

甘肃灵台黄土-红粘土序列中坡缕石的分布及其古气候意义

谢巧勤¹, 陈天虎¹, 季峻峰², 陈 骏², 徐惠芳³, 徐晓春¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093;
3. Department of Geology and Geophysics, University of Wisconsin, Madison, WI 53706, USA)

摘要: 坡缕石是典型的干旱、强蒸发环境的指示矿物, 黄土-红粘土序列中坡缕石的分布对古气候和古环境重建具有重要的指示意义。本文对灵台任家坡剖面中黄土、古土壤和红粘土代表性样品进行了场发射扫描电镜和高分辨透射电镜观察, 结果发现, 在 3.6 Ma 以前沉积的红粘土中存有大量的自生坡缕石, 而在 3.2 Ma 以来沉积的红粘土及其上覆黄土-古土壤序列没有坡缕石。剖面样品扫描电镜原位观察形貌特征和微观结构显示, 坡缕石属于成壤作用自生矿物, 系由伊-蒙矿物在富镁孔隙液作用下转化形成。灵台剖面中坡缕石消失的层位与红粘土磁化率升高和粉尘通量及沉积速率增加的层位相一致。坡缕石在剖面中的分布指示 3.6~3.2 Ma 前后是东亚季风的重要转型期, 东亚古气候格局发生改变, 由连续干-暖的夏季风占主导向干-冷冬季风和暖-湿夏季风高频强波动交替环境演化。

关键词: 坡缕石; 古气候; 灵台; 黄土-红粘土序列

中图分类号: P579; P578

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)06-0653-06

The distribution of palygorskite in Lingtai section of Chinese Loess Plateau and its paleoclimate significance

XIE Qiao-qin¹, CHEN Tian-hu¹, JI Jun-feng², CHEN Jun², XU Hui-fang³ and XU Xiao-chun¹

(1. School of Natural Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Department of Geology and Geophysics, University of Wisconsin, Madison WI53706, USA)

Abstract: Palygorskite is a typical indicator mineral for arid and strong evaporation environment. The distribution of palygorskite in loess_red clay sequence may act as an important indicator for reconstruction of paleoenvironment and paleoclimate in ~ 7.0 Ma eolian sequence from the Chinese Loess Plateau. In this paper, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) investigations on Renjiapo red clay_loess_paleosol profile in Lingtai, Gansu Province were performed. The results indicate that palygorskite extensively existed in red clay sequence deposits before 3.6 Ma, while no palygorskite has been observed in the eolian sediments in the last 3.6 Ma, including 3.6~2.6 Ma red clay sequence and Quaternary loess_paleosol sediments. Micromorphology and microstructure shows that palygorskite is an autogenic mineral formed during pedogenesis. The results of this study indicate that the horizon where palygorskite disappeared in the red clay sequence was consistent with that of magnetic susceptibility enhancement, and eolian flux and dust depositional rate increased in about 3.6~3.2 Ma, which was a conversion period of east Asian monsoon type, during which paleomonsoon climate pattern shifted from summer monsoon dominated by sustainable dry_warm climate to east Asian paleomonsoon characterized by the alternation of winter monsoon with dry and cold climate and summer monsoon with warm and humid climate, noted for simultaneous strengthening of east Asian winter and summer monsoon.

Key words: palygorskite; paleoclimate; Lingtai; loess_red clay sequences

收稿日期: 2005-07-14; 修订日期: 2005-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40331001, 40472026); 中国科学院海外杰出学者基金资助(2003_1_7)

作者简介: 谢巧勤(1970-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事环境矿物学研究; 联系作者: 陈天虎, E-mail: chentianhu168@vip.sina.com, 电话: 0551-2903013。

黄土高原的风尘序列包括第四纪以来沉积的黄土-古土壤序列和下伏的含三趾马化石的第三纪红粘土。黄土-古土壤序列的沉积学、地球化学等研究表明,黄土是冰期冷-干气候下由偏北冬季风搬运的粉尘堆积,而与此相间的古土壤则是间冰期相对暖-湿偏南夏季风作用产物(Kukla, 1987; An *et al.*, 1990, 1991),其粒度和磁化率完整记录了东亚冬、夏季风的演化历史,并被广泛用于海陆对比(Porter *et al.*, 1995; Balsam *et al.*, 2005)。越来越多的证据显示,下伏的红粘土也是风成成因(Ding *et al.*, 1998a),从而将黄土高原风尘沉积推到 7.0 Ma 左右(Ding *et al.*, 1999; Sun *et al.*, 1998a)。

