

# 陕西北部三趾马红粘土的形成环境<sup>①</sup>

张云翔 陈丹玲 薛祥煦

(西北大学地质系 新生代地质与环境研究所 西安 710069)

**摘要** 多种地质资料表明,陕西北部的三趾马红粘土主体形成于半干旱草原疏林环境中。5.3 Ma B. P 左右所对应地层记录了半湿润森林景观。红粘土形成期间古气候周期性波动是其重要特征之一,使得淋溶粘土层与钙质淀积结核层交替出现。化石埋藏特点与含化石岩性的差别显示了不同层位有着不同的沉积环境。气候干湿、冷暖的交替不断改变着本区动植物的面貌。

**关键词** 陕西北部 三趾马红粘土 形成环境

**第一作者简介** 张云翔 男 40岁 博士 副教授 新生代生物地层及哺乳动物化石

三趾马红粘土系指华北含有晚中新世三趾马动物群化石的红色土状堆积,被称为保德组或蓝田组。对其形成时代及所含动物群的研究近年来取得了重要进展<sup>[1~3]</sup>,但对其成因认识多样。持残积成因观点者认为该层是一古风化壳残余物质。从山东庙岛群岛的情况看,这种看法有着重要证据。该岛发育着剖面完整的古风化壳,从下而上依次是基岩→基岩风化裂隙带→基岩风化破碎角砾带→风化粘土夹岩屑带→风化红粘土带<sup>[4]</sup>等。但在中国北方绝大部分地区,无论是笔者所到之处还是其他资料所列,如甘肃的武都、静宁,陕西的府谷、榆林、蓝田,山西的保德,河南的新安等,都没有见到上述过渡关系<sup>[5,6]</sup>,有人以红粘土的地层结构、化学成分、粒度、岩石微结构等为依据,提出风成观点<sup>[7~8]</sup>。笔者曾根据甘肃武都龙家沟三趾马粘土中化石的搬运、分选、埋藏等情况,认为该区红层系流水所致<sup>[9]</sup>。但是,整个三趾马红粘土是否都是这种成因有待进一步研究。

陕西府谷老高川王大夫梁附近有一套出露较好的中新世晚期地层,其层序清楚,含有非常丰富的分属三个层位的哺乳动物化石,薛祥煦等对化石组合及含化石地层作了初步研究,并分别命名了喇嘛沟动物群(下层化石)和庙梁动物群(中上层化石)<sup>[10]</sup>。化石鉴定结果、古地磁测定及地层层序确定为研究该地质体形成环境提供了基本条件。日前笔者等在该剖面上系统采集和分析了常量元素、微量元素、氧、碳稳定同位素、粘土矿物组成、粒度及孢粉等,磨制了岩石定向薄片,并在电子显微镜下观察了矿物

成分及其形态,为解释红粘土形成环境提供了多方面的证据。

## 1 研究剖面及其岩性简介

王大夫梁剖面所属中新统部分共厚40余米,原划分17层粘土和15层钙质结核。实际上,在最下部还有一断续分布的砾石层,砾石成分为侏罗系砂岩及少量泥砾,杂色。其上岩性可分两段,下段为黄红色细砂岩、粉砂岩;上段主要是块状棕红色粘土及粉砂质粘土。粘土层质地均一,物质组成以粘土矿物为主。扫描电子显微镜下可见,粘土层中絮状蒙脱石或伊利石占绝对优势,其局部边缘偶见丝状埃洛石化。碎屑颗粒少且被粘土矿物层层包裹,原生方解石极少,在成土较好的层中则完全消失。粒径以0.05~0.005 mm之间为主。粘土表面覆有黑褐色铁质膜。光学镜下观察,可见粘土微粒具有较好的定向光性,呈絮状及斑点状,特别是在垂直于地层面方向。粘土层之下基本都存在有一薄厚不等的灰白色钙质结核层或钙质泥岩,电镜下可见主要成分为次生成因、自形较好的微晶方解石,呈紧密镶嵌状或颗粒支撑。方解石表面的粗糙现象为粘粒向下移动包裹而成。此外,另有少量粘土矿物及其他碎屑颗粒。结核层中有较多垂直或近垂直细小近圆形孔洞,其内壁有碳酸钙被膜或泉华状碳酸钙沉淀。

