

doi: 10.12097/gbc.2023.06.013

大兴安岭南段黄岗梁地区早白垩世正长花岗岩成因及构造启示: 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素证据

顾玉超¹, 陈仁义^{2*}, 杜继宇¹, 鞠楠¹

GU Yuchao¹, CHEN Renyi^{2*}, DU Jiyu¹, JU Nan¹

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. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

1. *Shenyang Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Northeast China), Shenyang 110034, Liaoning, China;*

2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

摘要:【研究目的】大兴安岭南段黄岗梁锡铁矿区及外围发育大面积花岗岩类, 加强其成岩时代、岩石成因类型、成岩成矿物质来源等研究, 有利于探究该区成岩与成矿关系和早白垩世碰撞造山机制。【研究方法】采集大兴安岭南段黄岗梁锡铁矿区及外围样品, 进行岩相学、锆石 U-Pb 测年、岩石地球化学及 Rb-Sr、Sm-Nd、Pb 同位素研究。【研究结果】获得岩浆结晶年龄为 141.9~139.1 Ma, 较成矿年龄早约 3 Ma, 形成于早白垩世。岩石具有高硅、低铝、低镁、富钾少钠特征, 为高钾钙碱性 A 型花岗岩。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值分别介于 0.70031~0.70543 和 0.512572~0.512636 之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 0.07~1.18, Nd 同位素模式年龄 T_{DM2} 为 926~838 Ma。【结论】黄岗梁砂卡岩型锡铁矿床成岩物质于新元古代从亏损地幔分离, 在上升侵位过程中受到地壳物质混染。大兴安岭南段地区在早白垩世经历了蒙古-鄂霍次克洋碰撞闭合伸展作用和古太平洋高角度俯冲作用叠加。

关键词: Sr-Nd-Pb 同位素; 花岗岩; 碰撞后伸展环境; 锆石 U-Pb 年龄; 黄岗梁地区; 大兴安岭

创新点: 开展大兴安岭南段地区早白垩世典型多金属矿床成岩成矿对比研究和 Pb 同位素对比研究, 提出黄岗梁砂卡岩型锡铁矿床的中酸性侵入岩较成矿年龄早 3 Ma 左右, 代表了与碳酸盐岩的接触交代矿化期。

中图分类号: P534.53; P597; P588.12⁺ 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)01-0091-26

Gu Y C, Chen R Y, Du J Y, Ju N. Petrogenesis and tectonic implications of the Early Cretaceous syenogranite in Huanggangliang area, southern Great Hinggan Range: Evidence from zircon U-Pb ages, petrogeochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(1): 91-116

Abstract: [Objective] A large area of granitoids had been developed in the Huanggangliang tin-iron mining and its surrounding area in the southern Great Hinggan Range. Thus, the study on its diagenetic age, petrogenetic type and source of diagenetic and ore-forming materials provides important insights to the mechanism of Early Cretaceous collision orogeny in this area and its relationship with mineralization. [Methods] Samples were collected from the Huanggangliang tin-iron mining area and its surrounding areas in the southern Great Hinggan Range for petrography, zircon U-Pb geochronology, rock geochemistry, and Rb-Sr, Sm-Nd, Pb isotope studies. [Results] The crystallization ages of these samples range from 141.9 Ma to 139.1 Ma, which was formed during the Early Cretaceous and was about 3 Ma earlier than the mineralization age. The rocks are belong to high potassium calcium alkaline A-type

收稿日期: 2023-06-12; 修订日期: 2023-10-12

资助项目: 中国地质调查局项目《吉黑东部成矿带战略性矿产调查》(编号: DD20240060) 和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: 以辽东地区赛马铌钽矿床为例》(批准号: 42102087)

作者简介: 顾玉超(1986-), 男, 博士, 高级工程师, 从事岩石学和矿床学研究。E-mail: guyi1224@126.com

* 通信作者: 陈仁义(1966-), 男, 博士, 研究员, 从事矿床学研究与矿产勘查规划研究。E-mail: cgschenry@126.com

granites with characteristics of high silicon, low aluminum, low magnesium, high potassium and low sodium. The ratios of ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ are 0.70031~0.70543 and 0.512572~0.512636, respectively, the value of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ is 0.07~1.18, and the Nd isotope model age T_{DM2} ranges from 926 Ma to 838 Ma. **[Conclusions]** The diagenetic materials of the Huanggangliang skarn tin-iron deposit were separated from the depleted mantle in Neoproterozoic, and experienced crustal contamination during ascending emplacement process. The southern Great Hinggan Range area experienced high-angle subduction of the Paleo-Pacific Ocean plate after post-collisional extension of the Mongol-Okhotsk Ocean closure.

Key words: Sr-Nd-Pb isotopes; granite; post-collisional extension environment; zircon U-Pb dating; Huanggangliang area; the Great Hinggan Range

Highlights: A comparative study was conducted on the diagenesis and mineralization of typical polymetallic deposits formed in the Early Cretaceous of the southern Great Hinggan Range, as well as Pb isotopes. It is suggested that the age of the intermediate-acid intrusive rocks from Huanggangliang skarn-type tin-iron deposit is about 3 Ma earlier than the metallogenic age, which represents the metasomatic mineralization period between intermediate-acidic intrusive rocks and carbonate rocks.

大兴安岭南段位于古亚洲构造域、滨西太平洋构造域和蒙古-鄂霍次克洋构造域交汇部位,东至嫩江断裂,南被西拉木伦河断裂所截。该区经历了古生代西伯利亚板块与华北板块碰撞拼接构造作用、中生代蒙古-鄂霍次克洋闭合作用(Kravchinsky et al., 2002; Tomurtogoo et al., 2005)及古太平洋板块大规模俯冲(Zorin, 1999; Wu et al. 2004),并发生了多期次大规模构造-火山-岩浆作用,形成了现今广泛出露的火山岩和侵入岩(Wu et al., 2011)。最新获得的年龄显示,大兴安岭南段岩浆岩主要形成于2个时期,分别为中晚二叠世—三叠纪(275~210 Ma)和晚侏罗世—早白垩世(160~130 Ma)(Zhang et al., 2010; Zhai et al., 2019)。这2个时期的岩浆活动具有明显不同的岩石组合、成因类型、岩浆物质来源和构造背景。伴随古亚洲洋的闭合作用,该地区在中晚二叠世—三叠纪形成了以内蒙古好力宝铜矿床、劳家沟铜矿床、敖尔盖铜金矿床等为代表的斑岩型多金属矿床(郭志军等, 2012; Zeng et al., 2013; Duan et al., 2015)。晚侏罗世—早白垩世,受蒙古-鄂霍次克洋及古太平洋板块构造体系影响,在西拉木伦河深断裂北部形成了维拉斯托-拜仁达坝、黄岗梁、边家大院、双尖子山、浩布高等一系列大、中型铜-铅-锌-银-锡-钨-铁多金属矿床,沿北东向次级断裂带两侧分布(图1),矿床类型为岩浆热液型和矽卡岩型。近年的研究表明,这些多金属矿床的形成时间集中在142~131 Ma(刘建明等, 2004; 周振华等, 2010a; 王喜龙等, 2014a; 吴冠斌等, 2014; 翟德高等, 2016; Liu et al., 2017; Zhai et al., 2017; Wang et al., 2018; 陈公正等, 2018; 刘瑞麟等, 2018; 周振华等,

2019; Hong et al., 2021)。鉴于岩浆热液型矿床和矽卡岩型矿床的成因均与岩浆作用直接相关,近年来学者们对该区的早白垩世二长花岗岩、黑云母正长花岗岩、石英二长闪长岩、斑状花岗岩等中酸性侵入岩进行了相关研究,其成岩年龄在144~134 Ma之间,I型花岗岩类和A型花岗岩类均有分布,多为含幔源组分的年轻地壳发生部分熔融的产物(刘伟等, 2007; Wang et al., 2016; 张天福等, 2019; 李猛兴等, 2020; 刘芳等, 2021; 周桐等, 2022);对成岩成矿构造背景仍有争议,目前有古太平洋俯冲作用(王喜龙等, 2014b; Wang et al., 2016; 王晰等, 2018; 李猛兴等, 2020; 刘芳等, 2021; 周桐等, 2022)、蒙古-鄂霍次克洋闭合作用(杨奇荻等, 2014; 赵辉等, 2015; 李剑锋等, 2016; 王迪等, 2020; 车亚文等, 2021; 章培春等, 2022)、兴蒙造山带造山后板内伸展底侵作用(吴福元等, 1999; 邵济安等, 2001; Fan et al., 2003; 林强等, 2004; 魏巍等, 2017)等观点。

黄岗梁锡铁矿床位于大兴安岭南段内蒙古黄岗梁-甘珠尔庙多金属成矿带西南端,是中国北方重要的大型矽卡岩型锡多金属矿床,直接产出于二叠系火山岩和沉积地层,并具有层状矿化特征。前人围绕成矿年龄(Ishiyama et al., 2001; 周振华等, 2010a; 翟德高等, 2012; Zhai et al., 2014; 要梅娟等, 2016; Li et al., 2022)、成矿物质来源(王莉娟等, 2002; Zhou et al., 2012; 刘智等, 2013; Zhai et al., 2014; Mei et al., 2015)、形成环境(周振华等, 2011; 徐卓彬等, 2017; 尤诗祥等, 2022)、成矿演化(梅微等, 2020)等问题进行了相关研究,但对与成矿密切相关的花岗岩类成因类型、成岩物质来源、成岩成矿构造背景等(周振华等, 2010b, 2010c; Zhou et al., 2012; 翟德高等, 2012;

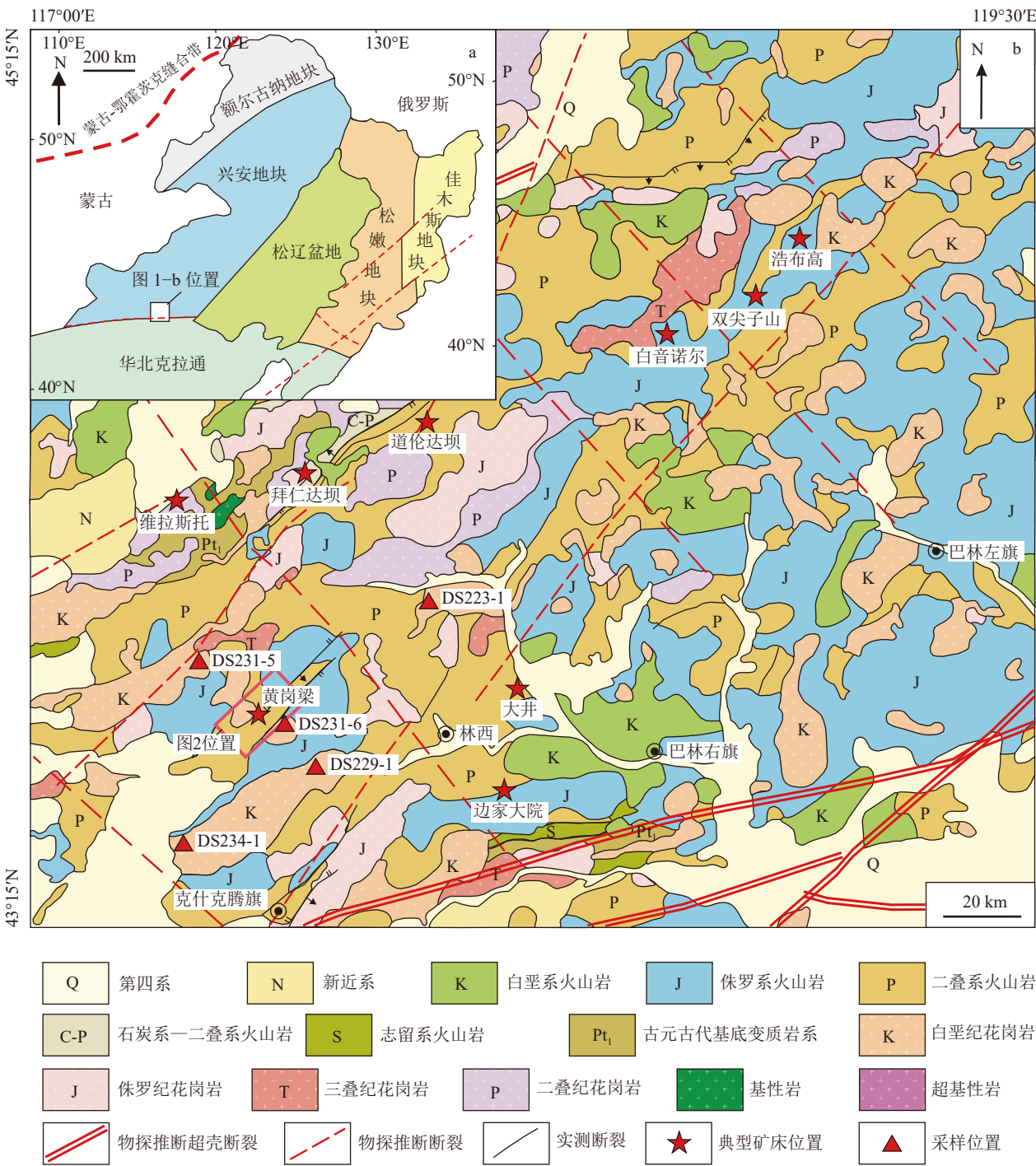


图 1 中国东北构造分区简图(a, 底图据中华人民共和国自然资源部 GS(2016)1600 号修改)和大兴安岭南段地质图
(b, 据内蒙古自治区 2018 年区域地质志 1 : 100 万区域地质图修改)

Fig. 1 Sketch geotectonic unit map of NE China (a) and geological map of southern Great Hinggan Range (b)

赵辉等, 2015) 仍然存在争议。因此, 本次选取矿区及外围花岗岩样品进行了岩相学、锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学、全岩 Rb-Sr、Sm-Nd 和 Pb 同位素研究, 为大兴安岭南段中生代构造-岩浆作用的深部过程和动力学背景研究提供参考。

1 地质概况

大兴安岭南段地区出露地层主要有元古宇、古生界石炭系和二叠系、中生界侏罗系和白垩系, 其中二叠系、侏罗系和白垩系在研究区分布最广泛。元古

宇为宝音图群变质岩系,岩性以云母片岩、斜长片麻岩和石英岩为主。古生界石炭系为浅海相长石砂岩、石英砂岩、白云质灰岩、砂质灰岩夹碎屑岩等。二叠系是研究区多数矿床的赋矿围岩,为海相中酸性熔岩、火山碎屑岩夹碎屑沉积岩、滨海浅海相砂岩、碳酸盐岩夹页岩组合等。侏罗系以含煤层为特征,为火山碎屑岩、凝灰岩、流纹岩夹凝灰质砂岩、沉积岩组合。白垩系以酸性凝灰岩、凝灰质砂岩、流纹质火山碎屑岩及火山熔岩为主,并出现辉石安山岩、玄武岩、安山质凝灰岩等中基性火山岩。受海西期和燕山期构造活动影响,区域深大断裂构造发育北部的北东东向二连-贺根山断裂、东部的北东向嫩江断裂和南部的近东西向西拉木伦断裂。另外,北东向、北西向次级构造呈菱形格子状分布,控制了研究区岩浆岩和矿床的分布。研究区岩浆活动频繁,晚古生代—中生代岩浆岩总体呈北东向展布,以酸性、中酸性花岗岩类为主,与成矿关系紧密,基性岩、超基性岩呈岩株或岩脉零星分布。晚古生代岩体以中晚二叠世花岗岩类为代表,岩性以英云闪长岩、花岗闪长岩和闪长岩为主,年龄多为 275~250 Ma;中生代岩浆活动集中在三叠纪(250~210 Ma)和晚侏罗世—早白垩世(160~130 Ma),岩性主要为正长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩等,浅成岩发育花岗斑岩和正长斑岩(Zhang et al., 2010; Zhai et al., 2019)(图 1)。

黄岗梁锡铁矿区出露地层主要为下二叠统青凤山组砂岩、板岩等砂泥质碎屑沉积,大石寨组厚层状安山岩、凝灰岩和凝灰质粉砂岩,黄岗梁组厚层状大理岩、粉砂岩夹薄层凝灰岩;上二叠统林西组主要为陆相粉砂岩、砂质板岩;中侏罗统新民组、上侏罗统玛尼吐组和白音高老组火山碎屑岩主要分布在矿区东南部,东北部零星出露(图 2-a)。大石寨组及黄岗梁组是矿床的主要赋矿围岩,黄岗梁组大理岩与含矿砂卡岩有密切的成因联系。矿区北东向、近东西向和北西向断裂构造均有发育,其中北东向压剪性断裂为主要控岩、控矿构造。矿区内侵入岩呈岩株状侵入下二叠统大石寨组安山岩、凝灰质粉砂岩及砂质板岩中,岩性主要为正长花岗岩;深部资料显示,锡铁矿体主要产于正长花岗岩与下二叠统安山岩及大理岩地层的砂卡岩接触带上(图 2-b~c),正长花岗岩体与锡铁成矿作用时空关系密切。

2 样品特征

本次采集了大兴安岭南段克什克腾旗北部黄岗梁

锡铁矿区及外围正长花岗岩样品 5 件,进行岩相学、锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学测试等。

DS231-6 采集自克什克腾旗黄岗梁锡铁矿区东部(坐标:北纬 43.552°、东经 117.613°),岩性为细中粒正长花岗岩,花岗结构、块状构造(图 3-a)。钾长石为半自形—他形板状,一级灰白干涉色,具条纹结构,负低突起,轻微泥化,粒径 1.2~5.5 mm,含量约 50%;石英为他形粒状,透明洁净,波状消光,局部因静态重结晶作用呈细粒化,含量约 25%;斜长石呈半自形板状,聚片双晶不明显,表面绢云母化,粒径 0.4~3.5 mm,含量约 24%;黑云母为黄褐色半自形片状,多为脉状充填裂隙,含量约 1%(图 3-b)。

