

青藏高原当雄地区方沸石响岩的主要造岩矿物特征:原生方沸石的证据

蒋云¹, 赵珊茸¹, 马昌前^{1,2}, 张金阳³

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 方沸石响岩是一种罕见的碱性火山岩。采用电子探针、粉晶X射线衍射、扫描电镜、拉曼光谱等研究了青藏高原当雄地区方沸石响岩的主要造岩矿物种属、共生关系和结晶顺序。研究表明, 斑晶由方沸石和长石组成。方沸石为岩浆结晶晚期形成的原生矿物; 长石均发育“次生边”结构, 中央相为斜长石, 边缘相为碱性长石。基质由碱性长石、次透辉石、钛磁铁矿和褐铁矿组成。原生矿物的结晶顺序是: 斑晶长石的中央相→斑晶方沸石+斑晶长石边缘相富钾长石→基质长石→次透辉石→钛磁铁矿和褐铁矿。利用方沸石—熔体平衡估算出方沸石结晶时岩浆的温度和压力条件分别为 $600\sim 640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $(5\sim 13)\times 10^8\text{ Pa}$, 考虑到青藏高原当时已形成巨厚地壳, 认为岩浆房存在于地壳深部。

关键词: 原生方沸石; 长石; 响岩; 矿物学特征; 拉萨地块。

中图分类号: P583

文章编号: 1000-2383(2008)03-0320-09

收稿日期: 2008-01-23

Characteristics of Rock-Forming Minerals of Analcime Phonolite in the Damxung Area, Qinghai-Tibet Plateau: Evidence for Primary Analcime

JIANG Yun¹, ZHAO Shan-rong¹, MA Chang-qian^{1,2}, ZHANG Jin-yang³

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Analcime phonolite is a rare alkaline volcanic rock. Using the electron microprobe, X-ray powder diffraction, scanning electron microscope, and Raman spectroscopy, this paper studies characteristics of rock-forming minerals, coexisting relations and crystallization sequences of the analcime phonolite from the Damxung area, Qinghai-Tibet plateau. Phenocrysts are euhedral analcime and feldspar, while the groundmass is composed of K-feldspar, salite, titanomagnetite, and limonite. Analcime is primary and crystallizes in the late magmatic stage. Phenocrystal feldspars have secondary rims of K-feldspar, and their cores are plagioclases. Crystallization sequences are the plagioclase core of feldspar phenocrysts, analcime and K-feldspar in the rim of feldspar phenocrysts, K-feldspar in the groundmass, salite, titanomagnetite and limonite. The balance between analcime and melt places constraints on the P/T regime $(5\sim 13)\times 10^8\text{ Pa}$ and $600\sim 640\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectively, implying depths of origin in the deep crust.

Key words: primary analcime; feldspar; phonolite; mineralogical characteristics; Lhasa block.

方沸石响岩是一种罕见的碱性火山岩。Mackenzie(1914)首次在加拿大阿尔伯达发现这类岩石。随后,方沸石响岩在莫桑比克雷帕特峡谷、澳大利亚奇安德拉、肯尼亚大裂谷以及英国哥伦比亚等地相

继被发现(Mackenzie and White, 1970; Lippard, 1973; Woolley and Symes, 1976; Church, 1978; Luth and Bowerman, 2004). 产出时代多为晚第三纪, 为拉张、裂谷环境的产物. 在我国, 方沸石响岩在湖北大别山、江苏娘娘山、黑龙江省五大连池、青藏高原当惹雍错—许如错、鱼鳞山、巴毛穷宗等地(丁林等, 1999; 刘燊等, 2001, 2003; 李才等, 2002; 廖思平等, 2002; 杨日红等, 2002; 黄勇等, 2004; 李佑国等, 2005)零星见有报道. 许多学者对其进行了岩石学、地球化学及同位素等研究, 而对岩石主要造岩矿物的研究极为少见, 且方沸石到底是原生成因还是次生成因尚无定论. 本文在野外和前人工作的基础上, 通过对当雄县拿多拉山口方沸石响岩的岩石学、矿物学特征的研究, 确认此方沸石为岩浆结晶晚期形成的原生矿物.

1 地质背景及岩体地质

自始新世(50~40 Ma)印度板块和欧亚板块碰撞以来, 青藏高原新生代火山活动相当频繁(熊熊等, 2007; 赵振明等, 2007). 藏北新生代火山岩从早到晚可划分为多格错仁和走构油茶错高钾钙碱性系列(40~30 Ma)、巴毛穷宗和鱼鳞山白榴石碧玄岩

—响岩系列(29~24 Ma)以及黑石北湖钾玄岩系列(1.5 Ma)(迟效国等, 1999; 刘燊等, 2003).

本次方沸石响岩采自班公—怒江结合带以南的当雄县拿多拉山口($E90^{\circ}39'$, $N30^{\circ}13'$), 覆盖在林子宗群帕那组(43.93~53.52 Ma)(莫宣学等, 2003)英安质火山岩之上. 方沸石响岩的岩石组合特征与当惹雍错—许如错、鱼鳞山、巴毛穷宗等地的鱼鳞山组火山岩相似, 均属于白榴石碧玄岩—响岩系列(图1). 该系列火山岩属陆内裂谷型碱性火山岩, 是印度板块和欧亚板块碰撞后板内构造—岩浆作用的产物, 是青藏高原由挤压向伸展转换的标志(迟效国等, 1999; 丁林等, 1999; 黄勇等, 2004).

2 岩石学及矿物学特征

岩石为灰色, 似斑状结构, 块状构造(图2a). 镜下薄片观察、电子探针、X射线衍射及拉曼光谱研究表明, 岩石的主要矿物为方沸石、长石, 其次为次透辉石、Fe氧化物等.

