

松辽盆地北部徐家围子断陷下白垩统营城组火山机构类型与喷发模式研究*

贺电 李江海 刘守偈

HE Dian, LI JiangHai and LIU ShouJie

教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2008-12-12 收稿, 2009-01-09 改回.

He D, Li JH and Liu SJ. 2009. Volcanic edifice types and eruption model of Yingcheng Formation, Lower Cretaceous, in Xujiaweizi fault depression, northern Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3):659-666

Abstract Volcanic hydrocarbon reservoir has already been one of the most important reservoir types in Mesozoic-Neozoic rift basin in eastern China. Volcanic rocks, mainly dacitic to rhyolitic rocks, of Yingcheng Formation in Xujiaweizi fault depression, which contain natural gas, have been the key for exploration and production, hence we must make sure volcanic edifice types and eruption model first. According to investigation, there are three types of volcanic edifices, including stratovolcano, lava dome, and caldera, in Xujiaweizi fault depression. Controlled by two phases of orthogonal and oblique extension in Xujiaweizi fault depression, there are three types of spatial patterns of volcanic edifices around the regional fault. In the footwall of fault, volcanic edifices develop; in the fault belt, there is the pattern of volcanic edifices overlapping one by one; in the hanging wall of fault, it is occupied by remarkable amount of volcanic rocks and Xudong caldera. The formation of Xudong caldera indicates that the magma chamber with low aspect ratio intruded to the bottom of crust, and then magma erupted out of the ground to form volcanic edifices. It is a center-fissure eruption model controlled by both the magma chamber and regional fault in Xujiaweizi fault depression.

Key words Xujiaweizi fault depression; Yingcheng Formation; Volcanic edifice; Eruption model; Caldera; Magma chamber

摘要 火山岩油气藏已成为我国东部中、新生代陆内裂谷盆地内一种重要的油气藏类型。松辽盆地北部徐家围子断陷营城组火山岩中形成大规模气藏, 不同火山岩相对油气的储集性差异很大, 因此探究断陷内火山机构类型和喷发模式成为天然气勘探开发的基础。徐家围子断陷发育中酸性火山岩, 识别出层状火山、熔岩穹隆、破火山口等 3 种主要火山机构赋存类型。受区域垂向和斜向两期拉张作用控制, 在断裂上盘、下盘和断裂带, 火山机构分别以不同形式展布: 断裂下盘的掀斜肩部火山机构发育、断裂带火山机构串珠状叠置、断裂上盘火山爆发强烈并形成大型徐东破火山口。徐东破火山口的形成说明岩浆侵位于地壳底部, 形成扁平状的岩浆房。岩浆垂直上升喷发或沿断裂喷发, 形成徐家围子断陷中心式-裂隙式火山喷发模式。

关键词 徐家围子断陷; 营城组; 火山机构; 喷发模式; 破火山口; 岩浆房

中图法分类号 P317.2

1 引言

火山岩油气藏已成为我国东部中、新生代陆内裂谷盆地的重要油气藏类型(郭占谦, 2001; 牛嘉玉等, 2003; 宋维海

等, 2003b; 吴昌志等, 2005), 松辽盆地、渤海湾盆地、江汉盆地等均在火山岩中发现工业油气流。火山岩相对油气藏的储集性能影响很大, 因此火山机构喷发机制和分布规律的研究是火山岩油气藏勘探和开发的关键。通过地表露头观察、地下钻井和地震等地球物理资料分析, 人们对古火山机构识

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB403502)资助。

第一作者简介: 贺电, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 石油与构造地质专业, E-mail: hedian06@163.com

别方法已有了深入的认识(王槐基,1994;赵国连和张岳桥,2002;文百红等,2006;杨辉等,2006;任利军等,2007;王璞珺等,2007),为恢复一个地区隐伏古火山喷发模式奠定了基础。

徐家围子断陷是松辽盆地深层勘探程度最高的一个含气断陷。营城期火山活动是断陷中最为频繁的时期,形成的火山岩规模大、分布面积广,火山活动对烃源岩的影响也最大(金晓辉等,2005)。徐家围子断陷天然气藏的分布受火山机构和区域构造控制(姜传金等,2007)。前人对该地区火山机构类型、火山岩相划分、以及火山岩相与储层物性关系等问题已经进行了广泛的研究和深入的探讨(陈建文等,2000;程日辉等,2003b;刘万洙等,2003;王璞珺等,2003,2006;黄玉龙等,2007),本文在此基础上,通过地震剖面解释和钻井资料分析,拟建立徐家围子断陷营城期火山机构喷发模式。

2 区域地质概况

徐家围子断陷是松辽盆地内最大的中生代断陷(陈建文等,2000),经历了两期演化阶段,即火石岭期—沙河子期(J_3h-K_1sh)强烈断陷阶段与营城期(K_1yc)断陷向坳陷转化阶段(图1)。早白垩世营城期徐家围子断陷大规模火山喷发,火山岩平均厚度300m,最厚处超过1000m,埋深一般3000~4500m(冯志强等,2007)。位于徐家围子断陷中、西部的两条NW-NNW向基底断裂(徐中、徐西断裂)规模较大,控制着断陷的发育,将断陷划分为徐西断陷带、徐中构造带、徐东斜坡带等构造单元。徐中、徐西断裂断穿整个断陷层序,一般向上断至沙河子组二段或营城组底部(殷进垠等,2002),控制着营城组火山岩的展布。徐东断裂为徐东斜坡带延伸最长、断距最大的正断层。

