



地球科学

Earth Science

ISSN 1000-2383, CN 42-1874/P

《地球科学》网络首发论文

题目：华北克拉通北缘东段榆树沟 Nb-Ta-REE 矿床成因、物质来源及成矿构造背景
作者：鞠楠，杨高，刘欣，张鹏鸽，刘博，卢君实，伍月，王海鹏，施璐，马维，冯玉辉
收稿日期：2025-06-15
网络首发日期：2025-09-11
引用格式：鞠楠，杨高，刘欣，张鹏鸽，刘博，卢君实，伍月，王海鹏，施璐，马维，冯玉辉. 华北克拉通北缘东段榆树沟 Nb-Ta-REE 矿床成因、物质来源及成矿构造背景[J/OL]. 地球科学.
<https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20250910.1552.015>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.3799/dqkx.2025.187

华北克拉通北缘东段榆树沟 Nb-Ta-REE 矿床成因、物质来源及成矿构造背景

鞠楠¹, 杨高^{2*}, 刘欣^{1*}, 张鹏鸽³, 刘博⁴, 卢君实⁵, 伍月¹, 王海鹏⁵,
施璐¹, 马维⁶, 冯玉辉³

- 1.中国地质调查局沈阳地质调查中心(东北地质科技创新中心), 辽宁 沈阳, 110034;
- 2.辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新, 123000;
- 3.沈阳师范大学, 辽宁 沈阳, 110000;
- 4.东北大学, 辽宁 沈阳, 110021
- 5.辽宁省地质勘察院有限责任公司, 116100
- 6.辽宁省第六地质大队有限责任公司, 116200

摘要: 华北克拉通北缘作为关键金属成矿潜力区带之一, 区内稀有-稀土矿床成矿背景相似, 矿化类型丰富。其中, 榆树沟 Nb-Ta-REE 矿床是区内典型的碱性岩/碱性花岗岩型稀有-稀土矿床。其矿体主要赋存于石英正长岩体内, 呈层状、脉状产出, 矿石矿物以铌钽铁矿、褐钨铌矿为主并伴生氟碳铈矿等, 围岩蚀变较弱且与矿体呈渐变过渡关系。本文首次在欲收购矿床中利用 SHRIMP U-Pb 锆石定年技术, 精确厘定榆树沟矿床与成矿相关岩体 U-Pb 年龄为 $1724.1 \pm 7.1 \text{ Ma}$ (中元古代四堡运动时期)。岩石地球化学特征表明, 石英正长岩属于过铝质、碱性-钙碱性、拉斑玄武岩系列, 具有 LREE 富集的右倾 V 型稀土配分模式, 较弱的负 Eu 异常、微弱的正 Ce 异常、明显的稀土四分组效应、负的 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值以及较老的 Nd 同位素二阶模式年龄, 指示成矿物质来源于下地壳与亏损地幔的混合源区, 且成矿过程受高演化岩浆熔体-流体相互作用控制。综上, 榆树沟矿床形成于四堡期大陆裂谷向被动大陆边缘转化的构造背景下, 成矿过程与软流圈上涌引发的岩石圈底侵和拆沉事件有关, 不仅导致正长岩结晶基底受幔源岩浆作用改造, 更促使 Nb、Ta、REE 元素富集, 导致大规模多金属成矿事件的发生。揭示了裂谷拉张背景下壳幔相互作用是寻找高演化碱性岩浆相关稀有-稀土矿床的重要方向。

关键词: Nb-Ta-REE 矿床; 矿床成因; 物质来源; 成矿背景; 榆树沟; 华北克拉通北缘东段

中图分类号: P619.14

收稿日期: 2025-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(No. 42473076 和 No. U2244201)与中国博士后科学基金(No. 2022M712966)联合资助。

作者简介: 鞠楠(1986-), 男, 正高级工程师, 主要从事东北地区战略性矿产调查与研究. Email: junan-cgs@qq.com. ORCID: 0000-0001-7485-8825.

通信作者: 刘欣, Email: syzlx213@163.com; 杨高, Email: ywq_yg@qq.com

The genesis, material source and metallogenic tectonic background of the Yushugou Nb-Ta-REE deposit in the eastern section of the northern margin of the North China Craton

Ju Nan¹, Yang Gao^{2*}, Liu Xin^{1*}, Zhang Pengge³, Liu Bo⁴, Lu Junshi⁵, Wu Yue¹, Wang Haipeng⁵, Shi Lu¹, Ma Wei⁶, Feng Yuhui³

1. Shenyang Center of Geological Survey, China Geological Survey (CGS)/Northeast China Center for Geoscience Innovation, Shenyang 110034, China;

2. Liaoning Technical University, Fuxin 110000, China;

3. Shenyang Normal University, Shenyang 110000, China;

4. Northeastern University, Shenyang 110021, China;

5. Liaoning Provincial Institute of Geological Exploration Co, Dalian, 116100, China

6. Liaoning Sixth Geological Brigade Co, Dalian 116200, China

Abstract: The northern margin of the North China Craton is one of the prospective belts for critical metal mineralization, where rare-earth element (REE) deposits share similar metallogenic backgrounds but exhibit diverse mineralization styles. Among them, the Yushugou Nb-Ta-REE deposit is a typical alkaline rock/alkaline granite-type rare-REE deposit in this region. The ore bodies are primarily hosted within quartz syenite intrusions, occurring as layered or vein-like structures, with ore minerals dominated by columbite-tantalite and fergusonite, accompanied by bastnäsite. The wall-rock alteration is weak and shows a gradual transition with the ore bodies. For the first time, this study employs SHRIMP U-Pb zircon dating to precisely constrain the U-Pb age of the metallogenic intrusion at 1724.1 ± 7.1 Ma (Middle Proterozoic, Sibao Orogeny). Rock geochemical characteristics indicate that the quartz syenite belongs to the peraluminous, alkaline-calc-alkaline, tholeiitic series. It exhibits a right-sloping V-shaped REE pattern with LREE enrichment, weak negative Eu anomalies, slight positive Ce anomalies, and a pronounced tetrad effect, negative $\epsilon\text{Nd}(t)$ values and relatively old Nd isotope second-stage model ages, indicating that the ore-forming materials were derived from a mixed source of lower crust and depleted mantle, with the metallogenic process controlled by highly evolved magma melt-fluid interactions. In summary, the Yushugou deposit formed during the Sibao period in a tectonic setting transitioning from continental rifting to a passive continental margin. The mineralization process was associated with lithospheric underplating and delamination triggered by upwelling asthenosphere, which not only modified the syenite crystalline basement through mantle-derived magmatism but also facilitated the enrichment of Nb, Ta, and REE elements, leading to large-scale polymetallic mineralization. This study highlights that crust-mantle interaction in rift-related extensional settings is a critical indicator for exploring highly evolved alkaline magma-related rare-REE deposits.

Key words: Nb-Ta-REE deposit; genesis of the deposit; material source; metallogenic tectonic background;

0. 引言

战略性关键金属指现今社会必需、安全供应存在高风险的稀有金属、稀土金属、稀散金属和包括部分稀贵在内的其它金属（如 PGE、Cr、Co 等），而 Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Zr、Hf 等稀有金属因其重要战略意义而列入中国和欧、美、日等国关键矿产资源目录（毛景文等，2019；翟明国等，2019；Long et al., 2025）。近年来，中国“三稀”（稀有、稀土、稀散元素）金属的地质找矿工作不断加强，陆续发现和探明“三稀”矿产地 1550 余处，形成了“稀土不土，稀散不散，稀有常有”的总体认识（王登红等，2012）。中国内生稀有-稀土矿床分布广泛，从矿床形成时代看，从矿床形成时代来看，自太古宙至喜马拉雅期均有不同规模的矿床分布，从分布地区看，集中分布于阿尔泰造山带、天山造山带、兴蒙造山带、松潘-甘孜-甜水海造山带、秦岭-大别造山带、喜马拉雅造山带、三江造山带、武夷-云开造山带和江南造山带（邹天人等，2006；张辉等，2019；Xiao et al., 2003, 2015；Wu et al., 2021, 2023）。按含矿岩石类型，中国内生稀有-稀土矿床大致可分为碱性岩型、花岗岩型、花岗伟晶岩型、夕卡岩或条纹岩型、石英脉型、浅粒岩型、混合岩型、酸性火山岩型及细晶岩型等 8 种主要类型，其中，最主要的且为数最多的是前三类，即碱性岩类型、花岗岩类型和花岗伟晶岩类型，产地从华北到西南均有分布，而辽宁地区稀有-稀土金属矿床数量少，且以中小型为主（表 1），研究程度较低（Zheng et al., 2007；Wu et al., 2024）。

华北克拉通北缘作为关键金属成矿潜力区带之一，区内稀有-稀土矿床成矿背景相似，矿化类型丰富且具有可比性，但围绕区内代表性稀有-稀土矿床的区域地质背景、矿床地质特征、矿床成因类型、找矿方向等方面的研究较少，辽吉构造带中元古代稀有-稀土矿床的年代学框架尚未建立，稀有-稀土矿床的岩浆演化过程与稀有-稀土金属元素富集成矿机制、矿床成因等规律的认识不清，无法为找矿勘查工作提供理论支撑。

基于此，本文将在区域地质背景和矿床地质特征研究基础上，通过对区内代表性矿床即榆树沟 Nb-Ta-REE 矿床的地球化学研究，分析成岩成矿物质来源，确定成岩成矿物质源区；结合富矿围岩（石英正长岩）年代学研究，判断成岩成矿构造背景，揭示华北克拉通北缘东段稀有-稀土成矿集中区的成因。

1. 区域地质背景

大地构造位置上，研究区位于华北板块北缘东段，自中生代以来属于环太平洋带的外带（Rudnick et al., 2003）。在长期的地壳演化过程中，多期复活的几组不同方向断裂带及岩浆岩带组成了辽西地区近似“U”字型的東西向弧型构造带；本区主要地层属于晋冀鲁豫地层区，

燕辽地层分区，辽西地层小区，稀有-稀土矿产和中元古代、晚古生代、中生代岩浆岩关系密切，出露岩性主要为中元古代正长岩、石英二长岩和二长闪长岩，晚二叠世中细粒花岗岩（图 1）。

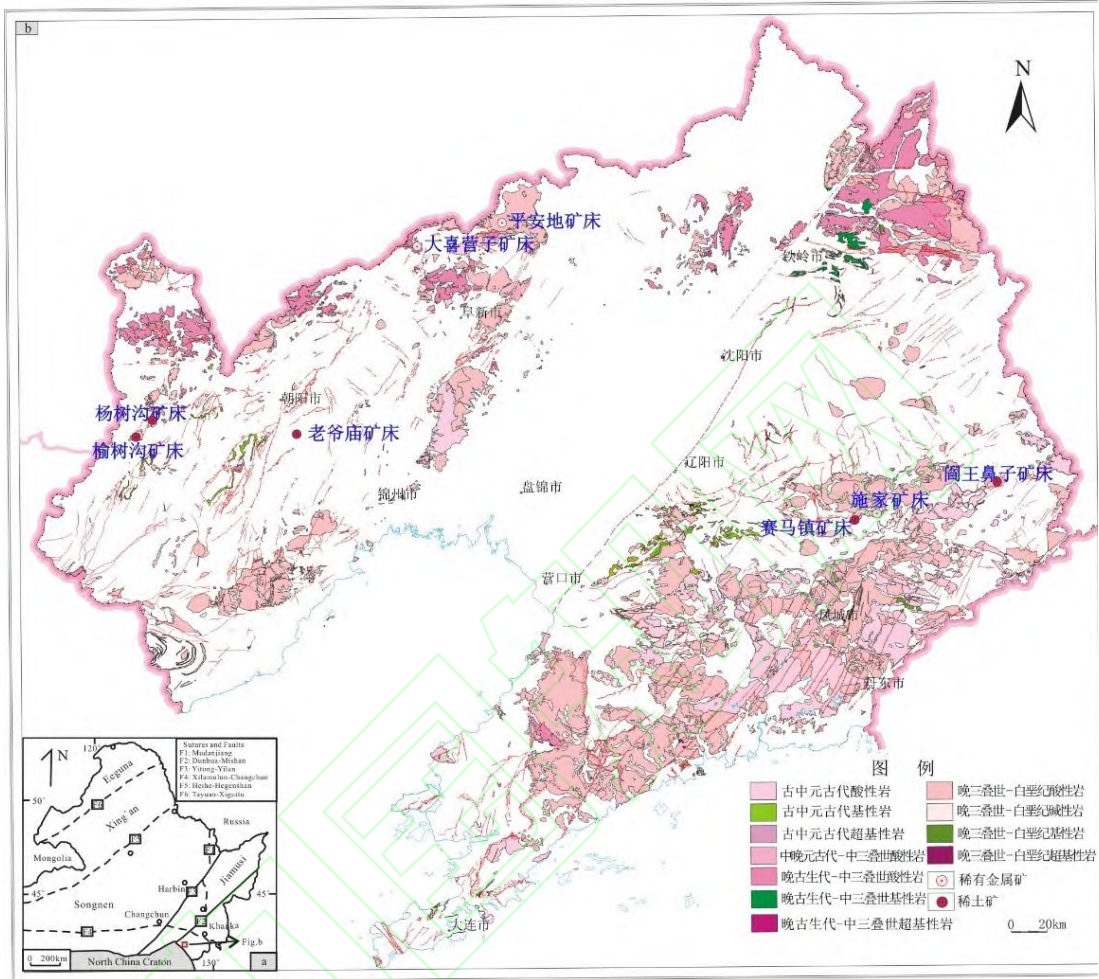


图 1 研究区构造地质及典型矿床分布图
Fig 1 Location and stratigraphic characteristics of the study area

研究区目前已发现的稀有-稀土矿床 3 处，矿点 5 处（表 1），矿化点 60 余处，主要分布于辽东及辽西地区。区内稀有-稀土矿床勘查程度和研究程度均较低，因其多样的成矿类型，具有较高的研究意义。本文选取了区内最典型且规模较大的榆树沟矿床进行了详细的成矿地质条件和矿床地质特征研究，结合矿床年代学及地球化学研究，揭示区内稀有-稀土矿床成矿规律，为找矿勘查工作提供借鉴。

表 1 辽宁省稀有-稀土矿床（点）特征表

Table 1 Characteristics of Rare and Rare Earth Deposits (Points) in Liaoning Province						
序号	矿床（点）名称	位置	矿种	构造背景	成矿岩体/富矿围岩	规模
1	榆树沟	辽西地区	铌、钽、稀土	辽吉构造带	正长岩	小型矿床
2	老爷庙	辽西地区	铌、钽、稀土	辽吉构造带	花岗岩	矿点

3	杨树沟	辽西地区	稀有	辽吉构造带	花岗岩	矿点
4	大喜营子	辽西地区	铷、铯、钽	辽吉构造带	花岗岩-伟晶岩	小型矿床
5	平安地	辽西地区	稀有	辽吉构造带	花岗岩	矿点
6	施家	辽东地区	铷、铯、稀土	辽吉构造带	碳酸岩	矿点
7	赛马	辽东地区	铯、钽	辽吉构造带	碱性岩	中型矿床
8	白棋	辽东地区	稀有	辽吉构造带	花岗岩	矿点

