阴山—燕山北麓富碱侵入岩体的岩石地球化学特征、锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及构造意义

龚弥[1,2)],蔡剑辉[1)],阎国翰[3)],刘楚雄[3)],刘钊[1)]

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)中国地质大学(北京),北京,100083;
3)北京大学地球科学与空间科学学院,北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京,100871

内容提要:本文研究的达茂旗黄合少、察哈尔右后旗古城和河北尚义县八道沟岩体位于华北克拉通北缘阴山—燕山北麓,索伦缝合带以南,沿近东西方向展布。主要岩石类型为正长岩、二长岩和石英二长岩。岩石地球化学研究表明其 SiO_2 含量 59.08%~66.52%, Al_2O_3 = 15.34%~21.67%, A/CNK<1。属于准铝质中性岩范畴。全碱含量(Na_2O+K_2O)均在 8%以上,在岩石的碱度率 AR—SiO_2 图解上大多数样品落入碱性与过碱性区域,里特曼指数 σ 值从 3.73~10.83 均位于碱性或过碱性系列,属于碱性岩。岩体的微量元素以富集大离子亲石元素(LILE)如 Rb、Ba 和 Sr 等,亏损高场强元素(HFSE)如 Ti、P、Nb 和 Ta 等为特征。岩石稀土元素特征显示富集轻稀土元素(LREE),亏损重稀土元素(HREE)并且轻重稀土元素分馏比较明显的特征。除极个别样品外,岩石具有 Eu 负异常(δEu= 0.35~0.91)。通过对察哈尔右后旗古城正长岩体和河北尚义县八道沟富碱侵入岩体的高精度测年研究,获得其 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 413.2±3.3~415.0±5.9 Ma 和 366.8±5.2~372.3±4.7 Ma,表明其均为古生代泥盆纪富碱侵入岩浆活动的产物。结合前人关于阴山—燕山北麓其它富碱侵入岩体(内蒙古固阳东高家村碱性正长岩体、黄合少碱性正长岩和冀北水泉沟碱性杂岩体)的研究成果,推断在华北克拉通北缘阴山—燕山北麓一带,可能存在一条东西方向展布的晚古生代泥盆纪富碱侵入岩带。根据该岩带岩石地球化学特征,以及 Ta/Yb—Th/Yb 与 Zr/Nb—Zr/Nb—Y/Nb 判别图推测其岩浆物质来源可能与富集地幔有关,按照成岩温压环境指示,其形成深度位置约为下地壳,岩浆上升侵位过程中明显受到地壳物质的混染。依据前人关于碱性岩特征的研究,结合本文研究岩体的岩石化学特征和及 Rb—Nb+Y 构造判别图解指示,推测岩体形成于张性构造环境,可能与古生代志留纪末兴蒙造山带南部发育的白乃庙岛弧带和华北克拉通发生弧—陆碰撞后的伸展背景相关。

关键词:富碱侵入岩;阴山—燕山北麓;岩石地球化学;SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄;古生代

碱性岩这种岩石类型在地壳中分布较少,其物质来源深,具有显著的幔源特征,且多产出于拉张性构造环境(涂光炽,1989;曾广策等,1996;汤艳杰,2014)。所以,它与壳幔深部相互作用过程以及碰撞造山作用可能具有密切的成因联系(Liegeois,1998)。研究碱性岩可以为探讨下地壳和上地幔等地球深部物质的组成、演化过程以及壳幔相互作用提供丰富的依据,碱性岩研究是岩石学研究的重要组成部分(赵振华等,1994;任康绪,2003)。许多地质学家将碱性岩称作窥视地幔的窗口(曾广策等,1996)。碱性岩的微量、稀土元素来源特征具有特征地幔的来源与组合特征(王涛等,2013)。碱性岩特殊的产出环境使其蕴含着重要的地质信息,如它形成时的地球深部物质组成、地球动力学背景、物化条件以及稀有、稀土元素成矿特征等(阎国翰等,2001a)。

前人对华北克拉通北缘阴山—燕山北麓部分富碱侵入岩岩体开展过一定程度的岩石地球化学研究和同位素测年工作。如张招崇等(1997)、罗镇宽等(2001)对冀北水泉沟碱性杂岩体开展岩石地球化学研究和 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,获得岩体形成年龄为 390 Ma;阎国翰等(2000,2001b)对研究区的

注:本文为科技部科技基础性工作专项项目(编号:2011FY120100,2012FY120300)和国家自然科学基金资助项目(编号:40773041,41073047)的成果。
收稿日期:2018-12-25;改回日期:2019-06-25;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.008
作者简介:龚弥,男,1994 年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业,Email: gongmimail@163.com。通讯作者:蔡剑辉,女,1966 年生。研究员,主要从事碱性岩岩石学、矿物学研究工作,Email:caijh_cags@163.com。

达茂旗黄合少岩体和察哈尔右后旗古城岩体进行岩石地球化学研究和 Rb-Sr 等时线年龄测定,显示岩体均为印支期岩浆活动的产物;Zhang Xiaohui 等(2010)获得内蒙古集宁西北三道沟碱性岩体的两个 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据分别为 409±2 Ma 和 408±4 Ma;王惠初等(2012)获得内蒙古固阳东部高家村角闪正长岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 399±7 Ma;Zhang Qiqi 等(2018)对华北克拉通北缘泥盆纪碱性花岗岩和碱性杂岩进行了总结性研究。总体上来看,研究区富碱侵入岩浆活动发育,但研究工作主要针对部分岩体的主体岩石展开,仍然缺乏较为全面系统的岩石地球化学研究,而且高精度的测年数据较少。我们知道,Rb-Sr 放射体系易于受到变质作用的影响而导致研究数据具有较大的不确定性(蔡剑辉等,2002),而黄合少和古城岩体恰恰经历了较明显的变质过程,因此仅有 Rb-Sr 等时线年龄只能仅具一定的参考价值。为了加强华北克拉通北缘阴山—燕山北麓富碱侵入岩研究,精确厘定岩体的形成年龄,本文选取研究工作相对薄弱的古城岩体、黄合少岩体和八道沟岩体开展全面、系统的野外调查、岩石地球化学工作和 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,旨在确定华北克拉通北缘古生代富碱侵入岩带的存在,探讨古生代富碱侵入岩浆活动的特征,为全面认识华北克拉通北缘岩石圈演化历史和壳幔作用过程提供更充足的科学证据。

1　岩体概况及岩石学特征

华北克拉通北缘阴山—燕山北麓富碱侵入岩岩体成东西向展布,由西至东依次有内蒙古固阳东高家村角闪正长岩体、达茂旗黄合少正长岩体、察哈尔右后旗古城正长岩体(也有学者将其命名为三道沟岩体,见 Zhang Xiaohui et al.,2010)、河北省尚义八道沟二长岩体和张家口水泉沟碱性杂岩体(图 1)。该区域出露的地层主要为前寒武古老变质岩系(阎国翰等,2001b)。北侧为兴蒙造山带以及近东西向的索伦缝合带(Windley et al., 2007;马旭等,2012)。南侧分布着一条与之大致平行的三叠纪富碱侵入岩带(阎国翰等,2000),西起包头东霓辉正长岩体、凉城霓辉正长岩体、阳原正长岩体和河北矾山杂岩体等,向东一直延伸至吉林省北部。

黄合少岩体位于内蒙古达尔罕—茂明安联合旗黄合少村北(41°32′16.1″N,111°10′57.7″E),岩体形态呈椭长形,沿东西向展布。出露面积约 3.5 km^2。岩体主要岩性为含辉石正长岩、角闪正长岩和伟晶正长岩。岩体中有多条巨型石英脉穿插,宽度 20 cm 到 2 m 不等。古城岩体位于内蒙古察哈尔右后旗古城遗址以东约 1 km(41°33′23.4″N,112°53′32.4″E),岩体形态呈扇形,出露面积约 15 km^2。岩体主要由角闪正长岩和含辉石正长岩组成。八道沟岩体位于河北省尚义县八道沟村,地处冀蒙交界处(41°11′27.2″N,114°6′22.2″E)。岩体出露面积较小,约 2 km^2,呈月牙状的岩株产出。主要岩性为石英二长斑岩和二长斑岩。

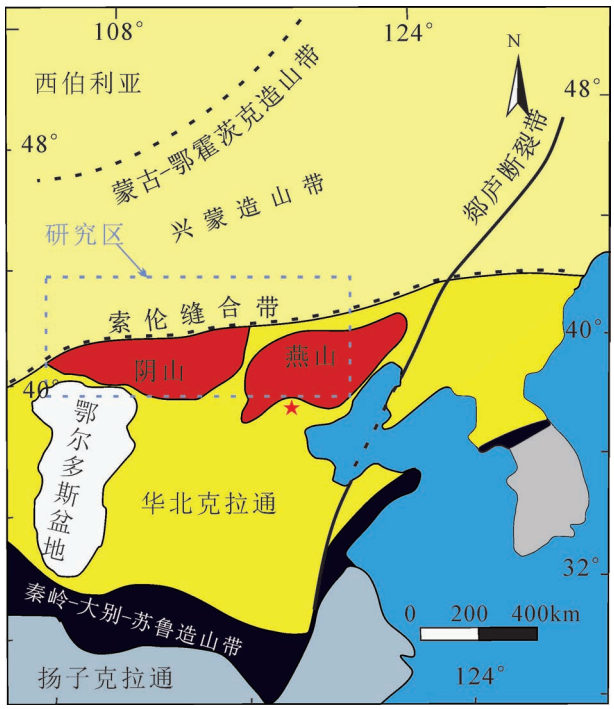


图 1 阴山—燕山北麓地区位置图

Fig. 1 Geological sketch map of the Yinshan Mountains and Yanshan Mountains

1.1　岩石学特征

1.1.1　黄合少岩体

主要岩石类型为含辉石正长岩、角闪正长岩以及伟晶正长岩。

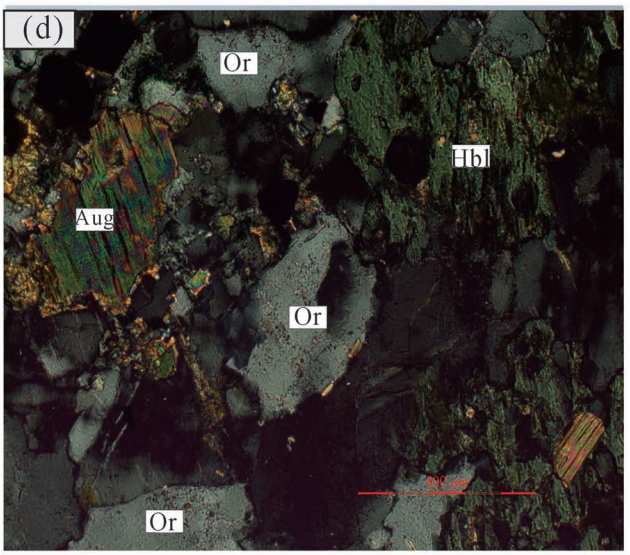
其主体岩石含辉石正长岩新鲜面呈灰绿色(见图 2a),风化面呈浅黄色。细粒至中粗粒结构,块状构造。岩体露头风化蚀变严重,部分岩体表面风化成易碎的颗粒,有一层浅黄色的风化面。主要矿物成分为:碱性长石约 65%,斜长石约 20%,辉石 5%~10%,石英小于 4%,少量角闪石。副矿物含少量磁铁矿等。显微镜下碱性长石成半自形到他形板状颗粒,风化严重,双晶不明显,表面成花灰色。斜长石成半自形到他形,成块状和板状形态产出,颜色呈麻

灰至灰黑色,发育有聚片双晶。辉石表面蚀变严重,解理不清晰,他形。

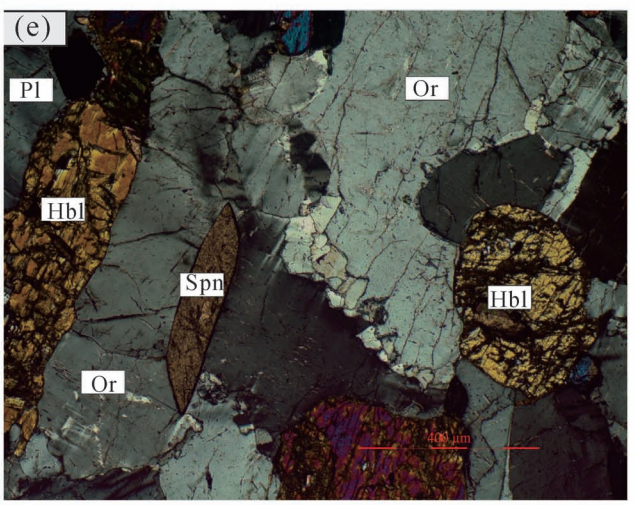
角闪正长岩呈肉红色,中粗粒结构,块状构造。主要矿物成分为:碱性长石约 80%,斜长石约 15%。含有少量石英、辉石和磁铁矿。在显微镜下碱性长石成他形板状,双晶不明显,表面磨蚀严重,正交偏光镜下成麻灰色。斜长石成半自形柱状,发育有聚片双晶和卡钠复合双晶。辉石成他形结构,解理不明显。

伟晶正长岩呈肉红色伟晶结构,块状构造。碱性长石含量大于 80%,斜长石约 10%。副矿物含少量角闪石、磁铁矿和石英。











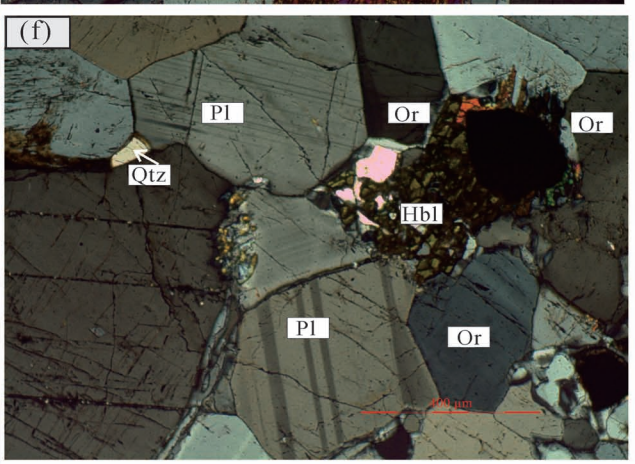


图 2 阴山—燕山北麓富碱侵入岩岩石学特征图

Fig. 2 Photos and photomicrographs of the alkali-rich intrusions on the northern side of the Yinshan Mountains and Yanshan Mountains

(a)、(d) 含辉石正长岩手标本及镜下照片(产地:黄合少);辉石解理不明显,他形。(b)、(e) 角闪正长岩手标本及镜下照片(产地:古城):角闪石菱形解理发育,呈半自形粒状。榍石呈竹叶状,自形。碱性长石具有卡尔斯巴双晶。(c)、(f) 石英二长斑岩手标本及镜下照片(产地:八道沟):石英呈半自形粒状,斜长石具有明显的聚片双晶。Or—正长石;Pl—斜长石;Hbl—角闪石;Aug—辉石;Qtz—石英;Spn—榍石。(d)、(e)、(f)三图中比例棒总长为 400 μm

