

文章编号: 1000-6524(2004)03-0193-10

辽西凌源河坎子碱性杂岩体地球化学 特征及地质意义

任康绪¹, 阎国翰¹, 牟保磊¹, 蔡剑辉¹, 李凤棠¹, 谭林坤¹, 邵宏翔¹, 李元崑², 储著银³

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 辽宁朝阳地质大队, 辽宁朝阳 122000;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 分析测定了河坎子碱性杂岩体的稀土、微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素数据, 对该杂岩体形成的构造背景、源区特征及意义进行了讨论。河坎子碱性杂岩体稀土元素总量较高, 富集 LREE 和大离子亲石元素, Eu 呈弱负异常或异常不明显, Nb、Ta、K、P、Ti 和 Y 呈负异常, 过渡族元素含量偏低。稀土和微量元素分布模式与辽东风城碱性杂岩体相似。主侵入期 4 个全岩加 1 个黑云母样品的全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 $221.4 \pm 8.5(2\sigma)$ Ma, 属于印支期碱性岩浆活动。该岩体的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 均为正值, 平均 7.23, $I_{\text{Sr}} = 0.70477 \pm 0.00015$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为负值。微量元素和 Sr、Nd 及 Pb 示踪同位素特征显示其源区与 EM I 型富集地幔端员有关。河坎子碱性杂岩体地球化学特征不仅揭示了华北地台北缘东部上地幔在三叠纪时具有富集性, 而且也显示了辽东地区比辽西地区更富集的特点。河坎子碱性杂岩体形成于板内拉张环境, 岩浆作用以批式部分熔融占主导地位。

关键词: 地球化学; Sr、Nd 和 Pb 同位素; Rb-Sr 等时线年龄; 碱性杂岩体; 河坎子; 辽西

中图分类号: P588.15; P597.1

文献标识码: A

Geochemical characteristics and geological implications of the Hekanzi alkaline complex in Lingyuan County, western Liaoning Province

REN Kang_xu¹, YAN Guo_han¹, MOU Bao_lei¹, CAI Jian_hui¹, LI Feng_tang¹,
TAN Lin_kun¹, SHAO Hong_xiang¹, LI Yuan_kun² and CHU Zhu_yin³

(1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Geological Party of Chaoyang, Chaoyang 122000, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: REE, trace element and Sr, Nd and Pb isotopic data of the Hekanzi alkaline complex are presented in this paper, together with a discussion on its relationship with the regional tectonic regime and its geological implications. Rocks of this complex have high REE contents. In the chondrite-normalized REE diagram, these rocks show LREE enrichment and have weak or very indistinct negative Eu anomalies. The PM-normalized trace element diagram exhibits LREE and LILE (Rb, Ba, Th and Sr) enrichment with negative Nb, Ta, K, P, Ti and Y anomalies. Transitional element contents of the complex are very low compared with data of the primitive mantle. REE and trace element characteristics of the Hekanzi alkaline complex are very similar to those of the Fengcheng alkaline complex in eastern Liaoning Province. A five point whole rock-mineral Rb-Sr isochron for the main intrusive stage of the complex yields an age of $221.4 \pm 8.5(2\sigma)$ Ma, implying that the Hekanzi alkaline complex results from activity of Indosinian alkaline magma. All $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ values of the Hekanzi alkaline complex

收稿日期: 2004-02-13; 修订日期: 2004-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49303170, 40072024)

作者简介: 任康绪(1972-), 男, 博士研究生, 岩石地球化学专业, E-mail: renkangxu@163.com。

are positive with an average of 7.23, and the initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value obtained from the Rb_Sr whole rock_mineral isochron is 0.70477 ± 0.00015 . However, all the $\epsilon\text{Nd}(t)$ values are negative. Trace element compositions and Nd, Sr, Pb isotopic geochemical characteristics of the Hekanzi alkaline complex show that its source has features similar to those of the EM I end member. These features suggests that the upper mantle of the eastern North edge of North China platform was fertile in Triassic period and, what is more, the upper mantle under the eastern part was more fertile than that under the western part of Liaoning Province. Variation diagrams of major and trace elements imply that the Hekanzi alkaline complex was formed in an intra_plate environment, and its major magmatic process is dominated by batch melting.

Key words: geochemistry; Sr, Nd and Pb isotopes; Rb_Sr isochorn age; alkaline complex; Hekanzi; western Liaoning Province

在华北地台北缘近东西走向的印支期碱性岩带东段(辽宁境内),迄今为止仅发现辽西河坎子和辽东风城两个印支期碱性岩体。凤城碱性杂岩体的年代学、矿物学、岩石学和地球化学已做过较深入的研究(吴利仁等, 1966; 北京铀矿地质所赛马矿床研究组, 1977; 周玲棣等, 1991, 1996; 牟保磊等, 1992; 景立珍等, 1995; 谭东娟等, 1999)。河坎子岩体位于辽宁西部凌源县河坎子乡, 余昌涛等(1974)最早将其确定为碱性杂岩体, 随后沈阳地矿所和朝阳地质大队联合对该碱性杂岩体做了较详细的野外地质调查以及岩石、矿物和岩石化学的综合研究, 并进行了 K-Ar 年龄测定(李之彤等, 1986)。近 20 年来, 除了对该岩体中含霞石的碱性正长岩做了 Nd 同位素研究(阎国翰等, 2000)外, 未见有新的报道。针对河坎子碱性杂岩体研究的空白点, 本文测定了相关的稀土、微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素数据, 对河坎子碱性杂岩的岩浆起源、地幔源区性质及其与区域构造环境演化的关系加以探讨, 这对于认识华北地台北缘印支期碱性岩带东段的地球化学特点、成因以及华北地台北缘东部上地幔的组成和演化具有重要意义。

1 岩体地质概况

河坎子碱性杂岩体在大地构造位置上处于中朝准地台北缘的燕山台褶带(任纪舜等, 1980)。区内出露有零星的太古宇和大面积的元古宇, 古生界包括断续的寒武-奥陶系、石炭-二叠系, 中生界出露有三叠系和侏罗系。岩体侵入寒武-奥陶系及更古老地层(主要是蓟县系雾迷山组和铁岭组白云岩类), 北东端被侏罗系砂、砾岩石不整合覆盖。其侵位和展布受锦西-青龙近东西向的大断裂及次一级的断

