

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019120501

# MIS13 时期黄土高原东西部地区夏季风不对称演化

王博, 王牛牛, 王志远, 张兴泽, 杨丽雯, 陈渠, 李凤全

浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004

**摘要:**根据黄土高原中东部地区黄土沉积物的地质记录,前人研究推断 MIS13 时期北半球气候为高温高湿环境,然而,这似乎与黄土高原西部黄土沉积物的地质记录存在差别。本研究通过综合前人的研究结果,对比黄土高原东西部地区 MIS13 时期的古气候及古土壤风化强度在空间上的梯度分布,发现两地的古气候演化存在不对称性。对比 MIS13 时期低纬度的亚非季风区和北半球中高纬度地区气候状况得出:高降水量环境仅存在于亚非季风区大部分地区,但当时是否呈现高温环境值得商榷;北半球中高纬地区则显著不同,呈现相对较干冷的间冰期气候。由此推断,MIS13 时期黄土高原东西部地区之间气候演化的不对称现象可能是季风缺少动力因素,对黄土高原西部影响较小,且长时间停留在黄土高原中东部地区所致;而在此之后的间冰期,由于季风的扩展和加深可能进一步加剧黄土高原西部地区 S5S1 古土壤风化强度与年轻古土壤层的差别。

**关键词:**MIS13; 古气候; 不对称演化; 黄土高原

**中图分类号:**P532      **文献标识码:**A

## Unparallel MIS13 climate evolution between western and eastern Chinese Loess Plateau

WANG Bo, WANG Niuniu, WANG Zhiyuan, ZHANG Xingze, YANG Liwen, CHEN Qu, LI Fengquan

College of Geography and Environmental Sciences, Jinhua 321004, China

**Abstract:** The quasi-continuously deposited Chinese loess is widely recognized as one of the most important paleoclimatic and paleoenvironmental archive for Quaternary climate. The paleosol layer S5S1, corresponding to the Marine Isotope Stage (MIS) 13, is the most prominent paleosol layer in the central Chinese Loess Plateau (CLP). According to the pedogenesis evidence there, previous studies suggested that the North Hemisphere was then dominated by humid and warm climate under the strong East Asian Summer Monsoon (EASM). It seems contradicted with the common understanding that the period was prevailed by large global ice volumes in the past interglacials. Recently, it is found that in some of the CLP loess sequences, the phenomenon is lacking. Then a question is raised if the EASM is really strong at that time. In this study, we made a thorough review of previous studies, and discovered that the strongly pedogenic S5S1 units are located in the East and Central CLP only, while the pedogenesis was weak in the West CLP. Comparing the Africa-Asian monsoon records with those in the region of mid- and high latitudes in the North Hemisphere, it is found that the abnormal MIS13 climate occurred only in the Africa-Asian monsoon region, but not the high latitude region of the North Hemisphere. In addition, the abnormal climate on CLP is possibly characterized by humidity, but not temperature. Based on the facts mentioned above, it is proposed that the EASM did not cover the region of West CLP during MIS13 benefited from the atmosphere dynamics, which caused the unparallel pedogenesis of loess-paleosol sequences between the West and East CLP.

**Key words:** MIS13; paleoclimatic; out-of-phase pattern of climate variation; Chinese Loess Plateau

MIS13 是中更新世以来全球冰量最大和 CO<sub>2</sub> 浓度最低的间冰期之一<sup>[1-2]</sup>。而与此同时,黄土高原中东部地区夏季风异常强盛<sup>[3-6]</sup>。这种异于全球古气候演化历史的特殊现象逐渐引起学者关注<sup>[3-8]</sup>。越来越多的研究发现这个时期的季风增强事件并不

是孤立的,对地中海沉积物的研究发现 MIS13 时期沉积了大量由洪水搬运的腐泥沉积物(Sapropel A)<sup>[9]</sup>,阿拉伯海沉积物的氧同位素同样由于大洪水事件造成了浮游有孔虫氧同位素偏正的“Y”事件<sup>[10]</sup>。然而,研究表明同样气候条件下,更长时期的土壤发

**资助项目:**国家自然科学基金项目“中国南方网纹红土的网纹形态特征及其与物质迁移的关系”(41971111);浙江省自然科学基金一般项目“我国不同气候区典型城市交通污染生物磁学诊断及影响因素评估”(LY20D040001)

**作者简介:**王博(1986—),女,讲师,从事环境磁学研究, E-mail: bowang@zjnu.edu.cn

**通讯作者:**王志远(1984—),男,讲师,主要从事环境变化研究, E-mail: wzhy@zjnu.edu.cn

**收稿日期:**2019-12-05; **改回日期:**2019-12-25. 文凤英编辑

育可以造成风化强度的增加<sup>[1]</sup>,由此可能导致对当时古气候条件的错误估算;MIS13时期是否受此影响?此外,在黄土沉积速率更高的高原西部——现代季风边缘区是否也存在类似现象?出现这种现象的可能控制因素是什么?对上述现象的质疑和疑问并未得到解答。本研究拟选取黄土高原中东部和西部典型黄土剖面进行研究(图1),试图回答上述问题。