3 火山机构类型

徐家围子断陷营城组火山岩发育,全区营城组火山岩以酸性岩石类型为主,北部地区发育少量中基性火山岩。火山机构类型多样,营城组下部火山岩以熔岩为主,多形成熔岩穹隆;上部火山岩多为熔岩和火山碎屑岩互层交错,形成以层状火山为主的火山机构(黄玉龙等,2007)。另外,徐东破火山口也是一个显著的火山机构。

3.1 层状火山

层状火山(stratovolcano)也称为复合火山(composite volcano),它是由熔岩流、火山灰和火山碎屑流共同喷发组成,形成熔岩和火山碎屑互层的层状构造样式,在其顶部常形成火山口,在火山翼部常发育多个分支火山通道,形成寄生火山。组成层状火山的岩石类型多样,包括玄武岩、安山岩、英安岩和流纹岩,其喷发周期长达几万年到几十万年。

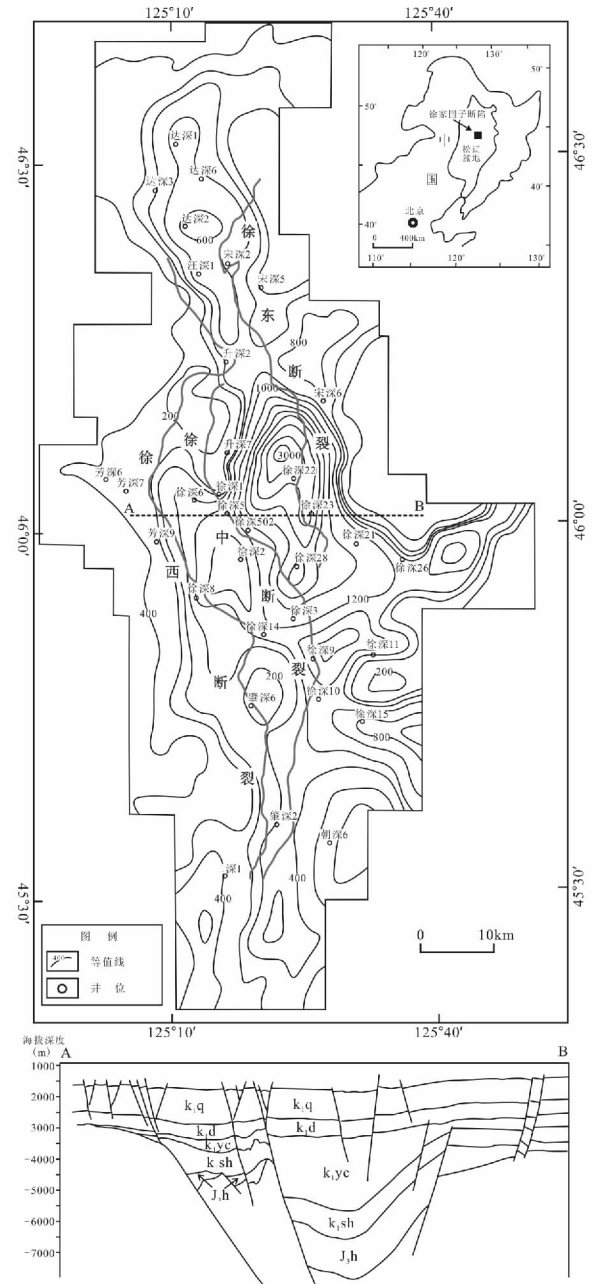


图1 徐家围子断陷营城组火山岩厚度与断裂展布图(据韩龙和刘锦文,2007修改^①)

J_3h -火石岭组; K_1sh -沙河子组; K_1yc -营城组; K_1d -登楼库组; K_1q -青山口组

Fig. 1 Isopach map of volcanic rocks of Yingcheng Formation with regional faults in Xujiaweizi fault depression J_3h -Huoshiling Fm; K_1sh -Shahezi Fm; K_1yc -Yingcheng Fm; K_1d -Denglouku Fm; K_1q -Qingshankou Fm

由于熔岩的侵入和喷发将火山碎屑和火山灰编织成巨大堆

^① 韩龙,刘锦文. 2007. 松辽盆地北部徐家围子断陷补充三维构造解释及全断陷构造拼图. 大庆油田勘探开发研究院

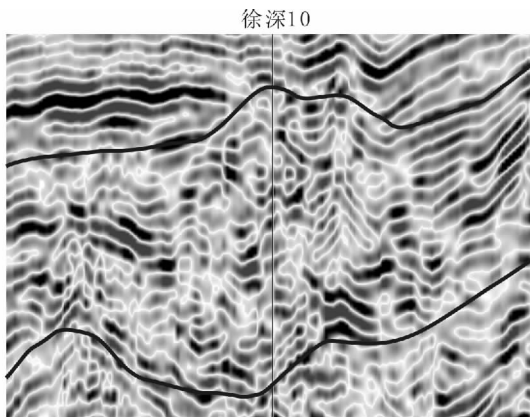


图2 徐家围子断陷层状火山地震反射特征

Fig. 2 Character of seismic reflection of stratovolcano in Xujiaweizi fault depression

积,使得层状火山比其他的火山类型高耸,并且形成翼部下凹的轮廓形态。

层状火山是徐家围子断陷最常见的一种火山机构类型。在地震剖面上表现为杂乱反射和连续反射并存,分别代表火山碎屑和熔岩,例如徐深10井区(图2)。此外,徐深1、徐深7、徐深13等井区见火山碎屑岩(火山角砾岩、凝灰岩等)与火山熔岩(流纹岩、英安岩等)互层,为典型的层状火山机构类型喷发。

