

豫西偃师龙门地区上石炭统本溪组含铝岩系 矿物学特征及其原岩分析

曹高社^{1,2)}, 张松¹⁾, 徐光明¹⁾, 杜忠¹⁾, 周红春³⁾, 李建全³⁾, 陈永才³⁾, 陈光³⁾

1) 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作, 454000;

2) 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 河南焦作, 454000;

3) 河南省地矿局第四地质勘察院, 郑州, 450001

内容提要:以华北陆块南部豫西偃师县龙门镇地区全取芯铝土矿钻孔 ZK4704 为主要研究对象,通过岩芯观察和垂向上连续取样,运用扫描电镜、能谱分析、X 射线衍射分析、差热分析、红外光谱分析等手段对本溪组含铝岩系的矿物学特征及其垂向变化规律进行了分析。研究表明,偃龙地区本溪组含铝岩系的矿物均为自生矿物,除后期重结晶作用的影响外,主要以隐晶质或微晶存在,矿物成分在垂向上具有明显的变化规律:下部和上部泥岩以粘土矿物为主,但下部泥岩以伊利石为主,上部泥岩以高岭石为主。中部铝矿物含量较高,粘土矿物含量较少。在上述分析基础上,以化学风化作用的基本原理和产生的条件为联结本溪组含铝岩系矿物学特征和原岩的纽带,分析了铝土矿的原岩。认为,可以迅速水解的火山灰是最有可能的含铝岩系的原岩,而由弱碱性的海相环境逐渐转变为弱酸性沼泽环境的海退序列可以很好地解释水解过程中化学环境的变化,含铝岩系基底强烈的古岩溶作用,可以为硬水铝石的产生提供良好的泄水条件。偃龙地区本溪组铝土矿的火山灰物源可由华北陆块北缘和我国西部地区同时期强烈活动的火山作用提供。

关键词:铝土矿;矿物学;物源;火山灰;水解;上石炭统本溪组;豫西

华北陆块南部上古生界的最底部地层本溪组是华北地区铝土矿的主要产出层位,其时代一般认为属于晚石炭世(裴放,2004)。本溪组下部为下古生界寒武系或奥陶系碳酸盐岩,其间有大约 1500 Ma 的地层缺失,造成这一地层缺失的原因一般认为是加里东运动所致(王鸿祯等,1982)。所以,本溪组铝土矿的产生也被归结为原岩长期风化作用的结果(廖士范等,1989,1991;刘长龄,2005),但是铝土矿的原岩是下伏的碳酸盐岩(廖士范等,1991),抑或是古陆铝硅酸盐(刘长龄等,1985;真允庆等,1991,1993),或者是两者兼而有之(温同想,1996),长期存在着争议,影响了对铝土矿成因的认识,也限制了铝土矿作为华北陆块一个重要构造界面上的沉积物所承载的沉积构造作用信息的挖掘。

对于本溪组铝土矿原岩的认识主要是基于铝土矿产出的层位和空间的分布情况、某些地球化学参数和重矿物的对比等进行间接推测的(廖士范等,

1989,1991;吴国炎等 1996;真允庆等,1993;温同想,1996;刘长龄,2005;班宜红等,2012),并没有从铝土矿的矿物学特征及其垂向变化的角度对原岩进行恢复和分析。本项研究通过对华北陆块南部豫西偃(师县)龙(门镇)地区钻孔网度为 400m × 260m 的 101 口全取芯铝土矿钻孔的详细观察,选择 ZK4704 井为主要研究对象(图 1),在垂向上连续取样,运用岩石薄片、带能谱的扫描电镜分析、X 射线衍射分析、差热分析和红外光谱分析等手段对本溪组含铝岩系矿物学和垂向变化规律进行分析,在此基础上,以化学风化作用的基本原理和产生的条件为联结含铝岩系矿物学特征和原岩的纽带,分析铝土矿的原岩,以期对本溪组铝土矿的成因研究,以及铝土矿所承载的地质信息的挖掘有所帮助。

1 样品采集和分析条件

通过大量钻孔岩芯的观察,发现几乎所有钻孔

注:本文为全国油气资源战略选区调查与评价(编号:1211302108023-2)和河南省两权价款项目(编号:20111-36-8)资助成果。

收稿日期:2015-02-28;改回日期:2016-04-18;责任编辑:黄敏。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.05.014

作者简介:曹高社,男,1965年生。博士,教授。主要从事构造地质有关方面的研究。通讯地址:河南省焦作市高新区世纪大道 2001 号。

Email:caogs@hpu.edu.cn。

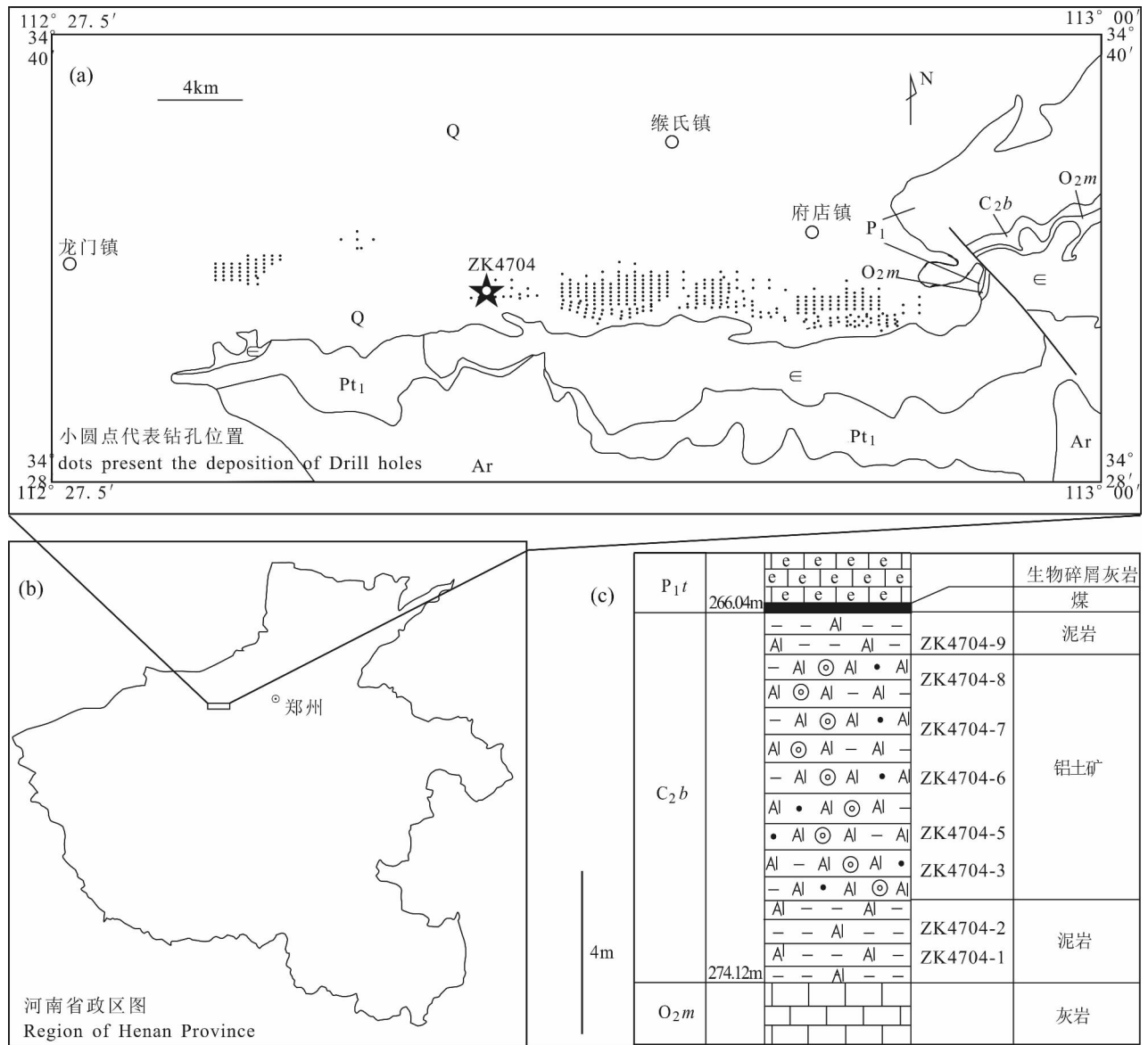


图 1 豫西偃龙地区地质简图和 ZK4704 钻孔柱状图(地质简图据 1: 20 万临汝幅地质图修改)

Fig. 1 Sketch geological map of Yanlong area, western Henan and lithological column of ZK4704
(sketch geological map modified from the 1: 200000 Geological Map of Linru area)

Q—第四系;P₁—下二叠统;C_{2b}—石炭统本溪组;O_{2m}—中奥陶统马家沟组;Є—寒武系;Pt₁—古元古界;Ar—太古宇
Q—Quaternary; P₁—Lower Permian; C_{2b}—Upper Carboniferous Benxi Formation;
O_{2m}—Middle Ordovician Majiagou Formation; Є—Cambrian; Pt₁—Lower Proterozoic; Ar—Archean

的本溪组含铝岩系的岩性和结构构造在垂向上具有明显的变化规律:下部为灰黑色致密块状泥岩,厚薄不一,最薄处只有数厘米或缺失,最厚可达数米,含有黄铁矿团块和不规则的纹层,与中部铝土矿呈截然的冲刷接触关系;中部铝土矿以块状构造,豆粒(或鲕粒)、碎屑结构为主,夹有多层泥岩薄层,并组成多个豆鲕(或碎屑)状铝土矿——泥岩的小旋回。该层厚度变化很大,最大厚度可达 60 余米,且局限

于零星的钻孔,一般小于 10m,与上部泥岩呈渐变过渡关系;上部为灰—灰黑色泥岩,发育微细水平纹层且向上部夹有煤线纹层,最上部以一层薄煤层(线)与太原组分界,厚度一般小于 5m。这一具有普遍性的垂向变化规律可能与铝土矿的成因有着深刻的内在联系,除了与沉积环境和水动力的差异有关外,亦可能与原岩化学风化的差异和风化程度具有相关性。所以,本项研究根据上述含矿岩系在垂向上的

