

松辽盆地白垩系营城组火山岩喷发旋回划分^①

杨 帝¹⁾ 王璞琚²⁾ 梁江平¹⁾ 唐华风²⁾ 黄玉龙²⁾ 包 丽¹⁾

1) 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712;

2) 吉林大学地球科学学院 吉林长春 130061

摘 要: 鉴于松辽盆地白垩系营城组火山活动多中心、多旋回、火山物质运动方向多变、成分复杂等特征, 依据火山旋回的三个基本要素, 即共生序列、内在规律的外部结构表现、同源性, 着重考虑对储层研究的指导作用, 采用“组内划段—段内划旋回—旋回内划期次”的方案, 定义火山旋回为火山活动强度由平静到强烈再到平静而构成的喷发周期内形成的一套火山岩组合, 由一系列具有同源性的火山岩构成。一个至若干个期次构成一个旋回, 岩性演化具方向性: 从基性→中性→酸性的连续变化或其中部分连续变化, 相序上呈周期性演变。经大量盆内钻井和盆缘剖面资料研究, 将营城组一段和三段分别划分出 3 个火山喷发旋回。

关键词: 火山岩, 火山活动, 喷发旋回, 营城组, 白垩系, 松辽盆地

中图法分类号: P 534.53

文献标识码: A

文章编号: 0253-4959(2011)02-0122-07

火山旋回是指反映某火山的行为变化的一个规则层序(Jackson, 1997)。这一定义指出了火山旋回的 3 个要点: 首先, 火山旋回是一套规则的、与火山作用有关的岩石序列, 应具有一定的叠置关系或规律性; 其次, 火山旋回是一个火山内部形状变化的外部表象, 而且这种变化也应遵循一定规律的; 第三, 同一火山旋回的物质必须源于同一岩浆源。

在研究火山作用方面(王德滋、周新民, 1982), 岩相表示同一期产物在空间上分布的格局和依存关系, 喷发旋回是指火山活动由初喷期经历高峰期、衰退期到休眠期的整个过程。一个喷发旋回往往包括多期喷发活动, 反映火山作用在时间上的演化历史。在构造岩浆方面(尹家衡等, 1991), 火山旋回是指在一个火山活动期内, 由火山作用于同阶段形成, 并与一定火山构造形式相联系的火山产物的总和。王中杰等(1989)采用火山构造—岩相法(旋回法)来研究火山岩区地层。将火山产物与各自的喷发中心或火山构造联系起来, 划分岩石类型, 再按岩石类型及其组合、产出状态等划分出火山岩相, 进而根据岩相组合与相序恢复火山构造、确定火山旋回, 最后以古生物与同位素年龄定出火山旋回或岩系的年代。谢家莹(1996)提出陆相火山岩火山地层单位划分为旋回—组—岩相—层—4 级填图单元。火山活动旋回为对应的火山机构以及由火山机构按不同方式组合成

的不同级别和类型的火山构造形迹。组相当于火山机构演化阶段的火山岩浆作用产物; 岩相是某一火山喷发类型的相应产物, 可由流动单元或冷却单元和最基本单元岩性层组成。黄玉龙等(2007)采用旋回—期次—岩相三级方案对松辽盆地营城组火山岩储层进行研究。其中旋回对应于火山机构, 期次对应于岩相组合, 岩相与火山岩形成的作用方式相对应, 由一个或多个火山岩层构成。

实际研究中, 火山旋回的定义又是服务于研究目的的。例如研究区域性构造岩浆作用, 着眼于区域乃至全球尺度的构造岩浆事件的大的宏观规律, 则火山旋回的时空尺度就很宏大, 其涵义要超出上述对火山旋回的定义的 3 项原则, 一个火山旋回可能是一个纪或更大的时限跨度。这种火山旋回可以认为是广义火山旋回。而研究松辽盆地下部重要储气地层——火山岩储层(Feng Zhi-qiang *et al.*, 2010), 火山岩旋回就必须是对储层刻画和储层对比有实际作用的、具有成因联系的、火山成因岩石的叠置序列, 可以将其理解为狭义火山旋回。营城组不同火山喷发旋回在空间上存在复杂的叠置关系, 火山活动在很多方面都有所不同, 表现在构造特征、岩相特征、岩性组成和储层类型的差异。这些差异将引起不同喷发旋回或同一喷发旋回火山岩的油气藏类型的不同和油气富集程度的差异。因此, 火山岩

