

文章编号: 1000- 6524 (2001) 03- 0281- 12

阴山地区印支期碱性侵入岩 岩石地球化学特征

阎国翰, 谭林坤, 许保良, 牟保磊, 邵宏翔,
陈廷礼, 童英, 任康绪, 杨斌
(北京大学地质学系, 北京 100871)

摘要: 通过系统的矿物学、岩石学、地球化学研究, 确立了阴山地区印支期碱性岩在空间上分为南北两条近东西走向的岩带。南带以霓辉正长岩为主, 北带以碱性正长岩为主。南北两带岩体均富集轻稀土元素、大离子亲石元素和高场强元素, 而 Cr、Ni 等相容元素含量很低。结合 Nd、Sr、Pb 同位素特征, 认为该地区印支期碱性岩源自富集地幔, 并受到不同程度的地壳物质混染。

关键词: 印支期碱性岩; 岩石地球化学; 富集地幔; 板内裂谷环境; 阴山地区

中图分类号: P588. 12

文献标识码: A

在 1: 20 万填图工作中, 内蒙古阴山地区发现有若干碱性侵入岩体, 但前人对该区碱性岩几乎未进行过研究。1994 年笔者发现该区的碱性岩和燕辽地区印支期碱性岩十分相似^[1], 曾推测该区碱性岩可能是燕辽印支期碱性岩带向西的延伸。对该区碱性岩进行系统研究, 对于进一步探讨华北地台北缘深部物质组成、早中生代时的构造环境、地幔性质及深部地球动力学都有重要意义。

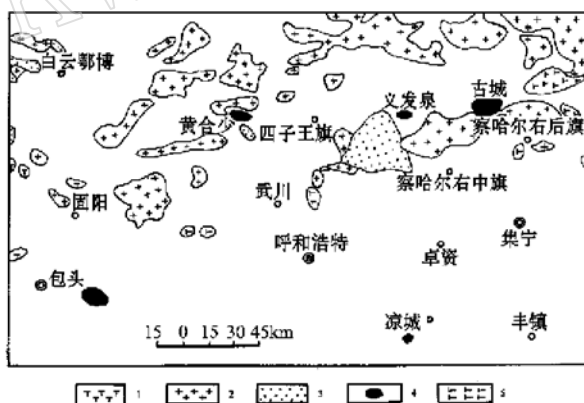


图 1 内蒙古阴山地区侵入岩分布图
(据《内蒙古地质志》, 1991)

Fig. 1 Schematic map showing intrusive rocks in Yinshan Area, Inner Mongolia

1—加里东期花岗岩类; 2—海西期花岗岩类; 3—印支期花岗岩类; 4—印支期碱性岩类; 5—燕山期花岗岩类

1 区域及岩体地质

阴山地区在大地构造区划上位于中朝地台北缘、内蒙地轴西段。该区出露地层简单, 主要是前寒武纪老变质岩系, 其它时代的地层很少。印支期碱性侵入岩分布于阴山的南麓和北麓, 分别构成南北两条近东西走向的碱性岩带(图 1)。北带自东向西, 由察哈尔右后旗古城碱性正长岩体、察哈尔右中旗义发泉正长岩体及四子王旗黄合少碱性正长岩体组成。

收稿日期: 2001- 04- 19; 修订日期: 2001- 07- 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49303170)

作者简介: 阎国翰(1939-), 男, 教授, 博士生导师, 从事岩浆岩地球化学研究。

南带目前仅发现凉城霓辉正长岩体和包头东的霓辉正长岩。

1.1 北岩带

(1) 古城碱性正长岩体位于察哈尔右后旗忠义堂—巴音忽拉山西侧,岩体出露面积约 15 km²。主要由辉石正长岩和角闪正长岩组成,有时渐变为石英角闪二长岩,部分地段还有少量霓辉正长岩。主要造岩矿物为条纹长石、微斜条纹长石(75%~85%),次要矿物为辉石、角闪石、钠长石及少量霞石。

(2) 黄合少碱性正长岩体位于四子王旗西边 40 km 处,岩体东西长约 5.7 km,南北宽 0.6 km,出露面积约 3.5 km²。以肉红色中粒正长岩为主,并有少量粗粒及伟晶状正长岩。造岩矿物以微斜长石为主,并有微量霞石及霓石。该岩体的 Rb-Sr 等时线年龄为 203 Ma ± 4 Ma^[2]。

1.2 南带岩

(1) 凉城霓辉正长(斑)岩体位于凉城新庄子东北,出露面积约 1 km²,以肉红色中粒霓辉正长岩为主,还有部分浅灰色霓辉正长岩。主要造岩矿物为正长石、霓辉石,次生矿物为黑云母。该岩体的 Rb-Sr 等时线年龄为 190.3 Ma ± 5.6 Ma^[2]。

(2) 包头东霓辉正长岩体呈岩株状出露面积约 14 km²,岩体由边缘向中心依次为细粒正长岩→似斑状正长岩及中粒正长岩。主要造岩矿物为正长石、透辉石、霓辉石。侵位于早二叠世大红山组,被早侏罗世五当组不整合覆盖。该岩体的 Rb-Sr 等时线年龄为 197.7 Ma ± 5.6 Ma^[2]。

总的来看,阴山南北麓两个碱性岩带的岩石类型有明显不同:南带以霓辉正长岩为主,北带以碱长正长岩为主。具体岩石名称和矿物组成见表 1。

2 岩石化学

2.1 岩石化学成分特征

阴山地区碱性侵入岩的全岩化学分析结果见表 2。该区碱性岩 SiO₂ 含量从 55.80%~69.44%,大部分集中在中性岩的变化范围,只有黄合少岩体的 SiO₂ 含量多大于 65%。各个岩体普遍出现了标准矿物石英,其含量从 7.5%~28.1%,反映出该区碱性岩为一套硅饱和或过饱和的岩石。Al₂O₃ 含量为 14.09%~19.84%,并在标准矿物中部分出现了刚玉,说明这些岩体属铝正常或过铝型的中性岩。Na₂O+K₂O 含量为 7.81%~9.77%,表现出碱金属相对富集。Fe、Mn、Ca 则相对较低。标准矿物中以 Or 和 Ab 为主,这和岩体中碱性长石占绝对优势的事实相一致。另外,标准矿物计算中未出现 Ne、Lc、Ac、Ns 等碱性标准矿物,因为它们与标准矿物石英不共存,这反映出该区碱性岩的碱质并不过剩。

