

# 基于无机二氧化碳成藏期探讨博兴断层启闭性 ——兼论断层活动性与启闭性的关系

徐春华<sup>1</sup>, 王亚琳<sup>2</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司 油气勘探管理中心, 山东 东营 257001;

2.中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

**摘要:**博兴断层是东营凹陷博兴洼陷与南坡西段的分界断层。紧邻博兴断层下降盘钻遇一系列未见油气显示或见厚层油气显示但试油出水的探井,而上升盘目前仅发现金家稠油油田,表明博兴断层在油气成藏后曾发生构造活动,破坏了古油藏,随后在部分圈闭中形成二氧化碳聚集成藏。为探讨博兴断层的启闭性及其对古油藏的控制作用,以博兴断层上升盘高95、樊54等井及邻区花沟气田二氧化碳气藏幔源成因研究为出发点,从花沟气田花501、花17等井有机甲烷和无机二氧化碳成藏期分析入手,对博兴断层的启闭过程进行研究。结果表明,花沟气田及博兴断层上升盘有机天然气及古油藏形成于馆陶组沉积时期—明化镇组沉积时期,而二氧化碳成藏期应在距今2 Ma的第四纪;具有早期形成的油藏受到破坏、晚期捕获的二氧化碳得以保存的特点。在馆陶组沉积时期—明化镇组沉积早期,博兴断层封闭,沙三段古油藏形成;明化镇组沉积中期,伴随玄武岩喷发,古油藏受到破坏;明化镇组沉积晚期—平原组沉积时期,博兴断层停止活动,但沟通幔源与有效圈闭。根据博兴断层活动性与无机二氧化碳成藏关系的研究成果,认为火山喷发期是无机二氧化碳成气期,但不是成藏期;而火山活动的平静期,幔源无机二氧化碳沿深大断裂向上运移,进而在有利圈闭中聚集成藏。

**关键词:**幔源成因 二氧化碳 甲烷成藏期 二氧化碳成藏期 断层启闭性 博兴断层 东营凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)05-0030-07

## Discussion on the opening and sealing properties of the Boxing Fault based on the accumulation time of inorganic CO<sub>2</sub>: Also discussing the relationship between fault activity and sealing property

Xu Chunhua<sup>1</sup>, Wang Yalin<sup>2</sup>

(1.Oil and Gas Exploration Management Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong

Province, 257001, China; 2.Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield

Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** The Boxing Fault is the boundary fault separating Boxing sag from the west of southern slope of Dongying sag. Some wells, with no evidences of oil and gas or showing thick layer of oil and gas but only yielding water in oil test, were drilled adjacent to the thrown side, while heavy oil was only found in Jinjia oilfield at the upthrown side currently. This indicates that the Boxing Fault experienced tectonic activity after the accumulation of oil and gas, which destroyed the palaeo-oil reservoir, and then some of CO<sub>2</sub> were trapped there forming gas-bearing reservoirs. In this paper, Well Gao95 and Fan54 and the neighboring Huagou gas field in the upthrown side of Boxing Fault were taken as examples to analyze the opening and sealing properties of the fault and its control on palaeo-oil reservoirs. Based on the origin of mantle-derived CO<sub>2</sub> gas reservoir, the accumulation period of organic CH<sub>4</sub> and inorganic CO<sub>2</sub> of Well Hua501 and Hua17 in Huagou gas field was analyzed. The obtained results show that organic natural gas and palaeo-oil reservoir found in Huagou gas field

收稿日期:2016-06-09。

作者简介:徐春华(1967—),男,山东莱州人,高级工程师,博士,从事油气勘探综合研究及管理工作。联系电话:(0546)8717612, E-mail: xch0524@sohu.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”(2011ZX05006-003)。

and the upthrown of Boxing Fault were formed in the depositional period of Guantao-Minghuazhen Formation of Neogene and the accumulation of CO<sub>2</sub> gas reservoir happened in the Quaternary period from 2 Ma to now. The whole process can be characterized as reservoir destroyed first and CO<sub>2</sub> gas reservoir preserved later. In the early depositional period of Guantao-Minghuazhen Formation, Boxing Fault was sealed when palaeo-oil reservoirs developed in the third member of Shahejie Formation; and then in the middle depositional period of Minghuazhen Formation, palaeo-oil reservoirs were destroyed when basalt erupted; in the late depositional period of Minghuazhen-Pingyuan Formation, the fault activity stopped and effective traps were connected to mantle source. According to the analysis on the correspondence between the fault activity and the formation time of inorganic CO<sub>2</sub>, it is concluded that the period of volcanic eruption was the time for inorganic gas accumulation but not for trapping. Mantle derived inorganic gas migrated upward along the faults and into the favorable traps for accumulation while volcanic activity was quiet.

