

松辽盆地营城组中基性火山岩成岩作用:矿物晶出序列、杏仁体充填和储层效应*

刘万洙¹ 黄玉龙^{1**} 庞彦明² 王璞珺¹

LIU WanZhu¹, HUANG YuLong^{1**}, PANG YanMing² and WANG PuJun¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Exploration and Development Institute of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China

2009-08-05 收稿, 2009-11-05 改回.

Liu WZ, Huang YL, Pang YM and Wang PJ. 2010. Diagenesis of intermediate and mafic volcanic rocks of Yingcheng Formation (K_{1y}) in the Songliao basin: Sequential crystallization, amygdale filling and reservoir effect. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1):158-164

Abstract Crystallizing sequence, amygdale filling features and reservoir effect were studied on the intermediate and mafic volcanic rocks of K_{1y} in the Songliao basin by means of microscope, chemical determination and electron probe. The volcanics include basalt, andesite, basaltic andesite, trachybasalt, basaltic trachyandesite and trachyte. Crystallizing sequence of the porphyritic crystals is as follows. The earliest is olivine (Ol) which is totally altered into serpentite (Srp), iddingsite (Idn) and magnetite (Mag) left a frame of the olivine. Pigeonite (Pgt) crystallized simultaneously with or a little bit earlier than plagioclase (Pl) because Pgt inclosed/intergrowed with Pl. Following the porphyritic crystals, matrix is composed of fine-grained piled-up Pl needles infilled with micro-grains of Ol, Pgt and Mag as well as glass, called tholeiitic texture. Crystallizing sequence of the matrix is Ol/Pgt/Mag→Pl→glass. There are two kinds of amygdale, mono- and multiple component ones. The mono is silica or calcite with growing rings showing increasingly sized particles inwards, which is preferred to be interpreted as sequential precipitation of a post fluid. This can deteriorate the reservoir quality. The multiple ones involve in the associations of Srp/chlorite (Chl)-glass, quartz (Qtz)-calcite (Cal)-saponite (Snt), and Qtz-Chl-Cal. They are made up of hydration of glass in solid state through four steps: fresh glass (refractive index 1.57), hydrate glass (refractive index 1.53), palagonite and new formed minerals mainly of Qtz, Cal, Chl and Snt. As a result of the devitrification and recrystallization, secondary pore-spaces can be increased by 7% to 10%, improving the reservoir features of the volcanics.

Key words Songliao Basin; Cretaceous Yingcheng Formation; Intermediate and mafic volcanic rock; Diagenesis; Amygdale; Mineral crystallizing sequence

摘要 利用露头 and 钻井资料, 通过显微镜观测、化学分析和电子探针分析, 研究营城组中基性火山岩的矿物晶出序列和杏仁体充填及其储层效应。本区中基性火山岩包括玄武岩、安山岩、玄武安山岩、粗面玄武岩、玄武粗安岩和粗安岩。斑晶矿物的晶出顺序为: 橄榄石最早并几乎全部蚀变为蛇纹石、伊丁石和磁铁矿, 仅保留橄榄石假象; 辉石被斜长石包含或与之交生, 说明辉石晶出有的略早于斜长石、有的与之同时。基质呈间隐间粒结构, 为比斑晶偏酸性/碱性的板条状微晶长石堆积搭成格架、内充填玻璃质及微晶粒状矿物(橄榄石、辉石和磁铁矿)。基质结晶晚于斑晶, 晶出序列为微晶粒状矿物→微晶长石→玻璃质。有单成分和复成分两种杏仁体。单成分者主要见硅质和钙质, 具结晶世代性, 为后生流体沉淀充填形成, 可作为储层变差或非储层的标志。复成分杏仁体是原生火山玻璃固态下水合与蚀变作用的结果: 包括蛇纹石/绿泥石-火山玻璃、石英-方解石-皂石/方解石和石英-绿泥石-方解石等组合类型, 通常可作为储层改善或有效性增加的标志。中基性火山玻璃蚀变

* 本文受国家“973”项目(2009CB219305)资助。

第一作者简介: 刘万洙, 男, 1950年生, 教授, 从事盆地火山岩和沉积成岩作用研究与教学, E-mail: liuwanzhu@126.com

** 通讯作者: 黄玉龙, 男, 1982年生, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业, E-mail: hyl1982@yahoo.cn

分为四个阶段:新鲜火山玻璃(折光率1.57)→水合火山玻璃(折光率降至1.53)→橙玄玻璃(铁镁质微晶矿物集合体)→新生矿物(石英、方解石、蛇纹石、绿泥石、皂石);由火山玻璃变为新生矿物的体积减小或孔隙增加效应为7%~10%。