## 2 化石埋藏特征及沉积环境

王大夫梁的脊椎动物化石采自坑道。由于条件所限,无法进行大规模的化石赋存状态统计,笔者曾

① 中国科学院西安黄土与第四纪地质国家重点开放实验室资助项目  
收稿日期:1997-07-24 收修改稿日期:1997-11-19

在化石发掘现场, 选择了  $2.0 \times 2.2 \text{ m}^2$ ,  $1.5 \times 1.0 \text{ m}^2$ ,  $2.0 \times 1.8 \text{ m}^2$  三个小区域对所出露的上百件化石的产状进行了统计。

以西北大学地质系已修出的 60 余个犀牛头骨为基础, 对喇嘛沟动物群动物死亡时的年龄结构初步观察的结果表明, 其主要为老年个体, 另有一定数量的幼年个体, 壮年者很少, 构成现代墓地统计的年龄结构, 是正常死亡下的遗体堆积。化石表面风化程度及破碎程度差别很大, 反映了它们经历了不同的风化过程, 是动物遗体埋藏前暴露时限差别的具体表现。对于非特殊原因的埋藏类型(如洞穴堆积, 崩塌等)而言, 化石分选程度是恢复搬运动力和搬运过程的重要手段。喇嘛沟动物群中, 化石完整程度反差明显, 即有相当完整的动物骨架, 也有短小的骨骼碎块, 个体大小悬殊, 水动力搬运性质不同组分含量彼此接近, 各类长轴骨骼在地层中展布没有明显规律, 似乎近东西向略多一些。可见这些化石经过了明显的搬运, 但水流搬运动力较弱。庙梁动物群化石的保存状态特征与上述不同, ①化石呈透镜状赋存; ②化石保存状态好但分选性更差。我们曾在—块体积约为  $60 \times 50 \times 40 \text{ cm}^3$  的土块中修出犀牛头骨及下颌一件, 完整羚羊头骨 6 个(带有下颌的 3 件), 肢骨 20 余件, 这些化石保存精美, 头骨上一些很细薄的骨片毫无损伤, 它们在地层中彼此交错, 相互叠复; ③关节骨骼较多。除了动物骨骼彼此脱离关节外, 几乎未见被搬运的痕迹。含化石层位是一套细粒的粘土层, 岩石微结构中能见到良好的粘粒定向光性, 发育有程度不等的淀积铁质粘粒胶膜, 这是沉积物经历长期土壤化过程后的产物, 证明其受到了强烈的淋溶作用<sup>[11]</sup>。土壤化的过程是一个水上的过程, 成土过程中的强烈淋溶作用未对化石产生明显的影响, 可见它们是在土壤化过程之后才被埋藏。

化石埋藏群的形成实质上是生物遗体在外动力作用下的集中或分散过程, 化石骨骼组合不同是在分选中产生, 这些外动力是环境的重要组成部分。老高川剖面含化石层段中, 方解石、长石等易风化物含量较高(最高达 43%), 而石英含量 10% 左右, 碎屑矿物颗粒很细, 这些特征都是较弱的水动力和未经过长距离的搬运所留下的特征, 其结论和所含化石反映的一致, 是近源河湖相沉积。