3.2 熔岩穹隆

熔岩穹隆(lava dome)为圆形的、边缘陡峭的隆状物,由于高粘度的火山熔岩(英安岩或流纹岩)堵塞喷火口所形成。熔岩穹隆规模较小,顶端一般无火山口,从地下涌来的岩浆挤入熔岩穹隆内部,从而引起熔岩穹隆突起变形,形成内生穹隆。熔岩穹隆常形成于火山爆发作用不强烈的薄弱地带,以及大型层状火山和破火山口形成末期的火山口内部,如美国圣海伦斯层状火山顶部火山口内发育熔岩穹隆。

熔岩穹隆在徐家围子断陷也是一种特征的火山机构。在地震剖面上表现为穹隆状,内部空白反射,外部强反射,例如徐深2井区(图3)。此外,徐深4、徐深8、徐深9等井区也识别为熔岩穹隆,以流纹岩、英安岩等中酸性熔岩为主。其中在徐深2井见珍珠岩(郭振华等,2006),指示高粘度岩浆受到内力挤压侵出地表时遇水淬火形成的(王璞珺等,2003),是典型的岩浆侵出形成熔岩穹隆的特征。

3.3 破火山口

破火山口(caldera)是在火山喷发末期,由于其下部的浅层侵位的岩浆房物质喷发而抽空,导致火山机构坍塌,形成的一个陡壁的碗形深凹陷(Lipman, 2000)。后期在破火山口内常形成次生火山机构和湖水。破火山口的形成是火山物质喷发量最大、破坏力最强的一种火山作用现象(Renbi

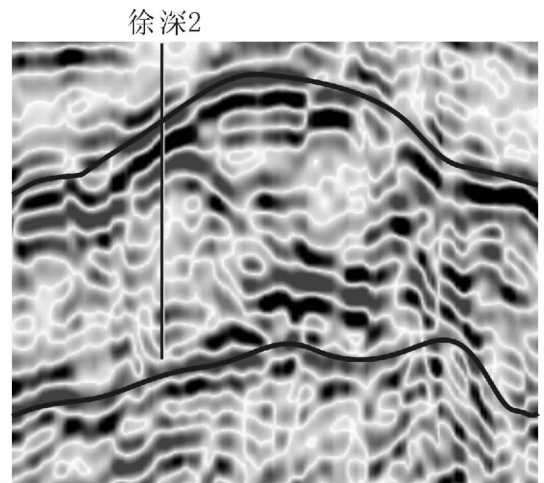


图3 徐家围子断陷熔岩穹隆地震反射特征

Fig. 3 Character of seismic reflection of lava dome in Xujiaweizi fault depression

and Nicholls, 2004)。由于层状火山爆发强烈,后期坍塌常形成大型破火山口。流纹质破火山口是地球上规模最大的火山机构类型。

通过对外部形态、断裂特征、填充物质等方面的研究,识别出徐深22井区天窗式塌陷,并且堆积巨厚流纹质凝灰岩和熔结凝灰岩,为典型的破火山口特征,称为徐东破火山口(贺电等,2008)(图4),其对整个断陷的火山起控制作用。此外,徐深3井区是由层状火山塌陷形成的破火山口,但规模不大(图5)。

4 火山机构与区域断裂关系

区域断裂不仅控制着火山活动和火山机构的分布(程日辉等,2003b),而且对火山岩的储集性能有很大影响(宋维海等,2003a)。徐中断裂是徐家围子断陷内一条主控铲形正断裂,其强烈构造活动造成断陷内掀斜断块的发育,断裂两侧火山岩厚度剧烈变化,断裂附近构造高部位强烈剥蚀,断裂下盘出现沉积夹层、上盘出现巨厚火山岩。火山机构的赋存形式与徐中断裂空间展布存在3种关系(例如,程日辉等,2003a),分别是断裂下盘的掀斜肩部火山机构发育、断裂带火山机构串珠状叠置、断裂上盘形成厚层火山岩且发育大型破火山口。

4.1 断裂下盘(掀斜肩部火山机构发育)

Corti *et al.* (2003)指出裂谷环境下,岩浆侵位和喷发与区域断裂存在空间上和成因机制上的联系。当垂直拉张作用下,侵位于地壳底部的岩浆房向断裂下盘方向移动,即向裂谷盆地外侧移动并向上喷发于地表,因此在断裂下盘且靠近断裂的区域会形成一系列火山机构。营城期徐中断裂持续活动造成下盘不断抬升掀斜,岩浆沿火山通道很容易到达

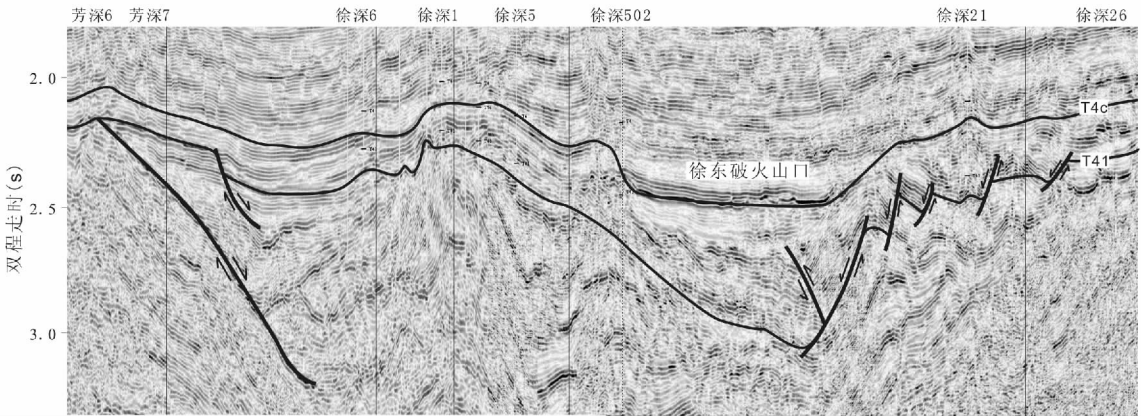


图4 徐家围子断陷徐东破火山口地震剖面特征
 Fig.4 Character of seismic reflection of Xudong caldera in Xujiaweizi fault depression

