

北衙地区贫矿和富矿斑岩对比研究

——对斑岩成矿的指示意义*

付小锦^{1,2}, 李其在³, 刘欢^{1**}, 周癸武³, 张维涛¹, 张长青¹, 张盼盼⁴,
郑瑜林^{1,3,5}, 李彪⁶

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 天津华北地质勘查局, 天津 300170; 3 云南黄金矿业集团股份有限公司, 云南 昆明 650200; 4 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 5 浙江省有色金属地质勘查局, 浙江 绍兴 312000; 6 河北省地矿局第五地质大队, 唐山 河北 063000)

摘要 北衙超大型斑岩—矽卡岩型金矿床位于金沙江-哀牢山富碱斑岩带中段, 大地构造位置处于扬子板块西缘与三江特提斯构造域结合部位, 其成矿与新生代富碱斑岩密切相关。前人研究均集中在富矿岩体地球化学特征, 而对贫矿岩体研究甚少, 控制北衙地区岩体含矿差异性的因素尚不明确。文章以北衙矿区外围白莲村、马头湾和南大坪贫石英正长斑岩为研究对象, 运用全岩主微量、锆石 U-Pb 定年以及角闪石矿物学分析, 讨论了北衙地区富碱斑岩岩石成因、源区特征、岩浆含水量、氧逸度等要素, 并与本区富矿岩体进行对比, 由此探讨其成矿的差异性。贫石英正长斑岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $(33.96 \pm 0.43) \text{Ma}$ 、 $(33.26 \pm 0.30) \text{Ma}$ 和 $(32.80 \pm 0.27) \text{Ma}$, 与金沙江-哀牢山富碱斑岩带的岩浆活动时限吻合。岩石地球化学特征显示, 贫石英正长斑岩具有高钾富碱的特点, 微量元素上显示富轻稀土元素和 Ba、Rb、K、Sr 等大离子亲石元素而亏损 Ta、Ti 和 Nb 等高场强元素。富碱斑岩的 Rb/Sr、Nb/Ta、La/Nb 以及 LREE/HREE 比值较高, Eu 异常不明显表明北衙富碱斑岩具有壳幔混合特征。角闪石化学成分显示, 贫矿岩体中的角闪石主要是绿钙闪石。通过角闪石计算其结晶时温度、压力、氧逸度和水含量等参数并与富矿岩体中的角闪石进行对比, 发现北衙地区贫矿岩体角闪石结晶环境相比于富矿岩体具有高温高压的特点, 且贫矿岩体相对于富矿岩体具有更低的氧逸度和更深的侵位深度。贫矿岩体更深的侵位深度意味着更大的围岩压力, 难以发生对成矿有利的流体出溶; 低氧逸度意味着金属元素早期就已经沉淀无法随岩浆向上运移。因此, 在北衙矿区, 氧逸度和侵位深度是北衙地区岩体含矿差异性的主要控制因素。

关键词 地球化学; 富碱斑岩; 锆石 U-Pb 定年; 角闪石; 氧逸度; 侵位深度

中图分类号: P618.42

文献标志码: A

A comparative study of fertile and barren porphyry in Beiya area: Indicative significance for porphyry mineralization

FU XiaoJin^{1,2}, LI QiZai³, LIU Huan¹, ZHOU GuiWu³, ZHANG WeiTao¹, ZHANG ChangQing¹,
ZHANG PanPan⁴, ZHENG YuLin^{1,3,5} and LI Biao⁶

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 North China Geological Exploration Bureau of Tianjin, Tianjin 300170, China; 3 Yunnan Gold & Mining Group Co. Ltd., Kunming 650200, Yunnan, China; 4 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 5 Non-ferrous Metals Geological Exploration Bureau of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, Zhejiang, China; 6 The Fifth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Tangshan 063000, Hebei, China)

* 本文得到深地资源项目(编号:2016YFC0600305)、国家自然科学基金(编号:41602103)、“大兴安岭中南段有色金属基地综合地质调查”(编号:DD20190815)和“津冀重要矿产资源集中区资源综合利用与评价”项目(编号:DD20190182)联合资助

第一作者简介 付小锦,女,1983年生,工程师,从事城市地质调查和矿产勘查工作。Email: fuxiaojinamina@126.com

** 通讯作者 刘欢,女,1986年生,副研究员,从事矿物学、岩石学、矿床学研究。Email: xhhyliuhuan@163.com

收稿日期 2021-11-30; 改回日期 2022-07-15。孟秋熠编辑。

Abstract

The Beiya porphyry-skarn Au deposit is located in the middle domain of the Jinshajiang-Ailaoshan alkali-rich porphyry belt as well as at the junction of the western margin of the Yangtze Plate and the Sanjiang Tethys orogenic belt. The mineralization is closely related to Cenozoic alkali-rich porphyry. Previous studies have mostly focused on the geochemical characteristics of ore-bearing porphyry, but a little on barren porphyry. It remains obscure as to what control their contrasting ore-forming potential. In this study, we take barren porphyries in the Bailiancun, Matouwan and Nandaping as research objects, using whole rock major-trace elements, zircon U-Pb dating and amphibole mineralogy analysis, to discuss their petrogenesis, magma source, water content and oxygen fugacity, compared with ore-bearing porphyry in this area, aimed to explore the geochemical differences between ore-bearing and barren porphyries. The zircon U-Pb ages of the barren quartz syenite porphyries are $(33.96 \pm 0.43)\text{Ma}$, $(33.26 \pm 0.30)\text{Ma}$ and $(32.80 \pm 0.27)\text{Ma}$, respectively, consistent with the magmatic time of the Jinshajiang-Ailaoshan alkali-rich porphyry belt. Geochemical characteristics show that barren quartz syenite porphyry are characterized by enrichment in alkaline and potassium, and also enriched in LREE and LILE (Ba, Rb, K, Sr), depleted HFSE (Ta, Ti and Nb). Have high Rb/Sr, Nb/Ta, La/Nb and LREE/HREE ratio and do not show obvious Eu anomalies indicate a characteristic of mixture between normal mantle and subducted oceanic crust. Chemical compositions of amphibole show that the amphibole from barren porphyry belongs to hastingsite. The crystallization temperature, pressure, oxygen fugacity and water content are calculated by amphibole composition and compared with ore-forming porphyry, it is found that amphibole from barren porphyry are characterized by high temperature and high pressure compared with ore-forming porphyry, and barren porphyry has lower oxygen fugacity and deeper emplacement relative to ore-forming porphyry. Deeper emplacement of magma indicating higher pressure of surrounding rocks make it difficult to cause fluid exsolution which is favourable for mineralization. Low oxygen fugacity resulted in the early precipitation of metal element. Thus, oxygen fugacity and emplacement depth of magma are key factors that control their contrasting ore-forming potential.

Key words: geochemistry, alkali-rich porphyry, zircon U-Pb dating, amphibole, oxygen fugacity, emplacement depth

金沙江-哀牢山富碱斑岩带是中国重要的铜、金、铅、锌等金属资源集中区(Lu et al., 2013; Mao et al., 2017),带内发育众多新生代富碱斑岩。云南北衙富碱斑岩是金沙江-哀牢山新生代富碱斑岩带的重要组成部分(肖晓牛等, 2011; 和文言等, 2012; 2013; Lu et al., 2013; Hou et al., 2015a),其作为滇西北地区与富碱斑岩有关的金矿床的典型代表之一,一直是学者们研究的热点。众多学者从不同角度对北衙金矿进行了深入的研究,发表过很多北衙地区富碱斑岩体和金多金属矿床成矿作用关系的研究成果。徐受民等(2006)通过对万铜山、红泥塘和笔架山岩体的主微量元素和稀土元素分析认为,富碱斑岩并非起源于俯冲大洋板片,而是源于加厚地壳底部,源区为榴辉岩相岩石;薛传东等(2008)认为北衙富碱斑岩具有埃达克岩石特征,来源于加厚玄武质地壳底部或上地幔的局部熔融,北衙成岩成矿作用是喜马拉雅期

印亚大陆碰撞造山在东南缘转换远程效应的结果; Hu等(2004)通过黄铁矿 He-Ar 同位素分析认为,北衙富碱斑岩来自幔源岩浆,但受到地壳岩石水岩相互作用的影响而有别于幔源碱性岩浆;肖晓牛等(2009)对富碱斑岩 Sr-Nd-Pb 同位素研究认为,富碱斑岩源区为 EMII 富集地幔,与区域上成矿关系密切的富碱斑岩源区一致(毕献武等, 2005; Lu et al., 2013; 2015);肖晓牛等(2011)、和文言等(2012; 2013)认为北衙地区喜马拉雅期的走滑断裂诱发壳幔相互作用,形成富碱斑岩,岩浆作用不仅为流体上升提供通道,也是成矿物质的主要来源和载体;鲍新尚等(2017)对北衙富矿岩体中的角闪石进行了分析,得出富矿岩体具有较高的含水量和氧逸度,对成矿较为有利。

但北衙地区富碱斑岩出露数量较多,外围斑岩体(白莲村、马头湾、南大坪)由于并未发现明显矿化,所以研究较少。年代学研究表明,北衙矿区外围

的富碱斑岩体形成年代与金矿区的富碱斑岩相近,但只有主矿段(万铜山、红泥塘)的富碱斑岩矿化强烈,矿石矿物含量达到工业品位,为富矿岩体;其余外围富碱斑岩体(白莲村、马头湾、南大坪)矿化强度极弱甚至部分未发现矿化,为贫矿岩体。针对这一问题,本文对北衙地区贫矿的富碱斑岩体进行了矿物学特征和地球化学特征的研究,从矿物学特征和地球化学特征2个方面,将贫矿岩体与富矿岩体特征进行综合对比,厘定了北衙地区富碱斑岩体含矿性特征,并为后续找矿勘探工作的部署提供依据。

1 区域地质背景与矿床地质特征

研究区地层出露较为齐全,从元古界到新生界均有发育。点苍山变质岩是区内元古界出露的主要地层,该地层在大理洱海西侧出露广泛,岩性主要为斜长角闪岩、变粒岩、云母片岩、片麻岩以及大理岩等;下古生界主要为志留系和奥陶系,岩性为砂岩、白云岩、页岩和粉砂岩等;上古生界发育齐全,以碳酸盐岩为主;中生界发育较全,三叠系以碎屑岩和碳酸盐为主,主要分布于丽江—北衙一带。其中,三叠系北衙组灰岩与北衙富碱斑岩型金矿关系密切,是本区主要的赋矿层位。侏罗系、白垩系主要为河湖相红色碎屑岩,夹碳酸盐岩,仅出露于程海—宾川断裂以东和红河断裂以西的地区。在北衙地区,侏罗系、白垩系缺失。区内新生界出露不完整,主要出露新近系沉积砂泥岩及红色粗碎屑岩,夹膏盐、角砾岩层。研究区位于扬子克拉通西缘,西邻德格—中甸、兰坪—思茅陆块,区域上被金沙江—红河断裂、宾川—程海断裂和木里—丽江断裂3个断裂所夹持(图1a,b)。区内岩浆活动强烈,以二叠系玄武岩分布最广,次为酸性岩,基性岩和碱性岩。岩浆具有多期次活动特征,并受到区域断裂构造的控制,并以新生代富钾碱性火山-岩浆岩活动最为广泛。新生代岩浆岩沿着金沙江断裂带、红河断裂带和哀牢山断裂带两侧分布,明显受断裂带控制,岩性复杂,以二长花岗斑岩、花岗斑岩、石英二长斑岩、透辉石正长岩、细晶斑岩、石英正长斑岩和正长斑岩为主(侯增谦等,2015b)。此外,还有与富碱侵入岩分布时空一致的煌斑岩脉和钾质火山岩,如碱玄岩、安粗岩、粗面岩等(Huang et al., 2010; Lu et al., 2015)。前人测得碱性侵入岩、碱性火山岩、煌斑岩的U-Pb同位素年龄范围分别为38.4~33.0 Ma、37.3~30.0 Ma、(31.12±

