

doi: 10.12029/gc20180303

张超, 吴新伟, 张渝金, 郭威, 权京玉. 2018. 龙江盆地龙江组火山岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. 中国地质, 45(3): 456-468.

Zhang Chao, Wu Xinwei, Zhang Yujin, Guo Wei, Quan Jingyu. 2018. Geochemistry and zircon LA-ICP-MS U-Pb age of volcanic rocks in Longjiang Formation of Longjiang basin[J]. Geology in China, 45(3): 456-468(in Chinese with English abstract).

龙江盆地龙江组火山岩的地球化学特征 及锆石 U-Pb 年龄

张超^{1,2} 吴新伟^{1,2} 张渝金^{1,2} 郭威^{1,2} 权京玉³

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

3. 东北煤田地质局沈阳测试研究中心, 沈阳 110016)

摘要:在龙江盆地地区, 龙江组由中—中酸性火山岩、火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩组成。岩石地球化学显示为钙碱性岛弧火山岩系列, 火山熔岩主体具有高 SiO₂、Na₂O、Al₂O₃、Sr, 低 MgO、Y、Yb, 和高场强元素 Ta、Nb 明显亏损等特征, 与典型埃达克岩地球化学特征吻合, Sr 和 Sr/Y 值显示为俯冲型埃达克岩。地球化学相关图解等表明岩浆在早期演化过程阶段可能发生了陆壳混染, 经历了斜长石、辉石、铁钛氧化物和磷灰石的分离结晶作用。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄为 (125.9±1.5) Ma, 与在该组中发现的化石资料完全一致, 代表了火山岩的形成年龄。从东北地区火山岩的定年结果及其空间展布来看, 龙江组火山岩的形成既与环太平洋构造体系有关, 又与蒙古—鄂霍茨克构造带相联系。

关键词:龙江盆地; 龙江组; 埃达克岩; 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

中图分类号: P597.3; P588.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)03-0456-13

Geochemistry and zircon LA-ICP-MS U-Pb age of volcanic rocks in Longjiang Formation of Longjiang basin

ZHANG Chao^{1,2}, WU Xinwei^{1,2}, ZHANG Yujin^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, QUAN Jingyu³

(1. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Shenyang 110034, Liaoning, China*; 2. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China*; 3. *Shenyang Tests Research Center, Northeast China Coal Field Geology Bureau, Shenyang 110016, Liaoning, China*)

Abstract: The Longjiang Formation in Longjiang basin is composed of intermediate-acidic volcanic rocks, pyroclastic rocks and tuffaceous sedimentary rocks. The petrochemical compositions of most volcanic rocks belong to the calc-alkaline island arc series. These volcanic rocks are characterized by high SiO₂, Na₂O, Al₂O₃ and Sr content, low MgO, Y and Yb content and clear depletion of high field strength elements (Ta, Nb), similar to the characteristics of the classical adakite. These Sr values and Sr/Y ratios are also similar or close to features of most subduction-type adakites. Geochemical characteristics indicate that the magma experienced crust contamination and fractional crystallization of clinopyroxene, plagioclase, Ti-Fe-oxides and apatite during the early evolution

收稿日期: 2016-06-22; 改回日期: 2016-08-14

基金项目: 中国地质调查局项目 (12120113053900、DD20160048-04、DD20160343-08、DD20160343-09) 资助。

作者简介: 张超, 男, 1986 年生, 博士生, 工程师, 从事区域地质调查工作; E-mail: conggray@163.com。

process. The zircon LA-ICP-MS U-Pb age is 125.9 ± 1.5 Ma, consistent with the fossils data, representing volcanics formation age. Combined with the spatial variation of ages of the Mesozoic volcanic rocks in Northeast China, the authors hold that the formation of the volcanic rocks was related to the Circum-Pacific tectonic system as well as the Mongolia-Okhotsk structural belt.

Key words: Longjiang basin; Longjiang Formation; adakite; zircon LA-ICP-MS U-Pb dating

About the first author: ZHANG Chao, male, born in 1986, engineer, doctor, engages in regional geological survey; E-mail: conggray@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 12120113053900, DD20160048-04, DD20160343-08, DD20160343-09).

1 引言

位于兴蒙造山带东段的大兴安岭及其邻区,古生代期间受古亚洲洋构造体系的影响(Wu et al., 2002)。晚古生代一早中生代经历了古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋构造体系的叠加与改造(Xu et al., 2009)。晚中生代时期,该区作为东亚大陆边缘中生代巨型火山岩带的重要组成部分,火山活动及盆地构造发育,不同区域的火山岩岩石类型复杂多样(李思田等, 1987)。关于火山岩形成的构造环境问题存在争议,先后有地幔柱成因(葛文春等, 2000a, 2000b; 林强等, 2003)、板内成因(邵济安等, 1994)、蒙古—鄂霍茨克洋俯冲成因(Fan et al., 2003; Wang et al., 2006; 张玉涛等, 2007; ; Ying et al., 2010)及古太平洋俯冲成因(赵国龙等, 1989)等多种观点。根据我们的分析,前人所提出的观点都是基于不同地区(点)的研究获得的认识,分歧主要是对各火山盆地的研究工作不平衡,以往的研究主要集中在大兴安岭的中西部地区,而对松辽外围西部盆地(龙江盆地、突泉盆地以及扎鲁特盆地等)火山岩的研究较为薄弱。针对上述问题,本文对大兴安岭北段龙江盆地内龙江组火山岩进行了岩石地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究,讨论火山岩的成因及形成的构造环境,为晚中生代火山岩的构造环境提供依据。

2 地质背景与样品描述

龙江盆地位于黑龙江省龙江县境内,内蒙古自治区东部,其所在区域为古生代陆壳侧向增生区,亦为兴安地块和松嫩地块的缝合区(图 1a)。在地质特征上龙江盆地是由多个发育在海西褶皱基底上,以早白垩世为主体的一群中小规模的断陷湖盆组合而成,形成条件相近的断陷具有各自独立的沉

积体系。

20世纪50—60年代的1:20万区域地质调查^①奠定了龙江地区的地层系统,近几年开展的大规模地质矿产工作又取得了大量新的地质资料^②,到目前为止的最新资料显示,区内出露的地质体主要包括晚古生代大石寨组、哲斯组、花岗岩岩体及晚中生代火山岩。其中大石寨组为一套经过低级变质作用改造的火山—沉积岩系(吕志成等, 2002),其形成环境为浅海并伴随着较为强烈的火山活动;哲斯组为一套浅海相碳酸盐岩—碎屑岩组合沉积,含有丰富的海相动物化石,为浅海相沉积,并伴随着相对微弱的火山活动。花岗岩主要由花岗闪长岩和二长花岗岩组成,为一套高钾钙碱性系列岩石。盆地内出露的晚中生代地层自下而上为下白垩统龙江组、光华组和甘河组,是大兴安岭北段火山盆地组成的基本类型之一。

笔者沿龙江县光华村和邵家窝棚地区的龙江组火山岩剖面进行了系统的地质观察,该套火山岩产状平缓,倾向北东,倾角 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$,剖面岩性为偏中性火山岩,以安山岩、粗安岩、安山质凝灰岩、火山角砾岩、凝灰质细—粉砂岩夹少量英安岩、英安质凝灰岩为主,与下伏二叠纪地层和侵入岩呈角度不整合接触。并在龙江组的沉积火山碎屑岩中采集到 *Bairdestheria* sp., *Ephemeropsis trisetalis*, *Coptoclava longipoda* 等化石,其时代为早白垩世。在上覆地层光华组中采集到大量热河生物群化石:包括 *Eosestheria opima*, *Eosestheria (Dongbeiestheria) guanghuaensis*, *Eosestheria (Dong beiestheria) sp.*, *Eosestheria (Clithrograpta) cf. Gujialingensis*, *Eosestheria (Clithrograpta) sp.*, *Eosestheria (Plocestheria) chifengensis*, *Eosestheria (Plocestheria) damiaoensis*, *Eosestheria (Plocestheria) cf. zhangjiagouensis*, *Asioestheria*