DS234-1 采集自克什克腾旗南沟村(坐标:北纬 43.328°、东经 117.356°),岩性为细中粒正长花岗岩,花岗结构。钾长石为半自形宽板状,负低突起,具卡式双晶,表面粘土化强烈,粒径 1.0~5.0 mm,含量约 45%;石英呈他形粒状,波状消光,粒径 0.3~3.8 mm,含量约 30%;斜长石呈半自形长板状,聚片双晶较细密,表面绢云母化明显,粒径 0.8~2.0 mm,含量约 15%;绢云母具鲜艳的二级至三级干涉色,小片集合体沿长石边缘分布,含量约 10%(图 3-c)。

DS223-1 采集自林西县小莫古吐村(坐标:北纬 43.746°、东经 117.921°),岩性为中粒含白云母正长花岗岩,花岗结构。微斜条纹长石为半自形粒状,格子状双晶发育,少数轻度泥化,粒径为 2~5 mm,含量约 50%;斜长石为自形—半自形板状,具钠长聚片双晶或钠—卡联合双晶,被微斜条纹长石交代,使其边缘呈现孤岛状,多受到绢云母化和泥化,粒径为 2~4.5 mm,含量约 20%;石英呈粒状,扇形波状消光,边缘有粒化现象,一般粒径为 2~4.5 mm,含量约 25%;白云母含量约 4%,黑云母、磷灰石、锆石及不透明矿物含量约 1%(图 3-d)。

DS229-1 采集自克什克腾旗当中营子村(坐标:北纬 43.509°、东经 117.631°),岩性为中细粒含楣石黑云母正长花岗岩,花岗结构。钾长石呈半自形板状,条纹结构,平行消光,一级灰白干涉色,粒径 0.5~6.5 mm,含量约 40%;石英呈他形粒状,具波状消光,粒径 0.5~3.0 mm,含量约 30%;斜长石呈半自形板状,发育聚片双晶,具斜消光,粒径 0.8~2.6 mm,含量约 18%;黑云母为黄褐色,半自形片状,粒径 0.2~1.8 mm,六边形的横截面上析出细针状的金红石且排列成等边三角形,含量约 10%;楣石呈淡褐色、楔形,粒径 0.2~0.6 mm,含量约 2%(图 3-e)。

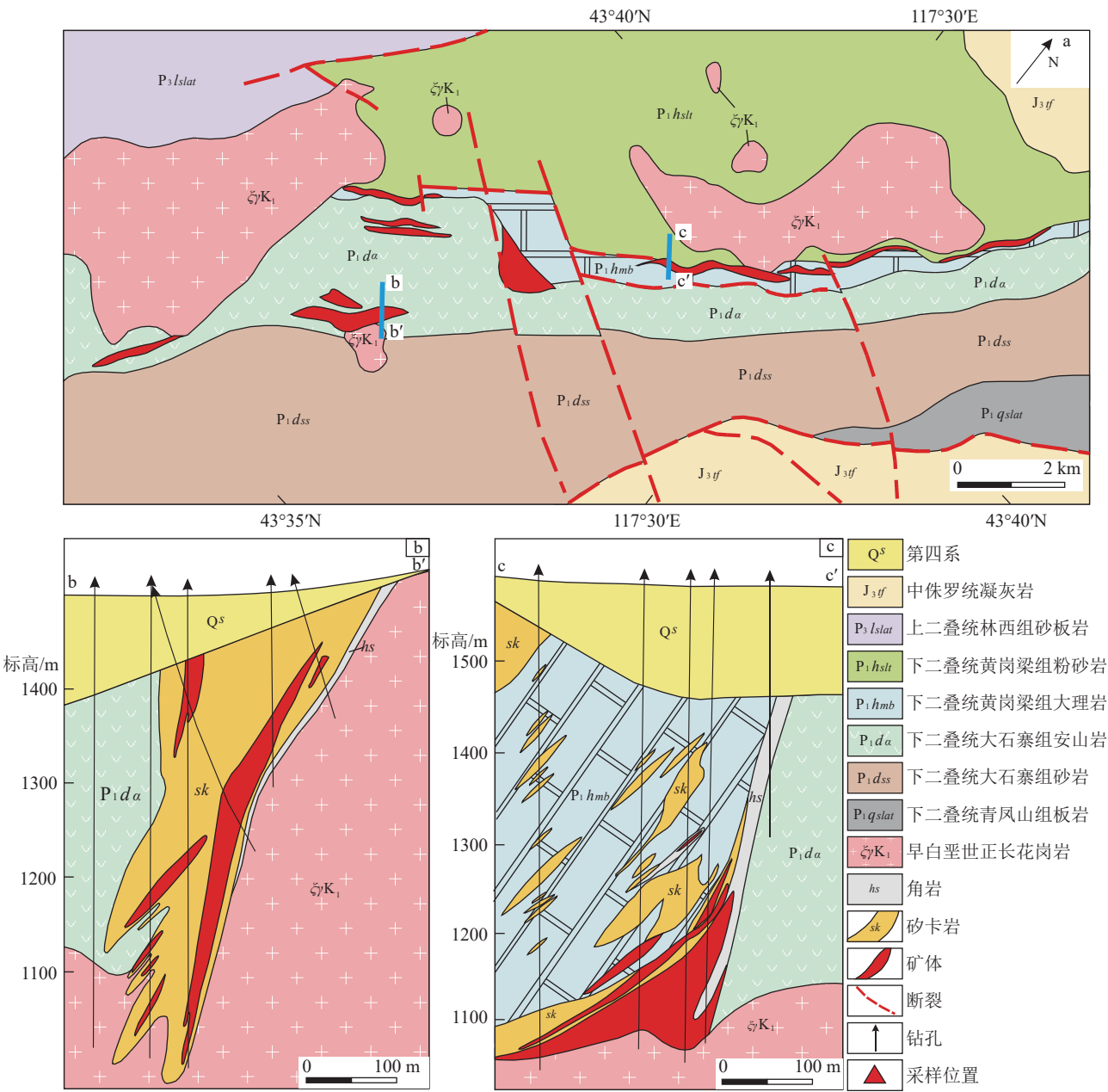


图 2 黄岗梁锡铁矿区地质图(a)及深部剖面图(b, c)(据 Mei et al., 2015 修改)

Fig. 2 Geological map (a) and cross sections (b, c) of the Huanggangliang Fe-Sn deposit

DS231-5 采集自克什克腾旗嘎布台村(坐标: 北纬 43.745°、东经 117.382°), 岩性为细中粒黑云母正长花岗岩, 花岗结构, 具绢云母化、绿泥石化、绿帘石化。钾长石为他形板状, 具条纹结构, 平行消光, 粒径 0.6~4.4 mm, 含量约 45%; 石英为无色, 因静态重结晶作用呈细粒化, 粒径 0.05~0.6 mm, 含量约 30%; 斜长石呈半自形板状, 粒径 0.6~2.8 mm, 聚片双晶发育, 斜消光, 含量约 20%; 黑云母绿泥石化明显, 呈脉状充填裂隙, 含量约 5%(图 3-f)。

3 测试方法

将 5 件无蚀变的样品人工碎样至 0.5~1 cm 大小的碎块, 一部分用来分选锆石; 其余磨制粉末至 200 目, 取每件样品粉末约 20 g 用于主量、微量和稀土元素及 Rb-Sr、Sm-Nd、Pb 同位素测试。样品的锆石分选及主量、微量和稀土元素测试在中国地质调查局沈阳地质调查中心实验测试中心完成。主量元素测试采用压片法 X 射线荧光光谱法(XRF), 测试精

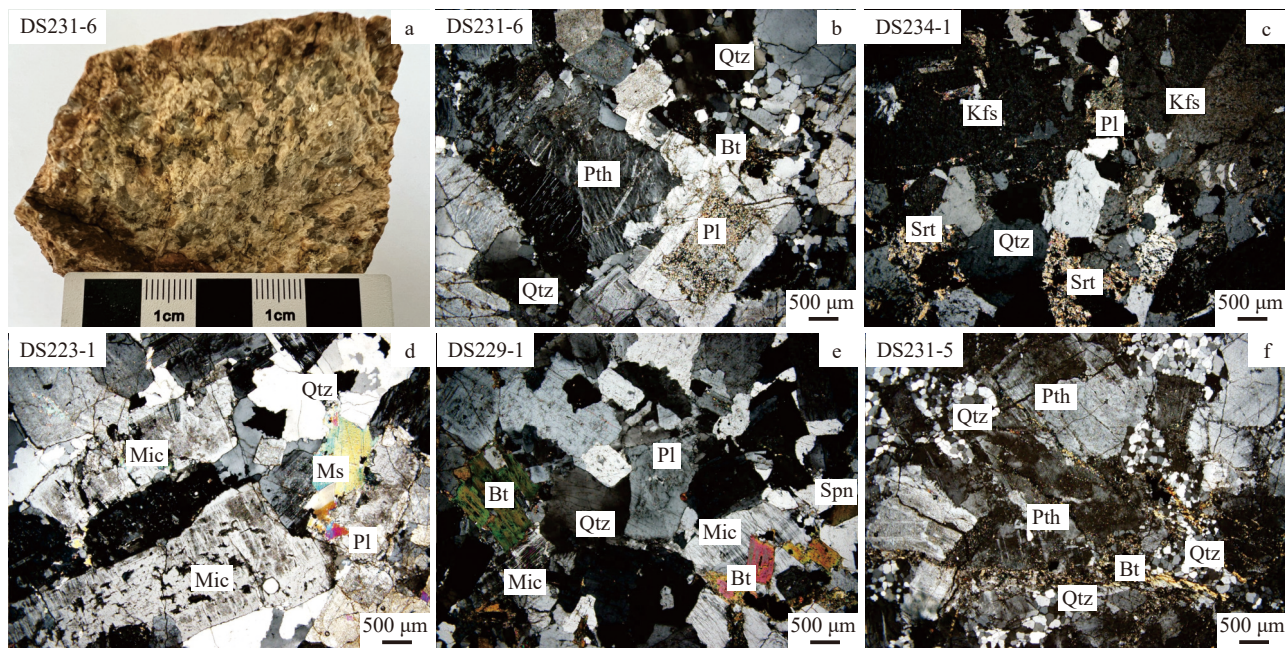


图3 黄岗梁地区正长花岗岩手标本(a)及显微(b~f)照片

Fig. 3 Hand specimen (a) and microphotographs (b~f) of syenogranites in Huanggangliang area

Bt—黑云母; Kfs—钾长石; Mic—微斜长石; Ms—白云母; Pl—斜长石; Pth—条纹长石; Qtz—石英; Spn—榍石; Srt—绢云母

度和准确度优于5%;微量元素测试采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS),测试精度和准确度优于10%。

锆石制靶、阴极发光(CL)照相、SHRIMP U-Pb 同位素测年在中国地质科学院北京离子探针中心使用 SHRIMP II 完成。测试时一次流 O^{-2} 强度为 3~5nA,束斑直径为 25 μ m。标样 M257($U=840\times 10^{-6}$, Nasdala et al., 2008)和 TEM(年龄为 417 Ma, Black et al., 2003)分别用于锆石 U 含量和年龄校正。每测试 3 个未知样品数据,测试 1 次标准锆石 TEM。数据处理采用 Squid 和 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)。根据实测的 ^{204}Pb 含量扣除普通铅,锆石年龄采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄,单点的同位素比值和年龄分别为 1σ 相对误差和 1σ 绝对误差。

Rb-Sr、Sm-Nd 同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。准确称取 0.1~0.2 g 粉末样品置于低压密闭溶样罐中,加入稀释剂并用混合酸($HF+HNO_3+HClO_4$)溶解 24 h。待样品完全溶解后,蒸干,加入 6 mol/L 的盐酸转为氯化物蒸干。用 0.5 mol/L 的盐酸溶液溶解,离心分离,清液加入阳离子交换柱($\phi 0.5cm\times 15cm$, AG50W $\times 8(H^+)$ 100~200 目),用 1.75 mol/L 的盐酸溶液和 2.5 mol/L 的盐酸溶液淋洗基体元素和其他元素,用 4 mol/L 的盐酸溶液淋洗稀土元素,蒸干,用质谱仪分析。同位素测试采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计,

可调多法拉第接收器接收。Rb-Sr 质量分馏用 $^{86}Sr/^{88}Sr=0.1194$ 校正,标准测量结果 NBS987 为 0.710250 ± 7 。Sm-Nd 质量分馏用 $^{146}Nd/^{144}Nd=0.7219$ 校正,标准测量结果 JMC 为 $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512109\pm 3$ 。

Pb 同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。准确称取 0.1~0.2 g 粉末样品于低压密闭溶样罐(PFA)中,用混合酸($HF+HNO_3+HClO_4$)溶解 24 h。待样品完全溶解后,蒸干,加入 6 mol/L 的盐酸转为氯化物蒸干。用 1 mL 0.5 mol/L HBr 溶解,离心分离,清液加入阴离子交换柱(250 μ l AG1 x 8 100~200 目),用 0.5 mol/L HBr 淋洗杂质,用 1 mL 6 mol/L 的 HCl 解析铅于聚四氟乙烯的烧杯中,蒸干备用。同位素测试采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计,用磷酸硅胶将样品点在铯带上,用静态接受方式测量 Pb 同位素比值。NBS 981 未校正结果: $^{208}Pb/^{206}Pb=2.164940\pm 15$, $^{207}Pb/^{206}Pb=0.914338\pm 7$, $^{204}Pb/^{206}Pb=0.0591107\pm 2$,全流程本底 Pb < 100 pg。

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 测年

对 5 件正长花岗岩样品进行锆石 U-Pb 测年,测试结果见表 1。锆石呈自形长柱状、短柱状或半自

表 1 黄岗梁地区正长花岗岩锆石 U-Th-Pb 同位素数据

Table 1 U-Th-Pb data of zircons obtained from the syenogranites in Huanggangliang area

