

松辽盆地二氧化碳成因及分布主控因素^{*}

鲁雪松¹ 宋岩¹ 王兆宏² 马淑芳¹ 柳少波¹ 洪峰¹

1. 中国石油勘探开发研究院 2. 中国石油大学·北京

鲁雪松等. 松辽盆地二氧化碳成因及分布主控因素. 天然气工业, 2009, 29(2): 125-128.

摘要 松辽盆地天然气成因类型复杂, 烃类气和 CO₂ 大量共存, 已发现多个高含 CO₂ 气藏。地质和地球化学指标判别表明, 松辽盆地高含量的 CO₂ 皆来自于上地幔的岩浆脱气。通过对已发现含 CO₂ 天然气分布特征的分析, 总结了松辽盆地高含 CO₂ 天然气分布的五大主控因素: ①深部构造背景控制 CO₂ 区域分布; ②基底大断裂控制 CO₂ 区带分布; ③中生代火山岩构成 CO₂ 深部优质储层; ④新生代火山岩浆活动控制 CO₂ 气源; ⑤区域盖层控制 CO₂ 聚集层位。松辽盆地 CO₂ 充注成藏期较晚, 主要与新生代幔源玄武岩岩浆活动有关。

关键词 松辽盆地 CO₂ 成因 分布 断裂 火山岩 主控因素

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.03.037

1 松辽盆地 CO₂ 成因

关于松辽盆地 CO₂ 的成因, 前人已做了大量研究^[1-9]。运用 CO₂ 碳同位素和 CO₂ 含量判别图版进行分析, 结果表明其 CO₂ 有 3 种成因: 无机成因、有机成因和混合成因, 但以前者为主^[10]。有机成因 CO₂ 的含量一般都小于 20%, 绝大多数 CO₂ 含量小于 5%, 甚至更小, 多作为伴生气存在, $\delta^{33}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 小于 -10‰。CO₂ 含量大于 20% 的皆为无机成因, 无机成因 $\delta^{33}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 介于 -3‰ ~ -10‰, 平均在 -5‰ 左右。大量数据表明^[4], 碳酸盐岩变质成因 CO₂ 的 $\delta^{33}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值在 0 ± 3‰ 左右, 而幔源—岩浆成因 CO₂ 的 $\delta^{33}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 大多在 -6‰ ± 2‰, 据此可判断松辽盆地高含量的 CO₂ 为幔源—岩浆成因。进一步判断 CO₂ 是来自地壳熔融岩浆还是来自于上地幔岩浆, 则需要借助于稀有气体 ³He/⁴He 比值和 CO₂/³He 比值。昌德东、万金塔、孤店、红岗、乾安、长深 1 等 CO₂ 气藏中 ³He/⁴He 为 10⁻⁶ ~ 10⁻⁵, R/Ra > 2, CO₂/³He 比值处在 10⁸ ~ 10¹⁰, 为典型的幔源成因, 来自于上地幔的直接脱气^[10]。松辽盆地莫霍面上隆, 深大断裂、热流底辟体和壳内岩浆房发育, 构造和岩浆多期活动, 为深部幔源 CO₂ 气向上运移和聚集提供了有利条件^[11-14]。

2 松辽盆地 CO₂ 分布主控因素

2.1 深部构造背景控制 CO₂ 区域分布

松辽盆地高含量 CO₂ 和 He 气主要分布在莫霍

面上隆部位, 并与深大断裂、壳内岩浆房和热流异常相伴产出^[9, 11]。松辽盆地莫霍面埋藏较浅, 在 29 ~ 34 km 范围内, 而高含量 CO₂ 和 He 气又主要分布在莫霍面埋深小于 32 km 的范围内(图 1), 这充分说明了 CO₂ 的深部来源。现今发现的 CO₂ 气藏和井大多分布在盆地内地温较高的中央凹陷区。而且, CO₂ 气与深大断裂关系密切, CO₂ 的南北向分布主要受控于盆地中央的孙吴—双辽岩石圈断裂带的控制^[9, 11]。上地幔隆起导致莫霍面埋藏较浅、深大

