

# 济阳坳陷 CO<sub>2</sub> 气藏同位素地球化学特征及成因

林治家<sup>1,2</sup>, 陈衍景<sup>1,3</sup>, 黄智龙<sup>2</sup>, 申宝剑<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002;

3. 北京大学 造山带与地壳演化实验室, 北京 100871

**摘 要:** 济阳坳陷 CO<sub>2</sub> 气藏主要发育在高青-平南深断裂中南段和阳信次级凹陷西北缘及商店火山岩穹隆构造内。气藏中 CO<sub>2</sub> 气体浓度为 69%~97%,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值为 -5.67‰~-3.35‰, CH<sub>4</sub>/<sup>3</sup>He 值为 (1.01~5.65) × 10<sup>8</sup>, <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值为 (2.80~4.49) × 10<sup>-6</sup>, 即 R/Ra 为 2.00~3.21, <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值为 317~1791, CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He 值为 (0.25~2.61) × 10<sup>9</sup>。以上地球化学数据表明, 济阳坳陷气藏中 CO<sub>2</sub> 主要来源于地幔, 且幔源 CO<sub>2</sub> 在成藏过程中有损失, 或者有壳源 CO<sub>2</sub> 的加入, 特别是部分碳酸盐岩变质成因 CO<sub>2</sub> 的加入。在对 CO<sub>2</sub> 气来源定性分析的基础上, 还需要在各来源的定量区分和 CO<sub>2</sub> 气藏的成藏及其与岩浆活动的时空匹配关系等方面作进一步的研究。

**关 键 词:** 济阳坳陷; CO<sub>2</sub> 气藏; 同位素; 惰性气体; 成因

**中图分类号:** R618.130.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2006)03-0272-07

## The Isotopic Geochemical Characteristics and Genesis of the CO<sub>2</sub> Gas Pools in the Jiyang Depression

LIN Zhi-jia<sup>1,2</sup>, CHEN Yan-jing<sup>1,3</sup>, HUANG Zhi-long<sup>2</sup>, SHEN Bao-jian<sup>1,2</sup>

1. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. Department of Geology, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** The CO<sub>2</sub> gas pools of the Jiyang Depression are mainly located in the central and southern parts of the Gaoqing-Pingnan deep fault zone, Northwestern margin of the Yangxin subsidiary depression and the Shangdian volcanic dome. These CO<sub>2</sub> gas pools contain 69%–97% CO<sub>2</sub>. The geochemical analyses indicate that the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  values are varied from -5.67‰ to -3.35‰, the CH<sub>4</sub>/<sup>3</sup>He ratios are varied from 1.01 × 10<sup>8</sup> to 5.65 × 10<sup>8</sup>, the <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios are varied from 2.80 × 10<sup>-6</sup> to 4.49 × 10<sup>-6</sup> (i. e. R/Ra = 2–3.21), the <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratios are varied from 317 to 1791, and the CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He ratio are varied from 0.25 × 10<sup>9</sup> to 2.61 × 10<sup>9</sup> respectively. The data above consistently suggest that the CO<sub>2</sub> reserved in the Jiyang Depression was mainly sourced from the mantle, with possible influence of partly losing CO<sub>2</sub> in the upward migration process of the mantle sourced CO<sub>2</sub>, or possible mixing with small part of crust-sourced CO<sub>2</sub> gases such as the CO<sub>2</sub> produced from metamorphism of carbonate rocks. Besides the qualitative analysis of the CO<sub>2</sub> source, many other research works, such as the quantitative analysis of CO<sub>2</sub> sources, the forming process of CO<sub>2</sub> gas pools and its relationship to the magmatic activities, should be further undertaken.

**Key words:** Jiyang depression; CO<sub>2</sub> gas pool; isotope; noble gas; origin

我国东部构造强烈活动带发育有一系列中新生代裂谷盆地, 如松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地、三水盆地及莺歌海盆地等。这些盆地普遍发育富含 CO<sub>2</sub> 的 (CO<sub>2</sub> 含量 > 60%) 气藏 (田), 尤其是在渤海湾盆地和莺歌海盆地。前人曾对渤海湾盆地济阳坳陷 CO<sub>2</sub> 气藏的地球化学特征、分布规律、成因和成

藏模式做过比较详细的研究<sup>[1~7]</sup>。在碳和氦同位素分析的基础上, 多数学者<sup>[1,3,7]</sup>认为此类 CO<sub>2</sub> 气藏是以幔源无机气为主的壳幔混合成因, 但并未说明详细壳源机理。沈渭洲等<sup>[6]</sup>认为壳源 CO<sub>2</sub> 主要来自前古近系碳酸盐岩的热变质脱碳作用。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  是目前最常用的判别 CO<sub>2</sub> 成因与来源的指标, 由于影响

收稿日期: 2005-12-19 收到, 2006-02-27 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40425006, 40352003); 中国科学院地球化学研究所百人计划资助项目

第一作者简介: 林治家 (1980—), 男, 硕士研究生, 专业方向: 油气地球化学。E-mail: lin-zhijia@163.com.