测点	普通Pb/%	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	放射性Pb/ 10^{-6}	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$1\sigma/\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$1\sigma/\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$1\sigma/\%$	误差相 关系数	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	不谐和度/%
DS223-1															
1.1	0.61	223	90	0.42	4.29	0.02221	1.9	0.1538	6.0	0.0502	5.7	0.312	141.6 $\pm$ 2.6	205 $\pm$ 130	31
2.1	1.45	268	98	0.38	5.16	0.02208	2.0	0.149	13	0.0490	13	0.150	140.8 $\pm$ 2.7	147 $\pm$ 300	5
3.1	1.12	286	131	0.47	5.46	0.02199	1.9	0.156	12	0.0514	12	0.162	140.2 $\pm$ 2.7	259 $\pm$ 270	46
4.1	2.28	130	55	0.44	2.49	0.02185	2.4	0.157	20	0.052	20	0.121	139.3 $\pm$ 3.4	295 $\pm$ 450	53
5.1	1.70	306	121	0.41	5.81	0.02176	1.9	0.144	12	0.0481	12	0.156	138.8 $\pm$ 2.6	103 $\pm$ 280	-34
6.1	2.65	213	83	0.40	4.09	0.02180	2.0	0.146	14	0.0485	14	0.138	139.0 $\pm$ 2.7	125 $\pm$ 330	-11
7.1	0.42	1206	401	0.34	23.1	0.02222	1.6	0.1476	3.5	0.0482	3.1	0.463	141.6 $\pm$ 2.3	108 $\pm$ 73	-31
8.1	0.61	667	192	0.30	12.4	0.02143	1.7	0.1436	5.7	0.0486	5.4	0.299	136.7 $\pm$ 2.3	128 $\pm$ 130	-6
9.1	1.91	258	112	0.45	4.97	0.02199	2.0	0.150	18	0.0495	18	0.111	140.2 $\pm$ 2.7	171 $\pm$ 410	18
10.1	5.40	79	27	0.35	1.40	0.01964	3.4	0.146	36	0.054	36	0.095	125.3 $\pm$ 4.2	366 $\pm$ 810	66
11.1	2.85	180	69	0.40	2.94	0.0185	5.5	0.126	21	0.049	21	0.256	117.9 $\pm$ 6.4	169 $\pm$ 480	30
12.1	0.77	243	138	0.59	4.50	0.02134	2.1	0.151	10	0.0513	9.9	0.209	136.1 $\pm$ 2.8	256 $\pm$ 230	47
13.1	3.36	158	75	0.49	3.07	0.02183	2.3	0.154	21	0.051	21	0.110	139.2 $\pm$ 3.2	247 $\pm$ 480	44
14.1	1.47	256	123	0.49	5.00	0.02241	1.9	0.153	13	0.0496	13	0.151	142.9 $\pm$ 2.7	179 $\pm$ 300	20
15.1	1.76	237	95	0.41	4.49	0.02171	2.0	0.148	14	0.0495	14	0.138	138.5 $\pm$ 2.7	171 $\pm$ 340	19
DS229-1															
1.1	1.09	463	161	0.36	9.17	0.02278	1.9	0.142	11	0.0451	11	0.167	145.2 $\pm$ 2.7	-52 $\pm$ 270	381
2.1	1.59	447	172	0.40	8.66	0.02220	2.0	0.141	17	0.0461	17	0.118	141.5 $\pm$ 2.8	1 $\pm$ 410	-26820
3.1	0.86	569	192	0.35	11.2	0.02268	1.8	0.151	9.6	0.0484	9.4	0.193	144.6 $\pm$ 2.6	117 $\pm$ 220	-24
4.1	1.40	424	130	0.32	8.17	0.02213	1.8	0.153	7.3	0.0501	7.1	0.243	141.1 $\pm$ 2.5	198 $\pm$ 160	29
5.1	4.74	115	16	0.14	2.38	0.02295	2.8	0.161	31	0.051	31	0.090	146.2 $\pm$ 4.1	231 $\pm$ 720	37
6.1	2.12	245	88	0.37	4.65	0.02161	2.0	0.170	14	0.0571	13	0.149	137.8 $\pm$ 2.8	496 $\pm$ 300	72
7.1	0.54	1633	397	0.25	31.9	0.02261	1.7	0.1534	3.6	0.0492	3.2	0.463	144.1 $\pm$ 2.4	157 $\pm$ 75	8
8.1	4.81	131	50	0.39	2.64	0.02228	2.8	0.154	31	0.050	30	0.091	142.0 $\pm$ 3.9	203 $\pm$ 710	30
9.1	1.26	262	106	0.42	5.20	0.02279	2.0	0.171	14	0.0543	14	0.143	145.3 $\pm$ 2.9	383 $\pm$ 320	62
10.1	7.20	67	24	0.38	1.35	0.02175	3.4	0.160	41	0.053	41	0.082	138.7 $\pm$ 4.7	344 $\pm$ 930	60
11.1	2.02	286	100	0.36	5.50	0.02191	1.9	0.152	13	0.0503	13	0.146	139.7 $\pm$ 2.7	207 $\pm$ 310	32
12.1	0.88	576	174	0.31	10.9	0.02176	1.8	0.1565	6.0	0.0522	5.7	0.293	138.8 $\pm$ 2.4	292 $\pm$ 130	52
13.1	2.63	245	96	0.41	4.85	0.02245	2.0	0.165	15	0.0533	15	0.135	143.1 $\pm$ 2.9	342 $\pm$ 340	58
14.1	1.59	192	74	0.40	3.70	0.02205	2.1	0.162	15	0.0534	15	0.135	140.6 $\pm$ 2.9	346 $\pm$ 340	59
15.1	1.07	370	103	0.29	7.11	0.02210	1.8	0.146	8.4	0.0478	8.2	0.216	140.9 $\pm$ 2.5	90 $\pm$ 190	-56
DS231-5															
1.1	1.27	206	97	0.49	3.82	0.02131	2.0	0.156	13	0.0532	13	0.155	135.9 $\pm$ 2.7	336 $\pm$ 280	60
2.1	2.41	437	193	0.46	8.33	0.02162	1.8	0.150	13	0.0503	13	0.142	137.9 $\pm$ 2.5	210 $\pm$ 290	34
3.1	1.37	431	148	0.36	8.27	0.02202	1.8	0.148	9.5	0.0488	9.3	0.187	140.4 $\pm$ 2.5	139 $\pm$ 220	-1
4.1	1.21	360	165	0.47	6.58	0.02104	1.8	0.140	7.8	0.0484	7.6	0.228	134.2 $\pm$ 2.4	118 $\pm$ 180	-14
5.1	0.60	350	172	0.51	6.66	0.02205	1.7	0.1506	4.8	0.0495	4.5	0.360	140.6 $\pm$ 2.4	174 $\pm$ 110	19
6.1	0.57	495	156	0.33	8.71	0.02036	1.7	0.1453	4.7	0.0518	4.4	0.362	130.0 $\pm$ 2.2	275 $\pm$ 100	53
7.1	0.21	1890	632	0.35	36.3	0.02230	1.6	0.1509	2.4	0.0491	1.9	0.647	142.2 $\pm$ 2.2	151 $\pm$ 44	6
8.1	0.38	1541	722	0.48	30.3	0.02278	1.6	0.1581	2.6	0.0503	2.1	0.605	145.2 $\pm$ 2.3	210 $\pm$ 49	31
9.1	0.40	854	281	0.34	16.5	0.02236	1.6	0.1545	4.1	0.0501	3.7	0.403	142.6 $\pm$ 2.3	199 $\pm$ 87	28

续表 1

测点	普通Pb/%	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	放射性Pb/ 10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	1σ/%	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	1σ/%	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	1σ/%	误差相 关系数	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	不谐和度/%
10.1	0.40	513	205	0.41	9.41	0.02126	1.7	0.1479	5.5	0.0505	5.2	0.314	135.6±2.3	217±120	38
11.1	1.46	227	82	0.37	4.23	0.02133	2.1	0.147	17	0.0498	17	0.122	136.0±2.8	187±400	27
12.1	0.47	1107	354	0.33	21.0	0.02201	1.6	0.1469	4.2	0.0484	3.9	0.390	140.3±2.3	120±91	-17
13.1	0.31	1642	486	0.31	31.6	0.02231	1.6	0.1505	3.5	0.0489	3.1	0.465	142.3±2.3	143±72	1
14.1	1.18	256	82	0.33	4.82	0.02166	1.9	0.153	12	0.0513	12	0.159	138.1±2.6	254±270	46
15.1	1.03	516	211	0.42	9.80	0.02187	1.9	0.151	7.9	0.0499	7.7	0.244	139.5±2.7	190±180	27
DS231-6															
1.1	0.92	354	116	0.34	6.73	0.02195	1.9	0.152	6.9	0.0503	6.7	0.279	139.9±2.7	207±150	32
2.1	5.92	778	361	0.48	15.2	0.02144	1.8	0.160	10	0.0543	10	0.168	136.8±2.4	382±230	64
3.1	0.41	937	337	0.37	18.2	0.02251	1.6	0.1489	4.2	0.0480	3.9	0.384	143.5±2.3	99± 92	-45
4.1	0.17	1795	648	0.37	35.0	0.02263	1.6	0.1506	2.7	0.0483	2.1	0.596	144.3±2.3	113± 50	-28
5.1	0.35	524	202	0.40	9.75	0.02159	1.7	0.1486	5.3	0.0499	5.0	0.321	137.7±2.3	192±120	28
6.1	0.84	381	171	0.46	7.24	0.02196	1.7	0.145	8.2	0.0480	8.1	0.210	140.0±2.4	101±190	-39
7.1	2.31	1693	908	0.55	31.7	0.02130	1.7	0.152	14	0.0516	13	0.123	135.9±2.2	268±310	49
8.1	—	837	251	0.31	15.8	0.02194	1.6	0.1531	2.6	0.0506	2.0	0.637	139.9±2.3	224± 46	37
9.1	0.36	573	186	0.34	10.7	0.02158	1.7	0.1441	5.6	0.0484	5.4	0.302	137.7±2.3	119±130	-15
10.1	0.19	811	438	0.56	15.2	0.02184	1.7	0.1521	3.3	0.0505	2.9	0.496	139.3±2.3	218± 67	36
11.1	1.54	740	274	0.38	14.2	0.02192	1.7	0.1447	6.3	0.0479	6.1	0.267	139.8±2.3	93±140	-50
12.1	1.25	621	137	0.23	11.0	0.02035	1.7	0.1417	5.9	0.0505	5.6	0.291	129.8±2.2	219±130	41
13.1	0.00	617	291	0.49	11.3	0.02127	1.7	0.1502	3.1	0.0512	2.7	0.538	135.7±2.3	251±61	46
14.1	0.67	574	218	0.39	10.8	0.02166	1.8	0.145	7.8	0.0484	7.6	0.224	138.2±2.4	119±180	-16
15.1	1.52	317	178	0.58	6.08	0.02198	1.9	0.161	11	0.0532	11	0.176	140.1±2.6	337±240	58
DS234-1															
1.1	0.82	272	125	0.47	5.26	0.02234	1.9	0.163	9.8	0.0530	9.6	0.197	142.4±2.7	328±220	57
2.1	0.13	1129	309	0.28	21.3	0.02189	1.7	0.1594	2.5	0.0528	1.9	0.672	139.6±2.3	321± 42	57
3.1	—	656	442	0.70	12.3	0.02184	1.8	0.1643	2.9	0.0545	2.3	0.621	139.3±2.5	394± 50	65
4.1	0.17	346	118	0.35	6.50	0.02181	2.0	0.165	6.4	0.0550	6.1	0.310	139.1±2.7	411±140	66
5.1	0.24	8903	12035	1.40	193	0.02514	1.8	0.1688	2.1	0.0487	1.1	0.858	160.0±2.8	134± 25	-19
6.1	0.02	726	359	0.51	13.3	0.02123	1.9	0.1603	4.0	0.0547	3.5	0.481	135.4±2.6	402±78	66
7.1	0.15	3585	2252	0.65	72.8	0.02359	1.7	0.1651	2.2	0.0508	1.4	0.777	150.3±2.5	230±31	35
8.1	0.01	2278	562	0.25	43.0	0.02194	1.7	0.1512	2.2	0.05	1.4	0.776	139.9±2.4	194±32	28
9.1	0.19	2625	715	0.28	50.3	0.02226	1.7	0.1494	2.4	0.0487	1.7	0.706	141.9±2.4	133±40	-7
10.1	0.32	2294	578	0.26	44.0	0.02225	1.7	0.1475	2.8	0.0481	2.3	0.606	141.8±2.4	104±53	-36
11.1	0.49	266	140	0.54	5.03	0.02190	2.0	0.173	6.6	0.0574	6.3	0.302	139.6±2.7	508±140	73
12.1	0.23	2546	646	0.26	49.7	0.02267	1.7	0.1527	2.4	0.0488	1.6	0.724	144.5±2.5	140±38	-3
13.1	0.23	1527	640	0.43	29.8	0.02263	1.8	0.1516	3.3	0.0486	2.8	0.530	144.3±2.5	128±66	-13
14.1	0.18	2249	487	0.22	43.4	0.02243	1.7	0.1537	2.2	0.0497	1.4	0.765	143.0±2.4	181± 34	21
15.1	0.18	2865	708	0.26	55.9	0.02267	1.7	0.1540	2.6	0.0493	1.9	0.671	144.5±2.4	160±44	10

形椭圆状，表面平整干净，长轴、短轴比在 3：1~1：1 之间(图 4)，DS229-1 样品锆石粒径较大，多在 80×120~120×280 μm 之间，DS223-1、DS231-5、DS231-6、DS234-1 样品粒径较小，多在 50×150~100×200 μm 之间。锆石振荡环带结构明显，显示岩浆成因结晶锆石特征。部分锆石可见港湾状熔蚀结构(图 4)，指示后期可能受到岩浆热液蚀变的改造。

DS223-1 样品锆石 Th 含量为 $27\times10^{-6}\sim$

401×10^{-6} , U 含量为 $79 \times 10^{-6} \sim 1206 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.30~0.59, 扣除普通 Pb 后, 13 个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据投影点落于 U-Pb 谐和线上或其附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 136.1~142.9 Ma 之间, 年龄加权平均值为 139.6 ± 1.5 Ma ($n=13$, MSWD=0.55) (图 5-a)。

DS229-1 样品锆石 Th 含量为 $16 \times 10^{-6} \sim 397 \times 10^{-6}$, U 含量为 $67 \times 10^{-6} \sim 1633 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.14~0.42, 扣除普通 Pb 后, 15 个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据投影点落于 U-Pb 谐和线上或其附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 137.8~146.2 Ma 之间, 年龄加权平均值为 141.9 ± 1.4 Ma ($n=15$, MSWD=0.82) (图 5-b)。

DS231-5 样品锆石 Th 含量为 $82 \times 10^{-6} \sim 722 \times 10^{-6}$, U 含量为 $206 \times 10^{-6} \sim 1890 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.31~0.51, 扣除普通 Pb 后, 13 个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据投影点落于 U-Pb 谐和线上或其附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 134.2~142.6 Ma 之间, 年龄加权平均值为 139.1 ± 1.7 Ma ($n=13$, MSWD=1.4) (图 5-c)。

DS231-6 样品锆石 Th 含量为 $116 \times 10^{-6} \sim 908 \times 10^{-6}$, U 含量为 $317 \times 10^{-6} \sim 1796 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.23~0.58, 扣除普通 Pb 后, 13 个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据投影点落于 U-Pb 谐和线上或其附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

年龄介于 135.7~144.3 Ma 之间, 年龄加权平均值为 139.2 ± 1.5 Ma ($n=14$, MSWD=1.2) (图 5-d)。

DS234-1 样品锆石 Th 含量为 $118 \times 10^{-6} \sim 2252 \times 10^{-6}$, U 含量为 $266 \times 10^{-6} \sim 3586 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.22~0.70, 扣除普通 Pb 后, 13 个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据投影点落于 U-Pb 谐和线上或其附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 139.1~144.5 Ma 之间, 年龄加权平均值为 141.7 ± 1.4 Ma ($n=12$, MSWD=0.72) (图 5-e)。

结合锆石发育较好的振荡环带结构和较高的 Th/U 值特征, 确定本次采集的 5 件正长花岗岩的锆石均为岩浆成因, 形成于早白垩世。

4.2 主量、微量和稀土元素

对 5 件正长花岗岩样品进行了全岩主量、微量和稀土元素测试。从测试结果(表 2)看, 5 件样品具有极相似的岩石地球化学特征。岩石普遍具有较高的 SiO_2 含量, 为 73.35%~75.16%, 平均 74.27%; 且具有低铝(Al_2O_3 含量为 13.13%~14.14%)、中等钙(CaO 含量为 0.61%~1.56%); 低镁(MgO 含量为 0.08%~0.19%)的特征; 碱含量较高($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为 8.01%~8.55%), 且均富钾、少钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.29~1.99); 铁含量较低(TFeO 为 1.56%~3.22%), 其中 Fe_2O_3 含量为 0.93%~2.38%, FeO 含量为



图 4 黄岗梁地区正长花岗岩锆石阴极发光(CL)图像和测试点位

Fig. 4 CL images and test positions of zircons obtained from the syenogranites in Huanggangliang area

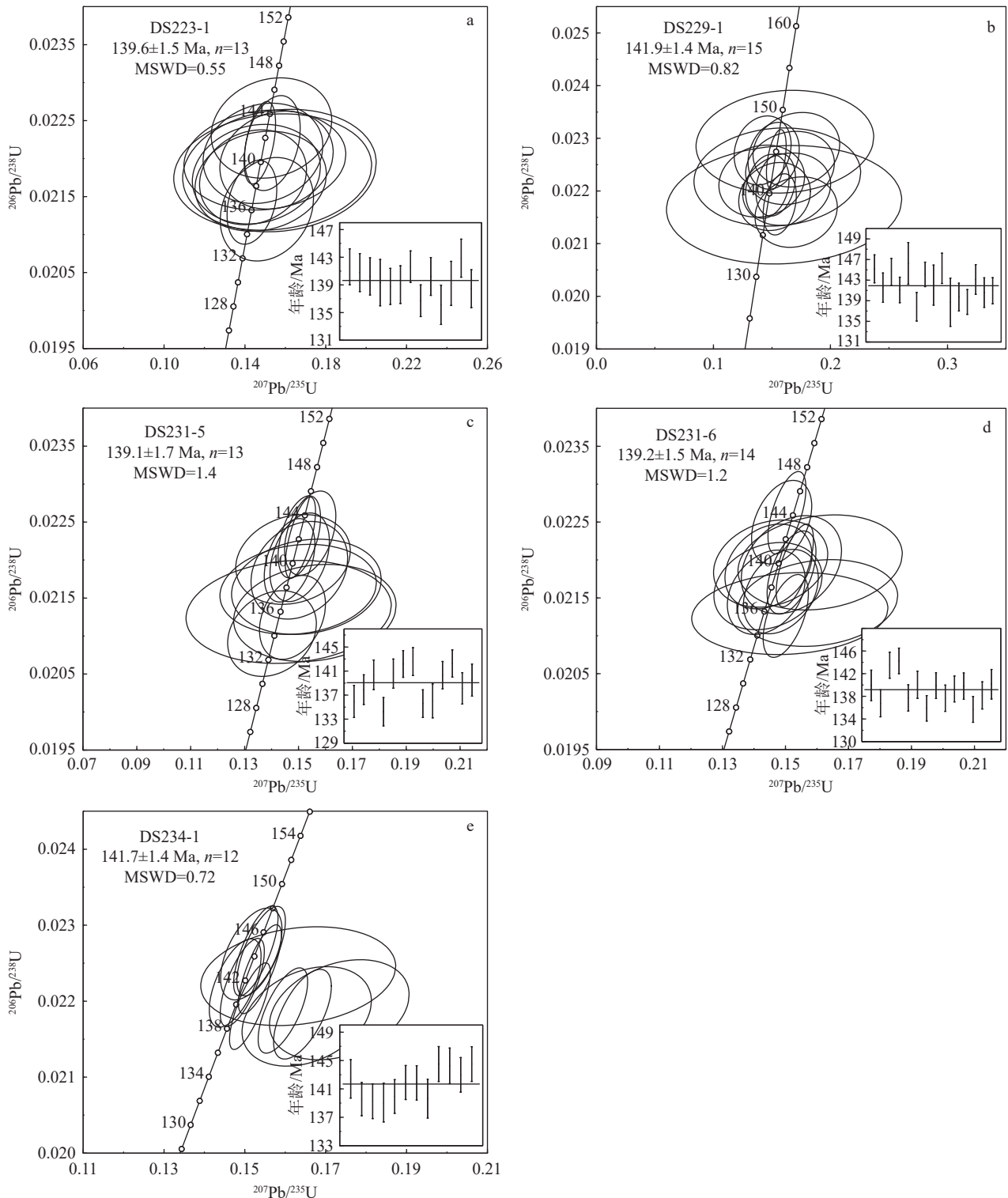


图5 黄岗梁地区正长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagrams of zircons obtained from the synengranites in Huanggangliang area

0.65%~1.53%, 具有高的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 特征。在花岗岩类 Q-A-P 图解上投点于正长花岗岩和碱性长石花岗岩区域(图 6-a), 与岩相学研究结果一致。岩石结晶分

