

# 大兴安岭北段漠河地区塔木兰沟组火山岩地球化学特征

张玉涛

中国地质科学院矿产资源研究所区域成矿规律研究室, 北京 100037

**摘要** 大兴安岭北段漠河地区分布有大面积的晚中生代火山岩,塔木兰沟组是其中喷发较早的一期。塔木兰沟组是一套中基性火山岩,包括熔岩和火山碎屑岩,研究其成因对于理解大兴安岭北段的构造演化具有重要意义。对塔木兰沟组火山岩样品进行了系统的主量元素和微量元素地球化学分析。结果表明:样品大部分呈碱性, SiO<sub>2</sub> 的质量分数为 52.7%~57.8%,为中基性岩石,岩石类型为玄武质粗面安山岩和粗面安山岩;相容的过渡族金属元素如 Cr、Co、Ni 等含量低,微量元素比值如 Nb/La、Ba/Nb、Nb/U、Ce/Pb 等及稀土元素总量的变化范围大,具有右倾的轻稀土元素富集的稀土元素分布模式。岩石成因分析表明,富集的大陆岩石圈地幔先经历了部分熔融,然后熔浆受到了轻度的地壳物质的混染以及一定程度的分离结晶作用,最终形成了塔木兰沟组火山岩。

**关键词** 大兴安岭北段;漠河;塔木兰沟组;中生代;火山岩

**中图分类号** P588.1

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.33.003

## Geochemistry of Tamulangou Formation Volcanic Rocks in Mohe, North Da Hinggan Mountains

ZHANG Yutao

Division of Metallogeny, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract** There are large areas of late Mesozoic volcanic rocks in Mohe, north Da Hinggan Mountains. Among these volcanic rocks, the Tamulangou Formation erupted earlier than other formations. The Tamulangou Formation is a set of basic to intermediate volcanic rocks, including lavas and pyroclastic rocks. The study of petrogenesis of the Tamulangou Formation may provide a very important insight for the tectonic evolution of north Da Hinggan Mountains. A systematic geochemical analysis of major and trace elements was carried out with samples from the Tamulangou Formation. It is shown that most samples are alkaline basic to intermediate rocks with SiO<sub>2</sub> contents of 52.7%~57.8%. These rocks are basaltic trachy andesites and trachy andesites. Compatible transitional elements such as Cr, Co and Ni are low in contents. Trace element ratios such as Nb/La, Ba/Nb, Nb/U and Ce/Pb and the total rare earth elements contents of these samples vary in a large range, with a right-oblique rare earth element distribution mode. The petrogenesis study indicates that the partial melting of the enriched continental lithospheric mantle plus a slight crustal contamination and a certain degree of fractional crystallization are responsible for the formation of the Tamulangou Formation volcanic rocks.

**Keywords** north Da Hinggan Mountains; Mohe; Tamulangou Formation; Mesozoic; volcanic rocks

### 0 引言

位于中国东北黑龙江省的漠河地区属于大兴安岭北段的组成部分。漠河地区分布有大面积的晚中生代火山岩,对比与漠河临近的其他地区(如满洲里、牙克石、根河、扎兰屯)的晚中生代火山岩的研究<sup>[1-3]</sup>,漠河晚中生代火山岩的研究相对薄弱。漠河地区主要分布有 3 组晚中生代火山岩,从早到

晚依次为塔木兰沟组、上库力组、伊列克得组。

前人对大兴安岭北段晚中生代火山岩已做了大量研究,但由于这些岩石的岩石组合和地球化学特征的复杂性,对于这些岩石的分类命名、岩浆成因和源区仍然存在分歧,例如对大兴安岭北段晚中生代火山岩的成因,就有地幔柱成因<sup>[4]</sup>、拆沉作用<sup>[5]</sup>、造山后伸展作用<sup>[6]</sup>、太平洋板块俯冲作用<sup>[7]</sup>等认

收稿日期:2013-06-05;修回日期:2013-08-06

基金项目:国家自然科学基金项目(40803012)