关键词 松辽盆地;白垩系营城组;中基性火山岩;成岩作用;杏仁体;矿物结晶序列

中图分类号 P588.144;P588.145

1 引言

火山岩从喷出地表到成为油气储层,其间历经了固结成岩、风化淋滤、抬升剥蚀和埋藏改造等地质过程,并在此过程中经受了一系列复杂的成岩作用改造。火山岩储层成岩作用主要包括以下5个阶段:火山岩形成阶段、岩浆期后热液活动阶段、表生作用阶段、埋藏作用阶段和油气充注阶段(如 Sruga and Rubinstein, 2007; 刘成林等, 2008; 张顺存等, 2008)。可划分为原生成岩和次生成岩作用两部分,前者主要控制原生孔隙的发育和分布,后者决定了次生储集空间的发育,是原生孔隙不发育的火山岩能否成为有效储层的关键因素(冯子辉等, 2008)。中基性火山岩受成岩作用影响发生次生改造,显著的结果是普遍发育杏仁构造(Augustithis, 1978)。杏仁体类型和成因极其复杂,从岩浆冷凝到低级变质阶段的重结晶和热液蚀变作用均可形成/改造杏仁体;这些地质作用对于基性火山岩孔隙的演化具有重要影响(Neuhoff *et al.*, 1999, 2006)。在岩流单元的不同相带,组成杏仁体的矿物成分和组合可呈现一定规律性(杨献忠等, 2002, 2004)。

在松辽盆地由于酸性火山岩储层首先被发现,所以迄今相关研究主要侧重于酸性岩类(高有峰等, 2007; 赵海玲等, 2009);中基性火山岩储层近年才有突破,包括成岩作用在内的相关研究刚刚起步。笔者在火山岩储层研究过程中发现,松辽盆地营城组中基性火山岩孔缝(尤其是杏仁体)的充填现象十分普遍,组成矿物多样,单期或多期充填,孔缝连通或孤立出现;按化学成分有“单成分”和“复成分”两种显著不同的充填类型。本文旨在揭示杏仁体的成因、演化及其储层效应,综合运用盆缘剖面资料和盆内钻井岩心资料,通过岩石手标本观察和显微镜下薄片鉴定,结合岩石化学成分和电子探针分析,详细描述了松辽盆地营城组中基性火山岩的岩石学和矿物学特征,重点讨论了矿物晶出序列、杏仁体充填和储层效应。

2 地质背景和采样

松辽盆地广泛发育中生代火山岩,构成盆地内部断陷期地层的主体(Wang *et al.*, 2002),并成为徐家围子断陷和长岭断陷等深层气藏的主要储集层(Feng, 2008; 周荔青等, 2009)。中生代火山岩在松辽盆地东南缘九台地区出露较好,与盆内断陷区钻遇火山岩在时空分布和岩性序列上具有很好的类比性。在盆缘地区,通过剖面解剖和露头钻井揭

示,建立了松辽盆地断陷期营城组火山岩地层序列(贾军涛等, 2007)和地质模型(张斌等, 2007),显示基性火山岩主要发育于营城组一段下部和营城组三段中部。

本次研究所采用的样品采自于九台地区营城组火山岩露头和剖面钻井(Y1D1井和Y3D1井)和安达断陷探井岩心,平面上位于松辽盆地东南隆起区和徐家围子断陷北部(吴颜雄等, 2007; 闵飞琼等, 2007)。采样工作分两个部分:首先,加密取样(钻井岩心上平均1.4m左右取一个样品)磨制薄片,进行详细的岩石学特征描述;其次,在岩性上有变化的井段取样进行全岩分析,进而确定岩石的化学成分。全岩分析样品共计28件,筛选出其中成岩现象典型的4套样品重点研究;样品用X荧光光谱仪在国土资源部沈阳矿产资源监督检测中心测试。

3 中基性火山岩地球化学

本文营城组中基性火山岩见6种类型,主要为粗面玄武岩、玄武粗安岩和粗安岩区(图1a); SiO_2 49.57%~60.34%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 4.41%~7.51%, CaO 2.59%~8.34%, Al_2O_3 13.50%~19.33%。Shand's图解投影显示以偏铝质系列为主(图1b);用Siebel *et al.* (1997)提出的岩石蚀变判别标准(摩尔比 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) > 1.4$ 说明存在蚀变),所测火山岩的主量元素地球化学($\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 普遍小于1)显示所选样品基本未有显著的全岩蚀变。 SiO_2 - K_2O 图解显示为中钾-高钾系列, K_2O 含量介于1.21%~4.26%,投在中钾系列区的样品大多靠近中钾系列与高钾系列区的分界线附近(图1c)。

表1给出了代表性的4个样品的主量元素分析结果。确定岩性为粗面玄武岩、玄武粗安岩和玄武岩,其中3个样品位于碱性系列区,另外一个样品(YS10-1)位于亚碱性系列区、且靠近碱性系列与亚碱性系列区的分界线附近(图1a);4个样品均为偏铝质、高钾系列(图1b, c)。

4 中基性火山岩成岩作用

4.1 主矿物(斑晶)特征和晶出序列

松辽盆地营城组中基性火山岩斑晶和杏仁体,主要矿物成分为橄榄石、辉石(易变辉石)、斜长石、碱性长石、磁铁矿和玻璃质。另外出现大量的蚀变矿物伊丁石、蛇纹石、皂石、绿泥石、方解石、石英和磁铁矿等。主要斑晶矿物特征如下:

橄榄石:粒状,晶径通常为0.3~0.1mm,含量8%左右。在岩石中以斑晶和基质成分出现,经常被长石包裹形成嵌晶

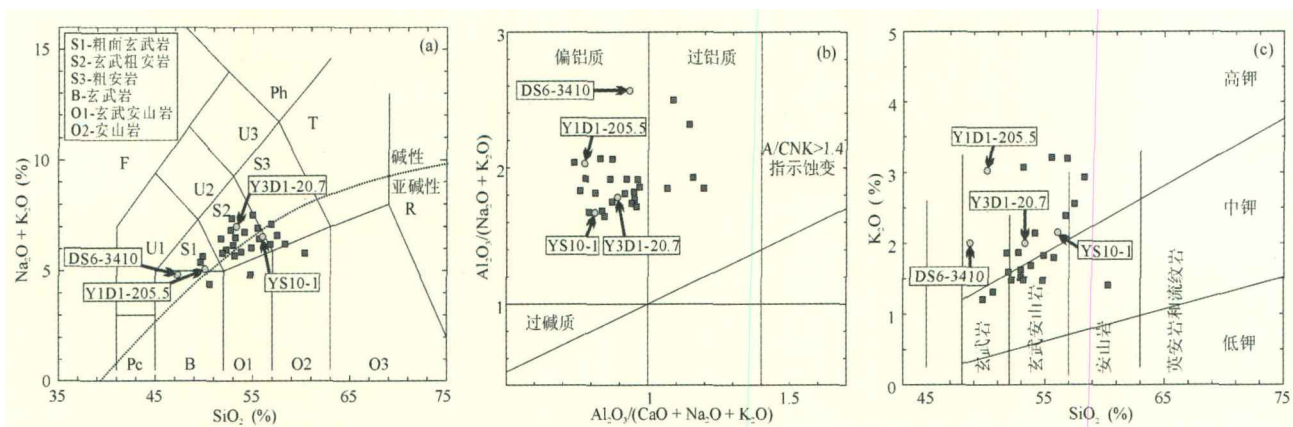


图1 松辽盆地营城组中基性火山岩主量元素地球化学特征

(a)-TAS图解(据 Le Maitre *et al.*, 1989, 图 B13);(b)-Shand's 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989, 图 2);(c)- SiO_2 - K_2O 图解(据 Le Maitre *et al.*, 1989, 图 B15)

Fig. 1 Major element features of Cretaceous intermediate and mafic volcanic rocks in Songliao Basin

(a)-Chemical classification using the total alkali versus silica (TAS) diagram (after Le Maitre *et al.*, 1989, fig. B13); (b)-Shand's index (after Maniar and Piccoli, 1989, fig. 2); (c)-Division of basalts, basaltic andesites and andesites in low-K, medium-K and high-K types (after Le Maitre *et al.*, 1989, fig. B15)

结构,说明结晶早于长石;现已全部蚀变为桔红色蛇纹石、红色伊丁石、黄绿色皂石和磁铁矿,只保留具有粒状晶形轮廓和表面裂开(裂理)特征的橄榄石晶体假象(图版1~3)。

辉石:单斜晶系,自形或半自形晶,解理发育,具有聚片双晶的板状易变辉石,晶径0.8~0.2mm,含量10%左右,在岩石斑晶和基质成分中出现,经常与长石共生形成联合斑晶,晶体表面较新鲜,见有裂理(图版4~5)。

长石:结晶程度较高,一般为单晶、聚斑、嵌晶(包裹早期结晶的橄榄石)以及联合斑晶(与辉石共生),晶径0.8~0.2mm,含量75%左右,其中斑晶占15%,主要为环带构造、聚片双晶、卡斯巴双晶、卡-钠复合双晶斜长石和碱性长石(正长石),其中环带构造的斜长石(中长石)沿环带蚀变析出磁铁矿,形成净边结构,同时长石晶体边缘被石英交代形成文象结构(图版6~8)。

通过斑晶矿物组合及结晶特征分析,主要斑晶矿物结晶顺序归纳为橄榄石最早,然后依次为辉石、斜长石,在斑晶中多数情况下辉石和斜长石同时结晶,并共生组合成联合斑晶(图版5)。

4.2 基质矿物类型、晶出序列及其与斑晶的关系

从基质矿物围绕斑晶呈流变型包围式排列分布(如图版7~8)和基质在斑晶之间呈填隙型不规则状分布(图版3~4,9)等特点分析,基质结晶总体晚于斑晶。组成基质的矿物主要为微晶斜长石、碱性长石以及铁镁矿物橄榄石和辉石等,还有隐晶质纤维状矿物集合体和玻璃质基质,组成间粒结构、间隙结构和交织结构。其中浅色矿物为柱状微晶长石搭成三角形或不规则状格架,铁镁矿物和磁铁矿充填在长石格架中(图版6,8~9)。通过现象分析基质中的铁镁矿物结晶早于长石,后结晶的长石围绕早期结晶的橄榄石和辉石生

长而形成格架状,在斑晶中辉石和长石同成岩阶段结晶的共生关系(交代结构、联斑结构)清楚,而基质中长石的结晶晚于辉石,长石围绕橄榄石和辉石生长形成间粒结构、嵌晶结构等,而交代等共生关系几乎不见。

4.3 孔隙充填(杏仁体)矿物类型与晶出序列

中基性火山岩中杏仁体的形成机理不同,矿物组合不同,结晶序列也不一样,根据成分组合及结晶特征可归纳为两大类:一类是火山岩成岩后期沿裂隙火山期后热液充填气孔形成的杏仁体(图版14),成分往往较单一;另一类是火山岩成岩同生或准同生期形成的杏仁体(图版10~13),矿物质成分组合较复杂,从微观形态上看与前一种类型杏仁体很相似,但形成机理和结晶序列上完全不同。其形成机理和结晶序列特征在结果与讨论中详细论述。

