

青藏米巴勒地区中新世钠质方沸石(霞石)响岩中单斜辉石环带研究:对岩浆-构造演化的启示*

赵文霞¹ 于丽芳^{1,2} 陈建林³ 郭倩¹ 王保弟³

ZHAO WenXia¹, YU LiFang^{1,2}, CHEN JianLin³, GUO Qian¹ and WANG BaoDi³

1. 中山大学测试中心, 广州 510275

2. 广东省地质局七一九地质大队 肇庆 526020

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. Instrumental Analysis and Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. No. 719 Brigade of Bureau of Geology of Guangdong Province, Zhaoqing 526020, China

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2011-04-01 收稿, 2011-05-28 改回.

Zhao WX, Yu LF, Chen JL, Guo Q and Wang BD. 2011. The zoning structure of clinopyroxene phenocrysts in the Miocene sodium analcime (nepheline) phonolite in Mibale area, Tibet: Implications for the magmatic and tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7):2073–2082

Abstract Sodium analcime (nepheline) phonolites in Mibale area of Tibetan Plateau contain abundant clinopyroxene phenocrysts which show the normal, reverse or oscillatory zoning patterns. The normal zones increase in FeO, Na₂O, Al₂O₃ and TiO₂ but decrease in Mg[#], MgO, Cr₂O₃ from core to rim, which indicates the normal magmatic evolution of fractional crystallization. The reverse zone have increasing Mg[#], MgO and Cr₂O₃ but decreasing FeO, Na₂O and Al₂O₃, indicating that the sodium analcime (nepheline) phonolite had been mixed or contaminated by the ultra-potassic or potassic magmas, and that both phonolite and potassic-rich rocks might have different parental magmas. The clinopyroxenes with oscillatory zones were probably the result of multi-stage magmatic mixing since that Na₂O, Al₂O₃, TiO₂ and Cr₂O₃ vary between normal and reverse zone clinopyroxenes as well as Mg[#] within the range of the phenocryst and the matrix clinopyroxenes. The peralkaline sodium magmas erupted at 13 ~ 12Ma in the area, corresponding to a temporary tectonic transformation, which suggests a typical intracontinental extensional setting.

Key words Zone; Clinopyroxene; Nepheline phonolite; Miocene; Tibetan Plateau

摘要 在拉萨地块中部米巴勒地区产出的中新世钠质方沸石(霞石)响岩中的单斜辉石发育大量环带结构,环带结构包括正环带、反环带和韵律环带。其中正环带结构从核部到边部 Mg[#]、MgO、Cr₂O₃ 呈逐渐降低趋势,而 FeO、Na₂O、Al₂O₃、TiO₂ 呈逐渐升高的趋势,它反映了岩浆正常结晶的历史。反环带结构中 Mg[#]、MgO、Cr₂O₃ 从核部到边部呈升高的趋势,FeO、Na₂O、Al₂O₃ 的含量总体上呈降低趋势,本文认为响岩中单斜辉石的这种环带结构是受到了和它共存的钾质-超钾质火山岩岩浆混合或混染所致,两种岩石应是各自独立的母岩浆的结晶产物。具韵律环带结构的单斜辉石从核部到边部出现成分规律性波动,Na₂O、Al₂O₃、TiO₂、Cr₂O₃ 含量的变化在正反环带的范围内, Mg[#] 值的变化范围较小,在正环带斑晶和基质的范围内,它是岩浆多次混合作用的结果。该地区钠质过碱性岩的出现可能指示青藏高原在这套火山岩喷发时(13 ~ 12Ma)构造体制发生了显著的改变,进入到一个典型的陆内伸展阶段。

关键词 环带;单斜辉石;霞石响岩;中新世;青藏高原

中图法分类号 P578.954; P588.15

* 本文受国家自然科学基金项目(40772046)和中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-Q04)联合资助。

第一作者简介:赵文霞,女,1962年生,博士,副研究员,岩石矿物学专业, E-mail: zhaowx@mail.sysu.edu.cn

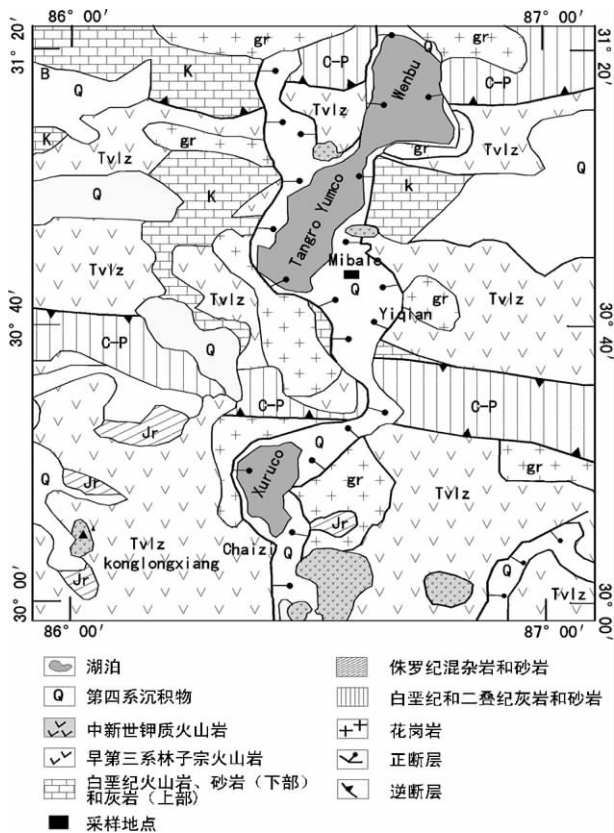


图1 当惹雍错地区地质简图(据 Ding *et al.* 2003 修改)
Fig. 1 Sketch geological map of Danggreyong Co (modified after Ding *et al.*, 2003)

本文报道了在拉萨地块中厘定出的与钾质-超钾质火山岩共生的一套钠质过碱性火山岩及其在该钠质过碱性火山岩中普遍发育的单斜辉石环带结构。众所周知,造岩矿物的成分取决于岩浆的化学成分和结晶环境,矿物成分、结构和矿物组合的变化可以反映成岩环境及其变化,因此可以利用矿物成分变化特征来探讨其岩石成因及其岩浆演化机制。岩浆从产生到喷发结晶的过程中会发生分异、混合或混染作用等,这些复杂的过程往往记录在斑晶等矿物的成分变化上(Yang *et al.*, 1999; Huang *et al.*, 2010)。本文对米巴勒地区新识别出的中新世富钠方沸石(霞石)响岩中的单斜辉石进行详细的矿物学工作,以期深入探讨其岩浆演化过程等。

1 地质背景及岩石学特征

当惹雍错和许如错这两个地区湖泊位于拉萨地块中部的南北向裂谷中,属于南北向地堑的一部分。在当惹雍错两侧的亚前、米巴勒、仪仟等地有中新世以来的火山-侵入活动,火成岩空间分布总体呈南北向串珠状展布,岩性有白榴石响岩、碱玄岩、粗安岩、碱性粗面岩、安山岩、凝灰岩等。早期为粗面质-碱玄质岩浆的喷溢和侵入,晚期为碱质岩浆的喷溢和爆发(赵志丹等, 2006)。

本文研究的钠质方沸石(霞石)响岩位于当惹雍错的东侧的米巴勒地区(图1),其与钾质-超钾质粗面岩共存2种火山岩呈互层产出在1个具有多次喷发旋回的火山岩剖面上。野外调查表明在该火山剖面上可识别出10余次喷发的火山岩,以钾质-超钾质粗面岩为主,其中夹有5次喷发的钠质方沸石(霞石)响岩。钠质方沸石(霞石)响岩呈灰黑色,对其进行的X射线粉晶衍射(中国科学院广州地球化学研究所,仪器型号为: Bruker D8 ADVANCE)显示,钠质方沸石(霞石)响岩的主要组成矿物为方沸石、镁橄榄石、透辉石、金云母和少量磁铁矿(图2、图3)。通过偏光显微镜观察,响岩呈斑状结构,斑晶主要为透辉石(约15%~20%),金云母(约5%)和橄榄石(约5%)。透辉石斑晶一般呈自形-半自形,可以分成两类,一类颗粒较大且具有明显的成分环带,另一类不具成分环带。橄榄石为半自形粒状,裂理发育;金云母呈黄褐色,片状。基质呈微晶,主要由方沸石、透辉石、磷灰石、磁铁矿等组成,少量样品含透长石。从晶体形态来看,方沸石为等轴晶系的矿物,其应该显示该矿物特有的四角三八面体或与立方体的聚形,但在薄片和电子探针背散射电子图片中显示该矿物出现有长柱状形或者六角状晶形(图3、图4)。根据其电子探针分析显示的特征,结合X射线粉末衍射测试结果分析,其应该是由碱性岩特征矿物霞石蚀变而来,而部分方沸石仍保留有霞石六方晶系的晶形。方沸石(霞石)的出现表明了其岩浆是富钠贫硅的,明显不同于共生的富钾的粗面岩。

