

山东胶南燕山期碱性正长岩的地球化学 及其成因探讨

王 涛^{1,2}, 刘 燊³, 马润则¹

1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;
2. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;
3. 西北大学地质系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069

【摘要】 从岩石学和主微量元素地球化学的角度对山东胶南燕山期碱性正长岩进行研究, 结果表明: 该正长岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 63.28%~64.66%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 5.62%~6.08%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 10.20%~11.05%, 为准铝质(其中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 16.84\% \sim 17.23\%$, $A/\text{KNC} = 0.96 \sim 0.98$), 属于碱性正长岩; 相对富集轻稀土而亏损重稀土, 具有较弱的负 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 0.73 \sim 0.85$), 富集大离子亲石元素(Rb, Ba)、Th 和 U, 相对亏损高场强元素(Nb, Ta, Zr, Hf, Ti, P)。研究表明, 该碱性正长岩为富集岩石圈地幔部分熔融的产物, 但在成岩过程中可能经历了钾长石、斜长石、磷灰石、Ti-Fe 氧化物、角闪石和黑云母等矿物的分离结晶作用, 该正长岩形成于岩石圈拉张减薄的构造环境, 岩浆在上升侵位过程中没有受到明显地壳物质的混染。

【关键词】 岩石成因; 地球化学; 碱性正长岩; 燕山期; 胶南; 山东
中图分类号: P581; P595 文献标识码: A
文章编号: 1001-6872(2013)03-0054-09

碱性岩是地球上出露较少和产出环境独特(拉张环境)的一种岩石类型^[1], 它可能与碰撞造山作用、下地壳拆沉减薄作用、壳-幔相互作用等深部过程具有密切的成因联系^[2], 是深部地球动力学过程在浅部地壳的历史记录和直接表现。因此对其研究是探索地球深部物质组成、物理化学环境和深部动力学过程的一个重要途径。碱性岩具有特征地幔来

源的稀土、微量元素含量和组合^[3]以及 Sr, Nd, Pb, O 等同位素组成, 因此有关研究是探索地球深部物质组成、演化、构造-岩浆活动、物理化学环境和地球动力学过程的重要途径^[4]。碱性岩与许多金属(REE, Nb, V, U-Th, Cu, Au 等)、非金属(磷灰石、陶瓷原料、金刚石等)矿产资源密切相关^[5], 因此阐明该类岩石的成因不仅对揭示大型-超大型矿床形

收稿日期: 2013-04-18; 改回日期: 2013-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(41103017); 矿床地球化学国家重点实验室开放基金(2011005)

作者简介: 王 涛, 男, 33 岁, 讲师, 岩石地球化学专业, 研究方向: 岩石学及地球化学. E-mail: wangt1117@163.com.

成的动力学机制具有重要意义,而且还可以用于指导找矿勘探,具有重要的实际应用价值。同时,中生代岩石圈减薄被认为是中国东部一个重要的地质过程^[6],它诱发了中国东部中生代大面积的深源岩浆活动和大规模成矿作用^[7],因此对山东胶南燕山期碱性正长岩的研究可以为中国东部岩石圈减薄的机制提供可能的约束。关于山东地区的碱性正长岩的成因还存在很大的争议:Yang *et al* (2005)认为山东甲子山三叠纪碱性正长岩(209 Ma~215 Ma)来源于扬子板块岩石圈地幔^[8],而 Xie *et al* (2006)则认为华北板块岩石圈地幔的产物^[9]。针对前面所阐述的碱性岩的重要研究意义和存在问题,选择从岩石学及元素地球化学方面对山东胶南地区的碱性正长岩进行研究,以期对其成因作合理的解释,同时对燕山期苏鲁造山带演化及其带内岩浆活动等提供一定的参考。

1 地质背景和岩石学特征

山东胶南地区位于苏鲁造山带中部,苏鲁造山带是三叠纪扬子板块向北俯冲与华北板块碰撞的结果,它位于郯庐断裂带以东,是秦岭-大别造山带的东延部分,以发育花岗片麻岩-榴辉岩-大理岩组成的超高压变质杂岩为特征^[10]。苏鲁地块内广泛发育中生代岩浆岩,岩石类型多样,镁铁质-超镁铁质岩、中性岩、碱性岩和酸性岩都有出露。苏鲁造山带根据地理位置可划分为 3 段:北段指胶东东部,即

墨-牟平以东地区,称为威海断隆(UHP1);中段指胶东南部胶南-日照-莒南-东海地区,称为胶南断隆(UHP2);南段在苏北的连云港-灌云-清江一带,称为海州断隆(HP);研究区主要位于苏鲁造山带中段。按照地质构造特征的差异,苏鲁超高压变质带可分为南、北两部分:北带(北苏鲁造山带)包括威海断隆和胶南断隆,基底岩系主要由新元古代花岗质片麻岩类、片麻状花岗岩类、元古宙超基性-基性岩类和新太古代-古元古代变质岩组成,韧性变形构造复杂,榴辉岩广泛发育;南带(南苏鲁造山带)即海州断隆,基底岩系主要由经受了高压变质的中新元古代浅变质火山沉积岩系组成,变形相对较弱。沂沭断裂带(郯庐断裂带山东段)和由它派生的旋卷构造对研究区内中生代地层和岩浆活动(特别是青山组和王氏组)有着极明显制约作用。由于它的长期左行扭动,因此派生了苏鲁造山带“入”字型构造,该构造由胶北隆起、胶莱拗陷和胶南隆起组成。研究区地层分区的最大特点是发育前寒武纪和中、新生代的地质,缺失古生代沉积。

研究对象位于苏鲁带的胶南市代戈庄地区。岩性为中细粒正长岩,其主要侵位于太古一下元古代地层中的片麻岩内,出露面积约 30 km²,并与燕山期碱性杂岩体相伴生(图 1)。岩石手标本总体呈肉红色,具细粒花岗结构,块状构造。经镜下鉴定,主要矿物组成有石英(15%~20%),钾长石主要为正长石(30%~40%),发育具卡氏双晶,斜长石(20%~30%)主要为中性斜长石,普遍发育聚片双晶,石

