

doi:10.3799/dqkx.2017.136

大兴安岭中段早三叠世 O 型埃达克岩的发现及其大地构造意义

李世超¹, 张凌宇¹, 李鹏川¹, 施 璐², 郑常青^{1*}

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: 为了研究大兴安岭中段地区早三叠世的构造背景问题, 以下三叠统哈达陶勒盖组火山岩为研究对象, 通过野外观测和 X 射线荧光光谱分析法、等离子质谱法分别对样品的主量、微量元素进行了测试。结果显示哈达陶勒盖组火山岩是一套中酸性钙碱系列岩石组合, 具有高 Sr、低 Yb 与 Y 和高 Sr/Y 的特点, 为钠质(O 型)埃达克岩。结合区域资料认为, 古亚洲洋于早三叠世时期闭合的碰撞应力使贺根山—嫩江—黑河构造带活化, 推动构造带内年轻地壳由南向北俯冲, 进而推动古生代残留洋壳向更深的地幔插入, 在此过程中加热并熔融、喷出地表形成哈达陶勒盖组埃达克岩, 并在山间盆地沉积了湖相碎屑堆积—老龙头组。

关键词: 早三叠世; O 型埃达克岩; 哈达陶勒盖组; 大兴安岭中段; 地球动力学; 岩石学。

中图分类号: P541; P588.14

文章编号: 1000-2383(2017)12-2117-12

收稿日期: 2017-03-18

Discovery and Tectonic Implications of Early Triassic O-Type Adakite in Middle of Great Xing'an Range

Li Shichao¹, Zhang Lingyu¹, Li Pengchuan¹, Shi Lu², Zheng Changqing^{1*}

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

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

Abstract: In order to study the tectonic setting of the Early Triassic of the middle of the Greater Xing'an Range, the volcanic rocks of Lower Triassic Hadataolegai Formation was studied by field observation. Respectively, the main elements and trace elements were analyzed by XRF and ICP-MS. The results show that the volcanic rocks are a series of calcareous series rocks with high Sr, low Yb, Y and high Sr/Y ratios, showing geochemical features of O-type adakites are related to subduction of oceanic slab. we suggests Paleo-Asian Ocean collision along the line of Silumulon River-Changchun-Yanji which activated Hegenshan-Nenjiang-Heihe structural belt in Early Triassic. The collision pushed the young crust to subduct northward along Hegenshan-Nenjiang-Heihe line. The residual Paleozoic oceanic crust are advanced to the deeper mantle melting and then the Hadataolegai Formation adakites were formed. At the same time, the Laolongtuo Formation that is lacustrine clastic sediments was deposited in the intermountain basin.

Key words: Early Triassic; O-type adakite; Hadataolegai Formation; middle of Greater Xing'an Range; geodynamics; petrology.

大兴安岭地区因特殊的构造位置, 经历和记录了不同构造域、不同时期构造事件的影响, 是研究和解决中亚造山带东段地质演化的重要部位。三叠纪是大兴安岭地区构造演化中承上启下的时期, 即是

古亚洲洋构造域的结束时期(王玉净和樊志勇, 1997; Chen *et al.*, 2000; 孙德有等, 2004; 李锦轶等, 2007; Miao *et al.*, 2007, 2008; Wu *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2008), 又是蒙古—鄂霍茨克洋

基金项目: 科技部“973”项目(No.2013CB429802); 国家自然科学基金项目(Nos.41340024, 41602209, 41472164, 41272223)。

作者简介: 李世超(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事构造地质学教学与研究工作。ORCID: 0000-0003-3928-2132. E-mail: lsc@jlu.edu.cn

*** 通讯作者:** 郑常青, ORCID: 0000-0002-9622-6922. E-mail: zhengchangqing@jlu.edu.cn

引用格式: 李世超, 张凌宇, 李鹏川, 等, 2017. 大兴安岭中段早三叠世 O 型埃达克岩的发现及其大地构造意义. 地球科学, 42(12): 2117-2128.

然而,大兴安岭中段地区三叠系地层的出露十分有限,该区三叠纪构造环境主要通过相邻时代或临区同时代地质体的研究间接推论。近年来最新的区域地质调查资料显示,大兴安岭地区下三叠统地层仅存在6个较大的地质体,分属于老龙头组砂岩和哈达陶勒盖组的火山碎屑岩夹砂岩、粉砂岩。本文以哈达陶勒盖组火山岩为研究对象,对其进行详细的野外观测和系统的室内地球化学分析,本研究可为大兴安岭中段地区早三叠世的构造演化提供重要约束。

1 地质概况

哈达陶勒盖组(T_1hd)主要分布于托欣河流域的索伦地区(图 1 中 A)、扎兰屯市蘑菇气镇西北(图

1 中 B) 以及扎兰屯北部(图 1 中 C), 出露面积约为 370 km²。哈达陶勒盖组是一套中酸性火山碎屑岩沉积, 并在火山活动的间歇期沉积了细碎屑沉积岩。主要岩性为安山岩和角闪辉石安山岩, 并有少量流纹质熔结凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质粉砂岩、粉砂质板岩。该地层厚度各处有差异, 1 600 m 至 2 500 m 厚不等。局部地区可见其下部与老龙头组呈整合接触、与林西组呈角度不整合接触。

索伦地区(图 1 中 A)的哈达陶勒盖组出露面积约为 150 km²,主要岩性为安山岩、流纹质凝灰岩,少量沉凝灰岩、粉砂岩和板岩。厚度各处变化较大,最厚处可达 2 200 m。自下而上可分 4 个岩性段:(1)蚀变安山岩;(2)蚀变熔结凝灰岩;(3)杂色陆源碎屑沉积,主要为砂岩和板岩,该层含叶肢介及孢粉;(4)蚀变安山岩。部分地区剖面上可划分出 11 个火山喷发旋回,从岩性上看,早期 9 个喷发旋回以中酸性熔岩为主,夹含角砾熔结凝灰岩。晚期 2 个大型喷发旋回以安山岩、安山质熔结凝灰岩夹酸性熔岩为主。二者之间为细碎屑沉积岩,其厚度变化较大,最厚处为 200 m 左右,最薄处尚不足 1 m。

扎兰屯市蘑菇气镇西北(图1中B)哈达陶勒盖组的出露面积约为180 km²,厚度大于2 500 m.与索伦地区一样自下而上可分4个岩性段,分别为安山岩、含角砾流纹质熔结凝灰岩、杂色碎屑沉积

