

河北井陘地区铝土矿地质特征及成矿分析

——河北井陘地区本溪组铝土矿成因机制：来自地球化学与沉积环境的约束

姚莉¹, 鲍五堂², 庞志勇², 李澎², 徐博会^{1*}

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北省煤田地质勘查院(河北省非常规天然气勘查研究中心), 河北 邢台

收稿日期: 2026年3月6日; 录用日期: 2026年4月15日; 发布日期: 2026年4月27日

摘要

河北省井陘地区蕴藏着典型的“华北型”古风化壳沉积型铝土矿资源, 但其精细成矿规律与机理尚未得到充分揭示。本文以该区典型铝土矿床为研究对象, 通过系统的野外调查、钻孔岩心观察, 并结合X射线衍射(XRD)、电子探针(EPMA)、X射线荧光光谱(XRF)及电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等分析手段, 对矿石的矿物学与地球化学特征进行了综合研究。结果表明: (1) 矿体呈透镜状、似层状产出, 矿石矿物以一水硬铝石为主, 具致密块状和土状构造; (2) 综合地球化学证据表明, 该矿床形成于氧化环境下的强烈红土化风化过程: 主量元素揭示风化本质, 微量元素蛛网图的右倾趋势提供印证, 而轻稀土显著富集($\Sigma\text{REE} > 300 \text{ ppm}$)及 δ_{Ce} (1.13)、 δ_{Eu} (0.56)的异常特征则直接指示了氧化的成矿环境; (3) Sr/Cu值(0.96~35.37)与化学蚀变指数(CIA, 85~99)反映了其形成于热带-亚热带温暖湿润的气候背景; V/Cr比值(1.43~3.66)与Ni/Co比值(均值3.33)指示成矿主体形成于氧化环境, 期间存在阶段性贫氧过渡; Sr/Ba比值(0.36~4.04)指示成矿期环境以陆相为主导; (4) 铝土矿的物质来源以花岗质酸性岩的风化产物为主, 其成矿过程受奥陶系灰岩古岩溶风化及石炭纪海侵事件控制, 在潟湖环境中经沉积分异作用成矿。综合认为, 河北井陘地区铝土矿属于典型的沉积型矿床, 其成因与“山西式铁矿”、耐火黏土共生的“铁矿-铝土矿-黏土岩”垂向序列密切相关。

关键词

井陘, 本溪组G层铝土矿, 地球化学特征, 物质来源, 沉积环境, 成因机制

*通讯作者。

Geological Characteristics and Metallogenic Analysis of Bauxite Deposits in Jingxing Area, Hebei Province

—The Genetic Mechanism of Bauxite in Benxi Formation in Jingxing Area, Hebei Province: Constraints from Geochemistry and Sedimentary Environment

Li Yao¹, Wutang Bao², Zhiyong Pang², Peng Li², Bohui Xu^{1*}

¹School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Hebei Provincial Coal Geological Exploration Institute (Hebei Province Unconventional Natural Gas Exploration and Research Center), Xingtai Hebei

Received: March 6, 2026; accepted: April 15, 2026; published: April 27, 2026

Abstract

The Jingxing area in Hebei Province is rich in typical “North China type” weathered crustal sedimentary bauxite resources, but the detailed mineralization patterns and mechanisms of these resources have not yet been fully elucidated. This paper takes the typical bauxite deposit in this area as the research object. Through systematic field investigations, observation of drill core samples, and combined with X-ray diffraction (XRD), electron probe microanalysis (EPMA), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and other analytical methods, a comprehensive study was conducted on the mineralogical and geochemical characteristics of the ore. The results show that: (1) The ore body is lens-shaped and layered in its occurrence, and the ore minerals are mainly one water-alumina stone, with dense blocky and earthy structures. (2) Comprehensive geochemical evidence indicates that this deposit was formed during a strong redox weathering process under an oxidized environment: the major element data reveal the nature of the weathering, the rightward trend of the trace element spider plot provides confirmation, and the significant enrichment of light rare earth elements ($\Sigma\text{REE} > 300$ ppm) and the abnormal characteristics of δ_{Ce} (1.13) and δ_{Eu} (0.56) directly indicate the oxidized mineralization environment. (3) The Sr/Cu ratio (0.96-35.37) and the chemical alteration index (CIA, 85~99) indicate that it formed under a tropical-subtropical warm and humid climate background; the V/Cr ratio (1.43~3.66) and the Ni/Co ratio (mean 3.33) suggest that the main ore-forming process occurred in an oxidized environment, with intermittent periods of reduced oxygen content as a transition; the Sr/Ba ratio (0.36~4.04) indicates that the environmental dominance during the ore-forming period was mainly terrestrial. (4) The material source of bauxite mainly consists of the weathering products of granitic acidic rocks. The mineralization process is controlled by the ancient karstification of Ordovician limestone and the Cretaceous marine invasion events. It forms through sedimentary fractionation in a lagoon environment. In summary, the bauxite in Jingshen area of Hebei Province is a typical sedimentary-type deposit. Its formation is closely related to the “Shanxi-style iron ore” and the “iron ore-alumina ore-clay rock” vertical sequence that coexists with refractory clay.

Keywords

Jingxing, Bauxite in Layer G of the Benxi Formation, Geochemical Characteristics, Material Sources, Depositional Environment, Genesis Mechanism



1. 引言

铝土矿作为提炼金属铝的最主要原料，是重要的耐火材料和高铝水泥原料，被广泛应用于航空航天、建筑、交通等关键领域，其战略资源地位日益凸显[1][2]。随着新能源与高端制造业的快速发展，铝资源需求持续增长。然而，我国铝土矿资源以中低品位为主，资源保障形势严峻[3]。华北克拉通是我国极其重要的铝土矿蕴藏区，其中山西、河南、山东等地赋存的古风化壳沉积型铝土矿床规模大、经济价值高，具有举足轻重的地位。位于华北克拉通地台重要组成的河北省井陘地区，以其独特的大地构造位置和复杂的古地理格局，形成了具有区域特色的铝土矿资源，属典型的“华北型”铝土矿床[4]。

在铝土矿研究方面，国内外学者对喀斯特型铝土矿的成因模式、物质来源、古地理控制及地球化学行为等方面已构建了较为完善的理论体系。针对华北地区，尤其是山西、河南等地的石炭纪铝土矿，大量研究揭示了其形成于奥陶系碳酸盐岩古风化壳之上，并受晚古生代海侵作用控制的沉积成矿特征[5]-[12]。然而，对于井陘这一相对独立的成矿单元，系统性、精细化研究仍较为薄弱，其成矿规律与资源潜力亟待深入揭示。

本文以河北井陘地区典型铝土矿床为研究对象，通过系统的野外地质调查与室内综合分析相结合，剖析铝土矿及其围岩的地球化学特征(主量、微量、稀土元素)，示踪成矿物质来源，重建其成矿古地理环境，探讨成矿规律，构建该地区铝土矿的成矿模式。

