

任杰, 郝爱华, 郑江, 等. 川西南峨眉山玄武岩中蚀变绿泥石的成分特征及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(3): 877-889. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220181.

Ren Jie, Xi Aihua, Zheng Jiang, et al. Composition Characteristics and Geological Significance of Altered Chlorite in Basalt of Emeishan, Southwestern Sichuan. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 54(3): 877-889. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220181.

川西南峨眉山玄武岩中蚀变绿泥石的成分特征及其地质意义

任杰¹, 郝爱华¹, 郑江¹, 武浩宇², 李亚³, 成炼¹, 葛玉辉¹, 姜欢¹

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 615000

2. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司, 西安 710016

3. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 成都 610950

摘要:在火山岩和碎屑岩储层中普遍发育大量绿泥石,影响着物性。为查明火山岩中蚀变绿泥石的成因及其对储层物性的影响,本次工作选取川西南峨眉山典型剖面、ZG1井、ZG2井以及YT1井等系列玄武岩样品进行岩相学研究和电子探针微区成分分析。结果显示:玄武岩中绿泥石大致可分为显晶质、隐晶质和微晶3种结晶类型,总体上属于富铁种属的铁斜绿泥石(辉绿泥石)和铁镁绿泥石,形成于富铁的还原环境;隐晶质与微晶和显晶质绿泥石分别受到岩浆期后热液和来自深部的多期次构造热液叠加蚀变的控制,形成主要表现为 Fe^{2+} 对 Mg^{2+} 的成分置换,反映流体具有从碱性向弱酸性-中酸性过渡的变化规律。绿泥石的形成过程对火山岩储集空间的影响具有双重作用:岩浆期后热液的充填—结晶充填减少了火山岩原生孔隙并降低储层物性,对火山岩储层起到破坏性作用;多期次构造热液的溶蚀—迁移—沉淀则产生了新的微孔,对火山岩储层起到建设性作用。

关键词:绿泥石;微区成分分析;峨眉山玄武岩;火山岩储层;川西南地区

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220181

中图分类号: P58

文献标志码: A

Composition Characteristics and Geological Significance of Altered Chlorite in Basalt of Emeishan, Southwestern Sichuan

Ren Jie¹, Xi Aihua¹, Zheng Jiang¹, Wu Haoyu², Li Ya³, Cheng Lian¹, Ge Yuhui¹, Jiang Huan¹

1. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 615000, China

2. PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710016, China

3. Exploration and Development Research Institute, Petro China Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610950, China

Abstract: Previous research has shown that a large number of chlorites are commonly developed in

收稿日期: 2022-06-17

作者简介: 任杰(1998—),男,硕士研究生,主要从事火山岩蚀变和储层方面的研究, E-mail: renjiegeo@163.com

基金项目: 中石油西南油气田分公司项目(XNS14JS2019-029); 中国地质调查局项目(DD20190159-30)

Supported by the Project of Petro China Southwest Oil & Gas Field Company (XNS14JS2019-029) and the Project of China Geological Survey (DD20190159-30)

volcanic and clastic rock reservoirs, which affects the physical properties of these reservoirs. In order to study the influence of the genetic mechanism of chlorite alteration in volcanic rocks on reservoir physical properties, a series of basalt samples from the typical section of Mount Emei, wells ZG1, ZG2 and YT1 were selected for petrographic research and micro-area composition analysis. The results show that chlorite in basalt can be roughly divided into three crystal types: Crystalline, cryptocrystalline and microcrystalline, and generally belonging to ferroan clinocllore (diabantite) and brunsvigite, formed in an iron-rich reducing environment. The rare earth element characteristics show that the three chlorite types result from the multi-stage superposition and transformation of hydrothermal fluids and tectonic hydrothermal fluids after the magmatic stage. During their formation process, it is mainly represented by the replacement of Fe^{2+} with Mg^{2+} , reflecting a transition in fluid from alkaline to weakly acidic, following an intermediate acid acid variation law. The formation process of chlorites has a dual effect on the storage space of volcanic rocks; The filling and crystallization of hydrothermal fluid after the magmatic stage reduce the primary pores of volcanic rocks, thereby diminishing reservoir physical properties. Whereas the dissolution-migration of tectonic hydrothermal fluids generates new micropores, enhancing reservoir physical properties.

Key words: chlorite; electron probe analysis; Emeishan basalt; volcanic rock reservoir; southwest Sichuan

0 引言

峨眉山大火成岩省是 1929 年被赵亚曾先生命名的我国目前唯一被国际学术界认可的大火成岩省,以四川、贵州及云南等地区广泛发育的二叠纪中晚期巨厚的“峨眉山玄武岩”为标志^[1-2]。中国石油天然气集团有限公司勘探的 YT1 井成功测试,并获得日产量为 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的工业气流,标志着四川盆地内二叠系火山岩勘探取得重大突破^[3-4]。前人^[5-10]研究表明,川西南地区火山岩原生孔隙多为孤立的孔洞系统,连通性较差,其储集空间主要为后期形成的裂隙以及各种次生孔隙。火山岩常见的充填与胶结的绿泥石,不仅是火山岩储层中数量最多的次生蚀变矿物,也广泛存在碎屑岩储层中,主要由黏土矿物在地层埋藏演化中转化形成;其不仅能形成薄膜,抑制石英的自身加大和在孔隙内部形成衬里,降低压实作用对孔隙的减少,还能保持储层油润湿性。同时,作为敏感性的黏土矿物,绿泥石通常也会占据有效空间,并对储层起到破坏性的作用^[11-17]。

火山岩中的绿泥石一般被认为是其中的辉石或者角闪石等镁铁质矿物的热液蚀变成因,但对火山岩储层的影响前人鲜有研究。对四川西南部多口钻井岩心及典型的火山岩剖面岩石学及矿物学研究发现,峨眉山玄武岩中的绿泥石在形态、产状、光学性质及空间分布上具有多样性特点,暗示它们可能具有不同的生成顺序及成因。前人^[18-22]研究表明,绿

泥石的种类和化学成分与原岩、环境以及流体性质有关,其对于储层形成机制以及成矿作用中的地层埋深、流体来源以及地质演化过程的物理化学条件变化均具有指示作用。本次工作在已有的岩石学基础上,以电子探针原位微区成分分析为主,结合稀土元素测试分析,对川西南火山岩中蚀变绿泥石的成分特点、形成环境和形成期次进行研究,还原其蚀变演化过程,探讨玄武岩成岩后热液活动对火山岩储层物性的制约机制,以期为四川盆地火山岩储层及预测提供矿物学支撑。

1 区域地质概况

研究区地处扬子板块西缘的四川盆地西南部(图 1),位于龙泉山断裂与宝兴—宜宾断裂的交会处。区内发育峨眉山大火成岩省中带的溢流相基性玄武岩($P_2\beta$),与下伏的茅口组(P_2m)生屑灰岩及上覆的宣威组(P_3x)碎屑岩呈不整合接触或假整合接触。玄武岩在盆地内埋深一般为 1 000~4 500 m,在盆地的西南部边缘常出露于地表,出露厚度为 400~500 m,且具有从 SW 向 NE 方向逐渐变薄的趋势变化。

本次重点研究的火山岩剖面位于沙湾镇二峨山范店乡(EM 剖面),剖面起点坐标为 $29^\circ 22' 20''\text{N}$, $103^\circ 26' 27''\text{E}$;终点坐标为 $29^\circ 22' 52''\text{N}$, $103^\circ 26' 57.52''\text{E}$,总长约 430 m,出露在“村村通”公路两侧,弱风化且