异指数(DI 值)为 90.1~90.7, 指示结晶分异程度中等; 岩石铝饱和指数 A/CNK 值为 0.97~1.18。碱度率 AR 值为 2.25~3.19, 里特曼指数 σ_{43} 为 2.00~2.34,

表 2 黄岗梁地区正长花岗岩主量、微量和稀土元素含量

Table 2 Major, trace elements and rare earth elements compositions of the syenogranites in Huanggangliang area

元素	DS223-1	DS231-5	DS231-6	DS229-1	DS234-1	天山-兴安
SiO ₂	73.41	74.34	75.11	73.35	75.16	72.73
TiO ₂	0.20	0.17	0.08	0.22	0.09	0.26
Al ₂ O ₃	13.89	13.15	13.13	13.93	14.14	14.04
Fe ₂ O ₃	2.17	1.88	0.93	2.38	1.22	0.90
FeO	1.03	1.53	0.72	0.65	0.76	0.89
MnO	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04
MgO	0.19	0.18	0.09	0.19	0.08	0.46
CaO	0.70	1.11	1.56	0.61	0.88	1.32
Na ₂ O	3.25	3.73	2.82	3.04	3.08	3.86
K ₂ O	5.08	4.82	5.62	5.22	4.93	4.09
P ₂ O ₅	0.05	0.04	0.02	0.05	0.03	0.07
烧失量	0.90	0.45	0.52	0.89	0.25	-
总量	100.9	101.4	100.6	100.5	100.67	-
TFeO	2.98	3.22	1.56	2.79	1.86	1.70
Na ₂ O+K ₂ O	8.33	8.55	8.44	8.26	8.01	7.95
K ₂ O/Na ₂ O	1.56	1.29	1.99	1.72	1.60	1.06
A/CNK	1.14	0.98	0.97	1.18	1.18	-
A/NK	1.28	1.16	1.22	1.31	1.36	-
DI	90.1	90.1	90.5	90.5	90.72	-
σ43	2.28	2.34	2.22	2.24	2.00	-
AR	2.61	3.19	2.25	2.44	2.39	-
M	1.55	1.79	1.89	1.50	1.49	-
t	792	760	756	815	741	-
Hf	10.30	7.04	7.28	7.16	3.92	4.70
Ta	2.25	3.72	2.23	2.20	1.50	0.92
Th	15.90	45.11	49.93	13.82	17.32	12.80
U	2.51	19.73	16.54	3.52	7.11	2.13
Ba	343.44	151.91	108.45	386.59	260.82	461
Cr	2.91	6.47	5.35	5.60	2.07	4
Ga	23.23	24.17	22.84	24.25	19.11	18
Pb	90.48	14.34	8.36	30.23	18.79	19
Nb	17.93	20.85	3.94	18.91	8.44	11
Rb	347.92	527.66	537.74	237.14	282.65	125
Sr	59.49	54.09	53.72	78.71	117.81	179
Zr	193.83	163.62	168.21	241.19	99.75	141
Y	64.37	56.28	45.79	27.70	27.90	19
10000*Ga/Al	3.16	3.47	3.29	3.29	2.55	2.42
Nb/Ta	7.97	5.61	1.77	8.59	5.64	11.95
Zr/Hf	18.83	23.24	23.11	33.69	25.44	30.0
La	45.66	56.64	49.87	19.91	21.31	26
Ce	93.67	113.10	103.80	92.61	42.23	52
Pr	11.78	12.38	11.97	5.35	5.10	5.76
Nd	43.22	42.31	41.44	20.34	18.31	21.2
Sm	8.64	8.62	8.78	5.38	4.25	3.9
Eu	0.83	0.90	0.82	0.99	0.74	0.72
Gd	7.41	7.68	7.66	4.85	3.60	4.50
Tb	1.24	1.30	1.29	0.86	0.62	0.55
Dy	6.89	7.37	6.92	4.87	3.32	3.70
Ho	1.12	1.24	1.16	0.85	0.57	0.74
Er	3.00	3.61	3.12	2.36	1.65	2.18
Tm	0.32	0.44	0.37	0.30	0.22	0.38
Yb	2.25	3.16	2.42	2.05	1.53	2.20
Lu	0.24	0.36	0.28	0.25	0.18	0.33
ΣREE	226.27	259.10	239.91	160.97	103.61	124.16
LREE/HREE	9.07	9.30	9.33	8.82	7.87	7.52
Eu/Eu*	0.32	0.34	0.31	0.59	0.58	0.17

注: A/CNK=(Al₂O₃)/[(CaO)+(Na₂O)+(K₂O)], DI/(标准矿物组分: 石英+正长石+钠长石+霞石+白榴石+六方钾霞石)。M=(Na+K+2Ca)/(Al×Si)(阳离子比率); t(°C)=12900/{ln[496 000/ω(Zr)]+0.85M+2.95}-273.5, 据Watson et al.(1983)。主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

在 SiO_2 - K_2O 图解上位于高钙碱性系列区,属高钾钙碱性岩石(图 6-b)。根据锆石饱和温度计,计算样品岩石阳离子比率(M 值)为 1.49~1.89,结晶温度为 741~815 $^{\circ}\text{C}$,属中温岩浆系列。

在微量元素原始地幔标准化配分图解上(图 7-a),5 件岩石样品微量元素分布趋势与天山-兴安花岗岩(1259 件样品平均值)大体一致(史长义等,2007),呈现整体右倾形态,富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素(LILE),相对亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE)。与天山-兴安花岗岩微量元素平均值相比,黄岗梁正长花岗岩 Rb、Th、U 元素含量较高,这与岩

石富 K、低 Mg 的元素成分特征有关;Sr 含量为 53.72×10^{-6} ~ 117.81×10^{-6} ,属于低 Sr 花岗岩类,与斜长石、角闪石含量较少的矿物特征一致。5 件样品稀土元素总量 ΣREE 为 103.61×10^{-6} ~ 259.10×10^{-6} ,与天山-兴安花岗岩稀土元素总量特征基本一致。在稀土元素球粒陨石标准化图解上呈显著右倾趋势(图 7-b),LREE/HREE 值为 7.87~9.33,轻、重稀土元素分馏明显且轻稀土元素强烈富集。 δEu 值为 0.31~0.59,呈中等负 Eu 异常,由于 Eu 元素在岩浆结晶分异时容易分配在斜长石中,结合岩石低 Al、Sr 元素含量特征,指示岩浆分异过程中源区有斜长石分离

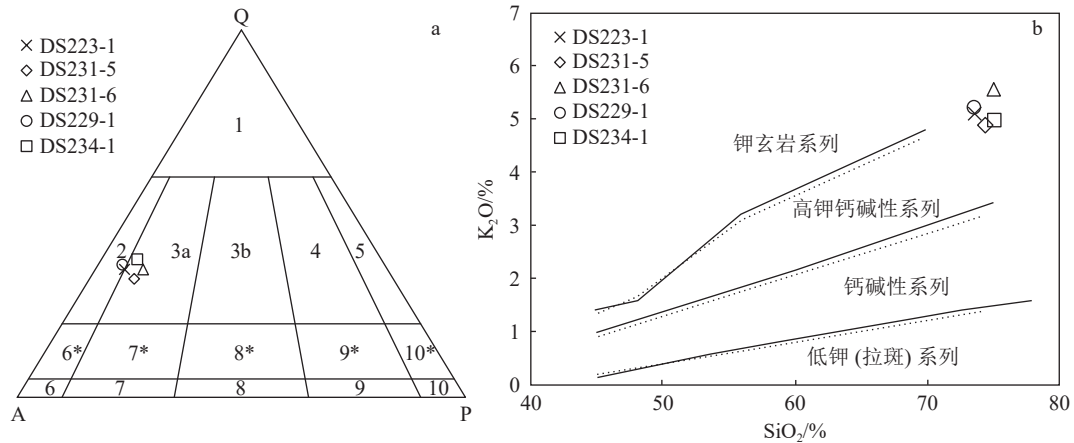


图 6 黄岗梁地区正长花岗岩 Q-A-P 图解(a, 底图据 Streckeisen et al., 1979)和 SiO_2 - K_2O 图解(b, 底图据 Peccerillo et al., 1976)

Fig. 6 Q-A-P diagram(a) and SiO_2 - K_2O diagram(b) of the syenogranites in Huanggangliang area

1—富石英花岗岩; 2—碱性长石花岗岩; 3a—正长花岗岩; 3b—二长花岗岩; 4—花岗闪长岩; 5—云英闪长岩; 6*—石英碱性长石正长岩; 7*—石英正长岩; 8*—石英二长岩; 9*—石英二长闪长岩/石英二长辉长岩; 10*—石英闪长岩/石英辉长岩; 6—碱性长石正长岩; 7—正长岩; 8—二长岩; 9—二长闪长岩/二长辉长岩; 10—闪长岩/辉长岩/斜长岩

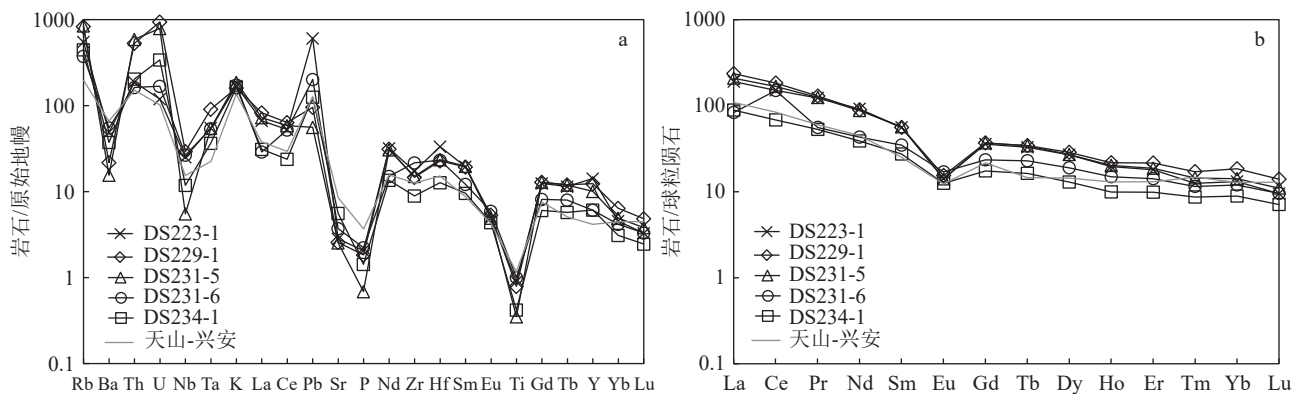


图 7 黄岗梁地区正长花岗岩微量元素原始地幔标准化图解(a)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b)

(标准值据 Sun et al., 1989; 天山-兴安平均值据史长义等, 2007)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace elements patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the syenogranites in Huanggangliang area

晶出残留。

4.3 全岩 Rb–Sr、Sm–Nd、Pb 同位素

黄岗梁地区正长花岗岩 Sr–Nd 同位素组成和测试结果见表 3。以本文得到的锆石 U–Pb 年龄计算 Sr、Nd 同位素初始比值及相关参数。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值分别介于 0.70031~0.70543 和 0.512572~0.512636 之间, $\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$ 为 -1.29~-0.04, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 0.07~1.18。 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 为 -0.43~-0.32, Nd 同位素模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为 926~838 Ma。 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 38.381~39.942、15.541~15.609、18.565~19.979。

5 讨 论

5.1 年龄意义

黄岗梁矽卡岩型锡铁矿床直接产出于二叠系火

山岩和沉积地层, 并具备层状矿化特征, 曾被认为与矿区花岗岩无成因关系(王长明等, 2007)。但近年来对该矿床成矿年龄和成矿有关花岗岩年龄的研究显示, 成岩与成矿时间关系紧密。周振华等(2010a)通过对 5 件辉钼矿样品进行 Re–Os 同位素测试, 获得等时线年龄 135.3 ± 0.85 Ma; 翟德高等(2012)通过矿石辉钼矿 Re–Os 同位素方法, 得到 134.9 ± 5.2 Ma 单点年龄; Li et al.(2022)对矽卡岩中的石榴子石和锡矿石中的锡石进行了 U–Pb 测年, 获得年龄分别为 136.03 ± 1.22 Ma 和 137.10 ± 3.65 Ma; 要梅娟等(2016)对 2 件辉钼矿进行了 Re–Os 同位素测试, 得到 141.2 ± 4.3 Ma 和 264.8 ± 3.9 Ma 两期单点年龄, 认为黄岗梁锡铁矿床经历了二叠纪喷流沉积和燕山期岩浆热液叠加的 2 期成矿作用。综上, 可将黄岗梁锡铁矿床的主成矿年龄限定为约 136 Ma 的早白垩

表 3 黄岗梁地区正长花岗岩 Rb–Sr、Sm–Nd、Pb 同位素数据

Table 3 Rb–Sr, Sm–Nd and Pb isotopic compositions of the syenogranites in Huanggangliang area

样号	DS223-1	DS229-1	DS231-5	DS231-6	DS234-1
Rb/ 10^{-6}	382	232	593	561	286
Sr/ 10^{-6}	56.4	89.5	51.8	47.1	102
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	19.6	7.4917	33.0899	34.4911	8.0822
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.742105	0.719977	0.765734	0.773669	0.719964
误差	0.000014	0.000013	0.000013	0.000014	0.000014
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.70321	0.70487	0.70031	0.70543	0.70369
$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$	-16	7.6	-57.2	15.5	-9.1
Sm/ 10^{-6}	10.3	4.54	8.57	9.35	4.52
Nd/ 10^{-6}	51.8	20.6	46.3	46	21.2
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1202	0.1331	0.112	0.1228	0.129
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512572	0.51261	0.512591	0.512629	0.512636
误差	0.000007	0.000008	0.000008	0.000007	0.000007
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512462	0.512486	0.512489	0.512517	0.512516
$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	-1.29	-0.55	-0.92	-0.18	-0.04
$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	0.07	0.6	0.59	1.13	1.18
$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	-0.39	-0.32	-0.43	-0.38	-0.34
T_{DM}/Ma	945	1024	841	877	928
$T_{\text{DM}2}/\text{Ma}$	926	885	885	840	838
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.426	38.381	38.984	39.942	38.905
误差	0.003	0.005	0.005	0.005	0.009
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.543	15.541	15.608	15.609	15.609
误差	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.683	18.565	19.91	19.979	19.789
误差	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003

世。另外,前人对矿区花岗岩岩体及钻孔深部花岗岩进行了锆石 U-Pb、白云母 K-Ar 测年研究,获得成岩年龄为 142~136.8 Ma(Ishiyama et al., 2001; 周振华等, 2010b; 翟德高等, 2012; Li et al., 2022), 矿区东南当中营子钾长花岗岩年龄为 137.7 ± 1.2 Ma(赵辉等, 2015)。由此确定,约 140 Ma 岩浆作用与早白垩世成矿作用时间关系密切。

本次采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法对黄岗梁地区采集的 5 件正长花岗岩进行了测年,年龄为 141.9~139.1 Ma, 与前人研究结果在误差范围内一致,位于大兴安岭南段早白垩世岩浆作用的峰期,成矿年龄较花岗岩形成年龄晚约 3 Ma(图 8-a, b), 推测黄岗梁矽卡岩型锡铁矿床的矿化期约为 3 Ma。与黄岗梁锡铁矿床类似,大兴安岭南段浩布高矽卡岩型铅锌多金属矿床成矿年龄(142~138 Ma)(Liu et al., 2017; Wang et al., 2018; Hong et al., 2021)较花岗岩成岩年龄(143.9~139 Ma)(Wang et al., 2018; Hong et al., 2021; Liu et al., 2021; Niu et al., 2022; 周桐等, 2022)晚约 2 Ma(图 8-a, b; 表 4), 反映了 2 Ma 的矿化期。2~3 Ma 的成岩与成矿时间差可能为中酸性侵入岩与碳酸盐岩的接触交代反应期,与矽卡岩型矿床成因机制相符;也反映了从岩浆结晶到矽卡岩形成再到矿石矿物形成的时间,即矽卡岩期和石英硫化物期的时间跨度。而研究区双尖子山、道伦达坝、维拉斯托、边家大院等多金属矿床属岩浆热液型矿床,依据年龄数据分布,其成矿时间与成岩时间的高

峰期为 141~135 Ma,二者在形成时间上基本吻合(图 8-a, c; 表 4)。因此,在大兴安岭南段地区,早白垩世矽卡岩型矿床与岩浆热液型矿床具有相近的时间关系、相似的空间分布和地质条件,表明这些矿床具有统一的深部地质过程和构造背景,可能由于局部地质条件,如构造、围岩等不同而形成了不同类型的矿化富集。

5.2 岩石成因类型

I-S-A 型成因分类是目前最常用的花岗岩分类方案(吴福元等, 2007),但是 A 型花岗岩在含义上与 I 型、S 型花岗岩类划分标准不一致,前者更多强调形成时的构造环境而不涉及成岩物质来源,后者则偏重于花岗岩类的源岩或岩浆源区(Chappell et al., 1974; Loiselle et al., 1979)。按照 Chappell et al.(1974)最初对 I 型和 S 型花岗岩类的判别标准,只划分为源岩为火成岩的 I 型花岗岩类和源岩为沉积岩或变质沉积岩的 S 型花岗岩类,并以 Na_2O 含量(3.2%)、A/CNK 值(1.1)及 CIPW 标准矿物中是否含透辉石和刚玉含量(1%)为划定界线;S 型花岗岩被认为岩浆仅来自长英质地壳,I 型花岗岩含有来自原始地幔铁镁质物源的成分,即幔源型或壳幔混合源型。然而,在不考虑岩浆物源的情况下,Loiselle et al.(1979)提出了以具有碱性、无水和形成于非造山环境为典型特征的 A 型花岗岩类,这类花岗岩通常具有低 CaO 和 Al_2O_3 含量、高 $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 值、 K_2O 含量和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值,矿物成分钾长石含量