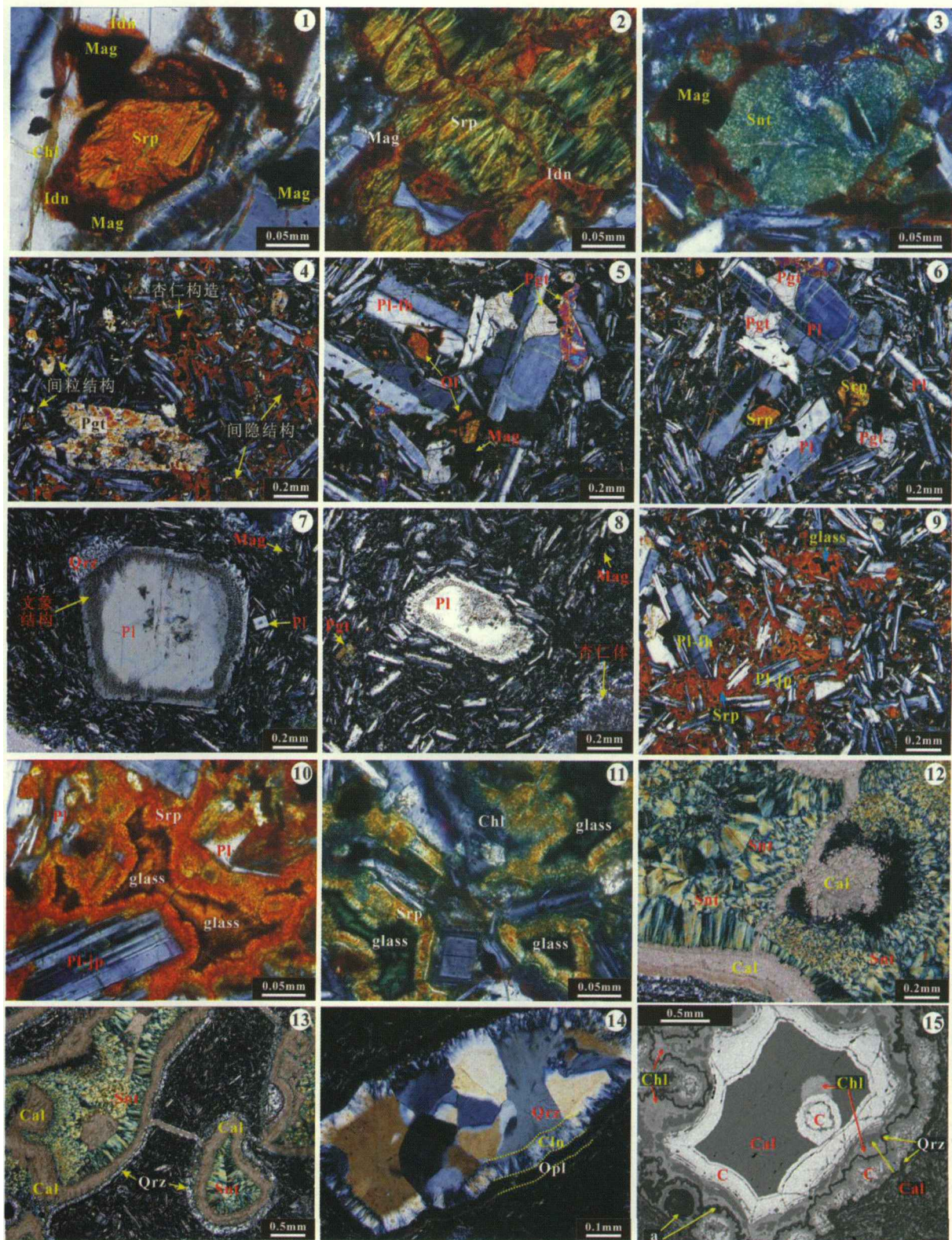
5 结果与讨论

5.1 杏仁体类型:单成分和复成分

本文营城组基性火山岩中见单成分和复成分杏仁体两大类,以后者为主。笔者趋向于将单成分杏仁体解释为次生的,复成分为原生的。单成分杏仁体主要是硅质充填(图版14)。复成分杏仁体按矿物成分和环带结构类型可进一步分为蛇纹石/绿泥石-火山玻璃(图版10~11),石英-方解石-皂石/方解石(图版12~13)和石英-绿泥石-方解石(图版15)等几种代表类型。

5.2 单成分杏仁体成因:后生流体沉淀充填

单成分硅质杏仁体(图版14)呈环带状,在显微镜下可



图版

1~6, 9~11 对应于样品 YS10-1, 7~8, 13 对应于样品 Y3D1-20, 7, 14 对应于样品 Y1D1-205.55, 15 对应于样品 DS6-3410

1-蚀变蛇纹石化橄榄石晶体轮廓完整, 蚀变产物为磁铁矿、伊丁石和蛇纹石; 2-橄榄石蚀变形成蛇纹石、伊丁石和磁铁矿, 仍然保留其晶体假象; 3-橄榄石蚀变形成皂石并析出磁铁矿, 仍然保留其晶体假象; 4-聚片双晶易变辉石斑晶, 基质为间粒、间隐结构, 具杏仁构造; 5-早期结晶的橄榄石和易变辉石镶嵌在斜长石斑晶中形成联斑嵌晶结构; 6-斜长石、蛇纹石化橄榄石和易变辉石构成联斑嵌晶结构, 基质为卡-钠复合双晶斜长石; 7-具环带构造的板状中长石斑晶沿环带溶蚀, 同时发生交代形成文象结构, 晶体边缘局部富集新生石英; 8-具环带状溶蚀边缘斜长石