**Key words:** mantle-derived origin; CO<sub>2</sub>; accumulation time of CH<sub>4</sub>; accumulation time of CO<sub>2</sub>; opening and sealing properties of fault; Boxing Fault; Dongying sag

同一条断层在其形成、发育直至消亡的演化过程中,可能要经历多期的开启与封闭阶段,准确认识断层启闭性及其演化过程,有助于正确认识油气的运移、聚集、散失以及现今的油气分布规律<sup>[1-10]</sup>。东营凹陷博兴断层是一条开启断层,不具备封闭能力,但对其开启的原因尚无研究。通过对博兴断层上、下盘探井的钻探结果进行分析,发现博兴断层至少经历了封闭和开启等2个演化阶段。目前,通常采用模糊评价、泥岩涂抹系数和断层活动性分析等方法来研究断层的启闭性,但仅能静态描述断层现今的启闭性,却不能全面反映其启闭性的演化过程。笔者基于区域地质资料研究成果,发现博兴断层上升盘的樊54井奥陶系和高95井沙三段均发育二氧化碳气藏,向西的花沟气田也发育二氧化碳气藏和混源气藏;可以尝试从区域上二氧化碳成藏期研究入手,探讨博兴断层的启闭性。为此,以博兴断层上升盘高95、樊54等井及邻区花沟气田二氧化碳气藏幔源成因研究为出发点,从花沟气田花501、花17等井有机甲烷和无机二氧化碳成藏期分析入手,基于前人研究成果,对博兴断层启闭性进行研究,明确其演化过程,以期为惠民凹陷、临清坳陷(东部)以及其他无机二氧化碳气藏发育区断层启闭性研究提供新的思路和方法,亦对其圈闭有效性评价具有重要的指导意义。

## 1 地质概况

博兴断层位于东营凹陷南部,是博兴洼陷与东营凹陷南坡西段的分界断层。博兴断层整体呈东西走向,东端始于博107井,西端止于高902井,延伸超过45 km;断面北倾,倾角一般为60°~70°;在樊54和高93井之间向南发育2个断面北倾的分支断层,延伸分别约为20和15 km。博兴断层以北目

前已发现博兴、正理庄和大芦湖等多个油田,特别是沙四段上亚段滩坝砂油藏的发现,使得原本分散的多个油田实现了含油连片;断层以南仅发现以古近系和新近系馆陶组砂岩为主要储层、以地层不整合圈闭为主的金家油田(图1)。

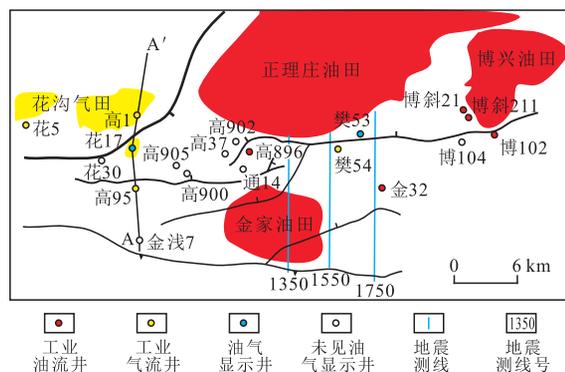


图1 东营凹陷博兴断层构造位置及周边油气田分布  
Fig.1 Structural location of Boxing Fault and distribution of oil-gas fields in Dongying sag

近年来,在博兴断层上升盘和下降盘完钻探井10余口。博兴断层下降盘完钻的博103、高900、高902、高37和通14等井未见油气显示,樊53、高93和高905井仅见油气显示。而2014年完钻的博斜21井在沙四段上亚段见油斑显示4层10.5 m,沙三段上亚段见油斑显示7层20.4 m,测井解释沙四段上亚段油层3层6.8 m;对沙四段上亚段压裂试油,获日产油量为13.09 m<sup>3</sup>/d,日产水量为9.41 m<sup>3</sup>/d,对沙三段上亚段试油出水;博斜21井区多口老井在沙三段上亚段见油气显示,但试油均出水。博兴断层上升盘完钻的樊54井于奥陶系电测解释Ⅰ类层1层1.4 m,Ⅱ类层4层11.1 m,Ⅲ类层11层36.9 m,对3302.98~3432.2 m井段中途测试,获日产二氧化碳量为2.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。位于博兴断层西段2个分支断层之间的高95井,于沙三段1643.0~1658.9 m井段取心,见油浸显示3层1.81 m、油斑显示5层3.72

m、油迹显示1层1.16 m,电测解释油层1 m、油水同层7.5 m;试油射开1 647.5~1 650.5 m井段日产二氧化碳量为 $1.2 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d。

通过对博兴断层上升盘和下降盘探井的钻探结果进行分析,可以得到3点启示:①博斜21和高95井于沙三段见油斑显示,但试油不出油或出水,表明油气在博兴断层下降盘的圈闭中成藏后遭受破坏<sup>[11]</sup>。②高95井于沙三段试油,获得二氧化碳工业气流,表明部分遭受破坏的油气藏在某一地质时期又充注二氧化碳并保存至今,即二氧化碳成藏期晚于油气藏破坏期。③博斜21和博斜211等井沙三段发育的厚储层构造油藏被破坏,而沙四段上亚段发育的薄储层岩性或构造-岩性油藏得以保存。