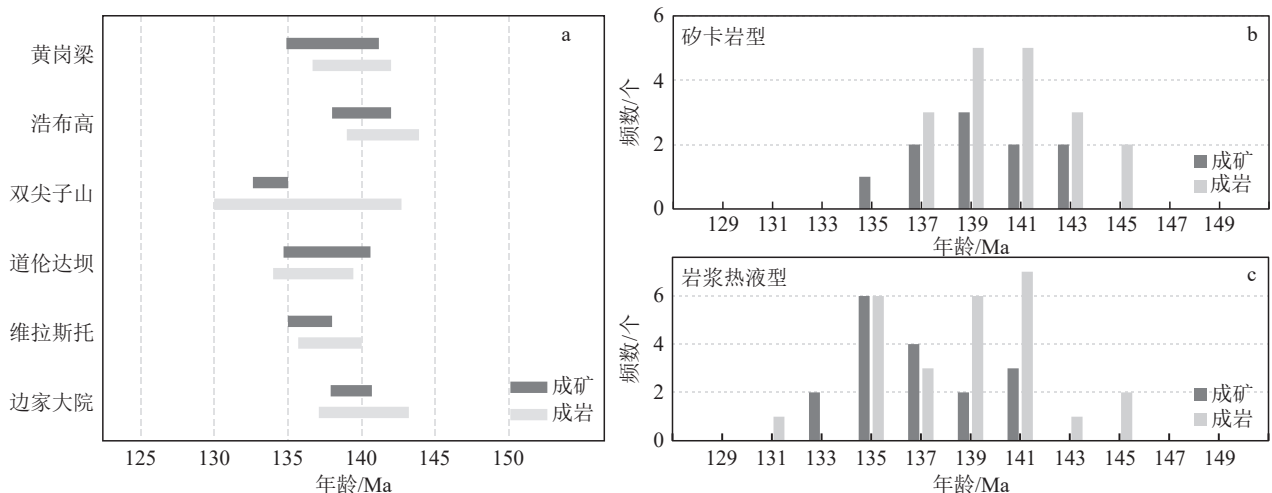


图 8 大兴安岭南段典型矿床年龄及与成矿有关岩体年龄分布图

Fig. 8 Age distribution of typical ore deposits and the granitic intrusions associated with the mineralization of southern Great Hinggan Range

表 4 大兴安岭南段典型矿床年龄及与成矿有关岩体年龄

Table 4 Age data of typical ore deposits and the granitic intrusions associated with the mineralization of southern Great Hinggan Range

矿床名称	矿床类型	测试对象	样号	测试方法	年龄	资料来源
黄岗梁 锡-铁-锌矿床	矽卡岩型	矿石	HG-4-1; HG-2-28 ~ HG-2-31	辉钼矿Re-Os	135.3 ± 0.85 Ma	周振华等, 2010a
		矿石	07HGL-04	辉钼矿Re-Os	141.2 ± 4.3 Ma	要梅娟等, 2016
		矿石	07HGL-05	辉钼矿Re-Os	134.9 ± 5.2 Ma	翟德高等, 2012
		锡矿脉	—	钾长石K-Ar	137 ± 3 Ma	Ishiyama et al., 2001
		钻孔1337.5 m矽卡岩	HGL-93	石榴石U-Pb LA-ICP-MS	136.03 ± 1.22 Ma	Li et al., 2022
		钻孔1250 m锡矿石	HGL-220	锡石U-Pb	137.10 ± 3.65 Ma	Li et al., 2022
		钻孔1200 m花岗岩	HGL-243	锆石U-Pb LA-ICP-MS	138.45 ± 0.45 Ma	Li et al., 2022
		矿区细粒花岗岩	—	白云母K-Ar	142 ± 3 Ma	Ishiyama et al., 2001
		矿区花岗岩	WL1	锆石U-Pb LA-ICP-MS	139.96 ± 0.87 Ma	翟德高等, 2012
		矿区钾长花岗岩	HG-1-7	锆石U-Pb LA-ICP-MS	136.7 ± 1.1 Ma	周振华等, 2010b
		矿区花岗斑岩	HG-3-5	锆石U-Pb LA-ICP-MS	136.8 ± 0.57 Ma	周振华等, 2010b
		当中营子钾长花岗岩	14RS-7	锆石U-Pb LA-ICP-MS	137.7 ± 1.2 Ma	赵辉等, 2015
浩布高 铅-锌-铜-锡 矿床	矽卡岩型	矿石	HL13	辉钼矿Re-Os	142 ± 1 Ma	Liu et al., 2017
		矿石	HBG01 ~ HBG05	辉钼矿Re-Os	138 ± 3 Ma	Wang et al., 2018
		矿石	17HBG-1	辉钼矿Re-Os	138.27 ± 0.81 Ma	Hong et al., 2021
		矿石	17HBG-2	辉钼矿Re-Os	138.82 ± 0.80 Ma	Hong et al., 2021
		矿石	Grt A	石榴石U-Pb LA-ICP-MS	139.10 ± 5.40 Ma	Hong et al., 2021
		矿石	Grt B	石榴石U-Pb LA-ICP-MS	140.70 ± 1.89 Ma	Hong et al., 2021
		矿区花岗岩	HBG-9	锆石U-Pb LA-ICP-MS	143.49 ± 0.76 Ma	Hong et al., 2021
		矿区黑云母花岗岩	HBG-10	锆石U-Pb LA-ICP-MS	141.10 ± 1.40 Ma	Hong et al., 2021
		矿区蚀变花岗斑岩	HBG-1	锆石U-Pb LA-ICP-MS	140.97 ± 0.73 Ma	Hong et al., 2021
		矿区花岗斑岩	HBG-13	锆石U-Pb LA-ICP-MS	140.85 ± 0.75 Ma	Hong et al., 2021
		矿区黑云母花岗岩	ZK2507-17-2	锆石U-Pb LA-ICP-MS	140.9 ± 0.8 Ma	Niu et al., 2022
		钻孔920 m花岗岩	ZK0605	锆石U-Pb LA-ICP-MS	139 ± 2 Ma	Wang et al., 2018
		小罕山二长花岗岩	XHS-02	锆石U-Pb LA-ICP-MS	143.9 ± 1.1 Ma	周桐等, 2022
		小罕山石英二长斑岩	XHS	锆石U-Pb LA-ICP-MS	140 ± 2 Ma	Liu et al., 2021
		乌兰坝黑云母花岗岩	WLB	锆石U-Pb LA-ICP-MS	142 ± 2 Ma	Liu et al., 2021
		乌兰楚鲁特花岗岩	WLCLT	锆石U-Pb LA-ICP-MS	139 ± 2 Ma	Liu et al., 2021
双尖子山 铅-锌-银矿床	岩浆热液型	矿石	17SJ-34; 17SJ-35; 17SJ-41	辉钼矿Re-Os	134.9 ± 3.4 Ma	Zhai et al., 2020
		矿石	15SJ-10; 15SJ-16; 17SJ-26; 15SJ-114	黄铁矿Re-Os	135.0 ± 0.6 Ma	Zhai et al., 2020
		矿石	SJ-30-1 ~ 4; SJ-55- 1 ~ 3; SJ-68-1 ~ 3	闪锌矿Rb-Sr	132.7 ± 3.9 Ma	吴冠斌等, 2014
		石英正长斑岩	NS-17	锆石U-Pb LA-ICP-MS	131.4 ± 0.5 Ma	赵家齐等, 2022
		矿区正长花岗岩	SJ-52	锆石U-Pb LA-ICP-MS	133.71 ± 0.64 Ma	吴冠斌等, 2014
		钻孔1021 m花岗斑岩	DS233-8	锆石U-Pb SHRIMP	133.4 ± 1.2 Ma	顾玉超等, 2017a
		斑状花岗闪长岩	14SJ55	锆石U-Pb LA-ICP-MS	130 ± 6 Ma	Liu et al., 2016
		矿区花岗岩	17SJ-87	锆石U-Pb LA-ICP-MS	135.2 ± 1.4 Ma	Zhai et al., 2020
		矿区粗粒花岗岩	17SJ-53	锆石U-Pb LA-ICP-MS	134.4 ± 1.0 Ma	Zhai et al., 2020
		矿区细粒花岗岩	17SJ-59	锆石U-Pb LA-ICP-MS	134.4 ± 1.0 Ma	Zhai et al., 2020
		钻孔细粒正长花岗岩	ZK1237-4	锆石U-Pb LA-ICP-MS	140.72 ± 0.44 Ma	Dai et al., 2022
		钻孔二长花岗岩	ZK101-1	锆石U-Pb LA-ICP-MS	142.7 ± 0.82 Ma	Dai et al., 2022

续表 4

矿床名称	矿床类型	测试对象	样号	测试方法	年龄	资料来源
道伦达坝 锡-铜-钨矿床	岩浆热液型	矿石	DL	石英包裹体Ar-Ar	140.6 ± 2.2 Ma	张雪冰等, 2021
		矿石	DX3	锡石U-Pb	136.8 ± 7.4 Ma	陈公正等, 2018
		矿石	DX1	锡石U-Pb	134.7 ± 6.6 Ma	陈公正等, 2018
		矿石	DL2	独居石U-Pb LA-ICP-MS	136 ± 2.3 Ma	陈公正等, 2021
		矿石	D8-2	独居石U-Pb LA-ICP-MS	135.1 ± 2.2 Ma	陈公正等, 2021
		矿石	DX8	独居石U-Pb LA-ICP-MS	134.7 ± 2.8 Ma	陈公正等, 2021
		矿石	D13	绢云母Ar-Ar	140.0 ± 1.1 Ma	陈公正等, 2021
		张家营子似斑状花岗岩	DW1-2	锆石U-Pb LA-ICP-MS	135 ± 1 Ma	陈公正等, 2018
		张家营子细粒花岗岩	DW3-9	锆石U-Pb LA-ICP-MS	136 ± 1 Ma	Chen et al., 2021b
		张家营子细粒花岗岩	DW3-3	锆石U-Pb LA-ICP-MS	134 ± 1 Ma	Chen et al., 2021b
		张家营子细粒花岗岩	ZYZ	全岩Rb-Sr	139.3 ± 2.9 Ma	毛萼等, 2001
维拉斯托-拜仁达坝 锡-铜-钨-铅-锌-银 矿床	岩浆热液型	矿石	WLST09-7	辉钼矿Re-Os	135 ± 11 Ma	Liu et al., 2016
		矿化石英斑岩	AY1	锡石U-Pb	138 ± 6 Ma	Wang et al., 2017
		矿化云英岩	AY2	锡石U-Pb	135 ± 6 Ma	Wang et al., 2017
		石英脉矿石	W22	锡石U-Pb	136.0 ± 6.1 Ma	刘瑞麟等, 2018
		北大山花岗岩	BD1-1	锆石U-Pb LA-ICP-MS	140 ± 2 Ma	刘瑞麟等, 2018
		北大山二长花岗岩	WH-01	锆石U-Pb LA-ICP-MS	140 ± 3 Ma	Liu et al., 2016
		北大山岩体外围花岗岩	BR2011-10	锆石U-Pb LA-ICP-MS	139 ± 2 Ma	Liu et al., 2016
		钻孔1550 m石英斑岩	ZK809-1	锆石U-Pb LA-ICP-MS	138 ± 2 Ma	Liu et al., 2016
		钻孔500 m石英斑岩	WL1	锆石U-Pb LA-ICP-MS	135.7 ± 0.9 Ma	翟德高等, 2016
		矿区碱长花岗岩	WLST01	锆石U-Pb LA-ICP-MS	139.5 ± 1.2 Ma	祝新友等, 2016
边家大院 铅-锌-银矿床	岩浆热液型	矿石	BJ-07 ~ BJ-11	辉钼矿Re-Os	140.7 ± 1.7 Ma	Zhai et al., 2017
		矿石	——	绢云母Ar-Ar	137.9 ± 4.1 Ma	Zhai et al., 2017
		矿区黑云母二长花岗岩	BJN2	锆石U-Pb LA-ICP-MS	143.2 ± 1.2 Ma	Wang et al., 2016
		矿区正长花岗岩	DS211-1	锆石U-Pb LA-ICP-MS	140.31 ± 0.34 Ma	顾玉超等, 2017b
		钻孔884 m石英斑岩	BJ-58	锆石U-Pb LA-ICP-MS	140.2 ± 1.2 Ma	王喜龙等, 2014b
		矿区花岗闪长岩	BJY-YT	锆石U-Pb LA-ICP-MS	143.2 ± 1.5 Ma	阮班晓等, 2013
		花岗斑岩	BJP1-C22	锆石U-Pb LA-ICP-MS	138.2 ± 0.8 Ma	蒋昊原等, 2020
		辉石闪长岩	BJP1-C31	锆石U-Pb LA-ICP-MS	137.4 ± 0.7 Ma	蒋昊原等, 2020
		乌兰坝粗粒花岗岩	HL02	锆石U-Pb LA-ICP-MS	138.0 ± 1.4 Ma	Xu et al., 2022
		乌兰坝粗粒花岗岩	HL04	锆石U-Pb LA-ICP-MS	137.1 ± 0.6 Ma	Xu et al., 2022

远大于斜长石、含铁黑云母、碱性角闪石等。尽管 King et al.(1997)认为, A 型花岗岩可能更多来自于火成岩为源岩的源区, 但笔者认为 A 型花岗岩的源岩可能既有火成岩又有沉积岩, 可能来自幔源基性岩浆与壳源酸性岩浆的混合, 符合其形成于稳定克拉通内伸展构造环境的特征, 这可能也是 A 型花岗岩类某些元素特征与典型 I 型花岗岩类和 S 型花岗岩类不相符的原因。虽然 Whalen et al.(1987)试图以 Ga/Al 值将 A 型花岗岩类与 I 型、S 型花岗岩类独立划分的方案可能略有不妥, 但目前绝大多数学者仍然认可高 Ga/Al 值是识别 A 型花岗岩的典型特征。

赵辉等(2015)根据 A 型花岗岩类判别图解投点于过渡区域(Whalen et al., 1987), 以及样品不含典型碱性暗色矿物和亏损 Ba 元素特征, 认为黄岗梁地区火山-侵入杂岩多为 I 型花岗岩类。本文持有不同观点, 上文提到 A 型花岗岩类的划分标准与 I 型和 S 型花岗岩不一致, 高 Ga/Al 值是识别 A 型花岗岩的标志, 而绝非划分 A 型花岗岩与 I 型花岗岩的界线。黄岗梁地区正长花岗岩属高钾钙碱性岩石, 以具有高 SiO₂(73.35%~75.16%)和(Na₂O+K₂O)(8.01%~8.55%)、低 CaO(0.61%~1.56%)和低 MgO(0.08%~0.19%)的主量元素特征区别于典型 I 型钙碱性花岗岩; 以低 Al₂O₃(13.13%~14.14%)、中等铝

饱和指数 A/CNK (0.97~1.18)、矿物成分不含堇青石区别于 S 型花岗岩 (Chappell et al., 1974); 其具有高 $TFeO/(TFeO+MgO)$ 值 (14.96~22.12)、 K_2O/Na_2O 值 (1.29~1.99)、 $10000 \times Ga/Al$ 值 (2.55~3.47) 和低 CaO (0.61%~1.56%)、 Sr (53.72×10^{-6} ~ 117.81×10^{-6}) 含量, 符合 A 型花岗岩类地球化学特征, 在 Whalen et al. (1987) 判别图解上投点于 A 型花岗岩区域 (图 9-a~c)。另外, 黄岗梁正长花岗岩 Y/Nb 值介于 1.46~11.62 之间, 在 Y/Nb - Rb/Nb 和 Nb - Y - Ce 判别图解上投点于 A_2 型花岗岩类区域 (图 9-d, e)。岩石含黑云母和少量榍石, $TFeO/(TFeO+MgO)$ 值为 0.94~0.96、富 K_2O 、准铝质, 岩浆分异程度中等, 符合相对还原型 A 型花岗岩类特征, 在 Al_2O_3 - $TFeO/(TFeO+MgO)$ 判别图解上投点于还原型 A 型花岗岩区域 (图 9-f), 暗示岩浆源区为缺水且熔融温度较高的还原状态环境 (Frost et al., 1997; Dall' Agnol et al., 2007)。

5.3 岩浆物质来源

实验岩石学研究已证明, 地壳中碎屑沉积岩熔

融, 形成偏酸性的过铝质花岗岩类, 基性岩熔融形成偏基性的准铝质花岗岩类 (Lofgren et al., 1991)。A 型花岗岩为低铝富碱的准铝质花岗岩类, 其源岩应含有基性岩类成分。尽管少数学者提出了 A 型花岗岩存在来自亏损地幔基性岩浆结晶分异的可能性 (Han et al., 1997; Mushkin et al., 2003), 但 A 型花岗岩类大多亏损 Eu 、 Ba 、 Sr 元素, 其岩浆分异过程中源区有斜长石分离结晶并残留, 此类岩浆不可能是由幔源岩浆直接分异形成的 (Wyllie, 1977; 吴福元等, 2007)。因此, A 型花岗岩类岩浆物质可能来源于地壳铁镁质岩石的部分熔融 (Collins et al., 1982; Clemens et al., 1986), 或来自幔源岩浆和重熔地壳物质的混合 (Dickin, 1994; Harris et al., 1999)。