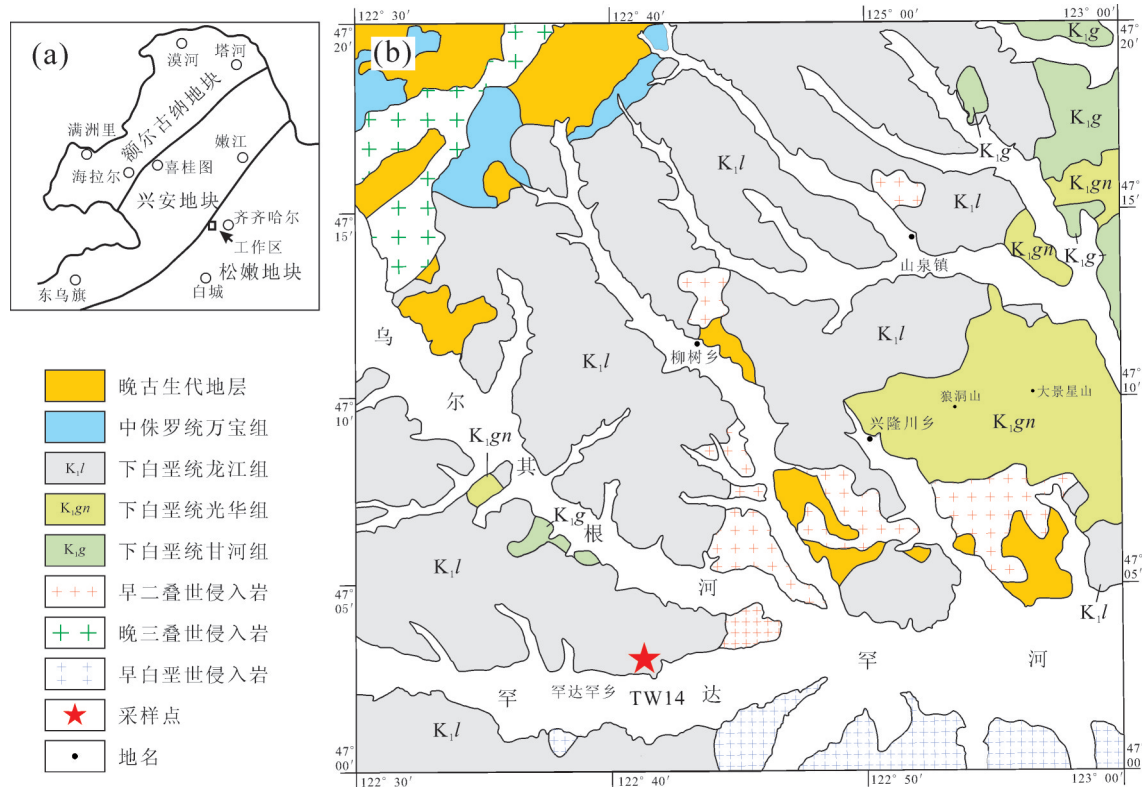


图1 大兴安岭北部构造单元划分图(a,据叶茂等,1994)和龙江盆地地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic setting of the Northern Da Hinggan Mountains (after Ye Mao et al., 1994) and simplified geological map of Longjiang basin (b)

hamakengensis, *Yanjiestheria* sp., *Eosestheria* (*Filigrapta*) sp. 等叶肢介化石; *Ephemeropsis* *trisetalis*, *Aeschnidium* sp., *Coptoclava longipoda*, *Karataviell chinensis* 等昆虫化石及 *Liaoningogriphus quadripartitus*, *Lycoptera davidi* 等鱼虾化石(张渝金等, 2016; ③)。从生物地层对比的角度看, 光华组与辽西地区的义县组下部基本上可以对比, 时代置于早白垩世阿普特期, 显然龙江组的时代应更早些。

从火山岩剖面看, 主要表现为沉积地层式的单斜构造, 各喷发韵律火山岩层厚度变化较大, 火山喷发强度由弱到强。受火山构造盆地演化阶段控制, 多以喷溢相和火山碎屑流相岩石为主, 喷发沉积相、空落相岩石较少。喷发沉积相岩石中发现中期热河生物群(丁秋红等, 2014)(如柳树屯附近)的产出, 与同期不同喷发期次的火山作用有关, 含生物碎屑火山沉积物层的出现也代表了一次火山喷发旋回。

本文所研究的火山熔岩样品采自龙江组上部层

位, 具体采样位置如图1b所示, 其岩相学特征如下:

安山岩的新鲜岩石呈青灰色, 块状构造, 斑状结构, 可见多斑, 聚斑; 斑晶占20%~25%, 由自形板状、溶蚀状斜长石和柱状辉石组成, 辉石部分发生绿泥石化; 基质为交织结构, 占75%~80%, 由针板状斜长石和柱状绿泥石化角闪石组成(图2a)。

粗安岩的新鲜岩石呈灰黑色, 块状构造, 斑状结构; 斑晶占15%~20%, 由板状斜长石、碱性长石和少量暗化的角闪石组成, 部分长石发生绿帘石化、葡萄石化; 基质为交织结构, 占80%~85%, 斜长石和正长石微晶微定向, 正长石和少量的石英充填于斜长石间隙中(图2b)。

英安岩的新鲜岩石呈灰紫色, 块状构造、流动构造, 斑状结构; 斑晶占5%~10%, 由自形板状斜长石和暗化角闪石组成; 基质为霏细交织结构, 占90%~95%, 由定向的板条状的斜长石微晶和脱玻化玻璃质组成。

安山质和英安质火山凝灰岩、角砾凝灰岩, 具火山凝灰结构和角砾凝灰结构。火山碎屑物有岩

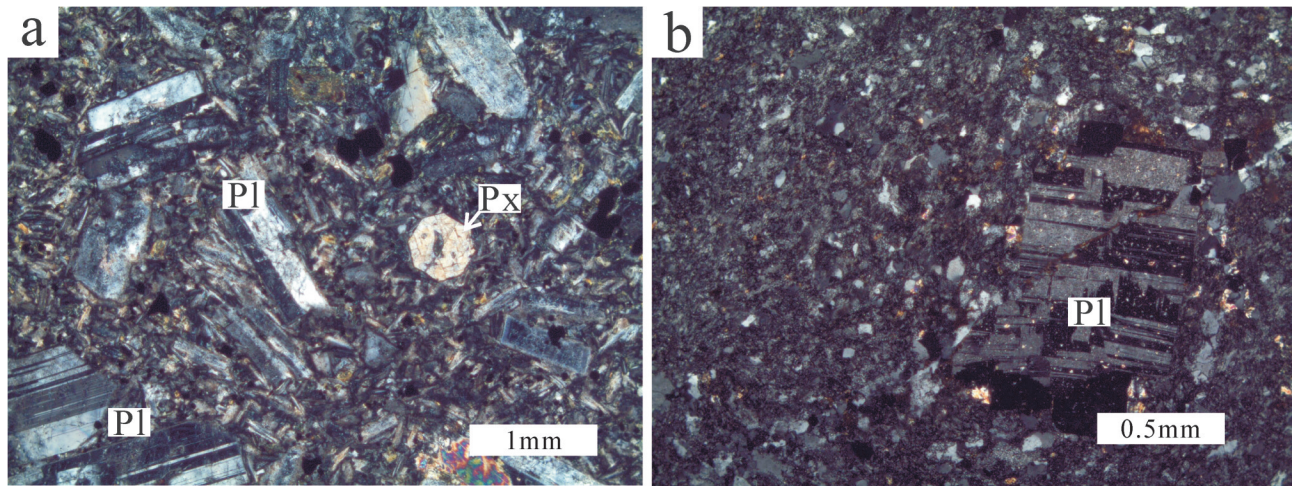


图2 龙江组火山岩镜下显微照片

a—青灰色安山岩;b—灰紫色粗安岩;Pl—斜长石;Px—辉石

Fig.2 Microphotographs of volcanic rocks from the Longjiang Formation
a—Green gray andesite;b—Grayish purple tralhyandesite;Pl—Plagioclase;Px—Pyroxene