2 单斜辉石的环带特征

本文主要对钠质方沸石(霞石)响岩中的单斜辉石进行详细的矿物学研究,矿物成分(表1、表2)分析在中山大学电镜室利用日本电子JXA-8800R型电子探针分析仪进行,加速电压15kV,电子束流 2×10^{-8} A,电子束径 $1 \mu\text{m}$,元素峰位的分析时间为10s(钾、钠易迁移元素分析时间为7~8s),ZAF校正,分析误差小于3%。

电子探针及背散射电子图观察表明,单斜辉石斑晶的成分变化复杂,环带结构多样。大部分的单斜辉石从核部到边部 $\text{Mg}^{\#}$ 升高,为反环带结构;少量辉石从核部到边部 $\text{Mg}^{\#}$ 降低,为正环带结构。总体上,正、反环带单斜辉石的 Na_2O , Al_2O_3 的含量与 $\text{Mg}^{\#}$ 呈负相关,而 Cr_2O_3 与 $\text{Mg}^{\#}$ 呈正相关。

2.1 单斜辉石的正环带结构

具正环带结构的辉石核部相对富镁(15.61%~17.39%)贫铁(2.90%~4.22%), $\text{Mg}^{\#}$ 值的变化范围为78.69~85.42,并具有较高的 TiO_2 (0.18%~0.51%)和 Al_2O_3 (0.86%~1.96%),端元组分为 $\text{Wo}_{(46.82-49.29)}-\text{En}_{(42.79-47.17)}-\text{Fs}_{(4.48-6.54)}$,其 Na_2O 的含量和 Cr_2O_3 的含量分别为0.14%~0.71%和0.08%~0.42%。边部相对富铁(4.01%~7.50%)贫镁(13.65%~16.30%), $\text{Mg}^{\#}$ 值的变化

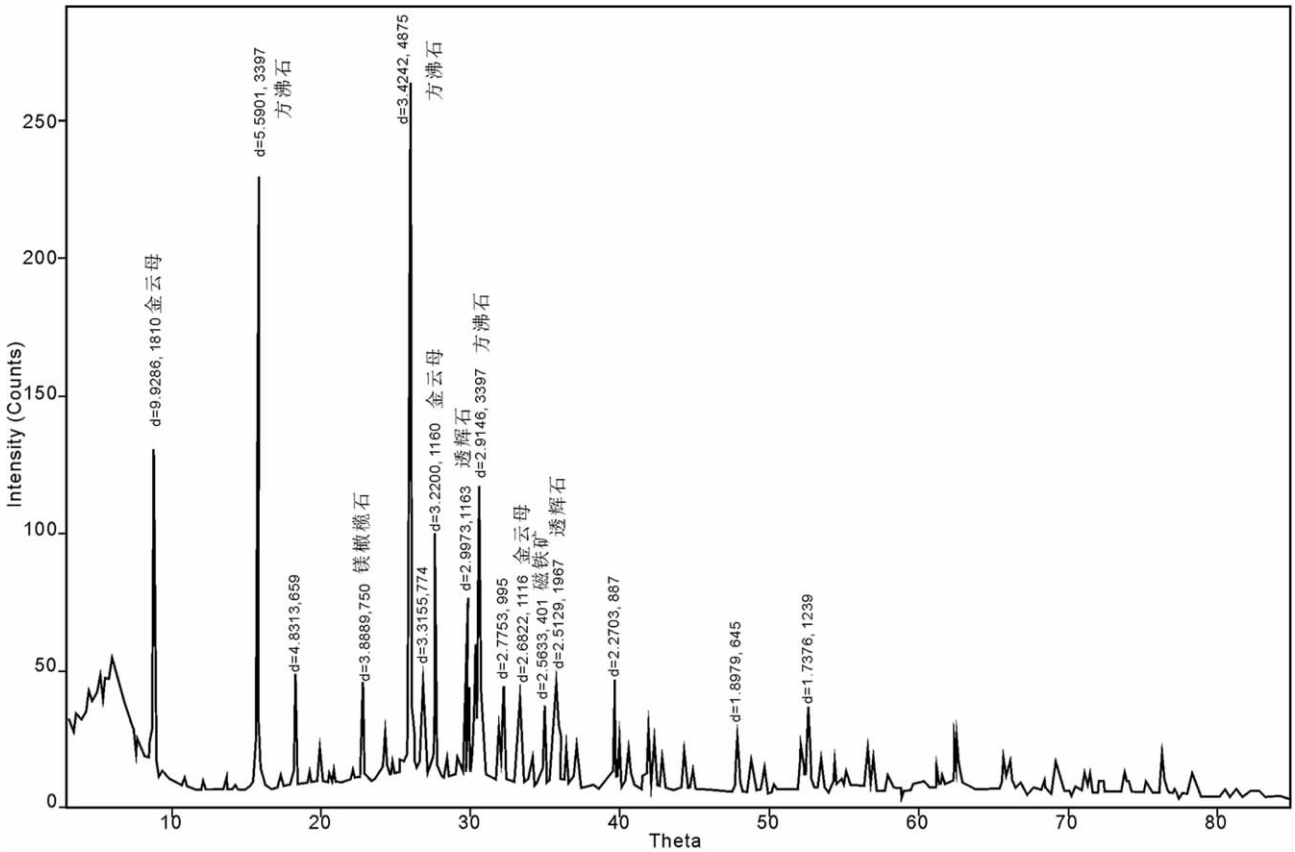


图2 钠质方沸石(霞石)响岩 X 射线衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction diagram of sodium analcime (nepheline) phonolite

表1 方沸石(霞石)响岩中斑晶单斜辉石电子探针成分含量(wt%)

Table 1 The chemical composition of clinopyroxene phenocrysts in sodium analcime (nepheline) phonolite (wt%)

测点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Wo	En	Fs	Mg [#]
CM10-04-09	54.57	0.29	0.53	3.19	0.20	0.11	18.05	22.99	0.21	0.01	100.09	45.04	49.20	5.03	85.00
CM10-04-09	54.17	0.32	0.50	3.57	0.21	0.21	17.87	22.82	0.16	0.01	99.84	44.82	48.81	5.79	83.36
CM10-04-09	54.94	0.22	0.36	3.74	0.12	0.22	17.76	22.97	0.14	0.01	100.48	45.02	48.42	6.06	82.61
CM10-04-11	54.76	0.35	0.35	3.90	0.19	0.20	17.87	22.81	0.15	0.00	100.57	44.61	48.61	6.26	82.10
CM10-04-11	54.37	0.30	0.38	3.92	0.11	0.16	17.48	23.07	0.10	0.01	99.91	45.46	47.92	6.27	81.69
CM10-04-11	53.94	0.28	0.43	3.67	0.11	0.22	17.55	22.74	0.22	0.04	99.20	44.94	48.28	5.99	82.71
CM10-04-13	54.04	0.26	0.38	3.91	0.18	0.18	17.50	23.25	0.17	0.00	99.85	45.51	47.67	6.23	81.74
CM10-04-13	53.91	0.25	0.37	3.71	0.20	0.23	17.71	23.20	0.09	0.01	99.68	45.42	48.26	6.01	82.69
CM10-04-13	54.25	0.37	0.48	3.99	0.22	0.25	17.19	23.25	0.17	0.00	100.16	45.80	47.11	6.51	81.17
CM10-04-16	54.33	0.30	0.41	3.53	0.19	0.23	17.39	23.30	0.12	0.00	99.78	46.01	47.76	5.79	83.14
CM10-04-16	53.90	0.32	0.46	3.68	0.20	0.22	17.73	23.25	0.22	0.00	99.94	45.28	48.04	5.91	82.80
CM10-04-16	54.69	0.36	0.38	4.09	0.14	0.20	17.56	22.84	0.12	0.00	100.37	44.94	48.06	6.59	81.11
CM10-04-23	53.24	0.32	0.56	4.14	0.16	0.21	17.37	23.68	0.19	0.00	99.87	45.92	46.86	6.55	80.74
CM10-04-23	54.34	0.33	0.49	3.76	0.15	0.21	18.10	23.19	0.20	0.00	100.77	44.75	48.59	5.96	82.78
CM10-04-23	54.06	0.27	0.50	3.56	0.24	0.21	17.67	23.25	0.18	0.03	99.92	45.50	48.10	5.75	83.24
CM10-04-23	54.82	0.30	0.40	3.92	0.17	0.23	17.30	23.13	0.12	0.04	100.43	45.66	47.51	6.40	81.53
CM10-04-23	53.94	0.31	0.51	3.65	0.25	0.23	17.90	23.00	0.23	0.00	100.03	44.79	48.50	5.89	83.06