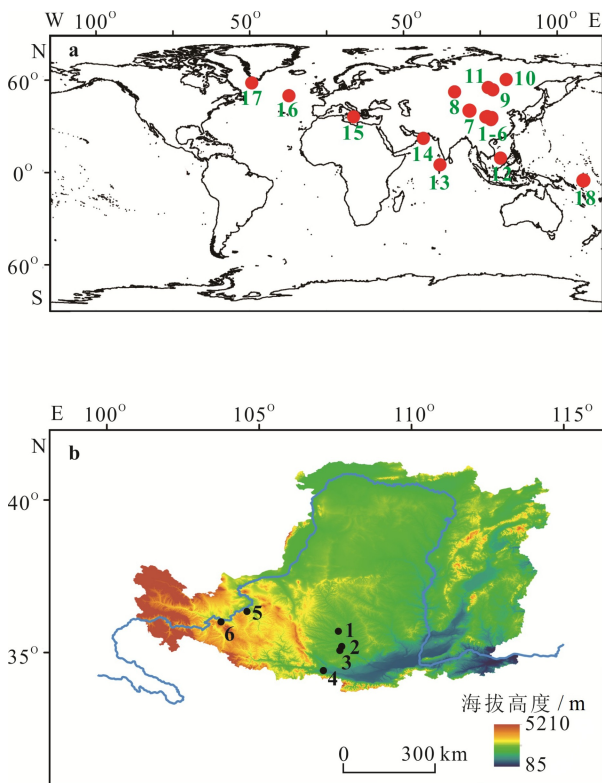


图1 文章中涉及的研究点位置图(a)与黄土高原及附近地区位置图(b)

- 1—8依次为西峰、长武、灵台、宝鸡、靖远、西津村、Darai Kalon、西伯利亚黄土剖面,9.贝加尔湖BDP-96-2钻孔,10和11分别为西伯利亚地区Ledianaya lenskaya洞和Botovskaya洞石笋,12.南海ODP1146-b钻孔,13.阿拉伯海MD90-0963钻孔,14.阿拉伯海MD04-2881钻孔,15.地中海KC-01钻孔,16.北大西洋IODP-U1308钻孔,17.北大西洋ODP 646钻孔,18.东赤道太平洋钻孔ODP806-b。

Fig.1 a. location of research sections used in this paper, b. sections from Chinese Loess Plateau

No. 1—8 indicates the locations of loess sections at Xifeng, Changwu, Lingtai, Baoji, Jingyuan, Xinjincun, Darai Kalon, and Siberian loess; lake sediment core BDP-96-2 from Baikal lake; stalagmites from Ledianaya lenskaya and Botovskaya caves; oceanic core ODP 1146b, MD90-0963, MD04-2881, KC-01, IODP-U1308, ODP 646, ODP806-b.

## 1 研究区气候

黄土高原位于亚洲季风区边缘区,我国季风区西北边缘带。气候特点为雨热同期,且降水主要集中在夏季。近40年气候监测结果发现,本区年均降水量呈现由东南向西北逐渐减少的连续变化,由东南部的半湿润气候过渡为西北部的半干旱气候。现代水汽输送的观测结果表明<sup>[12]</sup>,我国季风区的水汽主要来源于孟加拉湾地区和南海地区。同时,太平洋西部副热带高压的北伸和西进可以有效影响我国季风区低纬水汽的西北向输送<sup>[13]</sup>。此外,现代观测还注意到高纬气团对季风降水的影响,当其活动频繁时,季风被压缩在低纬地区;反之,季风北跳的可能性增加<sup>[13]</sup>。

## 2 MIS13时期黄土高原东西部古气候的不对称演化

### 2.1 MIS13时期黄土高原中东部气候

在黄土高原中东部,组成S5的3个古土壤层颜色明显较深,被认为是中国黄土高原黄土-古土壤序列中成壤最强的土壤层,也是重要的标志层,被称为“红三条”。野外观测S5顶部S5S1土壤层的土壤发育程度为整个序列最高,并得到了众多指示土壤化学风化强度代用参数的支持(图2)。虽然黄土高原南部部分剖面的磁学参数显示S5S1层总体磁性和细粒磁性矿物含量均较低<sup>[14]</sup>,但研究表明这应与地层中次生磁性矿物由强磁性的磁铁矿转变为弱磁性且风化程度更高的赤铁矿有关,即土壤发育在风化强度更高的气候条件下<sup>[15-16]</sup>。同样值得注意的是,在MIS13阶段粉尘通量较低且粉尘中粗颗粒物组分少<sup>[5]</sup>,表明此时冬季风强度弱。有研究注意到S5S1地层的强发育可能与土壤发育时间长有关,而这又可以影响地层次生磁性矿物的数量<sup>[11]</sup>,当然同样可能影响到诸如游离铁、全铁等参数;由此可以造成研究者高估当时古气候条件的可能。那么S5S1古土壤层的强风化特征是否受到较低的粉尘沉积通量影响,即地层风化强度参数仅反映了夏季风强度信号还是同时夹杂了冬季风强度变化的信号呢?这个问题显然是需要深入讨论的。

西峰剖面S1至S5S1古土壤层的平均沉积速率分别为<sup>[5]</sup>:  $1.04 \times 10^5$ 、 $1.23 \times 10^5$ 、 $1.12 \times 10^5$ 、 $1.00 \times 10^5$ 、 $0.73 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$ ,其中S5S1的沉积速率明显低于

