

doi: 10.12029/gc20170207

杨培奇, 刘敬党, 张艳飞, 梁帅, 赵越, 刘淑梅. 2017. 黑龙江佳木斯地块典型石墨矿床含矿岩石地球化学特征及成矿时代[J]. 中国地质, 44(2): 301-315.

Yang Peiqi, Liu Jingdang, Zhang Yanfei, Liang Shuai, Zhao Yue, Liu Shumei. 2017. Ore geochemical characteristics and metallogenic epoch of typical graphite deposits in Jiamusi Massif, Heilongjiang Province[J]. *Geology in China*, 44(2): 301-315(in Chinese with English abstract).

黑龙江佳木斯地块典型石墨矿床含矿岩石地球化学特征及成矿时代

杨培奇^{1,2} 刘敬党^{1,2} 张艳飞² 梁帅³ 赵越¹ 刘淑梅²

(1. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁省化工地质勘查院, 辽宁 锦州 121000;
3. 辽宁省地质矿产调查院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:佳木斯地块位于东北亚早前寒武纪陆块, 区内变质岩系发育, 是重要的晶质石墨富集地带。文章通过对佳木斯地块典型的萝北云山和鸡西柳毛石墨矿床含矿岩石进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定, 结果表明: 变质锆石和碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $(1855\pm 5)\sim(1979\pm 13)$ Ma 和 $(476\pm 9)\sim(575\pm 12)$ Ma。通过地球化学特征分析, 萝北云山石墨矿和鸡西柳毛石墨矿含矿岩石富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素和 Zr、Hf、Th、U、Nb、Ta 等高场强元素, 含矿岩石 Rb/Sr 平均值均高于陆壳值 0.24, 表明循环沉积作用较弱; Sr/Ba 比值较低, 表明岩浆来源于陆壳重熔, 显示以陆源物质为主; V/Cr 平均值为 4.58, $V/(Ni+V)$ 平均值为 0.90, 显示弱还原环境; 两处典型矿床轻稀土元素含量均高于重稀土元素, 萝北云山矿床负 Eu 异常明显, 显示陆棚浅海沉积特征, 鸡西柳毛矿床正 Ce 异常明显, 显示海源物质为主的浅海沉积特征。研究区混合花岗岩脉的稀土元素配分曲线具有正 Eu 异常, 显示出外来岩浆热液交代岩石特征。因此, 佳木斯地块典型石墨矿床含矿岩石在古元古代晚期经受区域性高温高压变质作用, 后经过早古生代强烈的泛亚构造作用, 在构造岩浆侵入背景下进一步增生形成巨晶鳞片状石墨。

关键词:佳木斯地块; 石墨矿床; 麻山群; 地球化学; 年代学

中图分类号: P619.25²; P597+3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)02-0301-15

Ore geochemical characteristics and metallogenic epoch of typical graphite deposits in Jiamusi Massif, Heilongjiang Province

YANG Peiqi^{1,2}, LIU Jingdang^{1,2}, ZHANG Yanfei², LIANG Shuai³, ZHAO Yue¹, LIU Shumei²

(1. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. Chemical Geological Exploration Institute of Liaoning Province, Jinzhou 121000, Liaoning, China; 3. Geological Survey Institute of Liaoning Province, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: Jiamusi massif is located in the northeast Asia early Precambrian landmass, where metamorphic rocks well developed and constituted an important crystalline graphite enrichment zone. The SHRIMP U-Pb dating results of ore rocks from typical Luobei

收稿日期: 2016-11-01; 改回日期: 2017-03-06

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160049-[2017]-14)资助。

作者简介: 杨培奇, 男, 1982年出生, 高级工程师, 地质工程专业, 博士, 主要从事矿床学方面研究; E-mail: yangpeiqi19821013@163.com。

Yunshan and Jixi Liumao graphite deposits in Jiamusi massif show that $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age is $(1855\pm 5)-(1979\pm 13)\text{Ma}$ and $(476\pm 9)-(575\pm 12)\text{Ma}$ respectively for metamorphic recrystallization zircon and authigenic zircon. The geochemical characteristic analysis indicates that the ore rock is enriched in large ion lithophile elements such as Rb, Ba and high field strength elements such as Zr, Hf, Th, U, Nb and Ta, and Rb/Sr ratio of ore rock is higher than continental crust Value 0.24, suggesting weak cyclic sedimentation; Sr/Ba ratio is lower, implying that magma was derived from the continental crust remelting; terrigenous material is dominant; the average V/Cr ratio is 4.58, average V/(Ni+V) ratio is 0.90, suggesting a weak reduction environment; the light rare earth element values are higher than those of heavy rare earth elements in the two typical deposits; negative europium anomalies are obvious for Luobei Yunshan mineral deposit, implying shelf shallow sea sedimentary characteristics; cerium is abnormal in Jixi Liumao deposit, indicating that the source material was dominated by shallow sea sedimentary materials. Mixed granite dike of rare earth elements in the study area exhibits a positive europium anomaly distribution curve, suggesting the characteristics of foreign magmatic hydrothermal metasomatic rock. Ore rocks of typical graphite deposit in Jiamusi massif were subjected to regional metamorphism of high temperature and high pressure in Paleoproterozoic period, and later experienced the pan-Asian structural activity under the background of tectonic magmatic intrusion in early Paleozoic period, which caused further proliferation and formation of giant crystal flaky graphite.

Key words: Jiamusi massif; graphite deposit; Mashan Group; geochemistry; chronology

About the first author: YANG Peiqi, male, born in 1982, senior engineer, mainly engages in the study of mineral deposit geology; E-mail: yangpeiqi19821013@163.com.

1 引 言

黑龙江省在大地构造位置上位于西伯利亚板块、华北板块和古太平洋板块三者叠覆的中间地带,即传统的天山—兴安造山系东段,区域地质构造背景十分复杂(王长水等,2006)。黑龙江石墨矿床普遍产在变质岩中,即早前寒武纪黑龙江群、麻山群、东风山群三套地层而且以黑龙江群、麻山群为主(姜继圣等,1992)。佳木斯地块是该区最重要的早前寒武纪晶质石墨矿富集地带,位于天山—兴安加里东弧形造山带东界(徐衍强等,2001)。佳木斯石墨成矿带分为三个区段,从北部的萝北—嘉荫成矿区段,中部的华南—双鸭山成矿区段,到南部的鸡西—勃利区段,含矿孔兹岩集中分布,形成一系列大中型石墨矿床(孙向东,1994;张本臣,2005;赵然等,2013)。佳木斯地块内发育两套变质岩系:下部黑龙江群和上部麻山群,其中主要赋矿地层为麻山群(任留东等,2010)。区内典型石墨矿床主要有鸡西市柳毛石墨矿、萝北云山石墨矿、佛岭石墨矿和马来山石墨矿。

本文通过地球化学和年代学分析的方法对鸡西柳毛石墨矿和萝北云山石墨矿进行了分析研究,通过对比不仅可以提高对该区石墨矿床成矿条件的认识,而且对该地区进一步找矿提供参考。

2 区域成矿地质背景

佳木斯地块向北联合俄罗斯布列亚地块构成了东北亚一巨大的前寒武纪陆块,早寒武世末与西伯利亚古陆对接拼合,作为古西伯利亚板块的一部分,在古生代向其东、西、南三个方向增生演化。佳木斯地块向北延伸到布列亚地块,向南东以敦化—密山断裂与兴凯地块相邻,更远延伸到俄罗斯境内(曹熹等,1992;Wilde et al.,1997;葛肖虹等,2014)。佳木斯地块周围东部为那丹哈达地体的增生混染岩,西以牡丹江断裂带与松辽地块相邻。

佳木斯地块内发育两套变质岩系:黑龙江群和上部麻山群,其中下部黑龙江群主要由绿片岩和钠长绢云片岩等组成,是以绿色糜棱片岩为主的构造岩;上部麻山群,由含石墨矽线石、石榴石等矿物的片麻岩和变粒岩及大理岩等组成,是经历了角闪岩相—麻粒岩相变质岩系,混合岩化作用非常强烈,形成有各种混合片麻岩甚至混合花岗岩,麻山群孔兹岩系也是石墨主要富集层位。其分布见图1。

麻山群主要岩性为石墨片岩、大理岩、石墨透辉大理岩、含橄榄大理岩、辉石变粒岩、斜长透辉变粒岩、角闪透辉斜长变粒岩、黑云斜长片麻岩、含紫苏辉石麻粒岩等,变质相达到高角闪岩相—麻粒岩相,并经历了混合岩化作用,形成混合片麻岩及混

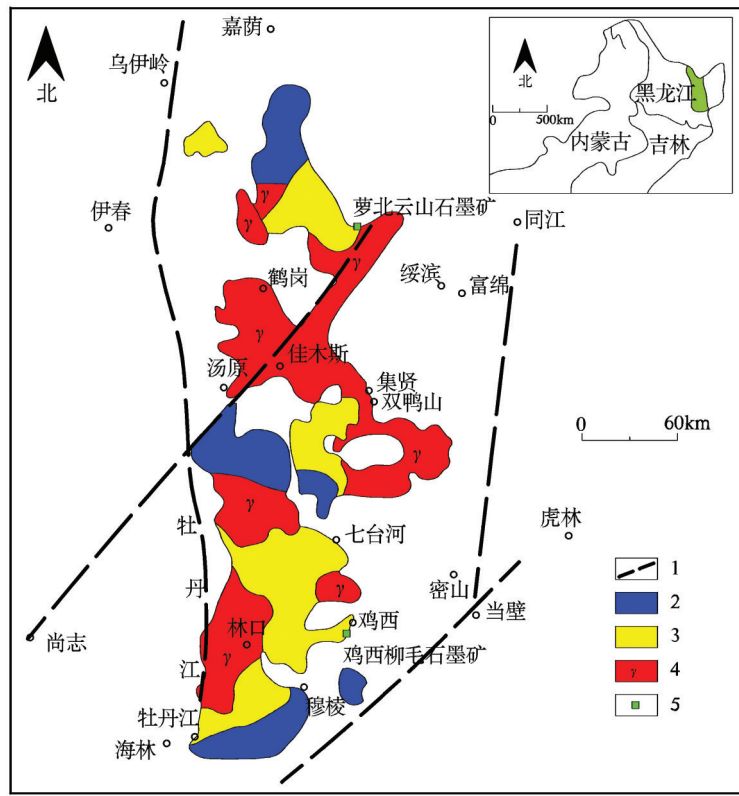


图1 佳木斯地块麻山群孔兹岩系分布图
1—区域性大断裂;2—黑龙江杂岩绿片岩相糜棱岩;3—麻山杂岩麻粒岩相变质岩;4—混合花岗岩;5—样品采集地

Fig. 1 Mashan Group exhibited rocks distribution in Jiamusi massif

1—Regional major fault; 2—Greenschist facies mylonite in Heilongjiang complex; 3—Granulite facies metamorphic rocks in Mashan complex; 4—Migmatitic granite; 5—Sampling position