作者简介:张玉涛,助理研究员,研究方向为岩石地球化学,电子信箱:ihzozolite@163.com

识。因此,尽管这些火山岩被分为塔木兰沟组、上库力组、伊列克得组,但由于这种分组是建立在火山岩层位的相互接触关系之上的,在实际应用中比较难以区分各组。根据研究,这些火山岩的形成年龄大部分集中在 120~130Ma,也有大于 140Ma 的,因此用年龄区分各组更为可行。比如把大于 140Ma 的归为塔木兰沟组,约 120Ma 的归为上库力组,约 110Ma 的归为伊列克得组。本文对漠河晚中生代的塔木兰沟组火山岩进行地球化学研究,分析大兴安岭北段晚中生代火山岩的成因。

1 地质背景

中国东北地区构造复杂,是东北亚造山带的一部分,该造山带由许多陆块碰撞拼合而成<sup>[1]</sup>,至少经历了两期在不同应力场中的构造演化<sup>[1]</sup>。古生代时,该区的构造演化受到夹持于西伯利亚克拉通和东北克拉通之间的古亚洲洋的控制,从侏罗纪开始,该区主要受到太平洋板块俯冲的影响。古生代时,中国东北地区由几个微大陆板块聚合而成<sup>[2]</sup>。从北至南,依次是额尔古纳地块、兴安地块、松辽地块。漠河地区位于额尔古纳地块之上。额尔古纳地块被认为是中蒙古微大陆的东延部分,发育有从元古代到古生代的地层和花岗岩岩石。兴华渡口群是本区最古老的地层,形成于中元古代<sup>[3]</sup>。但也有研

究表明,本群并没有那么古老<sup>[4]</sup>。

大兴安岭北段的晚中生代火山岩从下至上至少可分为的 3 组<sup>[5]</sup>:晚侏罗世塔木兰沟组、早白垩世上库力组、早白垩世伊列克得组。有研究表明,晚侏罗世火山岩仅分布于为数不多的几个地区,如满洲里地区,而绝大部分的大兴安岭北段晚中生代火山岩为早白垩世<sup>[7]</sup>。由于该组火山岩处于大兴安岭北部晚中生代火山岩的底部,多以基性火山岩为主,因此研究该组火山岩,更有利于分析大兴安岭北段晚中生代火山岩的源区和成因。

塔木兰沟组火山岩为一套中基性火山岩(包括火山熔岩与火山碎屑岩),下部为深灰色凝灰质粗砾岩、巨砾岩与深灰色凝灰岩互层,夹薄层状安山岩,底部砾岩稳定;中部为浅灰色、灰绿色安山质含砾晶屑凝灰岩与安山质岩屑凝灰岩互层夹块状安山岩;上部为灰绿色蚀变安山岩、浅灰绿色、灰紫色厚层安山岩不等厚互层,横向上相变为气孔状玄武安山岩、杏仁状辉石安山岩。杏仁状安山岩通常呈灰绿色,杏仁状构造,杏仁成分主要为方解石、绿泥石、石英等。塔木兰沟组的中性火山岩组合整体上具有蚀变,普遍具有青盘岩化、绿帘石化、阳起石化,后期叠加了硅化和碳酸盐化等。研究区的大地构造位置如图 1(a)所示,地质简图及采样位置如图 1(b)所示<sup>[3]</sup>。本次研究样品的镜下特征见图 2。

