



广西平果原生铝土矿地质地球 化学特征与成矿环境

李晓峰^{1,2}, 李欢¹, 吴甄虹¹, 祝瑞勤¹, 奚小双¹

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 湖南省煤炭地质勘查院, 长沙 410019)

摘要: 广西平果铝矿集区是我国重要的铝土矿产区, 有岩溶堆积型和原生沉积型两种铝土矿类型。前人主要专注于堆积型铝土矿的成因研究, 而对于原生矿的沉积相、古地貌、沉积环境及其对铝土矿矿层的控制作用尚未开展具体分析。本文对矿区多种原生矿石开展了精细的矿物学及地球化学研究, 结果表明: 平果原生铝土矿总体富集 Zr、Ga、Th、U、V, 亏损 Sr、Ba; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值普遍较高, 大多为 0.7080~0.7085; 原生矿中的鲕粒能谱扫描电镜及电子探针分析显示, 不同样品具有差异较大的 O、Al、Si、Fe、K、Ti 以及 Ga 元素含量。结合矿体野外产状及空间分布特征, 本文提出平果矿集区古地貌特征为东部、北部地势较高, 南部、西部地势逐渐变低, 从太平矿区到那豆矿区再到新安矿区, 沉积环境呈现出近陆到远陆、水浅到水深的沉积环境变化, 总体表现为海陆交汇沉积环境格局。原生铝土矿成矿物质依次被搬运至太平矿区、那豆矿区和新安矿区沉积成矿, 总体沉积环境为三角洲相; 矿区三角洲沉积环境可进一步分为分支河流相、沼泽相、沙坝相等沉积微相, 其中, 沙坝微相最有利于原生矿富集, 因此平果矿集区的那荣地区和塘琴地区最有利于原生矿的形成。

关键词: 原生铝土矿; 沉积鲕粒; 沉积相; 成矿环境; 广西平果

文章编号: 1004-0609(2022)-10-3183-23

中图分类号: P61

文献标志码: A

引文格式: 李晓峰, 李欢, 吴甄虹, 等. 广西平果原生铝土矿地质地球化学特征与成矿环境[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(10): 3183-3205. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42248

LI Xiao-feng, LI Huan, WU Qian-hong, et al. Geological and geochemical characteristics of primary sedimentary bauxite in Pingguo, Guangxi and its metallogenic environment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(10): 3183-3205. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42248

铝是重要的战略资源, 我国是世界上主要的铝资源生产国, 《2014年中国国土资源公告》显示, 我国查明的铝土矿矿石资源储量为 42.3 亿 t。广西平果铝矿集区位于广西壮族自治区百色市平果县内, 是我国重要的铝土矿产区, 拥有岩溶堆积型铝土矿和原生沉积型铝土矿两种矿床类型^[1-4]。一直

以来, 平果等矿区主要以勘探生产岩溶堆积型铝土矿为主^[5-10]; 近年来, 原生沉积型铝土矿资源的勘探及研究渐渐被人们所重视^[11-14]。已有工作显示, 平果铝矿区原生矿体的多层、透镜体空间分布规律与通常的沉积型矿床矿体分布规律有较大差别^[15], 但控制因素尚不清楚, 原生沉积环境与富矿体之间

基金项目: 中国铝业集团资助项目(GX2007CAQB01)

收稿日期: 2021-10-08; 修订日期: 2021-11-11

通信作者: 李欢, 教授, 博士; 电话: 18827415616; E-mail: lihuan@csu.edu.cn

的成因联系尚不明确。平果矿集区原生铝土矿矿石中富含鲕粒，这些鲕粒为铝土矿同生沉积时期形成的，因此它们的微观特征对沉积环境有重要的指示意义^[16]。本文基于原生矿矿石的全岩微量元素以及Sr同位素分析，结合鲕粒的能谱扫描电镜(SEM-EDS)以及电子探针(EPMA)原位测试，对平果地区太平矿区、那豆矿区及新安矿区原生沉积铝土矿开展系统的矿物学及地球化学研究，旨在揭示其沉积环境，划分沉积相，厘定微观地貌与矿体空间分布的关系，并对成矿环境进行探讨，进而对优质铝土矿层进行定位预测。

中于那豆矿区和太平矿区(见图1)。原生矿层露头呈现圈闭矿区短轴背斜的环形形态，矿区中主要分布两个原生矿构造，即那豆矿区环形构造和太平矿区环形构造，此外还有果化矿区和新安矿区。

在太平矿区和那豆矿区，原生矿层基本连续分布，但发育程度有变化。在太平矿区，原生矿层露头在地表多个地段被植被覆盖。探槽揭露发现，矿区中大部分地段都可以揭露出矿层，但是仍然有一些地段尚未揭露原生矿层，如太平矿区北西部的雁山村到巴宁屯一带。这些地方原生矿层分布在盆地中，地势平坦，目前还没有工程揭露，但是从堆积矿分布情况可以认为应该存在连续的原生矿层。有一些地段原生矿层的连续性可能不好，如太平矿区中部的新圩到那卷一带，矿层是断续分布的。那豆矿区原生矿的分布是完整的，即原生矿层位上都有原生铝土矿分布，教美矿区原生矿分布则是不完整

1 矿床地质

1.1 原生矿空间分布特征

平果矿集区内地表和深部的原生铝土矿主要集

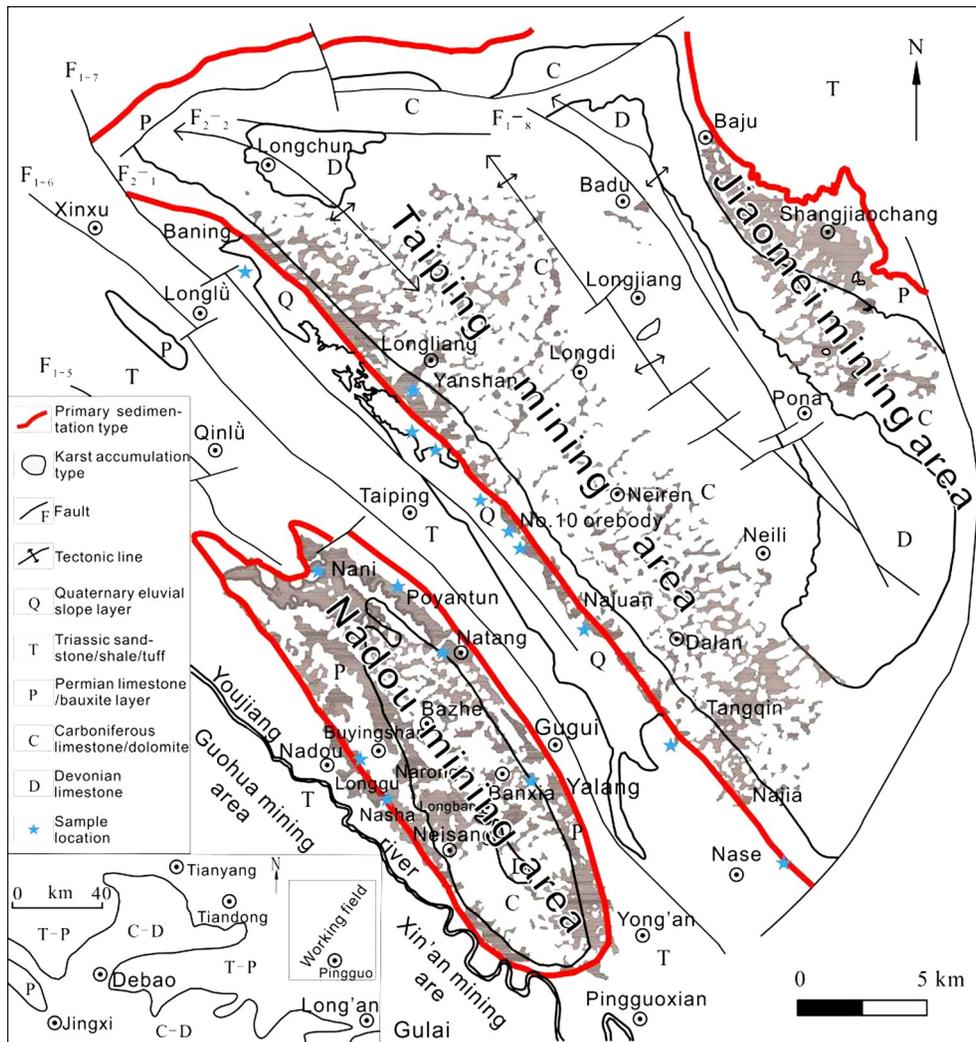


图1 平果矿集区地质简图与原生矿分布(据文献^[7]修改)

Fig. 1 Geological map of primary ore distribution in Pingguo mining area (modified from reference^[7])

的, 在背斜的环形原生矿层位上, 在南东和北西两端背斜倾覆端部位都没有原生铝土矿分布, 而在背斜中部原生矿层位上有原生矿连续分布。总体来看, 太平矿区原生矿露头分布长度明显大于教美矿区, 果化矿区和新安矿区原生矿为零散分布。

1.2 矿体特征

1.2.1 太平矿区

太平矿区的原生铝土矿主要分布在巴宁、贯屯、那银、新圩、塘琴、那甲一带。巴宁地表原生矿层下部为灰绿色致密块状铝土矿层, 上部为灰色豆鲕粒铝土矿层, 矿层厚度小于 1 m。矿区中部 10 号矿体原生矿层揭露厚度达 4 m, 未见底, 矿层上覆页岩层, 部分地区也有原生矿层直接与合山组灰岩接触情况, 矿体两层矿化, 上层为浅灰色豆鲕粒矿层, 厚度约 2 m; 下层为灰色孔隙状矿层, 厚度在 2 m 以上。在原生矿层底部是一层灰绿色致密状矿层, 未见底。

那银到贯屯一带煤层发育, 原生矿层厚度不大但变化大。那银附近 1 km 距离内多个探槽揭露煤层或炭质页岩厚度 4~10 m, 煤层与茅口组灰岩可

直接接触。多数探槽见有铝土矿层, 厚度小于 1 m, 但是局部钻孔见原生矿层厚度 4 m。新圩揭露原生矿层厚度 3 m, 中心为灰色粗粒豆鲕状矿层, 边缘带同样为豆鲕粒铝土矿, 但为浅灰色细粒铝土矿。新圩原生矿层剖面并没有煤层出现, 但其北侧出现煤层, 煤层与原生矿层并不叠加, 原生矿层上部可以直接连接合山组灰岩。塘琴揭露的多处原生矿露头显示, 矿层具有分层特征, 底部是暗黄褐色致密状矿层, 出露厚度 2 m, 未见底; 中部是浅灰色中粒豆鲕状矿, 矿层厚度 1 m; 上部浅灰色粗粒豆鲕状矿, 显示有层理, 厚度 2 m, 未见顶。矿层上部部分出露页岩层, 厚度 3 m, 有炭质页岩和黏土质页岩, 其中夹一层铁质胶结的粗豆鲕粒铝土矿, 厚约 0.5 m。那甲矿层可划分为上、下两层, 上部是灰色豆鲕状铝土矿, 矿层上覆合山组灰岩, 只有不厚的页岩层; 下部是黄绿色致密状铝土矿, 与下伏茅口组灰岩接触(见图 2)。

1.2.2 那豆矿区

那豆矿区的原生铝土矿主要分布在那匿、坡眼屯、那荣、雅朗、陇谷、内桑一带。那匿有少量原生矿露头揭露, 根据附近堆积矿矿石特点, 推测下

Period	Epoch	Group	Formation	Histogram 1:100	Thickness/ m	Lithology
Permian	Upper	The Heshan group	P ₂ H _{1-s}		105-150	Flint Limestone: dark gray, fine crystal to microcrystalline structure. Medium-thick stratified structure, and the interlayer is intercalated with a thin layer of black shale. Flint lentils and black shale are locally intercalated in the limestone. Calcitees is irregular veined filling cleavage fissures. The main component is calcite, with a small amount of peat and silica. Conformable contact with the underlying strata.
			P ₂ H ₁₋₂		1-10	Black shale: grayish black, thinly-bedded, clearly layered. Pyrite is intercalated between layers, appearing in star point or cluster. The main component is peat. Conformable contact with the underlying strata.
			P ₂ H ₁₋₁		0-4	The bauxite layer: cyan gray to dark gray. It has oolitic and pisolitic structure, in which pyrite develops in granular or star shape, and the ore is brittle and hard. Conformable contact with the underlying strata.
	Lower	The Maokou group	P ₁ m		200-350	Limestone: light gray, fine crystal to microcrystalline structure. Thick stratified structure with many bioclastic fossils interspersed, and calcite veins well developed. The intercalated dolomitic limestone layer is light gray, with coarse crystal-fine crystal structure. It's mainly composed of calcite, with a small amount of dolomite. Conformable contact with the underlying strata.

