

冀东唐山赵各庄本溪组含铝岩系地球化学特征及成矿物质来源

陈雪超¹, 庞志勇², 李 澎², 苏 野³, 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河北省煤田地质局勘查院(河北省非常规天然气勘查研究中心), 河北 邢台

³河北省煤田地质局第二地质队(河北干热岩研究中心), 河北 邢台

收稿日期: 2026年2月10日; 录用日期: 2026年3月10日; 发布日期: 2026年3月19日

摘 要

随着全球资源竞争的加剧, 矿产资源越发的重要。掌握各种矿产的资源状况有助于在国际资源博弈中占据有利地位, 保障国家的资源安全。金属铝具有密度小、导电性好、抗腐蚀性强的特点, 甚至可以广泛应用到航空航天领域。我国铝土矿主要集中于山西省与河南省地区, 针对河北地区含铝岩系调查研究较为薄弱, 即便发现了铝土资源也仅仅处于研究阶段, 很大程度上限制了河北省整体铝土资源的找矿勘察与开发利用, 本文针对这种情况对冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系展开研究。本论文主要通过X射线衍射实验(XRF)和电感耦合等离子体质谱分析技术(ICP-MS)对主微量元素进行测定得到了以下结论: (1) 通过X射线衍射实验(XRF)得知该地区含铝岩系主要的矿物组成为石英、高岭石、伊利石和钛矿物。(2) 通过主量元素 $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ 三角图解可知冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系主要是以高岭土化作用的铝土质高岭石为主。(3) 根据样品可知冀东唐山赵各庄地区稀土总量变化大, 轻稀土较重稀土富集, 重稀土呈现部分亏损。较为轻微的 δCe 正异常, 较为明显的 δEu 负异常。(4) 根据 $(La/Yb)_N-\Sigma REE$ 图解、 $Eu/Eu^*-TiO_2/Al_2O_3$ 图解、 $Th-Hf-Co$ 图解和 $Zr-Cr-Ga$ 图解综合分析显示赵各庄地区本溪组含铝岩系的成矿物质来源主要是中酸性花岗岩风化而成。(5) 通过 Sr/Ba 、 Sr/Cu 、 U/Th 、 V/Cr 和 Ni/Co 的比值可以得出赵各庄地区本溪组含铝岩系的成矿环境主要为湿润气候, 来自富氧环境的陆相沉积, 最终形成的冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系。

关键词

冀东, 含铝岩系, 地球化学特征, 成矿物质来源, 成矿环境

Geochemical Characteristics and Ore-Forming Material Sources of the Aluminum-Bearing Rock Series of Benxi Formation in Zhaogezhuang, Tangshan, Eastern Hebei

*通讯作者。

文章引用: 陈雪超, 庞志勇, 李澎, 苏野, 徐博会. 冀东唐山赵各庄本溪组含铝岩系地球化学特征及成矿物质来源[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(3): 383-397. DOI: 10.12677/ag.2026.163035

Xuechao Chen¹, Zhiyong Pang², Peng Li², Ye Su³, 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

³No. 2 Exploration Team, Hebei Bureau of Coal Geological Exploration (Hebei Province Hot Dry Rock Research Center), Xingtai Hebei

Received: February 10, 2026; accepted: March 10, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

With the intensification of global resource competition, mineral resources have become increasingly important. Mastering the resource status of various minerals helps to gain an advantageous position in the international resource game and ensure national resource security. Aluminum metal has the characteristics of low density, good electrical conductivity, and strong corrosion resistance, and can even be widely used in the aerospace field. In China, bauxite mines are mainly concentrated in Shanxi Province and Henan Province. The investigation and research on aluminum-bearing rock series in Hebei Province are relatively weak. Even if bauxite resources are discovered, they are only in the research stage, which greatly limits the prospecting, exploration, and development and utilization of bauxite resources in Hebei Province as a whole. In response to this situation, this paper conducts research on the aluminum-bearing rock series of the Benxi Formation in the Zhaogezhuang area of Tangshan, eastern Hebei. This thesis mainly measures the major and trace elements through X-ray diffraction experiment (XRF) and inductively coupled plasma mass spectrometry analysis technology (ICP-MS), and the following conclusions are obtained: (1) Through the X-ray diffraction experiment (XRF), it is known that the main mineral components of the aluminum-bearing rock series in this area are quartz, kaolinite, illite, and titanium minerals. (2) From the triangular diagram of major elements Al_2O_3 - SiO_2 - Fe_2O_3 , it can be seen that the aluminum-bearing rock series of the Benxi Formation in the Zhaogezhuang area of Tangshan, eastern Hebei, is mainly composed of argillaceous kaolinite formed by kaolinization. (3) According to the samples, the total amount of rare earth elements in the Zhaogezhuang area of Tangshan, eastern Hebei, varies greatly. Light rare earth elements are more enriched than heavy rare earth elements, and heavy rare earth elements show partial depletion. There is a relatively slight positive δCe anomaly and a relatively obvious negative δEu anomaly. (4) Comprehensive analysis based on the $(La/Yb)_N$ - ΣREE diagram, Eu/Eu^* - TiO_2/Al_2O_3 diagram, Th-Hf-Co diagram, and Zr-Cr-Ga diagram shows that the ore-forming materials of the aluminum-bearing rock series of the Benxi Formation in the Zhaogezhuang area are mainly derived from the weathering of intermediate - acid granite. (5) From the ratios of Sr/Ba, Sr/Cu, U/Th, V/Cr, and Ni/Co, it can be concluded that the ore-forming environment of the aluminum-bearing rock series of the Benxi Formation in the Zhaogezhuang area is mainly a humid climate, a continental deposit from an oxygen-rich environment, and finally the aluminum-bearing rock series of the Benxi Formation in the Zhaogezhuang area of Tangshan, eastern Hebei, was formed.

Keywords

Eastern Hebei, Bauxite, Geochemical Characteristics, Ore-Forming Material Sources, Metallogenic Environment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着全球资源竞争的加剧,矿产资源越发的重要,铝土矿产是一种重要的矿产资源,由于我国铝土矿产主要赋存于山西、河南、广西、贵州等地[1]。于是针对上述地区的研究更为深入,但河北省同样是矿产资源大省,河北省的煤炭、铁矿、耐火粘土等矿产资源储量丰富[2][3]。但是针对河北地区的铝土矿的调查研究较为薄弱,即便发现了铝土矿也仅仅处于研究阶段,其很大程度限制了河北省整体铝土资源的找矿勘察与开发利用。

华北地区铝土矿是产于石炭系本溪组的沉积型铝土矿,亦称本溪组 G 层铝土矿。本溪组 G 层铝土矿的成矿物质来源一直存在较大的争议,目前针对华北地区本溪组铝土矿的物质来源有以下观点:一是认为冀东地区本溪组含铝岩系的物质来源于硅铝酸盐风化产物[4];二是认为冀东地区本溪组含铝岩系的物质来源于基地寒武系、奥陶系等各类碳酸盐的化学风化产物,同时可能存在微量古陆碎屑物质和岩浆侵入体的参与[5];三是认为其物质来源是混合物质来源[6]。同时由于石炭系本溪组铝土矿经历了复杂的风化、搬运、沉积过程导致研究其物质来源充满挑战;目前通过微区矿物学分析寻找风化残留的微量矿物与地球化学的方法相结合验证的方法是探究物质来源探索的重要方法。

冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系位于华北地区典型的喀斯特型沉积铝土矿床。本文对冀东赵各庄地区本溪组含铝岩系的地球化学特征进行系统的研究,探讨其成矿物质来源,助力该区本溪组含铝岩系的综合勘察,提高该区矿产的综合利用水平,为进一步探索冀东唐山地区本溪组含铝岩系成矿规律提供借鉴意义[7]。

2. 地质背景

赵各庄地区本溪组含铝岩系位于华北克拉通东部陆块冀东唐山地区。华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,也是我国最大最古老的前寒武纪克拉通。在 2002 年赵国春等人根据华北地区基底在变质作用上的差异结合岩石组成、构造样式、地球化学特征将华北克拉通早前寒武纪基底划分成东部陆块、西部陆块和中部造山带[8]。华北克拉通东部北缘断裂发育主要为近东西向的木兰峪复式背斜和南北向、北东向及近东西向等断裂构造。基底为太古宇迁西群、遵化群、滦县岩群、单塔子群、朱杖子群、三屯营片麻岩、海岸片麻岩和迁安片麻岩等组成的深变质岩系[9],华北克拉通主要出露在 EW 向大断裂南部和 NW 向断裂西南部。出露地层由老到新依次为震旦系、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、第三系、第四系[10]。出露岩石岩性主要为滨海相陆源碎屑岩、页岩、浅海相泥质、砂质白云岩、灰岩、含锰泥质白云岩、泥晶白云岩夹钙质页岩等[11]。唐山地区区内岩浆活动较为活跃,岩浆侵入活动可分为印支期和燕山期,主要以中生代燕山期侵入岩体为主。侵入岩体呈浑圆状、宽带状、长条状,侵入太古宇变质岩,产出特征多为岩株和岩基。岩性以中酸性岩为主多为花岗岩、闪长岩[12]。

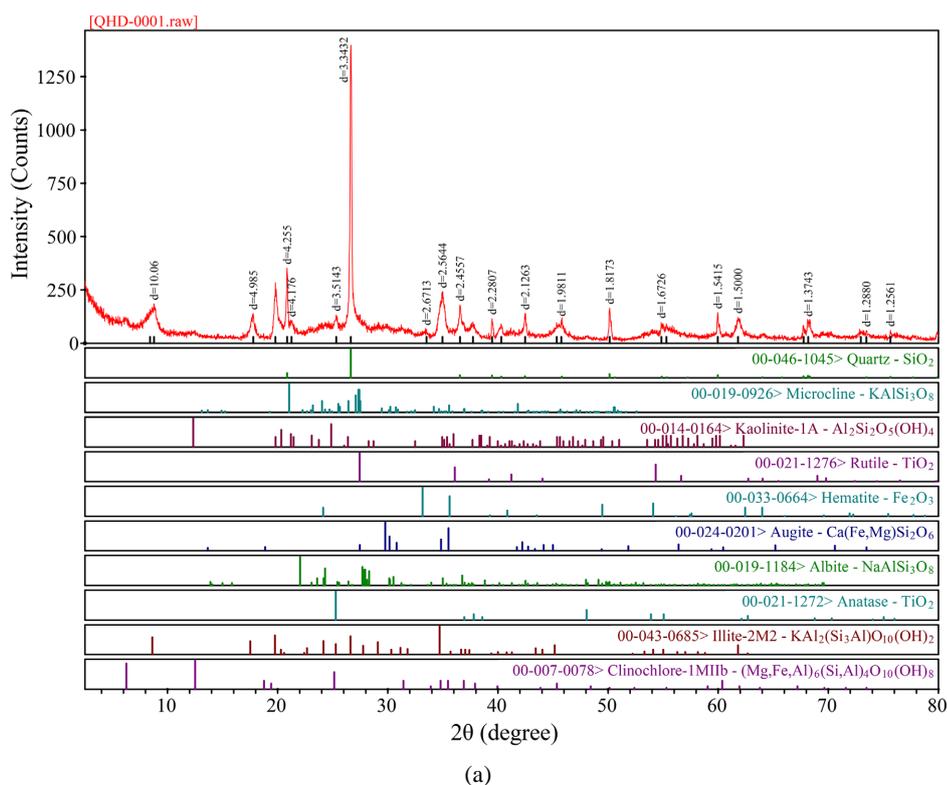
赵各庄地区本溪组含铝岩系所主体形成时代为晚古生代,华北地区自奥陶世起,遭受长期的风化剥蚀,其风化破碎后的产物以碎屑物质为主,并伴有黏土物质和溶解物质。冀东赵各庄地区本溪组含铝岩系岩层平行不整合于中奥陶系马家沟组灰岩之上。华北地区赋存众多灰岩组分,华北地区灰岩自上而下分层分别为 K1、K2、K3、K4,其中 K3 层灰岩亦称唐山灰岩。含矿岩层上部(C_{2b3})为紫灰、浅灰色鲕状铝质泥岩,局部含有煤线;中部铝土矿层(C_{2b2})以灰、深灰色泥岩、铝质泥岩、粉砂岩为主,中细粒砂岩次之;下部为铁质粘土岩(C_{2b1})含硫铁矿和菱铁矿,出露地表风化形成赤铁矿、褐铁矿即山西式铁矿;其铁-铝黏土矿的产出严格受喀斯特地貌的控制,赤铁矿、针铁矿赋存于喀斯特地貌的隆起部位;铝土矿主要赋存于喀斯特洼地主要以含有菱铁矿和黄铁矿的铝土矿层为主。由于受喀斯特地貌的影响铝土矿层常呈透镜状、似层状与层状产出[13]。

3. 唐山赵各庄地区含铝岩系矿物学的特征

研究唐山地区本溪组含铝岩系的矿物学特征利用 X 射线衍射实验测得其矿物学特征, 实验在河北工程大学实验室内完成, 利用不同矿物具有不同的衍射峰的特点, 本文利用衍射图与 PDF 卡片库中的标准衍射图谱进行对比, 进一步进行验证, 从而检索样品中所包含的矿物。

根据(图 1(a))的晶面间距 $d = 9.973$ 、 $d = 4.974$ 、 $d = 4.46$ 、 $d = 2.56$ 和 $d = 1.497$ 等处的衍射峰与伊利石($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)的标准图谱文件 PDF#00-043-0685 相对应。晶面间距 $d = 4.255$ 等处的衍射峰与属于钾长石(KAlSi_3O_8)标准图谱文件是 PDF#00-019-0926 相对应。晶面间距 $d = 4.187$ 、 $d = 2.23$ 等处的衍射峰与钠长石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)的标准图谱文件 PDF#00-019-1184 相对应。晶面间距 $d = 3.34$ 和 $d = 1.81$ 处的衍射峰与石英(SiO_2)的标准图谱文件 PDF#00-046-1045 相对应。晶面间距 $d = 3.51$ 和 $d = 2.38$ 处的衍射峰与属于锐钛矿(TiO_2)的标准图谱文件 PDF#00-021-1272 相对应。晶面间距 $d = 2.67$ 和 $d = 1.81$ 处的衍射峰与赤铁矿(Fe_2O_3)的标准图谱文件 PDF#00-033-0664 相对应。晶面间距 $d = 2.455$ 的衍射峰与金红石(TiO_2)的标准图谱文件 PDF#00-021-1276 相对应。可知样品 a 的矿物组成为伊利石、钾长石、钠长石、石英、锐钛矿、金红石和赤铁矿, 根据峰的强弱可知样品 a 的主要矿物组成为石英、伊利石、钾长石、钠长石、锐钛矿、金红石和赤铁矿。

