



华北板块北缘东段稀有-稀土成矿作用综述

鞠楠¹,施璐¹,杨高²,陈明哲³,伍月¹,刘欣¹,赵忠海²,刘博⁴,冯玉辉⁵

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
2. 辽宁工程技术大学 辽宁省矿产资源绿色开发重点实验室, 辽宁 阜新 123000;
3. 中国地质调查局 牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157000;
4. 东北大学, 辽宁 沈阳 110034; 5. 沈阳师范大学, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 华北克拉通北缘东段稀有-稀土矿产资源主要分布在板块边缘或不同时代的构造接合处, 受郯庐断裂带、索伦-西拉木伦-长春-延吉断裂带等区域性大断裂控制, 主要经历了吕梁期、印支期和燕山期等 3 期的构造-岩浆事件。区内的稀有-稀土矿产与中元古代和中生代岩浆岩关系密切。目前, 研究区内已发现稀有-稀土矿床或矿点 10 余处, 主要分布于辽宁省和内蒙古东部地区, 成矿类型以碱性花岗岩-碱性岩型为主, 伟晶岩型次之。区内稀有-稀土成矿均与碱性岩浆作用有关, 成矿岩体的年代学研究表明, 成矿作用可分为 3 个阶段, 即燕山期的 120~140 Ma、印支期的 200~230 Ma 以及与吕梁运动有关的 2 500~2 510 Ma。本区稀有-稀土元素富集成矿过程主要与碱性岩浆的高度演化密切相关, 在水和挥发分作用下, 岩浆强烈分异结晶, 导致成矿元素迁移聚集, 随着温度、压力等成矿条件的变化, 含矿流体在岩浆作用晚期随着主要造岩矿物的晶出而富集成矿。

关键词: 稀有金属; 稀土元素; 矿床成因; 成矿作用; 岩浆作用; 华北板块

RARE METAL AND RARE EARTH ELEMENT MINERALIZATION IN THE EASTERN SECTION OF THE NORTH MARGIN OF NORTH CHINA PLATE: A Review

JU Nan¹, SHI Lu¹, YANG Gao², CHEN Ming-zhe³, WU Yue¹, LIU Xin¹, ZHAO Zhong-hai²,
LIU Bo⁴, FENG Yu-hui⁵

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Green Development of Mineral Resources, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China; 3. Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Mudanjiang 157000, Heilongjiang Province, China; 4. Northeastern University, Shenyang 110034, China; 5. Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China

Abstract: The rare metal and rare earth mineral resources in the eastern section of the north margin of North China Plate are distributed mainly in the plate margin or tectonic junction of different ages, controlled by regional major faults, such as Tancheng-Lujiang fault belt and Suolun-Xilamulun-Changchun-Yanji fault zone, and experienced mainly three stages of tectono-magmatic events including Lyuliangian, Indosinian and Yanshanian. The rare metal-rare earth minerals in the area are closely related to Mesoproterozoic and Mesozoic magmatic rocks. Over 10 rare metal-rare earth deposits or ore occurrences have been found so far, distributed mainly in Liaoning Province and eastern Inner

收稿日期:2024-04-01;修回日期:2024-04-09. 编辑:张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“碱性岩浆作用中铌钽元素富集机制研究:以辽东地区赛马镍钽矿床为例”(42102087)、“蒙古-鄂霍次克洋俯冲带流体性质及其成矿效应”(U2244201);中国博士后基金项目“辽东地区碱性岩型铌钽矿床成因研究”(2022M712966).

作者简介: 鞠楠(1986—),男,博士,高级工程师,主要从事关键金属矿产资源的调查与研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//junan-cgs@qq.com

通信作者: 施璐(1988—),男,博士,高级工程师,主要从事关键金属矿产相关的岩石学研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//shilu880208@hotmail.com

Mongolia, dominated by metallogenesis of alkaline granite-alkali rock type, followed by pegmatite type. The mineralization of rare metal-rare earth elements is related to alkaline magmatism. The geochronology of ore-forming rock mass shows that the mineralization can be divided into three stages: Yanshanian (120–140 Ma), Indosinian (200–230 Ma) and Lyuliangian (2500–2510 Ma). The enrichment and mineralization process of rare metal-rare earth elements is closely related to the advanced evolution of alkaline magma. Under the action of water and volatiles, the magma experienced strong fractional crystallization, resulting in migration and accumulation of ore-forming elements. With the change of mineralization conditions such as temperature and pressure, the ore-bearing fluids were concentrated and mineralized in the late stage of magmatism with the crystallization of major rock-forming minerals.

Key words: rare metal; rare earth element; genesis of deposit; mineralization; magmatism; North China Plate

0 前言

随着战略性关键金属的工业价值的不断提高,“三稀”(稀有、稀土、稀散元素)金属矿床的成矿规律研究受到国内外学者的广泛关注.普遍认为,中国内生稀有-稀土金属矿床大致划分为碱性岩型、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、酸性火山岩型等 8 种主要类型.其中,最主要的且数量最多的是前三类,即碱性岩类型、花岗岩类型和花岗伟晶岩类型,其形成时代从元古宙直到喜马拉雅期.华北克拉通北缘东段作为中国关键金属成矿潜力区带之一^[1-5],分布着规模大小不一,差异较大的稀有-稀土金属矿床.由于研究程度较低,前人仅对矿床地质特征、矿床成因类型和找矿方向等方面进行了初步研究,但对其矿床成因及成矿物质来源缺乏系统研究,无法为区域找矿勘查提供理论支撑.

基于此,本文以华北板块北缘东段新发现的稀有-稀土矿床为研究对象,系统收集和整理前人资料,结合本团队近 10 年的研究成果,以区域成矿作用为切入点,旨在查明研究区内典型稀有-稀土矿床地质特征,总结矿化类型及成因,为东北地区稀有-稀土矿产勘查与理论研究提供借鉴,支撑新一轮找矿突破战略行动.

1 区域地质背景

华北克拉通北缘东段稀有-稀土矿产资源主要分布在板块边缘或不同时代的构造接合处,受郯庐断裂带、索伦-西拉木伦-长春-延吉断裂带等区域性大断裂控制,主要经历了吕梁期、印支期和燕山期等 3 期的构造-岩浆事件.区内的稀有-稀土矿产与中元古代和中生代岩浆岩关系密切.目前,研究区内已发现稀有-

稀土矿床或矿点 10 余处,主要分布于辽宁省和内蒙古东部地区,成矿类型以花岗岩型、碱性岩型和伟晶岩型为主^[6-13](图 1).

2 典型矿床特征及成因

本研究选取区内最具代表性的巴尔哲、赛马等 7 个矿床(表 1)为对象,对比研究不同成矿类型的地质特征及矿床成因,探讨华北板块北缘构造-岩浆作用对稀有-稀土元素富集成矿的制约机制.

2.1 赛马钼-钽-稀土矿床(碱性岩型)

赛马钼钽矿床处于辽东地块的太子河-浑江凹陷与营口-宽甸隆起的交汇部位.区域出露地层主要为古元古界盖县岩组、大石桥岩组,新元古界细河群,古生界寒武系、奥陶系及中生界侏罗系.矿区内岩浆活动强烈,可分为元古宙辽河期和中生代构造岩浆旋回.与成矿有关的碱性岩体位于中生代构造岩浆岩带的核部,岩体多以岩脉、岩墙形式出露.岩石类型以霓霞正长岩为主体,其中富含绿色、草绿色、灰褐色霓石的霓霞正长岩矿化较好,而演化晚期形成的伟晶岩体矿化程度更高.矿区内构造活动复杂,发育有东西向、近南北向、北东向及北西向断裂构造(图 2).矿区范围内岩石普遍遭受蚀变,蚀变种类较多、程度较高、分布范围广.蚀变类型有微斜长石化、霞石化、钠沸石化、钙霞石化、碳酸盐化等.蚀变将各种原生霞石正长岩改造成变生正长岩,构成赛马碱性岩体主体.蚀变分带不显著,钼钽矿化与霞石化、钙霞石化关系密切.目前工程揭露 8 条矿体,主要赋存于灰褐色-草绿色霓霞正长岩中.Ⅰ号矿体长 500 m,宽 6 m;Ⅱ号矿体长 160 m,宽 18 m.矿体呈似层状、透镜状产出,倾向 45~115°,倾角 25~75°.矿体间互相平行,在剖面上呈鱼群状排