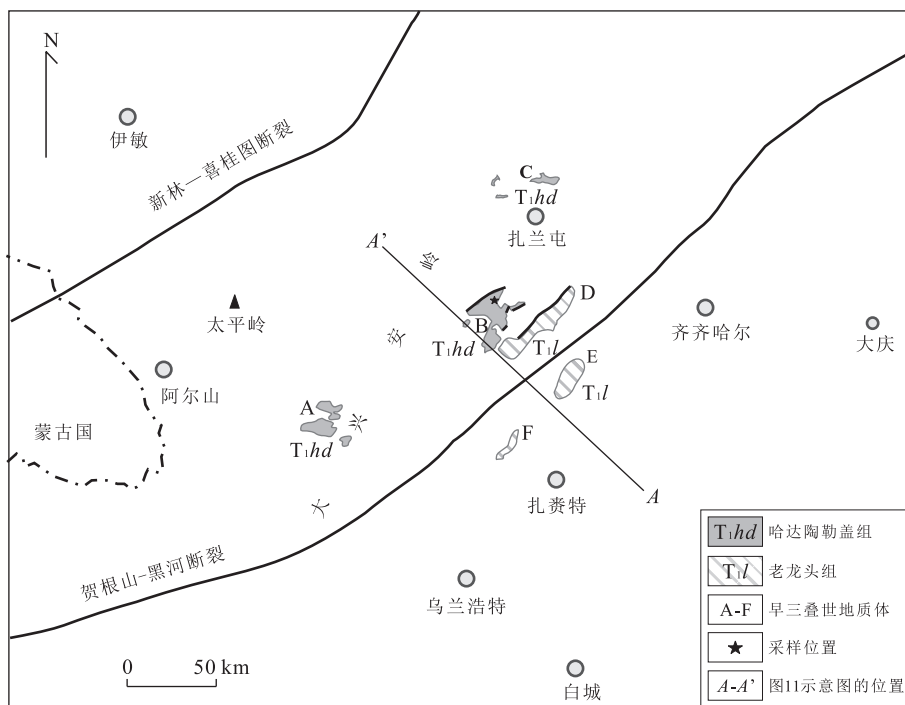


图 1 大兴安岭中段下三叠统地层分布图

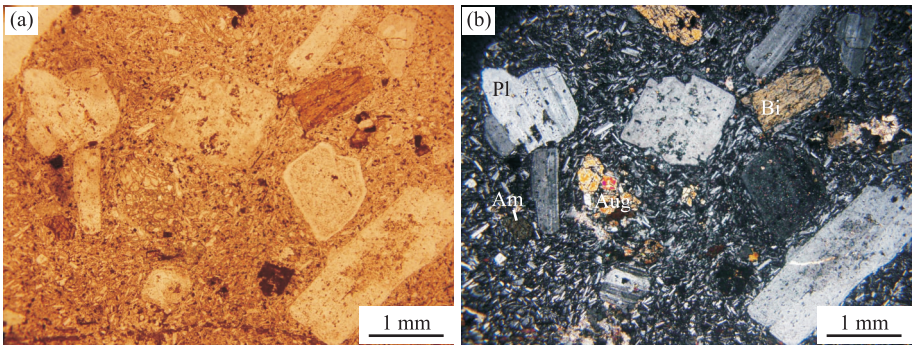


图 2 哈达陶勒盖组火山岩的显微照片

Fig.2 Micrograph of volcanic rock from Hadataolegai Formation
a.单偏光;b.正交偏光;Pl.斜长石;Bi.黑云母;Aug.普通辉石;Am.角闪石

和安山岩。

扎兰屯北部(图 1 中 C)的哈达陶勒盖组在空间上多与林西组相伴沉积,出露面积约为 40 km²。岩石组合以安山岩和少量流纹岩夹层以及大理岩透镜体为主,总体为一套陆相的火山—沉积建造。

哈达陶勒盖组火山岩总体来说是一套以中酸性火山岩为主、夹薄层砂岩的火山—沉积地层。其中蘑菇气镇西北的角闪辉石安山岩显微镜下有如下特点:斑状、块状构造,基质为交织结构。斜长石晶体略微呈定向排列,斑晶主要有斜长石、角闪石、普通辉石、黑云母。其中斜长石粒度 0.25~2.25 mm,具有聚片双晶,表面轻微绿帘石化,一级灰白干涉色;角闪石为黄绿色,粒度 0.25~0.75 mm,具有明显的多色性,斜消光,具两组近 60°解理,干涉色为二级黄绿,具有暗化边;普通辉石为粒状,粒度 0.25~0.75 mm,浅褐色,正高突起,斜消光,干涉色二级黄绿,有近 90°两组解理;黑云母为片状,0.125~0.500 mm,一组级完全解理,平行消光,暗化边明显(图 2)。

2 分析方法

本研究对不同岩性进行了采样,覆盖了安山岩、气孔杏仁状安山岩、绿帘石化英安岩、安山岩、辉石安山岩和角闪辉石安山岩。它们取自蘑菇气镇西北地质体(图 1 中 B)中的新鲜岩石,具体采样位置见图 1。

样品的主量元素和痕量元素分析在天津地质矿产研究所完成。挑选新鲜的样品洗净、烘干、粉碎后用玛瑙钵研磨至小于 200 目,用于主量和微量元素分析。

主量元素测试是采用 X 射线荧光光谱法分析(XRF)完成,具体方法为:将上述研磨好的样品粉末 0.7 g 与试剂(成分为 LiF 0.4 g、Li₂B₄O₇ 5.2 g、NH₄NO₃ 0.3 g)混合均匀后置于铂金坩埚内,滴入 0.1 mL LiBr 溶液,放置于熔样机中熔融,冷却后玻璃熔片制备完成。测试执行标准主要为 GSR-1、BCR-2 和 GSR-3,分析的精度和准确度均优于 5%。

痕量元素测试采用等离子质谱法(ICP-MS)分析完成。具体方法如下:取 50 mg 样品粉末置于容量为 15 mL 的 Teflon 有盖熔样弹中,加入 1.5 mL 高纯度 HF、1.5 mL 高纯度 HNO₃ 以及 0.01 mL 高纯度 HClO₄,将熔样弹置于 140 °C 的电热板之上,并开盖加热至蒸干;再次加入 1.5 mL 高纯度 HF、1.5 mL 高纯度 HNO₃,将熔样弹放入钢套中冷却,放入烤箱中烘烤 48 h(190 °C);烘烤结束后,擦净熔样弹后置于电热板上开盖蒸干(140 °C);再加入 2 mL 高纯度 HNO₃,并置于电热板(140 °C)上蒸干;再次加入 2 mL 1:1 HNO₃,将熔样弹装入钢套冷却,拧紧后放入烘箱中烘烤 12 h(190 °C);烘干结束取出熔样弹擦净后将样品倒入聚乙烯材质的塑料瓶,加水稀释至 80 g 定溶,同时加 1 g 铑作为内标。测试使用的标样为 AGV-1 和 BHVO-1 等,分析精度和准确度均优于 10%。详细的实验分析原理和分析步骤见(王晓蕊等, 2005)。

3 分析结果

哈达陶勒盖组 8 件火山岩的地球化学分析结果(表 1)表明,其 SiO₂ 含量为 56.15%~64.50%,为中性岩。Na₂O 含量为 3.35%~6.91%,K₂O 含量为 1.78%~4.40%,Na₂O/K₂O 为 0.76~3.88。里特曼

