

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018091901

铜川地区早中全新世黄土沉积特征及其古气候意义

周家兴^{1,2}, 于娟^{2,3}, 杨丽君¹, 吴利杰^{1,2}

1. 西北大学地质学系 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069
2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061
3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

摘要:通过对铜川剖面黄土-古土壤沉积粒度的组成和变化特征及磁化率值进行分析,探讨了该地区 11.4~1.5 kaBP 期间的古气候变化特征。结果表明:(1)铜川剖面黄土-古土壤沉积以粉砂粒(4~63 μm)为主,黏粒(<4 μm)次之,砂粒(>63 μm)含量最低。(2)粒度和磁化率值在不同地层单元呈规律性变化:粉砂粒和砂粒在黄土层中较高,古土壤层中较低;黏粒和磁化率值在黄土层中较低,古土壤层中较高。(3)粉砂粒、黏粒和磁化率值的变化情况较好地记录了铜川地区 11.4~1.5 kaBP 期间的气候变化特征,可以将该地区的气候变化划分为4个阶段:11.4~10.2 kaBP 寒冷干燥期,10.2~9.1 kaBP 略温偏干期,9.1~4.4 kaBP 温暖湿润期,4.4~1.5 kaBP 较冷干期。

关键词:粒度;磁化率;古气候;早中全新世;铜川剖面

中图分类号:P595; P532 **文献标识码:**A

Sedimentary characteristics of the Early and Middle Holocene loess in Tongchuan area and their implications for paleoclimate

ZHOU Jiaying^{1,2}, YU Juan^{2,3}, YANG Lijun¹, WU Lijie^{1,2}

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China
2. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China
3. School of Environment Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The grain size of the loess and palaeosol in the Tongchuan section was studied as the main subject of this paper. Combining the magnetic susceptibility data, we analyzed the paleoclimate changes during the period from 11.4 to 1.5 kaBP. It is revealed that: (1) The loess-palaeosol deposits in the profile of Tongchuan are silt dominated (69.78%) over clay (28.35%) and sand (1.87%). (2) Silt and sand are higher in loess but lower in paleosol, while the values of clay particles and magnetization were lower in loess but higher in paleosol layers. (3) The variation trend of the clay (<4 μm), silt (4~63 μm) and magnetic susceptibility index have good correspondence to the loess-palaeosol alternation and the cold and dry climatic events between 11.4~1.5 kaBP. Based upon it the climate change in this area can be divided into four stages. In the period of 11.4~10.2 kaBP, the climate was very dry and cold; in the period of 10.2~9.1 kaBP, temperature gradually increased, and the climate was slightly warm and dry; during the period of 9.1~4.4 kaBP, the climate was warm and humid; while in the period of 4.4~1.5 kaBP, climate gradually turned to cold and dry.

Key words: grain size; magnetic susceptibility; climate change; Early-Middle Holocene; Tongchuan

沉积物的粒度特征主要受沉积环境、搬运动力以及搬运机制等因素的影响,可以通过沉积物不同粒径组分的变化,来恢复古气候和古环境演变。近年来,已经广泛应用于黄土^[1]和湖泊沉积^[2]等各类地质载体中,尤其在黄土-古土壤中的应用较早,也较为成熟^[3-4]。在黄土研究中,粒度和磁化率值作为经典的东亚季风替代性指标已得到了广泛应用^[5-6]。

黄土高原及其南部的关中盆地是我国重要的黄土-古土壤堆积区,为全球气候变化研究提供了不可替代的重要载体。截止目前,已经开展了大量关于古气候、古环境等方面的研究^[7-8]。黄春长^[9]、庞奖励^[10]和贾耀锋^[11]等的研究认为 6.0~5.0 kaBP 气候恶化事件在关中盆地是普遍存在的。刘安娜等^[12]在甘肃庄浪剖面的研究中指出这一气候恶化事件发生

资助项目:中国地质调查局地质科技调查项目“西北黄土堆积与中国古气候变化”(1212010911048)

作者简介:周家兴(1992—),男,硕士研究生,研究方向为第四纪气候与环境, E-mail: 970896733@qq.com

通讯作者:于娟(1982—),女,工程师,研究方向为环境地质, E-mail: 48833488@qq.com

收稿日期:2018-09-19; 改回日期:2018-12-19. 文凤英编辑

时间要早于关中盆地,大约发生在8.0~6.5 kaBP。王琳栋等^[13]的研究也进一步指出中全新世气候恶化事件自西向东发生的时间是顺次延后的。铜川地区,贾佳^[14]和Xia等^[15]在耀县剖面开展了关于东亚夏季风和冬季风非同步演化方面的研究,但是其并没有对这一气候恶化事件进行探讨。此外,上述研究均没有开展相关的测年工作。因此,本文选择铜川剖面黄土-古土壤沉积(400~50 cm)为研究载体,在可靠的AMS-¹⁴C测年数据基础上,将粒度和磁化率指标相结合,探讨铜川地区11.4~1.5 kaBP期间的气候变化特征,为进一步研究黄土高原和关中盆地的气候变化异同提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