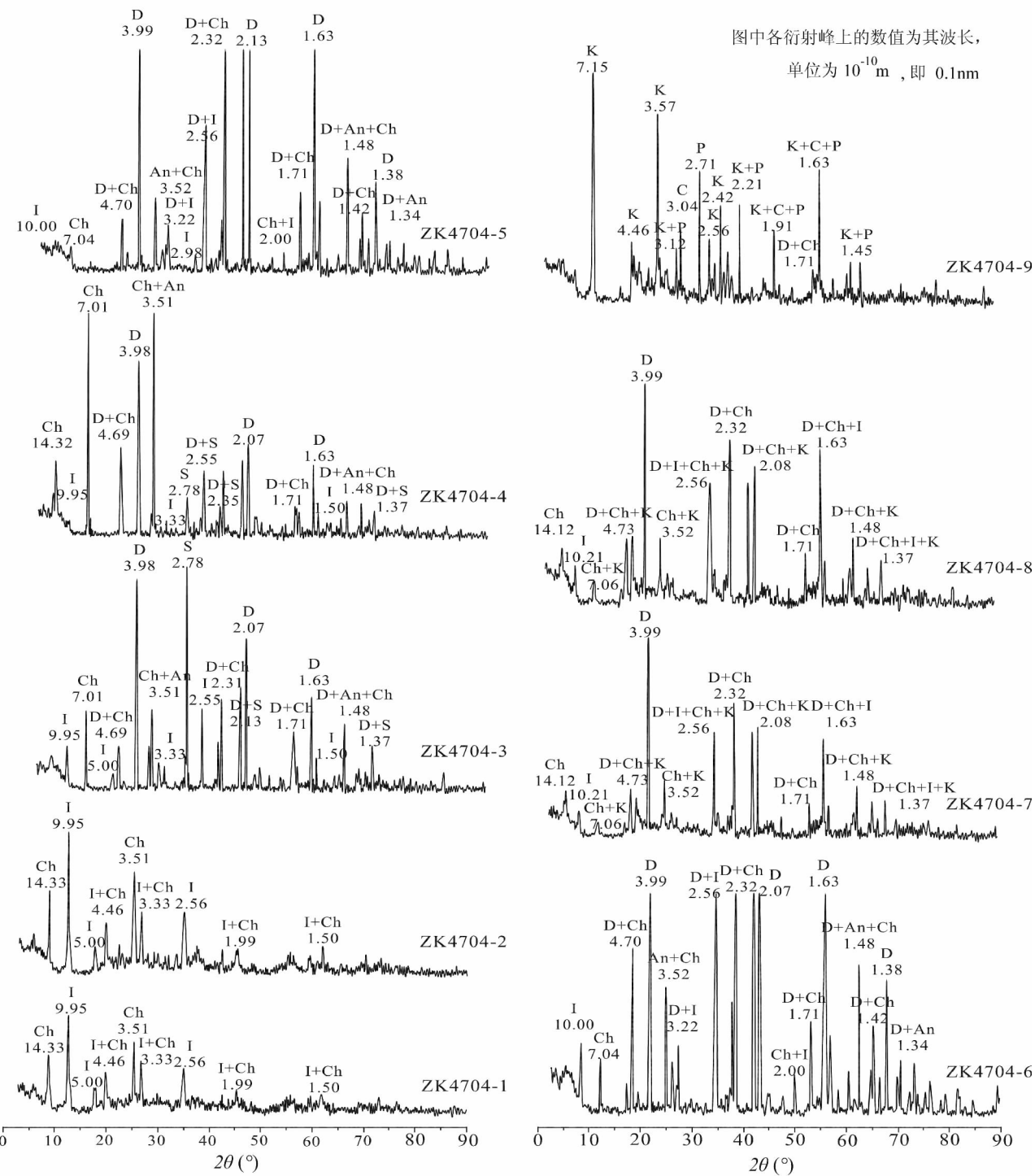


图 2 豫西偃龙地区 ZK4704 钻孔本溪组含铝岩系 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction analysis of Al-bearing rock series of ZK4704 in Benxi Formation, Yanlong area, western Henan
I—伊利石;Ch—鲕绿泥石;D—硬水铝石;An—锐钛矿;S—菱铁矿;K—高岭石;C—方解石;P—黄铁矿
I—illite; Ch—chamosite; D—diaspore; An—anatase; S—siderite; K—kaolinite; C—calcite; P—pyrite

变化规律,重点分析含矿岩系上部、中部和下部三个层位的矿物学特征和垂向上的变化规律,并进一步对铝土矿的原岩进行讨论(表 1)。

样品主要采用偏光显微镜和扫描电镜对矿物的形貌进行观察,通过 X 射线衍射分析对含矿岩系的主要矿物成分进行分析,同时运用差热分析、能谱分

表 1 豫西偃龙地区 ZK4704 钻孔本溪组含铝岩系采样表
Table 1 Sampling list of Al-bearing rock series of ZK4704 in Benxi Formation,
Yanlong area, western Henan

样品编号	岩性描述	采样位置(孔深,m)
ZK4704-1	泥岩,灰黑色,粘土质结构,块状构造,含团块状和草莓状黄铁矿。	274.22
ZK4704-2	泥岩,灰黑色,粘土质结构,块状构造,含团块状和草莓状黄铁矿。	273.42
ZK4704-3	铝土矿,灰色,致密状结构,块状构造,含有约 20% 的鲕粒和少量豆粒。	271.10
ZK4704-4	铝土矿,灰色,致密结构,块状构造,豆粒和碎屑 40%,豆粒粒径 2~4mm。	269.93
ZK4704-5	铝土矿,灰色,豆状结构,块状构造,豆粒粒径 2~4mm,含量约 30%。	269.33
ZK4704-6	铝土矿,灰色,豆状结构,块状构造,豆粒粒径 3~5mm,含量约 10%。	268.36
ZK4704-7	铝土矿,灰黑色,粘土质结构,块状构造,整体致密均匀,层理不发育。	267.28
ZK4704-8	铝土矿,灰黑色,粘土质结构,致密块状,含有零星豆粒。	266.18
ZK4704-9	泥岩,灰黑色,粘土质结构,水平层理发育,含有零星的黄铁矿。	266.08

析等辅助手段对矿物成分进一步确认。X 射线衍射为德国布鲁克 AXS 有限公司的 D8 ADVANCE,实验参数为: CuK α 靶,测试电压为 40kV,测试电流 25mA,扫描宽度为 3°~90°,扫描方式为连续扫描,发散狭缝尺寸为 0.6°,接受狭缝尺寸为 0.1mm,测量温度为 25℃;扫描电镜为日本电子株式会社的 JSM-6390LV 扫描电子显微镜,样品镀金膜;能谱仪为英国牛津仪器公司生产的 ZNCA-ZNERAGY250 型能谱仪;差热分析采用美国 TA 公司的 Q600 同步热分析仪,Ar 气保护氛围,升温速率为 15℃/min,升温范围为 20~950℃;红外光谱为 Bruke 公司的 V70 全自动切换傅里叶变换红外光谱仪,采用 KBr 压片,测试范围为 400~4000cm⁻¹,主要的测试工作在河南理工大学河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室完成。

2 本溪组铝土矿矿物学特征

2.1 下部泥岩矿物成分及组合特征

2.1.1 粘土矿物

下部泥岩 X 衍射图谱具有 1.0 nm 的整数基面衍射序列(图 2 中 ZK4704-1,ZK4704-2),这是伊利石矿物的主要特征峰,一些高级次衍射峰如 0.500 nm、0.333 nm、0.199 nm 较明显,此外还有一些衍射峰如 0.446 nm、0.256 nm、0.150 nm 均能对应。但是这些主强峰的强度并不是很大,一些非基面衍射峰缺失或者宽而弥散,反映了伊利石结晶程度较差的特点。此外,在 2 θ 角为 3°~30°之间,具有 1.4 nm、0.7 nm、0.47 nm、0.35 nm 四个基面衍射峰,为绿泥石的特征衍射峰,且由于在 0.7 nm 附近衍射峰较强,1.4 nm 衍射峰微弱,0.351 nm 衍射峰较强,应是其中 Fe 含量较高所致,为鲕绿泥石的特征衍射峰(赵杏媛等,1990)。

伊利石矿物的化学成分和结构变化较大,在差热分析中表现为从 400℃ 开始直至 900℃ 均存在脱羟基反应。下部泥岩的两个样品的差热曲线在 400~600℃ 范围内有一宽缓的吸热谷,同时伴随有较明显的热失重现象,为伊利石脱羟基所造成,在 850~1000℃ 有微弱的吸热效应,热失重现象微弱,为伊利石排除剩余的结构水所造成(图 3 中 ZK4704-1,ZK4704-2)。两个样品在 760℃ 有一微弱的放热峰,可能是含量较少的鲕绿泥石相变的放热反应(图 3 中 ZK4704-1,ZK4704-2)。红外光谱主要表现为伊利石的吸收特征,吸收波数为 3620 cm⁻¹、3412 cm⁻¹、1430cm⁻¹、1024 cm⁻¹、825 cm⁻¹、754cm⁻¹、536cm⁻¹、476cm⁻¹、420 cm⁻¹,其中 3620 cm⁻¹ 附近的宽缓 OH 伸缩振动吸收峰和 825cm⁻¹ 与 750cm⁻¹ 附近的吸收峰是伊利石矿物的特征吸收峰。鲕绿泥石在红外光谱中的特征不明显,可能与鲕绿泥石含量较少有关(图 4 中 ZK4704-1,ZK4704-2)。

薄片 中伊利石主要呈隐晶质集合体存在,单偏光和正交偏光下均呈褐黑色,在隐晶质集合体中见有板条状伊利石微晶,含量很少,单偏光下呈白色,正交偏光下呈淡绿色和淡蓝色,正低突起,定向性不明显,近均匀地分布于隐晶质伊利石中,且与隐晶质伊利石边界模糊,显系重结晶作用的产物(图 5a,图 5b)。

扫描电镜下,伊利石呈多种形态的不规则片状,每个片的厚度很小,片与片之间交叉叠织,使其集合体呈很薄的层状(图 5c),与伊利石晶体表面弯曲的鳞片状的形态相差较大,能谱分析主要元素有 C、K、Fe、Mg、Al、Si、O(图 5d),其中 K 含量较高,符合伊利石的元素特征。

2.1.2 其他矿物

岩芯和薄片 中,下部泥岩含有大量的团块状、草

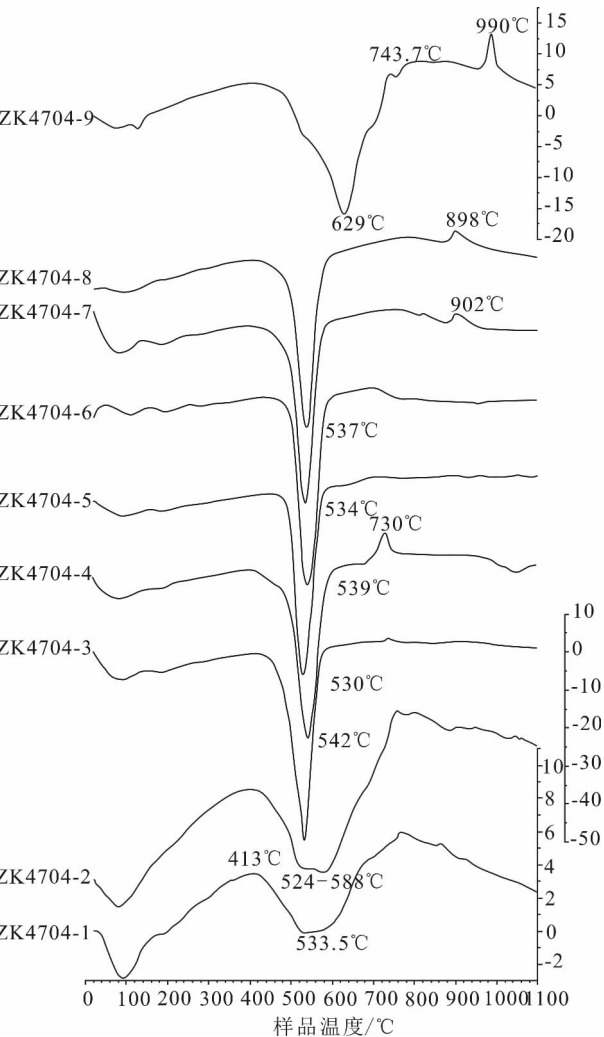


图 3 豫西偃龙地区 ZK4704 钻孔本溪组含铝岩系差热曲线

Fig. 3 Differential thermal curve of Al-bearing rock series of ZK4704 in Benxi Formation, Yanlong area, western Henan