表 1 哈达陶勒盖组的地球化学分析结果(单位: 10^{-6})
Table 1 Geochemical data of Hadataolegai Formation volcanic rocks

样号	B1096-1	B1101-1	B1102-1	B2018-2	B2068-1	B2073-5	B3079-1	B6002-2
岩性	气孔杏仁状安山岩	玄武安山岩	玄武安山岩	绿帘石化英安岩	安山岩	辉石安山岩	辉石安山岩	角闪辉石安山岩
SiO ₂	60.20	63.10	62.90	64.50	63.0	58.60	56.15	59.90
Al ₂ O ₃	17.00	16.10	15.75	16.60	15.90	16.20	18.00	15.70
Fe ₂ O ₃	5.20	2.75	3.04	3.74	3.76	4.54	6.34	3.50
FeO	1.30	1.95	2.05	0.65	1.15	1.65	0.34	2.04
CaO	1.46	3.95	2.67	2.70	3.22	5.42	3.52	3.79
MgO	2.52	2.13	2.04	0.76	2.46	3.60	3.64	2.84
K ₂ O	1.78	3.24	4.22	2.93	4.40	2.94	2.38	3.98
Na ₂ O	6.91	3.96	4.22	5.32	3.35	4.29	6.19	4.98
TiO ₂	1.05	0.78	0.76	0.56	0.66	0.83	0.98	0.86
P ₂ O ₅	0.34	0.28	0.28	0.22	0.21	0.29	0.39	0.33
MnO	0.08	0.065	0.076	0.089	0.062	0.100	0.085	0.082
LOI	1.82	1.24	1.46	1.69	1.32	1.14	1.72	1.42
Cu	89.80	24.10	25.60	9.08	67.20	59.30	15.00	42.70
Pb	18.3	16.2	17.4	14.9	23.3	19.8	11.2	26.4
Zn	84.6	75.0	73.7	78.8	66.7	74.6	59.0	67.8
Cr	128.0	61.5	63.9	14.5	49.9	112.0	75.6	92.8
Rb	13.6	61.9	90.5	51.6	91.1	42.7	16.2	48.2
Mo	0.57	0.70	1.29	0.17	0.39	0.42	0.15	0.64
Sr	459	875	1 000	684	916	1 410	1 960	604
Ba	619	1 020	1 260	1 620	946	1 010	1 240	1 460
Nb	4.66	6.51	6.28	6.64	7.19	4.36	2.62	7.90
Ta	0.40	0.43	0.45	0.40	0.49	0.36	0.18	0.56
Zr	168	214	209	238	283	159	112	310
Hf	4.48	5.46	5.41	6.16	7.79	4.32	3.26	8.61
U	1.40	1.37	1.39	1.39	3.74	1.92	0.30	3.84
Th	2.55	4.96	4.80	4.43	16.10	7.10	4.08	14.00
La	25.6	31.9	33.5	26.2	40.2	34.1	38.0	44.6
Ce	60.9	61.3	62.3	55.4	83.3	72.8	71.2	82.4
Pr	7.48	7.61	7.76	6.86	10.10	8.93	12.00	12.80
Nd	30.6	29.5	29.5	27.3	38.0	35.9	50.4	51.0
Sm	5.59	5.06	4.87	4.98	6.22	6.11	8.52	8.63
Eu	1.59	1.49	1.54	1.79	1.46	1.77	2.52	2.20
Gd	4.41	3.96	4.02	4.21	4.73	4.71	5.64	6.08
Tb	0.58	0.54	0.54	0.65	0.68	0.64	0.70	0.82
Dy	2.93	2.32	2.39	3.51	3.04	2.68	2.66	3.62
Ho	0.54	0.44	0.42	0.68	0.57	0.48	0.42	0.64
Er	1.50	1.13	1.09	1.92	1.60	1.38	1.11	1.82
Tm	0.20	0.16	0.15	0.30	0.24	0.19	0.14	0.26
Yb	1.30	0.92	0.99	2.07	1.56	1.18	0.88	1.69
Lu	0.20	0.15	0.16	0.34	0.23	0.19	0.13	0.26
Y	13.6	11.4	11.6	18.4	16.0	12.9	11.4	17.2
Mg [#]	54.68	50.31	62.49	61.39	64.83	43.15	52.58	55.77
σ	4.39	2.58	3.58	3.17	3.00	3.35	5.59	4.75
A/CNK	1.07	0.94	0.96	0.99	0.99	0.81	0.94	0.81
ΣREE	157.02	157.88	160.83	154.61	207.93	183.96	205.72	234.02
δEu	1.20	0.82	0.98	0.93	1.01	1.06	1.02	1.11

指数σ为2.58~5.59。Al₂O₃含量为15.7%~18%，A/NCK为0.81~1.07，平均为0.94，为偏铝质岩石。MgO含量为0.76%~3.64%，Mg[#]为42.9~52.8(另有一件绿帘石化样品为25.23)，TiO₂含量介于0.56%~1.05%。FeO_i含量介于4.39%~6.68%之间。

哈达陶勒盖组部分火山岩样品遭受后期蚀变作用，为了确保分类的有效性，使用基于高场强元素Nb、Y、Zr、Ti的Nb/Y-Zr/Ti图解(图3)。从Nb/Y-

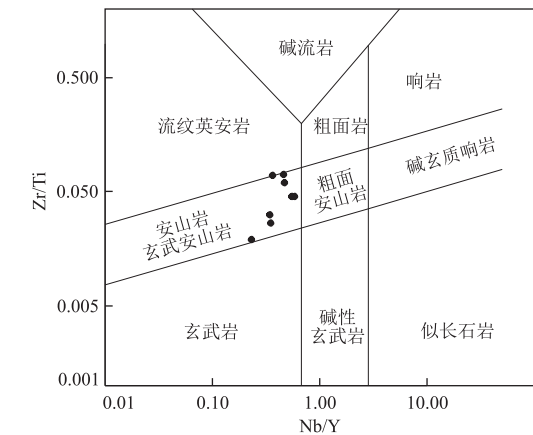


图 3 大兴安岭中段地区早三叠世哈达陶勒盖组火山岩 Nb/Y-Zr/Ti 图解

Fig.3 Nb/Y-Zr/Ti Diagram of volcanic rock from Hadataolegai Formation in Early Triassic in the middle of the Greater Xing'an Mountains

底图据 Pearce(1996)

Zr/Ti 图解上可以看出哈达陶勒盖组火山岩主要集中于安山岩—玄武安山岩,由于哈达陶勒盖组火山岩的蚀变较严重,而且尚有部分样品未落入亚碱性区域,因此采用活动性弱的高场强元素 Th、Ta、Hf、Nb、Zr 之间的图解来限制其岩石系列,从 AFM 图解(图 4a)、Th-Hf/3-Ta 图解(图 4b)、Th-Hf/3-Nb/16 图解(图 4c)、Th-Zr/117-Nb/16 图解(图 4d)可以看出哈达陶勒盖组火山岩无一例外地显示出钙碱性系列的演化趋势。

