

郯庐断裂带辽河段始新世中基性火山岩成因与构造背景:地球化学和 Sr-Nd 同位素证据*

王岩泉¹ 孙德有^{1**} 单俊峰² 李军² 黄玉龙¹ 李思伟¹

WANG YanQuan¹, SUN DeYou^{1**}, SHAN JunFeng², LI Jun², HUANG YuLong¹ and LI SiWei¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 中国石油辽河油田勘探开发研究院, 盘锦 124010

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

2. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, China

2015-08-08 收稿, 2015-11-13 改回.

Wang YQ, Sun DY, Shan JF, Li J, Huang YL and Li SW. 2016. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on the origin of Eocene intermediate-basic volcanic rocks from the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone. *Acta Petrologica Sinica*, 32 (4): 1101–1113

Abstract Liaohe segment located in the transitional zone of Tan-Lu fault, is mainly composed of Paleogene volcanic-sedimentary rock series with a depth of 7000m. We conducted detail studies on 7 wells of Shahejie Formation. The results reveal that the Eocene volcanic rocks are mainly composed of basalt rocks and trachytic rocks, with SiO₂ contents varying from 45.20% to 59.55%, which were dominated by alkaline lavas. Basaltic rocks were barely rich in Ti, not lack in Nb, Ta. Trachytic rocks show geochemical affinities similar to basalt rocks but depleted in Sr, P and Ti. They have similar Sr-Nd isotopic compositions. Basalt rocks have very enriched isotope characteristics with $I_{Sr} = 0.7033 \sim 0.7042$, $\varepsilon_{Nd}(t) = 3.56 \sim 5.86$, which is consistent with the isotope composition of trachytic rocks ($I_{Sr} = 0.7035 \sim 0.7045$, $\varepsilon_{Nd}(t) = 3.25 \sim 4.46$). Their Sr-Nd isotopes were similar with OIB. Based on the comprehensive studies, we suggested that Eocene volcanic rocks were the product of partial melting of mantle wedge replaced by slab-derived fluid, which intruded above in the back-arc extensional condition. Two distinct rocks generate from magma through differentiation in the magma chamber. The change from destructive settings in Mesozoic to a continental rift environment in Paleogene may be derived from the interaction between Asia plate and Pacific plate. In this process, the large-scale strike-slip movements of Tan-Lu fault controlled the contemporary asthenosphere-derived volcanicity.

Key words Tan-Lu fault zone; Volcanic rocks of Shahejie Formation; Geochemistry; Petrogenesis; Tectonic setting

摘要 研究区位于郯庐断裂南、北两段过渡带构造蜂腰部, 其内充填厚达 7000m 的古近纪火山-沉积岩系。本文选取火山岩最发育的沙河街组 7 口代表性钻井进行研究。结果表明, 这些始新世火山岩主要为玄武质岩石和粗面质岩石, SiO₂ 含量为 45.20% ~ 59.55%, 以碱性系列为主。玄武质岩石弱富集大离子亲石元素和 Ti, 不亏损 Nb、Ta 等高场强元素。粗面质岩石具有与玄武质岩石相似的地球化学特征, 但 Sr、P 和 Ti 明显亏损。玄武质岩石的 $I_{Sr} = 0.7033 \sim 0.7042$, $\varepsilon_{Nd}(t) = 3.56 \sim 5.86$, 粗面质岩石的 $I_{Sr} = 0.7035 \sim 0.7045$, $\varepsilon_{Nd}(t) = 3.25 \sim 4.46$, 二者的 Sr-Nd 同位素组成一致, 均与 OIB 相似。综合研究认为, 始新世火山岩是弧后拉张环境下, 曾遭受俯冲板片流体交代的地幔岩石部分熔融的产物。岩浆在岩浆房内分异演化形成了两种不同类型的岩石。郯庐断裂辽河段从中生代的板缘环境到古近纪陆内裂谷带, 其控制因素可能来源于欧亚大陆板块和太平洋板块间的相互作用。在此过程中郯庐断裂系活化并发生大规模走滑运动, 导致辽河裂谷盆地同期地幔来源的火山岩浆活动。

关键词 郯庐断裂带; 沙河街组火山岩; 地球化学; 岩石成因; 构造背景

中图法分类号 P588.14

* 本文受国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2012CB822002)和国家自然科学基金青年基金项目(41202085、41002038)联合资助。

第一作者简介: 王岩泉, 男, 1988 年生, 博士生, 岩石学专业, E-mail: wang_yan_quan@126.com

** 通讯作者: 孙德有, 男, 1965 年生, 教授, 主要从事火成岩岩石学研究与教学, E-mail: sundy@jlu.edu.cn

1 引言

郯庐断裂带是贯穿中国东部的巨型断裂带,形成于中晚三叠世同碰撞造山过程中(朱光等, 2005a, b; Zhu *et al.*, 2009),经历了长期、复杂的演化(Xu and Zhu, 1994; 万天丰和朱鸿, 1996; 朱光等, 2005a)。断裂带演化的不同阶段伴有相应的火山岩浆活动(牛漫兰等, 2007),沿断裂带分布的岩浆岩为认识郯庐断裂带的时空演化过程提供了可能。

辽河断陷带处于郯庐断裂带由华北向东北及俄罗斯延伸的过渡部位,是郯庐断裂最窄处,因而也被称为郯庐断裂的“构造蜂腰段”(图 1),是研究郯庐断裂带的重要地段。该

地区新生代火山岩的分布明显受到郯庐断裂及其派生的次级断裂控制,也是揭示郯庐断裂新生代特征与构造属性的钥匙。近年来,有关郯庐断裂带的起源、活动规律、演化历史等问题,已经得到了广泛的研究,并取得了丰硕的成果(金隆裕, 1989; 徐嘉炜和马国锋, 1992; Yin and Nie, 1993; Ratschbacher *et al.*, 2000; 谢成龙等, 2009; Zhu *et al.*, 2010; Xiao *et al.*, 2010)。在火山岩上的研究主要集中在郯庐断裂带南北两端中生代火山岩(朱光等, 2005a, b; 孙晓猛等, 2010),近些年许多学者对郯庐断裂带内新生代火山岩也开展了部分研究(牛漫兰等, 2005; Xiao *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2012; Xu, 2014),但对于盆地内火山岩的研究还是较为缺乏。这是因为以往受到探井分布、揭示井段和取心

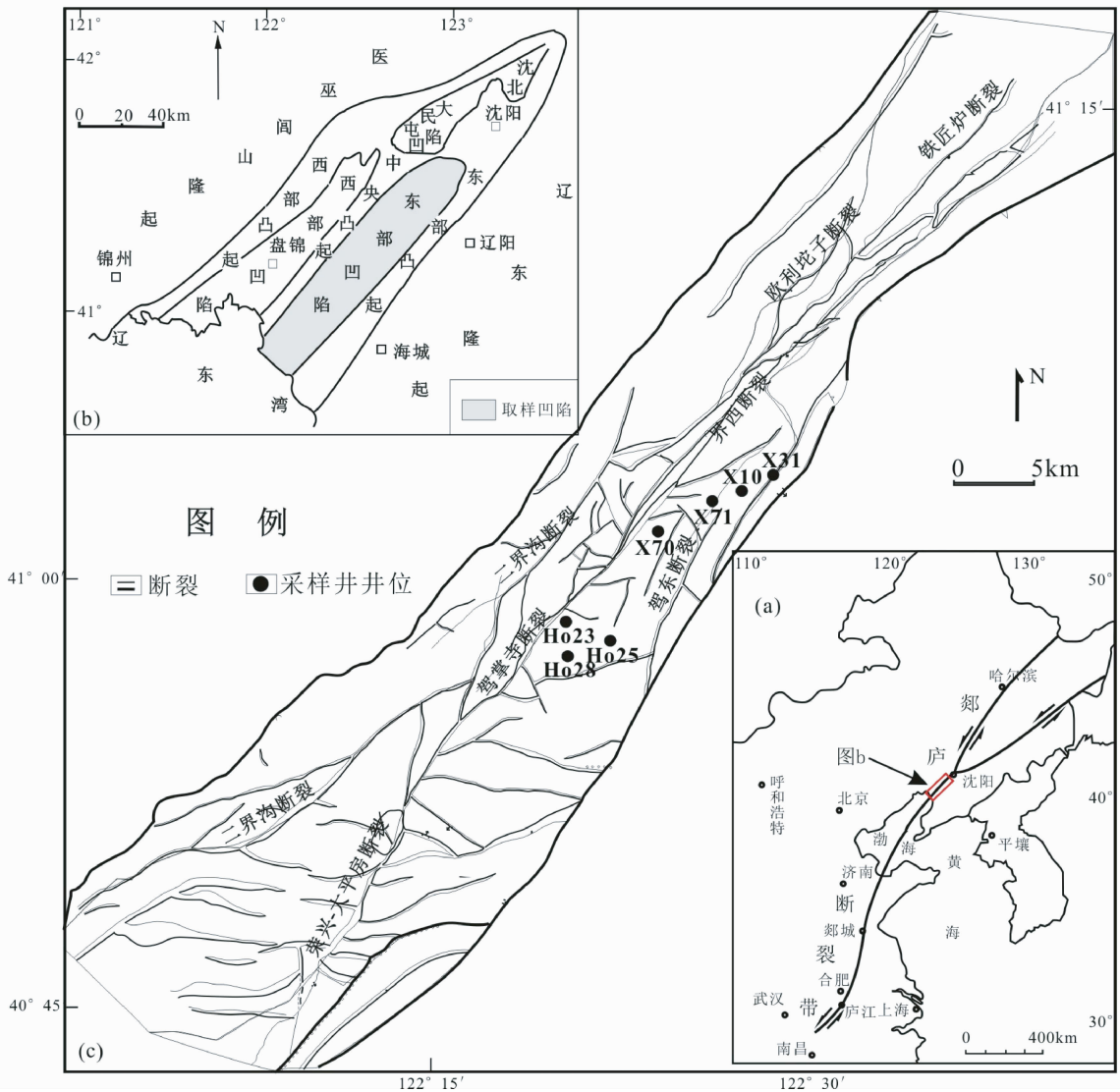


图 1 郯庐断裂带辽河段东部凹陷构造特征及采样井位置图

(a) 区域构造位置; (b) 辽河盆地构造单元; (c) 东部凹陷采样井分布

Fig. 1 Structural units of Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone, showing the location of the samples wells