$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  的因素很多,因此非烃气藏的成因解释较多,争论较大<sup>[8]</sup>。

本文总结了济阳凹陷  $\text{CO}_2$  气藏的同位素和稀有气体地球化学研究成果,探讨了成藏物质来源。

## 1 气藏地质和组分特征

三叠纪一早侏罗世,华北板块与扬子板块碰撞<sup>[9]</sup>,同时,沿蒙古-鄂霍茨克缝合带与西伯利亚板块碰撞<sup>[10]</sup>,强烈的陆陆碰撞作用导致华北板块内部破碎、走滑和向东蠕散、逃逸。其中,沿郯庐断裂发生左行走滑,鲁东地块向东逃逸,在郯庐断裂两侧形成了中晚侏罗世以来的走滑拉分(pull-apart)盆地,

如莱阳盆地、济阳盆地和合肥盆地等。

济阳拗陷北部和西北部为埕宁隆起,西南为临清拗陷,南部以齐河-广饶深断裂与鲁西隆起相隔,东界为郯庐大断裂(图1)。济阳拗陷最古老的基底岩层是太古界泰山群,缺失元古界;下古生界以浅海碳酸盐岩沉积为主,上古生界为陆相含煤建造,缺失上奥陶统到下石炭统之间的地层;中生界缺失三叠系,侏罗系和白垩系是一套火山-沉积地层;古近系为河湖相砾岩、砂岩、泥岩,局部发育礁-滩白云岩和膏岩层等,拗陷中部断裂两侧有大面积玄武岩类分布;新近系超覆不整合在所有老地层之上;第四系泥质、砂质沉积物互层。

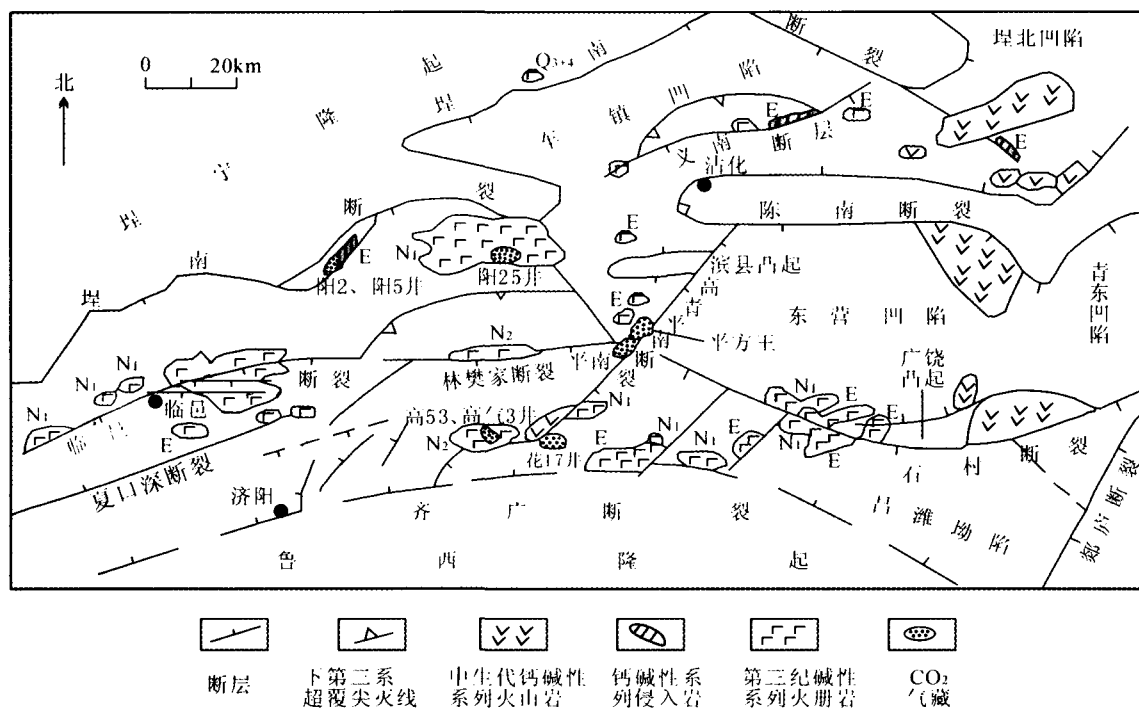


图1 济阳拗陷断层、火成岩及  $\text{CO}_2$  气藏分布图

Fig. 1 The distribution of faults, igneous rocks and  $\text{CO}_2$  gas pools in Jiyang depression

拗陷内发育不同规模的断裂 1500 多条,多为犁式断层,呈箕状断陷,显示为块断运动的产物,使济阳拗陷由一系列凹凸相间的次级凸起和凹陷构造组成。晚中生代至新近纪,火山活动活跃,发育大量碱性、钙碱性系列火山岩。