哈达陶勒盖组火山岩的 SiO₂ 哈克图解显示(图 5),随着 SiO₂ 含量的增加,CaO、MgO、TiO₂、P₂O₅、FeO_T 的含量明显降低,其中 FeO_T、MgO、TiO₂ 含量的降低指示了辉石等铁镁质矿物和钛铁矿、磁铁矿分离结晶作用的发生,CaO 含量的降低则主要指示了单斜辉石和基性斜长石的分离结晶,而 P₂O₅ 含量的降低则指示了磷灰石的分离结晶。

哈达陶勒盖组火山岩的稀土总量 $\sum \text{REE}$ 为 $(154.64 \sim 234.02) \times 10^{-6}$, $\sum \text{LREE} / \sum \text{HREE}$ 为 $3.82 \sim 7.91$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值介于 $8.53 \sim 29.11$,轻重稀土分离明显。 δEu 值介于 $0.82 \sim 1.20$,平均值 1.02,无明显 Eu 异常。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值介于 $2.81 \sim 4.33$, $(\text{Eu}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值介于 $2.46 \sim 8.14$,说明轻、重稀土内部分馏中等。

微量元素蛛网显示(图 6a),哈达陶勒盖组火山岩强烈亏损高场强元素 Nb、Ta,轻微亏损 P、Ti,及部分样品轻微亏损 Zr、Th,而明显富集大离子亲石元素 K、Sr、Ba、Pb.稀土元素的球粒陨石标准化图解(图 6b)显示整体分布模式呈右倾直线,具轻稀土富

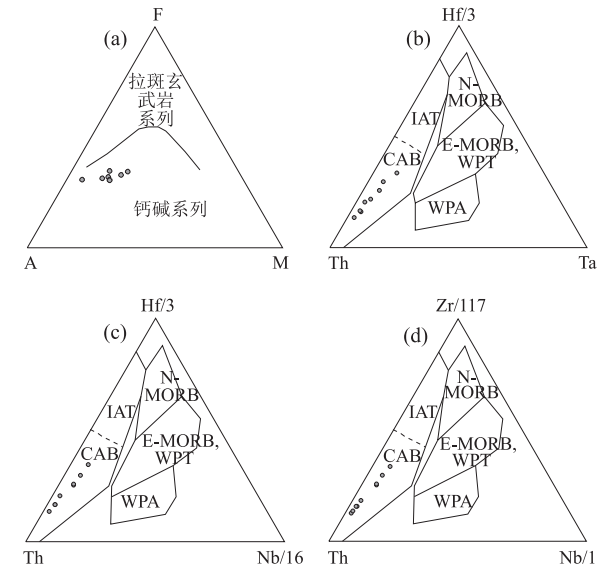


图 4 大兴安岭中段地区哈达陶勒盖组图解
Fig.4 Diagrams of rock from Hadataolegai Formation in the middle of the Greater Xing'an Mountains

a.AFM 图解;b. Th-Hf/3-Ta 图解;c. Th-Hf/3-Nb/16 图解;d. Th-Zr/117-Nb/16 图解;AFM 图解据 Irvine and Baragar(1971);b、c、d 图解据 Wood(1980);WPA.板内碱性玄武岩;WPT.板内拉斑玄武岩;IAT.岛弧拉斑玄武岩;E-MORB.富集型洋中脊玄武岩;N-MORB.正常洋中脊玄武岩;IAB.岛弧玄武岩;CAB.钙碱性玄武岩

集型特点,大部分相互平行或重合叠加。

4 讨论

4.1 哈达陶勒盖组火山岩的形成时代

哈达陶勒盖组火山岩的凝灰质粉砂岩夹层中含叶肢介 *Dictyostriaca-Rhyssestheria* 组合,先后经沈阳地质矿产研究所张武等(2006)、王五力和董杰、中国科学院地质研究所王思恩、中国科学院南京地质古生物研究所陈丕基鉴定,认为该古生物组合与陕西府谷、内蒙古准格尔旗、鄂尔多斯盆地、苏联等地的早三叠世地层均具有可比性.经沈阳地质矿产研究所丁秋红(2005)鉴定下段孢粉以 *Calamospora-Lundbladispota-Alisporites* 组合为代表;上段孢粉以 *Verrucosisporites-Lundbladispota-Chordasporites* 组合为代表.时代为早三叠世;内蒙古自治区地质矿产测试中心赵丽霞鉴定,粉砂质板岩中的植物孢粉 *Cyclogranisporites*, *Laevigatosporites*, *Leitriteles*, *Cibotiumspora* 可与河南登封早三叠世地层对比。

4.2 哈达陶勒盖组火山岩的岩石学性质

哈达陶勒盖组火山岩无论从岩石学还是岩石地

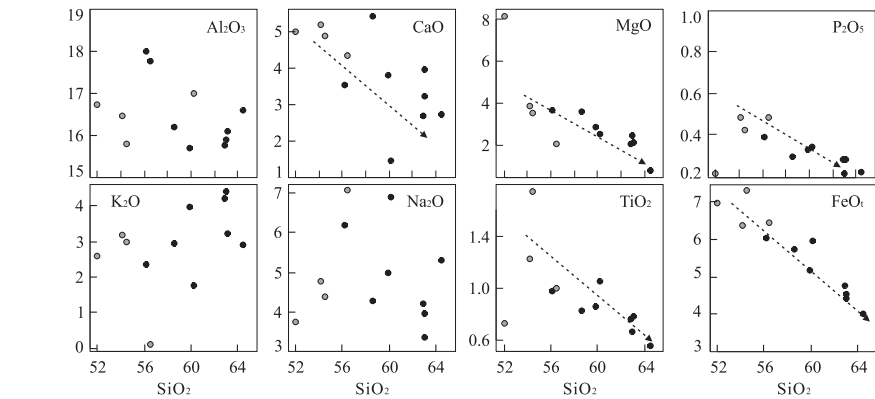


图 5 大兴安岭中段地区哈达陶勒盖组火山岩 Harker 图解

Fig.5 Harker Diagram of volcanic rock from Hadataolegai Formation in the middle of the Greater Xing'an Mountains
空心数据引用自内蒙古自治区第二区域地质调查队

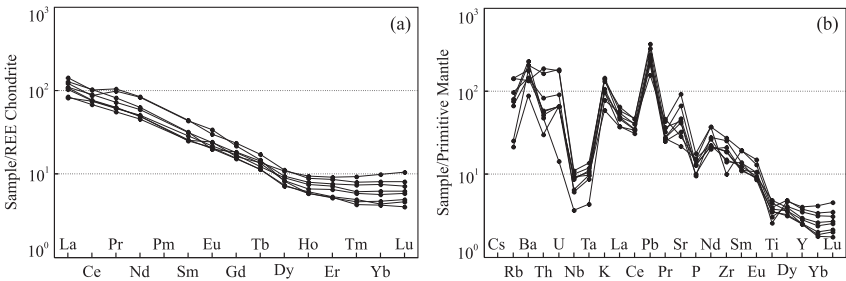


图 6 大兴安岭中段地区哈达陶勒盖组火山岩图解

Fig.6 REE partition pattern graphs

a. 稀土元素配分模式图, 球粒陨石标准化值据 Boynton(1984); b. 微量元素蛛网图, 原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989)

