

文章编号: 0253-9985(2009)01-0097-05

松辽盆地二氧化碳成因判识与分布规律

鲁雪松¹, 王兆宏², 魏立春^{1,3}, 柳少波¹, 洪峰¹

(1. 中国石油天然气股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学, 北京 102249;

3. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

摘要: 运用 CO₂ 碳同位素 ³He/⁴He 和 CO₂/³He 比值判断松辽盆地高含量的 CO₂ 皆为幔源成因。松辽盆地 CO₂ 的分布具有极大的不均匀性, 研究表明, 松辽盆地 CO₂ 在含量上具有“两端元”的分布特征; 受区域盖层和储层性质的控制, CO₂ 在层位上主要富集于白垩系营城组和泉头组四段地层中; 在平面上 CO₂ 呈多个点状或狭长带状局限分布, 明显受控于深大断裂, 与基底大断裂和火山岩体具有较好的成生关系。常规烃类气和幔源 CO₂ 因同受基底大断裂控制, 并共享某些圈闭和储层要素而耦合混杂分布在一起。幔源 CO₂ 运聚通道组合类型在很大程度上决定了火山岩气藏中烃类气和 CO₂ 相对含量的大小以及含 CO₂ 天然气的赋存层位。

关键词: 幔源成因; 运聚通道; 成因类型; 二氧化碳; 松辽盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Origin and distribution patterns of carbon dioxide in the Songliao Basin

Lu Xuesong¹, Wang Zhaohong², Wei Lichun^{1,3}, Liu Shaobo¹, Hong Feng¹

(1. PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China;

2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Various indexes such as CO₂ carbon isotope, ³He/⁴He and CO₂/³He ratios show that CO₂ with high content in the Songliao Basin is mantle-derived gas. Distribution of CO₂ in the Songliao Basin is highly uneven. The content of CO₂ in the Songliao Basin shows a kind of “two-end member” distribution. Vertically, CO₂ are mainly concentrated in the Yingcheng Formation and the fourth member of the Quantou Formation and their distribution is under the control of regional caprock and reservoir characteristics. While laterally, they are locally distributed in several patchy or narrow and long zonal areas, and their distribution is obviously under the control of deep major faults and has relatively close genetic relations with the basement faults and volcanic rock bodies. Conventional hydrocarbon gas and mantle-derived CO₂ occur in hybrid, as both of them are controlled by the major basement faults and sharing some trap and reservoir elements. It was pointed out that, to a great extent, the combination type of pathways for mantle-derived CO₂ migration and accumulation determined the relative content of CO₂ and hydrocarbon gas in volcanic reservoirs and accumulating horizons of CO₂-bearing natural gas.

Key words: mantle-derived origin; migration and accumulation pathway; genetic type; carbon dioxide; Songliao Basin

松辽盆地深层天然气成因类型复杂, 烃类气 并存, 而且常规烃类气与无机成因 CO₂ 大量共
以高成熟煤型气和混合气为主, 油型气和无机气 存^[1~3]。目前已发现多个高含 CO₂ 气藏或气苗显

收稿日期: 2008-08-11。

第一作者简介: 鲁雪松(1982—), 男, 博士研究生, 天然气地质与油气成藏综合研究。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(07-02Z-01-01)。

示,如盆地北部边缘五大连池泉水中的 CO_2 气苗,盆地南部的万金塔、孤店、乾安、红岗等中浅层 CO_2 气藏,以及近几年深层勘探白垩系在营城组火山岩储层中发现的多个 CO_2 气藏或气井,如盆地北部的芳深 9 气藏、徐深 8、徐深 10、徐深 19、徐深 28、达深 2 等井,盆地南部的长深 2、长深 4、长深 6、长深 7 井和德深 7 井。 CO_2 含量在平面上、层位和深度上变化较大,显示出极不均匀的分布特征。目前,在还没有形成对 CO_2 进行工业化利用和处理的条件下,给常规烃类气的勘探和开发增大了风险和难度。 CO_2 是何成因?含 CO_2 天然气的分布规律如何?钻前如何预测 CO_2 气藏的分布及火山岩气藏中的 CO_2 含量?这些问题一直困扰着人们,制约了深层天然气的勘探。因此,深入探讨松辽盆地 CO_2 的成因及其分布规律对于松辽盆地深层天然气的勘探具有重要的理论和指导意义。