2.2 碱性程度

由表 2 可看出阴山地区几个正长岩体的里特曼指数 σ 都大于 3.3,其变化范围为 3.31~5.44,因此均属于碱性正长岩。在 A.R-SiO₂ 图解(图略)上除 1 个样品外,全部落入碱性岩范围。在 SiO₂-(Na₂O+K₂O) 图解(图略)上,阴山地区大部分样品都落入了碱性岩范围。据此可以确定阴山地区印支期的正长岩体都是碱度较弱的碱性正长岩体。

2.3 主元素和碱度的变化关系

由表 2 可看出,阴山地区南北两条碱性岩带有明显差别:南带酸度低, SiO₂=55.80%~64.89%,碱度高, σ =4.06~5.44;而北带酸度高, SiO₂=61.43%~69.44%,碱度低, σ =3.31~4.16。

3 造岩矿物特征

3.1 碱性长石

阴山地区碱性岩中的碱性长石为钾长石和钠长石两个较端员的系列。钾长石出现在各个岩体的岩石中,含量可达 80%以上,构成各岩体的主体。而钠长石仅出现在北带岩体中,含量可达 15%左右。这是南北两个碱性岩带在造岩矿物上的显著不同特点之一。根据显微镜下观察,在南带的包头东岩体和凉城岩

体中钾长石均为卡氏双晶发育的正长石;北带的黄合少岩体和古城岩体以微斜长石为主,格子双晶发育,还有少量条纹长石。南北两带钾长石种属的不同,可能反映出两带碱性岩的结晶条件不同,南带比北带可能有较高的结晶温度。根据X光粉晶衍射数据,计算出南带岩体中的钾长石有序度(δ)为0.01~0.062,明显低于北带岩体钾长石的 δ 值(0.262~0.891)。

表1 阴山地区碱性正长岩主要岩石类型及矿物组成

Fig. 1 Main rock types and mineral constituents of alkaline syenite in Yinshan Area

岩带	岩体	编号	岩石名称	主要和次要造岩矿物	副矿物
	包头东	9401	中粗粒含霓辉正长岩	正长石、霓辉石	磁铁矿、榍石、磷灰石
		9402	中粗粒霓辉正长岩	正长石、霓辉石、霓石	磁铁矿、榍石、磷灰石
		9403	中粗粒含霓石正长岩	正长石、霓辉石	磁铁矿、榍石、磷灰石
		9404	中粗粒霓辉正长岩	正长石、霓辉石	磁铁矿、榍石、磷灰石
		9405	粗粒黑云母霓辉正长岩	正长石、霓辉石、黑云母	磁铁矿、榍石、磷灰石
		9406	中粗粒含霓辉正长岩	正长石、霓辉石、黑云母	磁铁矿、榍石、磷灰石
南带	凉城	9436	细粒石榴石霓辉正长岩	正长石、霓辉石、黑榴石	磁铁矿、磷灰石
		9437	中细粒含斑霓辉正长岩	正长石、霓辉石	磁铁矿、磷灰石
		9438	细粒含霓辉碱长正长岩	正长石、霓辉石	磁铁矿、磷灰石
		9439	细粒含斑碱长正长岩	正长石	磁铁矿、磷灰石
		9440	中细含斑黑云霓辉正长岩	正长石、霓辉石、黑云母	磁铁矿、磷灰石
		9441	中细含斑黑榴碱长正长岩	正长石、黑榴石	磁铁矿、磷灰石
		9442	中细含斑黑云霓辉正长岩	正长石、黑云母、霓辉石	磁铁矿、磷灰石
		9443	中粒含斑霓辉正长岩	正长石、霓辉石	磁铁矿、磷灰石
		9628	黑云母碱长正长岩	正长石、黑云母	磁铁矿、磷灰石
		9631	似斑状含霓霓辉正长岩	正长石、霓辉石、霓石	磷灰石、黑榴石
	黄合少	9417	细粒含霓辉石正长岩	微斜长石、条纹长石、霓辉石	磁铁矿
		9418	中粗粒碱长正长岩	微斜长石、条纹长石	磁铁矿
		9419	伟晶碱长正长岩	伟晶微斜长石、条纹长石	磁铁矿
		9420	细粒似片麻霓辉正长岩	微斜长石、条纹长石、霓辉石	磁铁矿、磷灰石
		9421	中粒霓辉正长岩	微斜长石、条纹长石、霓辉石	磁铁矿、磷灰石
北带	古城	9606	细粒霓辉正长岩	微斜长石、条纹长石、霓辉石	磁铁矿、磷灰石
		9423	细粒石榴石碱长正长岩	条纹长石、石榴石	磁铁矿
		9424	中细粒辉石碱性正长岩	条纹长石、辉石	磁铁矿
		9425	中粒碱长正长岩	条纹长石	磁铁矿
		9426	含黑榴石伟晶正长岩	条纹长石、黑榴石	磁铁矿
		9427	细粒含辉角闪正长岩	条纹长石、角闪石、辉石	磁铁矿、黑榴石
		9428	中粒角闪碱性正长岩	条纹长石、角闪石	磁铁矿、黑榴石
		9429	中粗粒辉碱正长岩	条纹长石、辉石	磁铁矿、黑榴石
		9626	中粗粒辉碱正长岩	条纹长石、辉石	磁铁矿、黑榴石

3.2 辉石

该区碱性岩中的辉石,多为半自形-自形晶,多色性明显, N_g 为黄绿色, N_m 为淡绿色, N_p 为暗绿色。根据辉石的大量化学成分测定,并利用端员组分投图确定该区的辉石为富钠的普通辉石-霓辉石-霓石系列,南带岩体中辉石以霓石、霓辉石为主,北带岩体中则以富钠的普通辉石为主,也有部分霓辉石。

3.3 黑云母

在阴山地区的碱性岩中,黑云母为较次要的造岩矿物之一。电子探针测定表明,该区碱性岩中黑云母均属于镁质黑云母。

表2 阴山地区碱性岩化学分析数据($w_p/\%$)和有关参数及 CIPW 标准矿物计算结果

Table 2 Chemical analyses, related parameters and CIPW norms of alkaline rocks in Yinshan Area