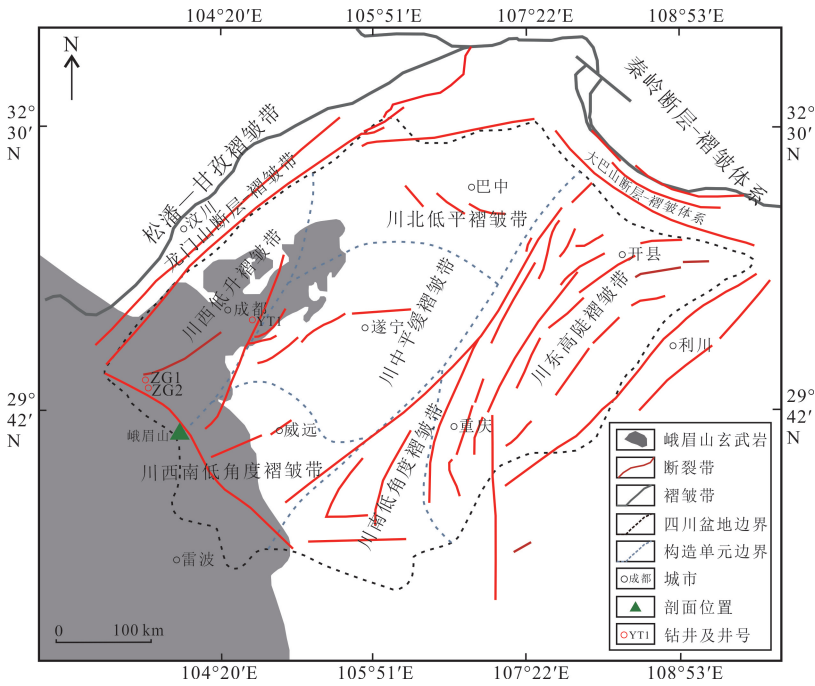
连续性好。实测剖面(图2)显示,玄武岩自下而上可识别出辉石玄武岩、斜斑玄武岩与粗面玄武岩3种岩性(图3)。

辉石玄武岩:岩石多呈致密块状构造,无斑或者少斑结构(图3d)。斑晶为斜长石或者少量的辉石。基质矿物组合为长石、辉石与磁铁矿,构成间隐-间粒结构,普遍发生绿泥石化、皂石化、绿帘石化、沸石化、碳酸盐化及硅化等蚀变,局部强烈蚀变,孔洞充填绿泥石、方解石等热液矿物构成次生杏仁体,在空间上受构造控制呈串珠状分布。

斜斑玄武岩:岩石主要呈致密块状构造,少斑和聚斑结构(图3e)。斑晶体积分数在5%~20%之间,主要为柱状-板柱状斜长石。基质由板柱状的微

晶长石、不透明磁铁矿、火山玻璃及绿泥石化辉石颗粒构成间隐-间粒结构。长石普遍发生高岭土化和绢云母化,蚀变表面略显污浊,辉石等暗色矿物通常发生绿泥石化和褐铁矿化蚀变,蚀变形成的基质溶孔常被隐晶质绿泥石充填。

粗面玄武岩:多呈致密块状构造,无斑或少斑结构。斑晶主要为斜长石和钾长石(图3f),体积分数不足10%,且钾长石以发育卡氏双晶为特征。基质长石与粒间充填的辉石及磁铁矿构成间粒结构,局部可见间隐与填间结构。蚀变矿物以绿泥石为主,含少量钛铁氧化物、石英及方解石等,靠近断裂构造的区域杏仁体大量发育,其中常见石英、绿泥石、沸石及方解石等热液矿物充填。



据文献[23]修编。

图1 四川盆地及周边峨眉山玄武岩和构造分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of the distribution of basalts and structures in Sichuan basin and surrounding Mount Emei

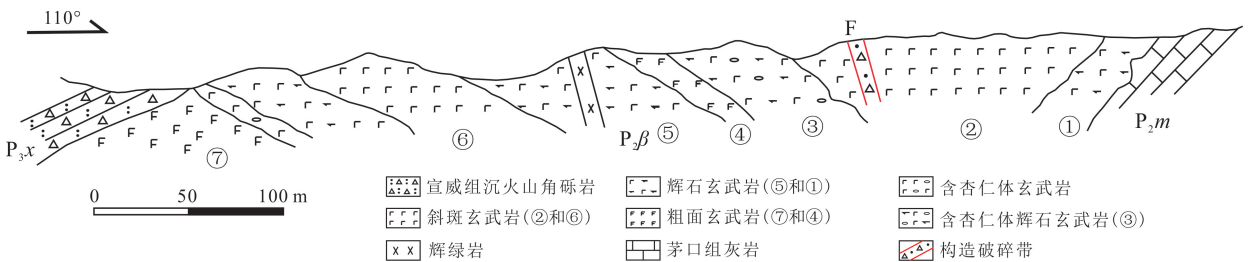
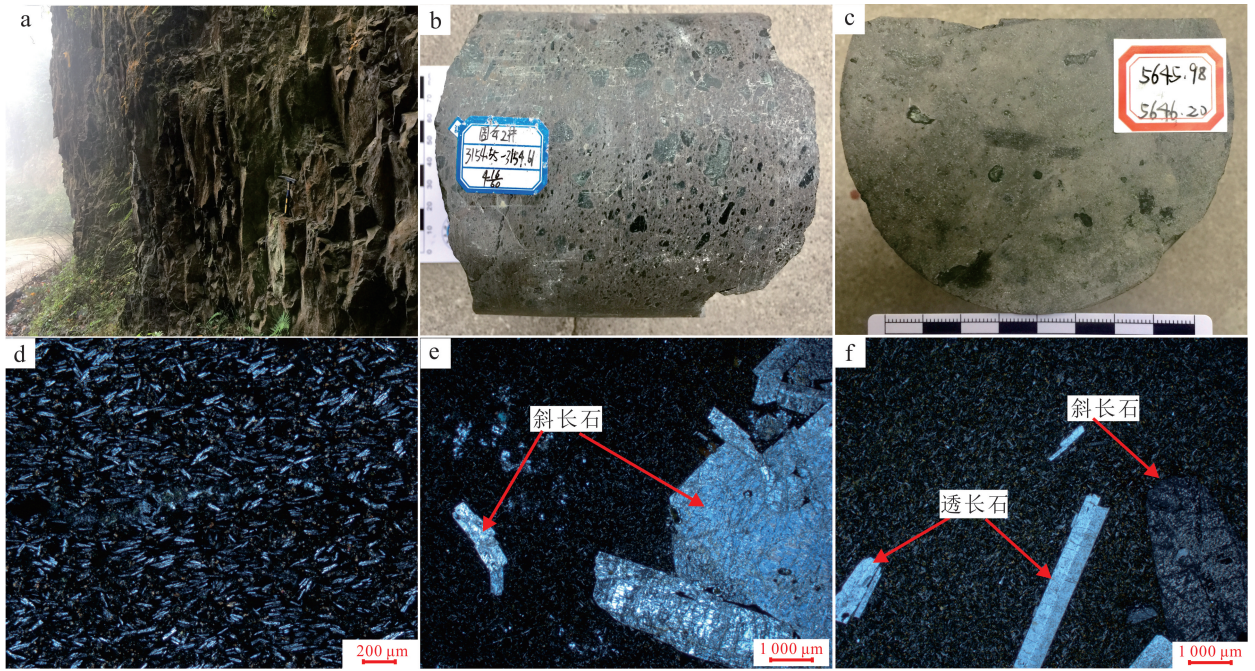


图2 峨眉山沙湾镇范店乡火山岩剖面岩性分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of lithologic distribution of volcanic rock section in Fandian Township, Shawan Town, Mount Emei



a. EM 剖面,玄武岩柱状节理;b. ZG2 井,3 154.55~3 154.61 m,灰色玄武岩,发育大量杏仁体充填绿泥石;c. YT1 井,5 645.98~5 646.20 m,灰色玄武岩,发育少量杏仁体全充填;d. EM 剖面,辉石玄武岩,斑晶不发育,基质由斜长石和隐晶质构成间隙结构(+);e. EM 剖面,斜斑玄武岩,粗大的斜长石斑晶聚集成聚斑结构(+);f. EM 剖面,粗面玄武岩,发育透长石斑晶和斜长石斑晶,透长石 2 mm×8 mm,斜长石 4 mm×8 mm(+).