济阳拗陷内的  $\text{CO}_2$  气藏主要发育在高青-平南深断裂中南段和阳信次级凹陷西北缘及商店火山岩穹隆构造内,主要有平方王气顶、平南潜山、花沟、高青、阳 2 及阳 5 井、阳 25 井  $\text{CO}_2$  气藏(图 1)。各气藏或沿断裂呈链状分布,或分布在断裂交汇地段,或

位于火山岩穹隆地带,均与新生代碱性系列火山岩在空间上有密切关系。

如表 1 所示,气藏中  $\text{CO}_2$  含量为 68.85%~96.99%,变化较大,总体上呈两个集合,且距气藏越深  $\text{CO}_2$  含量越高(图 2)。气藏中  $\text{CH}_4$  含量为 0.44%~26.43%, $\text{N}_2$  为 0.06%~5.43%,He 为  $(84\sim847)\times 10^{-6}$ ,含量变化均较大;其他烃类组分含量较低; $\text{CO}_2$  与  $\text{CH}_4$  含量呈负相关,与 He 含量关系不明显(图 3)。

表 1 济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 气藏气体组分特征  
Table 1 The composition of gases in CO<sub>2</sub> gas pools in Jiyang depression

地区	井号	地层	井段	He( $\times 10^{-6}$ )	N <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	C <sub>1+</sub> (%)	资料来源
平方王	平 12	ES <sub>1</sub>	1470.5~1498.0	216	0.63	74.20	21.63	3.39	文献[7]
	平 4	ES <sub>1</sub>	1459.4~1474.5	237	0.46	75.33	20.89	3.27	
	平 9-3	ES <sub>1</sub>	1462.6~1489.2	277	0.25	73.87	22.46	3.36	
	平 13-2	ES <sub>1</sub>	1453.6~1483.2	242	1.07	68.85	26.43	3.54	
	平 13-4	ES <sub>1</sub>	1450.8~1486.4	238	1.21	74.92	19.04	4.36	
	平 14-3	ES <sub>1</sub>	1467.0~1484.6	222	0.61	77.93	18.17	3.15	
平南	滨 4-10-4	ES <sub>1</sub>	1441.0~1469.0		0.93	71.90	23.78	3.40	文献[2]
	滨 4-13-2	ES <sub>1</sub>	1453.0~1455.0		0.85	72.68	22.71	3.77	
	滨 4-6-6	ES <sub>1</sub>	1469.7~1481.6	281	0.33	72.50	23.52	3.53	
	滨古 14	( )	2404.0~2460.0		0.46	96.99	0.16	1.39	
高青	高气 3	Ng	833.40~834.80		5.43	94.36	0.14		
花沟	花 17(1)	ES <sub>3</sub>	1965.1~1980.0	358	1.60	93.78	3.89	0.73	文献[2]
	花 17(2)		2000.0~2009.6	847	2.06	93.54	3.86	1.46	
平方王	平 12-61	ES <sub>1</sub>	1452.4~1487.6	84	0.38	79.17	17.13	3.19	
阳信	阳 25	ES <sub>1</sub>	2794.0~2805.0		3.06	96.50	0.44		

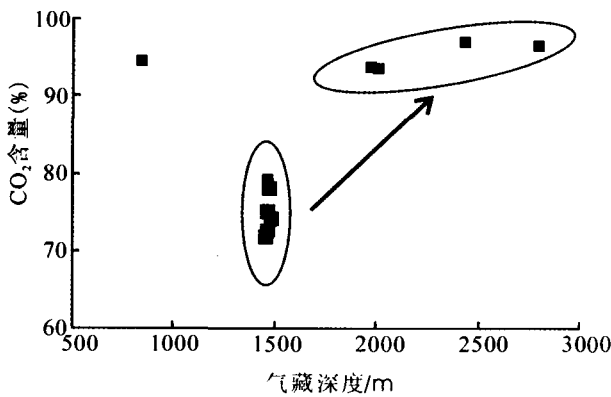


图 2 济阳拗陷气藏深度与 CO<sub>2</sub> 含量关系

Fig. 2 A plot showing the depth of gas pools vs. the CO<sub>2</sub> contents of the gas pools in the Jiyang depression

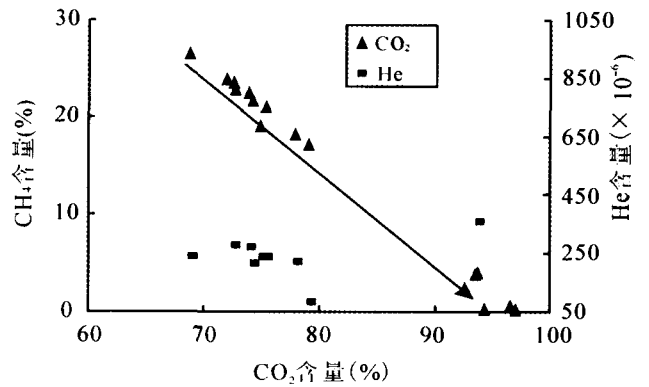


图 3 济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 含量与 CH<sub>4</sub>、He 含量关系

