



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403266

引用格式:朱尤青,陈旭,达伟,等.贵州清镇蔡家坝铝土矿床地球化学特征[J].科学技术与工程,2025,25(10):3996-4005.

Zhu Youqing, Chen Xu, Da Wei, et al. Geochemical characteristics of Caijiaba bauxite deposit in Qingzhen, Guizhou province and their implication for the ore-forming process[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 3996-4005.

天文学、地球科学

贵州清镇蔡家坝铝土矿床地球化学特征

朱尤青,陈旭,达伟,刘江

(贵州省有色金属和核工业地质勘查局一总队,清镇 551400)

摘要 黔中铝土矿集区作为中国重要的铝工业基地,含铝岩系主要为下石炭统九架炉组,矿床类型属沉积型铝土矿。蔡家坝铝土矿床是近年在黔中地区开展铝土矿精查工作时新发现的隐伏的沉积型铝土矿床,研究了该铝土矿床在成矿过程中相关的古气候条件、沉积环境以及成矿物质来源等问题。结果表明,含铝岩系上部铝土岩主要呈泥质结构,主要由高岭石和伊利石组成;中部铝土矿主要呈碎屑状和隐晶质结构,以及少量的鲕粒结构,主要由硬水铝石和伊利石组成;下部铁质岩主要呈隐晶质结构,主要由赤铁矿组成。蔡家坝铝土矿床含铝岩系整体主要形成于陆相环境,且含铝岩系上部铝土岩层和中部铝土矿层主要形成于相对氧化的环境,而下部铁质岩层则主要表现出相对还原的环境。同时,含铝岩系的下部铁质岩和中部铝土矿主要形成于炎热潮湿的古气候条件,而上部铝土矿则为温暖湿润气候条件下的产物。成矿物质来源研究表明,蔡家坝铝土矿床含铝岩系主要来源于下伏寒武系清虚洞组白云岩和灰绿色黏土岩夹层。对指导该区铝土矿的找矿勘探具有重要意义。

关键词 铝土矿;地球化学;古气候;沉积环境;成矿母岩;黔中地区

中图法分类号 P618.45;

文献标志码 A

Geochemical Characteristics of Caijiaba Bauxite Deposit in Qingzhen, Guizhou Province and Their Implication for the Ore-forming Process

ZHU You-qing, CHEN Xu, DA Wei, LIU Jiang

(The 1st Brigade of Guizhou Nonferrous Metals and Nucleus Industry Geological Exploration Bureau, Qingzhen 551400, China)

[Abstract] As an important aluminum industrial base in China, the bauxite concentration area in central Guizhou Province is hosted within the Lower Carboniferous Jiujialu Formation, and the deposit type belongs to the sedimentary bauxite. The Caijiaba bauxite deposit is a newly discovered bauxite deposit during the fine investigation of bauxite in central Guizhou Province in recent years. The paleoclimatic conditions, sedimentary environment and metallogenic provenance related to this bauxite deposit in the metallogenic process were studied. The results show that the upper bauxitic claystone of the Al-bearing rock series is mainly pelitomorph texture and is mainly composed of kaolinite and illite. The middle bauxite ore is mainly clastic and cryptocrystalline textures, followed by a small number of ooidal texture, which is mainly composed of diaspre and illite. The lower ferruginous rock is mainly cryptocrystalline texture and is mainly composed of hematite. The Al-bearing rock series of the Caijiaba bauxite deposit is mainly formed in the continental environment, and the upper bauxitic claystone and middle bauxite ore layers are mainly formed in a relatively oxidized environment, while the lower ferruginous rock layer mainly shows a relatively reduced environment. Meanwhile, the lower ferruginous rock and middle bauxite ore layers are mainly formed in hot and humid paleoclimatic conditions, while the upper bauxitic claystone layer is the product of warm and humid climatic conditions. Research on the sources of ore-forming materials indicates that the Al-bearing rock series of the Caijiaba bauxite deposit is mainly derived from the dolomite and interbedded gray-green claystone of the Lower Cambrian Qingxudong Formation. The results are of great significance in guiding the exploration and prospecting of bauxite deposits in this area.

[Keywords] bauxite; geochemistry; paleoclimate; sedimentary environment; metallogenic provenance; central Guizhou Province

铝土矿作为工业上提炼金属铝的主要来源,是中国重要的战略性矿产资源之一。中国铝土矿主要以沉积型为主,且集中分布于山西、河南、广西、

贵州以及云南等省(区),合计资源储量占全国总量的90%以上^[1]。黔中铝土矿集区作为中国重要的铝工业基地,是黔中—渝南铝土矿成矿带(南起清

收稿日期:2024-05-05; 修订日期:2025-01-01

基金项目:贵州省重点矿产资源大精查专项(MCHC-ZC20212218-2)

第一作者:朱尤青(1984—),男,汉族,云南宣威人,高级工程师。研究方向:矿产勘查及矿床地质。E-mail:569428696@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

镇、修文,向北经息烽、遵义、正安、道真、务川,直至重庆的南川和武隆等地,呈 NNE 向展布,长约 370 km)的重要组成部分^[2]。目前,已在黔中地区共计发现矿床(点)59 处,累计探明各类资源储量约为 $6.5 \times 10^8 \text{ t}^{[3]}$ 。长期以来,大量学者对该区铝土矿的地球化学^[4-6]、矿床成因^[7-9]及成矿模式^[10]等开展了不同程度的研究,并取得了一定的成果。但对于铝土矿在成矿过程中有关的古气候条件、沉积环境以及成矿物质来源等问题的研究仍较为薄弱。

地球化学方法是重建和认识铝土矿成矿过程与成因的重要方法^[11-12]。蔡家坝铝土矿床位于黔中地区的清镇市犁倭乡,是贵州省有色金属和核工业地质勘查局一总队近期对清镇市铝土矿开展精查工作时新发现的沉积型隐伏铝土矿床,矿床在规模上已达到中型铝土矿床。因此,本文研究在通过详细野外地质调查的基础之上,对蔡家坝铝土矿的含铝岩系开展系统的地球化学取样,运用岩相学和地球化学的方法,进一步深入认识该地区沉积型铝土矿在成矿过程中有关的古气候条件、沉积环境以及成矿物质来源等问题,为后续黔中地区铝土矿的找矿勘探和科学研究提供参考和依据。

1 区域地质背景

1.1 区域地质概况

研究区在大地构造上属于华南板块—上扬子地块—黔北隆起区—织金穹盆构造变形区。区内构造线总体呈北东向展布,包括北东向的褶皱以及北东向和北西向的断裂(图 1)。区内出露地层主要包括寒武系金顶山组(C_2j)和清虚洞组(C_2q)、石炭系九架炉组(C_1jj)和摆佐组(C_1b)、二叠系梁山组(P_2l)、栖霞组(P_2q)、茅口组(P_2m)、峨眉山玄武岩组($P_{2,3}em$)、龙潭组(P_3l)、长兴组+大隆组(P_3c+d)、三叠系嘉陵江组($T_{1,2}j$)、关岭组(T_2g)、白垩系茅台群(Kmt)及第四系(Q)(图 1)。金顶山组(C_2j)以砂岩粉砂岩、页岩、灰岩、泥灰岩为主,厚度大于 150 m。清虚洞组(C_2q)以白云岩夹灰绿色黏土岩为主,厚度大于 147 m。九架炉组(C_1jj)以黏土岩、铝土矿、铝土矿、铁质黏土岩及铁质岩为主,厚 0~28 m。摆佐组(C_1b)以白云岩为主,厚 65~120 m。梁山组(P_2l)以石英砂岩、黏土岩、砂页岩夹劣质煤层为主,厚 11~46 m。栖霞组(P_2q)以生物碎屑灰岩、薄层泥质灰岩及白云质灰岩为主,厚 85~191 m。茅口组(P_2m)以生物碎屑灰岩、白云岩为主,含白云质条带及团块,厚 174~538 m。峨眉山玄武岩组($P_{2,3}em$)以灰黑色玄武岩为主,厚 40~100 m。龙潭组(P_3l)以砂岩、粉砂岩、黏土岩及硅质

