

# 松辽盆地北部徐家围子断陷营城组 大型破火山口的发现

贺 电 李江海 刘守偈 韩 亮

(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)

**摘要:**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,因此,探寻破火山口存在的证据是明晰松辽盆地北部徐家围子断陷下白垩统营城组火山喷发规律和叠置关系的关键。徐家围子断陷营城组地层中徐东破火山口呈一个长轴约 17 km,短轴约 10 km 的椭圆形、塌陷深度近 3 km 的大型破火山口,其天窗式塌陷是下方岩浆房的不对称形态或岩浆房的不对称抽空导致。徐东破火山口内被厚层流纹质凝灰岩和熔岩填充,剖面上显示一对发育完整的正、逆断层,指示徐东破火山口经历了完整的沉降、塌陷、火山喷发过程。徐东破火山口形成于大陆裂谷背景下,是岩石圈减薄,大规模岩浆作用的产物。受区域 NNW 向构造格架控制,形成破火山口南北延伸的椭圆形态。

**关键词:**徐家围子断陷;破火山口;天窗式塌陷;流纹质凝灰岩

中图分类号:P588.14 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2008)03-0463-09

东北亚地区晚中生代( $J_3-K_1$ )广泛的裂陷作用促使大规模的火山喷发<sup>[1]</sup>,探寻古火山机构存在依据和喷发模式对于研究地球历史时期构造运动和寻找火山相关的矿产和油气资源有重要的意义<sup>[2]</sup>。松辽盆地北部徐家围子断陷是中国最大的深层火山岩气藏,探明储量已达上千亿立方米,但火山岩埋深大、岩性复杂、喷发期次多、喷发样式多样等因素给深层天然气的勘探开发带来了很大困难。努力探寻徐家围子断陷火山喷发规律和火山叠置关系已成为继续深入研究的基础。目前,徐家围子断陷内主要识别出了层状火山和熔岩穹隆型等火山机构类型,并精细划分了火山岩相,指出了有利相带储层<sup>[3]</sup>。对于是否存在火山作用更为强烈、影响更为广泛的破火山口尚未讨论。破火山口的形成是火山喷发物质量最大、破坏力最强的一种火山作用现象<sup>[4]</sup>,通常破火山口形成伴随的火山喷发物质可达几千立方千米<sup>[5]</sup>。因此研究破火山口的存在依据和作用机理是深化了解整个

徐家围子断陷火山岩分布规律的关键。笔者以火山理论为指导,分析大量地震剖面和测井资料,首次探讨了徐家围子断陷大型破火山口的存在。

## 1 区域地质概况

徐家围子断陷为松辽盆地北部深层规模较大的断陷,近北向展布,南北向长 90 km,中部最宽处为 55 km,面积达 4300 km<sup>2</sup>(图 1)。白垩系营城组火山岩埋藏深度一般为 3000~4500 m<sup>[6]</sup>,在徐家围子断陷北部以中基性(安山质、玄武安山质)为主,南部以中酸性、酸性(英安质、流纹质)为主<sup>[7]</sup>。营城组火山岩顶、底面对应的地震反射层位分别是 T4c、T41。SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄揭示营城组火山岩形成于 113~111 Ma<sup>[8]</sup>。徐家围子断陷为西断东超型箕状断陷,划分为徐西断阶带、徐中构造带、徐东斜坡带等多个构造单元。徐深 22 井区存在一个火山岩厚度巨大的破火山口,因其位于徐家围子断陷中部的徐

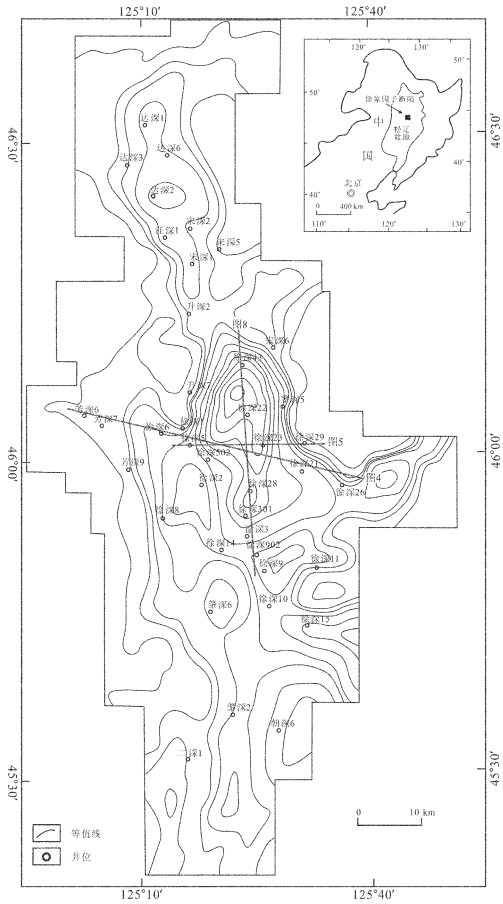


图1 徐家围子断陷营城组火山岩厚度图  
(据大庆油田内部资料修改)