Fig. 3 A plot showing the relationship among contents of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and He of the gas pools in the Jiyang depression

## 2 气藏的同位素地球化学特征

### 2.1 碳同位素

CO<sub>2</sub> 可由多种方式产生, 各类碳储库均可作为气藏提供 CO<sub>2</sub>; 在各类碳储库中<sup>[11~13]</sup> 无机碳储库的  $\delta^{13}C$  高于有机碳储库; 无机碳储库中以海相碳酸盐的  $\delta^{13}C$  最高(0.5‰), 地幔或岩浆岩的  $\delta^{13}C$  约为 -5‰, 大气 CO<sub>2</sub> 的  $\delta^{13}C$  约为 -8‰。总的来说, 无机成因 CO<sub>2</sub> 的  $\delta^{13}C > -8‰$ , 有机成因 CO<sub>2</sub> 的  $\delta^{13}C < -10‰$ <sup>[1]</sup>。研究表明, 济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 气藏中的  $\delta^{13}C_{CO_2}$  值为 -5.67‰ ~ -3.35‰, 主频率段为 -4.76‰ ~ -4.32‰ (表 2), 指示 CO<sub>2</sub> 以无机成因为主, 最大可能来自地幔或岩浆活动, 不排除来自碳酸盐岩地层受热变质脱气而产生的 CO<sub>2</sub> 混入<sup>[7]</sup>。

研究表明, 无机成因甲烷的  $\delta^{13}C > -30‰$ , 多数有机成因的甲烷的  $\delta^{13}C < -30‰$ <sup>[1]</sup>。Zheng 等<sup>[7]</sup> 指出, 济阳拗陷气藏中 CH<sub>4</sub> 的  $\delta^{13}C$  为 -54.39‰ ~ -35.00‰, 主频率段为 -54.39‰ ~ -51.55‰, 显示以有机成因为主。此外, 他们报道的其他烃类 (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ~ C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) 的碳同位素组成均显示有机成因特点, 指示部分 CO<sub>2</sub> 可能来自有机质的氧化<sup>[7]</sup>。

### 2.2 氦同位素

地球上不同氦储库的 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值<sup>[14]</sup> 为: 大气氦 (Ra) 1.4 × 10<sup>-6</sup>, 壳源氦 2 × 10<sup>-8</sup>, 上地幔源氦 1.1 × 10<sup>-5</sup>。济阳拗陷气藏中 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值为 (2.80 ~ 4.49) × 10<sup>-6</sup>, 主频率段为 (3.55 ~ 4.49) × 10<sup>-6</sup>, 其 R/Ra 为 2.00 ~ 3.21, 介于壳源 (1.43 × 10<sup>-2</sup>) 与幔

表 2 济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 气田气体同位素特征Table 2 The gas isotope characteristics of CO<sub>2</sub> gas pools in Jiyang depression

地区	井号	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}, \text{PDB})$		$^3\text{He}/^4\text{He}$ ( $\times 10^{-6}$ )	R/Ra	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	幔源 He (%)	$\text{CH}_4/^3\text{He}$ ( $\times 10^8$ )	$\text{CO}_2/^3\text{He}$ ( $\times 10^9$ )	$\text{CO}_2/^3\text{He}_m$ ( $\times 10^9$ )	资料来源
		CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>								
平方王	P12	-51.87	-4.36	$3.85 \pm 0.11$	2.75	1051	27.40	2.60	0.89	3.26	文献[7]
	P4	-51.67	-4.52	$3.85 \pm 0.11$	2.75	1758	27.40	2.29	0.83	3.01	
	P9-3	-51.58	-4.47	$3.87 \pm 0.11$	2.76	317	27.54	2.10	0.69	2.50	
	P13-2	-52.69	-4.74	$3.59 \pm 0.11$	2.56	1220	25.54	3.04	0.79	3.10	
	P13-4	-51.74	-4.43	$3.55 \pm 0.11$	2.54	1722	25.25	2.25	0.89	3.51	
平南	P14-3	-51.82	-4.32	$4.47 \pm 0.11$	3.19	1378	31.83	1.83	0.79	2.47	文献[3]
	B4-10-4	-50.19	-5.67								
	B4-13-2	-52.37	-5.08			600					
	B4-6-6	-51.67	-4.57	$3.87 \pm 0.11$	2.76	1791	27.54	2.16	0.67	2.42	
	BG14	-47.50	-4.76	$2.80 \pm 0.11$	2.00		19.89				
高青	GQ3	-35.00	-4.41								
花沟	花 17(1)	-54.39	-3.41	$4.45 \pm 0.12$	3.18	770	31.69	2.44	0.59	1.86	文献[2]
	花 17(2)	-53.98	-3.35	$4.49 \pm 0.12$	3.18	1054	31.97	1.01	0.25	0.769	
平方王	平 12-61	-51.80	-4.50	$3.61 \pm 0.10$	2.58	1478	25.68	5.65	2.61	10.2	
阳信	阳 25	-42.51	-4.38	$4.12 \pm 0.12$	2.94		29.33				