2. 成矿背景概述

2.1. 大地构造位置

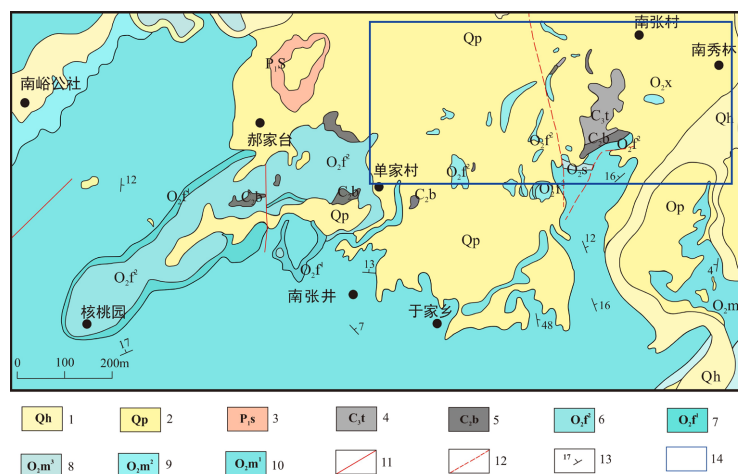


Figure 1. Regional structural geological map (adapted from Weibenzan *et al.*, 2025 [13]). 1-New Series; 2-Updated Series; 3-Lower Permian Shanxi Formation; 4-Upper Carboniferous Taiyuan Formation; 5-Middle Carboniferous Benxi Formation; 6-Middle Ordovician Fengfeng Formation Stage II; 7-Middle Ordovician Fengfeng Formation Stage I; 8-Middle Ordovician Majiagou Formation Stage III; 9-Middle Ordovician Majiagou Formation Stage II; 10-Lower Ordovician Majiagou Formation Stage I; 11-Measured fault; 12-Postulated fault; 13-Stratigraphic occurrence; 14-Study area

图 1. 区域构造地质图(引自魏本赞等, 2025 [13])。1-全新统; 2-更新统; 3-二叠系下统山西组; 4-石炭系上统太原组; 5-石炭系中统本溪组; 6-奥陶系中统峰峰组二段; 7-奥陶系中统峰峰组一段; 8-奥陶系中统马家沟组三段; 9-奥陶系中统马家沟组二段; 10-奥陶系中统马家沟组一段; 11-实测断层; 12-推测断层; 13-地层产状; 14-研究区

研究区位于太行山脉东麓的井陘盆地内，地处华北地台与太行山隆起带的过渡区域，属晋冀两省交界地带。该盆地是燕山运动和喜马拉雅运动作用下形成的断陷盆地，四周由奥陶系石灰岩低山或丘陵环绕，中部覆盖第四系黄土，是太行山区典型的山间盆地之一。在大地构造上，井陘盆地受华北克拉通构造演化控制，总体呈南北向延伸，长约 25 km，东西宽约 10 km。凤凰岭背斜横穿盆地中部，将其分为南北两部分，矿区主要分布于北部横涧一带(图 1)。

2.2. 矿体地质特征

井陘地区铝土矿体主要赋存于中石炭统本溪组底部的铁铝质泥岩中，与下伏中奥陶统峰峰组呈平行不整合接触[14][15]。区域上含矿层位较为稳定，铝土矿常与耐火黏土、铁矾土共(伴)生，三者形成于同一成矿地质背景。矿体多呈透镜状、扁豆状或似层状产于铁铝质泥岩中，含矿层数为 1~4 层，规模差异显著，长度一般为 10~1500 m，厚度通常介于 0~6.78 m。矿体产状与围岩一致，底板多为高铁黏土或铁矾土，顶板多为硬质黏土或半软质黏土，矿体与含矿层之间呈渐变过渡关系[9]。井陘地区铝土矿矿床地质特征表 1。

Table 1. Summary of geological characteristics of Bauxite Deposits in the Jingxing Region
表 1. 井陘地区铝土矿产地矿床地质特征简表

序号	产地名称	矿床规模	赋存层位	矿层代号	矿体代号	矿体规模			矿石类型	矿石品级	伴生矿产 耐火黏土	利用情况
						长度	厚度	埋深				
1	井陘高家庄	中型			扁豆状	150~350	0~5.05	-		II	中型	开采
2	井陘山北	小型			-	150~350	0~6.78	53.23		II	中型	开采
3	井陘赵村铺	小型	C ₂ b	G	扁豆状	150~350	0~2.75	-	一水型	II	中型	未采
4	井陘南关	中型			-	150~350	2~3.61	40~50	铝土矿	II	中型	开采
5	井陘南张村	中型			-	-	-	-	II	中型	开采	
6	井陘马峪	小型			-	100	1.72	-		II	中型	开采

2.3. 矿石特征

2.3.1. 矿石结构构造

河北地区铝土矿常见鲕状、豆状、致密块状及土块状构造，其中井陘地区以致密块状和土块状为主(图 2)。致密块状矿石质地均匀坚硬，由隐晶质硬水铝石紧密胶结，孔隙度低，形成于半封闭潟湖或局限海湾的还原环境，以化学沉积为主导；土块状矿石结构疏松、孔隙度高，易于捏碎，多发育于矿体表层或断裂带附近，是表生氧化淋滤及构造破碎改造的结果，体现了铝土矿作为“沉积红土”或“再沉积风化壳”的属性。

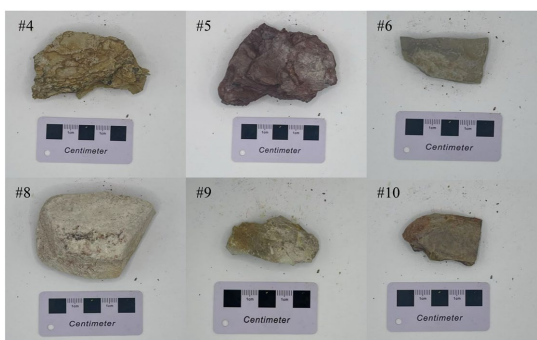


Figure 2. Macro photograph of the sample
图 2. 样品宏观照片

据观察，铝土矿顶、底板黏土岩中普遍发育水平层理及透镜状层理，这些沉积构造指示成矿期水体以静水为主、间歇性受潮汐或风暴影响的滨海潟湖环境，为铝土矿的堆积与分异提供了有利的沉积条件。

2.3.2. 矿石矿物组成

XRD 以及电子探针测试结果显示井陘地区铝土矿的矿石类型比较单一，其矿物组成主要包括含铝矿物、含硅矿物及含铁矿物三大类。含铝矿物以一水硬铝石($Al_2O_3 \cdot H_2O$)为主，部分样品中含有勃姆石($AlOOH$)；含硅矿物其主要成分是高岭石($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)其占比较高，其次为伊利石($K_{1.5}Al_4(Si_{6.5}Al_{1.5})O_{20}(OH)_4$)、石英(SiO_2)和锆石($ZrSiO_4$)等；含铁矿物主要为赤铁矿(Fe_2O_3)、纤铁矿($FeO(OH)$)和针铁矿($Fe_2O_3 \cdot H_2O$)；此外，矿石中还含有锐钛矿、金红石、方解石及白云母等矿物。其中锐钛矿是铝土矿中重要的钛氧化物(图 3，图 4)。