1 松辽盆地 CO_2 成因判识

沉积盆地中 CO_2 可具有不同的成因,一般可分为无机成因和有机成因两种,其中无机成因中又可进一步分为幔源-岩浆成因和岩石变质成因两种^[4~6]。不同成因类型的 CO_2 的成因判识除考虑其产区地质构造和岩石化学特征外,还应综合 CO_2 的含量和碳同位素组成,天然气中伴生烃类气、稀有气体的同位素组成数据以及利用它们之间的组合关系来判定^[4,7]。

从判别图版(图 1)中可以看出松辽盆地 CO_2 具有 3 种成因,即无机成因,有机成因和混合成因,但以无机成因为主。有机成因 CO_2 的含量一般都小于 20%,绝大多数 CO_2 含量小于 10%,甚至更小,多作为伴生气存在, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 小于 -10‰。 CO_2 含量大于 20% 的皆为无机成因,无机成因 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 介于 -2‰~-10‰,平均值在 -5‰ 左右。大量数据表明,碳酸盐岩变质成因 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值在 0 ± 3 ‰ 左右,而幔源-岩浆成因 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 大多在 -6‰ ± 2 ‰^[4],据此可判断松辽盆地高含量的 CO_2 为幔源-岩浆成因。

进一步判断 CO_2 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氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值和 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值。一般,幔源成

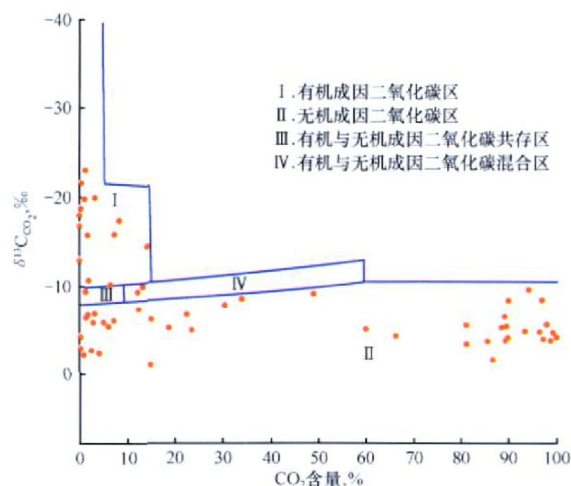


图 1 松辽盆地 CO_2 有机与无机成因判别图^[4]

Fig. 1 Diagram showing discrimination of organic and inorganic CO_2 in the Songliao Basin

因 CO_2 中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$, R/R_a 值(R 为样品中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 含量比; R_a 为标准大气中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 含量比,其值为 1.4×10^{-6}) 大于 1,而壳源岩浆成因 CO_2 中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $10^{-8} \sim 10^{-6}$, R/R_a 小于 1^[8,9]。从表 1 中可以看出昌德东、万金塔、孤店、红岗、乾安、长深 1 气藏中 CO_2 地化特征与五大连池和长白山天池气苗十分相似, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$, R/R_a 大于 2,为典型的幔源成因。

$\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值常用于火山口脱气中幔源气体的鉴别^[10],本文尝试将该指标用于鉴别 CO_2 气藏和火山温泉气中的幔源 CO_2 。通过对不同构造环境中幔源气体的 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值的大量研究表明,上地幔中原始岩浆分离出的幔源气体具有基本恒定的 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值^[11~14],为 $2 \times 10^9 \sim 7 \times 10^9$ 。但幔源气体在地壳中运移和聚集过程中其 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值会受到各种因素的影响而发生不同程度的变化。那么 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值能否用于鉴别 CO_2 气藏和火山温泉气中的幔源 CO_2 呢?根据对我国东部火山温泉气和 CO_2 气藏的统计分析表明,这些温泉气和 CO_2 气藏中 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值均处在 $10^8 \sim 10^{10}$,只有少部分与幔源气体脱离玄武岩浆时所具有的 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值($2 \times 10^9 \sim 7 \times 10^9$)一致,而多数是处在 $10^8 \sim 10^9$ 范围内,但 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值测定结果均表明这些 CO_2 为幔源成因^[15~17]。造成这种现象的原因是因为 CO_2 是典型的活性气体,有可能大量溶于地层水或参加化学反应转化为碳酸盐沉淀

