

文章编号: 1000-0550(1999)02-0214-07

# 黄河中游三趾马红粘土的岩石学 研究及古气候意义

——以陕西府谷老高川三趾马红粘土剖面为例<sup>①</sup>

罗静兰 张云翔

(西北大学地质系 西安 710069)

**摘要** 将岩石学研究方法引入三趾马红粘土研究中,利用薄片系统观察、电镜扫描、X-射线衍射、粒度分析及化学分析手段,对红粘土的岩石学、微结构及形态学进行较为细致的研究。结果表明,各粘土层下部的沉淀层系成壤过程中钙质从上部土壤中淋滤并向下迁移再沉淀的结果。土壤中粘化层的光性定向粘粒及淀积铁质粘胶膜的发育程度受古气候及淋滤作用强度的控制。红粘土形成过程中主要为干旱、半干旱—半湿润气候的草原疏林环境,也有湿润气候的森林环境出现。府谷老高川三趾马红粘土剖面记录了四个大的气候旋回。

**关键词** 黄河中游 三趾马红粘土 古气候

**第一作者简介** 罗静兰 女 1957 年出生 副教授 岩石学专业

**中图分类号** P588.22 **文献标识号** A

## 1 前言

上第三系红粘土与第四系黄土共同构成了我国北方的风成粉尘的堆积序列,是季节分明的古气候、古季风气候下的产物,它能反映古季风形成的早期信息及大型气候转型事件<sup>[1,2]</sup>。所记录的古气候分辨率是其它岩石类型所无法比拟的<sup>[3,4]</sup>。作为古气候演化的物质记录,至今尚未见对红粘土的物质成分及岩石学研究方面的论著。本文试图将岩石学方法引入红粘土研究领域,通过对红粘土层的结构、物质成分、岩石学及土壤的微结构及形态研究,结合其化学成分特征及其中所含生物群特征,以陕西府谷老高川三趾马红粘土剖面为例,对黄河中游类似的三趾马红粘土的特征及其成因和其形成的古气候条件做一探讨。

上第三系红粘土的岩性主要为黄棕—褐红色粉砂质粘土或亚粘土及土黄—土黄白色状或团状钙质结核。无论平面上还是垂向上,各地点的岩性变化较小,特征相似。其中位于陕西省府谷县西北 60 km 处的老高川乡王大夫梁的三趾马红粘土出露完整,层序清楚,古地磁年龄为 7.4~4.3 M,是中国北方最具代表性的中新世晚期剖面之一。该剖面直接发育在侏罗纪含煤砂页岩系上,其上为第四系黄土

覆盖。岩性为一套富含钙质淀积层的棕红—褐红色土状堆积物,其中钙质淀积层为土黄—灰白色,厚度 20~70 cm 不等,多发育在粘土层的底部,钙质结核或泥质结核呈局部集中的团块状或层状分布,据此可将剖面分为 18 个层:由下至上依次为 1、2、…18 层,几乎每层均由表面覆有黑褐色铁锰质胶膜的棕红—褐红色土壤粘土层与钙质淀积层组成<sup>[5,6]</sup>。采自不同层位样品的粒度分析资料表明,粘土层粒度大小均匀,粒径以 0.01~0.05 mm 的风成基本粒组(占粘土总量的 30.21%~40.9%)和小于 0.005 mm 的风成挟持粒组(27.33%~44.97%)为主,其次为粒径 0.05~0.1 mm 的风成附加粒组(5.89%~19.41%),粒径为 0.1~0.2 mm 的颗粒含量小于 2%,少数样品可达 3%~4%,大于 0.2 mm 的颗粒少见。整个剖面未见层理构造。黄河中游地区三趾马红粘土特征相当一致,对该剖面 and 系统研究得出的一些主要结论及形成时的古气候特征,对黄河中游甚至整个华北地区晚第三纪总的气候及其演化特征将会有重要的参考价值<sup>[7,8]</sup>。

