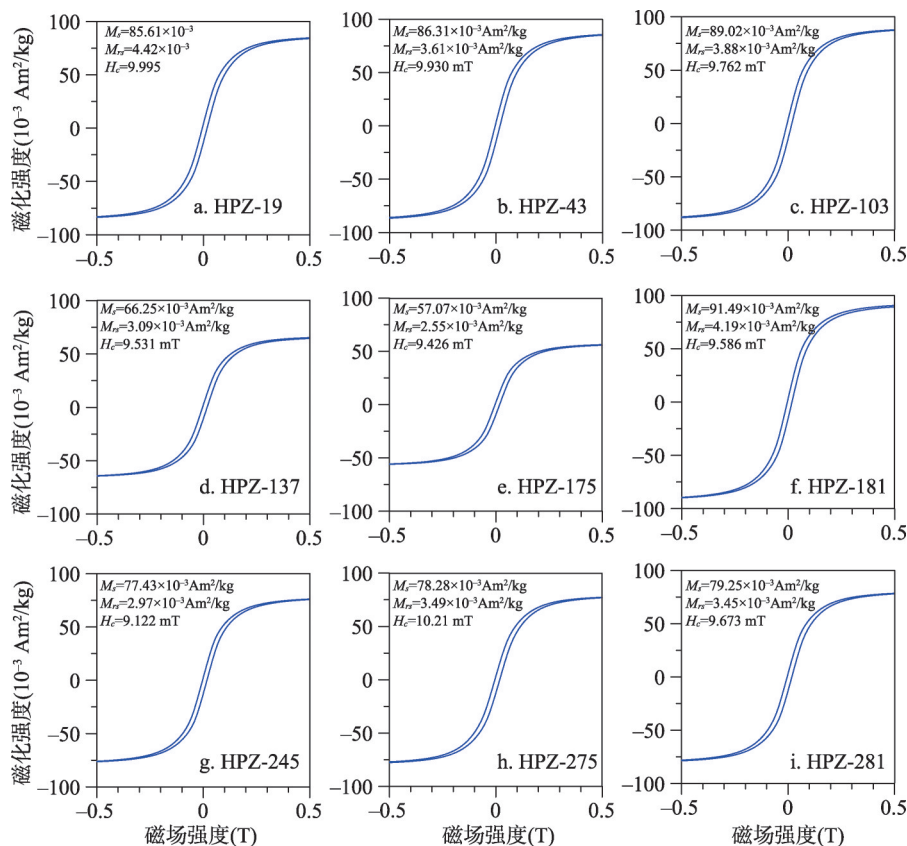


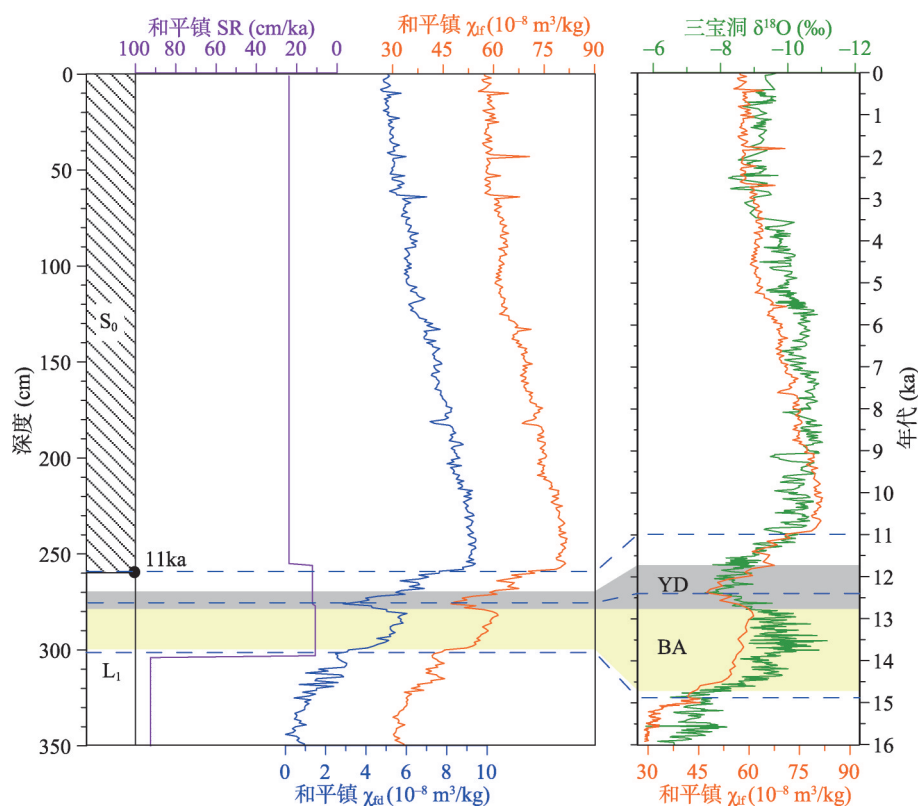
图5 和平镇黄土剖面代表性样品的磁滞回线

Fig. 5 Hysteresis loops for selected samples from the Hepingzhen loess section

### 3.2 磁化率变化特征及年代标尺的建立

Heller等首次发现中国黄土—古土壤序列的磁化率变化与深海氧同位素变化存在相关性<sup>[15]</sup>,并提出磁化率可作为气候变化的代用指标,开辟了海陆气候耦合研究的新途径。中国黄土的磁学研究证明,黄土—古土壤的磁化率值与成土作用呈现良好的正相关关系,磁化率的高值和低值分别对应于成土作用强的古土壤层和成土作用相对较弱的黄土层<sup>[28]</sup>。磁化率作为一个反映夏季风强度变化的气候代用指标,能够指示受东亚季风控制的成土作用强度和降水量的变化,极大地推动了中国黄土古土壤全球变化的研究<sup>[29]</sup>。

和平镇黄土剖面的低频磁化率( $\chi_{lf}$ )和频率磁化率( $\chi_{fd}$ )随深度呈相同变化特征(图6),二者之间的线性相关系数 $R^2$ 达0.99(图7),这表明该剖面的磁化率和频率磁化率主要反映了成土作用形成的细颗粒(SP、SD和较细的PSD)磁铁矿的含量变化,因此与黄土高原中部和东部黄土的磁化率和频率磁化率类似,都可以用来反映季风降雨的变化特征。和平镇剖面黄土—古土壤序列的高分辨率磁化率和频率磁化率记录反映了与中



注: YD表示 Younger Dryas 冷事件, BA 表示 Bølling-Allerød 暖事件;  $\delta^{18}\text{O}$  数据来自文献[30]。

图6 和平镇黄土剖面沉积速率、低频磁化率、频率磁化率与华南三宝洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的年代学对比