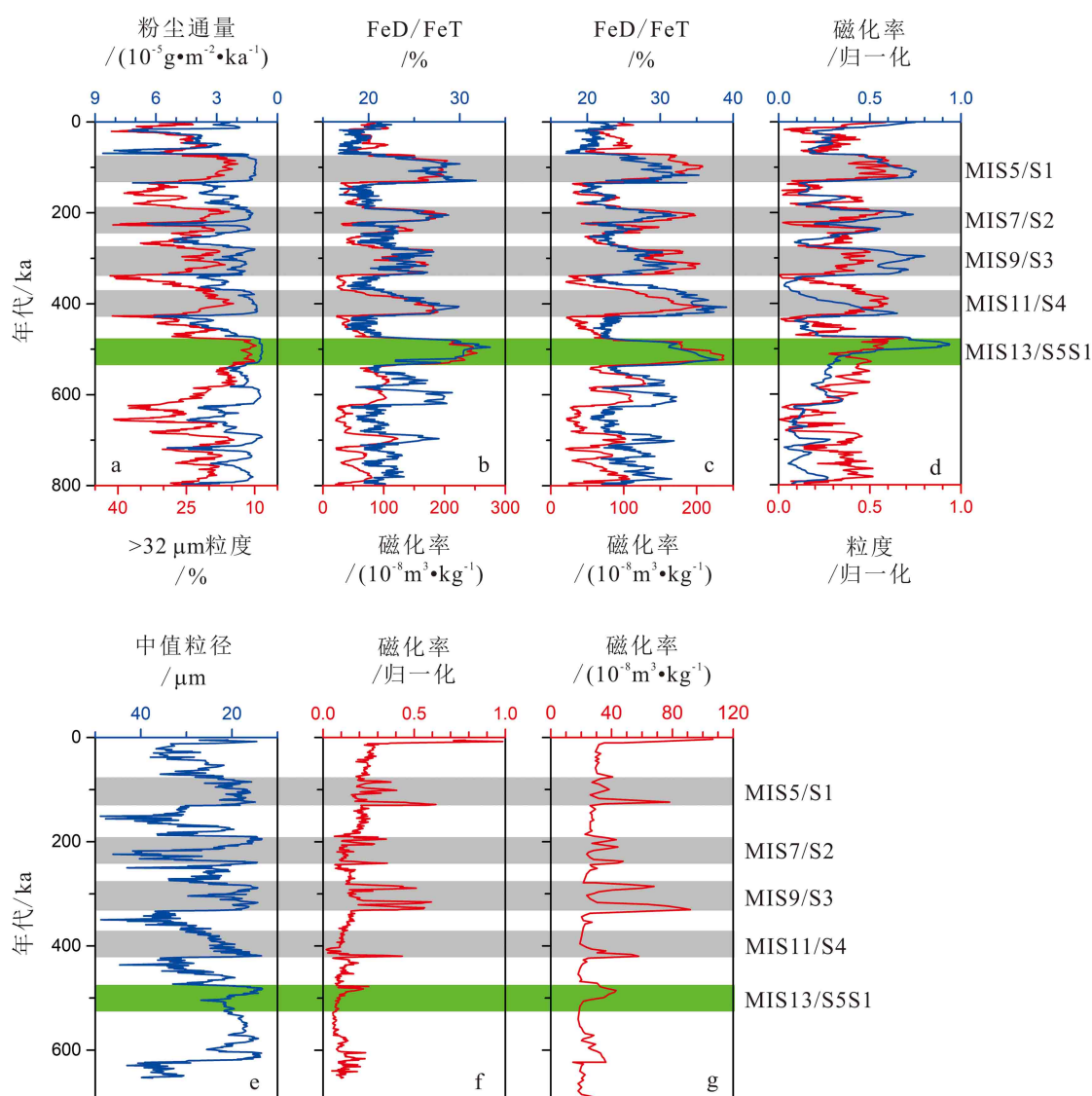


图 2 黄土高原中东部与西部黄土剖面记录的古气候演化历史对比

a、b 图为西峰剖面记录<sup>[5]</sup>, c 图为长武剖面记录<sup>[5]</sup>, d 图为灵台剖面记录<sup>[17]</sup>, e 图为靖远剖面粒度数据<sup>[18,19]</sup>, f 图为靖远剖面磁化率数据<sup>[18,19]</sup>, g 图为西津村剖面磁化率数据<sup>[20]</sup>, 剖面位置如图 1 所示。

Fig.2 Correlation of paleoclimate records among central, eastern and western Chinese Loess Plateau

a and b from Xifeng section<sup>[5]</sup>, c from Changwu section<sup>[5]</sup>, d from Lingtai section<sup>[17]</sup>, e and f from Jingyuan section<sup>[18,19]</sup>, g from Xijincun section<sup>[20]</sup>.

The locations of sections are marked in figure 1.