根据(图 1(b))晶面间距 $d = 7.145$ 、 $d = 4.471$ 、 $d = 4.358$ 、 $d = 3.357$ 、 $d = 3.738$ 、 $d = 2.338$ 、 $d = 1.667$ 和 $d = 1.487$ 等处的衍射峰与高岭石($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)的标准图谱文件 PDF#00-014-0164 相对应。晶面间距 $d = 3.51$ 和 $d = 2.38$ 处的衍射峰与金红石(TiO_2)的标准图谱文件 PDF#00-021-1276 相对应。晶面间距 $d = 2.49$ 、 $d = 2.19$ 和 $d = 1.686$ 处的衍射峰与属于锐钛矿(TiO_2)的标准图谱文件 PDF#00-021-1272 相对应。晶面间距 $d = 4.378$ 、 $d = 4.172$ 等处的衍射峰与属于钾长石(KAlSi_3O_8)标准图谱文件是 PDF#00-019-0926 相对应。可知(下图 b)的矿物组成为高岭石、钾长石、锐钛矿和金红石。根据峰的强弱可知样品 b 的主要矿物组成为其主峰与次峰均为高岭石, 另存在少量的金红石与锐钛矿, 以及部分石英。



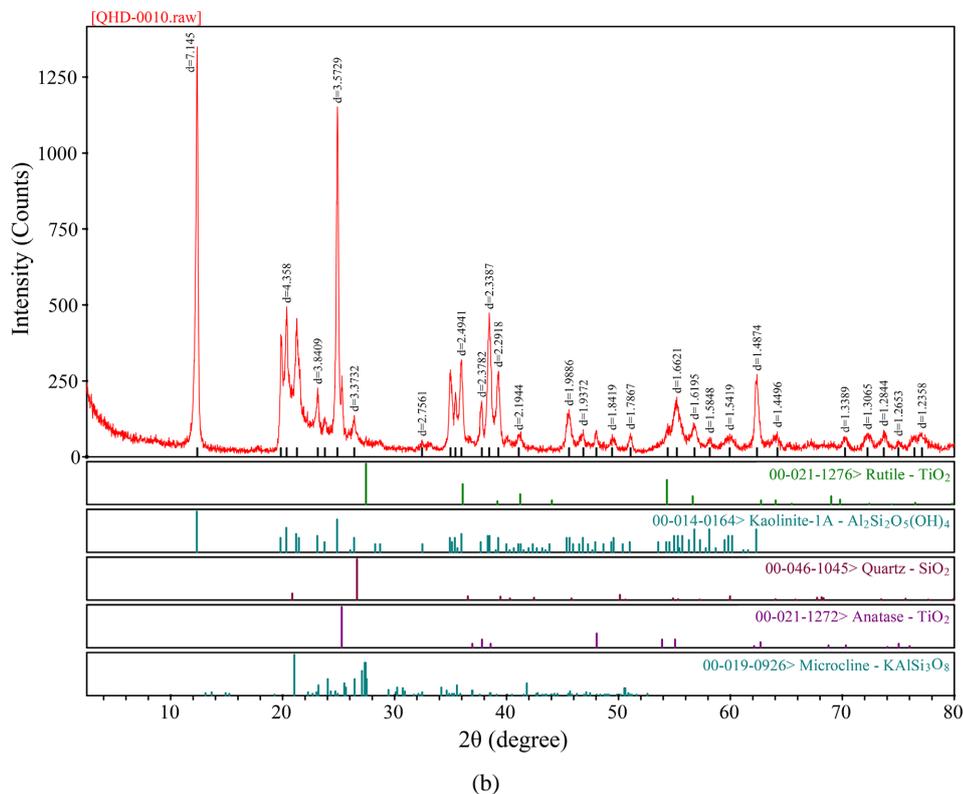


Figure 1. X-ray diffraction pattern
图 1. X 射线衍射图谱

综上可知冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系的主要矿物组成是由石英矿物、黏土矿物和钛矿物组成。

4. 元素地球化学特征

本研究是在野外地质调查的基础上,对河北省唐山地区赵各庄地区含铝岩系进行采样,研究矿物微量元素是在河北工程大学实验室内完成,利用 X 射线荧光光谱分析技术(XRF)对矿物的常量元素进行定量测试。微量元素在长安大学实验室完成,利用电感耦合等离子质谱分析技术(ICP-MS)对微量元素进行系统的测定。

4.1. 主量元素特征

本研究对赵各庄铝土矿区铝质黏土矿研究分析,见表 1 可以发现常量元素氧化物以 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 元素为主。其中 Al_2O_3 的含量 21.38%~48.76%,均值为 28.45%、 SiO_2 的含量 39.03%~65.77%,均值为 56.56%、 Fe_2O_3 的含量 0.796%~6.58%,均值为 2.58%、 K_2O 的含量 0.17%~3.66%,均值为 1.65%。 TiO_2 的含量 0.69%~2.68%,均值为 1.38%。并且含有少量的 CaO 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 等。矿石中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 的比值从 0.33 到 1.24,可见比值变化较小,均值为 0.55。样品中 SiO_2 与 Fe_2O_3 的含量相对较高,这是因为弱风化作用的结果[14];根据 Al_2O_3 - SiO_2 - Fe_2O_3 的三元图解(图 2)可知区铝土矿属红土化的弱脱硅富铝化阶段,同时可以根据 Al_2O_3 - SiO_2 - Fe_2O_3 三元图解(图 3)将铝土矿进行分类,根据图可知该区铝土矿主要落于铝土质高岭石,并有小部分落于高岭土型铝土矿上,可见该区高岭土化作用明显。

Table 1. Determination results of major elements in bauxite from Zhaojiazhuang area, Tangshan, Jidong (unit: wt%)
表 1. 冀东唐山赵各庄地区铝土矿主要元素测定结果(单位: wt%)

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Al ₂ O ₃	22.65	21.38	23.30	37.70	24.72	38.19	23.15	22.93	21.80	48.76
SiO ₂	65.77	64.39	62.27	45.14	57.35	45.03	58.70	63.35	64.65	39.03
Fe ₂ O ₃	0.868	2.38	2.32	0.921	6.58	0.595	5.72	2.73	2.96	0.796
TiO ₂	0.69	1.44	1.34	1.67	1.44	1.22	1.25	0.90	1.13	2.68
CaO	0.19	0.30	0.24	0.13	0.15	0.17	0.35	0.19	0.12	0.05
MgO	0.63	0.64	0.89	0.24	0.29	0.18	0.85	2.23	0.97	0.001
K ₂ O	2.17	0.80	2.76	0.36	1.25	0.17	2.95	3.66	2.28	0.17
Na ₂ O	0.34	0.20	0.00	0.05	0.04	0.02	0.13	0.21	0.16	0.04
MnO	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
P ₂ O ₅	0.075	0.064	0.056	0.107	0.111	0.034	0.063	0.0564	0.0565	0.0625

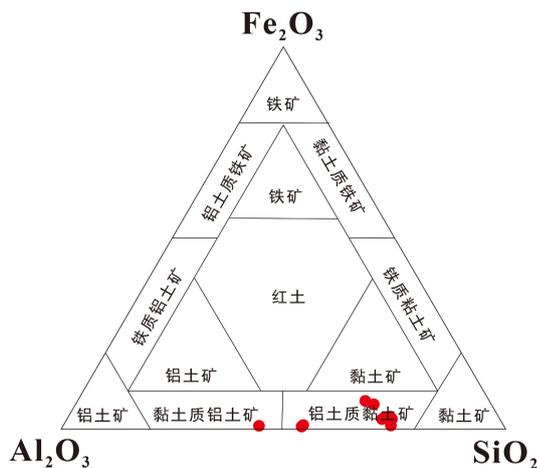


Figure 2. Graphitic representation of bauxite classification in terms of SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃
图 2. 铝土矿 SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ 矿石分类图解