0.88)Ma(Xu et al., 2007a; Lu et al., 2013; Yan et al., 2018)。

矿区地层出露面积较大,地层较完整,由老到新依次为:上二叠统峨眉山组灰绿色玄武岩;下三叠统青天堡组灰黑色砂泥岩、杂砂岩及砂砾岩;中三叠统北衙组灰白色白云岩、白云质灰岩、铁质砂屑灰岩、泥质灰岩及蠕虫状灰岩;第四系更新统蛇山组、更新统与全新统为褐红色、黄褐色残坡积砂砾、黏土及含砂砾黏土(岩)。矿区构造活动强烈,北衙向斜是北衙金多金属矿区的主要控矿褶皱,向斜北北东向延伸,最大延伸可达12 km,两翼宽比较均匀,约1.4 km,两翼地层主要为三叠系北衙组灰岩和青天堡组砂岩(图2)。矿区断裂构造发育,其中南北向马鞍山大断裂是区内主要的断裂构造,延伸距离超过10 km。该断裂的次级断裂是万铜山矿体的主要控矿断裂,这些断裂具有多期次、多阶段性的特点,区内可见压扭性、张扭性断裂破碎带。矿区内主要的岩浆岩为喜马拉雅期的富碱斑岩体,出露的富碱斑岩体数量较多,规模较小,富碱斑岩体的岩性变化不大。其中,岩性为石英正长斑岩的万铜山岩体与北衙金矿成矿有关;白莲村、马头湾、南大坪正长斑岩中未发现矿化。徐兴旺等(2006)在万铜山矿段深部发现存在石英钠长斑岩,研究表明该石英钠长斑岩与金多金属矿床的成矿也有一定的关系。在矿区外围广泛分布的二叠系峨眉山玄武岩呈灰绿色,气孔构造和杏仁构造及其发育。此外,红泥塘矿段还可见隐爆角砾岩。

2 岩石学特征

区内岩体多受北衙向斜两翼的断层影响,岩体倾角一般为21°~85°不等。万铜山富碱斑岩体呈岩株状产出,白莲村、马头湾和南大坪富碱斑岩呈岩脉产出(和中华等,2013)。其中,万铜山岩体主要为石英正长斑岩,白莲村、马头湾和南大坪为正长斑岩。

本次采集的贫矿富碱斑岩来自白莲村、马头湾和南大坪,其岩相学特征为:正长斑岩,浅灰白色,具斑状结构,斑晶含量约35%~50%,斑晶的主要组成矿物是钾长石、斜长石、石英和少量的角闪石,基质主要是由长石和石英组成(图3a~h)。钾长石斑晶含量约15%~20%,呈自形-半自形斑状或柱状,粒径大小

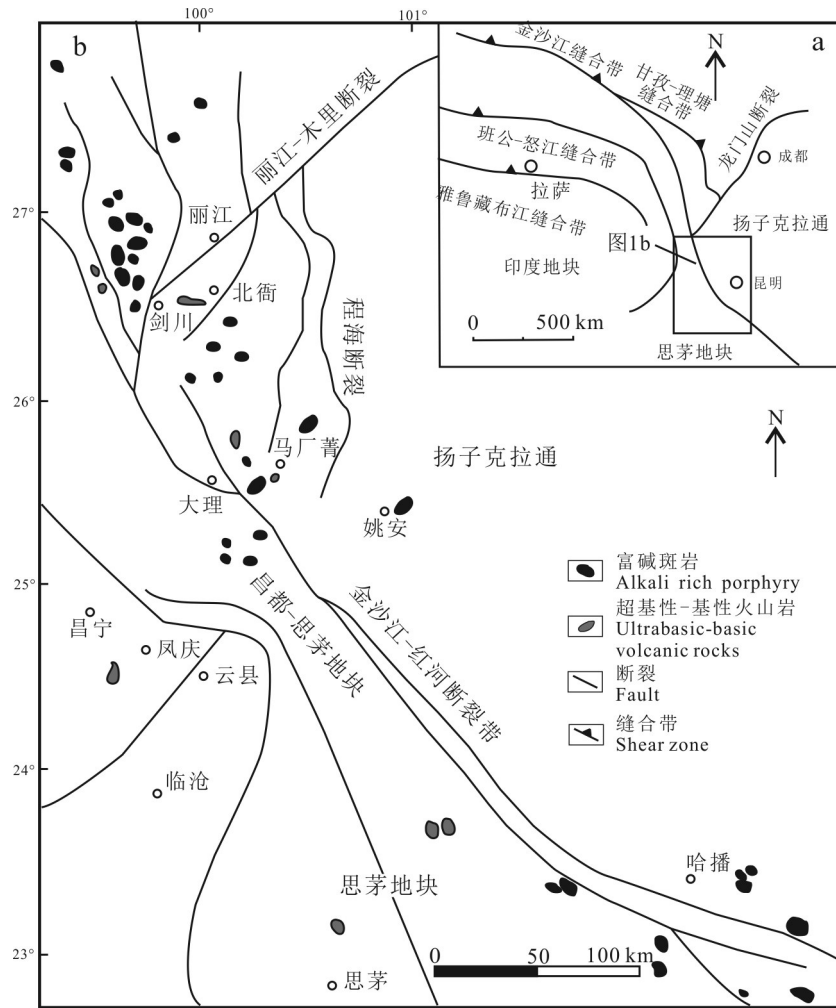


图1 扬子克拉通西缘构造格架图(a)和滇西新生代富碱斑岩分布简图(b,据Lu et al.,2013修改)

Fig.1 Tectonic framework of western margin of the Yangtze Craton(a)and distribution of Cenozoic alkali porphyry in West Yunnan(b,modified after Lu et al.,2013)

约0.5~3.0 mm,可见卡式双晶,部分钾长石斑晶包裹已经完全绿泥石化的角闪石斑晶;斜长石斑晶含量约5%~10%,呈自形-半自形长柱状,可见聚片双晶,粒径约0.5~2.0 mm,部分斜长石发生蚀变;石英斑晶含量约5%,呈他形粒状,具有熔蚀形成的圆滑或港湾状边界,石英表面干净,粒径约0.3~2.0 mm;角闪石斑晶含量约2%~5%,呈他形-半自形晶型,部分角闪石呈他形,粒径约0.3~1.5 mm,自形程度高的角闪石可见环带构造,2组解理,部分角闪石发生蚀变,形成绿泥石。副矿物有锆石和榍石。

3 样品采集与分析方法

野外避开断裂破碎带、蚀变带等,在露天采坑、

钻孔及少量新鲜露头,采集新鲜的富碱斑岩体样品。全岩样品制备,首先对采集的新鲜样品进行切片鉴定,进一步选择新鲜的样品在实验室将风化面除去,经纯水洗净风干后,在碎样机上粉碎,研磨至<200目。本次选取白莲村、马头湾和南大坪岩体进行主微量元素分析,锆石定年及角闪石主量元素分析,取样位置见图2。

岩石样品全分析是由国家地质实验测试中心完成测试,将样品无污染粉碎至200目,主量元素 Na_2O 、 MgO 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 P_2O_5 、 CaO 、 SiO_2 、 FeO^T 、 MnO 、 TiO_2 等采用X荧光法(XRF)在X荧光光谱仪(3080E)上测定,烧矢量(LOI)为高温加热后重量和灼烧后重量之差。微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)在离子质谱仪(X-series)

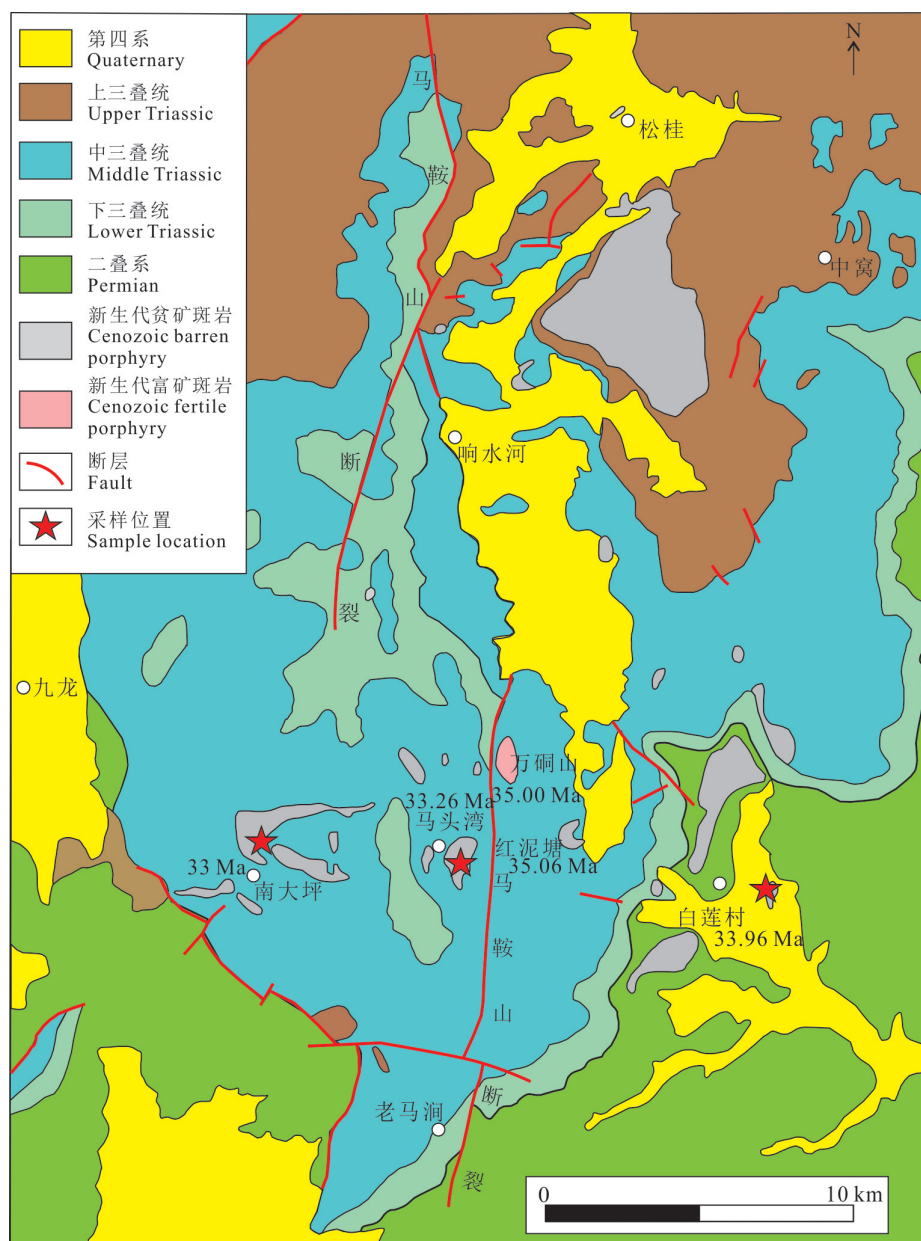


图2 北衙矿区地质简图(据王建华等,2015)