裂构造控制, 呈南西-北东向的小岩株, 大体上南西部宽, 北东部渐窄, 至末端又岔开, 呈一浮游的鲸鱼状。岩体长 9 km, 宽 1~3 km, 出露面积约 15 km^2 (李之彤等, 1986)(图 1)。岩体各阶段均发育有清楚的岩相带, 整体呈拉长的同心环带状, 内有大量期后脉岩的穿插。主体岩石类型有含霞黑云正长岩、花斑状云霞正长岩、含霞云辉(云闪)正长岩、含霞辉石(霓辉)正长岩、辉石黑云正长岩、(角闪)黑云正长岩等。主要造岩矿物有钾长石、黑云母、低铁次透辉石、角闪石和霞石等。

2 岩石地球化学特征

本次样品取自河坎子碱性杂岩体由外至内的主要代表性岩相带。由于前人已经做过比较详细的岩石化学研究, 为避免重复, 下文只简单总结其研究要点, 而将重点放在地球化学特征的讨论上。样品经破碎后用玛瑙钵研磨至 200 目, 稀土元素和微量元素的测试分别在北京大学造山带与地壳演化重点实验室的 VG Axiom ICP-MS 系统和 AES-ICP-9000 系统上完成, 采用酸熔法熔样。

2.1 岩石化学特征

河坎子碱性杂岩体主体岩石 SiO_2 的含量 ($w_B/\%$, 下同) 为 52.67~58.64, 标准矿物无石英(实际矿物也不出现石英), 为硅不饱和岩类; K_2O 含量绝大多数大于 Na_2O , $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1$, 属于云霞质系列; Al_2O_3 属于正常系列, Fe_2O_3 普遍低于 FeO , ΣFe 、 CaO 、 MgO 较高(李之彤等, 1986)。

2.2 稀土元素特征

稀土元素测试数据见表 1, 球粒陨石标准化配分型式如图 2 所示。由表 1 和图 2 可知, 该碱性杂岩体岩石的 REE 分布模式大致相似, 均为 LREE 富集

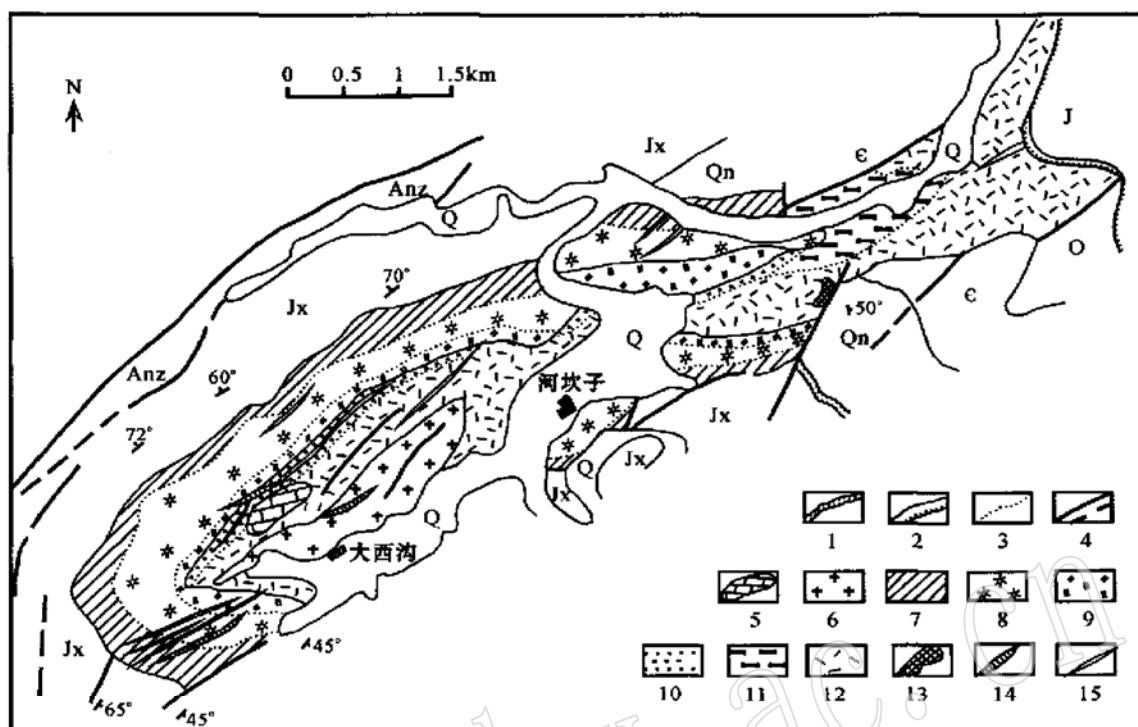


图1 河坎子碱性杂岩体地质略图(据李之彤等, 1986)

Fig. 1 Schematic geological map of the Hekanzi alkaline complex (after Li Zhitong *et al.*, 1986)

1—辉绿岩脉(早古生代); 2—地质界线及不整合界线; 3—岩相带界线; 4—实测及推测断层; 5—大理岩; 6—花岗斑岩; 7—细粒似斑状含霞黑云正长岩; 8—花斑状云霞正长岩; 9—中粒含霞辉正长岩; 10—细粒含霞辉正长岩; 11—中粒辉石黑云正长岩; 12—中粒角闪黑云正长岩、中粗粒黑云正长岩; 13—磷灰石黑云辉石岩; 14—酸性岩脉; 15—碱性岩脉; Q—第四系; J—侏罗系; O—奥陶系; €—寒武系; Qn—青白口系; Jx—蓟县系; Anz—前震旦系

1—Early Paleozoic diabase veins; 2—geological boundary and unconformity; 3—boundary of petrographical zone; 4—measured and inferred faults; 5—marble; 6—granite porphyry; 7—fine grained porphyritic nepheline bearing biotite syenite; 8—granophytic biotite nepheline syenite; 9—medium grained nepheline bearing biotite pyroxene syenite; 10—fine grained nepheline bearing pyroxene syenite; 11—medium grained pyroxene biotite syenite; 12—medium grained hornblende biotite syenite, medium coarse grained biotite syenite; 13—apatite biotite pyroxenite; 14—acid rock veins; 15—alkaline rock veins; Q—Quaternary; J—Jurassic; O—Ordovician; €—Cambrian; Qn—Qingbaikou System; Jx—Jixian System; Anz—Presinian System

