九州台古土壤 S_1 记录的末次间冰期东亚夏季风变化

饶志国[1,2,3]，陈发虎[1]，汪海斌[4]，张家武[1]，朱照宇[2]

(1 兰州大学 西部环境教育部重点实验室中德干旱环境联合研究中心，兰州 730000；
2 中国科学院 边缘海地质重点实验室，广州 510640；
3 中国科学院 研究生院，北京 100039； 4 北京师范大学 资源学院，北京 100875)

摘要：对沉积速率较高的黄土高原西部地区九州台剖面 S_1 古土壤的夏季风代用指标——磁化率、碳酸钙含量、色度进行了测量。综合分析结果表明，MIS5e 开始前，夏季风有一次衰退事件，末次盛间冰期早期夏季风强于晚期，而中期夏季风强度相对较弱，然而这种变化是较为和缓的，并没有表现出类似 GRIP 冰心氧同位素的大幅度、快速变化，表明 MIS5e 期间东亚夏季风是相对稳定的。来自海洋的研究表明，西太平洋洋面温度(SST)和洋面高度在 MIS5e 早期和晚期相对较高，中期相对较低，证实了西太平洋环境变化和东亚夏季风强度之间存在成因上的联系。与先前有关全新世东亚夏季风研究结果的对比表明，MIS5e 和全新世东亚夏季风演化具有一定的相似性，可能反映了低纬海洋和高纬大陆之间能量和物质交换对太阳辐射响应的某种内在机制。

关键词：东亚夏季风；末次间冰期；全新世；九州台古土壤

中图分类号：P532　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0256-1492(2006)02-0103-09

气候快速变化研究是国际上第四纪研究近十余年来持续的热点问题[1]，而末次间冰期(MIS5e，相当于欧洲的 Eemian 间冰期，但并不完全一致[2])是距今最近的一次间冰期，和现代间冰期(全新世)具有相似的气候条件[3]，有可能为人类预测未来的气候变化提供重要的参考系[4]。MIS5e 气候是否同样快速变化和不稳定，理所当然地成为相关研究的焦点问题。欧共体格陵兰冰心计划获得的钻孔 GRIP 记录表明 MIS5e 气候不稳定，有短尺度、大幅度的快速变化[5-8]，而相距仅 28 km 的美国格陵兰冰心计划 GISP2 得到的资料却表明 MIS5e 气候是稳定的[9-10]。目前，关于 MIS5e 的起止时间[11-15]以及 MIS5e 内部气候变化过程，世界范围内仍存在分歧。丹麦北部钻孔的底栖有孔虫和同位素证据表明 MIS5e 被两次冷事件打断[16]，来自美国东南海洋钻孔 ODP1059 孢粉和同位素证据同样表明 MIS5e 是不稳定的[17]，而来自法国的陆生软体动物记录[18]和德国湖泊孢粉记录[19]则表明 MIS5e 相当稳定。同样来自欧洲的孢粉记录，早先来自法国和波兰的 7 个高分辨率孢粉记录定量重建的结果表明 Eemian 开始后 4～5 ka 之间，冬季温度有 6～10 ℃的快速降低[20]。最近来自希腊西北部的孢粉和同位素记录表明 MIS5e 盛间冰期气候变化的频率和幅度显著低于冰期和间冰期转化时期[21]，而阿尔卑斯山脉北方前陆数个孢粉记录定量重建的结果表明 MIS5e 中期气候稍有恶化，但整体是稳定的[22]。同样来自北大西洋的钻孔则表明 MIS5e 期间，北大西洋气候状况[23]和深水产量[24]都相当地稳定。国内基于黄土的研究也同样得到了不同的结论，洛川坡头和下黑木两个剖面古土壤 S_1 石英和全样粒度的研究[25-26]，得到了末次间冰期气候不稳定的结论。然而，最近来自北京地区[27]、黄土高原中部地区[28-29]和西部地区[30-34]的证据都不支持末次间冰期气候不稳定的结论。可见，有关 MIS5e 气候变化的争论远未结束，深刻理解这一时段气候变化的事实和机制仍需大量的工作，开展空间和时间上的对比或许是一个较好的途径。国外已开始相同区域 MIS5e 和全新世气候记录之间的对比研究[35-36]，以此来更为深刻地理解气候变化的机制。有关非洲季风在 MIS5e 和全新世的对比更是发现了类似的气候事件，可能反映了高低纬之间的某种变化机制[37]。国内这方面的研究不多见，本文报道来自九州台剖面的高分辨率 MIS5e 东亚夏季风记录，它和先前研究得到的全新世夏季风变化同样存在一定的相似性，可能也反映了东亚季风气候系统的某种内在机制。

基金项目：国家自然科学杰出青年基金项目(40125001)；科技部重点国际合作项目(2002CB714004)；教育部博士点基金(20020730010)

作者简介：饶志国(1978—)，男，博士生，从事地球化学和古气候变化研究，E-mail：zgrao@gig.ac.cn

收稿日期：2005-09-14；**改回日期**：2005-11-23.　　文凤英编辑

1 剖面与分析方法

兰州处于陇西黄土高原西缘，为中国三大自然区划——东部季风区、西北干旱区以及青藏高寒区之间的过渡地带，同时也是"季风三角"顶点位置所在。它处于现代夏季风影响区域的前缘，是季风环境的敏感地带。由于距北部沙漠粉尘源区近，且南有秦岭、东有六盘山对冬季风的阻挡(图 1)，北支西风急流又在高原北侧绕流产生了常年存在的兰州小高压，因而该地区粉尘沉降速率快。陇西黄土高原黄土沉积厚度为世界之最，黄土-古土壤序列气候记录的分辨率高[38]。兰州现代年均温约为 9.9 ℃，年降水量约为 313 mm(据 20 世纪 90 年代资料平均)。

