

文章编号: 1006-6616 (2011) 02-0175-10

黄土高原东南部黄土记录的全新世东亚季风变化

许晨曦^{1,2}, 郝青振¹, 杨石岭¹, 赵淑君^{1,2}, 周鑫^{1,2},
葛俊逸^{2,3}, 肖国桥^{2,3}

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 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, 陕西 西安 710075)

摘要: 在全球变暖背景下, 未来东亚季风的变化一直备受关注, 而东亚季风演化规律的研究能够为未来的预测提供重要基础。黄土-古土壤序列几乎连续地记录了古东亚季风变化的信息, 本文选取黄土高原东南部的茌阳、偃师、灵宝、吉县、丁村五个剖面进行磁化率和古风化强度分析, 重建了黄土高原东南部两万年以来的东亚夏季风演化历史: 18~12 ka B. P., 季风强度较弱; 12~10 ka B. P., 季风强度显著增强; 10~6 ka B. P., 季风强度最强; 6 ka B. P. 以后季风强度逐渐减弱。对比发现黄土高原东南缘全新世东亚夏季风的演化与东亚季风区不同纬度代表性记录基本同步, 没有显著的区域性差别; 东亚夏季风变化主要受控于北半球低纬太阳辐射, 但存在明显滞后。同时发现全新世古土壤磁化率与古风化强度峰值在地层中的位置往往不一致, 在风化较强的地区, 古风化强度最大值位置偏下, 两个指标相比, 古风化强度能够更客观地反映东亚夏季风强度。

关键词: 黄土; 磁化率; 风化强度; 东亚夏季风

中图分类号: P588.23; P512.2⁺1

文献标识码: A

0 引言

东亚季风作为全球气候系统的重要组成部分, 对全球的水循环有着重要的影响。东亚夏季风带来的降水更是对季风区人民的生活环境和社会发展有着极其重要的作用^[1]。研究东亚古夏季风的变化有助于了解东亚夏季风的演化规律, 为认识东亚季风在全球变暖背景下的变化趋势提供重要历史参照。广泛分布于黄土高原的第四纪黄土-古土壤序列是研究东亚古季风的理想载体^[2]。已有的研究^[3]表明, 在黄土高原地区, 东亚夏季风相对强盛时, 化学风化较强, 以成壤作用为主, 发育古土壤; 东亚冬季风相对强盛时, 化学风化较弱, 以粉尘堆积为主, 发育黄土。

黄土高原黄土-古土壤序列的研究较多的是洛川^[2]、西峰^[4]等剖面。相比于黄土高原的其他地区, 黄土高原东南缘的研究较为薄弱, 仅对丁村剖面^[5]和邙山剖面^[6-7]等少数剖面进

收稿日期: 2010-02-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (编号: KZCX2-YW-Q1-03) 资助。

作者简介: 许晨曦 (1985-), 男 (满族), 辽宁人, 硕士。研究方向: 第四纪环境。联系电话: 010-82998408, E-mail: xuchenxi@gmail.com

行过较深入的研究。而大量的考古遗址分布于黄土高原东南部，旧石器中期的丁村文化、新石器时期的仰韶文化、夏、商都发源于该地区。因此研究该区的古季风演化也可以提供与人类演化有关的环境变化的重要信息。

目前为止，黄土-古土壤序列夏季风替代性指标主要有磁化率^[3]、土壤微型态特征^[8]、Rb/Sr^[9-10]、色度^[11]以及 FeD/FeT^[4,12-13]等。其中磁化率是在黄土研究中广泛应用的指标，但古土壤磁化率增强的机制比较复杂，使其所代表的确切的古气候意义尚不完全清楚^[14]。如土壤学研究所获得的某些气候变化信息在磁化率曲线上并无体现^[15]，FeD/FeT所反映某些时段的古夏季风强盛期也在磁化率曲线上没有反映^[13]。因此古夏季风研究中，不同指标的相互印证是非常必要的。

选择黄土高原东南部的荥阳、偃师、灵宝、丁村、吉县 5 个第四纪黄土剖面进行黄土磁化率和古风化强度的研究，重建了末次盛冰期以来古东亚季风的变化，并与我国不同地区的古气候记录进行对比，试图进一步探讨东亚季风变化的规律和控制因素。

1 研究材料与方法

为了研究黄土高原东南部晚第四纪以来的气候变化，分别在荥阳（34°56′27″N，113°22′32″E，201 m）、偃师（34°46′43″N，112°44′48″E，220 m）、灵宝（34°34′17″N，110°49′50″E，593 m）、吉县（36°06′29″N，110°38′34″E，990 m）、丁村（35°35′51″N，110°16′1″E，599 m）的晚第四纪黄土剖面采样（图 1）。这些剖面现代年均温介于 10~14℃，年降水量介于 530~650 mm 范围内。采集样品包括 L₁（典型黄土）的顶部、S₀（全新世古土壤）和 L₀（全