图 3 川西南玄武岩特征和镜下图像

Fig.3 Feature and microscope photos of basalt in southwestern Sichuan

2 绿泥石镜下特征

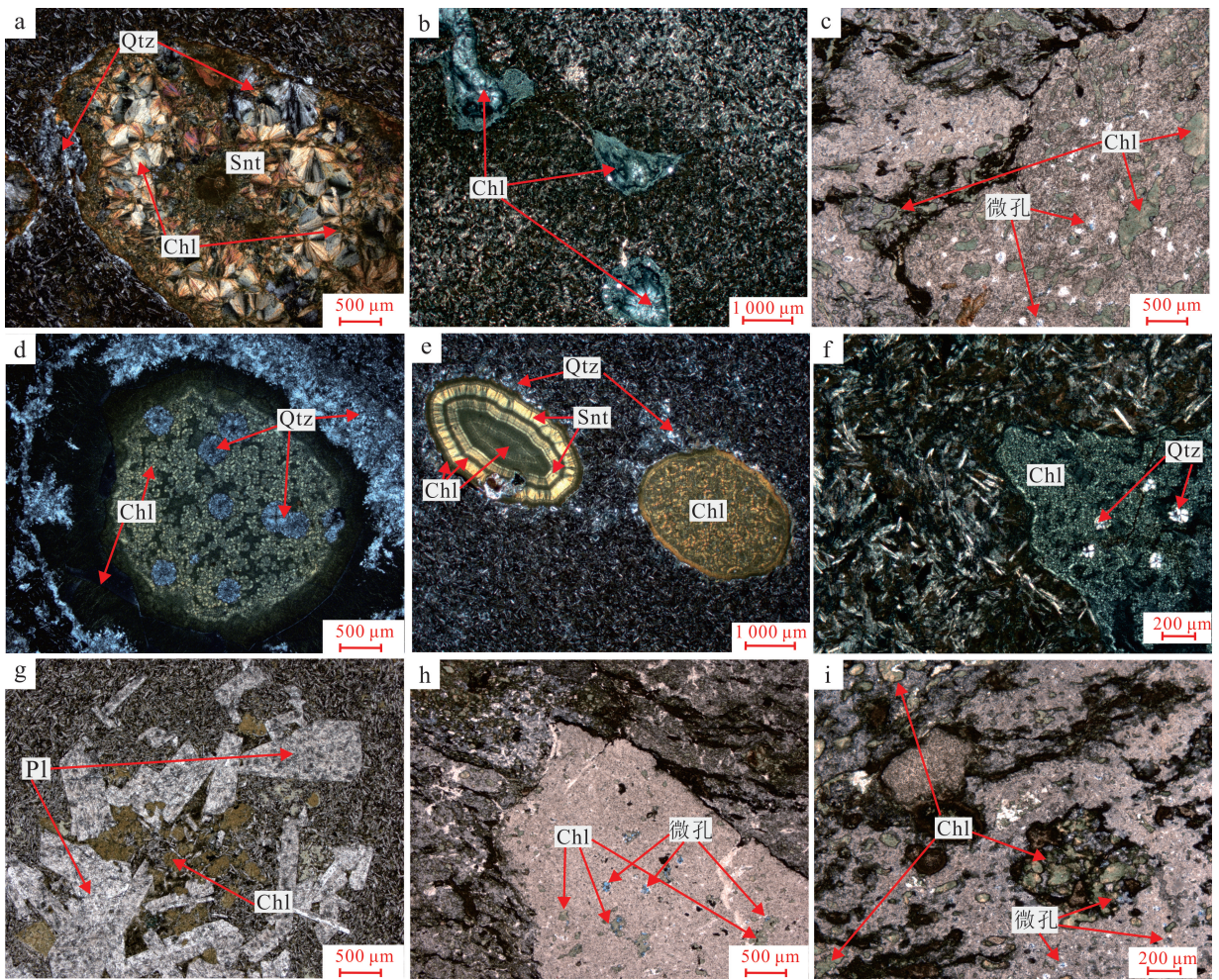
对中国石油天然气集团有限公司的 ZG1 井、ZG2 井、YT1 井以及范店剖面的玄武岩镜下鉴定发现,绿泥石是玄武岩中普遍发育的次生蚀变矿物,体积分数最多可达 30% 以上。依据绿泥石的空间产状可大致划分为杏仁体和基质充填两种类型。其中:杏仁体充填型绿泥石可分为显晶质和微晶两种结晶状态,其既可以全部充填杏仁体内,也可以与其他矿物环带状多期次充填;基质充填型绿泥石则主要赋存在基质矿物粒间,以溶孔和斑晶缝隙充填的隐晶质为主,颗粒细小且结晶程度低。

显晶质绿泥石:形态多呈放射形的花瓣状显晶质集合体充填在次生杏仁体内,单偏光下呈浅黄色—黄褐色多色性,正交光下呈一级灰—黄褐异常干涉色(图 4a)。杏仁体多呈椭圆状或者串珠状沿微裂隙分布(图 4b、c),具有明显的裂控型特点。通常可见杏仁体的外部边缘发育颜色不同的微晶绿泥石及石英的环边,显晶质绿泥石在杏仁体内与皂石、褐铁矿、石英及方解石等矿物伴生。

微晶绿泥石:通常在显微镜下以纤维状微晶集合体的形式全部或者部分环带状充填在原生气孔中形成杏仁体,单偏光下具灰黄—褐黄色多色性,正交偏光下呈一级灰褐—蓝灰异常干涉色,部分可具十字消光特点(图 4d)。杏仁体多呈孤立的圆形—椭圆形(图 4e),少数沿微裂隙呈串珠状分布。具有微晶绿泥石充填的杏仁体多发育硅化边,中心也可见显晶质绿泥石、微晶石英集合体及方解石(图 4f),显示出蚀变热液多期次叠加的特点。

隐晶质绿泥石:显微镜下难以分辨绿泥石的单体形态,通常以不规则隐晶质集合体的形式充填在基质矿物粒间溶孔和斑晶的解理扩溶缝内。绿泥石细小且结晶程度低,单偏光下呈浅绿—褐黄色多色性,一级灰褐异常干涉色(图 4g)。绿泥石的充填状态显示其为辉石等暗色矿物的热液溶蚀成因,部分不规则基质溶孔可扩溶成次生杏仁体(图 4h、i)。

3 种绿泥石在充填位置、形态特征、光学性质以及充填先后顺序上存在明显差异,并且在玄武岩中的整体空间分布也存在不同。其中,隐晶质绿泥石通常在玄武岩上部 and 顶部发育较多,显晶质和微晶



a. EM 剖面, 不规则杏仁体中充填淡黄色放射状显晶绿泥石, 边缘环绕透明的石英环边(+); b. ZG2 井, 不规则杏仁体沿微裂隙相连, 主体由显晶质绿泥石充填(+); c. YT1 井, 杏仁体充填显晶质绿泥石, 发育未被充填的针状微孔(铸体, -); d. EM 剖面, 杏仁体具有不透明的铁氧化物环边, 内部充填微晶绿泥石和蛋白石硅质集合体(+); e. EM 剖面, 左上角椭圆形杏仁体至少有 5 期微晶绿泥石自外向内环带状充填(+); f. ZG2 井, 杏仁体中充填微晶绿泥石和蛋白石(+); g. EM 剖面, 斜长石斑晶溶蚀充填黄褐色隐晶绿泥石(-); h, i. YT1 井, 构造破碎的玄武岩发育绿泥石化未充填微孔(铸体, -)。Chl. 绿泥石; Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Snt. 皂石。

图 4 川西南玄武岩绿泥石蚀变图

Fig.4 Microscope photo of basalt chlorite in southwestern Sichuan

绿泥石大多沿构造裂隙分布, 且明显存在蚀变程度随着远离裂隙而逐渐变弱的趋势。

3 绿泥石微区成分

选取剖面上不同岩性的玄武岩磨制探针片, 在西南石油大学电子探针实验室进行绿泥石微区成分分析。测试仪器为 JE-OL-JXA-8230 型电子探针, 加速电压 15 kV, 加速电流 20 nA, 束斑直径为 4 μm。标样采用天然矿物或者合成金属国家标准, 分析误差在 ±0.01% 以内。绿泥石中的 $n(Fe^{3+})$ (物质的量) 一般小于铁总量的 5%, 电子探针分析过程中 Fe^{2+} 可以近似地用全铁质量分数处理^[24]。

3.1 测试结果

绿泥石的微区成分数据见表 1, 将氧化物含量处理为阳离子物质的量后的特征值见表 2(以 14 个氧原子为标准)。隐晶质与微晶绿泥石成分相似, 表现在 SiO_2 、 MgO 质量分数较低, 与显晶质类型差异明显; 但总体上绿泥石 SiO_2 、 FeO 与 MgO 和 Al_2O_3 质量分数之间呈明显的负相关关系, 即随着 SiO_2 、 FeO 质量分数增加, 绿泥石中的 Al_2O_3 、 MgO 质量分数降低, 揭示峨眉山玄武岩绿泥石普遍存在 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等阳离子之间的相互置换。3 种绿泥石均表现出高 CaO 质量分数的成分特点, 尤其是显晶质绿泥石的 CaO 平均质量分数为 1.46%, 明

