

黔中清镇汪家寨铝土矿地球化学及成因

饶慧¹, 金中国^{1,2*}, 黄智龙³, 郑明泓², 杨晓飞⁴, 杨云杰⁴, 刘玲²,
杜丽娟¹, 吴莎^{3,5}, 刘添益⁴, 沈其俊⁶

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵州 贵阳 550005; 3. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 4. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局一总队, 贵州 贵阳 551400;
5. 中国科学院大学, 北京 100049; 6. 贵州省土地矿产资源储备局, 贵州 贵阳 550004)

摘要: 本文通过对清镇汪家寨大型铝土矿矿床的矿物组成、主微量元素、稀土元素及环境敏感元素地球化学特征分析, 探讨成岩成矿环境, 揭示含铝岩系成矿物质来源及矿床成因。研究表明: 矿石中主要化学成分为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 TiO_2 , Al_2O_3 与 TiO_2 含量具有土状矿石>碎屑状矿石>致密块状矿石特征, 并具有显著的正相关; 含铝岩系中REE含量呈致密状铝土岩>致密状铝土矿>土状铝土矿>碎屑状铝土矿>赤铁矿趋势; 稀土元素配分模式、Nb-Ta、Hf-Zr、Y-Ho元素相关性, 碎屑锆石及其微量元素示踪显示, 铝土矿直接成矿物源主要为下伏寒武系清虚洞组及下古生界其他层位, 间接物源可能有新元古界-古元古界基底物质参与; Sr/Ba、Rb/K、Th/U、Sr/Cu、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值特征及Th含量推测, 铝土矿主要形成于气候炎热温湿、水体深度小、开放富氧的陆相湖泊淡水沉积环境, 其间可能存在海陆交互沉积作用, 矿床成因属产于古喀斯特侵蚀面上的沉积型铝土矿。

关键词: 汪家寨铝土矿; 地球化学; 矿床成因; 贵州清镇

中图分类号: P595; P611; P612 **文献标志码:** A

第一作者: 饶慧, 女, 2001年生, 硕士研究生, 岩石学、矿床学、矿物学专业。E-mail: 1553129716@qq.com。

Geochemistry and genesis of the Wangjiazhai bauxite deposit in the Qingzhen area of the central Guizhou, China

RAO Hui¹, JIN Zhongguo^{1,2*}, HUANG Zhilong³, ZHENG Minghong², YANG Xiaofei⁴, YANG Yunjie⁴,
LIU Ling², DU Lijuan¹, WU Sha^{3,5}, LIU Tianyi⁴, SHEN Qijun⁶

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, China; 2. Guizhou Nonferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau, Guiyang Guizhou 550005, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang Guizhou 550081, China; 4. Bureau of Nonferrous and Nuclear Industry Geology of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 551400, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. Guizhou Bureau of Land and Mineral Resources Reserve, Guiyang Guizhou 550004, China)

Abstract: Through the analysis of mineral composition, geochemical characteristics of major and trace elements, rare earth elements, and environmentally sensitive elements of the large-sized Wangjiazhai bauxite deposit in the Qingzhen area, in this paper, we explored the diagenetic and metallogenic environments, and revealed the source of ore-forming materials in the aluminiferous rock series and the genesis of this bauxite deposit. The study indicates that main chemical components of the ores are Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , and TiO_2 . There is a characteristic decreasing trend for contents of Al_2O_3 and TiO_2 of ore samples from the earthy ore, clastic ore, to compact massive ore. There is a significant positive correlation between Al_2O_3

收稿日期: 2025-10-25。

基金项目: 中国科学院前瞻战略科技先导专项(A类)(编号: XDA0430103); 贵州省铝土矿探矿顶尖专家团队项目(黔科合人才CXTD[2025]007); 贵州省地质勘查资金项目(编号: 2024-2号)。

*通信作者, E-mail: gzkyjzg@sina.com。

and TiO_2 contents. There is a decreasing trend for contents of rare earth elements (REE) in the aluminiferous rock series from the compact bauxitic rock, compact bauxite ore, earthy bauxite ore, clastic bauxite ore, to hematite sample. The distribution patterns of rare earth elements and correlations of Nb-Ta, Hf-Zr, and Y-Ho of bauxite samples, the analysis and tracing of trace elements of detrital zircons suggest that the direct ore-forming materials of the bauxite deposit were primarily sourced from the underlying Cambrian Qingxudong Formation and other Lower Paleozoic strata, with possible indirect contributions from the Neoproterozoic to Paleoproterozoic basement materials. Based on the characteristics of Sr/Ba, Rb/K, Th/U, Sr/Cu, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios, and Th contents of samples, it is inferred that the bauxite was mainly formed in a continental lacustrine freshwater depositional environment characterized by a hot and humid climate, shallow water, and open, oxygen-rich conditions, with possible intermittent marine-continental transitional sedimentation. The genesis of the deposit is classified as the sedimentary bauxite deposit formed on a paleokarst erosion surface.

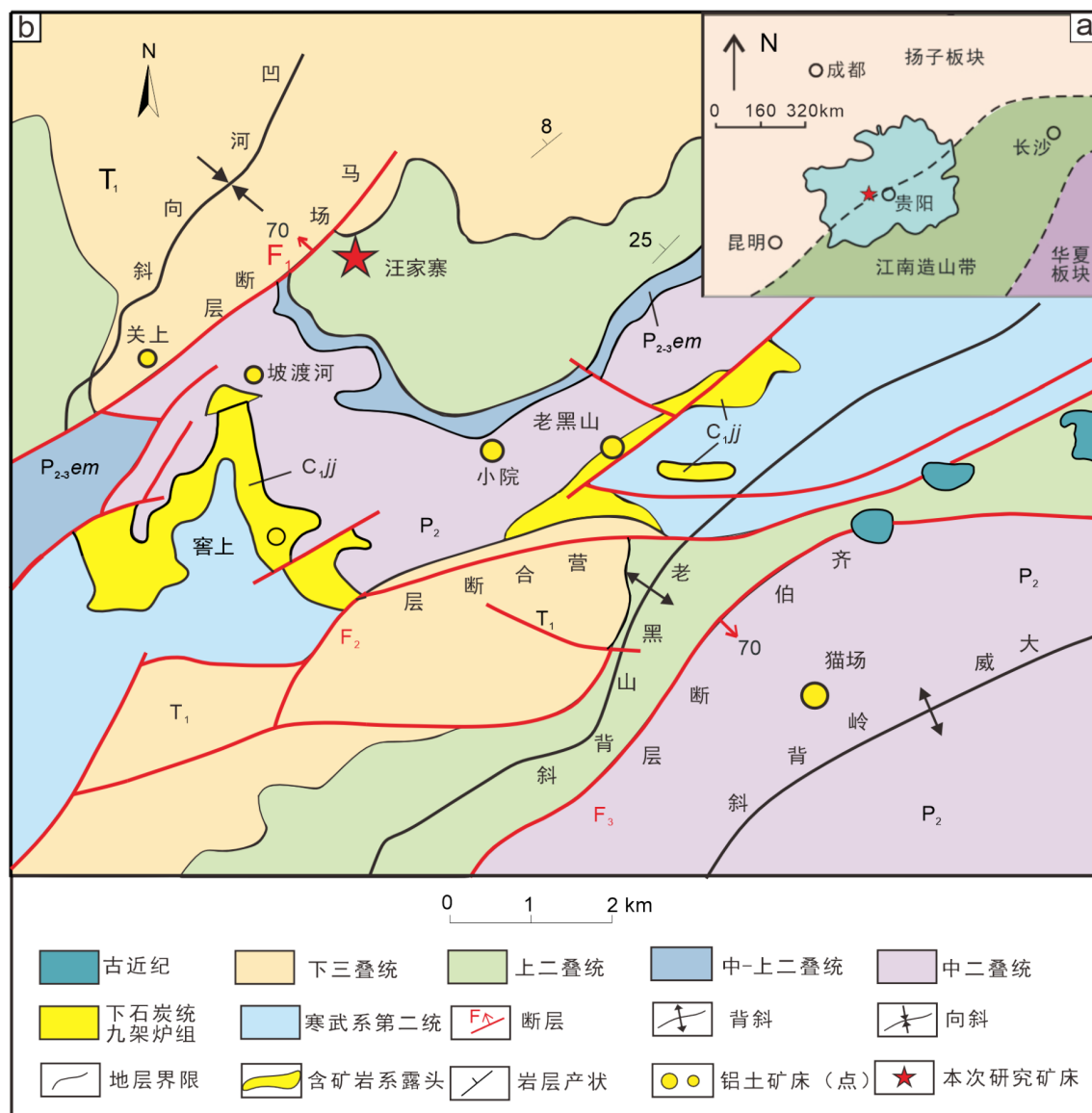
Keywords: Wangjiazhai bauxite deposit; geochemistry; metallogenesis of the deposit; Qingzhen, Guizhou

铝土矿是我国紧缺的战略性矿产, 其产量、消耗量均位居世界首位, 对外依存度居高不下^[1]。铝土矿也是贵州优势矿产, 其探明资源储量11.31亿t, 在全国排名第三^[2]。铝土矿中富含Li、Ga、Ti、V、Zr、Sc、REE等关键金属元素, 这些元素对高精尖技术发展至关重要^[3-9]。为此, 铝土矿成矿机理研究及其找矿勘查工作备受关注。黔中地区是贵州最重要的铝土矿分布区和铝工业生产基地, 近年, 在国家实施新一轮找矿突破战略行动和贵州省“富矿精开”(依托贵州矿产资源的比较优势, 开展精准探矿、精细配矿、精深加工、精准用矿, 实现矿产资源高质化、绿色化开发利用的发展战略)战略推动下, 在清镇汪家寨探获了资源量超5000万t的大型铝土矿, 也是近30年来黔中地区深部全隐伏铝土矿找矿取得的重大突破^[10]。前人对该矿床的研究集中在地质特征和成矿预测^[11-16], 地球化学研究尚处于起始阶段, 制约了矿床成因探讨和找矿预测的深入开展。本文对汪家寨铝土矿进行了较为系统的主量、微量及稀土元素含量及分布特征研究, 对揭示成矿物质来源与铝土矿富集成矿机理, 解剖区域古地理环境、喀斯特地貌对铝土矿成矿的控制作用, 探讨矿床成因, 构建区域成矿模式与找矿预测模型具有重要的借鉴作用。