(a) regional structural location; (b) tectonic units of Liaohe basin; (c) distribution of sampled wells

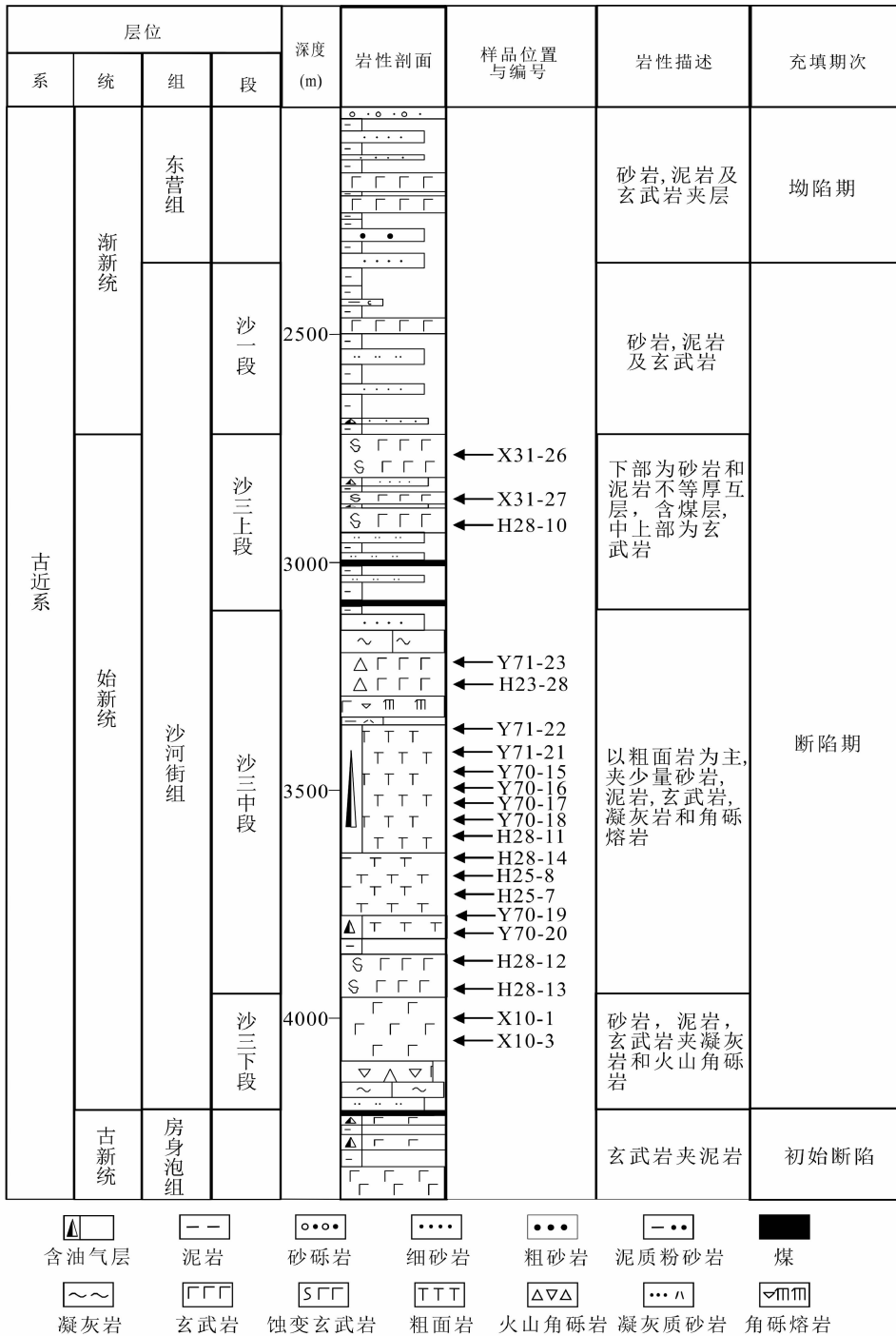


图 2 钻井综合柱状图及采样位置

Fig. 2 Stratigraphic columns of the wells and the sampling layers

率低等因素限制,同时以往盆地火山岩研究又侧重于油气地质与勘探,因此,迄今有关郟庐断裂辽河段新生代火山岩构造属性及其与郟庐断裂演化的关系等相关研究还较缺乏。作者基于近年新钻井资料,在系统的样品采集与筛选基础上,以郟庐断裂带辽河段始新世火山岩为研究对象,通过主量元素、微量元素、稀土元素和 Sr-Nd 同位素研究,探讨火山岩的源区属性及其岩浆演化特征,尝试揭示郟庐断裂带辽河

段火山岩形成的区域背景和深部过程。

2 火山地层序列和采样

研究区构造-盆地充填经历了扩张、断陷和拗陷三个发展阶段(陈振岩等, 2011),所形成的火山岩从早到晚依次为

房身泡组(65~48.2Ma)、沙河街组(42.4~35Ma)和东营组(32.6~24.5Ma)(刘若新, 1992; 杨默函等, 2006)(图2)。其中断陷期的始新统沙河街组三段火山岩最为发育,是研究郯庐断裂带辽河段火山岩的关键层位,也是本区最为重要的油气储集层。在整个渤海湾盆地沙河街组分为四段,自下而上分别是沙四段、沙三段、沙二段和沙一段。郯庐断裂带辽河段古近纪缺失沙四段和沙二段,仅发育沙三段和沙一段。沙三段又自下而上分为沙三下、沙三中和沙三上3个亚段。其中沙三上和沙三下以基性岩为主,主要为玄武岩、玄武质火山岩角砾岩和凝灰岩;沙三中以中性岩为主,主要发育粗面岩、粗面质角砾熔岩和火山角砾岩及少量玄武质岩石夹层,沙三中粗面质岩石和沙三下玄武质岩石为连续的火山序列,仅有少量薄层砂泥岩夹层。与沙三上的玄武质岩石间有厚层的沉积岩夹层。

结合详细的钻井资料及岩相学研究,同时考虑样品的井深与层位分布,选取研究区7口钻井共计21块有代表性的始新统沙河街组三段火山岩样品进行全岩主量、微量和稀土元素地球化学分析,并对其中的12个火山岩样品进行Rb-Sr、Sm-Nd同位素地球化学分析(表1、表2)。

3 岩石学特征

郯庐断裂带辽河段始新世火山岩主要岩性为玄武岩、粗面玄武岩、粗面岩、粗面安山岩等熔岩及角砾岩、凝灰岩等火山碎屑岩类。代表性火山岩的特征如下:

玄武岩:颜色主要为灰黑色和灰绿色,风化面紫红或深褐色等。斑状结构,基质为间粒结构、间隐结构等。斑晶主要为橄榄石、斜长石和辉石,其中橄榄石粒径0.2~1.0mm,占斑晶含量的50%以上,除部分橄榄石斑晶发生伊丁石化外,无明显蚀变现象。基质主要为斜长石(40%)、辉石等(图3a, b)。

粗面玄武岩:灰黑色,块状构造,斑状结构。斑晶含量约20%~25%,主要为斜长石、碱性长石、单斜辉石、橄榄石;基质为间粒结构、间隐结构,主要由条状、针状斜长石微晶组成(图3c, d)。

粗面岩:多呈暗灰色,风化面褐灰-褐红色,常见斑状结构、聚斑结构,斑晶含量约20%~35%,多为自形的透长石、正长石或中长石,粒径为0.8~1.2mm,有时出现辉石或暗化的角闪石、黑云母,含量较少约为1%;基质以微晶透长石为主,常具有典型的粗面结构,有时出现球粒和少量玻璃质。常见块状、流动构造,气孔、杏仁构造亦常见,但较玄武质岩石发育程度低(图3e, f)。

粗面安山岩:多呈深灰色,风化后颜色变浅成红褐色,块状构造,斑状结构。斑晶主要为斜长石(20%),粒径为0.3~0.5mm,另外含有少量的辉石(5%)及黑云母(<5%);基质具粗面结构或交织结构,主要由斜长石、透长石、单斜辉石和磁铁矿等组成,有时含少量玻璃质。(图3g, h)。

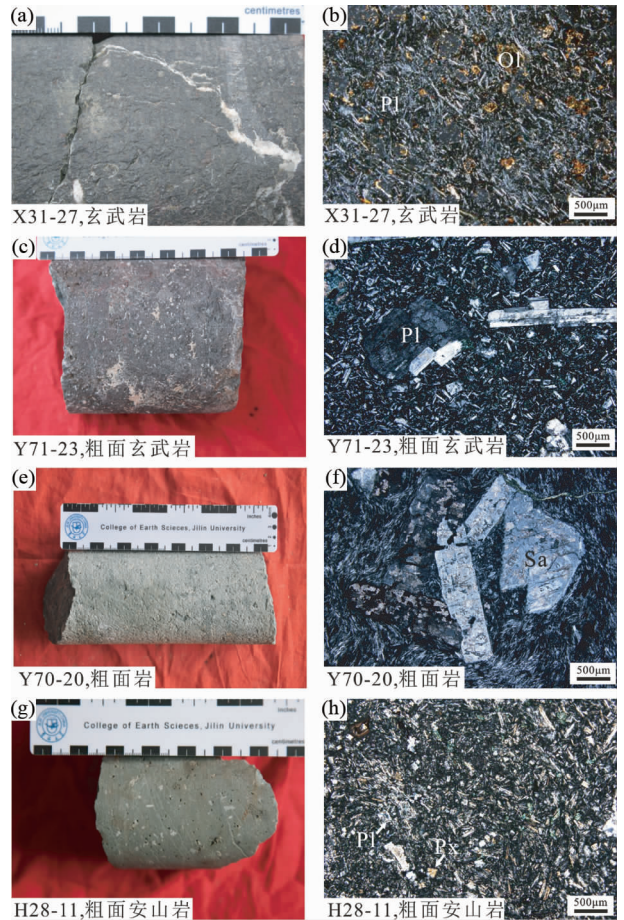


图3 郯庐断裂带辽河段始新世中基性火山岩照片
Pl-斜长石;Ol-橄榄石;Sa-透长石;Px-辉石

Fig. 3 Photographs of Eocene intermediate and basic volcanic rocks in the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone

Pl-plagioclase; Ol-olivine; Sa-sanidine; Px-pyroxene

4 分析方法

在对样品进行显微镜下矿物组成与结构观察后,挑选未蚀变或蚀变微弱的样品开展测试分析。先将岩石粉碎到1~2cm大小,经过超声波清洗再晾干后在放大镜下将风化和蚀变的岩屑剔除,剩余的新鲜岩屑在玛瑙破碎机中粉碎到20目以下,从中缩分出一半在玛瑙球磨机中研磨至200目以下。主量、微量元素分析由吉林大学科学测试实验中心完成,主量元素利用X射线荧光光谱法测定,精度优于10%;微量元素利用等离子光谱质谱(ICP-MS)分析方法测定,精度优于10%。

Rb-Sr、Sm-Nd同位素分析在中国科学技术大学放射性成因同位素地球化学实验室完成。准确地称取粉末样品100mg左右于15mL的Teflon闷罐中,滴入纯化HClO₄ 8~10滴摇匀后,加入2~3mL纯化HF,密闭加热一周左右以充分

表 1 郑庐断裂带辽河段始新世火山岩的主量 (wt%)、微量 ($\times 10^{-6}$) 元素分析结果Table 1 Analytical results of major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements of Eocene volcanic rocks in the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone

样品号 岩性	玄武质岩石											粗面质岩石										
	X10-1	X10-3	H28-10	H28-12	H28-13	Y71-23	X31-26	X31-27	H23-28	H25-7	H25-8	H28-11	H28-14	Y70-15	Y70-16	Y70-17	Y70-18	Y70-19	Y70-20	Y71-21	Y71-22	
SiO ₂	45.64	46.86	48.80	50.99	49.33	47.46	46.38	46.94	45.20	57.09	59.04	55.58	56.76	58.40	58.16	57.64	58.97	55.35	59.55	54.47	57.36	
TiO ₂	2.73	2.51	1.92	1.56	1.68	1.79	2.29	2.58	2.19	0.42	0.42	0.95	0.93	0.50	0.48	0.51	0.59	1.23	0.35	1.12	0.41	
Al ₂ O ₃	17.34	17.20	16.20	16.02	17.15	21.16	16.33	15.30	20.15	18.58	18.53	17.91	18.24	17.02	16.64	17.01	19.69	18.23	20.24	20.95	18.74	
Fe ₂ O ₃	7.25	6.68	4.52	4.89	4.32	4.51	7.31	8.71	3.76	3.27	3.72	4.00	4.44	3.32	4.14	2.35	2.68	4.08	1.13	6.67	3.92	
FeO	3.67	3.83	4.87	4.58	4.79	4.71	2.94	4.01	4.29	1.21	1.22	3.65	3.30	2.11	2.12	4.50	1.09	2.12	1.80	0.78	2.05	
MnO	0.14	0.00	0.12	0.10	0.16	0.11	0.30	0.23	0.14	0.12	0.10	0.13	0.13	0.10	0.12	0.09	0.03	0.07	0.07	0.04	0.21	
MgO	5.02	5.93	9.24	6.17	6.03	2.76	7.78	5.20	3.57	1.22	1.03	1.38	1.18	1.12	1.13	1.44	0.79	1.30	1.44	1.64	0.65	
CaO	7.02	8.82	4.53	4.89	5.76	6.26	7.04	9.45	10.37	2.64	1.40	2.85	1.73	2.82	2.94	2.86	0.91	2.41	1.47	2.13	3.07	
Na ₂ O	4.82	3.49	3.00	4.17	4.35	4.36	2.21	2.29	3.25	3.74	4.11	4.09	6.19	4.51	4.28	4.02	4.64	5.58	3.42	2.98	4.32	
K ₂ O	1.68	1.08	1.10	1.06	1.75	1.49	1.71	1.13	0.61	7.74	8.05	6.40	3.95	4.82	5.16	4.96	7.04	4.86	9.28	5.43	5.45	
P ₂ O ₅	0.73	0.71	0.37	0.45	0.36	0.52	0.55	0.59	0.68	0.23	0.12	0.30	0.22	0.13	0.12	0.13	0.15	0.39	0.09	0.18	0.12	
LOI	4.42	2.38	5.12	5.07	4.11	4.49	5.26	3.58	5.43	3.80	2.01	2.64	2.71	4.17	4.10	4.39	3.03	3.41	1.90	3.23	3.81	
Total	100.46	99.48	99.78	99.95	99.79	99.63	100.11	99.99	99.64	100.06	99.75	99.88	99.78	99.02	99.39	99.91	99.61	99.03	99.74	99.62	100.11	
Mg [#]	31	36	50	39	40	23	43	29	31	21	17	15	13	17	15	17	17	17	13	18	10	
Rb	25.7	7.70	18.9	16.7	33.3	4.16	15.2	26.4	17.1	101	68.8	44.3	37.2	49.9	52.0	32.7	75.4	60.8	130	117	65.4	
Sr	551	692	626	347	582	664	652	568	877	138	137	696	208	249	236	187	159	284	79.0	514	186	
Y	25.9	22.2	18.3	22.7	28.6	20.5	26.6	28.0	27.1	24.0	26.7	37.3	24.2	17.2	22.2	24.7	27.5	15.6	36.9	32.3	37.5	
Zr	183	186	188	187	277	213	212	230	241	581	598	469	472	412	382	355	478	297	579	552	550	
Nb	35.3	35.8	34.0	32.0	43.2	40.0	35.1	43.5	53.3	77.1	84.6	75.0	70.1	64.3	65.6	64.1	75.2	57.3	108	86.8	90.7	
Ba	357	357	197	141	305	344	267	358	413	360	480	1163	350	610	690	358	520	730	154	300	258	
Hf	4.16	4.17	3.82	3.80	5.55	4.26	4.34	4.73	5.17	9.00	8.20	8.81	8.3	7.20	6.70	7.03	8.50	4.60	11.90	9.84	9.66	
Ta	2.29	2.31	3.16	2.73	3.51	3.17	2.99	3.57	3.99	4.80	5.00	4.84	4.1	3.90	3.80	4.31	4.70	3.40	6.98	5.82	5.65	
Th	3.39	2.60	3.15	2.85	4.40	2.33	2.66	3.89	3.75	5.00	6.10	6.41	6.60	4.50	4.40	4.33	4.90	4.40	9.07	9.24	7.83	
U	0.81	0.90	3.20	2.06	2.70	2.99	1.82	2.85	1.65	1.40	1.40	2.24	3.60	1.50	1.80	3.39	1.50	1.00	3.19	3.19	3.14	
La	30.8	30.3	21.1	20.5	29.3	17.1	27.1	30.3	30.7	31.2	45.0	46.0	43.9	36.5	37.1	24.9	43.9	41.3	34.6	41.9	42.4	
Ce	65.0	63.2	44.1	41.8	55.5	35.5	52.4	60.2	61.9	45.3	70.9	80.0	88.6	51.3	51.9	49.3	51.3	64.5	68.7	77.6	79.0	
Pr	7.98	7.79	5.10	4.83	6.37	4.77	5.95	7.07	7.42	7.82	8.64	8.61	9.08	7.30	7.16	5.56	8.92	9.01	7.62	8.43	8.67	
Nd	33.3	32.4	20.0	19.5	24.6	19.8	23.8	28.0	30.0	29.5	29.6	31.1	33.6	27.6	26.4	20.5	32.3	35.0	27.4	29.4	30.4	
Sm	6.52	6.26	4.12	4.26	5.15	4.35	4.96	5.76	6.27	5.98	5.81	6.23	6.74	5.23	5.04	4.17	6.28	6.71	5.46	5.38	5.78	
Eu	2.26	2.19	1.45	1.53	1.74	1.78	2.10	1.99	2.17	1.21	1.20	1.93	1.83	1.33	1.15	1.20	1.32	1.97	0.65	1.48	1.34	
Gd	6.23	5.93	4.02	4.35	5.21	4.39	5.19	5.81	6.10	5.55	5.17	6.19	5.70	4.78	4.64	4.17	5.43	5.60	5.34	5.37	5.67	
Tb	0.93	0.89	0.60	0.67	0.80	0.65	0.77	0.82	0.86	0.90	0.85	0.97	0.99	0.78	0.75	0.68	0.86	0.75	0.91	0.82	0.91	
Dy	5.32	5.07	3.19	3.48	4.36	3.57	4.06	4.36	4.51	6.16	5.53	5.59	5.81	4.70	4.38	3.84	5.27	4.43	5.53	4.68	5.34	
Ho	0.92	0.88	0.58	0.64	0.80	0.66	0.74	0.76	0.77	1.26	1.20	1.06	1.15	0.93	0.95	0.73	1.09	0.83	1.08	0.86	1.03	
Er	2.57	2.44	1.71	1.87	2.51	1.89	2.16	2.23	2.16	3.66	3.61	3.44	3.4	2.68	2.81	2.29	3.14	2.08	3.60	2.63	3.46	
Tm	0.41	0.38	0.25	0.27	0.35	0.27	0.30	0.30	0.29	0.56	0.58	0.52	0.51	0.40	0.41	0.34	0.46	0.30	0.54	0.38	0.52	
Yb	2.39	2.27	1.56	1.65	2.29	1.65	1.83	1.83	1.74	3.64	3.62	3.31	3.18	2.62	2.59	2.20	3.02	1.85	3.54	2.39	3.54	
Lu	0.35	0.33	0.22	0.24	0.33	0.24	0.27	0.26	0.25	0.58	0.58	0.50	0.54	0.41	0.41	0.33	0.51	0.28	0.53	0.36	0.55	
δEu	1.08	1.09	1.08	1.09	1.03	1.25	1.26	1.05	1.07	0.64	0.66	0.95	0.89	0.81	0.72	0.88	0.68	0.96	0.37	0.84	0.71	