合花岗岩。岩石中副矿物以锆石、石榴石、钛铁矿较多。含矿岩系内混合岩发育,有混合片麻岩、条带状混合岩、混合花岗岩及一系列长英质岩脉和石英脉等。

该区孔兹岩系岩石片麻理的区域性走向为NEE向到近EW向,且与岩层展布方向基本一致。但剖面及露头中各种尺度的褶皱十分发育,且有明显叠加现象,在镜下片麻岩中也常发现两期片理的穿切关系,此外还发育不少规模不等的韧性变形带,区内孔兹岩系的构造演化过程可分为早期、峰期、峰期后和晚期4个热动力学阶段,相应形成4个时期的变形构造和变质矿物。

3 典型矿床成矿地质背景

3.1 萝北云山石墨矿地质概况

黑龙江萝北云山石墨矿床大地构造位置位于佳木斯地块北缘的四方山背斜的北东翼(黑龙江省地质矿产局,1989)。区内断裂褶皱构造发育,北东

和北西两组褶皱构造构成复式倒转向斜。矿区内主体地层麻山群柳毛组上段混合片麻岩构成云山复向斜核部,柳毛组中段结晶片岩、片麻岩、变粒岩和下段大理岩构成复向斜两翼,该复向斜由一系列复杂紧密倒转褶皱构成(李寒滨,2014)。区内断裂构造发育,有南北向、东西向、北东向和北西向不同性质的断裂构造。

矿区主要含矿地层为麻山群柳毛组,混合岩和混合花岗岩发育,构造复杂(房俊伟等,2009)。石墨矿化层分为上下两段,下段下盘围岩为黑云斜长片麻岩、混合片麻岩、石英片岩、斜长角闪岩、云母石英片岩,有混合花岗岩侵入。上段混合片麻岩夹黑云斜长片麻岩、黑云片岩、矽线片岩等,有混合花岗岩及伟晶岩脉贯入。石墨矿石类型有片岩型石墨矿石、黑云斜长变粒岩—片麻岩型石墨矿石、大理岩—透辉岩型石墨矿石三大类。主要呈现鳞片变晶结构,石墨鳞片及片状脉石矿物平行排列,形成片状或者片麻状构造,石墨在长英质脉石矿物晶间分

布,石墨鳞片长0.05~1.5 mm,大者达5 mm。矿石矿物主要是晶质鳞片状石墨,鳞片片径较大,一般在0.2~1.0 mm,但是片岩型矿石石墨鳞片稍小,片麻岩和混合岩型矿石石墨鳞片较大,构造挤压破碎处石墨被破碎成小的碎裂鳞片。石墨鳞片在粒状矿物之间分布,一般呈定向排列,排列方向与片麻理一致。石墨鳞片多为复合晶,不同期的鳞片聚合在一起形成大的鳞片,之间可以见到明显的聚合纹。

矿区柳毛组上段硅酸盐类变质岩混合岩化强,形成大量混合岩和混合花岗岩。混合岩化限于一定的层位和岩性层,混合岩化方向与区域变质方向一致,由北西向南东逐渐增强。黑云混合花岗岩是混合岩化的中心,位于背斜轴部。断裂发育处的混合花岗岩浆交代作用强,斜长石被绢云母、白云母和石英交代,或者分解为绢云母、石英,弱蚀变处保持变余长石外形,蚀变强处形成白云母集合其他矿物团块。

3.2 鸡西柳毛石墨矿地质概况

鸡西柳毛石墨矿位于佳木斯地块南段鸡西—勃利成矿区,矿区构造上显示为郎家沟背斜构造,背斜核部为余庆岩组(含磷岩系),两翼为西麻山岩组含石墨岩系(袁犁等,1993)。

含矿地层古元古界麻山群分为西麻山岩组和余庆岩组(苗富林,2006)。余庆岩组是一套含磷岩系,主要由矽线黑云片岩、石榴矽线黑云石英片岩、含石墨磷灰金云透辉大理岩、磷灰透辉石岩、黑云变粒岩、透辉石岩、含石墨透辉石英岩、金云磷灰石墨片麻岩等组成,普遍发育条带状、条痕状、眼球状混合岩和均质混合岩(李春文,2003;李光辉等,2008)。西麻山岩组是一套夹碳酸盐的片岩—片麻岩组合,包括矽线片岩类、云母片岩类、石英片岩类、石墨片岩类、长英片麻岩类、堇青片麻岩类、钙质片麻岩类、钙硅酸盐岩类、大理岩类、变粒岩类和麻粒岩类等,其内广泛发育含榴斑状混合岩和榴斑条带状、条痕状混合岩。该岩组是石墨矿主要富集层位,特别是下部层位(曹圣恩等,1993)。

石墨矿石以石榴透辉石墨片岩、矽线石墨片岩、堇青矽线石墨片岩、石榴石墨片岩、石榴石墨钾长片岩等为主。岩石具有鳞片变晶结构,片状构造。矿石矿物主要是晶质鳞片状石墨,鳞片片径较大,一般在0.3~1.0 mm,片岩型矿石石墨鳞片稍小,黑云斜长片麻岩和变粒岩型矿石石墨鳞片较大,构

造挤压破碎处石墨被破碎成小的碎裂鳞片。

麻山群变质岩系主要由基性岩系列、富铝系列、长英质系列和碳酸盐岩系列岩石组成,最高变质相达到麻粒岩相,高温高压变质导致岩石的部分熔融释放出硅酸溶液交代围岩形成各种蚀变岩石(姜继圣,1992)。矿区内硅铝质片麻岩类岩石混合岩化、硅化、钾化强,而碳酸盐岩的透辉石化、金云母化、硅灰石化、透闪石化普遍,都是释放CO₂的反应。

4 含矿岩石地球化学

4.1 样品采集分析

矿石样品采自萝北云山石墨矿床和鸡西柳毛石墨矿床。该实验分析在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究中心实验室完成,岩石主量元素数据是通过X-射线荧光光谱法、容量法和重量法来测定;微量元素和稀土元素采用等离子体质谱法来测定。

萝北云山矿床采集矿石样品主要为黑云斜长变粒岩,少量透辉透闪变粒岩及混合花岗岩,夹石岩性包括混合花岗岩,呈层状,与矿层产状基本一致;鸡西柳毛石墨矿床采集矿石样品为透辉透闪变粒岩,脉石样品为蛇纹石化大理岩及混合花岗岩脉样品(表1)。

4.2 主量元素分析

萝北云山石墨矿床黑云斜长变粒岩矿石化学组成比较均一, SiO₂含量44.22%~60.92%,平均51.13%; Al₂O₃含量7.84%~13.82%,平均9.54%; 镁钙含量较低,黑云斜长变粒岩MgO/CaO均大于1,个别样品CaO达到10.68%, MgO/CaO较小,属于钙质泥灰岩变质形成的透辉透闪变粒岩; K₂O显著高于Na₂O, K₂O/Na₂O平均50.79; A/CNK在CaO高的样品中明显小于1,其他样品均略大于1,表明除含碳酸盐岩石,其他岩石都是铝略过饱和, Al₂O₃主要构成硅酸盐矿物(表2)。夹石有蛇纹石化大理岩及岩浆岩, LB-04花岗岩类岩石显示花岗岩的岩石化学特征,其他角闪变粒岩及大理岩均显示副变质岩特征, K₂O显著高于Na₂O, K₂O/Na₂O在12.84以上; CaO高的样品中A/CNK都小于1(表2),显示CaO主要形成碳酸盐矿物。