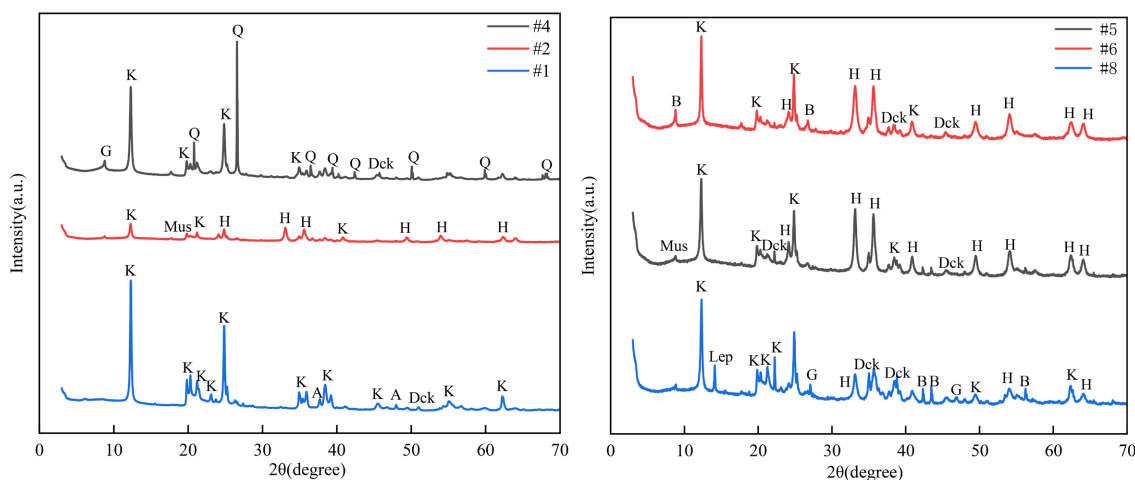


Figure 3. X-ray diffraction pattern of sample X from the Jingxing area
图 3. 井陘地区样品 X 衍射图谱

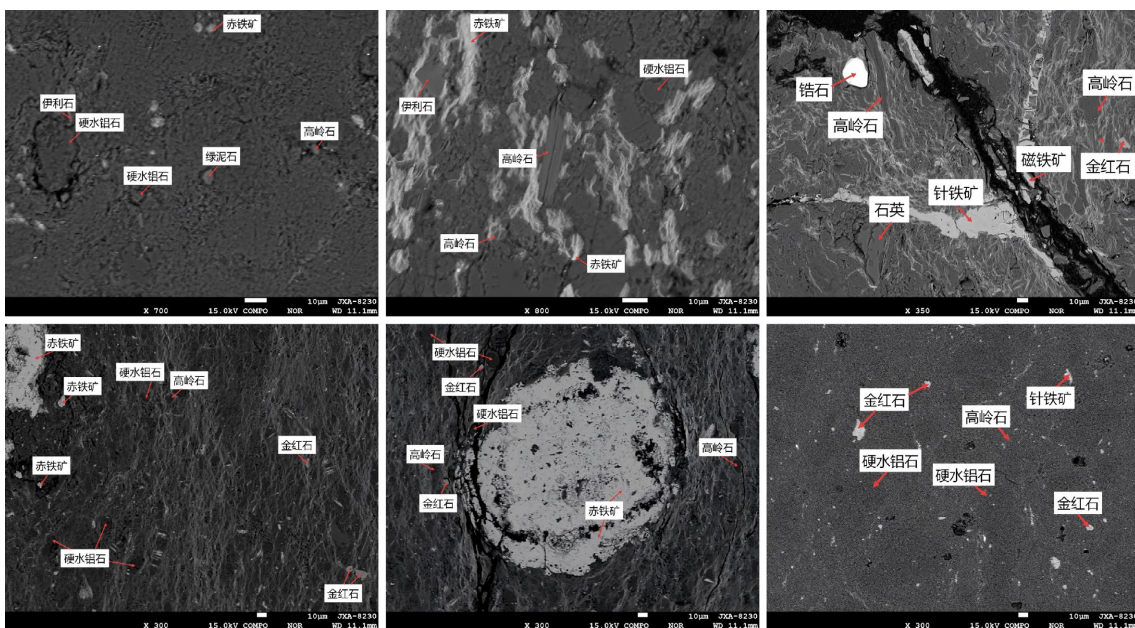


Figure 4. Electron probe microanalysis results for samples from the Jingxing Region
图 4. 井陘地区样品电子探针结果

3. 样品采集与测试方法

本研究在井陘县长河镇和南张村系统采集了 11 件代表性铝土矿样品。采集后于野外进行初步观察与宏观描述,详细记录各样品的岩性特征与编号,并密封保存。样品前处理阶段,取 1/3 原始样品,经制样粉碎机按预设程序研磨 5 分钟至均质化,通过 200 目标准筛弃粗颗粒,筛后粉末装入清洁干燥且标注原始编号的聚乙烯自封袋密封保存,同步完善管理记录,剩余 2/3 样品作为备份,存放于干燥避光、标识清晰的样品柜中,保持理化性质稳定,供后续复核或补充实验使用。

综合运用 X 射线衍射(XRD)与电子探针(EPMA)分析矿物种类。XRD 使用 Rigaku D/MaX-2200 型衍射仪(Cu 靶, $K\alpha$ 辐射, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, 40 kV/40mA),扫描范围 $5^\circ \sim 70^\circ (2\theta)$,步长 0.02° 。样品经粉末压片制样,所得图谱用 Jade6.5 软件比对 PDF 卡片进行物相鉴定。EPMA 使用 JXA-8230 型电子探针(加速电压 15 kV,束流 20 nA,束斑 $1 \sim 5 \mu\text{m}$),样品经薄片喷碳处理后,利用能谱(EDS)与波谱(WDS)进行微区化学成分定性与定量分析。

主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,仪器为 ARL Perform X4200 型。样品经 25 T 压力保压 1 分钟压制成圆片,使用铑(Rh)靶 X 光管(50 kV/50mA),通过标准曲线法定量。微量元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,仪器为 Thermo ICP-PRQ 型。称取 0.1 g 过 200 目样品,经 $\text{HNO}_3\text{-HF-HCl}$ 混合酸微波消解后赶酸定容。仪器功率 1550 W,以 Sc、Y、In、Bi 为内标校正基体效应,通过跳峰模式与多点校准曲线定量分析。

4. 地球化学特征

4.1. 主量元素

XRF 分析结果表明(表 2),研究区铝土矿在化学成分上呈现出显著的多样性和复杂性。样品中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 SiO_2 含量较高: Al_2O_3 含量介于 23.88%~40.48%之间,平均为 31.22%、属于中低品位矿石; Fe_2O_3 含量分布不均匀,变化范围为 0.93%~33.02%,平均为 13.31%; SiO_2 含量在 32.24%~65.37%之间,平均达 47.95%。据此可划分出高铝型、高铁型和高硅型三种矿石类型。碱金属和碱土金属氧化物(Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO)含量普遍较低,表明成矿过程经历了强烈的风化淋滤作用,活动性较强的元素已被大量带走。 TiO_2 含量相对稳定,平均含量为 1.24%。这些主量元素特征共同揭示了井陘铝土矿形成于强烈的红土化风化过程。