图 2 太平矿区、那豆矿区矿层柱状图(据原始资料)

Fig. 2 Histogram of ore layers in Taiping mining and Nadou mining area (modified from original files)

部是孔隙状和致密状矿层，上部是豆鲕状矿层，矿层厚度均不大。同时该地区存在有平果地区最大的煤矿，可知矿体附近必定有厚度很大的煤层。坡眼屯上层为浅灰色豆鲕状矿层，厚度约1.3 m；中层为深色豆鲕状矿层，厚度1.2 m；下层为孔隙状矿层，可见厚度0.7 m。调查表明，三层矿的界线清楚，矿层延伸是连续稳定的。那荣原生矿层露头显示，矿层出露厚度为2~5 m，部分可达6 m。原生矿层可分为两层矿，但总体上都是浅灰色豆鲕状矿层，只是矿体上层所含颗粒比下层多，矿体上层可见一层厚约0.3 m的铝质页岩，矿体延伸稳定。雅朗矿层可见厚度约4 m，为灰绿色致密块状，调查表明，致密块状矿层向NW方向转变为豆鲕状矿层，往SE方向也发生相似转变，但转变界线不清楚。陇谷位于那豆矿区SW翼，矿体可见厚度1.5~2 m，为典型河道原生矿层，中间为浅灰色粗粒豆鲕状矿层，边缘为灰色细粒豆鲕状矿层，在矿体附近可见少量炭质页岩以及煤层出露(见图2)。内桑位于那豆矿区SW翼，原生矿层露头中，矿体厚度约0.9 m，矿体下层为深灰色豆鲕状矿层，上层为深灰色小颗粒碎屑矿层，部分矿体上覆一层红色黏土层。

通过野外实地观察结果分析，对两矿区中各地区矿体展布特征进行了总结(见表1和2)。

从表中可以看出，虽然原生矿层在太平矿区和那豆矿区两个主要矿区中总体上是连续分布的，但是各地区原生铝土矿矿体特征在空间上有明显的变

化。在太平矿区，除巴宁、贯屯地区出露一层矿外，其余地区均可见2~3层矿；矿层厚度方面，由NW到SE呈现出由薄变厚，再到薄再到厚的特点；除巴宁外，其余地区均可见铝质或炭质页岩层；而煤层方面，贯屯地区大量出露，新圩可见少量，其余地区未见。那豆矿区中，只有那匿、雅朗地区矿层数为单层，其余皆为2~3层；在那豆矿区的NE翼端，矿体厚度由NW到SE逐渐由薄变厚，在SW翼，陇谷地区矿体较厚而内桑地区较薄；只有那匿、陇谷和那荣地区可见铝质或炭质页岩层；在那匿地区可见大量煤层，陇谷和那荣地区偶尔可见。由此说明了平果原生铝土矿矿体并不是连续均匀沉积的，受沉积环境影响，各地表现出不同的特征。

2 原生铝土矿矿石特征

2.1 原生铝土矿样品分布

为研究平果矿集区的沉积环境和铝土矿成矿规律，本次对太平矿区、那豆矿区以及新安矿区地表原生矿进行了重点调查，针对性选取太平矿区的巴宁、10号矿体、新圩、塘琴、那甲地区，那豆矿区中的那匿、坡眼屯、陇谷、那荣、雅朗、内桑地区，新安矿区的古来地区原生铝土矿样品(见图1)，开展岩相学和矿相学以及地球化学特征研究。

2.2 矿石组构特征

根据野外调查以及室内显微镜观察，矿区中各

表1 太平矿区原生铝土矿体空间特征表(从NW→SE方向)

Table 1 Spatial distribution characteristics of primary bauxite ore body in Taiping area (direction: NW→SE)

Location	Baning	No.10 orebody	Guantun	Xinxu	Tangqin	Najia
Number of ore layers	1	3	1	2	2	3
Total thickness of ore layers	<1 m	>4 m	<1 m	>4 m	>2 m	>3.5 m
Shale layers	None	Common	Common	Minor	Common	Common
Coal layers	None	None	Abundant	Minor	Common	None

表2 那豆矿区原生铝土矿空间特征表(从NW→SE方向)

Table 2 Spatial distribution characteristics of primary bauxite ore body in Nadou area (direction: NW→SE)

Location	Nani	Narong	Poyantun	Yalang	Longgu	Neisang
Number of ore layers	1	2	3	1	2	2
Total thickness of ore layers	<1 m	2~5 m	>3.2 m	>4 m	>2 m	<1 m
Shale layers	Common	Common	None	None	Minor	None
coal layers	Abundant	Common	None	None	Minor	None

地区原生铝土矿石表现出不同的特征, 具体如下:

2.2.1 太平矿区

巴宁地区矿石较致密, 红色铁质胶结和黄色铝质硅质胶结, 豆觔粒含量(质量分数)少于 5%, 豆觔粒粒径 1~2 mm, 铁质与泥质胶结。在显微镜下该点见铁质胶体觔粒(见图 3(a)), 觔核为泥质、微晶胶体, 外圈为铁质, 同时发育磨圆状泥岩碎屑颗粒, 呈透镜状、不规则状泥质、微晶集合体颗粒, 发育脱水裂隙; 基质为铁质与微晶一水铝石。

10 号矿体原生矿上层为豆觔状矿石, 浅灰色, 觔粒大小 1~3 mm, 含量为 20%, 细砂和粉砂胶结, 胶结中等(见图 3(b)); 中间多为孔隙矿石, 孔隙状矿石浅灰色, 粉砂胶结, 孔隙率低, 一般在 10% 以下, 孔隙形态多样(见图 3(c)); 在原生矿层底部是一层灰绿色致密状矿石, 胶结紧密, 矿石坚硬。镜下颗粒为微晶质、铁质胶体、有机质集合体, 外圈

层为泥质、微晶一水铝石胶结, 呈塑性状(见图 3(d)); 基质为泥质、微晶质一水铝石集合体构成的小粒径颗粒, 基质中泥质和微晶质显示了塑性特点。

新圩主要为浅灰色豆觔状矿石, 但颗粒变化大, 矿石颗粒粒径约 6 mm, 含量达 80%, 胶结疏松(见图 3(e)); 向外矿石颗粒粒径为 1 mm, 含量在 10% 以下, 胶结疏松; 在最底层存在灰黑色铝土矿石, 豆觔粒含量小于 5%, 粒径为 1~4 mm, 豆觔粒形态较杂, 铁质及细砂致密胶结。显微镜下, 可见泥质、微晶质集合体, 偶见富有机质泥质颗粒, 颗粒以磨圆-次磨圆状为主, 可见不规则棱角状的一水铝石颗粒; 填隙物为泥质、微晶质, 局部塑性扰动特征明显(见图 3(f))。

塘琴上部为浅灰色粗豆觔状矿石, 粒径约 6 mm, 颗粒含量 20%, 粗砂胶结, 胶结疏松(见图 3

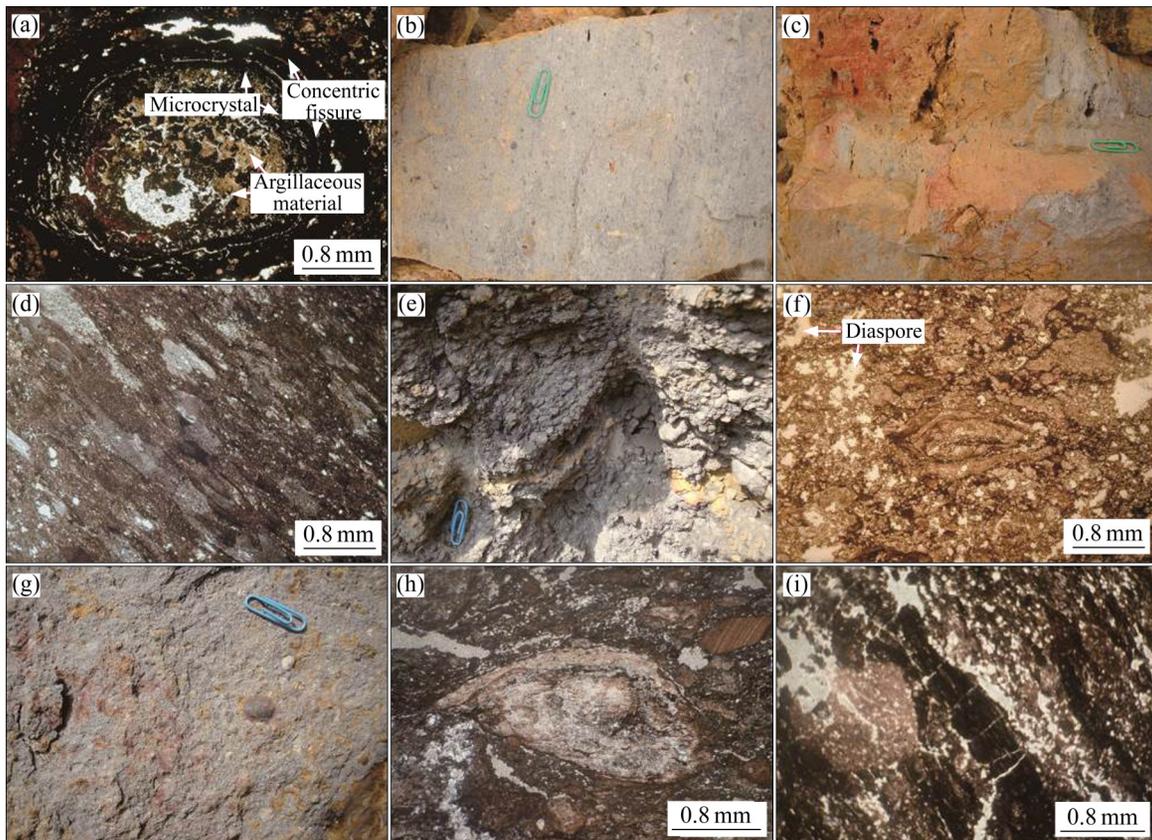


图 3 太平矿区原生矿矿石野外及显微特征:(a) 铁质胶体觔粒;(b) 豆觔状矿石;(c) 孔隙状矿石;(d) 椭圆状、透镜状豆觔或砂、砾屑颗粒定向排列;(e) 豆觔粒密集矿石;(f) 一水铝石集合体颗粒;(g) 粗豆觔状矿石;(h) 塑性变形泥岩屑;(i) 纤维状炭质屑

Fig. 3 Field and microscopic characteristics of primary bauxite ore in Taiping area: (a) Iron colloidal oolite; (b) Pisolitic ore; (c) Porous ore; (d) Elliptical and lenticular pisolite oolites, sand and gravel particles are arranged in a directional manner; (e) Pisolitic and oolitic dense ore; (f) Diaspore aggregate particles; (g) Coarse pisolitic oolitic ore; (h) Plastic deformation debris; (i) Fibrous carbonaceous debris

(g); 中部是浅灰色中粒豆鲕状矿石, 粒径4 mm, 颗粒含量30%, 粗砂胶结, 胶结中等; 底部为黄褐色致密状矿石, 豆鲕粒含量小于5%, 粒径1~3 mm, 铁质、泥质胶结。显微镜下发育泥质、微晶质集合体, 可见泥岩屑颗粒, 一水铝碎屑塑性变形的颗粒(见图3(h)), 以及有机质颗粒; 基质为泥质和微晶质。层理不发育。

那甲原生矿上部是灰色豆鲕状铝土矿石, 结构变化很大, 颗粒状包含豆鲕状颗粒和碎屑颗粒, 颗粒含量30%, 粒径0.5~2 mm, 粉砂质胶结; 下部是黄绿色致密状铝土矿石, 颗粒较少, 胶结紧密。矿石在镜下发育泥质、微晶质集合体, 可见炭质屑, 屑多呈纤维状(见图3(i)), 同时也出现泥岩屑和不规则棱角状的一水铝石集合体, 包裹构造普遍, 颗粒外层发育泥质、微晶质物的粘结生长环; 基质为炭质、泥质、微晶质, 基本不定向。

2.2.2 那豆地区

那匿分布多种矿石类型, 有豆鲕状为主的颗粒矿石, 孔隙状矿石, 致密状矿石, 孔隙与颗粒共存的矿石等, 下部是孔隙状矿石和致密状矿石, 上部是颗粒状矿石和混合型矿石, 矿石基本上是浅灰色。孔隙状矿石有不规则状孔隙, 有近圆形光滑内膜孔隙, 有粒状孔隙, 也有两种孔隙共存的情况。致密状矿石呈粉砂质胶结。在显微镜下, 可见发育鲕状结构, 略定向, 出现富一水硬铝石鲕粒, 为次圆状-为棱角状, 发育1~3圈层(见图4(a)), 鲕核为一水硬铝石、泥质物和有机物集合体, 圈层组成与核心相同。部分存在黑色富碳质颗粒(见图4(b)), 塑性变形; 颗粒基质为含铁的微晶质、泥质以及炭质。

坡眼屯原生矿上部为浅灰色孔隙颗粒状矿石, 颗粒大小1.5~5 mm, 含量为50%左右, 细砂胶结, 胶结疏松(见图4(c)); 中间夹一薄层灰黑色紧密胶结的颗粒状矿石, 颗粒含量小于5%, 泥质、硅质胶结, 胶结紧密; 往下为浅灰色密集颗粒状矿石, 颗粒含量20%, 粉砂胶结, 胶结疏松(见图4(d))。显微镜下可见透镜状和次圆状鲕粒、豆粒及泥质、微晶集合体, 有的颗粒表面呈凹凸不平状, 有的发生龟裂(见图4(e)), 定向不明显。可见星点铁质的泥质屑; 基质由泥质、一水铝石和黏土矿物微晶质及细小颗粒组成, 无定向。

陇谷原生矿中心部分为粗豆鲕状矿石, 颗粒含

量60%以上, 粒径5~10 mm, 砂质胶结, 胶结紧密(见图4(f)); 往外缘同样为豆鲕状矿石, 但颗粒含量20%, 粒径3 mm以下, 变化较大, 细砂和粉砂胶结, 胶结紧密; 上部部分可见孔隙状和泥质致密状矿石, 浅灰色, 孔隙内径约2 mm, 孔隙率为5%, 泥质胶结, 胶结疏松。该点的矿石富有机质、塑性变形的颗粒(见图4(g)), 无铁质颗粒, 颗粒多为磨圆-次磨圆状, 磨圆度较高, 并发育透镜状颗粒; 基质为有机质、铁质、一水铝石微晶, 定向较明显。

那荣原生矿上部为浅灰色豆鲕状矿石(见图4(h)), 豆鲕粒径约2 mm, 颗粒含量约50%; 下部为浅红色致密状矿石, 粉砂质胶结, 胶结紧密(见图4(i))。镜下观察, 颗粒磨圆度较高, 发育泥质、微晶质集合体鲕粒(见图4(j)); 鲕粒内部为一水铝石胶结, 多数鲕粒圈层不明显, 未见塑性变形; 基质为泥质、微晶、铁质、小粒径颗粒等。