(a), (d) Photos and microphotographs showing the pyroxene syenite in Huangheshao: pyroxene cleavage is not obvious, heteromorphic. (b), (e) Photos and microphotographs showing hornblende syenite in Gucheng: rhombic cleavage is well developed in hornblende, exists as subhedral granular. The sphene is bamboo-leaf-like, idiomorphic. Alkaline feldspar has karspa twin crystal. (c), (f) Photos and microphotographs showing the beschtauite in Badaogou: quartz is semi-automorphic granular and plagioclase has obvious albite twins. Or—orthoclase; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende; Aug—augite; Qtz—quartz; Spn—sphene. The scale bars in fig. (d), (e), (f) are 400 μm

1.1.2　古城岩体

岩性较为单一,主要岩石类型含辉石正长岩和角闪正长岩。

含辉石正长岩呈麻灰色带浅肉红色,中粒结构,块状构造和斑状构造。主要造岩矿物为碱性长石(约 65%),斜长石(约 20%),辉石(约 8% ~ 10%)。次要矿物有磁铁矿(约 5%)、磷灰石和石英。显微镜下,碱性长石成半自形板状,具有明显的卡式双晶,表面裂纹较多。斜长石成半自形到自形柱状、板状,发育有条纹双晶。辉石自形程度较好,呈板状,两组近平行的解理十分明显。

角闪正长岩(见图 2b)呈麻灰色,中细粒结构,块状构造。主要矿物成分为:碱性长石(约 65%),斜长石(约 20%),次要矿物为角闪石(约 8% ~ 10%)及少量辉石、磁铁矿、榍石和石英。显微镜下,碱性长石成半自形结构,板状构造,发育有卡尔斯巴双晶。角闪石菱形解理发育,呈半自形粒状,多色性较明显。榍石呈竹叶状,自形结构。

1.1.3　八道沟岩体

主要岩石类型有二长斑岩、石英二长斑岩(见图 2c)。二长斑岩呈灰黑色、灰白色,细粒到粗粒结构,块状构造。主要造岩矿物为斜长石和碱性长石,含量分别大约为 75% 和 15 %,次要矿物为辉石、角闪石,含有少量磁铁矿和石英。在显微镜下斜长石成柱状自形晶,具条纹双晶和卡钠复合双晶,碱性长石成板状自形晶到半自形晶,具有明显的卡尔斯巴双晶。

石英二长斑岩呈灰白色、浅肉红色,伟晶结构,

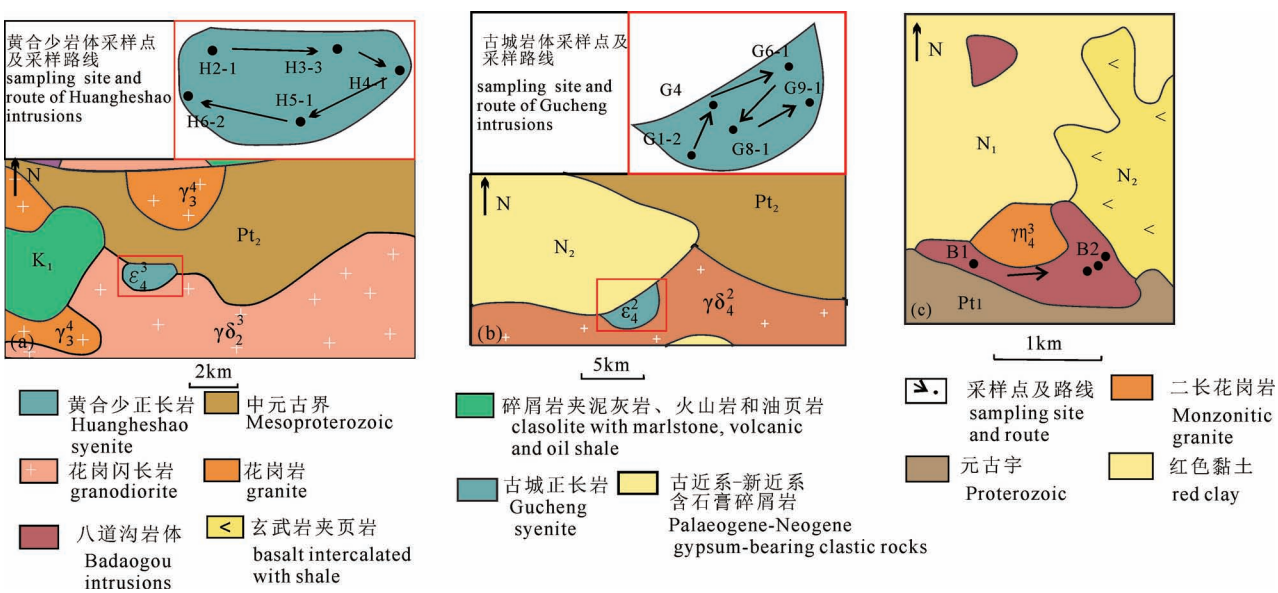


图 3 达尔汗茂明安联合旗黄合少岩体(a)、察哈尔右后旗古城岩体(b)与尚义县八道沟岩体(c)的采样位置示意图

Fig. 3 Sampling location diagram of Huangheshao intrusions, Darhan Maomingan Union Banner (a); Gucheng intrusions, Chahal Right Rear Banner (b) and Baodaogou intrusions, Shangyi County (c)

块状构造。主要造岩矿物为石英(平均含量 10%~15%)、碱性长石(约 50%)和斜长石(约 30%),含少量暗色矿物角闪石、辉石和磁铁矿。显微镜下呈斑状结构,石英成半自形粒状,斜长石和正长石成自形至半自形板状、柱状。

2 岩石地球化学特征

本文研究的岩石样品采自黄合少岩体、古城岩体和八道沟岩体(采样位置图见图 3)。样本研磨至 200 目,缩分后取 10g 送样分析。主量和微量元素分析测试在核工业北京地质研究院进行,主量元素分析使用 AxiosmAX X 射线荧光光谱仪完成;微量元素使用 NexION300D 等离子体质谱仪测定。

2.1 主量元素特征

各岩体主要类型岩石的主量元素分析结果见表 1 中,其中高家村岩体和水泉沟岩体的数据为文献中相关数据的计算平均值。

由主量元素分析结果表可知,黄合少、古城、八道沟岩体主要岩石的 SiO_2 变化范围从 59.07% 到 66.52%,平均 63.59%。总体而言,岩体的 SiO_2 含量变化范围不大,均属于中性岩范畴,主要岩石类型为正长岩、二长岩和石英二长岩(图 4a)。

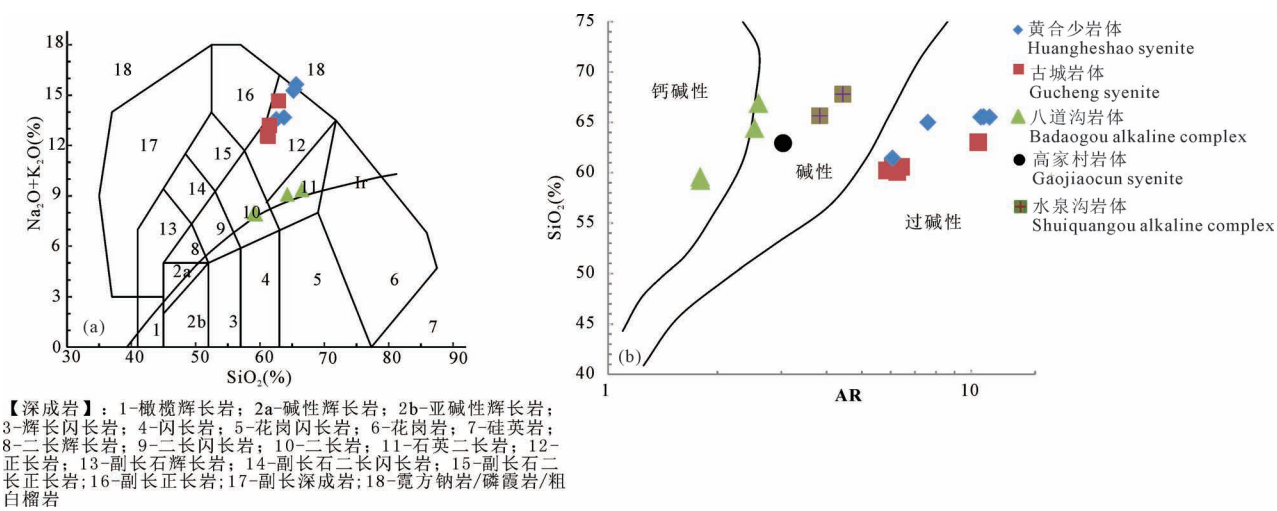
三个岩体均出现标准矿物石英,并且无硅不饱和矿物的出现(表 1),表明研究的侵入岩体均为硅过饱和岩石。$w(Al_2O_3)$ 从 15.34% 到 21.67% 变化,平均含量 17.54%,除个别样品外,岩石 A/CNK<1,大多数属于铝不饱和型岩石。黄合少、古城岩体的里特曼指数 σ 平均值为 9.65,八道沟岩体的平均 σ 值为 3.85,属于富碱性岩石。所有岩石样品的全碱含量(Na_2O+K_2O)均在 8%以上,在 AR—SiO_2 图解上均落于黄合少岩体和古城岩体落于过碱性系列,八道沟岩体除少样品外,落入碱性系列(图 4b)。黄合少岩体与古城岩体的 K_2O/Na_2O 的比值变化于 2.98~11.54 之间,岩石总体相对富钾;八道沟岩体的 K_2O/Na_2O 的比值变化范围为 0.11~0.71,相对富钠。三个岩体均为富碱侵入岩。

2.2 稀土元素特征

研究区各岩体的稀土元素和微量元素分析结果见表 1。

黄合少岩体的稀土总量 ΣREE 为 12.12×10^{-6}~113.1×10^{-6},平均值 52.95×10^{-6},轻重稀土比值 LREE/HREE 为 7.89~39.39,平均 16.94;古城岩体的稀土总量 ΣREE 为 108.6×10^{-6}~184.5×10^{-6},平均值 152.5×10^{-6},轻重稀土比值 LREE/HREE 为 11.35~12.67,平均 11.96;八道沟岩体的稀土总量 ΣREE 变化范围为 108.6×10^{-6}~226.8×10^{-6},均值为 161.0×10^{-6},LREE/HREE 平均为 10.98。可以看出,黄合少正长岩的稀土含量波动较大,且稀土总量明显低于古城正长岩与八道沟富碱侵入岩的,这可能与黄合少岩体普遍遭受较强烈的蚀变作用相关。

在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 5a)上,研究的三个岩体的样品均显示富集轻稀土、亏损重稀土的右倾斜分离形态。八道沟岩体与古城岩体的配分曲线较为平缓,显示出轻重稀土分馏作用较弱的特征;黄合少岩体的配分曲线总体位置较低,但图像呈锯齿形,斜率较大,显示其岩体轻、重稀土元素的



【深成岩】:1-橄榄辉长岩;2a-碱性辉长岩;2b-亚碱性辉长岩;3-辉长闪长岩;4-闪长岩;5-花岗闪长岩;6-花岗岩;7-硅英岩;8-二长辉长岩;9-二长闪长岩;10-二长岩;11-石英二长岩;12-正长岩;13-副长石辉长岩;14-副长石二长闪长岩;15-副长石二长正长岩;16-副长正长岩;17-副长深成岩;18-霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

图 4 阴山—燕山北麓富碱侵入岩 TAS 图解(a)(底图据 Middlemost, 1994)和 AR—SiO_2 图解(b)(底图据 Wright, 1969)

Fig. 4 TAS(after Middlemost, 1994) and AR—SiO_2(after Wright, 1969) diagrams of alkali-rich intrusions on the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains

表 1 阴山—燕山北麓富碱侵入岩体主量元素含量(%)微量、稀土元素含量($\times10^{-6}$)及 CIPW 矿物计算结果

Table 1 Contents (%) of major elements, trace and rear earth elements ($\times10^{-6}$) and CIPW standard minerals of the alkali-rich intrusions on the northern side of the Yinshan Mountains and Yanshan Mountains

	黄合少岩体					古城岩体					八道沟岩体				高家村岩体	水泉沟岩体	
样品号	H2-1	H3-3	H4-1	H5-1	H6-2	G1-2	G4	G6-1	G8-1	G9-1	B1-1	B2-1	B2-4	B2-6	王惠初等,2007	张招崇,2001	
岩石名称	含辉石正长岩 灰绿色细粒	含辉石正长岩 灰绿色粗粒	角闪正长岩 肉红色粗粒	伟晶正长岩 肉红色	角闪正长岩 肉红色中粒	含辉石正长岩 灰色粗粒	角闪正长岩 麻灰色细粒	角闪正长岩 麻灰色中粒	含辉石正长岩 浅肉红色中粒	角闪正长岩 浅肉粉色中粒	石英二长斑岩 灰白色伟晶	石英二长斑岩 浅肉红色粗粒	二长斑岩 麻灰色中粒	二长斑岩 灰黑色细粒	角闪正长岩	正长岩	碱长正长岩
SiO_2	62.60	64.04	64.93	65.40	64.96	61.59	61.69	62.10	61.80	62.95	64.60	66.24	59.48	59.03	62.94	65.25	67.36
TiO_2	0.20	0.36	0.02	0.01	0.12	0.44	0.57	0.49	0.42	0.34	0.29	0.26	0.33	0.34	0.36	0.28	0.10
Al_2O_3	16.23	16.21	17.87	18.25	17.93	15.63	15.69	15.54	15.89	16.89	18.47	18.28	21.52	21.66	19.12	17.54	16.53
Fe_2O_3	2.60	2.51	0.56	0.14	0.65	4.50	5.22	4.67	3.87	3.02	2.86	1.25	3.10	3.41	1.45	1.42	1.70
FeO	1.20	0.91	0.30	0.10	0.25	1.88	1.73	1.99	1.67	0.94	1.23	0.50	1.03	0.89	1.18	1.04	0.70
MnO	0.04	0.03	0.01	0.01	0.02	0.08	0.08	0.08	0.07	0.05	0.10	0.05	0.09	0.10	0.06	0.08	0.04
MgO	0.93	0.80	0.15	0.05	0.17	1.07	0.85	1.02	0.86	0.36	0.39	0.34	0.58	0.46	0.66	0.51	0.18
CaO	2.52	1.78	0.22	0.12	0.248	2.54	2.05	2.52	2.5	0.71	3.36	3.23	6.02	5.9	2.45	1.89	1.07
Na_2O	2.09	2.83	1.99	1.42	1.38	2.74	2.70	3.19	1.73	1.17	5.34	5.47	7.00	7.19	6.07	5.65	4.97
K_2O	11.47	10.91	13.24	14.17	13.84	9.95	10.01	9.51	11.54	13.50	3.80	3.86	0.92	0.82	5.00	5.53	6.11
P_2O_5	0.148	0.107	0.065	0.01	0.068	0.242	0.26	0.221	0.167	0.142	0.094	0.094	0.136	0.133	0.12	0.06	0.05
烧失	0.65	0.37	0.44	0.43	0.61	0.17	0.32	0.16	0.12	0.32	0.18	0.39	0.32	0.44	0.37	0.11	0.03
总量	100.03	100.49	99.35	99.68	99.63	100.66	100.86	101.33	100.51	100.07	100.53	99.58	100.2	99.94	99.67	99.82	99.81
A	85.22	86.73	95.56	95.98	93.71	81.16	81.00	82.16	82.16	89.55	49.19	51.80	16.23	15.00	68.12	73.40	74.18
P	1.29	0	0.81	0.61	0.90	1.33	1.54	0	1.81	1.08	33.30	31.61	72.97	75.30	23.48	13.89	9.76
A/CNK	0.79	0.82	0.99	1.02	1.01	0.79	0.83	0.77	0.80	0.95	0.97	0.96	0.92	0.92	0.96	0.94	0.99
AR	6.23	7.47	11.65	12.22	11.29	5.63	6.05	5.74	6.18	11.02	2.44	2.53	1.81	1.82	3.11	3.71	4.4
δ43	9.38	9.01	10.51	10.82	10.51	8.73	8.73	8.58	9.42	10.79	3.88	3.73	3.81	3.99	6.09	5.57	4.99
Q	2.09	2.86	2.14	2.59	3.38	2.66	3.61	2.49	3.02	3.04	10.69	12.58	1.71	0.85	2.99	6.94	12.44
An	1.03	0	0.67	0.53	0.79	0.96	1.12	0	1.50	0.96	15.14	13.99	24.55	24.45	8.73	6.23	4.81
Ab	17.69	22.54	16.95	12.05	11.72	23.06	22.68	26.65	14.57	9.90	44.99	46.50	59.19	60.98	51.34	48.14	42.57
Or	67.79	64.19	78.75	84.01	82.10	58.47	58.74	55.51	67.90	79.77	22.36	22.92	5.46	4.87	29.52	32.92	36.56
Ne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–
C	0	0	0.02	0.38	0.39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–