岩为主,夹薄层灰岩和煤层,厚 118~296 m。长兴组+大隆组(P_3c+d)以细晶灰岩、硅质岩夹黏土岩为主,厚 16~70 m。嘉陵江组($T_{1,2}j$)以灰、深灰色灰岩及白云质灰岩为主,厚 400~500 m。关岭组(T_2g)以灰绿、紫红色黏土岩、泥质白云岩及灰岩为主,厚度大于 350 m。茅台群(Kmt)主要为紫红色砾岩层,砾石成分复杂,厚 0~140 m。

1.2 矿床地质特征

蔡家坝铝土矿床赋存于区内下石炭统九架炉组含铝岩系中,与下伏寒武系清虚洞组和上覆下石炭统摆佐组均呈平行不整合接触。下石炭统九架炉组在研究区内总厚度为 0~28 m,除在犁倭林区一带有地表露头外,在研究区内的大部分地区均隐伏于地表之下。根据岩性特征,九架炉组含铝岩系可分为下部的铁质岩层,中部的铝土矿层以及上部的铝土岩层,图 2 所示。上部的铝土岩层主要为灰绿色或杂色黏土岩及铝土质黏土岩(铝土岩)[图 3(a)],厚 0~10 m;中部的铝土矿层主要为灰白色、灰色碎屑状及致密状铝土矿石[图 3(b)],厚 0~12 m;下部的铁质岩层主要为紫红色铁质黏土岩夹赤铁矿体[图 3(c)],厚 0~6 m。

2 采样与分析

通过对黔中地区蔡家坝铝土矿床九架炉组含铝岩系和下伏寒武系清虚洞组基底进行系统的采样,共采集钻孔(编号:ZK72-35)岩芯样品 12 件,其中,九架炉组上部铝土岩 3 件,中部铝土矿石 6 件,下部铁质岩 2 件,下伏寒武系清虚洞组基底白云岩 1 件。在进行全岩的地球化学分析前,所有样品均已破碎和研磨至 200 目以下。全岩主量和微量元素分析在奥实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素分析采用荷兰 PANalytical PW2424 型 X 射线荧光光谱仪(x-ray fluorescence, XRF)进行。微量元素分析采用美国 Agilent 5100 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MS)进行。

3 岩相学和地球化学特征

3.1 岩相学特征

显微镜下观察显示,蔡家坝铝土矿床含铝岩系上部的铝土岩主要呈泥质结构[图 3(d)],矿物成分以隐晶质的高岭石和伊利石为主,立方体状的黄铁矿主要在局部分散于隐晶质的高岭石和伊利石中。中部的铝土矿石则主要呈碎屑状结构和隐晶质结构[图 3(e)和图 3(f)],局部可见鲕粒结构[图 3(g)],矿物成分主要为硬水铝石和伊利石。下部的铁质岩主要为隐晶质结构[图 3(h)],矿物成分主要为赤铁矿。

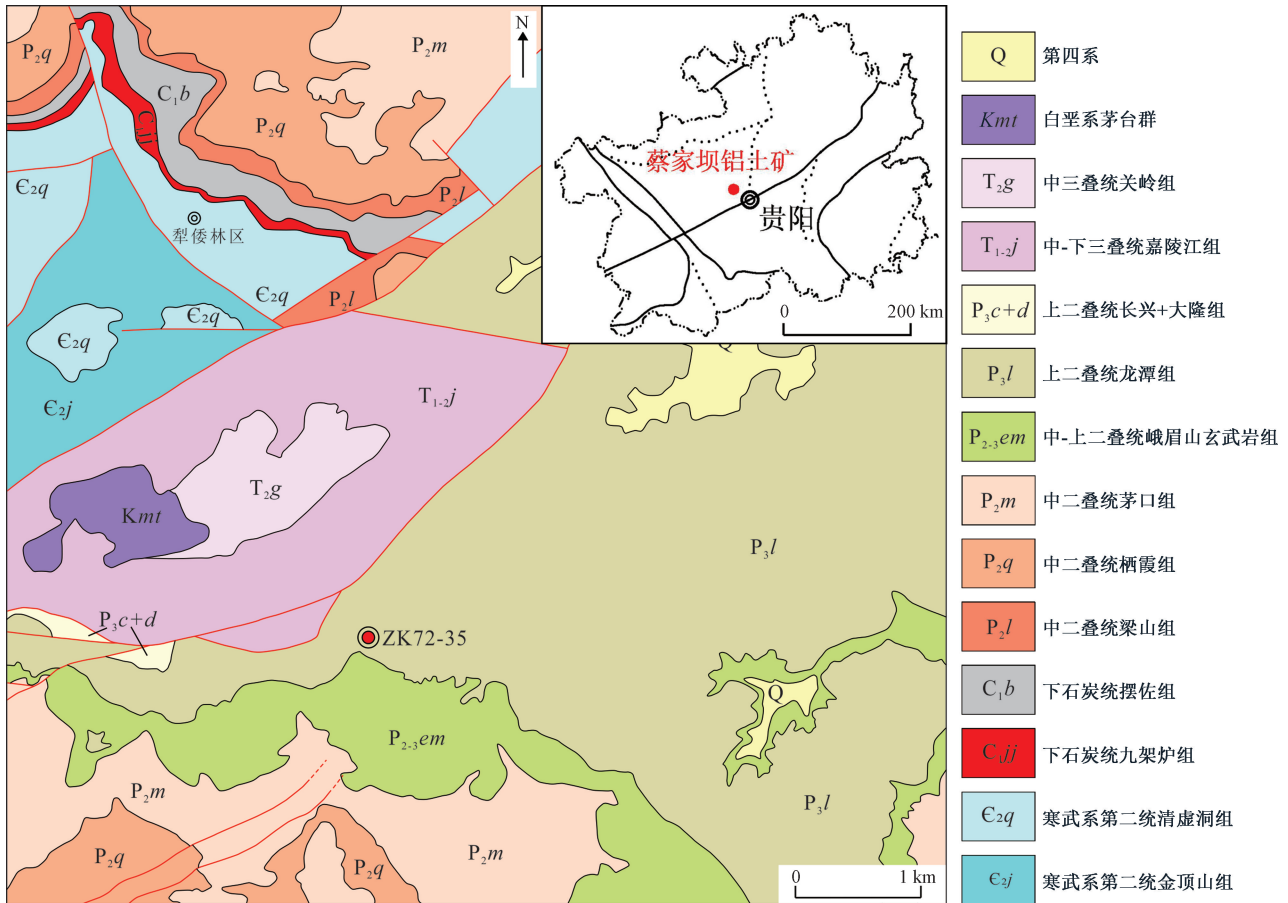


图1 清镇蔡家坝铝土矿床地质简图

Fig. 1 Geological map of the Caijiaba bauxite deposit in Qingzhen City

底层代号	厚度/m	岩性花纹	主要岩性特征
C _{1b}	65~120		浅灰、灰白色厚层至块状粗晶白云岩
C _{1j}	0~10		灰绿色或杂色黏土岩及铝土质黏土岩
	0~12		灰白色、灰色碎屑状及豆石状铝土矿石
	0~6		紫红色铁质黏土岩夹赤铁矿体
E _{2q}	>147		浅灰-肉红色薄-中厚层状细晶白云岩夹灰绿色黏土岩

图2 蔡家坝铝土矿床含铝岩系地层柱状图

Fig. 2 The stratigraphic column of Al-bearing rock series in the Caijiaba bauxite deposit