## 2 岩石学及土壤微结构研究

采自红粘土不同层位的岩石薄片研究表明,红

<sup>①</sup>中科院西安黄土与第四纪地质国家重点实验室资助项目

粘土由粉砂粒级的碎屑和粘土粒级的填隙物组成。其中碎屑含量为 30%~70%，平均 47.8%。碎屑以石英为主，可占粘土总量的 20%~50%，平均 35.0%；其次为中酸性斜长石和少量碱性长石（以微斜长石为主，少量条纹长石），两者含量在 4%~15% 之间，平均 7.7%；少量岩屑，含量为 2%~10% 之间，平均 4.3%，岩屑以硅质岩、泥岩、浅变质岩为主；少量白云母和黑云母，含量 0.5%~4% 之间，平均 0.7%。碎屑颗粒的分选性好，磨圆度差，多呈次棱角状-棱角状，颗粒间以点-漂浮状接触多见。

填隙物占 30%~65%，平均 52.5%，其粒径多小于 0.01 mm，以泥质杂基及灰泥杂基为主，含量多在 30%~65% 之间，其次为微晶-细晶方解石胶结物，其含量在 0~20% 之间。泥质杂基的大部份已重结晶为粘土矿物，样品的 X-射线分析结果表明，粘土矿物以蒙脱石（21%~56%，平均 36.3%）和伊利石（2%~22%，平均 14%）为主，少量绿泥石（0%~9%，平均 5.25%）。扫描电镜下可见片状蒙脱石和毡状及发状伊利石占绝对优势（图版 1、2）。方解石胶结物有两种产出形式，一种为微晶或泥晶方解石，其在粘土中分布较均匀或呈局部集中的团块状和皮壳状，几乎见于剖面各个层的不同部位（图版 3）。这种方解石粒径较小，一般在 0.005~0.01 mm 之间，结晶程度较低，晶形较差，多为它形-半自形晶，少数为自形晶（图版 4），它们代表了由灰泥重结晶为方解石过程中的中间产物。这种方解石系原灰泥杂基重结晶的产物，属于原生型。其在粘土中的含量越高，说明当时的气候干旱，淋溶作用越弱，因而土层中的碳酸盐部分仍保存未迁移。另一种为次生的微晶-细晶亮晶方解石胶结物，大多数粒径在 0.01~0.03 mm 之间，少数可达 0.05~0.1 mm，为很好的菱形面体自形晶（图版 5），多充填或半充填在粒间孔隙及裂隙中，在此情况下，孔隙裂隙相互连通，一些大有孔隙中仅在其壁见此方解石，大部分已被淋滤掉。说明这种方解石是溶液裂隙及孔隙运移而沉淀的。这类次生方解石主要于 6、8、16、17 层的下部及底部，11、13、15 和 18 层的下部及底部也可见到。薄片中原生灰泥杂基的含量与次生方解石的含量呈反消长关系。显然，这类方解石系溶液淋滤上部土层中的碳酸盐并向下运移再沉淀的结果。同时也说明这些层形成时的雨量充足，气候温暖潮湿，有过较为强烈的淋溶作用。

岩石的定向薄片研究显示，大部分红粘土层在

镜下具有良好的光性定向粘粒，它们主要呈流胶状（图版 6、7），其次呈絮状及斑点状，多在碎屑颗粒周围以薄膜出现（图版 8）或沿孔隙裂隙壁分布，当粘粒沿孔隙及裂隙壁分布时，其定向性更明显（图版 9），显示了流动成因的特点。土壤学研究表明，光性定向粘粒是在成壤过程中经风化淋滤形成的<sup>[9]</sup>。在整个剖面中，几乎每层都具有土壤化的特点，但各层之间粘化层的光性定向粘粒及淀积铁质粘粒效膜的发育程度不同，说明其形成时的古气候条件有差异。成壤作用过程中，光性定向粘粒的形成过程又分为淀积粘化和残积-淀积粘化两种形式。淀积粘化是一种受淋滤较强的粘化，一般形成于年平均降水量 750 mm 以上的森林区。所形成的粘土胶膜都是由向下移动的粘粒淀积形成的。这种作用发生在碳酸盐从土壤上部完全淋失的条件下，因此形成的光性定向粘土胶膜厚度与面积大，连续性强。残积-淀积粘化是一种受淋滤较弱的粘化，多形成于年平均降水量 400~600 mm 左右的森林草原和偏干旱的森林区，形成的粘粒移动不强烈，只有少部分下移到淀积层下部，大部分仍残留在淀积层上部，因此形成的光性定向粘土胶膜厚度与面积小，连续性差。根据薄片光性定向粘土的发育程度来看，红粘土中既有淀积光性定向粘粒，又有残积-淀积光性定向粘粒，因此府谷老高川三趾马红粘土形成过程中既有湿润气候和森林环境出现，也有干旱和半干旱-半湿润气候和森林草原环境出现。