① 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB219300)。

文稿接受日期: 2011-01-23; 修改稿收到日期: 2011-03-26。

第一作者简介: 1983 年生, 女, 工学硕士, 主要从事石油与天然气勘探研究; E-mail: yangdi929@163.com

通讯作者: 王璞琚, 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事油气地质勘查与盆地火山岩研究; E-mail: wangpj@jlu.edu.cn

喷发旋回的划分对于查明区域火山岩活动规律、研究火山岩相带展布特征及油气分布与富集规律具有重要意义。

一、松辽盆地营城组火山喷发旋回的划分

对松辽盆地营城组火山岩旋回的划分, 笔者首先依据火山旋回的3个基本要素, 即共生序列、内在规律的外部结构表现、同源性, 最后着重考虑对储层研究的指导作用, 采用“组内划段—段内划旋回—旋回内划期次”的方案, 在正确划分火山喷发期次的基础上, 提出松辽盆地白垩系营城组火山喷发旋回指火山活动强度由平静到强烈再到平静而构成的喷发周期内形成的一套火山岩组合, 它由一系列具有同源性的火山岩构成。以初始火山间歇性喷发开始, 与下伏层之间多为各种规模的间断面; 地震剖面上多表现为区域性下超面。以火山活动末期相组合结束, 与上覆层之间多为各种规模的间断面, 多以出现大规模沉积岩层和风化壳为标志; 地震剖面上多表现为区域性削截面。一个至若干个期次构成一个旋

回; 火山活动强度呈弱—强—弱规律性叠合变化; 岩性一般演化方向性: 从基性→中性→酸性的连续变化或其中部分连续变化, 但有时也可见到相反的情况, 早期旋回产物偏酸性, 晚期旋回产物偏基性; 相序上呈周期性演变。

在对比研究营城组地层序列的基础上(任延广, 2004; 贾军涛, 2007), 运用火山喷发旋回期次的划分原则, 将营城组一段和三段的火山岩地层分别划分出3个火山喷发旋回。

1 火山喷发旋回期次识别方法

1.1 地质界面的识别 由于营城组火山岩形成时间持续长, 每一期火山机构建造时间可能在相对较短的时间内完成, 后期改造时间较长, 且火山喷发常与构造活动密切有关, 因此在火山活动初期, 火山岩底部常见典型火山灰层和熔浆胶结复成分砾岩, 火山岩顶部存在红土风化壳、松散层和沉积夹层等间断界面。笔者详细研究松辽盆地徐家围子断陷52口钻井、盆缘东南隆起区5条典型野外剖面等资料, 总结出如表1所示火山喷发旋回地质界面特征。

表1 地质界面识别标志

Tab. 1 Identification marks of geological interface

地质界面	指示界面	揭示厚度/m	地质特征	测井响应
红土风化壳	顶面	0.2~5	为下伏火山岩经过长期风化形成, 松散易碎	高伽马、低电阻率、低密度
沉积夹层	顶面	2~12	为压实固结而成的沉积岩和火山沉积岩, 多含有来自下部的火山碎屑物	中高伽马、低电阻率、低密度
松散层	顶面	1~8	为火山活动间歇期接受异源的沉积物, 主要有泥、砂和砂砾石组成, 极松散, 多未胶结。	低伽马(相对下部)、低电阻率、低密度
火山灰层	底面	0.1~15	主要为凝灰岩夹层和膨润土	低伽马、低电阻率、中高密度
熔浆胶结复成分砾岩	底面	5~43	砾石成分复杂, 主要以外来砾石为主, 其次为火山岩砾石, 整体分选差, 磨圆较好, 基质为熔浆胶结或沉积压实形成	中高伽马、低电阻率、中低密度

1.2 岩性组合 火山喷发常常表现出周期性的变化, 这种变化包括喷出的物质成分、喷发强度和喷出熔岩厚度等的变化。1) 以熔岩为主, 对于熔岩成分不同的, 可以根据成分的变化来划分; 对于熔岩成分相同或接近的, 可根据熔岩层的厚薄、斑晶矿物成分及岩石结构构造的变化来划分; 2) 以火山碎屑(熔)岩为主, 一般的变化规律为粗火山碎屑岩向细火山碎屑岩过渡; 3) 熔岩与火山碎屑(熔)岩互层, 期次内部岩性构成一般下部为火山碎屑(熔)岩、上部为熔岩; 4) 熔岩、火山碎屑(熔)岩、沉积岩交替互层, 期次内部岩性通常的构成方式为火山碎屑(熔)岩—熔岩—沉积岩, 这是一个由爆发—喷溢—间歇的周期, 反映出火山活动由强渐弱的正韵律变化趋势(李石、王彤, 1980)。

