

南兴安岭晚中生代火山岩的岩石成因 (II): Pb 同位素制约*

高晓峰^{1,2}, 郭 锋², 李超文²

(1. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054;

2. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要: 对南兴安岭地区晚中生代火山岩的 Pb 同位素进行了分析, 结合其主微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学特征, 探讨了火山岩的岩石成因。满克头鄂博组低钾拉斑-钙碱性玄武安山岩表现出富集 LILE、LREE 和 HFSE 亏损元素地球化学特征以及稍高放射性成因 Sr、Pb ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70488 \sim 0.70499$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.18 \sim 18.23$) 和弱相对亏损至弱富集的 Nd 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.12 \sim +0.68$), 其来源于俯冲沉积物参与改造富集地幔熔融源区。该组的英安岩-流纹岩较基性岩浆具有稍高放射性成因 Sr、Pb ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70522 \sim 0.70709$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.16 \sim 18.33$) 和低 Nd 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.5 \sim -0.4$), 且在空间上与玄武岩共生, 为玄武质岩浆结晶分异, 并同化混染作用 (AFC) 的产物。玛尼吐组英安岩具有与现代俯冲带 adakite 岩石相似的特征; 在 Sr-Nd-Pb 同位素组成上, 它们较同期或近期玄武安山岩更低 Sr、Pb ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70409 \sim 0.70425$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.15 \sim 18.17$) 和高 Nd 同位素比值 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +0.9 \sim +2.1$), 为造山带下地壳镁铁质岩石的部分熔融产物。

关键词: Pb 同位素; 岩石成因; 火山岩; 晚中生代; 南兴安岭

中图分类号: P558.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 06-0121-06

Origin of Late Mesozoic Volcanic Rocks from the Southern Da Hinggan Mountain, NE China (II): Constraints of Pb Isotope

GAO Xiaofeng^{1,2}, GUO Feng², LI Chao wen²

(1. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China

2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Major, Trace element and Sr-Nd-Pb isotope data of Late Mesozoic volcanic rocks from the northern Da Hinggan Mountain, NE China are reported in this paper. The basaltic-andesites occurring in the Manketou'ebo Formation (Fm) belonging to low-K calc-alkaline series, Which show LILE, LREE enrichment and HFSE depletion. They have slightly high radiogenic Sr-Pb ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70488 \sim 0.70499$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.18 \sim 18.23$) and are slightly depleted to enriched in Nd isotope ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.12 \sim +0.68$) attributed to the participation of sediments in the mantle source. The dacites and rhyolites of the Manketou'ebo Formation have higher radiogenic Sr, Pb ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70522 \sim 0.70709$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.16 \sim 18.33$) and lower radiogenic Nd isotopic compositions ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.5 \sim -0.4$) than the contemporaneous basaltic lavas. This resulted from the differentiation of primary basaltic magmas and assimilation and fractional crystallization (AFC). The dacites of the Manitu Formation have the signatures of modern adakites from the subduction zones. Compared with the basaltic lavas,

* 收稿日期: 2009-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40673035); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (40702008)

作者简介: 高晓峰 (1979 年生), 男, 博士; E-mail: xfgao2000@163.com

they have lower radiogenic Sr, Pb ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704\ 09 \sim 0.704\ 25$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.15 \sim 18.17$) but higher radiogenic Nd isotopic compositions ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +0.9 \sim +2.1$), arguing against an origin of differentiation of the contemporaneous basalts. These rocks are considered as melts of mafic protoliths from the lower crust beneath the orogen under the heating of the underplating basaltic magmas.

Key words: Pb isotope; petrogenesis; volcanic rocks; late Mesozoic; the southern Da Hinggan Mountain

南兴安岭地区属于东亚陆缘增生、陆-陆碰撞形成的东北亚造山带的一部分^[1-8], 区域上广泛分布着燕山期岩浆岩(图1)。作为北方造山带最大规模的中生代火山岩带, 前人曾对区域上中生代火山岩做过系统的研究工作^[5-9], 本文在前人工作

基础上, 分析了该火山岩 Pb 同位素组成, 结合其元素和 Sr-Nd 同位素地球化学特征, 旨在进一步探讨南兴安岭地区晚中生代满克头鄂博组和玛尼吐组火山岩的成因。