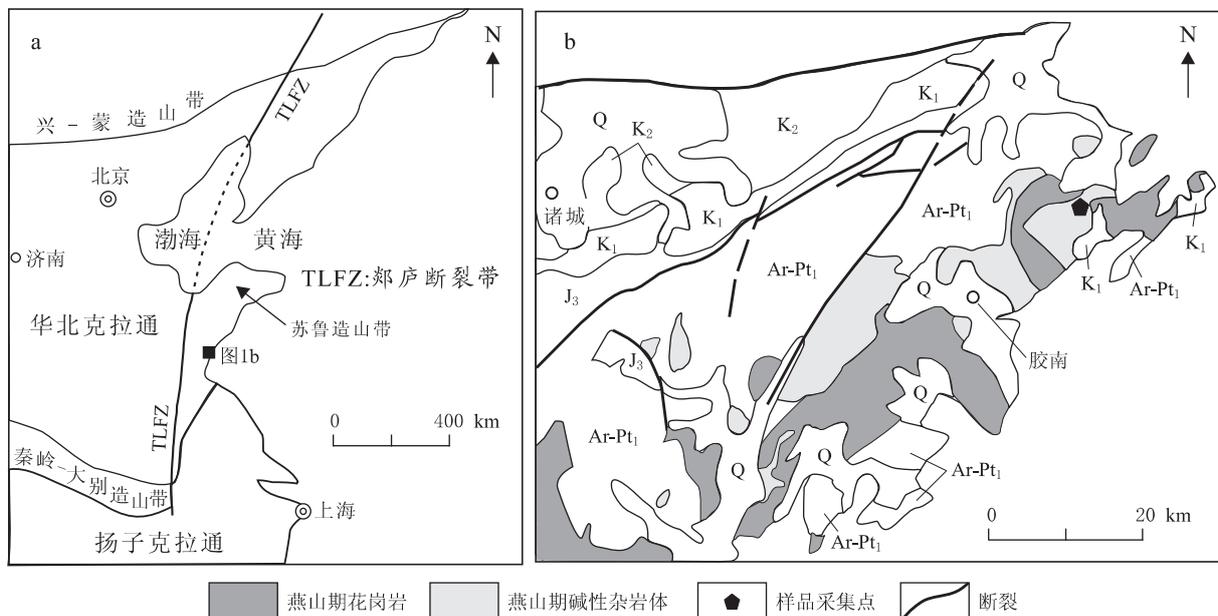


图 1 胶南大地构造位置图(a)及胶南地质简图(b)

Q. 第四系; K₂. 上白垩统; K₁. 下白垩统; J₃. 上侏罗统; Ar-Pt₁. 太古-下元古界

Fig. 1 Simplified map showing tectonic location(a) and geology in the Jiaonan area(b)

英与正长石相互交生,发育显微文象结构;次要矿物有黑云母和角闪石(约 10%);副矿物有锆石、磷灰石、褐帘石和榍石等。

2 分析方法

主量元素是在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室采用 Axios PW 4400 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成,分析精度优于 3%。首先选取具有代表性的样品,粉碎至 200 目,然后称样品 0.7 g, XRF 分析专用熔剂(复合熔剂: $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7, \text{LiBO}_2, \text{LiF}$) 7 g,搅拌均匀之后倒入白金坩埚中,进入熔样机高温熔融,烧制熔片。然后把将制备的熔片放入 XRF 仪器上进行测试。烧失量称重 1 g 样品,在马弗炉中 1 000 °C 温度下灼烧一个小时,再称重,以计算烧失量。

微量及稀土元素分析是在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室采用电感耦合等离子质谱(POEMS 型 ICP-MS)完成,分析精度优于 5%。处理过程如下:称取 50 mg 的 200 目样品,置于密封容器中,加入 1 ml HF,电热板蒸干去 SiO_2 ,再加入 1 ml HF 和 0.5 ml HNO_3 ,加盖,放置烘箱中(170 °C)分解 24 h,然后放在电热板上蒸干,

加入 1 ml HNO_3 再蒸干,重复两次操作,最后加入 2 ml HNO_3 和 5 ml 去离子水,盖上盖子,130 °C 下溶解残渣 3 h,然后冷却加入 500 ng Rh 内标溶液,转移至 50 ml 离心管中,上机测定。具体分析流程见 Qi and Gregoire (2000) [11]。

3 结果

3.1 主量元素

表 1 列出了所采岩石样品的主量元素数据。从表中可以看出,本文研究样品的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 63.28%~64.66%(平均为 63.92%),属于中性岩; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 16.84%~17.23%,平均为 17.03%; $w(\text{MgO})$ 为 0.69%~0.94%,平均为 0.82%, $\text{Mg}^\# = 31.74 \sim 35.48$,平均为 33.451。另外,岩石具有高 $w(\text{K}_2\text{O})$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$,富碱 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 10.20%~11.05%,平均为 10.56%。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (图 2a)图解中胶南岩体落在碱性系列中的正长岩区域,岩石样品的里特曼指数($\sigma = (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$)为 5.10~5.64,平均为 5.33,也属于碱性岩系列。样品具有较高的赖特碱度率(A. R. = 3.31~3.78),在 $\text{SiO}_2 - \text{A. R.}$ 图解(图 2b)中,全部落在碱性区域,则表现出碱性岩的特

表 1 胶南正长岩的主元素组成. $w(\text{B})/\%$

Table 1 Major element composition of the syenites from Jiaonan (in percentage)