虽然红粘土-黄土-古土壤序列磁性地层学(Kukla and An, 1989; Ding *et al.*, 1998b; Sun *et al.*, 1998b) 地球化学(Chen *et al.*, 1999; Ding *et al.*, 2001) 岩石磁学(Zhu *et al.*, 1995; Liu *et al.*, 2003) 和微形态学(Kemp *et al.*, 1997, 2001) 等都取得了很大进展,但对粘土矿物及其古气候指示的研究较少,特别是粘土矿物对古气候转型的指示。

早期的粘土矿物学多采用 X 射线粉晶技术、差热分析和光学显微镜等方法,对黄土中粘土矿物进行定性和定量研究(Kalm *et al.*, 1996; Ji *et al.*, 1999; 季峻峰等, 1999; 赵良等, 2003; 张永双等, 2004),认为黄土中粘土矿物主要有伊利石、高岭石、蒙脱石、绿泥石和伊-蒙混层矿物。黄土高原不同层位和地点的黄土中粘土矿物相对含量有差别,但种类相同,并且粘土矿物种类和粘土矿物结晶度及相对含量对气候有指示意义(Ji *et al.*, 2004)。然而,一般粘土矿物颗粒细小,成分复杂,用常规的 XRD 和光学显微镜等手段对成土过程中形成的低含量的纳米粘土矿物无法识别。随着分析技术和仪器进步,对黄土中自生粘土矿物种类、粘土矿物组合和古气候关系有了新认识(陈天虎等, 2004, 2005)。由于坡缕石具有特殊且易于识别的形态,本文采用高分辨透射电镜(HRTEM)和场发射扫描电镜(FE-SEM),对黄土高原中部灵台剖面中具有干-暖环境指示意义的粘土矿物坡缕石进行了原位观察研究,了解坡缕石在剖面中分布,通过该矿物在剖面中分布特点为红粘土向黄土-古土壤古气候演化提供新的矿物学证据。

1 灵台剖面特征和样品分析方法

灵台剖面位于甘肃灵台县南 13 km 的任家坡村,该区年均温 8.8℃,年均降雨量 650 mm。该剖面完整记录了晚第三纪以来东亚季风演化历史,是一个较为完整的剖面。剖面厚 300 m 左右,其中上部为厚约 170 m 的黄土-古土壤序列,由 33 个 L1~L33 和 S0~S32 黄土和土壤相间的沉积成壤旋回构成,下伏厚约 130 m 的晚第三纪红粘土,不整合上覆于第三纪红色砂岩之上(Ding *et al.*, 1999)。黄土-古土壤序列最老黄土层 L33 底界为红粘土顶层,整个红粘土沉积由 7 个大的沉积-成壤旋回构成,每个大的沉积或成壤旋回内又有 10~

20 个不等的小的沉积-成壤旋回(Sun *et al.*, 1998a),显示在稳定气候环境下存在小的气候波动。红粘土沉积-成壤旋回频率显著小于黄土-古土壤的高频振荡。在 Gauss 正极性和 Gilbert 负极性分界处,即约 200 m (199.72 m) 处,对应年代为约 3.6 Ma (3.58 Ma),红粘土磁化率急剧升高,显著高于该深度以下红粘土的磁化率,并且振荡频率向黄土趋近(An *et al.*, 1999; Ding *et al.*, 1999)。

从灵台剖面红粘土顶部至底部,对 7 个大的沉积-成壤旋回中的典型红粘土样品,以及黄土-古土壤序列中每层黄土和古土壤样品进行了高分辨透射电镜和场发射扫描电镜观察,对样品中的坡缕石分布进行了研究。高分辨透射电镜在美国新墨西哥大学地球与行星科学系电镜室完成,使用 JE-OL2010 型透高分辨射电子显微镜,带有 ISIS X 射线能谱分析系统,用于获得 TEM 图象、电子衍射(SAED)和能谱分析成分(EDS)。透射电镜研究采用超声波分散水悬浮法制样(Chen *et al.*, 2003)。场发射扫描电镜在中国科学技术大学结构中心扫描电镜室完成,仪器型号 JSM_6700F。XRD 在合肥工业大学化学与工程学院实验中心粉晶 X 射线衍射室完成, D/MAX_RB 型 X 射线衍射仪,铜靶,电压 40 kV,电流 100 mA,扫描速度 4°/min。