注: Mg[#] = 100 * Mg / (Mg + Fe), 摩尔比

表2 郯庐断裂带辽河段始新世火山岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 2 Sr-Nd isotopic compositions of Eocene volcanic rocks in the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone

样品号	岩性	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (\pm 2\sigma)$	I_{Sr}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} (\pm 2\sigma)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$
H28-10		0.087	0.703402 ± 13	0.7034	0.1244	0.512907 ± 5	5.60
H28-12		0.139	0.703651 ± 14	0.7036	0.1319	0.512852 ± 5	4.49
H28-13		0.166	0.703986 ± 11	0.7039	0.1268	0.512812 ± 4	3.73
Y71-23	玄武质岩石	0.034	0.704178 ± 10	0.7042	0.1270	0.512803 ± 5	3.56
X31-26		0.135	0.703664 ± 9	0.7036	0.1243	0.512813 ± 3	3.77
X31-27		0.057	0.703579 ± 12	0.7035	0.1265	0.512878 ± 4	5.04
H23-28		0.024	0.703267 ± 11	0.7033	0.1301	0.512921 ± 3	5.86
H28-11		0.184	0.703762 ± 13	0.7037	0.1212	0.512788 ± 4	3.31
Y70-18		0.505	0.704770 ± 11	0.7045	0.1230	0.512848 ± 5	4.46
Y70-19	粗面质岩石	4.796	0.706438 ± 10	0.7038	0.1206	0.512817 ± 5	3.88
Y71-21		0.657	0.703839 ± 12	0.7035	0.1107	0.512783 ± 4	3.25
Y71-22		1.020	0.704457 ± 11	0.7039	0.1151	0.512795 ± 4	3.47

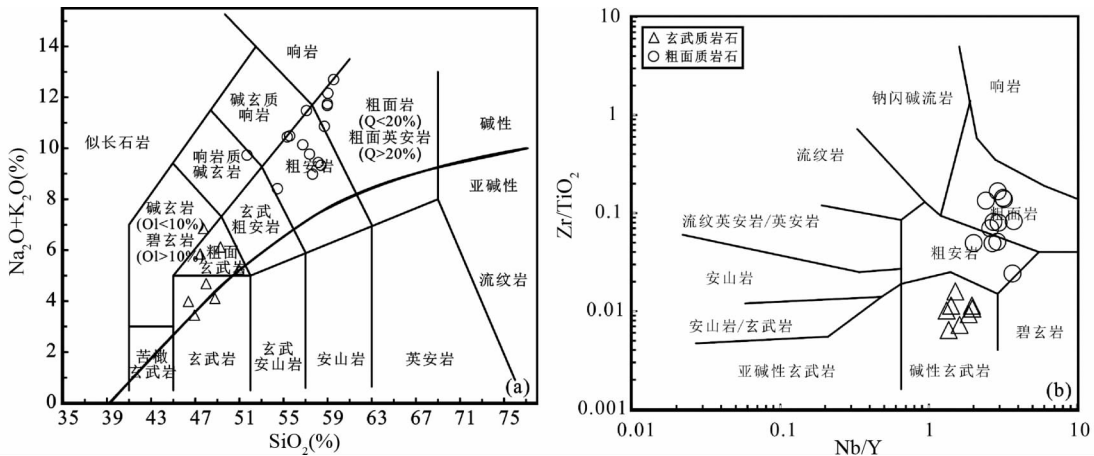


图4 郯庐断裂带辽河段始新世火山岩 TAS 分类图解(a, 据 Le Maitre *et al.*, 1989; 碱性分界线据 Irvine and Baragar, 1971) 和 Zr/TiO_2 - Nd/Y 图解(b, 据 Winchester and Floyd, 1977)

图中含量为去除烧失量后重新换算成 100% 的结果, 图 5 同; 后图图例同此图

Fig. 4 TAS (Total alkaline vs. silicon) (a, after Le Maitre *et al.*, 1989; the alkaline boundary after Irvine and Baragar, 1971) and Zr/TiO_2 vs. Nd/Y (b, after Winchester and Floyd, 1977) diagram for Eocene volcanic rocks in the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone

All major element contents are normalized to 100% on LOI (loss of ignition)-free basis before plotted in these diagrams, also in Fig. 5; The legends in Fig. 5-Fi. 11 are the same as in this figure

溶解样品。Rb-Sr 同位素和 REE 分离纯化在装有 5mL AG50W-X12 交换树脂(200 ~ 400 目)的石英交换柱中完成, Sm-Nd 同位素的分离纯化在装有 1.7mL Teflon 粉末的石英交换柱中完成。同位素比值的测试在 MAT-262 热电质谱计完成, Rb-Sr 同位素比值测定采用 Ta 金属带和 Ta 发射剂; Sm-Nd 同位素比值测定采用 Re 金属带。对标准溶液 NBS987 的重复测量结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710249 \pm 0.000012$ ($n = 38$), 标准溶液 La Jolla 的重复测量结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511869 \pm 0.000006$ ($n = 25$)。同位素比值的分析误差用 2σ 给出, 同位素比值测量精度优于 0.003%。测量得到的同位素比值采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行

质量分馏校正。全岩 Sr、Nd 同位素分析的全流程本底分别是 $< 200\text{pg}$ 、 $< 100\text{pg}$ 。

5 分析结果

5.1 主量元素

在全碱- SiO_2 (TAS) 图上(图 4a), 火山岩也显示出中性和基性岩的特点, 多数落在玄武岩、粗面玄武岩、粗安岩和粗面岩的范围, 主体属碱性系列。考虑到蚀变过程中 K、Na 等碱金属元素较活泼, 用 TAS 图解判别岩石类型可能会产生偏差, 因此, 我们选择一些在蚀变过程中不活泼的元素 (Ti、Zr、

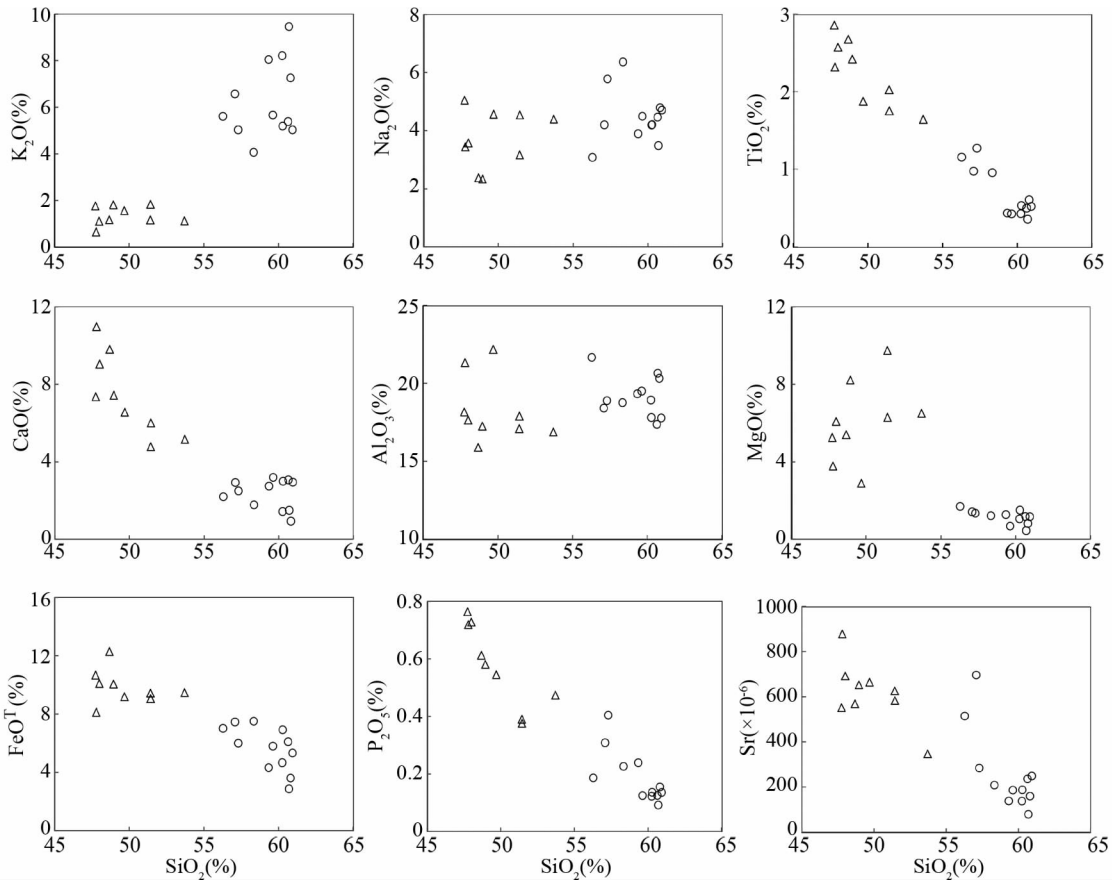


图5 郟庐断裂带辽河段始新世火山岩的 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagram of the Eocene volcanic rocks in the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone

Y、Nb)来做进一步的判别。在 Zr/TiO₂-Nb/Y 图上(图 4b), 样品落入碱性玄武岩、粗安岩和粗面岩区, 与 TAS 图解一样显示出碱性的特征。根据岩石中钾、钠的相对含量, 可进一步区分为钠质和钾质两种类型, 其中玄武质岩石 K₂O/Na₂O 多数小于 1, 属钠质类型; 而粗面质岩石 K₂O/Na₂O 多大于 1, 属钾质类型。因此玄武质岩石和粗面质岩石分属钠质和钾质两种类型。

