

doi: 10.12029/gc20170111

刘哲, 薛怀民, 曹光跃. 2017. 内蒙古正蓝旗地区中生代火山岩锆石 U-Pb 年龄与板内伸展环境成因讨论[J]. 中国地质, 44(1): 151-176.

Liu Zhe, Xue Huaimin, Cao Guangyue. 2017. Zircon U-Pb geochronology, intraplate extensional environment and genesis of Mesozoic volcanic rocks in Zhenglan Banner area, Inner Mongolia, China[J]. Geology in China, 44(1): 151-176(in Chinese with English abstract).

内蒙古正蓝旗地区中生代火山岩锆石 U-Pb 年龄与板内伸展环境成因讨论

刘哲 薛怀民 曹光跃

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 内蒙古东南部正蓝旗地区中生代火山岩广泛出露, 岩性主要包括流纹岩、粗面岩、碎斑熔岩、熔结凝灰岩以及黑曜岩等, 以碎斑熔岩发育为显著特征。本次研究测得流纹岩、霏细质碎斑熔岩及熔结凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 (141.4 ± 0.7) Ma、 (141.6 ± 0.6) Ma 和 (139.4 ± 0.7) Ma, 三者误差范围内一致, 表明研究区火山活动(从溢流、爆发到侵入)持续的时间很短, 时代为早白垩世早期, 属张家口组。除个别样品, 正蓝旗地区晚期侵入的碎斑熔岩与早期溢流相的流纹岩、粗面岩在地球化学特征上极为一致, 均为富硅富钾, 贫 Ca、Mg 和 Al, 属粗面岩-流纹岩组合, 部分样品具有碱性流纹岩的特征; 富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素, 而强烈亏损 Ba、Sr、Ti、P; 轻稀土元素(LREE)富集, Eu 强烈亏损, 轻、重稀土元素分馏较强(La_N/Yb_N 主要介于 6.87~42.74)。碎斑熔岩体相较于早期熔岩更加富硅贫碱, 表明流纹岩-粗面岩喷溢之后, 岩浆房中剩余岩浆又经过一定程度的分异, 向更为富硅贫碱方向演化之后侵入地表。正蓝旗地区火山岩具有 A 型花岗岩的特征, 为 A_1 型为主, A_1 - A_2 过渡的地球化学特征。碎斑熔岩体与流纹岩-粗面岩的 Nb/Ta 介于 10.46~24.02, 在地壳和地幔岩浆 Nb/Ta 比值之间; Y/Nb、Ti/Yb、Ti/Zr 均体现出壳幔混合的特点; Rb/Sr 介于 0.61~64.51, 为壳源特征。因此, 研究区火山岩是造山后向板内非造山转换并以板内非造山为主的伸展环境下, 经较为强烈地幔物质改造的下地壳部分熔融的产物。

关键词: 早白垩世; 正蓝旗地区; 火山岩; 碎斑熔岩; 熔结凝灰岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄

中图分类号: P588.14; P597.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2017)01-0151-26

Zircon U-Pb geochronology, intraplate extensional environment and genesis of Mesozoic volcanic rocks in Zhenglan Banner area, Inner Mongolia, China

LIU Zhe, XUE Huaimin, CAO Guangyue

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Mesozoic volcanic rocks are widely exposed in Zhenglan Banner of southeast Inner Mongolia. The volcanic rocks mainly consist of rhyolite, trachyte, porphyroclastic lava, ignimbrite, and obsidian, in which the porphyroclastic lava is the most developed.

收稿日期: 2016-06-07; 改回日期: 2016-12-29

基金项目: 中国地质调查局项目“中国东部(中、北段)重要成矿带火山岩时空演化及其成矿意义”(121201102000150021)资助。

作者简介: 刘哲, 男, 1991 年生, 硕士生, 岩石学专业; E-mail: zheliu1991@163.com。

通讯作者: 薛怀民, 男, 1962 年生, 研究员, 主要从事岩石学与地球化学研究; E-mail: huaiminx@sina.com。

According to the results of the zircon LA-ICP-MS dating, the U-Pb zircon age of rhyolites is (141.4 ± 0.7) Ma, that of felsitic mortar lava is (141.6 ± 0.6) Ma and that of ignimbrite is (139.4 ± 0.7) Ma. Within the error range, the formation ages of the three kinds of rocks are the same, which indicates that the time of the volcanic activity (from effusion to explosion and extrusion) lasted a short time. So they should be assigned to early Cretaceous Zhangjiakou Formation. Except for very few samples, the porphyroclastic lava that extruded in the late phase and the rhyolite-trachyte belonging to the early phase effusion facies are extremely consistent in the geochemical characteristics. They are rich in silicon and potassium, and poor in Ca, Mg and Al. So they could be classified as trachyte-rhyolite combination, and some samples have the features of pantellerite. They are enriched in Rb, Th, U and other large-ion lithophile elements, and strongly depleted in Ba, Sr, Ti, P. The chondrite-normalized REE patterns show enrichment of light rare earth elements (LREE), strong negative Eu anomalies, and significant fractionation of LREE and HREE for the volcanic rocks ($La_N/Yb_N=6.87-42.74$, except for LQ-38). Compared with the early phase effusion facies lava, porphyroclastic lava has higher silicon and lower alkali, which shows that the magma chamber experienced obvious crystallization differentiation after effusion of the rhyolite and trachyte in the magma event. Then the magma with higher silicon and lower alkali extruded out of the earth's surface. The volcanic rocks of Zhenglan Banner area have the characteristics of A-type granites and possess the geochemical characteristics of A_1 type and A_1-A_2 transition granite. The Nb/Ta ratio of the extrusive porphyroclastic lava and effusive rhyolites is 10.46-24.02, which is between the values of the crust and the mantle magma; Y/Nb, Ti/Yb, Ti/Zr also reflect the characteristics of crust-mantle mixing; Rb/Sr ratio is between 0.61-64.51 (>0.5), reflecting the characteristics of crust source. These data suggest that the volcanic rocks might have been produced in an extension environment of the transportation period of anorogenic and post-orogenic activities, mainly being intraplate anorogenic activity. In addition, the volcanic rocks were probably derived from partial melting of the Precambrian lower crust which was strongly transformed by Mesozoic underplating and metamorphism.

Key words: Early Cretaceous; Zhenglan Banner area; volcanic rock; porphyroclastic rhyolite lava; geochemistry; zircon U-Pb chronology

About the first author: LIU Zhe, male, born in 1991, master candidate, major in petrology; E-mail: zheliu1991@163.com.

About the corresponding author: XUE Huaimin, male, born in 1962, senior researcher, mainly engages in the study of petrology and geochemistry; E-mail: huaiminx@sina.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program "Spatial and Temporal Evolution and Ore-forming Significance of Volcanic Rock of the Important Metallogenic Belts in Eastern China" (No. 121201102000150021).

1 引 言

华北克拉通北缘冀北—辽西地区中生代火山岩,作为中国东部岩浆带的重要组成部分,不仅涉及到古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋、古太平洋构造域的转化(许文良等, 2013),而且与晚中生代华北克拉通的破坏紧密相关(Yang et al., 2008)。该时期也是中国东部中生代构造格局由挤压向伸展转变的重要时期(Wilde et al., 2015b),吸引了众多学者的注意,并且取得了大量的年代学(李创举等, 2012; 柳永清等, 2003; Zhang et al., 2008a, 2008b; Niu et al., 2004)、地球化学(巫建华等, 2005; 彭艳东等, 2010; 汪洋等, 2010; 张学斌等, 2015)、形成源区及构造背景(邵济安等, 2003; 周新华等, 2001; 顾玉超等, 2016; Zhang et al., 2014; Yang et al., 2008)的研究成

果。其中标志着白垩纪开始的张家口组火山岩在冀北—辽西火山岩带中十分重要,已有的研究主要集中在在冀北的承德—滦平—张家口一带和辽西的凌源地区,笔者对张家口组火山岩同位素年龄进行了搜集(表1),而处于中亚造山带与华北克拉通结合区域、构造环境上更具争议的内蒙正蓝旗—正镶白旗一带的研究较为匮乏。虽然高同德(1987)对内蒙正镶白旗—正蓝旗一带碎斑熔岩进行了报道,但在正蓝旗地区后续工作中,仍然多将其作为侵入体处理(林琛, 2009; 胥迎红, 2009; 杨秀俊, 2009; Zhang et al., 2014),而碎斑熔岩作为火山活动旋回晚期侵入相岩穹,具有指示火山构造中心的重要意义(陶奎元等, 1985; 尹家衡等, 1985)。对于正蓝旗地区火山岩的形成时代,目前仅高同德(1987)、赖绍聪(1992)对其中碎斑熔岩进行了Rb-Sr法测

表1 冀北辽西张家口组火山岩同位素年龄
Table 1 Isotopic ages of Zhangjiakou Formation in north Hebei and west Liaoning

位置	岩性	年龄/Ma	测年方法	参考文献
张家口	英安岩	143±3.7	LA-ICP-MS U-Pb	Zhang et al., 2008b
张家口	英安岩	136.1±1.4	LA-ICP-MS U-Pb	Zhang et al., 2008b
张家口	英安岩	139.6±2.6	LA-ICP-MS U-Pb	Zhang et al., 2008b
张家口	英安岩	138.9±2.7	LA-ICP-MS U-Pb	Zhang et al., 2008b
张家口	粗面岩	127.8±3.9	SHRIMP U-Pb	李创举等, 2012
张家口	流纹岩	126±1	LA-ICP-MS U-Pb	杨进辉等, 2006
崇礼	流纹岩	139±9	全岩 Rb-Sr	邵济安等, 2003
赤城	英安岩、流纹岩	138±13	全岩 Rb-Sr	邵济安等, 2003
滦平	流纹岩	135.2±12.3	LA-ICP-MS U-Pb	张宏等, 2005b
滦平	凝灰岩	135.7±1.8	LA-ICP-MS U-Pb	张宏等, 2005b
滦平	流纹岩	133.9±1.3	SHRIMP U-Pb	Niu et al., 2004
滦平	流纹岩	135±2	SHRIMP U-Pb	柳永清等, 2003
滦平	流纹岩	135±1	Ar-Ar	季强等, 2004
滦平	粗安岩	151	Ar-Ar	罗修泉等, 1997
滦平	流纹岩	135.3±9.5	全岩 Rb-Sr	胡光华等, 1982
承德	流纹岩	128.8±1.3	SHRIMP U-Pb	Niu et al., 2004
承德	流纹岩	125.9±2.8	SHRIMP U-Pb	Niu et al., 2004
承德	流纹岩	125.8±3.1	SHRIMP U-Pb	牛宝贵等, 2002
凌源	(酸性)凝灰岩	129.6±0.9	LA-ICP-MS U-Pb	张宏等, 2005b
凌源	(酸性)凝灰岩	129.4±0.8	LA-ICP-MS U-Pb	张宏等, 2005b
凌源	英安岩	129.1±1.7	LA-ICP-MS U-Pb	张宏等, 2005b
凌源	流纹岩	131.7±1.7	LA-ICP-MS U-Pb	张宏等, 2005b
凌源	英安岩	132.4±1.4	LA-ICP-MS U-Pb	张宏等, 2005a
凌源	角砾熔岩	130.2±1.5	LA-ICP-MS U-Pb	张宏等, 2005a
沽源	流纹岩	136.2±2.9	SHRIMP U-Pb	巫建华等, 2005
沽源	流纹斑岩	140.2±1.6	SHRIMP U-Pb	巫建华等, 2005
沽源	石英斑岩	138.6±1.4	SHRIMP U-Pb	巫建华等, 2005
正蓝旗-正镶白旗	碎斑熔岩	119.3±3.0	全岩 Rb-Sr	赖绍聪等, 1992b
正蓝旗-正镶白旗	碎斑熔岩	142.2±3.7	全岩 Rb-Sr	高同德等, 1987

年, 结果分别为(142.2±3.7) Ma 和(119.3±3.0) Ma(表1), 两者相差约 20 Ma, 可信度较低。本文以正蓝旗地区碎斑熔岩为中心, 对碎斑熔岩体及其周围的火山岩进行了较系统的岩石学、地球化学和年代学研究, 在初步恢复古火山机构的基础上, 探讨了岩浆成因、演化及其形成的构造背景。

2 地质背景

研究区所处的大地构造位置, 目前还有不同认

识。多数学者以赤峰—白云鄂博断裂为界, 将本区归为兴蒙造山带南部白乃庙岛弧岩带(图 1a)(李英康等, 2014; 赵越等, 2010; Wilde et al., 2015a, 2015b, 2015c; Zhang et al., 2014; Wu et al., 2005; Xiao et al., 2003; Zhou and Wilde, 2013)。少数学者以西拉木伦断裂为界, 将其归为华北克拉通北缘(图 1a)(赖绍聪等, 1990, 1992a, 1992b, 1997a, 1997b; 高同德等, 1987)。周新华(2001)在火山岩同位素填图中, 根据地幔端元变化将本地区分为西拉木伦河断

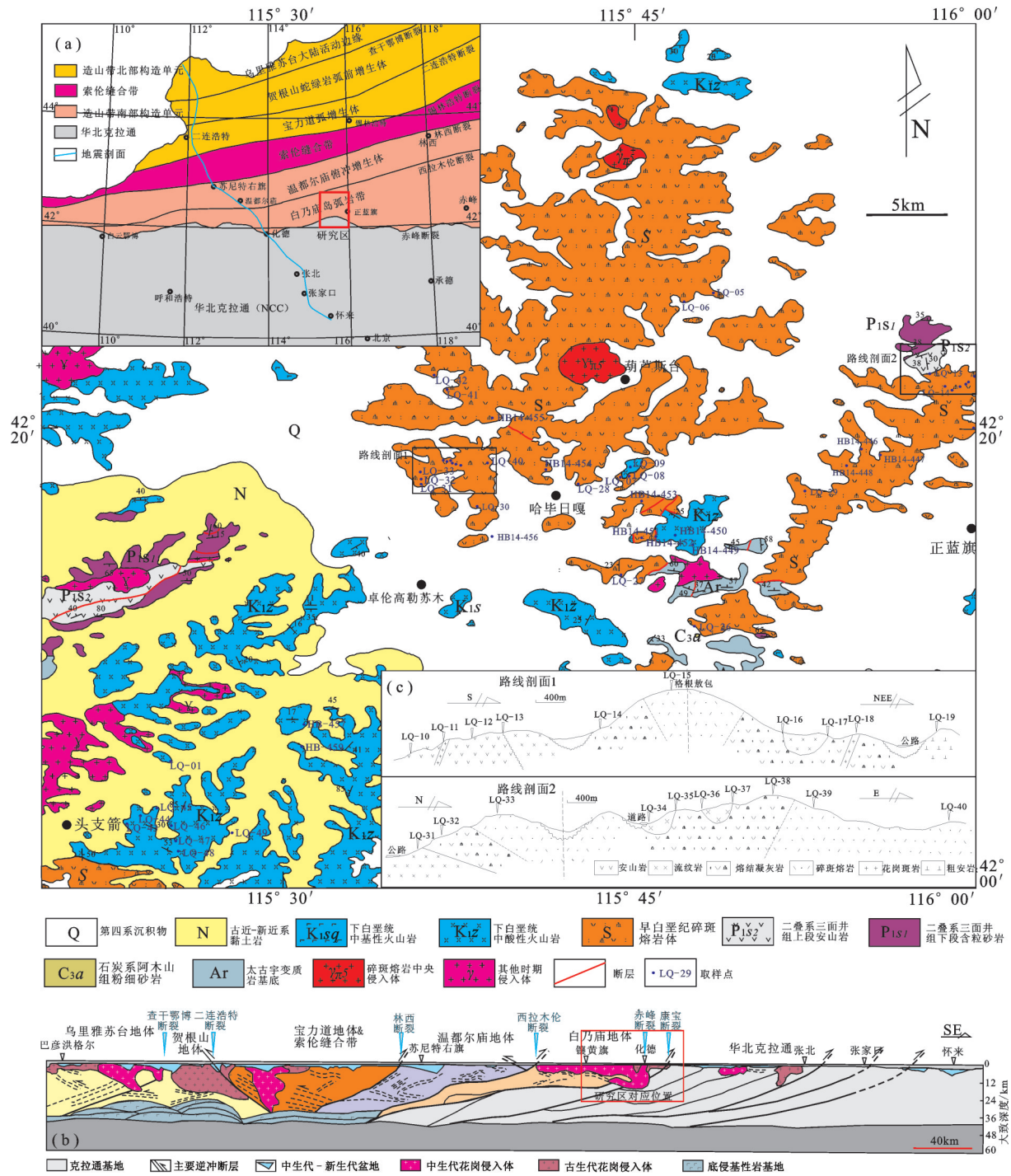


图1 正蓝旗工作地区地质简图及取样位置

a—华北北缘大地构造图(Zhang et al., 2014); b—华北北缘地震深反射地壳结构(Zhang et al., 2014); c—正蓝旗地区火山岩路线剖面图

Fig. 1 Simplified geological map of the study area in Zhenglan Banner and sampling locations of volcanic rocks

a—Tectonic subdivision of the north of North China (after Zhang et al., 2014); b—Major crustal structures revealed from the deep seismic reflection profile of the north of North China (after Zhang et al., 2014); c—Cross section of the volcanic rocks of Zhenglan Banner area