2 黄土-红粘土序列中坡缕石分布特征

坡缕石是链层状镁铝硅酸盐粘土矿物,具有特殊纤维形态。坡缕石的直径一般为 20~50 nm,长度不等,从几十纳米到几个微米。由于坡缕石等粘土矿物颗粒细小,光学显微镜下无法鉴别,即使用传统的扫描电镜,由于受到分辨率的限制,要得到清晰的单根坡缕石晶体图像也比较困难。同样,由于坡缕石等自生粘土矿物结晶度低,XRD 分析难以发现这类自生矿物的存在。只有使用场发射扫描电镜和透射电镜,才能在高空间分辨率下准确鉴别坡缕石等粘土矿物。在所有的粘土矿物中,海泡石、伊利石、埃洛石、蛇纹石可以具有类似坡缕石的晶体形态,但是,它们在成分上与坡缕石都有明显的差别。海泡石、蛇纹石属于镁硅酸盐,基本不含铝;伊利石、埃洛石属于铝的硅酸盐或铝的铝硅酸盐,基本不含镁。利用透射电镜在高空间分辨率下的电子能谱成分分析可以快速、准确鉴别坡缕石,即使只有 0.5% 含量也可以很容易鉴别出来。透射电镜观察结果见图 1。单根坡缕石晶体直径 20~30 nm。透射电镜研究结果还表明在黄土-红粘土序列中不存在海泡石、蛇纹石、埃洛石,而黄土-古土壤中伊利石主要呈磨圆或不规则片状,纤维状晶体很少见。

另外,研究发现黄土-古土壤中广泛分布纳米棒状方解石类似于坡缕石的形态(陈天虎, 2005)。但是系统的电镜鉴别发现,虽然纳米棒状方解石直径也在 40 nm 左右,但它们的单晶形态、集合体形态、成分、结构都与坡缕石不同。

扫描电镜观察显示坡缕石分布在红粘土的粒间空隙或呈

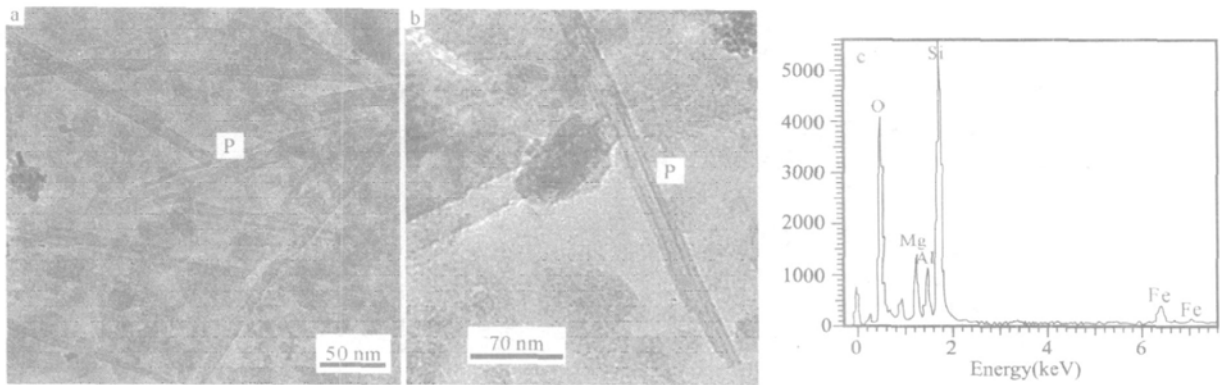


图 1 灵台红粘土中坡缕石透射电镜图像和能谱图(P—坡缕石)
 Fig. 1 TEM image and EDS of palygorskite in red clay of Lingtai section (P—palygorskite)

毡状分布,坡缕石晶体常平行连生呈现束状排列,并且晶束普遍弯曲缠绕,呈现交织状排列(图 2)。高放大倍数图像中可以观察到坡缕石沿片状伊蒙矿物边缘生长,或整个晶片基本由坡缕石组成(图 3)。FE_SEM 高分辨图像不仅清晰的揭示出红粘土中的坡缕石是自生成因,而且直接观察到伊-蒙矿物向坡缕石转化的过程(图 3b)。

根据 TEM 和 FE_SEM 对灵台红粘土-黄土-古土壤剖面中代表样品观察结果,灵台剖面中坡缕石的分布有如下规律:

- (1) 在约 170 m 厚的黄土-古土壤沉积序列中,没有坡缕石出现,在该序列中出现的棒状矿物是方解石。
- (2) 坡缕石是红粘土中广泛出现的粘土矿物,在 XRD 图上坡缕石的最强特征衍射峰(1.04 nm)并不显著,即使在小