屑、晶屑和玻屑,还有少量粒度更细小的火山尘。火山角砾的成分为安山质和英安质火山岩岩屑,多呈斑状结构,其岩相学特征与前述安山岩和英安岩基本一致,晶屑多为次棱角状、半自形板柱状等。玻屑呈弧面形、弧面棱角形等。矿物成分有斜长石、石英、钾长石、角闪石和普通辉石等。后期蚀变有绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化和黏土化等。

3 锆石 U-Pb 年代学

3.1 样品采集及测试技术

样品破碎和锆石分选由河北省廊坊市科大矿物分选技术股份有限公司完成。锆石阴极发光(CL)照相在中国地质科学院北京离子探针中心获取。锆石激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)U-Pb同位素分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。试验中采用高纯He作为剥蚀物质载气,用标准参考物质NIST SRM610进行仪器最佳化,样品测定时用哈佛大学国际标准锆石91500作为外部校正。本次实验所采用的激光斑束直径为30 μm,激光脉冲为10 Hz,能量密度约为16~17 J/cm²。普通铅校正采用Anderson(2002)的方法,详细实验测试过程可参见袁洪林等(2003)。样品的年龄计算采用国际标准程序Isoplot(ver3.0)。锆石分析结果见表1,锆石阴极发光图像见图3,年龄谐和图见图4。

3.2 测试结果

安山岩样品(TW14)采自罕达罕乡东约3 km处的采石场(47°02'38"N;122°41'06"E),样品中大多数锆石晶体呈短柱状,部分长柱状,晶轴比1:1~1:3,柱面和锥面比较发育,韵律环带发育,Th/U比值介于0.35~1.2,反映了岩浆成因锆石的特点(Koschek, 1993)。对其进行了30个测试分析,其中5个测点由于Pb丢失而偏离谐和曲线,无年龄意义。其余25个测试数据分布在谐和线及其附近,23个数据集集中分布,²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(125.9±1.5)Ma($n=23$, MSWD=0.59),为龙江组火山岩形成的年龄,该年龄与前述的化石资料完全一致。还有2个测点²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄分别为234 Ma和245 Ma,可能为捕获的早期岩浆锆石。李永飞等(2013)对龙江盆地中的中基性火山岩进行激光重熔⁴⁰Ar/³⁹Ar测试,获得的等时线年龄分别为(125.1±1.5)Ma、(123.1±1.1)Ma。

4 岩石地球化学特征

4.1 测试技术

本文对采集于罕达罕乡—山泉镇地区的10件龙江组火山岩样品进行了主量、微量元素测试,测试结果见表2。样品的测试在国土资源部东北矿产资源监督检测中心完成,整个过程均在无污染设备中进行。主量元素采用X射线荧光光谱法(XRF),微量元素的分析则采用电感耦合等离子质谱法

表 1 龙江盆地安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果
Table 1 Zircon U-Pb isotope LA-ICP-MS analyses of the volcanic rocks of Longjiang Formation

样号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		Pb^{207}/Pb^{206}	1σ	Pb^{207}/U^{235}	1σ	Pb^{206}/U^{238}	1σ	Pb^{206}/U^{238}	1σ				
TW014-3	59	95	0.62	0.0498	0.0028	0.1358	0.0082	0.0202	0.0006	183	128	129	7	129	4
TW014-4	312	505	0.62	0.0506	0.0012	0.1358	0.0034	0.0201	0.0006	221	52	129	3	128	3
TW014-5	68	109	0.63	0.0495	0.0016	0.1322	0.0046	0.0196	0.0006	170	75	126	4	125	3
TW014-6	229	280	0.82	0.0500	0.0017	0.1338	0.0050	0.0195	0.0006	193	79	128	4	125	3
TW014-8	85	144	0.59	0.0503	0.0028	0.1329	0.0079	0.0195	0.0006	207	125	127	7	125	4
TW014-9	90	96	0.93	0.0504	0.0028	0.1372	0.0080	0.0203	0.0006	215	122	131	7	130	4
TW014-10	354	476	0.74	0.0547	0.0017	0.1421	0.0048	0.0195	0.0006	400	68	135	4	125	3
TW014-11	138	163	0.85	0.0523	0.0016	0.1427	0.0047	0.0200	0.0006	297	69	136	4	128	4
TW014-12	65	84	0.78	0.0511	0.0026	0.1405	0.0076	0.0206	0.0006	244	113	134	7	131	4
TW014-13	259	229	1.13	0.0485	0.0017	0.1326	0.0049	0.0198	0.0006	124	79	127	4	127	4
TW014-14	83	122	0.68	0.0481	0.0015	0.1292	0.0042	0.0195	0.0005	105	70	123	4	124	3
TW014-15	80	138	0.57	0.0476	0.0019	0.1349	0.0057	0.0202	0.0006	81	91	129	5	129	4
TW014-16	123	164	0.75	0.0499	0.0019	0.1357	0.0056	0.0204	0.0006	188	88	129	5	130	4
TW014-17	106	114	0.92	0.0531	0.0016	0.1468	0.0047	0.0196	0.0005	332	66	139	4	125	3
TW014-18	657	676	0.97	0.0565	0.0012	0.1533	0.0036	0.0203	0.0006	471	47	145	3	130	3
TW014-20	70	198	0.35	0.0514	0.0020	0.1355	0.0056	0.0198	0.0006	258	86	129	5	127	4
TW014-21	78	92	0.85	0.0477	0.0016	0.1297	0.0047	0.0197	0.0006	83	80	124	4	126	3
TW014-22	151	186	0.81	0.0499	0.0019	0.1347	0.0054	0.0196	0.0006	189	85	128	5	125	4
TW014-23	342	430	0.8	0.0520	0.0012	0.1385	0.0034	0.0191	0.0005	286	52	132	3	122	3
TW014-24	624	518	1.2	0.0475	0.0017	0.1279	0.0050	0.0191	0.0005	73	85	122	5	122	3
TW014-25	87	108	0.81	0.0506	0.0023	0.1333	0.0063	0.0193	0.0006	223	100	127	6	123	4
TW014-26	181	235	0.77	0.0482	0.0018	0.1275	0.0050	0.0190	0.0005	107	84	122	4	122	3
TW014-27	84	163	2	0.05167	0.00159	0.2790	0.0098	0.0388	0.0011	271	69	250	8	245	7
TW014-28	23	242	11	0.05105	0.00125	0.2599	0.0071	0.0370	0.0010	243	56	235	6	234	6
TW014-30	167	236	0.71	0.0564	0.0015	0.1537	0.0044	0.0196	0.0005	465	59	145	4	125	3