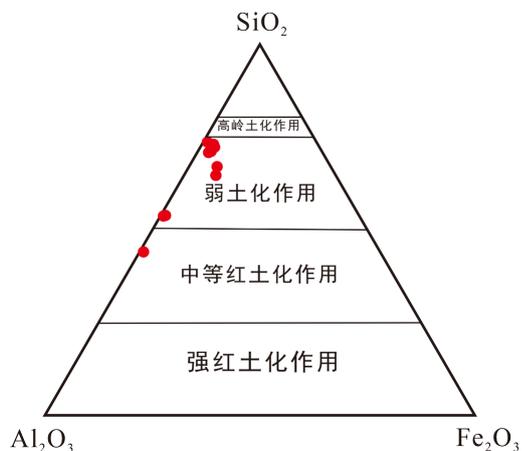


Figure 3. Diagram of lateritization degree of bauxite Al₂O₃-Fe₂O₃-SiO₂
图 3. 铝土矿 Al₂O₃-Fe₂O₃-SiO₂ 红土化程度图解

4.2. 微量元素特征

微量元素虽其含量较低, 但其在指示矿物的沉积环境、物源区特征、成岩演化等地质过程具有重要意义。不同的地质条件会造成会对微量元素的含量造成较大的影响, 会致使部分微量元素发生富集与亏损的现象。针对微量元素做地球化学分析, 可以用来辨别成矿时期的沉积环境和推断成矿物质来源。唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系样品的地球化学分析结果见表 2 所示。根据下表我们可以观测到唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系样品的微量元素具有以下的特点:

唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系岩石样品的微量元素特征: 相容元素 Sc、V、Co、Cr、和 Ni 的含量分别在 4.12~19.4 ug/g 之间、69.1~232.49 ug/g 之间、1.44~23.6 ug/g 之间、23.4~140 ug/g 之间和 7.68~71.2 ug/g 之间, 平均值分别为 11.78 ug/g, 155.05 ug/g, 7.82 ug/g, 77.3 ug/g 和 30.12 ug/g。大离子亲石元素 Rb、Cs、Sr 和 Ba 的含量分别在 4.16~147 ug/g 之间、0.35~12.2 ug/g 之间、13.2~201 ug/g 之间和 9.96~332.07 ug/g 之间, 平均值分别为 73.256 ug/g、5.782 ug/g、74.898 ug/g 和 159.768 ug/g。高场强元素 Zr、Th、Hf 和 U 的含量分别在 221.7~700.88 ug/g 之间、14.23~28.5 ug/g 之间、5.66~19.4 ug/g 之间和 3.51~14.1 ug/g 之间, 平均值分别为 414.414 ug/g、19.26 ug/g、12.11 ug/g 和 6.75 ug/g。其他微量元素 Li、Be、Cu、Zn、Ga、Y、Ta 和 Pb 的含量分别为 5.8~538 ug/g 之间、0.97~4.28 ug/g 之间、8.15~69.36 ug/g 之间、6.9~102.09 ug/g 之间、9.36~30.8 ug/g 之间、12.47~52.1 ug/g 之间、0.27~1.8 ug/g 之间、9.83~51.5 ug/g 之间, 平均值分别为 169.919 ug/g、2.287 ug/g、28.29 ug/g、36.6 ug/g、24.03 ug/g、23.8 ug/g、0.716 ug/g 和 23.23 ug/g。

本次研究的微量元素共有 22 种(Li、Be、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Cs、Ba、Hf、Ta、Th 和 U)为了研究矿石中微量元素特征, 选择上地壳作为对比研究赵各庄地区微量元素的富集与亏损情况, 根据上地壳的比值绘制的蜘蛛图(图 4)可知: 唐山赵各庄地区的 V、Cr、Ga、Zr、Hf、Th、U 含量显著富集; Li、Cs、Sc、Ni、Y 等元素相对富集, Sr、Ba、Ta 显著亏损; Be、Co、Cu、Zn、Rb、Nb、Pb 元素相对亏损。

Table 2. Determination results of trace elements in bauxite from Zhaogezhuang area, Tangshan, eastern Hebei (unit: wt%)
表 2. 冀东唐山赵各庄地区铝土矿微量元素测定结果(单位: wt%)

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Li	11.3	396	75	538	5.8	177	77	69.78	16.6	332.71
Be	2.63	2.35	2.43	3.66	4.28	1.07	2.05	2.31	1.33	0.76
Sc	11.8	11.7	13	11.9	19.4	10	15.2	15.21	4.12	5.49
V	104	199	175	136	136	69.1	228	141.63	129.27	232.49
Cr	49	75.8	56.7	81.4	140	23.4	84.8	97.75	81.67	82.55
Co	1.52	13.2	6.61	4.8	26.3	2.58	5.17	10.55	1.44	6.07
Ni	7.68	44.6	25.1	71.2	45	11.2	19.8	35.63	9.92	31.12
Cu	21.1	42.3	23.4	8.15	35.9	9.32	17.4	69.36	11.5	44.48
Zn	14.3	63.4	31.5	14.1	87.7	6.9	26.1	102.09	12.49	7.46
Ga	25	22.6	24.6	30.8	31.6	28.7	25.3	20.42	9.36	21.93
Rb	121	44.8	147	16.3	63.5	11.6	163	92.35	68.85	4.16
Sr	103	50.9	83.6	201	93.9	13.2	67.9	54.98	45.43	35.07

续表

Y	34.7	20.3	29.5	12.7	52.1	8.84	23.1	25.28	19.02	12.47
Zr	232	320	278	415	662	500	299	221.7	515.56	700.88
Nb	19	20.5	21.9	51.3	27.9	25.9	22.8	15.51	16.8	8.13
Cs	9.04	6.3	11.4	1.04	3.17	2.09	12.2	7.13	5.1	0.35
Ba	281	95.4	185	31.8	146	21.9	294	332.07	229.17	9.96
Hf	8.8	9.84	8.58	13.6	19.4	15.3	9.2	5.66	12.52	18.28
Ta	1.8	0.65	0.513	0.354	0.531	0.55	0.315	1.09	1.09	0.27
Pb	26	22.1	13	24.7	51.5	20.5	16	24.94	23.77	9.83
Th	20.4	17.8	17.2	26.9	28.5	14.6	20.9	14.56	14.23	17.53
U	5.39	5.09	4.11	14.1	7.84	6.7	3.93	3.47	3.51	13.35
Sr/Cu	4.88	1.20	3.57	24.66	2.62	1.42	3.90	0.79	3.95	0.79
Sr/Ba	0.37	0.53	0.45	6.32	0.64	0.60	0.23	0.17	0.20	3.52