裂以北的北区, 西拉木伦河断裂到赤峰—开原断裂之间的过渡区, 以及赤峰—开原断裂以南的南区,

这也与 Zhang et al. (2014)的深地震反射图像有一定程度的吻合(图 1b), 反映研究区的基底以华北克拉

通为主,具有华北克拉通与白乃庙岛弧岩带共同影响的特征。

正蓝旗地区既是华北克拉通与兴蒙造山带构造转换区域,也是大兴安岭火山岩带与冀北—辽西火山岩带转换的区域。区内火山岩的基底地层主要以太古宙乌拉山岩群(Ar_{1w})斜长角闪岩、黑云斜长变粒岩,元古宙二道凹群(Pter)透辉斜长变粒岩、斜长角闪岩,二叠系三面井组(P_{2s})中粗粒砂岩、硬砂岩、泥页岩与额里图组(P_{2e})安山玢岩、安山岩组成。亦可见少量石炭系阿木山组(C_{2a})粉细砂岩、石英细粒岩。早期侵入岩主要包括二叠纪二长花岗岩、正长花岗岩,侏罗纪花岗岩、石英正长岩。区内褶皱构造主要发育于较老变质岩地层中。断裂构造以北东与北西向最为发育。其中北西向断裂以含矿构造为主,规模较小;北东向断裂以基底大断裂为主,也是张家口组火山岩喷发与分布的主要控制断裂。

正蓝旗地区中生代火山盆地岩性主要以碎斑熔岩与流纹岩为主。盆地中心以侵出相碎斑熔岩体为主,主要包括西部以破火山口为中心形成的火山沉陷式岩穹以及东部沿北东向裂隙侵出的裂隙式穹状岩脊,约占盆地的1/3。碎斑熔岩中可见后期侵入相花岗岩,两者形成盆地主要正地形。溢流相流纹岩、粗面岩及少量安山岩主要分布于碎斑熔岩为中心的盆地边部(图1)。另外,盆地中可见少量爆发相火山角砾岩。两条野外路线剖面图(图1c)显示碎斑熔岩体呈侵出相超覆于早期溢流相流纹岩、粗面岩之上。碎斑熔岩岩穹、岩脊从边缘相到中间相均表现出熔结凝灰岩、霏细碎斑熔岩、粒状碎斑熔岩渐变过渡的特点,且没有明显的界限。碎斑熔岩体上可见部分流纹岩、粗面岩残留团块,以流纹岩、粗面岩为中心也呈现出熔结凝灰岩、霏细碎斑熔岩、粒状碎斑熔岩的过渡特征。

对于侵出相碎斑熔岩体的相划分,前人已经做了较为详细的研究(赖绍聪等,1990,1992a,1992b,1997a,1997b;高同德等,1987;陶奎元等,1985;尹家衡等,1985;谢家莹等,1986,1989,1993;王德滋等,1982,1993;王美星等,1985),包括边缘相熔结凝灰岩(玻质碎斑熔岩)、过渡相霏细碎斑熔岩及中心相粒状碎斑熔岩,概括为“三相一体”。其中最具争议的是熔结凝灰岩的成因,主要包括火山灰流成因以及熔离成因,本文支持陶奎元(1985)及谢家莹

(1986)的观点,认为熔结凝灰岩为熔离成因,应当将其划入碎斑熔岩体。首先,从熔结凝灰岩到粒状碎斑熔岩之间并不存在明显的界限,渐变过渡特征明显。若将碎斑熔岩归为侵出相,而熔结凝灰岩为爆发相,很难解释;其次,熔结凝灰岩中部分晶屑存在碎斑晶的特征,即碎而不散、散而不离、离而不远。这亦不是爆发相火山灰流成因可以解释,而熔离成因则可以较好的解释。同时,对于脱玻化的熔结条带并不仅仅存在于熔结凝灰岩,在霏细碎斑熔岩甚至粒状碎斑熔岩之中均可见。说明三者应当是在相似条件下形成。

3 岩石学特征及取样位置

区域上张家口组(K_{2z})主要由流纹岩、石英斑岩、粗面斑岩熔结凝灰岩、碎斑熔岩和含角砾凝灰岩组成,局部可见粗安玢岩,并且以正蓝旗最为发育。本文主要对正蓝旗地区碎斑熔岩体进行了较为系统的采样,并且对碎斑熔岩边部和顶部的张家口组流纹岩、粗面岩进行了取样,具体取样位置见图1,涉及岩性主要包括熔结凝灰岩、霏细质碎斑熔岩、粒状碎斑熔岩、流纹岩以及粗面岩。

流纹岩:多呈灰白色,暗紫色,斑状结构,流纹构造(图2,HB14-450),部分流纹岩沿流线脱玻化,形成石英微细晶的梳状构造。斑晶含量极不均匀,在5%~30%,斑晶含量较多时,以石英、钾长石为主,可见少量斜长石;而斑晶较少时以石英为主,可见极少量钾长石,部分石英斑晶边界模糊化,流纹条带多已脱玻化,主要为他形石英集合条带,基质以隐晶质、霏细结构为主,流动构造极为发育。

粗面岩:呈灰白色、青灰色,斑状结构,块状构造。斑晶以碱性长石为主,含量约为20%,斑晶大小为1.5~4 mm,其中可见钾长石、条纹长石,以及钾长石边部可见出溶形成的条纹长石。基质以霏细结构为主,可见隐晶质结构。

粒状碎斑熔岩:为碎斑熔岩体中心相,风化面呈黄褐色,新鲜面呈灰白色。斑晶主要以钾长石、石英为主,粒径在1~5 mm,个别斑晶接近1 cm,含量约为40%。钾长石碎斑晶周边珠边结构十分发育(图2,LQ-06),为鉴别碎斑熔岩重要标志。基质以他形粒状石英为主,粒径在0.1~0.5 mm,含量约为60%。基质为粒状结构,岩石为碎斑结构,块状

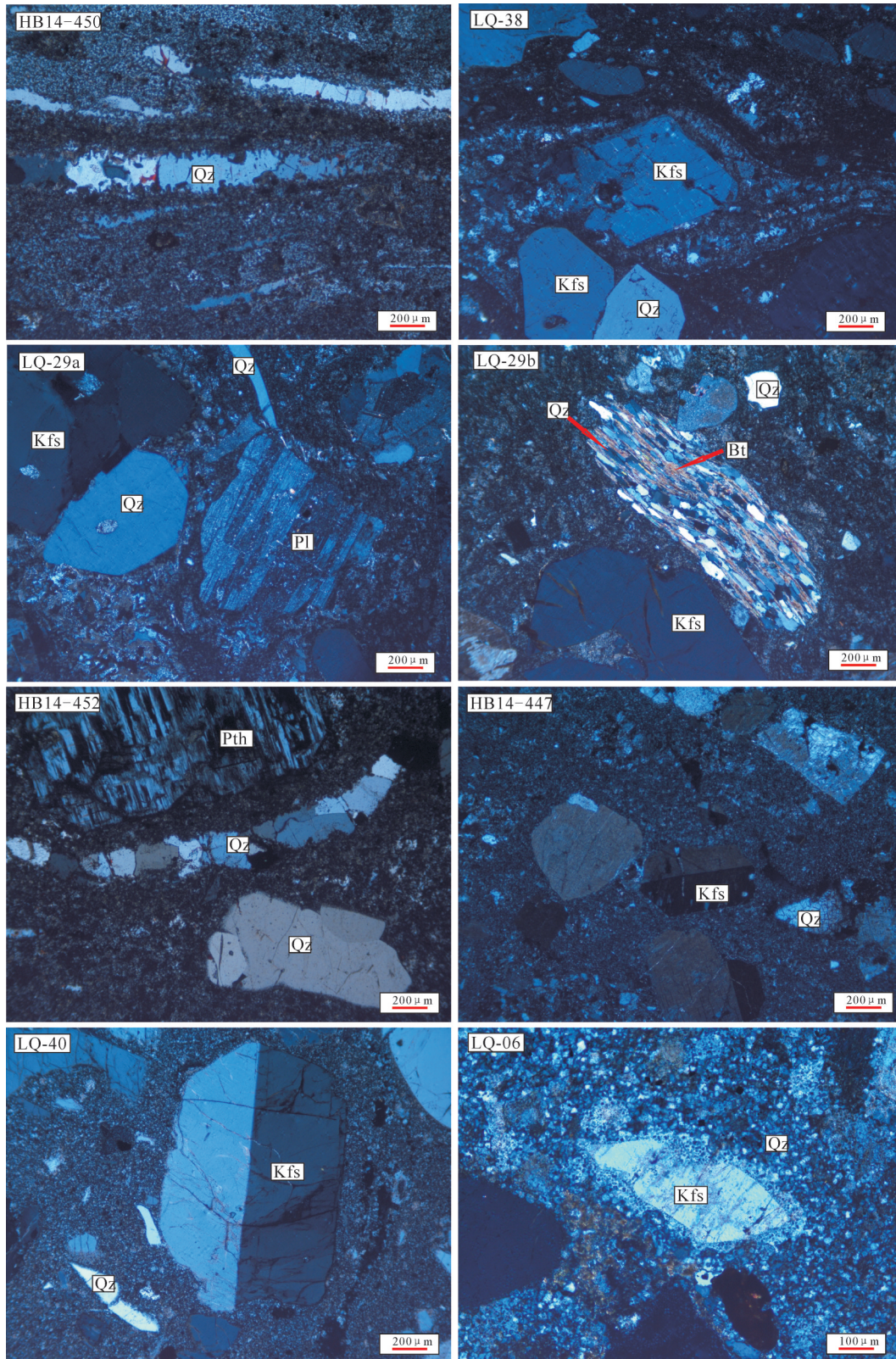


图2 正蓝旗地区侵入相碎斑熔岩与溢流相流纹岩偏光显微镜下照片

Qz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Pth—条纹长石

Fig.2 Microscope photos (crossed photos) for extrusive porphyroclastic lava and effusive rhyolites of Zhenglan Banner area

Qz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Bt—Biotite; Pth—Perthite

构造。

霏细质碎斑熔岩: 为碎斑熔岩体过渡相, 呈灰白色、暗灰色。斑晶主要以石英、钾长石为主, 可见少量斜长石、黑云母, 斑晶的碎斑晶特征明显, 表现为碎而不散、散而不离、离而不远, 粒径为0.5~4 mm, 含量可达40%。钾长石以透长石为主(图2, LQ-40), 亦可见少量条纹长石(图2, HB14-452), 边部被霏细基质熔蚀(图2, HB14-447)。基质为霏细结构, 霏细碎斑结构。以块状构造为主, 但部分霏细碎斑熔岩亦可见流动构造(图2, HB14-452)。显示碎斑熔岩侵入相向溢流相过渡的特征。岩石中含少量角砾, 主要为流纹岩。

晶屑熔结凝灰岩(玻质碎斑熔岩): 主要分布于碎斑熔岩体边部, 呈灰白色、灰紫色, 晶屑主要以石英、钾长石为主, 部分样品可见少量斜长石、黑云母晶屑, 含量45%~50%, 晶屑粒径变化较大, 0.2~3 mm不等。钾长石以透长石为主, 有明显的熔蚀现象。斜长石晶屑含量极不均匀, 在0~10%不等(图2, LQ-29a)。斑晶多具有碎裂特征, 但部分斑晶亦呈现出碎而不散的碎斑结构。胶结物为岩浆, 熔结条带十分发育, 存在大量飘带状、枝杈状脱玻化熔结条带绕过晶屑的现象, 形成脱玻化透镜体(图2, LQ-38), 含量约为50%。另外部分样品可见少量岩屑(图2, LQ-29b), 岩性为黑云母片岩, 粒径在0.5~2 mm, 含量在0~5%不等。熔结凝灰结构, 流动构造, 碎裂度、碎散度均较高。

4 分析方法

锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所进行, 用常规方法对样品锆石进行分选。样品经人工破碎后, 按常规重力和磁选方法分选出锆石, 然后在双目镜下进行挑选, 将挑选好的锆石黏贴在环氧树脂表面并进行抛光打磨, 制成靶。然后对其进行透射光、反射光和阴极发光(CL)研究。其中锆石阴极发光研究在中国地质科学院地质研究所离子探针室扫描电子显微镜上完成。在此基础上, 根据锆石光学特征挑选合适样品进行U-Pb同位素分析。

锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb定年在北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室完成, 利用德国相干公司(Coherent)准分子激光器COMPex Pro102对锆石进行剥蚀, 激光束斑

直径为32 μm , 以He为载气。质谱仪采用美国安捷伦科技有限公司电感耦合等离子质谱仪Agilent ICP-MS 7500ce。信号收集时间为75 s, 收集信号之前先用激光剥蚀清除样品表面污染, 标样采用TEMORA 锆石标样和NIST610玻璃标样。数据处理先用西澳大学Glitter软件进行同位素、微量元素处理, U-Pb谐和年龄则通过Ludwing (2001)的Isoplot获得。岩石主量、微量和稀土元素则是在核工业北京地质研究院分析测试中心通过Finnigan MAT公司的HR-ICP-MS(Element I)完成。

5 分析结果

5.1 碎斑熔岩体及流纹岩锆石形貌及年代学

碎斑熔岩体取样主要包括过渡相霏细碎斑熔岩(HB-454)边缘相熔结凝灰岩(图3, LQ-27)。通过LA-ICP-MS方法对锆石进行Th、U、Pb同位素测定, 结果见表2。

霏细质碎斑熔岩(图3, HB14-454)锆石CL图像显示, 锆石结晶较好, 呈典型的长柱状晶形, 长:宽一般在2:1~3:1, 具有典型的震荡环带(图3)。所测锆石的Th/U均大于0.1(0.29~0.70), 平均值为0.42, 均符合岩浆结晶锆石的特点。本次研究对30粒锆石进行了年龄测定, 所有测试点均落在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线上或其附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄较为集中, 变化范围为140~145 Ma, 加权平均值为(141.6 \pm 0.6) Ma (MSWD = 1.18)(图4), 可代表碎斑熔岩的形成时间。

晶屑熔结凝灰岩(LQ-27)锆石CL图像显示其结晶较好, 多呈短柱状, 长:宽一般在1:1~2:1, 锆石的震荡环带较为发育(图3), 锆石Th/U比值介于0.32~0.77, 均值为0.49, 为岩浆结晶的产物。对样品的30个锆石颗粒进行U-Pb同位素分析, 其中LQ-27-09号锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 偏差较大, 而LQ-27-01、LQ-27-05、LQ-27-20号锆石数据点偏离 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线, 将其剔除, 其余26个测试点均落在谐和线上或其附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在136~143 Ma, 加权平均值为(139.4 \pm 0.7) Ma (MSWD = 0.96)(图4), 该年龄与样品HB-454的年龄在误差范围内相近, 也可代表碎斑熔岩的侵位时间。

流纹岩(图3, HB14-449)锆石CL图像显示其结晶也较好, 多呈短柱状, 长:宽一般在1:1~2:1, 锆石的内部环带基本不发育, 部分可见明显扇形分带(图

表2 正蓝旗地区侵入相碎斑熔岩体及溢流相流纹岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for the extrusive porphyroclastic rhyolite lava domes and effusive rhyolites of Zhenglan Banner area