盆地内始新世中基性火山岩 SiO₂ 变化于 45.20% ~ 59.55%, 缺乏典型的酸性流纹质火山岩。火山岩具有如下特征, (1) 富碱, 偏基性玄武质岩石的 K₂O + Na₂O 值多大于 4%, 粗面质岩石的 K₂O + Na₂O 值均在 8% 以上, 反映在里特曼指数(σ)上, 绝大多数样品大于 3.3, 属碱性岩石组合; (2) 富铝, Al₂O₃ 主要变化于 15% ~ 22% 之间, SiO₂ 与 Al₂O₃ 缺乏明显的相关性(图 5f)。在 Harker 图解上(图 5), 火山岩的 SiO₂ 与 FeO^T、P₂O₅、TiO₂ 和 CaO 均呈良好的负相关关系, 表明存在着单斜辉石、磷灰石及钛铁矿等矿物的分离结晶作用(李献华, 2000); (3) Mg 指数变化很大, 玄武质岩石 Mg[#] = 23 ~ 50, 比 Frey *et al.* (1978) 定义的原生岩浆 Mg[#] 范围(68 ~ 75) 和中国东部新生代玄武岩原始岩浆的 Mg[#] 范围(60 ~ 68) (Fan and Hooper, 1991) 明显偏低, 所以这些母岩浆不代表原始地幔岩浆, 而是原始地幔岩浆在地幔条件下经历地壳

混染或者分离结晶后的岩浆。

5.2 稀土、微量元素

玄武质岩石和粗面质岩石具有相似的稀土元素组成, 大多数表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损, 粗面质岩石稀土总量与轻、重稀土分异富集程度明显高于玄武质岩石(图 6a, b)。玄武质岩石 Σ REE 介于 $96.6 \times 10^{-6} \sim 165.5 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 132×10^{-6} , $(La/Yb)_N = 8.19 \sim 27.20$, 平均 15.77, 具有 Eu 正异常($\delta Eu = 1.03 \sim 1.26$), 呈现出轻稀土富集、重稀土亏损的右倾配分曲线, 且重稀土内部分馏不明显, $(Dy/Yb)_N = 0.98 \sim 1.65$ 。粗面质岩石 Σ REE 为 $120 \times 10^{-6} \sim 205 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N = 6.76 \sim 25.54$, 轻稀土富集, 部分粗面质岩石具有明显的 Eu 负异常($\delta Eu = 0.37 \sim 0.77$), 表明存在斜长石分离结晶作用的可能性。

在微量元素原始地幔标准化图中(图 7a, b), 玄武质岩石总体富集 Ba、Sr 等大离子亲石元素与 Ta、Hf 等高场强元素。粗面质岩石同样富集大离子亲石元素和亏损高场强元素, 不同的是表现出 Sr、P 和 Ti 元素的强烈亏损, 这可能与斜长石、磷灰石、金红石、钛铁矿等的分离结晶密切相关。

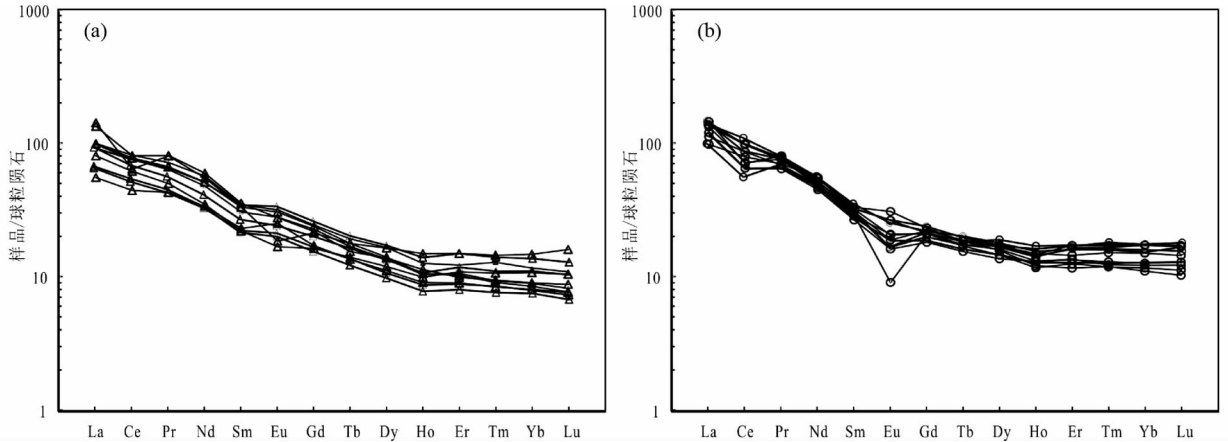


图6 郑庐断裂带辽河段始新世玄武质岩石(a)和粗面质岩石(b)球粒陨石标准化稀土元素配分图(标准化值据 Boynton, 1984)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of the Eocene volcanic rocks in the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone (normalization values after Boynton, 1984)

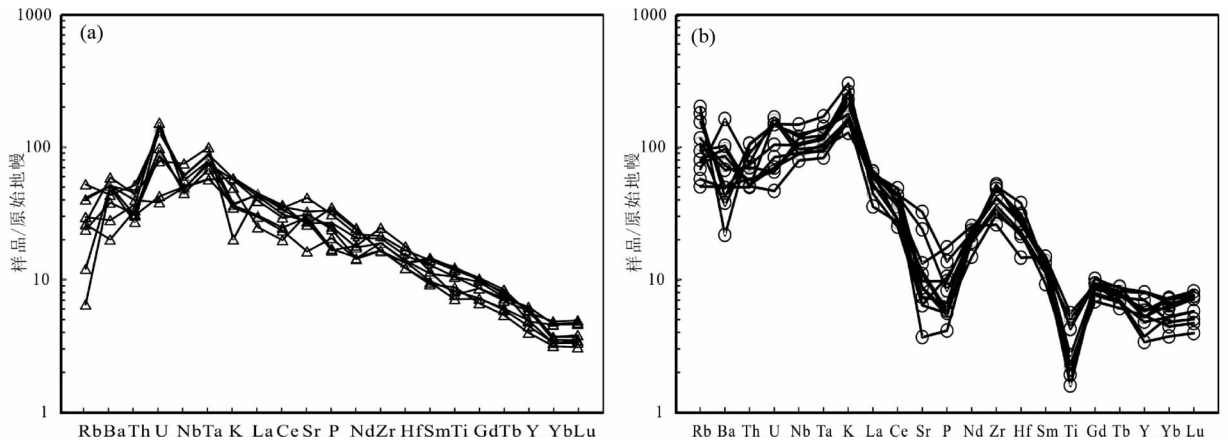


图7 郑庐断裂带辽河段始新世玄武质岩石(a)和粗面质岩石(b)原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

图中K、P、Ti元素含量为去除烧失量后重新换算成100%的结果

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of the Eocene volcanic rocks in the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

K, P, Ti element contents are normalized to 100% on LOI-free basis before plotted in these diagrams

5.3 Sr-Nd 同位素

始新世玄武质岩石与粗面质岩石的 Sr、Nd 同位素分析结果及计算的 ϵ_{Nd} 值见表2。根据前人对沙三段中基性火山岩的年代学资料及其与沉积地层接触关系(陈文寄等, 1992; 杨默函等, 2006), 我们选定 39Ma 作为计算沙河街组三段中基性火山岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的年龄。玄武质岩石的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在 0.7033 ~ 0.7042 之间, $\epsilon_{Nd}(t) = 3.56 \sim 5.86$, 全部为正值。粗面质岩石的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在 0.7035 ~ 0.7045 之间, $\epsilon_{Nd}(t) = 3.25 \sim 4.46$, 与玄武质岩石几乎完全一致, 暗示它们来自相似的源区。正 ϵ_{Nd} 值显示了亏损地幔

的特征, 与洋岛玄武质岩石的 Sr、Nd 同位素组成比较一致(图8)。

6 讨论

6.1 岩浆源区性质与岩浆演化

基性的玄武质岩石来自于地幔没有异议, 而对于与玄武质岩石共存的粗面质岩石的成因则有多种不同认识: (1) 源区组成不同所致。粗面质岩石和玄武质岩石分别来自不同的母岩浆, 二者虽然在空间上共生, 但其源区并不相同, 两者的共生可能只是与同一热事件有关(Hildreth, 1981; Doe *et*

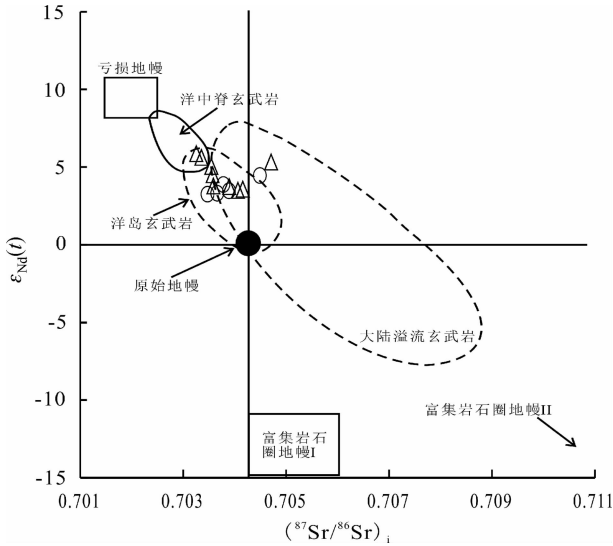


图8 郟庐断裂带辽河段始新世火山岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 关系图(地幔端元投影区域引自 Zindler and Hart, 1986)