注: 电子探针数据测自中山大学测试中心, 所用仪器型号为日本电子公司 JXA-8800R 型电子探针, 并辅助使用 Inca Energy 型号 X 射线能谱仪; FeO^T 代表全铁; Mg[#] = 100 × Mg / (Mg + Fe²⁺)。其他数据表注释和此表同

表2 方沸石(霞石)响岩中基质单斜辉石电子探针成分含量(wt%)

Table 2 The chemical composition of clinopyroxene groundmass in sodium analcime (nepheline) phonolite (wt%)

测点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Wo	En	Fs	Mg [#]
CM10-04-09	54.46	1.16	1.14	4.98	0.41	0.14	16.46	21.97	0.52	0.02	101.39	44.09	45.96	8.04	76.77
CM10-04-09	54.19	0.88	0.78	4.88	0.25	0.11	16.74	22.31	0.39	0.04	100.57	44.43	46.39	7.76	77.43
CM10-04-09	53.30	0.97	0.77	6.67	0.32	0.35	16.71	21.31	0.53	0.04	101.06	41.80	45.60	10.71	71.45
CM10-04-11	53.37	0.76	0.47	5.84	0.33	0.38	17.33	21.88	0.45	0.01	100.94	42.37	46.70	9.35	74.80
CM10-04-11	54.00	0.70	0.67	6.25	0.33	0.32	17.17	21.30	0.48	0.06	101.44	41.63	46.69	9.98	73.31
CM10-04-11	53.59	0.76	0.63	6.23	0.39	0.36	16.64	21.21	0.47	0.04	100.42	42.13	45.98	10.21	72.75
CM10-04-13	51.76	1.09	1.05	7.25	0.20	0.36	15.58	20.30	0.56	0.06	98.29	41.50	44.33	12.10	68.26
CM10-04-13	51.82	1.32	1.26	7.33	0.22	0.28	15.90	20.50	0.59	0.03	99.34	41.32	44.60	11.93	68.44
CM10-04-16	52.27	0.72	0.92	5.34	0.46	0.25	16.86	22.42	0.39	0.04	99.75	44.05	46.07	8.51	75.94
CM10-04-16	51.60	1.23	1.15	7.19	0.31	0.37	16.45	20.34	0.58	0.02	99.31	40.58	45.65	11.69	69.60
CM10-04-16	53.23	0.88	0.92	5.87	0.50	0.25	16.79	21.66	0.47	0.03	100.66	42.79	46.13	9.41	74.09
CM10-04-16	53.26	0.68	0.90	5.34	0.43	0.22	16.73	22.31	0.37	0.03	100.33	44.11	46.03	8.55	75.82
CM10-04-16	51.70	1.49	1.36	8.81	0.16	0.39	15.93	20.53	0.66	0.06	101.14	40.26	43.46	13.96	64.39

表3 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石正环带电子探针成分表(wt%)

Table 3 The chemical composition of the normal zoning in clinopyroxenes for sodium analcime (nepheline) phonolite (wt%)

测点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Wo	En	Fs	Mg [#]
1	53.03	0.99	0.96	5.98	0.00	0.18	15.24	23.07	1.31	0.03	100.79	44.88	41.25	9.25	71.81
2	50.13	1.87	3.00	6.32	0.02	0.17	14.28	23.47	1.15	0.06	100.46	46.56	39.43	9.90	69.33
3	53.27	0.48	1.74	3.73	0.20	0.05	16.16	24.39	0.38	0.02	100.42	48.29	44.52	5.82	81.23
4	54.27	0.30	1.34	3.14	0.28	0.10	16.49	24.18	0.42	0.01	100.51	47.96	45.52	5.02	84.00
5	54.49	0.24	0.86	3.17	0.16	0.09	16.95	24.05	0.39	0.02	100.42	47.27	46.37	4.99	84.26
6	54.02	0.31	0.98	3.27	0.19	0.11	17.21	23.80	0.25	0.01	100.15	46.82	47.12	5.18	84.03
7	55.06	0.25	0.94	3.35	0.17	0.12	17.01	24.33	0.21	0.01	101.45	47.62	46.33	5.31	83.53
8	54.00	0.28	0.97	3.38	0.11	0.09	16.94	24.77	0.20	0.01	100.74	48.19	45.87	5.25	83.36
9	54.49	0.31	0.99	3.28	0.09	0.03	16.37	24.76	0.22	0.03	100.57	49.01	45.08	5.12	83.30
10	53.72	0.28	1.07	3.28	0.12	0.05	16.73	24.72	0.23	0.01	100.21	48.45	45.63	5.09	83.59
11	53.65	0.33	1.11	3.45	0.12	0.07	16.41	24.59	0.18	0.02	99.93	48.72	45.23	5.42	82.65
12	50.92	0.10	2.85	6.39	0.05	0.10	14.72	23.93	0.58	0.04	100.58	47.41	40.57	9.92	69.74
13	50.24	1.30	2.86	6.50	0.00	0.12	14.43	23.77	0.77	0.08	100.08	47.22	39.88	10.13	68.95
14	52.04	0.95	1.88	5.17	0.02	0.18	15.50	24.33	0.64	0.02	100.73	47.53	42.13	8.08	74.98
15	51.40	1.29	1.89	5.56	0.00	0.14	14.67	23.74	0.81	0.02	99.51	47.46	40.80	8.81	72.52
16	50.66	1.78	2.10	7.50	0.01	0.19	14.05	21.71	1.72	0.21	99.93	43.19	38.88	11.74	65.18