鸡西柳毛石墨矿床透辉透闪变粒岩,矿石化学组成也比较均一,但是SiO₂含量低于萝北云山矿

表1 含矿岩石样品特征
Table 1 Ore-bearing rock sample registration table

样号	岩性	主要矿物组成	组构
萝北云山石墨矿床	LB-01 黑云斜长变粒岩石墨矿石	斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 3~4 mm, 粒状变结构, 斜长石略有定向
	LB-02 黑云斜长片麻岩石墨矿石	斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 1~2 mm, 粒状变结构, 片麻状构造
	LB-22 黑云斜长变粒岩石墨矿石	斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 1~2 mm, 粒状变晶结构, 略具定向排列
	LB-25 透辉透闪变粒岩石墨矿石	透闪石、透辉石、斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 1~2 mm, 粒状变晶结构, 略具定向排列
	LB-26 黑云斜长变粒岩石墨矿石	斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 0.5~1.5 mm, 粒状变晶结构, 略具定向排列
	LB-27 黑云斜长变粒岩石墨矿石	斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 2~3 mm, 石英长石 0.2~0.5 mm, 略具定向排列
	LB-33 透辉透闪变粒岩石墨矿石	透闪石、透辉石、斜长石、石英、角闪石、方解石、石墨	石墨鳞片 0.5~1 mm, 矿物定向排列
云山石墨矿床	LB-03 透辉透闪变粒岩	透闪石、透辉石、斜长石、石英、黑云母、角闪石	细粒花岗变晶结构, 粒度 0.1~0.2 mm, 略具有定向排列
	LB-09 黑云斜长角闪变粒岩	斜长石、白云母、石英	块状构造, 粗粒花岗结构, 粒度 0.3~0.4 mm
	LB-15 透辉透闪变粒岩	透闪石、透辉石、斜长石、黑云母、石英	块状构造, 细粒花岗结构, 粒度 0.1~0.2 mm
夹石	LB-21 蛇纹石化大理岩	白云石、蛇纹石、白云母	粒状变晶结构, 白云石颗粒 0.5~1 mm, 蛇纹石团块状交代白云石
	LB-04 粗粒混合花岗岩	石英、斜长石、黑云母	块状构造, 发育石英脉, 粒度 0.3~0.4 mm
柳毛石墨矿床	JX-09 透辉透闪变粒岩石墨矿石	透闪石、透辉石、斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 0.5~1.5 mm, 粒状变晶结构, 略具定向排列
	JX-13 黑云斜长变粒岩石墨矿石	斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 0.5~1.5 mm, 细粒变晶结构
	JX-17 透辉透闪变粒岩石墨矿石	透闪石、透辉石、斜长石、石英、黑云母、白云母、鳞片石墨	石墨鳞片 1.5~3 mm, 细粒变晶结构
	JX-28 透辉透闪变粒岩石墨矿石	透闪石、透辉石、斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 0.5~1.5 mm, 细粒变晶结构
	JX-29 透辉透闪变粒岩石墨矿石	透闪石、透辉石、斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 0.5~1.5 mm, 细粒变晶结构
	JX-30 透辉透闪变粒岩石墨矿石	透闪石、透辉石、斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 1~2.0 mm, 细粒变晶结构
	透辉透闪变粒岩石墨矿石	透闪石、透辉石、斜长石、石英、黑云母、鳞片石墨	石墨鳞片 0.1~0.5 mm, 细粒变晶结构
柳毛夹石	JX-10 透辉石化大理岩	白云石、透辉石	块状构造、粗晶交代残余结构
	粗晶花岗岩	斜长石、石英、云母	块状构造, 晶体 1.5~2 mm
	JX-22 钾长花岗岩	钾长石、石英	粗粒花岗结构, 粒度 0.5~1 mm

床,为 36.81%~51.48%,平均 45.00%; Al_2O_3 含量也较低,为 6.86%~10.31%,平均 8.08%;镁钙含量较高,尤其是 CaO 为 5.03%~16.08%,平均 12.10%,并且 MgO/CaO 较低,平均 0.13; K_2O 显著高于 Na_2O , K_2O/Na_2O 平均 95.64;A/CNK 均明显小于 1,表明原岩属于泥灰岩类岩石。夹石有蛇纹石化大理岩,特征与矿石特征一致,JX-22 花岗岩类岩石显示花岗岩的

岩石化学特征。

4.3 微量元素分析

由萝北云山和鸡西柳毛石墨矿含矿岩石微量元素分析数据,进行原始地幔标准化如图 2 和图 3,原始地幔标准化蛛网图整体略向右倾。

萝北云山石墨矿含矿岩石富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素,Zr、Hf、Th、U、Nb 等高场强元素也高于

表2 萝北云山石墨矿和鸡西柳毛石墨岩石化学分析结果
Table 2 Petrochemical analyses of Luobei Yunshan graphite deposit and Jixi Liumao graphite deposit

组分	萝北云山										鸡西柳毛																		
	石墨矿石					围岩					石墨矿石					围岩													
	LB01	LB02	LB22	LB25	LB26	LB27	LB33	平均	最高	最低	LB03	LB09	LB15	LB21	LB28	LB04	JX09	JX13	JX17	JX28	JX29	JX30	JX31	平均	最高	最低	JX12	JX10	JX22
SiO ₂	60.92	48.86	51.47	51.43	44.22	49.05	51.94	51.13	60.92	44.22	47.47	64.59	60.37	20.11	74.03	51.48	51.48	42.48	48.47	47.81	36.81	41.74	46.19	45	51.48	36.81	17.21	71.49	73.8
TiO ₂	0.80	0.64	0.7	0.48	0.85	0.82	0.51	0.69	0.85	0.48	0.84	0.65	0.49	0.14	0.05	0.50	0.50	0.60	0.50	0.42	0.51	0.49	0.41	0.49	0.6	0.41	0.06	0.26	0.01
Al ₂ O ₃	13.82	7.84	9.33	8.06	7.90	10.63	9.18	9.54	13.82	7.84	14.55	13.34	8.96	2.12	12.78	8.38	10.31	8.48	8.66	7.36	8.17	6.98	8.08	10.31	10.31	6.86	0.29	14.55	13.42
Fe ₂ O ₃	1.67	1.76	0.35	0.57	2.66	0.88	0.49	1.20	2.66	0.35	0.94	0.86	2.31	0.43	1.42	0.56	3.56	2.07	2.27	2.30	2.72	0.96	2.06	2.06	3.56	0.56	0.18	0.37	0.2
FeO	0.70	7.60	9.44	3.68	5.60	6.48	3.28	5.25	9.44	0.7	6.20	4.16	3.8	1.88	0.32	0.96	2.36	1.68	1.72	0.92	0.8	2.32	1.54	2.36	0.8	0.39	0.12	0.08	
MnO	0.01	0.12	0.07	0.04	0.07	0.06	0.08	0.07	0.12	0.01	0.11	0.04	0.16	0.14	0.03	0.08	0.03	0.04	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07	0.09	0.03	0.2	0.01	0.01
MgO	1.00	1.23	2.02	0.92	1.69	1.86	0.83	1.36	2.02	0.83	7.68	2.76	1.37	12.88	0.26	0.96	1.82	0.6	0.96	1.68	1.79	1.67	1.35	1.82	0.6	28.74	0.29	0.01	
CaO	0.17	1.49	1.13	8.33	1.16	0.61	10.68	3.37	10.68	0.17	8.66	2.71	10.93	33.51	4.14	12.48	5.03	9.48	11.82	16.08	16.05	13.76	12.1	16.08	5.03	24.86	1.36	1.6	
Na ₂ O	0.72	0.15	0.99	0.02	0.94	0.72	0.02	0.51	0.99	0.02	0.19	0.43	0.02	0.02	2.52	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	2.53	0.67
K ₂ O	6.15	4.24	4.48	3.58	3.44	6.86	2.44	4.46	6.86	2.44	7.44	5.52	1.31	1.21	1.18	0.94	7.1	0.75	2.6	0.11	0.25	1.64	1.91	7.1	0.11	0.01	6.73	9.12	
P ₂ O ₅	0.03	0.15	0.04	0.14	0.04	0.05	0.21	0.09	0.21	0.03	0.18	0.07	0.07	0.34	0.07	0.2	0.1	0.13	0.4	0.61	0.39	0.22	0.29	0.61	0.1	0.01	0.11	0.07	
Los	13.5	25.89	19.29	21.94	31.1	20.03	20.14	21.7	31.1	13.5	5.24	4.5	9.77	27.12	3.03	23.41	25.25	26.41	24.17	33.07	26.16	24.52	26.14	33.07	23.41	27.96	1.18	0.95	
Total	99.5	99.97	99.31	99.19	99.66	98.05	99.8	99.35	99.97	98.05	99.5	99.56	99.56	99.91	99.84	99.98	98.67	98.63	99.11	99.55	98.67	98.79	99.06	99.98	98.63	99.93	99	99.95	
Corr.	9.02	21.07	15.3	17.11	23.91	15.9	13.63	16.56	23.91	9.02	0.06	0.02	0.25	0.08	0.04	20.22	19.23	20.75	17.57	22.51	21.48	20.38	20.31	22.51	17.57	0.07	0.05	0.11	
Na ₂ O+K ₂ O	6.87	4.39	5.47	3.6	4.38	7.58	2.46	4.96	7.58	2.46	7.63	5.95	1.33	1.23	3.7	0.96	7.12	0.77	2.62	0.13	0.27	1.66	1.93	7.12	0.13	0.03	9.26	9.79	
K ₂ O/Na ₂ O	8.54	28.27	4.53	1.79	3.66	9.53	1.22	50.79	1.79	3.66	39.16	12.84	65.5	60.5	0.47	47	35.5	37.5	1.30	5.5	12.5	82	95.64	35.5	5.5	0.5	2.66	13.63	
A/CNK	1.69	1.04	1.09	0.42	1.07	1.09	0.41	0.97	1.69	0.41	0.6	1.15	0.42	0.03	0.99	0.35	0.61	0.47	0.28	0.25	0.28	0.26	0.36	0.61	0.25	0.01	1.04	0.96	
A/NK	1.76	1.62	1.44	2.06	1.5	1.23	3.42	1.86	3.42	1.23	1.74	1.99	6.16	1.58	2.36	7.96	1.33	10.01	2.4	48.34	26.86	3.85	14.39	48.34	1.33	6.86	1.27	1.22	
MgO/CaO	5.88	0.83	1.79	0.11	1.46	3.05	0.08	1.88	5.88	0.08	0.89	1.02	0.13	0.38	0.06	0.08	0.36	0.06	0.08	0.10	0.11	0.12	0.13	0.36	0.06	1.16	0.21	0.01	
Rb	228.3	160	248.7	150.2	202.7	310.6	109.2	201.39	310.6	109.2	314.1	222.2	49	42.3	53.8	52.8	318	27.3	122.8	7.6	19.2	78.1	90.28	318	7.6	1.6	263.4	256.1	
Sr	46.7	49.5	81.4	126.3	71	88.3	119.8	83.29	126.3	46.7	167.1	139.1	217.9	230.9	170.1	115.1	171.4	35.9	168.7	55	103.9	253.2	151.02	253.2	35.9	120.3	136.8	114.2	
Ba	1545.4	645.3	716.3	990.4	788.2	1043.2	408.9	876.81	1545.4	408.9	761.2	946.5	374.2	235.8	125.1	551.8	2102.2	308.7	548.6	54.6	117.3	128.1	499.35	2102.2	54.6	55.6	216.4	307.8	
Zr	199.9	116.9	165.8	114.6	186.1	195.4	98.3	153.86	199.9	98.3	153.1	160.1	111.3	20.3	21.8	111.1	141.3	81.5	93	126.3	119.9	69.3	95.99	160.1	20.3	10.3	96.2	24.8	
Hf	5.31	3.16	4.47	3.3	4.9	5.17	3.07	4.2	5.31	3.07	6.25	5.69	4.01	0.68	0.8	3.21	3.88	2.67	2.53	3.42	3.32	2.08	2.94	5.69	0.68	0.22	3.16	0.83	
Th	7.6	12.38	10.41	6.72	10.57	8.94	11.4	9.72	12.38	6.72	13.89	11.76	10.06	1.86	3.14	9.27	7.57	9.03	7.75	10.34	7.62	4.5	7.54	11.76	1.86	1.09	87	0.63	
U	5.94	20.03	7.06	34.21	9.11	6.31	41.57	17.75	41.57	5.94	5.76	4.25	3.35	0.56	2.82	22.01	34.95	55.35	53.43	71.56	66.86	35.68	31.89	71.56	0.56	1.14	20.25	2.74	
Y	41.55	54.26	38.67	43.44	26.93	25.74	49.78	40.05	54.26	25.74	21.58	40.84	68	18.31	12.2	31.52	45.24	32.8	55.14	69.35	60.36	31.32	42.28	69.35	12.2	8.42	18.35	6.13	
Nb	6.87	5.8	4.21	7.76	3.74	4.68	10.91	6.28	10.91	3.74	8.97	15.52	11.87	3.28	0.99	10.71	6.75	10.38	9.18	11.87	11.22	8.81	9.14	15.52	0.99	0.37	19.12	0.8	
Ta	0.58	0.37	0.32	0.45	0.27	0.26	0.89	0.45	0.89	0.26	0.66	1.16	0.95	0.34	0.13	0.85	0.49	0.77	0.69	0.88	0.89	0.73	0.71	1.16	0.13	0.05	1.79	0.14	
Cr	154.1	199	199.5	95.2	286.2	223.7	157	187.81	286.2	95.2	439.1	63.3	56.2	15.3	10.4	136.8	291.8	279.4	206.7	235.2	249.6	165.4	155.46	291.8	10.4	7	9.9	6.3	
Ni	47.28	246.2	75.38	52.55	52.66	44.84	125.7	92.09	246.2	44.84	113.2	115.3	154.2	8.62	16.26	9.73	58.01	209.7	97.09	86.97	87.88	75.48	83.57	209.7	8.62	2.82	8.1	2.96	