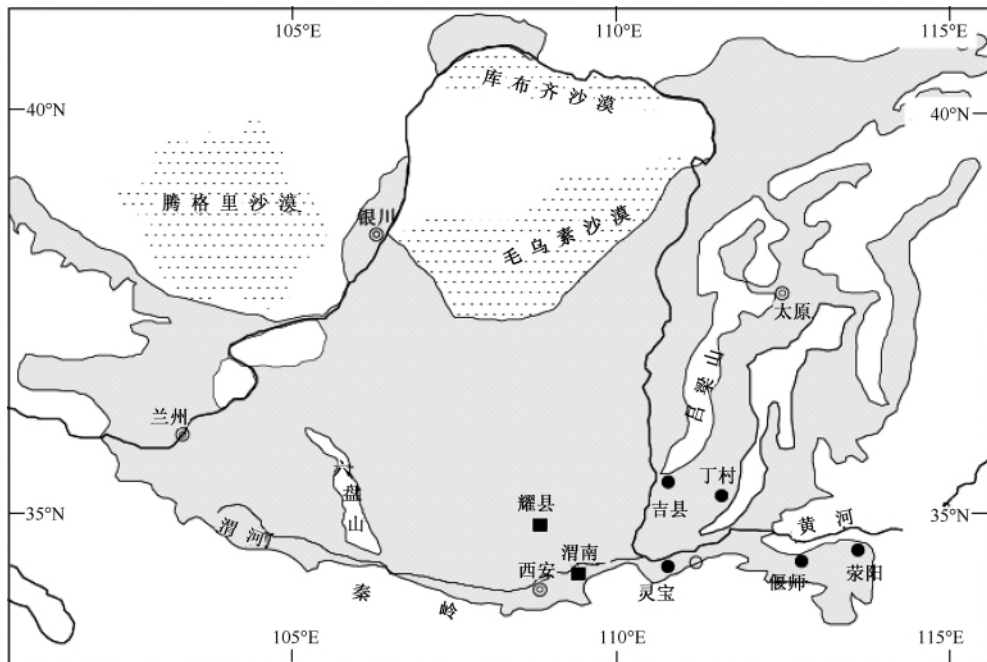


图 1 黄土高原观测剖面分布图

(黑圆点为本文研究剖面位置，黑框表示有明确测年结果剖面位置)

Fig. 1 Locations of XY, YS, LB, DC and JX sections

新世黄土), 采样间距分别为 10 cm、5 cm、5 cm。

本文选取黄土剖面中光释光测年结果作为参考年龄。基于黄土磁化率地层的空间对比, 本文综合黄土高原南部具有较多绝对测年数据的渭南、耀县剖面的研究结果^[16-17], 获得 S_0/L_0 、 S_0/L_1 (即全新世古土壤的顶底年龄) 以及 LGM 的年龄分别为 3.74 ka B. P.、12.87 ka B. P.、18.7 ka B. P.。本文用这 3 个年龄作为剖面年龄的控制点, 利用 Kukla 的磁化率年代模型^[18]进行内插, 建立时间标尺。

磁化率的测量是在 Bartington MS 2 型磁化率仪上完成, 在低频状态 (0.47kHz) 下, 对自然干燥的样品进行测量。样品的游离铁和全铁分别用 CBD (citrate-bicarbonate-dithionite) 方法^[19]和酸溶法^[20]提取, 在中国科学院新生代地质与环境重点实验室的 GGX-600 型原子吸收光谱仪上测定 (比色波长为 248.3 nm), 分析误差分别为 6% 和 5%。

2 结果与讨论

2.1 磁化率和游离铁/全铁值反映的晚第四纪夏季风变化

荥阳、偃师、灵宝、吉县、丁村五个剖面 FeD/FeT 值与磁化率的测量结果见图 2。磁化率主要反映成壤过程中新形成的细粒亚铁磁性矿物 (磁铁矿/磁赤铁矿) 的信息。而 CBD 方法^[19]确定的游离铁不仅包括了成壤成因的磁赤铁矿、磁铁矿、还包括了主要矿物赤铁矿、针铁矿和水铁矿等所有成土作用产生的铁的氧化物 (氢氧化物) 的信息^[21-22], 反映了风化成壤的综合效应。由图 2 可以看出, 在所有剖面中, 磁化率与 FeD/FeT 值大体上具有相同的趋势, 即在 S_0 中两者具有较高的值, 而在 L_0 、 L_1 中则有较低的值。