表 2 哈达陶勒盖组火山岩与埃达克岩特征比较

Table 2 Comparison table of characteristics of adakites and volcanic rock from Hadataolegai Formation

	埃达克岩特征(值)	哈达陶勒盖组火山岩
岩石组合	安山岩、英安岩、流纹岩	安山岩、英安岩、流纹岩
矿物组合	斜长石+角闪石+黑云母+辉石	斜长石+角闪石+黑云母+辉石
SiO ₂ 含量(10 ⁻²)	≥56.00	61.04
Al ₂ O ₃ 含量(10 ⁻²)	≥15.00	16.41
MgO 含量(10 ⁻²)	<3.00(很少超过 6.00)	2.50
Mg [#]	≈50.00	45.08(剔除一件绿帘石化样品后 47.91)
Na ₂ O 与 K ₂ O 关系	Na ₂ O>K ₂ O	Na ₂ O>K ₂ O
Na ₂ O 含量(10 ⁻²)	4.0±	4.9
K ₂ O 含量(10 ⁻²)	1.00~2.00±	3.23
Sr 含量(10 ⁻⁶)	>400.0	988.5
Yb 含量(10 ⁻⁶)	≤1.90	1.32
Y 含量(10 ⁻⁶)	≤18.00	14.06
Sr/Y	>20.00~40.00	75.94
La/Yb	>20.00	28.14
Zr/Sm	>50.00	35.46
高场强元素	Nb、Ta、Zr、Hf、Ti、P 亏损	Nb、Ta、Zr、Ti、P 亏损, Hf 无数据
Eu 异常	无异常	1.016
Sr 异常	正异常	正异常

注:特征(值)由 Gill(1981)、Drummond(1990)和 Defant and Drummond(1990).

球化学均具有明显的埃达克岩特征(表 2).通过模拟和实验所建立的 $Yb_N-(La/Yb)_N$ 判别图解(图 7a, Drummond, 1990)、 Sr/Y 比值判别图解(图 7b, Defant *et al.*, 2002)以及对压力敏感的 $Yb-Sr/Yb$

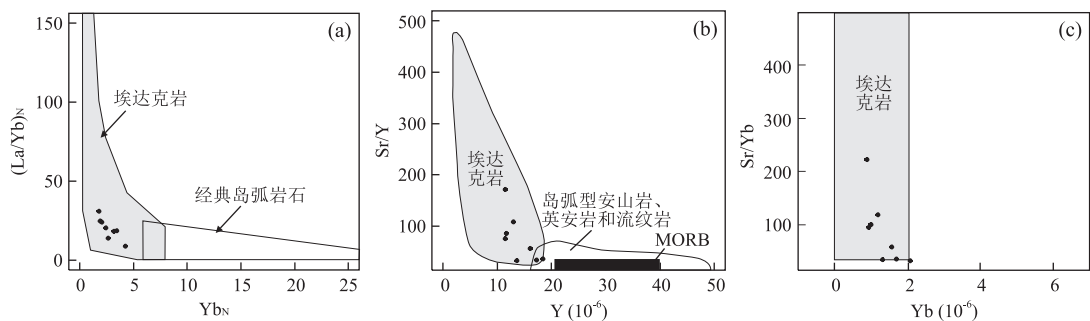


图 7 大兴安岭中段哈达陶勒盖组火山岩图解

Fig.7 $Yb_N-(La/Yb)_N$ discrimination diagrams

a. $Yb_N-(La/Yb)_N$ 判别图解, 底图据 Drummond(1990); b. $Y-Sr/Y$ 判别图解, 底图据 Defant *et al.* (2002); c. $Yb-Sr/Yb$ 判别图解, 底图据张旗(2008)

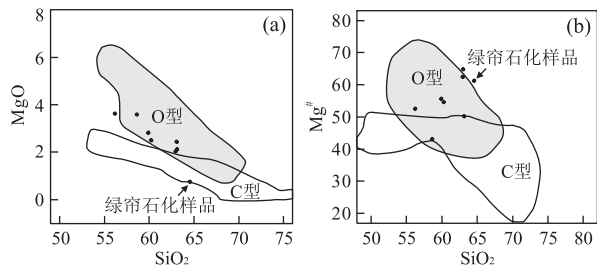


图 8 大兴安岭中段哈达陶勒盖组火山岩的两类埃达克岩的成分对比图

Fig.8 Components comparison picture of two kinds of adakites of volcanic rock of volcanic rock in Hadataolegai Fomation in the middle of the Greater Xing'an Mountains

a. SiO_2-MgO 成分图解 (Wang *et al.*, 2007); b. $SiO_2-Mg^\#$ 成分图解 (Sheppard *et al.*, 2001)

判别图解(图 7c, 张旗, 2008)均判别哈达陶勒盖组火山岩是一套埃达克岩组合。

埃达克岩最初定义为“Volcanic or intrusive rocks in Cenozoic arcs associated with subduction of young (≤ 25 Ma) oceanic lithosphere” (Defant and Drummond, 1990). 而作为补充, Defant 和 Drummond 具体描述这类岩石具有以下岩石地球化学特征“Characterized by $\geq 56\%$ SiO_2 , $\geq 15\%$ Al_2O_3 (rarely lower), usually $< 3\%$ MgO (rarely above 6% MgO), low Y and HREE relative to ADRs (for example, Y and $Yb \leq 18$ and 1.9×10^{-6} , respectively), high Sr relative to island arc ADR (rarely $< 400 \times 10^{-6}$), low high-field strength elements (HFSEs), as in most island arc ADRs, and $^{87}Sr/^{87}Sr$ usually < 0.7040 ” (Defant and Drummond, 1990). 原始定义表明, 埃达克岩的定义实际是以岩石地球化学特征、构造环境和特殊产生条件为限定的一套岩石类型组合。

然而, 埃达克岩自被提出以来, 就引起了广泛而持续的争议. 首先, 部分学者认为作为一种岩石类型不应该依据地球化学特征来定义和命名, 而是应该遵照传统通过矿物学、岩相学特征来描述和命名, 而且不能是一套岩石组合; 其次, 对埃达克岩的岩浆起源也存在的很大的分歧, 部分学者认为埃达克岩不应扩大化, 应当遵循命名者所定义的“源自年轻、热的俯冲板片熔融”. 而另外一些学者则认为, 其他介质在适当的物理化学条件下同样可以使下地壳熔融并产生埃达克岩 (Petford and Atherton, 1996); 另外, 对埃达克岩产出的构造背景是另一个争论的热点, 越来越多的学者认为不仅是原始定义的岛弧环境可以产生埃达克岩 (Defant and Drummond, 1990), 下地壳 (Peacock *et al.*, 1994; Petford and Atherton, 1996; Sheppard *et al.*, 2001) 和玄武岩底侵同样可以产生埃达克岩, 并通过蚀变玄武岩的部分熔融实验进行了验证 (Atherton and Petford, 1993; Rapp *et al.*, 2002). 因此, 埃达克岩的提出者之一 Defant 后撰文予以声明 “Adakite should be a general term used for those rocks with adakitic geochemical characteristics and should have no process implications” (Defant *et al.*, 2002). 由此可见, 埃达克岩的提出者对其形成过程并无特殊定义。