其他古土壤层。相似现象同样发生在灵台<sup>[17]</sup>、长武<sup>[5]</sup>、宝鸡<sup>[21]</sup>等剖面。由此可知,黄土高原地区 MIS13 时期的粉尘通量确实普遍较低。对 S1 古土壤层的土壤发育状况研究发现,黄土高原中东部地区黄土的沉积速率显著低于成壤速率<sup>[22]</sup>,土壤可以发育为与气候相对应的成熟土壤;而 S5S1 地层的沉积速率更低、土壤发育更好,可以推断土壤同样发育为与气候相对应的成熟土壤。在这种情况下,次生矿物之间的相对含量的变化受土壤发育时长的影响应较为有限。对宝鸡剖面的磁性矿物研究可知:由  $\chi_{fd}$  和  $\chi_{ARM}$  参数指示的细粒次生磁铁矿和/或磁赤铁

矿含量在 S5S1 古土壤层显著低于 S3,而赤铁矿含量却在前者中明显较高<sup>[14-15,23]</sup>。由于赤铁矿的形成对应于更为氧化的风化条件,可以判断 S5S1 时期的强土壤发育主要与当时气候条件相关,而非成壤时间。对洛川剖面 140 万年以来碳酸岩中碳同位素的研究同样发现<sup>[24]</sup>,S5S1 地层数值明显偏负,且显著小于其他古土壤层。由于土壤层中碳酸盐除少部分为原生矿物外,其余次生部分的碳来源主要为大气  $CO_2$  和土壤呼吸所产生的  $CO_2$ ,因此碳同位素与植物生长过程中同位素分馏效应存在密切关系,植物量大,造成的分馏效应越明显,碳同位素趋于



偏轻;反之则相反<sup>[25]</sup>。由于碳酸盐的形成过程相对于成壤发育时间是十分短暂的,而形成后即保持了当时的环境信息,其性质变化也与成壤发育时长无明显联系,由此同样可以判断 S5S1 古土壤发育于更为高温湿润的环境。这些地质证据均表明 MIS13 时期黄土高原中东部地区雨热条件可能是十分优越的。

## 2.2 MIS13 时期黄土高原西部气候

前人对黄土高原西部黄土沉积序列(六盘山以西)的关注显然低于中部和东部地区,然而由于此地区黄土沉积物的沉积速率高,记录了更为详细的古气候演化信息,是良好的古气候研究载体<sup>[17-20]</sup>;同时随着研究的扩展,受到越来越多关注。仅有的研究成果表明,本区 S5S1 古土壤层的土壤发育强度明显低于 S1—S4 古土壤层(图 2e-g)。就土壤厚度而言,九州台剖面 S4 古土壤层厚度可达 3.50 m,而 S5S1 古土壤层厚度仅为 1.20 m<sup>[24]</sup>。就土壤颜色而言:S4 古土壤层上部为棕色,底部为褐色,颜色更为鲜亮;S5S1 古土壤层颜色为橙色<sup>[24]</sup>;靖远剖面土壤色度测量结果同样显示 S5S1 古土壤层的红度和亮度均显著低于 S4 古土壤层<sup>[26]</sup>。就土壤层钙积现象而言,S4 古土壤层存在明显钙积现象,存在白色钙菌丝体,而 S5S1 古土壤层则未发现明显钙积现象<sup>[24]</sup>;气量法测量的碳酸钙含量结果表明,S5S1 古土壤层含量高于下覆黄土层,且峰值位于古土壤层中上部<sup>[26]</sup>,表明其碳酸钙为表聚型,土壤发育时期有效降水低。就土壤有机质含量而言:S5S1 古土壤层有机质的峰值含量约为 3%,而 S1—S4 古土壤层有机质的峰值含量均可达到 4%,表明当时生物生产量相对较低<sup>[26]</sup>。与此相对应,磁化率测量结果同样发现,黄土高原西部地区 S5S1 古土壤层的磁化率仅略高

于下伏黄土层,且明显低于上部古土壤层(图 2)。低粉尘通量现象同样出现在黄土高原西部地区<sup>[18-19]</sup>,但较低的古风化强度却与黄土高原东部相反,表明二者 MIS13 时期气候演化存在明显不对称。总体而言,与黄土高原中东部黄土-古土壤沉积序列不同,黄土高原西部地区 S5S1 地层土壤发育相对较弱,即 MIS13 时期本区气候较干旱。

## 2.3 MIS13 时期黄土高原气候空间格局

葛俊逸等<sup>[6]</sup>对黄土高原六盘山以东黄土剖面土壤风化强度的空间特征研究发现,风化强度的纬向差别显著大于径向,呈现由东南向西北逐渐减弱的趋势;同时不同时期风化强度的纬向梯度变化存在不一致性。由图 3 可知,黄土沉积时期,土壤风化强度的梯度变化最小,S4 发育时期梯度变化略高于末次冰期,而 S5S1 发育时期的梯度变化显著高于前两者。在北纬 35°以北各地 S5S1 古土壤的发育强度仅略高于 S4,然而在北纬 34°~35°之间,S5S1 古土壤层的土壤风化强度却显著高于 S4(图 3)。值得注意的是,虽然黄土高原中东部地区土壤风化强度的径向空间变化微弱,但在六盘山出现突变;在黄土高原西部地区 S5S1 古土壤的土壤风化出现明显降低。此现象表明当时气候格局与现代明显不同。

## 3 MIS13 时期黄土高原东西部气候不对称演化的驱动机制探讨

早期研究受米兰科维奇理论影响,认为全球气候变化受控于北半球高纬地区太阳辐射变化。然而,在中更新世以来古气候变化的主周期由 40 ka 变为 100 ka,后者在太阳辐射变化周期中并不明显,