Table 2. Major element analysis results of Jingxing bauxite Mine (%)

表 2. 井陘铝土矿主量元素分析结果(%)

样品编号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11
Al_2O_3	40.48	29.89	40.46	23.88	31.86	27.94	24.57	36.18	33.69	26.9	27.62
SiO_2	46.52	33.97	46.67	65.37	33.23	32.24	64.79	33.43	54.16	56.04	61.06
Fe_2O_3	1.66	33.02	0.93	2.88	31.61	34.68	1.34	26.93	2.3	8.84	2.27
MgO	0.42	0.66	0.23	2.33	0.71	1.03	0.99	0.44	0.611	0.83	1.09
CaO	0.19	0.07	0.16	0.20	0.30	0.39	0.25	0.22	0.28	0.61	0.38
K_2O	0.33	1.56	/	3.83	0.84	2.01	2.9	0.67	1.07	1.22	2.21
MnO	/	0.003	0.056	0.01	0.04	0.06	0.005	0.05	0.006	0.003	0.004
TiO_2	2.26	1.25	1.35	0.95	0.99	1.13	0.96	1.41	1.43	0.99	0.923
P_2O_5	0.12	0.09	0.081	0.06	0.15	0.17	0.10	0.285	0.11	0.07	0.05

续表

A/S	0.87	0.88	0.87	0.37	0.96	0.87	0.38	1.08	0.62	0.48	0.45
ICV	0.12	1.23	0.07	0.44	1.08	1.41	0.27	0.82	0.17	0.47	0.25
CIA	98.90	94.43	99.79	85.44	97.43	93.29	88.03	98.19	96.28	94.94	91.94

4.2. 微量元素

ICP-MS 分析结果(表 3)显示, 元素 Zr、V、Sr、Li 和 Ba 的平均值明显高于其他元素, 其次 Cr、Ni、Cu、Rb 和 Pb 的平均值也相对较高。

从元素分布特征来看, 大离子亲石元素(LILE)呈现局部富集, 整体分异的特点。所有样品中 Pb 含量均高于地壳均值(12.5×10^{-6}), 呈现普遍富集状态; 元素 Sr(地壳均值: 375×10^{-6})仅在#8 样品显著高于均值, 其余样品普遍亏损; Ba(地壳均值: 425×10^{-6})所有样品均低于均值, 处于亏损状态。高场强元素(HFSE)普遍富集, 所有 HFSE(尤其 Zr、Hf、Nb、Th)含量均显著高于地壳均值, 符合铝土矿风化残留富集特征。原始地幔标准化蛛网图(图 5), 整体呈现右倾趋势。

Table 3. Trace element analysis results of bauxite in Jingxing Region (10^{-6})

表 3. 井陘地区铝土矿微量元素分析结果(10^{-6})

样品编号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11
Li	313.85	114.45	138.35	9.42	196.95	134.85	9.95	352.36	16.09	41.05	35.57
Be	3.60	3.54	1.63	2.84	8.24	7.57	2.00	10.37	1.71	1.55	1.65
Sc	7.28	12.40	7.38	6.48	10.03	11.50	4.85	15.46	8.13	5.72	5.44
V	222.19	241.32	149.82	240.54	133.18	248.08	131.80	233.68	132.57	142.20	154.46
Cr	85.21	133.42	68.88	65.65	92.91	122.34	56.86	78.86	64.52	55.35	56.63
Co	8.45	6.60	9.14	11.30	47.07	83.07	4.76	25.62	5.62	3.15	2.17
Ni	57.29	34.01	14.95	29.58	106.49	120.01	13.24	85.78	22.31	25.17	15.70
Cu	61.58	27.16	12.09	61.57	76.54	106.51	22.73	16.12	7.87	41.36	18.40
Zn	14.04	111.45	7.81	31.53	48.56	47.33	41.42	36.82	9.68	20.63	18.53
Ga	19.37	30.60	18.08	11.94	26.02	33.84	11.98	23.54	13.89	16.74	11.79
Rb	12.37	53.43	1.44	80.13	20.88	30.74	114.68	20.91	35.69	44.71	81.69
Sr	127.84	126.05	32.00	59.36	281.04	210.19	71.55	570.25	103.33	74.58	59.26
Y	23.70	33.09	16.07	30.76	40.55	56.92	45.62	34.51	18.50	12.18	13.45
Zr	702.68	282.39	429.79	257.12	267.58	413.77	221.13	389.76	305.27	229.70	236.97
Nb	13.66	27.76	29.57	17.94	30.07	64.44	16.73	39.79	22.13	14.99	15.17
In	0.15	0.22	0.11	0.10	0.15	0.14	0.08	0.16	0.06	0.06	0.08
Mo	0.31	0.89	0.56	2.16	1.18	2.48	0.28	1.90	0.96	8.17	1.18
Cd	0.58	0.30	0.41	0.37	0.31	0.51	0.20	0.42	0.29	0.34	0.24
Cs	1.86	4.93	0.11	8.63	2.15	2.84	7.80	1.55	3.13	4.26	9.58
Ba	31.61	182.20	58.59	144.55	96.92	192.80	198.75	104.42	75.47	119.70	109.91
Hf	18.59	7.53	11.05	6.34	6.93	9.75	5.86	10.01	7.91	6.36	6.28

续表

Ta	0.45	1.95	1.35	1.17	2.05	4.02	1.15	2.69	1.23	0.97	1.02
Pb	47.33	82.01	24.39	29.43	25.74	110.99	28.37	28.67	35.04	83.06	32.09
Bi	1.44	0.74	0.64	0.53	0.77	0.70	0.44	1.03	0.65	0.43	0.45
Th	31.72	23.64	17.85	15.84	21.50	31.19	15.82	30.93	19.96	9.38	14.47
U	19.46	9.74	11.54	6.79	7.20	12.18	4.20	11.97	7.24	10.88	5.49
V/Cr	2.61	1.81	2.18	3.66	1.43	2.03	2.32	2.96	2.05	2.57	2.73
Ni/Co	6.78	5.16	1.64	2.62	2.26	1.44	2.78	3.35	3.97	7.99	7.23
Sr/Cu	2.08	4.64	2.65	0.96	3.67	1.97	3.15	35.37	13.13	1.80	3.22
Sr/Ba	4.04	0.69	0.55	0.41	2.90	1.09	0.36	5.46	1.37	0.62	0.54

