

北山地区辉长岩类的地球化学特征及其深部信息

范育新¹⁾ 白云来²⁾ 陈发虎¹⁾

1) 兰州大学西部环境教育部重点实验室,甘肃 兰州,730000 2) 西北石油地质研究所,甘肃 兰州,730000

摘 要 据稀土元素配分曲线可将北山辉长岩类分为 3 组,第 1 组 Σ REE 较大, LREE 富集且发生了较大程度的分馏,第 2 组轻稀土未发生明显的分馏,曲线较为平坦, Σ REE 较低,第 3 组 LREE 亏损, Σ REE 较低。Nb 亏损,指示北山辉长岩类形成于俯冲相关的构造环境, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均大于 0,指示来源于亏损型地幔源区。本文认为北山地区辉长岩产出于活动大陆边缘的不同次一级构造环境,原始岩浆在上升途中遭受了陆壳混染, Sm-Nd 模式年龄不代表岩石的形成年龄。

关键词 微量元素 构造环境 辉长岩类 北山地区

Geochemical Characteristics of Gabbros in Beishan Area and Their Deep Setting Implications

FAN Yuxin¹⁾ BAI Yunlai²⁾ CHEN Fahu¹⁾

1) Key Laboratory of Western Environment Sciences of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu, 730000;

2) Northwest Petrological Institute, Lanzhou, Gansu, 730000

Abstract Being the main type of mafic and ultramafic rocks in Beishan area, the gabbros can be divided into three groups according to the rare earth element patterns. The first group has high concentration of total REE, with the enrichment and obvious fractionation of LREE. The second group with the lower total REE content than the first group has a smooth REE pattern. The third group is slightly depleted in LREE and has the low total REE concentration. The gabbros from Beishan area are obviously enriched in LILE such as Cs, U and Pb and depleted in HFSE like Nb (some samples are depleted in Ta, Ti and Zr), which implies that gabbros are somewhat subduction-related. Both $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ are positive, suggesting that the primary magma was derived from sources of depleted mantle. The obvious linear correlation between ratios of Th/Sm and Th/Nb shows continental hybrid processes. Geochemical characteristics indicate that gabbros were formed at different sub-settings along the active continental margin. The primary magma assimilated the continental wall rock during its migration to the present site, which changed the composition of the primary magma. The gabbros resulted from the evolution of the hybrid magma. The Sm-Nd model age of the depleted mantle (t_{DM}) can not represent the chronological age of the gabbros.

Key words trace elements geo-settings gabbro Beishan area

北山地区岩浆活动较为活跃,自早古生代晚期至晚古生代晚期均有镁铁-超镁铁岩产出(甘肃省地质矿产局,1989)。镁铁-超镁铁杂岩体中辉长岩主要形成于早古生代晚期(独红山、营毛沱、牛圈子、独红山、锡林柯博、双井和玉石山)和晚古生代晚期(马鬃山)^①。不少研究者试图在研究区获得岩体形成的具体年龄,并做了大量的工作,但除在牛圈子岩体的基性熔岩中获得了 463 ± 18 Ma 的等时线年龄

(任秉琛等,2001)外,在其他岩体中得到的年龄都是模式年龄,如黑山含矿复式岩体 t_{DM} 为 $1\,026 \sim 1\,212$ Ma 的 Sm-Nd 模式年龄^②,红柳园辉长岩 t_{CHUR} 为 $1\,027 \pm 45$ Ma 和 $1\,207 \pm 40$ Ma 的 Sm-Nd 模式年龄^③,在咸水井地区 3 个井东南的辉长岩、角闪辉长岩中磷灰石 721 Ma 的 U-Pb 表面年龄(左国朝等,1996)。近年来 1:50000 区调研究发现北山地区基性-超基性岩体的侵位具有多期性。笔者在野