表 1 峨眉山玄武岩绿泥石电子探针分析结果

Table 1 Electron probe analysis results of basalt chlorite in Mount Emei

 $\omega_B/\%$

绿泥石 类型	样品号	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	总和
显晶质	1-1	33.48	23.05	12.22	14.88	0.18	0.00	0.00	0.10	1.11	0.00	0.00	85.01
	1-2	35.00	22.69	12.40	15.57	0.16	0.00	0.03	0.03	1.13	0.00	0.00	87.01
	1-3	35.66	21.42	11.31	16.14	0.13	0.00	0.04	0.03	1.39	0.00	0.01	86.12
	1-4	35.75	20.46	11.50	16.06	0.15	0.00	0.04	0.02	1.20	0.01	0.01	85.21
	1-5	33.22	22.50	12.39	16.45	0.16	0.03	0.04	0.01	0.89	0.00	0.00	85.68
	1-6	38.93	22.99	10.62	11.95	0.07	0.01	0.07	0.17	2.61	0.06	0.00	87.48
	1-7	37.45	25.30	12.37	10.40	0.07	0.05	0.05	0.26	2.34	0.05	0.03	88.36
	1-8	38.69	21.53	10.67	12.97	0.06	0.00	0.08	0.27	2.62	0.01	0.00	86.91
	1-9	33.60	24.59	12.85	13.37	0.16	0.01	0.05	0.06	1.25	0.00	0.01	85.95
	1-10	31.10	24.24	12.37	14.37	0.21	0.00	0.02	0.04	0.97	0.00	0.00	83.33
	1-11	33.30	25.59	10.77	13.32	0.14	0.00	0.08	0.11	1.65	0.04	0.03	85.02
平均值	34.64	23.48	12.25	13.95	0.15	0.01	0.05	0.10	1.46	0.01	0.01	86.11	
微晶	2-1	30.10	30.06	15.12	10.83	0.29	0.00	0.04	0.15	0.71	0.00	0.00	87.31
	2-2	29.91	29.86	14.90	11.10	0.31	0.00	0.02	0.13	0.80	0.01	0.00	87.05
	2-3	29.96	29.83	15.37	10.41	0.32	0.00	0.03	0.16	0.85	0.03	0.03	87.00
	2-4	31.16	30.16	15.41	10.18	0.31	0.03	0.03	0.46	0.79	0.03	0.00	88.54
	2-5	29.76	29.99	15.26	10.14	0.30	0.00	0.04	0.20	0.93	0.00	0.01	86.62
	2-6	30.55	30.08	15.40	10.25	0.30	0.02	0.02	0.37	0.82	0.00	0.00	87.81
	2-7	30.10	28.92	15.11	10.76	0.29	0.02	0.01	0.11	0.76	0.00	0.00	86.08
	2-8	30.70	27.93	14.99	12.03	0.26	0.00	0.01	0.05	0.79	0.01	0.04	86.81
	2-9	30.88	27.41	15.57	12.21	0.24	0.00	0.00	0.08	0.79	0.02	0.01	87.22
	平均值	30.35	29.36	15.24	10.88	0.29	0.01	0.02	0.19	0.80	0.01	0.01	87.16
隐晶质	3-1	31.28	28.58	16.40	9.42	0.31	0.06	0.07	0.69	0.97	0.01	0.03	87.82
	3-2	30.51	29.88	16.06	10.01	0.39	0.02	0.05	0.46	0.65	0.00	0.03	88.05
	3-3	31.78	28.31	16.23	9.55	0.31	0.02	0.03	0.84	0.70	0.00	0.04	87.80
	3-4	31.97	26.22	13.79	14.78	0.23	0.01	0.08	0.01	0.49	0.00	0.02	87.61
	3-5	31.13	24.44	11.81	15.99	0.16	0.03	0.02	0.02	0.75	0.00	0.00	84.35
	3-6	31.35	27.32	14.59	12.96	0.24	0.02	0.02	0.05	0.78	0.00	0.00	87.34
	3-7	29.77	26.29	13.50	13.99	0.27	0.02	0.04	0.03	0.63	0.02	0.08	84.65
	平均值	31.11	27.29	14.63	12.39	0.27	0.03	0.04	0.30	0.71	0.01	0.03	86.80

显高于其他两种(平均为 0.75%)。Foster^[25] 研究认为,在未被外源物质混染的绿泥石结构中,由于没有 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 等大的阳离子,其 $\omega(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}) < 0.5\%$,峨眉山玄武岩中绿泥石的高钙特点,得益于玄武岩镁铁质矿物及蚀变热液的成分,与前人^[26-28]关于玄武岩蚀变成因绿泥石 CaO 质量分数远大于 0.5%相一致。

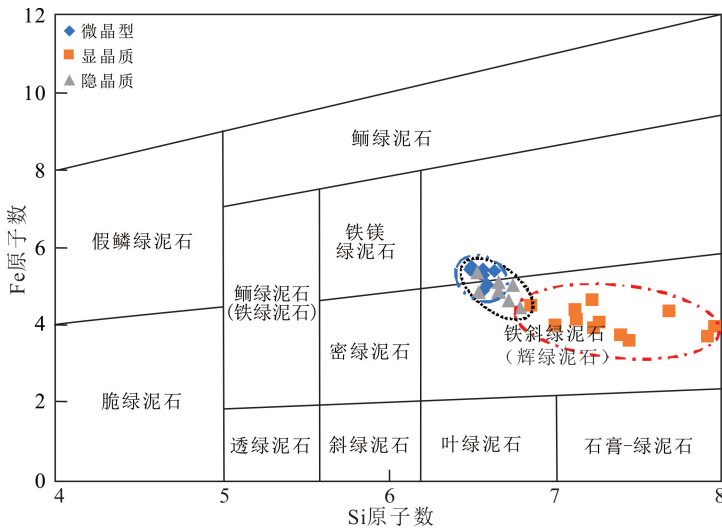
3.2 绿泥石种类判别

原位成分分析在绿泥石研究中占据着重要的地位。前人^[25,29-30]研究发现,绿泥石的成分特点和种类受到形成时母岩成分、流体温度、环境酸碱度、氧化还原条件等因素的制约。将以 14 个 O 原子为标淮对样品数据处理后得到阳离子特征值(表 2)进行 Fe-Si 原子数比投图^[31],绿泥石主要分布在 2 个不同的区间(图 5):微晶质绿泥石具有高 Fe 低 Si 原子

表2 峨眉山玄武岩绿泥石阳离子特征值(以14个O原子为基准计算)

Table 2 Characteristic values of basalt chlorite in Mount Emei (calculated based on 14 O atoms)