铜川地区位于陕北黄土高原南缘,河谷阶地广泛发育。地势北高南低,自北向南依次为中低山区—黄土丘陵沟壑区—台塬区。本文选取的研究剖面位于其南部台塬区,属于关中盆地向黄土高原的过渡带。气候四季分明,年平均降水量554 mm,年平均气温13℃,为典型的暖温带大陆性半湿润、半干旱气候^[14]。该区属于东亚夏季风和冬季风交错影响地带,对气候变化响应敏感。并且该区堆积的黄土厚度大,沉积连续,时间分辨率高,为其记录的古气候研究提供了得天独厚的优势。

1.2 研究材料

研究剖面位于陕西省铜川市耀州区董家河镇(34°57'N、109°00'E,图1)。该剖面选自一个天然的露头处,为提高结果的可靠性,采样前用小铲将表层风化层清除,然后距剖面顶部50 cm处自上而下按照2 cm间隔,连续采样至400 cm深度处。该剖面共获得175组粒度和磁化率测试样品,5个AMS-¹⁴C测年样品(52、96、150、250和330 cm)。从顶部到底部岩性变化依次为:表土耕作层(0~50 cm)、全新世黄土层(51~155 cm)、全新世古土壤层(156~320 cm)、全新世过渡性黄土层(321~362 cm)和马兰黄土层(363~400 cm),剖面描述见周家兴等^[16]。

1.3 实验方法

粒度利用英国Malvern公司生产的Mastersizer 2000型激光粒度仪进行测量。测试之前需要对样

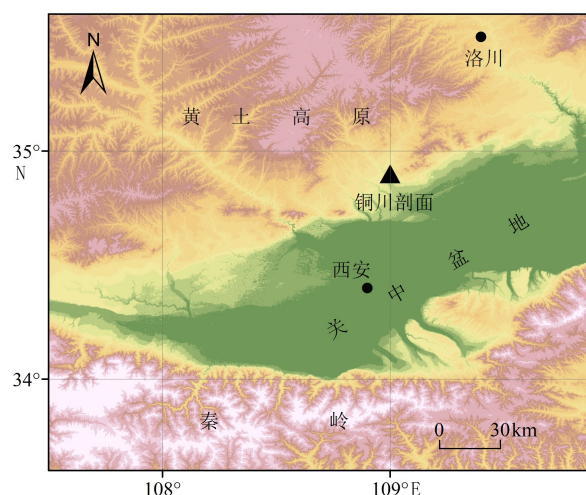


图1 铜川剖面地理位置

Fig.1 Location of the Tongchuan loess section, Shaanxi Province

品进行预处理,首先将样品烘干后,利用10%的H₂O₂和10%的HCl去掉有机质和碳酸盐。待其静置分层后,小心倒掉上清液,然后加入30%的(NaPO₃)₆溶液,再上机测试。该仪器测试范围为0.02~2000 μm,测试误差小于1%。磁化率利用英国Bartington公司生产的MS2型磁化率仪进行测试。磁化率测试前,利用烘箱将样品烘干(40℃),然后称取约10 g样品装入磁化率专用测试盒并将其压实。待仪器稳定后,测量低频(0.47 kHz)和低频(4.7 kHz)磁化率值(χ_{lf}, χ_{hf})。以上实验均在中国地质科学院水文学地质环境地质研究所实验室完成。

1.4 年代标尺

铜川剖面选取的5组¹⁴C测年样品在北京大学考古文博学院科技考古与文物保护实验室进行前处理和加速器测试,AMS-¹⁴C的测年结果利用Calib7.1在线程序(<http://calib.org/calib/calib.html>, intcal13)进行日历年代校正。根据该剖面黄土沉积特征以及¹⁴C测年校正结果,通过线性插值(线性方程: $y=28.39x+18.35$),最终确定铜川剖面(400~50 cm)的年代界线为11.4~1.5 kaBP。AMS-¹⁴C测试方法及测年结果详见周家兴等^[16]。

2 结果

2.1 粒度组成特征

目前,关于沉积物粒径的划分界线因研究对象不同而存在多个不同的划分标准。本文依据Udden-Wentworth标准^[17],以4和63 μm为界线,将铜川剖面粒径值划分为黏粒(<4 μm)、粉砂粒