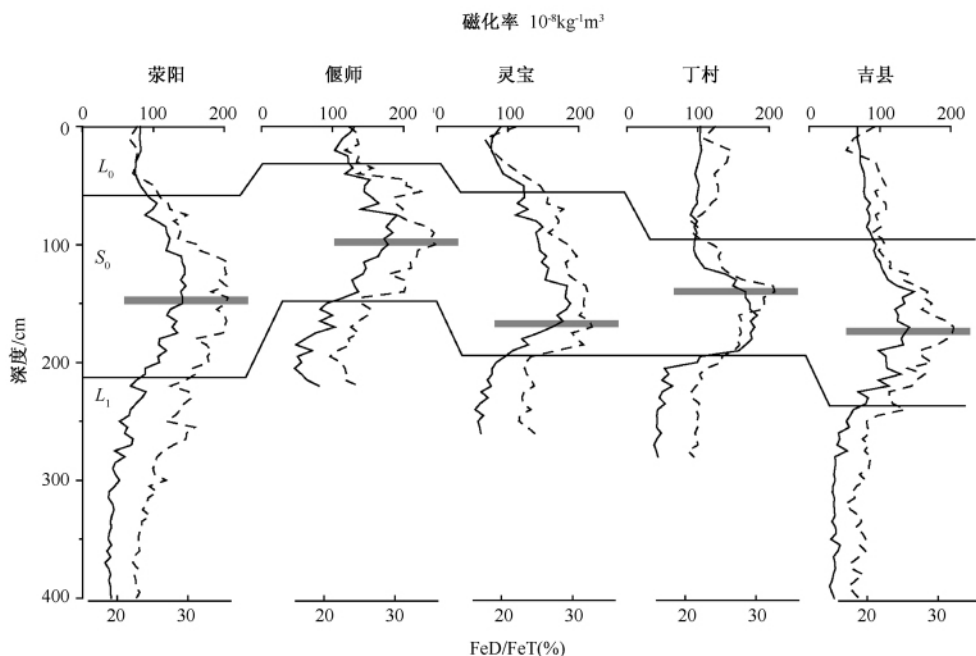


图 2 黄土高原东南部荥阳、偃师、灵宝、丁村、吉县剖面磁化率与 FeD/FeT 值
灰色矩形代表的是 FeD/FeT 的峰值位置, 实线为磁化率, 虚线为 FeD/FeT 值

Fig. 2 Magnetic susceptibility and FeD/FeT values on XY, YS, LB, DC and JX sections Grey bar indicates maximum values of FeD/FeT. Dashed lines, FeD/FeT. Solid line, magnetic susceptibility

为了进一步理解夏季风替代指标的气候意义,作者将磁化率和 FeD/FeT 值两东亚夏季风指标进行了对比,发现这两种指标在剖面中的变化存在着一定的不一致性,磁化率与 FeD/FeT 峰值的出现位置存在着 3 种关系(图 2)。第一种为 FeD/FeT 峰值早于磁化率峰值,见于灵宝、偃师、荥阳 3 个剖面。在这 3 个剖面中磁化率峰值与 FeD/FeT 峰值的距离不同,大致在 20 ~ 35 cm 之间,磁化率最大值与 FeD/FeT 值最大值年代差别约在 1 ~ 1.5 ka 之间。此种现象在渭南的晚第四纪黄土剖面中^[13]也有记录。第二种为 FeD/FeT 峰值与磁化率峰值同时出现,见于吉县剖面。第三种为 FeD/FeT 峰值晚于磁化率峰值,见于丁村剖面。

FeD/FeT 峰值早于磁化率峰值出现是风化较强的土壤剖面的典型特征。对于正常土壤剖面而言,磁化率的增强首先表现在富含有机质的淋滤层,随着土壤发育程度的加深,磁化率增高的部分逐渐向下伏淀积层扩展^[23-24]。而游离铁所指示的含铁矿物主要富集于细粒物质中,强烈的风化会导致细粒物质的向下淋滤,导致游离铁的峰值向下移动,这种磁化率和古风化强度的位置不一致的现象在风化较强的土壤剖面中较为常见^[23-24]。造成上述现象的另外一个可能原因与土壤中铁矿物的形成演化有关,根据 Torrent 的土壤中亚铁磁性矿物演化理论^[22,25],亚铁磁性矿物的形成转化模式为:含铁硅酸盐矿物的风化→水铁矿→磁赤铁矿→赤铁矿,这种转化模式也得到新近纪风尘沉积研究结果的支持^[26]。在土壤剖面风化最强的部位,磁赤铁矿向赤铁矿的转化比较彻底,导致磁化率降低。当然土壤剖面内部不同部位的氧化-还原状态也会对铁矿物的演化产生一定的影响。

对于 FeD/FeT 峰值与磁化率峰值同时出现的情况,是风化较弱的土壤剖面的典型特征。由于风化较弱,造成的细粒物质向下淋滤或者向下移动很短的距离,而磁赤铁矿向赤铁矿转化的比例也相对较低,此时就出现 FeD/FeT 峰值与磁化率峰值同相位的关系。而对于 FeD/FeT 峰值滞后于磁化率峰值出现的情况,尚不清楚其中的原因。从本文的结果看(图 2),南部的 3 个剖面(荥阳、偃师、灵宝) FeD/FeT 峰值均出现于 S₀ 的中下部,而北部的丁村、吉县剖面 FeD/FeT 峰值出现于 S₀ 的中上部,与上述解释是一致的。

研究剖面中 FeD/FeT 值与磁化率值的空间变化规律也不完全一致。位于黄土高原东南缘的荥阳剖面是本次研究剖面中年均降水量、年均温最大的剖面(年均降水量 645.5 mm、年均温 14.3℃),但从图 2 中可以看出其磁化率的峰值与平均值却是远远低于距离荥阳仅 50km 偃师剖面的磁化率值,甚至低于年均温以及年降水量都更少的灵宝和丁村剖面。偃师剖面的磁化率最大值为 $191.35 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, FeD/FeT 峰值为 35.66%,而荥阳的磁化率峰值为 $145.98 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, FeD/FeT 峰值为 35.59%。这与过去的研究结果类似,尽管大体上同一层黄土磁化率的值在黄土高原上空间是由东南向西北逐渐减小^[27-28],但也有例外。从现代气候的降水、温度分布格局来看 FeD/FeT 值似乎更能反映夏季风强度的空间变化。而且 Guo 等^[4]通过磁化率、FeD/FeT 值以及成壤强度对比发现,FeD/FeT 值能够更客观地指示成壤强度。因此在本研究中主要运用 FeD/FeT 指标重建夏季风变化。