样品号	Si	Fe	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Al	Mg	Mn	Ti	Na	K	Ca	P	Cr	Fe/(Fe+Mg)	Mg/(Mg+Fe)	Al/(Fe+Mg+Al)		Al ^{IV} /(Al ^{VI})	n/mol	
																Al	Mg		Fe+	Al ^{IV}
1-1	3.57	2.05	0.43	1.10	1.53	2.36	0.02	0.00	0.00	0.01	0.13	0.00	0.00	0.46	0.54	0.26	0.39	3.15	4.42	
1-2	3.62	1.96	0.38	1.13	1.51	2.40	0.01	0.00	0.01	0.00	0.12	0.00	0.00	0.45	0.55	0.26	0.34	3.09	4.36	
1-3	3.70	1.86	0.30	1.08	1.38	2.50	0.01	0.00	0.01	0.00	0.15	0.00	0.00	0.43	0.57	0.24	0.28	2.94	4.35	
1-4	3.72	1.78	0.28	1.14	1.41	2.49	0.01	0.00	0.01	0.00	0.13	0.00	0.00	0.42	0.58	0.25	0.24	2.92	4.28	
1-5	3.50	1.98	0.50	1.04	1.54	2.58	0.01	0.00	0.01	0.00	0.10	0.00	0.00	0.43	0.57	0.25	0.48	3.02	4.57	
1-6	3.98	1.97	0.02	1.26	1.28	1.82	0.01	0.00	0.01	0.02	0.29	0.00	0.00	0.52	0.48	0.25	0.01	3.23	3.79	
1-7	3.84	2.17	0.16	1.34	1.50	1.59	0.01	0.00	0.01	0.03	0.26	0.00	0.00	0.58	0.42	0.28	0.12	3.51	3.76	
1-8	3.96	1.84	0.04	1.25	1.29	1.98	0.01	0.00	0.02	0.04	0.29	0.00	0.00	0.48	0.52	0.25	0.03	3.09	3.82	
1-9	3.56	2.18	0.44	1.17	1.61	2.11	0.01	0.00	0.01	0.01	0.14	0.00	0.00	0.51	0.49	0.27	0.37	3.35	4.29	
1-10	3.43	2.23	0.57	1.03	1.61	2.36	0.02	0.00	0.00	0.01	0.11	0.00	0.00	0.49	0.51	0.26	0.55	3.27	4.59	
1-11	3.61	2.32	0.39	0.99	1.38	2.15	0.01	0.00	0.02	0.02	0.19	0.00	0.00	0.52	0.48	0.24	0.39	3.31	4.48	
平均值	3.64	2.07	0.36	1.16	1.52	2.19	0.01	0.00	0.01	0.01	0.16	0.00	0.00	0.49	0.51	0.26	0.31	3.22	4.25	
2-1	3.26	2.72	0.74	1.19	1.93	1.75	0.03	0.00	0.01	0.02	0.08	0.00	0.00	0.61	0.39	0.30	0.63	3.91	4.47	
2-2	3.25	2.71	0.75	1.15	1.91	1.80	0.03	0.00	0.00	0.02	0.09	0.00	0.00	0.60	0.40	0.30	0.65	3.87	4.51	
2-3	3.25	2.71	0.75	1.22	1.97	1.68	0.03	0.00	0.01	0.02	0.10	0.00	0.00	0.62	0.38	0.31	0.61	3.93	4.39	
2-4	3.32	2.69	0.68	1.25	1.93	1.62	0.03	0.00	0.01	0.06	0.09	0.00	0.00	0.62	0.38	0.31	0.54	3.94	4.30	
2-5	3.25	2.74	0.75	1.22	1.97	1.65	0.03	0.00	0.01	0.03	0.11	0.00	0.00	0.62	0.38	0.31	0.61	3.96	4.39	
2-6	3.29	2.71	0.71	1.24	1.95	1.64	0.03	0.00	0.01	0.05	0.09	0.00	0.00	0.62	0.38	0.31	0.58	3.94	4.35	
2-7	3.28	2.64	0.72	1.23	1.94	1.75	0.03	0.00	0.00	0.02	0.09	0.00	0.00	0.60	0.40	0.31	0.58	3.87	4.39	
2-8	3.30	2.51	0.70	1.19	1.90	1.93	0.02	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	0.57	0.43	0.30	0.59	3.70	4.43	
2-9	3.29	2.44	0.71	1.24	1.95	1.94	0.02	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	0.56	0.44	0.31	0.58	3.68	4.38	
平均值	3.28	2.65	0.72	1.21	1.94	1.75	0.03	0.00	0.00	0.03	0.09	0.00	0.00	0.60	0.40	0.31	0.60	3.86	4.40	
3-1	3.33	2.55	0.67	1.39	2.06	1.50	0.03	0.01	0.01	0.09	0.11	0.00	0.00	0.63	0.37	0.34	0.48	3.93	4.04	
3-2	3.27	2.68	0.73	1.29	2.03	1.60	0.04	0.00	0.01	0.06	0.07	0.00	0.00	0.63	0.37	0.32	0.57	3.97	4.27	
3-3	3.38	2.52	0.62	1.41	2.03	1.51	0.03	0.00	0.01	0.11	0.08	0.00	0.00	0.62	0.38	0.34	0.44	3.92	4.03	
3-4	3.36	2.31	0.64	1.07	1.71	2.32	0.02	0.00	0.02	0.00	0.05	0.00	0.00	0.50	0.50	0.27	0.60	3.38	4.62	
3-5	3.39	2.23	0.61	0.91	1.52	2.60	0.01	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.46	0.54	0.24	0.67	3.14	4.83	
3-6	3.33	2.43	0.67	1.16	1.83	2.05	0.02	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	0.54	0.46	0.29	0.58	3.58	4.48	
3-7	3.27	2.42	0.73	1.02	1.75	2.29	0.03	0.00	0.01	0.00	0.07	0.00	0.01	0.51	0.49	0.27	0.71	3.44	4.71	
平均值	3.33	2.44	0.67	1.18	1.85	1.98	0.02	0.00	0.01	0.04	0.08	0.00	0.00	0.55	0.45	0.29	0.57	3.62	4.43	



底图据文献[31]。

图 5 峨眉山玄武岩中绿泥石的分类图解

Fig.5 Classification diagram of basalt chlorite in Mount Emei

数成分的特点,主体分布在铁镁绿泥石区间,少量归属于铁斜绿泥石(辉绿泥石);显晶质绿泥石则表现为低 Fe 高 Si 原子数,散布在铁斜绿泥石区间;隐晶质绿泥石位于 2 种类型的交界。

3.3 阳离子置换特点

绿泥石结构通式为 $((Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+})_x (Al^{3+}, Fe^{3+}, Cr^{3+})_y \square_z)^{VI} (Si_{4-u} Al_u)^{IV} O_{10+w} (OH)_{8-w}$ 。其中:IV 和 VI 分别代表四次配位和六次配位; \square 代表结构空穴; $x+y+z=6$;u 代表四次配位上 Al^{3+} 的物质的量; w 是被替代的阴离子,它的数值通常很小。绿泥石中 Al^{3+} 可以分别对四面体上的 Si^{4+} 、八面体上的 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等阳离子进行置换,镁铁质矿物蚀变为绿泥石的过程实质上就是 Al 置换 Si 的过程^[32]。随着 Al^{3+} 对 Si^{4+} 的逐渐替代,绿泥石对矿物的蚀变作用也逐渐加强。

峨眉山玄武岩中所有绿泥石的 Al^{IV} 值均小于 Al^{VI} 值,说明 Al^{3+} 在八面体上对 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的置换高于 Al^{3+} 在四面体上对 Si^{4+} 的置换。在 $n(Al^{IV})-n(Al^{VI})$ 关系图(图 6a)中,显晶质与微晶绿泥石的 Al^{IV} 值和 Al^{VI} 值存在明显的负相关性,印证了流体蚀变交代形成绿泥石的过程中 Al^{3+} 的规律性变化。但隐晶质绿泥石的 $n(Al^{IV})-n(Al^{VI})$ 相关性不强,表明其四面体和八面体上 Al^{3+} 对阳离子的置换情况复杂,可能存在多种成因的复合与叠加。 $n(Al^{IV} + Fe^{2+})-n(Mg^{2+})$ 关系图(图 6b)显示, Al^{3+} 和 Fe^{2+} 都与 Mg^{2+} 存在离子置换关系。但在 $n(Fe^{2+})-$

$n(Mg^{2+})$ 与 $n(Al^{VI})-n(Mg^{2+})$ 关系图解(图 6c、d)中,绿泥石的 $n(Mg^{2+})-n(Fe^{2+})$ 相关性强于其 $n(Mg^{2+})-n(Al^{VI})$ 相关性,表明在峨眉山绿泥石形成过程中八面体位置上主要表现为 Fe^{2+} 对 Mg^{2+} 的置换,揭示了绿泥石形成于高铁的流体环境,且与镜下所见的绿泥石与铁矿化的伴生现象相互印证,明确了峨眉山 3 种富铁种属的绿泥石是高铁流体作用于玄武岩的蚀变结果。

前人^[33]在研究 Barberton 绿岩带绿泥石的过程中发现,由一次变质作用形成的绿泥石中,其主要阳离子与 Mg^{2+} 物质的量应具有较好的线性相关性。峨眉山玄武岩绿泥石的 Mg^{2+} 与主要阳离子物质的量关系图解(图 6c、d、e)显示,3 种绿泥石的 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 、 Al^{VI} 、 Si^{4+} 等阳离子物质的量都存在明显的线性关系,但显晶质绿泥石 $n(Mg^{2+})-n(Si^{4+})$ 呈负相关性,隐晶质和微晶两种绿泥石呈正相关。结合 $n(Al^{IV})-Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg^{2+})$ 关系图(图 6f),可知不同类型绿泥石的成因受到单一热液流体控制,但不同绿泥石阳离子与镁离子物质的量相关存在差异,表明其不是形成于同一热液环境,而可能是多期热液分别作用的结果。