岩体	包头东岩体										凉城岩体										古城岩体										黄合少岩体									
	9401	9402	9403	9405	9406	包头*	9436	9437	9438	9440	9442	9443	9423	9424	9426	9427	9428	9429	古城*	9417	9418	9419	9420	9421	黄合少*															
SiO ₂	64.90	62.8	63.65	62.62	55.80	56.59	60.55	62.66	61.41	63.74	60.13	64.89	66.49	65.99	68.35	61.43	63.81	61.44	61.99	69.44	68.76	68.84	66.44	64.58	64.64															
TiO ₂	0.53	0.79	0.57	0.84	1.15	0.76	0.12	0.67	0.60	0.12	0.59	0.30	0.12	0.18	0.03	0.64	0.64	0.72	0.52	0.03	0.13	0.04	0.31	0.30	0.05															
Al ₂ O ₃	16.14	17.53	17.84	17.36	14.09	15.74	19.82	17.74	17.54	16.80	17.33	17.38	19.44	18.97	19.84	16.55	15.93	15.58	15.29	19.08	18.85	18.95	17.77	17.37	18.54															
Fe ₂ O ₃	3.70	3.24	3.66	3.88	6.00	4.28	2.37	3.78	6.12	3.40	5.46	3.61	0.97	1.75	0.44	2.85	2.86	3.69	5.44	0.85	1.11	0.34	1.16	1.22	1.10															
FeO	0.50	0.80	0.73	1.12	2.96	2.63	0.52	1.18	0.78	0.47	0.56	0.54	0.65	0.42	0.21	3.34	2.97	2.71	1.79	0.36	0.47	0.34	0.98	0.80	0.27															
MnO	0.09	0.09	0.09	0.12	0.20	0.14	0.09	0.15	0.22	0.14	0.15	0.17	0.05	0.07	0.03	0.14	0.14	0.12	0.09	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04															
MgO	0.16	0.46	0.64	0.86	3.43	2.3	0.33	0.54	1.35	0.22	0.54	0.10	0.04	0.05	0.05	1.71	1.35	1.47	0.11	0.15	0.15	0.03	0.67	0.44	0.20															
CaO	2.09	2.14	1.33	1.46	5.12	4.81	3.31	1.14	0.66	3.93	2.61	1.88	1.05	1.52	0.15	4.53	2.87	3.93	3.39	0.11	0.27	0.11	1.90	3.71	0.21															
N ₂ O	2.87	2.96	2.77	3.24	2.71	3.25	3.83	3.11	2.78	3.04	2.98	2.97	2.87	2.83	2.78	3.89	2.65	2.43	2.22	2.55	2.08	2.22	3.13	3.53	2.19															
K ₂ O	6.56	6.43	6.69	6.47	5.50	7.71	5.94	6.66	6.60	6.33	6.31	6.67	6.56	6.94	6.83	3.92	5.79	6.23	9.30	7.21	7.46	7.32	6.58	5.73	12.52															
P ₂ O ₅	0.20	0.18	0.23	0.22	0.55	0.80	0.15	0.26	0.15	0.15	0.22	0.18	0.15	0.14	0.14	0.38	0.32	0.30	0.13	0.14	0.13	0.2	0.18	0.01																
烧失量	1.35	1.75	0.83	1.02	1.41	0.94	2.48	1.18	0.93	0.83	2.16	0.65	0.21	0.21	0.10	0.31	0.20	0.92	0.10	0.42	1.53	0.52	1.81																	
Total	99.97	99.94	99.91	99.94	99.98	99.94	100.00	99.92	99.91	99.93	99.94	99.97	99.80	99.96	99.99	99.98	99.98	99.99	101.50	99.97	99.97	99.98	99.97	100.01	99.96															
K ₂ O+N ₂ O	9.43	9.39	9.46	9.71	8.21		9.77	9.77	9.38	9.37	9.29	9.64	9.43	9.77	9.61	7.81	8.44	8.76	9.76	9.54	9.54	9.54	9.71	9.26																
ϕ	4.06	4.45	4.33	4.81	5.27		5.44	4.86	4.78	4.23	5.04	4.25	3.79	4.15	3.64	3.31	3.42	4.16	3.60	3.53	3.52	4.02	3.97																	
A.R	3.14	2.83	2.95	3.13	2.49		2.46	3.14	3.13	2.65	2.74	3.00	2.71	2.82	2.85	2.18	2.63	2.64	3.09	2.99	3.00	2.95	2.57																	
Q	18.0	14.8	17.1	13.8	9.7	0.0	7.5	14.9	15.5	15.8	11.5	17.2	19.8	18.2	23.8	11.8	17.0	12.9	2.8	26.9	27.6	28.1	17.9	14.5	1.3															
C	0.0	0.8	2.6	1.6	0.0	0.0	0.5	2.4	3.6	0.0	0.0	1.1	3.6	2.8	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	7.1	7.4	2.1	0.0	0.7															
Or	39.3	38.7	39.9	38.7	33.0	46.2	36.0	39.9	39.4	37.7	38.1	39.7	38.9	41.1	40.4	23.2	34.3	37.6	54.4	42.7	44.3	43.9	39.1	34.5	75.8															
Ab	24.6	25.5	23.7	27.7	23.3	23.5	33.2	26.6	23.8	26.0	25.8	25.3	24.3	24.0	23.6	33.0	22.5	20.7	18.6	21.6	17.7	19.1	26.6	30.4	18.5															
An	11.9	13.5	9.5	9.5	10.2	5.6	18.3	8.3	6.2	13.6	15.6	11.4	11.1	11.1	5.0	16.2	14.4	12.7	4.2	0.0	0.9	0.2	9.5	14.9	1.0															
Dx	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	0.0	8.3	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0															
Hy	0.4	1.2	1.6	2.2	8.6	0.0	0.8	1.4	3.4	0.6	1.4	0.2	0.4	0.1	0.1	5.1	5.7	0.4	6.7	0.3	0.4	0.4	2.1	-0.3	2.2															
Mt	0.4	0.6	1.0	1.6	7.0	1.8	1.7	2.4	1.5	1.2	0.6	1.4	1.4	1.1	0.6	4.1	4.2	5.4	1.7	1.2	1.3	0.5	1.7	1.8	0.3															
Il	1.0	1.5	1.1	1.6	2.2	1.5	0.2	1.3	1.2	0.5	1.1	0.6	0.2	0.3	0.1	1.2	1.4	1.0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.6	0.1															
Ap	0.4	0.4	0.5	0.5	1.2	1.8	0.3	0.6	0.3	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.6	0.7	0.7	0.0	2.9	0.3	0.3	0.4	0.4	0.0															

分析方法: K₂O 和 N₂O 用原子吸收法, FeO 用容量法, 烧失量用重量法, 其余均为 ICP-AES 分析。表中带 * 者摘自《内蒙古地质志》。

3.4 富钛石榴石(黑榴石)