续表2

组分	萝北云山										鸡西柳毛																	
	石墨矿石					围岩					石墨矿石					围岩												
	LB01	LB02	LB22	LB25	LB26	LB27	LB33	平均	最高	最低	LB03	LB09	LB15	LB21	LB04	JX09	JX13	JX17	JX28	JX29	JX30	JX31	平均	最高	最低	JX12	JX10	JX22
V	870.8	1629.1	814.3	346	1097.5	767.3	510	862.14	1629.1	346	162.7	125.8	218.7	16.8	11.1	655.2	1301.6	1781.2	1299.1	1649.3	1746.7	937	885.68	1781.2	11.1	25.4	33.2	21.9
F	462.74	819.23	1929.78	482.01	1573.66	1707.45	695.87	1095.82	1929.78	462.74	5806.65	1707.45	320.52	1929.78	181.05	591.08	320.52	283.6	668.05	1135.42	853.34	544.77	775.96	1929.78	181.05	204.62	295.41	190.48
Cl	78.5	124.5	121.2	87.6	120.4	105.6	67.1	100.7	124.5	67.1	118.8	84.4	43.9	195.6	64.5	77	88.9	84	77.8	97.8	95.7	150.2	96.35	195.6	43.9	132.8	44.7	55.5
Rb/Sr	4.89	3.23	3.06	1.19	2.85	3.52	0.91	2.81	4.89	0.91	1.88	1.6	0.22	0.18	0.32	0.46	1.86	0.76	0.73	0.14	0.18	0.31	0.61	1.86	0.14	0.01	1.93	2.24
Sr/Ba	0.03	0.08	0.11	0.13	0.09	0.08	0.29	0.12	0.29	0.03	0.22	0.15	0.58	0.98	1.36	0.21	0.08	0.12	0.31	1.01	0.89	1.98	0.7	1.98	0.08	2.16	0.63	0.37
Th/U	1.28	0.62	1.48	0.2	1.16	1.42	0.27	0.92	1.48	0.2	2.41	2.76	3.01	3.36	1.12	0.42	0.22	0.16	0.15	0.14	0.11	0.13	1.05	3.36	0.11	0.95	4.3	0.23
V/Cr	5.65	8.19	4.08	3.63	3.83	3.43	3.25	4.58	8.19	3.25	0.37	1.99	3.89	1.1	1.07	4.79	4.46	6.38	6.28	7.01	7	5.67	4.51	7.01	1.07	3.63	3.35	3.48
V/(Ni+V)	0.95	0.87	0.92	0.87	0.95	0.94	0.80	0.90	0.95	0.80	0.59	0.52	0.59	0.66	0.41	0.99	0.96	0.89	0.93	0.95	0.95	0.93	0.94	0.99	0.89	0.90	0.80	0.88
Zr/Y	4.81	2.15	4.29	2.64	6.91	7.59	1.97	4.34	7.59	1.97	7.1	3.92	1.64	1.11	1.79	3.52	3.12	2.49	1.69	1.82	1.99	2.21	2.3	3.92	1.11	1.22	5.24	4.05
Nb/Ta	11.86	15.72	13	17.44	13.75	18.01	12.24	14.57	18.01	11.86	13.51	13.43	12.46	9.76	7.74	12.66	13.69	13.53	13.28	13.5	12.64	12.15	12.26	13.69	7.74	6.85	10.7	5.74
F/Cl	5.89	6.58	15.92	5.5	13.07	16.17	10.37	10.5	16.17	5.5	48.88	20.23	7.3	9.87	2.81	7.68	3.61	3.38	8.59	11.61	8.92	3.63	7.96	20.23	2.81	1.54	6.61	1.63
La	19.89	56.46	41.34	33.09	49.69	41.61	36.28	39.77	56.46	19.89	34.8	42.14	42.67	12.31	9.48	14.39	26.83	30.47	31.22	38.37	27.88	15.54	26.39	38.37	14.39	6.42	139.15	7.35
Ce	50.63	114.12	97.36	71.76	119.17	100.62	64.65	88.33	119.17	50.63	70.76	92.72	82.55	23.62	15.39	33.38	118.45	60.74	78.22	89.86	66.34	37.38	69.2	118.45	33.38	12.39	279.85	11.21
Pr	7.06	15.58	10.90	8.89	12.89	11.41	8.43	10.74	15.58	7.06	8.54	12.11	11.13	3.00	1.92	4.43	11.72	7.99	8.49	10.40	7.67	4.65	7.91	11.72	4.43	1.39	34.13	1.29
Nd	29.1	61.15	42.53	35.26	50.21	45.19	32.23	42.24	61.15	29.1	31.67	46.8	45.67	11.92	7.19	17.62	49.76	31.83	34.62	42.81	32.75	19.63	32.72	49.76	17.62	5.38	121.23	4.53
Sm	6.55	12.00	8.14	7.19	9.46	8.50	6.36	8.31	12	6.36	5.62	9.42	9.38	2.76	1.77	4.11	10.63	6.55	7.82	9.92	8.05	4.63	7.39	10.63	4.11	1.07	24.84	1.13
Eu	1.68	1.26	1.54	1.40	1.59	1.81	1.35	1.52	1.81	1.26	1.53	1.65	1.83	0.67	0.92	0.89	2.26	1.27	1.72	2.12	1.85	1.00	1.59	2.26	0.89	0.31	0.70	0.59
Gd	6.12	10.66	7.40	6.85	8.20	7.17	6.17	7.51	10.66	6.12	4.64	8.11	8.98	2.90	1.75	3.92	9.37	5.63	8.15	10.25	8.61	4.79	7.24	10.25	3.92	1.10	15.69	1.1
Tb	1.07	1.61	1.13	1.11	1.11	1.00	1.04	1.15	1.61	1.00	0.71	1.39	1.55	0.48	0.36	0.74	1.53	0.91	1.36	1.74	1.47	0.82	1.22	1.74	0.74	0.18	1.65	0.19
Dy	6.92	9.13	6.50	6.85	5.45	5.11	6.73	6.67	9.13	5.11	4.06	8.31	10.16	2.81	2.34	5.01	8.75	5.49	8.61	10.92	9.46	5.17	7.63	10.92	5.01	1.11	5.29	1.15
Ho	1.44	1.73	1.27	1.36	0.93	0.88	1.39	1.29	1.73	0.88	0.78	1.55	2.10	0.53	0.45	1.02	1.62	1.06	1.71	2.18	1.87	1.00	1.49	2.18	1.00	0.22	0.65	0.2
Er	4.64	4.85	3.72	4.00	2.46	2.38	4.2	3.75	4.85	2.38	2.28	4.52	6.41	1.56	1.32	3.2	4.61	3.14	5.01	6.26	5.55	2.93	4.39	6.26	2.93	0.65	1.68	0.59
Tm	0.77	0.68	0.55	0.63	0.32	0.32	0.67	0.56	0.77	0.32	0.35	0.72	1.03	0.24	0.21	0.55	0.73	0.49	0.77	0.98	0.88	0.47	0.69	0.98	0.47	0.10	0.19	0.09
Yb	5.03	4.02	3.41	3.94	1.95	1.98	4.19	3.5	5.03	1.95	2.27	4.54	6.45	1.49	1.22	3.46	4.49	3.16	4.69	5.88	5.36	2.89	4.28	5.88	2.89	0.59	1.19	0.48
Lu	0.89	0.66	0.56	0.66	0.33	0.34	0.72	0.59	0.89	0.33	0.37	0.76	1.1	0.26	0.18	0.6	0.77	0.52	0.8	1.01	0.92	0.47	0.73	1.01	0.47	0.11	0.19	0.08
REE	141.78	293.93	226.35	183.01	263.76	228.33	174.4	215.94	293.93	141.78	168.39	234.75	231.01	64.54	44.49	93.33	251.52	159.24	193.18	232.71	178.67	101.38	172.86	251.52	93.33	31.03	626.44	29.98
LRE/HRE	4.28	7.82	8.22	6.2	11.71	10.9	5.95	7.87	11.71	4.28	9.89	6.85	5.12	5.28	4.69	4.04	6.89	6.81	5.21	4.93	4.24	4.47	5.23	6.89	4.04	6.64	22.62	6.73
δCe	1.03	0.93	1.10	1.01	1.13	1.11	0.89	1.03	1.13	0.89	0.99	0.99	0.91	0.94	0.87	1.01	1.61	0.94	1.16	1.08	1.09	1.06	1.13	1.61	0.94	1.00	0.98	0.88

