

doi:10.3799/dqkx.2017.138

# 大兴安岭中段晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩成因及构造背景

马永非<sup>1,2</sup>, 刘永江<sup>1\*</sup>, 温泉波<sup>1</sup>, 张志斌<sup>2</sup>, 李伟<sup>2</sup>, 司秋亮<sup>2</sup>, 唐振<sup>2</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 沈阳地质矿产研究所, 辽宁沈阳 110034

**摘要:**为了解大兴安岭中段晚三叠世时期的构造背景,对该时期哈达陶勒盖组火山岩进行了岩石学、锆石 U-Pb 年代学及地球化学等方面的研究。哈达陶勒盖组火山岩可划分为中性系列安粗岩、安山岩,中酸性系列石英粗安岩及酸性系列流纹岩,形成年龄分别为:210.9±3.5 Ma、216.6±3.1 Ma、216.9±2.1 Ma 和 230.2±2.2 Ma。中性系列岩浆来源于原始地幔的部分熔融,并遭受俯冲板片释放流体的强烈富集作用。岩浆演化过程中结晶分异作用不明显,但遭受较强的地壳混染。中酸性系列和酸性系列岩浆来源于相对较浅的地壳物质深熔,前者岩浆演化过程中结晶分异作用较弱,而后者则较强。大兴安岭中段晚三叠世时期的构造演化背景受蒙古—鄂霍茨克洋板块向南俯冲作用的影响明显,在研究区表现为弧后伸展的构造背景。俯冲板片的断离拆沉引起了软流圈物质上涌,并导致伸展构造背景的形成,也为哈达陶勒盖组火山岩原始岩浆的形成提供了热量来源。

**关键词:**大兴安岭中段;晚三叠世火山岩;哈达陶勒盖组;锆石 U-Pb 年代学;地球化学;构造学。

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2017)12-2146-28

收稿日期: 2017-03-12

## Petrogenesis and Tectonic Settings of Volcanic Rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm. at Central Part of Great Xing'an Range

Ma Yongfei<sup>1,2</sup>, Liu Yongjiang<sup>1\*</sup>, Wen Quanbo<sup>1</sup>, Zhang Zhibin<sup>2</sup>, Li Wei<sup>2</sup>, Si Qiuliang<sup>2</sup>, Tang Zhen<sup>2</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110034, China

**Abstract:** To realize the tectonic setting at central part of Great Xing'an Range during Late Triassic, petrology, zircon U-Pb chronology and geochemical of the Late Triassic Hadataolegai Fm. were analyzed in this paper. The volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm. can be divided into three rock series which are intermediate latite and andesite, intermediate to acidic quartz trachyandensite and acid rhyolite, and their formation ages are 210.9±3.5 Ma, 216.6±3.1 Ma, 216.9±2.1 Ma and 230.2±2.2 Ma, respectively. The magma of intermediate series was derived from partial melting of lithospheric mantle which fully enriched by fluids released from subduction oceanic lithosphere. There have no or slightly crystallization fractionation but suffered seriously crustal contamination during magma upwelling. Intermediate to acidic and acidic series rocks have crustal-derived magma source features, the crystallization fractionation of intermediate to acidic magma was unobvious during its evolution course, but it was quite obvious to the acidic series. The southward subduction of the Okhotsk oceanic lithosphere has played an important role to the tectonic setting at central part of Great Xing'an Range during Late Triassic, and appear back-arc extension signature at the study area. This extension background leaded by asthenosphere magma upwelling which caused by subduction oceanic lithosphere delamination, and the asthenosphere magma upwelling provides energy to the primary magma generation for volcanic rocks of the Late Triassic Hadataolegai Fm. meanwhile.

**基金项目:** 科技部“973”项目(No.2013CB429802);中国地质调查局地调项目(Nos.1212011120665,12120113053800,DD20160201-03)。

**作者简介:** 马永非(1986—),男,博士研究生,主要从事构造地质研究。ORCID:0000-0003-0740-0472.E-mail:yongjiang@jlu.edu.cn

\* 通讯作者: 刘永江, ORCID:0000-0002-9409-3425.E-mail:yongjiang@jlu.edu.cn

**引用格式:** 马永非,刘永江,温泉波,等,2017.大兴安岭中段晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩成因及构造背景.地球科学,42(12):2146—2173.

**Key words:** central part of Great Xing'an Range; Late Triassic volcanic rock; Hadataolegai Fm.; zircon U-Pb geochronology; geochemistry; tectonics.

## 0 引言

中国东北地区位于中亚造山带东段,北邻西伯利亚板块,南与华北板块接壤(图 1a)(李锦轶,1998;张兴洲等,2008,2012;刘永江等,2010).该区的构造演化依次经历了古生代古亚洲洋构造域、中生代蒙古—鄂霍茨克洋构造域及中—新生代环太平洋构造域的影响与叠加,构造演化历史十分复杂(Şengör *et al.*, 1993; Şengör and Natal'in, 1996; Zhou *et al.*, 2011, Zhou and Wilde, 2013; 徐备等,2014; Xiao *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017).大兴安岭位于中国东北地区西侧,是该区的一个重要构造单元,其构造演化历史的研究对东北地区乃至整个中亚造山带东段地区构造演化历史的恢复有着重要意义(Zhou and Wilde, 2013; Liu *et al.*, 2017).

目前,多数研究表明,中亚造山带东段存在较多具有前寒武纪古老基底的微地块,自西向东依次为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块及布列亚—佳木斯地块,它们分别在晚古生代之前沿新林—喜桂图缝合带、贺根山—黑河缝合带及牡丹江断裂碰撞缝合(图 1b),形成统一的佳蒙地块(王成文等,2008; Liu *et al.*, 2017),并于中三叠世时期沿索伦克尔—西拉木伦—长春缝合带与华北板块碰撞缝合(Liu *et al.*, 2017).至此古亚洲洋闭合,东北地区进入碰撞后的伸展造山阶段(Zhou and Wilde, 2013; Xiao *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017).进入中生代时期,古亚洲洋闭合后的伸展造山作用、蒙古—鄂霍茨克洋及古太平洋板块的俯冲作用均对我国东北地区的构造演化产生了深刻影响,但三大构造域的影响时间及具体影响范围存在着较大争议(赵越等,1994; 孙德有等,2005; Ge *et al.*, 2007; 裴福萍等,2008; 孟恩等,2011; 许文良等,2013; 孟凡超等,2014).三叠纪时期是古生代的古亚洲洋构造域向中新生代蒙古—鄂霍茨克洋构造域及环太平洋构造域转换的重要时期,大兴安岭在该时期处于重要的构造位置,因此关于大兴安岭三叠纪时期构造背景的研究对认识古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋及环太平洋三大构造域在东北地区的影响时间及范围有着重要的指示意义.

笔者在大兴安岭地区多年 1:5 万区域地质调查的基础上,选择构造指示意义较强的大兴安岭中段地区晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩为研究对象,

通过岩石学、地球化学及 U-Pb 同位素年代学的研究,探讨其岩石组合、形成年代、岩石成因及构造背景,并分析其与古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋及环太平洋三大构造域的关系,为区域构造历史研究提供详实可靠的资料.

## 1 地质背景及岩性特征

研究区位于大兴安岭中段,大地构造位置处于中亚造山带东缘,兴安地块中部东侧,与松嫩地块西缘相邻(图 1b).额尔古纳—兴安地块与松嫩地块于晚古生代晚石炭世早期沿贺根山—黑河缝合带碰撞缝合(Han *et al.*, 2012, 2015; Feng *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017),并分别以蒙古—鄂霍茨克缝合带为界与北部的西伯利亚板块相邻、以索伦克尔—西拉木伦—长春缝合带为界与南部的华北板相邻.从古生代到中新生代,研究区分别遭受古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋及环太平洋三大构造体域的影响(许文良等,2013; Liu *et al.*, 2017).

研究区发育有大量晚古生代侵入岩(Shi *et al.*, 2015),包括早石炭世花岗闪长岩及晚石炭世、二叠纪二长花岗岩等,主要位于研究区的中东部地区,其中石炭纪岩体多发生糜棱岩化作用.研究区晚古生代火山岩及沉积岩地层主要包括晚石炭世—早二叠世宝力高庙组砂岩、粉砂岩,早二叠世大石寨组变安山岩、粉砂岩,中二叠世哲思组大理岩及少量晚二叠世林西组砂岩、粉砂岩,分布于研究区的北部及东南部.研究区中生代侵入岩十分发育,主要分布于西部及东北部地区,岩性特征复杂,主要为二长花岗岩及碱长花岗岩等.中生代火山岩及沉积岩地层包括早三叠世老龙头组砂岩、粉砂岩,晚三叠世哈达陶勒盖组安山岩、英安岩、流纹岩及大量火山碎屑岩,中侏罗世万宝组砂岩、粉砂岩及砂砾岩,晚侏罗世玛尼吐组安山岩,早白垩世白音高老组流纹岩等.规模较大,分布于研究区的大部分地区(图 1c).

哈达陶勒盖组由吉林省区调队于 1980 年根据科尔沁右翼前旗索伦镇哈达陶勒盖剖面建组,最初建组时的时代定为早三叠世,岩性以安山岩为主夹中酸性或酸性火山岩和碎屑沉积层(杨雅军等,2012).该套地层在研究区分布面积较大,岩性较为复杂,包括安山岩、玄武安山岩、气孔杏仁状玄武安

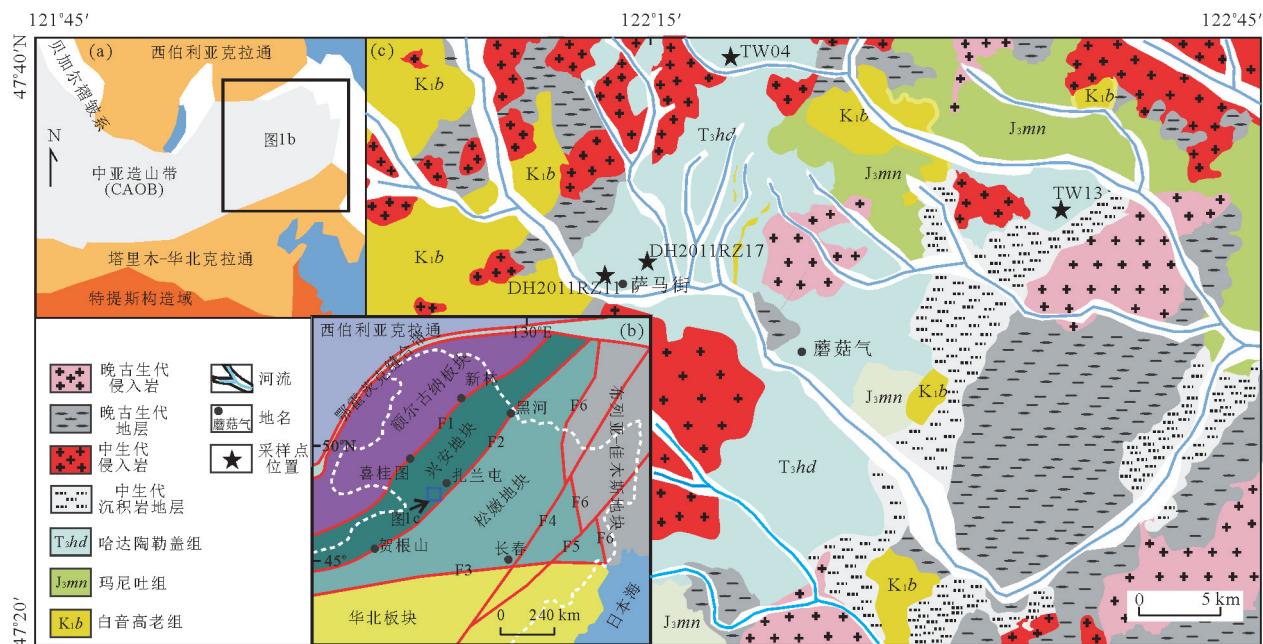


图 1 (a) 中亚造山带及邻区构造简图;(b) 东北地区构造格架图;(c) 研究区地质图

Fig.1 (a) Simplified tectonic framework of CAOB and surround areas; (b) Tectonic division of Northeast China; and (c) Detailed geological maps of study area

F1.新林—喜桂图缝合带;F2.贺根山—黑河缝合带;F3.索伦克尔—西拉木伦—长春缝合带;F4.依兰—伊通断裂;F5.敦化—密山断裂;F6.牡丹江断裂;a.根据 Safonova and Santosh (2014)修改;b.根据 Liu et al.(2017)、Zhou and Wilde(2013)修改

山岩、粗安岩、英安岩及流纹岩等,其中以安山岩、玄武安山岩等为主体。根据同位素测年及区域地层接触关系的厘定,确定其形成时代为中一晚三叠世。

本次研究在1:5万区域地质调查的基础上,对哈达陶勒盖组的岩石组合开展了系统的分析,将其划分为中性系列、中酸性系列及酸性系列3类,其中中性系列代表岩性包括安山岩、安粗岩、玄武安山岩及相应的中性火山碎屑岩,为哈达陶勒盖组的主体岩性。中酸性系列代表岩性包括英安岩、石英粗安岩。酸性系列成分代表岩性主要为流纹岩。通过对各系列成分岩石进行系统的样品采集,实验测试,分析其岩石成因及形成的构造背景。本次研究分析的样品详述如下:

安粗岩(DH2011RZ11):岩石呈灰紫色,具斑状结构和碎裂结构,具块状构造。斑晶矿物成分包括钾长石:半自形,板状,粒度:0.2~1.2 mm,低负突起,一级灰干涉色,约含10%。斜长石:自形,柱状,粒度:0.2~1.6 mm,聚片双晶发育,约含5%。基质矿物成分:主要由长石组成,具霏细结构和隐晶质结构,其中长石约含75%,云母约含5%,金属矿物约含5%(图2a)。

安山岩(DH2011RZ17):岩石呈深灰色,具斑状结构,块状构造。斑晶矿物成分包括斜长石:自形,柱

状,粒度:0.4~4.8 mm,聚片双晶发育,约含30%。普通辉石:自形,短柱状,高正突起,粒度:0.4~0.8 mm,约含3%。黑云母:绿色,已绿泥石化,粒度:0.4~1.2 mm,约含7%。基质矿物成分斜长石:自形,柱状,粒度:0.05~0.40 mm,聚片双晶发育,约含55%。

普通辉石:自形,短柱状,高正突起,粒度:0.1~0.4 mm,约含2%。黑云母:绿色,已绿泥石化,粒度:0.2~0.4 mm,约含3%(图2b)。

石英粗安岩(TW04):岩石呈黄褐色,具斑状结构,具块状构造。斑晶矿物成分包括斜长石:自形,柱状,粒度:0.2~1.2 mm,聚片双晶发育,约含20%。黑云母:黄褐色,片状,平行消光,粒度:0.4~0.8 mm,约含5%。石英:它形,粒状,见裙边结构,粒度:0.2~0.6 mm,约含5%。基质矿物成分由长石、石英和云母组成,具霏细结构,其中长英质矿物约含65%,云母约含5%(图2c,2d)。

流纹岩(TW13):岩石呈黄褐色,具斑状结构,具块状构造。斑晶矿物成分包括斜长石:自形,柱状,粒度:0.4~3.4 mm,聚片双晶发育,正低突起,一级灰白干涉色,约含15%。钾长石:半自形,板状,粒度:0.4~5.0 mm,条纹结构发育,低负突起,一级灰干涉色,约含5%。石英:它形,粒状—港湾状,一级黄白干涉色,约含5%。

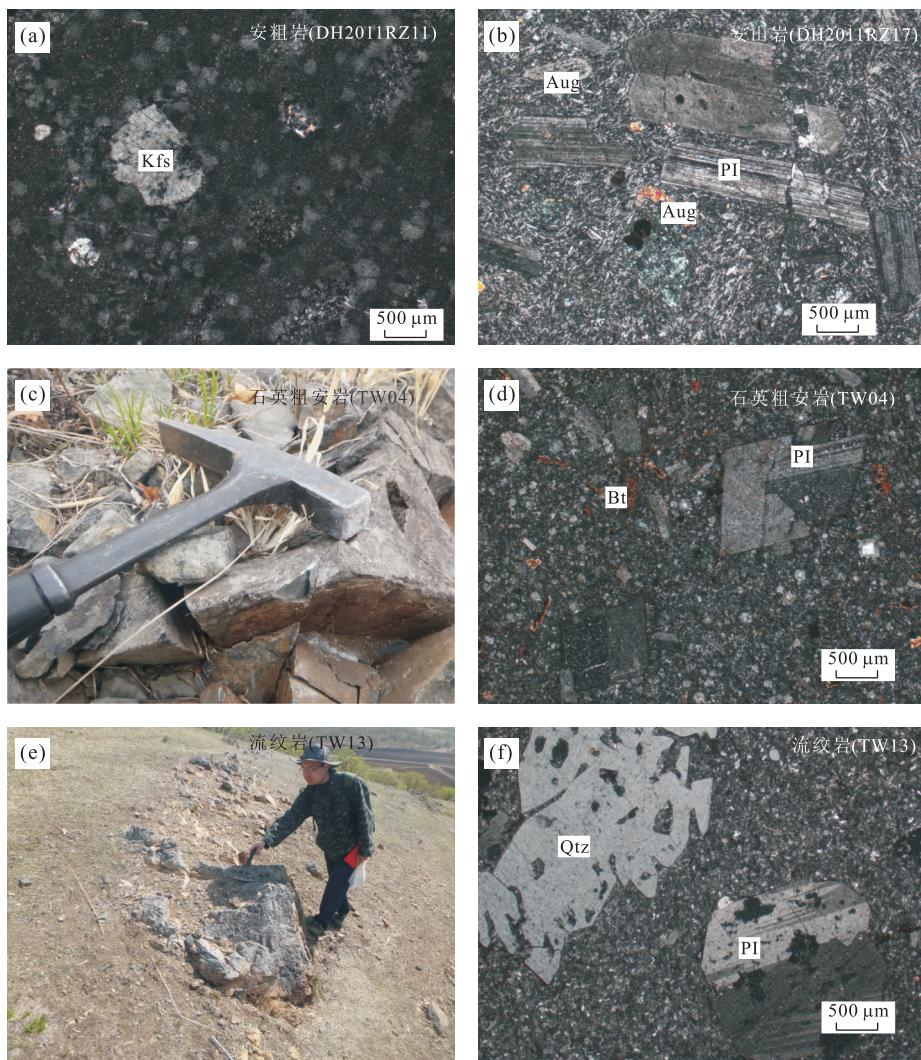


图 2 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩典型岩石露头及显微照片

Fig.2 Typical filed rock outcrops and its microscopic photomicrographs for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.  
a.安粗岩镜下照片;斑晶钾长石遭受明显的熔蚀及轻微碎裂;b.安山岩镜下照片;斑晶斜长石碎裂明显;c.石英粗安岩野外露头;d.石英粗安岩镜下照片;e.流纹岩野外露头;f.流纹岩镜下照片(斜长石及石英斑晶遭受明显熔蚀);Kfs.钾长石;PI.斜长石;Aug.普通辉石;Bt.黑云母;Qtz.石英

涉色,粒度:0.4~4.0 mm,约含8%.黑云母:片状,已铁化,粒度:0.2~0.6 mm,约含2%.基质矿物成分由长石和石英组成,具霏细结构,约含70%(图 2e、2f).