在古城和凉城两个碱性岩体中都含少量富钛石榴石, 一般含量为 2% ~ 3%, 个别地段可达 5%, 黑色或暗红褐色, 油脂光泽。偏光镜下观察, 无解理, 高正突起, 而且有的还发育环带构造。经探针分析, TiO₂ 含量在 2.35% 左右, 应为黑榴石。

4 地球化学特征

4.1 稀土元素地球化学特征

阴山地区南北两个岩带碱性岩石的稀土元素测定结果和主要参数列于表 3。由表可知, 南带岩体的稀土元素总量较北带岩体高。在稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 2)上, 不论是南带岩体还是北带岩体, 均为右倾的较平滑的配分曲线。尽管同一岩体中不同岩石的稀土元素丰度不同, 但配分模式大致平行。 δEu 异常不明显, 反映了它们为同源岩浆演化的产物。

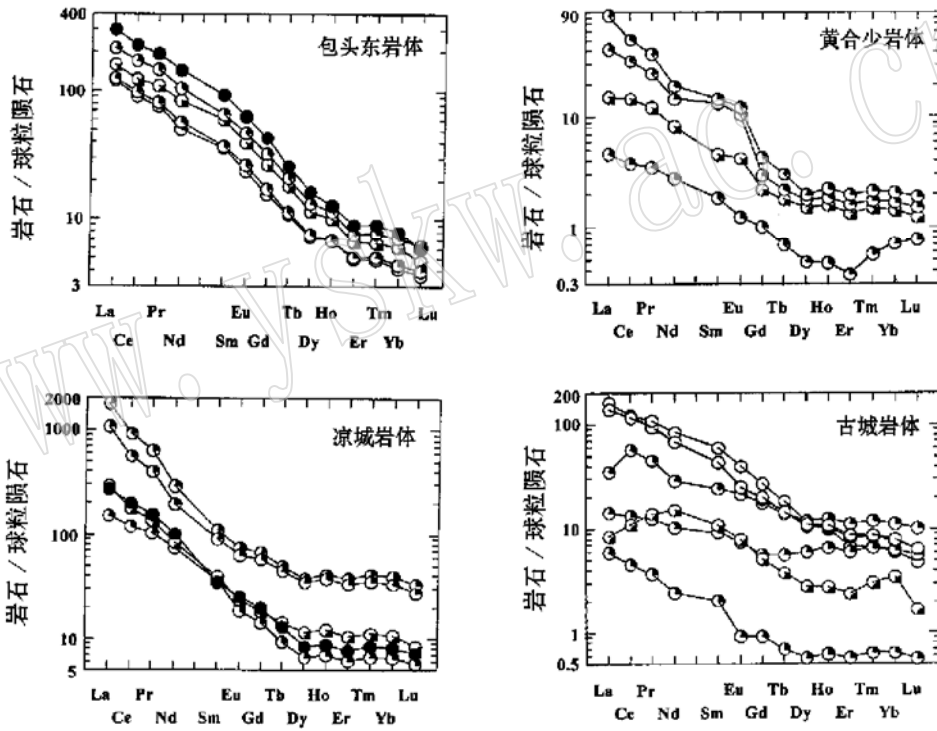


图 2 阴山地区碱性岩的稀土配分模式图(据 Haskin 等, 1968)

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of alkaline rocks in Yinshan Area

4.2 微量元素地球化学特征

阴山地区南北两个岩带中碱性岩的微量元素均用 ICP- AES 测定, 其测定结果列于表 4。

(1) 第一过渡族元素(TME)地球化学特征

过渡族元素中 Fe、Mn、Ti 不属微量元素, 但为了反映过渡族元素变化趋势也将它们列出。在图 3 中可清楚地显示出南北两岩带碱性正长岩的 TME 球粒陨石标准化曲线呈 W 型, 相容元素 Cr、Ni 处于低谷。对于 Cr、Ni 元素的相对负异常可用晶体场理论解释: 在地幔部分熔融过程中, 由于 Cr³⁺、Ni²⁺ 具有较大的八面体择位能力而易于保留在地幔矿物(橄榄石、辉石)中, 致使熔体严重贫 Cr、Ni。Foley 等(1987)也曾指出源于富集地幔的原始岩浆中 Cr、Ni 含量可大大低于一般原始岩浆的含量(Ni= 250 × 10⁻⁶ ~ 300 × 10⁻⁶,