于 2 μ m 粒级的 XRD 图上也是如此(图 4),原因是坡缕石颗粒细小,结晶度低,基体吸收系数大,导致衍射峰弱化(Chen *et al.*, 2004; 陈天虎等, 2003)。

(3) 在近 130 m 厚的红粘土中,坡缕石并不是在所有层位中存在。大约从 191 m 深度处到红粘土顶部(170 m 处)不存在坡缕石,但偶见零星分散的棒状方解石; 200 m 深度至红粘土底部,坡缕石广泛存在,在 FE_SEM 下观察到纳米尺度的矿物大多数是纤维状的坡缕石; 191~ 200 m 这一深度范围是一过渡部位,少见或没有坡缕石,同时也未见到棒状方解石。

(4) 整个剖面中坡缕石仅在红粘土中出现。

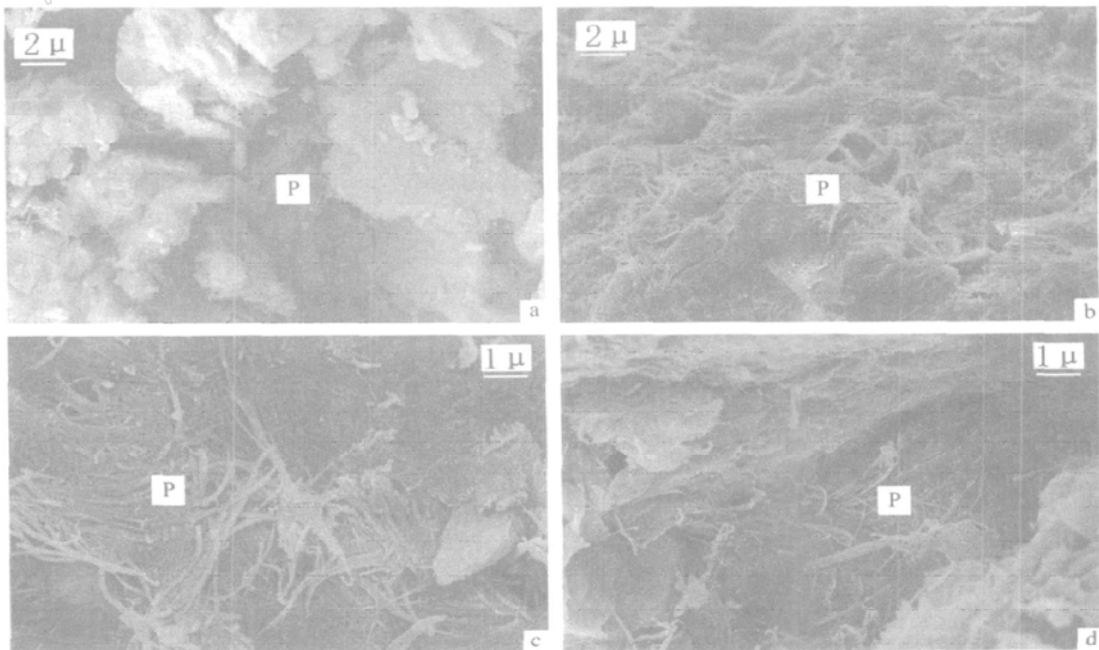


图 2 灵台红粘土中坡缕石的场发射扫描电镜图像(P—坡缕石)
 Fig. 2 FS_SEM images showing distribution characteristics of palygorskite in red clay of Lingtai section (P—palygorskite)

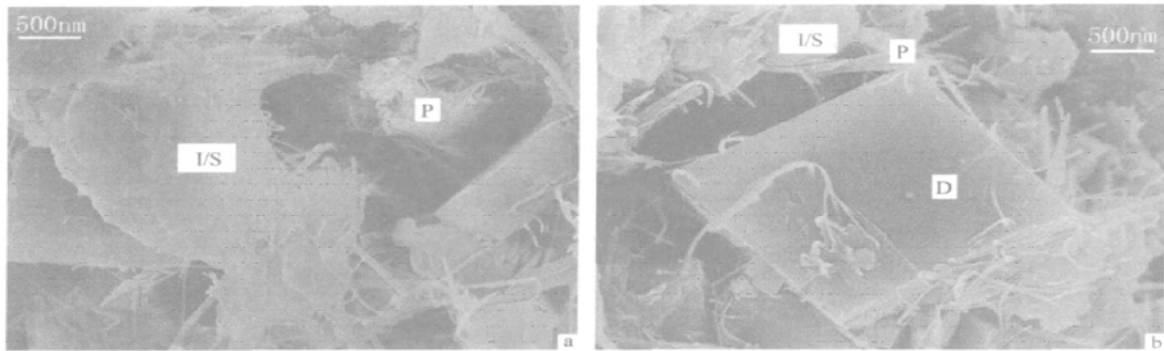


图3 显示坡缕石形成机制的场发射扫描电镜图像

Fig. 3 FS-SEM images showing genetic relationship between palygorskite and smectite

