

# 辽河盆地东部凹陷早第三纪火山岩 地球化学及形成环境

张连昌<sup>1,2</sup>, 陈志广<sup>1,2</sup>, 周新华<sup>1,2</sup>, 王 非<sup>1,2</sup>, 张玉涛<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2 中国科学院 矿产资源研究重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 中生代频繁的岩浆活动是辽河盆地重要特征之一, 东部凹陷作为各时期岩浆活动的中心, 下第三系火山岩基本覆盖了整个凹陷。受构造运动差异影响, 东部凹陷各地区不同时期岩浆活动强度不同, 房身泡组火山岩分布最广, 从沙三段到东营组沉积时期岩浆活动具有自中部向南、北转移的特征。岩石学和地球化学研究表明, 主要火山熔岩类型为碱性玄武岩、粗面岩和辉绿玢岩; 岩石化学组成上具有高碱、高铝和镁, 较富集轻稀土元素, Eu 异常不明显 ( $\delta\text{Eu}$  为 0.70~1.05), 弱亏损 Ti、P、Sr、Ta 元素的特征。岩石  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  和  $(N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr}))_i$  组成分别为 -2.8~2.8 和 0.704 6~0.706 7。综合研究表明, 玄武质岩浆来源于岩石圈地幔, 而粗面岩和辉绿玢岩可能源于幔源玄武质岩浆的分异, 但辉绿岩受地壳物质污染较重; 该火山岩形成于大陆裂谷环境, 反映出早第三纪辽河盆地处于拉张构造背景。

**关键词:** 早第三纪; 火山岩; 地球化学; Sr-Nd 同位素; 构造环境; 辽河盆地

**中图分类号:** P588.1; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)04-0368-08

## Geochemistry and the Tectonic Setting of Early Tertiary Volcanic Rocks in the East Depression, Liaohe Basin

ZHANG Lian-chang<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi-guang<sup>1,2</sup>, ZHOU Xin-hua<sup>1,2</sup>, WANG Fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu-tao<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Key Laboratory of Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Frequent magmatic activity is one of the important characteristics for the Liaohe basin. The east depression in the Liaohe basin was covered with lower Tertiary volcanic rocks. The volcanic rocks are composed of basalt, dolerite and trachyte. The analysis of major and trace elements show that the volcanic rocks are characterized by high  $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ , high  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  and  $w(\text{MgO})$ , enrichment of light rare earth elements, no pronounced Eu anomaly ( $\delta\text{Eu} = 0.70 \sim 1.05$ ) and weak negative Ti, P, Sr and Ta anomalies. These geochemical characteristics are similar to those of continental alkali basalt. Isotopic geochemistries show that values of  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  and  $(N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr}))_i$  of the volcanic range from -2.8 to 2.8 and from 0.704 6 to 0.706 7, respectively. These geochemistries show that the basaltic magma was formed in partial melting of asthenosphere mantle. Based on above mentioned characteristics, combined with the regional researching results, we suggest that the east depression was very likely an extensional rift environment during the early Tertiary.

**Key words:** early Tertiary; volcanic rock; geochemistry; Sr-Nd isotope; tectonic setting; Liaohe basin

## 0 引言

中国东部中生代含油气盆地发育多种类型的火山岩, 在这些火山岩中陆续发现了一批具有相

当储量的油气藏, 如河北黄骅、山东济阳、苏北等拗陷均有火山岩型油气藏发现。辽河盆地火山岩地层极为发育, 在中生界和下第三系有多套火山岩系, 具有良好的油气勘探前景。近年在火山岩最为

收稿日期: 2009-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40334043); 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403506)

作者简介: 张连昌(1959-), 男, 陕西西安人, 研究员, 博士研究生导师, 从事矿床地质和岩石地球化学研究。E-mail: lc Zhang@mail.igcas.ac.cn

发育的辽河盆地东部凹陷下第三系沙河街组三段(简称“沙三段”)粗面岩中找油取得重大突破<sup>[14]</sup>。同时对沙三段的构造地质、火山岩岩石化学和测井响应特征等也得到一定的研究成果<sup>[4-9]</sup>。但是, 对下第三系下部房身泡组和上部东营组火山岩还缺少研究; 对新近发现有工业油流的辉绿玢岩的时代和地球化学性质也缺乏了解。笔者以火山熔岩为重点, 对下第三系主要期次火山岩的地球化学进行综合研究, 并探讨该火山岩的形成环境。

# 1 火山岩分布与岩石学特征

## 1.1 火山岩分布

辽河盆地可划分为“三凹三凸”, 即西部凹陷、东部凹陷、大民屯凹陷、中央凸起、东部凸起、西部凸起等 6 部分(图 1), 总体上呈北东向展布。辽河盆地东部凹陷下第三系地层从下到上依次包括房身泡组、沙河街组和东营组。火山岩主要分布于房身泡组、沙河街组三段和东营组, 其中房

身泡组火山岩沿北东向断裂展布, 分布范围基本覆盖整个凹陷(图 1、表 1), 小龙湾地区(小 22~小 23 井)为主要喷发中心, 厚度达 1 123 m, 房身泡组火山岩以玄武岩类为主, 局部见粗安岩。沙河街组三段沉积时期是东部凹陷岩浆活动较为活跃的阶段, 火山岩分布广, 厚度大, 主要分布在凹陷中段黄沙坨—欧利坨子—热河台(黄 98—热 27—欧 26 井, 图 1)、南段的红星—驾掌寺及北段的青龙台、茨榆坨(茨 20 井)等地区。其岩性主要为粗面岩、玄武岩、粗面安山岩类。沙河街组一段(简称“沙一段”)岩浆活动相对于沙三段规模小的多, 尽管面积也较大, 但总体厚度小。东营组火山岩, 主要分布在黄金带—驾掌寺以南至荣兴屯(荣 76~荣 80 井)的广大地区, 具有层数多、厚度大的特点, 以溢流相玄武岩为主, 分布范围包括荣 21~荣 76 井区; 其北段亦有一定的分布, 面积较小, 火山岩以玄武岩为主, 见辉绿玢岩, 该辉绿玢岩局部形成油藏, 前人曾将该类次火山岩归为沙三期, 但 K-Ar 年龄测定(33.8~