1.3 岩相序列 一个完整的火山岩相序组合在纵向上表现为爆发相→喷溢相→火山通道相→侵出相→火山沉积相(王璞珺等, 2003、2006)。这只是一个理想的火山喷发相序模式, 实际情况中的相序组合可能只出现其中的2、3个岩相类型, 亦可为单一的岩相类型, 还可能会出现相序重复、颠倒的情况。松辽盆地营城组火山岩相序主要受岩性控制(表2)。酸性岩喷发旋回多以爆发相开始、侵出相或火山通道相结束; 中基性岩多以喷溢相开始、火山沉积相结束; 酸性岩夹中基性岩的相序复杂, 常见喷溢相±爆发相→火山沉积相。风化壳层之上和沉积夹层之上的火山岩是新的喷发旋回的开始, 而火山沉积相和侵出相的出现往往标志着一个火山喷发旋回的结果。

表 2 火山喷发旋回与岩相的对应关系

Tab. 2 Corresponding relation between volcanic cycles and lithofacies

相	酸性岩旋回		中基性岩旋回		酸性岩夹中基性岩旋回	
	开始	结束	开始	结束	开始	结束
喷溢相			+(达深 302)		+(徐深 10)	
爆发相	+(徐深 26)				+(徐深 21)	
火山通道相		+(徐深 21)		+(汪深 1)		
侵出相		+(徐深 903)				+(徐深 211)
火山沉积相		+(徐深 23)		+(达深 1)		+(徐深 17)

注: 依据松辽盆地徐家围子地区 52 口钻井和盆地东南隆起区 5 条典型野外剖面火山岩喷发旋回统计而来; 括号中为典型井

二、火山喷发旋回的演化规律

由于火山喷发岩系在空间上发育不均衡, 即同一时期火山活动在不同地段的表现形式及强度不同(表现在岩性、岩相及厚度上的差异), 因此松辽盆地徐家围子断陷营城组火山喷发旋回综合柱状图(图 1)和松辽盆地东南隆起区营城组火山喷发旋回综合柱状图(图 2)的构筑有所选择, 力求反映研究区火山活动的总体概貌。

1 徐家围子断陷营城组火山喷发旋回特征

营城组一段以徐深 7 井(3857~4233 m)为参考, 自下而上划分 3 个喷发旋回: 旋回一为玄武岩旋回。伽马值 14~75 API, 平均值为 33A PI, 伽马曲线呈弱齿平直状(注: 文中涉及伽马曲线形态均在比例尺为 1/1000 时读取)。旋回二以强爆发相大套流纹质角砾岩开始至弱爆发相流纹质凝灰岩结束, 夹薄层流纹岩。伽马值 45~194 API, 平均值为 118 API, 伽马曲线呈中高幅齿型, 该旋回火山活动较频繁。旋回三主要为大套喷溢相流纹岩为主, 伽马值 72~234 API, 平均值为 146 API, 伽马曲线呈弱齿平直状。

在松辽盆地徐家围子断陷研究区缺失营城组二段(姜传金等, 2010)。营城组三段以达深 1 井(3223~3672 m)为参考, 自下而上划分 3 个喷发旋回: 旋回一以爆发相凝灰岩为主。伽马值 66~170 API, 平均值为 104 API, 伽马曲线呈中高幅齿型。顶部为风化壳, GR 值变大, DEN 值变小、电阻率曲线值变大, DT 值也变大。旋回二主要为大套喷溢相玄武岩, 顶部为薄层凝灰岩与上覆沉积相泥岩接触, 代表火山活动进入间歇期。伽马值 19~156 API, 平均值为 54 API, 伽马曲线呈中低幅齿化箱型。该旋回尤其在安达地区, 分布较广。旋回三主要为爆发相流纹质凝灰岩。伽马值 22~285 API, 平均值

为 130 A PI, 伽马曲线呈高幅齿化型一齿化漏斗型。

表 3 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山喷发旋回统计

Tab. 3 Statistic of volcanic cycles of the Yingcheng Formation in Xujiaweizi Depression, Songliao Basin

组	段	喷发旋回	出现几率/%	喷发期次
营城组	三段	旋回三	85	1~2
		旋回二	90	3~4
		旋回一	15	2~3
	一段	旋回三	90	1~3
		旋回二	80	3~4
		旋回一	20	1~2