### 3 红粘土形成的古气候特征分析

根据红粘土剖面的物质成分、土壤化的程度、土壤的微结构形态、粒度大小、粉砂粘粒比值  $K_d$  值，结合红粘土的化学成分及所含动植物群的特点，参考碳氧同位素资料<sup>[10]</sup>将府谷老高川三趾马红粘土的形成划分为四个大的气候旋回，对应的地层是：第一旋回（1—9 层）、第二旋回（10—14 层）、第三旋回（15—17 层）和第四旋回（18 层）。每一旋回均以干冷气候开始，以湿润或半湿润-半干旱气候结束。干冷气候由于以物理风化作用为主，碎屑中石英含量较低而长石和岩屑的含量较高。粘化层中光性定向粘粒及铁锰质胶膜不发育，钙积层中次生方解石的含量很低。由于风化成壤作用及淋溶作用弱，粘土层粒度以 0.05~0.1 mm 的风成基本粒组和风成附加粒组为主，小于 0.005 mm 的颗粒含量较低。因为小于 0.005 mm 的颗粒属于易变动的次生粒组，

其含量随风化成壤作用的加强而增强,因此粉砂粒比值  $K_d$  值较高。一些在风化成壤过程中易积聚的元素如  $Fe^{3+}$ 、 $K^+$ 、 $Al^{3+}$ 、 $Si^{4+}$ 、及  $Mg^{2+}$  的积聚不明显,具有低的  $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $MgO$  值和  $F/Cl$  及  $Sr/Ba$  比值;而一些易淋失的元素如  $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、及  $Ba^{2+}$  的丢失也不明显,因此  $CaO$ 、 $CaO/MgO$ 、 $CaO + Na_2O + K_2O/Al_2O_3$ 、 $SiO_2/Al_2O_3$  和  $FeO/Fe_2O_3$  各值较高。对于温暖潮湿的气候,以上各指标则具有相反的趋势。各气候旋回的特征如下:

第一旋回(1—9层):古地磁年龄为 7.4~6.4 Ma。总体上以干旱-半干旱和气候条件为主,孢粉多为耐干旱的草本植物,如 *Artemisiaepollenites*、*Chenopodipollis* 等,哺乳动物也主要为 *Hipparion*、*Acerorhiuns*、*Chilotherium*、*Sinotherium*、*Palaeotragus*、*Samotherium*、*Miotragocerus*、*Pleisiadex* 等一般生活在草原、疏林环境的类型。下部(1—4层)碎屑中石英的含量较低,大多在 25%~35%之间,长石及岩屑含量较高,分别在 5%~15%和 3%~7%之间(图1)。粘化层中粘粒的光性定向发育程度较差,其分布面积和厚度均较小,钙积层中次生碳酸盐矿物的含量接近于零(图1)。由于风化成壤作用弱,粒度以 0.05~0.01 mm 的风成基本粒组及粒度为 0.05~0.1 mm 的风成附加粒组为主,两者含量为 50%~70%,小于 0.005 mm 的粘粒含量低,而且大于 0.1 mm 的颗粒含量也高,为 3%~6.5%。 $CaO$ 、 $CaO/MgO$ 、 $CaO + Na_2O + K_2O/Al_2O_3$  比值较高,分别为 11.85%~22.00%, 7.85~18.03, 1.47~2.83。而  $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $MgO$  和  $Sr/Ba$  比值较低,分别在 2.52%~2.82%, 1.60%~1.82%, 8.62%~10.08%, 42.28%~57.43%, 1.22%~1.51%和 0.27(图1)。 $K_d$  值为 1.0~1.5,表明土壤的风化成壤作用及淋溶作用弱,气候应是干冷的。上部(5—9层)的粘化层中粘粒的光性定向发育程度稍高,其粘粒膜在层中的分布范围有所扩大,钙层中次生碳酸盐矿物的含量变较大,为 0%~15%,多集中在各粘土的下部及底部的淀积层中。碎屑中石英的含量有所增加,大多为 30%~40%,长石和岩屑的含量较稳定分别在 5%~10%和 3%~7%之间(图1)。 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $SiO_2/Al_2O_3$ 、 $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ 、 $F/Cl$  和  $Sr/Ba$  比值总体变化较稳定,呈小的波状起伏。其中  $MgO$ 、 $CaO$ 、 $FeO$  值及  $SiO_2/Al_2O_3$ 、 $FeO/Fe_2O_3$ 、 $CaO/MgO$