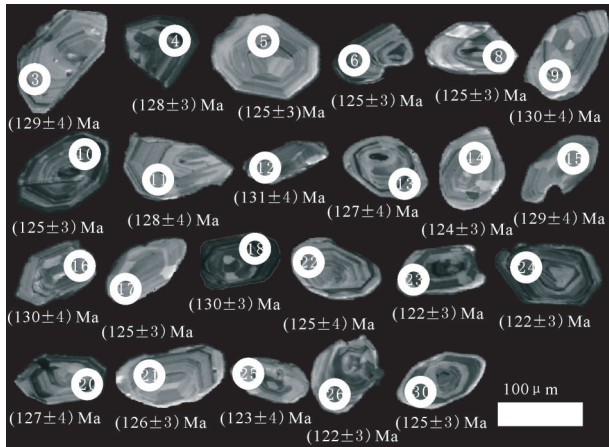


图3 龙江盆地安山岩的锆石阴极发光图像

Fig.3 Cathodoluminescence images of analyzed zircon grains from Longjiang basin

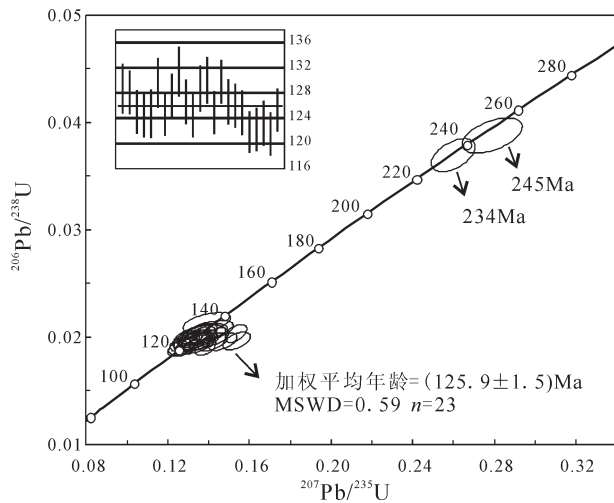


图4 龙江盆地安山岩的锆石 U-Pb 谐和图

Fig.4 U-Pb concordia diagram of zircons from Longjiang basin

(ICP-MS)完成。主量元素分析精度和准确度优于5%，微量元素的分析精度和准确度优于10%。

4.2 主量元素

龙江组火山岩的烧失量变化较大(LOI=0.77~6.68),遭受不同程度的绿泥石化、碳酸盐化。扣除烧失量重新计算的主量元素数据显示, SiO₂含量为57.06%~68.93%, Al₂O₃为16.64%~18.78%, MgO为0.93%~3.24, CaO为2.14%~5.66%。TiO₂的平均值为0.67%, 低于 MORB 和 OIB (平均值分别为1.5%和>2.0%), 而与岛弧火山岩的 TiO₂ 含量(平均0.8%)接近。K₂O+Na₂O 含量变化较大, 为4.17%~7.43%, 平均为6.18%, Na₂O/K₂O 比值1.11~3.1, 表现

较明显的钠质特征。

在 SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解中(图5), 样品都落入亚碱性系列区内, 岩石类型包括安山岩、粗安岩和英安岩。在 AFM 图解中, 所有样品都落在了钙碱性区域。在 SiO₂-(FeOt/MgO)图解中(图6), 主体为钙碱性系列, 个别落入拉板玄武岩区内, 可能与岩石的蚀变作用有关。可见龙江组火山岩的主体应该属于钙碱性火山岩系列。

4.3 微量元素

龙江组火山岩稀土总量(ΣREE)为102.61×10⁻⁶~131.85×10⁻⁶, 轻重稀土比值LR/HR在7.48~8.49, (La/Yb)_N=6.14~8.38, 轻重稀土元素分馏程度中等, 轻稀土分馏较明显, (La/Sm)_N 比值为2.74~3.32, 重稀土分馏相对不显著((Gd/Lu)_N=1.28~2.01), 岩石的球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线具有轻稀土富集的右倾特征(图7a), 不具铕异常(δEu=0.91~1.02)。微量元素蛛网图(图7b)显示, 龙江组火山岩富集 LILEs, 亏损 Nb、Ta、Ti 等 HFSS。

5 讨论

5.1 岩石成因

从哈克图解(图略)中可以看出龙江组火山岩具有良好的同源岩浆分异演化趋势, 随 SiO₂ 含量的增加 Al₂O₃、TiO₂、CaO、MgO、P₂O₅ 和 FeOt 含量呈规律性降低, K₂O 和 Na₂O 含量总体呈规律性增加, 这些特征表明斜长石、辉石、铁钛氧化物和磷灰石等的分离结晶作用对岩浆演化可能起了重要作用, 这与岩石中以斜长石、辉石为主要斑晶, 磁铁矿和磷灰石为副矿物的岩相学观察一致。K₂O 和 Na₂O 的含量与 SiO₂ 的变化曲线波动较大, 与后期的蚀变有关。

在 SiO₂-微量元素哈克图解中, SiO₂ 与 Nb、Ta、Th、U、Rb 等不相容元素呈明显的正相关关系, 说明这些元素富集在残余岩浆中。在岩浆上升过程中, 由于陆源物质的加入会增加岩浆中 SiO₂、K₂O 和 Rb、Ba、Cs 等大离子元素的丰度, 同时会升高 La/Nb、Zr/Nb 比值, 降低 Ti/Yb、Ce/Pb 比值(Barker et al., 1997; Meedonald et al., 2001), 在龙江组火山岩 SiO₂ 与上述元素比值的图解(图8)中显示, La/Nb、Ti/Yb、Ce/Pb 比值均与 SiO₂ 呈负相关, 只有 Zr/Nb 比值与 SiO₂ 呈正相关关系, 可以说明岩浆演化过程中有陆壳物质参与, 轻稀土的富集, 也暗示了岩浆在

表2 龙江组火山岩主量元素(%)、稀土及微量元素(10^{-6})分析结果Table 2 Major (wt%) and trace elements (10^{-6}) compositions of the volcanic rocks of Longjiang Formation