## 2 分析方法

主量元素、微量元素和稀土元素的分析测试由国土资源部沈阳矿产资源监督检测中心完成.主量元素使用 X 射线荧光光谱仪(XRF-1500)完成分析测试.微量元素、稀土元素分析使用等离子体质谱仪(ICP-MS)ELEMENT II 测试完成.分析结果见表 1.

锆石挑选工作由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,锆石制靶工作由北京凯德正科技有限

公司完成,在国家地质实验测试中心完成了阴极发光图像采集和 U-Pb 年龄测定工作.测试仪器采用 Thermo Element II 及 New Wave UP213 激光剥蚀系统,测试结果通过 GLITTER4.0 软件计算获得,普通 Pb 校正采用 Andersen *et al.*(2002)的方法进行,锆石谐和图采用 Isoplot 3.0 绘制.详细实验步骤和分析方法请参考 Yuan *et al.*(2004).分析结果见表 2.

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 定年

本文对大兴安岭中段地区哈达陶勒盖组中的安粗岩(DH2011RZ11)、安山岩(DH2011RZ17)、石英

**表 1 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩主量(wt%)、稀土和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果**  
Table 1 Major (wt%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) analysis result of the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.

样号	中性系列										酸性系列					
	PM305-5-1YQ	TC303Q1	TC106Q2	TC107Q2	TC125YQ1	PMI01-18-1Q	PM302-1-1Q	PM209-5-1YQ	PM206-13-1YQ	PM209-7-1YQ	PM206-37-1YQ	PM208-9-1YQ	TC128YQ1	TC1106YQ3		
SiO <sub>2</sub>	55.86	55.98	53.59	60.17	56.26	57.28	61.44	66.18	67.42	67.51	70.60	79.37	72.92	75.60		
TiO <sub>2</sub>	1.17	1.12	1.19	0.80	0.92	1.00	0.69	0.76	0.59	0.61	0.35	0.14	0.36	0.13		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.41	18.06	17.51	16.85	17.82	17.20	15.85	16.33	15.52	15.10	14.47	10.85	14.38	12.58		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.52	7.42	5.79	2.92	3.56	4.57	3.41	3.61	1.84	1.29	2.74	1.09	1.73	1.20		
FeO	1.28	1.71	4.04	3.23	4.36	3.55	2.56	0.76	0.81	1.17	0.31	0.22	0.67	0.56		
TFeO	6.25	8.39	9.25	5.86	7.57	7.66	5.63	4.01	2.47	2.33	2.78	1.20	2.23	1.64		
MnO	0.08	0.13	0.13	0.09	0.11	0.13	0.09	0.04	0.06	0.08	0.07	0.01	0.03	0.02		
MgO	2.17	1.68	4.05	4.24	4.42	3.21	2.96	0.60	0.56	0.79	0.48	0.02	0.47	1.66		
CaO	5.29	1.99	6.37	2.56	4.52	5.72	5.06	1.42	1.06	1.53	1.40	0.43	0.43	0.29		
Na <sub>2</sub> O	5.84	6.10	4.44	4.33	3.86	4.49	4.31	4.63	5.56	4.70	3.36	1.66	3.08	3.98		
K <sub>2</sub> O	2.30	2.21	1.74	2.14	1.40	1.92	2.92	4.63	4.76	4.86	5.12	5.49	4.57	3.21		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.42	0.41	0.44	0.31	0.32	0.31	0.23	0.21	0.13	0.16	0.15	0.06	0.11	0.03		
LOI	1.63	3.61	1.09	2.36	3.11	0.87	0.55	0.99	0.85	0.96	1.06	0.59	1.27	0.93		
Total	98.97	100.41	100.37	99.99	100.66	100.23	100.07	100.16	99.17	98.75	100.10	99.93	100.03	100.18		
K <sub>2</sub> O <sup>+</sup>																
Na <sub>2</sub> O	8.37	8.58	6.22	6.63	5.39	6.45	7.26	9.34	10.50	9.78	8.56	7.20	7.75	7.24		
A/CNK	0.80	1.12	0.85	1.19	1.11	0.87	0.82	1.07	0.95	0.95	1.06	1.14	1.32	1.18		
La	39.46	28.16	21.35	27.63	19.87	20.71	24.73	39.73	43.77	42.84	30.80	17.14	34.98	23.21		
Ce	84.90	71.16	43.93	55.99	40.26	43.38	48.48	81.41	89.85	88.44	61.76	35.72	65.95	47.83		
Pr	11.59	8.45	6.57	7.68	5.46	6.46	6.42	10.58	11.71	11.33	7.16	4.47	7.58	6.43		
Nd	46.82	34.88	28.21	31.08	24.19	27.62	25.43	42.81	43.98	42.58	26.36	18.23	28.14	27.12		
Sm	8.05	6.93	5.46	5.53	4.85	5.38	4.45	8.11	8.05	7.85	4.56	4.00	4.84	5.91		
Eu	2.47	2.13	1.77	2.17	1.47	2.11	2.11	1.67	2.11	1.92	0.74	0.59	0.87	1.26		
Gd	6.08	5.20	4.52	4.43	3.72	4.51	3.77	6.35	6.89	6.49	3.53	3.36	3.98	5.10		
Tb	0.80	0.70	0.66	0.55	0.57	0.68	0.50	1.01	1.03	1.00	0.57	0.66	0.63	0.91		
Dy	4.07	3.63	3.50	2.64	2.69	3.61	2.60	5.08	6.24	6.01	2.97	3.74	3.25	5.37		
Ho	0.68	0.67	0.68	0.50	0.59	0.72	0.48	1.00	1.14	1.10	0.56	0.88	0.68	1.19		
Er	1.75	1.83	1.66	1.24	1.59	1.84	1.26	2.80	3.06	3.03	1.77	2.64	2.02	2.92		
Tm	0.27	0.25	0.28	0.21	0.25	0.32	0.20	0.49	0.53	0.53	0.33	0.50	0.38	0.51		
Yb	1.60	1.75	1.71	1.32	1.52	1.99	1.28	3.11	3.35	3.42	2.40	3.27	2.38	3.95		
Lu	0.21	0.23	0.24	0.19	0.24	0.28	0.17	0.48	0.47	0.50	0.36	0.54	0.36	0.53		
Y	16.49	16.88	19.40	15.66	12.97	20.48	12.71	25.72	29.74	28.30	17.22	23.55	18.45	31.20		
$\Sigma$ REE	208.75	165.97	120.55	141.15	107.25	119.62	121.88	204.63	222.17	217.05	143.86	95.73	156.03	132.23		
$L_{(A/Yb)N}$	17.64	11.55	8.96	14.97	9.41	7.48	13.87	9.17	9.37	9.00	9.22	10.54	3.76	4.22		
$\delta_{Eu}$	1.04	1.04	1.06	1.29	1.02	1.28	1.53	0.69	0.85	0.80	0.54	0.59	0.48	0.69		

续表 1

样号	中性系列						中酸性系列						酸性系列					
	PM305-5-1YQ	TC303Q1	TC106Q2	TC125YQ2	TC107Q2	PM101-18-1Q	PM302-1-1Q	PM206-13-1YQ	PM209-5-1YQ	PM206-37-1YQ	PM209-7-1YQ	PM208-9-1YQ	PM208-37-1YQ	PM209-7-1YQ	PM208-9-1YQ	TC128YQ1	TC1106YQ3	
Li	9.65	72.16	8.03	19.76	33.02	5.56	8.45	17.31	13.25	18.52	17.71	2.74	21.47	11.94	11.94	11.94		
Be	1.46	4.57	0.84	1.28	1.24	0.84	0.94	2.31	2.51	2.88	2.23	0.87	1.81	1.30	1.30	1.30		
Th	5.61	10.32	6.59	16.10	8.80	12.04	9.27	10.92	8.22	11.48	11.23	7.90	6.94	7.28	7.28	7.28		
U	1.18	1.89	0.79	2.44	0.82	1.07	1.75	3.60	2.49	4.05	3.48	1.93	2.62	2.37	2.37	2.37		
Hf	4.54	5.35	3.74	5.09	9.96	5.78	6.03	12.23	8.61	9.74	9.88	4.71	5.51	6.09	6.09	6.09		
Ta	0.25	0.49	0.31	0.63	0.37	0.46	0.33	1.05	0.34	0.72	1.22	0.92	0.99	1.02	1.02	1.02		
Sc	13.12	19.71	13.29	9.78	13.84	11.88	9.67	6.73	7.72	6.96	3.44	4.18	5.13	7.45	7.45	7.45		
Ba	829	827	550	1100	460	663	882	1056	1162	1103	1045	1417	769	772	772	772		
Nb	3.35	8.28	6.39	6.39	4.30	6.44	6.29	11.24	15.33	15.12	10.69	9.11	9.52	9.97	9.97	9.97		
Rb	31	63	33	41	24	33	56	116	99	120	129	77	84	65	65	65		
Sr	1814	960	937	778	995	798	706	384	295	360	246	109	308	74	74	74		
Zr	150	185	119	177	147	166	162	409	403	418	245	166	236	213	213	213		
Co	20.81	31.66	22.74	19.05	27.21	19.46	15.82	8.57	5.00	6.09	7.70	4.63	6.00	0.91	0.91	0.91		
V	148.0	161.4	176.8	93.0	112.7	133.9	93.2	39.7	31.8	38.7	23.3	12.4	31.1	17.6	17.6	17.6		
$\text{La}/(\text{Sm})_{\text{N}}$	3.17	2.62	2.53	3.22	2.65	2.48	3.59	3.16	3.51	3.52	4.36	2.77	4.67	2.54	2.54	2.54		
$\text{Ba}/\text{Th}$	147.7	80.11	83.39	68.33	52.29	55.08	95.16	96.71	141.38	96.06	93.11	179.26	110.75	105.97	105.97	105.97		
$\text{La}/\text{Nb}$	11.78	3.40	3.34	4.32	4.62	3.22	3.93	3.53	2.86	2.83	2.88	1.88	3.67	2.33	2.33	2.33		
$\text{La}/\text{Ba}$	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.01	0.05	0.03	0.03	0.03		
$\text{Sm}/\text{Yb}$	5.01	3.96	3.19	4.18	3.20	2.71	3.48	2.61	2.40	2.30	1.90	1.22	2.03	1.50	1.50	1.50		
$\text{Sm}/\text{Th}$	1.43	0.67	0.83	0.34	0.55	0.45	0.48	0.74	0.98	0.68	0.41	0.51	0.70	0.81	0.81	0.81		
$\text{Th}/\text{Y}$	0.34	0.61	0.34	1.03	0.68	0.59	0.73	0.42	0.28	0.41	0.65	0.38	0.38	0.23	0.23	0.23		

**表 2 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据**  
Table 2 LA-ICP-MS Zircon U-Pb data for the volcanic rocks from Late Triassic Hadatolegai Fm.

测点号	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	同位素比值			同位素年龄 (Ma)					
			$\pm 1\delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\delta$
<b>DH2011RZ11; 安粗岩</b>											
DH2011RZ11_3	0.67	0.0581	0.0034	0.0310	0.0008	0.2273	0.0148	532	123	197	5
DH2011RZ11_5	0.75	0.0497	0.0017	0.0328	0.0007	0.2304	0.0086	180	78	208	4
DH2011RZ11_7	0.85	0.0518	0.0021	0.0334	0.0007	0.2390	0.0110	277	92	212	5
DH2011RZ11_9	0.84	0.0515	0.0016	0.0327	0.0007	0.2357	0.0081	264	71	208	4
DH2011RZ11_10	0.96	0.0521	0.0015	0.0332	0.0007	0.2330	0.0069	288	62	211	4
DH2011RZ11_12	0.69	0.0540	0.0021	0.0353	0.0008	0.2432	0.0102	371	83	223	5
DH2011RZ11_13	0.80	0.0516	0.0014	0.0360	0.0007	0.2546	0.0071	267	59	228	4
DH2011RZ11_15	1.59	0.0514	0.0013	0.0313	0.0006	0.2245	0.0061	261	58	199	4
DH2011RZ11_17	0.76	0.0537	0.0023	0.0313	0.0007	0.2220	0.0105	360	93	199	4
DH2011RZ11_18	0.89	0.0496	0.0019	0.0329	0.0007	0.2251	0.0097	177	88	208	4
DH2011RZ11_19	0.97	0.0515	0.0017	0.0342	0.0007	0.2552	0.0094	265	75	217	4
DH2011RZ11_20	0.88	0.0480	0.0018	0.0332	0.0007	0.2146	0.0088	97	88	211	4
DH2011RZ11_22	0.65	0.0529	0.0017	0.0340	0.0007	0.2433	0.0083	323	70	216	4
DH2011RZ11_23	0.89	0.0494	0.0017	0.0338	0.0007	0.2289	0.0085	165	78	215	4
DH2011RZ11_24	1.24	0.0508	0.0018	0.0323	0.0007	0.2363	0.0092	231	80	205	4
DH2011RZ11_26	0.79	0.0550	0.0014	0.0321	0.0006	0.2337	0.0064	410	57	204	4
DH2011RZ11_27	0.85	0.0514	0.0014	0.0332	0.0007	0.2340	0.0066	259	61	210	4
DH2011RZ11_28	0.77	0.0507	0.0016	0.0341	0.0007	0.2399	0.0083	226	72	216	4
DH2011RZ11_29	0.94	0.0489	0.0014	0.0330	0.0007	0.2238	0.0068	143	66	209	4
DH2011RZ11_30	0.82	0.0496	0.0014	0.0332	0.0007	0.2300	0.0071	178	66	211	4
DH2011RZ11_34	0.57	0.0494	0.0018	0.0343	0.0007	0.2272	0.0090	166	82	218	4
DH2011RZ11_35	0.70	0.0504	0.0016	0.0351	0.0007	0.2443	0.0082	212	71	223	4
<b>DH2011RZ17; 安山岩</b>											
DH2011RZ17_1	0.74	0.0510	0.0014	0.0336	0.0007	0.2423	0.0072	242	63	213	4
DH2011RZ17_2	0.87	0.0526	0.0016	0.0344	0.0007	0.2464	0.0082	313	68	218	4
DH2011RZ17_3	0.77	0.0522	0.0015	0.0348	0.0007	0.2523	0.0081	293	66	221	4
DH2011RZ17_4	0.87	0.0516	0.0017	0.0345	0.0007	0.2367	0.0084	267	73	219	4
DH2011RZ17_5	0.81	0.0510	0.0015	0.0355	0.0007	0.2524	0.0081	239	66	225	5
DH2011RZ17_6	0.77	0.0502	0.0022	0.0321	0.0007	0.2183	0.0109	205	101	204	5
DH2011RZ17_7	0.81	0.0497	0.0016	0.0332	0.0007	0.2336	0.0084	181	75	211	4
DH2011RZ17_8	1.14	0.0524	0.0012	0.0324	0.0006	0.2298	0.0057	301	53	206	4
DH2011RZ17_9	0.95	0.0502	0.0013	0.0329	0.0007	0.2306	0.0065	206	61	209	4
DH2011RZ17_11	0.79	0.0503	0.0013	0.0357	0.0007	0.2512	0.0068	209	58	226	4
DH2011RZ17_13	0.66	0.0500	0.0016	0.0343	0.0007	0.2403	0.0084	195	73	218	4