Fig.1 Isopach map of volcanic rocks of the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi fault depression

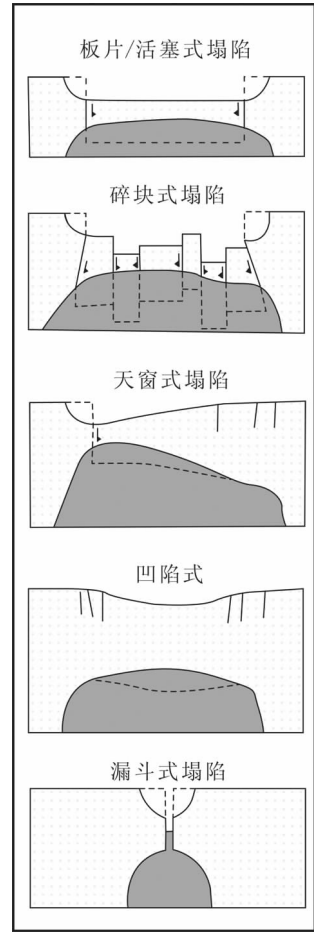


图2 破火山口形态分类方案<sup>[10]</sup>

Fig.2 Classification scheme of the geometries of calderas<sup>[10]</sup>

东斜坡带,因此称之为徐东破火山口。

## 2 破火山口定义和类型

破火山口(caldera)是在火山喷发末期,由于其下部的浅层岩浆房物质喷发而抽空,导致火山机构坍塌,从而形成一个陡壁的碗形深凹陷<sup>[9]</sup>。地球上,破火山口直径从<1 km到40 km×75 km (La Carita

破火山口)均有发现<sup>[9]</sup>。

由于破火山口形成受多个因素的共同控制,再加上塌陷后期火山喷发以及剥蚀等地质作用的影响,使得破火山口的分类一直不能得到很好的统一。目前比较公认的分类方案有以下3种(表1):

按破火山口形态特征,Lipman<sup>[10]</sup>将破火山口划分为5个端元类型(图2),分别是:板片式(或活塞

表1 破火山口分类方案对比

Table 1 Comparison of classification schemes of calderas

Lipman <sup>[10]</sup>	Cole et al <sup>[5]</sup>	Accocella <sup>[11]</sup>
板片式(活塞式)塌陷	玄武质破火山口	凹陷期(第1阶段)
碎块式塌陷	过碱性破火山口	环状逆断层期(第2阶段)
天窗式塌陷	安山质-英安质破火山口	周缘凹陷期(第3阶段)
凹陷式	流纹质破火山口	周缘环状正断层期(第4阶段)
漏斗式塌陷		

式) 塌陷 (plate/piston subsidence)、碎块式塌陷 (piecemeal subsidence)、天窗式塌陷 (trapdoor subsidence)、凹陷式 (downsag subsidence)、漏斗式塌陷 (funnel subsidence) 破火山口。徐家围子断陷徐东破火山口可以归为天窗式塌陷类型 (见后文详述)。

按破火山口喷发岩性特征, Cole 等<sup>[5]</sup>将破火山口划分为玄武质破火山口 (basaltic caldera)、过碱性破火山口 (peralkaline caldera)、安山质-英安质破火山口 (andesite-dacite caldera)、流纹质破火山口 (rhyolitic caldera)。尽管大多数破火山口都是以单一的火山岩类型为主, 但仍有一些流纹质破火山口经常包括中性或基性的火山作用。徐家围子断陷火山岩就是一个以流纹质为主, 多种岩性 (从基性到酸性均有发育) 共存的例子。

按破火山口演化过程, Acocella<sup>[11]</sup>对 Lipman 的分类方案进行了改进, 提出了连续演化的 4 个阶段, 分别是: (1) 凹陷期 (downsag); (2) 环状逆断层期 (reverse ring fault); (3) 周缘凹陷期 (peripheral downsag); (4) 周缘环状正断层期 (peripheral normal ring fault)。这一分类方案涵盖了一个演化完全的破

火山口形成的整个连续过程, 弥补了许多破火山口无法归类的不足。

### 3 徐家围子断陷徐东破火山口依据

#### 3.1 外部形态

徐东破火山口内火山岩厚度巨大 (图 1), 破火山口为一个长轴约 17 km、短轴约 10 km 的近椭圆形 (图 3), 其东侧较平直, 是不对称塌陷的结果。火山岩顶面 (T4c) 最大凹陷深度约 2 km, 火山岩厚度一般 900~1200 m, 因此徐东破火山口最大塌陷深度约 3 km。按照圆柱体塌陷的简化计算得到破火山口的最大塌陷体积约为 400 km<sup>3</sup>, 考虑到徐东破火山口为天窗式塌陷, 得其塌陷体积约为 200 km<sup>3</sup>, 而美国的火山湖 (Crater Lake) 破火山口平面直径约 9 km, 塌陷体积约 80 km<sup>3</sup>[10]。徐东破火山口塌陷体积为火山湖 (Crater Lake) 破火山口的 2.5 倍。