3.2 主量元素特征

含铝岩系中, 铝土矿石主要由 Al₂O₃ (45.47% ~ 76.62%, 平均 68.96%) 和 SiO₂ (2.63% ~ 12.12%, 平均 6.22%) 组成, 其次为变化的 Fe₂O₃ (0.35% ~ 26.11%, 平均 4.84%) 和少量的 TiO₂ (1.78% ~

4.18%, 平均 3.08%), 以及微量的碱金属和碱土金属氧化物(表1)。相比之下, 上层的铝土岩中明显包含了更高的 SiO₂ (40.98% ~ 45.94%, 平均 43.21%)、K₂O、MgO、Na₂O 和 CaO 含量, 而 Al₂O₃ (28.59% ~ 38.05%, 平均 33.80%) 和 TiO₂ (1.10% ~ 1.64%, 平均 1.38%) 的含量则明显要低得多。下层的铁质岩主要成分为 Fe₂O₃ (56.96% ~ 75.12%, 平均 66.04%), 其次为少量的 Al₂O₃ (3.32% ~ 6.01%, 平均 4.67%)、SiO₂ (3.35% ~ 6.80%, 平均 5.08%)、MgO (3.11% ~ 5.64%, 平均 4.38%) 和 CaO (1.53% ~ 2.22%, 平均 1.88%), 以及微量的 TiO₂、K₂O 和 Na₂O 等。含铝岩系的主量元素二元相关性分析显示, Al₂O₃ 与 TiO₂、SiO₂ 与 K₂O 之间呈明显的正相关性, Al₂O₃ 与 Fe₂O₃ 为负相关性; Al₂O₃ 与 SiO₂ 在铁质岩和铝土岩中为正相关性、在铝土岩和铝土矿石中为负相关性(图4)。

3.3 微量元素特征

微量元素分析显示, 蔡家坝铝土矿含铝岩系中含有丰富的 Zr (33 ~ 1 060 × 10⁻⁶, 平均 611.7 × 10⁻⁶)、Cr (20 ~ 410 × 10⁻⁶, 平均 127.3 × 10⁻⁶) 和 V (65 ~ 563 × 10⁻⁶, 平均 223.6 × 10⁻⁶) 等微量元素;

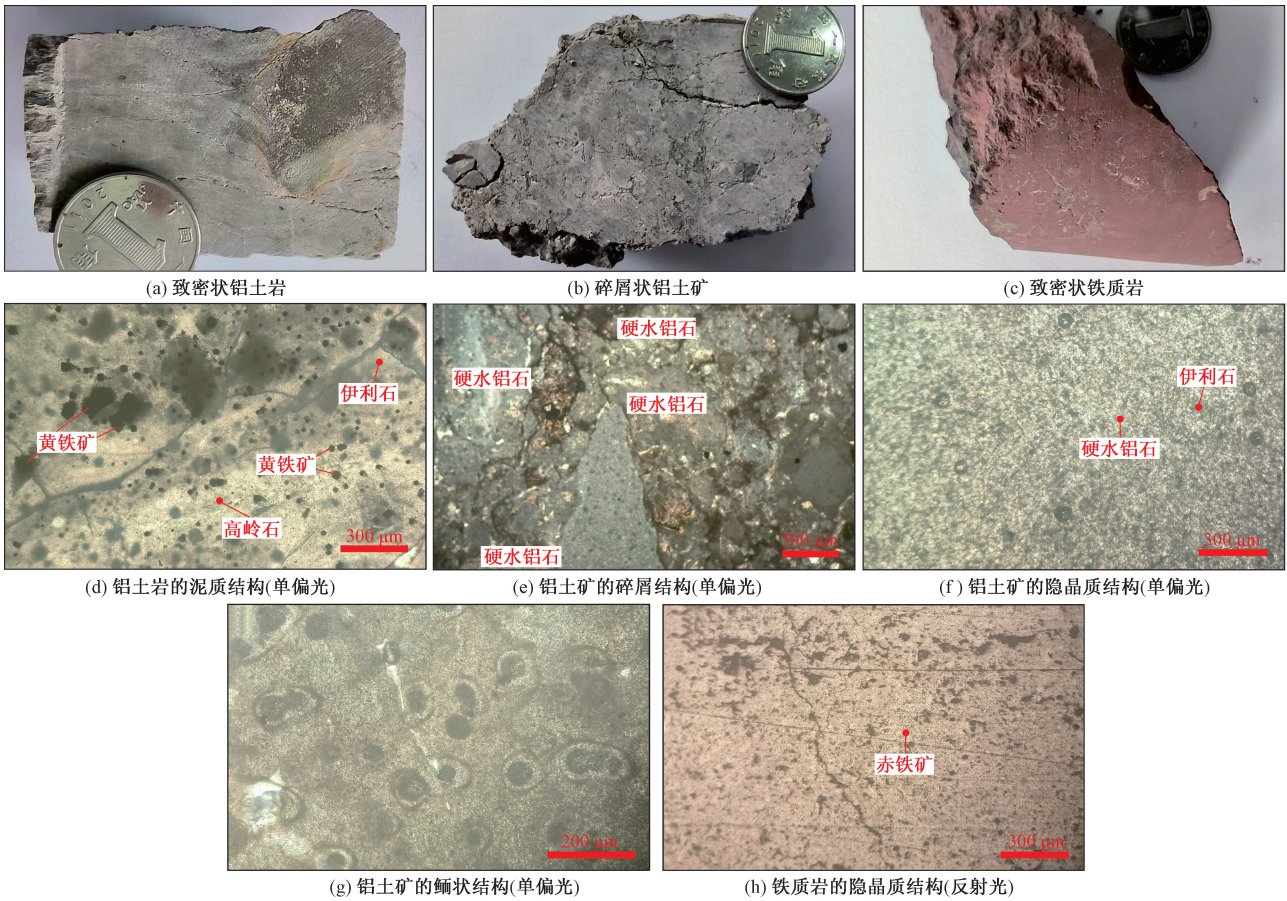


图3 蔡家坝铝土矿床含铝岩系手标本照片和岩相学特征

Fig. 3 The hand specimen pictures and petrographic characteristics of the Al-bearing rock series in the Caijiaba bauxite deposit