续表 2

测点号	Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)				
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$
DH2011RZ17_安山岩												
DH2011RZ17_15	0.88	0.0498	0.0013	0.0334	0.0007	0.2329	0.0064	188	60	212	4	213
DH2011RZ17_17	0.78	0.0516	0.0014	0.0363	0.0007	0.2556	0.0071	268	59	230	4	231
DH2011RZ17_18	0.72	0.0520	0.0017	0.0328	0.0007	0.2316	0.0080	284	71	208	4	212
DH2011RZ17_19	0.77	0.0499	0.0018	0.0336	0.0007	0.2368	0.0091	191	80	213	4	216
DH2011RZ17_20	0.68	0.0529	0.0015	0.0352	0.0007	0.2487	0.0077	323	64	223	4	226
DH2011RZ17_22	0.78	0.0514	0.0014	0.0341	0.0007	0.2443	0.0070	259	61	216	4	222
DH2011RZ17_23	0.63	0.0486	0.0031	0.0337	0.0009	0.2282	0.0164	127	142	214	6	209
DH2011RZ17_24	0.67	0.0512	0.0018	0.0348	0.0007	0.2497	0.0096	249	78	221	5	226
DH2011RZ17_25	0.76	0.0538	0.0018	0.0369	0.0008	0.2569	0.0092	363	72	233	5	232
DH2011RZ17_26	0.78	0.0493	0.0017	0.0338	0.0007	0.2251	0.0085	162	79	214	4	206
DH2011RZ17_29	0.94	0.0549	0.0018	0.0337	0.0007	0.2442	0.0088	408	71	214	4	222
DH2011RZ17_30	0.87	0.0501	0.0018	0.0351	0.0008	0.2440	0.0098	201	82	222	5	222
DH2011RZ17_32	0.79	0.0495	0.0016	0.0343	0.0007	0.2376	0.0083	171	73	217	4	216
TW04_石英粗安岩												
TW04_3	1.94	0.0505	0.0013	0.0350	0.0008	0.2463	0.0066	217	57	222	5	224
TW04_5	2.37	0.0539	0.0023	0.0345	0.0008	0.2700	0.0129	368	92	219	5	243
TW04_6	3.18	0.0547	0.0031	0.0345	0.0009	0.2678	0.0175	400	122	218	6	241
TW04_7	2.15	0.0510	0.0015	0.0353	0.0008	0.2473	0.0078	238	65	224	5	224
TW04_8	2.13	0.0525	0.0020	0.0344	0.0008	0.2440	0.0103	309	85	218	5	222
TW04_9	2.39	0.0518	0.0028	0.0340	0.0008	0.2455	0.0148	275	120	216	5	223
TW04_10	2.18	0.0519	0.0028	0.0354	0.0009	0.2478	0.0151	283	121	224	5	225
TW04_12	1.98	0.0544	0.0016	0.0346	0.0008	0.2647	0.0083	388	62	219	5	239
TW04_13	2.07	0.0523	0.0013	0.0339	0.0008	0.2474	0.0067	300	57	215	5	224
TW04_14	2.29	0.0569	0.0020	0.0339	0.0008	0.2660	0.0103	487	76	215	5	240
TW04_16	2.30	0.0518	0.0020	0.0356	0.0009	0.2636	0.0114	274	86	225	5	238
TW04_17	1.86	0.0508	0.0012	0.0338	0.0008	0.2414	0.0060	229	54	215	5	220
TW04_19	2.29	0.0556	0.0015	0.0332	0.0008	0.2617	0.0076	435	59	210	5	236
TW04_21	2.13	0.0522	0.0020	0.0357	0.0008	0.2591	0.0110	292	83	226	5	234
TW04_22	1.64	0.0505	0.0013	0.0345	0.0008	0.2462	0.0066	219	57	219	5	224
TW04_23	1.89	0.0508	0.0014	0.0338	0.0008	0.2450	0.0071	230	61	214	5	223
TW04_24	2.27	0.0542	0.0016	0.0337	0.0008	0.2635	0.0085	379	64	214	5	238
TW04_25	2.61	0.0522	0.0017	0.0339	0.0008	0.2522	0.0092	295	73	215	5	228
TW04_26	1.86	0.0513	0.0013	0.0334	0.0008	0.2453	0.0067	253	58	212	5	223
TW04_27	2.41	0.0511	0.0015	0.0333	0.0008	0.2383	0.0076	246	66	211	5	217
TW04_28	1.40	0.0513	0.0012	0.0343	0.0008	0.2504	0.0061	255	53	218	5	227

续表 2

测点号	Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\delta$
TW04:石英粗安岩 <sup>143</sup>													
TW04_29	1.74	0.0281	0.0018	0.0334	0.0008	0.1376	0.0089	212	53	212	5	131	8
TW13:流纹岩													
TW13_1	2.60	0.0511	0.0026	0.0366	0.0010	0.2749	0.0164	244	115	231	6	247	13
TW13_2	2.74	0.0522	0.0018	0.0368	0.0010	0.2607	0.0105	296	78	233	6	235	8
TW13_3	3.46	0.0566	0.0043	0.0367	0.0011	0.2789	0.0245	477	160	232	7	250	19
TW13_4	1.91	0.0515	0.0026	0.0367	0.0010	0.2597	0.0150	264	111	232	6	234	12
TW13_5	2.23	0.0535	0.0039	0.0357	0.0011	0.2619	0.0217	348	155	226	7	236	17
TW13_6	2.47	0.0513	0.0030	0.0382	0.0011	0.2665	0.0177	256	130	242	7	240	14
TW13_7	2.00	0.0509	0.0030	0.0382	0.0011	0.2693	0.0180	235	129	242	7	242	14
TW13_8	1.82	0.0546	0.0024	0.0381	0.0010	0.2866	0.0146	396	95	241	6	256	12
TW13_9	3.51	0.0532	0.0037	0.0368	0.0011	0.2788	0.0230	336	151	233	7	250	18
TW13_10	2.19	0.0537	0.0027	0.0371	0.0010	0.2751	0.0158	357	109	235	6	247	13
TW13_11	2.04	0.0681	0.0019	0.0364	0.0010	0.3414	0.0112	871	57	231	6	298	8
TW13_12	2.60	0.0504	0.0017	0.0363	0.0010	0.2546	0.0100	211	77	230	6	230	8
TW13_13	3.02	0.0648	0.0024	0.0366	0.0010	0.3267	0.0142	766	75	232	6	287	11
TW13_14	2.45	0.0541	0.0028	0.0353	0.0010	0.2728	0.0160	375	110	224	6	245	13
TW13_15	2.66	0.0519	0.0028	0.0368	0.0010	0.2597	0.0160	279	119	233	6	234	13
TW13_16	1.73	0.0525	0.0029	0.0356	0.0010	0.2598	0.0168	309	122	226	6	235	14
TW13_17	3.38	0.0509	0.0019	0.0366	0.0010	0.2639	0.0112	238	83	232	6	238	9
TW13_18	2.29	0.0557	0.0047	0.0354	0.0011	0.2740	0.0266	442	176	224	7	246	21
TW13_19	3.73	0.0517	0.0029	0.0360	0.0010	0.2645	0.0172	270	123	228	6	238	14
TW13_20	1.87	0.0508	0.0014	0.0371	0.0010	0.2578	0.0079	232	61	235	6	233	6
TW13_21	2.76	0.0551	0.0035	0.0366	0.0011	0.2790	0.0200	417	135	232	7	250	16
TW13_22	2.22	0.0510	0.0018	0.0368	0.0010	0.2579	0.0102	239	78	233	6	233	8
TW13_23	3.14	0.0501	0.0026	0.0361	0.0010	0.2526	0.0144	199	114	229	6	229	12
TW13_24	1.96	0.0495	0.0015	0.0374	0.0010	0.2610	0.0087	170	67	236	6	236	7
TW13_25	3.01	0.0552	0.0022	0.0351	0.0010	0.2671	0.0121	419	85	222	6	240	10
TW13_26	2.89	0.0532	0.0019	0.0357	0.0010	0.2570	0.0104	336	79	226	6	232	8
TW13_27	1.92	0.0497	0.0013	0.0362	0.0010	0.2474	0.0075	182	62	229	6	225	6
TW13_28	1.94	0.0520	0.0015	0.0353	0.0009	0.2590	0.0082	285	63	224	6	234	7
TW13_29	2.34	0.0551	0.0023	0.0348	0.0009	0.2820	0.0134	417	89	220	6	252	11
TW13_30	2.12	0.0531	0.0017	0.0354	0.0009	0.2597	0.0094	333	71	224	6	234	8

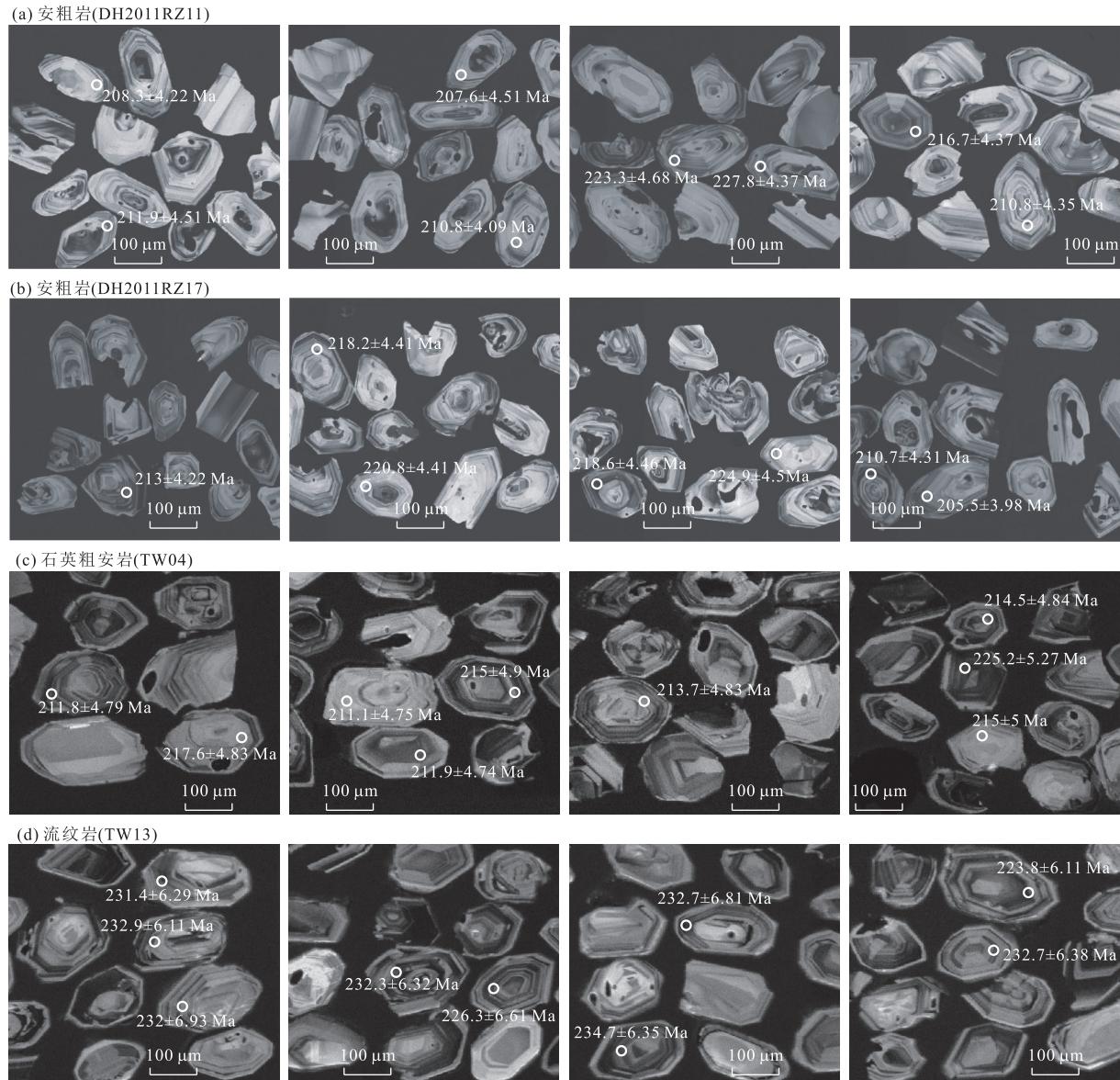


图 3 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩典型锆石阴极发光(CL)图像

Fig.3 Typical Cathodoluminescence (CL) images of selected zircon grains for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.

粗安岩(TW04)及流纹岩(TW13)分别进行了LA-ICP-MS U-Pb 定年,分析结果见表 2 和图 4。

安粗岩(DH2011RZ11)锆石多呈自形柱状或双锥状,锆石颗粒长度为 100~210 μm,长宽比为 1.5~2.5,阴极发光图像中(图 3a),锆石均呈现出清晰的震荡环状结构, Th/U 比值为 0.57~1.59,结晶环带较窄,晶棱明显,呈现典型的岩浆结晶锆石特征。所测定的 23 个测点数据均落在 U-Pb 一致线上,均有较好的谐和性(图 4)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 196.9~223.3 Ma,加权平均值年龄为  $210.9\pm3.5$  Ma, MSWD=3.3,代表了安粗岩的形成时间,为晚三叠世。

安山岩(DH2011RZ17)锆石多呈自形柱状或半

自形短柱状,锆石颗粒长度为 80~180 μm,长宽比为 1.5~2.0,阴极发光图像中(图 3b),部分锆石遭受破碎或溶蚀作用而呈现残缺特征,但所有锆石均呈现出清晰的震荡环状结构, Th/U 比值为 0.62~1.14,为典型的岩浆结晶锆石特征。所测定的 24 个测点数据均落在 U-Pb 一致线上,且具有较好的谐和性(图 4)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于 203.5~233.3 Ma 之间,加权平均值年龄为  $216.6\pm3.1$  Ma, MSWD=2.8,代表了安山岩的形成时间,为晚三叠世。

石英粗安岩(TW04)锆石多呈自形或半自形柱状,少数呈近椭球状,锆石颗粒长度 90~200 μm,长宽比 1.2~2.5,阴极发光图像中(图 3c),锆石多呈现

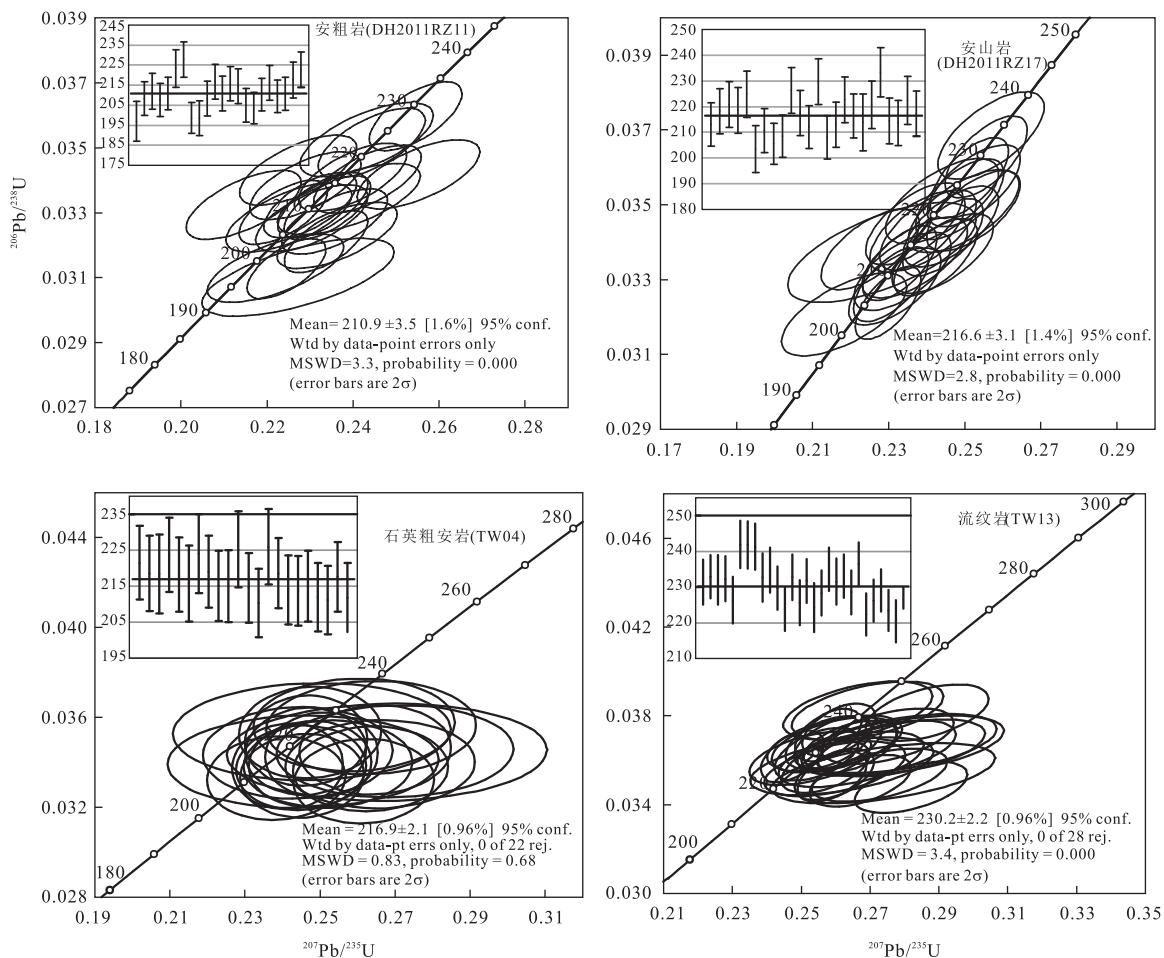


图 4 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 U-Pb Concordia diagrams for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.

出清晰的震荡环状结构,具有较高的 Th/U 比值,为 1.40~2.69,呈现典型的岩浆结晶锆石特征.所测定的 22 个测点数据均落在 U-Pb 一致线上,数据点分布集中,且具有较好的谐和性(图 4). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于 211.1~225.9 Ma 之间,加权平均值年龄为  $216.9 \pm 2.1$  Ma, MSWD=0.83, 代表了石英安粗岩的形成时间,为晚三叠世.

流纹岩(TW13)锆石多呈自形或半自形柱状,锆石颗粒长度 100~220  $\mu\text{m}$ ,长宽比 1.5~2.5,阴极发光图像中(图 3d),锆石呈现出清晰的震荡环状结构,具有较高的 Th/U 比值,为 1.73~3.51,呈现典型的岩浆结晶锆石特征.所测定的 28 个测点数据均落在 U-Pb 一致线上,数据点分布集中,且具有较好的谐和性(图 4). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于 220.4~241.9 Ma 之间,加权平均值年龄为  $230.2 \pm 2.2$  Ma, MSWD=3.4, 代表了流纹岩的形成时间,为晚三叠世.

### 3.2 岩石地球化学

根据本次研究样品的岩石学及地球化学特征,

将其划分为中性系列、中酸性系列及酸性系列分别讨论,中性系列代表岩性为安粗岩(DH2011RZ11)和安山岩(DH2011RZ17),中酸性系列代表岩性为石英粗安岩(TW04),酸性系列代表岩性为流纹岩(TW13).3 个岩石系列主量元素和微量元素分析测试结果见表 1.