Fig.2 Simplified geological map of the Beiya area(after Wang et al., 2015)

上完成测试。

LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析测试在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点实验室完成,测试仪器为 Thermo Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS,具体测试步骤参考侯可军等(2009)。

角闪石矿物成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,测试采用日本电子 JOEL 公司生产的 JXA-823V 型电子探针分析仪,实验中的加速电压为 15 kV,束流为 2.0×10^{-8} A,束斑大

小为 5 μm ,测试的主量元素包括 Na_2O 、 MgO 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 P_2O_5 、 CaO 、 SiO_2 、 FeO^{T} 、 MnO 、 TiO_2 、 NiO 、 Cr_2O_3 、 F 、 V_2O_3 。

4 测试结果

4.1 全岩地球化学特征

4.1.1 主量元素特征

研究区内富碱斑岩主量元素测试结果(表 1)

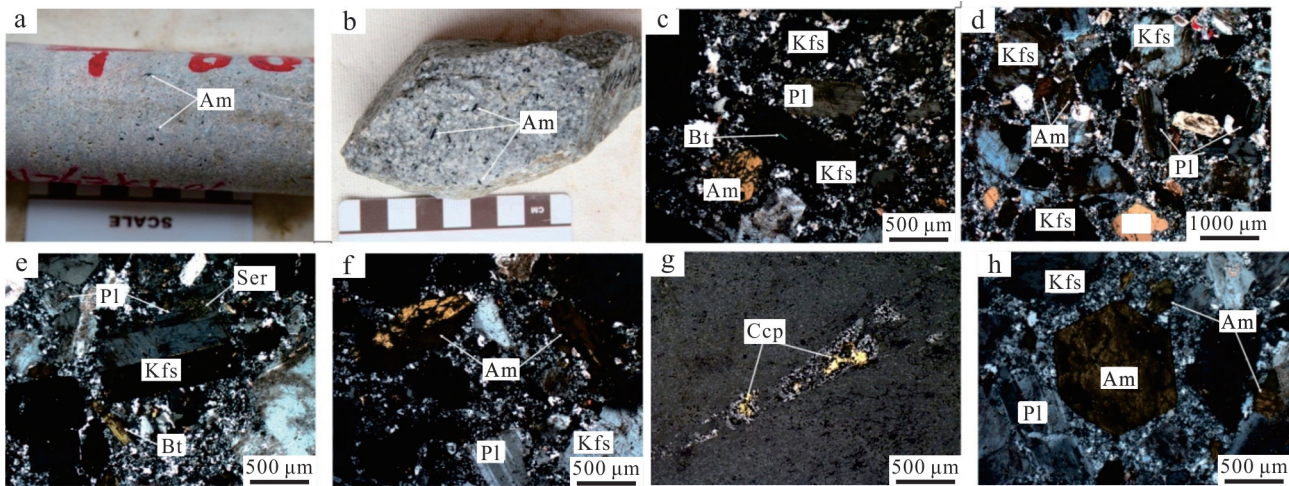


图3 北衙正长斑岩手标本及镜下照片

a, b. 正长斑岩手标本照片; c~h. 正长斑岩镜下照片

Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英; Ccp—黄铜矿; Ser—绢云母; Bt—黑云母; Am—角闪石

Fig.3 Hand specimen and microscopic characteristic of the Beiya syenite porphyry

a, b. Hand specimen of syenite porphyry; c~h. Microscopic characteristic of syenite porphyry

Kfs—Potassium feldspar; Pl—Plagioclase; Qtz—Quartz; Ccp—Chalcopyrite; Ser—Sericite; Bt—Biotite; Am—Amphibole

显示, 该地区富碱斑岩体 $w(\text{SiO}_2)$ 为 58.01%~71.96%, 平均 66.82%, 属于中酸性-酸性岩类; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 13.39%~15.86%, 平均 14.78%; $w(\text{FeO}^T)$ 为 1.39%~4.22%, 平均 2.39%; $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 为 8.18%~10.06%, 平均 9.39%; 里特曼指数(σ)为 3.07~4.51, 平均 3.67, 属于钙碱性-碱性岩石; 铝饱和指数为 0.94,

属于偏铝质岩石。固结系数(SI)为 2.16~13.87, 平均 5.24, 分异指数(DI)为 69.90~93.52, 平均 85.49, 指示岩浆分异程度较高。

在 TAS 图解(图 4a)中, 所有富碱斑岩侵入体样品均落到石英正长岩和花岗岩过渡区, 富矿斑岩主要落在花岗岩和石英二长岩区域, 贫矿斑岩

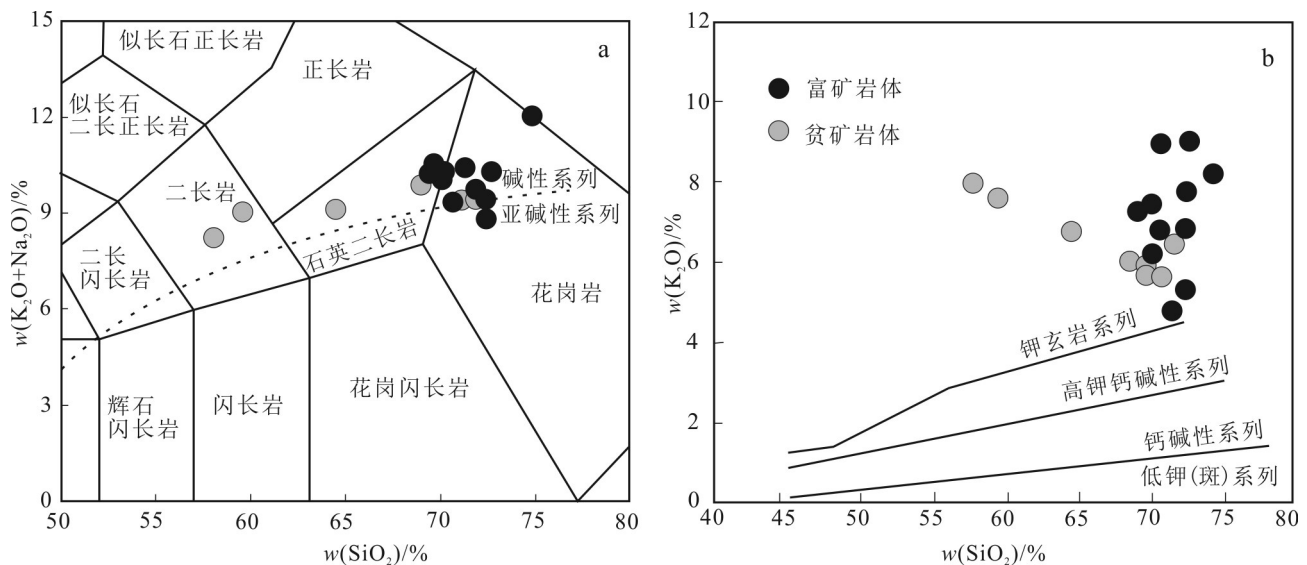


图4 北衙矿区富碱斑岩 TAS 图解(a)和 SiO_2 - K_2O 图解(b)(富矿岩体数据引自 Xu et al., 2007b; Lu et al., 2013)

Fig.4 TAS diagram (a) and SiO_2 - K_2O diagram (b) of alkali-rich porphyries from the Beiya area (data of ore-forming porphyries are after Xu et al., 2007b; Lu et al., 2013)

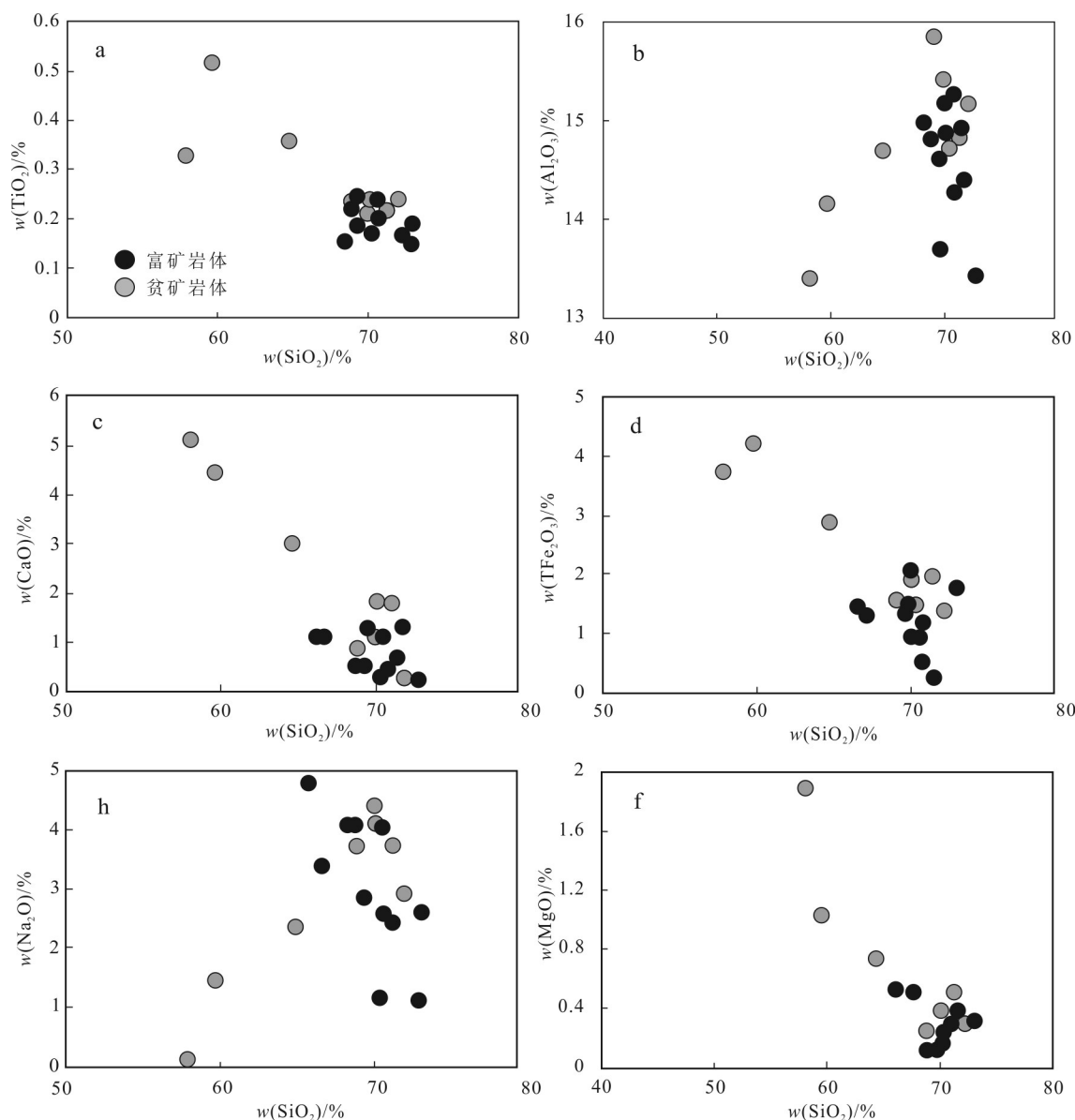


图5 北衙矿区富碱斑岩Harker图解(a~f,图例同图4,富矿岩体数据引自 Xu et al., 2007b; Lu et al., 2013)

