

doi: 10.12029/gc20170212

孙立新, 张云, 李影, 张永, 任邦方, 张天福. 2017. 内蒙古赤峰地区晚泥盆世双峰式火山岩地球化学特征与板内伸展事件[J]. 中国地质, 44(2): 371-388.

Sun Lixin, Zhang Yun, Li Ying, Zhang Yong, Ren Bangfang, Zhang Tianfu. 2017. Geochemical characteristics and intraplate extension of Late Devonian bimodal volcanic rocks in Chifeng area of Inner Mongolia[J]. Geology in China, 44(2): 371-388(in Chinese with English abstract).

内蒙古赤峰地区晚泥盆世双峰式火山岩地球化学特征与板内伸展事件

孙立新 张云 李影 张永 任邦方 张天福

(中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要: 内蒙古赤峰敖汉旗一带的朝吐沟组火山岩由变玄武岩、变流纹岩组成, 是一套典型的“双峰式”火山岩组合。采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法, 获得了流纹岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 (359 ± 1) Ma 和 (360 ± 1) Ma, 形成于晚泥盆世法门期。火山岩的 SiO_2 含量分布在 46.24%~56.6% 和 77.59%~85.75%, 分别属于变玄武岩(玄武安山岩)和变流纹岩。变玄武岩(玄武安山岩)轻稀土元素弱富集而重稀土元素略亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.4\sim 8.76$, 有弱 Eu 负异常, 富集大离子亲石元素和高场强元素, Nb、Ta、Ti 有明显负异常, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.705076~0.707770, 具有高的正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+0.51~+4.90)和年轻的模式年龄 $T_{\text{DM}}(964\sim 1090 \text{ Ma})$, 推断其源于遭受地壳物质混染的亏损地幔; 变流纹岩富硅、钾和钠, 贫镁, 具有轻稀土元素富集而重稀土元素略亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 7.07\sim 11.07$, 有强烈的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.12\sim 0.43$), Ti、P、Sr、Ba 相对强烈亏损, Nb、Ta 亏损, Rb、Th、U、K 相对富集; 其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.713757~0.739647, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -1.75~+2.54, 和年轻的模式年龄 $T_{\text{DM}}(846\sim 1156 \text{ Ma})$; 多数锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -2.3~+6.9, 年轻的模式年龄 $T_{\text{DM}}(707\sim 1074 \text{ Ma})$, 具有 A 型花岗岩的特征, 推测其来源为新元古代时新生的年轻陆壳。综合前人区域研究成果、地球化学特征, 朝吐沟组“双峰式”火山岩形成于晚泥盆世板内伸展构造背景。

关键词: 晚泥盆世; 双峰式火山岩; 伸展构造背景; 内蒙古赤峰

中图分类号: P588.14⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2017)02-0371-18

Geochemical characteristics and intraplate extension of Late Devonian bimodal volcanic rocks in Chifeng area of Inner Mongolia

SUN Lixin, ZHANG Yun, LI Ying, ZHANG Yong, REN Bangfang, ZHANG Tianfu

(Tianjin Center of Geological Survey, CGS, Tianjin 300170, China)

Abstract: The volcanic rocks of the Chaotugou Formation in Chifeng area of Inner Mongolia consist of meta-basalts and meta-rhyolites and exhibit typical "double peaks", with the SiO_2 content being 46.24%~56.6% and 77.59%~85.75% respectively. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of rhyolite yielded U-Pb ages of (359 ± 1) Ma- (360 ± 1) Ma, which represent the time of crystallization

收稿日期: 2016-03-07; 改回日期: 2016-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(41572172)和中国地质调查局项目(1212011121078)联合资助。

作者简介: 孙立新, 男, 1964年生, 研究员, 从事地层古生物和区域地质研究; E-mail: tjslixin@126.com。

of the volcanic rocks. The volcanic rocks were formed in late Devonian Famennian age. Geochemically, meta-basalts (or basaltic andesites) are characterized by enriched LREE, depleted HREE, slightly negative Eu, Nb, Ta, Sr and Ti anomalies and high abundances of LILE and HFSE, with the $(La/Yb)_N$ ratios from 2.4 to 8.76, and the $^{87}Sr/^{86}Sr$ initial values from 0.705076 to 0.707770; in addition, they have relatively high positive $\epsilon_{Nd}(t)$ values (+0.51 to +4.90) and relatively young T_{DM} (964–1090 Ma) ages. The mafic rocks might have resulted from the mixture of depleted mantle with crustal source. Meta-rhyolites are generally characterized by rich silicon, alkali and poor magnesium. They are characterized by enriched LREE, depleted HREE, noticeable negative Eu (δEu 0.12–0.43), Nb, Ta, Sr, P and Ti anomalies, relatively high U, Th and rather low Ba, Sr, Ti and P; the $(La/Yb)_N$ ratios are from 7.07 to 11.07, $^{87}Sr/^{86}Sr$ initial values are high (0.713757–0.739647), negative $\epsilon_{Nd}(t)$ values are low (–1.75 to +2.54), and T_{DM} ages are relatively young (846–1156 Ma); besides, most zircons have the positive $\epsilon_{Hf}(t)$ values (–2.3 to +6.9) and relatively young T_{DM} ages (707–1074 Ma). The felsic rocks show an A-type affinity and might have come from a juvenile crustal source. According to their geochemistry and previous regional geological studies, the late Devonian volcanic rocks are basalts and rhyolites, suggesting a typical bimodal volcanic rock association and implying an extensional setting.

Key words: Late Devonian; bimodal volcanic rocks; extensional setting; Chifeng area

About the first author: SUN Lixin, male, born in 1964, senior researcher, engages in research on stratigraphic palaeontology and regional geology; E-mail: tjslixin@126.com.

Fund support: Supported by Programs of National Natural Science Foundation (No. 41572172) and China Geological Survey (No. 1212011121078).

1 引 言

“双峰式”火山岩组合是重要的构造-岩石组合之一,对确定岩石形成的大地构造环境具有十分重要的作用,它可以形成于大陆裂谷、洋岛、洋内岛弧、初始弧后盆地、大陆拉张减薄环境等多种大地构造环境(Pearce et al., 1984,1995; Brouxel et al., 1987; Hochstaedter et al., 1990; 钱青等, 1999),但普遍认为是伸展背景下的产物。虽然双峰式火山岩是伸展构造环境的典型岩石组合,但是不同环境下的双峰式火山岩却有着不同的岩石组合和地球化学属性(钱青等, 1999),如大陆裂谷以富碱质岩石组合碱性玄武岩-碧玄岩-石榴岩-响岩-碱性流纹岩等组成为主(Wilson, 1989);洋岛环境以玄武岩为主,流纹岩所占比例非常少为特征(Christian et al., 1997; Geist et al., 1995);大陆拉张减薄环境下双峰式火山岩成分比较复杂(Pin et al., 1980);而洋内岛弧、成熟岛弧以及初始弧后盆地环境下基性岩类多以岛弧拉斑玄武岩或钙碱性岩石组合为主(Donnelly et al., 1980; Kay et al., 1993; Rollison, 1993)。因此,鉴别双峰式火山岩组合及其产出的构造背景显然是十分必要的。

内蒙古赤峰地区大地构造上处于华北克拉通北缘断裂和西拉木伦河断裂之间(图1),是古亚洲

洋与华北板块毗邻地区之一(潘桂棠等, 2009)。近年来,华北北缘晚古生代(尤其是石炭—二叠纪)岩浆活动已进行了大量的研究,并认为石炭—二叠纪其形成于安第斯型活动大陆边缘环境(王惠初等, 2007; Zhang et al., 2007, 2009a, 2009b; 张拴宏等, 2010; 张维等, 2012)。然而,对华北地块北缘泥盆纪岩浆活动及其构造背景还较为模糊(王芳等, 2009; 罗殿宽等, 2001; Jiang, 2005; Miao et al., 2002; Shi et al., 2010; 刘建峰等, 2013),泥盆纪是古亚洲洋构造演化过程中的重要阶段,记录这一时期地质构造演化过程的地质记录,主要分布在二连—东乌珠穆沁旗地区和赤峰敖汉旗地区。二连—东乌珠穆沁旗地区泥盆系以浅海相碎屑岩夹生物碎屑灰岩为主,生物化石丰富,形成于稳定被动陆缘环境,缺少岩浆记录;内蒙古赤峰敖汉旗地区泥盆系除前坤头沟组外,还发育朝吐沟组,朝吐沟组由变质基性和酸性火山岩夹火山碎屑岩、绢云石英片岩等组成,早期认为其形成于早石炭世(内蒙古自治区地质矿产局, 1991, 1996),最新的研究表明其时代为晚泥盆世(叶浩等, 2014; 孙立新等, 2015)并具有“双峰式”火山岩特征。相比而言,赤峰地区晚泥盆世双峰式火山岩的研究程度较低,晚泥盆世火山岩组合、成因及其构造意义尚未得到充分的认识。为此,本文报道了内蒙赤峰敖汉旗一带出露的朝土沟

组火山岩的锆石U-Pb年龄、岩石地球化学以及Sr-Nd-Hf同位素组成的结果,对限定晚古生代地层时代、构造环境及其古亚洲洋的构造演化历史具有重要意义。

2 地质背景

内蒙古赤峰敖汉旗地区位于华北北缘古生代陆缘增生带,区内早古生代地层少量发育,广泛出露有大面积的晚古生代和中新生代火山-沉积岩系,并有大面积的晚古生代和中生代花岗岩类及火山岩产出(图1)。研究区介于华北克拉通北缘断裂与西拉木伦断裂之间,华北克拉通北缘断裂通常被认为是华北克拉通与兴蒙造山带(褶皱带)的边界

断裂(任纪舜等,1980;内蒙古自自区地质矿产局,1996;张振法等,2001),西拉木伦河断裂带则代表西伯利亚和中朝古板块的缝合带(李春昱等,1982;Li, 2006;李锦轶等,2009)。华北克拉通北缘断裂以南地区出露代表华北克拉通基底组成的太古-古元古代结晶岩系(河北省地质矿产局,1989;内蒙古自自区地质矿产局,1996;李江海等,1998;毛德宝等,1999;刘树文等,2007);西拉木伦河断裂以北地区以广泛发育显生宙以来具有高钨、低铈同位素比值的岩浆岩为其显著特征(洪大卫等,2000;Wu et al., 2000; Jahn Borning et al., 2000, 2004; Chen et al., 2009),代表西伯利亚古陆的古亚洲洋增生边缘。两条断裂带之间属于传统的兴蒙地槽褶皱带的南