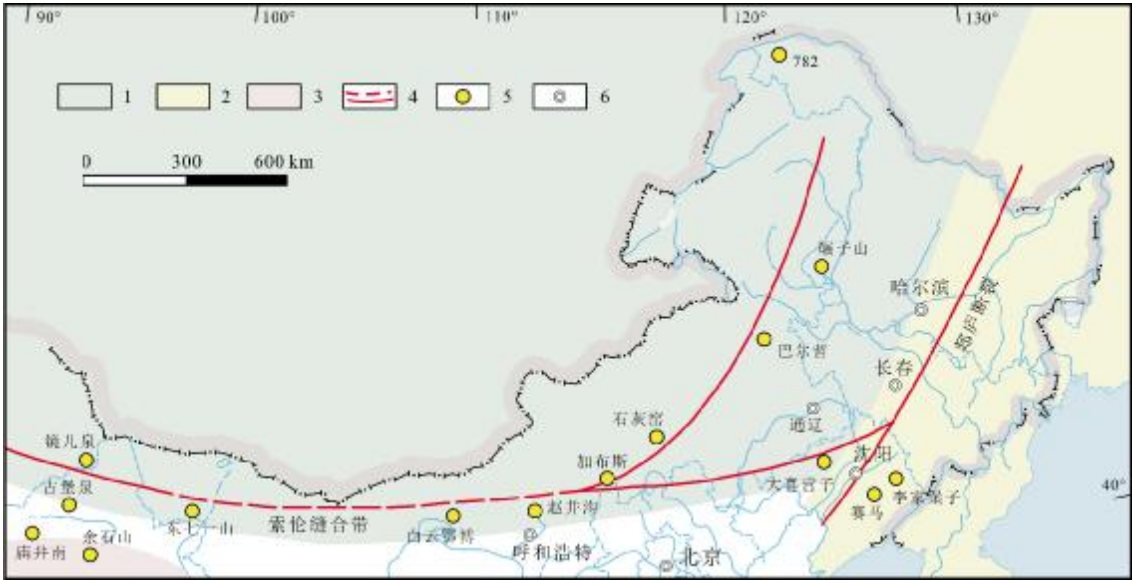


图 1 华北板块北缘稀有-稀土矿床分布图
(据文献[8])

Fig. 1 Distribution map of rare metal-rare earth deposits in the northern margin of North China Plate
(From Reference [8])

1—古亚洲洋构造域(Paleo-Asian Ocean tectonic domain); 2—西太平洋构造域(Western Pacific tectonic domain); 3—特提斯构造域(Tethyan tectonic domain); 4—主要构造线(major tectonic line); 5—稀有金属矿床(rare metal deposit); 6—城市(city)

表 1 研究区典型稀有-稀土金属矿床地质特征

Table 1 Geological characteristics of typical rare metal-rare earth deposits in the study area

矿床名称	位置	矿化元素组合	含矿岩石	规模
巴尔哲	内蒙古扎鲁特旗	铈、钽、锆、稀土	碱性花岗岩	超大型
石灰窑	内蒙古锡林浩特	铈、钽	花岗岩	中型
赵井沟	内蒙古武川	铈、钽	碱性花岗岩	中型
大喜营子	辽宁阜新	铷、铈、铈、钽	花岗岩-伟晶岩	中型
加不斯	内蒙古镶黄旗	铈、钽	碱性花岗岩	中型
赛马	辽宁丹东	铈、钽、稀土	碱性岩	中型
李家堡子	辽宁抚顺	铈、钽	伟晶岩	大型

列. 矿体主要受岩体结晶分异成分层控制, 矿体最大厚度可达 40 m (图 2). 主要矿石矿物为铈钽铁矿、褐钇铈矿和褐钇铈矿, 脉石矿物为霞石、霓石、金红石、黄铁矿等. 铈含量一般在 0.03%~0.06%之间, 钽含量一般为 0.1%, Nb 元素含量较高, Ta 元素含量低. 矿体与围岩无明显界线, 呈渐变过渡关系. 大多数矿石中主要组成矿物为硅酸盐矿物, 以碱性矿物为主, 成分主要为钾长石、霓石、钠闪石及钠长石. 金属矿物含量较少, 主要为褐铁矿及赤铁矿. 含铈的矿物主要为金红

石, 含稀土元素的独立矿物种类较多, 包括硅钽石、氟碳铈矿、独居石、易解石等.

作者团队曾测试成矿岩体的锆石 U-Pb 年龄结果表明, 霓霞正长岩中的锆石自形程度较好, 为自形一半自形, 长柱状, 粒径为 50~200 μm, 长宽比在 1.5~2.3 之间, 岩浆震荡环带结构明显, 锆石 Th/U 比值为 0.5~1.0(>0.1), 具有岩浆成因锆石的特征. 在 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和图上, 所有数据均位于谐和线上或附近, 所测 16 个锆石测点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 233~200 Ma

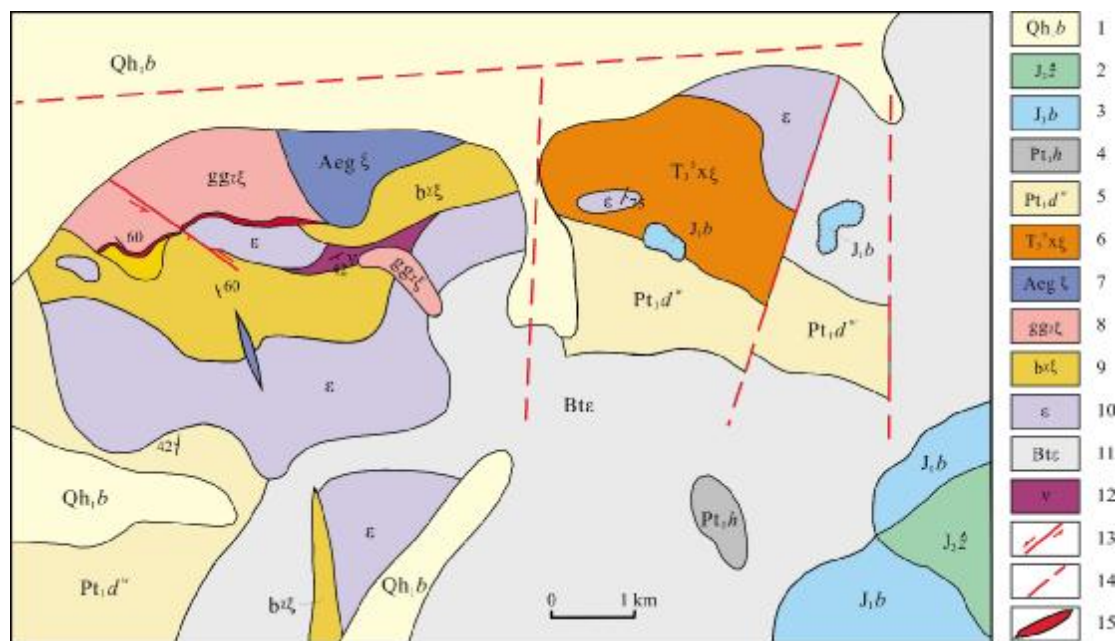


图2 赛马矿床矿区地质图

Fig. 2 Geological map of Saima deposit

1—第四系冲积物(Quaternary alluvium); 2—侏罗系转山子组(Jurassic Zhuanshanzi fm.); 3—侏罗系北庙组(Jurassic Beimiao fm.); 4—辽河群桦子裕组(Huaziyu fm. of Liaohe gr.); 5—辽河群王家沟段(Wangjiagou section of Liaohe gr.); 6—晚三叠世赛马碱性杂岩(Late Triassic Saima alkaline complex); 7—晚三叠世霓石正长岩(Late Triassic aegirine syenite); 8—晚三叠世草绿色霓霞正长岩(Late Triassic grass green ijolite syenite); 9—晚三叠世褐色霓霞正长岩(Late Triassic brown ijolite syenite); 10—晚三叠世霞石正长岩(Late Triassic nepheline syenite); 11—晚三叠世黑云母霞石正长岩(Late Triassic biotite nepheline syenite); 12—晚三叠世响岩(Late Triassic phonolite); 13—平移断层(strike-slip fault); 14—推测断层(inferred fault); 15—铌矿体(Nb orebody)

之间,加权平均年龄为 224.40 ± 6.10 Ma (MSWD=8.0)。霓霞正长岩(矿石和围岩)里特曼指数远大于9,属过碱性岩,具有高碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量、高 TFeO/MgO 比值,较低的 MgO 、 CaO 含量,属于A型花岗岩,形成于古亚洲洋闭合后伸展构造背景。霓霞正长岩(成矿岩体)岩浆来源于富集轻稀土元素和大离子亲石元素的地幔源区,霓霞正长岩(围岩)岩浆来源于壳幔混合源区。霓霞正长岩矿石比围岩的结晶分异程度更高,岩浆结晶分异在矿床成矿过程中起到了至关重要的作用。

2.2 大喜营子铷-铍-铌-钽稀土矿床(花岗岩-伟晶岩型)

大喜营子铷钼矿床位于辽宁省阜新市,区内出露的地层为新太古界变质表壳岩及新生界第四系松散堆积物。区内断裂构造发育,北东向断裂是本区的主控矿构造,仅见脆性断裂,以正断层为主,具有多期活动的特点。该矿床属花岗岩伟晶岩型矿床,矿体产于三叠纪花岗岩中,主要由黑云母花岗岩、钠长石花岗岩和天河石花岗岩伟晶岩组成(图3)。矿区主要蚀变有钠长石

化、天河石化、云英岩化、萤石化、硅化、绿泥石化,其中与稀有金属成矿关系最为密切的是钠长石化、天河石化和萤石化。钠长石化和天河石化为区内主要蚀变类型,属于面状蚀变。钠长石化表现为钠长石交代条纹长石、早期更长石和石英。天河石颜色有鲜绿色和浅绿色之分,鲜艳的天河石在野外易于识别,是醒目的找矿标志。天河石化对铷矿的富集起主导作用。萤石多为紫色,常与稀有-稀土元素伴生,在岩石中呈粒状、细脉状。含Rb和Be的矿石矿物为天河石和绿柱石,主要赋存于天河石花岗伟晶岩中。通过云母Ar-Ar测年获得该矿床的成岩成矿年龄约为223 Ma。地球化学特征表明该含矿花岗岩具有较高的Li、Be、Nb、Ta、Rb含量,为高分异I型花岗岩,来源于中-一新元古界基底的高温部分熔融,并有幔源岩浆注入。大喜营子铷钼矿床成矿作用与岩浆结晶分异过程具有明显的耦合关系。随着岩浆演化趋势,云母中的F和 Rb_2O 含量均显示升高趋势,这也与岩相的垂向分带变化相对应。