斑晶, 基质中微晶斜长石形成的三角形格架或不规则格架中充填辉石和磁铁矿构成间粒结构, 局部为间隐结构、交织结构; 9-橄榄石、易变辉石、磁铁矿和玻璃质充填在长石格架中构成间粒、间隐结构; 10-长石格架中充填红色橙玄玻璃(隐晶质纤维集合体蛇纹石和铁镁混合物玻璃质)构成间隐结构, 见杏仁体包裹基质中的长石; 11-斜长石格架中充填黄绿色橙玄玻璃(隐晶质纤维集合体蛇纹石、绿泥石和玻璃质); 12、13-杏仁体成分由孔壁向内依次为石英→皂石→方解石→皂石→方解石; 14-杏仁体全为硅质, 由外向内为浅褐色蛋白石→无色纤维集合体玉髓→无色粒状石英, 呈现环带状构造; 15-杏仁体电子探针背散射电子像, 气孔内物质分层“沉淀”, 相同颜色区域为同种矿物成分, 气孔边缘见残余胶状的分散状石英(a), 杏仁体外壳由石英组成, 向内依次为胶状方解石(C)→石英→胶状绿泥石→结晶方解石(Cal)→胶状方解石(C)→结晶方解石(Cal), 结晶方解石基质中为胶状绿泥石和胶状方解石(C)

矿物代号: Mag-磁铁矿; Idn-伊丁石; Srp-蛇纹石; Chl-绿泥石; Snt-皂石; Pgt-易变辉石; Ol-橄榄石; Pl-斜长石; Orz-石英; Or-碱性长石; glass-玻璃质; Cal-方解石; Opl-蛋白石; Cln-玉髓; Pl-fh-卡-钠复合双晶斜长石; Pl-jp-聚片双晶斜长石

Photo plate

1, 2-Altered olivine form serpentine, magnetite and iddingsite with remaining pseudomorph; 3-Altered olivine form Saponite and magnetite with remaining pseudomorph; 4-Pigeonite phenocryst with polysynthetic twin and the groundmass show intergranular and intersertal texture; 5-Olivine and pigeonite inserted into plagioclase form poikilitic texture; 6-Serpentinized olivine and pigeonite inserted into plagioclase form poikilitic texture; 7-Circular zoned tabular andesine show graphic texture due to dissolution and metasomatism, with secondary quartz enriched in its margin; 8-Pyroxene and magnetite filled in the voids among plagioclase microcrystal; 9-Olivine, pigeonite, magnetite and glass filled in the voids among plagioclase microcrystal; 10-Intersertal texture shown by palagonite filling in the voids among feldspars, also see feldspar wrapped by glass amygdule; 11-Palagonite including serpentine, chlorite and glass filled in the voids among plagioclase; 12, 13-Components of multiple amygdule show as quartz, saponite, calcite, saponite and calcite from exterior to interior; 14-Components of mono-amygdule show as opal, chalcedony and quartz from exterior to interior; 15-Backscattered electron image show layered deposition of an amygdule, the crust is quartz, and inward sequence is colloid calcite, quartz, colloid chlorite, crystalline calcite, colloid calcite and crystalline calcite

Mineral abbreviations: Mag-magnetite; Idn-iddingsite; Srp-serpentine; Chl-chlorite; Snt-saponite; Pgt-pigeonite; Ol-olivine; Pl-plagioclase; Orz-quartz; Or-alkali feldspar; Cal-calcite; Opl-opal; Cln-chalcedony; Pl-jp-plagioclase of polysynthetic twin; Pl-fh-plagioclase of carlsbad and albite twin

表 1 松辽盆地东南隆起区营城组中基性火山岩主量(wt%)元素分析结果

Table 1 Abundance of major element (wt%) of the Cretaceous intermediate and mafic volcanic rocks in southeast uplift zone of Songliao Basin (four samples according to the specimen discussed in chapter 4 & 5)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	TAS 定名
Y1D1-205.50	50.08	1.10	13.50	10.97	6.94	0.22	3.45	5.90	2.05	3.03	0.60	3.08	100.92	粗面玄武岩
Y3D1-20.7	53.30	2.03	18.50	9.26	4.72	0.20	2.19	5.70	5.00	2.01	0.41	0.35	103.67	玄武粗安岩
YS10-1	56.04	1.81	16.01	9.29	2.85	0.13	2.08	5.58	4.41	2.15	0.40	1.10	101.85	玄武粗安岩
DS6-3410	47.26	2.58	17.45	2.09	9.17	0.14	1.49	6.57	2.81	2.01	0.45	7.56	99.58	玄武岩