部分学者在原有认识的基础上, 增加了埃达克岩起源于克拉通内部的构造环境, 并将埃达克岩的形成背景分为阿留申型 (O 型) 和地壳加厚型 (C 型). O 型即与俯冲板片有关的岛弧型埃达克岩, 而 C 型则被认为是与加厚陆壳底部局部熔融有关的埃达克岩. O 型埃达克岩和 C 型埃达克岩的主要区别在于前者富 Na, 而后者更富 K。

哈达陶勒盖组火山岩的 Na_2O/K_2O 值除一个样品为 0.76 外, 其他均大于 1.00, 最高达 3.88, 平均

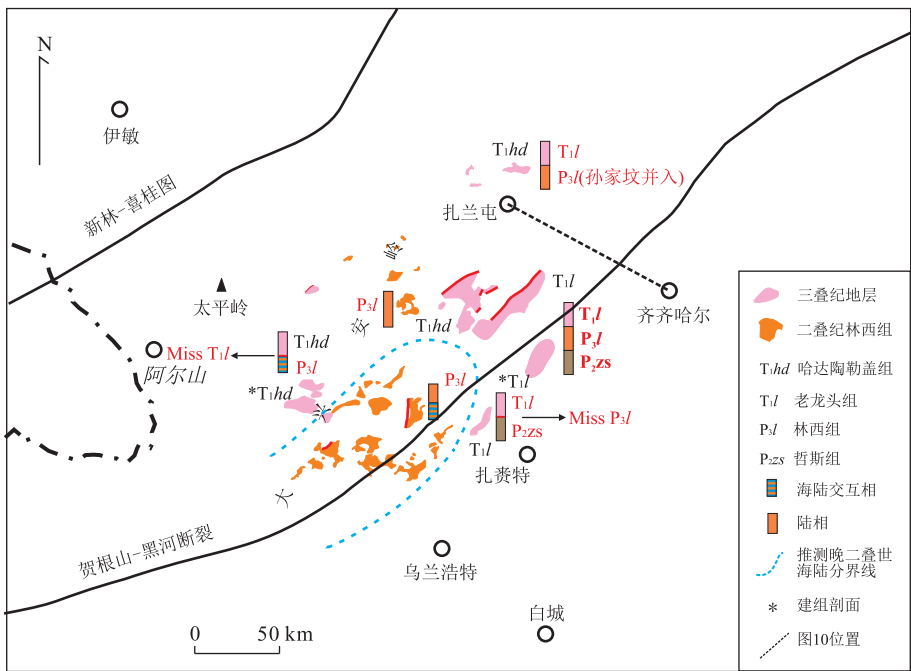


图 9 研究区晚二叠世—早三叠沉积地层分布图

Fig.9 Distribution map of sedimentary strata in Late Permian-Early Triassic in the study area

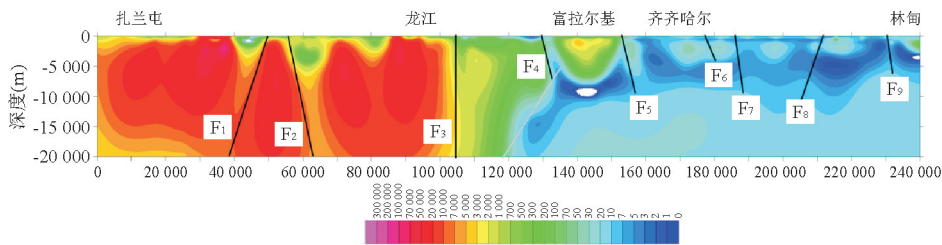


图 10 林甸—扎兰屯大地电磁测深(MT) 二维反演

Fig.10 2D inversion on telluric electromagnetic sounding (MT) at Lindain-Zhalantun

据张兴洲,内部资料

值为 1.75,而 $(\text{Na}_2\text{O}-2)/\text{K}_2\text{O}=1.08$.目前尚没有统一的钾质和钠质定义,但更常见于在讨论 TTG 的时候使用 $(\text{Na}_2\text{O}-2)/\text{K}_2\text{O}$ 来区分钾质与钠质,而其他情况则应用 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 进行区分.因此,无论以哪种标准来看,哈达陶勒盖组火山岩均为钠质,是阿留申型-O 型埃达克岩,是俯冲环境下板片熔融的产物.根据 SiO_2 与 $\text{MgO}/\text{Mg}^\#$ 的判别图解也显示了同样的结果(图 8a、8b).

4.3 哈达陶勒盖组火山岩的构造背景

尽管中国东北地区北部的额尔古纳—兴安地块与南部的松嫩—佳木斯地块于二叠纪沿贺根山—嫩江—黑河一线闭合(Miao *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2017).但考虑到这种拼合是以弧—陆或弧—弧的软碰撞形式为主.因此该缝合带并未发生剧烈的造山,而是在拼合之后很长一段时期内处于“拼而不合”的

状态,以至于到二叠纪末该区域仍然处于地表残留海盆的状态,并广泛地沉积了哲斯组(P_{2zs})海相沉积以及林西组(P_{3l})海陆交互相—陆相的碎屑沉积(图 9).到目前为止该构造带仍然时常发生不同深度、不同强度的地震,并从现代地球物理(MT)的观测结果我们也可以看出,松嫩地块沿着贺根山—黑河构造带向北西俯冲到兴安地块之下(图 10),这种构造样式在之后的中生代晚期—新生代基本没有发生大的改变.

另外,研究区南部扎赉特地区的老龙头组直接沉积于哲斯组之上,中间缺失了上二叠统林西组,而其北部的林西组下段为海陆交互相沉积,及至扎兰屯南部林西组则全部为陆相沉积(图 9).另外,目前的地质展布情况是经过中生代由北向南推覆以及晚中生代左行走滑旋转 $20^\circ\sim 30^\circ$ 之后的面貌,二叠

纪末至三叠纪初他们的展布方向应为近东西向, 并因为推覆的原因地理位置可能会向北一些(李世超, 2012). 由此可见, 晚二叠世贺根山—嫩江—黑河一带中部存在一个狭长的近东西向的残留海盆或陆表海.