1 地质概况

1.1 区域地质

清镇汪家寨铝土矿矿床位于贵州省中部清镇市, 大地构造位置处于上扬子地块西南缘黔北隆起区之织金穹盆构造变形区(图1a)^[17], 属黔中铝土矿成矿带清镇-修文早石炭世维宪中晚期成矿亚带^[18]。区内构造线总体呈北东向展布, 主要包括凹河向斜、大威岭背斜、老黑山背斜以及马场断层(F_1)、营合断层(F_2)和齐伯断层(F_3)等(图1b)。钻孔揭露汪家寨铝土矿矿床明显受凹河向斜控制, 而 F_1 、 F_2 、 F_3 等断层均为成矿后断层, 对含铝岩系和矿体都有破坏作用^[15]。主要出露地层从老到新依次为寒武系第二统清虚洞组(C_2q)白云岩, 下石炭统九架炉组(C_{1jj})铝土质黏土岩及铝土矿(岩)和摆佐组(C_{1b})白云岩(图2), 中二叠统梁山组(P_2l)炭质页岩、石英砂岩和栖霞-茅口组(P_{2q-m})灰岩, 中二叠统龙潭组(P_3l)粉砂岩、黏土岩及煤层和长兴组至大隆组(P_{3c+d})硅质岩、灰岩, 下三叠统夜郎组(T_{1y})灰岩、黏土岩和安顺组(T_{1a})白云岩, 以及第四系残坡物。其中下石炭统九架炉组(C_{1jj})为含铝岩系, 与黔中铝土矿成矿带含铝岩系层位^[17-24]一致。岩浆岩为中-上二叠统峨眉山玄武岩(P_{2-3em}), 仅在矿区局部出露(图1b)。矿区外围有关上、坡渡河、窖上、小院和老黑山等铝土矿床和矿点分布(图1b)。



据文献[18]修改。

图1 清镇汪家寨铝土矿矿床大地构造位置略图 (a) 和区域地质图 (b)

Fig. 1. A sketch map showing the tectonic location (a) and the regional geology (b) of the Wangjiazhai bauxite deposit in the Qingzhen area

1.2 矿床地质

汪家寨矿区出露地层包括寒武系、石炭系、二叠系、三叠系及峨眉山玄武岩层。矿区构造主要以NE向构造为主,包括马场断层(F_1)及其派生的 F_{1-2} 断层。 F_1 走向NE 40°,倾向NW,倾角70°~80°,为铝土矿成矿后形成的具有走滑性质和破矿作用的正断层(图3a, b)。汪家寨铝土矿含铝岩系为下石炭统九架炉组^[12-16],在矿区内全隐伏;上覆地层为摆佐组灰白色厚层中至粗晶白云岩,见重晶石团块,偶见星点状菱铁矿;下伏地层为寒武系清虚洞组浅肉红色薄至中厚层细晶白云岩^[15]。

含铝岩系九架炉组自下而上可划分为三段：下段（ C_{jj}^1 ）为铁质岩段，由暗红色赤铁矿、紫红色铁质黏土岩、灰绿色绿泥石黏土岩及硫铁矿组成；赤铁矿呈结核状、团块状及透镜体产于中部，局部含黄铁矿及菱铁矿结核或团块，厚0.89~2.67 m；中段（ C_{jj}^2 ）为铝质岩段，黄白至灰白淡绿色薄至中厚层层状铝土岩或土状、半土状铝土矿，灰色、淡绿色中厚层铝土矿、致密块状、碎屑状

铝土矿及铝土岩, 含星点状黄铁矿, 偶产黄铁矿, 厚0.44~3.38 m; 上段(C_{jj}^3)为灰绿色、褐红色薄层状绿泥石黏土岩和铝铁岩, 偶见黄铁矿结核、团块或星点状黄铁矿, 局部夹泥质白云岩和灰岩, 厚0.47 m, 九架炉组与顶板、底板地层均呈假整合接触(图2、3)。

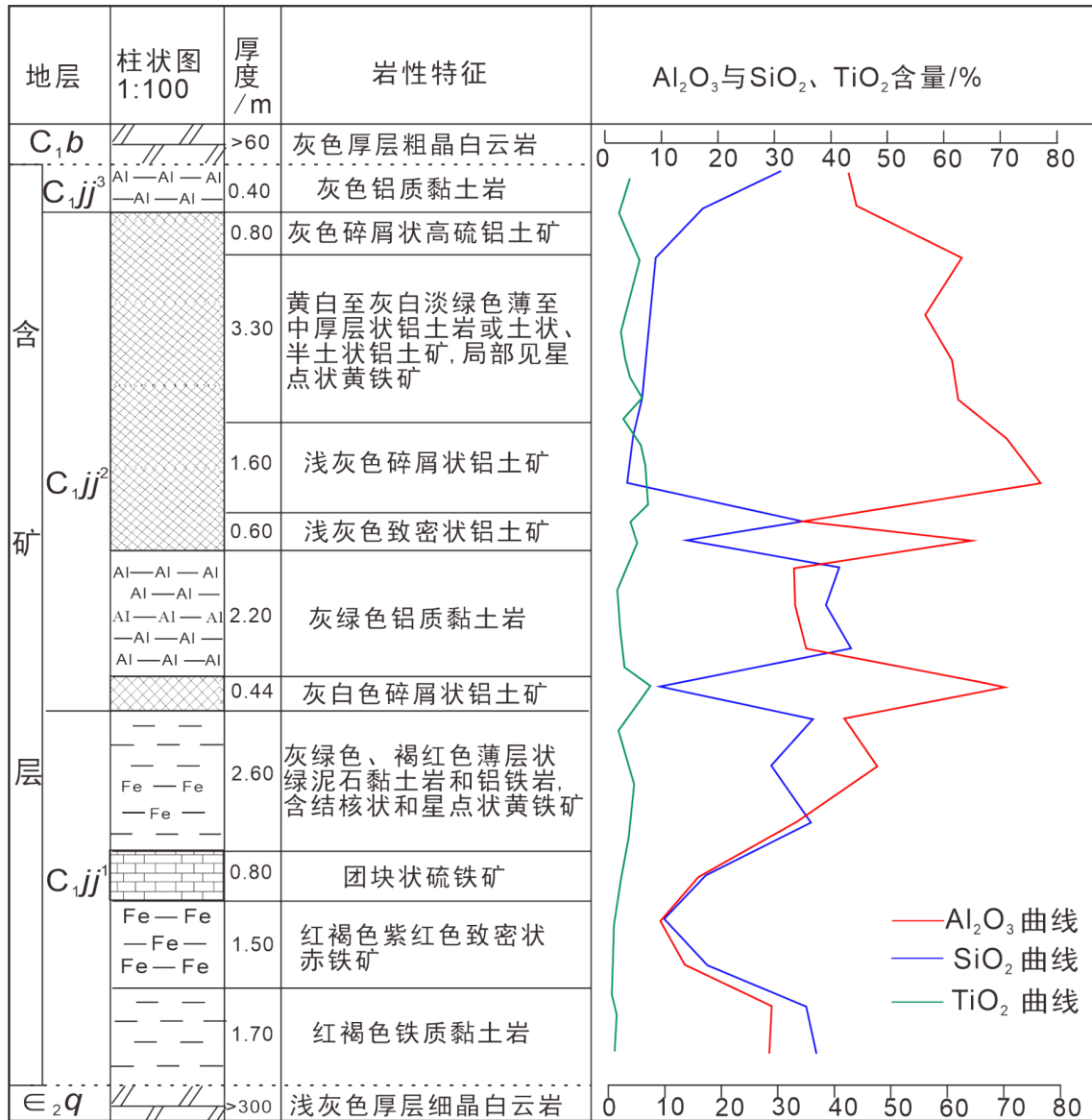
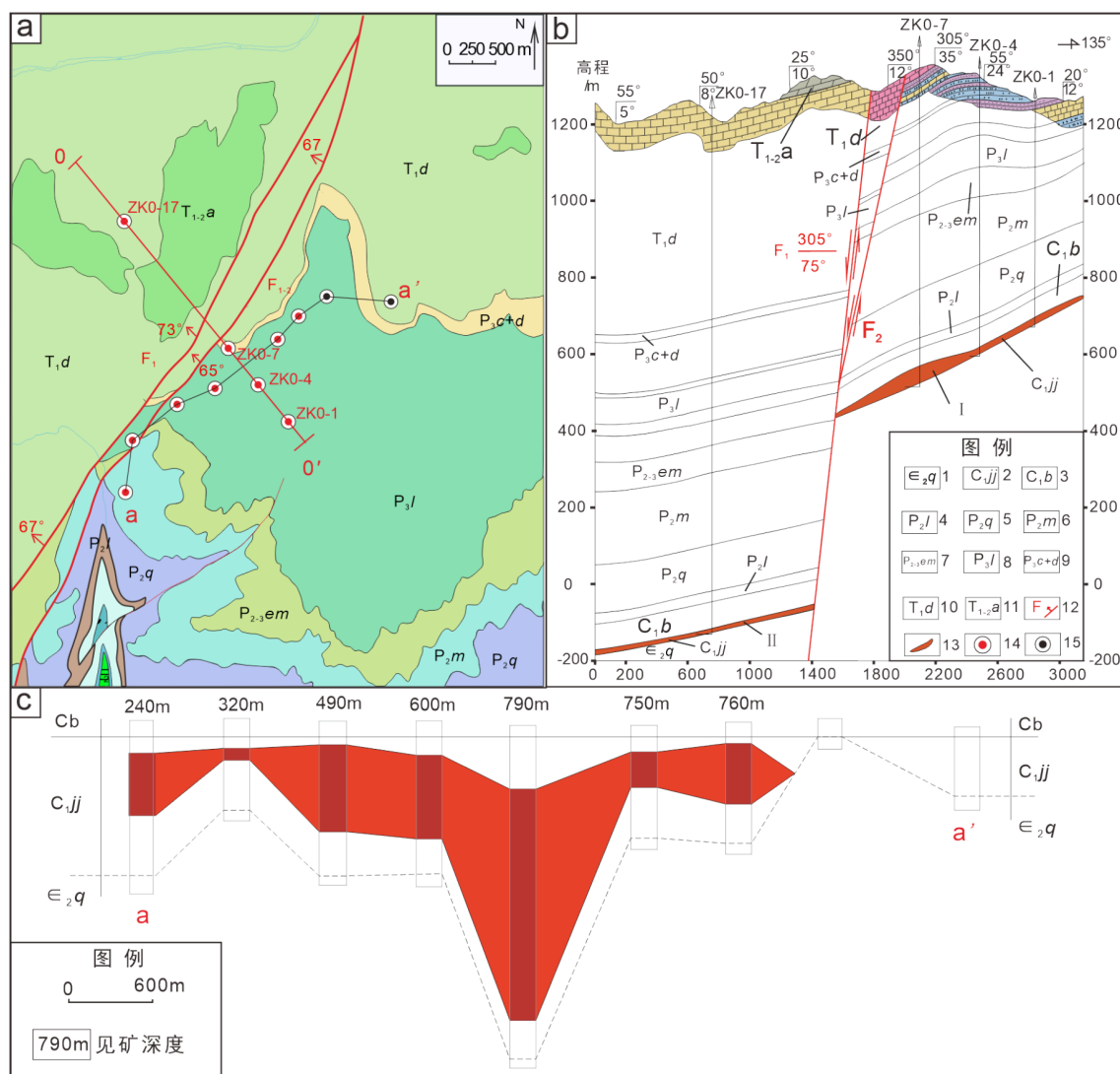