比值有逐渐减小的趋势,而  $F/Cl$  则表现出明显的递增趋势。 $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  及  $MgO$  的积累不明显(图1)。以上特征暗示,5—9层沉积时气候整体上较稳定,成壤作用及淋滤作用有所增强,为干旱-半干旱的草原森林环境。因此第一旋回的气候由早期的干旱-半干旱草原疏林环境向半干旱-半润草原森林环境过渡。

第二旋回 10—13 层:古地磁年龄为 6.4~5.8 Ma。其中第 10 层碎屑中石英的含量较高(35%~45%),而且长石和岩屑的含量也较高,分别为 5%~15%和 3%~10%,次生亮晶方解石的含量接近于零,而泥质杂基的含量较高(图1)。在整个剖面中具有最大的粉砂粘粒比值  $K_d$ ,为 2.5。粘化层中粘粒不具定向性。 $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $MgO$  的含量及  $F/Cl$  和  $Sr/Ba$  比值均较低,说明上述  $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $MgO$  的积聚程度不高。而  $CaO$ 、 $CaO/MgO$  及  $CaO + Na_2O + K_2O/Al_2O_3$  的值在整个剖面中达最高值, $Na_2O$  及  $K_2O$  也较高(图1),说明一些易淋失的元素如  $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$  及  $Mg^{2+}$  没有或者基本没有流失。上述特征表明 10 层沉积时以干冷气候为特征。11 层至 13 层,粘化层中粘粒含量较高,其分布面积及厚度均较大,粘粒的定向性较明显,碎屑中长石岩屑的含量由第 11 层向第 13 层逐渐减少, $F/Cl$  比值由低逐渐增高, $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  和  $Sr/Ba$  比值的变化不明显(图1)。钙层中的次生微晶方解石含量在 5%~10%之间。表明风化成壤作用及溶蚀淋滤作用均较强烈。总体上为半暖湿气候环境,化石中已出现 *Honanotherium*、*Chleuastochoerus* 等林栖或疏林栖动物。

第三旋回 14—17 层:古地磁年龄为 5.8~5.3 Ma。其中第 14 层与第 10 层类似,碎屑中石英的含量变化较大,在 22%~45%之间,长石 5%~10%,岩屑 5%~8%,孔隙 0~6%;大多小于 4%。次生亮晶方解石的含量接近于零,而原生灰泥杂基及泥质杂基的含量较高,分别在 25%~40%和 20%~40%(图1)。小于 0.005 mm 的粒组含量较低,而以 0.05~0.1 mm 的风成基本粒组和风成附加组为主,局部地段大于 0.1 mm 的粗粒组含量高达 6.5%,具有较高的  $K_d$  值(1.5~2.0)。粘化层中粘粒的定向性较差,在风化成壤作用中一些易积聚的元素如  $Fe^{3+}$ 、 $K^+$ 、 $Al^{3+}$ 、 $Si^{4+}$ 、 $Mg^{2+}$  的积聚及易淋失的元素如  $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Na^+$  的丢失均不明显,而  $F/Cl$  及  $Sr/Ba$  比值很低(图1)。暗示了第 14 层堆积及