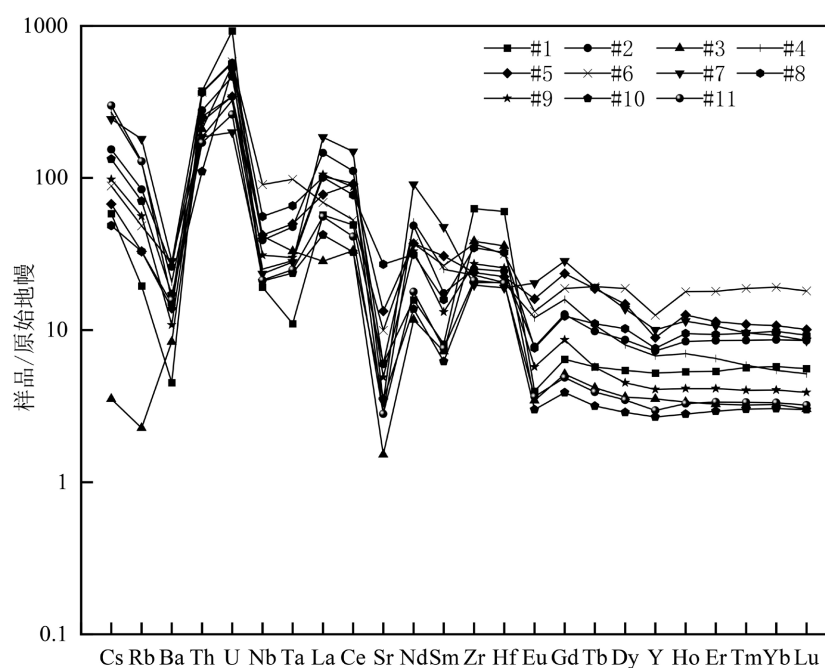


Figure 5. Trace element primitive mantle spider diagram for the study area
图 5. 研究区微量元素原始地幔蛛网图

4.3. 稀土元素

井陘地区铝土矿展现出较为显著的稀土元素富集的特征(表 4)。其稀土元素的总量(Σ REE)较高(平均为 327.38 ppm, 最高达 663.16 ppm), 超出了全球铝土矿的平均水平, 表明该矿床具有重要的伴生稀土资源能力。高 LREE/HREE 比值以及轻稀土标准化整体 > 1 (图 6), 呈现出了强烈的轻稀土富集。 La_N/Yb_N 比值直接反映了轻稀土(LREE)内部的分馏程度, 高比值表明 LREE 强烈分馏, La 相对 Sm 显著富集。 Gd_N/Yb_N 比值是揭示重稀土(HREE)分馏行为的关键参数, 比值越小, 重稀土富集程度越高[16]。从表 2 中可以看出 La_N/Yb_N 比值的范围在 3.39~24.56 之间, 多数样品的比值 > 10 , Gd_N/Yb_N 比值的范围在 0.96~3.01, 平均为 1.73, 进一步表明研究区铝土矿中稀土元素总体特征为轻稀土富集、轻稀土的分馏程度大于重稀土。样品中铈呈现出明显的负异常, 铈呈现出明显的正异常。这一特征指示铝土矿的风化过程中处于氧化环境, 铈正异常反应 Ce^{3+} 在氧化条件下被氧化为 Ce^{4+} 并沉淀富集。

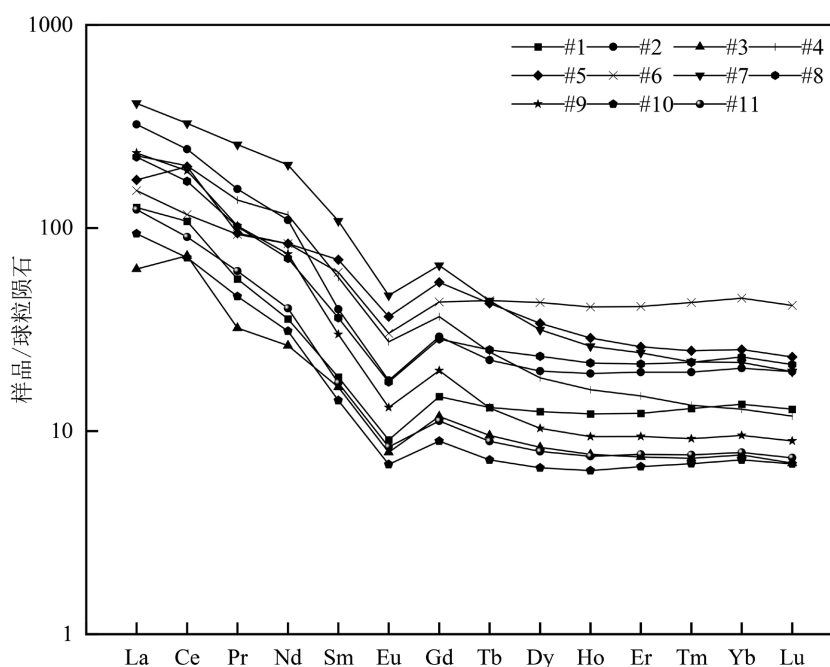


Figure 6. Standardized distribution pattern of rare earth elements in chondritic meteorites
图 6. 稀土元素球粒陨石标准化分布模式图

Table 4. Analysis results of rare earth elements in bauxite from Jingxing Region (10^{-6})
表 4. 井陘地区铝土矿稀土元素分析结果(10^{-6})

样品编号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11
La	39.13	100.41	19.46	70.28	53.46	47.41	127.31	69.39	72.50	29.05	38.23
Ce	87.19	197.30	58.95	163.61	161.96	94.03	264.68	137.37	154.63	57.77	73.05
Pr	6.85	18.97	3.93	16.75	11.51	11.34	31.42	12.38	12.49	5.61	7.49
Nd	21.38	65.68	15.81	69.57	50.26	50.25	122.66	42.54	44.68	18.63	24.15
Sm	3.60	7.76	3.21	11.14	13.61	11.80	21.13	7.05	5.84	2.76	3.36
Eu	0.67	1.31	0.58	2.02	2.69	2.23	3.42	1.28	0.96	0.50	0.61
Gd	3.83	7.56	3.06	9.49	13.99	11.20	16.96	7.36	5.14	2.31	2.91
Tb	0.62	1.06	0.45	1.16	2.02	2.08	2.08	1.19	0.62	0.34	0.42
Dy	4.01	6.36	2.68	5.89	10.92	13.85	10.16	7.52	3.32	2.12	2.56
样品编号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11
Ho	0.87	1.38	0.55	1.15	2.06	2.93	1.88	1.55	0.67	0.46	0.54
Er	2.57	4.09	1.57	3.13	5.46	8.62	5.10	4.49	1.98	1.40	1.61
Tm	0.42	0.63	0.24	0.43	0.81	1.39	0.71	0.71	0.30	0.22	0.25
Yb	2.84	4.26	1.60	2.68	5.27	9.42	4.55	4.85	1.99	1.51	1.64
Lu	0.41	0.63	0.22	0.38	0.75	1.34	0.63	0.68	0.29	0.22	0.24
Sc	7.28	12.40	7.38	6.48	10.03	11.50	4.85	15.46	8.13	5.72	5.44
Y	23.70	33.09	16.07	30.76	40.55	56.92	45.62	34.51	18.50	12.18	13.45