的大斜率右倾型。稀土元素总量较高, 除了一个样品(9504)高达 623×10^{-6} 外, 其他 5 个样品为 $197 \times 10^{-6} \sim 314 \times 10^{-6}$ (平均值 260×10^{-6}), 变化幅度不大。所分析样品的 $(La/Yb)_N$ 变化范围在 12.67~35.32 之间(平均值 21.39), 反映出轻重稀土元素分馏明显的特征。该杂岩体岩石的 Eu 异常不显著, 其中黑云角闪辉石正长岩、辉石黑云正长岩呈弱负 Eu 异常(0.76~0.79), 而含霞云辉正长岩、含霞辉石正长岩、花斑状云霞正长岩和黑云母辉石正长岩基本无 Eu 异常(0.90~1.14)。虽然 9504 号样品总稀土元素出现偏高的异常现象, 但 6 个样品的稀土元素分布模式大致平行, 反映了它们来自于同源岩浆的特点。9504 号样品总稀土元素出现偏高的原因有两

种可能: 一是由于该样品属于主侵入期晚阶段, 可能是岩浆部分熔融比例相对更低一些; 另一种可能就是岩浆发生结晶分异作用的结果。

总体看来, 河坎子碱性杂岩体的 REE 分布模式与处于同一碱性岩带东端的凤城碱性杂岩体(周玲棣等, 1991; 牟保磊等, 1992; 谭东娟等, 1999) 极其相似, 仅轻稀土元素 La、Ce 偶显偏低, 但其整体变化范围基本处于凤城碱性杂岩体的变化范围之内, 稀土元素总量整体上低于凤城杂岩体(谭东娟等, 1999)(图 2, 阴影区为凤城杂岩体 REE 变化范围), 但比该带西段阴山地区碱性岩的总稀土元素变化范围(阎国翰等, 2001) 要高。

表1 河坎子碱性杂岩体微量和稀土元素测试数据

 $w_B/10^{-6}$

Table 1 Trace element and REE composition of representative samples from the Hekanzi alkaline complex

样品编号	9501	9502	9503	9504	9505	9506
岩石名称	黑云角闪辉石正长岩	含霞云辉石正长岩	含霞辉石正长岩	花斑状霞正长岩	黑云母辉石正长岩	辉石黑云正长岩
Rb	165	128	136	147	150	119
Sr	2 749	1 751	2 215	1 996	2 301	1 015
K	4 471	5 303	5 863	6 094	1 581	3 170
Ba	2 568	1 473	1 731	2 185	2 037	1 130
P	305	209	140	240	166	502
Nb	33	23	32	34	25	26
Ta	4	3	4	4	3	2
Zr	227	270	249	227	180	552
Ti	438	372	348	372	396	713
Th	24	16	19	25	14	14
Cr	100	84	95	120	82	57
Ni	68	52	56	77	41	54
Co	22	14	22	21	20	20
V	122	75	109	151	83	80
Ga	21	16	19	25	16	19
La	43.70	53.90	32.50	94.90	71.40	60.80
Ce	97.20	107.00	72.20	273.00	138.00	135.00
Pr	17.00	14.30	15.80	33.20	15.60	14.70
Nd	47.40	56.60	42.90	142.00	57.50	51.50
Sm	8.90	9.43	8.74	25.40	10.05	8.33
Eu	2.18	2.91	2.66	8.25	2.94	1.97
Gd	7.66	8.02	9.13	17.30	7.52	7.15
Tb	1.02	1.10	1.19	2.52	1.04	1.05
Dy	4.34	4.98	4.84	12.8	4.80	5.48
Ho	1.05	1.02	1.14	2.12	0.82	0.86
Er	2.70	2.39	2.89	5.64	2.10	2.61
Tm	0.33	0.30	0.36	0.75	0.27	0.35
Yb	1.68	1.61	1.84	4.18	1.45	2.04
Lu	0.24	0.30	0.44	0.63	0.24	0.35
Y	12.40	15.20	10.09	39.20	14.90	15.30
ΣREE	235.40	263.86	196.63	622.69	313.73	292.19
ΣLREE	216.38	244.14	174.80	576.75	295.49	272.30
ΣHREE	19.02	19.72	21.83	45.94	18.24	19.89
(La/Yb) _N	18.66	24.01	12.67	16.29	35.32	21.38
δEu	0.79	1.00	0.90	1.14	0.99	0.76

2.3 微量元素特征

从碱性杂岩体不相容元素原始地幔标准化的蛛网图(图3)来看,该杂岩体富集大离子亲石元素(LILE)(如Rb、Ba、Th和Sr)和LREE(如La、Ce、Pr、Nd和Sm)。这一方面可能是由于源岩区发生低程度部分熔融的结果,另一方面也可能说明其岩浆起源于富集地幔源区。微量元素分布模式的另一特点是Nb、Ta、K、P、Ti、Y具有明显的负异常。谭东娟等(1999)在研究凤城岩体时用岩浆作用过程中有壳源物质的参与来解释,但河坎子碱性杂岩体野外未见到有地壳岩石的捕掳体,并且如果如其所言,主

期岩体的 Al_2O_3 、 SiO_2 应更高,而 ΣFe 、 MgO 应更低,但实际情况并非如此。该岩体蛛网图上表现的“TNT”型亏损,可能是由于源区在低程度部分熔融时有富钛、含水硅酸盐矿物如金红石、金云母等分离以及石榴石、磷灰石等残留引起的。

6个全岩样品的不相容元素分布模式总体上,大致相似,呈左高右低的分布形式,与凤城碱性杂岩体(谭东娟等,1999)基本一致(图3,阴影区为凤城杂岩体不相容元素变化范围),反映出它们成因模式具可比性,但其强不相容元素Rb、Ba、Th的变化幅度不如凤城碱性杂岩体的大,反映了源区性质的差异。

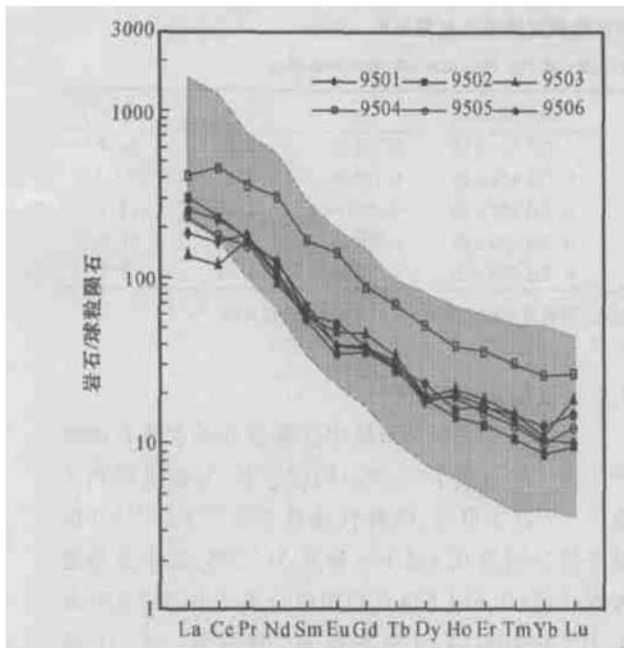


图 2 河坎子碱性杂岩体 REE 分配模式图
(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of the Hekanzi alkaline complex (after Sun and McDonough, 1989)