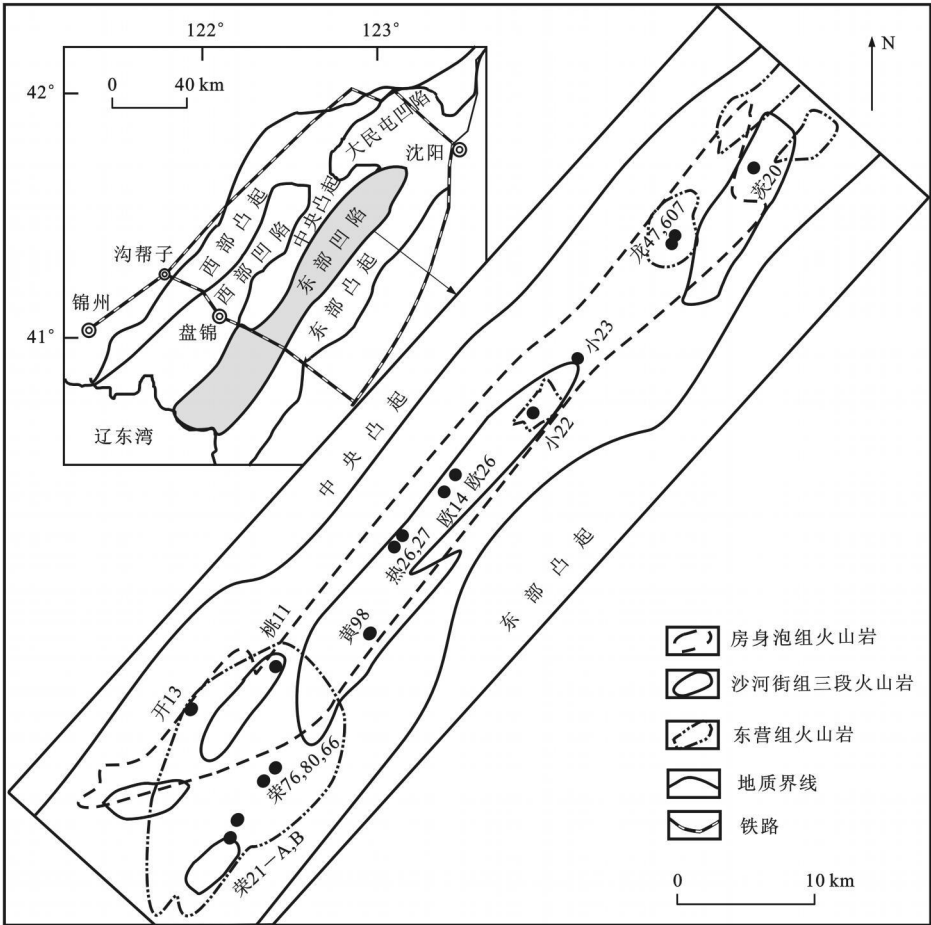


图 1 辽河盆地东部凹陷下第三系火山岩分布

Fig. 1 Geological Map of Volcanic Rocks of Palaeogene System in the East Depression Liaohe Basin

表 1 辽河盆地东部凹陷火山岩时空分布特征

Tab. 1 Time space Distribution of the Volcanic Rocks in the East Depression, Liaohe Basin						
组	段	K-Ar 年龄/ Ma	火山旋回	主要火成岩	代表钻孔	火成岩分布特征
东营组	D <sub>1</sub>	21.0~30.8	4	岩性以玄武岩为主, 在 D <sub>3</sub> 有辉绿玢岩侵入	茨 21, 桃 5	主要分布在南北两端, 南部以红星地区为中心, 北部以茨榆坨地区为中心
	D <sub>2</sub>	31.4~34.3				
	D <sub>3</sub>	34.5~36.0				
沙河街组	S <sub>1</sub>	36.0~38.6	3	岩性以玄武岩为主	马 79	主要分布在南北两端, 南部以黄金带为中心, 北部以茨榆坨地区为中心
				岩性以玄武岩为主	热 21	两个喷发中心, 南部为热河台地区, 北部为青龙台—茨 53 井区
	S <sub>3</sub>	39.4~42.4	2	岩性以粗面岩为主	小 23, 欧 29, 欧 26, 欧 15	岩性以粗面岩为主。在欧利坨子、黄沙坨和热河台 3 个地区各有 1 个喷发中心, 沿界西断裂分布
房身泡期	F	43.0~65.0	1	房身泡组火山岩以玄武岩类为主	欧 7	东部凹陷以小龙湾地区为主要喷发中心, 从中心向南北分 3 支

注: 火山岩 K-Ar 年龄测试单位为中国地震局地质研究所

35.5 Ma, 表 1) 表明其侵入时代为东营期。

1.2 岩石学特征

通过岩芯观察、薄片鉴定, 并结合岩石化学成分分析, 将本区的火山岩岩石类型划分为熔岩类和火山碎屑岩类。熔岩类包括粗面岩、粗安岩、玄武岩、玄武安山岩等; 火山碎屑岩类包括火山角砾岩、凝灰岩等。笔者研究对象主要为熔岩类火山岩, 包括玄武岩、粗面岩和辉玢岩等。

1.2.1 玄武岩

新鲜岩石呈灰黑、黑绿色, 块状致密。主要矿物组成为斜长石和辉石, 多数含有橄榄石。本区的玄武岩可进一步划分为辉石玄武岩、橄榄玄武岩和玄武岩 3 个亚类。

1.2.2 粗面岩

新鲜岩石呈灰绿-浅灰色, 具斑状、聚合斑状结构和碎斑结构, 斑晶质量分数普遍超过 10%, 部分达 30%, 主要为钾长石(50%~70%)和歪长石(10%~20%), 并含有少量斜长石(5%~10%)、单斜辉石和黑云母, 未见霞石和石英。歪长石具细密的格子状双晶, 并具钠长石反应边; 斜长石常具钠长石聚片双晶, 双晶纹细密, 基质呈粗面结构, 主要由碱性长石、少量辉石、黑云母和钛铁氧化物等组成。