4 讨论

4.1 绿泥石的形成环境

绿泥石是一种中—低温压环境下的常见矿物,其成分和结构的变化能揭示其形成环境。绿泥石的

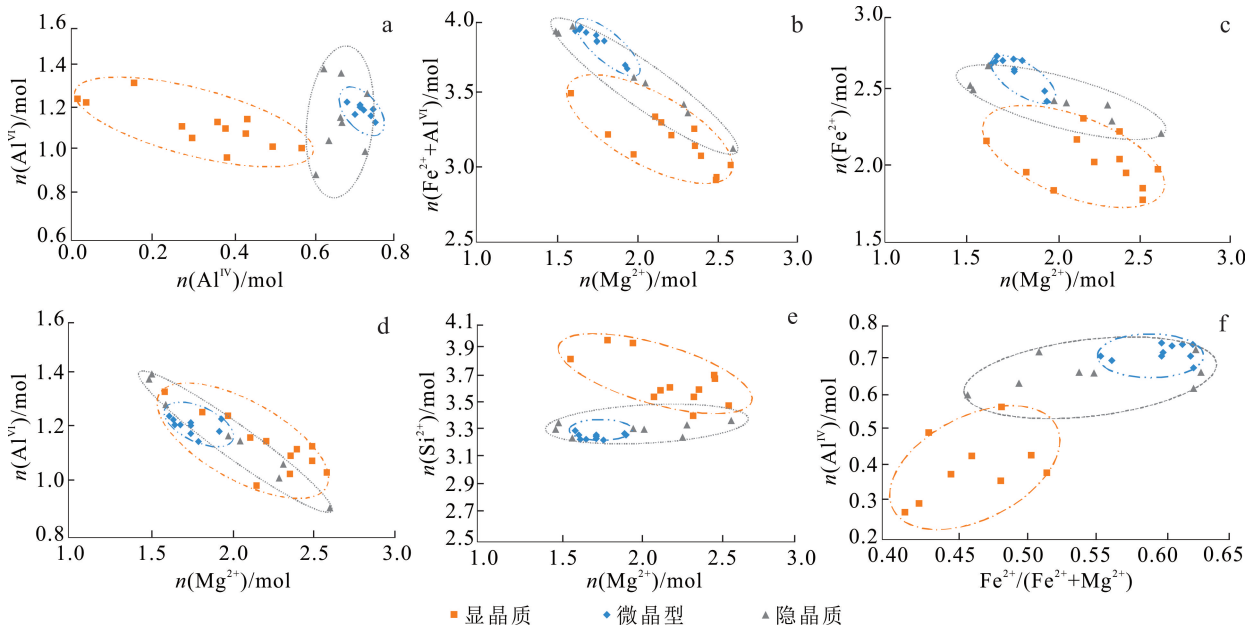


图 6 峨眉山玄武岩绿泥石阳离子成分相关图解

Fig.6 Relation of cationic components of basalt chlorite in Mount Emei

$n(\text{Fe}^{2+})/n(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 值的变化一般与系统的氧逸度有关,系统还原度越高则 $n(\text{Fe}^{2+})/n(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 值越大^[34],且绿泥石六次配位的八面体空间 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的类质同像替代也能表征形成环境的酸碱度,即如果存在广泛的 Fe^{2+} 替代 Mg^{2+} 则表示为相对的酸性环境;反之,如果 Mg^{2+} 取代 Fe^{2+} 则需要相对碱性的环境^[35]。峨眉山玄武岩中显晶质绿泥石的 $n(\text{Fe}^{2+})/n(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 值主要分布在 0.42~0.58 之间,微晶与隐晶绿泥石比值集中在 0.51~0.63 之间,且表现出明显的 Fe^{2+} 置换 Mg^{2+} ,揭示了绿泥石形成于还原性的热液流体的水岩反应,且环境具有从碱性向中性、弱酸性逐渐过渡的变化特点。

4.2 绿泥石的蚀变流体来源

选取剖面 3 种类型绿泥石样品,在澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室进行激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)测试分析(成果见另文^[36])。绿泥石球粒陨石标准化后的原位稀土元素总体上具有轻稀土元素富集的右倾型模式(图 7),但 3 种绿泥石轻、重稀土元素分馏程度存在明显差异。其中:隐晶质绿泥石稀土元素配分具有轻微的 Eu 负异常,配分模式与峨眉山玄武岩呈现高度一致,且无明显的稀土元素流失及分馏程度的差异,说明其与玄武岩的稀土元素之间具有继承性;微晶绿泥石稀土元素配分具明显的 Eu 负异常,轻、重稀土元素分馏程度高,表明其蚀变流体可能源于分馏

程度较高的热液流体;显晶质绿泥石稀土元素总量最低,具强烈 Eu 和 Ce 负异常,稀土元素呈现亏损重稀土元素的右倾型形态,具有明显受到深部热液和地层水叠加改造的特点。原位稀土元素的特点在一定程度上支持隐晶质绿泥石源自岩浆期后热液的自蚀变,而微晶绿泥石和显晶质绿泥石则受到后期区域构造热液的叠加与改造。

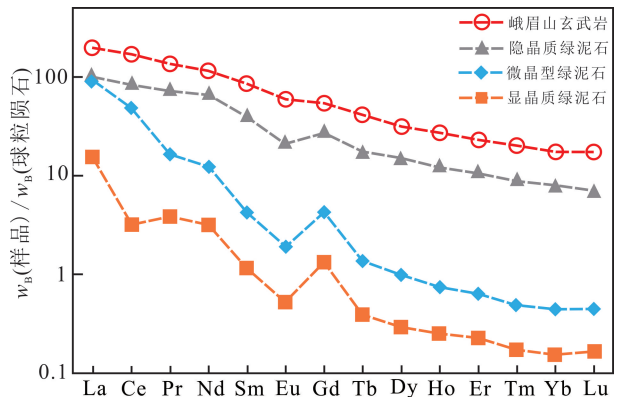


图 7 峨眉山玄武岩及绿泥石稀土元素均值配分模式图

Fig.7 Rare earth partition pattern of basalt and chlorite in Mount Emei

4.3 绿泥石的形成期次及对火山岩储集空间的影响

近几年四川盆地内发现了大量非常规火山岩储

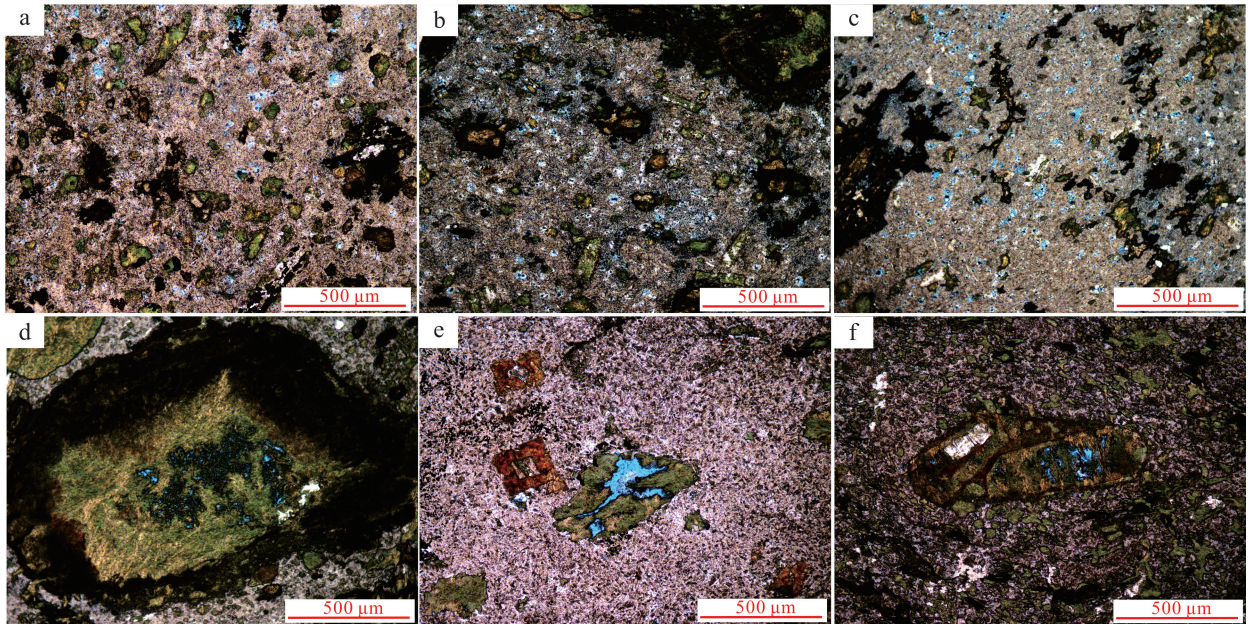
层,以 ZG2 井、YT1 井为代表的火山熔岩储层形成机制一直是关注的焦点。而川西南玄武岩储层原生孔隙的孔隙度和渗透率都较差,优质的储层空间通常与构造破碎和热液改造形成的次生溶孔和微裂隙密切相关,蚀变成因的绿泥石是影响次生孔隙最重要的黏土矿物。根据 3 种绿泥石的形态、产状、成分、结构、形成温度以及稀土元素特征,可大致将峨眉山玄武岩中绿泥石的形成分为 2 个阶段:

1) 岩浆期后热液自蚀变阶段。二叠纪末期峨眉山大火成岩省的大面积喷发结束后,漫长的期后热液对玄武岩中正在冷却的辉石、角闪石等暗色矿物进行蚀变交代,显微镜下可见暗色矿物全部消失或者部分残留,蚀变产物即为充填在基质矿物粒间的隐晶质绿泥石,并且由于岩浆期后热液密度低于玄武岩,这种基质蚀变通常在溢流玄武岩的上部和顶部更加强烈。该种绿泥石颗粒细小,堵塞了原生的气孔和粒间孔,降低了火山岩的孔隙度和连通性,对川西南火山岩储层起到了破坏性作用。

2) 多期次构造热液叠加蚀变阶段。二叠纪以来,四川盆地遭受了海西、印支、燕山及喜马拉雅等构造运动,其不仅使玄武岩产生相应的构造形变,更是为来自深部的构造热液与玄武岩之间的水-岩反

应提供了通道。这种多期次的构造热液对玄武岩的溶蚀具有非均质性,在断裂带附近的玄武岩多发育“串珠状”的次生杏仁体,且靠近断裂带杏仁体分布密集,远离断裂带杏仁体数量减少并逐渐消失。多期次构造热液作用于玄武岩不仅会直接形成绿泥石,还会溶蚀、萃取、活化迁移玄武岩中的镁铁质组分以绿泥石胶体的形式运移至原生气孔和次生溶蚀孔中沉淀结晶绿泥石。这个过程中,流体溶蚀迁移在岩体中形成大量未被充填的次生微孔(图 8a、b、c)和充填残余孔隙(图 8d、e、f),为川西南玄武岩储集天然气提供了新的储集空间,改善了火山岩储层的物性。

不同成因的绿泥石对火山岩储层的影响重大,至少在储集空间形成的过程中起到了双重作用:岩浆期后热液对玄武岩溶蚀交代,形成的隐晶质绿泥石通常充填原生孔隙降低火山岩储集性能;而多期次构造热液的叠加蚀变形成绿泥石的过程,一方面绿泥石会阻塞原有的孔喉结构影响物性,另一方面热液流体的迁移过程又会形成大量未被充填的次生微孔,改善火山岩储层的物性。并且绿泥石的形成会产生大量 H^+ ,促使原本孤立的原生孔隙连通性增强。综合分析认为,多期构造热液流体溶蚀一迁



a—c. YT1 井,不规则溶孔被黄绿色绿泥石充填形成次生杏仁体,发育大量未充填的微孔,蓝色铸体(—);d. YT1 井,不规则杏仁体被两期绿泥石充填,内部绿泥石被后期改造发育未充填微孔,蓝色铸体(—);e—f. YT1 井,不规则次生杏仁体被绿泥石充填,发育杏仁体充填残留孔隙,蓝色铸体(—)。

图 8 峨眉山玄武岩储集空间类型图

Fig.8 Basalt reservoir space types of Mount Emei

移—沉淀结晶绿泥石的过程,在一定程度上改善了火山岩储层的物性,是川西南峨眉山玄武岩能否构成天然气储层的重要制约因素。

5 结论

1)峨眉山玄武岩中大量蚀变成因的绿泥石可以分为显晶质、隐晶质以及微晶3种结晶类型。其中,隐晶质绿泥石赋存在玄武岩基质矿物粒间,微晶绿泥石和显晶质绿泥石一般充填在位于杏仁体中,并显示出由老到新的形成顺序。

2)峨眉山绿泥石均为富铁种属,显晶质和隐晶的绿泥石属于铁斜绿泥石(辉绿泥石),微晶属于铁镁绿泥石,指示其形成于还原环境。绿泥石八面体位置上阳离子表现为 Fe^{2+} 对 Mg^{2+} 的普遍置换,揭示出蚀变热液具有富Fe且由碱性向弱酸—中酸性逐渐过渡的变化特点。且稀土元素特征显示,隐晶质与微晶和显晶质绿泥石分别受到了岩浆期后热液和来自深部的多期次构造热液叠加蚀变的控制。

3)绿泥石的形成过程对川西南火山岩储集空间起到双重制约作用。岩浆期后热液的充填—结晶减少了火山岩的原生孔隙,降低储层物性;而多期次构造热液的溶蚀—迁移—沉淀结晶形成大量未充填的次生微孔,提供了新的火山岩有效储层空间。

参考文献(References):

- [1] Courtillot V, Jaupart C, Manighetti L, et al. On Causal Links Between Flood Basalts and Continental Breakup [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 166(3/4): 177-195.
- [2] 侯明才,王文楷,张本健,等.四川周公山—汉王场地区峨眉山玄武岩中流体类型及活动期次[J]. *岩石学报*, 2013, 29(8): 2709-2718.
Hou Mingcai, Wang Wenkai, Zhang Benjian, et al. Fluid Types and Activities of Emeishan Basalt in Zhongong Mountain-Hanwang Field of Sichuan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(8): 2709-2718.
- [3] 马新华,杨雨,张健,等.四川盆地二叠系火山碎屑岩气藏勘探重大发现及其启示[J]. *天然气工业*, 2019, 39(2): 1-8.
Ma Xinhua, Yang Yu, Zhang Jian, et al. A Major Discovery in Permian Volcanic Rock Gas Reservoir Exploration in the Sichuan Basin and Its Implications [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2): 1-8.
- [4] 文龙,李亚,易海永,等.四川盆地二叠系火山岩岩相与储层特征[J]. *天然气工业*, 2019, 39(2): 17-27.
Wen Long, Li Ya, Yi Haiyong, et al. Lithofacies and Reservoir Characteristics of Permian Volcanic Rocks in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2): 17-27.
- [5] 邓敏,侯明才,张本健,等.川西南部周公山地区峨眉山玄武岩有利储层分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 378-386.
Deng Min, Hou Mingcai, Zhang Benjian, et al. Favorable Reservoir Analysis of Emeishan Basalt in Zhongong Shan Area of Southwest Sichuan Province [J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 378-386.
- [6] 张若祥,王兴志,蓝大樵,等.川西南地区峨眉山玄武岩储层评价[J]. *天然气勘探与开发*, 2006, 29(1): 17-20, 80.
Zhang Ruoxiang, Wang Xingzhi, Lan Daqiao, et al. Reservoir Evaluation of Emeishan Basalt in Southwest Sichuan [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2006, 29(1): 17-20, 80.
- [7] 冯仁蔚,王兴志,张帆,等.四川西南部周公山及邻区“峨眉山玄武岩”特征及储集性能研究[J]. *沉积学报*, 2008, 26(6): 913-924.
Feng Renwei, Wang Xingzhi, Zhang Fan, et al. The Study on Reservoir Property and Characteristics of the Emeishan Basalts of Zhongongshan and Its Neighbour Area in the Southwest Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(6): 913-924.
- [8] 马新华,李国辉,应丹琳,等.四川盆地二叠系火成岩分布及含气性[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(2): 216-225.
Ma Xinhua, Li Guohui, Ying Danlin, et al. Distribution and Gas-Bearing Properties of Permian Igneous Rocks in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(2): 216-225.
- [9] 刘冉,罗冰,李亚,等.川西地区二叠系火山岩展布与茅口组岩溶古地貌关系及其油气勘探意义[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 575-585.
Liu Ran, Luo Bing, Li Ya, et al. Relationship Between Permian Volcanic Rocks Distribution and Karst Paleogeomorphology of Maokou Formation and Its Significance for Petroleum Exploration in Western Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 575-585.
- [10] 罗冰,夏茂龙,汪华,等.四川盆地西部二叠系火山岩气藏成藏条件分析[J]. *天然气工业*, 2019, 39(2): 9-16.