表 1 松辽盆地高含 CO₂ 气藏中天然气地球化学特征

Table 1 Geochemical behaviors of natural gas in high content CO ₂ gas pools in the Songliao Basin											
地区	井号	层位	井深/m	主要组分含量, %				δ ¹³ C _{CO₂} , ‰	³ He/ ⁴ He	R/ R _a	数据来源
				CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	N ₂				
昌德东	芳深 9	K _{1yc}	3 602– 3 620	89.73	9.61	0.14	0.49	– 4.06	3.90 × 10 ^{– 6}	2.78	文献[8]
	芳深 9	K _{1yc}	3 602– 3 632	90.38	9.37	0.15	0.09	– 5.46	4.50 × 10 ^{– 6}	3.21	
长深 1	长深 1	K _{1yc}	3 754	18.88	74.61	0.65	5.86	– 5.26	2.94 × 10 ^{– 6}	2.10	
	长深 1	K _{1yc}	3 594	22.56	71.4	1.90	4.14	– 6.80	(2.88 ± 0.08) × 10 ^{– 6}	2.06	
	长深 1– 1	K _{1yc}	3 739	12.55	79.45	2.12	5.87	– 7.50	(2.93 ± 0.08) × 10 ^{– 6}	2.09	
孤店	孤 12	K _{1q} ⁴	1 623.4– 1 648.2	81.05	5.05	0.68	13.19	– 5.74	(4.53 ± 0.13) × 10 ^{– 6}	3.24	
	孤 9	K _{1q} ⁴	1 572.4– 1 580.2	97.05	2.65	0.20		– 8.44	(4.51 ± 0.14) × 10 ^{– 6}	3.22	
红岗	红 75– 5– 21	K _{1q} ⁴	2 365– 2 371	30.68	52.82	11.24	5.26	– 8.05	(3.16 ± 0.09) × 10 ^{– 6}	2.26	
乾安	乾深 1	K _{1q} ⁴	2 176.2– 2 185.2	80.73	0.99	0.20	16.16	– 3.73	(4.43 ± 0.08) × 10 ^{– 6}	3.16	
万金塔	万 2	K _{1q} ³	838.8– 863.4	99.02	0.61		0.37	– 4.04	(6.87 ± 0.22) × 10 ^{– 6}	4.91	文献[4]
	万 5	K _{1q} ³	740	93.43	3.74		2.67	– 4.95	(4.67 ± 0.08) × 10 ^{– 6}	3.34	
	万 6	K _{1q} ³	603	97.77	1.39			– 4.31	(6.94 ± 0.20) × 10 ^{– 6}	4.96	
五大连池	科 4 泉			97.41			2.34	– 3.96	4.17 × 10 ^{– 6}	2.98	
	翻 A– 4 泉			99.45	0.02		0.24	– 5.39	4.43 × 10 ^{– 6}	3.16	
长白山天池	锦江热泉 1			84.28	1.25		3.86	– 7.40	7.70 × 10 ^{– 6}	5.50	文献[9]
	白河屯泉			60.41	28.31			– 9.30	3.32 × 10 ^{– 6}	2.37	

而部分损耗,从而使幔源气体中 CO₂/³He 比值有所降低。因此,我们认为仍可以用 CO₂/³He 比值判断 CO₂ 气藏中 CO₂ 的成因,当 CO₂/³He 比值介于 10⁸~ 10¹⁰ 即可认为是幔源 CO₂。此外,由于大量有机烃类气体的混入使得气藏中幔源 CO₂ 的相对含量减小。这两种原因所导致的变化趋势在 CO₂/³He 比值与 CO₂ 含量关系图版上有着明显的区别,CO₂ 损耗作用使得样品点向下方偏移,稀释作用使得数据点向左边偏移,两者的共同作用使样品点向左下角偏移(图 2),据此可以判别幔源 CO₂ 及其在气藏中发生的变化情况。