$w_B/10^{-6}$

表3 阴山地区碱性岩的稀土元素丰度及主要参数

Table 3 REE abundances and main parameters of alkaline rocks in Yinshan Area

岩体 样号	南带										北带											
	包头东					凉城					古城					黄合少						
La	9401	9402	9403	9405	9406	9436	9437	9438	9440	9442	9443	9423	9424	9426	9427	9428	9429	9417	9418	9419	9420	9421
Ce	39.03	51.11	40.18	68.89	96.32	63.04	48.52	91.86	576.60	340.20	86.88	4.594	2.718	1.888	11.355	44.36	44.82	1.493	4.826	5.59	13.11	26.87
Pt	71.4	96.9	77.91	136.5	179.1	126.2	95.01	139.8	727.6	438.4	156.7	10.46	8.658	3.581	45.03	93.36	92.66	2.964	11.48	8.557	25.58	40.26
Nd	8.449	12.268	9.01	16.499	21.989	13.59	11.60	15.444	72.122	44.728	17.39	1.404	1.56	0.411	5.092	11.04	10.65	0.3891	1.351	0.791	2.790	4.156
Sm	29.48	48.71	32.88	60.92	93.29	42.77	43.03	48.10	169.1	114.4	58.79	1.704	8.913	1.384	16.65	39.26	39.58	1.627	4.76	2.866	8.45	10.98
Eu	6.656	11.083	6.807	12.145	17.147	3.075	6.674	7.213	20.54	16.90	6.346	6.044	2.010	0.377	4.551	8.112	8.06	0.343	0.848	0.662	2.483	2.7
Gd	1.679	2.825	1.87	3.355	4.486	0.675	1.314	1.670	5.299	4.479	1.776	0.528	0.573	0.065	1.538	1.806	1.775	0.088	0.296	0.108	0.850	0.861
Tb	4.014	6.895	4.405	8.398	11.00	1.736	3.704	4.639	17.19	14.78	5.088	1.455	1.307	0.233	4.542	4.98	5.167	0.255	0.556	0.3073	0.760	1.094
Dy	0.554	0.922	0.572	1.061	1.288	0.233	0.468	0.72	2.518	2.229	0.648	0.286	0.190	0.035	0.701	0.723	0.723	0.035	0.089	0.044	0.110	0.150
Ho	2.530	3.954	2.592	4.601	5.656	1.124	2.274	4.019	12.84	11.91	2.906	2.08	0.961	0.198	4.094	3.629	3.748	0.164	0.518	0.335	0.607	0.674
Er	0.488	0.700	0.484	0.808	0.901	0.215	0.490	0.839	2.883	2.616	0.619	0.465	0.193	0.044	0.885	0.720	0.75	0.033	0.110	0.068	0.130	0.155
Tm	1.114	1.515	1.138	1.724	2.034	0.522	1.381	2.319	8.489	7.533	1.726	1.365	0.527	0.129	2.509	1.843	1.942	0.083	0.304	0.178	0.363	0.444
Yb	0.145	0.200	0.152	0.236	0.272	0.073	0.201	0.333	1.22	1.058	0.25	0.197	0.091	0.019	0.337	0.253	0.26	0.017	0.044	0.028	0.052	0.064
Lu	0.77	1.130	0.83	1.33	1.483	0.421	1.212	1.993	7.29	6.149	1.505	1.182	0.65	0.118	2.109	1.43	1.49	0.133	0.264	0.178	0.313	0.383
Y	0.125	0.162	0.135	0.213	0.201	0.068	0.193	0.286	1.133	0.926	0.244	0.192	0.057	0.019	0.344	0.219	0.218	0.026	0.042	0.03	0.051	0.065
ΣREE	11.78	17.201	12.07	22.279	25.919	2.305	12.27	22.879	67.310	76.70	16.699	9.202	6.172	0.845	21.921	17.37	18.42	0.866	2.034	1.472	3.634	4.579
L/H	160.7	235.5	179.1	305.16	422.6	253.8	215.9	320.69	163.19	100.29	337.77	31.92	28.26	8.464	98.422	210.5	211.9	7.59	25.32	19.82	50.18	88.12
Ce/Yb	7.28	6.821	7.537	7.338	8.252	37.233	9.289	7.997	12.999	7.741	11.045	1.506	2.408	4.699	2.248	6.351	6.038	4.283	5.948	7.035	8.831	11.281
ΣCe/Yb	92.73	85.752	93.867	102.63	120.77	299.76	78.391	70.146	99.808	71.296	104.12	8.849	13.320	30.347	21.351	65.287	62.188	22.286	43.485	48.073	81.725	105.12
ΣEu	1.178	0.921	0.980	0.948	0.936	0.817	0.737	0.828	0.840	0.848	0.826	1.001	1.016	0.624	1.024	0.808	0.788	0.873	1.240	0.698	0.697	1.141

$w_B/10^{-6}$

表 4 阴山地区碱性岩的微量元素丰度

Table 4 Trace element abundances of alkaline rocks in Yinshan Area

岩体 样号	南 带										北 带									
	包头东					凉城					古城					黄合少				
Ba	9401	9402	9403	9405	9406	9437	9438	9440	9442	9443	9423	9424	9426	9427	9428	9429	9417	9418	9419	9420
Rb	4641	3549	4492	4111	5867	5574	4931	3349	5930	3607	4373	922.2	2469	1053	2245	2353	269.5	618.3	1680	1218
Rb	240.89	235.9	234.27	237.58	180.78		300.31	240.45	236.66	242.55		104.86	123.99		127.15	137.38	131.91	117.61	160.88	109.97
Sr	3030.8	3186.1	3235.5	2249.2	3372.6		1848.2	1945.5	1966.1	1956.5		6727.5	6461.8		1645.2	2443.7	169.46	163.54	639.06	1953.8
Ga	12.34	15.79	13.44	18.90	24.97	19.17	15.65	9.989	16	10.89	6.191	7.779	4.948	16.55	15.51	16.82	5.363	7.089	10.68	9.989
Ta	1.986	2.078	2.473	2.341	4.182	3.682	3.577	21.065	2.88	2.275	1.46	0.8023	0.5261	2.92	2.92	3.393	1.039	0.8417	1.71	1.092
Nb	17.29	24.83	19.14	24.70	35.15	23.11	22.31	18.08	22.18	18.35	11.2	10.54	6.439	23.37	23.64	27.61	6.439	13.32	20.2	19.4
Hf	4.349	4.533	4.717	5.115	9.342	6.861	7.136	4.441	6.034	4.502	2.512	2.726	1.409	6.922	6.34	6.83	2.021	2.297	3.032	2.757
Zr	221.3	378.3	249.7	241.9	272.8	347.5	267.7	334.6	365.5	450.4	30.89	38.61	20.59	226.5	28.31	41.18	79.79	48.90	90.08	162.1
Th	10.19	13.05	11.59	15.25	27.69	15.25	16.16	7.959	14.13	8.352	3.865	4.815	2.047	16.92	16.08	17.28	2.473	4.012	6.96	6.714
Cr	25.52	52.26	32.23	30.85	62.62	47.43	41.9	23.25	31.54	30.16	21.87	23.94	19.11	30.85	39.14	27.4	23.94	26.71	23.94	28.78
Ni	9.308	13.38	16.29	21.52	36.07	34.9	30.83	15.71	29.09	28.5	21.52	12.22	17.45	21.52	30.83	23.85	12.80	23.85	19.78	11.05
Co	14.91	12.20	20.33	17.08	25.75	19.52	16.81	9.758	15.45	12.2	10.03	6.776	8.674	19.24	21.14	21.41	8.403	0.30	12.2	10.03
Sc	0	0	1.56	0.624	20.28	9.984	7.176	10.92	12.79	0	1.56	1.56	5.304	14.66	33.38	9.984	6.240	1.56	33.38	7.176
V	95.17	101.5	99.83	128.2	236.7	126.9	104.5	68.06	118.9	67	51.54	76.53	11.72	97.71	132.9	175.2	52.39	49	86.7	85.85
Cu	31.31	24.72	22.25	17.31	38.73	5.768	28.84	14.01	10.71	7.416	0	7.416	14.83	14.01	6.592	7.416	16.48	31.31	9.065	0.8241
Pb	26.17	26.64	25.97	25.70	24.97	30.57	30.57	23.37	32.04	27.64	31.51	26.97	28.84	26.5	26.37	25.9	26.24	26.5	29.91	26.64
Zn	52.46	59.15	49.42	68.26	127.2	95	135.7	102.9	145.4	102.9	17.83	16.61	9.318	84.67	83.45	63.4	20.26	34.23	36.66	45.78
Mo	0.8114	0.8276	0.9983	1.209	0.8144	1.209	1.011	0.9195	0.9064	0.867	0.775	0.8407	1.064	0.8276	0.9195	0.7488	0.775	0.8933	1.209	0.8538