- Luo Bing, Xia Maolong, Wang Hua, et al. Hydrocarbon Accumulation Conditions of Permian Volcanic Gas Reservoirs in the Western Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2): 9-16.
- [11] 黄鑫, 段冬平, 刘彬彬, 等. 西湖凹陷花港组绿泥石成因及其对储层物性的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(3): 669-679.
- Huang Xin, Duan Dongping, Liu Binbin, et al. Origin Mechanism of Chlorite and Its Impact on Reservoir Properties in Huagang Formation, Xihu Depression [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(3): 669-679.
- [12] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(3): 257-271.
- Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chengzao, et al. Formation and Distribution of Volcanic Hydrocarbon Reservoirs in Sedimentary Basins of China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(3): 257-271.
- [13] 陈国松, 孟元林, 郇金来, 等. 自生绿泥石对储集层质量影响的定量评价: 以北部湾盆地涠西南凹陷涠洲组三段为例[J]. *古地理学报*, 2021, 23(3): 639-650.
- Chen Guosong, Meng Yuanlin, Huan Jinlai, et al. Quantitative Evaluation of Impact of Authigenic Chlorite on Reservoir Quality: A Case Study of the Member 3 of Weizhou Formation in Weixinan Sag, Beibu Gulf Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2021, 23(3): 639-650.
- [14] 曲长胜, 邱隆伟, 李文涛, 等. 渤海湾盆地潍北凹陷孔三段中基性火山岩储层特征及控制因素[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(5): 1284-1296.
- Qu Changsheng, Qiu Longwei, Li Wentao, et al. Characteristics and Controlling Factors of the Intermediate and Mafic Volcanic Reservoirs of the Paleogene Kongdian Formation in the Weibei Sag of the Bohaiwan Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(5): 1284-1296.
- [15] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(4): 449-456.
- Wang Pujun, Chi Yuanlin, Liu Wanzhu, et al. Volcanic Facies of the Songliao Basin: Classification, Characteristics and Reservoir Significance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(4): 449-456.
- [16] 陈亚军, 于家义, 宋小勇, 等. 三塘湖盆地马朗凹陷牛圈湖—牛东构造带上石炭统火山岩黏土矿物特征及其对储层物性的影响[J]. *石油学报*, 2021, 42(8): 1053-1071.
- Chen Yajun, Yu Jiayi, Song Xiaoyong, et al. Characteristics of Clay Mineral in the Upper Carboniferous Volcanic Rocks of Niujuanhu-Niudong Structural Belt in the Malang Sag, Santanghu Basin and Their Effects on Reservoir Physical Properties [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(8): 1053-1071.
- [17] 张玉银. 溶蚀作用对火山岩有效储层形成的控制作用: 以松辽盆地徐家围子断陷营城组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(3): 587-593.
- Zhang Yuyin. Controlling Effect of Dissolution on Valid Volcanic Reservoir Formation: A Case Study of the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 587-593.
- [18] 张娟, 刘新星, 王义天, 等. 陕西凤太矿集区八卦庙金矿床绿泥石特征及其找矿意义[J]. *地质通报*, 2021, 40(4): 586-603.
- Zhang Juan, Liu Xinxing, Wang Yitian, et al. Characteristics of Chlorite from the Baguamiao Gold Deposit in Shaanxi Province and Its Geological Implication [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 586-603.
- [19] Walshenn J L. A Six-Component Chlorite Solid Solution Model and the Conditions of Chlorite Formation in Hydrothermal and Geothermal Systems [J]. *Economic Geology*, 1986, 81(3): 681-703.
- [20] Nieva D. A Chlorite Solid Solution Geothermometer the Los Azufres (Mexico) Geothermal System [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1985(3): 235-244.
- [21] Inoue A, Kurokawa K, Hatta T. Application of Chlorite Geothermometry to Hydrothermal Alteration in Toyoha Geothermal System, Southwestern Hokkaido, Japan [J]. *Resource Geology*, 2010, 60(1): 52-70.
- [22] Cathelineau M. Cation Site Occupancy in Chlorites and Illites as a Function of Temperature [J]. *Clay Minerals*, 1988, 23(4): 471-485.
- [23] 刘冉, 李亚, 赵立可, 等. 四川华蓥偏岩子晚二叠世玄武岩地球化学特征及其与峨眉山大火成岩省的成因关系[J]. *岩石矿物学杂志*, 2022, 41(1): 1-17.
- Liu Ran, Li Ya, Zhao Like, et al. Geochemical Characteristics of the Late Permian Basalts in

- Pianyanzi, Huaying, Sichuan and Their Genetic [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2022, 41(1): 1-17
- [24] 郑巧荣. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. *矿物学报*, 1983, 9(1): 55-62.
- Zheng Qiaorong. Calculation of Fe^{3+} and Fe^{2+} from Electron Probe Analysis [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1983, 9(1): 55-62.
- [25] Foster M D. Interpretation of the Composition and a Classification of the Chlorites, US Geology Survey Professional Paper, 414A, Washington [M]. DC: US Government Printing Office, 1962:1-33.
- [26] 戴朝成, 刘晓东, 饶强, 等. 川中地区须家河组自生绿泥石成分演化及其形成温度计算[J]. *地质论评*, 2017, 63(3): 831-842.
- Dai Chaoheng, Liu Xiaodong, Rao Qiang, et al. Authigenic Chlorite Compositional Evolution and Temperature Calculation of Xujiahe Formation Sandstone in Central Sichuan Basin [J]. *Geological Review*, 2017, 63(3): 831-842.
- [27] 张良钜, 阮青锋, 杨育富, 等. 川南普格玄武岩中沥青质杏仁体的矿物学与成因[J]. *高校地质学报*, 2020, 26(6): 628-638.
- Zhang Liangju, Ruan Qingfeng, Yang Yufu, et al. Mineralogy and Genesis of Asphaltene Amygdalae in the Puge Basalt, Southern Sichuan, China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2020, 26(6): 628-638.
- [28] 杨献忠, 杨祝良, 陶奎元, 等. 含油玄武岩中绿泥石的形成温度[J]. *矿物学报*, 2002, 22(4): 365-370.
- Yang Xianzhong, Yang Zhuliang, Tao Kuiyuan, et al. Formation Temperature of Chlorite in Oil-Bearing Basalt [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002, 22(4): 365-370.
- [29] Laxird J. Chlorites: Metamorphic Petrology [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1988, 19(1): 405-453.
- [30] Cathelineau M, Nieva D. A Chlorite-Oxidation Solution Geothermometer for the Los Azufres (Mexico) Geothermal System [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1985, 91(3): 235-244.
- [31] Deer W A, Howie R A, Juseman J. *Rock-Forming Mineral Silicates* [M]. London: Longman, 1962:1-270.
- [32] Hillier S. Origin, Diagenesis, and Mineralogy of Chlorite Minerals in Devonian Lacustrine Mudrocks, Orcadian Basin, Scotland [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1993, 41(2): 240-259.
- [33] Ferrellre. lib Trioctahedral Chlorite from the Barberton Greenstone Belt: Crystal Structure and Rock Composition Constraints with Implications to Geothermometry [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1997, 126(3): 275-291.
- [34] Bryndzia L T, Scott S D. The Composition of Chlorite as a Function of Sulfur and Oxygen Fugacity; An Experimental Study [J]. *American Journal of Science*, 1987, 287(1): 50-76.
- [35] 郭国林, 刘晓东, 潘家永, 等. 302 铀矿床绿泥石特征及其与铀成矿的关系[J]. *铀矿地质*, 2012, 28(1): 35-41.
- Guo Guolin, Liu Xiaodong, Pan Jiayong, et al. Character of Chlorite and Its Relationship to Uranium Mineralization in Uranium Deposit No. 302 [J]. *Uranium Geology*, 2012, 28(1): 35-41.
- [36] 郑江, 郝爱华, 葛玉辉, 等. 峨眉山玄武岩蚀变年龄及其对扬子西缘热事件的响应[J]. *科学通报*, 2022, 67(36): 4415-4428.
- Zheng Jiang, Xi Aihua, Ge Yuhui, et al. Alteration Age of Emeishan Basalt and Its Response to Thermal Events on the Western Margin of the Yangtze Block [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(36): 4415-4428.