2. 矿床地质特征

矿区出露的地层为侏罗世海房沟组砂砾岩、粉砂岩、泥岩及中酸性-酸性火山碎屑岩，侏罗世张家口组流纹质含角砾凝灰岩、泥岩、凝灰质粉砂岩及英安岩，白垩世义县组玄武岩、玄武安山岩及安山岩，山间谷地分布有第四系的松散堆积物。矿区出露的的侵入岩主要为中元古代石英二长岩为代表，侵入岩岩石类型有石英正长岩、石英二长岩、黑云母闪长岩、橄榄辉长岩，以石英二长岩和黑云母闪长岩最发育，脉岩不发育。矿区断裂构造最为发育，主要呈近东西向、北东向、北北东向及北西向展布，包括沙金沟断裂、朱碌科—中三家壳断裂及叨尔登—张家营壳断裂，其中，北东向的断裂对成矿具有明显的控制作用，榆树沟矿床就位于该断裂上盘。矿区围岩蚀变类型简单，主要有绢云母化、绿泥石化、高岭土化及碳酸盐化等（图2）。

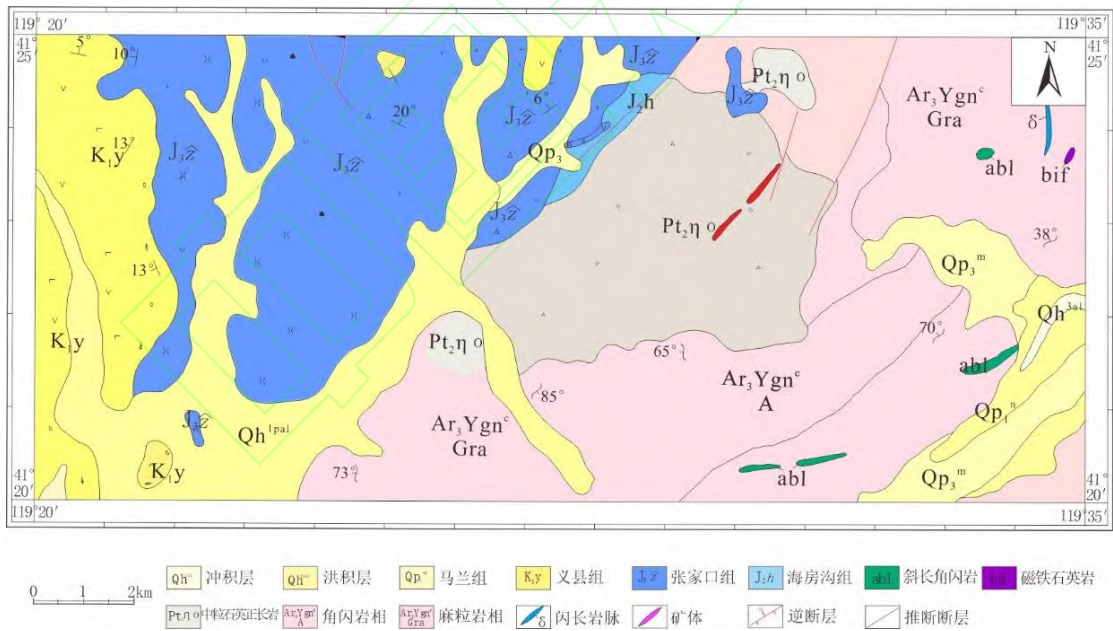


图2 榆树沟矿区地质图

Fig2. Geological map of Yushugou Mining Area

该矿床仍处于勘查阶段，通过已完成的槽探和钻探工程揭露，新发现铯钽、稀土矿（化）体6条，主要赋存于正长岩中，其中，单个矿体的形态为似层状、透镜状，倾向NE75°，倾角一般10°~15°。矿体之间近于平行，且与围岩分异层理产状大体一致。矿体在围岩中呈透

镜体分布。矿体最大厚度可达 40m，大部分矿体集中在距地表 200m 以上。探槽 TC1801 和 TC4801 中发现 3 个化学分析样品铌钽、稀土氧化物总量分析结果达到或超过矿床边界品位，稀土品位 0.25%—0.28%，铌钽品位 0.02%（图 3）。钻孔 ZK001 中发现有 9 个样品品位达到或超过稀土矿床边界品位，最高 0.28%，ZK002 中有 14 个样品品位达到或超过稀土矿床工业品位，最高 760ppm。围岩为二长花岗岩、石英正长岩与石英二长岩。

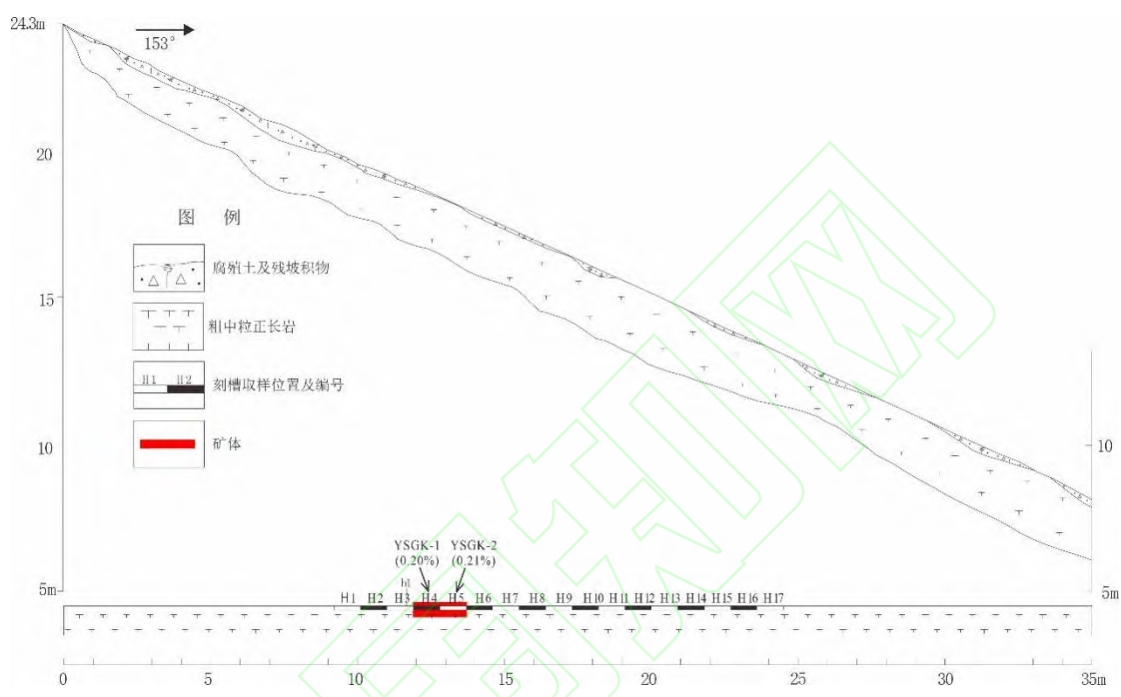


图 3 榆树沟 TC4801 探槽剖面图

Fig3. Cross-sectional view of the TC4801 trench in Yushugou

此外，本区已发现初具规模的中小型稀有-稀土矿床 3 处，即大喜营子铷-铍矿床、榆树沟铌-钽-稀土矿床和赛马铌-钽矿床，将该区矿床特征进行对比研究，如下表（表 2）：

表 2 代表性稀有-稀土矿床特征对比表

Table 2 Comparison Table of Characteristics of Representative Rare-Earth Deposits in Liaoning Province								
矿床	矿种	控矿构造	成矿岩体/ 富矿围岩	成矿时代	矿体 产出	围岩 蚀变	矿石 矿物	资料 来源
大喜营子	Be、 Rb	NE 向断 裂	白云母花 岗岩、花 岗伟晶岩	中远 古代	层状、 脉状/岩 体内	钠长石化、天河石 化、云英岩化、萤 石化、硅化、绿泥 石化	褐钇铌矿、 天河石	本文
榆树 沟	Nb、 Ta、 REE	NE 向断 裂	正长岩	中生 代	层状/岩 体内	绢云母化、绿泥石 化、高岭土化、碳 酸盐化	铌钽铁矿、 褐钇铌矿、 褐钽铌矿、 异性石	本文

赛马	Nb、 Ta	NE 向断 裂	霓霞正长 岩	中生 代	层状/岩 体内	硅化、钾化、碳酸 盐化、绿泥石化、 绿帘石化、泥化、 绢云母化	铌钽铁矿、 褐钇铌矿、 褐钨铌矿	本文
----	-----------	---------------	-----------	---------	------------	--	------------------------	----

从上表可以看出，区内矿床多为稀有金属型，榆树沟矿床为稀有-稀土型；NE 向断裂为区内矿床的控矿构造；3 个矿床的成矿岩体/富矿围岩分别为花岗岩或花岗伟晶岩及碱性岩；矿体形态简单，多呈层状、脉状产出；矿体均产于花岗岩或正长岩体内；矿床的围岩蚀变较弱，与矿体成渐变过渡关系；多数矿床的矿石矿物以铌钽铁矿、褐钇铌矿为主，伴有一定量的褐钨铌矿、异性石、天河石等。综上，本区代表性稀有-稀土矿床成矿类型分为两类，即大喜营子矿床为花岗岩-花岗伟晶岩型，而榆树沟和赛马矿床则为碱性岩型。

3.岩相学特征

本次研究的样品取自榆树沟矿区主矿体地表探槽，样品 YSG-2010 为富矿围岩，无明显矿化和蚀变现象，岩相学研究在北京中兴美科科技有限公司完成。岩相学研究表明，主要岩石类型为石英正长岩，具半自形粒状结构，块状构造；主要由黑云母、石英、斜长石和钾长石组成，其次为少量细小绿泥石、碳酸盐矿物和不透明暗色矿物等；岩石以含有大量粒径较大钾长石为特点，且普遍发生轻微粘土化现象；黑云母呈黄褐色鳞片状集合体，粒径 0.07~0.51mm，干涉色常被本身颜色所覆盖，含量约 4%；石英呈他形粒状，粒径 0.03~0.26mm，I 级灰白干涉色，粒径和含量均相对细小，含量约 6%；斜长石呈自形-半自形板柱状，粒径 0.08~0.73mm，I 级灰白干涉色，普遍发生轻微的粘土化现象，含量约 10%；钾长石：呈半自形-他形板柱状，以条纹长石为主，粒径最大可达数毫米至厘米级，普遍发育轻微粘土化现象，发生不规则微裂隙，含量约 76%；其次可见少量细小绿泥石，碳酸盐矿物和不规则状不透明暗色矿物产出，含量约 4%（图 4）。

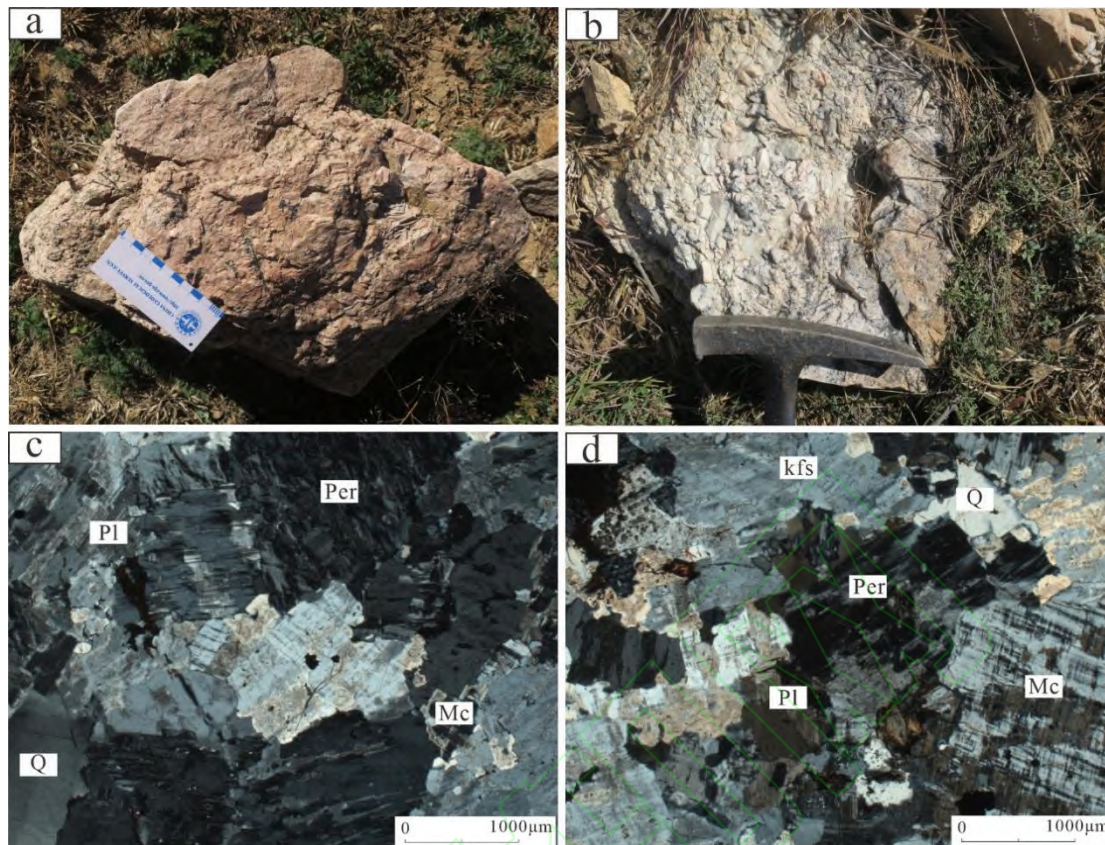


图 4 榆树沟矿床富矿围岩野外及显微照片

a.石英正长岩；b. 石英正长岩（含铌钽矿物）；c. 细粒石英正长岩（+）；d. 细粒石英正长岩（+）；Pl:斜长石；Per: 橄榄石；Mc:白云母；kfs: 钾长石

Fig4. Field and microscopic photos of the ore-forming rock mass of the Yushugou Deposit

a. Quartz orthoclase b. Quartz orthoclase (niobium-tantalum minerals); c. Fine-grained quartz orthoclase (+); d. Fine-grained quartz orthoclase (+); Pl: Plagioclase; Per: Olivine; Mc: Muscovite; kfs: K-Feldspar

4. 成岩成矿时代

4.1 样品选取及分析方法

用于锆石定年的岩石样品来自榆树沟矿床（编号：YSG/ysg）的富矿围岩，岩石新鲜，无明显矿化和蚀变现象。锆石单矿物的挑选、样品的制靶和反射光、透射光照相以及锆石阴极发光(CL)图像（图 5）均由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。SHRIMP U-Pb 锆石定年在北京离子探针中心 SHRIMP A 仪器上完成。测年方法和原理见 Williams（1998）。锆石定年为 5 组扫描，个别铅丢失强烈的数据点为 3~4 组扫描。一次离子流 O₂-强度为 3.5 nA，束斑为椭圆形，长轴约为 25μm。标准锆石 M257（U 含量为 840ppm）（Nasdala et al., 2008）和 TEMORA2（年龄为 417Ma）（Black et al., 2004）用于未知样品 U 含量标定和年龄校正。标准样 TEMORA2 和待测样之比为 1:3~4。数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序（Ludwig，2001）。实测 ²⁰⁴Pb 用于普通铅校正。单个数据点误差为 1σ，加权平均年龄误差为 95%置信