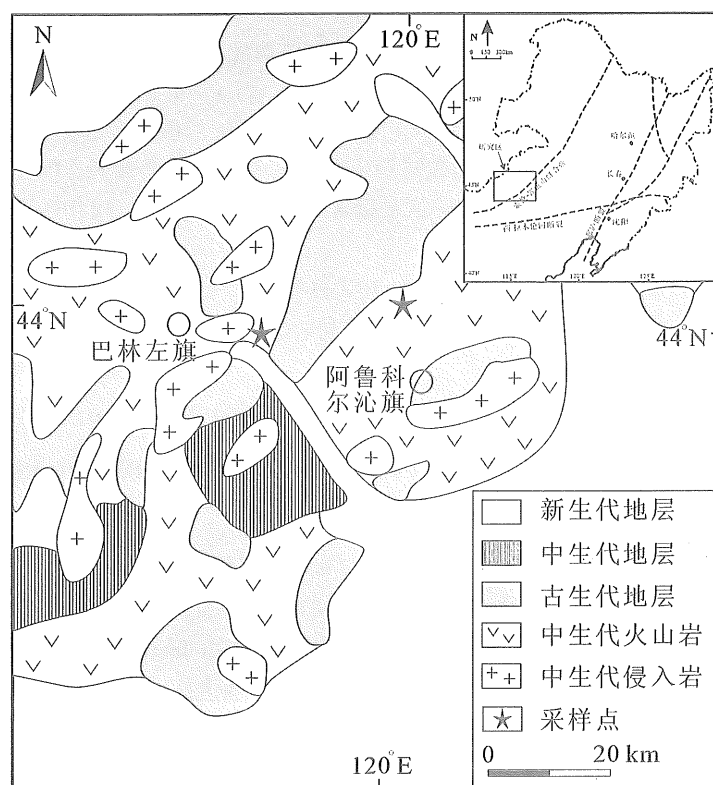


图1 南兴安岭地区晚中生代火山岩分布图(据文献[10]修改)。

Fig. 1 Distribution of Late Mesozoic volcanic rocks at the southern Da Hinggan Mountain, NE China

1 火山岩地质学特征

南兴安岭地区位于华北克拉通与西伯利亚地台的交接部位, 西拉木伦河断裂以北, 贺根山-索伦山蛇绿岩带以南, 属于东北亚造山带的一部分(图1)。晚侏罗世-早白垩世期间, 区域上火山活动非常强烈, 形成满克头鄂博组、玛尼吐组、梅勒图组和白音高老组等火山岩。其中满克头鄂博组具有双峰式特征, 其岩石组合为玄武安山岩和英安-流纹岩^[6-7]; 玛尼吐组和白音高老组则主要为中酸性火山岩组合, 岩石类型包括安山岩、英安岩、流

纹岩和凝灰岩等; 梅勒图组主要为一套中性-基性的安山岩、玄武安山岩和玄武岩组合^[9-10]。本文研究的火山岩样品分别采自满克头鄂博组玄武安山岩-英安岩-流纹岩和玛尼吐组的英安岩。详细的岩相学、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素地球化学特征见郭锋等^[6]和高晓峰等^[7]。Pb 化学分离和同位素比值测量在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室 MAT262 热电离子质谱计上完成, 详细流程见文献[11]。Pb 同位素比值的分析结果见表1。

表1 南兴安岭地区晚中生代火山岩的 Pb 同位素组成分析结果¹⁾

Table 1 Pb isotope data of Late Mesozoic volcanic rocks in the Manketou'ebo and Manitu Formations in the southern Da Hinggan mountain, NE China