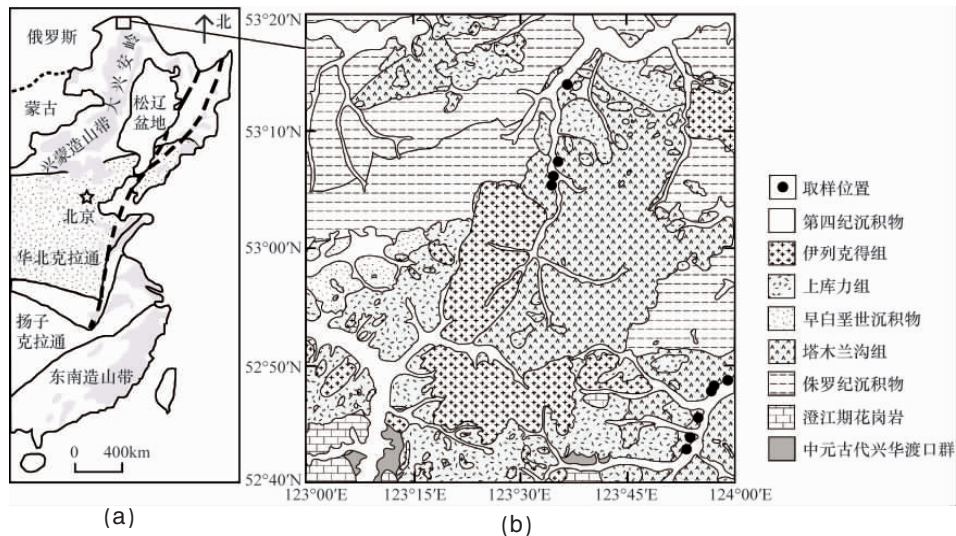


图 1 漠河地区大地构造位置图(a)及地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic position of Mohe (a) and geological sketch map (b)

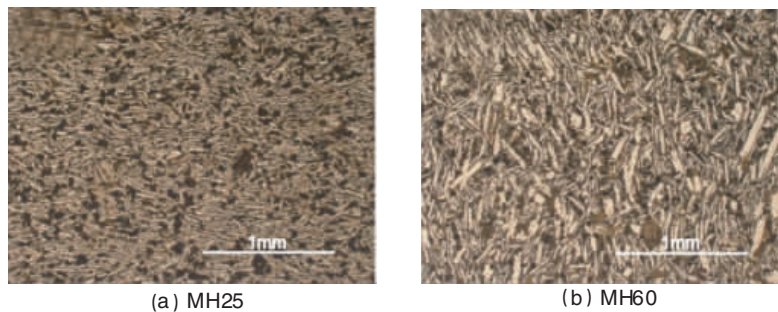


图 2 漠河塔木兰沟组火山岩单偏光镜图

Fig. 2 Single polarization micrographs of Tamulangou Formation volcanic rocks

## 2 地球化学特征分析

### 2.1 分析流程和方法

样品磨碎至 200 目,于核工业北京地质研究院进行主量和微量元素的分析测试。主量元素采用 X 射线荧光分析法 (XRF):用 0.6g 样品和 6g 四硼酸锂制成玻璃片测定氧化物含量,测试精度优于 2%~3%。微量元素采用酸溶法:制备样品溶液,进行 Element 电感耦合等离子体质谱 (ICPMS)测试,按照 GSR-1 和 GSR-2 国家标准,元素含量大于  $10^{-5}$  的元素测试精度优于 5%,小于  $10^{-5}$  的元素精度优于 10%。

### 2.2 主量元素的地球化学特征

对 10 件漠河塔木兰沟组火山岩样品进行了主量元素测试,结果见表 1。结果表明,这些火山岩的  $\text{SiO}_2$  质量分数介于

52.7%~57.8%,属于中基性岩石。这些样品的  $\text{TiO}_2$  含量变化大,变化范围为 0.78%~1.66%, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{FeO}$ , $\text{MnO}$ , $\text{MgO}$ , $\text{CaO}$ , $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  也具有较大的变化范围。样品的  $\text{MgO}$  含量都比较低,最高为 4.49%,因为与地幔橄榄岩相平衡的原始岩浆通常具有很高的 Mg 指数,因此认为这些岩石是由经历过分离结晶作用的岩浆形成的。

在硅碱图 (TAS 图) (图 3,底图根据文献[15])上,10 个样品有 7 个落入碱性范围,有 2 个落入亚碱性范围,还有 1 个落在碱性和亚碱性区域的交界部位,说明塔木兰沟组火山岩以碱性岩石为主。就岩石类型而言,本区火山岩都落入玄武质粗面安山岩和粗面安山岩范围,并且以玄武质粗面安山岩为主。

表 1 漠河塔木兰沟组火山岩主量元素分析结果

Table 1 Major element analysis results of Tamulangou Formation volcanic rocks from Mohe