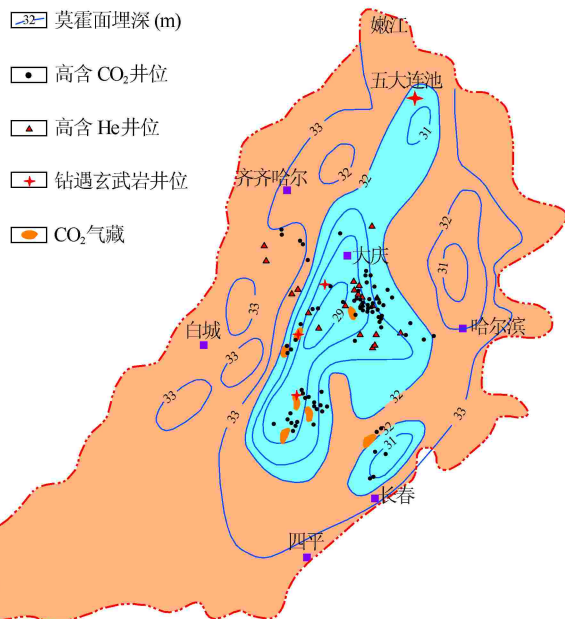


图 1 松辽盆地高含 CO₂ 和 He 气与莫霍面叠合图

^{*} 本文为中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(编号:07-02Z-01-01)的部分研究成果。

作者简介: 鲁雪松, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事石油与天然气地质综合研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路 20 号石油地质实验中心。电话: (010) 62097197, 13811743248。E-mail: luxuesong2002@yahoo.com.cn

断裂形成,是幔源岩浆灌入岩石圈的必要条件,而幔源岩浆是 CO₂ 和 He 的主要气源^[12]。以上认识充分说明深部构造背景直接控制了 CO₂ 的区域分布。

2.2 基底大断裂控制 CO₂ 区带分布

全球已发现高含 CO₂ 气藏或气苗的分布与基底断裂的关系密切,基底断裂为 CO₂ 气藏的形成提供了运移通道和储集空间^[4,12-13]。研究表明,控制 CO₂ 气藏的基底断裂多为规模较大的、控陷的、控制火山岩浆上涌通道的基底大断裂。松辽盆地已发现高含 CO₂ 气藏或井的分布无一例外地受基底大断裂的控制,即基底大断裂控制了 CO₂ 富集区带,表现如下:

2.2.1 基底大断裂与深大断裂相衔接构成幔源 CO₂ 脱气和上运通道

研究表明,松辽盆地控制 CO₂ 气藏的断裂多为规模较大、低角度的控陷断层。这些控陷的基底大断裂向下倾角逐渐变缓,并最终以下于水平的韧性剪切方式消失于拆离带内。在岩石圈上部巨大的压力作用下,呈现韧性状态的拆离带是良好的封盖层^[14]。由于拆离带的作用,使得沿岩石圈下部裂缝上升的岩浆和气体等在拆离带的下部聚集而形成岩浆房(或称低速体)或热流底辟体,这些低速体或热流底辟体就是幔源 CO₂ 的气源供应体。岩浆房内的岩浆和气体沿着与之沟通的基底大断裂上升,并最终运移到沉积盆地中聚集和成藏^[15]。通过徐家围子 15 s 深地震剖面解释,可见徐西和徐中断裂这种铲式基底大断裂向下收敛于拆离带,并与深部的热流底辟体相衔接,从而构成 CO₂ 脱气和上运通道(图 2)。

2.2.2 基底大断裂形成的构造带控制了 CO₂ 的聚集和分布

基底大断裂由于其规模较大且长期活动,控制形成了一系列的构造带,在这些构造带内与基底断裂有关的圈闭就为 CO₂ 的聚集提供了空间和场所。一方面,基底大断裂控制了深层断陷的构造格局,并控制了火山岩带的分布,从而控制 CO₂ 在深层的聚集和分布。断陷内部通常发育陡坡构造带、中央断隆带和缓坡构造带,其中陡坡构造带和中央断隆带是 CO₂ 聚集和分布的有利部位。如徐家围子断陷高含 CO₂ 气主要分布在徐西断裂控制的陡坡带和徐中断裂控制的中央断隆带;长岭断陷高含 CO₂ 气主要分布在乾安、前神字井断裂控制的中央断隆带和孤西断裂控制的陡坡带^[16]。由基底大断裂控制的火山岩带则为 CO₂ 提供了储集空间。另一方面,部分基底大断裂在坳陷期或反转期持续活动断至浅层,并发生反转形成了中浅层的反转构造带,从而控制了 CO₂ 在中浅层的聚集和分布。如万金塔、孤店、乾安、红岗等中浅层 CO₂ 气藏都分布在反转构造带上。

