第 31 卷第 5 期　　地 质 与 资 源　　Vol. 31 No. 5
2022 年 10 月　　GEOLOGY AND RESOURCES　　Oct. 2022
文章编号:1671-1947(2022)05-0614-11　　中图分类号:P588.1;P597　　开放科学标志码(OSID):
DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2022.05.005　　文献标志码:A

内蒙古北山地区小红山钒钛磁铁矿区双峰式侵入岩
——岩石学、年代学、地球化学特征及其地质意义

潘志龙,李　强,程学芹,王　硕
河北省区域地质调查院,河北 廊坊 065000

摘　要: 对内蒙古北山地区小红山钒钛磁铁矿区内侵入岩的岩石学、锆石 U-Pb 年代学和全岩地球化学资研究显示,该岩体岩性为辉长岩和花岗岩,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明成岩年龄分别为 431.1±2.4 Ma 和 424.9±2.3 Ma,形成时代相近,属同一构造岩浆作用事件. 该套侵入岩的 SiO_2 含量呈双峰式,稀土、微量元素特征表明它们具有岛弧岩浆岩地球化学特征,其源区可能受到了俯冲流体交代作用的影响. 地球化学特征指示小红山花岗岩源于下地壳物质在高温条件下的部分熔融,辉长岩为富集地幔部分熔融的产物. 结合区域地质背景及构造判别,认为小红山中晚志留世双峰式岩浆组合是北山洋南向俯冲诱导大陆边缘伸展环境下的产物.

关键词: 北山造山带;钒钛磁铁矿;双峰式侵入岩;锆石 U-Pb 年代学;活动大陆边缘;内蒙古

BIMODAL INTRUSIVE ROCKS IN XIAOHONGSHAN VANADIUM-TITANIUM MAGNETITE OREFIELD IN BEISHAN AREA OF INNER MONGOLIA: Petrology, Geochronology, Geochemistry and Geological Implication

PAN Zhi-long, LI Qiang, CHENG Xue-qin, WANG Shuo
Hebei Regional Geological Survey Institute, Langfang 065000, *Hebei Province, China*

Abstract: Study on the petrology, zircon U-Pb chronology and whole-rock geochemistry of intrusive rocks in Xiaohongshan vanadium-titanium magnetite orefield of Beishan area in Inner Mongolia shows that the lithology of the intrusion is gabbro and granite with the diagenetic age of 431.1±2.4 Ma and 424.9±2.3 Ma respectively. The two types of rocks were formed at a similar time of the same tectono-magmatism event. The SiO_2 content in the intrusive rocks shows double peaks, and the characteristics of rare earth and trace elements indicate that they have the geochemical features of island-arc magmatic rocks, with the source area metasomatized by subduction-related fluid. The geochemical characteristics reflect Xiaohongshan granite is originated from the partial melting of lower crust materials at high temperature while the gabbros resulted from the partial melting of enriched mantle. Combined with the regional geological background and tectonic discrimination, it is concluded that the Middle and Late Silurian bimodal magmatic assemblage in Xiaohongshan area is the product of continental margin extension induced by the southward subduction of Beishan ocean.

Key words: Beishan orogenic belt; vanadium-titanium magnetite; bimodal intrusive rock; zircon U-Pb chronology; active continental margin; Inner Mongolia

收稿日期:2021-09-03;**修回日期:**2021-11-03. **编辑:**张哲.
基金项目:中国地质调查局项目"内蒙古 1:5 万基东、尖山、蒜井子、三道明水等四幅区域地质矿产调查"(编号 12120113056500).
作者简介:潘志龙(1983—),男,高级工程师,从事地质及矿产勘查工作,通信地址 河北省廊坊市曙光道 32 号,E-mail//15304570@qq.com
通信作者:李强(1986—),男,硕士,从事地质工程研究工作,通信地址 河北省廊坊市曙光道 32 号,E-mail//1032564223@qq.com

0　引言

北山造山带地处甘肃北部、新疆东南部和内蒙古西部交界处,大地构造位置处于华北板块、塔里木板块及哈萨克斯坦板块交汇部位，属古亚洲洋构造域的组成部分,经历了多期次、多阶段的板块裂解–俯冲–碰撞–拼合的复杂地质演化过程,成矿潜力大,备受国内外学者关注[1-10]. 许多地质学家认为红柳河–牛圈子–洗肠井蛇绿岩形成于早古生代洋盆环境，并将其代表的早古生代洋盆称为“北山洋”,北山洋闭合时限在早泥盆世之前[1]. 隶属于北山造山带的小红山钒钛磁铁矿床大地构造位于红柳河–牛圈子–洗肠井早古生代蛇绿岩缝合线南侧(图 1a),目前只有少量学者对与钒钛磁铁矿及与成矿密切相关的辉长岩做了部分工作:严忠等认为其成因为辉长岩岩浆分异及后期构造热液叠加富集成矿[2];杨福新等认为小红山钒钛磁铁矿床属于一种岩浆分异和分凝–贯入叠加复合型的钒钛磁铁矿类型，为介于攀枝花式和大庙式钒钛磁铁矿特征之间一种新的成矿类型[3];杨建国等获得辉长岩体的锆石 SHRIMP U–Pb 年龄为 424±6 Ma，形成环境为陆缘裂谷环境[4];张国鹏等认为小红山钒钛磁铁矿具有 3 期成矿作用,分别为岩浆分异作用、贯入式及热液叠加成矿作用,属于与铁镁质岩有关的岩浆分异–贯入–热液型复式成因矿床[5];王硕等认为小红山钒钛磁铁矿赋矿辉长岩产生于洋壳俯冲诱导的大陆边缘裂解背景[6]. 上述研究集中在钒钛磁铁矿和其赋矿围岩辉长岩，而对区内出露的花岗岩与辉长岩之间的关系缺少系统研究. 本研究依托“内蒙古 1:5 万基东、尖山、蒜井子、三道明水等四幅区域地质矿产调查”项目,通过详

