

汉江上游弥陀寺剖面风化成壤特征 及其对气候变化的响应*

张文桐, 庞奖励, 周亚利, 黄春长, 查小春, 王学佳, 王海燕
(陕西师范大学旅游与环境学院//地理学国家级实验教学示范中心, 陕西 西安 710062)

摘要: 对汉江上游弥陀寺发现的完整黄土-古土壤剖面进行了沉积学特征以及磁化率、粒度、烧失量和 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 等气候替代性指标的分析及研究, 结果表明: 弥陀寺剖面自下而上具有马兰黄土(L_1)→过渡层黄土(L_t)→古土壤层(S_0)→近代黄土(L_0)→表土层(TS)地层序列, 记录了自晚更新世以来的气候变化; 不同地层单元之间风化成壤差异显著, 古土壤层(S_0)的风化成壤强度明显高于其它地层, 马兰黄土(L_1)的风化成壤强度最弱。剖面风化成壤强度的变化揭示了自马兰黄土堆积以来记录的气候变化, 马兰黄土形成时期气候干燥寒冷, 过渡层黄土的存在则说明气候由干冷向暖湿转变, 古土壤层形成时期气候最为温暖湿润, 近代黄土形成时期气候由暖湿向干冷转变。此外, 弥陀寺剖面还记录了在全新世大暖期期间的一次气候变冷事件, 结合光释光(OSL)测年数据, 确定此事件发生于 6.48 ka BP 左右。

关键词: 风化成壤; 气候变化; 黄土-古土壤; 汉江上游

中图分类号: P532 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)06-0031-07

Pedogenic characteristics of Mituosi profile in the upper Hanjiang river valley and its response to climate change

ZHANG Wentong, PANG Jiangli, ZHOU Yali, HUANG Chunchang, ZHA Xiaochun,
WANG Xuejia, WANG Haiyan

(College of Tourism and Environment//National Demonstration Center for
Experimental Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: The Mituosi (MTS) profile in Yunxian, Hubei of China was served to investigate pedo-stratigraphy and sedimentary characteristics of the first river terrace of the upper Hanjiang river. Magnetic susceptibility, grain-size distribution, loss on ignition and Rb/Sr were analyzed. The MTS profile recorded the environmental evolution with the stratigraphic series from bottom to top: Malan Loess(L_1)→Transitional Loess(L_t)→Paleosol(S_0)→Holocene Loess(L_0)→Top soil(TS). Different stratigraphic units show different degree of weathering intensity, with $S_0 > L_t > L_0 > L_1$. The weathering intensity change of MTS profile indicates the climate change since Malan loess accumulation. It was cold and arid with gradually intensified southeast monsoon during the early Holocene. The strongest monsoon occurred in the mid-Holocene. During the late Holocene, the climate became drying with the monsoon recession. A cold climate event was recorded in MTS profile, dating to around 6.48 Ka BP (OSL dating).

Key words: pedogenesis; climate change; loess-paleosol; upper Hanjiang river

* 收稿日期: 2016-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(41271108, 41371029); 国家社会科学基金(14BZS070); 中央高校基本科研费(201601006)

作者简介: 张文桐(1991年生), 男; 研究方向: 土地利用和气候变化; E-mail: 978696657@qq.com

通信作者: 庞奖励(1963年生), 男; 研究方向: 资源开发与环境演变; E-mail: jlpang@snnu.edu.cn

随着全球变暖问题的加剧,气候变化问题成为人类关注的焦点,因此对未来气候变化进行有效预测显得尤为重要。大量研究表明黄土-古土壤序列作为记录气候变化的良好载体,记录了自其堆积以来的气候变化,能反映其经历的化学风化及成壤演变过程^[1-5]。地处秦岭以南的汉江上游地区,广泛分布着风成黄土,部分学者对其研究,取得了一系列研究进展^[6-10]。例如,马兰黄土以上的黄土-古土壤序列记录了自末次冰期以来的气候变化规律(晚更新世末期气候干冷→全新世初期气候向暖湿转变→全新世中期气候最为暖湿→全新世晚期气候由暖湿向冷干转变)。本文通过对汉江上游弥陀寺剖面的研究,不仅揭示了自晚更新世以来的气候变化规律,并且发现在全新世大暖期期间存在气候变冷事件,此次发现进一步完善了区域气候变化资料。