平面上, 徐东破火山口椭圆形态, 可以受到很多因素的影响, 如区域应力场、区域构造格架、岩浆房几何形状以及破火山口塌陷前的地表形态<sup>[11]</sup>。

剖面上, 徐家围子断陷徐东破火山口营一段火

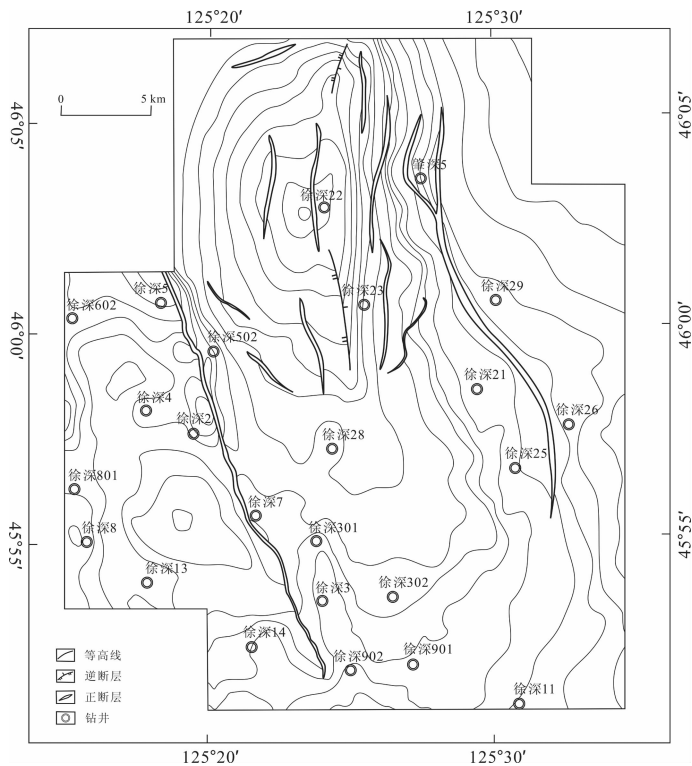


图 3 徐东斜坡带火山岩顶面构造图 (据大庆油田内部资料修改)

Fig.3 Isobath map of the top of volcanic rocks in the Xudong slope

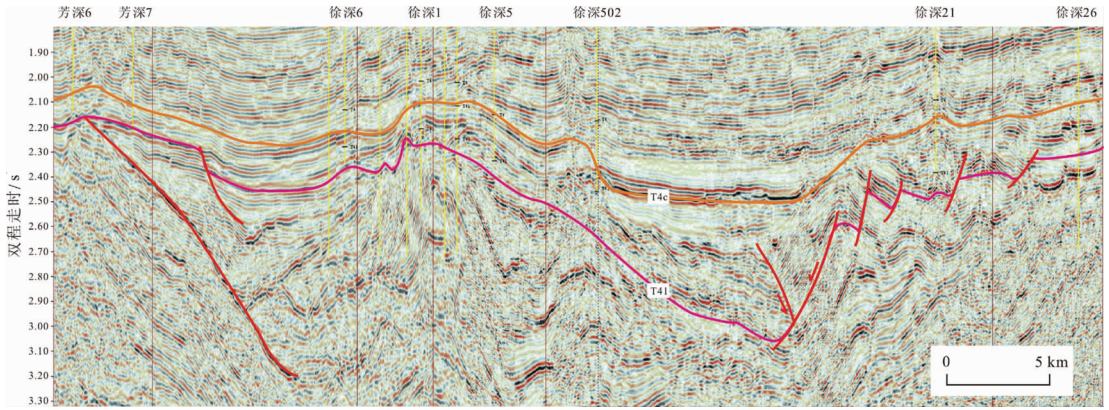


图 4 地震剖面示天窗式塌陷的徐东破火山口(位置见图 1)  
 Fig.4 Seismic profile showing the trapdoor subsidence of the Xudong caldera

山岩顶、底面均为一大型的深凹陷,并且为不对称塌陷形态(图 4)。按照 Lipman<sup>[10]</sup>分类方案,徐东破火山口属于天窗式塌陷(trapdoor subsidence)类型(图 2)。破火山口西侧以铰链式的倾斜为主,东侧以陡倾的正断层为边界,内部大幅度塌陷,这种天窗式塌陷形态是由于底部岩浆房的不对称形态,或者岩浆房的不对称抽空,导致岩浆房上方的岩层不对称塌陷。通常在岩浆房深的一侧形成陡倾正断层塌陷,在另一侧形成铰链式倾斜<sup>[12-13]</sup>。