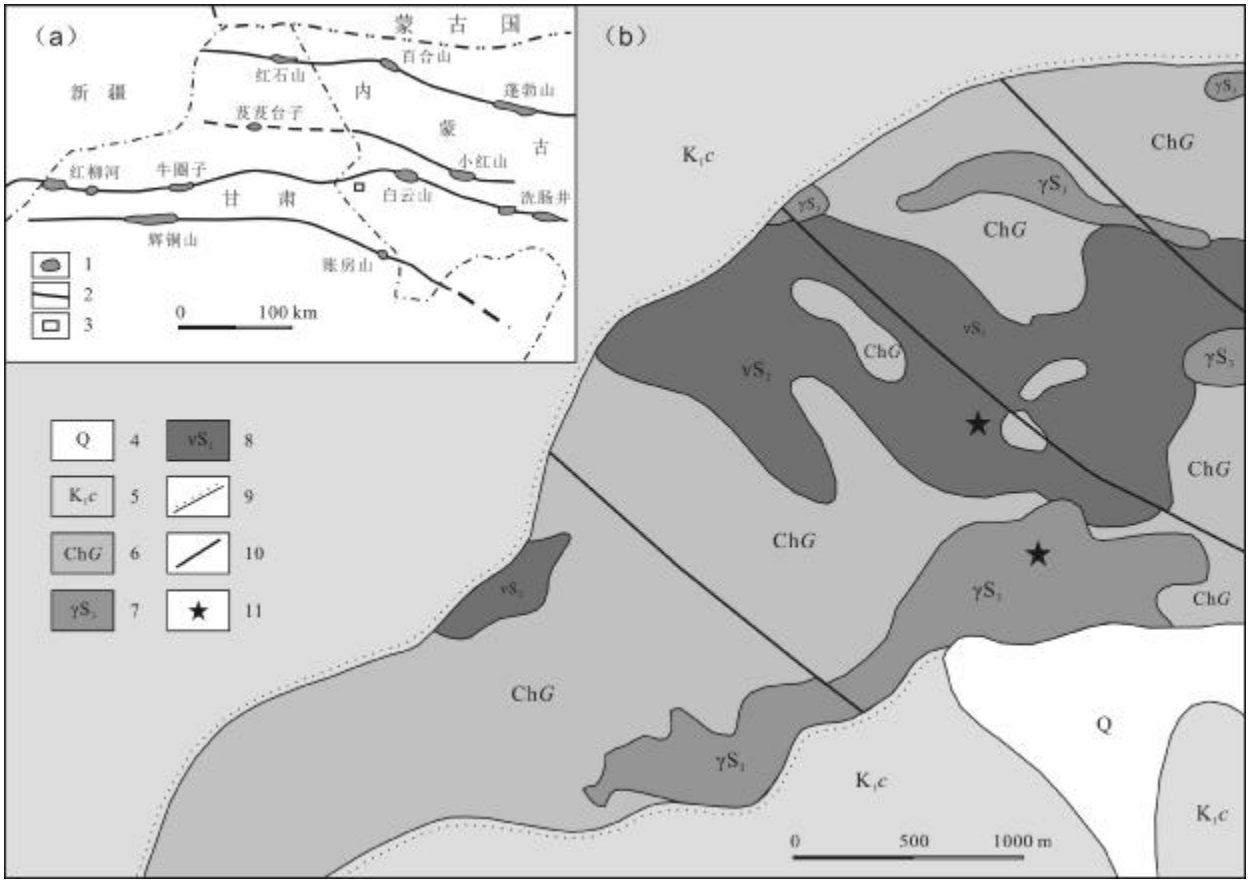

图 1　内蒙古北山地区大地构造位置及地质图

Fig. 1　Geotectonic location and geological maps of Beishan area, Inner Mongolia

a —大地构造图(据文献[7]) (tectonic map, from Reference [7]): 1—蛇绿岩(ophiolite), 2—深大断裂(deep fault), 3—研究区位置(study area); b —研究区地质图(geological map of the study area): 4—第四系(Quaternary), 5—下白垩统赤金堡组(Lower Cretaceous Chijinbao fm.), 6—古硐井群(Gudongjing gr.), 7—晚志留世花岗岩(Late Silurian granite), 8—中志留世辉长岩(Middle Silurian gabbro), 9—角度不整合(angular unconformity), 10—断层(fault), 11—采样点位置(sampling site)

细的区域地质调查，对小红山钒钛磁铁矿区内及附近相关侵入体的岩石学、地球化学和年代学进行了详尽的研究，探讨其形成时代、岩石成因和构造背景，以期为进一步研究北山地区大地构造演化提供资料.

1 地质背景和岩石学特征

研究区位于内蒙古自治区西部，行政区划属于阿拉善盟额济纳旗算井子乡管辖. 大地构造位置处于红柳河-牛圈子-洗肠井早古生代蛇绿混杂岩带南侧(图 1a)，塔里木板块敦煌微陆块之内. 区内以发育寒武纪—奥陶纪海进序列沉积地层为特征，主要为中寒武统—下奥陶统西双鹰山组、下奥陶统罗雅楚山组及中奥陶统横峦山组；基底由中新元古界稳定浅海沉积地层构成，主要有中元古界古硐井群、野马街组和大豁落山组，另有下白垩统赤金堡组角度不整合覆盖于前述地层之上. 侵入岩构成较为简单，为本次研究的中晚志留世辉长岩和二长花岗岩(图 1b). 辉长岩呈岩株状产出，出露面积约 2.27 km^2，侵入长城纪古硐井群变质砂岩，外接触带岩石具角岩化、大理岩化，被二长花岗岩侵入. 该岩体为小红山钒钛磁铁矿的赋矿岩体，局部受北东向构造影响岩石强劈理化. 二长花岗岩亦呈岩株状产出，侵入长城纪古硐井群和辉长岩，形态不规则，出露面积约 2.05 km^2，岩体定向特征不明显.

本次研究对位于小红山磁铁矿附近的辉长岩和花岗岩分别进行了取样(图 1b)，样品采集于岩体内部，采集处露头较好，岩石样品新鲜无蚀变、无明显变质变形现象.

辉长岩：岩石呈灰绿色，中粒半自形粒状结构(图 2a)，似海绵陨铁结构，块状构造. 岩石主要由斜长石(55%~70%)、石英(约 5%)、辉石(5%~15%)、角闪石(10%~20%)、黑云母(2%~10%)和不透明矿物(约 5%)构成. 斜长石为拉长石，半自形长板状，粒径一般 2~5 mm，部分 0.2~2.0 mm，具不均匀绢云母化、黝帘石化等，隐约可见聚片双晶，少见环带构造. 石英为他形粒状，一般小于 2 mm，个别达 3 mm，填隙于斜长石粒间，零散可见，粒内具波状消光，粒内可见有斜长石等嵌布. 辉石呈近半自形—他形柱状、粒状，一般 2~3 mm，部分小于 2 mm，分布于斜长石粒间，明显纤闪石化，常见角闪石、黑云母反应边. 角闪石呈半自形—他形柱粒状，粒径 0.2~1.8 mm，多以单斜辉石反应边形式产出，明显纤闪石化，有的沿斜长石晶内裂纹分布，显褐绿色，多色性明显，少见退色为蓝绿色. 黑云母呈不规则叶片状，片径小于 2 mm，个别达 3.5 mm，零散填隙状分布，显深棕色，多色性明显，有的呈不透明矿物、辉石反应边. 不透明矿物主要呈他形粒状，少量近半自形粒状，填隙于斜长石粒间.

二长花岗岩：岩石呈灰红色，中粒花岗结构(图 2b)，块状构造. 岩石由钾长石(35%~40%)、斜长石(35%)、石英(20%~25%)、黑云母(3%~5%)组成. 钾长石主要为正条纹长石，半自形板状，粒径以 0.3~2 mm 的细粒为主，2~5 mm 的中粒次之，杂乱分布，钠质斜长石条纹主要呈薄片状、树枝状、网格状，聚片双晶较发育，可能为交代成因，钾长石明显高岭土化，少量绿帘石化，部分晶内包嵌少量斜长石晶体，局部交代斜长石. 斜长石呈半自形板状，粒径一般 0.3~2 mm，少部分 2~3.5 mm，杂乱分布，不同程度高岭土化、绢云母化，聚片双晶较发育，少见环带构造，局部被钾长石蚕蚀状交代，根据⊥(010) 晶带的最大消光角法测得 Np′∧(010)=15，斜长石牌号 An=32，属于中长石. 石英为他形粒状，粒径一般 0.4~3 mm，杂乱分布，颗粒表面干净，粒内明显波状消光. 黑云母为鳞片-叶片状，片径一般 0.3~1.5 mm，零散状或细小堆状分布，多色性明显：Ng′=暗褐色，Np′=浅黄褐色，局部绿泥石化.

2 分析方法

选择新鲜均一代表性样品进行分析测试，全岩主量元素和微量元素分析在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成. 主量元素(SiO_2、TiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、MgO、MnO、Na_2O、K_2O、CaO、P_2O_5) 分析测试采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)完成，分析精度为 0.05%；FeO 采用滴定法分析完成；灼烧减量、H_2O^+和 H_2O 用重量法完成；微量元素分析采用 $HF+HClO_3+HNO_3$ 溶解样品，王水复溶，在线加入 Rh 内标溶液，用 Thermofisher X Series Ⅱ 型 ICP-MS 完成测定，稀土元素分析精度为 0.1×10^{-6}，微量元素 $\leqslant5\times10^{-6}$. 分析结果如表 1(扫描首页 OSID 二维码可见).

锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成. 双目镜下挑选晶形好、无裂隙和包裹体的锆石，用环氧树脂制靶. 将锆石靶打磨、抛光后，进行反射光、透射光和阴极发光(CL)显微观察照片. 锆石制

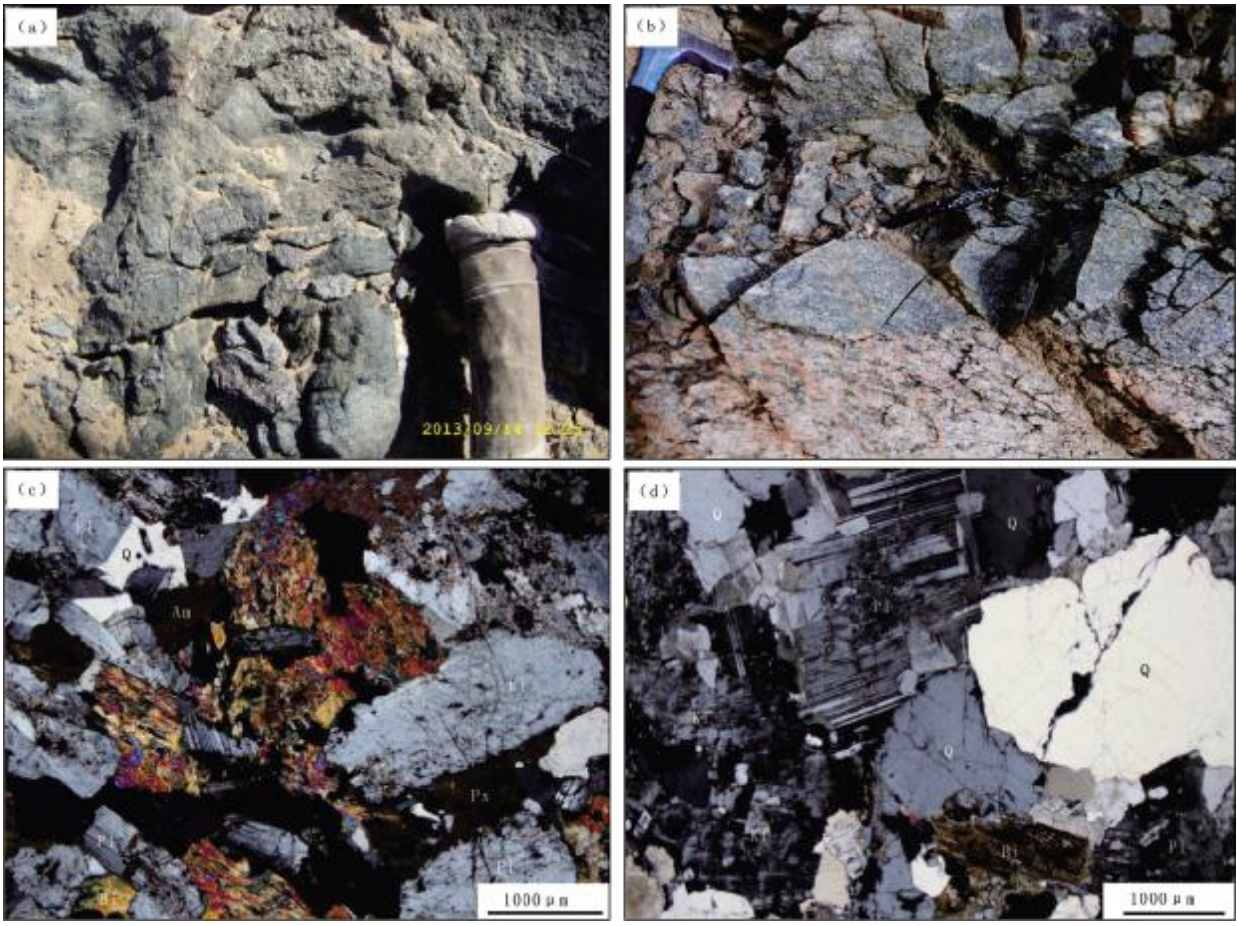

图 2　小红山中晚志留世侵入岩野外露头及显微照片

Fig. 2　Field outcrops and micrographs of Middle-Late Silurian intrusive rocks in Xiaohongshan area

a—辉长岩野外特征(field characteristics of gabbro); b—二长花岗岩侵入辉长岩(monzogranite intruding into gabbro); c—辉长岩镜下特征(microscopic characteristics of gabbro); d—二长花岗岩镜下特征(microscopic characteristics of monzogranite); Q—石英(quartz); Pl—斜长石(plagioclase); Kf—钾长石(k-feldspar); Px—辉石(pyroxene); Am—角闪石(hornblende); Bi—黑云母(biotite)

靶及阴极发光照相在北京锆年领航科技有限公司完成. LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在天津地质调查中心完成. ICP-MS 仪器为 Agilent 7500a 型,所用激光剥蚀斑束直径为 35 μm,频率为 8~10 Hz,能量密度为 13~14 J/cm^2,以 He 为载气. 采用 TEMORA 为外标. 数据处理采用 ICP-MS-DataCal 程序[11],采用 206Pb 校正法对普通铅进行校正. 利用 NIST612 玻璃作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量. 锆石 U-Pb 年龄谐和图采用 Isoplot3.0 程序获得. 分析结果如表 2 (扫描首页 OSID 二维码可见).

3　分析结果

3.1　LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学

本研究对小红山钒钛磁铁矿区辉长岩和二长花岗岩进行了锆石 U-Pb 同位素年龄测试.

辉长岩(JDYQ5)样品中的锆石呈柱状,半自形—自形,震荡环带较发育(图 3a). 对晶形较好的 32 颗锆石共分析了 32 个测点(表 2,扫描首页 OSID 二维码可见). Th/U 值除 15 号点(0.28)和 20 号点(0.06)较小外,其余在 0.32~0.79 之间,平均 0.54,显示岩浆锆石特征. 23 和 24 号点 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄较大, 分别为 513 Ma 和 542 Ma,可能为捕获锆石,其余在 414~442 Ma 之间,均分布在谐和线上, 加权平均年龄为 431.1±2.4 Ma (N=30, MSWD=1.8)(图 3b), 代表了辉长岩的结晶年龄,时代为中志留世(图 3c).

二长花岗岩(JDYQ4)样品中的锆石呈柱状,半自形—自形,震荡环带发育(图 4a). 对晶形较好的 30 颗锆石共分析了 30 个测点(表 2,扫描首页 OSID 二维码