样品号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	P_2O_5	TiO_2	LOI	Total
DGZ-1	63.28	17.07	3.35	0.93	1.90	4.70	5.69	0.09	0.20	0.65	1.10	98.96
DGZ-2	64.03	17.06	3.30	0.83	1.91	4.62	5.85	0.09	0.20	0.66	0.69	99.23
DGZ-3	64.66	17.23	3.07	0.80	1.76	4.97	6.08	0.08	0.18	0.60	0.64	100.07
DGZ-4	64.52	17.10	2.92	0.69	1.69	4.54	6.07	0.08	0.17	0.56	0.66	99.00
DGZ-5	63.98	16.97	3.10	0.81	1.74	4.58	6.06	0.08	0.18	0.60	0.97	99.08
DGZ-6	63.40	17.01	3.55	0.94	2.01	4.59	6.00	0.09	0.22	0.69	0.75	98.86
DGZ-7	64.10	16.92	3.13	0.77	1.76	4.45	6.00	0.09	0.19	0.61	0.86	98.87
DGZ-8	63.32	17.05	3.14	0.80	1.80	4.81	5.87	0.08	0.19	0.61	0.85	98.52
DGZ-9	63.64	16.91	3.17	0.79	1.77	4.75	5.98	0.08	0.19	0.62	0.85	98.75
DGZ-10	64.43	17.16	3.39	0.87	1.88	4.62	5.90	0.09	0.20	0.67	0.89	100.09
DGZ-11	63.74	16.84	3.28	0.77	1.83	4.61	5.79	0.09	0.19	0.62	0.86	98.62

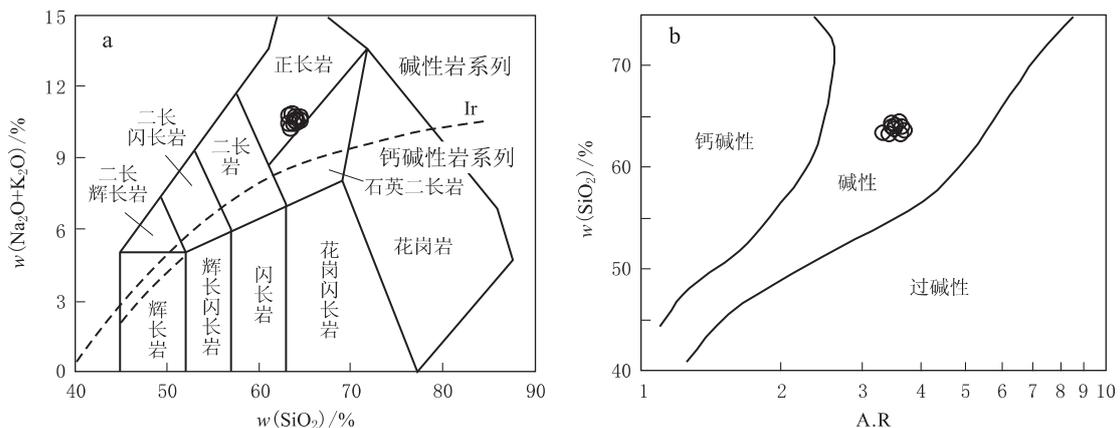


图 2 胶南正长岩的 TAS(a)和 A. R.- $w(\text{SiO}_2)$ (b)图解

Fig. 2 TAS(a) and A. R.- $w(\text{SiO}_2)$ (b) diagrams for the Jiaonan syenites

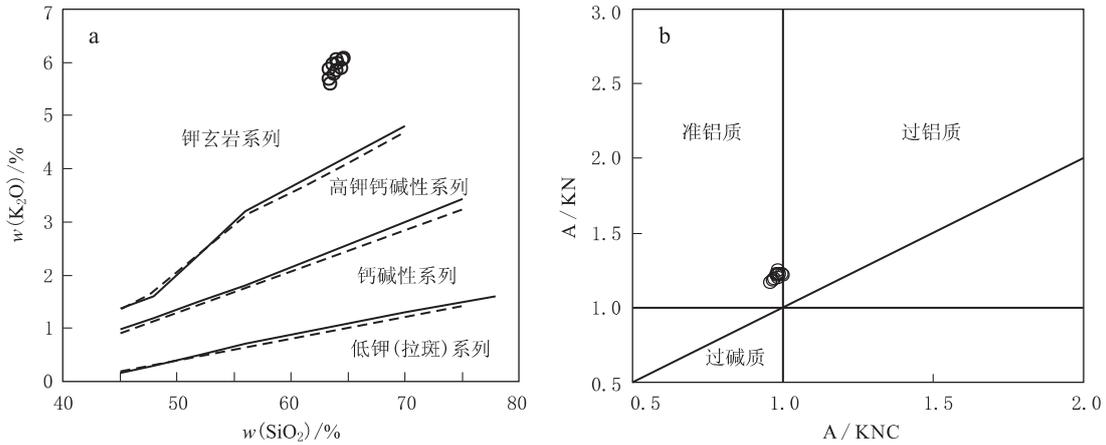


图 3 胶南正长岩的 $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ (a)和 A/KNC - A/KN (b)图解
Fig. 3 $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ (a) and A/KNC - A/KN (b) diagrams for the Jiaonan syenites

征^[12]。在 SiO_2 - K_2O 图解中(图 3a),胶南正长岩体都落入钾玄岩系列。 A/CNK 为 0.960~0.981,平均为 0.98,在 A/KNC - A/KN 图解中研究区正长岩绝大部分落入准铝质范围内(图 3b),表明岩体属于准铝质岩石。在 Harker 图解中(图 4), SiO_2 与 $\text{TiO}_2, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{P}_2\text{O}_5$ 呈负相关,但后两者的负相关较弱, SiO_2 与 K_2O 呈正相关,与 $\text{Na}_2\text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3$ 无相关性。