1.2.3 辉绿玢岩

新鲜岩石呈灰黑、绿灰及杂色, 具典型的辉绿结构, 主要矿物成分为斜长石、辉石。另外本区见碱性辉绿岩, 矿物组成中出现霓辉石和碱性长石。

2 岩石地球化学特征

2.1 主量元素

根据主量元素分析结果, 投点于火成岩硅-碱

图(图 2)中, 可见本区火山岩是一套粗面岩-粗面安山岩-粗面玄武岩组合, 发育大量的次火山岩(辉绿玢岩)。以碱性火山岩(粗面岩)和基性火山岩(粗面玄武岩)为主, 过渡型的火山岩(粗面安山岩、玄武安山岩)以及次火山岩体所占比例小。其中粗面岩是分布最广的一类岩石, 其  $w(\text{SiO}_2)$  为 58%~62%, 和本区其他类型的岩石相比, 富 Si、Al、K、Na、P 等碱性和酸性成分, 贫 Fe、Mg、Ti、Ca 等基性成分。玄武岩为本区第二大类岩石,  $w(\text{SiO}_2)$  为 45%~52%, 富 P、Ca、Fe、Mg 等元素。辉绿玢岩的化学成分类似于本区的玄武岩。

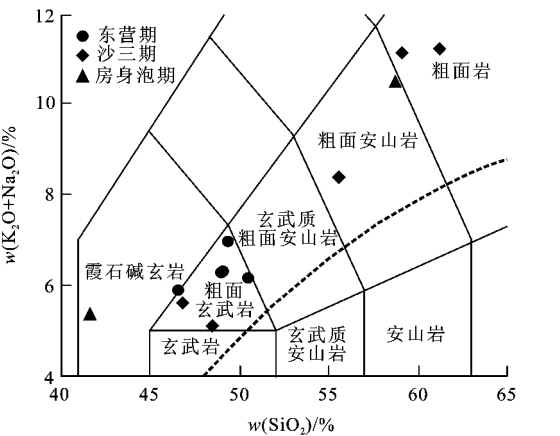


图 2 东部凹陷火山岩硅-碱图

Fig. 2  $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  Diagram of the Volcanic Rocks in the East Depression

总体来说, 东部凹陷中的火山岩碱质和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高, 并表现出较强的分离结晶趋势, 这与其稀土元素形式是一致的。在各种主元素对  $\text{SiO}_2$  的关系图中(图 3),  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_2$  呈连续变化的正相关, 而  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  和

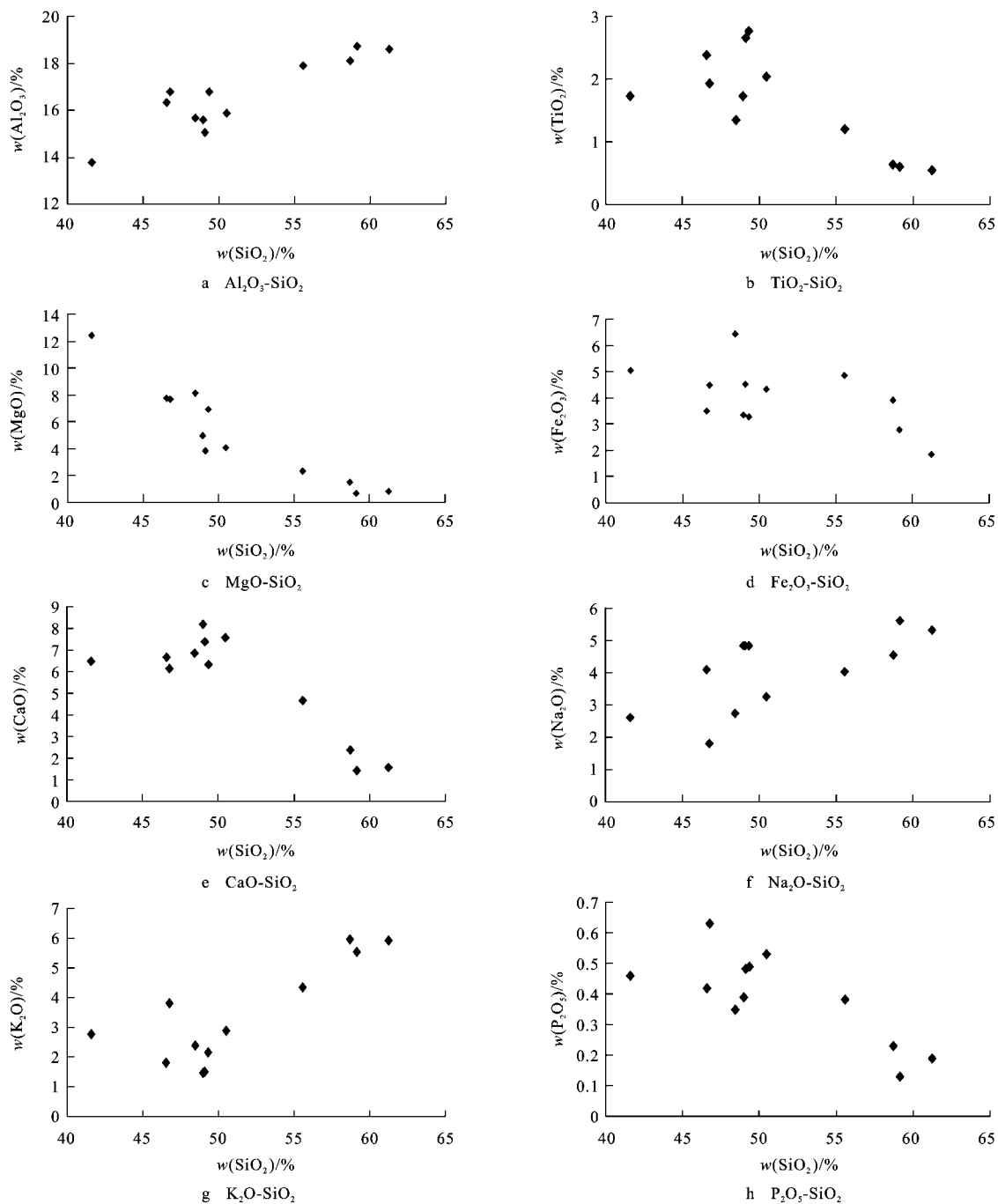


图 3 东部凹陷火山岩主量元素相关图解

Fig. 3 Harker Diagram of Major Elements of the Volcanic Rocks in the East Depression

$P_2O_5$  与  $SiO_2$  呈连续变化的负相关, 显示了这些岩石可能源于同一岩浆演化系列。

除了样品  $Mg^\#$  小于 23, 其他粗面岩的  $Mg^\#$  变化范围为 30~47(另文发表), 表明该类岩石中发生了较高分异结晶作用, 或具有明显的壳源物质混入; 而玄武岩仍具有很高的  $Mg^\#$  值, 基本上所有的样品  $Mg^\#$  都大于 65, 反映其岩浆基本没有受到地壳物质的混染。