续表

Σ REE	205.37	462.89	135.76	394.92	385.35	336.31	663.16	348.33	332.04	140.8	175.95
Σ LREE	158.82	391.43	101.94	333.37	293.49	217.06	570.62	270.01	291.1	114.32	146.89
Σ HREE	46.55	71.46	33.82	61.55	91.86	119.25	92.54	78.32	40.94	26.48	29.06
L/H	3.41	5.48	3.01	5.42	3.19	1.82	6.17	3.45	7.11	4.32	5.05
La _N /Yb _N	9.29	15.89	8.20	17.68	6.84	3.39	18.86	9.65	24.56	12.97	15.72
Gd _N /Yb _N	1.09	1.43	1.55	2.86	2.14	0.96	3.01	1.23	2.08	1.24	1.43
δ_{Eu}	0.55	0.52	0.56	0.59	0.59	0.58	0.54	0.54	0.52	0.59	0.58
δ_{Ce}	1.18	1.02	1.54	1.11	1.50	0.95	0.98	1.05	1.14	1.02	0.98

稀土元素配分模式(REE Patterns)是示踪其地球化学行为及成岩成矿过程的关键指标[17][18]。由图6可以看出,所有样品整体展现出了显著的右倾趋势,所有样品均呈现LREE富集、HREE平坦的配分模式((La/Yb)_N > 1),表明成矿过程中LREE相对于HREE强烈富集,Eu显示明显的负异常。

5. 矿床成因机制

5.1. 成矿物质来源

沉积岩在成岩过程中经历的搬运、分选与富集作用,使其微量和稀土元素(REE)组成成为追溯源区母岩岩性的重要地球化学指标[19][20]。在Th/Sc-Zr/Sc判别图(图7(a)),样品主要落入花岗岩区域,仅少数落在玄武岩区域。同时,井陘铝土矿样品整体呈现出轻稀土富集并伴有Eu负异常的特征(表4),这与钙质泥岩、大洋拉斑玄武岩等基性岩的平坦稀土配分模式明显不同。在La/Sc-Th/Co判别图中(图7(b)),所有样品均集中分布在酸性岩区域(La/Sc值约10¹, Th/Co值约10⁰~10¹),无样品落入基性岩区域。两图共同证实了成矿物质来源为花岗质酸性岩,共同表明研究区成矿物质主要来源于花岗质酸性岩,证实河北井陘地区本溪组G层铝土矿主要由花岗质酸性岩的风化产物经沉积形成。

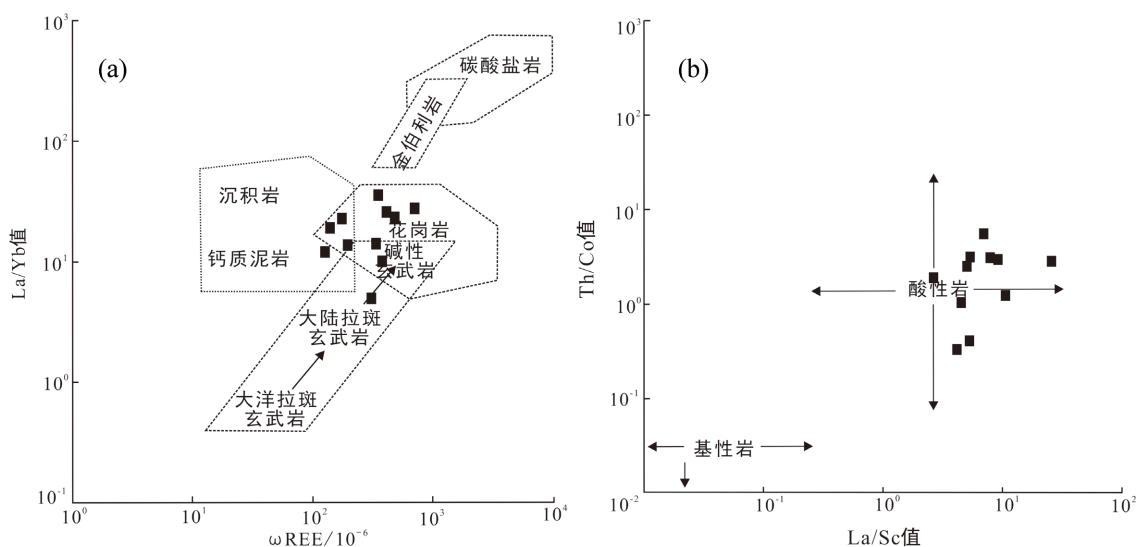


Figure 7. Diagrammatic representation of rock type discrimination in the Benxi formation source area. (a) ω REE-La/Yb diagram (base map adapted from [21]); (b) La/Sc-Th/Co diagram (base map adapted from [22])

图 7. 本溪组物源区岩石类型判别图解。(a) ω REE-La/Yb 图解(底图引自文献[21]) (b)La/Sc-Th/Co 图解(底图引自文献[22])

5.2. 沉积环境分析

5.2.1. 古气候判别

Sr/Cu 比值是反映古气候条件的有效指标, 通常认为比值介于 1.3~5.0 指示湿润气候, 大于 5.0 则反映干热气候[23]。表 3 分析结果显示研究区样品的 Sr/Cu 值位于 0.96~35.37 之间, 表征成矿期间井陘地区曾为温湿 - 干热气候, 其化学蚀变指数 CIA 介于 85.44~99.79, 大多数都超过了 90(表 2), 从而进一步表明了铝土矿形成于热带 - 亚热带的气候环境中。该时期井陘地区的气候以高温、高湿度及充沛降雨为特征, 非常有利于原始岩石的红土化作用以及黏土矿物的铝化作用的进行[24], 最终促进了铝土矿矿床的形成。

5.2.2. 氧化还原条件

① V/Cr 和 Ni/Co 比值

V/Cr 与 Ni/Co 比值是判别氧化还原条件的有效指标[25]。当 Ni/Co > 7.0 时, 指示缺氧还原环境, 当 Ni/Co 位于 5.0~7.0 之间, 指示贫氧过渡环境, 当 Ni/Co < 5.0 时, 指示富氧氧化环境[25]。研究区样品 V/Cr 比值介于 1.43~3.66 之间(表 3), 其中大于 2.0 者指示贫氧的过渡环境, 多与海侵影响下的海陆交互作用有关, 但整体仍以氧化环境为主。同时, Ni/Co 比值的均值为 3.33, 亦符合氧化环境特征。综合表明, 井陘地区本溪组 G 层铝土矿主体形成于氧化环境, 沉积过程中受海侵影响出现阶段性贫氧的过渡环境。

② δ_{Eu} 和 δ_{Ce}

δ_{Eu} 和 δ_{Ce} 的值也是有效判别铝土矿氧化还原条件的重要指标。 δ_{Ce} 均值为 1.13, 整体均大于 1(表 4), 呈现出正异常, Ce 的富集直接反映了沉积时期的氧化条件; δ_{Eu} 的均值为 0.56, 整体均小于 1, 呈现出负异常, 而 Eu 的亏损则可能主要继承了富长石母岩的特征, 并进一步印证了其成矿期间处于氧化环境中。两者共同佐证了井陘地区本溪组 G 层铝土矿在成矿期处于氧化环境中的结论, 该结果与上文分析结果相一致。