2.2.3 中生代火山岩构成 CO₂ 深部优质储层

松辽盆地中生代火山岩主要发育于火石岭组和营城组,岩性复杂多样,从基性到酸性均有产出,但以中酸性为主。由于中生代火山岩主要来源于壳源岩浆,且是喷出岩,故不能作为 CO₂ 的主要气源^[12]。中生代火山岩厚度大,分布广泛,储集物性好,是松辽盆地深层天然气的重要储层。火山岩相控制了火山岩储层的发育和气藏的富集,不同类型的火山岩相的火山岩储集物性特征差异很大,火山通道相附近及爆发相和多个火山口交汇处的喷溢相是有利的火山岩相^[17]。由于近火山口爆发相储层常沿基底大断裂成带分布^[18],位于基底大断裂的幔源气体释

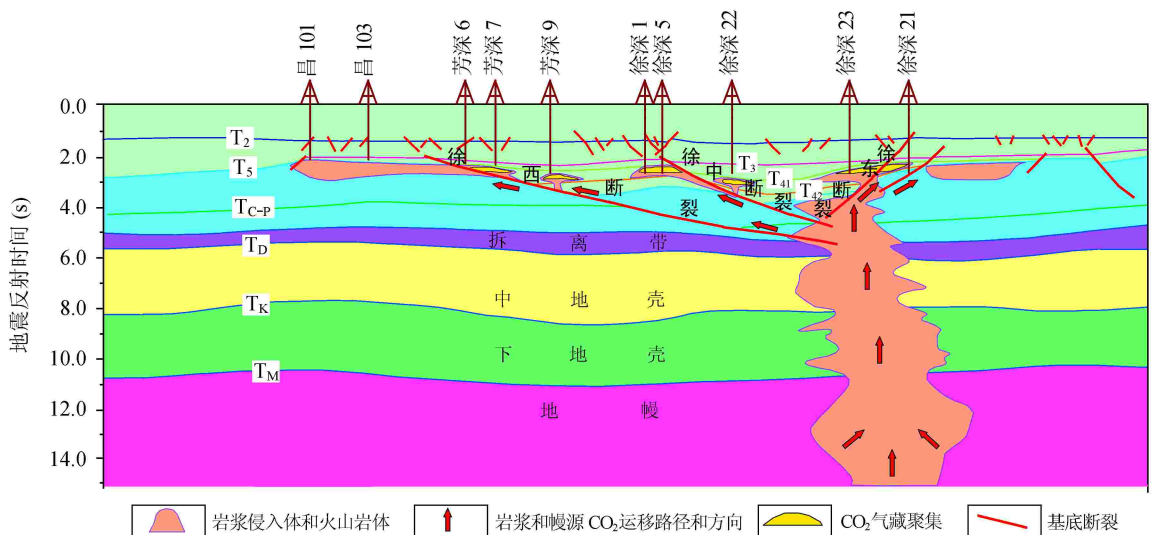


图 2 基底大断裂控 CO₂ 气源及 CO₂ 聚集带模式图

气点处的近火山口爆发相储层中就会捕获幔源成因 CO₂ 气。从徐家围子断陷深层已发现高含 CO₂ 井位与营城组火山岩相叠合图(图 3)上可以看出,目前已发现的高含 CO₂ 井位基本上都位于火山口爆发、喷溢及火山通道叠合相区,这充分说明了火山岩相对深层 CO₂ 富集的控制作用。