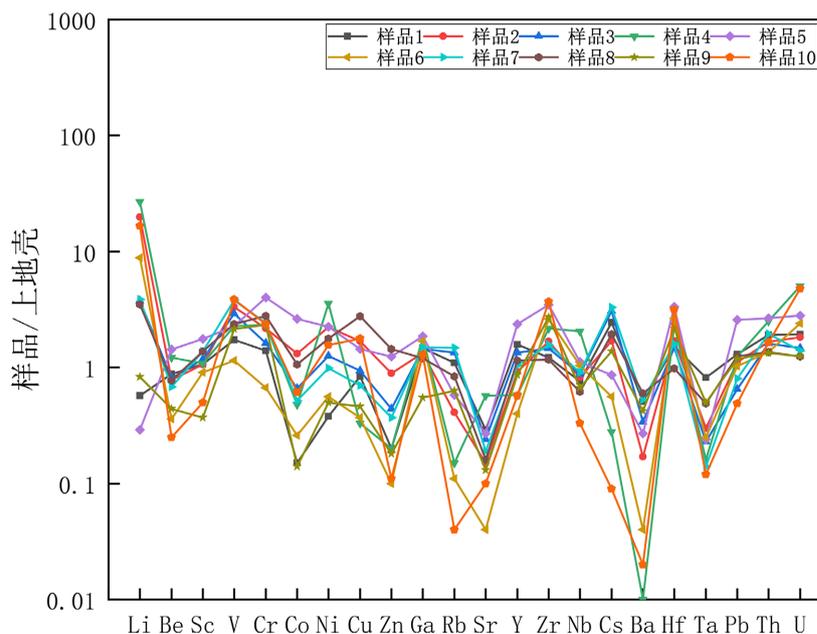


Figure 4. Spider diagram of trace elements in the upper crust of rock samples from the aluminum-bearing rock series in Zhaogezhuang area, Tangshan

图 4. 唐山赵各庄地区含铝岩系岩石样品中微量元素上地壳蛛网图

4.3. 稀土元素特征

赵各庄铝土矿含铝岩系轻重稀土元素(表 3), 稀土元素配分模式特征(图 4)可知含矿岩系的分配曲线相似均为左倾型。轻稀土分异较为明显, 重稀土分异变化波动较小。该批含铝岩系稀土总量变化范围较大 46.865~435.86 ppm 轻重稀土的总量变化范围分别是 22.515~326.69 ppm、24.35~109.17 ppm 均值分别为 168.605 ppm 和 53.043 ppm。轻重稀土的比值(LREE/HREE)为 0.92~5.44, 表现为轻稀土较为富集。通过含矿岩系及相关岩石稀土元素配分模式图, 可知样品中多数样品变化趋势一致, 其中岩石 δEu 的变化

范围从 0.567~0.644, 平均值为 0.565, 表现为明显的 Eu 负异常。根据稀土元素配分模式图可以发现 Eu 处均呈现出深“V”型, 表明成矿物质源基本保持一致。但有少部分样品变化趋势存在部分差异, 这反映含矿岩石并不是来自同一个岩层, 具有不同的岩性[15]。

Table 3. Determination results of rare earth elements in bauxite in the Zhaogezhuang area, Tangshan, eastern Hebei (unit: wt%)

表 3. 冀东唐山赵各庄地区铝土矿稀土元素测定结果(单位: wt%)

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
La	66.60	37.40	53.70	46.90	87.00	5.82	34.80	49.88	34.28	6.98
Ce	121.00	70.60	85.80	105.00	153.00	11.80	58.10	111.30	69.42	20.81
Pr	13.10	6.94	9.43	8.57	16.10	0.91	6.30	13.82	7.70	1.61
Nd	48.60	24.60	32.10	29.30	57.80	3.13	22.90	56.93	26.07	5.84
Sm	9.2	4.37	5.23	4.3	10.6	0.725	4.12	9.94	4.58	1.2
Eu	1.36	0.80	0.99	0.66	2.19	0.13	0.80	1.79	0.84	0.29
Gd	8.24	4.17	4.88	3.32	11.10	1.04	3.90	7.66	3.90	1.58
Tb	1.31	0.66	0.87	0.45	1.80	0.18	0.66	0.98	0.55	0.31
Dy	7.25	4.03	5.46	2.73	10.20	1.52	4.33	5.03	3.17	2.13
Ho	1.34	0.77	1.08	0.50	1.94	0.29	0.87	0.99	0.65	0.46
Er	3.98	2.36	3.36	1.69	5.71	1.02	2.82	2.84	1.92	1.32
Tm	0.77	0.45	0.67	0.33	1.10	0.18	0.56	0.43	0.29	0.21
Yb	3.58	2.29	3.2	1.88	5.07	1.1	2.87	2.9	1.99	1.42
Lu	0.55	0.36	0.49	0.29	0.75	0.18	0.43	0.43	0.30	0.21
∑REE	333.38	191.8	249.76	230.52	435.86	46.865	181.76	305.41	178.8	62.33
LREE	259.86	144.71	187.25	194.73	326.69	22.515	127.02	243.66	142.89	36.73
HREE	73.52	47.09	62.51	35.79	109.17	24.35	54.74	61.75	35.91	25.6
L/H	3.53	3.07	3.00	5.44	2.99	0.92	2.32	3.95	3.98	1.43
(La/Yb)N	12.54	11.01	11.31	16.82	11.57	3.57	8.17	11.60	11.61	3.31
(Gd/Yb)N	1.86	1.47	1.23	1.43	1.77	0.76	1.10	2.13	1.58	0.90
(La/Sm)N	4.55	5.38	6.46	6.86	5.16	5.05	5.31	3.16	4.71	3.66
δCe	0.93	0.98	0.85	1.17	0.92	1.11	0.88	1.00	0.99	1.44
δEu	0.47	0.57	0.59	0.52	0.61	0.46	0.60	0.60	0.59	0.64

5. 物质来源

成矿物质来源可以分为两类: 其一是来源于母岩风化的产物, 二说源于早期沉积物的搬运剥蚀再沉

积过程。不同的物源的形成过程，其物质组分和得到的化学信号可能存在部分差异。准确识别冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系的物源类型对接下来的研究至关重要。

本文利用 Zr/Sc-Th/Sc 二元图解(图 5)可以用来辨别冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系的成岩是因原岩风化控制还是多旋回改造作用致使的，这是利用 Zr 元素主要存在于稳定的重矿物锆石中，Th 元素在酸性岩中富集而 Sc 元素在基性岩中分别富集的特点[16]。随着旋回沉积的进行，沉积物中的稳定重矿物锆石会不断富集，而在火成岩中则不会，从而使 Zr/Sc 增大而 Th/Sc 基本保持不变[17]。发现冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系主要受原岩成分控制而非沉积物质的多旋回改造作用导致的。

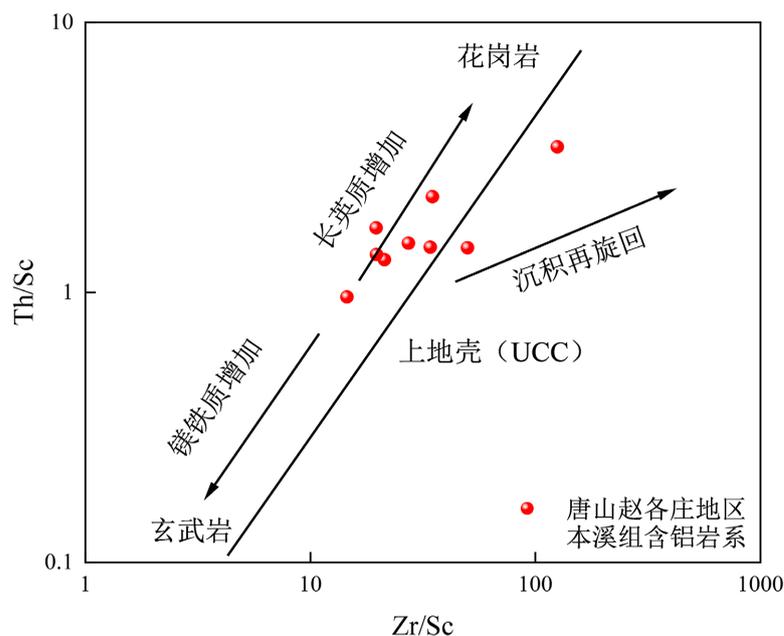


Figure 5. Zr/Sc-Th/Sc diagram of the aluminum-bearing rock series in the Benxi Formation in the Zhaoge Zhuang area, eastern Hebei