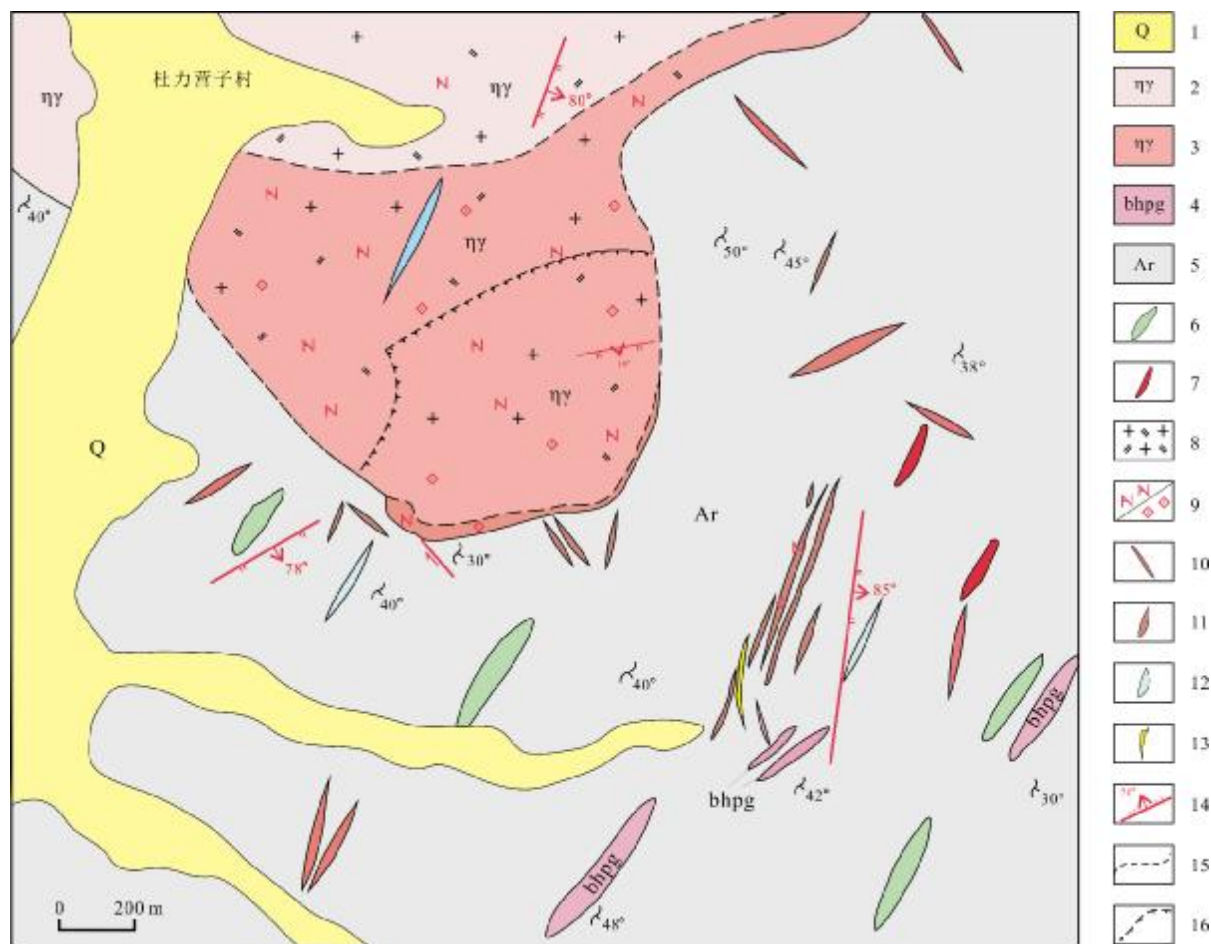


图3 大喜营子矿床矿区地质图

Fig. 3 Geological map of Daxiyingzi deposit

1—第四纪沉积物(Quaternary sediment); 2—灰粉色中粒二长花岗岩(grayish pink medium-grain monzogranite); 3—灰白色中细粒二长花岗岩(offwhite fine-medium grained monzogranite); 4—灰色黑云角闪斜长片麻岩(gray biotite amphibole plagiogneiss); 5—新太古代角闪斜长片麻岩(Neoarchean amphibole plagiogneiss); 6—新太古代角闪岩(Neoarchean amphibolite); 7—新太古代磁铁石英岩(Neoarchean magnetite quartzite); 8—二长花岗岩(monzogranite); 9—天河石化/钠长石化(amazonitization/albitization); 10—花岗岩脉(granite dike); 11—伟晶岩脉(pegmatite dike); 12—闪长玢岩(diorite porphyrite); 13—金矿化闪长斑岩脉(gold mineralized diorite porphyry dike); 14—断层(fault); 15—地质界限(geological boundary); 16—铷矿体边界(Rb orebody boundary)

2.3 加不斯铯钽矿床(碱性花岗岩型)

加不斯铯钽稀有金属矿床位于内蒙古自治区镶黄旗新宝力格镇东约 50 km, 行政区划属内蒙古自治区镶黄旗巴音塔拉苏木管辖。矿区出露的地层较为简单, 仅见新近系上新统宝格达乌拉组红色黏土及第四系风成细砂土, 未见有其他地层出露。主要出露的侵入岩为早白垩世钠长石化花岗岩、中粗粒黑云母二长花岗岩。脉岩发育, 以中酸性为主, 展布方向大体上与区域构造线方向一致, 多数呈北西向, 少数呈北东或近南北向。区域构造方面, 位于巴龙查布诺尔背斜的南西端, 沿褶皱轴向被大面积花岗岩所侵位, 使得褶皱构

造相当隐蔽, 断裂构造的形迹亦不十分明显(图 4)。仅从脉岩的展布特征来看, 矿区的构造大致可划分为 3 组: 1) 北西向断裂, 是矿区最主要的断裂, 主要分布在矿区的西部, 共 11 条, 展布方向为 300~330°, 规模较小, 属于张性断裂, 发育在燕山期黑云母花岗岩内, 被石英脉所充填; 2) 北北西向断裂, 走向 350°, 断层长 900 m, 宽 0.5~1.2 m, 亦为张性断裂, 被石英脉所充填; 3) 北东向断层, 走向 65~70°, 长 100~200 m, 呈透镜状产出, 为花岗岩脉所充填。该区断裂以张性为主, 其展布方向较为零乱, 断裂相互切割关系不明显, 为成矿后期断裂^[9-13]。

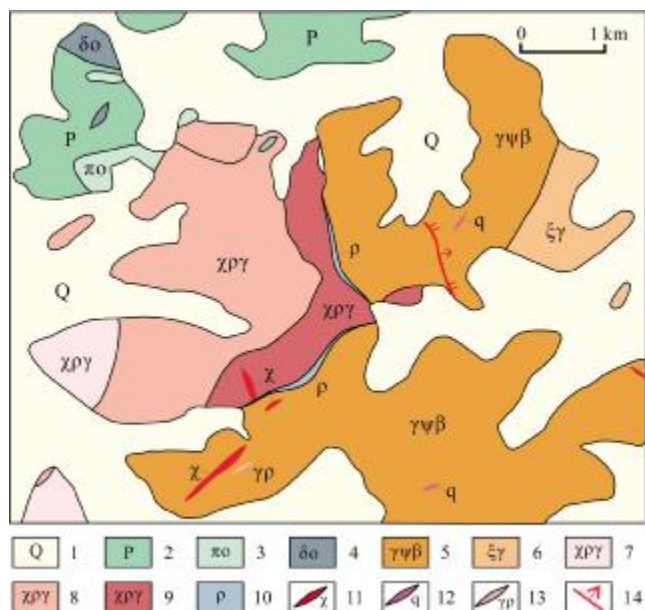


图4 加不斯矿床矿区地质图

(据文献[9-13]改编)

Fig. 4 Geological map of Jiabusi deposit

(Modified from References [9-13])

1—第四系沉积物 (Quaternary sediment); 2—二叠纪碎屑岩 (Permian clastic rock); 3—石英斑岩 (quartz porphyry); 4—石英闪长岩 (quartz diorite); 5—角闪石黑云母正长花岗岩 (hornblende biotite syenogranite); 6—中粗粒正长花岗岩 (medium-coarse grained syenogranite); 7—含白云母钠长石花岗岩 (muscovite-bearing albite granite); 8—中粗粒白云母钠长石花岗岩 (medium-coarse grained muscovite albite granite); 9—中细粒白云母钠长石花岗岩 (fine-medium grained muscovite albite granite); 10—似伟晶岩壳 (pegmatoid shell); 11—细粒钠长石花岗岩脉 (fine-grained albite granite dike); 12—石英脉 (quartz vein); 13—花岗伟晶岩脉 (granite pegmatite dike); 14—正断层 (normal fault)