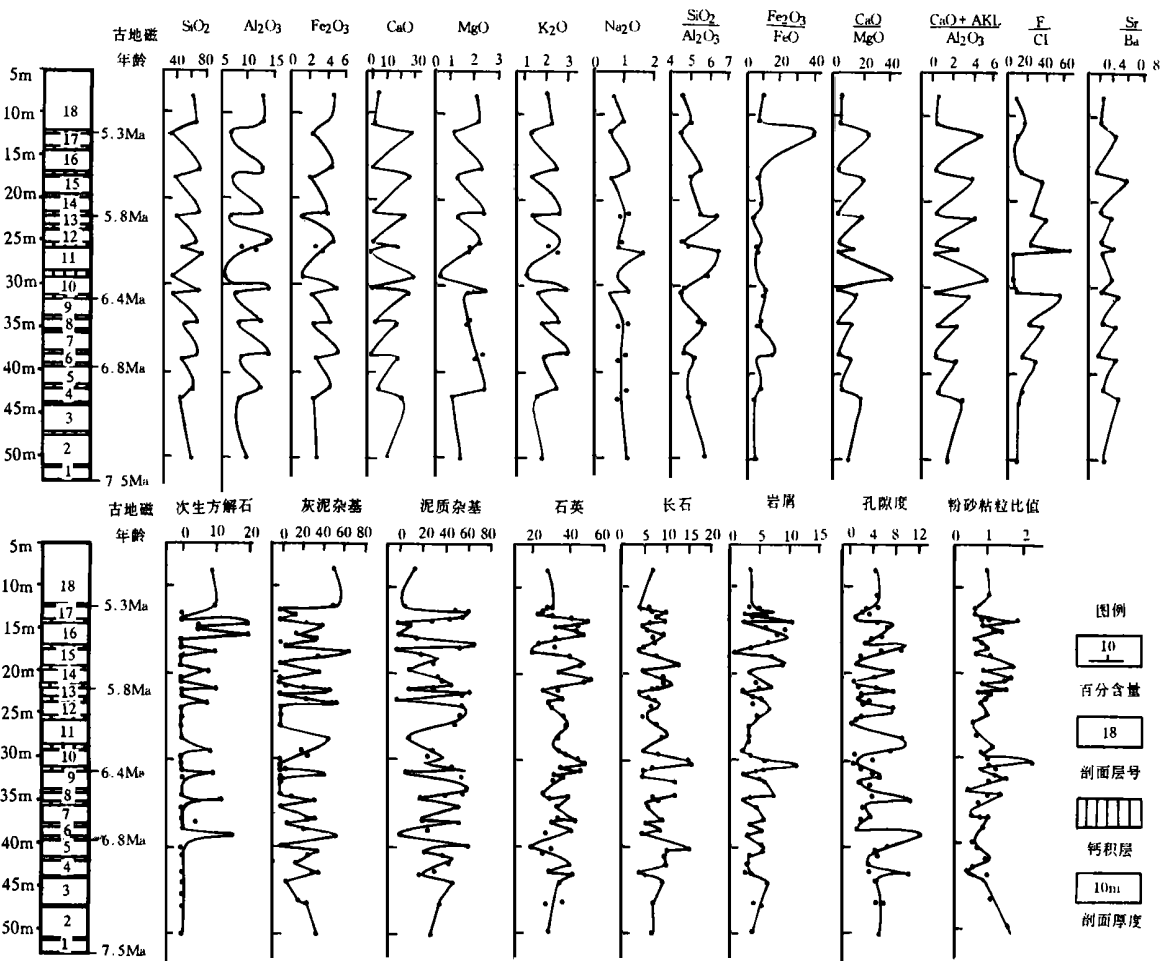


图 1 府谷三趾马红粘土层的化学成分及矿物成分曲线图

Fig. 1 Diagram of the mineral and chemical components of the Hipparion red clay in Fugu

成壤期的气候应以干旱-半干旱为特征。第 15~17 层, 碎屑中石英的含量高, 多在 35%~50% 之间, 长石与岩屑的含量分别在 3%~7% 和 2%~10%。与 11 层~13 层相比, 粘化层中粘粒的含量增高, 粘粒的定向性明显, Kd 值及  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  比值由低逐渐增高, Sr/Ba 比值由高逐渐降低(图 1)。钙质淀积层中次生微晶方解石的含量高, 在 5%~20% 之间, 淋溶作用及淀积作用较强。粘化层中  $Fe_2O_3$ 、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  相对积聚, 而 CaO、FeO、 $Na_2O$  及  $K_2O$  和  $MgO$  相对淋失而具有较高的  $SiO_2/Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3/FeO$  及 Sr/Ba 比值和较低的 CaO/MgO 及  $CaO+Na_2O+K_2O/Al_2O_3$  比值(图 1)。生物组合中木本阔叶植物和喜湿植物比例增大, 如 *Caryapollenites*、*Betula-ceipollenites*。哺乳动物大量出现, *Chleuastochaerus*、*Honanotherium*、*Eostyloceras*、*Muntiacus*、*Cervavi-*