度。

4.2 成岩成矿时代及年代学特征

石英正长岩中的锆石多呈无色透明的四方柱和四方双锥的聚形体，粒径一般在100~200 μm 之间，多数锆石呈锥状发育，晶体长宽比小于2，少部分呈柱状，长宽比大于2。阴极发光图像(CL)显示，晶体生长环带清晰，少数颗粒具有规则的环带结构，多数颗粒环带宽窄不一，或者呈平行晶体长轴方向的条带状，锆石 Th/U 比值一般为 0.5~1.0，显示锆石为典型的岩浆成因（图 5, Hoskin et al., 2000, 2003; Watson et al., 2006）。锆石 U-Pb 法定年测试结果列于表 3，根据测试数据所做的 U-Pb 谐和图如图 5 所示。所测岩石形成于中元古代，测年结果以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄计算，单个数据点的年龄误差均为 2σ 。所测 9 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 1713Ma 和 1734Ma 之间，在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}\sim^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上，所有数据均位于谐和线上或分布在谐和线附近。对 9 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值加权平均，在 $\text{MSWD}=0.33$ ，可信度 95%条件下，得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 $1724.1\pm 7.1\text{Ma}$ （图 5）。

由于华北克拉通北缘东段的稀有-稀土矿床发现较晚、规模不大，前人从未开展系统的年代学研究工作，本文首次利用 SHRIMP U-Pb 锆石定年技术，精确厘定区内代表性稀有-稀土矿床的成矿成岩时代，为区域成矿规律研究奠定了良好基础。本文所测榆树沟矿床石英正长岩的 U-Pb 年龄为 $1724.1\pm 7.1\text{Ma}$ ，该矿床形成较早，与四堡运动有关(Wu et al., 2007, 2011)。位于华北克拉通北缘东段索伦缝合带的西拉木伦-长春段大喜营子矿床和赛马矿床，两者与榆树沟矿床均位于辽西构造小区内，并长期经历复杂的构造运动，区域成矿均受区域 NE 向构造系统控制。作者及团队对该区域成矿岩体/富矿围岩的研究认为区域成矿年龄分为两部分，即 $229.5\pm 4.0\text{Ma}$ 和 $205.4\pm 3.0\text{Ma}$ ，说明成矿作用可以细分为两个阶段，即早期的白云母花岗岩阶段和晚期的伟晶岩阶段，总体上，大喜营子矿床是印支晚期-燕山早期岩浆作用的产物；赛马矿床成矿岩体的 U-Pb 年龄为 $224.4\pm 6.1\text{Ma}$ ，形成于印支晚期。综上所述，辽吉构造带稀有-稀土成矿作用发生在两个时期，即中生代的印支晚期-燕山早期以及中元古代的四堡期。

表 3 榆树沟矿床石英正长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the ore-forming intrusion in the Yushugou deposit.

Plot	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ (ppm)	Total $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	Error (%)	Total $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age(Ma)	1sigma
YSG-20105-1	0.03	242.75	197.81	0.84	63.30	3.30	0.58	0.11	0.57	1,708.10	± 8.70
YSG-20105-2	0.02	240.38	144.95	0.62	63.30	3.26	0.58	0.10	0.57	1,723.90	± 8.70
YSG-20105-3	0.02	234.04	199.22	0.88	62.20	3.23	0.57	0.11	0.58	1,736.70	± 8.70
YSG-20105-4	0.02	201.87	134.76	0.69	52.00	3.33	0.62	0.11	0.64	1,691.00	± 9.20
YSG-20105-5	0.04	149.81	94.52	0.65	39.10	3.29	0.68	0.11	0.74	1,710.00	± 10.00

YSG-20105-6	0.05	311.67	238.81	0.79	82.90	3.23	0.52	0.11	0.51	1,737.70	±7.90
YSG-20105-7	0.01	423.67	285.63	0.70	112.00	3.25	1.00	0.11	0.44	1,727.00	±15.00
YSG-20105-8	0.02	248.03	173.55	0.72	65.00	3.28	0.57	0.11	0.57	1,715.00	±8.50
YSG-20105-9	0.02	229.40	166.79	0.75	63.60	3.10	1.20	0.11	0.61	1,802.00	±19.00
YSG-20105-10	0.03	246.69	204.43	0.86	64.30	3.30	0.57	0.11	0.57	1,707.30	±8.50
YSG-20105-11	0.04	343.17	451.49	1.36	89.80	3.28	1.50	0.11	0.59	1,713.00	±23.00

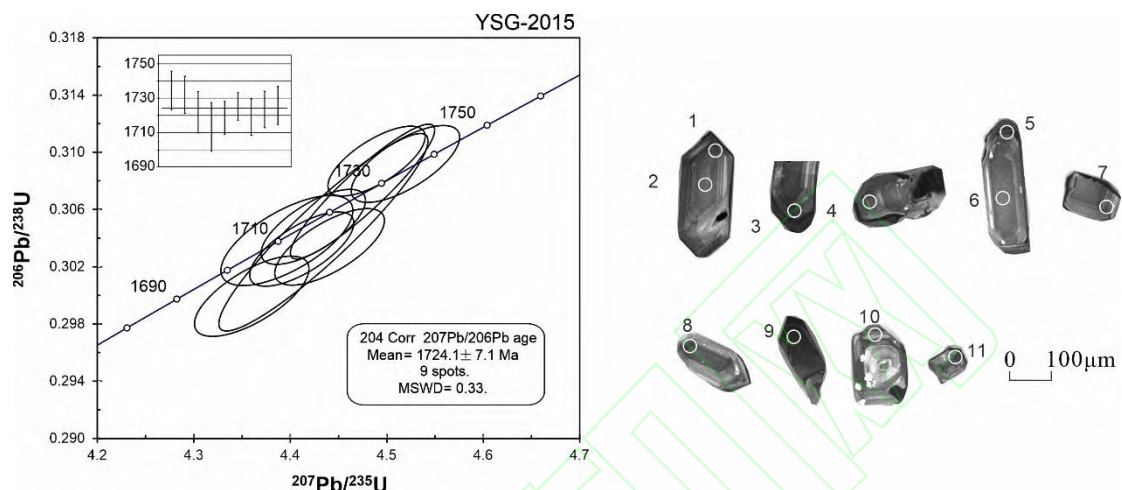


图 5 榆树沟矿床富矿围岩-石英正长岩锆石 U-Pb 谐和图及锆石 CL 图像

Fig. 5 shows the zircon U-Pb harmony diagram and zircon CL image of the quartz orthoclase in the ore-forming rock mass of the Yushugou Deposit

5. 地球化学特征

5.1 样品选取及分析方法

本文测试的 25 件岩石样品主要取自榆树沟矿床的见矿地表探槽，其中 20 件样品用于主量、微量及稀土元素分析，5 件样品用于 Sr-Nd-Pb 同位素分析，均为富矿围岩，无明显矿化和蚀变现象。全岩主量、稀土、微量元素分析在中国地质大学(北京)科学研究院实验中心元素地球化学实验室完成，主量元素含量测定使用仪器为美国利曼公司 (LEEMAN LABS.INC)Prodigy 型等离子发射光谱仪(ICP-OES)；部分低含量元素，采用酸溶溶液，利用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 进行 K、P、Ti、Mn 等元素含量验证性测定。稀土、微量元素含量测定使用美国安捷伦公司生产 Agilent 7500 a 型等离子质谱仪；分析过程中采用美国标准局 Equipment 实验室制备的标准溶液 Std-1、Std-2、Std-4 为检测外部标样，定值加入的 Rh 为检测内部标准。

Sr-Nd-Pb 同位素化学分离和测试在北京科荟测试技术有限公司实验室完成。Sr、Nd、Pb 同位素组成测试均在 ThermoFisher 公司 Neptune plus 型 MC-ICP-MS 上进行。Sr 同位素仪器分馏校正采用指数方程，以 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375209$ 进行校正；Nd 同位素仪器分馏校正采用指数方程，以 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行校正；Pb 同位素仪器分馏校正采用指数方程，以

$^{203}\text{Tl}/^{205}\text{Tl}=2.3889$ 进行校正。

5.2 主量元素特征

榆树沟矿床富矿围岩主量元素特征表明（表 4），20 件石英正长岩样品的 SiO_2 含量为 64.96%~74.35%，主要集中在 70.32%~73.59% 之间；具有较低的 TiO_2 含量（0.14%~0.71%）和 P_2O_5 含量（0.01%~0.10%）； Al_2O_3 含量集中在 12.90%~14.00% 之间，普遍低于 15%；岩石中全碱含量较高（ $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=9.01\%\sim 13.02\%$ ），相对富钾（ $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.30\sim 1.74$ ），里特曼指数（ $\sigma=[\omega(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})]^2/[\omega(\text{SiO}_2-43)]$ ）主要集中在 2.90~3.53 之间。在 TAS 图解上（图 6a），多数样品落在花岗岩岩区，少数样品落入正长岩岩区，属于碱性-亚碱性岩系；在 A/NK-A/CNK 判别图解上（图 6b），样品均落在过铝质区域；在 FMA 岩石系列分类图解上（图 6c），样品全部落入钙碱性系列。岩体主量元素特征表明，榆树沟 Nb-Ta-REE 矿床的富矿围岩属于过铝质、碱性-钙碱性正长岩/花岗岩系列。

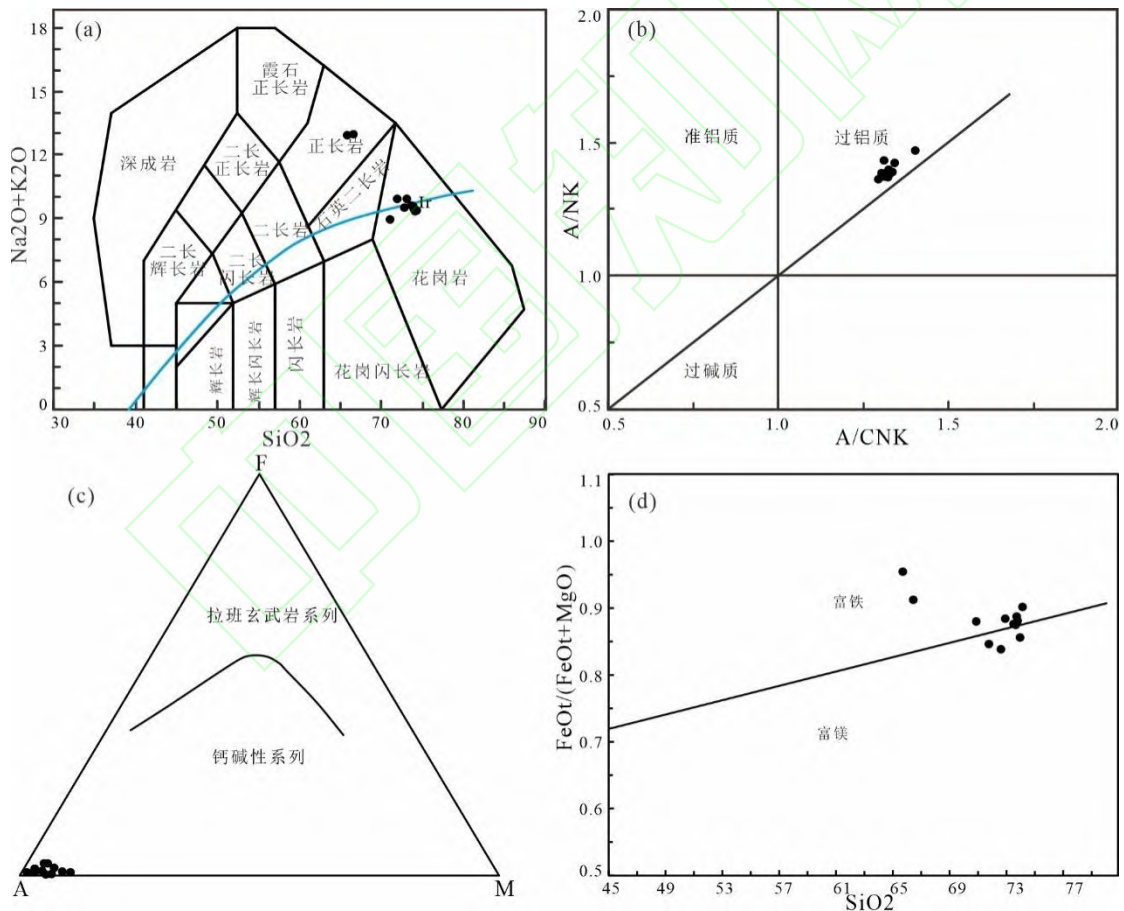


图 6 榆树沟矿床石英正长岩体主量元素地球化学判别图解

Fig. 6 Geochemical discrimination diagrams of major elements for the ore-forming rocks of the Yushugou deposit

5.3 微量、稀土元素特征

微量元素分析结果表明（表 5），榆树沟矿床石英正长岩体相对富集 Rb、Pb、K 等大离子亲石元素（LILE），相对亏损 Ce、Ti、Hf 等高场强元素（HFSE），并表现出明显贫 P、Ti

富 Nb、Ta 的特征。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上（图 7b），过渡族元素的分布模式曲线呈现出典型的 W 型，以及明显的 LILE 富集趋势，此外 HFSE 中的 Th、Pb 相对富集，且 Ti 出现明显负异常。

稀土元素的分析结果表明（表 5），榆树沟矿床的石英正常岩体稀土元素总量较高（ $\Sigma\text{REE}=217.74\text{ppm}\sim 1953.40\text{ppm}$ ），LREE/HREE 介于 20.90~61.54 之间。稀土元素球粒陨石标准化图解（图 7a）表现为明显的右倾模式。 $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 14.55~51.16 之间， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均值（46.08） >10 ， $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 介于 6.08~21.59 之间，显示出明显的轻稀土（LREE）富集和重稀土（HREE）亏损。具有较弱的负 Eu 异常（ $\delta\text{Eu}=0.50\sim 0.89$ ），弱的正 Ce 异常（ $\delta\text{Ce}=1.04\sim 1.65$ ）。

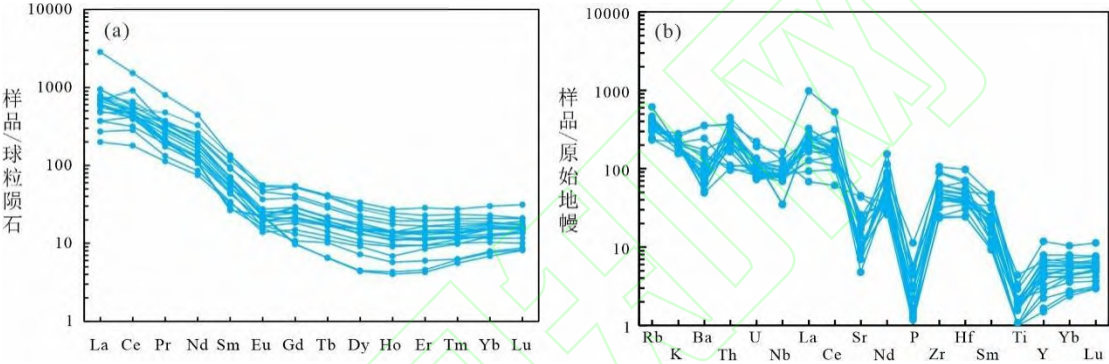


图 7 榆树沟矿床石英正长岩稀土、微量元素地球化学图解（据 Sun & McDonough,1989 球粒陨石标准化）
Fig. 7 Geochemical diagram of rare earth and trace elements in the ore-forming rock mass of the Yushugou Deposit (According to Sun & McDonough,1989 chondrite standard)