### 3 沉积物物质组成特征

沉积物是保存它们形成时古环境信息的载体,

不同环境必然造成沉积物中矿物成分、化学元素、同位素组成等不同的分布特征。环境演变过程中的地球化学行为, 可作为重建古气候、古环境的重要指标。

粘土矿物是各类表生沉积物重要组成部分, 主要由长石等铝硅酸盐矿物风化而成。在热带雨林区, 由于基岩分解出碱性元素 K、Na、Ca、Mg 等大量淋失, 介质呈酸性或中性, 粘土矿物主要为高岭石和埃洛石, 蒙脱石和伊利石只能暂时停留。在亚热带区, 水解和水合作用有所减弱, 矿物分解出来的碱性元素有相当一部分残留原地, 介质呈弱碱性或碱性。此时, 蒙脱石、伊利石、拜来石、绿泥石、高岭石、铝土矿、含水针铁矿为主导矿物。随着降雨量的减少, 粘土矿物组合更趋单调, 蒙脱石在粘土矿物中的比例增大。而在干旱-半旱沙漠地带, 常见的只有伊利石和蒙脱石等。王大夫梁剖面土层中的粘土矿物以蒙脱石为主(34%~56%), 另有伊利石、绿泥石。在风化过程中, 干热、弱碱性到碱性的介质环境, 丰富的盐基离子、特别是富  $\text{Mg}^{2+}$  的介质条件有利于蒙脱石的形成。以蒙脱石、伊利石为主的粘土矿物组合反映了一个相对干热少雨的自然环境, 与温带降雨量较少的草原、草原疏林分布区土壤矿物组合特征一致<sup>[12]</sup>。这一结论与以前所认识的三趾马红粘土形成环境为湿润炎热的古气候有着明显的差别。此外, 电镜下观察, 粘土矿物主要呈碎屑状存在, 极少有自形现象。定向薄片下可见到比较新鲜的钠长石, 仅其四周有少许风化粘土。这是物源区强烈物理风化及沉积区未强烈改造的表现, 亦说明没有湿润炎热的环境出现。

由于风化作用, 矿物分解出来的钙质被雨水所携向下淋滤, 使粘土层中钙质含量减少, 并在其下形成钙质淀积层, 其结果造成粘土层-钙质层交替出现。在王大夫梁剖面上, 成土性较好的层位中钙质已淋失殆尽, 其下淀积层厚度较大。并多集中在剖面中上部, 如 11、13、16 层等。钙质的淋溶作用需要水分的参与, 较彻底的淋溶作用是降水量增多的结果。因此, 王大夫梁剖面上不同层中钙质含量变化及中部层位趋于减少的现象是古气候波动发展及降水量增加的表现。但这并不意味着雨水愈多愈好。雨水过少, 钙质无法淋溶, 在半干旱到半湿润的气候条件下, 通常可见上部土层脱钙, 下部出现钙积, 形成结核的特点<sup>[13]</sup>。因此, 次生碳酸盐化的程度主要取决于当时的气候环境, 可作为降水量的替代性指

标<sup>[14]</sup>, 400~800 mm 之间的降雨量并有大于降雨量的蒸发量对钙质富集最为有利。上部某些层段的完全脱钙是淋溶作用较强烈的表现, 但此现象仅出现于局部层段。无论粘土层钙淋溶程度如何, 在王大夫梁剖面粘土上, 粘土层钙含量与下伏结核层含量(百分含量)的总和大致相当, 这是值得注意的现象, 它可能暗示着组成红层物源的一致性或形成方式的一致性。

$Fe^{3+}/Fe^{2+}$  比值(又被称为氧化度)是近年来广泛使用的反映表生作用地球化学行为和古气候的指标。影响 Fe 变价的主要因素是介质 pH 值及温度。对于王大夫梁剖面来说, 其 pH 值变化很小(7.02~7.50 之间), 排除了这个因素, 该比值的大小就直接反映了古气温的变化。表 1 给出了王大夫梁剖面上各层沉积时的  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  比值, 我们姑且不论具体数值如何, 所测 17 组数据在剖面上的跳跃式变化是明显的。粘土层和结核层形成时的  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  相差较大, 前者值均 10.41, 后者仅 7.00。正如前述,  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  比值大小反映着古气温的变化, 其“值大则暖, 反之则寒”的认识无论在理论上还是实际应用中都已基本得到认同<sup>[15]</sup>。该值的变化应是古气候波动演变的具体表现, 或者说是粘土沉积期与成土期交替出现时所记录的古气候周期性振动。第四纪古气候的重要特征就是干湿、冷暖的交替变化, 这一特征是否从第三纪晚期(或更早)就开始出现是今后古气候研究中值得注意的问题, 或许二者间只是频率、幅度的不同。 $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  比值在剖面上变化的规律不够明显, 似乎有下部较低, 中部最高, 而后又有所下降的趋势。值得注意的是化石产出层位既不对应  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  比值的最高值, 也不对应最低值, 而与孢粉主要产出层位一致。这是否说明哺乳动物与植被的关系要比与温度的关系更为密切。