九州台黄土剖面(36.05°N、103.88°E)位于兰州市黄河北岸，处于黄河的第 6 级阶地上(图 1)。前人的大量工作[38]证实了九州台剖面是中国标准黄土剖面之一。S_1古土壤对应的剖面深度为顶部以下约 29～36 m，在野外可以明显地识别出 3 层次一级古土壤(S_1S_1、S_1S_2和 S_1S_3，分别对应于 MIS5a、MIS5c 和 MIS5e)夹两层黄土(S_1L_1和 S_1L_2，对应于 MIS5b 和 MIS5d)的复合结构(图 2)，其中以 S_1S_3古土壤发育程度最高，这一结构在陇西黄土高原具有普遍意义[33-34,38]。本文在参考前人地层和年代框架的基础上开展工作，为了方便对比并获得较高分辨率，对九州台剖面 S_1古土壤及其上下黄土(约 26～39 m)按 2 cm 间隔进行了采样，得到样品 650 个。

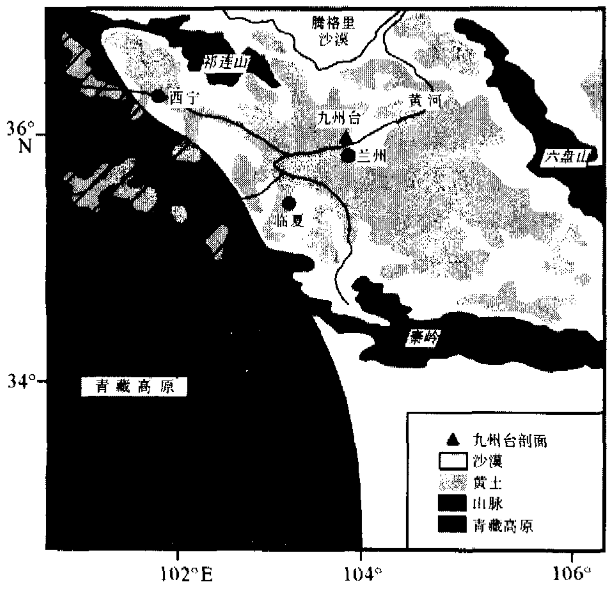

图 1 陇西黄土高原九州台剖面的位置

Fig. 1 The location of Jiuzhoutai(JZT) section in Longxi Loess Plateau

据初步估算，九州台 S_1 中每 2 cm 样品在古土壤中约相当于 120～150 a，在黄土中则为 80～100 a。九州台剖面地层结构以及频率磁化率指标和 SPECMAP 的对比见图 2。

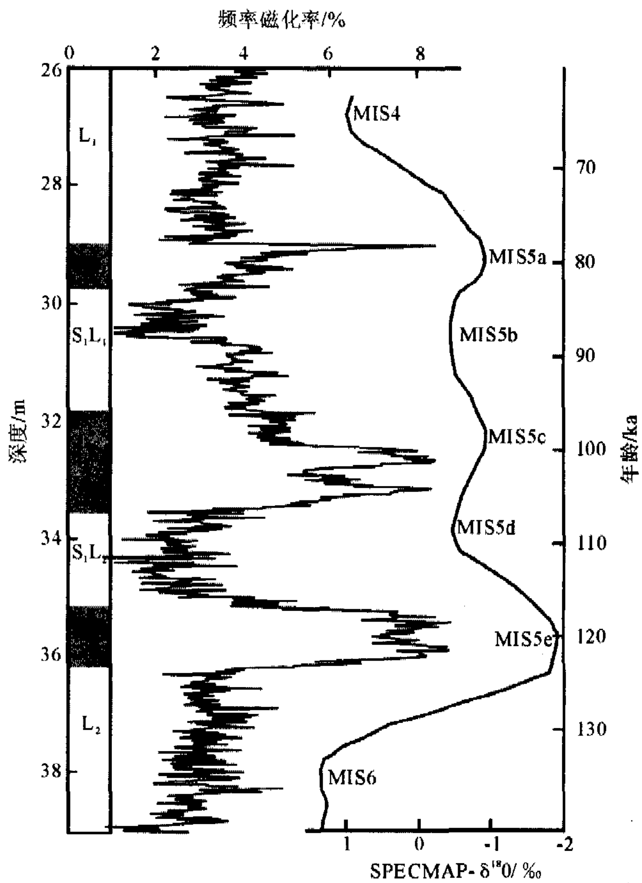

图 2 九州台剖面 S_1古土壤及其上下黄土频率磁化率指标、地层结构以及与 SPECMAP 曲线之间的对比

Fig. 2 Comparison of frequency-dependent susceptibility, stratigraphic structure and SPECMAP curve above and below palaeosol S_1

对整个 S_1古土壤及其上下黄土进行了磁化率测量，并测量了 S_1S_3及其上下黄土的碳酸钙含量和色度。磁化率测量在 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率仪上进行。采用国际规范的环境磁学参数测量方法[39]，每个样品都测量了高频和低频磁化率，各测量 3 次求其均值，利用 Walden 提出的公式[39]计算了频率磁化率。色度测量在日本 Minolta 公司生产的 SPAD-503 土色计上进行，样品先烘干，然后研磨至小于 45 μm，再进行测量，每一个样品重复测 3 次求其平均，以保证其数据的可靠性。碳酸钙含量的测量在江苏海安石油仪器厂生产的 GMY-Ⅲ型岩石碳酸盐含量测定仪上进行，所有样品的碳酸钙含量测量保证在大致相同的室温下进行。所有

实验均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

虽然磁化率在古土壤中增强的机制仍不是非常明确[40]，在解释方面存在通量模式[41]、源区模式[42]、成壤模式[43]，但是可以肯定暖湿气候是古土壤磁化率增加的共同原因[40]。一般认为，中国黄土-古土壤序列的磁化率信号的主要载体是在成壤过程中形成的极细的超顺磁矿物[43-45]，频率磁化率表明了超顺磁矿物对整个磁化率贡献的比率，因此频率磁化率更好地指示了成壤强度[46]，而中国黄土序列的成壤强度受控于夏季风强度，因此频率磁化率间接指示了夏季风强度。碳酸钙是一种相对较易溶解的成分，它的淋溶强度反映了降水的不同，先前的研究工作[47-50]表明黄土序列中碳酸钙含量的变化可以捕捉千年尺度的夏季风变化。颜色是土壤的重要属性，已被用于古气候变化研究中[51-52]。本文所提到的色度由 L^* a^* b^* 表色系(CIE，1976)表示，其中 L^* 表示明度，其值在 0(黑)和 100(白)之间变化。研究表明黄土序列中有机质含量与 L^* 值为负相关关系，有机质含量是导致土壤颜色变暗的一个主要因素[53-55]。黄土有机质主要来源于地表植被，而黄土高原植被发育又决定于夏季风带来的降水，因此 L^* 的变化也可以间接指示夏季风强度的变化。