5.4 Sr-Nd-Pb 同位素特征

榆树沟矿床石英正长岩的 Sr-Nd 同位素分析结果见表 6，Pb 同位素分析结果见表 7。岩体的 Rb、Sr 含量分别为 150.91ppm~303.2ppm 和 149.35ppm~534.55ppm， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别介于 0.720790~0.786738、0.510728~0.5110967， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 35.2088~37.7335、15.0470~15.2380、15.1181~16.4612。利用岩石加权平均结晶年龄（1724Ma）校正 Rb、Sr、Pb 同位素组成后， I_{Nd} 初始值为 0.510099~0.510177，对应的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -4.52~-6.05，Nd 模式年龄(T_{DM})和二阶段模式年龄($T_{2\text{DM}}$)分别为 2265Ma~2446Ma、2596Ma~2718Ma；初始比值 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{i}}$ 、 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{i}}$ 和 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{i}}$ 分别为 35.1953~37.7202、15.0461~15.2372、15.1099~16.4546。

表 4 榆树沟矿床石英正长岩主量元素分析结果表

Table 4 Major Element Analysis Results for the Ore-forming Intrusive Rocks in the Yushugou Deposit

样品编号	YSG-20101	YSG-20103	YSG-20104	YSG-20105	YSG-20107	YSG-20108	YSG-20109	YSG-201010	YSG-201012	YSG-201013
SiO ₂	74.35	71.48	73.45	71.74	73.33	73.36	65.77	64.96	70.32	72.6
TiO ₂	0.2	0.42	0.39	0.42	0.36	0.4	0.22	0.14	0.71	0.37

Al ₂ O ₃	13.56	13.87	13.14	14	13.48	13.35	17.85	17.89	12.9	13.9
TFe ₂ O ₃	1.66	2.53	1.9	2.05	2.01	1.98	1.34	2.24	4.6	1.86
MnO	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.05	0.01
MgO	0.17	0.42	0.29	0.36	0.26	0.26	0.12	0.1	0.57	0.22
CaO	0.55	0.6	0.5	0.44	0.38	0.35	0.57	0.49	0.81	0.38
Na ₂ O	3.68	4.1	3.59	3.86	3.71	3.56	4.75	5.34	3.91	3.78
K ₂ O	5.86	5.92	5.81	5.66	6.01	6.1	8.27	7.62	5.1	6.23
P ₂ O ₅	0.03	0.07	0.05	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.1	0.03
LOI	0.38	0.43	0.53	0.62	0.51	0.37	0.44	0.41	0.59	0.55
SUM	100.46	99.87	99.66	99.23	100.09	99.77	99.35	99.22	99.66	99.94
Na ₂ O+K ₂ O	12.04	9.06	10.98	10.13	10.52	9.33	11.22	10.68	9.52	10.08
K ₂ O/Na ₂ O	1.24	1.72	1.41	1.48	1.59	1.59	1.43	0.78	1.59	1.44
里特曼指数 (δ)	6.36	2.64	5.28	3.96	4.04	2.89	6.41	4.73	2.9	3.52
A/NK	1.44	1.46	1.51	1.51	1.36	1.46	1.63	1.7	1.42	1.38
A/CNK	1.37	1.42	1.39	1.42	1.26	1.42	1.52	1.53	1.34	1.31
样品编号	YSG- 201014	YSG- 201014b	YSGH-1	YSGH-2	YSGH-3	YSGH-4	YSGH-5	YSGH-6	YSGH-7	YSGH-8
SiO ₂	73.84	73.59	65.03	73.18	64.98	68.02	69.53	72.26	60.64	66.13
TiO ₂	0.39	0.39	0.44	0.33	0.62	0.47	0.46	0.46	0.92	0.16
Al ₂ O ₃	13.26	13.17	17.18	13.11	16.37	15.12	14.08	13.48	17.72	17.93
TFe ₂ O ₃	2.04	2.04	3.28	2.68	4.19	3.69	3.03	2.84	5.1	2.36
MnO	0.02	0.02	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.03	0.07	0.03
MgO	0.25	0.24	0.3	0.21	0.62	0.55	0.37	0.21	0.48	0.19
CaO	0.48	0.47	0.62	0.31	0.9	0.67	0.74	0.28	0.77	1.17
Na ₂ O	3.56	3.57	5.31	3.3	4.5	4.03	4.01	3.56	4.48	5.9
K ₂ O	6.01	6.1	6.59	5.66	6.34	5.97	6.38	5.66	6.39	4.62
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.06	0.03	0.12	0.1	0.12	0.03	0.24	0.03
LOI	0.41	0.39	0.22	0.44	0.33	0.37	0.22	0.46	2.28	0.52
SUM	100.3	100.01	99.09	99.28	99.03	99.03	99.01	99.27	99.09	99.04
Na ₂ O+K ₂ O	9.66	9.48	9.76	9.72	13.16	13.11	9.09	10.08	9.71	9.59
K ₂ O/Na ₂ O	1.47	1.62	1.62	1.71	1.74	1.43	1.3	1.65	1.71	1.69
里特曼指数 (δ)	3.14	2.89	3.11	3.06	7.37	7.56	2.95	3.38	3.05	2.97
A/NK	1.47	1.4	1.39	1.38	1.37	1.38	1.43	1.39	1.36	1.38
A/CNK	1.41	1.33	1.33	1.33	1.31	1.33	1.31	1.34	1.3	1.32

表 5 榆树沟矿床石英正长岩微量、稀土元素分析结果表

Table 5 Trace and REE Analysis Results of the Ore-forming Intrusive Rocks in the Yushugou Deposit										
样品 编号	YSG- 20101	YSG- 20103	YSG- 20104	YSG- 20105	YSG- 20107	YSG- 20108	YSG- 20109	YSG- 201010	YSG- 201012	YSG- 201013
La	87.7	222	158	117	170	64.2	47.1	145	675	132
Ce	256	362	309	255	312	173	109	240	938	271
Pr	16.6	31.7	25.6	19.3	28.4	12.5	10.7	18.8	76.1	23.3
Nd	51.1	93	75.8	57.9	84.7	39.8	35.0	50.5	207	68.5
Sm	6.76	10.8	9.02	6.62	9.58	5.23	5	4.34	20.6	8.25
Eu	1.12	1.60	1.29	1.15	1.29	0.805	0.979	0.905	2.75	1.11
Gd	3.98	5.93	4.19	4.45	5.04	3.06	2.70	2.22	11	4.46
Tb	0.632	0.818	0.648	0.618	0.713	0.461	0.409	0.381	1.55	0.651
Dy	3.40	4.27	3.44	3.94	3.76	2.52	2.32	1.83	8.47	3.79

Ho	0.624	0.776	0.616	0.787	0.682	0.512	0.389	0.324	1.55	0.707
Er	1.96	2.14	1.90	2.74	1.92	1.56	1.41	0.99	4.71	2.28
Tm	0.314	0.350	0.292	0.418	0.309	0.284	0.251	0.160	0.700	0.339
Yb	2.57	2.56	2.11	2.97	2.24	2.13	2.08	1.34	5.10	2.57
Lu	0.412	0.418	0.345	0.487	0.351	0.344	0.372	0.221	0.792	0.393
Y	19.6	23.3	18.4	25.1	21.6	14.9	12.1	10.1	53.7	20.6
Pb	36.2	39.7	22.9	24.5	26.3	25.8	23.2	22.2	27.3	24.7
Cr	0.329	0.901	1.95	2.54	0.678	0.597	0.297	0.320	1.40	0.345
Li	6.95	15.4	7.26	13.2	17.1	15.5	1.17	1.15	16.8	14.1
Be	12.8	5.44	3.90	4.85	4.42	4.40	6.86	8.24	7.11	4.46
Ba	437	505	708	777	563	579	2467	2466	517	492
Ga	21.7	21.3	17.9	19.4	19.5	18.6	31.1	29.3	24.4	19.8
Hf	10.9	14.9	12.3	11.9	11.1	12.3	21.1	9.4	30.0	12.8
Nb	51.9	63.2	52.6	58.0	55.8	59.6	89.7	67.7	115	60.4
Rb	399	275	246	262	259	259	214	193	218	270
Sr	146	185	195	230	196	201	914	951	291	182
Ta	2.74	3.39	2.99	3.32	3.16	3.35	4.51	2.69	5.99	3.36
Th	27.1	25.1	20.1	14.7	18.8	31.3	33.4	32.4	40.1	20.8
U	2.70	1.77	2.28	1.50	1.45	1.60	4.43	2.22	3.81	1.55
Zr	358	607	496	484	450	489	654	276	1180	537
TE _{1,3}	0.965565	0.966926	1.003204	1.021647	1.044845	1.101562	1.137097	0.944548	0.938877	1.175272
ΣLREE	418.56	719.16	577.23	455.70	605.23	294.95	206.82	458.30	1916.79	503.15
ΣHREE	13.89	17.26	13.55	16.41	15.02	10.88	9.94	7.46	33.86	15.18
ΣREE	433.57	738.02	592.08	473.26	621.54	306.64	217.74	466.67	1953.40	519.44
δEu	0.61	0.55	0.56	0.61	0.51	0.57	0.74	0.80	0.50	0.51
δCe	1.54	0.93	1.08	1.19	1	1.40	1.15	0.97	0.84	1.10
(La/Yb) _N	24.46	62.05	53.75	28.27	54.57	21.61	16.21	77.55	94.99	36.99
(Ce/Yb) _N	27.69	39.28	40.70	23.83	38.75	22.56	14.55	49.58	51.16	29.33
样品 编号	YSG- 201014	YSG- 201014b	YSGH-1	YSGH-2	YSGH-3	YSGH-4	YSGH-5	YSGH-6	YSGH-7	YSGH-8
La	145	144	185	223	138	87.4	180	112	163	186
Ce	269	265	324	349	292	192	401	291	556	269
Pr	27.6	27.1	45.2	33.5	33.2	18.0	35.4	20.3	31.2	20.0
Nd	84.9	82.7	152	93.8	120	60.7	111	61.3	104	49.7
Sm	10.7	10.8	20.6	10.4	17.8	7.93	14.5	7.13	13.8	4.06
Eu	1.32	1.29	3.23	1.48	3.11	1.47	2.12	0.95	2.66	1.33
Gd	6.03	5.87	11.2	5.24	10.7	5.04	7.86	3.73	8.44	2.03
Tb	0.79	0.80	1.47	0.68	1.49	0.72	1.06	0.53	1.14	0.24
Dy	4.62	4.61	6.91	3.33	7.37	3.83	5.29	2.80	5.75	1.11
Ho	0.78	0.81	1.26	0.64	1.39	0.77	0.99	0.54	1.10	0.23
Er	2.41	2.32	3.24	1.81	3.78	2.26	2.75	1.54	3.19	0.71
Tm	0.388	0.354	0.495	0.306	0.599	0.382	0.451	0.258	0.524	0.142
Yb	2.87	2.74	3.20	1.97	3.87	2.59	3.05	1.75	3.57	1.17
Lu	0.408	0.394	0.448	0.295	0.536	0.380	0.434	0.256	0.528	0.207
Y	27.1	25.9	31.9	19.4	35.9	19.9	29.1	12.8	29.8	6.82
Pb	25.2	25.1	54.4	32.4	48.8	43.9	50.3	35.1	54.2	46.4
Cr	0.684	0.705	2.65	1.47	2.97	5.84	5.44	1.60	0.901	3.57
Li	15.5	15.4	13.7	5.17	25.3	29.3	2.60	2.71	14.2	5.48

Be	4.41	3.99	4.02	3.27	5.73	3.37	5.32	4.74	3.68	10.8
Ba	485	474	342	611	1687	1088	1224	365	970	757
Ga	19.9	19.4	28.1	19.7	26.2	22.5	26.1	18.6	28.8	27.7
Hf	12.7	13.1	15.6	11.9	21.9	14.5	11.2	16.8	20.5	7.51
Nb	60.3	60.1	48.8	52.1	65.8	55.7	74.2	73.4	92.6	24.5
Rb	269	262	217	303	241	201	273	261	150	157
Sr	182	176	149	181	495	351	369	100	401	523
Ta	3.30	3.23	2.69	2.57	3.30	2.71	3.59	3.35	4.06	0.97
Th	17.2	17.1	9.25	24.4	9.97	8.56	22.5	19.2	9.64	26.6
U	1.70	1.63	1.63	2.09	2.10	1.89	2.52	2.31	2.22	2.45
Zr	541	546	725	431	1009	581	479	679	984	262
TE _{1,3}	0.996599	1.073833	1.041627	1.028298	1.1007	1.105438	1.085573	0.9793419	1.061508	1.023327
ΣLREE	537.80	528.85	729.28	710.55	602.08	367.03	743.82	492.82	869.22	529.62
ΣHREE	18.30	17.88	28.25	14.27	29.70	15.98	21.88	11.42	24.25	5.84
ΣREE	557.41	548.02	760.76	726.29	634.90	384.47	767.83	505.19	896.13	536.79
δEu	0.46	0.45	0.59	0.54	0.64	0.66	0.55	0.51	0.70	1.26
δCe	0.97	0.97	0.84	0.88	1.03	1.13	1.16	1.38	1.79	0.89
(La/Yb) _N	36.40	37.70	41.72	81.52	25.65	24.20	42.50	46.09	32.91	114.47
(Ce/Yb) _N	26.08	26.86	28.21	49.35	21.02	20.68	36.64	46.18	43.33	64.25

表 6 榆树沟矿床石英正长岩 Sr-Nd 同位素分析结果表

Table 6 Sr-Nd Isotopic Analysis Results of the Ore-forming Intrusive Rocks in the Yushugou Deposit

样品 编号	含量(μg/g)		⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	<i>I</i> _{Sr}	含量(μg/g)		¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	<i>I</i> _{Nd}	εNd(t)	年龄(Ma)		fRb/	fSm/
	Rb	Sr				Sm	Nd					TDM	T2DM		
Ysb1	217.6	149.3	4.215957	0.7760	0.6741	20.65	152.7	0.081791	0.5110	0.5101	-5.5	2431	2675	48.76	-0.57
Ysb3	303.2	181.6	4.830803	0.7867	0.6698	10.40	93.81	0.067006	0.5109	0.5101	-4.52	2303	2596	56.02	-0.65
Ysb11	273.6	369.7	2.141531	0.7414	0.6896	14.54	111.5	0.078844	0.5110	0.5100	-6.05	2446	2718	24.28	-0.58
Ysb15	150.9	401.8	1.086814	0.7260	0.6997	13.82	104.3	0.080069	0.5110	0.5101	-5.21	2403	2650	11.83	-0.58
YSG1b	159.3	534.5	0.862725	0.7207	0.6999	4.07	50.00	0.049243	0.5107	0.5101	-5.11	2265	2643	9.18	-0.74

表 7 榆树沟矿床石英正长岩 Pb 同位素分析结果表

Table 7 Pb Isotopic Analysis Results of the Ore-forming Intrusive Rocks in the Yushugou Deposit

样品号	U	Th	Pb	Age/Ma	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	ω
					b	b	b	b)i	b)i	b)i		
Ysb1	1.63	9.25	54.47	1724	15.1181	15.0470	35.2088	15.1099	15.0461	35.1953	9.14	37.57
Ysb3	2.09	24.45	32.41	1724	16.4612	15.2380	37.7335	16.4546	15.2372	37.7202	9.05	42.44
Ysb11	2.10	9.97	48.81	1724	15.9950	15.1520	36.9888	15.9884	15.1513	36.9754	8.99	41.41
Ysb15	1.89	8.56	43.98	1724	15.2697	15.0791	35.3911	15.2639	15.0784	35.3855	9.14	37.68
YSG1b1	2.5	25.81	46.09	1724	16.0864	15.1552	36.9548	16.0798	15.1545	36.9412	8.97	40.48
7												