本文由科技部国际合作重点项目(编号 2002CB714004)资助。

第一作者 范育新,男,1975 年生,讲师,在职博士生,主要从事构造地球化学、干旱区环境演变研究, E-mail: yxfan@lzu.edu.cn。

① 1:100 万《甘肃省地质图》和 1:150 万《中华人民共和国甘肃省岩浆岩图》,1990。

② 汤中立等,1996。甘肃省肃北蒙古族自治县黑山镁铁-超镁铁岩区镍铜(铂)找矿研究报告。

③ 杨雨,1999。甘肃北山红柳园地区发现早元古代地层。甘肃地质科技情况(3):39~41。

外考察中也发现即使同一岩体中的岩浆活动也具有多期性,例如大山头岩体中保留了至少两期岩浆活动的反应边结构。但北山地处塔里木板块东北边缘,是亚欧大陆桥的关键地带,对该区地质构造的正确认识直接影响到中亚许多重要构造带的对比连接(左国朝,1996)。因此本文选择该区镁铁-超镁铁杂岩体中的辉长岩,通过对其地球化学、尤其是微量元素和稀土元素地球化学特征的揭示,探讨这些岩石

形成的深部过程。

1 地质特征

1.1 岩体地质特征

北山地区镁铁-超镁铁岩体多呈小透镜状断续出露于早元古代(Pt_1)、前寒武纪(An)和古生代(Pz)地层之中(图1),与围岩呈侵入接触,部分岩体(营毛沱)保留了烘烤边。岩体中的主要岩石类型为辉

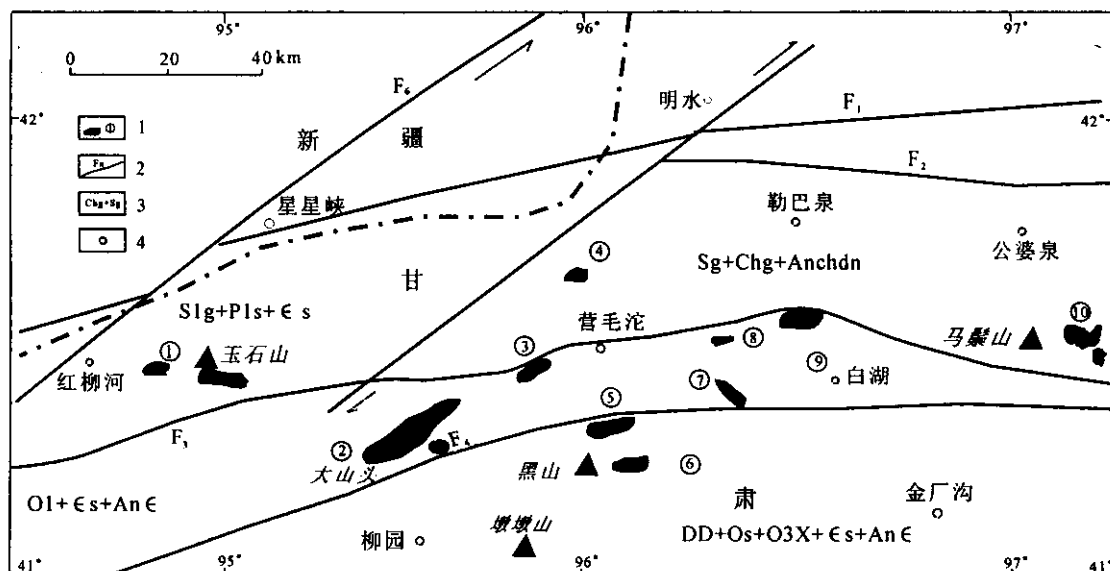


图1 北山地区镁铁-超镁铁侵入岩岩体分布略图

Fig.1 Distribution sketch of mafic and ultramafic in Beishan area

1-岩体及编号 2-主要断裂 3-地层时代 4-居民点 ①玉石山岩体 ②大山头岩体 ③独红山岩体;
④营毛沱山北岩体 ⑤黑山北岩体 ⑥黑山岩体 ⑦锡林柯博岩体 ⑧双井岩体 ⑨牛圈子岩体 ⑩马鬃山岩体

长岩-辉石岩-橄榄岩,辉长岩构成岩体的主要部分,辉石岩和橄榄岩呈条带状出露,各岩体岩相变化不大,界线不明显。

1.2 岩石学特征

辉长岩类是北山地区镁铁-超镁铁杂岩体中的主要岩石类型,由橄榄辉长苏长岩、辉长苏长岩、辉长岩、角闪辉长岩和橄榄角闪辉长岩组成。

2 地球化学特征

2.1 主量元素

北山地区辉长岩类岩石具有高 Al_2O_3 (10.68~20.25)、高 CaO (6.0~21.2) 的特点。除双井辉长岩的里特曼指数(σ)较大,属于碱性系列外,其余岩体中的辉长岩为亚碱性系列, σ 小于 3.3,在 AFM 图(略)上的投影点较为分散,以拉斑系列(TH)为主,同时还存在拉斑系列(TH)。