	黄合少岩体					古城岩体					八道沟岩体				高家村岩体	水泉沟岩体	
样品号	H2-1	H3-3	H4-1	H5-1	H6-2	G1-2	G4	G6-1	G8-1	G9-1	B1-1	B2-1	B2-4	B2-6	王惠初等,2007	张招崇,2001	
岩石名称	灰绿色细粒含辉石正长岩	灰绿色粗粒含辉石正长岩	肉红色粗粒角闪正长岩	肉红色伟晶正长岩	肉红色中粒角闪正长岩	灰色粗粒含辉石正长岩	麻灰色细粒角闪正长岩	麻灰色中粒角闪正长岩	浅肉红色中粒含辉石正长岩	浅肉粉色中粒角闪正长岩	灰白色伟晶石英二长斑岩	浅肉红色粗粒石英二长斑岩	麻灰色中粒二长斑岩	灰黑色细粒二长斑岩	角闪正长岩	正长岩	碱长正长岩
Di	6.46	5.53	0	0	0	8.14	5.97	8.35	6.62	1.30	0.72	1.22	3.71	3.41	–	–	–
Hy	0	0	0.48	0.18	0.43	0.24	0.69	0	0	0.56	2.63	0.89	1.96	1.90	–	–	–
Wo	1.02	0.5	0	0	0	0	0	0.28	0.66	0	0	0	0	0	–	–	–
Ol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–
Ac	0	1.15	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	–	–	–
Il	0.39	0.68	0.04	0.03	0.22	0.83	1.08	0.92	0.79	0.65	0.55	0.5	0.62	0.65	–	–	–
Mt	3.20	2.31	0.79	0.20	0.77	5.08	5.51	5.28	4.56	3.49	2.71	1.19	2.48	2.59	–	–	–
Hm	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–
Ap	0.34	0.25	0.15	0.02	0.16	0.56	0.60	0.51	0.39	0.33	0.22	0.22	0.31	0.31	–	–	–
总计	100.00	100.01	99.98	99.99	100.00	99.99	100.00	100.00	100.02	100.00	100.01	100.01	100.00	100.01			
Rb	122	113	90.3	114	111	194	178	176	112	203	55.9	49.4	14.1	4.28	50.05	70.4	76.38
Ba	1222	855	1228	1496	629	2240	2196	1908	2195	2121	1653	1706	527	445	4033	1024.6	1410
Th	3.59	4.39	3.1	1.85	1.31	2.42	3.21	2.84	1.44	0.906	6.58	3.47	1.91	2.05	3.24	7.82	6.28
U	0.379	0.665	0.189	0.132	0.645	0.312	0.411	0.323	0.35	0.154	0.228	0.387	0.416	0.459	0.45	0	0
Ta	0.219	0.436	0.02	0.01	0.714	0.716	0.893	0.825	0.696	0.535	0.541	0.501	0.666	0.662	0.6	1.18	0.7
Nb	19.5	31.1	1.79	0.528	66	9.95	12.4	12.4	10.9	7.23	9.56	8.97	12.5	11.2	7.09	7.14	3.71
Sr	2230	401	186	1091	416	1568	1034	1190	2543	1249	1473	1391	2121	2168	2071	1242	407
P	646	467.4	284.1	43.7	296.4	1056.4	1135.3	964.3	728.7	619.4	410.4	410.4	593.8	580.6	523.45	250.80	207.1
Zr	28.2	52.6	18.9	4.75	14.1	20.6	22.6	27.5	18	9.71	20	18.5	22.4	23	13.65	119.23	75.8
Hf	1.12	2.17	0.691	0.136	0.803	1.05	1.14	1.38	0.817	0.44	0.717	0.643	0.855	0.826	0.77	11.95	2.71
Ti	1222	2145	130	78	689	2652	3432	2925	2496	2054	1755	1560	1963	2054	2158	1677	598
La	16.8	21.9	2.57	11.2	5.87	33.5	39.7	36.9	30.2	22.3	62.6	34.1	21.5	22.6	23.35	17.51	27.86
Ce	30.2	48.4	5.23	17.6	13.5	68	78.4	73.5	61.7	47.4	102	62.3	52.4	55.5	40.85	41.29	73.3
Pr	3.41	6.17	0.574	1.82	1.49	7.95	9.35	8.65	7.25	5.78	9.57	7.17	7.07	7.66	5.38	3.22	9.02
Nd	12.5	23.6	2.2	6.27	5.45	30	35.1	31.5	26.3	21.1	33.4	26.3	29	30.6	20.55	17.45	37.03
Sm	2	3.7	0.345	0.658	1.09	4.92	5.91	5.21	4.23	3.39	5.01	4.37	5.34	5.69	3.51	2.56	6.12
Eu	0.534	0.833	0.157	0.07	0.163	0.96	1.2	1.1	0.85	0.682	1.19	1.06	1.43	1.56	1.76	0.99	1.46
Gd	1.62	3.05	0.337	0.535	0.965	4.26	4.97	4.61	3.69	2.91	4.37	3.71	4.31	4.57	3.49	2.63	4.83

样品号	黄合少岩体					古城岩体					八道沟岩体			高家村岩体	水泉沟岩体	
	H2-1	H3-3	H4-1	H5-1	H6-2	G1-2	G4	G6-1	G8-1	G9-1	B1-1	B2-1	B2-4	B2-6	王惠初等,2007	张招崇,2001	
岩石名称	含辉灰绿色细粒正长岩	含辉石正长岩灰绿色粗粒	角闪正长岩肉红色粗粒	伟晶正长岩肉红色	角闪正长岩肉红色中粒	含辉石正长岩灰色粗粒	角闪正长岩麻灰色细粒	角闪正长岩麻灰色中	含辉石正长岩浅肉红色中粒	角闪正长岩浅肉粉色中粒	石英二长斑岩灰白色伟晶	石英二长斑岩浅肉红色粗粒	二长斑岩麻灰色中粒	二长斑岩灰黑色细粒	角闪正长岩	正长岩	碱长正长岩
Tb	0.242	0.448	0.05	0.051	0.179	0.656	0.816	0.732	0.569	0.443	0.649	0.583	0.74	0.79	0.47	0.42	0.61
Dy	1.12	2.05	0.261	0.146	1.07	3.17	3.89	3.62	2.8	2.12	3.18	2.99	3.78	4.01	2.36	1.84	3.61
Ho	0.205	0.391	0.049	0.026	0.195	0.576	0.714	0.687	0.512	0.381	0.628	0.596	0.725	0.774	0.46	0.4	0.94
Er	0.562	1.08	0.135	0.092	0.50	1.54	1.96	1.86	1.38	1.00	1.82	1.77	2.01	2.18	1.41	1.04	2.18
Tm	0.09	0.176	0.027	0.013	0.083	0.239	0.322	0.294	0.212	0.15	0.297	0.301	0.356	0.38	0.21	0.19	0.36
Yb	0.59	1.09	0.164	0.081	0.449	1.44	1.87	1.76	1.28	0.826	1.85	1.81	2.12	2.27	1.44	1.06	2.6
Lu	0.087	0.167	0.025	0.011	0.054	0.203	0.258	0.253	0.178	0.114	0.252	0.252	0.28	0.309	0.21	0.15	0.62
Y	5.8	11	1.54	0.712	4.98	15.3	19.1	17.8	13	9.76	18.5	18.1	20.9	22.2	11.9	18.38	9.6
ΣREE	70.0	113.1	12.1	38.6	31.1	157.4	184.5	170.7	141.2	108.6	226.8	147.3	131.1	138.9	105.4	90.8	170.5
LREE	65.4	104.6	11.1	37.6	27.6	145.3	169.7	156.9	130.5	100.7	213.8	135.3	116.7	123.6	95.4	83.0	154.8
HREE	4.5	8.5	1.1	1.0	3.5	12.1	14.8	13.8	10.6	7.9	13.1	12.0	14.3	15.3	10.0	7.7	15.8
LREE/HREE	14.5	12.4	10.6	39.4	7.9	12.0	11.5	11.4	12.3	12.7	16.4	11.3	8.2	8.1	9.5	10.7	9.8
$(La/Yb)_N$	20.42	14.41	11.24	99.18	9.38	16.69	15.23	15.04	16.92	19.37	24.27	13.51	7.27	7.14	11.67	11.85	7.69
δEu	0.88	0.74	1.39	0.35	0.48	0.63	0.66	0.67	0.64	0.65	0.76	0.78	0.88	0.91	1.52	1.16	0.79
δCe	0.92	1.01	1.01	0.87	1.09	0.99	0.96	0.97	0.99	1	0.91	0.93	1.04	1.03	0.86	1.25	1.13

注:里特曼指数(σ):$\sigma 43=\frac{[w(Na_2O)+w(K_2O)]^2}{w(SiO_2)-43\%}$;碱度率(AR)$=\frac{w(Al_2O_3)+w(CaO)+w(Na_2O)+w(K_2O)}{w(Al_2O_3)+w(CaO)-w(Na_2O)-w(K_2O)}$;A/CNK$=\frac{n(Al_2O_3)}{n(CaO)+n(Na_2O)+n(K_2O)}$;Q—石英;A—碱性长石;P—斜长石;(邓晋福等,2015)。

分馏度较高。黄合少、古城和八道沟岩体的 δEu 变化范围分别为 0.35 ~ 1.39、0.63 ~ 0.67 和 0.76 ~ 0.91,平均值分别为 0.77、0.65 和 0.83,均具明显的 Eu 负异常。这表明这几个岩体原生岩浆分离结晶过程中有大量斜长石的晶出,导致残余的岩浆成岩后的 Eu 负异常。三个岩体的 δCe 变化范围为 0.87 ~ 1.04,铈异常不明显。对比图(5a)发现,高家村角闪正长岩体和水泉沟碱性杂岩体岩石的稀土元素分配型式与古城和八道沟岩体的基本相似。高家村角闪正长岩体的稀土总量 ΣREE 均值为 105.4 $\times 10^{-6}$,LREE/HREE 平均值为 9.52;水泉沟碱性杂岩体中富碱侵入岩的稀土总量 ΣREE 均值为 130.7$\times 10^{-6}$,LREE/HREE 平均值为 10.29。两个岩体的 δCe 变化于 0.86 ~ 1.25 之间,也表现为铈异常不明显。但差别在于高家村角闪正长岩和水泉沟正长岩呈现明显的正铕异常。总体上来看,除黄合少岩体的稀土元素含量普遍偏低之外,其余几个岩体岩石的稀土配分型式是较为相似的,暗示它们之间可能具有一定的成因联系。

2.3　微量元素特征

黄合少岩体的 Rb、Sr、Ba 的平均丰度分别为 110.1 $\times 10^{-6}$、864.8 $\times 10^{-6}$、1086 $\times 10^{-6}$;古城岩体的 Rb、Sr、Ba 的丰度平均值分别 172.6 $\times 10^{-6}$、1516.8 ×

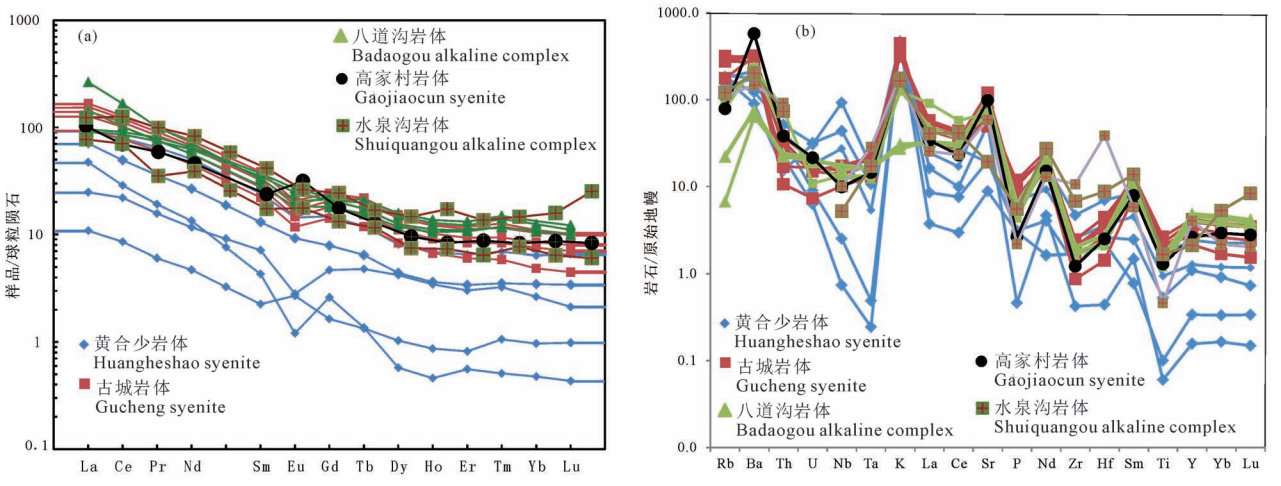


图 5 阴山—燕山北麓富碱侵入岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a)与原始地幔标准化不相容元素配分图解(b)
(球粒陨石与原始地幔标准化值据 Sun 和 McDonough,1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE petterns (a) and primitive mantle-normalized distribution patterns of trace elements (b) of the alkali-rich intrusions on the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