根据重建 5 个剖面的古风化强度(图 3-d),可以将 20 ka B. P. 以来的气候分为以下 4 个阶段: 1) 末次冰盛期(20 ~ 18 ka B. P.), 5 个剖面的 FeD/FeT 值整体偏低,最低值在 17% ~ 21% 之间,指示了当时该地区的风化强度较低,夏季风强度较弱; 2) 末次冰盛期向全新世适宜期发展的过渡期(18 ~ 10 ka B. P.), 在此阶段, FeD/FeT 值呈现一定的波动性,并且逐渐升高,在 12 ~ 10 ka B. P. 期间, FeD/FeT 值显著增加。从沉积速率较大的荥阳、吉县剖面可以看出,在 FeD/FeT 值整体升高的情况下,其中包含着一些千年尺度的次一级波动; 3) 全新世气候适宜期(10 ~ 6 ka B. P.), FeD/FeT 达到最大值,其峰值在 32% ~

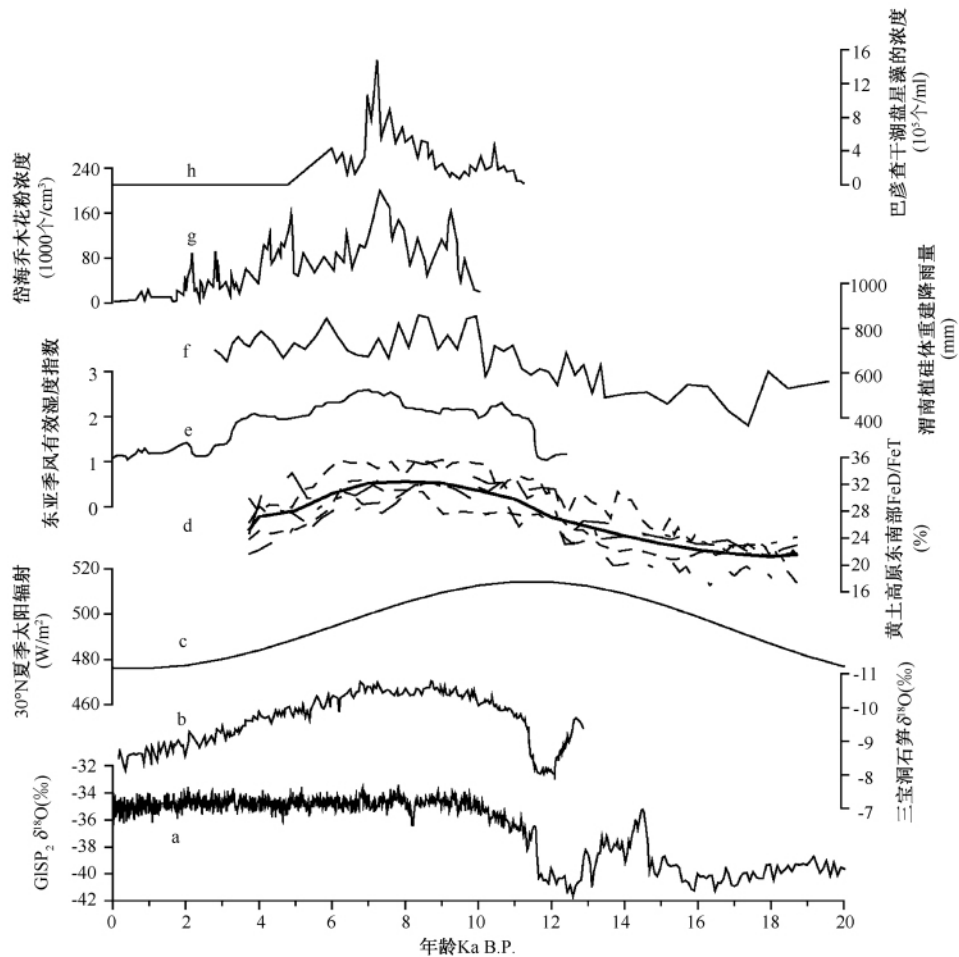


图 3 黄土高原东南部黄土古风化强度与东亚夏季风指标、冰芯记录的对比

Fig. 3 Comparison of paleo-weathering intensity in southeastern Loess Plateau and several proxies such as EAM and oxygen isotope record of ice core

a. GISP2 冰芯中氧同位素^[29]; b. 三宝洞石笋氧同位素^[30]; c. 北纬 30° 太阳辐射^[31]; d. 黄土高原东南部古风化强度 (虚线为 5 个剖面 FeD/FeT 值, 实线为 5 个剖面平均的 FeD/FeT 值); e. 东亚季风有效湿度指数^[32]; f. 渭南黄土剖面的植硅体组合重建过去 20 ka 的降雨量^[33]; g. 岱海钻孔中 10 ka 以来的木本花粉浓度的变化^[34]; h. 巴彦查干湖钻孔中 10 ka 以来盘星藻浓度的变化^[35]