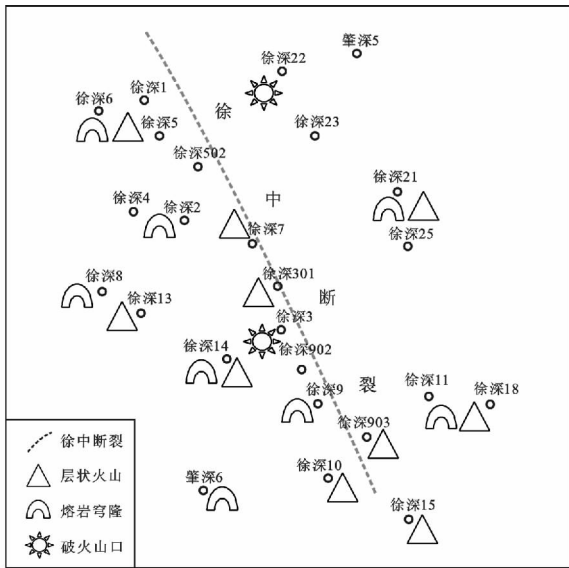


图5 徐家围子断陷营城组火山机构分布图
 Fig.5 Distribution of volcanic edifices of Yingcheng Formation in Xujiaweizi fault depression

构造高点的掀斜肩部位置,形成火山机构(以层状火山为主),掀斜肩部常为近火山口的火山物质,属于中心亚相(刘为付,2004)。通过钻井资料和地震剖面,在徐中断裂下盘掀斜肩部的确存在许多火山喷发中心(图6),但由于构造高部位剥蚀强烈,难以保存完整的火山机构形貌。

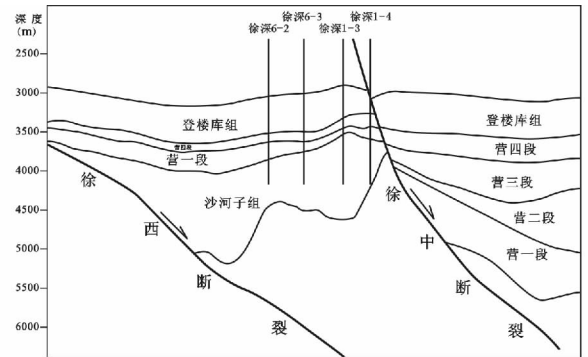


图6 过徐深1-徐深6井区构造剖面图
 Fig.6 Structural profile map through Well Xushen 1-Xushen 6

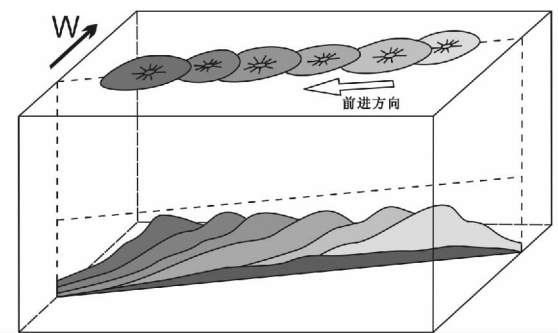


图7 火山机构平行于断裂喷发叠置模式
 Fig.7 The model of volcanic eruption along the fault

4.2 断裂带(火山机构串珠状叠置)

火山机构沿陡倾的徐中断裂呈串珠状喷发(唐华风等,2007),火山机构依次斜向SE方向叠覆(图7)。由于徐中断裂起到很好的火山通道作用,因此部分岩浆容易沿断裂向上喷发于地表,因此形成串珠状火山结构叠置关系。火山机构沿着断裂走向迁移,形成前后不对称的平面形态,前进翼加长。图7指示了徐深2-徐深7-徐深902-徐深9-徐深10井区

平行于徐中断裂剖面火山机构叠置关系。垂直于断裂剖面上,也可看出火山机构沿断裂面向上叠置,如升深202-升深201井区(图8)。

4.3 断裂上盘(火山岩厚度大,破火山口发育)