图 5. 冀东赵各庄地区本溪组含铝岩系 Zr/Sc-Th/Sc 图解

根据前文可知冀东地区本溪组含铝岩系成矿物质来源是由源岩控制的，后续通过利用主微量元素中部分元素在成岩的过程中相对较为稳定的特点，分析主微量元素的成分，辨别出成矿的物源特征。基于这一原理，通过分析岩石样品的主微量元素的组成，能推断物源区的地球化学特征，进而揭示矿物的物源信息。

针对主量元素本文利用冀东赵各庄地区本溪组含铝岩系中的 Al_2O_3 和 TiO_2 可以有效地指示沉积母岩的性质，因 Al、Ti 是惰性元素，其在风化、搬运、迁移过程中较稳定，同迁移、同富集[18]，当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 10$ 时，沉积物的母岩可能来自铁镁质岩。当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值 > 20 时，母岩可能是长英质岩[19]。冀东赵各庄地区本溪组含铝岩系 Al_2O_3 和 TiO_2 的比值取值范围为 14.84~32.82，平均值为 21.75，绝大多数 Al_2O_3 和 TiO_2 的值大于 20，根据这一点可以推断冀东赵各庄地区本溪组含铝岩系主要的成矿物质来源是长英质物源区。

利用微量和稀土元素的物源判别图可以对沉积岩的物源类型进行更细致的划分。这是利用微量元素在不同岩石中的富集特征不同，根据这一点微量元素和稀土元素可为示踪沉积物母岩提供了重要依据。针对 Eu 异常其可以反应源区丰度[20][21]，上地壳 Eu 异常一般为 0.66，玄武岩 Eu 异常一般为 0.9~1.03。故利用 $\text{Eu}/\text{Eu}^*-\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图 6(a))可以用来判断原岩信息，可以发现样品整体落于上地壳的上方，

存在部分样品与花岗岩较为接近, 对此认为其成矿物质来源上地壳沉积有关, 并存在部分岩浆岩的影响。根据 La/Sc-Th/Co 图解(图 6(b))可以发现冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系落于中性岩与酸性岩之间, 可以得知成矿来源于中酸性岩石中。根据 Th-Hf-Co 三角图解(图 6(c)), 可知样品分布可以得知样品以长英质火山岩为主, 并存在少量的石英岩与泥岩。根据 $(\text{La/Yb})_N-\sum\text{REE}$ 图解(图 6(d)), 可以发现绝大多数样品均落在花岗岩与沉积岩的区域, 通过这一分配模式表明冀东赵各庄地区本溪组含铝岩系的物源区主要是由花岗岩与沉积岩组成的。长英质火山岩是岩浆岩的一种故冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系的物质来源于中酸性花岗岩。

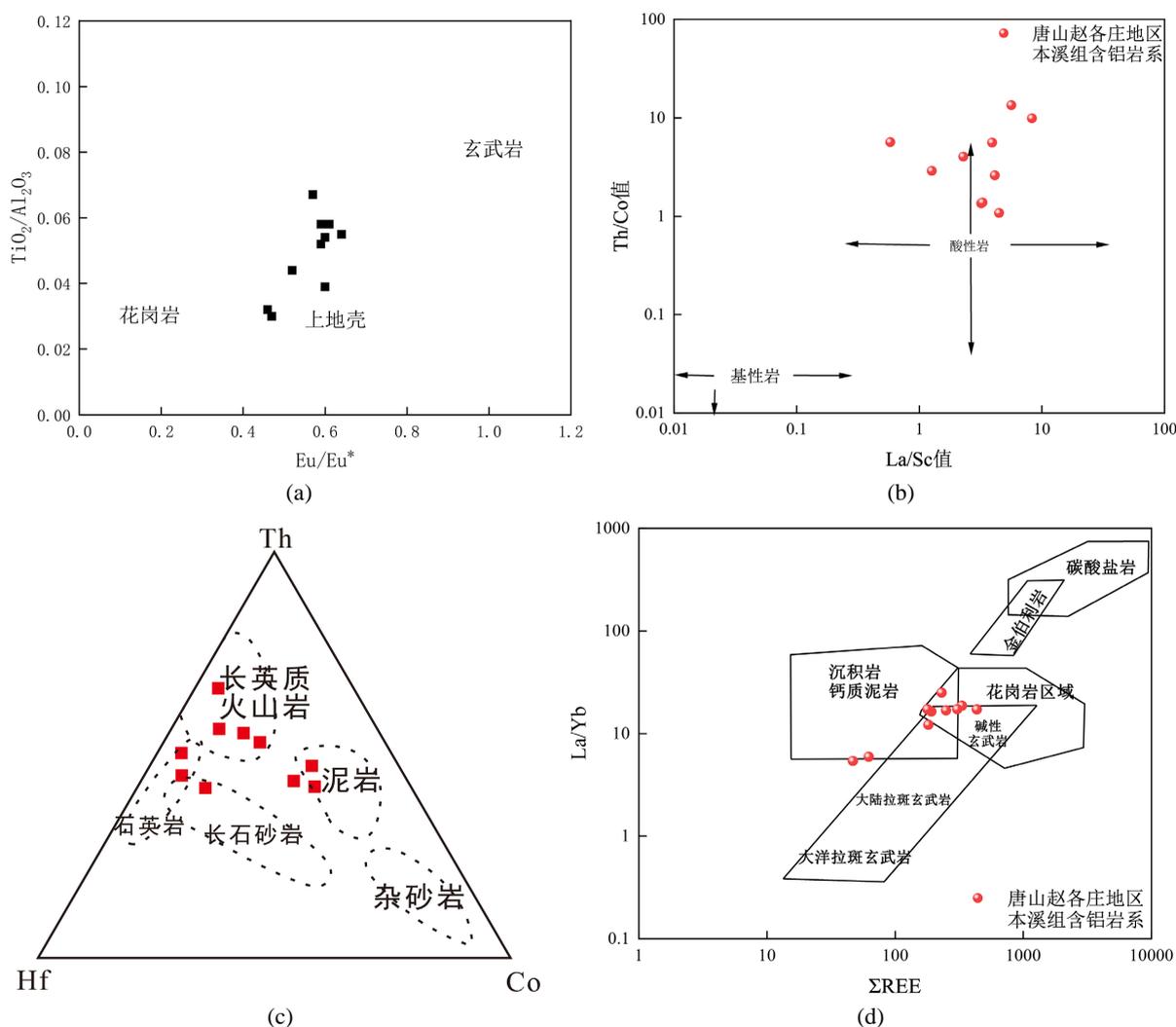


Figure 6. Discrimination diagram of aluminum-bearing rock series in Benxi Formation in Zhaogezhuang area, Tangshan. (a) $\text{Eu/Eu}^*-\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram [22] [23]; (b) La/Sc-Th/Co diagram [24]; (c) Th-Hf-Co diagram [25]; (d) $(\text{La/Yb})_N-\sum\text{REE}$ diagram [26]