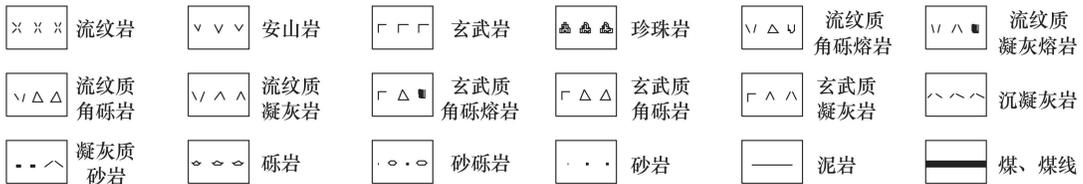
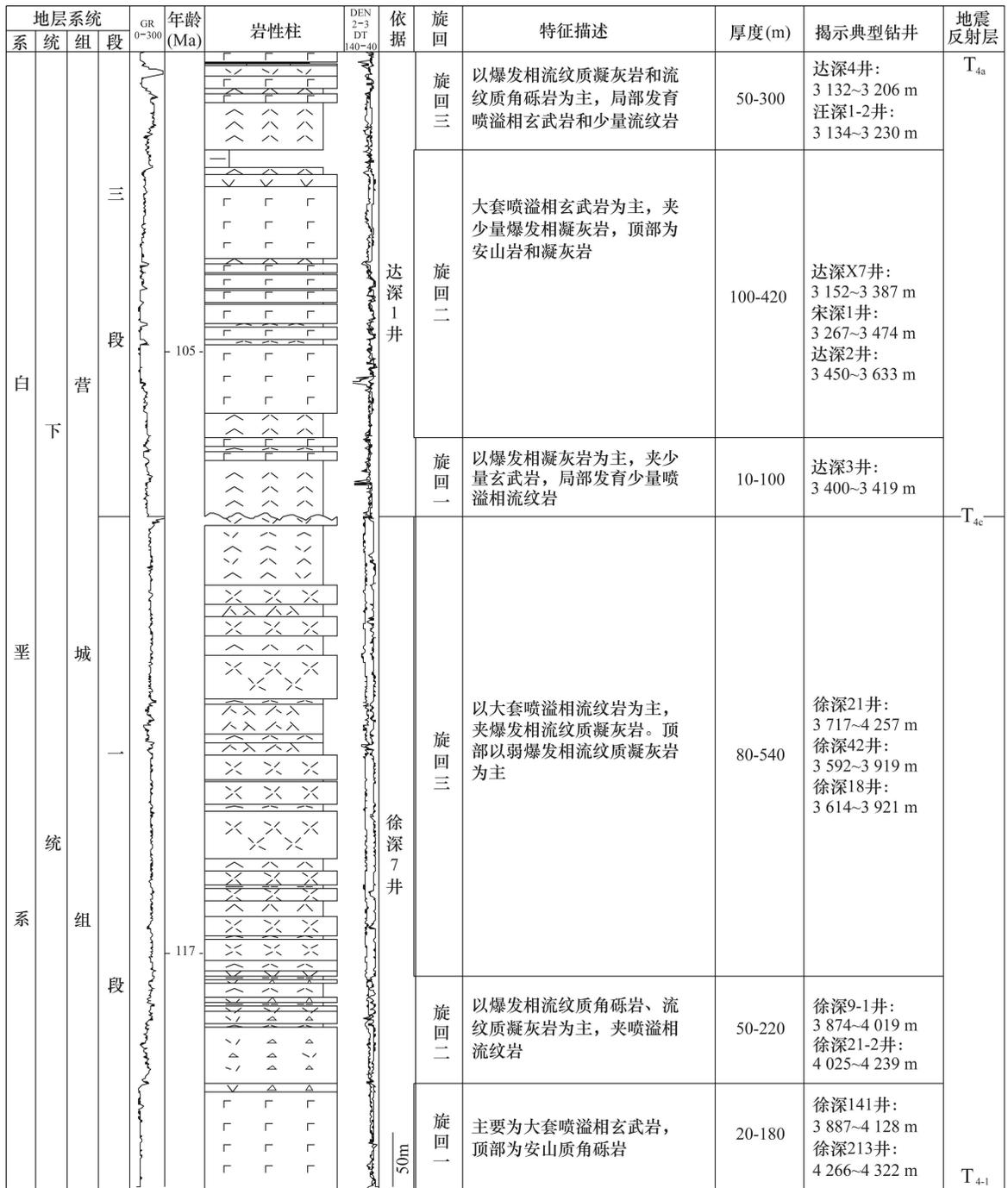
注: 依据徐家围子地区 52 口钻井火山岩喷发旋回统计而来