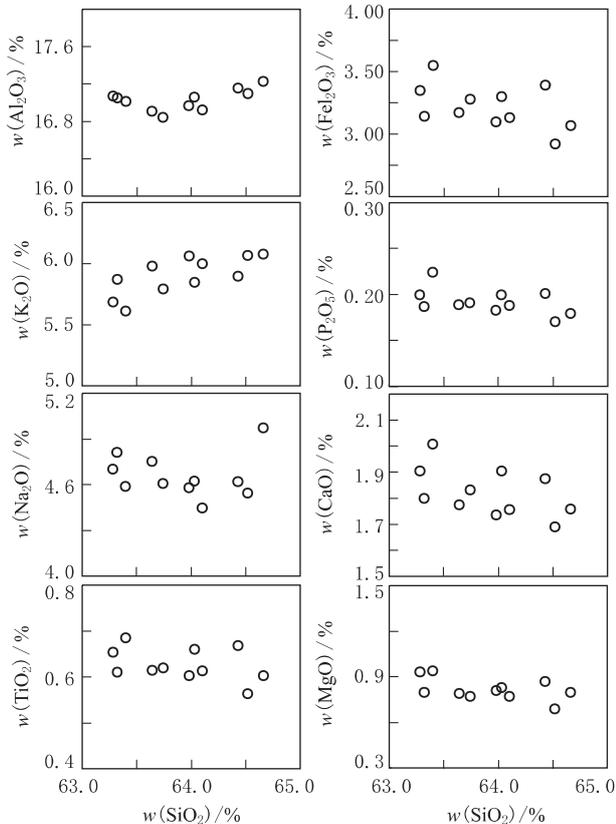


图 4 胶南正长岩 Harker 图解
Fig. 4 Harker diagrams for the Jiaonan syenites

3.2 稀土及微量元素

表 2 列出了所采岩石样品的稀土元素数据。胶

南正长岩体的稀土总量较高($\sum\text{REE} = 338 \times 10^{-6} \sim 454 \times 10^{-6}$,平均为 393×10^{-6})。且以轻稀土富集及重稀土亏损为特征($\text{LREE}/\text{HREE} = 19.93 \sim 29.51$,平均为 24.99); $(\text{La}/\text{Yb})_N = 27.98 \sim 51.30$,平均 39.66,反映了轻重稀土分异明显的特点。在 δEu - $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解中(图 5a),样品全部落在壳幔源区,暗示岩浆演化过程中经历了壳幔相互作用。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图中^[13](图 5b),稀土配分模式为重稀土明显亏损的右倾型,与典型的碱性岩具有相似的稀土配分曲线,较弱 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.73 \sim 0.85$,平均 0.78),暗示在成岩过程存在一定程度的斜长石的分离结晶作用。大部分岩石样品不具有 Ce 的负异常,表明岩石基本没有受到低温蚀变作用的影响^[14]。表 2 列出了所采岩石样品的其他微量元素数据。在微量元素原始地幔蛛网图上^[13](图 5c),可明显看出胶南正长岩富集高场强元素(Th, U, Pb)、部分轻稀土元素和大离子亲石元素(Rb, Ba),亏损 Sr, P 和高场强元素(Nb, Ta, Zr, Hf, Ti),这可能与成岩过程中斜长石、磷灰石、钛铁矿、金红石和榍石等矿物的分离结晶作用有关。

4 成因讨论

关于碱性岩的成因,主要有以下几种争论^[8]: (1) 挥发分助熔下的下地壳岩石的部分熔融; (2) 存在或不存在地壳混染的幔源岩浆的部分熔融; (3) 基性和酸性熔体的混熔及分异。

4.1 源区性质

源区性质是岩石学成因研究中的重要部分。相似元素的比值,与各地典型构造背景下样品比值的对比,能够对岩浆源区性质有一定的指示作用。

表 2 胶南正长岩的微量元素组成. $w(B)/10^{-6}$ Table 2 Trace element compositions of the syenites from Jiaonan (in [$\times 10^{-6}$])

样品号	DGZ-1	DGZ-2	DGZ-3	DGZ-4	DGZ-5	DGZ-6	DGZ-7	DGZ-8	DGZ-9	DGZ-10	DGZ-11
La	105	105	108	96.2	113	125	109	118	83.1	128	118
Ce	184	179	180	161	191	200	179	173	150	215	194
Pr	18.5	18.1	17.8	15.7	19.1	19.7	17.2	18.2	18.4	20.3	17.8
Nd	60.0	56.8	57.7	49.8	60.8	61.8	54.5	55.7	60.3	63.8	56.9
Sm	8.20	7.44	7.62	6.83	8.35	8.59	7.11	6.69	7.80	8.16	7.04
Eu	1.74	1.57	1.61	1.53	1.69	1.84	1.60	1.51	1.85	1.81	1.67
Gd	5.51	5.54	5.41	4.67	6.06	6.18	5.28	5.38	6.25	6.43	5.14
Tb	0.79	0.69	0.78	0.66	0.88	0.86	0.73	0.65	0.81	0.84	0.69
Dy	3.92	3.14	3.44	3.09	4.12	3.96	3.11	2.94	3.57	3.79	3.03
Ho	0.82	0.64	0.72	0.61	0.86	0.76	0.66	0.60	0.74	0.77	0.61
Er	2.39	1.77	2.03	1.68	2.36	2.22	1.77	1.95	2.01	2.27	1.77
Tm	0.32	0.25	0.30	0.25	0.35	0.29	0.26	0.30	0.28	0.32	0.24
Yb	2.40	1.75	1.99	1.73	2.21	2.01	1.79	2.19	2.13	2.29	1.65
Lu	0.34	0.32	0.33	0.30	0.34	0.32	0.29	0.33	0.34	0.39	0.28
Σ REE	394	382	388	344	411	434	382	387	338	454	409
δ Eu	0.79	0.75	0.77	0.83	0.73	0.77	0.80	0.77	0.81	0.76	0.85
δ Ce	1.02	1.01	1.01	1.02	1.01	0.99	1.01	0.92	0.94	1.03	1.04
V	33.4	32.4	27.8	27.1	29.7	35.9	32.0	29.7	29.0	33.9	30.4
Cr	15.8	10.4	5.92	12.4	20.0	9.81	12.1	27.1	17.3	19.8	7.39
Co	93.7	72.7	107	88.2	92.7	86.6	107	77.5	125	108	93.8
Ni	7.80	5.28	7.19	6.85	9.68	5.64	6.26	11.2	8.31	7.94	4.64
Cu	6.57	8.32	10.1	8.52	8.92	8.04	6.99	7.85	9.71	9.00	8.09
Zn	74.3	69.6	76.9	60.5	64.7	73.9	69.5	66.7	61.8	71.0	66.3
Ga	18.8	19.3	18.9	18.2	18.2	19.3	18.6	18.6	19.5	19.8	19.4
Rb	90.4	93.3	93.3	93.0	93.7	94.5	101	92.6	96.0	91.8	95.7
Sr	395	377	367	368	383	431	391	375	381	377	402
Y	22.2	16.3	18.9	16.1	22.2	20.0	16.9	17.9	20.0	21.1	16.5
Zr	430	393	305	287	282	517	481	432	382	491	391
Nb	24.5	23.3	23.8	21.9	23.4	25.0	20.4	23.0	23.7	25.6	20.4
Ba	1 630	1 670	1 640	1 710	4 920	1 830	1 620	1 420	1 710	1 820	
Hf	9.36	8.61	6.40	6.45	6.33	10.90	10.20	9.09	8.25	10.50	8.02
Ta	1.51	1.34	1.47	1.38	1.53	1.22	0.98	1.32	1.52	1.55	0.93
Pb	19.6	19.0	18.9	18.6	19.4	17.9	19.5	18.3	19.5	18.8	18.3
Bi	0.04	0.06	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03
Th	7.79	8.57	8.87	7.96	7.87	9.28	7.37	8.52	7.91	9.39	8.25
U	1.34	1.85	1.77	1.62	1.21	1.77	1.22	1.80	1.63	1.78	1.24