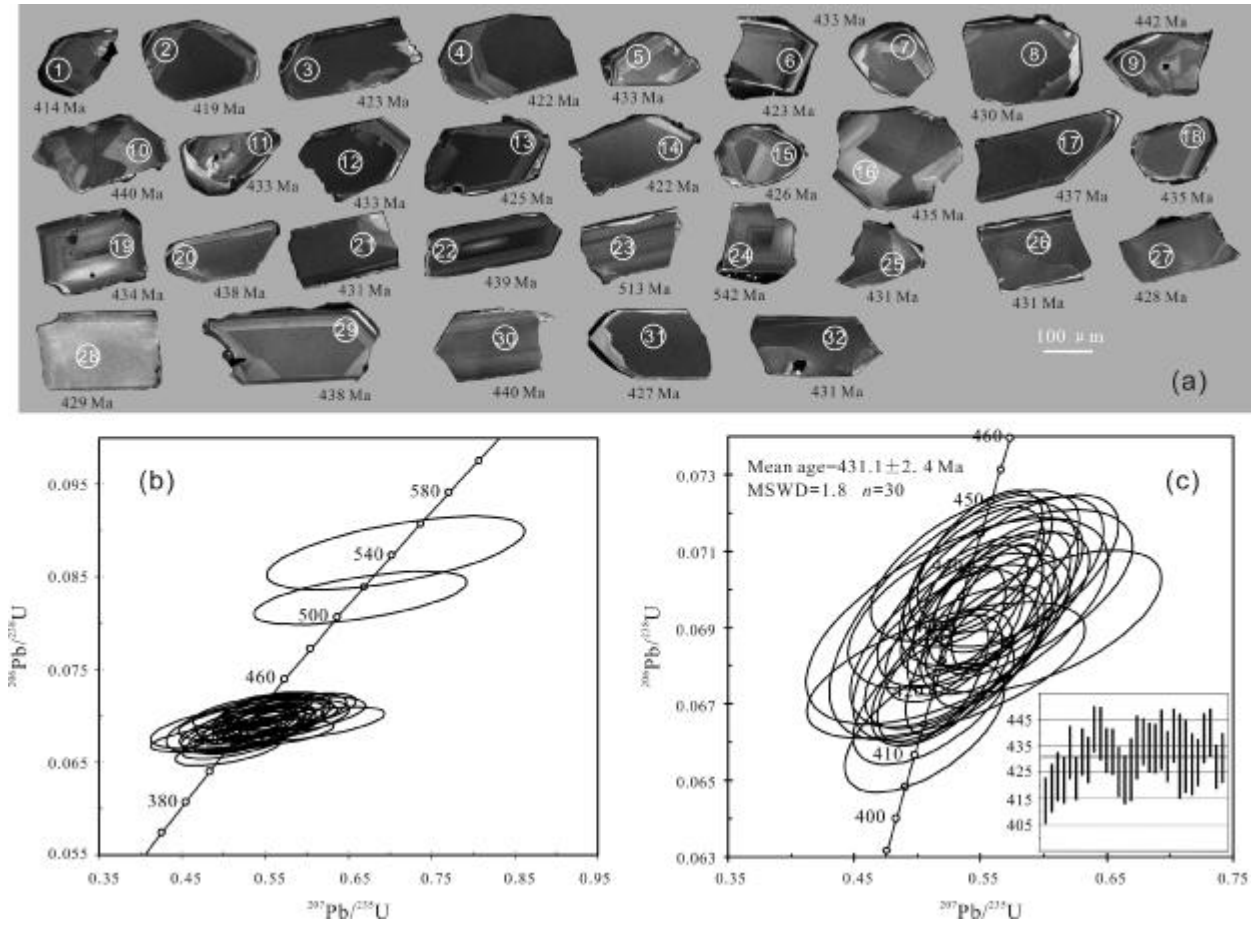

图 3 小红山辉长岩锆石阴极发光图像及 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 CL images and U-Pb concordia diagrams for zircons in Xiaohongshan gabbros

可见). Th/U 值除 20 号点(0.06)较小外,其余在 0.31~0.99 之间, 平均 0.48, 显示岩浆锆石特征. 14 号点 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄较大(474 Ma),可能为捕获或继承锆石, 23 和 27 号点锆石裂隙造成普通铅逃逸导致 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄偏小, 分别为 388 Ma 和 344 Ma, 其余在 413~435 Ma 之间, 均分布在谐和线上, 加权平均年龄为 424.9±2.3 Ma(N=27,MSWD=2.1)(图 4b),代表了二长花岗岩的形成年龄,时代为晚志留世(图 4c).

3.2 主量元素特征

小红山地区辉长岩 SiO_2 含量较低, 为 46.12% ~51.62%,平均 48.87%(质量分数),低于大陆下地壳平均含量(53.4%)[12]; Al_2O_3 含量为 14.06%~15.69%; $Fe_2O_3^T$ 含量高, 为 17.11%~18.09%; CaO 含量较高,为 6.09%~7.27%; K_2O+Na_2O 含量较低,为 3.68%~4.36%; Na_2O/K_2O 比值为 2.75~3.49,显示富钠低钾特征; MgO 含量较低,为 0.98%~2.5%,$Mg^{\#}$ 值为 11.49~23.84,平均 17.67;里特曼指数(σ)为 2.00~3.43,平均 2.72;铝饱和指数 A/CNK 为 0.80~0.83,为准铝质岩石. 样品烧失量(LOI)介于 1.73%~2.41%. 扣除烧失量,主量元素归一化计算后再投图,在侵入岩 TAS 图解(图 5a)中,辉长岩样品落入 Irvine 线之下及附近的辉长岩、辉长闪长岩区内, 与镜下定名基本一致. 在 K_2O-SiO_2 图解 (图 5b)中样品投点于钙碱性系列中.

小红山二长花岗岩 SiO_2 含量较高, 为 71.48%~77.20%,平均 74.34%; Al_2O_3 含量为 12.50%~14.08%; $Fe_2O_3^T$ 含量低,为 0.58%~2.38%; CaO 为 0.62%~1.40%; K_2O+Na_2O 含量较高,为 8.29%~8.69%; Na_2O/K_2O 值为 0.68~0.86; MgO 含量低, 为 0.11%~0.40%,$Mg^{\#}$ 值为 19.42~60.55; 里特曼指数为 2.01~2.64; 铝饱和指数 A/CNK 为 0.99~1.04, 属偏铝质—弱过铝质钙碱性岩石,A/NK 为 1.15~1.21. 样品烧失量(LOI)介于 0.52%~0.77%. 扣除烧失量, 主量元素归一化计算后投图,在