因此二叠纪末—三叠纪初时期, 研究区尽管有部分隆升导致地壳加厚、海退, 但隆升幅度有限. 此时, 研究区南侧的古亚洲洋在西拉木伦河—长春—延吉一线正经历着由西向东的剪刀式闭合(王玉净和樊志勇, 1997; Chen *et al.*, 2000; 孙德有等, 2004; 李锦轶等, 2007; Miao *et al.*, 2007, 2008; Wu *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2008). 闭合应力使研究区构造活化, 年轻地壳沿贺根山—嫩江—黑河一线由南向北俯冲, 推动下地壳或地幔内的残留板片(MORB)向更深的地幔俯冲, 增温使得残留板片熔融, 岩浆喷出地表形成哈达陶勒盖组埃达克岩(图 11).

陆内俯冲通常发育于大地构造位置上处于古老褶皱山系与内陆盆地边缘拗陷之间, 俯冲带早期为正断层, 后期转化为逆断层, 成为盆地拗陷边缘主动向山系潜滑的俯冲断层(罗志立等, 2003). 由此可见研究区早三叠世的地球动力学过程为古亚洲洋闭合, 碰撞应力或碰撞蠕散应力导致地体内部年轻陆壳沿复活构造带发生陆内俯冲作用, 并在此过程中残留洋壳随俯冲而增温熔融. 索伦地区门德沟附近见哈达陶勒盖组与索伦组(后并入林西组)呈角度不整合(姜万德, 1992), 说明 P_3/T_1 之间发生了一次大规模的构造运动, 而扎兰屯市小柴沟、陈家地营子等地见老龙头组与林西组为逐渐过渡的整合接触关系更加说明老龙头组所处位置为前陆盆地(李文国

等, 1996; 杨雅军, 2012), 哈达陶勒盖组为陆弧火山岩. 老龙头组分布于贺根山—黑河断裂带两侧, 而哈达陶勒盖则只分布于该断裂带以北也说明了这点(图 9). 上述地质事实也说明说明此次构造运动发生于老龙头—哈达陶勒盖时期.

5 结论

(1) 哈达陶勒盖组火山岩以安山岩、含角砾流纹质熔结凝灰岩、角闪辉石安山岩夹少量流纹岩、陆源碎屑沉积为主, 是一套中酸性的钙碱系列岩石, 具有高 Sr(均值 989×10^{-6})、低 Yb(均值 1.32×10^{-6}) 和 Y(均值 14.06×10^{-6}) 和高 Sr/Y 比值(均值 76×10^{-6}) 的特点, 为钠质阿留申型(O 型)埃达克岩, 是俯冲环境下板片熔融的产物.

(2) 早三叠世由于古亚洲洋沿西拉木伦河—长春—延吉一线的闭合, 碰撞使贺根山—黑河构造带活化, 碰撞应力或碰撞蠕散应力推动研究区年轻地壳沿贺根山—嫩江—黑河一线由南向北俯冲, 推动下地壳或地幔内残留板片向更深的地幔推进并使之熔融, 形成哈达陶勒盖组埃达克岩, 并在地表山间盆地沉积积相碎屑堆积—老龙头组.

致谢: 两位匿名审稿专家对文章提出了宝贵的修改意见, 在此致以诚挚的感谢!

References

Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362(6416): 144—146. doi:10.1038/362144a0

Boynnton, 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

Chen, B., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Two Contrasting Paleozoic Magmatic Belts in Northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 328(1—2): 157—182. doi:10.1016/s0040-1951(00)00182-7

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

Defant, M. J., Xu, J. F., Kepezhinskias, P., et al., 2002. Adakites: Some Variations on a Theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129—142.

Ding, Q. H., Zhang, L. J., Xu, K., 2005. The Lower Triassic Series

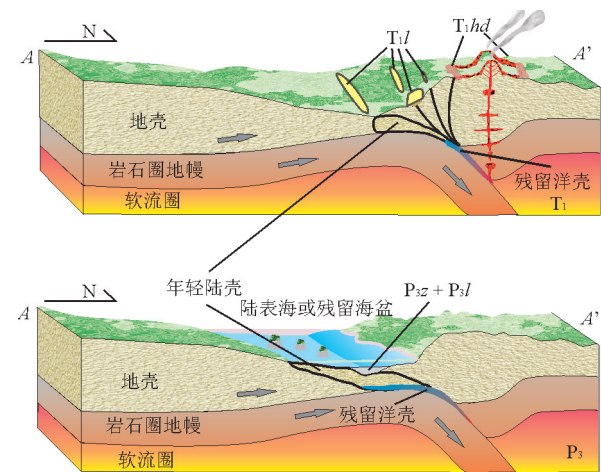


图 11 晚二叠世及三叠纪构造演化模式图

Fig.11 Triassic tectonic evolution model in the study area

P_{3z} , 哲斯组; P_{3l} , 林西组; T_1 , 老龙头组; T_{1hd} , 哈达陶勒盖

- and Its Palynological Assemblages in Southwestern Songliao Basin, NE China. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 22(1):107–114 (in Chinese with English abstract).
- Donskaya, T. V., Gladkochub, D. P., Mazukabzov, A. M., et al., 2012. The Late Triassic Kataev Volcanoplutonic Association in Western Transbaikalia, a Fragment of the Active Continental Margin of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Russian Geology and Geophysics*, 53(1): 22–36. doi:10.1016/j.rgg.2011.12.002
- Drummond, M. S., Defant, M. J., 1990. A Model for Trondhjemite-Tonalite-Dacite Genesis and Crustal Growth via Slab Melting: Archean to Modern Comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95(B13): 21503. doi:10.1029/jb095ib13p21503
- Gill, J., 1981. Orogenic Andesite and Plate Tectonics. Springer, New York, 385.
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548. doi: 10.1139/e71-055
- Jiang, W. D., 1992. The Triassic in the Middle Sector of the Greater Khingan Mountains in Inner Mongolia. *Regional Geology of China*, (1): 39–42 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Gao, L. M., Sun, G. H., et al., 2007. Shuangjingzi Middle Triassic Syn-Collisional Crust-Derived Granite in the East Inner Mongolia and Its Constraint on the Timing of Collision between Siberian and Sino-Korean Paleo-Plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565–582 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2017. Geochronology of Ershi'erzhan Formation Sandstone in Mohe Basin and Tectonic Environment of Its Provenance. *Earth Science*, 42(1): 35–52 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. C., Liu, Z. H., Li, S. C., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry, Zircon Hf Isotopic Characteristics and Tectonic Setting of Hudugshaorong Pluton in Balinyouqi, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(12): 1995–2007 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. C., 2012. Study on the Triassic-Jurassic Tectonic Evolution of the Middle Great Xing'an Range (Dissertation). Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, S. C., Li, Y. F., Wang, X. A., et al., 2016. Delineation of the Late Triassic Granitic Pluton from the Middle Part of Greater Xing'an Mountains Showing Tetrad REE Patterns and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2793–2806 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. C., Liu, Z. H., Xu, Z. Y., et al., 2015. Age and Tectonic Setting of Volcanic Rocks of the Tamulangou Formation in the Great Xing'an Range, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 471–480. doi:10.1016/j.jseaes.2014.09.014
- Li, W. G., Li, Q. F., Jiang, W. D., 1996. The Stratigraphy of Inner Mongolia Autonomous Region. China University of Geoscience Press, Wuhan, 1–344 (in Chinese).
- 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
- Luo, Z. L., Liu, S. G., Yong, Z. Q., et al., 2003. Formation and Development of Viewpoint about Chinese-Subduction. *Xinjiang Petroleum Geology*, 24(1): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Miao, L. C., Fan, W. M., Liu, D. Y., et al., 2008. Geochronology and Geochemistry of the Hegenshan Ophiolitic Complex: Implications for Late-Stage Tectonic Evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 348–370. doi:10.1016/j.jseaes.2007.11.005
- Miao, L. C., Liu, D. Y., Zhang, F. Q., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb Ages of the “Xinghuadukou Group” in Hanjiayuanzi and Xinlin Areas and the “Zhalantun Group” in Inner Mongolia, Da Hinggan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 52(8): 1112–1124. doi:10.1007/s11434-007-0131-2
- Peacock, S. M., Rushmer, T., Thompson, A. B., 1994. Partial Melting of Subducting Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(1–2): 227–244. doi: 10.1016/0012-821x(94)90042-6
- Pearce, J., 1996. Sources and Settings of Granitic Rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125.
- 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
- Rapp, R. P., Xiao, L., Shinizu, N., 2002. Experimental Constraints on the Origin of Potassium-Rich Adakites in East China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 293–302.
- Shao, J. A., Mu, B. L., He, G. Q., et al., 1997. Geological Processes of the Structural Overlapping between Paleo-Asia Domain and Paleo-Pacific Domain in Northern Part of North China. *Science in China (Series D)*, 27(5): 390–394 (in Chinese).
- Sheppard, S., Griffin, T. J., Tyler, I. M., et al., 2001. High- and Low-K Granites and Adakites at a Palaeoproterozoic