断裂上盘沿徐中断裂沉降,形成西断东超的半地堑式断

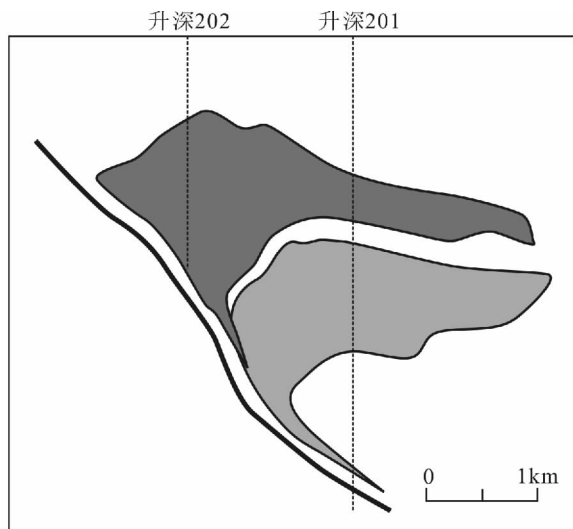


图8 火山机构垂直断裂叠置模式

Fig. 8 The model of volcanic eruption perpendicular to the fault

陷盆地,营城期堆积了厚层的火山碎屑和火山熔岩,平均厚度在500m以上。该区下部火山岩中以熔岩穹隆形式赋存,上部火山岩中以层状火山形式赋存,钻井和地震反射剖面分析徐深11、徐深18、徐深21、徐深25等井区都是这样的例子。熔岩穹隆代表相对较弱的火山喷发作用,层状火山代表强烈的爆发作用,指示断裂上盘火山活动是一个由弱变强的作用过程。

然而,在断裂上盘,最显著的火山机构是徐深22井区的徐东破火山口(图4)。徐东破火山口是一个直径 10×17 km的深凹陷,内部填充1000m以上的流纹质凝灰岩和熔岩,边缘火山通道发育(例如破火山口东缘的徐深23井)。破火山口的形成是由于其下岩浆房的抽空、顶板坍塌形成的,徐东破火山口对断裂上盘,也就是整个徐家围子断陷火山岩展布起到控制作用。Corti *et al.* (2003)指出断陷盆地内部的火山喷发是在区域斜向拉张作用下形成的,即岩浆房在区域斜向拉张环境下侵位于断陷盆地内部,而并不向盆地外侧移动。徐家围子断陷盆地内部厚层的火山岩与破火山口的形成说明强烈的岩浆房物质的不断供给和强烈喷发。

如前已述,在断裂下盘(断陷盆地外侧)存在众多火山机构,其形成于区域垂直拉张作用下;而在断裂上盘(断陷盆地内部)也存在大量火山机构和徐东破火山口,其形成与区域斜向拉张作用下。这说明徐家围子断陷是在两期区域构造拉张应力作用下形成的,从而形成现今的火山机构喷发模式(例如,Corti *et al.*, 2003)。

5 徐家围子断陷火山机构喷发模式

徐家围子断陷营城组火山岩是以酸性、中酸性的流纹质和英安质火山碎屑岩和熔岩为主。由于中酸性岩浆的黏度

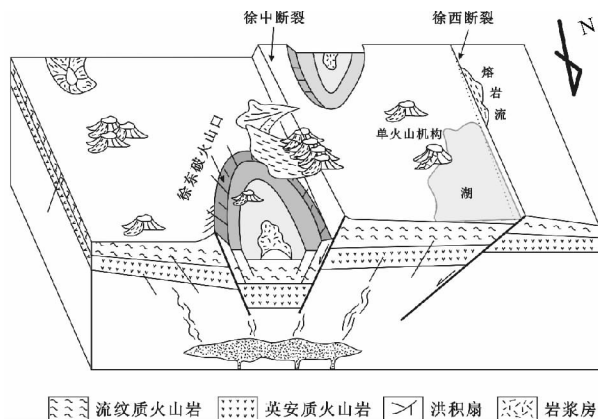


图9 徐家围子断陷营城期火山机构喷发模式图

Fig. 9 Volcanic eruption model in Yingcheng stage in Xujiaweizi fault depression

大、含气性高,常以强烈爆发的火山作用形成大规模的火山机构。随之岩浆房的抽空,形成大型破火山口。大型酸性火山岩区经常形成一个或多个破火山口(Miura and Wada, 2007)。

徐家围子断陷大规模中酸性火山物质喷发模式(图9):地幔基性岩浆物质上升,由于密度差异,在地壳底部滞留,使得地壳物质部分熔融,随即上升并停留在上地壳底部(10~15km)附近,形成扁平状的中酸性岩浆房,随着岩浆物质的充注,压力升高,导致以中心式的火山喷发作用开始。先期喷发的火山物质以中酸性的英安质火山岩为主,使得岩浆房内物质进一步酸化,后期则大规模喷发酸性的流纹质火山岩(表1)。由于火山作用之前徐家围子控陷断裂(徐中、徐西断裂)的存在,使得部分岩浆沿着断裂上涌,在断裂带形成沿断裂走向展布的串珠状火山机构叠置以及溢流熔岩流。众多学者认为,中酸性大规模火山喷发以及大型破火山口的形成需要岩浆底侵于地壳底部并使得地壳物质进入岩浆房,经过长时间的熔融作用,最终形成高强度的火山作用(Gudmundsson, 1998; Maughan *et al.*, 2002; Christiansen, 2005; Smith *et al.*, 2006)。杨光等(2001)通过深部地震剖面解释得出的位于地下10km附近的地幔热底辟体也证实了浅层岩浆房的存在。

随着岩浆房物质的抽空,岩浆房上方顶板重力失稳塌陷,形成大型徐东破火山口。徐东破火山口的塌陷势必引发更大规模的火山碎屑物质的爆发,在徐东破火山口内就形成厚层流纹质凝灰岩和流纹岩,例如徐深22、徐深23、徐深5、徐深28井等。破火山口塌陷形成的火山碎屑爆发影响范围非常大,可以达到几百千米以外。因此可以说,徐东破火山口的形成对徐家围子断陷的火山分布格局起到至关重要的作用。