Fig.5 Harker diagram of alkali-rich porphyries from the Beiya area(data of ore-forming porphyries are from Xu et al., 2007b; Lu et al., 2013)

主要落在石英二长岩和正长岩区域,个别贫矿岩体的样品落在花岗岩区域;在 $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ 图解(图4b)中,所测样品均落入钾玄岩系列。Haker图解(图5a~f)中可以很清楚地看到,北衙地区富碱斑岩 TiO_2 、 MgO 、 CaO 、 FeO^T 、 P_2O_5 的含量随 SiO_2 含量的减少而增加,而 Al_2O_3 的含量随着 SiO_2 含量的减少而减少,指示岩浆演化过程中发生了分离结晶作用。

4.1.2 微量元素特征

微量元素的测试结果如表1所示,在微量元素的原始地幔标准化图解(图6a)中,富矿斑岩体与贫

矿斑岩体的配分曲线表现出一致的右倾趋势,暗示了他们具有相同的起源。岩体整体上相对富集大离子石元素(Ba、K、Pb和Sr等),亏损高场强元素(Ta、Ti、P、Th、Nb和HREE等)。但不同的岩体中元素之间具有不同的富集或亏损程度,可能表明不同岩体在岩浆演化过程中具有一定的差异。其中,富矿岩体的Rb、U和K含量略高于贫矿岩体,Nb、Ta和Ti等含量略低于贫矿岩体。

稀土元素见表1,北衙贫矿富碱斑岩体稀土元素总量(ΣREE)为 $76.57 \times 10^{-6} \sim 113.86 \times 10^{-6}$;高 $w(\text{Sr})$

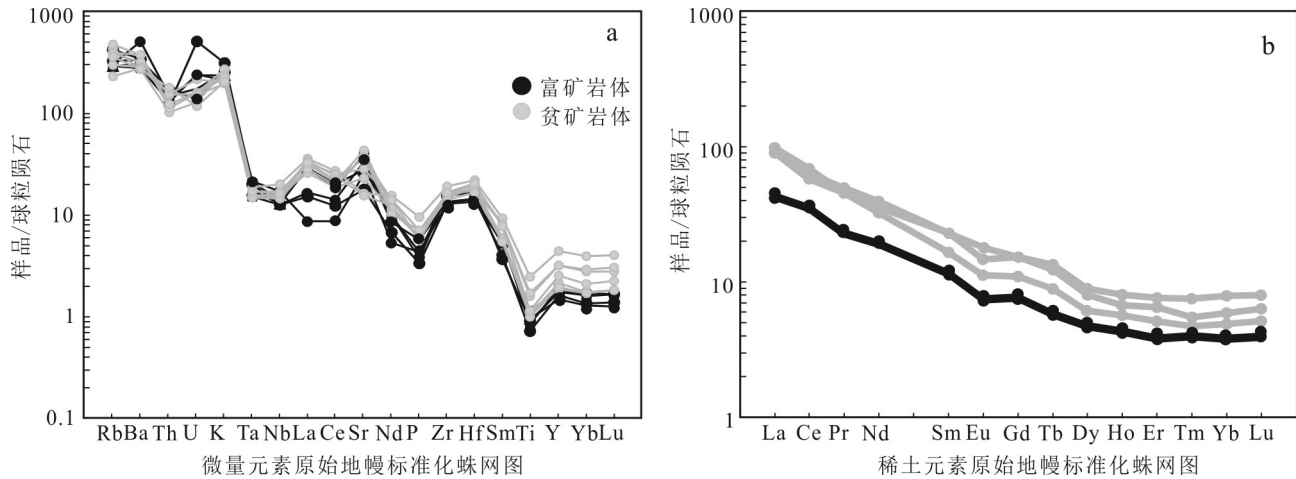


图6 北衙富碱斑岩微量元素原始地幔标准化分配模式图(a)与稀土元素球粒陨石标准化分配模式图(b,微量元素原始地幔和球粒陨石标准化值来自 Sun et al., 1989)(富矿岩体数据引自 Xu et al., 2007b; Lu et al., 2013)

Fig.6 Primitive mantle-normalized trace element pattern of alkali-rich porphyries from the Beiya area (a) and chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns (b, chondrite and primitive mantle normalizing value are from Sun et al., 1989) (data of ore-forming porphyries are from Xu et al., 2007b; Lu et al., 2013)

($319 \times 10^{-6} \sim 891 \times 10^{-6}$), 低 $w(Y)$ ($8.28 \times 10^{-6} \sim 19.4 \times 10^{-6}$), 高 Sr/Y 比值 ($17.16 \sim 94.39$); 轻、重稀土元素比值 ($LREE/HREE$) = $7.62 \sim 12.58$, $(La/Yb)_N = 9.13 \sim 18.32$, 指示轻、重稀土元素之间有很强的分异程度, 属于轻稀土元素富集型。在稀土元素球粒陨石标准化图解 (图 6b) 中, 富碱斑岩体配分曲线均为右倾型, $\delta Eu = 0.76 \sim 0.93$, 平均 0.83, 表现出轻微的铕负异常, 说明在岩浆的分离结晶过程中没有或有少量的斜长石晶出, 导致残余岩体中形成了弱的铕负异常。稀土元素球粒陨石标准化分布型式图 (图 6b) 中, 富矿岩体与贫矿岩体均呈右倾, 表明富矿与贫矿富碱斑岩体的演化过程基本一致。

4.2 锆石 U-Pb 同位素测年结果

所测试贫矿岩体 (白莲村, 马头湾和南大坪) 的锆石颗粒均为无色透明, 颗粒大小不等, 晶型多为自形-半自形, 呈长柱状, 锆石颗粒大小变化较大。从 CL 图像 (图 7) 中可以看到大部分锆石颗粒具有清晰的震荡环带, 平均 Th/U 比值均大于 0.1, 表明锆石具有岩浆结晶锆石的特征。

锆石测试结果见表 2, 白莲村岩体中锆石的 $w(U)$ 为 $404 \times 10^{-6} \sim 1860 \times 10^{-6}$, 平均 1024×10^{-6} , $w(Th)$ 为 $35 \times 10^{-6} \sim 2835 \times 10^{-6}$, 平均 1174×10^{-6} , Th/U 比值介于 $0.32 \sim 2.02$, 平均 1.10, 年龄谐和图 (图 7b) 显示, 样品的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 $(33.96 \pm 0.43) Ma$ ($MSWD=0.24, n=19$)。马头湾岩体中锆石的 $w(U)$ 为

$305 \times 10^{-6} \sim 1603 \times 10^{-6}$, 平均 1017×10^{-6} , $w(Th)$ 为 $69 \times 10^{-6} \sim 1872 \times 10^{-6}$, 平均 820×10^{-6} , Th/U 比值介于 $0.32 \sim 1.87$, 平均 0.88, 年龄谐和图 (图 7d) 显示, 样品的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 $(33.26 \pm 0.30) Ma$ ($MSWD=0.54, n=18$)。南大坪岩体中锆石的 $w(U)$ 为 $333 \times 10^{-6} \sim 2374 \times 10^{-6}$, 平均 1147×10^{-6} , $w(Th)$ 为 $74 \sim 8256$, 平均 1228×10^{-6} , Th/U 比值介于 $0.32 \sim 5.02$, 平均 0.91, 年龄谐和图 (图 7f) 显示, 样品的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 $(32.80 \pm 0.27) Ma$ ($MSWD=0.89, n=13$)。

4.3 角闪石成分特征

研究区角闪石呈自形-半自形晶出现, 角闪石电子探针结果显示 (表 3), 其中贫矿岩体中角闪石斑晶的 $w(SiO_2)$ 为 $38.68\% \sim 42.36\%$; $w(Al_2O_3)$ 为 $9.08\% \sim 12.64\%$; $w(FeO)$ 为 $19.15\% \sim 24.53\%$; $w(F)$ 为 $0.79\% \sim 1.84\%$ 。角闪石阳离子特征, $Ca_B = 1.76 \sim 1.85$, $Na_A + K_A = 0.72 \sim 0.91$ 。按国际矿物学协会角闪石专业委员会提出的命名原则, 属于钙角闪石 ($Ca_B \geq 1.5, Na_A + K_A \geq 0.5$)。

本次工作通过对贫矿岩体中角闪石的研究, 结合前人对富矿岩体中角闪石的研究, 对比发现, 北衙地区富碱斑岩体中, 角闪石有一定差别 (图 8), 主要体现在角闪石类型方面, 富矿岩体中角闪石投点主要落在浅闪石区和镁角闪石区, 属于 SiO_2 饱和类型, 其中, 富矿岩体中有 2 个点落在阳起石区, 表明

表 1 北衙地区富碱斑岩主量与微量分析结果表

Table1 Major and trace elements compositions of Beiya alkali-rich porphyries

组分	正长斑岩							
	白莲村				马头湾		南大坪	
				$w(B)/\%$				
SiO ₂	69.99	59.64	58.01	64.71	71.96	71.18	70.06	69.04
TiO ₂	0.24	0.52	0.33	0.36	0.24	0.22	0.21	0.24
Al ₂ O ₃	15.41	14.19	13.39	14.7	15.2	14.83	14.72	15.86
CaO	1.14	4.49	5.13	3.04	0.32	1.81	1.84	0.97
FeO ^T	1.92	4.22	3.76	2.83	1.39	1.97	1.5	1.54
K ₂ O	5.72	7.65	7.99	6.81	6.5	5.68	5.87	6.05
MgO	0.35	1.06	1.89	0.74	0.3	0.49	0.35	0.25
MnO	0.05	0.18	0.3	0.09	0.01	0.02	0.03	0.01
Na ₂ O	4.32	1.41	0.19	2.32	2.95	3.71	4.19	3.78
P ₂ O ₅	0.13	0.2	0.12	0.15	0.13	0.13	0.15	0.12
烧失量	0.86	6.25	8.09	4.22	1.19	0.83	1.2	1.31
总和	100.13	99.81	99.2	99.97	100.18	100.87	100.12	99.17
K ₂ O/Na ₂ O	1.32	5.43	42.05	2.94	2.2	1.53	1.4	1.6
K ₂ O+Na ₂ O	10.04	9.06	8.18	9.13	9.45	9.39	10.06	9.83
A/CNK	1	0.75	0.73	0.88	1.22	0.95	0.89	1.09
Mg [#]	0.27	0.33	0.5	0.34	0.3	0.33	0.32	0.24
σ	3.72	4.51	3.89		3.07	3.13	3.72	3.66
AR	4.08	2.88	2.58	3.12	4.11	3.59	4.1	3.81
固结指数(SI)	2.86	7.5	13.87	5.89	2.71	4.17	2.96	2.16
分异指数(DI)	91.37	75.51	69.9	82.12	93.52	88.75	91.22	91.52
				$w(B)/10^{-6}$				
Cu	3.03	3.09	3.14	1.14	14.8	45.6	1.29	23.7
Zn	45.8	76	39.1	54	46.9	20.6	26	35.7
Ga	20.5	19.8	20.9	23	20.7	22.3	21.5	22
Rb	265	292	243	237	248	143	183	221
Ba	1844	2514	2544	2142	2684	1893	1937	1850
Th	8.46	9.14	10.1	12.5	11.9	12.7	12.9	14.8
U	2.62	3.23	3.25	3.16	4.39	3.06	4.33	2.41
K	63504.95	66327.39	56531.85	53958.45	57860.06	47151.38	48728.63	50222.87
Ta	0.74	0.6	0.67	0.62	0.65	0.61	0.59	0.67
Nb	13.7	11	11.7	10.9	12	10.5	9.99	11.1
Pb	21.1	30.4	45.5	52.1	31.7	18.8	28.7	21.7
Sr	333	317	582	470	504	891	772	739
P	872.92	523.75	654.69	567.4	916.57	567.4	654.69	523.75
Zr	209	171	177	172	197	160	152	179
Hf	6.62	5.19	5.9	5.49	6.35	5.53	5.03	6.19
Ti	3117.4	1978.35	2158.2	1438.8	2457.95	1318.9	1258.95	1438.8
La	23.6	22.9	21.6	17.4	17.3	21.2	19	21.7
Ce	46.3	41.7	43.8	31.8	34.9	36.5	33.8	37.6
Pr	5.25	4.4	4.74	3.73	4.02	4.07	3.76	4.71
Nd	20.3	16.1	18.7	14.2	16	15.2	13.5	18.4
Sm	4.01	3.47	3.49	2.57	2.94	2.51	2.35	3.34