图2 汪家寨矿床含铝岩系柱状图及 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 含量变化图

Fig. 2. Stratigraphic column and variations of Al_2O_3 , SiO_2 , and TiO_2 contents of the aluminous rock series in the Wangjiazhai deposit

汪家寨铝土矿矿层主要呈层状产于含铝岩系中段, 共包括2个矿体, 其中I号矿体位于 F_1 断层SE盘, 走向长约2800 m, 最大延伸1300 m, 平均厚7.10 m, $w(Al_2O_3)$ 为44.10%~76.46%, 平均为66.41%; $w(SiO_2)$ 为3.44%~15.94%, 平均为6.30%; $w(Fe_2O_3)$ 为0.073%~33%, 平均为5.95%; $w(TiO_2)$ 为2.60%~3.10%, 平均为3.04%^[12]。在中段厚度较大, 向NE和SW逐渐变薄(图3c)。II号矿体位于矿体 F_1 断层NW盘, NE走向长1300 m, 倾向延伸500 m, 平均厚5.62 m, $w(Al_2O_3)$ 为55.03%~57.50%, 平均为55.22%; $w(SiO_2)$ 为8.64%~20.83%, 平均为9.65%; $w(Fe_2O_3)$ 为1.86%~16.15%, 平均为15.04% (未发表数据)。两矿体铝土矿资源量超5000万t^[10,14]。矿石结构主要有泥

晶结构、泥-微晶结构和含砂屑结构等。矿石构造有半土状、块状、碎屑状构造等 (图4a, c)。矿层下部常见块状赤铁矿产出 (图4d), 断层破碎带中见方解石脉沿角砾状赤铁矿边缘呈网脉状充填 (4e), 铝质黏土岩中细脉状黄铁矿发育 (4f)。铝矿物主要由硬水铝石组成, 含量60%~95%; 其次为水云母、高岭石等黏土矿物 (占比4%~39%), 以及少量的黄铁矿、锆石、锐钛矿等 (图4g~1)。



1-寒武系清虚洞组; 2-石炭系下统九架炉组; 3-石炭系下统摆佐组; 4-二叠系中统梁山组; 5-二叠系中统栖霞组; 6-二叠系中统茅口组; 7-二叠系中-上统峨眉山玄武岩组; 8-二叠系上统龙潭组; 9-二叠系上统长兴+大隆组; 10-三叠系下统大冶组; 11-三叠系中-下统安顺组; 12-断层; 13-矿体; 14-见矿钻孔; 15-未见矿钻孔。

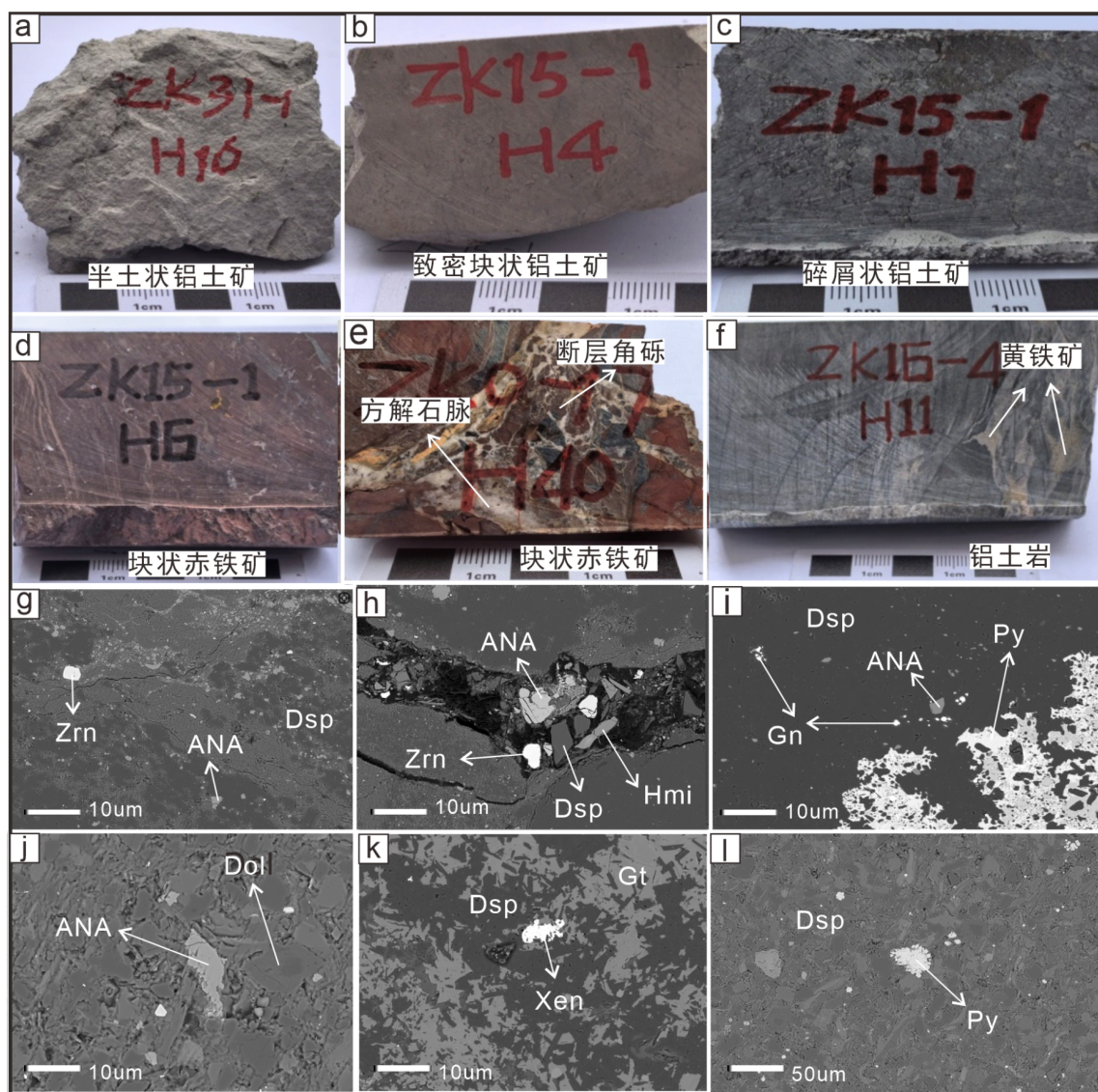
图3 汪家寨铝土矿矿床地质图 (a)、0-0'横剖面图 (b) 和a-a'纵剖面图 (c)

Fig. 3. Geological map (a), the 0-0' cross-section (b), and the a-a' longitudinal section (c) of the Wangjiazhai bauxite deposit

2 取样及分析测试

本次研究共采取样品19件, 其中含铝岩系九架炉组铝土矿10件、铝质黏土岩1件、赤铁矿4件、上覆摆佐组白云岩1件、下伏清虚洞组白云岩3件, 岩矿鉴定及分析测试在贵州大学资源与环境工程学院实验室完成, 主量元素采用X射线荧光光谱 (XRD) 分析, 微量及稀土元素使用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 分析, 实验仪器为日本JEOL公司的JXA-iHP200F型电子探针, 获取的数据包

括用于评估数据质量的方法检测线 (MDL)、用于校准与质量监控的标准物质信息 (CRM) 以及样品中目标元素的定量含量。



Dsp-硬水铝石; Zrn-锆石; ANA-锐钛矿; Py-黄铁矿; Gn-方铅矿; Kln-高岭石; Hmi-水云母; Dol-白云石; Xen-磷铈矿。

图4 汪家寨铝土矿矿石结构构造及能谱分析图

Fig. 4. Textures and structures, and the EDS Analyzed minerals in ores of the Wangjiazhai bauxite deposit

3 分析测试结果

3.1 主量元素

主量元素分析结果显示 (表1), 研究区铝土岩系的主要化学成分 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为41.87%~78.58%、 $w(\text{SiO}_2)$ 为1.04%~34.54%、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为0.08%~27.50%、 $w(\text{TiO}_2)$ 为1.41%~4.32%、 $w(\text{LOI})$ 为1.84%~15.14%等, 其总含量>88%; 而MgO、CaO、Na₂O、P₂O₅和MnO含量极少, 可忽略不计。下伏清虚洞组及上覆的摆佐组白云岩主量元素含量对比显示, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 前者明显高于后者, 且均高于1个数量级以上。不同构造铝土矿矿石中 Al_2O_3 、 TiO_2 和LOI的质量分数占比

呈土状>碎屑状>致密块状铝土矿, 而 SiO_2 、 Fe_2O_3 和S呈相反变化特征。赤铁矿主要成分为 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{LOI})$, 五者之和>96%。铝土矿中 Al_2O_3 与 TiO_2 呈显著正相关, 与 SiO_2 、 Fe_2O_3 、S呈负相关 (图5)。

表1 汪家寨含铝岩系及顶底板白云岩样品主量元素分析结果表

Table 1. Table of analytical results of major elements of the aluminum-bearing rock series and dolomite samples of hangingwall and footwall from the Wangjiazhai bauxite deposit