36% 之间, 指示了当时较高的风化强度以及温暖湿润的气候; 4) 全新世适宜期结束, 大概在 6 ka B. P. 以后, FeD/FeT 值逐渐减小, 在 4 ka B. P. 时仅比末次盛冰期稍高 (图 3), 指示了东亚夏季风的显著减弱。

2.2 游离铁/全铁值所反映的夏季风强度的空间变化

从图 4 中可以看出, 在全新世适宜期, 黄土高原东南部的古风化强度存在一定的空间梯度, 但是空间变化不大, FeD/FeT 值最大相差仅为 3%, 而且 FeD/FeT 值都在 30% 以上, 指示了当时夏季风强盛, 使得研究区都处于相对温暖湿润的气候。在末次冰盛期, FeD/FeT 值在研究区均表现为低值, 且空间变化也不大, FeD/FeT 值最大相差约为 4%, 而 FeD/FeT 值

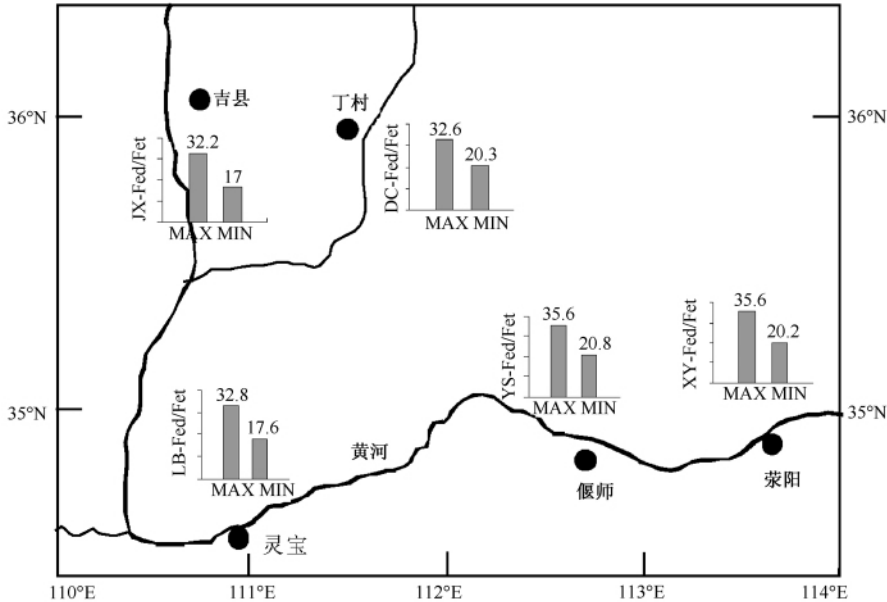


图4 末次冰盛期与全新世气候适宜期古季风强度的空间分布

Fig. 4 Spatial changes of paleo-monsoon intensity during the Holocene Optimum and Last Glacial Maximum

都在 21% 以下, 说明在当时研究区夏季风很弱, 研究区是一个较寒冷环境。这与过去基于黄土高原空间环境重建结果大体一致^[27-28]。

2.3 古东亚季风记录对比以及古东亚季风的变化机制

为了从整体上探讨古东亚季风的变化, 本文分别选取不同地区的季风记录 (湖北三宝洞石笋氧同位素^[30]、渭南黄土剖面中植硅体重建古降水^[33]、农牧交错带巴彦查干湖盘星藻个数^[35]、内蒙古地区岱海钻孔中木本花粉含量^[34]以及东亚季风有效湿度指数^[32]) 与本文的黄土高原东南缘的晚第四纪夏季风变化进行对比研究 (图 3)。磁性地层学^[36-38]为黄土提供了长尺度的时间框架, 但很难为高分辨率的古气候事件提供精确的时间标尺, Kukla 时间模型的年代标尺^[18]提供了较为独立的年代证据, 并且过去研究证实该时间标尺在轨道尺度和亚轨道尺度的气候事件研究中是比较有效的^[4, 39]。从图 3 可以看出, 东亚夏季风在中国大陆不同地区变化基本同步, 在 18~12 ka B. P. 期间, 季风强度总体较弱, 有逐渐增强的趋势; 12~10 ka B. P., 季风强度快速增强; 10~6 ka B. P., 季风强度最大; 6ka B. P. 季风强度开始减弱, 4ka B. P. 以后季风强度明显减弱。

前人的研究指出亚洲季风的变化在轨道尺度上受控于北半球低纬太阳辐射^[40], 在千年尺度上受北大西洋地区气候影响^[41]。通过东亚夏季风与北纬 30° 太阳辐射、格陵兰 GISP2 冰芯的氧同位素进行对比 (图 3) 发现, 在曲线变化形态上, 晚第四纪东亚夏季风的变化与北纬 30° 太阳辐射比较一致, 但有约 2~3 ka 的滞后; 在 10 ka B. P. 之前东亚夏季风的变化与北极地区温度的变化也比较一致。

