

大兴安岭晚中生代火山岩成因与古老地块物质贡献： 锆石 U-Pb 年龄及多元同位素制约

周新华, 英基丰, 张连昌, 张玉涛

中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

摘要: 系统的元素及多元同位素地球化学研究表明, 以西乌珠穆沁旗地区和塔河地区为代表的部分大兴安岭晚中生代火山岩地幔源区组分中存在明确的古老地块物质贡献。与大兴安岭其他地区晚中生代火山岩源区组分主要为新生地壳物质特征相比, 塔河火山岩中的碎屑锆石记录了晚元古代和早古生代年龄; 配套的微量元素和多元同位素特征则清晰地指示了上述两个地区火山岩的源区组分是在继承古老地块富集地幔的基础上叠加了古生代岛弧等新生地壳物质。上述研究首次为兴蒙造山带内存在前寒武古老地体以及该造山带组成特征提供了明确和系统的深部地球化学制约。晚中生代全球深部事件以及蒙古—鄂霍茨克洋闭合后的伸展作用, 触发岩石圈地幔部分熔融, 是本区晚中生代强烈火山活动成因可能的地球动力学背景。

关键词: 中生代火山岩; 源区特征; 古老地块; Sr-Nd-Pb-Hf 同位素; 大兴安岭。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2009)01-0001-10

收稿日期: 2008-12-01

The Petrogenesis of Late Mesozoic Volcanic Rock and the Contributions from Ancient Micro-Continents: Constraints from the Zircon U-Pb Dating and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Systematics

ZHOU Xin-hua, YING Ji-feng, ZHANG Lian-chang, ZHANG Yu-tao

State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Comprehensive geochemical investigations on the Late Mesozoic volcanic rocks from Tahe and Xiwu areas, Great Xing' an range reveal that the mantle sources for these rocks are of attributes of old continent blocks, while the mantle sources for the coeval volcanic rocks from other area show juvenile features. The detrital zircons from Tahe volcanic rocks have records of Late Proterozoic and Early Paleozoic. Trace elements and Sr, Nd, Pb and Hf isotopic features imply that the mantle sources for these two volcanic fields were inherited from enriched lithospheric mantle beneath old blocks with overprint of subducted juvenile island arc materials. This study provides solid deep geochemical constraints on the existence of Precambrian blocks among the Paleozoic Xingmeng orogen. During the Late Mesozoic, with the closure of the Mongol-Okhotsk and Mesozoic global event, regional extensional geological setting developed in these regions, which triggered decompressional melting of the lithospheric mantle and caused the voluminous eruption of volcanic rocks.

Key words: Mesozoic volcanic rocks; source features; old blocks; Sr-Nd-Pb-Hf isotopes; Great Xing' an range.

我国东北及其邻近的东北亚地区, 如蒙古国东南部、俄罗斯远东、西伯利亚、朝鲜半岛等广泛分布有晚中生代火山岩, 这些火山岩构成了规模宏大的东北亚大陆边缘巨型火山岩带。从大地构造背景上看, 东北地区晚中生代火山岩形成于古生代古亚洲

洋构造域与中生代古太平洋构造域的叠加地区(邵济安等, 1997), 对这些火山岩的研究无疑将有助于了解该地区的构造演化以及如此大规模火山活动的构造背景。我国学者对东北晚中生代火山岩曾做过大量研究并对其成因和构造背景提出了不同的模

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 40334043)。

作者简介: 周新华(1942-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事同位素地球化学、地质年代学、地幔地球化学和岩石圈深部研究。

E-mail: xzhzhou@mail.igcas.ac.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

式,如地幔柱成因模式(林强等,1998;葛文春等,1999),与古亚洲洋和蒙古鄂霍次克海封闭有关的盆岭型构造模式(Fan *et al.*, 2003; Meng, 2003),与太平洋板块俯冲相关的弧后伸展构造模式(赵国龙等,1989;赵越等,1994)以及伸展造山过程中的岩浆作用(邵济安等,1999)等.同时有作者曾强调了该区是由位于华北板块和西伯利亚板块之间的多个古地体拼合而成(邵济安和张履桥,1990;邵济安,1991;张炯飞等,2000),并曾对这些古地体的地层、构造变形以及与蛇绿岩的关系作过相应的研究.然而迄今为止,对于这些古老地体的存在尚缺乏系统的地球化学论证,尤其是缺乏来自岩石圈地幔尺度的制约.大陆火山岩作为大陆岩石圈深部物质信息的载体,其地球化学特征可以用来描绘大陆岩石圈深部物质组成特征和深部地球动力学过程,并进而指示其所处的大地构造单元属性(周新华等,2001).本文在大兴安岭塔河地区和西乌珠穆沁旗地区(下文简称为西乌地区)晚中生代火山岩系统地球化学研究基础上,将首次提供这些火山岩地幔源区具有古老块体属性的系统同位素地球化学论据.上述发现将对探讨本区中生代火山岩成因及其地球动力学背景具有重要意义,它提示了本区部分火山岩可能发育于造山带内古老块体之上,这一研究同时也将对兴蒙造山带内古老地体的存在及其位置提供明确的深部地球化学制约.

1 地质背景及样品描述

东北火山岩区位于古生代中亚造山带东段的兴蒙造山带中,中亚造山带是在古亚洲洋俯冲闭合过程中不同来源不同性质的地体拼合而成的典型的增生型造山带,同时也是地球上显生宙新生陆壳增长最为显著的地区(Sengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2000).自晚古生代至早中生代该区经历了古亚洲洋、蒙古—鄂霍次克海的封闭以及华北板块与西伯利亚板块的最终拼贴.索伦—西拉木伦—长春—延吉构造带和蒙古—鄂霍茨克带是区内最重要的两条缝合带,前者是在晚二叠世—早三叠世中间地块群与华北板块碰撞形成的,后者形成于晚三叠世—早白垩世,标志着与中间地块群拼合后的华北板块与西伯利亚板块的最终拼合.大兴安岭北段古生代地层出露很少,大面积分布的是中生代火山岩和侵入岩,晚侏罗世—早白垩世火山活动非常强烈,火山岩