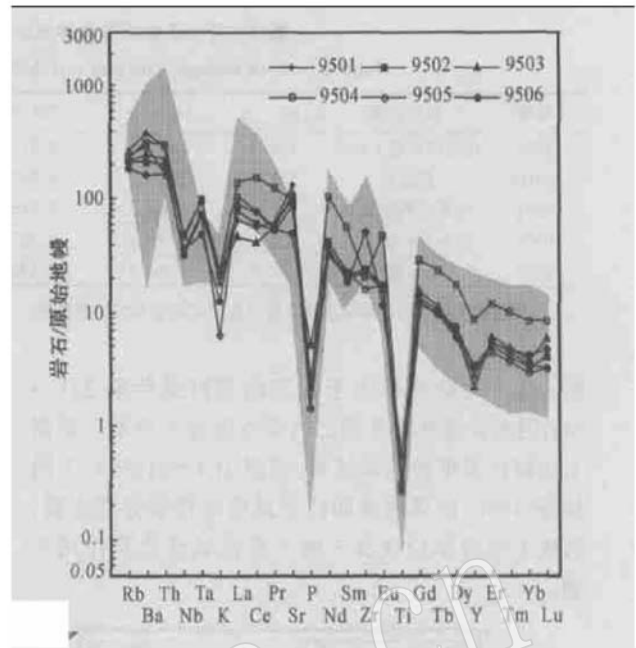


图 3 河坎子碱性杂岩体不相容元素蛛网图
(原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 PM-normalized diagram of incompatible elements from the Hekanzi alkaline complex (after Sun and McDonough, 1989)

河坎子碱性杂岩体的过渡族元素 Cr、Ni、Co、V 的含量 ($w_B/10^{-6}$, 下同) 分别为: 57~124、41~82、14~26 和 75~202, 除 V 的含量接近原始地幔值外, 其他 3 个元素的含量远远低于原始地幔值。Foley 等 (1987) 曾指出源自富集地幔的原始岩浆中 Cr、Ni 含量可以大大低于一般原始岩浆的含量 (Ni: 250~300, Cr: 500~600)。可见, 河坎子碱性杂岩体过渡族元素特征尤其是 Cr、Ni 的含量暗示其源区可能与富集地幔源有关。

3 同位素地球化学特征

Nd-Sr-Pb 同位素组成在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室用 VG354 固体源热电离质谱计分析测定, 仪器内部测量精度: Sr 和 Nd 均小于 20×10^{-6} , 外部测量精度: Sr 和 Nd 均小于 30×10^{-6} 。分析流程见 Qiao (1998)。所有样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素比值统一采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化处理 (Faure, 1986; Depalo, 1988)。

3.1 Sr 同位素特征

河坎子碱性杂岩体的 Sr 同位素分析数据见表 2。4 个代表性全岩样品 Sr 同位素的初始比值非常接近, $I_{\text{Sr}} = 0.70464 \sim 0.70484$, 平均值为 0.70477, 比原始地幔现今 Sr 的初始比值 ($I_{\text{Sr}} = 0.7045$) 略高; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 现代值与 EM I 型地幔端员的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 现代值 (0.7050~0.7055) (Hart, 1988; Weaver, 1991) 大致相当; $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 皆为正值, 变化范围为 5.33~8.22, 平均值为 7.23。另外, 根据 4 个全岩样品加 1 个单矿物黑云母的 Rb-Sr 分析数据拟合出的等时线年龄值为 $221.4 \pm 8.5 (2\sigma) \text{ Ma}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的初始比值为 0.70477 ± 0.00015 , $\text{MSWD} = 6.3$ (图 4)。Rb-Sr 等时线采用 ISOPLOT (2.49 版) 专用软件拟合 (Ludwig, 2001), 拟合参数 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 误差为 2%, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 误差为 0.01%。从拟合等时线图中可见, 5 个数据点虽然集中在等时线的上下两端, 但是其 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 差别比较大 (0.15‰~5.60‰), MSWD 不大, 选用样品都比较新鲜, 因此该等时线年龄值可信。李之彤等 (1975) 用 K-Ar 法获得河坎子碱性杂岩体云霞正长岩中黑云母单矿物的年龄值为 234

表2 河坎子碱性杂岩体 Rb-Sr 同位素测试数据及处理结果

Table 2 Rb-Sr isotopic data and calculation results of the Hekanzi alkaline complex

样号	岩石类型	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	I_0	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	$\epsilon_{\text{Sr}}(0)$
9504	花斑状霞石正长岩	160.9	2184.0	0.2132	0.705511 ± 18	0.70484	8.22	14.4
9504a	黑云母	458.4	237.3	5.5974	0.722413 ± 25	0.70479	7.48	254.3
9502	含霞云辉正长岩	132.6	1809.3	0.2120	0.705453 ± 20	0.7049	7.45	13.5
9506	辉石黑云正长岩	136.9	1173.4	0.3375	0.705699 ± 20	0.70464	5.33	17.0
9507	含霞石辉石岩	132.6	2504.4	0.1531	0.705300 ± 20	0.70482	7.91	11.4

由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室乔广生等测定, t 取 Rb-Sr 等时线年龄 221.4 Ma, $\lambda(^{87}\text{Rb}) = 1.42 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ 。

Ma, 这一年龄值稍大于本文的等时线年龄 221.4 Ma, 但在误差允许范围之内基本上是一致的。根据上述同位素年龄测试结果, 按照 IUGS(1989)、王鸿祯等(1990)的国内外同位素地质年代学分类方案, 河坎子杂岩体应该属于晚三叠世碱性岩浆作用产物。

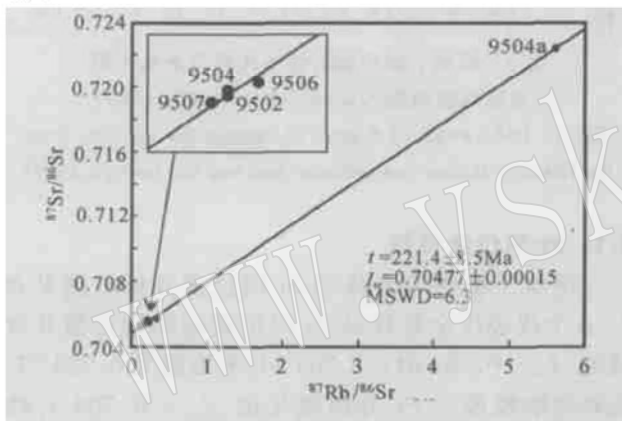


图4 河坎子碱性杂岩体 Rb-Sr 等时年龄图
Fig. 4 Rb-Sr conventional isochron diagram of the Hekanzi alkaline complex