关于全新世夏季风与北半球低纬太阳辐射的相位关系, 研究者们持有不同的观点。Wang 等^[30]认为亚洲季风变化受控于岁差周期, 季风强度并不滞后于太阳辐射的变化, 12 ka B. P. 发生的 Younger Dryas 事件打断了季风强度增加的过程。但是大多数学者认为亚洲季

风的变化滞后于低纬太阳辐射的变化。Feitmann 等^[42]对阿曼石笋的研究指出, 亚洲季风强度的峰值滞后于太阳辐射的峰值, 其原因可能是北半球冰盖在未消融之前对亚洲季风起主控作用。Clemens 等^[43-44]通过对海洋沉积物的研究发现, 亚洲季风的变化受到岁差和地轴倾斜度的控制, 滞后于太阳辐射岁差周期的变化, 同时由于海洋热容量较大, 对气候变化具有缓冲效应, 海温增加较慢, 导致夏季风变化滞后。从中国北方湖泊的记录来看, Xiao 等^[45]认为全新世气候适宜期的出现滞后于低纬太阳辐射的峰值, 其可能原因是在 7.5~6 ka B. P. 西太平洋暖池的西进以及黑潮的加强导致的。东亚夏季风的变化也受到南海海平面变化的影响。Yu K F. et, al.^[46]对雷州半岛的珊瑚礁的研究表明 7 ka B. P. 左右中国南海海平面到达最大, 高出现代的海平面约 2m, 其他研究^[47-48]也表明在 7~6.2 ka B. P. 时, 南海北部出现全新世高海平面, 并且高出现代海平面 2~3m。海平面变化对东亚季风的控制主要体现在大冰盖消融后, 海平面迅速上升, 一方面海洋面积增加, 蒸发量加大; 另一方面, 大陆架被海水淹没, 缩短了中国北方与水汽来源的距离^[49]。从上述解释可以看出东亚夏季风的变化受到北极冰盖的规模、海平面的变化、低纬海-气相互作用等多种因素的影响, 地球气候系统内部要素对太阳辐射响应的滞后是东亚夏季风在 10~6 ka B. P. 达到适宜期的重要原因。10 ka B. P. 以来, 低纬太阳辐射虽然开始减少, 但是 9 ka B. P. 以后, 北半球冰盖基本融化, 一方面减弱了东亚冬季风的强度, 并缩短了冬季风的控制时间; 另一方面, 海平面逐渐上升, 并且海水温度增高, 蒸发量增大, 黑潮加强, 为夏季降水提供了大量的水汽来源, 导致全新世适宜期的出现。其后, 随着太阳辐射的逐渐减少, 海平面趋于稳定以及海洋吸收的热量减少, 季风强度在 6 ka B. P. 之后逐渐减弱。

3 结论

通过对黄土高原东南部 5 个晚第四纪黄土剖面的磁化率和古风化强度的分析, 我们获得了以下几点认识:

1) 18 ka B. P. 以来黄土高原东南缘的东亚夏季风演化历史为: 18~12 ka B. P., 季风强度较弱; 12~10 ka B. P., 季风强度显著增强; 10~6 ka B. P., 季风强度最强; 6 ka B. P. 以后季风强度逐渐减弱。

2) 磁化率与 FeD/FeT 值在大多数剖面上存在着相位差, 此种差别主要是由于两者反映的土壤化学风化信息不同所致。与磁化率相比, 黄土中 FeD/FeT 值能更客观地反映了古夏季风强度。

3) 东亚夏季风在中国大陆不同地区变化无显著的地区差别。全新世东亚夏季风的变化基本受控于北半球低纬太阳辐射的变化, 但存在明显的滞后, 可能与气候系统对于太阳辐射的响应的过程以及气候系统内部各要素之间的相互作用有密切的联系。