分析点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
	Th	U	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
HB14-454	霏细碎斑熔岩, 坐标: N42°18.238' E115°41.222'															
HB454-01	157	497	13	0.32	0.05044	0.0014	0.1521	0.0040	0.02188	0.00023	215	41	144	4	140	1
HB454-02	62	172	5	0.36	0.04861	0.0023	0.1503	0.0068	0.02244	0.00029	129	80	142	6	143	2
HB454-03	190	433	11	0.44	0.05098	0.0014	0.1540	0.0040	0.02192	0.00023	240	41	145	4	140	1
HB454-04	163	282	8	0.58	0.04800	0.0017	0.1474	0.0052	0.02227	0.00025	99	60	140	5	142	2
HB454-05	132	347	9	0.38	0.04990	0.0016	0.1522	0.0047	0.02214	0.00025	190	50	144	4	141	2
HB454-06	146	331	9	0.44	0.05252	0.0017	0.1616	0.0049	0.02232	0.00025	308	49	152	4	142	2
HB454-07	117	276	7	0.42	0.04761	0.0017	0.1467	0.0051	0.02235	0.00025	80	58	139	4	142	2
HB454-08	83	118	3	0.70	0.04739	0.0037	0.1451	0.011	0.02221	0.00038	69	137	138	10	142	2
HB454-09	155	332	9	0.47	0.04837	0.0017	0.1463	0.0048	0.02193	0.00025	117	56	139	4	140	2
HB454-10	154	353	9	0.43	0.04863	0.0016	0.1479	0.0046	0.02207	0.00024	130	52	140	4	141	2
HB454-11	131	347	9	0.38	0.05226	0.0018	0.1587	0.0052	0.02203	0.00026	297	54	150	5	140	2
HB454-12	144	400	11	0.36	0.04721	0.0013	0.1473	0.0040	0.02263	0.00023	60	43	139	3	144	1
HB454-13	182	383	10	0.48	0.05003	0.0015	0.1524	0.0045	0.02209	0.00024	196	48	144	4	141	2
HB454-14	153	406	11	0.38	0.05370	0.0015	0.1623	0.0042	0.02192	0.00023	358	39	153	4	140	1
HB454-15	205	512	13	0.40	0.04866	0.0014	0.1483	0.0039	0.02210	0.00023	131	42	140	3	141	1
HB454-16	108	284	7	0.38	0.04978	0.0017	0.1527	0.0051	0.02225	0.00025	185	56	144	4	142	2
HB454-17	132	358	9	0.37	0.05040	0.0016	0.1526	0.0048	0.02196	0.00025	213	51	144	4	140	2
HB454-18	105	260	7	0.40	0.05043	0.0020	0.1532	0.0058	0.02203	0.00028	215	64	145	5	140	2
HB454-19	148	409	11	0.36	0.04882	0.0014	0.1508	0.0041	0.02241	0.00023	139	44	143	4	143	1
HB454-20	96	207	6	0.46	0.04954	0.0022	0.1509	0.0065	0.02210	0.00027	173	77	143	6	141	2
HB454-21	94	185	5	0.51	0.04810	0.0021	0.1483	0.0062	0.02237	0.00027	104	73	140	5	143	2
HB454-22	147	370	10	0.40	0.04859	0.0014	0.1515	0.0043	0.02261	0.00024	128	47	143	4	144	2
HB454-23	187	649	17	0.29	0.04823	0.0012	0.1516	0.0035	0.02281	0.00023	111	35	143	3	145	1
HB454-24	155	347	10	0.45	0.05065	0.0025	0.1551	0.0075	0.02221	0.00024	225	116	146	7	142	2
HB454-25	176	428	11	0.41	0.04720	0.0014	0.1443	0.0040	0.02217	0.00023	59	45	137	4	141	1
HB454-26	127	380	10	0.33	0.05009	0.0014	0.1528	0.0040	0.02213	0.00023	199	41	144	3	141	1
HB454-27	162	302	8	0.54	0.04961	0.0017	0.1507	0.0048	0.02204	0.00025	177	53	143	4	141	2
HB454-28	158	428	11	0.37	0.05337	0.0014	0.1628	0.0040	0.02213	0.00023	345	37	153	4	141	1
HB454-29	131	242	7	0.54	0.04923	0.0018	0.1513	0.0052	0.02230	0.00026	159	58	143	5	142	2
HB454-30	130	381	10	0.34	0.05023	0.0015	0.1531	0.0044	0.02211	0.00024	206	46	145	4	141	2
LQ-27	晶屑熔结凝灰岩, 坐标: N42°13.689' E115°44.498'															
LQ27-01	136	253	8	0.54	0.04178	0.0024	0.1270	0.0072	0.02205	0.00028	-189	106	121	7	141	2
LQ27-02	119	264	8	0.45	0.04523	0.0025	0.1351	0.0072	0.02167	0.00028	-8	88	129	6	138	2
LQ27-03	299	648	18	0.46	0.04642	0.0014	0.1405	0.0039	0.02195	0.00023	19	41	133	4	140	1
LQ27-04	130	261	8	0.50	0.04848	0.0023	0.1493	0.0069	0.02234	0.00029	123	82	141	6	142	2
LQ27-05	102	140	5	0.73	0.07529	0.0090	0.2158	0.025	0.02078	0.00041	1076	251	198	21	133	3
LQ27-06	147	317	9	0.46	0.04854	0.0021	0.1475	0.0062	0.02204	0.00027	126	74	140	5	141	2
LQ27-07	166	362	11	0.46	0.04949	0.0019	0.1508	0.0057	0.02211	0.00026	171	66	143	5	141	2
LQ27-08	169	420	12	0.40	0.05084	0.0017	0.1556	0.0051	0.02220	0.00025	234	55	147	4	142	2
LQ27-09	132	253	8	0.52	0.04707	0.0023	0.1487	0.0071	0.02292	0.00029	53	80	141	6	146	2
LQ27-10	135	271	8	0.50	0.05355	0.0023	0.1636	0.0068	0.02216	0.00028	352	71	154	6	141	2
LQ27-11	119	226	8	0.52	0.04680	0.0037	0.1442	0.011	0.02234	0.00029	39	175	137	10	142	2
LQ27-12	208	475	14	0.44	0.05051	0.0016	0.1531	0.0047	0.02198	0.00024	219	50	145	4	140	2
LQ27-13	102	193	6	0.53	0.04638	0.0030	0.1363	0.0087	0.02133	0.00030	17	112	130	8	136	2
LQ27-14	154	436	12	0.35	0.04985	0.0017	0.1468	0.0047	0.02136	0.00024	188	54	139	4	136	2
LQ27-15	223	405	12	0.55	0.04965	0.0017	0.1474	0.0049	0.02154	0.00025	179	56	140	4	137	2

续表2

分析点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
	Th	U	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
LQ27-16	147	249	8	0.59	0.04992	0.0025	0.1492	0.0073	0.02169	0.00028	191	90	141	6	138	2
LQ27-17	188	379	11	0.50	0.04978	0.0019	0.1485	0.0054	0.02164	0.00025	185	63	141	5	138	2
LQ27-18	225	490	14	0.46	0.04918	0.0016	0.1473	0.0046	0.02173	0.00024	156	52	140	4	139	2
LQ27-19	102	321	9	0.32	0.04918	0.0020	0.1478	0.0058	0.02181	0.00026	156	70	140	5	139	2
LQ27-20	197	247	9	0.80	0.06018	0.0026	0.1863	0.0078	0.02246	0.00029	610	68	173	7	143	2
LQ27-21	174	444	13	0.39	0.04944	0.0017	0.1532	0.0049	0.02247	0.00025	169	54	145	4	143	2
LQ27-22	113	245	7	0.46	0.05001	0.0025	0.1506	0.0073	0.02185	0.00028	195	88	142	6	139	2
LQ27-23	116	276	8	0.42	0.04492	0.0022	0.1368	0.0064	0.02209	0.00028	-23	75	130	6	141	2
LQ27-24	119	156	5	0.77	0.04833	0.0034	0.1460	0.010	0.02192	0.00033	115	126	138	9	140	2
LQ27-25	179	565	15	0.32	0.04927	0.0014	0.1493	0.0041	0.02199	0.00024	161	44	141	4	140	2
LQ27-26	325	717	20	0.45	0.05013	0.0013	0.1494	0.0037	0.02163	0.00022	201	38	141	3	138	1
LQ27-27	151	318	9	0.47	0.04864	0.0020	0.1477	0.0059	0.02203	0.00027	131	70	140	5	140	2
LQ27-28	143	377	11	0.38	0.04965	0.0019	0.1499	0.0056	0.02191	0.00026	179	65	142	5	140	2
LQ27-29	134	256	8	0.52	0.04905	0.0041	0.1448	0.012	0.02141	0.00028	150	187	137	10	137	2
LQ27-30	131	276	8	0.48	0.04692	0.0023	0.1407	0.0066	0.02175	0.00027	45	78	134	6	139	2
HB14-449	流纹岩, 坐标: N42°15.020' E115°47.736'															
HB449-01	87	157	4	0.56	0.05034	0.0026	0.1530	0.0077	0.02204	0.00030	211	91	145	7	141	2
HB449-02	126	203	6	0.62	0.04993	0.0041	0.1454	0.012	0.02112	0.00028	192	185	138	10	135	2
HB449-03	59	151	4	0.39	0.04344	0.0029	0.1320	0.0086	0.02204	0.00033	-100	115	126	8	141	2
HB449-04	163	265	7	0.61	0.04973	0.0018	0.1490	0.0051	0.02173	0.00025	182	59	141	5	139	2
HB449-05	76	137	4	0.56	0.04918	0.0026	0.1501	0.0078	0.02212	0.00030	156	94	142	7	141	2
HB449-06	51	137	4	0.38	0.04667	0.0027	0.1441	0.0081	0.02240	0.00031	32	95	137	7	143	2
HB449-07	40	75	2	0.53	0.04881	0.0039	0.1503	0.012	0.02233	0.00037	139	145	142	10	142	2
HB449-08	127	198	6	0.64	0.04969	0.0022	0.1500	0.0065	0.02189	0.00028	181	77	142	6	140	2
HB449-09	70	120	4	0.59	0.05193	0.0051	0.1574	0.015	0.02198	0.00034	282	225	148	13	140	2
HB449-10	189	276	8	0.68	0.04953	0.0018	0.1530	0.0053	0.02239	0.00026	173	58	145	5	143	2
HB449-11	46	88	2	0.52	0.04912	0.0039	0.1483	0.011	0.02189	0.00036	154	142	140	10	140	2
HB449-12	335	482	14	0.69	0.04928	0.0012	0.1536	0.0035	0.02260	0.00022	161	35	145	3	144	1
HB449-13	123	190	5	0.65	0.05061	0.0022	0.1539	0.0064	0.02205	0.00028	223	72	145	6	141	2
HB449-14	51	91	3	0.56	0.04796	0.0050	0.1432	0.015	0.02165	0.00037	97	231	136	13	138	2
HB449-15	155	212	6	0.73	0.04836	0.0020	0.1480	0.0058	0.02218	0.00027	117	68	140	5	141	2
HB449-16	179	264	7	0.68	0.04823	0.0017	0.1471	0.0050	0.02211	0.00025	111	58	139	4	141	2
HB449-17	80	180	5	0.45	0.04959	0.0025	0.1501	0.0072	0.02194	0.00029	176	87	142	6	140	2
HB449-18	79	176	5	0.45	0.05152	0.0024	0.1536	0.0070	0.02162	0.00029	264	80	145	6	138	2
HB449-19	90	164	4	0.54	0.05054	0.0026	0.1525	0.0075	0.02188	0.00030	220	89	144	7	140	2
HB449-20	52	99	3	0.52	0.04939	0.0038	0.1491	0.011	0.02188	0.00036	166	142	141	10	140	2
HB449-21	64	111	3	0.58	0.05035	0.0030	0.1525	0.0088	0.02196	0.00033	211	105	144	8	140	2
HB449-22	88	148	4	0.59	0.04811	0.0024	0.1478	0.0071	0.02228	0.00028	105	85	140	6	142	2
HB449-23	130	227	6	0.57	0.05374	0.0021	0.1633	0.0062	0.02203	0.00028	360	63	154	5	140	2
HB449-24	116	182	5	0.64	0.04749	0.0021	0.1489	0.0064	0.02274	0.00029	74	72	141	6	145	2
HB449-25	107	172	5	0.62	0.04931	0.0028	0.1496	0.0083	0.02199	0.00033	163	99	142	7	140	2
HB449-26	142	218	6	0.65	0.04910	0.0020	0.1500	0.0058	0.02216	0.00027	153	68	142	5	141	2
HB449-27	165	250	7	0.66	0.04897	0.0017	0.1505	0.0051	0.02228	0.00026	146	57	142	4	142	2
HB449-28	140	220	6	0.63	0.05004	0.0018	0.1522	0.0053	0.02204	0.00026	197	59	144	5	141	2
HB449-29	91	148	4	0.62	0.04803	0.0026	0.1473	0.0076	0.02223	0.00031	101	90	140	7	142	2
HB449-30	153	273	7	0.56	0.04970	0.0017	0.1521	0.0049	0.02219	0.00025	181	53	144	4	141	2

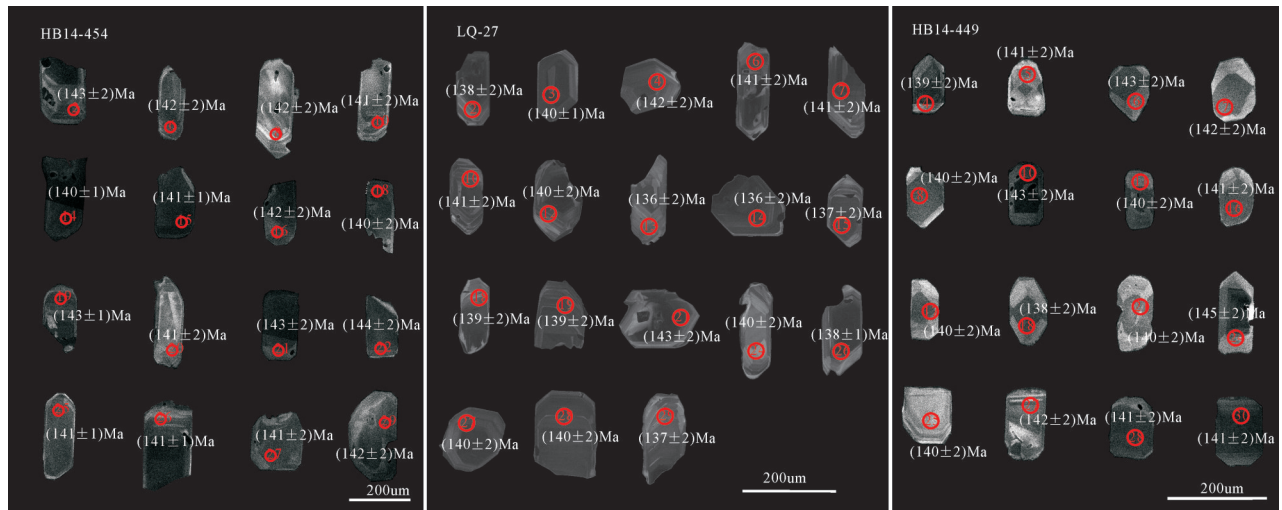


图3 正蓝旗地区侵入相碎斑熔岩及溢流相流纹岩中锆石阴极发光图(CL)

Fig. 3 CL images of representative zircons from extrusive porphyroclastic lava and effusive rhyolites of Zhenglan Banner area

3)。通过LA-ICP-MS方法对锆石进行Th、U、Pb同位素测定,结果见表2,锆石的Th/U值介于0.38~0.73,平均值为0.58,为典型岩浆成因锆石。完成了样品30粒锆石的测年,其中HB449-01号锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄明显低于其他测试点年龄值,而HB449-03、HB449-09、HB449-14、HB449-23号锆石的测试点则偏离 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线,其余25点均落于谐和线及其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在139~145 Ma,加权平均值为 (141.4 ± 0.7) Ma (MSWD = 0.82)(图4),该年龄可代表张家口组流纹岩喷出的年龄。

5.2 侵入相碎斑熔岩体及溢流相流纹岩、粗面岩的地球化学

5.2.1 主量元素

正蓝旗地区碎斑熔岩体地球化学分析结果见表3,流纹岩、粗面岩地球化学分析结果见表4。从表中可以看出碎斑熔岩体 SiO_2 含量变化范围较窄,为73.46%~79.89%,为硅过饱和;而流纹岩、粗面岩 SiO_2 含量介于65.72%~76.88%,变化较大,且相较于碎斑熔岩体明显偏低。碎斑熔岩体与溢流相流纹岩、粗面岩($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)分别为4.3%~8.59%、5.52%~10.04%,而 K_2O 含量分别集中在3.3%~5.64%与4.42%~6.74%,富碱高钾特征显著,并且溢流相明显比侵入相更加富碱。碎斑熔岩体 Al_2O_3 变化较小,为11.48%~13.55%,A/CNK在1.044~2.193,平均值为1.33;流纹岩、粗面岩 Al_2O_3 含量变化范围较大为

11.71%~15.3%,A/CNK在0.958~2.228,平均值为1.246,两者均为弱-强过铝质,其中LQ-34样品A/CNK过高(>1.50)可能是由于后期蚀变使 Na_2O 含量过低引起($\leq 1.0\%$)。而 Na_2O 含量低可能是由于后期风化作用引起,下文再做讨论。其 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}+\text{MgO})$ 值碎斑熔岩介于0.74~0.91,流纹岩、粗面岩介于0.89~0.97,在 SiO_2 - $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}+\text{MgO})$ 图解中均投影于铁质区域(图略),具有较为显著的富铁贫镁的特点。碎斑熔岩体碱度率介于2.09~5.0,里特曼指数为0.5~2.3,主要为钙碱性岩。流纹岩、粗面岩碱度率介于2.17~6.58,里特曼指数为1.01~4.28,为钙碱性-碱性岩。投影于国际地科联推荐的TAS图解中(Irvine, 1971),正蓝旗地区碎斑熔岩体均集中于流纹岩区域,为亚碱性;而早期溢流相火山岩投影于粗面岩、流纹岩区域,碱性、亚碱性均有分布,呈现出粗面岩与流纹岩组合,部分流纹岩体现出碱性流纹岩的地球化学特征(图5a)。在 SiO_2 - K_2O 图上(Peccerillo et al., 1976; Middlemost, 1985),除碎斑熔岩中一个样品由于 K_2O 含量较低落于钙碱性系列,其余样品均分布于高钾钙碱性系列和钾玄岩系列区域,且早期溢流相火山岩比碎斑熔岩富钾贫硅(图5b)。样品常量分析总量整体偏低可能存在一定蚀变,因此其岩性判别在TAS图解基础上应当辅以微量元素判别。在Nb/Y-Zr/TiO₂图(图5c)中,碎斑熔岩体与早期溢流相火山岩均集中于碱性岩区域;而在Zr/TiO₂-SiO₂图(图5d)中,碎斑熔岩体主要分