5.2.3. 古盐度判别

锶钡比值(Sr/Ba)常用于恢复古水体盐度[26]。井陘地区 11 个铝土矿样品中, 5 个样品的 Sr/Ba > 1(海相), 3 个样品的 Sr/Ba 比值介于 0.6~1 之间(过渡相), 6 个样品的 Sr/Ba < 1(陆相)。这表明成矿期沉积环境以陆相为主, 兼具过渡相与海相特征, 反映本溪组 G 层铝土矿形成于受地形、海侵进退及陆源输入影响的滨海 - 浅海环境, 属海陆交互作用背景下的沉积产物。

Table 6. Discrimination criteria for trace elements in ancient salinity (10^{-6}) [27] [28]

表 6. 古盐度微量元素判别指标(10^{-6}) [27] [28]

沉积相	Sr	Ba	Sr/Ba
陆相	<60	<300	<1
过渡相	60~160	300~400	0.6~1
海相	>160	>400	>1

5.2.4. 氧化还原与古盐度的耦合关系

为进一步揭示氧化还原条件与古盐度的协同关系, 将 V/Cr 与 Sr/Ba 比值联合投图(图 8)。结果显示, 11 个样品未呈现简单线性正相关, 分布复杂: Sr/Ba < 1 的 6 件样品中, 5 件 V/Cr > 2.0(贫氧区间), 仅#2 符合陆相氧化环境; Sr/Ba > 1 的 5 件样品中, #1、#6、#8、#9 的 V/Cr > 2.0(海相贫氧), #5 的 V/Cr < 2.0(海相氧化)。这一“矛盾”可能由多种因素导致: Sr/Ba < 1 的样品可能形成于受淡水影响的局限潟湖或沼泽, 水体滞留致底层贫氧, 造成 V/Cr 偏高而 Sr/Ba 偏低; 成岩过程中有机质分解及黏土矿物转化可能使 V 相对富集; 本溪组沉积期海侵频繁, 早期陆相沉积受后期贫氧孔隙水影响; 此外, 物源区花岗质岩石 V/Cr 背景

值较高, 可能在风化搬运中部分继承。综合来看, V/Cr 与 Sr/Ba 的耦合关系揭示了井陘地区铝土矿沉积环境并非简单的“陆相氧化或海相贫氧”模式, 而是经历了复杂的海陆交互作用及后期成岩改造。

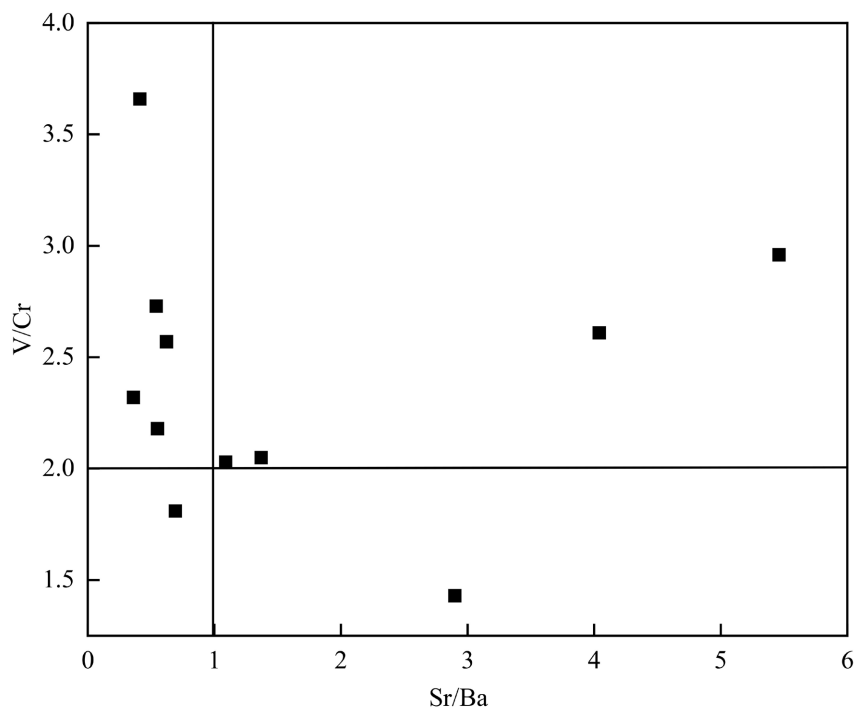


Figure 8. V/Cr-Sr/Ba plot for bauxite in the Jingxing area
图 8. 井陘地区铝土矿 V/Cr-Sr/Ba 交汇图

5.3. 成因探讨

早期的研究中, 国内外学者对喀斯特型铝土矿的成因提出了多种观点, 主要包括化学沉积学说、变质学说、红土化学说、钙红土学说、红土-沉积碎屑岩学说以及碎屑-胶体混合沉积多因复合成因学说等[29]。

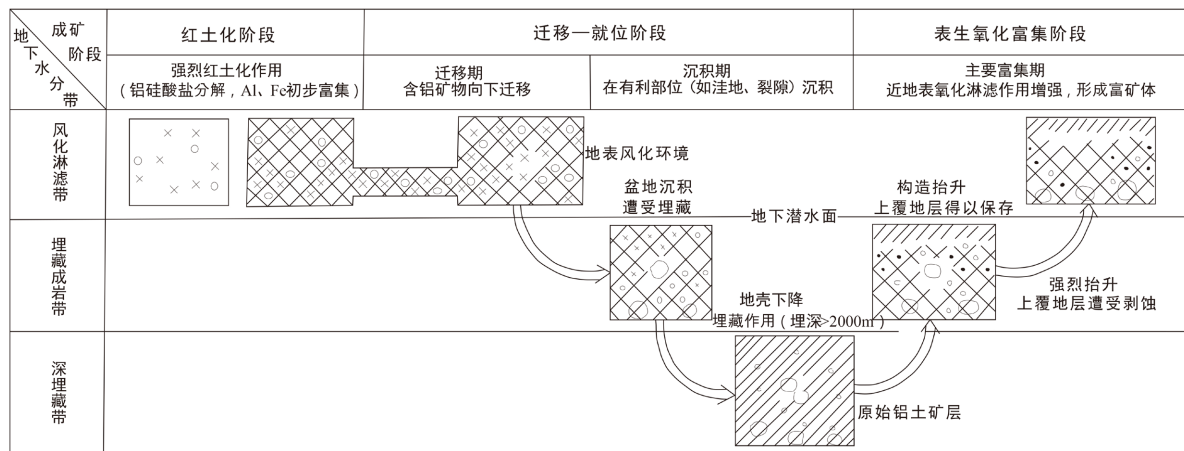


Figure 9. Bauxite mineralization model diagram (Modified from Zhang Liang, 2012 [31])
图 9. 铝土矿成矿模式图(据张亮, 2012 [31]修改)