雅朗原生矿为致密块状矿石, 灰绿色, 硅质胶结, 胶结紧密, 矿石坚硬(见图4(k)); 部分矿点存在少量豆鲕状矿层, 颗粒含量明显少于其他观察点, 小于10%, 粒径偏小。镜下可见富铁鲕粒, 铁质鲕核外围为泥质、微晶质圈层(见图4(l)), 颗粒表面光滑, 部分有轻微压扁或变形现象(见图4(m)); 基质为富铁质和泥质、微晶质及小粒径颗粒。

内桑矿点中原生矿矿石类型主要是致密状矿石, 通常呈黄色(见图4(n)), 部分偏红色, 胶结物为泥砂质, 胶结紧密; 少数为豆鲕状矿石, 豆鲕状矿石颗粒粒径在2 mm左右, 颗粒含量40%, 胶结紧密。

2.2.3 新安矿区

古来村出露的矿石为青灰色砂质致密块状, 见风化。也见含豆鲕粒的矿石, 鲕粒含量小于15%, 且鲕粒大小不等, 分布不均。在显微镜下矿石的颗粒磨圆度较好, 多数鲕粒存在较厚的圈层, 粒中可见一水铝石结晶, 圈层为一水铝石微晶与泥砂质胶结(见图4(o))。部分屑为泥质屑, 中间夹杂少量一水铝石; 基质为一水铝石泥质、微晶质及小粒径颗粒, 粒径均匀。

因此, 三个矿区中巴宁、雅朗地区矿石类型为少颗粒致密块状, 多含铁质胶体鲕粒; 新圩、那匿地区为浅灰色豆鲕状矿石, 颗粒变化大, 胶结疏

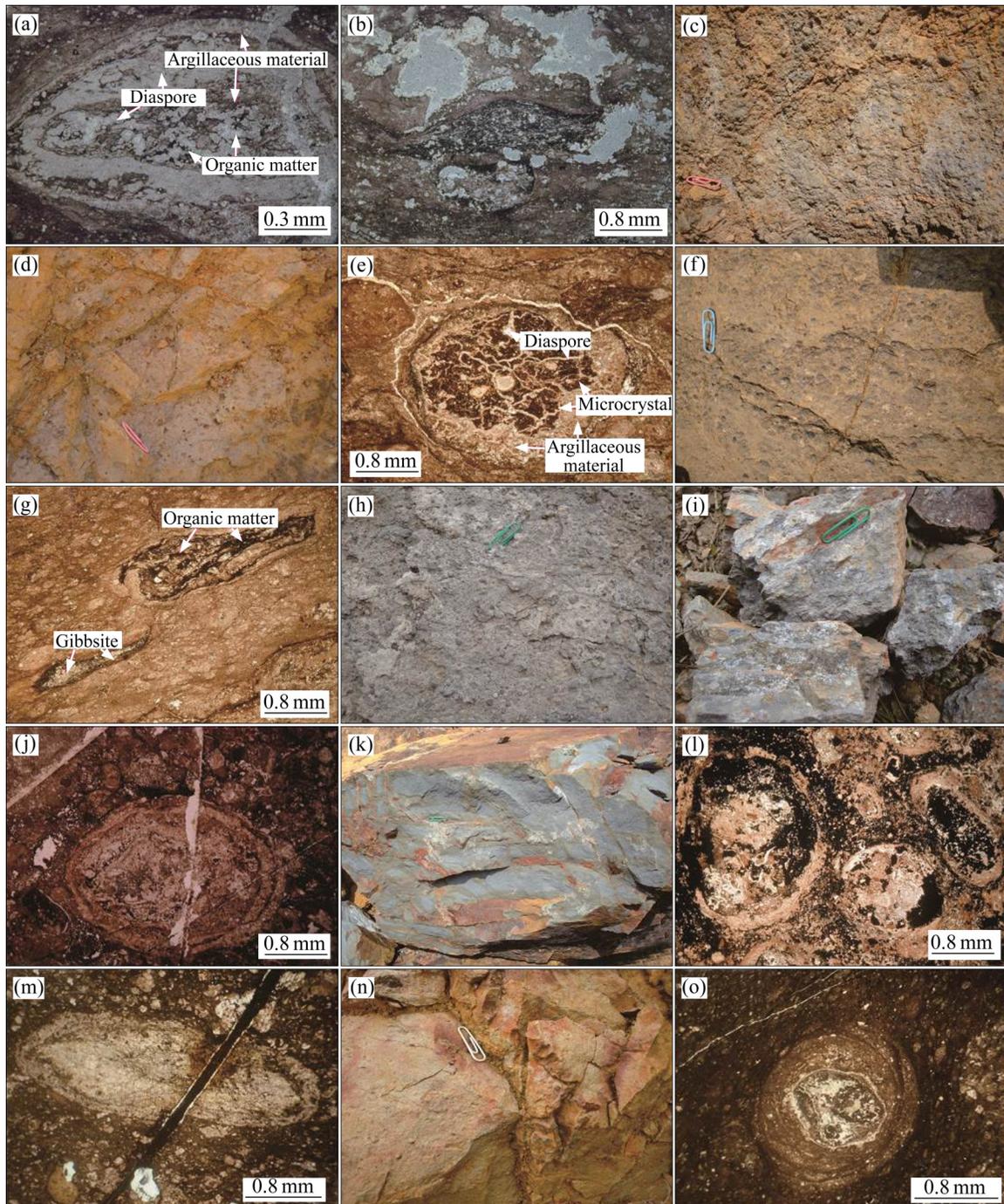


图 4 那豆及新安矿区原生矿矿石野外及显微特征:(a) 富一水硬铝石鲕粒;(b) 黑色富炭质颗粒;(c) 疏松豆鲕状矿石;(d) 孔隙豆鲕状矿石;(e) 凹凸不平次圆状泥质、微晶集合体;(f) 粗颗粒豆鲕状矿石;(g) 三水铝石塑性变形结构,富有机质;(h) 豆鲕状矿石;(i) 青灰色致密块状矿石;(j) 磨圆度较高、发育泥质、微晶质集合体鲕粒;(k) 致密块状矿石;(l) 富铁鲕粒,鲕核外围为泥质、微晶质圈层;(m) 鲕粒轻微压扁现象;(n) 黄色致密块状矿石;(o) 鲕粒磨圆度较好,存在较厚的圈层

Fig. 4 Field and microscopic characteristics of primary ore in Nadou and Xin'an areas: (a) Rich diaspore oolite; (b) Black carbonaceous particles; (c) Loose pisolitic and oolitic ore; (d) Pore pisolitic ore; (e) Uneven sub-round argillaceous and microcrystalline aggregate; (f) Coarse-grained pisolitic ore; (g) Gibbsite plastic deformation structure, rich in organic matter; (h) Pisolitic ore; (i) Greenish-gray dense ore; (j) Argillaceous and microcrystalline aggregate Oolites with high roundness; (k) Dense massive ore; (l) Iron rich oolite with mud and microcrystalline circles around the oolitic core; (m) Oolitic particles are slightly flattened; (n) Yellow dense massive ore; (o) Oolitic grain has good roundness and thick circle

松, 豆鲕粒形态复杂, 铝质、铁质、泥质、炭质层均有分布; 10号矿体、那荣、陇谷、坡眼屯、那甲、塘琴等地区上部多为浅灰色孔隙豆鲕状矿石, 豆鲕粒含量较高, 豆鲕粒总体较大, 呈透镜状和次圆状, 基质以铝质、泥质层为主, 泥质细砂胶结, 胶结疏松, 下部矿石逐渐变致密; 内桑、古来地区矿石为青灰色砂质致密块状, 豆鲕粒含量较少, 泥质层居多。

3 矿石地球化学特征

本文对原生铝土矿矿石开展了微量元素及Sr同位素地球化学特征研究, 探讨其对环境的指示意义, 为研究矿区沉积环境提供地球化学依据。所用样品采样位置与前述样品一致, 微量元素及Sr同位素测试分析在湖北省地质实验测试中心完成, 分析方法分别为等离子质谱法及同位素稀释热电离质谱法。

3.1 微量元素特征

本次选择的铝土矿样品以太平矿区、那豆矿区为主, 新安矿区少量分布, 具体包括太平矿区的巴宁、10号矿体、塘琴、那甲地区以及那豆矿区的坡眼屯、那匿、内桑地区, 新安矿区的古来地区。通过对环境沉积相有指示意义的Zr、Ga、Th、U、V、Sr、Ba等微量元素含量的分析, 对各地区沉积环境进行研究, 结果见表3, 表中中国沉积岩微量

元素数据取自文献[17]。

太平矿区中的巴宁、10号矿体、塘琴、那甲地区, 那豆矿区中的那匿等地区在Zr、Ga、Th等不活泼元素的含量分布曲线上有一定的相似性, 而坡眼屯、内桑、古来地区分布相似(见图5)。Zr含量高的地区包括巴宁、10号矿体、塘琴、那甲、那匿, Zr含量偏低的地区有内桑、古来等, 显示出平果矿集区Zr含量总体从N到S逐渐减少的趋势; 而由Sr、Ba等活泼元素含量分布曲线可知, 各地区Sr、Ba等活泼元素含量基本偏低, 但内桑、古来地区更为少见。

各地区微量元素含量结果与中国沉积岩标准微量元素含量相比较(见图5), 结果显示平果铝土矿矿石中总体表现为Zr、Ga、Th、U、V等元素富集, Sr、Ba元素亏损。

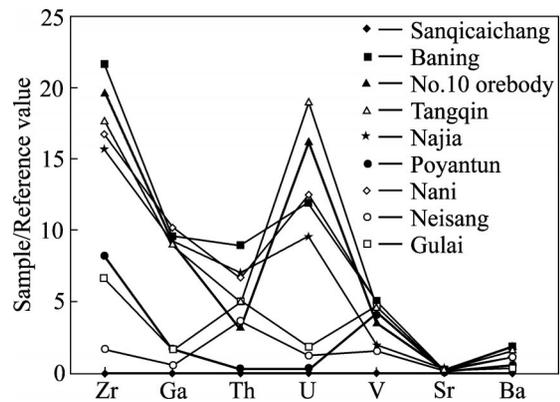


图5 平果矿集区原生铝土矿微量元素标准化图
Fig. 5 Standardization of trace elements of primary bauxite ore in Pingguo mining area

表3 平果矿集区原生铝土矿微量元素含量

Table 3 Contents of trace elements of primary bauxite ore in Pingguo mining area

Mining area	Location	Sample number	Mass fraction/ 10^{-6}							$w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$	$w(\text{V})/w(\text{Zr})$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$
			Zr	Ga	Th	U	V	Sr	Ba			
Taiping	Sanqicaichang	0110-2-1	788.3	28.3	42.4	7.7	143.8	29.2	128.4	0.23	0.18	5.51
	Banning	2002-3	2815.5	123.0	77.5	24.0	264.9	74.0	472.0	0.16	0.09	3.22
	No.10	2202-2	2584.1	118.8	29.2	32.8	194.8	62.4	465.9	0.13	0.08	0.89
	Tangqin	2002-3	2295.8	116.3	43.0	38.0	244.4	35.4	423.0	0.08	0.11	1.13
	Najia	2305-3B	2044.0	119.4	60.6	19.1	102.5	16.7	273.4	0.06	0.05	3.17
Nadou	Nani	2601-4	2175.0	131.3	57.4	25.3	260.5	57.6	289.0	0.20	0.12	2.27
	Poyantun	1031-1	1066.0	21.3	2.1	0.5	224.4	17.0	111.1	0.15	0.21	4.14
	Neisang	1019-2	218.8	7.4	31.7	2.5	82.5	65.9	108.1	0.61	0.38	12.84
Xin'an	Gulai	0113-4-1	865.0	19.3	44.4	3.7	254.5	75.9	101.0	0.75	0.29	12.10
Chinese Sedimentary Rocks			130.0	13.0	8.7	2.0	54.0	330.0	260.0			

3.2 Sr同位素特征

本次通过对太平矿区的巴宁、10号矿体、塘琴、那卷、那色,那豆矿区的那匿、那塘地区原生铝土矿进行取样分析,各地区的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值见表4。

表4显示,太平矿区中除那卷和那色地区外,各地区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值普遍较高,大多为0.7080~0.7085,其中巴宁地区最高,可达0.70928之多,那卷地区平均值约0.706;那豆矿区的那匿地区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较高,平均值约为0.7084,那塘地区偏低,平均值约为0.7074。这些 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的差异反映出矿区中不同地区处于不同的海陆相沉积环境。

表4 原生铝土矿Sr同位素分析结果

Table 4 Strontium isotope analysis results of primary bauxite ore

Mining area	Location	Sample number	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma/10^{-6}$
Taiping	Baning	2103-6	0.70928	7
	Baning	2104-2	0.70825	5
	No.10 orebody	2202-2	0.70815	9
	No.10 orebody	2202-5	0.70832	9
	Tangqin	2002-3	0.70878	9
	Tangqin	2002-1	0.70805	4
	Najuan	2003-7	0.70753	9
	Najuan	2003-6	0.70768	11
	Nase	2305-6	0.70765	8
	Nase	2305-7	0.70782	7
Nadou	Nani	2601-2	0.70836	7
	Nani	2601-3	0.70842	7
	Natang	1028-2	0.70734	5
	Natang	1028-3	0.70752	6

4 矿石微区地球化学特征

在平果矿区原生铝土矿中广泛发育鲕粒,本次采用扫描电镜能谱(SEM-EDS)结合电子探针(EPMA)测试手段,对太平矿区的巴宁、10号矿体、塘琴、那甲地区,那豆矿区的坡眼屯、那荣地区以及新安矿区的古来地区矿石中的鲕粒和周边基质进行元素地球化学研究。SEM-EDS和EPMA分析在中南大学材料学院进行,运用X射线,使用偏光显微镜及电子显微镜进行观察,通过铝土矿鲕粒的微