莓状和立方体状黄铁矿,在 X 衍射、差热和红外光谱分析中,为避免干扰,样品处理时尽量选择肉眼未见黄铁矿的位置进行分析,因而在实验分析中未见有黄铁矿。此外,样品 ZK4704-2 的差热曲线在 524℃ 有一微弱的吸热谷,可能为少量的微晶硬水铝石的吸热反应。

2.2 中部铝土矿物成分及组合特征

2.2.1 铝矿物

中部铝土矿六个样品均具有硬水铝石 X 衍射的特征衍射峰 0.469 nm、0.398 nm、0.256 nm、0.232 nm、0.207 nm、0.163 nm、0.148 nm,且峰形尖锐,强度高(图 2 中 ZK4704-3, ZK4704-4, ZK4704-5, ZK4704-6, ZK4704-7, ZK4704-8)。差热曲线在

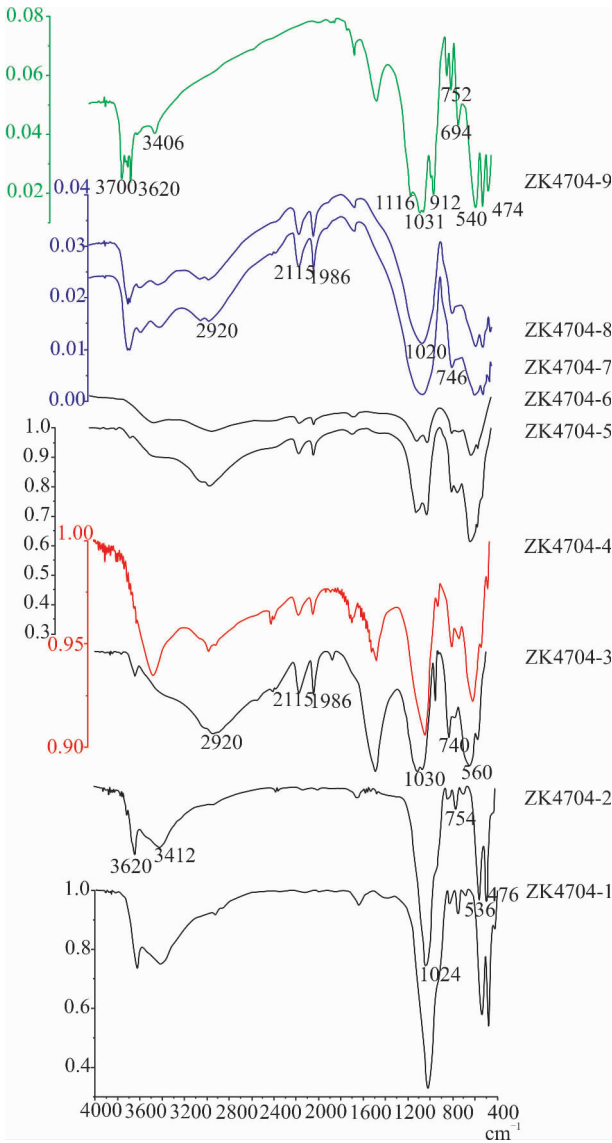


图 4 豫西偃龙地区 ZK4704 钻孔本溪组含铝岩系红外光谱

Fig. 4 Infrared spectrum analysis of Al-bearing rock series of ZK4704 in Benxi Formation, Yanlong area, western Henan

450 ~ 600℃ 均具有较强的吸热反应,吸热谷为 534 ~ 542℃,同时伴随有强烈的失重现象(图 3 中 ZK4704-3, ZK4704-4, ZK4704-5, ZK4704-6, ZK4704-7, ZK4704-8),主要为硬水铝石晶格受到破坏脱羟基的反应。红外光谱中红外光吸收波数主要有 2920cm⁻¹、2115cm⁻¹、1986cm⁻¹、1060cm⁻¹、970cm⁻¹、740cm⁻¹、560cm⁻¹,与硬水铝石的吸收波数一致(图 4 中 ZK4704-3, ZK4704-4, ZK4704-5, ZK4704-6, ZK4704-7, ZK4704-8)。

薄片硬水铝石主要呈隐晶质或微晶存在,隐晶质集合体在单偏光和正交偏光下均呈褐色,主要

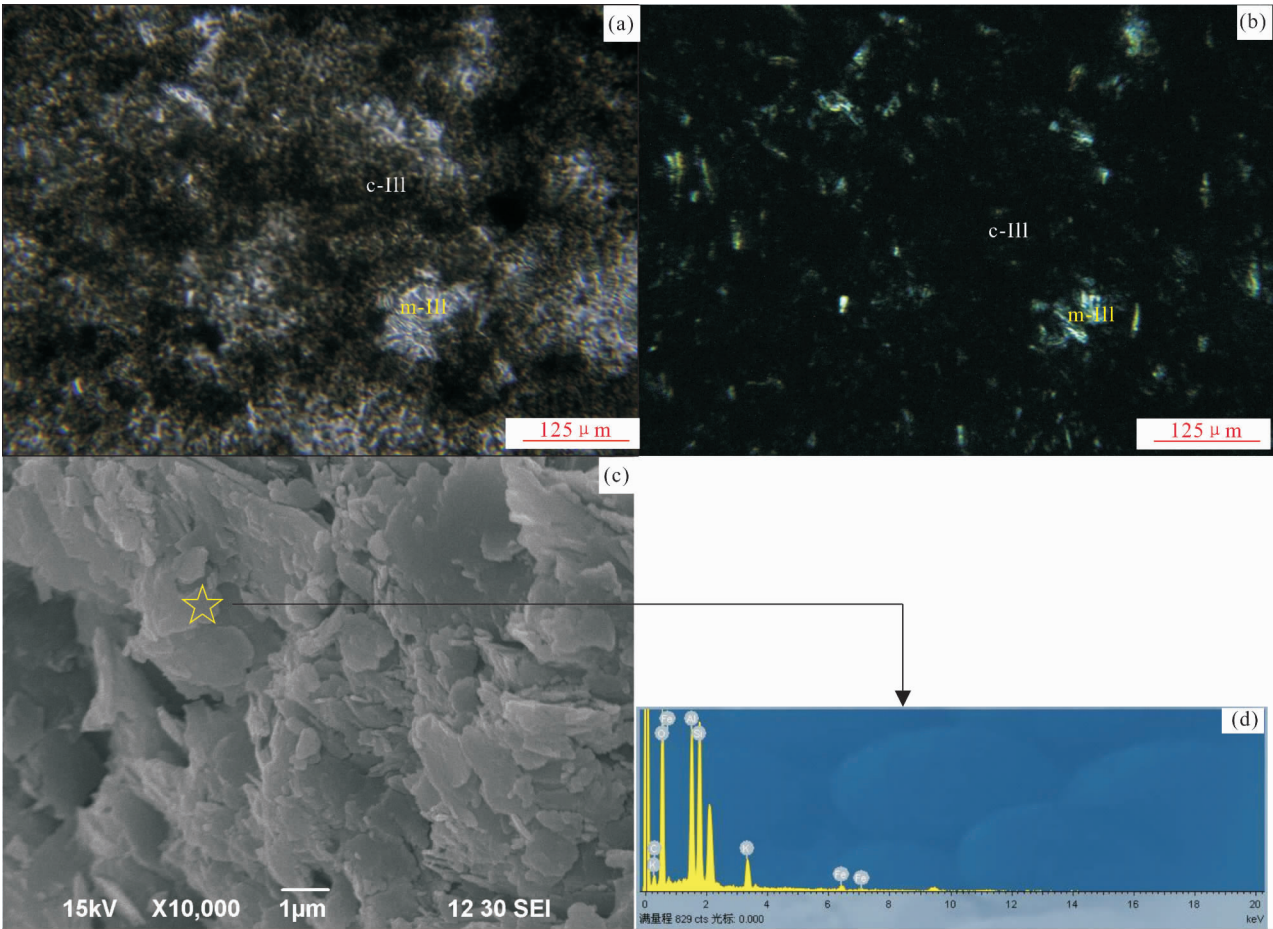


图 5 豫西偃龙地区 ZK4704 钻孔本溪组含铝岩系下部泥岩微观和超微观特征
Fig. 5 Micro and ultra-microscopic features of the lower mudstone of Al-bearing rock series of ZK4704 in Benxi Formation, Yanlong area, western Henan

(a) 伊利石隐晶质集合体单偏光下呈褐黑色,其中见有白色板条状伊利石微晶(×400),ZK4704-2;(b) 正交偏光伊利石隐晶质集合体呈褐黑色,伊利石微晶呈淡绿色和淡蓝色,定向性不明显;(c) 扫描电镜下伊利石呈不规则片状,集合体呈很薄的层状;(d) 能谱。c-III—伊利石隐晶质集合体;m-III—伊利石微晶

(a) black brown cryptocrystalline aggregate and white lath microcrystal of illite under polarized light microscope(×400), ZK4704-2; (b) black brown cryptocrystalline aggregate and light green or light blue lath microcrystal of illite with unconspicuous orientation under orthogonal polarization microscope; (c) irregular flaky illite and lamellar aggregate under SEM; (d) EDS. c-III—cryptocrystalline illite aggregate; m-III—microcrystal illite

存在于颗粒之间的胶结物中。硬水铝石微晶在单偏光下呈无色或灰色,正交偏光下为蓝色和绿色,正高突起,形态呈半自形—他形粒状、板柱状或针状,主要分布在不同类型和形状的颗粒中——碎屑状铝土矿中的碎屑以及豆鲕状铝土矿的鲕粒和豆粒中(图 6a,6b)。这些微晶的集合体呈交织镶嵌状,无定向排列,散布于隐晶质的硬水铝石中,反映了硬水铝石微晶系重结晶作用的产物。