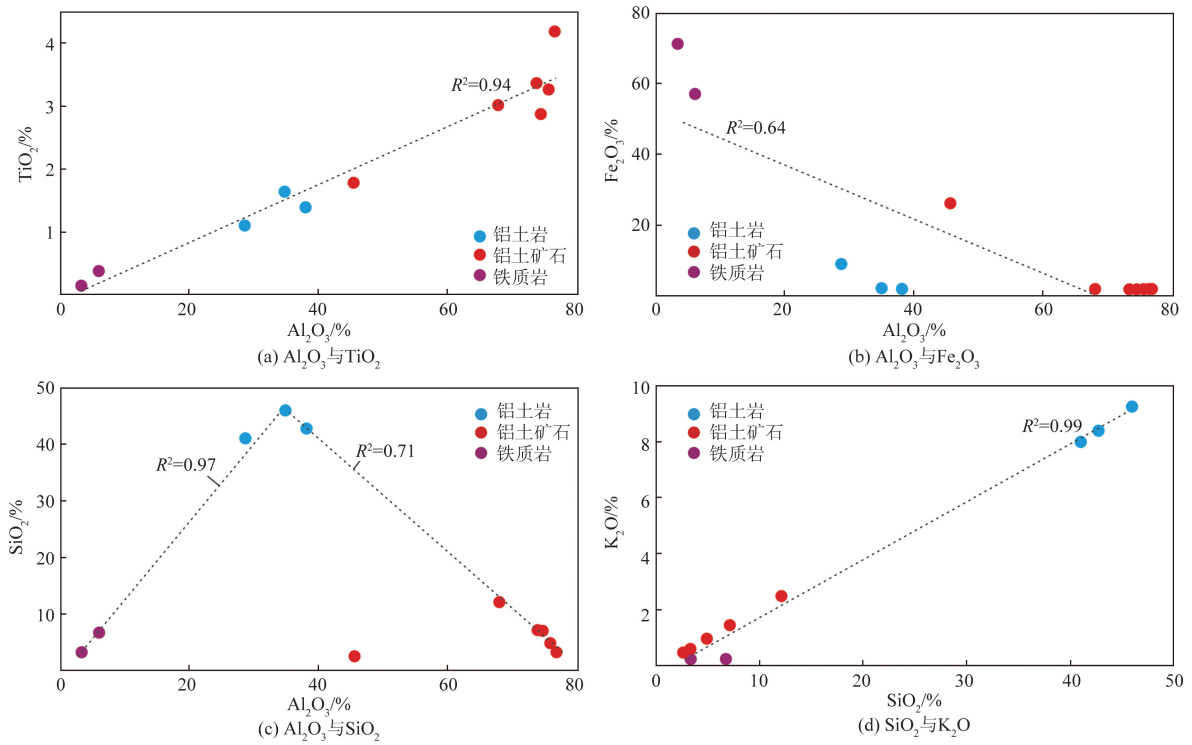


图4 蔡家坝铝土矿床主量元素二元相关性图解

Fig. 4 The binary diagrams of major elements in the Caijiaba bauxite deposit

其中,Zr 和 Cr 主要富集在铝土矿石和铝土岩中,V 则主要富集在铁质岩中(表 1)。相比之下,其他微量元素含量则明显较低。上地壳(upper continental crust, UCC) 标准化后的微量元素蛛网图显示(图 5),铝土岩、铝土矿石及铁质岩均表现出明显不同的模式:①Li 和 Cs 元素在铝土岩中明显富集,但在铝土矿石和铁质岩中明显亏损;②Ba 元素在铝土岩和铝土矿石中表现为富集,但在铁质岩中表现为亏损;③高场强元素 Zr、Hf、Nb、Ta 和 Th 在铝土矿

石和铝土岩中表现为富集,且铝土矿石中比铝土岩中更富集,但在铁质岩中表现为亏损。

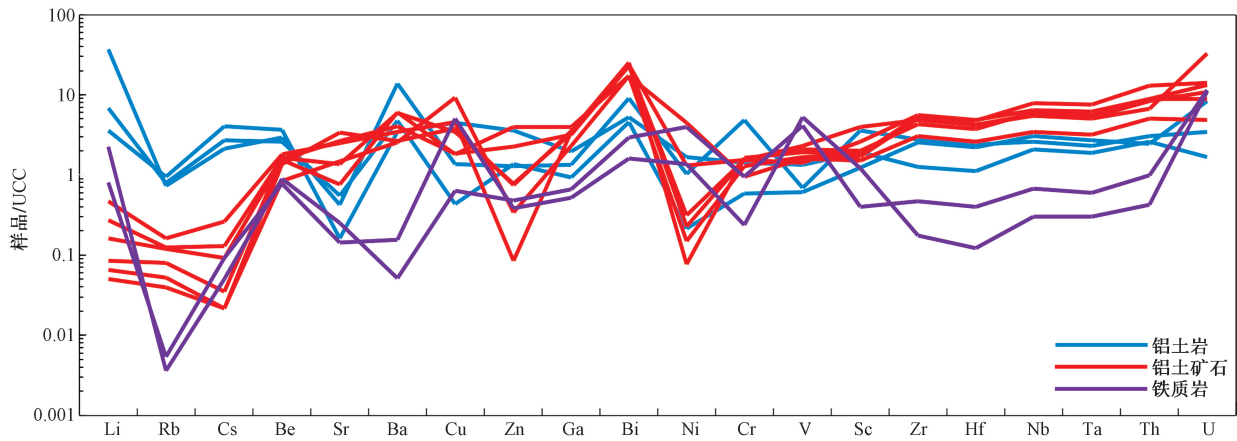
蔡家坝铝土矿床含铝岩系的相关性分析结果表明(表 2):Al₂O₃与 Ga、SiO₂与 Li、Fe₂O₃与 V、Li 与 Cr 之间呈明显的正相关关系;高场强元素(HFSE, 如 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Th)与 Al₂O₃、TiO₂和 Ga 之间均呈明显的正相关关系,与 Fe₂O₃和 MgO 均呈强烈的负相关关系;高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Th 和 U)彼此之间呈强烈的正相关关系。

表 1 贵州清镇蔡家坝铝土矿床含铝岩系主量和微量元素含量

Table 1 The major and trace elements of Al-bearing rock series in the Caijiaba bauxite deposit

元素	ZK72-35-H2	ZK72-35-H4	ZK72-35-H6	ZK72-35-H8	ZK72-35-H10	ZK72-35-H12	ZK72-35-H13	ZK72-35-H14	ZK72-35-H15	ZK72-35-H17	ZK72-35-H19	ZK72-35-H20
Al ₂ O ₃	34.76	28.59	38.05	74.43	73.77	76.62	75.66	67.83	45.47	3.32	6.01	0.93
SiO ₂	45.94	40.98	42.70	7.12	7.18	3.32	4.93	12.12	2.63	3.35	6.80	1.26
Fe ₂ O ₃	0.24	9.10	0.39	0.35	0.41	0.38	0.59	1.20	26.11	75.12	56.96	2.98
TiO ₂	1.64	1.10	1.39	2.87	3.36	4.18	3.26	3.01	1.78	0.15	0.38	0.02
K ₂ O	9.25	7.99	8.39	1.46	1.46	0.60	0.97	2.49	0.48	0.01	0.01	0.23
MgO	1.10	1.31	0.70	0.12	0.11	0.08	0.10	0.16	0.03	3.11	5.64	19.80
Na ₂ O	0.09	0.07	0.09	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.09	0.08	0.08	0.07
P ₂ O ₅	0.07	0.01	0.04	0.11	0.15	0.28	0.19	0.17	0.12	0.03	0.03	0.01
CaO	0.14	0.20	0.11	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.02	1.53	2.22	28.80
LOI	5.40	9.30	6.50	13.26	13.25	14.01	13.92	12.37	22.66	11.92	20.81	45.15
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.76	0.70	0.89	10.45	10.27	23.08	15.35	5.60	17.29	0.99	0.88	0.74
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0.047	0.038	0.037	0.039	0.046	0.055	0.043	0.044	0.039	0.045	0.063	0.022
CIA	78.8	77.9	81.7	98.2	98.3	99.7	99.0	96.7	99.1	95.1	97.2	—
Li	137.5	71.5	740	3.2	5.5	1.3	1.7	9.4	1.0	16.2	45.4	20.5
Rb	88.4	106.5	81.4	13.4	14.0	5.8	9.0	18.2	4.4	0.6	0.4	3.2
Cs	12.45	18.75	9.85	0.42	0.59	0.10	0.16	1.21	0.10	0.42	0.23	0.18
Be	7.72	11.05	8.76	4.64	4.95	4.10	4.73	5.42	2.50	2.35	2.70	0.27
Sr	194.5	56.2	147.0	266	475	1 185	923	865	519	49.8	87.6	75.8
Ba	2 600	1 890	7 660	3 340	3 230	1 460	2 240	1 880	1 400	84.7	28.4	98.0
Cu	10.9	111.0	34.0	45.6	85.8	95.6	46.4	115.0	232.0	126.0	15.9	2.6
Zn	97	256	92	283	55	53	159	6	24	27	34	11
Ga	15.7	33.1	22.9	67.6	55.8	60.1	54.3	58.1	39.4	8.8	11.3	0.9
Bi	0.59	0.68	1.18	2.23	3.24	3.30	2.99	3.10	2.25	0.21	0.38	0.04
Ni	9.5	73.5	45.7	6.6	10.1	3.4	13.9	57.1	197.5	59.6	176.0	11.1
Cr	50	120	410	110	130	140	130	130	80	20	80	10
V	65	143	74	177	151	207	221	247	172	563	440	31
Se	16.8	26.1	49.0	23.3	35.5	24.4	27.4	54.1	20.5	16.4	5.4	1.8
Zr	485	241	525	955	1 060	1 020	820	927	574	33	89	10
Hf	12.8	6.5	13.9	24.4	28.0	27.7	21.8	24.6	15.1	0.7	2.3	0.2
Nb	36.5	24.9	31.1	65.4	77.8	94.8	72.2	68.7	41.3	3.6	8.1	0.7
Ta	2.7	1.9	2.3	5.0	6.2	7.5	5.6	5.3	3.2	0.3	0.6	0.1
Th	26.0	27.7	32.7	72.0	94.4	138.0	94.7	89.3	53.8	4.52	10.55	1.10
U	23.50	4.66	9.73	91.40	36.80	39.30	25.20	30.30	13.45	31.00	32.40	1.19
Sr/Cu	17.84	0.51	4.32	5.83	5.54	12.40	19.89	7.52	2.24	0.40	5.51	—
Sr/Ba	0.07	0.03	0.02	0.08	0.15	0.81	0.41	0.46	0.37	0.59	3.08	—
V/Cr	1.30	1.19	0.18	1.61	1.16	1.48	1.70	1.90	2.15	28.15	5.50	—
Ni/Co	0.87	0.66	1.34	0.14	0.12	0.04	0.30	0.50	0.85	0.47	11.07	—
岩性特征	铝土岩	铝土岩	铝土岩	铝土矿	铝土矿	铝土矿	铝土矿	铝土矿	铝土矿	铁质岩	铁质岩	白云岩