火山岩组	样品号	岩石类型	Th	U	Pb	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\Delta 7/4$	$\Delta 8/4$
			$(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$			$\pm 2\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 2\sigma$	$^{204}\text{Pb}(i)$	$^{204}\text{Pb}(i)$	$^{204}\text{Pb}(i)$		
满克头鄂博组	LD-5	玄武安山岩	1.24	0.36	3.99	18.191 ± 14	15.539 ± 16	38.135 ± 19	18.18	15.53	38.01	7.2	40.1
	LD-6	玄武安山岩	1.26	0.39	4.43	18.235 ± 14	15.549 ± 15	38.194 ± 16	18.22	15.54	38.08	7.7	41.6
	LD-7	玄武安山岩	1.28	0.36	3.74	18.238 ± 9	15.567 ± 9	38.249 ± 10	18.23	15.56	38.11	9.5	44.6
	LD-9	玄武安山岩	1.33	0.38	4.25	18.221 ± 10	15.542 ± 11	38.163 ± 13	18.21	15.54	38.03	7.1	39.1
	LD-10	玄武安山岩	1.31	0.38	3.86	18.223 ± 9	15.547 ± 10	38.178 ± 11	18.21	15.54	38.04	7.5	39.3
	LD-11	玄武安山岩	1.26	0.35	3.50	18.241 ± 19	15.558 ± 25	38.233 ± 33	18.23	15.55	38.08	8.5	41.8
	LD-15	英安岩	4.01	1.16	14.06	18.337 ± 5	15.582 ± 6	38.382 ± 6	18.33	15.58	38.26	9.9	48.0
	LD-17	英安岩	4.28	1.18	11.85	18.243 ± 7	15.540 ± 8	38.178 ± 9	18.23	15.53	38.03	6.7	36.2
	LD-19	英安岩	3.95	1.04	16.66	18.172 ± 6	15.537 ± 6	38.119 ± 7	18.16	15.53	38.02	7.3	43.4
	LD-20	英安岩	3.24	0.92	11.14	18.194 ± 7	15.537 ± 6	38.143 ± 8	18.18	15.53	38.02	7.0	41.2
玛尼吐组	LD-25	流纹岩	6.43	1.38	10.15	18.263 ± 12	15.548 ± 15	38.353 ± 17	18.25	15.54	38.09	7.1	40.5
	LD-26	流纹岩	5.20	0.78	7.98	18.210 ± 8	15.529 ± 9	38.386 ± 7	18.20	15.52	38.12	6.0	48.9
玛尼吐组	21LD-1	英安岩	2.49	0.78	7.79	18.168 ± 9	15.479 ± 12	37.945 ± 14	18.16	15.47	37.81	1.4	23.6
	21LD-2	英安岩	2.72	0.90	8.17	18.188 ± 7	15.490 ± 8	37.989 ± 8	18.17	15.48	37.85	2.2	25.2
	21LD-3	英安岩	2.63	0.82	7.80	18.161 ± 7	15.477 ± 7	37.939 ± 7	18.15	15.47	37.80	1.2	23.2
	21LD-4	英安岩	2.69	0.90	8.17	18.169 ± 8	15.472 ± 9	37.925 ± 9	18.16	15.47	37.79	0.6	21.3

1) 所有样品的初始 Pb 同位素比值计算采用 140 Ma 计算。

2 Pb 同位素特征

在 Pb 同位素组成上 (图 2), 满克头鄂博组玄武安山岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i)$ 比值范围为 18.18 ~ 18.23, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i)$ 比值为 15.53 ~ 15.56, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i)$ 比值范围为 38.01 ~ 38.11, $\Delta 7/4$ 比值范围为 7.1 ~ 9.5, $\Delta 8/4$ 比值范围为 39.1 ~ 44.6。满克头鄂博组英安岩和流纹岩表现出与玄武安山岩相对更富集放射成因 Pb: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i) = 18.16 \sim 18.33$;

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i) = 15.52 \sim 15.58$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i) = 38.02 \sim 38.26$; $\Delta 7/4 = 6.0 \sim 9.9$; $\Delta 8/4 = 36.2 \sim 48.9$ 。而玛尼吐组埃达克质英安岩则表现出与前者略低的放射性 Pb 同位素组成 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i) = 18.15 \sim 18.17$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i) = 15.47 \sim 15.48$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i) = 37.79 \sim 37.85$; $\Delta 7/4 = 0.6 \sim 1.4$; $\Delta 8/4 = 21.3 \sim 25.2$)。结合以前报道的主、微量元素和 Sr-Nd 同位素数据^[6-7]: 玛尼吐组埃达克质英安岩具有比满克头鄂博组玄武安山岩略低的 Sr 和高