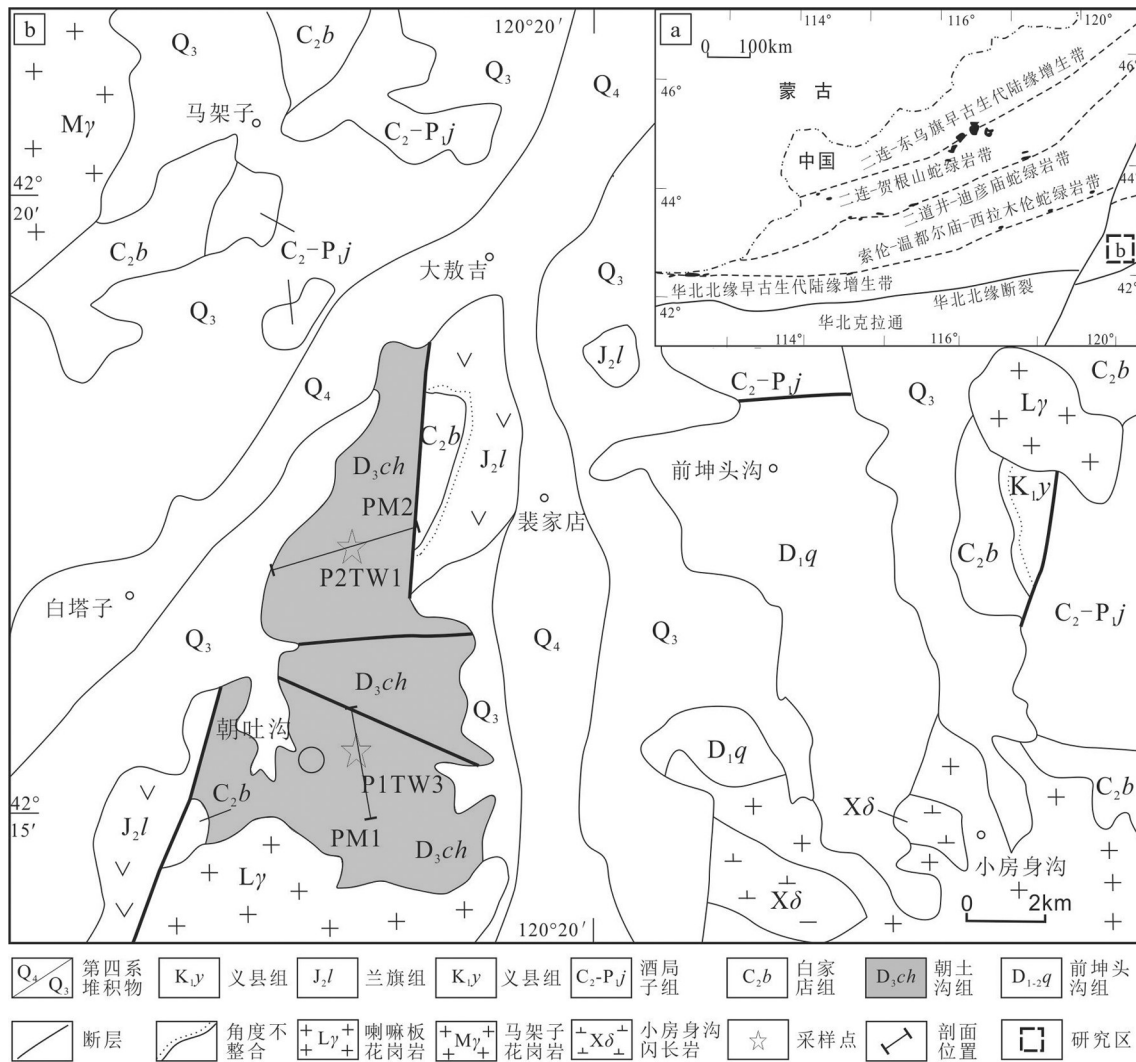


图1 内蒙古敖汉旗朝吐沟一带地质图及大地构造位置

Fig.1 Geological map and tectonic location for Chaotugou of Aohan Banner area, Inner Mongolia

部地区,在早奥陶世古亚洲洋向南和向北分别沿着白乃庙古岛弧和锡林浩特微古陆块发生过板块俯冲事件(Chen et al., 2000),发育奥陶纪钙碱性岩浆活动,前人曾将其划分为白乃庙岛弧带(邵济安, 1991;唐克东,1992)或温都尔庙—翁牛特增生地体(王荃等,1991)。区域上志留系西别河组与下伏奥陶系包尔汉图群之间为角度不整合接触,反映了华北板块北缘在奥陶纪期间曾发生过一次重要的板块俯冲增生事件(邵济安,1991;唐克东,1992;张允平等, 2010)。因而,一些学者将其划分为华北北缘早古生代增生边缘(李锦轶等,2009)。之后志留纪—泥盆纪开启了新的洋盆演化阶段,早石炭世晚期—中二叠世,该增生边缘与华北克拉通北缘内蒙古隆起(地轴)地区发育强烈的钙碱性岩浆活动,该地区则转化成为安第斯型活动大陆边缘环境(王惠初等, 2007; Zhang et al., 2007, 2009a, 2009b; 张拴宏等, 2010; 张维等, 2012),进入新的构造演化阶段。

3 样品及岩石特征

本文所研究的火山岩样品主要产自赤峰敖汉旗地区朝吐沟组,采样位置见图1、图2。

样品产自敖汉旗地区朝吐沟组建组剖面(图2)。该组为一套整合于早—中泥盆世前坤头沟组(D₁₋₂q)之上、白家店组(C₂b)之下的火山岩夹碎屑岩组合,出露于敖汉旗莲花山、白塔子乡朝吐沟、前坤头沟一带,呈南北向带状展布。岩性以玄武岩、玄武安山岩和流纹岩及角砾凝灰岩为主,夹变砂岩、板岩等。

样品P₁TW3坐标:42°10'30"N, 121°20'40"E;取自朝吐沟组上部的流纹岩,风化面呈灰黄色,流纹构造,斑状结构,斑晶为石英、微斜长石和斜长石,基质为隐晶质。

样品P₂TW1产自敖汉旗地区朝吐沟组西大山剖面(图2)。采样坐标:42°15'30"N, 121°23'40"E。取自该组中部的流纹岩,风化面呈灰白色、灰黄色,流纹构造,斑状结构,斑晶为石英、碱性长石和斜长石,基质为隐晶质。

朝吐沟组火山岩分布在朝吐沟—大西沟附近,火山岩主要为玄武岩和流纹岩,缺少中性火山岩,剖面上玄武岩与流纹岩交互产出(图2)。玄武岩岩石表面绿帘石化呈灰绿色,新鲜面为灰黑色—黑色,呈块层状,岩石普遍发育块状构造、气孔杏仁构造,

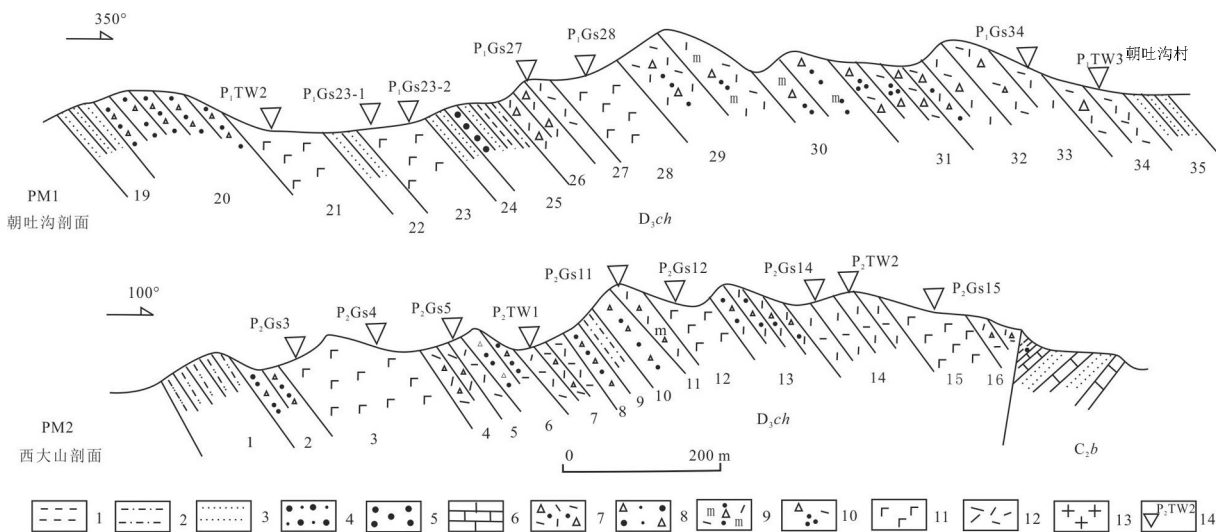


图2 朝吐沟组火山岩剖面及样品点

1—板岩;2—粉砂质板岩;3—砂岩;4—含砾砂岩;5—砾岩;6—灰岩;7—流纹质凝灰角砾岩;8—含角砾砂岩;9—流纹质熔结凝灰角砾岩;10—英安质含角砾晶屑凝灰岩;11—玄武岩;12—流纹岩;13—花岗岩;14—样品及编号

Fig.2 Geological section of Chaotugou Formation volcanic rocks and sampling locations

1—Slate; 2—Silty slate; 3—Sandstone; 4—Pebbly sandstone; 5—Conglomerate; 6—Limestone; 7—Rhyolitic tuff breccias; 8—breccias-bearing sandy conglomerate; 9—Liparitic welded tuff breccias; 10—Dacite breccias-bearing crystal tuff; 11—Basalt; 12—Rhyolite; 13—Granite; 14—Sample and its serial number

气孔常被方解石或燧石充填,呈杏仁体。显微镜下,具有间粒结构、斑状结构,斑晶为单斜辉石和斜长石。单斜辉石,呈半自形或他形粒状,发育简单双晶和环带构造,有些构成聚斑晶;部分辉石斑晶发生绿帘石化,有的已蚀变为绿泥石,也有大部分蚀变为假象纤闪石。斜长石既以斑晶出现,又出现于基质中,斜长石斑晶大小1~5 mm,含量15%~30%,呈半自形板条状,具卡斯巴双晶和聚片双晶,多已发生绢云母化和泥化。基质呈玻基交织结构、间粒结构和间隐结构,含有他形粒状的辉石,角闪石偶尔出现,副矿物有磁铁矿、磷灰石等,有些磁铁矿已蚀变为褐铁矿。有次生的方解石脉、绿泥石脉穿插在岩石中。

流纹岩呈灰白色,常见流纹构造、石泡构造,呈斑状结构和流动结构。主要矿物是石英、斜长石和钾长石,有很少量的黑云母和次生的白云母,副矿物有磁铁矿、褐铁矿。斜长石的绢云母化和泥化普遍比较强烈。岩石中有次生的方解石脉穿插。

4 分析方法

4.1 岩石化学分析

岩石化学分析样品的制备在河北区域地质调查研究所完成。鉴于火山岩或多或少含有大小不同的杏仁石,在细加工样品之前精心剔除杏仁石,但难免混入显微级杏仁体。选择新鲜样品用于地球化学分析,首先将岩石样品在颚式破碎机上进行粗碎,然后在玛瑙钵体的研磨机上研磨至200目以下,样品加工过程均在无污染设备中进行。在朝土沟组中选择了16件代表性样品,包括玄武岩和流纹岩类,分别对8个变玄武岩和8个变流纹岩样品做地球化学分析,主量元素采用X射线荧光光谱分析法(XRF)分析误差<1%;微量元素分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验室用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析完成,测试方法和依据参照DZ/T0223-2001(ICP-MS)标准执行,分析精度优于5%~10%。

4.2 锆石U-Pb测年

选择剖面上的2件流纹岩样品(P_1TW_3 、 P_2TW_1)进行锆石U-Pb定年分析,锆石挑选由河北省廊坊区域地质调查研究院地质实验室完成,锆石阴极发光照相和LA-ICP-MS定年在天津地质矿产研究所

实验室完成。流纹岩样品在河北省区域地质矿产调查研究所采用常规方法进行粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选,在双目镜下选出晶形较好的锆石;然后将锆石黏贴在环氧树脂表面,打磨抛光后露出锆石的表面,制成样靶。对测试样靶中锆石进行透射、反射和阴极发光(CL)照相,便于确定所测定的颗粒位置。根据对锆石的阴极发光的研究,采用LA-MC-ICP-MS仪器对锆石U-Pb进行了分析。测试在天津地质矿产研究所同位素实验室LA-MC-ICP-MS仪器上完成。利用193 nm激光器对锆石进行剥蚀,采用的激光剥蚀的束斑直径为35 μm ,进行锆石U-Pb同位素测定。采用TEMORA作为外部锆石年龄标准。利用NIST612玻璃标样作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量,详细的实验原理和流程参见文献(Liu, et al., 2010)。采用ICP-MS DataCal程序和Isoplot(ver3.0)程序(Ludwig, 2003)进行数据处理。