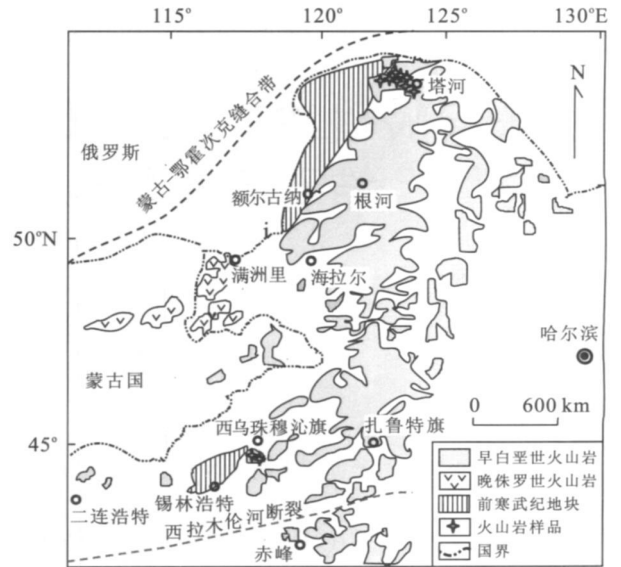


图 1 大兴安岭及其邻近地区中生代火山岩分布简图

Fig. 1 Geological map showing the distribution of the Late Mesozoic volcanic rocks in the northern Great Xing'an range and its adjacent regions

地层自下而上分别为塔木兰沟组、吉祥峰组、木瑞组、上库力组和伊列克得组.这套火山岩的时代过去多被认为是晚侏罗世(内蒙古地质矿产局,1991),最新的火山岩年龄研究认为晚侏罗世火山岩仅局部分布在满洲里地区,而大范围分布的火山岩的时代主要为白垩纪(Zhang *et al.*, 2008).

塔河地区位于大兴安岭的北西侧,而西乌地区分布于大兴安岭的中部(图 1).塔河火山岩的采样主要是沿着翠岗—塔河—盘古的公路采样,所采样品新鲜,致密块状构造,颜色为灰色、灰绿色和黑色.岩石具斑状结构,主要斑晶为单斜辉石、少量橄榄石和长石,基质为隐晶质结构,另有少量暗色不透明矿物,主要岩石类型为玄武质安山岩.西乌地区为草原覆盖区,岩石露头较少,本次样品采自猴头庙地区,样品新鲜,致密块状构造.岩石具斑状结构,主要斑晶为单斜辉石、橄榄石和长石,基质为隐晶质结构.

2 分析方法

主量元素采用 X 荧光光谱法.将样品粉末与四硼酸锂均匀混合,高温下熔成玻璃片,在中国科学院地质与地球物理研究所 Shimadzu XRF 荧光光谱仪上测试.元素分析精度优于 2%~3%.微量元素采用酸溶法,制备好的样品溶液在中国科学院地质与

地球物理研究所的 Finnigan Element II 型 ICP-MS 测试, 微量元素含量大于 $10 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ 的精度优于 5%, 小于 $10 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ 的元素精度优于 10%。

锶、钕同位素分析采用传统的阳离子交换树脂法分别分离富集 Sr 和 Nd 元素, 采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 和 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 标准化校正测得的 Nd 和 Sr 同位素比值。Nd 和 Sr 同位素国际标样 AMS 和 NBS987 的测试值分别为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512139 \pm 18$ ($2\sigma, n = 28$) 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710255 \pm 16$ ($2\sigma, n = 33$)。铅同位素采用阴离子交换树脂来分离富集, 铅国际标样 NBS981 的测定结果为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.9139 \pm 4$ ($2\sigma, n = 65$)。上述同位素测试在 Finnigan Mat262 固体表面热电离质谱计上完成。

在进行铅同位素分析时, 先用类似与主量元素分析方法制备玻璃片, 制成的玻璃片用盐酸分解, Hf 的分离采用改进型单柱方法(李献华等, 2005), Hf 同位素的测试用 Finnigan Neptune 多接收器等离子体质谱计(MC-ICPMS), 采用 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 标准化, 以及根据国际标样 JMC 475 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282160$ 比值进行样品测定值校正。

锆石原位微区 U-Pb 年龄测试在澳大利亚珀斯科廷大学的 SHRIMP II 型离子探针上进行。详细的分析方法见 Williams (1998)。

3 分析结果

3.1 主、微量元素特征

火山岩的主量元素测试结果见表 1。火山岩的 SiO_2 含量为 47.3%~58.0%, MgO 含量为 2.7%~6.9%, 全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 含量为 4.3%~7.6%, 且 Na_2O 含量稍高于 K_2O 的含量。全岩的 $\text{Mg}^\#$ 在 0.4~0.6 间。在火山岩的 TAS 图解上, 样品落在碱性和亚碱性火山岩系列的分界线附近, 从岩性上看, 主要有玄武安山岩、玄武粗面安山岩以及粗面安山岩等, 在全岩 SiO_2 与主要氧化物的相关图上, K_2O 含量随着 SiO_2 含量的增加而增加, TFe_2O_3 、 MgO 和 CaO 等随着 SiO_2 的增加而降低(图 2), 这种变化趋势表明岩浆在演化过程中经历了分离结晶作用。

微量元素分析结果见表 1, 在稀土元素球粒陨石标准化模式图上, 所有样品均表现为轻稀土富集型, 轻重稀土分馏明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 9 \sim 20$, 岩石样品没有或有微弱的 Eu 负异常(图 3)。在微量元素蛛

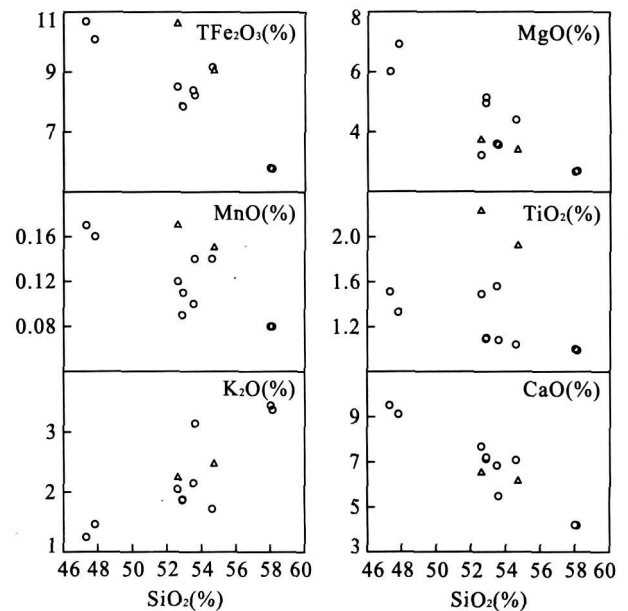


图 2 主要氧化物含量随 SiO_2 含量的变化

Fig. 2 The correlation between SiO_2 and major oxides of volcanic rocks

网图上火山岩表现为富集大离子亲石元素(LILE), 显著亏损高场强元素(HFSE)(图 3), 这一特征与 MORB 和 OIB 形成鲜明对比, 而类似于岛弧地区火山岩。相对西乌火山岩而言, 塔河地区的火山岩中高场强元素的亏损程度更高。