斑晶由方沸石和长石组成, 含量40%~70%. 斑晶方沸石呈肉红色, 自形—半自形, 薄片无色, 负低突起, 显均质性, 粒径0.3~1.5 cm, 含量20%~60%. 部分方沸石斑晶周围存在暗棕色边缘. 部分方沸石边缘被基质中的碱性长石交代. 斑晶内部不见辉石、磁铁矿等包裹体呈放射状分布. 斑晶长石呈自形板状, 粒度 $0.5 \times 0.1 \sim 1.0 \times 0.5 \text{ cm}^2$, 含量10%~50%. 部分长石定向包裹于方沸石晶体中(图2b), 平行方沸石晶体边缘排列, 表明长石形成可能早于方沸石. 长石均发育“次生边”结构, 呈现为环带状, 是晚期富钾的熔体对斜长石交代反应形成的产物. 因此, 将长石分为2个相, 中央相为斜长石(Pl), 发育聚片双晶纹; 边缘相为碱性长石(Kf), 平直、干净. 中央相与边缘相同结构、同消光(图2c). 值得注意的是, 部分边缘相碱性长石较宽, 与包裹自身的外围方沸石交生(图2d), 其中长石的(010)面与方沸石的某个结晶面形成规则定向连生, 与长石和石英交生形成的“文象结构”类似, 说明边缘相碱性长石与方沸石是同时结晶的. 此外, 边缘相碱性长石不见出溶条纹长石, 说明结晶时温度下降很快.

基质主要由碱性长石、次透辉石、Fe氧化物组成, 含量30%~60%. 碱性长石无色透明, 半自形—他形, 约1.5 mm大小, 约占基质的80%; 次透辉石呈灰绿色, 约占基质的5%; Fe氧化物(包括褐铁矿

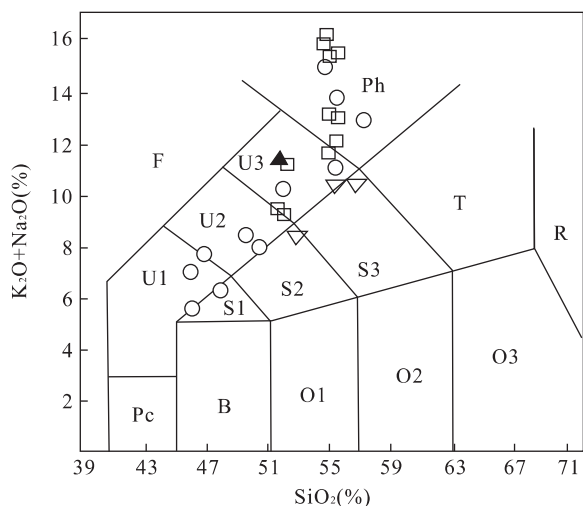


图1 鱼鳞山组火山岩的 TAS 图解(据 Le Maitre, 1989)

Fig. 1 TAS diagram of volcanic rocks of the Yulinshan Formation
▲本文数据; ▽引自廖思平等(2002); □引自刘燊等(2003); ○引自李佑国等(2005); Pc. 苦橄玄武岩; B. 玄武岩; O1. 玄武安山岩; O2. 安山岩; O3. 英安岩; S1. 粗面玄武岩; S2. 玄武粗安岩; S3. 粗安岩; T. 粗面岩/粗面英安岩; R. 流纹岩; U1. 碱玄岩/碧玄岩; U2. 响岩质碱玄岩; U3. 碱玄质响岩; Ph. 响岩; F. 副长石岩

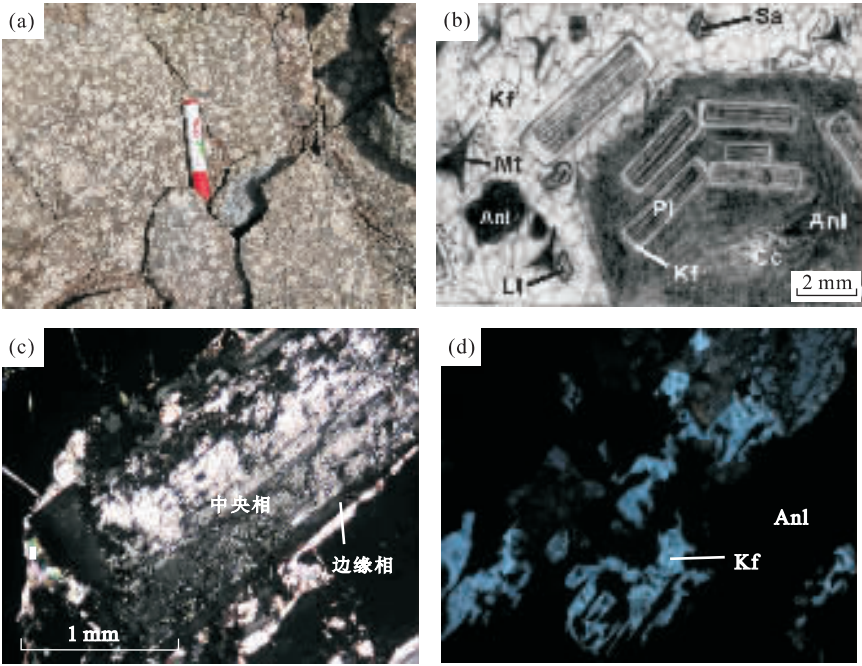


图 2 方沸石响岩的图片及镜下照片

Fig. 2 Photograph of analcime phonolite in the field and in cross-polarized light

(a)方沸石响岩照片,其中灰白色粒状矿物为方沸石;(b)方沸石响岩正交镜下素描图,其中 Anl:方沸石;Pl:斜长石;Kf:碱性长石;Sa:次透辉石;Mt:磁铁矿;Lt:褐铁矿;Cc:方解石;(c)斑晶长石的中央相和边缘相;(d)边缘相碱性长石与方沸石共生

