

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2017.02.021

加纳阿瓦索红土型铝土矿床地球 化学特征及成矿作用研究

郑 辉¹, 葛志超¹, 秦术凯², 黄 奎^{1,3}, 白进春^{1,3}, 梁清玲¹

(1. 四川省冶金地质勘查局六〇六大队, 成都 611730;

2. 四川省鑫铁矿业有限责任公司, 成都 610041;

3. 成都理工大学地球科学学院研究生院, 成都 610059)

摘要: 红土型铝土矿是加纳共和国铝土矿资源的主要矿床类型。阿瓦索铝土矿床产于西非克拉通古元古界比理姆岩系(泥板岩类)的表层红土中,是典型的红土型铝土矿。通过分析阿瓦索铝土矿的成矿地质背景、矿体特征以及矿石地球化学元素特征发现,铝土矿石的化学组分以 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TFe_2O_3 为主, TiO_2 次之,碱金属元素含量极低;风化过程中 Zr、Hf、Nb、Ta 等微量元素含量稳定;Cr—Ni 关系图显示比理姆岩系为铝土矿的矿源岩,三水铝石主要由比理姆岩系中的黏土矿物经过风化淋滤形成,表层铝土矿在后期风化和红土化作用下结构构造发生一定的变化,铁氧化成以赤铁矿为主的铁壳,最终形成一个大型的红土型铝土矿。

关键词: 阿瓦索铝土矿;矿床地球化学;红土型矿床;加纳共和国

中图分类号: P163;P168.45 **文献标识码:** A

0 引言

全球铝土矿带主要位于南/北纬 30° 线间热带及亚热带地区^[1],地理分布较为集中,其常见的矿床类型划分为红土型铝土矿床、岩溶型铝土矿床和沉积型铝土矿床^[2-3]。加纳地理位置为北纬 $4^\circ \sim 12^\circ$,1914 年在东部地区埃万尼马山区发现第一个铝土矿床^[4],1921 年在西部地区的阿瓦索附近发现了红土型铝土矿床;2010—2013 年,四川省冶金地质勘查局六〇六大队对阿瓦索铝土矿进行了普查工作,2014 年提交报告认定(333+334)资源量 $7\,717.09 \times 10^4$ t,为一大型优质铝土矿床^①。

本文通过总结阿瓦索铝土矿床地质特征及地球化学特征等,探讨其成矿作用,为国内企业在境外寻找红土型铝土矿提供科学依据。

1 地质背景

加纳位于非洲大陆以太古宇—元古宇为基底的西非克拉通内^[5],出露地层主要为前寒武纪变质岩系^[6],包括古元古界比理姆岩系(Birimian Series)、塔克瓦岩系(Tarkwaian Units)和达荷美岩系(Dahomeyan Units),新元古界—古生界沃尔特岩系(Voltaian Series)。加纳南部绝大部分地区出露比理姆岩系(图 1),后期受艾布尼造山运动(Eburnian Orogeny)的影响(Kesse G. O. 等,1986),发育有一系列呈带状分布的复式褶皱及其断裂,并伴随有岩浆、变质活动。

思考考—阿弗复式向斜、基比背斜为区域主要构造,总体呈 NNE 走向。断裂构造十分发育,主要分为 NE 向和 NW—NWW 向 2 组,少数为近 SN 向,分布在各时代地层和侵入体中。由于断裂活动

收稿日期: 2017-02-24; 责任编辑: 余和勇

作者简介: 郑辉(1969—),男,高级工程师,主要从事地质矿产勘查工作。通信地址:四川省成都市郫县一里东街 249 号,四川省冶金地质勘查局六〇六大队;邮政编码:611730;E-mail:314371747@qq.com