岩体的 Nb/Ta (15.29~21.98, 平均值为 17.62) 以及 Zr/Hf (44.50~48.75, 平均值为 46.57), Zr/Hf 也明显高于指示存在流提作用的值(25)^[15], 因此高的 Nb/Ta, Zr/Hf 比值不仅反映了研究区岩体来源于地幔物质, 而且岩体在形成过程中也受到了比较明显的流体作用。岩体大离子亲石元素 Rb 富集、高场强元素 Nb 和 Zr 相对富集且 Ti 相对亏损, Rb/Nb=3.59~4.69, 低的 Sm/Yb(3.05~4.27), 这也暗示该碱性岩具有幔源的特征^[16]。所分析的胶南燕山期碱性正长岩样品均具高钾含量 $w(K_2O) = 5.62 \sim 6.08\%$, 具有相对一致的 K_2O/Na_2O 比值 (1.21~1.35), 且 K_2O 和 MgO 之间不具有相关性, 表明所研究的钾质碱性岩的高钾是其固有的特征, 这就反映了岩浆源区存在富钾的金云母的矿物相^[17]。Wyllie and Sekine(1982)认为钾质碱性岩浆一般由富含金云母的富集地幔的部分熔融形成^[17],

这就暗示苏鲁造山带碱性岩很可能是富集地幔部分熔融的产物。Foley(1987)曾指出源自富集地幔的岩石 Cr 和 Ni 质量分数可以远低于原始岩浆的 Cr ($500 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$) 和 Ni ($250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$)^[18], 因此, 研究区碱性岩较低的 Cr ($5.92 \times 10^{-6} \sim 27.1 \times 10^{-6}$) 和 Ni ($4.64 \times 10^{-6} \sim 11.2 \times 10^{-6}$) 的质量分数也暗示其可能来自富集的地幔源区。岩石富集 Th、大离子亲石元素 (Rb, Ba) 和 LREE, 也表明其岩浆可能起源于富集地幔源区^[19]。在研究区碱性岩中发现有来自幔源的捕虏体, 进一步表明碱性岩的源区为岩石圈地幔。在高场强元素判别图 Yb-Nb 图解上 (图 6a)^[20], 胶南正长岩也落在富集地幔源区。从 Zr-Zr/Sm 图解来看 (图 6b), 研究区内碱性岩明显为部分熔融作用下的产物^[21]。由此可见, 研究区碱性正长岩来源于岩石圈富集地幔的部分熔融。

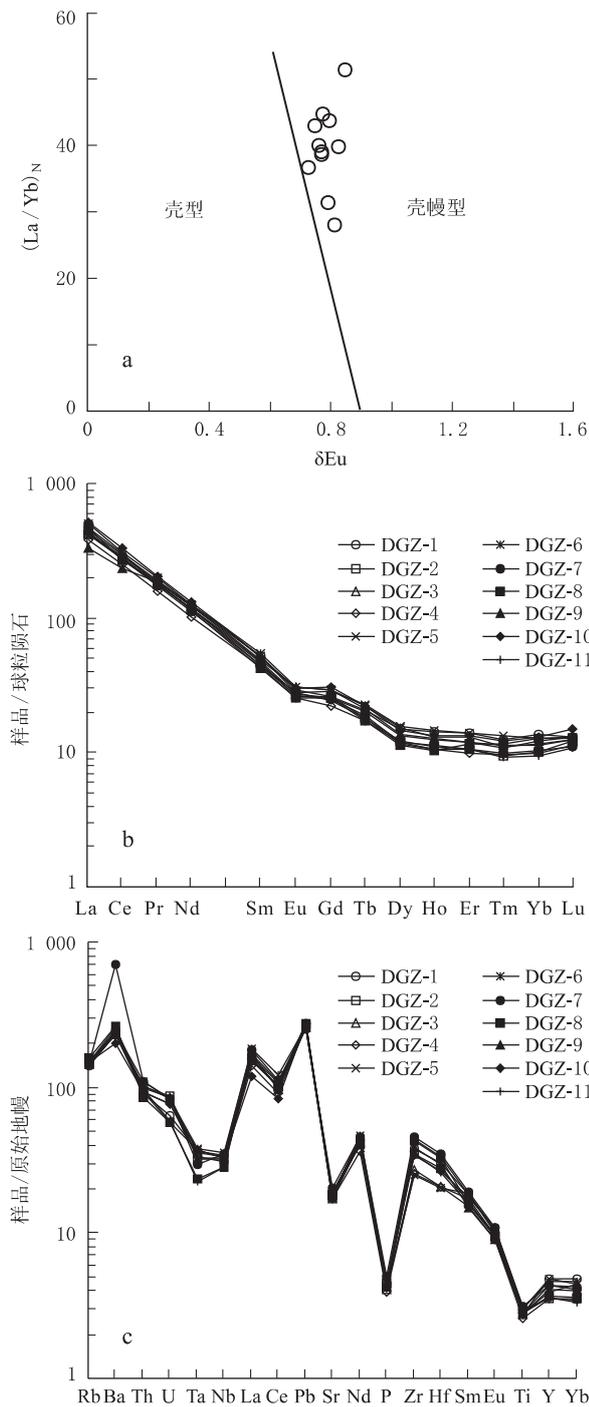


图 5 胶南正长岩 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解(a)及稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(b)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(c)