注:表中主量元素分析结果(%);微量元素分析结果(10⁻⁶)。

原始地幔值,而K元素明显亏损,反映出样品岩石为偏基性,Sr略显亏损,与斜长石风化作用有关,Sr在风化过程中丢失,造成亏损。而P的亏损,反映了沉积岩原岩的特征(图2)。含矿岩石Rb/Sr平均值为2.81,均高于陆壳平均值0.24(Taylor, 1986),表明循环沉积作用较弱;Sr/Ba比值较低,平均值为0.12,表明岩浆来源于陆壳重熔,显示以陆源物质为主;V/Cr平均值为4.58,V/(Ni+V)平均值为0.90,显示弱还原环境(表2)。

鸡西柳毛石墨矿含矿岩石原始地幔标准化蛛网图(图3)呈右倾趋势,富集大离子亲石元素Rb、Sr、Ba、K(只有围岩样品12显示K亏损),高场强元素Zr、Hf、Th、U、Nb、Ta等也高于原始地幔值,Sr元素也略显亏损,与斜长石风化作用有关,Sr在风化过程中丢失。Zr、Hf高场强元素含量相对较高,反映出高场强元素受重矿物控制。含矿岩石Rb/Sr平均值为0.61,高于陆壳平均值0.24(Taylor, 1986),反映为弱循环沉积作用;Sr/Ba比值较低,平均值为1.98,表明岩浆来源于陆壳重熔,显示以陆源物质为主;V/Cr平均值为4.51,V/(Ni+V)平均值为0.94,与萝北云山样品接近,显示弱还原环境(表2)。

4.4 稀土元素分析

萝北云山石墨矿含矿岩石稀土含量较高(表2),变化范围较广,从球粒陨石标准化的稀土配分曲线图(Boynton, 1984)中可以看出,大部分样品都表现出相似性(图4,图5),都向右倾斜,并且呈现了

几乎平行的特征,表明稀土含量的变化大致同步。 ΣREE 在 $44.5 \times 10^{-6} \sim 293.91 \times 10^{-6}$,平均值 187.89×10^{-6} ,略高于上地壳总量平均值;LREE平均值为 164.86×10^{-6} ,HREE平均值为 23.04×10^{-6} ,LREE/HREE平均值为7.24;反映出轻稀土元素富集,重稀土元素平坦的配分模式,轻、重稀土元素分异较强烈; δCe 平均值为0.98,曲线略显负铈异常; δEu 平均值为0.71,负铕异常明显。

曲线总体分为两段式,从Eu处明显分开。轻稀土较陡,呈右倾,重稀土段显示平缓,反映出分馏不明显或较弱。而轻重稀土之间显示分馏明显,具有Ce弱负异常、Eu负异常,代表了潮汐带的沉积环境。

鸡西柳毛石墨矿稀土配分曲线呈右倾(图6,图7),大部分样品显示稀土含量变化大致同步(除围岩JX10), ΣREE 在 $29.98 \times 10^{-6} \sim 526.43 \times 10^{-6}$,平均值 179.74×10^{-6} ,略高于上地壳总量平均值;LREE平均值为 156.92×10^{-6} ,HREE平均值为 22.82×10^{-6} ,LREE/HREE平均值为6.88;反映出轻稀土元素富集,重稀土元素平坦的配分模式,轻、重稀土元素分异较强烈; δCe 平均值为1.07,异常不明显; δEu 平均值为0.71,负铕异常明显。

该区稀土分布大致一致,曲线总体呈现不对称右倾趋势,说明原岩成分具有相似性。与其他稀土元素相比,沉积体系中 Eu^{2+} 更易被含水溶液带走。 Eu^{2+} 在长期的开放体系中不断减少,经过化学风化的作用, Eu 优先被迁移出来,留下的物质则贫

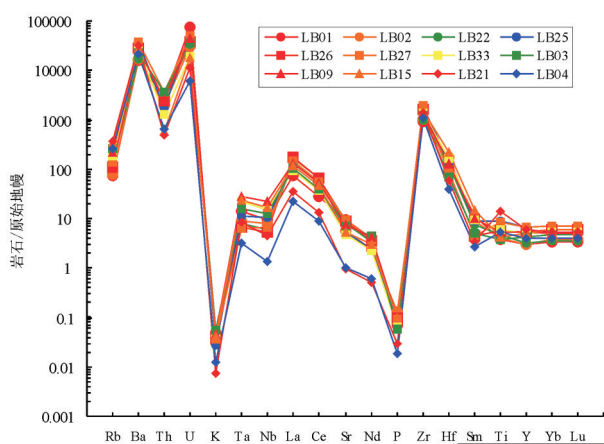


图2 萝北云山矿微量元素原始地幔标准化蛛网图
Fig.2 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram of the Luobei Yunshan graphite deposit

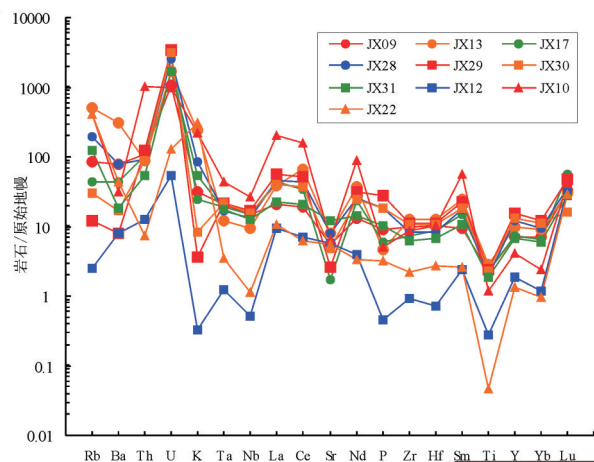


图3 鸡西柳毛矿微量元素原始地幔标准化蛛网图
Fig.3 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram of the Jixi Liumao graphite deposit

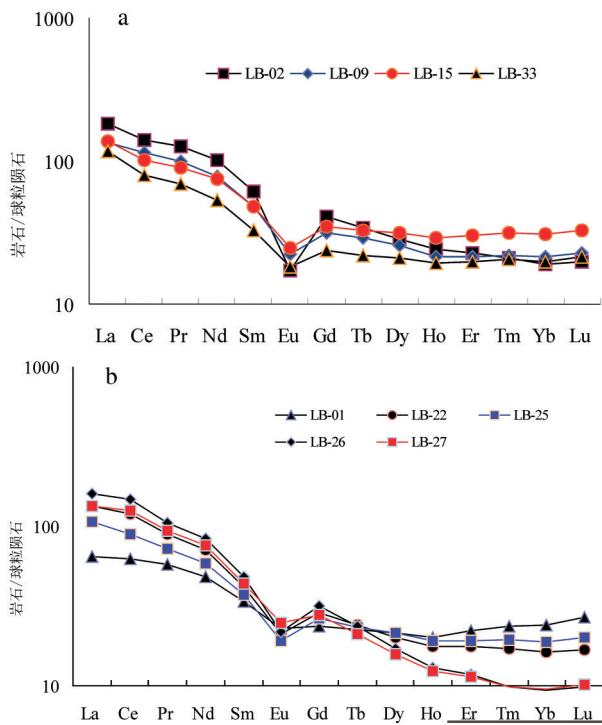


图4 萝北云山石墨矿床黑云斜长变粒岩矿石稀土元素配分曲线图

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of biotite plagioclase granulite in the Luobei Yunshan graphite deposit

Eu^{2+} 。在岩浆岩中, Eu^{3+} 还原成 Eu^{2+} 而进入早期分离结晶的斜长石中,造成Eu负异常。若原岩为岩浆岩,则推测为酸性岩;若原岩为沉积岩,则为浅海相沉积环境。

5 石墨矿石锆石测年

5.1 样品采集及分析

本次样品采自萝北云山石墨矿和鸡西柳毛石墨矿(图1),选取黑云斜长变粒岩型石墨矿石分选锆石进行SHIRIMP锆石U-Pb年龄分析。

锆石分选工作由中国地质科学院地球物理与地球化学勘查研究所中心实验室完成。对收集样品进行粉碎,破碎到80目左右,经人工淘选和电磁选法进行分离,将分选后的纯净锆石颗粒和标样同置于环氧树脂中制成靶,并打磨抛光使锆石中心部位暴露出来。对样品靶上的锆石进行透射光、反射光照相,选出晶体特征较好的锆石进行阴极发光(CL)研究(图8),用以查明锆石内部生长层的分布和结构(田京等,

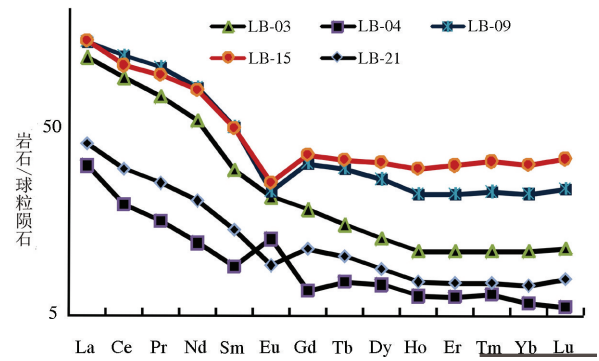


图5 萝北云山石墨矿床夹石稀土元素配分曲线图
Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of band in the Luobei Yunshan graphite deposit

