

内蒙古红花尔基白钨矿矿床花岗岩成因 类型及成矿意义

郭志军^{1,2}, 李进文¹, 常裕林³, 韩增光⁴, 董旭舟⁵, 杨郎城¹, 田京^{1,5}, 余宏全¹,
向安平¹, 康永建¹

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 北京矿冶研究总院 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100044; 3. 山东正元地质勘查院, 山东 济南 250101; 4. 内蒙古自治区第六地质矿产勘查开发院, 内蒙古 海拉尔 021008; 5. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 红花尔基白钨矿矿床位于内蒙古自治区呼伦贝尔市海拉尔南 120 km 处, 为大兴安岭中北段近年来新发现的规模有望达到大型的钨矿床, 也是本地区到目前为止发现的唯一的白钨矿矿床。赋矿围岩是侵入奥陶系裸河组 ($O_{2-3}h$) 地层中的花岗岩体, 岩性主要为二长花岗岩和石英二长岩。对赋矿花岗岩进行的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明: 肉红色二长花岗岩的加权平均年龄为 179.2 ± 0.6 Ma ($N=20$, MSWD=1.3); 灰白色二长花岗岩的加权平均年龄为 179.0 ± 0.6 Ma ($N=20$, MSWD=0.7); 石英二长岩的加权平均年龄为 178.6 ± 0.7 Ma ($N=20$, MSWD=0.6)。这一结果表明上述花岗岩为燕山早期早侏罗世岩浆活动的产物。在 3 件花岗岩样品中均发现继承性锆石 (年龄为 779.1 Ma 和 463.2~486.0 Ma), 说明本区可能具有新元古代和早中奥陶世的基底。岩石地球化学数据表明, 与成矿密切相关的 3 种花岗岩具有相似的地球化学特征, 即: 均以高硅 ($SiO_2 = 63.09\% \sim 73.53\%$)、富碱 (ALK=7.60%~8.74%) 和整体弱过铝质 ($A/CNK = 0.97 \sim 1.08$) 为特征。轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损 [$(La/Yb)_N = 3.96 \sim 12.28$], 整体具中等铈负异常 ($\delta Eu = 0.55 \sim 1.01$)。在微量元素原始地幔比值蛛网图上主要显示大离子亲石元素富集, 高场强元素亏损的特点, Rb、Th、U、K、Pb 等元素富集, Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 等元素明显亏损。岩石地球化学特征显示其为典型的 I 型花岗岩。经过分析认为, 矿床的成矿物质主要来自于下地壳, 岩浆上侵过程中也可能萃取含钨建造中的钨等元素。

关键词: 白钨矿矿床; I 型花岗岩; 早侏罗世; 锆石 U-Pb 定年; 岩石地球化学; 成矿物质来源; 红花尔基

中图分类号: P588.12⁺1; P595; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)03-0322-21

Genetic types and ore-forming geological significance of granites in the Honghuaerji scheelite deposit, Inner Mongolia

GUO Zhi-jun^{1,2}, LI Jin-wen¹, CHANG Yu-lin³, HAN Zeng-guang⁴, DONG Xu-zhou⁵, YANG Yun-cheng¹,
TIAN Jing^{1,5}, SHE Hong-quan¹, XIANG An-ping¹ and KANG Yong-jian¹

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology, Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China; 3. Shandong Zhengyuan Geological Exploration Institute, Jinan 250101, Shandong, China; 4. Inner Mongolia Sixth Geological Mineral Exploration and Development Institute, Hailar 021008, China; 5. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2015-02-01; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: “973”资助项目(2013CB428805); 地质调查资助项目(科[2013]01-042-003)

作者简介: 郭志军(1988-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: GHN_07@163.com; 通讯作者: 李进文(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿床学和矿产勘查学研究, E-mail: lijinwen958@sohu.com。

Abstract: Located about 120 km south of Hailar City in Hulun Buir League, the newly-discovered Honghuaerji scheelite deposit is the only scheelite deposit in central-northern section of Da Hinggan Mountains. The ore-bearing granites comprising monzogranites and quartz monzonite intruded into the Ordovician Luohe Formation ($O_{2-3}lh$). The LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating results show that the reddish monzogranite was formed at 179.2 ± 0.6 Ma ($N=20$, MSWD=1.3), the gray monzogranite was formed at 179.0 ± 0.6 Ma ($N=20$, MSWD=0.7) and the quartz monzonite was formed at 178.6 ± 0.7 Ma ($N=20$, MSWD=0.6). The high concordance of the dating results indicates that they were formed by magma activities in Early Jurassic. The inherited zircon (779.1 Ma and 463.2~486.0 Ma) has also been found in the three granites, which indicates that the Neoproterozoic and Lower-Middle Ordovician blocks are probably existent in the study area. The three granites have similar petrogeochemical characteristics. Geochemical analysis shows that all of the three rocks have high SiO_2 (63.09%~73.53%) and K_2O+Na_2O (7.60%~8.74%), and are slightly peraluminous ($A/CNK=0.97\sim1.08$). They are enriched in light rare earth elements and depleted in heavy rare earth elements [$(La/Yb)_N=3.96\sim12.28$] with a medium negative Eu anomaly ($\delta Eu=0.55\sim1.01$). They are also enriched in Rb, Th, U, K, Pb and depleted in Ba, Nb, Ta, Sr, P, Ti. The analytical results of main and trace elements show that they are typical I-type granites. The ore-forming materials were mainly derived from the lower crust and also extracted from the tungsten-bearing formation by the magma.

Key words: scheelite deposit; I-type granite; Early Jurassic; zircon U-Pb dating; petrogeochemistry; ore-forming materials; Honghuaerji

大兴安岭中北段地区是我国重要的内生多金属成矿区,斑岩型铜-钼矿床、热液型铅-锌-银矿床等内生有色金属矿床较为发育(余安全等, 2009; 白令安等, 2012)。但是该区钨矿床并不发育,独立白钨矿矿床更是少见。然而,近年来的地质找矿工作发现了红花尔基白钨矿矿床,其位于呼伦贝尔海拉尔市南 120 km 处(图 1a),北距红花尔基镇 2 km。该钨矿床的发现不仅丰富了大兴安岭中北段地区内生有色金属矿床的类型,同时也说明该区具有良好的钨成矿地质条件。据近期详查结果^①,矿床(332+333) WO_3 金属量 47 628.67 t,矿体平均品位(WO_3) 0.257%,有望成为大型钨矿床;(332+333)Mo 金属量 3 177.56 t,平均品位(Mo) 0.12%,可综合回收利用。

红花白钨矿矿床的钨矿体主要赋存在花岗岩中,且花岗岩具有钾、钠长石化和云英岩化等热液蚀变现象,说明花岗岩体与钨矿的形成具有紧密的内在联系。向安平等(2014)得到矿区花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 179.4~179.2 Ma,辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 176.8 Ma,认为矿床成岩成矿时代为早中侏罗世。郭志军等(2014)对矿区不同特征花岗岩进行了 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素研究,认为花岗岩的源岩

为新元古代加入下地壳的亏损地幔物质。到目前为止,未见对矿区不同特征花岗岩进行详细的岩石地球化学研究工作,从而大大限制了对矿区花岗岩成因及其与成矿关系等问题的深入探讨。红花尔基作为该地区首例钨矿床,厘定其花岗岩的成因与钨成矿之间的关系,将有助于理解和认识区域钨成矿作用,也将有助于区域下一步的钨矿勘查工作。鉴于此,本文对矿区 3 种赋矿花岗岩进行了详细的年代学、地质以及地球化学特征研究,探讨了矿区成矿花岗岩的成岩年龄、岩石成因及成矿意义。

1 区域地质和矿区地质

红花尔基白钨矿矿床位于中亚造山带东段,区域受前中生代古亚洲洋构造域演化以及中生代蒙古-鄂霍茨克洋构造体系和滨太平洋构造体系的叠加影响,构造-岩浆作用复杂(王东方等, 1984)。区域出露地层主要有下元古界兴华渡口群,奥陶系下中统多宝山组、中上统裸河组,泥盆系下中统泥鳅河组、中上统大民山组,石炭系下统红水泉组、莫尔根河组,侏罗系上统满克头鄂博组、玛尼吐组和白音高老组,白垩系下统梅勒图组以及第四系。区域断裂

① 内蒙古第六地质矿产勘探开发有限责任公司. 2013. 内蒙古自治区鄂温克自治旗红花尔基矿区钨矿详查报告.

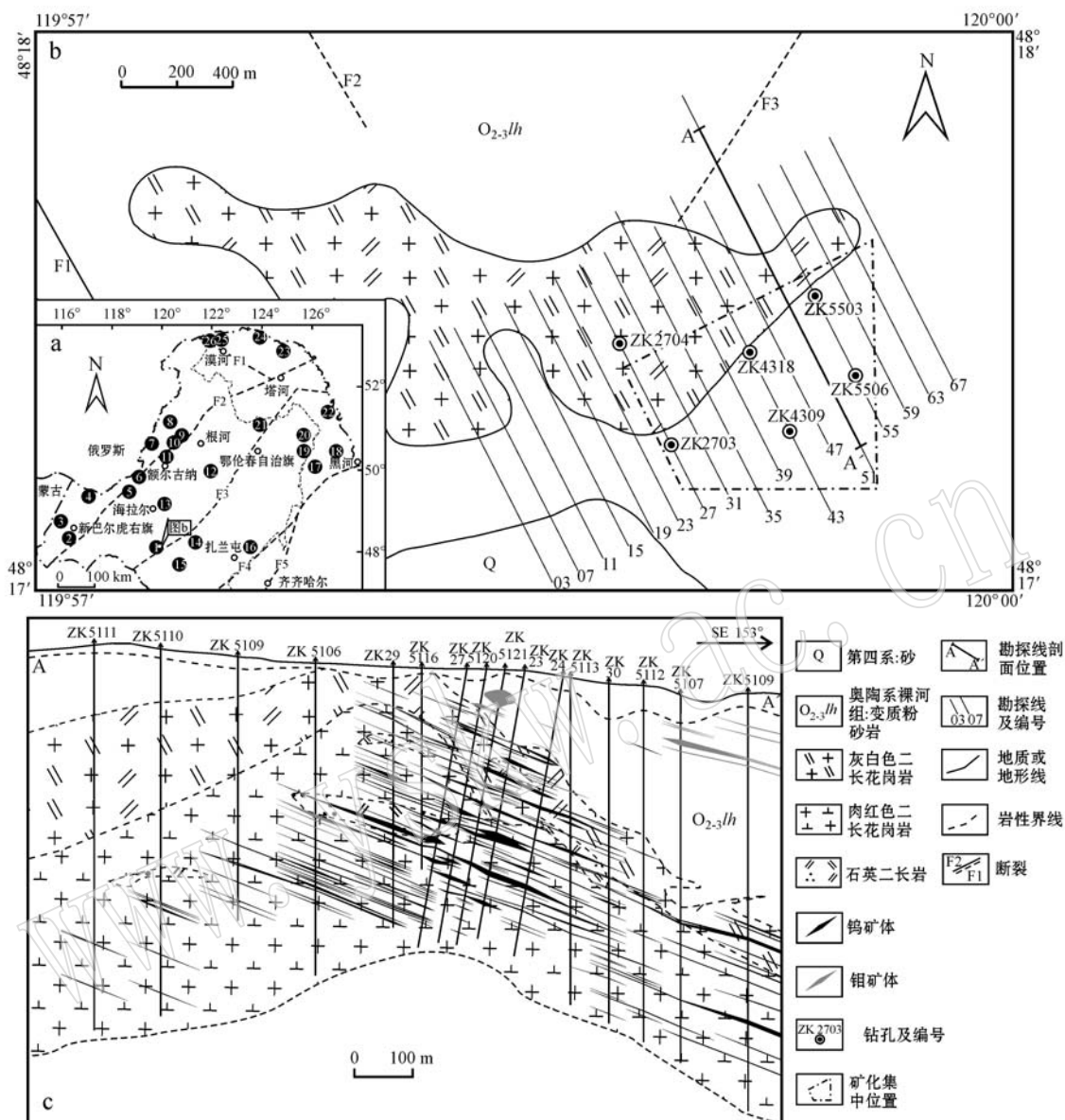


图1 大兴安岭中北段中生代典型矿床分布图(a, 据武广等, 2014), 红花尔基白钨矿矿床基岩地质简图(b)和勘探线剖面 A-A'图(c)(b、c 据内蒙古第六地质矿产勘查开发有限责任公司, 2013^①修改)

Fig. 1 Distribution of typical deposits formed in Mesozoic in the central-northern section of the Honghuaerji mountains (a), schematic geological map (b) and NW-SE section (c) of the Honghuaerji scheelite deposit (modified after Wu Guang *et al.*, 2014 for Fig. 1a; Fig. 1b and 1c after Inner Mongolia Sixth Geological Mineral Exploration Institute, 2013^①)

矿床名称: 1—红花尔基白钨矿矿床; 2—额仁陶勒盖银锰矿床; 3—甲乌拉—查干布拉克铅锌银多金属矿床; 4—乌奴格吐山铜钼矿床; 5—四五牧场金矿床; 6—八大关铜钼矿; 7—小伊诺盖沟金矿; 8—太平川钼铜矿; 9—得耳布尔铅锌矿床; 10—二道河子铅锌矿床; 11—东塔铅锌银矿床; 12—外新河钼矿床; 13—谢尔塔拉铁锌矿床; 14—八十公里铁锌矿床; 15—二道河铅锌银矿床; 16—太平沟铜钼矿床; 17—争光金矿床; 18—三道湾子金矿床; 19—三沟铁铜矿床; 20—古利库金矿床; 21—岔路口钼矿床; 22—旁开门金矿床; 23—二十一站铜金矿床; 24—二根河金矿床; 25—老沟金矿床; 26—砂宝斯金矿床

断裂名称: F1—塔源—漠河断裂; F2—得尔布干断裂; F3—头道桥—鄂伦春断裂; F4—二连—贺根山—黑河断裂; F5—嫩江断裂

Major deposits: 1—Honghuaerji scheelite deposit; 2—Erentaolegai Ag-Mn deposit; 3—Jiaowula-Chaganbulagen Pb-Zn-Ag deposit; 4—Wunuge-tushan Cu-Mo deposit; 5—Siwumuchang Au deposit; 6—Badaguan Cu-Mo deposit; 7—Xiaoyinuogai Au deposit; 8—Taipingchuan Mo-Cu deposit; 9—Derbuer Pb-Zn deposit; 10—Erdahezi Pb-Zn deposit; 11—Dongjun Pb-Zn-Ag deposit; 12—Waxinhe Mo deposit; 13—Xieertala Fe-Zn deposit; 14—Bashigongli Fe-Zn deposit; 15—Erdahe Pb-Zn-Ag deposit; 16—Taipinggou Cu-Mo deposit; 17—Zhengguang Au deposit; 18—Sandaowanzi Au deposit; 19—Sankuangou Fe-Cu deposit; 20—Guliku Au deposit; 21—Chalukou Mo deposit; 22—Pangkaimen Au deposit; 23—Ershiyizhan Cu-Au deposit; 24—Ergenhe Au deposit; 25—Laogou Au deposit; 26—Shabaosi Au deposit

Names of numberd faults: F1—Tayuan-Mohe fault; F2—Derbugan fault; F3—Toudaoqiao-Orogen fault; F4—Erlan-Hegenshan-Heihe fault; F5—Nenjiang fault

① 内蒙古第六地质矿产勘查开发有限责任公司. 2013. 内蒙古自治区鄂温克自治旗红花尔基矿区钨矿详查报告.