目前,共圈定铌钽矿体3条、铷矿体1条,其中Ta-1铌钽矿体规模最大,为主矿体,矿体呈厚板状或透镜状产出,矿区范围内属于隐伏矿体,在矿区西侧外围出露地表。赋矿岩石为燕山期强钠长石化花岗岩,围岩为黑云母角闪正长花岗岩。矿体整体呈北东走向,局部变化较大,倾向整体呈南东向,倾角较缓,仅在6~16°之间。主矿体Ta-1号属隐伏矿体,赋存标高1 274~1 120 m,矿石类型主要为锂云母花岗岩型。矿体具分支复合现象,矿体东部未闭合。探明的矿石量 515.8×10^4 t, Ta_2O_5 金属量1 000 t,探明共生 Nb_2O_5 金属量399 t。该矿体呈厚板状产出,其中6、-6、8、和-8线之间矿体变膨大,6勘探线向北至2线变薄趋于尖灭,8线向南至12线亦变薄趋于尖灭。沿走向控制该

矿体长度最大840 m,沿倾向控制矿体斜深为920 m。勘探区西部矿体较平缓,沿倾向矿体厚度变大;而东部矿体则沿倾斜方向变陡,厚度变小,埋藏深度逐渐加深。沿矿体走向,矿体由北向南逐渐侧伏而变深,且矿体厚度亦变薄,埋藏深度变大。该矿体在矿区内揭露的最小埋藏深度为45 m,最大埋藏深度为577 m^[9-13]。

Ta-Nb-Li矿化主要发生在锂云母花岗岩和位于其上方的似伟晶岩壳的细晶岩中,而且在铁锂云母花岗岩和似伟晶岩壳的伟晶岩中偶见Ta-Nb氧化物。不同岩相中的Ta-Nb氧化物存在于不同的矿物组合中,并表现出不同的结构和化学特征。中等演化的铁锂云母花岗岩中的铌铁矿族矿物(CGM)、烧绿石超族矿物(PSM)和锡石与岩浆成因的铁锂云母是平衡结晶的,表明这些矿石矿物代表着岩浆阶段的矿化。锂云母花岗岩和细晶岩中无分区的CGM和CGM+PSM过生长的沉淀是由水硅酸盐液体引起的,水硅酸盐液体迁移导致过生长相对于核心的不平衡结构和突然的Ta增加。锂云母花岗岩主要是交代岩,其原岩被水硅酸盐液体控制的强烈交代作用所掩盖。然而,这种水硅酸盐液体被限制在锂云母花岗岩中,并没有迁移到铁锂云母花岗岩中,这是两种岩石类型之间矿化样式和强度不同的主要原因。研究表明,交代作用在加不斯矿床的Ta的富集、运移和再分配中发挥着关键作用,并且对于锂云母花岗岩和细晶岩中Ta的矿化至关重要^[9-13]。

2.4 巴尔哲铷-铍-铌-钽-锆-稀土矿床(碱性花岗岩-伟晶岩型)

巴尔哲铷-铍-铌-钽-锆-稀土矿床位于大兴安岭山系南段东部,区域大地构造位于华北大陆北缘,蒙古弧形构造东翼与大兴安岭北北东向构造带的复合部位。该矿床不仅是超大型的REE-Zr-Nb-Ta-Be多金属矿床,同时也是大型的U-Th矿床。矿区内地层比较简单,仅分布有上侏罗统白音高老组和梅勒图组两套地层。岩浆岩较发育,多成群成带出现,出露面积小,主要分布在背斜轴部和两翼,呈小岩株和岩脉状产出。岩性主要为碱性花岗岩、花岗细晶岩、花岗斑岩、二长斑岩、闪长玢岩和安山玢岩。主要赋矿岩体是碱性花岗岩体,出露面积约为0.35 km²,由出露不连续的东、西两个岩体构成。东岩体面积为0.24 km²,西岩体为0.11 km²,经钻探证实,两岩体在深部连为一体。碱性花岗岩体在垂

向和水平方向上分带明显. 水平方向上, 自边缘向中心分为3个相带, 分别为晶洞状钠闪石花岗岩带、伟晶状花岗岩带、强蚀变钠闪石花岗岩带. 在垂直方向上, 自上而下分为6个相带, 分别为晶洞状钠闪石花岗岩带、伟晶状花岗岩带、强蚀变钠闪石花岗岩带、中蚀变钠闪石花岗岩带、弱蚀变似斑状钠闪石花岗岩带和似斑状钠闪石花岗岩带. 主要围岩为白音高老组碱性流纹质晶屑岩屑凝灰岩和中酸性火山碎屑岩^[9-13](图5).

前人对巴尔哲铅-铋-稀土矿床成岩成矿进行了大量的研究. 陈金勇等^[14]测得强蚀变钠闪石花岗岩中

钠闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 122.15 ± 0.65 Ma; 王一先等^[15]测得矿区内含矿碱性花岗岩的Rb-Sr等时线年龄为 125.2 ± 2 Ma; 丘志力等^[16]利用LA-ICP-MS测得矿区内碱性花岗岩矿石的锆石U-Pb年龄为 122.7 ± 1.8 Ma. 前人的这些年代学数据表明, 巴尔哲铅-铋-稀土矿床成矿时代基本不存在争议, 即为 $122.15\sim 125.2$ Ma. 碱性花岗岩(成矿岩体和围岩)具有高碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$), 高TFeO/MgO比值, 较低的MgO、CaO含量, U强烈亏损, 稀土元素配分图为典型的“V”字形, 属于A型花岗岩. 岩浆来源于下地壳和亏损地幔

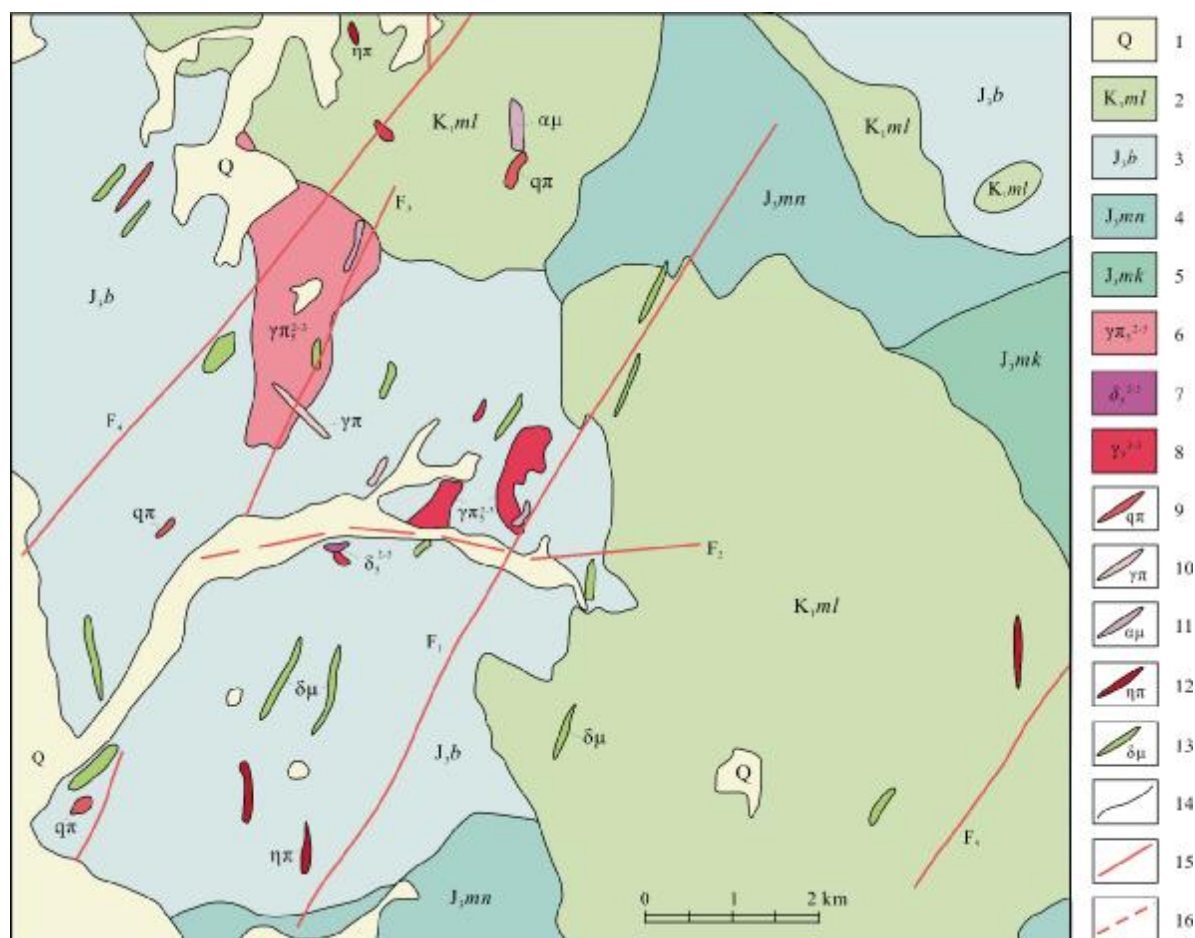


图5 巴尔哲矿床矿区地质图

(据文献[14])

Fig. 5 Geological map of Barzhe deposit

(From Reference [14])

1—第四系(Quaternary); 2—下白垩统梅勒图组(Lower Cretaceous Meiletu fm.); 3—下白垩统白音高老组(Lower Cretaceous Baiyingaolao fm.); 4—上侏罗统玛尼吐组(Upper Jurassic Manitu fm.); 5—上侏罗统满克头鄂博组(Upper Jurassic Manketoubo fm.); 6—燕山期花岗斑岩(Yanshanian granite porphyry); 7—燕山期闪长岩(Yanshanian diorite); 8—燕山期蚀变钠长石花岗岩(Yanshanian altered albite granite); 9—石英斑岩脉(quartz porphyry dike); 10—花岗斑岩脉(granite porphyry dike); 11—安山玢岩脉(andesite porphyryite dike); 12—二长斑岩脉(monzonite porphyry dike); 13—闪长岩(diorite); 14—地质界限(geological boundary); 15—实测断层(surveyed fault); 16—推测断层(inferred fault)

的混合源区,形成于与古太平洋板块俯冲相关的陆内伸展构造环境.碱性花岗岩(矿体)具有明显的稀土四分组效应,碱性花岗岩(围岩)具有轻微的稀土四分组效应.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^[17-26].