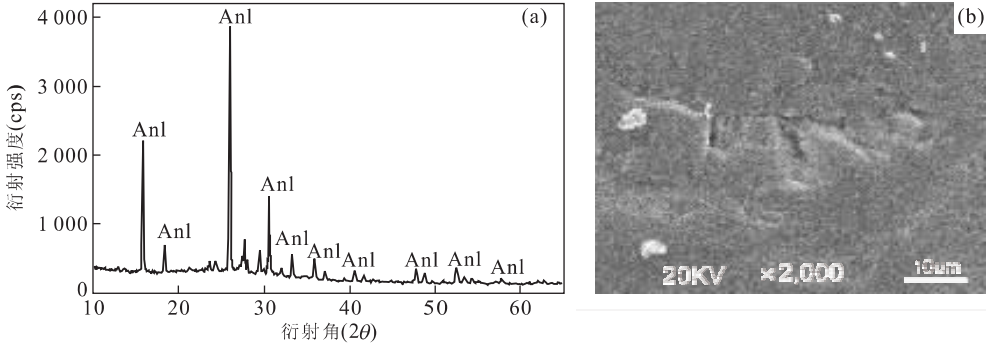


图 3 方沸石的粉晶 X 射线衍射图谱(a)和二次电子扫描电镜图(b)

Fig. 3 X-ray powder diffraction pattern (a) and secondary electron SEM image (b) of the analcime in analcime phonolite
(a)分析由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成. 仪器型号:D/MAX-III B 粉晶衍射仪;靶:Cu;滤波片:Ni;狭缝:0.15 mm;管电压/电流:40 kV/40 mA;起始角:30°;终止角:65°;扫描速度:2°/min;温度:20℃;湿度:60%

和钛磁铁矿)约占基质的 10%，其中钛磁铁矿呈他形粒状分布，含量约 8%；褐铁矿呈红褐色粒状，含量约 2%。样品部分发生碳酸盐化，碳酸盐约占基质的 5%。

2.1 方沸石

方沸石是最主要的斑晶矿物。粉晶 X 射线衍射图谱(图 3a)表明，其衍射图谱中除长石外，没有显示其余相，与方沸石标准衍射图谱拟合程度最大，达 88%。将岩石样品制成标准电子探针薄片，表面镀碳，

选取方沸石的中心、长石的中央相和边缘相、辉石、Fe 氧化物作电子探针分析，分析结果及以 8 个氧为基础的长石端元组分见表 1。晶体化学式见表 2。

结合电子探针分析结果(表 1 中编号为 TM48-1)，进一步确定为方沸石。SiO₂ 含量较高，为 59.81%，钾的含量很低，为 0.05%，可能与岩浆的成分、成岩的化学环境(如温度、压力)有关。二次电子扫描电镜图(图 3b)显示，晶体表面干净平整，不见微孔和裂隙(表面上的气孔和裂纹是样品处理过

表 1 方沸石响岩主要矿物的电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses results of major minerals in analcime phonolite

成分 (%)	TM48								TM50					
	方沸石			长石			次透辉石	钛磁铁矿	长石			褐铁矿		
	1a	1b	2-c	2-r	4-c	4-r	5	3	6	2-c	2-r	4-c	4-r	3
SiO ₂	59.81	59.15	51.95	66.36	53.58	65.21	66.07	49.44	—	53.30	64.54	52.77	65.10	9.07
TiO ₂	0.09	0.04	0.08	0.08	0.03	0.14	0.03	0.86	23.86	0.06	0.04	0.04	0.05	0.32
Al ₂ O ₃	23.56	23.87	28.43	18.15	27.92	19.83	18.71	2.27	3.05	27.78	18.54	28.29	18.87	5.15
FeO	0.28	0.32	0.59	0.15	0.58	0.28	0.21	11.42	71.62	0.56	0.08	0.46	0.07	71.49
MnO	0.05	0.01	0.05	0.01	0.01	—	0.01	0.37	0.88	0.04	—	—	—	0.27
MgO	0.01	0.01	0.06	0.01	0.05	—	0.01	12.84	0.59	0.06	—	0.06	—	1.56
CaO	0.13	0.05	12.10	0.39	11.09	1.12	1.02	21.84	—	10.90	0.25	11.32	0.19	0.97
Na ₂ O	9.88	10.10	4.27	3.07	4.78	5.35	3.57	0.41	—	4.61	2.81	4.43	2.90	0.12
K ₂ O	0.05	0.05	0.83	11.78	0.71	8.06	10.37	—	—	1.14	12.62	1.12	12.51	0.04
Cr ₂ O ₃	—	0.00	0.02	—	0.03	—	—	0.01	—	—	—	—	—	—
Total	93.86	93.60	98.39	100.00	98.77	99.99	100.00	99.45	100.00	98.45	98.87	98.48	99.69	88.97
Ab			0.37	0.28	0.42	0.48	0.32			0.41	0.25	0.39	0.26	
An			0.58	0.02	0.54	0.06	0.05			0.53	0.01	0.55	0.01	
Or			0.05	0.70	0.04	0.47	0.63			0.07	0.74	0.07	0.73	

注: TM48 和 TM50 为样品号; TM48-1(a, b), 方沸石; TM48-2, 包裹在方沸石中的斑晶长石; TM48-3, 次透辉石; TM48-4, 基质中的斑晶长石; TM48-5, 基质长石; TM48-6, 钛磁铁矿; TM50-2, 包裹在方沸石中的斑晶长石; TM50-3, 褐铁矿; TM50-4, 基质中的斑晶长石. c, 中央相; r, 边缘相. —, 表示未检测到. 表中数据 2-r, 5, 6 由武钢钢铁研究所探针室完成分析, 电子探针为 JXA-8800 型, 能谱仪为 ISIS 型, 实验条件为 20 kV, 0.5 nA; 其余数据由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针室完成分析, 电子探针为 JXA-8100 型, 实验条件为 15 kV, 20 nA.