2.2 稀土元素与微量元素

稀土元素和微量元素测试由中国地质大学(武

汉)壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室采用等离子光谱仪(ICP-MS)在超纯实验条件下完成,测试过程中用标准样品进行了质量监控,测试结果列于表1和图2。

由图2可见,研究区辉长岩总体上可以分为3组,第1组辉长岩(双井、黑山北和独红山岩体) ΣREE 较大, Eu 异常不明显, $LREE$ 富集且发生了较大程度的分馏作用,在微量元素蛛网图上 Cs 、 U 、 Pb 等大离子元素强烈富集而 Nb 、 K 亏损,其中双井辉长岩较为特殊,还表现出了 Ta 和 Ti 亏损的特征;第2组辉长岩(大山头和营毛沱及锡林柯博岩体) ΣREE 较低,轻稀土略微富集且未发生明显的分馏,表现为较为平坦的曲线模式,强烈富集 Cs 、 U 、 Pb 和 K ,明显亏损 Nb 、 Ta 、 Zr 和 Ti ,其中 X-24 和 Da-2 还表现出了 Sr 富集和 Ta 亏损;第3组辉长岩(牛圈子岩体) $LREE$ 亏损, Rb 、 Cs 、 U 、 Pb 的富集而 Nb 、 Ta 、 Zr 、 Ti 、 P 亏损。从微量元素分布特点看,研究区除第1组中的黑山和独红山岩体的辉长岩亏损 Nb 而

表 1 北山地区辉长岩类稀土和微量元素分析数据

Table 1 Analysis result of REE and trace elements of the gabrruite in the Beishan area											10 ⁻⁶
岩石类型	橄榄辉长苏长岩			辉长岩							
	大山头		营毛沱	锡林柯博	双井		独红山	黑山北		牛圈子	
	样品	Da-2	Da-3	YM-11	X-24	SJ-15	SJ-16	DO-9	HSB-19	HSB-21	NQ-36
La	5.54	4.44	2.50	3.19	13.42	17.90	15.43	22.5	18.68	1.16	
Ce	13.93	12.23	5.92	8.82	36.95	44.52	38.52	54.2	49.73	2.73	
Pr	1.88	1.73	0.98	1.28	5.70	6.29	5.71	7.35	6.91	0.51	
Nd	8.18	8.12	4.49	6.56	26.93	27.64	25.16	33.7	31.28	2.51	
Sm	1.87	2.25	1.22	1.90	6.97	6.73	6.12	7.86	7.75	0.95	
Eu	1.00	0.94	0.59	0.92	2.36	2.17	2.05	2.85	2.63	0.50	
Gd	1.86	2.11	1.30	1.91	6.03	5.78	5.74	7.14	6.73	0.98	
Tb	0.33	0.39	0.25	0.40	1.14	1.13	1.08	1.33	1.33	0.23	
Dy	2.52	2.87	1.81	2.76	6.64	6.75	6.64	7.75	7.53	1.67	
Ho	0.49	0.59	0.36	0.54	1.25	1.41	1.22	1.42	1.37	0.35	
Yb	1.47	1.57	0.96	1.55	2.72	3.52	2.85	3.36	3.38	0.92	
Lu	0.20	0.21	0.12	0.22	0.35	0.48	0.37	0.45	0.44	0.13	
ΣREE	39.25	37.46	20.51	30.03	110.47	124.31	110.88	154.24	137.77	12.64	
δEu	1.62	1.29	1.43	1.47	1.09	1.04	1.04	1.14	1.09	1.58	
Ba	96.57	69.87	101.09	273.69	498.76	368.43	480.78	144	218.04	24.20	
Rb	7.45	4.94	28.57	7.00	15.82	95.52	19.24	13.9	21.23	23.05	
Cs	0.71	0.29	0.85	0.99	2.17	2.51	2.58	0.44	0.48	0.28	
Th	0.95	0.68	0.60	0.43	2.12	2.64	3.42	3.28	3.62	0.55	
Nb	3.98	2.34	0.88	3.18	20.14	9.66	15.47	31.2	25.82	0.62	
U	0.27	0.29	0.25	0.19	0.98	0.74	1.16	0.84	1.03	0.14	
Ta	0.19	0.11	0.05	0.16	1.00	0.44	0.78	1.33	1.26	0.04	
K	1202.90	829.58	1327.33	663.67	1451.77	5516.73	1866.56	1534.7	1493.25	456.27	
Pb	6.71	4.90	6.67	4.86	9.24	13.12	6.43	19.3	5.90	3.94	
Sr	307.88	271.20	328.14	246.48	231.17	362.79	250.83	286	251.86	131.38	
Zr	56.26	48.39	18.32	43.86	195.11	203.76	158.96	205	202.38	11.19	
Hf	1.45	1.38	0.60	1.20	5.19	4.46	4.44	5.25	5.51	0.40	
P	480.07	436.42	130.93	305.50	1134.70	1571.13	1003.77	1352.9	1221.99	87.28	
Ti	7493.74	4496.25	2398.00	6654.44	17265.58	13788.49	14028.29	19903.4	18104.88	2158.20	