P—坡缕石; I/S—伊利石-蒙托石混层矿物; D—白云石

P—palygorskite; I/S—mixed layer illite-smectite; D—dolomite

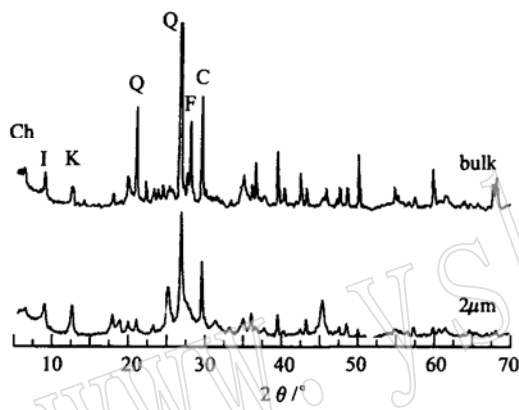


图4 含坡缕石的红粘土 XRD 图谱

Fig. 4 XRD pattern of palygorskite-bearing red clay in

Lingtai section

Ch—绿泥石; I—伊利石; K—高岭石; Q—石英; F—长石; C—方解石;

bulk—红粘土全样; 2 μm—红粘土全样中粒径小于 2 μm 的部分

Ch—chlorite; I—illite; K—kaolinite; Q—quartz; F—feldspar;

C—calcite; bulk—bulk sample of red clay; 2 μm—less than

2 μm grain-sized section in bulk sample of red clay

3 坡缕石分布与古气候

红粘土和黄土-古土壤序列最为显著区别在于,红粘土被认为是由红色黄土和红色古土壤组成的古土壤复合体,而黄土则是红色古土壤和黄色或浅黄色黄土交替沉积的地质体。黄土-古土壤序列的粒度和磁化率作为东亚冬、夏季风替代性指标已经被广泛应用和对比。然而红粘土的粒度在剖面上较均一,变化小(Ding *et al.*, 1999),磁化率阶段性增加或减小,仅在红粘土上部陡增,到顶部接近于黄土(Liu *et al.*, 2003; 安芷生等, 2000)。从颜色看,红粘土成壤强度应大于黄土-古土壤,但磁化率低于古土壤。因此,黄土-古土壤

序列和红粘土应是两种气候背景下沉积物已得到共识,前者被认为是冰期干-冷气候和间冰期暖-湿环境交替作用的产物(Evans and Heller, 1994),而后者则被认为是连续暖-湿大背景下小幅波动气候下的沉积物(Liu *et al.*, 2003; 薛祥煦等, 2003)。虽然红粘土是在整体暖湿稳定的大气候背景下沉积,但在 3.6~3.2 Ma,由于青藏高原隆升和全球冰量影响,使得亚洲内陆干旱加剧,东亚季风由红粘土沉积早中期的暖湿夏季风占优势向晚期的冬、夏季风同增长的环境演变,从而使得红粘土粉尘通量、沉积速率和磁化率都显著增加(Sun *et al.*, 2002; An *et al.*, 1999; 曹军骥等, 2003)。很显然,在红粘土沉积晚期东亚季风发生了重大转型,3.6~3.2 Ma应是一个重要分界年代。

坡缕石是典型的干-暖环境标志矿物(Singer and Norrish, 1974; Khademi and Mermut, 1999; 陈天虎等, 2004),它在灵台剖面上的分布是红粘土沉积晚期这一古气候转型的重要指示矿物。在 191 m 深度以上的样品中没有坡缕石存在,而 200 m 深度以下的样品中坡缕石广泛存在。根据磁性地层研究成果(Sun *et al.*, 1998a; 安芷生等, 2000),结合标准极性柱的年龄界限控制点,用线性内插法计算出 191 m 和 200 m 对应年龄分别为 3.2 Ma 和 3.6 Ma。从坡缕石在红粘土的广泛分布到少量存在直至完全消失,说明 3.6 Ma 之前、3.6~3.2 Ma 以及 3.2 Ma 以后古环境性质显著不同。