Fig. 5 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ diagram, chondrite-normalized REE patterns and Primitive mantle-normalized trace elements spidergram for the Jiaonan syenites

4.2 地壳混染

在原始地幔标准化蛛网图(图 5c)上,高场强元素 Nb, Ta 和 Ti 具有明显的负异常,暗示成岩过程中有古特提斯洋壳或古大陆地壳组分加入^[22]。地壳物质可以通过拆沉或俯冲进入岩石圈地幔,以熔

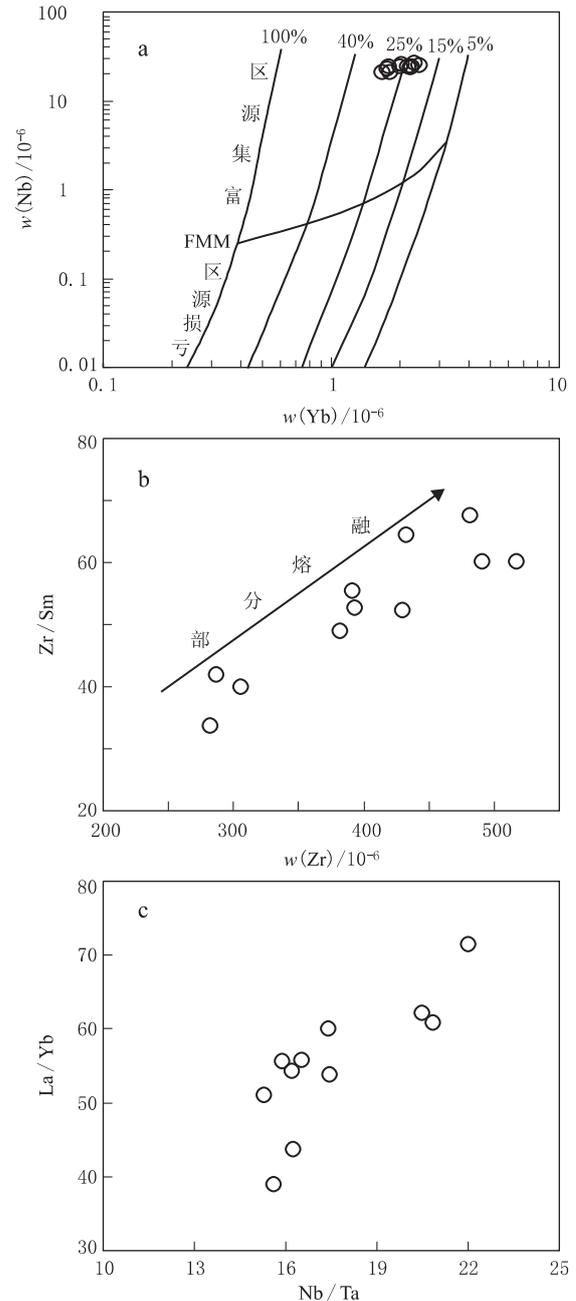


图 6 胶南正长岩的 $w(\text{Yb})-w(\text{Nb})$ (a), $w(\text{Zr})-\text{Zr}/\text{Sm}$ (b) 和 $\text{Nb}/\text{Ta}-\text{La}/\text{Yb}$ (c) 图解

Fig. 6 $w(\text{Yb})-w(\text{Nb})$ (a), $w(\text{Zr})-\text{Zr}/\text{Sm}$ (b) and $\text{Nb}/\text{Ta}-\text{La}/\text{Yb}$ (c) diagrams for the Jiaonan syenites

融产生的熔体对岩石圈地幔进行改造,也可以地壳混染的形式在岩浆上升侵位的过程中实现。

苏鲁造山带碱性岩产于中国东部岩石圈拉张构造背景下,并在一个不断活化的构造活动带上,岩浆上升速度快,一般来说遭受地壳混染的可能性较小。研究区碱性岩具有高的 Th/U (4.63~6.65) 和 Ce/Pb 比值 (7.71~11.44) 以及低的 Nb/La 比值 (0.17~0.29), 反映岩浆在上升侵位过程中受明显地壳混染的可能性不大^[23]。岩石的 La/Sm 比值和 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 比值变化小的特点,同样表明岩浆

在上升的过程中不大可能存在强烈的壳源物质的混染作用^[7]。在原始地幔标准化蛛网图上, Th 表现出显著富集的特点(图 5c), 也说明岩浆在上升侵位的过程中没有受到明显的地壳混染^[24]。在 Nb/Ta-La/Yb 的相关图中 Nb/Ta 和 La/Yb 为正相关关系, 而不存在负相关关系(图 6c), 也表明在成岩过程中不存在明显的地壳混染作用^[25]。因此, 苏鲁造山带碱性岩岩石地球化学特征应该来自富集的岩石圈地幔。