样品	$w_B/\%$												
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	P_2O_5	TiO_2	S	LOI	总量
H33 摆佐组白云岩	0.04	0.08	0.11	21.60	30.76	0.02	0.03	0.04	0.01	0.00	0.38	47.18	100.24
H4 半土状铝土矿	2.66	76.06	1.93	0.20	0.09	0.05	0.49	0.02	0.23	3.80	0.04	14.15	99.72
H16 半土状铝土矿	2.37	77.41	0.73	0.12	0.10	0.05	0.38	0.02	0.30	4.32	0.02	13.61	99.42
H89 半土状铝土矿	1.95	78.58	0.42	0.11	0.08	0.05	0.25	0.02	0.25	3.96	0.04	13.85	99.55
H3 碎屑状铝土矿	3.29	70.07	5.50	0.16	0.08	0.05	0.62	0.02	0.14	3.06	1.47	15.08	99.51
H9 碎屑状铝土矿	4.07	77.51	0.15	0.14	0.18	0.02	0.84	0.02	0.24	3.38	0.05	13.26	99.85
H90 碎屑状铝土矿	1.04	73.97	3.86	0.09	0.17	0.05	0.07	0.02	0.42	3.63	0.80	15.14	99.26
H95 碎屑状铝土矿	7.11	73.38	0.08	0.10	0.19	0.05	1.43	0.02	0.36	3.47	0.06	13.40	99.64
H27 块状铝土矿	34.54	47.54	0.28	0.22	0.04	0.05	7.70	0.01	0.04	1.41	0.39	7.33	99.56
H76 块状铝土矿	5.71	41.87	27.50	0.38	0.09	0.03	1.34	0.02	0.15	2.18	18.93	1.84	100.04
H80 块状铝土矿	2.35	77.96	0.14	0.11	0.09	0.05	0.44	0.02	0.28	3.67	0.06	14.21	99.38
H19 致密状铝土岩	38.37	34.36	5.63	0.84	0.17	0.05	7.91	0.01	0.10	1.68	2.30	8.25	99.67
H23 致密状赤铁矿	9.86	9.39	69.11	2.15	2.30	0.12	0.04	0.30	0.10	0.48	0.00	5.87	99.71
H12 致密状赤铁矿	1.27	1.00	59.38	1.05	20.52	0.00	0.10	0.18	0.03	0.10	0.02	15.97	99.62
H77 块状赤铁矿	11.44	8.61	70.69	1.45	0.71	0.00	1.91	0.23	0.10	0.36	0.10	3.95	99.54
H82 块状赤铁矿	9.72	7.91	76.31	1.11	0.08	0.00	1.41	0.19	0.09	0.30	0.04	2.45	99.60
H24 清虚洞白云岩	1.16	0.91	2.44	19.57	29.53	0.04	0.28	0.40	0.03	0.05	0.02	45.73	100.16
H78 清虚洞白云岩	4.96	3.26	3.50	18.11	26.63	0.04	1.03	0.29	0.04	0.16	0.04	42.35	100.41
H93 清虚洞白云岩	2.94	1.68	1.39	19.93	28.49	0.05	0.60	0.09	0.03	未检出	0.03	44.82	100.03

3.2 微量元素

前人研究显示, 我国含铝岩系及铝土矿中Li、Ga、Sc、Zr、Ta、V、Nb、Hf、Y等微量元素较富集^[6-8]。由表2可知, $w(\text{Li})$ 、 $w(\text{V})$ 、 $w(\text{Co})$ 在块状矿石中最高, 分别为 170×10^{-6} 、 220.50×10^{-6} 和 81.00×10^{-6} , 含量均呈块状矿石>碎屑状矿石>半土状矿石变化趋势。半土状矿石中Zr、Hf、Nb、Th、Sn等元素含量相对高, 碎屑状铝土矿和赤铁矿中Mo显著富集。 $w(\text{Ba})$ 在致密状铝土矿(岩)中相对高(2054.00×10^{-6} 和 505.73×10^{-6})、在土状铝土矿中相对低(45.33×10^{-6})。图6a显示, 含矿岩系中除Co、Ni、Rb和Cs亏损外, 其他元素均呈不同程度的富集; 下伏清虚洞组白云岩中无论富集或亏损元素, 含量均较含铝岩系低, 但两者的元素含量变化趋势相似。

3.3 稀土元素

据表3可知, 含铝岩系中铝土矿(岩)的 $w(\sum \text{REE})$ 为 $327.22 \times 10^{-6} \sim 519.32 \times 10^{-6}$, 均值为 442.54×10^{-6} , $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}$ 为11.01~30.70, LREE显著富集。含铝岩系中, $w(\sum \text{REE})$ 致密状铝土岩(519.32×10^{-6})>致密状铝土矿(511.48×10^{-6})>土状铝土矿(412.14×10^{-6})>碎屑状铝土矿

(327.22×10^{-6}) > 赤铁矿 (103.550×10^{-6}), 下伏清虚洞组白云岩 $w(\sum \text{REE})$ (115.74×10^{-6}) > 摆佐组白云岩 (27.39×10^{-6})。含铝岩系中 δCe 为 2.98~4.00, δEu 为 0.55~0.65; 下伏清虚洞白云岩 δCe 为 3.26, δEu 为 0.69, 两者的 δCe 值和 Eu 值相近。图 6b 显示出, 两种的稀土配分模式也相似, 属典型的富 LREE, 贫 HREE 型。

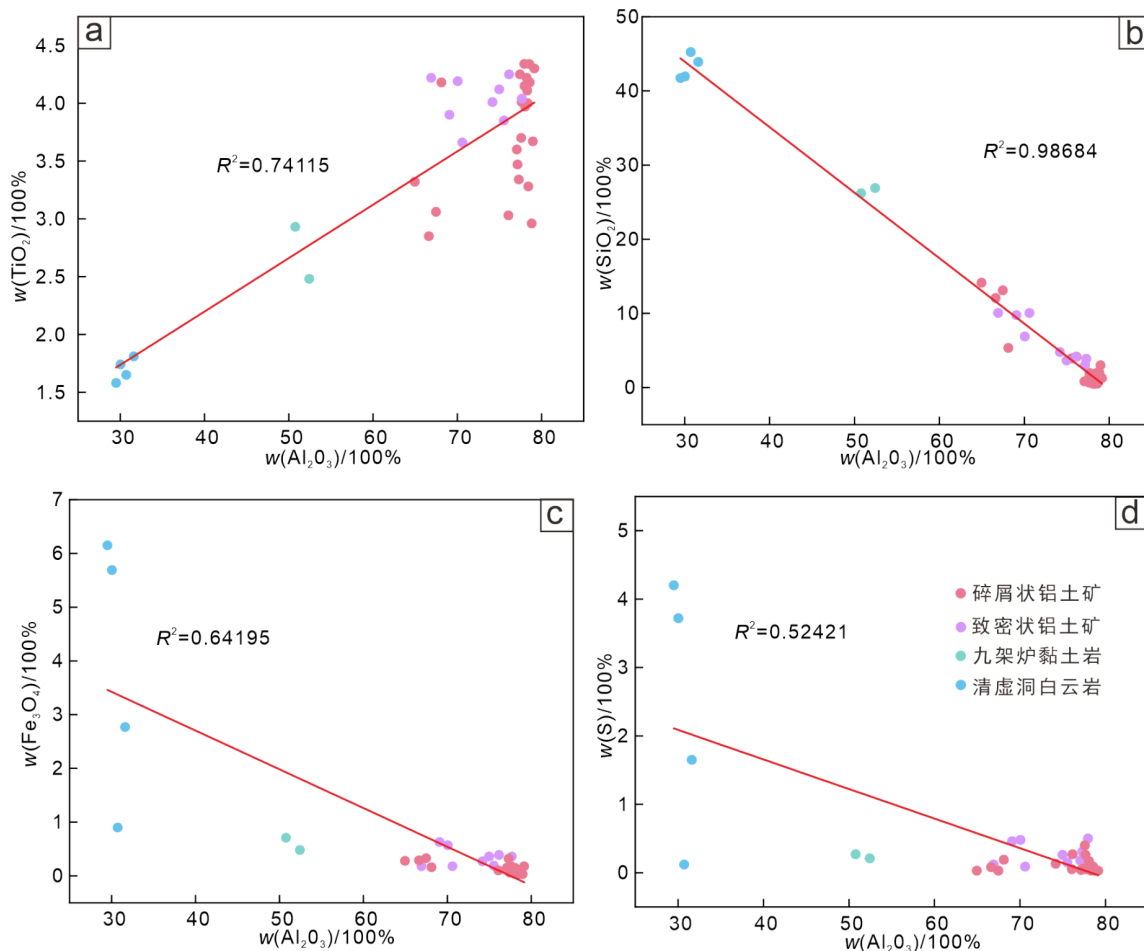


图5 汪家寨铝土矿床ZK0-7铝土矿层中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{S})$ 关系散点图

Fig. 5. Scattered plots of $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs. $w(\text{TiO}_2)$, $w(\text{SiO}_2)$, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, and $w(\text{S})$ in samples of the bauxite layer of Borehole ZK0-7 in the Wangjiazhai bauxite deposit

4 讨论

通过对比含铝岩系及其顶底板主量元素、微量元素、稀土元素含量或比值特征, 可以揭示铝土矿成矿物质来源、沉积环境、形成演化过程。研究表明^[21], Sr、Ba、Rb、K、V、Cr、Ni、Co、Th、U、Cu等敏感元素比值及含量在沉积物中的分布和分配除与自身的地球化学性质和行为有关外, 在一定程度上还受沉积物物理化学条件和古气候的影响。

4.1 元素富集与贫化

汪家寨铝土矿床含铝岩系的主量元素相关性图显示, Al_2O_3 与 TiO_2 呈显著正相关, 与 SiO_2 、 Fe_2O_3 、S呈负相关 (图2、5), 说明Al、Ti元素的地球化学性质较稳定, 在成矿母岩风化、搬运、沉积成岩成矿过程中同迁移同富集, 而地球化学性质相对活泼的Si、Fe、S则不断发生淋滤脱硅、

表 2 汪家寨含铝岩系及顶底板白云岩样品微量元素分析结果表

Table 2. Table of analytical results of trace elements of the aluminum-bearing rock series and dolomite samples of hanging wall and footwall from the Wangjiazhai bauxite deposit