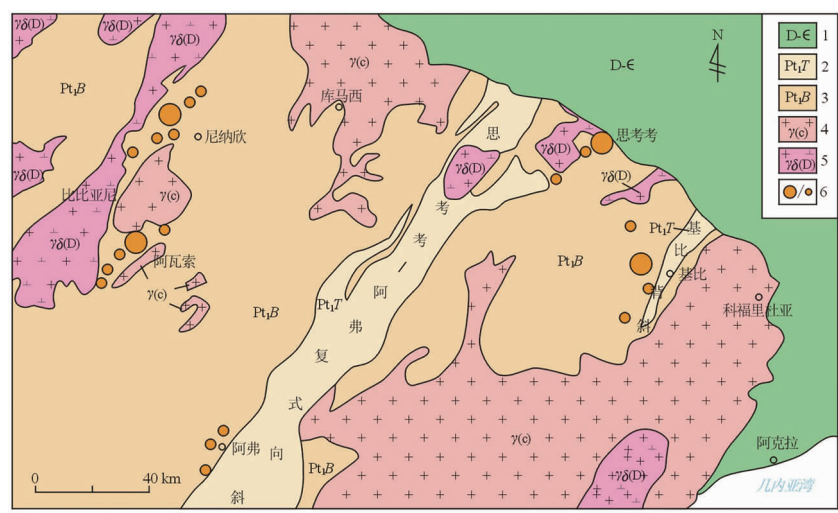


图 1 加纳南部地区地质构造及铝土矿床(点)分布图
(据文献[7],略有修改)

Fig. 1 Map showing geological structure and and bauxite deposits distribution in the south Ghana

1. 泥盆纪-寒武系;2. 古元古界塔克瓦岩系;3. 古元古界比理姆岩系;
4. 海岸角型过铝质花岗岩;5. 迪克斯戈弗型花岗岩闪长岩;6. 铝土矿床(点)

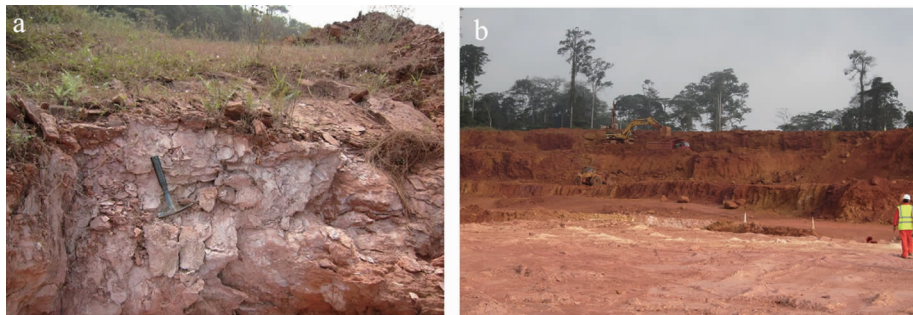


图 2 阿瓦索铝土矿区比理姆岩系(a)及红土层(b)照片

Fig. 2 Photographs of Birim rock sequence (a) and Laterite (b) in the Awaso bauxite deposit

时间长,断裂性质和断面产状常有较大变化。区域岩浆岩较发育,分布较广的为海岸角型(Cape Coast)过铝质花岗岩和英云闪长岩(Cgr),其次为迪克斯戈弗型(Dixcove)英云闪长岩和花岗闪长岩(Dgr),此外,可见少量的辉绿岩墙和辉长岩脉。

2 矿床地质特征

矿区出露的地层主要是古元古界比理姆岩系,为一套浅变质的泥板岩类(图 2a),走向 NE 向,地表发育厚 0~80 m 的风化残积、残坡积物(红土层)(图 2b)。阿瓦索向斜为矿区的主要构造,轴向为 NE

向,两翼地层均为比理姆岩系,产状较平缓,矿区未发现明显的断裂构造及岩浆活动。

阿瓦索铝土矿矿体的分布与地形地貌特征关系紧密,铝土矿赋存于准平原近于平坦的残丘顶部,矿区几乎所有山头或山脊的最上部都存在少量铁质红土,风化壳边缘常呈陡峭的悬崖。矿体层位较稳定,产状近水平,呈层状、似层状;矿体厚度和产状随地形起伏或风化面起伏而变化。矿体规模较大,单个矿体长一般 830~2 258 m、宽 630~1 038 m、面积在 0.30~1.32 km² 之间,单个矿体均可达中—大型规模^①。