3.2 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素特征

火山岩配套的 Sr、Nd、Pb、Hf 同位素分析结果列于表 1。塔河地区火山岩的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在 0.7055~0.7078, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 在 0.4~-5.5 间。西乌火山岩的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.7055~0.7067, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -1.2~-6.7。在 Sr-Nd 同位素相关图上, 塔河和西乌火山岩有较大分布范围, 且分别有向 EM1 和 EM2 地幔端元变化趋势, 与岛弧火山岩和美国西部新生代盆岭省火山岩相似。相比之下, 东北其他地区的同时代火山岩则主要落在原始地幔附近(图 4)。

塔河火山岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.149 \sim 18.529$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.489 \sim 15.539$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.761 \sim 38.344$, 西乌火山岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.780 \sim 18.215$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.450 \sim 15.499$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.860 \sim 38.137$ 。所有样品均位于北半球参考线之上, 而西乌火山岩具有最低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值(图 5)。

塔河火山岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.28259~0.28276, 相应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 1.88 \sim -4.58$ 。西乌火山岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.28258~0.28279, 相应的

表 1 大兴安岭塔河、西乌等地区中生代火山岩的主量、微量元素和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成

Table 1 The major, trace elements and Sr, Nd, Pb and Hf isotopic compositions of Tahe and Xiwu volcanic rocks

样品号	05TH05	05TH10	05TH11	05TH12	05TH14	05TH19	05TH21	05TH23	05TH25	05TH27	XW04-1	XW04-4
SiO ₂	53.6	47.3	47.8	58.1	58.0	52.87	52.9	54.6	52.6	53.5	54.7	52.6
TiO ₂	1.08	1.51	1.33	0.99	1.00	1.09	1.10	1.04	1.49	1.56	1.92	2.23
Al ₂ O ₃	18.6	17.9	17.4	16.3	16.3	16.27	16.2	17.8	16.3	16.3	15.5	15.4
TF ₂ O ₃	8.23	10.68	10.08	5.77	5.79	7.86	7.85	9.16	8.50	8.39	9.04	10.6
MnO	0.14	0.17	0.16	0.08	0.08	0.09	0.11	0.14	0.12	0.10	0.15	0.17
MgO	3.57	6.01	6.92	2.70	2.67	4.96	5.15	4.40	3.22	3.60	3.39	3.73
CaO	5.48	9.50	9.11	4.18	4.20	7.13	7.19	7.08	7.68	6.83	6.15	6.52
Na ₂ O	3.30	3.03	3.17	4.23	4.16	4.22	4.35	2.74	3.12	3.95	3.44	3.54
K ₂ O	3.14	1.25	1.46	3.37	3.44	1.87	1.88	1.72	2.05	2.15	2.47	2.24
P ₂ O ₅	0.32	0.44	0.37	0.37	0.37	0.31	0.29	0.34	0.59	0.64	0.74	1.01
LOI	2.40	1.55	1.65	3.73	3.55	3.25	3.21	0.43	3.75	2.48	2.05	2.22
Total	99.9	99.4	99.5	99.7	99.6	99.92	100.2	99.4	99.4	99.4	99.5	100.3
Sc	15.9	27.9	23.5	9.99	9.97	16.9	17.8	12.4	14.1	11.3	14.8	15.0
V	169	223	185	102	101	178	174	180	177	158	135	171
Cr	23.3	122	170	36.7	37.0	402	418	17.1	77.7	52.1	46.1	80.1
Co	24.5	32.3	35.7	14.9	14.9	29.4	29.9	26.8	31.6	24.5	22.3	28.3
Ni	15.6	41.1	84.9	21.6	20.0	100	96.4	18.1	44.9	36.5	15.5	33.7
Cu	94.7	27.7	23.2	22.3	22.6	66.7	49.8	93.8	49.0	38.1	18.6	25.4
Zn	85.3	101.9	94.4	74.6	73.6	87.5	89.2	78.1	107	102	158	168
Ga	22.0	21.4	19.1	20.8	21.0	21.9	21.7	20.4	21.9	21.9	21.5	21.5
Rb	50.6	28.7	32.7	98.2	112	33.4	32.7	38.9	29.3	52.3	75.9	54.1
Sr	753	834	706	793	814	881	888	907	1140	920	714	896
Y	17.4	20.8	16.1	19.5	19.7	12.8	12.6	14.6	17.8	18.3	21.9	22.3
Zr	142	183	155.6	299.2	297	177	173	100	225	244	303	302
Nb	6.41	7.66	6.54	12.2	12.2	6.10	5.99	4.50	10.5	13.3	20.4	23.3
Cs	1.63	1.17	1.39	3.83	4.00	0.39	0.40	2.26	0.39	1.05	2.13	1.86
Ba	594	946	912	978	1025	860	871	589	772	779	862	1189
La	24.2	28.6	24.0	45.4	46.3	31.6	30.8	19.2	42.8	43.5	48.59	59.9
Ce	49.2	63.4	49.2	89.6	91.8	62.6	61.8	39.3	87.3	89.9	101	127
Pr	6.62	8.79	6.57	11.4	11.6	8.29	8.09	5.27	11.2	11.7	12.9	15.6
Nd	26.2	35.2	26.5	42.2	43.1	31.0	30.6	20.9	42.3	43.8	51.87	61.1
Sm	5.19	7.41	5.62	7.81	7.75	5.95	5.90	4.47	8.12	8.48	9.64	10.8
Eu	1.33	2.35	1.93	1.71	1.63	1.62	1.63	1.41	2.06	2.10	2.52	2.93
Gd	4.20	5.62	4.40	5.86	5.89	4.37	4.35	3.81	6.15	6.50	7.79	8.23
Tb	0.60	0.79	0.61	0.80	0.79	0.56	0.56	0.56	0.79	0.84	1.00	1.05
Dy	3.30	4.24	3.24	3.97	4.01	2.74	2.72	2.93	3.76	4.06	5.08	5.12
Ho	0.67	0.83	0.63	0.74	0.74	0.50	0.49	0.58	0.67	0.72	0.93	0.94
Er	1.79	2.17	1.67	1.87	1.89	1.29	1.30	1.52	1.68	1.81	2.38	2.28
Tm	0.27	0.31	0.24	0.28	0.27	0.18	0.18	0.23	0.23	0.24	0.31	0.31
Yb	1.76	1.98	1.51	1.68	1.69	1.18	1.13	1.36	1.36	1.48	1.85	1.78
Lu	0.27	0.30	0.23	0.26	0.26	0.17	0.16	0.21	0.19	0.22	0.27	0.26
Hf	3.92	4.60	3.79	7.82	7.78	4.73	4.67	2.73	5.65	6.09	8.14	7.40
Ta	0.41	0.34	0.32	0.78	0.78	0.32	0.31	0.25	0.58	0.81	1.41	1.45
Pb	11.9	5.48	5.32	21.0	19.9	13.6	11.9	11.9	13.8	14.4	12.9	14.2
Th	4.25	0.73	0.92	10.3	10.4	3.35	3.30	1.71	3.91	4.45	4.83	3.76
U	1.03	0.32	0.35	2.38	2.52	0.78	0.75	0.36	0.95	1.19	1.23	0.87
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.705 51	0.707 50	0.707 57	0.706 11	0.705 71	0.706 75	0.706 82	0.705 74	0.705 71	0.707 84	0.705 51	0.706 72
ε _{Nd} (<i>t</i>)	-1.3	-5.5	0.0	0.1	-1.3	-3.5	0.4	-1.0	-0.5	-4.2	-1.2	-6.7
<i>T</i> _{DM} (Ma)	1003	1340	650	836	947	1120	630	1060	910	1030	1000	1320
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	18.422	18.149	18.207	18.498	18.507	18.401	18.436	18.395	18.474	18.529	18.215	17.780
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15.497	15.489	15.501	15.495	15.489	15.496	15.534	15.518	15.516	15.539	15.499	15.450
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38.191	37.761	37.854	38.219	38.215	38.132	38.255	38.191	38.246	38.344	38.137	37.860
¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	0.282 74	0.282 60	0.282 59			0.282 67	0.282 67	0.282 71	0.282 76	0.282 75	0.282 79	0.282 58
ε _{Hf} (<i>t</i>)	0.86	-4.17	-4.58			-1.32	-1.20	-0.26	1.88	1.63	0.75	-4.55