2.5 石灰窑铌钽矿床(花岗岩型)

石灰窑位于华北陆台艾力格庙-锡林浩特前寒武纪中间地块的中间地带,区内上二叠统林西组局部出露,岩性以浅灰色粉砂质夹泥灰岩、暗黑色炭质板岩、变质砂岩为主.第四系全新统冲积、湖积层及以风成砂为主的堆积层广泛分布于矿区的沟谷和低洼地带.侏罗纪岩体在矿区出露最广泛,岩性主要有中细粒花岗岩、钠长石化云英岩化花岗岩、细粒石英二长(斑)岩、中细粒花岗闪长岩、中细粒石英闪长岩,其分布和产出形态严格受北东向断裂带控制,多呈岩株状、脉状产出(图6).从区域上来看应属小乌兰沟-海流特山大基岩的南缘部分,且剥蚀深度不大.受种畜场-海流特山破碎带的影响,以及后期强烈的糜棱岩化作用,构造形迹改造,部分地段岩石破碎呈碎裂花岗岩或具片麻状构造,并在岩体中出现了电气石化白云母伟晶岩脉、花岗伟晶岩脉、花岗(斑)岩脉、二长花岗斑岩脉、石英正长岩脉、石英闪长岩脉等.铌钽矿体赋存于燕山早期蚀变碱性花岗岩体内,产于岩体顶部裂隙密集带的钠长石化花岗岩中,矿化主要受岩体的微细构造及后生构造裂隙所控制.目前共圈出11条铌钽矿体,均伴生铀.其中I号岩体圈出工业矿体6个,低品位矿体2个;V号岩体圈出工业矿体1个,低品位矿体2个,以V-1号主矿体规模最大.工业矿体规模大小不一,铌钽矿体一般长度94.5~1140 m,延深40~590 m.按其蚀变强度及钠长石含量可分为3个岩相带:强钠长石化花岗岩带是稀有金属最主要的富集带;中钠长石化花岗岩带位于强钠长石化带之下,二者关系呈渐变过渡,界线不明显;弱钠长石化花岗岩带位于中钠长石化花岗岩带的下部,往下逐渐过渡到蚀变作用微弱的中细粒花岗岩.该区围岩蚀变属强-中等范畴,与碱性钠长石化花岗岩型铌钽铀矿的蚀变模式相一致,两种蚀变互相叠加,分带不甚明显.岩体自上而下为云英岩化带-钠长石化云英岩化带(过渡带)-钠长石化带(中细粒)-弱钠长石化带(细粒),蚀变逐步减弱,岩石粒度变粗. Nb、Ta、Be、Li、Rb、W、Sn 等元素含量自上而下

呈舒缓波状下降,稀有金属矿化主要聚集于钠长石化云英岩化带(过渡带)-钠长石化带(中细粒)中,规模较大,以岩体顶部含矿较富;W、Sn 矿化主要与云英岩化呈正相关,赋存于岩体的浅部,分布范围较小^[9-13].

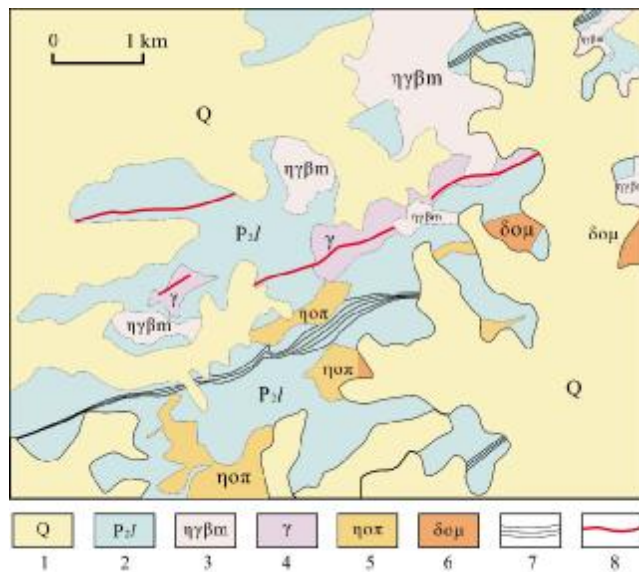


图6 石灰窑矿床矿区地质图

(据文献[9-13]改编)

Fig. 6 Geological map of Shihuiyao deposit

(Modified from References [9-13])

1—第四系冲积、洪积层(Quaternary alluvium and diluvium); 2—上二叠统林西组砂质板岩及碳质板岩(sandy slate and carbonaceous slate of Linxi fm., Upper Permian); 3—燕山早期云英岩化钠长石化中细粒二云母二长花岗岩(Early Yanshanian greisenized albitized fine-medium grained two-mica monzogranite); 4—燕山期碎裂带细粒花岗岩(Yanshanian fine-grained granite); 5—石英二长斑岩(quartz monzoporphyry); 6—石英闪长岩(石英闪长岩)(quartz diorite porphyrite); 7—破碎断裂带或糜棱岩带(fracture zone or mylonite zone); 8—断层(fault)

孙艳等^[27]利用高精度白云母 Ar-Ar 同位素测年方法,分别获得云英岩化花岗岩内白云母的坪年龄 144.7 ± 1.1 Ma, 等时线年龄 143.3 ± 1.4 Ma; 石英脉中片状白云母的坪年龄为 146.4 ± 1.0 Ma, 等时线年龄为 143.9 ± 1.5 Ma. 云英岩化花岗岩内白云母和石英脉中片状白云母的年龄在误差范围内一致,厘定了矿床成矿时代为燕山晚期. 区内褶皱强烈,断裂发育,岩浆活动频繁而分布广泛,利于流体运移. 区内分布有规模较大的天河石化花岗岩、云英岩化花岗岩及部分花岗伟晶岩,钠长石化作用普遍分布,利于铀钽铌钽等稀有金属发生沉淀和聚集,具有较大的成矿潜力^[26-37].

石灰窑矿床与我国大部分稀有金属成矿时代(燕山期)一致。

2.6 李家堡子铌钽矿床(伟晶岩型)

李家堡子铌钽矿床位于辽宁省新宾县,构造位置处于华北克拉通北缘,是近年来东北地区探明的唯一具有开采价值的伟晶岩型稀有金属矿床。李家堡子铌钽矿化伟晶岩脉全部产于新太古代鞍山群通什村组斜长角闪岩和角闪斜长片麻岩中,沿北西向和北东向2组断裂产出,与矿区新太古代末期混合花岗岩无明显共生关系。含铌钽矿化伟晶岩脉的新太古代变质岩系部分被侏罗纪安山岩和凝灰岩及第四纪沉积物覆盖。含铌钽伟晶岩主要由钠长石、微斜长石、石英、白云母、锂云母组成,副矿物为铌钽铁矿、磷灰石、锆石等(图7)。花岗伟晶岩矿化均匀,品位较稳定,其中 Nb_2O_5 平均含量0.0045%, Ta_2O_5 平均含量0.0312%。

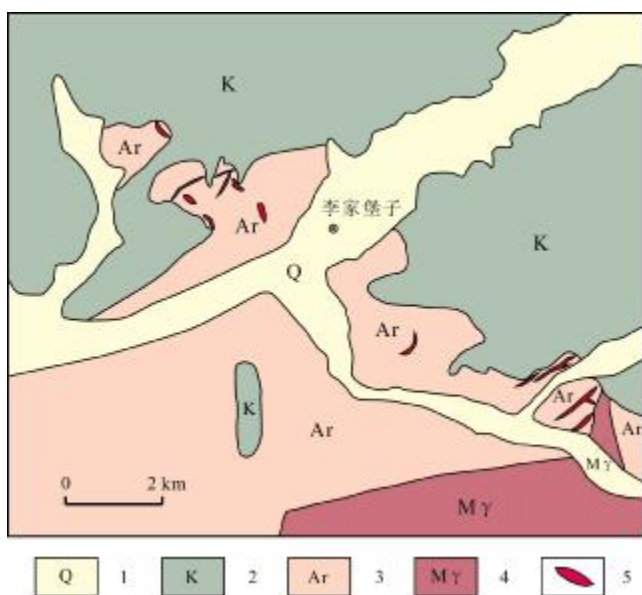


图7 李家堡子矿床矿区地质图

(据文献[37])

Fig. 7 Geological map of Lijiapuzi deposit

(From Reference [37])

1—第四系(Quaternary); 2—侏罗系(Jurassic); 3—太古宙变质岩系(Archean metamorphic rock series); 4—太古宙混合花岗岩(Archean migmatitic granite); 5—铌钽矿体(Nb-Ta orebody)

姚玉增等^[37]测得花岗伟晶岩中铌钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 2.51~2.49 Ga, 与华北克拉通新太古代末期构造-岩浆事件有关, 可能代表了中国成矿时代最老的铌钽矿床^[33]。其含矿花岗伟晶岩具有富钽高