4.3 分离结晶

CaO, MgO, P₂O₅, TiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ 与 SiO₂ 有较明显的负相关性(图 4), 说明岩浆在侵位过程中发生了一定程度的单斜辉石、磷灰石、Ti-Fe 氧化物和斜长石分离结晶作用。在原始地幔标准化蛛网图和球粒陨石标准化配分模式图中(图 5b, c), 胶南碱性正长岩表现出明显的 Sr 和 Eu 负异常特征, 也说明成岩过程中存在钾长石和斜长石的分离结晶或部分熔融过程中斜长石残留在源区。在所有的岩石样品中都具有明显的 Ti 负异常(图 5c), 这就进一步暗示在成岩的过程中存在着 Ti-Fe 氧化物(金红石和钛铁矿)的分离结晶。另外, Ta, Nb 的亏损及 Th 的富集现象(图 5c), 可能与角闪石和黑云母等矿物的分离结晶有关。从过渡族元素的含量特征来看, 过渡族元素总体含量偏低, 其标准化图解(图略)明显亏损 Cr, Ni(在原始地幔中相应的丰度分别为 $3\ 000 \times 10^{-6}$ 和 $2\ 000 \times 10^{-6}$), 这可能与岩浆演化早期有铁镁矿物如橄榄石(与 Ni 相关)和单斜辉石和/或铬铁矿(与 Cr 相关)的结晶分异有关^[26]。

4.4 成岩机制

中晚侏罗纪到白垩纪初, 为古太平洋动力演化时期, 中国东部处于以挤压和挤压-剪切为主的动力学状态中, 白垩纪中期(约 110 Ma±5 Ma)以来为太平洋动力演化阶段, 中国东部转入以拉张为主的构造背景^[27]。同时, 苏鲁带基性超基性岩墙群的大量出露^[28]和燕山期大规模强烈的岩浆作用^[29]也表明白垩纪中期以来苏鲁带岩石圈处于拉张背景之下。另外, 该地区晚侏罗世至晚白垩世形成的断陷盆地—胶莱盆地可作为苏鲁造山带岩石圈拉张构造背景最直接的证据之一^[30]。

已有研究表明, 镁铁-超镁铁质下地壳的拆沉作用在地球物理上将使下地壳波速降低, 相应地壳平均波速也降低^[31]。而苏鲁造山带下地壳和地壳整体 V_P 波速均比全球平均值低 0.2 km/s~0.3 km/s^[32]。苏鲁造山带具有两个显著的地球物理特征: 一是地壳厚度较薄, 无山根。苏鲁造山带地壳厚度

变化为 31 km~38 km, 平均为 34 km^[32]。中国东部大陆地壳的平均厚度为 37 km^[32], 与 Rudnick 和 Fountain(1995)获得的全球大陆地壳厚度相同^[33], 但略低于 Christensen 和 Mooney(1995)给出的 41 km 的全球大陆地壳厚度^[34]。苏鲁造山带相对于全球大陆或中国东部, 地壳厚度薄 3 km~7 km, 表明该造山带不存在山根。由于下地壳主要由镁铁质岩石组成, 因此下地壳和岩石圈地幔的拆沉最直接的结果就是造成大陆地壳向长英质方向 * 演化^[35]。地球化学研究表明, 以华北克拉通为主体的中国东部地壳具有长英质含量较高的特点^[32]。

综上所述, 作者认为岩石圈拆沉作用是导致苏鲁带岩石圈拉张减薄及碱性岩产生的最可能的一种模式。在早侏罗世(205 Ma~185 Ma)由于华北板块和扬子板块发生了板内挤压, 这就导致了苏鲁地壳的进一步加厚和加厚下地壳的榴辉岩化, 榴辉岩具有独特的物理和化学特性, 其密度比地幔橄辉岩的密度高 0.2 g/cm³~0.4 g/cm³^[33], 这就导致了重力不平衡, 随着这种重力不平衡的累积, 在中侏罗世(185 Ma~165 Ma)苏鲁带榴辉岩化的部分下地壳与下伏的岩石圈地幔一起通过拆沉作用进入软流圈地幔中^[36], 这就引发了软流圈上涌、苏鲁带的快速隆升、造山带的垮塌及岩石圈的拉张和减薄。由于榴辉岩的熔解温度低于地幔橄辉岩的熔解温度约 300 °C^[37], 随着榴辉岩进入软流圈地幔后被加热, 玄武质的榴辉岩发生部分熔融产生了长英质的英云闪长—奥长花岗—花岗闪长质或埃达克质岩浆, 并与上覆地幔橄辉岩发生大规模交代作用, 这就产生了交代富集的岩石圈地幔; 在早白垩世(130 Ma~110 Ma)交代富集的岩石圈地幔得到减压并发生部分熔融, 这就产生了原始岩浆(玄武质熔体), 原始岩浆在上升成岩的过程中发生了分离结晶作用, 最后在造山带的有利位置生成了研究区的碱性正长岩。

5 结 论

5.1 通过对山东燕山期胶南正长岩的主量元素和微量元素地球化学研究, 表明研究区碱性正长岩来源于华北板块富集的岩石圈地幔的部分熔融, 在成岩的过程中不存在明显的地壳物质混染。