模式年龄计算所用参数: 现代亏损地幔¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.213 6, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.513 15.

ε_{Hf}(*t*)=0.75~-4.55. 所有样品均表现出 ε_{Hf}(*t*) 与 ε_{Nd}(*t*) 的正相关关系, 并与地球物质阵列相似(图 6).

3.4 锆石 U-Pb 年代学

塔河地区火山岩中的锆石具有不规则的晶形, 同时也表现出不同的内部结构, 即既存在具有震荡

环带内部结构的锆石样品, 也存在不具环带结构的锆石样品. 锆石颗粒大小在 50~100 μm 左右. 在对锆石进行分析的 12 个测点中, 除了一个颗粒给出 907 Ma 的晚元古代年龄, 另一个颗粒给出 321 Ma 的晚古生代年龄外, 其余的颗粒都给出了较为均匀

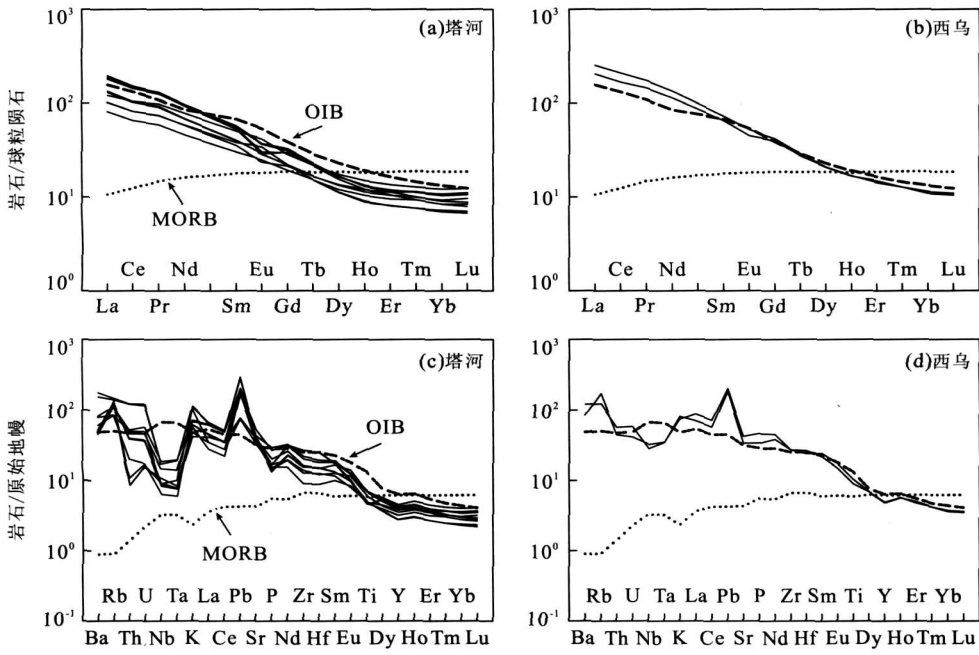


图 3 火山岩稀土元素球粒陨石标准化和微量元素原始地幔标准化图

Fig. 3 Chondrite normalized rare earth elements patterns and primitive mantle normalized trace elements diagrams of the volcanic rocks
球粒陨石标准值采用 Anders and Grevesse (1989), 原始地幔标准值采用 Sun and McDonough (1989)

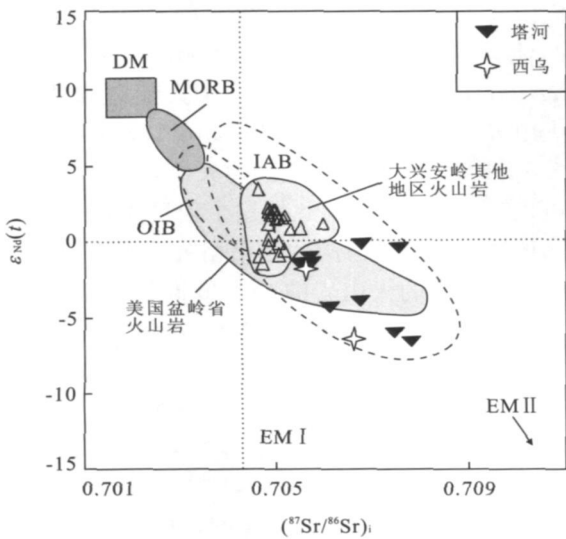


图 4 大兴安岭中生代火山岩 Sr-Nd 同位素相关图

Fig. 4 Correlation diagram between the Sr and Nd isotopes for the volcanic rocks

大兴安岭其他地区火山岩据 Zhang *et al.* (2008)