6. 讨论

6.1 成矿时代

根据近年来在华北克拉通北缘东段乃至东北地区获得的成岩成矿年龄数据,我们发现研究区内金属矿床的成矿作用是多期、多阶段、多地质作用的产物,大致可以分为两个主要成矿期(Wu F Y, et al., 2000; 张春晖等, 2009; 宋建潮, 2010; REN Yunsheng, et al, 2012;

陈衍景等, 2012; 张勇, 2013; Yong Zhang, et al, 2015): (1) 早中元古代成矿期(2170~1400Ma): 在早元古代形成期间, 伴随着强烈的构造运动、水下火山作用和沉积作用(Zhou et al., 2017), 来自上地幔或者地壳深部的火山喷发物质对其金属矿床的形成起着至关重要的作用, 形成了岩丘、岩脊及次一级的盆地或水下沟槽, 控制了区内硼矿、铜钴矿、铅锌矿、菱镁矿及稀土矿的产状和分布(杨进辉等, 2007; 王一先等, 1997; 郭斌等, 2018, 2020), 裂谷形成期间存在上下两个较大的火山喷发旋回, 下部为强烈的里尔峪火山喷发旋回, 形成了铜钴金属矿床, 上部为较弱的高家略组至大石桥组火山喷发旋回, 对铅锌、稀土矿的形成有重要的贡献; (2) 中生代成矿期(250~66Ma): 中生代在中国东部环太平洋沿岸一带发生了大规模的构造岩浆活动, 构造以形成北北东、北东向挤压深大断裂为特征, 岩性以碱性-中酸性闪长岩花岗岩及其过渡类型为特征(Zhu et al., 2016), 后者的发育空间常受前者的控制, 伴随大规模的构造活动、岩浆侵入喷发活动, 形成了大量金属矿产(陈金勇等, 2019; 李锦铁等, 2007), 不同的区域形成不同的矿产种类, 这些金属矿床的形成受到下部地壳甚至上地幔的地球化学性质、地球动力学特征的制约, 除形成了最具特点的金矿外, 尚有少量的斑岩型、夕卡岩型、金属矿床, 而且有迹象表明, 花岗岩型和碱性岩型具有较好的找矿前景。

本文所测榆树沟矿床石英正长岩体的 U-Pb 年龄为 $1724.1 \pm 7.1\text{Ma}$, 说明该岩体形成较早, 应为花岗岩结晶基底, 受后期构造、岩浆活动影响后富集成矿, 与四堡运动有关, 是引发区域性低绿片岩相变质的重要因素, 该时期断裂为 NNE 向硅铝层深断裂, 其北段横切四堡期褶皱, 逆冲断距达三千米。断裂带发育糜棱岩、构造透镜体及硅化带。作者及团队曾测区内成矿类型相似的大喜营子矿床成矿不同岩体的 U-Pb 年龄为 $229.5 \pm 4.0\text{Ma}$ (白云母花岗岩) 和 $205.4 \pm 3.0\text{Ma}$ (花岗伟晶岩), 说明成矿作用为两个阶段, 即早期的白云母花岗岩阶段和晚期的伟晶岩阶段, 由此可知, 大喜营子矿床是印支晚期-燕山早期岩浆作用的产物; 赛马矿床成矿岩体的 U-Pb 年龄为 $224.4 \pm 6.1\text{Ma}$, 形成于印支晚期。结合前人区域成矿期次的研究成果(鞠楠等, 2019, 2024, 2025), 我们认为, 辽宁省稀有-稀土成矿作用发生在两个时期, 即中生代的印支晚期-燕山早期以及中元古代的四堡期, 榆树沟矿床属长城纪成岩成矿事件的产物。

6.2 成岩成矿物质来源

通常认为 A 型花岗岩岩浆活动主要发生在地壳伸展期间(Clemens et al., 1986; Ostendorf et al., 2014), 物质来源有亏损地幔、原始地幔、富集地幔、壳-幔和地壳物质等(许保良等, 1998; 吴锁平等, 2007; 华北等, 2020)。榆树沟矿床碱性岩具有相似的岩石地球化学特征, Ga/Al - $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、 Ga/Al -Ce、 Ga/Al -Zr、Y/Nb-Yb/Ta 等系列地球化学判别图解表明(图 8), 榆树

沟石英正长岩与典型的 A 型花岗岩地球化学特征一致 (Whalen et al., 1987)。并表现出富硅、富碱, 贫钙和镁, 较弱 Eu 负异常, 微弱 Ce 正异常, 富集 LILE 元素, 亏损 HFSE 元素, 与大陆裂谷层状基性侵入岩的过渡族元素的分布模式一致, 表明碱性岩来源于相同的岩浆源区, 且来源较深 (牛贺才等, 2002; 赵振华等, 2008, Qiu et al., 2023)。(Ce/Yb)_N 介于 14.55~51.16 之间, (La/Yb)_N 平均值 (46.08) > 10, (La/Sm)_N 介于 6.08~21.59 之间, 反映 LREE 与 HREE 的内部分异程度很高, 具有幔型正长岩的特点, 可能反映源区存在有限石榴子石参与或后期角闪石分离结晶的影响。

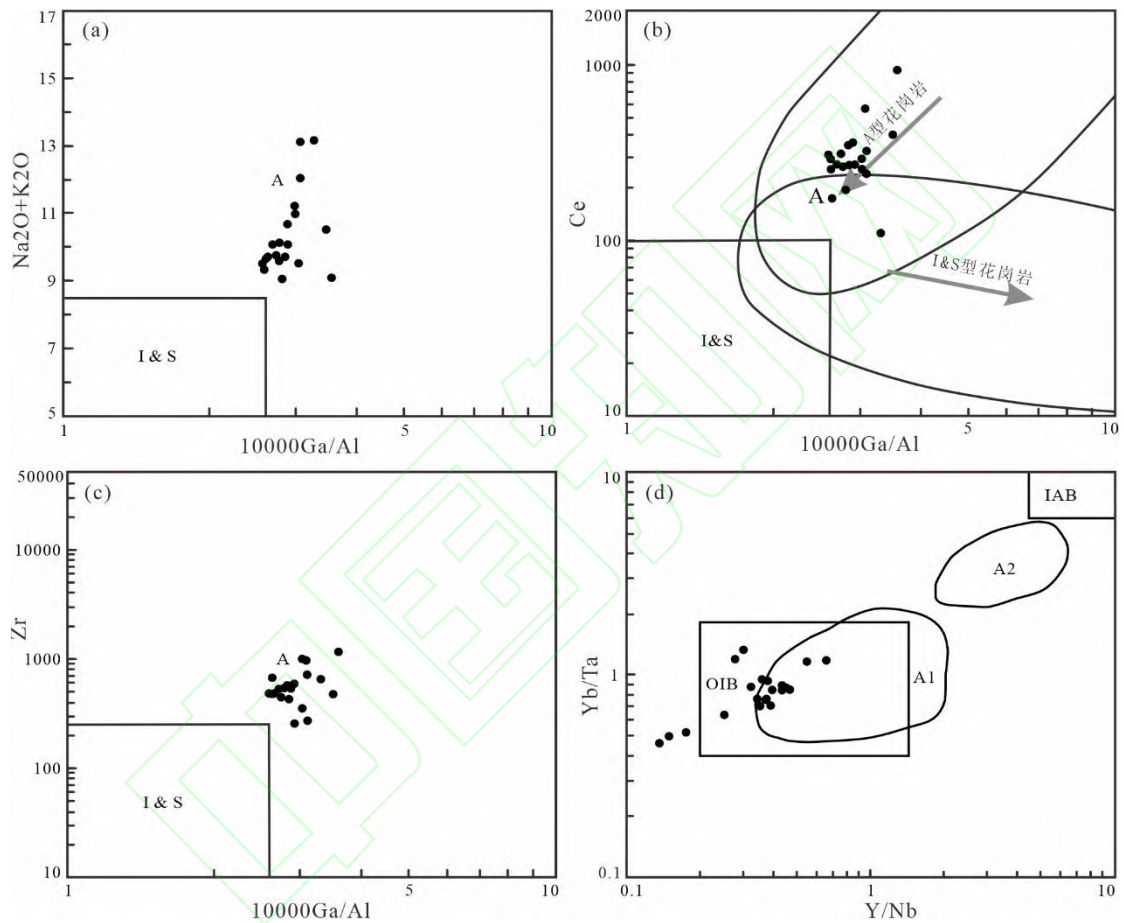


图 8 榆树沟矿床石英正长岩岩浆源区判别图解

Fig. 8 Diagram for identifying the magmatic source area of the ore-forming rock mass of the Yushugou Deposit

结合野外地质观察以及元素地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素示踪的综合分析, 本文认为榆树沟矿床碱性岩来源于亏损岩石圈地幔, 并受一定程度的地壳物质混染 (图 9), 理由如下:

- (1) Nd-Pb 同位素证据: 榆树沟矿床石英正长岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}(t)}$ 值为负, 具有较老的 Nd 同位素二阶模式年龄, 显示出亏损地幔源区特征 (邱检生等, 2000, 2005; Xu et al., 2015; King et al., 1997; Wu et al., 2002)。
- (2) 主量元素证据: 样品在 $\text{SiO}_2\text{-FeO}^t/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 图解中落在富铁与富镁的过渡区域, 指示在成岩过程中受到一定的地壳混染。
- (3) 微量元素证据: 碱性岩的 Sr 含量较低, 而富集地幔 Sr 含量高达 1100 ppm (Chen and Zhai, 2003), 因此不可能是富集地幔部

分熔融的产物 (Li et al., 2015; Miao et al., 2007, 2008)。而亏损地幔和下地壳的 Sr 含量分别为 20ppm、290 ppm 的值较为一致(Wang et al., 2006)。综上，榆树沟石英正长岩具有典型的 A 型花岗岩特征，成岩物质主要来源于亏损岩石圈地幔，并经历了一定程度的地壳物质混染。

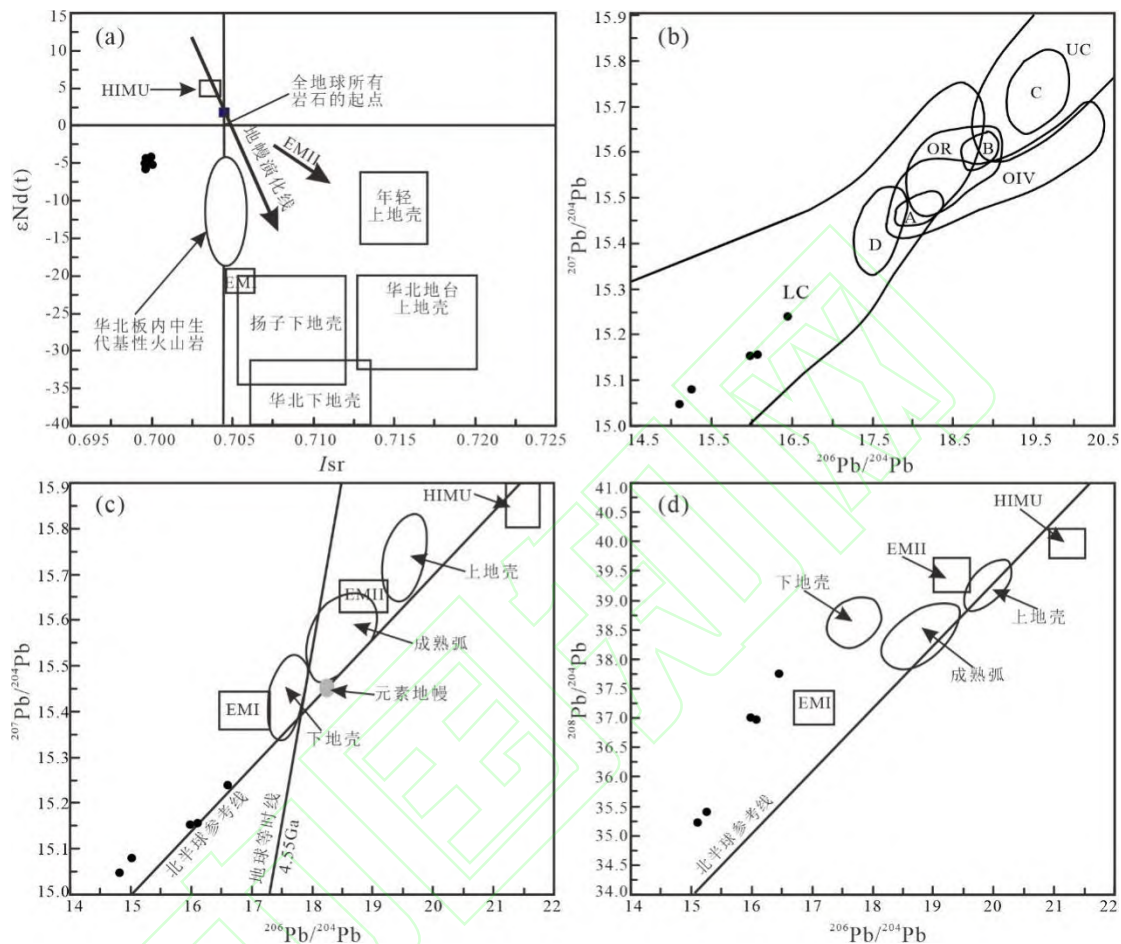


图 9 榆树沟矿床石英正长岩岩浆来源判别图解

Fig. 9 Diagram for Identifying the magmatic source of the ore-forming rock mass in the Yushugou Deposit

6.3 岩浆演化与稀有-稀土成矿作用

花岗岩稀土四分组效应是地球化学研究领域的前沿问题 (Jahn et al., 2001)，研究表明花岗岩岩浆高程度结晶分离作用导致残余熔体富含 F、H₂O、Cl 等挥发分，形成富卤素的熔体-流体共存体系。这种特殊的熔体-流体相互作用会引发 M 型稀土四分组效应，并促使稀有金属元素在体系中极端富集，形成 (超) 大型稀有金属矿床(赵振华等,1997; 杨武斌等 2009; 李世超等,2015; 范文博等,2019; 武广等,2021; 徐夕生等, 2010; 钟军等, 2020)。具有稀土四分组效应的系统显著偏离球粒陨石的 Zr/Hf、Y/Ho 比值，明显受高演化的富挥发分岩浆的制约，表明岩浆体系已经进入了类似水-流体系统(Bau M, 1996; 杨武斌等 2011)。Irber(1999)以 1.0 和 1.1 的 TE_{1,3} 值为界限，认为 TE_{1,3} 值大于 1.1 的岩石具有明显的稀土元素四分组效

应, $TE_{1,3}$ 值小于 1.0 的岩石不存在稀土四分组效应。如图 10 所示, 榆树沟矿床石英正长岩的 $TE_{1,3}$ 值绝大部分大于 1.0 (图 10c), Y/Ho 、 Zr/Hf 、 Y/Ho 、 K/Rb 比值随 $TE_{1,3}$ 值的增大增减小, K/Ba 比值随 $TE_{1,3}$ 值的增大而增大, 表明榆树沟矿床大部分石英正长岩存在明显的稀土四分组效应(Irber et al., 1999), 且碱性碱性岩体岩浆演化程度明显高于碱性花岗岩。在 $Ba-Eu$ 、 $Sr-Eu$ 、 $Ba-Sr$ 和 $1/Sr-Rb/Sr$ 协变图解中(图 11), 石英正长岩样品的投影点呈线性排列, 表明其岩浆在侵位后经历了较强烈的分异演化, 石英正长岩分异演化主要受黑云母、长石和角闪石结晶的控制。