钽明显特征,主要的含钽矿物有钠长石、细晶石及重钽铁矿等。岩石地球化学特征表明,李家堡子伟晶岩富硅、富碱,贫Ca、Mg、Ti、P,属过铝质花岗岩类,形成于造山后相对伸展的构造环境^[36]。研究表明,华北克拉通北缘含有大量条带状铁建造的鞍山群变质岩系的沉积,时代约为2.55 Ga,并在约2.5 Ga遭受了构造-岩浆事件的改造,导致区域性高级变质作用、深熔作用和壳源花岗岩的形成。李家堡子花岗伟晶岩的形成可能与华北克拉通新太古代末期构造-岩浆事件有关。近期,有学者在华北克拉通辽东地区的鞍山式铁矿床中发现,富铁矿体边部富绿泥石蚀变岩发育铌钽矿化。初步研究表明,铌钽成矿时代也与约2.5 Ga的花岗质岩浆活动有关。这表明,华北克拉通东北缘具有早前寒武纪铌钽成矿和找矿潜力。形成于1.4 Ga的白云鄂博矿床是中国目前已知的形成时代最老的铌钽矿床,成矿与碳酸岩岩浆活动有关。而与花岗质岩浆活动有关的最老的铌钽矿床产于桂北元宝山和黔东梵净山地区,成矿时代约为0.82 Ga。辽宁李家堡子铌钽矿床的成矿时代为新太古代末期,是中国形成时代最老的铌钽矿床。

2.7 赵井沟铌钽矿床(花岗岩-伟晶岩型)

赵井沟铌钽矿位于华北地台北缘大青山金、铁、稀有-稀土金属成矿带,出露的地层主要有中元古界渣尔泰群和中石炭统栓马庄组以及第四系冲洪积物。其中栓马庄组是一套以轻变质砾岩和轻变质粗砂岩为主的岩系,是含矿岩体的主要围岩。矿区已发现40余条矿化岩脉,其中较大铌钽矿体5条,含钨锡石英脉数十条。赋矿岩体(脉)主要为含天河石钠长细晶岩、含天河石花岗伟晶岩、钠长细晶岩、钠长石化花岗岩。矿(化)体在空间上呈25°方向展布,地表出露长度450 m,宽20~50 m,受北东向构造控制,呈脉状贯穿于栓马桩组轻变质含砾变质砂岩构造裂隙中,向南陡倾,倾角40~70°,深部及东部变缓,中部形态较平稳,两端收缩或分叉尖灭。矿体由上、下两部分构成,上部脉状矿体赋矿标高1950~1590 m,矿体分支较多,品位铌高钽低。两侧有较多的大致平行主矿体的脉群,多数呈雁行或羽毛状分布,铌钽大多低于工业品位。下部岩株状矿体赋矿标高1590~1221 m,矿体形态、产状、厚度、品位与上部矿体有明显不同,形态呈不规则岩株状,长750 m,厚度最大可达200 m左右,倾向143~

205°,倾角 20~40° (图 8),深部矿体品位变富. $\text{Na}_2\text{O}_5+\text{Tb}_2\text{O}_5$ 含量为 0.0224%~0.0287%^[9-13].

高允等^[38]以赵井沟铌钽矿区内天河石花岗伟晶岩脉中的白云母为研究对象,利用 Ar-Ar 同位素年代学方法,以确定其成矿时代. 研究发现区内铌钽矿化主要赋存在碱长花岗岩、碱长花岗细晶岩、云英岩和天河石花岗伟晶岩中,且铌钽矿物与白云母同时形成,有重要的共生关系. 故本次研究获得的白云母坪年龄 $123.57\pm0.66\text{ Ma}$ 和等时线年龄 $124.0\pm2.0\text{ Ma}$ 具有地质意义,可代表成矿年龄,表明赵井沟铌钽多金属矿床形成于燕山晚期. 岩石地球化学分析结果表明,矿区晚古生代白垩纪花岗岩为准铝-弱过铝质、高钾钙碱性

系列,轻稀土元素富集,具极强的 Eu 负异常,大离子亲石元素(Rb、Th、U) 和高场强元素(Nd、Hf、Y)强烈富集. 花岗岩体主要是在多种地质因素影响下由部分下地壳物质熔融形成,在后期上升过程中受少量上地壳物质混染. 已有资料显示,区域上已发现的稀有金属矿床的成矿时代同属于燕山晚期,显示华北地台北缘大青山成矿带在燕山运动的晚期存在一次重要稀有金属成矿作用. 同时,研究区及相邻区域经历了强烈的构造运动,岩浆活动频繁,含钠长石化细晶花岗岩广泛分布,局部有天河石钠长伟晶岩,钠长石化、天河石化强烈且分布广泛,利于铌、钽、铷、锂等稀有金属发生沉淀和聚集,指示该区具有较大的成矿潜力^[9-13].

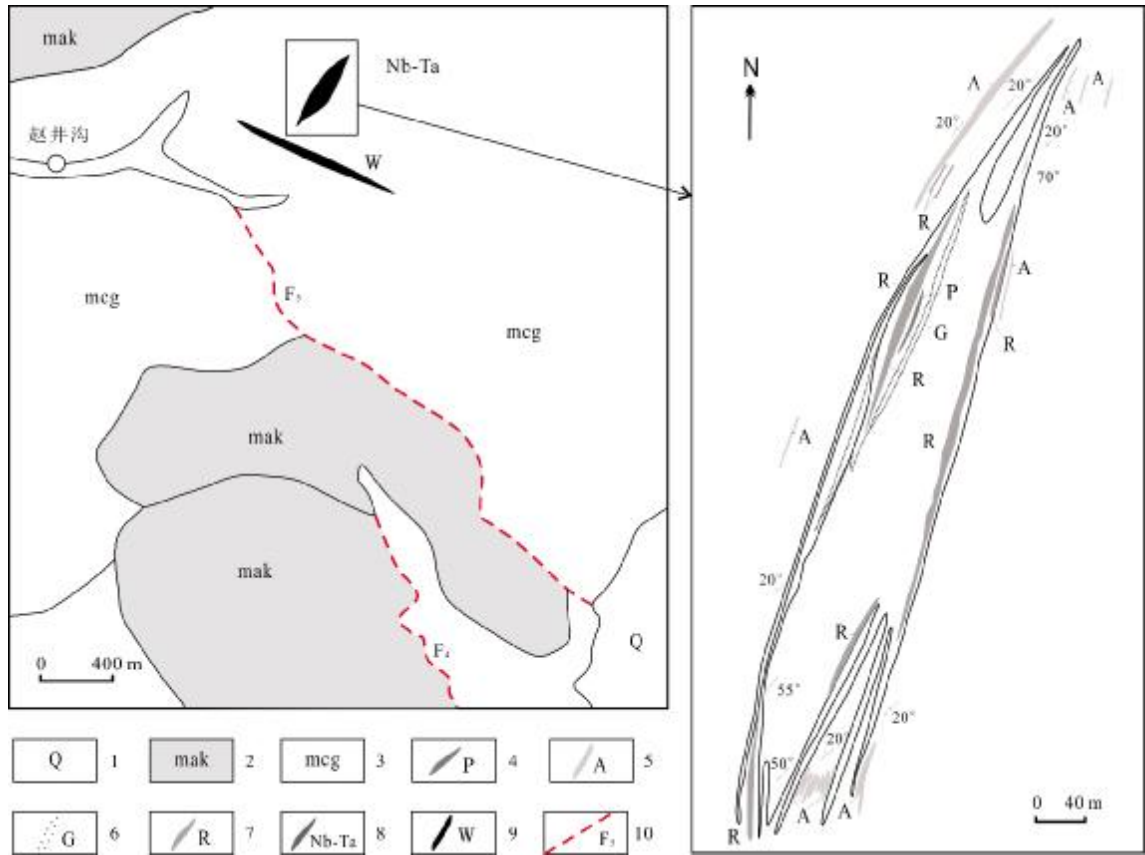


图 8 赵井沟矿床矿区地质图
(据文献[9-13]改编)

Fig. 8 Geological map of Zhaojinggou deposit
(Modified from References [9-13])

1—第四系 (Quaternary); 2—中石炭统拴马庄组变质长石砂岩 (metamorphic arkose of Shuanmazhuang fm., Middle Carboniferous); 3—变质砾岩 (metamorphic conglomerate); 4—碱长花岗伟晶岩脉 (alkaline feldspar granite pegmatite dike); 5—碱长花岗细晶岩脉 (alkaline feldspar granite aplite dike); 6—云英岩脉 (greisen dike); 7—含天河石钠长石碱长花岗岩脉 (amazonite-bearing albite alkali-feldspar granite dike); 8—铌钽矿体 (Nb-Ta orebody); 9—含钨石英脉 (W-bearing quartz vein); 10—断层 (fault)