2　结果与讨论

2.1　MIS5e 东亚夏季风记录与其他记录对比

图 3 表示的是九州台 S_1 记录的 MIS5e 夏季风变化和其他记录之间的对比，由于各个记录 MIS5e 开始和结束的时间不一致，Vostok 冰心氘同位素记录的全球相对温度异常稳定(图 3-F)[56-57]，持续的时间明显长于 GRIP 冰心氧同位素指示的 MIS5e (图 3-E)[5-6]，精确定年的 Dongge 石笋氧同位素记录的 MIS5e 时间则更短，约为(9.7±1.1)ka[15]。来自大西洋东北部相距 200 km 的海洋记录表明南方记录的 MIS5e 比北方早 2～3 ka[64]，MIS5e 在各地开始和结束时间的不一致可能是事实，因此本文仅探讨 MIS5e 气候变化的过程，而不涉及年代上的差异。九州台 S_1 的色度和碳酸盐含量表明在 MIS5e 开始前有一次夏季风衰退，表现为碳酸钙含量高，明度值高(图 3 中圆点)，但是在频率磁化率上表现不明显，这可能是由于频率磁化率并不是一个很敏感的代用指标，S_1L_1 和 S_1L_2 频率磁化率值甚至低于 L_1 和 L_2(图 2 和图 3)可能从一个侧面反映了这个问题。同样在 MIS5e 中期，明度的降低和碳酸钙含量的下降表明有一个夏季风较弱的阶段，而 MIS5e 早期夏季风的强度要高于晚期，频率磁化率表现为一系列幅度很小的波动，具有不太明显的 MIS5e 中期频率磁化率值较低的特点。3 个代用指标的变化表明九州台 S_1 的确记录了 MIS5e 中期有一个夏季风较弱的阶段，但是这种变化并没有表现出类似 GRIP 的短尺度、快速变化的特点，更不具有 GRIP 所具有的 5 个阶段性(图 3-E)，九州台记录的 MIS5e 东亚夏季风变化是相对稳定的。高分辨率的 Dongge 石笋(D3 和 D4，图 3-D)记录的 MIS5e 东亚季风变化同样是稳定的，但是没有表现出 MIS5e 中期的夏季风较弱阶段，这可能是由于处于夏季风前缘的九州台对夏季风变化更为敏感造成的。来自中国南海(图 3-J)[62-63]、苏禄海(图 3-H)[59]、赤道西太平洋(图 3-I 虚线)[60]、南半球中纬度西太平洋(图 3-G)[58]的记录，以及对全球海平面高度的估计(图 3-I 实线)[60-61]，表明 MIS5e 中期西太平洋存在一个海平面较低、洋面温度较低的时段。来自现代气候的研究表明，西太平洋暖异常时，中国大陆夏季风增强[65]，陆面和洋面的温差越大，季风会越强[66]。来自贝加尔湖的记录表明西南西伯利亚 MIS5e 从 127 ka 持续到 115 ka，在 120 ka 附近发生了一次气候振荡[67]。有理由推测，西太平洋以及北半球高纬的这种变化和东亚夏季风变化之间存在成因上的联系。

2.2　MIS5e 与全新世东亚夏季风记录对比

对关中盆地西部的扶风剖面[68-73]、岐山剖面[74-78]，东部的李湾剖面[79-80]以及其他剖面[81-82]的地层学、土壤学、微量元素以及其他众多气候代用指标的分析研究表明，约 8.5～3 ka 的全新世盛间冰期形成的埋藏古土壤 S_0，被一次黄土沉积阶段打断，从而分为两个主要的土壤发育时期，约为 8.5～7 和 5～3 ka[81]。这期间发生了一次由于夏季风衰退而导致的以 6～5 ka 为中心的干旱事件，而早期土壤发育阶段的气候条件明显好于晚期[69,77,79]。来自沙漠-黄土过渡带的孢粉记录表明 7.5～4.5 ka 之间，花粉浓度低，旱生-中旱生蒿属、藜科花粉占较明显优势，种类单调，几乎无木本植物出现，作者认为该时段虽然太阳辐射强，气候温暖，但夏季风降水的减少以及蒸发的加强导致了有效湿度较低，出现了不利于草原植被生长的暖干气候时期。随后的 4.5～3.5 ka 的夏季风增强，降水增加的时期比早全新世气候适宜期的夏季风强度要弱许多[83]。来自内蒙古阿拉善高原湖泊沉积地层以及孢粉浓度

(图 4-C、D)、多样性指数(图 4-E)[84],同样记录了由于夏季风衰退导致的中全新世干旱,早全新世夏季风似稍强于晚全新世(多样性指数)。从这些研究结果来看,全新世早期夏季风强于晚期,中期夏季风衰退,和九州台古土壤 S_1 记录的 MIS5e 夏季风演化具有一定的相似性(图 4)。

