

川南玄武岩气孔中硅铁灰石杏仁体的特征与研究

张良钜, 刘靖娜, 曾伟来, 李东升, 黎琪, 曾南石, 阮青锋

(桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 川南普格杏仁状玄武岩气孔中产出硅铁灰石、绿泥石、石英、方解石、沥青等5种不同成分类型的杏仁体。硅铁灰石杏仁体呈圆形或椭圆形, 其直径多为5~8 mm, 由杏仁体壁至中心, 依次分别产出石英→铁镁绿泥石→硅铁灰石。硅铁灰石晶体呈铁黑色、薄板状, 由5个平行双面单形组成。微区X射线衍射分析结果显示, 硅铁灰石属三斜晶系, 空间群为 $P\bar{1}$ 。化学成分分析表明, 硅铁灰石氧化物含量($w_B/\%$)为SiO₂ 53.55%、CaO 18.84%、Fe₂O₃ 13.65%、FeO 9.68%、MgO 1.44%、H₂O⁺ 1.74%, FeO/Fe₂O₃ = 0.71; 铁镁绿泥石氧化物含量($w_B/\%$)为SiO₂ 33.17%、Al₂O₃ 13.03%、Fe₂O₃ 8.45%、FeO 13.06%、MgO 18.82%、H₂O⁺ 12.12%、CaO 0.87%、FeO/Fe₂O₃ = 1.55。硅铁灰石杏仁体的矿物组合变化表明, 玄武岩晚期的成矿热液由富Mg、Fe向富Si、Ca演化, 硅铁灰石是由偏酸性、弱还原环境向偏碱性、弱氧化环境转化时所形成的过渡性产物。

关键词: 硅铁灰石杏仁体, 绿泥石, FeO/Fe₂O₃值, 成因, 玄武岩, 川南普格

中图分类号: P578.94; P588.14⁺ 5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)05-0917-07

Characteristics of babingtonite amygdaloid complex in vesicular basalt from south Sichuan

ZHANG Liang-ju, LIU Jing-na, ZENG Wei-lai, LI Dong-sheng, LI Qi, ZENG Nan-shi and RUAN Qing-feng
(College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Five different types of amygdaloid complexes were found in vesicular basalt of Puge County, south Sichuan, mainly calcite amygdaloid complex and asphalt (bitumen) amygdaloid complex. The babingtonite amygdaloid complexes are spheroidal with 5~8 mm in diameter. A commonly recognized mineral sequence of the amygdaloid complex from the wall inward is quartz→brunsvigite→babingtonite. The babingtonite crystals are black and lamellar, and are composed of five pinacoids. X-ray micro-diffraction measurements indicate that babingtonite is triclinic, with space group P. Chemical composition analyses show that babingtonite has the following data: SiO₂ 53.55%, CaO 18.84%, Fe₂O₃ 13.65%, FeO 9.68%, MgO 1.44%, H₂O⁺ 1.74%, and FeO/Fe₂O₃ = 0.709, whereas brunsvigite has the data SiO₂ 33.17%, Al₂O₃ 13.03%, Fe₂O₃ 8.45%, FeO 13.06%, MgO 18.82%, H₂O⁺ 12.12%, CaO 0.87%, and FeO/Fe₂O₃ = 1.55. The evolution of mineral associations in babingtonite amygdaloid complexes suggests that the ore-forming fluids at the late stage converted from Mg- and Fe-rich fluids to Si- and Ca-rich fluids. Babingtonite crystallized in a transitional environment from meta-acid and weak reduction to meta-alkaline and weak oxidation.

Key words: babingtonite amygdaloid complex; chlorite; FeO/Fe₂O₃ ratio; genesis; basalt; Puge County in south Sichuan

收稿日期: 2014-03-19; 修订日期: 2014-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172054, 40572026)

作者简介: 张良钜(1949-), 男, 教授, 研究方向: 矿物形貌-成因矿物学, E-mail: zljpgig@glut.edu.cn

硅铁灰石是自然界极为罕见的单链钙铁硅酸盐矿物。根据前人资料,硅铁灰石主要产于花岗岩、片麻岩、洞穴的裂隙面上,也产于伟晶岩、夕卡岩中,与绿帘石、石榴石共生(中国地质科学院地质矿产所,1977; Gole, 1981; Duggan, 1986; 王濮等, 1994; 张德, 1996)。我国于 1996 年首次报道在湖北大冶夕卡岩铜矿床中发现硅铁灰石(张德, 1996), 2008 年笔者首次在云南昭通峨眉山玄武岩晶洞中发现硅铁灰石并进行了相关研究(张良钜等, 2008)。2013 年笔者在川南峨眉山杏仁状玄武岩气孔中又发现了硅铁灰石杏仁体,其地质产出与矿物共生组合均不同于前人的研究报道(中国地质科学院地质矿产所, 1977; Gole, 1981; Duggan, 1986; 王濮等, 1994; 张德, 1996; 张良钜等, 2008),这是一种新的成因类型硅铁灰石。本文以川南峨眉山硅铁灰石杏仁体的地质产出特征为基础,对硅铁灰石的化学成分,特别是 FeO/Fe_2O_3 值进行了研究,以探讨硅铁灰石形成的氧化-还原环境条件,并根据杏仁体中的共生矿物绿泥石与石英的特征,研究硅铁灰石的成因及其与共生矿物之间的生成顺序及其演化关系,探讨杏仁体成分演化与玄武岩晚期火山活动及成矿热液关系,以完善硅铁灰石的矿物学研究内容。