和褶皱构造较发育,断裂构造的走向主要呈北东向,次为北西向,与大兴安岭地区的整体构造线方向基本一致(刘建明等,2004),褶皱构造走向以北西向为主。区域上,古生代和中生代岩浆侵入和喷发活动较强烈,岩浆岩大致呈北东向展布,且多与内生有色金属矿床的形成有密切关系(陈志广等,2008,2010;余宏全等,2009;李进文等,2011;吕鹏瑞等,2012)。早古生代岩浆作用以海相喷发活动为主,晚古生代则以岩浆侵入活动为主,形成中酸性侵入岩体;中生代岩浆活动非常频繁,三叠纪-中侏罗世以花岗质侵入岩为主,中晚侏罗世到早白垩世则以双峰式陆相火山-次火山活动为主。区域内生金属矿床丰富,且多形成于中生代,主要以铜、钼、铅、锌、银、金、铁等为主。

矿区出露地层主要为奥陶系裸河组($O_{2.3}lh$)变质粉砂岩和第四系(Q)风成砂(图1b)。裸河组地层岩性主要为变质粉砂岩,局部劈理发育,变为板岩。第四系主要由风成砂、现代冲积、坡积物组成,分布于河谷及宽缓沟谷中。矿区构造主要为断裂,有两条较大断裂F1(伊敏河断裂)和F7,根据物探资料推测断裂6条,其中北西向断裂4条;北东向断裂4条。矿区内各断裂均未延伸至矿床范围,对矿体无破坏作用。矿区出露的侵入岩种类较少,主要是二长花岗岩和石英二长岩。赋矿围岩主要为二长花岗岩,侵入奥陶系裸河组($O_{2.3}lh$)地层中。花岗岩体自下至上岩性略有变化:下部为肉红色二长花岗岩,其上过渡为灰白色二长花岗岩,石英二长岩在上述两种二长花岗岩中以椭圆状或不规则状透镜体形式存在(图1c;其中石英二长岩分布位置和大小仅为示意图),其界线较截然。石英二长岩透镜体大小不一,小的直径约几厘米,大者直径可达50 cm左右,大多集中在10~20 cm之间(图2g、2h)。

矿区3种花岗岩的岩相学特征及其描述见图2和表1。从表中可以看出两种颜色的二长花岗岩具有大致相似的矿物组成,但二者组成矿物的粒度明显不同,说明位于上部的灰白色二长花岗岩可能是岩体的边缘相。不仅如此,与肉红色二长花岗岩相比,灰白色二长花岗岩相对发育稍强的绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化和高岭土化等蚀变作用,这种蚀变作用程度的不同导致两种花岗岩呈渐变过渡,界线比较模糊。与二长花岗岩相比,石英二长岩颜色稍深,为灰色、灰绿色或粉红色,粒度较细,镜下观察可发现其含较多针状磷灰石,且出现长板状长石类矿

物和刀刃状黑云母等矿物具半定向排列分布,同时被包裹在石英和长石巨晶中的现象。根据石英二长岩野外产出特征及其岩相学特征可以初步推断其可能为岩浆混合作用形成的。

2 样品采集及分析测试方法

由于矿体直接赋存在花岗岩中,导致矿区花岗岩遭受了一定程度的热液蚀变作用,为了保证实验结果的可靠性,本次研究采集了相对新鲜的肉红色二长花岗岩7件,灰白色二长花岗岩8件以及石英二长岩6件进行主量、稀土和微量元素分析;同时采集上述3种花岗岩各1件进行LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年(样品位置见图1b和表1)。

样品的破碎和锆石挑选在河北省廊坊市地科勘探(地源矿物测试分选)技术服务有限公司完成。首先采用常规方法进行粉碎,并用电磁方法进行分选,最后在双目镜下精选出锆石1000颗以上。挑好的锆石颗粒由北京镐年中心制成环氧树脂样品靶,并完成阴极发光(CL)图像的采集。对锆石样品进行透射光、反射光显微观察及照相。LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所MC-ICP-MS实验室完成,锆石定年分析所用仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的Newwave UP 213激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为25 μm ,频率为10 Hz,能量密度约为2.5 J/cm²,以He为载气。信号较小的²⁰⁷Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁴Pb(+²⁰⁴Hg)、²⁰²Hg用离子计数器(multi-ion-counters)接收,²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U信号用法拉第杯接收,实现了所有目标同位素信号的同时接收并且不同质量数的峰基本上都是平坦的,进而可以获得高精度的数据,均匀锆石颗粒²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U的测试精度(2 σ)均为2%左右,对锆石标准的定年精度和准确度在1%(2 σ)左右。LA-MC-ICP-MS激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石GJ-1进行调试仪器,使之达到最优状态,锆石U-Pb定年以锆石GJ-1为外标,U、Th含量以锆石M127(U:923 $\times 10^{-6}$,Th:439 $\times 10^{-6}$,Th/U:0.475;Nasdala *et al.*, 2008)为外标进行校正。测试过程中在每测定5~7个样品前后重复测定2个锆石GJ-1对样品进行校正,并测量1个锆石Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用ICPMSDataCal程序(Liu *et al.*, 2010),测量过程

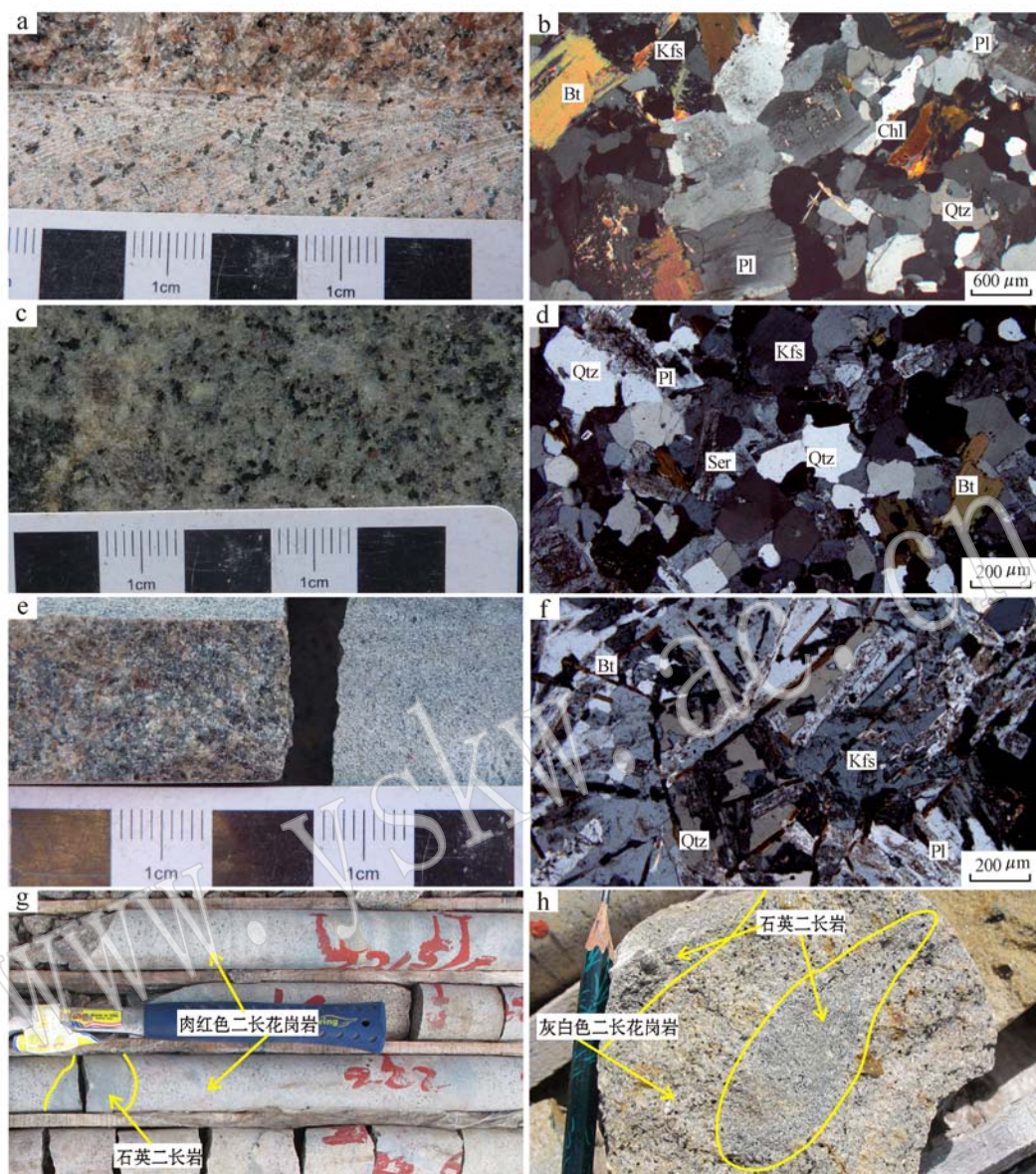


图 2 红花尔基白钨矿床花岗岩手标本及镜下显微照片(正交)

Fig. 2 Photographs and photomicrographs of the three granites in the Honghuaerji scheelite deposit (crossed nicols)

a, b—肉红色二长花岗岩手标本和镜下照片; c, d—灰白色二长花岗岩手标本和镜下照片; e, f—石英二长岩手标本和镜下照片;

g—肉红色二长花岗岩中透镜体状的石英二长岩; h—灰白色二长花岗岩中透镜体状的石英二长岩; Qtz—石英; Bt—黑云母;

Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Ser—绢云母; Chl—绿泥石

a, b—reddish monzogranite; c, d—gray monzogranite; e, f—quartz monzonite; g—lenticular quartz monzonite in reddish monzogranite;

h—lenticular quartz monzonite in gray monzogranite; Qtz—quartz; Bt—biotite; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Ser—sericite; Chl—chlorite

中绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1\,000$, 未进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响, 对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除, 锆石年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序 (Ludwig, 2003) 获得。详细实验测试过程可参见侯可军等 (2009)。样品分析过程中, Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为 $336.5 \pm$

$1.1\text{ Ma} (n = 3, 2\sigma)$, 对应的年龄推荐值为 $337.13 \pm 0.37 (2\sigma)$ (Sláma *et al.*, 2008), 两者在误差范围内完全一致。

采集的样品经过薄片显微鉴定后, 选择蚀变较弱的样品进行岩石地球化学分析测试, 样品的破碎加工均在无污染设备中进行。主量元素、稀土元素和微量元素测试均在中国地质科学院国家地质实验

表1 红花尔基白钨矿矿床花岗岩采样位置及岩性特征描述

Table 1 The positions and the descriptions of the granites in the Honghuaerji sheelite deposit

样号	代号	岩性描述			测试项目	采样位置
		名称	结构	矿物组成及粒径		
HH4309-154	A	肉红色二长花岗岩	似斑状、中-粗粒花岗岩结构; 块状构造	主要矿物为石英(25%~35%, 1~4 mm)、钾长石(25%~35%, 1~5 mm)、条纹长石(5%~18%, 2~4 mm)、斜长石(20%~25%, 1~5 mm)等, 次要矿物为黑云母(4%~6%, 0.1~0.6 mm), 副矿物为磷灰石、锆石等。	主量、痕量元素	ZK4309 的 1 168 m
HH4309-157	B				年龄; 主量、痕量元素	ZK4309 的 820~1 168 m
HH4309-145	C				主量、痕量元素	ZK4309 的 625 m
HH4309-158	D				主量、痕量元素	ZK4309 的 970 m
HH4309-104	E				主量、痕量元素	ZK4309 的 386 m
HH5503-32	F				主量、痕量元素	ZK5503 的 440 m
HH5506-62	G	灰白色二长花岗岩	似斑状和中-细粒花岗岩结构; 块状构造	主要矿物为石英(25%~30%, 0.1~1.2 mm)、钾长石(20%~30%, 0.1~1.5 mm)、条纹长石(5%~15%, 1.0~3 mm)、斜长石(25%~30%, 0.2~1.6 mm)等, 次要矿物为黑云母(4%~5%, 0.1~0.4 mm), 副矿物为磷灰石、锆石等。	主量、痕量元素	ZK5506 的 616 m
HH2703-17	H				主量、痕量元素	ZK2703 的 297 m
HH4309-62	I				主量、痕量元素	ZK4309 的 286 m
HH4318-01	J				主量、痕量元素	ZK4318 的 96 m
HH5503-14	K				主量、痕量元素	ZK5503 的 83 m
HH2704-12	L				年龄; 主量、痕量元素	ZK2704 的 63~163 m
HH2704-13	M				主量、痕量元素	ZK2704 的 118 m
HH2704-14	N				主量、痕量元素	ZK2704 的 137 m
HH2704-15	O				主量、痕量元素	ZK2704 的 108 m
HH5503-05	P				主量、痕量元素	ZK5503 的 192 m
HH5506-59	Q	石英二长岩	二长结构; 块状构造。	主要矿物有石英(15%~25%, 0.4~3 mm)、钾长石(20%~25%, 0.3~2 mm)、斜长石(35%~40%, 0.1~1 mm)等, 次要矿物为黑云母(4%~7%, 0.05~0.1 mm), 副矿物为磷灰石、锆石等。	主量、痕量元素	ZK5506 的 571 m
HH4309-146	R				主量、痕量元素	ZK4309 的 662 m
HH4309-140	S				主量、痕量元素	ZK4309 的 552 m
HH5503-01	T				年龄; 主量、痕量元素	ZK5503 的 64~333 m
HH5506-64	U				主量、痕量元素	ZK5506 的 336 m

测试中心完成。其中, 主量元素采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定, 检测下限为 0.01% (FeO 为 0.05%); 稀土元素和微量元素含量使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定, 检测精度一般优于 10%。数据处理采用路远发(2004)地球化学工具软件包 GeoKit 程序。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

红花尔基白钨矿矿床 3 件花岗岩样品中锆石晶形一般较完整, 呈典型的自形-半自形的粒状或长柱状, 长轴在 100~200 μm , 长宽比介于 1.5:1~5:1 之间, 其次为浑圆状、不规则状。锆石为无色到略带浅黄色, 少数锆石内分布有细长针状磷灰石包体, 表面可见少量裂隙和熔蚀小坑。由锆石的阴极发光图像可以看出(图 3), 大部分锆石结晶较好, 具有典型的岩浆振荡生长环带(Rubatto, 2002; Belousova *et al.*, 2002), 指示其主体为岩浆结晶的产物, 但部分锆石发育疑似继承锆石的核结构, 核部为灰黑色, 缺少生长环带, 边部为灰白色, 发育环带结构, 可能为同一岩浆过程不同阶段形成, 亦或为经历了不同程

