

文章编号: 1000-0550(2009)06-1184-07

再搬运红粘土的发现及地质意义^①

李建星^{1,2} 岳乐平¹ 徐永¹ 孙勃¹ 孙露¹ 王晓勇² 白斌^{1,3}

(1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室 西安 710069

2. 中国地质调查局西安地质调查中心 西安 710054 3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100086)

摘要 在位于吕梁山西部山前山西柳林卫家洼红粘土层下部发现了一套特殊的水成砂砾层, 组成该砂砾石层的碎屑主要是红粘土团块及钙质结核。沉积学的研究表明红粘土和钙质结核碎屑具有不同程度分选性和磨圆度, 作为碎屑的钙质结核不再具有不规则的“生姜”状外形而呈典型的圆状或次圆状, 这是经过搬运碎屑的典型特征。垂向上自下向上变细的沉积序列, 部分层位中埋藏有动物化石都是典型水成堆积物的特征。磁性地层学研究表明其形成于 8 Ma 前。这种特殊水成堆积物的发现可为红粘土的成因解释提供新资料。

关键词 红粘土 古地磁测年 吕梁山 柳林

第一作者简介 李建星 男 1978 年出生 工程师 第四纪地质学 E-mail: lijianxing2005@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

自从 20 世纪 90 年代中晚期以来, 众多的学者意识到黄土—古土壤序列下伏的红粘土同样具有记录古气候信息的特征^[1-9], 从而将研究古气候演变的时间下限由原来的第四纪底界一直下延到 8 Ma^[10-15], 即在黄土高原黄土—古土壤序列之下存在有一红土高原^[16-17]。但是这种风尘堆积说不能解释红粘土中为何会埋藏有大量的三趾马动物化石^[18-19], 因此红粘土的成因尚有残积^[20]、水成^[18-19]、早期水成, 晚期风成^[20]、早期与地下水作用有关, 晚期风成^[21] 等不同认识。风成成因的主要阵地在于红粘土在诸多方面与其上覆的黄土—古土壤序列具有相似性^[22-24], 水成成因则在部分层位得到了动物化石埋藏学^[18-19]、磁组构^[25]、和矿物颗粒形态^[26] 的支持。深究其分歧所在发现风成成因和水成成因并非针对同一层位得出不同的结论, 而是将某一层位得出的结论应用于其余所致, 磁组构研究就说明这一点^[25]。从这种意义上讲“早期水成, 晚期风成^[20]、早期与地下水作用有关^[21]”显然比单纯的风成成因和水成成因更为科学。但是往往发现化石的层位并非总是位于剖面底部, 而是各个层位均有发现, 现有各种成因认识都无法解释这种现象。虽然化石埋藏学^[18-19] 和磁组构^[25] 研究认为这些层位为典型的水成堆积, 但一

直缺少沉积学证据支持, 本次野外工作中新发现了一套特殊的水成堆积物, 基于对其沉积学研究的基础上, 结合古地磁定年, 对红粘土的成因作出新的讨论。

1 剖面组成及沉积学特征

柳林剖面位于吕梁山西麓晋陕谷地中, 行政区划为山西省柳林县高家沟乡卫家洼村(图 1) 剖面距离吕梁山的主峰数十千米, 剖面控制的红粘土及水成堆积物厚度约 100 m, 下部未见底, 其上覆有典型的黄土—古土壤序列。总体上剖面中显示了上部风尘堆积(约占 60%) 下部水成堆积(约占 40%) 的特征。

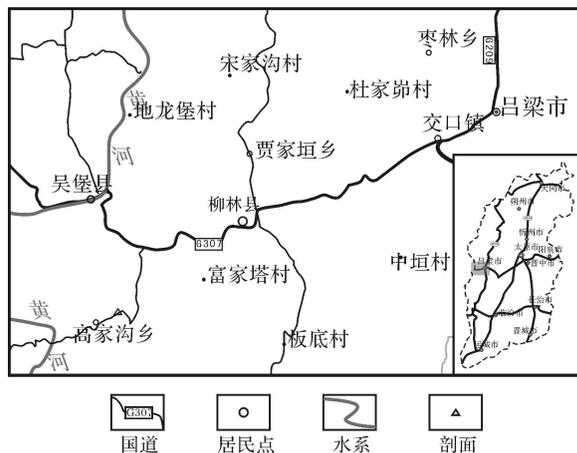


图 1 研究区交通位置图

Fig 1 The location of the study area

^① 国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2003CB214607)、教育部长江学者和“油气盆地”创新团队发展计划项目(编号: RT0559)、国家自然科学基金项目(批准号: 40372202)、中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(批准号: SKLLQG0511)和中国地质调查局项目(编号: 20022307, 1212010610313)共同资助。
收稿日期: 2008-11-18 收修改稿日期: 2009-01-04