从图 2 上可以看出,除了莺歌海盆地部分 CO₂ 气藏为壳源变质成因(CO₂/³He 比值大于 10¹⁰)之外,我国东部火山温泉气及 CO₂ 气藏皆为幔源成因;火山温泉气主要是由于 CO₂ 在水中的大量溶解而使 CO₂ 有所损耗,导致其 CO₂/³He 比值有所降低;而长深 1 气藏、红岗气藏及黄骅坳陷港西断裂带附近的 CO₂ 气藏由于混入大量的烃类气而使 CO₂ 的相对含量减小;昌德东芳深 9 井 CO₂ 气藏由于气藏规模大,CO₂ 损耗较小,其 CO₂/³He 比值与幔源气基本一致,且没有烃

类气体的稀释,其 CO₂ 含量很高(90%以上),为纯 CO₂ 气藏。

通过以上各种指标的综合分析,可以判断松辽盆地高含量的 CO₂ 皆为幔源成因,来自于上地幔的岩浆脱气。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

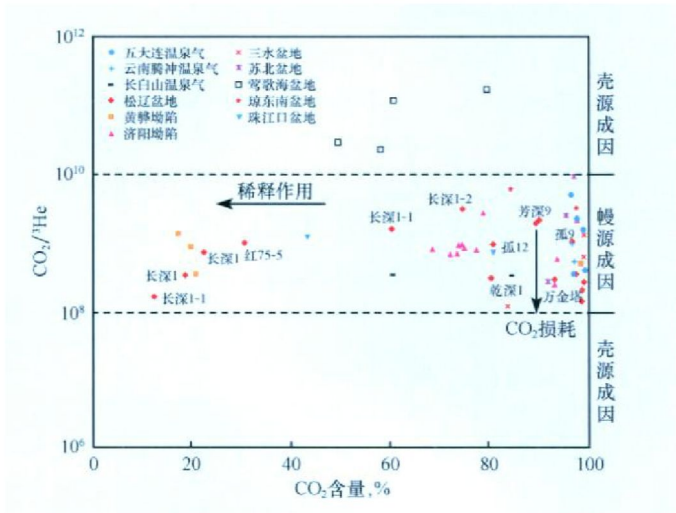


图 2 我国东部温泉气及高含 CO₂ 气藏中 CO₂/³He 比值与 CO₂ 含量的关系
Fig. 2 CO₂/³He ratio vs. CO₂ content in hot spring gas and high CO₂ content gas pools in eastern China

活动,为深部幔源 CO_2 气的向上运移和聚集提供了条件^[18-20]。

2 松辽盆地 CO_2 分布规律

2.1 含量分布特征

考虑到天然气中 CO_2 含量小于 5% 时对天然气勘探开发基本没有影响,这里只对 CO_2 含量大于 5% 的天然气进行研究。虽然 CO_2 含量介于 5%~10% 之间的有少部分为有机成因 CO_2 ,但基本不影响对幔源 CO_2 分布特征的统计认识。对 146 口含 CO_2 气井、185 个含 CO_2 气层段中 CO_2 含量的统计表明,松辽盆地含 CO_2 天然气中 CO_2 含量变化很大,从 5% 一直到 99% 都有分布。 CO_2 含量具有“两端元”的分布特征,绝大部分 CO_2 含量低于 30%,占总数的 62.70%, CO_2 含量在 40%~80% 之间的较少,而 CO_2 含量在 80% 以上的又有所增加,占总数的 21.08%。

2.2 层系分布特征

从分布层位上看,松辽盆地 CO_2 纵向上分布层位较多,主要集中在营城组地层中,其次在泉四段;在纵向上, CO_2 含量分布呈现 3 个高值部位,即青山口组二三段、泉四段和营城组^[21]。这一方面可能与储层发育条件有关,如松辽盆地营城组火山岩储层十分发育,孔渗性好,是深层天然气成藏和聚集的主要层位。另一方面可能与区域盖层的分布有关,在深层登二段和泉一、二段泥岩区域盖层的封盖下,高含 CO_2 气主要富集在营城组,登娄库组也有一定分布;在中浅层青山口组区域盖层的封盖下,高含 CO_2 天然气在泉四段砂岩地层中较为富集;在嫩江组区域盖层的封盖下,青山口二、三段和姚家组地层中也有一定高含量 CO_2 天然气的分布。