观形貌进行相关矿物学的判定,同时应用能谱仪,对鲕粒及其周边基质中O、Al、Si、K、Na、Fe、Ti等元素进行定量分析。

4.1 扫描电镜能谱分析结果

巴宁地区以少鲕含铁块状原生铝土矿为主,样品在光学显微镜下同样显示了富铁特点。图6(a)和(b)所示为巴宁铝土矿鲕粒二次电子图像,可以看出鲕粒中一水铝石与铁质物呈交织生长,但多数可见矿物界线,铁质物在基质中含量较高,在鲕粒中则呈团状集合体零散分布。分别对鲕粒的周围基质、鲕粒的边缘、鲕粒核部(包括鲕粒中铁质富集部位)进行点分析(见图6(b);表5),以及对鲕粒及周边基质进行Fe、Al、Si、K、Na元素X射线扫描分析(见图6(c))。结果显示,鲕粒内部主要富集Al,均匀分布,Fe呈团状集合体状少量存在, Si含量很少,呈星状分布;鲕粒的边缘主要分布Al元素;鲕粒附近基质中主要富集Fe、Ti, Al含量较少。鲕粒和基质中K与Na等活泼元素含量很低(见表5)。

10号矿体中主要为灰白色豆鲕状铝土矿,鲕粒和基质中含铝矿物居多,少量分布一些其他矿物,且鲕粒比基质铝矿物含量多,二者可见清晰界线。X射线分析显示,10号矿体鲕粒和基质中均含有大量的Al,且鲕粒中Al元素的含量相对较高;Fe元素基本不存在, Si的含量较少,只是星状分布于鲕粒和基质中, K、Na活泼元素含量很少(见图6(d)~(f);表5)。该鲕粒从基质到边缘再到核部, Al含量波动较大,同时K、Si元素增多,核部局部Na元素增多,说明除了铝矿物外,还有黏土矿物的存在。

坡眼屯地区出露的主要为灰白色豆鲕粒原生铝土矿,鲕粒和周边基质基本为铝矿物,成凝胶状,其余矿物混杂其中,无法分辨,但基质与鲕粒、以及鲕粒圈层之间有明显界线。鲕粒以及周边基质中含有大量Al,二者差别不大; Si元素多数存在于基质和鲕粒边缘,在鲕粒核中也有个别集中分布;该地区的鲕粒Fe元素含量极少; K、Na等活泼元素含量很少,分布均匀(见图6(g)~(i))。该鲕粒及周边主要元素含量呈一定规律分布:基质中Al含量高,说明基质中主要为铝矿物;鲕粒边缘圈层中以铝矿物为主,但Ti的含量增多;鲕粒中元素含量波动较大, Al元素持续偏高,说明粒中总体还是以铝矿物

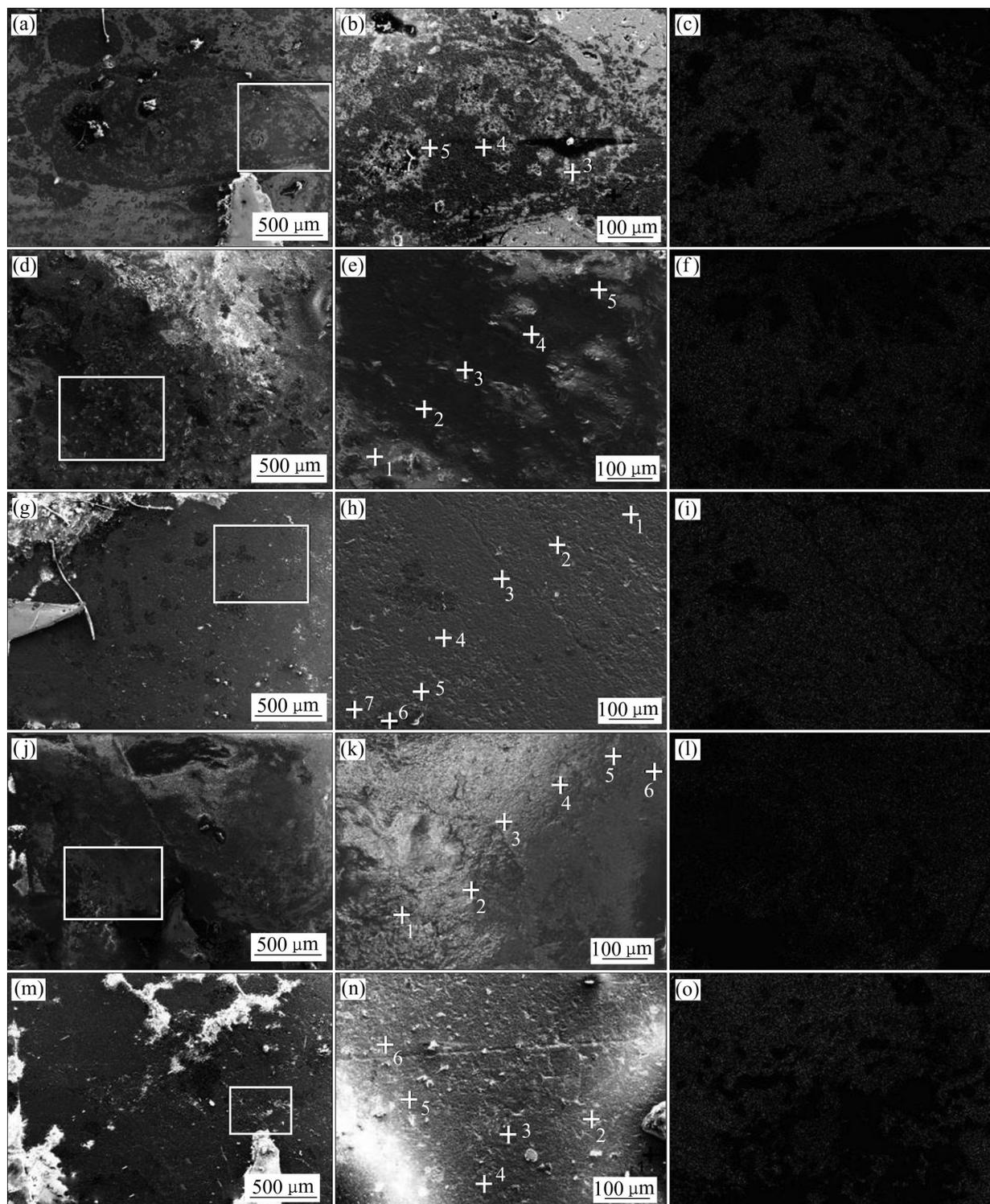


图6 铝土矿鲕粒二次电子图像及X射线分析图:(a)~(c) 巴宁地区;(d)~(f) 10号矿体;(g)~(i) 坡眼屯地区;(j)~(l) 那荣地区;(m)~(o) 塘琴地区;(a), (d), (g), (j), (m) 鲕粒全貌二次电子图像以及测试区域;(b), (e), (h), (k), (n) 能谱分析点分布位置;(c), (f), (i), (l), (o) Al元素X射线扫描分析图

Fig. 6 Secondary electron image and X-ray analysis of oolites in bauxite: (a)~(f) No. 10 ore body; (g)~(i) Poyantun area; (j)~(l) Narong area; (m)~(o) Tangqin area; (a), (d), (g), (j), (m) Secondary electron image and analytical area of oolites; (b), (e), (h), (k), (n) Position of energy spectrum analysis point; (c), (f), (i), (l), (o) Al element X-ray scan analysis result

为主, 但也有含 Fe 的矿物, 同时 K、Si、Na 含量增多, 说明有黏土矿物存在, 同时 Ti 元素含量增多(见表 5)。

那荣地区多为青灰色块状铝土矿, 鲕粒基本由铝矿物凝结而成, 基质中可见少量其他矿物。鲕粒中 Al 的含量较周围基质中高(见图 6(j)~(l)); 基质中 Si 元素的含量较高, 在鲕粒中含量很少; 该地区鲕粒基本不含 Fe 元素; 同时 K、Na 活泼元素的含量也很少, 基本呈均匀分布。鲕粒与基质中基本以 Al

元素为主, 但基质较鲕粒中含量少, 且不均匀(见表 5)。基质中 Al 元素含量波动较大, 其中 Si、K、Na 元素均有分布但含量变化较大, 说明基质中铝矿物夹杂有一定量的黏土矿物等其他矿物; 鲕粒边缘圈层中 Na、Si 含量增多, 说明含有较多的黏土矿物; 鲕粒中基本为 Al 元素, 其他元素较少出现, 说明粒中主要为铝矿物胶结。

塘琴地区多为青灰色豆鲕状铝土矿, 鲕粒及周围基本由铝矿物凝结而成, 少量其他矿物。鲕粒和

表 5 鲕粒点元素分析结果表

Table 5 Element point analytical results of oolites

Location	Point	Number	Mass fraction/%						
			O	Al	Si	K	Na	Fe	Ti
Baning	Matrix	1	44.82	51.21	0	0	0	0	3.97
	Rim of oolite	2	44.01	53.57	0	0	0	0	2.42
	Core of oolite	3	24.2	4.5	0.68	1.56	0	69.07	0
	Core of oolite	4	44.94	55.06	0	0	0	0	0
	Core of oolite	5	31.09	11.17	0	0	0.35	52.77	4.63
	Rim of oolite	6	42.08	57.92	0	0	0	0	0
	Matrix	7	39.02	41.13	0	0	0	17.21	2.64
No.10 orebody	Matrix	1	47.72	50.97	0.16	0.3	0.43	0	0.43
	Rim of oolite	2	43.63	52.3	0.24	0.27	0.49	0	2.07
	Rim of oolite	3	45.46	52.81	0.32	0.14	0.53	0	0.74
	Core of oolite	4	57.69	39.6	0.15	0.38	2.03	0	0.14
	Core of oolite	5	60.59	35.27	0.72	0.7	2.26	0	0.47
Poyantun	Matrix	1	45.56	51.48	0.79	0.33	0.57	0.66	0.6
	Matrix	2	41.69	55.86	0.14	0.3	0.49	0.69	0.83
	Rim of oolite	3	47.11	49.59	0.61	0.8	0.24	0.54	1.12
	Rim of oolite	4	42.01	54.83	0.13	0.15	0.32	0.78	1.77
	Core of oolite	5	37.32	53.33	0.27	0.54	0.64	1.71	6.2
	Core of oolite	6	38.64	30.17	20.37	0.78	0.92	6.3	2.82
	Core of oolite	7	41.8	51.28	0.53	0.19	0.36	0.87	4.97
Narong	Matrix	1	64.18	24.77	3.79	2.1	5.15	0	0
	Rim of oolite	2	55.63	41.15	1.16	0.35	0.77	0.4	0.55
	Rim of oolite	3	58.34	32.38	2.15	0.47	6.66	0	0
	Core of oolite	4	65.98	32.01	0.25	0.38	1.39	0	0
	Core of oolite	5	66.26	30.62	0.94	0.3	1.88	0	0
	Core of oolite	6	64.47	32.38	0.59	0.36	2.21	0	0
Tangqin	Matrix	1	64.18	24.77	3.79	2.1	5.15	0	0
	Rim of oolite	2	55.63	41.15	1.16	0.35	0.77	0.4	0.55
	Rim of oolite	3	58.34	32.38	2.15	0.47	6.66	0	0
	Core of oolite	4	65.98	32.01	0.25	0.38	1.39	0	0
	Core of oolite	5	66.26	30.62	0.94	0.3	1.88	0	0
	Core of oolite	6	64.47	32.38	0.59	0.36	2.21	0	0

基质中Al含量高,二者差别不明显(见图6(m)~(o)); Si元素有一定的含量,多以团状集合体分布于鲕粒边缘以及基质中; 鲕粒中Fe含量极少; K、Na含量在鲕粒中很少,在鲕粒的边缘以及周围基质中Na有一定的存在。鲕粒中以Al元素为主,基质中Al有一定的含量,但分布不均匀(见表5)。基质中Al元素含量相对偏低, Si、Na元素有一定的含量,说明基质中铝矿物和一定量的黏土矿物混杂; 鲕粒边缘Al元素含量较基质增多,但Si、Na的含量仍然较高,说明鲕粒边缘铝矿物增多,但仍含有黏土矿物; 鲕粒中基本为Al元素,其他元素

较少出现,说明鲕粒核中主要为铝矿物胶结。

4.2 电子探针分析结果

本次选取太平、那豆、新安三个矿区中有代表性的一水铝石鲕粒,分别对鲕粒及其周边基质进行电子探针扫描及点分析,对O、Al、Si、Fe、K、Ti以及Ga元素的分布情况进行精确厘定(见图7~9,表6)。