2.2 微量元素

对火山岩稀土元素组成进行球粒陨石标准化后作图(图 4<sup>[10]</sup>)表明, 粗面岩稀土元素总量高于玄武岩及辉绿玢岩, 并出现了较明显的负 Eu 异常, 反映了早期的成岩过程中斜长石结晶分异作用的影响及可能混有壳源物质的特点; 玄武岩和辉绿玢岩无明显的负 Eu 异常, 稀土配分模式基本一致, 其配分曲线分布范围窄, 表明其来源单一,

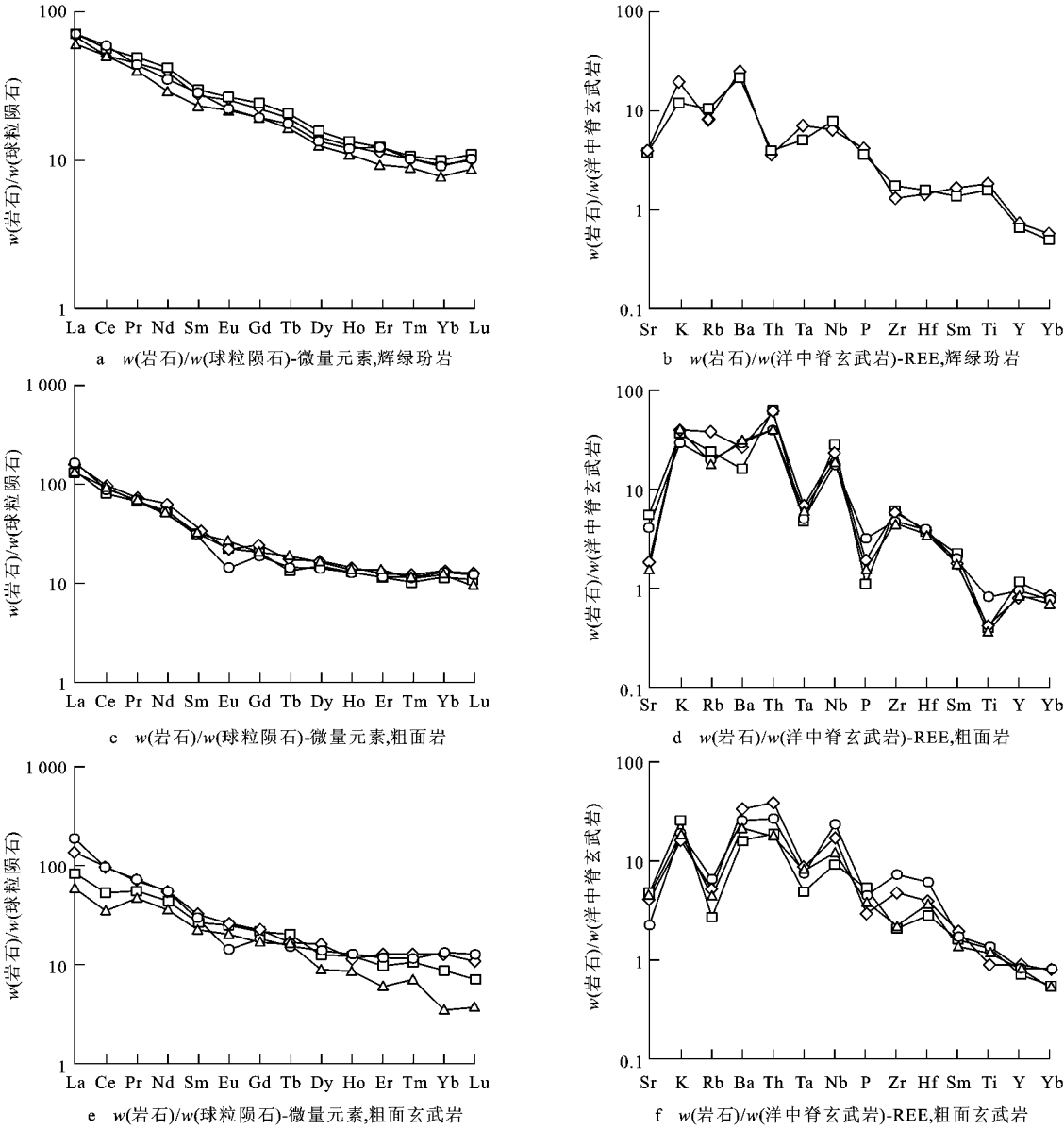


图 4 东部凹陷火山岩稀土和微量元素配分图解

Fig. 4 Chondrite-normalized REE Patterns and MORB-normalized Trace Elements  
Pidergrams of the Volcanic Rocks in the East Depression

成因关系密切。

本区的各类岩石基本表现出相同的微量元素配分模式(图 4), K 呈现正异常, 这和本区岩石偏碱性的岩石特征一致; Ta、Ti 等高场强元素呈现不同程度的负异常, 表明早期钛铁矿发生结晶分离作用, 反映了岩浆曾发生过结晶分异作用; Sr、P 等元素具有不同程度的亏损以及 Nb 的正异常表明, 岩浆演化过程中没有明显的壳源物质混入。普遍的 Ta、Ti、P、Sr 的负异常, K、Rb、Th 的正异常是本区火山岩主要特征, 这些异常特征都可与世界上板内岩浆系列的特征相比。

2.3 Sr-Nd 同位素

为了全面反映研究区代表性火成岩(玄武岩、辉绿玢岩和粗面岩)成因及源区特征, 笔者在岩石学、岩石化学和年代学测定的基础上, 选择代表性样品, 进行 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析(表 2)。

粗面岩样品的  $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$  为 0.704 6 ~ 0.704 9,  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值为 1.4 ~ 1.9。在粗面岩岩浆本身锆含量很低的情况下, 如有地壳物质加入, 即使其量甚微, 也会使  $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$  值明显升高。研究区玄武岩的  $N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})$  值较高,  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值为 2.3 ~ 2.8, 初始  $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$  值 (0.704 56 ~

表 2 辽河盆地东部凹陷新生代火成岩 Sr-Nd 同位素分析

Tab. 2 Analysis of Sr-Nd Isotopes of Cenozoic Igneous Rocks in the East Depression, Liaohe Basin