3 成矿作用及地球动力学背景

华北克拉通北缘毗邻中亚造山带,其岩浆活动与古亚洲洋构造演化息息相关。前人研究认为,古亚洲洋在晚志留世到晚二叠世沿着西拉木伦—长春—延吉自西向东呈剪刀式闭合。虽然有关古亚洲洋的闭合时限还存在争议,可从二叠纪末到三叠纪初,大多数学者认为最终闭合时间为晚二叠世,在三叠纪中晚期华北克拉通北缘处于后碰撞的伸展构造背景。已有的研究成果显示,中亚造山带东段石炭纪—二叠纪岩浆岩具有俯冲相关的地球化学特征,而晚三叠世的岩浆岩具有后造山伸展环境相关的地球化学特征,证实了晚三叠世华北克拉通北缘处于古亚洲洋闭合后伸展构造背景。由此推断,与成矿有关的碱性岩—碱性花岗岩是在古亚洲洋闭合造山后伸展构造背景下产生的,造山后阶段地壳伸展、走滑等产生或复活了深大断裂,为富集轻稀土元素和大离子亲石元素的地幔岩浆提供了上升通道,形成了正长岩岩体。华北克拉通北缘早白垩世A型花岗岩的形成与古太平洋板块俯冲相关。早白垩世受古太平洋板块俯冲作用影响,华北克拉通北缘岩石圈减薄,地幔岩浆沿着伸展破坏产生的不规则通道上涌,导致伸展构造和岩浆活动在地壳浅部层次发展^[38-47]。因此,认为本区所有矿床的形成均与碱性岩浆作用有关,形成于古亚洲洋构造体制和太平洋构造体制叠加转换时期,其动力学背景独特且复杂,总体上是在陆内伸展构造环境下,亏损地幔物质上涌、底侵,与下地壳物质发生部分熔融形成的,成岩构造背景与古太平洋板块俯冲密切相关(图9)。

综上,本研究认为华北克拉通北缘东段的稀有-稀土元素富集成矿过程主要与碱性岩浆的高度演化密切相关,在水和挥发分作用下,岩浆强烈分异结晶,导致成矿元素迁移聚集,随着温度、压力等成矿条件的变化,含矿流体在岩浆作用晚期随着主要造岩矿物的晶出而富集成矿^[48-50]。

4 结论

(1)华北板块北缘东段经历了古亚洲洋—太平洋构造—岩浆事件,发育有近东西向的碱性岩浆岩带,带内发现以巴尔哲、赛马为代表的稀有-稀土矿床/点10余处,成矿类型以碱性花岗岩—碱性岩型为主,伟晶岩型次之。

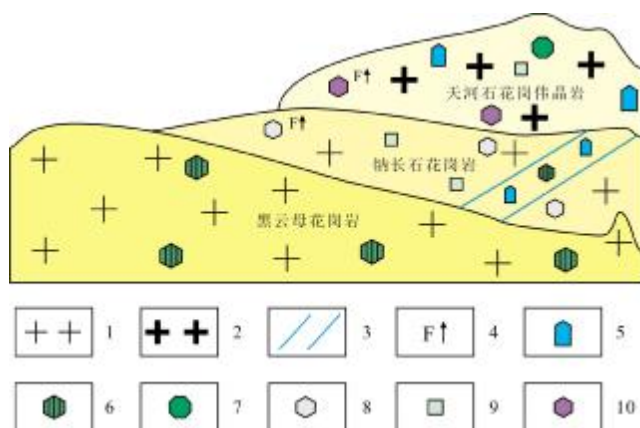


图9 碱性花岗岩-伟晶岩型矿床成矿模式简图

(据文献[8])

Fig. 9 Metallogenic model of alkaline granite-pegmatite type deposit

(From Reference [8])

1—花岗岩(granite); 2—花岗伟晶岩(granitic pegmatite); 3—伟晶岩脉(pegmatite dike); 4—云母中F含量升高(increased F content in mica); 5—天河石(amazonite); 6—黑云母(biotite); 7—绿柱石(beryl); 8—白云母(muscovite); 9—萤石(fluorite); 10—锂云母(lepidolite)

(2)区内典型稀有-稀土矿床均与碱性岩浆作用有关,成矿作用可分为3个阶段,即燕山期的120~140 Ma、印支期的200~230 Ma以及吕梁运动有关的2500~2510 Ma。

(3)研究区稀有-稀土元素富集成矿过程主要与碱性岩浆的高度演化密切相关,在水和挥发分作用下,岩浆强烈分异结晶,导致成矿元素迁移聚集,随着温度、压力等成矿条件的变化,含矿流体在岩浆作用晚期随着主要造岩矿物的晶出而富集成矿。

参考文献(References):

- [1] Akoh J U, Ogunleye P O, Ibrahim A A. Geochemical evolution of micas and Sn-, Nb-, Ta-mineralization associated with the rare metal pegmatite in Angwan Doka, central Nigeria [J]. Journal of African Earth Sciences, 2015, 112: 24-36.
- [2] Dewaele S, Hulsbosch N, Cryns Y, et al. Geological setting and timing of the world-class Sn, Nb-Ta and Li mineralization of Manono-Kitotolo (Katanga, Democratic Republic of Congo) [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 373-390.
- [3] 吴学敏, 周敏娟, 罗喜成, 等. 江西西北部锂及稀有金属成矿条件及找矿潜力分析[J]. 华东地质, 2016, 37(4): 275-283.

Wu X M, Zhou M J, Luo X C, et al. The metallogenic conditions and prospecting potential of lithium and rare metals in northwestern Jiangxi

- [J]. East China Geology, 2016, 37(4): 275–283.
- [4] Gulley A L, Nassar N T, Xun S A. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4111–4115.
- [5] Siegel K, Vasyukova O V, Williams-Jones A E. Magmatic evolution and controls on rare metal-enrichment of the Strange Lake A-type peralkaline granitic pluton, Québec-Labrador [J]. Lithos, 2018, 308–309: 34–52.
- [6] 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(2): 106–111.
Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, et al. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 106–111.
- [7] 王安建, 高蕊蕊. 中国能源与重要矿产资源需求展望 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(3): 338–344.
Wang A J, Gao X R. China's energy and important mineral resources demand perspective [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(3): 338–344.
- [8] 施璐, 鞠楠, 伍月, 等. 华北克拉通北缘东段新发现大喜营子铷-铍矿床 [J]. 地质与资源, 2023, 32(02): 245–248.
Shi L, Ju N, Wu Y, et al. A new discovery of the Daxiyingzi rubidium-beryllium deposit in the eastern part of the northern margin of the North China Craton [J]. Geology and Resources, 2023, 32(02): 245–248.
- [9] 李晓峰, 韦星林, 朱艺婷, 等. 华南稀有金属矿床: 类型、特点、时空分布与背景 [J]. 岩石学报, 2021, 37(12): 3591–3614.
Li X F, Wei X L, Zhu Y T, et al. Rare metal deposits in South China: Types, characteristics, distribution and tectonic setting [J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(12): 3591–3614.
- [10] 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展 [J]. 矿床地质, 2019, 38(5): 935–969.
Mao J W, Yuan S D, Xie G Q, et al. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st Century [J]. Mineral Deposits, 2019, 38(5): 935–969.
- [11] 张荣臻, 李柱, 刁习, 等. 内蒙古加不斯花岗岩型铌钽矿床地质特征及成因 [C]//河南省地质学会. 河南地球科学研究进展(2022). 武汉: 中国地质大学出版社, 2023.
Zhang R Z, Li Z, Diao X, et al. Geological characteristics and genesis of granite-type niobium-tantalum deposit in Gabis, Inner Mongolia [C]//Henan Geological Society. Research progress of earth sciences in Henan(2022). Wuhan: China University of Geosciences Press, 2023. (in Chinese)
- [12] 朱京占, 卢显成, 姚仲伟. 内蒙古石灰窑稀有金属矿地质特征及矿化规律 [J]. 矿产勘查, 2013, 4(6): 635–641.
Zhu J Z, Lu X C, Yao Z W. Geological characteristics and metallogenic regularity of rare metal desposit in Shihuiyao, Inner Mongolia [J]. Mineral Exploration, 2013, 4(6): 635–641.
- [13] 鄂阿强. 内蒙古中部典型花岗岩型稀有金属矿床特征和控矿因素 [J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(2): 62–69.
E A Q. Ore characteristics and ore controlling factors of rare metal deposits of typical granite type in the middle of the Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(2): 62–69.
- [14] 陈金勇, 范洪海, 王生云, 等. 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.
Chen J Y, Fan H H, Wang S Y, et al. Geochemical characteristics, chronology and geological significance of alkaline granites in Bazhe area, Inner Mongolia [J]. Geological Review, 2019, 65(S1): 45–46.
- [15] 王一先, 赵振华. 巴尔哲超大型稀土铌钽矿床地球化学和成因 [J]. 地球化学, 1997, 26(1): 25–26, 28, 30–36.
Wang Y X, Zhao Z H. Geochemistry and genesis of the very large rare earth niobium-beryllium-zirconium deposit in Balje [J]. Acta Geochimica, 1997, 26(1): 25–26+28+30–36.
- [16] 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.
Qiu Z L, Liang D Y, Wang Y F, et al. Rare earth trace elements, U–Pb ages of zircons from Barzhe alkaline granite and their metallogenic indications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1757–1768.
- [17] 张辉, 吕正航, 唐勇. LCT 型伟晶岩及其锂矿床成因概述 [J]. 地质学报, 2021, 95(10): 2955–2970.
Zhang H, Lü Z H, Tang Y. A review of LCT pegmatite and its lithium ore genesis [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(10): 2955–2970.
- [18] 张辉, 吕正航, 唐勇. 新疆阿尔泰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(4): 792–814.
Zhang H, Lü Z H, Tang Y. Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegmatite-type rare metal ore deposits in Altay Orogenic Belt, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 792–814.
- [19] 熊定一, 王孝磊, 邢光福. 从超大陆旋回看前寒武纪伟晶岩型锂矿的形成 [J]. 华东地质, 2023, 44(1): 1–12.
Xiong D Y, Wang X L, Xing G F. A supercontinental cycles perspective for the formation of Precambrian pegmatitic lithium deposits [J]. East China Geology, 2023, 44(1): 1–12.
- [20] 周玲棣, 赵振华, 周国富. 我国一些碱性岩的同位素年代学研究 [J]. 地球化学, 1996, 25(2): 164–171.
Zhou L D, Zhao Z H, Zhou G F. Isotopic chronology of some alkaline rock bodies in China [J]. Geochimica, 1996, 25(2): 164–171.
- [21] 谭东娟, 林景仟, 单玄龙. 赛马-柏林川碱性火山-侵入杂岩体岩浆成因 [J]. 地质论评, 1999, 45(S1): 474–481.