10^{-6}、2132×10^{-6};八道沟岩体的 Rb、Sr、Ba 的平均丰度分别为 30.9×10^{-6}、1788.3×10^{-6}、1082.8×10^{-6};高家村角闪正长岩的 Rb、Sr、Ba 平均丰度为 50.1×10^{-6}、2071×10^{-6}、4033.5×10^{-6};水泉沟岩体中富碱侵入岩的 Rb、Sr、Ba 平均丰度分别为 73.4×10^{-6}、842.5×10^{-6}、1217.3×10^{-6}。黄合少岩体的高场强元素 Ti、P、Nb、Ta 的平均丰度分别为 852.8×10^{-6}、347.5×10^{-6}、23.8×10^{-6}、0.3×10^{-6};古城岩体 Ti、P、Nb、Ta 的平均丰度分别为 2711.8×10^{-6}、900.8×10^{-6}、10.6×10^{-6}、0.7×10^{-6};八道沟岩体的 Ti、P、Nb、Ta 的平均丰度分别为 1833×10^{-6}、498.8×10^{-6}、10.6×10^{-6}、0.6×10^{-6};高家村角闪正长岩体 Ti、P、Nb、Ta 的平均丰度分别为 1677×10^{-6}、250.9×10^{-6}、7.1×10^{-6}、0.6×10^{-6};水泉沟碱性杂岩体 Ti、P、Nb、Ta 的平均丰度分别为 1378×10^{-6}、365.3×10^{-6}、5.4×10^{-6}与 0.9×10^{-6}。

微量元素原始地幔标准化分配形式图(图 5b)显示,研究区富碱侵入岩富集 Rb、Ba、Sr 和 K 等大离子亲石元素(LILE),亏损高场强元素(HFSE)Ti、P、Nb、Ta。HFSE 负异常暗示成岩可能有大陆地壳物质的参与,参与物质由亏损 HFSE 的交代流体带来(Ionov and Hofmann, 1995;Chung Sun-Lin et al., 2005;赵振华,2007)。几个岩体的不相容元素配分模式比较相似,元素异常程度接近,表明这些岩体在成因上有一定的内在联系(蔡剑辉等,2011;柳晓艳等,2011;周伟伟等,2014)。

3 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

3.1 测试方法

测年样品 G1-2、G5-1、G6-1 采自古城碱性正长岩体,前者为含辉石正长岩,后二者均为角闪石正长岩。样品 B2-3、B2-4 采自八道沟岩体,前者为石英二长斑岩,后者为二长斑岩。

锆石的挑选工作由廊坊河北省区域地质矿产调查研究所帮助完成。锆石的分选经人工破碎、清洗富集以及镜下单矿物挑选。制靶、阴极发光照相在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心完成。CL 照相完成后,用反射光显微镜观察了锆石颗粒表面的整洁度,用透射光观察了锆石颗粒内部的裂纹及包体情况并拍照。结合 CL 照片,确定锆石定年的打点位置。本文中的锆石 U-Pb 年龄数据是在国家科技基础条件平台北京离子探针中心(中国地质科学院地质研究所)的 SHRIMP Ⅱ 仪器上获得的。测试过程中为校正年龄与元素的分馏,每测定三个未知数据点,分析一次标准锆石 TEM。数据处理采用 ISOPLOT 程序。详细测试方法与流程见宋彪等(2002)。

3.2 锆石颗粒形态、结构

古城正长岩体三个样品中的锆石均呈浅黄色,锆石晶体的长宽比近 1∶1,颗粒内部裂纹不发育,

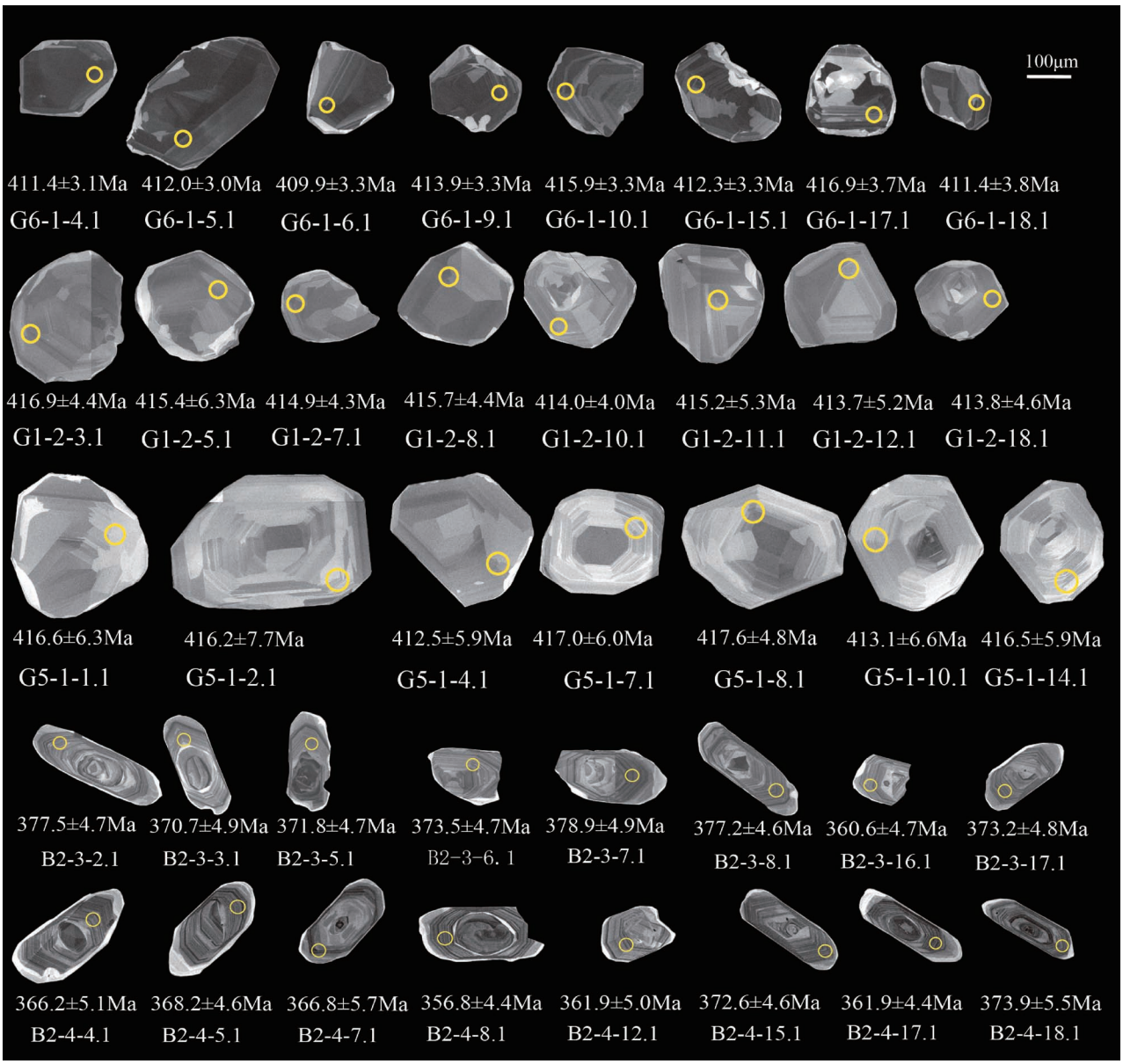


图 6 阴山—燕山北麓古城岩体和八道沟岩体的锆石 CL 图像

Fig. 6 Cathodoluminescence image of zircons for alkali-rich intrusions on the northern side of Yinshan mountains and Yanshan Mountains

包体较少(图 6)。其中 G1-2 锆石颗粒成等轴粒状,粒度 150~400 μm,震荡环带结构较为明显,晶形较完好;G5-1 样品中锆石成等轴粒状,粒度 300~500 μm。晶形完整,棱角清晰,表面整洁,内部无包体,结构较为简单,同心震荡环带发育完好;样品 G6-1 成短柱状或等轴粒状,粒度 150~350 μm,震荡环带结构特征不明显。

八道沟岩体两个样品中锆石晶体形态相似,均为自形结构长柱状,晶形完整,长轴短轴比约 2∶1 到 4∶1,短轴长度 80~120 μm。颗粒透明度不高,震荡环带结构明显,部分颗粒裂纹明显,含少量包体。

本次测年锆石均具有明显的震荡环带结构,没有核幔结构,为典型的岩浆锆石。

3.3　锆石 U-Pb 年龄

古城和八道沟两个岩体 5 个岩石的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年数据如表 2 所示。剔除离群数据后,古城碱性正长岩体三个样品 G1-2、G5-1、G6-1 各获得 13 个有效数据。八道沟富碱侵入岩体两个样品 B2-3、B2-4 分别获得 9、14 个有效数据。

表 2 阴山—燕山北麓富碱侵入岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果

Table 2 Zircon SHRIMP U-Pb dating result of alkali-rich intrusions on the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains

测点号	元素含量(×10⁻⁶)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)				不谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
古城正长岩(样品号 G1-2、G5-1、G6-1)															
G1-2-3.1	11.4	174	197	0.91	0.0548	3.4	0.50	3.6	0.0668	1.1	403	76	416.9	4.4	−3
G1-2-5.1	10.1	124	177	0.72	0.0530	3.2	0.49	3.5	0.0666	1.6	329	72	415.4	6.3	−26
G1-2-6.1	12.4	200	217	0.95	0.0507	6.3	0.46	6.4	0.0662	1.1	229	146	413.1	4.4	−80
G1-2-7.1	12.9	184	225	0.85	0.0554	4.4	0.51	4.6	0.0665	1.1	429	99	414.9	4.3	3
G1-2-8.1	11.6	145	204	0.74	0.0566	3.5	0.52	3.7	0.0666	1.1	478	78	415.7	4.4	13
G1-2-9.1	13.4	198	234	0.88	0.0543	3.2	0.50	3.3	0.0667	1.0	383	71	416.2	4.2	−9
G1-2-10.1	9.6	124	166	0.77	0.0527	6.9	0.48	7.0	0.0663	1.2	317	157	414.0	5.0	−30
G1-2-11.1	8.3	110	144	0.79	0.0520	7.9	0.48	8.0	0.0665	1.3	283	180	415.2	5.3	−47
G1-2-12.1	7.1	99	124	0.82	0.0570	3.6	0.52	3.9	0.0663	1.3	490	80	413.7	5.2	16
G1-2-13.1	11.5	214	201	1.10	0.0543	3.7	0.50	3.8	0.0662	1.1	385	83	413.5	4.4	−7
G1-2-16.1	11.4	174	198	0.91	0.0535	7.4	0.49	7.7	0.0665	1.8	352	168	415.0	7.3	−18
G1-2-17.1	11.2	126	196	0.66	0.0547	5.0	0.50	5.1	0.0660	1.2	402	112	412.2	4.7	−3
G1-2-18.1	11.7	179	204	0.91	0.0534	4.2	0.49	4.4	0.0663	1.2	347	96	413.8	4.6	−19
G5-1-1.1	4.8	77	83	0.97	0.0584	4.6	0.54	4.9	0.0668	1.6	545	101	416.6	6.3	24
G5-1-2.1	3.3	46	57	0.84	0.0530	13.3	0.49	13.4	0.0667	1.9	331	301	416.2	7.7	−26
G5-1-4.1	6.0	75	105	0.74	0.0522	9.6	0.48	9.8	0.0661	1.5	292	220	412.5	5.9	−41
G5-1-5.1	6.5	126	114	1.14	0.0569	6.1	0.52	6.3	0.0664	1.3	488	135	414.4	5.4	15
G5-1-6.1	6.5	137	114	1.24	0.0597	4.6	0.55	4.8	0.0663	1.3	593	99	413.7	5.3	30
G5-1-7.1	4.9	79	85	0.96	0.0518	9.5	0.48	9.6	0.0668	1.5	275	218	417.0	6.1	−52
G5-1-8.1	9.1	157	157	1.03	0.0536	5.7	0.49	5.8	0.0669	1.2	352	128	417.6	4.8	−19
G5-1-10.1	4.4	69	77	0.93	0.0492	9.2	0.45	9.3	0.0662	1.6	160	215	413.1	6.6	−159
G5-1-11.1	5.8	89	101	0.92	0.0572	9.1	0.52	9.3	0.0665	1.5	498	201	415.2	6.2	17
G5-1-12.1	6.8	157	117	1.39	0.0507	6.0	0.47	6.2	0.0668	1.4	226	139	416.6	5.5	−84
G5-1-14.1	5.8	126	101	1.29	0.0619	6.5	0.57	6.6	0.0667	1.5	671	139	416.5	5.9	38
G5-1-16.1	7.2	99	127	0.80	0.0539	6.8	0.49	6.9	0.0657	1.3	367	154	410.2	5.3	−12
G5-1-17.1	8.2	134	142	0.97	0.0497	8.7	0.46	8.8	0.0666	1.3	179	203	415.6	5.4	−132
G6-1-4.1	32.5	386	573	0.70	0.0541	2.3	0.49	2.4	0.0659	0.8	376	52	411.4	3.1	−9
G6-1-5.1	29.1	412	512	0.83	0.0526	2.7	0.48	2.8	0.0660	0.8	311	61	412.0	3.3	−33
G6-1-6.1	29.0	624	514	1.25	0.0546	2.1	0.49	2.2	0.0656	0.8	395	46	409.9	3.3	−4
G6-1-7.1	36.5	438	634	0.71	0.0521	3.5	0.48	3.6	0.0666	0.8	288	80	415.6	3.2	−44