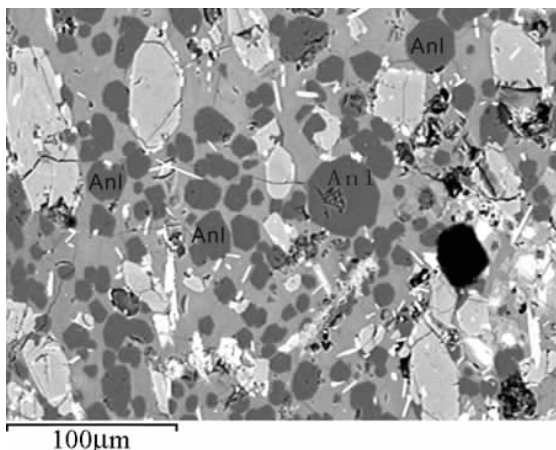


图3 方沸石(Anl)背散射电子图

Fig. 3 Backscattered electron picture of analcime

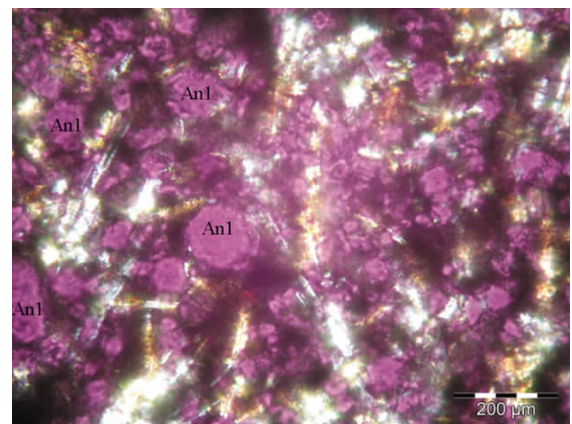


图4 方沸石(Anl)正交偏光照片

Fig. 4 Orthogonal polarized photo of analcime

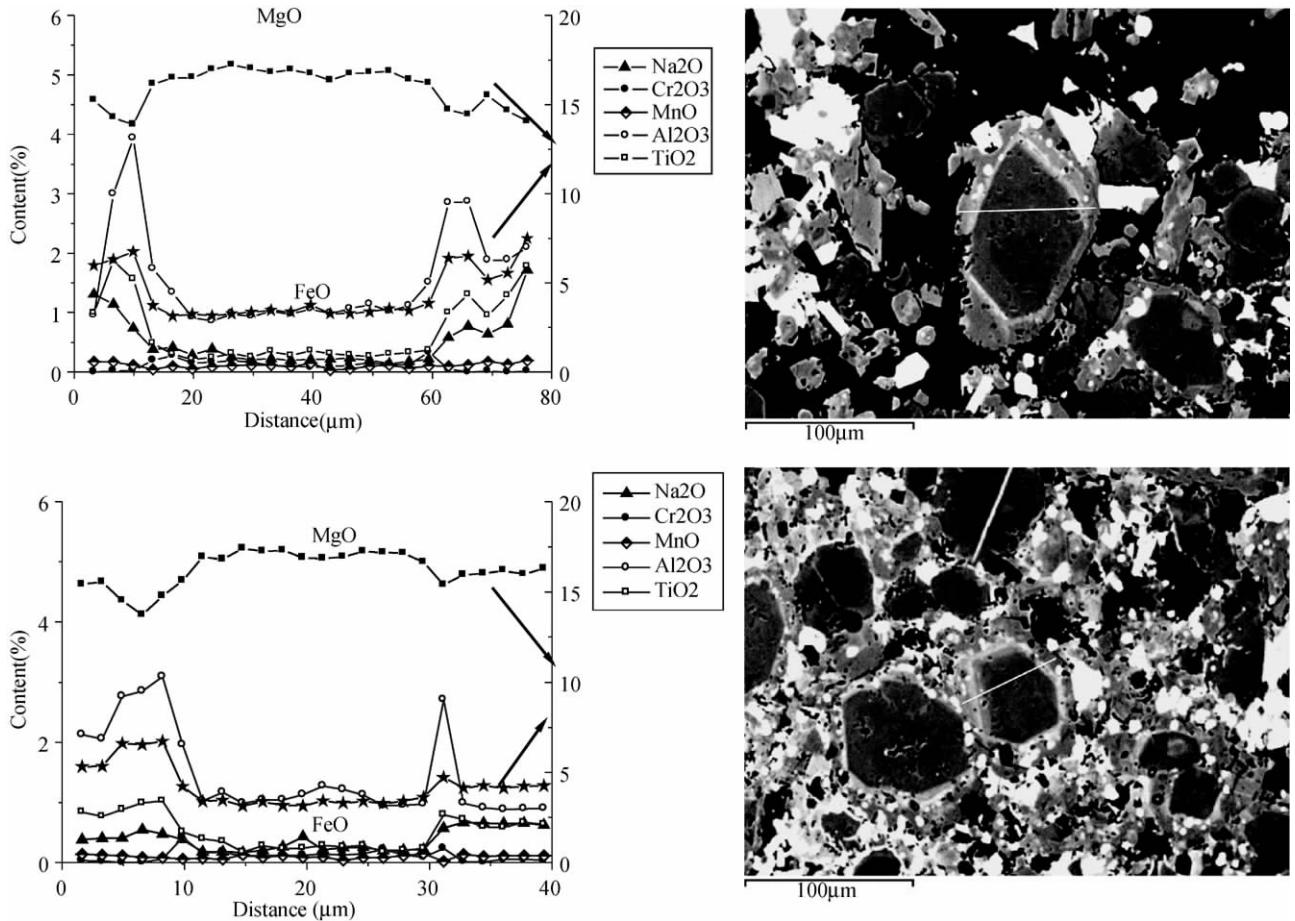


图5 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石正环带成分趋势图及对应的背散射电子照片

Fig.5 The compositional profile and the backscattered electronic image of the normal zone of clinopyroxenes in the sodium analcime (nepheline) phonolite

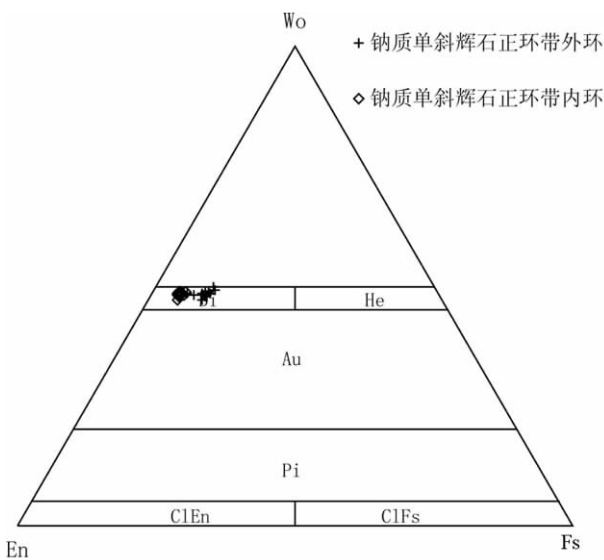


图6 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石正环带成分分类图
Fig.6 Wo-En-Fs classification diagram of clinopyroxenes normal zone in sodium analcime (nepheline) phonolite

范围为 65.18 ~ 79.95，具有相对较高 TiO_2 (0.57% ~ 2.29%) 和 Al_2O_3 含量 (0.89% ~ 3.93%)。边部端元组分为 $Wo_{(43.19-49.06)}-En_{(38.58-44.05)}-Fs_{(6.25-11.74)}$ ，其 Na_2O 的含量也相对较高 (0.38% ~ 1.71%)， Cr_2O_3 的含量较核部更低 (0% ~ 0.24%)。因此，从正环带的核部到边部 $Mg^{\#}$ 、 MgO 、 Cr_2O_3 呈逐渐降低趋势，而 FeO 、 TiO_2 、 Na_2O 、 Al_2O_3 呈逐渐升高的趋势，这反映了岩浆正常结晶的历史 (表 3、图 5 ~ 图 7)。先结晶的辉石富镁贫铁且铬作为相容元素优先进入辉石晶格，而钠、铝、钛作为不相容元素富集于晚期结晶的辉石环带中。

2.2 单斜辉石的反环带结构

具反环带辉石的核部相对富铁 (4.14% ~ 10.09%) 贫镁 (13.05% ~ 16.72%)， $Mg^{\#}$ 值的变化范围为 57.64% ~ 79.82%，低 $Ti-Al$ ($TiO_2 = 0.23\% \sim 1.34\%$ ； $Al_2O_3 = 0.23\% \sim 1.34\%$)，端元组分为 $Wo_{(42.28-48.78)}-En_{(36.52-45.81)}-Fs_{(6.47-15.35)}$ ，其 Na_2O 、 Cr_2O_3 的含量分别为 0.21% ~ 1.31% 和 0% ~ 0.10%。边部富镁 (15.93% ~ 18.59%) 贫铁 (2.53% ~ 5.04%)， $Mg^{\#}$ 值的变化范围为 75.97 ~ 87.15 与核

表 4 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石反环带电子探针成分表(wt%)

Table 4 The chemical composition of the reverse zoning in clinopyroxenes for sodium analcime (nepheline) phonolite (wt%)