3.2 断裂特征

剖面上,徐东破火山口东缘(塌陷一侧)外围被陡立的内倾正断层围限,内部发育外倾逆断层,并且

在正、逆断层之间形成弯曲的楔状体(图 5)。根据实验模拟和自然界观察,一个演化完全的破火山口一般都被内侧外倾的环形逆断层和外侧内倾的环形正断层围限<sup>[11]</sup>(图 6)。从图 5 可见,徐东破火山口内侧逆断层切割外侧正断层是巨大塌陷作用之后四周向内侧挤压作用的结果。平面上,徐东破火山口东侧显示较好的环形断裂特征,而西侧并未识别出完整的断层(图 3)。这是因为天窗式塌陷破火山口,通常只在陡倾正断层限定的塌陷一侧发育完整的正、逆断层对,而在铰链式倾斜的一侧通常不发育正、逆断层对,或者发育不完全<sup>[13]</sup>(图 7)。正、逆断层之间的弯曲内倾楔状体也是破火山口的一个显著变形样式<sup>[14]</sup>。

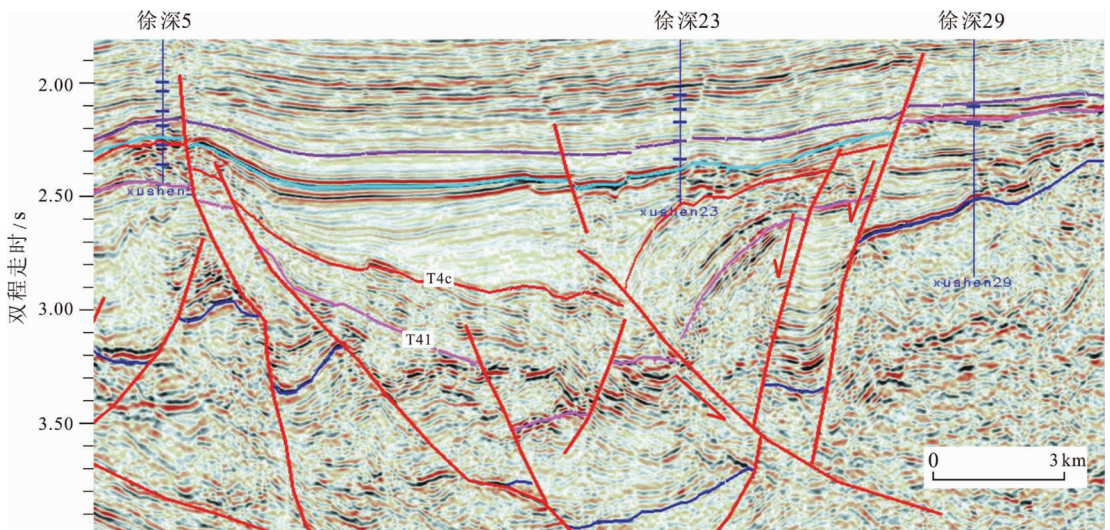
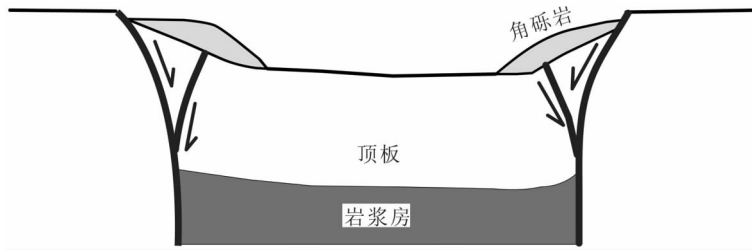


图 5 地震剖面示徐东破火山口的正、逆断层对(位置见图 1)  
 Fig.5 Seismic profile showing a pair of normal and reverse faults of the Xudong caldera

图 6 对称型破火山口剖面特征示意图<sup>[11]</sup>Fig.6 Section features of the symmetrical caldera with complete evolution<sup>[11]</sup>图 7 天窗式塌陷破火山口的实验模拟<sup>[13]</sup>Fig.7 Experimental modeling of trapdoor subsidence of a caldera<sup>[13]</sup>

### 3.3 火山通道

通过地震剖面火山岩相解释,可以识别出火山口位置。在地震剖面上,爆发相常表现为丘状或伞状外型,内部多为杂乱状,边界为强反射,内部反射弱;喷溢相常表现为中-强反射,反射轴呈间断性连续特征;沉积相为强反射、反射轴连续且稳定。火山口内和近火山口位置爆发相发育。