测点号	元素含量(×10⁻⁶)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)				不谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
G6-1-8.1	19.1	315	334	0.97	0.0535	2.4	0.49	2.6	0.0666	0.9	351	55	415.8	3.7	−18
G6-1-9.1	27.3	487	476	1.06	0.0578	3.2	0.53	3.3	0.0663	0.8	524	70	413.9	3.3	21
G6-1-10-1	23.4	278	407	0.71	0.0544	2.7	0.50	2.8	0.0666	0.8	388	61	415.9	3.3	−7
G6-1-11-1	46.9	1425	827	1.78	0.0544	1.6	0.49	1.8	0.0659	0.7	388	36	411.2	2.8	−6
G6-1-13.1	44.8	605	789	0.79	0.0568	2.1	0.52	2.2	0.0662	0.8	485	46	413.0	3.0	15
G6-1-15.1	30.1	637	529	1.24	0.0530	2.4	0.48	2.5	0.0660	0.8	331	54	412.3	3.3	−25
G6-1-16.1	50.6	1821	892	2.11	0.0558	1.4	0.51	1.6	0.0661	0.7	444	32	412.3	2.9	7
G6-1-17.1	18.0	191	312	0.63	0.0542	2.9	0.50	3.1	0.0668	0.9	379	66	416.9	3.7	−10
G6-1-18.1	14.9	249	262	0.98	0.0549	2.8	0.50	3.0	0.0659	1.0	407	63	411.4	3.8	−1
八道沟富碱侵入岩岩(样品号 B2-3、B2-4)															
B2-3-1.1	21.7	330	429	0.79	0.0522	4.8	0.42	5.0	0.0587	1.3	293	110	367.6	4.6	−25
B2-3-2.1	20.1	264	389	0.70	0.0566	3.2	0.47	3.5	0.0603	1.3	475	71	377.5	4.7	21
B2-3-3.1	16.1	280	317	0.91	0.0534	2.7	0.44	3.0	0.0592	1.4	348	61	370.7	4.9	−7
B2-3-5.1	15.9	187	312	0.62	0.0533	4.2	0.44	4.4	0.0594	1.3	342	95	371.8	4.7	−9
B2-3-6.1	16.9	343	330	1.07	0.0550	4.1	0.45	4.3	0.0596	1.3	413	91	373.5	4.7	10
B2-3-7.1	13.5	160	261	0.63	0.0555	3.9	0.46	4.1	0.0605	1.3	433	86	378.9	4.9	12
B2-3-8.1	20.8	322	401	0.83	0.0516	3.1	0.43	3.3	0.0603	1.3	266	70	377.2	4.6	−42
B2-3-16.1	14.3	167	288	0.60	0.0515	4.5	0.41	4.7	0.0575	1.3	261	104	360.6	4.7	−38
B2-3-17.1	20.2	318	393	0.84	0.0532	2.3	0.44	2.7	0.0596	1.3	337	53	373.2	4.8	−11
B2-4-1.1	20.3	265	397	0.69	0.0515	6.3	0.42	6.6	0.0591	1.7	262	146	370.0	6.2	−41
B2-4-2.1	17.6	239	339	0.73	0.0534	6.2	0.44	6.4	0.0600	1.3	345	141	375.4	4.9	−9
B2-4-4.1	11.8	176	231	0.79	0.0579	7.1	0.47	7.3	0.0584	1.4	527	156	366.2	5.1	31
B2-4-5.1	18.1	296	358	0.85	0.0545	3.1	0.44	3.3	0.0588	1.3	391	69	368.2	4.6	6
B2-4-7.1	8.5	133	168	0.82	0.0496	7.2	0.40	7.4	0.0586	1.6	177	169	366.8	5.7	−107
B2-4-8.1	23.9	413	484	0.88	0.0547	4.9	0.43	5.1	0.0569	1.3	402	111	356.8	4.4	11
B2-4-9.1	20.7	282	416	0.70	0.0527	3.5	0.42	3.7	0.0578	1.3	318	79	362.1	4.5	−14
B2-4-11.1	8.3	118	164	0.74	0.0528	4.5	0.42	4.8	0.0581	1.6	321	103	364.1	5.6	−13
B2-4-12.1	12.9	139	260	0.55	0.0549	2.6	0.44	3.0	0.0577	1.4	406	58	361.9	5.0	11
B2-4-13.1	14.0	196	284	0.71	0.0624	3.3	0.49	3.6	0.0571	1.3	687	71	358.1	4.6	48
B2-4-14.1	12.2	123	234	0.54	0.0501	3.7	0.42	4.2	0.0602	1.9	200	86	377.0	7.1	−89
B2-4-15.1	18.6	254	365	0.72	0.0568	3.1	0.47	3.3	0.0595	1.3	485	68	372.6	4.6	23
B2-4-17.1	21.8	355	435	0.84	0.0591	3.3	0.47	3.6	0.0577	1.3	569	73	361.9	4.4	36
B2-4-18.1	18.2	288	352	0.85	0.0495	6.4	0.41	6.5	0.0597	1.5	173	148	373.9	5.5	−117

古城岩体 G1-2 锆石样品的 Th 平均含量为 158×10^{-6},U 平均含量为 191×10^{-6},Th/U 从 0.66 到 1.10 波动,平均值为 0.85,^{206}Pb/^{238}U 谐和年龄为 414.6±5.0 Ma(图 7a);G5-1 锆石的 Th 平均含量为 106×10^{-6},U 平均含量为 106×10^{-6},Th/U 从 0.74 到 1.39 波动,平均 1.02,^{206}Pb/^{238}U 谐和年龄为 415.0±5.9 Ma(图 7b);样品 G6-1 中锆石的 Th 平均含量为 605×10^{-6},U 平均含量为 543×10^{-6},Th/U 从 0.63 到 2.11 波动,平均值为 1.06,^{206}Pb/^{238}U 谐和年龄 413.2±3.3 Ma(图 7c)。三个样品的年龄谐和图数据点均较为集中,可以代表岩石的形成年龄。

八道沟岩体样品 B2-3 中锆石的 Th 平均含量为 263×10^{-6},U 平均含量为 347×10^{-6},Th/U 值从 0.60 到 1.07 波动,平均值为 0.78,,^{206}Pb/^{238}U 谐和年龄

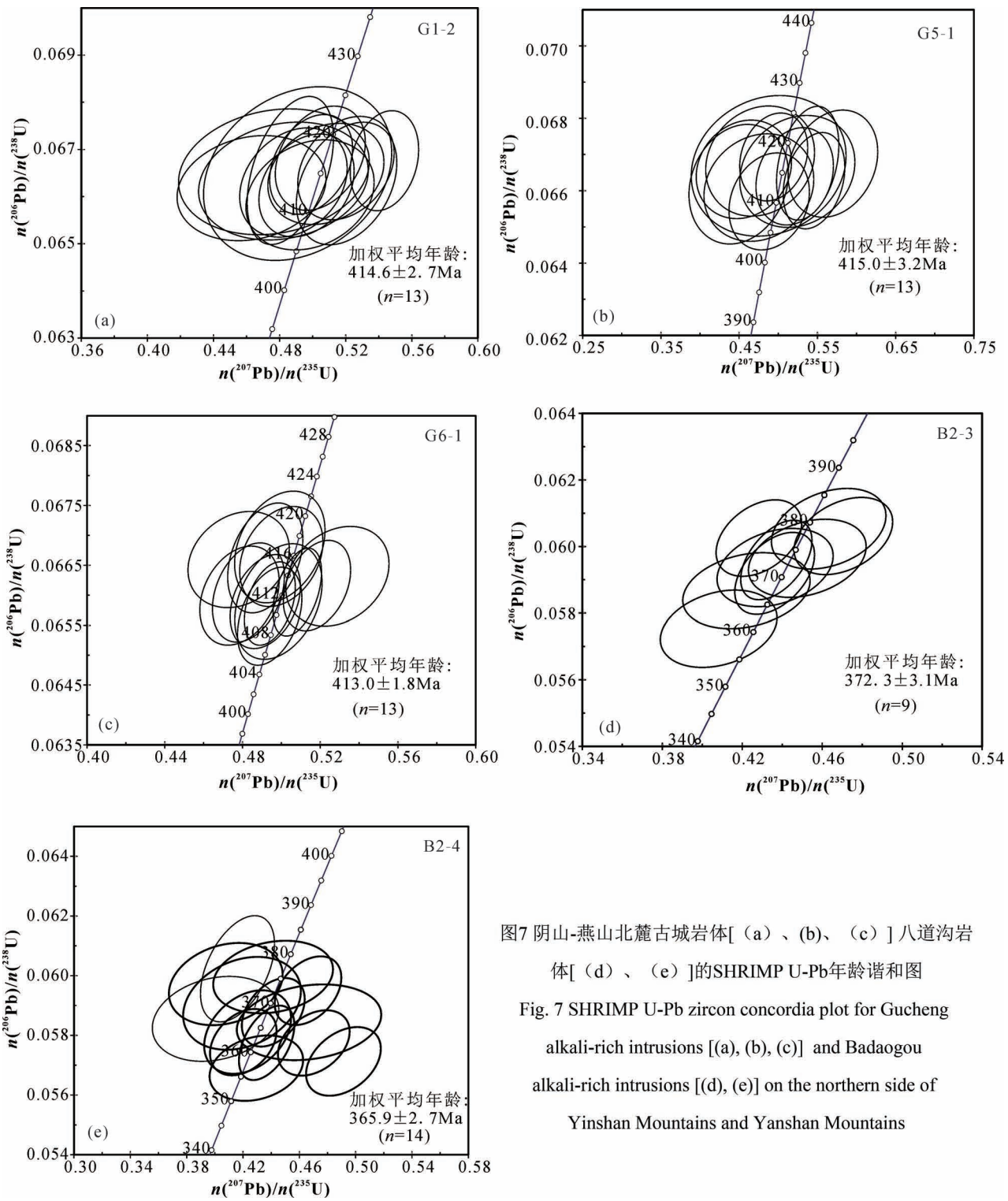


图7 阴山-燕山北麓古城岩体[(a)、(b)、(c)]八道沟岩体[(d)、(e)]的SHRIMP U-Pb年龄谐和图

Fig. 7 SHRIMP U-Pb zircon concordia plot for Gucheng alkali-rich intrusions [(a), (b), (c)] and Badaogou alkali-rich intrusions [(d), (e)] on the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains

为 372.3±4.7 Ma(图 7d);样品 B2-4 中锆石的 Th 平均含量为 234×10^{-6},U 平均含量为 321×10^{-6},Th/U 从 0.54 到 0.88 波动,平均值为 0.74,$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和年龄为 366.8±5.2 Ma(图 7e)。

由表 3 所示的高精度测年结果可以看出,分布于阴山—燕山北麓高家村、黄合少、古城、八道沟和水泉沟五个富碱侵入岩体均为晚古生代泥盆纪碱性岩浆活动的产物。

4　讨论

4.1　岩浆物质来源

关于富碱侵入岩岩浆物质来源的探讨一直是岩石学研究的重要部分,目前普遍采用分析岩石的同位素特征、稀土和微量元素特征来研究推断岩石的岩浆物质来源。本文主要通过稀土元素与微量元素特征来探讨岩浆源区的性质。

稀土元素的化学行为和离子半径的细微差别是造成许多成岩过程中轻重稀土元素发生分馏的内因,所以可以利用稀土元素的分馏特征来研究岩石的成岩过程,讨论其成因。稀土元素 Eu^{2+} 主要富集于长石矿物中以及一些副矿物(如榍石、锆石、褐帘石、独居石和磷灰石)中,但在岩浆体系中长石含量占有绝对优势,副矿物不会造成 Eu 含量的剧烈变化,故 Eu^{2+} 含量主要受控于长石(Hanson,1978;刘红涛等,2002a)。Eu 的弱亏损表明研究区成岩岩浆在分馏结晶过程中,出现长石的分离,或者在部分熔融过程中长石残留在源区。由于 REE 在石榴子石中的分配系数变化很大,故 HREE 相对于 LREE 的显著亏损可能是源区岩石存留石榴子石的缘故。在源区残留相中存在斜长石与石榴子石共存的状态下,由于斜长石消失线(plagioclase-out)的相界主要受温度影响,但随着压力的增大,斜长石在残留固相中的占比会急剧下降(刘红涛等,2002a)。故共存相的温压条件要低于石榴子石单独存在的稳定线(garnet-in)($P\geqslant1.2$ GPa;$t\geqslant800\sim1000$℃)。如前所述,黄合少、古城与八道沟岩体富碱岩石均具明显的 Eu 负异常和轻稀土元素富集、重稀土元素亏损,表明其源区残留相中有大量斜长石的存在,少量石榴子石及角闪石推测其成岩温压应未达到石榴子石单独稳定存在的温压条件,我们推断其源区温压条件的温度低于 850℃ 、压力小于 1.2 GPa(Rapp and Watson, 1995);相对应的深度大致为加厚大陆地壳底部至中部(刘红涛等,2002b)。而高家村角闪正长岩和水泉沟碱性正长岩具有 Sr 正异常与 Eu 正异常,表明它们在源岩部分熔融过程中的残留相没有斜长石存在,后续岩浆过程也没有发生明显的长石分离结晶。结合其重稀土的亏损特征,可以断定岩体在成岩过程部分熔融过程中残留相中有大量石榴子石存在。故推断,高家村角闪正长岩与水泉沟碱性正长岩形成于相对较高的温压条件(Rapp and Watson, 1995; Litvinovsky et al.,2000)。其形成深度较前三个岩体要深,可能对应加厚或者强烈加厚的大陆地壳底部的深度范围。

八道沟岩体与古城岩体岩石的球粒陨石稀土元素分布型式更为相近,暗示二者的岩浆物质来源更接近一些,并且可能经历了相似的岩浆演化过程,而黄合少岩体却有所不同。

阴山—燕山北麓富碱侵入岩微量元素以亏损高场强元素(HFSE)Ti、P、Nb 和 Ta,富集 Rb、Ba 和 Sr 等大离子亲石元素(LILE)为特征,但与 Ba、Sr 相比,Rb 含量相对较低。通常亏损高场强元素指示岩浆来源于富集的大陆岩石圈地幔。结合 Nb/Yb—Th/Yb 图解(图 8a)可以看出,研究区样品数据均落在富集型地幔区域附近,表明岩浆物质来源和富集

表 3 阴山—燕山北麓富碱侵入岩体的形成年龄

Table 3 High-precision age datas of alkali-rich intrusions on the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains

岩体名称	黄合少岩体	古城岩体	八道沟岩体	高家村岩体	水泉沟岩体
锆石 U-Pb 年龄	410.1±6.2 Ma	413.2±3.3 Ma 414.6±5.0 Ma 415.0±5.9 Ma	366.8±5.2 Ma; 372.3±4.7 Ma	389.9±4.7 Ma; 399±7 Ma	390±6 Ma
测试方法	SHRIMP	SHRIMP	SHRIMP	TIMS; SHRIMP	SHRIMP
数据来源	蔡剑辉等,2019(待发表)	本文	本文	王惠初等,2012	罗镇宽等,2001