扫描电镜下,靠近下部的样品 ZK4704-3 和 ZK4704-4 硬水铝石自形程度较差,为粒度较小、轮廓不规则的薄片,这些薄片一般在水平方向叠置,形

成微层状集合体(图 6c,6d)。至铝土矿中部样品 ZK4704-5 和 ZK4704-6,硬水铝石的含量增加,自形程度趋好,以半自形硬水铝石和短柱状硬水铝石为主,同时仍有较多的不规则薄片状硬水铝石(图 6e,6f)。中部铝土矿上部 ZK4704-7 和 ZK4704-8 样品未见有板柱状硬水铝石晶体,仍为不规则薄片(图 6g,6h)。能谱分析主要元素为 Al 和 O,其次为 Si、Ti、Fe,少量的 K、Na、Ca、Mg、S 和 C(图 6d,6f,6h),也表明主要矿物为硬水铝石,Fe、S 和 C 可能为黄铁矿和菱铁矿所具有,Si、K、Na、Ca、Mg 可能为少量粘土矿物所具有。

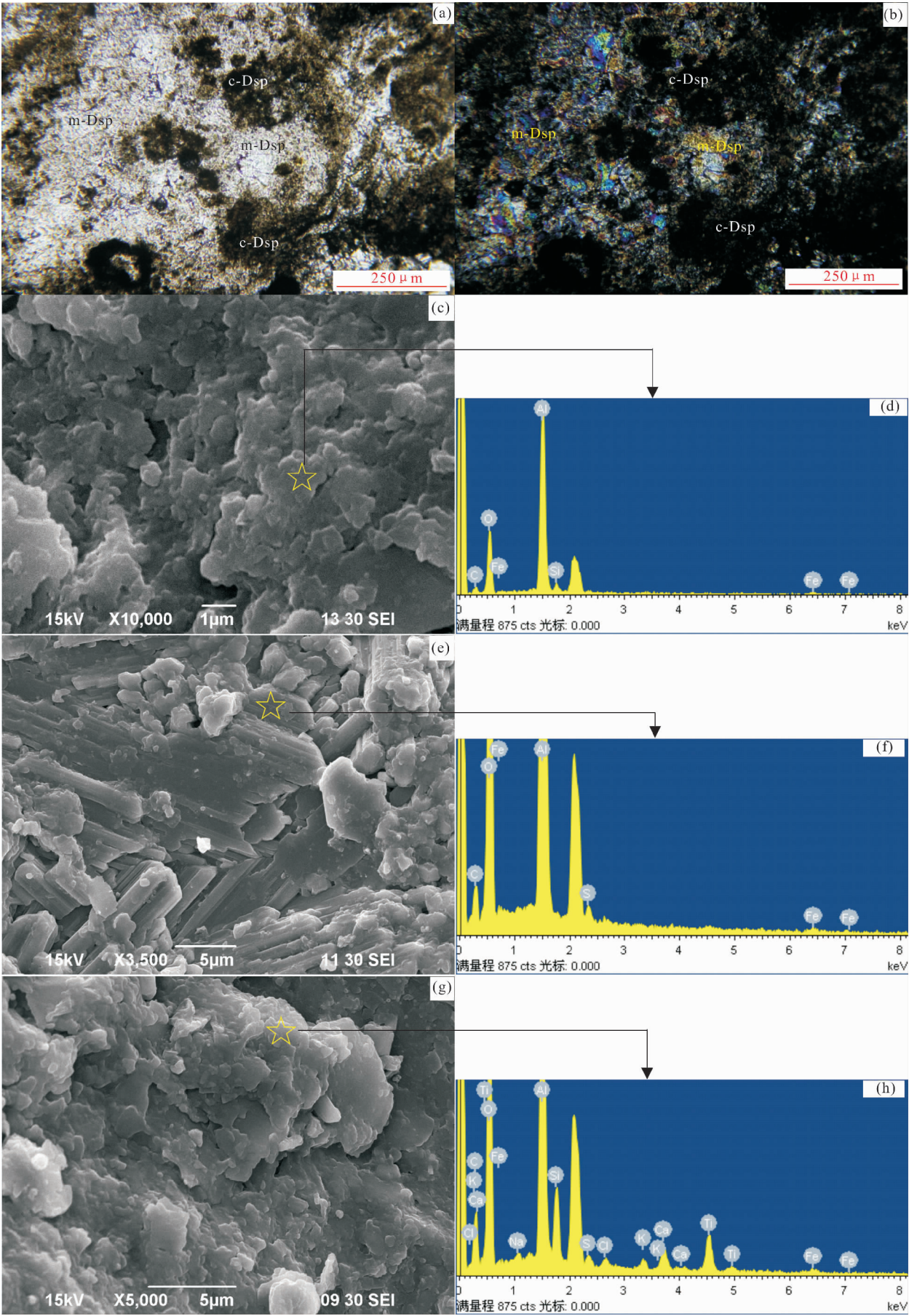


图 6 豫西偃龙地区 ZK4704 钻孔本溪组含铝岩系中部铝土矿微观和超微观特征
Fig. 6 Micro and ultra-microscopic features of the middle bauxite of Al-bearing rock series
of ZK4704 in Benxi Formation, Yanlong area, western Henan

(a) 硬水铝石隐晶质集合体在单偏光呈褐色,硬水铝石微晶在呈无色或灰色($\times 250$),ZK4704-6;(b) 正交偏光下硬水铝石隐晶质集合体呈褐色,硬水铝石微晶呈蓝色和绿色,形态呈半自形—他形粒状、板柱状或针状($\times 250$),ZK4704-6;(c) 扫描电镜下,靠近下部的样品硬水铝石自形程度较差,为粒度较小、轮廓不规则的薄片,ZK4704-3;(d) 能谱;(e) 中部样品硬水铝石自形程度趋好,以半自形硬水铝石和短柱状硬水铝石为主,同时仍有较多的不规则薄片状硬水铝石,ZK4704-5;(f) 能谱;(g) 上部样品硬水铝石晶体仍为不规则薄片状,ZK4704-7;(h) 能谱。c-Dsp—硬水铝石隐晶质集合体;m-Dsp—硬水铝石微晶
(a) colorless or gray microcrystal and brown cryptocrystalline aggregate of diaspore under polarized light microscope ($\times 250$), ZK4704-6; (b) brown cryptocrystalline aggregate and light green or light blue microcrystal of diaspore with subhedral—euhedral granular shape, tabular—prismatic shape and acicular shape under orthogonal polarization microscope ($\times 250$), ZK4704-6; (c) under SEM, poor euhedral diaspore with smaller particle size and irregular flaky contour near the lower portion of Al-bearing rock series, ZK4704-3; (d) EDS; (e) under SEM, euhedra short columnar diaspore at the middle Al-bearing rock series, also with irregular flaky diaspore, ZK4704-5; (f) EDS; (g) under SEM, irregular flakes diaspores near the upper portion of Al-bearing rock series, ZK4704-7; (h) EDS. c-Dsp—diaspore cryptocrystalline aggregate; m-Dsp—diaspore microcrystal

2.2.2 粘土矿物

中部铝土矿普遍具有 1.4 nm、1.0 nm 和 0.7 nm 的衍射峰,这是粘土矿物的主要衍射峰。1.4 nm 衍射峰是鲕绿泥石类矿物的特征衍射峰,并具有 0.70 nm、0.473 nm、0.446 nm、0.352 nm、0.256 nm、0.232 nm、0.213 nm、0.208 nm、0.171 nm、0.163 nm、0.162 nm、0.148 nm、0.143 nm、0.137 nm 的次级衍射峰,但鉴于主强峰强度较小,且次强峰与硬水铝石和高岭石的衍射峰存在重合,说明鲕绿泥石的结晶程度较差,含量较少。0.7 nm 衍射峰既是高岭石的特征衍射峰,也是鲕绿泥石的次级衍射峰,鉴于差热分析中上部两个样品 Zk4704-7 和 Zk4704-8 具有 900℃左右的放热峰,确定上部两个样品 Zk4704-7 和 Zk4704-8 的 0.7 nm 衍射峰为高岭石的特征衍射峰,其他样品的 0.7 nm 衍射峰为鲕绿泥石的次级衍射峰。1.0 nm 的衍射峰是伊利石的特征衍射峰,并具有 0.501 nm、0.445 nm、0.333 nm、0.322 nm、0.298 nm、0.256 nm、0.200 nm 的次级衍射峰,部分衍射峰与硬水铝石存在重合,伊利石的衍射峰整体强度较小,结合能谱分析中含有少量的 K 元素和红外光谱在 3630cm⁻¹、3400cm⁻¹、1030cm⁻¹有微弱的吸收,所以确定样品中普遍存在伊利石,但伊利石结晶程度较差,含量较少。

2.2.3 其他矿物

样品中普遍具有锐钛矿的 0.35 nm、0.18 nm、0.14 nm 的主要衍射峰,其他峰也有对应,但强度较弱。能谱分析显示硬水铝石中含有少量的钛元素,表明锐钛矿在中部铝土矿中普遍存在,但含量较少,结晶较差,应是同生的锐钛矿或呈类质同象的方式存在于铝土矿中。

ZK4704-4 样品具有菱铁矿的 0.278 nm、0.255 nm、0.235 nm、0.213 nm、0.173 nm、0.137 nm 的特征衍射峰,差热曲线在 730℃有较明显的放热峰,为二价铁离子转化为三价铁离子的放热反应,在扫描电镜下,菱铁矿主要呈板状、柱状和胶状。

此外,中部铝土矿具有黄铁矿 0.27 nm 和 0.31 nm 的主要特征峰,说明黄铁矿仍普遍存在。

2.3 上部泥岩矿物学特征

2.3.1 粘土矿物

上部泥岩 X 衍射图谱中 0.715 nm 和 0.357 nm 的衍射峰强度较大(图 2 中 ZK4704-9),这是高岭石矿物的特征衍射峰。此外,高岭石的其他次级衍射峰如 0.446 nm、0.312 nm、0.256 nm、0.242 nm、0.221 nm、0.191 nm、0.163 nm 和 0.145 nm 对应也较好,但 20~25°(2 θ)内衍射峰强度微弱,表明高岭石的结晶程度较差。差热曲线在 450~700℃有一个幅度较大的吸热谷,并在 629℃达到最大值,为高岭石脱羟基组分的反映,在 990℃有一个特征明显的放热峰,为高岭石莫来石化形成的放热峰,表明上部泥岩的主要矿物成分为高岭石,但吸热谷和放热峰的宽度都较大,说明高岭石的结晶程度较差(图 3 中 ZK4704-9)。红外光谱的吸收波数主要有 3700cm⁻¹、3620cm⁻¹、3406cm⁻¹、1116cm⁻¹、1031cm⁻¹、1008cm⁻¹、912cm⁻¹、794cm⁻¹、758cm⁻¹、752cm⁻¹、694cm⁻¹、540cm⁻¹、474cm⁻¹、422cm⁻¹(图 4 中 ZK4704-9),与高岭石的标准红外光谱吸收波数一致,也说明上部泥岩的主要矿物成分为高岭石,但整体上吸收波数较弱,且不具有 3669cm⁻¹和 3652cm⁻¹两个吸收峰,758cm⁻¹吸收峰的强度大于 794cm⁻¹吸收峰的强度,也说明高岭石结晶程度较