表 2 方沸石响岩各矿物晶体化学式

Table 2 Crystallochemical formulas of minerals in analcime phonolite

样号	点号	矿物	晶体化学式
TM48	1-a	方沸石	(Na _{0.641} Ca _{0.005} K _{0.002}) _{0.648} (Al _{0.929} Fe _{0.008} Ti _{0.002} Mn _{0.001}) _{0.940} Si _{2.000} O ₆
	1-b	方沸石	(Na _{0.662} Ca _{0.002} K _{0.002}) _{0.666} (Al _{0.951} Fe _{0.009} Ti _{0.001}) _{0.961} Si _{2.000} O ₆
	2-c	长石	(Na _{0.384} Ca _{0.601} K _{0.049}) _{1.034} (Al _{0.961} Fe _{0.023} Mg _{0.004} Ti _{0.003} Mn _{0.002} Cr _{0.001}) _{0.994} (Al _{0.592} Si _{0.408}) _{1.000} Si _{2.000} O ₈
	2-r	长石	(Na _{0.269} Ca _{0.019} K _{0.679}) _{0.967} (Al _{0.967} Fe _{0.006} Ti _{0.003} Mg _{0.001}) _{0.976} Si _{1.000} Si _{2.000} O ₈
	4-c	长石	(Na _{0.425} Ca _{0.546} K _{0.041}) _{1.013} (Al _{0.974} Fe _{0.022} Mg _{0.003} Ti _{0.001}) _{1.002} (Al _{0.538} Si _{0.462}) _{1.006} Si _{2.000} O ₈
	4-r	长石	(Na _{0.468} Ca _{0.054} K _{0.463}) _{0.985} (Al _{0.914} Fe _{0.011} Ti _{0.005}) _{1.009} (Al _{0.06} Si _{0.940}) _{1.000} Si _{2.000} O ₈
TM50	5	长石	(Na _{0.313} Ca _{0.049} K _{0.599}) _{0.962} (Al _{0.991} Fe _{0.009} Mg _{0.001} Ti _{0.001} Mn _{0.001}) _{1.002} (Al _{0.008} Si _{0.992}) _{1.006} Si _{2.000} O ₈
	3	次透辉石	(Ca _{0.894} Na _{0.030}) _{0.924} (Mg _{0.732} Fe _{0.365} Ti _{0.025} Mn _{0.012}) _{1.133} (Si _{1.889} Al _{0.102}) _{1.991} O ₆
	6	钛磁铁矿	(FeO) _{0.299} (Fe ₂ O ₃) _{0.313} (TiO ₂) _{0.299}
	2-c	长石	(Na _{0.413} Ca _{0.539} K _{0.067}) _{1.019} (Al _{0.973} Fe _{0.022} Ti _{0.002}) _{1.002} (Al _{0.539} Si _{0.461}) _{1.000} Si _{2.000} O ₈
	2-r	长石	(Na _{0.252} Ca _{0.012} K _{0.774}) _{1.009} (Al _{0.994} Fe _{0.003} Ti _{0.001}) _{0.998} (Al _{0.016} Si _{0.984}) _{1.000} Si _{2.000} O ₈
	4-c	长石	(Na _{0.396} Ca _{0.560} K _{0.066}) _{1.022} (Al _{0.977} Fe _{0.018} Ti _{0.001} Mg _{0.004}) _{1.000} (Al _{0.563} Si _{0.437}) _{1.000} Si _{2.000} O ₈
	4-r	长石	(Na _{0.258} Ca _{0.009} K _{0.731}) _{0.998} (Al _{0.999} Fe _{0.003} Ti _{0.002}) _{1.004} (Al _{0.019} Si _{0.981}) _{1.000} Si _{2.000} O ₈
	3	褐铁矿	(FeO) _{0.788} (SiO ₂) _{0.120} (Al ₂ O ₃) _{0.04} (MgO) _{0.031} (CaO) _{0.014} (OH) · H ₂ O

程形成的). 背散射图及钠、硅和铝的 X 射线面扫描图(图 4)显示方沸石成分上的均一性.

2.2 长石

长石是斑晶和基质的重要成分.

从图 5a 可看出,包裹在方沸石中的斑晶长石与基质中的斑晶长石一样,中央相均为斜长石,边缘相均为富钾的碱性长石. 中央相斜长石, An 介于 53~58.1 之间,属于拉长石. 斜长石中均含 Or 分子,含

量为 4%~7% 之间. 边缘相碱性长石, Or 介于 47~74 之间,除一个(TM48-4-r)属于钾钠长石外,其余均属于钾长石,大大偏离碱性长石低温槽成份密集区(Or=30%~40%),说明钾长石结晶时的温度较高. 碱性长石中均含有 An 分子,含量为 1%~6%. 斑晶长石从中央相到边缘相,成分从斜长石到钾长石,是岩浆成分改变的结果. 基质长石(TM48-5)与斑晶长石的边缘相成分相近,为富钾的碱性长石,表