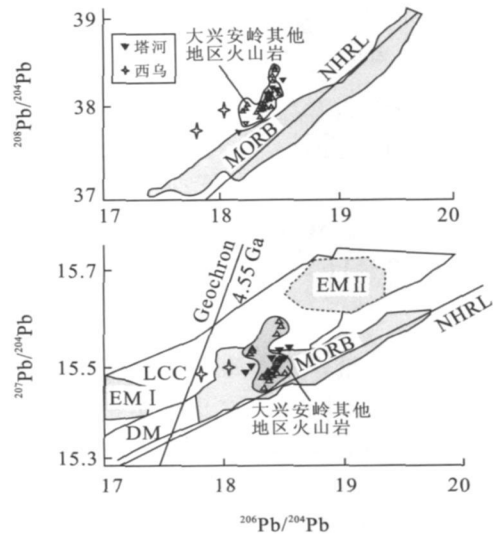


图 5 大兴安岭中生代火山岩 Pb 同位素相关图

Fig. 5 The Pb isotopes of the Mesozoic volcanic rocks in Great Xing'an range

大兴安岭其他地区火山岩据 Zhang *et al.* (2008)

且协和的早古生代年龄, 10 个颗粒的平均年龄为 485 ± 6 Ma (图 7). 在前期的研究中, 笔者曾对塔河火山岩的全岩基质进行了 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学测试, 其结果为 122.3 ± 0.6 Ma (Wang *et al.*, 2006), 据此笔者认为火山岩中的锆石均为火山喷发过程中的捕获晶.

4 讨论

4.1 分离结晶与陆壳混染

塔河火山岩和西乌火山岩具有较高的 SiO_2 , 全岩 $\text{Mg}^\#$ 值也远低于与地幔橄榄岩平衡的原始岩浆

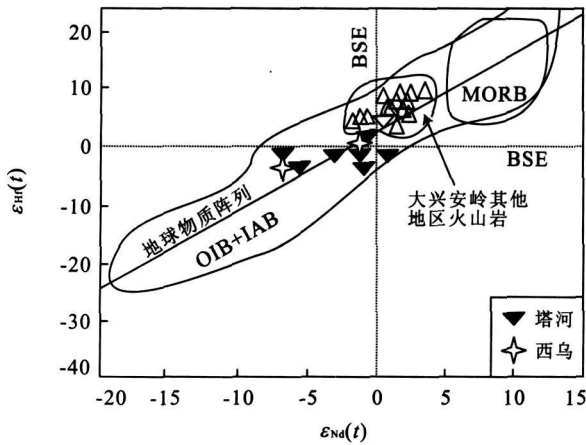


图 6 大兴安岭地区中生代火山岩的 Nd-Hf 同位素相关图
Fig. 6 Correlation diagram between the Nd and Hf isotopes for the Mesozoic volcanic rocks in Great Xing'an range
大兴安岭其他地区火山岩据 Zhang *et al.* (2008)

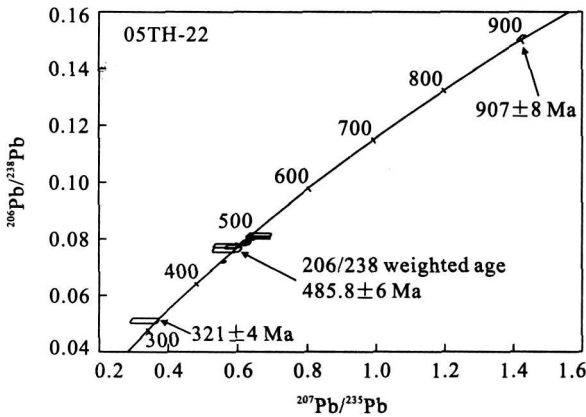


图 7 塔河火山岩中碎屑锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄
Fig. 7 SHRIMP U-Pb dating of detrital zircon from Tahe volcanic rocks

的 $Mg^\#$ 值, 此外相容元素如 Ni、Co 等的含量也较低, 说明这些火山岩是原始岩浆经分离结晶作用后形成的, 这一点在 La/Sm-La 相关图上表现较为明显. 在主量元素随 SiO_2 含量变化的相关图上, TFe_2O_3 、 MgO 随 SiO_2 的升高而降低, 指示了橄榄岩和斜方辉石的分离结晶作用, 而 CaO 的降低则说明了单斜辉石的分离结晶作用, Eu 异常的缺失说明斜长石对分离结晶过程的影响不大.

对于形成于大陆背景下的火山岩而言, 陆壳物质的混染是火山岩成因探讨中不可忽视的因素, 因为岩浆从深部上升至地表必然要穿过厚的大陆地壳. 火山岩中微量元素特征, 如轻稀土元素的富集以及微量元素 Nb、Ta 等元素的亏损特征, 除了地幔源区成因外, 还有可能是因岩浆上升过程中陆壳物质的混染所导致; 另外, 陆壳物质在火山岩岩浆源区的

混合, 称之为源区地壳混染, 同样也可以造成上述特征. 塔河火山岩中碎屑锆石的存在则是火山岩已受到一定程度陆壳物质混染的矿物学证据. 从强调源区组成特征与岩浆成因机制关系分析, 火山岩同位素组成与主、微量元素的关系, 如初始 Sr 或 Nd 同位素组成与代表岩浆演化的指数如 $Mg^\#$ 或 SiO_2 间的相关关系应是判断陆壳混染程度更为本质的一种参数. 然而本文样品数据点在 $Mg^\# - \epsilon_{Nd}(t)$ 和 $SiO_2 - \epsilon_{Nd}(t)$ 相关图上均不存在明显的相关关系(图 8), 这说明尽管在本区火山岩成因过程中存在陆壳混染作用, 但其对火山岩总体组成上的影响是有限的. 即从影响的权重角度分析, 所观察到的火山岩同位素地球化学特征, 基本上应反映其地幔源区组成的地球化学特征.