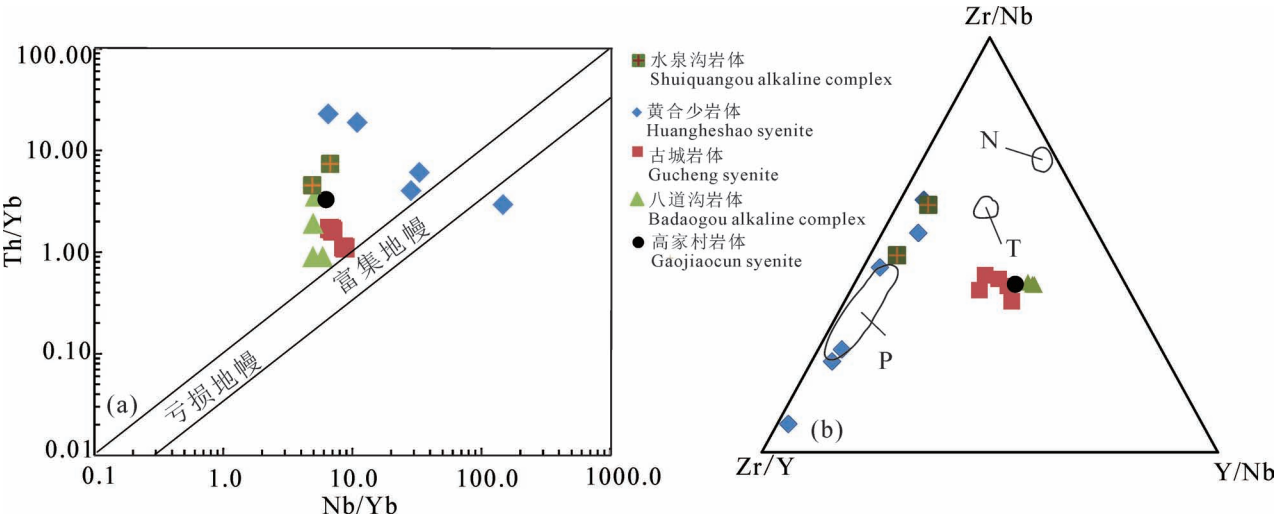


图 8 阴山—燕山北麓富碱侵入岩 Ta/Yb—Th/Yb(a)(底图据 Wilson, 1989)与 Zr/Nb—Zr/Nb—Y/Nb 判别图解(b)(底图据 Pearce,1996)

Fig. 8 Ta/Yb—Th/Yb (a) (after Wilson, 1989) and Zr/Nb—Zr/Nb—Y/Nb (b) (after Pearce, 1996) diagrams of alkali-rich intrusions on the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains

N—亏损地幔;T—过渡地幔;P—富集地幔

地幔紧密相关。在 Zr/Nb—Zr/Nb—Y/Nb 判别图中(图 8b),样品投影于富集地幔区附近,主要介于富集地幔和过渡地幔之间,同样印证岩浆物质来源与富集地幔关系较为密切。而高场强元素(HFSE)如 Ti、Nb、Ta 等的负异常,表明大陆地壳物质参与了成岩过程(蔡剑辉等,2006;柳晓艳等,2010;蔡剑辉等,2011;周伟伟等,2013;赵振华,2016)。包志伟等(1996)在进行水泉沟岩体同位素地球化学研究的基础上,推测其岩浆物质来源于上地幔和下地壳,可能是二者部分熔融的产物。王惠初等(2012)认为高家村角闪正长岩的 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素特征与大陆下部地壳源区相似。所以,结合研究区同时代形成的其它富碱侵入岩体的同位素地球化学研究成果,可以认为,阴山—燕山北麓晚古生代富碱侵入岩浆活动的物质来源与富集地幔和下地壳密切相关。

4.2 构造环境判别

根据前人对于富碱侵入岩的研究成果,富碱侵入岩具有形成于拉张环境的特征。故本文阴山—燕山富碱侵入岩也形成于引张型构造环境。

根据 Collins 等(1982)的划分方法,碱性岩被划分为 A 型花岗岩。在 Pearce(1996)的花岗岩类构造环境判别图对岩体的构造环境具有一定的指示意义,在判别图上(图 9),研究区岩石数据点几乎全都落在后碰撞花岗岩区,表明阴山—燕山北麓晚古生代富碱侵入岩可能形成于碰撞期后。从研究区富碱侵入岩的岩石地球化学特征来看,基本符合 A 型花岗岩(碱性、贫水、非造山期)的特征。在 Eby(1992)提出的 A 型花岗岩构造环境判别图上(图 10),A1 型花岗岩为和大陆裂谷环境或地幔热点有关的非造山板内花岗岩;A2 型花岗岩为造山后或碰撞后成因花岗岩,一般形成环境为大陆边缘。研究区岩石样品多数落在 A2 区域,表明阴山—燕山北麓这些晚古生代富碱侵入岩体可能主要形成于造山

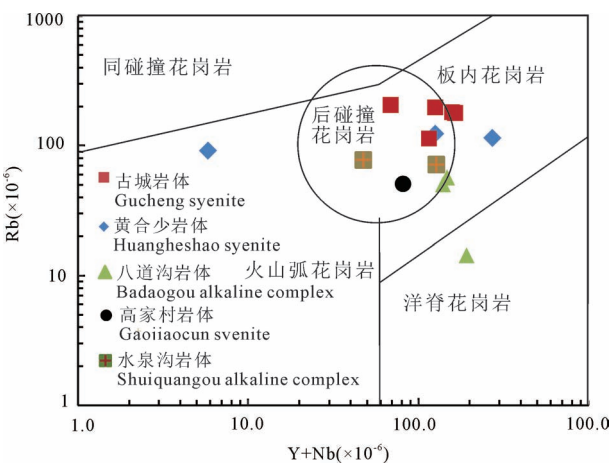


图 9 阴山—燕山北麓富碱侵入岩 Rb—(Nb+Y)构造判别图解(底图据 Pearce,1996)

Fig. 9 Rb—(Nb+Y) (after Pearce, 1996) discrimination diagrams of Alkali-rich intrusions on the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains

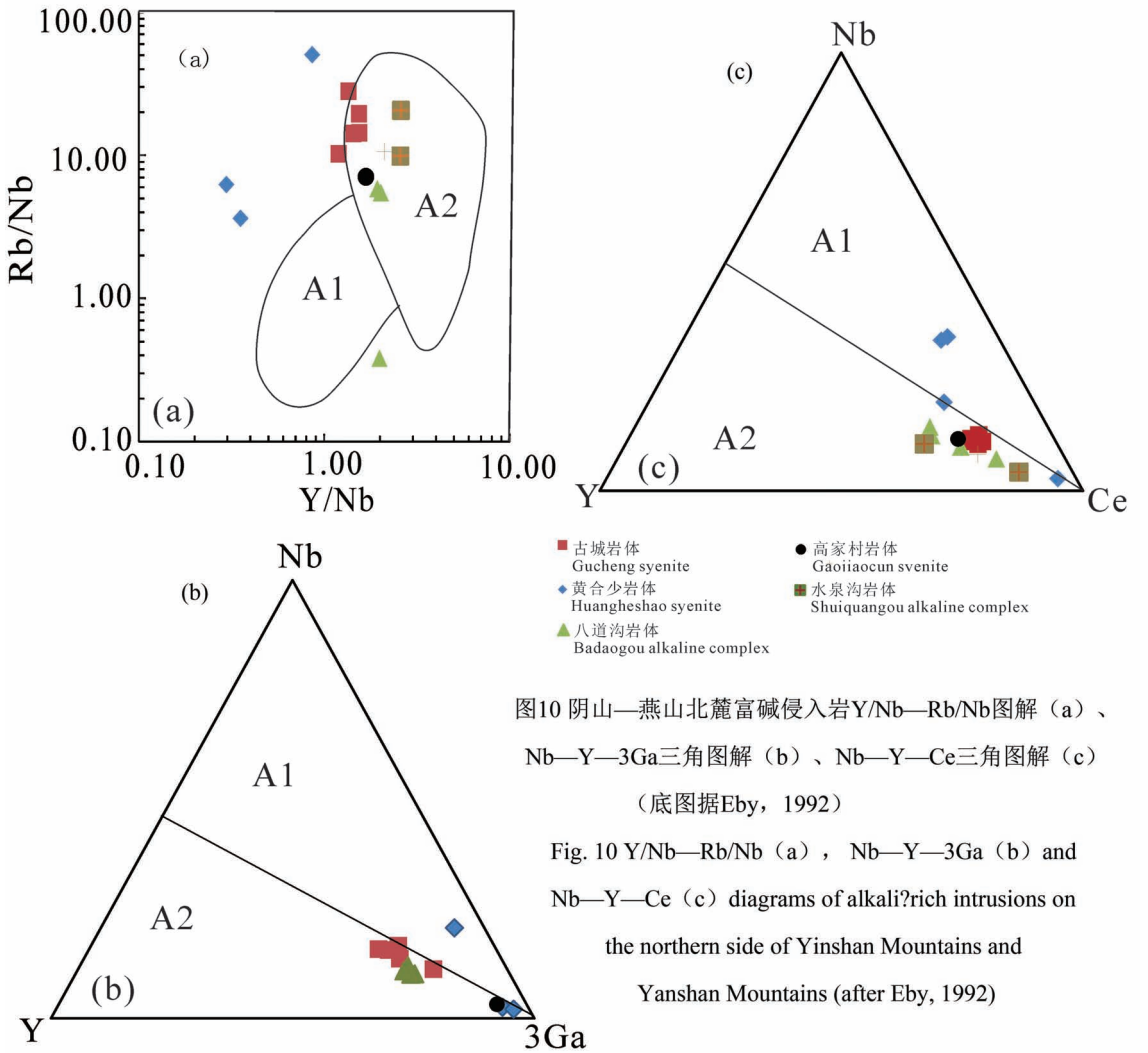


图10 阴山—燕山北麓富碱侵入岩Y/Nb—Rb/Nb图解（a）、Nb—Y—3Ga三角图解（b）、Nb—Y—Ce三角图解（c）（底图据Eby，1992）

Fig. 10 Y/Nb—Rb/Nb（a）， Nb—Y—3Ga（b）and Nb—Y—Ce（c）diagrams of alkali?rich intrusions on the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains (after Eby, 1992)

期后拉张环境。

4.3　华北克拉通北缘晚古生代富碱侵入岩带的厘定

华北克拉通是中国最古老的克拉通之一,它的形成主要经过三个重大地质历史事件:2.7~2.9Ga 陆壳生长阶段,2.5G 发生克拉通化,2.3~1.8Ga 克拉通经基底隆升和一系列岩浆活动最终形成。在古元古代末期到新元古代这一时段进入了稳定的地台发展阶段(翟明国等,2007;翟明国,2010;胡波等,2013)。在早古生代时期,华北克拉通北缘仍然保持稳定,但其北侧发育有近东西向分布的白乃庙岛弧岩带,在克拉通与岛弧岩带之间隔着古亚洲洋洋盆。白乃庙岛弧带岩浆活动较为频繁,根据白乃庙岛弧带中部分火山岩组合及深成岩组合的形成年龄(许立权等,2003;贾和义等,2003;刘敦一等,2003;王惠初等,2007;张维等,2008),可以推断白乃庙岛弧岩带的形成时间限于早奥陶世至晚志留世之间。据张允平等(2010)研究,达茂旗—白乃庙岛弧之上被西别河组角度不整合覆盖,这套磨拉石或类磨拉石沉积是华北克拉通北缘与白乃庙岛弧发生陆—弧碰撞的产物,由于西别河组的时代为晚志留世—早泥盆世,说明晚志留世华北克拉通北缘的造山作用已进入尾声。根据汪相(2018)对阿蒙兴造山带的同碰撞花岗岩的研究指示,古亚洲洋在早二叠世闭合,此后进入了西伯利亚板块和华北板块的碰撞期,根据吕洪波等(2018)对内蒙古狼山南坡发现的蛇绿混杂岩的研究成果,该蛇绿混杂岩是中亚造山带与华北克拉通最后一次碰撞的产物,其形成时间为早白垩世晚期。

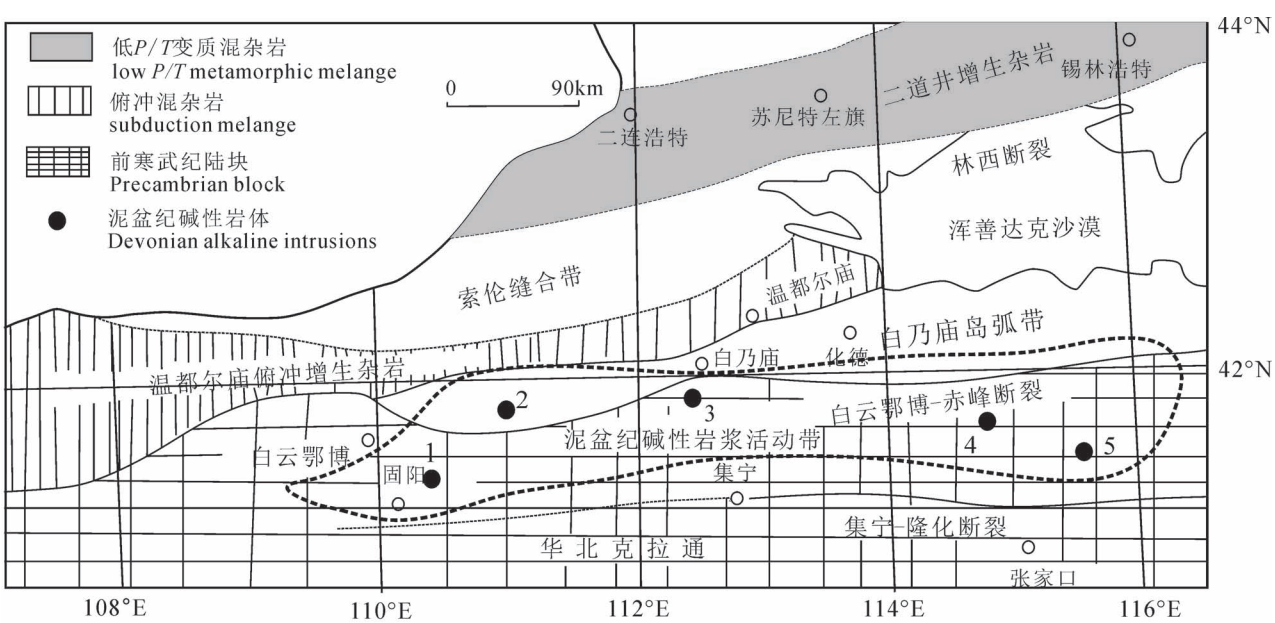
王惠初等(2012)在获得内蒙古固阳东高家村角闪正长岩的锆石 U-Pb 年龄(TIMS 年龄为 389.9±4.7 Ma;SHRIMP 年龄为 399±7 Ma)后,确定其形成时代为早—中泥盆世,紧随西别河组之后,为华北克拉通北缘早古生代造山后伸展作用的产物。联系

到在冀西北发现有与高家村岩体同位素年龄、岩石化学特征、构造背景较为一致的水泉沟岩体,推测其间可能存在一条近东西向展布的泥盆纪后造山碱性岩带。本文的研究成果基本确证了华北克拉通北缘这条晚古生代泥盆纪碱性岩带的存在,目前在这条碱性岩带上已发现并证实的岩体一共有五个,从西至东依次为内蒙古固阳东高家村角闪正长岩体、黄合少碱性正长岩、古城碱性正长岩体、河北尚义八道沟二长岩体和冀北水泉沟碱性杂岩体。通过更深入的工作,可望在这条碱性岩带上发现更多的岩体,比照华北克拉通北缘与之相距不远、大致平行的中生代三叠纪富碱侵入岩带,不排除这条古生代碱性岩带往东西方向进一步延伸的可能性。华北克拉通北缘晚古生代碱性岩带的时空分布特征及构造环境正好吻合华北克拉通北缘与白乃庙岛弧陆—弧碰撞后的伸展背景(图 11),而碱性岩带中岩体年龄的细微差别可能代表了伸展背景持续整个泥盆纪,代表华北克拉通北缘晚古生代一次十分重要的构造演化事件。