度固态重结晶作用的继承锆石(吴元保等, 2004)。部分锆石 U、Th 含量较高, 通过阴极发光图像难以分辨其内部结构。

针对 3 种花岗岩中的锆石分别测试了 25 颗锆石, 结果见表 2 和图 4, 所有测试点的 Th/U 值变化范围为 0.13~3.07(均值为 0.76), 均大于 0.1。样品 HH4309-157(肉红色二长花岗岩)的 25 颗锆石中有 1 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 480.0 Ma, 还有 4 颗锆石的谐和度较低, 未采用; 其余 20 颗锆石的年龄值介于 176.7~180.9 Ma 之间, 加权平均年龄为 179.2 ± 0.6 Ma (MSWD = 1.3)。样品 HH2704-12(灰白色二长花岗岩)的 25 颗锆石中有 1 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值测定结果为 463.2 Ma, 还有 3 颗锆石的谐和度较低, 未采用; 其余 20 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 176.5~181.8 Ma 之间, 加权平均年龄为 179.0 ± 0.6 Ma (MSWD = 0.7)。样品 HH5503-01(石英二长岩)中 25 颗锆石中有 4 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为分别为 467.6 Ma、470.9 Ma、486.0 Ma 和 779.1 Ma, 还有 1 颗锆石的谐和度较低, 未采用; 其余 20 颗锆石的年龄数据在 176.0~181.6 Ma 之间, 加权平均年龄为 178.6 ± 0.7 Ma (MSWD=0.6)。从以上测年数据可以看出, 3 种花岗



图 3 红花尔基白钨矿矿床花岗岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons and their analyzed positions in the granites from the Honghuaerji scheelite deposit

岩的侵位年龄为 179.2 ~ 178.6 Ma, 为燕山早期早侏罗世岩浆活动的产物。3 种花岗岩中识别出了 463.2 ~ 486.0 Ma 和 779.1 Ma 的继承锆石的年龄, 分别对应着新元古代和早中奥陶世, 说明本区可能具有新元古代和早中奥陶世的基底。

3.2 主量元素

从岩石主量元素分析结果(表 3)可以看出, 3 种花岗岩均以高 SiO_2 , 富 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O , 贫 MgO 、

CaO 为特征。肉红色二长花岗岩、灰白色二长花岗岩以及石英二长岩的 SiO_2 含量分别为 69.27% ~ 73.53% (均值为 71.63%)、69.28% ~ 72.36% (均值为 71.19%) 以及 63.09% ~ 68.00% (均值为 66.39%), 后者硅含量明显低于前两者。三者的 Na_2O 含量分别为 2.95% ~ 4.09%、2.89% ~ 3.67% 以及 4.16% ~ 5.65%, 后者钠高于前两者; K_2O 含量则是前两者高于后者, 三者分别为 3.78% ~ 5.43%、

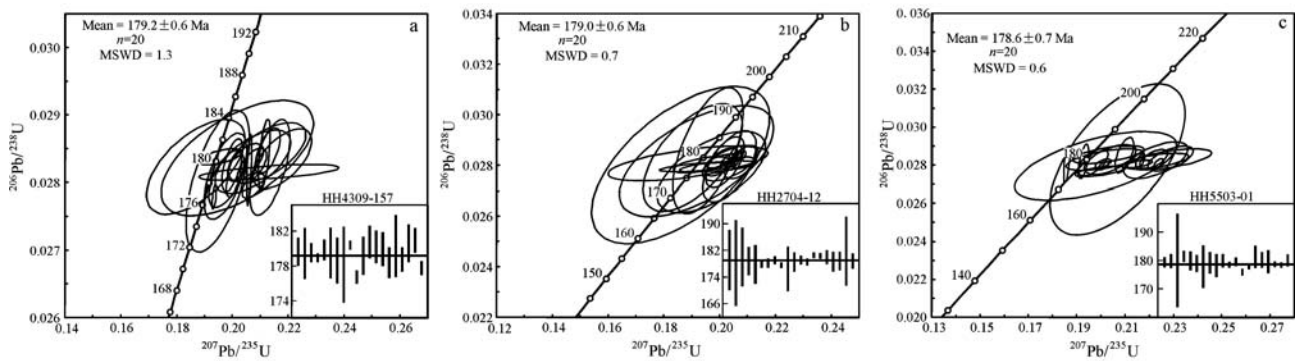


图 4 红花尔基白钨矿矿床花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年谱和图及加权平均年龄

Fig. 4 Zircon U-Pb isotope concordia diagrams and weighted average ages of the granites in the Honghuaerji scheelite deposit

表 2 红花尔基白钨矿矿床赋矿花岗岩样品 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 2 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the three ore-bearing granites in the Honghuaerji scheelite deposit

样品点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			年龄 (Ma, 1 σ)		
	Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
肉红色二长花岗岩(HH4309-157)										
HH4309-157-01	69.76	135.71	228.66	0.59	0.0512 ± 0.0004	0.1999 ± 0.0024	0.0283 ± 0.0003	253.8 ± 49.1	185.0 ± 2.1	179.7 ± 1.6
HH4309-157-02	147.19	268.42	407.10	0.66	0.0548 ± 0.0006	0.2133 ± 0.0047	0.0282 ± 0.0005	466.7 ± 19.4	196.4 ± 4.0	179.5 ± 2.9
HH4309-157-03	59.06	120.58	269.68	0.45	0.0531 ± 0.0006	0.2069 ± 0.0034	0.0282 ± 0.0002	344.5 ± 28.7	191.0 ± 2.9	179.6 ± 1.1
HH4309-157-04*	57.37	103.79	343.48	0.30	0.0571 ± 0.0008	0.2239 ± 0.0109	0.0284 ± 0.0010	498.2 ± 31.5	205.1 ± 9.0	180.6 ± 6.3
HH4309-157-05	444.80	592.47	402.17	1.47	0.0549 ± 0.0043	0.2130 ± 0.0165	0.0282 ± 0.0001	405.6 ± 169.4	196.0 ± 13.8	179.0 ± 0.5
HH4309-157-06	82.57	144.84	298.14	0.49	0.0524 ± 0.0011	0.2045 ± 0.0043	0.0283 ± 0.0002	301.9 ± 46.3	188.9 ± 3.6	179.9 ± 1.2
HH4309-157-07	1.39	48.70	49.31	0.99	0.0480 ± 0.0029	0.1867 ± 0.0116	0.0282 ± 0.0005	98.2 ± 137.0	173.8 ± 10.0	179.5 ± 2.9
HH4309-157-08	68.63	67.96	238.26	0.29	0.0510 ± 0.0011	0.1974 ± 0.0050	0.0281 ± 0.0004	239.0 ± 50.0	182.9 ± 4.3	178.6 ± 2.6
HH4309-157-09	121.95	211.05	308.90	0.68	0.0504 ± 0.0018	0.1947 ± 0.0075	0.0280 ± 0.0007	213.0 ± 83.3	180.6 ± 6.4	178.2 ± 4.3
HH4309-157-10	82.74	119.58	328.84	0.36	0.0500 ± 0.0012	0.1957 ± 0.0050	0.0284 ± 0.0001	194.5 ± 25.0	181.4 ± 4.3	180.4 ± 0.5
HH4309-157-11	198.01	204.69	335.85	0.61	0.0504 ± 0.0002	0.1934 ± 0.0005	0.0278 ± 0.0001	216.7 ± 13.9	179.5 ± 0.4	176.7 ± 0.7
HH4309-157-12	190.70	413.82	269.08	1.54	0.0530 ± 0.0007	0.2059 ± 0.0006	0.0282 ± 0.0003	327.8 ± 34.3	190.1 ± 0.5	179.2 ± 2.2
HH4309-157-13	210.13	299.83	501.39	0.60	0.0541 ± 0.0021	0.2123 ± 0.0092	0.0284 ± 0.0003	376.0 ± 88.9	195.5 ± 7.7	180.8 ± 1.8
HH4309-157-14	281.26	188.23	425.75	0.44	0.0557 ± 0.0012	0.2178 ± 0.0069	0.0284 ± 0.0003	438.9 ± 48.1	200.1 ± 5.8	180.2 ± 1.8
HH4309-157-15*	494.19	210.96	223.87	0.94	0.0664 ± 0.0018	0.7081 ± 0.0136	0.0773 ± 0.0007	820.4 ± 57.4	543.6 ± 8.1	480.0 ± 4.0
HH4309-157-16	251.46	264.96	517.16	0.51	0.0531 ± 0.0017	0.2073 ± 0.0090	0.0283 ± 0.0003	331.5 ± 104.6	191.3 ± 7.6	180.0 ± 1.9
HH4309-157-17	48.53	89.27	162.95	0.55	0.0511 ± 0.0011	0.1977 ± 0.0042	0.0281 ± 0.0003	255.6 ± 51.8	183.2 ± 3.5	178.4 ± 1.7
HH4309-157-18*	237.79	162.90	724.23	0.22	0.0583 ± 0.0037	0.2245 ± 0.0153	0.0279 ± 0.0001	542.6 ± 138.9	205.7 ± 12.7	177.4 ± 0.9
HH4309-157-19	76.26	76.87	123.67	0.62	0.0515 ± 0.0044	0.2017 ± 0.0180	0.0284 ± 0.0006	264.9 ± 198.1	186.5 ± 15.2	180.3 ± 3.5
HH4309-157-20	309.35	520.28	909.01	0.57	0.0517 ± 0.0003	0.2005 ± 0.0018	0.0281 ± 0.0002	272.3 ± 14.8	185.5 ± 1.5	178.8 ± 1.4
HH4309-157-21*	267.21	290.15	593.69	0.49	0.0633 ± 0.0010	0.2479 ± 0.0058	0.0284 ± 0.0006	716.7 ± 34.1	224.9 ± 4.7	180.6 ± 3.5
HH4309-157-22	160.86	258.29	517.82	0.50	0.0540 ± 0.0007	0.2113 ± 0.0014	0.0284 ± 0.0003	368.6 ± 29.6	194.7 ± 1.1	180.6 ± 2.1
HH4309-157-23	183.34	312.82	474.81	0.66	0.0542 ± 0.0009	0.2126 ± 0.0030	0.0285 ± 0.0002	388.9 ± 38.9	195.7 ± 2.5	180.9 ± 1.4
HH4309-157-24	98.43	165.43	286.95	0.58	0.0538 ± 0.0005	0.2074 ± 0.0026	0.0280 ± 0.0001	361.2 ± 23.1	191.3 ± 2.2	177.8 ± 0.8
HH4309-157-25*	294.78	522.35	590.39	0.88	0.0632 ± 0.0008	0.2469 ± 0.0042	0.0283 ± 0.0002	716.7 ± 21.3	224.0 ± 3.4	180.0 ± 1.6
灰白色二长花岗岩(HH2704-12)										
HH2704-12-01	1.24	60.91	63.38	0.96	0.0496 ± 0.0062	0.1916 ± 0.0183	0.0282 ± 0.0014	176.0 ± 266.6	178.0 ± 15.6	179.1 ± 9.0
HH2704-12-02*	160.23	251.89	900.28	0.28	0.0553 ± 0.0007	0.2142 ± 0.0051	0.0281 ± 0.0009	433.4 ± 27.8	197.1 ± 4.3	178.6 ± 5.6
HH2704-12-03	4.90	48.54	57.29	0.85	0.0480 ± 0.0042	0.1859 ± 0.0211	0.0280 ± 0.0020	101.9 ± 196.3	173.1 ± 18.0	178.2 ± 12.8
HH2704-12-04	166.26	297.43	267.39	1.11	0.0485 ± 0.0008	0.1902 ± 0.0118	0.0283 ± 0.0014	124.2 ± 37.0	176.8 ± 10.0	180.1 ± 8.8
HH2704-12-05	35.81	80.56	99.87	0.81	0.0523 ± 0.0015	0.2018 ± 0.0045	0.0281 ± 0.0007	298.2 ± 67.6	186.7 ± 3.8	178.9 ± 4.1
HH2704-12-06	351.42	432.19	517.11	0.84	0.0527 ± 0.0001	0.2034 ± 0.0063	0.0280 ± 0.0009	316.7 ± 0.9	188.0 ± 5.3	177.8 ± 5.8
HH2704-12-07*	26.39	81.49	68.10	1.20	0.0538 ± 0.0004	0.2081 ± 0.0008	0.0281 ± 0.0002	361.2 ± 23.1	192.0 ± 0.7	178.5 ± 1.1
HH2704-12-08	32.04	91.74	125.19	0.73	0.0517 ± 0.0021	0.1993 ± 0.0090	0.0280 ± 0.0001	333.4 ± 92.6	184.5 ± 7.6	177.8 ± 0.9
HH2704-12-09	22.38	87.05	248.42	0.35	0.0500 ± 0.0018	0.1931 ± 0.0065	0.0280 ± 0.0002	194.5 ± 81.5	179.3 ± 5.5	178.2 ± 1.3
HH2704-12-10	20.39	87.09	336.59	0.26	0.0517 ± 0.0010	0.2006 ± 0.0037	0.0282 ± 0.0002	333.4 ± 44.4	185.7 ± 3.1	179.1 ± 1.1
HH2704-12-11*	147.91	100.69	102.36	0.98	0.0598 ± 0.0005	0.6147 ± 0.0053	0.0745 ± 0.0003	598.2 ± 1389	486.5 ± 3.31	463.2 ± 1.8
HH2704-12-12	68.68	197.98	244.23	0.81	0.0499 ± 0.0025	0.1921 ± 0.0090	0.0279 ± 0.0001	190.8 ± 112.0	178.4 ± 7.7	177.6 ± 0.7
HH2704-12-13*	55.46	69.82	69.70	1.00	0.0549 ± 0.0017	0.2131 ± 0.0057	0.0282 ± 0.0005	409.3 ± 66.7	196.1 ± 4.8	179.3 ± 3.0