样品编号	元素含量/%											烧失量 /%	总含量 /%
	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$		
MH25	53.29	1.66	16.96	5.56	3.55	0.16	3.34	6.02	4.31	2.84	0.96	1.20	99.85
MH27	53.44	1.44	17.36	4.37	4.02	0.10	3.91	5.90	4.31	2.90	0.83	1.70	100.28
MH29	55.67	0.97	17.86	7.85	0.47	0.09	2.89	6.10	4.16	2.68	0.35	1.04	100.12
MH33	55.04	1.13	17.45	4.50	3.57	0.11	3.24	7.26	4.10	2.17	0.40	1.20	100.17
MH60	53.45	1.47	16.68	4.79	4.16	0.11	4.47	7.58	3.84	1.73	0.55	1.20	100.03
MH62	57.79	0.78	17.83	5.02	1.15	0.10	1.51	4.93	6.58	1.42	0.32	2.60	100.03
MH63	55.94	0.80	17.26	4.64	1.72	0.11	1.91	5.42	5.80	2.30	0.31	3.48	99.69
MH66	56.56	1.15	16.85	4.84	2.33	0.09	3.78	6.43	4.23	2.35	0.37	1.08	100.07
MH68	53.81	1.49	16.48	4.24	4.51	0.10	2.68	7.27	3.40	2.20	0.59	3.34	100.11
MH69	52.72	1.48	16.14	5.06	3.52	0.10	4.49	8.05	3.06	1.98	0.57	2.86	100.04

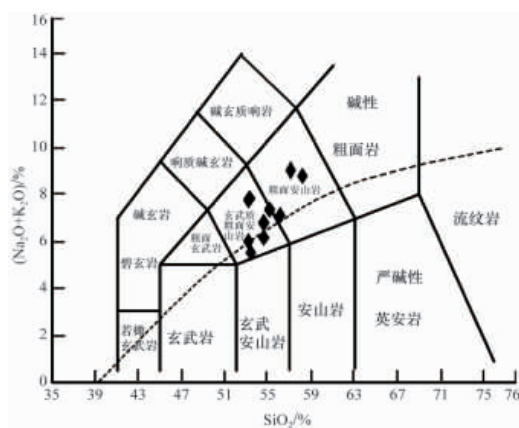


图 3 漠河塔木兰沟组火山岩全碱-二氧化硅图

Fig. 3 TAS diagram of Tamulangou Formation volcanic rocks from Mohe

### 2.3 微量元素的地球化学特征

本区火山岩的微量元素分析结果见表 2。样品的过渡族金属元素含量较低,其中 Cr 的含量为  $6.19 \times 10^{-6}$ ~ $97.6 \times 10^{-6}$ ;Co 的含量为  $14.8 \times 10^{-6}$ ~ $32.8 \times 10^{-6}$ ;Ni 的含量为  $16.6 \times 10^{-6}$ ~ $55 \times 10^{-6}$

(其中 2 件样品 Ni 含量未检测出)。这些过渡金属元素的含量,比通常认为的原始岩浆相应元素的含量要低很多,即使是这些样品里面过渡金属元素含量最高的也不能代表原始地幔熔体,而与富镁熔浆经过分离结晶后的熔体比较相似。对于指示成岩过程有重要意义的大离子亲石元素 Rb、Sr、Ba 的变化范围分别为  $21.2 \times 10^{-6}$ ~ $68.7 \times 10^{-6}$ 、 $747 \times 10^{-6}$ ~ $1384 \times 10^{-6}$ 、 $847 \times 10^{-6}$ ~ $1340 \times 10^{-6}$ 。这些样品的稀土元素总量(REE)变化较大,为  $155 \times 10^{-6}$ ~ $297 \times 10^{-6}$ 。一些反映岩浆形成过程的微量元素的比值变化也较大,如 Nb/La、Ba/Nb、Nb/U、Ce/Pb 的比值变化范围分别为 0.2~0.4、49~162、6.3~21.3、3.1~7.8。这些元素含量及其比值指示塔木兰沟组火山岩受到了壳源物质的影响。球粒陨石标准化后的轻稀土分馏系数  $(\text{La}/\text{Sm})_n$  为 3.22~4.60,轻重稀土分馏系数  $(\text{La}/\text{Yb})_n$  为 8.57~20.16,重稀土分馏系数  $(\text{Gd}/\text{Yb})_n$  为 1.67~3.24,较大的比值说明这些元素之间的分异很强(尤其是轻重稀土分馏系数)。通常壳源岩石都具有非常明显的 Eu 负异常,而测试样品的铕(Eu)异常都不明显( $\delta_{\text{Eu}}$  变化范围仅为 0.84~0.95),因此认为这些岩石较少受到地壳岩石的混染。