见三个结晶世代关系, 自外向内结晶程度变好, 依次为带状蛋白石、栉状玉髓和镶嵌粒状石英。所展现的结晶学特点是边缘结晶速率快(晶体成核作用强)、平行内壁生长; 中间结晶速率降低、垂直内壁生长; 内部结晶速率慢、成核质点稀少、晶体颗粒变大。根据絮凝动力学原理(Hiemenz, 1977), 一大群质点的运动由布朗运动支配, 只有当两个及以上质点接触时它们才能附着在一起形成一个偶子。絮凝速率即为形成偶子的速率, 与流体中质点密度呈正比。因此在同一局部封闭体系中, 絮凝(结晶)速率总是先大后小呈指数下降。反过来说, 呈现同种组分结晶世代性关系的局部封闭体系, 往往与同源流体的连续晶出有关。再考虑到本文单成分硅质杏仁体常与裂缝穿切和硅化伴生, 笔者因此认为, 这类杏仁体的成分源于后生硅质流体, 但其结晶过程是自壁向内依次连续结晶。

5.3 复成分杏仁体成因: 原生火山玻璃固态下水合与蚀变作用

中基性火山玻璃(SiO₂ < 65%)易于蚀变且方式多样; 其中的铁镁矿物蚀变通常先形成橙玄玻璃, 最终将转化为热力学稳定的晶体相态(主要为蒙皂石)(Fisher and Schmincke, 1984; Pichler *et al.*, 1999)。水合作用和离子交换是引起火山玻璃蚀变的主要动因, 它们具有明显地沿着岩石微裂缝发育的特点。岩石表面少许水就可引发水合和离子交换作用, 导致水合氢离子 H₃O⁺ 与火山玻璃中游离碱金属离子交换反应: 2H₂O + Na⁺(glass) → H₃O⁺(glass) + NaOH。结果会使体系的 pH 值升高(碱性增加)。这种体系物化条件的变化使原有平衡被破坏, 又会反过来引起适应新条件的新生矿物的生成。Brey and Schmincke(1980)将基性火山玻璃蚀变分为四阶段: 新鲜火山玻璃 → 水合火山玻璃 → 橙玄玻璃 → 新生矿

物。火山玻璃随着水合程度增加折光率降低,油浸法测得水合火山玻璃的折光率仅为 1.53,而新鲜火山玻璃的折光率为 1.57。

所谓橙玄玻璃就是棕黄色或橙色的中基性维晶矿物集合体。本文基性火山岩中橙玄玻璃普遍存在,经详细鉴定可确定它们的主要成分为微晶蛇纹石 $Mg_6[Si_4O_8](OH)_8$ (图版 10) 和绿泥石 ($R^{2+}, R^{3+})_{5,6}[(Si, Al)_4O_{10}](OH)_8$ (图版 11); 而且它们呈不规则环带状包围水合火山玻璃 (图中的 glass)。在蚀变较彻底、热力学稳定的新生矿物大量出现的情况下,橙玄玻璃基本消失,此时会出现清晰、界限分明的新生矿物分带性。环带状矿物自杏仁体外壁向中心规律性分布,依次为硅质 (带状-栉状石英,厚 0.1mm ±)、钙质 (带状、栉状和嵌晶状方解石,厚度为石英条带的 2~4 倍) 和粘土矿物 (栉状、扇状或花瓣状皂石) (见图版 12~13)。绿泥石可与石英显微互层,也可与方解石呈凝块状交生 (见图版 15)。皂石为蒙脱石含 Mg 多的变种 $Na_x(H_2O)_4\{Mg_3[Al_xSi_{4-x}O_{10}](OH)_2\}$ 。在多种离子共存的复杂电解质环境中,硅质在酸性 (pH < 6.5~7) 条件下絮凝,方解石在碱性 (pH > 9) 条件下沉淀,而粘土矿物 (沸石、皂石和绿泥石等) 形成于类似于现代盐碱湖的偏碱性条件 (可能的 pH 为 9~7) (Fisher and Schmincke, 1984; Giresse and Wiewióra, 1999)。本文复成分杏仁体的成分环带可以认为是成岩过程中物化条件变化的矿物学记录。首先出现的硅质环带暗示成岩环境起初是酸性的,这可能源于水合氢离子 H_3O^+ 的作用,由于火山玻璃可吸纳高达 3%~10% 体积的水、且以分子或水合离子状态存在 (Jackson, 1997; Svensen *et al.*, 2008)。作为水合作用和离子交换反应的结果, SiO_2 析出会导致体系 pH 值升高。当 pH 升高到一定程度时出现钙质沉淀。由于 Ca 的大量消耗和物化条件的变化,最终导致大量不含钙的层状硅酸盐粘土矿物 (皂石、绿泥石和蛇纹石) 的形成。这些反应可能主要是通过固相玻璃质与其表面流体的水合和离子交换作用来实现的,即主要在固态下进行。其主要证据有:① 新生杏仁体保持原生玻璃质的外形;② 杏仁体中部残余火山玻璃的普遍存在,说明杏仁体从未经历过整体溶解作用,也说明反应是自外向内逐次进行的;③ 所形成的环带状矿物组合总体上属于热力学非平衡体系,所反映的物化条件也是不断变化的,说明是在局部热力学平衡的封闭体系下进行的。

5.4 成岩作用的储层效应

成岩作用的储层效应指在成岩作用过程中的体积效应及其导致的岩石空隙的增减 (Mansurbeg *et al.*, 2008)。后期流体沉淀形成的单成分硅质杏仁体,通常是一定规模的硅化作用的结果,会使原生气孔全部或部分填充,导致岩石局部密度增大而储集空间大幅度降低。因此,这类杏仁体的出现往往可作为储层变差或非储层的标志。而复成分杏仁体是玻璃质脱玻化和蚀变作用的结果,其体积效应相当于固态下杂乱排列的无定形物质转变为规则排列的晶体和部分物质