4.2 火山岩源区地球化学与兴蒙造山带物质组成特征

正如前文所述, 塔河和西乌火山岩均具有富集 LILE、LREE 而亏损 HFSE 的特征, 这与 MORB 和 OIB 型火山岩有显著区别, 因此软流圈的直接部分熔融不能形成塔河和西乌地区的火山岩. 上述地球化学特征却非常类似于活动大陆边缘以及岛弧环境的火山岩, 这些火山岩主要来源于受到俯冲板片释放的流体交代的地幔楔 (Briqueu *et al.*, 1984; Ringwood, 1990). 一般认为活动大陆边缘环境下的火山岩的 Ba/Nb 均大于 28 (Gill, 1981; Fitton *et al.*, 1988), 塔河和西乌地区的火山岩的 Ba/Nb 在 42 ~ 146, 远高于 28, 因此从这个角度来看, 塔河和西乌地区火山岩是与俯冲作用相关的火山岩. 然而现代岛弧环境的火山岩的 Sr 、 Nd 同位素都在一个较小的范围内变化, 如 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值在 0.703 ~ 0.704 间 (Hawkesworth *et al.*, 1993), 而塔河和西乌火山岩的同位素组成远远大于这个范围, 并且有明显的向 EM I 和 EM II 型富集地幔端元变化的趋势. 世界范围的研究工作表明, EM I 型地幔端元与古老的克拉通岩石圈有关, 即反映了古老的富集端元组分的影响, 古老的大陆岩石圈地幔在其漫长的地质历史演化进程中由于经历了地幔交代作用, 因而使其在同位素组成上表现为 EM I 特征 (Menzies, 1990), 也就是说塔河和西乌火山岩的地幔源区一方面继承了古老大陆下富集岩石圈地幔的特征, 另一方面叠加了俯冲的陆壳物质所释放流体交代的印记.

众所周知, 中亚造山带是地球上显生宙期间新生陆壳增生最显著的地区, 大量具有正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的花岗岩类的形成反映了地幔物质在其形成过程中的重要作用 (邵济安等, 2002; Jahn, 2004), 作为典型

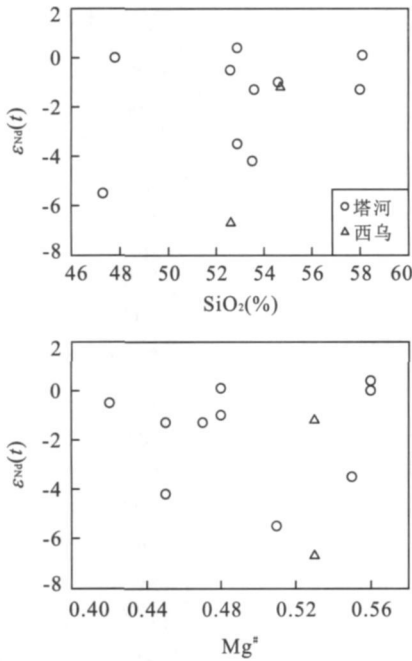


图 8 塔河和西乌火山岩的 $Mg^{\#}$ 、 SiO_2 与 $\epsilon_{Nd}(t)$ 的相关图
 Fig. 8 Correlation diagram between $Mg^{\#}$, SiO_2 and $\epsilon_{Nd}(t)$ for the Tahe and Xiwu volcanic rocks

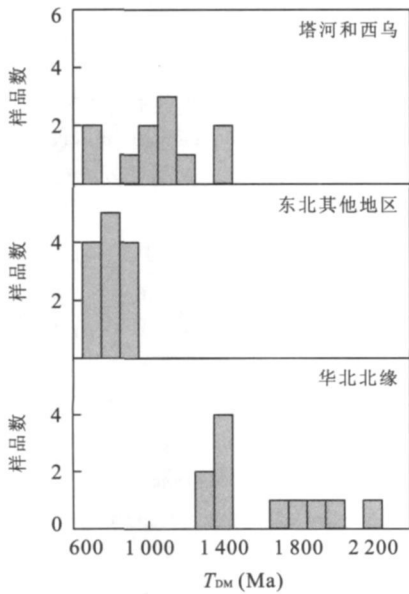


图 9 Nd 亏损地幔模式年龄直方图

Fig. 9 Histogram of T_{DM} for the volcanic rocks

东北其他地区据 Zhang *et al.* (2008), 华北北缘据周新华等(2001)

大部分地区中生代火山岩的源区。

相对大兴安岭大部分地区的中生代火山岩, 塔河和西乌火山岩的 EM 1 和 EM 2 特征以及较低的 Pb 同位素比值, 非常类似于华北克拉通北缘的中生代火山岩. 已有研究表明华北北缘的中生代火山岩的 EM 1 特征和较大的 Nd 亏损地幔模式年龄表明了古老克拉通岩石圈组分的贡献(图 9)(周新华等, 2001). 通常认为古老大陆块体的地壳和岩石圈地幔在大陆演化过程中保持耦合, 也就是说古老大陆块体下的岩石圈地幔的高浮力以及高粘滞度使得其在水平流动中不会穿越块体的边界, 不同块体岩石圈地幔的边界能够保持相当长的时间(Irvine *et al.*, 2001; Carlson *et al.*, 2005). 因此, 根据塔河和西乌火山岩的同位素组成特征, 笔者推断塔河和西乌地区有可能存在古老的岩石圈地幔块体。

古亚洲洋和兴蒙造山带的演化历史等基础地质问题一直是国内外地质学界关注的重要问题, 近些年来越来越多的学者认为夹持在西伯利亚板块和华北板块之间的兴蒙造山带内有众多的具有前寒武纪结晶基底的古老微地块组成(邵济安和张履桥, 1990; 邵济安, 1991)。

在塔河火山岩分布区的西南部是额尔古纳地块, 传统上认为额尔古纳地块基底是太古代和早元古代片麻岩和早、中元古代角闪质侵入岩(黑龙江省地质矿产局, 1993), 近年来的研究则表明组成额尔古纳地块基底的兴华渡口群绿岩的年龄为中元古代和晚中元古代(孙广瑞等, 2002; 武广等, 2005), 此外广泛分布的早古生代后碰撞花岗岩也是额尔古纳地块的重要特征(葛文春等, 2005; 武广等, 2005). 塔河火山岩中碎屑锆石的晚元古代和早古生代年龄以及元古代 Nd 同位素模式年龄与额尔古纳地块是一致的, 据此可以认为塔河地区火山岩下的基底构造具有额尔古纳地块属性。

西乌火山岩地区的西南部为锡林浩特古地体, 该地体的主要地层艾力格庙群的年龄为 950 ~ 1 060 Ma, 证明其为一晚元古代地体(邵济安, 1991). 西乌地区火山岩的低放射成因铅同位素以及晚元古代 Nd 同位素模式年龄则暗示了该地区深部可能为锡林浩特地体的组成部分。

4.3 火山岩成因的构造背景

对大兴安岭晚中生代火山岩形成的构造背景和成因模式自 20 世纪 80 年代以来一直存在广泛争论, 如地幔柱成因(林强等, 1998; 葛文春等, 1999), 碰撞后的弥散伸展(Fan *et al.*, 2003; Meng,