研究表明,坡缕石是干-暖环境标志的粘土矿物,其形成需要富 Mg 孔隙水(Chen *et al.*, 2004; Worden and Morad, 2003)。3.6 Ma 之前的红粘土中坡缕石广为存在,说明红粘土沉积古气候以干-暖气候为主。但红粘土沉积期的干旱特性是由于高温使得蒸发量大于降雨量,从而使得气候干燥,完全有别于第四纪黄土沉积期低降雨量造成的干燥特点。由于红粘土沉积时降雨量大,因而红粘土的化学风化强烈,成壤强度大,红粘土显示比黄土-古土壤序列中的古土壤更红的颜色。以强降雨量和强蒸发量为组合的长干短湿的干-暖气候环境为红粘土沉积期主要气候特点(孙有斌等, 2000; Han *et al.*, 2002)。3.6~3.2 Ma,其间古气候既非典型的红

粘土形成时的干-暖气候特点,也非第四纪黄土-古土壤沉积期的典型东亚冬、夏季风分明的气候特点,应为介于以上两种典型古气候之间的过渡气候。3.2 Ma 以来,典型的东亚冬、夏季季风形成,干-冷的冬季风和暖-湿夏季风交替,说明古气候总体变得干冷。但 3.2~ 2.6 Ma 之间的红粘土红色比 2.6 Ma 以来的古土壤明显,说明红粘土沉积时的降雨量应大于第四纪黄土沉积期。

坡缕石在红粘土中的分布特点显示了在 3.6 Ma 前后,东亚古季风格局发生了重大转型,该矿物反映的信息与红粘土磁化率、风尘通量和沉积速率研究结果相一致。可见,3.6 Ma 是东亚古季风演化史上的重要时代,犹如红粘土底界年龄标志黄土高原风尘沉积的开始和亚洲内陆干旱开始。坡缕石的分布也反映了这一气候转型并非快速过程,而是渐变的。

根据灵台风尘序列中坡缕石分布特点,将红粘土-黄土-古土壤沉积古气候环境以时间先后为演化序列概括为:3.6 Ma 之前,以强降雨强蒸发为显著特征的长干短湿的干-暖气候为主,气候平稳无大的波动;3.6~ 3.2 Ma,干-暖气候向干-冷气候的过渡,气候特征不典型;3.2~ 2.6 Ma,以干-冷冬季风和暖-湿夏季风气候分明的古气候交替为总特征,但气候总体变得干-冷;2.6 Ma 以来,古气候特征类似于前者,但干旱和寒冷程度加剧,应大于前者。

4 结论

根据黄土高原灵台风尘序列自生纳米矿物坡缕石扫描电镜和透射电镜观察结果,得出如下结论:

(1) 灵台剖面中自生坡缕石仅大量存在于 3.6 Ma 以前的红粘土中,说明东亚古季风在 3.6 Ma 前后发生了重大转型,古气候环境由干-暖向干-冷转化,说明自 7.0 Ma 黄土高原风尘沉积开始,标志亚洲内陆干旱的开始,在 3.6 Ma 干旱进一步加剧;