- Tan D J, Lin J Q, Shan X L. On magma origin of Saima-Bailinchuan alkaline volcanic-intrusive complex[J]. *Geological Review*, 1999, 45 (S1): 474–481.
- [22] Wu B, Wang R C, Yang J H, et al. Wadeite ($K_2ZrSi_3O_9$), an alkali-zirconosilicate from the Saima agpaitic rocks in northeastern China: Its origin and response to multi-stage activities of alkaline fluids[J]. *Lithos*, 2015, 224–225: 126–142.
- [23] Wu B, Wang R C, Yang J H, et al. Zr and REE mineralization in sodic lujavrite from the Saima alkaline complex, northeastern China: A mineralogical study and comparison with potassic rocks[J]. *Lithos*, 2016, 262: 232–246.
- [24] 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(6): 1741–1757.
- Wu B, Wang R C, Liu X D, et al. 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*, 2018, 34(6): 1741–1757.
- [25] Ju N, Ren Y S, Zhang S, et al. Metallogenic epoch and tectonic setting of Saima niobium deposit in Fengcheng, Liaoning Province, NE China[J]. *Minerals*, 2019, 9(2): 80.
- [26] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, et al. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1/2): 89–113.
- [27] 孙艳, 王瑞江, 李建康, 等. 锡林浩特石灰窑钼多金属矿床白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代及找矿前景分析[J]. *地质论评*, 2015, 61(2): 463–468.
- Sun Y, Wang R J, Li J K, et al. Analysis of ^{40}Ar - ^{39}Ar age and prospecting prospect of muscovite in rubidium polymetallic deposit of Xilinhot limekiln [J]. *Geological Review*, 2015, 61(2): 463–468.
- [28] 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.
- Yuan Z X, Bai G. Temporal and spatial distribution of endogenic rare and rare earth mineral deposits of China[J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20(4): 347–354.
- [29] 张培善, 杨主明, 陶克捷, 等. 我国铌钽稀土矿物学及工业利用[J]. *稀有金属*, 2005, 29(2): 206–210.
- Zhang P S, Yang Z M, Tao K J, et al. Niobian-tantalum and rare earth mineralogy in China and their industrial utilization[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2005, 29(2): 206–210.
- [30] 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.
- Yang J H, Wu F Y, Xie L W, et al. 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*, 2007, 23(2): 263–276.
- [31] Yang J H, Sun J F, Zhang M, et al. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension [J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 149–167.
- [32] 孙立军, 张永红, 于金辉, 等. 辽宁东部凤城碱性岩体的地质特征及形成时代探讨[J]. *辽宁省交通高等专科学校学报*, 2008, 10(4): 41–44.
- Sun L J, Zhang Y H, Yu J H, et al. Discussion geological features and age on the alkaline-complex of Fengcheng of the eastern Liaoning [J]. *Journal of Liaoning Provincial College of Communications*, 2008, 10(4): 41–44.
- [33] 鞠楠, 张森, 毕中伟, 等. 辽宁凤城赛马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(1): 130–139, 153.
- Ju N, Zhang S, Bi Z W, et al. Geochemical characteristics and geological significance of metallogenic rock bodies of Saima niobium deposit in Fengcheng, Liaoning[J]. *Global Geology*, 2019, 38(1): 130–139, 153.
- [34] Wu Y, Ju N, Liu X, et al. Sources of metallogenic materials of the Saima alkaline rock-hosted niobium-tantalum deposit in the Liaoning region: Evidence from the Sr-Nd-Pb and Li isotopes [J]. *Minerals*, 2023, 13(11): 1443.
- [35] Wu F Y, Yang Y H, Marks M A W, et al. *In situ* U-Pb, Sr, Nd and Hf isotopic analysis of eudialyte by LA-(MC)-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2010, 273(1/2): 8–34.
- [36] Zhu Y S, Yang J H, Sun J F, et al. Petrogenesis of coeval silica-saturated and silica-undersaturated alkaline rocks: Mineralogical and geochemical evidence from the Saima alkaline complex, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 117: 184–207.
- [37] 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(1): 131–144.
- Zhong J, Fan H H, Chen J Y, et al. Geochemistry characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar age of biotite from the Saima aegirine-nepheline syenite and its geological significance [J]. *Earth Science*, 2020, 45(1): 131–144.
- [38] 高允, 孙艳, 赵芝, 等. 内蒙古武川县赵井沟铌钽多金属矿床白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄及地质意义[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(5): 551–558.
- Gao Y, Sun Y, Zhao Z, et al. Age and geological significance of ^{40}Ar - ^{39}Ar isotope of muscovite in Zhaojinggou niobium-tantalum polymetallic deposit, Wuchuan County, Inner Mongolia [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(5): 551–558.
- [39] Zhu Y S, Yang J H, Sun J F, et al. Zircon Hf-O isotope evidence for recycled oceanic and continental crust in the sources of alkaline rocks [J]. *Geology*, 2017, 45(5): 407–410.
- [40] Ju N, Shi L, Feng Y H, et al. Genesis of the recently discovered

- Daxiyingzi Rb-Be deposit on the northern margin of the North China Craton: Evidence from $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ ages and geochemical data[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 150: 105152.
- [41]刁纯才, 凤金龙, 于金辉, 等. 辽宁新宾李家堡子铌钽矿床地质特征[J]. *地质与资源*, 2013, 22(1): 20–24.
- Diao C C, Feng J L, Yu J H, et al. Geological characteristics of the Lijiapuzi niobium-tantalum deposit in Xinbin County, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(1): 20–24.
- [42]姚玉增, 李立兴, 付建飞, 等. 华北克拉通辽宁李家堡子早前寒武纪花岗伟晶岩型铌钽成矿的年龄证据[J]. *地质通报*, 2023, 42(6): 1047–1049.
- Yao Y Z, Li L X, Fu J F, et al. Geochronological constraints on Early Precambrian granitic pegmatite type Nb-Ta mineralization of the Lijiapuzi deposit in North China Craton[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(6): 1047–1049.
- [43]Fu J F, Yao Y Z, Liu J, et al. Geology and petrogeochemistry of Lijiapuzi Nb-Ta granitic pegmatite deposit: Implications for ore genesis and prospecting[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(5): 2542.
- [44]尹志刚, 李萌萌, 吴子杰, 等. 辽宁本溪地区新太古代晚期钾质花岗岩的发现及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(1): 125–139.
- Yin Z G, Li M M, Wu Z J, et al. The discovery and geological implications of late Neoproterozoic kaligranites in Benxi area, Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(1): 125–139.
- [45]Guo R R, Li Z H, Liu S W, et al. Late Neoproterozoic geodynamic regime of the northeastern North China Craton: Constraints from metamorphosed volcanic rocks of the Anshan-Benxi greenstone belt[J]. *Precambrian Research*, 2022, 371: 106583.
- [46]耿元生, 杨崇辉, 宋彪, 等. 吕梁地区 18 亿年的后造山花岗岩: 同位素年代和地球化学制约[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(4): 477–487.
- Geng Y S, Yang C H, Song B, et al. Post-orogenic granites with an age of 1800 Ma in Luliang area, North China Craton: Constraints from isotopic geochronology and geochemistry[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(4): 477–487.
- [47]Zhang S H, Liu S W, Zhao Y, et al. The 1.75–1.68 Ga anorthositic-mangerite-alkali granitoid-rapakivi granite suite from the northern North China Craton: Magmatism related to a paleoproterozoic orogen[J]. *Precambrian Research*, 2007, 155(3/4): 287–312.
- [48]Shi L, Zheng C Q, Yao W G, et al. Geochronological framework and tectonic setting of the granitic magmatism in the Chaihe-Moguqi region, central Great Xing'an Range, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 443–453.
- [49]Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, et al. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 131: 49–87.
- [50]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(9): 2793–2806.
- Li S C, Li Y F, Wang X A, et al. 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*, 2016, 32(9): 2793–2806.

(上接第 446 页/Continued from Page 446)

- [108]江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 等. 兴蒙造山带成矿规律及若干科学问题[J]. *矿床地质*, 2018, 37(4): 671–711.
- Jiang S H, Zhang L L, Liu Y F, et al. Metallogeny of Xing-Meng Orogenic Belt and some related problems[J]. *Mineral Deposits*, 2018, 37(4): 671–711.
- [109]Xu W L, Pei F P, Wang F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 167–193.
- [110]Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 31: 218–240.
- [111]Koppers A A P, Staudigel H, Duncan R A. High-resolution $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the oldest oceanic basement basalts in the western Pacific basin[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(11): 8914.
- [112]Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(3/4): 212–270.