形成流体可流失,其结果导致杏仁体物质排列更紧密、体积变小;在岩石骨架体积不变的情况下会使岩石孔隙增加。研究区无定形二氧化硅的密度为 $2.30g/cm^3$,晶体石英的密度为 $2.65g/cm^3$ (冯子辉等, 2008),由胶状二氧化硅 (蛋白石) 转化为石英后体积缩小 (孔隙增加) 量为 13.2%。Dyda (2005) 研究泥质岩成岩作用结果表明,其密度及体积变化率为 8.4%~10.8%。然而实际上,本区最常见的成岩现象是火山玻璃转化为硅质、钙质和粘土质等多种矿物的环带状或交生状集合体 (图版 9~15),经面孔率测量其体积减少量 (孔隙增加) 通常为 7%~10% 左右 (高有峰等, 2007; 王璞珺等, 2009^①)。因此本区中基性岩中的复成分杏仁体的出现,通常可作为储层改善或有效性增加的标志。

致谢 本文获“东北亚生物演化与环境教育部重点实验室”、吉林大学“211”工程三期建设项目和 2009 年教育部基本科研业务经费 (“吉林大学创新团队发展计划”) 支持。

References

- Augustithis SS. 1978. Atlas of the Textural Patterns of Basalts and Their Genetic Significance. Elsevier Scientific Pub. Co., 67
- Brey G and Schmincke HU. 1980. Origin and diagenesis of the Roque Nublo Breccia, Gran Canaria (Canary Islands): Petrology of Roque Nublo volcanics, II. Bulletin Volcanologique, 43(1): 15-33
- Dyda M. 2005. Density limits of recrystallization inferred from rock glasses. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2(4): 49-61
- Feng ZH, Shao HM and Tong Y. 2008. Controlling factors of volcanic gas reservoir property in Qingshen Gas Field, Songliao Basin. Acta Geologica Sinica, 82(6): 760-768 (in Chinese with English abstract)
- Feng ZQ. 2008. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China. Marine and Petroleum Geology, 25: 416-432
- Fisher RV and Schmincke HU. 1984. Pyroclastic Rocks. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 326-336
- Gao YF, Liu WZ, Ji XY, Bai XF, Wang PJ, Huang YL, Zheng CQ and Min FQ. 2007. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 37(6): 1251-1258 (in Chinese with English abstract)
- Giresse P and Wiewióra A. 1999. Origin and diagenesis of blue-green clays and volcanic glass in the Pleistocene of the Côte d'Ivoire - Ghana Marginal Ridge. Sedimentary Geology, 127: 247-269
- Hiemenz PC. 1977. Principles of Colloid and Surface Chemistry. New York: Marcel Dekker Inc., 516
- Jackson JA. 1997. Glossary of Geology (fourth edition). Virginia: American Geological Institute, 311
- Jia JT, Wang PJ, Shao R, Chen RH, Zhang B, Hou JT, Li JL and Bian WH. 2007. Stratigraphical sequence and regional correlation of Yingcheng Formation in the southeast of Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 37(6): 1110-1123 (in Chinese with English abstract)
- Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre MJ, Lebas MJ,

① 王璞珺, 刘万洙, 黄玉龙, 唐华风. 2009. 徐东-安达地区火山岩储层综合研究. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院项目研究报告和图册