综上所述,博兴断层下降盘发育的构造圈闭在油气大规模运移期受博兴断层封堵,捕获大量油气并成藏;在油气成藏期后,博兴断层开始活动,断层封闭性变差或失去封闭能力,导致圈闭中油气散失殆尽;之后,博兴断层停止活动,遭受破坏的部分圈闭又捕获大量二氧化碳。总之,博兴断层在其演化过程中至少经历封闭和开启等2个演化阶段。

## 2 断层启闭性分析

从二氧化碳气藏研究入手,分析博兴断层启闭性,须解决3个问题:①二氧化碳成因。如果是幔源无机成因气,则表明博兴断层在某一地质时期是开启的。②油气成藏期。如果油藏是早-中期形成,则博兴断层的封闭能力存在变差的地质条件和可能性。③二氧化碳成藏期。如果二氧化碳是晚期成藏,则表明断层开启对早期形成的油藏具有破坏作用。因此,可以根据二氧化碳成因、油气成藏期和二氧化碳成藏期来分析博兴断层的启闭性。

### 2.1 二氧化碳成因

二氧化碳包括有机和无机2种成因类型,可以根据二氧化碳含量以及同位素分析结果进行成因判别。通常情况下,气藏中的二氧化碳含量超过60%, $\delta^{13}\text{CO}_2$ 值为 $-8\text{‰} \sim -4\text{‰}$ ,属于无机成因二氧化碳;二氧化碳含量低于15%, $\delta^{13}\text{CO}_2$ 值小于 $-9\text{‰}$ ,属于有机成因二氧化碳。此外,气藏中伴生的岩浆-幔源成因氦气,其 $R/R_a$ 值通常大于 $2.5^{[12-17]}$ 。

前人对济阳坳陷平方王气藏、花沟气田、平南气藏和高青气藏等非烃类气体成因进行了研究<sup>[18-25]</sup>,认为其为岩浆幔源成因,即来自幔源岩浆脱气过程中释放的二氧化碳。高95和樊54井二氧化碳未进行同位素分析,但其高纯度(二氧化碳含量

大于95%)可以证实与花沟气田二氧化碳为同源。以上气田(藏)二氧化碳的岩浆幔源成因,证实高青-平南断裂、博兴断层等在某一地质时期是沟通不同层系圈闭与幔源气源的垂向运移通道。

### 2.2 油气成藏期

综合前人对东营凹陷特别是南坡油气成藏期的研究成果<sup>[26-29]</sup>,认为其油气成藏期主要分为2期,即渐新世末和中新世末-上新世。其中,大规模的油气聚集发生于中新世末-上新世,尤以上新世明化镇组沉积中-晚期为主。

东营凹陷不同层系和不同构造单元油气藏的主要成藏期也存在差异。大芦湖、梁家楼地区沙三段油藏在东营组沉积末期已有油气充注,但主要油气成藏期为馆陶组沉积末期-明化镇组沉积中期;东部沙四段和沙三段油气成藏期主要为馆陶组沉积末期-明化镇组沉积时期,尤以明化镇组沉积时期为主;南部金家地区油气成藏时间较晚,为明化镇组沉积晚期-第四纪。整体上,东营凹陷的油气成藏表现为自下而上、由凹陷中心向盆地边缘成藏期逐渐变晚的趋势。

### 2.3 二氧化碳成藏期

针对博兴断层及其周缘含气层系及气藏类型的研究发现,青城凸起的天然气主要富集于新近系馆陶组上部和明化镇组下部,以发育岩性气藏为主;花沟向斜(博兴断层下降盘)的花17井天然气主要聚集于沙三段,以发育构造气藏为主<sup>[23]</sup>。位于分支断层之间的高95井二氧化碳主要富集于沙三段中亚段,发育构造气藏;博兴断层上升盘的樊54井二氧化碳主要富集于奥陶系,亦发育构造气藏。因此,博兴断层及其周缘的二氧化碳气藏具有多层系、多类型的特征;而针对典型气藏及其成藏期进行剖析,有助于分析博兴断层的启闭性。

#### 2.3.1 典型气藏分析

花沟气田花501井气藏 花501井气藏位于花沟断层下降盘,为受花沟断层及其次级断层控制形成的鼻状构造。该气藏发现于明化镇组埋深820 m以上地层,在埋深为459~820 m发现气层5层18.2 m,自上而下依次命名为1—5号气层。从圈闭条件看,1—5号气层属于2种气藏类型;发育于明化镇组上部埋深524.2 m以上的1—3号气层为岩性气藏,发育于明化镇组底部的4号和5号气层为低幅度背斜构造背景下的构造-岩性气藏<sup>[20]</sup>。气体组分分析结果表明<sup>[20-21]</sup>,花501井气藏的气体组分复杂。其中,1号气层以氮气和二氧化碳为主(二者含量大于95%),氦气含量高达3.08%,甲烷含量仅为1.01%;4