1 研究材料与方法

汉江位于秦岭南侧,流经陕西、湖北两省,于武汉汇入长江,其河谷深切入基岩之中,河道蜿蜒曲折,滩多流急,交替出现基岩峡谷和河谷盆地^[11-12]。郧县盆地位于湖北省十堰境内,地势西高东低,南部和北部隆起,中间为汉江谷地,盆地宽几公里到数十公里不等,长约 20 km,汉江从中穿越而过,在汉江两侧发育四级河流阶地,阶地面(特别是低级阶地)比较平缓,有利于黄土的堆积以及厚层黄土的发育,在河流两岸呈现面积不等的平坦黄土台地。

弥陀寺剖面(MTS)位于湖北省郧县弥陀寺段汉江左岸一级河流阶地(图 1)。由于采砂金而挖出的新鲜断面,该地点一级阶地河流相及其上覆沉积物出露,清晰可见黄土直接覆盖在一级阶地上。剖面地层完整,层次清晰。根据野外考察并结合实

验数据分析,对此剖面进行了详细的地层划分(表 1)。自剖面顶部向下,以 2 cm 为间距进行连续采样,360 cm 以下以 4 cm 为间距进行连续采样到深度 620 cm 处,共 245 个样品,样品自然风干后进行磁化率、粒度、烧失量、化学元素等指标的测量。

磁化率测量方法:取适量风干样品(>10 g)在研钵中研磨至土壤颗粒的自然形态,称取 10 g 研磨好的样品放入塑料瓶并编号,用 MS-2 型磁化率仪(英国 Bartington 公司生产)进行测量,每个样品重复测 3 次,取平均值。粒度测量方法:取 0.8 g 风干土样置于 500 mL 的烧杯中,先后加入 $\varphi = 10\%$ 的双氧水和 $w = 10\%$ 的盐酸除去有机质和钙质胶结物,经过加水清洗,静置 72 h 后加入适量的 0.5 mol/L 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 使颗粒充分分散,采用美国 Beckman 公司生产的 LS13320 型激光粒度仪进行测量,重复测量 3 次,取平均值,误差小于 2%。元素测量方法:用荷兰 Panalytical 公司生产的 X-Ray 荧光光谱仪(PW2403)测量,将自然风干的土样放入磨土机内研磨至 200 目以内,称取 4.0 g 土样放入 YY60 型压力机中,覆盖适量硼酸压成可用圆片进行测量,实验误差 < 5%。烧失量的测量:先将研磨至 200 目以下粒径的样品在电热恒温干燥箱内 105 °C 温度条件下烘干称量,然后在马弗炉中 400 °C 灼烧 2 h 后,再次称量。烧失量为灼烧前后样品质量的差值占灼烧前样品质量的百分比。OSL 年龄是在装有 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 型 β 辐射源的释光仪(RIS ϕ -TL/OSL-20 型)上进行测定,采用粗颗粒(90 ~ 125 μm)石英单片再生剂量法(SAR)获得^[13-14],已另行撰文进行论述^[6],本文未进行深入讨论。

表 1 郧县弥陀寺剖面地层特征描述

Table 1 Stratigraphic description of the MTS profile in Yunxian county

地层单元	深度/cm	地层结构特征
表土层(TS)	0 ~ 70	浊棕色(7.5YR/5/4),典型耕作土,团粒构造,疏松多孔,多植物根系
近代黄土(L ₀)	70 ~ 140	浊黄橙色(10YR/6/4),粉砂质地,块状构造,成壤作用微弱
古土壤(S ₀)	140 ~ 280	暗棕色(7.5YR/3/4),黏土粉砂质地,棱块结构,致密坚硬,结构面发育大量明亮的棕色黏土胶膜
过渡层黄土(L ₁)	280 ~ 360	浊黄橙色(10YR/7/4),粉砂质地,块状构造
马兰黄土(L ₁)	360 ~ 600	浊黄橙色(10YR/7/3),粉砂质地,均质块状构造
河流相(AL-1)	>600	浊黄橙色(10YR/6/3),中砂,为河漫滩相沉积物