王大夫梁剖面成土碳酸盐  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{18}O$  的特征是氧同位素组成相对稳定( $\delta^{18}O$  值变化于-10.48‰~-8.78‰), 碳同位素变化较大( $\delta^{13}C$  值在-7.52‰~-3.94‰之间波动), 但仍落在土壤碳酸盐范围内(-11‰±2‰), 即表明所分析的碳酸盐是经过大气降水改造的次生碳酸盐, 与镜下观察结果一致。

现代土壤和古土壤稳定同位素研究表明,  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{18}O$  值是良好的气候变化代用指标<sup>[16-18]</sup>, 其中氧同位素组成与当地大气降水密切相关, 受大气降水的来源、温度和降水量大小的控制, 温暖气候条件下形成碳酸盐具有较重的  $\delta^{18}O$  值。碳同位素组成

与土壤发育时期植被密度及植被类型有关, 现已有人用土壤碳酸盐的  $\delta^{13}C$  值来表示土壤的湿度。气候越干旱, 土壤碳酸盐  $\delta^{13}C$  值越高。王大夫梁剖面同位素研究的特征是①  $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$  值在剖面上呈锯齿状变化, 显然是古气候相对冷暖、干湿交替的结果。②根据前人的经验公式计算, 剖面各粘土层  $C_4$  植物相对生物量在 30%~60%之间变动。土壤发育较好, 无碳酸盐反映的第 3、11、13、及 16 层地表植物以  $C_3$  木本植物占优势(表 1)。其中第 11、16 层恰好对应于中层化石层和庙梁动物群产出层位, 大量林栖动物与木本植物, 如 *Betulaceoipollenites*, *Caryapollenites* 的出现表明在当时的确出现过半湿润森林植被。在土壤发育程度较差的第 14 层,  $C_4$  植物相对含量高达 60%, 成为优势类别。其余各层  $C_4$  植物含量在上述二者之间, 总体上反映了含有较多草本植物的草原疏林环境。

总之, 该区中新世晚期古气候的发展具有周期性变化的特点, 降水量、古温度波动明显, 各种地化指标和粘土矿物组合分析结果基本吻合, 当时该地自然环境以半干旱草原疏林。

#### 4 环境的演变对哺乳动物群性质影响

在王大夫梁剖面上产有 40 余种哺乳类化石, 从动物生态角度看, 该地不同层位动物群的性质差别明显。下部喇嘛沟动物群以犀牛为优势动物, 如 *Chilotherium*, *Acerorhinus*, *Sinootherium* 的个体数约占整个动物群的 60%左右。此外还有较多高冠长颈鹿及牛科动物, *Palaotherium*, *Samotherium*, *Miotragocerus*, *Pleisidax*(?)及食肉类、长鼻类等; 中部化石层所含化石是一个过渡类型的动物组合, 既有高冠的羚羊类, 如 *Gazella* 等, 也有低冠长颈鹿和猪类, 如 *Honanotherium*, *Chleuastochoerus* 等, 也有诸如 *Hipparion*, *Acerorhinus* 等适应较广环境的类别; 上部庙梁动物群则基本都是低冠长颈鹿及鹿类, 如 *Eostylocerus*, *Muntiacus*, *Cervavitus*, *Procapreolus* 等。动物群性质的变化是环境演变的结果, 前者被认为生活在草原环境而后者被认为生活于森林环境。

上述化石层沉积环境及地层组成物质成分分析显示了本区古环境的变化特征。易溶成分含量大幅度跳跃变化, 强烈淋溶层与钙质富集层的交替出现,  $\delta^{13}C$  曲线锯齿状变化, 对气候敏感的  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  比值的高低都展示了该期气候相对冷暖、干湿交替变

表 1 陕西府谷王大夫梁剖面古气候代用指标及其变化

Table 1 Paleoclimate proxy and its changes in Wangdaifu Ridge Profile, Fugu Shanxi