1 地质概况

川南普格硅铁灰石杏仁体产于上二叠统玄武岩组($P_2\beta$)中,其下伏地层为下二叠统(P_1)碳酸盐岩,两者之间呈假整合接触。根据岩石的结构构造,玄武岩可分为致密状、斑状、气孔状及杏仁状玄武岩。根据资料(张正伟等, 2004),玄武岩组($P_2\beta$)厚度在 1000 m 以上,有 4 个喷发旋回,每个旋回从底部到顶部,其岩石的结构构造从致密状→斑状→气孔状或杏仁状,呈韵律性变化,硅铁灰石杏仁体发育在喷发层顶部的杏仁状玄武岩中。下二叠统碳酸盐岩是富含有机质的生物灰岩。

玄武岩组的喷发层下部为致密状、斑状玄武岩。镜下研究玄武岩具典型的辉绿结构及细粒结构。斜长石呈自形长条板状,辉石或橄榄石为半自形-它形粒状,斜长石含量稍多于辉石,并有少量细长条状铁钛矿。斜长石新鲜干净,辉石或橄榄石有微弱蚀变。

玄武岩组上部、顶部为气孔状、杏仁状玄武岩,岩石中发育大量密集的气孔,气孔约占顶部相 30%~40%,甚至更多。气孔中的杏仁体主要矿物为绿

泥石(图 1a)、玉髓或玛瑙,其次为方解石、硅铁灰石(图 1b)、沥青等杏仁体(图 1c)。杏仁体多呈椭球状、饼状、近圆形等。岩石蚀变明显,绿泥石化普遍(图 1d)。铜矿化矿物产于玄武岩晶洞中。从晶洞壁往晶洞中心,生成顺序依次为:石英→葡萄石→铜矿物球粒(由球粒中心为自然铜,往外依次为黑铜矿、硅孔雀石等)→方解石等矿物(图 1e)。

2 杏仁体的地质产出及其矿物共生组合

根据野外杏仁体地质产出特征及薄片镜下研究,按主要成分(矿物),杏仁状玄武岩气孔中可划分出 5 种不同成分类型的杏仁体,即绿泥石、石英、硅铁灰石、沥青及方解石等。它们的矿物组合及生成顺序有明显差异。

(1) 绿泥石杏仁体:杏仁体中以绿泥石矿物为主。从杏仁体壁往中心依次分别产出玉髓(玛瑙)薄壳→纤维状绿泥石→球粒状绿泥石(图 1d),少数杏仁体中心产出有沥青(图 1f)。

(2) 石英杏仁体:从杏仁体壁往中心依次分别产出蛋白石→玉髓→玛瑙→水晶晶体。

(3) 硅铁灰石杏仁体:从杏仁体壁往中心依次分别产出为玉髓→水晶→硅铁灰石(图 1g),或者玉髓或玛瑙→绿泥石→石英→硅铁灰石(图 1h)。

(4) 沥青杏仁体:从杏仁体壁往中心依次分别产出水晶晶体→沥青团块→自然铜(图 1c)(张良钜等, 2013)。

(5) 方解石杏仁体:从杏仁体壁往中心依次分别产出玉髓或玛瑙→方解石(但仍然保留绿泥石的纤维状结构)。

根据 5 种不同类型的杏仁体中矿物(成分)组合及生成顺序,每种类型杏仁体的壁或边都产出一圈硅质壳(玉髓或玛瑙或水晶),即石英最先晶出。

3 硅铁灰石杏仁体的特征

3.1 形貌与性质

矿区硅铁灰石产出在川南普格县东山乡六水坪村杏仁状玄武岩气孔中,由气孔壁往中心依次分别产出玉髓壳(0.5~1 mm)→绿泥石→硅铁灰石。晶体由 5 个平行双面组成薄板状晶形(图 1h),粒径约 2~5 mm。晶体以{010}单形最发育,单偏光镜下正高突起,不同切面分别可见两组解理、一组解理或无