加里东运动使华北地区抬升, 早古生代碳酸盐岩与前震旦纪变质岩经历长期风化, 其中奥陶系马家沟组灰岩风化剥蚀期达 1.4 亿年[30]。在温湿至干热气候下, 井陘地区灰岩及周缘古陆铝硅酸盐岩发生红土化, Si、Ca、Mg 等易溶元素淋失, Al、Fe、Ti 等难溶元素富集, 形成富铝铁红色风化壳。中石炭世海侵成为成矿转折: 海水侵入为风化产物提供搬运介质与沉积空间[29], 红土化物质被短途搬运至滨海半封闭潟湖环境, 在水动力微弱且具还原性条件下, 下部氧化环境沉淀赤铁矿层(“山西式铁矿”), 上部则堆积形成 G 层铝土矿主体, 古岩溶洼地严格控矿, 使矿体呈透镜状展布, 厚度与洼地深度正相关。

综上所述, 河北井陘地区本溪组 G 层铝土矿的矿床成因属于典型的古风化壳沉积型成矿模式, 是漫长地质历史中多因素协同作用的结果。该矿床以“红土沉积粗粒碎屑岩型学说”为最主要的成因模型, 同时兼具“碎屑胶体混合沉积多因型学说”的特点。成矿模式图如图 9。

6. 结论

(1) 河北井陘地区本溪组 G 层铝土矿属于中低品位矿石, 主要矿物为一水硬铝石、高岭石及赤铁矿等。地球化学特征综合表明, 其成矿物质主要源自华北古老地块的花岗质酸性岩风化产物, 稀土元素配分模式(LREE 富集、Eu 负异常)进一步佐证了这一来源。

(2) 成矿期沉积环境分析表明, 矿床形成于热带-亚热带温暖湿润至干热的古气候条件下, 强烈的化学风化(高 CIA 值)促进了红土化作用。地球化学指标(V/Cr、Ni/Co、 δ_{Cc})一致指示主体为氧化环境, Sr/Ba 比值则揭示了海陆交互的沉积背景, 中石炭世海侵是导致风化物质再搬运和沉积成矿的关键地质事件。

(3) 井陘铝土矿的成因可概括为典型的古风化壳沉积型矿床。其成矿模式始于加里东运动后长期的陆上红土化阶段, 形成富铝铁风化壳; 随后中石炭世海侵将风化产物搬运至滨海半封闭潟湖, 在弱水动力条件下经机械堆积与化学分异最终成矿, 矿体形态受古岩溶洼地控制。该模式综合了“红土沉积”与“碎屑-胶体混合沉积”的复合成因特点, 系统揭示了研究区铝土矿的形成机制。

基金项目

河北省煤田地质局公共财政专项资金基金项目(13000025P00B04410112E); 自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(ZKKJ202403-4)。

参考文献

- [1] 王斌峰. 山西霍西-河东地区铝土矿地质特征及找矿前景[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 华北理工大学, 2018.
- [2] 王文鹏. 桂西二叠纪铝土矿地质特征与成矿物质来源[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [3] 管涛. 豫西仁村铝土矿成因研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [4] 蔡书慧. 华北克拉通石炭系铝土矿碎屑锆石年代学及其意义[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [5] 赵利华. 豫西晚石炭世喀斯特型铝土矿成因[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [6] 高兰, 王登红, 熊晓云, 等. 中国铝土矿资源特征及潜力分析[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 853-863.
- [7] 吴国炎. 华北铝土矿的物质来源及成矿模式探讨[J]. 河南地质, 1997(3): 2-7.
- [8] 王庆飞, 邓军, 刘学飞, 等. 铝土矿地质与成因研究进展[J]. 地质与勘探, 2012, 48(3): 430-448.
- [9] 刘蕾, 刘学飞, 马遥, 等. 华北石炭纪艾雨头大型喀斯特铝土矿成因机制研究[J]. 岩石学报, 2023, 39(2): 621-637.
- [10] 马建胜, 王帅. 我国铝土矿分类、特征与成因研究[J]. 硅谷, 2014, 7(17): 152-153.
- [11] 侯莹玲. 中国喀斯特型铝土矿的地质特征与成矿物质源研究的思考[J]. 低碳世界, 2022, 12(1): 126-128+132.
- [12] 吴振寰. 喀斯特型铝土矿床的特征与形成[J]. 地质与勘探, 1984(1): 57-63.
- [13] 魏本赞, 卢辉雄, 李瑞炜, 等. 冀西井陘地区奥陶系马家沟组灰岩地质特征及综合利用模式[J]. 地质学刊, 2026,

50(1): 23-29.

- [14] 李军. 齐家庄铝土矿地质特征及矿床成因分析[J]. 华北自然资源, 2019(4): 18-20.
- [15] 李彦华, 佟文剑, 王婧. 河北省铝土矿资源现状及潜力分析[J]. 甘肃科技, 2019, 35(6): 14-15.
- [16] 刘平, 廖友常, 韩忠华, 等. 黔中-渝南铝土矿含矿岩系稀土元素地球化学特征[J]. 贵州地质, 2019, 36(1): 1-9.
- [17] 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展, 1999(2): 63-66.
- [18] 刘平, 韩忠华, 廖友常, 等. 黔中-渝南铝土矿含矿岩系微量元素区域分布特征及物质来源探讨[J]. 贵州地质, 2020, 37(1): 1-13.
- [19] 刘海鹏, 陈磊, 李军旗, 等. 河南省新安县石寺-北冶地区铝土矿地球化学特征及成矿物质来源探讨[J]. 地质与勘探, 2022, 58(2): 247-257.
- [20] 李治海. 铝土矿地质与成因分析[J]. 世界有色金属, 2022(22): 105-107.
- [21] Allègre, C.J. and Minster, J.F. (1978) Quantitative Models of Trace Element Behavior in Magmatic Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, **38**, 1-25. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(78\)90123-1](https://doi.org/10.1016/0012-821x(78)90123-1)
- [22] 张英利, 陈雷, 王坤明, 等. 豫西巩义地区上石炭统本溪组泥岩地球化学和富锂特征及其控制因素[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 208-226.
- [23] 王随继, 黄杏珍, 妥进才, 等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 1997(1): 66-71.
- [24] 陈勇, 冯阳光, 董化祥, 等. 河南省淅川县关底沃地区铝土矿床地质特征及矿床成因研究[J]. 矿产勘查, 2024, 15(S2): 432-438.
- [25] 阚子燕. 桂西德保二叠纪铝土矿的成矿环境研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2023.
- [26] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 405-414.
- [27] 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.
- [28] 韦访, 周辉, 李活松, 等. 广西靖西三合沉积铝土矿成矿环境研究[J]. 贵州地质, 2022, 39(4): 342-352.
- [29] 高天祥. 山西北部宁武县铝土矿成因研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [30] 郭政斌, 王浩乾, 刘安, 等. 山西孟县王子台-南小坪铝土矿矿床地质特征及其成因分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2020(3): 29-31.
- [31] 张亮. 山西孝义西部铝土矿地质特征与矿床成因[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2012.