4.3 Sr-Nd同位素分析方法

Sr-Nd同位素分析在天津地质矿产研究所实验室完成。采用HF+HNO₃混合酸溶解,用阳离子交换技术进行分离,分离本底在同位素测量误差范围之内。同位素比值的测定是在多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)上进行,分析精度优于0.002%。国际标样La Jolla和BCR-2¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd测定的平均值分别为0.511859±6 (2 σ , n=20)和0.512637±3 (2 σ , n=2), NBS-987给出的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值为0.710245±15 (2 σ , n=9)。

4.4 锆石Hf同位素分析方法

锆石Hf同位素测试在天津地质矿产研究所配有193 nm激光取样系统的Neptune多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上进行,仪器的运行条件和详细的分析流程见(耿建珍等, 2011)。测定时用锆石国际标样91500作外标,分析时激光束直径为63 μm ,所用的激光脉冲速率为6~8 Hz,激光束脉冲能量为100 mJ。

5 分析结果

5.1 锆石U-Pb年代学

敖汉旗朝吐沟组(D_3ch)流纹岩样品(P_1TW_3 和 P_2TW_1)中的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果见表1,测定的锆石阴极发光(CL)图像与锆石U-Pb

表1 朝吐沟组流纹岩(P1TW3, P2TW1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the rhyolites (P1TW3, P2TW1) of the Chaotugou Formation

测点	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值及误差						表面年龄/ Ma		
	Pb	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
P ₁ TW3												
1	20	319	0.68	0.0575	0.0006	0.4136	0.0079	0.0522	0.0009	360±4	351±7	292±39
2	20	311	0.7	0.0575	0.0006	0.4409	0.0079	0.0556	0.0009	361±3	371±7	435±35
3	19	312	0.68	0.0573	0.0005	0.4269	0.0077	0.054	0.0009	359±3	361±7	372±36
4	16	255	0.65	0.057	0.0005	0.4275	0.0104	0.0544	0.0012	357±3	361±9	387±51
5	15	231	0.73	0.057	0.0007	0.4314	0.0088	0.0549	0.0011	357±4	364±7	408±44
6	10	159	0.55	0.0577	0.0006	0.4302	0.0146	0.0541	0.0018	362±4	363±12	374±74
7	12	189	0.6	0.0581	0.0006	0.4417	0.0131	0.0551	0.0015	364±3	371±11	418±63
8	13	208	0.52	0.0578	0.0006	0.436	0.0127	0.0547	0.0014	362±4	367±11	400±59
9	19	293	0.75	0.058	0.0006	0.4253	0.0149	0.0532	0.0016	364±4	360±13	335±67
10	27	414	0.8	0.0579	0.0005	0.4514	0.0083	0.0565	0.0008	363±3	378±7	474±33
11	23	356	0.7	0.0574	0.0007	0.4412	0.009	0.0557	0.001	360±4	371±8	442±39
12	49	753	0.97	0.0568	0.0005	0.4152	0.0047	0.053	0.0004	356±3	353±4	328±18
13	17	268	0.73	0.0571	0.0006	0.4385	0.0089	0.0556	0.001	358±4	369±8	438±40
14	9	142	0.53	0.0568	0.0005	0.433	0.0193	0.0553	0.0023	356±3	365±16	425±94
15	17	270	0.75	0.0567	0.0005	0.4419	0.011	0.0565	0.0013	356±3	372±9	472±52
16	10	156	0.59	0.0573	0.0006	0.461	0.0147	0.0583	0.0018	359±4	385±12	542±66
17	9	155	0.58	0.0564	0.0005	0.4328	0.0191	0.0557	0.0024	354±3	365±16	439±94
18	8	138	0.5	0.0579	0.0008	0.4214	0.0197	0.0527	0.0023	363±5	357±17	318±100
19	22	346	0.64	0.0585	0.0005	0.4448	0.0111	0.0552	0.0012	366±3	374±9	419±49
20	14	229	0.62	0.0585	0.0005	0.4581	0.0107	0.0568	0.0012	367±3	383±9	483±48
21	16	271	0.5	0.0582	0.0006	0.4059	0.0082	0.0506	0.0009	364±4	346±7	223±41
22	10	172	0.6	0.0575	0.0006	0.4418	0.0117	0.0557	0.0014	360±4	372±10	442±55
23	12	197	0.63	0.0579	0.0007	0.4335	0.0102	0.0543	0.0012	363±5	366±9	384±50
24	19	296	0.76	0.0573	0.0007	0.42	0.0089	0.0532	0.001	359±5	356±8	338±41
P ₂ TW1												
1	9	150	0.47	0.0575	0.0005	0.4346	0.014	0.0548	0.0018	360±3	366±12	406±72
2	7	115	0.48	0.0569	0.0006	0.4244	0.0171	0.0541	0.0022	357±4	359±14	376±89
3	12	188	0.53	0.0575	0.0004	0.4376	0.0106	0.0552	0.0013	360±3	369±9	420±52
4	11	183	0.44	0.057	0.0005	0.4402	0.0118	0.056	0.0014	357±3	370±10	454±57
5	7	123	0.48	0.0575	0.0007	0.4348	0.0143	0.0548	0.0018	361±4	367±12	405±72
6	14	229	0.52	0.0584	0.0004	0.4136	0.009	0.0513	0.0011	366±3	351±8	256±48
7	13	214	0.55	0.0573	0.0005	0.435	0.0104	0.0551	0.0012	359±3	367±9	416±51
8	14	230	0.51	0.0575	0.0007	0.4134	0.009	0.0521	0.0011	361±4	351±8	291±49
9	27	430	0.63	0.0568	0.0005	0.4253	0.0054	0.0543	0.0007	356±3	360±5	383±29
10	12	191	0.49	0.0581	0.0006	0.4363	0.0127	0.0545	0.0016	364±4	368±11	391±65
11	11	173	0.47	0.0576	0.0006	0.4491	0.0113	0.0566	0.0014	361±4	377±9	476±54
12	9	147	0.44	0.0565	0.0005	0.4307	0.0295	0.0553	0.0038	354±3	364±25	425±151
13	11	174	0.69	0.0574	0.0006	0.4375	0.0115	0.0552	0.0015	360±4	368±10	422±61
14	11	186	0.49	0.0568	0.0005	0.4081	0.012	0.0522	0.0016	356±3	348±10	292±68
15	49	687	1.05	0.057	0.0011	0.4442	0.007	0.0566	0.0008	357±7	373±6	475±31
16	15	241	0.62	0.0575	0.0006	0.4145	0.0078	0.0522	0.001	361±4	352±7	296±42
17	9	144	0.43	0.0574	0.0007	0.4205	0.0146	0.0532	0.0018	360±5	356±12	336±78
18	21	327	0.61	0.0569	0.0007	0.4405	0.0141	0.0562	0.0015	357±4	371±12	458±59
19	11	174	0.6	0.0581	0.0008	0.4405	0.0153	0.055	0.0017	364±5	371±13	413±69
20	12	192	0.49	0.0574	0.0006	0.448	0.0093	0.0566	0.0012	360±4	376±8	475±45
21	14	223	0.63	0.0577	0.0007	0.4326	0.0087	0.0544	0.001	362±4	365±7	386±42
22	12	187	0.65	0.0579	0.0006	0.4447	0.0124	0.0557	0.0015	363±4	374±10	441±61
23	10	158	0.59	0.0574	0.0006	0.4148	0.0121	0.0524	0.0015	360±4	352±10	304±67
24	10	160	0.5	0.0566	0.0006	0.4381	0.0114	0.0561	0.0015	355±4	369±10	457±59

谐和图见图3和图4。

5.1.1 流纹岩样品(P₁TW3)

样品(P₁TW3)中所分选出的锆石目镜下无色透明,颗粒粒度变化于80~200 μm,锆石晶体形态有浑圆状、短柱状、长柱状,总体上自形到半自形。柱状锆石的长宽比为2~3,阴极发光图像显示,锆石具有明显的岩浆锆石振荡环带结构(图3)。

该样品锆石24个测点的分析结果见表1,其中24颗锆石的年龄都非常集中,位于谐和线上,24个测点²⁰⁶Pb/²³⁸U的年龄变化于354~376 Ma,获得年龄加权平均值为(360.3±1.4) Ma(图3);相应测点的Th、U分别变化于46.06×10⁻⁶~345.44×10⁻⁶和123×

10⁻⁶~444×10⁻⁶,Th/U值主体在0.4~1.27,二者之间的相关性良好,与典型的岩浆锆石一致。因此,变流纹岩的锆石U-Pb年龄(360.3±1.4) Ma可代表该流纹岩的形成年龄。

5.1.2 流纹岩样品(P₂TW1)

染房村老西沟朝吐沟组变流纹岩锆石U-Pb流年分析结果(表1)。

样品(P₂TW1)中所分选出的锆石目镜下无色透明,颗粒粒度变化于60~180 μm,锆石晶体形态有短柱状、长柱状,总体上自形到半自形。柱状锆石的长宽比为2~3,阴极发光图像显示,锆石具有明显的岩浆振荡环带结构(图4)。锆石Th/U值主体在

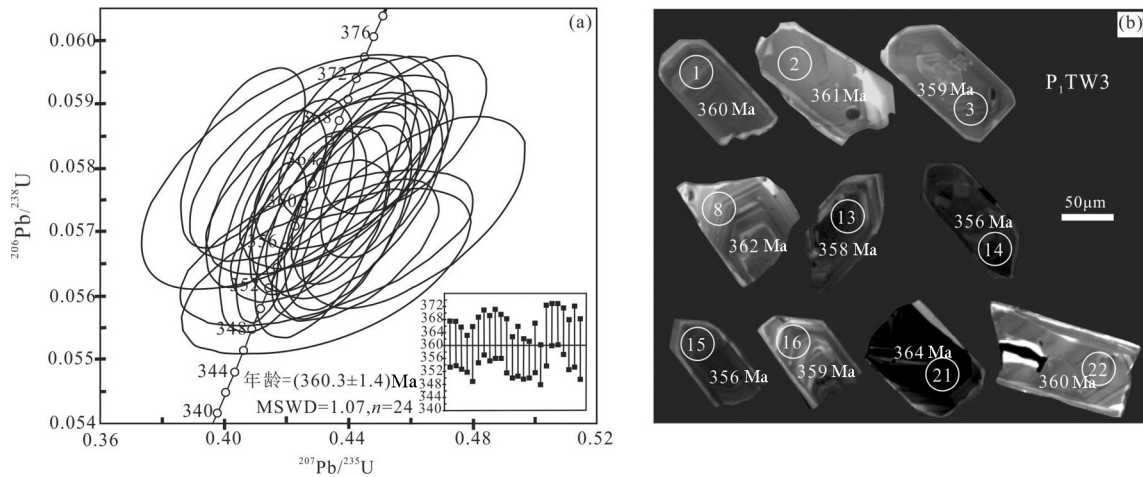


图3 朝吐沟组流纹岩(P₁TW3)U-Pb谐和图(a)与锆石CL图像(b)

Fig.3 U-Pb concordia diagram (a) and CL images of zircons (b) from rhyolite of Chaotugou Formation (P₁TW3)