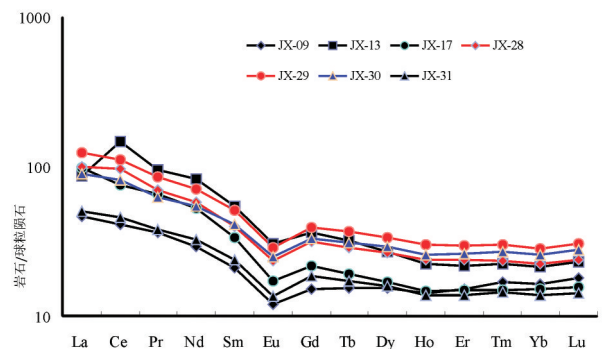


图6 鸡西柳毛石墨矿床黑云斜长变粒岩矿石稀土元素配分曲线图

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of biotite plagioclase granulite in the Jixi Liumao graphite deposit

2014)。SHRIMP 锆石U-Pb定年工作在中国地质科学院北京离子探针中心完成,分析所用仪器为高灵敏度高分辨率离子探针(SHRIMP II)详细的实验流程及原理参考Compston et al.(1992)和宋彪等(2002)文献。

5.2 分析结果

样品主要为含石墨黑云斜长变粒岩,粒状花岗变晶结构,主要矿物成分是斜长石、石英和黑云母,石墨含量10%以上。其中锆石具有两种形态,即碎屑锆石,在锆石晶体核部分布,围绕变质锆石外环形成的环带,遭受变质重结晶改造;变质锆石围绕碎屑锆石边缘形成平滑环带,但是较重结晶锆石透明度高。其中萝北石墨矿石(LB09)锆石全部为单一环带的变质锆石,外环具有较窄的透明度高的碎

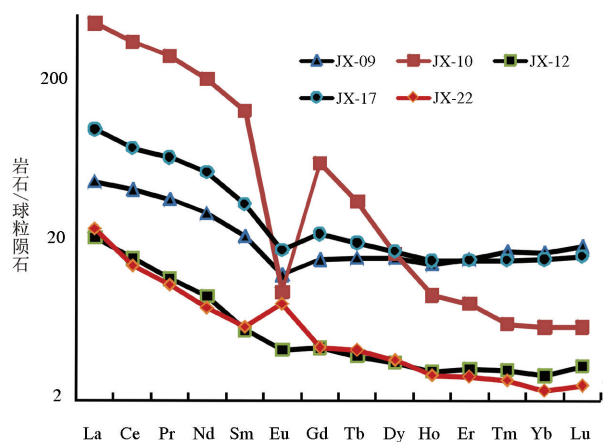


图7 鸡西柳毛石墨矿床脉石与石墨矿石稀土元素配分曲线比较图

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of veins and graphite ores in the Jixi Liuniao graphite deposit

屑锆石边,鸡西柳毛石墨矿(JX29)锆石具有明显的核幔结构。

SHIRIMP 锆石U-Pb年龄分析只有一颗碎屑锆石(JX29-13)显示 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(2543\pm 8)\text{Ma}$,其他大部分锆石为变质锆石和重结晶锆石, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $(1855\pm 5)\sim(1979\pm 13)\text{Ma}$ 和 $(476\pm 9)\sim(575\pm 12)\text{Ma}$ (表3、图9、图10)。

6 讨论

6.1 含矿岩石特征对比

比较两个矿区矿石化学组成,柳毛矿 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Na_2O 、 K_2O 都比较低,而 Fe_2O_3 、 CaO 、 P_2O_5 较高(图11);柳毛矿特征元素比值 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、 A/NK

高于云山矿, MgO/CaO 低于云山变粒岩, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 和 A/CNK 低于萝北云山矿。这些特征显示萝北云山矿沉积物陆源物质多于柳毛矿,而柳毛矿沉积物成熟度高于云山矿,沉积环境更稳定,根据 MgO/CaO 分析,柳毛原始泥灰岩沉积属于低盐度海洋环境,并且石墨有机碳品位高于萝北云山矿。

萝北云山石墨矿床黑云斜长变粒岩类矿石微量元素富集Rb、Ba、Zr、Y、V、F,Rb/Sr比值均大于1,Sr/Ba比值较低;变粒岩的V/Cr比值4.58,V/(V+Ni)比值0.90,均较高,显示原岩为缺氧环境沉积(表2)。角闪变粒岩及大理岩与变粒岩矿石不同,Sr含量相对增高,Rb/Sr比值有大于1和小于1两种,而Sr/Ba比值增高;LB-04花岗岩类岩石Rb/Sr比值为0.32,Sr/Ba比值1.36,V/Cr、Th/U等均小于变粒岩矿石和角闪岩变粒岩夹石,显示I型岩浆岩特征,是异地侵位岩脉。

鸡西柳毛石墨矿床透辉透闪变粒岩矿石微量元素富集特征与云山矿床基本一致,但是含量相对降低,Rb/Sr比值降低,Sr/Ba比值升高,V/Cr比值4.51,V/(V+Ni)比值0.94,也较高(表2)。蛇纹石化大理岩与黑云斜长变粒岩矿石基本一致,两个花岗岩类岩石显示Rb/Sr高,Sr/Ba比值低,为S花岗岩特征,属于原地重熔花岗岩特征。

比较两个矿区矿石微量元素含量,柳毛矿Sr、U、Nb、Ta、Co、V含量较云山矿明显增高,其他元素含量降低;特征元素比值Sr/Ba、Th/U显著增高,而Rb/Sr、Zr/Y、Nb/Ta、F/Cl降低,V/Cr、V/(V+Ni)基本一致,这些特征进一步显示柳毛矿陆源沉积物质少于云山矿,沉积环境更稳定,原始沉积是缺氧环境(图12)。

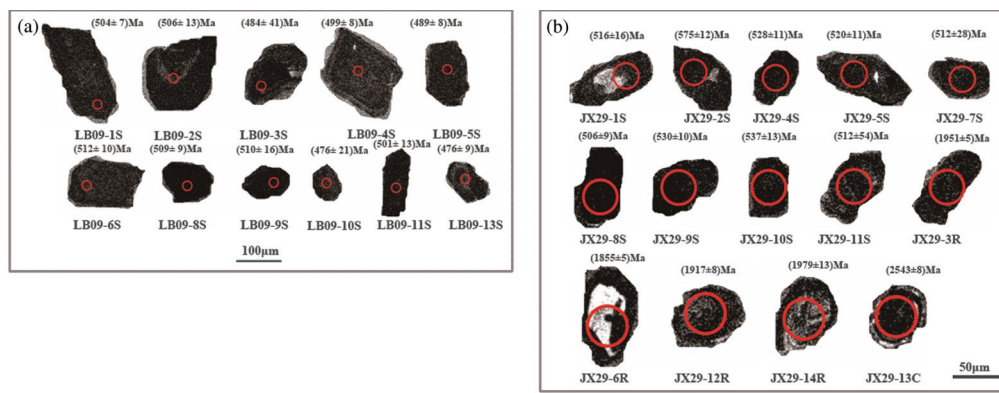


图8 萝北云山和鸡西柳毛石墨矿锆石样品阴极发光图

Fig.8 Cathodoluminescence images of zircon samples in Luobei Yunshan and Jixi Liuniao graphite deposits

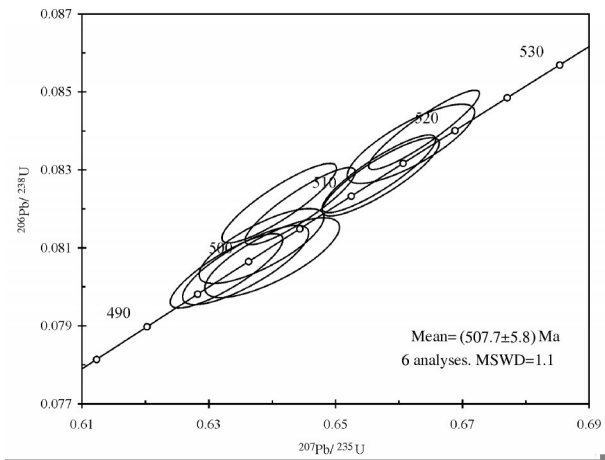


图9 佳木斯地块萝北石墨矿石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谱和曲线图

Fig.9 Zircon SHRIMP U - Pb age concordia diagram of Luobei Yunshan graphite deposit in Jiamusi massif

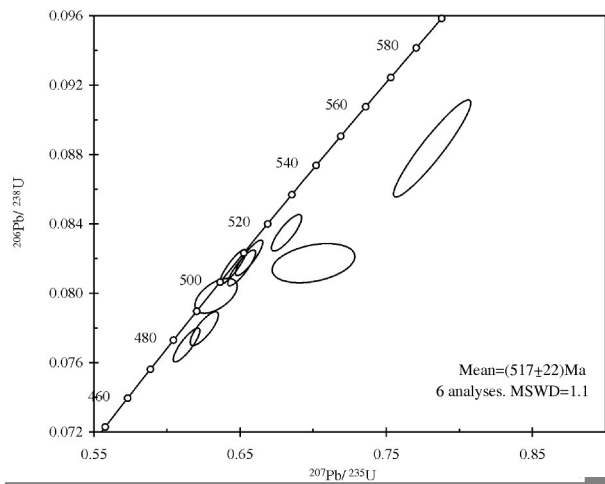


图10 佳木斯地块鸡西石墨矿石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谱和曲线图

Fig.10 Zircon SHRIMP U - Pb age concordia diagram of Jixi Liumao graphite deposit in Jiamusi massif

稀土元素总量比较,云山矿高于柳毛矿,表明稀土元素主要与黏土矿物吸附有关,两个矿床都显示轻稀土元素含量高于重稀土元素, LREE/HREE 平均都大于5(表2)。

萝北云山矿黑云斜长变粒岩稀土元素配分曲线具有两种类型,第一种类型略具有负铈异常,斜率大的曲线负铈异常明显,显示原始沉积海源物质

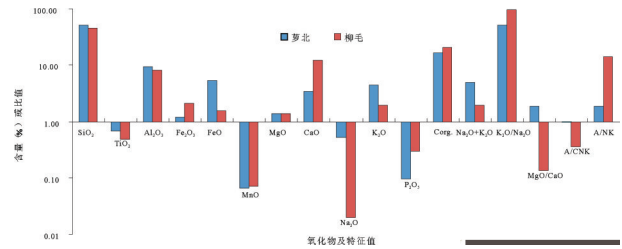


图11 柳毛矿与萝北云山矿含矿岩石化学组成及特征氧化物比值比较图

Fig.11 Comparison of petrochemical composition and characteristic oxide ratios between Jixi Liumao and Luobei Yunshan graphite deposits