4.2.1 太平矿区鲕粒元素分布特征

太平矿区中铝土矿中鲕粒多为铝质、泥质胶体,在巴宁地区还存在铁质胶体,圈层鲕粒的含量相对较少,本次选取那甲地区的鲕粒作为该区域的

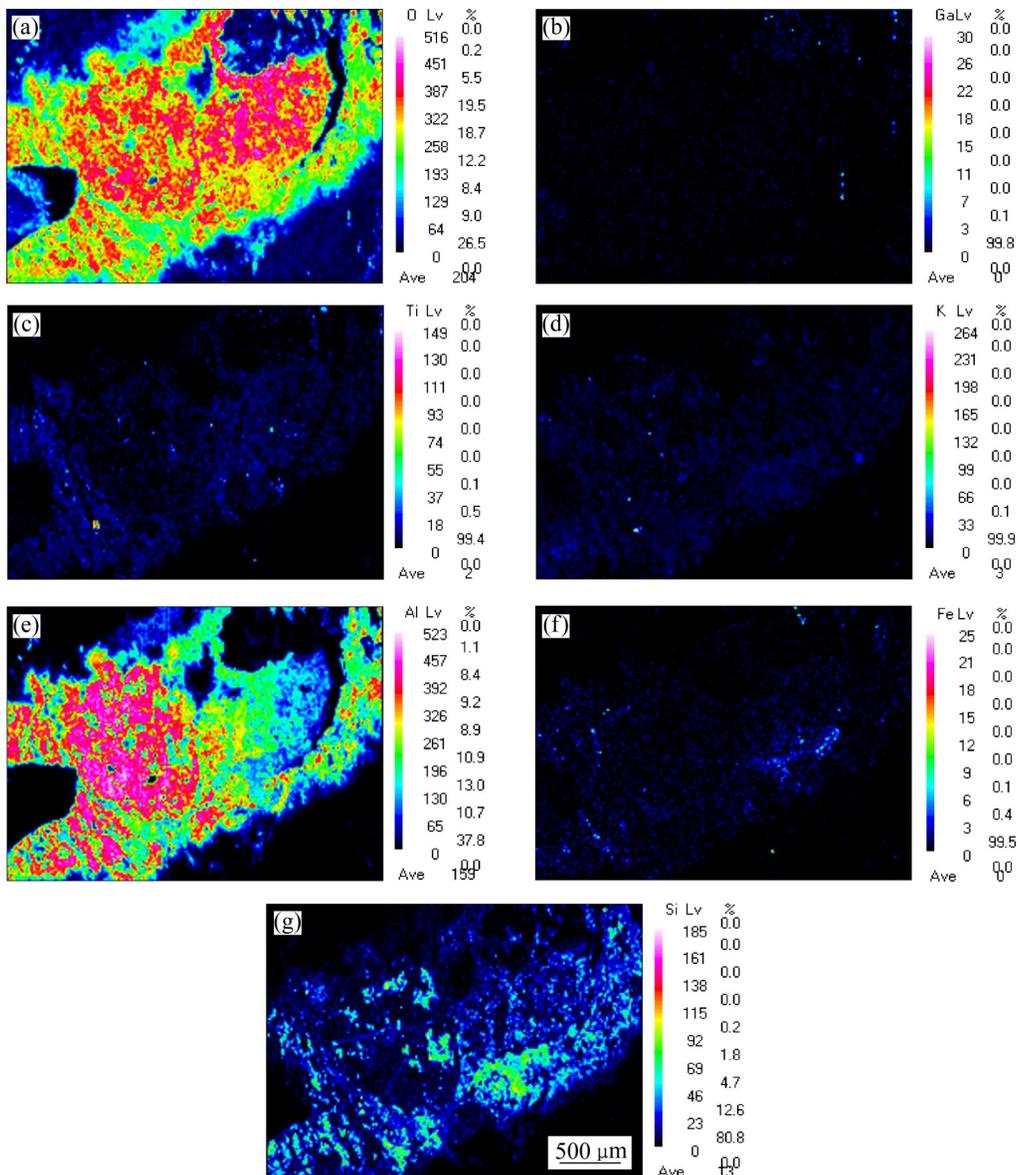


图7 太平矿区中原生矿鲕粒及基质电子探针元素面扫描图

Fig. 7 EPMA mapping of oolites and matrix in primary bauxite ore in Taiping area: (a) O; (b) Ga; (c) Ti; (d) K; (e) Al; (f) Fe; (g) Si

表6 太平、那豆、新安矿区鲕粒及基质电子探针化学成分分析结果

Table 6 EPMA point analytical results of oolites and matrix in primary bauxite ore in Taiping, Nadou and Xin'an areas

Mining area	Sample number	Point	Mass fraction/%							
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂	Ga ₂ O ₃	TiO ₂	FeO
Taiping	0319-4	Matrix	61.75	0.43	0.12	0.05	0.03	0	0.172	1.6
		Circle	66.1	0.34	0.09	0.07	0.03	0.03	0.26	0.52
		Core	61.38	0.45	0.13	0.14	0.08	0	0.045	0.39
		Core	65.09	0.72	0.14	0.05	0.08	0	0.234	1.06
Nadou	0325-21	Matrix	31.75	14.6	0.18	0.12	0.33	0.1	4.268	37.4
		Circle	70.76	2.61	0.07	0.06	0.15	0	0.832	13.6
		Circle	70.55	4.61	0.1	0.05	0	0	0.61	11.1
		Core	72.33	1.01	0.11	0.03	0.09	0.08	0.1	7
		Core	25.433	20.5	0.07	0.07	0.15	0.08	2.844	39.2
Xin'an	0113-4-2	Matrix	58.07	2.18	0.11	0.08	0.15	0.02	0.54	3.95
		Circle	71.57	0.49	0.13	0.79	0	0.06	0.845	0.24
		Circle	74.64	0.81	0.09	0.17	0	0	0.993	3.12
		Core	17.34	15.7	0.15	0.08	0.07	0	0.553	43.4
		Core	56.56	12.8	0.17	0.12	0.19	0.07	0.803	11.9

研究对象。被分析的鲕粒呈卵形,核部由两部分组成的,一部分结晶程度较高,颜色较浅,而另一部分颜色较暗。外围圈层只有一层,约0.02 mm,很薄并且不连续。周边基质结晶程度与鲕粒中核部的暗色部分相近。电子探针元素含量分析结果显示,Al元素在鲕粒及周围基质中均有大量的分布(见图7、表6),核中结晶程度高的部分Al元素含量高,说明基本为含铝矿物,暗色部分则可能为泥质物;Si元素则主要分布于基质中,鲕粒中含量相对很少,说明基质中含有较多的黏土物质。从结果看,鲕粒和周围基质中也含有少量Ti元素,其分布较均匀,说明铝矿物中Ti与Al成类质同象存在;其他如K、Ti、Fe等元素含量很少且分布相对均匀,并没有明显分布规律。

4.2.2 那豆矿区鲕粒元素分布特征

那豆矿区鲕粒含量很多,在坡眼屯、陇谷、雅朗地区均存在大量的鲕粒铝土矿。所分析的鲕粒为扁圆形,核部较为完整,外缘有一层较厚的圈层,宽约0.1 mm,鲕粒的结晶程度较高,这与其周围基质有较为明显差异,鲕粒被后期铁质细脉贯穿。该鲕粒Al元素在圈层中含量最高,平均可达70.65%,在鲕粒的核部以及周围基质中含量偏低,只有个别部位富集,说明鲕粒圈层中基本为铝矿物;Si元素含量较少,主要分布于鲕粒核部以及周

围基质中,说明在这些地方有黏土矿物的存在;Fe元素在鲕粒核部以及基质中含量较多;Ti元素在鲕粒核部中含量较少,在圈层和周围基质中有一定的存在(见图8,表6)。鲕粒核部及基质中Ga元素有一定的含量且均匀分布,这与它和铝矿物呈类质同象存在有关;其他如K元素含量极少。

4.2.3 新安矿区鲕粒元素分布特征

新安矿区中鲕粒分布广泛,且多数存在圈层,这里以古来地区鲕粒为例进行分析。新安矿区中鲕粒多数为圆球状构造,磨圆程度较高,鲕粒的圈层厚度较大且层数较多,图中鲕粒圈层粗略可见2~5层,总体厚度约0.4 mm。该鲕粒的Al元素主要分布于圈层中,鲕粒的核部和基质Al元素含量较低;Si元素含量恰好相反,主要集中在鲕粒的核部,在鲕粒的圈层中分布很少;在鲕粒的核部和基质中也含有一定量的Fe元素;其余如K等元素含量很少,在圈层部分地区可见星点状分布(见图9,表6)。

5 矿区沉积微相划分以及成矿环境分析

5.1 矿体与矿石特色及其形成环境

太平矿区矿体和矿石特征显示,北部巴宁地区只发育一层较薄的铝土矿,矿石类型为少颗粒致密

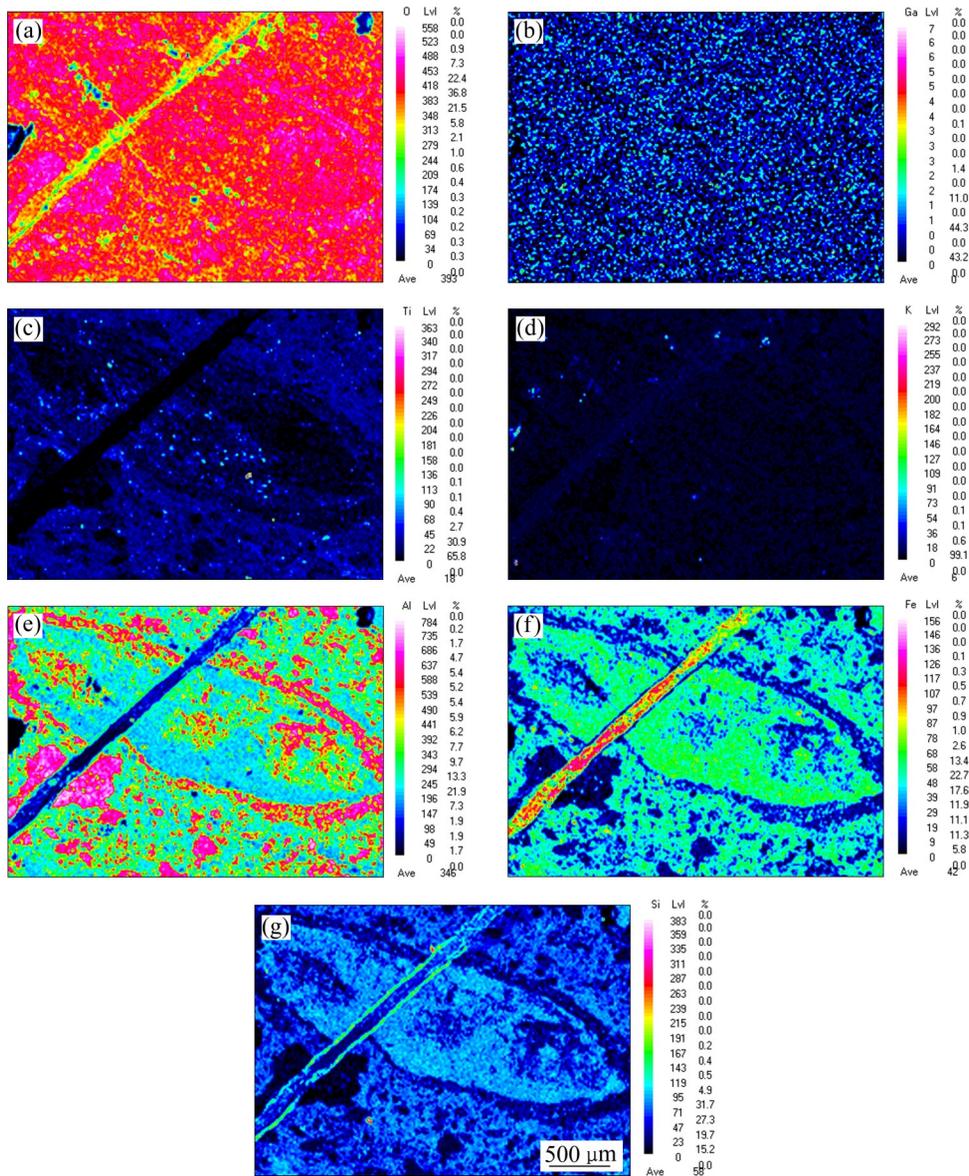


图8 那豆矿区鲕粒及基质电子探针元素面扫描图

Fig. 8 EPMA mapping of oolites and matrix in primary bauxite ore in Nadou area: (a) O; (b) Ga; (c) Ti; (d) K; (e) Al; (f) Fe; (g) Si

块状, 在该地区甚至可见合山组灰岩和茅口组灰岩相隔仅1 m的现象, 说明巴宁地区地势很高, 所接受的堆积物偏少; 矿区中部的10号矿体到那卷一带及矿区南部的塘琴到那甲地区相似, 它们都具有多层矿的组合, 上部矿层都是颗粒状矿石, 下部矿层为致密块状矿石, 在剖面上呈现出至下而上由细变粗的层序, 这种下细上粗的沉积层序正是三角洲沉积相的一种特征; 新圩地区中铝土矿呈透镜状横向尖灭, 这是河道滞留沉积的特点; 矿区中部贯屯地区一带发育大量煤层, 出露一层铝土矿, 矿石类型复杂, 包括孔隙状、豆鲕状、致密块状等, 表现

出复杂的偏还原环境, 可以推断该地区形成于水较浅、水动力较弱的沼泽环境。

从矿石的微观特征来看, 矿区中巴宁地区以铁质、泥岩屑为主, 其他地区以铝质屑、富有机质颗粒居多, 铁质颗粒、泥岩屑减少, 颗粒以塑性为主, 显示了物质沉积环境由近陆、水浅环境逐渐过渡到远陆、水深环境; 新圩地区有机质颗粒及高磨圆颗粒的存在以及塑性扰动特征, 显示了该地区水动力环境强且复杂。

野外观察那豆矿区各矿体与矿石特征发现, 矿区NW端那匿地区出露一层原生矿层, 其中可见颗

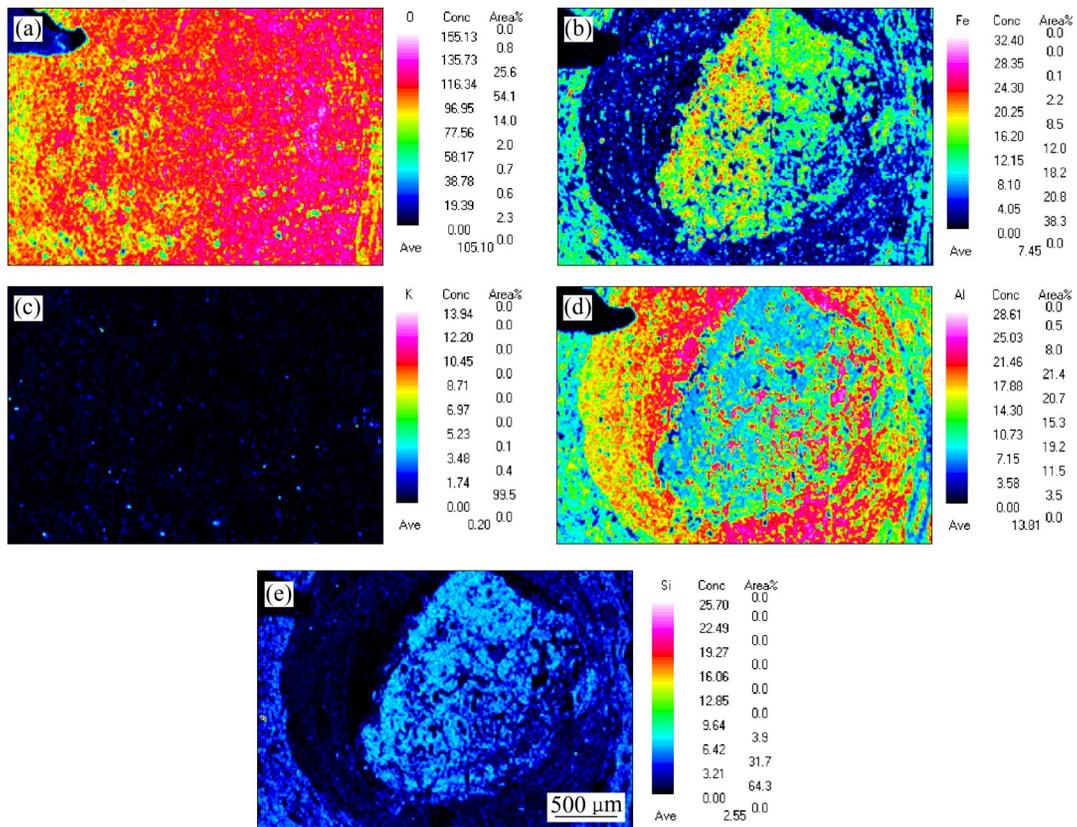


图9 新安矿区鲕粒及基质电子探针元素面扫描图

Fig. 9 EPMA mapping of oolites and matrix in primary bauxite ore in Xin'an area: (a) O; (b) Fe; (c) K; (d) Al; (e) Si