(4~63 μm)和砂粒(>63 μm)。铜川黄土-古土壤剖面粒度组成以粉砂粒(4~63 μm)含量最高,含量变化范围为61.20%~79.10%,平均含量为69.78%;其次是黏粒,含量变化范围为17.72%~37.90%,平均含量为28.35%;砂粒含量最低,含量变化范围为0.01%~6.89%,平均含量为1.87%(图2、表1)。

在整个剖面不同地层单元中,平均粒径、黏粒、粉砂粒和砂粒呈规律性变化(表1)。平均粒径在全新世古土壤层(S_0)中最细(14.08 μm),过渡性黄土层(L_t)次之(16.78 μm),在全新世黄土(L_0)和马兰黄土(L_1)中最粗,分别为19.35和20.33 μm 。粉砂粒和砂粒在整个剖面的变化规律基本一致:马兰黄土层中含量最高,分别为75.15%和2.88%;全新世黄土层中含量次之,分别为71.45%和2.75%;全新世古土壤层最低,分别为67.25%和1.07%。黏粒与平均粒径、粉砂粒和砂粒呈相反的变化规律:全新世古土壤层(31.68%)>过渡性黄土层(27.24%)>全新世黄土层(25.80%)>马兰黄土层(21.98%)。

2.2 磁化率变化特征

磁化率是土壤物质在磁场中被磁化程度的重要衡量指标^[18]。在黄土高原黄土古气候研究中通常被用作评估夏季风强度的可靠替代性指标^[5,19]。通过低频(χ_{lf})和低频磁化率值(χ_{hf}),计算得到频率磁化率值($\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$)。由于高频和低频磁化率值具有很好的一致性,本研究只选取低频和频率磁化率进行对比分析(表1、图3)。铜川剖面低频磁化率值变化范围为 $86.90 \times 10^{-8} \sim 357.45 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $188.41 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。低频磁化率值在不同地

层单元呈规律性变化,由高到低依次为:全新世古土壤层 $S_0(268.26 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}) >$ 全新世黄土层 $L_0(125.41 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}) >$ 过渡性黄土层 $L_t(114.02 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}) >$ 马兰黄土层 $L_1(94.22 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$ 。频率磁化率变化范围为7.19%~11.36%,平均值为10.16%。其变化规律与低频磁化率值一致,在古土壤层中较高,在黄土层中较低。

3 分析与讨论

3.1 古气候指标

在黄土高原第四纪黄土古气候研究中,不同粒

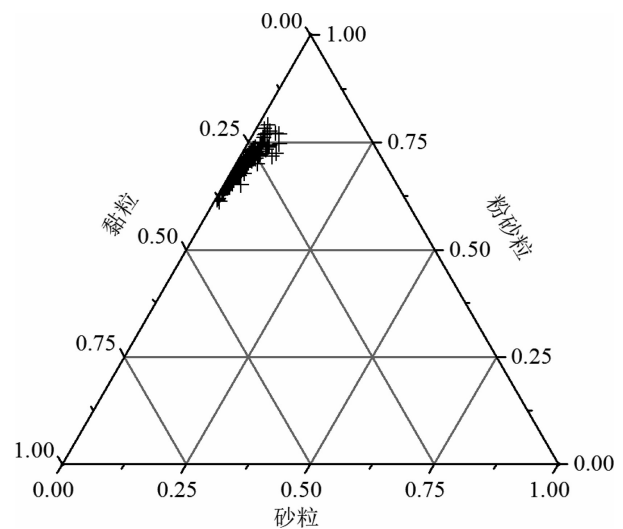


图2 铜川剖面粒度组成三角图

Fig.2 Grain-size distribution of the loess and paleosols from the Tongchuan section

表1 铜川剖面粒度及磁化率参数

Table 1 Magnetic susceptibility and grain size parameters of the samples from Tongchuan section