前人多认为, 大兴安岭南段地区侵入岩多为含有幔源组分的年轻地壳发生部分熔融的产物 (刘伟等, 2007; Wang et al., 2016; 张天福等, 2019; 李猛兴等, 2020; 刘芳等, 2021; 周桐等, 2022), 但对黄岗梁体的成岩物质来源存在争议, 主要有来源于亏损地幔物质的部分熔融 (周振华等, 2010c)、新生下地壳

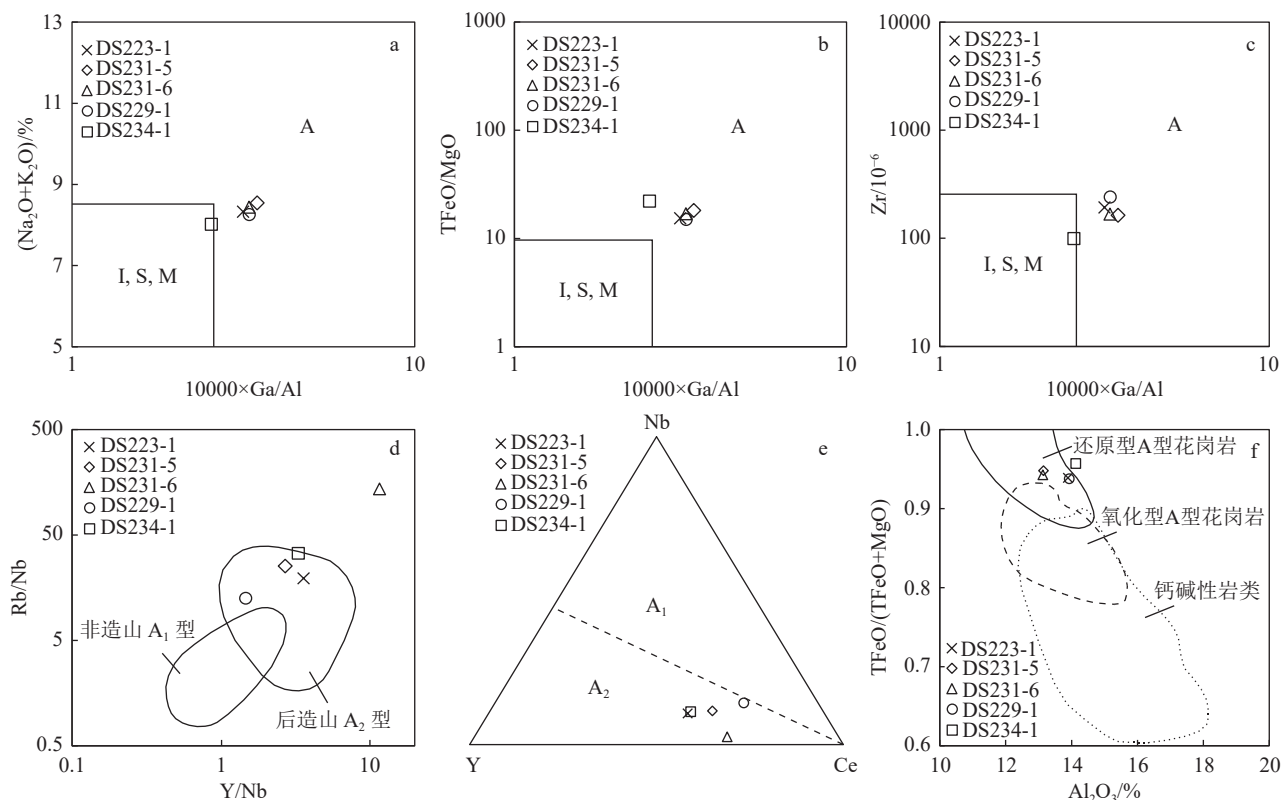


图 9 黄岗梁地区正长花岗岩成因类型判别图(a, b, c 图底图据 Whalen et al., 1987; d, e 图底图据 Eby, 1992; f 图底图据 Dall' Agnol et al., 2007)

Fig. 9 A-type granite of discrimination diagrams of the syenogranites in Huanggangliang area

物质的部分熔融(Zhou et al, 2012)、新生地壳的重熔且在侵位过程中受到古老地壳物质的混染(赵辉等, 2015)等观点。黄岗梁地区正长花岗岩富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素(LILE), 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(HFSE), 其中亏损 Ti、P 元素的特征与俯冲带岩浆地球化学特征相似, 表明岩浆源区或运移过程有陆源物质参与(Wilson, 1989); δEu 值为 0.31~0.59, 其不均一性特征反映了岩浆物质来源可能是复杂多样的。 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 38.381~39.942、15.541~15.609、18.565~19.979, 在 Pb 同位素构造模式图上具明显的线性分布趋势, 且投点于造山带演化线和地幔演化线之间(图 10-a), 显示壳幔混合源特征。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值分别介于 0.70031~0.70543 和 0.512572~0.512636 之间, $\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值为 -1.29~-0.04, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 0.07~1.18。表明岩石的 Nd 同位素与球粒陨石均一库(CHUR)近相同, 因其岩性为酸性岩类, 且结晶年龄远小于相对于亏损地幔的模式年龄(T_{DM2} 为 926 Ma~838 Ma), 排除了岩浆直接来源于 CHUR 库的可能。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ -($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 图解上, 投点于洋岛玄武岩区域(图 10-b), 推测成岩物质应来源于亏损地幔岩浆且受到地壳物质的混染。样品相对于亏损地幔的单阶段 Nd 同位素模式年龄 T_{DM} 为 1024~841 Ma, 二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 926~838 Ma, 表明成岩物质于新元古代从亏损地幔中分离。此外, 黄岗梁

锡铁矿床矿石 Pb 同位素组成($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 38.071~38.388、15.511~15.607、18.252~18.345)与花岗岩 Pb 同位素组成较一致, 为地壳与地幔混合的俯冲铅成因(要梅娟等, 2012; 刘智等, 2013), 表明二者可能来源于同一 U-Pb 系统, 即同一岩浆源区。结合矿床与矿区及外围早白垩世花岗岩的时空关系, 推测成岩与成矿物质于新元古代从亏损地幔分离, 并在上升侵位过程中受到地壳物质的混染。

值得一提的是, 大兴安岭南段地区, 如白音诺尔、浩布高、道伦达坝、维拉斯托、双尖子山等多金属矿床 Sr-Nd-Pb 同位素特征与黄岗梁锡铁矿床非常相近(周振华等, 2014; Jiang et al., 2017; Wang et al., 2018; 刘瑞麟等, 2018; Zhao et al., 2020; Dai et al., 2022), 结合其相近的时间关系、相似的空间分布和地质条件, 这些多金属矿床可能具有相同的成岩成矿物质来源, 并形成于同一成矿地质背景和同一地质作用下。

5.4 成岩成矿地质背景

中国北方中生代时期经历了后碰撞造山过程(200~160 Ma)、构造体制大转折(约 140 Ma)和岩石圈大规模快速减薄(约 120 Ma)三大成矿事件和成岩成矿背景; 在大兴安岭南段地区, 三大成矿事件分别形成了 180~160 Ma 的铜铅锌银矿床、约 140 Ma 的锡多金属矿床和约 120 Ma 的稀有矿床(毛景文等,

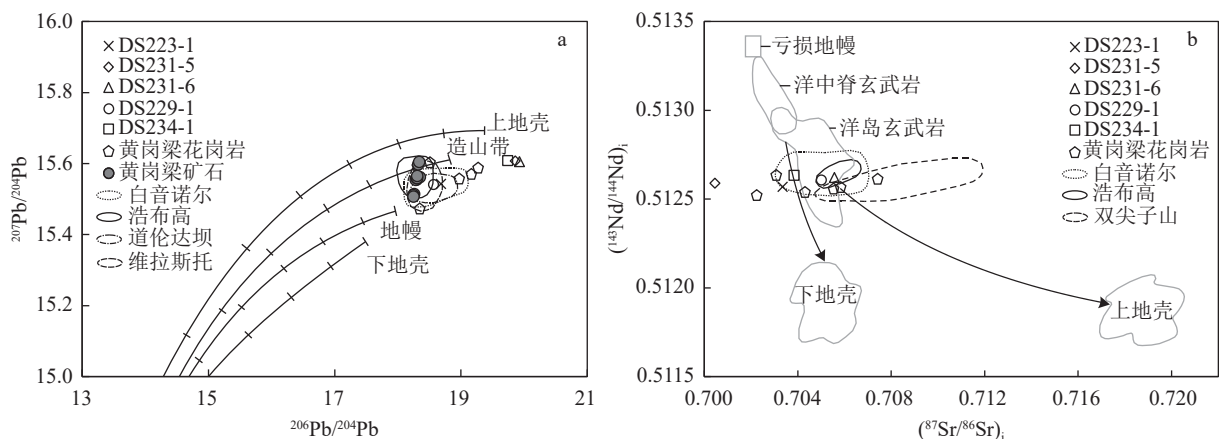


图 10 Pb 同位素构造模式图(a, 底图据 Zartman et al., 1981)和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ -($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 图解(b, 底图据 Zindler et al., 1986)

(a 图黄岗梁花岗岩 5 件样品据蔡剑辉等, 2004; Zhou et al., 2012; 黄岗梁矿石 14 件样品据要梅娟等, 2012; 刘智等, 2013; 白音诺尔 11 件样品据 Jiang et al., 2017; Zhao et al., 2020; 浩布高 5 件样品据 Wang et al., 2018; 道伦达坝 14 件样品据周振华等, 2014; 维拉斯托 8 件样品据刘瑞麟等, 2018. b. 黄岗梁花岗岩 6 件样品据 Zhou et al., 2012; 苏荣昆等, 2022; 白音诺尔 24 件样品据 Jiang et al., 2017; Zhao et al., 2020; 浩布高 5 件样品据 Wang et al., 2018; 双尖子山 12 件样品据 Dai et al., 2022)

Fig. 10 Pb isotopic compositions diagram(a) and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ -($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i diagram(b)

2005)。黄岗梁锡铁矿床的主成矿年龄约为 136 Ma, 矿区及外围岩体年龄为 141.9~139.1 Ma, 对应毛景文等(2005)提出的大兴安岭南段 140 Ma 的锡多金属矿床成矿期和构造体制大转折的动力学背景, 即岩石圈由全面挤压向伸展过渡。但是毛景文等(2005)认为, 140 Ma 成矿作用主要与 I 型或壳幔混源型花岗岩有关, 而本文认为该期成矿作用还与 A 型花岗岩关系密切。样品在 R_1 - R_2 上投点于造山后 A 型花岗岩区(图 11-a), 在 Rb-(Y+Nb) 图解(图 11-b)上投点于同碰撞花岗岩、火山弧花岗岩和板内花岗岩交叠区域。研究显示, A 型花岗岩形成于伸展环境且分布广泛, 包括活动大陆边缘、被动大陆边缘、克拉通内部、大陆裂谷等多种构造环境, 其中 A_1 型花岗岩具有与洋岛玄武岩类似的地球化学特征, 多形成于大陆裂谷或板块内部的岩浆作用; 而本文黄岗梁 A_2 型花岗岩的形成环境比 A_1 型更广泛, 如形成于陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用, 具有明显的岛弧岩浆特征的造山后伸展环境(Eby, 1992)。

大兴安岭南段地区位于古亚洲构造域、滨西太平洋构造域和蒙古-鄂霍次克洋构造域交汇部位, 目前对该区早白垩世碰撞造山的机制仍有古太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用(王喜龙等, 2014b; Wang et al., 2016; 王晰等, 2018; 李猛兴等, 2020; 刘芳等, 2021; 周桐等, 2022)、蒙古-鄂霍次克洋闭合作用、

(杨奇荻等, 2014; 赵辉等, 2015; 李剑锋等, 2016; 王迪等, 2020; 车亚文等, 2021; 章培春等, 2022)、兴蒙造山带造山后(即古亚洲洋闭合作用后)板内伸展底侵作用(吴福元等, 1999; 邵济安等, 2001; Fan et al., 2003; 林强等, 2004; 魏巍等, 2017)等观点。近期研究显示, 古亚洲洋的最终闭合发生在晚二叠世—中三叠世, 且具有自西向东逐渐变年轻的趋势(孙德有等, 2004; Cao et al., 2013; Wang et al., 2015, 2018), 因此从时空关系看, 大兴安岭南段地区早白垩世(约 140 Ma)板内伸展环境受古亚洲洋闭合作用影响可能不大。

蒙古-鄂霍次克洋板块于晚三叠世—早侏罗世存在以西北方向对西伯利亚板块、南南东方向对额尔古纳板块的双向俯冲过程, 南向影响范围达到松辽盆地以西地区, 自西向东以“剪刀式”逐渐闭合(Li et al., 2017; 许文良等, 2019); 近年依据在大兴安岭北段发现的 S 型约 168 Ma 白云母二长花岗岩和燕辽地区自北向南的推覆构造指示的陆壳加厚背景, 推测蒙古-鄂霍次克洋应在中—晚侏罗世完全闭合(邓晋福等, 2005; 许文良等, 2019)。后碰撞伸展作用期及岩浆热液事件一般发生在主碰撞期造山作用结束后约 20 Ma(侯增谦等, 2010), 可见蒙古-鄂霍次克洋后碰撞伸展作用期与约 140 Ma 岩浆作用时间上高度契合。但是现今大兴安岭地区北北东向的

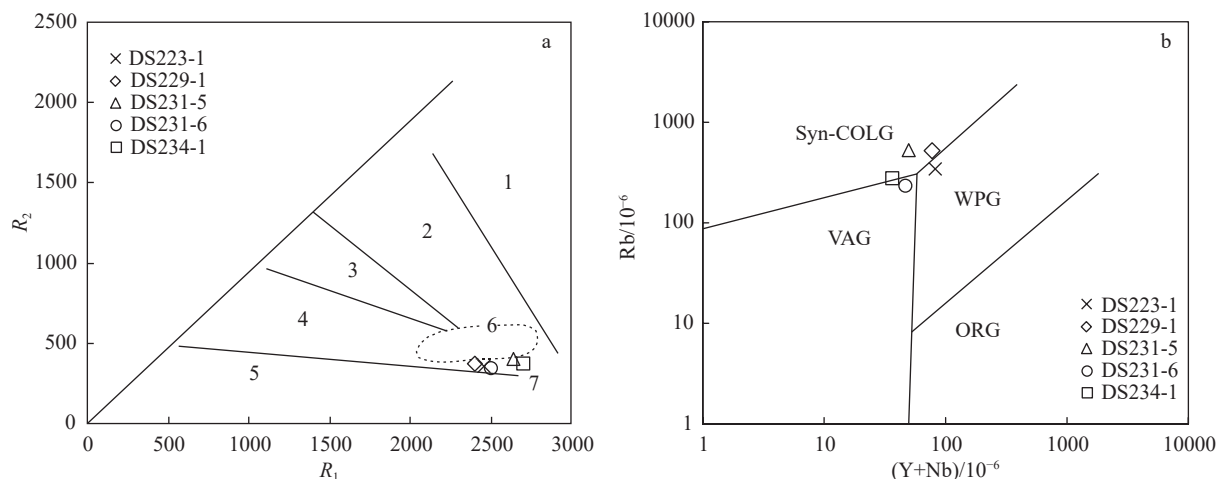


图 11 黄岗梁地区正长花岗岩 R_1 - R_2 图解 (a, 底图据 Batchelor et al., 1985) 和 (Y+Nb)-Rb 图解 (b, 底图据 Pearce et al., 1984)
($R_1=[4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)]$; $R_2=(Al+2Mg+6Ca)$)

Fig. 11 R_1 - R_2 diagram (a) and (Y+Nb)-Rb diagram (b) of the syenogranites in Huanggangliang area

1—地幔分异(斜长花岗岩); 2—破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩; 3—板块碰撞后隆起期花岗岩; 4—晚造山期花岗岩;
5—非造山期 A 型花岗岩; 6—同碰撞 S 型花岗岩; 7—造山期后 A 型花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩;
Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩

深大断裂和岩浆岩展布方向无法解释与蒙古-鄂霍次克洋北北西闭合方向的关系(杨雅军等, 2022), 因此近年研究考虑古太平洋板块中生代俯冲作用对该区的叠加影响。虽然学者对古太平洋板块起始俯冲时间未达成一致, 但对其北西俯冲方向和 140~130 Ma 的俯冲峰期基本达成共识(许文良等, 2019; 冯亚洲等, 2020; 刘俊来等, 2022; 杨雅军等, 2022)。古地磁资料显示, 古太平洋板块在 145~135 Ma 以约 NW50° 向欧亚大陆高角度俯冲(Engelbreton et al., 1985), 结合近年来在罕苏木、小乌兰沟、满都、维拉斯托等地区报道的 142~130 Ma I 型花岗岩类研究成果(张天福等, 2019; 李猛兴, 2020; 刘芳等, 2021; 章培春等, 2022), 推测大兴安岭南段地区在早白垩世经历了蒙古-鄂霍次克洋碰撞闭合伸展作用和古太平洋高角度俯冲作用叠加。

6 结 论

(1) 大兴安岭南段黄岗梁地区正长花岗岩年龄为 141.9~139.1 Ma, 矿区内与成矿直接相关的骆驼场梁花岗岩体年龄为 139.2 ± 1.5 Ma, 较成矿年龄早 3 Ma, 反映了黄岗梁矽卡岩型锡铁矿床中酸性侵入岩与碳酸盐岩的接触交代矿化期。

(2) 黄岗梁地区正长花岗岩为高钾钙碱性 A_2 型花岗岩类, 岩浆源区为缺水且熔融温度较高的还原状态环境, 成岩物质于新元古代从亏损地幔分离, 在上升侵位过程中受到地壳物质混染。