源(7.86)氦之间,也介于地幔与大气氦之间(高于后者)。由于工业气井中的大气氦含量通常可以忽略不计<sup>[14]</sup>,因此可以认为,济阳拗陷气藏中的氦以幔源为主,受壳源氦的影响。

此外,同一口井中(如花 17 井)深部气层的氦含量和<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值高于浅部气层,说明运移过程对深部来源气体的含量和同位素组成有一定影响。

据赖勇等<sup>[15]</sup>的研究,6 件五大连池和 3 件宽甸新生代玄武岩中地幔包体的 R/Ra 值分别为 4.53~5.49 和 7.30~7.52,显示了中国东部新生代地幔的不均一性。这与济阳拗陷气藏的氦同位素组成接近,略高于济阳拗陷气藏的 R/Ra,显示济阳气藏中的氦主要来自地幔,并受到壳源氦的混染。

### 2.3 氦同位素

天然气中的氦主要由大气氦和放射性成因氦组成,并受到幔源氦的影响<sup>[14]</sup>。大气氦的<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值为 295.5<sup>[15]</sup>,就壳源氦而言,其<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值受放射成因<sup>40</sup>Ar 积累的影响,气源岩的年龄越老,<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值越大,如古近系-新近系天然气(指自生自储)<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值约为 400,二叠系增至 1000,震旦系达 7000<sup>[14]</sup>。济阳拗陷的 CO<sub>2</sub> 气藏与新生代地层和火山岩有密切的成因和空间联系,成藏时间较晚<sup>[1]</sup>,因此其<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 表征值应在 400 左右。济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 气藏的实测<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值为 317~1791,变化较大,多值为 770~1791,高于大气<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 表征值 295.5,与五大连池火山岩地幔包体中的

<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值(557.2~4005.6, n=7)<sup>[16]</sup>接近(略低)。以上种种特征都显示成藏气体主要来自地幔,并略微受到低<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值的大气氦或壳源氦的混染。此外,在同一气藏不同深度的气层中,如花 17 井和阳 25 井气藏,深部气层的<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值高于浅部气层同样也说明有大气氦的混入,并降低了浅层气藏的<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值。

### 2.4 碳、氮、氩同位素

研究表明,多来源混合成因是多数气藏的特征<sup>[11]</sup>,尤其是含油气的伸展盆地,既存在有机质转变而来的 CO<sub>2</sub>,又有地幔/岩浆释放的无机 CO<sub>2</sub>,还有碳酸盐岩变质脱气释放的 CO<sub>2</sub>,不同来源的 CO<sub>2</sub> 混合到同一盆地,造成厘定气藏成因的困难。借鉴前人的研究<sup>[17~21]</sup>,我们借助 C-He-Ar 同位素组合来探讨济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 气藏的成因。

由于壳源<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值低于大气,更低于地幔源,且地幔碳储库的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值近于-5‰,地壳中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -7\text{‰}$ <sup>[22]</sup>,大气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -8\text{‰}$ ,有机质转变的 CO<sub>2</sub> 的 $\delta^{13}\text{C} < -10\text{‰}$ ,因此,济阳拗陷气藏较高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值和<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He(图 4),应指示成藏气体主要来源于地幔;图 4 显示的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 呈正相关关系,应指示幔源气体与来自地壳或大气圈的 CO<sub>2</sub>、He 的二元混合作用。此外,花沟气藏 2 个样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值明显偏高,且没有显示与<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 之间的相关关系(图 4),表明花沟气藏的部分 CO<sub>2</sub> 来自碳酸盐地层的分解。

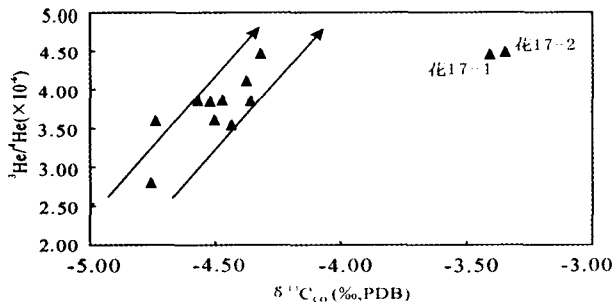
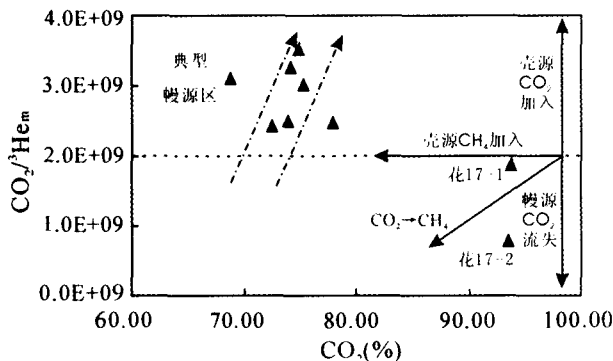