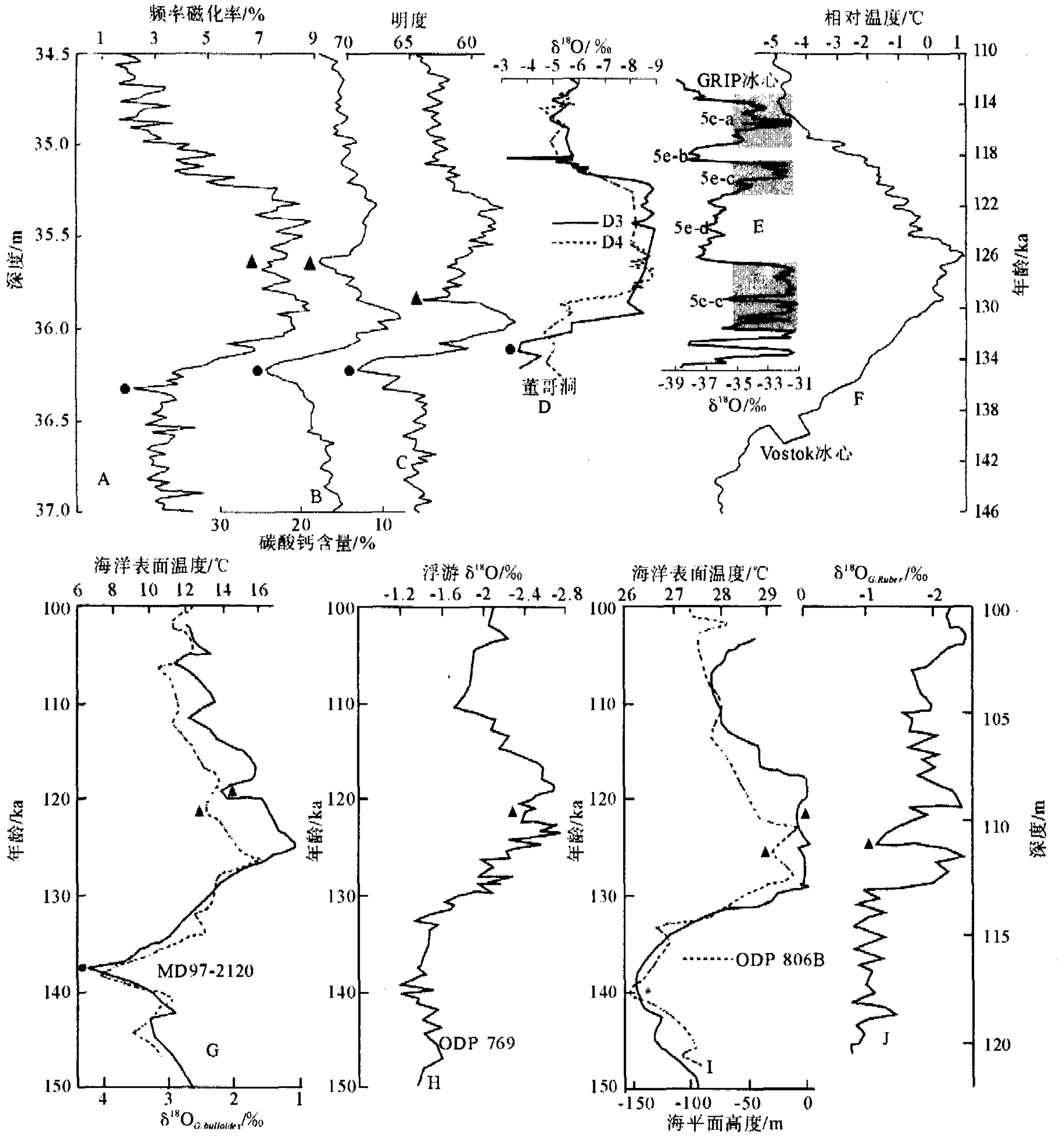

图 3 九州台 S_1 记录的 MIS5e 东亚夏季风变化与其他记录的对比

A. JZT 频率磁化率;B. JZT 碳酸钙含量;C. JZT 色度;D. Dongge 洞石笋 $\delta^{18}O$[15];E. GRIP $\delta^{18}O$[5-6];F. Vostok 氘同位素记录的相对温度(时间分辨率 126±100 a)[56-57];G. 西太平洋钻孔 MD97-2120(45°32.06′S、174°55.85′E)浮游有孔虫 $\delta^{18}O$(时间分辨率 192±83 a,实线)和 Mg/Ca 记录的洋面温度(SST,时间分辨率 931±405 a,虚线)[58];H. 苏禄海钻孔 ODP769 浮游有孔虫 $\delta^{18}O$(分辨率约为 400 a)[59];I. 西太平洋钻孔 ODP806B(0°19′N、159°22′E)Mg/Ca 记录的洋面温度(虚线)[60],估计的全球海平面变化(实线)[60-61];J. 南海钻孔 ODP1144(20°3.18′N、112°54′E)浮游有孔虫 $\delta^{18}O$[62-63]。

Fig. 3 Comparison between Asian summer monsoon change of MIS5e recorded by S_1 of JZT loess section and other records

A. Frequency-dependent susceptibility of JZT; B. Carbonate content of JZT; C. Chroma of JZT; D. $\delta^{18}O$ record of Dongge cave stalagmites[15]; E. $\delta^{18}O$ of GRIP[5-6]; Relative temperature recorded by deuterium isotope of Vostok (time step, 126±100 a)[56-57]; G. $\delta^{18}O_{plk}$ of MD97-2120(45°32.06′S, 174°55.85′E. time step, 192±83 a; solid line) and SST recorded by Mg/Ca (time step, 931±405 a, dashed line)[58]; H. $\delta^{18}O_{plk}$ of deep sea core ODP769, Sulu Sea (time step, ~400 a)[59]; I. SST recorded by Mg/Ca of deep sea core ODP806B, western equatorial Pacific (0°19′N, 159°22′E; dashed line)[60], estimate of global sea level (solid line)[60-61]; $\delta^{18}O_{plk}$ of ODP1144, South China Sea (20°3.18′N, 112°54′E)[62-63]