样品号	岩石	Rb	Sr	$n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$	$N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$	$(N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr}))_i$	$\epsilon_{\text{Sr}}$	Sm	Nd	$n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})$	$N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})$	$(N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd}))_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}$
龙 607-1		26.96	382.8	0.202 2	0.706 068±0.000 012	0.705 95	21.3	5.620	23.95	0.142 0	0.512 586±0.000 010	0.512 549	-0.7
龙 607-2	辉	22.25	367.6	0.174 8	0.705 833±0.000 010	0.705 73	18.2	5.652	24.03	0.142 4	0.512 589±0.000 011	0.512 552	-0.7
龙 607-3	绿	25.85	345.9	0.214 3	0.705 803±0.000 013	0.705 68	17.5	5.317	23.05	0.139 6	0.512 560±0.000 009	0.512 524	-1.2
龙 607-4	玢	23.73	372.1	0.183 5	0.705 705±0.000 010	0.705 60	16.3	5.463	23.46	0.141 0	0.512 563±0.000 011	0.512 526	-1.2
龙 607-5	岩	24.11	377.6	0.182 8	0.706 088±0.000 013	0.705 98	21.8	5.416	23.00	0.142 5	0.512 593±0.000 012	0.512 556	-0.6
龙 607-6		26.46	390.2	0.196 1	0.706 049±0.000 010	0.705 94	21.1	5.421	23.03	0.142 5	0.512 557±0.000 009	0.512 520	-1.3
龙 47-253-1		15.91	551.1	0.083 3	0.706 586±0.000 012	0.706 54	29.6	5.672	24.53	0.140 0	0.512 495±0.000 010	0.512 458	-2.5
龙 47-253-2	辉	15.03	482.2	0.089 2	0.706 558±0.000 015	0.706 51	29.2	5.652	24.16	0.141 6	0.512 501±0.000 011	0.512 464	-2.4
龙 47-253-3	绿	18.60	553.0	0.096 6	0.706 271±0.000 014	0.706 22	25.0	5.848	25.23	0.140 3	0.512 493±0.000 007	0.512 456	-2.5
龙 47-253-4	玢	15.28	565.0	0.077 7	0.706 463±0.000 020	0.706 42	27.9	5.329	22.72	0.142 0	0.512 497±0.000 009	0.512 460	-2.5
龙 47-253-5	岩	17.71	478.8	0.106 3	0.706 758±0.000 018	0.706 70	31.9	5.682	24.67	0.139 4	0.512 482±0.000 009	0.512 446	-2.8
热 26-2		21.36	1 037	0.059 6	0.704 716±0.000 015	0.704 68	3.3	5.906	27.33	0.130 8	0.512 754±0.000 012	0.512 72	2.6
热 26-3	玄	17.88	960.8	0.053 3	0.704 605±0.000 013	0.704 57	1.7	5.717	26.64	0.129 9	0.512 760±0.000 013	0.512 726	2.7
热 26-4	武	28.20	1 056	0.076 6	0.704 725±0.000 012	0.704 68	3.3	5.983	27.51	0.131 7	0.512 762±0.000 012	0.512 728	2.8
热 26-5	岩	31.26	883.9	0.101 5	0.704 618±0.000 015	0.704 56	1.5	5.975	27.31	0.132 4	0.512 741±0.000 010	0.512 706	2.3
欧 26-1		39.18	172.8	0.649 5	0.705 148±0.000 018	0.704 78	4.6	6.885	35.49	0.117 4	0.512 690±0.000 011	0.512 659	1.4
欧 26-2	粗	40.69	160.7	0.727 3	0.705 065±0.000 014	0.704 65	2.8	7.066	36.75	0.116 4	0.512 702±0.000 013	0.512 672	1.7
欧 26-3	面	39.40	161.6	0.704 2	0.705 314±0.000 014	0.704 91	6.6	5.934	31.40	0.114 4	0.512 698±0.000 009	0.512 668	1.6
欧 26-5	岩	45.33	192.3	0.681 3	0.705 167±0.000 015	0.704 78	4.7	6.343	34.41	0.111 6	0.512 711±0.000 008	0.512 682	1.9
欧 26-6		43.64	154.3	0.809 6	0.705 221±0.000 013	0.704 76	4.4	6.445	32.54	0.119 9	0.512 694±0.000 008	0.512 663	1.5

注: 测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室完成; 2 $\sigma$  测量误差为 10<sup>-3</sup>; 所用参数  $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})=0.710\ 244$ , [ $N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})$ ] (CHUR)<sub>0</sub>=0.512 638, [ $n(^{144}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})$ ] (CHUR)<sub>0</sub>=0.196 7,  $\lambda(^{87}\text{Rb})=1.42\times 10^{-12}\text{a}^{-1}$ ,  $\lambda(^{147}\text{Sm})=6.57\times 10^{-12}\text{a}^{-1}$

0.704 68)较低。在  $\epsilon_{\text{Nd}}-(N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr}))_i$  相关图解中投入洋岛玄武岩区(图 5), 表明该玄武岩可能源于软流圈地幔, 地壳物质污染较弱。

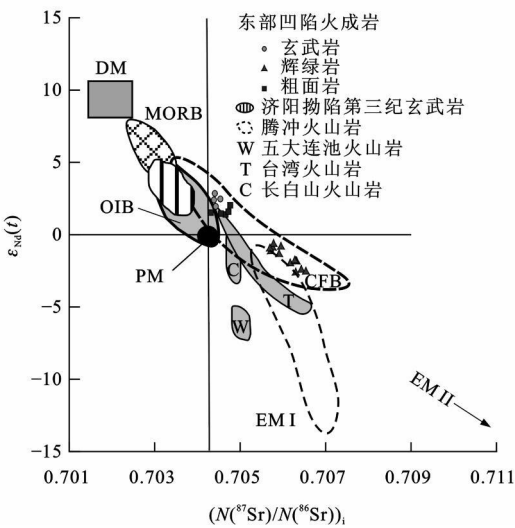
辉绿玢岩的  $N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})$  值较低,  $\epsilon_{\text{Nd}}$  为 -2.8~-0.7, 初始  $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$  值(0.705 7~0.706 7)较高。在  $\epsilon_{\text{Nd}}-(N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr}))_i$  相关图解中位于大陆溢流玄武岩的右下段, 但仍沿地幔演化线分布, 表明该辉绿岩可能源于幔源玄武岩的分异, 地壳物质污染较强。