续表 1
Continued Table 1

组分	正长斑岩							
	白莲村				马头湾		南大坪	
	$w(\text{B})/10^{-6}$							
Eu	1.19	1.02	0.93	0.61	0.69	0.65	0.63	0.85
Gd	4.13	3.1	3.44	2.25	2.45	2.22	2.05	3.15
Tb	0.68	0.49	0.51	0.33	0.41	0.33	0.3	0.46
Dy	3.32	2.27	2.54	1.49	1.94	1.57	1.43	2.03
Ho	0.67	0.45	0.51	0.29	0.37	0.32	0.31	0.38
Er	1.97	1.27	1.5	0.83	1.05	0.85	0.78	1.07
Tm	0.27	0.19	0.22	0.12	0.15	0.12	0.12	0.14
Yb	1.88	1.34	1.38	0.82	1.04	0.83	0.82	1
Lu	0.29	0.2	0.22	0.13	0.16	0.13	0.13	0.16
Y	19.4	13.9	13.9	8.28	11.2	9.44	8.67	11.1
ΣREE	113.86	98.9	103.58	76.57	83.42	86.5	78.98	94.99
LREE	100.65	89.59	93.26	70.31	75.85	80.13	73.04	86.6
HREE	13.21	9.31	10.32	6.26	7.57	6.37	5.94	8.39
LREE/HREE	7.62	9.62	9.04	11.23	10.02	12.58	12.3	10.32
La _N /Yb _N	9	12.26	11.23	15.22	11.93	18.32	16.62	15.57
La _N /Sm _N	3.8	4.26	4	4.37	3.8	5.45	5.22	4.19
Gd _N /Yb _N	1.82	1.91	2.06	2.27	1.95	2.21	2.07	2.61
δEu	0.89	0.93	0.81	0.76	0.76	0.82	0.86	0.79
δCe	0.98	0.95	1.01	0.92	0.99	0.9	0.92	0.87

注:比值单位为1。

部分样品已经发生蚀变;而在贫矿岩体中,角闪石投点主要落在绿钙闪石区,属于 SiO_2 不饱和类型。

5 讨 论

5.1 成岩成矿年代

北衙金多金属矿床位于金沙江-哀牢山富碱斑岩带上,该地区产出大量不同岩性的富碱斑岩,前人对北衙矿区成岩和成矿年龄进行了大量的研究工作。Xu 等(2007b)利用北衙万洞山矿段石英正长斑岩钾长石 Ar-Ar 定年,确定成岩年龄为 $(32.50 \pm 0.09)\text{Ma}$;刘红英等(2003)利用锆石 SHRIMP U-Pb 定年测得马头湾透辉石花岗斑岩成岩年龄为 $(34.1 \pm 4.0)\text{Ma}$;刘博(2014)在万洞山矿段利用辉钼矿定年,确定其成矿年龄为 $(37.47 \pm 0.51)\text{Ma}$;并对红泥塘石英正长斑岩、笔架山正长斑岩、马头湾正长斑岩进行了锆石 U-Pb 定年,显示成岩年龄分别为: $(35.06 \pm 0.16)\text{Ma}$ 、 $(35.21 \pm 0.19)\text{Ma}$ 和 $(35.12 \pm 0.13)\text{Ma}$;Liu 等(2012)确定红泥塘成岩年龄为 $(35.06 \pm 0.16)\text{Ma}$ 。本

次工作分别对白莲村、马头湾和南大坪岩体进行年代学研究,确定其成岩年龄依次为 $(33.96 \pm 0.43)\text{Ma}$ 、 $(33.26 \pm 0.30)\text{Ma}$ 和 $(32.80 \pm 0.27)\text{Ma}$ 。这与已有的万洞山、红泥塘、笔架山和马头湾岩体的成岩年限基本一致,显示北衙地区富碱岩浆是同一期岩浆活动的产物。

莫宣学(2011)对金沙江-哀牢山富碱斑岩体年龄进行了统计,显示该带富碱斑岩的成岩时代在 23~62 Ma 之间,即形成于印度-欧亚大陆碰撞(65 Ma)之后,高峰期在 30~45 Ma 之间。邓军等(2010;2011),杨立强等(2011)对金沙江-哀牢山-红河断裂带中富碱斑岩的年代学进行研究,认为沿该断裂带分布的富矿与贫矿富碱斑岩的成岩年龄基本一致(前者为 31~38 Ma,后者为 34~39 Ma),都是金沙江-哀牢山-红河富碱斑岩岩浆活动的高峰期的产物。侯增谦等(2004;2009)提出金沙江-哀牢山多金属成矿带成矿时代与成岩时代大致相当,主要落在 30~40 Ma 之间,并且此期间正是与区域上大规模走滑断裂系统有关的斑岩型 Cu-Mo-Au 成矿时期。北衙地区成岩

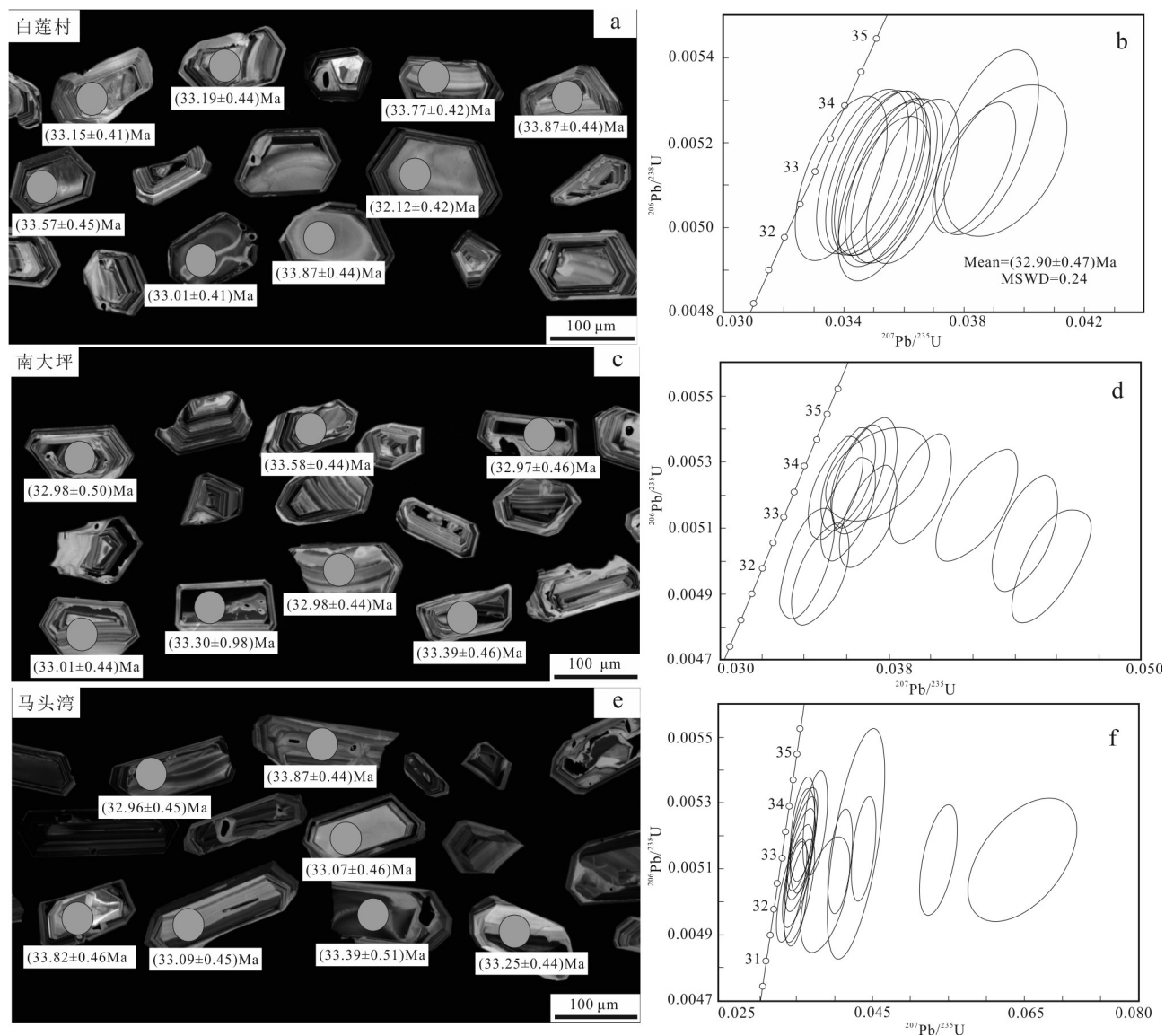


图7 北衙富碱斑岩CL图像(a、c、e)及年龄协和图(b、d、f)

Fig.7 Zircon Cathodoluminescence photograph(a, c, e) and U-Pb concordia age diagram(b, d, f)

成矿年代坐落于大规模走滑剪切成矿期内,表明北衙金多金属矿床与该带具有相同的动力学背景:在晚碰撞大规模走滑剪切背景下,金沙江-红河断裂由压扭向张扭转变,加之矿区外围印-亚板块主碰撞期就已形成的盐源-丽江走滑断裂和宾川-程海断裂等深大断裂的进一步活动,使得北衙所处的断裂交汇部位形成了局部伸展环境,该环境导致地壳拉张减薄,诱发地幔减压分熔,形成具有壳幔特征的富碱斑岩岩浆,此时该地区沟通着金沙江-红河断裂和盐源-丽江断裂的马鞍山断裂构造带为富碱岩浆的运移提供了通道(邓军等,2011;侯增谦等,2015b),于是随

之上侵的岩浆经历地壳物质混染和成矿流体的出溶后定位于浅部环境,最终构成了区域斑岩-矽卡岩成矿系统。因此,北衙金多金属矿床的形成是印-亚板块碰撞及其导致的深部壳幔岩浆形成演化的综合结果。

5.2 岩浆构造背景与源区特征

本次对北衙地区富碱斑岩主微量元素特征研究表明,该地区北衙富碱斑岩在构造背景判别图解中全部落入火山弧型与同碰撞型区域内(图9a、b),前人研究表明印度和欧亚板块在新生代(60~55 Ma)发生了碰撞由此形成了喜马拉雅造山带,这也