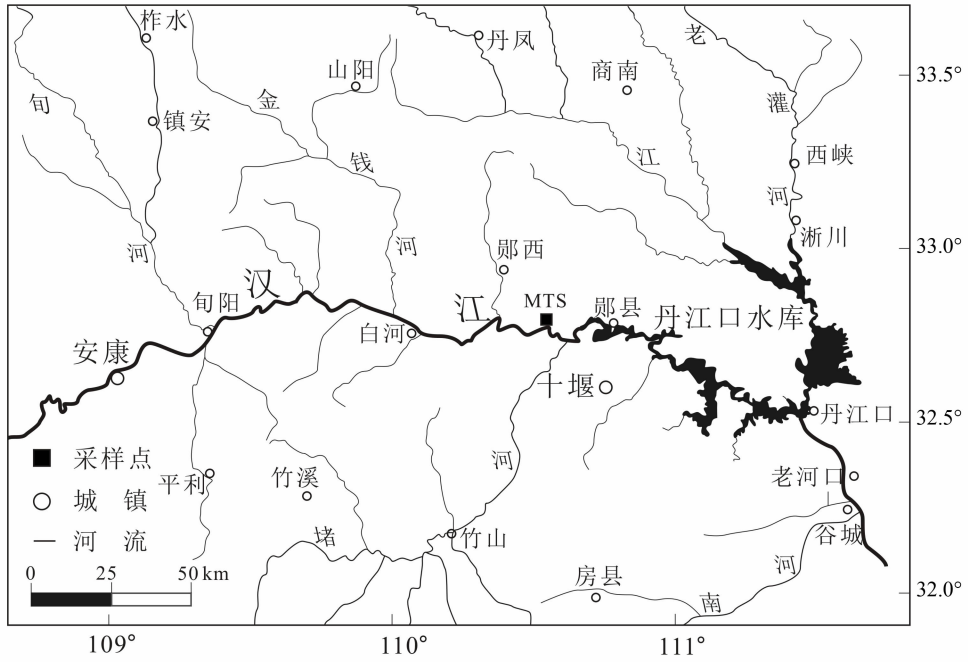


图 1 汉江上游弥陀寺剖面采样点位置图

Fig. 1 The location of MTS profile in the upper reaches of the Hanjiang River

2 实验结果分析

2.1 磁化率

MTS 剖面的磁化率值在 $(45.3 \sim 350.8) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间(表2,图2)。不同地层单元之间磁化率值差异显著,古土壤(S_0)的磁化率值变化范围为 $(75.0 \sim 337.1) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 平均值为 $259.9 \times$

$10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 仅低于表土层 $(309.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$; 马兰黄土(L_1)的磁化率是整个剖面的最低值, 为 $65.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 近代黄土(L_0)与过渡层黄土(L_1)的磁化率值介于古土壤(S_0)和马兰黄土(L_1)两者之间, 分别为 $196.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $65.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (表2)。

表 2 MTS 剖面磁化率、粒度参数、烧失量及 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})^{1)}$

Table 2 Magnetic susceptibility, grain-size, loess on ignition and $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ of the MTS profile

层	深度 cm	磁化率 ($10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	w (样品粒度)/%		w (黏粒)/ w (粉砂)	烧失量 %	$w(\text{Rb})/$ $w(\text{Sr})$
			w (黏粒)($<5 \mu\text{m}$)	w (砂粒)($>50 \mu\text{m}$)			
TS	0 ~ 70	240.1 ~ 350.8 (309.0)	14.0 ~ 25.9 (20.3)	13.0 ~ 27.2 (20.5)	0.24 ~ 0.44 (0.34)	2.6 ~ 4.9 (4.1)	0.77 ~ 1.04 (0.90)
L_0	70 ~ 140	118.4 ~ 329.0 (196.1)	10.4 ~ 31.4 (16.2)	16.1 ~ 42.1 (33.5)	0.22 ~ 0.60 (0.32)	1.6 ~ 4.0 (2.6)	0.65 ~ 0.85 (0.71)
S_0	140 ~ 280	75.0 ~ 337.1 (259.9)	25.1 ~ 38.2 (32.4)	6.6 ~ 27.6 (14.2)	0.44 ~ 0.69 (0.61)	2.3 ~ 4.4 (3.51)	0.68 ~ 1.10 (0.92)
L_1	280 ~ 360	55.7 ~ 95.6 (65.1)	12.4 ~ 23.8 (19.2)	19.0 ~ 26.1 (21.8)	0.20 ~ 0.44 (0.33)	2.3 ~ 3.5 (2.8)	0.81 ~ 0.92 (0.88)
L_1	360 ~ 600	45.3 ~ 66.9 (54.0)	6.1 ~ 20.6 (13.0)	18.3 ~ 67.1 (40.3)	0.20 ~ 0.38 (0.27)	1.1 ~ 2.6 (2.0)	0.45 ~ 0.81 (0.68)