5.2 在成岩的过程中存在斜长石、钾长石、黑云母、磷灰石、钛铁矿等矿物的分离结晶作用。

5.3 研究区碱性正长岩形成于岩石圈拉张减薄的构造环境, 岩石圈下部(下地壳和岩石圈地幔)拆沉作用是导致拉张的主因和成岩最可能的模式。

参考文献

- [1] 曾广策, 邱家骥. 碱性岩的概念及分类命名综述[J]. 地质科技情报, 1996, 15(1): 31-37.
- [2] Liegeois J P. Contrasting Origin of Post-collisional High-K Calc-alkaline and Shoshonitic Versus Alkaline and Peralkaline Granitoids; the use of sliding normalization[J]. *Lithos*, 1998, 45: 1-26.
- [3] 赵振华, 周玲棣. 我国某些富碱侵入岩的稀土元素地球化学[J]. 中国科学(B), 1994, 24(10): 1109-1120.
- [4] 阎国翰, 许保良, 牟保磊, 等. 中国北方中生代富碱侵入岩钨、铋、铅同位素特征及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 234-237.
- [5] Müller D, Groves D I. **Potassic Igneous Rocks and Associated Gold-Copper Mineralization**[M]. New York: Springer-Verlag, 1995, 1-238.
- [6] Menzies M A, Fan W M, Zhang M. **Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of N120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. magmatic processes and plate tectonics**[M]. Geological Society of London Special Publication, Academic Press, London, 1993.
- [7] Fan W M, Guo F, Wang Y J, *et al.* Postorogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China [J]. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26: 733-746.
- [8] Yang J H, Chung S L, Wilde S A, *et al.* Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence [J]. *Chemical Geology*, 2005, 214: 99-125.
- [9] Xie Z, Li Q Z, Gao T S. Comment on " Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu orogenic belt, east China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence" by Yang *et al* [J]. *Chemical Geology*, 2006, 235: 191-194.
- [10] Zheng Y F, Fu B, Gong B, *et al.* Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime [J]. *Earth Science Review*, 2003, 62: 105-161.
- [11] Qi L, Gregoire D C. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostandards Newslett*, 2000, 24: 51-63.
- [12] Wright J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic genesis [J]. *Geological Magazine*, 1969, 101: 370-384.
- [13] Sun S-S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. **Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins**[C]. 313-345, London: Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-347.
- [14] Zou H B, Zindler A, Xu X S, *et al.* Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variation, and tectonic significance [J]. *Chemical Geology*, 2000, 171(1-2): 33-47.
- [15] Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 489-508.
- [16] 黎敦朋, 赵越, 胡健民, 等. 青藏高原西北缘中新世晚期 A 型花岗岩的特征及意义[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1671-1677.
- [17] Wyllie P J, Sekine T. The formation of mantle phlogopite in subduction zone hybridization[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 79: 375-380.
- [18] Foley S F, Venturelli G, Green D H, *et al.* The ultrapotassic rocks: characteristics, classification and constraints for petrogenetic models [J]. *Earth Science Review*, 1987, 24: 81-134.
- [19] 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 等. 辽西凌源河坎子碱性杂岩体地球化学特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 3(23): 193-202.
- [20] Peate D W, Pearce J A, Hawkesworth C J, *et al.* Geochemical variations in Vanuatu arc lavas: the role of subducted material and a variable mantle wedge composition[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(10): 1331-1358.
- [21] Hanson G N. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 38(1): 26-43.
- [22] Zhang H F, Sun M, Zhou X H, *et al.* Geochemical constraints on the origin of Mesozoic alkaline intrusive complexes from the North China Craton and tectonic implications [J]. *Lithos*, 2005, 81: 297-317.
- [23] Miller C, Schuster R, Klötzli U, *et al.* Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis [J]. *J Petrol*, 1999, 40(9): 1399-1424.
- [24] 李献华, 李奇颀, 刘颖, 等. 华夏古陆元古代变质火山岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 1999, 15(3): 364-371.
- [25] Münker C. Nb/Ta fractionation in a Cambrian arc/back system, New Zealand: source constraints and application of refined ICPMS techniques [J]. *Chemical Geology*, 1998, 144: 23-45.
- [26] Rollison H R. **Using Geochemistry Data: Evaluation, Presentation, Interpretation**[M]. London: Longman Group U K Ltd, 1993.
- [27] 任纪舜. 中国及邻区大地构造图(1:5 000 000) [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [28] Liu S, Hu R Z, Gao S, *et al.* Coulson. U-Pb zircon age, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on age and origin of alkaline intrusions and associated mafic dikes from Sulu orogenic belt, Eastern China [J]. *Lithos*, 2008, 106: 365-379.
- [29] Fan W M, Guo F, Wang Y J, *et al.* Postorogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China [J]. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26: 733-746.
- [30] 徐贵忠, 周瑞, 闫臻, 等. 论胶东地区中生代岩石圈减薄的证据及其动力学机制 [J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(4): 368-380.
- [31] Meissner R, Tanner B. From collision to collapse: phases of lithospheric evolution as monitored by seismic records [J]. *Phys Earth Planet*

Int., 1993, 79: 75-86.

- [32] Gao S, Luo T C, Zhang B R, *et al.* Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 1 959-1 975.
- [33] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective [J]. *Review Geophysics*, 1995, 33: 267-309.
- [34] Christensen N I, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100: 9 761-9 788.
- [35] Gao S, Rudnick R L, Xu W L, *et al.* Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China craton [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 270: 41-53.
- [36] Li S G, Huang F, Li H. Post-collisional delamination of the lithosphere beneath Dabie-Sulu orogenic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 46: 1 487-1 490.
- [37] Sobolev A V, Hofmann A W, Sobolev S V. The amount of recycled crust in sources of Mantle-derived melts [J]. *Science*, 2007, 316: 412-417.

ELEMENTAL GEOCHEMISTRY AND PETROGENESIS OF THE YANSHANIAN ALKALINE SYENITES IN JIAONAN, SHANDONG PROVINCE

WANG Tao^{1,2}, LIU Shen³, MA Run-ze¹

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: Petrological and geochemical studies are carried out for the Yanshanian alkaline syenites from Jiaonan of Shandong Province, and the petrogenesis of these rocks are discussed. It shows that the $w(\text{SiO}_2)$ contents of the syenites vary from 63.28% to 64.66%, and are characterized by high $w(\text{K}_2\text{O})$ (5.62%~6.08%) and $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ contents 10.20%~11.05%, belonging to metaluminous rocks and alkaline series. Chondrite-normalized patterns for the syenites exhibit moderate depletion in HREE, as well as moderate negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.73 \sim 0.85$); and the primitive mantle-normalized spidergrams show relatively enrichment in the LILE (Rb, Ba), Th and U, but depletion in the HSFE (Nb, Ta, Zr, Hf, Ti and P). It is considered that these alkaline rocks were derived from partial melting of the enriched lithospheric mantle in the extensional tectonic setting. Meanwhile, the parental magma underwent intense mineral fractional crystallization, such as potassium feldspar, plagioclase, apatite, hornblende and biotite, whereas there have no obvious crustal contamination during magma ascent.

Key words: petrogenesis; geochemistry; alkaline syenites; Yanshanian; Jiaonan; Shandong Province

ISSN 1001-6872(2013)03-0054-09; CODEN: KUYAE2

Synopsis of the first author: WANG Tao, male, 33 years old, a lecturer of litho-geochemistry. Now he is engaged in the research of petrology and element geochemistry.