5 结论

(1)通过对华北克拉通北缘阴山—燕山富碱侵入岩体的岩石地球化学和高精度年代学研究,确证华北克拉通北缘近东西向晚古生代泥盆纪富碱侵入岩带的存在,由西至东,依次由内蒙古固阳高家村角闪正长岩体、黄合少碱性正长岩体、古城碱性正长岩体、八道沟富碱侵入岩体和冀北水泉沟碱性杂岩体构成。首次获得该碱性岩带上古城、八道沟两个岩体的 5 个 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄数据,即古城含辉石正长岩(G1-2)年龄 414.6±5.0 Ma、角闪正长岩(G5-1)年龄 415.0±5.9 Ma、角闪正长岩(G6-1)年龄 413.2±3.3 Ma;八道沟石英二长斑岩年龄 372.3±4.7 Ma、二长斑岩年龄 366.8±5.2 Ma。

(2)根据岩石地球化学特征,华北克拉通北缘晚古生代富碱侵入岩带的主体岩石为正长岩、二长岩和石英二长岩,属于中性岩,高碱、偏铝质,除八道沟岩体外,均以富钾为特征。岩石的微量元素特征表现为富集大离子亲石元素 Rb、Sr、Ba 等,亏损高场强元素 Ti、P、Nb、Ta 等。各岩体岩石的不相容元素配分模式比较相似,元素异常程度接近,说明各岩体的成因可能具有一定的联系。除黄合少正长岩的稀土含量波动较大、稀土总量较低外,研究岩体的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线均显示比较相近的轻稀土富集、重稀土亏损的右倾斜分离型式。黄合



1-高家村岩体 2-黄合少岩体 3-古城岩体 4-八道沟岩体 5-水泉沟岩体

1-Gaojiacun intrusions 2-Huangheshao intrusions 3-Gucheng intrusions 4-Badaogou intrusions 5-Shuiquangou intrusions

图 11 白乃庙岛弧带与泥盆纪碱性岩带相对位置简图(底图据周志广等,2018)

Fig. 11 sketch map of the relative position between Bainaimiao Island arc belt and Devonian alkaline intrusions belt (after Zhou Zhiguang et al., 2018)

少、古城和八道沟岩体基本上呈明显的负铕异常,但高家村角闪正长岩和水泉沟正长岩呈现明显的正铕异常。

(3)研究区富碱侵入岩的稀土和微量元素地球化学研究表明,其岩浆物质来源与富集地幔和下地壳有关,可能为两者物质部分熔融的产物。推测黄合少、古城、八道沟岩体的成岩温压对应深度大致为加厚大陆地壳底部至中部,高家村和水泉沟岩体的形成深度更深。

(4)基于构造环境的岩石地球化学判别,指示阴山—燕山北麓古生代富碱侵入岩带主要形成于引张型构造环境,为碰撞—造山后岩浆活动的产物。结合前人关于研究区晚古生代构造活动和岩浆活动的研究成果,推断阴山—燕山北麓古生代富碱侵入岩形成的构造环境确有可能与晚古生代志留纪末至泥盆纪初华北克拉通北缘与其北侧的白乃庙岛弧发生陆—弧碰撞后的引张性构造背景密切相关,这也进一步印证了构造环境判别的结论。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

包志伟,赵振华,周玲棣,周国富. 1996. 冀西北水泉沟正长岩杂岩体的成因.岩石学报,12 (4): 562~762.

蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 邵宏翔, 徐荣华. 2002. 辽宁盖县梁屯—矿洞沟碱性正长岩杂岩体的 U-Pb 和 Sm-Nd 年龄及其地质意义. 岩石学报, 18(3): 349~354.

蔡剑辉, 阎国翰,许保良, 王关语, 牟保磊, 赵永超. 2006. 太行山—大兴安岭东麓晚中生代碱性侵入岩岩石地球化学特征及其意义. 地球学报, 27(5): 447~459.

蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 任康绪, 李凤棠, 杨斌. 2011. 天津蓟县孙各庄碱性杂岩体年代学和岩石地球化学特征. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1901~1913.

邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717~734.

胡波, 翟明国, 彭澎, 刘富, 第五春荣, 王浩铮, 张海东. 2013. 华北克拉通古元古代末—新元古代地质事件——来自北京西山地区寒武系和侏罗系碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学的证据. 岩石学报, 029(7): 2508~2536.

贾和义, 宝音乌力吉, 张玉清. 2003. 内蒙古达茂旗乌德缝合带特征及大地构造意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 30(1): 30~34.

柳晓艳, 蔡剑辉, 阎国翰. 2010. 华北克拉通南缘古中元古代碱性岩岩石地球化学特征及其地质意义. 矿床地质, 29(增刊):1109~1110.

柳晓艳, 蔡剑辉, 阎国翰. 2011. 华北克拉通南缘熊耳群眼窑寨组次火山岩岩石地球化学与年代学研究及其意义. 地质学报, 85(7): 1134~1145.

罗镇宽, 苗来成, 关康, 裘有守. 2001. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义. 地球化学, 30(2): 116~122.

刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年:早古生代洋壳消减的证据. 地质学报, 77(3): 317~327.

刘红涛, 孙世华, 刘建明, 翟明国. 2002a. 华北克拉通北缘中生代高锶花岗岩类:地球化学与源区性质. 岩石学报, 18(3): 257~274.

刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002b. 华北克拉通北缘中生代花岗岩:从碰撞后到非造山. 岩石学报, 18(4): 433~448.

吕洪波, 冯雪东, 王俊, 朱晓青, 董晓朋, 张海春, 章雨旭. 2018. 狼山发现蛇绿混杂岩——华北克拉通与中亚造山带碰撞边界的关键证据. 地质论评, 64(4): 777~805.

马旭, 陈斌, 陈家富, 牛晓露. 2012. 华北克拉通北缘晚古生代岩体的成因和意义:岩石学、锆石 U-Pb 年龄、Nd-Sr 同位素及锆石原位 Hf 同位素证据. 中国科学:地球科学, 42(12): 1830~1850.

任康绪. 2003. 碱性岩研究进展述评. 化工矿产地质, 25(3): 151~163.

宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增): 26~30.

汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 2014. 阴山及邻区三叠纪富碱侵入岩的成因意义. 岩石学报, 30(7): 2031~2039.

涂光炽. 1989. 关于富碱侵入岩. 矿产与地质, 13(3): 1~4.

王惠初, 赵凤清, 李惠民, 孙立新, 苗来成, 冀世平. 2007. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄:晚古生代岩浆弧的地质记录. 岩石学报, 23(3): 597~604.

王惠初, 相振群, 赵凤清, 李惠民, 袁桂, 邦初航. 2012. 内蒙古固阳东部碱性侵入岩:年代学、成因与地质意义等. 岩石学报, 28(9):2843~2854.

王涛, 刘燊, 马润则. 2013. 山东胶南燕山期碱性正长岩的地球化学及其成因探讨. 矿物岩石, 33(3): 54~62.

汪相. 2018. 白云鄂博超大型稀土—铌—铁矿床的成矿时代及成因探析——兼论 P—T 之交生物群灭绝事件和"阿蒙兴造山运动". 地质论评, 64(2): 299~345.

许立权, 邓晋福, 陈志勇. 2003. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义. 现代地质, 17(4): 428~434.

阎国翰, 牟保磊, 许保良, 何国琦, 谭林坤, 赵晖, 何中甫, 张任祜, 乔广生. 2000. 燕辽—阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr,Nd,Pb 同位素特征及意义. 中国科学(D 辑), 30(4): 383~387.

阎国翰, 许保良, 牟保磊, 何国琦, 童英等. 2001a. 中国北方中生代富碱侵入岩钕锶、铅同位素特征及其意义. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 234~237.

阎国翰, 谭林坤, 许保良,牟保磊, 邵宏翔, 陈廷礼, 童英, 任康绪, 杨斌. 2001b. 阴山地区印支期碱性侵入岩岩石地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 20(3): 281~292.

曾广策, 邱家骧. 1996. 碱性岩的概念及分类命名综述. 地质科技情报, 15(1): 31~37.

翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23(11): 2665~2682.

翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. 矿床地质, 29(1): 24~36.

张维, 简平. 2008. 内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U-Pb 年代学. 地质学报, 82(6): 778~787.

张招崇, 陈洪新. 1997. 冀北水泉沟偏碱性杂岩体的地质—地球化学特征及其构造环境. 中国区域地质, 16(3):275~289.

张拴宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 2010. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. 岩石矿物学杂志, 29(6): 824~842.

张允平,苏养正,李景春.2010.内蒙古中部地区晚志留世西别河组的

区域构造学意义.地质通报,29 (11):1599~1605.
赵振华, 周玲棣. 1994. 我国某些富碱侵入岩的稀土元素地球化学. 中国科学(B), 24(10): 1109~1120.
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. 大地构造与成矿学, 31(1): 92~113.
赵振华. 2016. 矿物微量元素组成用于火成岩构造背景判别. 大地构造与成矿学, 40(5): 986~995.
周伟伟, 蔡剑辉, 阎国翰. 2013. 山东郗山碱性杂岩体地球化学特征及其意义. 西北地质, 46(4): 93~105.
周伟伟, 蔡剑辉, 阎国翰, 王亚莹, 闫星光, 闫志娇. 2014. 安徽金寨响洪甸碱性侵入岩年代学、岩石地球化学及其意义. 矿床地质, 33(1): 104~122.
周志广, 张达, 谷永昌, 王果胜, 李红英, 於炀森, 柳长峰, 刘文灿. 2018. 内蒙古白乃庙逆冲推覆构造特征及其地质意义. 大地构造与成矿学, 42(1): 1~17.
Bao Zhiwei, Zhao Zhenhua, Zhou Lindi, Zhou Guofu. 1996&. An investigation into the petrogenesis of the Shuiquangou syenite complex, Northwest of Hebei Province. Acta Petrologica Sinica, 12(4): 562~572.
Cai Jianhui, Yan Guohan, Mou Baolei, Xu Baoliang, Shao Hongxiang, Xu Ronghua. 2002&. U-Pb and Sm-Nd isotopic ages of an alkaline syenite complex body in Liangtun—Kuangdonggou, Gai County, Liaoning Province, China and their geological significance. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 349~354.
Cai Jianhui, Yan Guohan, Xu Baoliang, Wang Guanyu, Mou Baolei, Zhao Yongchao. 2006&. The Late Mesozoic alkaline intrusive rocks at the east foot of the Taihang—Da Hinggan Mountains: lithogeochemical characteristics and their implications. Acta Geoscientica Sinica, 27(5): 447~459.
Cai Jianhui, Yan Guohan, Mou Baolei, Ren Kangxu, Li Fengtang, Yang Bin. 2011&. Geochronology and geochemistry of Sungezhuang alkaline complex in Jixian County, Tianjin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41 (6): 1901~1913.
Chung Sun-lin, Chu Mei-fei, Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Lo Ching-hua, Lee Tung-yi, Lan Ching-ying, Li Xianhua, Zhang Qi, Wang Yizhao. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. Earth-Science Reviews, 68(3~4): 173~196.
Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. Contrib. Miner Petrol., 80: 189~200.
Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015&. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: Discussion and suggestion. Geological Review, 61(4): 717~734.
Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implicatons.Geology, 20:641~644.
Hanson J N. 1978. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. Earth and Planetary Science Letters, 38:26~43.
Hu Bo, Zhai Mingguo, Peng Peng, Liu Fu, Diwu Chunrong, Wang Haozheng and Zhang Haidong. 2013&. Late Paleoproterozoic to Neoproterozoic geological events of the North China Craton: Evidences from LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Cambrian and Jurassic sedimentary rocks in Western Hills of Beijing. Acta Petrologica Sinica, 29(7) : 2508~2536.
Ionov D A, Hofmann A W. 1995. Nb & Ta-rich mantle amphiboles and micas: implications for subduction-related metasomatic trace element fractions. Earth and Planetary Science Letters, 131(3,4): 341~356.
Jia Heyi, Baoyin Wuliji, Zhang Yuqing. 2003&. Characteristics and tectonic significance of the Wude suture zone in northern Damaoqi, Inner Mongolia. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 30(1): 30~34.
Liegeois J P. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids; the use of sliding normalization. Lithos, 45:1~26.
Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo, Shi Guanghai, Zhang Nüqiao, Tao Hua. 2003&. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction. Acta Geologica Sinca, 77(3): 317~327.
Liu Hongtao, Sun Shihua, Liu Jianming, Zhai Mingguo. 2002a&. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Craton: geochemistry and source region. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 257~ 274.
Liu Hongtao, Zhai Mingguo, Liu Jianming, Sun Shihua. 2002b&. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: evolution from post-collisional to anorogenic settings. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 433~448.
Liu Xiaoyan, Cai Jianhui, Yan Guohan. 2011&. Lithogeochemistry and geochronology of Xiong´er Group Yanyaozhai subvolcanics in the southern margin of the North China Craton and their geological signifan. Acta Geologica Sinica, 85(7): 1134~1145.
Liu Xiaoyan. 2011&. Chronological, petrological and geochemical characteristics of the Paleo-Mesoproterozoic alkali-rich intrusive rocks along the southern part of the North China Carton. Mineral Deposits, 29(supp.): 1109~1110.
Litvinovsky B A, Steele I M and Wickham S M. 2000. Silicic magma formation in overthickened crust melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar. Journal of Petrology, 41(5): 717~737.
Luo Zhengkuan, Miao Laicheng, Guan Kang, Qiu Youshou. 2001&. SHRIMP chronological study of Shuiquangou intrusive body in Zhangjiakou area, Hebei Province and its geochemical significance. Geochimica, 30(2): 116~122.
Lü Hongbo, Feng Xuedong, Wang Jun, Zhu Xiaoqing, Dong Xiaopeng, Zhang Haichun, Zhang Yuxu. 2018&. Ophiolitic melanges found in Mount Langshan as the crucial evidence of collisional margin between North China Craton and central Asian orogenic belt. Geological Review, 64(4): 777~805.
Ma Xu, Chen Bin, Chen Jiafu, Niu Xiaolu. 2012#. The petrogenesis and significance of Late Paleozoic rocks in the northern foot of North China Craton: the evidence of petrology, Zircon U-Pb ages, Nd-Sr isotope and in-situ zircon Hf isotope. Science China: Earth Science, 42(12): 1830~1850.
Middlemost E A K . 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth-Science Reviews, 37(3~4): 0~224.
Pearce J A. 1996. Source and settings of granitic rocks. Episodes, 19: 120~125.
Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar Implications for continental growth and crust—mantle recycling. Journal of Petrology, 36(4): 891~931.
Ren Kangxu. 2003&. Study progress of the alkaline rocks: A review. Geology of the Chemical Minerals, 25(3): 151~163.
Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002&. Mount

making and procedure of the SHRIMP dating. Geological Review, 48 (supp.): 26~30.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geological Society London Special Publications, 42(1).313~345.