测点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Wo	En	Fs	Mg [#]
1	53.75	0.58	0.66	3.41	0.09	0.06	17.36	24.60	0.15	0.01	100.66	47.56	46.69	5.21	83.58
2	53.07	0.49	0.69	3.16	0.24	0.02	17.32	24.17	0.22	0.00	99.38	47.27	47.11	4.83	84.56
3	54.37	0.43	0.59	3.05	0.24	0.01	17.73	24.01	0.18	0.01	100.62	46.72	48.01	4.64	85.34
4	53.70	0.42	0.45	7.29	0.05	0.14	14.81	24.10	0.68	0.02	101.66	46.62	39.87	11.13	67.03
5	53.24	0.40	0.48	7.24	0.04	0.14	14.47	23.73	0.79	0.02	100.55	46.52	39.48	11.20	66.65
6	52.77	0.42	0.66	9.03	0.05	0.12	13.78	22.98	1.00	0.01	100.82	45.05	37.57	13.85	60.41
7	52.39	0.33	0.51	9.56	0.03	0.24	13.42	22.54	1.21	0.01	100.24	44.23	36.65	14.82	58.40
8	51.97	0.37	0.59	9.40	0.02	0.24	13.35	22.42	1.15	0.00	99.51	44.40	36.78	14.71	58.69
9	51.57	0.44	0.63	9.34	0.02	0.19	13.48	22.36	1.05	0.00	99.07	44.40	37.25	14.58	59.08
10	51.36	0.37	0.65	9.50	0.05	0.20	13.37	22.79	1.05	0.00	99.33	44.92	36.66	14.70	58.46
11	51.10	0.46	0.62	8.97	0.06	0.17	13.58	22.41	1.06	0.01	98.41	44.60	37.60	14.00	60.22
12	51.05	0.44	0.62	9.27	0.07	0.19	13.64	22.96	1.00	0.02	99.27	45.00	37.19	14.25	59.52
13	51.92	0.40	0.61	9.38	0.08	0.23	13.59	22.86	1.08	0.00	100.16	44.71	36.99	14.47	59.16
14	52.77	0.39	0.56	3.00	0.19	0.03	17.82	24.53	0.22	0.01	99.50	47.13	47.62	4.49	85.60
15	52.14	0.46	0.58	2.96	0.15	0.04	17.79	24.90	0.17	0.01	99.18	47.63	47.35	4.42	85.74
16	51.65	0.56	0.56	3.41	0.09	0.08	17.64	24.35	0.16	0.00	98.50	46.94	47.31	5.19	83.80
17	51.12	0.60	0.54	3.51	0.10	0.05	17.53	24.76	0.20	0.00	98.40	47.39	46.69	5.24	83.32

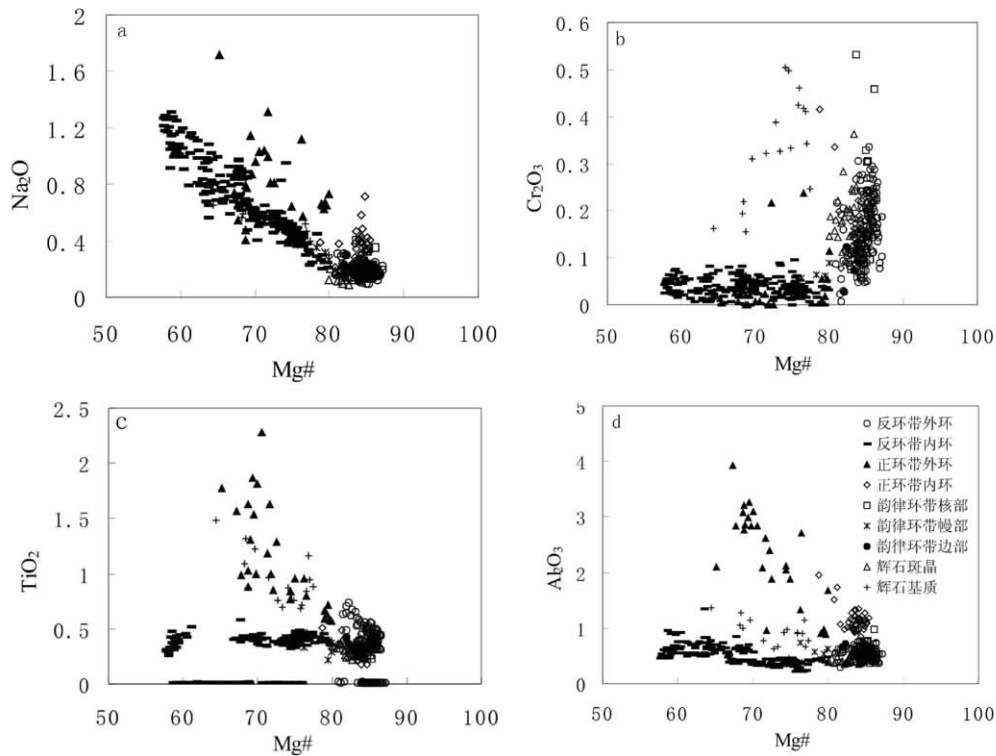


图 7 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石的成份图解

Fig. 7 The composition diagram diagram of clinopyroxenes in sodium analcime (nepheline) phonolite

部相比低 Al (0.25% ~ 0.77%) 高 Ti (0.31% ~ 0.74%) , 端元组分为 $Wo_{(45.57-51.27)}-En_{(42.66-48.93)}-Fs_{(4.00-7.74)}$, 其 Na_2O 、 Cr_2O_3 的含量分别为 0.01% ~ 0.46%、0.01% ~ 0.33%。总体上, $Mg^{\#}$ 、 MgO 、 Cr_2O_3 从核部到边部呈升高的趋势, FeO 、 Na_2O 、 Al_2O_3 的含量总体上呈降低趋势(表 4、图 7a - d、图 8、图 9)。这表明 Cr_2O_3 作为相容元素优先进入原始岩浆, 越到晚期其含量越低, $Mg^{\#}$ 、 MgO 的变化与正环带相反, 它反映了

单斜辉石可能受到了共存的钾质岩浆的混合。

2.3 单斜辉石的韵律正环带

少量单斜辉石从核部到边部出现成分规律性波动, 其 $Mg^{\#}$ 的值有明显的高低变化, 其它成分的含量也随 $Mg^{\#}$ 呈规律性的变化(表 5、图 10)。在背散射电子图像显示黑色的部分是正环带, 其 MgO 的含量高而 FeO 的含量低, $Mg^{\#}$ 的值较

表5 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石韵律环带电子探针成分表(wt%)

Table 5 The chemical composition of the oscillatory zoning in clinopyroxenes for sodium analcime (nepheline) phonolite (wt%)

测点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Total	Wo	En	Fs	Mg [#]
1	53.79	0.37	0.60	3.55	0.07	0.12	17.78	0.21	0.06	23.03	99.59	45.16	48.51	5.60	83.34
2	54.08	0.37	0.71	3.75	0.12	0.08	17.36	0.30	0.04	21.84	98.63	44.10	48.78	6.04	82.25
3	53.08	0.39	0.57	4.58	0.07	0.20	16.46	0.35	0.05	22.99	98.74	45.74	45.58	7.41	78.22
4	53.03	0.47	0.38	4.87	0.03	0.20	15.58	0.44	0.02	23.69	98.70	47.28	43.25	7.88	76.17
5	53.89	0.43	0.36	5.35	0.03	0.17	15.87	0.39	0.03	24.06	100.58	47.06	43.18	8.38	74.80
6	54.14	0.37	0.42	3.22	0.10	0.09	17.62	0.18	0.02	23.08	99.24	45.70	48.54	5.11	84.54
7	53.52	0.35	0.37	3.00	0.10	0.08	17.80	0.20	0.04	23.15	98.62	45.69	48.88	4.73	85.57
8	53.72	0.32	0.42	3.20	0.06	0.07	17.65	0.17	0.05	23.07	98.71	45.70	48.65	5.05	84.65
9	54.22	0.31	0.39	3.28	0.07	0.13	17.69	0.19	0.01	23.18	99.47	45.64	48.45	5.24	84.37
10	53.69	0.32	0.97	2.91	0.46	0.13	17.98	0.35	0.05	21.71	98.57	43.66	50.30	4.77	86.06
11	54.84	0.23	0.78	3.16	0.31	0.14	18.25	0.35	0.05	22.35	100.45	43.87	49.85	5.05	85.23
12	53.78	0.26	0.76	3.18	0.30	0.18	18.14	0.33	0.06	21.90	98.89	43.49	50.13	5.20	85.10
13	53.94	0.28	0.52	3.30	0.10	0.07	17.45	0.26	0.04	22.59	98.56	45.21	48.57	5.27	84.10
14	54.29	0.25	0.40	3.34	0.06	0.06	17.28	0.17	0.05	23.53	99.42	46.57	47.58	5.24	83.81
15	54.46	0.26	0.39	3.53	0.08	0.09	17.13	0.21	0.01	23.62	99.77	46.64	47.05	5.57	82.93
16	53.74	0.22	0.53	4.37	0.06	0.10	16.86	0.32	0.04	23.38	99.62	45.94	46.09	6.83	79.40
17	53.07	0.34	0.73	4.96	0.06	0.12	15.97	0.39	0.06	23.35	99.05	46.48	44.24	7.87	76.29
18	53.78	0.29	0.63	4.28	0.09	0.13	17.10	0.27	0.06	23.12	99.75	45.49	46.80	6.76	79.97
19	53.83	0.32	0.51	3.29	0.09	0.11	17.29	0.12	0.05	22.94	98.55	46.01	48.24	5.33	84.00