图4 济阳拗陷<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He与δ<sup>13</sup>C<sub>CO<sub>2</sub></sub>关系图

Fig. 4 A plot showing the ratios of <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He vs. δ<sup>13</sup>C<sub>CO<sub>2</sub></sub> values of the gas pools in the Jiyang depression

典型上地幔来源气 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He 值为 (2~7) × 10<sup>9</sup>[23,24], 壳源气 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He 值变化范围较大(约 10<sup>8</sup>~10<sup>14</sup>[25,26])。在含油气的陆内盆地, 壳源 CO<sub>2</sub> 加入可减少气藏中幔源 CO<sub>2</sub> 的相对比例, 幔源 CO<sub>2</sub> 转变成 CH<sub>4</sub> 或通过反应形成碳酸盐矿物, 会使幔源 CO<sub>2</sub> 丢失, 这些过程都会引起 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He 值发生变化(图5)[17]。因此, CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He<sub>m</sub> 与 CO<sub>2</sub> 含量的协变关系可以反映幔源气藏中 CO<sub>2</sub> 来源及其在成藏过程中的变化, 其中<sup>3</sup>He<sub>m</sub> = He × He<sub>m</sub> × R<sub>m</sub> / (R<sub>m</sub> + 1), He<sub>m</sub>(%) = 100(R<sub>s</sub> - R<sub>c</sub>) / (R<sub>m</sub> - R<sub>c</sub>), R<sub>c</sub> 为地壳氮 R/Ra 值, R<sub>m</sub> 为上地幔氮 R/Ra 值, R<sub>s</sub> 为样品 R/Ra 值, He 为气藏中氮含量, He<sub>m</sub> 表示气藏中幔源氮的比例(%), <sup>3</sup>He<sub>m</sub> 表示幔源氮中的<sup>3</sup>He 含量。

如图5所示, 绝大多数取样井的 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He<sub>m</sub> 值都略高于 2.0 × 10<sup>9</sup>, CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He<sub>m</sub> 值与 CO<sub>2</sub> 含量有一定的正相关, 说明济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 气藏具幔源特征, 且在成藏过程中有部分壳源 CO<sub>2</sub> 气体加入。然而, 花17-1 和花17-2 井十分特殊, 显示幔源 CO<sub>2</sub> 丢失或壳源 CO<sub>2</sub> 加入而导致 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He<sub>m</sub> 值偏低。



底图据文献[17]

图5 济阳拗陷 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He<sub>m</sub> 与 CO<sub>2</sub> 含量关系图

Fig. 5 Relationship of the CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He<sub>m</sub> ratios and the CO<sub>2</sub> contents of the gas pools in the Jiyang depression

美国萨克拉门托盆地和德国艾费尔地区的研究表明[27,28], 当天然气中的 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He 与<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 呈显著相关时, CO<sub>2</sub> 具地壳和地幔双重来源, 且幔源 CO<sub>2</sub> 在运移、聚集过程中没有损失; 当 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He 值与<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值之间的相关性不明显时, 则不能用简单的壳幔混合模式来解释。图6显示, CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He 与<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 之间的相关性微弱, 说明济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 有一定程度的壳幔混合, 并在运移、聚集过程中发生了变化。

图4、图5和图6均显示花17-1 和花17-2 井样品与众不同, 而花沟地区 CO<sub>2</sub> 气藏的平均 He 含量最高, 达 (358~847) × 10<sup>-6</sup>, 高于绝大多数气藏, 后者 He 含量一般小于 300 × 10<sup>-6</sup>[1]。文中的研究数据还显示花沟地区 CO<sub>2</sub> 气藏的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值和 δ<sup>13</sup>C<sub>CO<sub>2</sub></sub> 值是最高的。这些特征都说明花沟地区气藏有特殊的气体来源和成藏过程, 有待进一步研究。

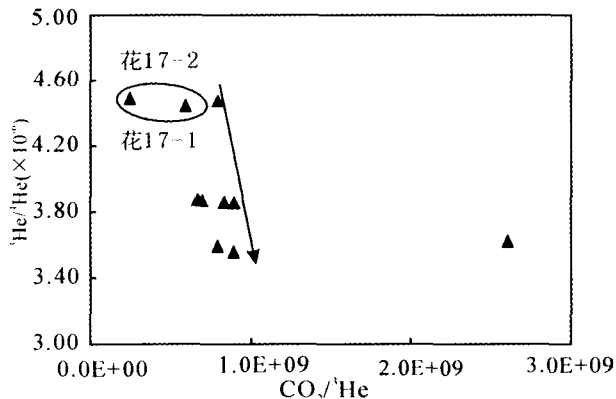


图6 济阳拗陷<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He与CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He关系图

Fig. 6 The relationship of the <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He and CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He ratios of the gas pools in the Jiyang depression