图 6. 唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系判别图解。(a) $\text{Eu/Eu}^*-\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解[22] [23]; (b) La/Sc-Th/Co 图解[24]; (c) Th-Hf-Co 图解[25]; (d) $(\text{La/Yb})_N-\sum\text{REE}$ 图解[26]

6. 沉积环境

在元素地球化学领域, 微量和稀土元素常用做指示剂存在, 因微量和稀土元素不易受次生变化影响,

因此微量元素和稀土元素常用作指示沉积环境及物质来源的标志[27] [28]。

6.1. 海陆相

在元素地球化学当中 Sr、Ba 与 Ga 元素常用来指示沉积环境，在陆相环境下，由于钡的离子半径较大其具有比锶元素小的水合能，易于被黏土矿物、胶体和有机质等吸附，最终使得陆相环境下钡元素富集。在海陆交互地带，淡水与咸水汇合，淡水中的 Ba^{2+} 会与海水中的 SO_4^{2-} 结合，因 $BaSO_4$ 的溶解度较低致使生成沉淀，最终淡水中的 Ba^{2+} 的浓度下降，但 Sr^{2+} 却不会沉淀而是继续迁移到深海。在海相环境下，由于锶具有比钡较大的活动性，在搬运过程中不易形成化学沉淀，也因游离态的锶大部分被搬运入海，使得海水中的锶远大于钡[29]。参考前人的研究成果，当 $Sr/Ba > 1$ 时指示为海相沉积环境；当 $Sr/Ba < 1$ 时沉积环境处于陆相沉积环境[30]；若再细分 Sr/Ba 的值在 0.6~1.0 时为半咸水相，小于 0.6 时为微咸水相[31]根据表 3 微量元素数据表明该区铝土矿 Sr/Ba 的变化范围为 0.17~6.32 ppm，均值为 1.31 ppm，4 号样品与 10 号样品 Sr/Ba 的比值分别为 6.32 和 3.52，代表 4 号样品与 10 号样品沉积时期显示为海相沉积环境，其余样品均值为 0.39，均值小于 0.6，代表其余样品的沉积时期显示为陆相沉积环境，综上可知冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系是以陆相沉积环境为主，结合冀东地区地质背景可知冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系在沉积过程中是遭受海侵事件影响致使呈现海陆交互相沉积环境。

Ga 元素也可判断海陆环境，Ga 元素在大陆和淡水泥岩页岩中较为富集；当 Ga 的含量 $> 20 \times 10^{-6}$ ppm 显示为陆相环境；当 Ga 的含量 $< 15 \times 10^{-6}$ ppm 显示为海相环境；介于两者之间表现为过渡相环境。冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系样品中 Ga 的取值范围为 $9.36 \sim 31.6 \times 10^{-6}$ ppm，样品仅有一个样品 Ga 的含量为 9.36×10^{-6} ppm，其余 Ga 含量均大于 20×10^{-6} ppm。通过这点也可发现冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系沉积环境以陆相沉积为主，并存在受海侵事件影响致使出现个别样品呈现海相沉积环境。

6.2. 古气候条件

微量元素中 Sr 与 Cu 的比值与沉积的气候环境相关，这是因为 Cu 作为一种亲湿性元素，其在水体中的存在形态与气候条件密切相关。在温暖湿润的环境中，水体中的 Cu 通常呈现不饱和状态，难以发生沉淀；而在干旱气候条件下，由于强烈的蒸发作用，水体中的 Cu 逐渐趋近于过饱和，最终致使 Cu 从水体中析出，参考前人的研究成果，当 $Sr/Cu < 10$ 时沉积环境为湿润气候；当 $Sr/Cu > 10$ 时沉积环境为炎热干燥的气候[32] [33]；该区铝土矿 Sr/Cu 的变化范围为 0.79~24.66，均值为 4.77。由此可以发现冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系沉积气候环境以湿润气候为主，存在样品 Sr/Cu 数值过高的原因是因为受海水的影响，致使 Sr 的含量变高使其显示为干旱气候。

6.3. 古氧化还原条件

针对氧化还原条件的判别通常利用沉积物中明显受氧化还原状态控制的元素及其比值来推断沉积物沉积期的氧化还原条件。受氧化还原控制的元素主要有 U、V、Cr、Co、Ni 和 Mo 等微量元素，这是利用了这些元素在氧化环境中易溶，还原环境下不溶，并且一旦发生沉积，就很难再发生迁移，能够代表沉积时的原始记录，因此可以作为判别古沉积水体氧化 - 还原环境的指标[34]。结合前人成果综合分析认为 V/Cr、Ni/Co 及 U/Th 比值是最为可靠的参数。Th 和 U 元素的化学性质在还原环境下十分相似，但在氧化条件下差别却很大。在表生环境下，Th 只有正三价一种价态且不易溶解，而 U 则不一样。U 在强还原状态下为正四价，且不溶于水，而在氧化状态下表现为正六价，易溶于水，所以 U 在还原条件下容易富集；而在氧化状态下，沉积物中 U 含量相对较低。基于这两种元素的地球化学性质差异，常利用 U/Th 比值法判断成矿环境的氧化还原状态[35]。根据前人的研究发现当 $U/Th > 1.25$ ，表现为缺氧的还原环境，

当 U/Th 的取值范围 0.75~1.25, 表现为贫氧的过渡环境, 当 $U/Th < 0.75$, 为富氧的氧化环境。当 $V/Cr < 2$ 和 $Ni/Co < 5$ 时说明沉积的时候处于富氧的沉积环境; 当 $2 < V/Cr < 4.25$ 和 $5 < Ni/Co < 7$ 时说明沉积环境为贫氧的沉积环境; 当 $V/Cr > 4.25$ 和 $Ni/Co > 7$ 时表现为缺氧环境。数据表明 U/Th, V/Cr 和 Ni/Co 比值的变化范围分别为 0.188~0.761、0.971~3.086、1.711~6.889 均值为 0.35、2.005、3.031, 数据表明沉积环境是以富氧环境为主, 少量呈现临界过渡状态。

同时稀土元素中 Ce、Eu 元素常用来作为验证氧化还原条件的有效指示剂[36]。在氧化环境下, 沉积物中 Ce 元素, 会经氧化环境的淋滤作用致使 Ce^{3+} 被氧化成 Ce^{4+} , 最终呈现正 Ce 异常。在还原环境下, 更易溶解的 Ce^{3+} 将占主导地位, 导致沉积物中呈现负 Ce 异常[37] [38]。在氧化环境下, 沉积物中 Eu 元素仍以 Eu^{3+} 的形式存在, 与其他稀土元素同步分配, 无显著异常。但在还原环境下, Eu^{3+} 易被还原为二价态 Eu^{2+} , Eu^{2+} 优先进入斜长石等富钙矿物, 导致残余岩石中 Eu 亏损(负 Eu 异常)。当 δCe 和 $\delta Eu < 1$ 时表示亏损, δCe 和 $\delta Eu > 1$ 表示富集[39]。该批铝土样品中 δCe 的变化范围从 0.848~1.442 平均值为 1.028, 其平均值略高于 1, 整体呈微弱的正 Ce 异常。Ce 的变化浮动较小, 代表冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系处于氧化 - 还原的临界过度地带。岩石 δEu 的变化范围从 0.567~0.644 平均值为 0.565 表现为明显的 Eu 负异常。综合唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系 δCe 和 δEu 的数值可以发现, 唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系的沉积环境为富氧环境。根据稀土元素配分模式图可以发现 Eu 处均呈现出深“V”型, 表明成矿物质源基本保持一致。