2.2.4 新生代火山岩浆活动控制 CO₂ 气源

我国东北地区新生代火山岩主要以基性、碱性玄武岩为主^[19]。对伊通—大屯地区的新生代玄武岩研究表明,该区玄武岩浆形成深度为 54~108 km,且由老至新,玄武岩的形成深度逐渐变深,且受地壳物质的混染作用不大。前人大量研究表明,来自于上地幔的碱性和基性玄武岩浆是富含 CO₂ 等挥发份的热液流体^[20-22]。因此,新生代幔源岩浆的多期活动为大量幔源 CO₂ 运移至盆地中形成聚集提供了可能。虽然新生代火山岩在松辽盆地外围出露较多,而在盆地内部较少,仅在南部的伊通—大屯地区和北部的五大连池、克山地区出露火山口,但这可能正说明了松辽盆地新生代岩浆活动在巨厚沉积盖层的覆盖下,岩浆能量不足以形成大规模喷发,但是却可以沿着某些薄弱带在中上地壳或盆地基底中形成热流底辟体、岩浆房低速体或深层侵入体,其中所富含 CO₂ 等挥发份的热液流体可以通过基底大断裂的沟通进入沉积盆地中形成大量 CO₂ 气的聚集(图 2)。

关于松辽盆地 CO₂ 气源与新生代玄武岩浆活动有关的其他证据分析如下:①中生代火山岩以酸性为主,且为喷发相,缺乏盖层,不具备成藏条件。②火山岩储层中 CO₂ 包裹体不发育,且不管气藏中 CO₂ 含量的高低,储层包裹体中气体组分主要为甲烷,CO₂ 的含量都很低(表 1)。推测 CO₂ 包裹体不发育的原因为 CO₂ 充注晚且非常快,在 CO₂ 充注前储层已经被烃类气体饱和,储层在缺水条件下包裹体无法形成。③高含 CO₂ 气藏储层中流体包裹体中的 CO₂ 含量低且为有机成因,而气藏中 CO₂ 则为无机幔源成因(表 1),说明幔源 CO₂ 与烃类气非同期成藏。④高含量 CO₂ 与盆地周边新生代幔源岩浆喷发的火山泉气的地化特征相似。⑤已发现的中浅层 CO₂ 气藏如万金塔、孤店、乾安、红岗、英台 CO₂ 气藏等皆与反转构造有关,而反转构造主要形成于明水期末或新近纪末,因此 CO₂ 充注成藏也应较晚。⑥片钠铝石是地质历史时期 CO₂ 运移、聚集或逸散的示踪矿物^[23]。在英台、大安北、红岗、孤店和新立等 CO₂ 气藏分布区的砂岩储层中都发现有片钠铝石,且片钠铝石形成于成岩作用晚期,说明幔源 CO₂