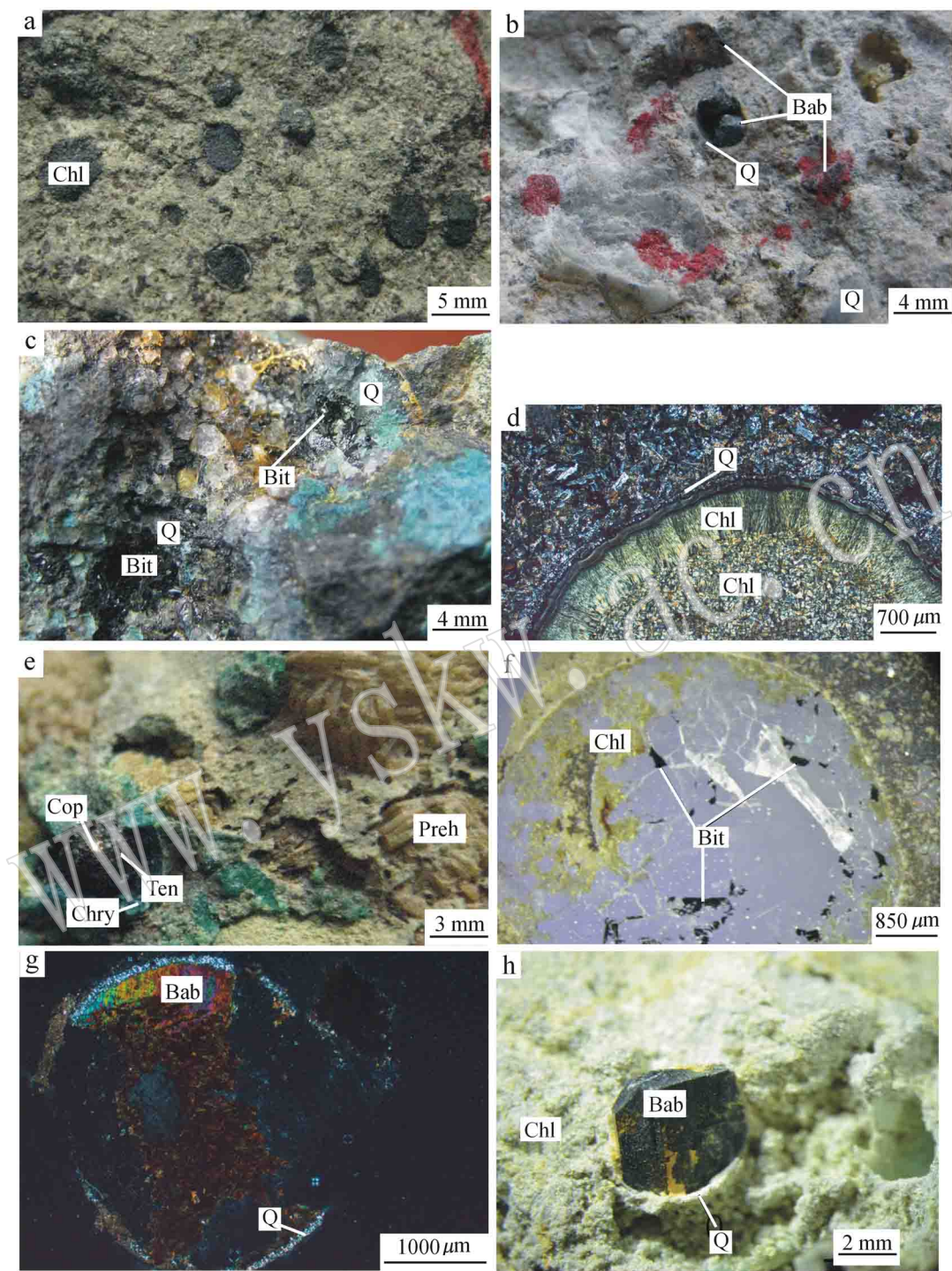


图 1 杏仁体照片

Fig. 1 Photographs of amygdaloid

a—绿泥石(Chl)杏仁体；b—硅铁灰石(Bab)与石英(Q)杏仁体；c—沥青(Bit)杏仁体；d—绿泥石杏仁体的圈层结构；e—晶洞中葡萄石(Preh)与铜球粒[由自然铜(Cop)、黑铜矿(Ten)、硅孔雀石(Chry)组成]；f—绿泥石杏仁体中的沥青；g—硅铁灰石杏仁体的显微照片(+)

h—气孔中硅铁灰石晶体

a—chlorite (Chl) amygdaloid; b—babingtonite (Bab) amygdaloid and quartz (Q) amygdaloid; c—bitumen (Bit) amygdaloid; d—circle layer texture of chlorite amygdaloid; e—prehnite (Preh) and copper pelletoidal particles [composed of copper (Cop), tenorite (Ten) and chrysocolla (Chry)] in vugs; f—bitumen in chlorite amygdaloid; g—microphotograph of babingtonite amygdaloid (+); h—babingtonite crystal in vesicle