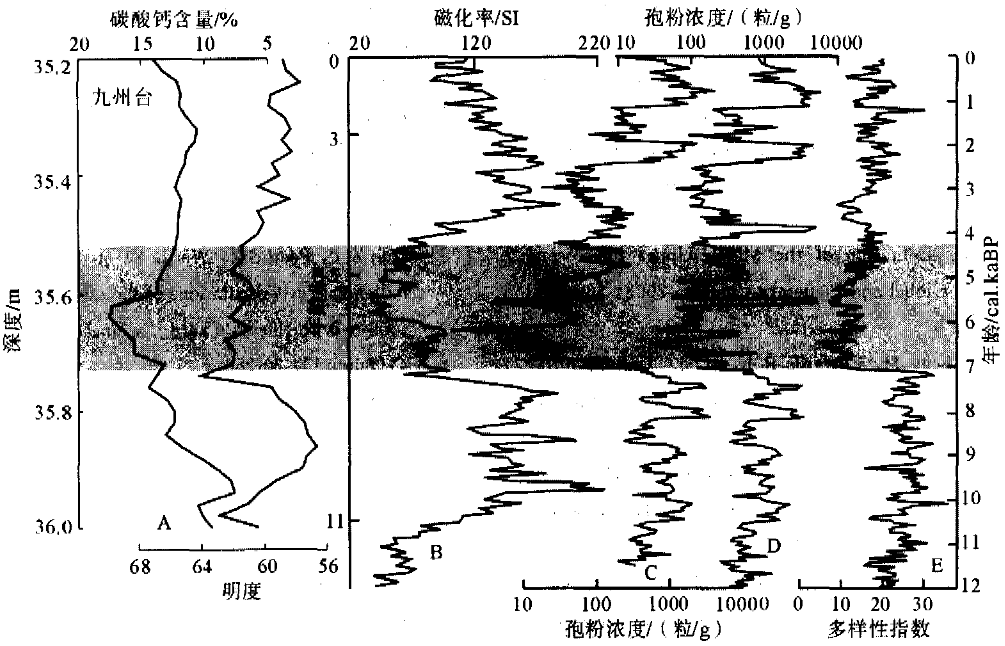

图 4　九州台古土壤 S_1 记录的 MIS5e 夏季风演化(A)和陕西岐山全新世磁化率记录的夏季风演化(B)[75]以及阿拉善高原全新世夏季风记录(C、D、E)[84]之间的对比

Fig. 4　The comparison between MIS5e Asian summer monsoon evolution recorded by palaeosol S_1 of JZT loess section(A), Holocene summer monsoon change recorded by susceptibility of Qishan loess section, Shaanxi(B)[75], and summer monsoon record that comes from Alashan Plateau, Inner Mongolia(C,D,E)[84]

3　结论

对九州台古土壤 S_1 磁化率、碳酸钙含量以及色度的分析表明 MIS5/6 转化过程中有一次夏季风衰退,MIS5e 早期强于晚期,中期存在一个夏季风强度较弱的阶段。MIS5e 东亚夏季风变化是比较和缓的,没有表现出大幅度、快速变化,也不具备 GRIP 冰心所表现的 5 个亚阶段性,MIS5e 东亚夏季风相对稳定。它的这种演化可能与西太平洋在 MIS5e 期间的变化存在成因上的联系。MIS5e 东亚夏季风演化和最近研究得到的全新世夏季风演化具有一定的相似性,可能反映了高低纬之间水汽和能量交换对太阳辐射响应的某种内在机制。

致谢:杨美临、陈建徽、曹洁帮助进行了色度测量,特此致谢。

参考文献(References)

[1] Lockwood J G. Abrupt and sudden climatic transitions and fluctuations: a review[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21:1 153-1 179.

[2] Shackleton N J, Maria Fernanda Sánchez-Goñi, Delphine Pailler, et al. Marine isotope substage 5e and the Eemian interglacial[J]. Global and Planetary Change, 2003, 36: 151-155.

[3] Kolfschoten T V, Gibbard P L, Knudsen K L. The Eemian Interglacial: a Global Perspective, Introduction[J]. Global and Planetary Change, 2003, 36:147-149.

[4] Broecker W S. The end of the present interglacial: How and When? [J]. Quaternary Science Reviews, 1998, 17:689-694.

[5] Dansgaard W, Johnson S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250 ka ice-core record [J]. Nature, 1993, 364:218-220.

[6] Greenland Ice-cord Project(GRIP) Members. Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core[J]. Nature, 1993, 364: 203-207.

[7] Johnsen S J, Clausen H B, Dansgaard W, et al. The Eem stable isotope record along the GRIP ice core and its interpretation[J]. Quaternary Research, 1995, 43: 117-124.

[8] Thorsteinn Thorsteinsson, Josef Kipfsuhl, Hajo Eicken, et al. Crystal size variations in Eemian-age ice from the GRIP ice core, Central Greenland[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 131: 381-394.

[9] Taylor K C, Hammer C U, Alley R B, et al. Electrical conductivity measurements from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. Nature, 1993,366:549-552.

[10] Grootes P M, Stuiver M, White J W C, et al. Comparison of oxygen records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores [J]. Nature, 1993, 366:552-554.

[11] Kukla G J, Thouveny N, Stockhauen H. Tentative correlation of pollen records of the last interglacial at Grande Pile

and Ribains with marine isotope stages[J]. Quaternary Research, 2002, 58: 32-35.

[12] Kukla G J, Bender M L, Bond G, et al. Last interglacial climates[J]. Quaternary Research, 2002, 58: 2-13.

[13] Turner C. Problems of the duration of the Eemian interglacial in Europe North of the Alps[J]. Quaternary Research, 2002, 58: 45-48.

[14] Gibbard P L. Definition of the Middle-Upper Pleistocene boundary[J]. Global and Planetary Change, 2003, 36: 201-208.

[15] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian Monsoon [J]. Science, 2004, 304: 575-578.

[16] Solveig M S, Knudsen K L. Eemian climatic and Hydrographical instability on a marine shelf in Northern Denmark[J]. Quaternary Research, 1997, 47: 218-234.

[17] Heusser L, Oppo D. Millennial-and orbital-scale climate variability in Southeastern United States and in the subtropical Atlantic during Marine Isotope Stage 5: evidence from pollen and isotope from ODP site 1059[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 214: 483-490.

[18] Rousseau D D, Puisségur J J. Climatic interpretation of terrestrial malacofaunas of the last interglacial in southeastern France[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1999, 151: 321-336.

[19] Capers G, Merkt J, Müller H. The Eemian interglaciation in Northwestern Germany[J]. Quaternary Research, 2002, 58: 49-52.

[20] Cheddadi R, Mamakowa K, Guiot J, et al. Was the climate of Eemian stable? A quantitative climate reconstruction from seven European pollen records[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1998, 143: 73-85.

[21] Tzedakis P C, Frogley M R, Heaton T H E. Last interglacial conditions in southern Europe: evidence from Ioannina, northwest Greece[J]. Global and Planetary Change, 2003, 36: 157-170.