为主的潮坪环境沉积特征;第二种类型,不具有铈异常,斜率小的曲线负铈异常明显,显示陆源碎屑物质来源和陆棚浅海沉积特征。

斜长角闪变粒岩、蚀变大理岩(LB-21)与混合花岗岩(LB-04)三种夹石类型稀土元素配分曲线具有明显差异。蚀变大理岩稀土元素总量较低,蚀变大理岩和角闪变粒岩的稀土元素配分曲线与黑云斜长变粒岩矿石稀土元素配分曲线基本类似,略具有负铈异常,斜率小的曲线负铈异常明显,显示陆源物质为主潮坪环境沉积特征。混合花岗岩脉的稀土元素配分曲线具有正铈异常,应该是外来岩浆热液交代岩石特征。

柳毛矿稀土元素配分曲线与云山矿有一定差异,略具有正铈异常,斜率大的曲线负铈异常略明显,这是海源物质为主的浅海沉积特征;夹石蚀变大理岩稀土元素含量低,具有弱负铈异常,特征与石墨矿石类似;而粗粒钾长花岗岩脉的稀土元素总量差异明显,配分曲线一条具有显著的负铈异常,一条具有显著的正铈异常,这可能是不同源区花岗岩来源特征。

6.2 成岩时代

20世纪80年代在黑龙江群中发现了低温高压变质的蓝闪石片岩,麻山群则为低压角闪岩相至麻粒岩相,因此认为两者构成古生代的双变质带(莫如爵等,1989)。最早认为佳木斯地块麻山群是古太古代形成的,麻山群的同位素年龄值变化在2871~95 Ma,揭示了漫长多阶段的地质演化过程(于恩君,2008)。马家骏等(1991)在黑龙江群和麻山群中的部分火山-沉积岩系获得(2494±654) Ma

表3 萝北云山石墨矿和鸡西柳毛石墨矿石锆石年龄
Table 3 Ore rock zircon ages of Jixi Liumao and Luobei Yunshan graphite deposits

Table area (content obscured or blank)

注：Pb*代表放射性成因，测定²⁰⁶Pb值作普通铅校正；C—碎屑锆石，R—变质增生锆石，S—重结晶锆石。

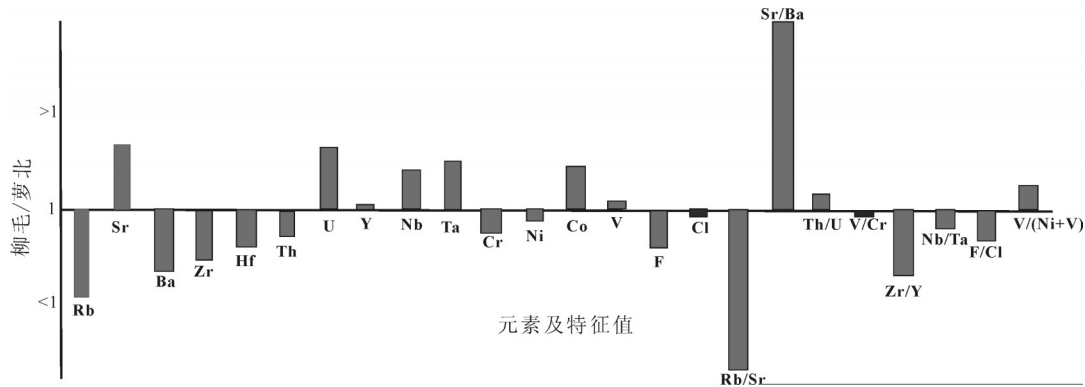


图12 柳毛矿与萝北云山矿微量元素含量及特征元素比值比较图

Fig.12 Comparison of trace element values and characteristic element ratios between Jixi Liumao and Luobei Yunshan graphite deposits

的Sm-Nd等时年龄,因此认为都属新太古代。麻山群含石墨富铝片麻岩和大理岩等副变质岩系测得(2269±68) Ma的Pb-Pb等时年龄和(2251±360) Ma的U-Pb等时年龄,属于古元古代。

区域上铁力中新代沉积物中碎屑锆石年龄主要集中在1800~2000 Ma,是重结晶碎屑锆石,表明区域上有2000 Ma左右的沉积物,而1800~2000 Ma的锆石是该沉积物重结晶锆石,其次也见有2442 Ma古元古代早期的碎屑锆石。鸡西三道沟和西麻山的矽线石片麻岩中锆石测年资料,最大 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为1900 Ma(Simon et al., 2001; 周建波等, 2011)。任留东等(2010)对麻山群混合岩进行了系统测试研究,西麻山地区的矽线石片麻岩和石榴石麻粒岩包体都含有500 Ma左右的锆石,但总体上年龄范围变化较大,最大年龄可达1900 Ma。较大年龄的锆石是重结晶锆石年龄,可代表原岩沉积的上限,柳毛地区变闪长岩的细小锆石核最大年龄显示(1464±33) Ma,反映了火成闪长岩的原岩侵入年龄。

本文测试结果显示,佳木斯地区萝北和柳毛石墨矿石碎屑锆石和变质锆石年龄在2000 Ma左右,是石墨矿床初始沉积年龄。这一测试结果与区域上孔兹岩系锆石测试结果基本一致。

本次研究多数样品都含有500 Ma左右的锆石,结合锆石形态、化学成分和年代学资料综合分析,柳毛和萝北地区孔兹岩系的变质岩在该期变质作用过程中由于深熔作用形成的黑云斜长变粒岩中岩浆锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为(476±9)~(575±12) Ma,厘定为早古生代(赵忠海等, 2014),这一年龄与麻山地区片麻岩和麻粒岩变质锆石年龄一致。表明

该区在古元古代晚期经受区域性高温高压变质作用,后经过早古生代强烈的泛亚构造作用,在构造岩浆侵入条件下增生形成巨晶鳞片状石墨。

6.3 成岩成矿背景

佳木斯地块麻山群孔兹岩系各种沉积变质岩以富钾富铝和碱金属、碱土金属大离子亲石元素及轻稀土元素为特征。变泥质岩石体现出极高的稀土元素总量和强烈的轻、重稀土元素分异及负钕异常,说明在其原岩沉积过程中不可能有更多的铁镁质岩石风化残余物加入。变质黏土岩中大量泥质石英砂岩、长石石英砂岩的存在,都反映其成熟陆源地壳物源特征。透辉透闪变粒岩和大理岩的MgO/CaO比值平均0.40和0.32,显示低盐度开阔海沉积环境,与环境地理特征一致。

麻山群孔兹岩系中连续出现大量高铝黏土岩、石英砂岩、炭质页岩及碳酸盐岩,反映原岩沉积环境是一套有连续相序的陆棚浅海沉积物,其岩石地球化学及微量元素、稀土元素地球化学特征也都反映了稳定大陆边缘沉积环境,即潮坪相及陆棚浅海相沉积环境,局部属于陆缘泻湖相或者发育陆缘裂谷环境。

孔兹岩系地层中,同沉积期火山岩较少,仅局部见正变质岩夹层,变质前与同变质期的火成岩也很少,其地球化学特征不同于绿岩活动带内沉积变质岩的岩石地球化学特征。这表明麻山群孔兹岩系原岩形成于一个克拉通化的相对稳定的构造环境,属于稳定克拉通陆缘沉积环境。

佳木斯地块麻山群孔兹岩系主期变质作用在区域上可以划分出角闪岩相和麻粒岩相两个变质带,区域上不同的变质级别是变质分带的结果(姜

继圣, 1992), 麻粒岩相带内的岩石先后经历了低角闪岩相—高角闪岩相—麻粒岩相变质等不同的递增变质阶段。从变质程度上可分出至少两种类型, 一种为麻粒岩相变质部分, 如鸡西柳毛石墨矿附近的麻山杂岩; 另一部分仅达角闪岩相变质, 如萝北云山附近的麻山杂岩。

鸡西柳毛石墨矿和萝北云山石墨矿在古元古代晚期经受区域性高温高压变质作用, 开始了有机碳到石墨的变质重结晶, 经过早古生代强烈的泛亚构造作用, 石墨晶体在构造岩浆作用下进一步增生形成巨晶鳞片状石墨。

7 结 论

通过对鸡西柳毛石墨矿和萝北云山石墨矿床的成岩成矿时代及成矿岩体元素地球化学特征的研究, 获得以下认识:

(1) 通过对鸡西柳毛石墨矿和萝北云山石墨矿床 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分析, 样品变质锆石和碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $(1855 \pm 5) \sim (1979 \pm 13)\text{Ma}$ (古元古代) 和 $(476 \pm 9) \sim (575 \pm 12)\text{Ma}$ (早古生代)。

(2) 通过萝北云山石墨矿和鸡西柳毛石墨矿含矿岩石地球化学分析, 研究区岩浆来源于陆壳重熔, 显示以陆源物质为主, 弱还原环境。化学特征显示萝北石墨矿沉积物陆源物质较多, 而柳毛石墨矿沉积环境稳定, 沉积物成熟度较高, 柳毛矿区原始泥灰岩属于低盐度海洋沉积环境, 且石墨有机碳品位较高。

(3) 萝北云山石墨矿和鸡西柳毛石墨矿均形成于佳木斯地块, 黑龙江群和麻山群孔兹岩系在元古宙晚期开始拼合, 至加里东期, 麻山群又仰冲到黑龙江群之上, 期间经历多次复杂的高温高压变质和构造变形作用, 有机碳变质重结晶为石墨, 在构造岩浆作用下富集成矿。

References

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 63-114.
Cao Xi, Dang Zengxin, Zhang Xingzhou, Jiang Jisheng, Wang Hongde. 1992. Jianusi Composite Terrane[M]. Jilin Science and Technology Press.
Cao Shengen, Zhao Chunli. 1993. Geological characteristics of Jixi lingnan graphite mine deposit[J]. Non-Metallic Geology, (2):8-12.