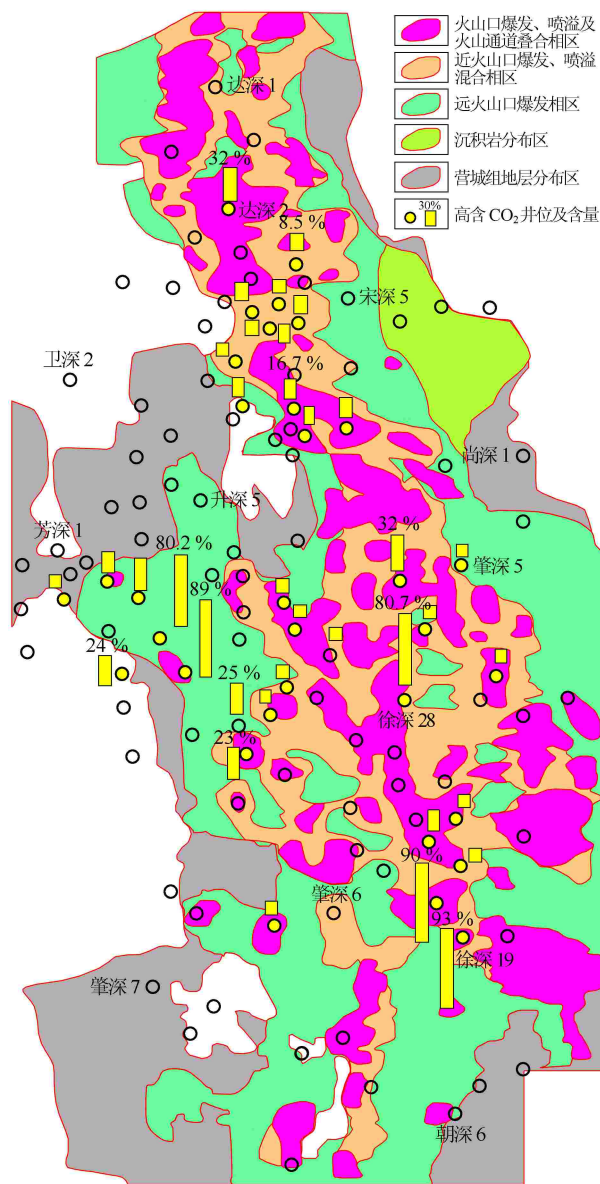


图 3 徐家围子断陷营城组火山岩相与高含 CO₂ 井位叠合图

表 1 高含 CO₂ 井中或包裹体中碳同位素值对比表

井号	气体来源	CO ₂ (%)	δ ¹³ C ₁ (‰)	δ ¹³ C ₂ (‰)	δ ¹³ C _{CO₂} (‰)
长深 1	包裹体中	2.35	-22.85	-32.40	-12.71
	井中	23.45	-23.00	-26.30	-6.80
长深 1-1	包裹体中	1.63	-24.50	-27.38	-14.72
	井中	31.64	-22.20	-26.90	-7.70
徐深 28	井中	84.00	-34.00		-7.00
徐深 19	井中	98.00	-34.91	-35.86	-5.41

注:据米敬奎,2007 年。

充注较晚,应为新生代^[24]。⑦与松辽盆地构造背景相似的海拉尔、渤海湾、苏北盆地中发现的大量 CO₂ 气藏均形成于新生代。如海拉尔盆地乌尔逊坳陷 CO₂

气藏形成于距今 46 Ma 或更晚^[25];渤海湾盆地 CO₂ 气藏形成与新近纪的碱性橄榄玄武岩浆火山有关^[26];苏北盆地黄桥 CO₂ 气藏形成于距今 30 Ma 之后^[27]。

2.2.5 区域盖层控制 CO₂ 聚集层位

对松辽盆地已发现 CO₂ 分布层位的统计表明,CO₂ 主要分布在营城组和泉三、四段储层中,纵向上 CO₂ 含量的分布出现 3 个高值部位,即青山口组二、三段,泉四段和营城组,这反映出深部来源的 CO₂ 的富集明显受到区域盖层的控制^[10]。在深层登二段泥岩区域盖层和泉一、二段泥岩局部盖层的封盖下,高含 CO₂ 气主要富集在营城组火山岩储层中,登娄库组也有局部分布;在中浅层青山口组区域盖层的封盖下,高含 CO₂ 天然气在泉三、四段砂岩中较富集。

3 结论与认识

松辽盆地 CO₂ 具有无机、有机和混合 3 种成因,但以无机成因为主,高含量的 CO₂ 皆为幔源成因。其 CO₂ 分布虽具极大不均匀性,但也具一定规律性。松辽盆地 CO₂ 的分布主要受控于 5 大因素,即深部构造背景控制 CO₂ 区域分布;基底大断裂控制 CO₂ 聚集区带;中生代火山岩构成 CO₂ 深部优质储层;新生代火山岩浆活动控制 CO₂ 气源;区域盖层控制 CO₂ 聚集层位。松辽盆地 CO₂ 充注成藏期较晚,主要与新生代幔源玄武岩浆活动有关。受区域盖层控制,松辽盆地 CO₂ 在层位上主要分布于营城组火山岩和泉三、四段砂岩储层中。