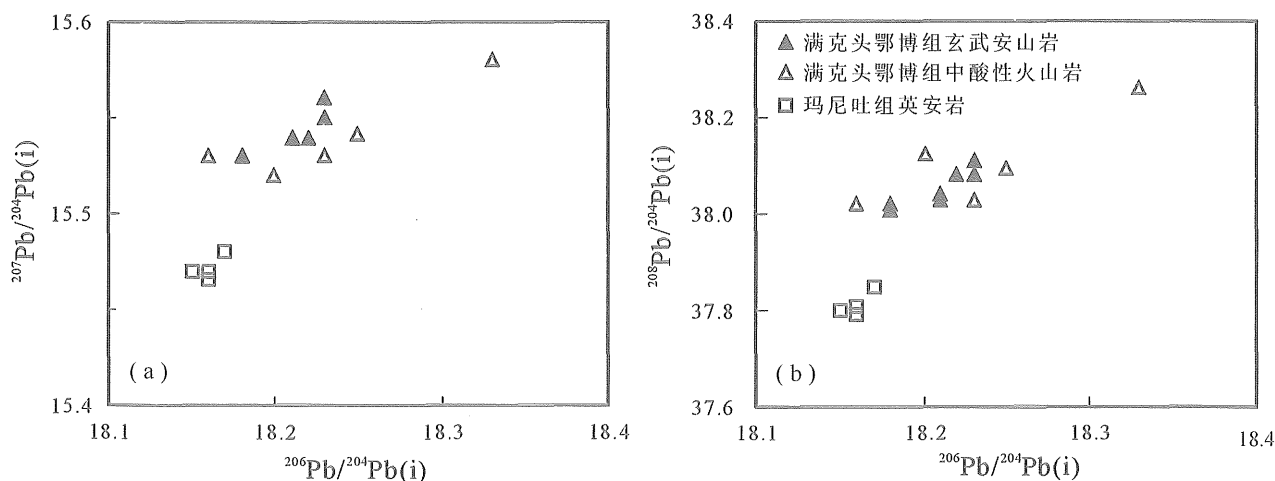


图2 南兴安岭地区晚中生代火山岩 Pb 同位素比值变化图

Fig. 2 Pb isotope variation diagram of Late Mesozoic volcanic rocks from the southern Da Hinggan Mountain, NE China

的 Nd 同位素比值, 暗示这两组火山岩其来源于不同熔融源区的产物。总体上, 这些晚中生代的火山岩都具有正的 $\Delta 7/4$ 和 $\Delta 8/4$ 值, 反映区域岩石圈总体具有亲北方劳亚大陆的属性^[12]。

3 岩石成因讨论

对于大陆岩石圈地幔, 俯冲交代和板内交代作用都可以形成相对亏损 HFSE 而富集 LILE、LREE 的地幔源区。在板内地幔交代作用过程中主要包括 2 种类型: ① 富 CO_2 流体/熔体交代作用^[13-14], 形成的地幔源区以高度富集 LREE 为特征, 并随着时间演化形成低 Nd 同位素比值, 但受碳酸岩交代的岩石圈地幔以相对低 Sr-Pb 同位素比值为特征, 且在微量元素蛛网图上显示出明显的 Zr-Hf 相对 Sm、Eu 的亏损; ② 小比例富碱熔体交代作用^[13,15], 形成的岩石圈地幔则富集 LILE, 如 Rb、K 和高 Rb/Sr 比值, 因此随着时间演化则形成相当高 Sr 同位素比值的地幔源区, 然而这类交代作用形成的地幔源区 HFSE 亏损不明显, 甚至不亏损, 并且富碱熔体交代地幔形成的是碱性玄武岩。结合大兴安岭南段地区晚中生代满克头鄂博组低钾拉斑-钙碱性玄武质安山岩表现出富集 LILE、LREE 和 Zr-Hf 相对 REE 不亏损元素地球化学特征, 以及稍高的 Sr-Pb 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70488 \sim 0.70499$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.18 \sim 18.23$) 和弱相对亏损至弱富集的 Nd 同位素组成 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.12 \sim +0.68$), 说明单一的板内交代过程, 无论是富碳酸岩还是富碱熔体/流体都难以解释这套岩石的 Sr-Nd-Pb 同位素组成和元素地球化学特征。

在板块俯冲过程中, 随着被俯冲洋壳或陆壳达到含水矿物相的脱水条件, 被俯冲作用带入的沉积物和板片随即发生脱水反应, 从而析出相对亏损 HFSE 而富集 LILE 和 LREE 的流体/熔体, 对上覆的地幔楔进行交代作用^[16]。由于 K、Rb 等元素相对于 LREE 活动性更强, 更容易进入到熔体或流体中, 因此由板片析出的交代介质将能同时满足这些基性火山岩所要求的地幔具有亏损 HFSE 和略富集 LREE 的要求。但是俯冲板片析出流体/熔体具有高的 Rb/Sr 比值, 被其交代的地幔楔必然具有高的 Rb/Sr 比值, 形成具有较高 Sr 同位素组成的地幔储库。而满克头鄂博组的低钾拉斑玄武安山岩的 Rb/Sr 比值较低, 由俯冲板片析出流体/熔体交代的地幔楔作为其熔融源区不合适的。因此, 我们认为这套岩石的形成与板块俯冲作用密切相关, 但其熔融地幔源区应该存在俯冲沉积物的贡献, 可能主