3.2 Nd 同位素特征

对河坎子碱性杂岩体中含霞石和不含霞石的两种代表性岩石做了 Sm-Nd 测试分析, 分析数据列于表 3。从表 3 可见, 两种代表性岩石 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的现今值分别为 0.512176 和 0.512275, 低于原始地幔现今值(0.512638); 初始值分别为 0.512030 和 0.512129; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 全为负值, 分别为 -6.31 和 -4.38。两个样品的分析数据一定程度上揭示了该碱性杂岩体源区富集的性质。

3.3 Pb 同位素特征

用河坎子碱性杂岩体中含霞石和不含霞石两种代表性岩石中的钾长石进行普通铅同位素测定, 结果列于表 4。由表 4 可以看出, 两种代表性岩石中的钾长石铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围均不大, 均值分别为: 17.040、15.330 和 36.825, 在一定程度上反映出该杂岩体的普通铅同位素组成特征。与凤城赛马岩体一个霞石正长岩长石(样号 LN013)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 18.068、15.486 和 38.189(张理

表3 河坎子碱性杂岩体 Nd 同位素测试数据及处理结果

Table 3 Sm-Nd isotopic data and calculation results of the Hekanzi alkaline complex

样号	岩石类型	$\frac{\text{Sm}}{\text{Nd}}$ $w_B/10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} (\pm 2\sigma)$	t/Ma	t_{DM}/Ma	I_0	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
9502	含霞云辉正长岩	7.653	45.819	0.1010	221.4	1184	0.512030	-0.49	-9.01	-6.31
9506	辉石黑云正长岩	7.644	45.791	0.1009	221.4	1319	0.512129	-0.49	-7.08	-4.38

由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室乔广生、张仁祜、储著银测定, t 取 Rb-Sr 等时线年龄 221.4 Ma, $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \ln\{[(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - 0.513151]/[(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - 0.21357] + 1\}$; $\lambda(^{143}\text{Nd}) = 6.54 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$ 。

表4 河坎子碱性杂岩体 Pb 同位素测试数据及处理结果

Table 4 Pb isotopic data and calculation results of the Hekanzi alkaline complex

样号	岩石类型	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} (\pm 2\sigma\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} (\pm 2\sigma\%)$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} (\pm 2\sigma\%)$
9502	含霞云辉正长岩	16.978 ± 0.015	15.330 ± 0.017	36.770 ± 0.017
9506	辉石黑云正长岩	17.100 ± 0.029	15.330 ± 0.030	36.880 ± 0.030

由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室乔广生、许荣华、储著银测定。

刚, 1995) 相比, 河坎子碱性杂岩体的铅同位素比值明显偏低。

4 讨 论

4.1 碱性岩浆的物质来源

牟保磊等(1992)研究燕辽地区三叠纪碱性偏碱性岩体地球化学特征时, 根据岩体主量元素 SiO₂ 不饱和或极端不饱和以及富含铁和镁, 推断它们源自于上地幔。前人研究表明, 河坎子碱性杂岩体属于 SiO₂ 不饱和类型, 出现霞石、霓辉石, 主体岩石 ΣFe·CaO、MgO 含量较高, 可见似长石矿物和碱性暗色矿物, 结合主量元素特征初步推断该杂岩体源

自幔源。

通过对河坎子碱性杂岩体某些微量元素分析数据投制 Th/Yb- Ta/Yb 和 Zr/Nb- Zr/Y- Y/Nb 图解, 发现绝大部分样品落在富集地幔区域及其附近, 反映了该碱性杂岩体的物质来源与富集地幔源区关系密切(图 5)。而辽东的凤城岩体投影点虽然也靠近富集地幔区域, 但明显比河坎子碱性杂岩体靠外, 暗示河坎子碱性杂岩体受到的地壳混染程度比较低。此外, 两个代表性样品的钾长石 Pb 同位素组成在 Zartman 等(1981)的地球不同区域铅模式图解上落在地幔与下地壳演化线之间靠近地幔一侧, 指示该碱性杂岩体的物质来源与地幔关系密切, 可能有少量下地壳物质的混染(图略)。

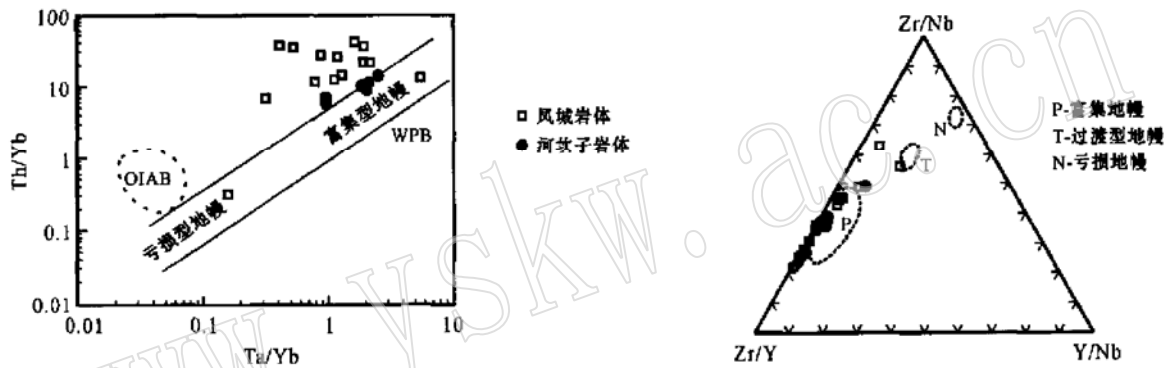


图 5 河坎子碱性杂岩体的 Th/Yb- Ta/Yb 图解(据 Wilson, 1989)和 Zr/Nb- Zr/Y- Y/Nb 图解(据 Fodor, 1984)
Fig. 5 Th/Yb- Ta/Yb (after Wilson, 1990) and Zr/Nb- Zr/Y- Y/Nb (after Fodor, 1984) diagrams of the Hekanzi alkaline complex

前文已述河坎子碱性杂岩体的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 为 7.23 (均值), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -5.35 (均值), 反映出源区富集的特征, 总体上 Sr、Nd、Pb 同位素特征与华北地区区中生代富碱性侵入岩的特征相吻合(阎国翰等,