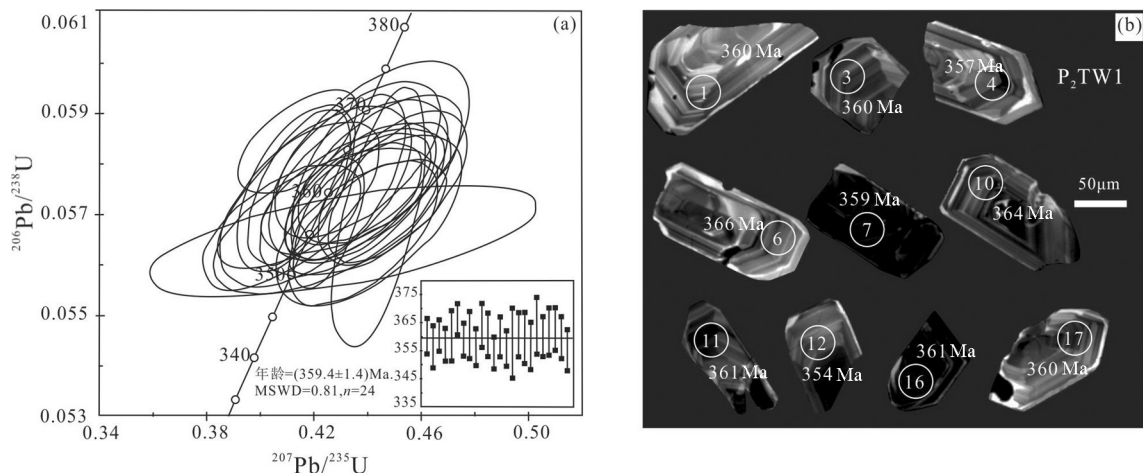


图4 朝吐沟组流纹岩(P₂TW1)锆石U-Pb谐和年龄图(a)及CL图(b)

Fig.4 Concordia U-Pb diagrams (a) and CL images of zircons (b) from rhyolite of Chaotugou Formation (P₂TW1)

0.43~1.05,均大于0.4,显示为岩浆锆石特征。

朝吐沟组流纹岩(P₂TW1)样品中24个测点锆石的年龄相对较为集中位于谐和线上,24个测点²⁰⁶Pb/²³⁸U的年龄变化于354~366 Ma,获得年龄加权平均值为(359.4±1.4) Ma(图4);相应测点的Th、U分别变化于55.2×10⁻⁶~721.35×10⁻⁶和115×10⁻⁶~678×10⁻⁶,Th/U比值主体在0.43~1.06(表1),二者之间的相关性良好,与典型的岩浆锆石一致。因此,流纹岩的锆石U-Pb年龄(359.4±1.4) Ma可代表该剖面火山岩的形成年龄,这一结果与建组剖面流纹岩的年龄完全一致。

5.2 岩石地球化学特征

本文对采自朝吐沟组两条剖面不同层位的火山岩进行了主量和微量元素分析,分析结果见表2。

5.2.1 主量元素

朝吐沟组火山岩主要由变玄武岩和变流纹岩组成,其SiO₂含量介于42.46%~85.1%,SiO₂在56%~73%出现明显成分间断,具有双峰式火山岩特征(图5)。变玄武岩的SiO₂含量变化不大(42.46%~56.48%),TiO₂含量变化明显(1.12%~1.78%);MgO含量相对较低,变化较大(1.93%~8.07%),Mg[#]在26.28~56.27。随Mg[#]降低,Fe₂O₃、TiO₂、P₂O₅含量逐步增加,而CaO、K₂O则呈下降趋势,体现较好的线性关系;CaO含量逐步降低,全碱(Na₂O+K₂O)含量逐步降低且由富K向富Na过渡,反映了玄武岩由钙碱性向拉斑玄武岩演化的趋势。在Nb/Y-Zr/TiO₂图中玄武岩样品落入玄武岩区,为安山玄武岩和亚碱性玄武岩,主体属于亚碱性系列(图5)。

流纹质岩石具有高硅SiO₂(73.84%~85.1%),低钛TiO₂(0.1%~0.21%);富钾(2.89%~6.63%)K₂O/Na₂O>>1;Al₂O₃含量中等(14.01%~8.80%),Fe₂O₃含量较低(0.05%~1.24%),低的CaO含量(0.08%~1.22%),贫镁MgO含量(0.07%~1.36%),和过铝质的地球化学属性ACNK值(1.11~3.17),极低含量P₂O₅(0.013%~0.11%)。在Nb/Y-Zr/TiO₂图中,流纹岩样品落入粗面岩和流纹岩区,属碱性岩类,此判断与岩相学观察一致,即长石斑晶以碱性长石为主;属于碱性系列(图5)。

5.2.2 微量元素

朝吐沟组玄武岩的微量元素组成与它们的主量元素一样具有较大的变化。其变化与它们的Mg[#]相

关。除玄武岩的Cr、Ni、Co和Sr与Mg[#]成正相关,而Rb(Ba)、Nb、Zr和Hf等亲石元素以及REE与Mg[#]具有负相关性。玄武质岩石ΣREE相对较低(65.39×10⁻⁶~178.5×10⁻⁶),但呈逐步增加趋势,(La/Yb)_N为2.55~9.32;稀土元素标准化曲线(图6a)显示LREE弱富集特点;δEu为0.8~1.01,具有弱负异常-正异常为特征,表明玄武质岩浆上涌过程中未曾发生过斜长石结晶分异作用。在微量元素蛛网图中(图6b),强不相容元素相对富集,但富集程度不明显;Nb、Ta、Sr和Ti亏损的特点。

流纹岩的ΣREE总量较高(91.84×10⁻⁶~424.53×10⁻⁶),轻稀土分异明显(La/Sm)_N为3.62~5.71,重稀土分异很弱(Gd/Yb)_N为1.05~1.73,(La/Yb)_N为7.93~11.78)。球粒陨石标准化曲线(图6a)呈LREE富集特征,Eu呈明显的负异常(0.12~0.34)。微量元素蛛网图(图6b)上,流纹岩富集Rb、Ba、K、Th等大离子亲石元素;Nb、Zr、Y等高场强元素含量也较高,具有典型A型花岗岩的微量元素特点(Whalen et al., 1987);Eu、Sr、P、Ti则表现为明显的负异常。流纹岩样品都有很高的(La/Sm)_N(3.62~5.71),可能与地壳物质混染或者与玄武岩不同的源区性质有关。

5.3 Sr-Nd同位素

从朝吐沟组火山岩Sr-Nd同位素分析结果(表3)可以看出,3件玄武岩样品(P₂Gs3、P₂Gs12、P₁Gs23-2)的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr为0.706996~0.709204,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd为0.512248~0.512793,以该期火山岩形成年龄360 Ma计算,其I_{Sr}为0.705076~0.707770和ε_{Nd}(t)值为+0.51~+4.91,Nd同位素单阶段模式年龄T_{DM}为(946~1090)Ma,玄武岩的ε_{Nd}(t)>0,显示为地幔物质加入的特征,暗示岩浆起源于新元古代时新生的年轻地壳。而5件流纹岩样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(0.738879~0.779580)和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd比值为0.512333~0.512552,I_{Sr}为0.713757~0.739647和ε_{Nd}(t)值为(-1.75~+2.54),其T_{DM}分别为846~1156 Ma,ε_{Nd}(t)值变化较大,可能显示为既有地幔物质的加入,又存在古老地壳的熔融。

5.4 锆石 Hf 同位素

本文在对晚泥盆世火山岩中锆石LA-ICP-MS U-Pb定年研究基础上,同时对流纹岩锆石进行了微区原位Hf同位素分析,分析结果列于表4。

朝吐沟组2个流纹岩样品(P₁TW3和P₂TW1)锆

表2 赤峰敖汉旗晚泥盆世朝吐沟组火山岩地球化学分析结果
Table2 Geochemical compositions of Late Devonian volcanic rocks in Aohanqi area of Chifeng

样号	玄武岩 (玄武安山岩)															
	P ₁ TW2	P ₁ GS23-1	P ₁ GS23-2	P ₁ GS28	P ₂ GS3	P ₂ GS4	P ₂ GS12	P ₂ GS15	P ₁ TW3	P ₁ GS27	P ₁ GS34	P ₂ TW1	P ₂ TW2	P ₂ GS5	P ₂ GS11	P ₂ GS14
SiO ₂	42.76	56.48	42.46	55.3	46.57	54.84	50.84	50.13	85.1	76.65	82.64	78.06	74.1	73.84	78.4	77.97
TiO ₂	1.2	1.15	1.13	1.28	1.78	1.35	1.64	1.37	0.1	0.15	0.15	0.15	0.18	0.21	0.15	0.15
Al ₂ O ₃	17.44	17.94	17.75	19.24	16.19	19.55	15.54	17.45	8.8	13.42	11.74	13.2	14.06	13.65	12.85	11.77
Fe ₂ O ₃	7.03	7.78	6.85	7.15	3.37	2.82	4.42	4.45	0.11	0.92	0.24	0.67	1.17	1.24	0.73	0.54
FeO	3.84	1.75	4.04	2.11	8.23	6.66	4.86	5.12	0.17	0.13	0.15	0.32	0.25	2.69	0.28	0.3
MnO	0.27	0.12	0.27	0.068	0.19	0.14	0.15	0.16	0.007	0.017	0.008	0.021	0.025	0.054	0.018	0.027
MgO	2.06	1.93	2.1	2.4	8.07	2.82	6.3	5.8	0.25	0.2	0.095	0.33	0.48	1.36	0.32	0.4
CaO	9.88	4.28	10.03	1.2	8.63	3.82	7.28	8.48	0.11	0.23	0.088	0.09	1.22	0.2	0.11	1.04
Na ₂ O	4.98	4.99	4.81	5.92	1.11	2.76	3.08	3.92	0.18	0.29	0.18	0.24	0.84	1.27	0.17	0.62
K ₂ O	1.5	1.17	1.59	2.12	0.45	1.53	0.066	0.22	4.45	6.63	3	5.55	5.09	2.89	5.62	5.26
P ₂ O ₅	0.2	0.21	0.18	0.49	0.43	0.41	0.54	0.31	0.013	0.021	0.019	0.017	0.11	0.037	0.014	0.017
LOI	8.42	2	8.35	2.49	4.08	2.56	4.76	2.01	0.69	1.32	1.68	1.33	2.44	2.26	1.3	1.87
Total	99.58	99.80	99.56	99.77	99.10	99.26	99.48	99.42	99.98	99.98	99.99	99.98	99.97	99.70	99.96	99.96
Na ₂ O/K ₂ O	3.32	4.26	3.03	2.79	2.47	1.80	46.67	17.82	0.04	0.04	0.06	0.04	0.17	0.44	0.03	0.12
Mg [#]	26.68	28.38	26.99	33.54	56.27	35.50	56.14	53.30	62.53	27.28	31.80	39.11	39.83	39.08	38.02	47.76
FeO/(FeO+MgO)	0.65	0.48	0.66	0.47	0.50	0.70	0.44	0.47	0.40	0.39	0.61	0.49	0.34	0.66	0.47	0.43
Ba	497	148	487	117	91.2	307	93.8	264	486	484	142	343	236	384	352	772
Rb	59.3	54.1	59	89.3	20	46.7	14.4	17.5	101	147	84.3	144	186	121	133	160
Sr	487	423	473	128	399	212	641	665	67.8	95	46.7	55.5	40.1	61.3	54.7	99.7
Y	28.3	26.4	26.7	23.8	24.1	28.8	35.6	27.8	39.5	21.5	12.2	14.2	27.6	68.7	14.8	27.8
Zr	120	149	112	125	135	182	208	130	291	170	123	179	206	252	179	166
Nb	6.9	7.12	6.41	9.29	11.9	13	16.2	6.9	22.9	35.4	29.4	36.2	28.7	47	36.9	23.7
Th	0.99	1.18	0.83	0.95	3.76	2.14	4.12	3.24	11.6	14.5	11.8	12.7	21.1	17.5	13.5	19.1
Ga	2.88	3.4	2.79	2.34	3.09	2.46	2.57	2.58	1.61	1.38	0.77	1.43	1.33	2.23	1.35	1
Ni	102	166	105	68.9	133	88.5	60.9	27	2.96	3.36	2.92	2.19	2.4	7.16	2.52	2.29
V	194	141	196	232	236	218	182	248	4.35	6.5	10.2	5.4	5.87	14.5	4.53	4.78
Ga/Al	0.31	0.36	0.30	0.23	0.36	0.24	0.31	0.28	0.35	0.19	0.12	0.20	0.18	0.31	0.20	0.16
Zr/Y	4.24	5.64	4.19	5.25	5.60	6.32	5.84	4.68	7.37	7.91	10.08	12.61	7.46	3.67	12.09	5.97
Zr/Nb	17.39	20.93	17.47	13.46	11.34	14.00	12.84	18.84	12.71	4.80	4.18	4.94	7.18	5.36	4.85	7.00
Rb/Nb	8.59	7.60	9.20	9.61	1.68	3.59	0.89	2.54	4.41	4.15	2.87	3.98	6.48	2.57	3.60	6.75