- Sabine PA, Schmid R, Scorensen H, Streckeisen A, Wooley AR and Zanettin B. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. London: Blackwell, 28
- Liu CL, Du YH, Gao JY, Jin H, Liu RH, Fan BJ, Zhu YX and Zhu J. 2008. Diagenesis and porosity evolution of deep volcanic reservoir in Songliao Basin. *Lithologic Reservoirs*, 20(4): 33-37 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *GSA Bulletin*, 101: 635-643
- Mansurbeg H, Morad S, Salem A, Marfil R, El-ghali MAK, Nystuen JP, Caja MA, Amorosi A, Garcia D and La Iglesia A. 2008. Diagenesis and reservoir quality evolution of palaeocene deep-water, marine sandstones, the Shetland-Faroes Basin, British continental shelf. *Marine and Petroleum Geology*, 25: 514-543
- Min FQ, Wang PJ, Yu SQ, Huang YL, Wu YX, Li J and Ren LJ. 2007. Meticulous depiction of lithology, lithofacies and reservoir porosity and permeability in the third & second member of Yingcheng Formation: Based on whole coring Y3D1 Well drilled in the standard section. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1203-1216 (in Chinese with English abstract)
- Neuhoff PS, Fridriksson T, Arnórsson S and Bird DK. 1999. Porosity evolution and mineral paragenesis during low-grade metamorphism of basaltic lavas at Teigarhorn, eastern Iceland. *American Journal of Science*, 299: 467-501
- Neuhoff PS, Rogers KL, Stannius LS, Bird DK and Pedersen AK. 2006. Regional very low-grade metamorphism of basaltic lavas, Disko-Nuussuaq region, West Greenland. *Lithos*, 92: 33-54
- Pichler T, Ridley WI and Nelson E. 1999. Low-temperature alteration of dredged volcanics from the Southern Chile Ridge: Additional in formation about early stages of seafloor weathering. *Marine Geology*, 159:155-177
- Siebel W, Raschka HIW, Kreuzer H, Lenz KL, Hoehndorf A and Wendt I. 1997. Early Palaeozoic acid magmatism in the Saxothuringian belt: New insights from a geochemical and isotopic study of orthogneisses and metavolcanic rocks from the Fichtelgebirge, SE Germany. *J. Petrol.*, 38: 203-230
- Sruoga P and Rubinstein R. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins, Argentina. *AAPG Bulletin*, 91(1): 115-129
- Svensen H, Bebout G, Kronz A, Li L, Planke S, Chevallier L and Jamtveit B. 2008. Nitrogen geochemistry as a tracer of fluid flow in a hydrothermal vent complex in the Karoo Basin, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 4929-4947
- Wang PJ, Liu WZ, Wang SX and Song WH. 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: Constraints on stratigraphy and basin dynamics. *International Journal of Earth Sciences*, 91: 331-340
- Wu YX, Wang PJ, Qu LC, Min FQ, Li Z and Ren LJ. 2007. Detailed description of lithology, lithofacies and porosity and permeability of the first and the lower member of Yingcheng Formation: Based on the latest data of Y1D1 Well cores in standard section. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1192-1202 (in Chinese with English abstract)
- Yang XZ, Yang ZL, Tao KY and Wang LB. 2002. The association characteristics and the applications of clay minerals from oil-bearing basalts in Minqiao area, northern Jiangsu Province. *Resources Survey & Environment*, 23(1): 60-67 (in Chinese with English abstract)
- Yang XZ, Yang ZL, Tao KY and Wang LB. 2004. The features of vesicles, holes and fissures in oil-bearing basalt and their oil-bearing characteristics, Jindu Depression. *J. Mineral. Petrol.*, 24(1): 88-92 (in Chinese with English abstract)
- Zhang B, Wang PJ, Ding RX and Xu ZJ. 2007. Geologic model quantification and characterization for volcanic reservoir of the Yingcheng Formation in Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1232-1243 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SC, Huang ZJ, Kong YH, Shi JA, Lei TZ and Fang LH. 2008. The porosity evolution of volcanic reservoir of Carboniferous in Luxi area, Junggar basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(5): 561-564 (in Chinese with English abstract)
- Zhao HL, Wang C, Sun WL, Qing Z, Chen L and Zhu F. 2009. Characteristics of petrology and thermodynamics of selective dissolution of plagioclase in volcanic reservoir rocks. *Geological Bulletin of China*, 28(4): 412-419 (in Chinese with English abstract)
- Zhou LQ, Lei YX and Wang HY. 2009. Play types and distribution features of coexistence of organic and abiogenetic hydrocarbon in the Changling faulted depression of Songliao Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 31(4): 324-328, 332 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 冯子辉, 邵红梅, 董英. 2008. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层储集性控制因素研究. *地质学报*, 82(6): 760-768
- 高有峰, 刘万洙, 纪学雁, 白雪峰, 王璞珺, 黄玉龙, 郑常青, 闵飞琼. 2007. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1251-1258
- 贾军涛, 王璞珺, 邵锐, 程日辉, 张斌, 侯景涛, 李金龙, 边伟华. 2007. 松辽盆地东南缘营城组地层序列的划分与区域对比. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1110-1123
- 刘成林, 杜蕴华, 高嘉玉, 金惠, 刘人和, 范柏江, 朱玉新, 朱杰. 2008. 松辽盆地深层火山岩储层成岩作用与孔隙演化. *岩性油气藏*, 20(4): 33-37
- 闵飞琼, 王璞珺, 于世全, 黄玉龙, 吴颜雄, 李喆, 任利军. 2007. 营城组三段及二段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营三 D1 井全取心钻孔资料. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1203-1216
- 吴颜雄, 王璞珺, 曲立才, 闵飞琼, 李喆, 任利军. 2007. 营城组一段及二段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营一 D1 井全取心钻孔资料. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1192-1202
- 杨献忠, 杨祝良, 陶奎元, 王力波. 2002. 苏北闵桥含油玄武岩中粘土矿物的组合特征及其应用. *资源调查与环境*, 23(1): 60-67
- 杨献忠, 杨祝良, 陶奎元, 王力波. 2004. 金湖凹陷含油玄武岩中孔隙的特征及其含油性. *矿物岩石*, 24(1): 88-92
- 张斌, 王璞珺, 丁日新, 许中杰. 2007. 松辽盆地营城组火山岩定量储层地质模型及其精细描述. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1232-1243
- 张顺存, 黄治超, 孔玉华, 史基安, 雷天柱, 方琳浩. 2008. 陆西地区石炭系火山岩储集层的孔隙演化特征. *新疆石油地质*, 29(5): 561-564
- 赵海玲, 王成, 刘振文, 孙文亮, 卿忠, 陈令, 朱峰. 2009. 火山岩储层斜长石选择性溶蚀的岩石学特征和热力学条件. *地质通报*, 28(4): 412-419
- 周荔青, 雷一心, 王红燕. 2009. 松辽盆地长岭断陷无机与有机油气共生藏组合类型及分布规律. *石油实验地质*, 31(4): 324-328, 332