致谢: 感谢姜文英副研究员、冯少华、陈祚玲同学在野外采样中所提供的帮助。感谢审稿人提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- [1] Zhang J C, Liu Z G. Climate of China [M]. New York: Wiley, 1992. 1~376.
- [2] 刘东生, 等. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 1~481.
LIU Dong-sheng, et al. Loess and the Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985. 1~481.
- [3] 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 [J]. *Quaternary International*, 1990, 7 (8): 91 ~ 95.
- [4] Guo Z T, Biscaye P, Wei L, 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.
- [5] 吴文祥, 刘东生. 丁村旧石器文化遗址的黄土地层研究 [J]. *地震地质*, 2002, 24 (2): 241 ~ 248.
WU Wen-xiang, LIU Dong-sheng. Study on the Loess-Paleosols sequence of the Dingcun Paleolithic sites [J]. *Seismology and Geology*, 2002, 24 (2): 241 ~ 248.
- [6] Jiang F C, Fu J, Wang S, et al. Formation of the Yellow River, inferred from loess - palaeosol sequence in Mangshan and lacustrine sediments in Sanmen Gorge, China [J]. *Quaternary International*, 2007, 175 (1): 62 ~ 70.
- [7] 蒋复初, 傅建利, 王书兵, 等. 关于黄河贯通三门峡的时代 [J]. *地质力学学报*, 2005, (4): 293 ~ 301.
JIANG Fu-chu, FU Jian-li, WANG Shu-bing, et al. The age of the Yellow River passing through the Sanmen Gorge [J]. *Journal of Geomechanics*, 2005, (4): 293 ~ 301.
- [8] Guo Z T, Liu D S, Fedoroff N, et al. Shift of monsoon intensity on the Loess Plateau at ca. 0.85 Ma BP [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38: 586 ~ 586.
- [9] Chen J, An Z S, Head J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130,000 years and their implications for monsoon paleoclimatology [J]. *Quaternary Research*, 1999, 51 (3): 215 ~ 219.
- [10] Chen J, An Z S, Liu L, W, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44 (5): 403 ~ 413.
- [11] Yang S L, Ding Z L. Color reflectance of Chinese loess and its implications for climate gradient changes during the last two glacial-interglacial cycles [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30 (20): 2058 ~ 2061.
- [12] Guo Z T, Liu T S, Guiot J et al. High frequency pulses of East Asian monsoon climate in the last two glaciations: Link with the North Atlantic [J]. *Climate Dynamics*, 1996, 12 (10): 701 ~ 709.
- [13] Ding Z L, Yang S L, Sun J M, et al. Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for long-term Asian monsoon evolution in the last 7.0 Ma [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185 (1): 99 ~ 109.
- [14] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52 (4): 1041 ~ 1048.
LIU Qingsong, DENG Chenglong. Magnetic susceptibility and its environmental significances [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52 (4): 1041 ~ 1048.
- [15] 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 [J]. *Global and Planetary Change*, 1998, 18 (3): 113 ~ 128.
- [16] 刘嘉麒, 陈铁梅, 聂高众, 等. 渭南黄土剖面的年龄测定及十五万年来高分辨时间序列的建立 [J]. *第四纪研究*: 1994, 3: 193 ~ 200.
LIU Jia-qi, CHEN Tie-mei, NIE Gao-zong, et al. Dating and reconstruction of the high resolution time series in Weinan Loess section of the last 150000 years [J]. *Quaternary Sciences*, 1994, 3: 193 ~ 200.
- [17] Zhao H, Chen F H, Li S H, et al. A record of Holocene climate change in the Guanzhong Basin, China, based on optical dating of a loess-palaeosol sequence [J]. *The Holocene*, 2007, 17 (7): 1015 ~ 1022.
- [18] Kukla G, Heller F, Ming L X, et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility [J]. *Geology*, 1988, 16 (9): 811 ~ 814.
- [19] Mehra O P, Jackson M L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1960, 7: 317 ~ 327.
- [20] McKeague J A. *Manual on soil sampling and methods of analysis* [M]. Toronto: Canadian Society of Soil Science, 1981. 1 ~ 491.
- [21] Hunt C P, Singer M J, Kletetschka G, et al. Effect of citrate-bicarbonate-dithionite treatment on fine-grained magnetite and maghemite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 130 (1): 87 ~ 94.
- [22] Torrent J, Liu Q S, Bloemendal J, et al. Magnetic enhancement and iron oxides in the Upper Luochuan Loess Paleosol Sequence, Chinese Loess Plateau [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71 (5): 1570.
- [23] Singer M J, Fine P. Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of northern California soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53 (4): 1119.
- [24] Singer M J, Fine P, Verosub K L, et al. Time dependence of magnetic susceptibility of soil chronosequences on the California coast [J]. *Quaternary research*, 1992.
- [25] Torrent J, Barrón V, Liu Q S. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil [J].