2.3 平面分布特征

根据现有 CO_2 发现井资料,研究认为松辽盆地 CO_2 在平面上具有以下分布特征:① CO_2 分布零散,在面上呈多个点状或狭长带状局限分布,展布方向与区域构造和断裂走向一致,明显受深大断裂的控制^[22];②从空间分布看,松辽盆地高含 CO_2 气虽然产出层位不同,但都具有一个共同的

特点,主要分布于基底大断裂、火山喷发岩体附近,反映了 CO_2 气与基底大断裂、火山岩体具有成因上的联系;③对深层和中浅层已发现 CO_2 井位叠合分析表明,在部分中浅层发现 CO_2 异常井的地区,其深层也发现了高含 CO_2 气井或层段,如长深 7 井营城组 CO_2 气藏在平面上就处于孤店中浅层 CO_2 气藏的下部,这可能说明深层和中浅层 CO_2 气藏具有相同的 CO_2 气源供应体,由于断裂和储层组合输导方式不同而聚集在不同的层位中^[21];④从已发现 CO_2 气藏的区带分布来看, CO_2 气藏主要分布在断陷边部的陡坡带和中央断隆带部位,分别受断陷的边界控陷断裂和中央断裂控制^[22,23]。以长岭断陷为例,长深 2、长深 4 井 CO_2 气藏受前神字井中央断裂控制,长深 7 和孤店气藏则分布在边界控陷断裂——孤西断裂和伏龙泉断裂的交叉部位,红岗 CO_2 气藏受反转基底断裂红岗断层控制。

3 幔源 CO_2 与烃类气耦合分布规律

松辽盆地深层天然气成因类型复杂,常规烃类气与幔源 CO_2 大量共存,气源基底大断裂是联系烃类气和 CO_2 气的桥梁和纽带,两者共享某些圈闭和储层等成藏要素而耦合混杂分布在一起,从而形成多个 CO_2 含量变化较大的含 CO_2 混合气藏。统计表明,在含 CO_2 天然气藏中 CO_2 和 CH_4 的含量具有明显的此消彼长的关系(图 3),这充

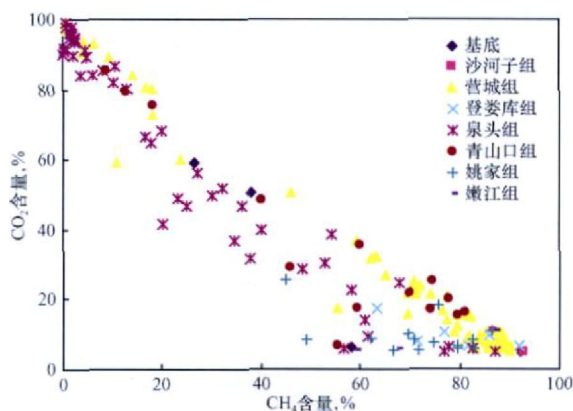


图3 松辽盆地含 CO_2 天然气藏中 CH_4 和 CO_2 含量的关系

Fig. 3 CH_4 vs. CO_2 content in CO_2 -bearing gas pools in the Songliao Basin

分说明了 CO_2 和 CH_4 气主要来源于不同的成因, 由于成藏条件不同, 两者以不同比例相互混合形成 CO_2 含量差异较大的多个含 CO_2 气藏。

研究表明, 基底大断裂和古火山通道是幔源 CO_2 在盆地中的主运聚通道^[23, 24]。基底大断裂与古火山通道的组合配置关系, 在很大程度上决定了火山岩体中 CO_2 和烃类气运聚成藏条件的好坏, 从而决定了火山岩气藏中烃类气和 CO_2 相对含量的大小。以松辽盆地北部昌德东地区为例进行说明。同属于昌德东地区的芳深 9- 芳深 701 井 CO_2 气藏(CO_2 含量为 80%~ 90%) 和芳深 6- 芳深 7 高含 CO_2 气藏(CO_2 含量为 15%~ 40%), 虽然处在两个不同的火山喷发岩体上, 但是两者均为火山岩储层, 均位于深大断裂附近, 生储盖条件和发育环境也比较类似, 为什么前者富 CO_2 气, 而后者烃类气含量高呢?