Fig. 6 Stratigraphic variations of sedimentation rate, low frequency susceptibility, and frequency-dependent susceptibility for the Hepingzhen loess section, and their comparison with the Sanbao cave  $\delta^{18}\text{O}$  record from South China

国南方石笋氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) [30] 相同的季风变化特征, 尤其是发生在末次冰消期的BA暖事件 (Bølling-Allerød Warming, BA) 和YD冷事件 (Younger Dryas, YD) 在磁化率和频率磁化率记录中都具有明显的响应。基于 $S_0$ 和 $L_1$ 的边界年代 (~11 ka) [31] 以及磁化率变化与石笋氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) 变化曲线具有的良好对比性 (图6), 本文将磁化率与具有精确年代的石笋氧同位素进行对比, 结合剖面沉积速率的变化特征, 建立了和平镇剖面黄土—古土壤序列的年代框架 (图6)。这一年代框架仅有一个年代控制点 (即 $S_0$ 和 $L_1$ 的边界年代~11 ka), 主要基于与具有准确年代的石笋记录进行对比建立年代, 因此, 这一年代框架在短时间尺度 (千年) 上存在不确定性, 但这并不影响在长时间尺度和变化趋势方面的古气候解释。

和平镇黄土剖面磁化率和频率磁化率记录一致, 两者的值都非常低, 表明在末次冰期 (16~11.7 ka), 黄土高原西部的夏季风降雨较少, 成土作用较弱。随着末次冰期北半球冰盖的逐渐融化, 夏季风降雨、磁化率和频率磁化率的值都逐渐增加, 并在BA暖期