样品编号	312YQ4	312YQ7	312YQ20	315Y4	315YQ47	211YQ43	313YQ31	315YQ45	315YQ54	313YQ27
岩性	粗安岩			安山岩		英安岩				
SiO ₂	57.43	58.58	57.66	58.95	62.68	60.48	66.27	64.18	64.67	67.74
Al ₂ O ₃	18.22	17.25	16.81	16.48	17.16	17.32	16.9	17.04	16.61	16.38
Fe ₂ O ₃	5.47	5.32	6.17	4.69	4.07	3.18	2.67	3.3	3.04	2.19
FeO	3.32	3.1	4.09	2.02	2.83	0.31	2.66	1.39	2.29	0.94
TiO ₂	0.87	0.78	0.93	0.68	0.66	0.5	0.51	0.62	0.59	0.46
K ₂ O	2.13	2.65	3.05	1.61	2.69	0.94	2.33	2.24	2.43	2.95
Na ₂ O	3.95	3.62	3.4	4.2	3.11	2.91	4.38	3.96	4.11	4.35
CaO	5.64	4.9	5.42	4.56	4.14	4.56	2.93	3.78	3.02	2.1
MgO	2.16	2.52	3.12	3.13	2.44	1.7	1.54	2.18	1.73	0.91
MnO	0.09	0.1	0.11	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06
P ₂ O ₅	0.34	0.26	0.29	0.31	0.3	0.24	0.23	0.25	0.25	0.2
LOI	2.37	2.69	1.72	3.88	1.26	6.68	0.77	0.97	2.08	1.25
Total	101.98	101.77	102.76	100.61	101.42	98.9	101.26	99.98	100.88	99.53
A/CNK	0.96	0.97	0.9	0.97	1.1	1.23	1.12	1.08	1.12	1.16
σ	2.54	2.48	2.9	2.01	1.71	0.77	1.94	1.8	1.95	2.13
AR	1.68	1.79	1.82	1.76	1.75	1.43	2.02	1.85	2	2.31
La	22.8	22.2	25.2	19.1	22.4	19.1	24.1	23.7	24.8	24.9
Ce	45.9	43.0	50.2	39.4	46.5	40.0	48.2	48.0	51.7	50.1
Pr	5.9	5.6	7.6	5.3	6.0	5.3	6.3	6.4	6.7	6.6
Nd	25.8	23.6	28.0	22.0	24.8	21.5	25.5	25.5	25.7	25.5
Sm	5.0	4.4	5.4	4.4	4.6	4.0	4.7	4.5	4.9	4.7
Eu	1.5	1.4	1.6	1.3	1.4	1.1	1.3	1.4	1.4	1.3
Gd	4.0	3.7	4.4	3.5	3.7	3.2	3.9	3.8	3.8	3.8
Tb	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
Dy	3.3	3.1	3.6	3.3	3.5	3.1	3.5	3.7	3.7	3.8
Ho	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.8	0.7	0.8
Er	1.6	1.6	1.8	1.6	2.0	1.6	1.9	2.0	1.8	2.0
Tm	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
Yb	1.8	1.8	2.1	2.1	2.4	2.1	2.4	2.5	2.4	2.7
Lu	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
Y	15.6	14.5	17.7	14.4	15.8	14.9	16.9	18.3	15.8	16.7
Sr	887.3	853.5	675.4	673.6	600.0	515.8	524.6	579.8	566.0	410.1
Rb	38.7	61.5	59.8	38.1	60.8	28.6	60.5	52.1	68.9	77.9
Ba	1100.0	962.7	909.4	619.2	869.1	563.1	896.2	865.6	887.9	1076.7
Th	4.1	3.6	4.9	5.3	6.6	4.1	4.6	8.0	6.4	6.1
Ta	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.6	0.5	0.9
Nb	6.3	6.0	7.5	6.2	7.9	6.2	9.0	9.1	8.3	10.0
Zr	138.0	134.8	190.2	153.1	191.0	170.9	223.9	229.5	228.5	256.3
Hf	3.8	3.8	5.0	10.1	6.8	7.8	4.9	10.0	14.6	7.1
Sc	12.4	12.4	12.6	15.6	13.1	9.5	9.4	11.6	9.0	7.1
Cr	5.0	4.0	11.7	22.4	16.2	10.3	9.2	17.2	12.3	7.4
Ni	4.0	6.3	4.1	3.0	2.0	2.0	2.0	3.8	2.0	2.0
U	1.0	1.1	1.2	0.9	1.2	1.2	1.3	1.4	1.2	1.2
Cs	2.2	2.0	1.8	1.6	0.9	9.3	3.2	2.1	1.7	3.1
Cu	17.3	15.4	22.9	24.2	24.3	9.6	14.7	12.8	9.7	12.7
Zn	79.9	85.6	60.9	53.2	55.2	73.1	57.1	55.7	47.8	47.8
Co	13.9	14.9	16.3	20.1	15.3	16.5	11.8	13.5	13.8	8.4
Pb	14.7	15.1	16.8	17.2	21.0	15.3	22.3	21.6	20.3	28.7
Ga	16.5	15.3	15.7	18.0	20.1	21.8	18.7	18.2	19.3	18.5
Σ REE	119.41	112.17	131.85	103.7	119.13	102.61	123.67	123.63	128.77	127.73
L _R /H _R	8.49	8.42	8.45	7.48	7.8	7.77	8.11	7.75	8.4	7.77
δ Eu	1.02	1.01	0.98	0.94	0.99	0.92	0.93	1	0.94	0.91
δ Ce	0.93	0.91	0.86	0.93	0.95	0.94	0.92	0.92	0.95	0.92
(La/Yb) _N	8.38	8.24	8.2	6.28	6.31	6.14	6.83	6.32	7.06	6.23
(La/Sm) _N	2.89	3.14	2.95	2.74	3.09	3.02	3.23	3.3	3.19	3.32
(Gd/Lu) _N	2.01	1.84	1.91	1.61	1.47	1.41	1.82	1.44	1.53	1.28

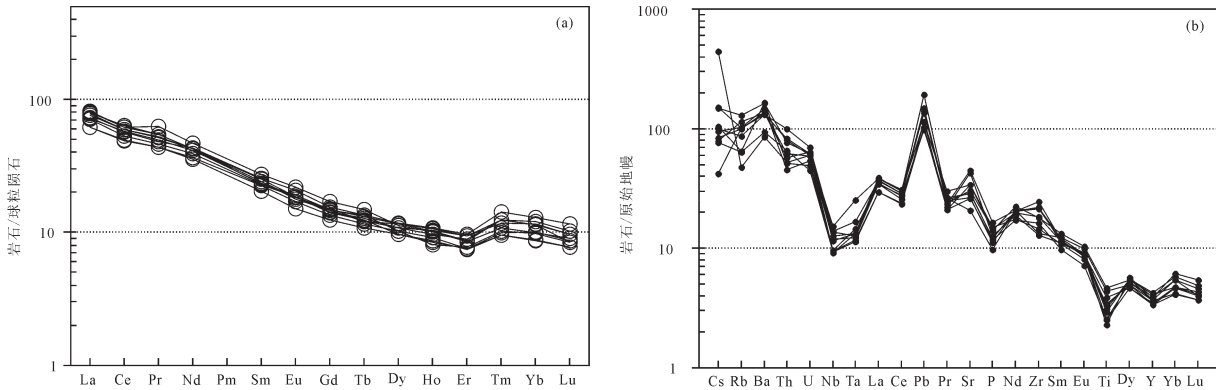


图7 稀土元素配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石标准化值据 Boynton, 1984;原始地幔标准化值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 7 REE patterns (after Boynton, 1984) (a)and trace elements spidergrams (after McDonough and Sun, 1995)(b)

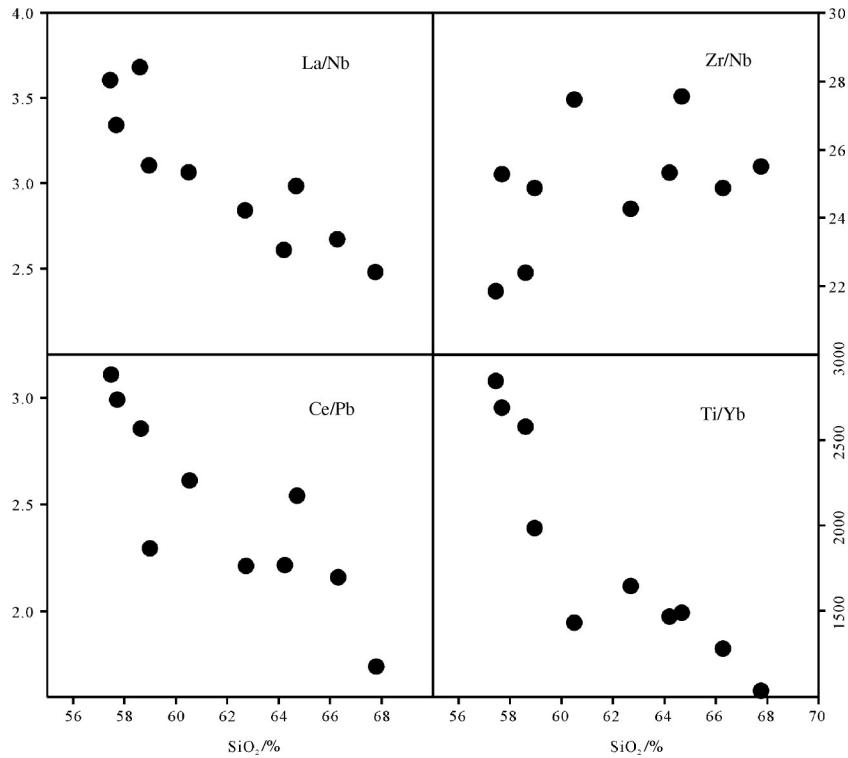


图8 龙江组火山岩的La/Nb、Zr/Nb、Ce/Pb、Ti/Yb-SiO₂图解

Fig. 8 La/Nb, Zr/Nb, Ce/Pb, and Ti/Yb-SiO₂ diagrams of the volcanic rocks of Longjiang Formation