远离控陷断裂和破火山口的地区,岩浆通常沿小断裂和裂隙等沟通岩浆房的通道上升喷发,形成规模相对较小的火山机构,例如徐深11-徐深18井区为熔岩穹隆和层状火山、徐

表1 徐家围子断陷徐深钻井钻遇营城组火山岩岩性统计表(单位:m)^①

Table 1 Statistic lithology of volcanic rocks of Yingcheng Formation in Xushen Wells in Xujiaweizi fault depression

井名	旋回 I				旋回 II			
	顶深	底深	厚度	岩性	顶深	底深	厚度	岩性
徐深 1	3447	3705	258				×	
徐深 1-1	3382	3460	78				×	
徐深 2	3854	4007	153		4052	4369	317	流纹质
徐深 201	4028	4260	232		4260	4333	194	英安质-流纹质
徐深 3	3774	4100	326		4100	4423	323	英安质
徐深 4	3857	3950	93		3973	4055	82	英安质-流纹质
徐深 401	3922	3994	72		4042	4237	195	流纹质-玄武质
徐深 5	3592	3698	106	流纹质	3698	4041	343	英安质
徐深 502	3990	4147	157		4147	4360	213	英安质-流纹质
徐深 6	3621	3820	199		3831	3880	49	流纹质
徐深 601	3491	3649	158				×	
徐深 602	3791	3908	117		3987	4032	45	英安质
徐深 7	3942	4200	258		4200	4408	208	英安质-粗安质
徐深 8	3624	3970	346		3970	4070	100	英安质-流纹质
徐深 9	3578	3845	267		3845	4070	225	英安质-流纹质

深 8 井区为熔岩穹隆。

由此可见,徐家围子断陷火山机构的形成是一种中心式—裂隙式喷发模式。断陷内各火山机构是由一个位于上地壳底部的大型扁平状岩浆房共同作用的产物,同时对松辽盆地早白垩世时期陆内伸展裂谷的构造格局产生控制作用(葛肖虹和马文璞,2007)。

6 结论

(1)徐家围子断陷营城组火山岩以中酸性的流纹质、英安质火山碎屑岩和熔岩为主,形成了 3 种主要火山机构类型,分别是层状火山、熔岩穹隆、破火山口。

(2)火山机构分布受到区域控陷断裂(徐中断裂)的控制:下盘火山机构发育于靠近断裂的掀斜肩部;断裂带火山机构沿断裂呈串珠状叠置喷发;上盘火山喷发强烈,形成厚层火山岩,并且在断陷盆地内部形成徐东破火山口,对全区火山岩分布起到控制作用。

(3)徐东破火山口的形成指示岩浆侵位于其下方地壳底部,并形成一个扁平状的岩浆房。这个岩浆房受到区域垂向拉张应力作用的影响,部分岩浆物质向断陷盆地外侧流动,在徐中断裂下盘位置滞留并喷发形成火山机构。随后,在区域斜向拉张作用控制下,岩浆侵位于徐家围子断陷盆地内部正下方的地壳底部,促使在徐中断裂上盘喷发大量火山物质

并形成徐东破火山口。因此,徐家围子断陷火山喷发形式为中心—裂隙式喷发模式。

由于对徐家围子断陷营城组火山岩遭受后期构造运动和剥蚀作用的改造,很难保留完整的古火山机构,再加之埋藏于地下 3000m 以上的深度,给隐伏古火山机构的识别带来了很大难度。因此需要进一步的详细工作,为徐家围子断陷天然气勘探提供更精确的指导方针。

致谢 研究过程中得到了大庆油田勘探开发研究院刘文龙、张常久等专家以及北京大学侯贵廷教授的指导和帮助,在此一并感谢。

References

- Chen JW, Wang DF, Zhang XD and Li CS. 2000. Analysis of volcanic facies and apparatus of Yingcheng Formation in Xujiaweizi faulting depression, Songliao Basin, northeast China. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 371–379 (in Chinese with English abstract)
- Cheng RH, Liu WZ, Wang PJ, Shan XL, Chen SM and Qu YB. 2003a. Occurrences of volcanic rocks in Xujiaweizi fault-depression and their significance. *Oil & Gas Geology*, 24(1): 24–27 (in Chinese with English abstract)