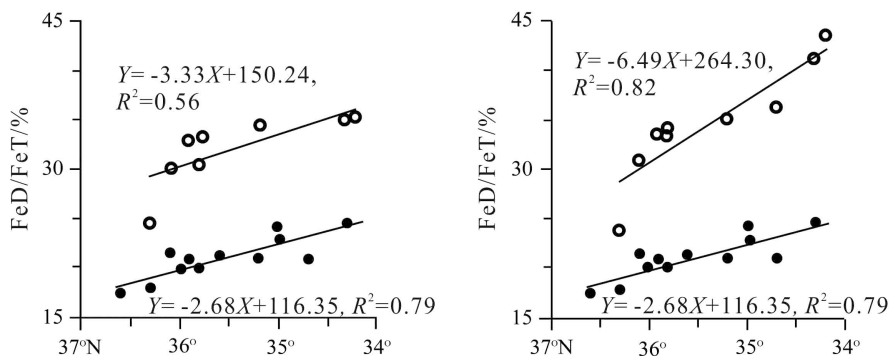


图3 黄土高原古风化强度沿纬向变化特征(引自文献[6])

左图中空心点和实心点分别表示 S4 和 L1 层位古风化强度的空间变化,右图中空心点和实心点分别表示 S5 和 L1 层位古风化强度的空间变化

Fig.3 Latitudinal changes of paleoweathering intensity in the units L1 (solid cycles), S4 (hollow cycles in left plot), and S5 (hollow cycles in right plot) from Chinese Loess Plateau (after reference [6])

由此,部分学者提出在中更新世北半球高纬地区冰量有显著增加,且其数量变化可以控制全球气候呈周期性变化,而冰量变化周期为100 ka<sup>[21]</sup>。然而,在低纬地区的研究发现,100 ka的气候变化周期并不显著,更可能直接受控于太阳辐射,且与低纬地区太阳辐射变化更为密切<sup>[27-28]</sup>。此外,还有研究发现间冰期变化中存在10~12 ka的半岁差周期,其起因可能是在一个岁差旋回中春分点和秋分点与近日点重合产生<sup>[29]</sup>;而这个猜测即是强调低纬地区对全球气候变化的控制。因此,在探讨MIS13时期黄土高原东西部气候不对称演化的驱动机制过程中,需要考察当时低纬和北半球高纬地区的气候状况。

### 3.1 MIS13时期低纬气候

亚非地区存在一个面积广阔的季风带,包括东非季风区、南亚季风区以及东亚季风区等,且三者均与赤道复合带移动和印度洋水汽输送存在密切关系<sup>[12]</sup>。MIS13时期三地似乎均出现气候异常现象。地中海的KC-01孔发现大量腐泥,表明大量的河流沉积物输入<sup>[9]</sup>;这显然与尼罗河上游东非地区的季风增强具有密切关系。与此同时,阿拉伯海北部MD90-0963孔发现深海氧同位素极度偏正的“Y”事件,同样可能是附近河流输入大量碎屑物质导致<sup>[10]</sup>。近期一项研究还发现,阿拉伯海地区在MIS13时期海洋生物生产量明显较高,且粉尘输入量较低,表明此时夏季风显著增强而冬季风减弱<sup>[7]</sup>;然而印度洋的深海氧同位素曲线则显示,此时海洋

温度相对较低<sup>[7]</sup>(图4a和b)。与印度洋相对应,南海地区MIS13时期的深海氧同位素同样偏正,指示当时温度相对其他间冰期较低<sup>[30]</sup>(图4c),而西太平洋赤道地区也显示海表温度较低<sup>[31]</sup>(图4d)。由以上地质证据可知,印度洋附近季风区在MIS13时期盛行湿润多雨的气候,但其是否呈现高温气候值得商榷。

### 3.2 MIS13时期北半球中高纬地区气候

北半球中高纬地区不但是全球气候变化的重要驱动地之一,而且对气候变化十分敏感。西伯利亚地区分布大面积黄土沉积物,是古气候地质记录的良好载体。与黄土高原不同,区内黄土序列中古土层通常表现为黑色,而非鲜亮的红色;这显然与西伯利亚地区常年处于低温高湿状态有关,大量有机物质未被完全分解,且次生赤铁矿含量极低。由黄土的颜色和厚度可以发现,S5地层土壤发育状况相对较差(图5)。区内贝加尔湖中生物成因的硅含量为中更新世以来间冰期中最低的,表明当时温度较低<sup>[33]</sup>。最新研究还发现,西伯利亚南部地区石笋发育开始于MIS11阶段,即在MIS11之后的间冰期温度相对较高,可以长时期出现液态水,同时表明MIS13阶段土层中水体可能长期保持为固态水,暗示当时温度较低<sup>[34]</sup>。