*tus*、*Adcrocuta*、*Procapreolus* 等典型林栖动物类型。暗示了该旋回以雨量充足的半湿润-湿润气候为主。但 17 层沉积晚期气候有逐渐变干冷的趋势。

第四旋回(第 18 层): 古地磁年龄为 5.3~4.3 Ma。粘粒的定向性较差, 碎屑中石英的含量较低(25%~35%), 长石及岩屑的含量分别为 5%~10% 和 3%~8% 之间。Kd 值中等, 为 1.15~1.20。淀积层中的次生微晶方解石含量在 10% 左右, 灰泥杂基含量较高, 为 50% 左右。易积聚元素相对积聚, 因此  $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  及  $MgO$  值较高, 分别为 4.39%~4.72%、1.60%~2.09%、8.62%~13.33%、42.28%~61.45% 和 1.22%~2.16%, F/Cl 和 Sr/Ba 比值较低, 易淋滤的元素相对略集中, 因此, CaO、CaO/MgO 及  $CaO+Na_2O+K_2O+Al_2O_3$  比值较小,  $FeO/Fe_2O_3$  及  $SiO_2/Al_2O_3$  比值中

等(图1)。说明风化成壤作用及溶蚀淋滤作用较强烈,但与15~17层相比为弱,为半温潮湿的气候环境,晚期气候有逐渐变干冷的趋势。现有资料证实,上新世是我国古气候转向干旱的重要时期,这一认识与我们的资料完全吻合。

## 4 结果与讨论

(1) 黄河中游三趾马红粘土形成时的气候主要为干旱、半干旱-半湿润的草原森林环境,也有湿润和半湿的森林环境出现。这种气候的格局与演化特征可能与青藏高原隆起到高度足以阻挡印度洋暖湿季风向华北吹送的古地理格局有关。相比较而言,10层以下的气候整体上以干旱-半干旱的草原疏林气候为主,虽然古气候波动明显,但环境状况的差异不明显,10层(约6.0Ma)以后,相邻各层温差增大,环境状况的差异明显,这可能与青藏高原的隆起速度加快以及由之引起的气候进一步恶化有关。

(2) 以陕西府谷老川三趾马红粘土剖面为例,其形成经历了四个大的气候旋回:第一旋回(1-9层),古地磁年龄为7.4~6.4Ma,气候总体以干旱-半干旱的草原疏林为特征,晚期(5-9层)向半干旱-半湿润的草原疏林环境过渡。第二旋回(10-13层),古地磁年龄为6.4~5.8Ma,早期(10层)以干冷气候为特征,中晚期(11-13层)为半湿润的草原森林环境。第三旋回(14-17层),古地磁年龄为5.8~5.3Ma,早期(14层)为干旱-半干旱气候,中晚期(15-17层)为雨量充足的半湿润-湿润的草原森林环境。第四旋回(18层),古地磁年龄为5.3~4.3Ma,为半温暖潮湿的气候,晚期气候有逐渐变干冷的趋势。其中10层及14层为本区最干冷期。

(3) 各粘土层下部及底部的钙质淀层是由于风化成壤过程中碳酸盐从土壤上部淋滤并沿裂缝、孔隙向下运移再沉淀的结果。

(4) 各层之间粘化层的光性定向粘粒及淀积铁质粘粒胶膜的发育程度与古气候及淋溶作用的强度有关:粘粒胶膜分布面积及厚度大、光性定向明显是一种受淋滤较强的粘化,多形成于风化成壤作用强烈、气候温暖、年平均降水量大于750mm以上的森林区。而粘粒定向性较差,粘粒胶膜分布面积及厚度小,连续性差者是一种受淋滤较弱的粘化,多形成于年平均降水量小于或在400~600mm左右的森林草原和偏干旱的草原疏林区。