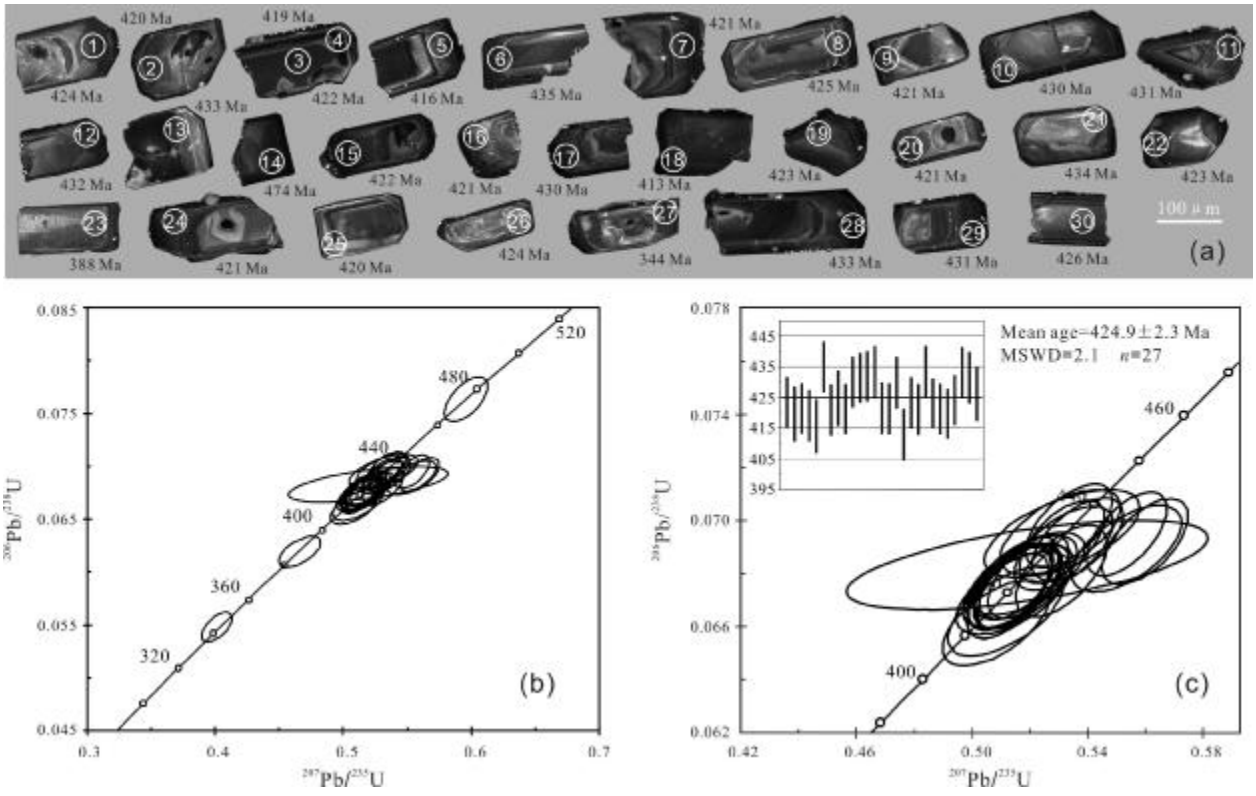

图 4　小红山二长花岗岩锆石阴极发光图像及 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4　CL images and U-Pb concordia diagrams for zircons in Xiaohongshan monzogranites

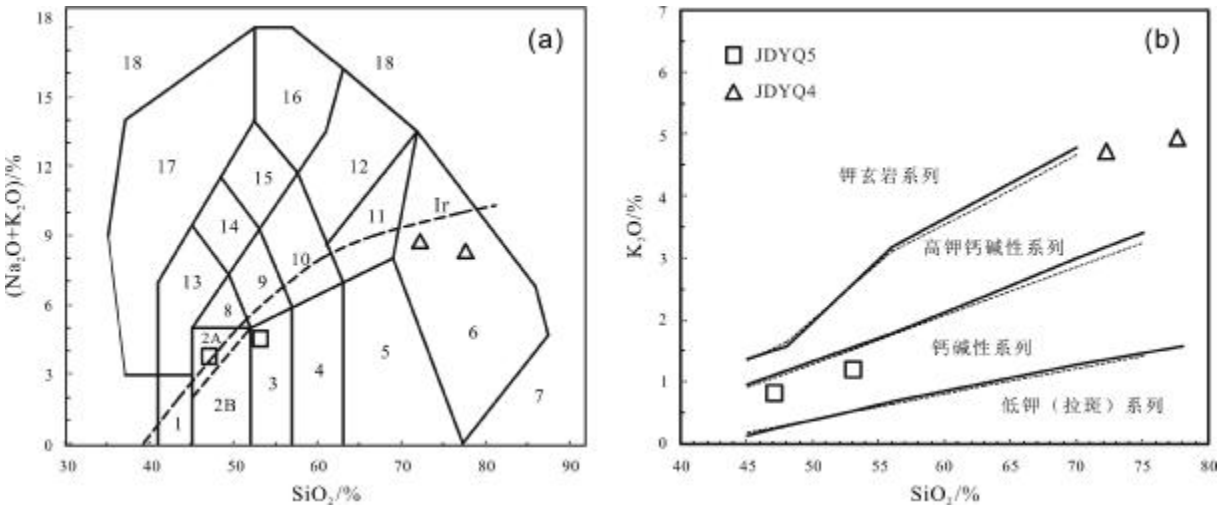

图 5　小红山地区中晚志留世侵入岩 TAS 图解和 K_2O–SiO_2 图解

Fig. 5　The TAS and K_2O-SiO_2 diagrams for Middle-Late Silurian intrusive rocks in Xiaohongshan area

1—橄榄辉长岩(olivine gabbro)；2A—碱性辉长岩(alkali gabbro)；2B—亚碱性辉长岩(subalkali gabbro)；3—辉长闪长岩(gabbro diorite)；4—闪长岩(diorite)；5—花岗闪长岩（granodiorite)；6—花岗岩（granite)；7—硅英岩（quartzolite)；8—二长辉长岩（monzogabbro)；9—二长闪长岩(monzodiorite)；10—二长岩(monzonite)；11—石英二长岩(quartz monzonite)；12—正长岩(syenite)；13—副长石辉长岩(foid gabbro)；14—副长石二长闪长岩(foid monzodiorite)；15—副长石二长正长岩(foid monzosyenite)；16—副长正长岩(foid syenite)；17—副长深成岩(foid plutonite)；18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩(tawite/urtite/italite)

侵入岩 TAS 图解(图 5a)中,样品均落入 Irvine 线下方的花岗岩区,与镜下定名一致,为亚碱性系列岩石. 在 K_2O–SiO_2 图解(图 5b)中样品投点于高钾钙碱性系列岩石中.

小红山地区侵入岩出现明显的 SiO_2 成分间断,具有明显的双峰式侵入岩特征.

3.3 微量元素特征

研究区辉长岩稀土元素总量为 137.26×10^{-6}~145.10×10^{-6};轻/重稀土元素比值为 4.82~4.83,$(La/Yb)_N$ 为 3.86~4.41,轻稀土分馏程度相对较高,重稀土相对亏损; δEu 为 1.52~1.83,具明显的正铕异常,说明斜长石结晶分异作用不明显. 稀土配分曲线(图 6a)总体表现为 LREE 弱富集的平缓右倾型,明显不同于 N–MORB,类似于 E–MORB, 而与 East Scotia Ridge 弧后盆地玄武岩(E–BABB)更为一致[13]. 微量元素蛛网图(图 6b)中,辉长岩相对富集 Rb、Ba、Zr、Hf,轻微亏损 Nb、Ta 和 Ti, 与 E–MORB 不同, 而与 E–BABB 相似,Nb、Ta、Ti 亏损暗示辉长岩岩浆可能遭受到地壳混染或者俯冲过程中释放流/熔体的交代作用,亦或是俯冲沉积物加入.

二长花岗岩稀土元素总量为 76.17×10^{-6}~254.55×10^{-6}; 轻/重稀土元素比值为 4.63~6.81,$(La/Yb)_N$ 为 3.76~6.86,轻稀土分馏程度相对较高,重稀土相对亏损; δEu 为 0.41~0.55,具较明显的负铕异常,表明其经历了较明显的斜长石结晶分异作用或源区残留有较多的斜长石[14]. 稀土元素配分曲线(图 6c)具右倾特征,与上地壳平均组成特征相似[12]. 微量元素蛛网图(图