注: CIA = $n(\text{Al}_2\text{O}_3) \times 100 / [n(\text{Al}_2\text{O}_3) + n(\text{CaO}^*) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})]$, $n(\text{CaO}^*)$ 代表了硅酸盐岩中 CaO 的含量; $n(\text{CaO}^*)_{\text{计算}} = n(\text{CaO})_{\text{测试}} - 5/3n(\text{P}_2\text{O}_5)_{\text{测试}}$, 若 $n(\text{CaO}^*)_{\text{计算}} > n(\text{Na}_2\text{O})_{\text{测试}}$, 则 $n(\text{CaO}^*) = n(\text{Na}_2\text{O})_{\text{测试}}$, 若 $n(\text{CaO}^*)_{\text{计算}} < n(\text{Na}_2\text{O})_{\text{测试}}$, 则 $n(\text{CaO}^*) = n(\text{CaO}^*)_{\text{计算}}$ 。



UCC 标准化数值来自文献[13]

图5 蔡家坝铝土矿床含铝岩系微量元素蛛网图

Fig. 5 Upper continental crust (UCC) normalized patterns of trace elements of Al-bearing rock series from the Caijiaba bauxite deposit

表2 蔡家坝铝土矿床含铝岩系主量和微量元素的相关系数矩阵

Table 2 The correlation coefficients of major and trace elements of the Al-bearing rock series in the Caijiaba bauxite deposit

元素	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	Li	Ga	V	Cr	Ni	Nb	Ta	Zr	Hf	Th	U
Al ₂ O ₃	1.00																
SiO ₂	-0.28	1.00															
Fe ₂ O ₃	-0.80**	-0.35	1.00														
TiO ₂	0.97**	-0.32	-0.75**	1.00													
K ₂ O	-0.18	0.99**	-0.43	-0.23	1.00												
MgO	-0.83**	-0.04	0.81**	-0.76**	-0.16	1.00											
Li	-0.20	0.64*	-0.19	-0.26	0.63*	-0.03	1.00										
Ga	0.95**	-0.41	-0.67*	0.91**	-0.32	-0.74**	-0.35	1.00									
V	-0.53	-0.57	0.89**	-0.46	-0.64*	0.71*	-0.37	-0.37	1.00								
Cr	0.19	0.41	-0.45	0.13	0.43	-0.28	0.88**	0.08	-0.48	1.00							
Ni	-0.55	-0.19	0.57	-0.56	-0.25	0.50	-0.08	-0.42	0.33	-0.18	1.00						
Nb	0.97**	-0.32	-0.74**	0.99**	-0.23	-0.76**	-0.27	0.91**	-0.45	0.12	-0.56	1.00					
Ta	0.97**	-0.34	-0.73*	0.99**	-0.25	-0.75**	-0.28	0.91**	-0.44	0.11	-0.55	0.99**	1.00				
Zr	0.98**	-0.28	-0.78**	0.96**	-0.18	-0.80**	-0.16	0.91**	-0.52	0.21	-0.54	0.97**	0.96**	1.00			
Hf	0.98**	-0.28	-0.78**	0.97**	-0.18	-0.80**	-0.16	0.91**	-0.52	0.21	-0.54	0.97**	0.97**	0.99**	1.00		
Th	0.92**	-0.43	-0.63*	0.98**	-0.35	-0.69*	-0.30	0.89**	-0.33	0.11	-0.47	0.98**	0.98**	0.91**	0.92**	1.00	
U	0.41	-0.46	-0.09	0.37	-0.43	-0.10	-0.36	0.51	0.12	-0.23	-0.36	0.37	0.37	0.44	0.42	0.31	1.00

注: **表示在 $p < 0.01$ 级别的显著相关性; * 表示在 $p < 0.05$ 级别的显著相关性。

4 讨论

4.1 古气候条件

Sr/Cu 比值作为沉积物古气候条件的判别指标,被广泛用来指示铝土矿形成时的古气候条件^[4, 14-15]。研究表明,当 $1 < Sr/Cu < 10$ 时,通常指示了温湿的古气候条件,当 $Sr/Cu > 10$ 时,则指示了干热的古气候条件^[16-17]。在蔡家坝铝土矿含铝岩系中(表1、图6),下部铁质岩的 Sr/Cu 为 0.40 ~ 5.51(平均 2.95),中部铝土矿层的 Sr/Cu 为 2.24 ~ 19.89(平均 8.90),上部铝土矿的 Sr/Cu 为 0.51 ~ 17.84(平均 7.56),且含铝岩系的 1 所有样品中,除上部铝土岩层的 1 个样品和中部铝土矿层的 2 个样

品 $Sr/Cu > 10$ 外,其余所有样品的 $Sr/Cu < 10$,表明含铝岩系主要形成于温暖湿润的古气候条件,但期间也有短暂的干热气候。

此外,化学蚀变指数(chemical index of alteration, CIA)作为反映沉积物和岩石化学风化作用强弱的一个指标^[18],通常也被广泛用来判定沉积物形成时的古气候环境^[19-21]。前人研究表明,当 $50 < CIA < 65$ 时,代表了干冷气候条件下的较弱风化;当 $65 < CIA < 85$ 时,代表了温暖、湿润气候条件下的中等风化;当 $85 < CIA < 100$ 时,代表了炎热、潮湿的气候条件下的强烈风化^[18]。蔡家坝铝土矿含铝岩系的 CIA 计算结果显示(表1、图6),下部铁质岩的 CIA 介于 95.1 ~ 97.2,中部铝土矿石的 CIA 介于