幔源流体中 CH<sub>4</sub>/<sup>3</sup>He 值一般为 10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup>[29], 高者可达 10<sup>8</sup> 数量级, 受壳源混染者呈明显高值, 甚至达 10<sup>11</sup>~10<sup>12</sup> 数量级, 其原因与 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He 值的变化相同。在图7中, 除花17-1 和花17-2 井外, CH<sub>4</sub>/<sup>3</sup>He 值随<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值减少而增加, 说明本区气藏有明显的壳源混染特征。

### 3 结论

济阳拗陷内非烃类气藏中气体具多来源的特征, 但 CO<sub>2</sub> 主体是无机成因, 并主要来自地幔, 少量来自碳酸盐岩热变质作用; 成藏过程中幔源 CO<sub>2</sub> 通过转变为 CH<sub>4</sub> 或碳酸盐岩而丢失了部分 CO<sub>2</sub>, 壳源

CO<sub>2</sub> 和其他烃类加入气藏。花沟地区的气体地球化学特征与众不同,可能有碳酸盐地层变质脱气产生的 CO<sub>2</sub> 的混入。此外,为促进对 CO<sub>2</sub> 气藏的开发,应加强 CO<sub>2</sub> 气体各来源的定量区分、气藏的成藏年代、成藏过程及其与岩浆活动的时空匹配关系的研究。

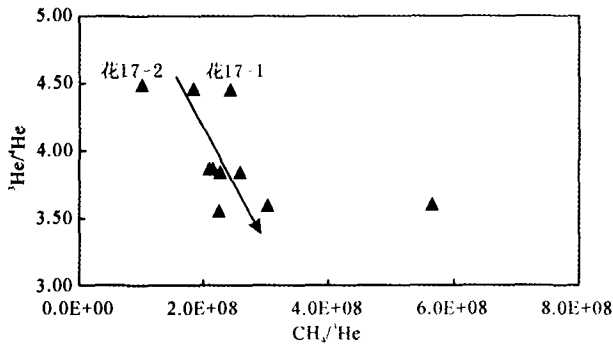


图7 济阳拗陷 CH<sub>4</sub>/<sup>3</sup>He 与 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 关系图

Fig. 7 The relationship of the CH<sub>4</sub>/<sup>3</sup>He ratios and <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios of the gas pools in the Jiyang depression

#### 参考文献 (References):

- [1] 戴金星, 宋岩, 戴春森, 陈安福, 孙明良, 廖永胜. 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. 131-150.  
Dai Jinxing, Song Yan, Dai Chunsen, Chen Anfu, Sun Mingliang, Liao Yongsheng. Inorganic gases and the formative conditions of the inorganic gas pools in eastern China[M]. Beijing: Science Press, 1995. 131-150. (in Chinese)
- [2] 郑乐平, 冯祖钧, 徐寿根, 廖永胜. 起源于地球深部的济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 气藏[J]. 科学通报, 1995, 40(24): 2264-2266.  
Zheng Leping, Feng Zujun, Xu Shougen, Liao Yongsheng. CO<sub>2</sub> gas pools originated from the earth interior in Jiyang depression [J]. Chinese Sci. Bull., 1995, 40(24): 2264-2266. (in Chinese)
- [3] 郑乐平, 冯祖钧, 廖永胜, 徐寿根. 济阳拗陷非烃类气藏 (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, Xu Shougen. Genesis of the non-hydrocarbon gas reservoir (CO<sub>2</sub>, He) in Jiyang depression [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 1997, 33(1): 76-81. (in Chinese with English abstract)
- [4] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民, 范亮星. 济阳拗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, Fan Liangxing. The origin of carbon dioxide gas fields in Jiyang Basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1996, 32(6): 712-718. (in Chinese with English abstract)
- [5] 廖永胜, 李钜源, 李祥臣, 徐寿根. 应用碳、氮、氩同位素探讨济阳拗陷二氧化碳气成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 351-353.  
Liao Yongsheng, Li Juyuan, Li Xiangchen, Xu Shougen. 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. (in Chinese with English abstract)
- [6] 沈渭洲, 徐士进, 王汝成, 陆建军. 济阳拗陷高含 CO<sub>2</sub> 气藏的同位素特征和成因探讨[J]. 南京大学学报(自然科学), 1998, 34(3): 308-313.  
Shen Weizhou, Xu Shijin, Wang Rucheng, Lu Jianjun. The study on the isotopic characters and the origin of the CO<sub>2</sub>-rich gas deposits of Jiyang depression [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 1998, 34(3): 308-313. (in Chinese with English abstract)
- [7] Zheng L P, Wang S J, Liao Y S, Feng Z J. CO<sub>2</sub> gas pools in Jiyang sag, China [J]. Applied Geochemistry, 2001, 16: 1033-1039.
- [8] 陶明信, 徐永昌, 韩文功, 高波, 马锦龙, 王万春. 中国东部幔源流体的活动特征与成藏效应[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(3): 265-270.  
Tao Mingxin, Xu Yongchang, Han Wengong, Gao Bo, Ma Jinlong, Wang Wanchun. Active characteristics and accumulative effects of mantle-derived fluids in eastern China [J]. Geotectonic et Metallogenia, 2001, 25(3): 265-270. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈衍景, 陈华勇, Zaw K, Pirajno F, 张增杰. 中国陆区大规模成矿的地球动力学: 以矽卡岩型金矿为例[J]. 地学前缘, 2004, 11: 57-83.  
Chen Yanjing, Chen Huayong, Zaw K, Pirajno F, Zhang Zengjie. The geodynamic setting of large-scale metallogenesis in mainland China: Exemplified by skarn type gold deposits [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11: 57-83. (in Chinese with English abstract)
- [10] Zorin Y A, Zorina L D, Spiridinov A M, Rutshtein I G. Geodynamic setting of gold deposits in eastern and central Trans-Baikal (Chita region, Russia) [J]. Ore Geology Reviews, 2001, 17: 215-232.
- [11] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 193-217.  
Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. Stable isotope geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000. 193-217. (in Chinese)
- [12] 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno F. CMF 模式的排他性证据和造山型银矿的实例: 铁炉坪银矿同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 551-568.  
Chen Yanjing, Sui Yinghui, Pirajno F. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 551-568. (in Chinese with English abstract)