由于徐东破火山口沿着环状断裂塌陷,同塌陷期或后塌陷期岩浆沿着周缘环状断裂或薄弱带上升,形成了多个火山通道。在破火山口东缘南北向一条地震剖面上识别出 4 个火山通道(图 8)。该地震剖面划分出两套火山岩(粉线为界线):下部为同塌陷期火山岩,上部为后塌陷期火山作用产物。火山通道颈部地震反射特征为:杂乱反射,与周围反射不连续,反射轴陡立;喷出地表的火山机构地震反射外形均为伞状,内部杂乱反射、不连续反射。火山通道 B 伞状形态较完整,其他 3 个火山机构顶部均遭受后期剥蚀被削截,形成不完整伞状反射特征。从火山岩相分布特征看,爆发相多集中在火山通道附近。上部火山岩爆发相呈纺锤形、火山岩厚度较大,说明后塌

陷期发生了规模更大的火山爆发活动。

### 3.4 破火山口内填充物

破火山口内巨厚的火山物质填充是破火山口存在的一个关键证据。因为几乎所有的破火山口的塌陷都伴随着大规模的火山碎屑岩和熔岩等物质的喷发,通常在大型的破火山口内都堆积了大量的凝灰岩,厚度可以达到几千米<sup>[10]</sup>。同时破火山口内壁由于重力作用形成的滑塌角砾岩(landslide breccia)也占一定比例(图 6)。流纹质破火山口是一种爆发最猛烈、产生火山碎屑物质最多的破火山口类型,在火山喷发中心位置经常形成大规模的坍塌凹陷,直径通常 >10 km,塌陷深度一般 >1 km<sup>[6]</sup>。

徐东破火山口内营城组火山岩厚度巨大(图 2),一般在 900~1200 m,最大可达 2400 m,计算得破火山口内喷发的火山岩体积约 140 km<sup>3</sup>。相当于美国 Crater Lake 破火山口内填充物的 3.5 倍<sup>[10]</sup>。

徐深 23 井位于徐东破火山口内东部边缘,下部为厚层流纹质凝灰岩,上部为流纹质熔岩(图 9),代表了破火山口塌陷后火山喷发强度的减弱;中间的两层角砾岩夹层以及厚层的含角砾晶屑岩屑凝灰岩

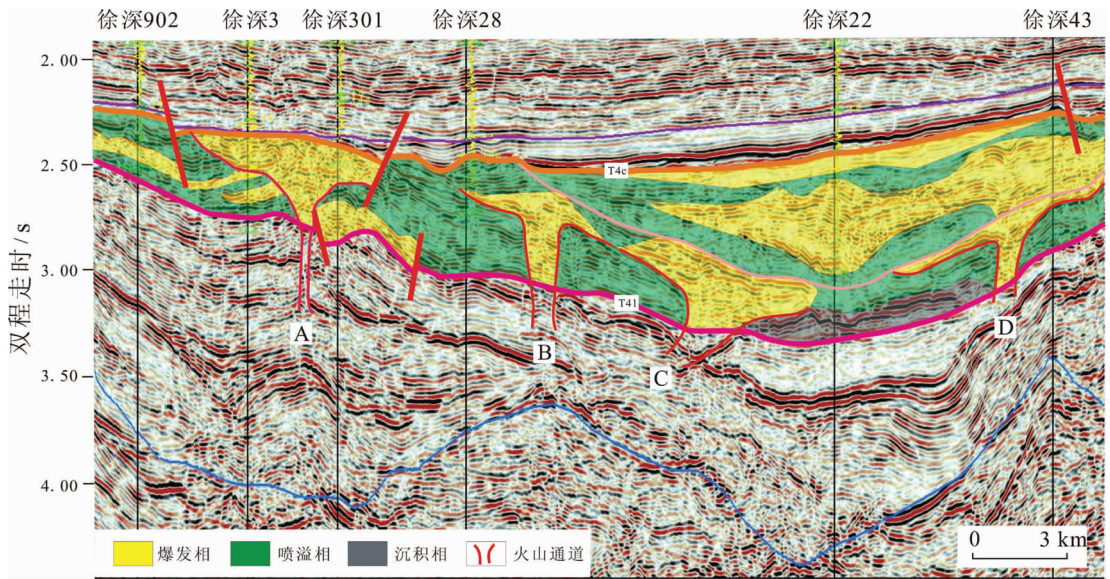


图 8 地震剖面示火山通道和火山岩相分布(位置见图 1)

A、B、C、D—火山通道;T4c—火山岩顶部

Fig.8 Seismic profile showing the volcanic conduit and distribution of volcanic facies

(323 m,底部未打穿),说明火山喷发期间破火山口内壁滑塌同时作用。徐深 23 井所在的边部位置与厚层滑塌角砾岩的存在吻合。另外,进一步发现位于破火山口周缘的井均有滑塌角砾岩夹层,例如徐深 28 井、徐深 5 井、徐深 502 井。