地层单元	平均粒径 / μm	黏粒 (<4 μm) /%	粉砂 (4~63 μm) /%	砂粒 (>63 μm) /%	低频磁化率 $\chi_{lf} / (10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	频率磁化率 $\chi_{fd} / \%$	
全新世黄土 (L_0 , 50~155 cm)	范围	14.01~28.60	20.11~32.99	65.77~78.23	0.84~6.89	117.90~142.80	8.73~10.74
	均值	19.35	25.80	71.45	2.75	125.41	9.70
全新世古土壤 (S_0 , 155~320 cm)	范围	11.22~20.20	20.83~37.90	61.20~76.77	0.01~3.54	160.22~357.45	10.02~11.36
	均值	14.08	31.68	67.25	1.07	268.26	10.85
过渡性黄土层 (L_t , 320~362 cm)	范围	13.25~18.39	24.94~32.82	66.12~72.98	1.06~2.61	98.39~157.41	9.38~10.37
	均值	16.78	27.24	70.79	1.97	114.02	9.73
马兰黄土层 (L_1 , 362~400 cm)	范围	16.38~29.48	17.72~25.96	72.57~79.10	1.47~6.43	86.90~103.13	7.19~9.65
	均值	20.33	21.98	75.15	2.88	94.22	8.84
全剖面 (50~400 cm)	范围	11.22~29.48	17.72~37.90	61.20~79.10	0.01~6.89	86.90~357.45	7.19~11.36
	均值	16.65	28.35	69.78	1.87	188.41	10.16

径组分是东亚夏季风和冬季风强度的重要替代性指标^[20]。在早期的研究中,中值粒径被用于指示黄土高原地区东亚冬季风强度的替代性指标,但是由于低粒径组分($<4\ \mu\text{m}$)受到成壤作用的影响较大,其代表性显著降低^[21]。鹿化煜^[4]和汪海斌^[22]等分别利用 $>30\ \mu\text{m}$ 和 $>40\ \mu\text{m}$ 粒径组分来指示黄土高原地区冬季风强度的变化。 30 和 $40\ \mu\text{m}$ 介于粉砂粒组分($4\sim 63\ \mu\text{m}$)之间,因此,本研究选取粉砂粒组分作为东亚冬季风的替代性指标,黏粒组分($<4\ \mu\text{m}$)作为东亚夏季风的替代性指标。

磁化率是黄土高原地区重要的古气候代用指标之一。通常在黄土层中较低,在古土壤层中较高,因而被用于指示黄土的成壤强度,进而成为东亚夏季风强度的重要替代性指标^[20]。宋扬等^[23]在黄土高原现代表土的研究中发现,磁化率值与大气降水具有较好的正相关性,而与温度的相关性较低。近期,路彩晨等^[24]在黄土高原安塞剖面的研究中,进一步指出降水是影响磁化率值的主要环境因素,低温或高温都不能增加地层中强磁性矿物的含量。进入全新世以来,铜川剖面频率磁化率同东亚季风区重建的降水信息呈同步变化,即降水增加,频率磁化率值增加(图3)。低频磁化率值在早晚全新世相对较低,中全新世较高,也能够响应东亚季风区重建的降水变化。但是,频率磁化率及低频磁

化率与温度记录的变化趋势有较大出入,特别是在晚全新世,温度的降低并没有引起磁化率值的增加。因此,铜川剖面磁化率主要受到降水的控制,进而,本研究将其作为指示东亚夏季风降水的替代性指标。

3.2 古气候意义

通过上述对粒度和磁化率指标的古气候意义进行分析,这里将粉砂粒作为指示东亚冬季风的替代性指标,黏粒和磁化率值作为东亚夏季风的替代性指标。此外,为了更准确地阐述铜川剖面黄土-古土壤记录的古气候变化,本研究还结合在该剖面已经开展的元素地球化学指标进行对比分析^[16]。可初步将铜川地区在 $11.4\sim 1.5\ \text{kaBP}$ 期间的古气候变化划分为如下4个阶段(图4):

$11.4\sim 10.2\ \text{kaBP}$,粉砂粒(75.15%)含量为全剖面最高值(图4a),黏粒(21.98%)和频率磁化率(8.84%)值在该时段处于全剖面的最低值(图4b, c)。指示该阶段东亚冬季风较强,东亚夏季风带来的区域有效降水较少,气候以寒冷干燥为主。该剖面的元素地球化学指标(Rb/Sr和CIA值)也相对较低,指示化学风化作用较弱,降水较少(图4d, e)。该阶段气候可能受新仙女木事件^[25]结束期的影响,仍处于较寒冷干燥期。