**3.2.1 主量元素** 中性系列安粗岩(DH2011RZ11)和安山岩(DH2011RZ17)的代表性样品  $\text{SiO}_2$  含量为 53.6%~61.4%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 15.9~18.1%, 全碱 ALK( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) 含量为 5.3%~8.3%,  $\text{TFeO}$  ( $\text{TFeO} = \text{FeO} + 0.899 \cdot 8\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 含量为 5.6%~9.2%,  $\text{CaO}$  含量为 2.0%~6.4%,  $\text{MgO}$  含量为 1.7%~4.4%. 岩石在  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$  图解上多数投于粗面安山岩区(图 5a). 属于碱钙性~碱性(图 5b)及中钾钙碱性~高钾钙碱性系列(图 5c). 铝指数 A/CNK 为 0.80~1.19, 为准铝质到过铝质岩石(图 5d).

中酸性系列石英粗安岩(TW04)的代表性样品  $\text{SiO}_2$  含量为 66.2%~67.5%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为

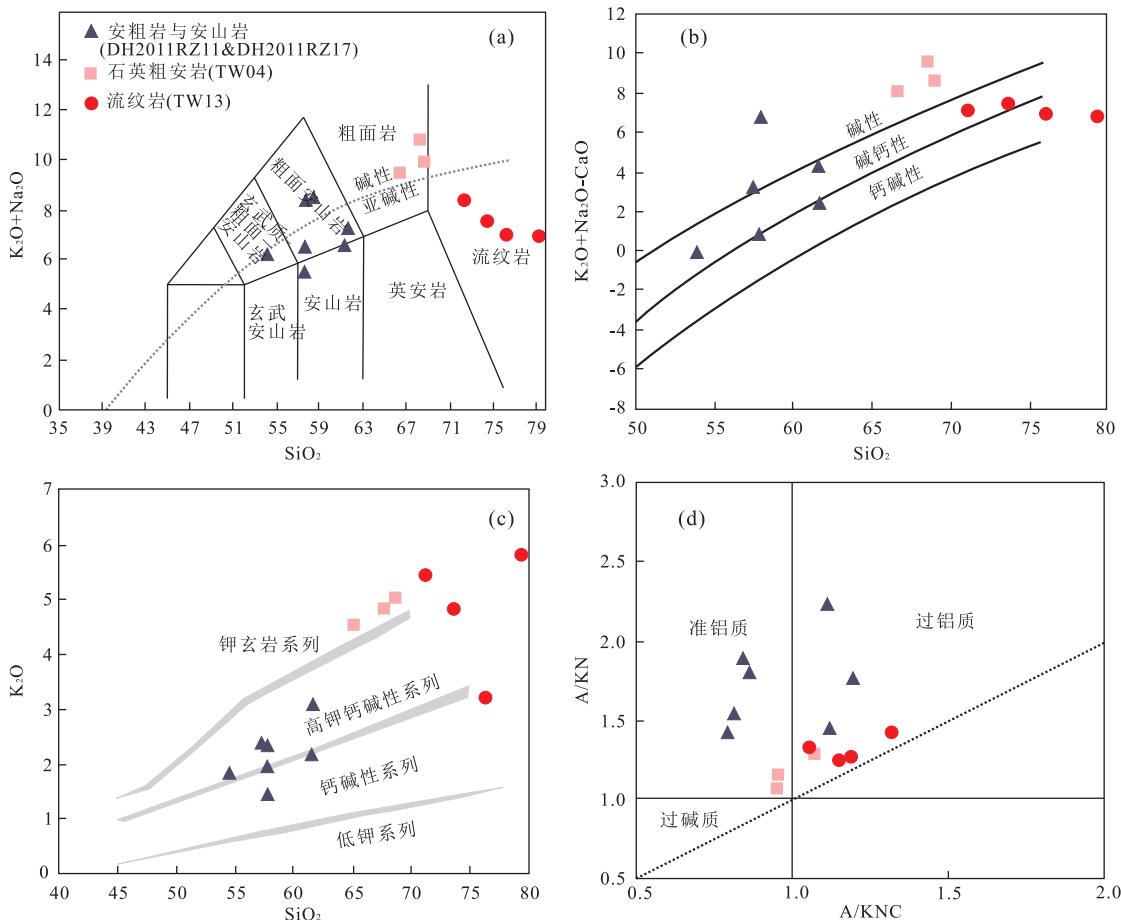


图 5 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩主量元素图解

Fig.5 Major element diagrams for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.

a.  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})-\text{SiO}_2$  图解; b.  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO})-\text{SiO}_2$  图解, 根据 Frost *et al.* (2001) 绘制; c.  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解, 根据 Peccerillo and Taylor (1976) 绘制; d.  $\text{A}/\text{CNK}$ - $\text{A}/\text{KNC}$  图解, 根据 Maniar and Piccoli (1989) 绘制;  $\text{A}/\text{CNK}$  = 分子数  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ ,  $\text{A}/\text{NK}$  = 分子数  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$

15.1%~16.3%, 全碱 ALK ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) 含量为 9.6%~10.3%, TFeO 含量为 2.3%~4.0%, CaO 含量为 1.0%~1.5%, MgO 含量为 0.56%~0.79%. 岩石在  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$  图解上投于粗面岩、粗面英安岩区(图 5a). 属于碱性(图 5b) 及钾玄岩系列(图 5c). 铝指数  $\text{A}/\text{CNK}$  为 0.95~1.07, 为过铝质岩石(图 5d).

酸性系列流纹岩(TW13)的代表性样品  $\text{SiO}_2$  含量为 70.6%~79.4%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 10.8%~14.5%, 全碱 ALK ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) 含量为 7.1%~8.5%, TFeO 含量为 1.2%~2.8%, CaO 含量为 0.3%~1.4%, MgO 含量为 0.02%~1.70%. 岩石在  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$  图解上多数投于流纹岩区(图 5a). 属于钙碱性-碱钙性(图 5b) 及高钾钙碱性-钾玄岩系列(图 5c). 铝指数  $\text{A}/\text{CNK}$  为 1.06~1.32, 为过铝质-强过铝质岩石(图 5d).

在主量元素 Harker 图解上(图 6), 部分中酸性系列石英粗安岩主量元素含量与  $\text{SiO}_2$  含量变化呈负相关关系, 如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  及  $\text{P}_2\text{O}_5$  等. 而有些元素含量随  $\text{SiO}_2$  含量变化则没有明显规律, 较为凌乱, 如  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  等. 说明中酸性系列岩浆演化过程中经历了一定的结晶分异作用, 但较为微弱. 酸性系列流纹岩呈现出较为明显的演化趋势,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、TFeO、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$  及  $\text{P}_2\text{O}_5$  均随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加而减少, 呈现负相关关系.  $\text{K}_2\text{O}$  随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加而增加, 呈现正相关关系. 说明岩浆演化过程中经历了显著的结晶分异作用. 中性系列安粗岩与安山岩的演化趋势与中酸性系列石英粗安岩、酸性系列流纹岩存在诸多差异, 如:  $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{MnO}$  与  $\text{SiO}_2$  含量的变化均无明显的相关性关系,  $\text{P}_2\text{O}_5$  随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加而增加, 呈现出正相关的趋势. 说明中性系列的岩浆演

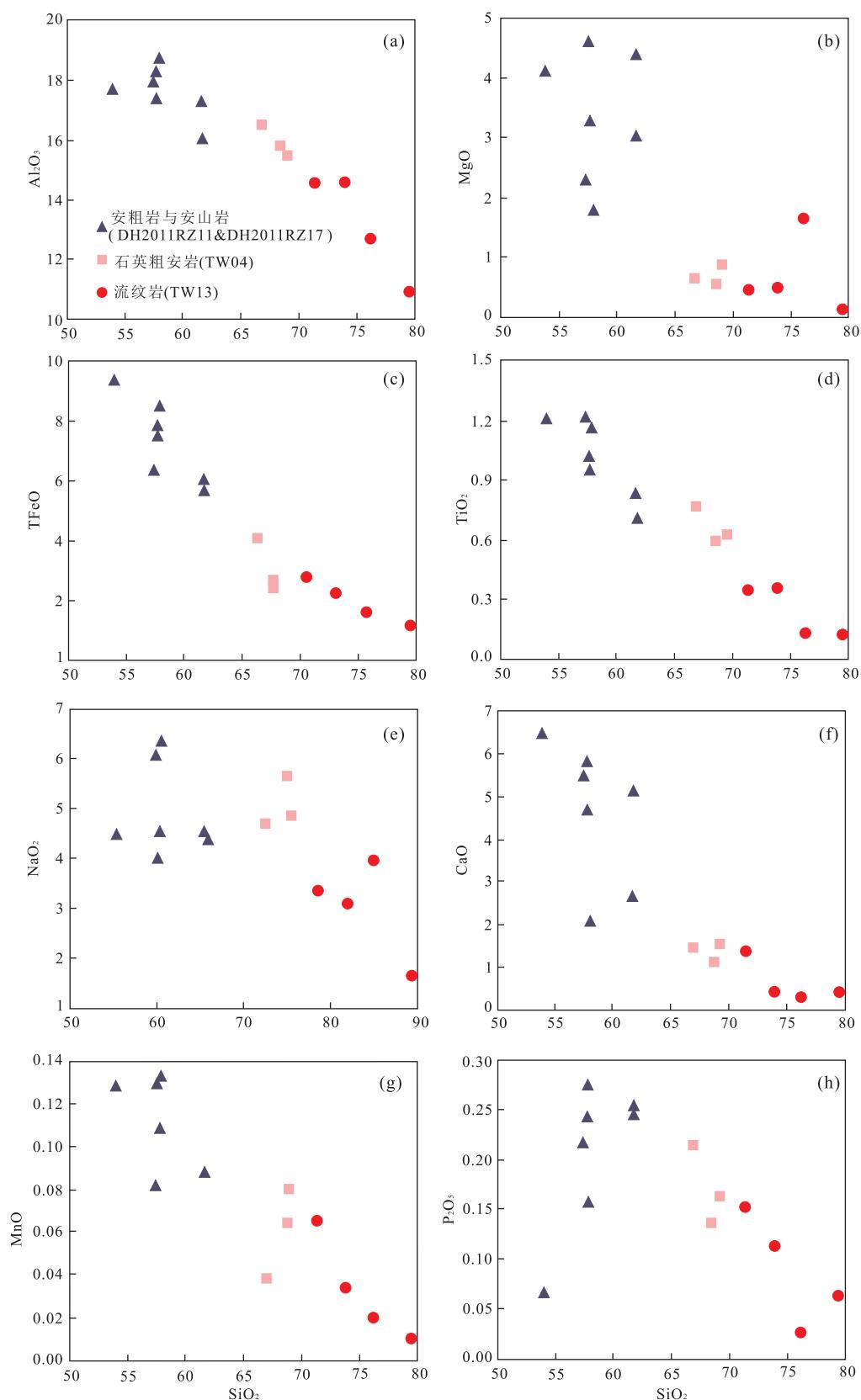
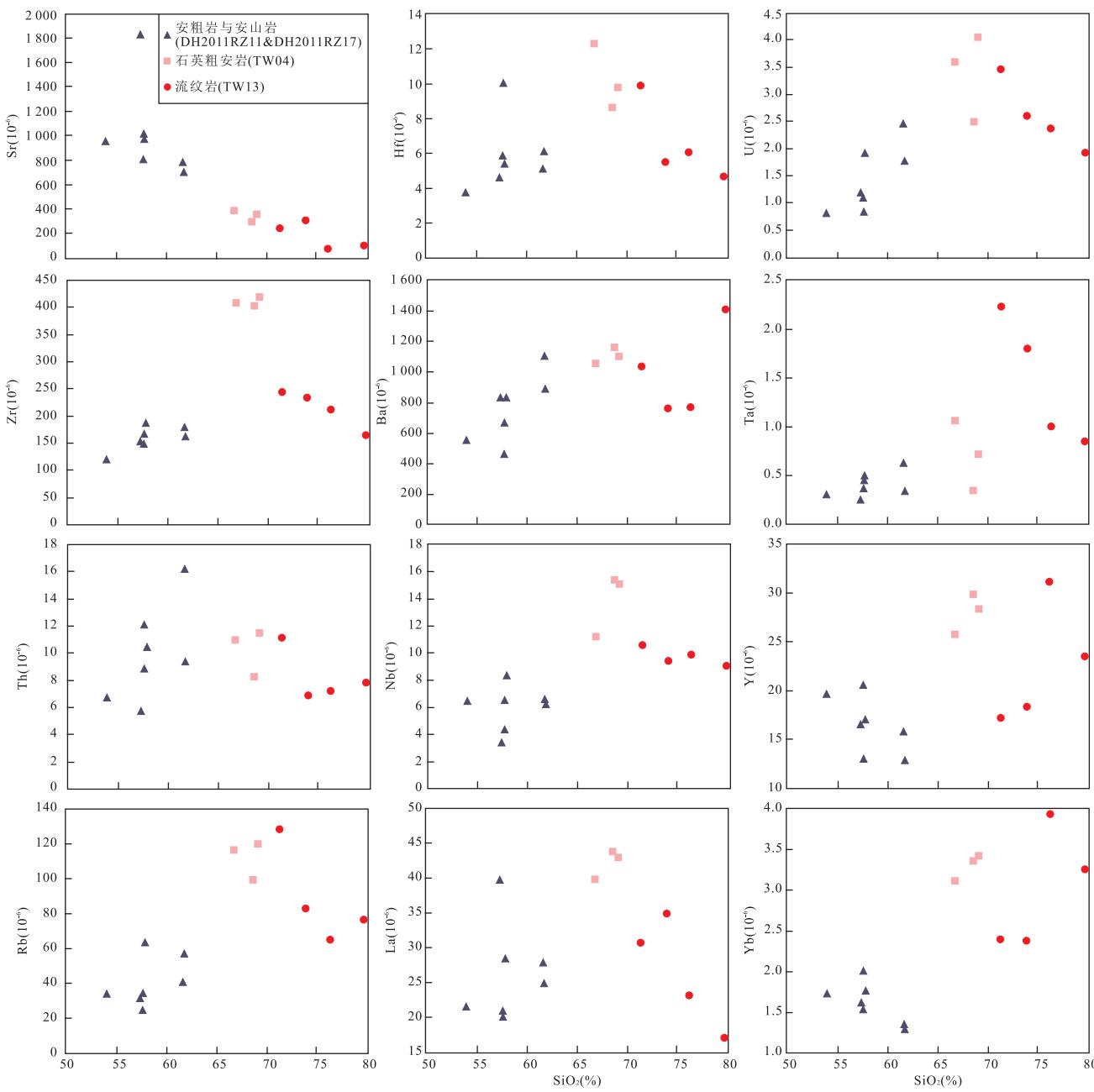


图 6 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩主量元素 Harker 图解

Fig.6 Major element Harker diagrams for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.

$$\text{TFeO} = \text{FeO} + 0.899 \cdot 8\text{Fe}_2\text{O}_3$$

图 7 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩微量元素与 SiO<sub>2</sub> 含量协变图解Fig.7 Plots of various trace elements vs. SiO<sub>2</sub> for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.

化过程与中酸性、酸性系列存在较大差异,岩浆演化过程中结晶分异作用较差。

**3.2.2 微量元素** 在微量元素与 SiO<sub>2</sub> 含量协变图解上(图 7),多数中酸性系列石英粗安岩、酸性系列流纹岩的元素呈现出一致的演化趋势,如:Sr、Hf、U、Ba、Ta 及 Y 等。仅有少量元素演化趋势不一致或者关系不明显,如:Th、Nb。而中性系列安粗岩及安山岩的元素演化趋势与前两个岩石系列差异则较大,例如:在中酸性系列石英粗安岩、酸性系列流纹岩中,Hf、U、Zr、Ba、Ta、Rb 及 La 等原始含量随着

SiO<sub>2</sub> 含量的增加而减少,呈现负相关关系,而中性系列安粗岩及安山岩则与之相反,则呈现正相关关系。结合主量元素 Harker 图解,可见中酸性系列石英粗安岩与酸性系列流纹岩的岩浆演化过程具有一定的相似性,同时也有一定的差异,而中性系列安粗岩及安山岩与中酸性系列石英粗安岩及酸性系列流纹岩的岩浆演化过程差别则较大。

中性系列安粗岩及安山岩的稀土元素总量( $\Sigma$ REE)较高,在  $107.25 \times 10^{-6} \sim 208.75 \times 10^{-6}$  之间,平均为  $140.74 \times 10^{-6}$ 。 $\delta$ Eu = 1.02 ~ 1.53, 呈现出

较为明显的正 Eu 异常。 $(La/Yb)_N = 7.48 \sim 14.97$ , 轻重稀土分离较为明显, 富集轻稀土元素, 而亏损重稀土元素, 呈现明显的右倾趋势(图 8a). 原始地幔微量元素标准化蛛网图(图 8b)显示, 中性系列安粗岩及安山岩富集 Rb, Sr, K, Ba 等大离子亲石元素及 Th, Zr, Hf 等部分高场强元素, 而亏损元素 Nb.