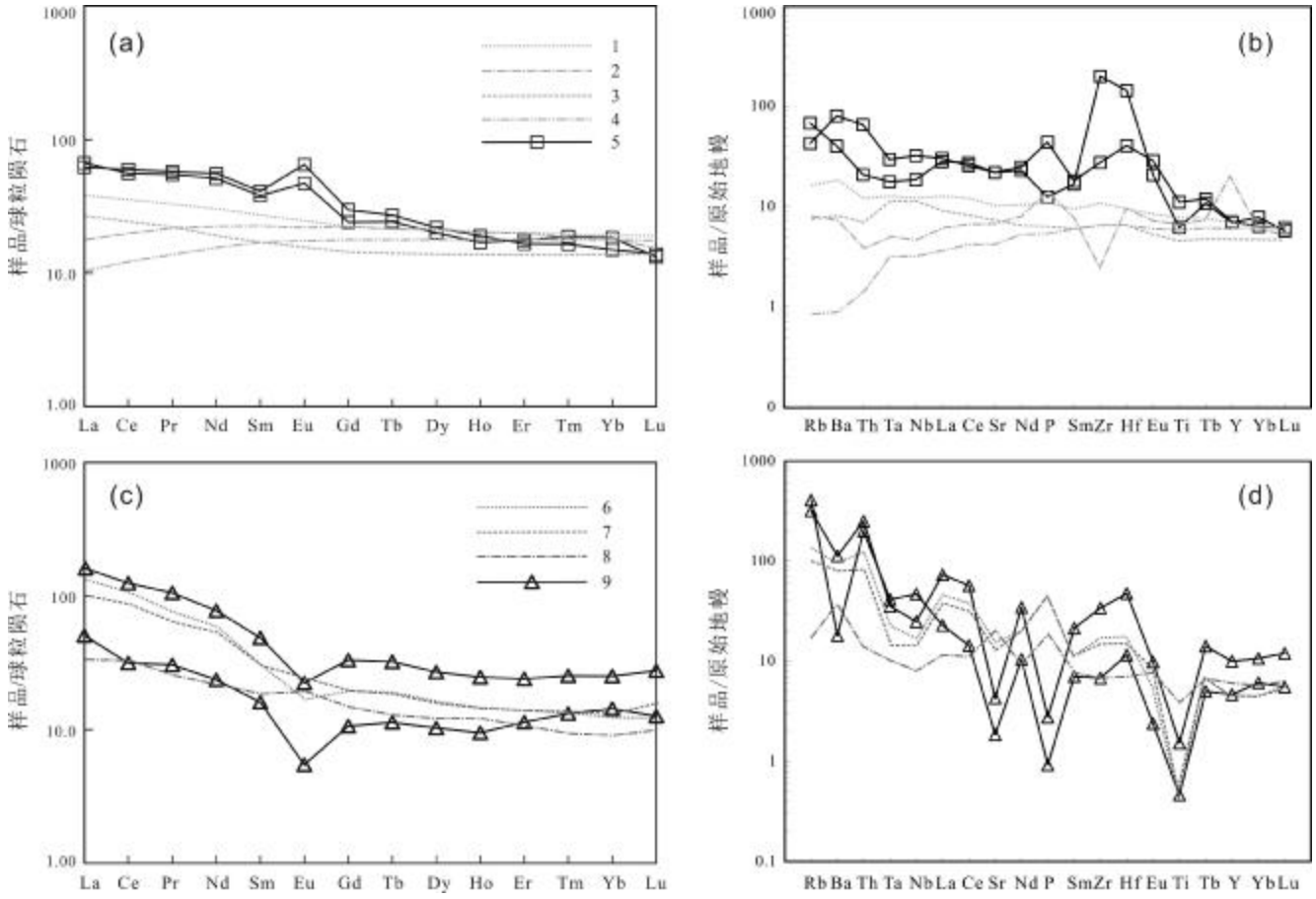

图 6 球粒陨石标准化和微量元素原始地幔标准化配分曲线

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams

1—富集弧后盆地玄武岩(enriched back-arc basin basalt, E–BABB); 2—亏损弧后盆地玄武岩(depleted back-arc basin basalt, D-BABB); 3—富集大洋中脊玄武岩 (enriched mid-ocean ridge basalt, E-MORB); 4—正常大洋中脊玄武岩 (normal mid-ocean ridge basalt, N-MORB); 5—辉长岩(gabbro); 6—上地壳(upper crust); 7—中地壳(middle crust); 8—下地壳(lower crust); 9—花岗岩(granite); 数据来源:球粒陨石、原始地幔据文献[15]; N-MORB、E-MORB 据文献[16]; E-BABB、D-BABB 据文献[13, 17]; 上、中、下地壳数据据文献[12]

6d）显示，岩石具 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素富集，Ta、Nb、Ti 高场强元素及 Ba、Sr、P 等元素明显亏损,同样与上地壳平均组成特征相似[12].

4　讨论

4.1　岩体形成时代

小红山钒钛磁铁矿区一带岩体出露规模较小,它们侵入中元古界地层，被下白垩统地层覆盖. 根据野外岩体之间的侵位关系,辉长岩侵位时间早,二长花岗岩较晚. 本研究在辉长岩和二长花岗岩中分别获得了 431.1±2.4 Ma 和 424.9±2.3 Ma 的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,与野外实际情况相符,亦与杨建国等人获得的辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(424±6 Ma)在误差范围内一致[4]. 该套双峰式侵入岩形成时代为中晚志留世.

4.2　构造环境及地质意义

地球化学数据显示，小红山地区出露的中晚志留世岩体中的辉长岩和花岗岩分别属于钙碱性系列和高钾钙碱性系列,微量元素显示轻稀土元素富集,高场强元素 Nb、Ta 和 Ti 相对亏损(图 6),类似于典型俯冲带组分，暗示本区中晚志留世侵入岩可能形成于俯冲带条件下与弧有关的构造环境[18]. 在 Hf/3-Th-Nb/16 图解(图 7a)中,小红山中晚志留世辉长岩投在岛弧拉斑玄武岩区;在 Nb/Yb-Th/Yb 图解(图 7b)中,辉长岩投在大陆弧玄武岩区与洋中脊玄武岩区、板内玄武岩区交界处. 在花岗岩 R_1-R_2 判别图解(图 8a)中,中晚志留世花岗岩位于同碰撞花岗岩区和同碰撞花岗岩向造山后 A 型花岗岩过渡区域;在 Rb-(Y+Nb)判别图(图 8b)中均位于板内花岗岩区. 同时,小红山辉长岩具有 E-MORB 型 REE 配分模式，但微量元素亏损 Nb、Ta,又与 E-MORB 不同,而与 E-BABB 相似,故推测其可能形成于与俯冲带消减作用相关的弧后盆地环境.

从区内有限的资料来看，小红山构造-岩浆带的中晚志留世岩浆具双峰式组合特征，显示张性构造背景. 研究区红山头中奥陶世具高镁安山岩地球化学特性的安山质凝灰岩证实，牛圈子-洗肠井蛇绿岩所代表的北山洋在中奥陶世出现南向初始俯冲[19]. 因此,根据上述地球化学数据分析结果和区域地质特征综合判定，小红山中晚志留世双峰式岩浆组合很可能是在洋壳俯冲诱导的大陆边缘伸展背景下产生的，这为北山洋的构造演化增添了新的资料，并为该地区找矿工作提供了方向.