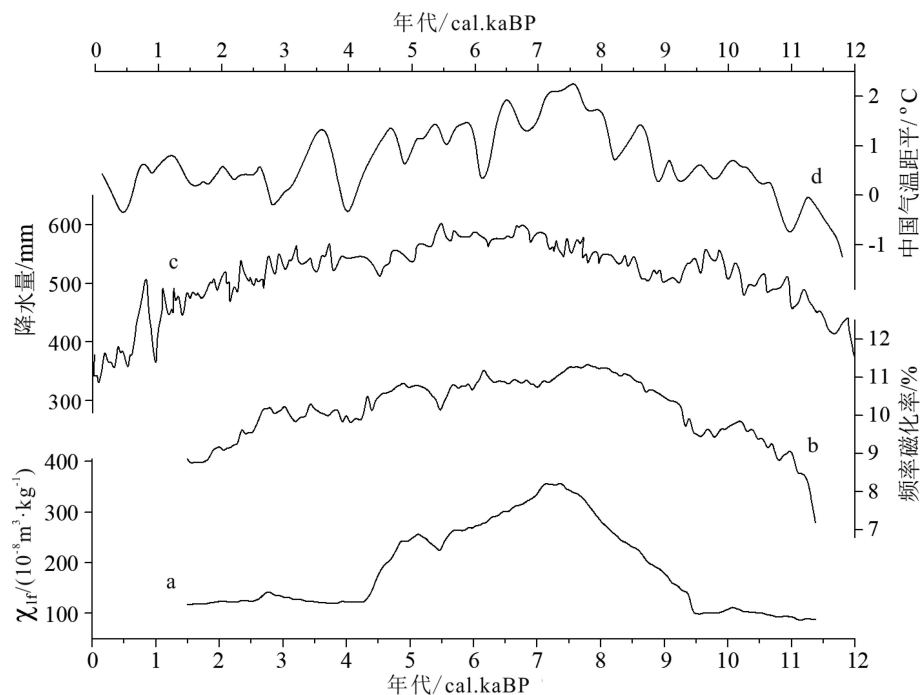


图3 铜川剖面磁化率指标对降水和温度变化的响应(a, b)与东亚季风区年平均降水量(c)^[25]及中国气温距平曲线(d)^[26]

Fig.3 a,b. Response of magnetic minerals to climatic factors of Tongchuan section, c. Reconstructed annual precipitation in East Asian monsoon region^[25], d. The air temperature anomaly in China^[26]