2 东南隆起区营城组火山喷发旋回特征

松辽盆地东南隆起区营城组火山喷发旋回划分主要依据东南隆起区九台市城子街镇两口预探井即“营一 D1”井、“营三 D1”井和松辽盆地营城组建组次层型剖面^①。

营城组一段 以营一 D1 井(0~204.2 m)为参考, 自下而上划分为 3 个喷发旋回: 旋回一以大套喷溢相玄武岩为主, 其次为爆发相玄武质集块熔岩、玄武质角砾岩, 夹有流纹质凝灰岩、安山岩、安山质凝灰岩等。顶部见为标志着火山活动进入末期的火山沉积相沉火山碎屑岩。分布范围小, 相当于火山初始沉陷-喷发阶段。旋回二以流纹质凝灰/角砾岩、流纹质凝灰/角砾熔岩和流纹岩等酸性岩为主, 夹有少量的沉火山碎屑岩, 岩相以强弱爆发相交为主, 末期火山通道相、火山沉积相。分布范围较大, 相当于大规模火山喷发前期强烈爆发阶段。旋回三以大套流纹岩为主, 夹流纹质凝灰/角砾岩和流纹质凝灰/角砾熔岩等。分布范围广泛, 相当于大规模火山喷发后期稳定喷溢阶段直至进入间歇期。

① 营一 D1 井、营三 D1 井及九台市城子街镇石场村营城组实测剖面资料数据来自“吉林大学地球科学学院营城组地质剖面项目组, 2007. 营城组火山岩野外露头岩石分析及地质大剖面的建立”



注: 年代据章凤奇等, 2007、2008、2009; 丁日新等, 2007; 舒萍等, 2007; 王璞珺等, 2010;
地震反射层据王璞珺等, 2006; 姜传金等, 2010

图 1 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩喷发旋回划分

Fig. 1 Division of volcanic cycles of the Yingcheng Formation in Xujiaweizi Depression, Songliao Basin

地层系统		年龄 (Ma)	岩性柱	依据	旋回	特征描述	厚度(m)	出露情况	地震 反射层										
系	统																		
白	下	110		营三 D 1 井	旋回三	含火山弹流纹质角砾(熔)岩夹流纹岩(见柱状节理)	10-70	出露于九台市斜尾巴沟—官马山—团结村、九台市羊草沟1720孔、营城煤矿64-9孔	T _{4a}										
					旋回二	以大套喷溢相玄武岩为主, 夹玄武质角砾(熔)岩和, 玄武质集块岩其次为安山岩和安山质碎屑岩	140-190												
					旋回一	爆发相流纹质角砾岩(见火山弹)夹流纹岩为主, 顶部为火山沉积相沉火山碎屑岩	40-50												
					莹	城	117		九台市城子街镇石场村营城组实测剖面	旋回三	凝灰质砾岩、砂砾岩、砂岩夹凝灰岩和流纹岩含煤层, 顶部为凝灰岩含煤	92-640	出露于九台市斜尾巴沟—官马山—团结村、吉林梨树县孟家岭ZK86-1孔、吉林公主岭市刘房子Zk30孔、长春市石碑岭Zk6001孔、九台市羊草沟ZK4103孔、九台市营城64-9孔	T _{4b}					
										旋回二	以强弱爆发相交交互流纹质角砾岩和流纹质凝灰岩为主, 顶部火山沉积相凝灰岩	30-100							
										系	统	117		营一 D 1 井	旋回三	以喷溢相流纹岩为主, 其次为爆发相流纹质凝灰岩和流纹质角砾岩	150-450	长春市石碑岭, 九台市营城银矿山, 九台市斜尾巴沟—官马山—团结村和三台、九台市营城煤矿64-4孔、64-9孔	T _{4c}
															旋回二	以强弱爆发相交交互流纹质角砾岩和流纹质凝灰岩为主, 顶部火山沉积相凝灰岩	30-100		
															旋回一	喷溢相玄武岩、爆发相玄武质角砾岩为主	30-40	九台市营城煤矿341、343孔、营城煤矿64-4孔	T ₄₋₁

图2 松辽盆地东南隆起区营城组火山岩旋回划分(说明与图例同图1)

Fig. 2 Division of volcanic cycles of the Yingcheng Formation in Southeast Rise, Songliao Basin

营城组二段 以九台市城子街镇石场村营城组实测剖面(481.75~637.47 m)为参考, 为粗碎屑岩(含硅化木)→细碎屑岩(含煤)→粗碎屑岩(含硅化木、火山碎屑)。