差。薄片中高岭石主要呈隐晶质集合体存在,单偏光和正交偏光下均呈黑色或褐色,少量的薄板状高岭石微晶散布于隐晶质集合体中,单偏光下无色,正交偏光下为蓝色或淡黄色(图 7a,7b)。

扫描电镜下,高岭石呈极不规则的微小的薄片状,薄片的厚度在数纳米至数十纳米之间,并堆积成微层状,未见有结晶较好的六方片状高岭石以及蠕虫状和书状集合体。能谱分析主要元素为 Al、Si、O,且 Al、Si 的原子百分含量比值接近 1:1,与高岭石中 Al、Si 的比值一致,同样表明上部泥岩的主要矿物成分为高岭石(图 7c,7d)。

2.3.2 其他矿物

X 衍射图谱中具有方解石的 0.304 nm 的特征衍射峰,差热曲线在 756℃ 有一个微弱的吸热谷,认为上部泥岩中含有少量的方解石,薄片中方解石主要呈脉体存在。钻孔岩芯中含有少量的团块状黄铁矿,X 衍射分析中也发现有 0.27 nm 和 0.31 nm 的特征峰,表明黄铁矿的存在。

3 本溪组铝土矿原岩分析

上述分析表明,本溪组含铝岩系中的矿物主要是粘土矿物和硬水铝石。粘土矿物普遍存在于含铝岩系中,主要呈隐晶质或微晶,微晶具有明显的重结

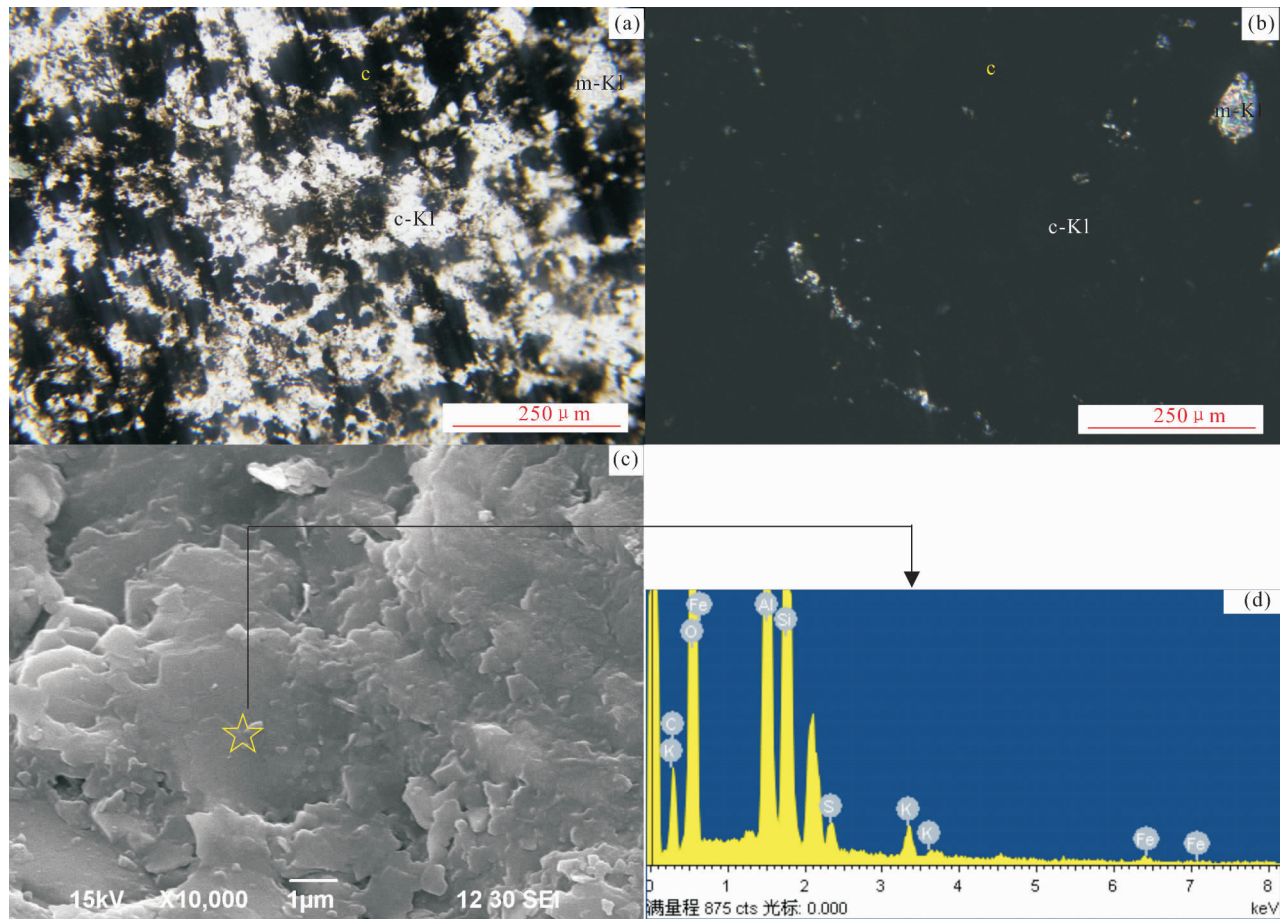


图 7 豫西偃龙地区 ZK4704 钻孔本溪组含铝岩系上部泥岩微观和超微观特征

Fig.7 Micro and ultra-microscopic features of the upper mudstone of Al-bearing rock series of ZK4704 in Benxi Formation, Yanlong area, western Henan

(a) 高岭石隐晶质集合体单偏光呈黑色或褐色,少量的薄板状高岭石微晶散布于隐晶质集合体中,单偏光下无色(×250),ZK4704-9;(b) 高岭石隐晶质集合体正交偏光下呈黑色或褐色,高岭石微晶为淡蓝色或淡黄色(×250),ZK4704-9;(c) 扫描电镜下,高岭石呈极不规则的微小的薄片状,ZK4704-9;(d) 能谱。c-Kl—高岭石隐晶质集合体;m-Kl—高岭石微晶;C—碳质

(a) black or brown cryptocrystalline aggregate of kaolinite with a small quantity of colorless thin plate microcrystal under polarized light micro-scope (×250), ZK4704-9; (b) black or brown cryptocrystalline aggregate of kaolinite and light blue or yellow microcrystal of kaolinite under orthogonal polarization microscope (×250), ZK4704-9; (c) very irregular small flaky kaolinites under SEM, ZK4704-9; (d) EDS. c-Kl—kaolinite cryptocrystalline aggregate; m-Kl—kaolinite microcrystal; C—carbon

晶作用的特点。垂向上,粘土矿物的成分具有显著的变化规律:下部泥岩几乎全部为伊利石;中部铝土矿粘土矿物减少,其下部主要含伊利石,其上部主要含高岭石;上部泥岩几乎全为高岭石。硬水铝石主要出现在中部铝土矿中,也主要以隐晶质或微晶存在,后者主要出现在不同类型的颗粒中,也具有重结晶作用的特点。黄铁矿在含铝岩系中普遍存在,除上部泥岩外,鲕绿泥石也普遍存在。

粘土矿物可分为自生粘土矿物和它生粘土矿物。后者主要指来自目前所构成的岩石以外的粘土矿物,显然是物理风化对先成粘土矿物的机械破碎、搬运和再沉积的产物,这类粘土矿物具有明显的磨蚀特征,且可能随着源区的不同,粘土矿物的成分、粒度和结晶程度存在较大的差异,但本区粘土矿物在同一层位中相对均一,以单一的隐晶质或微晶存在,集合体形态各异,且具有棱角,显然不是物理风化再搬运的产物。自生粘土矿物主要指就地形成或再生的粘土矿物,它们多具有化学成因,或作为溶液(或胶体)的沉淀产物,或是先存矿物的水解产物,或成岩作用过程中粘土矿物的转化产物。尽管有学者提出海洋中的粘土矿物可以在河流附近,由不同成分和性质的胶体絮凝作用形成(阿尔汉格斯基,1959),但整个华北陆块南部的本溪组以一致的、相似于本文描述的含铝岩系为特点,未见有任何的河流沉积的特点,此外,Al也不可能长距离地迁移,更不可能与活性的Si一同长距离地迁移(布申斯基等,1984),显然,形成如此大面积分布的粘土矿物不可能是胶体絮凝作用的产物。所以,本区粘土矿物应是先存矿物的水解产物或成岩作用过程中粘土矿物的转化产物。研究表明,成岩过程中,随着埋深的增加,粘土矿物均具有向伊利石或绿泥石转化的特点(Garrels et al., 1971)。但本区含铝岩系下部泥岩的伊利石不可能是高岭石转化的产物,否则,无法解释仅隔几米的距离,上部的高岭石没有转化为伊利石。一般认为,先存矿物水解产生的高岭石是在开放或者半开放的体系中,介质主要为酸性的条件下,原岩强烈脱K等碱性元素形成的(Dixon et al., 1989),如若在成岩期由高岭石转变为伊利石,则必须有K离子的参与和介质由酸性转变为碱性,这些都要有活动的富钾流体的存在(Berger et al., 1997; Lanson et al., 2002),本区含铝岩系主要为泥岩,不具有流体迁移的条件,即使有这样的流体,也不可能上部保存高岭石,下部产生高岭石向伊利石的转变。所以,含铝岩系下部泥岩中的伊利石可能

是在埋藏作用下由蒙皂石转变而来的,转化所必需的K离子由地层本身含钾物质的溶解提供,或由富钾蒙脱石自身提供,因为产生蒙皂石的水解相较产生高岭石的水解,风化程度较低,碱性元素不可能被带走很远,甚至多被吸附在新形成的粘土矿物的表面(Borchardt, 1989),其中的钾元素可为后期蒙皂石向伊利石的转化所利用(Tatsuo Kimura et al., 1994; Lynch et al., 1997)。上部泥岩的高岭石显然不可能是在成岩埋藏作用下由其它粘土矿物转化而来(Braide, 1987; Foscolos et al., 1980),也不可能是成岩期的自生粘土矿物,因为成岩期自生的高岭石多与砂岩中长石的水解有关,具有良好的晶形(Wilson et al., 2014)。所以,上部泥岩的高岭石只有可能是原岩在表生环境下水解的产物,在成岩过程中由于缺少钾离子的参与,没有发生高岭石向伊利石的转化。除上部泥岩外,普遍存在的鲕绿泥石可能是介质中一部分 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 与蒙皂石反应的结果,地层中普遍具有的成岩期黄铁矿的存在,说明成岩期有大量 Fe^{2+} 的存在,至于 Mg^{2+} 可能是蒙皂石在伊利石化过程中释放的(Freed, 1989; Roberson et al., 1981)。硬水铝石应是成岩压实过程中由三水铝石转变而来(巴多西等, 1994),三水铝石系红土化过程中,存在有良好的泄水条件时,原岩彻底水解的产物,这一认识已被人们所公认。