解理,其中一组解理密集且发育,另一组解理发育中等,具显著多色性, N_g 浅粉黄色, N_p 暗蓝色;正交偏光下显三级橙红、蓝,但极不均匀(图1g)。用英国“Dialdex”型转盘式折射仪测试硅铁灰石的抛光面,其折射率 $N_g = 1.751$, $N_m = 1.730$, $N_p = 1.718$, $N_g - N_p = 0.033$,二轴正晶,静水称重法实测相对密度为 3.18 g/cm^3 。

3.2 微区 X 射线单晶衍射分析

在中南大学地质系谷湘平实验室对硅铁灰石单

晶样品进行了微区 X 射线单晶衍射分析。仪器为日本理学公司产的 Rigaku D/Max Rapid II R 型 X 射线衍射仪,测试条件:电压 45 kV,电流 45 mA, $\text{CuK}\alpha 2\theta = 5^\circ \sim 160^\circ$,步长 $2\theta = 0.045^\circ$ 。根据单晶衍射分析结果得到硅铁灰石的晶胞参数为: $a = 0.745 \text{ nm}$, $b = 1.2467 \text{ nm}$, $c = 0.6673 \text{ nm}$, $\alpha = 85.7596^\circ$, $\beta = 94.178^\circ$, $\gamma = 112.1803^\circ$,空间群: $P\bar{1}$, $Z = 2$,与 JCPDS45-1387 号卡吻合(表1、图2),与文献张德,1996;张良钺等,2008)结果基本一致。

表1 硅铁灰石的晶体衍射数据

Table 1 X-ray crystal diffraction data for babingtonite

2θ	$d(\text{Å})$	I/I_0	hkl	2θ	$d(\text{Å})$	I/I_0	hkl
7.830	11.282	6.58	010	34.193	2.558	22.43	$\bar{2}22$
12.825	6.897	18.52	100	36.446	2.463	51.06	$\bar{1}32$
13.276	6.663	38.47	001	36.898	2.434	42.26	$\bar{3}10$
17.416	5.088	10.79	$\bar{1}11$	41.074	2.196	36.66	$\bar{3}41$
20.065	4.422	9.22	021	41.588	2.170	66.00	$\bar{1}13$
21.823	4.069	20.09	111	44.603	2.030	15.64	$\bar{3}11$
23.882	3.723	9.36	$\bar{2}10$	55.176	1.663	65.81	$\bar{3}31$
25.824	3.447	53.55	200	56.118	1.638	20.84	$\bar{2}42$
26.733	3.332	35.23	002	58.591	1.574	17.98	114
27.219	3.274	14.78	$\bar{2}21$	61.878	1.498	10.49	$\bar{3}80$
28.399	3.140	26.19	$0\bar{1}2$	65.204	1.430	17.07	$\bar{1}54$
28.659	3.112	73.42	$\bar{1}12$	66.692	1.401	9.95	$\bar{4}62$
29.696	3.006	55.04	210	70.186	1.340	8.30	$\bar{1}64$
30.283	2.949	100.0	022	71.633	1.316	15.24	304
31.098	2.874	52.14	040	74.549	1.272	22.57	511
32.664	2.739	53.49	$\bar{1}41$				

3.3 红外光谱

挑选出硅铁灰石单晶体进行了红外光谱测试。仪器为美国 NICOLET NEXUS 470FT-IR 型红外光谱仪,试样用 KBr 压片法,扫描范围从 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$,扫描次数为 32,分辨率为 4 cm^{-1} 。得到的红外光谱曲线如图3,与前人(张德,1996;张良钺等;2008)结果基本一致。

红外光谱图谱中 3484 cm^{-1} 为基团 $(\text{OH})_n$ 特征频率, $600 \sim 765 \text{ cm}^{-1}$ 为 Si—O—Si 的对称伸缩振动带。由于硅铁灰石属于单链硅酸盐,链的重复周期为 5 个硅氧四面体 $([\text{SiO}_4])$,在图谱中出现有相应的 764 、 705 、 696 、 656 、 646 cm^{-1} 等 5 个吸收带,与 $[\text{SiO}_4]$ 重复周期个数相一致,且这 5 个吸收带的位置与间距有一定的规律性,即 656 与 646 cm^{-1} 及 705 与 696 cm^{-1} 中的每两个吸收带的间距约 10 cm^{-1} , 696 与 656 cm^{-1} 及 764 与 705 cm^{-1} 中的每两个吸收的间距约 $40 \sim 60 \text{ cm}^{-1}$ 。分裂间距的不同可能与链间阳离子键合力的差异有关,对于硅铁灰石

而言,链间的阳离子分别是 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} ,其中 Ca^{2+} 半径最大,半径最小为 Fe^{3+} 。 $600 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 强吸收区属于 Si—O 弯曲振动与 M(阳离子)—O 的伸缩振动。