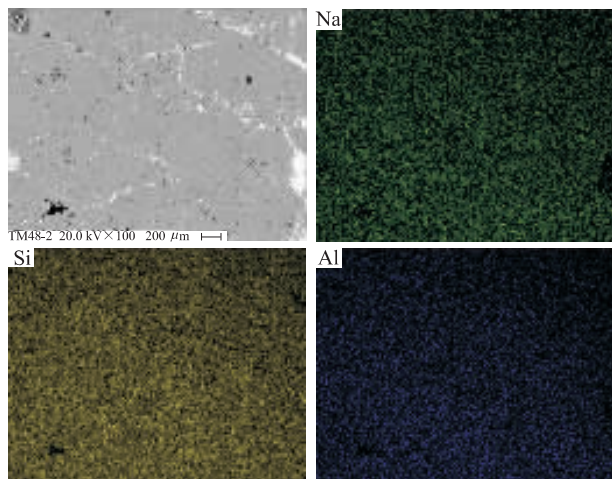


图 4 斑晶方沸石的背散射图及钠、铝和硅的 X 射线面扫描图

Fig. 4 Back scattered electron image and X-ray surface scan graphs of Na, Si and Al of the analcime phenocryst
以上分析由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室扫描电子显微镜室完成。仪器型号为 QUANTA 200, 实验条件为 20 kV, 1.6 nA

明基质长石与边缘相长石为同种岩浆结晶的产物。

选取有代表性的斑晶长石, 对应的拉曼光谱图如图 5b。

长石类的拉曼图谱十分相似, 主要峰位为 $\text{Si}(\text{Al}^{\text{IV}})-\text{O}_{\text{br}}-\text{Si}$ 的弯曲振动峰 $506 \sim 518 \text{ cm}^{-1}$ 和 $\text{Si}(\text{Al}^{\text{IV}})-\text{O}_{\text{nb}}^-$ 的伸缩振动峰 $1050 \sim 1150 \text{ cm}^{-1}$ 。 510 cm^{-1} 左右峰高耸尖锐, 1080 cm^{-1} 峰较平缓。当三斜长石的 Al^{3+} 在 T_{10} 、 T_{1m} 、 T_{20} 、 T_{2m} 中的分布为有序或无序时, 可引起对应拉曼振动谱的较小变化(徐培苍和李如璧, 1996)。一般来说, 长石的有序度越大, 对应的特征谱峰越多, 峰位移越大, 强度之比越大。

从图 5b 可以看到, 本区方沸石响岩中斑晶长石图谱的主要峰位为 $\text{Si}(\text{Al}^{\text{IV}})-\text{O}_{\text{br}}-\text{Si}$ 的弯曲振动峰 $506 \sim 512 \text{ cm}^{-1}$ 及 $\text{Si}(\text{Al}^{\text{IV}})-\text{O}_{\text{nb}}^-$ 的伸缩振动峰 $1111 \sim 1182 \text{ cm}^{-1}$ 。 $506 \sim 512 \text{ cm}^{-1}$ 峰高耸尖锐, 而 $1111 \sim 1182 \text{ cm}^{-1}$ 峰较平缓。还有一个 $470 \sim 478 \text{ cm}^{-1}$ 的峰, 很可能是长石有序化所形成的特征峰。分析 TM48 样品斑晶长石图谱, 边缘相(B)的两特征峰差($512 \text{ cm}^{-1} - 472 \text{ cm}^{-1} = 40 \text{ cm}^{-1}$)较大, 峰强度之比也较大, 而中央相(A)的两个特征峰差($506 \text{ cm}^{-1} - 478.9 \text{ cm}^{-1} = 27.1 \text{ cm}^{-1}$)较小, 峰强度之比也较小, 说明边缘相长石的有序度较中央相高; 同样, 分析 TM50 样品斑晶长石图谱, 边缘相(C)长石的有序度也较中央相(D)高。进一步表明斑晶长

石的中央相和边缘相分属于 2 个期次, 前者在富钠的岩浆中早结晶, 后者在富钾的岩浆中晚结晶。另外, 斑晶长石中央相的特征谱峰均在 506 cm^{-1} 、 478 cm^{-1} 左右, 而边缘相的特征谱峰均在 512 cm^{-1} 、 478 cm^{-1} 左右, 表明包裹在方沸石中的斑晶长石和基质中的斑晶长石岩浆成分来源一致, 且同时结晶。

3 认识和讨论

关于方沸石的成因, 前人已作了大量研究工作(Larsen and Buie, 1938; Wilkinson, 1968, 1977; Pearce, 1970, 1993; Cundari, 1973; Roux and Hamilton, 1976; Woolley and Symes, 1976; Church, 1978, 1979; Ferguson and Edgar, 1978; Edgar, 1979; Karlsson and Clayton, 1991, 1993; Giampaolo and Lombardi, 1994; Putnis *et al.*, 1994; Luth and Bowerman, 2004; Prelevic *et al.*, 2004)。本文将方沸石分为 5 种类型: (1) P 型(Primary), 原生成因, 在火山岩中作为斑晶或基质出现, 在岩浆结晶过程中形成。主要特征为: 岩石样品新鲜, 方沸石斑晶自形, 晶体表面干净平整, 不见微孔和裂隙。现有报道有莫桑比克雷帕特峡谷、加拿大阿尔伯达发现的原生液相线方沸石; (2) H 型(Hydrothermal), 热液成因, 岩浆期后的流体在镁铁质岩的晶洞里结晶形成。镜下特征与 P 型方沸石相似, 自形, 晶体表面干净平整, 不见微孔和裂隙, 与基性火山岩伴生。 (3) X 型, 交代成因, 在岩浆冷却期间或在主岩固结之后由富钠流体与白榴石发生离子交换和水化作用形成, 保留白榴石假象。主要特征为: 白榴石方沸石化后, 体积相应增加 10%, 颗粒不规则, 晶体表面粗糙, 高倍镜下可见晶体表面不平整, 发育微孔和裂隙(Putnis *et al.*, 1994); (4) S 型(Sedimentary), 沉积成因, 在沉积条件下由火山碎屑岩玻璃与富钠流体作用形成; (5) M 型(Metamorphic), 低级变质成因, 典型的沸石相矿物。需要说明的是, 文献中提到的 I 型方沸石包括 X 型和本文新提出的 P 型, 其来源还一直存在争议(Wilkinson, 1977; Karlsson and Clayton, 1991; Pearce, 1993; Giampaolo and Lombardi, 1994; Putnis *et al.*, 1994)。