续表2

样品号	玄武岩(玄武安山岩)																流纹岩															
	P1TW2	PIGS23-1	PIGS23-2	PIGS28	P2GS3	P2GS4	P2GS12	P2GS15	P1TW3	PIGS27	PIGS34	P2TW1	P2TW2	P2GS5	P2GS11	P2GS14																
Cr	239	216	262	150	327	159	120	8.06	2.25	2.92	3.01	2.95	2.01	2.83	2.01	2.96																
Hf	3.36	3.79	3.08	3.44	3.68	4.55	5.37	3.61	7.56	12.2	4.36	12.3	7.52	19.2	13.5	6.14																
Cs	14.1	5.87	14.3	8.97	2.48	4.82	0.24	0.68	4.54	9.72	1.86	3.4	5.09	5.55	3.44	5.8																
Sc	35.3	20.8	34.5	23.2	27.6	25.3	23.1	28.4	0.62	0.45	0.71	0.52	1.77	3.27	0.46	1.62																
Ta	0.39	0.41	0.36	0.54	0.69	0.74	1	0.48	1.48	2.3	2.34	2.23	2.59	2.96	2.52	2.25																
Co	37.4	42.7	36.3	44.6	44.6	38.9	38.6	39.7	0.27	2.55	0.42	0.47	1.13	5.53	1.03	0.36																
U	0.3	0.68	0.26	0.82	0.82	1.09	0.73	0.81	1.04	3.15	4.44	1.97	3.25	3.28	2.55	3.2																
La	11.2	13.7	10.1	9.43	27.8	18.4	28.6	20	43.4	35.7	20.6	36.3	40.3	91	28.8	36.7																
Ce	29.6	32.1	26.5	21.9	68.2	42	73.6	50.9	76.5	97.9	40.2	55.9	85	176	45.6	74.2																
Pr	3.54	4.03	3.2	2.83	7.36	5.64	8.06	5.83	10.5	8.53	4.21	7.89	8.25	20.6	6.64	7																
Nd	16.3	18.3	14.7	12.4	31	24.5	33.8	25.3	40	31.6	14.5	27.8	27.3	72.7	23.8	23.3																
Sm	4.23	4.42	3.9	3.04	6.25	5.67	7.28	5.79	7.74	5.97	2.74	4.81	4.75	14.3	4.33	4.15																
Eu	1.46	1.47	1.38	1.01	1.92	1.5	2.23	1.9	0.31	0.33	0.3	0.24	0.43	0.73	0.22	0.47																
Gd	4.85	4.79	4.44	3.42	6.09	5.67	7.25	5.61	7.48	5.53	2.7	4.11	4.52	13.8	3.84	4.23																
Tb	0.82	0.78	0.76	0.59	0.85	0.88	1.14	0.89	1.17	0.83	0.42	0.55	0.68	2.16	0.54	0.63																
Dy	5.34	5.01	4.86	3.94	4.91	5.38	6.94	5.42	7.3	5.04	2.56	2.96	4.4	13.2	3.08	4.2																
Ho	1.1	1.06	1.03	0.86	0.96	1.1	1.41	1.1	1.5	1.02	0.52	0.59	0.98	2.7	0.65	0.95																
Er	2.98	2.97	2.73	2.49	2.51	3.04	3.79	2.94	4.15	2.85	1.38	1.81	2.99	7.52	1.91	2.9																
Tm	0.44	0.44	0.4	0.4	0.35	0.45	0.56	0.43	0.65	0.43	0.2	0.31	0.51	1.18	0.33	0.49																
Yb	2.72	2.75	2.53	2.65	2.14	2.87	3.33	2.64	4.14	2.64	1.31	2.21	3.54	7.5	2.33	3.32																
Lu	0.4	0.42	0.38	0.43	0.32	0.44	0.51	0.4	0.62	0.39	0.2	0.37	0.55	1.14	0.4	0.52																
ΣREE	84.98	92.24	76.91	65.39	160.66	117.54	178.5	129.15	205.46	198.76	91.84	145.85	184.2	424.53	122.47	163.06																
δ Eu	0.98	0.97	1.01	0.95	0.94	0.80	0.93	1.01	0.12	0.17	0.33	0.16	0.28	0.16	0.16	0.34																
Nb/U	23.00	10.47	24.65	11.33	14.51	11.93	22.19	8.52	22.02	11.24	6.62	18.38	8.83	14.33	14.47	7.41																
Ta/U	1.30	0.60	1.38	0.66	0.84	0.68	1.37	0.59	1.42	0.73	0.53	1.13	0.80	0.90	0.99	0.70																
Th/Ta	2.54	2.88	2.31	1.76	5.45	2.89	4.12	6.75	7.84	6.30	5.04	5.70	8.15	5.91	5.36	8.49																
La/Nb	1.62	1.92	1.58	1.02	2.34	1.42	1.77	2.90	1.90	1.01	0.70	1.00	1.40	1.94	0.78	1.55																
(La/Sm) _N	1.71	2.00	1.67	2.00	2.87	2.09	2.54	2.23	3.62	3.86	4.85	4.87	5.48	4.11	4.29	5.71																
(Th/Nb) _N	1.22	1.41	1.10	0.87	2.68	1.40	2.16	3.98	4.30	3.47	3.40	2.98	6.24	3.16	3.10	6.84																

注:氧化物含量单位为%,微量元素和稀土元素含量单位为μg/g,所有样品位置及编号见图2。

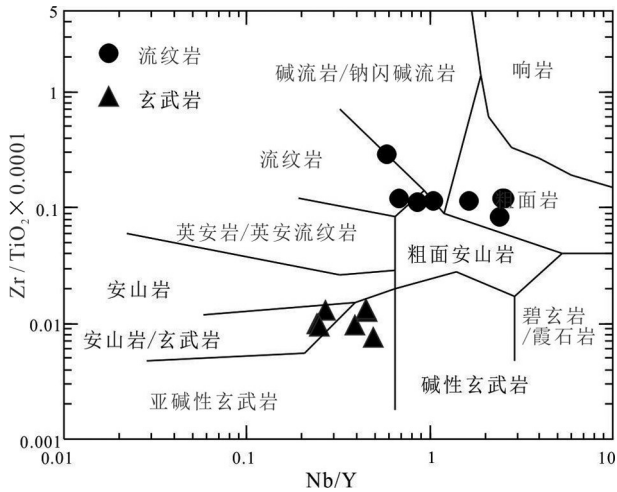


图5 晚泥盆世朝吐沟组火山岩 Nb/Y-Zr/TiO₂ 分类图解 (Winchester et al., 1977)

Fig.5 Diagram of Nb/Y-Zr/TiO₂ of volcanic rocks from Chaotugou Formation of Late Devonian (after Winchester et al., 1977)

石 U-Pb 定年结果表明,它们均形成于晚泥盆世,分别为 359 Ma 和 360 Ma。锆石微区原位 Hf 同位素分析结果表明,其 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i 比值介于 0.282519~0.282709 和 0.282494~0.282756,分别以其年龄计算,ε_{Hf}(t) 值分别介于 -1.4~+5.3 和 -2.3~+6.9,其 Hf 同位素单阶段模式年龄 T_{DM1} 分别变化于 773~1034 Ma 和 707~1074 Ma, T_{DM2} 分别变化于 1005~1433 Ma 和 901~1490 Ma (表 4)。

Hf 同位素分析结果显示,流纹岩中锆石的 ε_{Hf}(t) 值大多数大于 0,在 Hf 同位素特征图解上(图 7),全部多位于球粒陨石演化线和亏损地幔演化线之间,具有亏损地幔演化趋势。

6 讨论

6.1 泥盆纪火山作用及其对朝吐沟组地层时代的限定

朝吐沟组自创名以来,在以往的研究中均认为朝吐沟组的时代为早石炭世(内蒙古自自区地质矿产局, 1991, 1996; 金玉环等, 1991; 沈阳地质矿产研究所, 1978),这一结论主要是根据与其整合接触的上覆地层白家店组中的腕足类、珊瑚类古生物化石推测为早石炭世早期,由于缺少可靠的年代学资料支持,因而在早期的研究中人们就对所推论的早石炭世早期的地质年代存有疑问(内蒙古自自区地质矿产局, 1996),但未能解决。本次研究采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年技术,对朝吐沟组流纹岩进行了锆石 U-Pb 年代学测定,获得了 (359.4±1.4) Ma 和 (360.3±1.4) Ma 的年龄值,区域上除赤峰敖汉旗朝吐沟—裴家店一带外,晚泥盆世火山岩在赤峰东部的莲花山也有分布,莲花山朝吐沟组流纹质熔结凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (364.0±2.0) Ma,与建组剖面朝吐沟组流纹岩的测年结果基本一致。根据 2014 年国际地层年表 (International commission on Stratigraphy, 2014) 该年龄值为晚泥

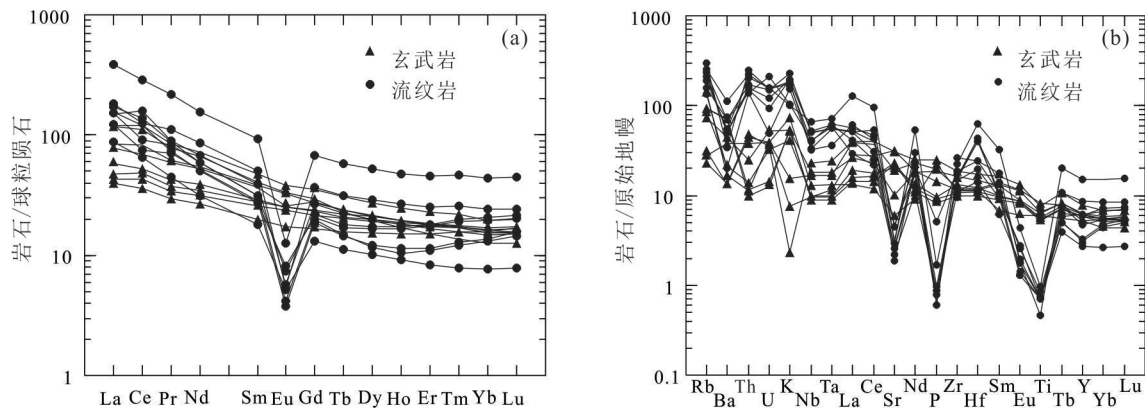


图6 晚泥盆世朝吐沟组火山岩稀土元素配分形式图(a)与微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace elements patterns and chondrite-normalized rare earth elements patterns for bimodal volcanic rocks (after Sun and McDonough, 1989)