注 :分析测试由中国地质大学(武汉)壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室完成 ;分析方法均为 ICP-MS。

不亏损 Ta 和 Ti 外 ,其他辉长岩均存在 Nb、Ta、Ti 亏损的特点。

2.3 Sm-Nd 同位素组成

针对第 2 组样品 ,在大山头岩体和马鬃山岩体中采集了 Sm-Nd 同位素样品 ,送国家地质实验测试中心进行了 Sm-Nd 同位素组成分析 ,实验在 MAT-261 质谱仪上进行 ,并采用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd 为 0.7219

进行质量分馏校正 ,流程空白为 10⁻¹⁰ ,表 2 列出了测试结果。

由测试结果看 ,Sm/Nd 比值和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 较为集中 ,但 Sm、Nd 浓度变化较大。Sm/Nd 为 0.2338 ~ 0.2836 ,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 为 0.512659 ~ 0.512757 ,这些比值与 Lr Antilles 和美国西部与俯冲有关火山岩的对应值(Rollison ,1993)相似。利用

表 2 北山地区辉长岩类 Sm-Nd 同位素组成

Table 2 Sm-Nd isotopic composition of gabbride in Beishan region												10 ⁻⁶
样号	产地	岩石	Sm	Nd	Sm/Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	1σ	t _{DM}	ε _{Nd} (0)	ε _{Nd} (t)	
Mz-29	马鬃山	辉长岩	3.653	15.62	0.234	0.1415	0.512659	15	1062 ± 15	0.4096	7.94	
Da-2	大山头	橄榄辉长苏长岩	7.731	6.104	0.284	0.1716	0.512757	11	1421 ± 40	2.321	6.92	
Da-3	大山头	苏长岩	2.135	7.778	0.274	0.166	0.512718	7	1379 ± 19	1.561	7.01	

注 Sm-Nd 同位素分析由中国地质科学院国家地质实验测试中心 2001 年在 MAT-261 质谱计上进行 ,质量分馏采用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正 ,流程空白为 10⁻¹⁰。