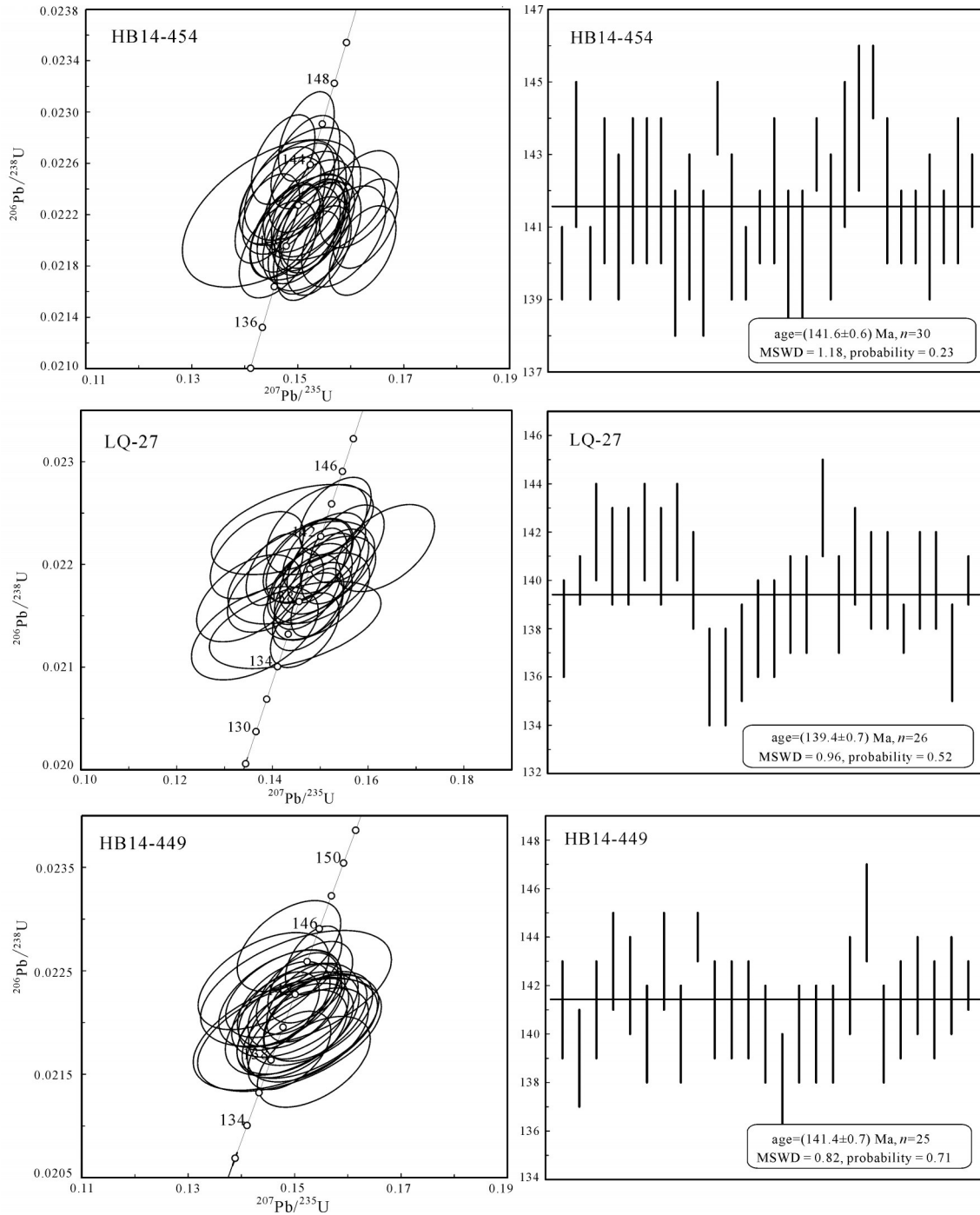


图4 正蓝旗地区侵入相碎斑熔岩体及溢流相流纹岩锆石U-Pb谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄
 Fig.4 U-Pb concordant diagrams and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age diagrams of zircon grains from extrusive porphyroclastic lava and effusive rhyolites of Zhenglan Banner area

布于流纹岩区域,而溢流相火山岩主要分布于碱性流纹岩与粗面岩区域(Winchester and Floyd, 1977),说明整体而言白垩纪早期火山岩具有明显的富碱

特征,从早期溢流相到后期侵入相具有明显向富硅贫碱演化的趋势。碎斑熔岩体的分异指数(DI)为90.45~96.45,溢流相火山岩介于83.54~96.25,两者

表3 碎斑熔岩体主量元素(%)和微量元素(10^{-6})含量分析结果Table 3 Major/(%) and trace element (10^{-6}) content of the porphyroclastic rhyolite lava domes

样品号	HB14-453	LQ-27	LQ-03	HB14-454	HB14-455	HB14-452	LQ-40	HB14-447	LQ-38	LQ-29	LQ-06	HB14-446
岩性	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	碎斑 熔岩	碎斑 熔岩	碎斑 熔岩	熔结 凝灰岩	碎斑 熔岩	碎斑 熔岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	碎斑 熔岩	熔结 凝灰岩
SiO ₂	79.89	79.37	78.13	77.96	77.8	76.95	76.65	76.57	76.28	75.02	74.95	73.46
Al ₂ O ₃	12.02	11.48	12.08	12.39	12.47	11.72	12.45	12.92	12.55	13.15	12.46	13.55
Fe ₂ O ₃ ^f	0.322	0.663	0.48	0.396	0.274	1.77	0.746	0.816	1.07	1.35	2.06	1.81
MgO	0.05	0.086	0.168	0.052	0.075	0.154	0.08	0.212	0.115	0.207	0.126	0.409
CaO	0.145	0.198	0.729	0.267	0.293	0.25	0.328	0.214	0.191	0.259	0.423	0.487
Na ₂ O	1	0.207	0.143	3.16	2.42	2.33	2.73	3.21	2.62	3.13	3.31	3.62
K ₂ O	3.3	5.57	5.64	4.9	5	5.64	5.57	4.47	5.29	5.26	5.28	4.53
MnO	0.004	0.005	0.018	0	0	0.013	0.005	0.005	0.021	0.06	0.038	0.101
TiO ₂	0.249	0.163	0.143	0.179	0.215	0.103	0.209	0.182	0.079	0.218	0.235	0.27
P ₂ O ₅	0.038	0.017	0.02	0.029	0.035	0.015	0.029	0.033	0.014	0.035	0.039	0.056
LOI	2.91	2.14	2.35	0.65	1.38	1.03	1.12	1.35	1.71	1.24	1	1.62
Total	97.018	97.759	97.551	99.333	98.582	98.945	98.797	98.632	98.23	98.689	98.921	98.293
FeO	0.24	0.56	0.4	0.31	0.23	0.72	0.49	0.72	0.81	0.41	0.64	0.65
A/CNK	2.193	1.706	1.576	1.128	1.256	1.128	1.12	1.229	1.209	1.162	1.044	1.154
V	13.7	4.49	11.4	4.74	7.6	4.36	5.41	12.5	4.06	14.9	16.9	24
Cr	5.89	3.71	3.81	2.53	3.54	1.06	4.36	5.07	6.05	6.15	3.01	5.22
Co	0.398	0.091	0.881	0.259	0.458	0.277	0.222	0.534	0.527	1.5	1.17	1.72
Ni	2.28	0.831	1.9	1.27	3.62	0.585	2.14	1.22	3.53	4.78	3.57	2.9
Cu	5.08	2.24	2.51	2.87	3.34	3.28	2.08	5.44	2.93	4.6	4.42	6.03
Zn	19.8	19.1	32.6	12.1	21	52	35	32.2	102	37.2	90.8	61.3
Ga	24.1	17.3	18.5	23.9	24.1	22	22.7	18.4	22.5	16.8	28.1	20.6
Rb	132	226	299	192	208	352	209	220	459	182	194	272
Sr	42.9	14.2	41.7	26.5	39.9	12.3	26.2	37.3	5.84	37.2	48.9	102
Y	43.1	24.9	25.7	41.2	46.3	55.2	30.1	19.4	32.6	10.7	30.7	24.4
Mo	3.28	0.842	2.56	1.14	1.14	3.13	2.03	0.388	0.925	0.974	3.63	1.13
Cd	0.569	0.174	0.152	0.366	0.469	0.305	0.155	0.172	0.136	0.132	0.23	0.365
Sb	1.38	2.8	4.5	0.596	2.08	1.02	0.762	0.684	0.566	0.424	0.296	0.774
Cs	6.92	6.01	13.8	2.75	6.73	3.87	5.58	6.5	12.6	5.8	3.78	14.3
Ba	177	111	218	114	157	32.3	134	292	42.1	316	246	784
La	89.9	30.1	47.6	86.4	99.2	83.1	84.3	38.7	7.45	28	134	41.6
Ce	179	43.4	91.1	148	158	119	124	59.1	17.5	54.5	222	87.9
Pr	20.3	5.46	11.2	20.1	22.2	17.7	17.7	7.65	1.92	5.69	24.8	9.58
Nd	73.7	18.9	37.4	75.4	82.1	62	65.1	26.3	7.45	19.1	85.5	35.5
Sm	12.7	3.57	6.2	13	14.6	11.5	10.7	4.34	2.09	2.99	13	6.36
Eu	0.45	0.11	0.327	0.303	0.401	0.187	0.264	0.37	0.033	0.342	0.467	0.643
Gd	9.75	3.49	4.97	10.5	11.1	9.91	7.95	3.75	2.37	2.05	9.62	5.07
Tb	1.62	0.747	0.978	1.75	1.84	1.82	1.25	0.619	0.682	0.353	1.48	0.857
Dy	7.84	4.45	4.29	8.17	8.81	9.78	6.08	3.06	5.33	2.01	6.53	4.24
Ho	1.53	0.961	0.829	1.53	1.68	2.06	1.13	0.621	1.18	0.424	1.07	0.835
Er	4.49	2.77	2.4	4.28	4.53	5.64	3.31	1.71	4.07	1.19	2.87	2.31
Tm	0.782	0.487	0.409	0.66	0.708	0.974	0.476	0.28	0.644	0.212	0.494	0.373
Yb	5.34	2.96	2.9	4.24	4.56	6.67	3.19	1.91	5	1.39	3.18	2.64
Lu	0.756	0.424	0.405	0.616	0.664	0.901	0.467	0.273	0.645	0.185	0.459	0.37
W	5.56	2.64	1.83	2.74	3.39	3.13	5.09	1.59	4.59	2.01	0.94	3.32
Tl	0.402	1.22	1.48	0.586	0.53	0.997	1.08	0.663	2.12	0.91	1.01	0.665
Pb	69.5	12.6	10.2	25.9	21.6	28.6	21.1	8.99	32.1	19.2	26.7	36.1
Th	25.6	17.1	25.9	27.1	28.6	33.7	16.8	27.3	26.5	15.1	29.5	30
U	13.1	3.94	3.95	3.04	7.63	2.24	2.14	3.71	7.03	1.91	4.35	5.58
Nb	26	35.4	22.5	27.5	29.8	37.7	32.5	20.1	66.6	17.9	29.3	25.1
Ta	1.94	1.9	1.41	2.12	2.16	3.42	1.91	2.05	4.66	1.36	1.22	2.4
Zr	478	321	166	310	392	231	317	168	246	180	308	267
Hf	13.7	11.1	6.21	10.6	11.6	10.1	11	6.41	12.6	5.79	9.62	8.49
ΣREE	408.16	117.83	211.01	374.95	410.39	331.24	325.92	148.68	56.36	118.44	505.47	198.28
(La/Yb) _N	12.08	7.29	11.77	14.62	15.6	8.94	18.96	14.53	1.07	14.45	30.23	11.3
δEu	0.12	0.09	0.17	0.08	0.09	0.05	0.08	0.27	0.05	0.4	0.12	0.33

分异程度均较高。

5.2.2 稀土元素

正蓝旗地区碎斑熔岩体稀土元素分析结果见表3,除样品LQ-38与其他样品明显偏离((ΣREE)含量仅为 56.36×10^{-6} ,且轻重稀土分馏不明显),其余(ΣREE)介于 $117.83 \times 10^{-6} \sim 505.47 \times 10^{-6}$,变化范围较大;(LREE/HREE)变化较宽,主要介于6.23~

18.67,轻重稀土具有一定程度的分馏,属轻稀土富集型(LREE);(La/Yb)_N在7.29~30.23,值较大并且变化范围较宽,可能具有较强的结晶分异。

而研究区溢流相流纹岩-粗面岩稀土元素含量见表4,其总量(ΣREE)变化范围为 $127.64 \times 10^{-6} \sim 1069.66 \times 10^{-6}$,主要介于 $294.97 \times 10^{-6} \sim 644.13 \times 10^{-6}$,相较于碎斑熔岩体变化范围更大;(LREE/HREE)介于

表4 溢流相流纹岩-粗面岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})含量分析结果

Table 4 Major (%) and trace element (10^{-6}) content of the effusive rhyolites and trachyte											
样品号	LQ-30	LQ-26	LQ-43	HB14-449	HB14-450	HB14-456	LQ-34	LQ-46	HB14-451	HB14-457	HB14-459
岩性	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	粗面岩	粗面岩
SiO ₂	76.88	76.3	75.31	75.14	74.97	74.1	72.64	71.15	69.97	66.19	65.72
Al ₂ O ₃	12.02	13.45	11.71	12.22	12.02	13.16	14.75	14.38	14.53	15.3	15.22
Fe ₂ O ₃ ^T	1.7	0.767	2.31	2.48	2.84	2.29	1.7	2.02	3.44	4.74	5.22
MgO	0.052	0.092	0.114	0.085	0.137	0.125	0.07	0.129	0.213	0.252	0.299
CaO	0.108	0.08	0.286	0.255	0.152	0.279	0.198	0.577	0.304	0.959	1.77
Na ₂ O	0.424	3.38	3.81	3.42	3.1	2.13	0.516	4.35	2.69	4.07	3.78
K ₂ O	6.13	4.42	5.02	5.1	5.39	5.88	5	5.69	6.74	5.97	4.85
MnO	0.032	0.008	0.027	0.006	0.019	0.006	0.009	0.027	0.019	0.158	0.097
TiO ₂	0.222	0.079	0.141	0.248	0.247	0.235	0.496	0.476	0.424	0.498	0.924
P ₂ O ₅	0.02	0.053	0.011	0.033	0.029	0.032	0.067	0.095	0.065	0.09	0.29
LOI	2.4	1.27	1.26	0.99	0.99	1.72	4.5	1.09	1.59	1.73	1.75
Total	97.588	98.629	98.739	98.987	98.904	98.237	95.446	98.894	98.395	98.227	98.17
FeO	0.6	0.64	0.86	0.59	0.44	0.5	0.81	0.37	0.39	0.4	0.6
A/CNK	1.596	1.282	0.958	1.053	1.072	1.268	2.228	1.001	1.184	1.027	1.036
V	5.06	5.89	3.86	4.1	4.65	5.81	11.7	5.32	4.63	6.1	72.3
Cr	3.84	4.9	4.24	2.42	6.3	2.7	4.11	3.74	10.6	1.52	6.48
Co	0.319	0.3	0.243	0.297	0.283	0.41	0.323	0.396	0.761	2.17	8.99
Ni	1.84	3.14	2.04	1	3.18	1.04	1.84	1.9	6.81	1.59	4.79
Cu	2.9	2.73	3.34	4.74	6.03	6.51	8.34	5.67	8.18	11.1	17.8
Zn	32.4	29.6	179	141	108	66.8	36.9	133	66.2	112	102
Ga	39.5	16.9	27.2	29.4	27.6	22.3	29	27.4	23.9	25.1	24.2
Rb	264	147	378	225	214	232	174	177	218	154	147
Sr	18.3	18.9	5.86	8.88	12.6	20.1	38.3	32.4	30.1	43.3	242
Y	50.3	22.7	42.2	50.3	47.1	36.6	44.9	25.8	38.3	34.8	39.3
Mo	1.04	2.52	0.997	2.26	2.49	1.21	1.49	2.53	3.01	2.98	3.31
Cd	0.411	0.126	0.527	0.845	0.875	0.583	0.364	0.288	1.13	1.1	0.579
Sb	1.14	0.575	0.176	0.344	0.699	1.33	2.59	0.092	1.57	0.825	0.967
Cs	5.18	2.08	7.03	11.3	8.18	11.2	10.2	2.12	11.3	7.03	9.53
Ba	51.8	129	25.6	46.1	97.6	107	122	305	166	323	1336
La	283	27	87.4	119	187	90.2	120	97.8	77.9	64.1	71.5
Ce	421	47.6	148	239	221	169	193	129	107	124	138
Pr	63.1	6.95	20.7	26.3	36.8	21.3	25.6	20.1	17.5	14.5	15.8
Nd	223	24.9	78	97.1	136	78	95.9	75.4	64.4	55.7	59.6
Sm	31.6	5.06	15.4	15.3	20.9	13.5	15.4	11.7	10.9	9.62	10
Eu	0.576	0.208	0.199	0.51	0.699	0.427	1.7	1.35	0.622	0.937	2.32
Gd	20.5	4.02	11.5	12	16.5	10.7	11.2	8.71	8.71	7.78	8.53
Tb	2.79	0.831	2.07	1.97	2.38	1.77	1.86	1.28	1.45	1.3	1.44
Dy	11.1	4.07	9.64	9.75	10.4	8.62	9.73	5.84	7.2	6.56	7.1
Ho	1.86	0.792	1.81	1.9	1.84	1.56	1.63	1.08	1.39	1.3	1.45
Er	5.13	2.54	4.78	5.27	4.73	4.09	4.57	2.43	3.99	3.77	3.87
Tm	0.65	0.408	0.677	0.832	0.709	0.618	0.696	0.323	0.625	0.611	0.644
Yb	4.75	2.82	4.17	5.45	4.54	4.1	4.44	2.12	4.17	4.14	4.08
Lu	0.603	0.436	0.583	0.752	0.636	0.579	0.566	0.267	0.609	0.652	0.618
W	10.6	1.74	1.32	2.34	1.94	1.74	11	0.874	3.13	1.94	2.38
Tl	0.888	1.06	1.82	0.753	0.698	0.674	0.54	0.788	0.539	0.607	0.786
Pb	24.5	19.2	36.3	43.3	38.5	38.3	34.3	26.8	26.3	36.7	38.2
Th	26.7	16.3	34.5	25.1	24.1	23.6	15.2	18.3	15.3	12.1	13.5
U	3.16	3.02	5.42	4.49	4.54	1.74	2.42	1.88	3.31	2.59	2.97
Nb	42.6	17.6	60.8	38.7	35.2	33.1	32.8	33.8	25.8	22.2	20.9
Ta	2.36	1.17	4.2	2.79	2.68	2.35	2.02	2.02	1.73	1.46	1.51
Zr	721	181	965	751	707	490	596	626	932	1014	417
Hf	16.4	7.11	27.2	19.2	18.1	14.6	13.6	14.8	21.1	22.1	11.6
ΣREE	1069.66	127.64	384.93	535.13	644.13	404.46	486.29	357.4	306.47	294.97	324.95
(La/Yb) _N	42.74	6.87	15.03	15.66	29.55	15.78	19.39	33.09	13.4	11.11	12.57
δEu	0.06	0.14	0.04	0.11	0.11	0.1	0.38	0.39	0.19	0.32	0.75