上部风尘堆积物为典型红粘土及钙质结核层,局部可见少量的水成砂砾层,下部水成堆积物根据碎屑物是否固结成岩以及物源的差异可以分为两大类:其一碎屑为已经固结成岩的灰岩、砂砾岩,是东部山体隆升的产物,其二碎屑为早期周缘堆积尚未固结的红粘土与钙质结核,总体上前者位于后者的上部。

上部风成段:主要为红粘土及钙质结核,局部夹有少量砂砾石层,厚度较大且以红粘土层厚度大于钙质结核层为特征。钙质结核的粒径、密集程度差异较大。靠上部钙质结核层较少且粒径较小,一般为 5~10 mm,分布较为密集,中下部钙质结核粒径较大,一般可为 30~80 mm,外形极不规则,分布较为稀疏。局部层位仅零星分布有钙质结核。红粘土单层较为均一,自上而下颜色略微变浅,土壤的团粒结构、铁锰胶膜的垂向分布不具规律性。不同的红粘土及钙质结核层可能是不同气候环境的产物。

下部水成堆积物:主要由水成堆积物组成,仅局部夹有红粘土层。前已述及,根据碎屑是否固结成岩可以将水成堆积物分为两类,已经固结成岩的碎屑组成的堆积物位于尚未固结的上部。碎屑为固结成岩的水成堆积物根据碎屑粒级大小可以分为砾砂泥三个级别。砾岩、砂岩与泥岩三者在上为过渡关系,垂向上组成总体自下而上变细的沉积序列,其中砾岩中发育叠瓦构造和递变层理,向上过渡的砂砾岩,发育有平行层理和交错层理,顶部泥岩中可见有水平纹层和泥裂,自下而上组成的沉积层序与冲击扇相的沉积层序相同,为冲积扇相堆积,是东部吕梁山隆升的产物。

碎屑为尚未固结成岩水成堆积物根据碎屑组成又可细分为三种不同的沉积序列。

序列 I 中碎屑全部为红粘土颗粒,粒径一般为 1~3 mm,砾石占碎屑总量 40%~50%,砾石均成球状,磨圆度高。小于 2 mm 的碎屑也都呈球状,磨圆度高,分选性好,常可见由粗粒的砾石与较细粒的碎屑分别成层分布组成的自下而上由粗变细的基本层序(图版 I-2A 段为粗粒, B 段为细粒, C 为下一次粗粒旋回)。碎屑之间的充填物也是红粘土,碎屑的红粘土和填隙物的红粘土在物质上并无大的差异,其固结程度也基本相同。野外新开挖的剖面中红粘土的碎屑结构明显,剖面风干后需要仔细辨认方可识别其碎屑结构。碎屑组成及沉积特征表明该序列是周缘红粘土经过相对远距离搬运的产物。

序列 II 碎屑主要为钙质结核,少量红粘土团块;

碎屑中粒径达砾石钙质结核与红粘土团块占碎屑物总量的 50%~60%,填隙物是较为细小的红粘土。其中钙质结核砾石占砾石总量的 50%~60%,粒径大小不一,为 2~10 mm 以 3~5 mm 者居多。砾石呈圆一次圆状,磨圆度较高(图版 I-3),不再具有不规则的生姜外形(未经搬运的钙质结核因外形与生姜相似而俗称“料姜石”,图版 I-4),局部甚至具有叠瓦排列的特征,显然是经水流搬运的产物。红粘土砾石与钙质结核砾石相比粒径较小,一般为 2~3 mm 且多为棱角状,充填在钙质结核砾石之中,两种不同类型的砾石混杂在一起指示其沉积的水动力较强且该地早期已有红粘土和钙质结核堆积。垂向上常可见自下而上由粗变细的沉积旋回,在这种沉积旋回中钙质结核是明显的标志层(图版-1)。序列 III 是以红粘土为主兼有钙质结核碎屑的沉积序列;这种沉积序列中粒级达砾石的组分较少,一般小于 10%。略具磨圆的红粘土碎屑与钙质结核无序的堆积在一起,显示搬运距离较短水动力较强的特征。