参 考 文 献

- [1] 戴金星,丁巍伟.松辽盆地深层气勘探和研究[M]//松辽盆地深层天然气勘探研讨会报告集.北京:石油工业出版社,2004:27-44.
- [2] 冯子辉,刘伟,徐家围子断陷深层天然气的成因类型研究[J].天然气工业,2006,26(6):18-20.
- [3] 付晓飞,宋岩.松辽盆地无机成因气及气源模式[J].石油学报,2005,26(4):23-28.
- [4] 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.
- [5] WYCHERLEY. Some observations on the origins of large volumes of carbon dioxide accumulations in sedimentary basins [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999,16(6):489-494.
- [6] 陶士振,刘德良,杨晓勇,等.无机成因天然气藏形成条件分析[J].天然气地球科学,2004,11(1):10-18.
- [7] 何家雄,夏斌,刘宝明,等.中国东部及近海陆架盆地 CO₂ 成因及运聚规律与控制因素研究[J].石油勘探与开发,2005,32(4):42-47.
- [8] 云金表,庞庆山,徐佰承,等.松辽盆地南部 CO₂ 气藏的形成条件[J].大庆石油学院学报,2000,24(2):82-84.
- [9] 侯启军,杨玉峰.松辽盆地无机成因天然气及勘探方向探讨[J].天然气工业,2002,22(3):5-10.
- [10] 鲁雪松,王兆宏,魏立春,等.松辽盆地二氧化碳成因判识及分布规律研究[J].石油与天然气地质,待刊.
- [11] 付晓飞,云金表,卢双舫,等.松辽盆地无机成因气富集规律研究[J].天然气工业,2005,25(10):14-17.
- [12] 鲁雪松,宋岩,柳少波,等.幔源 CO₂ 释出机理、脱气模式及成藏机制研究进展[J].地学前沿,2008,15(6):293-302.
- [13] 朱岳年.二氧化碳地质研究的意义及全球高含二氧化碳天然气的分布特点[J].地球科学进展,1997,12(1):26-31.
- [14] 戴春森,宋岩,戴金星.中国两类无机成因 CO₂ 组合、脱气模型及构造专属性[J].石油勘探与开发,1996,23(2):1-4.
- [15] 魏立春,鲁雪松,宋岩,等.松辽盆地昌德东 CO₂ 气藏形成机制及成藏模式[J].石油勘探与开发,待刊.
- [16] 鲁雪松,宋岩,柳少波,等.松辽盆地幔源 CO₂ 分布规律与运聚成藏机制及成藏模式[J].石油学报,待刊.
- [17] 王璞珺,陈树民,刘万洙,等.松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J].石油与天然气地质,2003,24(1):18-23.
- [18] 王玲,孙夕平,张研,等.松辽盆地深层断裂体系对火山岩成因和火山岩相带的控制:以徐深地区为例[J].天然气地球科学,2007,18(3):389-393.
- [19] 刘嘉麒.中国东北地区新生代火山幕[J].岩石学报,1988(1):1-10.
- [20] 杜乐天.地幔流体与软流层(体)地球化学[M].北京:地质出版社,1996.
- [21] 赫英,王定一,祝总祺,等.非线性二氧化碳气藏成因——胜利油田火山岩及其中包裹体证据[J].矿物岩石地球化学通报,1996,15(2):97-99.
- [22] 邓晋福,赵海玲,罗照华,等.玄武岩反演软流层地球化学与地幔流体[M]//杜乐天,主编.地幔流体与软流层(体)地球化学.北京:地质出版社,1996:58-96.
- [23] 高玉巧,刘立,曲希玉.片钠铝石的成因及其对 CO₂ 天然气运聚的指示意义[J].地球科学进展,2005,20(10):1083-1088.
- [24] 高玉巧,刘立,杨会东,等.松辽盆地孤店二氧化碳气田片钠铝石的特征及成因[J].石油学报,2007,28(4):62-67.
- [25] 高玉巧,刘立.海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机 CO₂ 与油气充注的时间记录[J].沉积学报,2007,25(4):574-582.
- [26] 王兴谋,邱隆伟,姜在兴,等.济阳坳陷火山活动和 CO₂ 气藏的关系研究[J].天然气地球科学,2004,15(4):421-427.
- [27] 郭念发,尤孝忠,雷一心,等.黄桥 CO₂ 气田特征及其勘探远景[J].天然气工业,2000,20(4):14-18.

(修改回稿日期 2008-12-23 编辑 居维清)