[22] Klotz S, Guiot J, Mosbrugger V. Continental European Eemian and early Würmian climate evolution: comparing signals using different quantitative reconstruction approaches based on pollen[J]. Global and Planetary Change, 2003, 36: 277-294.

[23] McManus J F, Bond G C, Broecker W S, et al. High-resolution climate records from the North Atlantic during the last interglacial[J]. Nature, 1994, 371: 326-329.

[24] Kergwin L D, Curry W B, Lehman S J, et al. The role of the deep ocean in North Atlantic climate change between 70 and 130 ka ago[J]. Nature, 1994, 371: 323-325.

[25] An Z S, Porter S C. Millennial-scale climatic oscillations during the last interglaciation in central China[J]. Geology, 1997, 25(7): 603-606.

[26] 李力，孙有斌，鹿化煜，等. 末次间冰期黄土高原粉尘事件及其与北大西洋寒冷事件的对比[J]. 科学通报，1998, 43(1):90-93. [LI Li, SUN You-bin, LU Hua-yu, et al. Dust events of Chinese Loess Plateau during last interglacial and its comparison with the cold events of North Atlantic[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(1): 90-93.]

[27] Liu X M, Hesse P, Liu T S, et al. High resolution climate record from the Beijing area during the last glacial-interglacial cycle[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(3): 349-352.

[28] Guo Z T, Peng S Z, Wei L Y, et al. Weathering signals of millennial-scale oscillations of the eastern Asian summer monsoon over the last 220 ka[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(Supp. 1): 20-25.

[29] Lu H Y, Huissteden K V, An Z S, et al. East Asia winter monsoon variations on a millennial time-scale before the last glacial-interglacial cycle[J]. Journal of Quaternary Science, 1999, 14(2): 101-110.

[30] 任剑璋，丁仲礼，刘东生，等. 从会宁末次间冰期土壤看北大西洋气候不稳定性[J]. 地球物理学报，1998, 41(2):162-167. [REN Jian-zhang, DING Zhong-li, LIU Tung-sheng, et al. A window to view climatic instability occurring at North Atlantic Ocean from the last interglacial palaeosol in Huining during MIS 5e[J]. Acta Geophysica Sinica, 1998, 41(2): 162-167.]

[31] Ding Z L, Ren J Z, Yang S L, et al. Climate instability during the penultimate glaciation: evidence from two high-resolution loess records, China[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B9): 20 123-20 132.

[32] Chen F H, Bloemendal J, Feng Z D, et al. East Asian monsoon variations during the last interglacial: evidence from the northwestern margin of the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Review, 1999, 18(8-9): 1 127-1 135.

[33] Chen F H, Feng Z D, Zhang J W. Loess particle size data indicative of stable winter monsoons during the last interglacial in the western part of the Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2000, 39: 233-244.

[34] Chen F H, Qiang M R, Feng Z D, et al. Stable East Asian monsoon climate during the Last Interglacial (Eemian) indicated by paleosol S1 in the western part of the Chinese Loess Plateau[J]. Global and Planetary Changes, 2003, 36: 171-179.

[35] Bauch H A, Erlenkeuser H, Fahl K, et al. Evidence for a steeper Eemian than Holocene sea surface temperature gradient between Arctic and sub-Arctic regions[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1999, 145: 95-117.

[36] Eynaud F, Turon J L, Duprat J. Comparison of the Holocene and Eemian palaeoenvironments in the South Icelandic Basin: dinoflagellate cysts as proxies for the North Atlantic surface circulation[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2004, 128: 55-79.

[37] Rohling E J, Cane T R, Cooke S, et al. African monsoon variability during the previous interglacial maximum[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 202: 61-75.

[38] 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: 11-12. [CHEN Fa-hu,

ZHANG Wei-xin. Loess stratigraphy and Quaternary glaciation research in Gansu and Qinghai region[M]. Beijing: Science Press, 1993:11-12.]

[39] Walden F, Oldfield F, Smith J. Environmental magnetism: a practical guide[C]//Walden J, Oldfield F, Smith J P, eds. Technical Guide series, No. 6. London: Quaternary Research Association, 1999: 35-62.

[40] 鸟居雅之，福间浩司，苏 黎，等. 黄土-古土壤磁化率述评[J]. 海洋地质与第四纪地质,1999,19(3): 83-96. [Torii M, Fukuma K, SU Li, et al. Initial magnetic susceptibility of the Chinese loess-paleosols: A review[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(3): 83-96.]

[41] Kukla G L, An Z S. Loess stratigraphy in Central China[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1989, 72: 203-225.

[42] Derbyshire E, Meng X M, Kemp R A. Provenance, transport and characteristics of modern aeolian dust in western Gansu Province, China, and interpretation of the Quaternary loess record[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39: 497-516.

[43] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese Loess[J]. Nature, 1990, 346: 737-739.

[44] 刘秀铭，刘东生，Heller F，等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换[J]. 第四纪研究,1990,10(1):42-50. [LIU Xiu-ming, LIU Tung-sheng, Heller F, et al. Magnetic susceptibility depend on frequency of Chinese loess and paleoclimatic changes [J]. Quaternary Sciences, 19990, 10(1): 42-50.]

[45] 刘秀铭，刘东生，Heller F，等. 中国黄土磁颗粒分析及其古气候意义[J]. 中国科学 B 辑,1991,6: 639-644. [LIU Xiu-ming, LIU Tung-sheng, Heller F, et al. Magnetic grain analysis of Chinese loess and its implication for paleoclimatic research[J]. Science in China (Series B), 1991, 6: 639-644.]

[46] 刘秀铭，刘东生，Heller F,等. 中国黄土磁化率与第四纪古气候研究[J]. 地质科学,1992(增刊):279-284. [LIU Xiu-ming, LIU Tung-sheng, Heller F, et al. Magnetic susceptibility of Chinese loess and Quaternary paleoclimatic research [J]. Chinese Journal of Geology, 1992(Supplement): 279-284.]

[47] Fang X M, Fukusawa, Pan B T, et al. Asian summer monsoon instability during the last 60 000 a: magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the western Chinese Loess Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 168: 219-232.