(3) 大兴安岭南段地区在早白垩世经历了蒙古-鄂霍次克洋碰撞闭合伸展作用和古太平洋高角度俯冲作用叠加。

致谢: 感谢中国地质科学院北京离子探针中心车晓超副研究员在实验测试过程中给予的指导和帮助, 感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改意见。

References

- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multication parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1): 43–55.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U–Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200(1/2): 155–170.
- Cai J H, Yan G H, Xiao C D, et al. 2004. Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the Mesozoic intrusive rocks in Taihang–Da Hinggan Mountains tectonomagmatic belt and their source region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1225–1242 (in Chinese with English abstract).
- Cao H H, Xu W L, Pei F P, et al. 2013. Zircon U–Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic–Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block[J]. *Lithos*, 170/171: 191–207.
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 8: 173–174.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1/2): 1–26.
- Che Y W, Liu J F, Zhao S, et al. 2021. Early Early–Cretaceous post-collisional tectonic setting of the southern segment of the Great Xing'an Range: Evidence from the Lanjiayingzi gabbro–diorite in Linxi area[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(1): 152–163 (in Chinese with English abstract).
- Chen G Z, Wu G, Li T G, et al. 2018. LA–ICP–MS zircon and cassiterite U–Pb ages of Daolundaba copper–tungsten deposit in Inner Mongolia and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 37(2): 225–245 (in Chinese with English abstract).
- Chen G Z, Wu G, Li T G, et al. 2021a. Mineralization of the Daolundaba Cu–W–Sn deposit in the southern Great Xing'an Range: Constraints from zircon and monazite U–Pb and sericite ^{40}Ar – ^{39}Ar ages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 865–885 (in Chinese with English abstract).
- Chen G Z, Wu G, Li T G, et al. 2021b. Mineralization of the Daolundaba Cu–Sn–W–Ag deposit in the southern Great Xing'an Range, China: Constraints from geochronology, geochemistry, and Hf isotope[J]. *Ore Geology Reviews*, 133: 104117.
- Clemens J D, Holloway J R, White A J R. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints[J]. *American Mineralogist*, 71(3/4): 317–324.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to Southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200.
- Dai M, Yan G S, Li Y S, et al. 2022. The origin of microgranular enclaves in the Early Cretaceous Shuangjianzishan granites in southern Great Hinggan Range, NE China[J]. *Geological Journal*, 57(7): 2631–2655.
- Dall'Agnol R, Carvalho de Oliveira D. 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajas, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites[J]. *Lithos*, 93: 215–233.
- Deng J F, Zhao G C, Su S G, et al. 2005. Structure overlap and tectonic setting of Yanshan orogenic belt in Yanshan Era[J]. *Geotectonica et Metallogenia* 29(2): 157–165 (in Chinese with English abstract).
- Dickinson A P. 1994. Nd isotope chemistry of Tertiary igneous rocks from Arran, Scotland: Implications for magma evolution and crustal structure[J]. *Geological Magazine*, 131(3): 329–333.
- Duan X X, Zeng Q D, Yang Y H, et al. 2015. Triassic magmatism and Mo mineralization in northeast China: geochronological and isotopic constraints from the Laojiagou porphyry Mo deposit[J]. *International Geology Review*, 57(1): 55–75.

- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641–644.
- Engelbreton D C, Cox A, Gordon R G. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 206(9): 1–60.
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121: 115–135.
- Feng Y Z, Yang J H, Sun J F, et al. 2020. Material records for Mesozoic destruction of the North China Craton by subduction of the Paleo-Pacific slab[J]. *Science China Earth Sciences*, 63: 690–700 (in Chinese with English abstract).
- Frost C D, Frost B R. 1997. Reduced rapakivi-type granites: the tholeiite connection[J]. *Geology*, 25(7): 647–650.
- Gu Y C, Chen R Y, Jia B, et al. 2017a. Zircon U–Pb dating and geochemistry of the granite porphyry from the Shuangjianzishan silver polymetallic deposit in Inner Mongolia and tectonic implications[J]. *Geology and Exploration*, 53(3): 495–507 (in Chinese with English abstract).
- Gu Y C, Chen R Y, Jia B, et al. 2017b. Zircon U–Pb dating and geochemistry of the syenogranite from the Bianjiadayuan Pb–Zn–Ag deposit of Inner Mongolia and its tectonic implications[J]. *Geology in China*, 44(1): 101–117 (in Chinese with English abstract).
- Guo Z J, Zhou Z H, Li G T, et al. 2012. SHRIMP U–Pb zircon dating and petrogeochemical characteristics of the intermediate–acid intrusive rocks in the Aoergai copper deposit of Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 39(6): 1487–1500 (in Chinese with English abstract).
- Han B F, Wang S G, Jahn B, et al. 1997. Depleted–mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd–Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 138(3/4): 135–159.
- Harris C, Marsh J S, Milner S C. 1999. Petrology of the alkaline core of the Messum igneous complex, Namibia: Evidence for the progressively decreasing effect of crustal contamination[J]. *Journal of Petrology*, 40(9): 1377–1397.
- Hong J X, Zhang H Y, Zhai D G, et al. 2021. The geochronology of the Haobugao skarn Zn–Pb deposit (NE China) using garnet LA–ICP–MS U–Pb dating[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 1–23.
- Hou Z Q. 2010. Metallogensis of continental collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 30–58 (in Chinese with English abstract).
- Ishiyama D, Mizuta T, Ishikawa Y, et al. 2001. Geochemical characteristics of igneous rocks and tin–copper mineralization[R]. Project Final Report of Chinese Research Center for Mineral Resources Exploration, 4: 115–138.
- Jiang H Y, Zhao Z D, Zhu X Y, et al. 2020. Characteristics and metallogenic significance of granite porphyry and pyroxene diorite in the Bianjiadayuan Pb–Zn–Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 47(2): 450–471 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Chen C L, Bagas L, et al. 2017. Two mineralization events in the Baiyinnuoer Zn–Pb deposit in Inner Mongolia, China: Evidence from field observations, S–Pb isotopic compositions and U–Pb zircon ages[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 339–367.
- 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[J]. *Journal of Petrology*, 38: 371–391.
- Kravchinsky V A, Cogne J P, Harbert W P, et al. 2002. Evolution of the Mongol–Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol–Okhotsk suture zone, Siberia[J]. *Geophysical Journal International*, 148: 34–57.
- Li J F, Wang K Y, Quan H Y, et al. 2016. Discussion on the magmatic evolution sequence and metallogenic geodynamical setting background Hongling Pb–Zn deposit in the southern Da Xing'an Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1529–1542 (in Chinese with English abstract).
- Li M X. 2020. Geochemical characteristics and petrogenesis of Early Cretaceous monzonitic granite in the Mandu area, southern Da Hinggan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(2/3): 224–233 (in Chinese with English abstract).
- Li Y S, Liu Z F, Shao Y J, et al. 2022. Genesis of the Huanggangliang Fe–Sn polymetallic deposit in the southern Da Hinggan Range, NE China: Constraints from geochronology and cassiterite trace element geochemistry[J]. *Ore Geology Reviews*, 151: 105226.
- Li Y, Xu W L, Wang F, et al. 2017. Triassic volcanism along the eastern margin of the Xing'an Massif, NE China: Constraints on the spatial–temporal extent of the Mongol–Okhotsk tectonic regime[J]. *Gondwana Research*, 48: 205–223.
- Lin Q, Ge W C, Wu F Y, et al. 2004. Geochemistry of Mesozoic granites in Da Hinggan Ling ranges[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 403–412 (in Chinese with English abstract).
- Liu C H, Bagas L, Wang F X. 2016. Isotopic analysis of the super-large Shuangjianzishan Pb–Zn–Ag deposit in Inner Mongolia, China: Constraints on magmatism, metallogenesis, and tectonic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 75: 252–267.
- Liu F, Wang X, Hai L F, et al. 2021. Zircon U–Pb ages, Hf isotope and extensional tectonics of monzogranite in the Hansumu area of southern Great Khingan[J]. *Geology in China*, 48(5): 1609–1622 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhang R, Zhang Q Z. 2004. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269–277 (in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Ji L, Ni J L, et al. 2022. Dynamics of the Early Cretaceous lithospheric thinning and destruction of the North China craton as the consequence of Paleo-Pacific type active continental margin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(10): 3360–3380 (in Chinese with English abstract).
- Liu L J, Zhou T F, Fu B, et al. 2021. Petrogenesis of Early Cretaceous granitic rocks from the Haobugao area, southern Great Xing'an Range, northeast China: Geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf–O isotope constraints[J]. *Lithos*, 406/407: 106501.
- Liu Y F, Jiang S H, Bagas L. 2016. The genesis of metal zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag–Zn–Pb–Cu–(Sn–W) deposits in the

- shallow part of a porphyry Sn–W–Rb system, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 75(2): 150–173.
- Liu R L, Wu G, Li T G, et al. 2018. LA–ICP–MS cassiterite and zircon U–Pb ages of the weilasituo tin–polymetallic deposit in the southern Great Xing’an Range and their geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(5): 183–201 (in Chinese with English abstract).
- Liu W, Pan X F, Xie L W, et al. 2007. Sources of material for the Linxi granitoids, the southern segment of the Da Hinggan Mts.: When and how continental crust grew?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (3): 667–679 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Jiang S H, Leon B, et al. 2017. Isotopic(C–O–S) geochemistry and Re–Os geochronology of the Haobugao Zn–Fe deposit in Inner Mongolia, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 82: 130–147.
- Liu X, Lü X B, Mei W. 2013. Sulfur–Lead–Oxygen isotope compositions of the Huanggang skarn Fe–Sn deposit, Inner Mongolia: Implications for the sources of ore–forming materials[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 33(3): 30–37 (in Chinese with English abstract).
- Lofgren G E, Beard J S, 1991. Dehydration melting and water–saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1.3 and 6.9 kb[J]. *Journal of Petrology*, 32(2): 365–401.
- Loiselle M C, Wones D S. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geological Society of American, Abstracts with Programs*, 11: 468.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0–A geochronological toolkit for Micro–soft Excel[M]. Bekeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 1–70.
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. 2005. Mesozoic large–scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169–188 (in Chinese with English abstract).
- Mao Q. 2001. Petrogenesis of granitoids associated with tin–mineralization in Huanggang tin–mineralization belt, Inner Mongolia, China[D]. Doctor Thesis of Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences: 1–74 (in Chinese with English abstract).
- Mei W, Lü X B, Cao X F, et al. 2015. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Huanggang skarn iron–tin polymetallic deposit, southern Great Xing’an Range: Evidence from fluidinclusions and isotope analyses[J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 239–252.
- Mei W, Lü X B, Wang X D, et al. 2020. Alteration, mineralization and genesis of Huanggang skarn iron–tin polymetallic deposit, Southern Great Xing’an Range[J]. *Earth Science*, 45(12): 4428–4445 (in Chinese with English abstract).
- Mushkin A, Navon O, Halicz L, et al. 2003. The petrogenesis of A–type magmas from the Amram Massif, Southern Israel[J]. *Journal of Petrology*, 44(5): 815–832.
- 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[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247–265.
- Niu X D, Shu Q H, Xing K, et al. 2022. Evaluating Sn mineralization potential at the Haobugao skarn Zn–Pb deposit (NE China) using whole–rock and zircon geochemistry[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 234: 106938.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25: 956–983.
- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 50: 63–81.
- Ruan B X, Lü X B, Liu S T, et al. 2013. Genesis of Bianjiadayuan Pb–Zn–Ag deposit in Inner Mongolia: Constraints from U–Pb dating of zircon and multi–isotope geochemistry[J]. *Mineral Deposits*, 32(3): 501–514 (in Chinese with English abstract).
- Shao J A, Liu F T, Chen H, et al. 2001. Relation ship between Mesozoic magmatism and subduction in Da Hinggan–Yanshan area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 56–63 (in Chinese with English abstract).
- Shi C Y, Yan M C, Chi Q H. 2007. Abundances of chemical elements of granitoids in different geotectonic units of China and their characteristics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 48–59 (in Chinese with English abstract).
- Streckeisen A L, Le Maitre R W. 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks[J]. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Abhandlungen*, 136: 169–206.
- Su R K, Xue H M, Cao G Y. 2022. Huanggangliang volcanic–extrusive uplift in the southern Da Hinggan Mountains: Discussion on genetic relation between different lithofacies[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(4): 727–745 (in Chinese with English abstract).
- Sun D Y, Wu F Y, Zhang Y B, et al. 2004. The final closing time of the west Lamulun River–Changchun–Yanji plate suture zone—Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 174–181 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J(eds.)[J]. *Magmatism in Oceanic Basins. Geological Society Special Publication*, 42: 313–345.
- Tomurtogoo O, Windley B F, Krnoer A, et al. 2005. Zircon age and occurrence of the Adaatsag ophiolite and Muron shear zone, central Mongolia: constraints on the evolution of the Mongol–Okhotsk ocean, suture and orogen[J]. *Journal of the Geological Society* 162: 125–34.
- Wang C M, Zhang S T, Deng J, et al. 2007. The exhalative genesis of the stratabound skarn in the Huanggangliang Sn–Fe polymetallic deposit of Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 409–417 (in Chinese with English abstract).
- Wang C G, Sun F Y, Sun G S, et al. 2016. Geochronology, geochemical and isotopic constraints on petrogenesis of intrusive complex associated with Bianjiadayuan polymetallic deposit on the southern margin of the Greater Khingan, China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 9: 334.
- Wang D, Zhao G C, Su S G, et al. 2020. Spatial–temporal distribution of late Mesozoic intrusive rocks in south Daxing’anling mountains and the

- characteristic contrast of rocks in the mid ridge and the east slope[J]. *Geoscience*, 34(3): 466–482 (in Chinese with English abstract).
- Wang F X, Bagas L, Jiang S H, et al. 2017. Geological, geochemical, and geochronological characteristics of Weilasituo Sn–polymetal deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 1206–1229.
- Wang L J, Wang J B, Wang Y W et al. 2002. REE geochemistry of the Huangguangliang skarn Fe–Sn deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 575–584 (in Chinese with English abstract).
- Wang X, Ren X G, Wang Y, et al. 2018. Zircon U–Pb ages and geochemical characteristics of the quartz monzonite diorite rocks from Hanmiao area in the southern segment of the Da Hinggan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(9): 1662–1670 (in Chinese with English abstract).
- Wang X L, Liu J J, Zhai D G, et al. 2014a. A study of isotope geochemistry and sources of ore-forming materials of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit in Linxi, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 41(4): 1288–1303 (in Chinese with English abstract).
- Wang X L, Liu J J, Zhai D G, et al. 2014b. U–Pb Dating, geochemistry and tectonic implications of Bianjiadayuan quartz porphyry, Inner Mongolia, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33 (5): 654–665 (in Chinese with English abstract).
- Wang X D, Xu D M, Lü X B, et al. 2018. Origin of the Haobugao skarn Fe–Zn polymetallic deposit, Southern Great Xing’an Range, NE China: Geochronological, geochemical, and Sr–Nd–Pb isotopic constraints[J]. *Ore Geology Reviews*, 94: 58–72.
- Wang Y N, Xu W L, Wang F, et al. 2018. New insights on the Early Mesozoic evolution of multiple tectonic regimes in the northeastern North China Craton from the detrital zircon provenance of sedimentary strata[J]. *Solid Earth*, 9(6): 1375–1397.
- Wang Z J, Cao H H, Pei F P, et al. 2015. Geochronology and geochemistry of middle Permian–Middle Triassic intrusive rocks from central–eastern Jilin Province, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern segment of the Paleo–Asian Ocean[J]. *Lithos*, 238: 13–25.
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in a variety of crustal magmas types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304.
- Wei W, Chen J P, Huang X K, et al. 2017. Magmatic migmatization of Haliheiba pluton: Petrographic study of dark inclusion, U–Pb chronology and Hf isotope of zircon mineral in central and southern section of the Da Hinggan Mountains area[J]. *Mineral Exploration*, 8(6): 948–956 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis a global tectonic approach*[M]. London: Chapman and Hall: 1–466.
- Wu F Y, Li X H, Yang J H, et al. 2007. Discussion on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 1–30.
- Wu F Y, Sun D Y, Jahn B, et al. 2004. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 731–44.
- Wu F Y, Sun D Y, Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181–189 (in Chinese with English abstract).
- Wu G B. 2014. Research of silver mineralization in central–southern segment of the Great Xing’an Range—A case study of the Shuangjianzishan silver deposit, Inner Mongolia[D]. Doctor Thesis of University of Chinese Academy of Sciences, 1–150 (in Chinese with English abstract).
- Wyllie P J. 1977. Effects of H₂O and CO₂ on magma generation in the crust and mantle[J]. *Journal of the Geological Society*, 134(2): 215–234.
- Xu C H, Sun F Y, Fan X Z, et al. 2022. The Early Cretaceous tectonic evolution of the southern Great Xing’an Range, northeastern China: New constraints from A2-type granite and monzodiorite[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 59: 135–155.
- Xu W L, Sun C Y, Tang J, et al. 2019. Basement nature and tectonic evolution of the Xing’an–Mongolian orogenic belt[J]. *Earth Science*, 44(5): 1620–1646 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z B, Shao Y J, Yang Z A, et al. 2017. LA–ICP–MS analysis of trace elements in sphalerite from the Huanggangliang Fe–Sn deposit, Inner Mongolia, and its implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(3): 360–370 (in Chinese with English abstract).
- Yang Q D, Guo L, Wang T, et al. 2014. Geochronology, origin, sources and tectonic settings of Late Mesozoic two-stage granites in the Ganzhuermiao region, central and southern Da Hinggan Range, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1961–1981 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y J, Yang X P, Jiang B, et al. 2022. Spatio-temporal distribution of Mesozoic volcanic strata in the Great Xing’an Range: Response to the subduction of the Mongol–Okhotsk Ocean and Paleo–Pacific Ocean[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(2): 115–131 (in Chinese with English abstract).
- Yao M J, Liu J J, Zhai D G, et al. 2012. Sulfur and lead isotopic compositions of the polymetallic deposits in the southern Daxing’anling: implication for metal sources[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(2): 362–373 (in Chinese with English abstract).
- Yao M J, Cao Y, Liu J J, et al. 2016. Isotope age of Re–Os in molybdenite and genetic implication of Huanggangliang Fe–Sn deposit in Inner Mongolia[J]. *Mineral Exploration*, 7(3): 399–403 (in Chinese with English abstract).
- You S X, Chen K, Zhang Y C, et al. 2022. Geochemical characteristics and geological significance of magnetite in Huanggangliang iron polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Exploration*, 13(4): 398–409 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics—the mode[J].