1)表中各列括号内是相应量值范围的均值

2.2 粒度

实验数据显示, MTS 剖面的粒度参数具有以下几个特点:

1) w (黏粒) ($< 5 \mu\text{m}$) 的变化范围为 6.1% ~ 38.2%, 不同地层单元之间区别显著。古土壤 (S_0) 中 w (黏粒) 为整个剖面的最高值, 为 32.4%; 马兰黄土 (L_1) 为最低值, 为 13.0%; 表土层、近代黄土及过渡层黄土的 w (黏粒) 介于二者之间 (表 2)。 w (黏粒) 由高到低剖面层为 $S_0 > TS > L_1 >$

$L_0 > L_1$ 。

2) w (砂粒) ($> 50 \mu\text{m}$) 的变化趋势与 w (黏粒) 及磁化率变化趋势相反 (图 2)。MTS 剖面 w (砂粒) 变化范围为 6.6% ~ 67.1%, 马兰黄土 w (砂粒) 为 40.3%, 是整个剖面的最高值; 古土壤层 w (砂粒) 为 14.2%, 是整个剖面的最低值; 表土层、近代黄土及过渡层黄土的 w (砂粒) 分别为 20.5%、33.5% 和 21.8% (表 2)。

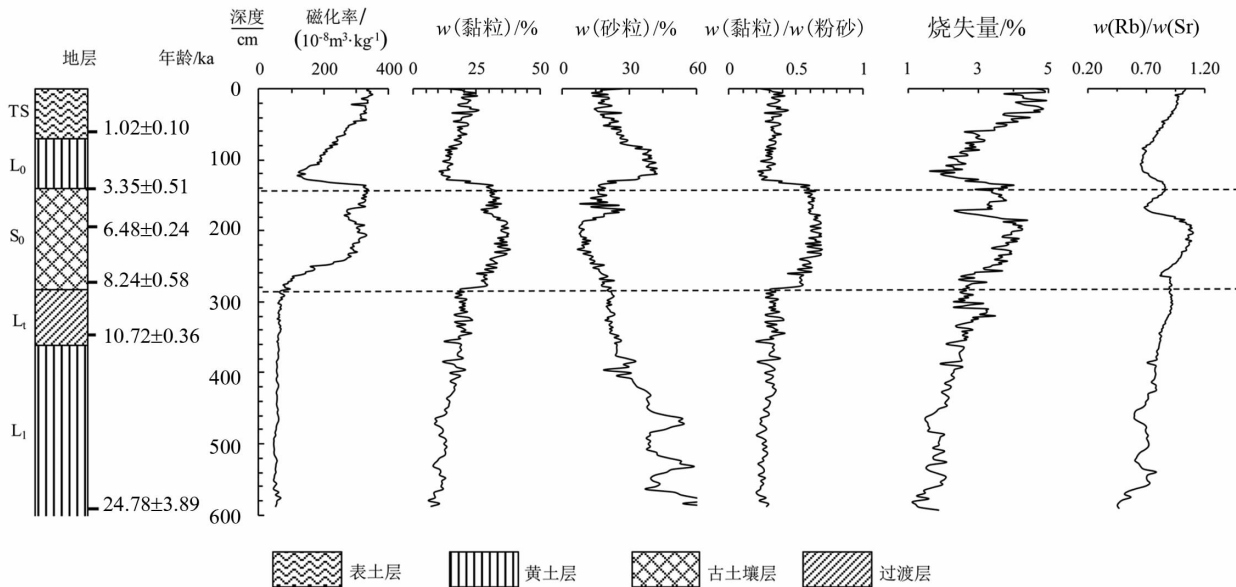


图 2 MTS 剖面磁化率、粒度、烧失量和 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 分布曲线

Fig. 2 The distribution curves of magnetic susceptibility, grain-size, loess on ignition and $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ at MTS profile