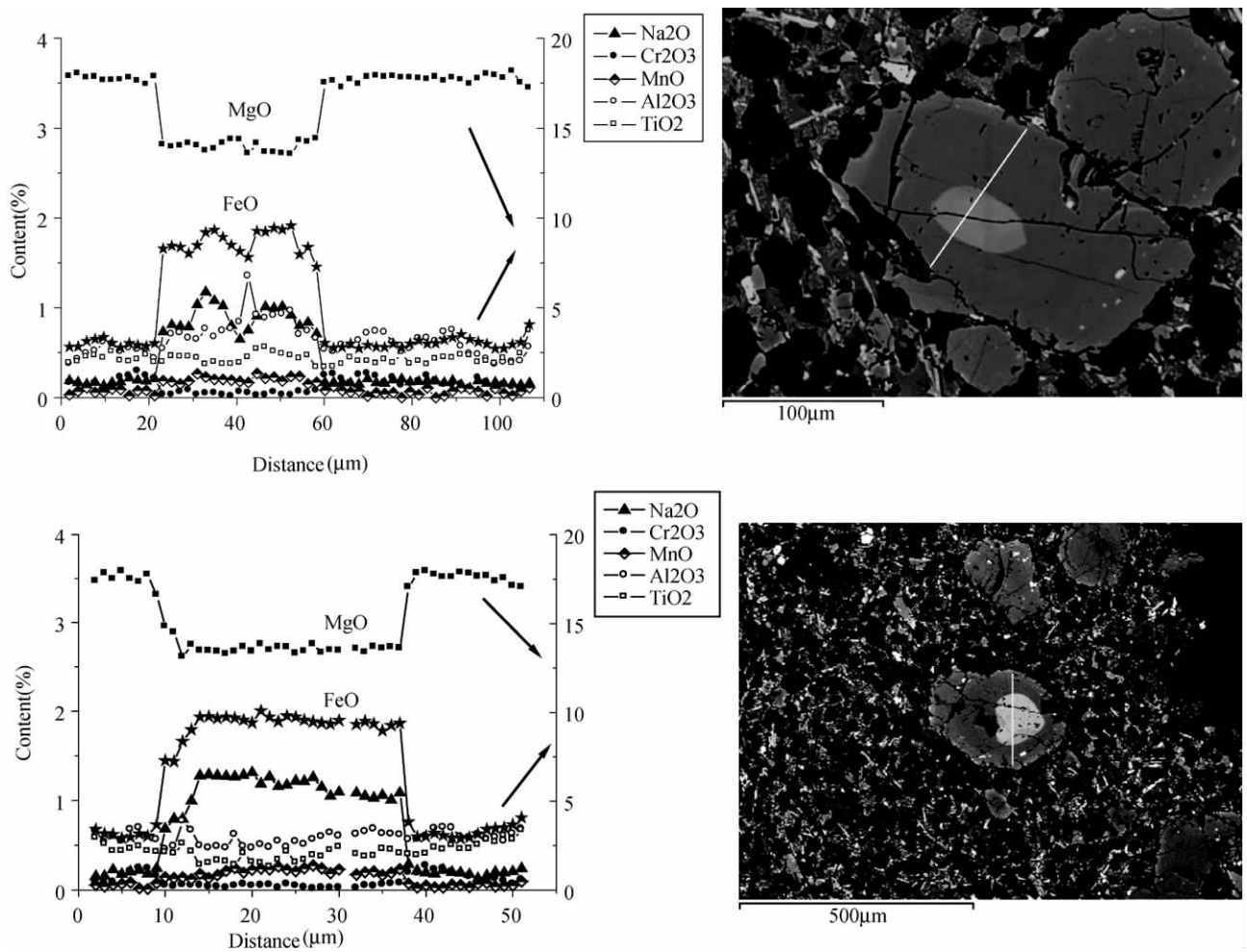


图8 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石反环带成分趋势图及对应的背散射电子照片

Fig. 8 The compositional profile and the backscattered electronic image of the reverse zone of clinopyroxenes in the sodium analcime (nepheline) phonolite

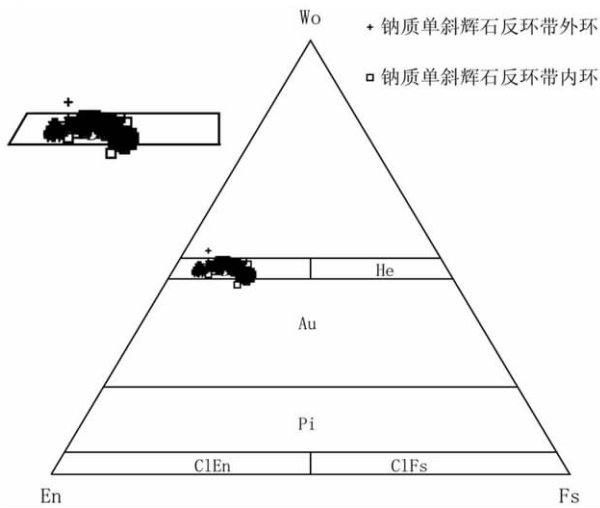


图9 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石反环带成分分类图
Fig. 9 Wo-En-Fs classification diagram of clinopyroxenes reverse zone in sodium analcime (nepheline) phonolite

高 Na_2O 、 Al_2O_3 、 TiO_2 的含量较低,但 Cr_2O_3 的含量较反环带高;背散射电子图像显示白色的部分是反环带,其 MgO 的含量低而 FeO 的含量高, $\text{Mg}^\#$ 的值较低, Na_2O 、 Al_2O_3 、 TiO_2 的含量较高, Cr_2O_3 含量较正环带低。具韵律环带结构的单斜辉石 Na_2O 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 含量的变化在正反环带的范围内, $\text{Mg}^\#$ 值的变化范围较小,在正环带斑晶和基质的范围内(图 7a-d、图 10、图 11)。

3 单斜辉石环带的成因探讨

类似于橄榄石斑晶与平衡熔体间的 $\text{Mg}^\#$ 关系,单斜辉石与岩浆熔体之间的 Fe-Mg 分配系数也可用来探讨斑晶是否与全岩 $\text{Mg}^\#$ 值平衡 (Yang *et al.*, 1999; Streck *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2010), 未经历明显结晶分异或堆晶作用的岩浆,其结晶的单斜辉石成分将与全岩 $\text{Mg}^\#$ 构成平衡曲线。本文利用环带较多的样品进行投图分析 (CM10-09, CM10-13), 从图 12 中结果可知,钠质方沸石(霞石)响岩中的辉石正环