从研究区火成岩同位素分布及其与中国东部代表性火山岩组成对比(图 5)可以看出, 研究区火山岩主要位于大陆溢流玄武岩区。

3 讨论与总结

3.1 火山岩形成的构造环境

$w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  和  $w(\text{SiO}_2)$  之间连续变化的正相关, 表明随着岩浆的演化, 碱度也在增加, 岩石系列虽然跨越了碱性区和强碱性区, 整个系列偏碱性。一般认为, 碱性火山岩来自较深的、部分熔融

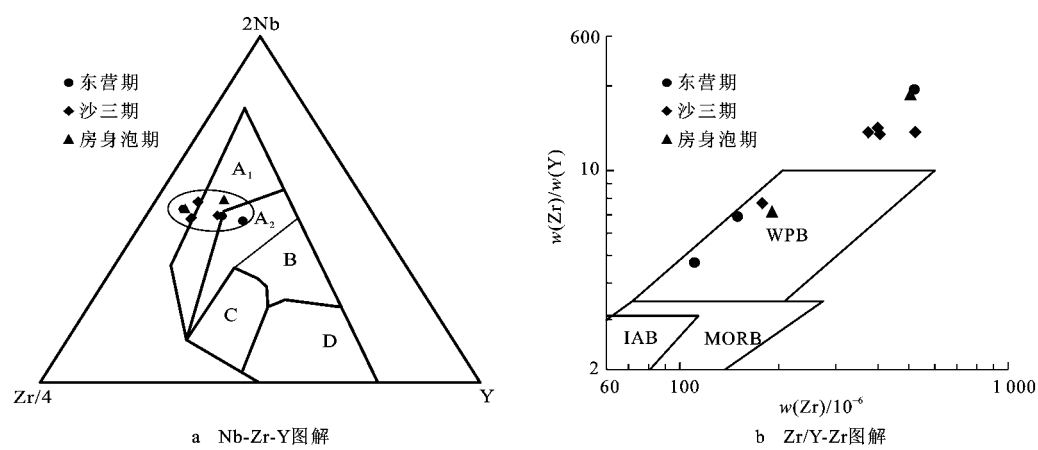


DM—洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; DM—亏损地幔; CFB—大陆溢流玄武岩; PM—原始地幔; EM—富集岩石圈地幔  
图 5 东部凹陷火山岩  $\epsilon_{\text{Nd}}-(N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr}))_i$  相关图解  
Fig. 5  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  Versus  $(N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr}))_i$  Diagrams of the Volcanic Rocks in the East Depression

程度低的源区, 其构造背景为张裂的环境<sup>[11-15]</sup>。上

述主要元素的变化特征表明, 本区不同类型的火山岩呈现出一个岩浆序列的演化趋势, 可能是同一个源区岩浆演化的结果。从本研究区基性火山岩

Nb-Zr-Y 图解(图 6a)看, 样品位于板内环境碱性玄武岩区, 在 Zr/Y-Zr 构造图解(图 6b)中样品均位于板内环境。



A<sub>1</sub>—板内碱性玄武岩; A<sub>2</sub>—板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; B—E 型洋中脊玄武岩; C—板内拉斑玄武岩和岛弧玄武岩; D—N 型洋中脊玄武岩和岛弧玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; WPB—碱性板内玄武岩; IAB—岛弧拉斑(板块边缘)玄武岩

图 6 东部凹陷玄武岩 Nb-Zr-Y 和 Zr/Y-Zr 的构造图解

Fig. 6 Nb-Zr-Y and Zr/Y-Zr Diagrams of Basaltic Rocks in the East Depression

3.2 火成岩源区特征

根据代表性样品的 Sr-Nd 同位素组成, 表明东部凹陷火成岩源区组成以亏损地幔端元为特征。与区域对比发现, 辽河盆地源区组成的亏损程度以东部凹陷为中心, 向西、向北递减, 辽河盆地与外围地区新生代火山岩的源区组成特征在空间和时间上基本是连续演化的, 它们是在一个统一的壳幔深部动力学过程控制下, 在不同阶段、不同地域具有不同的特征。在东北北部(牡丹江)是以原始地幔和 I 型富集地幔为主, 包括辽河在内的渤海盆地亏损地幔起了主导作用, 而在华北的东北地区(北京), 基本由原始地幔组成所控制<sup>[16-17]</sup>。

根据东部凹陷早第三系火山岩代表岩石 Sr-Nd 同位素分析结果(表 3), 从玄武岩到粗面岩, 再到辉绿玢岩  $\epsilon_{Nd}$  值变小,  $N(^{143}Nd)/N(^{144}Nd)$  值变大, 表示岩浆源区亏损程度增加(图 7)。根据东部凹陷早第三系不同时期玄武岩 Nd 同位素组成, 随时代变新, 玄武岩源区亏损程度相应增加。

根据上述同位素组成变化特征以及区域地幔地球化学分析可见, 本区玄武岩的源区可能有 3 种来源: ①亏损的上地幔软流圈, 其成分相当于大洋中脊玄武岩( $\epsilon_{Nd}=10\sim12$ ); ②略亏损的地幔源, 其成分相当于主体大洋岛弧玄武岩( $\epsilon_{Nd}=5\sim7$ ); ③略亏损—富集的古老岩石圈地幔。3 种源区不等比例的混合, 有可能说明本区岩浆源区的

特征。

表 3 东部凹陷不同时期玄武岩的 Sr-Nd 同位素组成

Tab. 3 Sr-Nd Isotopic Composition of Basaltic Rocks in Different Epochs in the East Depression

组段	代表样品	K-Ar 年龄/Ma	$N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)_i$	$N(^{143}Nd)/N(^{144}Nd)$	$\epsilon_{Nd}(t)$
东营组	沟 1A	27.4		0.512 87	4.5
	红 8-10B	35.9	0.703 1	0.512 91	5.9
沙一段	荣 7	37.7	0.704 1	0.512 75	2.1
沙三段	热 21A	39.5	0.703 1	0.512 93	6.7
	湾 3	39.4	0.705 4		
	热 26	41.0	0.704 5	0.512 71	2.6
房身泡组		50.0	0.705 4		
		65.0	0.704 4	0.512 65	0.3