红土剖面显示矿床自地表向下有较明显的分带,由上而下依次为:铁壳带、铝土矿带(浅黄-褐黄

色土状铝土矿层、黄-褐红色土状块状铝土矿层、褐黄-褐红色块状铝土矿层)、弱分解带(铝质黏土)以及基岩^[7]。

矿石矿物以三水铝石为主,次为赤铁矿、高岭石、一水软铝石、针铁矿、锐钛矿、石英,以及少量云母、金红石等(表1)。三水铝石、赤铁矿主要富集在铁质壳、土状铝土矿和块状铝土矿中,进入铝质黏土中含量逐步下降;云母和高岭石在上部层位含量很少,进入铝质黏土后含量陡然增高。铝质黏土的主要矿物成分为三水铝石、高岭石,次为赤铁矿等,与上下层位比较明显具有过渡带特征。而铝土矿层位的三水铝石与赤铁矿、高岭石呈相互消长关系。

3 矿石地球化学元素研究

3.1 主量元素特征

选择矿区钻孔 KN03、KN05、KN07、KN08 和 KN10 中铝土矿样品进行主量元素分析。其中,KN03 矿石样品为黄褐色土状-块状铝土矿,KN05 为褐色土状铝土矿和黄褐色块状铝土矿,KN07 为红褐色土状-块状铝土矿,KN08 为褐色块状铝土矿,KN10 为红褐色土状-块状铝土矿。

分析结果显示,铝土矿主量元素以 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TFe_2O_3 为主, TiO_2 次之,碱金属元素含量极低(见表2)。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 43.90\% \sim 57.00\%$, $w(\text{SiO}_2) = 0.78\% \sim 9.16\%$, $w(\text{TFe}_2\text{O}_3) = 8.10\% \sim 28.70\%$,占总量的 $67.90\% \sim 74.35\%$; $w(\text{TiO}_2) = 1.05\% \sim 2.85\%$;碱金属元素和其他主量元素仅含 $0.15\% \sim 0.36\%$ 。从样品分析结果来看,垂向上, Al_2O_3 含量呈低→高→低的变化,总体上含量变化

幅度不大; SiO_2 含量的变化趋势与 Al_2O_3 呈反消长关系, TFe_2O_3 含量呈高→低的变化; Si 和 Fe 的含量变化幅度较大,总体趋势为随着 Al 含量的增加, Si 和 Fe 呈降低的趋势,表明成矿过程中 Fe 与 Si 的地球化学行为具有差异性。

总之,阿瓦索铝土矿主量元素以 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TFe_2O_3 为主, Al_2O_3 含量变化相对较小, SiO_2 和 TFe_2O_3 的变化较大,其次为 TiO_2 ,含量较稳定,碱金属和其他元素含量极低,变化幅度不大。

3.2 微量元素特征

选取钻孔 ZK4803 和 ZK521 中 2 件具有代表性的铝土矿样品进行了微量元素测试,结果见表3。从分析结果来看,微量元素含量稳定,其中在风化过程中十分稳定的 Zr 、 Hf 、 Nb 、 Ta 元素^[8-9] 含量稳定,可能指示单一的成矿母源, Cr 、 Ni 元素也可用来追踪可能的铝土矿物源。

4 成矿作用研究

4.1 铝土矿物源

不同类型铝土矿及其母岩 Cr 、 Ni 值具明显差异,因此可以利用 Cr — Ni 关系图来示踪可能的铝土矿物源^[10-11]。阿瓦索铝土矿矿区地层主要是古元古界比理姆岩系,为一套浅变质的泥板岩类,由绢云千枚岩、碳质板岩、泥质板岩、杂砂岩以及少量泥岩等组成,阿瓦索铝土矿在 Cr — Ni 关系图解(图3)上主要靠近低铁型铝土矿,母岩类型靠近页岩、板岩与玄武岩范围,图解显示铝土矿可能由多种母岩提供物源,但结合矿区实际出露地层,反映比理姆岩系为阿瓦索铝土矿的重要成矿源岩。