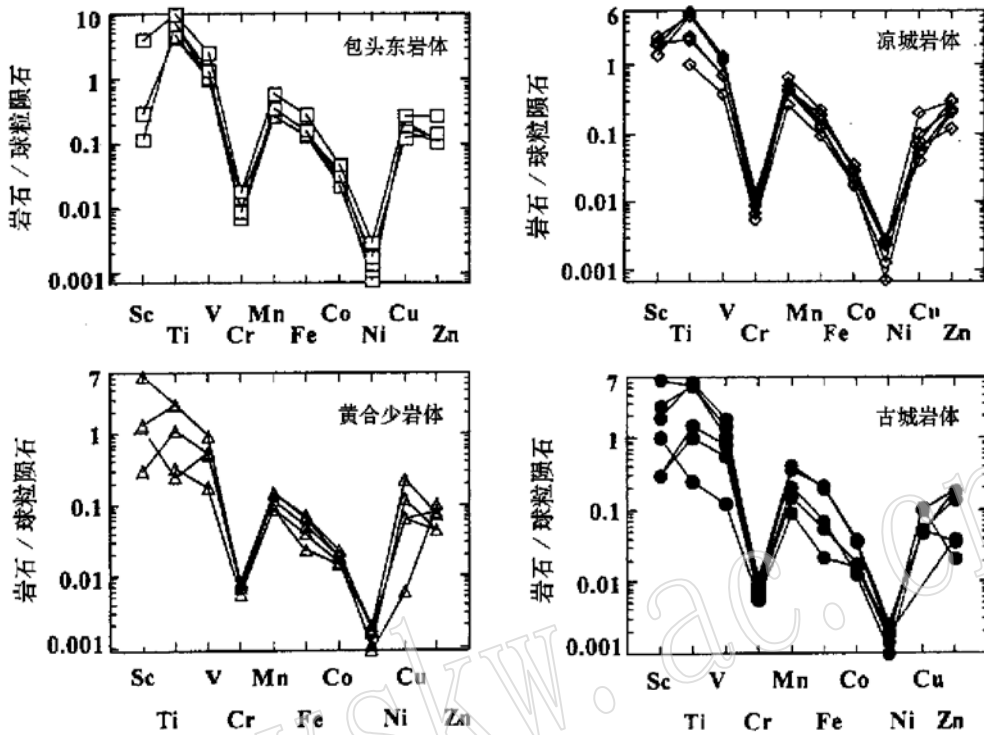


图3 阴山地区碱性岩的TME配分模式图(据Mason, 1971)

Fig. 3 Chondrite-normalized TME patterns of alkaline rocks in Yinshan Area

$Cr = 500 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$)。

据Allegre等(1973)研究,在TME球粒陨石标准化曲线中,地幔岩石的分配曲线趋于平缓,而经地幔派生的岩石的分配曲线则趋于W型,并且从超基性到酸性,随 SiO_2 含量增加,曲线的W形态也更加明显,同源岩石其分异程度愈强者,W形态也愈明显。阴山地区的碱性岩为中性或偏酸性,明显的W形态曲线正好说明了它们为幔源岩派生而来,具有较高的分异程度。但南北两岩带相比差异不大,只是北带岩石相应元素丰度的离散性较南带明显。

(2) 不相容元素特征

大离子亲石元素(LILE)和高场强元素(HFSE)均为不相容元素,在某些地球化学过程中(如部分熔融和结晶分异)它们的行为是相似的。从表4可看出,本区碱性岩富集不相容元素Rb、Ba、Sr,它们的丰度高出球粒陨石达2~3个数量级,甚至更高,Nb、Ta、Zr、Hf和Th的丰度也是球粒陨石的1~2个数量级倍数,但北带相对丰度较低。在不相容元素蛛网图(图4)上可看出,南北两岩带的微量元素曲线具较强的相似性,均以Ba、Rb、K、Sr为峰尖,以Th、Nb为峰谷。差别仅是北带岩石比南带岩石相应元素丰度偏低,各岩石之间相应元素的离散稍大,说明北带岩石遭受了地壳物质的混染。

5 成因探讨

5.1 物质来源

碱性岩的物质来源一直是岩石学家所关注的问题,本文试图通过微量和稀土元素结合同位素地球化学来加以探讨。

阴山地区碱性岩在Th/Yb-Ta/Yb图解(图5)和Zr/Nb-Zr/Y-Y/Nb图解(图6)上,绝大部分样品

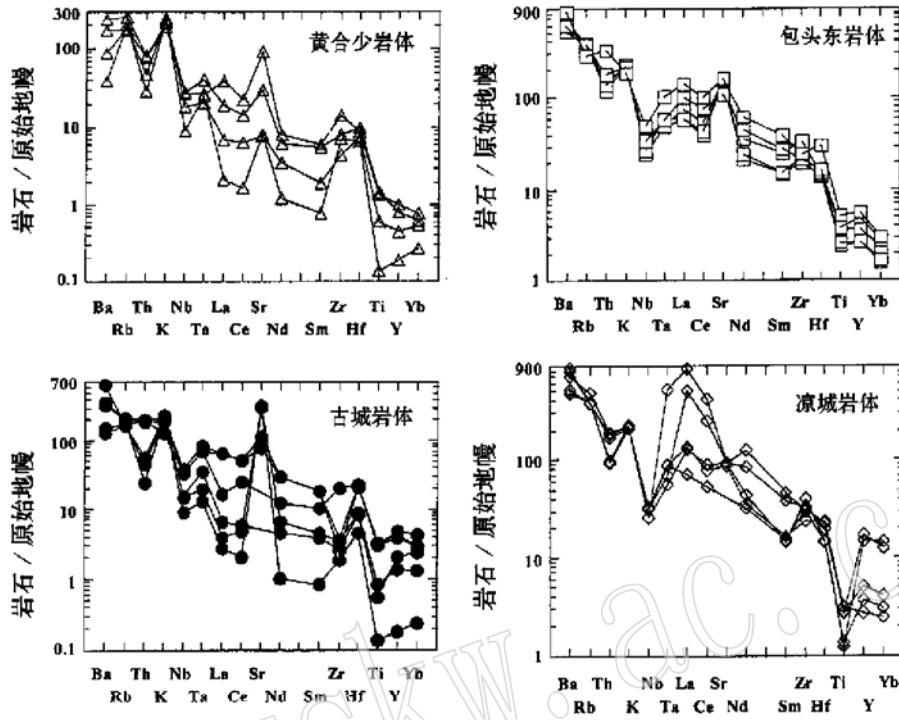


图4 阴山地区碱性岩的微量元素蛛网图(据 Thompson, 1982)