在石榴石稳定区。

5.3 区域火山事件对比

近年来对区域中生代火山岩年代学研究结果表明,早白垩世晚期火山岩(峰值年龄125 Ma)在大兴安岭地区广泛分布,北部上库力组火山岩形成于111~135 Ma(葛文春等, 2001; Wang et al., 2006; Zhang et al., 2008),伊列克得组火山岩形成于106~148 Ma(武广等, 2005; Wang et al., 2006; Zhang et al., 2008)。冀北—辽西地区义县组火山岩形成于

120~126 Ma(韦忠良等, 2008),而伊列克得组中发现的热河生物化石与义县组、光华组中热河生物群化石组合时代也相当,该期火山岩岩石组合为典型的双峰式火山岩,是早白垩世晚期区域性伸展的直接反映。同时,早白垩世晚期A型花岗岩的广泛分布(Wu et al., 2002)、变质核杂岩的产出(Zheng et al., 1991; Davis et al., 2002)以及同期沉积盆地的形成(Graham et al., 2001; 张昱等, 2005)都指示了一种伸展背景。根河地区早白垩世火山杂岩(任风和

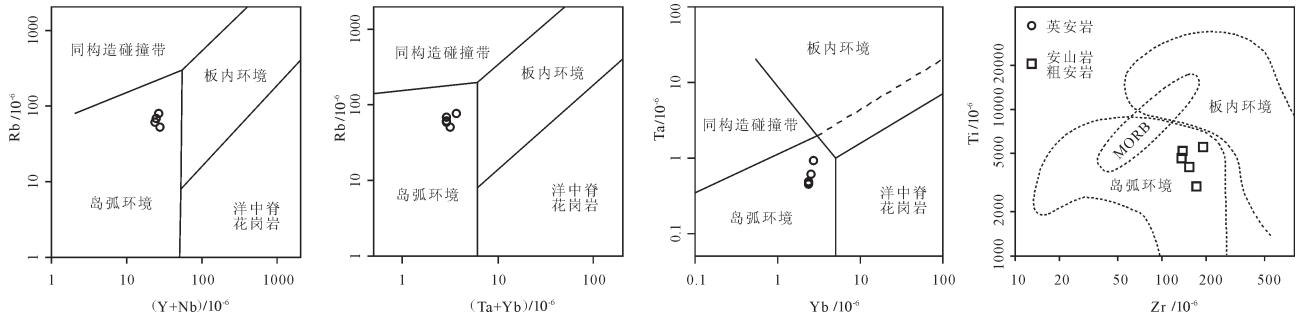


图9 龙江组火山岩构造背景判别图解

Fig. 9 Discrimination diagrams for tectonic settings of the volcanic rocks of Longjiang Formation

表3 龙江组火山岩与典型埃达克岩成分对比
Table 3 A comparison of adakite with the volcanic rocks from Longjiang Formation

特征	典型埃达克岩	龙江组火山岩
SiO ₂	>56%	57.43%~67.74%
Al ₂ O ₃	>15%	16.38%~18.22%
MgO	<3%	平均 2.1% (0.91%~3.13%)
Na ₂ O	3.5%~7.5%	2.91%~4.38%(±)
Sr	>400×10 ⁻⁶	>410×10 ⁻⁶ (平均 649×10 ⁻⁶)
Yb	<1.9×10 ⁻⁶	≤ 2.7×10 ⁻⁶
Y	<18×10 ⁻⁶	≤ 18.26×10 ⁻⁶
Eu 异常	无	0.91~1.02
Sr/Y	>40	平均 39.7
Zr/Sr	>50	平均 41

在岩石化学上, 靠近虎林—东宁—临江一线(陆缘), 早白垩世火山岩显示钙碱性组合, 而靠近松辽盆地及以西地区(陆内)早白垩世火山岩显示双峰式火山岩的组合特征, 根据这种空间变化特征, 龙江组火山岩的形成应与环太平洋构造体系有关(古太平洋板块的俯冲作用)。但研究区并非一直处于拉张环境, 比如本次调查中发现的龙江组火山岩 ((125.9±1.5)Ma), 为一套俯冲型埃达克性质的中酸性岩石, 形成于俯冲板块的部分熔融。根据已有的研究成果可知, 蒙古—鄂霍茨克洋呈剪刀式自西向东逐渐闭合的特征, 多数学者认为东部最终关闭时间在早中侏罗世 (Zorin, 1999; Tomurtogoo et al., 2005; Kelty et al., 2008), 也有人认为东部最终的闭合碰撞为早白垩世 (Metelkin et al., 2007), 结合地球化学特征分析, 该期火山岩的形成应该与蒙古—鄂霍茨克洋的碰撞造山相联系。

等, 2005) 以及研究区光华组火山岩中碱流岩 ((122.4±1.7) Ma, 张超等, 2017) 的发现, 揭示了早白垩世晚期大兴安岭地区区域性伸展环境的存在。

综上所述, 龙江期火山事件既与环太平洋构造体系有关, 又与蒙古—鄂霍茨克构造带相联系, 从

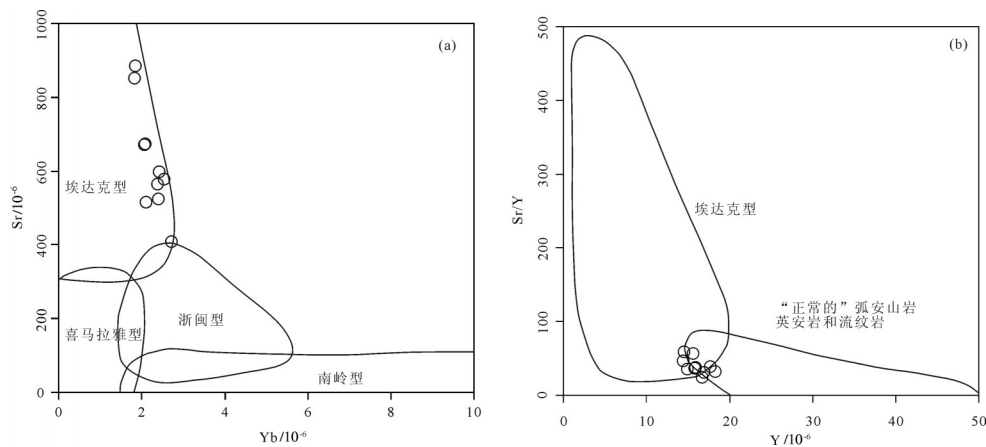


图10 龙江组火山岩的 Sr-Yb 和 Sr/Y-Y 图解

Fig. 10 Sr-Yb and Sr/Y-Y diagrams for the volcanic rocks of Longjiang Formation

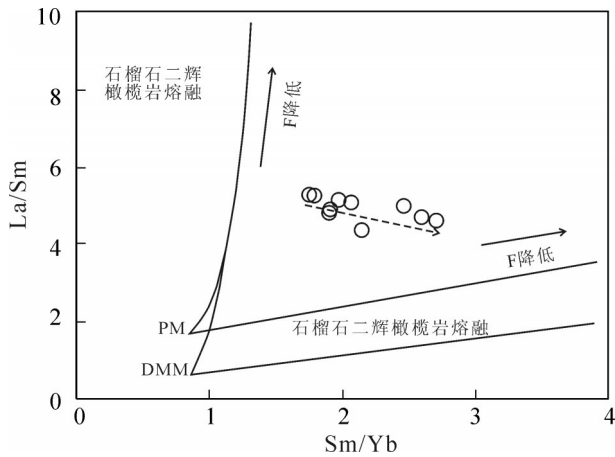


图 11 龙江组火山岩的 Sm/Yb-La/Sm 图解

Fig. 11 Sm/Yb-La/Sm diagrams for the volcanic rocks of Longjiang Formation

大兴安岭地区中生代火山岩的空间展布可以判断,位于松辽盆地以西的龙江组火山岩的形成与后者的联系更为密切。

6 结 论

(1) 龙江盆地早白垩世龙江组火山岩地球化学特征与经典埃达克岩吻合,微量元素丰度及构造背景说明龙江组火山岩形成于岛弧环境,S、Y、Yb、Sr/Y 值暗示其为俯冲型埃达克岩,形成于俯冲板块的部分熔融,岩浆在上升过程中经历了分离结晶作用,早期演化过程阶段可能发生了陆壳混染。