- Geophysical Research Letters, 2006, 33 (2): L02401.
- [26] Hao Q Z, Oldfield F, Bloemendal J, et al. The record of changing Hematite and Goethite deposition over the last 22Ma on the Chinese Loess Plateau from magnetic measurements and Diffuse Reflectance Spectroscopy [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114 (B12101), doi: 10.1029/2009JB006604.
- [27] 孙东怀, 周杰. 全新世气候适宜期黄土高原及黄土/沙漠过渡区年降水量的初步恢复 [J]. 中国沙漠, 1995, 15 (004): 339 ~ 344.
- SUN Dong-huai, ZHOU Jie. Preliminary reconstruction of annual rainfall in Loess Plateau and loess-desert transitional regions in suitable climatic period of Holocene [J]. Journal of Desert Research, 1995, 15 (004): 339 ~ 344.
- [28] Hao Q Z, Guo Z T. Spatial variations of magnetic susceptibility of Chinese loess for the last 600 kyr: Implications for monsoon evolution [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110 (B12101), doi: 10.1029/2005JB003765.
- [29] Grootes P M, Stuiver M. Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 103 to 105-year time resolution [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 26455 ~ 26470.
- [30] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224, 000 years [J]. Nature, 2008, 451 (7182): 1090 ~ 1093.
- [31] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years [J]. Quaternary Science Reviews, 1991, 10 (4): 297 ~ 317.
- [32] Herzschuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50, 000 years [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25 (1): 163 ~ 178.
- [33] Lu H Y, Wu N Q, Liu K B, et al. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China II: palaeoenvironmental reconstruction in the Loess Plateau [J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26 (5 ~ 6): 759 ~ 772.
- [34] Li X Q, Zhou J, Ji S, et al. Vegetation history and climatic variations during the last 14 ka BP inferred from a pollen record at Daihai Lake, north-central China [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2004, 132 (3 ~ 4): 195 ~ 205.
- [35] Jiang W Y, Guo Z T, Sun X, et al. Reconstruction of climate and vegetation changes of Lake Bayanchagan (Inner Mongolia): Holocene variability of the East Asian monsoon [J]. Quaternary Research, 2006, 65 (3): 411 ~ 420.
- [36] Hao Q Z, Guo Z T. Magnetostratigraphy of a late Miocene-Pliocene loess-soil sequence in the western Loess Plateau in China [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L092099, doi: 10.1029/2003GL019392.
- [37] 乔彦松, 刘冬雁, 李朝柱, 等. 川西甘孜地区黄土的磁性地层学研究 [J]. 地质力学学报, 2007, (4): 289 ~ 296.
- QIAO Yan-song, LIU Dong-yan, LI Chao-zhu, et al. Magnetostratigraphy of a Loess-soil sequence in the Garze area, western Sichuan [J]. Journal of Geomechanics, 2007, (4): 289 ~ 296.
- [38] 施炜, 马寅生, 吴满路, 等. 青藏高原东北缘共和盆地第四纪磁性地层学研究 [J]. 地质力学学报, 2006, (3): 317 ~ 323.
- SHI Wei, MA Yan-sheng, WU Man-lu, et al. Quaternary magnetostratigraphy of the Gonghe Basin on the northeastern of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2006, (3): 317 ~ 323.
- [39] Guo Z T, Liu T S, Guiot J, et al. High frequency pulses of East Asian monsoon climate in the last two glaciations: link with the North Atlantic [J]. Climate Dynamics, 1996, 12: 701-709.
- [40] Kutzbach J E. Monsoon climate of the early Holocene: climate experiment with the earth's orbital parameters for 9000 years ago [J]. Science, 1981, 214 (4516): 59 ~ 61.
- [41] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. Nature, 1995, 375: 305 ~ 308.
- [42] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman [J]. Science, 2003, 300 (5626): 1737 ~ 1739.
- [43] Clemens S, Prell W, Murray D, et al. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon [J]. Nature, 1991, 353: 720 ~ 725.
- [44] Clemens S C, Prell W L. The timing of orbital-scale Indian monsoon changes [J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26 (3 ~ 4): 275 ~ 278.
- [45] Xiao J L, Si B, Zhai D Y, et al. Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian monsoon variability [J]. Journal of Paleolimnology, 2008, 40 (1): 519 ~ 528.
- [46] Yu K F, Zhao J X, Liu T S, et al. High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 224 (1 ~ 2): 143 ~ 155.

- [47] 聂宝符. 五千年来南海海面变化的研究 [J]. 第四纪研究, 1996, (001): 80~87.
NIE Bao-fu. Sea-Level changes of the South Sea in the past 5000 years [J]. Quaternary Sciences, 1996, (001): 80~87.
- [48] 黄镇国, 张伟强. 南海地区全新世高海面遗迹高程的区域差异问题 [J]. 台湾海峡, 2005, 24 (002): 228~235.
HUANG Zhen-guo, ZHANG Wei-qiang. On elevation differentiation of the Holocene high sea level relics in the South China Sea area [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005, 24 (002): 228~235.
- [49] 丁仲礼, 余志伟. 第四纪时期东亚季风变化的动力机制 [J]. 第四纪研究, 1995, 1: 63~74.
DING Zhong-li, YU Zhi-wei. Forcing mechanisms of paleomonsoons over East Asia [J]. Quaternary Sciences, 1995, 1: 63~74.

EAST ASIAN MONSOON CHANGES DURING THE HOLOCENE —RECORDS FROM THE SOUTHEASTERN LOESS PLATEAU

XU Chen-xi^{1,2}, HAO Qing-zhen¹, YANG Shi-ling¹, ZHAO Shu-jun^{1,2}, ZHOU Xin^{1,2},
GE Jun-yi^{2,3}, XIAO Guo-qiao^{2,3}

(1. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; 3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075)

Abstract: The influence of global warming on East Asian Monsoon (EAM) has received intensive concern, and studies on history of EAM could provide important climate analogue in the warmer temperature context. Five loess-paleosol sequences in the southeastern Loess Plateau were sampled to address the history of EAM during the last 20 ka. The intensity of EAM was weak from 18 to 12 ka B. P., increased rapidly in the interval of 12-10 ka B. P., and reached highest points during 10-6 ka B. P., and declined after 6 ka B. P. The proxies of summer monsoon, magnetic susceptibility and paleo-weathering intensity in this study is basically timely consistent with the geological records in different part of EAM region. The insolation of low-latitude northern hemisphere is main control factor of EAM, although changes of EAM lagged variations of insolation of low-latitude northern hemisphere. The lag may be induced by several important boundary conditions (e. g., scales of polar ice sheet in northern high latitudes, sea level changes, interaction between sea and atmosphere in low latitudes) of EAM to insolation and interaction between components of climate system. Additionally, our studies showed that magnetic susceptibility (MS) and maximum FeD/FeT values in same section were not in same position of soil profiles, with lower position of maximum FeD/FeT value than that of MS in relatively strong weathering area. Compared with MS, FeD/FeT ratio can better reflect the intensity of EAM.

Key words: loess; magnetic susceptibility; paleo-weathering intensity; East Asian summer monsoon