4.3　岩石成因

小红山辉长岩明显的正 Eu 异常暗示其形成于较

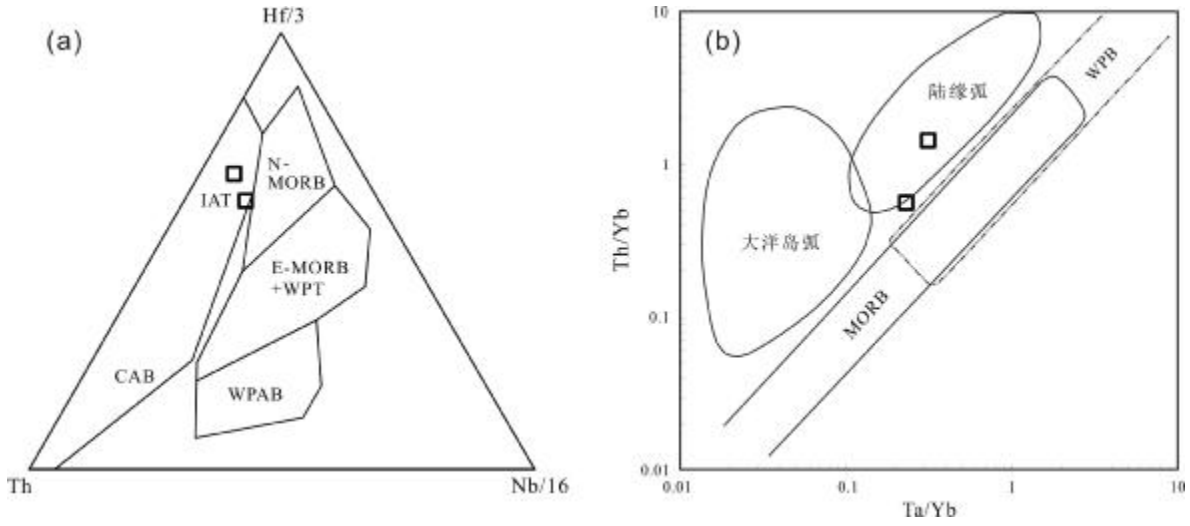

图 7　小红山地区辉长岩 Hf/3-Th-Nb/16 图解和 Nb/Yb-Th/Yb 图解

Fig. 7　The Hf/3-Th-Nb/16 and Nb/Yb-Th/Yb diagrams for Xiaohongshan gabbros

CAB—钙碱性玄武岩(calc-alkali basalt); IAT—岛弧拉斑玄武岩(island arc tholeiite); WPB—板内玄武岩(within-plate basalt); WPT—板内拉斑玄武岩(within-plate tholeiite); WPAB—板内碱性玄武岩(within-plate alkali basalt); N-MORB—正常洋中脊玄武岩(normal mid-ocean ridge basalt); MORB—洋中脊玄武岩(mid-ocean ridge basalt); E-MORB—富集洋中脊玄武岩(enriched mid-ocean ridge basalt)

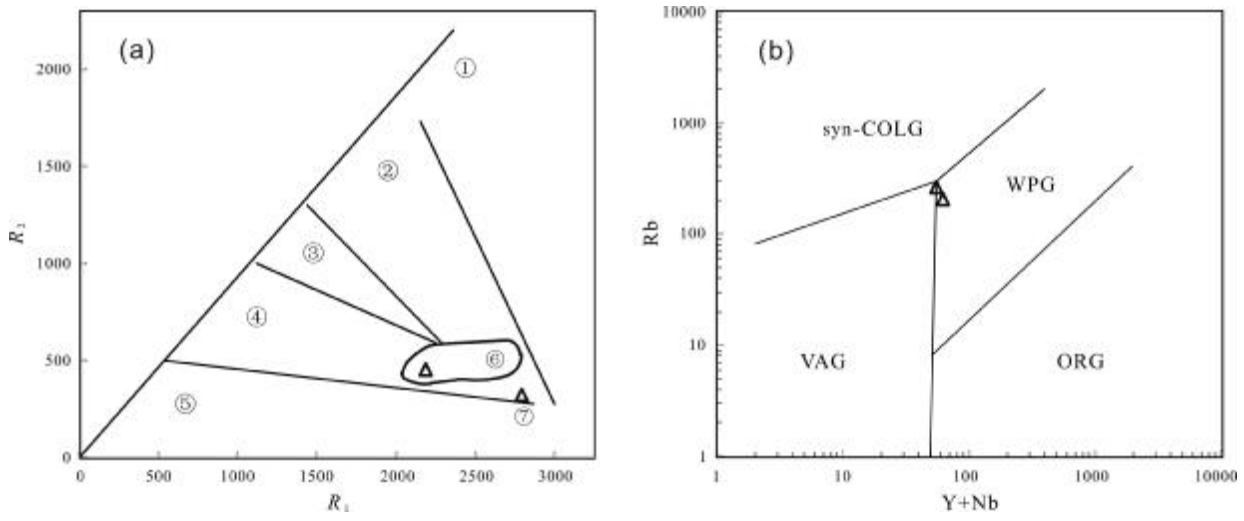

图 8 小红山地区花岗岩 R_1–R_2 图解和 Rb–(Y+Nb)图解

Fig. 8 The R_1-R_2 and Rb-(Y+Nb) diagrams for Xiaohongshan granites

①地幔斜长花岗岩(mantle plagiogranite); ②破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩(destructive active plate margin granite); ③板块碰撞后隆起期花岗岩(post-plate collision uplift granite); ④晚造山期花岗岩(serorogenic granite); ⑤非造山期 A 型花岗岩(anorogenic A-type granite); ⑥同碰撞(S 型)花岗岩(syn-collision S-type granite); ⑦造山期后 A 型花岗岩(postorogenic A-type granite); syn–COLG—同碰撞花岗岩(syn-collision granite); VAG—岛弧花岗岩(volcanic arc granite); WPG—板内花岗岩(within-plate granite); ORG—洋中脊花岗岩(ocean ridge granite)

深的地幔，轻稀土和 Zr、Hf 相对富集，Nb–Ta–Ti 负异常说明小红山辉长岩岩浆具有交代形成的富集地幔的特征[20]. 前述显示该套辉长岩形成于与俯冲带消减作用相关的弧后盆地环境，那么岩浆源区地幔应会受到俯冲洋壳、沉积物及相关流体在内的多种组分的贡献而富集. 所以，小红山钒钛磁铁矿辉长岩很可能是来源于俯冲作用改造的岩石圈地幔. 小红山辉长岩的 $Mg^{\#}$ 值为 11.49~23.84，Cr 含量为 3.89×10^{-6}~7.11×10^{-6}，Ni 含量为 1.28×10^{-6}~2.58×10^{-6}，远小于原始岩浆值($Mg^{\#}$ 68~75，Cr 300×10^{-6}~500×10^{-6}，Ni 300×10^{-6}~400×10^{-6})[21-23]，说明其经历了较为明显的镁铁质矿物(如橄榄石、辉石)分离结晶作用.

一般而言，双峰式火成岩中高硅花岗岩有 3 种成因：一是玄武岩浆分离结晶作用的产物，二是玄武质岩浆底侵导致地壳部分熔融形成，三是玄武质岩浆和地壳混合作用的产物[24]. 小红山花岗岩出露面积较大，如果是玄武质岩浆结晶分异的产物，那么区内就会出现规模巨大的基性岩体，这与野外实际情况不符，且小红山花岗岩与辉长岩具有完全不同的稀土、微量元素分布形式，暗示该花岗岩并非由辉长岩分离结晶作用或 AFC 过程形成. 同时，小红山花岗岩不具有 A 型花岗岩特征，暗示花岗岩并非幔源基性岩浆与壳源酸性岩浆混合作用的结果[23]. 小红山花岗岩体具有高的 SiO_2 含量(71.48%~77.20%)，类似于大陆中上地壳的组成，稀土、微量元素分布形式与上地壳平均组成特征相似，Rb/Sr 比值介于 2.24~6.66，平均 4.45，远高于大陆地壳(>0.23)，Zr/Hf 比值介于 21.24~25.82，低于壳源岩石(约 33)[12]，$Mg^{\#}$ 值较低，为 26.33~41.37，与基性下地壳部分熔融产生的岩浆一致($Mg^{\#}$<40 或 45)[25-28]，表明它们来源于地壳，为基性下地壳部分熔融的产物. 结合区内出露的同时代辉长岩，认为小红山花岗岩为张性环境下幔源玄武质岩浆底侵加热，从而导致下地壳物质在低压条件下发生部分熔融而形成.

5 结论

(1)小红山钒钛磁铁矿区侵入岩成岩时代为431.1~424.9 Ma，属中晚志留世，辉长岩和花岗岩形成时代相近，为同一构造事件的产物. 侵入岩出现明显的 SiO_2 成分间断，是典型的双峰式火成岩.

(2)小红山地区中晚志留世辉长岩起源于富集地幔，并经历了明显的结晶分离作用；花岗岩起源于下地壳，为玄武质岩浆底侵加热从而导致下地壳物质在低压条件下部分熔融的产物，它们形成于活动大陆边缘环境，为牛圈子–洗肠井蛇绿岩所代表的北山洋南向俯冲诱

导的大陆边缘伸展背景下的产物.