表1 阿瓦索铝土矿区主要矿物组成

Table 1 Main minerals in Awaso bauxite deposit

矿物名称	矿物含量 $\varphi_B/\%$					
	铁质壳	土状铝土矿	块状铝土矿	铝质黏土岩	弱分解带	绢云板岩
三水铝石	49.66	75.58	72.18	44.37	20.37	17.39
赤铁矿	42.02	14.02	11.54	8.54	4.32	2.45
高岭石	2.26	4.12	8.60	32.47	59.11	18.54
一水软铝石	1.81	0.92	0.86	0.00	0.00	0.00
针铁矿	0.00	0.16	1.75	3.34	1.03	0.57
石英	0.00	0.28	0.59	1.67	2.37	17.95
锐钛矿	2.14	1.76	0.98	1.36	1.68	1.85
云母	0.00	0.00	0.30	5.66	8.54	38.80

表 2 铝土矿主量元素分析结果

Table 2 Analysis of major elements of the bauxite

样品编号	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TFe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	Lost	Total
KN03 9-10	50.10	7.96	13.70	0.00	0.16	0.05	0.00	0.08	0.00	2.06	25.75	99.86
KN03 10-11	54.00	6.16	9.50	0.00	0.13	0.05	0.00	0.07	0.00	1.99	27.76	99.66
KN03 11-12	51.80	7.89	10.20	0.00	0.16	0.05	0.00	0.08	0.00	2.21	26.60	98.99
KN05 4-5	44.70	0.78	28.70	0.00	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	1.65	24.02	99.99
KN05 6-7	50.70	1.28	18.60	0.00	0.13	0.01	0.00	0.06	0.00	1.99	27.05	99.82
KN05 10-11	51.30	9.16	10.10	0.02	0.19	0.05	0.00	0.08	0.00	2.28	26.25	99.43
KN05 11-12	54.90	4.20	8.80	0.00	0.19	0.03	0.00	0.07	0.00	2.73	28.68	99.60
KN05 12-13	57.00	2.93	8.10	0.00	0.17	0.02	0.00	0.07	0.00	1.66	29.76	99.71
KN07 10-11	45.10	6.84	21.40	0.00	0.21	0.04	0.00	0.07	0.00	2.27	23.90	99.82
KN07 11-12	47.30	6.64	18.70	0.02	0.22	0.03	0.00	0.08	0.00	2.29	24.50	99.78
KN07 12-13	43.90	6.95	23.50	0.00	0.24	0.04	0.00	0.06	0.00	2.06	23.07	99.82
KN07 13-14	47.80	7.57	17.60	0.00	0.21	0.05	0.00	0.06	0.00	1.98	24.37	99.64
KN08 14-15	51.10	5.55	14.40	0.00	0.23	0.05	0.00	0.06	0.00	1.60	26.79	99.78
KN08 15-16	50.50	7.82	13.40	0.00	0.21	0.08	0.00	0.07	0.00	1.60	26.13	99.81
KN08 16-17	51.2	13.60	7.8	0.00	0.11	0.08	0.00	0.07	0.00	1.61	25.16	99.63
KN10 11-12	52.20	2.17	14.90	0.00	0.24	0.03	0.00	0.06	0.00	2.20	27.79	99.59
KN10 12-13	52.60	3.25	13.50	0.00	0.18	0.03	0.00	0.06	0.01	2.31	27.67	99.61
KN10 13-14	49.20	3.35	18.00	0.00	0.22	0.02	0.00	0.07	0.01	2.26	26.27	99.40

量的单位: $w_B/\%$ 。数据来源:加纳铝土矿有限公司。

表 3 铝土矿微量元素分析结果

Table 3 Trace elements analyses of the bauxite

分析编号	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	La	Ce	Sr	Nd	Zr	Hf	Y	Yb	Cr	Ni
ZK4803H9	1.49	205	3.74	0.61	26.8	2.49	78.9	29.4	32.4	10.9	394	10.0	30.23	3.30	644	45.0
ZK5219H16	1.11	201	2.90	0.61	27.4	1.33	55.3	20.8	41.1	8.86	401	9.71	22.83	2.53	634	57.0