样品	$w_B/(\times 10^{-6})$																
	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
H33	未检出	未检出	1.1	2.84	5.31	5.38	25.8	3.96	8.83	0.254	0.033	1.78	0.439	119	3.83	1.27	0.221
H4	未检出	5.99	10.4	168	82.9	4.54	10.5	27.8	41.2	27.8	3.61	7.15	5.96	279	49.7	930	76.9
H16	1.03	5.86	16.4	138	75.8	6.9	10.4	39.5	43.8	23.1	2	5.71	5.33	266	77.9	1352	71.8
H89	未检出	4.61	12.1	191	59.4	3.6	3.36	58.7	45.5	18.8	2.46	4.66	2.63	295	14.2	1314	73.4
H3	未检出	4.79	11.8	285	92.8	54	68	219	34.7	30.2	2.95	54.2	8.42	162	27.2	950	64
H9	未检出	6.74	12.4	95.5	63.6	5	4.59	34.9	38.7	22.9	2.01	3.6	7.71	90.5	60.3	893	71.2
H90	22.9	6.93	15.1	139	52.9	7.66	28.9	142	36.9	19.2	1.41	5.41	19.7	211	39.5	793	60.8
H95	1.14	5.59	14.2	118	66.4	4.46	3.22	69.8	47.8	21.5	2.64	2.68	12.8	479	18.4	1230	73.3
H27	170	3.24	15	272	147	36.6	39.6	18.7	20.9	28	1.53	6.95	49	38.4	21.1	290	35.6
H76	4.17	3.78	31.6	177	93	30.9	91.6	314	27.4	32.8	4.11	29.8	9.26	424	32.2	438	43.7
H80	未检出	5.79	8.41	116	62.4	4.9	6.52	77.4	80.9	20.1	2.5	5.1	4.17	210	46.7	909	71.6
H19	101	3.84	23.6	136	121	27.6	34.4	67.4	45.8	39.3	1.12	19.4	72.8	334	52.3	536	40.3
H23	118	4.32	6.91	155	29.4	81	102	16.8	66	15.6	1.69	7.96	0.238	147	27	89.2	9.2
H12	4.38	9.91	4.55	95.9	3.73	28.8	30.7	31.5	15.3	3.29	1.27	13.7	0.575	206	53.5	9.23	0.861
H77	56.9	7.22	11.1	62.4	22.1	55.8	150	120	46	12.5	1.52	15.9	37.2	69.5	30.4	84.4	7.52
H82	76.5	5.76	7.27	91.2	22.6	54.2	17.8	9.52	27.5	11.3	1.66	15	22.9	86.8	28.6	59.6	5.84
H24	1.71	0.565	1.93	9.64	5.46	16.1	26	3.28	8.88	1.44	0.095	1.03	4.96	253	4.98	15.4	0.973
H78	15.6	1.42	3.3	21.5	24.7	16.8	30.8	4.56	10.6	4.55	0.245	1.54	22.2	142	15.5	31.6	3.16
H93	5.62	0.909	2.21	12.4	11.5	10.2	25.5	3.67	9.49	2.61	0.169	1.82	13.8	76.1	11	24.8	1.81
样品	$w_B/(\times 10^{-6})$																
	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	
H33	0.671	0.088	0.088	未检出	0.046	2.38	0.06	43.9	0.04	0.11	0.16	未检出	0.79	0.07	0.36	0.32	
H4	0.36	3.65	未检出	0.048	15	0.862	0.135	53.4	28.8	6.66	8.16	0.023	96.1	1.07	60.5	23.4	
H16	0.358	3.67	未检出	0.198	22.2	0.878	0.149	52.8	41.2	4.63	4.64	0.005	125	1.08	85.1	27	
H89	0.33	3.49	0.152	0.227	18.6	1.32	0.071	29.8	35.6	4.98	5.36	未检出	87.5	1.2	45.7	18.1	
H3	17	3.68	0.031	0.069	15.2	3.51	0.122	188	25.6	5.44	8.28	0.08	85.7	2.59	29.3	21	
H9	1.96	5.24	0.023	0.028	9.94	1.29	0.133	190	24.2	5.9	8.82	0.078	596	2.79	43	22.2	
H90	5.09	3.13	0.028	0.198	18.8	1.77	2.72	225	21.6	5.12	8.03	0.099	305	2.4	45	28.1	
H95	1.84	3.62	未检出	0.172	28.8	1.62	0.249	210	33.6	6.04	9.35	0.182	69.7	1.47	47.2	27.2	
H27	3.56	1.68	0.038	0.095	9.54	1.4	4.43	1290	8.4	3.06	4.4	0.41	23.1	1.63	33.3	7.46	
H76	0.957	2.86	0.026	0.188	11.5	4.13	0.503	187	12.7	3.78	5.78	0.204	466	1.86	51	13.5	
H80	1.43	4.18	0.123	0.117	14.6	1.72	0.084	40.2	26	5.18	6.5	0.012	285	2.35	51.7	22.9	
H19	0.798	3.08	0.148	0.084	6.75	3.16	7.31	2054	14.8	3.49	4.79	0.621	120	1.68	57.6	8.9	
H23	6.67	0.456	0.059	未检出	2.02	2.33	0.117	57.6	2.46	0.788	2.21	未检出	65.5	0.444	10.1	19.4	
H12	10.8	0.089	0.079	0.045	0.176	1.27	0.088	70	0.375	0.203	0.969	未检出	17.2	0.488	1.03	8.4	
H77	11.2	0.434	0.086	0.12	1.88	5.36	3.12	217	2.35	0.684	2.39	0.182	19.4	0.238	8.9	15.3	
H82	2.99	0.306	0.022	0.002	1.36	1.94	2.31	171	1.71	0.567	1.11	0.132	24.7	0.308	6.91	11.6	
H24	未检出	0.086	0.12	未检出	0.185	0.115	0.197	39.6	0.431	0.127	0.199	未检出	3.17	0.002	0.88	0.609	
H78	0.007	0.28	0.199	未检出	0.771	0.536	1.6	101	0.851	0.295	0.485	0.058	10.7	0.048	2.88	2.38	
H93	未检出	0.139	0.061	未检出	0.39	0.23	1.2	45.4	0.628	0.195	0.229	未检出	1.21	0.005	2.97	0.697	

表3 元素比值及特征值表

Table 3. A table for elemental ratios and eigenvalues of samples

样品性质/件数	Rb/K			Sr/Ba			Th/U			Sr/Cu			Ni/Co		
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
C ₁ b白云岩/1	17.63	17.63	17.63	2.71	2.71	2.71	1.1	1.1	1.1	30.05	30.05	30.05	4.8	4.8	4.8
半土状铝土矿/3	16.9	12.67	14.74	9.9	5.04	6.72	3.15	2.52	2.75	10.04	5.03	7.27	2.31	0.93	1.58
碎屑铝土矿/4	16.36	10.78	13.28	2.28	0.48	1.14	1.94	1.4	1.67	6.86	0.74	2.92	3.77	0.72	1.67
致密状铝土矿/3	11.42	7.67	9.14	5.22	0.03	2.5	4.46	2.26	3.5	2.71	1.35	2.04	2.96	1.08	1.79
致密状铝土岩/1	11.09	11.09	11.09	0.16	0.16	0.16	6.47	6.47	6.47	4.96	4.96	4.96	1.25	1.25	1.25
赤铁矿/4	23.47	7.29	14.54	2.94	0.32	1.58	0.60	0.12	0.5	9.12	0.58	6.25	2.69	0.33	1.34
C ₂ q白云岩/3	21.34	27.72	25.00	6.39	1.41	3.16	4.26	1.21	2.31	77.13	20.72	43.00	2.50	1.61	1.98

样品性质/件数	V/Cr			V/Ni			V/Zr			L/H	δCe	δEu	LREE	HREE	ΣREE	L/H	CIA
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值								
C ₁ b白云岩/1	0.53	0.53	0.53	0.11	0.11	0.11	2.24	2.24	2.24	2.46	3.14	0.75	2.76	1.12	3.88	2.46	
半土状铝土矿/3	3.22	1.82	2.35	56.85	13.27	28.7	0.18	0.1	0.14	14.59	2.98	0.62	385.7	26.44	412.14	14.59	99.64
碎屑铝土矿/4	3.07	1.5	2.24	36.65	4.19	16.61	0.3	0.1	0.17	16.08	4.00	0.6	308.06	19.16	327.22	16.08	99.57
致密状铝土矿/3	1.90	1.85	1.87	17.79	1.93	8.86	0.94	0.13	0.49	24.82	3.27	0.55	491.67	19.81	511.48	24.82	99.37
致密状铝土岩/1	1.12	1.12	1.12	3.95	3.95	3.95	0.25	0.25	0.25	19.28	3.79	0.65	509	10.32	519.32	49.34	97.01
赤铁矿/4	25.71	2.82	9.46	3.12	0.42	2.55	10.39	1.74	3.60	6.46	3.52	0.71	89.68	13.88	103.55	6.46	
C ₂ q白云岩/3	1.77	0.87	1.24	0.70	0.37	0.52	0.68	0.5	0.60	7.92	3.26	0.69	31.98	4.04	36.02	7.92	

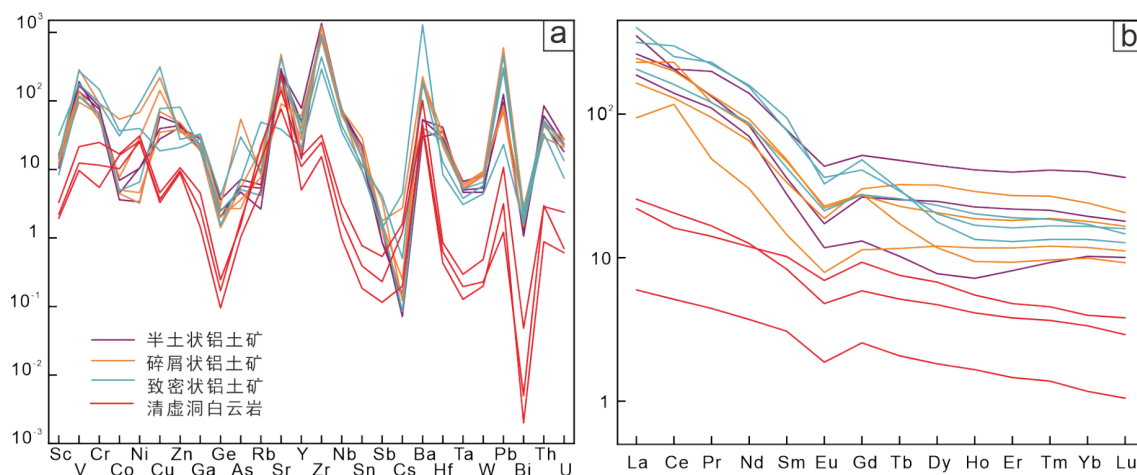


图6 汪家寨矿床含铝岩系与清虚洞组微量元素标准化蛛网图 (a) 和稀土元素配分模式图 (b)

(球粒陨石标准据文献[25])

Fig. 6. The spidergrams of trace elements (a) and REE distribution patterns (b) of the aluminum-bearing rock series and samples of the Qingxudong Formation in the Wangjiazhai deposit (after reference [25])

去铁、失硫作用而贫化^[26]。

$w(\text{Li})$ 、 $w(\text{V})$ 、 $w(\text{Co})$ 含量呈块状矿石>碎屑状矿石>半土状矿石变化趋势，推测原因一是Li、V、Cr在沉积成岩过程中易被黏土矿物吸附，部分以吸附状态富集有关；二是 Li^+ (0.68 Å)、 V^{3+} (0.74 Å)、 Cr^{3+} (0.68 Å)与 Al^{3+} (0.61 Å)离子半径相近，部分以类质同象富集有关；三是在表生条件下，地球化学性质较活泼的Li在黏土矿物水解过程中易迁移流失，而 V^{3+} 、 Cr^{3+} 被氧化转化为溶解度较高的钒酸根离子 $(\text{VO}_4)^{3-}$ 和铬酸根 $(\text{CrO}_4)^{2-}$ 迁移流失^[27]，从而导致Li、V、Cr在淋滤作用

表4 汪家寨含铝岩系及顶底板白云岩样品稀土元素分析结果表

Table 4. Table of analytical results of rare earth elements of the aluminum-bearing rock series and dolomite samples of hangingwall and footwall from the Wangjiazhai bauxite deposit