研究中的方沸石为罕见的 P 型方沸石, 主要证据为: (1) 手标本上方沸石呈肉红色, 不是白色。Pearce(1993)研究指出, 白榴石离子交换和水化作

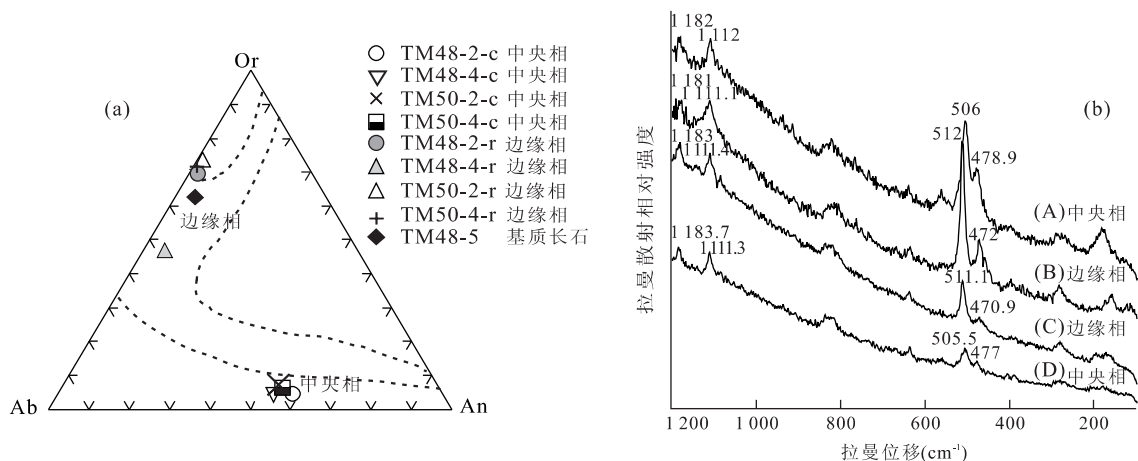


图 5 方沸石响岩中长石成分投影图(a)和拉曼图谱(b)(据赵珊茸等,2003)

Fig. 5 Projection drawing of feldspars' composition (a) and Raman spectrum (b) of feldspars in analcime phonolite (b)图分析由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室激光拉曼室完成。仪器型号为 RM-1000 型,实验条件为氩离子激光器,波长为 514.5 nm,狭缝宽度为 25 μm ,叠加次数为 3 次;(A)TM48-2-c;(B)TM48-2-r;(C)TM50-2-r;(D)TM50-2-c

用形成的方沸石(即 X 型)为典型的白色;(2)白榴石晶体中常见辉石、磁铁矿等包裹体呈放射状分布,方沸石化后该特征通常保留,本次研究的方沸石中没有这些特征,且方沸石 X 射线衍射图谱显示除斑晶长石图谱外,没有其余相;(3)部分方沸石晶体边缘呈现暗棕色,Pearce(1970)研究指出,方沸石的这种边缘含水量比中央少 10%,指示由结构不稳定的原生方沸石脱水形成;(4)方沸石二次电子扫描电镜图象(图 3)显示晶体表面干净平整,不见微孔和裂隙;(5)方沸石背散射图及钠、硅和铝的 X 射线面扫描图(图 4)显示方沸石成分上的均一性;(6)方沸石中包裹的斑晶长石非常自形(图 2b、2c),呈平行方沸石边缘排列,部分边缘相钾长石与方沸石交生(图 2d),说明边缘相钾长石与方沸石同时结晶;(7)岩石中含有大量自形的方沸石、长石斑晶,这表明岩浆在上升到近地表之前在一个较深的岩浆囊里停留了较长时间,因此岩浆有足够的时间冷却,使得斑晶有足够的时间生长;(8)本研究中方沸石响岩属于白榴石碧玄岩—响岩系列,不与基性火山岩伴生,不属于 H 型方沸石。因此本文认为此方沸石是岩浆结晶晚期形成的原生矿物。

包裹在方沸石中的斑晶长石和基质中的斑晶长石成分完全一致,均为同时结晶的同类斑晶。部分斑晶长石被方沸石定向包裹,表明斑晶长石形成稍早于方沸石。镜下可见部分斑晶长石的边缘相碱性长石与包裹自身的外围方沸石交生,表明边缘相碱性长石与方沸石是同时结晶的。基质长石与斑晶长石

的边缘成分相近,表明基质长石与边缘相长石几乎为同种岩浆成分。因此根据以上特征可以判断,方沸石响岩的原生矿物结晶顺序是:斑晶长石的中央相→斑晶方沸石+斑晶长石边缘相富钾长石→基质长石→次透辉石→钛磁铁矿和褐铁矿。

利用方沸石—熔体平衡可以估算出方沸石结晶时岩浆的温度、压力条件。Peters *et al.* (1966)研究了方沸石固熔体在 Ab-Ne-H₂O 体系中的熔融实验,实验指出方沸石在压力大于 $(4.5 \sim 5) \times 10^8$ Pa 条件下可从熔体中直接结晶,且能在一个较小的温度范围内与流体稳定共存。Kim and Burley(1971)研究 Ab-Ne-H₂O 体系,发现液相线方沸石稳定存在的温压范围分别为 575~657 $^{\circ}\text{C}$ 、 $(5.15 \sim 12.5) \times 10^8$ Pa。Roux and Hamilton(1976)在研究 Ab-Or-Ne-Ks-H₂O 体系时指出,方沸石—熔体仅能稳定存在的温压范围分别为 600~640 $^{\circ}\text{C}$ 、 $(5 \sim 13) \times 10^8$ Pa (Morse, 1969; Roux and Hamilton, 1976; Wilkinson, 1977)。以 1GP=33 km 来估算,原生方沸石形成于 17~43 km 的深度范围,说明岩浆房存在于地壳深部。