3) w (砂粒)/ w (粉砂) 的变化与 w (黏粒) 的变化一致 (表 2, 图 2)。MTS 剖面 w (砂粒)/ w (粉砂) 变化范围为 0.20 ~ 0.69, 古土壤层 w (黏粒)/ w (粉砂) 的变化范围为 0.44 ~ 0.69, 平均值为 0.61, 在粒度分布曲线图上显示为高值区, 且明显高于其它地层 (图 2)。表土层、近代黄土、过渡层黄土及马兰黄土的 w (黏粒)/ w (粉砂) 值分别为 0.34、0.32、0.33 和 0.27, 具有 $S_0 > TS > L_1 > L_0 > L_1$ 的特征。

4) 在古土壤 (S_0 , 140 ~ 280 cm) 中 170 ~ 190 cm 深度处的 w (黏粒) (32.3%) 低于古土壤层 (32.4%), 而 w (砂粒) (16.9%) 明显高于古土壤层 (14.2%)。

2.3 烧失量

图 2 所示, MTS 剖面的烧失量介于 1.1% ~ 4.9% 之间, 从烧失量变化曲线可以看出: 古土壤

(S_0) 的烧失量要远高于马兰黄土 (L_1), 其值分别为 3.5% 和 2.0%, 变化范围为 2.3% ~ 4.4% 和 1.1% ~ 2.6%。表土层的烧失量最大, 为 4.1%, 变化范围为 2.6% ~ 4.9%。近代黄土与过渡层黄土的烧失量介于古土壤与马兰黄土之间, 分别为 2.6% 和 2.7%。在 170 ~ 190 cm 深度处烧失量的平均值为 3.3%, 明显低于古土壤 (S_0) 的烧失量 (3.5%)。

2.4 Rb-Sr 比值

$w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 在各地层中具有明显的差异性, 变化范围为 0.49 ~ 1.10 (表 2, 图 2), 与磁化率值以及烧失量的变化趋势呈现出高度一致性。古土壤 (S_0) 的 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 值最高, 平均值为 0.92; 表土层次之, 为 0.91; 马兰黄土的 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 值在整个剖面中为最低值, 变化范围为 0.45 ~ 0.81, 平均值为 0.68。在 170 ~ 190 cm 深度处 w