号气层以甲烷为主(含量为74.76%),氮气和二氧化碳含量较高(二者含量约为25%);5号气层以氮气和二氧化碳为主(二者含量大于95%),氦气含量为2.08%,甲烷含量仅为1.77%。4号气层甲烷的 $\delta^{13}C_1$ 值为-48.8‰,与附近甲烷气藏的 $\delta^{13}C_1$ 值一致,为来源于东侧博兴洼陷古近系烃源岩的油型气。

从气藏的天然气组分构成来看,用同期成藏、分异聚集的模式难以解释花501井气藏不同组分气层的分布结构。研究表明,花501井气藏应存在2期成藏。第1期为4号气层的甲烷成藏期,明化镇组沉积中期玄武岩喷发后形成很好的盖层(该期为火山活动期,也是前期油气藏的破坏期),花沟断层的活动致使其下降盘的玄武岩及其下伏地层形成小型牵引背斜,具有很好的圈闭条件;此时,东侧博兴洼陷沙四段和沙三段烃源岩已进入生油气阶段,油型甲烷沿断层和不整合面运移至4号气层的圈闭中聚集成藏。第2期为幔源二氧化碳成藏期,发生在距今较近的地质时期,在1—3号和5号气层中聚集成藏并保存<sup>[20]</sup>。考虑到在上部1号气层储集砂体沉积后,还需沉积局部盖层才能形成有效圈闭,以及需要区域盖层才能避免二氧化碳的大面积散失,推测在现今埋深400 m左右二氧化碳开始成藏,按照225 m/Ma的沉积速率计算<sup>[30]</sup>,花501井气藏二氧化碳成藏期应为距今小于2 Ma的第四纪。

花沟向斜高95—花17井气藏 花17井二氧化碳气藏位于高青断层下降盘沙三段底部,发育由断层遮挡形成的构造圈闭,储层为埋深为1 970~2 014.5 m的近岸水下扇砂岩(图2);录井见油迹、油斑显示2层3.3 m、荧光显示4层10.9 m;电测解释为油层30.9 m,油水同层13.6 m;射开2 000.0~2 009.6 m井段油水同层,5 mm油嘴求产,日产天然气量为16 010 m<sup>3</sup>/d;射开顶部14.9 m油层,8 mm油嘴求产,日产天然气量为52 728 m<sup>3</sup>/d。试油结果表

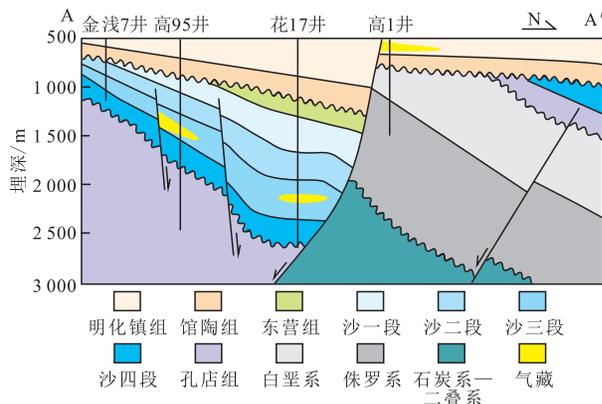


图2 花沟向斜金浅7—花17—高1井近南北向油气藏剖面  
Fig.2 Profile of gas pool crossing Well Jinqian7-Hua17-Gao1 of nearly SN direction in Huagou syncline

明,花17井沙三段下部砂体均充满天然气(气层厚度达44.5 m),为一厚层断块气藏,二氧化碳含量高达93.54%<sup>[31-32]</sup>。

高95井位于花17井南部,发育由次级断层控制的走向南北、断面北东倾的断鼻圈闭。于沙三段中亚段1 643.0~1 658.9 m井段取心,见油浸显示3层1.81 m,油斑显示5层3.72 m,油迹显示1层1.16 m;电测解释油层1 m、油水同层7.5 m。试油射开1 647.5~1 650.5 m井段1层3.0 m,日产二氧化碳量为 $1.2 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d(二氧化碳含量为98%)。

花17和高95井沙三段录井均见油斑和油迹显示,电测解释也发育油层,但试油均未出油,表明其油藏为已受到破坏的古油藏,与博斜21井等沙三段油气显示和试油出水的结果一致。根据现有钻井资料推断,高95和花17等井的二氧化碳气藏应形成于同一地质时期,即沙三段沉积时期之后。考虑花17、高95和博斜21等井沙三段古油藏均应为明化镇组沉积中期玄武岩喷发阶段受到破坏,综合东营凹陷南坡油气成藏期分析结果,推测研究区及周缘二氧化碳成藏期应在明化镇组沉积之后。