- Plate Boundary in Northwestern Australia. *Journal of the Geological Society*, 158(3): 547—560. doi: 10.1144/jgs.158.3.547
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Zhang, Y. B., et al., 2004. The Final Closing Time of the West Lamulun River-Changchun-Yanji Plate Suture Zone—Evidence from the Dayushan Granitic Pluton, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 174—181 (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
- Wang, X. R., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2005. Geochemical of Andesite in Yixian Formation of Sihetun, Western Liaoning: Intrusions of Lower Crust Delamination and Sr/Y Change. *Science in China (Earth Science)*, 35(8): 700—709 (in Chinese).
- Wang, Q., Wyman, D. A., Zhao, Z. H., et al., 2007. Petrogenesis of Carboniferous Adakites and Nb-Enriched Arc Basalts in the Alataw Area, Northern Tianshan Range (Western China): Implications for Phanerozoic Crustal Growth in the Central Asia Orogenic Belt. *Chemical Geology*, 236(1—2): 42—64. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.08.013
- Wang, Y. J., Fan, Z. Y., 1997. Discovery of Permian Radiolarians in Ophiolite Belt on Northern Side of Xar Moron River, Nei Monggol and Its Geological Significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 36(1): 60—71 (in Chinese with English abstract).
- 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.jseas.2010.11.014
- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Sun, D. Y., et al., 2007. The Hulan Group: Its Role in the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3—4): 542—556. doi: 10.1016/j.jseas.2007.01.003
- 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).
- Zhang, J. H., Ge, W. C., Wu, F. Y., et al., 2008. Large-Scale Early Cretaceous Volcanic Events in the Northern Great Xing'an Range, Northeastern China. *Lithos*, 102(1—2): 138—157. doi: 10.1016/j.lithos.2007.08.011
- Zhang, Q., 2008. Adakite Research: Retrospect and Prospect. *Geology in China*, 35(1): 32—39 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Fu, X. P., Ding, Q. H., et al., 2006. A New Knowledge of the Lower Triassic Laolongtou Formation in the Defatun Area, Jalaid Qi, Inner Mongolia. *Journal of Stratigraphy*, 30(1): 26—33 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁秋红, 张立君, 许坤, 2005. 松辽盆地西南部下三叠统及其孢粉组合. 微体古生物学报, 22(1): 107—114.
- 姜万德, 1992. 内蒙古大兴安岭中段三叠系. 中国区域地质, (1): 39—42.
- 李锦铭, 高立明, 孙桂华, 等, 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3): 565—582.
- 李良, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2017. 漠河盆地二十二站组砂岩形成时代及物源区构造环境判别、地球化学及其构造意义. 地球科学, 42(1): 35—52.
- 李鹏川, 刘正宏, 李世超, 等, 2016. 内蒙古巴林右旗胡都格绍荣岩体的年代学、地球化学、Hf 同位素特征及构造背景. 地球科学, 41(12): 1995—2007.
- 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). 中国地质科学院地质研究所, 北京.
- 李世超, 李永飞, 王兴安, 等, 2016. 大兴安岭中段晚三叠世四分组效应花岗岩的厘定及其地质意义. 岩石学报, 32(9): 2793—2806.
- 李文国, 李庆富, 姜万德, 1996. 内蒙古自治区岩石地层. 中国地质大学出版社, 武汉.
- 罗志立, 刘树根, 雍自权, 等, 2003. 中国陆内俯冲(C-俯冲)观的形成和发展. 新疆石油地质, 24(1): 1—7.
- 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 等, 1997. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用. 中国科学(D辑)地球科学, 27(5): 390—394.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等, 2004. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报: 地球科学版, 34(2): 174—181.
- 王晓蕊, 高山, 柳小明, 等, 2005. 辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学: 对下地壳拆沉作用和 Sr/Y 变化的指示. 中国科学(D辑), 35(8): 700—709.
- 王玉净, 樊志勇, 1997. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义. 古生物学报, 36(1):

60—71.	32—39.
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.	张武,傅晓平,丁秋红,等,2006.内蒙古扎赉特旗德发屯地区下三叠统老龙头组的新发现.地层学杂志,30(1): 26—33.
张旗,2008.埃达克岩研究的回顾和前瞻.中国地质,35(1):	

《地球科学》	
2018 年 1 月 第 43 卷 第 1 期 要目预告	
华北中部造山带五台—恒山地区古元古代变质作用与构造演化	魏春景
鞍山—本溪地区鞍山群含 BIF 表壳岩形成时代新证据:锆石 SHRIMP U-Pb 定年	万渝生等
喜马拉雅造山带的部分熔融与淡色花岗岩成因机制	张泽明等
近同心带状岩体侵位机制的接触变质标志	陈能松等
冀东—辽西太古宙变质基底区火成岩岩石组合和动力学过程	刘树文等
西南天山超高压变质带中的两类石榴角闪岩	吕 增等
西藏定结高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)的变质 P-T 轨迹及构造意义	丁自耕等
内蒙古莫尔道嘎佳疙瘩组变质岩地球化学特征及构造意义	王照元等