中酸性系列石英粗安岩的稀土元素总量( $\Sigma REE$ )均较高, 在  $204.63 \times 10^{-6} \sim 222.67 \times 10^{-6}$  之间, 平均为  $214.62 \times 10^{-6}$ .  $\delta Eu = 0.69 \sim 0.85$ , 呈现较为明显的负 Eu 异常。 $(La/Yb)_N = 9.00 \sim 9.37$ , 轻重稀土分离明显, 富集轻稀土元素, 而亏损重稀土元素, 呈现明显的凹型右倾趋势(图 8c). 原始地幔微量元素标准化蛛网图(图 8d)显示, 中酸性系列石英粗

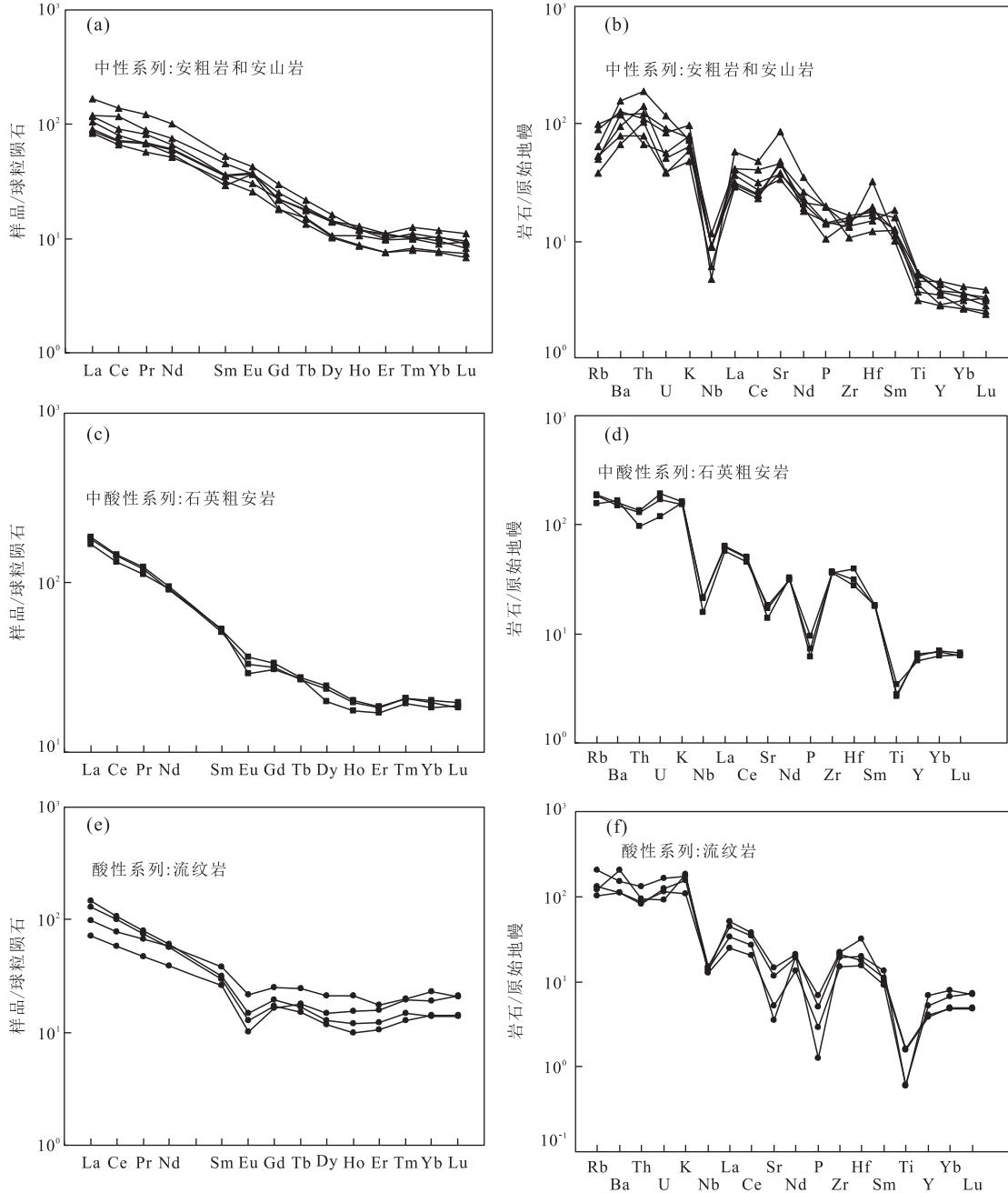


图 8 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a,c,e)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b,d,f)

Fig.8 Chondrite-normalized rare earth element patterns (a,c,e) and Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b,d,f) for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.

a,c,e. 标准化值据 Boynton(1984); b,d,f. 标准化值据 Sun and McDonough(1989)

安岩富集 Rb, K, Ba 等大离子亲石元素,而亏损 Nb, P, Ti 等高场强元素.亏损 Sr 元素,可能与斜长石的结晶分异有关.

酸性系列流纹岩的稀土元素总量( $\Sigma$ REE)较高,在  $95.73 \times 10^{-6} \sim 156.03 \times 10^{-6}$  之间,平均为  $131.96 \times 10^{-6}$ . $\delta$ Eu = 0.48~0.69,呈现较为明显的负 Eu 异常. $(La/Yb)_N = 3.76 \sim 10.54$ ,轻重稀土分离明显,富集轻稀土元素,而亏损重稀土元素,呈现明显的凹型右倾趋势(图 8e).原始地幔微量元素标准化蛛网图(图 8f)显示,酸性系列流纹岩富集 Rb, K, Ba 等大离子亲石元素,而亏损 Nb, P, Ti 等高场强元素.亏损 Sr 元素,可能与斜长石的结晶分异有关.

以上分析可见,中酸性系列石英粗安岩和酸性系列流纹岩的稀土元素特征,微量元素标准化蛛网图特征等均较为一致,如:相似的负 Eu 异常及负 Sr 异常等.而中性系列安粗岩及安山岩的稀土元素特征及微量元素标准化蛛网图特征与中酸性系列石英粗安岩和酸性系列流纹岩呈现出较为明显的差别,如:正 Eu 异常及正的 Sr 异常等.预示着中酸性系列石英粗安岩和酸性系列流纹岩可能具有相似的岩石成因,而与中性系列安粗岩及安山岩的岩石成因不同.

## 4 讨论

### 4.1 哈达陶勒盖组火山岩的形成时代

哈达陶勒盖组最早的建组剖面被厘定为早三叠世,岩性以巨厚、大套安山岩为主,夹中酸性或酸性火山岩层和沉积碎屑岩层.研究区晚三叠世的岩石组合特征与哈达陶勒盖组标准剖面的岩性特征基本一致,且在研究区南部地区发现该套火山岩层之底与下伏老龙头组顶层沉积碎屑岩层呈整合接触,故将其划归为哈达陶勒盖组.1:25 万蘑菇气幅修测过程中将该套岩石组合厘定为中三叠世,但新开展的 1:5 万区域地质调查详细测年结果表明,该套岩系既有中三叠世  $239 \pm 5$  Ma、 $240 \pm 2$  Ma(未发表数据)岩性,又有大量晚三叠世  $210.9 \pm 3.5$  Ma、 $216.6 \pm 3.1$  Ma、 $216.9 \pm 2.1$  Ma、 $230.2 \pm 2.2$  Ma(本研究)岩性.野外地质调查厘定出该套中、晚三叠世的岩石组合均属于哈达陶勒盖期火山喷发旋回,说明该期火山喷发持续时间较长,喷发间歇时间相对短,哈达陶勒盖组火山岩的形成时代从早三叠世一直持续到中、晚三叠世时期.

大兴安岭地区三叠纪沉积岩及火山岩的缺失一直是该区的一个热点地质问题,随着近几年 1:5 万

大比例尺区域地质调查的开展,越来越多三叠纪火山岩被发现(葛文春等,2005;刘宝山等,2005,2007;孙德有等,2005;李世超,2012;王伟等,2012),哈达陶勒盖组火山岩是其中的重要组成部分.同时,大兴安岭中部地区近年来又有大量三叠纪侵入岩的发现,包括与晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩配套产出的同时期二长花岗岩、正长花岗岩等(Shi et al., 2015);明水地区及博克图地区的中晚三叠纪花岗闪长岩、二长花岗岩(余宏全等,2012; Liu et al., 2017);大兴安岭中段地区中晚三叠世的 I 型花岗岩(Yang et al., 2016)等.这些研究表明,大兴安岭中段地区三叠纪有着重要的岩浆活动事件.

### 4.2 岩石成因

#### 4.2.1 中性系列安粗岩及安山岩

从中性系列安粗岩及安山岩的 Harker 图解可以看出(图 6),该系列岩石多数主量元素与 SiO<sub>2</sub> 含量的变化呈现出散乱波动的特征,无明显的趋势,说明岩浆演化过程中没有经历结晶分异作用或者该过程不明显.微量元素蛛网图中 Zr、Hf 正异常预示了该岩浆体系可能受到地壳混染作用(图 8),同时,其较高的 Th/Ce ( $\sim 0.19$ ) 与 Th/La ( $\sim 0.40$ ) 比值说明地壳混染可能在岩浆演化过程中起着较为重要的作用,因为地壳有着相对较高的 Th/Ce ( $\sim 0.15$ ) (Taylor and McLennan, 1995) 与 Th/La ( $\sim 0.3$ ) (Plank, 2005) 比值,而幔源岩浆的 Th/Ce ( $0.02 \sim 0.05$ ) 与 Th/La ( $\sim 0.12$ ) 比值较低(Sun and McDonough, 1989).

晚三叠世哈达陶勒盖组中性系列安粗岩及安山岩具有较高的 TFeO, TiO<sub>2</sub>, MgO, Sc, Co 及相对较低的 SiO<sub>2</sub> 和 (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) 含量,预示着岩浆来源可能为地幔.同时区域上存在较多晚三叠世幔源岩浆成因的中基性岩石.例如,在研究区西北部额尔古纳地块内发现有同时期的辉长岩—闪长岩侵入体,其 SiO<sub>2</sub> 和 (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) 含量较低,而 MgO, TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Sc, Cr, Co, 及 Ni 含量较高,与哈达陶勒盖组中性系列安粗岩及安山岩地球化学特征较为相似,二者可能为区域上的同期幔源岩浆产物.该辉长岩—闪长岩岩体的 Hf 同位素特征及模式年龄特征进一步表明其原始成岩岩浆来源于亏损岩石圈地幔的部分熔融(Tang et al., 2016).同时,与辉长岩—闪长岩同期产出的还有中性镁质侵入岩体,其原始成岩岩浆也来源于岩石圈地幔的部分熔融(Tang et al., 2016).另外,哈达陶勒盖组火山岩组合还包括大量安山岩、玄武安山岩等一系列弧岩浆岩性质的岩石组合,该种类型的岩石组合多形成于与俯冲作用相关的构造背景之下,预示着

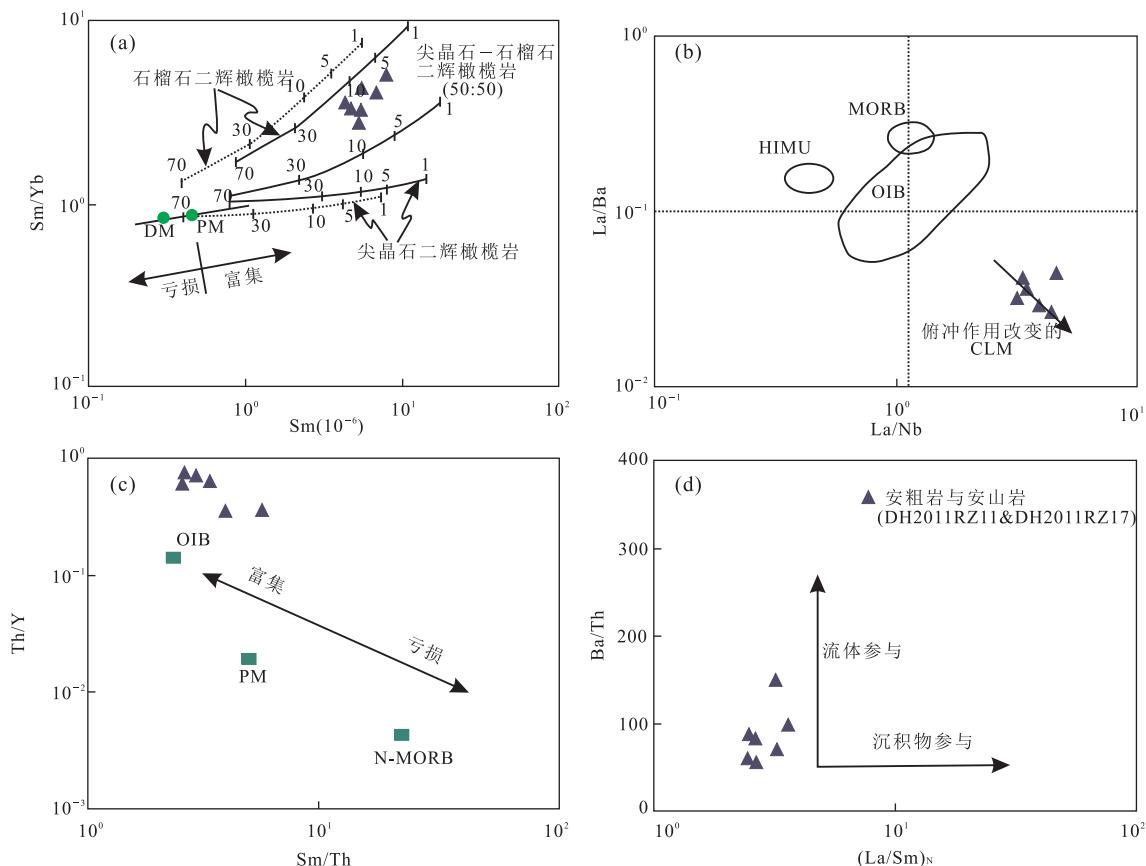


图 9 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩

Fig.9 The volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.

a. Sm/Yb-Sm 图解;b. La/Ba-La/Nb 图解;c. Th/Y-Sm/Th 图解;d. Ba/Th-(La/Sm)<sub>n</sub> 图解;其中图 a 中分别由原始地幔及亏损地幔为源区的尖晶石二辉橄榄岩( $\text{Ol}_{0.53} + \text{Opx}_{0.27} + \text{Cpx}_{0.17} + \text{Sp}_{0.13}$ )及石榴石二辉橄榄岩( $\text{Ol}_{0.60} + \text{Opx}_{0.20} + \text{Cpx}_{0.10} + \text{Gt}_{0.10}$ )熔融曲线根据 Aldanmaz *et al.*(2000)和 Zhao and Zhou(2007b, 2009)的数据模式绘制. 实线代表由原始地幔熔融的曲线, 虚线代表由亏损地幔熔融的曲线, 各熔融曲线上短线段旁的数字代表熔融程度; DM. 亏损地幔(McKenzie and O'Nions, 1991); PM. 原始地幔(Sun and McDonough, 1989); HIMU. 高 U/Pb 比值地幔源区(Saunders *et al.*, 1992); MORB. 大洋中脊玄武岩源区; OIB. 洋岛玄武岩源区(Sun and McDonough, 1989); CLM. 大陆岩石圈地幔(Sun and McDonough, 1989); N-MORB. 正常的大洋中脊玄武岩(Sun and McDonough, 1989)

哈达陶勒盖组中性系列安粗岩及安山岩幔源岩浆的形成可能与俯冲作用相关.而且,该系列岩石高场强元素 Th, Zr, Hf 的亏损预示着其岩浆可能来源于遭受俯冲板片所释放流体富集之后的亏损岩石圈地幔的部分熔融.

稀土元素的丰度及比值经常用来研究地幔岩浆的来源深度、熔融程度及岩浆演化过程中的结晶分异程度等(Aldanmaz *et al.*, 2000; Zhao and Zhou, 2007a).本次研究的大兴安岭中段哈达陶勒盖组中性系列安粗岩及安山岩具有较大范围的 Ce/Y 比值(2.1~5.1),说明其有着较大范围的岩浆来源.但多数样品的 Ce/Y 比值大于 3,说明深度为 60~80 km 的尖晶石—石榴石稳定区域岩浆来源较少(McKenzie and Bickle, 1988),可能更深岩浆源区的贡献比例较大.该系列岩石较高的(Tb/Yb)<sub>n</sub> 比值,进一

步说明尖晶石橄榄岩相对应源区的贡献比例较小这一事实.在 Sm/Yb-Sm 图解中(图 9a),所有哈达陶勒盖组中性系列粗安岩及安山岩样品的 Sm/Yb 比值均高于尖晶石—石榴石 50:50 熔融曲线,但低于石榴石熔融曲线,分布于尖晶石—石榴石 50:50 熔融曲线与石榴石熔融曲线之间,说明石榴石相应源区的部分熔融作用对哈达陶勒盖组中性系列粗安岩及安山岩原始岩浆贡献较大.因此,该岩石系列岩浆由较深的原始地幔源区岩石 5%~10% 的部分熔融形成,且石榴石相应的稳定区对岩浆贡献比例较大,而尖晶石—石榴石稳定区对岩浆贡献比例较小.