7.02~21.57, 轻重稀土具有明显分馏, 亦属轻稀土富集型(LREE); (La/Yb)_N变化较大, 介于6.87~42.74, 可能是结晶分异的产物。

稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图6a、6c)(Sun and McDonough, 1989)中, 碎斑熔岩体与流纹岩-粗面岩配分曲线均呈右倾, 重稀土相对于轻稀土较为平缓, 表现为轻稀土富集。碎斑熔岩体

δEu在0.05~0.40, 具有强烈的Eu亏损, 流纹岩-粗面岩δEu在0.04~0.75, 变化较大, 流纹岩具有Eu的强烈亏损, 而粗面岩亏损较小。两者δCe分别介于0.72~1.11与0.74~1.00, Ce异常不明显, 其与大陆裂谷流纹岩的稀土元素曲线接近(Macdonald, 1987)。

5.2.3 微量元素

正蓝旗地区侵入相碎斑熔岩体及早期溢流相

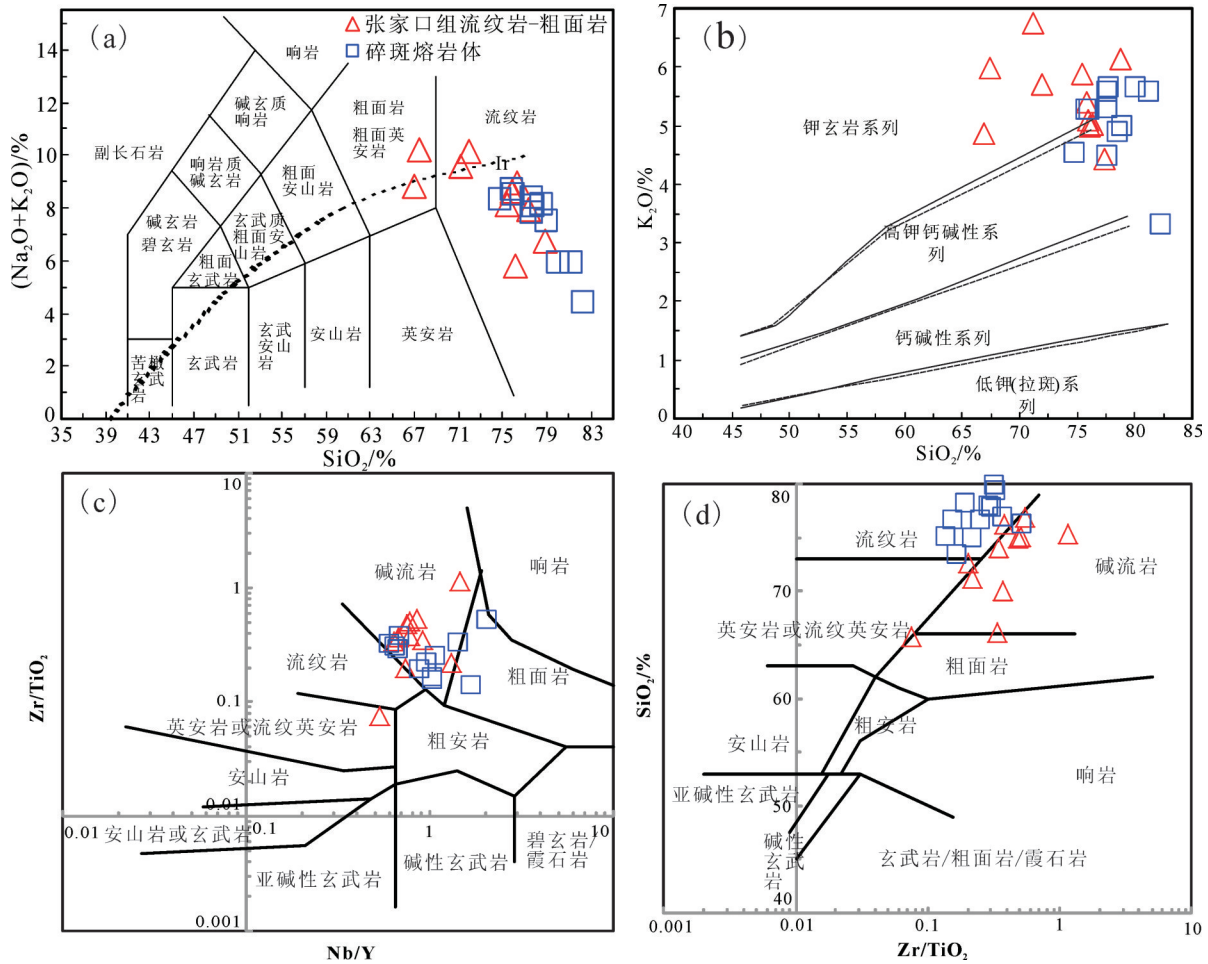


图5 正蓝旗地区溢流相火山岩及侵入相碎斑熔岩 TAS(a) ; K₂O-SiO₂ (b) 微量元素岩性判别图解(c, d)
 a—Ir为 Irvine 分界线, 据 Irvine (1971), 虚线上方为碱性, 下方为亚碱性; b—中实线据 Peccerillo (1976), 虚线据 Middlemost (1985); c、d—据 Winchester (1977)
 Fig. 5 a-TAS; b-K₂O versus SiO₂; c and d- Trace elements lithological discrimination diagrams of extrusive porphyroclastic lava and effusive rhyolites of Zhenglan Banner area
 a-Dashed line of Ir representing boundary between alkalinity and sub-alkali series (after Irvine ,1971), above the dashed line for alkalinity, below for sub-alkali series; b-solid line (after Peccerillo, 1976) , dashed line (after Middlemost, 1985); c and d after Winchester (1977)

火山岩微量元素含量分别见表3和表4, 除HB14-459可能由于硅含量较低, 导致其Ba含量较高, Sr、P、Ti含量较低, Rb/Sr较低, 与其他样品差异较大, 其余样品微量元素特征相似。两者均表现为大离子亲石元素Rb(侵入相与溢流相含量分别介于 $132 \times 10^{-6} \sim 458 \times 10^{-6}$ 、 $147 \times 10^{-6} \sim 378 \times 10^{-6}$, 下同)含量较高, 而Ba($32.3 \times 10^{-6} \sim 784 \times 10^{-6}$ 、 $25.6 \times 10^{-6} \sim 323 \times 10^{-6}$)与Sr($12.3 \times 10^{-6} \sim 102 \times 10^{-6}$ 、 $5.86 \times 10^{-6} \sim 43.3 \times 10^{-6}$)含量较低, Rb/Sr(2.67~78.60、3.56~64.51)变化较大。放射性元素Th($16.8 \times 10^{-6} \sim 33.7 \times 10^{-6}$ 、 $12.1 \times 10^{-6} \sim 34.5 \times 10^{-6}$)、U($1.91 \times 10^{-6} \sim 13.1 \times 10^{-6}$ 、 $1.74 \times 10^{-6} \sim 5.42 \times 10^{-6}$)含量也较高, Th/U分别在1.95~15.04、4.62~13.56。高场强

元素Nb($17.9 \times 10^{-6} \sim 35.4 \times 10^{-6}$ 、 $17.6 \times 10^{-6} \sim 60.8 \times 10^{-6}$)、Ta($1.22 \times 10^{-6} \sim 4.66 \times 10^{-6}$ 、 $1.17 \times 10^{-6} \sim 4.2 \times 10^{-6}$)含量较低, 而Zr($166 \times 10^{-6} \sim 478 \times 10^{-6}$ 、 $181 \times 10^{-6} \sim 1014 \times 10^{-6}$)、Hf($5.79 \times 10^{-6} \sim 12.6 \times 10^{-6}$ 、 $7.11 \times 10^{-6} \sim 22.1 \times 10^{-6}$)相对含量较高。两者Nb/Ta分别介于10.46~24.02、13.13~18.05, 位于地壳和地幔岩浆Nb/Ta之间。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图6b、6d)显示(Sun and McDonough, 1989), 除LQ-38表现为Nb、Ta较为富集, 而轻稀土较为亏损, 其余均表现出很好的一致性, 既富集大离子亲石元素Rb、Th、U、K, LREE亦富集, 而强烈亏损Ba、Sr、Ti、P。Nb、Ta相对于Th、U、LREE亏损。

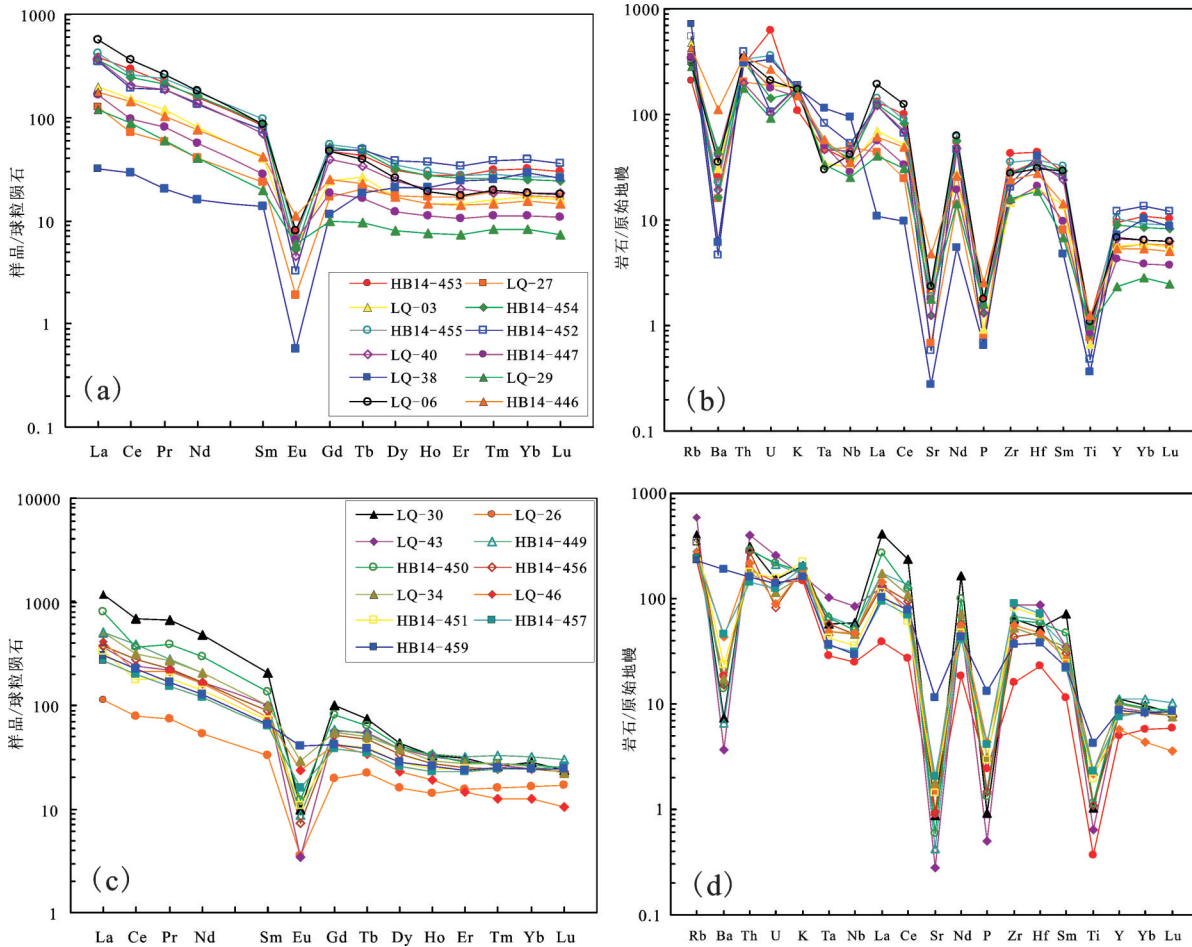


图6 侵入相碎斑熔岩体(a,b)及溢流相流纹岩-粗面岩(c,d)稀土元素球粒陨石配分图及微量元素蛛网图
(球粒陨石和原始地幔值据Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spider diagrams of the extrusive porphyroclastic lava and effusive rhyolites-trachytes(normalization values after Sun and McDonough, 1989)

6 讨论

6.1 正蓝旗地区侵入相碎斑熔岩体和溢流相流纹岩时代及其意义

张家口组火山岩前人已经做了较多研究, 通过对华北北缘张家口组火山岩同位素定年数据进行搜集(表1), 剔除以全岩Rb-Sr定年方法测定以及较老的数据(误差较大), 其锆石U-Pb年龄介于143~125.8 Ma。取样位置主要集中在张家口—承德—凌源一带, 其他地区年龄比较匮乏。就研究区而言, 正蓝旗地区碎斑熔岩体年代学数据较少, 现有测年结果相差较大(赖绍聪等, 1992b; 高同德等, 1987)。同时, 通过间接方法测得的全岩Rb-Sr等时线年龄, 范围太宽且确定性较大, 难以满足对地质

事件的准确定年(周珣若等, 1994; 李进文等, 2007)。

本文通过LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb法测定正蓝旗地区侵入相碎斑熔岩体形成年龄限定在(141.6±0.6)~(139.4±0.7) Ma, 而早期溢流相流纹岩的形成年龄为(141.4±0.7) Ma, 根据国际地层委员会(ICS)确定的地层年代, 可以确定正蓝旗地区中生代火山岩为早白垩世早期燕山晚期岩浆作用的产物, 归为张家口组。这也与前人得到的张家口组的年龄范围一致(李创举等, 2012; 杨进辉等, 2006; 邵济安等, 2003; 张宏等, 2005a, 2005b; 柳永清等, 2003; 季强, 2004; 罗修泉等, 1997; 胡光华等, 1982; 牛宝贵等, 2002; 巫建华等, 2015; 赖绍聪等, 1990, 1992a, 1992b, 1997a, 1997b; 高同德等, 1987; Zhang et al., 2008a, 2008b; Niu et al., 2004)。由于两者空间

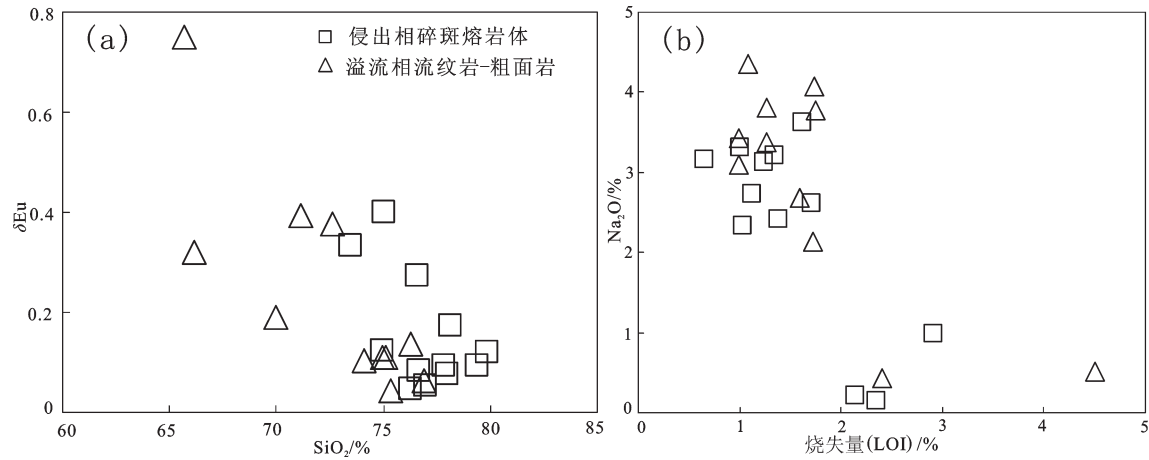


图7 正蓝旗地区火山岩 a— SiO_2 - δEu , b— LOI - Na_2O 图解

Fig.7 a— SiO_2 - δEu and b— LOI - Na_2O diagrams of the volcanic rocks of Zhenglan Banner area