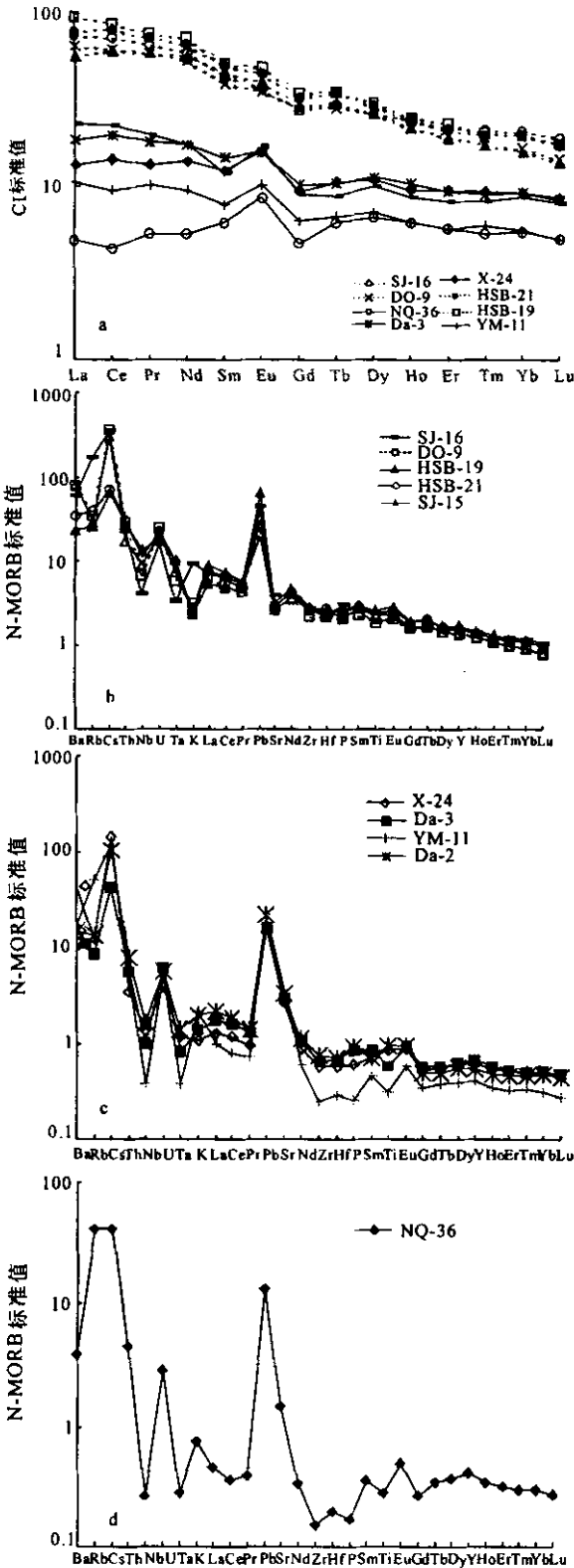


图2 北山地区辉长岩类稀土元素 CI 标准化和微量元素 N-MORB 标准化蛛网图 (CI, N-MORB 标准值据 Sun 等, 1989)

Fig.2 Chondrite normalized diagram of REE and N-MORB normalized spiderdiagrams of trace elements for gabbro in Beishan area (standard values for CI, N-MORB 万方数据 from Sun et al., 1989)

测得的 t_{DM} 计算得到的单个样品的钕同位素初始比值 $I_{Nd}(t)$ 为 $0.511155 \sim 0.51167$, $\epsilon_{Nd}(0)$ 为 $+0.4096 \sim +2.321$, $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 $+6.92 \sim +7.94$ 。

3 讨论

3.1 岩浆源区

大多数研究者认为 ϵ_{Nd} 大于 0 指示岩浆导源于亏损地幔, 小于 0 指示岩浆导源于大陆壳或富集地幔, 接近于 0 指示岩浆导源于未亏损地幔(许荣华等, 1985; 李昌年, 1992; 陆松年, 1996; 朱炳泉, 1998; 郭新生等, 2001; Wilson, 1989; Rollison, 1993)。从研究区实测辉长岩的 Sm-Nd 同位素组成看, 无论现今值 $\epsilon_{Nd}(0)$ 还是初始值 $\epsilon_{Nd}(t)$ 均大于 0, 结合稀土元素略微富集的特点, 本文认为研究区第 2 组辉长岩来源于亏损型地幔源区。

3.2 岩体形成年龄

此次研究重点对大山头和马鬃山复式杂岩体进行了 Sm-Nd 年龄测定, 但没有获得等时线年龄, 仅得到了大山头 t_{DM} 为 1283 ± 19 Ma 至 1666 ± 37 Ma (其中辉长岩为 1379 ± 19 Ma 至 1421 ± 40 Ma) 和马鬃山 t_{DM} 为 1062 ± 15 Ma 至 1749 ± 24 Ma 的模式年龄 (其中辉长岩为 1062 ± 15 Ma)。

Sm-Nd 模式年龄并不代表辉长岩形成的年龄值(左国朝, 1996), 而是反映了组成岩石的物质由未分异的球粒陨石地幔 (CHUR) 或亏损地幔 (DM) 发生部分熔融并分离到现在的时间, 因此在该区所获得的模式年龄难以反映岩体侵位的真实时间, 很可能反映了北山地区自中元古代时期就出现了一次构造热事件, 在此次热事件中亏损地幔源区发生部分熔融, 熔融岩浆在时隔几百万年之后的加里东时期才侵位上升, 形成研究区的镁铁-超镁铁质岩体。