96.7 ~ 99.7, 上部铝土岩的 CIA 介于 78.8 ~ 81.7; 表明下部的铁质岩和中部铝土矿层为炎热潮湿气候条件下的产物, 上部铝土矿为温暖湿润气候条件下的产物。这也表明, 铝土矿比铝土岩经历了更强烈的风化作用, 且炎热潮湿的气候比温暖潮湿的气候更有利于铝土矿的形成^[20]。

4.2 沉积环境

大量研究表明, 由于一些敏感微量元素在不同的环境中表现出不同的地球化学行为和性质, 这些敏感微量元素的比值被通常用来揭示包括铝土矿在内的沉积岩形成时的古环境^[4, 14, 22-25]。因此, 在本文研究中, 将应用 Sr/Ba、V/Cr 以及 Ni/Co 等微量元素比值来分析蔡家坝铝土矿床含铝岩系形成的古环境。

Sr 和 Ba 具有相似的化学性质, 但 Sr 的迁移能力强于 Ba; 因此, 当沉积物受到海水改造时, Ba 更容易发生沉淀^[26]。通常, 海相环境中沉积物的 Sr/Ba > 1, 而陆相环境中沉积物的 Sr/Ba < 0.6, 当 Sr/Ba 介于 0.6 ~ 1 时, 则指示了过渡相的沉积环境^[4, 27]。在蔡家坝铝土矿床中(表 1, 图 6), 除含铝岩系最底部铁质岩样品(ZK72-35-H19)的 Sr/Ba > 1 以外, 其余所有样品的 Sr/Ba < 1, 且只有 1 个中部铝土矿样品 Sr/Ba 介于 0.6 ~ 1, 表明清镇蔡家坝铝土矿床整体以陆相沉积为主, 矿床在沉积和形成过程中并未明显收到海水的改造。

在沉积环境的氧化还原条件方面, 大量研究表明, 当包括铝土矿在内的沉积物中 V/Cr < 2 和 Ni/Co < 5 时, 指示其形成于相对氧化的环境; 当 V/Cr > 4.25 和 Ni/Co > 7 时, 指示其形成于相对还

原的环境^[14, 28-29]。在蔡家坝铝土矿床(表 1, 图 6)中, 含铝岩系上部铝土岩和中部铝土矿石的 V/Cr 为 0.18 ~ 2.15 (平均 1.41)、Ni/Co 为 0.04 ~ 1.34 (平均 0.54), 而下部铁质岩的 V/Cr 为 5.50 ~ 28.15 (平均 16.83)、Ni/Co 为 0.47 ~ 11.07 (平均 5.78); 表明蔡家坝铝土矿床含铝岩系上部铝土岩层和中部铝土矿层主要形成于相对氧化的环境, 而下部铁质岩层则主要表现出相对还原的环境。

4.3 成矿物质来源

已有研究表明, Nb、Ta、Zr、Hf 和 Th 等微量元素以及 Ti 元素在风化和铝土矿化过程中通常具有稳定的化学性质, 因此, 这些元素间的相互比值和二元图解通常被用来示踪铝土矿的成矿母岩^[30-32]。从图 7 可知, 蔡家坝铝土矿床含铝岩系和下伏清虚洞组白云岩的 Nb vs Ta、Zr vs Hf、Th vs Nb、TiO₂ vs Nb、TiO₂ vs Th 和 TiO₂ vs Hf 的二元相关性图解显示, 清虚洞组白云岩以及含铝岩系中的铝土岩、铝土矿和铁质岩在这些二元图解中均呈强烈的线性关系, 由含铝岩系样品投点拟合的风化线也明显穿过清虚洞组白云岩样品投点, 表明蔡家坝铝土矿床含铝岩系中的铝土岩、铝土矿和铁质岩具有相似的物质来源, 且与下伏的清虚洞组白云岩具有显著的亲缘关系。

另一方面, LogNi 与 LogCr 图解对指示铝土矿的类型和成矿物质来源也具有重要的意义^[32-33]。蔡家坝铝土矿床含铝岩系中的 Ni 含量为 3.4×10^{-6} ~ 197.5×10^{-6} 、Cr 含量为 10×10^{-6} ~ 410×10^{-6} , LogNi 与 LogCr 图解(图 8)显示蔡家坝铝土矿床含铝岩系样品投点分布较分散, 铝土岩和铝土矿主要分布在高铁红土型铝土矿区域内和红土型铝土矿

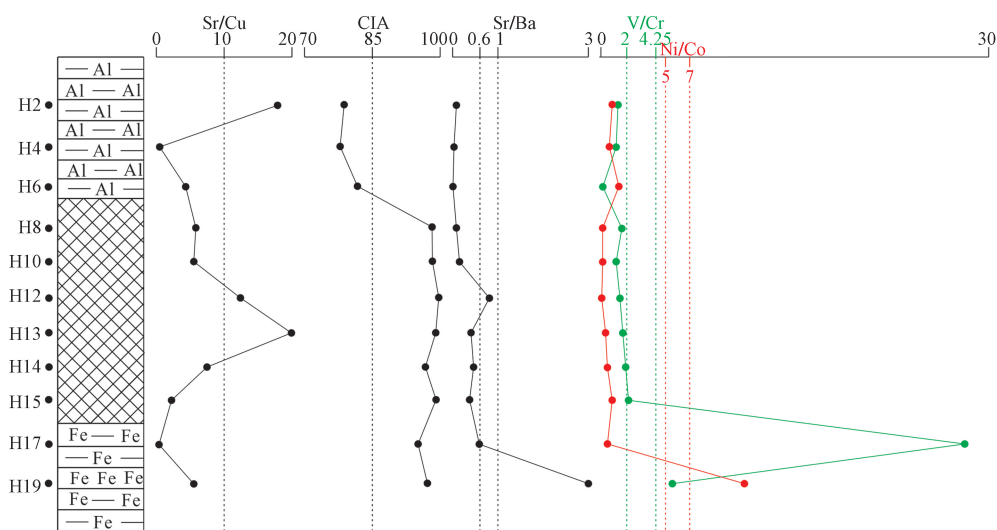


图 6 清镇蔡家坝铝土矿床含铝岩系地球化学参数图解

Fig. 6 The geochemical parameters of Al-bearing rock series of the Caijiaba bauxite deposit, Qingzhen City, central Guizhou Province