表 2 漠河塔木兰沟组火山岩微量元素分析

Table 2 Trace element analysis results of Tamulangou Formation volcanic rocks from Mohe

样品 编号	元素含量/ $10^{-6}$																	
	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Nb	Cs	Ba	La	Ce
MH25	10.9	1.38	15.4	208	55.8	25.7	21.4	36.6	136	24.7	58.9	921	27.4	22.2	0.40	1091	59.9	123
MH27	16.3	1.65	16.5	168	72.4	24.9	31.2	41.1	118	24.3	68.7	966	26.0	20.5	0.90	1089	60.4	120
MH29	11.7	1.54	21.3	180	24.9	26.3	16.6	39.6	90.1	21.7	63.9	747	23.8	7.65	1.11	854	30.9	61.0
MH33	4.61	1.06	18.9	214	95.2	28.3	43.0	43.2	102	22.7	46.0	818	20.4	9.62	1.25	847	35.3	71.6
MH60	11.9	1.5	17.4	200	86.9	31.5	47.8	48.4	116	22.9	21.2	966	22.3	11.6	1.60	877	43.8	88.9
MH62	7.75	1.27	9.64	107	6.19	14.8	—	14.1	86.7	18.8	22.4	1384	17.7	8.47	1.03	991	44.6	82.9
MH63	9.01	1.17	10.4	116	6.31	16.2	—	22.1	85.7	20.2	45.3	1330	18.2	8.25	1.49	1340	42.4	80.0
MH66	15.7	1.33	14.9	184	97.6	22.6	35.6	27.2	100	22.4	53.7	929	16.5	8.39	0.80	947	40.9	82.4
MH68	11.5	1.35	16.8	221	85.5	30.4	55.0	30.6	115	22.2	37.6	1125	21.6	11.9	0.39	874	46.7	93.8
MH69	17.4	1.54	18.8	201	86.8	32.8	47.2	149	121	23.5	32.4	965	22.9	12.5	0.43	862	48.0	96.7

样品 编号	元素含量/ $10^{-6}$																	
	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ta	Tl	Pb	Bi	Th	U
MH25	15.5	63.3	10.8	2.7	8.11	1.25	5.88	0.96	2.57	0.38	2.30	0.35	0.92	0.15	17.0	0.07	4.10	1.04
MH27	15.5	61.8	10.9	2.8	8.11	1.19	5.63	0.92	2.38	0.34	2.02	0.33	0.86	0.16	15.3	0.02	4.56	1.23
MH29	7.74	31.6	5.87	1.5	5.04	0.85	4.44	0.81	2.40	0.39	2.43	0.40	0.36	0.19	10.4	0.05	4.38	1.00
MH33	9.04	37.1	6.89	1.8	5.44	0.82	4.26	0.72	1.95	0.31	1.80	0.29	0.43	0.13	12.5	0.01	4.58	1.13
MH60	11.3	45.7	8.33	2.2	6.59	0.97	4.78	0.76	2.11	0.32	1.82	0.28	0.48	0.07	14.8	0.03	4.30	1.01
MH62	10.0	38.6	6.10	1.7	4.67	0.73	3.65	0.66	1.89	0.30	1.83	0.30	0.36	0.09	26.8	0.04	5.31	1.14
MH63	9.60	37.0	6.14	1.8	4.96	0.72	3.72	0.64	1.92	0.30	1.91	0.30	0.34	0.13	15.6	0.02	4.88	1.08
MH66	10.1	41.0	7.12	1.9	5.31	0.77	3.72	0.58	1.60	0.23	1.39	0.22	0.38	0.17	18.3	0.04	6.14	1.34
MH68	11.7	48.6	8.78	2.3	6.84	1.03	4.98	0.78	2.12	0.33	1.95	0.29	0.54	0.12	15.0	0.03	4.41	1.40
MH69	12.4	51.1	9.35	2.5	6.96	1.04	5.32	0.85	2.27	0.33	2.04	0.29	0.54	0.11	14.3	0.03	4.62	1.12