(2) 红粘土中自生坡缕石大量存在,指示了红粘土沉积期是以强降雨强蒸发的长干短湿的干-暖沉积环境为主。

References

- An Z S, Kukla G, Porter S C, *et al.* 1991. Late Quaternary dust flow on the Chinese loess Plateau [J]. *Catena*, 18: 125~ 132.
- An Z S, Liu T S, Lu Y C, *et al.* 1990. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China [J]. *Quaternary International*, 7/8: 91~ 95.
- An Zhisheng, Sun Donghuai, Chen Mingyang, *et al.* 2000. Red clay sequences in Chinese loess plateau and recorded paleoclimate events of the late Tertiary [J]. *Quaternary Sciences*, 20(5): 435~ 446 (in Chinese with English Abstract).
- An Z S, Wang S M, Wu X H, *et al.* 1999. Eolian evidence from the Chinese loess Plateau: the onset of the late Cenozoic great glaciation in the northern hemisphere and Qinghai-Xizang plateau uplift forcing [J]. *Science in China (Series D)*, 42(3): 258~ 271.
- Balsam W, Ellwood T B and Ji J F. 2005. Direct correlation of the marine oxygen isotope record with the Chinese Loess Plateau iron oxide and magnetic susceptibility records [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 221: 141~ 152.
- Cao Junji, Zhang Xiaoye, An Zhisheng, *et al.* 2003. Variations of dust flux in the loess plateau during 6.5~ 2.2 MaBp: Implications for Asian winter monsoon evolution and Asian aridity [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 23(3): 97~ 101 (in Chinese with English Abstract).
- Chen J, An Z S, Wang Y J, *et al.* 1999. Distribution of Rb and Sr in the Luochuan loess-paleosol sequence of China during last 800ka [J]. *Science in China (Series D)*, 28(6): 225~ 232.
- Chen Tianhu, Chen Jun, Ji Junfeng, *et al.* 2005. Nanometer investigation on the Luochuan loess: nano-fiber calcites [J]. *Geological Review*, in press (in Chinese with English Abstract).
- Chen T H, Xu H F, Ji J F, *et al.* 2003. Formation mechanism of ferromagnetic minerals in loess of China: TEM investigation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(20): 2 259~ 2 266.
- Chen Tianhu, Xu Huifang, Lu Anhuai, *et al.* 2003. Interaction between smectite and palygorskite in the colloid system of aqueous suspension. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(4): 313~ 318 (in Chinese with English abstract).
- Chen T H, Xu X C, Yue S C. 2004. Nanometer Mineralogy and Geochemistry of Palygorskite Clays in the Border of Jiangsu and Anhui Provinces [M]. Beijing: Science Publishing House, 135~ 139 (in Chinese).
- Chen T H, Xu H F, Lu A H, *et al.* 2004. Direct evidences of transformation from smectite to palygorskite: TEM investigation [J]. *Science in China (Series D)*, 47(11): 985~ 994.
- Ding Z L, Sun J M, Liu T S, *et al.* 1998a. Wind-blown origin of the Pliocene Red Clay formation in the central Loess Plateau, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 135~ 143.
- Ding Z L, Sun J M, Yang S L, *et al.* 1998b. Preliminary magnetostratigraphy of a thick eolian red clay-loess sequence at lingtai, the Chinese Loess Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 25(8): 1 225~ 1 228.
- Ding Z L, Xiong S F, Sun J M, *et al.* 1999. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~ 7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at lingtai, Loess Plateau, north-central China and the implication for paleomonsoon evolution [J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 152: 49~ 66.
- Ding Z L, Yang S L, Sun J M, *et al.* 2001. Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess Plateau and implication for long-term Asian monsoon evolution in the last 7.0 Ma [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 185: 99~ 109.
- Evans M E and Heller F. 1994. Magnetic enhancement and palaeoclimatic: study of a loess/paleosol couplet across the Loess Plateau of China [J]. *Geophys J Int*, 117: 257~ 264.
- Han JM, Fyfe WS, Gu ZY. 2002. Assessment of the palaeoclimate during 3.0~ 2.6 Ma registered by transition of Red Clay to loess-