所以,本溪组含铝岩系总体上为原岩水解的产物,不同层位中矿物成分的差异尽管与成岩后生变化有关,但可能主要与表生环境下原岩水解过程中的环境因素和原岩水解的程度有关。此外,还要求含铝岩系的原岩具有迅速和易于风化的特点,否则,不可能造成在相对短的时间内原岩矿物的彻底消失、下部伊利石上部高岭石的粘土矿物分层性,以及仅在含铝岩系中部产生三水铝石的特点。

目前,对于形成铝土矿的原岩主要有两种不同的认识:含铝岩系基底的碳酸盐岩和铝土矿形成时古隆起提供的铝硅酸盐。持基底碳酸盐岩为原岩的学者,认为碳酸盐岩中的粘土矿物可以风化水解成铝土矿(廖士范等, 1991),但姑且不论碳酸盐岩中粘土矿物能否经过风化作用还能保存下来,即使这些粘土矿物能够保存下来,能够彻底水解形成三水铝石,但它们不可能再由三水铝石转变为不同类型的粘土矿物,形成上述含铝岩系的三层结构。事实上,在地表条件下粘土岩中的高岭石再次风化是困难的(引自巴多西, 1990),因为粘土岩中的高岭石晶格是相当稳定的。此外,统计表明,碳酸盐岩分布

区的铝土矿只有在较纯的灰岩上才能形成,而泥岩夹层多或泥灰岩地区则没有铝土矿的存在(Zarasvandi et al., 2008)。持古隆起上铝硅酸盐为原岩的学者,认为铝硅酸盐中含有丰富的铝并易于水解形成铝土矿(真允庆等, 1991, 1993; 刘长龄等, 1985),但暂且不论当时古老隆起是否存在(陈旺, 2007),即使存在这样的古隆起,铝硅酸盐风化速率也不会那么快,造成原岩矿物的彻底消失、粘土矿物的分层性和仅在含铝岩系中部产生三水铝石的特征。研究表明,最容易发生红土化的基性和超基性火山岩要形成铝土矿至少需要 2 ~ 5Ma(引自巴多西, 1990),而研究区本溪期如果对应卡西莫夫阶和格泽里阶(席文祥等, 1997),其沉积时间也仅为 7.5Ma,要完成上述含铝岩系一系列的矿物学变化,并完全失去母岩的矿物学特征显然是不可能的。

注意到,含矿岩系中隐晶质的粘土矿物和硬水铝石往往呈微小的不规则的薄片,并组合成微层状,可能继承了原岩的结构构造特征,由于这种不规则的薄片磨蚀程度小,排除了水流搬运的可能,所以,从结构上说,空降的微小颗粒的沉积物是最有可能的含铝岩系的原岩,由于这些颗粒的粒度多在 2 μm 以下,所以这些空降的微小颗粒就是火山灰。研究认为,由火山碎屑形成的粘土矿物可以不同程度地保留火山玻屑的外形(Williamson, 1970; 张慧, 1992),并在后期粘土矿物的转化过程中被保留下来(张慧, 1992)。从成分上说,火山灰具有极好的比表面积、极好的渗透性、极易水解的组分,完全可以发生迅速的水解(Shoji, 1994),产生含铝岩系的矿物组合。

含铝岩系上部泥岩发育微细水平纹层,其中富含炭质纹层,愈往上部炭质纹层增加,并逐渐过渡到太原组底部的煤层,说明上部泥岩沉积环境主要为沼泽。沼泽环境下,富含植物腐烂产生的有机酸,可使环境为酸性,有利于火山灰向高岭石的转变(梁绍暹等, 1995)。含铝岩系中部铝土矿的上部也含有少量的高岭石,再往下部高岭石消失,伊利石含量增加,并过渡为下部泥岩较为单一的伊利石。反映了沉积环境逐渐由弱酸性转变为弱碱性,而由弱碱性的海相环境逐渐转变为弱酸性沼泽环境的海退序列可以很好地解释这一化学环境的变化。

野外和岩芯观察,以及前人的研究(胡安国等, 1993; 吴国炎等, 1996)均表明,含铝岩系下部寒武系或奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用强烈,尤其在富含硬水铝石、厚度大的含铝岩系的下部,古岩溶作用尤其

强烈。岩溶作用的产生需要良好的泄水条件,而强烈岩溶作用与硬水铝石的紧密相关性,充分说明了良好的泄水条件对产生硬水铝石的促进作用。

岩相古地理研究表明,研究区在本溪组沉积时期是一个向北缓倾的斜坡(杨起, 1987),由海侵作用主导的海退序列中,可以产生宽广的粉砂淤泥质海岸向陆侧的大面积的近岸沼泽(任明达等, 1981)。这一环境下,陆源碎屑供给匮乏,水体很薄,接近于地表,并具有缓慢的沉降作用,易于对飘落的火山灰产生富集,这是华北上古生界火山灰蚀变粘土岩夹矸(Tonstein)主要与煤层相伴生的原因(梁绍暹等, 1995),也同样是华北陆块南部晚古生代海侵初期易于产生铝土矿的原因。这一由海侵作用主导的海退序列,也造成了水体的物理化学条件的改变,导致了含铝岩系粘土矿物的分层性,中部铝土矿则是在这一海退过程中,由于基底碳酸盐岩的喀斯特化产生良好的泄水条件所导致的。

火山灰作为岩溶型铝土矿的物源早在 20 世纪 40 年代就已提出,Goldich 和 Bergquist(1947, 1948)最早认为在伊斯帕尼奥拉岛上的铝土矿是由落在凹凸不平的石灰岩上的安山—玄武质火山灰形成的(引自巴多西, 1990)。D'Argenio 等(1969)对意大利阿布鲁齐山坎波菲利切铝土矿的古地理研究后认为,该地区在铝土矿形成时为一个群岛,成矿物源唯一的可能是飘落在这一群岛上的火山灰。太平洋伦内尔岛上的铝土矿也有相似的成因(Taylor and Hughes, 1975)。Muhs 等(2009)通过对牙买加海岸红土地球化学分析,认为牙买加铝土矿的成矿物质来源可能是来自非洲的火山灰。

晚石炭世,各大陆逐渐靠近,洋盆逐渐缩小,大陆边缘不断发生剧烈的构造运动,并导致大陆向外增生。石炭纪晚期,大部分大陆都完成对接联合,早二叠世末期,西伯利亚古陆与中国古陆最后对接联合,形成统一的古大陆——潘吉亚大陆(Pangea)(王鸿祯, 1997)。这一背景下,华北陆块周缘,尤其是北缘和西部地区构造作用强烈,伴随着强烈的火山作用,具有产生大量火山灰的背景条件。

华北陆块北缘石炭纪晚期的火山岩仅有少量分布,但大面积分布着该时期的侵入岩,不仅主要分布在内蒙古隆起上,也在冀东遵化、冀北崇礼—赤城—隆化、山西临县等地区有所分布,岩性主要为闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩及花岗岩(杨兴科等, 2006; 王芳等, 2009; 张拴宏等, 2010)。对这些侵入岩侵位深度研究表明,内蒙古隆起在晚古生代—早

中生代期间经历了强烈的剥露作用,剥露幅度达到 15 ~ 18 km (张拴宏等,2004; Zhang shuan hong et al. ,2006)。在这种强烈的剥露过程中,华北地块北缘大量的石炭纪晚期火山岩可能被剥蚀。根据内蒙古大青山、河北兴隆、山西大同、宁夏银川,以及华北陆块腹地的石炭—二叠系地层中发现的凝灰岩层(冯宝华,1989;梁绍暹等,1995;钟蓉等,1995;贾炳文等,1999;周安朝等,2001),以及对北京西山上古生界凝灰岩夹层(Zhang shuan hong et al. ,2007)和山西宁武—静乐盆地上石炭统太原组碎屑锆石(李洪颜等,2009) U-Pb 测年及微区 Lu—Hf 同位素分析,表明物源区主要为华北陆块北缘的内蒙古隆起。因此,晚古生代期间在内蒙古隆起上应该存在有与安第斯型活动大陆边缘有关的古火山活动(张拴宏等,2010),这得到了岩石组合、矿物组合、岩石地球化学、同位素组成及空间分布等方面证据的支持(Ducea,2001; Lackey et al. ,2005),这一古火山活动与古亚洲洋板块向华北克拉通俯冲有关(李孟江等,2012)。

华北陆块西部天山地区分布有大量的石炭纪晚期火山岩和火山碎屑岩,被认为是古亚洲洋北侧的西伯利亚板块和南侧的塔里木板块,以及古亚洲洋中诸多小陆块俯冲、碰撞的岛弧火山岩或拼合后形成的陆相火山岩(Allen et al. ,1992; Sengor et al. ,1993)。伴随着古亚洲洋的消亡,该时期华北陆块与我国西部的诸多的陆块已成为欧亚板块的一部分,已相当靠近,具有提供大量火山灰的可能。

华北陆块南缘未发现广泛分布的海西期岩浆岩,大别山北缘石炭系沉积岩地层的碎屑锆石年龄也主要集中在 400 ~ 480 Ma (Li et al. ,2004),没有晚古生代年龄出现,说明华北陆块南缘晚石炭世相对平静,没有明显的构造岩浆活动。

上述分析表明,石炭纪晚期伴随着古亚洲洋的消亡,在华北陆块的北缘和我国西部地区存在有广泛的火山活动,完全可能为华北陆块腹地本溪组铝土矿提供充足的火山灰物源。

4 结论

华北陆块南部本溪组含铝岩系中的矿物在垂向上具有显著的三分性:下部泥岩以伊利石为主;中部铝土矿以硬水铝石为主,并普遍含有少量的粘土矿物,其下部以伊利石为主,其上部以高岭石为主;上部泥岩以高岭石为主。含铝岩系矿物组合的差异性尽管与成岩后生变化有关,但主要与表生环境下原

岩水解过程中的环境因素和原岩水解的程度有关。可以迅速水解的火山灰是最有可能的含铝岩系的原岩,而由弱碱性的海相环境逐渐转变为弱酸性沼泽环境的海退序列可以很好地解释水解过程中化学环境的变化,含铝岩系基底强烈的古岩溶作用,可以为硬水铝石的产生提供良好的泄水条件。华北陆块的北缘和我国西部地区存在有广泛的石炭纪晚期火山活动,完全可能为华北陆块腹地本溪组铝土矿提供充足的火山灰物源。

致谢:测试工作得到了河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室宋党育教授的帮助,研究工作得到了河南省地质矿产勘查开发局第四地质勘查院杜欣教授级高工和刘国印教授级高工等的支持!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

阿尔汉格斯基(苏). 1959. 苏联铝土矿类型及其成因. 陈良. 译. 北京: 科学出版社: 1 ~ 90.