(2) 龙江组及上覆光华组所含化石资料显示其形成于早白垩世阿普特期。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(125.9 ± 1.5)Ma,与化石资料完全一致,应为龙江组火山岩形成的精确年龄。

埃达克岩中的斑岩型铜矿的岩浆有很多报道(张旗等,2002;张连昌等,2004)。近年来笔者在龙江盆地龙江组火山岩中发现有一定规模的斑岩型铜矿(杏山铜矿),可以为寻找与此有关的矿产资源提供新的线索。

注释

① 黑龙江区测队. 1:20 万扎赉特旗幅区域地质调查报告. 黑龙江省地质局. 1957

② 郑长青等. 1:25 万柴河幅、蘑菇气幅 1:25 万区域地质调查报告. 沈阳地质调查中心. 2013

③ 吴兴伟等. 1:5 万南燕窝沟、山泉公社、罕达罕、陈家大岗幅

区域地质矿产调查报告. 沈阳地质调查中心. 2015

References

- Bark J A. 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a Yemen: Implication and polybaric melt hybridization[J]. *Journal of Petrology*, 38(10): 1359-1390.
- Boynton W V. 1984. Chapter 3- Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 2 (2): 63-114.
- Davis G A, Darby B J, Zheng Y, Spell T L. 2002. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. *Geology*, 30: 1003-1006.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662-665.
- Ding Qihong, Chen Shuwang, Shang Ling, Li Yongfei, Wang Jie. 2014. New understanding of the Lower Cretaceous Longjiang Formation in the eastern Daxinganling region[J]. *Geology and Resources*, 23(3): 215-234 (in Chinese with English abstract).
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, Lin G. 2003. Late Mesozoic calcalkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121: 115-135.
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Li Xianhua, Wu Fuyuan, Sun Deyou, Yun Sungyo. 2000a. Geochemical characteristics of basalts of the Early Cretaceous Yiliekedede Formation, North Da Hinggan Ling[J]. *Journal of Mineral Petrology*, 20(3): 14-18 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Li Xianhua. 2000b. Geochemical research into origins of two types of Mesozoic rhyolites in Da Hinggan Ling[J]. *Earth Science*, 25(2): 172-178 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Li Xianhua, Lin Qiang, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Yun Sungyo. 2001. Geochemistry of Early Cretaceous alkaline rhyolites from Hulun Lake, Daxinganling and its tectonic implications[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 176-183 (in Chinese with English abstract).
- Gill J B. 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*[M]. Springer-Verlag. New York. 1-390.
- Graham S A, Hendrix M S, Johnson C L, Badamgarav D, Badarch G, Amory J. 2001. Sedimentary record and tectonic implications of Mesozoic rifting in southeast Mongolia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 113: 1560-1579.
- Henderson P. 1984. *Rare Earth Element Geochemistry*[M]. New York: Elsevier Science Publications, 1-50.
- Kelty T, Yin A, Dash B, Gehrels G E, Ribeiro A E. 2008. Detrital zircon geochronology of Paleozoic sedimentary rocks in the Hangay-Hentey basin, north-central Mongolia: Implications for

- the tectonic evolution of the Mongol–Okhotsk Ocean in central Asia[J]. *Tectonophysics*, 451(1/4): 290–311.
- Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. *Journal of Microscopy*, 171: 223–232.
- Li Sitian, Yang Shigon, Wu Chonglong, Huang Jiafu, Cheng Shoutian, Xia Wenchen, Zhao Genrong. 1987. The late Mesozoic rifting in the northeastern China and the fault–rifting basins in East Asia[J]. *Science in China(Series B)*, 21(2): 185–195 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongfei, Bian Xiongfei, Gao Xiaoyong, Chen Shuwang, Ding Qihong. 2013. Laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of the Mesozoic volcanic rocks from Longjiang basin in northern Da Hinggan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(8): 1212–1223 (in Chinese with English abstract).
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Cao Lin, Sun Deyou, Lin Jingguo. 2003. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Da Hinggan Ling: The bimodal volcanic Rocks[J]. *Geochemica*, 32(3): 208–222 (in Chinese with English abstract).
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, Li Dianchao, Pan Jun, Dong Guanghua. 2000. Magmatism and its tectonic significance in the Manzhouli–Eerguna region[J]. *Journal of Mineral Petrology*, 21(1): 77–85 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3/4): 223–253.
- McDonald R. 2001. Plume–lithosphere interaction in the generation of the Kenya Rift, East Africa[J]. *Journal of Petrology*, 42(5): 877–900.
- Metelkin D V, Gordienko I V, Klimunk V S. 2007. Paleomagnetism of Upper Jurassic basalts from Transbaikalia: New data on the time of closure of the Mongol–Okhotsk Ocean and Mesozoic intraplate tectonics of Central Asia[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 48(10): 825–834.
- Ren Fenghe, Yang Xiaoping, Li Yangchun, Wang Yan, Zhou Xingfu. 2005. Chronostratigraphic division of the Jixi Group in eastern Heilongjiang Province and its geological significance[J]. *Geology in China*, 32(1): 48–54 (in Chinese with English abstract).
- Salter V J M, Hart S R. 1991. The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs: The Hf isotope connection[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104: 364–380.
- Shao Jian, Zang Saoxian. 1994. Extensional tectonics and asthenospheric upwelling in the orogenic belt: A case study from Hinggan–Mongolia Orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 39: 533–537 (in Chinese with English abstract).
- Tomurtogoo O, Windley B F, Kroner A, Badarch G, Liu D Y. 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[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 162(1): 125–134.
- Wang F, Zhou X H, Zhang L C, Ying J F, Zhang Y T, Wu F Y. 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range(NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 251: 179–198.
- Wang P J, Chen F K, Shen S M, Siebel W, Satir M. 2006. Geochemical and Nd–Sr–Pb isotopic composition of Mesozoic volcanic rocks in the Songliao basin, NE China[J]. *Geochemical Journal*, 40: 149–159.
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. 2001. Th/Hf–Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 413–421 (in Chinese with English abstract).
- Wei Zhongliang, Zhang Hong, Guo Wenmin, Liu Xiaoming. 2008. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating: Constraints on Late Mesozoic regional unconformity timing in the northern Hebei–western Liaoning Provinces[J]. *Progress in Natural Science*, 18(10): 1119–1127 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun S Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A–type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187: 143–173.
- Wu Guang, Zhu Qun, Li Zhitong, Wang Xijin, Wang Hongbo, Li Guangyuan. 2005. Geochemical feature and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Mesozoic volcanic rocks in the northern Great Xing'an Range[C]// National Meeting of the Petrology and Geodynamics in China, 127–130 (in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Ji W Q, Pei F P, Meng E, Yu Y, Yang D B. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 392–402.
- Ye Mao, Zhang Shihong. 1994. The classification of the Paleozoic tectonic units in the area crossed by M–SGGT[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(3): 241–245 (in Chinese with English abstract).
- Ying J F, Zhou X H, Zhang L C, Wang F, Zhang Y T. 2010. Geochronological and geochemical investigation of the Late Mesozoic volcanic rocks from the Northern Great Xing'an Range and their tectonic implications[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 9(2): 357–378.
- Zhang Chao, Wu Xinwei, Zhang YuJin, Guo Wei, Quan Jinyu. 2017. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating and geochemical characteristics of the pantellerite of Guanghua Formation from Longjiang basin in northern Da Hinggan Mountains and their geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(9): 1531–1541 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiheng. 2005. Geochronological Framework of the Mesozoic Volcanic Rocks in the Great Xing'an Range, NE China[D]. Master Degree Thesis, Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, Wilde S A, Yang J H, Liu X M. 2008a. Large–scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great