(Rb)/ w (Sr)与磁化率及烧失量表现一致,皆低于古土壤(S_0) (图 2),此深度处 w (Rb)/ w (Sr)为 0.83。

3 讨论

3.1 弥陀寺剖面风化强度变化规律

磁化率、粒度、烧失量及 w (Rb)/ w (Sr)值等气候替代性指标在黄土-古土壤剖面中的变化与风化成壤强度密切相关^[7-8,15-16]。磁化率的高低取决于黄土中铁磁性矿物(主要是磁铁矿、磁赤铁矿等)的含量、种类及其粒径大小,反映了气候的干湿状况^[17-20];黄土的粒度能够很好地指示东亚冬季风的强弱变化^[15,21-22],其组成与风力强弱以及后期成壤改造作用密切相关^[23-25];烧失量的高低与沉积物中有机质含量密切相关,而有机质的损失量可以反映过去的气候和环境条件^[26]; w (Rb)/ w (Sr)值则反映了风成沉积物形成过程中经历的风化成壤强度^[27-28]。马兰黄土(L_1 , 360~600 cm)的磁化率值($65.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)、 w (黏粒)(13.0%)、 w (黏粒)/ w (粉砂)值(0.27)、烧失量(2.0%)及 w (Rb)/ w (Sr)值(0.68)在整个剖面中均为最低值(表 2),而 w (砂粒)(40.3%)为剖面中的最高值,说明其成壤改造作用微弱,风化强度低,保持了风成黄土的基本特征。过渡层黄土(L_1 , 280~360 cm)的磁化率值、 w (黏粒)、 w (黏粒)/ w (粉砂)值、烧失量及 w (Rb)/ w (Sr)值略高于马兰黄土层,表明过渡层黄土仍保持了黄土的基本特性,但是风化成壤强度要略高于马兰黄土。与过渡层黄土相比古土壤(S_0 , 140~280 cm)的 w (黏粒)明显升高,磁化率值变大,烧失量、 w (Rb)/ w (Sr)值增大, w (砂粒)降低(表 2),说明古土壤形成阶段风尘堆积物中的原生含铁矿物分解为游离铁,形成细小的铁磁性矿物,使磁化率值明显升高;粗颗粒分解形成黏粒及细粒物质,导致黏粒及细粉砂含量升高而 w (砂粒)降低;Sr 发生淋溶迁移, w (Rb)/ w (Sr)明显增大,这些表明古土壤(S_0)经历的风化及淋溶作用显著高于马兰黄土(L_1)与过渡层黄土(L_1),受到强烈的成壤改造。近代黄土(L_0 , 70~140 cm)的地层结构特征(颜色、质地、结构)与马兰黄土极为相似,其磁化率值($196.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)、 w (黏粒)(16.2%)、 w (黏粒)/ w (粉砂)(0.32)及 w (Rb)/ w (Sr)值(0.71)明显低于古土壤层而高于马兰黄土层,但 w (砂粒)高于古土壤层,说明其风化成壤强度低于古土壤层而高于马兰黄土层。在

170~190 cm 处的 w (黏粒)(32.3%)、烧失量(3.3)和 w (Rb)/ w (Sr)值(0.83)均低于古土壤(S_0),而 w (砂粒)(16.9)则明显高于古土壤(S_0)(表 2),说明在 170~190 cm 深度处的风化成壤作用要明显低于古土壤(S_0)形成阶段的风化成壤作用。

3.2 风化成壤对气候变化的响应

MTS 剖面风化成壤强度的变化反映了汉江上游地区不同时期的气候特征,并可以与汉江上游地区归仙河口及辽瓦店等剖面形成良好对比^[8-9],与之前王学佳等人基于化学元素对此剖面进行讨论得出的结果基本一致^[29]。马兰黄土(L_1)形成阶段:厚层黄土的堆积以及微弱的风化成壤作用,表明该时期冬季风强盛,有利于黄土的形成。过渡层黄土(L_1)形成阶段:风化成壤作用略高于马兰黄土(L_1)形成阶段,说明末次冰期结束后,进入全新世早期,气候开始由干燥寒冷向温暖湿润转变,冬季风减弱。古土壤(S_0)形成阶段:此阶段经历了最为强烈的成壤改造作用,说明该时期气候最为温暖湿润,降水充沛,生物活动频繁。同时在古土壤(S_0)中 170~190 cm 明显变弱的风化成壤作用,表明此阶段气候与整个古土壤(S_0)形成阶段相比表现为相对干燥寒冷,结合 OSL 测年数据,确定了此次气候事件的发生时间约为 6.48 Ka BP,此次气候事件可以与鹿化煜等人对东亚季风的研究形成良好对比^[30]。近代黄土(L_0)形成阶段:该阶段的成壤改造作用明显低于古土壤(S_0)阶段,说明全新世大暖期结束后,气候开始由温暖湿润向干燥寒冷转变,冬季风变强,风尘堆积速率加快,进入一个相对干旱少雨时期。

4 结论

通过对汉江上游 MTS 剖面的磁化率、粒度、烧失量及 w (Rb)/ w (Sr)值的综合分析,揭示了该地区自晚更新世末期以来的风成沉积物的风化成壤过程及其反映的气候变化规律:晚更新世末期,汉江上游一级阶地上厚层马兰黄土的堆积,表明该时期成壤作用微弱,气候干燥寒冷,沙尘暴活动频繁,冬季风强盛。

进入全新世早期,成壤作用增强,气候向暖湿转变,冬季风减弱,沉积物堆积变慢。全新世大暖期,成壤作用最为强烈,气候最为温暖湿润,降水丰富,生物活动频繁。进入全新世晚期,成壤作用减弱,黄土继续堆积,气候向干燥寒冷转变。