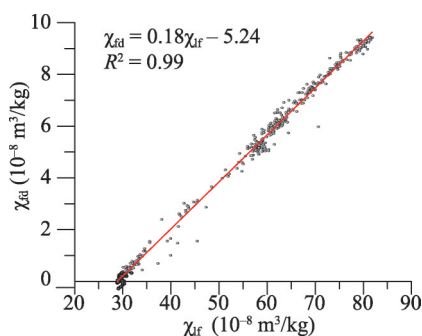
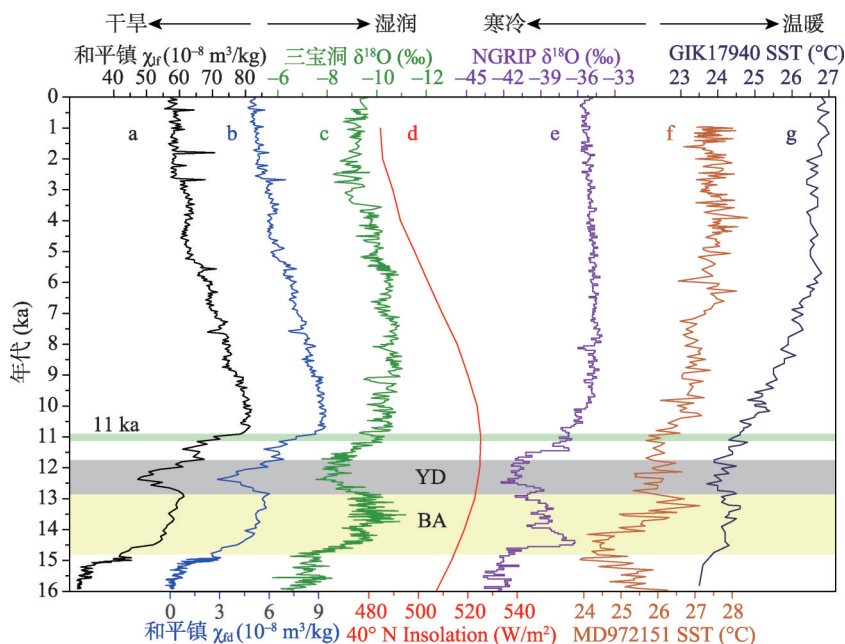


图7 和平镇黄土剖面 $\chi_{\text{ia}}$ 和 $\chi_{\text{if}}$ 线性关系  
Fig. 7 The linear relationship between  $\chi_{\text{ia}}$  and  $\chi_{\text{if}}$  in the Hepingzhen loess section

形成显著的磁化率和频率磁化率峰值。然而,随着YD的到来,磁化率和频率磁化率明显降低,反映了夏季风降雨的减少。经历YD冷期后,磁化率和频率磁化率值都进一步升高,并在早全新世达到峰值,反映出夏季风降雨达到最高值。从早全新世至现今,磁化率和频率磁化率都呈现显著的减弱趋势,表明夏季风降雨从早全新世开始呈逐渐减弱趋势。

## 4 讨论

和平镇黄土磁化率(图8a~8b)与中国南方石笋氧同位素(图8c)<sup>[30]</sup>在过去16 ka以来的变化相同,表明二者在这一时期都较好地反映了东亚夏季风降雨的特征。二者与北半球太阳辐射(图8d)<sup>[30]</sup>、北极温度(图8e)<sup>[32]</sup>和南海海表温度(Sea Surface Temperature, SST,图8f~8g)<sup>[33-34]</sup>对比,表明东亚季风的驱动机制在11 ka发生了变化。16—11 ka间东亚季风降雨的增加趋势可能受到北半球太阳辐射和北半球区域温度的共同影响,而在大约12 ka的YD冷期,明显受到此时北半球温度降低的影响,降雨量显著减少。和平镇黄土磁化率与中国南方石笋氧同位素一致,揭示了11 ka以来东亚夏季风降雨的减少趋势主要受到太阳辐射降低的影响。通常,太阳辐射增加和北半球温度的增加会导致印度洋和西太平洋形成更多的水汽,这些水汽通过夏季风环流从低纬海洋带入东亚大陆季风区,使得季风降雨可以深入到中国北方地区,包括黄土高原<sup>[35]</sup>。太阳辐射增加和北半球温度的增加还会导致海陆热力差异增大,进而增强夏季风环流<sup>[29]</sup>,使其可以输送更多的水汽到季风降雨区<sup>[36-37]</sup>。现代大气研究表明,太阳辐射增加和北半球温度的增加还会促进热带辐合带、哈德利环流圈的北部上升,以及夏季风前缘向西北扩展<sup>[37-39]</sup>。