Fig. 8 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram of the Eocene volcanic rocks in the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone (the fields of mantle end-members are all from Zindler and Hart, 1986)

al., 1982; Davies and MacDonald, 1987)。由于这种基性岩浆和中性岩浆来源不同,生成的玄武质岩石和粗面质岩石在微量元素和 Sr、Nd 同位素组成上就有很大的差异(Doe *et al.*, 1982; Davies and MacDonald, 1987);(2)源区地幔组成差异与地壳混染程度不同综合影响的结果。这一变化往往与构造背景变化下地壳组分的混染程度有关,另外,随着时间的演化,构造活动的影响下,其源区也可能随之发生变化(Glazner and Ussler, 1989);(3)岩浆房分异演化所致。粗

面质岩石和玄武岩具有共同的幔源母岩浆,粗面质岩石是由玄武质岩浆经结晶分异作用形成的(Grove and Donnelly-Nolan, 1986; MacDonald, 1987)。这种来源的粗面质岩石一般具有和玄武质岩石相似的微量元素和 Sr、Nd 同位素特征(Brouxel *et al.*, 1987; Hochstaedter *et al.*, 1990; Geist, 1998)。

研究区火山岩的 Th/La 比值(≈ 0.14)较低,接近原始地幔和球粒陨石值(Th/La ≈ 0.12 , Sun and McDonough, 1989),与陆壳(Th/La ≈ 0.3 , Plank, 2005)明显不同,此外始新世火山岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较高(3.25 ~ 5.86),因此它们未经过明显的陆壳混染。样品的 Nb 含量均大于 7×10^{-6} 且其 $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ 比值均小于 2,与由俯冲板片熔体交代过的上覆地幔楔部分熔融形成的典型富 Nb 玄武岩(Nb $> 7 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}} < 2$, Sajona *et al.*, 1996)相一致。前文中已排除地壳混染的存在,研究区玄武质岩石和粗面质岩石相似的主量、微量元素特征,氧化物与 SiO_2 呈明显的线性相关(图 5)以及 La/Yb 值不随 La 变化而发生明显改变(图 9)均表明本区粗面质岩石和玄武质岩石为同源岩浆分离结晶形成。相同且较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值则表明二者均来自略亏损的地幔源区。在 Sr-Nd 同位素初始值图中(图 8),绝大部分样品落入 OIB(洋岛玄武岩)或是与 CFB(大陆溢流玄武岩)分界的区域附近,说明火山岩岩浆很可能来自类似 OIB-CFB 的地幔源区。在 Ta/Yb-Th/Yb 图解(图 10a)上,两类火山岩都指示相对富集的地幔源区。这说明玄武质岩石和粗面质岩石都来自一个 MORB(洋中脊玄武岩)源区与洋岛玄武岩源区过渡的地幔源区,而非典型的亏损地幔源区。在 Th/La-Rb/La 图解(图 10b)上,显示曾受俯冲板片富集流体改造过的特征。因此,我们认为,辽河盆地始新世玄武质岩石与粗面质岩石的成分变异应主要为岩浆房分异演化所形成。

Chung *et al.* (1997) 提出的岩浆房对流与双扩散模型可很好的解释本区两种岩浆的形成过程。由于粗面质岩石和

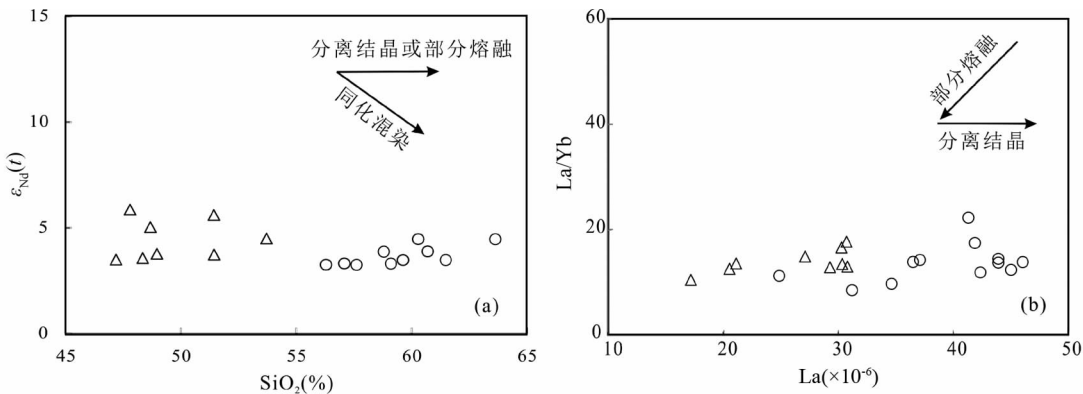


图9 郟庐断裂带辽河段始新世火山岩岩浆过程判别图解
图 a 中 SiO_2 含量为去除烧失量后重新换算成 100% 的结果

Fig. 9 Magma process discrimination diagrams for the Eocene volcanic rocks in the Liaohe segment of the Tan-Lu fault zone
 SiO_2 contents are normalized to 100% on LOI-free basis before plotted in Fig. 9a

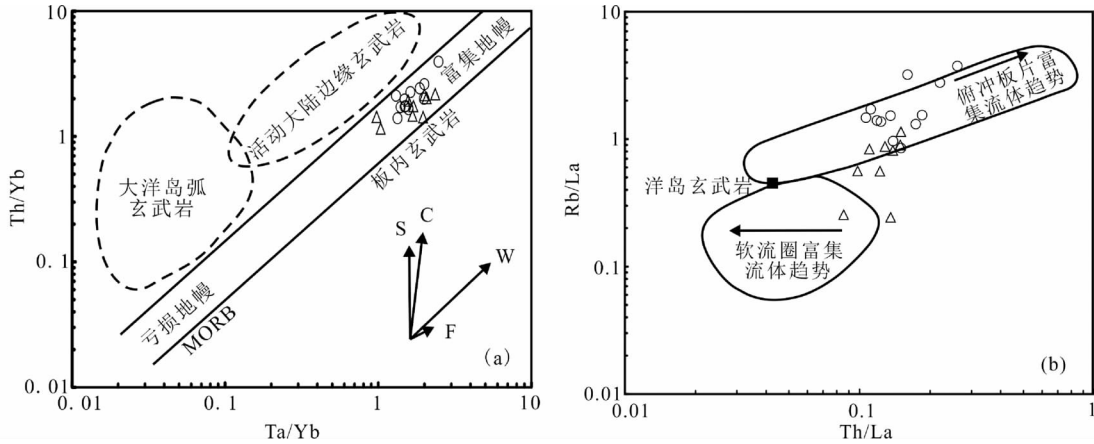


图 10 郯庐断裂带辽河段始新世火山岩 Th/Yb-Ta/Yb (a) 和 Rb/La-Th/La (b) 图解

图中箭头表示各种影响因素:俯冲带流体(S)、地壳混染(C)、板内富集(W)和结晶分异(F)

Fig. 10 Diagrams of Th/Yb vs. Ta/Yb (a) and Rb/La vs. Th/La (b) of the Eocene volcanic rocks in the Liaohé segment of the Tan-Lu fault zone

Vectors shown indicate the influence of subduction components (S), crustal contamination (C), within plate enrichment (W), fractional crystallization (F)

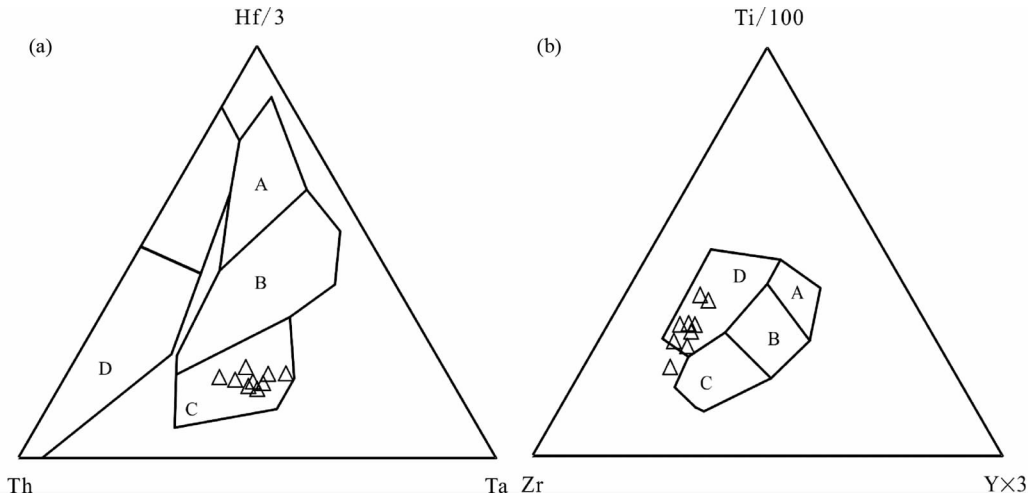


图 11 郯庐断裂带辽河段始新世火山岩的 Hf-Th-Ta 判别图解 (a, 据 Wood, 1980) 及 Ti-Zr-Y (b, 底图据 Pearce and Cann, 1973)

图(a)中:A-N-MORB; B-E-MORB; C-碱性板内玄武岩; D-火山弧玄武岩,其中 Hf/Th > 3 为岛弧拉斑玄武岩, Hf/Th < 3 为钙碱性玄武岩;图(b)中:A-岛弧拉斑玄武岩; B-MORB、岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩; C-钙碱性玄武岩; D-板内玄武岩

Fig. 11 Hf-Th-Ta (a, after Wood, 1980) and Ti-Zr-Y (b, after Pearce and Cann, 1973) discriminant diagrams of the Eocene volcanic rocks in the Liaohé segment of the Tan-Lu fault zone

In Fig. 11a: A, N-MORB; B, E-MORB; C, within-plate alkali basalts; D, volcanic-arc basalts. Island-arc tholeiites plot in the field D where Hf/Th > 3 and calc-alkaline basalts where Hf/Th < 3. In Fig. 11b: A, volcanic arc basalts, B, MORB, Island-arc tholeiites and calc-alkaline basalts, C, calc-alkaline basalts, D, within-plate basalts