粒状、孔隙状以及致密状矿石，组成较为复杂，同时附近产出大量煤炭，这些特征与太平矿区贯屯一带相似，同样表现出偏还原的沼泽沉积环境；坡眼屯和那荣地区揭露出连续的多层矿组合，总体上部为粗颗粒豆鲕矿石，到下部逐渐变细的沉积层序；而陇谷地区中心部分粗豆鲕状矿石的存在，以及剖面上可见下粗上细的沉积层序，这些都显示出河流沉积相的特点，同时该地区附近夹杂一些煤层，说明了水动力环境较为复杂；雅朗地区为一层较厚的灰绿色致密块状矿石，矿石鲕粒含量较少，说明沉积物覆盖时水动力条件是较为平静，沉积物缓慢下沉的环境。

在陇谷、坡眼屯一带，多塑性、龟裂颗粒，同时伴生有黄铁矿、炭质屑的特点，说明了在这一带附近存在沼泽还原环境，同时陇谷有塑性变形颗粒和圆度较高的颗粒，无铁质颗粒，定向较明显，显示出水动力环境强的特点；那荣一带有机质颗粒减少，偶见铁质屑，其圈层和填隙物均为一水铝石和泥质物，可见水动力条件较强，不利于生物的聚

集，同时泥质屑的减少也说明了水体变深；雅朗地区豆鲕含量很少，同时该地区存在一定量的铁质屑，说明了雅朗地区地势较高，水动力环境较弱。

新安矿区中，古来地区为一层青灰色砂质致密块状矿石，说明了该地区水动力环境稳定，水体较深，同时矿石中的豆鲕粒磨圆度高，且圈层较厚，显示出长距离搬运的特点。

总体上，可以认为平果矿集区向东、向北地势较高，向南、向西地势偏低，局部地区存在变化，如那豆的雅朗地区地势增高。从太平矿区到那豆矿区再到新安矿区沉积环境总体呈现出由近陆、水浅到远陆、水深的变化，矿区中各地区又有差异，如新圩、陇谷地区地水动力环境较强，贯屯、那匿地区沉积环境环境偏还原等。

5.2 矿石地球化学特征的环境指示意义

5.2.1 微量元素特征

前人研究表明，沉积岩中的 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Zr})$ 、 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 等比值用来划分海陆相沉积环

境格局^[18-20]。平果矿集区中各地区样品的 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Zr})$ 、 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值同样表现出很强的区分度(见图10(a)~(c))。

我国13个现代海底样品 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba}) > 0.8 \sim 1$ ，例如，吐鲁番中生代陆相地层 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值为0.16，鄂尔多斯中生代陆相地层 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值为0.54^[2]。俞缙等^[18]提出，淡水沉积物的 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba}) < 0.6$ ，海水沉积物中 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba}) > 1$ ，过渡相水沉积物中 $0.6 < w(\text{Sr})/w(\text{Ba}) < 1$ 。图10(a)可以看出，除那豆矿区中的内桑 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 为0.61，新安矿区中的古来地区 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 为0.75，二者处于过渡相外，其余地区的 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 均小于0.6，指示淡水沉积相。

$w(\text{V})/w(\text{Zr})$ 值也来推测沉积环境特点，以高加索地区的陆相和海相岩石的 $w(\text{V})/w(\text{Zr})$ 作为沉积相的判别标准，陆相沉积 $w(\text{V})/w(\text{Zr})$ 为0.12~0.4，海相沉积 $w(\text{V})/w(\text{Zr})$ 一般为0.25~4.0^[21]。从图10(b)可

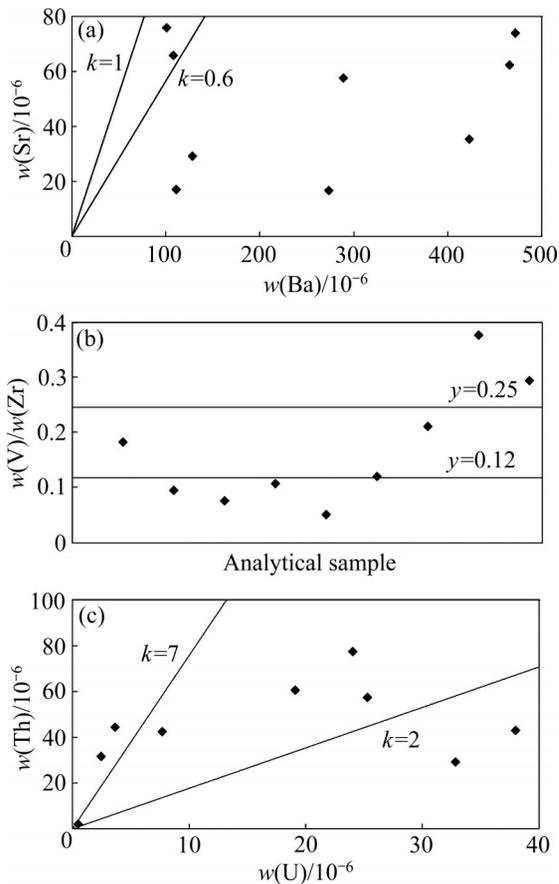


图10 平果原生铝土矿 $w(\text{Sr})-w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{V})-w(\text{Zr})$ 及 $w(\text{Th})-w(\text{U})$ 图

Fig. 10 $w(\text{Sr})-w(\text{Ba})$ (a), $w(\text{V})-w(\text{Zr})$ (b) and $w(\text{Th})-w(\text{U})$ (c) diagrams of primary bauxite ore in Pingguo

以看出，平果内桑和古来矿区的 $w(\text{V})/w(\text{Zr})$ 值大于0.25，由此可以说明，该地区的沉积环境偏海相，矿区其余地区偏陆相。

LAUKAS^[22]曾对原生铝土矿成因与 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值之间的关系进行总结，认为 $w(\text{Th})/w(\text{U}) > 7$ 时，铝土矿多是强烈红土化作用产物，风化作用占主导； $w(\text{Th})/w(\text{U}) < 2$ 为还原环境下的沉积产物； $w(\text{Th})/w(\text{U}) = 2 \sim 7$ 时可能是风化作用不彻底或者沉积混杂所致。图10(c)显示内桑和古来地区 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值明显大于7，指示还原环境的沉积特征，为海相沉积环境；其他地区的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 在2~7或者小于2，显示氧化陆相沉积特征。

$w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Zr})$ 、 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值的分析揭示，太平矿区总体上呈现出陆相淡水沉积环境特征，那豆矿区的NW端为陆相沉积环境，在SW端的内桑地区却表现出海相沉积环境特征，新安矿区中古来地区则呈海相沉积环境。总体平果矿集区呈现出海陆交汇环境格局。

5.2.2 Sr同位素特征

已有研究表明，Sr元素在化学和生物过程中不会产生明显的同位素分馏。Sr在海洋中至少存留百万年以上，因此认为Sr在海洋中的分布是均一的，常用来作为海洋环境的指示元素^[23]。史忠生等^[24]研究发现海洋中Sr一般有三个来源：一是由大陆岩石中锶经风化搬运进入海洋，这类陆源锶同位素的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值最高，平均为 0.720 ± 0.005 ；二是洋中脊热液活动带入海洋，锶同位素的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值最低，平均为 0.704 ± 0.002 ；三为海洋碳酸盐的再溶解释放的锶，Sr同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值处于前面二者之间，平均为 0.708 ± 0.001 。因此，不同地质时期海洋锶同位素因为物质来源的不同而变化，但它们在在同一地质时期内又表现出相对恒定，进而可以推测当时沉积环境。

有关学者研究了中国南方二叠纪古海洋锶同位素的演化，指出从早二叠世茅口晚期到茅口末期，碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.70739 \sim 0.70749$ ，从晚二叠世开始，碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.70747 \sim 0.70758$ ，然后逐渐变为 $0.0748 \sim 0.0722$ ^[23]。平果原生铝土矿位于二叠系上统第一层，下覆二叠系下统茅口组，由此可以认为处于晚二叠世，可借助 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.70722 \sim 0.70758$ 来指示平果矿集区

的沉积环境。

本研究中, 太平矿区的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值基本上大于 0.70758, 显然不处于海洋沉积环境, 只有在那卷地区一个 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值接近 0.70758, 表现出近海洋环境特征; 那豆矿区的那匿地区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值远大于 0.70758, 但是在那塘地区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值处于 0.70722~0.70758 的范围内, 显示出海洋沉积特征。

结合矿石微量元素特征分析结果, 可以推断出, 平果矿集区总体上为海陆交汇沉积环境, 包括

太平矿区、那豆矿区 NW 端和 SE 端均为陆相沉积环境, 海相环境包括那豆矿区的中部地区和 SW 端以及新安矿区, 海陆交汇线处于那豆矿区的那塘地区一带, 以及太平矿区的那卷地区南端。

5.3 矿石显微地球化学特征

从鲕粒扫描电镜能谱分析结果来看, 从鲕粒外的基质, 到鲕粒的圈层, 再到鲕粒的核部, 各个地区豆鲕元素含量分布出现有规律的变化(见图 11)。

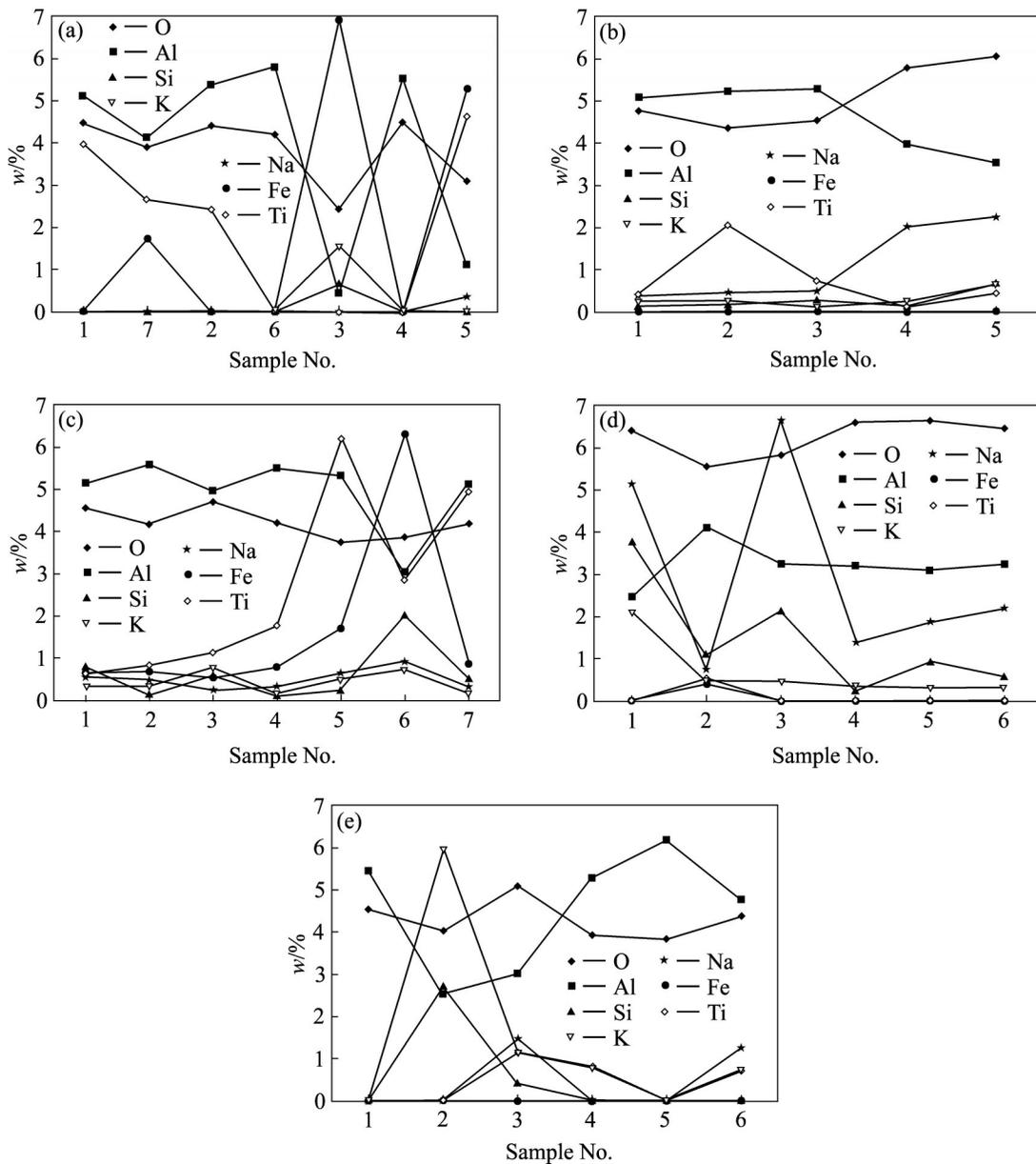


图 11 平果矿集区鲕粒及周边基质能谱分析元素分布曲线(为了方便对比, 图中主要元素 Al、O、Fe 含量 $w_1=w/10$, 其中 w 为实际含量)