量的单位: $w_B/10^{-6}$ 。

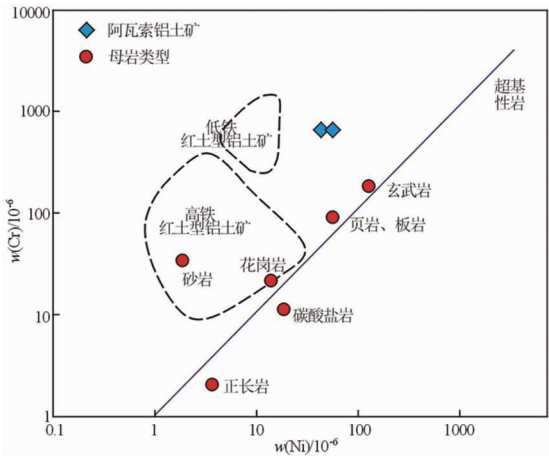


图 3 阿瓦索铝土矿 $w(\text{Cr})-w(\text{Ni})$ 物源示踪图

Fig. 3 The $w(\text{Cr})-w(\text{Ni})$ tracing diagram of Awaso bauxite deposit

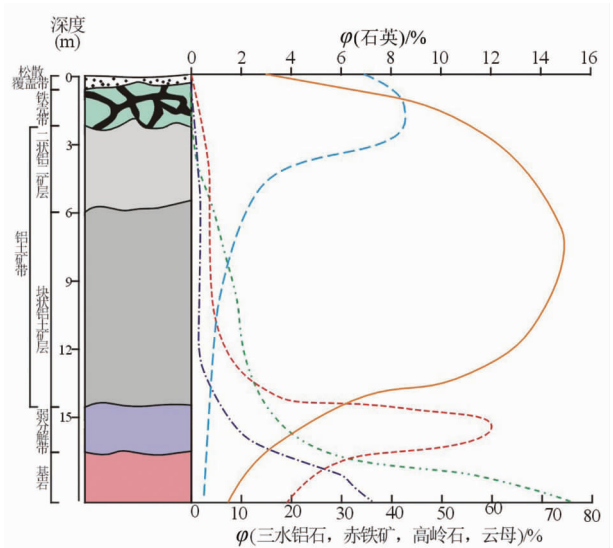


图 4 阿瓦索红土型铝土矿剖面及铝土矿物关系图

Fig. 4 Map showing section of Awaso lateritic bauxite deposit and relationship of minerals

4.2 红土型铝土矿成矿作用研究

阿瓦索矿区红土剖面(图 4)显示,自上而下可分为松散覆盖带、铁壳带、铝土矿带(浅黄-褐黄色土状铝土矿层、黄-褐红色土状块状铝土矿层、褐黄-褐红色块状铝土矿层)、弱分解带(铝质黏土)以及基

岩,相应的化学元素含量和矿石组成变化明显。

红土剖面中化学元素组成以 Al、Si、Fe、O 为主,而碱金属元素含量极低,铝土矿中不同元素富集

程度的不同除了与基岩有关,还受红土化和风化作用的进一步影响。剖面中与基岩其他元素相比,Al是最富集的一个元素,在铁壳带以下和弱分解带以上的分层界面 Al 含量急剧上升,而在靠近地表覆盖层和下部基岩层中,Al 的含量明显地下降。剖面中 Si 的含量取决于基岩的性质,从基岩和弱分解带(铝质黏土)的接触带向上,SiO₂ 的含量逐渐降低,相比一些花岗岩类红土型铝土矿剖面中地表有较高 SiO₂ 含量(可达 25%)^[12],阿瓦索剖面中 SiO₂ 在铁壳和地表含量很低,由原生矿物风化形成以高岭石为主的黏土,再到三水铝石,铝硅酸盐活性不断增强,SiO₂ 不断流失,导致在含矿带和弱分解带中 SiO₂ 迅速降低。剖面中 Fe 的含量在各带之间也有变化,铁壳中铁的含量明显升高,阿瓦索铝土矿基岩为泥质板岩类,说明铁在风化和红土化作用下具有明显的富集。