表3 赤峰敖汉旗晚泥盆世火山岩Sr-Nd同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of Late Devonian volcanic rocks in Aohan Banner area of Chifeng

样号	Sm/10 ⁻⁶	Nd/10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	T _{DM} /Ga	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd(t)}	Sm/Nd	fSm/Nd
P ₂ Gs3	6.25	31.00	0.1056	0.512448	0.992	0.512198	0.51	0.201613	-0.463142
P ₂ Gs12	6.93	31.66	0.1324	0.512570	1.090	0.512256	1.65	0.218956	-0.326894
P ₁ Gs23-2	3.78	14.66	0.1559	0.512793	0.946	0.512423	4.91	0.257876	-0.207422
P ₂ TW1	5.51	31.51	0.1058	0.512333	1.156	0.512082	-1.75	0.174958	-0.462125
P ₂ TW2	5.50	31.62	0.1056	0.512340	1.144	0.512090	-1.60	0.173981	-0.463142
P ₂ TW11	4.33	23.80	0.1056	0.512346	1.135	0.512096	-1.49	0.181933	-0.463142
P ₂ TW14	4.15	23.30	0.1056	0.512506	0.910	0.512256	1.64	0.178112	-0.463142
P ₁ Gs34	2.74	14.50	0.1056	0.512552	0.846	0.512302	2.54	0.188966	-0.463142

样号	岩性	Rb/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	Rb/Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _S	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	ε _{Sr(t)}
P ₂ Gs3	玄武岩	20.00	399.00	0.050125	0.15	0.708517	0.707770	52.41
P ₂ Gs12	玄武岩	73.73	569.35	0.129497	0.37	0.706996	0.705065	14.00
P ₁ Gs23-2	玄武岩	90.62	417.53	0.217032	0.63	0.709204	0.705967	26.81
P ₂ TW1	流纹岩	131.60	157.73	0.834328	2.42	0.752142	0.739647	505.16
P ₂ TW2	流纹岩	188.13	51.84	3.629055	10.57	0.779580	0.725086	298.35
P ₂ TW11	流纹岩	133.00	54.70	2.431444	7.06	0.750244	0.713837	138.59
P ₂ TW14	流纹岩	160.00	97.70	1.637666	4.75	0.738879	0.714385	146.37
P ₁ Gs34	流纹岩	84.30	46.70	1.805139	5.24	0.740761	0.713757	137.45

注: (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_{CHUR}=0.7045, (⁸⁷Rb/⁸⁶Sr)_{CHUR}=0.0827; λ_{Sr}=0.0000142 Ma⁻¹, λ_{Rb}=0.0000654 Ma⁻¹, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512638, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.1967, 同位素年龄校正 t=360 Ma。

盆世法门期(Famennian)。因此,该组的时代为晚泥盆世晚期。

6.2 岩浆源区及成因

晚泥盆世玄武岩显示低的SiO₂含量,具有富钠(Na₂O/K₂O)=1.80~4.26、富镁(Mg[#]=26.68~56.27)及较高的Cr(120×10⁻⁶~327×10⁻⁶),Co(36.3×10⁻⁶~44.6×10⁻⁶),Ni(60.9×10⁻⁶~166×10⁻⁶)含量等特征,结合其正的ε_{Nd(t)}值(+1.63~+4.90)>0,显示其原始岩浆起源于亏损的岩石圈地幔(Sunder et al.,1992)。玄武岩微量元素显示具有明显高于岛弧玄武岩的Zr含量(112×10⁻⁶~208×10⁻⁶)和Zr/Y比值(4.19~6.32)(夏林圻等,2007),结合其主量元素富钠特征、LREE和Rb、Ba的富集以及高的Nb/U(8.52~24.65),Ta/U(0.59~1.38)等特征,Nb/U值与原始地幔(34)、MORB(47±11)及OIB(52±15)相比明显偏低,表明微量元素中Nb、Ta和Ti的亏损应是岩浆源区受到陆壳物质的混染作用造成的(Hofmann,1997)或俯冲带流体或熔体对岩石圈地幔交代作用所致(Gill et al.,1978)。因此,笔者认为研究区朝吐沟组玄武岩岩浆应起源于亏损的岩石圈地幔,岩浆源区受到了陆壳物质的混染。

Mg[#]与氧化物关系(表2)显示8个玄武岩样品都表现出很好的线性关系,指示结晶分异对玄武岩岩浆演化的控制作用。玄武岩表现出Nb、Ta、Ti等

HFSE亏损特征,(La/Sm)_N的变化范围不大(1.67~2.87),暗示了岩浆源区受到陆壳物质混染的影响。

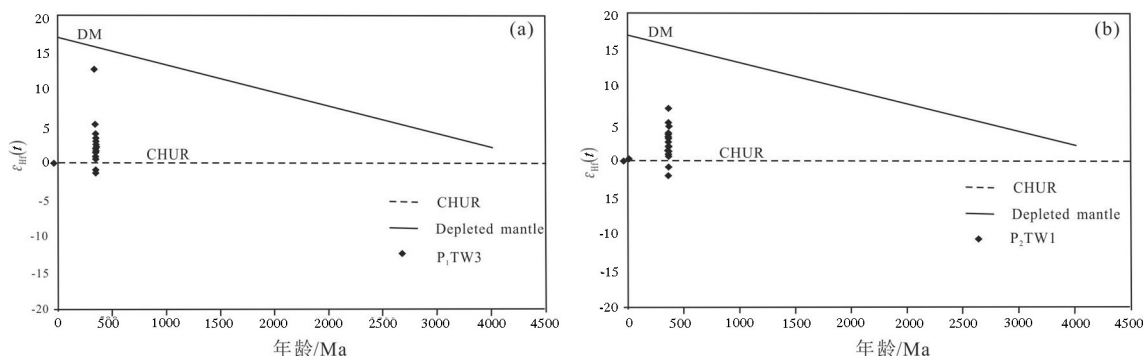
Zr、Nb都是高场强(HFS)元素,它们对后期的蚀变保持相对惰性,Zr/Nb比值常被用于指示源区性质。典型的NMORB起源于亏损的地幔具有很高的Zr/Nb比值(40~50),球粒陨石的Zr/Nb比值为16~18(Sun et al.,1989)。朝吐沟组玄武岩的Zr/Nb比值为11~21,平均16,明显低于N-MORB,与球粒陨石的相近,表明它们起源于正常的地幔或亏损地幔且源区受到陆壳物质的混染。

流纹岩具有高硅(SiO₂=74.1%~85.1%)、富钾Na₂O/K₂O=0.03~0.44、低铝(Al₂O₃=10.5%~14.06%)及富集Rb、Th、U、K,亏损Nb、Ta、Eu、P、Ti等特征。该剖面流纹岩与玄武岩就Mg[#]与氧化物没有相关性(表2),暗示其不可能是玄武岩直接结晶分异成因;而Eu、Ti、P、Sr的强烈亏损则表现出地壳物质属性。而流纹岩样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.752142~0.77958和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd比值为0.51233~0.51234, I_{Sr}和ε_{Nd(t)}值分别为0.72576~0.73977和-1.63~-1.77,其T_{DM1}为1144~1156 Ma。锆石ε_{Hf(t)}值分别介于-1.0~+5.7和-1.9~+7.3,其Hf同位素单阶段模式年龄T_{DM1}分别变化于773~1034 Ma和707~1074 Ma,暗示其岩浆起源于新元古代时新生的年轻地壳。地壳岩石部分熔融

表4 赤峰敖汉旗晚泥盆世朝吐沟组流纹岩锆石 Hf 同位素组成

Table 4 Hf isotopic compositions of zircon from rhyolites samples in Aohan Banner area of Chifeng

测点	年龄 / Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1} / Ga	T_{DM2} / Ga	$f_{\text{Lu/Hf}}$
P ₁ TW3											
1	360	0.1032	0.0025	0.282601	0.000024	0.282584	0.9	0.8	0.959	1.287	-0.93
2	360	0.0491	0.0012	0.282582	0.000020	0.282574	0.6	0.7	0.953	1.309	-0.97
3	360	0.0684	0.0016	0.282629	0.000020	0.282618	2.1	0.7	0.897	1.210	-0.95
4	360	0.0614	0.0014	0.282613	0.000021	0.282603	1.6	0.7	0.917	1.245	-0.96
5	360	0.0379	0.0009	0.282538	0.000021	0.282531	-1.0	0.7	1.009	1.406	-0.97
6	360	0.2196	0.0047	0.282953	0.000028	0.282921	12.8	1.0	0.470	0.522	-0.86
7	360	0.0756	0.0018	0.282643	0.000023	0.282631	2.6	0.8	0.882	1.182	-0.95
8	360	0.0672	0.0018	0.282683	0.000026	0.282671	4.0	0.9	0.824	1.092	-0.95
9	360	0.0508	0.0013	0.282528	0.000021	0.282519	-1.4	0.7	1.034	1.433	-0.96
10	360	0.0862	0.0021	0.282723	0.000023	0.282709	5.3	0.8	0.773	1.005	-0.94
11	360	0.0626	0.0015	0.282628	0.000023	0.282617	2.1	0.8	0.898	1.212	-0.95
12	360	0.0878	0.0022	0.282669	0.000023	0.282655	3.4	0.8	0.852	1.128	-0.93
13	360	0.0658	0.0017	0.282626	0.000021	0.282615	2.0	0.7	0.903	1.219	-0.95
14	360	0.0792	0.0020	0.282634	0.000021	0.282620	2.2	0.7	0.900	1.205	-0.94
15	360	0.0677	0.0018	0.282655	0.000025	0.282643	3.0	0.9	0.865	1.155	-0.94
16	360	0.0474	0.0012	0.282616	0.000020	0.282607	1.7	0.7	0.907	1.235	-0.96
P ₂ TW1											
1	359	0.0438	0.0011	0.282598	0.000025	0.282591	1.1	0.9	0.928	1.272	-0.97
2	359	0.0660	0.0016	0.282505	0.000030	0.282494	-2.3	1.1	1.074	1.490	-0.95
3	359	0.0717	0.0017	0.282539	0.000028	0.282527	-1.1	1.0	1.030	1.416	-0.95
4	359	0.0562	0.0014	0.282615	0.000026	0.282605	1.6	0.9	0.912	1.240	-0.96
5	359	0.0644	0.0015	0.282577	0.000023	0.282567	0.3	0.8	0.969	1.327	-0.95
6	359	0.0603	0.0014	0.282664	0.000024	0.282654	3.4	0.9	0.843	1.130	-0.96
7	359	0.0652	0.0015	0.282656	0.000023	0.282646	3.1	0.8	0.856	1.148	-0.96
8	359	0.1257	0.0027	0.282609	0.000025	0.282590	1.1	0.9	0.955	1.274	-0.92
9	359	0.1324	0.0029	0.282597	0.000027	0.282577	0.6	0.9	0.977	1.303	-0.91
10	359	0.0786	0.0017	0.282670	0.000027	0.282659	3.5	0.9	0.841	1.119	-0.95
11	359	0.1141	0.0026	0.282703	0.000025	0.282685	4.5	0.9	0.814	1.060	-0.92
12	359	0.0775	0.0017	0.282652	0.000022	0.282641	2.9	0.8	0.867	1.161	-0.95
13	359	0.0686	0.0015	0.282634	0.000023	0.282624	2.3	0.8	0.888	1.198	-0.95
14	359	0.1431	0.0029	0.282627	0.000023	0.282608	1.7	0.8	0.933	1.235	-0.91
15	359	0.0979	0.0022	0.282604	0.000026	0.282589	1.0	0.9	0.949	1.277	-0.93
16	359	0.0625	0.0015	0.282595	0.000025	0.282585	0.9	0.9	0.943	1.286	-0.96
17	359	0.1038	0.0023	0.282771	0.000031	0.282756	6.9	1.1	0.707	0.901	-0.93
18	359	0.0649	0.0014	0.282655	0.000027	0.282645	3.0	0.9	0.856	1.150	-0.96
19	359	0.0804	0.0018	0.282711	0.000028	0.282699	4.9	1.0	0.783	1.028	-0.95