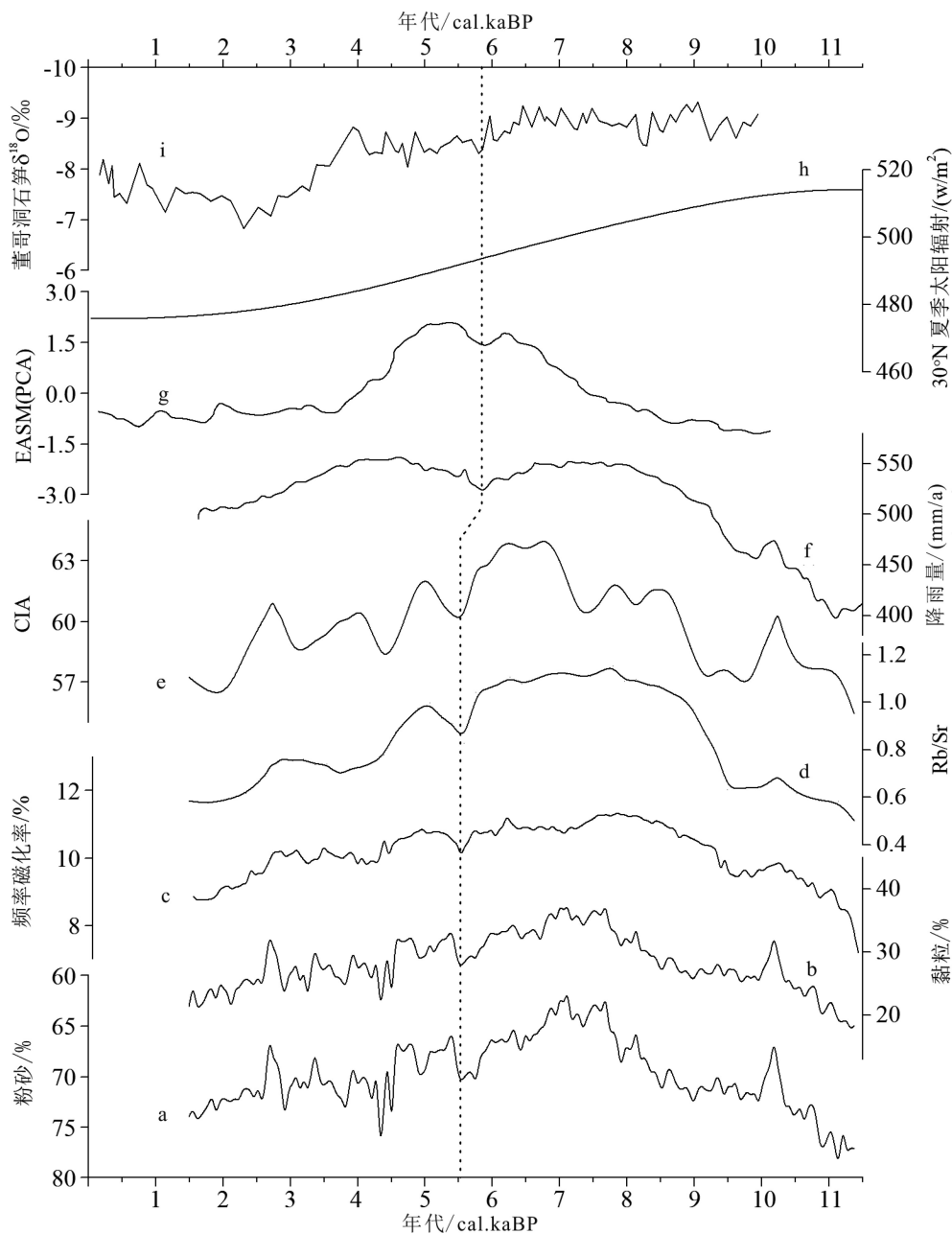


图4 铜川剖面气候记录指标与东亚夏季风指标、降水记录及石笋记录对比
a, b, c. 铜川剖面粒度、磁化率指标; d, e. 铜川剖面元素地球化学指标^[16]; f. 耀县剖面重建的区域有效降水^[15];
g. 东亚夏季风强度指标^[27]; h. 30°N 太阳辐射^[28]; i. 董哥洞石笋氧同位素^[29]。

Fig.4 Comparison of climatic records in Tongchuan section with some proxies such as EAM, precipitation recorder and oxygen isotope record($\delta^{18}\text{O}$) from the Dongge cave

a, b, c. particle size and magnetic susceptibility indices; d, e. geochemical indices^[16]; f. Reconstructed rainfall in Yaoxian^[15]; g. EASM index synthesized from monsoonal eastern China^[27]; h. Summer insolation record for 30°N^[28]; i. Oxygen isotope record($\delta^{18}\text{O}$) from the Dongge cave^[29].

10.2~9.1 kaBP, 该时段为全新世早期, 气候处于向全新世暖湿期的过渡阶段。这一时期, 黏粒(27.24%)和频率磁化率值(9.73%)处于相对低值上升区(图4b, c), 表明该阶段东亚夏季风呈增强的趋势, 其带来的降水增加。耀县剖面重建的区域有效降水也与之同步变化(图4f), 呈增加的变化趋势。粉砂粒(70.79%)组分为相对高值下降区(图4a), 表

明该阶段冬季风强度有所减弱。此外, 在10.1 kaBP(358 cm)左右, 粉砂粒组分出现一个较强的低谷值说明在该时段东亚冬季风有一个明显的减弱期。但是, 低频磁化率在该时段的变化并不明显(图3a), 仅频率磁化率和黏粒值有小幅度的峰值出现, 指示夏季风带来的降水并没有显著增加。CIA和Rb/Sr值在10.1 kaBP左右也出现一个较强的峰值, 表明

风化成壤作用增强,可能是冬季风减弱,导致区域温度出现短暂上升,利于土壤发育(图4d, e)。总体而言,该阶段气候仍较冷干,但是,与末次冰期相比,有较大改善。

9.1~4.4 kaBP,该阶段区域有效降水量及东亚夏季风强度达到全新世最高(图4f, g),铜川剖面黏粒和磁化率值指示的东亚夏季风强度与之具有较好的对应性:黏粒(31.68%)含量和频率磁化率(10.85%)值上升至全剖面最高(图4b, c),表明该阶段东亚夏季风带来的降水达到最丰沛期;粉砂粒(67.25%)含量降至全剖面最低(图4a),说明东亚冬季风强度降低至全新世最弱期。该阶段的沉积地层以灰黑色、黑色的黑垆土为主,进一步说明该阶段气候温暖湿润,十分利于古土壤发育。其中,频率磁化率和黏粒值在约5.5 kaBP(图4虚线)出现较小幅度低谷值,指示该时段东亚夏季风带来的降水减少。磁化率指标与该阶段的元素地球化学指标(Rb/Sr和CIA值)变化趋势趋于一致,且元素地球化学指标的变化更为显著(图4d, e),可能是不同指标响应气候事件的敏感性差异导致的。东亚夏季风指标以及耀县剖面利用磁化率值定量重建的区域有效降水减弱期发生在5.8 kaBP左右(图4g, f),可能是铜川剖面对中全新世气候恶化事件的响应期要晚于东亚夏季风减弱期。但是,也不排除利用不同定年手段确定年代标尺产生的误差。总之,这一气候恶化事件将中全新世暖湿期(9.1~4.4 kaBP)分为两个阶段:前期(9.1~5.5 kaBP)气候最为温暖湿润,即全新世适宜期,后期(5.5~4.4 kaBP)暖湿度降低。