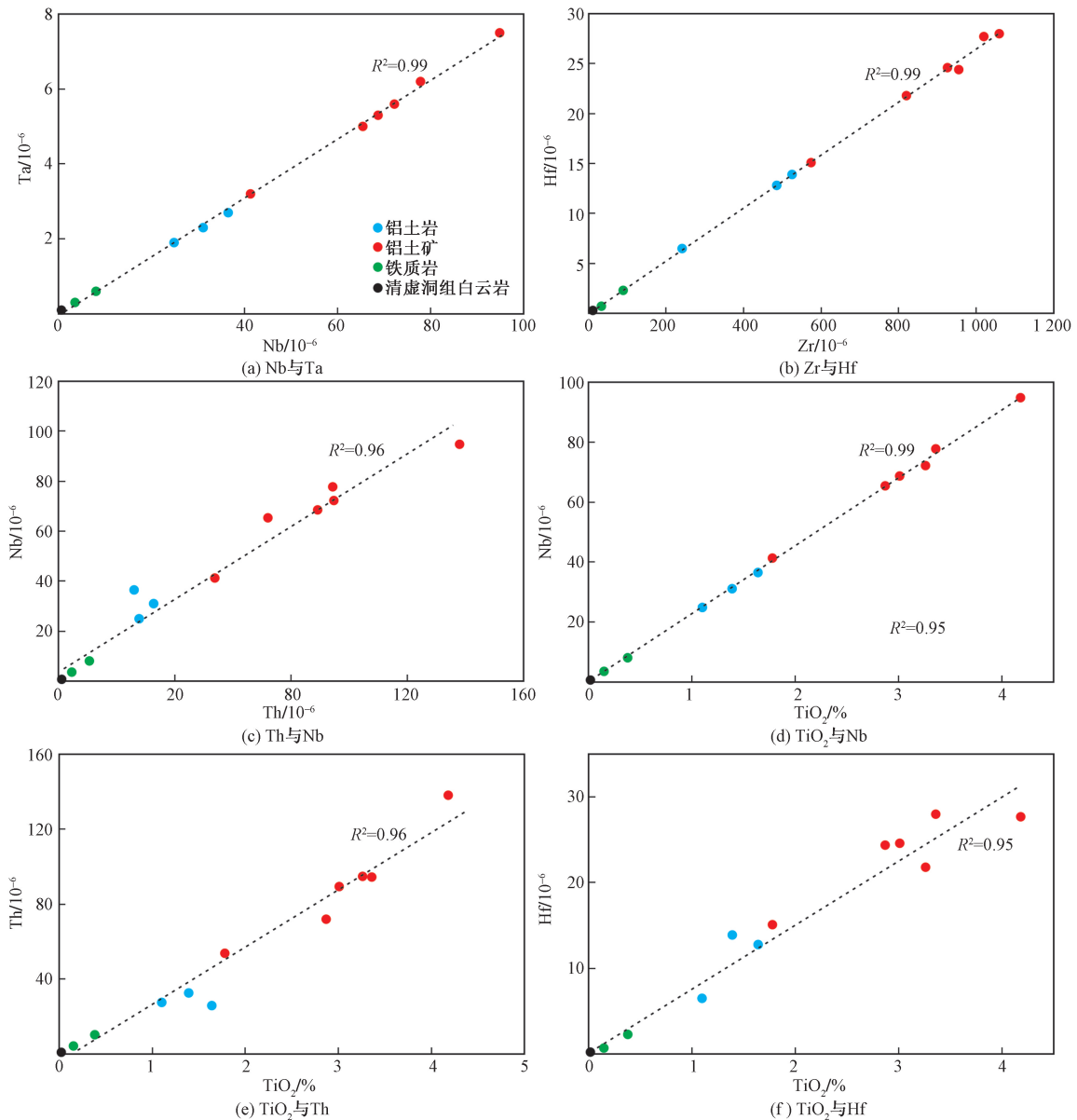


图7 蔡家坝铝土矿床微量元素二元相关性图解

Fig. 7 The binary diagrams of trace elements in the Caijiaba bauxite deposit

与喀斯特型铝土矿区域之间,铁质岩则集中分布在红土型铝土矿与喀斯特型铝土矿区域之间,同时,大部分样品投点也都靠近碳酸盐岩、页岩、花岗岩和玄武岩。由于在研究区内并未发现于铝土矿成矿相关的岩浆岩体,表明蔡家坝铝土矿的成矿母岩主要包括碳酸盐岩和以页岩为主的细碎屑岩。这一结论也与野外地质调查中,在下伏寒武系清虚洞组白云岩中有灰绿色黏土岩夹层的发现相一致(图2)。综上所述,清镇地区蔡家坝铝土矿床主要来源于下伏寒武系清虚洞组白云岩和灰绿色黏土岩夹层。

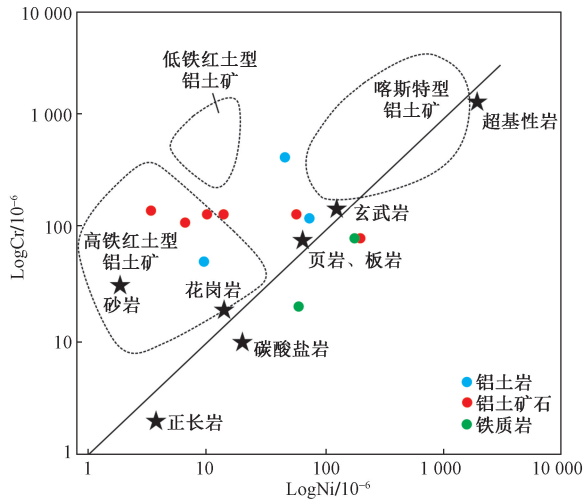
5 结论

(1) 含铝岩系上部的铝土岩以泥质结构为主,

主要由高岭石和伊利石组成;中部铝土矿以碎屑状和隐晶质结构为主,以及少量的鲕粒结构,主要由硬水铝石和伊利石组成;下部铁质岩以隐晶质结构为主,主要由赤铁矿组成。

(2) 古气候条件分析的结果表明,蔡家坝铝土矿床含铝岩系的下部铁质岩和中部铝土矿主要形成于炎热潮湿的古气候条件,而上部铝土矿则为温暖湿润气候条件下的产物。

(3) 沉积环境的地球化学分析结果表明,蔡家坝铝土矿床含铝岩系整体主要形成于陆相环境,且含铝岩系上部铝土岩层和中部铝土矿层主要形成于相对氧化的环境,而下部铁质岩层则主要表现出相对还原的环境。



底图据文献[30]

图8 蔡家坝铝土矿床含铝岩系logNi与logCr图解

Fig. 8 The plot of logNi vs logCr of the Al-bearing rock series in the Caijiaba bauxite deposit