[48] 邬光剑，潘保田，管清玉，等. 祁连山东段北麓近 10 ka 来的气候变化的初步研究[J]. 中国沙漠,1998,18(3):193-200. [WU Guang-jian, PAN Bao-tian, GUAN Qing-yu, et al. Climatic changes in the north piedmont of eastern Qilian mountains since 10 kaBP[J]. Journal of Desert Research, 1998, 18(3): 193-200.]

[49] 邬光剑，潘保田，管清玉，等. 祁连山东段全新世与现代水热组合特征研究[J]. 地理科学,2000,20(2):160-165. [WU Guang-jian, PAN Bao-tian, GUAN Qing-yu, et al. Study on hydrothermal characteristic of eastern Qilian mountains in Holocene and present[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(2): 160-165.]

[50] 刘志刚，潘保田，邬光剑，等. 末次间冰期以来中国西北部沙漠边缘区夏季风变化初步研究[J]. 中国沙漠,2000,20(4): 375-377. [LIU Zhi-gang, PAN Bao-tian, WU Guang-jian, et al. Initial research of summer monsoon change at desert marginal zone in the Northwest of China since the last interglacial[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 375-377.]

[51] 夏应菲，汪永进，陈 峻. 李家岗下蜀黄土剖面的反射光谱研究[J]. 土壤学报,2000,37(4):443-448. [XIA Ying-fei, WANG Yong-jin, CHEN Jun. Systematic study on reflectance spectrum of Xiashu loess in Lijiagang, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 443-448.]

[52] 杨石岭，丁仲礼，秦小光，等. 黄土沉积中红光/反射光亮度值变化及古气候意义[J]. 第四纪研究,1999,19(4):125. [YANG Shi-ling, DING Zhong-li, QIN Xiao-guang, et al. Luminosity ratio of red light to reflected light of loess deposit and its implication of paleoclimatic research[J]. Quaternary Sciences, 1999, 4: 125.]

[53] Fang X M, Li J J. Millennial-scale mosoonal climatic change from poleosol sequences on the Chinese Western Loess Plateau and Tibetan Plateau: a brief summary and review[J]. Chinese Science Bulletin,1999,44(supplement):38-52.

[54] 杨胜利，方小敏，李吉均，等. 表土颜色和气候定性至半定性关系研究[J]. 中国科学 D 辑,2001,31:175-181. [YANG Sheng-li, FANG Xiao-min, LI Ji-jun, et al. Transformation functions of soil color and climate[J]. Science in China(Series D), 2001, 31: 175-181.]

[55] Yang S L, Chen S Y, Yan M D, et al. Soil color: a new sensitive indicator from climate change[J]. Chinese Science Bulletin,1999,44(supplement):282-285.

[56] Jouzel J, Lorius C, Petit J R, et al. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160 000 years)[J]. Nature, 1987, 329: 402-408.

[57] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctic[J]. Nature, 1999, 399: 429-436.

[58] Katharina Pahnke, Rainer Zahn, Elderfield Henry, et al. 340 000-year Centennial-scale marine record of southern hemisphere climatic oscillation[J]. Science, 2003, 301: 948-952.

[59] Linsley B K. Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150 000 years[J]. Nature, 1996, 380: 234-267.

[60] Tudhope A W, Chilcott C P, McCulloch M T, et al. Variability in the El Niño-Southern Oscillation Through a Glacial-Interglacial Cycle[J]. Science, 2001, 291: 1 511-1 517.

[61] Shankleton N J. The 100 000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity[J]. Science, 2000, 289: 1 897-1 902.

[62] 涂 霞，郑 范，王吉良，等. 南海北部末次间冰期早期的突然

降温事件[J]. 中国科学D辑，2001，31(10)：823-827. [TU Xia, ZHENG Fan, WANG Ji-liang, et al. An abrupt cooling event early in the last glacial in the northern South China Sea [J]. Science in China(Series D), 2001, 44(10): 865-870.]

[63] Tamburini F, Adatte T, Bernasconi S M, et al. Investigating the history of East Asian monsoon and climate during the last glacial-interglacial period (0～140 000 years): mineralogy and geochemistry of ODP Sites 1143 and 1144, South China Sea[J]. Marine Geology, 2003, 20: 147-168.

[64] Rasmussen T L, Thomsen E, Kuijpers Antoon, et al. Late warming and early cooling of the sea surface in the Nordic seas during MIS 5e (Eemian Interglacial)[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22: 809-821.

[65] 金祖辉，陈隽. 西太平洋暖池区海表水温暖异常对东亚夏季风影响的研究[J]. 大气科学，2002，26(1)：57-68. [JIN Zu-hui, CHEN Jun. A composite study of the influence of SST warm anomalies over the Western Pacific Warm Pool on Asian Summer Monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(1): 57-68.]

[66] 张存杰，谢金南，李栋梁，等. 东亚季风对西北地区干旱气候的影响[J]. 高原气象，2002，21(2)：193-198. [ZHANG Cun-jie, XIE Jin-nan, LI Dong-liang, et al. Effect of East-Asian monsoon on drought climate of Northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(2): 193-198.]

[67] Prokopenko A A, Karabanov E B, Williams D F, et al. The stability and abrupt ending of the Last Interglaciation in Southeastern Siberia[J]. Quaternary Research, 2002, 58: 56-59.

[68] Huang C C, Zhou J, Pang J L. A regional aridity phase and its possible cultural impact during the Holocene Megathermal in the Guanzhong Basin, China[J]. Holocence, 2000, 10 (1): 135-143.

[69] 陈宝群，黄春长，李平华. 陕西扶风黄土台塬全新世成壤环境变化研究[J]. 中国沙漠，2004，24(2)：149-152. [CHEN Bao-qun, HUANG Chun-chang, LI Ping-hua. Holocene pedogenesis and environmental change on the loess tableland in Fufeng country, Shaanxi Province[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(2): 149-152.]

[70] 黄萍，庞奖励，黄春长. 渭北黄土台塬全新世地层高分辨率研究[J]. 地层学杂志，2001，25(2)：107-110. [HUANG Ping, PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang. High resolution studies of the Holocene loess strata of the loess tableland in the Weihe river basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2001, 25 (2): 107-110.]