#### 4 徐东破火山口形成的构造环境

流纹质火山岩破火山口大部分形成于陆内或大陆边缘的伸展环境<sup>[5]</sup>,这种伸展环境和汇聚的板块边缘有关,例如新西兰的 Taupo 火山带<sup>[15]</sup>;或者和大陆裂谷有关,例如美国中南部的 Rio Grande 裂谷<sup>[16]</sup>。另外,流纹质火山岩破火山口也可能与大陆热点(hot spot)有关,例如美国怀俄明州的 Yellowstone 破火山口<sup>[17]</sup>。早白垩世时期,徐家围子断陷大规模的流纹质火山岩喷发形成于大陆裂谷背景下,是岩石圈减薄,岩浆作用的产物<sup>[18]</sup>。尽管区域性的伸展作用导致的沉降以及后期火山和沉积作用一定程度上改变了破火山口的形态,同时模糊了火山作用和构造背景之间的关系,但是地质、地球物理和深部钻井数据揭示了沿着 NNW 向断陷轴线方向形成近南北向延伸的大型破火山口塌陷<sup>[10]</sup>。

#### 5 徐东破火山口形成机制探讨

椭圆形的徐东破火山口是自然界中很常见的一类平面形态。尽管在区域性伸展环境下椭圆形破火山口长轴常与拉张方向平行(即与断陷构造方向垂直)<sup>[19-20]</sup>,但是破火山口的平面形态同时也可受到区域构造格架的控制<sup>[11]</sup>。徐家围子营城组形成时期,在近东西向拉张应力的作用下,形成了近南北向的断陷构造格局<sup>[21]</sup>。徐东破火山口形成于南北向的断陷构造格局上,受近南北向断裂的控制,岩浆多沿断裂走向上升侵位,尤其是沿着陡立的断裂更容易上升,从而造成了在南北向(区域断陷构造线方向)延伸的趋势大于东西向(区域拉张应力方向)的破火山口平面形态,即破火山口沿徐家围子断陷构造线方向伸长,而垂直于区域拉张应力方向(图 1,图 3)。据 Acocella<sup>[11]</sup>统计,全球 57 个椭圆形破火山口中,42% 平行于区域性裂谷(断陷)构造方向,即垂直于区域拉张应力方向;49% 垂直于区域性裂谷(断陷)构造方向,即平行于区域拉张应力方向。

徐东破火山口天窗式塌陷是受到其下部形态不对称的岩浆房或岩浆房不对称抽空的控制。在破火山口东侧(正断层围限的塌陷一侧)岩浆房侵位较

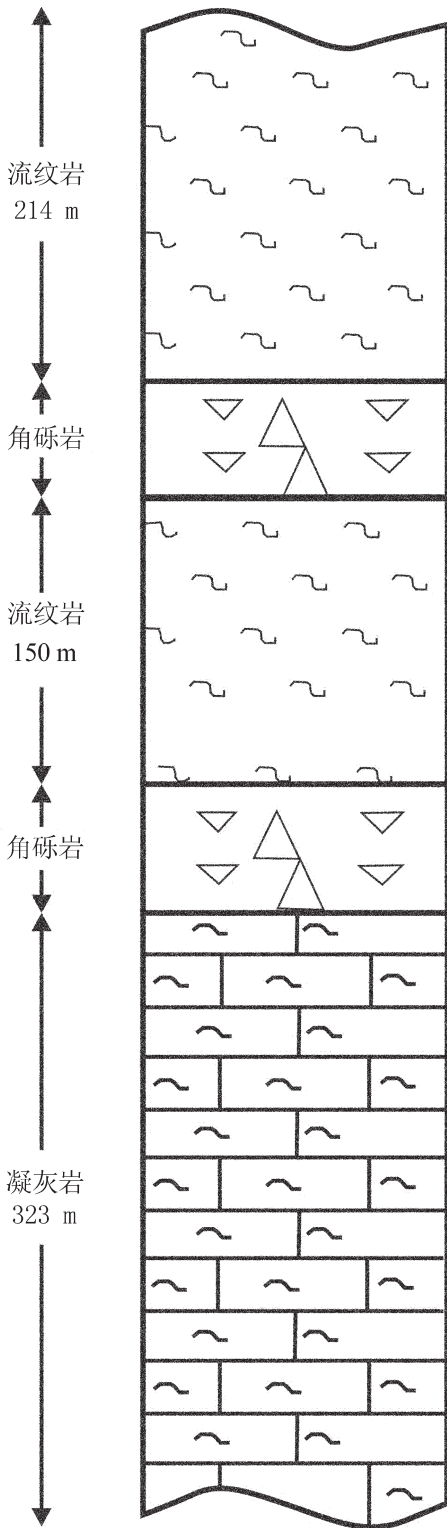


图 9 徐深 23 井火山岩岩性序列(角砾岩厚度夸大表示)  
 Fig.9 Lithological sequence of volcanic rocks in well Xushen 23 (thickness of breccia exaggerated)