3.3 构造环境及岩浆成因

3.3.1 构造环境 利用分布较广的玄武岩和花岗岩研究板块运动机制及岩浆演化过程已较成熟, 而通过辉长岩研究其产出的构造环境难度较大, 目前还很薄弱。然而辉长岩和玄武岩作为基性岩浆岩的两种产出状态, 尽管在结晶程度上存在差异, 但都经历了大致相同的岩浆过程, 在化学成分、尤其是微量元素组成上具有一定的一致性。前文已论述了研究区的辉长岩来源于亏损型地幔源区, 岩浆在上侵过程中可能发生了陆壳物质的混染作用。如能确切证实如此地质作用的存在, 则就不难恢复研究区辉长岩的产出环境和成岩过程。下文将通过微量元素特征探索研究区辉长岩的产出环境。

尽管研究区辉长岩普遍发生了蚀变作用, 但在

蚀变过程中较稳定的元素基本不丢失,可用于恢复岩体形成的构造环境。难溶于水的高场强元素如 Nb-Ta、Ti、Zr-Hf 等活动性较弱,在风化和蚀变作用过程中往往保存于蚀变残留物中,是构造环境判别中最重要和常用的元素(邓晋福等,1996;马英军等,1999)。与相邻元素相比,板内镁铁质岩浆岩不亏损 Nb 和 Ta,Nb 和少量 Ti 的亏损是与俯冲相关岩石的一个典型特征(Thirlwall,1994;Keppie,2000;Anders,2001)。该区辉长岩都亏损高场强元素 Nb,绝大多数辉长岩还同时亏损 Ta、Zr 和 Ti,表明研究区岩体不可能形成于板内环境,而与大陆边缘的俯冲作用密切相关。前人根据微量元素的投影结果,认为牛圈子岩体中的基性熔岩形成于大洋环境(任秉琛等,2001),但此次研究显示该岩体中的辉长岩(Nb/La) N 小于 1,Ce/Pb 为 0.6925,界于陆壳与大洋壳的对应值(Sun,1989;Rudnick 等,1995;赵振华,1995)之间,表现为陆缘弧火山岩的微量元素特征,反映该岩体产出活动大陆边缘张裂环境。综上所有微量元素特征,本文认为研究区辉长岩产出同一大地构造背景(活动大陆边缘)的不同次一级构造环境,经历了不同的形成过程,其中第 3 组(牛圈子岩体)辉长岩是活动大陆边缘张裂作用的结果,代表新生洋壳的出现。

3.3.2 岩浆成因 Eu 异常主要由长石所控制,但角闪石、榍石、单斜辉石、斜方辉石和石榴石也能对熔体中的 Eu 异常起作用,只是后述矿物与长石的作用相反(Rollinson,1993)。在稀土元素配分模式图上,北山地区辉长岩都表现出了 Eu 的微弱—中等富集,表明在岩浆演化过程中没有发生长石的明显分异作用,而是发生了辉石族矿物的结晶作用,这与其岩石学特征是吻合的。

稀土和微量元素特征暗示研究区辉长岩在形成过程中可能存在一定程度的陆壳物质混入。由于铝在表生环境中不易溶于水而损失(牟保磊,1999),所以基本上反映了岩浆作用过程的信息。该区辉长岩的 Al_2O_3 很高,高于全球辉长岩中的平均含量 9.1%(牟保磊,1999)和原始上地幔中的对应值 3.3%~4.75%(孙卫东,1998),这种特征不可能来自于岩浆的熔融过程,很可能是岩浆在上升途中受到陆壳围岩混染所致。为了验证这一过程的存在,本文对微量元素进行了相关分析,因为已有的研究显示,Th/Sm 与 Th/Nd 之间的相关性是地幔岩浆与地壳物质混和的结果(Maier 等,2000)。该区辉长岩类在 Th/Sm-Th/Nd 之间具有相关性(图 3),表明研究区辉长岩在形成过程中确实经历了壳幔物质的混和作用,原始岩浆在上升途中受到了陆壳混染。