Fig. 4 Trace elements web diagrams of alkaline rocks in Yinshan Area

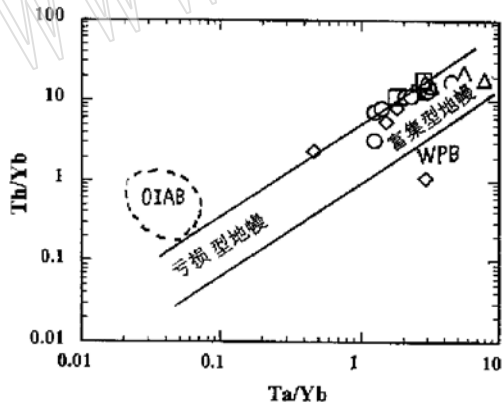


图5 阴山地区碱性岩的 Th/Yb- Ta/Yb 图解(据 Wilson, 1989)

Fig. 5 Th/Yb- Ta/Yb diagram of alkaline rocks in Yinshan Area

□—包头东岩体; ◇—凉城岩体; △—黄合少岩体; ○—古城岩体

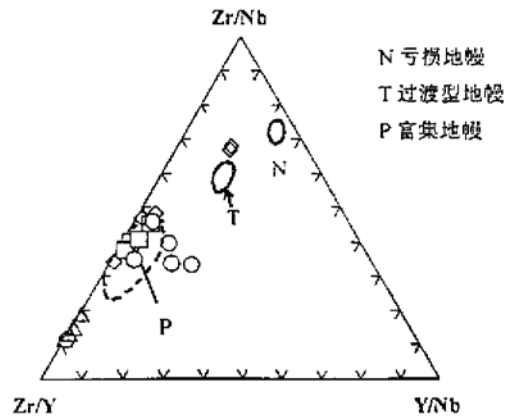


图6 阴山地区碱性岩的 Zr/Nb- Zr/Y- Y/Nb 图(据 Fodor, 1984)

Fig. 6 Zr/Nb- Zr/Y- Y/Nb diagram of alkaline rocks in Yinshan Area

图例同图5

落在富集地幔区, 暗示其物质来源与富集地幔密切相关。在 Yb/Ta- Y/Nb 和 Ce/Nb- Y/Yb 图解(图7)上, 主要落在大洋岛屿玄武岩(OIB)区内及其附近, 也表明其物质来源与大洋岛屿玄武岩的来源相似, 而后

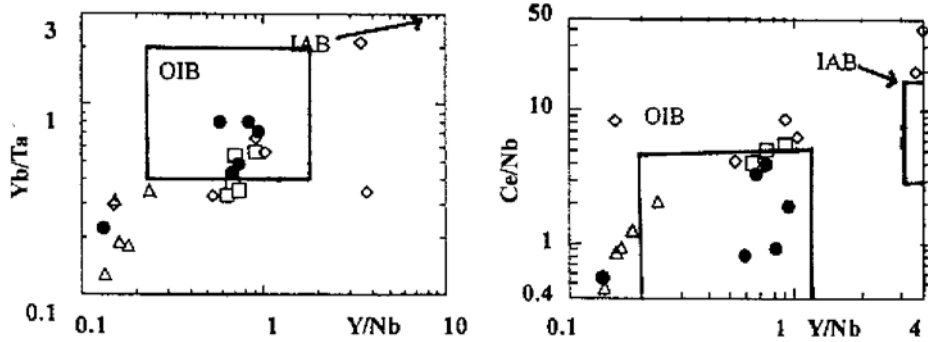


图7 阴山地区碱性岩的 Yb/Ta- Y/Nb 和 Ce/Nb- Y/Nb 图解(据 Eby, 1990)
 Fig. 7 Yb/Ta- Y/Nb and Ce/Nb- Y/Nb diagrams of alkaline rocks in Yinshan Area
 OIB—洋岛玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; 图例同图5

者一般被认为来自软流圈以下,这也说明阴山地区碱性岩可能源于比软流圈更深处。

铅同位素特征和 $\epsilon Nd(t)$ 、 $\epsilon Sr(t)$ 等值是岩石物质来源的重要标志^[5,6]。阴山地区碱性岩的 $\epsilon Sr(t)$ 均为正值, $\epsilon Nd(t)$ 均为负值^[2], 在 $\epsilon Sr(t) - \epsilon Nd(t)$ 图解(图8)上, 均落在第四象限富集地幔化线附近, 这是该区碱性岩源于富集地幔的又一证据。Zartman 等(1981)的地球不同区域铅的结构模式图^[7]适用于确定碱性岩和花岗岩的起源, 钾长石的铅同位素组成, 可被用来探讨碱性岩的物质来源。该区碱性岩钾长石的铅同位素组成为 $^{206}Pb/^{204}Pb = 17.317 \sim 17.982$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.335 \sim 15.557$ ^[2]。在 $^{207}Pb/^{204}Pb - ^{206}Pb/^{204}Pb$ 相关图解(图9)上, 该区南带钾长石铅同位素投影点均落在地幔铅模式线上, 显然它们属地幔成因。而北岩带钾长石投点于地幔与造山带铅模式线之间, 这可能暗示来自地幔的岩浆在上升途中受到了地壳物质的混染。

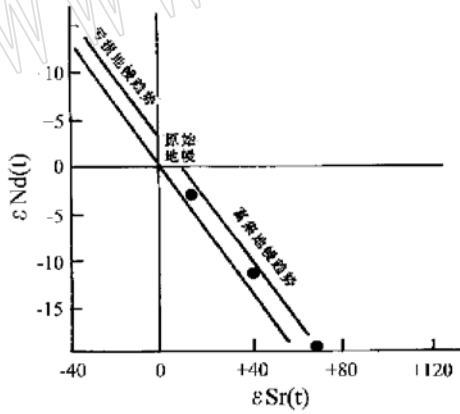


图8 阴山地区碱性岩的 $\epsilon Nd(t) - \epsilon Sr(t)$ 图解
 (据 Faure, 1986)