3.4 差热与热重分析

由于实验条件或样品质量的原因,至今未见前人有关硅铁灰石热学性质的报道(王濮等,1994;张德,1996;张良钺等,2008)。笔者对川南峨眉山硅铁灰石单矿物晶体进行了差热与热重分析的研究,测试仪器为美国 TA 仪器公司生产的同步热分析仪,仪器型号 SDT-Q600,仪器的温度范围为室温 $\sim 1500^\circ\text{C}$,差热精确度 $0.1 \mu\text{V}$,热重精确度 $0.1 \mu\text{g}$,调温速率 $0.1 \sim 100^\circ\text{C}/\text{min}$ 。测试样品用量 10 mg ,升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。得到的差热曲线(图4)显示,在 861°C 有一明显的吸热谷, 1092°C 为放热峰,紧接着在 1155°C 产生一个尖而锐的吸热谷。根据红外光谱图谱(图3中的 3484 cm^{-1})研究结果和差热(DTA)分析曲线,温度 861°C 时的吸热谷,可认为是

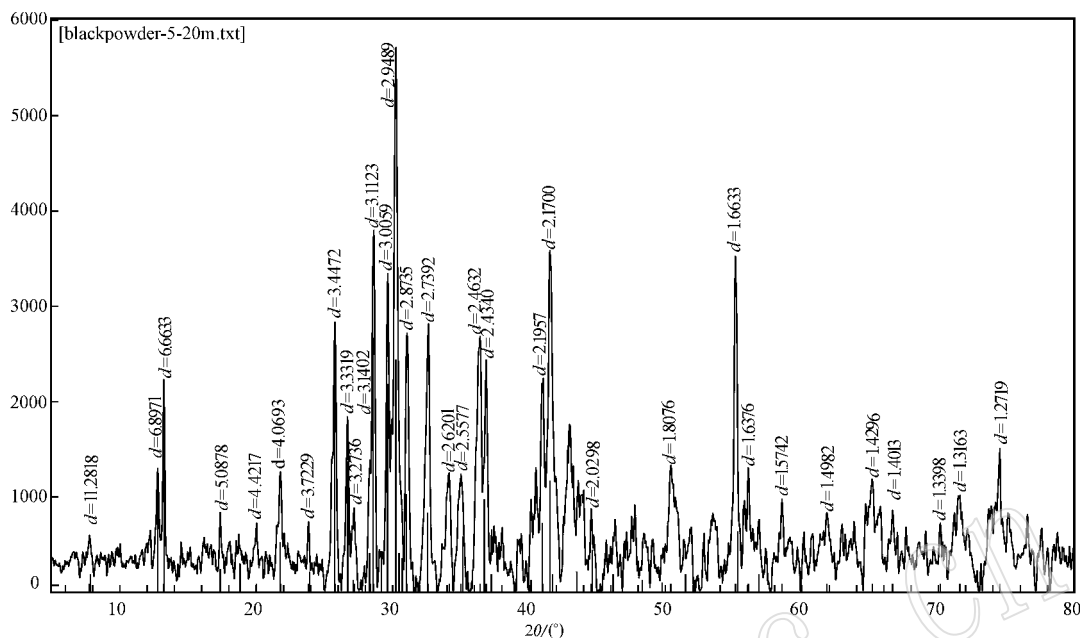


图 2 硅铁灰石的微区 X 射线衍射图

Fig. 2 Micro- XRD pattern of babingtonite

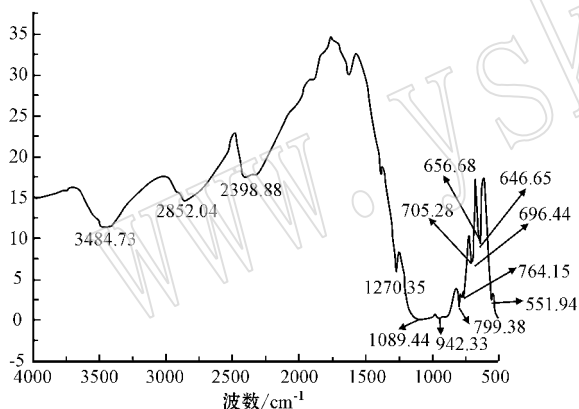


图 3 硅铁灰石红外吸收光谱

Fig. 3 Infrared absorbed spectra of babingtonite

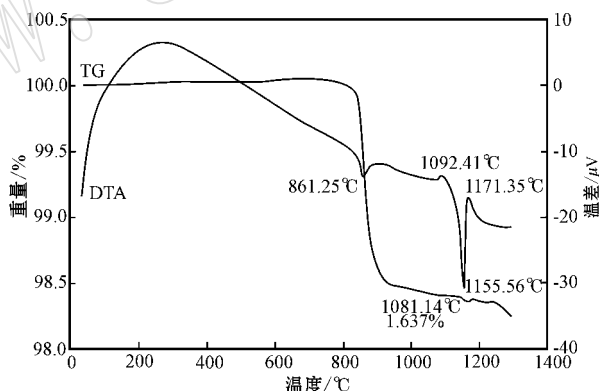


图 4 硅铁灰石晶体的差热分析 (DTA) 与热重 (TG) 分析

Fig. 4 Differential thermal (DTA) and thermo-gravimetric (TG) analyses of babingtonite