续表 2

Continued Table 2

样品点号	$\omega_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			年龄(Ma, 1 σ)		
	Pb	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U
HH2704-12-14	42.08	86.51	333.93	0.26	0.051 7 $\pm$ 0.005 3	0.197 0 $\pm$ 0.012 8	0.027 8 $\pm$ 0.001 1	333.4 $\pm$ 241.6	182.6 $\pm$ 10.9	176.5 $\pm$ 6.6
HH2704-12-15	60.22	70.36	142.00	0.50	0.048 6 $\pm$ 0.004 1	0.188 6 $\pm$ 0.018 9	0.028 1 $\pm$ 0.000 5	127.9 $\pm$ 194.4	175.4 $\pm$ 16.1	178.5 $\pm$ 2.8
HH2704-12-16	119.89	153.32	461.11	0.33	0.052 3 $\pm$ 0.000 4	0.203 3 $\pm$ 0.002 1	0.028 2 $\pm$ 0.000 2	298.2 $\pm$ 19.4	187.9 $\pm$ 1.7	179.1 $\pm$ 1.3
HH2704-12-17*	88.46	122.42	165.36	0.74	0.057 6 $\pm$ 0.005 6	0.222 6 $\pm$ 0.017 6	0.028 0 $\pm$ 0.000 5	522.3 $\pm$ 217.6	204.1 $\pm$ 14.6	178.3 $\pm$ 3.2
HH2704-12-18	180.80	220.21	545.15	0.40	0.053 4 $\pm$ 0.000 6	0.207 0 $\pm$ 0.003 4	0.028 1 $\pm$ 0.000 2	346.4 $\pm$ 25.9	191.1 $\pm$ 2.9	178.5 $\pm$ 1.0
HH2704-12-19	293.83	428.95	777.07	0.55	0.052 8 $\pm$ 0.000 2	0.206 6 $\pm$ 0.001 0	0.028 4 $\pm$ 0.000 1	320.4 $\pm$ 2.8	190.7 $\pm$ 0.8	180.6 $\pm$ 0.8
HH2704-12-20	189.39	269.33	501.34	0.54	0.053 0 $\pm$ 0.000 3	0.207 5 $\pm$ 0.001 3	0.028 4 $\pm$ 0.000 1	331.5 $\pm$ 11.1	191.4 $\pm$ 1.1	180.4 $\pm$ 0.8
HH2704-12-21	114.86	152.61	394.56	0.39	0.052 6 $\pm$ 0.000 2	0.205 3 $\pm$ 0.001 6	0.028 3 $\pm$ 0.000 3	309.3 $\pm$ 9.3	189.6 $\pm$ 1.4	180.0 $\pm$ 2.0
HH2704-12-22	142.48	235.76	582.63	0.40	0.052 5 $\pm$ 0.000 8	0.203 5 $\pm$ 0.006 4	0.028 1 $\pm$ 0.000 5	309.3 $\pm$ 35.2	188.1 $\pm$ 5.4	178.6 $\pm$ 2.9
HH2704-12-23	90.48	171.50	261.28	0.66	0.053 6 $\pm$ 0.000 2	0.207 7 $\pm$ 0.004 0	0.028 1 $\pm$ 0.000 4	353.8 $\pm$ 9.3	191.6 $\pm$ 3.4	178.8 $\pm$ 2.7
HH2704-12-24	77.01	95.74	142.04	0.67	0.049 7 $\pm$ 0.000 7	0.195 7 $\pm$ 0.008 3	0.028 6 $\pm$ 0.001 6	189.0 $\pm$ 35.2	181.5 $\pm$ 7.0	181.8 $\pm$ 10.3
HH2704-12-25	128.43	176.78	427.81	0.41	0.051 7 $\pm$ 0.000 9	0.200 5 $\pm$ 0.004 0	0.028 1 $\pm$ 0.000 4	272.3 $\pm$ 45.4	185.6 $\pm$ 3.4	178.9 $\pm$ 2.2
石英二长岩(HH5503-01)										
HH5503-01-01	905.17	1 699.20	1 392.86	1.22	0.057 1 $\pm$ 0.001 8	0.222 4 $\pm$ 0.009 0	0.028 2 $\pm$ 0.000 3	494.5 $\pm$ 65.7	203.9 $\pm$ 7.5	179.4 $\pm$ 1.7
HH5503-01-02	85.84	181.10	102.97	1.76	0.051 7 $\pm$ 0.002 9	0.201 6 $\pm$ 0.010 7	0.028 3 $\pm$ 0.000 4	272.3 $\pm$ 127.8	186.5 $\pm$ 9.0	179.9 $\pm$ 2.4
HH5503-01-03	2 283.97	5 415.84	3 083.83	1.76	0.052 9 $\pm$ 0.000 2	0.206 7 $\pm$ 0.018 5	0.028 3 $\pm$ 0.002 6	327.8 $\pm$ 13.9	190.8 $\pm$ 15.5	180.1 $\pm$ 16.4
HH5503-01-04*	8.66	30.25	37.60	0.80	0.046 7 $\pm$ 0.004 4	0.180 4 $\pm$ 0.002 6	0.028 3 $\pm$ 0.003 1	31.6 $\pm$ 224.0	168.4 $\pm$ 2.2	180.0 $\pm$ 19.4
HH5503-01-05	79.16	175.17	205.90	0.85	0.051 5 $\pm$ 0.003 0	0.202 9 $\pm$ 0.009 7	0.028 6 $\pm$ 0.000 3	264.9 $\pm$ 135.2	187.5 $\pm$ 8.2	181.6 $\pm$ 1.9
HH5503-01-06	84.43	221.11	401.65	0.55	0.052 2 $\pm$ 0.001 7	0.203 7 $\pm$ 0.007 1	0.028 3 $\pm$ 0.000 5	294.5 $\pm$ 72.2	188.2 $\pm$ 6.0	179.9 $\pm$ 3.2
HH5503-01-07	198.42	440.46	366.98	1.20	0.050 8 $\pm$ 0.001 5	0.196 6 $\pm$ 0.004 1	0.028 2 $\pm$ 0.000 5	231.6 $\pm$ 65.7	182.3 $\pm$ 3.5	179.0 $\pm$ 2.9
HH5503-01-08	106.80	227.70	228.02	1.00	0.051 1 $\pm$ 0.003 6	0.197 7 $\pm$ 0.022 1	0.028 0 $\pm$ 0.001 2	242.7 $\pm$ 161.1	183.2 $\pm$ 18.7	177.9 $\pm$ 7.5
HH5503-01-09	111.33	213.27	390.19	0.55	0.049 5 $\pm$ 0.000 7	0.192 6 $\pm$ 0.001 4	0.028 2 $\pm$ 0.000 6	172.3 $\pm$ 33.3	178.9 $\pm$ 1.2	179.3 $\pm$ 3.7
HH5503-01-10*	735.74	614.18	1 205.76	0.51	0.060 6 $\pm$ 0.000 3	0.233 9 $\pm$ 0.006 1	0.075 8 $\pm$ 0.000 6	627.8 $\pm$ 9.3	498.5 $\pm$ 3.8	470.9 $\pm$ 3.7
HH5503-01-11	255.10	610.64	273.29	2.23	0.048 1 $\pm$ 0.001 1	0.185 7 $\pm$ 0.000 9	0.028 0 $\pm$ 0.000 6	101.9 $\pm$ 49.1	173.0 $\pm$ 0.7	178.3 $\pm$ 4.0
HH5503-01-12	202.67	377.14	1 065.60	0.35	0.058 4 $\pm$ 0.002 2	0.228 1 $\pm$ 0.011 6	0.028 3 $\pm$ 0.000 4	542.6 $\pm$ 88.0	208.6 $\pm$ 9.6	180.0 $\pm$ 2.3
HH5503-01-13*	329.82	161.94	157.31	1.03	0.069 9 $\pm$ 0.000 4	1.237 4 $\pm$ 0.007 9	0.128 5 $\pm$ 0.000 6	924.1 $\pm$ 43.1	817.7 $\pm$ 3.6	779.1 $\pm$ 3.6
HH5503-01-14*	265.59	154.45	198.32	0.78	0.064 4 $\pm$ 0.003 3	0.694 7 $\pm$ 0.029 2	0.078 3 $\pm$ 0.000 8	753.7 $\pm$ 107.4	535.6 $\pm$ 17.5	486.0 $\pm$ 4.6
HH5503-01-15	144.65	238.93	365.75	0.65	0.051 8 $\pm$ 0.0005 6	0.200 8 $\pm$ 0.002 2	0.028 1 $\pm$ 0.000 2	276.0 $\pm$ 22.2	185.8 $\pm$ 1.9	178.6 $\pm$ 1.0
HH5503-01-16	320.92	491.96	1 242.93	0.40	0.055 5 $\pm$ 0.000 2	0.216 2 $\pm$ 0.001 2	0.028 3 $\pm$ 0.000 2	431.5 $\pm$ 2.8	198.8 $\pm$ 1.0	179.6 $\pm$ 1.5
HH5503-01-17*	351.45	149.94	1 143.78	0.13	0.063 6 $\pm$ 0.001 7	0.659 5 $\pm$ 0.014 9	0.075 2 $\pm$ 0.000 4	727.8 $\pm$ 25.0	514.3 $\pm$ 9.1	467.6 $\pm$ 2.3
HH5503-01-18	212.62	398.33	541.20	0.74	0.052 2 $\pm$ 0.001 4	0.199 2 $\pm$ 0.006 6	0.027 7 $\pm$ 0.000 2	300.1 $\pm$ 63.0	184.4 $\pm$ 5.5	176.0 $\pm$ 1.1
HH5503-01-19	235.20	374.31	804.22	0.47	0.052 1 $\pm$ 0.000 3	0.200 9 $\pm$ 0.001 3	0.028 0 $\pm$ 0.000 1	287.1 $\pm$ 11.1	185.9 $\pm$ 1.1	177.9 $\pm$ 0.9
HH5503-01-20	162.19	247.91	409.77	0.61	0.053 3 $\pm$ 0.001 4	0.209 6 $\pm$ 0.002 5	0.028 5 $\pm$ 0.000 6	342.7 $\pm$ 57.4	193.2 $\pm$ 2.1	181.4 $\pm$ 3.9
HH5503-01-21	112.84	117.80	178.70	0.66	0.058 5 $\pm$ 0.000 7	0.228 6 $\pm$ 0.006 2	0.028 4 $\pm$ 0.000 4	546.3 $\pm$ 25.9	209.1 $\pm$ 5.1	180.3 $\pm$ 2.7
HH5503-01-22	78.26	115.93	141.99	0.82	0.057 2 $\pm$ 0.002 2	0.222 7 $\pm$ 0.008 7	0.028 3 $\pm$ 0.000 6	498.2 $\pm$ 89.8	204.1 $\pm$ 7.2	179.7 $\pm$ 4.0
HH5503-01-23	3 129.35	5 648.07	1 838.07	3.07	0.057 7 $\pm$ 0.006 6	0.223 8 $\pm$ 0.001 3	0.028 1 $\pm$ 0.000 2	520.4 $\pm$ 24.1	205.1 $\pm$ 1.1	178.8 $\pm$ 1.1
HH5503-01-24	115.74	191.53	394.23	0.49	0.055 7 $\pm$ 0.001 0	0.215 5 $\pm$ 0.003 7	0.028 1 $\pm$ 0.000 1	438.9 $\pm$ 40.7	198.2 $\pm$ 3.1	178.5 $\pm$ 0.8
HH5503-01-25	1 662.71	3 137.79	1 506.88	2.08	0.056 7 $\pm$ 0.000 3	0.221 7 $\pm$ 0.003 8	0.028 3 $\pm$ 0.000 3	479.7 $\pm$ 8.3	203.3 $\pm$ 3.2	180.1 $\pm$ 2.1

注：※代表继承锆石年龄；*代表谱和度较低，未采用数据。

4.08%~5.44%以及2.15%~4.02%。3种花岗岩的全碱(ALK)含量较高,且无明显差别,Na₂O+K₂O值分别为7.71%~8.40%、7.60%~8.33%和7.48%~8.74%。在SiO₂-K₂O图解(图5a)上,两种二长花岗岩显示高钾钙碱性系列和钾玄岩系列的特征,而石英二长岩为高钾钙碱性系列。它们的Al₂O₃含量分别为13.13%~14.68%、13.08%~14.61%和15.17%~17.56%;MgO含量分别为0.66%~0.99%、0.52%~1.10%和0.93%~1.47%;CaO含量分别为1.02%~2.10%、1.00%~1.95%和1.94%~3.54%。以上数据可以看出:两种二长花岗岩的地球化学测试结果较为一致,石英

二长岩则相对贫硅、钾,富钠、铝、镁、钙等。三者的分异指数(DI)均较高,分别为83.10~90.07、83.80~88.40、73.25~83.11,固结指数(SI)较低,分别为6.02~8.48、4.95~8.97、7.35~11.10,说明其均经历了较高分异演化作用。3种花岗岩的A/CNK值变化范围较小且均小于1.1,分别为1.00~1.04、1.03~1.08和0.97~1.05,具有弱过铝质到准铝质的特征(图5b)。

3.3 稀土元素

稀土元素的分析结果及特征值(表3)显示:矿区3种花岗岩的稀土元素总量(Σ REE,不包括元素Y)中等且差别不大,分别为115.26 $\times 10^{-6}$ ~192.44 $\times 10^{-6}$ 、

Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) compositions of the granites in the Honghuacriji scheelite deposit