在 6.48 ka BP 前后,虽处于全新世大暖期期

间,但是气候发生过一次剧烈波动,气候表现为相对干燥,且降水较少,通过磁化率、粒度组分、烧失量及 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 值的变化曲线很好的表现出来。

参考文献:

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社, 1985.
- [2] 鹿化煜,王先彦,孙雪峰,等. 钻探揭示的青藏高原东北部黄土地层与第四纪气候变化[J]. 第四纪研究, 2007,27(2):230-241.
LU H Y, WANG X Y, SUN X F, et al. Loess stratigraphy and palaeoclimate changes during Quaternary in Northeastern Tibetan plateau revealed by loess core [J]. Quaternary Sciences, 2007,27(2):230-241.
- [3] ZHAO S, XIA D S, JIN H L, et al. Long-term weakening of the East Asian summer and winter monsoons during the mid-to late Holocene recorded by aeolian deposits at the eastern edge of the Mu Us Desert[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016,457:258-268.
- [4] WANG H P, CHEN J H, ZHANG X J, et al. Palaeosol development in the Chinese Loess Plateau as an indicator of the strength of the East Asian summer monsoon: Evidence for amid-Holocene maximum [J]. Quaternary International, 2014,334/335:155-164.
- [5] 唐克丽,贺秀斌. 黄土高原全新世黄土-古土壤交替及气候演变的再研讨[J]. 第四纪研究, 2004,24(2):129-139.
TANG K L, HE X B. Re-discussion on Loess-paleosol evolution and climatic change on the Loess Plateau during the Holocene [J]. Quaternary Sciences, 2004,24(2):129-139.
- [6] 庞奖励,黄春长,周亚利,等. 郧县盆地风成黄土-古土壤与汉江 I 级阶地形成年龄研究[J]. 地理学报, 2015,70(1):63-72.
PANG J L, HANG C C, ZHOU Y L, et al. Eolian loess-paleosol sequence and OSL age of the first terraces within the Yunxian Basin along the upper Hanjiang River [J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(1):63-72.
- [7] 庞奖励,黄春长,周亚利,等. 汉江上游谷地全新世风成黄土及其成壤改造特征[J]. 地理学报, 2011,66(11):1562-1573.
PANG J L, HUANG C C, ZHOU Y L, et al. Holocene aeolian loess and its pedogenic modification in the Upper Hanjiang River Valley, China [J], Acta Geographica Sinica, 2011,66(11):1562-1573.
- [8] 毛沛妮,庞奖励,黄春长,等. 汉江上游谷地归仙河口剖面风化成壤特征及其记录的气候变化事件[J]. 中国沙漠, 2013,33(6):1678-1683.
MAO P N, PANG J L, HUANG C C, et al. Pedogenesis characteristics and its environmental information interpretation of Guixianhekou profile in the Upper Hanjiang River valley, China [J]. Journal of Desert Research, 2013,33(6):1678-1683.
- [9] 崔天宇,庞奖励,黄春长,等. 湖北郧县辽瓦店黄土剖面风化特征及其对气候变化的响应[J]. 中国沙漠, 2015,35(3):610-615.
CUI T Y, PANG J L, HUANG C C, et al. Pedogenic characteristics of Liaowadian Holocene loess profile in the Upper Hanjiang River valley of China and its response to climate change [J]. Journal of Desert Research, 2015,35(3):610-615.
- [10] 高鹏坤,庞奖励,黄春长,等. 陕西省丹凤县茶房村黄土-古土壤剖面风化程度及对气候变化的响应[J]. 中国沙漠, 2014,34(5):1248-1253.
GAO P K, PANG J L, HUANG C C, et al. Weathering intensity of the Chafangcun loess-paleosol profile in Shaanxi, China and its response to climate change [J]. Journal of Desert Research, 2014,34(5):1248-1253.
- [11] 朱震达. 汉江上游丹江口至白河间的河谷地貌[J]. 地理学报, 1955,21(3):259-271.
ZHU Z D. The valley form of the Upper Han River, from Pai-Ho to Tan-Chiang-Kou [J]. Acta Geographica Sinica, 1955,21(3):259-271.
- [12] 李中轩,朱诚,张广胜,等. 湖北辽瓦店遗址地层记录的环境变迁与人类活动的关系研究[J]. 第四纪研究, 2008,28(6):1145-1159.
LI Z X, ZHU C, ZHANG G S, et al. Relationship between human activity and environment of the Liaowadian site in Hubei Province [J]. Quaternary Sciences, 2008,28(6):1145-1159.
- [13] ZHOU L P, SHACKLETON N J. Photon-stimulated luminescence of quartz from loess and effects of sensitivity change on palaeodose determination [J]. Quaternary Science Reviews, 2001,20:853-857.
- [14] DULLER G A T. Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements [J]. Radiation Measurements, 2003,37:161-165.
- [15] CHEN Fahu, JIA Jia, CHEN Jianhui, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China [J]. Quaternary Science Reviews, 2016,146:134-146.
- [16] SCHATZ A K, SCHOLTEN T, KÜHN P. Paleoclimate and weathering of the Tokaj (Hungary) loess-paleosol sequence [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015,426:170-182.