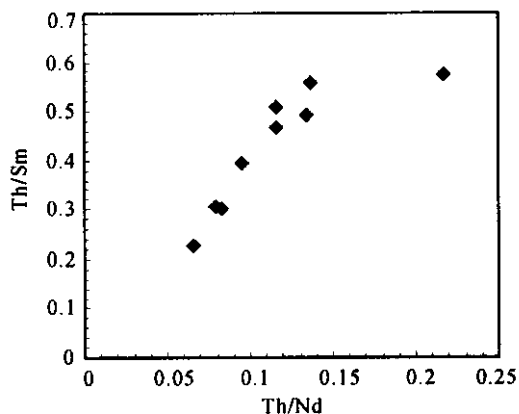


图 3 辉长岩类的 Th/Nd-Th/Sm 变异图

Fig. 3 Diagram of Th/Sm vs Th/Nd for gabbroite

4 初步结论

(1)从北山地区辉长岩中所得 Sm-Nd 的模式年龄(t_{DM})并不代表辉长岩形成的年龄,而是反映北山地区中元古代出现过一次较长时间的构造热事件,该区岩浆活动存在明显的多期性,出露的辉长岩不是同期岩浆作用的产物。

(2)北山地区辉长岩形成于同一大地构造背景不同次一级构造单元,很可能形成于加里东期,是活动大陆边缘裂解阶段的产物,牛圈子辉长岩为该活动大陆边缘裂解形成的新生洋壳的一部分。

(3)北山地区的辉长岩来自亏损型地幔源区,原始岩浆在上升途中受到了陆壳混染。

参考文献

- 邓晋福,赵海岭,罗照华等. 1996. 玄武岩反演软流层地球化学与地幔流体. 见杜乐天. 1996. 地幔流体与软流层(体)地球化学. 北京: 科学出版社, 58~96.
- 甘肃省地质矿产局. 1989. 中华人民共和国地质矿产部地质专报——区域地质第 19 号甘肃省区域地质志, 北京: 地质出版社, 1~692.
- 郭新生,陈江峰,张翼等. 2001. 桂东南富钾岩浆杂岩的 Nd 同位素组成: 华南中生代地幔物质上涌事件. 岩石学报, 17(1): 19~27.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~195.
- 陆松年,杨春亮,蒋明媚等. 1996. 前寒武纪大陆地壳演化示踪. 北京: 地质出版社, 1~156.
- 马英军,刘丛强. 1999. 化学风化作用过程中的微量元素地球化学——以江西龙南黑云母花岗岩风化壳为例. 科学通报, 44(22): 2433~2437.
- 牟保磊. 1999. 元素地球化学. 北京: 北京大学出版社, 1~227.
- 任秉琛,何世平,姚文光等. 2001. 甘肃北山牛圈子蛇绿岩钼-锆同位素年龄及其大地构造意义. 西北地质, 34(2): 21~27.

孙卫东,支霞臣,彭子成等. 1998. 原始上地幔的 Os 同位素组成. 科学通报 43(17):1866~1869.

许荣华,张宗清,宋鹤彬等. 1985. 稀土地球化学和同位素地球化学新方法. 北京 地质出版社,1~159.

赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理. 北京 科学出版社,238.

朱炳泉等. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化. 北京 科学出版社,1~330.

左国朝,李茂松等. 1996. 甘蒙北山地区早古生代岩石圈形成与演化. 兰州 甘肃科学技术出版社,1~120.

Anders L, Anderson UB, Lundqvist T et al. 2001. Evidence of crustal continuation of mafic rocks associated with rapakivi rocks: an example from the Nordingra complex, Central Sweden. Geol. Mag., 138(4):371~386.

Keppie J D, Dostal J, Dallmeyer R D et al. 2000. Superposed neoproterozoic and silurian magmatic arcs in central cape Breton Island. Canada: geochemical and geochrological constraints. Geo. Mag., 137(2):137~153.

Maier W D, Ardnt N T, Curl E A. 2000. Progressive crustal contamination of the Busheveld complex: evidence from Nd isotopic analysis of cumulate rocks. Contrib. Mineral Petrol., (140):316~327.

Rollison H R. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman: Scientific & Technical Limited, 1~351.

Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. Rev. Geophys., 33:267~309.

Sun S S, Mc Donough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In saunders, A. D., Norry, M. J. (ed), Magmatism in the oceanic basalts. Geological Society Special Publishing House, 42:313~345.

Thirlwall M F, Smith T E, Graham A M et al. 1994. High field strength element anomalies in arc lavas: Sources or Process? J. Petrol., 35(3):819~838.

Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis. London: Unwin Hyman Ltd., 1~446.