2 古地磁记录

作者在山西柳林卫家洼剖面间隔 5 cm 采样,剖面厚约 100 m 采样剖面由 3 个相邻的采样段组成,各采样剖面由灰绿色泥岩层和砂砾石层作为标志层对比衔接,共采集古地磁样品 1 680 个,在部分粗粒堆积地段及松散堆积层中未采集古地磁样品。样品加工后选择其中 1/4 在西北大学大陆动力学国家重点实验室古地磁室完成测试分析,在极性变化频繁部位加密到连续测试,共测试样品 618 个。测量结果显示剖面共记录了 10 个清晰的正极性段、9 个清晰的负极性段和两个不完整的负极性段(图 2)。

其中第一层水成堆积物以及其上的风尘堆积(静乐组)记录了 4 个完整正极性段和 3 个完整负极性段,与古地磁年表中 C3n 1n、C3n 2n、C3n 3n、C3n 4n 及其间的负极性带对比,下部还跨及 C3r 负极性带的部分,年龄约为 4.18~5.60 Ma。中部红粘土夹水成堆积物带(保德组)记录了 5 个清晰的正极性段和 4 个清晰的负极性段,与古地磁年表中的 C3An 1n—C4n 1r 之间的极性带对比,其上部记录了 C3r 负极性带下半部分,下段记录了 C4n 2n 正极性带的上半部分,年龄约为 5.60~7.62 Ma。下部以水成堆积物为主体,夹有红粘土堆积(芦子沟组)记录了 1 个不完整正极性段和 1 个不完整的负极性段,即 C4n 2n 和 C4n 2r 的部分,年龄约为 7.6~8.1 Ma。