4.4~1.5 kaBP,该时段东亚夏季风强度显著降低,耀县剖面重建的区域有效降水也缓慢降低(图4g, f)。铜川剖面黏粒(25.80%)含量和频率磁化率值(9.70%)也缓慢下降(图4b, c),指示该阶段东亚夏季风减弱,区域有效降水减少。粉砂粒(71.45%)含量缓慢上升(图4a),表明东亚冬季风强度有所增强。其中,频率磁化率和黏粒值在3.0~2.5 kaBP左右出现的峰值,及粉砂粒组分在该时段出现的低谷值,指示该时段气候出现一个短暂的暖湿期。在该阶段之后,气候逐渐向冷干的方向演化。此外,该时段粒度指标波动较大,不排除存在人为扰动等因素的影响。

综合上述分析,粒度和磁化率等指标较好地记录了铜川地区11.4~1.5 kaBP期间的气候变化情况,与东亚夏季风强度指标及耀县剖面利用磁化率值定量重建的区域有效降水记录具有较好的一致性(图4g, f)。特别是在中晚全新世铜川剖面的气

候记录与30°N太阳辐射量呈同步变化,说明铜川地区和董哥洞石笋氧同位素记录的全新世气候变化一样,都主要受到太阳辐射量的控制(图4i, h)。铜川剖面粒度、磁化率和元素地球化学指标记录的全新世气候变化规律具有较好的一致性,总体变化趋势为:早期(11.4~9.1 kaBP)寒冷干燥,中期(9.1~4.4 kaBP)温暖湿润,晚期(4.4~1.5 kaBP)气候恶化,转向冷干。

4 结论

(1)铜川剖面粒度组成主要以粉砂粒为主,其次是黏粒,砂粒含量最低。粒度参数(黏粒、粉砂粒和砂粒)和磁化率值与黄土-古土壤沉积具有很好的对应性,黏粒、低频磁化率和频率磁化率在古土壤层中较高,在黄土层中较低;粉砂粒和砂粒在古土壤层中较低,在黄土层中较高。

(2)铜川剖面11.4~1.5 kaBP期间的气候变化可以划分为4个阶段:11.4~10.2 kaBP,以寒冷干燥为主;10.2~9.1 kaBP,冬季风减弱,气候略温偏干,总体仍较冷干;9.1~4.4 kaBP,夏季风达到强盛期,气候温暖湿润;4.4~1.5 kaBP,冬季风增强,夏季风减弱,气候逐渐向冷干的方向演化。

参考文献(References)

- [1] Lu H Y, An Z S. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, 41(6): 626-631.
- [2] Guan H C, Zhu C, Zhu T X, et al. Grain size, magnetic susceptibility and geochemical characteristics of the loess in the Chaohu lake basin: implications for the origin, palaeoclimatic change and provenance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 117: 170-183.
- [3] 杨石岭,丁仲礼.黄土高原黄土粒度的空间变化及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(5): 934-944. [YANG Shiling, DING Zhongli. Spatial changes in grain size of loess deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for palaeoenvironment [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(5): 934-944.]
- [4] 鹿化煜,安芷生.洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(1): 67-69. [LU Huayu, AN Zhisheng. Paleoclimatic significance of the composition of Luochuan loess [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(1): 67-69.]
- [5] 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 [J]. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36.
- [6] Sun Y B, An Z S, Clemens S C, et al. Seven million years of wind and precipitation variability on the Chinese Loess Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 297(3-4): 525-535.