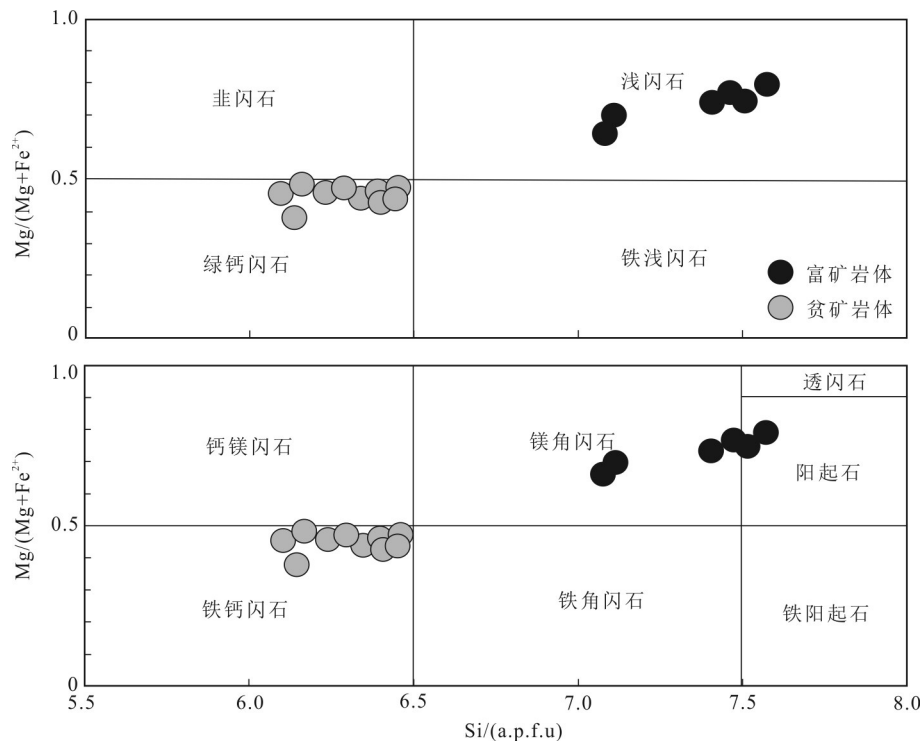


图8 北衙地区角闪石分类图解(据 Leake et al., 1997; 富矿岩体数据引自鲍新尚等, 2017)

Fig.8 Classification diagram for amphiboles from the Beiya area(after Leake et al., 1997; data of ore-forming porphyries are from Bao et al., 2017)

对哀牢山-红河断裂带的构造格局造成了重大影响, 上述证据表明北衙地区富碱斑岩形成于大陆边缘环境。

微量元素测试结果显示, 北衙富碱斑岩全岩样品的 Rb/Sr 比值平均为 0.48; Nb/Ta 比值平均为 17.63; La/Nb 比值平均为 1.82。与此对应的地壳、上地幔 Rb/Sr 比值分别为 0.350、0.034 (Taylor et al., 1995); Nb/Ta 比值对应的地壳、地幔比值分别为 8.3 和 17.5 (Sun et al., 1989); La/Nb 比值对应的地壳、地幔标准值分别为 2.20 和 0.94 (Weaver, 1991), 暗示北衙地区富碱斑岩具有地壳和地幔双重特征。此外, 本次测试工作所得富碱斑岩体稀土元素总量 (ΣREE) 为 $76.57 \times 10^{-6} \sim 113.86 \times 10^{-6}$, 与地壳花岗岩平均值 (246.5×10^{-6}) 和维诺格拉多夫的酸性岩体的平均值 (258×10^{-6}) 相比明显偏低。赵振华 (2007) 总结壳幔花岗岩稀土组成特征提出, 具有轻稀土元素富集 (即 $(La/Yb)_N > 10$), 铈亏损不明显 ($\delta Eu > 0.5$) 等特征的这类花岗岩, 其物质来源为上地幔或者下部地壳硅镁层。本文研究的富碱斑岩体稀土元素特征 ($(La/Yb)_N$ 变化范围 9.13~18.32, δEu 变化范围 0.76~

0.93, 与之类似, 表明研究区富碱斑岩的物质来源为上地幔或下地壳。同时, 北衙地区部分斑岩表现出较高的 $Mg^\# (> 0.4)$, 和前人实验证实有地幔组分参与形成的岩浆岩 $Mg^\#$ 特征一致。上述微量元素比值、稀土元素含量等地球特征变化于壳源和幔源之间, 表明该地区富碱斑岩具壳幔混合特征。

5.3 富碱斑岩含矿差异性

本次工作收集了前人对北衙地区富矿斑岩体中角闪石斑晶研究成果的基础上, 采集了该地区白莲村、南大坪、马头湾等贫矿斑岩体样品, 并对其中的角闪石斑晶开展了电子探针实验, 并根据 Ridolfi (2010) 公式计算岩体中角闪石斑晶的结晶温度、压力和氧逸度等物理参数 (表 3)。

角闪石氧逸度计算结果表明, 北衙地区与成矿作用有关的富碱斑岩体 (万洞山岩体) 的氧逸度 (ΔNNO 变化范围为 1.12~1.89, 鲍新尚等, 2017) 高于贫矿岩体中角闪石斑晶计算所得的氧逸度 ($\Delta NNO = -0.62 \sim 0.12$) (图 10a)。富矿岩体中角闪石斑晶的结晶环境相比于贫矿岩体中的角闪石斑晶结晶环境具有低温、低压的特征 (富矿岩体 679.98~

表 2 北衙富碱斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb analytical data of the alkali-rich porphyries from the Beiya area

样品号	$w(\text{B})/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
白莲村															
BLC-1-1	563	1072	1.91	0.0053	0.0001	0.037	0.0006	0.0509	0.0008	34	0	37	1	237	36
BLC-1-2	782	477	0.61	0.0346	0.0004	0.2528	0.0034	0.053	0.0006	219	3	229	3	327	26
BLC-1-3	1425	2130	1.49	0.005	0.0001	0.0348	0.0006	0.0508	0.0007	32	0	35	1	233	32
BLC-1-4	1063	736	0.69	0.0276	0.0007	0.2151	0.0055	0.0565	0.0006	176	4	198	5	471	25
BLC-1-5	763	534	0.7	0.0211	0.0013	0.1843	0.012	0.0635	0.0008	134	8	172	11	724	26
BLC-1-6	404	347	0.86	0.0052	0.0001	0.0422	0.0008	0.0593	0.0012	33	0	42	1	577	42
BLC-1-7	1550	2184	1.41	0.005	0.0001	0.0457	0.0007	0.0664	0.001	32	0	45	1	819	31
BLC-1-8	1147	1314	1.15	0.0052	0.0001	0.0395	0.0007	0.0549	0.0009	34	0	39	1	408	35
BLC-1-9	1860	2835	1.52	0.0057	0.0001	0.1334	0.0059	0.169	0.0065	37	1	127	6	2547	65
BLC-1-10	954	1597	1.67	0.005	0.0001	0.0342	0.0005	0.0496	0.0006	32	0	34	1	178	30
BLC-1-11	1198	1402	1.17	0.005	0.0001	0.0443	0.0007	0.0643	0.0009	32	0	44	1	751	28
BLC-1-12	963	403	0.42	0.0051	0.0001	0.0372	0.0005	0.0526	0.0007	33	0	37	1	311	31
BLC-1-13	1168	1271	1.09	0.0052	0.0001	0.0359	0.0005	0.0498	0.0006	34	0	36	0	184	27
BLC-1-14	1177	1147	0.97	0.0093	0.0002	0.0776	0.0014	0.0608	0.001	59	1	76	1	631	35
BLC-1-15	1154	1519	1.32	0.0052	0.0001	0.0363	0.0006	0.0502	0.0007	34	0	36	1	202	34
BLC-1-16	1089	345	0.32	0.0052	0.0001	0.0355	0.0005	0.0493	0.0006	34	0	35	1	164	30
BLC-1-17	963	1507	1.57	0.0067	0.0001	0.0466	0.0012	0.0501	0.0011	43	1	46	1	202	50
BLC-1-18	764	739	0.97	0.0053	0.0001	0.0375	0.0009	0.0517	0.0011	34	0	37	1	273	49
BLC-1-19	553	35	0.06	0.0062	0.0005	0.0493	0.0039	0.058	0.0012	40	3	49	4	531	45
BLC-1-20	935	1889	2.02	0.0052	0.0001	0.0361	0.0005	0.0508	0.0006	33	0	36	1	233	29
马头湾															
MTW-1-1	640	552	0.86	0.0482	0.0013	0.4378	0.0112	0.0658	0.0008	304	8	369	9	801	24
MTW-1-2	923	635	0.69	0.0051	0.0001	0.0373	0.0009	0.0528	0.0009	33	0	37	1	322	41
MTW-1-3	305	472	1.55	0.0104	0.0002	0.0867	0.0021	0.0605	0.0009	67	1	84	2	622	32
MTW-1-4	768	680	0.88	0.0051	0.0001	0.0345	0.0006	0.0486	0.0007	33	0	34	1	128	34
MTW-1-5	1153	742	0.64	0.0051	0.0001	0.04	0.0015	0.0563	0.0015	33	0	40	1	466	61
MTW-1-6	1167	758	0.65	0.0052	0.0001	0.0356	0.0005	0.0501	0.0006	33	0	36	0	199	27
MTW-1-7	1544	1180	0.76	0.0052	0.0001	0.0655	0.0042	0.0915	0.0048	33	1	64	4	1458	99
MTW-1-8	1201	1071	0.89	0.0513	0.0011	0.4577	0.009	0.0648	0.0007	322	7	383	8	766	24
MTW-1-9	354	604	1.71	0.0052	0.0001	0.036	0.0005	0.0503	0.0006	33	0	36	1	211	30
MTW-1-10	1326	1872	1.41	0.0053	0.0001	0.0421	0.001	0.058	0.001	34	0	42	1	529	36
MTW-1-11	1630	1436	0.88	0.0051	0.0001	0.0381	0.0011	0.0537	0.0011	33	0	38	1	358	45
MTW-1-12	1158	715	0.62	0.0053	0.0001	0.0383	0.0006	0.0528	0.0008	34	0	38	1	321	33
MTW-1-13	614	1150	1.87	0.0052	0.0001	0.0378	0.0006	0.0524	0.0007	34	0	38	1	301	29
MTW-1-14	543	527	0.97	0.0052	0.0001	0.0522	0.0023	0.0729	0.0028	33	0	52	2	1010	77
MTW-1-15	1117	868	0.78	0.0052	0.0001	0.0399	0.0007	0.0562	0.0008	33	0	40	1	460	31
MTW-1-16	1268	402	0.32	0.0048	0.0001	0.0319	0.0008	0.0479	0.0011	31	0	32	1	96	55
MTW-1-17	1056	572	0.54	0.0051	0.0001	0.0342	0.0007	0.0483	0.0007	33	1	34	1	115	35
MTW-1-18	1622	1596	0.98	0.0052	0.0001	0.0363	0.0005	0.0503	0.0006	34	0	36	1	207	27
MTW-1-19	1094	69	0.06	0.0051	0.0001	0.0355	0.0005	0.0503	0.0006	33	0	35	1	208	27
MTW-1-20	850	500	0.59	0.0052	0.0001	0.0362	0.0006	0.0507	0.0006	33	0	36	1	229	28