(4)成矿物质来源分析的结果表明,蔡家坝铝土矿床含铝岩系主要来源于下伏寒武系清虚洞组白云岩和灰绿色黏土岩夹层。

参 考 文 献

- [1] 高兰,王登红,熊晓云,等. 中国铝矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2284-2295.
Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, et al. Summary on aluminum ore deposits minerogenetic regulation in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2284-2295.
- [2] 刘平,廖友常. 黔中—渝南沉积型铝土矿区域成矿模式及找矿模型[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2063-2082.
Liu Ping, Liao Youchang. Regional metallogenic model and prospecting criteria of sedimentary bauxite deposits in Central Guizhou-Southern Chongqing region [J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2063-2082.
- [3] 陈庆刚,陈群,戴晓燕. 黔中地区铝土矿成矿时代探讨[J]. 贵州地质, 2016, 33(2): 101-107.
Chen Qinggang, Chen Qun, Dai Xiaoyan. Discussion of metallogenic epoch of bauxite deposit in central Guizhou [J]. Guizhou Geology, 2016, 33(2): 101-107.
- [4] 金中国,郑明泓,刘玲,等. 贵州福泉高洞铝土矿床成矿地质地球化学特征[J]. 地质与勘探, 2018, 54(3): 522-534.
Jin Zhongguo, Zheng Minghong, Liu Ling, et al. Geological and geochemical characteristics of mineralization in the Gaodong Bauxite Deposit, Fuquan, Guizhou Province [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(3): 522-534.
- [5] 汪小勇,王泽鹏,潘启权,等. 贵州修文比例坝铝土矿床地质地球化学特征及其意义[J]. 中国锰业, 2018, 36(3): 39-43.
Wang Xiaoyong, Wang Zepeng, Pan Qiquan, et al. Geological geochemical characteristics and significance of bauxite deposit in Xiuwen Proportional Dam, Guizhou Province [J]. China's Manganese Industry, 2018, 36(3): 39-43.
- [6] 吴林,黄智龙,王智琳,等. 黔中猫场铝土矿地球化学研究[J]. 矿物学报, 2021, 41(S1): 475-484.
Wu Lin, Huang Zhilong, Wang Zhilin, et al. Geochemistry of bauxite in the Maochang deposit, central Guizhou [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2021, 41(S1): 475-484.
- [7] 张信伦,柴大博,王兵,等. 贵州清镇老黑山铝土矿床成矿物质来源及矿床成因[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(3): 384-391.
Zhang Xinlun, Chai Dabo, Wang Bing, et al. Source and genetic analysis of mineral deposits of Laoheishan bauxite deposit in Qingzhen, Guizhou Province [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(3): 384-391.
- [8] 朱永红,翁申富,李沛刚,等. 贵州遵义铝土矿(带)成矿条件及成因分析[J]. 地质科技情报, 2018, 37(1): 177-183.
Zhu Yonghong, Weng Shenfu, Li Peigang, et al. Metallogenic factor and origin in Zunyi Bauxite Belt, Guizhou [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(1): 177-183.
- [9] 吴波,邓克勇,刘应忠,等. 贵州修文红黄铝土矿地质地球化学特征及成因意义[J]. 贵州地质, 2020, 37(2): 144-153.
Wu Bo, Deng Keyong, Liu Yingzhong, et al. Geological and geochemical characteristics and its genesis significance of Honghuang Bauxite Deposit in Xiuwen, Guizhou [J]. Guizhou Geology, 2020, 37(2): 144-153.
- [10] 刘平,韩忠华,聂坤. 贵州铝土矿含矿岩系特征、形成时代、古地理环境及成因探讨[J]. 贵州地质, 2021, 38(3): 269-282.
Liu Ping, Han Zhonghua, Nie Kun. Study on the rock series characteristics, formation age, paleogeographic environment and genesis of bauxite in Guizhou [J]. Guizhou Geology, 2021, 38(3): 269-282.
- [11] Bardossy G. Karst bauxites, bauxite deposits on carbonate rocks [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [12] 谷静,黄智龙,金中国,等. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床稀土元素地球化学特征及其对成矿过程的指示[J]. 矿物学报, 2015, 35(2): 229-238.
Gu Jing, Huang Zhilong, Jin Zhongguo, et al. Rare-earth element (REE) geochemistry and ore-forming process of the Wachangping bauxite deposit, Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Area, northern Guizhou Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(2): 229-238.
- [13] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. London: Blackwell, 1985.
- [14] 金中国,刘辰生,邹林,等. 贵州务-正-道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据[J]. 地质学报, 2018, 92(4): 817-827.
Jin Zhongguo, Liu Chensheng, Zhou Lin, et al. Geochemical evidence of sedimentary environment of permian bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Area, Guizhou [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(4): 817-827.
- [15] 林景昱,褚庆忠,邵先杰,等. 柳江盆地上寒武统崮山组微量元素地球化学特征及古环境指示意义[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(7): 2749-2758.
Lin Jingyu, Chu Qingzhong, Shao Xianjie, et al. Geochemical characteristics of trace elements of the upper cambrian Kushan formation in the Liujiang Basin and paleoenvironmental implications [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(7): 2749-2758.

- [16] Lerman A. Lakes: chemistry, geology, physics [M]. Berlin: Springer, 1978.
- [17] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用——以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 308-310.
Liu Gang, Zhou Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: taking Qianjiang Formation the Jianghan Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 308-310.
- [18] Nesbitt H W, Young G M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299: 715-717.
- [19] 齐靓, 余文超, 杜远生, 等. 黔东南南华纪铁丝坳期-大塘坡期古气候的演变: 来自 CIA 的证据[J]. 地质科技情报, 2015, 34(6): 47-57.
Qi Liang, Yu Wenchao, Du Yuansheng, et al. Paleoclimate evolution of the Cryogenian Tiesiao Formation-Datangpo Formation in eastern Guizhou Province: evidence from the chemical index of alteration [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(6): 47-57.
- [20] 余文超, 杜远生, 周琦, 等. 黔北务正道地区铝土矿层特征及其反映的早二叠世古气候[J]. 古地理学报, 2014, 16(1): 30-40.
Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, et al. Palaeoclimate of the Early Permian: evidence from characteristics of bauxite beds in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 30-40.
- [21] 吴黎军, 李明龙, 陈林, 等. 鄂西走马地区 ZK701 孔南华系大塘坡组主量元素地球化学对古气候的指示[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 47-54.
Wu Lijun, Li Minglong, Chen Lin, et al. Geochemistry characteristics of major elements and their indication to paleoclimate in the Datangpo formation of Nanhua system of ZK701 drillcore in Zouma area of western Hubei Province[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science Edition), 2019, 38(6): 47-54.
- [22] 莫光员, 吴启美. 黔北地区浣溪铝土矿床地球化学特征及指示意义[J]. 矿产与地质, 2020, 34(2): 228-235.
Mo Guangyuan, Wu Qimei. Geochemical characteristics and indicative significance of Huanxi bauxite deposit in North Guizhou [J]. Mineral Resources and Geology, 2020, 34(2): 228-235.
- [23] 林义华, 梁定勇, 魏昌欣, 等. 海南岛西北部晚更新世海滩岩地球化学特征及其古环境意义[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4079-4090.
Lin Yihua, Liang Dingyong, Wei Changxin, et al. Geochemical characteristics of late pleistocene beach rocks in northwest Hainan Island and their paleoenvironment implications[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 4079-4090.
- [24] 石平舟, 李婷, 朱永峰, 等. 缝洞充填物地球化学特征及环境指示意义——以塔里木盆地富满地区中奥陶统一间房组为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4527-4535.
Shi Pingzhou, Li Ting, Zhu Yongfeng, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of fracture-cave fillings: a case study of the middle ordovician Yijianfang formation in Fuman Area, Tarim Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4527-4535.
- [25] 龙珍, 付勇, 何伟, 等. 贵州新民铝土矿床 Li 的地球化学特征与富集机制探究[J]. 矿床地质, 2021, 40(4): 873-890.
Long Zhen, Fu Yong, He Wei, et al. Geochemical characteristics and enrichment mechanism of Li in Xinmin bauxite deposit, Guizhou [J]. Mineral Deposits, 2021, 40(4): 873-890.
- [26] 赵振华. 微量元素地球化学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Zhao Zhenhua. Principles of trace element geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [27] 史忠生, 陈开远, 史军, 等. 运用锶钡比判定沉积环境的可行性分析[J]. 断块油气田, 2003, 10(2): 12-16.
Shi Zhongsheng, Chen Kaiyuan, Shi Jun, et al. Feasibility analysis of the application of the ratio of strontium to barium on the identifying sedimentary environment [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2003, 10(2): 12-16.
- [28] 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1265-1273.
Wang Feng, Liu Xuanchun, Deng Xiuqin, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(6): 1265-1273.
- [29] 杨季华, 罗重光, 杜胜江, 等. 高黏土含量沉积岩古环境指标适用性探讨[J]. 矿物学报, 2020, 40(6): 723-733.
Yang Jihua, Luo Chongguang, Du Shengjiang, et al. Discussion on the applicability of paleoenvironmental index for sedimentary rocks with high clay content [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2020, 40(6): 723-733.
- [30] Long Y Z, Chi G X, Liu J P, et al. Trace and rare earth elements constraints on the sources of the Yunfeng paleo-karstic bauxite deposit in the Xiuwen-Qingzhen Area, Guizhou, China [J]. Ore Geology Reviews, 2017, 91: 404-418.
- [31] Luo C K, Yang R D, Chen J, et al. Genesis of the Carboniferous karstic bauxites in Qingzhen region, central Guizhou, southwest China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2022, 235. DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.106955.
- [32] 孙朋飞, 江思宏, 韩宁. 西澳 Darling Range 地区红土型铝土矿地球化学特征及源区研究[J]. 地质学报, 2018, 92(3): 587-603.
Sun Pengfei, Jiang Sihong, Han Ning. Geochemical characteristics and source of the Laterite-type Bauxite Deposit in Darling Range, western Australia [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(3): 587-603.
- [33] Schroll E, Sauer D. Beitrag zur geochemie von Titan, Chrom, Nickel, Cobalt, vanadium und molibdan in bauxitischen gestermenund problem der stofflichen herkunft des aluminiums [J]. Traux du ICSOBA, 1968, 5: 83-96.