塔吉克斯坦地处中亚干旱区南部,盛行地中海式气候。水汽应主要由西风输送。前人研究发现,塔吉克斯坦黄土与黄土高原黄土类似,在间冰期发

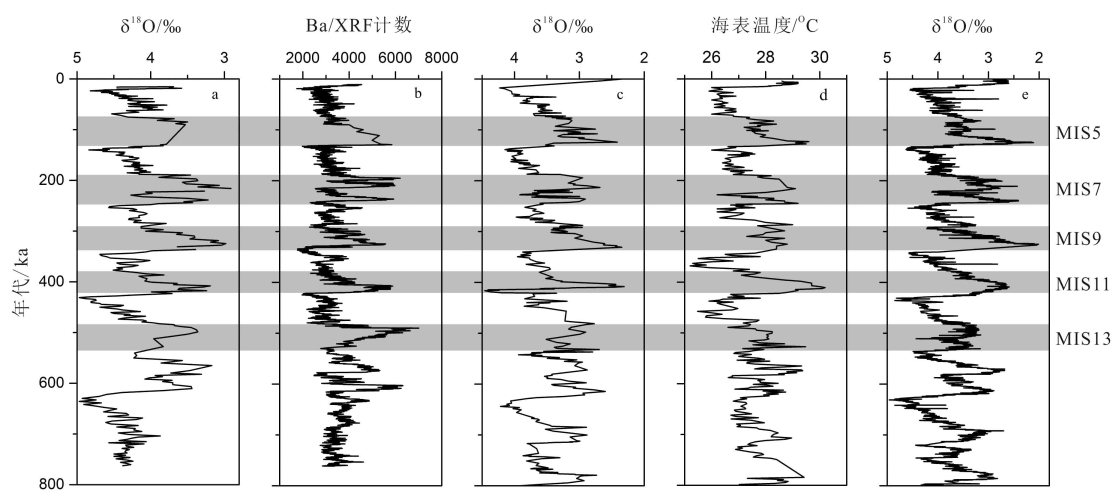


图4 海洋沉积物记录的800 kaBP以来的古气候演化历史

(a, b.阿拉伯海 MD04-2881 孔<sup>[7]</sup>, c.南海 ODP1146-b 孔<sup>[30]</sup>, d.赤道西太平洋 ODP806-b 孔<sup>[31]</sup>, e.北大西洋 IODP-U1308 孔<sup>[32]</sup>)

Fig.4 The 800 ka paleoclimate change recorded in oceanic sediment

a, b. Core MD04-2881 from Arabian Sea<sup>[7]</sup>. c. Core ODP1146-b from South China Sea<sup>[30]</sup>. d. Core ODP806-b from equatorial western Pacific Ocean<sup>[31]</sup>. e. Core IODP U1308 from North Atlantic Ocean.

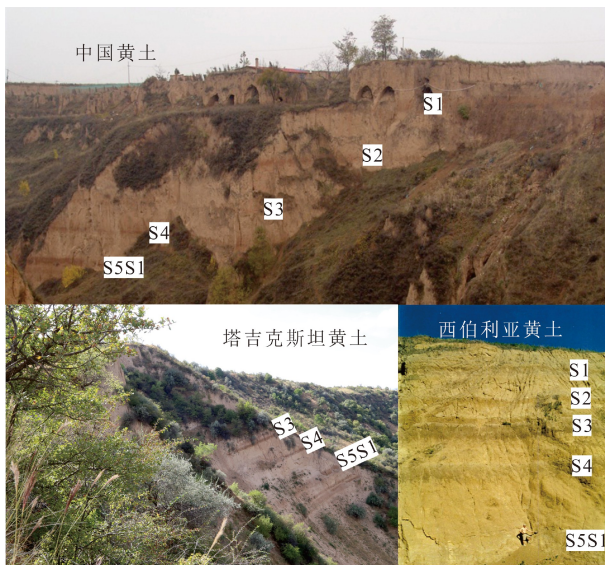


图5 西伯利亚典型黄土序列与中国、塔吉克斯坦黄土剖面序列对比图

(西伯利亚黄土图片来自 Matasova 博士, 中国和塔吉克斯坦黄土剖面照片引自文献 [35])

Fig.5 The pictures of loess sections from Chinese Loess Plateau, Tajikistan, Siberia, respectively

(The picture of Siberian loess was sourced from Dr. Matasova. And the pictures of Chinese and Siberian loesses were sourced from reference [35])

育古土壤, 冰期发育黄土; 然而部分特征气候事件的记录存在差别<sup>[35-36]</sup>, 如 S5 (相当于黄土高原的 S5S1 地层) 地层的磁化率和红度明显较低, 显著低于更年轻的古土壤层, 表明当时气候条件较差。

Vernal 和 Hillaire-Marcel<sup>[37]</sup> 对格陵兰南部附近 ODP 646 钻孔中深海沉积物的孢粉研究结果显示, MIS13 时期海洋沉积物中种子植物的孢粉浓度仅略低于 MIS11 时期, 为 1Ma 以来第二高的峰值。这也是前人研究中判断高纬地区在 MIS13 时期出现高温环境的主要证据<sup>[5, 7-8]</sup>。然而, ODP646 孔显示 MIS11 时期的气候最为适宜, 而非 MIS13; 此外, 当进一步对比不同间冰期总孢粉浓度时可以发现, MIS13 时期沉积物中种子植物的高浓度可能是由当时总体孢粉浓度较高造成, 即种子植物孢粉在总孢粉中的比重并不一定高; 而且, 通过孢粉重建的夏季海表温度也可以发现 MIS13 时期不仅显著低于 MIS11, 也低于 MIS1、MIS5 和 MIS7 等时期<sup>[37]</sup>。对北冰洋东北部 IODP-U1308 钻孔的氧同位素研究同样发现, MIS13 时期氧同位素数值较为偏正<sup>[32]</sup> (图 4e)。