续表 2

Continued Table 2

样品号	$w(\text{B})/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
南大坪															
NDP-1-1	1476	1253	0.85	0.0051	0.0001	0.0649	0.0028	0.0917	0.0033	33	0	64	3	1461	67
NDP-1-2	1644	8256	5.02	0.0052	0.0001	0.0374	0.0006	0.052	0.0007	34	0	37	1	285	31
NDP-1-3	1785	1838	1.03	0.005	0.0001	0.0388	0.0013	0.0561	0.0013	32	0	39	1	456	51
NDP-1-4	2027	1699	0.84	0.005	0.0001	0.034	0.0005	0.0489	0.0006	32	0	34	0	143	28
NDP-1-5	1282	843	0.66	0.005	0.0001	0.0352	0.0005	0.0508	0.0007	32	0	35	1	230	31
NDP-1-6	2374	3106	1.31	0.005	0.0001	0.0337	0.0005	0.0486	0.0006	32	0	34	0	127	28
NDP-1-7	1053	615	0.58	0.0052	0.0001	0.0357	0.0005	0.0497	0.0006	33	0	36	1	183	28
NDP-1-8	736	364	0.49	0.0051	0.0001	0.035	0.0005	0.0495	0.0006	33	0	35	1	170	29
NDP-1-9	1434	535	0.37	0.0223	0.0014	0.2002	0.0166	0.0651	0.0013	142	9	185	15	778	41
NDP-1-10	588	259	0.44	0.0051	0.0001	0.0539	0.0011	0.0762	0.0013	33	0	53	1	1100	33
NDP-1-11	1751	1375	0.78	0.005	0.0001	0.0348	0.001	0.05	0.0011	32	0	35	1	195	52
NDP-1-12	637	303	0.47	0.0051	0.0001	0.0352	0.0006	0.0501	0.0006	33	0	35	1	198	30
NDP-1-13	635	396	0.62	0.0051	0.0001	0.0356	0.0005	0.0502	0.0007	33	0	35	1	206	31
NDP-1-14	751	424	0.56	0.005	0.0001	0.0354	0.0005	0.0508	0.0006	32	0	35	1	233	29
NDP-1-15	958	1065	1.11	0.0051	0.0001	0.0407	0.0006	0.0576	0.0009	33	0	41	1	514	35
NDP-1-16	594	188	0.32	0.0052	0.0001	0.0362	0.0005	0.0505	0.0007	33	0	36	1	219	30
NDP-1-17	588	788	1.34	0.0051	0.0001	0.0363	0.0005	0.0514	0.0007	33	0	36	1	261	30
NDP-1-18	1108	1067	0.96	0.0052	0.0001	0.0437	0.0006	0.0614	0.0008	33	0	43	1	653	29
NDP-1-19	1176	74	0.06	0.0246	0.0007	2.3166	0.0777	0.682	0.0099	157	4	1217	41	4693	21
NDP-1-20	333	119	0.36	0.0052	0.0001	0.043	0.0014	0.0602	0.0016	33	1	43	1	609	57

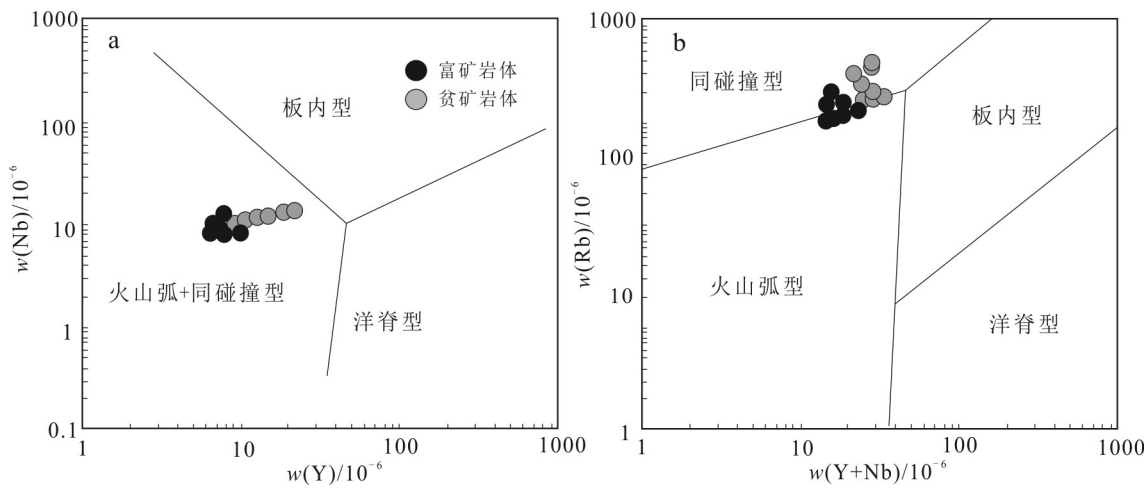


图9 北衙地区富碱斑岩构造判别图解(据 Muller et al., 1992)

Fig.9 Discrimination diagram of tectonic settings for alkali-rich porphyries from the Beiya area (base map after Muller et al., 1992)

805.19℃，34.70~70.93 MPa；贫矿岩体 860.44~964.57℃，203.60~520.49 MPa)(图 10b、c)。富矿岩体中角闪石斑晶计算岩浆房侵位深度(约 1.22~2.50 km)较之贫矿岩体浅(约 7.18~18.37 km)(表 6)。然

表 3 北衙富碱斑岩角闪石电子探针分析及计算结果
Table 3 Composition of the amphiboles from the Beiya area

组分	正长斑岩									
	白莲村				马头湾				南大坪	
	<i>w</i> (B)/%									
SiO ₂	38.68	41.41	41.92	41.01	42.36	39.34	40.03	39.09	42.11	41.74
TiO ₂	1.00	0.65	0.75	0.63	0.56	1.41	1.61	1.75	0.88	1.28
Al ₂ O ₃	10.33	9.67	9.08	9.45	9.32	12.62	12.19	12.64	9.51	9.79
Cr ₂ O ₃	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.06	0.01	0	0.03
FeO	24.53	21.53	20.46	21.54	20.62	19.87	19.57	19.15	20.85	19.35
MnO	0.12	0.14	0.18	0.18	0.19	0.14	0.11	0.09	0.09	0.18
MgO	7.77	9.04	9.58	8.87	9.36	8.71	8.86	8.70	9.14	9.31
CaO	10.58	11.18	11.23	11.15	11.20	11.08	11.20	11.12	11.06	10.72
Na ₂ O	2.26	2.25	2.27	2.28	2.19	2.35	2.29	2.40	2.36	2.36
K ₂ O	1.41	1.45	1.36	1.36	1.21	1.75	1.79	1.82	1.33	1.70
F	0.79	1.31	1.36	1.80	1.27	1.22	1.24	1.29	1.84	1.53
	以 23 个氧原子为基准									
Si	6.19	6.45	6.53	6.46	6.57	6.11	6.17	6.09	6.52	6.49
Ti	0.12	0.08	0.09	0.07	0.07	0.16	0.19	0.21	0.10	0.15
Al	1.95	1.78	1.67	1.75	1.70	2.31	2.22	2.32	1.74	1.80
Cr	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0
Fe	3.28	2.81	2.66	2.84	2.67	2.58	2.52	2.50	2.70	2.52
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
Mg	1.85	2.10	2.22	2.08	2.16	2.02	2.04	2.02	2.11	2.16
Ca	1.81	1.87	1.87	1.88	1.86	1.84	1.85	1.86	1.84	1.79
Na	0.70	0.68	0.69	0.70	0.66	0.71	0.68	0.72	0.71	0.71
K	0.29	0.29	0.27	0.27	0.24	0.35	0.35	0.36	0.26	0.34
Tot	16.21	16.07	16.03	16.08	15.96	16.10	16.05	16.09	15.99	15.98
T 位	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Si	6.00	6.34	6.43	6.34	6.47	6.02	6.10	6.02	6.43	6.42
Al ^{IV}	1.89	1.66	1.57	1.66	1.53	1.98	1.90	1.98	1.57	1.58
Ti	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C 位	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Al ^{VI}	0	0.09	0.07	0.07	0.15	0.29	0.29	0.32	0.14	0.20
Ti	0	0.07	0.09	0.07	0.06	0.16	0.18	0.20	0.10	0.15
Cr	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0
Fe ³⁺	1.41	0.80	0.69	0.79	0.71	0.70	0.56	0.51	0.65	0.51
Mg	1.80	2.06	2.19	2.05	2.13	1.99	2.01	2.00	2.08	2.14
Fe ²⁺	1.78	1.95	1.94	2.00	1.93	1.84	1.94	1.96	2.02	1.98
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
B 位	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	1.76	1.83	1.85	1.85	1.83	1.82	1.83	1.84	1.81	1.77
Na	0.24	0.17	0.15	0.15	0.17	0.18	0.17	0.16	0.19	0.23
A 位	0.72	0.79	0.79	0.80	0.72	0.85	0.85	0.91	0.77	0.81
Na	0.44	0.50	0.52	0.53	0.48	0.51	0.50	0.55	0.51	0.47
K	0.28	0.28	0.27	0.27	0.24	0.34	0.35	0.36	0.26	0.33
Ca _B	1.76	1.83	1.85	1.85	1.83	1.82	1.83	1.84	1.81	1.77
<i>T</i> /°C	936.78	877.25	867.75	876.18	860.44	956.27	945.08	964.57	867.29	878.74
<i>P</i> /MPa	290.32	236.09	203.6	229.02	214.1	505.66	447.21	520.49	225.04	247.12
深度/km	10.24	8.33	7.18	8.08	7.55	17.84	15.78	18.37	7.94	8.72
ΔNNO	-0.02	-0.01	0.12	-0.04	0.1	-0.46	-0.5	-0.62	-0.09	-0.16
log(<i>f</i> (O ₂))	-11.24	-12.29	-12.35	-12.34	-12.51	-11.28	-11.52	-11.31	-12.56	-12.41
H ₂ O _{melt}	4.67	3.97	3.69	4.03	4.64	5.04	4.73	4.79	4.21	3.43

矿岩体中的角闪石对比得出,相比于富矿岩体,贫矿岩体角闪石结晶环境具有高温高压低氧逸度以及更深的侵位深度的特征。贫矿岩体较深的侵位深度意味着大的围岩压力,难以发生对成矿有利的流体出溶;低氧逸度意味着金属元素早期就已经沉淀无法随岩浆向上运移。且对比全岩主量元素显示,富矿岩体极高的 K_2O 含量可能是岩浆形成后有幔源钾质熔体的加入,提高了岩浆的金属量与氧逸度。因此,在北衙矿区,氧逸度和侵位深度以及富含金属高氧逸度的幔源钾质岩浆的注入是岩体含矿差异性的主要控制因素。