层位 <sup>1)</sup> layers	深度/m depth/m	Ca <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup>	C <sub>4</sub> 植物含量 /%	粒度 /(% < 0.001mm)	孢粉 sporopollen	动物群 Faunas
17	14.0			47.2	6.50	<i>Gemmatricoporites</i>	
17a	14.5					<i>Betulaceipollenites</i>	
16	17.0	0.80	9.10	0	31.3	<i>Caryapollenites</i>	庙梁动物群
						<i>Artemisiaepollenites</i> (Miaoliang F.)	
						<i>Graminidites</i>	
16a	17.5	26.60	4.05				
15	19.5			41.4	6.95		
15a	20.0						
14	21.1	2.20	6.67	0.18	60.1	7.04	
14a	22.1	24.40	3.77				
13	23.5			33.2	7.35		中部动物层
13a	23.7						
12	25.3	2.40	8.88	0.14	53.5	7.46	
12a	25.8	18.60	6.22				
11	28.6	0.80	6.16	0.23	39.1	5.74	
11a	29.3	29.20	5.86	0.38			
10	31.3	0.85	11.50	0	43.6	8.09	
10a	31.8	25.95	10.60				
09	33.8			47.1	6.71		
09a	34.2						
08	35.3	3.80	0.18	0.33	50.5	5.58	
08a	35.7	17.70	5.55				
07	37.8			41.6	7.37	<i>Artemisiaepollenites</i>	
						<i>Chenopodipollis</i>	
07a	38.2						
06	39.3	0.80	14.88	0	45.9	7.83	
06a	39.7	18.40	6.24				
05	41.7			56.8	7.97		
05a	42.1						
04	43.8	5.40	7.50	0.50	51.3	7.12	
04a	44.1	22.00	4.42	2.10			
03	47.3			38.8	6.15		
03a	47.6						
						<i>Artemisiaepollenites</i>	喇嘛沟动物群
02	51.1	11.85	5.40	1.20	56.7	5.14	
						<i>Brevitricolpites</i>	群
						<i>Compositoipollenites</i> (Lamagou F.)	

化的特征。植被是环境变化灵敏的记录者,降水量、温度变化必然使植物类型发生重大更新。王大夫梁剖面上分析结果显示,其植被面貌主要是干旱、半干旱草原疏林,在对应庙梁动物群产出的层位记录了短暂的向半湿润草原森林的转变,如剖面中下部孢粉主要是 *Artemisiaepollenites minor* (小蒿粉), *Brevitricolpites* of. *B. Punctatus* (点纹短三沟粉相似种), *Compositoipollenites* sp. (菊粉), *Chenopodipollis minor* (小藜粉) 等为主的干旱型草本植物,而顶部(剖面第 16 层)虽然也有 *Artemisiaepollenites sellularis* (谢露拉蒿粉), *Graminidites* sp. (禾本粉), *Gemmatricoporites* sp. (粒面三孔沟粉) 等,但同时也出现了一定数量的喜湿性木本植物 *Betulaceipollenites bituitus* (拟桦粉), *Caryapollen-*

*ites* sp. (山核桃粉)。动物作为食物链中更高层次,环境及其食用对象的变化必然会导致其种类的演变。

纵观陕、晋北部的三趾马红粘土,岩性特征一致或相似,都以红、棕红、黄红色粘土或粉砂质粘土为主,粘土层之下绝大多数都发育有钙质结核层。该层分布稳定,厚度彼此相差不大,这应该是形成环境彼此相似的表现。因此,以府谷老高川王大夫梁剖面为代表所得到的各种结论在较大区域内会有一些的参考价值。