岩性代号	肉红色二长花岗岩					灰白色二长花岗岩					石英二长岩										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
SiO ₂	71.05	70.90	73.21	69.27	70.86	72.60	73.53	72.19	69.82	69.28	70.60	72.00	71.86	72.36	71.40	67.38	67.80	67.72	64.37	63.09	68.00
TiO ₂	0.36	0.47	0.29	0.45	0.40	0.30	0.30	0.33	0.42	0.45	0.39	0.46	0.39	0.42	0.49	0.54	0.50	0.50	0.57	0.62	0.51
Al ₂ O ₃	14.64	13.95	13.31	14.68	13.85	13.47	13.13	13.95	14.32	14.61	14.11	13.12	13.36	13.08	13.48	15.31	15.55	16.12	17.56	16.88	15.17
Fe ₂ O ₃	1.14	1.31	0.72	1.11	1.05	0.78	0.76	0.48	0.73	0.84	0.79	0.99	0.72	1.04	1.03	1.16	1.27	1.14	1.82	1.58	1.26
FeO	1.33	1.71	1.19	1.71	1.53	1.20	1.17	1.56	1.96	2.01	1.53	1.81	1.71	1.58	2.03	2.28	2.10	1.80	1.98	2.55	2.07
Mn ₂ O	0.08	0.11	0.06	0.10	0.09	0.06	0.07	0.07	0.09	0.08	0.06	0.10	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.10	0.11	0.14	0.10
MgO	0.71	0.99	0.67	0.93	0.79	0.66	0.67	0.52	0.94	0.81	0.82	0.96	0.84	0.90	1.10	1.16	0.97	0.93	1.09	1.47	1.10
CaO	2.04	1.86	1.40	2.10	1.77	1.33	1.02	1.28	1.82	1.69	1.95	1.00	1.30	1.02	1.20	2.40	1.94	2.06	2.81	3.54	2.39
Na ₂ O	4.09	3.72	3.07	3.90	3.29	2.95	3.01	3.39	3.61	3.67	3.52	2.90	2.98	2.89	3.15	4.16	5.22	4.72	5.65	4.85	4.32
K ₂ O	3.78	3.99	4.92	4.05	4.51	5.43	5.39	4.61	4.27	4.13	4.08	5.32	5.31	5.44	4.93	3.54	2.85	4.02	2.15	2.80	3.16
P ₂ O ₅	0.13	0.16	0.10	0.15	0.14	0.10	0.10	0.11	0.15	0.17	0.14	0.14	0.12	0.13	0.15	0.19	0.17	0.19	0.25	0.31	0.20
LOI	0.47	0.60	0.75	1.02	1.67	1.17	0.79	1.20	1.37	1.97	1.49	0.88	1.21	0.74	0.83	1.41	1.00	0.51	1.31	1.64	1.43
Total	99.96	99.95	99.82	99.66	100.11	100.18	100.05	99.88	99.70	99.92	99.65	99.85	100.06	99.86	100.11	99.89	99.71	99.99	99.86	99.76	99.92
DI	84.72	84.05	88.23	83.10	85.18	88.58	90.07	87.91	83.80	84.05	84.36	87.75	87.34	88.40	86.00	79.66	82.68	83.11	77.26	73.25	80.24
SI	6.41	8.48	6.35	7.97	7.06	6.02	6.05	4.95	8.21	7.05	7.63	7.98	7.26	7.60	8.97	9.44	7.82	7.35	8.62	11.10	9.24
AR	2.79	2.90	3.37	2.80	2.99	3.61	3.92	3.21	2.90	2.84	2.80	3.79	3.60	3.89	3.45	2.54	2.71	2.85	2.24	2.20	2.48
A/CNK	1.01	1.01	1.03	1.00	1.03	1.02	1.04	1.08	1.03	1.08	1.03	1.06	1.03	1.05	1.06	1.02	1.02	1.02	1.05	0.97	1.02
A/NK	1.35	1.34	1.28	1.36	1.35	1.26	1.22	1.32	1.36	1.39	1.38	1.25	1.25	1.23	1.28	1.43	1.33	1.33	1.51	1.53	1.44
σ	2.20	2.12	2.10	2.38	2.16	2.36	2.30	2.18	2.29	2.29	2.07	2.32	2.37	2.35	2.29	2.40	2.60	3.07	2.79	2.84	2.21
La	38.30	34.60	20.80	40.30	24.30	22.50	26.40	21.50	19.60	26.00	27.30	26.30	21.70	23.40	21.90	35.10	26.30	38.70	44.00	34.40	37.30
Ce	74.00	69.90	42.90	77.40	49.60	46.40	54.10	46.10	42.00	54.70	56.40	56.20	45.90	51.40	47.60	72.90	52.30	77.00	84.90	69.00	77.60
Pr	8.70	8.31	5.43	9.25	6.14	5.67	6.65	5.72	5.15	6.66	6.87	7.03	5.70	6.24	6.20	8.04	6.11	9.08	10.30	8.32	8.94
Nd	32.50	32.00	21.70	34.90	24.50	22.40	27.00	22.50	21.20	26.80	26.40	27.80	22.60	24.90	25.90	31.20	24.40	33.90	39.60	33.10	34.30
Sm	6.62	7.04	5.46	7.63	5.90	5.72	6.16	5.72	5.64	6.57	6.11	6.78	5.82	6.39	6.69	6.53	5.87	7.63	7.94	6.60	7.23
Eu	1.58	1.42	1.52	1.82	1.56	1.42	1.39	1.14	1.57	1.70	1.59	1.29	1.41	1.36	1.28	1.51	1.67	2.28	1.68	1.69	1.81
Gd	6.79	8.20	6.38	6.67	5.53	5.50	5.65	7.07	6.54	6.10	5.21	6.35	6.83	6.51	7.63	6.69	7.71	5.68	6.67	5.50	7.07
Tb	0.82	0.92	0.68	0.93	0.75	0.74	0.77	0.90	0.78	0.85	0.74	0.91	0.78	0.87	1.01	0.81	0.75	0.71	1.18	0.76	0.95
Dy	4.98	5.68	4.21	5.64	4.55	4.71	4.54	5.52	4.52	4.79	4.30	5.05	4.42	4.69	6.25	4.94	4.77	4.53	7.29	4.59	5.07
Hf	0.83	0.97	0.75	0.94	0.77	0.90	0.77	1.12	0.87	0.89	0.79	0.94	0.83	0.85	1.27	0.83	0.86	0.73	1.38	0.79	0.87
Er	2.89	3.20	2.43	3.12	2.44	2.82	2.60	3.32	2.60	2.65	2.45	2.90	2.60	2.58	3.69	2.75	2.79	2.44	4.24	2.57	2.77
Tm	0.37	0.41	0.33	0.41	0.31	0.40	0.33	0.53	0.38	0.37	0.34	0.40	0.37	0.35	0.57	0.36	0.39	0.31	0.63	0.35	0.36
Yb	2.68	2.91	2.31	2.96	2.24	2.85	2.43	3.67	2.73	2.66	2.41	2.90	2.62	2.51	3.97	2.59	2.73	2.26	4.52	2.52	2.62

续表 3
Continued Table 3

岩性代号	肉红色二长花岗岩							灰白色二长花岗岩							石英二长岩						
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
Lu	0.41	0.45	0.36	0.47	0.34	0.44	0.38	0.58	0.43	0.42	0.38	0.44	0.42	0.40	0.62	0.39	0.45	0.37	0.71	0.41	0.41
Y	24.10	26.90	21.90	26.50	21.70	25.60	21.80	31.80	25.00	24.40	21.40	26.10	23.40	23.20	35.80	23.40	24.60	20.90	41.20	23.50	23.80
ΣREE	181.47	176.01	115.26	192.44	128.93	122.47	139.17	125.39	114.01	141.16	141.29	145.29	122.00	132.45	134.58	174.64	137.10	185.62	215.04	170.60	187.30
(La/Yb) _N	10.25	8.53	6.46	9.77	7.78	5.66	7.79	4.20	5.15	7.01	8.13	6.51	5.94	6.69	3.96	9.72	6.91	12.28	6.98	9.79	10.21
δCe	0.96	0.98	0.97	0.95	0.97	0.98	0.97	1.00	1.00	0.99	0.98	0.99	0.99	1.02	0.99	1.02	0.98	0.97	0.94	0.97	1.01
δEu	0.71	0.57	0.79	0.76	0.82	0.76	0.71	0.55	0.79	0.81	0.84	0.59	0.68	0.64	0.55	0.69	0.76	1.01	0.69	0.83	0.76
Rb	109	114	134	122	119	146	157	122	124	133	109	148	135	150	49	110	126	144	114	116	119
Ba	561	559	637	759	626	596	615	372	638	673	572	578	533	627	553	589	657	1107	438	5640	637
Th	13.10	15.90	12.20	19.10	13.30	14.70	21.00	13.10	7.60	13.70	12.40	15.70	11.30	14.90	14.40	12.50	9.50	11.80	12.20	7.70	13.60
U	2.20	3.40	2.50	4.80	2.20	3.50	2.80	8.20	3.10	5.50	2.60	2.20	3.40	2.00	4.20	3.30	3.70	2.10	4.90	2.80	8.10
Ta	1.61	1.55	0.87	1.37	0.88	1.23	0.96	1.87	1.41	1.31	1.46	1.28	1.07	1.01	1.89	1.34	1.39	1.06	2.35	1.31	1.81
Nb	11.90	15.20	10.00	14.10	12.50	11.70	10.50	17.30	13.80	13.90	13.10	15.10	11.00	12.60	17.30	12.80	14.70	14.90	19.00	15.60	13.60
Sr	244	209	177	263	235	161	156	143	227	257	235	119	148	151	136	238	243	395	311	407	294
Zr	164	133	138	221	160	132	116	145	154	163	201	153	150	152	176	145	220	332	314	267	185
Hf	4.34	4.48	4.42	6.79	5.20	4.60	3.76	5.15	4.95	5.01	6.18	5.30	5.13	5.09	6.30	4.66	6.40	8.44	8.66	6.90	5.82
Sc	5.38	7.17	5.82	7.47	7.11	6.37	5.55	6.73	7.43	7.99	6.65	7.64	7.34	7.95	9.33	6.83	6.48	4.86	6.96	6.86	7.60
Cr	6.00	6.50	5.10	9.90	6.30	4.90	6.10	5.70	11.40	12.00	9.80	10.80	8.70	8.20	6.90	5.10	3.10	5.30	18.00	5.90	8.50
Cs	6.00	5.30	5.90	7.70	18.00	7.40	7.00	6.10	16.00	8.80	7.10	16.00	8.70	16.00	13.10	18.30	8.50	10.20	17.30	16.20	15.40
Li	43.40	50.90	41.40	54.40	34.30	45.90	50.60	27.10	46.20	36.00	56.10	42.60	36.70	42.20	43.00	46.40	54.40	53.60	52.20	53.90	61.70
Be	3.23	2.47	2.08	3.02	2.17	2.60	2.27	3.27	2.75	2.94	2.60	2.29	1.94	2.03	2.83	2.94	5.71	2.74	5.51	3.42	4.00
B	18.80	17.60	12.30	5.20	6.90	11.00	12.70	5.00	13.30	33.10	27.50	6.30	5.50	12.50	47.80	12.70	13.80	13.80	13.70	7.30	13.20
F	600	450	460	570	510	390	360	480	630	580	500	660	480	590	660	650	610	550	690	880	500
Cl	136	107	37	41	55	38	37	52	107	57	56	151	102	122	162	103	40	48	59	152	56
V	24.40	27.70	15.50	29.80	22.10	16.30	16.70	17.00	24.90	25.70	20.80	24.00	20.10	21.80	26.60	30.10	31.00	18.30	25.40	39.20	39.10
Ni	3.99	4.53	3.01	6.66	4.34	3.11	4.71	3.56	6.33	7.84	6.03	5.34	4.59	4.55	4.29	3.98	3.61	3.83	9.89	7.05	6.57
W	0.52	0.91	0.88	7.28	1.12	1.69	2.03	4.12	0.42	6.81	68.90	7.54	1.66	3.07	1.29	0.30	2.72	8.93	10.30	0.83	0.37
Cu	5.87	6.33	5.92	7.64	9.14	6.83	6.59	36.60	7.40	48.80	48.20	7.01	6.96	6.68	8.00	9.68	10.20	9.32	11.70	12.00	11.20
Rb/Sr	0.45	0.55	0.76	0.46	0.51	0.91	1.01	0.85	0.55	0.52	0.46	1.24	0.91	0.99	1.10	0.46	0.52	0.36	0.37	0.29	0.40
Nb/Ta	7.39	9.81	11.49	10.29	14.20	9.51	10.94	9.25	9.79	0.61	8.97	11.80	10.28	12.48	9.15	9.55	10.58	14.06	8.09	11.91	7.51
Zr/Hf	37.79	29.69	31.22	32.55	30.77	28.70	30.85	28.16	31.11	32.53	32.52	28.87	29.24	29.86	27.94	31.12	34.38	39.34	36.26	38.70	31.79

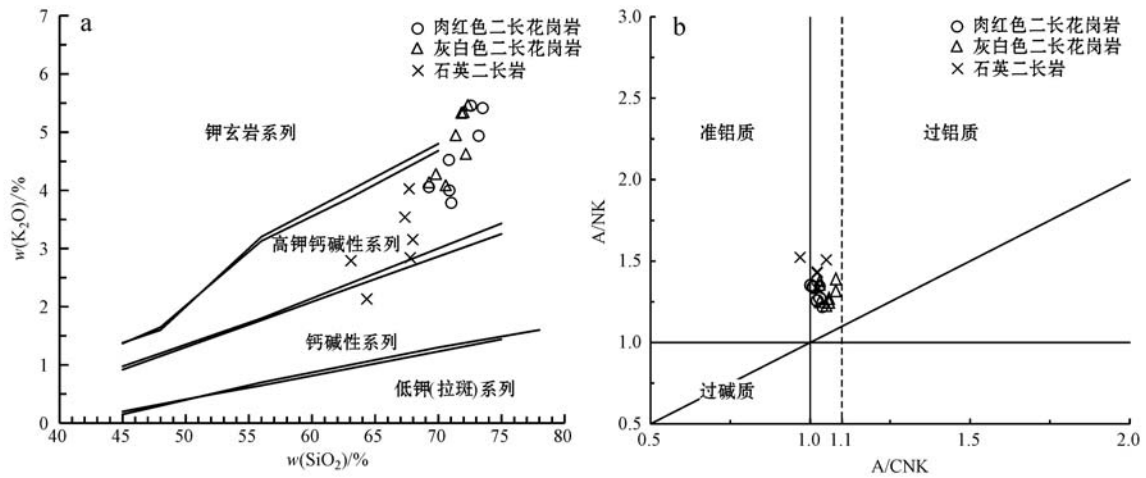


图 5 红花尔基白钨矿矿床花岗岩 K_2O-SiO_2 (a, 据 Peccerillo *et al.*, 1976 和 Middlemost, 1985) 和 $A/NK-A/CNK$ (b, 据 Shand, 1943) 图解

Fig. 5 Diagrams of K_2O-SiO_2 (a, after Peccerillo *et al.*, 1976 and Middlemost, 1985) and $A/NK-A/CNK$ (b, after Shand, 1943) of the granites in the Honghuaerji scheelite deposit

$114.01 \times 10^{-6} \sim 145.29 \times 10^{-6}$ 、 $137.10 \times 10^{-6} \sim 215.04 \times 10^{-6}$, 与世界平均花岗岩 (ΣREE 为 254.3×10^{-6} ; Vinogradov, 1962) 以及华南地区改造型花岗岩 (ΣREE 为 234.5×10^{-6} ; 刘英俊, 1984) 的稀土含量相比偏低。它们的 $(La/Yb)_N$ 值分别为 $5.66 \sim 10.25$ 、 $3.96 \sim 8.13$ 和 $6.91 \sim 12.28$, 反映了花岗岩轻重稀土之间的分馏较明显。球粒陨石标准化配分曲线上 (图 6a), 3 种花岗岩样品显示了相似的稀土配分模式: 整体显示右倾轻稀土富集型特征, 且轻稀

土元素分馏程度明显高于重稀土元素。它们的 δCe 值分别为 $0.95 \sim 0.98$ (均值为 0.97)、 $0.98 \sim 1.02$ (均值为 1.00)、 $0.94 \sim 1.02$ (均值为 0.98)。样品均具有弱的 Ce 负异常或无异常。三者均呈现中等负 Eu 异常的特点, δEu 值分别为 $0.57 \sim 0.82$ (均值为 0.73)、 $0.55 \sim 0.84$ (均值为 0.68) 和 $0.69 \sim 1.01$ (均值为 0.79)。钕亏损不明显的特征指示岩浆源区含少量斜长石或者岩浆经历了少量斜长石的分离结晶作用 (Hassanen, 1997)。三者的稀土配分曲线在 Eu