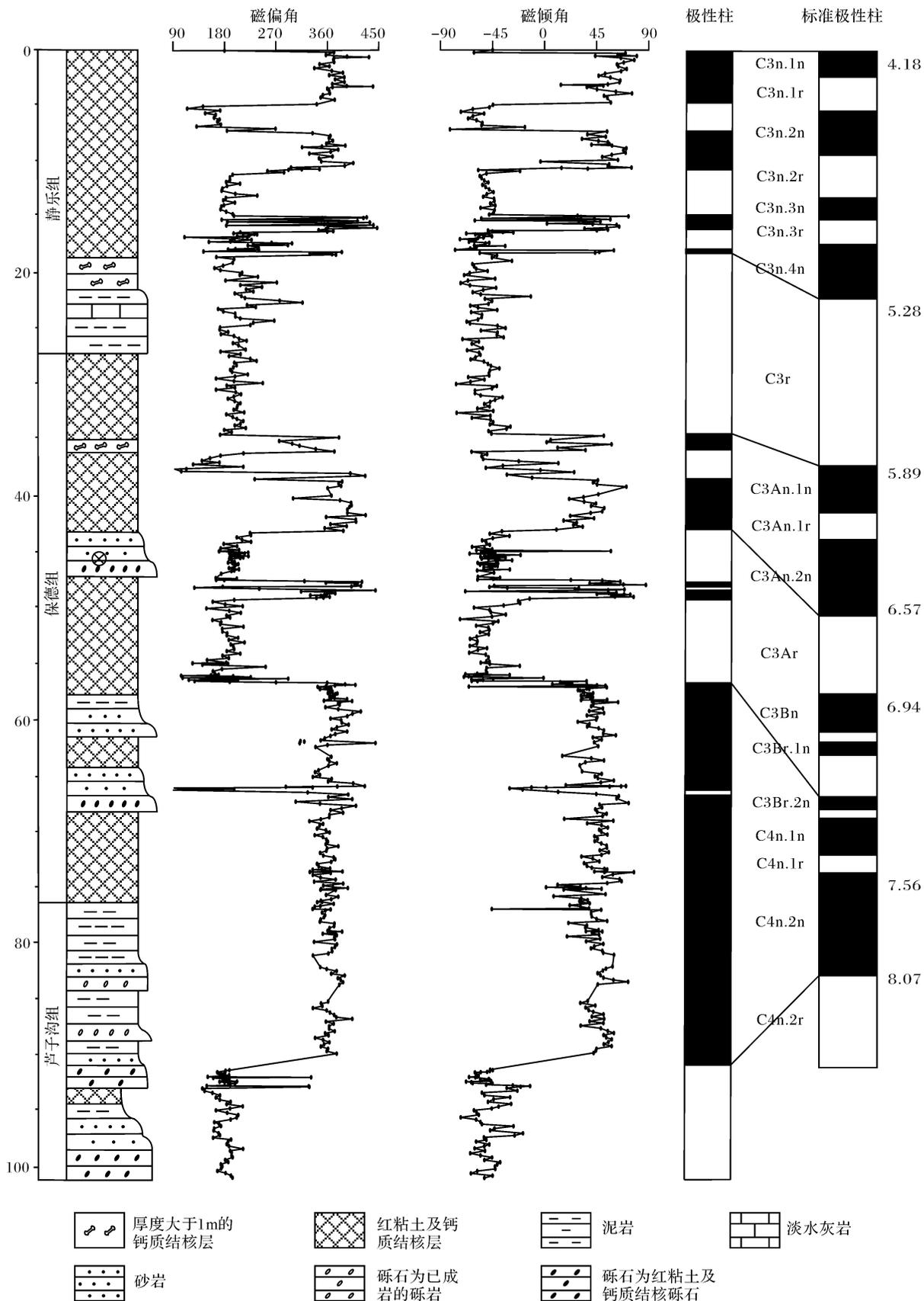


图 2 柳林剖面岩石地层与磁性地层柱

Fig 2 Lithostratigraphic and magnetostratigraphic columns at Liulin section

剖面中下段由于有过多的水成堆积物,且水成堆积物中的粗砾岩及松散砂层无法取样,可能漏掉了两个短暂的极性段,但总体为正极性段(C3Bn—C4n 2n)的特征保留,且由于其沉积速率远大于风成红粘土,所以中下部的极性柱与上部极性柱存在比例失调现象。在 C3Ar 负极性带中产 *Hipparion Samotherium* 可与保德剖面相应层位的古生物化石对应,另外 C3r C3An 2n C3Ar 几个较长的极性柱也为与标准极性柱对比提供依据。

古地磁定年结果表明卫家洼剖面的沉积速率差异很大(图 3)上部风尘堆积速率较低,3.1 Ma(4.2~7.3 Ma)内沉积约 60 m 厚度的沉积物;下部的沉积速率陡然增大,0.8 Ma(7.3~8.1 Ma)之内堆积了厚度可达 40 m 的堆积物。这与野外观测结果相同,上部的风尘堆积物源是远源的,其堆积速率较低;下部的水成堆积物物源主要来自于周缘,是近源快速堆积的产物,因此其堆积速率很高。剖面未见底,以该地区的平均基岩面作为沉积物的下界,剖面至少还有 50 m 厚的沉积物,以下部沉积物的沉积速率推断,该剖面的底界年龄至少可达 9.2 Ma(图 3)。