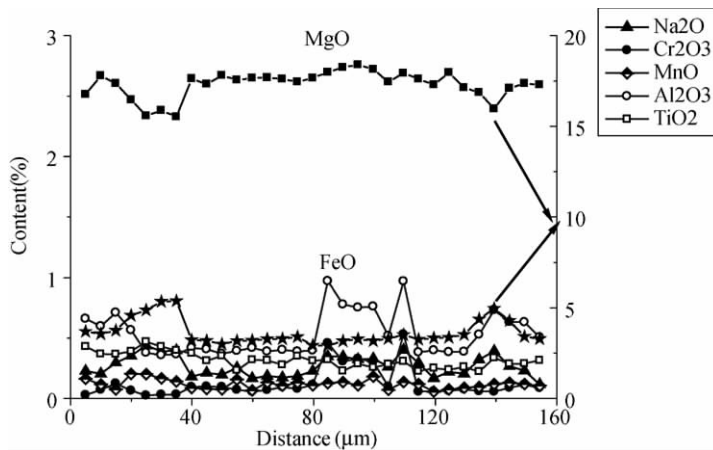


图10 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石韵律环带成分趋势图及对应的背散射电子照片
Fig. 10 The compositional profile and the backscattered electronic image of the oscillatory zone of clinopyroxenes in the sodium analcime (nepheline) phonolite

带的核部和反环带边部的岩浆成分落在平衡曲线上,表明它们结晶于原始的寄主岩浆,具正环带结构较大的单斜辉石斑晶的核部成分相对均匀,仅具有较窄的边部,也反映了岩浆存在平衡结晶的过程。钠质方沸石(霞石)响岩中辉石反环带的核部和正环带的边部的成分落在了平衡线之下,表明它们结晶于非平衡的岩浆体系,可能被其它岩浆混染。钾质-超钾质粗面岩与钠质方沸石(霞石)响岩共存,因此钠质岩浆在喷发时可能与钾质岩浆存在一定程度的混合。

总体上,钠质方沸石(霞石)响岩中单斜辉石正环带(韵律正环带)的核部、边部及基质辉石构成了 $\text{Mg}^\#$ 逐渐降低, Na_2O 、 Al_2O_3 、 TiO_2 含量逐渐升高的趋势,它们代表了岩浆结晶演化分异结晶的过程,正环带的核部先结晶,边部及基质

后结晶。单斜辉石的反环带的核部和边部有着剧烈的成分变化,它是岩浆混合作用的产物。具有韵律环带的单斜辉石,它们的成分落在单斜辉石正环带和基质的范围内,因此,它与具有正环带的单斜辉石来源于同一岩浆体系,是岩浆多次混合作用的结果。

4 单斜辉石成分变化对构造环境改变的指示

Nisbet and Pearce (1977) 提出可以根据单斜辉石的 TiO_2 、 MnO 、 Na_2O 含量或 F_1 、 F_2 参数判断源岩生成的构造环境。由图 13 可知,在本文研究的钠质方沸石(霞石)响岩中,无环带的辉石斑晶、辉石正环带的核部和反环带的边部主要

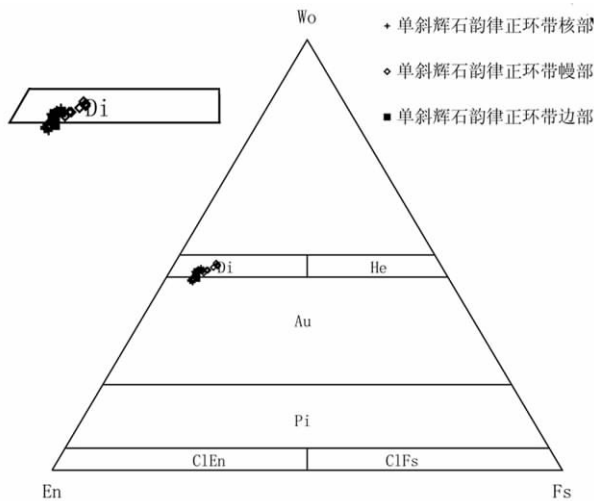


图 11 方沸石(霞石)响岩中单斜辉石韵律正环带成分分类图

Fig. 11 Wo-En-Fs classification diagram of clinopyroxenes oscillatory zone in sodium analcime (nepheline) phonolite

落在火山弧玄武岩 + 洋底玄武岩构造环境中, 而辉石正环带边部的成分则大部分位于大陆板内玄武岩构造环境区域或向后 1 种构造环境变化趋近。假如单斜辉石的正环带的成分演化反映了其母岩浆的成分正常演变趋势, 那么辉石正环带的核部代表了岩浆结晶最早的环境, 其可能来自 1 个与火山弧有关的岩浆源区, 由于青藏高原在中新世的 13 ~ 12Ma 已经是一个大陆环境, 因此单斜辉石正环带反映的岛弧成分特征是其母岩浆源区继承了先前的岛弧(如中生代冈底斯岛弧)地幔源区的特征; 另一方面, 单斜辉石中正环带的边部落入大陆板内玄武岩构造环境, 首先指示出该时期构造环境的改变, 成为 1 个典型的大陆板内环境; 结合该区域霞石响岩岩浆的出现, 其应形成在大陆伸展拉张构造环境, 单斜辉石边部的大陆板内组成特征与钠质碱性火山岩霞石响岩岩浆的产出是一致的。钠质过碱性火成岩是后造山和非造山阶段的典型岩浆作用产物, 它们是典型的伸展构造体制下裂谷作用产生的 (Sorensen *et al.*, 1974; Fitton *et al.*, 1987)。因此, 单斜辉石成分的显著变化暗示了该套火山岩喷发时, 青藏高原在 13 ~ 12Ma 时构造体制发生了变化, 而可能进入到

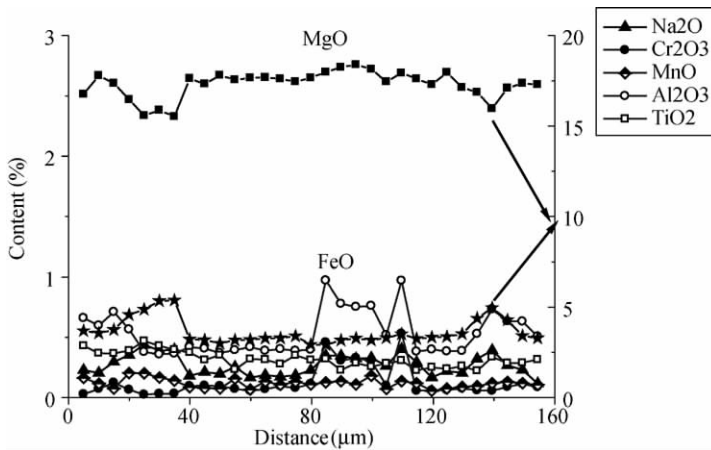
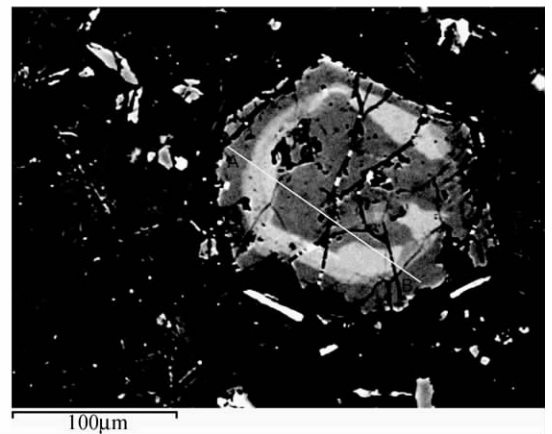


图 12 钠质方沸石(霞石)响岩全岩 Mg[#]-辉石 Mg[#]图解
单斜辉石与熔体间的 Fe-Mg 分配系数 $K_d = 0.36 \pm 0.04$ (据 Kinzler, 1997)

Fig. 12 Total Mg[#] vs. clinopyroxenes Mg[#] diagram of sodium analcime (nepheline) phonolite
The partition coefficients (Kd) of Fe-Mg between Cpx and liquid are 0.36 ± 0.04 (after Kinzler, 1997)