2002)。在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 关系图解和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图解(图 6)上, 河坎子碱性杂岩体的投影点落在 EM I 区域, 显示其物质来源与 EM I 型富集地幔源区有关。

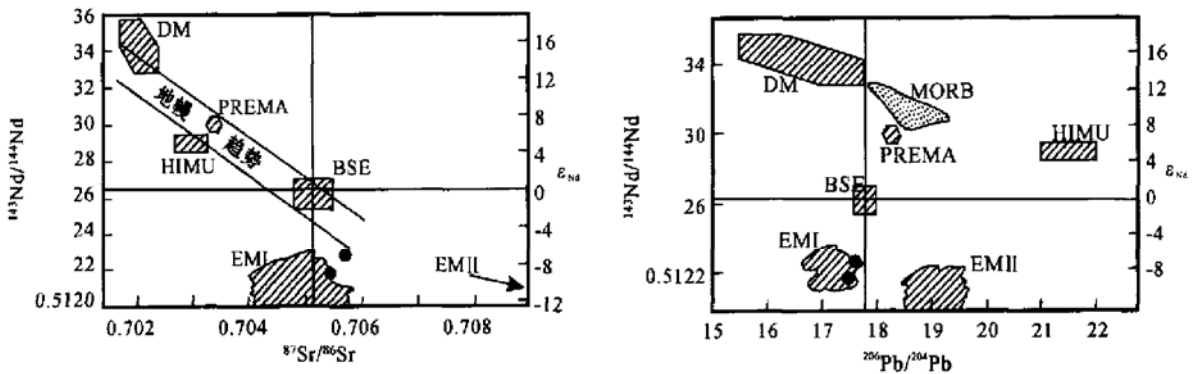


图 6 河坎子碱性杂岩体的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图解(据 Rollison, 1993)
Fig. 6 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the Hekanzi alkaline complex (after Rollison, 1993)

4.2 构造环境

Brown(1982)提出的 $\text{Log}[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$ - SiO_2 图解能根据几个主量元素的变化关系判断出挤压造山和拉张两种不同构造环境的岩浆作用。用河坎子碱性杂岩体主期侵入岩石的常量元素分析数据(李之彤等, 1986)制作该图解(图7), 结果投影点主要落在左下侧代表拉张环境岩浆作用的区域, 暗示该碱性杂岩体形成于引张环境。

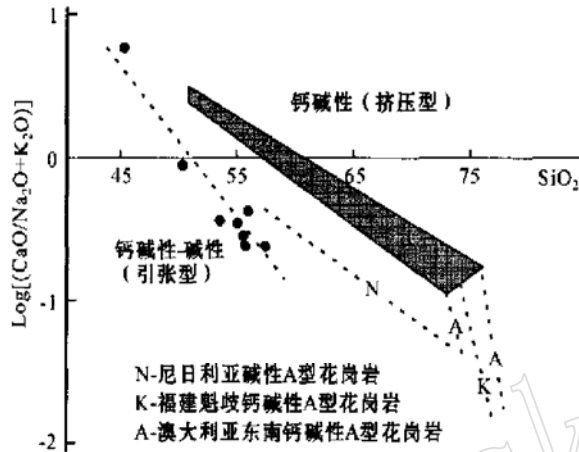


图7 河坎子碱性杂岩体的 $\text{Log}[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$ - SiO_2 图解(据 Brown, 1982)

Fig. 7 $\text{Log}[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$ - SiO_2 diagram of the Hekanzi alkaline complex (after Brown, 1982)

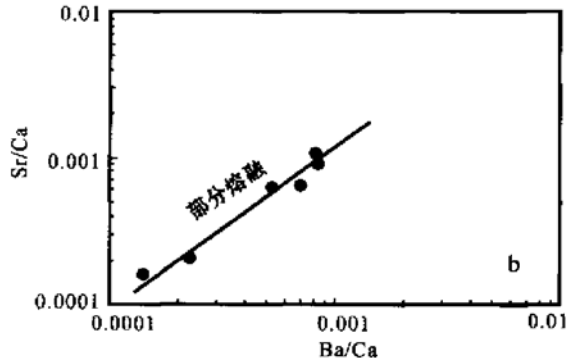
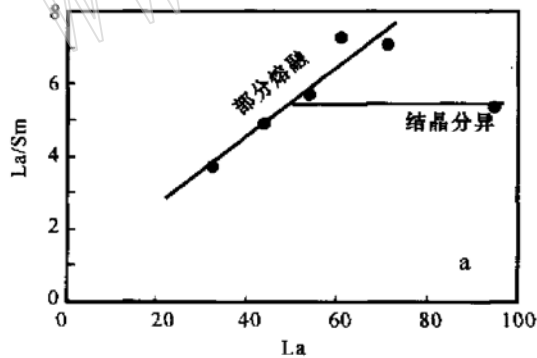


图8 河坎子碱性杂岩体的 La/Sm - La 图解(据 Treuil, 1975) 和 S - B 图解(据 Oumn, 1981)

Fig. 8 La/Sm - La diagram (after Treuil, 1975) and S - B diagram (after Oumn, 1981) of the Hekanzi alkaline complex

作用上侵形成, 而每个阶段的岩浆侵位过程中可能又存在结晶分异作用。

4.4 地质意义

通常认为大陆碱性岩的空间分布主要与裂谷作用有关, 或者出现在具有加厚的岩石圈和相对于扩张中心或汇聚型板块边缘带具有较低的地热梯度构造稳定地区(如大陆克拉通)(Best, 1982)。马文璞等

4.3 岩相带成因

前文已经提到, 河坎子碱性杂岩体从中心到边缘岩相变化明显, 将该岩体几个代表性样品的 La 、 Sm 分析数据在 La/Sm - La 变化关系图(Allegre *et al.*, 1978)上投影, 结果多数样品的 La/Sm 值随 La 的增加而增加, 说明批式部分熔融占主导地位, 只有一个数据点暗示存在有非主导性的结晶分异作用(图8a)。另外, Ouma(1981)提出的 S - B 图解(图8b)也暗示河坎子碱性杂岩体主期岩石成因与部分熔融作用关系密切。

该杂岩体各岩相带的发育以及众多的脉岩穿插关系反映其形成的多期次性和复杂性, 李之彤等(1986)将其划分为主侵入期早、晚两阶段和附加侵入期, 主期两个阶段间以及与附加期(脉岩活动期)岩石间为明显的侵入接触关系且发育冷凝边, 从主侵入期早阶段内部相到晚阶段外部相, 岩石化学特征表现出镁、铁降低而碱质增加的趋势。REE 和不相容元素模式图均表现出平行的趋势(图2、图3), 指示其具同源属性。图8的两个判别图进一步反映出该碱性杂岩体是以批式部分熔融为主导的岩浆演化作用产物, 但不排除每个阶段内非主导性结晶分异作用的存在。可见, 河坎子碱性杂岩体主期岩石岩相带应该是由同一物源区发生不同程度部分熔融