在球粒陨石标准化稀土元素配分图(图4,球粒陨石标准化值来自文献[16])上,所有样品都具有轻稀土元素(LREE)富集,重稀土元素(HREE)亏损的右倾模式, Eu 异常很不明显。在原始地幔标准化不相容元素蛛网图(图5,原始地幔标准化值来自文献[17])上,这些样品具有明显的 Ba 和 K 的正异常以及非常明显的 Nb-Ta 负异常。通常认为 Nb-Ta 负异常表明样品受到了地壳物质的混染,但是 Nb-Ta 的亏损也可能由其

他原因引起:(1)地幔岩石部分熔融过程中残留有富含高场强元素的矿物,如金红石、金云母和角闪石等;(2)与俯冲作用相关的交代作用。但目前尚没有证据证实上述观点。通常认为这类岩石形成于岛弧环境,但也有特例,如中国云南腾冲的新生代火山岩具有很明显的 Nb-Ta 负异常,但是形成于板块内部环境<sup>[8]</sup>,可以被称为“滞后型弧火山岩”。同样,本区火山岩形成于中生代造山后伸展环境<sup>[9]</sup>,也不是岛弧环境。

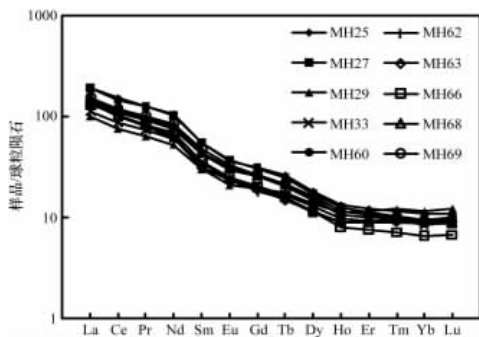


图 4 漠河塔木兰沟组火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分图  
Fig. 4 Chondrite normalized rare earth element distributions of Tamulangou Formation volcanic rocks from Mohe

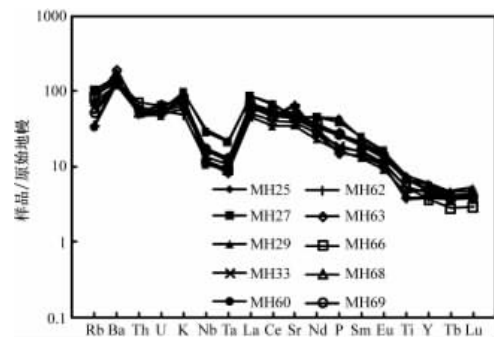


图 5 漠河塔木兰沟组火山岩原始地幔标准化不相容元素蛛网图  
Fig. 5 Primitive mantle normalized incompatible element spidergrams of Tamulangou Formation volcanic rocks from Mohe

### 3 讨论

漠河地区的塔木兰沟组火山岩是一套中基性火山岩,根据其地球化学特征可知其组成不能代表直接从地幔部分熔融所形成的原始岩浆,而是原始岩浆经历过一定程度的分离结晶作用的产物,因此有必要对其源区特征和成因做更详细的研究。

地壳混染可以发生在幔源熔体的源区或者发生在幔源熔体离开源区以后<sup>[20]</sup>,在源区发生的地壳混染作用是由俯冲的沉积物造成<sup>[21]</sup>。文献[22]表明,高 SiO<sub>2</sub> 含量及低 Nb 含量指示发生过地壳混染作用,这与塔木兰沟组火山岩稍高的 SiO<sub>2</sub> 含量及低 Nb 含量一致,说明塔木兰沟组火山岩经历过地壳混染作用。如果玄武质岩浆被地壳物质混染的话,不相容元素如 La 和 Ba 相对于 Nb 增高,通常会造成高的 La/Nb 和 Ba/Nb 值及低的 La/Ba 值<sup>[23,24]</sup>。本区火山岩样品具有很高的 Ba/Nb 比值(最高可达 162)及很低的 La/Ba 值(最低可达 0.032),说明可能存在地壳物质的混染作用。在 Ce/Pb-Ce 和 Nb/U-Nb 图(图 6,阴影部分根据文献[25])上,这些样品都落在靠近大陆