注: a为和平镇黄土剖面的低频磁化率;b为和平镇黄土剖面的频率磁化率;c为华南三宝洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[30]</sup>,d为40°N的太阳辐射<sup>[30]</sup>,e为格陵兰冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[32]</sup>,f为钻孔GIK17940的海表温度<sup>[33]</sup>,g为钻孔MD972151的海表温度<sup>[34]</sup>。

图8 16 ka以来北半球的古气候记录

Fig. 8 The composite paleoclimatic record for the Northern Hemisphere since 16 ka

另外, 太阳辐射和北半球温度的变化还会影响西风和冬季风的强度及其在黄土高原的作用时间, 进而影响夏季风的强度和作用时间<sup>[40]</sup>。因此, 从和平镇黄土记录可以看出, 东亚季风在不同时间段和不同时间尺度上的变化机制可能是不同的, 在探讨其过去变化时, 需要通过详细的区域和全球对比, 对具体情况进行具体分析。不宜认为东亚季风系统是对太阳辐射或区域温度的线性响应, 尤其是区域温度、季风降雨和太阳辐射在特定阶段可能并不是耦合的。例如, 在大约 12 ka 的 YD 冷期, 东亚季风降雨的减少和区域温度的降低与较高的太阳辐射就是呈现出耦合关系 (图 8)。在 11 ka 以来, 南海海表温度的增加趋势和稳定的北极温度与太阳辐射的减少趋势也呈现不耦合关系, 而此时东亚季风降雨的减少却与太阳辐射的减少是耦合的 (图 8)。后续结合气候模拟的综合研究将有助于更加准确的揭示太阳辐射和北半球温度在不同时间段和不同时间尺度上对东亚季风系统的不同影响。

本次开展研究工作的和平镇黄土剖面位于东亚季风区的边缘, 沉积速率较高, 甚至达  $\sim 1$  m/ka (图 6), 记录了  $\sim 16$  ka 至 11 ka 夏季风降雨的显著增强, 清晰识别出 BA 暖事件和 YD 冷事件, 以及 11 ka 以来夏季风的持续减弱现象。尤其是和平镇磁化率记录可以与南方石笋记录进行对比, 显示了黄土在高分辨率古气候重建方面具有的巨大潜力。以往在黄土高原中部和东部的研究认为, 黄土很难记录 BA 暖事件和 YD 冷事件, 这可能是这些黄土区域的分辨率不够高引起的。在黄土高原西部沉积速率更高和连续性更好的黄土剖面, 例如本文涉及到的兰州地区的黄土, 是完全可以较好地记录千年尺度的古气候事件的。尤其是以前在黄土高原中部和东部开展的研究, 都无法记录类似石笋表现出的 20 ka 周期特征<sup>[41-43]</sup>, 这可能也与黄土高原中部和东部黄土的沉积速率较低有关。而最近在黄土高原西部, 具有高沉积速率的靖远和古浪黄土就有效地揭示了石笋表现出的 2 ka 夏季风周期变化特征, 虽然其中也含有石笋不具有的 40 ka 和 100 ka 周期<sup>[44-45]</sup>。目前, 如何解释中国南方石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录不存在 40 ka 和 100 ka 周期, 仍然是石笋和古气候研究领域的重要科学问题。其中一种解释是石笋在轨道时间尺度的变化主要受太阳辐射影响, 受北半球冰量的影响较少<sup>[46]</sup>。黄土高原中部和东部的黄土记录由 10 万年周期主导, 而缺乏 40 ka 和 20 ka 周期<sup>[43]</sup>, 可能是该区域黄土的沉积速率较低引起的。而黄土高原西部沉积速率较高的黄土记录了 100 ka、40 ka 和 20 ka 的组合周期则可能反映了太阳辐射、北半球冰量和大气  $\text{CO}_2$  的综合影响<sup>[44-45]</sup>。