的增生型造山带, 大量岛弧物质则是该区中生代火山岩形成的主要源区, 这一点充分反映在大兴安岭大部分地区火山岩所表现出的类似原始地幔和略亏损的同位素特征以及较小的 Nd 同位素模式年龄上(图 9), 即古生代时期所形成的各类新生岛弧物质, 在增生造山过程中进入岩石圈地幔并成为大兴安岭

2003), 与古太平洋俯冲有关的活动大陆边缘(赵国龙等, 1989; 赵越等, 1994) 等。

早中生代太平洋地区存在 Izanagi-kula、Farallon 和 Phoenix 3 个板块, 在太平洋扩张中, 各个板块的存在时间和运动方向不断改变, 而对亚洲大陆东部影响最大的是 Izanagi-kula 板块。在侏罗纪至早白垩世 Izanagi-kula 板块的俯冲方向为北和北北东(Maruyama and Send, 1986; Kimura *et al.*, 1990), 直到晚白垩世才开始与东亚大陆正向俯冲(Engelbreton *et al.*, 1985), 因此在本地区不大可能形成大范围的弧后伸展环境。此外蒙古国中部和东部存在大量与中国东北境内具时代及成因联系的晚中生代火山岩, 也因距离大陆边缘过于遥远而不大可能与古太平洋的俯冲产生直接物质组成贡献上的联系(Yarmolyuk and Kovalenko, 2001; 英基丰等, 2008)。

考虑到东北地区晚中生代火山岩与美国西部盆岭省新生代钙碱性火山岩的相似性, 这些火山岩被认为是岩石圈伸展和减薄过程中富集的岩石圈地幔减压部分熔融形成的(Zhang *et al.*, 2008)。因此笔者倾向于大兴安岭地区火山岩的形成具有与之相似的构造背景。随着古亚洲洋的闭合, 夹持在华北板块和西伯利亚板块间的微古地体以及与消减碰撞有关的岩浆弧、混杂岩、增生楔等岛弧物质的拼合形成兴蒙造山带。在上述过程中俯冲板片释放熔、流体交代古地体的岩石圈地幔, 并成为塔河、西乌等地区火山岩的源区, 而增生楔中的岛弧等新生物物质则成为了大兴安岭其他大部分地区火山岩的源区。随着蒙古—鄂霍次克海的闭合以及晚中生代以来受该时段全球地幔深部事件的影响, 在东北地区产生局部地幔上涌及在岩石圈浅部形成伸展环境(邵济安和唐克东, 1995; 邵济安等, 1999), 从而引发了包括本区火山作用在内的白垩纪大范围强烈岩浆活动。

5 结论

分布在大兴安岭北部和中部的塔河、西乌地区晚中生代火山岩具有富集轻稀土元素、大离子亲石元素和亏损高场强元素的地球化学特征, 表明其受到了俯冲板片释放的熔、流体交代作用, 同时其 EM I 和 EM II 型的富集地幔端元同位素特征和较大的 Nd 同位素模式年龄又表明其源区继承了古老地块的富集组分。火山岩中碎屑锆石显示了晚元古代和

早古生代的年龄记录, 上述特征暗示在塔河和西乌火山岩源区组成中均存在古老块体贡献, 其中塔河火山岩可能发育在额尔古纳地块之上, 而西乌火山岩则发育在锡林浩特地块之上。大兴安岭晚中生代火山岩是岩石圈伸展背景下盆岭构造格局的产物。

References

- Anders, E., Grevesse, N., 1989. Abundances of the elements; Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 197–214.
- Briqueu, L., Bougault, H., Joron, J. L., 1984. Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones; Petrogenetic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 68(2): 297–308.
- Carlson, R. W., Pearson, D. G., James, D. E., 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Reviews of Geophysics*, 43(RG1001): doi: 10.1029/2004RG000156.
- Engelbreton, D. C., Cox, A., Gordon, R. G., 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. *Geological Society of America Special Paper*, 206: 1–59.
- Fan, W. M., Guo, F., Wang, Y. J., et al., 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121: 115–135.
- Fitton, J. G., James, D., Kempton, P. D., et al., 1988. The role of lithospheric mantle in the generation of Late Cenozoic basic magmas in the western United States. *Journal of Petrology, Special Volume (Special Lithosphere Issue)*: 331–349.
- Ge, W. C., Lin, Q., Sun, D. Y., et al., 1999. Geochemical characteristics of the Mesozoic basalts in Da Hinggan Ling: Evidence of the mantle-crust interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 397–407 (in Chinese with English abstract).
- Ge, W. C., Wu, F. Y., Zhou, C. Y., et al., 2005. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of the Da Hinggan range. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2097–2105.
- Gill, J. B., 1981. *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer-Verlag, New York, 390.
- Hawkesworth, C. J., Gallagher, K., Hergt, J. M., et al., 1993. Mantle and slab contributions in ARC magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21