Tang Yangjie, Zhang Hongfu, Ying Jifeng.2014&. Genetic significance of Triassic alkali-rich intrusive rocks in the Yinshan and neighboring area. Acta Petrologica Sinica, 30(7): 2031~2040.

Tu Guangchi. 1989&. On alkali- rich intrusive rocks. Mineral Resources and Geology, 13(3): 1~4.

Wang Huichu, Zhao Fengqing, Li Huimin, Sun Lixin, Miao Laicheng, Ji Shiping. 2007&. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from northern Hebei: the geological records of Late Paleozoic magmatic arc. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 597~604.

Wang Huichu, Xiang Zhenqun, Zhao Fengqing, Li Huimin, Yuan Gui, Bang Chuhang. 2012&. The alkaline plutons in eastern part of Guyang County, Inner Mongolia: Geochronology, petrogenesis and tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 28(9): 2843~2854.

Wang Tao, Liu Shen, Ma Runze. 2013&. Elemental geochemistry and petrogenesis of the Yan Shannian alkaline syenites in Jiaonan, Shandong Province. Mineral. Petrol., 33(3): 54~62.

Wang Xiang. 2018&. Analysis on the oreforming time and genesis of the Bayan Obo REE—Nb—Fe deposit: With a discussion on the mass extinction at the P—T boundary and "AMH Orogeny". Geological Review,64(2): 299~345.

Wilson M. 1989. Igoeous Petrogenesis: a Gobal Tectonic Approach. London: Unwin Hyman.

Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt. Journal of the Geological Society, 164:31~47.

Windley B F, Dmitriy A, Xiao Wenjiao, Kroner A, Gombosuren B. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt. Journal of the Geological Society, 164: 31-47.

Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. Geolocial Magazine, 106(4): 15.

Xu Liquan, Deng Jinfu, Chen Zhiyong. 2003&. The identification of Ordovician adakites and its signification in northern Damao, Inner Mongolia. Geoscience, 17(4): 428~434.

Yan Guohan, Mou Baolei, Xu Baoliang, He Guoqi, Tan Linkun, Zhao Hui, He Zhongfu, Zhang Renhu, Qiao Guangsheng. 2000 #. Chronology and characteristics of Sr, Nd, Pb isotopes of Triassic alkaline intrusions in Yanliao—Yinshan. Science in China (Series D), 30(4): 383~387.

Yan Guohan, Tan Linkun, Xu Baoliang, Mou Baolei, Shao Hongxiang, Chen Tingli, Tong Ying, Ren Kangxu, Yang Bin. 2001&. Petrogeochemical characteristics of Indosinian alkaline intrusion in Yinshan area. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(3): 281~292.

Yan Guohan, Xu Baoliang, Mou Baolei,He Guoqi, Tong Ying. 2001&. Characteristics and implications of Nd, Sr, Pb in Mesozoic alkaline-rich intrusions in North China. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(4): 234~237.

Zeng Guangce, Qiu Jiaxiang. 1996&. Study progress of Concepts taxonomy and onomatology of alkaline rocks. Geological Science and Technology Information, 15(1): 31~37.

Zhang Qiqi, Zhang Shuanghong, Zhao Yue. 2018. Devonian alkaline magmatic belt along the northern margin of the North China Block: petrogenesis and tectonic implications. Lithos, 302 ~ 303: S002449371830029X.

Zhang S H, Zhao Y, Liu X C, et al. 2009. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic—ultramafic complexes from the northern North China Block:Constraints on the composition and evolution of the lithospheic mantle. Lithos. 110: 229~246.

Zhang Wei, Jian Ping. 2008&. SHRIMP U-Pb dating of early Paleozoic granites from North Damaoqi,Inner Monglia. Acta Geologica Sinca, 82(6): 778~787.

Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Jiang Neng, Zhai Mingguo and Zhang Yanbin. 2010. Early Devonian alkaline intrusive complex from the northern North China craton: a petrological monitor of post-collisional tectonics. Journal of the Geological Society, 167: 717~730.

Zhang Yunping, Su Yangzheng, Li Jingchun.2010&. Regional tectonics significance of the Late Silurian Xibiehe Formation in central Inner Mongolia, China. Geological Bulletin of China, 29(11): 1599~1605.

Zhang Zhaochong, Chen Hongxin. 1997 #. Geology geochemistry and tectonic settings of Shuiquangou Alkaline rocks in the northern part of Heibei Province. Regional Geology of China, 16(3): 275~289.

Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, Hu Jianmin, Song Biao. 2010&. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic—Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 824~842.

Zhao Zhenhua, Zhou Lingdi. 1994#. Rare earth element geochemistry of some alkaline-rich intrusions in China. Science in China, Series B: Chemistry, 24(10): 1109~1120.

Zhao Zhenhua. 2007&. Use the trace element diagram to discriminate tectonic settings. Geotectonica et Metallogenia, 31 (1):92~103.

Zhao Zhenhua.2016&. Discrimination of Tectonic settings based on trace elements in igneous minerals. Geotectonica et Metallogenia, 40(5): 986~995.

Zhou Weiwei, Cai Jianhui, Yan Guohan. 2013&. The Geochemical characteristics and geological significance of alkaline complex in Chishan of Shandong Province. Northwestern Geology, 46(4): 93~105.

Zhou Weiwei,Cai Jianhui, Yan Guohan, Wang Yaying, Yan Xingguang, Yan Zhijiao. 2014&. Geochronology and petrogeochemistry of Xianghongdian alkaline intrusion in Jinzhai County of Anhui Province and its significance. Mineral Deposits, 33(1): 104~122.

Zhou Zhiguang, Zhang Da, Gu Yongchang, Wang Guosheng, Li Hongying, Yu Yangsen, Liu Changfeng, Liu Wencan. 2018&. Characteristics of Bainaimiao thrust belt along central Inner Mongolia in North China and its geological significance. Geotectonica et Metallogenia, 42(1): 1~17.

Petrogeochemical characteristics and zircon SHRIMP U-Pb ages of the alkaline intrusions on northern side of the Yinshan Mountains—Yanshan Mountains and their tectonic significances

GONG Mi[1,2)], CAI Jianhui[1)], YAN Guohan[3)], LIU Chuxiong[3)], LIU Zhao[1)]

1) *Key Laboratory of Mineralization and Resource Evaluation, Ministry of Natural Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

2) *China University of Geosciences, Beijing, Beijing*, 100083;

3) *Key Laboratory of Orogenic belt and Crustal evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing*, 100871

Objectives: For the important geological significance of alkali-rich intrusions, we studied the intrusions in north side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains on the petrogeochemistry and goechronology. Futhermore, we discussed petrogenesis and the magmatism evolution of these alkali-rich intrusions briefly.

Methods: Our study is based on sample collection and field work, observe through a microscope and the data analysis of major elements, trace elements, and SHRIMP zircon U-Pb dating to get the high-precision ages of alkali-rich intrusions on the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains.

Results: The experimental data show that the SiO_2 content of these whole intrusions account for 59.08%~66.52%, Al_2O_3=15.34%~21.67%, A/CNK<1, signifying that these alkali-rich intrusions belong to intermediate rock with quasi-aluminous. Geochemical characteristics of trace elements shows that the rocks enriches lithophile elements (LILE), such as Rb, Ba and Sr; on the contrast, it's relatively poor in high field strength elements (HFSE), such as Ti, P, Nb and Ta. The rare earth elements geochemistry shows distact fractionation of LREE and HREE, reveals a deficit of heavy rare earth elements and enriched the light one; with strong negative Eu anomaly (δEu= 0.35~0.91). SHRIMP zircon U-Pb ages of Gucheng pyroxene syenite (G1-2), hornblende syenite (G5-1), hornblende syenite (G6-1) are 414.6±5.0 Ma, 415.0±5.9 Ma and 413.2±3.3 Ma respectively; SHRIMP zircon U-Pb ages of Badaogou masanophyre and ivernite are 372.3±4.7 Ma and 366.8±5.2 Ma respectively.

Conclusions: These alkali-rich intrusions we studied are all distributed in the northern margin of the North China Craton, according to the same characteristics of geochronology and geochemistry, there is an alkali-rich intrusions belt distributed in the East—West direction in the northern foot of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains. From west to east, it is composed of five intrusions.

The geochemical characteristics analyses indicates the magmas came from the mantle depth, relating to enriched mantle. And the magmas may be contaminated by crustal materials in the process of its ascending emplacement. It is speculated that the corresponding diagenetic temperature and the pressure depths of Huangheshao, Gucheng and Badaogou intrusions are roughly from the bottom to the middle of the thickend continental crust, and the formation depths of the Gaojiacun and Shuiquangou intrusions are deeper.

The petrogeochemical discrimination based on the tectonic environment indicates that the Paleozoic alkali-rich intrusions belt in north side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains was mainly formed in the extensional tectonic environment and was the product of collision—postorogenic magmatism. Combined with previous studies on the Late Paleozoic tectonic and magmatism in the study area, it is concluded that the tectonic environment formed by the Paleozoic alkali-rich intrusions in Yinshan Mountains and the northern foot of Yanshan Mountains may be closely related to the extensional tectonic background after the arc—continent collision between the northern margin of the North China Craton and the Bainaimiao island arc on its northern side in the Late Paleozoic from Late Silurian to Early Devonian, it proves conclusion of tectonic environment discrimination further.

Keywords: alkali-rich intrusions; the northern side of Yinshan Mountains and Yanshan Mountains; Paleozoic; geochemistry; SHRIMP zircon U-Pb dating

Acknowledgements: The test of major elements and trace elements is supported by Beijing Research Institute of Uranium Geology; The test of SHRIMP zircon U-Pb dating is supported by Beijing Ion Probe Center

First author: GONG Mi, male, postgraduate, majored in mineralogy, petrology and mineral deposit, Email: gongmimail@163.com

Corresponding author: CAI Jianhui, female, professor, mainly working on alkaline intrusions, Email: caijh_cags@163.com

Manuscript received on: 2018-12-25; Accepted on: 2019-06-25; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.008

从三稀资源调查扩大到关键矿产调查是战略性新兴产业发展的必然需要

——推荐阅读《地质学报》"关键矿产"专辑

陈毓川, 王瑞江

中国地质科学院,北京, 100037

中国共产党第十八次全国代表大会召开以来,战略性新兴产业的发展被进一步上升到国家战略的高度,而保障战略性新兴产业发展所需的稀土等关键矿产的重要性也越来越被社会各界认识到。但是,随着改革开放以来社会的快速发展,我国对于矿产资源的消耗也是惊人的,无论是石油、铁、铜等大宗矿产,还是锡、锑、锂等年需要量不超过20万吨的"小金属"都已在进口,对外依存度不断攀升,甚至连国人自以为豪、国外害怕被"卡脖子"的稀土,也由20世纪末占世界资源储量的85%,降低到2009年只占世界的36%。现今占比则更低,因为中国在大规模开采的同时,国外不但关闭本国稀土矿山,而且在收储中国稀土。因此,以稀土为代表的中国传统优势矿产正在失去优势。另一方面,战略性新兴产业的发展越来越快,以锂为代表的新材料、新能源金属正在由"无名小辈"走向前台,成为2015~2018年间全球固体矿产勘探最热的矿种,且势头日趋旺盛。我国人口众多,底子薄,基础设施落后,而消费水平的期望值正在向世界先进国家看齐,因此,对于锡、锑、萤石等矿产资源的需求无疑是刚性的。另外,我国在新能源、新能源汽车等七大新兴产业领域的发展很快,对稀土、锂、锗等关键金属的需求也会上升到新的层次,为此,从三稀金属(稀有金属、稀土金属和稀散金属)资源调查扩大到关键矿产调查是战略性新兴产业发展的必然需要。

为适应我国战略性新兴产业发展需要,中国地质调查局于2011年地质调查计划中全面启动"我国三稀金属资源战略调查"工作, 2012年列为计划项目,2015年列入"大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查"工程,2019~2021年单独设立"战略性新兴产业矿产调查"工程。此外,国家重点研发计划专门设立了"锂能源金属矿产基地深部探测技术示范"等项目。《地质学报》2019年第6期发表的全部27篇文章即是这9年中上述项目部分成果的集中体现。其中,涉及关键矿产概况的有对关键矿产矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向的系统论述和对铷、锗、铪、钪等单矿种的成矿规律和资源潜力问题探讨(王登红,2019;孙艳等,2019;赵汀等,2019;黄凡等,2019);涉及调查研究技术方法的有遥感找矿(代晶晶等,2019)、生物找矿(于扬等,2019)以及针对稀有金属矿床的同位素定年、针对三稀矿产的仪器测试及锂含量的原位分析测试技术问题(屈文俊等,2019;王倩等,2019;谭细娟等,2019);涉及新发现新认识的有:在四川甲基卡发现花岗岩型的工业锂矿(刘善宝等,2019),在江西九岭发现岩体型以磷锂铝石为特点的锂矿(王成辉等,2019);在湖北赤壁锑矿中发现高含量的锂赋存在绿泥石中,而云南腾冲热泉中的锂明显存在深部来源(郭唯明等,2019a,b);在云南著名的临沧岩体也发现离子吸附型稀土矿(陆蕾等,2019);在基础性研究方面,通过环境调查查明了川西甲基卡矿田地表水中稀有金属元素分布特征及意义(高娟琴等,2019),将环境调查与地质找矿结合了起来;通过对陕西镇安核桃坪钨铍矿床成矿时代的测定(代鸿章等,2019),指出了南秦岭钨铍的找矿方向;通过对甲基卡综合调查成果的综述,提出了对甲基卡这一唯一的硬岩型锂矿的国家规划区的开发利用建议(王登红等,2019);综述了国内外离子吸附型稀土找矿及研究的新进展(赵芝等,2019),总结了2017~2018年间国外锂矿找矿的最新进展并对我国关键矿产的勘查提出了建议(刘丽君等,2019);根据国内外主要油(气)田水中锂的地球化学特征,对我国利用此类资源提出了建议(高娟琴等,2019);以湖南衡阳盆地为例,探讨了关键矿产成矿与地幔柱的关系及其对深部找矿的意义(秦锦华等,2019)。

《地质学报》"关键矿产"专辑,在关于我国关键矿产矿种选择原则、矿种名录建议、成矿理论研究、找矿成果、找矿方向、资源潜力、调查评价方法技术、环境影响评价、未来勘查开发规划部署建议等方面论述的全面性和系统性尚属首次,其刊出,将对提升社会公众关于关键矿产对全球资源控制力和话语权重要性的认知程度,增强对全球资源领域重大事件的敏感性和快速反应能力,推进我国关键矿产全产业链