要为沉积物流体的贡献。来自大兴安岭地区基性火山岩和蛇绿岩的研究资料显示^[5,6,9,17], 晚中生代期间区域上不存在大洋板块俯冲作用, 然而古亚洲洋在古生代-早中生代期间的消减闭合^[17-19], 南兴安岭地区地幔富集过程可能是此地质事件的响应。

满克头鄂博组英安岩和流纹岩相对玄武山岩具有较高的 SiO_2 含量及低 MgO 、 FeO^* 、 Al_2O_3 和高 CaO 、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ^[6-7]。显示出一定的结晶分异作用的发生, 但该组中酸性火山岩总体上较玄武安山岩稍高 Sr、Pb 和低 Nd 同位素比值, 也显示出一定的地壳混染或者同化混染作用的影响。因此, 选择同组玄武安山岩来近似代表母岩浆的同位素组成, 将文献 [20] 分析的片岩样品近似代表上地壳来计算 AFC 过程对这些中酸性火山岩浆演化的可能影响。Sr、Nd、Pb 的分配系数根据实验岩石学测定的中酸性岩浆体系的总体分配系数, 斜长石为主要分离结晶相, 估计的 Sr 总体分配系数 $K_D(\text{Sr})$ 为 1.2, $K_D(\text{Nd})$ 为 0.7, $K_D(\text{Pb})$ 为 0.7。计算结果显示, 当 r (混染速率/分离结晶速率之比) 为 0.25 时, 其残余岩浆 F 变化在 30% ~ 80% 之间可以较好地模拟这些中酸性火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成变化特征 (图 3)。模拟计算的各端元组分见表 2。

表 2 模拟计算的各端元组分¹⁾

Table 2 Compositions of end-members for modeling

端元组分	Sr	Nd	Pb	$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$
	(μg · g ⁻¹)					
大石寨组玄武岩	318	20	15	0.7032	5.1	18.10
UCC(片岩)	90	21	24	0.7135	-12.1	18.40
玄武安山岩	376	11	4	0.7049	-0.12	18.18

1) 数据来源: 大石寨组玄武岩和 UCC 的 Sr-Nd 同位素数据来自文献 [23], [20]; 大石寨组玄武岩 Pb 同位素数据为课题组未发表数据, UCC 的 Pb 同位素数据为推测。

玛尼吐组英安岩表现出与同期的满克头鄂博组玄武安山岩更低的 Sr、Pb 和高的 Nd 同位素比值, 因此很难用玄武岩浆的分异作用或 AFC 过程来解释。近年来对大陆造山带和陆内中酸性火山岩, 尤其是具有类似于现代俯冲带 adakite 岩微量元素特征的酸性火山岩的研究表明, 该类岩石可以由加厚的地壳或拆沉的下地壳基性岩石部分熔融形成^[21-22]。来自玛尼吐组英安岩的主、微量元素特征显示它们与高压条件下变基性火成岩的熔体具有相似的特征, 如高 SiO_2 、 Al_2O_3 、富 Na_2O , 低 MgO 、