玄武质岩石的粘度差异,盆地裂解初期会先形成玄武岩,同时可见到大量的粗面质岩石和玄武质岩石共生和岩浆混合现象,这也与我们根据观察大量井下样品得到的宏观地质事实相符。根据本区火山岩的岩石性质在时间和空间上的变化,初步认为玄武质岩石和粗面质岩石形成于同一岩浆房中,在岩浆房边缘形成的冷凝边阻止了围岩组分的加入和地

壳混染作用的发生,岩浆因冷却而发生结晶分异,晶出的矿物堆积在岩浆房的底部,同时形成双扩散界面,界面下部为玄武质岩浆,经大量单斜辉石、斜长石、磷灰石以及 Ti-Fe 氧化物的结晶分异后形成的较轻熔体运移到上部形成粗面质岩浆。

6.2 构造背景

关于郟庐断裂带辽河段始新世火山岩形成的动力学机制一直存在分歧。部分学者认为是受太平洋板块俯冲影响形成的弧后裂谷(任建业和李思田, 2000; 刘中云等, 2001; 侯贵廷等, 2001), 高知云和章濂澄(1993)和肖龙等(2004)则认为本区裂谷环境是地幔柱活动的产物, 这些假说都需要更多的证据予以证实。

郟庐断裂带辽河段始新世玄武岩具有与板内玄武岩相似的地球化学特征, 在 Hf-Th-Ta 判别图解(图 11a)和 Ti-Zr-Y 图解(图 11b)中投点也落在板内区域, 表明其在始新世为板内裂谷的构造环境。地幔柱模型虽然能够解释 OIB 型玄武岩的出现, 但不能很好的解释区域大规模伸展和走滑断裂的形成(侯贵廷等, 2001)。在同位素的协变图(图 8)中, 数据点均位于洋岛玄武岩构成的地幔系列及其附近, 有较明显的 EM 及 DM 属性, 反映了 DM、EM I 和 EM II 三个地幔端元之间不同程度的混合。通常认为, EM I 岩石圈地幔的富集主要与板块俯冲作用有关(Hawkesworth *et al.*, 1990), 它是因板块俯冲而导致 HIMU 地幔与俯冲大洋沉积物相混合的结果(Weaver, 1991; Rollinson, 1993)。中国东部山东、东北地区新生代玄武岩的研究认为玄武岩源区中有俯冲大洋壳物质参与(Xu *et al.*, 2012; Zeng *et al.*, 2010, 2011), Tatsumoto and Nakamura (1991)、许文良等(2004)曾用与古板块俯冲带有关的地幔交代作用机制来解释中国东北、日本海及部分日本岛弧中新生代玄武岩的成因。郟庐断裂带早白垩世-古近纪的活动被认为与海沟后退引起的弧后拉张有关(Zhu *et al.*, 2010; 朱光等, 2011)。本文对郟庐断裂带辽河段的研究也认为本区始新世火山岩的形成与古太平洋板块向东亚大陆俯冲密切相关, 其可能是弧后拉张环境下, 曾遭受俯冲板片流体交代的地幔岩石部分熔融的产物。

6.3 火山作用与郟庐断裂

郟庐断裂带辽河段新生代主要经历了右旋走滑运动, 其强度于沙河街组下部较弱、向上逐渐增强, 到东营组时期达到高峰(Chen *et al.*, 2005; Tong *et al.*, 2008)。该段的主干走滑断层(如图 1 中的驾掌寺和驾东断裂)具有走滑和伸展双重特征, 在渐新统东营组沉积之前表现为控陷正断层, 靠近断层一侧地层厚度大, 反映出断陷充填特点; 东营组沉积早中期走滑-拉分-沉降作用最为明显, 发育一系列花状构造, 且在主干走滑断层附近沉积厚度最大, 表现为断-拗转化特点(李思伟等, 2014)。

辽河段古近系火山岩喷发的频率和强度, 可用图 2 火山-沉积地层序列中火山岩出现的层数和厚度来近似表达。由图 2 可见, 无论是层数(喷发频率)还是厚度(喷发强度), 沙河街组火山岩都是最发育的, 火山岩占地层比例也最大。将走滑构造运动与火山作用特点相比较可见, 郟庐断裂带辽河段火山作用最强的时期, 发生在走滑运动由弱变强的中期,

即, 沙河街组中部。而到了走滑构造运动最显著的东营组时期, 火山喷发表现为高频率(层数多)低强度(层薄)的特点。与始新统沙三段相比, 渐新统东营组中火山岩所占地层比例明显减少许多。

郟庐断裂带辽河段新生代盆地充填, 属于典型的受到同期走滑运动改造的裂谷作用产物, 是郟庐断裂系统新生代活动的结果(Hsiao *et al.*, 2010)。火山岩作为盆地充填的重要组成部分, 无疑也是区域构造作用的结果。从断裂-火山二者间时空配置关系看, 火山岩主要发育于主干走滑断层附近, 且厚度大于 1km 的火山岩距主干断裂通常在 2km 范围内(李思伟等, 2014)。因此推测, 郟庐断裂系主干走滑断层是辽河段火山作用的主要岩浆运移通道。根据现今该区的岩石圈结构(卢造勋和夏怀宽, 1993), 推测当时该区的断裂切割所构成的岩浆疏导系统深度应大于 90km。

7 结论

(1) 郟庐断裂带辽河段始新世火山岩是一套富铝、碱性系列的玄武质-粗面质岩石, 玄武质岩石和粗面质岩石在空间上共生, 岩浆来源于经历过俯冲大洋板片流体改造的亏损地幔, 是同源岩浆在岩浆房内经历了分离结晶作用的产物。

(2) 郟庐断裂带辽河段始新世中基性火山岩受控于太平洋板块俯冲导致的弧后拉张构造环境。

(3) 郟庐断裂带是辽河段新生代火山岩浆活动的通道, 控制了火山岩的空间分布。

References

- Boynnton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam; Elsevier
- Brouxel M, Lapiere H, Michard A and Albarède F. 1987. The deep layers of a Paleozoic arc: Geochemistry of the Copley-Balaklala series, northern California. Earth and Planetary Science Letters, 85 (4): 386–400
- Chen HL, Yang SF, Jia CZ, Sun HB and Cheng XG. 2005. Origin of Cenozoic 'reverse faults' in northeastern China: An example from the Rongxintun fault in the Liaobe basin, China. Journal of Asian Earth Sciences, 25(1): 167–172
- Chen ZY, Qiu JT, Wang PJ, Li P, Zhang PX, Liu X, Hao T and Nie GM. 2011. Relationship between volcanic rocks and hydrocarbon accumulation during dominant period of basin formation in Liaobe depression. Acta Sedimentologica Sinica, 29(4): 798–808 (in Chinese with English abstract)
- Chung SL, Cheng H, Jahn BM, O'Reilly SY and Zhu BQ. 1997. Major and trace element, and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleogene volcanism in South China prior to the South China Sea opening. Lithos, 40(2–4): 203–220
- Davies GR and MacDonald R. 1987. Crustal influences in the petrogenesis of the naivasha basalt-comendite complex: Combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints. Journal of Petrology, 28(6): 1009–1031
- Doe BR, Leeman WP, Christiansen RL and Hedge CE. 1982. Lead and strontium isotopes and related trace elements as genetic tracers in the Upper Cenozoic rhyolite-basalt association of the Yellowstone Plateau