References

- Bao X S, He W Y and Gao X. 2017. The Beiya gold deposit: Constraint from water-rich magmas to mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 2175-2188(in Chinese with English abstract).
- Bi X W, Hu R Z, Peng J T, Wu K X, Su W C and Zhang X Z. 2005. Geochemical characteristic of the Yao'an and Machangqing alkaline-rich intrusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 113-124(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Hou Z Q, Mo X X, Yang L Q, Wang Q F and Wang C M. 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys[J]. *Mineral Deposit*, 29(1): 37-42(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Yang L Q and Wang C M. 2011. Research advances of superimposed orogenesis and metallogenesis in the Sanjiang Tethys[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2501-2509(in Chinese with English abstract).
- He W Y, Mo X X, Yu X H, He Z H, Dong G C, Liu X B, Su G S and Huang X F. 2013. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Beiya gold-polymetallic deposit in the western Yunnan Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1301-1310(in Chinese with English abstract).
- He W Y, Yu X H, Mo X X, He Z H, Li Y, Huang X K and Su G S. 2012. Genetic types and the relationship between alkali-rich intrusion and mineralization of Beiya gold-polymetallic ore field, western Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1401-1412(in Chinese with English abstract).
- He Z H, Zhou Y M, He W Y, Su G S, Li W H and Yang S W. 2013. Genetic types and metallogenic regularity of Beiya superlarge gold-polymetallic deposit, northwestern Yunnan[J]. *Mineral Deposit*, 32(2): 244-258(in Chinese with English abstract).
- Hou K J, Li Y H and Tian Y R. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multiion counting-ICP-MS[J]. *Minerals Deposit*, 28(4): 481-492(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q and Yang Z M. 2009. Porphyry deposits in continental settings of China: Geological characteristics, magmatic-hydrothermal system, and metallogenic model[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 83(12): 1779-1817(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Mo X X, Gao Y F, Qu X M and Meng X J. 2003. Adakite, A possible host rock for porphyry copper deposits: Case studies of porphyry copper belts in Tibetan plateau and in northern Chile[J]. *Mineral Deposits*, 1: 1-12(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Yang Z M, Lu Y J, Kemp A, Zheng Y C, Li Q Y, Tang J X, Yang Z S and Duan L F. 2015a. A genetic linkage between subduction and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones[J]. *Geology*, 43(3): 247-250.
- Hou Z Q, Zheng Y C and Gen Y S. 2015b. Metallic refertilization of lithosphere along cratonic edges and its control on Au, Mo and REE ore systems[J]. *Mineral Deposit*, 34(4): 641-674(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zhong D L and Deng W M. 2004. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold metallogenic belts on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 1: 1-14(in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, Zhou M F, Pen J T, Su W C and Wu K X. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China[J]. *Chemical Geology*, 203(3-4): 305-317.
- Huang X L, Niu Y, Xu Y G and Yang Q J. 2010. Mineralogical and geochemical constraints on the petrogenesis of post-collisional potassic and ultrapotassic rocks from western Yunnan, SW China[J]. *Journal of Petrology*, 51(8): 1617-1654.
- Kelley K A and Cottrell E. 2009. Water and the oxidation state of subduction zone magmas[J]. *Science*, 325: 605-607.
- Leake B E, Wooley A R, Arps C E S, Birch W, Gilbert M C, Grice J D, Hawthorne F C, Kato A, Kisch H J and Krivovichev V G. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219-246.
- Liu B. 2014. Geological features of diagenesis and mineralization in the Beiya gold polymetallic deposit, western Yunnan Province (a dissertation to Master degree) [D]. Director: Mao J W. Beijing: China University of Geosciences. 1-74(in Chinese with English abstract).
- Liu H Y, Xia B and Zhang Y Q. 2003. The SHRIMP U-Pb age of Matouwan diopside granite porphyry in Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 6: 552-554(in Chinese with English abstract).
- Liu H, Wang Q F, Li G J and Li W. 2012. Characterization of multi-type mineralizations in the Wandongshan gold polymetallic deposit, Yunnan (China), by fractal analysis[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 20-33.
- Lu Y J, Kerrich R, Kemp A I S, Mccuaig T C, Hou Z Q, Hart C J R, Li Z X, Cawood P A, Bagas L, Yang Z M, Cliff J, Belousova E A, Jourdan F and Evans N J. 2013. Intracontinental Eocene-Oligocene porphyry Cu mineral systems of Yunnan, western Yangtze

- Craton, China: Compositional characteristics, sources, and implications for continental collision metallogeny[J]. *Econ. Geol.*, 108 (7): 1541-1576
- Lu Y J, Mccuaig T C, Li Z X, Jouedan F, Hart C J R, Hou Z Q and Tang S H. 2015. Paleogene post-collisional lamprophyres in western Yunnan, western Yangtze Craton: Mantle source and tectonic implications[J]. *Lithos*, 139-161.
- Mao J W, Zhou Y M, Liu H, Zhang C Q, Fu D G and Liu B. 2017. Metallogenic setting and ore genetic model for the Beiya porphyry-skarn polymetallic Au orefield, western Yunnan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 21-34.
- Mo X X. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 351-367(in Chinese with English abstract).
- Muller D, Rock N M S and Goves D L. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and settings: A pilot study[J]. *Mineral Petrology*, 45: 259-289.
- Qiu K F and Deng J. 2017. Petrogenesis of granitoids in the Dewulu skarn copper deposit: Implications for the evolution of the Paleotethys ocean and mineralization in western Qinling, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 1078-1098.
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu- (Mo-Au) deposit formation[J]. *Econ. Geol.*, 98: 1515-1533.
- Ridolfi F, Renzulli A and Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 160 (1): 45-66.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42 (1): 313-345.
- Taylor A and Blum J D. 1995. Relation between soil age and silicate weathering rates determined from the chemical evolution of a glacial chronosequence[J]. *Geology*, 23(11): 979.
- Wang J H, Li W C, Wang K Y, Yin G H, Wu S and Jiang W T. 2015. The characteristics and evolution of the ore-forming fluids in the Beiya porphyry Au-polymetallic deposit, western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3269-3280(in Chinese with English abstract).
- Weaver B L. 1991. Trace element evidence for the origin of ocean-island basalts[J]. *Geology*, 19(2): 123-126.
- Xiao X N, Yu X H, Mo X X, Yang G L, Li Y and Huang X K. 2009. Geochemistry, zircon SHRIMP U-Pb dating and origin of alkali-rich porphyries in Beiya area, North Erhai Lake, western Yunnan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1786-1803(in Chinese with English abstract).
- Xiao X N, Yu X H, Mo X X, Li Y and Huang X K. 2011. Geochemical characteristics of metallogenesis in the gold polymetallic deposit in Beiya, western Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 42(2): 170-179(in Chinese with English abstract).
- Xu S M, Mo X X, Zeng P S, Zhang W H, Zhao H B and Zhao H D. 2006. Characteristics and origin of alkali-rich porphyries from Beiya in West Yunnan[J]. *Geoscience*, 4: 527-535(in Chinese with English abstract).
- Xu X W, Cai X P, Qu W J, Song B Z, Qin K Z and Zhang B L. 2006. Later Cretaceous granitic porphyritic Cu-Mo mineralization system in the Hongshan Area, northwestern Yunnan and its significances for tectonics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1422-1433 (in Chinese with English abstract).
- Xu X W, Zhang B L, Qin K Z, Mao Q and Cai X P. 2007a. Origin of lamprophyres by the mixing of basic and alkaline melts in magma chamber in Beiya area, western Yunnan, China[J]. *Lithos*, 99(3): 339-362.
- Xu X W, Cai X P, Xiao Q B and Stephen G P. 2007b. Porphyry Cu-Au and associated polymetallic Fe-Cu-Au deposit in the Beiya area, western Yunnan Province, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 31: 224-246.
- Xue C D, Hou Z Q, Liu X, Yang Z M, Liu Y Q and Hao B W. 2008. Petrogenesis and metallogenesis of the Beiya gold-polymetallic ore district, northwestern Yunnan Province, China: Responses to the Indo-Asian collision processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (3): 457-472(in Chinese with English abstract).
- Yan Q G, Jiang X J, Li C, Zhou L M, Wang Z Q, Sher S B, Qu W J and Du A D. 2018. Geodynamic background of intracontinental Cenozoic alkaline volcanic rocks in Laojiezi, western Yangtze Craton: Constraints from Sr-Nd-Hf-O isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 92(6).
- Yang L Q, Deng J, Zhao K and Liu J T. 2011. Tectono-thermochronology and gold mineralization events of orogenic gold deposits in Ailaoshan orogenic belt, southwest China: Geochronological constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2519-2532(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H. 2007. How to use the trace element diagram to discriminate tectonic settings[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 92-103 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y L, Zhang C Q, Jia F D, Liu H and Yan Q G. 2021. Apatite and zircon geochemistry in Yao'an alkali-rich porphyry gold deposit, southwest China: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Minerals*, 11(11): 1293.

附中文参考文献

- 鲍新尚, 和文言, 高雪. 2017. 滇西北衙金矿床富水岩浆对成矿的制约[J]. *岩石学报*, 33(7): 2071-2188.
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴, 苏文超, 战新志. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征[J]. *岩石学报*, (1): 113-124.
- 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 2010. 三江特提斯复合造山与成矿作用[J]. *矿床地质*, 29(1): 37-42.
- 邓军, 杨立强, 王长明. 2011. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展[J]. *岩石学报*, 27(9): 2501-2509.

- 和文言, 喻学惠, 莫宣学. 2012. 滇西北衙多金属矿田矿床成因类型及其与富碱斑岩关系初探[J]. 岩石学报, 28(5): 1401-1412.
- 和文言, 莫宣学, 喻学惠. 2013. 滇西北衙金多金属矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(4): 1301-1310.
- 和中华, 周云满, 和文言, 苏纲生, 李万华, 杨绍文. 2013. 滇西北衙超大型金多金属矿床成因类型及成矿规律[J]. 矿床地质, 32(2): 244-258.
- 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.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 2003. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例[J]. 矿床地质, 1: 1-12.
- 侯增谦, 杨志明. 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征——岩浆热液系统和成矿概念模型[J]. 地质学报, 83(12): 1779-1817.
- 侯增谦, 郑远川, 耿元生. 2015b. 克拉通边缘岩石圈金属再富集与金-钼-稀土元素成矿作用[J]. 矿床地质, 34(4): 641-674.
- 侯增谦, 钟大赉, 邓万明. 2004. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式[J]. 中国地质, 31(1): 1-14.
- 刘博. 2014. 滇西北衙金多金属矿床成岩成矿地质特征(硕士学位论文)[D]. 导师: 毛景文. 北京: 中国地质大学. 1-74.
- 刘红英, 夏斌, 张玉泉. 2003. 云南马头湾透辉石花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄研究[J]. 地球学报, 6: 552-554.
- 莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报, 17(3): 351-367.
- 王建华, 李文昌, 王可勇, 尹光候, 吴松, 姜文涛. 2015. 滇西北衙斑岩型金多金属矿床成矿流体特征及其演化[J]. 岩石学报, 31(11): 3269-3280.
- 肖晓牛, 喻学惠, 莫宣学, 杨贵来, 李勇, 黄行凯. 2009. 滇西洱海北部北衙地区富碱斑岩的地球化学、锆石 SHRIMP U-Pb 定年及成因[J]. 地质通报, 28(12): 1786-1803.
- 肖晓牛, 喻学惠, 莫宣学. 2011. 滇西北衙金多金属矿床成矿地球化学特征[J]. 地质与勘探, 47(2): 170-179.
- 徐受民, 莫宣学, 曾普胜, 张文洪, 赵海滨, 赵寒冬. 2006. 滇西北衙富碱斑岩的特征及成因[J]. 现代地质, 4: 527-535.
- 徐兴旺, 蔡新平, 屈文俊. 2006. 滇西北红山晚白垩世花岗斑岩型 Cu-Mo 成矿系统及其大地构造学意义[J]. 地质学报, 80(9): 1422-1433.
- 薛传东, 侯增谦, 刘星, 杨志明, 刘勇强, 郝百武. 2008. 滇西北北衙金多金属矿田的成岩成矿作用: 对印-亚碰撞造山过程的响应[J]. 岩石学报, 24(3): 457-472.
- 杨立强, 邓军, 赵凯, 刘江涛. 2011. 哀牢山造山带金矿成矿时序及其动力学背景探讨[J]. 岩石学报, 27(9): 2519-2532.
- 赵振华. 2007. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. 大地构造与成矿学, 31(1): 92-103.