Fig. 11 Element distribution curves of oolites and surrounding matrix revealed by energy spectrum analysis in Pingguo (for convenience of comparison, the major elements Al, O, Fe contents in the figure are $w_1=w/10$, where w is the actual content): (a) Banning; (c) No.10 orebody; (c) Poyantun; (d) Narong; (e) Tangqin

巴宁地区鲕粒的元素含量分布呈现出一定的规律,即从基质到鲕粒圈层,元素含量较稳定(见图11(a)),在鲕粒核中,元素含量波动变得紊乱,显示出鲕粒核中矿物较为复杂,周边基质以及圈层中矿物较均一,说明巴宁地区在沉积初期水动力环境强,碎屑物质迅速沉积,到了后期水动力变弱,环境中所含物质有了一定的分异。在巴宁地区基质中钛元素含量增多以及鲕粒铁质物大量出现则说明该地区距陆地物源很近。10号矿体地区鲕粒的元素含量分布特征与巴宁地区相似,即基质和鲕粒圈层元素含量稳定(见图11(b)),鲕粒内元素含量波动复杂,说明该地区也是有水动力环境由强到弱的转变过程。坡眼屯地区鲕粒的元素含量分布也存在与巴宁、10号矿体地区相似的规律(见图11(c)),即基质和鲕粒圈层元素含量稳定,鲕粒内元素含量波动复杂,说明该地区也是有水动力环境由强到弱的转变过程,同时Ti在该地区呈现出鲕粒中明显比基质多,说明了核中物质来源偏陆地。那荣地区从基质到鲕粒边缘再到粒中,主要元素含量呈现出先紊乱再到稳定的规律(见图11(d)),说明鲕粒核部是在较稳定的沉积环境中由铝质物逐渐胶结形成的,而到了后期该地区的沉积环境发生变化,从而导致鲕粒边缘圈层以及基质中夹杂有成分复杂矿物。塘琴地区从基质到鲕粒边缘再到粒中,主要元素含量呈现出先紊乱再到稳定的规律(见图11(e)),这与那荣地区所呈现出的规律相似,说明了该地区的沉积环境也发生了类似的变化,从而导致鲕粒核部矿物较稳定,边缘圈层以及基质中矿物复杂。

由此可见,在太平矿区的巴宁、10号矿体地区和那豆矿区的坡眼屯地区,鲕粒从基质到圈层,各元素含量基本呈稳定状,但鲕粒核部,含量曲线波动明显,反映了核由多种物质组成,而基质组成均一,这说明在沉积初期,鲕粒核部是在强动力水环境下激荡起的铝质悬浮粒快速沉积的产物,之后随着时间的推移,水动力环境慢慢变得平缓,鲕粒圈层的矿物组成趋于稳定,一直到最后基质的沉积。

太平矿区中那荣、塘琴地区鲕粒主要元素含量从基质到圈层再到核部呈现出先紊乱再到稳定的规律,说明鲕粒核部在沉积初期是处于一个较稳定的沉积环境,而到了后期该地区的沉积环境发生变化,从而导致鲕粒边缘圈层以及基质的物质组成复

杂。因此,在太平矿区的巴宁、10号矿体和那豆的坡眼屯地区沉积环境先是复杂后逐渐平缓,那豆矿区的那荣地区以及太平矿区的塘琴地区沉积环境由稳定变得复杂,结合前面所分析的矿区海陆交汇环境,可以认为是由于海平面的变化,导致在这些地区物质搬运沉积环境的变迁,考虑到矿区中部、东部及北部地势较高,南部、西部地势偏低这一特征,显示出从10号矿体→坡眼屯到那荣一带(NE→SW),以及塘琴地区一带海水逐渐后退,沉积物逐渐向前搬运沉积的过程。

从太平、那豆、新安矿区的鲕粒形态来看,太平矿区那甲地区的鲕粒的圈层较薄以及不连续,说明并没有经过长距离的搬运,可以肯定该地区距物源很近,水体较浅;那豆矿区雅朗地区的鲕粒多呈扁平状,说明在沉积初期鲕粒处于软塑性状态,结合其未遭受磨损的完整形态,反映出该鲕粒形成后未经过长距离的搬运迁移;新安矿区古来村地区的鲕粒的圈层明显比前面两个地区的厚得多,鲕粒具有圈层定向分布特征,表明鲕粒是成岩前形成的,是沉积作用的结果,这就说明该地区铝土矿经过了很长时间的迁移搬运。

在元素分布上,太平矿区那甲的鲕粒核部与周围基质富铝程度相似,说明了它们的组成成分一致;Si元素含量很少但主要分布于鲕粒外基质中,说明了豆鲕粒主要为陆源碎屑快速堆积沉积的结果;同时鲕粒以及基质中K含量低,说明鲕粒在沉积过程中介质含盐度低。那豆矿区雅朗地区的鲕粒核部总体Al含量较低,圈层的Al含量较高,同时鲕粒中含大量Fe元素,说明其环境一度呈氧化环境,雅朗地区在沉积期海拔相对较高,但鲕粒也是经过了一段时间搬运而沉积的。在新安矿区古来地区的鲕粒中,Al元素多分布于圈层,核中所占的比例很少,鲕粒中铝的富集主要是核部胶体黏附铝物质微粒来实现的,可见,鲕粒搬运时间较长,距离物源地较远。

无论从鲕粒圈层厚度变化还是从鲕粒Al元素赋存位置变化来看,均可推断平果原生铝土矿搬运沉积过程是沿着从太平矿区到那豆矿区再到新安矿区这一方向进行的,与前面得出的从太平矿区到那豆矿区再到新安矿区沉积环境总体呈现出由近陆、水浅到远陆、水深变化这一规律是相一致的。

5.4 沉积微相划分

三角洲是海陆过渡地带重要的地貌组成部分, 多形成于河流入海口, 海底较浅且比较稳定的地区, 由于海平面变化及三角洲发展等原因, 三角洲沉积物特征在空间上具有变化较大特点^[25-27]。通过前面对铝土矿石组构特征、地球化学特征及其空间分布研究, 结合矿石显微地球化学特征所指示意义, 认为平果矿集区原生矿沉积成矿环境为三角洲沉积相。

首先平果矿集区原生矿整体分布形态呈现扇形分布形态特征, 这为研究提供了直观证据。其次原生矿具有面状分布, 与三角洲沉积形态是一致的; 三角洲发育河流, 原生矿层中同样发育河流沉积相; 三角洲中包含有河道、砂坝、沼泽等单元, 矿区中陇谷、新安发育河流沉积相。此外, 贯屯、那匿发育沼泽沉积相, 以及 10 号矿体至那荣、塘琴一带发育向上变粗的沉积层序, 都显示了三角洲沉积特点。据此, 进一步对矿区中各地区进行沉积微相的划分(见图 12)。

5.4.1 三角洲平原亚相

三角洲平原是三角洲的陆上部分, 包括分支河道、天然堤、决口扇、沼泽、湖泊和分支间湾等, 其中分支河道与沼泽的泥炭或褐煤沉积构成三角洲平原相的主要部分^[25-28]。在矿区中这一亚相主要分布于太平矿区巴宁以西、贯屯以北的广大地区, 以及那豆矿区那匿、陇谷地区以西以及雅朗地

区一带。

1) 分支河道微相

无论是地球化学特征中所显示的淡水沉积环境, 还是矿体矿石特征中的粗豆鲕粒铝土矿层透镜状横向尖灭特点, 以及矿体剖面下粗上细的正旋回沉积层序特点, 都显示出太平矿区中新圩地区 and 那豆矿区中陇谷地区在铝土矿形成过程中多数时期为河流相。新圩地区中铝土矿矿层上面出露很薄的炭质页岩和黏土岩, 以及陇谷地区旁边少量煤层, 可能是后期向沼泽环境演变的结果。在河道的流向方面, 从整个三角洲沉积环境分布上看, 水流总方向应与三角洲的扩散方向一致, 结合矿区中东部和北部地势较高, 南部和西部地势偏低特征, 以及河流相所在地区原生矿层的序列层序的变化方向、矿石组构变化等特征, 得出塘琴地区河道方向为 NE 到 SW, 陇谷地区河道方向为 NW 到 SE。

2) 沼泽微相

一般来说, 黑色的炭质页岩以及煤层都是沼泽相的标志, 他们都是在沼泽还原环境中形成的^[29]。在贯屯、那匿一带, 颗粒中存在富有机质的黑色或褐色颗粒, 并发育龟裂, 说明矿石分布区的附近外围存在富有机质的水饱和泥质区。在那匿地区, 有平果地区最大的煤矿, 在贯屯, 同样存在大量的煤层, 说明了这些地区长时间处于沼泽相, 而不是短暂的演变。同时贯屯与新圩地区相邻, 而那匿就在陇谷地区的上方, 结合前面所分析新圩和陇谷地区

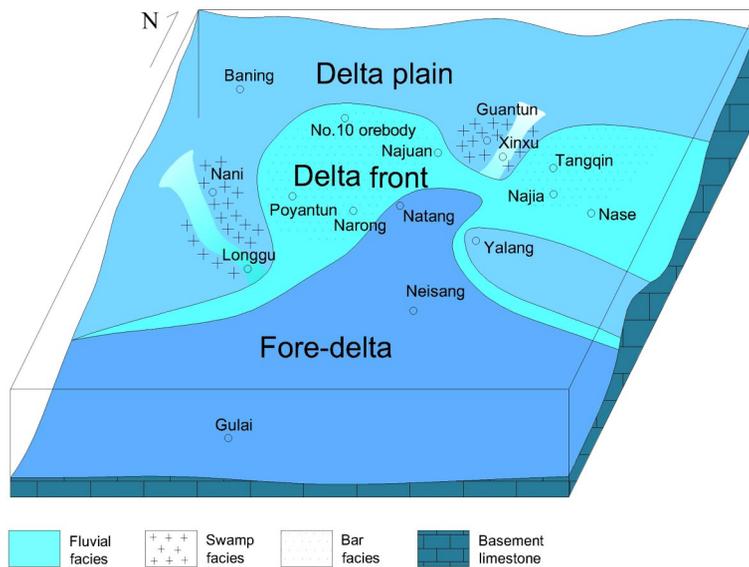


图 12 平果矿集区沉积微相分布示意图

Fig. 12 Schematic diagram of sedimentary microfacies distribution in Pingguo

河流相的特征,这也与三角洲平原沉积中河道碎屑与沼泽沉积共生的典型特征相似。

5.4.2 三角洲前缘亚相

三角洲前缘是三角洲的主体,并以水下为主,位于分支流河道的前端(河口部位),河流带来的砂、泥沉积物在河口与海洋结合部位迅速地沉积,形成三角洲厚度最大的部分,包括分支流河口沙坝、远沙坝、前缘席状沙、水下分支流河道和水下堤等^[25-28]。本区中最为典型的沉积特征是沙坝微相沉积,分布于矿区中的10号矿体至那卷地区以及塘琴地区一带。在这些地区矿层上部为豆鲕状矿石,下部为孔隙状和致密状矿石。那豆矿区NE翼包括坡眼屯、那荣地区,原生矿层的剖面基本组成也是上部矿层颗粒大、数量多,下部颗粒变小,数量也是减少趋势,同时胶结物的粒度变细。

由此看出矿区中较大范围的原生铝土矿在剖面上基本是表现为由细变粗层序,这与三角洲沙坝沉积的基本特征相似,因为沙坝沉积是不断向海推进的过程,河流入海口首先接受沉积,在沉积堆满老河口以后,新的河流入海口向海迁移,使沉积层相应向海前移。这样使得较晚的沉积层总是比较早的沉积层向海的方向移动一段距离,新的沉积层前端会覆盖在远处的海底之上,形成沙坝沉积层的超覆关系。因为沙坝沉积顺河流流向形成粒度变化,即在上游形成粗粒沉积层,中游形成细粒沉积层,下游形成泥质沉积层,这使得沙坝每个沉积层都有纵向沉积粒度的相带划分,在多层超覆沉积的情况下,形成剖面上下细上粗粒度变化,即反序列层序沉积。

因此可以将矿区分为两个主要沙坝带,即包括10号矿体、那卷、坡眼屯、那荣的西部沙坝带和塘琴至那甲一带的东部沙坝带。在这些地区,横剖面的矿石结构是相似的,如上部矿层都是豆鲕状结构类型,表明相似的沉积条件。局部也有变化,如下部矿层中孔隙矿石与致密矿石的差异,可能是沙坝在横剖面上中心区与边缘区的差异。

5.4.3 前三角洲亚相

前三角洲是位于三角洲前缘向海或湖一方,是由河流搬来的最细黏土悬浮物质和胶体溶液在海底沉积而成的,含海相化石,实际上是浪基面以下的正常海相沉积,沉积相相对简单^[25-28]。

矿区中那豆矿区那塘、内桑地区,新安矿区的

古来经地球化学数据以及Sr同位素分析,均处于海相沉积特征,且内桑、古来地区出露均为一层青灰色致密铝土矿,表现出沉积环境水体深的特点,这些地区处于前三角洲亚相中。

5.5 成矿环境探讨

根据前面对平果矿集区原生矿特征和沉积环境的认识,以及对平果矿集区中三角洲沉积相的划分,可知各沉积相中原生铝土矿的发育程度不同,因此原生矿所表现出来的不均匀分布是受到了各地区沉积环境的影响。