## 5 结论

和平镇黄土剖面的磁性矿物以成土作用形成的 SD、SP 和较细 PSD 颗粒的磁铁矿为主, 磁化率和频率磁化率的变化与黄土高原中部和东部黄土序列的磁化率和频率磁化率类似, 可以用来反映季风降雨的变化特征。根据  $S_0$  和  $L_1$  的边界年代以及高分辨率磁化率与石笋氧同位素变化特征的精细对比, 建立了 16 ka 以来黄土高原西部东亚夏季风降雨的变化历史, 确认了黄土高原西部对末次冰期 BA 暖事件和 YD 冷事件具有显著响应, 探讨了 16 ka 以来东亚夏季风降雨的驱动机制, 即 16—11 ka 间东亚季风降雨的变化受到北半球太阳辐射和北半球区域温度的共同影响, 而 11 ka 以来的夏季风降雨减少主要受到太阳辐射降低的影响。

致谢: 感谢中国科学院地球环境研究所古地磁实验室权春艳硕士在实验过程中给予的帮助。



## 参考文献(References)

- [1] Maher B A. Palaeoclimatic records of the loess/palaeosol sequences of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 154(15): 23-84.
- [2] An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130, 000 years. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36.
- [3] An Z S, Kukla G, Porter S C, et al. Late quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 1991, 18(2): 125-132.
- [4] Sun Y B, Wang X L, Liu Q S, et al. Impacts of post-depositional processes on rapid monsoon signals recorded by the last glacial loess deposits of Northern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289(1/2): 171-179.
- [5] Huang Chunchang. Loess- palaeosol and climatic changes on southern Loess Plateau in late Pleistocene. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(1): 1-10. [黄春长. 黄土高原南部晚更新世黄土古土壤与气候变迁. *地理学报*, 1989, 44(1): 1-10.]
- [6] Qiang X K, An Z S, Song Y G, et al. New eolian red clay sequence on the western Chinese Loess Plateau linked to onset of Asian desertification about 25 Ma ago. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(1): 136-144.
- [7] Deng Chenglong, Yuan Baoyin. Processes of gully erosion and accumulation in the central loess plateau of China since the last interglacial. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 92-98. [邓成龙, 袁宝印. 末次间冰期以来黄河中游黄土高原沟谷侵蚀—堆积过程初探. *地理学报*, 2001, 56(1): 92-98.]
- [8] An Z S, Liu T S, Lu Y C, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China. *Quaternary International*, 1990, 718: 91-95.
- [9] Zhao G Y, Liu X M, Chen Q, et al. Paleoclimatic evolution of Holocene loess and discussion of the sensitivity of magnetic susceptibility and Median diameter. *Quaternary International*, 2013, 296(16): 160-167.
- [10] Sun Y B, Clemens S C, Morrill C, et al. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon. *Nature Geoscience*, 2012, 5(1): 46-49.
- [11] 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. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(5): 1125-1138. [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. *第四纪研究*, 2016, 36(5): 1125-1138.]
- [12] Evans M E, Heller F. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetism*. New York: Academic Press, 2003.
- [13] Liu Q S, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: Principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): RG4002. DOI: 10.1029/2012RG000393.
- [14] Li Langping, Lu Huayu. A preliminarily quantitative estimation of the sedimentation and erosion rates of loess deposits in Chinese Loess Plateau over the past 250 ka. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 37-52. [李郎平, 鹿化煜. 黄土高原 25 万年以来粉尘堆积与侵蚀的定量估算. *地理学报*, 2010, 65(1): 37-52.]
- [15] Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1984, 77(1): 125-141.
- [16] Evans M E, Heller F. Magnetism of loess/palaeosol sequences: Recent developments. *Earth-Science Reviews*, 2001, 54(1-3): 129-144.
- [17] An Zhisheng, Sun Youbin, Cai Yanjun, et al. Asian monsoon change and its links to global climate. *Journal of Earth Environment*, 2017, 8(1): 1-5. [安芷生, 孙有斌, 蔡演军, 等. 亚洲季风变迁与全球气候的联系. *地球环境学报*, 2017, 8(1): 1-5.]
- [18] Sun Donghuai, Su Ruixia, Chen Fahu, et al. Composition, susceptibility and input flux of present aeolian dust over Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(2): 171-180. [孙东怀, 苏瑞侠, 陈发虎, 等. 黄土高原现代天然降尘的组成、通量和磁化率. *地理学报*, 2001, 56(2): 171-180.]
- [19] Local Chronicles Office of Yuzhong County. *Yuzhong Yearbook 2012-2014*. Lanzhou: Gansu Ethnic Press, 2015: 116. [榆中县地方志办公室. *榆中年鉴 2012—2014*. 兰州: 甘肃民族出版社, 2015: 116.]
- [20] Ao H, Dekkers M J, Deng C L, et al. Paleoclimatic significance of the Xiantai fluvio-lacustrine sequence in the Nihewan Basin (North China), based on rock magnetic properties and clay mineralogy. *Geophysical Journal International*, 2009, 177(3): 913-924.
- [21] Deng C L, Vidic N J, Verosub K L, et al. Mineral magnetic variation of the Jiaodao Chinese loess/paleosol sequence and its bearing on long-term climatic variability. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B3): B03103. DOI: 10.1029/