## 参 考 文 献

- 1 孙东怀,刘东生,陈明扬等.中国黄土高原红粘土序列的磁性地层与气候变化[J].中国科学.(D辑),1997,27(3):265~270
- 2 丁仲礼,孙继敏,朱日祥.黄土高原红粘土成因及上新世北方干旱化问题[J].第四纪研究,1997,2:147~157
- 3 文启忠,刁桂仪,贾蓉蕊等.黄土剖面中古气候变化的地球化学记录[J].第四纪研究,1995,3:223~231
- 4 刘东生.黄土与环境[M].北京:科学出版社,1985:188~292
- 5 张云翔,薛祥煦,岳东平.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,1995,19(3):214~219
- 6 薛祥煦,张云翔,岳东平.陕西府谷老高川三趾马动物群的发现及时代分期[J].科学通报,1995,40(5):447~449
- 7 赵景波.西安-山西保德第三纪晚期红土的研究[J].沉积学报,1989,7(3):113~120
- 8 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[J].中国科学(B辑),1994,24(2):216~224
- 9 安芷生,魏兰英.沉淀铁质粘粒胶膜及其成因意义[J].科学通报,1979,24(8):356~359
- 10 陈丹玲,张云翔,岳乐平等.陕西北部三趾马红粘土成土碳酸盐碳、氧稳定同位素特征及所记录的古气候演变[J].地球科学,1997,22(2):190~194

# Petrologic Study on the Late Neogene *Hipparion* Red Clay in the Middle Reaches of the Yellow River and Implications for Climatic Evolution