哈达陶勒盖组中性系列安粗岩及安山岩具有较高的 La/Nb(3.2~11.8)及 La/Ta(44.2~158.9)比值,且具有较低的 La/Ba(0.03~0.05)比值(图 9b),是典型的大陆岩石圈地幔经受俯冲作用影响改造后

的特征(Saunders *et al.*, 1992)。同时,安粗岩及安山岩样品的 Sm/Th(0.34~1.43)比值低于正常的大洋中脊玄武岩,而 Th/Y(0.34~1.03)比值却明显高于正常的大洋中脊玄武岩,说明该幔源岩浆没有经过前期部分熔融发生亏损,而是经过了较为强烈的富集作用。该富集作用之后,部分样品的 Th/Y 和 Sm/Th 比值已经与洋岛玄武岩相似(图 9c)。该幔源岩浆的富集作用可能由两方面的原因引起:(1)俯冲板块部分熔融过程中释放的流体;(2)俯冲板片携带的沉积物发生部分熔融所产生的岩浆。中性系列粗安岩及安山岩样品的 Ba/Th 比值变化较大,而  $(La/Sm)_N$  比值却较为恒定(图 9d),说明流体作用在该富集过程中起到了关键性的控制因素,而沉积物的影响作用较小或者没有。变化范围较大的 Sr/Nd(25.0~41.1)比值进一步说明了流体作用在该次幔源岩浆的富集过程中起到了关键作用。

由以上分析可知,形成大兴安岭中段地区晚三叠世哈达陶勒盖组中性系列安粗岩及安山岩的岩浆来源于地幔,由原始地幔 5%~10% 的部分熔融形成原始成岩岩浆。其中石榴石二辉橄榄岩稳定区物质的贡献比例较大,而尖晶石二辉橄榄岩稳定区物质的贡献比例相对较小。俯冲作用在成岩过程中起到了重要作用,俯冲板片部分熔融过程中所释放的流体使得原始地幔部分熔融所产生的原始岩浆得到富集。同时,较高的 Th/Ta 比值说明俯冲板片的部分熔融发生于较高的温度背景之下和较深的地幔源区(Elliott *et al.*, 1997; Pearce *et al.*, 2005)。这种较高的温度很可能由上升的软流圈地幔物质提供,而软流圈地幔物质的上升很可能由俯冲板片的断离拆沉引起。俯冲板片的断离拆沉及软流圈物质上涌会形成一种伸展的构造背景,并深刻影响区域构造历史的发展和岩浆活动。在伸展的构造背景之下,中性系列安粗岩及安山岩的岩浆迅速上升侵位,喷发至地表成岩。岩浆演化过程中没有或者遭受轻微的结晶分异作用,但受到明显的地壳混染作用。

#### 4.2.2 中酸性系列石英粗安岩

(1) 岩浆演化:晚三叠世哈达陶勒盖组中酸性系列石英粗安岩的主量元素 Harker 图解及微量元素与  $SiO_2$  含量协变图解表明(图 6、图 7),该系列岩石的岩浆演化过程中,有些元素呈现出斜率较为一致的演化趋势,例如  $Al_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $P_2O_5$  及 Sr 等与  $SiO_2$  含量变化呈现出显著的负相关的关系,而 Hf, Nb, La, Y 及 Yb 等与  $SiO_2$  含量变化呈现出显著的正相关的关系。但有些元素含量随着  $SiO_2$  含量的变化则呈现出较为凌

乱的分布特征,如  $MgO$ 、 $CaO$ 、Th 及 Rb 等,说明岩浆演化过程中经历了一定程度的结晶分异作用,但结晶分异作用较为微弱或不太显著,仅影响到了部分元素含量的变化。负 Eu 异常及负 Sr 异常说明岩浆演化过程中经历了斜长石的结晶分异过程;负 P 异常说明有磷灰石的结晶分异等。(2) 岩浆来源:较高的  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、全碱 ALK( $Na_2O+K_2O$ )及较低的 TFeO、MgO 含量说明哈达陶勒盖组中酸性石英粗安岩可能为壳源岩浆所形成。此外,样品富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损高场强元素等这些特征也表明石英粗安岩的岩浆源区可能为壳源。石英粗安岩的锆石中没有发现继承锆石或者继承锆石的内核残留,说明在岩浆的形成过程中温度较高,有较强的能量持续注入,将之前母岩中的锆石全部熔融(Miller *et al.*, 2003)。同时,样品中较高的 Ni 含量(平均  $55.22 \times 10^{-6}$ )需要地壳近乎 100% 的熔融作用方可形成(Jagoutz *et al.*, 2009),也需要较强的能量注入。这种较强的能量注入需要有稳定的且规模较大的深部能量源区来提供,例如软流圈地幔等。软流圈地幔原始熔浆的上升侵位对流很可能导致区域伸展的构造背景。哈达陶勒盖组石英粗安岩具有较高的  $Zr+Nb+Ce+Y$  值,以及相对较高的  $(K_2O+Na_2O)/CaO$  和 TFeO/MgO 值,具有典型的 A 型花岗岩的特征,在岩石类型判别图解中均投于 A 型花岗岩的区域(图 10a, 10b)。结合较高的  $SiO_2$ 、全碱 ALK( $Na_2O+K_2O$ )含量以及较低的 CaO、Sr 含量,认为哈达陶勒盖组石英粗安岩具 A 型特征,暗示了其形成于伸展构造背景之下。该伸展作用使得地壳减薄,继而深部能量较高的、热的软流圈地幔原始熔浆上升侵位,不断提供热量而使得地壳岩石发生深熔作用。较强的能量又使得地壳岩石深熔作用形成的中酸性、酸性岩浆不断上升侵位,并最终喷出地表,形成研究区哈达陶勒盖组的石英粗安岩。

哈达陶勒盖组石英粗安岩样品中的  $(La/Yb)_N$  值较低,而  $Yb_N$  值相对较高,同时  $Sr/Y$  值亦相对较低, Y 含量相对较高,具有经典的岛弧岩石属性,而非特征性的埃达克岩(图 11a, 11b)。因此石英粗安岩的成岩岩浆不可能形成于石榴石矿物相稳定的区域( $\geq 10$  kPa)(Patiño Douce, 1996; Singh and Johannes, 1996),因为在这个区域,由于大洋俯冲板片的部分熔融(Defant and Drummond, 1990; Wang *et al.*, 2007; Zhao and Zhou, 2007a)或者加厚下地壳镁质岩石的部分熔融(Petford and Atherton, 1996; Xu *et al.*, 2002; Zhao and Zhou, 2008)往往形

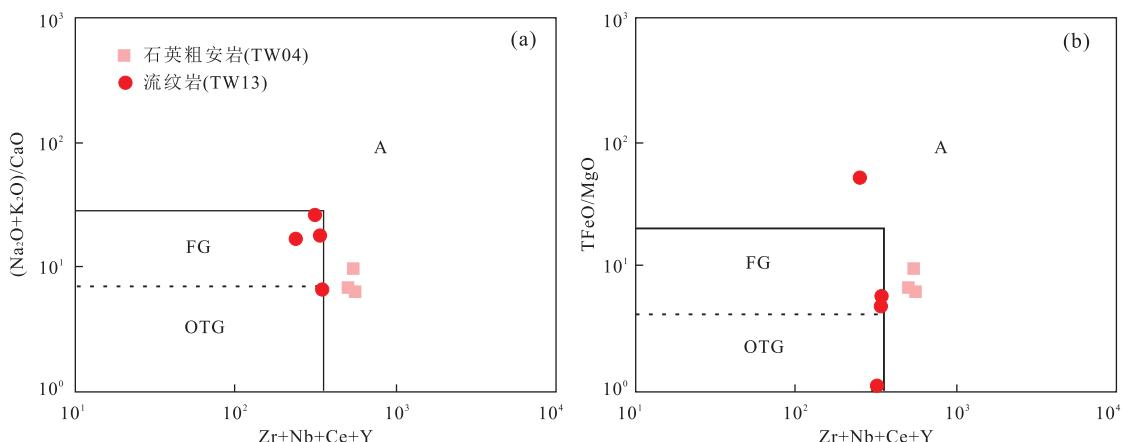


图 10 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩岩石类型判别图解

Fig.10 Diagrams for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm. with rock type discrimination purpose  
a.  $[(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}] - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$  图解; b.  $(\text{TFeO}/\text{MgO}) - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$  图解; a 和 b 据 Whalen *et al.* (1987) 绘制

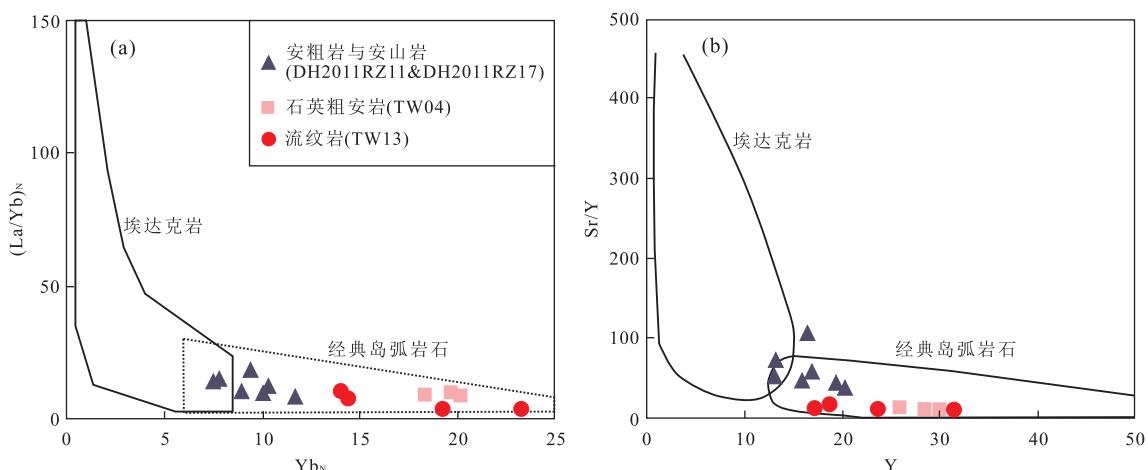


图 11 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩

Fig.11 Diagrams for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.  
a.  $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$  图解, 跟据 Drummond and Defant(1990); b.  $\text{Sr}/\text{Y} - \text{Y}$  图解, 跟据 Martin(1999)

成埃达克质岩浆.因此,哈达陶勒盖组石英粗安岩的岩浆很可能形成于石榴石矿物相稳定区域之上较浅的地壳部位.

**4.2.3 酸性系列流纹岩** (1) 岩浆演化: 晚三叠世哈达陶勒盖组中酸性系列流纹岩样品的主量元素 Harker 图解及微量元素与  $\text{SiO}_2$  含量的协变图解表明(图 6,7),该系列岩石多数元素的含量随  $\text{SiO}_2$  含量的变化均呈现出明显的且斜率较为一致的主量及微量元素演化趋势,说明岩浆演化过程中经历了显著的结晶分异过程.较为显著的 Nd, Sr, P 和 Ti 负异常也同样说明了这一过程.明显的负 Eu 异常及负 Sr 异常说明岩浆演化过程中经历了显著的斜长石结晶分异过程;较为明显的负 Ti 异常可能预示着钛铁矿、榍石等含 Ti 氧化物的结晶分异;负 P 异常可

能是由于磷灰石的结晶分异导致.(2) 岩浆来源: 哈达陶勒盖组酸性系列流纹岩的元素地球化学特征与中性系列石英粗安岩较为相似,例如该系列岩石也具有较高的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、全碱 ALK( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) 及较低的 TFeO、MgO 含量,富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损高场强元素等,说明哈达陶勒盖组酸性系列流纹岩与中酸性系列石英粗安岩的成岩岩浆有着相似的壳源特征.岩石主量元素特征表明该系列岩石主要属于钙碱性、碱钙性系列(图 5b)及钙碱性、高钾钙碱性系列(图 5c),具有 I 型花岗岩的特征.其铝指数  $A/\text{CNK}$  均大于 1.0,属于过铝质岩石(图 5d),呈现 I 型或 S 型花岗岩的特征.但其  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量随  $\text{SiO}_2$  含量的增加而呈现出明显的负相关关系(图 6h),这是区分 I 型和 S 型花岗岩的重要

标志(Chappell and White, 1992),说明其为 I 型而并非 S 型。同时,哈达陶勒盖组酸性系列流纹岩具有相对较高的  $Zr + Nb + Ce + Y$  值,以及相对较高的  $(K_2O + Na_2O)/CaO$  和  $TFeO/MgO$  值,在岩石类型判别图解中主要分布于 I 型与 A 型花岗岩边界部位或者少量投于 A 型花岗岩区域(图 10a, b)。结合较高的  $SiO_2$ 、全碱 ALK( $Na_2O + K_2O$ )含量、部分样品  $K_2O$  含量达钾玄质的特征(图 5c)以及较低的  $CaO/Sr$  含量,说明该系列岩石具有弱的 A 型花岗岩的特征。因此,哈达陶勒盖组酸性系列流纹岩同时具有 I 型与 A 型花岗岩的过度性质的特征,可能反映了晚三叠世初期,大兴安岭中段地区构造背景由俯冲向伸展转换的特征。

在  $(La/Yb)_N-Yb_N$ (图 11a)图解和  $Sr/Y-Y$  图解(图 11b)中,哈达陶勒盖组酸性系列流纹岩与中性系列石英粗安岩样均投于经典岛弧岩石区域,且展现出相似的地球化学特征,因此,哈达陶勒盖组酸性系列流纹岩的成岩岩浆很可能与中性系列石英粗安岩一样,形成于石榴石矿物相稳定区域之上较浅的地壳部位。

#### 4.3 构造背景分析

自古生代以来,中国东北地区构造演化主要受古亚洲洋、环太平洋及蒙古—鄂霍茨克洋三大构造域的影响。目前,关于该三大构造域对大兴安岭地区三叠纪构造演化历史影响的研究已有较多论述,但分歧仍然较大,概况来说主要有以下 3 种:(1)晚三叠世时期,古太平洋板块的早期俯冲作用已经开始(Maruyama and Seno, 1986),并对我国东北地区的区域构造演化产生了深刻的影响(彭玉鲸和陈跃军, 2007; Ge et al., 2007),但有关环太平洋构造域对我国东北地区影响开始的时间及具体影响范围仍存在其他不同意见。例如:一些学者通过对东北地区中生代火山岩的研究认为,古太平洋板块于早—中侏罗世时期才开始向西的俯冲作用,并影响东北地区构造格局的演化,但影响范围仅限于松辽盆地以东地区(Xu et al., 2009; Wu et al., 2011; 许文良等, 2013; 孟凡超等, 2014);(2)中生代早期,中亚造山带东段南侧沿索伦克尔—西拉木伦—长春缝合带与华北板块碰撞缝合,古亚洲洋闭合,之后进入碰撞后的伸展造山阶段,该伸展造山作用影响了大兴安岭中南段地区三叠纪的构造演化历史。沿索伦克尔—西拉木伦—长春缝合带所形成的东西走向的三叠纪火成岩带(Xu et al., 2009; Wang et al., 2011; Wu et al., 2011; Yang et al., 2016)以及大量的双峰式火

山岩和 A 型花岗岩(Wu et al., 2002, 2004; Liu et al., 2017)为该种观点提供了良好的证据;(3)近年来一些学者通过研究发现,额尔古纳地块内大量三叠纪花岗岩及斑岩型铜、钼矿床的形成与具有俯冲性质的活动大陆边缘密切相关(许文良等, 2013; 孟凡超等, 2014; Tang et al., 2016),说明蒙古—鄂霍茨克板块向北俯冲的同时也有着向南的俯冲作用。同时,蒙古—鄂霍茨克缝合带东南部早三叠世闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩及正长花岗岩所组成的北东向岩浆岩带也为蒙古—鄂霍茨克板块的南向俯冲提供了有力证据。因此,该种观点认为大兴安岭地区三叠纪的构造背景主要受蒙古—鄂霍茨克构造域的影响(Xu et al., 2013; 许文良等, 2013; 孟凡超等, 2014; Tang et al., 2014, 2016; Yang et al., 2016)。

本文所提供的数据为探讨大兴安岭中段地区三叠纪构造背景提供了新的资料。4.2 节的分析表明:哈达陶勒盖组中性系列安粗岩和安山岩的成岩岩浆来源于原始地幔的部分熔融,并经由断离俯冲板片部分熔融过程中所释放流体的显著富集作用。断离板片的下沉使得软流圈物质上涌,提供热源的同时形成了伸展的构造背景。在该伸展构造背景下,上涌的软流圈物质一直侵入到地壳,引起壳源物质的深熔作用,提供了哈达陶勒盖组中酸性系列石英粗安岩和酸性系列流纹岩的原始成岩岩浆,使得该套岩石具有 I 型及 A 型花岗岩的特征。在  $Hf/3-Tb-Nb/16$  三角构造图解上(图 12a),哈达陶勒盖组中性系列安粗岩和安山岩位于投于大陆弧区域,其形成可能与俯冲背景下的大陆弧有关。在  $Rb-Y+Nb$  构造图解中(图 12b),哈达陶勒盖组中性系列安粗岩和安山岩与中酸性系列石英粗安岩、酸性系列流纹岩均投于火山弧环境,预示着其形成与火山弧构造背景相关。可见,哈达陶勒盖组火山岩的形成既与伸展的构造背景有关,又与陆缘弧或者火山弧相关,其很可能形成于弧后伸展的总体背景之下。该种弧后伸展的构造背景分别与古亚洲洋、环太平洋及蒙古—鄂霍茨克洋三大构造域的关系分析如下:

目前,大量研究表明,华北板块与中亚造山带在中三叠世时期沿索伦克尔—西拉木伦—长春一线碰撞缝合(Zhou and Wilde, 2013; Xiao et al., 2015; Liu et al., 2017),古亚洲洋闭合,进入碰撞后的伸展造山阶段。但该造山作用主要影响大兴安岭南部地区及华北板块北缘地区,其形成的岩浆岩带沿索伦克尔—西拉木伦—长春缝合带呈近东西走向延伸(Tang et al., 2016; Yang et al., 2016)。而本次研究

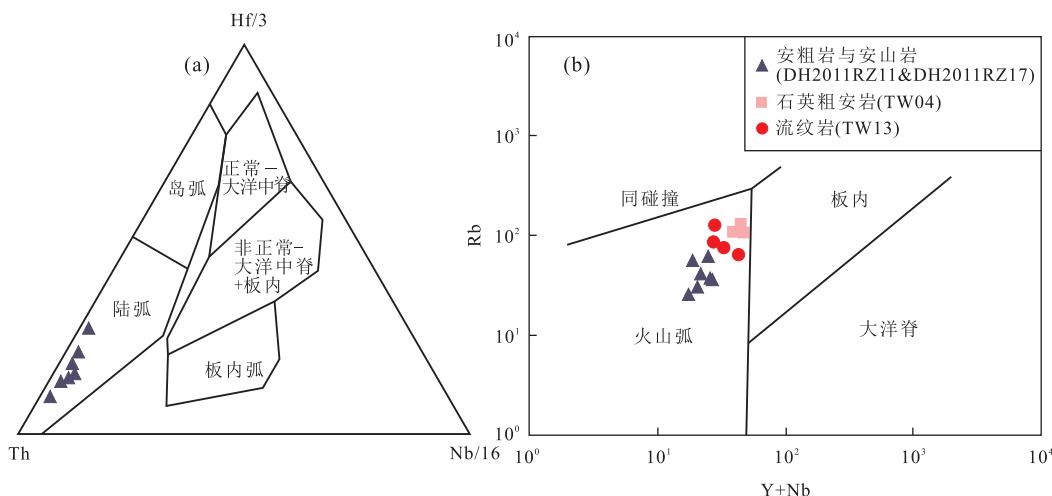


图 12 晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩图解

Fig.12 Diagrams for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.

a.  $\text{Hf}/3\text{-Th-Nb}/16$  图解, 跟据 Wood(1980); b.  $\text{Rb}-\text{Y}+\text{Nb}$  图解, 跟据 Pearce *et al.*(1984)

区位于大兴安岭中段地区, 研究区及附近地区的大量三叠纪火山岩和侵入岩在空间上呈北东走向, 其形成很可能与古亚洲洋闭合后的伸展造山作用无关 (Tang *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016). 值得注意的是, 大兴安岭中段地区北东向的三叠纪岩浆岩带与贺根山—黑河缝合带走向一致, 而研究区又正好位于该缝合带附近(图 1b), 其是否与贺根山—黑河洋(位于兴安地块与松嫩地块之间的古亚洲洋分支)闭合后的伸展造山作用有关尚不清楚. 最新的研究表明, 兴安地块与松嫩地块于晚石炭世早期( $\sim 320$  Ma)沿贺根山—黑河缝合带碰撞拼接 (Liu *et al.*, 2017), 之后进入伸展造山阶段. 研究区发育的大量早二叠纪 A型花岗岩表明, 该伸展造山作用至少持续到早二叠世(作者未发表资料). 但研究区内发育较多的晚二叠世林西组粉砂岩和早三叠世老龙头组砂岩、粉砂岩(图 1c), 且林西组整合于老龙头组之上(刘兵等, 2014), 说明该区在晚二叠世—早三叠世时期的隆升造山作用已经停止, 开始接受连续的沉积作用. 因此, 贺根山—黑河缝合带形成之后的伸展造山作用可能并未持续到三叠纪. 另外, 从晚石炭世早期贺根山—黑河洋闭合之后至晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩形成, 经历时间长达 100 Ma, 古亚洲洋内微陆块碰撞后的伸展造山作用一般难以持续如此长的时间. 综上分析可见: 古亚洲洋构造域不可能为大兴安岭中段地区晚三叠世火山岩的形成提供伸展构造背景.