[71] 黄春长，庞奖励，陈宝群，等. 扶风黄土台塬全新世多周期土壤研究[J]. 西北大学学报自然科学版，2001，31(6)：509-513. [HUANG Chun-chang, PANG Jiang-li, CHEN Bao-qun, et al. Polycyclic soil on the Zhouyuan loess tableland in Fufeng country in Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2001, 31(6): 509-513.]

[72] Huang C C, Pang J L, Huang P. An early Holocene erosion phase on the loess tablelands in the southern Loess Plateau of China[J]. Geomorphology, 2002, 43: 209-218.

[73] Huang C C, Pang J L, Huang P, et al. High-resolution studies of the oldest cultivated soils in the southern Loess Plateau of China[J]. Catena, 2002, 47: 29-42.

[74] 庞奖励，黄春长. 陕西五里铺黄土剖面中微量元素地球化学特征[J]. 长春科技大学学报，2001，31(2)：180-184. [PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang. Geochemical characters of trace elements in the Wulipu loess-paleosol section, Shaanxi Province[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001, 31(2): 180-184.]

[75] 张战平，庞奖励，黄春长，等. 陕西岐山全新世黄土高分辨率气候记录[J]. 中国沙漠，2000，20(4)：415-417. [ZHANG Zhan-ping, PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang, et al. Climatic record with high resolution in the Holocene loess in Qishan, Shaanxi[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20 (4): 415-417.]

[76] 庞奖励，黄春长，张战平. 陕西岐山黄土剖面Rb、Sr组成与高分辨率气候变化[J]. 沉积学报，2001，19(4)：637-641. [PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang, ZHANG Zhan-ping. Rb, Si elements and high resolution climatic records in the loess-paleosol profile at Qishan, Shaanxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 637-641.]

[77] 黄春长，庞奖励，黄萍，等. 关中盆地西部黄土台塬全新世气候事件研究[J]. 干旱区地理，2002，25(1)：10-15. [HUANG Chun-chang, PANG Jiang-li, HUANG Ping, et al. Holocene climatic events on the loess tableland in the western Guanzhong basin, China[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(1): 10-15.]

[78] 庞奖励，黄春长，张战平. 陕西五里铺黄土微量元素组成与全新世气候不稳定性研究[J]. 中国沙漠，2001，21(2)：151-156. [PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang, ZHANG Zhan-ping. Pb, Cu, Zn, Cd, Mn elements and climatic change in the loess-paleosol profile at Qishan, Shaanxi Province[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(2): 151-156.]

[79] 庞奖励，黄春长. 一万年以来西安地区古土壤特征与气候波动变化研究[J]. 高原气象，2003，22(1)：79-83. [PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang. Study on paleosol features in Xi'an area and climatic change during the last 10 000 years [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(1): 79-83.]

[80] 贾耀锋，庞奖励. 关中盆地东部全新世剖面粒度组成与气候变化研究[J]. 中国沙漠，2004，24(2)：153-155. [JIA Yao-feng, PANG Jiang-li. Composition characteristics of grain size and suggesting paleoclimate at Liwan section in eastern Guanzhong basin[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24 (2): 153-155.]

[81] 黄春长，延军平，马进福，等. 渭河阶地全新世成壤过程及人类因素研究[J]. 陕西师范大学学报自然科学版，1997，25(2)：72-76. [HUANG Chun-chang, YAN Jun-ping, MA Jin-fu, et al. Pedological processes and human dimensions on Weihe river plain in Holocene[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 1997, 25(2): 72-76.]

[82] 庞奖励，黄春长. 黄土-古土壤序列的典型微结构与1万年来的环境演化——以关中地区的全新世黄土剖面为例[J]. 吉

林大学学报地球科学版,2002,32(3):268-272.[PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang. Typical micromorphological features of the loess-palaeosol sequence and environmental change during last 10 000 years[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2002, 32(3): 268-272.]

[83] 李小强, 周卫建, 安芷生, 等. 沙漠-黄土过渡带 13 kaBP 以来季风演化的古植被记录[J]. 植物学报,2000,42(8):868-872.[LI Xiao-qiang, ZHOU Wei-jian, AN Zhi-sheng, et al. The palaeovegetation record of monsoon evolution in the desert-loess transition zone for the last 13 kaBP[J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(8): 868-872.]

[84] Chen F H, Wu W, Holmes J A, et al. A mid-Holocene drought interval as evidenced by lake desiccation in the Alashan Plateau, Inner Mongolia, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1 401-1 410.

EASTERN ASIAN SUMMER MONSOON VARIATION DURING MIS5e AS RECORDED BY PALEOSOL S_1 AT JIUZHOUTAI LOESS SECTION

RAO Zhi-guo[1,2,4], CHEN Fa-hu[1], WANG Hai-bin[3], ZHANG Jia-wu[1], ZHU Zhao-yu[2]

(1 Sino-German Center for Arid Environment and Paleoclimate Research, Key-Laboratory of Western China's Environment Systems, Ministry of Education, College of Environment and Resource, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2 Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry & South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
4 College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;)

Abstract: Proxies of the Eastern Asian Summer Monsoon (EASM)-magnetic susceptibility depending on frequency, carbonate content and soil color of paleosol S_1 of Jiuzhoutai loess-paleosol profile whose accumulative rate is high and which is located in western Chinese Loess Plateau have been measured. Synthesis analysis of the obtained data deduced a decline event of EASM at the beginning of MIS5e, and then the intensity of EASM increased quickly until the last interglacial. Early MIS5e EASM is stronger than the late MIS5e one, and the middle MIS5e is the weakest. The gentle change of MIS5e EASM has no characters of the abrupt change of GRIP oxygen isotope, suggesting the EASM is relative stable during MIS5e. The surface sea temperature and sea level in the west part of the Pacific is relatively high during early and late MIS5e and relatively low during middle MIS5e, consistent with the change of EASM, meaning that environmental change of the west part of the Pacific partly controlled the change of the EASM. Previous studies on Holocene EASM suggested that early Holocene EASM is stronger than late Holocene one, and middle Holocene is relatively dry. The same character of EASM change of MIS5e and Holocene may reveal the inherence mechanism of EASM change.

Key words: Eastern Asian Summer Monsoon; Holocene; MIS5e; Jiuzhoutai Paleosol S_1