Compston W, Williams IS, Kirschvink J L, Zhang Z C, Ma G G. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. J. Geol. Soc. (149):171-184.
Fang Junwei, Li Xiaojun, Liu Yanlin. 2009. Large flake graphite mine geological characteristics in Luobei Sifangshan forest farm eastern. [J]. Building Materials and Decorations, 60(10):43-53.
Ge Xiaohong, Liu Junlai, Ren Shoumai. 2014. The formation and evolution of the mesozoic-cenozoic continental in eastern China[J]. Geology in China, 41(1):19-38.
Heilongjiang Bureau of Gology and Mineral. 1989. Regional Geology of Heilongjiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 16-19.
Jiang Jisheng. 1992. Regional metamorphism and evolution of Mashan khondalite series[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 11(2):97-110.
Jiang Jisheng, Liu Xiang. 1992. The Early Precambrian sedimentary metamorphic type crystal graphite deposit[J]. Non-Metallic Geology, (5):18-22
Jiang Jisheng. 1992. Khondalite Series stratum subjects of MaShan group [J]. Journal of Stratigraphy, 16(4):304-311.
Li Chunwen. 2003. Development and Utilization for valuable metal uranium, vanadium, titanium occurrence state of Liumao graphite mine[J]. Heilongjiang Geology, 14(2):114-121.
Li Guanghui, Huang Yongwei, Wu Runtang, Xu Dajie. 2008. Origin of carbon and concentration of uranium and vanadium from Liumao graphite formation in Jixi[J]. Global Geology, 27(1):19-22.
Li Hanbin, Zhang Bing. 2014. Metamorphism and its significance of Yunshan graphite deposit in Heilongjiang[J]. China Nonmetallic Minerals Industry, (1): 45-46.
Ma Jiajun, Fang Dahe. 1991. A preliminary study of the Mesozoic volcanic rocks in HeiLongjiang province china[J]. Heilongjiang Geology, 2(2):1-16.
Miao Fulin. 2006. Analysis and discussed the characteristics of Jixi graphite resources[J]. Scientific and Technological Achievements, (3):70.
Mo Rujue, Liu Shaobin, Huang Cuirong, Zhang Guangrong, Tan Guanmin, Wang Baoxian, Xian Xiangzhang. 1989. China Graphite Mine Deposit geology[M]. China Architecture & Building Press.
Ren Liudong, Wang Yanbin, Yang Chonghui, Han Juan, Xie Hhangqiang, Li Linshan. 2010. Metamorphism, migmatization and granites of the Mashan complex[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 2005-2014.
Simon A wilde, Wu Fuyuan, Zhang Xingzhou. 2001. The Mashan complex: SHRIMP U-Pb zircon evidence for a Late Pan-African metamorphic event in NE China and its implication for global continental reconstructions[J]. Geochemica, 30(1): 35-50.
Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. Geological Review, 48(Supp.): 26-30.
Sun Xiangdong. 1994. Geological characteristics forming of graphite deposit in east of Heilongjiang Province[J]. Non-Metallic Geology, (1):15-19.

- Taylor H P, Sheppard S M F. 1986. Ingeous rocks: I. Processes of isotopic fractionation and isotopic systematic[C]//Valley J W, Taylor H P, O'Neil Taylor P N, Jones N W, Moorbath S (eds.). 1984. Isotopic Assessment of Relative Contributions from Crust and Mantle Sources to the Magma Genesis of Precambrian Granitoid Rocks. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A, 310: 605-625.
- Tian Jing, Li Jinwen, Wang Runhe, Liu Wen, Xiang Anping, Kang Yongjian, Guo Zhijun, Dong Xunzhou. 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and geochemical features of intrusions in Erentaolegai area of Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 41(4):1092-1107.
- Wang Changshui, Wang Xiuhua. 2006. Early precambrian basement and metallogenetic series in eastern Hei Longjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 15(4): 256-264.
- Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y. 1997. SHRIMP U-Pb data of granites and gneisses in the Tmhangshan-Wutaishan area: Implications for the timing of crustal growth in the Noah China craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(supp.):144.
- Xu Yanqiang, Han Zhenxin, Xu Shoumin. 2001. Formation and evolution of the centralized area of the large crystalline graphite deposit in the Jiamusi massif[J]. *Heilongjiang Geology*, 12(3):1-10.
- Yu Enjun. 2008. Geologic features and tectonic evolution mechanism of Mashan Group in Jiamusi block[J]. *JiLin Geology*, 27(4):16-25.
- Yuan Li, Yao Ping. 1993. Analysis on tectonic stress field of the Liuniao graphite in Jixi Heilongjiang and its significance [J]. *Non-Metallic Geology*, (5): 13-17.
- Zhang Benchen. 2005. Geological features and genesis of the Guangyi graphite deposit of Muling county[J]. *Jilin Geology*, 24(4): 47-53.
- Zhao Ranran, Song Shouyong. 2013. Graphite mine metallogenic conditions in Heilongjiang Province[J]. *Industrial Science Tribune*, 12(6): 64-65.
- Zhao Zhonghai, Qu Hui, Li Chenglu, Xu Guozhan, Wang zhuo, et al. 2014. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and tectonic implications of the Early Paleozoic granites in Huolongmen area, Heilongjiang Province[J]. *Geology in China*, 41(3):773-783.
- Zhou Jianbo, Zhang Xingzhou, Simon A Wilde, Zheng Changqing. 2011. Confirming of the Heilongjiang - 500Ma Pan-African khondalite belt and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4):1235-1245.
- 社, 16-19.
- 姜继圣. 1992. 麻山群孔兹岩系主期区域变质作用及演化[J]. *岩石矿物学杂志*, 11(2): 97-110.
- 姜继圣, 刘祥. 1992. 中国早前寒武纪沉积变质型晶质石墨矿床[J]. *建材地质*, (5):18-22.
- 姜继圣. 1992. 麻山群孔兹岩系地层新见[J]. *地层学杂志*, 16(4):304-311.
- 李春文. 2003. 鸡西市柳毛石墨矿有价金属铀、钒、钛赋存状态及开发利用[J]. *黑龙江地质*, 14(2):114-121.
- 李光辉, 黄永卫, 吴润堂, 徐大杰. 2008. 鸡西柳毛石墨矿碳质来源及铀、钒的富集机制[J]. *世界地质*, 27(1):19-22.
- 李寒滨, 张冰. 2014. 黑龙江云山石墨矿床变质作用及其意义[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (1):45-46.
- 马家骏, 方大赫. 1991. 黑龙江省中生代火山岩初步研究[J]. *黑龙江地质*, 2(2):1-16.
- 苗富林. 2006. 鸡西市石墨资源特征分析探讨[J]. *科技成果纵横*, (3):70.
- 莫如爵, 刘绍斌, 黄翠蓉, 张光荣, 谭冠民, 王宝娴, 肖祥章. 1989. 中国石墨矿床地质[M]. 中国建筑工业出版社.
- 任留东, 王彦斌, 杨崇辉, 韩娟, 颜颂强, 李林山. 2010. 麻山杂岩的变质-混合岩化作用和花岗岩浆活动[J]. *岩石学报*, 26(7):2005-2014.
- Simon A wilde, 吴福元, 张兴洲. 2001. 中国东北麻山杂岩晚泛非期变质的锆石 Shrimp 年龄证据及全球大陆再造意义[J]. *地球化学*, 30(1):35-50.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质评论*, 48(增刊): 26-30.
- 孙向东. 1994. 黑龙江省东部地区石墨矿床成矿地质特征[J]. *建材地质*, (1):15-19.
- 田京, 李进文, 王润和, 刘文, 向安平, 康永建, 郭志军, 董旭舟. 2014. 内蒙古额仁陶勒盖地区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. *中国地质*, 41(4):1092-1107.
- 王长水, 王秀华. 2006. 黑龙江省东部早前寒武纪基底及矿床成矿系列划分[J]. *地质与资源*, 15(4):256-264.
- 徐衍强, 韩振新, 徐受民. 2001. 佳木斯地块大型晶质石墨矿集区的形成和演化[J]. *黑龙江地质*, 12(3):1-10.
- 于恩君. 2008. 佳木斯地块麻山岩群的地质特征及构造演化机制探讨[J]. *吉林地质*, 27(4), 16-25.
- 袁犁, 姚萍. 1993. 黑龙江鸡西柳毛石墨矿区构造应力场分析及其意义[J]. *建材地质*, (5):13-17.
- 张本臣. 2005. 穆稜县光义石墨矿地质特征及成因浅析[J]. *吉林地质*, 24(4):47-53.
- 赵然然, 宋守永. 2013. 黑龙江省石墨矿成矿条件探究[J]. *产业与科技论坛*, 12(6):64-65.
- 赵忠海, 曲晖, 李成禄, 徐国战, 王军. 2014. 黑龙江霍龙门地区早古生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. *中国地质*, 41(3):773-783.
- 周建波, 张兴洲, Simon A Wilde, 郑常青. 2011. 中国东北—500Ma 泛非期孔兹岩带的确定及其意义[J]. *岩石学报*, 27(04):1235-1245.

附中文参考文献

- 曹熹, 党增欣, 张兴洲, 姜继圣, 王洪德. 1992. 佳木期复合地体[M]. 长春: 吉林科学技术出版社.
- 曹圣恩, 赵纯礼. 1993. 鸡西市岭南石墨矿床地质特征[J]. *建材地质*, (2):8-12.
- 房俊伟, 李晓军, 刘彦林. 2009. 萝北县四方山林场东部大鳞片石墨矿地质特征[J]. *建筑材料装饰*, 60(10), 43-53.
- 葛肖虹, 刘俊来, 任收麦. 2014. 中国东部中—新生代大陆构造的形成与演化[J]. *中国地质*, 41(1):19-38.
- 黑龙江省地质矿产局. 1989. 黑龙江区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.