样品	$w_B/(\times 10^{-6})$													
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
H33	1.42	2.80	0.366	1.61	0.39	0.106	0.477	0.075	0.447	0.091	0.243	0.033	0.203	0.028
H4	96.4	197	18.2	59.0	8.25	1.50	8.08	1.47	9.40	1.92	5.42	0.761	4.81	0.683
H16	129	197	27.2	99.2	17.9	3.77	15.8	2.76	16.7	3.48	9.82	1.45	9.85	1.38
H89	68.6	134	15.1	49.7	6.38	1.02	4.00	0.593	2.95	0.611	2.02	0.329	2.53	0.382
H3	34.6	112	6.68	21.5	3.33	0.686	3.47	0.672	4.58	0.996	2.91	0.428	2.92	0.424
H9	60.4	124	13.0	46.3	7.72	1.63	9.23	1.87	12.2	2.46	6.75	0.955	5.96	0.785
H90	89.8	191	18.5	65.6	11.1	1.92	8.32	1.32	7.84	1.59	4.52	0.668	4.44	0.631
H95	84.2	220	16.5	59.5	10.8	1.99	8.47	1.00	4.47	0.799	2.31	0.343	2.46	0.351
H27	116	286	30.4	113	21.8	2.84	14.7	1.73	6.75	1.14	3.22	0.477	3.32	0.484
H76	147	241	31.4	110	17.7	3.15	12.5	1.69	7.69	1.43	4.01	0.592	4.10	0.605
H80	75.4	154	16.5	61.6	9.77	1.84	8.40	1.49	8.81	1.72	4.72	0.66	4.23	0.559
H19	121	282	27.7	106	18.7	3.49	13.2	1.97	11.0	2.21	6.26	0.936	6.39	0.911
H23	18.5	39.3	4.67	18.4	4.06	0.906	3.90	0.648	4.06	0.865	2.42	0.353	2.29	0.337
H12	6.08	19.7	3.34	18.1	6.89	1.89	8.72	1.39	8.32	1.60	4.00	0.484	2.66	0.361
H77	15.4	32.1	3.33	13.5	3.40	0.895	4.20	0.78	5.08	1.03	2.73	0.381	2.28	0.325
H82	29.0	61.2	6.16	23.5	4.80	1.11	5.65	0.888	5.21	1.04	2.81	0.392	2.42	0.346
H24	2.19	4.90	0.607	2.64	0.71	0.163	0.78	0.12	0.695	0.141	0.364	0.049	0.289	0.04
H78	8.07	15.4	1.93	8.46	2.35	0.603	2.84	0.437	2.57	0.467	1.19	0.162	0.984	0.145
H93	9.38	19.6	2.28	8.91	1.92	0.416	1.80	0.298	1.79	0.351	0.946	0.130	0.832	0.111

强的碎屑状矿石、半土状矿石中贫化, 在淋滤作用弱的块状铝土矿(岩)富集。

半土状矿石中 $w(\text{Zr})$ 、 $w(\text{Hf})$ 、 $w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{Sn})$ 等元素含量相对高, 表明这些元素在表生条件下具有较稳定的地球化学性质, 并暗示与地球化学性质较惰性的Al、Ti等同迁移同富集。

碎屑状铝土矿和赤铁矿中Mo显著富集, 可能与表生氧化环境下Mo易被Fe的高价氧化物吸附沉淀有关^[27]。 $w(\text{Ba})$ 在致密状铝土矿(岩)中相对高, 在土状铝土矿中相对低推, 测成岩成矿阶段Ba被吸附富集, 与后期改造强弱有关, 即淋滤改造作用强, Ba流失量大。

赤铁矿中 $w(\text{Ni})$ 、 $w(\text{Co})$ 较高, 与 Co^{2+} (0.72 Å)、 Ni^{2+} (0.69 Å) 离子半径与 Fe^{2+} (0.74 Å) 离子半径十分相近, 易与铁矿物中 Fe^{2+} 发生类质同象富集有关。

含铝岩系中铝土矿(岩)的 $w(\sum\text{REE})$ 高于北美页岩值 (173×10^{-6})^[28]和地壳丰度值 (162.95×10^{-6})^[29], 这可能与铝土矿(岩)黏土矿物丰富, 这些矿物具有较大的比表面积, 对REE有强烈的吸附作用有关。 $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$ 值为11.01~30.07, LREE显著富集, 这是由于LREE的原子序数相对小、半径相对大, 被吸附的能力相对强所致^[27]。 $w(\sum\text{REE})$ 致密状铝土岩>致密状铝土矿>土状铝土矿>碎屑状铝土矿>赤铁矿, 下伏清虚洞组白云岩 $w(\sum\text{REE})$ >摆佐组白云岩, 与土状、碎屑状铝土矿中REE经淋滤流失及清虚洞组白云岩中含有易吸附稀土的黏土矿物有关。

4.2 成矿物质来源

微量、稀土元素的组成对母岩具有较强的继承性, Nb、Ta、Zr、Hf、Cr、Ni等元素的相关性

及比值特点, 可用来研究含铝岩系的形成与下伏地层的关联性, 判别可能的成矿物质来源^[20,21,30-38]。

从图6、7a~c和表4看出, 汪家寨铝土矿矿床含铝岩系九架炉组与下伏清虚洞组白云岩的微量元素含量变化除Ni、Cu相反外, 其余元素含量变化趋势总体相似, 仅含量高低有差异; 含铝岩系稀土含量明显高于底部清虚洞组白云岩, 但配分模式曲线均呈Ce和LREE富集、Eu亏损的右倾相似性特征; 含铝岩系与下伏清虚洞组白云岩中高场强元素Nb与Ta、Hf与Zr、Y与Ho均呈显著的正相关, 且拟合程度高, 这些特征暗示, 该矿床的成矿物质可能与下伏清虚洞组层位有关, 与有关学者研究黔中地区含铝岩系物质来源与下伏地层密切相关认识一致^[39-43]。

Cr/Ni值常被用来判别铝土矿床的源岩^[44-46]。图7d显示, 汪家寨矿床部分样品落入高铁红土型铝土矿以及与喀斯特型铝土矿之间过渡带, 且接近页岩、板岩、碳酸盐岩和花岗岩区, 反映出含铝岩系物源不仅来源于下伏清虚洞组, 还可能与下伏其他层位的碳酸盐岩、页岩及基底变质岩、岩浆岩有关, 具有明显的复杂性和多源性。

黔中地区含铝岩系碎屑锆石U-Pb定年显示, 存在800、537 Ma两个主要的年龄峰值^[47], 分别与新元古代早期和早寒武世对应, 推测含铝岩系形成其沉积物质除主要来源于下伏寒武纪清虚洞期白云岩外, 还可能与新元古代早期层位有关, 也反映出铝土矿成矿物质来源多源性。

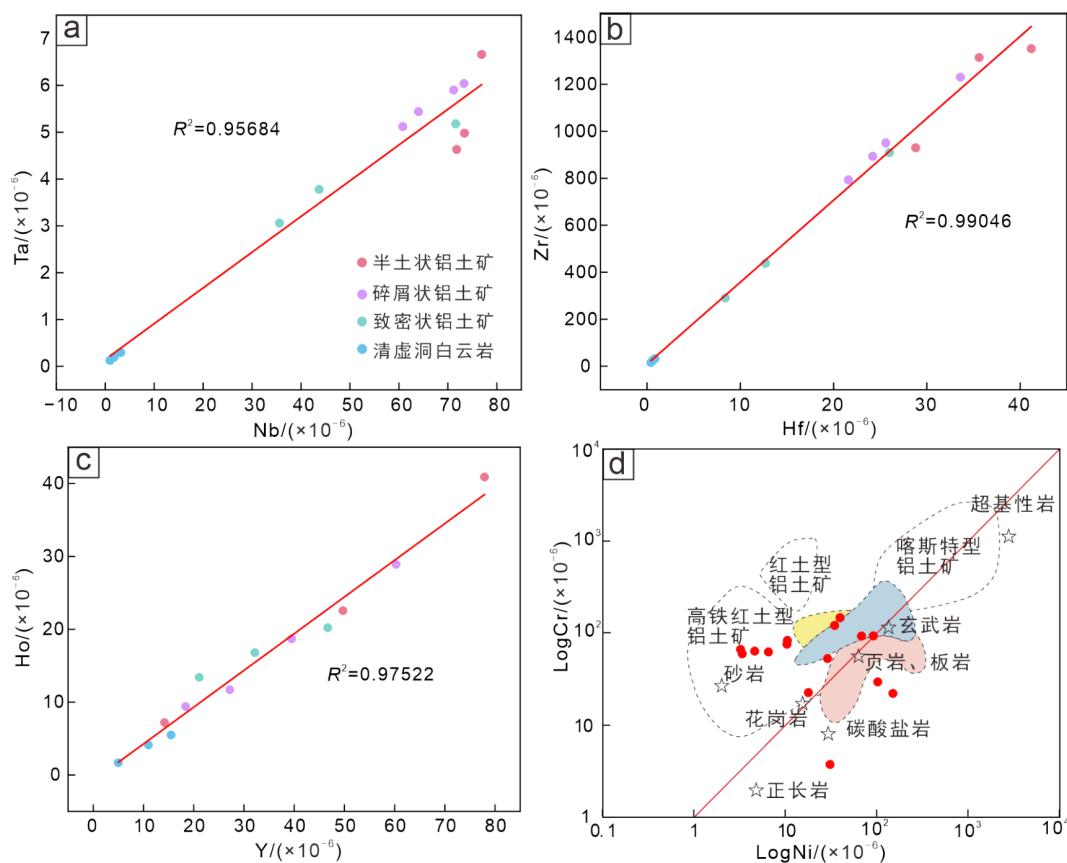


图7 汪家寨铝土矿床Nb-Ta、Hf-Zr、Ho-Y、Ni-Cr相关性图解

Fig. 7. Correlation diagrams of Nb-Ta, Hf-Zr, Ho-Y and Ni-Cr for samples in the Wangjiazhai bauxite deposit

4.3 沉积环境

4.3.1 海陆相沉积环境判别

全球铝土矿主要形成于气候炎热、雨量充沛、植被发育的亚热-热带赤道附近^[41]。黔中地区在

志留纪末的广西运动作用下全面隆升为陆, 形成“南海北陆”的古地理格局^[48,49]。据古地磁研究^[50,51], 早石炭世, 黔中地区位于赤道附近, 北纬 $8^{\circ}\sim 14^{\circ}$, 年平均气温与黔北播州地区的平均气温 $33.4\sim 40.1^{\circ}\text{C}$ 相近^[52], 有利于基底地层的风化、大量微生物和有机质的分解, 活泼元素的淋滤流失和富铝、脱硅等成矿作用发生。