(1986)论证了华北地台北缘燕辽地区早中生代时曾发育拗拉谷阶段, 本文认为河坎子碱性杂岩体产生于拉张型构造背景与此相一致, 属于与类大陆裂谷作用有关的碱性岩浆活动, 同时也对这种构造环境提供了地质学证据。由于处于类大陆裂谷张性环境, 断裂活动可能已深达上地幔, 使得岩石圈地幔因减压作用引发低程度部分熔融产生碱质熔浆, 在其

快速上升侵位过程中受地壳混染程度较小时形成碱性侵入岩(涂光炽, 1989)。

本文获得河坎子碱性杂岩体主侵入期全岩-单矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 221.4 Ma, 与前人用 K-Ar 法测定的年龄值在误差范围内基本吻合, 这一年龄数据与辽东风城碱性杂岩体的平均形成年龄 224 Ma(谭东娟等, 1999)相一致。两岩体共同奠定了华北地台北缘印支期碱性岩带东段的格局, 说明在晚三叠世这一地区正处于类裂谷活动阶段。

前人认为华北地台区中生代富碱性侵入岩的 $\epsilon Nd(t)$ 都为负值, 物质来源与富集地幔有关, 而兴蒙地槽区的 $\epsilon Nd(t)$ 为正值, 与亏损地幔源关系密切(阎国翰等, 2002)。本文得出河坎子碱性杂岩体的 $\epsilon Sr(t)$ 均为正值(均值 7.23), 而 $\epsilon Nd(t)$ 均为负值, I_{Sr} 平均值为 0.70477, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 初始值均值为 0.512080, 此外, Pb 同位素 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 的均值分别为: 17.040、15.330 和 36.825, 与华北地台印支期富碱侵入岩的该值平均数据(17.302、15.343、37.397)(阎国翰等, 2002)接近, 但比辽东风城碱性杂岩体的明显偏低。可见, 河坎子碱性杂岩体的 Nd-Sr、Pb 同位素特征均表明其属于地台碱性岩浆活动, 物质来源与富集地幔有关, Sr 和 Nd 的初始比值接近原始地幔, 说明其富集程度不是很高, 地壳的混染程度也比较低。 $^{143}Nd/^{144}Nd$ - $^{87}Sr/^{86}Sr$ 、 $^{143}Nd/^{144}Nd$ - $^{206}Pb/^{204}Pb$ 关系图揭示出这种地幔源区属于 EM I 型, 这是一种富集地幔或者是被深部释放的流体交代作用改造的岩石圈地幔(Hart, 1984; Zindler *et al.*, 1986)。Nd 同位素的亏损地幔模式年龄 t_{DM} 大于 10 亿年(表 3), 暗示了形成这种富集地幔源区的时间在中元古代。河坎子碱性杂岩体的 Nd-Sr、Pb 同位素特征不仅表明华北地台北缘东部地区上地幔在印支期具有富集的特性, 同时也揭示了这一时期辽东比辽西的上地幔富集程度要高。

5 结 论

(1) 河坎子碱性杂岩体地球化学特征表现出稀土元素配分曲线大致平行、大斜率右倾、Eu 弱负异常到无异常的特点, 微量元素蛛网图整体呈右倾形态, 富集 LREE 和 LILE (Rb、Ba、Th、Sr), 而 Nb、Ta、K、P、Ti、Y 相对呈负异常, 过渡族元素含量大都远低于原始地幔。稀土和微量元素分配模式与印支期凤城碱性杂岩体的分配模式非常相似。Sr、Nd 和 Pb

同位素特征表明, 该碱性杂岩体 I_{Sr} 比较低, 平均值 0.70477, $\epsilon Sr(t)$ 均为正值(均值 7.23), $\epsilon Nd(t)$ 均为负值(均值 -5.35), 反映出源区富集的特征, $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 的变化范围不大, 均值与中国北方印支期富碱侵入岩的该值平均数据总体上接近, 但比辽东风城碱性杂岩体的明显偏低。河坎子碱性杂岩体岩相变化明显, 从中心向边缘呈现同心环带状, 结合 La/Sm-La 图解和 S-B 图解表明该杂岩体是批次部分熔融为主导的多期次岩浆作用的产物。

(2) 河坎子碱性杂岩体主期岩石的全岩-单矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 221.4 Ma, 与辽东风城碱性杂岩体的平均形成年龄 224 Ma 相一致, 反映了该地区在晚三叠世处于拉张的类大陆裂谷活动阶段。

(3) 同位素及微量元素地球化学特征及变化关系说明: 河坎子和凤城两个碱性杂岩体的形成背景具有相似性, 源区都与 EM I 型富集地幔有关, 都是在引张环境中侵位形成, 同时也揭示出华北地台北缘辽东和辽西地区上地幔在印支期具有富集的特性, 但辽东的富集程度要比辽西的高。

致 谢 中国科学院地质与地球物理研究所完成了样品的 Nd-Sr、Pb 同位素分析, 北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室完成了稀土、微量元素的分析, 特此致谢!

References

- Allegre C J and Hart S R. 1978. Trace Elements in Igneous Petrology [M]. Amsterdam: Elsevier, 1~12.
- Best M G. 1982. Igneous and Metamorphic Petrology [M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 196~221.
- Brown G C. 1982. Calc-alkaline intrusive rocks: their diversity, evolution and relation to volcanic arcs [A]. Thorpe R S. Andersites [C]. John Wiley and Sons, 437~461.
- Depaolo D J. 1988. Neodymium Isotope Geochemistry: An Introduction [M]. New York: Springer.
- Faure G. 1986. Principle of Isotope Geology (2nd ed.) [M]. New York: John Wiley and Sons.
- Foley S F, Venturelli G, Green D H, *et al.* 1987. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification and constraints for petrogenetic models [J]. Earth Sci. Rev., 24: 81~134.
- Hart S R. 1984. A large-scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle [J]. Nature, 309: 753~757.
- Hart S R. 1988. Heterogeneous mantle domains signatures, genesis and mixing chronologies [J]. Earth and Planetary Science Letters, 90: 273~296.
- Jing Lizhen, Guo Yujia and Ding Caixai. 1995. Geochronology and origin of Saima alkaline rocks in Liaoning Province [J]. Liaoning Geology, 4: 257~271 (in Chinese with English abstract).