7. 总结

本论文通过 XRD 分析和地球化学分析对冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系的矿物组成、主微量和稀土元素的特征进行了分析, 阐述了地球化学特征对成矿环境和成矿物质来源的指示意义, 主要得到了以下结论:

- (1) 冀东唐山赵各庄地区本溪组含铝岩系主要的矿物组成为高岭石、伊利石、钾长石、钠长石、石英、锐钛矿、金红石和赤铁矿。
- (2) 研究区本溪组含铝岩系中 V、Cr、Ga、Zr、Hf、Th、U 含量显著富集; Li、Cs、Sc、Ni、Y 等元素相对富集, Sr、Ba、Ta 显著亏损; Be、Co、Cu、Zn、Rb、Nb、Pb 元素相对亏损。
- (3) 研究区本溪组含铝岩系中稀土元素分配曲线相似均为左倾型。轻稀土分异较为明显, 重稀土分异变化波动较小。
- (4) 研究区本溪组含铝岩系物质来源于中酸性花岗岩。
- (5) 研究区本溪组含铝岩系成矿环境的主要环境为湿润气候, 主要沉积环境为富氧环境的陆相沉积。

基金项目

河北省煤田地质局公共财政专项资金基金项目“河北省本溪组重点成矿区带共伴生钛锂镓稀土等矿产找矿预测”(13000025P00B04410112E); 自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目“重点成矿区带本溪组金红石型钛等矿产靶区优选和勘查示范”(ZKKJ202403-4)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告(2022) [R]. 北京: 地质出版社, 2022: 5-7.
- [2] 刘健. 河北省矿业可持续发展研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2010.
- [3] 徐博会. 冀南地区晶质石墨地球化学特征及成因研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2024.
- [4] 孟健寅, 王庆飞, 刘学飞, 等. 山西交口县庞家庄铝土矿矿物学与地球化学研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4):

- 593-604.
- [5] 卢静文, 彭晓蕾, 徐丽杰. 山西铝土矿床成矿物质来源[J]. 长春地质学院学报, 1997(2): 147-151.
- [6] 刘长龄. 论铝土矿的成因学说[J]. 河北地质学院学报, 1992, 15(2): 195-204.
- [7] 李宾, 宋立军, 马奎羽, 等. 河北省成矿规律及新一轮找矿突破行动建议——《中国矿产地质志·河北卷》研编[J]. 地球学报, 2025, 46(1): 235-250.
- [8] 赵国春, 孙敏, S.A. Wilde. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. 中国科学, 2002(7): 538-549.
- [9] 陈靖, 李厚民, 李立兴, 等. 冀东司家营 BIF 铁矿流体包裹体及氧同位素研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(5): 1253-1268.
- [10] 吕水, 刘海龙, 韦文国, 等. 冀东迁安柳河峪 BIF 铁矿床地球化学特征及其地质意义[J]. 矿产勘查, 2025, 16(6): 1322-1334.
- [11] 邢仕, 刘川, 王璇, 等. 冀东长凝 BIF 铁矿床 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 2025, 71(6): 1909-1924.
- [12] 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.
- [13] 曾威, 王佳营, 李俊建, 等. 华北地区铝土矿成矿规律概要[J]. 华北地质, 2021, 44(3): 25-32.
- [14] Kaufhold, S., Dohrmann, R., Ufer, K. and Meyer, F.M. (2002) Comparison of Methods for the Quantification of Montmorillonite in Bentonites. *Applied Clay Science*, **22**, 145-151. [https://doi.org/10.1016/s0169-1317\(02\)00131-x](https://doi.org/10.1016/s0169-1317(02)00131-x)
- [15] 蒋芹, 韩长寿, 薛亚飞, 等. 河南省嵩箕地区南部铝土矿成矿物质来源研究[J]. 轻金属, 2020(10): 5-11.
- [16] McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K. and Hanson, G.N. (1993) Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics. In: Johnsson, M.J. and Basu, A., Eds., *Geological Society of America Special Papers*, Geological Society of America, 21-40. <https://doi.org/10.1130/spe284-p21>
- [17] 乔雨, 李紫源, 郑德顺, 等. 豫西宜洛盆地上二叠统-下三叠统泥质岩地球化学特征与物源分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2018, 38(1): 62-70.
- [18] 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.
- [19] Girty, G.H. and Ridge, D.L. (1996) Provenance and Depositional Setting of Paleozoic Chert and Argillite, Sierra Nevada, California. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, **66**, 107-118. <https://doi.org/10.1306/d42682ca-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- [20] Cullers, R.L. (2002) Implications of Elemental Concentrations for Provenance, Redox Conditions, and Metamorphic Studies of Shales and Limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical Geology*, **191**, 305-327. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00133-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00133-x)
- [21] Taylor, S.R. and McLennan, S.H. (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell.
- [22] 叶枫, 董国臣, 郭红党, 等. 山西王润-西崖底铝土矿稀土元素特征及意义[J]. 中国矿业, 2015, 24(6): 76-80.
- [23] 覃国好. 桂西南平果铝土矿与三合铝土矿成矿特征异同点探讨[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2024.
- [24] Ma, L., Zhang, Z. and Meng, W. (2021) Climate-Provenance Effect on the Organic Matter Enrichment of the Chang 9 Source Rocks in the Central Ordos Basin, China. *Geofluids*, **2021**, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/1233879>
- [25] 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.
- [26] 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)
- [27] 刘本立. 地球化学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1994: 133-136.
- [28] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 68-70.
- [29] 史忠生, 何胡军, 陈少平, 等. 黏土矿物在石油初次运移中的作用研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2003(4): 26-29.
- [30] 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.
- [31] 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(2): 51-60.
- [32] 范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用-以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 382-389.

-
- [33] 梁子若, 侯明才, 曹海洋, 等. 内蒙古大青山石拐盆地侏罗系元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 307-317.
- [34] Tribouillard, N., Algeo, T.J., Lyons, T. and Riboulleau, A. (2006) Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: An Update. *Chemical Geology*, **232**, 12-32. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>
- [35] 宋立军, 刘池阳, 赵红格, 等. 鄂尔多斯地区黄旗口组地球化学特征及其沉积环境与构造背景 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2016, 41(8): 1295-1308, 1321.
- [36] Xiao, J., Li, Y., Yang, H., Xu, J. and Huang, M. (2021) Geochemistry of the Yudong Bauxite Deposit, South-Eastern Guizhou, China: Implications for Conditions of Formation and Parental Affinity. *Journal of Geochemical Exploration*, **220**, 106676. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106676>
- [37] Abedini, A., Calagari, A.A. and Azizi, M.R. (2018) The Tetrad-Effect in Rare Earth Elements Distribution Patterns of Titanium-Rich Bauxites: Evidence from the Kanigorgeh Deposit, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, **186**, 129-142. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.12.007>
- [38] 孙雪飞, 刘学飞, 左鹏飞, 等. 华北南缘石炭纪仁村大型喀斯特型铝土矿物质来源与成矿过程研究[J]. 岩石学报, 2023, 39(2): 600-620.
- [39] 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, 14(2): 164-166.