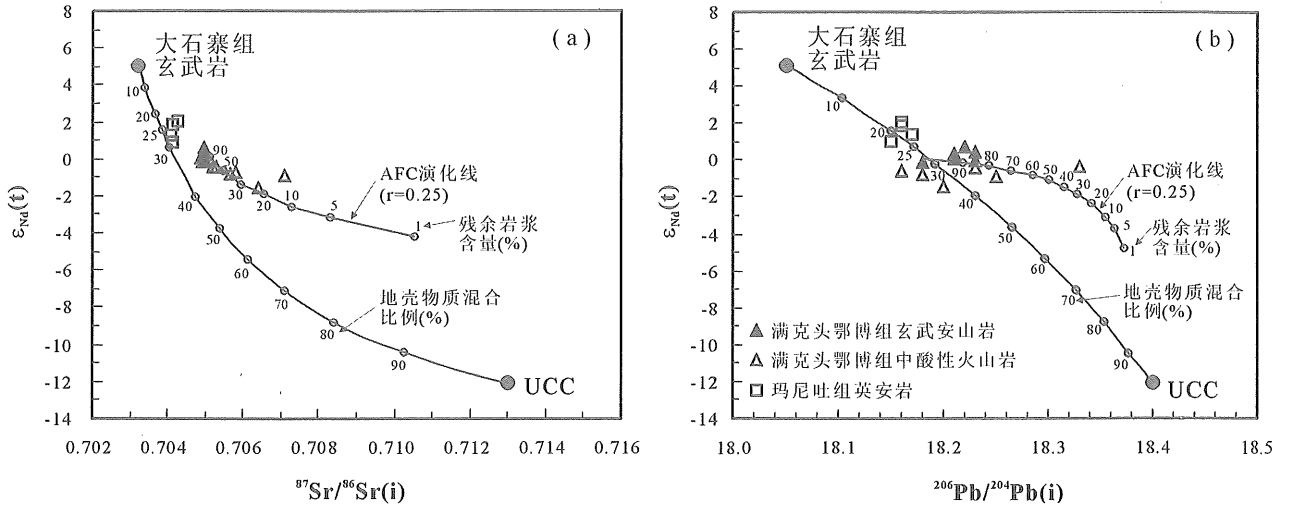


图 3 南兴安岭地区晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素比值变化图 (图中的大石寨组玄武岩和 UCC 分别据文献 [23], [20])

Fig. 3 Sr-Nd-Pb isotope variation diagram of Late Mesozoic volcanic rocks from the southern Da Hinggan Mountain, NE China

Cr、Ni 和高 Sr、低 Y 和 HREE 的特征 [7]。另外对贺根山蛇绿岩 - 霍林郭勒 - 小兴安岭一带的变质杂岩的研究表明华北 - 蒙古陆块的碰撞时间在印支期已经完成 [16-18]，在南兴安岭地区并不存在晚中生代大洋板片俯冲作用。根据以上地质事实，我们倾向认为这些具有与现代 adakite 相似元素地球化学特征的玛尼吐组英安岩为造山带大陆地壳镁铁质岩石的部分熔融产物，而同期的玄武岩浆很可能为这些岩石的熔融提供热源。

在熔融原岩方面，其相对富 Na₂O 和低 K₂O 的特征说明它们很可能为拉斑 - 钙碱性玄武岩，如古生代大石寨玄武岩 [23]，加上一部分陆壳物质组成 (以区域出露的片麻岩和片岩为代表) [19]。这些不同端元的混合可以解释这些英安岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成。计算结果表明大约 75% ~ 80% 的大石寨组岛弧玄武岩加上约 20% ~ 25% 的陆壳物质能模拟出目前所观察到的玛吐尼组英安岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成 (图 3)。

4 主要认识

(1) 南兴安岭地区满克头鄂博组富集 LILE、LREE 和 HFSE 亏损以及稍高 Sr、Pb 和弱亏损至弱富集 Nd 同位素玄武质安山岩来源于俯冲沉积物改造的富集岩石圈地幔，其形成很可能与古亚洲洋在古生代 - 早中生代的消减闭合作用相关。

(2) 满克头鄂博组的英安 - 流纹岩在空间上与基性火山岩共生，在主、微量元素上与同期玄武岩浆具有较好的演化趋势，较玄武岩浆稍高放射性成因 Sr、Pb 和低 Nd 同位素组成，代表了玄武岩

浆 AFC 作用的产物。

(3) 玛尼吐组英安岩具有与高压条件下镁铁质原岩的熔体一致的富 Al、Na，高 Sr、低 Y 和 HREE 含量，与现代俯冲带 adakite 相似。相对于同期玄武岩浆，它们具有更低的 Sr、Pb 和更高的 Nd 同位素组成，为玄武岩浆底侵作用下镁铁质原岩重熔作用的结果。

参考文献：

- [1] SENGÖR A M C, NATAL'IN B A, BURTMAN V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364: 299 - 307.
- [2] ROBINSON P T, ZHOU M F, HU X F, et al. Geochemical constraints on the origin of the Hengenshan Ophiolite, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Asian Earth Sci, 1999, 17: 423 - 442.
- [3] WU F Y, SUN D Y, LI H M, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. Chem Geol, 2002, 187: 143 - 173.
- [4] JAHN B M, WU F Y, CAPDEVILA R, et al. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountain in NE China[J]. Lithos, 2001, 59: 171 - 198.
- [5] 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]. J Volcano Geotherm Res, 2003, 121: 115 - 135.
- [6] 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: 161 - 168.