- [7] 于昊, 彭廷江, 李孟, 等. 西部黄土高原兰州黄土磁化率增强模式及其驱动机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 165-174. [YU Hao, PENG Tingjiang, LI Meng, et al. Magnetic susceptibility enhancement model and its driving mechanism of Lanzhou loess on the Western Loess Plateau [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(2): 165-174.]
- [8] 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-paleosol sequence [J]. *The Holocene*, 2007, 17(7): 1015-1022.
- [9] 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 Chunchang, PANG Jiangli, 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.]
- [10] 庞奖励, 黄春长, 刘安娜, 等. 黄土高原南部全新世黄土-古土壤序列若干元素分布特征及意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3): 357-364. [PANG Jiangli, HUANG Chunchang, LIU Anna, et al. Ba/Sr and Rb/Sr ratio of Holocene loess-paleosol sequences and its significance in South Loess Plateau, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(3): 357-364.]
- [11] 贾耀锋, 庞奖励, 黄春长, 等. 关中盆地全新世黄土-土壤剖面微量元素的地球化学特征及其古气候意义[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 513-520. [JIA Yaofeng, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Geochemistry of trace elements and their paleoclimatic implications in the loess-soil section in Guanzhong basin [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 513-520.]
- [12] 刘安娜, 庞奖励, 黄春长, 等. 甘肃庄浪全新世黄土-古土壤序列元素分布特征及意义[J]. 地球化学, 2006, 35(4): 453-458. [LIU Anna, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Element distributions of the Zhuanglang Holocene loess-paleosol sequence, Gansu Province and its significance [J]. *Geochimica*, 2006, 35(4): 453-458.]
- [13] 王琳栋, 杨太保, 梁焯, 等. 会宁地区全新世黄土沉积粒度特征及其古气候意义[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1150-1156. [WANG Lindong, YANG Taibao, LIANG Ye, et al. Grain size characteristics in the loess-paleosol at Huining section and its significance to paleoclimate during Holocene [J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(6): 1150-1156.]
- [14] 贾佳, 夏敦胜, 魏海涛, 等. 耀县黄土记录的全新世东亚夏季季风非同步演化[J]. 第四纪研究, 2009, 29(5): 966-975. [JIA Jia, XIA Dunsheng, WEI Haitao, et al. Asynchronous evolution of East Asia summer and winter monsoons of the Holocene recorded by Yao County loess [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 966-975.]
- [15] Xia D S, Jia J, Li G H, et al. Out-of-phase evolution between summer and winter East Asian monsoons during the Holocene as recorded by Chinese loess deposits [J]. *Quaternary Research*, 2014, 81(3): 500-507.
- [16] 周家兴, 吴利杰, 于娟, 等. 铜川地区11.4~1.5 kaBP期间黄土地球化学风化特征及其古气候意义[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 64-73. [ZHOU Jiaying, WU Lijie, YU Juan, et al. Characteristics of geochemical weathering of loess in the Tongchuan area during 11.4~1.5 kaBP and its paleoclimatic implications [J]. *Earth and Environment*, 2019, 47(1): 64-73.]
- [17] Zhao C L, Shao M A, Jia X U, et al. Particle size distribution of soils (0-500 cm) in the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma Regional*, 2016, 7(3): 251-258.
- [18] Buggle B, Hambach U, Müller K, et al. Iron mineralogical proxies and Quaternary climate change in SE-European loess-paleosol sequences [J]. *CATENA*, 2014, 117: 4-22.
- [19] Liu Q S, Deng C L, Yu Y, et al. Temperature dependence of magnetic susceptibility in an argon environment: implications for pedogenesis of Chinese loess/paleosols [J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 161(1): 102-112.
- [20] 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.
- [21] 陈璞皎, 郑祥民, 周立旻, 等. 宁镇地区下蜀黄土粒度特征及其古环境意义[J]. 地质科技情报, 2017, 36(5): 7-13. [CHEN Pujiao, ZHENG Xiangmin, ZHOU Limin, et al. Grain size distribution and its significance of the Xiashu loess in Nanjing-Zhenjiang area [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(5): 7-13.]
- [22] 汪海斌, 陈发虎, 张家武. 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 21-26. [WANG Haibin, CHEN Fahu, ZHANG Jiawu. Environmental significance of grain size of loess-paleosol sequence in Western part of Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1): 21-26.]
- [23] 宋扬, 郝青振, 葛俊逸, 等. 黄土高原表土磁化率与气候要素的定量关系研究[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 679-689. [SONG Yang, HAO Qingzhen, GE Junyi, et al. Quantitative relationships between modern soil magnetic susceptibility and climatic variables of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(4): 679-689.]
- [24] 路彩晨, 贾佳, 高福元, 等. 全新世安塞剖面的磁学特征变化历史及其受控因子分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(5): 178-184. [LU Caichen, JIA Jia, GAO Fuyuan, et al. Holocene variations of paleomagnetic characteristics along the loess section of Ansai and their controlling factors [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(5): 178-184.]
- [25] Chen F H, Xu Q H, Chen J H, et al. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11186.
- [26] 侯光良, 方修琦. 中国全新世气温变化特征[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1075-1080. [HOU Guangliang, FANG Xiuqi. Characteristics of Holocene temperature change in China [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(9): 1075-1080.]
- [27] Wang Y B, Liu X Q, Herzschuh U. Asynchronous evolution of the Indian and East Asian Summer Monsoon indicated by Holocene moisture patterns in monsoonal central Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 103(3-4): 135-153.
- [28] 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.
- [29] 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.