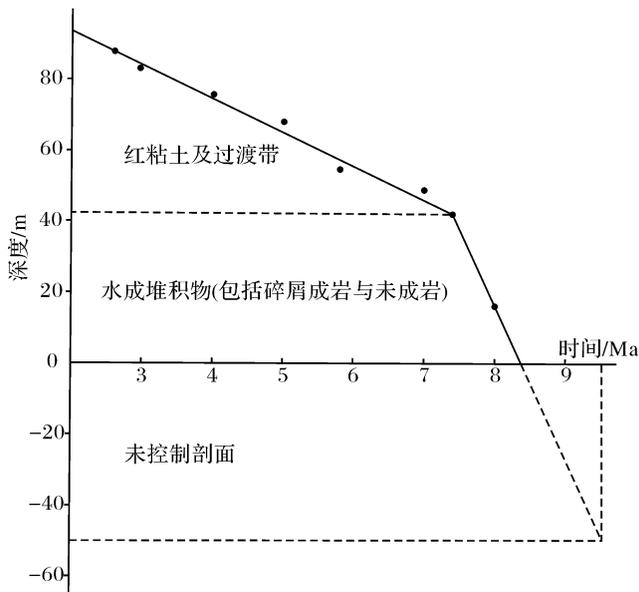


图 3 柳林剖面深度—时间关系

Fig 3 The relation of depth-time of Liulin section

3 讨论与结论

(1) 前已述及,红粘土的成因存在有多种认识,其差异主要来源于两个方面,其一在于不同认识是将不同层位得出的结论应用于其它层位而致;其二在于

对风尘堆积的定义差别而致。刘东生^[27]等强调黄土是风力搬运、未经次生扰动的粉砂质土状堆积物。Pye^[28]也强调黄土是“由风力搬运、以粉砂颗粒为主的气下沉积物”。虽然这两种定义不是针对红粘土而言的,但是对与黄土具有许多共同特征的红粘土同样适用。这两种定义中均强调在沉积过程中未经后期扰动,显然包括后期水流扰动作用,尹秋珍等认为经过改造的风尘堆积应具有特定意义,在恢复古气候过程中应注意避开这种层位^[29]。事实上,我们在定义经过水流搬运的花岗岩是沉积岩而不是火成岩,也是强调了后期改造作用。同理经过水流搬运的红粘土同样是水成堆积物而非风尘堆积。研究区发现的具有典型水成堆积序列并在该序列中发现了大量的三趾马动物化石更说明了这一点。红粘土诸多特性与黄土—古土壤序列相同而被认为风尘堆积,无可置疑。至于埋藏动物化石的“红粘土”,应是相邻地区红粘土经过水流搬运后的再沉积,不过在有的部位水流搬运后具有典型的沉积序列而有的部位这种特征不明显未被识别出来而已,磁组构各向异性的研究结果也与此一致^[25]。如果将经过搬运的红粘土与未经搬运的红粘土区分开来,则更容易理解红粘土的风成成因,同时也解释了风成成因不能解释的化石埋藏问题,从另一个方面印证了红粘土的风成成因。

(2) 远源的风尘堆积在平坦的、脱离了地表径流影响的区域堆积下来未接受后期水流的改造而成为典型的可记录古气候演变的红粘土;落在地势相对较低部位(未脱离了地表径流影响的区域)的红粘土则成为普通水成堆积物的物源之一。早期堆积的红粘土经过后期水流的搬运在地势相对较低的部位再堆积后,只能证明邻区脱离了地表径流影响的区域曾经有红粘土堆积。上部典型的红粘土是堆积在地势较高的部位未经后期改造,指示当时地势已抬升到一定的高度不再受周缘水流作用的影响。柳林剖面上下两分的特征说明在 8.1 Ma 之前,该区周缘曾经有红粘土堆积,后期的水流作用将红粘土搬运剥蚀堆积在剖面所在处,红粘土以碎屑形式出现,在 8.1~7.2 Ma 之堆积了代表吕梁山隆升的砂砾石层。7.2 Ma 之后该区地势由于吕梁山的隆升也随之抬升,脱离了地表径流的影响,堆积了典型的红粘土序列。

参考文献 (References)

- 1 Chen J, Chen Y, Liu LW, et al. Zr-Rb ratio in the Chinese loess sequences and its implication for changes in the east Asian winter mon-