上相关(侵入相碎斑熔岩体超覆于早期溢流相流纹岩-粗面岩之上),且形成年龄在误差范围内一致,说明两者应当是同一期岩浆作用的产物。

6.2 岩浆演化讨论

综合正蓝旗地区侵入相碎斑熔岩体与溢流相流纹岩-粗面岩年代学及地球化学特征可以明显看出,碎斑熔岩体的形成年龄在误差范围内与早期溢流相熔岩完全一致,而碎斑熔岩体与溢流相流纹岩-粗面岩均表现为右倾的轻稀土富集模式,且两者 SiO_2 含量相同的岩石Eu亏损程度接近(图7a);微量元素上两者除个别样品均表现出富集大离子亲石元素Rb、Th、U、K,而强烈亏损Ba、Sr、Ti、P。LREE较为富集,Nb、Ta相对于Th、U、LREE较为亏损的特征,说明其来源具有相关性,很有可能为同一期岩浆演化的产物。图7b中显示,除熔结凝灰岩及个别流纹岩样品烧失量大于2%(表3,表4),其余均较低,说明样品受后期蚀变影响较弱。从主要氧化物与 SiO_2 的协变图(图8)中可以看出:ALK、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 T、CaO、MgO、 TiO_2 、MnO、 P_2O_5 、 Na_2O 均具有随着 SiO_2 含量的增加而减小的趋势,其中ALK、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 T、 TiO_2 、 P_2O_5 与 SiO_2 显示出良好的线性相关性。这可能与岩浆演化过程中角闪石、铁钛氧化物、磷灰石、斜长石甚至钾长石的分离结晶作用相关。结合微量元素与 SiO_2 协变图(图9),其中Co、Ba、Sr与 SiO_2 呈现出明显的负相关关系,在过铝质酸性岩中,Ba主要富集于黑云母、钾长石之中;Sr主要与Ca形成类质同象,富集于斜长石、磷灰石之

中。P、Ti则主要富集于磷灰石、铁钛氧化物之中。结合张家口组流纹岩-粗面岩及碎斑熔岩体强烈亏损Ba、Sr、Ti、P的特征,也表明在岩浆演化过程中发生了较为强烈的黑云母、斜长石、钾长石、铁钛氧化物、磷灰石的分离结晶作用。而Nb、Ta的相对亏损也可能是岩浆存在钛铁矿结晶分异的佐证。同时,在图7a中可以看出 δEu 随着 SiO_2 的增加而降低,既随着向富硅发展越来越亏损Eu,也很难用简单地源区长石残留来解释,可能是对长石分离结晶的佐证。而 Na_2O 不仅与 SiO_2 具有负相关关系,并且与烧失量也具有负相关性(图7b),可能受后期蚀变作用的影响,这可能也是造成LQ-34样品A/CNK过高的原因。

另外,不论是主量元素MgO、MnO,还是微量元素Co、Ba、Sr、Zr在与 SiO_2 的图解中,侵入相碎斑熔岩体与溢流相流纹岩-粗面岩均呈现出截然不同的演化曲线,这说明碎斑熔岩体与溢流相熔岩可能是同一期岩浆演化不同阶段的产物。并且可以看出,碎斑熔岩体相较于早期溢流相熔岩有明显富硅贫碱的特征,投影于演化晚期,并且在形成年龄上相较于流纹岩-粗面岩略小,说明在这期岩浆事件中,可能是在流纹岩-粗面岩喷溢之后,岩浆房再经过一定的结晶分异,向更为富硅贫碱方向演化之后侵入地表。这也与野外观察到的碎斑熔岩体超覆于溢流相流纹岩-粗面岩之上的现象相符(图1c)。

6.3 岩浆成因与源区性质

正蓝旗地区早白垩世早期火山岩(包括侵入相

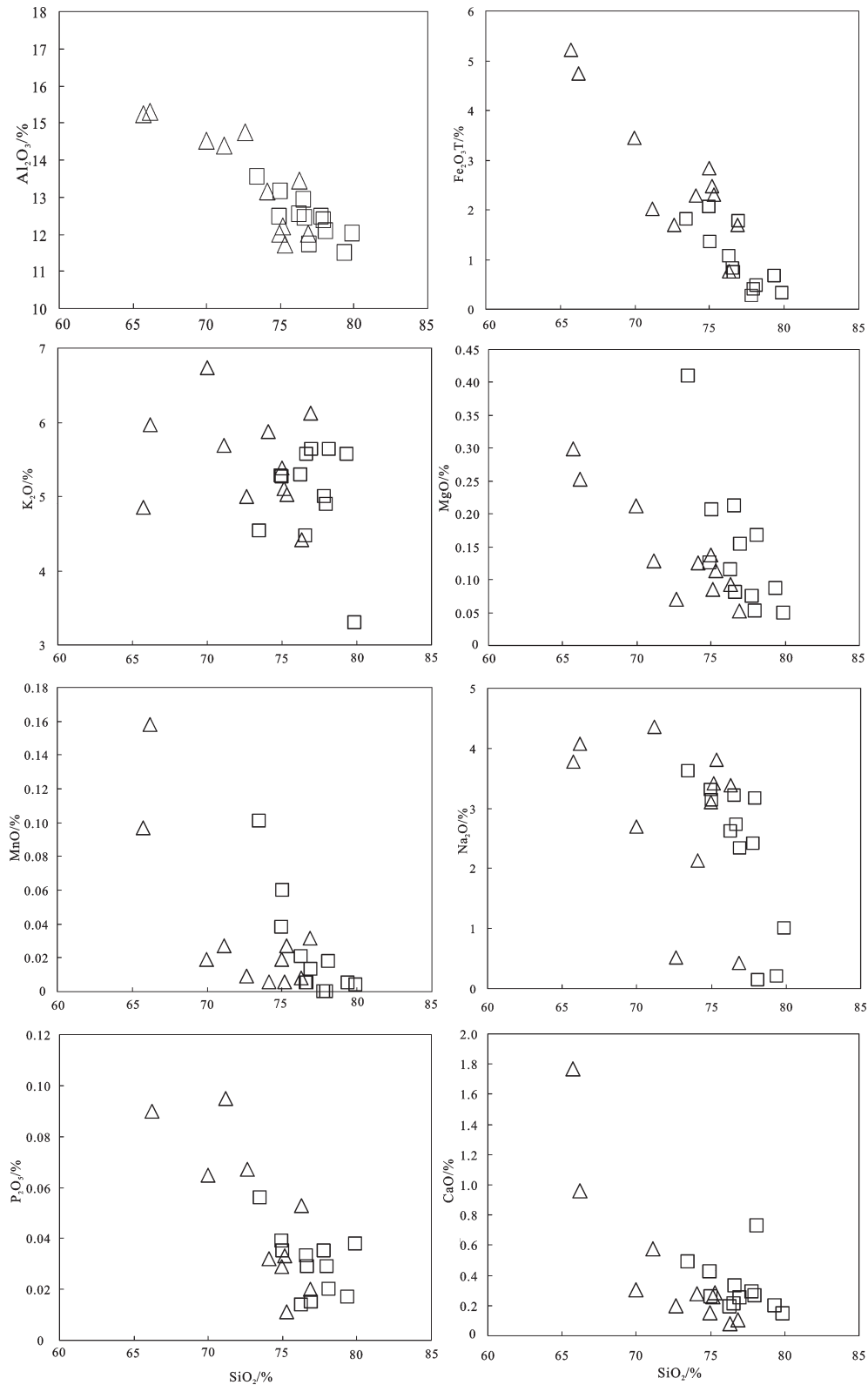


图8 正蓝旗地区早白垩世早期酸性火山岩主要氧化物和SiO₂的协变图(图例同图7)

Fig. 8 Variations of major oxides versus SiO₂ diagrams of Zhangjiakou Group volcanic rocks from Zhenglan Banner area for the same samples as those in Fig. 7

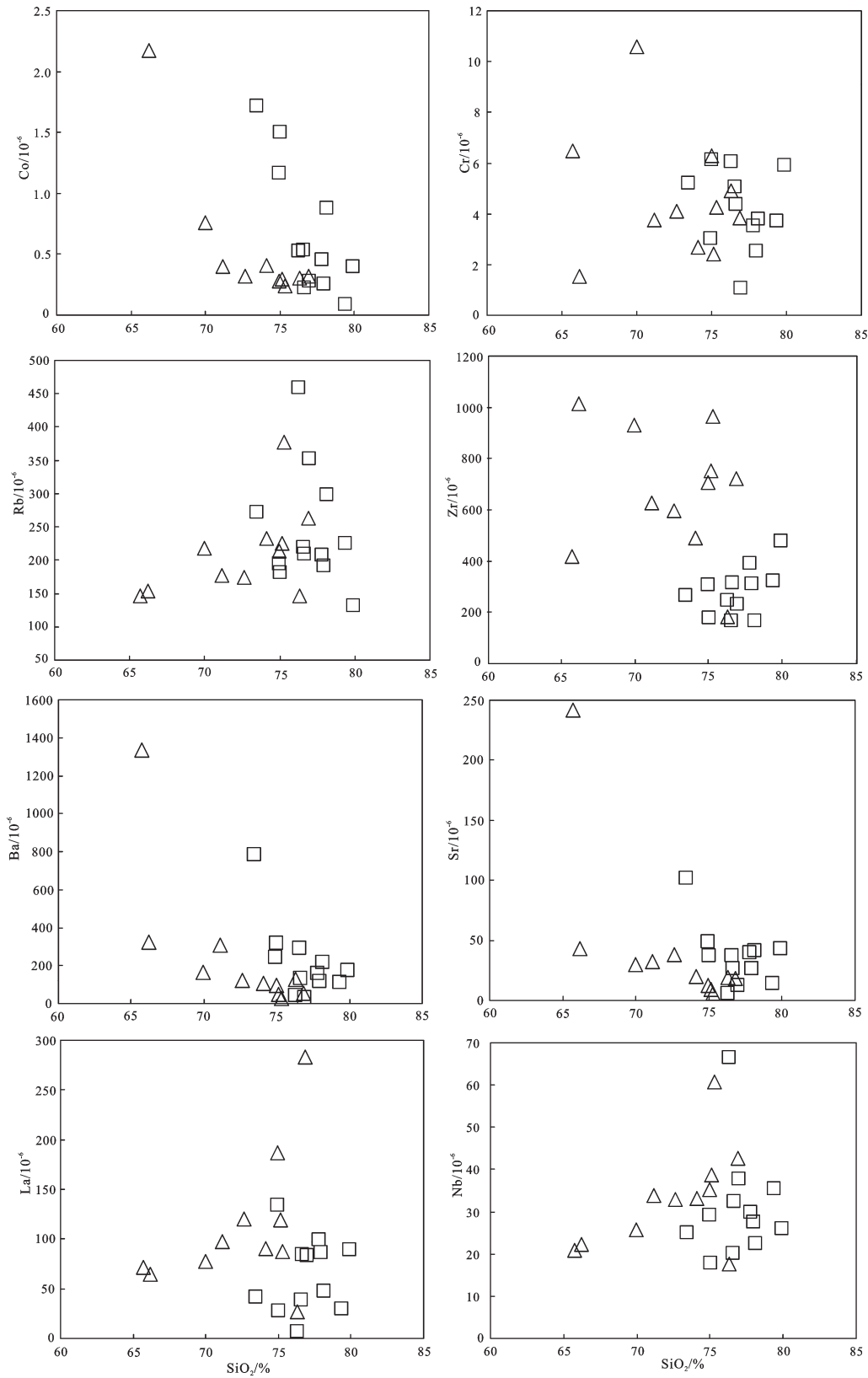


图9 正蓝旗地区火山岩微量元素-SiO₂协变图(图例同图7)

Fig. 9 Variations of trace elements versus SiO₂ diagrams of volcanic rocks from Zhenglan Banner area for the same samples as those in Fig. 7

碎斑熔岩体以及溢流相流纹岩-粗面岩)在地球化学上具有富硅富碱,特别是富K,贫Ca、Mg和Al; Rb、Th、U等大离子亲石元素及轻稀土(LREE)富集,而强烈亏损Ba、Sr、Ti、P等,同时Eu具有强烈的负异常,稀土配分为右倾燕式,即为A型花岗岩的特点(吴锁平等, 2007; 张旗等, 2012; 解龙等, 2015; 康磊等, 2015; 王对兴等, 2015; 汪洋, 2009; Whalen et al., 1987, 1996; Eby, 1990, 1992; Bernard Barbarin, 1999; Bernard Bonin, 2007)。正蓝旗地区早白垩世早期火山岩的 $10000\text{Ga}/\text{Al}$ 介于2.37~6.21,在A型花岗岩判别图解中(Whalen et al., 1987)(图10),除个别样品(LQ-26、LQ-29)落于I型、S型花岗岩范围之内,其余均落于A型花岗岩区域,所以正蓝旗地区火山岩应当与A型花岗岩具有可比性。

根据Eby(1992)A型花岗岩判别图,正蓝旗地

区早白垩世早期火山岩在 $\text{Y}/\text{Nb}-\text{Ce}/\text{Nb}$ 二元图解中主要分布于 A_1 型花岗岩范围之内,其次为 A_1 、 A_2 型的交汇区域(图11a);而在 $\text{Y}-\text{Nb}-\text{Ga}\times 3$ 三角图解中主要分布于 A_1 、 A_2 型花岗岩的交汇区域(图11b),说明其可能为以 A_1 型花岗岩为主,具有 A_1 - A_2 过渡的特点(吴锁平等, 2007)。一般认为, A_1 型花岗岩Rb、Ce、Y、Nb等不相容元素的比值与洋岛玄武岩(OIB)相近,其物源可能以幔源为主;而 A_2 型花岗岩的不相容元素比值变化较大,相似范围从陆壳到岛弧玄武岩,其物质来源应当为壳源(吴锁平等, 2007; Eby, 1990, 1992)。正蓝旗地区早白垩世早期火山岩 Nb/Ta 介于10.46~24.02,在地壳和地幔岩浆 Nb/Ta 之间; Y/Nb 介于0.49~1.88,也体现出洋岛玄武岩与地幔混合的特征(周振华等, 2010; Sun and McDonough, 1989; Eby, 1990); Rb/Sr 比值则介于

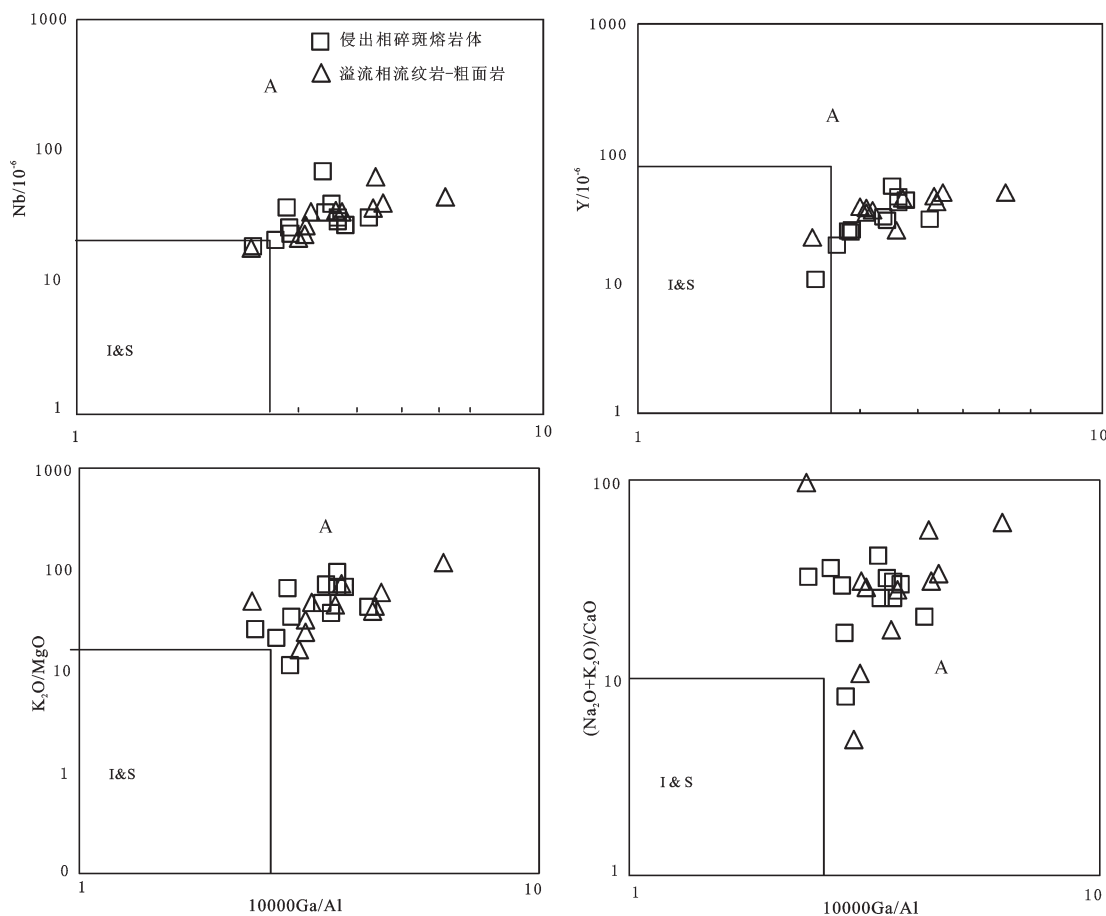


图10 正蓝旗地区火山岩A型花岗岩判别图解

(Whalen et al., 1987)

Fig.10 Discrimination diagram of A-type granite for volcanic rocks from Zhenglan Banner area

(Whalen et al., 1987)