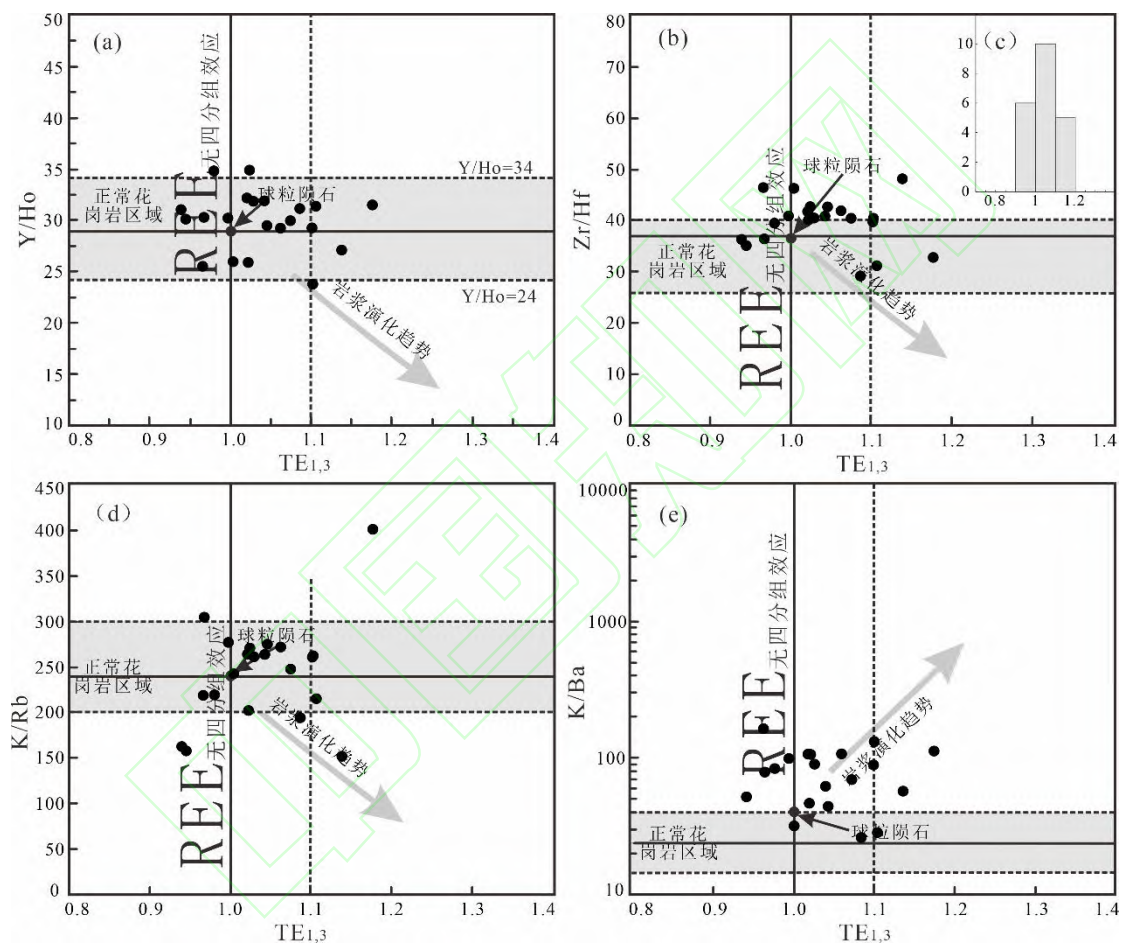


图 10 榆树沟矿床石英正长岩岩浆演化判别图解

Fig. 10 Diagram for the magmatic evolution discrimination of the ore-forming rock mass of the Yushugou Deposit

综上, 榆树沟铌-钽-稀土矿床石英正长岩的 $TE_{1,3}$ 值绝大多数大于 1.0, 具有稀土四分组效应, 说明富矿岩体的原始岩浆是富含挥发分(F、 H_2O 、Cl)的熔体, 除了分离结晶, 还发生了显著的熔体-流体相互作用(杨武斌等, 2009)。因此, 本文认为榆树沟铌-钽-稀土矿床的成矿作用与岩浆演化密切相关, 即受高演化岩浆后期阶段熔体-流体相互作用控制。

6.4 成矿构造背景

研究区位于华北克拉通北缘, 燕山板内造山带东段, 是天山—阴山巨型纬向构造体系与

新华夏构造体系的关键交接部位 (Windley et al., 2007; Xiao et al., 2003; Chen et al., 2000, 2009; Sun et al., 2007; Song et al., 2015)。该区构造演化可分为三个阶段：太古界-古元古代基底形成阶段、中元古代-三叠纪盖层演化阶段和中生代以来的板内造山阶段。其中，稀有-稀土成矿主要发生在中元古代-三叠纪构造演化时期 (Xu et al., 2009)，吕梁运动 (~1.8Ga) 固结后，华北克拉通进入稳定的盖层发育阶段。至中元古代初期，对应于全球性 Columbia 超大陆裂解事件，本区发生了关键的“燕辽裂陷”或“四堡裂陷”事件 (~1.7Ga-1.6Ga; 翟明国等, 2000; 李江海等, 2003)。这一事件标志着研究区从稳定的克拉通内部转化为大陆裂谷谷环境构成了区域上 NE 向展布的燕辽沉降带的雏形，本次榆树沟矿床的石英正长岩的锆石 U-Pb 年龄为 $1724.1 \pm 7.1\text{Ma}$ ，进一步证实了 NE 向断裂的形成，并为后续的岩浆上涌提供了通道 (He et al., 2024)。此过程中，陆壳减薄，为洋壳底侵，形成了大量中酸性-基性侵入体，构成了榆树沟地区的花岗质结晶基底。

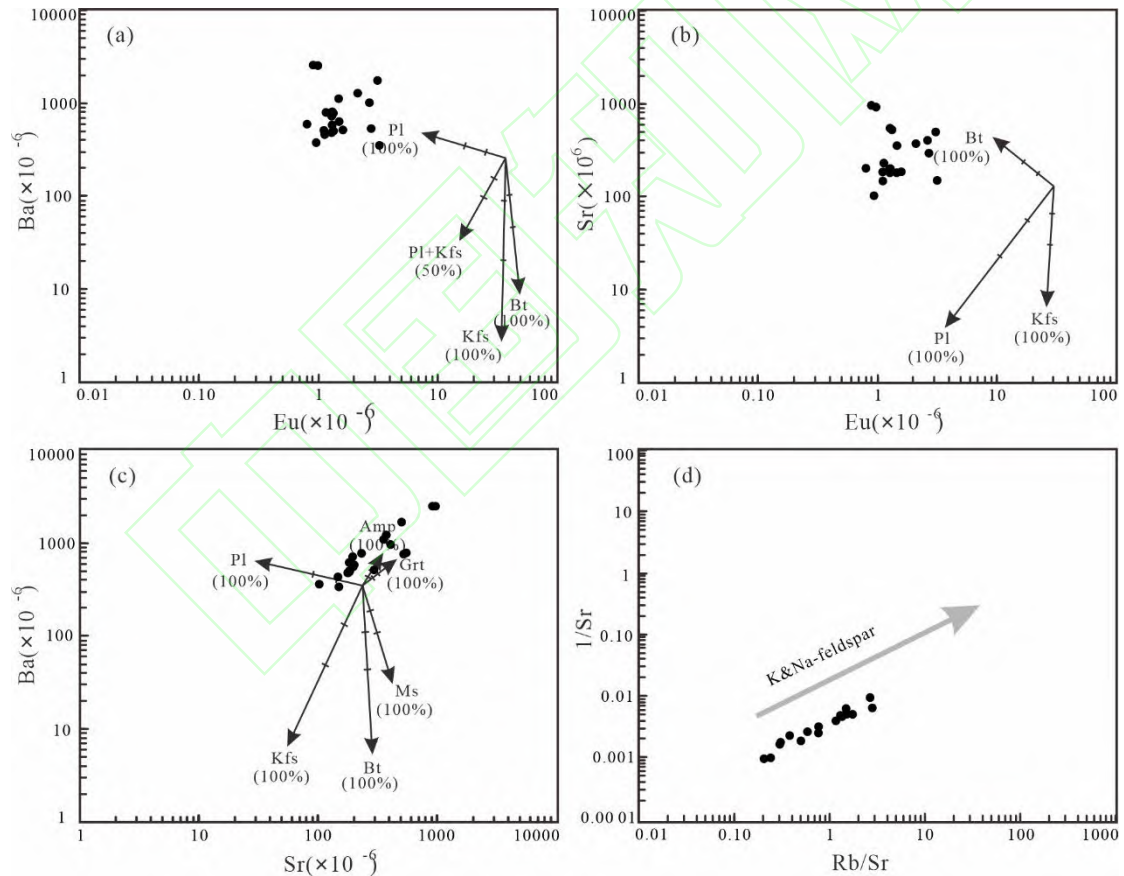


图 11 榆树沟矿床石英正长岩成矿构造背景判别图解

Fig. 11 Diagram for the identification of the metallogenic tectonic background of the ore-forming rock mass in the Yushugou Deposit

地球化学特征表现为富集 Rb、Pb、K 等 LILE 元素，而亏损 Ce、Ti、Hf 等 HFSE 元素；贫 P 但富 Nb、Ta。在 Ba-Eu、Sr-Eu 等源区判别图解中，样品则落入壳幔混合源区域 (图 11)，指示富矿岩体具有典型的板内裂谷岩浆岩属性。与研究团队在赛马砬钽矿床的研究成

果相似，具有高碱、高 TfO/MgO 比值、低镁钙、富 LILE 并亏损 HFSE 特征，并同属 A 型花岗岩（鞠楠等，2024）。大量研究表明，Nb、Ta 元素在岩浆及相关成岩成矿过程中的异常地球化学行为，即明显富集或亏损，从而导致 Nb/Ta 值强烈偏离原始地幔、亏损地幔及地壳比值的异常特点，可以反映岩浆来源及成因（赵振华等，2008；刘源等，2015）。大喜营子矿床成矿岩体的 Nb/Ta 值为 1.46~3.04，明显低于大陆地壳平均值（Nb/Ta=17.5），暗示其来源于花岗岩结晶基底；而榆树沟矿床岩体的 Nb/Ta 比值为 17.46~26.07，明显高于原始地幔平均值（Nb/Ta=17.5），指示榆树沟矿床来源于拉张环境下的深部地幔（丘志力等，2014）。在 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{Ga}/\text{Al}$ 、 $\text{Ce}-\text{Ga}/\text{Al}$ 、 $\text{Zr}-\text{Ga}/\text{Al}$ 、 $\text{Yb}/\text{Ta}-\text{Y}/\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}-\text{Yb}$ 、 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 、 $\log((\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO})-\text{SiO}_2$ 与 R2-R1 等火成岩构造环境、物质源区判别图解上（图 12），岩体样品全部落入 A 型花岗岩岩区，即产于裂谷带和稳定大陆板块内部的花岗岩（刘昌实等，2003；Yang JH et al., 2012；Yang WB et al., 2014），且属于板内-后碰撞-裂谷型岩石区域（图 12）。上述特征与国内同类型矿床成矿岩体地球化学特征基本一致，形成于后碰撞时期的大陆板块扩张或裂谷环境。

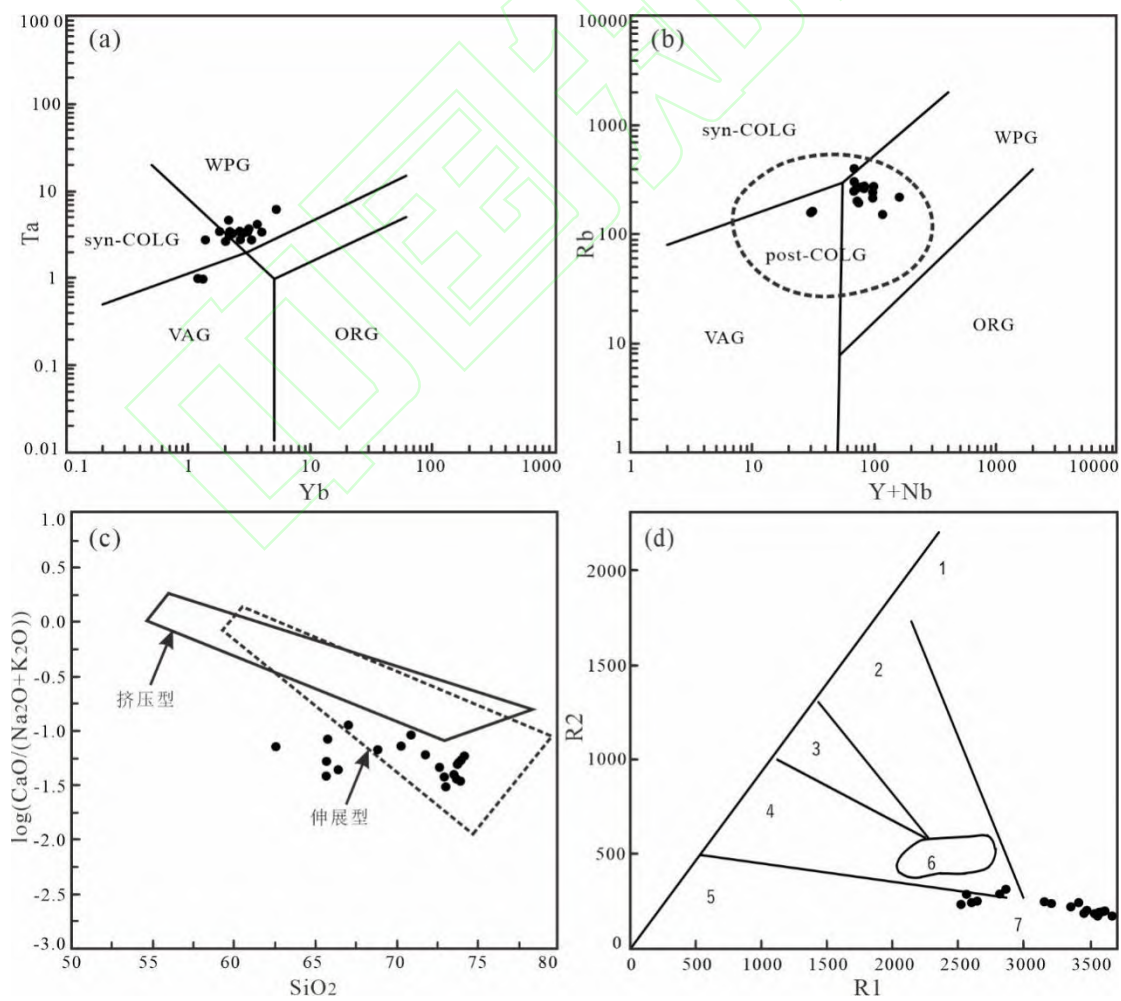


图 12 榆树沟矿床石英正长岩成矿背景判别图解

1.地幔分异; 2.碰撞前; 3.碰撞后抬升; 4.造山晚期; 5.非造山; 6.同碰撞; 7.后造山; syn-COLG: 同碰撞花岗岩; post-COLG: 同碰撞花岗岩; WPG: 板内花岗岩; VAG: 火山弧花岗岩; ORG: 洋中脊花岗岩;