参 考 文 献

1 邱占祥, 邱铸鼎. 中国晚第三纪地方动物群的排序及其分期. 地层学杂志, 1990, 14(4): 241 ~ 260

- 2 李传夔, 吴文裕, 邱铸鼎. 中国陆相新第三纪的初步划分与对比. 古脊椎动物与古人类, 1984, 22(3): 163~178
- 3 董永生, 郑绍华, 邱铸鼎. 中国新生代哺乳动物分期. 古脊椎动物学报, 1995, 33(4): 290~314
- 4 曹家欣, 严润娥, 王欢. 山东庙岛群岛的红色风化壳与棕红土及其古气候意义. 中国科学(B辑), 1994, 24(2): 216~224
- 5 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. 地层学杂志, 1995, 20(3): 214~219
- 6 岳乐平. 中国黄土与红色粘土记录的地磁极性界限及地质意义. 地球物理学报, 1995, 38(3): 311~320
- 7 赵景波. 西安. 山西保德第三纪晚期红土的研究. 沉积学报, 1987, 7(3): 113~120
- 8 郑洪波, 安芷生, Shaw J 等. 段家坡黄土剖面磁性地层学研究. 黄土、第四纪、全球变化, 1992, 3: 44~50
- 9 张云翔, 薛祥煦. 甘肃武都龙家沟三趾马动物群的埋藏特征及该区红层的成因. 科学通报, 1995, 40(19): 1782~1784
- 10 薛祥煦, 张云翔, 岳乐平. 陕西府谷老高川三趾马动物群的发现及时代分期. 科学通报, 1995, 40(5): 447~449
- 11 安芷生, 魏生英. 淀积铁质粘粒胶膜及其成因意义. 科学通报, 1979, 24(8): 356~359
- 12 田均良. 黄土高原土壤地球化学. 北京: 科学出版社, 1994. 27~43
- 13 张风荣, 马前州, 李连捷. 土壤发生与分类. 北京: 北京大学出版社, 1992. 37~43
- 14 文启忠, 刁桂仪, 贾蓉芬等. 黄土剖面中古气候变化的地球化学记录. 第四纪研究, 1995, 3: 223~231
- 15 朱 诚. 天目山姚砂岭地区第四纪沉积环境研究. 沉积学报, 1995, 13(3): 1~12
- 16 韩家懋, 姜文英, 吴乃琴等. 黄土中钙结核的碳氧同位素研究. 第四纪研究, 1995, 3: 130~138
- 17 Cerling T E, Quade J, Wang Y, et al. Carbon isotopes in soil and paleosols as ecology and paleoecology indicators. Nature, 1989, 341: 138~189
- 18 Smith G A, Wang Y, Cerling T E, et al. Comparison of a paleosol Carbonate isotope record to other of Pliocene-Early Pleistocene climate in the Western United States. Geology, 1993, 21: 691~694

## The Paleoenvironment of *Hipparion* Red Clay in North Part of Shanxi Province

Zhang Yunxiang Chen Danling Xue Xiangxu

(Department of Geology Institute of Cenozoic Geology and Environment

Northwest University Xi'an 710069)

### Abstract

*Hipparion* red clay, known as Baode Formation or Lantian Formation in north China is a special type of sediment characteristic of northeastern Asia. Opinions about its genesis differ widely, ranging from residual to eolian interpretations. Outcrops of *Hipparion* red clay are well exposed in the Wangdaifu Ridge, Laogochuan, Fugu, Shanxi Province. The authors of the present paper gathered the samples and analyzed the features of main and trace elements, stable isotope of oxygen and carbon, composition of clay minerals, granularity and sporopollen, made the oriented thin section, observed the forms of minerals under the SEA. All of these provide many a proof to explain its forming environment.

The Wangdaifu Ridge profile, more than 40m thick, is subdivided into two parts: the lower is yellowish red fine sandstone and siltstones, and the upper is massive brownish red clay and silty clay. Below each of clay beds, there exists a layer of greyish calcareous concretions or calcareous mudstones, consisting mainly of secondary calcite. The clay beds are composed mainly of clay minerals, most of which are garrulous montmorillonite-illite. Fragmented particles are scarce and all covered with clay minerals. Primary calcite are very few and even disappear in some clay beds. Micro-particles have a good optical orientation character under the microscope.

Clay minerals of the strata consist mainly of montmorillonite, illite and chlorite. The assemblages, which indicate a relatively hot and dry environment, is consistent with that of low rainfall grasslands of veldts in temperate zone. The conclusion differs drastically from the previous suggestion that *Hipparion* red clay formed in a humid and hot environment. As a result of weathering caliche in clay bed was eluviated and the content of