深,西侧(铰链式倾斜一侧)岩浆房侵位较浅,或者其下部岩浆房东侧抽空较快,从而导致东侧有更大的空间塌陷<sup>[13]</sup>。徐东破火山口在东缘塌陷一侧发育一对完整的正、逆断层(图 7),对应于 Acocella<sup>[11]</sup>分类中的第 4 阶段,说明破火山口塌陷充分,演化完全。徐家围子大面积的火山喷发物质也说明了该地区充分的火山活动。

徐东破火山口直径与塌陷深度比值较大,以及破火山口边缘的断裂(一条环形外倾逆断裂)特征说明了形成破火山口的岩浆房上方顶板纵横比较小,即岩浆房上方岩层厚度与岩浆房平面最大直径比值小于 1<sup>[14,22]</sup>。也就是说,岩浆房以扁平的形式侵位于浅层地壳,使得地壳岩石部分熔融,分异出中酸性的岩浆物质,从而形成了徐家围子大量的英安质、流纹质火山物质喷发。

### 6 结论

(1)在松辽盆地北部徐家围子断陷徐东斜坡带营城组火山岩中,通过地震反射和测井资料识别出一个大小 10 km×17 km、塌陷深度达近 3 km 的破火山口,称之为徐东破火山口。同期和后期火山物质喷发量约 140 km<sup>3</sup>,是一个大型的破火山口。

(2)徐东破火山口为天窗式塌陷型(trapdoorsubside)破火山口<sup>[10]</sup>,西侧以铰链式倾斜为主,东侧以一组环状正、逆断层控制其塌陷。按 Acocella<sup>[11]</sup>分类标准,徐东破火山口属于演化完全的第 4 阶段产物,指示徐东破火山口是在其下方的不对称型岩浆房或岩浆房的不对称抽空作用下形成的,并经历了沉降、塌陷、火山喷发作用的完整过程。

(3)徐东破火山口同塌陷期和后期塌陷期岩浆沿着破火山口周缘环状断裂或薄弱带上升,形成了大规模的火山喷发。破火山口内填充厚层的流纹质凝灰岩和熔岩,说明破火山口塌陷早期含挥发分的岩浆强烈爆发,在破火山口附近堆积大量的火山碎屑物质;随着大量挥发性物质的喷出,后期以高粘度、低含气的岩浆溢流作用形成厚层流纹质熔岩,直到火山活动的停止。破火山口边部的角砾岩夹层(例如徐深 23 井,图 9)是内壁重力滑塌的结果,滑塌角砾岩常存在于大型破火山口边缘。