1 个典型的陆内伸展构造阶段。

5 对岩浆演化和构造意义的启示

单斜辉石的成分可反映岩浆结晶过程和历史 (Sgarbi *et al.*, 2000; 王建等, 2002; Putirka *et al.*, 2003; 蔡劲宏等, 2007; 苏慧敏等, 2008)。辉石的环带结构记录了岩浆演化的温度、压力、氧逸度等条件。而具有复杂环带结构的辉石更能为我们提供岩浆演化的复杂信息 (Dobosi, 1989; Zhu and Ogasawara, 2004)。因此, 对当惹雍错单斜辉石中的环带进行详细的研究, 可以为我们提供更详细的岩浆演化过程。

当惹雍错单斜辉石的正环带从核部到边部 Mg[#] 的值逐渐降低而 Na₂O、Al₂O₃、TiO₂ 含量逐渐升高, 反映了岩浆结晶的先后顺序, 内环先结晶外环后结晶。正环带边部的成分范围与基质的单斜辉石的成分不落在同一范围内, 指示了母岩浆不是受到了相对原始岩浆的岩浆混合或混染, 而是受到了不同体系和不同成分母岩浆的影响。然而, 反环带的核部与边部有着剧烈的成分变化, 从核部到边部 Mg[#] 由低到高的骤变, 出现其核部与边部是不连续分异结晶的状况, 反环带的核部与其它辉石具有明显不同的成分变化趋势, 其边部成分与正环带的核部成分也落在不同的范围内, 这些现象指示它与正环带结晶于不同的岩浆环境, 反映了母岩曾受到其它岩浆的混合和混染。

在野外产状上, 钠质方沸石(霞石)响岩和钾质-超钾质

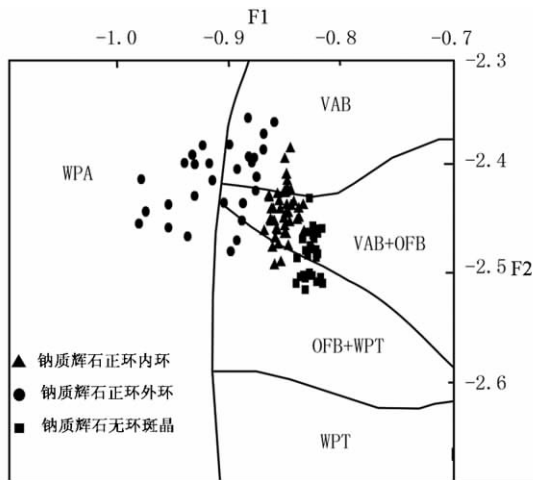


图 13 单斜辉石 F1-F2 图解(据 Nisbet and Pearce, 1977)

Fig. 13 F1 vs. F2 diagram of clinopyroxene (after Nisbet and Pearce, 1977)

火山岩共存。本文认为,由于地堑的拉伸,上升的软流圈物质携带了大量的热量,诱发了因古陆俯冲作用而富集的含金云母的地幔源区发生部分熔融,从而产生大量的流体物质,形成了富钾的母岩浆。这种钾质岩浆形成的火山岩在拉萨地块从 25 ~ 13Ma 广泛出现;而随着地堑的伸展作用的加强,地幔岩石圈被切割的深度加大,可能导致更深处地幔橄榄岩的部分熔融,从而引发了后期钠质岩浆的喷发。因此,约在 12Ma 拉萨地块出现从超钾质-钾质岩浆向钠质岩浆的重要转变。在拉萨地块上,12Ma 后钾质的幔源岩浆活动都停止了,而钠质的过碱性火成岩通常被认为是造山后和非造山阶段的岩浆作用产物,它们是典型的伸展构造体制下裂谷作用产生的。因此,钠质过碱性岩的喷发可能指示该时期构造伸展活动的最高峰,并且伴随着藏南地区高原的显著抬升,从钾质到钠质火山作用的演变暗示着青藏高原在这套过碱性火山岩喷发时(12 ~ 13Ma)构造体制发生了变化。

6 结论

(1) 当惹雍错单斜辉石中含多种环带结构,包括正环带、反环带和少量韵律环带。

(2) 正环带揭示了岩浆演化的正常过程,反环带表明了岩浆受到非同一体系岩浆(钾质-超钾质岩浆)的混合或混染。

(3) 韵律环带说明了岩浆结晶的过程中受到了多次岩浆混合作用。

(4) 拉萨地块出现从超钾质-钾质岩浆向钠质岩浆的重要转变,暗示着青藏高原在这套过碱性火山岩喷发时(13 ~ 12Ma),构造体制发生了变化,进入到一个典型的陆内伸展阶段。

References

Cai JH, Du YS and Li ST. 2007. Mineral chemistry and geological

- significance of clinopyroxenes from Middle Devonian picrite on the southern margin of the Altay Mountain. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 26(2): 141 - 146 (in Chinese with English abstract)
- Ding L, Kapp P, Zhong D and Deng W. 2003. Cenozoic volcanic rocks in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 44: 1833 - 1865
- Dobosi G. 1989. Clinopyroxene zoning patterns in the young alkali basalts of Hungary and their petrogenetic significance. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 101: 112 - 121
- Fitton JG and Upton BGJ. 1987. Introduction In: Fitton JG and Upton BGJ (eds.). *Alkaline Igneous Rocks*. London: Blackwell Scientific Publications, 1 - 568
- Huang XL, Niu YL, Xu YG *et al.* 2010. Mineralogical and geochemical constraints on the petrogenesis of post-collisional potassic and ultrapotassic rocks from western Yunnan, SW China. *Journal of Petrology*, 51: 1617 - 1654
- Kinzler RJ. 1997. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid-ocean ridge basalt. *Journal of Geophysical Research*, 102: 853 - 874
- Nisbet EG and Pearce JA. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 149 - 160
- Putirka KD, Mikaelian H, Ryerson F *et al.* 2003. New clinopyroxene liquid thermo barometer for mafic evolved and volatile-bearing lava composition with applications to lavas from Tibet and Snake River Plain Idaho. *American Mineralogist*, 88: 1542 - 1554
- Sgarbi PBA, Gaspar JC and Valença JC. 2000. Clinopyroxene from Brazilian kamafugites. *Lithos*, 53: 101 - 116
- Sorensen H. 1974. *The Alkaline Rocks*. London: John Wiley and Sons, 1 - 622
- Streck MJ, Dungan MA, Bussy F *et al.* 2005. Mineral inventory of continuously erupting basaltic andesites at Arenal volcano, Costa Rica: Implications for interpreting monotonous, crystal-rich, mafic arc stratigraphies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140: 133 - 155
- Su HM, Zhang DY, Ai Y *et al.* 2008. Mineralogy of clinopyroxene from the Middle Devonian volcanic rocks in the south margin of the Altay Mountains and its geological significances. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1602 - 1610 (in Chinese with English abstract)
- Wang J and Li JP. 2002. Clinopyroxenes from Cenozoic kamafugites in Lixian County, West Qinling. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 21(3): 251 - 263 (in Chinese with English abstract)
- Yang HJ, Frey FA, Clague DA *et al.* 1999. Mineral chemistry of submarine lavas from Hilo ridge, Hawaii: Implications for magmatic processes within Hawaiian rift zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135: 355 - 372
- Zhao ZD, Mo XX, Nomade S *et al.* 2006. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau: Spatial and temporal distribution and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 787 - 794 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF and Ogasawara Y. 2004. Clinopyroxene phenocrysts (with green salite cores) in trachybasalts: Implications for two magma chambers under the Kokchetav UHP massif, North Kazakhstan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 517 - 527

附中文参考文献

- 蔡劲宏, 杜杨松, 李顺庭. 2007. 泰山南缘中阿尔泥盆世苦橄岩中单斜辉石的成分特征及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 26(2): 141 - 146
- 苏慧敏, 张东阳, 艾羽等. 2008. 阿尔泰山南缘中泥盆世北塔山组火山岩中单斜辉石的矿物学研究及其地质意义. *地质学报*, 82(11): 1602 - 1610
- 王建, 李建平. 2002. 西秦岭礼县地区新生代钾霞橄黄长岩系的单斜辉石. *岩石矿物学杂志*, 21(3): 251 - 263
- 赵志丹, 莫宣学, Nonmade S 等. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及意义. *岩石学报*, 22(4): 787 - 794