- soon strength [J. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2006 70(6): 1471-1482
- 2 Ding Z L, Xiong S F, Sun J M, et al. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai, Loess Plateau, north-central China and the implications for paleomonsoon evolution [J. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 1999 152(1-2): 49-66
 - 3 Liu X M, Rolph T, An Z S, et al. Paleoclimatic significance of magnetic properties on the red clay underlying the loess and Paleosols in China [J. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 2003 199(1-2): 153-166
 - 4 Lu H Y, Vandenberghe J, An Z S. Aeolian origin and paleoclimatic implications of the "Red Clay" (North China) as evidenced by grain-size distribution [J. *Journal of Quaternary Science* 2001 16(1): 89-97
 - 5 Sun D H. Monsoon and westerly circulation changes recorded in the late Cenozoic aeolian sequences of northern China [J. *Global and Planetary Change* 2004 41(1): 63-80
 - 6 Sun D H, An Z S, Shaw J, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic significance of late Tertiary aeolian sequences in the Chinese Loess Plateau [J. *Geophysical Journal International* 1998 134(1): 207-212
 - 7 Sun J M. Nd and Sr isotopic variations in Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: implications for provenance change [J. *Earth and Planetary Science Letters* 2005 240(2): 454-466
 - 8 汶玲娟, 鹿化煜, 强小科. 新近纪黄土高原红黏土粒度和沉积速率的空间变化及其揭示的古大气粉尘传输动力 [J. *中国科学: D辑*, 2004 34(8): 739-747 [Wen Lingjuan, Lu Huayu. Plateau Neogene red clay particle size and sedimentation rate of change in space and atmospheric dust to reveal the ancient power transmission [J. *Science in China Series D* 2004 34(8): 739-747]
 - 9 郑洪波, 黄湘通, 刘锐, 等. 晚中新世以来亚洲季风阶段性演化的海陆记录 [J. *矿物岩石地球化学通报*, 2005 24(02): 103-109 [Zheng Hongbo, Huang Xiangtong, Liu Rui, et al. The evolution of the Asian monsoon since Late Miocene: evidence from the continental and oceanic sediments [J. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* 2005 24(02): 103-109]
 - 10 杨石岭, 侯圣山, 王旭, 等. 涇川晚第三纪红黏土的磁性地层及其与灵台剖面的对比 [J. *第四纪研究*, 2000 20(05): 423-434 [Yang Shiling, Hou Shengshan, Wang Xu, et al. Completeness and continuity of the late Tertiary red clay sequence in northern China: evidence from the correlation of magnetostratigraphy and pedostratigraphy between Jingchuan and Lingtai [J. *Quaternary Sciences* 2000 20(05): 423-434]
 - 11 Zhu Y M, Zhou L P, Mo D W, et al. A new magnetostratigraphic framework for late Neogene Hipparion Red Clay in the eastern Loess Plateau of China [J. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 2008 268(1-2): 47-57
 - 12 强小科, 安芷生, 李华梅, 等. 佳县红黏土堆积的磁学性质及其古气候意义 [J. *中国科学: D辑*, 2004 34(7): 658-667 [Qiang Xiaoke, An Zhisheng, Li Huamei, et al. Jiaxian accumulation of red clay of the nature of magnetism and its significance of the ancient climate [J. *Science in China Series D* 2004 34(7): 658-667]
 - 13 张云翔, 薛祥煦, 岳乐平. 陕西府谷老高川新第三纪"红层"的划分与时代 [J. *地层学杂志*, 1995 (03): 214-219 [Zhang Yunxiang, Xue Xiangxu, Yue Leping. Fugu, Shaanxi Loess Plateau Tertiary new "red bed" with the division of the time [J. *Journal of Stratigraphy* 1995 (03): 214-219]
 - 14 马玉贞, 吴福莉, 方小敏, 等. 黄土高原陇东盆地朝那红黏土 & 1~2.6 Ma 的孢粉记录 [J. *科学通报*, 2005 50(15): 1627-1635 [Ma Yuzhen, Wu Fuli, Fang Xiaomin, et al. Basin in eastern Gansu Loess Plateau step red clay & 1~2.6 Ma the pollen record [J. *Chinese Science Bulletin* 2005 50(15): 1627-1635]
 - 15 宋友桂, 李吉均, 方小敏. 黄土高原最老红黏土的发现及其地质意义 [J. *山地学报*, 2001 19(2): 104-108 [Song Yougui, Li Jijun and Fang Xiaomin. The oldest red clay in the Chinese Loess Plateau and its geological significance [J. *Journal of Mountain Research* 2001 19(2): 104-108]
 - 16 丁仲礼, 孙继敏, 杨石岭, 等. 灵台黄土-红黏土序列的磁性地层及粒度记录 [J. *第四纪研究*, 1998 (01): 86-94 [Ding Zhongli, Sun Jinmin, Yang Shiling, et al. Magnetostratigraphy and grain size record of a thick red clay-loess sequence at Lingtai, the Chinese Loess Plateau [J. *Quaternary Sciences* 1998 (01): 86-94]
 - 17 岳乐平, 李建星, 郑国璋, 等. 鄂尔多斯高原演化及环境效应 [J. *中国科学: D辑*, 2007 (S1): 16-22 [Yue Leping, Li Jianxing, Zheng Guozhang, et al. Ordos Plateau and the evolution of the environmental effects [J. *Science in China Series D* 2007 (S1): 16-22]
 - 18 张云翔, 弓虎军. 甘肃灵台上新世哺乳动物化石埋藏学 [J. *古生物学报*, 2003 42(03): 460-465 [Zhang Yunxiang, Gong Hujun. Taphonomy of Pliocene mammalian fossils from Lingtai, Gansu [J. *Acta Paleontologica Sinica* 2003 42(03): 460-465]
 - 19 张云翔, 薛祥煦. 甘肃武都龙家沟三趾马动物群化石的埋藏特点及该地区"三趾马红层"的成因 [J. *科学通报*, 1995 40(19): 1782-1784 [Zhang Yunxiang, Xue Xiangxu. Wudu Gansu Dragon Age Hipparion fauna fossils buried in the region and the characteristics of the "three red-toe horse" [J. *Chinese Science Bulletin* 1995 40(19): 1782-1784]
 - 20 Mo D W, Derbyshire E. The depositional environment of the late Pliocene "red clay", Jing-Le Basin, Shanxi Province, China [J. *Sedimentary Geology* 1991 70(1): 33-40
 - 21 Evans M E, Wang Y, Rutter N, et al. Preliminary magnetostratigraphy of the red clay underlying the loess sequence at Baoji, China [J. *Geophysical Research Letters* 1991 18(8): 1409-1412
 - 22 梁美艳, 郭正堂, 顾兆炎. 中新世风尘堆积的地球化学特征及其与上新世和第四纪风尘堆积的比较 [J. *第四纪研究*, 2006 26(04): 657-664 [Liang Meiyao, Guo Zhengtang, Gu Zhaoyan. Geochemical characteristics of the miocene eolian deposits and comparison with the Pliocene and Quaternary eolian deposits [J. *Quaternary Sciences* 2006 26(04): 657-664]
 - 23 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原红黏土与黄土古土壤粒度特征对比 [J. *沉积学报*, 1999 17(2): 226-232 [Lu Huayu, An Zhisheng