营城组三段 以营三 D1 井(0~205.3 m)为参考, 自下而上划分为3个喷发旋回: 旋回一以流纹质凝灰岩等流纹质火山碎屑岩(见火山弹)夹流纹岩为主, 顶部为沉火山碎屑岩, 如凝灰质砂岩。岩相主要是爆发相夹喷溢相, 末期为火山沉积相。分布范围小, 相当于火山初始沉陷-喷发阶段。旋回二以大套玄武岩、安山玄武岩、玄武质集块岩和玄武质碎屑熔

岩等基性岩为主, 其次为安山岩和安山质碎屑岩, 岩相以喷溢相为主, 其次为爆发相和火山通道相。喷发类型以夏威夷式为主, 分布范围较大, 相当于大规模火山喷发前期强烈爆发阶段。旋回三以含火山弹流纹质碎屑岩和流纹岩(见柱状节理)等酸性火山岩为主, 局部地区夹有安山岩、安山粗面岩等中性火山岩, 岩相以爆发相和喷溢相为主, 末期为火山通道相。分布范围较小, 相当于大规模火山喷发后期稳定喷溢阶段直至进入间歇期。

3 演化规律

3.1 火山喷发强度由弱(营城组一段旋回一)→强

(营城组一段旋回二)→中—弱(营城组一段旋回三)→间歇期(营城组二段)→弱(营城组三段旋回一)→中(营城组三段旋回二)→弱(营城组三段旋回三)。

3.2 主体岩性由中基性熔岩(营城组一段旋回一)→酸性碎屑岩(营城组一段旋回二)→酸性熔岩(营城组一段旋回三)→沉积岩和沉火山碎屑岩(营城组二段)→酸性碎屑岩(营城组三段旋回一)→中基性熔岩(营城组三段旋回二)→酸性碎屑岩(营城组三段旋回三)→沉积岩和沉火山碎屑岩(营城组四段)。营城组三段旋回一酸性碎屑岩除外,岩性演化具方向性,演化序列表现为从中基性→酸性物质的连续喷发。

3.3 从松辽盆地营城组整体火山岩厚度发育来分析,营城组一段自下而上分为 3 个旋回,营一段旋回一:旋回二:旋回三=1:1:5,即营一段以旋回三的大套流纹岩为主体岩性;营城组三段自下而上也分为 3 个旋回,营三段旋回一:旋回二:旋回三=1:4:1,即营三段以旋回二的玄武岩、玄武质碎屑(熔)岩为主体岩性。

四、结 论

依据火山旋回的 3 个基本要素,即,共生序列、内在规律的外部结构表现、同源性,着重考虑对储层研究的指导作用,采用“组内划段—段内划旋回—旋回内划期次”的方案,松辽盆地营城组一段和三段的火山岩地层分别划分出 3 个火山喷发旋回,且与盆缘营城组火山岩喷发旋回可对比。营城组一段自下而上 3 个旋回以顶部旋回三大套流纹岩为主体岩性。营城组三段自下而上 3 个旋回以中部旋回二玄武岩、玄武质碎屑(熔)岩为主体岩性。

参 考 文 献

丁日新,舒萍,纪学雁,曲延明,程日辉,张斌. 2007. 松辽盆地庆深气田储层火山岩锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 37(3): 525-530

黄清华,谭伟,杨会臣. 1999. 松辽盆地白垩纪地层序列与年代地层. 大庆石油地质与开发, 18(6): 15-28

黄玉龙,王璞瑛,门广田,唐华风. 2007. 松辽盆地营城组火山岩旋回和期次划分及其地质—地球物理方法——以盆缘剖面 and 盆内钻井为例. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6): 1183-1191

贾军涛,王璞瑛,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): 1110-1113

姜传金,陈树民,初丽兰,张广颖,鞠林波. 2010. 徐家围子断陷营城组火山岩分布特征及火山喷发机制的新认识. 岩石学报, 26(1): 63-72

李石,王彤. 1980. 火山岩. 北京:地质出版社. 216-219

任延广,朱德丰,万传彪,冯子辉,李景坤,王成. 2004. 松辽盆地北

部深层地质特征与天然气勘探方向. 中国石油勘探, (4): 12-22

舒萍,丁日新,纪学雁,曲延明. 2007. 松辽盆地庆深气田储层火山岩锆石地质年代学研究. 岩石矿物学杂志, 26(3): 239-245

王德滋,周新民. 1982. 火山岩岩石学. 北京:科学出版社. 10-13

王璞瑛,陈树民,李伍志,陈汉林,郎元强. 2010. 松辽盆地白垩纪火山期后热液活动的岩石地球化学和年代学及其地质意义. 岩石学报, 26(1): 33-46

王璞瑛,迟元林,刘万洙,程日辉,单玄龙,任延广. 2003. 松辽盆地火山岩相:类型、特征和储层意义. 吉林大学学报(地球科学版), 33(4): 317-325