地壳的位置,更进一步说明这些样品可能是地壳和地幔混合的产物。但由于本区火山岩样品的 La/Sm 比值变化不大(5.1~7.3),因此这些样品的元素地球化学特征主要反映了其源区的地球化学特征<sup>[26]</sup>。Nb/Ta、Zr/Hf 这 2 对元素,由于具有相近的离子半径和电负性<sup>[27]</sup>,而具有相似的地球化学性质,因此 Nb/Ta、Zr/Hf 很难随着分离结晶和部分熔融等岩浆过程改变,可以用来反映源区的性质。本区火成岩相对高的 Nb/Ta 值(18.9~24.6)表明其地幔源区可能经历了酸性熔体的改造<sup>[28,29]</sup>。

漠河地区在中生代时处于碰撞后的伸展环境<sup>[9]</sup>。漠河中生代火山岩经常沿正断层展布,意味着这些岩浆形成在张性环境中,上升相对容易。

综上所述,漠河塔木兰沟组中生代火山岩的地球化学特征主要反映了其地幔源区的不均一性并较少受到地壳物质的混染。考虑到其明显的 Nb-Ta 负异常,推测其是受到流体交代富集的大陆岩石圈地幔熔融的产物,考虑到漠河所处的大地构造环境,认为造成其岩石圈地幔富集的事件是古亚洲洋和/或蒙古—鄂霍茨克洋的俯冲。

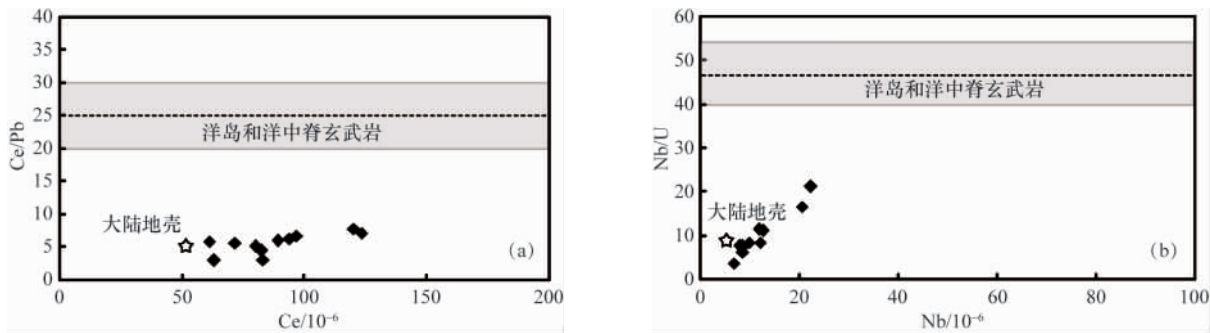


图 6 漠河塔木兰沟组火山岩 Ce/Pb-Ce(a) 和 Nb/U-Nb(b) 图

Fig. 6 Ce/Pb-Ce (a) and Nb/U-Nb (b) diagrams of Tamulangou Formation volcanic rocks from Mohe

### 4 结论

分布于漠河地区的晚中生代塔木兰沟组火山岩为一套以碱性为主的中基性火山岩,岩石类型主要为玄武质粗面安山岩和粗面安山岩。这些火山岩具有轻稀土元素富集的右倾球粒陨石标准化稀土元素配分曲线,在原始地幔标准化不相容元素分布蛛网图上,具有 Ba 和 K 正异常以及非常明显的 Nb-Ta 负异常。岩石成因和源区分析表明这些火山岩的地球化学特征主要反映了其地幔源区的特征,受地壳物质的混染较少,属于富集的大陆岩石圈地幔的产物,岩石圈地幔的富集由古亚洲洋和/或蒙古—鄂霍茨克洋的俯冲造成。

#### 参考文献 (References)

[1] 张昱, 赵焕力, 韩彦东. 大兴安岭北段塔木兰沟组玄武岩地球化学及构造背景[J]. 地质与资源, 2005, 14(2): 87-96.  
Zhang Yu, Zhao Huanli, Han Yandong. Geology and Resources, 2005, 14(2): 87-96.  
[2] 张昱, 赵焕力, 李仰春, 等. 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, 2005, 32(3): 405-410.  
Zhang Yu, Zhao Huanli, Li Yangchuan, et al. Geology in China, 2005, 32(3): 405-410.  
[3] 张玉涛, 张连昌, 英基丰, 等. 大兴安岭北部扎兰屯脉岩群的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(11): 2733-2742.  
Zhang Yutao, Zhang Lianchang, Ying Jifeng, et al. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(11): 2733-2742.  
[4] 张玉涛, 张连昌, 英基丰, 等. 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, 2007, 23(11): 2811-2822.  
Zhang Yutao, Zhang Lianchang, Ying Jifeng, et al. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2811-2822.  
[5] 张玉涛, 张连昌, 周新华, 等. 大兴安岭北段牙克石地区玄武质火山岩的元素、同位素地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2008, 27(1): 112-120.  
Zhang Yutao, Zhang Lianchang, Zhou Xinhua, et al. Geological Bulletin of China, 2008, 27(1): 112-120.  
[6] 林强, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义[J]. 地质科学, 1998, 33(2): 129-139.  
Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou, et al. Scientia Geologica Sinica,