Fig. 8 $\epsilon Nd(t) - \epsilon Sr(t)$ diagram of alkaline rocks in Yinshan Area

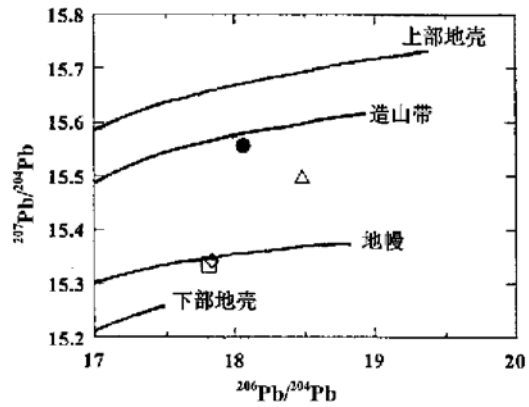


图9 阴山地区碱性岩的 $^{207}Pb/^{204}Pb - ^{206}Pb/^{204}Pb$ 图解(据 Zartman 等, 1981)

Fig. 9 $^{207}Pb/^{204}Pb - ^{206}Pb/^{204}Pb$ diagram of alkaline rocks in Yinshan Area

图例同图5

5.2 构造环境

阴山地区碱性正长岩属于中性和偏酸性的岩石, 从岩相学上可划归为广义的 A 型花岗岩类。Rogers

将A型花岗岩划分为造山后、非造山和碱性环状杂岩体3种类型^[8]。Eby提出将A型花岗岩简化为二分模式,即A₁和A₂两种类型^[9]。A₁型对应非造山板内裂谷或热点地幔柱环境,A₂型则是陆陆碰撞或岛弧岩浆作用产物。显然这两种类型A型花岗岩具有截然不同的构造环境和地球动力学意义。阴山地区碱性岩在Nb-Y-Ce和Nb-Y-3Ga三组分图解(图10)上,除2个样品落入A₂区,其余全部落入了A₁区,这表明阴山地区碱性岩生成于非造山板内裂谷或与热点地幔柱有成因上的联系。

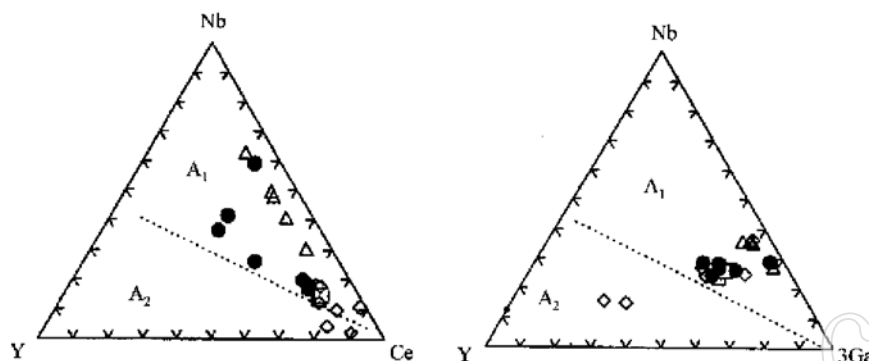


图10 阴山地区碱性岩的Nb-Y-Ce和Nb-Y-3Ga图解(据Eby, 1992)

Fig. 10 Nb-Y-C and Nb-Y-3Ga diagrams of alkaline rocks in Yishan Area

图例同图5

6 结论

(1) 阴山地区碱性侵入岩在空间上分为南、北两条近东西走向的岩带。两岩带岩石均富集轻稀土元素、大离子亲石元素和高场强元素,稀土元素配分曲线及微量元素蛛网图均呈现右倾形态,TME球粒陨石标准化图谱为W型形态。同位素及微量元素地球化学特征都说明该区碱性岩来自富集地幔源并在上升途中遭受到不同程度的地壳物质混染。

(2) 阴山地区碱性岩属A₁型,形成于非造山板内裂谷环境,或与热点地幔柱有成因上的关系,受深部地球动力学系统控制。

(3) 南带SiO₂含量低,碱度高,稀土、微量元素丰度也相对较高,岩石类型以霓辉正长岩为主;北带SiO₂含量高,碱度低,岩石类型以碱长正长岩为主,稀土、微量元素丰度相对也较低。造成南北差别的原因有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 牟保磊, 阎国翰. 燕辽三叠纪碱性偏酸性杂岩体地球化学特征及意义[J]. 地质学报, 1992, 66(2): 108~122.
- [2] 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 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), 2000, 30(4): 383~387.
- [3] Mason B. Hand book of elemental abundance in meteorites[M]. Cordon and Beach: New York, 1971, 55.
- [4] Thompson R N. Magmatism in the British Tertiary volcanic province, Seatt[J]. J. Geol., 1982, 18: 49~107.
- [5] 魏菊英, 王关玉编, 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988, 81~84.
- [6] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992, 147~154.
- [7] Zartman R E and Doe B R. Plumbotectonics—the model[J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135~162.
- [8] Rogers J J W. Trace elements in continental margin magmatism: Part III, Alkaline granites and their relationship to cratonization[J]. Geol. Soc. America Bull., 1990, 92: 57~93.
- [9] Eby G N. Chemical subdivision of the A₁ type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology, 1992, 20:

641~ 644.

Petrogeochemical Characteristics of Indosinian Alkaline Intrusions in Yinshan Area

YAN Guo_han, TAN Lin_kun, XU Bao_liang, MOU Bao_lei, SHAO Hong_xiang,

CHEN Ting_li, TONG Ying, REN Kang_xu, YANG Bin

(Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: Systematic research methods including mineralogy, petrology and geochemistry were used to study the Indosinian alkaline intrusions in Yinshan area. It is concluded that the Indosinian alkaline intrusions in Yinshan area make up two nearly EW-striking rock belts lying in the north and in the south respectively. The southern belt is mainly composed of augite-aegirine syenites, whereas the northern one consists mainly of alkali syenite. Both belts are enriched in LREE, large-ion lithophile elements and high charge density elements. However, the content of compatible elements such as Cr and Ni are very low. Combined with the isotopic characteristics of Nd, Sr, and Pb, the authors have drawn the conclusion that the Indosinian alkaline intrusions of Yinshan area were generated from the enriched mantle, and during their invasion they were contaminated by crustal materials in different degrees.

Key Words: Indosinian alkaline rock; petrogeochemistry; enriched mantle; intraplate rift environment; Yinshan area