- 2004JB003451.
- [22] O'Reilly W. Rock and mineral magnetism. Blackie, 1984. DOI: 10.1007/978-1-4684-8468-7.
- [23] Ao H, Roberts A P, Dekkers M J, et al. Late Miocene-Pliocene Asian monsoon intensification linked to Antarctic ice-sheet growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 444(15): 75-87.
- [24] Verwey E J W. Electronic conduction of magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) and its transition point at low-temperatures. *Nature*, 1939, 144 (3642): 327-328.
- [25] Roberts A P, Pike C R, Verosub K L, et al. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B12): 28461-28475.
- [26] Ao Hong, Deng Chenglong. Review in the identification of magnetic minerals. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 432-442. [敖红, 邓成龙. 磁性矿物的磁学鉴别方法回顾. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 432-442.]
- [27] Tauxe L, Mullender T A T, Pick T. Potbellies, wasp-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B1): 571-583.
- [28] 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110: B11102. DOI: 10.1029/2005JB003726.
- [29] Clemens S C. Late Cenozoic climate change in Asia: Loess, monsoon and monsoon-arid environment evolution. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 107: 274-275.
- [30] Cheng H, Edwards R L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations. *Nature*, 2016, 534(7609): 640-646.
- [31] Zhou W J, Head M J, An Z S, et al. Terrestrial evidence for a spatial structure of tropical-polar interconnections during the Younger Dryas episode. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 191(3/4): 231-239.
- [32] Basak C, Fröllje H, Lamy F, et al. Breakup of last glacial deep stratification in the South Pacific. *Science*, 2018, 359 (6378): 900-904.
- [33] Contrerasrosales L A, Jennerjahn T C, Steinke S, et al. Holocene changes in biome size and tropical cyclone activity around the northern South China Sea. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 215: 45-63.
- [34] Zhao M X, Huang C Y, Wang C C, et al. A millennial-scale  $\text{U}_{7\text{K}}$  sea-surface temperature record from the South China Sea ( $8^\circ\text{N}$ ) over the last 150 kyr: Monsoon and sea-level influence. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 236(1-2): 39-55.
- [35] Zhu Q G, He J H, Wang P X. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1986, 3: 466-477.
- [36] Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 2006, 19(21): 5686-5699.
- [37] Yang S L, Ding Z L, Li Y Y, et al. Warming-induced northwestward migration of the East Asian monsoon rain belt from the Last Glacial Maximum to the mid-Holocene. *PNAS*, 2015, 112(43): 13178-13183.
- [38] Lu H Y, Yi S W, Liu Z Y, et al. Variation of East Asian monsoon precipitation during the past 21 k.y. and potential  $\text{CO}_2$  forcing. *Geology*, 2013, 41(9): 1023-1026.
- [39] Schneider T, Bischoff T, Haug G H. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 2014, 513 (7516): 45-53.
- [40] An Z S, Colman S M, Zhou W J, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka. *Scientific Reports*, 2012, 2(1): 619. DOI: 10.1038/srep00619.
- [41] Hao Q, Wang L, Oldfield F et al. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400,000-year minima in insolation variability. *Nature*, 2012, 490(7420): 393-396.
- [42] 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. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1/2): 33-48.
- [43] Ao H, Dekkers M J, Xiao G Q, et al. Different orbital rhythms in the Asian summer monsoon records from North and South China during the Pleistocene. *Global and Planetary Change*, 2012, 80(1): 51-60.
- [44] Sun Y B, Yin Q Z, Crucifix M, et al. Diverse manifestations of the mid- Pleistocene climate transition. *Nature Communications*, 2019, 10(1). DOI: 10.1038/s41467-018-08257-9.
- [45] Sun Y B, Kutzbach J E, An Z S, et al. Astronomical and glacial forcing of East Asian summer monsoon variability. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 115: 132-142.
- [47] Kutzbach J E. Monsoon climate of the early Holocene: Climate experiment with the earth's orbital parameters for 9000 years ago. *Science*, 1981, 214(4516): 59-61.