- 1998, 33(2): 129-139.
- [7] Wang F, Zhou X H, Zhang L C, et al. 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*, 2006, 251(1): 179-198.
- [8] Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan mountains, northeastern China [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2003, 121(1): 115-135.
- [9] 赵国龙, 杨桂林, 傅嘉有, 等. 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, 1989.  
Zhao Guolong, Yang Guilin, Fu Jiayou, et al. Mesozoic volcanic rocks in the Central-southern Da Hinggan Mountains[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 1989.
- [10] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, Lo C H, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis [J]. *Lithos*, 2003, 66(3): 241-273.
- [11] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeast China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(1): 143-173.
- [12] 吴福元, 叶茂, 张世红. 中国满洲里—绥芬河地学断面域的地球动力学模型[J]. *地球科学*, 1995, 20(5): 535-539.  
Wu Fuyuan, Ye Mao, Zhang Shihong. *Journal of Earth Sciences*, 1995, 20(5): 535-539.
- [13] 王莹, 其和日格. 漠河、老沟、连崮、二十五站幅 1:200000 区域地质调查报告[R]. 哈尔滨: 黑龙江省地质矿产局, 1988.  
Wang Ying, Qihe Rige. Mohe, Laogou, Lianyu, Ershiwuzhan 1:200000 regional geological survey report[R]. Harbin: Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 1988.
- [14] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1-30.
- [15] Le Maitre R W. *Igneous rocks: A classification and glossary of terms*[M]. London: Cambridge University Press, 2002.
- [16] Taylor S R, McLennan S M. *The continental crust: Its composition and evolution*[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [17] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [18] Zhang Y T, Liu J Q, Meng F C. Geochemistry of cenozoic volcanic rocks in Tengchong, SW China: relationship with the uplift of the Tibetan plateau[J]. *Island Arc*, 2011, 21(4): 255-269.
- [19] Meng Q R. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract[J]. *Tectonophysics*, 2003, 369(3): 155-174.
- [20] Smithies R H, Champion D C, Sun S S. Evidence for early LREE-enriched mantle source Regions: diverse magmas from the c.3.0 Ga Mallina Basin, Pilbara Craton, NW Australia [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 48(5): 1515-1537.
- [21] Rollinson H R. *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation* [M]. New York: Longman Scientific and Technical/Wiley, 1993.
- [22] Larsen L M, Watt W S, Watt M. Geology and petrology of the Lower Tertiary plateau basalts of the Scoresby Sund region, East Greenland[J]. *Grønlands Geologiske Undersøgelse Bulletin*, 1989(157): 1-164.
- [23] Weaver B L, Tamey J. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust[J]. *Nature*, 1984(310): 575-577.
- [24] Wedepohl K H. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1217-1232.
- [25] Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, et al. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79(1): 33-45.
- [26] 郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 等. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(1): 161-168.  
Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, et al. *Acta Petrological Sinica*, 2001, 17(1): 161-168.
- [27] Jochum K P, McDonough W F, Palme H, et al. Compositional constraints on the continental lithospheric mantle from trace elements in spinel peridotite xenoliths[J]. *Nature*, 1989(340): 548-550.
- [28] Stolz A J, Jochum K P, Spettel B, et al. Fluid-and melt-related enrichment in subarc mantle: evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts[J]. *Geology*, 1996, 24(7): 587-590.
- [29] Klemme S, Blundy J D, Wood B J. Experimental constraints on major and trace element partitioning during partial melting of eclogite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(17): 3109-3123.

(编辑 四恬)



## 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿信箱:kjdbjb@cast.org.cn。