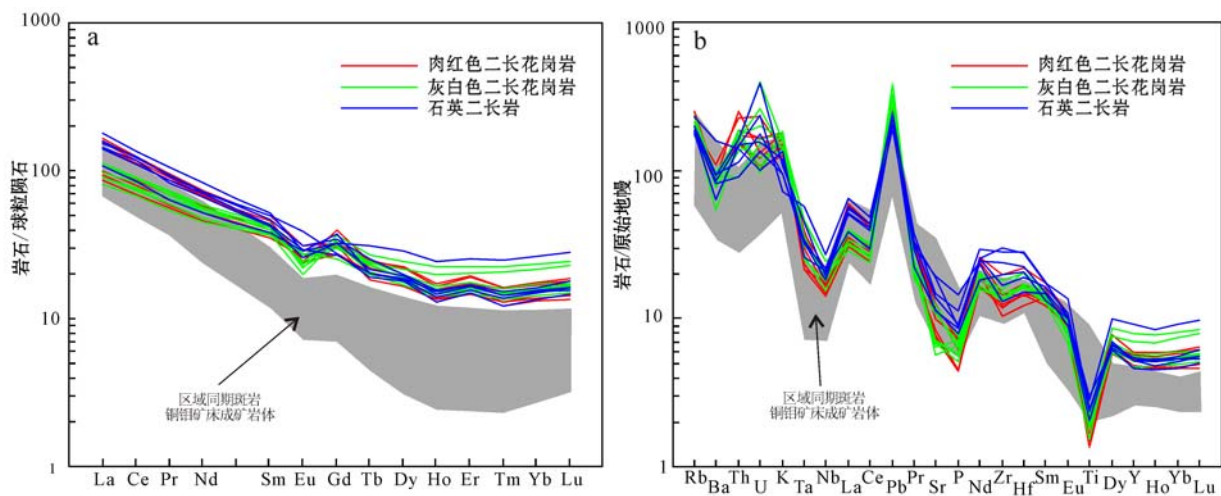


图 6 红花尔基白钨矿矿床花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b) (球粒陨石和原始地幔据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of the granites in the Honghuaerji scheelite deposit (after Sun and McDonough, 1989)

处均显示“V”型谷而在 Gd 和 Er 处则显示反“V”型谷的特征,暗示了三者为同一母岩浆演化的结果。与区域同期形成的斑岩型铜钼矿床的成矿岩体相比,红花尔基岩体的轻重稀土分馏程度略弱。

3.4 微量元素

从表 3 可知,3 种花岗岩的微量元素含量特征无明显差别。其中,大离子亲石元素(LILE) Rb、Ba、Sr 质量分数分别为 $109 \times 10^{-6} \sim 157 \times 10^{-6}$ 、 $372 \times 10^{-6} \sim 1107 \times 10^{-6}$ 、 $119 \times 10^{-6} \sim 407 \times 10^{-6}$;高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Zr、Hf 的质量分数分别为 $10.0 \times 10^{-6} \sim 19.0 \times 10^{-6}$ 、 $0.87 \times 10^{-6} \sim 2.35 \times 10^{-6}$ 、 $116 \times 10^{-6} \sim 332 \times 10^{-6}$ 、 $3.76 \times 10^{-6} \sim 8.66 \times 10^{-6}$ 。三者 Rb/Sr 比值为 $0.29 \sim 1.24$; Nb/Ta 和 Zr/Hf 值分别为 $7.39 \sim 14.20$ 和 $27.94 \sim 39.34$,略低于原始地幔平均值(原始地幔 Nb/Ta 和 Zr/Hf 平均值分别为 17.8 和 37.1, McDonough and Sun, 1995)。3 种花岗岩的微量元素比值蛛网图(图 6b)具有大致相似的特征,整体富集大离子亲石元素,相对亏损高场强元素。三者均显示富集 Rb、K 和放射性生热元素 U、Th、Pb,而 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 则明显亏损的特征。

4 讨论

4.1 花岗岩成因类型及成岩年龄

自从 Chappell 和 White(1974)首次提出花岗岩的 I 型和 S 型分类方案以后,学者们按照其源岩物质的不同(Pitcher, 1982, 1993)将花岗岩分为 I、S、M、A 4 种成因类型。红花尔基 3 种花岗岩的 $Zr + Nb + Ce + Y$ ($202 \times 10^{-6} \sim 459 \times 10^{-6}$), FeO^T/MgO ($2.69 \sim 3.83$) 以及 $(K_2O + Na_2O)/CaO$ ($2.16 \sim 8.24$) 均低于 A 型花岗岩(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987)。在 $(Zr + Nb + Ce + Y) - FeO^T$ 和 $(Zr + Nb + Ce + Y) - (K_2O + Na_2O)/CaO$ 判别图解上,几乎所有样品落入非 A 型花岗岩区域(图略),因此排除赋矿花岗岩为 A 型花岗岩的可能性。3 种花岗岩的 A/CNK 值介于 $0.97 \sim 1.08$,均小于 1.1,显示弱过铝质性质,低于典型的过铝质 S 型花岗岩(其 $A/CNK > 1.1$; Chappell, 1999; Clemens *et al.*, 2011)。由于磷灰石在准铝质和弱过铝质岩浆中已饱和,而在强过铝质岩浆熔体中却是可溶的(Wolf and London, 1994; Li *et al.*, 2007),因此花岗岩样品的 P_2O_5 含量随着 SiO_2 含量的增减就成为判定花

岗岩成因类型的重要指标。在 $P_2O_5 - SiO_2$ 图解上,随着岩浆演化过程的进行, P_2O_5 呈现明显的下降趋势(图 7f),可以判定红花尔基花岗岩体为 I 型花岗岩。另外,红花尔基花岗岩样品中微量元素 Y 和 Th 随着 Rb 的增加呈现正相关性的特征(图 8),这也是 I 型花岗岩的典型演化趋势(Li *et al.*, 2007)。还有,3 种花岗岩的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值较低,介于 $0.70476 \sim 0.70525$ 之间(郭志军等,2014),进一步支持了其 I 型花岗岩的认识(邢凤鸣,1987)。综上,可以认为红花尔基赋矿花岗岩应为典型的 I 型花岗岩。

LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,肉红色二长花岗岩的年龄为 179.2 ± 0.6 Ma,灰白色二长花岗岩的年龄为 179.0 ± 0.6 Ma,石英二长岩的年龄为 178.6 ± 0.7 Ma。矿区 3 种花岗岩的侵位年龄在误差允许范围内具有高度的一致性,为同期岩浆侵入活动的产物,形成时代为燕山早期早侏罗世。综合向安平等(2014)对矿区花岗岩进行的锆石 U-Pb 定年结果,可以将矿区花岗岩浆侵入活动的年龄限定在 $179.4 \sim 178.6$ Ma。在我国大兴安岭中北段地区,中生代的构造-岩浆活动十分频繁,为区域上包括红花尔基白钨矿矿床在内的斑岩型、热液型、矽卡岩型矿床的形成提供了物源、热源和动力源(余宏全等,2009)。区域上,该时期形成的典型矿床及其成矿岩体的地球化学特征介绍见表 4,从中可以对比看出不同矿床的成矿岩体地球化学特征非常相似,均为高分异的,高硅、富碱的酸性侵入岩,岩石成因类型均为 I 型花岗岩。然而,在区域上还未发现与 S 型花岗岩有关的金属矿床(点),甚至区域上的 S 型花岗岩体的量就非常有限(林强等,2004),这是区域新元古代构造演化进程决定的。新元古代时期,区域经历了中小块体之间板块的俯冲、碰撞和拼贴过程,发生了大规模的壳-幔作用,具体表现是在古亚洲洋闭合期间形成了由板块碰撞、拼贴作用形成的,由幔源物质组成的新地壳(林强等,2004;余宏全等,2012)。这些地壳就为区域中生代成矿岩体的形成提供了重要的物质来源,这些岩体的典型特征是具有正的 $\epsilon Nd(t)$ 值,较低的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值[有些岩浆岩的形成受到老地块的贡献导致 $\epsilon Nd(t)$ 值变小,而 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值变大,同时其 Nd 同位素模式年龄变大,如太平川(陈志广,2010)]和较年轻的 Nd 同位素模式年龄和锆石 Hf 同位素模式年龄(基本集中在新元古代),这种构造背景就解释了区域很少发现 S 型花岗岩的原因。从晚三叠世到早侏罗世,区域经

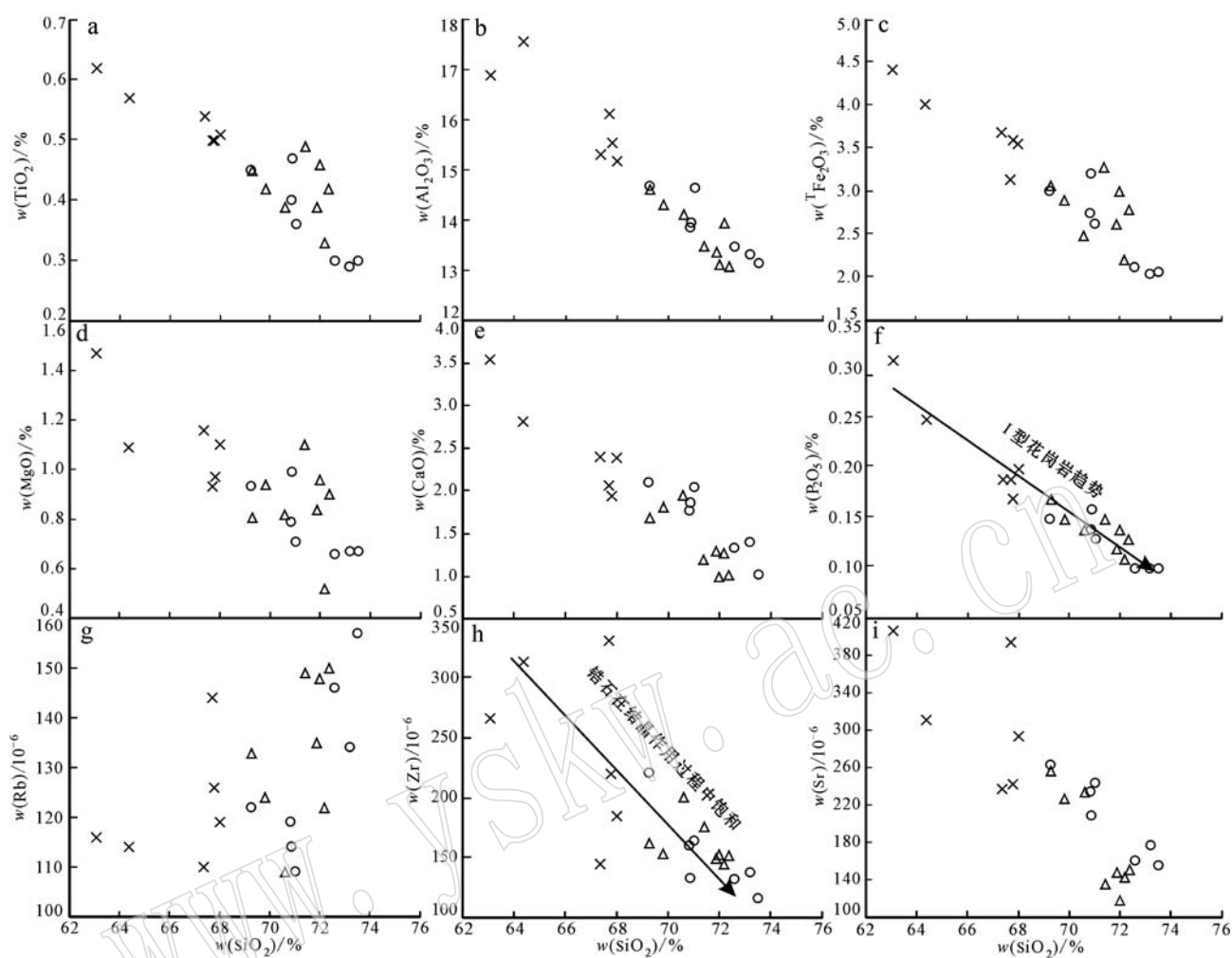


图7 红花尔基白钨矿矿床赋矿花岗岩哈克图解(图中趋势线据 Li *et al.*, 2007; 图例同图5)

Fig. 7 Harker diagrams for selected major and trace elements of the ore-bearing granites in the Honghuaerji scheelite deposit (after Li *et al.*, 2007; symbols as for Fig. 5)

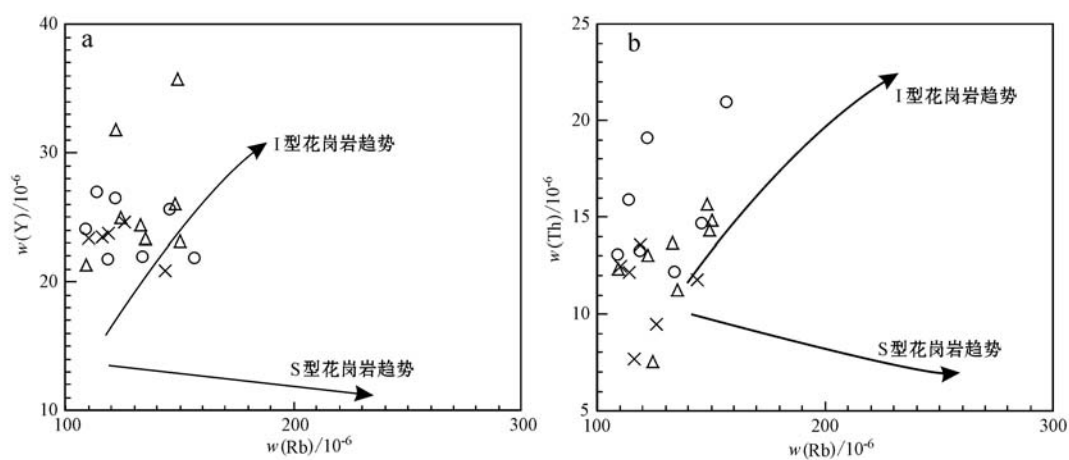


图8 红花尔基白钨矿矿床赋矿花岗岩 Y-Rb(a)和 Th-Rb(b)图解(图中趋势线据 Li *et al.*, 2007; 图例同图5)

Fig. 8 Variation diagrams of selected elements versus Rb for the three ore-bearing granites in the Honghuaerji scheelite deposit (after Li *et al.*, 2007; symbols as for Fig. 5)

表 4 大兴安岭中北段及邻区中生代典型矿床特征

Table 4 Characteristics of the typical ore deposits in the central-northern section of the Da Hinggan Mountains