羟基水的排出所致,热重 (TG) 分析表明其排出重量 (即脱水量) 为 1.637%, 这与化学全分析的 H_2O^+ 的 1.74% 基本一致。DTA 曲线 1092 °C 放热峰为硅铁灰石的相变峰, 即硅铁灰石脱出全部羟基水后, 其结构遭到破坏而转变为新的物相, 1155 °C 为新物相的吸热谷。热重 (TG) 分析表明硅铁灰石脱水温度较高 (861 °C), 温度 < 861 °C 时硅铁灰石的重量几乎无变化, 为一平滑曲线, 表明硅铁灰石晶体中也几乎不含吸附水或结晶水, 如果是结晶水其脱水温度不可能达到 861 °C。当温度一旦到达 861 °C 时, 失重曲线则发生急转直下变化, 脱出几乎所有的结构水, 即 H_2O^+ , 重量达 1.637%, 也证明 $(OH)^-$ 与 O 一样与

Si 结合形成硅铁灰石重复周期为 5 个硅氧四面体的 $[Si_5O_{14}(OH)]$ 的单链硅酸盐矿物, 与图 3 中在 600 ~ 765 cm^{-1} 区间内出现 5 个吸收带相一致。

3.5 化学成分

前人 (张德, 1996; 张良钜等, 2008) 对硅铁灰石的成分及含量的确定均采用了电子探针 (EPMA) 分析法, 其成分数据有较大的差异, 王濮等 (1994) 也未列出硅铁灰石的成分与含量。笔者在可能的条件下, 对硅铁灰石的化学成分与含量进行了化学全分析与 EPMA 等两种方法的综合测试。EPMA 法采用日本电子 JEOL JXA-8230 电子探针仪选取样品的 3 个点进行了测试, 电压 15 kV, 电流 20 nA, 其分

析结果(表 2)显示,3 个点的成分较一致,但不能定量区分 FeO 、 Fe_2O_3 含量及 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 值,也不能确定 H_2O^+ 的含量。在 EPMA 测试基础上,笔者又对硅铁灰石的成分进行化学全分析测试,以定量确定 FeO 、 Fe_2O_3 与 H_2O^+ 含量及其 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 值。将含硅铁灰石杏仁体的玄武岩进行破碎或用手方法分离出硅铁灰石单晶体,样品性状为粉末,检验环

境:温度 25°C ,湿度 40%,由中国有色桂林矿产地质研究院测试中心采用硅酸盐岩石化学分析法(GB/T14506-2010)进行测试,分析结果显示,硅铁灰石化学成分($w_B/\%$)为 SiO_2 53.55, MgO 1.44, CaO 18.84, MnO 0.89, FeO 9.68, Fe_2O_3 13.65, TiO_2 0.18, Cr_2O_3 0.017, H_2O^+ 1.74, 总量 99.99, $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 0.71。

表 2 硅铁灰石化学成分的 EPMA 分析结果

 $w_B/\%$

Table 2 EPM analyses of babingtonite

氧化物	SiO_2	MgO	CaO	MnO	FeO^*	Al_2O_3	SrO	BaO	K_2O	TiO_2	Na_2O	总量
lsg-a	53.29	0.731	19.392	0.636	22.543	0.504	0.195	0.078	0.011	0.054	0.036	97.47
lsg-b	53.24	0.633	19.782	0.667	22.217	0.408	0.152		0.003		0.044	97.15
lsg-c	52.8	0.01	19.774	0.926	22.391	0.177	0.168	0.014	0.005	0.047	0.015	96.33
平均值	53.11	0.458	19.649	0.743	22.384	0.363	0.172	0.046	0.006	0.051	0.032	97.01

上述两种测试结果表明硅铁灰石的成分有较好的一致性。据化学全分析结果,以 14 个 O 及 1 个(OH)共 15 个计算公约数,计算出硅铁灰石晶体化学式为 $(\text{Ca})_{1.891}(\text{Fe}_{0.758}^{2+}\text{Mg}_{0.201}\text{Mn}_{0.070}^{2+})_{1.029}(\text{Fe}_{0.962}^{3+}\text{Ti}_{0.013}\text{Cr}_{0.001})_{0.976}[\text{Si}_{5.016}\text{O}_{13.848}(\text{OH})_{1.152}]$