天然气地球化学和深部地质研究表明, 位于徐西大断裂附近的芳深 9- 芳深 701 井 CO_2 气藏和芳深 6- 芳深 7 高含 CO_2 气藏中的 CO_2 均来源于深部地幔, 而徐西基底大断裂则是幔源 CO_2 上运的通道^[24]。天然气成藏期综合研究表明, 松辽盆地深层烃类气主要在泉头- 嫩江期充注成藏, 幔源 CO_2 主要在喜马拉雅期充注, 晚于烃类气成藏^[22, 24, 25]。芳深 9 井区主控断层——徐西断裂倾角较缓, 火山岩体以中心式喷发为主, 有独立的火山通道, 气藏未被断层切割, 沙河子组生成的煤成气不能进入该火山岩体, 而喜山期深部高温高压且富含 CO_2 的玄武岩浆中分异出的热液流体顺着古火山通道裂缝进入该火山岩体中形成 CO_2 气藏聚集[图 4 中的(b)]。而芳深 6 井区主控断层——徐西断裂倾角较陡, 火山岩体受徐西断裂控制呈裂隙式喷发, 基底断裂与火山通道相互叠合, 一方面, 沙河子组烃源岩生成的煤成气能通过断层进入该火山岩体储层中, 另一方面喜山期岩浆热液活动也可使 CO_2 热液流体通过断裂或火山通道裂缝系统进入该火山岩体中, 而且由于运移距离长, 天然气组分分异大, 使得在芳深 6 井区聚集的 CO_2 量较少, 从而形成以烃类气为主的含 CO_2 混合气藏[图 4 中的(a)]。部分 CO_2 气通过断裂进入上部登娄库储层中, 如芳深 7 井 K_1d^2 段试气 CO_2 含量为 10.9% 左右。

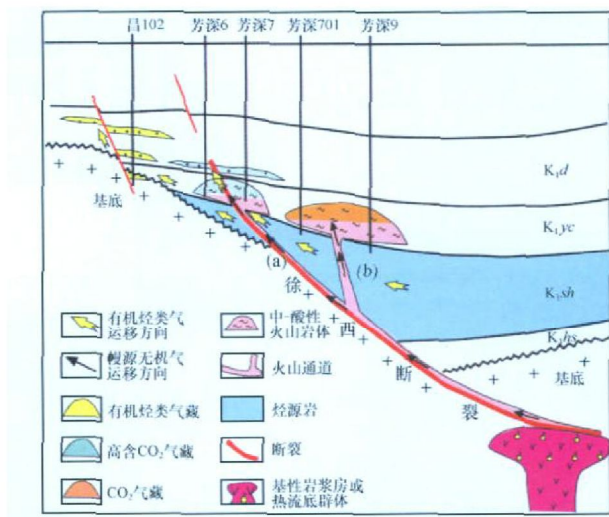


图 4 昌德东地区幔源 CO_2 和烃类气耦合成藏模式

Fig. 4 Pooling pattern of hybrid mantle-derived CO_2 and hydrocarbon gas in the eastern Changde area

4 结论

松辽盆地目前已发现多个高含 CO_2 气藏, 地球化学指标表明 CO_2 具有无机、有机和混合 3 种成因, 但以无机成因为主, 运用 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值判断表明高含量的 CO_2 皆为幔源成因。松辽盆地 CO_2 的分布虽然具有极大的不均匀性, 但也具有一定的规律性。 CO_2 含量具有“两端元”的分布特征; 受区域盖层和储层性质的控制, CO_2 在层位上主要富集于营城组和泉四段地层中; 在平面上 CO_2 呈多个点状或狭长带状局限分布, 明显受控于深大断裂, 与基底大断裂和火山岩体具有较好的成生关系。松辽盆地常规烃类气和幔源 CO_2 大量共存, 并因同受基底大断裂控制, 且共享某些圈闭和储层要素而耦合混杂分布在一起。幔源 CO_2 运聚通道类型在很大程度上决定了火山岩体中 CO_2 和烃类气运聚成藏条件的好坏, 从而决定了火山岩气藏中烃类气和 CO_2 相对含量的大小以及含 CO_2 天然气的赋存层位。

参 考 文 献

- 1 戴金星, 丁巍伟, 侯路, 等. 松辽盆地深层气勘探和研究[A]. 贾承造, 编. 松辽盆地深层天然气勘探研讨会报告集[C]. 北京: 石油工业出版社, 2004. 27~ 44

(下转第 107 页)