Fig. 12 The metallogenic background discrimination map of the Yushugou Deposit

1. Mantle differentiation; 2. Pre-collision; 3. Post-collision uplift; 4. Late orogenic; 5. Non-orogenic; 6. Syn-collision; 7. Post-orogenic; syn-COLG: Syn-Collisional Granite; post-COLG: Post-Collisional Granite; WPG: Within-Plate Granite; VAG: Volcanic Arc Granite; ORG: Ocean Ridge Granite;

综上所述, 榆树沟矿床稀有-稀土成矿过程可以推断为: 四堡运动时期末, 研究区从大陆裂谷型逐步向被动大陆边缘型转化, 岩石圈上升伴随的软流圈隆起事件、挤压造山事件或古大洋的消减事件、深部底侵和拆沉事件导致富集地幔部分熔融。形成的幔源岩浆在上升过程中与下地壳物质发生混染, 经高度分异演化后, 在正长岩结晶基底中富集 Nb、Ta、REE 元素 (Zhang SH et al., 2009, 2014, 2016), 形成以榆树沟为代表的华北克拉通北缘东段 Nb-Ta-REE 矿床。

7. 结论

(1) 榆树沟矿床的矿体形态简单, 多呈层状、脉状产出; 矿体均产于正长岩体内; 矿床的围岩蚀变较弱, 与矿体成渐变过渡关系; 矿石矿物以铌钽铁矿、褐钇铌矿为主, 伴有一定量的氟碳铈矿等。综上, 榆树沟矿床为典型的碱性岩/碱性花岗岩型稀有-稀土矿床。本文首次利用 SHRIMP U-Pb 锆石定年技术, 精确厘定榆树沟矿床成矿相关岩体的 U-Pb 年龄为 $1724.1 \pm 7.1\text{Ma}$, 表明该矿床形成较早, 与四堡运动有关。

(2) 榆树沟矿床成矿相关岩体属于过铝质、碱性-钙碱性、拉斑玄武岩系列, 与板块俯冲作用下的拉张环境或板内裂谷型岩系具有类似的元素地球化学特征; 同时, 稀土元素总量较高, 且含量差异明显, 轻重稀土元素分馏作用明显, 具有较弱的负 Eu 异常, 呈现轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾斜、V 字型图谱形式, 暗示其具有壳幔深部热液流体参与结晶的特征。全岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学特征表明, 榆树沟成岩成矿物质来源于下地壳和亏损地幔的混合源区, 且成矿岩体具有稀土四分组效应, 成矿作用与岩浆演化密切相关, 受高演化岩浆后期阶段熔体-流体相互作用控制。

(3) 榆树沟矿床形成于四堡期大陆裂谷向被动大陆边缘转化环境下, 成矿过程与岩石圈上升伴随的软流圈隆起、深部底侵和拆沉事件有关, 正长岩结晶基底受幔源岩浆作用改造, 促使 Nb、Ta、REE 元素富集, 导致大规模多金属成矿事件的发生。本研究的“裂谷拉张-壳幔相互作用-高演化岩浆成矿”模式, 可为华北克拉通北缘同类矿床勘查提供靶区预测标志。

参考文献(References):

- Bau, M., 1996. Controls on the Fractionation of Isovalent Trace Elements in Magmatic and Aqueous Systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and Lanthanide Tetrad Effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 323–333. doi:10.1007/s004100050159
- Black, L.P., Kamo, S.L., Allen, C.M., et al., 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Microprobe Geochronology by the Monitoring of a Trace-Element-Related Matrix Effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and Oxygen Isotope Documentation for a Series of Zircon Standards. *Chemical Geology*, 205(1–2): 115–140. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.01.003
- Chen, B., Jahn, B.M., Wilde, S.A., et al., 2000. Two Contrasting Paleozoic Magmatic Belts in Northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 328(1): 157–182. doi:10.1016/S0040-1951(00)00182-7
- Chen, B., Zhai, M.G., 2003. Geochemistry of Late Mesozoic Lamprophyre Dykes from the Taihang Mountains, North China, and Implications for the Sub-Continental Lithospheric Mantle. *Geological Magazine*, 140: 87–93. doi:10.1017/S0016756802007124
- Chen, B., Jahn, B.M., Tian, W., 2009. Evolution of the Solonker Suture Zone: Constraints from Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Ratios and Whole-Rock Nd-Sr Isotope Compositions of Subduction and Collision Related Magmas and Forearc Sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 245–257. doi:10.1016/j.jseae.2008.05.007
- Chen, J.Y., Fan, H.H., Wang, S.Y., et al., 2019. Geochemical Characteristics and Chronology of Alkali-granites in Baerzhe Area, Inner Mongolia, and Geological Significance [J]. *Geological Review*, 65(S1): 45-46(in Chinese).
- Chen, Y.J., Zhang, C., Li, N., et al., 2012. Geology of the Mo Deposits in Northeast China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(05): 1223-1268(in Chinese with English abstract).
- Clemens, J.D., Holloway, J.R., White, A.J.R., 1986. Origin of an A-Type Granites: Experimental Constraints. *American Mineralogist*, 71(3): 317–324.
- Fan, W.B., Jiang, N., Zhai, M.G., et al., 2019. Phanerozoic Garnet-bearing Leucogranite in the Northern Margin of North China Craton: Characters, Timing and Preliminary Petrogenesis study [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(07): 2237-2258(in Chinese with English abstract).
- He, D.Y., Qiu, K.F., Yu, H.C., et al., 2025. Lithospheric Architecture and Evolution of the Qinling Orogen of Central China and Associated Controls on Metallogeny. *Earth-Science Reviews*, 264: 105092. doi:10.1016/j.earscirev.2025.105092
- Hoskin, P.W.O., Black, L.P., 2000. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 423–439. doi:10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x
- Hoskin, P.W.O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62. doi: 10.2113/0530027
- Hua, B., Gao, X., Hu, Z.G., et al., 2020. Petrogenesis and Tectonic Setting of the Wuzhuxinwusu Granite, Western Xing-Meng Orogenic Belt: Evidences from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Sr-Nd-Hf Isotopes. [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(5): 1426-1444(in Chinese with English abstract).
- Hua, B., Gao, X., Hu, Z.G., et al., 2020. Petrogenesis and Tectonic Setting of the Wuzhuxinwusu Granite, Western Xing-Meng Orogenic Belt: Evidences from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Sr-Nd-Hf Isotopes. [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(5): 1426-1444(in Chinese with English abstract).
- Irber, W., 1999. The Lanthanide Tetrad Effect and Its Correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of Evolving Peraluminous Granite Suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3–4): 489–508. doi:10.1016/S0016-7037(99)00027-7

- Jahn, B.M., Wu, F.Y., Capdevila, R., et al., 2001. Highly Evolved Juvenile Granites with Tetrad REE Patterns: the Woduhe and Baerzhe Granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59: 171–198. doi:10.1016/S0024-4937(01)00066-4
- Ju, N., Liu, B., Ma, J.X., et al., 2025. Geochronology and Geochemistry of Magnetite-Bearing Leptynite in the Shengtieling REE Deposit, Liaoning, and Preliminary Study on Its REE Genetic Type. *Earth Science Frontiers*, 1–33 (in Chinese with English abstract).
- Ju, N., Shi, L., Yang, G., et al., 2024. Rare Metal and Rare Earth Element Mineralization in the Eastern Section of the North Margin of North China Plate: a Review [J]. *Geology and Resources*, 33(04): 537-550(in Chinese with English abstract).
- Ju, N., Shi, L., Yang, G., et al., 2024. Rare Metal and Rare Earth Element Mineralization in the Eastern Section of the North Margin of North China Plate: a Review [J]. *Geology and Resources*, 33(04): 537-550(in Chinese with English abstract).
- Ju, N., Yang, G., Zhao, D., et al., 2025. Geology, Mineralization and Development Potential of Rare and Uncommon Earth Ore Deposits in Southwest China. *Minerals*, 15: 459. doi:10.3390/min15050459
- King, P.L., White, A.J.R., Chappell, B.W., et al., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371–391. doi:10.1093/petroj/38.3.371
- Li, J.H., Qian, X.L., Huang, X.N., et al., 2000. Tectonic Framework of North China Block and its Cratonization in the Early Precambrian [J]. *Acta Petrologica Sinica*, (01): 1-10(in Chinese with English abstract).
- Li, J.Y., Gao, L.M., Sun, G.H., et al., 2007. Shuangjingzi Middle Triassic Syn-collisional Crust-derived Granite in the East Inner Mongolia and its Constraint on the Timing of Collision between Siberian and Sino-Korean Paleo-plates [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565-582(in Chinese with English abstract).
- Li, S.C., Li, Y.F., Wang, X.A., et al., 2016. Delineation of the Late Triassic Granitic Pluton from the Middle Part of Greater Xing'an Mountains Showing Tetrad REE Patterns and its Geological Implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(09): 2793-2806(in Chinese with English abstract).
- Li, S.C., Liu, Z.H., Xu, Z.Y., et al., 2015. Age and Tectonic Setting of Volcanic Rocks of the Tamulangou Formation in the Great Xing'an Range, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 471–480. doi:10.1016/j.jseaes.2014.09.014
- Liu, C.S., Chen, X.M., Chen, P.R., et al., 2003. Subdivision, Discrimination Criteria and Genesis for A Type Rock Suites [J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 573-591(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Jiang, S.H., Chen, C.L., et al., 2015. Petrogenesis of the Jiashan Syenite in Chengde, Hebei Province: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Evidence [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(01): 14-34(in Chinese with English abstract).
- Long, Z.Y., Qiu, K.F., Halama, R., et al., 2025. Reappraisal of Potassium Isotopic Composition of the Continental Lithospheric Mantle: Insights from Calc-Alkaline Lamprophyres in the Eastern North China Craton. *Geological Society of America Bulletin*. doi:10.1130/B37952.1
- Ludwig, K.R., 2001. Squid 1.02: A User's Manual. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, No. 2: 15–35.
- Mao, J.W., Yang, Z.X., Xie, G.Q., et al., 2019. Critical Minerals: International Trends and Thinking [J]. *Mineral Deposits*, 38(04): 689-698(in Chinese with English abstract).
- Miao, L.C., Fan, W.M., Liu, D.Y., et al., 2008. Geochronology and Geochemistry of the Hegenshan Ophiolitic Complex: Implications for Late-Stage Tectonic Evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5): 348–370. doi:10.1016/j.jseaes.2007.11.005

- Miao, L.C., Liu, D.Y., Zhang, F.Q., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb Ages of the “Xinghuadukou Group” in Hanjiayuanzi and Xinlin Areas and the “Zhalantun Group” in Inner Mongolia, Da Hinggan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 52(8): 1112–1124. doi:10.1007/s11434-007-0131-2
- Nasdala, L., Hofmeister, W., Norberg, N., et al., 2008. Zircon M257—A Homogeneous Natural Reference Material for the Ion Microprobe U–Pb Analysis of Zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32. doi:10.1111/j.1751-908x.2008.00914.x
- Niu, H.C., Shan, Q., Chen, X.M., et al., 2002. Relationship Between Light Rare Earth Element Deposits and Mantle Processes in the Panxi Rift Zone [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, (S1): 33-40(in Chinese).
- Ostendorf, J., Jung, S., Berndt-Gerdes, J., et al., 2014. Syn-Orogenic High-Temperature Crustal Melting: Geochronological and Nd–Sr–Pb Isotope Constraints from Basement-Derived Granites (Central Damara Orogen, Namibia). *Lithos*, 192–195(1): 21–38. doi:10.1016/j.lithos.2014.01.007
- Qiu, J.S., McInnes B IA, Jiang, S.Y., et al., 2005. Geochemistry of the Mikengshan Pluton in Huichang, Jiangxi Province and New Recognition of Its Genetic Type [J]. *Geochimica*, 34(1): 20-32(in Chinese).
- Qiu, J.S., Kanisawa S, Wang, D.Z., 2000. Geochemistry and Genetic Type of the Yaokeng Alkali-Feldspar Granite in Cangnan, Zhejiang Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (02): 97-105(in Chinese).
- Qiu, K.F., Deng, J., Li, S.S., et al., 2023. Roles and Perspectives of A- and I-Type Magmas in Rare Earth Element and Gold Mineralization. *GSA Bulletin*, 136(3–4): 1238–1250. doi:10.1016/j.lithos.2014.01.007
- Qiu, Z.L., Liang, D.Y., Wang, Y.F., et al., 2014. Zircon REE, Trace Element Characteristics and U-Pb Chronology in the Baerzhe Alkaline Granite: Implications to the Petrological Genesis and Mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1757-1768(in Chinese with English abstract).
- Ren, Y.S., Ju, N., Zhang, H.L., et al., 2012. Geochronology and Geochemistry of Metallogenic Porphyry Bodies from the Nongping Au-Cu Deposit in the Eastern Yanbian Area, NE China: Implications for Metallogenic Environment. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. doi: 10.1111/j.1755-6724.2012.00690.x
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: *Treatise on Geochemistry*, Vol. 3. Elsevier-Pergamon, Oxford: 1–64. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
- Song, J.C., Wang, E.D., Jia, S.S., et al., 2010. Geological Characteristics and Future Exploration Prospects of Copper Resources in the Liaodong Rift [J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 1123-1124(in Chinese).
- Song, S.G., Wang, M.M., Xu, X., et al., 2015. Ophiolites in the Xing'an-Inner Mongolia Accretionary Belt of the CAOB: Implications for Two Cycles of Seafloor Spreading and Accretionary Orogenic Events. *Tectonics*, 34(10): 2221–2248. doi: 10.1002/2015TC003948
- Sun, W.D., Ding, X., Hu, Y.H., et al., 2007. The Golden Transformation of the Cretaceous Plate Subduction in the West Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262: 533–542. doi:10.1016/j.epsl.2007.08.021
- Wang, D.H., Wang, R.J., Li, J.K., et al., 2012. Basic Characteristics and Research Status of 'Three-Rare' Metal Mineral Resources in China [J]. *Mineral Deposits*, 31(S1): 41-42(in Chinese).
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Zhang, H.F., et al., 2006. Early Cretaceous Gabbroic Rocks from the Taihang Mountains: Implications for a Paleo Subduction-Related Lithospheric Mantle Beneath the Central North China Craton. *Lithos*, 86: 281–302. doi: 10.1016/j.lithos.2005.07.001
- Wang, Y.X., Zhao, Z.H., 1997. Geochemistry and Genesis of the Baerzhe Super-Large REE-Nb-Be-Zr Deposit [J]. *Geochimica*, 26(1): 24-35(in Chinese).
- Watson, E.B., Wark, D.A., Thomas, J.B., 2006. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413–433. doi:10.1007/s00410-006-0068-5
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419. doi:10.1007/bf00402202