巴多西 G,阿列瓦 G J J. 1994. 红土型铝土矿. 顾皓民. 译. 沈阳: 辽宁科学技术出版社,1 ~ 541.

巴多西 G. 1990. 岩溶型铝土矿(碳酸盐岩上的铝土矿床). 顶仁杰, 吴振寰,史业新. 译. 北京: 冶金工业出版社,1 ~ 369.

班宜红,郭锐,王军强,孔德成,董晓荣,付恒一. 2012. 河南省钙红土风化壳型铝土矿沉积规律及找矿远景概论. 矿产与地质,26 (03): 210 ~ 220.

布申斯基(苏). 1984. 铝土矿地质学. 王恩孚,张汉英,祝修怡. 译. 北京: 地质出版社: 87 ~ 93.

陈旺. 2007. 豫西石炭系铝土矿出露位置的控制因素. 大地构造与成矿学,31(4): 452 ~ 456

冯宝华. 1989. 我国北方石炭—二叠纪火山灰沉积水解改造而成的高岭岩. 沉积学报,7(1): 101 ~ 108.

胡安国,张天乐,蒋伯昌,张润吉. 1993. 中国河南粘土—铝土矿床和江西高岭土、瓷石矿床及应用研究. 北京: 地质出版社,1 ~ 63.

贾炳文,周安朝,谷东起. 1999. 辽西地区晚古生代火山事件沉积地球化学特征及物源区分析. 沉积学报,17:473 ~ 477.

李洪颜,徐义刚,黄小龙,何斌,罗震宇. 2009. 华北克拉通北缘晚古生代活化:山西宁武—静乐盆地上石炭统太原组碎屑锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素证据. 科学通报,54(5): 632 ~ 640.

李孟江,陈衍景,张莉. 2012. 华北克拉通北缘晚古生代尚义钾质花岗岩的成因分析:来自岩石地球化学的证据. 地球化学,41(3): 227 ~ 239.

梁绍暹,王水利,姚改焕. 1995. 华北聚煤区火山灰蚀变粘土岩夹矸的研究. 中国煤田地质,7(1): 59 ~ 63.

廖士范,梁同荣,张月恒. 1989. 论我国铝土矿床类型及其红土化风化壳形成机制问题. 沉积学报,07(01): 1 ~ 10.

廖士范,梁同荣,等. 1991. 中国铝土矿地质. 贵阳: 贵州科技出版社,1 ~ 277.

刘长龄,时子祯. 1985. 山西、河南高铝粘土铝土矿床矿物学研究. 沉积学报,03(02): 18 ~ 36.

刘长龄. 2005. 论高岭石粘土和铝土矿研究的新进展. 沉积学报,23

- (03): 467~474.
- 裴放. 2004. 河南省华北型石炭纪一二叠纪? 和牙形石生物地层. 地层学杂志, 28(4): 344~353.
- 任明达, 王乃梁. 1981. 现代沉积环境概论. 北京: 科学出版社, 139~156.
- 王芳, 陈福坤, 侯振辉, 彭澎, 翟明国. 2009. 华北陆块北缘崇礼—赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr—Nd—Hf 同位素组成. 岩石学报, 25(11): 3057~3074.
- 王鸿祯, 徐成彦, 周正国. 1982. 东秦岭古海域两侧大陆边缘区的构造发展. 地质学报, 56(3): 270~279.
- 王鸿祯. 1997. 地球的节律与大陆动力学的思考. 地学前缘, 4(3): 1~12.
- 温同想. 1996. 河南石炭纪铝土矿地质特征. 华北地质矿产杂志, 11(04): 491~511.
- 吴国炎, 姚公一, 吕夏, 何振镛, 李忠烈, 郭保健. 1996. 河南铝土矿床. 北京: 冶金工业出版社, 1~174.
- 席文祥, 裴放. 1997. 全国地层多重划分对比研究(41)——河南省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 116~148.
- 杨起. 1987. 河南禹县晚古生代煤系沉积环境与聚煤特征. 北京: 地质出版社, 96~112.
- 杨兴科, 杨永恒, 季丽丹, 苏春乾, 郑孟林, 赵亮. 2006. 鄂尔多斯盆地东部热力作用的期次和特点. 地质学报, 80(5): 705~711.
- 张慧. 1992. 煤系地层中高岭石的形态—成因类型. 矿物学报, 12(1): 53~57.
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 2010. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. 岩石矿物学杂志, 29(6): 824~842.
- 张拴宏, 赵越, 宋彪, 吴海. 2004. 冀北隆化早前寒武纪高级变质区内的晚古生代片麻状花岗岩闪长岩——锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义. 岩石学报, 20(3): 0921~0626.
- 赵杏媛, 张有瑜. 1990. 粘土矿物与粘土矿物分析. 北京: 海洋出版社, 129~131.
- 真允庆, 王振玉. 1991. 华北式(G层)铝土矿稀土元素地球化学特征及其地质意义. 桂林冶金地质学院学报, 11(01): 49~56.
- 真允庆, 王振玉. 1993. 华北式(G层)铝土矿中的锆石标型研究. 桂林冶金地质学院学报, 13(01): 45~52.
- 钟蓉, 孙善平, 陈芬, 付泽明. 1995. 大青山、大同煤田太原组流纹质沉积凝灰岩的发现及地层对比. 地球学报, 16: 291~301.
- 周安朝, 贾炳文, 马美玲, 张慧. 2001. 华北板块北缘晚古生代火山事件沉积的全序列及其主要特征. 地质论评, 47(2): 175~183.
- Alkhangaskiy R (Алхангаский Р). 1959#. Types and Metallogeny of Bauxite in Soviet Union. Translated from Russian by CHEN Liang. Beijing: Science Press; 1~90.
- Allen M B, Windley B F, Zhang C. 1992. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tianshan, central Asia. Tectonophysics, 220: 89~115.
- Ban Yihong, Guo Rui, Wang Junqiang, Kong Desheng, Dong Xiaorong, Fu Hengyi. 2012#. Sedimentary environment of the red earth weathering crust type bauxite and the outlook for its exploration. Mineral Resources and Geology, 26(3): 210~220.
- Bardossy G, Aleva G J J. 1994#. Lateritic Bauxite. Translated by Gu Haomin Liaoning. Shenyang: Science and Technology Publishing House, 1~541.
- Bardossy G. Translated by Ding Renjie, Wu Zhenhuan Shi Yexin. 1990#. The Bauxite on the Coast Type Karst. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~369.
- Berger G, Lacharpagne J C, Velde B, Beaufort D, Lanson B. 1997. Kinetic constraints on illitization reactions and the effects of organic diagenesis in sandstone/shale sequences. Applied Geochemistry, 12(1): 23~35.
- Borchardt G. 1989. Minerals in soil environments, Soil Sci. Soc. America, Madison, Wisconsin: 675~727.
- Braide S P. 1987. Clay mineral burial diagenesis: A case study from the Calabar flank of the Niger Delta. Journal of African Earth Sciences (1983), 6(2): 181~196.
- Bushinskiy G I (Бушинский ГИ). 1984#. Bauxite Geology. Translated from Russian by WANG Enfu, ZHANG Hanying, ZHU Xiuyi. Beijing: Geological Publishing House; 87~93.
- Chen Wang. 2007#. Control Factors Distribution Of Carboniferous Bauxite Deposits In Western Henan Province. Geotectonica et Metallogenia, 31(4): 452~456.
- D'Argenio B, Scandone P. 1969. Jurassic facies pattern in the southern Apennines (Campania—Lucania). Ann. Geol. Inst. Publ. Hung., 54: 383~396.
- Dixon J B, Weed S B. 1989. Minerals in soil environments. Soil Sci. Soc. America, Madison, Wisconsin: 467~525.
- Ducea M. 2001. The California arc: thick granite batholiths, eclogitic residues, lithospheric-scale thrusting, and magmatic flare-ups. GSA Today, 11: 4~10.
- Erhart H. 1967. La Genese des sols en tant que phenomene geologique, esquisse d'une theorie geologique et geochemique, biostase et rhexistase. Feng Baohua. 1989#. Carboniferous—Permian Tonsteins Hydrolytic Reformation Of Volcanic Ash Sediments In Northern China. Acta Sedimentologica Sinica, 7(1): 101~108.
- Foscolos A E, Powell T G. 1980. Mineralogical and geochemical transformation of clays during catagenesis and their relation to oil generation. Geological and Geochemical Principles of Petroleum Occurrence, (1980): 153~172.
- Freed R L, Peacor D R. 1989. Variability in temperature of the smectite/illite reaction in Gulf Coast sediments. Clay Minerals, 24(2): 171~180.
- Garrels R M, Mackenzie F T. 1971. Evolution of Sedimentary Rocks. New York: Norton W W & Co., 397.
- Goldich S S, Bergquist H R. 1947. Aluminous lateritic soil of the Sierra de Bahoruco area, Dominican Republic, US Government Printing Office; 56~84.
- Goldich S S, Bergquist H R. 1948. Aluminous Lateritic Soil of the Republic of Haiti, WI. US Government Printing Office; 63~107.
- Hu Anguo, Zhang Tianle, Jiang Bochang, Zhang Runji. 1993#. The Clay—Bauxite Deposit in Henan Province and the hualin kaolin deposit in Jiangsu Province. Beijing: Geological Press, 1~63.
- Jia Bingwen, Zhou Anchao, Gu Dongqi. 1999#. Geochemistry and Provenance Analysis of Late Paleozoic Volcanic Event Deposits In the West Liaoning. Acta Sedimentologica Sinica, 17: 473~477.
- Lackey J S, Valley J W and Saleeby J B. 2005. Supracrustal input to magmas in the deep crust of Sierra Nevada batholith: Evidence from high- $\delta^{18}\text{O}$ zircon. Earth and Planetary Science Letters, 235: 315~330.
- Lanson B, Beaufort D, Berger G, Bauer A, Cassagnabere A, Meunier A. 2002. Authigenic kaolin and illitic minerals during burial diagenesis of sandstones: a review. Clay Minerals, 37(1): 1~22.
- Li Hongyan, Xu Yigang, Huang Xiaolong, He Bin, Luo Zhenyu, Yan Bin. 2009#. Activation of northern margin of the North China Craton in Late Paleozoic: Evidence from U-Pb dating and Hf isotopes of detrital zircons from the Upper Carboniferous Taiyuan Formation in the Ningwu—Jingling basin. Chinese Science Bulletin, 54(5): 632~

640.