3.3 火成岩形成机制

渤海周边的玄武岩为早第三纪古新世—渐新世(61.0~29.7 Ma)伸展构造体制下的火山喷出物。本区玄武岩的  $N(^{143}Nd)/N(^{144}Nd)$  值为 0.512 9~0.513 0, 在 Sr-Nd 同位素图解上, 玄武岩的投影点落在第四象限亏损地幔内, 暗示为上涌软流圈地幔部分熔融的产物。根据 McKenzie 等<sup>[18]</sup>地幔熔融模式和本区玄武岩的性质, 笔者认为玄武岩的熔融深度应类似于整个华北新生代早第三纪玄武岩, 其形成深度为 60~80 km。K-Ar 年龄为 61.0~29.7 Ma, 代表了玄武岩的喷发年龄, 即本区在早第三纪时, 软流圈的顶面至少上升到 60 km

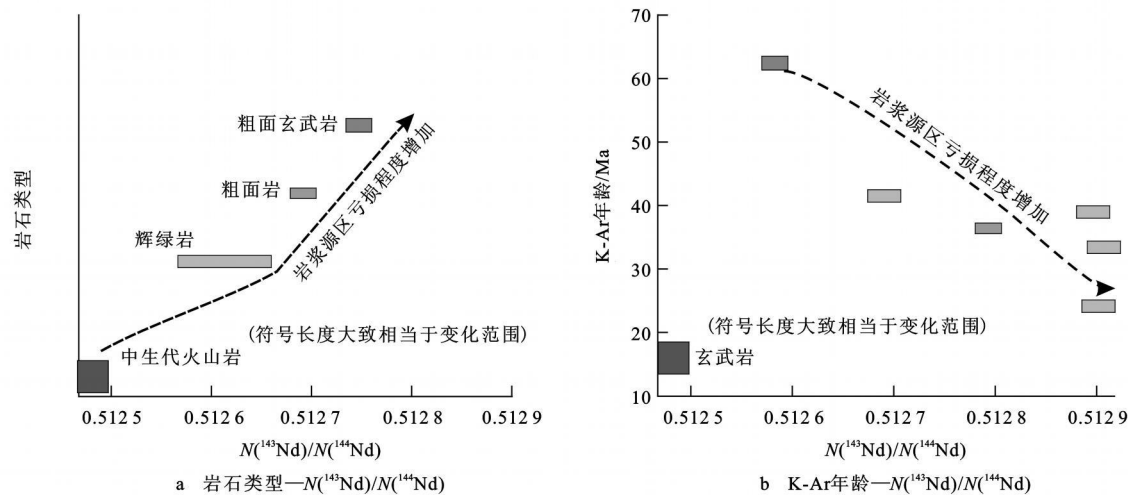


图 7 东部凹陷不同时期玄武岩 Nd 同位素组成变化

Fig. 7 Transformation Diagrams of Nd Isotopic Composition of Basaltic Rocks in Different Epochs in the East Depression

处,因此,当时的岩石圈处于伸展减薄状态才可能形成玄武岩浆,经上升喷发到地表而形成玄武岩,这与本区自中生代早三叠世以来进入地台活化阶段岩石圈发生伸展、减薄的地质事实一致。

传统相平衡实验研究认为,粗面质岩石只能在高压环境下( $>1.5\text{ GPa}$ )由下地壳物质部分熔融产生,或在低压环境下( $<1.0\text{ GPa}$ ),由碱性或过渡性玄武质岩石直接分离结晶产生,后者以较大的 Eu 负异常为特征。本区粗面斑岩产于辽河盆地早第三纪裂谷盆地中,粗面斑岩中地壳物质加入很少,具较高的 Nb 值及较低的 Pb、Rb 及 Sr 含量,粗面斑岩经历过显著的斜长石分离结晶作用,具强烈的 Eu、Sr 负异常。粗面斑岩的稀土元素特征表明,它可由伴生玄武岩岩浆经历斜长石的分离结晶作用产生。本区未发现与下地壳部分熔融有关的花岗质岩石。这些特征均表明,辽河盆地早第三纪粗面斑岩不是下地壳物质在高压下部分熔融的结果,而是玄武岩浆在低压( $<1.0\text{ GPa}$ ,相当于 32 km 的深度)环境下经历了橄榄石、辉石、斜长石和钾长石等大比例分离结晶作用的产物<sup>[19]</sup>。此外,对辉石和长石中的包裹体研究还发现,这种成因类型粗面岩浆分离结晶过程的压力极低(约为 100 MPa),而温度较高(950~1 200 °C),这也与中国东部早第三纪总体拉张的构造背景以及渤海湾盆地早第三纪较高的地壳热流背景相一致。

在图 5 中,辉绿岩位于大陆溢流玄武岩的右下段,但仍沿地幔演化线分布,表明其岩浆可能源于幔源玄武岩的分异,在上升过程中遭受到地壳物质

较强烈的污染。

#### 4 结语

通过对辽河盆地东部凹陷与油气有关的第三系火山岩的岩石学和地球化学研究,获得以下认识:

(1)主要火山熔岩类型有碱性玄武岩、粗面岩和辉绿玢岩。岩石化学组成上具有高碱、高铝和高镁,较富集轻稀土元素, Eu 异常不明显( $\text{Eu} = 0.70 \sim 1.05$ ),弱亏损 Ti、P、Sr、Ta 元素的特征。不同类型的火山岩呈现出一个岩浆序列,推测是同一个源区岩浆演化的结果。该火山岩形成于大陆裂谷环境,反映早第三纪辽河盆地处于拉张构造背景。

(2)岩石  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  和  $(N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr}))$  组成分别为  $-2.8 \sim -2.8$  和  $0.7046 \sim 0.7067$ ,研究表明,玄武岩岩浆来源于略亏损的岩石圈地幔,而粗面岩和辉绿玢岩可能源于幔源玄武质岩浆的分异,但辉绿岩受地壳物质污染较重。

(3)辽河盆地早第三纪粗面斑岩不是下地壳物质部分熔融的产物,而是玄武岩浆在低压环境下经历了橄榄石、辉石和长石等分离结晶作用的结果;辉绿玢岩岩浆源于幔源玄武岩的分异,但上升过程中遭受到地壳物质较强烈污染。

#### 参考文献:

[1] Allen M B, Macdonald D I M, Zhao X, et al. Early Cenozoic Two-phase Extension and Late Cenozoic Thermal Subsidence and Inversion of the Bohai Basin, Northern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(7/8): 951-972.