为了更好地探讨硅铁灰石的成因及其成分与成矿环境氧化-还原条件的关系,根据研究区硅铁灰石的地质产出及其矿物的共生组合,选择与硅铁灰石共生的绿泥石也进行了 EPMA 及化学全分析两种

测试,EPMA 分析结果列于表 3。绿泥石全化学分析结果($w_B/\%$)为 SiO_2 33.17, MgO 18.82, CaO 0.87, FeO 13.06, Fe_2O_3 8.45, Al_2O_3 13.03, Cr_2O_3 0.0014, CuO 0.011, H_2O^+ 12.12, 总量 99.53, $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 1.55。上述结果表明,杏仁体中绿泥石属铁镁绿泥石,成矿溶液富 Mg、Fe、Al 而贫 Ca,其 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1.55$ 。因此可根据绿泥石化学成分及 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 值来探讨杏仁体中的硅铁灰石与绿泥石的成矿环境的成分演化关系及其它们之间的成因联系。

表 3 绿泥石化学成分的 EPMA 分析结果

 $w_B/\%$

Table 3 EPM analyses of chlorite

氧化物	SiO_2	MgO	CaO	MnO	FeO^*	Al_2O_3	K_2O	CuO	Cr_2O_3	TiO_2	总量
lsg-a	32.69	15.85	0.66	0.09	21.62	16.88	0.00	0.02	0.74	0.10	88.65
lsg-b	32.94	16.20	0.61	0.12	21.99	16.28	0.05	0.13	0.69	0.04	89.05
平均值	32.82	16.03	0.64	0.11	21.81	16.58	0.03	0.08	0.72	0.07	88.89

4 讨论

硅铁灰石产于杏仁状玄武岩的气孔中,表明玄武岩浆由早期以火山侵入活动为主,逐步演化为晚期或末期的以火山溢出或喷发活动为主,随后进一步演化为富含挥发分的基性火山热液。火山热液在构造应力的驱动下,在早先形成的气孔状玄武岩的气孔中结晶,形成富 Mg、Fe、Al 而贫 Ca 的绿泥石。绿泥石的化学成分基本上反映基性或超基性岩的成分特点,因此该绿泥石是由基性火山热液直接结晶形成的原生绿泥石,而非蚀变作用产物。基性火山热液在形成玄武岩气孔中绿泥石的同时,也对玄武岩中早先结晶的基性斜长石与辉石及钛铁矿等矿物

进行热液蚀变或溶蚀,使斜长石、辉石绿泥石化,条板状钛铁矿遭到溶蚀或氧化或水化。根据资料,玄武岩中未变质的斜长石、辉石的 SiO_2 含量约 55%,它们蚀变为绿泥石时,其 SiO_2 含量约为 35%。因此,斜长石、辉石蚀变成绿泥石时,除部分 SiO_2 参加绿泥石形成外,剩余 SiO_2 则转入蚀变热液中。随蚀变作用不断进行与深入,转入热水溶液中的 SiO_2 的含量也不断增加。斜长石、辉石热液蚀变为绿泥石的同时,其成分中的 Ca 也转入热水溶液中,随着玄武岩气孔中原生结晶的绿泥石及玄武岩中的斜长石与辉石绿泥石化的不断进行,由火山热液与热水溶液混合作用形成的成矿热液愈加富含 Ca、Fe 而贫 Mg,同时成矿作用的物理、化学条件不断发生变化,成矿溶液也发生相应的演化,在玄武岩气孔中的孔壁首

先结晶出玉髓或石英,硅铁灰石随后晶出(Wise and Moller., 1990; Cepedal *et al.*, 2003)。因此硅铁灰石产出在硅铁灰石杏仁体或者绿泥石杏仁体的中心,与石英或水晶密切共生在一起,并且硅铁灰石总是结晶在石英之后。杏仁体中绿泥石和硅铁灰石的成分及其 FeO/Fe_2O_3 值数据显示,绿泥石是在弱酸性、弱还原的环境条件下结晶形成,而硅铁灰石则是弱碱性、弱氧化的环境中的产物,即研究区晚期或末期的火山活动形成气孔构造玄武岩,其后成矿热液依次经历了由早先的火山热液→蚀变热液→热水溶液演变,相应成矿环境成分由早期富 Mg、Fe 贫 Ca、Si 的火山热液向富 Ca、Fe、Si 贫 Mg 的热水溶液演化,由早期以弱酸性、弱还原条件为主逐步演化为以偏碱性、弱氧化为主的环境。硅铁灰石是由还原环境向氧化环境转化过程中的一种过渡产物,根据其 FeO/Fe_2O_3 值可以判断成矿的氧化-还原环境的程度。研究区硅铁灰石是富 Ca、Fe、Si 的成矿热液在偏碱性弱氧化的环境条件下结晶形成的矿物,它的产出是判断成矿环境由还原环境向氧化环境转化过程中的一个标志。而滇北硅铁灰石产出在玄武岩的晶洞中,与其共生矿物主要是葡萄石、绿帘石、铁绿纤石、黄铜矿及方解石,结晶温度较低($< 200\text{ }^\circ\text{C}$) (张良钜等, 2008),综合前人研究成果(中国地质科学院地质矿产所编著, 1977; Gole, 1981; Duggan, 1986; 王濮等, 1994; 张德, 1996),认为川南普格杏仁状玄武岩中的硅铁灰石杏仁体是一种新的成因类型。