- GUO F, FAN W M, WANG Y J, et al. Petrogenesis of the late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the southern Da Hinggan Mts, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17: 161 - 168
- [7] 高晓峰, 郭锋, 范蔚茗, 等. 南大兴安岭晚中生代中酸性火山岩的岩石成因 [J]. *岩石学报*, 2005, 21 (3): 737 - 748.
- GAO X F, GUO F, FAN W M, et al. Origin of late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks from the southern-Da Hinggan Mountain, NE China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21: 737 - 748
- [8] GUO F, FAN W M, LI C W, et al. Early Cretaceous highly positive- ϵ Nd felsic volcanic rocks from the Hinggan Mountains, NE China: origin and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, doi: 10.1007/s00531-008-0362-8.
- [9] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征: 壳幔相互作用的证据 [J]. *岩石学报*, 1999, 15: 396 - 407.
- GE W C, LIN Q, SUN D Y, et al. Geochemical characteristics of Mesozoic basaltic volcanic rocks in the Da Hinggan Mts: evidence for mantle - crust interaction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15: 396 - 407
- [10] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1 - 725.
- [11] CHEN F K, SATIR M, JI J, et al. Nd-Sr-Pb isotopes of Tengchong Cenozoic volcanic rocks from western Yunnan, China: evidence for an enriched mantle source [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21: 39 - 45.
- [12] 张理刚. 东亚岩石圈块体地质 - 上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 1 - 252.
- [13] MENZIES M A, ROGERS N, TINDLE A, et al. Metasomatic and enrichment processes in lithospheric peridotites, an effect of asthenosphere-lithosphere interaction [C]//Menzies M A and Hawkesworth C J, eds. *Mantle Metasomatism*. London: Academic Press, 1987: 313 - 361.
- [14] DUPUY C, LIOTARD J M, DISTAL J. Zr/Hf fractionation in intraplate basaltic rocks: carbonate metasomatism in the mantle source [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, 56: 2417 - 2423.
- [15] FOLEY S. Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin potassic alkaline magmas [J]. *Lithos*, 1992, 28: 435 - 453.
- [16] WORKMAN R K, HART S R, JACKSON M, et al. Recycled metasomatized lithosphere as the origin of the enriched mantle II (EM2) endmember: evidence from the Samoan volcanic chain [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2004, 5, Art. No. Q04008.
- [17] MIAO L C, FAN W M, LIU D Y, et al. 2007. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 348 - 370.
- [18] 苗来成, 范蔚茗, 张福勤, 等. 小兴安岭西北部新开岭 - 科洛杂岩锆石 SHRIMP 年代学研究及其意义 [J]. *科学通报*, 2003, 48: 2315 - 2323.
- MIAO L C, FAN W M, ZHANG F Q, et al. Zircon SHRIMP geochronology of the Xinkailing-Kele complex in the northwestern Lesser Xing'an Range, and its geological implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49: 201 - 209.
- [19] 施光海, 苗来成, 张福勤, 等. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义 [J]. *科学通报*, 2004, 49: 384 - 389.
- SHI G H, LIU D Y, ZHANG F Q, et al. SHRIMP U - Pb zircon geochronology of Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China, and its implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 48: 2742 - 2748.
- [20] ZHU Y F, SUN S H, GU L B, et al. Permian volcanism in the Mongolian orogenic zone, northeast China: geochemistry, magma sources and petrogenesis [J]. *Geol. Mag.*, 2001, 138: 101 - 115.
- [21] XU J F, SHINJO R, DEFANT M, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust [J]. *Geology*, 2002, 30: 1111 - 1114.
- [22] CHUNG S L, LIU D Y, JI J Q, et al. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet [J]. *Geology*, 2003, 31: 1021 - 1024.
- [23] GUO F, FAN W M, LI C W, et al. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: evidence from the geochronology and geochemistry of Dashizhai basalts from the Inner Mongolia region, NE China [J]. *Sci China Earth Sci Rev*, 2009, in press.