(下转第 417 页)



也对石膏的饱和指数产生一定影响。

(2)在实验单相混合溶液中,方解石、白云石饱和指数及 pH 值随混合比例的增大呈现迅速降低—平缓下降—急剧下降的变化趋势;模拟单相混合溶液中方解石、白云石饱和指数及 pH 值随混合比例的增大呈现缓慢下降—急剧下降的变化趋势。

(3)玉髓饱和指数在混合溶液 pH 值的影响下,随混合比例增大呈现先上升后下降的变化趋势。玉髓饱和指数受控于混合溶液中  $H_4SiO_4$  浓度,实验单相混合溶液中玉髓的饱和指数高于模拟单相混合溶液。

#### 参考文献:

- [1] 邹胜章,朱远峰,陈鸿汉,等.大连大魏家滨海岩溶区海水入侵化学过程[J].海洋地质与第四纪地质,2004,24(1):61-68.
- [2] 赵建,海(咸)水入侵与浅层地下水水化学特征及变化研究[J].地理科学,1999,19(6):525-531.
- [3] 张晓伦,梁杏,孙敬.奇村地热田水化学特征及其混合作用模拟[J].水文地质工程地质,2007,34(6):95-99.
- [4] 毕二平.地热水与回灌水混合的地球化学模拟——以冰岛 Laugaland 低温热田为例[J].地球科学——中国地质大学学报,1998,23(6):631-634.

- [5] 郭清海,阎世龙,蒋方媛.太原市深层孔隙水的水化学分带性及其地球化学模拟[J].地球科学——中国地质大学学报,2005,30(2):245-249.
- [6] 马致远,钱会,黄建勋,等.关中盆地南部含水层间相互关系的环境同位素水文地球化学证据[J].地球科学与环境学报,2006,28(2):69-74.
- [7] 钱会,连珥,冀妍.地下水混合作用的碳酸钙溶解沉淀效应[J].地球科学与环境学报,2007,29(1):55-65.
- [8] 钟佐燊,汤鸣皋,张建立.淄博煤矿矿坑排水对地表水体的污染及对地下水水质影响的研究[J].地学前缘,1999,6(增刊):237-244.
- [9] 《工业固体废物有害性试验与监测分析方法》编写组.工业固体废物有害性试验与监测分析方法(试行)[M].北京:中国环境科学出版社,1986.
- [10] 比契叶娃.水文地球化学[M].彭立红,译.北京:地质出版社,1981.
- [11] 区永和,陈爱光,王恒纯.水文地质学概论[M].武汉:中国地质大学出版社,1988.
- [12] 沈照理,朱宛华,钟佐燊.水文地球化学基础[M].北京:地质出版社,1993.
- [13] 钱会,马致远.水文地球化学[M].北京:地质出版社,2005.
- [14] Roy W R, Griffin R A, Dickerson D R, et al. Illinois Basin Coal Fly Ashes 1: Chemical Characterization and Solubility[J]. Environmental Science and Technology, 1984, 18(10): 734-739.

(上接第375页)

- [2] 蔡国钢,张坤,刘立,等.辽河盆地东部凹陷中部火山岩储层特征研究[J].海洋石油,2003,23(2):32-37.
- [3] 廖兴明,姚继峰,于天欣.辽河盆地构造演化与油气[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [4] 姜在兴,肖尚斌.渤海湾盆地第三系火山岩分布规律[J].地质论评,1999,45(增刊):618-626.
- [5] 梁鸿德,申绍文,刘香婷,等.辽河断陷火山岩地质年龄及地层时代[J].石油学报,1992,13(2):35-41.
- [6] 李思田,路凤香,林畅松,等.中国东部及邻区中、新生代盆地演化及地球动力学背景[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [7] 吴昌志,顾连兴,任作伟,等.辽河油田欧利坨子潜火山岩及其成藏机制[J].地质论评,2003,49(2):162-167.
- [8] 赵澄林,孟卫工,金春爽,等.辽河盆地火山岩与油气[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [9] Gu L X, Ren Z W, Wu C Z, et al. Hydrocarbon Reservoirs in a Trachyte Porphyry Intrusion in the Eastern Depression of the Liaohe Basin, Northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(10): 1821-1832.
- [10] Boynton W V. Geochemistry of the Rare Earth Elements; Meteorite Studies[C] //Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 66-144.
- [11] Bevins R E, Kokelaar B P, Dunkley P N. Petrology and Geochemistry of Lower to Middle Ordovician Igneous Rocks in Wales: a Volcanic Arc to Marginal Basin Transition[J]. Proceedings of the

Geologists' Association, 1984, 95(4): 337-347.

- [12] Fan Q C, Hooper P R. The Cenozoic Basaltic Rocks of Eastern China: Petrology Chemical Composition[J]. Journal of Petrology, 1991, 32(4): 765-810.
- [13] 刘若新,陈文寄,孙建中,等.中国新生代火山岩的K-Ar年代与构造环境[C] //刘若新.中国新生代火山岩年代学与地球化学.北京:地震出版社,1992: 1-43.
- [14] 刘若新,樊祺诚,郑祥身,等.长白山天池火山的岩浆演化[J].中国科学D辑:地球科学,1998,28(3):226-231.
- [15] Wang L S, Liu S W, Xiao W Y, et al. Distribution Feature of Terrestrial Heat Flow Densities in the Bohai Basin, East China[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(10): 857-862.
- [16] Zhou X H, Armstrong R L. Cenozoic Volcanic Rocks of Eastern China: Secular and Geographic Trends in Chemistry and Strontium Isotopic Composition[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 58(3): 301-329.
- [17] Zhou X H, Sun M H, Zhang G H, et al. Continental Crust and Lithospheric Mantle Interaction Beneath North China: Isotopic Evidence from Granulite Xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean Craton[J]. Lithos, 2002, 62(3): 111-124.
- [18] McKenzie D, O'Nions R K. Partial Melt Distributions from Inversion of Rare Earth Element Concentrations[J]. Journal of Petrology, 1991, 32(5): 1021-1091.
- [19] 吴昌志,顾连兴,任作伟,等.辽河盆地沙三期火山—侵入岩地球化学与岩石成因[J].岩石学报,2004,20(3):545-556.