- Wu, B., Wang, R.C., Guo, G.L., et al., 2020. Compositional Variations of Rinkite in the Saima Alkaline Complex, Liaoning Province, and Its Implications for Alkaline Magma Evolution [J]. *Earth Science*, 45(02): 467-478(in Chinese with English abstract).
- Wu, B., Wang, R.C., Liu, X.D., et al., 2018. Chemical Composition and Alteration Assemblages of Eudialyte in the Saima Alkaline Complex, Liaoning Province, and Its Implication for Alkaline Magmatic-hydrothermal Evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(06): 1741-1757(in Chinese with English abstract).
- Wu, G., Liu, R.L., Chen, G.Z., et al., 2021. Mineralization of the Weilasituo Rare Metal-tin-polymetallic Ore Deposit in Inner Mongolia: Insights from Fractional Crystallization of Granitic Magmas [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(03): 637-664(in Chinese with English abstract).
- Wu, S.P., Wang, M.Y., Qi, K.J. 2007. Present Situation of Researches on A-type Granites: A Review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57-66(in Chinese with English abstract).
- Windley, B.F., Alexeiev, D., Xiao, W.J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31–47. doi:10.1144/0016-76492006-022
- Williams, I.S., 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1–35. doi: 10.5382/Rev.07.01
- Wu, F.Y., Jahn, B.M., Wilde, S.A., et al., 2000. Phanerozoic Continental Crustal Growth: U-Pb and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89–113. doi: 10.1016/S0040-1951(00)00179-7
- Wu, F.Y., Sun, D.Y., Li, H.M., et al., 2002. A-Type Granites in Northeastern China: Age and Geochemical Constraints on Their Petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143–173. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00018-9
- Wu, F.Y., Sun, D.Y., Ge, W.C., et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.11.014
- Wu, F.Y., Zhao, G.C., Sun, D.Y., et al., 2007. The Hulan Group: Its Role in the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3): 542–556. doi: 10.1016/j.jseaes.2007.01.003
- Wu, M., Samson, I.M., Qiu, K.F., et al., 2021. Concentration Mechanisms of REE-Nb-Zr-Be Mineralization in the Baerzhe Deposit, NE China: Insights from Textural and Chemical Features of Amphibole and Rare-Metal Minerals. *Economic Geology*, 116: 651–679. doi: 10.5382/econgeo.4789
- Wu, M.Q., Samson, I.M., Qiu, K.F., et al., 2023. Multi-Stage Metasomatic Zr Mineralization in the World-Class Baerzhe Rare Earth Element-Nb-Zr-Be Deposit. *American Mineralogist*, 108(2): 389–405. doi: 10.2138/am-2022-8336
- Wu, M., Qiu, K.F., Diao, X., et al., 2024. The Giant Baerzhe REE-Nb-Zr-Be Deposit, Inner Mongolia, China, an Early Cretaceous Analogue of the Strange Lake Rare-Metal Deposit, Quebec. *Geological Society of London Special Publications*, 551(1): SP551–2023–146. doi:10.1144/sp551-2023-146
- Xiao, W.J., Windley, B.F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 1069–1076. doi: 10.1029/2002tc001484
- Xiao, W.J., Windley, B.F., Sun, S., et al., 2015. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Accretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477–507. doi: 10.1146/annurev-earth-060614-105254
- Xu, B., Jiang, S.Y., Wang, R., et al., 2015. Late Cretaceous Granites from the Giant Dulong Sn-Polymetallic Ore District in Yunnan Province, South China: Geochronology, Geochemistry, Mineral Chemistry and Nd-Hf Isotopic Compositions. *Lithos*, 218–219: 54–72. doi: 10.1146/annurev-earth-060614-105254

- Xu, B.L., Wang, S.G., Han, B.F., et al., 1998. A-Type Granites with the Character of Enrichment and Loss with Particular Reference to Both Suites of the Yanshan, North China and Wulunguhe, Northwest China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 34(S1): 352-362(in Chinese with English abstract).
- Xu, X.S., Qiu, J.S., 2010. Igneous Petrology. Science Press, Beijing: 215–220 (in Chinese).
- Xu, Y.G., Li, H.Y., Pang, C.J., et al., 2009. On the Timing and Duration of the Destruction of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 54(3): 379–396. doi: 10.1007/s11434-009-0346-5
- Yang, J.H., Sun, J.F., Zhang, M., et al., 2012. Petrogenesis of Silica-Saturated and Silica-Undersaturated Syenites in the Northern North China Craton Related to Post-Collisional and Intraplate Extension. *Chemical Geology*, 328: 149–167. doi:10.1016/j.chemgeo.2011.09.011
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Xie, L.W., et al., 2007. Petrogenesis and Tectonic Implications of Kuangdonggou Syenites in the Liaodong Peninsula, East North China Craton: Constraints from In-situ Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 263-276(in Chinese with English abstract).
- Yang, W.B., Niu, H.C., Shan, Q., et al., 2014. Geochemistry of Magmatic and Hydrothermal Zircon from the Highly Evolved Baerzhe Alkaline Granite: Implications for Zr–REE–Nb Mineralization. *Mineralium Deposita*, 49: 451–470. doi:10.1007/s00126-013-0504-1
- Yang, W.B., Niu, H.C., Shan, Q., et al., 2009. Ore-forming Mechanism of the Baerzhe Super-large Rare and Rare Earth Elements Deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2924-2932(in Chinese with English abstract).
- Yang, W.B., Shan, Q., Zhao, Z.H., et al., 2011. Petrogenic and Metallogenic Action of the Alkaline Granitoids in Baerzhe Area: A Comparison Between Mineralized and Barren Plutons [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(06): 1689-1704(in Chinese with English abstract).
- Yuan, Z.X., Bai, G., 2001. Temporal and Spatial Distribution of Endogenous Rare and Rare Earth Element Deposits in China [J]. *Mineral Deposits*, 20(4): 347-354(in Chinese).
- Zhai, M.G., Wu, F.Y., Hu, R.Z., et al., 2019. Strategic Key Metal Resources: Current Status and Problems [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(02): 106-111(in Chinese).
- Zhai, M.G., Bian, A.G., 2000. Amalgamation of the North China Craton at the End of the Neoproterozoic and Its Breakup During the Late Paleoproterozoic and Mesoproterozoic [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, (S1): 129-137(in Chinese).
- Zhang, C.H., Kang, Z., Zhang, G.Y., Liu, Y.C., 2009. Corresponding Chronogenesis Between the Mesozoic Metallogeny and Magmatic Activity in Northeast China [J]. *Geology and Resources*, 18(02): 87-90+99(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Lu, Z.H., Tang, Y., 2019. Metallogeny and Prospecting Model as well as Prospecting Direction of Pegmatite-type Rare Metal Ore Deposits in Altay Orogenic Belt, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 38(04): 792-814(in Chinese with English abstract).
- Zhang, P.S., Yang, Z.M., Tao, K.J., et al., 2005. Niobian-Tantalum and Rare Earth Mineralogy in China and Their Industrial Utilization [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2005, 29(2): 206-210(in Chinese).
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Davis, G.A., et al., 2014. Temporal and Spatial Variations of Mesozoic Magmatism and Deformation in the North China Craton: Implications for Lithospheric Thinning and Decratonization. *Earth-Science Reviews*, 131: 49–87. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.12.004
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Liu, J.M., et al., 2016. Different Sources Involved in Generation of Continental Arc Volcanism: The Carboniferous-Permian Volcanic Rocks in the Northern Margin of the North China Block. *Lithos*, 240–243: 382–401. doi: 10.1016/j.lithos.2015.11.027
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian–Middle Triassic Intrusive Suites from the Northern Margin of the North China Craton: Geochronology, Petrogenesis, and Tectonic Implications. *Geological Society of America Bulletin*, 120(1): 181–200. doi: 10.1130/B26157.1

- Zhang, Y., Sun, J.G., Xing, S.W., et al., 2015. Geochronology and Metallogenesis of Porphyry Mo Deposits in East-Central Jilin Province, China: Constraints from Molybdenite Re–Os Isotope Systematics. *Ore Geology Reviews*, 71: 363–372. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.06.014
- Zhang, Y., 2013. Study on Geology, Geochemistry and Metallogenic Mechanism of Jurassic Molybdenum Deposits in East-Central Jilin Province. Dissertation, *Jilin University* (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.H., Zhou, L.D., 1997. Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements of Some Alkali-Rich Intrusions in China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 40(2): 145-158(in Chinese).
- Zhao, Z.H., Xiong, X.L., Wang, Q., et al., 2008. Some Aspects on Geochemistry of Nb and Ta [J]. *Geochimica*, (04): 304-320(in Chinese).
- Zheng, J.P., Griffin, W.L., Reilly, S.Y., et al., 2007. Mechanism and Timing of Lithospheric Modification and Replacement Beneath the Eastern North China Craton: Peridotitic Xenoliths from the 100 Ma Fuxin Basalts and a Regional Synthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(5): 203–225. doi: 10.1016/j.gca.2007.07.028
- Zhong, J., Fan, H.H., Chen, J.Y., et al., 2020. Geochemistry Characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar Age of Biotite from the Saima Aegirine-Nepheline Syenite and Its Geological Significance [J]. *Earth Science*, 45(01): 131-144(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.B., Pei, F.F., Wang, Z.W., et al., 2017. Using Detrital Zircons from Late Permian to Triassic Sedimentary Rocks in the South-Eastern Central Asian Orogenic Belt (NE China) to Constrain the Timing of the Final Closure of the Paleo-Asian Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 82–109. doi:10.1016/j.jseas.2016.12.007
- Zhu, Y.S., Yang, J.H., Sun, J.F., et al., 2016. Petrogenesis of Coeval Silica-Saturated and Silica-Undersaturated Alkaline Rocks: Mineralogical and Geochemical Evidence from the Saima Alkaline Complex, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 117: 184–207. doi: 10.1016/j.jseas.2015.12.014
- Zou, T.R., 2006. Rare and Rare Earth Metal Deposits in Xinjiang, China [M]. *Geological Publishing House*, Beijing.

中文参考文献:

- 陈金勇,范洪海,王生云,张佳.内蒙古巴尔哲地区碱性花岗岩地球化学特征、年代学及地质意义[J].地质论评,2019,65(S1):45-46.
- 陈衍景,张成,李诺,杨永飞,邓軻. 中国东北钼矿床地质[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(05):1223-1268.
- 范文博,姜能,翟明国,等.华北克拉通北缘显生宙含石榴石淡色花岗岩:特征、时代及成因初探[J].岩石学报,2019,35(07):2237-2258.
- 华北,高雪,胡兆国,梅贞华,张之武,孟银生,张保涛,赵磊. 2020. 兴蒙造山带西段乌珠新乌苏花岗岩岩石成因和构造背景:地球化学、U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束. 岩石学报, 36(5): 1426-1444.
- 鞠楠,张森,毕中伟,任云生,石蕾,张迪,顾玉超,孙求实.辽宁凤城赛马镍钼矿床成矿岩体地球化学特征及其地质意义[J].世界地质,2019,38(01):130-139.
- 鞠楠,施璐,杨高,等.华北板块北缘东段稀有-稀土成矿作用综述[J].地质与资源,2024,33(04):537-550.
- 鞠楠,刘博,马婧轩,等.辽宁生铁岭稀土矿磁铁变粒岩年代学和地球化学特征及其稀土成因类型初探[J/OL].地学前缘,1-33[2025-06-15].
- 李江海,钱祥麟,黄雄南,等.华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通化过程[J].岩石学报,2000,(01):1-10.
- 李锦轶,高立明,孙桂华,等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J].岩石学报,23(3):565-582.
- 李世超,李永飞,王兴安,等.大兴安岭中段晚三叠世四分组效应花岗岩的厘定及其地质意义[J].岩石学报,2016,32(09):2793-2806.

- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. A 型岩套的分类、判别标志和成因[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4):573-591.
- 刘源, 江思宏, 陈春良, 等. 河北承德甲山正长岩成因的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(01):14-34.
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等. 关键矿产——国际动向与思考[J]. 矿床地质, 2019, 38(04):689-698.
- 牛贺才, 单强, 陈小明, 等. 攀西裂谷带轻稀土矿床与地幔过程的关系[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2002, (S1):33-40.
- 丘志力, 梁冬云, 王艳芬, 等. 巴尔哲碱性花岗岩锆石稀土微量元素、U-Pb 年龄及其成岩成矿指示[J]. 岩石学报, 2014, 30(6):1757-1768.
- 邱检生, McInnes B IA, 蒋少涌, 等. 2005. 江西会昌密坑山岩体的地球化学及其成因类型的新认识[J]. 地球化学, 34(1):20-32.
- 邱检生, 蟹泽·聪史, 王德滋. 浙江苍南瑶坑碱性花岗岩的地球化学及其成因类型[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, (02):97-105.
- 宋建潮, 王恩德, 贾三石, 等. 辽东裂谷铜矿资源地质特征及其未来勘查前景[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1):1123-1124.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 等. 我国三稀矿产资源的基本特征与研究现状[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1):41-42. DOI:10.16111/j.0258-7106.2012.s1.023.
- 王一先, 赵振华. 巴尔哲超大型稀土铈铍矿床地球化学和成因[J]. 地球化学, 1997, 26(1):24-35.
- 郭斌, 王汝成, 郭国林, 等. 辽宁赛马碱性岩体层硅铈铍矿化学成分变化及其对碱性岩浆演化的指示意义[J]. 地球科学, 2020, 45(02):467-478.
- 郭斌, 王汝成, 刘晓东, 等. 辽宁赛马碱性岩体异性石化学成分特征及其蚀变组合对碱性岩浆-热液演化的指示意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(06):1741-1757.
- 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A 型花岗岩研究现状及其述评[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 57-66.
- 武广, 刘瑞麟, 陈公正, 等. 内蒙古维拉斯托稀有金属-锡多金属矿床的成矿作用:来自花岗质岩浆结晶分异的启示[J]. 岩石学报, 2021, 37(03):637-664.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学. 北京:科学出版社, 215-220.
- 许保良, 王式洸, 韩宝福, 等. 富集性和亏损性 A 型花岗岩-以华北燕山和新疆乌伦古河地区岩石为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(S1):352-362.
- 杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 等. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义:锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 263-276.
- 杨武斌, 单强, 赵振华, 等. 巴尔哲地区碱性花岗岩的成岩和成矿作用:矿化和未矿化岩体的比较[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(06):1689-1704.
- 袁忠信, 白鸽. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布[J]. 矿床地质, 2001, 20(4):347-354.
- 杨武斌, 牛贺才, 单强, 等. 巴尔哲超大型稀有稀土矿床成矿机制研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(11):2924-2932.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(02):106-111.
- 张春晖, 康庄, 张广宇, 刘英才. 东北地区中生代区域成矿与岩浆活动时序特征[J]. 地质与资源, 2009, 18(02):87-90+99.
- 张培善, 杨志明, 陶克捷, 等. 我国铈钽稀土矿物学及工业利用[J]. 稀有金属, 2005, 29(2): 206-210.
- 张勇. 吉林省中东部地区侏罗纪钼矿床的地质、地球化学特征与成矿机理研究[D]. 吉林大学, 2013.
- 张辉, 吕正航, 唐勇. 新疆阿尔泰造山带中伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律、找矿模型及其找矿方向[J]. 矿床地质, 2019, 38(04):792-814.
- 赵振华, 熊小林, 王强, 等. 铈与钽的某些地球化学问题[J]. 地球化学, 2008, (04):304-320.
- 赵振华, 周玲棣. 中国一些富碱侵入岩的稀土元素地球化学特征[J]. 中国科学(D 辑:), 1997, 40(2):145-158.
- 翟明国, 卞爱国. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2000, (S1):129-137.

钟军,范洪海,陈金勇,等. 辽宁赛马霓霞正长岩黑云母地球化学特征、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J].地球科学,2020,45(01):131-144.

邹天人.中国新疆稀有及稀土金属矿床[M].地质出版社,2006.