前人研究认为^[41,53,54], 陆相沉积物富Ba贫Sr, 海相沉积物则富Sr贫Ba。由表3可知, 致密状铝土矿(岩) Sr/Ba值为 $0.16\sim 0.44<0.6$, 土状和碎屑状铝土矿 Sr/Ba值为 $1.16\sim 6.18>1$, 分别显示形成环境为淡水环境和咸水环境, 推测含铝岩系成岩成矿早期为陆相的湖泊淡水沉积环境, 后期可能受全球石炭纪-二叠纪冰期与间冰期影响^[55,56], 经历过海侵、海退的海陆交互沉积作用。海退过程中含铝岩系暴露地表或浅表遭受淋滤作用, 形成质量较好的铝土矿^[57]; 海侵过程中已遭受风化淋滤的铝土矿(岩) 黏土矿物含量多, 表面积增大, 对海水中Sr的吸附能力增强, 从而导致Sr含量增加, Sr/Ba值增大($\text{Sr/Ba}>1$); 而上覆摆佐组和下伏清虚洞组白云岩的Sr/Ba值均 >2 , 显示为典型的海相环境。

铝土矿(岩) 中 $w(\text{Th})$ 为 $29.3\times 10^{-6}\sim 60.6\times 10^{-6}$, 平均 49.95×10^{-6} , 远大于 20×10^{-6} ; Rb/K值为 $0.001\sim 0.002$, 也显示含铝岩系主要形成于淡水沉积环境^[41,54,58]。

4.3.2 沉积水体氧化还原条件

全球铝土矿绝大多数的含矿岩系形成于湖泊、沼泽、三角洲、河口湾、滨海等不同的陆相或滨海浅水沉积环境^[57]。汪家寨矿床铝土矿(岩) 的Th/U值为 $1.39\sim 6.47$, 平均2.90; Ni/Co值为 $1.25\sim 1.90$, 平均1.56; V/Cr值为 $1.12\sim 2.31$, 平均1.89; δCe 值为 $2.98\sim 4.00$, 平均3.51, 暗示含铝岩系主要形成于水体较浅、相对开放的富氧水体环境^[59-64]。

4.3.3 古气候环境

由表2和图8可知, 汪家寨含铝岩系中铝土矿(岩) 及赤铁矿的Sr/Cu值为 $1.64\sim 6.67$, 平均3.82, 位于 $2\sim 5$ 之间; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 $0.01\sim 1.12$, 平均0.20, 远小于4; 铝土矿(岩) 化学蚀变指数(CIA)显示, CIA值为 $50\sim 60$ 、 $61\sim 80$ 和 >80 , 分别指示环境为弱风化-干旱寒冷气候、中等风化-温室气候和强风化-炎热潮湿气候, 矿床CIA为 $99.71\sim 99.64$, 均大于80, 反映出含铝岩系形成环境以炎热、温湿气候为主^[65,66], 其间也可能存在短暂的干旱气候, 与前述早石炭世黔中地区位于北纬赤道附近气候环境吻合^[51,52]。

综上所述, 汪家寨铝土矿主要形成于气候炎热温湿、水体总体较浅、开放富氧的淡水湖泊环境, 其间可能存在海陆交互相沉积作用(图8)。

4.4 矿床成因及形成过程

Bárdossy^[66]将铝土矿成因类型划分喀斯特型和红土型2类, 前者产于碳酸盐岩古喀斯特侵蚀面之上, 后者产于铝硅酸盐岩侵蚀面之上^[67], 这是目前全球应用最为广泛的铝土矿分类方案。我国现行标准分为沉积型、堆积型和红土型3类^[68]。据铝土矿成因类型判别研究, 铝土矿中Th/U值为 $2\sim 7$ 时, 指示矿床由风化不彻底、沉积混杂形成^[62]; $w(\text{Be})$ 分别在 $0.25\times 10^{-6}\sim 5.0\times 10^{-6}$ 和 $3\times 10^{-6}\sim 300\times 10^{-6}$ 时, 指示矿床为残积黏土型、沉积黏土型形成^[63]。汪家寨矿床Th/U值平均2.90, $w(\text{Be})$ 平均含量 4.90×10^{-6} , 显示为形成于寒武系清虚洞组古喀斯特侵蚀面上的铝土矿床。

依据前述研究认为, 汪家寨铝土矿形成过程为: 都匀-广西构造运动导致下伏基底地层隆升与风化剥蚀、红土化作用形成丰富的风化残积物, 其中活泼的碱(土)金属K、Na、Ca、Mg等流失, 部分Si被地表水溶解成 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 流失, 惰性元素Al、Ti及部分Fe、Si等在风化残积物中初步富集, 部分Al、Si、K元素结合形成大量以高岭石、伊利石为主的黏土矿物; 河流的径流作用, 风化及红土化沉积物被

搬运至古岩溶洼地分异沉积，在此过程中黏土矿物进一步发生脱硅富铝作用，在浅湖水体环境形成初始的含铝岩系；冰期或短暂干旱气候影响，含铝岩系暴露地表或浅表遭受淋滤作用，形成品位高、质量好的铝土矿体；石炭纪摆佐期至二叠纪茅口期大规模海侵作用，沉积形成了巨厚的碳酸岩层覆盖含铝岩系，后期经历多期次构造运动影响，不断改变产出形态，形成现在所见的层序结构（图9）。

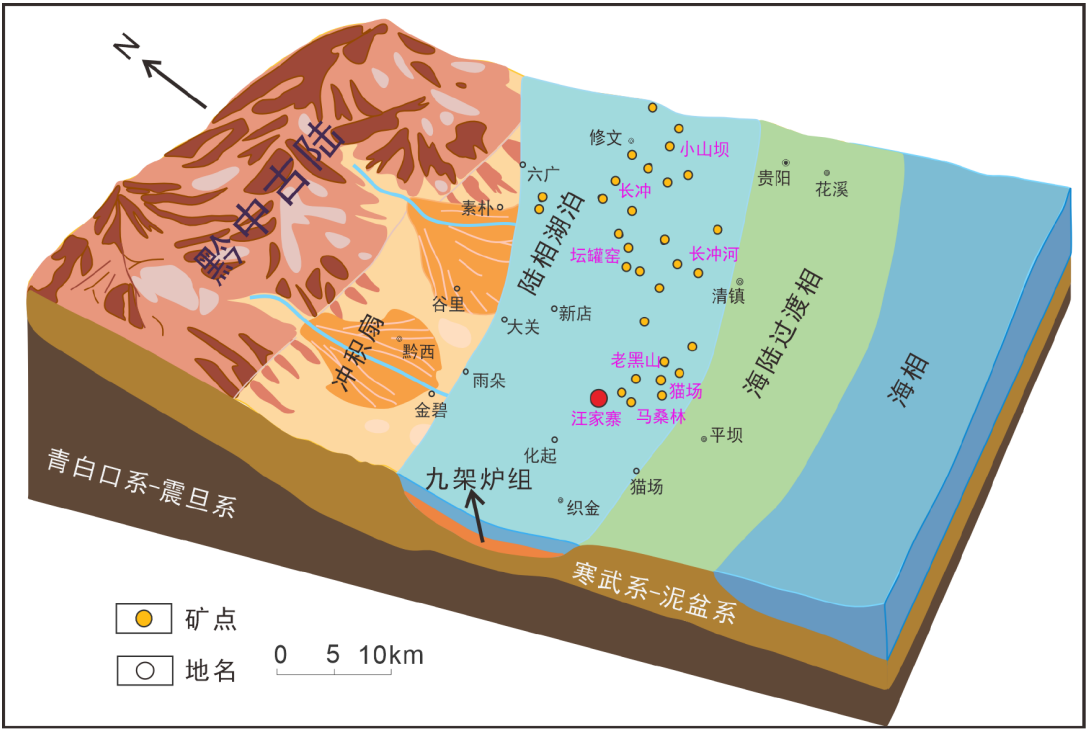


图8 黔中地区铝土矿沉积古环境图

Fig. 8. Paleoenvironment for the bauxite sedimentation in the central Guizhou

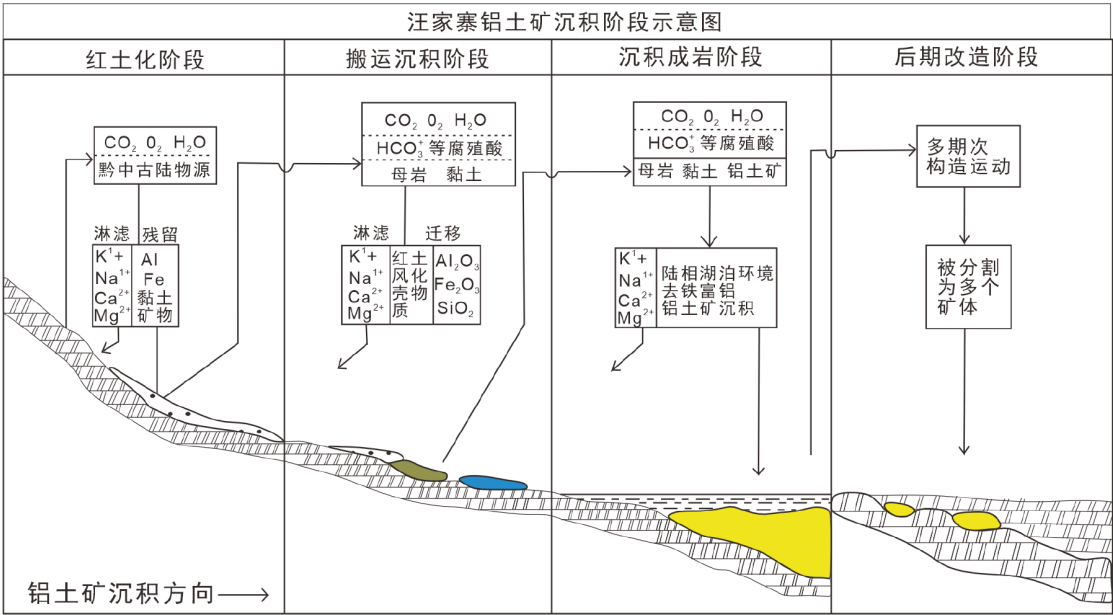


图9 汪家寨铝土矿沉积阶段示意图（据文献[69]修改）

Fig. 9. Schematic diagram showing various depositional stages of the Wangjiazhai bauxite deposit (after reference [69])

5 结论

1) 汪家寨铝土矿中主要化学成分为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 TiO_2 , Al_2O_3 与 TiO_2 具有显著的正相关, 显示Al、Ti在成岩成矿过程中具有稳定的地球化学性质和同迁移同富集特征。