### 2.3.2 二氧化碳成藏期分析

岩浆幔源成因无机二氧化碳气藏的形成过程包括成气和成藏2个阶段<sup>[23]</sup>。在成气阶段,幔源岩浆通过岩浆活动以超壳断裂及与之沟通的次级断裂为通道向浅层排放包括大量二氧化碳、少量氮气和稀有气体在内的非烃类气体(岩浆幔源成因),也可以在岩浆侵入过程中使邻近的碳酸盐岩层和煤系地层受热分解而形成二氧化碳(壳源成因)。因此,每1期岩浆的侵入和喷出即为1次无机二氧化碳排放的高峰期,即1个成气阶段。在成藏阶段,只有在成气期以前形成的圈闭才有机会捕获无机成因二氧化碳并成藏。因此,1个成气阶段并不等于1个成藏阶段,很多成气阶段释放的大量气体均未成藏。例如位于美国夏威夷岛的基拉韦厄火山,最近一次爆发始于1983年1月,至今仍然经常喷发;印度尼西亚一座火山于2014年5月30日爆发,喷出高约20 000 m的火山灰;这些火山活动喷出的气体均属于成气阶段产物,但由于不具备成藏条件而散失在大气中,成为对生命活动有害的气体。

对研究区及周缘二氧化碳成藏期的确定,可以采用排除法。济阳拗陷中—新生代岩浆活动共分为5期<sup>[33]</sup>,由于樊54井气藏的含气层系为奥陶系,因此与其成藏有关的岩浆活动可能发生于白垩纪、中新世—渐新世和新近纪<sup>[25]</sup>。综合樊54井气藏(含气层系为奥陶系)、高95井气藏(含气层系为沙三

段)、花17井气藏(含气层系为沙三段)的研究成果认为,如果是早期形成的无机二氧化碳气藏能够保存,则油藏更应得以保存(实际是已受到破坏);因此,可以排除白垩纪、中新世—渐新世成气阶段形成无机二氧化碳气藏的可能性,成气阶段为新近纪。馆陶组沉积时期是济阳拗陷新近纪岩浆活动的主要喷发期,也是主要成气期,此外明化镇组沉积早期也有岩浆活动(花501井钻遇玄武岩);考虑

研究区局部地区的成藏期具有一致性,应以花501井明化镇组1号气层二氧化碳成藏期作为博兴断层及邻区花17、高95、樊54等井无机二氧化碳气藏的成藏期,即为距今小于2 Ma的第四纪。

#### 2.4 断层启闭性的阶段性

通过对博兴断层及邻区油藏的破坏以及烃类、非烃类气藏成藏期的分析(表1)发现,高95井二氧化碳气藏和金家油田金31-35井油气成藏期均在明

表1 东营凹陷博兴断层及邻区重点探井油气成藏期分析  
Table1 Analysis of petroleum accumulation phases of Boxing Fault and its vicinity in Dongying sag

井号	含油层系	油藏成藏期	油藏破坏期	含气层位	气藏成藏期
花501				明化镇组4号气层(甲烷气藏) 明化镇组1,2,3和5号气层	明化镇组沉积中期 第四纪
花17	沙三段下亚段	馆陶组沉积末期—明化镇组沉积早期	明化镇组沉积早期	沙三段下亚段	第四纪
高95	沙三段中亚段	馆陶组沉积末期—明化镇组沉积早期	明化镇组沉积早期	沙三段中亚段	第四纪
樊54				奥陶系	第四纪
金31-35	沙一段	明化镇组沉积中期—第四纪			

化镇组沉积晚期之后,但其成藏期存在先后关系。金家油田发现稠油油藏但未发现二氧化碳气藏,表明二氧化碳的运移应晚于原油的运移,即高95井二氧化碳气藏的形成时间晚于金家稠油油田。研究区在明化镇组沉积中期有1期玄武岩喷发,应为高95、花17和博斜21等井古近系构造油藏的破坏期,也是博兴洼陷的原油和高95、花17、博斜21等井古油藏散失的原油越过博兴断层向东营凹陷南坡大规模运移的时期。

综上所述,博兴断层在馆陶组沉积时期—明化镇组沉积早期为封闭断层。伴随着明化镇组沉积中期玄武岩的剧烈喷发,导致博兴断层开启,其下降盘原有油藏遭受破坏,散失的油气部分富集于东营凹陷南坡的金家油田。第四纪,研究区进入火山活动的平静期,断层不再活动但仍然是开启的,继续沟通幔源与有效圈闭,形成二氧化碳气田(藏)(花沟气田以及高95、花17、樊54井气藏)。

#### 2.5 断层活动性与启闭性的关系

根据断层活动速率的研究结果(图3)发现,博兴断层在孔店组沉积时期的活动强度最大,表现为同沉积断层;至沙四段下亚段沉积时期,断层活动规模减小;沙四段上亚段沉积时期—沙二段沉积时期为博兴断层第2个活动高峰,之后断层活动速率逐渐降低;馆陶组沉积时期—明化镇组沉积末期,博兴断层微弱活动甚至停止。进入新近纪,博兴断层的活动规模较小,至第四纪基本消亡,但这一时期却与二氧化碳成藏期相一致。据此分析,博兴断