- Comparison of grain-size distribution of Red Clay and Loess-paleosol deposits in Chinese Loess Plateau [J. Acta Sedimentologica Sinica 1999 17 (2): 226-232]
- 24 彭淑贞, 郭正堂. 风成三趾马红土与第四纪黄土的粘土矿物组成异同及其环境意义 [J. 第四纪研究, 2007 22 (02): 277-285 [Peng Shuzhen Guo Zhengtang Clay mineral composition of the Tertiary red clay and the Quaternary loess-paleosols as well as its environmental implication [J. Quaternary Sciences 2007 22 (02): 277-285]
- 25 弓虎军, 张云翔, 岳乐平, 等. 甘肃灵台新近纪红粘土磁组构特征的沉积学意义 [J. 沉积学报, 2007 25 (3): 437-444 [Gong Hujun Zhang Yunxiang Yue Leping et al Sedimentological significance of the magnetic fabric of the Neogene red clay in Lingtai Gansu province [J. Acta Sedimentologica Sinica 2007 25 (3): 437-444]
- 26 王卫华, 彭淑贞, 赵庆海. 黄土高原晚第三纪红土的形态学和地球化学特征及其环境指示意义 [J. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2000 (1): 43-47 [Wang Weihua Peng Shuzhen Zhao Qinghai Geochemical and morphological character of the Late Tertiary red clay at the Loess Plateau and its environmental implications [J. Journal of Shandong University of Science and Technology 2000 (1): 43-47]
- 27 刘东生. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-481 [Liu Dongsheng Loess and Environment [M]. Beijing Science Press 1985 1-481]
- 28 Pyek The nature origin and accumulation of loess [J. Quaternary Science Reviews 1995 14 (7-8): 653-667]
- 29 尹秋珍, 肖国桥, 郭正堂, 等. 风尘堆积常见的同沉积和沉积后改造特征及其环境意义 [J. 第四纪研究, 2007 27 (02): 295-302 [Yin Qiuzhen Xiao Guoqiao Guo Zhengtang et al Syn and post-depositional modification of loess deposits and their paleoenvironmental significance [J. Quaternary Sciences 2007 27 (02): 295-302]

Discovery and Geological Significance of Red Clay in the Lülin Section in the West Part of Lüliang Mountains

LI Jian-xing^{1,2} YUE Le-ping¹ XU Yong¹ SUN Bo¹ SUN Lu¹ WANG Xiao-yong² BAIBin^{1,3}