化学成分的变化也相应表现在矿石含量的变化上。在垂向上,三水铝石自上而下含量由低到高再降低,一水软铝石在红土剖面中含量很少,主要分布在铁壳带和铝土矿带上部。前人研究表明,大多数一水型和少数三水铝矿由高岭石脱硅直接转变而来^[13]。赤铁矿、针铁矿等含铁矿物主要分布在剖面的上部,通常其含量会在铁壳带和铝土矿带的界面附近开始下降。石英的含量在铁壳带和铝土矿带均很低,从弱分解带到基岩,含量逐渐升高。从矿物含量变化的规律可知,泥板岩类基岩到铁壳带经历了不同阶段和程度的风化淋滤和红土化作用。

在热带亚热带潮湿炎热的气候条件下,基岩首先进行了化学初级风化,在去碱作用下,原岩中的绿泥石、蒙脱石等黏土矿物进行分解,K、Na、Ca、Mg 等碱土元素迁出进入水溶液,沿着岩石裂隙和孔隙流失,残留的 Al、Fe 及部分 Si 生成高岭石等矿物^[14],这在红土剖面上表现为弱分解带中的高岭石含量急剧上升。随着化学风化作用的持续进行,以高岭石为主的层状硅酸盐发生分解和去硅作用^[15],高岭石族由铝氧八面体层(三水铝石层)和硅氧四面体层(硅层)组成,随着 pH 值的升高,高岭石稳定性减小,发生分解形成三水铝石,同时 SiO₂ 在碱性环境中不凝结,随着水溶液流失;阿瓦索铝土矿体主要赋存于平缓的残丘顶部,SiO₂ 的不断流失为矿区大规模矿体的形成提供了有利条件,这在红土剖面上表现为形成了较厚的铝土矿带。同时在矿区山头或山脊的顶部几乎都存在铁质红土,说明铝土矿初步形成后除了持续的风化作用外还存在红土化作用。

矿区主要矿物成分分析结果显示,残留的针铁矿从铝土矿层往上含量是逐步减少。可见在铝土矿层上部由于后期化学风化和红土化作用,低价铁被氧化成高价铁,水解形成针铁矿、水针铁矿和水赤铁矿等,最后脱水形成赤铁矿^[14];同时上部的铝土矿结构构造也发生了较大的变化,这在红土剖面上表现为出现以赤铁矿为主的铁壳层及其下部的土状铝土矿层。

通过矿区矿体和矿石地球化学特征可以直观地分析铝土矿的成矿过程,然而成矿作用往往是一个漫长而复杂的过程,由于成矿地质条件和矿源岩的差异,在成矿过程中中间产物之间的转化、矿物的富集差异以及红土化作用对铝的富集程度仍需做进一步的详细研究。此外,阿瓦索矿区地表未发现明显的断裂构造及岩浆活动,但部分比理姆岩系露头中存在大量的黄铁矿和石英脉,有些地段甚至可见金矿化显示,说明矿区曾经可能经历了较为明显的热液活动,但形成热液活动的动力源以及热液活动对矿区铝土矿成矿作用是否有影响需要进一步的分析测试和研究予以界定。

5 结论

通过分析阿瓦索铝土矿床的地质背景、矿体特征以及矿石地球化学元素特征,对红土型铝土矿矿物源和成矿作用获得以下初步认识:

(1)阿瓦索铝土矿矿石元素以 Al₂O₃、SiO₂、TF_{e2}O₃ 为主,TiO₂ 次之,碱金属元素含量极低;风化过程中十分稳定的 Zr、Hf、Nb、Ta 等微量元素含量稳定。

(2)结合矿区实际出露地层和 Cr—Ni 关系图,指示比理姆岩系(泥板岩类)为阿瓦索铝土矿的重要矿源岩。

(3)成矿作用方面,比理姆岩系泥板岩类在化学风化作用下,黏土矿物再分解去硅形成高岭石,高岭石在 pH 值呈碱性环境下硅氧层和三水铝石层发生分解形成以三水铝石为主的铝土矿,表层铝土矿在后期红土化作用下,铁氧化成以赤铁矿为主的铁壳,形成一个完整的红土剖面。

注释:

① 秦术凯,葛志超,白进春,等.加纳阿瓦索红土型铝土矿普查地质报告.成都:四川省冶金地质勘查局六〇六大队,2014.