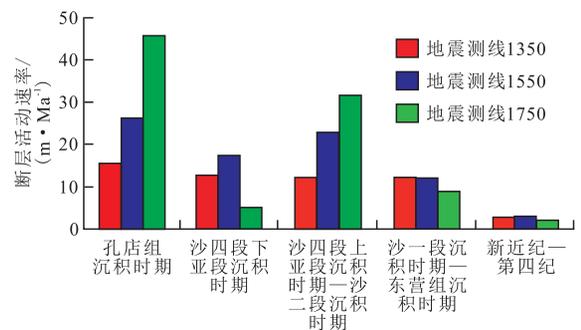


图3 博兴断层活动速率随时间变化

Fig.3 Evolution of the fault activity rate of Boxing Fault along with the geological time

层活动性与启闭性的关系表现为:明化镇组沉积中期为火山喷发期,断层强烈活动,幔源气喷出,但不具备有效圈闭条件,为二氧化碳成气期;第四纪为火山活动的平静期,断层开启,幔源气向上运移,不同层系具备有效圈闭条件,为二氧化碳成藏期。

米敬奎等研究认为,松辽盆地成藏的二氧化碳不是白垩系营城组火山岩后期脱气形成的,而是晚期(晚新生代以后)火山活动所伴生的二氧化碳聚集所形成<sup>[34]</sup>;郭栋等通过分析阳信洼陷火成岩和二氧化碳气藏中氦、氩同位素比值的相关性,认为气藏中的二氧化碳有别于新近纪和古近纪火成岩包裹体中的二氧化碳<sup>[35]</sup>,绝大部分应来源于幔源区,说明气藏中的二氧化碳主要为火山活动之后沿深大断裂或火山通道系统上逸形成的。这与笔者基于二氧化碳成藏期分析博兴断层启闭性的研究结果具有一致性。

### 3 结论

从博兴断层上升盘古油藏的破坏、二氧化碳气藏的成因及其成藏期研究入手,重点剖析花501、花17、高95等井钻遇的典型二氧化碳气藏,认为博兴断层在演化过程中至少经历了封闭、开启2个阶段。在馆陶组沉积时期—明化镇组沉积早期,博兴断层为封闭断层,为古油藏的成藏期;在明化镇组沉积中期,由于玄武岩喷发,导致博兴断层开启,受博兴断层封闭而形成的花17、高95、博斜21等井沙三段原有的古油藏遭受破坏,散失的油气越过博兴断层在金家地区部分聚集;第四纪,研究区及周缘进入火山活动的平静期,博兴断层仍然开启,继续沟通幔源与有效圈闭,形成沿博兴断层呈带状分布的多个二氧化碳气田(藏),即研究区及周缘二氧化碳成藏期为第四纪。