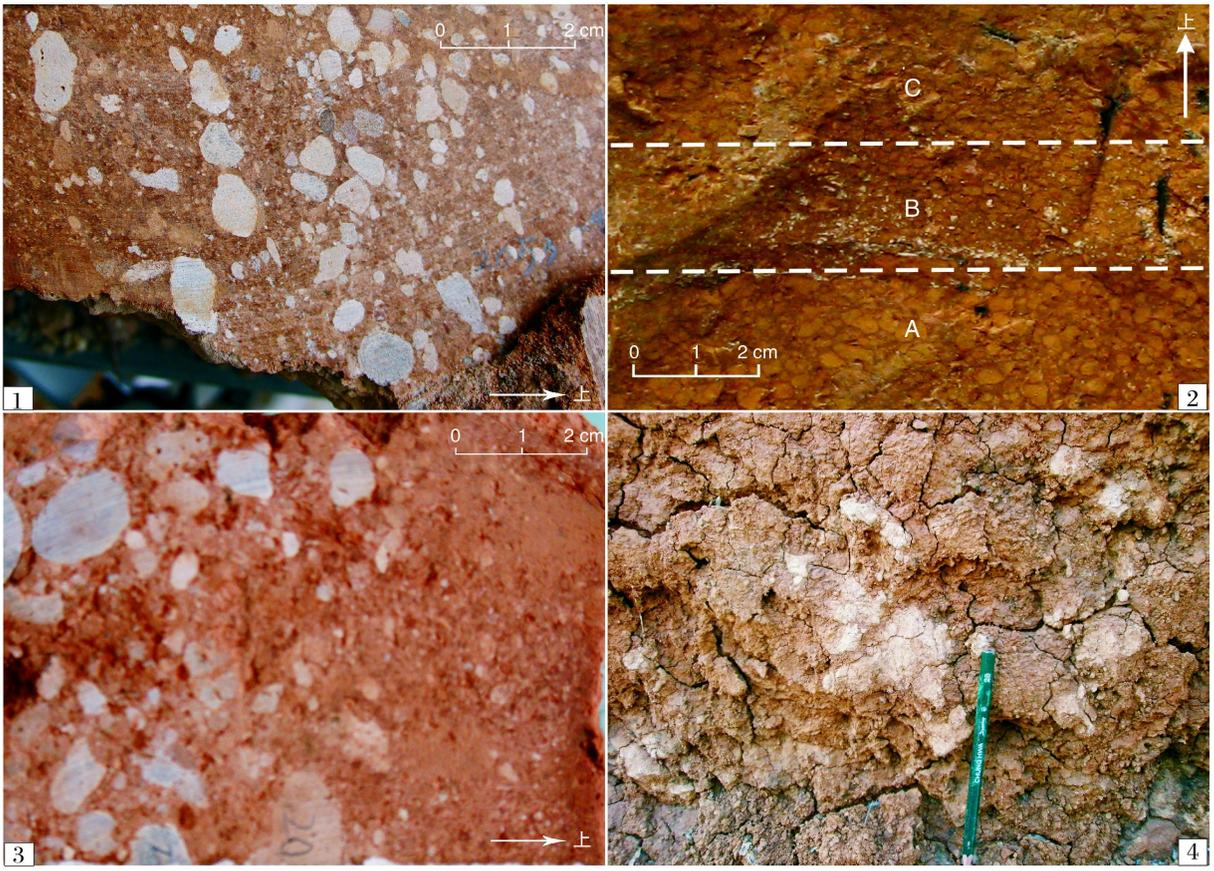
(1. State Key Laboratory of Northwest University Continental Dynamics Xi'an 710069

2. Xi'an Centre of Geology Survey China Geology Survey Xi'an 710054

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development Beijing 100086)

Abstract A special aqueous gravel bed which underlies the red clay and is mainly composed of red clay lumps and calcium nodules was found at Weijiawa village of Lülin county in the west part of Lüliang Mountains. Sedimentological study shows that the clast (composed of the red clay and calcium nodule) in this bed are all with certain sorting and roundness. The calcium nodules did not show the anomalous ginger shape but process typical round or sub-round character which is the product of fluvial transport. Both sedimentary sequences fining upward and fossil in certain beds are all typical features of aqueous deposit. The clast (red clay and calcium nodule) in the section indicate that some red clay deposited before the aqueous sediments. Magnetostratigraphic result reveals that the aqueous gravel bed is aged about 8.1 Ma. The discovery of the special aqueous gravel bed can provide new information for the cause of red clay.

Key words red clay paleomagnetic dating Lüliang Mountain Lülin



图版I 说明: 1 自下向上变细的沉积序列; 2 红粘土团块碎屑组成的沉积序列; 3 经过搬运的钙质结核; 4 未搬运的钙质结核