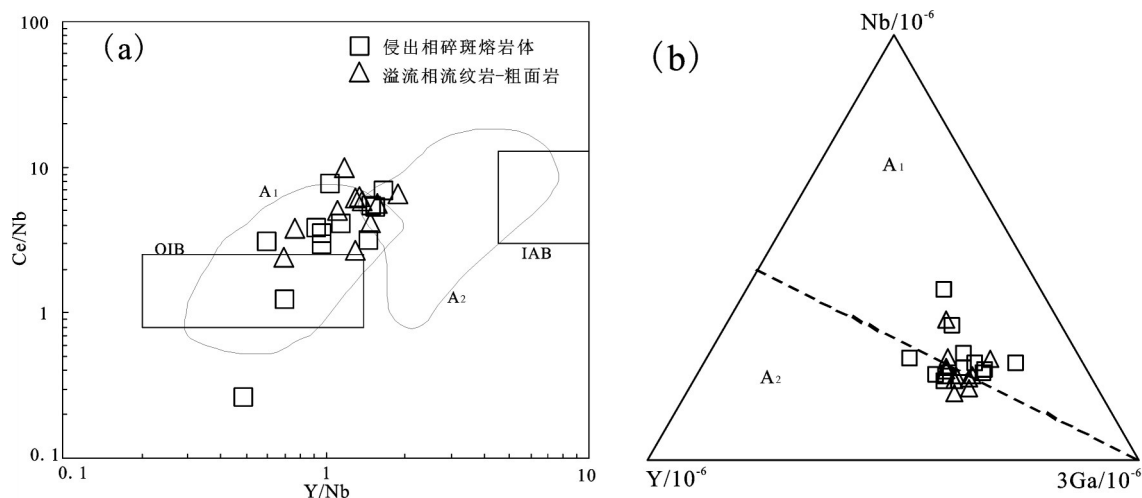
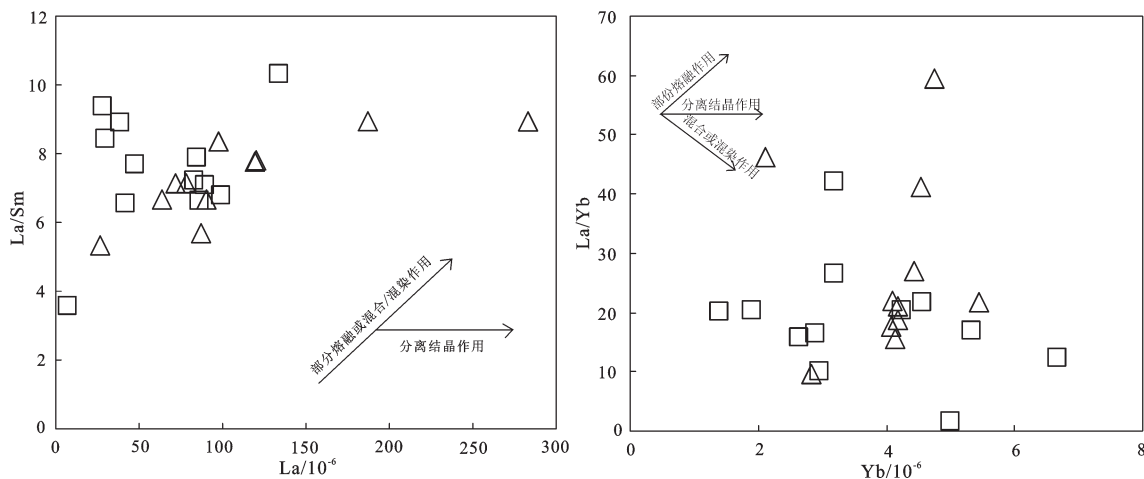
图 11 正蓝旗地区火山岩 A₁、A₂ 型花岗岩判别图解(Eby, 1992)Fig.11 Discrimination diagram of A₁, A₂ type granites for volcanic rocks from Zhenglan Banner area (after Eby, 1992)

图 12 正蓝旗地区火山岩 La-La/Sm 和 Yb-La/Yb 图解(图例同图 11)

Fig.12 Diagrams of La versus La/Sm and Yb versus La/Yb for volcanic rocks from Zhenglan Banner area for the same samples as those in Fig. 11

0.61~64.51(>0.5), 体现出壳源的特征(Tischendorf and Paelchen, 1985); Ti/Yb 比值除样品 LQ-38 为 94.72, 其余均介于 167.94~1357.69(>100), 又体现出幔源为主的特征; Ti/Zr 除样品 HB14-459 比值为 13.28, 其他均位于 0.88~7.26(<10), 而呈现出以壳源为主的特征(Francalanci et al., 1993; Pearce, 1983)。综上所述, 正蓝旗地区早白垩世早期火山岩很可能是以壳源为主, 并具有幔源岩浆的同化混染。

需要注意的是, 正蓝旗地区早白垩世早期张家口组火山岩呈现出典型的以流纹岩为主, 粗面岩-流纹岩组合。前人对冀北地区早白垩世早期流纹

岩-粗面岩组合研究认为, 其粗面岩来源于下地壳底部, 而流纹岩可能物源比较丰富, 但是以下地壳中上部为主, 都具有壳源为主的特征(巫建华等, 2015)。同时, 正蓝旗地区张家口组火山岩在部分熔融与结晶分异 La-La/Sm、Yb-La/Y 判别图解中(图 12a、12b)分布比较散乱, 相比于典型的结晶分异与部分熔融较好的线性关系(Peccerillo et al., 2003; Schiano et al., 2010), 其很难用简单的幔源岩浆结晶分异解释。

由于华北克拉通中生代(160~110 Ma)存在着强烈的地幔改造与破坏(钟福平等, 2015; Wu and

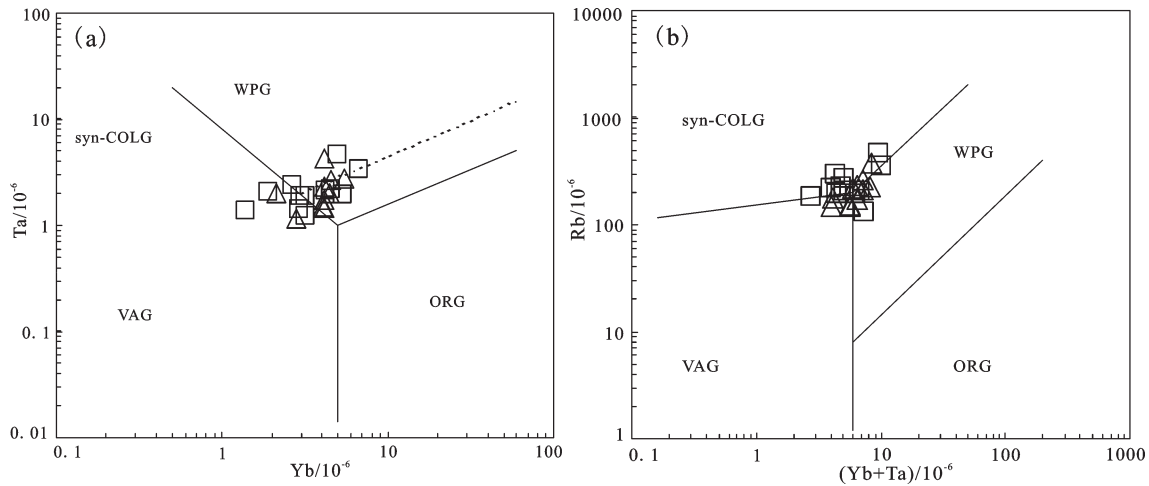


图13 正蓝旗地区火山岩构造背景判别图(图例同图11)(Pearce et al., 1984)

Fig. 13 Discrimination diagram of tectonic setting for volcanic rocks from Zhenglan Banner area for the same samples as those in Fig. 11 (after Pearce et al., 1984)

Simon, 2005), 以及由于岩浆底侵、置换和拆沉作用导致下地壳的减薄与置换, 华北北缘岩石圈减薄、置换的启动和结束时间皆比华北南缘要早(翟明国等, 2005)。结合冀北汉诺坝玄武岩中存在 140 Ma 麻粒岩相变质底侵辉长岩和辉石岩以及榴辉岩相变质的石榴辉石岩(樊祺诚, 1998), 正蓝旗地区张家口组火山岩很可能是由经较为强烈地幔物质改造的下地壳部分熔融形成。

6.4 构造背景判别

正蓝旗地区张家口组火山岩明显具有 A 型花岗岩的特征。而 A 型花岗岩通常认为形成于地壳减薄的伸展—拉张环境中, 这里主要包括碱性、无水、非造山的板内构造环境(Loiselle and Wones, 1979)和造山后(碰撞后)环境(Whalen et al, 1987, 1996; Eby, 1992; Sylvester, 1989)。依据化学成分不同, Eby (1992)将 A 型花岗岩分为 A₁与 A₂亚类, 部分学者亦称为 AA 型(Anorogenic Type)与 PA 型(Post-orogenic Type)(吴锁平等, 2007), 并且认为 A₁型花岗岩形成于非造山环境, 而 A₂型花岗岩就位于后造山环境。而本地区火山岩在 A₁-A₂型花岗岩判别图解中, 主要投影于 A₁型花岗岩与 A₁-A₂过渡型的特点, 说明其可能具有造山后向板内非造山过渡的特点, 并且以板内非造山为主。而在 Pearce(1984)花岗岩构造环境微量元素判别图解中(图 13), 正蓝旗地区火山岩主要分布于火山弧、同碰撞与板内非造山交汇区域, 并在 Yb-Ta 图解中显示出以板内非造山为

主的特征, 这也与岩石类型相符。刘红涛(2002)在对华北克拉通北缘从碰撞后到非造山中生代花岗岩的研究中认为, 华北克拉通北缘中生代碰撞后环境以高钾钙碱性和普通钙碱性花岗岩、强过铝质淡色花岗岩、高锆花岗岩和碱质 A 型花岗岩为特征, 而非造山环境则以碱性花岗岩和碱质 A 型花岗岩为主。而正蓝旗地区火山岩中流纹质岩石也主要以碱质流纹岩为主, 碱性流纹岩-碱质流纹岩组合, 并具有 A 型花岗岩的特点。结合中生代大地构造背景, 晚中生代古太平洋板块俯冲作用以及蒙古—鄂霍茨海的闭合导致华北克拉通动力学体制发生重大转折, 即由早中生代的南北向收缩或挤压转变为与古太平洋板块俯冲相关的近东西向(NWW-SEE向)的板内变形与伸展; 正是这次重大动力学体制转折导致华北克拉通东部的破坏, 并在早白垩世(约 125 Ma)达到峰期(朱日祥等, 2011)。因此正蓝旗地区张家口组火山岩应当是拉张环境下, 造山后向板内非造山过渡并以板内非造山为主的环境下形成。

7 结论

(1) 正蓝旗地区侵入相碎斑熔岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为(141.6±0.6) Ma (N=30, MSWD=0.82) 与 (139.4±0.7) Ma (N=26, MSWD=1.18), 溢流相流纹岩为 (141.4±0.7) Ma (N=25, MSWD=0.82), 两者形成年龄在误差范围内一致, 应当是同期岩浆作用的产物, 属早白垩世早期。

(2) 两者地球化学特征极为一致,均表现出富硅富碱,特别是富K,贫Ca、Mg和Al,富集Rb、Th、U等大离子亲石元素,而强烈亏损Ba、Sr、Ti、P;轻稀土(LREE)富集,同时Eu的负异常较为强烈,稀土配分具有右倾燕式分布的特征。并且明显经历了结晶分异作用。同时碎斑熔岩体相较于早期溢流相流纹岩-粗面岩更加富硅,应当是岩浆演化后期的产物。

(3) 张家口组火山岩与碎斑熔岩体具有A₁型为主, A₁-A₂过渡的地球化学特征。其应当是造山后向板内非造山转换并以板内非造山为主的伸展环境下,经较为强烈地幔物质改造的下地壳部分熔融的产物。

致谢: 锆石U-Pb年龄测试得到了北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室马芳老师的指导和帮助,审稿专家及编辑老师对文章的修改提出了宝贵意见及建议,在此一并表示感谢。

References

- Bernard Barbarin. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46: 605-626.
- Bernard Bonin. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 97: 1-29.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of The A-Type granitoids: Petrogenesis and implications[J]. *Geology*, 20: 641-644.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculation on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26: 115-134.
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Li Huimin, Li Ni, Sui Jianli, Lin Zhuoran. 1998. Zircon chronology and REE geochemistry of granulite xenoliths at Hannuoba[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 43(18): 1510-1515 (in Chinese with English abstract).
- Franzalanci L, Taylor S R, McCulloch M T. 1993. Geochemical and isotopic variations in the calc-alkaline rocks of Aeolian arc, southern Tyrrhenian Sea, Italy: Constraints on magma genesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113: 300-313.
- Gao Tongde, Zhang Xuequan, Wan Guoliang, Sun Baoheng. 1987. The petrological and geochemical characteristics of mortar rhyolite in Baiqi-Lanqi area, Inner Mongolia[J]. *Uranium Geology*, 3(4): 224-229 (in Chinese with English abstract).
- Gu Yuchao, Jia Bin, Yu Changtao, Zhang Chunhui, Shi Yi, Li Yupeng, Cong Longjiang. 2016. Geochemistry and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks in the Dazuozishanin copper polymetallic deposit, Inner Mongolia, and their geological implications[J]. *Geology in China*, (2): 432-445(in Chinese with English abstract).
- Hu Guanghua, Hu Shiling, Wang Songshan, Zhu Ming. 1982. Discussing the age of the Jurassic-Cretaceous volcanic strata according to isotopic ages[J]. *Acta Geologica Sinica*, 56(4): 315-323 (in Chinese with English abstract).
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523-548.
- Ji Qiang. 2004. Mesozoic Jehol Biota of western Liaoning, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-375 (in Chinese).
- Kang Lei, Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, Xi Rengang, Yang Zaizhao. 2015. Neopaleozoic and Mesozoic granitoid magmatism and tectonic evolution of the western West Kunlun Mountains[J]. *Geology in China*, (3): 533-552(in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong, Long Ping. 1997a. Chemical composition and ordering degree of plagioclase in porphyroclastic lava from Baiqi area, Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 18(3): 8-12 (in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong, Long Ping. 1997b. Infrared spectrum features and petrologic significance of minerals in porphyroclastic lava from Baiqi area, Inner Mongolia [J]. *Northwestern Geology*, 18(3): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong, Xu Haijiang. 1990. The lithologic feature and genesis of the porphyroclastic lava in Baiqi area, neimonggol[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 56-65 (in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong, Xu Haijiang. 1992a. Features and petrologic significance of feldspars in porphyroclastic lava from Baiqi area, Inner Mongolia[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 12(1): 26-35 (in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong, Xu Haijiang. 1992b. Geochemical features of the porphyroclastic lava from Baiqi area, Inner Mongolia, China[J]. *Geochimica*, 3(1): 86-94 (in Chinese with English abstract).
- Lin Chen. 2009. The Petrology and Petrogenetic study of Late Jurassic Volcanic Rocks in Taipusiqi, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing).
- Li Chuangju, Bao Zhiwei. 2012. Geochemical characteristics and geodynamic implications of the Early Cretaceous magmatism in Zhangjiakou region, northwest Hebei Province, China[J]. *Geochimica*, 41(4): 343-358 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinwen, Li Xuhui, Pei Rongfu, Mei Yanxiong, Wang Yonglei, Qu Wenjun, Huang Xiubao, Zang Wenshuan. 2007. Re-Os age of molybdenite from the southern ore zone of the Wushan copper deposit, Jiangxi Province, and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 801-807 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingkang, Gao Rui, Yao Yutao, Mi Shengxin, Li Wenhui, Xiong Xiaosong, Gao Jianwei. 2014. Crustal velocity structure from the

- northern margin of the North China Craton to the southern margin of the Siberian plate[J]. *Chinese Geophys.*, 57(2): 484–497 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongtao, Zhai Mingguo, Liu Jianming, Sun Shihua. 2002. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Evolution from post-collisional to anorogenic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 433–448 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongqing, Li Peixian, Tian Shugang. 2003. SHRIMP U-Pb zircon age of Late Mesozoic tuff (lava) in Luanping basin, northern Hebei, and its implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 237–244 (in Chinese with English abstract).
- Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geological Society of America Abstract Progressing*, 11: 468.
- Luo Xiuquan, Li Peixian. 1997. Study of the Jurassic-Cretaceous boundary[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 18(3): 242–247 (in Chinese with English abstract).
- Macdonald R, Davies G R, Bliss C M, Leat P T, Bailey D K. 1987. Geochemistry of high-silica peralkaline rhyolites, Naivasha, Kenya Rift Valley[J]. *Journal of Petrology*, 28(6): 979–1008.
- Middlemost EAK. 1985. *Magma and Magmatic Rocks*[M]. London: Longman, 1–266.
- Niu Baogui, He Zhengjun, Song Biao, Ren Jishun, Xiao Liwen. 2004. SHRIMP geochronology of volcanics of the Zhangjiakou and Yixian Formation, Northern Hebei Province, with a discussion on the age of the Xing'anling Group of the Great Hinggan Mountains and volcanic strata of the Southeastern Coastal Area of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 1214–1228.
- Niu Baogui, He Zhengjun, Song Biao, Ren Jishun. 2002. SHRIMP geochronology of volcanics of the Zhangjiakou and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(2): 140–141 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Pearce J A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 147(6): 2162–2173.
- Peccerillo A, Barberio M R, Yirgu G, Ayalew D, Barbieri M, Wu T W. 2003. Relationships between mafic and peralkaline silicic magmatism in continental rift settings: A petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa volcano, central Ethiopian rift[J]. *Journal of Petrology*, 44(11): 2003–2032.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Peng Yandong, Zheng Dehe, Bian Xiongfei, Song Weimin, Tao Nan. 2010. Characteristics of Rare Earth Elements and genesis of volcanic rocks of the Zhangjiakou Formation in the Sijiazhi Basin, Inner Mongolia[J]. *Geology and Exploration*, 46(6): 1071–1078 (in Chinese with English abstract).
- Schiano P, Monzier M, Eissen J P, Martin H, Koga K T. 2010. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(2): 297–312.
- Shao Ji'an, Zhang Lvqiao, Chu Zhuyin. 2003. Early Cretaceous volcanism-sedimentation in northern Hebei and its tectonic setting: A discussion[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 384–390 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42: 313–345.
- Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites[J]. *The Journal of Geology*, 97(3): 261–280.
- Tao Kuiyuan, Huang Guangzhao, Wang Meixing, Yin Jiaheng, Wang Zhanyu, Xie Jiaying. 1985. The characteristics and genetic mechanism of porphyroclastic lava in southeastern China[J]. *Resources Survey and Environment*, 6(1): 1–21 (in Chinese with English abstract).
- Tischendorf G, Paelchen. 1985. Zur Klassifikation von Granitoiden / Classification of granitoids[J]. *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften*, 13(5): 615–627.
- Wang Dezi, Liu Changshi, Shen Weizhou, Chen Fanrong. 1993. The contrast between Tonglu I-Type and Xiangshan S-Type Clastoporphyritic lava[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(1): 44–54 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Zhou Jincheng, Liu Shichang, Chen Kerong, Zhou Xinmin, Xue Jiyue, Chu Xuejun, Zeng Jiahu. 1982. The characteristics and the origin of the autoclastic monzonitic granite-porphry, Tonglu, Zhejiang[J]. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 1(3): 15–25 (in Chinese with English abstract).
- Wang Duixing, Gao Wanli, Li Chunlin, Wang Zongxiu, Zhao Zhidan. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology, petrochemistry of the Late Jurassic granite porphyry in central Zhejiang Province and their geological significance[J]. *Geology in China*, (6): 1684 (in Chinese with English abstract).
- Wang Meixing, Wang Zhanyuan, Tao Kuiyuan, Huang Guangzhao, Yin Jiaheng. 1985. Geologic and petrologic features of porphyroclastic lava dome and its genetic mechanism, Tonglu, Zhejiang[J]. *Resources Survey and Environment*, 4: 31–48 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang, Cheng Suhua. 2010. Element geochemistry and ptrogenesis of the volcanic rocks of Zhangjiakou formation in the Zhangjiakou area, north China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 30(1): 75–82 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang. 2009. Geochemistry of the Baicha A-type granite in