#### 参考文献:

- [1] Smith D A.Theoretical consideration of sealing and non-sealing faults[J].AAPG Bulletin, 1966, 50(2): 363-374.
- [2] Smith D A.Sealing and nonsealing faults in Louisiana Gulf Coast Salt Basin[J].AAPG Bulletin, 1980, 64(2): 145-172.
- [3] Weber K J, Mandl G, Pilaar W F, et al.The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth fault structures [R].OTC 3356, 1978; 2 643-2 653.
- [4] Bouvier J D, Kaars-Sijpestejn C H, Kluesner D F, et al.Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River field, Nigeria [J].AAPG Bulletin, 1989, 73 (11) : 1 397-1 414.
- [5] Yielding G, Freeman B, Needham D T.Quantitative fault seal prediction[J].AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.
- [6] 吕延防, 沙子萱, 付晓飞, 等.断层垂向封闭性定量评价方法及其应用[J].石油学报, 2007, 28(5): 34-38.  
Lü Yanfang, Sha Zixuan, Fu Xiaofei, et al.Quantitative evaluation method for fault vertical sealing ability and its application[J].Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 34-38.
- [7] 付晓飞, 方德庆, 吕延防, 等.从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J].地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(3): 328-336.  
Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lü Yanfang, et al.Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones[J].Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(3): 328-336.
- [8] 张文彪, 陈志海, 许华明, 等.断层封闭性定量评价——以安哥拉 Sangos 油田为例[J].油气地质与采收率, 2015, 22(6): 21-26.  
Zhang Wenbiao, Chen Zhihai, Xu Huaming, et al.Quantitative evaluation of fault seal: a case study of Sangos oilfield in Angola [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6) : 21-26.
- [9] 孙波, 张善文, 王永诗.断层输导能力定量评价及其在油气勘探中的应用——以济阳拗陷青西地区为例[J].油气地质与采收率, 2013, 20(6): 10-14.  
Sun Bo, Zhang Shanwen, Wang Yongshi.Quantitative evaluation of fault transporting capacity and its application in hydrocarbon exploration—case study of west Qingtuozhi uplift of Jiyang depression [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6) : 10-14.
- [10] 孙同文, 吕延防, 刘哲, 等.断裂控藏作用定量评价及有利区预测——以辽河拗陷齐家-鸳鸯沟地区古近系沙河街组三段上亚段为例[J].石油与天然气地质, 2013, 34(6): 790-796.  
Sun Tongwen, Lv Yanfan, Liu Zhe, et al.Quantitative evaluation of control of faults on hydrocarbon accumulation and play fairway prediction: a case from Es<sup>3(1)</sup> in Qijia-Yuanyangou area, the Liaohhe Depression[J].Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 790-796.
- [11] 霍志鹏, 庞雄奇, 杜宜静, 等.含油气盆地油气藏破坏的油气显示及其地质意义[J].石油与天然气地质, 2013, 34(4): 421-430.  
Huo Zhipeng, Pang Xiongqi, Du Yijing, et al.Oil-gas shows from destruction oil/gas reservoirs in the petroliferous basins of China and their geological significance[J].Oil & Gas Geology, 2013, 34(4) : 421-430.
- [12] 沈平, 徐永昌, 王先彬, 等.气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究[M].兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 15-60.  
Shen Ping, Xu Yongchang, Wang Xianbin, et al.Studies on geochemistry characteristics of gas-source rock and natural gas and mechanism of genesis of gas [M].Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 15-60.
- [13] 戴金星.中国东部和大陆架二氧化碳气田(藏)及其气的类型[J].大自然探索, 1996, 15(4): 18-20.  
Dai Jinxing.CO<sub>2</sub> fields(pools)and its gas types in East China and its continental shelf[J].Exploration of Nature, 1996, 15(4) : 18-20.
- [14] 戴金星, 宋岩, 戴春森, 等.中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M].北京: 科学出版社, 1995: 80-193.  
Dai Jinxing, Song Yan, Dai Chunsen, et al.Inorganic gas and gas reservoir forming conditions in eastern China [M].Beijing: Science Press, 1995: 80-193.
- [15] 戴金星, 邹才能, 张水昌, 等.无机成因和有机成因烷烃气的鉴别[J].中国科学: D辑 地球科学, 2008, 38(11): 1 329-1 341.  
Dai Jinxing, Zou Caineng, Zhang Shuichang, et al.Discrimination of abiogenic and biogenic alkane gases [J].Science in China: Series D Earth Science, 2008, 38(11) : 1 329-1 341.
- [16] 李先奇, 戴金星.中国东部二氧化碳气田(藏)的地化特征及成因分析[J].石油实验地质, 1997, 19(3): 215-221.  
Li Xianqi, Dai Jinxing.Geochemical characteristics and genetic analysis of CO<sub>2</sub> fields (pools) in East China [J].Experimental Petroleum Geology, 1997, 19(3) : 215-221.
- [17] 孙明良, 陈践发, 廖永胜.济阳拗陷天然气氩同位素特征及二氧化碳成因与第三纪岩浆活动的关系[J].地球化学, 1996, 25(5): 475-479.