- volcanic field. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978 ~ 2012), 87(B6): 4785–4806
- Fan QC and Hooper PR. 1991. The Cenozoic basaltic rocks of eastern China; Petrology and chemical composition. *J. Petrology*, 32(4): 765–810
- Frey FA, Green DH and Roy SD. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis; A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *Journal of Petrology*, 19(3): 463–513
- Gao ZY and Zhang LC. 1993. The Eocene Period volcanic rocks in Liaohe Basin and their analysis of tectonic setting. *Journal of Northwest University*, 23(4): 365–377 (in Chinese with English abstract)
- Geist V. 1998. *Deer of the World: Their Evolution, Behaviour, and Ecology*. Mechanicsburg, PA: Stackpole Books
- Grove TL and Donnelly-Nolan JM. 1986. The evolution of young silicic lavas at Medicine Lake volcano, California; Implications for the origin of compositional gaps in calc-alkaline series Lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(3): 281–302
- Hawkesworth CJ, Kempton PD, Rogers NW, Ellam RM and Van Calsteren PW. 1990. Continental mantle lithosphere, and shallow level enrichment processes in the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 96(3–4): 256–268
- Hildreth W. 1981. Gradients in silicic magma chambers; Implications for lithospheric magmatism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978 ~ 2012), 86(B11): 10153–10192
- Hochstaedter AG, Gill JB and Morris JD. 1990. Volcanism in the Sumisu Rift, II. Subduction and non-subduction related components. *Earth and Planetary Science Letters*, 100(1–3): 195–209
- Hou GT, Qian XL and Cai DS. 2001. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37(6): 845–851 (in Chinese with English abstract)
- Hsiao LY, Graham SA and Tilander N. 2010. Stratigraphy and sedimentation in a rift basin modified by synchronous strike-slip deformation; Southern Xialiao basin, Bohai, offshore China. *Basin Research*, 22(1): 61–78
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 532–548
- Jin LY. 1989. Petrologic and Geochemical characteristics of Cenozoic volcanic rocks in the middle segment of the Tancheng-Lujiang fault zone. *Acta Petrologica Sinica*, 5(4): 45–57 (in Chinese with English abstract)
- Le Maitre RW, Bateman P and Dudek A. 1989. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Oxford: UK, Blackwell Scientific Publications
- Li SW, Wang PJ, Ding XC, Fang BZ, Feng YH and Sun XM. 2014. The relationship of strike-slip belts and volcanic rocks distribution in the eastern depression Liaohe basin. *Geological Review*, 60(3): 591–600 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 2000. Geochemistry of the Late Paleozoic radiolarian cherts within the NE Jiangxi ophiolite melange and its tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 43(6): 617–624
- Liu RX. 1992. *The Age and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rock in China*. Beijing: Seismological Press, 1–43 (in Chinese)
- Liu ZY, Xiao SB and Jiang ZX. 2001. Volcanic rocks of Bohai Bay Basin in Tertiary and their genesis. *Journal of the University of Petroleum, China*, 25(1): 22–26 (in Chinese with English abstract)
- Lu ZX and Xia HK. 1993. Geoscience transect from Dong Ujimqin of Inner Mongolia to Donggou of Liaoning, China. *Acta Geophysica Sinica*, 36(6): 765–772 (in Chinese with English abstract)
- MacDonald R. 1987. Quaternary peralkaline silicic rocks and caldera volcanoes of Kenya. In: Fitton JG and Upton BGJ (eds.). *Alkaline Igneous Rocks*. Geological Society, London, Special Publications, 30(1): 313–333
- Niu ML, Zhu G, Liu GS, Song CZ and Wang DX. 2005. Cenozoic volcanic activities and deep processes in the middle south sector of the Tan-Lu fault zone. *Chinese Journal of Geology*, 40(3): 390–403 (in Chinese with English abstract)
- Niu ML, Xie CL, Song CZ, Wang DX and Xiang BW. 2007. K-Ar dating of early Cretaceous volcanic rocks along the Tan-Lu fault zone and its tectonic significance. *Chinese Journal of Geology*, 42(2): 382–387 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300
- 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
- Ratschbacher L, Hacker BR, Webb LE, McWilliams M, Ireland T, Dong SW, Calvert A, Chateigner D and Wenk HR. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China; Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu Fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978 ~ 2012), 105(B6): 13303–13338
- Ren JY and Li ST. 2000. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the Western Pacific. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 203–213 (in Chinese with English abstract)
- Rollinson HR. 1993. A terrane interpretation of the Archaean Limpopo Belt. *Geological Magazine*, 130(6): 755–765
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H, Cotton J and Defant MJ. 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines). *Journal of Petrology*, 37(3): 693–726
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Sun XM, Wang SQ, Wang YD, Du JY and Xu QW. 2010. The structural feature and evolutionary series in the northern segment of Tancheng-Lujiang fault zone. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 165–176 (in Chinese with English abstract)
- Tatsumoto M and Nakamura Y. 1991. DUPAL anomaly in the Sea of Japan; Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12): 3697–3708
- Tong HM, Yu FS and Geng CB. 2008. Characteristics and evolution of strike-slip tectonics of the Liaohe Western Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Science*, 5(3): 223–229
- Wan TF and Zhu H. 1996. The maximum sinistral strike-slip and its forming age of Tancheng-Lujiang fault zone. *Geological Journal of China Universities*, 2(1): 14–27 (in Chinese with English abstract)
- Weaver BL. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions; Trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2–4): 381–397
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magmas series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problem 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
- Xiao L, Wang FZ, Wang H and Pirajno F. 2004. Mantle plume tectonics constraints on the formation of Songliao and Bohaiwan Basins. *Earth Science*, 29(3): 283–292 (in Chinese with English abstract)
- Xiao Y, Zhang HF, Fan WM, Ying JF, Zhang J, Zhao XM and Su BX. 2010. Evolution of lithospheric mantle beneath the Tan-Lu fault zone, eastern North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. *Lithos*, 117(1–4): 229–246
- Xie CL, Zhu G, Niu ML and Liu XM. 2009. Geochemistry of Late Mesozoic volcanic rocks from Chuzhou area and its implication for the

- lithospheric thinning beneath the Tan-Lu fault zone. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 92–108 (in Chinese with English abstract)
- Xu JW and Ma GF. 1992. Review of the Tan-Lu Fault Zone for ten years. *Geological Review*, 38(4): 316–324 (in Chinese with English abstract)
- Xu JW and Zhu G. 1994. Tectonic models of the Tan-Lu fault zone, eastern China. *International Geology Review*, 36(8): 771–784
- Xu WL, Wang DY, Wang QH, Pei FP and Lin JQ. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of hornblende and biotite in Mesozoic intrusive complex from the North China Block: Constraints on the time of lithospheric thinning. *Geochimica*, 33(3): 221–231 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG. 2014. Recycled oceanic crust in the source of 90–40Ma basalts in North and Northeast China: Evidence, provenance and significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 49–67
- Xu Z, Zhao ZF and Zheng YF. 2012. Slab-mantle Xiao interaction for thinning of cratonic lithospheric mantle in North China: Geochemical evidence from Cenozoic continental basalts in central Shandong. *Lithos*, 146–147: 202–217
- Yang MH, Hou GT and Shi G. 2006. K-Ar geochronology of Cenozoic volcanic rocks of east depression in Liaohe basin and its geological significance. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 42(2): 184–191 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Nie SY. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12(4): 801–813
- Zeng G, Chen LH, Hofmann AW, Jiang SY and Xu XS. 2011. Crust recycling in the sources of two parallel volcanic chains in Shandong, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(3–4): 359–368
- Zeng G, Chen LH, Xu XS, Jiang SY and Hofmann AW. 2010. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China. *Chemical Geology*, 273(1–2): 35–45
- Zhu G, Niu ML, Liu GS, Wang YS, Xie CL and Li CC. 2005a. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the strike-slip movement on the Feidong part of the Tan-Lu Fault Belt. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 303–316 (in Chinese with English abstract)
- Zhu G, Xie CL, Wang YS, Niu ML and Liu GS. 2005b. Characteristics of the Tan-Lu high-pressure strike-slip ductile shear zone and its $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1687–1702 (in Chinese with English abstract)
- Zhu G, Liu GS, Niu ML, Xie CL, Wang YS and Xiang BW. 2009. Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China. *International Journal of Earth Sciences*, 98(1): 135–155
- Zhu G, Niu ML, Xie CL and Wang YS. 2010. Sinistral to Normal Faulting along the Tan-Lu Fault Zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin. *The Journal of Geology*, 118(3): 277–293
- Zhu G, Piao XF, Zhang L, Zhang BL, Chen Y and Hu SQ. 2011. Evolution of extensional direction in the Hefei basin and its dynamic mechanism. *Geological Review*, 57(2): 153–166 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493–571
- 析. 西北大学学报, 23(4): 365–377
- 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 2001. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 37(6): 845–851
- 金隆裕. 1989. 郟庐断裂带中段新生代火山岩的岩石学和地球化学特征. *岩石学报*, 5(4): 45–57
- 李思伟, 王璞珺, 丁秀春, 方炳钟, 冯玉辉, 孙晓猛. 2014. 辽河东部凹陷走滑构造及其与火山岩分布的关系. *地质论评*, 60(3): 591–600
- 李献华. 2000. 赣东北蛇绿混杂岩带中硅质岩的地球化学特征及构造意义. *中国科学(D辑)*, 30(3): 284–290
- 刘若新. 1992. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1–43
- 刘中云, 肖尚斌, 姜在兴. 2001. 渤海湾盆地第三系火山岩及其成因. *石油大学学报(自然科学版)*, 25(1): 22–26
- 卢造勋, 夏怀宽. 1993. 内蒙古东乌珠穆沁旗-辽宁东沟地质断面. *地球物理学报*, 36(6): 765–772
- 牛漫兰, 朱光, 刘国生, 宋传中, 王道轩. 2005. 郟庐断裂带中-南段新生代火山活动与深部过程. *地质科学*, 40(3): 390–403
- 牛漫兰, 谢成龙, 宋传中, 王道轩, 向必伟. 2007. 郟庐断裂带早白垩世火山岩的 K-Ar 年龄及其构造意义. *地质科学*, 42(2): 382–387
- 任建业, 李思田. 2000. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景. *地学前缘*, 7(3): 203–213
- 孙晓猛, 王书琴, 王英德, 杜继宇, 许强伟. 2010. 郟庐断裂带北段构造特征及构造演化序列. *岩石学报*, 26(1): 165–176
- 万天丰, 朱鸿. 1996. 郟庐断裂带的最大左行走滑断距及其形成时期. *高校地质学报*, 2(1): 14–27
- 肖龙, 王方正, 王华, Pirajno F. 2004. 地幔柱构造对松辽盆地及渤海湾盆地形成的制约. *地球科学*, 29(3): 283–292
- 谢成龙, 朱光, 牛漫兰, 柳小明. 2009. 滁州火山岩地球化学及其对郟庐断裂带内岩石圈减薄的指示. *岩石学报*, 25(1): 92–108
- 徐嘉炜, 马国锋. 1992. 郟庐断裂带研究的十年回顾. *地质论评*, 38(4): 316–324
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 裴福萍, 林景仟. 2004. 华北地块中东部中生代侵入杂岩中角闪石和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年: 对岩石圈减薄时间的制约. *地球化学*, 33(3): 221–231
- 杨默函, 侯贵廷, 史卫. 2006. 辽河盆地东部凹陷新生代火山岩 K-Ar 地质年代学及其地质意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 42(2): 184–191
- 朱光, 牛漫兰, 刘国生, 王勇生, 谢成龙, 李长城. 2005a. 郟庐断裂带肥东段走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年. *地质学报*, 79(3): 303–316
- 朱光, 谢成龙, 王勇生, 牛漫兰, 刘国生. 2005b. 郟庐高压走滑韧性剪切带特征及其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年. *岩石学报*, 21(6): 1687–1702
- 朱光, 朴学峰, 张力, 张必龙, 陈印, 胡召齐. 2011. 合肥盆地伸展方向的演变及其动力学机制. *地质论评*, 57(2): 153–166

附中文参考文献

- 陈振岩, 仇劲涛, 王璞珺, 李湃, 张培先, 刘鑫, 郝涛, 聂桂民. 2011. 主成盆期火山岩与油气成藏关系探讨. *沉积学报*, 29(4): 798–808
- 高知云, 章濂澄. 1993. 辽河盆地老第三纪火山岩及其构造环境分