- palaeosol sequences in central North China [J]. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 185: 355~ 368.
- Ji Junfeng, Chen Jun, Liu Lianwen, *et al.* 1999. Chemical weathering of chlorite in Luochuan loess- paleosol sequence and susceptibility enhancement[J]. *Progress in Natural Science*, 9(7): 619 (in Chinese).
- Ji J F, Chen J and Lu H Y. 1999. Illite genesis of the Luochuan loess- paleosol sequence in Shanxi province: TEM evidence [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(19): 372~ 375.
- Ji J F, Chen J, Balsam W, *et al.* 2004. High resolution hematite/goethite records from Chinese loess sequences for the last glacial- interglacial cycle: Rapid climatic response of the East Asian Monsoon to the tropical Pacific [J]. *Geophysical Research Letters*, 31(3): L03207, doi: 10.1029/ 2003GL018975.
- Kalm V E, Rutter N W and Rokosh C D. 1996. Clay minerals and their paleoenvironmental interpretation in the Baoji loess section, Southern Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 27: 49~ 61.
- Kemp R A, Derbyshire E and Meng X M. 1997. Micromorphological variation of the S1 paleosol across northwest China [J]. *Catena*, 31: 77~ 90.
- Kemp R A, Derbyshire E and Meng X M. 2001. A high resolution micromorphological record of changing landscapes and climates on the western Loess Plateau of China during oxygen isotope stage 5 [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 170: 157~ 169.
- Khademi H and Mermut A R. 1999. Source of palygorskite in gypsiferous arid soils and associated sediments from central Iran [J]. *Clay Minerals*, 33(4): 561~ 578.
- Kukla G. 1987. Loess stratigraphy in central China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 6: 191~ 219.
- Kukla G and An Z S. 1989. Loess stratigraphy in central China [J]. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 72: 203~ 225.
- Liu X M, Rolph T, An Z S, *et al.* 2003. Paleoclimatic significance of magnetic properties on the red clay underlying the loess and paleosols in China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 199: 153~ 166.
- Porter S C and An Z S. 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. *Nature*, 375: 305~ 308.
- Singer A, Norrish K. 1974. Pedogenic palygorskite occurrences in Australia [J]. *American Mineralogist*, 59(5~ 6): 508~ 517.
- Sun D H, An Z S, Shaw J, *et al.* 1998b. Magnetostratigraphy and palaeoclimatic significance of the late tertiary red clay sequences in the Chinese Loess Plateau [J]. *Geophysical Journal International*, 134: 207~ 212.
- Sun D H, Shaw J, An Z S, *et al.* 1998a. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 25(1): 85~ 88.
- Sun Y B and An Z S. 2002. History and variability of Asian interior aridity recorded by eolian flux in the Chinese Loess Plateau during the past 7Ma [J]. *Science in China (Series D)*, 45(5): 420~ 429.
- Sun Youbin, Zhou Jie and An Zhisheng. 2000. Geochemical characteristics of calcareous nodules in Lingtai eolian deposits [J]. *Geochemistry*, 29(3): 277~ 282 (in Chinese with English Abstract).
- Worden RH and Morad S. 2003. Clay mineral cements in oil field sandstones [A]. *International Association of Sedimentologists [C]. Blackwells, Oxford, UK. Special Publication No 34, 509.*
- Xue Xiangxi and Zhao Jingbo. 2003. Micromorphological characteristics and implications of Neogene red clay at Xunyi, Shanxi Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 448~ 451 (in Chinese with English Abstract).
- Zhang Yongshuang and Qu Yongxin. 2004. Quantitative research on clay mineral composition of the Malan loess from the loess plateau in China [J]. *Geological Review*, 50(5): 530~ 537 (in Chinese with English Abstract).
- Zhao Liang, Ji Junfeng, Chen Jun, *et al.* 2003. Chemical weathering of chlorite in Chinese loess paleosol sequences in the last 130ka and climate change [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(2): 163~ 168 (in Chinese with English Abstract).
- Zhu R X, Wu H N, Li C J, *et al.*, 1995. Magnetic property of Chinese loess and its paleoclimate significance [J]. *Science in China (Series D)*, 38(2): 238~ 244.

附中文参考文献

- 安芷生, 孙东怀, 陈明扬, 等. 2000. 黄土高原红粘土序列与晚第三纪的气候事件 [J]. *第四纪研究*, 20(5): 435~ 446.
- 曹军骥, 张小曳, 安芷生, 等. 2003. 最近 6.5~ 2.2 Ma 黄土高原粉尘通量变化及其指示的东亚冬季风演化和亚洲干旱化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 23(3): 97~ 101.
- 陈天虎, 陈骏, 季峻峰, 等. 2005. 洛川黄土纳米尺度观察: 纳米棒状方解石 [J]. *地质论评*, 51(6): 713~ 718.
- 陈天虎, 徐晓春, 岳书仓. 2004. 苏皖凹凸棒石黏土纳米矿物学及地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 135~ 139.
- 陈天虎, 徐惠芳, 鲁安怀, 等. 2003. 水悬浮体系中蒙脱石和凹凸棒石相互作用及其意义 [J]. *矿物学报*, 23(4): 313~ 318.
- 季峻峰, 陈骏, 刘连文, 等. 1999. 洛川黄土中绿泥石的化学风化与磁化率增强 [J]. *自然科学进展*, 9(7): 619~ 623.
- 孙有斌, 周杰, 安芷生. 2000. 灵台风尘堆积中钙结核的地球化学研究 [J]. *地球化学*, 29(3): 277~ 282.
- 薛祥熙, 赵景波. 2003. 陕西旬邑新近纪红粘土微形态特征及其意义 [J]. *沉积学报*, 21(3): 448~ 451.
- 张永双, 曲永新. 2004. 黄土高原马兰黄土黏土矿物的定量研究 [J]. *地质论评*, 50(5): 530~ 537.
- 赵良, 季峻峰, 陈骏, 等. 2003. 最近 13 万年来黄土高原黄土剖面中绿泥石的化学风化与古气候变迁 [J]. *矿物学报*, 23(2): 163~ 168.