三角洲平原相的各微相环境中原生矿发育普遍不好,只有在分支河道微相中,原生矿厚度较大,延伸较稳定,所以分支河道相的环境是有利于成矿的,但是分布范围小;前三角洲原生矿总体厚度较小;只有三角洲前缘相的沙坝微相中,矿层厚度大、矿层延伸范围大、延伸稳定,是最有利的成矿环境。

在沙坝微相中原生矿的沉积分布也不是均一的,实际上受复杂的水动力影响以及沙坝的延伸方向等影响,造成了原生矿发育程度的差异。根据矿区原生矿分布区域的总体发散方向以及前面分析得出的原生矿的搬运沉积方向等规律,可以确定沙坝的上下游方向,总体上是NE→SW,或者NW→SE,但这对具体研究沙坝中沉积特征以及成矿环境是显然不够的。

依据前面扫描电镜能谱分析可知,在所划分的沙坝带中,太平矿区的10号矿体地区和那豆矿区的坡眼屯地区,鲕粒核部由多种物质组成,而基质组成均一;太平矿区中那荣、塘琴地区鲕粒核部组成均一,而周边基质成分复杂。这说明沉积物从巴宁地区搬运过来,10号矿体地区和坡眼屯地区附近一直处于强动力水流环境,相当于沙坝的前缘,成矿物质相对不易沉积形成较厚的沉积层。但那荣地区相当于沙坝的中部,沉积初期环境比较稳定,有利于沉积物的沉积,可以接受更多的成矿物质,鲕粒周边基质的混杂则是由于搬运沉积物逐渐沉积的结果。同样在东部沙坝带,塘琴地区前期稳定的沉积环境也有利于成矿物质的沉积,因此在平果矿集区中,那豆矿区的那荣地区、以及太平矿区的塘琴地区处于最理想的原生矿成矿环境。

6 结论

1) 平果矿集区东部、北部地势较高,南部、西部地势逐渐变低,从太平矿区到那豆矿区再到新安矿区(NE→SW)沉积环境总体呈现出由近陆沉积物到远陆、水浅到水深的变化。矿区中各地区沉积环境有较大差异,新圩地区、陇谷地区水动力环境较强,雅朗地区水动力偏弱;巴宁地区偏氧化环境,贯屯地区、那匿地区沉积环境偏还原。

2) 平果矿集区中,太平矿区总体上呈现出陆相淡水沉积环境特征;那豆矿区的NW端为陆相沉积环境,在SW端的内桑地区却表现出海相沉积环境特征;新安矿区的古来地区呈海相沉积环境。因此,平果矿集区总体上呈现出海陆交汇沉积环境格局。

3) 矿区中豆鲕粒及周边基质主要元素分布分析表明,从10号矿体到坡眼屯地区再到那荣一带(NE→SW),以及塘琴地区一带,海水逐渐后退,沉积物逐渐向前搬运沉积,平果原生铝土矿总体是从太平矿区到那豆矿区再到新安矿区搬运沉积。

4) 平果矿集区在成矿期处于以三角洲为沉积相的沉积环境。通过对矿区三角洲沉积环境进行包括分支河流相、沼泽相、沙坝相等更为细致的沉积微相划分,推测沙坝微相最有利于原生矿富集,因此平果矿集区的那荣地区和塘琴地区最有利于原生矿的形成。

REFERENCES

- [1] 戴塔根,龙永珍,张起钻,等. 桂西某些铝土矿床稀土元素地球化学研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(4): 1-5.
DAI Ta-gen, LONG Yong-zhen, ZHANG Qi-zuan, et al. REE geochemistry of some bauxite deposits in the Western Guangxi district[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(4): 1-5.
- [2] 王力,龙永珍,彭省临. 桂西铝土矿成矿物质来源的地质地球化学分析[J]. 桂林工学院学报, 2004, 24(1): 1-6.
WANG Li, LONG Yong-zhen, PENG Sheng-lin. Geologic and geochemical study on material derivation of bauxite deposits in Western Guangxi[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2004, 24(1): 1-6.
- [3] 戴塔根,龙永珍,张起钻,等. 桂西铝多金属矿床地质地球化学特征与成矿机理[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(4): 345-350.
DAI Ta-gen, LONG Yong-zhen, ZHANG Qi-zuan, et al. Geological and geochemical characteristics and metallogenic mechanism of aluminium multi metal deposits in Western Guangxi[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(4): 345-350.
- [4] 程顺波,刘阿睢,崔森,等. 桂西二叠纪喀斯特型铝土矿地质成矿过程[J]. 地球科学, 2021, 46(8): 2697-2710.
CHENG Shun-bo, LIU A-sui, CUI Sen, et al. Mineralization process of Permian karst bauxite in Western Guangxi[J]. Earth Science, 2021, 46(8): 2697-2710.
- [5] 祝瑞勤,奚小双,吴玺虹,等. 广西平果堆积铝土矿岩溶地貌演化与成矿作用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(3): 744-751.
ZHU Rui-qin, XI Xiao-shuang, WU Qian-hong, et al. Karst landform evolution and mineralization of accumulative bauxite in Pingguo bauxite ore, Guangxi[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(3): 744-751.
- [6] 祝瑞勤,奚小双,吴玺虹,等. 广西平果堆积型铝土矿成矿封闭环境研究[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 386-393.
ZHU Rui-qin, XI Xiao-shuang, WU Qian-hong, et al. Enclosed environment for mineralization of accumulative bauxites in Pingguo, Guangxi[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(3): 386-393.
- [7] 祝瑞勤,奚小双,吴玺虹,等. 广西平果铝堆积矿分带特征和成矿规律研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(3): 353-360.
ZHU Rui-qin, XI Xiao-shuang, WU Qian-hong, et al. Zonation characteristics and metallogenic rules of the accumulative bauxite deposit in the Pingguo area, Guangxi Province[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(3): 353-360.
- [8] 戴塔根,李洁兰. 广西扶绥喀斯特型铝土矿氢氧同位素特征及地质意义[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1505-1514.
DAI Ta-gen, LI Jie-lan. Features and significance of H-O isotopes from Fusui Karst bauxite in Guangxi Province, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1505-1514.
- [9] CAO J Y, WU Q H, LI H, et al. Metallogenic mechanism of Pingguo bauxite deposit, Western Guangxi, China: Constraints from REE geochemistry and multi-fractal characteristics of major elements in bauxite ore[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(7): 1627-1636.
- [10] XIONG G L, YU W C, DU Y S, et al. Provenance of lower carboniferous bauxite deposits in northern Guizhou, China:

- Constraints from geochemistry and detrital zircon U-Pb ages [J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(1): 235–252.
- [11] 刘勤志. 广西平果原生铝土矿地质与地球化学特征及成矿环境探讨[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 30–50.
LIU Qin-zhi. Study on geology and geochemistry characteristics of Pingguo raw bauxite and metallogenic environment in Guangxi[D]. Changsha: Central South University, 2008: 30–50.
- [12] 祝瑞勤. 广西平果岩溶型铝土矿地质地貌环境与成矿机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 112–142.
ZHU Rui-qin. The study on geologic-landform environment and metallogenic mechanism of Karst type bauxite in Pingguo, Guangxi[D]. Changsha: Central South University, 2012: 112–142.
- [13] 崔滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北地区铝土矿矿物学与地球化学特征[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(10): 2905–2920.
CUI Tao, JIAO Yang-quan, DU Yuan-sheng, et al. Mineralogical and geochemical characteristic of bauxite in Northern Guizhou[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(10): 2905–2920.
- [14] LIU X F, WANG Q F, ZHANG Q Z, et al. Genesis of the Permian karstic Pingguo bauxite deposit, western Guangxi, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2017, 52(7): 1031–1048.
- [15] 李晓峰. 广西平果原生铝土矿矿石微观组构和地球化学特征对成矿环境的示踪初探[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 17–48.
LI Xiao-feng. Microscopic texture and geochemical characteristics of primary bauxite ore in Pingguo, Guangxi Province: The evidences for metallogenic environment implication[D]. Changsha: Central South University, 2013: 17–48.
- [16] 崔滔, 闫俊, 张敏. 黔北沉积型铝土矿鲕粒成因[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(2): 586–602.
CUI Tao, YAN Jun, ZHANG Min. Origin of oolites of sedimentary bauxite in northern Guizhou, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(2): 586–602.
- [17] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
CHI Qing-hua, YAN Ming-cai. Handbook of applied geochemical element abundance data[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [18] 俞缙, 李普涛, 于航波. 靖西三合铝土矿微量元素地球化学特征与成矿环境研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(3): 289–293.
YU Jin, LI Pu-tao, YU Hang-bo. Analysis on trace-element geochemical characteristics and ore-forming environment of bauxite mine in Sanhe town of Jingxi County[J]. *Journal of*
- Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2009, 28(3): 289–293.
- [19] 刘文, 李欢, 陈正山, 等. 黔东注溪黑色岩系地球化学特征及矿化富集规律[J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 2978–2994.
LIU Wen, LI Huan, CHEN Zheng-shan, et al. Geochemical characteristics and metal enrichment rules of black shales in the Zhuxi vanadium ore field, eastern Guizhou[J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 2978–2994.
- [20] WANG A H, WANG Z H, LIU J K, et al. The Sr/Ba ratio response to salinity in clastic sediments of the Yangtze River Delta[J]. *Chemical Geology*, 2021, 559: 119923.
- [21] 范忠仁. 河南省中西部铝土矿微量元素比值特征及其成因意义[J]. *地质与勘探*, 1989, 25(7): 23–27.
FAN Zhong-ren. Characteristic ratios of trace elements and genetic significance of bauxite deposits in central-western Henan[J]. *Geology and Prospecting*, 1989, 25(7): 23–27.
- [22] LUKAS T C, LOUGHNAN F C, EADES J L. Origin of bauxite at Eufaula Alabama, USA[J]. *Clay Minerals*, 1983, 18: 18(2): 127–138.
- [23] 田景春, 曾允孚. 中国南方二叠纪古海洋锶同位素演化[J]. *沉积学报*, 1995, 13(4): 125–130.
TIAN Jing-chun, ZENG Yun-fu. The revolution of the isotopic composition of strontium in the Permian paleo-ocean in South China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(4): 125–130.
- [24] 史忠生, 陈开远, 何胡军, 等. 锶同位素在沉积环境分析方面的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24(2): 187–190.
SHI Zhong-sheng, CHEN Kai-yuan, HE Hu-jun, et al. Application of Sr isotope to sedimentary environment analysis[J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(2): 187–190.
- [25] WRIGHT L D. Coastal sedimentary environments[M]. Edited by R.A. Davis, 1978: 5–64.
- [26] 曹荆亚. 广西平果矿区三角洲河道分布分形几何研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 21–46.
CAO Jing-ya. Study on distribution and fractal geometry of delta channel in Pingguo orefield, Guangxi[D]. Changsha: Central South University, 2012: 21–46.
- [27] 刘辰生, 金中国, 郭建华. 海平面变化对沉积型铝土矿富集成矿的影响: 以黔北铝土矿为例[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(5): 985–993.
LIU Chen-sheng, JIN Zhong-guo, GUO Jian-hua. Effect of sea level change on enrichment and mineralization of bauxite—Taking Qianbei bauxite for example[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(5): 985–993.
- [28] 顾家裕. 中国东部古代扇—三角洲沉积[J]. *石油与天然气地质*, 1984, 5(3): 236–245.
GU Jia-yu. Sedimentation of ancient fan-deltas in eastern

- China[J]. *Oil & Gas Geology*, 1984, 5(3): 236–245.
- [29] 崔滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿沉积古地理及其控矿意义[J]. *古地理学报*, 2014, 16(1): 9–18.
- CUI Tao, JIAO Yang-quan, DU Yuan-sheng, et al.

Sedimentary palaeogeography and its mineralization significance of the Early Permian bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(1): 9–18.

Geological and geochemical characteristics of primary sedimentary bauxite in Pingguo, Guangxi and its metallogenic environment

LI Xiao-feng^{1,2}, LI Huan¹, WU Qian-hong¹, ZHU Rui-qin¹, XI Xiao-shuang¹

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring of Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. The Coal Geological Exploration Institute of Hunan Province, Changsha 410083, China)

Abstract: The Pingguo bauxite mining area in Guangxi is an important bauxite producing area in China. There are two types of bauxite ores: Karst accumulation type and primary sedimentation type. Previous researches mainly focused on the genesis of accumulative bauxite, but no specific analysis has been carried out on the sedimentary facies, paleogeomorphology, sedimentary environment and its control on the formation of primary sedimentation type ore. In this paper, detailed mineralogical and geochemical studies have been carried out on a variety of primary ores in the Pingguo area. The results show that the primary bauxite ore is generally enriched in Zr, Ga, Th, U and V but depleted in Sr and Ba. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values are generally high, mostly between 0.7080 and 0.7085. Energy spectrum scanning electron microscope and electron probe microanalysis of oolites in primary ore show that different samples have variable contents of O, Al, Si, Fe, K, Ti and Ga. Combined with the field occurrences and spatial location of the ore bodies, this study puts forward that the paleogeomorphic characteristics of the Pingguo mining area are that the terrain in the east and north is higher, whereas the terrain in the south and west is lower. The sedimentary environment from the Taiping area to Nadou area and then to Xin'an area in Pingguo changed from near-land to far-land, and from shallow-water to deep-water, presenting the pattern of sea-land intersection sedimentary environment. The primary bauxite ore-forming materials were transported and deposited from Taiping to Nadou and then to Xin'an. On the whole, it was a delta sedimentary environment which can be divided into more detailed sedimentary microfacies such as branch fluvial facies, swamp facies and sandbank facies. It is pointed out that sandbank microfacies were most conducive to the enrichment of primary ore. Therefore, the Narong and Tangqin areas in Pingguo were most conducive to the deposition of primary ore.

Key words: primary bauxite ore; sedimentary oolitic; sedimentary facies; metallogenic environment; Pingguo-Guangxi

Foundation item: Project (GX2007CAQB0) supported by Aluminum Corporation of China

Received date: 2021-10-08; **Accepted date:** 2021-11-11

Corresponding author: LI Huan; Tel: +86-18827415616; E-mail: lihuan@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)