## Environmental magnetic record of East Asian summer monsoon variability on the Chinese Loess Plateau since 16 ka BP

LIANG Xiao<sup>1,2</sup>, YANG Pingguo<sup>1</sup>, YAO Jiao<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>,  
ZHANG Jianhui<sup>2</sup>, SUN Pengfei<sup>3</sup>, AO Hong<sup>2</sup>

(1. School of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen 041004, Shanxi, China; 2. Institute of Earth and Environment, CAS, Xi'an 710061, China; 3. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

**Abstract:** Climate change since the last deglaciation period is an important topic of Quaternary paleoclimate research. Eolian Holocene paleosols ( $S_0$ ) and last glacial loess ( $L_1$ ) on the western Loess Plateau margin have high sedimentation rates and provide valuable materials for the study of East Asian monsoon climate change since the last glacial deglaciation. Here we report high-resolution environmental magnetic records spanning the last 16 ka for the whole  $S_0$  and the uppermost  $L_1$  from the Hepingzhen section in the western Chinese Loess Plateau. Environmental magnetic results suggest that the magnetic properties of the Hepingzhen loess section are dominated by fine-grained magnetite, including superparamagnetic (SP), single-domain (SD), and fine pseudo single-domain (PSD) magnetite particles. The magnetic susceptibility and frequency dependent magnetic susceptibility records show identical variability during the last 16 ka. This consistent variability suggests that they are both influenced by content of pedogenic fine-grained (SP, SD, and fine PSD) magnetite particles, which is similar to the loess accumulations on the eastern Chinese Loess Plateau. Therefore, the magnetic susceptibility and frequency dependent magnetic susceptibility records of the Hepingzhen loess section can be also used to infer the soil pedogenic intensity and summer monsoon precipitation that dominates regional pedogenesis, as the case for the eastern Chinese Loess Plateau. The summer monsoon rainfall variation inferred from the Hepingzhen loess magnetic susceptibility and frequency dependent magnetic susceptibility records is consistent with that inferred from South China stalagmite oxygen isotope data during the last 16 ka. Both the western Chinese Loess Plateau and South China precipitation is suggested to be substantially lower during the last glacial period than in the Holocene. Precipitation was high during the Bølling-Allerød Warming (BA, 15–13 ka BP), and low during the Younger Dryas (YD, ~12 ka BP). The highest precipitation occurred in the early Holocene (~11 ka BP), with a long-term decreasing trend from early to late Holocene. Combining a detailed land-sea comparison, we suggest that the variation of East Asian monsoon precipitation between 16 ka and 11 ka was affected by combined solar radiation and regional temperature of the northern hemisphere, while the long-term summer monsoon precipitation during the last 11 ka was dominated by a decreasing trend in solar radiation.

**Keywords:** environmental magnetism; loess deposits; last deglaciation; East Asian monsoon