^① 王璞珺等. 2005. 安达-兴城储量区块火山岩相. 大庆油田勘探开发研究院

- Cheng RH, Wang PH, Liu WZ, Shan XL and Chen SM. 2003b. Volcanic massif and sedimentary facies belts controlled by Xujiaweizi fault terrace belts in Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 24(2): 126 – 129 (in Chinese with English abstract)
- Christiansen EH. 2005. Contrasting processes in silicic magma chambers: Evidence from very large volume ignimbrites. *Geological Magazine*, 142(6): 669 – 681
- Corti G, Bonini M, Conticelli S, Innocenti F, Manetti P and Sokoutis D. 2003. Analogue modelling of continental extension: A review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma. *Earth-Science Reviews*, 63: 169 – 247
- Feng ZQ, Wang YH, Lei MS and Feng ZH. 2007. Exploratory techniques and their advancement of deep volcanic gas reservoirs in the Songliao Basin. *Nature Gas Industry*, 27(8): 9 – 12 (in Chinese with English abstract)
- Ge XH and Ma WP. 2007. Mesozoic-Cenozoic tectonic framework of southern Northeast Asia. *Geology in China*, 34(2): 212 – 228 (in Chinese with English abstract)
- Gudmundsson A. 1998. Magma chambers modeled as cavities explain the formation of rift zone central volcanoes and their eruption and intrusion statistics. *Journal of Geophysical Research*, 103: 7401 – 7412
- Guo ZQ. 2001. Hydrocarbon-bearing prospects of volcanic rock covered regions in the southeastern coastal waters of China judged by the distribution of global oil and gas fields. *Petroleum Geology & Experiment*, 23(2): 122 – 132 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZH, Wang PJ, Yin CH and Huang YL. 2006. Relationship between lithofacies and logging facies of the volcanic reservoir rocks in Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(2): 207 – 214 (in Chinese with English abstract)
- He D, Li JH, Liu SJ and Han L. 2008. Discovery of a giant caldera in the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi fault depression, northern Songliao Basin. *Geology in China*, 35(3): 463 – 471 (in Chinese with English abstract)
- Huang YL, Wang PJ, Feng ZQ, Shao R, Guo ZH and Xu ZJ. 2007. Analogy of volcanic edifices between modern volcanoes and ancient remnant volcanoes in Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(1): 65 – 72 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CJ, Feng XY, Zhan YJ and Zhang YG. 2007. New methodology to explore gas-bearing volcanic reservoir in Xujiaweizi Fault Depression of the northern Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 26(4): 133 – 137 (in Chinese with English abstract)
- Jin XH, Lin RZ, Zhou HY, Feng ZH and Ren YG. 2005. Volcanic activities and evolution of source rocks in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 26(3): 349 – 355 (in Chinese with English abstract)
- Lipman PW. 2000. Calderas. In: Sigurdsson H (ed.). *Encyclopedia of Volcanoes*. San Francisco: Academic Press, 643 – 662.
- Liu WZ, Wang PJ, Men GT, Bian WH, Yin XZ and Xu LQ. 2003. Characteristics of deep volcanic reservoirs in northern Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 24(1): 28 – 31 (in Chinese with English abstract)
- Liu WF. 2004. Reservoir characteristics of deep volcanic rocks and prediction of favorable areas in Xujiaweizi fault depression in Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 25(1): 115 – 119 (in Chinese with English abstract)
- Maughan LL, Christiansen EH, Best MG, Gromme CS, Deino AL and Tingey DG. 2002. The Oligocene Lund Tuff, Great Basin, USA: A very large volume monotonous intermediate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 129 – 157
- Miura D and Wada Y. 2007. Effects of stress in the evolution of large silicic magmatic systems: An example from the Miocene felsic volcanic field at Kii Peninsula, SW Honshu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167: 300 – 319
- Niu JY, Zhang YH, Yuan XJ and Wu XS. 2003. Petroleum geology study, oil and gas exploration future and problems faced in Mesozoic and Cenozoic igneous rocks in eastern China. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 10(1): 7 – 12 (in Chinese with English abstract)
- Ren LJ, Shan XL, Wang PJ, Liu QD and Zhao YT. 2007. Analysis of ancient volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin: Examples from the mountain of perlite in Santai, southeast uplift. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1159 – 1165 (in Chinese with English abstract)
- Renbi O and Nicholls IA. 2004. Variability in eruptive dynamics associated with caldera collapse: An example from two successive eruptions at Batur volcanic field, Bali, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 66, 134 – 148
- Smith N, Cassidy J, Locke CA, Mauk JL and Christie AB. 2006. The role of regional-scale faults in controlling a trapdoor caldera, Coromandel Peninsula, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 149: 312 – 328
- Song WH, Wang PJ, Zhang XZ, Meng QA, Shan XL and Cheng RH. 2003a. Characteristics of Mesozoic volcanic reservoirs in Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 24(1): 12 – 17 (in Chinese with English abstract)