- Xing'an Range, northeastern China[J]. *Lithos*, 102(1/2): 138–157.
- Zhang Lianchang, Wan Bo, Jiao Xuejun, Zhang Rui. 2005. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, western Junggar [J]. *Geology in China*, 33(3): 626–631 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan. 2002. Adakite: Its characteristics and implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 431–435(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yu, Zhao Huanli, Li Yangchun, Han Yandong. 2005. Characteristics of Early Cretaceous volcanic complexes in the genhe area in the northern segment of the da hinggan mountains: With a discussion of their genesis[J]. *Geology in China*, 32(3): 405–410(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yujin, Wu Xinwei, Yang Yajun, Zhang Chao, Guo Wei, Song Weimin. 2016. Early Cretaceous plant fossils and their paleoenvironment in Longjiang basin on the eastern slope of middle Da Hinggan Mountains[J]. *Ecological Bulletin of China*, 35(6):856–865(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yutao, Zhang Lianchang, Ying Jifeng, Zhou Xinhua, Wang Fei, Hou Quanlin. 2007. Geochemistry and source characteristics of Early Cretaceous volcanic rocks in Tahe, north Da Hinggan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2811– 2822(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guolong, Yang Guilin and Wang Zhong. 1989. Mesozoic Volcanic Rocks in the Middle– south Daxinganling[M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y D, Wang S Z and Wang Y. 1991. An enormous thrust nappe and extensional metamorphic complex newly discovered in Sino–Mongolian boundary area[J]. *Science in China (Series D)*, 34: 1145–1152.
- Zhu Dicheng, Duan Liping, Liao Zhongli, Pan Guitang. 2002. Discrimination for kinds of adakites[J]. *Mineral. Petrol.*, 89(22): 5–9(in Chinese with English abstract).
- Zorin Y. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia–Okhotsk collisional belt, Trans– Baikal region (Russia) and Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 306(1): 33–56.
- 丁秋红, 陈树旺, 商翎, 李永飞, 王杰. 2014. 大兴安岭东部地区下白垩统龙江组新认识[J]. *地质与资源*, 23(3): 215–234.
- 葛文春, 林强, 李献华, 吴福元, 孙德有, 尹成孝. 2000a. 大兴安岭北部伊列克得组玄武岩的地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 20(3): 14–18.
- 葛文春, 林强, 孙德有, 吴福元, 李献华. 2000b. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究[J]. *地球科学*, 25(2): 172–178.
- 葛文春, 李献华, 林强, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 2001. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义[J]. *地质科学*, 36(2): 176–183.
- 李思田, 杨世恭, 吴冲龙, 黄家福, 程守田, 夏文臣, 赵根榕. 1987. 中国东北部晚中生代裂陷作用和东北亚断陷盆地系[J]. *中国科学 (B辑)*, 21(2): 185–195.
- 李永飞, 卞雄飞, 邵晓勇, 陈树旺, 丁秋红. 2013. 大兴安岭北段龙江盆地中生代火山岩激光全熔⁴⁰Ar/³⁹Ar测年[J]. *地质通报*, 32(8): 1212–1223.
- 林强, 葛文春, 曹林, 孙德有, 林经国. 2003. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征[J]. *地球化学*, 32(3): 208–222.
- 吕志成, 段国正, 郝立波, 李殿超, 潘军, 董广华. 2002. 大兴安岭中段二叠系大石寨组细碧岩的岩石学地球化学特征及其成因探讨[J]. *岩石学报*, 18(2): 212–222.
- 任风和, 杨晓平, 李仰春, 汪岩, 周兴福. 2005. 黑龙江省东部鸡西群地层时代划分及地质意义[J]. *中国地质*, 32(1): 48–54.
- 邵济安, 藏绍先. 1994. 造山带的伸展构造与软流圈隆起——以兴蒙造山带为例[J]. *科学通报*, 39(6): 533–537.
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成大地构造环境的Th/Hf–Ta/Hf图解判别[J]. *岩石学报*, 17(3): 413–421.
- 韦忠良, 张宏, 郭文敏, 柳小明. 2008. LA–ICP–MS锆石U–Pb测年对辽西—冀北地区晚中生代区域性角度不整合时代的约束[J]. *自然科学进展*, 18(10): 1119–1127.
- 武广, 朱群, 李之彤, 王希今, 王宏博, 李广远. 2005. 大兴安岭北部中生代火山岩地球化学特征及⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究[C]//全国岩石学与地球动力学研讨会论文集摘要集, 127–130.
- 叶茂, 张世红. 1994. 中国满洲里–绥芬河地学断面域古生代构造单元及其地质演化[J]. *长春地质学院学报*, 24(3): 241–245.
- 张超, 吴新伟, 张渝金, 郭威, 权京玉. 2017. 大兴安岭北段龙江盆地光华组碱流岩LA–ICP–MS锆石U–Pb年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 36(9): 1531–1541.
- 张吉衡. 2005. 大兴安岭中生代火山岩的年代学格架[D]. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学.
- 张连昌, 万博, 焦学军, 张锐. 2005. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义[J]. *中国地质*, 33(3): 626–631.
- 张旗, 王焰. 2002. 埃达克岩的特征及其意义[J]. *地质通报*, 21(7): 432–435.
- 张昱, 赵焕力, 李仰春, 韩彦东. 2005. 大兴安岭北段根河地区早白垩世火山杂岩特征及成因探讨[J]. *中国地质*, 32(3): 405–410.
- 张渝金, 吴新伟, 杨雅军, 张超, 郭威, 宋维民. 2016. 大兴安岭中段东坡龙江盆地早白垩世植物化石新材料[J]. *地质通报*, 35(6): 856–865.
- 张玉涛, 张连昌, 英基丰, 周新华, 王菲, 侯泉林. 2007. 大兴安岭北段塔河地区早白垩世火山岩地球化学及源区特征[J]. *岩石学报*, 23(11): 2811–2822.
- 赵国龙, 杨桂林, 王忠. 1989. 大兴安岭中南部中生代火山岩[M]. 北京: 北京科学技术出版社.
- 朱弟成, 段丽萍, 廖忠礼, 潘桂棠. 2002. 两类埃达克岩的判别[J]. *矿物岩石*, 89(22): 5–9.

附中文参考文献

- 丁秋红, 陈树旺, 商翎, 李永飞, 王杰. 2014. 大兴安岭东部地区下白垩统龙江组新认识[J]. *地质与资源*, 23(3): 215–234.
- 葛文春, 林强, 李献华, 吴福元, 孙德有, 尹成孝. 2000a. 大兴安岭北部伊列克得组玄武岩的地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 20(3): 14–18.
- 葛文春, 林强, 孙德有, 吴福元, 李献华. 2000b. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究[J]. *地球科学*, 25(2): 172–178.
- 葛文春, 李献华, 林强, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 2001. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义[J]. *地质科学*, 36(2):