综上所述, 北半球中高纬地区的陆地和海洋地质记录均显示 MIS13 时期较 MIS11 温度较低, 降水量较少; 而亚非季风区内出现的强降水现象并非半

球, 甚至全球事件。

### 3.3 MIS13 时期北半球高低纬气团的相互作用

由上述地质证据可知, 由东非经南亚至黄土高原中东部地区这个广阔的季风带与全球温度的变化趋势应基本一致, 但降水量却显著高于其他间冰期。如何在这个全球热量较低的时期在季风区形成降水量异常的现象? 其驱动机制逐步受到古气候工作者的重视。通过对北半球高纬地质证据的总结可以发现, MIS13 时期本区气候较为冷干, 西伯利亚南部地区为季节性冻土, 甚至永久冻土, 可以推测当时北极冰盖面积应有较大面积, 北半球夏季大陆气压相对较高。与此同时, 由于海洋表面温度较低, 太平洋西部的副热带高压的压场应相对较低, 其北伸和西进的幅度应十分有限。由此, 亚洲季风输送来的丰富水汽一方面由于缺少动力, 另一方面被极地气团压缩, 无法向季风边缘区推进而较长时间地停留在黄土高原中东部地区, 进而可能导致黄土高原东部湿润多雨而西部则较为干旱。上述原因可能导致 MIS13 时期黄土高原古风化强度变化梯度显著高于 MIS11 时期<sup>[6]</sup>。

### 3.4 气候转型与季风气候加深

在约 800 ka 附近, 全球气候出现明显变化, 古气候变化的主周期由 40 ka 逐步转变为 100 ka, 即中更新世气候转型。在中更新世, 又存在一个中布容事件, 发生在 MIS12 阶段。事实上, 在这个转型之前古气候变化周期并未完全转变为 100ka, 而是逐步过渡; 在此之后, 100 ka 的古气候变化周期则十分明显。在中布容事件之后, 全球气候总体均表现为间冰期气候更为高温湿润, 而冰期气候则更为寒冷干旱; 而这在黄土高原地区似乎表现的更为突出 (图 2)。就长尺度的古气候演化而言, 黄土高原西部地区和中亚南部地区在 MIS12 阶段以后的间冰期降水量增加尤为显著<sup>[18-19, 36]</sup>, 表明在此之后古夏季风可能出现了一次大规模的扩展和推进, 由此造成黄土高原西部地区降水量显著增加。然而, 必须注意到, 此时黄土高原西部地区古降水量的增加速率, 甚至增加的数量, 是高于黄土高原东部的; 这可能是季风扩展过程中将黄土高原中东部地区部分水分分流造成。由此可能造成黄土高原东部地区古降水量相对减少, 而西部地区则相对增加, 进一步加剧两地之间中布容事件前后间冰期气候的差别, 进而造成黄土高原西部地区 MIS13 时期气候显得更为干旱, 而东部地区更为湿热。



## 4 结论

通过对比黄土高原东西部古气候演化发现,两地在 MIS13 阶段存在气候演化的不对称现象;东部地区表现为中更新世以来气候最佳期,而西部地区则表现为较为干旱的间冰期。MIS13 阶段出现的高降水量事件应仅存在于亚非季风区大部分地区,北半球中高纬度地区则均未发现类似现象。黄土高原东西部古气候在 MIS13 阶段出现差异的原因可能是西南季风向北推进过程中缺少动力因素,导致季风可以更长时间停留在黄土高原东部地区,而对西部地区影响较少;此外,亚洲季风在 MIS13 之后间冰期的扩展和加深,可能加剧了两地之间 MIS13 与之后间冰期的气候差别。本研究结果表明在 MIS13 阶段的古气候演化十分特殊,不同地区存在明显差异性,季风的受控因素并不单一。

### 参考文献 (References)

- [1] Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650 000-800000 years before present [J]. *Nature*, 2008, 453 (7193): 379-382.
- [2] Lisiecki L E, Raymo M E. A pliocene-pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2005, 20(1): PA1003.
- [3] 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: Solid Earth*, 2005, 110(B12): B12101.
- [4] Yin Q Z, Guo Z T. Strong summer monsoon during the cool MIS-13 [J]. *Climate of the Past*, 2008, 4(1): 29-34.
- [5] Guo Z T, Berger A, Yin Z, et al. Strong asymmetry of hemispheric climates during MIS-13 inferred from correlating China loess and Antarctica ice records [J]. *Climate of the Past*, 2009, 5(1): 21-31.
- [6] 葛俊逸, 郭正堂, 郝青振. 特征时期黄土高原风化成壤强度的空间特征与气候梯度[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 962-968. [GE Junyi, GUO Zhengtang, HAO Qingzhen. Spatial variations of weathering intensity of the Loess Plateau and the climate gradients within characteristic timeslices [J]. *Quaternary Science*, 2006, 26(6): 962-968.]
- [7] Ziegler M, Louren L J, Tuenter E, et al. High Arabian Sea productivity conditions during MIS13-odd monsoon event or intensified overturning circulation at the end of the Mid-Pleistocene transition? [J]. *Climate of the Past*, 2010, 6(1): 63-76.
- [8] Caley T, Malaizé B, Bassinot F, et al. The monsoon imprint during the 'atypical' MIS 13 as seen through north and equatorial Indian Ocean records [J]. *Quaternary Research*, 2011, 76(2): 285-293.
- [9] Rossignol-Strick M, Paterne M, Bassinot F C, et al. An unusual mid-Pleistocene monsoon period over Africa and Asia [J]. *Nature*, 1998, 392(6673): 269-272.
- [10] Bassinot F C, Labeyrie L D, Vincent E, et al. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 126(1-3): 91-108.
- [11] Trapp K L, Soreghan G S, Elmore R D. Paleoclimatic inferences from paleopedology and magnetism of the Permian Maroon Formation loessite, Colorado, USA [J]. *GSA Bulletin*, 2004, 116(5-6): 671-686.
- [12] 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响[J]. *气象学报*, 2008, 66(1): 59-70. [ZHOU Xiaoxia, DING Yihui, WANG Panxing. Moisture transport in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(1): 59-70.]
- [13] 周兵, 文继芬. 1998年夏季我国东部降水与大气环流异常及其低频特征[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(2): 129-136. [ZHOU Bing, WEN Jifen. Abnormality of summertime precipitation of eastern china and general circulation with LFO in 1998 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(2): 129-136.]
- [14] Guo X L, Liu X M, Li P Y, et al. The magnetic mechanism of paleosol S5 in the Baoji section of the southern Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary International*, 2013, 306: 129-136.
- [15] Liu Q S, Bloemendal J, Torrent J, et al. Contrasting behavior of hematite and goethite within paleosol S5 of the Luochuan profile, Chinese Loess Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(20): L20301.
- [16] Liu Q S, Barrón V, Torrent J, et al. Magnetism of intermediate hydromaghemite in the transformation of 2-line ferrihydrite into hematite and its paleoenvironmental implication [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B1): B01103.
- [17] Sun Y B, Lu H Y, An Z S. Grain size of loess, palaeosol and Red Clay deposits on the Chinese Loess Plateau: Significance for understanding pedogenic alteration and palaeomonsoon evolution [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 241(1): 129-138.
- [18] Sun Y B, Chen J, Clemens S C, et al. East Asian monsoon variability over the last seven glacial cycles recorded by a loess sequence from the northwestern Chinese Loess Plateau [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(12): Q12Q02.
- [19] Shi P H, Yang T B, Tian Q C, et al. Loess record of climatic changes during MIS 12-10 in the Jingyuan section, northwestern Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary International*, 2013, 296: 149-159.
- [20] 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.
- [21] Ding Z L, Liu T S, Rutter N W, et al. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800,000 years [J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(2): 149-159.
- [22] Feng Z D, Wang H B. Geographic variations in particle size distribution of the last interglacial pedocomplex S1 across the Chinese Loess Plateau: Their chronological and pedogenic implications [J].