图7 赤峰敖汉旗晚泥盆世流纹岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图Fig. 7 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -age diagram of zircon for Late Devonian rhyolites in Aohan Banner area

往往表现较高的Rb/Nb、La/Nb值和极低的 TiO_2 含量(Pearce et al.,1984),比如美国Yellowstone地壳熔融成因流纹岩的Rb/Nb值为2~5,La/Nb值为0.8~2.3(Hildreth et al.,1991);而本文流纹岩的Rb/Nb值为2.57~6.75,La/Nb值为0.7~1.94, TiO_2 含量低至0.1%~0.21%,与美国Yellowstone地壳熔融成因流纹岩一致;流纹岩的REE分配形式图与微量元素蛛网图也反映与Yellowstone流纹岩更相似(Hildreth et al.,1991)。综上所述,该剖面流纹岩可能为软流圈上涌导致幔源岩浆底侵中、下地壳并诱发其重熔所致与少量地幔物质的加入相关。Sr、Eu、P、Ti的强烈负异常指示斜长石、磷灰石、钛铁矿在部分熔融中为残留相形式存在。

6.3 晚泥盆世火山岩形成的构造背景

朝吐沟组火山岩具有典型的双峰式火山岩特

点;由于地壳混入对Zr、Y的含量影响不大,Zr-Zr/Y图解可以较真实地反映玄武岩的形成环境。图8a中,8个玄武岩样品都落入板内玄武岩区;较高的Zr含量($112 \times 10^{-6} \sim 208 \times 10^{-6}$)与较高的Zr/Y比值(4.19~6.32 > 3)则体现大陆板内玄武岩特征。该剖面玄武岩的 $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ 比值 > 1 (1.01~3.98),La/Nb比值 > 1 (1.02~2.90),Nb、Ta、Ti表现出明显负异常,反映了大陆板内玄武岩在上侵过程中遭受了强烈的地壳混染作用。

朝吐沟流纹岩显示富 K_2O 、高HFS元素,低CaO、Sr含量以及高 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 和Ga/Al比值的地球化学特征(表2),具有与A型或碱性岩浆岩的相似性,这暗示它们形成于相似的构造背景。流纹岩高的不相容元素含量以及低的Sr含量和中等的Rb含量排除了其为岛弧型或碰撞型火山岩的可能

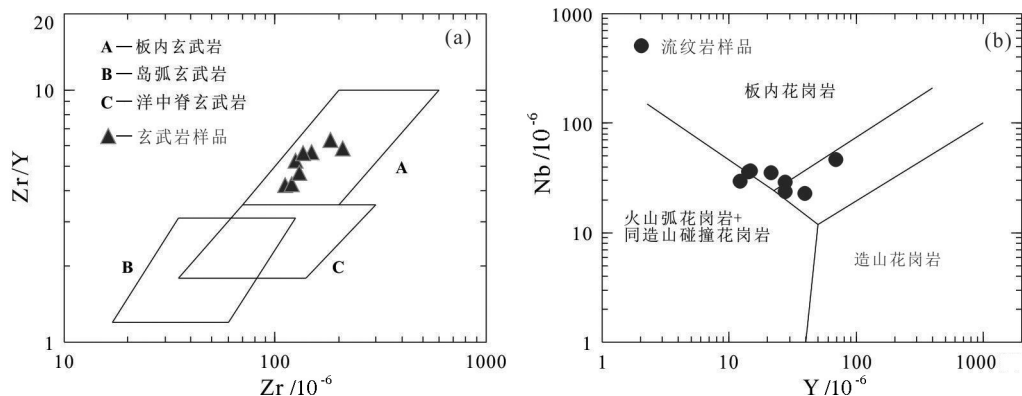


图8 朝吐沟组双峰式火山岩中玄武岩Zr-Zr/Y (a) (据Pearce et al.,1984,1995)及流纹岩Nb-Y构造判别图解 (b) (据Frster et al.,1997)

Fig.8 Tectonic discrimination diagram of Zr-Zr/Y (a) for basalts (after Pearce et al., 1984, 1995) and Nb-Y(b) for rhyolites (after Frster et al.,1997)

性。在MORB标准化蛛网图上(图6b),朝吐沟流纹岩也显示出与大陆边缘弧后盆地或大陆裂谷流纹岩完全一致的模式。在Y-Nb图解显示大部分流纹岩形成于板内环境(图8b),较低的Th/Ta比值(1.76~6.75)也反映了板内火山岩特性,同时暗示该剖面流纹岩的熔融源区没有或者很少受到俯冲作用的影响。

区域上前人的研究已证实兴蒙造山带早古生代温都尔庙洋俯冲消减闭合,以区域上志留系西别河组与下伏奥陶系包尔汉图群之间角度不整合为标志,反映了华北板块北缘在奥陶纪期间发生一次重要的板块俯冲增生事件;志留纪—泥盆纪华北北缘处于早古生代末造山后伸展阶段,其典型标志是华北克拉通北缘张家口、承德以及赤峰等地存在一系列以碱性岩和基性—超基性岩为代表的泥盆纪岩浆活动,岩石学和地球化学研究表明泥盆纪岩浆岩形成于伸展环境,被认为与华北克拉通北侧的白乃庙岛弧(温都尔庙—翁牛特地体)早古生代碰撞后的伸展有关。晚泥盆世朝吐沟组火山岩指示的伸展作用可能是中古生代末期白乃庙岛弧与华北克拉通北缘弧—陆碰撞后的伸展过程的继续,结合区域资料其伸展过程可能持续到中石炭世。晚泥盆世朝吐沟组之上的石炭纪白家店组碳酸盐岩夹碎屑岩组合处于被动陆缘构造环境。由于被动大陆边缘的形成是由一系列伸展构造使地壳拉张变薄所致,在拉张过程中,必然导致一系列火山活动,这与上述朝吐沟组火山岩的岩石组合及地球化学属性相吻合,进而揭示了晚泥盆世赤峰地区处于一个次稳定—非稳定的被动陆缘盆地沉积环境,而朝吐沟组双峰式火山岩的形成应与被动陆缘内的伸展环境相联系。

7 结 论

基于上述晚泥盆世火山岩锆石U-Pb年代学和Hf同位素组成,岩石地球化学以及Sr-Nd同位素分析,结合区域地质演化历史,可以得出以下认识:

(1)朝吐沟组流纹岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为359~360 Ma,形成时代为晚泥盆世。

(2)朝吐沟组火山岩形成于晚泥盆世被动陆缘背景,岩浆来源于亏损地幔且受到了地壳的混染。流纹岩为新元古代时新生的年轻地壳,可能为软流圈上涌

导致幔源岩浆底侵中、下地壳并诱发其重熔所致。

(3)朝吐沟组火山岩主要为玄武岩和流纹岩,缺少中性火山岩,岩石学、地球化学分析表明“双峰式火山岩”组合显示形成于板内伸展构造背景。

致谢: 锆石测年得到天津地质调查中心实验室耿建珍高级工程师、周红英研究员的帮助;论文撰写中,与中国地质科学院地质研究所李锦轶研究员、刘建峰研究员进行了有益的讨论;论文修改时,审稿专家和编辑提出了建设性意见和建议,在此表示衷心的感谢!

References

- Brouxel M, Lapierre H, Michard A, Albrede F. 1987. The deep layers of a Paleozoic arc: geochemistry of the Copley Balaklala series, northern California[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 85: 386-400.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province. 1989. *Regional Geology of Hebei Province, Beijing and Tianjing Municipality*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-654 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. 1991. *Regional Geology of Nei Mongol (Inner Mongolia) Autonomous Region*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 65-70 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. 1996. *Lithostratigraphic Units of of Inner Mongolia Autonomous Region*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 15-16 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bin, Jahn Borming, Tian Wei. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 245-257.
- Chen Bin, Jahn Borming, Wilde Simon A, Xu Bei. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1/2): 157-182.
- Christian P, Paquette J L. 1997. A mantle derived bimodal suite in the Hercynian Belt: Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the Late Devonian Brevenne metavolcanics, Massif Central (France) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 129: 222-238.
- Donnelly T W, Rogers J J W. 1980. Igneous series in island arcs: the northeastern Caribbean compared with world-wide island-arc assemblages[J]. *Bulletin Volcanologique*, 43: 347-382.
- Frster H J, Tischendorf G, Trumbull R B. 1997. An evaluation of the Rb