王璞瑛,吴河勇,庞彦明,门广田,任延广,刘万洙,边伟华. 2006. 松辽盆地火山岩相:相序、相模式与储层物性的定量关系. 吉林大学学报(地球科学版), 36(5): 805-812

王中杰,谢家莹,尹家衡,黄光昭,谢芳贵,王占宇,杨琴芳,王美星,陈瑞年,阮宏宏,邱永泉. 1989. 浙闽赣中生代火山岩区火山旋回火山构造岩石系列及演化. 中国地质科学院南京地质矿产研究所刊,增刊(6): 1-60

谢家莹. 1996. 试论陆相火山岩区火山地层单位与划分——关于火山岩区填图单元划分的讨论. 火山地质与矿产, 17(3-4): 85-93

尹家衡,阮宏宏,谢家莹,冯宗帆,俞云文. 1991. 中国东南大陆中生代火山旋回火山构造及其控矿意义. 北京:地质出版社. 10-11

章凤奇,陈汉林,董传万,庞彦明,舒萍,王岩楼,杨树锋. 2008. 松辽盆地北部火山岩锆石 SHRIMP 测年与营城组时代探讨. 地层学杂志, 32(1): 15-20

章凤奇,程晓敢,陈汉林,董传万,余星,肖骏,徐岩,庞彦明,舒萍. 2009. 松辽盆地东南缘晚中生代火山事件的锆石年代学与地球化学制约. 岩石学报, 25(1): 39-54

章凤奇,庞彦明,杨树锋,董传万,陈汉林,舒萍. 2007. 松辽盆地北部断陷区营城组火山岩锆石 SHRIMP 年代学、地球化学及其意义. 地质学报, 81(9): 1248-1258

Ding Ri-xin, Shu Ping, Ji Xue-yuan, Qu Yan-ming, Cheng Ri-hui & Zhang Bin. 2007. SHRIMP Zircon U-Pb age and geological meaning of reservoir volcanic rocks in Qingshen Gas Field of the Songliao Basin, NE China. *Journal of Jilin University* (Earth Science Edition), 37(3): 525-530

Feng Zhì-qiang, Jia Cheng-zao, Xie Xi-nong, Zhang Shun, Feng Zi-hui & Cross T A. 2010. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao Basin, Northeast China. *Basin Research*, 22(1): 79-95

Huang Qing-hua, Tan Wei & Yang Hui-chen. 1999. Stratigraphic succession and chronosrate of Cretaceous in Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 18(6): 15-28

Huang Yu-long, Wang Pu-jun, Men Guang-tian & Tang Hua-feng. 2007. Division of volcanic cycles and stages of the Yingcheng Formation of the Songliao Basin; take the cross sections at the margin and the boring holes as examples. *Journal of Jilin University* (Earth Science Edition), 37(6): 1183-1191

Jia Jun-tao, Wang Pu-jun, Shao Rui, Cheng Ri-hui, Zhang Bin, Hou Jing-tao, Li Jin-long & Bian Wei-hua. 2007. Stratigraphical sequence and regional correlation of Yingcheng Formation in the southeast of Songliao Basin. *Journal of Jilin University* (Earth Science Edition), 37(6): 1110-1113

Jiang Chuan-jin, Chen Shu-min, Chu Li-jing, Zhang Guang-Yin & Ju Lin-bo. 2010. A new understanding about the volcanic distribution characteristics and eruption mechanism of Yingcheng Formation in Xujiawazi fault depression. *Acta Petrologica Sinica*,