- Beijing municipality: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 13–24 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A– type granites: Geochemical characteristics, discriminations and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407–419.
- Whalen J B, Jenner G A, Longstaffe F J, Fobert F, Cariepy C. 1996. Geochemical and isotopic (O, Nd, Pb and Sr) constraints on A– type granite petrogenesis based on the Topsails igneous suite, Newfoundland Appalachians[J]. *Journal of Petrology*, 37(6): 1463–1489.
- Wilde S A, Zhou Jianbo. 2015a. The Late Paleozoic to Mesozoic evolution of the eastern margin of the Central Asian Orogenic Belt in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 909–921.
- Wilde S A. 2015b. Final amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo– Asian Ocean closure versus Paleo– Pacific plate subduction—A review of the evidence[J]. *Tectonophysics*, 662: 345–362.
- Wilde S A, Zhou Jianbo, Wu Fuyuan. 2015c. Development of the North– Eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt[C]// Kroner A (ed.). *The Central Asian Orogenic Belt*. Contributions to the Regional Geology of the Earth. E. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany: 184–210.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20(4): 325–343.
- Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Simon A Wilde, Zhang Xiaou, Yang Jinhui. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 233(1/2): 103–119.
- Wu Jianhua, Ding Hui, Niu Ziliang, Wu Rengui, Zhu Minqiang, Guo Guolin, Liu Shuai, Yu Dagan. 2015. SHRIMP zircon U– Pb dating of country rock in Zhangmajing U– Mo deposit in Guyuan, Hebei Province, and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 34(4): 757–768 (in Chinese with English abstract).
- Wu Suoping, Wang Meiyong, Qi Kaijing. 2007. Present situation of researches on A– type granites: A review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57–66 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 8–1.
- Xie Jiayin, Xie Fanggui. 1989. The relationship of tuff lava– porphyroclastic lava– granitic porphyry[J]. *Resources Survey and Environment*, (2): 26–39 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jiayin, Tao Kuiyuan, Xie Fanggui, Huang Guangzhao. 1993. Facies character and models of prophyroclastic lavas[J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 14(3): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jiayin, Tao Kuiyuan, Xie Fanggui, Wang Zhanyu, Wang Meixing. 1986. Characteristics and origin of liquation Ignimbrite[J]. *Resources Survey and Environment*, 4: 005: 76–87 (in Chinese with English abstract).
- Xie Long, Dun Du, Zhu Lidong, Nima Ciren, Yang Wenguang, Tao Gang, Li Chao, He Bi, He Yuan. 2015. Zircon U– Pb geochronology, geochemistry and geological significance of the Zhaduding A– type granites in northern Gangdise, Tibet[J]. *Geology in China*, (5): 1214–1227(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, Meng En, Tang Jie, Xu Meijun, Wang Wei. 2013. Mesozoic tectonic regimes and regional ore– forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339–353 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yinghong. 2009. Research on the Characteristics and Ore– bearing Property of the Caldera at Taipusiqi[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Shao Jian, Xie Wenlie, Liu Xiaoming. 2006. In– Situ U– Pb dating and Hf isotopic analyses of zircons from volcanic rocks of the Houcheng and Zhangjiakou Formations in the Zhang– Xuan area, northeast China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 71–80 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wei, Li Shuguang. 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton[J]. *Lithos*, 102(1): 88–117.
- Yang Xiujun. 2009. The Structural Feature and Mineralization Controlling Law in Taipusi County Area[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing).
- Yin Jiaheng, Wang Zhanyu, Tao Kuiyuan, Huang Guangzhao, Wang Zhongjie, Wang Meixing. 1985. Tonglu volcano– tectonic depression: basic features and its evolution[J]. *Resources Survey and Environment*, (4): 1–17 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Fan Qicheng, Zhang Hongfu, Sui Jianli. 2005. Lower crust processes during the lithosphere thinning in eastern China: Magma underplating, replacement and delamination[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1509–1526 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hong, Liu Xiaoming, Gao Shan, Zhang Lijun, Li Zhitong, Yang Fanglin, Wang Xiance. 2005a. Redefinition of the Zhangjiakou Formation in Ling yuan, western Liaoning and its significance— Constraints from laser ICP– MS zircon U– Pb ages[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(2): 110–117 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hong, Guo Wenmin, Liu Xiaoming. 2008a. Constraints on the Late Mesozoic regional angular unconformity in West Liaoning–

- north Hebei by LA-ICP-MS dating[J]. *Progress in Natural Science*, 18: 1395-1402.
- Zhang Hong, Wang Mingxin, Liu Xiaoming. 2008b. LA-ICP-MS dating of Zhangjiakou Formation volcanic rocks in the Zhangjiakou region and its geological significance[J]. *Progress in Natural Science*, 18(8): 975-981.
- Zhang Hong, Liu Xiaoming, Zhang Yeqing, Yuan Honglin, Hu Zhaochu. 2005b. Zircon U-Pb ages and significance of bottom and top beds of Zhangjiakou Formation in Liaoning and Hebei Provinces[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(4): 387-401 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Ran Hao, Li Chengdong. 2012. A-type granite: What is the essence?[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621-626 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shihong, Gao Rui, Li Haiyan, Hou Hesheng, Wu Huaichun, Li Qiusheng, Yang Ke, Li Chao, Li Wenhui, Zhang Jishen, Yang Tianshui, Keller G R, Liu Mian. 2014. Crustal structures revealed from a deep seismic reflection profile across the Solonker suture zone of the Central Asian Orogenic Belt, northern China: An integrated interpretation[J]. *Tectonophysics*, 612-613: 26-39.
- Zhang Xuebin, Zhou Changhong, Lai Lin, Xu Cui, Tian Ying, Chen Lizhen, Wei Min. 2015. Geochemistry and zircon U-Pb dating of volcanic rocks in eastern Xilin Hot, Inner Mongolia and their geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 51(2): 290-302 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Chen Bin, Zhang Shuanhong, Liu Jianmin, Hu Jianmin, Liu Jian, Pei Junling. 2010. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas[J]. *Geology in China*, 37(4): 900-915 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Fuping, Zhong Jianhua, Ahmatjan Abdurahman, Wang Yi, You Weifeng, Yang Weili. 2015. Timing and scale of the destruction of the North China Craton: Revelation from the Early Cretaceous volcanic rocks in Suhongtu Depression of Inggén-Ejin Banner Basin[J]. *Geology in China*, 42(2): 435-456 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianbo, Wilde S A. 2013. The crustal accretion history and tectonic evolution of the NE China segment of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1365-1377.
- Zhou Xinhua, Chen Wenji, Zhang Guohui, Chen Wenji, Sun Min. 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China Craton and implications to geodynamic processes[J]. *Geochimica*, 30(1): 10-23 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xunruo, Ren Jin. 1994. Mesozoic Granites in the Middle-Lower Reach of Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 118 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Lv Linsu, Yang Yongjun, Li Tao. 2010. Petrogenesis of the Early Cretaceous A-type granite in the Huanggang Sn-Fe deposit, Inner Mongolia: Constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3521-3537 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, Liu Junlai. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Sci. China (Earth Sci.)*, 54: 789-797 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 李霓, 隋建立, 林卓然. 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学[J]. *科学通报*, 43(2): 133-137.
- 高同德, 张学权, 万国良, 孙保恒. 1987. 内蒙白旗-蓝旗一带碎斑流纹岩岩石学和地球化学特征[J]. *轴矿地质*, 4: 003: 224-229.
- 顾玉超, 贾斌, 余昌涛, 张春晖, 时溢, 李玉鹏, 丛龙江. 2016. 内蒙古大座子山铜多金属矿火山岩地球化学、Sr-Nd 同位素特征及地质意义[J]. *中国地质*, (2): 432-445.
- 胡光华, 胡世玲, 王松山, 朱铭. 1982. 根据同位素年龄讨论侏罗、早白垩世火山岩系地层的时代[J]. *地质学报*, 56(4): 315-323.
- 季强. 2004. 中国辽西中生代热河生物群[M]. 地质出版社, 79-203.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 奚仁刚, 杨再朝. 2015. 西昆仑西段晚古生代一中生代花岗岩岩浆作用及构造演化过程[J]. *中国地质*, 42(3): 533-552.
- 赖绍聪, 隆平. 1997a. 内蒙白旗地区火山碎斑熔岩斜长石成分及其有序度[J]. *西北地质*, 18(3): 8-12.
- 赖绍聪, 隆平. 1997b. 内蒙白旗地区火山碎斑熔岩矿物红外光谱特征研究[J]. *西北地质*, 18(3): 1-7.
- 赖绍聪, 徐海江. 1990. 内蒙古正镶白旗碎斑熔岩岩石学特征及其岩相划分[J]. *岩石学报*, 2(1): 56-65.
- 赖绍聪, 徐海江. 1992a. 内蒙古正镶白旗碎斑熔岩长石特征及其岩石学意义[J]. *矿物学报*, 12(1): 26-35.
- 赖绍聪, 徐海江. 1992b. 内蒙古正镶白旗碎斑熔岩地球化学特征[J]. *地球化学*, 3(1): 86-94.
- 李创举, 包志伟. 2012. 冀西北早白垩世岩浆岩的地球化学特征及其地球动力学背景[J]. *地球化学*, 41(4): 343-358.
- 李进文, 李旭辉, 裴荣富, 梅燕雄, 王永磊, 屈文俊, 黄修保, 臧文栓. 2007. 江西武山铜矿南矿带辉钼 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 81(6): 801-807.
- 李英康, 高锐, 姚聿涛, 米胜信, 李文辉, 熊小松, 高建伟. 2014. 华北克拉通北缘-西伯利亚板块南缘的地壳速度结构特征[J]. *地球物理学报*, 57(2): 484-497.
- 林琛. 2009. 内蒙古太仆寺旗晚侏罗世火山岩岩石学及成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山[J]. *岩石学报*, 18(4): 433-448.
- 柳永清, 李佩贤, 田树刚. 2003. 冀北滦平晚中生代火山碎屑(熔)岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(3): 237-244.
- 罗修泉, 李佩贤. 1997. 侏罗系-白垩系界线年代研究[J]. *地球学报*,

- 18(3): 242 - 247.
- 牛宝贵, 和政军, 宋彪, 任纪舜. 2002. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义[J]. 地质通报, 22(2): 140 - 141.
- 彭艳东, 邢德和, 卞雄飞, 宋维民, 陶楠. 2010. 内蒙古赤峰四家子盆地张家口组火山岩稀土元素特征及成因[J]. 地质与勘探, 46(6): 1071-1078.
- 邵济安, 张履桥, 储著银. 2003. 冀北早白垩世火山沉积作用及构造背景[J]. 地质通报, 22(6): 384-390.
- 陶奎元, 黄光昭, 王美星, 尹家衡, 王占宇, 谢家莹. 1985. 中国东南部碎斑熔岩基本特征及成因机理的探讨[J]. 资源调查与环境, 6(1): 1-21.
- 汪洋. 2009. 北京白查 A 型花岗岩的地球化学特征及其成因与构造指示意义[J]. 岩石学报, 25(1): 13-24.
- 汪洋, 程素华. 2010. 张家口地区张家口组火山岩元素地球化学特征及成因[J]. 矿物岩石, 30(1): 75-82.
- 王德滋, 周金城, 刘昌实, 陈克荣, 周新民, 薛纪越, 楚雪君, 曾加湖. 1982. 浙江桐庐自碎二长花岗斑岩的特征和成因[J]. 岩矿测试, 1(3): 15-25.
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 陈繁荣. 1993. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. 岩石学报, 9(1): 44-54.
- 王对兴, 高万里, 李春麟, 王宗秀, 赵志丹. 2015. 浙中地区晚侏罗世花岗岩斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 42(6): 1684-1699.
- 王美星, 王占宇, 陶奎元, 黄光昭, 尹家衡. 1985. 桐庐碎斑熔岩岩穹地质、岩石特征及其成因机理探讨[J]. 资源调查与环境, 4: 31-48.
- 巫建华, 丁辉, 牛子良, 吴仁贵, 祝民强, 郭国林, 刘帅, 余达淦. 2015. 河北沽源张麻井铀-钼矿床围岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 34(4): 757-768.
- 吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及其述评[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 57-66.
- 谢家莹, 陶奎元, 谢芳贵, 王占宇, 王美星. 1986. 熔离熔结凝灰岩及其成因[J]. 资源调查与环境, (4): 005: 76-87.
- 谢家莹, 陶奎元, 谢芳贵, 黄光昭. 1993. 碎斑熔岩相特征与相模式[J]. 火山地质与矿产, 14(3): 1-6.
- 解龙, 顿都, 朱利东, 尼玛次仁, 杨文光, 陶刚, 李超, 何碧, 和源. 2015. 西藏北冈底斯扎独顶 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 中国地质 (5): 1214-1227.
- 谢家莹, 谢芳贵. 1989. 试论凝灰熔岩-碎斑熔岩-花岗斑岩的成因联系[J]. 资源调查与环境(2): 26-39.
- 胥迎红. 2009. 太仆寺旗破火山特征及其含矿性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君, 王伟. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. 岩石学报, 29(2): 339-353.
- 杨进辉, 吴福元, 邵济安, 谢烈文, 柳小明. 2006. 冀北张-宣地区后城组, 张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 31(1): 71-80.
- 杨秀俊. 2009. 太仆寺旗地区构造特征及控矿规律[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 尹家衡, 王占宇, 陶奎元, 黄光昭, 王中杰, 王美星. 1985. 桐庐火山-构造洼地基本特征及演化[J]. 资源调查与环境, (4): 1-17.
- 翟明国, 樊祺诚, 张宏福, 隋建立. 2005. 华东北部岩石圈减薄中的下地壳过程: 岩浆底侵, 置换与拆沉作用[J]. 岩石学报, 21(6): 1509-1526.
- 张宏, 柳小明, 高山, 张立君, 李之彤, 杨芳林, 王献策. 2005a. 辽西凌源地区张家口组的重新厘定及其意义——来自激光 ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. 地质通报, 24(2): 110-117.
- 张宏, 柳小明, 张晔卿, 袁洪林, 胡兆初. 2005b. 冀北滦平-辽西凌源地区张家口组火山岩顶、底的单颗粒锆石 U-Pb 测年及意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 30(4): 387-401.
- 张旗, 冉峰, 李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么?[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 621-626.
- 张学斌, 周长红, 来林, 徐翠, 田颖, 陈丽贞, 魏民. 2015. 锡林浩特东部早白垩世白音高老组岩石地球化学特征、LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质与勘探, 51(2): 290-302.
- 赵越, 陈斌, 张拴宏, 刘建民, 胡建民, 刘健, 裴军令. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件[J]. 中国地质, 37(4): 900-915.
- 钟福平, 钟建华, 艾合买提江·阿不都热合曼, 王毅, 由伟丰, 杨伟利. 2015. 华北克拉通破坏时间与破坏范围分布特征——来自银根-额济纳旗盆地苏红图拗陷早白垩世火山岩的启示[J]. 中国地质, 42(2): 435-456.
- 周新华, 张国辉, 杨进辉, 陈文寄, 孙敏. 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义[J]. 地球化学, 30(1): 10-23.
- 周珣若, 任进. 1994. 长江中下游中生代花岗岩[M]. 北京: 地质出版社, 118.
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 李涛. 2010. 内蒙古黄岗锡铁矿区早白垩世 A 型花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学制约[J]. 岩石学报, 26(12): 3521-3537.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583-592.