青藏高原新生代碱性火山岩与高原的形成、隆升关系密切。本次方沸石响岩的发现,对于揭示印度—欧亚大陆碰撞后的构造—岩浆作用、深入了解造山带由挤压向伸展转换的过程有重要的指示意义。

4 结论

(1) 方沸石响岩的岩石组合特征与当惹雍错—许如错、鱼鳞山、巴毛穷宗等地的鱼鳞山组碱性火山岩相似,均属于石榴石碧玄岩—响岩系列。(2) 方沸石晶体自形,晶体表面干净平整,不见微孔和裂隙。晶体内部包裹的斑晶长石自形,在方沸石中平行边缘排列。斑晶长石边缘相钾长石与方沸石交生,形成规则定向连生。方沸石是岩浆结晶晚期形成的原生矿物。(3) 方沸石响岩的原生矿物结晶顺序应是:斑晶长石的中央相→斑晶方沸石+斑晶长石边缘相富钾长石→基质长石→次透辉石→钛磁铁矿和褐铁矿。(4) 利用方沸石—熔体平衡可以估算出方沸石结晶时岩浆的温压范围分别为 $600\sim 640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(5\sim 13)\times 10^8\text{ Pa}$,说明岩浆房存在于地壳深部。

致谢:西藏地调院江万副院长指导了野外工作,2006 年中国地质大学(武汉)青藏高原考察队给予了大力支持。测试分析分别由地质过程与矿产资源国家重点实验室郑曙、何谋春、肖平老师等协助完成。在论文撰写过程中得到了余振兵、张超、王世明、陈玲、王连训等的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

References

Chi, X. G., Li, C., Jin, W., et al., 1999. Spatio-temporal evolution of Cenozoic volcanism in northern Tibet and the uplifting of Qinghai-Tibet plateau. *Geological Review*, 45(Suppl.): 978—986 (in Chinese with English abstract).

Church, B. N., 1978. Shacknite and related analcite-bearing lavas in British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15: 1669—1672.

Church, B. N., 1979. Shacknite and related analcite-bearing lavas in British Columbia: Discussion and reply. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16: 1298—1302.

Cundari, A., 1973. Petrology of the leucite-bearing lavas in New South Wales. *Journal of the Geological Society of Australia*, 20: 465—492.

Ding, L., Zhang, J. J., Zhou, Y., et al., 1999. Tectonic implication on the lithosphere evolution of the Tibet plateau: Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in northern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 408—421 (in Chinese with English abstract).

Edgar, A. D., 1979. Shacknite and related analcite-bearing lavas in British Columbia: Discussion. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16: 1298—1299.

Ferguson, L. J., Edgar, A. D., 1978. The petrogenesis and origin of the analcime in the volcanic rocks of the Crowsnest Formation, Alberta. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15: 69—77.

Giampaolo, C., Lombardi, G., 1994. Thermal behaviour of analcimes from two different genetic environments. *European Journal of Mineralogy*, 6: 285—289.

Huang, Y., Mou, S. Y., Lu, D. B., et al., 2004. Deliberation on characteristic and epoch of the volcanic rocks of the Yulinshan Formation in the Yulinshan area, North Tibet. *Guizhou Geology*, 21(3): 148—151, 147 (in Chinese with English abstract).

Karlsson, H. R., Clayton, R. N., 1991. Analcime phenocrysts in igneous rocks: Primary or secondary? *American Mineralogist*, 76: 189—199.

Karlsson, H. R., Clayton, R. N., 1993. Analcime phenocrysts in igneous rocks: Primary or secondary? — reply. *American Mineralogist*, 78: 230—232.

Kim, K., Burley, B. J., 1971. Phase equilibria in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{--NaAlSiO}_4\text{--H}_2\text{O}$ with special emphasis on the stability of analcite. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 311—337.

Larsen, E. S., Buie, B. F., 1938. Potash analcime and pseudo-leucite from the Highwood Mountains of Montana. *American Mineralogist*, 23: 837—849.

Le Maitre, R. W., 1989. Classification of igneous rocks and glossary of terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the systematics of igneous rocks. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 193.

Li, C., Zhu, Z. Y., Chi, X. G., 2002. Isotope chronology of volcanic rocks in the Yulinshan Formation in the Gerze area, northern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 732—734 (in Chinese with English abstract).

Li, Y. G., Mo, X. X., Ma, R. Z., et al., 2005. Petrology and ages of the Cenozoic volcanic rocks in the Huochetoushan, North Tibet, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 32(5): 441—446 (in Chinese with English abstract).

Liao, S. P., Chen, Z. H., Luo, X. C., et al., 2002. Discovery of leucite phonolite in the Tangra Yumco area, Tibet and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 735—738 (in Chinese with English abstract).

Lippard, S. J., 1973. The petrology of phonolites from the Kenya rift. *Lithos*, 6: 217—234.