- vs.(Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks[J]. *Lithos*, 40(2/4): 261–293.
- Geist D, Howard K. A, Larson P. 1995. The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation: the basalt–rhyolite association at Volcan Alcedo, Galapagos Archipelago[J]. *Journal of Petrology*, 36: 965–982.
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, Zhou Hongying, Li Huimin. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA–MC–ICP–MS[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508–1513 (in Chinese with English abstract).
- Gill J B, Stork A L. 1978. Miocene low–K dacites and trondjemites of Fiji[C]//Barker F(ed.). *Trondjemites, Dacites, and Related Rocks*[M]. Elsevier, Amsterdam, 629–649.
- Hildreth W, Halliday A N, Christiansen R L. 1991. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone plateau volcanic field[J]. *Journal of Petrology*, 32(1): 63–138.
- Hochstaedter A G, Gill J B, Morris J. 1990. Volcanism in the Sumisu Rift. II. Subduction and non–subduction related components[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 100: 195–209.
- Hofmann A W. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism[J]. *Nature*, 385: 219–229.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, Zhang Jisheng, Wang Tao. 2003. Correlation between continental crustal growth and the Supercontinental cycle: Evidence from the Granites with positive ϵ_{Nd} in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 203–209 (in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 2000. Genesis of positive $\epsilon(Nd,t)$ Granitoids in the Dahingan Mts–Monglia Orogenic Belt and Growth continental crust[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441–456 (in Chinese with English abstract).
- Rollison H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Longman Group UK Ltd, 73–155.
- International commission on Stratigraphy. 2014. International Stratigraphic Chart [S]. WWW.Stratigraphy.org.
- Jahn Borming, Wu Fuyuan, Hong Dawei. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east–central Asia [J]. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, 109: 5–20.
- Jahn Borming. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2004, 226(1): 73–100.
- Jiang Neng. 2005. Petrology and geochemistry of the Shuiquangou syenitic complex, northern margin of the North China Craton [J]. *Journal of the Geological Society*, 162 (1): 203–215.
- Jin Yugan, Fan Yingnian, Wang Xiangdong, Wang Rennuo. 1991. *Stratigraphical Lexicon of China: Carboniferous System*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 33 (in Chinese with English abstract).
- Kay R W, Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism[J]. *Tectonophysics*, 219: 177–189.
- Li Chunyu, Wang Quan, Liu Xueya, Tang Yaoqing. 1982. *Tectonic Map of Asia (1:8000000) and its Explanatory Notes*[M]. Beijing: Sinomaps Press, 1–45 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianghai, Zhai Mingguo, Li Yonggang, Zhang Yigang. 1998. The Discovery of Neoproterozoic High pressure Granulites in Luanping Chengde Area, Northern Hebei, and Their Tectono geological Implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 34–41 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Zhang Jin, Yang Tiannan, Li Yaping, Sun Guihua, Zhu Zhixin, Wang Lijia. 2009. Crustal Tectonic Division and Evolution of the southern part of the North Asian orogenic region and its adjacent areas[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 584–605 (in Chinese with English abstract).
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo–Asian Ocean and subduction of the Paleo–Pacific Plate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 207–224.
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, Feng Q W, Hu Z C, Zhou K. 2013. Early Devonian felsic volcanic rocks related to the arc–continent collision on the northern margin of North China Craton: Evidences of zircon U–Pb dating and geochemical characteristics[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(2/3): 267–278 (in Chinese with English abstract).
- Liu S W, Lv Y J, Feng Y G, Liu Xiaoming, Yan Quanren, Zhang Chen. 2007. Zircon and monazite geochronology of the Hongqiyingzi complex, northern Hebei, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1086–1100 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan, Xu Juan, Chen Haihong. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U–Pb isotope and trace element analyses by LA–ICP–MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546.
- Ludwig K R. 2003. *Users Manual for Isoplot/EX (rsv.3.0): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel* [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication No.1, 1–55.
- Luo diankuan, Miao Laicheng, Guan Kang, Qiu Youshou, Qin Y M, N J McNaughton, Groves D I. 2001. SHRIMP chronological study of Shuiquangou intrusive body in Zhangjiakou Area, Hebei Province and its geochemical significance[J]. *Geochimistry*, 30(2): 116–122 (in Chinese with English abstract).
- Mao Debao, Zhong Changting, Chen Zhihong, Lin Yuanxian, Li Huimin, Hu Xiaodie. 1999. The isotope ages and their geological implications of high–pressure basic granulites in north region to Chengde, Hebei province, China[J]. *Acta Petrologica sinica*, 15(4): 524–531 (in Chinese with English abstract).
- Miao Laicheng, Qiu Yumin, McNaughton N, Luo Zhenkuan, David Groves, Zhai Yusheng, Fan Weiming, Zhai Mingguo, Guan Kang.

2002. SHRIMP U–Pb zircon geochronology of granitoids from Dongping area, Hebei Province, China: constraints on tectonic evolution and geodynamic setting for gold metallogeny[J]. *Ore Geology Reviews*, 19: 187–204.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China [J]. *Geology in China*, 36(1): 1–28 (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, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 23: 251–285.
- Pin C, Paquette J L. 1997. A mantle–derived bimodal suite in the Hercynian belt Nd isotope and trace element evidence for a subduction related rift origin of the Devonian Bevenne metovolcanics Massif Central(France) [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 129: 222–238.
- Qian Qing, Wang Yian. 1999. Geochemical characteristics of bimodal volcanic suites from different tectonic settings[J]. *Geology–Geochemistry*, 27(4), 29–32 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, Qin Deyu. The Geotectonic Evolution of China[M]. Beijing: Science Press, 1980: 1–124 (in Chinese with English abstract).
- Saunders A D, Storey M, Kent RW, Jorroy Venue M. 1992. Consequences of plume lithosphere interaction [C]//Storey B C, Alabaster T, Pankhurst R J. *Magmatism and the Causes of Continental Break–up*. Geol. Soc. Spec. Pub. London, 68: 41–60.
- Shao Ji'an. 1991. Crust Evolution in the Middle Part of the Northern Margin of Sino–Korean Plate[M]. Beijing: Peking University Press, 1–136 (in Chinese with English abstract).
- Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources. 1978. Northeast Regional Stratigraphic (Liaoning Section)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 225–230 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yurao, Liu Dunyi, Miao Laicheng, Zhang Fuqin, Jian Ping, Zhang Wei, Hou Kejun, Xu Junyu. 2010. Devonian A–type granitic magmatism on the northern margin of the North China Craton: SHRIMP U–Pb zircon dating and Hf–isotopes of the Hongshan granite at Chifeng, Inner Mongolia, China[J]. *Gondwana Research*, 17: 632–641.
- Sun Lixin, Ren Bangfang, Teng Fei, Gu Yongchang, Zhang Yong, Guo Hu. 2015. LA–ICP–MS zircon U–Pb age of the volcanic rocks from the Chaotugou Formation in the Aohanqi area, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(8): 1492–1511 (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(eds.). *Magmatism in the Oceanic Basins*. Geological Society Special publication, 42: 313–346.
- Tang Kedong. 1992. Tectonic Evolution and Metallogenic Regularity of the Fold Belt on the Northern Margin of Sino–Korea Platform[M]. Beijing: Peking University Press, 1–277 (in Chinese with English abstract).
- Wang F, Chen F K, Hou Z H, Peng P, Zhai M G. 2009. Zircon ages and Sr–Nd–Hf isotopic composition of late Paleozoic granitoids in the Chongli–Chicheng area, northern margin of the North China block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3057–3074 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 597–604 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Liu X, Li J. 1991. Paleoplate tectonics in Neimonggol of China[J]. *Journal of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 22: 1–15.
- Whalen J B, Currie K L, Chaoell B W. 1987. A–type granites: geochemical characteristics, discrimination and Petrogenesis [J]. *Contributions to Mineral Petrology*, 95: 407–419.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1–466.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325–343.
- Wu Fuyuan, Jahn Borming, Wilde Simon A, Sun Deyou. 2000. Phanerozoic crustal growth: U–Pb and Sr–Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China [J]. *Tectonophysics*, 328: 89–113.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geological method[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77–89 (in Chinese with English abstract).
- Ye Hao, Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, He Zhefeng. 2014. Recognition of the latest Devonian volcanic rocks of Chifeng area, northern North China Block, and its implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(9): 1274–1284 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Alfred Kröner, Chen Fukun. 2009. Early Permian plutons from the northern North China Block: constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1441–1467.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, Hu Jianmin, Song Biao, Liu Jian, Wu Hai. 2010. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic–Early Mesozoic Magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 824–842 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, Hu Jianmin, Liu Shuwen, Chen Fukun, Liu Xiaoming, Liu Jian. 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian–Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 121(1/2): 181–200.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, Yang Yueheng. 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: implications for a late Palaeozoic active continental margin [J]. *Journal of the Geological Society*, 164: 451–463.
- Zhang Wei, Jian Ping. 2012. SHRIMP dating of the Permian Guyang diorite–quartz diorite–tonalite suite in the northern margin of the North China Craton [J]. *Geology in China*, 39(6): 1593–1604 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunping, Li Jingchun. 2010. Tectonic framework and main characteristics of North China and its northward areas in Late Paleozoic–Early Mesozoic period [J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 916–931 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunping, Su Yangzheng, Li Yingchun. 2010. Regional tectonics significance of the Late Silurian Xibiehe Formation in central Inner Mongolia, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(10): 1599–1605 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenfa, Jing Jianli, Qin Zhenggang, Guo Lixia, Xie Yuelan. 2001. According to information of geology and geophysics, redetermination of the boundary between Northern China platform and Da Hingganling Mongolian paleozoic geosynclinal folded belt [J]. *Geology in China*, 28(9): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- 刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 柳小明, 闫全人, 张臣. 2007. 冀北红旗营子杂岩的锆石, 独居石年代学及地质意义 [J]. *地质通报*, 26(9): 1086–1100.
- 罗镇宽, 苗来成, 关康, 裘有守, Qin Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2001. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义 [J]. *地球化学*, 30(2): 116–122.
- 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 林源贤, 李惠民, 胡小碟. 1999. 承德北部高压基性麻粒岩的同位素年龄及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 15(4): 524–531.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1–725.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1996. 内蒙古自治区岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 190–198.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分 [J]. *中国地质*, 36(1): 1–28.
- 钱青, 王焰. 1999. 不同构造环境中双峰式火山岩的地球化学特征 [J]. *地质地球化学*, 27(4): 29–32.
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化 [M]. 1–124.
- 邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1–136.
- 沈阳地质矿产研究所. 1978. 东北区域地层表 (辽宁省分册) [M]. 北京: 地质出版社, 225–230.
- 孙立新, 任邦方, 滕飞, 张永, 谷永昌, 郭虎. 2015. 内蒙古敖汉旗朝吐沟组火山岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄 [J]. *地质通报*, 34(8): 1492–1511.
- 唐克东. 1992. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1992, 1–277.
- 王芳, 陈福坤, 侯振辉, 彭澎, 翟明国. 2009. 华北陆块北缘崇礼—赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr–Nd–Hf 同位素组成 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(11): 3057–3074.
- 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: 晚古代岩浆弧的地质记录 [J]. *岩石学报*, 23(3): 597–604.
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国内蒙古中部的古板块构造 [J]. *中国地质科学院院报*, 22: 1–15.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩 [J]. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 77–89.
- 叶浩, 张拴宏, 赵越, 刘建民, 何哲峰. 2014. 内蒙古赤峰地区泥盆纪晚期火山岩的发现及其地质意义 [J]. *地质通报*, 33(9): 1274–1284.
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 胡建民, 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 [J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 824–842.
- 张维, 简平. 2012. 华北北缘固阳二叠纪闪长岩—石英闪长岩—英云闪长岩套 SHRIMP 年代学 [J]. *中国地质*, 39(6): 1593–1604.
- 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 [J]. *地质通报*, 29(11): 1599–1605.
- 张允平, 李景春. 2010. 华北及其以北地区晚古生代—早中生代构造格架主体特点 [J]. *中国地质*, 37(4): 916–931.
- 张振法, 姜建利, 秦增刚, 郭立霞, 解月岚. 2001. 根据地质和地球物理资料重新厘定槽台界线—关于华北地 兴蒙古生代地槽褶皱系界线的划分 [J]. *中国地质*, 28(9): 1–12.

附中文参考文献

- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA–MC–ICP–MS 测定 [J]. *地质通报*, 30(10): 1508–1513.
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省、北京市、天津市区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1–654.
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 张季生, 王涛. 2003. 从中亚正 ϵ_{Nd} 值花岗岩看超大陆演化和大陆地壳生长的关系 [J]. *地质学报*, 2003, 77(2): 203–209.
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长 [J]. *地质前缘*, 7(2): 441–456.
- 金玉玕, 范影年, 王向东, 王仁农. 1991. 中国地层典石炭系 [M]. 北京: 地质出版社, 33.
- 李春显, 王荃, 刘雪亚, 汤耀庆. 1982. 亚洲大地构造图 (1:8 000 000) 及其说明书 [M]. 北京: 地图出版社, 1–45.
- 李江海, 翟明国, 李永刚, 张毅刚. 1998. 冀北滦平—承德一带晚太古代高压麻粒岩的发现及其构造地质意义 [J]. *岩石学报*, 14(1): 34–41.
- 李锦轶, 张进, 杨天南, 李亚萍, 孙桂华, 朱志新, 王励嘉. 2009. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 39(4): 584–605.
- 刘建峰, 李锦轶, 迟效国, 冯乾文, 胡兆初, 周坤. 华北克拉通北缘与弧—陆碰撞相关的早泥盆世长英质火山岩—锆石 U–Pb 定年及地球化学证据 [J]. *地质通报*, 2013, 32(2/3): 267–278.