5 几点认识

(1) 川南普格杏仁状玄武岩气孔中产出硅铁灰石、绿泥石、石英、方解石、沥青等 5 种不同成分类型的杏仁体,它们是火山活动晚期成矿热液中的 Mg、Al、Fe、Ca、Si 等主要成分的演化产物,也是成矿的氧化-还原环境演变的产物。

(2) 成矿热液经历由早期的火山热液→蚀变热液→热水溶液的转化,因此成矿热液是由火山热液、蚀变热液与热水溶液等叠加作用形成的综合热液。早期的火山热液主要形成绿泥石杏仁体,蚀变热液主要导致玄武岩中的斜长石、辉石的绿泥石化,成矿热液作用主要形成矿区的硅铁灰石杏仁体及玄武岩晶洞中的葡萄石。

(3) 根据杏仁体中绿泥石与硅铁灰石的共生组合,判断成矿溶液由早期富 Mg、Al、Fe 而贫 Ca、Si 向

富 Fe、Ca、Si 而贫 Mg、Al 方向演化。

(4) 矿区产出的硅铁灰石是由还原环境向氧化环境转化过程中的一种过渡产物,是富 Ca、Fe、Si 的成矿热液在偏碱性弱氧化的环境条件下结晶形成的。

(5) 可根据杏仁体中绿泥石与硅铁灰石的 FeO/Fe_2O_3 值大小,了解矿物形成的氧化-还原环境的变化。

References

- Cepedal A, Moreiras D, Martin-Izard A, *et al.* 2003. The occurrence and origin of babingtonite in the El Valle-Boinas Cu-Au deposit in Asturias, Spain [J]. *Eur. J. Mineral.*, 15: 1069~1077.
- Duggan M B. 1986. Babingtonite and Fe-rich Ca-Al silicates from western Southland [J]. *New Zealand Mineral Mag.*, 50(4358): 657~665.
- Gole M J. 1981. Ca-Fe-Si Skarns containing babingtonite: first known occurrence in Australia [J]. *Canadian Mineralogist*, 19: 269~277.
- Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. 1977. *Microscopic Identification of Transparent Minerals* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 506, 526 (in Chinese).
- Wang Pu, Pan Zhulu, Weng Lingbao, *et al.* 1994. *Systematic Mineralogy* (2) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 324 (in Chinese).
- Wise W S and Moller W P. 1990. Occurrence of Ca-Fe silicate minerals with zeolites in basalt cavities at Bombay, India [J]. *Eur. J. Mineral.*, 2: 875~883.
- Zhang De. 1996. The first discovery for babingtonite in China [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 16(3): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangju, Ruan Qingfeng, Rao Can, *et al.* 2008. Discovery and research on babingtonite in the drusy cavities of basal [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(4): 360~366 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangju, Zeng Nanshi, Ruan Qingfeng, *et al.* 2013. Study on the genesis and characteristics of micro-morphologies for bitumen in amygdaloidal basalt at Southern Sichuan-Northern Yunnan area [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 523~528 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhengwei, Cheng Zhandong, Zhu Bingquan, *et al.* 2004. The relationship between the horizon of the Emeishan Basalt formation and copper mineralization [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(5): 503~508 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 王濮,潘兆麟,翁玲宝,等. 1994. 系统矿物学(中) [M]. 北京:地质出版社, 324.
- 张德. 1996. 硅铁灰石在我国的首次发现 [J]. *矿物岩石*, 16(3): 1~6.
- 张良钜,阮青峰,饶灿,等. 2008. 玄武岩晶洞中硅铁灰石的发现与研究 [J]. *矿物学报*, 28(4): 360~366.
- 张良钜,曾南石,阮青峰,等. 2013. 川南滇北交界处杏仁状玄武岩中的沥青微形貌特征与成因研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 32(4): 523~528.
- 张正伟,程占东,朱炳泉,等. 2004. 峨眉山玄武岩组铜矿化与层位关系研究 [J]. *地球学报*, 25(5): 503~508.
- 中国地质科学院地质矿产所编著. 1977. *透明矿物显微镜鉴定表* [M]. 北京:地质出版社, 506, 526.