- CATENA, 2006, 65 (3) : 315-328.
- [23] 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 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 223 (3-4) : 335-348.
- [24] 陈发虎, 张维信. 甘青地区的黄土地层学与第四纪冰川问题[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 18-19. [CHEN Fahu, ZHANG Weixin. The Loess Stratigraphy and Quaternary Glacial in Gan-Qing Region[M]. Beijing: Science Press, 1993: 18-19.]
- [25] 卢玉东, 孙建中, 李佩成. 用洛川黄土中碳同位素重建140万年以来古气候[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22 (1) : 60-63. [LU Yudong, SUN Jianzhong, LI Peicheng. Predicting Paleo-climate since 140 Ma BP by experiment of carbon isotope in loess [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22 (1) : 60-63.]
- [26] 石培宏, 杨太保, 田庆春, 等. 靖远黄土-古土壤色度变化特征分析及古气候意义[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2012, 48 (2) : 15-23. [SHI Peihong, YANG Taibao, TIAN Qingchun, et al. Chroma characteristics in the loess-paleosol at Jingyuan section and its signification to paleoclimete [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2012, 48 (2) : 15-23.]
- [27] Sun Y B, Yin Q Z, Crucifix M, et al. Diverse manifestations of the mid-Pleistocene climate transition [J]. *Nature Communication*, 2019, 10: 352.
- [28] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu cave, China [J]. *Science*, 2001, 294 (5550) : 2345-2348.
- [29] Berger A, Loutre M F. Intertropical latitudes and precessional and half-precessional cycles [J]. *Science*, 1997, 278 (5342) : 1476-1478.
- [30] Tian J, Wang P X, Chen X R, et al. Astronomically tuned plio-pleistocene benthic  $^{18}\text{O}$  record from South China Sea and Atlantic-Pacific comparison [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203 (3-4) : 1015-1029.
- [31] Medina-Elizalde M, Lea D W, Fantle M S. Implications of seawater Mg/Ca variability for Plio-Pleistocene tropical climate reconstruction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 269 (3-4) : 585-595.
- [32] Hodell D A, Channell J E T, Curtis J H, et al. Onset of "Hudson Strait" heinrich events in the eastern north atlantic at the end of the middle pleistocene transition (~640 ka)? [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2008, 23 (4) : PA4218.
- [33] Prokopenko A A, Karabanov E B, Williams D F, et al. Biogenic silica record of the lake Baikal response to climatic forcing during the Brunhes [J]. *Quaternary Research*, 2001, 55 (2) : 123-132.
- [34] Vaks A, Gutareva O S, Breitenbach S F M, et al. Speleothems reveal 500 000-year history of Siberian permafrost [J]. *Science*, 2013, 340 (6129) : 183-186.
- [35] Jia J, Lu H, Wang Y J, et al. Variations in the iron mineralogy of a loess section in Tajikistan during the Mid-Pleistocene and Late Pleistocene: implications for the climatic evolution in central Asia [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19 (4) : 1244-1258.
- [36] Ding Z L, Ranov V, Yang S L, et al. The loess record in southern Tajikistan and correlation with Chinese loess [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 200 (3-4) : 387-400.
- [37] De Vernal A, Hillaire-Marcel C. Natural variability of Greenland climate, vegetation, and ice volume during the past million years [J]. *Science*, 2008, 320 (5883) : 1622-1625.