- [13] 黄智龙. 幔源岩浆活动过程中的去气作用——以云南老王寨金矿煌斑岩为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(1): 1—5.  
Huang Zhilong. Degassing in the process of mantle-derived magmatism: As exemplified by lamprophyres in Laowangzhai gold deposit, Yunnan Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 20(1): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 陶明信, 孙明良, 杜建国. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 1—231.  
Xu Yongchang, Shen Ping, Liu Wenhui, Tao Mingxin, Sun Mingliang, Du Jianguo. Noble gas geochemistry in natural gases [M]. Beijing: Science Press, 1998. 1—231. (in Chinese)
- [15] Fisher D E. Implications of terrestrial <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar for atmospheric and mantle evolutionary models [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1982, 29: 242—251.
- [16] 赖勇, 刘玉琳, 黄宝玲, 陈衍景. 五大连池和宽甸地幔包体的惰性气体同位素特征——MORB型地幔和交代型地幔[J]. 岩石学报, 2005, 21: 1373—1381.  
Lai Yong, Liu Yulin, Huang Baoling, Chen Yanjing. The characteristics of noble gases in mantle-derived xenoliths in Wudalianchi and Kuandian, NE China; MORB-like mantle and metasomated mantle[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21: 1373—1381. (in Chinese with English abstract)
- [17] Lollar B S, Ballentine C J, O'Nions R K. The fate of mantle-derived carbon in a continental sedimentary basin: Integration of C/He relationships and stable isotope signatures [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1997, 61(11): 2295—2307
- [18] Wycherley H, Fleet A, Shwa H. Some observations on the origin of large volumes of carbon dioxide accumulations in sedimentary basins [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16: 489—494
- [19] Ballentine C J, Schoell M, Coleman D, Cain B A. Magmatic CO<sub>2</sub> 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.
- [20] Brauer K, Kampf H, Niedermann S, Strauch G, Weise S M. Evidence for a nitrogen flux directly derived from the European subcontinental mantle in the western Eger Rift, Central European [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2004, 68(23): 4935—4947.
- [21] Cheng H H, Parnell J, Gong Z S, Li S T. Observation of catastrophic degassing from mantle-crust in Yinggehai basin, South China Sea [J]. Journal of China University of Geosciences, 2004, 15(3): 295—605.
- [22] Faure G. Principles of isotope geology (2nd Edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, 1986. 1—589.
- [23] Marty B, Jambon A. C/<sup>3</sup>He in volatile fluxes from the solid Earth: Implications for carbon geodynamics [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1987, 83: 16—26.
- [24] Trull T, Nadeau S, Pineau F, Plove M, Javoy M. C-He systematics in hotspot xenoliths: Implications for mantle carbon contents and carbon recycling [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1993, 118: 43—64.
- [25] O'Nions R K, Oxburgh E R. Helium, volatile fluxes and the development of continental crust [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1988, 90: 331—347.
- [26] Hulston J R, Hilton D R, Kaplan I R. Helium and carbon isotope systematics of natural gases from Taranaki Basin, New Zealand [J]. Applied Geochemistry, 2001, 16: 419—436.
- [27] Poreda R J, Jenden P D, Kaplan I R, Craig H. Mantle helium in Sacramento basin natural gas wells [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1986, 50: 2847—2853.
- [28] Griesshaber E, O'Nions R K, Oxburgh E R. Helium and carbon isotope systematics in crustal fluids from the Eifel, the Rhine Graben and Black Forest, F. R. G [J]. Chem. Geol., 1992, 99: 213—235.
- [29] Fiebig J, Chiodini G, Caliro S, Rizzo A, Spangenberg J, Johannes C Hunziker. Chemical and isotopic equilibrium between CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in fumarolic gas discharges: Generation of CH<sub>4</sub> in arc magmatic-hydrothermal systems [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2004, 68(10): 2321—2334.