- Li Zhitong, Yu Changtao, Cheng Delin, *et al.* 1986. Geological characteristics of the Hekanzi alkaline complex in Lingyuan County of Liaoning Province [J]. *Bull. Shenyang Inst. Geol. Min. Res., Chinese Acad. Geol. Sci.*, 14: 43~ 61 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. ISOPLOT/Ex: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel (Ver. 2.49) [M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 1~ 8.
- Ma Wenpu and Liu Ang'ang. 1986. The Xi Shan of Beijing—a part of an aulacogen in Early Mesozoic [J]. *Scientia Geologica Sinica*. (1): 54~ 63 (in Chinese with English abstract).
- Mou Baolei and Yan Guohan. 1992. Geochemistry of Triassic alkaline or subalkaline igneous complexes in the Yan-Liao area and their significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 66 (2): 108~ 121 (in Chinese with English abstract).
- Ouma N, Ninomiya S and Nagasawa H. 1981. Mineral/groundmass partition coefficients for nepheline, melilite, clinopyroxene and perovskite in melilite-nepheline basalt, Nyiragongo, Zaire [J]. *Geochem. J.*, 15: 221~ 292.
- Qiao G S. 1988. Normalization of isotopic dilution analysis [J]. *Scientia Sinica (Series A)*, 31 (10): 1 263~ 1 268.
- Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, *et al.* 1980. The Geotectonic Evolution of China [M]. Beijing: Science Publishing House, 29~ 35 (in Chinese).
- Rollison H R. 1993. Using Geochemistry data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. New York: John Wiley & Sons.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunderson A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geo Soc. Spec*, 313~ 345.
- Tan Dongjuan, Lin Jingqian and Shan Xuanlong. 1999. Magma genesis of Saima-Bailinchuan alkaline extrusive-intrusive complex [J]. *Geological Review*, 45 (supp.): 474~ 482 (in Chinese with English abstract).
- The Research Group of Saima Deposits, Beijing Institute of Uranium. 1977. The uranium deposits of Saima alkaline rock bodies, Northeast China [J]. *Science in China*, (5): 466~ 483 (in Chinese).
- Tu Guanchi. 1989. On the alkali-rich intrusive rocks [J]. *Mineral Resources and Geology*, 3: 1~ 4 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongzhen and Li Guangcen. 1990. Correlation Table of Stratigraphical Subdivision [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island end-member compositions: trace element and isotopic constraints [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 381~ 397.
- Wu Liren. 1966. A Study on Some Alkaline Rock Bodies in China [M]. Beijing: Science Publishing House, 1~ 76 (in Chinese).
- Yan Guohan, Mou Baolei, Xu Baoliang, *et al.* 2000. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area: their chronology, Sr, Nd and Pb isotope characteristics and their implication [J]. *Science in China (Series D)*, 30 (4): 383~ 387.
- Yan Guohan, Mou Baolei, Xu Baoliang, *et al.* 2002. Characteristics and implications of Nd, Sr and Pb isotopes and chronology of Phanerozoic alkaline-rich intrusions in North China [J]. *Geological Review*, 48 (supp.): 69~ 75 (in Chinese with English abstract).
- Yan Guohan, Tan Linkun, Xu Baoliang, *et al.* 2001. Petrogeochemical characteristics of Indosinian alkaline intrusions in Yinshan area [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20 (3): 281~ 292 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R Z and Doe B R. 1981. Plumbotectonic the model [J]. *Tectonophysics*, 75: 135~ 162.
- Zhang Ligang. 1995. Block geology of Eastern Asia Lithosphere: Isotope Geochemistry and Dynamics of Upper Mantle, Basement and Granite [M]. Beijing: Science Publishing House, 226~ 231 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Lingdi and Wang Yangchuan. 1991. REE geochemistry and genetic model of Saima and Zijingshan alkaline rock bodies [J]. *Geochimica*, 3: 229~ 235 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Lingdi, Zhao Zhenhua and Zhou Guofu. 1996. Isotopic chronology of some alkaline rock bodies in China [J]. *Geochimica*, 25 (2): 164~ 171 (in Chinese with English abstract).
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics [J]. *Annv. Rev. Earth Science*, 14: 471~ 493.

附中文参考文献

- 北京铀矿地质研究所赛马矿床组. 1977. 我国东北赛马碱性岩体中的铀矿床 [J]. *中国科学*, (5): 466~ 483.
- 景立珍, 郭裕嘉, 丁彩霞. 1995. 辽宁赛马碱性岩的年代学及碱性岩浆的形成 [J]. *辽宁地质*, 4: 257~ 271.
- 李之彤, 余昌涛, 程德琳, 等. 1986. 辽宁省凌源县河坎子碱性杂岩体地质特征 [J]. *中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊*, 14: 43~ 61.
- 马文璞, 刘昂昂. 1986. 北京西山——一个早中生代拗拉谷的一部分 [J]. *地质科学*, (1): 54~ 63.
- 牟保磊, 阎国翰. 1992. 燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义 [J]. *地质学报*, 66(2): 108~ 121.
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 1980. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京: 科学出版社, 29~ 35.
- 谭东娟, 林景仟, 单玄龙. 1999. 赛马-柏林川碱性火山-侵入杂岩体岩浆成因 [J]. *地质论评*, 45(增刊): 474~ 482.
- 涂光炽. 1989. 关于富碱侵入岩 [J]. *矿产与地质*, 3: 1~ 4.
- 王鸿祯, 李光岑. 1990. 国际地层时代对比表 [M]. 北京: 地质出版社.
- 吴利仁. 1966. 若干地区碱性岩研究 [M]. 科学出版社, 1~ 76.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr、Nd、Pb 同位素特征及意义 [J]. *中国科学 D 辑*, 30 (4): 383~ 387.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 2002. 中国北方显生宙富碱性侵入岩年代学和 Nd、Sr、Pb 同位素特征及意义 [J]. *地质论评*, 48(增刊): 69~ 76.
- 阎国翰, 谭林坤, 许保良, 等. 2001. 阴山地区印支期碱性侵入岩岩石地球化学特征 [J]. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 281~ 292.
- 张理刚. 1995. 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]. 科学出版社, 226~ 231.
- 周玲棣, 王扬传. 1991. 赛马和紫金山碱性杂岩体稀土元素地球化学及成因模式 [J]. *地球化学*, 3: 229~ 235.
- 周玲棣, 赵振华, 周国富. 1996. 我国一些碱性岩的同位素年代学研究 [J]. *地球化学*, 25(2): 164~ 171.