2) 稀土元素配分模式、微量元素相关性 Cr/Ni 图解等指示, 汪家寨铝土矿成矿物质来源不仅直接与下伏的寒武系清虚洞组密切相关, 还与下伏的其他层位及基底层位有关, 成矿物源具有多源性。

3) 汪家寨铝土矿中主量元素、微量元素比值特征显示, 含铝岩系形成于气候炎热温湿、水体开放富氧、以淡水为主的湖泊沉积环境, 其间可能存在海陆交互相沉积作用。

4) 汪家寨铝土矿形成经历了区域构造运动及基底地层隆升, 基底地层遭受风化剥蚀、巨量风化物形成及Al、Ti等元素初步富集, 河流搬运风化物至古溶洼地的湖泊水体环境分异沉积, 并进一步发生淋滤作用和脱Si富Al作用, 形成铝土矿体。矿床成因属产于古喀斯特侵蚀面上的沉积型铝土矿。

参考文献:

- [1] 陈喜峰. 全球铝土矿资源分布特征、勘查开发格局及展望[J]. 中国矿业, 2024, 33(7): 59–68.
- [2] 贵州省自然资源厅. 2023年贵州省自然资源公报[R]. 2024.
- [3] Khosravi M, Abedini A, Alipour S, et al. The Darzi-Vali bauxite deposit, West-Azarbaidjan Province, Iran: Critical metals distribution and parental affinities[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, 129(2): 960–972.
- [4] Salamab-Ellahi S, Taghipour B, Mongelli G. Clayey bauxite from the Irano-Himalayan belt: Critical metals, provenance and palaeoclimate in the Upper Cretaceous Semrom ore deposit, Zagros Mountain, Iran[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 172(9): 126–142.
- [5] Long Y Z, Lu A H, Gu X P, et al. Cobalt enrichment in a paleo-karstic bauxite deposit at Yunfeng, Guizhou Province, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 117: 103308.
- [6] Mongelli G, Boni M, Oggiano G, et al. Critical metals distribution in Tethyan karst bauxite: The cretaceous italian ores[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86(3): 526–536.
- [7] Yang S J, Wang Q F, Deng J, et al. Genesis of karst bauxite-bearing sequences in Baofeng, Henan (China), and the distribution of critical metals[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 115: 103161.
- [8] Watari T, Nansai K, Nakajima K, et al. Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 155: 104669.
- [9] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189–1209.
- [10] 李晓娜. 盲区探“铝”拨开黔中深部找矿迷雾[N]. 中国矿业报, 2025-08-01, 001. DOI:10.28106/n.cnki.nckyb.2025.001497.
- [11] 刘添益, 刘江. 黔中石炭世维宪中晚期铝土矿深边部找矿预测方法厘定及运用: 以清镇汪家寨铝土矿为例, 中国会议, 2023.
- [12] 陈东廷, 达伟, 刘添益, 等. 黔中汪家寨铝土矿地质特征及找矿方向探讨[J]. 四川地质学报, 2025, 45(1): 69–74.
- [13] 陈东廷, 刘添益, 达伟, 等. 黔中汪家寨铝土矿矿石品位、厚度与埋深关系探讨[J]. 黑龙江国土资源, 2025, 23(5): 75–86.
- [14] 杨晓飞, 金中国, 肖宪国, 等. 黔中关上-汪家寨实现特大型隐伏铝土矿床找矿突破[J]. 地质与勘探, 2024, 60(4): 734.
- [15] 陈东廷, 达伟, 刘添益, 等. 黔中地区汪家寨铝土矿床地质特征及深部找矿预测[J]. 矿产与地质, 2025, 39(1): 32–41.
- [16] 陈东廷, 刘添益, 达伟, 等. 贵州汪家寨铝土矿地质特征及矿床成因探讨[J]. 四川地质学报, 2025, 45(2): 255–262.
- [17] 陶平, 曾昭光, 陈启飞, 等. 贵州省矿产资源潜力评价重要矿种区域成矿规律与矿产预测[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 2021.
- [18] 翁申富, 陈群, 韩忠华, 等. 中国矿产地质志·贵州卷·铝土矿[M]. 北京: 地质出版社. 2019.
- [19] 周洁, 王根厚, 吴春娇, 等. 滇东南铝土矿微量元素地球化学特征与成矿环境研究[J]. 矿物学报, 2013, 33(4): 497–502.
- [20] 柴大博. 贵州清镇荣祥铝土矿床地球化学特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [21] 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(4): 475–484.
- [22] 潘启权, 黄毅, 万大学. 贵州清镇长冲铝土矿矿体地质特征及矿床成因探讨[J]. 有色金属文摘, 2015, 30(5): 30–33.
- [23] 汪小勇, 王泽鹏, 潘启权, 等. 贵州修文比例坝铝土矿矿床地质地球化学特征及其意义[J]. 中国锰业, 2018, 36(3): 39–43.
- [24] 徐彬, 张华松, 陈建平, 等. 贵州旦坪铝土矿矿床地质特征及成因探讨[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(4): 570–579.
- [25] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[M]//Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- [26] 陈履安. 铝土矿形成过程中元素分异的实验研究[J]. 沉积学报, 1991, 9(4): 87–95.
- [27] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1984.
- [28] Haskin L A, Wildeman T R, Haskin M A. An accurate procedure for the determination of the rare earths by neutron activation[J]. *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 1968, 1(4): 337–348.
- [29] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976, 5(3): 167–174.

- [30] 陈代演, 王华. 贵州若干铝土矿床的稀土元素地球化学研究[J]. 贵州地质, 1997, 14(2): 132–144.
- [31] 叶霖, 程曾涛, 潘自平. 贵州修文小山坝铝土矿中稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(3): 228–233.
- [32] 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.
- [33] 金中国, 刘玲, 黄智龙, 等. 贵州务正道地区铝土矿床稀土元素组成及地质意义[J]. 地质与勘探, 2012, 48(6): 1067–1076.
- [34] Gu J, Huang Z L, Fan H P, et al. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Northern Guizhou Province, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 130: 44–59.
- [35] 黄智龙, 金中国, 向贤礼, 等. 黔北务正道铝土矿成矿理论及预测[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [36] Schroll E, Sauer D. Beiträge zur Geochemie von Titan, Chrom, Nickel, Cobalt, Vanadium und Molybden in bauxitischen Gesteinen und das Problem der stofflichen Herkunft des Aluminiums[J]. Travaux ICSOBA, 1968, 5: 83–96.
- [37] MacLean W H, Bonavia F F, Sanna G. Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: Evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia[J]. Mineralium Deposita, 1997, 32(6): 607–616.
- [38] Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, et al. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition[J]. Geology, 2016, 44(3): 231–234.
- [39] Ling K Y, Zhu X Q, Tang H S, et al. Mineralogical characteristics of the karstic bauxite deposits in the Xiuwen ore belt, Central Guizhou Province, Southwest China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65(9): 84–96.
- [40] 叶霖, 潘自平, 程曾涛. 贵州铝土矿中伴生元素综合利用前景[J]. 矿物学报, 2007, 27(3): 388–392.
- [41] 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.
- [42] 陈晓甫, 吴攀, 刘江, 等. 黔中蔡家坝铝土矿床微量元素特征及地质意义[J]. 地质科学, 2022, 57(3): 879–896.
- [43] 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.
- [44] Wang R X, Wang Q F, Huang Y X, et al. Combined tectonic and paleogeographic controls on the genesis of bauxite in the Early Carboniferous to Permian Central Yangtze Island[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 101: 468–480.
- [45] Wen J, Zhang Y X, Wen H J, et al. Gallium isotope fractionation in the Xiaoshanba bauxite deposit, central Guizhou Province, southwestern China[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 137: 104299.
- [46] Zarasvandi A, Carranza E J M, Ellahi S S. Geological, geochemical, and mineralogical characteristics of the Mandan and Deh-Now Bauxite deposits, Zagros Fold Belt, Iran[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 48(2): 125–138.
- [47] 王天顺, 付勇, 何伟, 等. 中国铝土矿碎屑锆石记录与物质来源分析[J]. 矿物学报, 2021, 41(S1): 558–569.
- [48] 邓新, 杨坤光, 刘彦良, 等. 黔中隆起性质及其构造演化[J]. 地学前缘, 2010, 17(3): 79–89.
- [49] 邓旭升, 杜远生, 余文超, 等. “黔中隆起”和贵州晚古生代古地理演化及其对铝土矿的控矿作用[J]. 古地理学报, 2020, 22(5): 872–892.
- [50] 吴祥和. 黔南泥盆-石炭系界线层序和海退事件[J]. 地层学杂志, 1986, 10, (3): 204–211.
- [51] 王俊达, 李华梅. 贵州石炭纪古纬度与铝土矿[J]. 地球化学, 1998, 27(6): 575–578.
- [52] 刘巽峰, 王庆生, 陈有能. 黔北铝土矿成矿地质特征及成矿规律[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1990.
- [53] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报, 1979, 7(2): 51–60.
- [54] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以汉江盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307–314.
- [55] 杜远生, 周琦, 金中国, 等. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式[J]. 古地理学报, 2014, 16(1): 1–8.
- [56] 余文超, 杜远生, 熊国林, 等. 中国铝土矿沉积中的碎屑锆石记录: 对铝土矿物源模式与矿床分类的启示[J]. 古地理学报, 2020, 22(5): 947–964.
- [57] 杜远生, 余文超. 沉积型铝土矿的陆表淋滤成矿作用: 兼论铝土矿床的成因分类[J]. 古地理学报, 2020, 22(5): 812–826.
- [58] Liu Y J, Li Z L, Wu Q Z, et al. Studies of melt inclusions in some basalts from Eastern China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1986, 5(2): 108–122.
- [59] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1/2/3/4): 111–129.
- [60] Rimmer S M. Geochemical palaeoredox indicators in Devonian–Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. Chemical Geology, 2004, 206(3/4): 373–391.
- [61] Elderfield H, Gieskes J M. Sr isotopes in interstitial waters of marine sediments from Deep Sea Drilling Project cores[J]. Nature, 1982, 300(5892): 493–497.
- [62] Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. Science, 1996, 272(5265): 1155–1158.
- [63] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as palaeoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12–32.
- [64] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 91–99.
- [65] 张威, 穆克华, 崔之久, 等. 云南拱王山地区全新世以来的环境变化记录[J]. 地球与环境, 2007, 35(4): 343–350.
- [66] 张天福, 孙立新, 张云, 等. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3454–3472.
- [67] Bárdossy G. Karst bauxites, bauxite deposits on carbonate rocks[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publication, 1982.
- [68] 《矿产资源工业要求参考手册》编委会. 矿产资源工业要求参考手册[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- [69] Sun L, Zhang S, Zhang S H, et al. Geologic characteristics and potential of bauxite in China[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 120: 103278.