- [17] GUAN Houchun, ZHU Cheng, ZHU Tongxin, 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;170-183.
- [18] 刘秀铭, 刘东生, SHAW John. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义[J]. *第四纪研究*, 1993, (3):281-287.
- LIU X M, LIU D S, John Shaw J. Magnetic mineral characteristics of Chinese loess and its palaeoclimatic significance [J]. *Quaternary Sciences*, 1993, (3):281-287.
- [19] 刘秀铭, 刘东生, HELLER Friedrich, 等. 中国黄土磁化率与第四纪古气候研究[J]. *地质科学*, 1992, (S1):279-285.
- LIU X M, LIU D S, HELLER Friedrich, et al. Study on magnetic susceptibility of loess and Quaternary climate in China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1992, (S1):279-285.
- [20] KARIMI A, KHADEMI H, AYOUBI S. SHAMSOLLAH Ayoubi. Magnetic susceptibility and morphological characteristics of a loess-paleosol sequence in northeastern Iran [J]. *Catena*, 2013, 101:56-60.
- [21] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(3):278-283.
- LU H Y, AN Z S. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(3):278-283.
- [22] 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):66-69.
- LU H Y, AN Z S. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Luochuan [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(1):66-69.
- [23] DING Z L, SUN J M, LIU D S. A Sedimentological proxy indicator linking changes in loess and deserts in the Quaternary[J]. *Science in China(Series D)*, 1999, 42(2):146-152.
- [24] QIU H J, AMAE Deep Regmi, CUI P, et al. Size distribution of loess slides in relation to local slope height within different slope morphologies [J]. *Catena*, 2016, 145:155-163.
- [25] PENG S Z, HAO Q Z, WANG L, et al. Geochemical and grain-size evidence for the provenance of loess deposits in the Central Shandong Mountains region, northern China [J]. *Quaternary Research*, 2016, 85:290-298.
- [26] ZHOU W J, DONAHUE D, PORTER S C, et al. Variability of Monsoon Climate in East Asia at the end of the Last Glaciation [J]. *Quaternary Research*, 1996, 46:219-229.
- [27] CHEN J, AN Z S, Head J. Variation of Rb/Sr relations in the Loess-Paleosol Sequence of Central China during the Last 130,000 Years and Their Implication for Monsoon Paleosolimatology [J]. *Quaternary Research*, 1999, 51:215-219.
- [28] LIANG L J, SUN Y B, Christiaan J. Beets, et al. Impacts of grain size sorting and chemical weathering on the geochemistry of Jingyuan loess in the northwestern Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69:177-184.
- [29] 王学佳, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游弥陀寺黄土-古土壤序列的化学风化特征及其环境意义[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(6):1191-1198.
- WANG X J, PANG J L, HUANG C C, et al. Chemical weathering characteristics of Mitsuosi's Loess-paleosol sequence in the upper Hanjiang River Valley and its environmental significance [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6):1191-1198.
- [30] LU H Y, YI S W, LIU Z Y. Variation of East Asian monsoon precipitation during the past 21 k. y. and potential CO₂ forcing [J]. *Geology*, 2013, 41:1023-1026.