- Li Mengjiang, Chen Yanjing, Zhang Li. 2012&. Genesis of Paleozoic Shangyi potassic Granite in the margin of the North China Craton: Petrochemistry evidence. *Geochemica*, 41(3): 227 ~ 239.
- Li R W, Li S Y, Jin F Q et al. 2004. Provenance of Carboniferous sedimentary rocks in the northern margin of Dabie Mountains, central China and the tectonic significance: Constraints from trace elements, mineral chemistry and SHRIMP dating of zircons. *Sediment. Geol.*, 166(3 ~ 4): 245 ~ 264.
- Liang Shaoxuan, Wang Shuili, Yao Gaihan. 1995&. Study of synsedimentary Volcanic-ash-derived clayrock bands in Carboniferous—Permian coal-bearing formation of north China. *Coal Geology of China*, 7(1): 59 ~ 63.
- Liao Shifan, Liang Tongrong, et al. 1991&. Bauxite Geology of China. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1 ~ 277
- Liao Shifan, Liang Tongrong, Zhang Yueheng. 1989&. Discussion on the Problems of Bauxite Deposits and their Lateritic Residuum as Mechanism for the Minerogenetic Of Bauxite in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 07(01): 1 ~ 10.
- Liu Changling, Shi Zizhen. 1985&. Mineralogy of High Alumina Clay—Bauxite Deposits in Shanxi and Henan provinces. *Acta Sedimentologica Sinica*, 03(02): 18 ~ 36.
- Liu Changling. 2005&. Recent Progress in Study on Kaolinite Clay and Bauxite. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(03): 467 ~ 474.
- Lynch F L, Mack L E, Land L S. 1997. Burial diagenesis of illite/smectite in shales and the origins of authigenic quartz and secondary porosity in sandstones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(10): 1995 ~ 2006.
- Muhs D R, Budahn J R. 2009. Geochemical evidence for African dust and volcanic ash inputs to terra rossa soils on carbonate reef terraces, northern Jamaica, West Indies. *Quaternary International*, 196(1 ~ 2): 13 ~ 35.
- Pei Fang. 1999&. The north China type Permo—Carboniferous fusulinid and conodont biostratigraphic units of Henan Province. *Journal of Stratigraphy*, 28(4): 344 ~ 353.
- Ren Mingda, Wang Nailiang. 1981&. Introduction of Modern Depositional Environment. Beijing: Science Press, 139 ~ 156.
- Roberson H E, Lahann R W. 1981. Smectite to illite conversion rates; effects of solution chemistry. *Clays and Clay Minerals*, 29(2): 129 ~ 135.
- Sengor A M C, Natan B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299 ~ 307.
- Shoji S, Nanzyo M, Dahlgren R A. 1994. Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Elsevier: 37 ~ 66.
- Tatsuo Kimura, Hiroyuki Kawashima, Ikuo Saito. 1994. Smectite and illite/smectite mixed-layer clay minerals in the Ashibetsu coals, *International Journal of Coal Geology*, 26(3 ~ 4), 215 ~ 231.
- Taylor G, Hughes G W. 1975. Biogenesis of the Rennell bauxite. *Economic geology*, 70(3): 542 ~ 546.
- Wang Fang, Chen Fukun, Hou Zhenhui, Peng Peng, Zhai Mingguo. 2009&. Zircon ages and Sr—Nd—Hf isotopic composition of late Paleozoic granitoids in the Chongli—Chicheng area, northern margin of the North China block. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3057 ~ 3074.
- Wang Hongzhen, Xu Chengyan, Zhou Zhengguo. 1982&. Tectonic Development of the Continental Margins on both sides of the Palaeo-Qinling Marine Realm. *Acta Geologica Sinica*, 56(3): 270 ~ 279.
- Wang Hongzhen. 1997&. Speculations on Earth's Rhythms and Continental Dynamics. *Earth Science Frontiers*, 4(3): 1 ~ 12.
- Wen Tongxiang. 1996&. The geological characteristics of Carboniferous Bauxite in Henan. *Jour Geol & Min Res North China*, 11(04): 491 ~ 511.
- Williamson I A. 1970. Tonsteins—their nature, origins and uses. *Mining Magazine*, 122(2): 119 ~ 125.
- Wilson L, Wilson M J, Green J, Patey I. 2014. The influence of clay mineralogy on formation damage in North Sea reservoir sandstones: A review with illustrative examples. *Earth-Science Reviews*, 134, 70 ~ 80.
- Wilson M D, Pittman E D. 1977. Authigenic clays in sandstones: recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis. *Journal of Sedimentary Research*, 47(1): 3 ~ 31
- Wu Guoyan, Yao Gongyi, Lü Xia, He Zhenyong, Li Zhonglie, Guo Baojian. 1996&. Henan Bauxite Deposits. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1 ~ 174.
- Xi Wenxiang, Pei Fang. 1997#. Multiple Classification and Correlation of the Stratigraphy in China (41)—Stratigraphy (lithostratic) of Henan Province. Wuhan: China University of Geosciences Press, 116 ~ 148.
- Yang Qi. 1987&. Depositional environment and coal-forming characteristics of Late Paleozoic coal measures in Yuzhou, Henan province. Beijing: Geological Publishing House, 96 ~ 112.
- Yang Xingke, Yang Yongheng, Ji Lidan, Su Chunqian, Zheng Menglin, Zhao Liang. 2006&. Stages and Characteristics of Thermal Actions in Eastern Part of Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 705 ~ 711.
- Zarasvandi A, Charchi A, Carranza E J M, Alizadeh B. 2008. Karst bauxite deposits in the Zagros mountain belt, Iran. *Ore Geology Reviews*, 34(4): 521 ~ 532.
- Zhang Hui. 1992&. Shps—Genesis Type of the Kaolinites in coal series. *Acta Mineralogica Sinica*, 12(1): 53 ~ 57.
- Zhang S H, Mao Y, Song B, et al. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb and in-situ Lu-Hf isotope analyses of a tuff from Western Beijing: evidence for missing late Paleozoic arc volcano eruptions at the northern margin of the North China block. *Gondwana Research*, 12: 157 ~ 165.
- Zhang S H, Zhao Y and Song B. 2006. Hornblende thermobarometry of the Carboniferous granitoids from the Inner Mongolia Paleo-uplift: implications for the geotectonic evolution of the northern margin of North China block. *Mineralogy and Petrology*, 87: 123 ~ 141.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, Hu Jianmin, Song Biao, Liu Jian, Wu Hai. 2010&. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic—Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 29(6): 824 ~ 842.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, Wu Hai. 2004&. The late Paleozoic granodiorite pluton in early Pre-cambrian high-grade metamorphic terrains near Longhua country in northern Hebei province, north China: result from Zircon SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 0921 ~ 0626.
- Zhao Xingyuan, Zhang Youyu. 1990#. Clay minerals and analysis of clay minerals. Beijing: China Ocean Press, 129 ~ 131.
- Zhen Yunqing, Wang Zhenyu. 1991&. Geochemical characteristics of the Earth elements in north China pattern (G Strata) Alumina ores

and their geological significance. Journal of Guilin College of geology, 11(01): 49 ~ 56.

Zhen Yunqing, Wang Zhenyu. 1993. Tyfomorphic Characteristics of Zircon within north China type (G Stratum) Bauxite. Journal of Guilin College of geology, 13(01): 45 ~ 52.

Zhong Rong, Sun Shanping, Chen Fen, Fu Zeming. 1995. The Discovery of Rhyo-tuffite in the Taiyuan Formation and Stratigraphic

Correlation of the Daqingshan and Datong Coalfields. Acta Geoscientia Sinica, 16: 291 ~ 301.

Zhou Anchao, Jia Bingwen, Ma Meiling, Zhang Hui. 2001. The Whole Sequence Of Volcanic Event Deposits on the North Margin of the North China Plate and Their Feature. Geological Review, 47(2): 175 ~ 183.

Mineralogical Characteristics and Original Rock Analysis of Al-bearing Rock Series in Upper Carboniferous Benxi Formation in Longmen District, Yanshi, Western Henan

CAO Gaoshe^{1, 2)}, ZHANG Song¹⁾, XU Guangming¹⁾, DU Zhong¹⁾, ZHOU Hongchun³⁾,
LI Jianquan³⁾, CHEN Yongcai³⁾, CHEN Guang³⁾

1) Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan, 454000;

2) Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains
Economic Region, Henan Province, Jiaozuo, Henan, 454000;

3) The Fourth Geological Exploration Institute of Henan Geology and Mineral Bureau, Zhengzhou, 450001

Abstract: Taking full coring ZK4704 as study sample, located in the southern margin of the North China Craton, Yanlong area, Western Henan, through core observation and vertical continuous sampling, the mineralogical characteristics and vertical varying pattern of bauxite mineral have been analyzed by rock thin section, SEM, EDS, X-ray diffraction, as well as differential thermal and infrared spectrum. The results show that all the minerals in Al-bearing rock series in Benxi Formation are authigenic minerals mainly exist in cryptocrystalline or microcrystalline except those affected by recrystallization during late stage. The mineral compositions and assemblages show significant variation in the vertical. Minerals in the lower and upper mudstone mainly are clay minerals. But the lower mudstone mainly consists of Illite, and the upper mudstone mainly consists of Kaolinite. Minerals in the middle between lower and upper mudstone mainly consist of aluminum minerals with a small number of clay minerals. On the basis of above, taking the basic principles and generation conditions of chemical weathering as the link of mineralogical characteristics of Al-bearing rock series and raw rock to analyze the original rock of bauxite, it is theorized with a high degree of probability that the Al-bearing rock series in Benxi Formation might be volcanic ash which could be rapidly hydrolyzed, the change of hydrolysed chemical environment can be explained by the transformation from weakly alkaline marine environment to weakly acid marsh environment, the strongly karstification of the basement under Al-bearing rock series provided well drainage condition for the formation of diaspore. Violent volcanic process in the northern margin of the North China Craton and China's western region can provide ash provenance of Benxi Formation in Yanlong area.

Keywords: Bauxite; Mineralogy; Provenance; Volcanic ash; Hydrolysis; Benxi Formation; Western Henan

Acknowledgements: The test effort was assisted by professor Song Danguy of Henan Key Laboratory of Organic Traces and Mineralization Process. This study was Supported by professor Du Xin and professor Liu Guoyin of The Fourth Geological Exploration Institute of Henan Geology and Mineral Bureau.

First author: CAO Gaoshe, male, born in 1965, professor, mainly engaged in structural geology. Address: No. 2001 Shiji Avenue, Gaoxin District, Jiaozuo, Henan, 454000. Email: caogs@hpu.edu.cn

Manuscript received on: 2015-02-28; Accepted on: 2016-04-18; Edited by: HUANG Min.

Doi: 10.16509/j.georeview.2016.05.014