- (1): 175—204.
- Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resource, 1993. Regional geology of Heilongjiang Province. Geological Publishing House, Beijing, 734 (in Chinese).
- Inner Mongolia Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991. Regional geology of Nei Mongol autonomous region. Geological Publishing House, Beijing, 725 (in Chinese).
- Irvine, G. J., Pearson, D. G., Carlson, R. W., 2001. Lithospheric mantle evolution of the Kaapvaal craton: A Re-Os isotope study of peridotite xenoliths from Lesotho kimberlites. *Geophysical Research Letters*, 28(13): 2505—2508.
- Jahn, B. M., 2004. The Central Asian orogenic belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. *Geological Society, London, Special Publications*, 226(1): 73—100.
- Jahn, B., Wu, F., Chen, B., 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82—92.
- Kimura, G., Takahashi, M., Kono, M., 1990. Mesozoic collision-extrusion tectonics in eastern Asia. *Tectonophysics*, 181(1—4): 15—23.
- Li, X. H., Qi, C. S., Liu, Y., et al., 2005. Rapid separation of Hf from rock samples for isotope analysis by MC-ICPMS: A modified single-column extraction chromatography method. *Geochimica*, 34(2): 109—114 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Q., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 1998. Tectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in northeastern China. *Scientia Geologica Sinica*, 33(2): 129—138 (in Chinese with English abstract).
- Maruyama, S., Send, T., 1986. Orogeny and relative plate motions; Example of the Japanese Islands. *Tectonophysics*, 127(3—4): 305—329.
- Meng, Q. R., 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369(3—4): 155—174.
- Menzies, M. A., 1990. Continental mantle. Clarendon Press, Oxford, 98.
- Ringwood, A. E., 1990. Slab-mantle interactions: 3. Petrogenesis of intraplate magmas and structure of the upper mantle. *Chemical Geology*, 82: 187—207.
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299—307.
- Shao, J. A., 1991. Crust evolution in the middle part of the northern margin of Sino-Korean plate. Peking University Press, Beijing, 136 (in Chinese).
- Shao, J. A., Hong, D. W., Zhang, L. Q., 2002. Genesis of Sr-Nd isotopic characteristics of igneous rocks in Inner Mongolia. *Regional Geology of China*, 21(12): 817—822 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Mou, B. L., He, G. Q., 1997. Geological processes during the superposition of Paleo-Asian Ocean domain and Paleo-Pacific Ocean domain in the north margin of North China. *Science in China (Ser. D)*, 27(5): 390—394 (in Chinese).
- Shao, J. A., Tang, K. D., 1995. Terranes in Northeast China and evolution of Northeast Asia continental margin. Seismological Press, Beijing, 185 (in Chinese).
- Shao, J. A., Zhang, L. Q., 1990. Paleo terranes in the Xingmeng orogeny. In: Subcommission of Tectonics, Geological Society of China, ed., International symposium on tectonic evolution of continental lithosphere: Orogeny, basin and Circum-Pacific tectonics. Geological Publishing House, Beijing, 16—21 (in Chinese).
- Shao, J. A., Zhang, L. Q., Mou, B. L., 1999. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan Mts. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 339—346 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Zhang, L. Q., Mou, B. L., et al., 2007. The uplift of Great Xinggan range and its geodynamic settings. Geological Publishing House, Beijing, 250 (in Chinese).
- Sun, G. R., Li, Y. C., Zhang, Y., 2002. The basement tectonics of Ergun massif. *Geology and Resources*, 11(3): 129—139 (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. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., Magmatism in the oceanic basalts. Geological Society Special Publication, 313—345.
- Wang, F., Zhou, X. H., Zhang, L. C., et al., 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(1—2): 179—198.
- Williams, I. S., 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben, M. A., Shanks, W. C. P., Ridley, W. I., eds., Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Reviews in Economic Geology. Society of Economic Geologists, 1—35.
- Wu, G., Sun, F. Y., Zhao, C. S., et al., 2005. The discovery and geological significance of Early Paleozoic post collisional granites in the north margin of Ergun block. *Chinese Science Bulletin*, 50(20): 2278—2288 (in Chinese).
- Yarmolyuk, V. V., Kovalenko, V. I., 2001. The Mesozoic-

- Cainozoic of Mongolia. In: Dergunov, A. B., ed., *Tectonics, magmatism, and metallogeny of Mongolia*. Taylor & Francis Group, London, 203–244.
- Ying, J. F., Zhou, X. H., Zhang, L. C., et al., 2008. Geochronology and geochemistry of Late Mesozoic volcanic rocks in northern Great Xinggan range and its tectonic implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27 (Suppl.): 66–67 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. F., Quan, H., Wu, G., et al., 2000. Tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Northeast China. *Journal of Precious Metallic Geology*, 9(1): 33–38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Zhou, X. H., Ying, J. F., et al., 2008. Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xinggan range, NE China: Implications for their origin and mantle source characteristics. *Chemical Geology*, 256(1–2): 12–23.
- Zhao, G. L., Yang, G. L., Fu, J. Y., 1989. Mesozoic volcanic rocks in the central-southern Da Hinggan Ling range. Beijing Press of Science and Technology, Beijing, 260 (in Chinese).
- Zhao, Y., Yang, Z. Y., Ma, X. H., 1994. Geotectonic transition from Paleo-Asian system and Paleo-Tethyan system to Paleo-Pacific active continental margin in eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105–119 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Zhang, G. H., Yang, J. H., et al., 2001. S-Nd-Pb isotope mapping of late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China craton and implications to geodynamic processes. *Geochimica*, 30(1): 10–23 (in Chinese with English abstract).
- 李献华, 祁昌实, 刘颖, 等, 2005. 岩石样品快速 Hf 分离与 MC-ICPMS 同位素分析: 一个改进的单柱提取色谱方法. *地球化学*, 34(2): 109–114.
- 林强, 葛文春, 孙德有, 1998. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义. *地质科学*, 33(2): 129–138.
- 内蒙古地质矿产局, 1991. 内蒙古区域地质志. 北京: 地质出版社, 725.
- 邵济安, 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化. 北京: 北京大学出版社, 136.
- 邵济安, 洪大卫, 张履桥, 2002. 内蒙古火成岩 Sr-Nd 同位素特征及成因. *地质通报*, 21(12): 817–822.
- 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)*, 27(5): 390–394.
- 邵济安, 唐克东, 1995. 中国东北地体与东北亚大陆边缘演化. 北京: 地震出版社, 185.
- 邵济安, 张履桥, 1990. 兴蒙造山带中的古地体. 国际大陆岩石圈构造演化与动力学讨论会和第三届全国构造会议论文集: 造山带、盆地、环太平洋构造. 北京: 地质出版社, 16–21.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 1999. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用. *地学前缘*, 6(4): 339–346.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 等, 2007. 大兴安岭的隆起与地球动力学背景. 北京: 地质出版社, 250.
- 孙广瑞, 李仰春, 张昱, 2002. 额尔古纳地块基底地质构造. *地质与资源*, 11(3): 129–139.
- 武广, 孙丰月, 赵财胜, 等, 2005. 额尔古纳地块北缘早古生代后碰撞花岗岩的发现及其地质意义. *科学通报*, 50(20): 2278–2288.
- 英基丰, 周新华, 张连昌, 等, 2008. 北大兴安岭晚中生代火山岩的年代学和地球化学研究及其构造意义. *矿物岩石地球化学通报*, 27(增刊): 66–67.
- 张炯飞, 权恒, 武广, 等, 2000. 东北地区中生代火山岩形成的构造环境. *贵金属地质*, 9(1): 33–38.
- 赵国龙, 杨桂林, 傅嘉友, 1989. 大兴安岭中南部中生代火山岩. 北京: 北京科学技术出版社, 260.
- 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.
- 周新华, 张国辉, 杨进辉, 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义. *地球化学*, 30: 10–23.

附中文参考文献

- 葛文春, 林强, 孙德有, 等, 1999. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征: 壳幔相互作用的证据. *岩石学报*, 15(3): 396–407.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等, 2005. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约. *科学通报*, 50(12): 1239–1247.
- 黑龙江省地质矿产局, 1993. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 734.