LUO Jing-lan ZHANG Yun-xiang

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

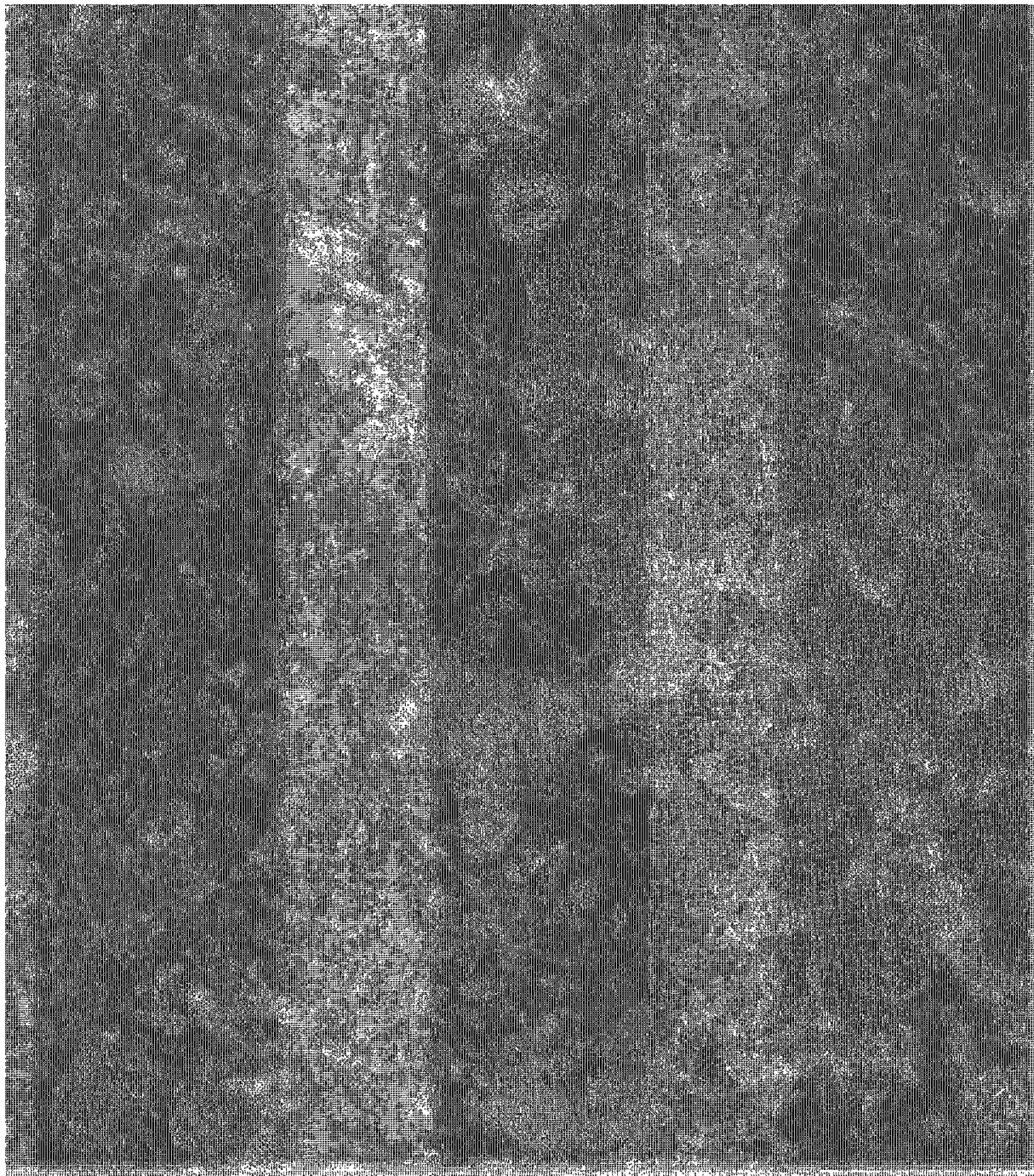
## Abstract

The reasonable interpretation of the genesis of the Late Neogene red clay has attracted increasingly attention due to its importance for better understanding of problems such as the evolution of the Quaternary paleoclimate and the Paleomonsoon. Several opinions have been documented. But a more systematic petrologic study on red clay has not been reported.

Recently we have made a careful field observation and conducted a systematic study on petrology, microtexture and morphology, geochemistry on several red clay sections in different parts in the middle reaches of the Yellow River, using thin section, SEM, X-ray diffraction, particle size and geochemical analysis. Field and laboratory studies show that the pedostratigraphic structure in different red clay sections can be fairly well correlated although they are located over far distances and the texture, mineral components exhibit an obvious homogeneity in different places. Our studies also found that preferentially oriented optical clay films are common in red clay. They mainly occur along the walls of pores and cracks as flowing colloid or as rim films around fragments. They were formed during soil-forming process and their development is controlled by paleoclimate. The developed optical clay films in red clay indicate a warm, wet forest climate accompanied by an intensely leaching process, while undeveloped ones imply an arid or semiarid prairie environment coupled with slight leaching. Our studies also show that calcareous concretion layer beneath the red clay horizon is an illuvial horizon which was resulted from eluviation of calc from the upper clay and by its migration and reprecipitation during pedogenic process of the red clay, implying a warm and wet climate with intensely leaching.

The *Hipparion* red clay was formed dominantly under an arid-semiarid prairie environment with subhumid-humid forest climate alternative. This climatic pattern was probably related with the paleogeographic pattern that Qing-Zang Plateau had elevated to a height that could blocked the warm and wet paleomonsoon blowing from the Indian Ocean to north China. The variation of the climate and differentiation of temperature among red clay layers became greater after about 6.0 Ma, this also attributed to the deteriorated climate resulted in accelerating elevation rate of Qing-Zang Plateau. Taking the *Hipparion* red clay in Ridge Wangdaifu, Fugu, northern Shaanxi province as an example, its formation experienced four main climatic cycles, according to the petrology, texture and micromorphological features as well as geochemical characteristics of the red clay. Each cycle initiated with arid or semiarid climate and ended with humid or subhumid climate.

**Key words** middle reaches of the Yellow River *Hipparion* red clay Paleoclimate



图版说明: 1. 粘土矿物以片状蒙脱石为主。×5000, 扫描电镜。样品采自14层21.6m处; 2. 粘土矿物主要为毡状及发状伊利石, 少量蒙脱石。×8000, 扫描电镜。样品采自14层20.5m处; 3. 泥晶钙质均匀分布于碎屑颗粒之间或粒表, 其为原生灰泥杂基。×400, 扫描电镜。样品采自13层24.5m处; 4. 同3, 局部放大, ×4000, 扫描电镜; 5. 由孔隙溶液再沉淀的方解石, 其为发育很好的菱面体晶。×2000, 扫描电镜。样品采自13层23.5m处; 6. 粘粒及黑云母呈明显的定向性, 黑云母(黑色条状)成扭曲状, 表明是成壤压实作用中形成的。×13.2, 单偏光。样品采自6层38.5m处; 7. 光性定向粘粒呈流胶状。×33, 单偏光。样品采自8层34.2m处; 8. 粘粒围绕碎屑呈薄膜状或环状分布, 系成壤过程中塑性流动形成。×66, 正交偏光。样品采自13层23.5m处; 9. 孔壁上分布的与孔隙壁平行的光性定向粘粒。×33, 正交偏光。样品采自17层14.5m处。