- Sun Mingliang, Chen Jianfa, Liao Yongsheng. Helium isotopic characteristics, genesis of CO<sub>2</sub> in natural gases and distribution of Tertiary magmatite in the Jiyang Depression [J]. *Geochimica*, 1996, 25(5): 475-479.
- [18] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民, 等. 济阳坳陷二氧化碳气田的成因机制研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 1996, 32(6): 712-718.
- Hou Guiting, Qian Xianglin, Song Xinmin, et al. The origin of carbon dioxide gas fields in Jiyang basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1996, 32(6): 712-718.
- [19] 赫英, 王定一, 刘洪营, 等. 胜利油气区二氧化碳气藏成因[J]. *石油与天然气地质*, 1997, 18(1): 82.
- He Ying, Wang Dingyi, Liu Hongying, et al. Genesis of CO<sub>2</sub> gas reservoirs in Shengli Oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 1997, 18(1): 82.
- [20] 曹忠祥, 车燕, 李军亮, 等. 济阳坳陷花沟地区高含He气藏成因分析[J]. *石油实验地质*, 2001, 23(4): 395-399.
- Cao Zhongxiang, Che Yan, Li Junliang, et al. Accumulation analysis on a helium-enriched gas reservoir in Huagou area, the Jiyang Depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2001, 23(4): 395-399.
- [21] 廖永胜, 李钜源, 李祥臣, 等. 应用碳、氦、氩同位素探讨济阳坳陷二氧化碳气成因[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 351-353.
- Liao Yongsheng, Li Juyuan, Li Xiangchen, et al. A discussion of CO<sub>2</sub> genesis in Jiyang depression by using C, He, Ar isotopes [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 351-353.
- [22] 黄高健, 陈建渝, 张冬梅, 等. 济阳坳陷花沟-高青气田CO<sub>2</sub>气成因与成藏机制——兼对莺歌海盆地CO<sub>2</sub>气成因的质疑[J]. *中国海上油气: 地质*, 2002, 16(5): 295-301.
- Huang Gaojian, Chen Jianyu, Zhang Dongmei, et al. Origin and accumulation of CO<sub>2</sub> gas in Huagou-Gaoqing gas field Jiyang Depression [J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 2002, 16(5): 295-301.
- [23] 彭晓波, 陈建渝, 曹忠祥, 等. 胜利油区花沟气田非烃类气体成因研究[J]. *地质科技情报*, 2003, 22(1): 79-82.
- Peng Xiaobo, Chen Jianyu, Cao Zhongxiang, et al. Origin study of the non-hydrocarbon gases of the Huagou gas field in the Shengli petroleum area [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2003, 22(1): 79-82.
- [24] 杜灵通, 吕新彪, 陈红汉. 济阳坳陷二氧化碳气藏的成因判别[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(5): 629-632.
- Du Lingtong, Lv Xinbiao, Chen Honghan. Origin discrimination of CO<sub>2</sub> gas pools in Jiyang depression [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(5): 629-632.
- [25] 张波, 吴智平, 刘华. 火成岩在阳信洼陷油气成藏中的地质意义[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(4): 80-84.
- Zhang Bo, Wu Zhiping, Liu Hua. Geological significance of igneous rock to oil/gas reservoir-forming in Yangxin sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(4): 80-84.
- [26] 蒋有录, 刘华, 张乐, 等. 东营凹陷油气成藏期分析[J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24(3): 215-218.
- Jiang Youlu, Liu Hua, Zhang Yue, et al. Analysis of petroleum accumulation phase in Dongying sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(3): 215-218.
- [27] 朱光有, 金强, 戴金星, 等. 东营凹陷油气成藏期次及其分布规律研究[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(2): 209-215.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang, Dai Jinxing, et al. A study on periods of hydrocarbon accumulation and distribution pattern of oil and gas pools in Dongying depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(2): 209-215.
- [28] 程慧, 常迎梅, 经雅丽. 渤海湾盆地东营凹陷地层油气藏成藏阶段分析[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(1): 54-57.
- Cheng Hui, Chang Yingmei, Jing Yali. Accumulation stages of stratigraphic reservoirs in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(1): 54-57.
- [29] 王冰洁, 罗胜元, 陈艳红, 等. 东营凹陷博兴洼陷石油生成、运移和聚集史数值模拟[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(5): 675-685.
- Wang Bingjie, Luo Shengyuan, Chen Yanhong, et al. Numerical simulation of hydrocarbon generation, migration and accumulation in the Boxing sag, Dongying Depression, Jiyang subbasin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(5): 675-685.
- [30] 潘元林, 张善文, 肖焕钦, 等. 济阳断陷盆地隐蔽油气藏勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 15-16.
- Pan Yuanlin, Zhang Shanwen, Xiao Huanqin, et al. Subtle trap pool exploration in Jiyang faulted basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 15-16.
- [31] 程有义. 花17井二氧化碳气藏形成条件讨论[J]. *石油勘探与开发*, 1993, 20(4): 9-14.
- Cheng Youyi. A discussion on the formation of CO<sub>2</sub> gas reservoir in well Hua17 [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1993, 20(4): 9-14.
- [32] 郑乐平, 冯祖均, 廖永胜, 等. 济阳坳陷非烃类气藏(CO<sub>2</sub>、He)的成因探讨[J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 1997, 33(1): 76-81.
- Zheng Leping, Feng Zujun, Liao Yongsheng, et al. Genesis of the non-hydrocarbon gas reservoir (CO<sub>2</sub>, He) in Jiyang depression [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1997, 33(1): 76-81.
- [33] 万丛礼, 金强, 李钜源, 等. 裂谷盆地岩浆活动控制油气概论[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(1): 1-5.
- Wan Congli, Jin Qiang, Li Juyuan, et al. Outline on magmatic activities controlling oil-gas theory in rift basins [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(1): 1-5.
- [34] 米敬奎, 张水昌, 陶士振, 等. 松辽盆地南部长岭断陷CO<sub>2</sub>成因与成藏期研究[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(4): 452-456.
- Mi Jingkui, Zhang Shuichang, Tao Shizhen, et al. Genesis and accumulation period of the CO<sub>2</sub> in Changling fault depression of Songliao basin, northeastern China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(4): 452-456.
- [35] 郭栋, 姚书振, 陈红汉, 等. 阳信洼陷火成岩与CO<sub>2</sub>气成藏关系[J]. *地质科技情报*, 2004, 23(4): 71-75.
- Guo Dong, Yao Shuzhen, Chen Honghan, et al. Relationships between igneous rock and CO<sub>2</sub> reservoir of Yangxin Sag [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4): 71-75.