26(1): 63-72

- Jackson J A. 1997. Glossary of geology (fourth edition). Alexandria: American Geological Institute. 1-769
- Li Shi & Wang Tong. 1980. Volcanic rocks. Beijing: Geological Publishing House. 216-219
- Ren Yan-guang, Zhu De-feng, Wan Chuan-biao, Feng Zi-hui, Li Jing-kun & Wang Cheng. 2004. Geological characteristics of deep layers in northern part of Songliao Basin and orientation for natural gas exploration. *China Petroleum Exploration*, (4): 12-22
- Shu Ping, Ding Ri-xin, Ji Xue-yan & Qu Yan-ming. 2007. SHRIMP zircon geochronology of reservoir volcanic rocks in the Qingshen Gas Field, Songliao Basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 239-245
- Wang De-zi & Zhou Xin-min. 1982. Petrology of volcanic rock. Beijing: Science Press. 10-13
- Wang Pu-jun, Chen Shu-min, Li Wu-zhi, Chen Han-lin & Lang Yuan-qiang. 2010. Chronology, petrology and geochemistry of the Cretaceous crypto-explosive breccia-bearing volcanic rocks; implications for volcanic reservoir and tectonics of the Songliao Basin, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 33-46
- Wang Pu-jun, Chi Yuan-lin, Liu Wan-zhu, Cheng Ri-hui, Shan Xuan-long & Ren Yan-guang. 2003. Volcanic facies of the Songliao Basin: classification, characteristics and reservoir significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4): 317-325
- Wang Pu-jun, Liu Wan-zhu, Wang Shu-xue & Song Wei-hai. 2002. ⁴⁰Ar/³⁹Ar 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(2): 331-340
- Wang Pu-jun, Wu He-yong, Pang Yan-ming, Men Guang-tian, Ren Yan-guang, Liu Wan-zhu & Bian Wei-hua. 2006. Volcanic facies of the Songliao Basin; sequence model and the quantitative rela-

tionship between porosity and permeability of the volcanic reservoir. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(5): 805-812

- Wang Zhong-jie, Xie Jia-ying, Yin Jia-heng, Huang Guang-zhao, Xie Fang-gui, Wang Zhan-yu, Yang Qin-fang, Wang Mei-xing, Chen Rui-nian, Ruan Hong-hong & Qiu Yong-quan. 1989. Volcanic cycles, structures, rock series and magma evolution for the Zhejiang-Fujian-Jiangxi Mesozoic Volcanic Terrane. *Bull Nanjing Inst Geol MR, CAGS, Sup.* (6): 1-60
- Xie Jia-ying. 1996. Approach to volcanic stratigraphic unit and its division in continental volcanic terrain. *Volcanology & Mineral Resources*, 17(3-4): 85-93
- Yin Jia-heng, Ruan Hong-hong, Xie Jia-ying, Feng Zong-zhi & Yu Yun-wen. 1991. Mesozoic volcanic cycles, volcanic structures and its ore-controlling significance of Southeast Continent of China. Beijing: Geological Publishing House. 10-11
- Zhang Feng-qi, Chen Han-lin, Dong Chuan-wan, Pang Yan-ming, Shu Ping, Wang Yan-lou & Yang Shu-feng. 2008. SHRIMP Zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks and discussion on the geological time of the Yingcheng Formation of the northern Songliao Basin. *Journal of Stratigraphy*, 32(1): 15-20
- Zhang Feng-qi, Cheng Xiao-gan, Chen Han-lin, Dong Chuan-wan, Yu Xing, Xiao Jun, Xu Yan, Pang Yan-ming & Shu Ping. 2009. Zircon chronological and geochemical constraints on the Late Mesozoic volcanic events on the southeastern margin of the Songliao Basin, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 39-54
- Zhang Feng-qi, Pang Yan-ming, Yang Shu-feng, Dong Chuan-wan, Chen Han-lin & Shu Ping. 2007. Geochronology of zircon SHRIMP, geochemistry and its implication of the volcanic rocks from Yingcheng Formation in depression area, the northern Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(9): 1248-1258

VOLCANIC ERUPTION CYCLES OF THE CRETACEOUS YINGCHENG FORMATION IN THE SONGLIAO BASIN

YANG Di^{1,2)}, WANG Pu-jun²⁾, LIANG Jiang-ping¹⁾, TANG Hua-feng²⁾,
HUANG Yu-long²⁾ and BAO Li¹⁾

1) Daqing Oilfield Exploration and Development Institute, Daqing 163712;

2) College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061

Abstract Volcanic activities recorded in the Cretaceous Yingcheng Formation in the Songliao Basin are characterized by multiple eruption centers, multiple eruption cycles, and complex and variable volcanic lithologies. On the basis of volcanic sequence and assemblage, volcanic eruption cycles in the Yingcheng Formation in the Songliao Basin are inferred to represent variations in the intensity of volcanic activity (e. g., from quiet to intense and then to quiet). An eruption cycle consists of one or several eruption stages. Furthermore, lithologic evolution during an eruption cycle is directional, basic to intermediate and then to acidic. Analysis of drill cores and field sections shows that the Member 1 (K₁y¹) and Member 3 (K₁y³) of Yingcheng Formation each consist of three volcanic eruption cycles.

Key words volcanic rocks, volcanic eruption cycles, Yingcheng Formation, Cretaceous, Songliao Basin