许文良等(2013)通过对东北地区中生代火山岩的详细总结发现: 吉黑东部地区晚三叠世 A型流纹

岩(Xu *et al.*, 2009) 和张广才岭地区晚三叠世双峰式火山岩(Wang *et al.*, 2011)、碱长花岗岩一起(Wu *et al.*, 2011), 表明松辽盆地东部地区晚三叠世期间处于一种伸展环境, 并不代表古太平洋构造体系域俯冲作用的开始(许文良等, 2013; Yang *et al.*, 2016). 而吉黑东部早—中侏罗世钙碱性火山岩组合代表着古太平洋构造体系俯冲作用的开始, 且其影响范围主要在松辽盆地以东地区(许文良等, 2008; 裴福萍等, 2009; 孟凡超等, 2014; Yang *et al.*, 2016). 可见, 环太平洋构造域并未对大兴安岭中段地区晚三叠世时期的构造运动产生影响.

蒙古—鄂霍茨克缝合带是东北亚地区一条重要的缝合带, 在东北亚地区的构造演化历史中有着重要作用(李锦轶等, 2009). 该缝合带在晚古生代末期已经存在俯冲作用, 一直持续到三叠纪(Tomurto-goo *et al.*, 2005; Mazukabzov *et al.*, 2010). 由于西伯利亚板块相对于中蒙地块的旋转, 造成了蒙古—鄂霍茨克洋由西向东的剪刀式闭合, 西部晚三叠世开始闭合、东部在晚侏罗世闭合(Zonenshain *et al.*, 1990; Zorin, 1999; Sorokin *et al.*, 2004). 以往的研究多强调蒙古—鄂霍茨克板块向北的俯冲作用(Zorin, 1999), 而近年来在我国及蒙古境内的额尔古纳地块内发现的大量早中生代花岗岩(Wu *et al.*, 2011)及与岛弧侵入杂岩相关的大型—特大型斑岩型铜钼矿床(江思宏等, 2010)等均表明: 蒙古—鄂霍茨克板块也有着向南的俯冲作用.

我国境内额尔古纳地块中的太平川斑岩型铜钼矿床形成于晚三叠世(锆石 U-Pb 年龄为 202 ±

6 Ma),该矿床形成于蒙古—鄂霍茨克板块向额尔古纳地块之下俯冲的活动陆缘弧环境(陈志广等,2010).说明晚三叠世时期蒙古—鄂霍茨克板块向南俯冲的影响作用仍然十分显著.李宇等(2015)通过对孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的研究认为其具有同碰撞花岗岩的特征(李宇等,2015),结合在大兴安岭与小兴安岭衔接地区变质杂岩(Miao et al., 2015)和冀北—辽西地区区域性地层不整合面(Zhang et al., 2011)的存在,判定蒙古—鄂霍茨克缝合带在额尔古纳地块西北部的闭合时间应为中侏罗世,而晚三叠世时期为蒙古—鄂霍茨克洋的洋壳俯冲阶段.同时,位于内蒙古林西地区的中三叠世高镁 adakitic 安山岩的形成应是北部蒙古—鄂霍茨克板块向额尔古纳—中蒙古地块之下俯冲作用的远程效应,即在伸展环境下早期俯冲板片熔融的熔体与地幔橄榄岩反应的结果(Liu et al., 2012).

研究区位于林西地区北东方向,因此明显受到蒙古—鄂霍茨克板块向南俯冲作用的影响.研究区及附近地区三叠纪火山岩和侵入岩所构成的北东向岩浆弧与蒙古—鄂霍茨克板块向南俯冲在额尔古纳地块西缘形成的北东向岩浆弧(Tang et al., 2016)走向基本一致,很可能是在蒙古—鄂霍茨克俯冲带的弧后伸展作用下形成.Tang et al.(2016)通过对额尔古纳地块早中生代侵入岩的研究系统总结了蒙古—鄂霍茨克板块向南俯冲的历史,指出在晚三叠世时期,蒙古—鄂霍茨克板块的向南俯冲作用出现一个间歇期,在该间歇期俯冲板片的断离下沉引起软流圈地幔物质上升,引起伸展的构造背景,并形成一套双峰式侵入岩(Tang et al., 2016).同时吉黑东部地区晚三叠世 A 型流纹岩(Xu et al., 2009)和张广才岭地区晚三叠世双峰式火山岩(Wang et al., 2011)、碱长花岗岩(Wu et al., 2011)等岩石学证据表明,晚三叠世时期伸展作用在东北地区有

着较大的影响范围,而本次研究的大兴安岭中段地区恰位于该伸展构造背景的影响范围之内.另外,以下资料也为研究区的伸展构造背景提供了证据:(1)本研究中的晚三叠世早期流纹岩具有 I 型与 A 型的特征,晚三叠世中期石英粗安岩具有 A 型的特征,说明研究区处于伸展构造背景之下,且该种伸展作用由晚三叠世早期至晚三叠世中期有着不断加强的趋势;(2)在研究区东北部,有较多晚三叠世侵入岩出露,岩性主要为二长花岗岩与少量碱长花岗岩,锆石 U-Pb 测年结果为  $237.2 \pm 7.8$  Ma,  $228 \pm 4$  Ma(作者未发表资料).岩石中钾长石矿物较多,K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 含量亦较高,具有与哈达陶勒盖组流纹岩及石英粗安岩相似的 I 型及 A 型花岗岩特征,其很可能形成于伸展构造背景下,说明研究区在晚三叠世时期很可能处于伸展的构造背景之下;(3)Yang et al.(2016)对大兴安岭地区中晚三叠世 I 型花岗岩进行了深入全面的研究,其岩石学、全岩地球化学及同位素特征表明该区晚三叠世 I 型花岗岩形成于伸展构造背景之下(Yang et al., 2016);(4)Wu et al.(2011)指出,东北地区大量三叠纪(200~300 Ma)酸性侵入体均属于 A 型花岗岩,其中就包括大量大兴安岭中段地区的诸多岩体(Wu et al., 2011),这说明该时期大兴安岭中段地区受伸展构造背景的影响.本次研究的晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩正是形成于由俯冲板片断离下沉及软流圈物质上涌而形成的伸展构造背景之下.

综上分析可知:大兴安岭中段晚三叠世时期的构造背景主要受蒙古—鄂霍茨克构造域的影响.蒙古—鄂霍茨克板块的向南俯冲作用在额尔古纳地块西北侧形成了大量大型—特大型斑岩型铜钼矿床以及花岗岩,构成一条规模较大的北东走向岩浆弧.在晚三叠世时期,蒙古—鄂霍茨克洋板块的向南俯冲作用出现一个间歇期,并出现伸展的构造背景.受该

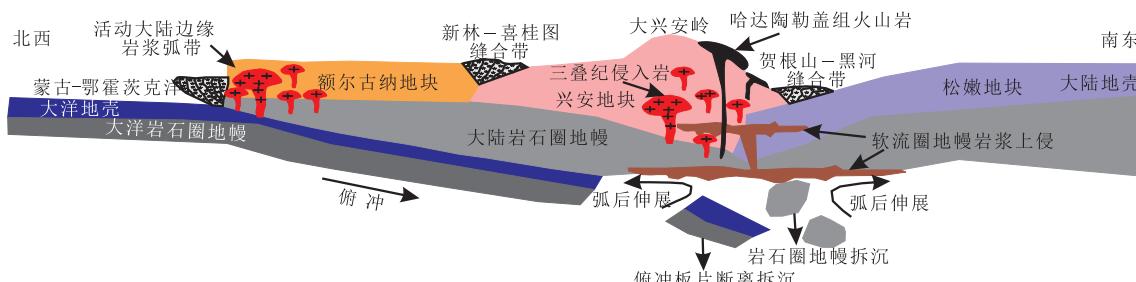


图 13 大兴安岭中段地区晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩成因模式及构造背景简图

Fig.13 Schematic diagram showing the petrogenetic model and tectonic background for the volcanic rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm. at central Great Xing'an Range

俯冲间歇期的影响,在大兴安岭中段东缘地区形成了类似弧后伸展的构造背景,本次研究的晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩即在该构造背景下形成。俯冲板片的断离拆沉导致软流圈物质上涌,形成伸展的构造背景。晚三叠世早期,研究区仅发现少量酸性流纹岩,而并未发现该期软流圈物质上涌所形成的相应岩石系列。因此,推断该时期可能处于伸展运动的初期阶段,构造运动相对较弱,上涌的软流圈物质较为有限,仅提供了形成哈达陶勒盖组流纹岩的能量,而其本身并未喷发至地表成岩。伴随着伸展运动的进行,构造活动逐渐强烈,同时也很可能伴随着固体岩石圈地幔物质的拆沉,引起大量软流圈物质的上涌。上涌的软流圈物质提供了较强的热量来源,使得相对较浅的地壳物质发生深熔,并喷发至地表形成研究区晚三叠世哈达陶勒盖组中性石英粗安岩。同时上涌的软流圈物质所提供的较强热量也使得原始地幔发生部分熔融,并被俯冲板片部分熔融时释放出来的大量流体富集。遭受明显的地壳混染作用之后喷发至地表,形成研究区的三叠世哈达陶勒盖组安粗岩和安山岩(图 13)。值得注意的是,晚三叠世时期大兴安岭中段地区伸展背景下的火山喷发活动具有多期活动的特征,例如,本研究的酸性流纹岩形成相对较早( $\sim 230$  Ma),而中酸性石英粗安岩和中性安山岩形成相对较晚( $\sim 216$  Ma),而安粗岩的形成则更晚( $\sim 210$  Ma)。代表着不同的岩浆活动期次。

## 5 结论

(1) 大兴安岭中段地区发育有大量晚三叠世火山岩及侵入岩,其中哈达陶勒盖组中性系列安粗岩和安山岩的形成年龄分别为  $210.9 \pm 3.5$  Ma,  $216.6 \pm 3.1$  Ma; 中酸性系列石英粗安岩的形成年龄为  $216.9 \pm 2.1$  Ma; 酸性系列流纹岩的形成年龄为  $230.2 \pm 2.2$  Ma。

(2) 晚三叠世时期,大兴安岭中段地区岩浆活动频繁,呈现多期活动的特征。本研究中的哈达陶勒盖组中性系列安粗岩和安山岩的成岩岩浆来源于原始地幔的部分熔融,并遭受俯冲板片部分熔融过程中所释放流体的强烈富集作用。岩浆演化过程中没有或者轻微发生结晶分异作用,但遭受明显的地壳混染作用。中酸性系列石英粗安岩和酸性系列流纹岩的岩浆均来源于相对较浅地壳物质的深熔,石英粗安岩岩浆在成岩演化过程中结晶分异作用较为微弱,而流纹岩岩浆在成岩演化过程中的结晶分异作

用则较为显著。

(3) 大兴安岭中段地区晚三叠世时期的构造演化背景受蒙古—鄂霍茨克板块向南俯冲的影响明显,而不受古亚洲洋构造域和环太平洋构造域的影响。蒙古—鄂霍茨克洋板块的向南俯冲作用在研究区表现为弧后伸展的构造特征。该伸展构造背景由俯冲板片断离拆沉导致软流圈物质上涌引起,并伴随着岩石圈地幔物质的拆沉作用得到进一步加强。大规模软流圈物质的上涌也为晚三叠世时期岩浆活动提供了热量来源。

致谢: 太原理工大学冯志强老师对本文提出了大量建议; 野外及室内工作中得到了沈阳地质调查中心张立东研究员、秦涛博士和孙巍博士的极大帮助, 在此一并致以诚挚的感谢!

## References

- Aldanmaz, E., Pearce, J. A., Thirlwall, M. F., et al., 2000. Petrogenetic Evolution of Late Cenozoic, Post-Collision Volcanism in Western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102 (1–2): 67–95. doi:10.1016/s0377-0273(00)00182-7
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192 (1–2): 59–79. doi:10.1016/s0009-2541(02)00195-x
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. *Developments in Geochemistry*, 63–114. doi:10.1016/b978-0-444-42148-7.50008-3
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 1992. I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83 (1–2): 1–26. doi:10.1017/s0263593300007720
- Chen, Z.G., Zhang, L.C., Lu, B.Z., et al., 2010. Geochronology and Geochemistry of the Taipingchuan Copper-Molybdenum Deposit in Inner Mongolia, and Its Geological Significances. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (5): 1437–1449 (in Chinese with English abstract).
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347 (6294): 662–665. doi: 10.1038/347662a0
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., et al., 1997. Element Transport from Slab to Volcanic Front at the Mariana Arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B7): 14991–15019. doi:10.1029/97jb00788
- Feng, Z.Q., Jia, J., Liu, Y.J., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of the Carboniferous Magmatism in the Northern Great Xing'an Range, NE China: Constraints

- on the Timing of Amalgamation of Xing'an and Songnen Blocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 411–426. doi:10.1016/j.jseaes.2014.12.017
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048. doi:10.1093/petrology/42.11.2033
- Ge, W.C., Wu, F.Y., Zhou, C.Y., et al., 2005. Zircon U-Pb Ages and Its Significance of the Mesozoic Granites in the Wulanhaote Region, Central Da Hinggan Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749–762 (in Chinese with English abstract).
- Han, G.Q., Liu, Y.J., Neubauer, F., et al., 2012. LA-ICP-MS U-Pb Dating and Hf Isotopic Compositions of Detrital Zircons from the Permian Sandstones in Da Xing'an Mountains, NE China: New Evidence for the Eastern Extension of the Erenhot-Hegenshan Suture Zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 249–271. doi:10.1016/j.jseaes.2011.11.011
- Han, G.Q., Liu, Y.J., Neubauer, F., et al., 2015. U-Pb Age and Hf Isotopic Data of Detrital Zircons from the Devonian and Carboniferous Sandstones in Yimin Area, NE China: New Evidences to the Collision Timing between the Xing'an and Erguna Blocks in Eastern Segment of Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 211–228. doi:10.1016/j.jseaes.2014.08.006
- Jagoutz, O.E., Burg, J.P., Hussain, S., et al., 2009. Construction of the Granitoid Crust of an Island Arc Part I: Geochronological and Geochemical Constraints from the Plutonic Kohistan (NW Pakistan). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(6): 739–755. doi:10.1007/s00410-009-0408-3
- Jiang, S.H., Nie, F.J., Su, Y.J., et al., 2010. Geochronology and Origin of the Erdenet Superlarge Cu-Mo Deposit in Mongolia. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 289–306 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.Y., 1998. Some New Ideas on Tectonics of NE China and Its Neighboring Areas. *Geological Review*, 44(4): 339–347 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.Y., Zhang, J., Yang, T.N., et al., 2009. Crustal Tectonic Division and Evolution of the Southern Part of the North Asian Orogenic Region and Its Adjacent Areas. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 584–605 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.C., 2012. Study on the Triassic-Jurassic Tectonic Evolution of the middle Great Xing'an Range (Dissertation). Chinese Academy of Geological Science, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Ding, L.L., Xu, W.L., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of Muscovite Granite in Sunwu Area, NE China: Implications for the Timing of Closure of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 31: 56–66 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Wen, Q.B., Liu, Y.J., et al., 2014. Contact Relationship between the Upper Permian and Lower Triassic Strata in the Central Great Xing'an Ranges and Its Tectonic Implication: Constraints from the Detrital Zircon U-Pb Ages. *Geotectonica et Metallogenesis*, 38(2): 408–420 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B.S., Ma, Y.Q., Lu, J., et al., 2005. Genesis and Emplacement Mechanism of the Late Triassic Adamellite Series in Yichun Area, Heilongjiang Province. *Geology and Resources*, 14(3): 170–175, 191 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B.S., Ren, F.H., Li, Y.C., et al., 2007. Characteristics and Tectonic Setting of Late Indosinian I-Type Granite Zone in the Yichun Area. *Geology and Prospecting*, 43(1): 74–78 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.J., Li, W.M., Feng, Z.Q., et al., 2017. A Review of the Paleozoic Tectonics in the Eastern Part of Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 43: 123–148. doi:10.1016/j.gr.2016.03.013
- Liu, Y.J., Zhang, X.Z., Jin, W., et al., 2010. Late Paleozoic Tectonic Evolution in Northeast China. *Geology in China*, 37(4): 943–951 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Wang, X.H., Wang, D.B., et al., 2012. Triassic High-Mg Adakitic Andesites from Linxi, Inner Mongolia: Insights into the Fate of the Paleo-Asian Ocean Crust and Fossil Slab-Derived Melt-Peridotite Interaction. *Chemical Geology*, 328: 89–108. doi:10.1016/j.chemgeo.2012.03.019
- Liu, X.W., Yang, H., Dong, Y., et al., 2015. Zircon U-Pb Ages and Geochemical Characteristics of the Triassic Granites from the Mingshui Region in the Great Xing'an Range, and Its Tectonic Implications. *Acta Petrol. Mineral.*, 34(2): 143–158.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643. doi:10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2
- Maruyama, S., Send, T., 1986. Orogeny and Relative Plate Motions: Example of the Japanese Islands. *Tectonophysics*, 127(3–4): 305–329. doi:10.1016/0040-1951(86)90067-3
- Mazukabzov, A. M., Donskaya, T. V., Gladkochub, D. P., et al., 2010. The Late Paleozoic Geodynamics of the West