- Song WH, Zhang XZ and Wang PJ. 2003b. Tertiary tectonic-volcanic events in the middle continental margin from eastern China and their control over oil-bearing basins. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4): 479 – 484 (in Chinese with English abstract)
- Tang HF, Wang PJ, Jiang CJ, Liu J, Zhang QC and Feng YL. 2007. Seismic characters of volcanic facies and their distribution relation to deep faults in Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(1): 73 – 78 (in Chinese with English abstract)
- Wang HJ. 1994. Palaeovolcanicity interpretation using seismic and geological data. *Oil Geophysical Prospecting*, 29(3): 325 – 336 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Chen SM, Liu WZ, Shan XL, Cheng RH, Zhang Y, Wu HB and Qi JS. 2003. Relationship between volcanic facies and volcanic reservoirs in Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 24(1): 18 – 23 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Pang YM, Tang HF, Huang YL and Zheng CQ. 2007. The characteristics of the paleo-volcanic edifice of Yingcheng Formation, Cretaceous, Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1064 – 1073 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Wu HY, Pang YM, Men GT, Ren YG, Liu WZ and Bian WH. 2006. Volcanic facies of the Songliao Basin: Sequence, model and the quantitative relationship with porosity and permeability of the volcanic reservoir. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(5): 805 – 812 (in Chinese with English abstract)
- Wen BH, Yang H and Zhang Y. 2006. Geophysical features of typical volcanic oil-gas reservoirs and predication of favorable exploration zones in China. *Exploration Techniques*, 4: 67 – 73 (in Chinese with English abstract)
- Wu CZ, Gu LX, Ren ZW, Chen ZY, Zhao M and Qiu J. 2005. Formation mechanism of hydrocarbon reservoirs related to igneous rocks in Mesozoic-Cenozoic basin, Eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 522 – 530 (in Chinese with English abstract)
- Yang G, Xue LF, Liu ZB and Liu JP. 2001. Studies of deep geology with seismic section interpretation in Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 22(4): 326 – 330 (in Chinese with English abstract)
- Yang H, Zhang Y, Zou CN, Wen BH and Li M. 2006. Volcanic rock distribution and gas abundance regularity in Xujiaweizi faulted depression, Songliao Basin. *Chinese Journal Geophysics*, 49(4): 1136 – 1143 (in Chinese with English abstract)
- Yin JY, Liu HF and Chi HJ. 2002. Evolution and gas-accumulation of Xujiaweizi Depression in Songliao Basin. *Acta Petroli Sinica*, 23(2): 26 – 29 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GL and Zhang YQ. 2002. Seismic reflection character of volcanic reservoir of Daqing and the comprehensive prediction technology. *Petroleum Exploration and Development*, 29(5): 44 – 46 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈建文,王德发,张晓东,李长山. 2000. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩相和火山机构分析. 地学前缘, 7(4): 371-379
- 程日辉,刘万洙,王璞珺,单玄龙,陈树民,曲永保. 2003a. 徐家围子断陷火山岩赋存型式及意义. 石油与天然气地质, 24(1): 24-27
- 程日辉,王璞珺,刘万洙,单玄龙,陈树民. 2003b. 徐家围子断陷带对火山岩体和沉积相带的控制. 石油与天然气地质, 24(2): 126-129
- 冯志强,王玉华,雷茂盛,冯子辉. 2007. 松辽盆地深层火山岩气藏勘探技术与进展. 天然气工业, 27(8): 9-12
- 葛肖虹,马文璞. 2007. 东北亚南区中-新生代大地构造轮廓. 中国地质, 34(2): 212-228
- 郭占谦. 2001. 从全球油气田分布看我国东南沿海火山岩覆盖区的含油气前景. 石油实验地质, 23(2): 122-132
- 郭振华,王璞珺,印长海,黄玉龙. 2006. 松辽盆地北部火山岩岩相与测井相关关系研究. 吉林大学学报(地球科学版), 36(2): 207-214
- 贺电,李江海,刘守偈,韩亮. 2008. 松辽盆地北部徐家围子断陷营城组大型破火山口的发现. 中国地质, 35(3): 463-471
- 黄玉龙,王璞珺,冯志强,邵锐,郭振华,许中杰. 2007. 松辽盆地改造残留的古火山机构与现代火山机构的类比分析. 吉林大学学报(地球科学版), 37(1): 65-72
- 姜传金,冯肖宇,詹怡捷,张元高. 2007. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩气藏勘探新技术. 大庆石油地质与开发, 26(4): 133-137
- 金晓辉,林子千,邹华耀,冯子辉,任延广. 2005. 松辽盆地徐家围子断陷火山活动期次与烃源岩演化. 石油与天然气地质, 26(3): 349-355
- 刘万洙,王璞珺,门广田,边伟华,尹秀珍,许利群. 2003. 松辽盆地北部深层火山岩储层特征. 石油与天然气地质, 24(1): 28-31
- 刘为付. 2004. 松辽盆地徐家围子断陷深层火山岩储层特征及有利区预测. 石油与天然气地质, 25(1): 115-119
- 牛嘉玉,张映红,袁选俊,吴贤顺. 2003. 中国东部中-新生代火成岩石油地质研究、油气勘探前景及面临问题. 特种油气藏, 10(1): 7-12
- 任利军,单玄龙,王璞珺,刘青帝,赵玉婷. 2007. 松辽盆地营城组古火山机构的剖析——以东南隆起区三台珍珠岩山为例. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6): 1159-1165
- 宋维海,王璞珺,张兴洲,蒙启安,单玄龙,程日辉. 2003a. 松辽盆地中生代火山岩油气藏特征. 石油与天然气地质, 24(1): 12-17
- 宋维海,张兴洲,王璞珺. 2003b. 中国东部陆缘中区第三纪构造-火山事件及其对含油气盆地的控制. 吉林大学学报(地球科学版), 33(4): 479-484
- 唐华风,王璞珺,姜传金,刘杰,张庆晨,冯有良. 2007. 松辽盆地火山岩相地震特征及其与控陷断裂的关系. 吉林大学学报(地球科学版), 37(1): 73-78
- 王槐基. 1994. 古火山活动的地震地质解释. 石油地球物理勘探, 29(3): 325-336
- 王璞珺,陈树民,刘万洙,单玄龙,程日辉,张艳,吴海波,齐景顺. 2003. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系. 石油与天然气地质, 24(1): 18-23
- 王璞珺,庞颜明,唐华风,黄玉龙,郑常青. 2007. 松辽盆地白垩系营城组古火山机构特征. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6): 1064-1073
- 王璞珺,吴河勇,庞颜明,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
- 文百红,杨辉,张研. 2006. 中国典型火山岩油气藏地球物理特征及有利区带预测. 勘探技术, 4: 67-73
- 吴昌志,顾连兴,任作伟,陈振岩,赵明,丘津. 2005. 中国东部中-新生代含油气盆地火成岩油气藏成藏机制. 地质学报, 79(4): 522-530
- 杨光,薛林福,刘振彪,刘金平. 2001. 松辽盆地深部地震剖面解释与深部地质研究. 石油与天然气地质, 22(4): 326-330
- 杨辉,张研,邹才能,文百红,李明. 2006. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩分布及天然气富集规律. 地球物理学报, 49(4): 1136-1143
- 殷进垠,刘和甫,迟海江. 2002. 松辽盆地徐家围子断陷构造演化. 石油学报, 23(2): 26-29
- 赵国连,张岳桥. 2002. 大庆火山岩地震反射特征与综合预测技术. 石油勘探与开发, 29(5): 44-46