矿床名称	八大关	太平川	乌奴格吐山	红花尔基	三矿沟	
矿床类型	斑岩型铜钼矿床		中高温热液型钨矿床		矽卡岩型铁铜矿床	
岩性	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	二长花岗斑岩	二长花岗岩	花岗闪长岩	
方法	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					
年龄/Ma	230.5	202.4	178.1	~179.0	175.9	
方法	辉钼矿 ¹⁸⁷ Re-Os 等时线					
年龄/Ma	228.7	203.6	177.4	176.8		
岩体地球化学特征	SiO ₂ / %	67.15~71.91	65.86~68.84	67.19~72.56	69.27~73.53	66.31~67.55
	ALK/ %	4.39~6.89	6.04~6.99	3.43~8.61	7.60~8.40	6.94~7.41
	A/CNK	1.04~1.13	1.04~1.12	0.98~1.06	1.01~1.08	0.87~0.91
	DI	77.54~82.69	72.26~76.61	78.41~88.56	83.10~90.07	70.83~74.13
	ΣREE/10 ⁻⁶	38.20~237.70	109.07~160.12	66.58~102.49	114.01~192.44	109.01~131.83
	(La/Yb) _N	7.68~22.76	10.33~19.32	15.43~30.55	3.96~10.25	8.51~11.30
	δEu	0.70~1.01	0.75~0.90	0.78~0.95	0.55~0.84	0.80~0.95
	富集	Rb、Pb、Hf	Rb、Ba、Th、U、K、Pb	Rb、Ba、K、Pb	Rb、K、U、Th、Pb	Rb、K、U、Nd、Pb
	亏损	Nb、Ta、Zr、Ti	Nb、Ta、P、Ti	Th、Nb、Ta、Sr、P	Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti	Nb、Ta、P、Zr、Ti
同位素地球化学	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.709 43~0.710 19	0.703 86~0.706 91	0.705 14~0.705 25	0.704 10~0.704 50	
	εNd(<i>t</i>)	-3.9~-3.4	-0.4~+1.1	+1.8~+2.7	+2.8~+3.9	
	<i>t</i> _{DM(Nd)}	1 328~1 138 Ma	793~715 Ma	901~792 Ma	733~647 Ma	
	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb		18.490~18.926	18.263~18.276	18.727~19.068	
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb		15.568~15.605	15.507~15.512	15.516~15.543	
	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb		38.255~38.529	37.994~38.018	38.173~38.426	
	εHf(<i>t</i>)			+3.1~+10.4		
	<i>t</i> _{DM2(Hf)}		1 028~562 Ma			
成因类型	I 型					
资料来源	陈志广, 2010; 康永建等, 2014; 李春风等, 2014	陈志广等, 2010	谭钢, 2011; 陈志广等, 2008	本文; 向安平等, 2014; 郭志军等, 2014	褚少雄等, 2012	

历了古亚洲洋演化过程中残留的鄂霍茨克洋盆向南俯冲、碰撞以及隆起等的一系列地质过程(陈志广等, 2008, 2010; 康永建等, 2014)。这一重要构造-岩浆事件使得新元古代时期形成的下地壳物质受到热扰动, 从而发生部分熔融, 形成了区域分布广泛的呈北东向延伸的岩浆岩带。岩浆岩的形成过程伴随着许多重要矿床的形成, 包括八大关、八八一、太平川、乌奴格吐山斑岩型铜钼矿床, 三矿沟矽卡岩型铁铜矿床, 红花尔基白钨矿矿床等在内的许多金属矿床。随着找矿投入的进一步加大, 相信还会有更多受本次构造-岩浆事件影响而形成的矿床被发现。

4.2 花岗岩浆演化过程

红花尔基白钨矿矿床赋矿花岗岩岩性主要为二长花岗岩和石英二长岩。首先, 石英二长岩主要分布在二长花岗岩体的上部, 呈透镜体状形式存在且界线截然(图 2h), 其颜色比二长花岗岩深, 而粒度较细。其次, 在镜下, 石英二长岩呈细粒半自形粒状结构或斑状结构, 为典型岩浆岩结构, 见较多的针状磷灰石等矿物, 且长板状长石和刀刃状黑云母呈半定

向被包裹在石英和长石巨晶中, 形成石英和长石的嵌晶结构(图 2f)。地球化学特征上, 石英二长岩偏中性, 相对二长花岗岩贫硅、钾, 而富钠、铝、镁、钙等。石英二长岩和二长花岗岩的锆石年龄一致(~179 Ma), 可以排除前者来源于深部固体岩石熔融残留体或浅部围岩捕虏体的可能性。同时, 郭志军等(2014)发表的 3 种花岗岩的 Sr-Nd-Hf 同位素特征表明, 石英二长岩相对二长花岗岩更加接近新生幔源物质(亏损地幔)的特征[石英二长岩具有更低的 *I*_{Sr}, 更高的正 εNd(*t*), 更年轻的 *t*_{DM(Nd)}, 更大的正 εHf(*t*), 更年轻的 *t*_{DM2(Hf)}]。石英二长岩的上述宏观和微观地质特征、元素地球化学、同位素年代学和同位素示踪学资料均指示石英二长岩应为来自亏损地幔的偏基性熔浆与花岗质熔浆通过岩浆混合作用形成的暗色包体(朱金初等, 2006; 薛玉山等, 2014; 方适宜等, 2014)。

岩浆演化过程中除经历了岩浆混合作用之外, 还经历了明显的结晶分异作用。在哈克图解上(图 7), 所有样品均表现出了系统而明显的变化, 且不同

特征花岗岩显示了相同的变化趋势。首先,随着 SiO_2 的增加, TiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 以及 CaO 都显示明显的下降趋势,说明了岩浆演化过程中角闪石等矿物(铁镁矿物相)的结晶分异作用。其次,样品中Ba、Sr、Nb、P、Ti和Eu的显著亏损说明了结晶分离作用在花岗岩形成过程中非常重要:含Ti矿物(钛铁矿和榍石)以及磷灰石等矿物的分离分别导致了Nb(Ta)-Ti和P的亏损;样品中Eu、Sr和Ba的负异常是长石类矿物结晶分异的结果(Wu *et al.*, 2002, 2003)。在La-La/Sm协变图解(图9)上,所有样品表现出明显的结晶分异演化趋势,更进一步地说明了结晶分异作用在岩浆演化成岩过程中的重要作用。尽管红花尔基花岗岩体与区域同时期斑岩铜钼矿床的成矿岩体具有岩浆起源、构造背景以及成因类型等的相同和相似性,但是二者的稀土元素球粒陨石标准化图和微量元素原始地幔标准化图却有一定的差异:与后者相比,红花尔基花岗岩体的轻重稀土分馏程度相对较弱,且具有相对强烈的铈负异常(图6a),同时在微量元素原始地幔比值蛛网图上显示Th、U正异常,稍弱的Ta、Nb负异常,更强的Pb正异常等(图6b)。这可能是二者岩浆演化过程的差异性造成的。岩浆演化过程中,由于不同矿物相对稀土元素、微量元素的容纳能力不同,因此岩浆源区残留矿物相的不同或者岩浆结晶分离出的矿物种类或程度不同都将导致最终岩浆熔体具有不同的稀土、微量元素特征。根据张旗等(2006)的研究可将

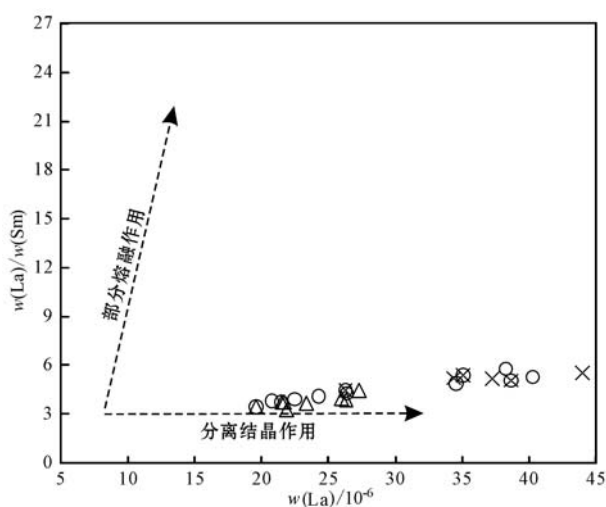


图9 红花尔基白钨矿矿床赋矿花岗岩 La/Sm-La 图解 (图中趋势线据 Zhou *et al.*, 2014; 图例同图5)

Fig. 9 La/Sm-La diagram (after Zhou *et al.*, 2014; symbols as for Fig. 5) for the three ore-bearing granites in the Honghuaerji scheelite deposit

红花尔基花岗岩体大致定为低Sr高Yb型花岗岩,而区域斑岩型铜钼矿床有关岩体则大致属于高Sr低Yb型的花岗岩类岩石(陈志广等,2008,2010;谭钢,2011;李春风等,2014),可以推断出前者的形成压力小于后者,这也是造成二者稀土、微量元素特征差异的一个原因。晚三叠世到早侏罗世,区域处在鄂霍茨克洋盆向南俯冲、碰撞到隆起的构造环境(陈志广等,2008,2010; Ouyang *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2014),而区域斑岩铜钼矿床的分布位置相对红花尔基要偏北约200 km左右,因此相对偏北部的区域处在一个相对高压的环境,从而造成了斑岩型铜钼矿床和热液型钨矿床的成矿岩体在不同的构造压力下,由源岩经部分熔融作用形成。

4.3 岩体形成与成矿的关系

基于钨元素几乎都源于地壳的观点,一般认为地壳沉积物质部分熔融形成的S型花岗岩类岩石为钨矿床的形成提供了重要的物质来源,地壳沉积物质为钨的初始矿源层。华南地区是我国重要的钨矿资源产地,且钨矿床均与花岗岩有直接的成因联系(华仁民等,2007),花岗岩为中元古代基底地壳岩石重熔作用形成的S型花岗岩,其源岩地层的W等成矿元素的含量是克拉克值的十几倍(刘英俊等,1982;花友仁,1984;康永孚,1984)。华南钨成矿花岗岩为高分异的高硅($\text{SiO}_2 > 73\%$)、富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 8\%$)、铝过饱和岩石,富含F、Cl、Li、B、Be等挥发组分(梅勇文,1985;毛景文等,1995; Hua *et al.*, 2003; 陈骏等,2008)。然而,红花尔基花岗岩并不是由W等成矿元素初步富集的地壳沉积物质部分熔融形成的富F、Cl、Li、B、Be(表3;均值分别为 $\text{F} = 562 \times 10^{-6}$, $\text{Cl} = 82 \times 10^{-6}$, $\text{Li} = 46 \times 10^{-6}$, $\text{B} = 15 \times 10^{-6}$, $\text{Be} = 3 \times 10^{-6}$)等挥发分的过铝质S型花岗岩,而是源岩为岩浆岩的I型花岗岩,因此其与上述华南钨成矿岩体的不同特征造就了二者的岩体与钨成矿的关系不同。

除红花尔基以外,世界上还存在其它成矿岩体为I型花岗岩的钨矿床(Newberry and Swanson, 1986;程海,1989; Stuart *et al.*, 1995; Zhao *et al.*, 2001;应立娟等,2011)。这就出现一个有意思的问题,与I型花岗岩有关的钨矿床的钨元素究竟是从哪里来的呢?这里以红花尔基白钨矿矿床为例,来探讨这个问题。首先,钨在现代地幔的平均含量是 $(0.0083 \pm 0.0071) \times 10^{-6}$ (Arevalo and McDonough, 2008),在下地壳的含量为 0.6×10^{-6} ,上

地壳的含量为 1.9×10^{-6} , 平均地壳含量为 1.0×10^{-6} (Rudnick and Gao, 2004), 单从钨元素含量就可以排除钨来自地幔的可能性。其次, 红花尔基钨矿床的成矿岩体为早侏罗世下地壳物质部分熔融形成的二长花岗岩, 因此, 下地壳物质部分熔融作用、岩浆结晶分异作用以及岩浆与含钨建造的相互作用等过程均可能是钨在成矿热液中富集的重要原因。再次, 与区域同一构造背景下形成的斑岩型铜钼矿床成矿岩体不同的是, 红花尔基成矿岩体在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6b)上显示更强烈的 Pb 正异常, 说明红花尔基岩体的物源可能有更多上地壳物质的成分。最后, 在红花尔基岩体中发现了 463.2~486.0 Ma 和 779.1 Ma 的继承锆石, 分别对应着新元古代和早中奥陶世, 也说明了成岩岩浆中有一定地壳基底物质的加入。笔者综合分析认为, 红花尔基白钨矿矿床的钨元素主要来自下地壳部分熔融形成的岩浆, 岩浆演化、上侵过程中与上地壳物质的相互作用也可能是钨的重要来源, 从而形成了富钨的岩浆。由于钨在晶体和熔体间的分配系数远小于 1 (Candela and Bouton, 1990), 其在结晶分异过程中表现出了强烈的不相容性 (康永孚, 1981; 刘英俊, 1982; Blevin and Chappell, 1992), 因此该过程使得钨元素在残留熔体(流体)中不断富集, 岩浆结晶分异越是到晚阶段, 残留液相中钨的浓度就越高。这种富钨的流体反过来对岩体进行交代作用是形成钨矿的重要机制。

5 结论

红花尔基白钨矿矿床的成矿岩体为典型的 I 型花岗岩, 侵入活动的精确年龄为 179.4 ~ 178.6 Ma, 岩浆经历了高度的结晶分异作用, 对成岩、成矿意义重大, 成矿物质主要来自下地壳, 岩浆上侵过程中也可能萃取含钨建造中的钨等元素。

致谢 野外地质工作期间得到了内蒙古第六地质矿产勘查开发有限责任公司的全力支持和帮助, 中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士和国家地质实验测试中心邓月金老师、马天芳老师等在论文实验中给予了大力帮助, 审稿专家为本文提出了许多建设性的意见, 特致谢忱。

References

- Arevalo J R and McDonough W F. 2008. Tungsten geochemistry and implications for understanding the Earth's interior[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(3~4): 656~665.
- Bai Ling'an, Sun Jinggui, Zhang Yong, *et al.* 2012. Genetic type, mineralization epoch and geodynamical setting of endogenous copper deposits in the Great Xing'an Range[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 468~482(in Chinese with English abstract).
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602~622.
- Blevin P L and Chappell B W. 1992. The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia[J]. *Royal Society of Edinburgh Transactions (Earth Sciences)*, 83: 305~316.
- Candela P A and Bouton S L. 1990. The influence of oxygen fugacity on tungsten and molybdenum partitioning between silicate melts and ilmenite[J]. *Economic Geology*, 85: 633~640.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46: 535~551.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geol.*, 8: 173~174.
- Chen Jun, Lu Jianjun, Chen Weifeng, *et al.* 2008. W-Sn-Nb-Ta-Bearing granites in the Nanling Range and their relationship to metallogenesis[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 459~473(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhiguang. 2010. Mesozoic tectono-magmatic mineralization and its geodynamic background of the De'erbugan metallogenic belt in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences: 1~190(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Lu Baizhi, *et al.* 2010. Geochronology and geochemistry of the Taipingchuan copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, and its geological significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1437~1449(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Wan Bo, *et al.* 2008. Geochemistry and geological significances of ore-forming porphyry with low Sr and Yb value in Wunugetushan copper-molybdenum deposit, Inner

- Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 115~128(in Chinese with English abstract).
- Cheng Hai. 1989. The differences between two types of granitoids and their relationships with tungsten mineralization[J]. *Geological Review*, 35(3): 193~202(in Chinese with English abstract).
- Chu Shaoxiong, Liu Jianming, Xu Jihua, *et al.* 2012. Zircon U-Pb dating, petrogenesis and tectonic significance of the granodiorite in the Sankuanggou skarn Fe-Cu deposit, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 433~450(in Chinese with English abstract).
- Clemens J D, Stevens G and Farina F. 2011. The enigmatic sources of I-type granites: the peritectic connexion[J]. *Lithos*, 126: 174~181.
- 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: 189~200.
- Fang Shiyi, Fan Liting, Tao Zhijun, *et al.* 2014. Character and genesis of dark residual in Douzhashan uranium production granite pluton [J]. *Uranium Geology*, 30(4): 212~218(in Chinese with English abstract).
- Guo Zhijun, Li Jinwen, Huang Guangjie, *et al.* 2014. Sr-Nd-Pb-Hf isotopic characteristics of ore-bearing granites in the Honghuajie scheelite deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 41(4): 1 226~1 241(in Chinese with English abstract).
- Hassanen M A. 1997. Post-collision, A-type granites of Homrit Waggat Complex, Egypt: petrological and geochemical constraints on its origin[J]. *Precambrian Research*, 82: 211~236.
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492(in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Chen P R, Zhang W L, *et al.* 2003. Metallogenic systems related to Mesozoic and Cenozoic granitoids in South China[J]. *Science in China (Series D)*, 46(8): 816~829.
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Gu Shengyan, *et al.* 2007. Comparison between REE granite and W-Sn granite in the Nanling region, South China, and their mineralizations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 321~2 328 (in Chinese with English abstract).
- Hua Youren. 1984. The crustal evolution of Southern China area and its relationships to the formation of tungsten deposits[J]. *Geology and Exploration*, 5: 1~11(in Chinese).
- Kang Yongfu. 1981. Geochemistry and ore deposit types of tungsten [J]. *Geology-Geochemistry*, 5(11): 1~7(in Chinese).
- Kang Yongfu. 1984. Discussion on some problems of Southern China stratabound tungsten deposit[J]. *Geology and Exploration*, 6: 1~10(in Chinese).
- Kang Yongjian, Wang Yajun, Huang Guangjie, *et al.* 2014. Study of rock-forming and ore-forming ages of Badaguan porphyry Cu-Mo deposit in Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 33(4): 795~806(in Chinese with English abstract).
- Li Chunfeng, Liu Zhenjiang, Mi Kuifeng, *et al.* 2014. Metallogenic age and ore genesis of the Badaguan porphyry copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 41(4): 1 253~1 269(in Chinese with English abstract).
- Li Jinwen, Liang Yuwei, Wang Xiangyang, *et al.* 2011. The origin of the Erdaohezi lead-zinc deposit, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1 745~1 754(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Li W X, *et al.* 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: a major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 96: 186~204.
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, *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 Jianming, Zhang Rui and Zhang Qingzhou. 2004. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269~277(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun. 1982. Metallogenic geochemistry of tungsten[J]. *Geology and Exploration*, (1): 15~23(in Chinese).
- Liu Yingjun. 1984. Geochemical Characteristics of Trace Elements of Granitoids in Southern China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 511~525(in Chinese).
- Liu Yingjun, Li Zhaolin, Ma Dongsheng, *et al.* 1982. Geochemistry of tungsten-constructions in Southern China[J]. *Science in China (Series B)*, 10: 939~950(in Chinese).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537~571.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0—A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4): 1~70.
- Lu Yuanfa. 2004. GeoKit—A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. *Geochimica*, 33(5): 459~464(in Chinese with English abstract).
- Lü Pengrui, Li Derong, Peng Yiwei, *et al.* 2012. S-Pb isotopic characteristics of ore sulfides and U-Pb dating of zircon from the

- Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo deposit in Heilongjiang Province [J]. *Geology in China*, 39(3): 717~728(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Hongyan, Pei Rongfu, *et al.* 1995. Geology and geochemistry of the Qianlishan granite stock and its relationship to polymetallic tungsten mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 14(1): 12~25(in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the earth[J]. *Chemical Geology*, 120: 223~253.
- Mei Yongwen. 1985. Characteristics of granitic bodies associated with tungsten mineralization and criteria for their recognition[J]. *Geological Review*, 31(6): 531~538(in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1985. *Magma and Magmatic Rocks*[M]. London, Longman.
- 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.
- Newberry R J and Swanson S E. 1986. Scheelite skarn granitoids: an evaluation of the roles of magmatic source and process[J]. *Ore Geology Reviews*, 1: 57~81.
- Ouyang H G, Mao J W, M. Santosh, *et al.* 2013. Geodynamic setting of Mesozoic magmatism in NE China and surrounding regions: Perspectives from spatio-temporal distribution patterns of ore deposits [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 222~236.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81.
- Pitcher W S. 1982. Granite type and tectonic environment[A]. Hsu K J. *Mountain Building Processes*[C]. London: Academic Press, 19~40.
- Pitcher W S. 1993. *The Nature and Origin of Granite*[M]. London: Blackie Academic & Professional: 321.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, (184): 123~138.
- Rudnick R L and Gao S. 2004. Composition of the continental crust [A]. Rudnick R L. *Treatise on Geochemistry*[C]. New York: Elsevier, 3: 1~64.
- Shand S J. 1943. Their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite[A]. Sons J W. *Eruptive Rocks*[C]. New York: 1~44.
- She Hongquan, Li Honghong, Li Jinwen, *et al.* 2009. The metallogenetic characteristics and prospecting direction of the copper-lead-zinc polymetal deposits in the Northern-Central Daxing'anling Mountain, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1456~1472(in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Xiang Anping, *et al.* 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxing'anling and its implications to geotectonic evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 28(2): 571~594(in Chinese with English abstract).
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plesovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249: 1~35.
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, *et al.* 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralisation, South Korea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 4663~4673.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean basins: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins* [C]. London: Geological Society of London and Blackwell Scientific Publications, 313~345.
- Tan Gang. 2011. The ore-forming processes and mineralization of Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1~81(in Chinese with English abstract).
- Vinogradov A P. 1962. Average content of chemical elements in the chief types of igneous rocks of the crust of the Earth[J]. *Geokhimiya*, 7: 555~571(in Russian with English abstract).
- Wang Dongfang and Quan Heng. 1984. Mesozoic tectonic-magmatism in Daxing'anling, China[J]. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 3: 81~90(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 187: 143~173.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 66: 241~273.
- Wu Guang, Wang Guorui, Liu Jun, *et al.* 2014. Metallogenic series and ore-forming pedigree of main ore deposits in northern Great Xing'an Range[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1127~1150(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. A study of genetic mineralogy and its constrictions on U-Pb dating[J]. *Chinese Science Bulletin*,

- 49(16): 1 589~1 604(in Chinese).
- Wolf M B and London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranite melts: An experimental study of solubilities and mechanisms[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 4 127~4 145.
- Xiang Anping, Wang Yajun, Qin Dajun, *et al.* 2014. Metallogenic and diagenetic age of Honghuaerji tungsten polymetallic deposit in Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 33(2): 428~439(in Chinese with English abstract).
- Xing Fengming. 1987. On the application of initial strontium isotope ratios in division of granite genetic types[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2: 75~79(in Chinese with English abstract).
- Xue Yushan, Liu Zhenjiang, Wang Jianping, *et al.* 2014. Characteristics of mafic microgranule enclaves (MMEs) in granitoids and future study prospects[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(1): 20~30(in Chinese with English abstract).
- Yang Y T, Guo Z X, Song C C, *et al.* 2014. A short-lived but significant Mongol-Okhotsk collision orogeny in latest Jurassic-earliest Cretaceous[J]. *Gondwana Research*.
- Ying Lijuan, Wang Denghong, Wang Huan, *et al.* 2011. Occurrence feature of scheelite from Jiama copper polymetallic deposit in Tibet and its ore-prospecting significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 318~326(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2 249~2 269(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Bao Z W, Zhang B Y, *et al.* 2001. Crust-mantle interaction and its contribution to the Shizhuoyuan superlarge tungsten polymetallic mineralization[J]. *Science in China (Series D)*, 44(3): 266~276.
- Zhou Z H, Mao J W, Wu X L, *et al.* 2014. Geochronology and geochemistry constraints of the Early Cretaceous Taibudai porphyry Cu deposit, northeast China, and its tectonic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 212~228.
- Zhu Jinchu, Zhang Peihua, Xie Caifu, *et al.* 2006. Magma mixing origin of the mafic enclaves in Lisong granite, NE Guangxi, western Nanling Mountains[J]. *Geochimica*, 35(5): 506~516(in Chinese with English abstract).
- 陈 骏, 陆建军, 陈卫锋, 等. 2008. 南岭地区钨锡铋钼花岗岩及其成矿作用[J]. *高校地质学报*, 14(4): 459~473.
- 陈志广. 2010. 得尔布干成矿带中生代构造-岩浆成矿作用及地球动力学背景与地质意义[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 1~190.
- 陈志广, 张连昌, 卢百志, 等. 2010. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义[J]. *岩石学报*, 26(5): 1 437~1 449.
- 陈志广, 张连昌, 万 博, 等. 2008. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床低 Sr-Yb 型成矿斑岩地球化学特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 24(1): 115~128.
- 程 海. 1989. 两类花岗岩的差异及其与钨成矿的关系[J]. *地质论评*, 35(3): 193~202.
- 褚少雄, 刘建明, 徐九华, 等. 2012. 黑龙江三矿沟铁铜矿床花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 定年、岩石成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 28(2): 433~450.
- 方适宜, 范立亭, 陶志军, 等. 2014. 豆乍山产钽花岗岩中暗色残留体特征及其成因[J]. *铀矿地质*, 30(4): 212~218.
- 郭志军, 李进文, 黄光杰, 等. 2014. 内蒙古红花尔基白钨矿床赋矿花岗岩 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素特征[J]. *中国地质*, 41(4): 1 226~1 241.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 28(4): 481~492.
- 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 等. 2007. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比[J]. *岩石学报*, 23(10): 2 321~2 328.
- 花友仁. 1984. 华南地区的地壳演化和钨矿床的形成[J]. *地质与勘探*, 5: 1~11.
- 康永孚. 1981. 钨的地球化学与矿床类型[J]. *地质地球化学*, 5(11): 1~7.
- 康永孚. 1984. 华南某些层控钨矿床若干问题的探讨[J]. *地质与勘探*, 6: 1~10.
- 康永建, 王亚君, 黄光杰, 等. 2014. 内蒙古八大关斑岩型铜钼矿床成岩成矿年代学研究[J]. *矿床地质*, 33(4): 795~806.
- 李春风, 柳振江, 宓奎峰, 等. 2014. 内蒙古八大关斑岩型铜钼矿床形成时代与成因分析[J]. *中国地质*, 41(4): 1 253~1 269.
- 李进文, 梁玉伟, 王向阳, 等. 2011. 内蒙古二道河子铅锌矿成因研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6): 1 745~1 754.
- 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.
- 刘建明, 张 锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. *地质前缘*, 11(1): 269~277.
- 刘英俊. 1982. 论钨的成矿地球化学[J]. *地质与勘探*, (1): 15~23.
- 刘英俊, 李兆麟, 马东升. 1982. 华南含钨建造的地球化学研究[J].

附中文参考文献

白令安, 孙景贵, 张 勇, 等. 2012. 大兴安岭地区内生铜矿床的成因类型、成矿时代与成矿动力学背景[J]. *岩石学报*, 28(2): 468

- 中国科学(B辑), 10: 939~950.
- 刘英俊. 1984. 华南花岗岩类中的微量元素的地球化学特征[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 511~525.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5): 459~464.
- 吕鹏瑞, 李德荣, 彭义伟, 等. 2012. 黑龙江三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石硫化物硫、铅同位素特征及锆石 U-Pb 定年[J]. 中国地质, 39(3): 717~728.
- 毛景文, 李红艳, 裴荣富, 等. 1995. 千里山花岗岩体地质地球化学及与成矿关系[J]. 矿床地质, 14(1): 12~25.
- 梅勇文. 1985. 钨的成矿岩体特征及其判别标志[J]. 地质论评, 31(6): 531~538.
- 余宏全, 李红红, 李进文, 等. 2009. 内蒙古大兴安岭中北段铜铅锌金银多金属矿床成矿规律与找矿方向[J]. 地质学报, 83(10): 1456~1472.
- 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. 岩石学报, 28(2): 571~594.
- 谭 钢. 2011. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 1~81.
- 王东方, 权 恒. 1984. 大兴安岭中生代构造岩浆作用[J]. 地球科学-武汉地质学院学报, 3: 81~90.
- 武 广, 王国瑞, 刘 军, 等. 2014. 大兴安岭北部主要金属矿床成矿系列和区域矿床成矿谱系[J]. 矿床地质, 33(6): 1127~1150.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 向安平, 王亚君, 秦大军, 等. 2014. 内蒙古红花尔基钨多金属矿床成岩成矿年代学研究[J]. 矿床地质, 33(2): 428~439.
- 邢凤鸣. 1987. 锶同位素初始比值在划分花岗岩成因类型上的应用探讨[J]. 岩石学报, 2: 75~79.
- 薛玉山, 柳振江, 王建平, 等. 2014. 花岗岩暗色微粒包体特征及其研究方向[J]. 地质找矿论丛, 29(1): 20~30.
- 应立娟, 王登红, 王 焕, 等. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿床中白钨矿的产出特征及其找矿意义[J]. 矿床地质, 30(2): 318~326.
- 张 旗, 王 焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2249~2269.
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 等. 2006. 桂东北里松花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因[J]. 地球化学, 35(5): 506~516.

我刊荣获 2015 年度科学出版社“期刊出版质量优秀奖”

我刊近日荣获 2015 年度科学出版社“期刊出版质量优秀奖”。这一奖项是科学出版社为进一步强化质量管理和质量意识、提升科技期刊的出版质量特地设立的,用以表彰出版质量优秀的期刊。本年度优秀奖是在对中国科技出版传媒股份有限公司(科学出版社)2013、2014 年的出版期刊进行严格审读和评议的基础上产生的,共有 124 种期刊获奖。地学类获奖期刊有《大地构造与成矿学》、《地球化学》、《地球学报》、《地质科学》、《地质论评》、《地质学报》、《矿床地质》、《岩矿测试》、《岩石矿物学杂志》、《中国地球化学(英文版)》等(以刊名拼音排序)。

此次获奖,是对我刊编辑部多年来注重编辑业务、严把出版质量关的肯定和鼓励。今后我刊仍将注重吸引优秀稿源,在致力于在不断提高学术水平的同时,保证出版质量,努力成为业内的精品期刊。