致谢:内蒙古 1/5 万基东等四幅区域地质调查项目组成员在野外地质调查工作中付出了艰辛的努力,感谢编辑老师及时高效的送审.

参考文献(References):

[1]陈超, 滕学建, 潘志龙, 等. 内蒙古北山造山带中段石板井地区 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及对北山洋闭合时间的限定[J]. 地质通报, 2020, 39(9): 1448-1460.
Chen C, Teng X J, Pan Z L, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of A-type granite from the Shibanjing area of middle Beishan orogenic belt, Inner Mongolia, and its constraint on closure time of Beishan Ocean[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(9): 1448-1460.

[2]严忠, 金海宽, 范泽. 内蒙古小红山钒钛磁铁矿地质特征及成因探讨[J]. 有色矿冶, 2009, 25(2): 10-11, 9.
Yan Z, Jin H K, Fan Z. Discussion about geological characteristics of vanadium-titanium magnetite and its causes of formation in Xiaohongshan of Inner Mongolia[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2009, 25(2): 10-11, 9.

[3]杨福新, 李为民, 陈岱, 等. 内蒙古小红山钒钛磁铁矿床成矿特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2010, 43(3): 66-74.
Yang F X, Li W M, Chen D, et al. Discussion on the deposit features and genetic characteristics of vanadium-titanium magnetite ore in Xiaohongshan, western Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(3): 66-74.

[4]杨建国, 王磊, 王小红, 等. 内蒙古北山额济纳旗小红山钒钛磁铁矿床 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1699-1705.
Yang J G, Wang L, Wang X H, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Xiaohongshan vanadium-titanium magnetite deposit, Ejin Banner, Beishan, Inner Mongolia, and its geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(9): 1699-1705.

[5]张国鹏, 谢春林, 赵寒森, 等. 内蒙古北山地区小红山钒钛磁铁矿成岩成矿过程探讨[J]. 西北地质, 2017, 50(1): 63-77.
Zhang G P, Xie G C, Zhao H S, et al. The diagenetic mineralization process of the Xiaohongshan vanadium-bearing titanometite in the Beishan area of Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(1): 63-77.

[6]王硕, 潘志龙, 张欢, 等. 内蒙古小红山钒钛磁铁矿赋矿岩石的地球化学特征及其地质意义[J]. 西部资源, 2017(3): 172-173.
Wang S, Pan Z L, Zhang H, et al. Geochemical characteristics and geological significance of ore-bearing rocks in Xiaohongshan Vanadium-titanium magnetite deposit, Inner Mongolia[J]. Western Resources, 2017(3): 172-173. (in Chinese)

[7]潘志龙, 张欢, 陈超, 等. 内蒙古北山敖包呼图仁斑状正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 地质科学, 2017, 52(1): 301-316.
Pan Z L, Zhang H, Chen C, et al. Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope compositions of porphyritic syenite granite from Aobaohuturen in Beishan, Inner Mongolia and its tectonic implication[J]. Chinese Journal of Geology, 2017, 52(1): 301-316.

[8]郝增元, 高鉴, 王晨, 等. 北山造山带风雷山地区二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造背景[J]. 中国地质, 2020, 47(4): 1204-1219.
Hao Z Y, Gao J, Wang C, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and tectonic setting of the monzogranites in the Fengleishan area of Beishan orogenic belt, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2020, 47(4): 1204-1219.

[9]牛文超, 辛后田, 段连峰, 等. 内蒙古北山地区百合山蛇绿混杂岩带的厘定及其洋盆俯冲极性——基于 1:5 万清河沟幅地质图的新认识[J]. 中国地质, 2019,46(5): 977-994.
Niu W C, Xin H T, Duan L F. The identification and subduction polarity of the Baiheshan ophiolite mélanges belt in the Beishan area, Inner Mongolia: New understanding based on the geological map of Qinghegou Sheet (1:50000) [J]. Geology in China, 2019,46(5): 977-994.

[10]任邦方, 段连峰, 李敏, 等. 内蒙古北山哈珠地区晚古生代花岗岩类年代学与地球化学测试数据集[J]. 中国地质, 2020. 47(S1): 40-49.
Ren B F, Duan L F, Li M, et al. Geochronological and geochemical dataset of Late Paleozoic granitoids in the Hazhu area of Beishan, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 47(S1): 40-49.

[11]Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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, 2010, 51(1/2): 537-571.

[12]Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C]// Holland D, Turekian K K. Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2003, 3: 1-64.

[13]Leat P T, Livermore R A, Millar I L, et al. Magma supply in back-arc spreading centre segment E2, East Scotia Ridge[J]. Journal of Petrology, 2000, 41(6): 845-866.

[14]王治淇. 西秦岭同仁县兰采地区三叠纪擦拉更复式花岗岩地球化学特征、时代及其地质意义[D]. 福州: 福州大学, 2018.
Wang Z Q. Geochemical characteristics, ages and geological significance of Triassic Chalageng composite granite in the Lancai area, Tongren County of the west Qinling orogenic belt[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.

[15]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1):

313-345.

[16]Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985.

[17]Fretzdorff S, Livermore R A, Devey C W, et al. Petrogenesis of the back-arc East Scotia Ridge, South Atlantic Ocean[J]. Journal of Petrology, 2002, 43(8): 1435-1467.

[18]吴宜翰, 刘博, 韩宝福, 等. 大兴安岭北部兴隆地区寒武纪侵入岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义[J]. 地球科学, 2019, 44(10): 3346-3360.
Wu Y H, Liu B, Han B F, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Cambrian plutons in Xinglong area of Northern Da-Hinggan Mountains: Implications for tectonic evolution[J]. Earth Science, 2019, 44(10): 3346-3360.

[19]杨鑫朋, 田粉英, 王硕, 等. 内蒙古横峦山组类高镁安山岩年代学及地球化学特征[J]. 中国地质调查, 2018, 5(5): 58-65.
Yang X P, Tian F Y, Wang S, et al. Geochronological and geochemical characteristics of analogy high-magnesium andesite in Henluanshan Formation of Inner Mongolia[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(5): 58-65.

[20]李守奎, 张世涛, 赵庆红, 等. 滇西兰坪皂角场新生代富碱斑岩体锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(1): 169-184.
Li S K, Zhang S T, Zhao Q H, et al. Zircon U-Pb chronology and petrogeochemistry of Cenozoic alkali-rich porphyry in Zaojiaochang, Lanping, Western Yunnan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(1): 169-184.

[21]Wilson M. Igneous petrogenesis: A global tectonic approach[M]. Dordrecht: Springer, 1989: 1-446.

[22]Perfit M R, Gust D A, Bence A E, et al. Chemical characteristics of island-arc basalts: Implications for mantle sources[J]. Chemical Geology, 1980, 30(3): 227-256.

[23]Hergt J M, Peate D W, Hawkesworth C J. The petrogenesis of Mesozoic Gondwana low-Ti flood basalts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 105(1/3): 134-148.

[24]贠杰. 西昆仑北带晚古生代火山岩成因及构造背景研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Yun J. Petrogenesis and the tectonic setting of the Lower Paleozoic volcanic rocks in the Northern Belt of West Kunlun[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

[25]Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. Nature, 1993, 362(6416): 144-146.

[26]Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. Journal of Petrology, 1995, 36(4): 891-931.

[27]Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. Chemical Geology, 1999, 160(4): 335-356.

[28]李强, 程学芹, 陈伟, 等. 额尔古纳地块早—中三叠世安山岩的发现及其对蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲的指示[J]. 地球科学, 2021, 46(8): 2768-2785.
Li Q, Cheng X Q, Chen W, et al. Discovery of Early-Middle Triassic andesite in Erguna Massif and its indication of southward subduction of Mongol-Okhotsk Ocean Plate[J]. Earth Science, 2021, 46(8): 2768-2785.