- Tectonophysics*, 75: 135–162.
- Zeng Q D, Sun Y, Duan X X, et al. 2013. U–Pb and Re–Os geochronology of the Haolibao porphyry Mo–Cu deposit, NE China: Implications for a Late Permian tectonic setting[J]. *Geological Magazine*, 150(6): 975–985.
- Zhai D G, Liu J J, Cook N J, et al. 2019. Mineralogical, textural, sulfur and lead isotope constraints on the origin of Ag–Pb–Zn mineralization at Bianjiadayuan, Inner Mongolia, NE China[J]. *Mineralium Deposita*, 54: 47–66.
- Zhai D G, Liu J J, Li J M, et al. 2016. Geochronological study of Weilasituo porphyry type Sn deposit in Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 35(5): 1011–1022 (in Chinese with English abstract).
- Zhai D G, Liu J J, Yang Y Q, et al. 2012. Petrogenetic and metallogenic ages and tectonic setting of the Huanggangliang Fe–Sn deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 513–523 (in Chinese with English abstract).
- Zhai D G, Liu J J, Zhang A L, et al. 2017. U–Pb Re–Os, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of porphyry $\text{Sn}\pm\text{Cu}\pm\text{Mo}$ and polymetallic (Ag–Pb–Zn–Cu) vein mineralization at Bianjiadayuan, Inner Mongolia, Northeast China: Implications for discrete mineralization events[J]. *Economic Geology*, 112(8): 2041–2059.
- Zhai D G, Liu J J, Zhang H Y, et al. 2014. S–Pb isotopic geochemistry, U–Pb and Re–Os geochronology of the Huanggangliang Fe–Sn deposit, Inner Mongolia, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 59: 109–122.
- Zhai D G, Williams–Jones A E, Liu J J, et al. 2020. The genesis of the giant Shuangjianzishan epithermal Ag–Pb–Zn deposit, Inner Mongolia, northeastern China[J]. *Economic Geology*, 115(1): 101–128.
- Zhang J H, Gao S, Ge W C, et al. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing’an Range, northeastern China: Implications for subduction–induced delamination[J]. *Chemical Geology*, 276: 144–165.
- Zhang P C, Peng B, Zhao J Z, et al. 2022. Petrogenesis of the syenogranite in the Xiaowulangou area of southern Great Xing’an Range: Constraints from zircon LA–ICP–MS U–Pb geochronology, geochemistry and Hf isotopes[J]. *Earth Science*, 47(8): 2889–2901 (in Chinese with English abstract).
- Zhang T F, Guo S, Xin H T, et al. 2019. Petrogenesis and magmatic evolution of highly fractionated granite and their constraints on Sn–(Li–Rb–Nb–Ta) mineralization in the Weilasituo deposit, Inner Mongolia, southern Great Xing’an Range, China[J]. *Earth Science*, 44(1): 248–267 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X B, Bao C J, Wu S S. 2021. Chronology of the Daolundaba Cu–W polymetallic deposit, southern Great Xing’an Range: Evidence from quartz fluid inclusion $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age[J]. *Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English)*, 38(1): 83–90 (in Chinese with English abstract).
- Zhao H, Li S, Wang T, et al. 2015. Age, petrogenesis and tectonic implications of the Early Cretaceous magmatism in the Huanggangliang area, southern Da Hinggan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(12): 2203–2218 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J Q, Zhou Z H, Ouyang H G, et al. 2022. Zircon U–Pb age and geochemistry of quartz syenite porphyry in Shuangjianzishan Ag–Pb–Zn (Sn) deposit, Inner Mongolia, and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 41(2): 324–344 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Q, Xiao R G, Zhang D H, et al. 2020. Petrogenesis and tectonic setting of ore–associated intrusive rocks in the Baiyinnuoer Zn–Pb deposit, southern Great Xing’an Range (NE China): Constraints from zircon U–Pb dating, geochemistry, and Sr–Nd–Pb isotopes[J]. *Minerals*, 10(1): 1–18.
- Zhou T, Sun Z J, Yu H N, et al. 2022. Zircon U–Pb geochronology, Hf isotope and whole–rock geochemical characteristics of Xiaohanshan pluton in Haobugao Pb–Zn deposit, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 36(1): 282–294 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Gao X, Ouyang H G, et al. 2019. Formation mechanism and intrinsic genetic relationship between tin–tungsten–lithium mineralization and peripheral lead–zinc–silver–copper mineralization: Exemplified by Weilasituo tin–tungsten–lithium polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 1004–1022 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Liu H W, Chang G X, et al. 2011. Mineralogical characteristics of skarns in the Huanggang Sn–Fe deposit of Inner Mongolia and their metallogenic indicating significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(1): 97–112 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Lü L S, Feng J R, et al. 2010a. Molybdenite Re–Os ages of Huanggang skarn Sn–Fe deposit and their geological significance, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 667–679 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Lü L S, Yang Y J, et al. 2010b. Petrogenesis of the Early Cretaceous A–type granite in the Huanggang Sn–Fe deposit, Inner Mongolia: Constraints from zircon U–Pb dating and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3521–3537 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Lü L S, Yang Y J, et al. 2010c. LA–ICP–MS zircon U–Pb chronology and Hf isotope composition of the Huanggang granite in the southern Great Hinggan Range and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 29(Supplement): 559–560 (in Chinese).
- Zhou Z H, Mao J W, Lyckberg P. 2012. Geochronology and isotopic geochemistry of the A–type granites from the Huanggang Sn–Fe deposit, southern Great Hinggan Range, NE China: Implication for their origin and tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 272–286.
- Zhou Z H, Ouyang H G, Wu X L, et al. 2014. Geochronology and geochemistry study of the biotite granite from the Daolundaba Cu–W polymetallic deposit in the Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 79–94 (in Chinese with English abstract).

- Zhu X Y, Zhang Z H, Fu X, et al. 2016. Geological and geochemical characteristics of the Weilasito Sn-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 43(1): 188–208 (in Chinese with English abstract).
- Zindler A, Hart S. 1986. Chemical Geodynamics[J]. *Annual Review of Earth Planet Science*, 14: 493–571.
- Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 306: 33–56.
- ### 附中文参考文献
- 蔡剑辉, 阎国翰, 肖成东, 等. 2004. 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征及物质来源探讨[J]. *岩石学报*, 20(5): 1225–1242.
- 车亚文, 刘建峰, 赵硕, 等. 2021. 大兴安岭南段早白垩世早期后碰撞构造环境——来自林西县兰家营子辉长闪长岩的证据[J]. *地质通报*, 40(1): 152–163.
- 陈公正, 武广, 李铁刚, 等. 2021. 大兴安岭南段道伦达坝铜钨锡矿床成矿作用: 来自锆石和独居石 U-Pb 和绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄的约束[J]. *岩石学报*, 37(3): 865–885.
- 陈公正, 武广, 李铁刚, 等. 2018. 内蒙古道伦达坝铜钨锡矿床 LA-ICP-MS 锆石和锡石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 37(2): 225–245.
- 邓晋福, 赵国春, 苏尚国, 等. 2005. 燕山造山带燕山期构造叠加及其大地构造背景[J]. *大地构造与成矿学*, 29(2): 157–165.
- 冯亚洲, 杨进辉, 孙金凤, 等. 2020. 中生代古太平洋板块俯冲诱发华北克拉通破坏的物质记录[J]. *中国科学: 地球科学*, 50: 651–662.
- 顾玉超, 陈仁义, 贾斌, 等. 2017a. 内蒙古双尖子山银多金属矿床花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *地质与勘探*, 53(3): 495–507.
- 顾玉超, 陈仁义, 贾斌, 等. 2017b. 内蒙古边家大院铅锌银矿床深部正长花岗岩年代学及形成环境研究[J]. *中国地质*, 44(1): 101–117.
- 郭志军, 周振华, 李贵涛, 等. 2012. 内蒙古敖尔盖铜矿中—酸性侵入岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年与岩石地球化学特征研究[J]. *中国地质*, 39(6): 1487–1500.
- 侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论[J]. *地质学报*, 84(1): 30–58.
- 蒋昊原, 赵志丹, 祝新友, 等. 2020. 内蒙古边家大院铅锌银矿床花岗岩及辉石闪长岩特征及对成矿的指示[J]. *中国地质*, 47(2): 450–471.
- 李剑锋, 王可勇, 权鸿雁, 等. 2016. 大兴安岭南段红岭铅锌矿床岩浆演化序列与成矿动力学背景探讨[J]. *岩石学报*, 32(5): 1529–1542.
- 李猛兴. 2020. 大兴安岭南段满都地区早白垩世二长花岗岩地球化学特征及成因[J]. *地质通报*, 39(2/3): 224–233.
- 林强, 葛文春, 吴福元, 等. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学[J]. *岩石学报*, 20(3): 403–412.
- 刘芳, 王晰, 海连富, 等. 2021. 大兴安岭南段罕苏木地区二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其伸展构造作用[J]. *中国地质*, 48(5): 1609–1622.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. *地学前缘* (中国地质大学, 北京), 11 (1): 269–277.
- 刘俊来, 季雷, 倪金龙, 等. 2022. 早白垩世华北克拉通岩石圈减薄与破坏动力学: 兼论古太平洋型活动大陆边缘[J]. *地质学报*, 96(10): 3360–3380.
- 刘瑞麟, 武广, 李铁刚, 等. 2018. 大兴安岭南段维拉斯托锡金属矿床 LA-ICP-MS 锡石和锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地学前缘* (中国地质大学, 北京), 25 (5): 183–201.
- 刘伟, 潘小菲, 谢烈文, 等. 2007. 大兴安岭南段林西地区花岗岩类的源岩: 地壳生长的时代和方式[J]. *岩石学报*, 23(2): 441–460.
- 刘智, 吕新彪, 梅微. 2013. 内蒙古黄岗梁砂卡岩型铁锡矿床 S-Pb-O 同位素组成及对成矿物质来源的指示[J]. *矿物岩石*, 33(3): 30–37.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 21(1): 169–188.
- 毛骞. 2001. 内蒙古黄岗梁集区与锡矿化有关的花岗岩成因研究[D]. 中国科学院地质与地球物理研究所博士学位论文: 1–74.
- 梅微, 吕新彪, 王祥东, 等. 2020. 大兴安岭南段黄岗梁砂卡岩型铁锡多金属矿床蚀变矿化特征及其成因[J]. *地球科学*, 45(12): 4428–4445.
- 阮班晓, 吕新彪, 刘申志, 等. 2013. 内蒙古边家大院铅锌银矿床成因——来自锆石 U-Pb 年龄和多元同位素的制约[J]. *矿床地质*, 32(3): 501–514.
- 邵济安, 刘福田, 陈辉, 等. 2001. 大兴安岭-燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系[J]. *地质学报*, 75(1): 56–63.
- 史长义, 鄢明才, 迟清华. 2007. 中国不同构造单元花岗岩类元素丰度及特征[J]. *地质学报*, 81(1): 48–59.
- 苏荣昆, 薛怀民, 曹光跃. 2022. 大兴安岭南段黄岗梁火山—侵入隆起: 不同岩相之间的成因联系[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(4): 727–745.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 2004. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 34(2): 174–181.
- 王长明, 张寿庭, 邓军, 等. 2007. 内蒙古黄岗梁锡铁多金属矿床层状夕卡岩的喷流沉积成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(5): 409–417.
- 王迪, 赵国春, 苏尚国, 等. 2020. 大兴安岭南段晚中生代侵入岩时空分布及主脊与东坡岩体特征对比[J]. *现代地质*, 34(3): 466–482.
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 等. 2002. 内蒙黄岗梁砂卡岩型铁锡矿床稀土元素地球化学[J]. *岩石学报*, 18(4): 575–584.
- 王晰, 任锡钢, 汪岩, 等. 2018. 大兴安岭南段罕庙地区石英二长闪长岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. *地质通报*, 37(9): 1662–1670.
- 王喜龙, 刘家军, 翟德高, 等. 2014a. 内蒙古林西边家大院银多金属矿床同位素地球化学特征及成矿物质来源探讨[J]. *中国地质*, 41(4): 1288–1303.
- 王喜龙, 刘家军, 翟德高, 等. 2014b. 内蒙古边家大院矿区石英斑岩 U-Pb 年代学、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(5): 654–665.
- 魏巍, 陈建平, 黄行凯, 等. 2017. 大兴安岭中南段哈力黑坝岩体岩浆混合作用: 暗色包体岩相学、年代学和锆石 Hf 同位素启示[J]. *矿产勘查*, 8(6): 948–956.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1217–1238.
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. *岩石学报*, 15(2): 181–189.
- 吴冠斌. 2014. 大兴安岭中南段银成矿作用研究——以双尖子山银多金属矿床为例[D]. 中国科学院大学博士学位论文: 1–150.
- 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等. 2019. 兴安造山带的基底属性与构造演化过

- 程[J]. 地球科学, 44(5): 1620–1646.
- 徐卓彬, 邵拥军, 杨自安, 等. 2017. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床闪锌矿 LA-ICP-MS 微量元素组成及其指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 36(3): 360–370.
- 杨奇荻, 郭磊, 王涛, 等. 2014. 大兴安岭中南段甘珠尔庙地区晚中生代两期花岗岩的时代、成因、物源及其构造背景[J]. 岩石学报, 30(7): 1961–1981.
- 杨雅军, 杨晓平, 江斌, 等. 2022. 大兴安岭中生代火山岩地层时空分布与蒙古-鄂霍茨克洋、古太平洋板块俯冲作用响应[J]. 地学前缘, 29(2): 115–131.
- 要梅娟, 刘家军, 翟德高, 等. 2012. 大兴安岭南段多金属成矿带硫-铅同位素组成及其地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 42(2): 362–373.
- 要梅娟, 曹烨, 刘家军, 等. 2016. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其成因意义[J]. 矿产勘查, 7(3): 399–403.
- 尤诗祥, 陈可, 张毓策, 等. 2022. 内蒙古黄岗梁铁多金属矿床磁铁矿地球化学特征及其地质意义[J]. 矿产勘查, 13(4): 398–409.
- 翟德高, 刘家军, 李俊明, 等. 2016. 内蒙古维拉斯托斑岩型锡矿床成岩、成矿时代及其地质意义[J]. 矿床地质, 35(5): 1011–1022.
- 翟德高, 刘家军, 杨永强, 等. 2012. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床成岩、成矿时代与构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 513–523.
- 章培春, 彭勃, 赵金忠, 等. 2022. 大兴安岭南段小乌兰沟正长花岗岩成因: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素的制约[J]. 地球科学, 47(8): 2889–2901.
- 张天福, 郭硕, 辛后田, 等. 2019. 大兴安岭南段维拉斯托高分异花岗岩体的成因与演化及其对 Sn-(Li-Rb-Nb-Ta) 多金属成矿作用的制约[J]. 地球科学, 44(1): 248–267.
- 张雪冰, 包长甲, 吴世山. 2021. 大兴安岭南段道伦达坝铜钨多金属矿床年代学研究: 来自石英包裹体⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄的证据[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 38(1): 83–90.
- 赵辉, 李舫, 王涛, 等. 2015. 大兴安岭南段黄岗梁地区早白垩世岩浆作用的时代、成因及其构造意义[J]. 地质通报, 34(12): 2203–2218.
- 赵家齐, 周振华, 欧阳荷根, 等. 2022. 内蒙古双尖子山银铅锌(锡)矿床石英正长斑岩 U-Pb 年龄、地球化学及其地质意义[J]. 矿床地质, 41(2): 324–344.
- 周桐, 孙珍军, 于赫楠, 等. 2022. 内蒙古浩布高铅锌矿床小罕山岩体年代学、Hf 同位素及地球化学特征[J]. 现代地质, 36(1): 282–294.
- 周振华, 高旭, 欧阳荷根, 等. 2019. 锡钨锂矿化与外围脉状铅锌银铜矿化的内在成因关系和形成机制——以内蒙古维拉斯托锡钨锂多金属矿床为例[J]. 矿床地质, 38(5): 1004–1022.
- 周振华, 刘宏伟, 常帼雄, 等. 2011. 内蒙古黄岗锡铁矿床夕卡岩矿物学特征及其成矿指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(1): 97–112.
- 周振华, 吕林素, 冯佳睿, 等. 2010a. 内蒙古黄岗夕卡岩型锡铁矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 667–679.
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 等. 2010b. 内蒙古黄岗锡铁矿区早白垩世 A 型花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学制约[J]. 岩石学报, 26(12): 3521–3537.
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 等. 2010c. 大兴安岭南段黄岗花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 矿床地质, 29(增刊): 559–560.
- 周振华, 欧阳荷根, 武新丽, 等. 2014. 内蒙古道伦达坝铜钨多金属矿黑云母花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(1): 79–94.
- 祝新友, 张志辉, 付旭, 等. 2016. 内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿的地质地球化学特征[J]. 中国地质, 43(1): 188–208.