- 北京: 石油工业出版社, 1998
- 3 张莉, 岳乐平. 鄯善油田地应力、裂缝系统与油田开发[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 330~ 332
 - 4 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
 - 5 孙樯, 谢鸿森, 郭捷, 等. 构造应力与油气藏生成及分布[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 99~ 103
 - 6 张景和, 孙宗顺. 地应力、裂缝测试技术在石油勘探开发中的应用[M]. 石油工业出版社, 2001
 - 7 王端平, 时佃海, 李相远, 等. 低渗透砂岩油藏开发主要矛盾机理及合理井距分析[J]. 石油勘探与开发, 2002, 30(1): 87~ 89
 - 8 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998
 - 9 曾联波, 田崇鲁. 构造应力场与低渗透油田开发[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(3): 91~ 93
 - 10 毕研斌, 石红萍. 油井压裂效果分析方法[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4): 72~ 75
 - 11 张守仁, 万天丰, 陈建平. 川西坳陷孝泉- 新场地区须家河组二- 四段构造应力场模拟及裂缝发育区带预测[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 70~ 74
 - 12 胡宗全, 廖红伟, 刘人和. 分砂层地质曲率分析在裂缝预测中的应用[J]. 石油实验地质, 2002, 24(5): 450~ 454
 - 13 魏春光, 雷茂盛, 万天丰, 等. 古龙- 徐家围子地区营城组古构造应力场数值模拟——构造裂缝发育区带预测及对比研究[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 78~ 84, 105
 - 14 胡宗全. R/S 分析在储层垂向非均质性和裂缝评价中的应用[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 110~ 113
 - 15 王安辉, 宇淑颖, 张英魁, 等. 神经网络在低渗透油田试井解释中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 338~ 343
 - 16 尹志军, 彭仕宓, 高荣杰. 裂缝性油气储层定量综合评价——以辽河油田齐家古潜山基岩储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 240~ 244

(编辑 高 岩)

(上接第 101 页)

- 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 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
- 9 上官志冠, 孙令昌, 孙凤民, 等. 长白山天池火山区深部流体成分及稳定同位素组成[J]. 地质科学, 1996, 31(1): 54~ 64
- 10 许多, 朱岳年, 周瑶琪. 地幔源气体的 CO₂/³He 特征及其地质意义[J]. 地质地球化学, 1999, 27(4): 87~ 91
- 11 Marty B, Jambon A, Sano Y. Helium isotopes and CO₂ in volcanic gases of Japan[J]. Chemical Geology, 1989, 76: 25~ 40
- 12 Trull T. C-He systematics in hot spot xenoliths: implications for mantle carbon content and carbon recycling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 118: 43~ 64
- 13 Porcelli D R. Isotopic relationships of volatile and lithophile — trace elements in continental ultramafic xenoliths[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1992, 110: 528~ 538
- 14 Ballentine C J, Schoell M. Magmatic CO₂ in natural gases in the Permian basin, West Texas: identifying the regional source and filling history [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69(70): 59~ 63
- 15 戴春森, 宋岩, 孙岩. 中国东部二氧化碳气藏成因特点及分布规律[J]. 中国科学(B 辑), 1995, 25(7): 764~ 771
- 16 李先奇, 戴金星. 中国东部 CO₂ 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
- 17 杜建国. 中国天然气中高浓度二氧化碳的成因[J]. 天然气地球科学, 1991, 2(5): 203~ 208
- 18 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
- 19 郭占谦, 杨步增, 李星军, 等. 松辽盆地无机成因气藏模式[J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 30~ 33
- 20 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
- 21 郭占谦, 刘俊峰, 李贵顺. 对大庆油田深层气田气源的讨论[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 441~ 448
- 22 齐井顺. 松辽盆地北部深层火山岩天然气勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 590~ 596
- 23 薛海涛, 卢双舫, 付晓泰. 甲烷、二氧化碳和氮气在油相中溶解度的预测模型[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 444~ 449
- 24 张居和, 李景坤, 闫燕. 徐深 1 井深层天然气地球化学特征与各类气源岩的贡献[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 501~ 504
- 25 米敬奎, 张水昌, 陶士振, 等. 松辽盆地南部长岭断陷 CO₂ 成因与成藏期研究[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(4): 452~ 456

(编辑 董 立)