- Transbaikalian Segment of the Central Asian Fold Belt. *Russian Geology and Geophysics*, 51(5):482—491.doi: 10.1016/j.rgg.2010.04.008
- McKenzie,D.,Bickle,M.J.,1988.The Volume and Composition of Melt Generated by Extension of the Lithosphere. *Journal of Petrology*, 29(3):625—679.doi: 10.1093/petrology/29.3.625
- McKenzie,D.,O'nions,R.K.,1991.Partial Melt Distributions from Inversion of Rare Earth Element Concentrations. *Journal of Petrology*, 32 (5): 1021 — 1091. doi: 10.1093/petrology/32.5.1021
- Meng,F.C.,Liu,J.Q.,Cui,Y.,et al.,2014.Mesozoic Tectonic Regimes Transition in the Northeast China: Constraints from Temporal-Spatial Distribution and Associations of Volcanic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (12): 3569—3586(in Chinese with English abstract).
- Miao,L. C., Zhang, F. Q., Zhu, M. S., et al., 2015. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Metamorphic Complexes in the Conjunction of the Greater and Lesser Xing'an Ranges, NE China: Timing of Formation and Metamorphism and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 634 — 648. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.09.035
- Miller,C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31 (6): 529.doi: 10.1130/0091—7613(2003)031<0529:hac>2.0.co;2
- Patiño Douce,A.E.,1996.Effects of Pressure and H<sub>2</sub>O Content on the Compositions of Primary Crustal Melts. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Science*, 87: 11 — 21. doi: 10.1017/S026359330000643X
- Pearce,J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G.,1984.Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25 (4):956—983.doi:10.1093/petrology/25.4.956
- Pearce,J. A., Stern, R. J., Bloomer, S. H., et al., 2005. Geochemical Mapping of the Mariana Arc-Basin System: Implications for the Nature and Distribution of Subduction Components. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(7):1—27.doi:10.1029/2004gc000895
- Peccerillo,A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1):63—81.doi:10.1007/bf00384745
- Pei,F.P., Xu, W.L., Yang, D.B., et al.,2008.Mesozoic Volcanic Rocks in the Southern Songliao Basin: Zircon U-Pb Ages and Their Constraints on the Nature of Basin Basement. *Earth Science*, 33(5):603 — 617 (in Chinese with English abstract).
- Pei,F.P., Xu, W.L., Yang, D.B., et al.,2009.Heterogeneity of Late Mesozoic Deep Lithosphere beneath the Northeastern North China Craton: Evidence from Elemental and Sr-Nd Isotopic Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks in the Southern Jilin Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8):1962—1974(in Chinese with English abstract).
- Peng, Y.J., Chen, Y.J., 2007.Location of Structural Boundary between Ji-Hei Orogenic Zone and Kaiyuan-Shanchen Town Section of North China Platform. *Global Geology*, 26(1):1—6,74(in Chinese with English abstract).
- Petford,N., Atherton, M., 1996.Na-Rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6):1491—1521.doi:10.1093/petrology/37.6.1491
- Plank, T., 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46 (5): 921—944.doi: 10.1093/petrology/egi005
- Safonova,I.Y.,Santosh,M.,2014.Accretionary Complexes in the Asia-Pacific Region: Tracing Archives of Ocean Plate Stratigraphy and Tracking Mantle Plumes. *Gondwana Research*, 25 (1): 126 — 158. doi: 10.1016/j.gr.2012.10.008
- Saunders,A.D., Storey, M., Kent, R. W., et al., 1992. Consequences of Plume-Lithosphere Interactions. In: Storey, B.C., Alabaster, T., Pankhurst, R. J., eds., Magmatism and the Cause of Continental Breakup. *Geological Society of Special Publication*, London, 68:41—60.
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B., 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a Synthesis. In: Yin, A., Harrison, M., eds., The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge University Press, Cambridge, 486—640.
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altai Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364 (6435): 299 — 307. doi:10.1038/364299a0
- She,H.Q., Li, J. W., Xiang, A. P., et al., 2012.U-Pb Ages of the Zircons from Primary Rocks in Middle-Northern Daxinganling and Its Implications to Geotectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2):571—594(in Chinese with English abstract).
- Shi,L., Zheng, C. Q., Yao, W. G., et al., 2015.Geochronological Framework and Tectonic Setting of the Granitic Magmatism in the Chaihe-Moguqi Region, Central Great

- Xing'an Range, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113:443—453.doi:10.1016/j.jseaes.2014.12.013
- Singh, J., Johannes, W., 1996. Dehydration Melting of Tonalites. Part I. Beginning of Melting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 125 (1): 16—25. doi: 10.1007/s004100050203
- Sorokin, A. A., Yarmolyuk, V. V., Kotov, A. B., et al., 2004. Geochronology of Triassic-Jurassic Granitoids in the Southern Framing of the Mongol-Okhotsk Fold Belt and the Problem of Early Mesozoic Granite Formation in Central and Eastern Asia. *Doklady Earth Sciences*, 399(8):1091—1094.
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2005. Confirmation of Two Episodes of A-Type Granite Emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the Central Jilin Province, and Their Constraints on the Structural Pattern of Eastern Jilin-Heilongjiang Area, China. *Earth Science Frontiers*, 12 (2): 263—275 (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. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313—345. doi: 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tang, J., Xu, W.L., Wang, F., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of Early-Middle Triassic Magmatism in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the Tectonic Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Lithos*, 184—187; 1—16. doi:10.1016/j.lithos.2013.10.024
- Tang, J., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2016. Early Mesozoic Southward Subduction History of the Mongol-Okhotsk Oceanic Plate: Evidence from Geochronology and Geochemistry of Early Mesozoic Intrusive Rocks in the Erguna Massif, NE China. *Gondwana Research*, 31:218—240. doi:10.1016/j.gr.2014.12.010
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2):241. doi:10.1029/95rg00262
- Tomurtogoo, O., Windley, B.F., Kröner, A., et al., 2005. Zircon Age and Occurrence of the Adaatsag Ophiolite and Muron Shear Zone, Central Mongolia: Constraints on the Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean, Suture and Orogen. *Journal of the Geological Society*, 162 (1):125—134. doi:10.1144/0016-764903-146
- Wang, C.W., Jin, W., Zhang, X.Z., et al., 2008. New Understanding of the Late Paleozoic Tectonics in Northeastern China and Adjacent Areas. *Journal of Stratigraphy*, 32 (2): 119—136 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Xu, W.L., Meng, E., et al., 2011. Late Triassic Bimodal Magmatism in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range, NE China: Constraints on the Timing of Transformation of Paleo-Asian Ocean into Circum-Pacific Ocean Tectonic Systems. *Mineralogical Magazine*, 75:2116.
- Wang, T., Tong, Y., Jahn, B. M., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Altai No.3 Pegmatite, NW China, and Its Implications for the Origin and Tectonic Setting of the Pegmatite. *Ore Geology Reviews*, 32(1—2):325—336. doi:10.1016/j.oregeorev.2006.10.001
- Wang, W., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2012. Zircon U-Pb Chronology and Assemblages of Mesozoic Granitoids in the Manzhouli-Erguna Area, NE China: Constraints on the Regional Tectonic Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 18 (1): 88—105 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4):407—419. doi:10.1007/bf00402202
- Wood, D.A., 1980. The Application of a Th-Hf-Ta Diagram to Problems of Tectonomagmatic Classification and to Establishing the Nature of Crustal Contamination of Basaltic Lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1):11—30. doi:10.1016/0012-821x(80)90116-8
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Ge, W. C., et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41 (1): 1—30. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.11.014
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Shu, S., et al., 2015. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Accretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43 (1): 477—507. doi: 10.1146/annurev-earth-060614-105254
- Xu, J.F., Shinjo, R., Defant, M.J., et al., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust? *Geology*, 30 (12): 1111. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<1111:oomair>2.0.co;2
- Xu, W.L., Ji, W.Q., Pei, F.P., et al., 2009. Triassic Volcanism in Eastern Heilongjiang and Jilin Provinces, NE China: Chronology, Geochemistry, and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3):392—402. doi: 10.1016/j.jseaes.2008.07.001
- Xu, W.L., Pei, F.P., Wang, F., et al., 2013. Spatial-Temporal Relationships of Mesozoic Volcanic Rocks in NE China:

- Constraints on Tectonic Overprinting and Transformations between Multiple Tectonic Regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167–193. doi: 10.1016/j.jseaes.2013.04.003
- Xu, B., Zhao, P., Bao, Q.Z., et al., 2014. Preliminary Study on the Pre-Mesozoic Tectonic Unit Division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB). *Acta Petrol. Sin.*, 30: 1841–1857 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W.L., Ge, W.C., Pei, F.P., et al., 2008. Geochronological Frame of Mesozoic Volcanism in NE China and Its Significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(Suppl.): 286–287 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W.L., Wang, F., Pei, F.P., et al., 2013. Mesozoic Tectonic Regimes and Regional Ore-Forming Background in NE China: Constraints from Spatial and Temporal Variations of Mesozoic Volcanic Rock Associations. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339–353 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Ge, W.C., Yu, Q., et al., 2016. Zircon U-Pb-Hf Isotopes, Bulk-Rock Geochemistry and Petrogenesis of Middle to Late Triassic I-Type Granitoids in the Xing'an Block, Northeast China: Implications for Early Mesozoic Tectonic Evolution of the Central Great Xing'an Range. *Journal of Asian Earth Sciences*, 119: 30–48. doi: 10.1016/j.jseaes.2016.01.012
- Yang, Y.J., Zhang, L.D., Zhang, L.J., et al., 2012. Division and Correlation of the Triassic Strata in Daxinganling Region. *Geology and Resources*, 21(1): 67–73 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28 (3): 353–370. doi: 10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x
- Zhang, C.H., Li, C.M., Deng, H.L., et al., 2011. Mesozoic Contraction Deformation in the Yanshan and Northern Taihang Mountains and Its Implications to the Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 798–822. doi: 10.1007/s11430-011-4180-7
- Zhang, X.Z., Zhou, J.B., Chi, X.G., et al., 2008. Late Paleozoic Tectonic-Sedimentation and Petroleum Resources in Northeastern China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(5): 719–725 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.Z., Ma, Y.X., Chi, X.G., et al., 2012. Discussion on Phanerozoic Tectonic Evolution in Northeastern China. *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Ed.)*, 42(5): 1269–1285 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.F., Zhou, M.F., 2007. Neoproterozoic Adakitic Plutons and Arc Magmatism along the Western Margin of the Yangtze Block, South China. *The Journal of Geology*, 115(6): 675–689. doi: 10.1086/521610
- Zhao, J.H., Zhou, M.F., 2007. Geochemistry of Neoproterozoic Mafic Intrusions in the Panzhihua District (Sichuan Province, SW China): Implications for Subduction-Related Metasomatism in the Upper Mantle. *Precambrian Research*, 152(1–2): 27–47. doi: 10.1016/j.precamres.2006.09.002
- Zhao, J.H., Zhou, M.F., 2008. Neoproterozoic Adakitic Plutons in the Northern Margin of the Yangtze Block, China: Partial Melting of a Thickened Lower Crust and Implications for Secular Crustal Evolution. *Lithos*, 104 (1–4): 231–248. doi: 10.1016/j.lithos.2007.12.009
- Zhao, J.H., Zhou, M.F., 2009. Secular Evolution of the Neoproterozoic Lithospheric Mantle underneath the Northern Margin of the Yangtze Block, South China. *Lithos*, 107(3–4): 152–168. doi: 10.1016/j.lithos.2008.09.017
- Zhao, Y., Yang, Z.Y., Ma, X.H., 1994. Geotectonic Transition from Paleoasian System and Paleotethyan System to Paleopacific Active Continental Margin in Eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105–119 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J.B., Wilde, S.A., 2013. The Crustal Accretion History and Tectonic Evolution of the NE China Segment of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23 (4): 1365–1377. doi: 10.1016/j.gr.2012.05.012
- Zhou, J.B., Wilde, S.A., Zhang, X.Z., et al., 2011. Early Paleozoic Metamorphic Rocks of the Erguna Block in the Great Xing'an Range, NE China: Evidence for the Timing of Magmatic and Metamorphic Events and their Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 499 (1–4): 105–117. doi: 10.1016/j.tecto.2010.12.009
- Zonenshain, L.P., Kuzmin, M.L., Natapov, L.M., 1990. Geology of the USSR: A Plate-Tectonics Synthesis. *Washington DC: American Geophysical Union, Geodynamics Series*, 21: 1–242.
- Zorin, Y.A., 1999. Geodynamics of the Western Part of the Mongolia-Okhotsk Collisional Belt, Trans-Baikal Region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306(1): 33–56. doi: 10.1016/s0040-1951(99)00042-6

## 附中文参考文献

- 陈志广, 张连昌, 卢百志, 等, 2010. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义. *岩石学报*, 26(5): 1437–1449.

- 葛文春,吴福元,周长勇,等,2005.大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义.岩石学报,21(3):749—762.
- 江思宏,聂凤军,苏永江,等,2010.蒙古国额尔登特特大型铜—钼矿床年代学与成因研究.地球学报,31(3):289—306.
- 李锦轶,1998.中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识.地质论评,44(4):339—347.
- 李锦轶,张进,杨天南,等,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.吉林大学学报:地球科学版,39(4):584—605.
- 李世超,2012.大兴安岭中段三叠—侏罗纪构造演化研究.博士学位论文,北京:中国地质科学院.
- 李宇,丁磊磊,许文良,等,2015.孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学:对蒙古—鄂霍茨克洋闭合时间的限定.岩石学报,31(1):56—66.
- 刘兵,温泉波,刘永江,等,2014.大兴安岭中段上二叠统一下三叠统接触关系研究—来自碎屑锆石年代学的证据.大地构造与成矿学,38(2):408—420.
- 刘宝山,马永强,吕军,等,2005.伊春地区上游新村晚三叠世二长花岗岩体成因及就位机制.地质与资源,14(3):170—175,191.
- 刘宝山,任凤和,李仰春,等,2007.伊春地区晚印支期 I 型花岗岩带特征及其构造背景.地质与勘探,43(1):74—78.
- 刘永江,张兴洲,金巍,等,2010.东北地区晚古生代区域构造演化.中国地质,37(4):943—951.
- 孟凡超,刘嘉麒,崔岩,等,2014.中国东北地区中生代构造体制的转变:来自火山岩时空分布与岩石组合的制约.岩石学报,30(12):3569—3586.
- 裴福萍,许文良,杨德彬,等,2008.松辽盆地南部中生代火山岩:锆石 U-Pb 年代学及其对基底性质的制约.地球科学,33(5):603—617.
- 裴福萍,许文良,杨德彬,等,2009.华北克拉通东北缘岩石圈深部物质组成的不均一性:来自吉林南部中生代火山岩元素及 Sr-Nd 同位素地球化学的证据.岩石学报,25(8):1962—1974.
- 彭玉鲸,陈跃军,2007.吉黑造山带与华北地台开原—山城镇段构造边界位置.世界地质,26(1):1—6,74.
- 余宏全,李进文,向安平,等,2012.大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系.岩石学报,28(2):571—594.
- 孙德有,吴福元,高山,等,2005.吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约.地学前缘,12(2):263—275.
- 王成文,金巍,张兴洲,等,2008.东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识.地层学杂志,32(2):119—136.
- 王伟,许文良,王枫,等,2012.满洲里—额尔古纳地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学与岩石组合:对区域构造演化的制约.高校地质学报,18(1):88—105.
- 徐备,赵盼,鲍庆中,等,2014.兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探.岩石学报,30(7):1841—1857.
- 许文良,葛文春,裴福萍,等,2008.东北地区中生代火山作用的年代学格架及其构造意义.矿物岩石地球化学通报,27(增刊 1):286—287.
- 许文良,王枫,裴福萍,等,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.岩石学报,29(2):339—353.
- 杨雅军,张立东,张立君,等,2012.大兴安岭地区三叠系划分与对比.地质与资源,21(1):67—73.
- 张兴洲,周建波,迟效国,等,2008.东北地区晚古生代构造—沉积特征与油气资源.吉林大学学报:地球科学版,38(5):719—725.
- 张兴洲,马玉霞,迟效国,等,2012.东北及内蒙古东部地区显生宙构造演化的有关问题.吉林大学学报(地球科学版),42(5):1269—1285.
- 赵越,杨振宇,马醒华,1994.东亚大地构造发展的重要转折.地质科学,29(2):105—119.