(4)徐东破火山口形成于大陆裂谷背景下,是岩石圈减薄,大规模岩浆上涌作用的产物。受徐家围子区域性 NNW 向断裂的控制,形成了近南北向拉长

的破火山口平面形态。

**致谢:**本文完成过程中得到大庆油田勘探开发研究院冯子辉、任延广、齐景顺、刘文龙、张常久等专家及北京大学侯贵廷副教授、师永民研究员的指导和帮助,在此一并感谢。

### 参考文献(References):

- [1] Ren J, Tamaki K, Li S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas [J]. *Tectonophysics*, 2002, 344:175–205.
- [2] 严海麒, 赵五洲, 云辉. 河南汝阳熊耳群古火山机构地质特征及意义[J]. *中国地质*, 2007, 34(2):300–305.  
Yan Haiqi, Zhao Wuzhou, Yun Hui. Geological characteristics of paleovolcanic edifices in the Xiong'er Group, Ruyang County, Henan, and their significance [J]. *Geology in China*, 2007, 34(2): 300–305(in Chinese with English abstract).
- [3] 王璞珺, 吴河勇, 庞彦明, 等. 松辽盆地火山岩相、相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(5): 805–812.  
Wang Pujun, Wu Heyong, Pang Yanming, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: Sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of the volcanic reservoir[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(5): 805–812(in Chinese with English abstract).
- [4] Renbi O, Nicholls I A. Variability in eruptive dynamics associated with caldera collapse: an example from two successive eruptions at Batur volcanic field, Bali, Indonesia [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2004, 66:134–148.
- [5] Cole J W, Milner D M, Spinks K D. Calderas and caldera structures: a review[J]. *Earth Science Reviews*, 2005, 69:1–26.
- [6] 冯志强, 王玉华, 雷茂盛, 等. 松辽盆地深层火山岩气藏勘探技术与进展[J]. *天然气工业*, 2007, 27(8):9–12.  
Feng Zhiqiang, Wang Yuhua, Lei Maosheng, et al. Exploratory techniques and their advancement of deep volcanic gas reservoirs in the Songliao Basin [J]. *Nature Gas Industry*, 2007, 27(8):9–12(in Chinese with English abstract).
- [7] 戴亚权, 罗静兰, 林潼, 等. 松辽盆地北部升平气田营城组火山岩储层特征与成岩演化[J]. *中国地质*, 2007, 34(3):528–535.  
Dai Yaquan, Luo Jinglan, Lin Tong, et al. Reservoir characteristics and petrogenesis of volcanic rocks in the Yingcheng Formation of the Shengping gas field, northern Songliao basin [J]. *Geology in China*, 2007, 34(3):528–535(in Chinese with English abstract).
- [8] 章凤奇, 庞彦明, 杨树锋, 等. 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 [J]. *地质学报*, 2007, 81(9): 1248–1258.  
Zhang Fengqi, Pang Yanming, Yang Shufeng, et al. Geochronology of zircon SHRIMP, geochemistry and its implication of the volcanic rocks from Yingcheng Formation in Depression area, north of Songliao Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(9):1248–1258 (in Chinese with English abstract).
- [9] Lipman P W. Calderas [C]//Sigurdsson H (ed.). *Encyclopedia of Volcanoes*[M]. San Francisco: Academic Press, 2000:643–662.
- [10] Lipman P W. Subsidence of ash-flow calderas; relation to caldera size and magma-chamber geometry [J]. *Bulletin of Volcanology*, 1997, 59:198–218.
- [11] Acocella V. Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas[J]. *Earth Science Reviews*, 2007, 85:125–160.
- [12] Acocella V, Cifelli F, Funicello R. Formation and architecture of nested collapse calderas: insights from analogue models [J]. *Terra Nova*, 2001, 13:58–63.
- [13] Kennedy B, Styx J, Vallance J W, et al. Controls on caldera structure: results from analogue sandbox modelling[J]. *GSA Bulletin*, 2004, 106:515–524.
- [14] Roche O, Druitt T H, Merle O. Experimental study of caldera formation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105B:395–416.
- [15] Wilson C J N, Houghton B F, McWilliams M O, et al. Volcanic and structural evolution of Taupo Volcanic Zone, New Zealand: a review[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1995, 68:1–28.
- [16] Elston W E. Mid-Tertiary ash-flow cauldrons, southwestern New Mexico [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89B:8733–8750.
- [17] Hildreth W, Christiansen R L, O'Neil J R. Catastrophic isotopic modification of rhyolitic magma at times of caldera subsidence, Yellowstone plateau volcanic field [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89B:8339–8369.
- [18] 葛肖虹, 马文璞. 东北亚南区中—新生代大地构造轮廓[J]. *中国地质*, 2007, 34(2):212–228.  
Ge Xiaohong, Ma Wenpu. Mesozoic–Cenozoic tectonic framework of southern Northeast Asia[J]. *Geology in China*, 2007, 34(2):212–228(in Chinese with English abstract).
- [19] Acocella V, Funicello R, Marotta E, et al. The role of extensional structures on experimental calderas and resurgence [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 129:199–217.
- [20] Holohan E P, Troll V R, Walter T R, et al. Elliptical calderas in active tectonic settings: an experimental approach [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2005, 144:119–136.
- [21] 刘学锋, 钟广法, 王正允, 等. 松辽盆地北部徐家围子断陷构造格局及其成因[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 21(4): 6–10.  
Liu Xuefeng, Zhong Guangfa, Wang Zhengyun, et al. Tectonic framework of Xujiaweizi fault depression in northern Songliao Basin and its origin [J]. *Journal of Xi'an Petroleum University (Natural Science Edition)*, 2006, 21(4):6–10 (in Chinese with English abstract).
- [22] Walter T R, Troll V R. Formation of caldera periphery faults: an experimental study[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2001, 63:191–203.



## Discovery of a giant caldera in the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi fault depression, northern Songliao basin

HE Dian, LI Jiang-hai, LIU Shou-jie, HAN Liang

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

**Abstract:** The formation of a caldera is the most catastrophic volcanic phenomenon leading to the most voluminous pyroclastic eruptions. Therefore, to explore the evidence for the existence of a caldera is the key to the understanding of the characteristics and superimposition relationship of volcanic eruptions in the Lower Cretaceous Yingcheng Formation in the Xujiaweizi fault depression, northern Songliao basin. The Xudong caldera, filled with thick rhyolitic tuff and lava, is a large caldera, ellipse in form with an area of 17 km $\times$ 10 km and a maximum subsidence depth of 3 km. Its trapdoor subsidence was caused by its underlying asymmetrical magma chamber or asymmetrical deflation of the magma chamber. In section, there is a pair of completely developed normal and reverse faults, indicating that the Xudong caldera experienced a complete process of sinking subsidence, and syn-subsidence volcanic eruption. The caldera is the product of lithosphere thinning and substantial magmatism in a continental rift setting. The N-S-elongated ellipse shape of the caldera was formed under the control of the NNW-trending structures.

**Key words:** Xujiaweizi fault depression; caldera; trapdoor subsidence; rhyolitic tuff

---

**About the first author:** HE Dian, male, born in 1984, master, mainly engages in the study of petroleum and structural geology; E-mail: hedian06@163.com.