Liu, S., Chi, X. G., Li, C., et al., 2001. Geochemistry and

- genesis of Cenozoic volcanic rock series in northern Tibet. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 31(3): 230—235 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Hu, R. Z., Chi, X. G., et al., 2003. Geochemistry, series subdivision and petrogenetic interpretation of Cenozoic volcanic rocks in northern Tibet. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 279—292 (in Chinese with English abstract).
- Luth, R. W., Bowerman, M., 2004. Microtextural and powder-diffraction study of analcime phenocrysts in volcanic rocks of the Crowsnest Formation, southern Alberta, Canada. *Canadian Mineralogist*, 42(3): 897—903.
- MacKenzie, D. E., White, A. J. R., 1970. Phonolite globules in basanite from Kiandra, Australia. *Lithos*, 3: 309—317.
- MacKenzie, J. D., 1914. The Crowsnest volcanics. *Canadian Geological Survey Museum Bulletin 4 (Geological Series)*, 20: 1—37.
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135—148 (in Chinese with English abstract).
- Morse, S. A., 1969. Syenites. *Carnegie Institution of Washington Year Book*, 67: 112—120.
- Pearce, T. H., 1970. The analcite-bearing volcanic rocks of the Crowsnest Formation, Alberta. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 7: 46—66.
- Pearce, T. H., 1993. Analcite phenocrysts in igneous rocks: Primary or secondary? — discussion. *American Mineralogist*, 78: 225—229.
- Peters, T. J., Luth, W. C., Tuttle, O. F., 1966. The melting of analcite solid solutions in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — H_2O . *American Mineralogist*, 51: 736—753.
- Prelevic, D., Foley, S. F., Cvetkovic, V., et al., 2004. The analcime problem and its impact on the geochemistry of ultrapotassic rocks from Serbia. *Mineralogical Magazine*, 68(4): 633—648.
- Putnis, A., Putnis, C., Giampaolo, C., 1994. The microtexture of analcime phenocrysts in igneous rocks. *European Journal of Mineralogy*, 6: 627—632.
- Roux, J., Hamilton, D., 1976. Primary igneous analcite—An experimental study. *Journal of Petrology*, 17: 244—257.
- Wilkinson, J. F. G., 1968. Analcimes from some potassic igneous rocks and aspects of analcime-rich igneous assemblages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 18: 252—269.
- Wilkinson, J. F. G., 1977. Analcime phenocrysts in a vitrophyric analcime: Primary or secondary? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 64: 1—10.
- Woolley, A. R., Symes, R. F., 1976. The analcime-phyric phonolites (blairmorites) and associated analcime kenytes of the Lupata Gorge, Mocambique. *Lithos*, 9: 9—15.
- Xiong, X., Wang, J. Y., Teng, J. W., 2007. Deep mechanical background for the Cenozoic volcanism in the Tibetan Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Xu, P. C., Li, R. B., 1996. Raman spectroscopy in geosciences. Shaanxi Science & Technology Press, xi'an, 57—66 (in Chinese).
- Yang, R. H., Dong, J. L., Li, C., et al., 2002. Major characteristics and temperature-pressure conditions of the minerals in Cenozoic volcanic rocks in the northern Tibetan plateau. *Geoscience*, 16(2): 153—158 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. R., Bian, Q. J., Ling, Q. C., 2003. Mineralogy. China University of Geosciences Press, Wuhan, 163 (in Chinese).
- Zhao, Z. M., Li, R. S., Ji, W. H., et al., 2007. The characteristics of geochemical and its tectonic significance from the adakite of Palaeogene volcanic rocks in northern Qiangtang area, Qinghai-Tibetan plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 651—680 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 迟效国, 李才, 金巍, 等, 1999. 藏北新生代火山作用的时空演化与高原隆升. 地质论评, 45 (增刊): 978—986.
- 丁林, 张进江, 周勇, 等, 1999. 青藏高原岩石圈演化的记录: 藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征. 岩石学报, 15(3): 408—421.
- 黄勇, 牟世勇, 卢定彪, 等, 2004. 藏北鱼鳞山地区鱼鳞山组火山岩的特征及时代探讨. 贵州地质, 21(3): 148—151, 147.
- 李才, 朱志勇, 迟效国, 2002. 藏北改则地区鱼鳞山组火山岩同位素年代学. 地质通报, 21(11): 732—734.
- 李佑国, 莫宣学, 马润则, 等, 2005. 藏北火车头山新生代火山岩的岩石特征与时代. 成都理工大学学报 (自然科学版), 32(5): 441—446.
- 廖思平, 陈振华, 罗小川, 等, 2002. 西藏当惹雍错地区白榴石响岩的发现及地质意义. 地质通报, 21(11): 735—738.

刘燊,迟效国,李才,等,2001.藏北新生代火山岩系列的地球化学及成因.长春科技大学学报,31(3):230—235.

刘燊,胡瑞忠,迟效国,等,2003.藏北高原新生代火山岩地球化学系列划分及成因分析.高校地质学报,9(2):279—292.

莫宣学,赵志丹,邓晋福,等,2003.印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应.地学前缘,10(3):135—148.

熊熊,王继业,滕吉文,2007.青藏高原新生代火山活动的深部力学背景.地球科学——中国地质大学学报,32(1):1—6.

徐培苍,李如璧,1996.地学中的拉曼光谱.西安:陕西科学技术出版社,57—66.

杨日红,董建乐,李才,等,2002.藏北新生代火山岩主要造岩矿物特征及温压条件.现代地质,16(2):153—158.

赵珊茸,边秋娟,凌其聪,2003.矿物学.武汉:中国地质大学出版社,163.

赵振明,李荣社,计文化,等,2007.青藏高原北羌塘地区古近纪火山岩中埃达克岩的地球化学特征及其构造意义.地球科学——中国地质大学学报,32(5):651—680.

《地球科学——中国地质大学学报》

2008 年 第 33 卷 第 4 期 要目预告

南海表层沉积物中放射虫的组合特征与海洋环境	陈木宏等
旋回地层学:地层学解读时间的第三里程碑	龚一鸣等
浙江舟山海岸带古木埋藏区铁的微生物成矿作用	吴自军等
东天山库姆塔格沙垄地区企鹅山群的解体及岩石地层单位厘定	李永军等
深部地层时深转换中的拟合式选择问题	周 蒂等
地形环境对海底热液硫化物矿体内部流体循环的影响	李怀明等
松辽盆地中部后裂谷早期正断层系形成机制	龚发雄等
基于自然伽马测井信号的维纳滤波法求取泥质含量	吴国平等