参考文献:

- [1] 王祝堂,熊慧. 世界铝土矿资源与分布[J]. 轻合金加工技术, 2014(9): 10.
- [2] 廖士范. 论铝土矿床成因及矿床类型[J]. 华北地质矿产杂志, 1994, 9(2): 153-160.
- [3] 刘中凡. 世界铝土矿资源综述[J]. 轻金属, 2001(5): 7-12.
- [4] Kesse G O. 加纳铝土矿床地质[J]. 轻金属, 1986(4): 6-10.
- [5] 高坪仙. 西非克拉通结晶基底构造分区概述[J]. 国外前寒武纪地质, 1992(4): 23-25.
- [6] 李鹏, 罗习文. 加纳北部上东部省金矿地质特征[J]. 陕西地质, 2015, 33(1): 40-45.
- [7] 秦术凯, 葛志超, 申欢华, 等. 加纳阿瓦索红土型铝土矿地质特征及成矿规律初探[J]. 四川地质学报, 2012, 32(增刊): 247-250.
- [8] 李普涛. 广西靖西县三合铝土矿床地质与地球化学特征研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2008.
- [9] 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.
- [10] Schroll E, Sauer D. Beitrag zur Geochemie von Titan, Chrom, Nickel, Cobalt, Vanadium und Molibdan in Bauxitischen Gesteinen und problem der stofflichen herkunft des Aluminiums[J]. Zangreb; Travaux du Icsoba, 1968: 83-96.
- [11] 崔滔. 黔北地区铝土矿成矿环境分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [12] 孙朋飞, 江思宏, 薛春纪, 等. 西澳 Darling Range 地区铝土矿特征及成矿控制因素[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 171-186.
- [13] 李启津, 杨国高, 侯正洪. 铝土矿床成矿理论研究中的几个问题[J]. 矿产与地质, 1996, 10(1): 22-26.
- [14] 袁杨森, 高灶其, 张成学, 等. 几内亚博凯地区红土型铝土矿成矿机理和控矿因素研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 344-350.
- [15] 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 193-194.

Geochemical characteristics and metallogeny of the Awaso lateritic bauxite deposit, Ghana

ZHENG Hui¹, GE Zhichao¹, QIN Shukai², HUANG Kui^{1,3},
BAI Jingchun^{1,3}, LIANG Qingling¹

(1. Exploration Team 606 of Sichuan Metallurgical &
Geological Exploration Bureau, Chengdu 611730, China;

2. Sichuan Xintie Mining Limited Liability Company, Chengdu 610041, China;

3. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Lateritic bauxite is the main type of bauxite resources in the Republic of Ghana. Awaso bauxite deposit is typical lateritic deposit occurring in surface laterite of Proterozoic Birim rock sequence in the West African craton. Comprehensive analysis of metallogenic background, characteristics of ore body and ore geochemical elements of the Awaso bauxite deposit reveals that the ore constituents are mainly Al_2O_3 , SiO_2 and TFe_2O_3 then TiO_2 and basic metal content is very low. Trace element content of Zr, Hf, Nb, Ta etc. is stable in the weathering process. The Cr-Ni diagram indicates that the ore-forming materials were mainly sourced from Birim rock sequence. Gibbsite is derived from weathering and leaching of the clay minerals in Birim rock sequence. Structure of the bauxite at surface was changed by late weathering and lateritization and the hematite-dominated iron oxides crust formed. The laterite bauxite deposit was formed through the long time evolution.

Key Words: Awaso bauxite deposit; deposit geochemistry; lateritic deposit; Ghana