

# 济阳坳陷高青-平南断裂带两类气藏的地球化学特征及成因

申宝剑<sup>1,2</sup>, 黄智龙<sup>1</sup>, 刘洪文<sup>1</sup>, 许成<sup>1</sup>,  
林治家<sup>2</sup>, 严再飞<sup>1,2</sup>, 陈觅<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

**【摘要】** 根据对高青-平南断裂带两侧的气藏进行气体组分及碳同位素地球化学分析发现: 两侧分布的是不同的气体类型, 南侧主要是以甲烷为主的烃类气藏, 其  $\text{CH}_4$  含量在 88.83%~99.26% 之间, 碳同位素值为 -55.17‰~-35.00‰ 之间, 结合该地区的地质特征认为该区  $\text{CH}_4$  气藏为混合气藏, 其来源主要有 3 种: 油型伴生气、幔源岩浆脱气以及  $\text{CO}_2$  还原气。而北侧主要是以  $\text{CO}_2$  为主的非烃类气藏, 其  $\text{CO}_2$  含量在 60.72%~99.99% 之间, 碳同位素值为: 9.8‰~3.41‰,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值主要在  $4.45 \times 10^{-6}$ ~ $6.35 \times 10^{-6}$  之间, 主要是幔源-岩石化学成因的混合气。通过分析两侧气体组分及碳同位素特征, 初步判断高青-平南断裂带两侧烃类气体形成于同一时期, 主要可能是早期强烈的岩浆喷发后形成, 而高青地区的二氧化碳气藏主要是由后期的岩浆脱气形成。两类气藏组分差异的最主要原因是由后期的岩浆活动影响造成。

**【关键词】** 碳同位素; 岩浆活动; 幔源还原; 济阳坳陷  
中图分类号: TE122.1<sup>+</sup>11 文献标识码: A  
文章编号: 1001-6872(2007)03-0081-07

## 0 引言

花沟、高青、平房王气田区处于济阳坳陷东营凹陷西南部的青城凸起一带(图 1), 东邻博兴洼陷, 北接里则镇洼陷, 南侧为鲁西隆起区, 西邻古潜山披覆

构造带。青城凸起为新近系披覆的基底凸起, 基底由中-古生界组成, 其中古生界包括上古生界煤系和下古生界碳酸盐岩地层。高青-平南断裂带位于济阳坳陷东营凹陷西部, 北东走向为主, 延伸 60 km, 由南向北大体可以分为 3 段: 高青段, 近东西走向, 断面南倾, 长约 34 km; 平南段, 北北东走向, 断面东

收稿日期: 2007-03-30; 改回日期: 2007-07-31

基金项目: 济阳坳陷火成岩地球化学、成因及其与天然气成藏的关系研究(04-12-01 06-12-01)

作者简介: 申宝剑, 男, 29 岁, 博士生, 地球化学专业, 研究方向: 深部流体与天然气成藏。E-mail: shenbaoj@163.com.

南倾,长约 14 km;滨南段,北东走向,断面东南倾,长约 12 km。各段的活动时间不一致,高青段始于新生代早期,一直活动到上新世末,而平南和滨南段始于中侏罗纪,在上新世早期停止活动。根据断层向下延伸和滑脱深度,高青-平南断裂为切穿盖层达基底的基底断裂,断层切割深度较大,可以和深断裂直接沟通起到沟通岩浆房和气源的作用从而控制二级构造单元的发育<sup>[1]</sup>。并通过广泛发育的沉积断层与各种各样的圈闭联系起来,从而使岩浆中的挥发份沿这些断裂运移至浅部。

高青、花沟、平南地区天然气的聚集与深大断裂

带的展布关系密切,其分布明显地受控于区域性大断裂,断裂的作用主要是控制气藏成带出现和形成断层遮挡的气藏。以高青-平南断裂为界,两侧分布有不同类型的气藏,南侧主要为烃类气藏(图 1),而北侧主要是以 CO<sub>2</sub> 为主的非烃类气藏。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,初步认为 CO<sub>2</sub> 具有幔源特征<sup>[2]</sup>。对于烃类气体则希望对烃类甲烷气的形成进行分析,并分析两侧的气体组分及碳同位素组成,结合地质特征探讨两侧气体的成因差别及形成这种差异的原因。

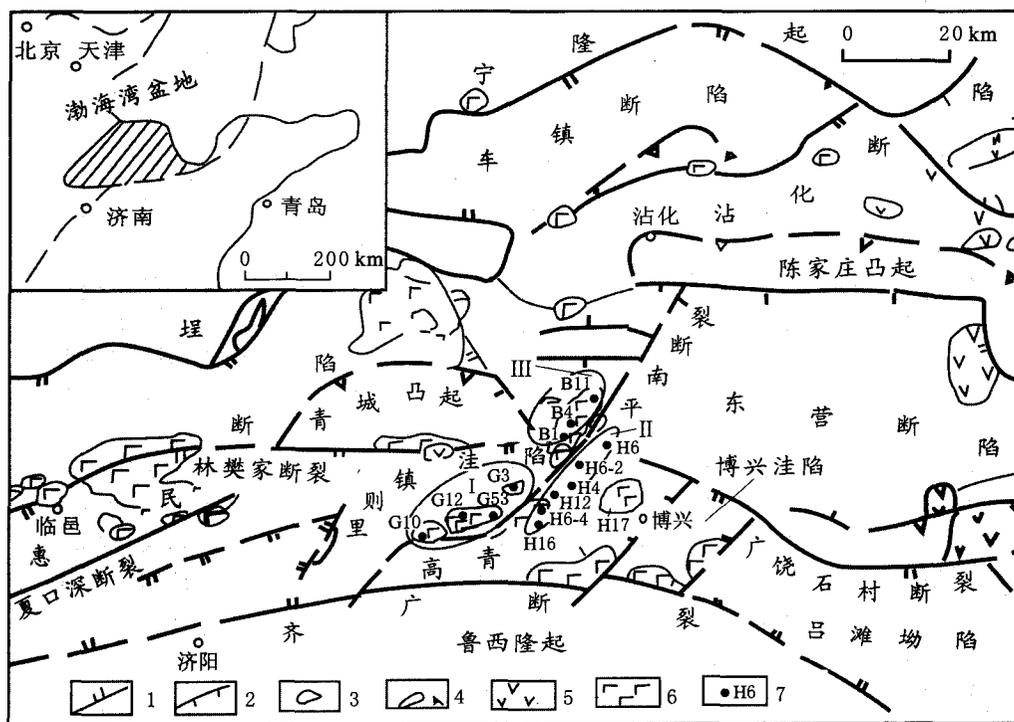


图 1 济阳坳陷高青-平南断裂带区域构造图

I. 高青地区; II. 花沟地区; III. 平方王地区; 1. 断裂; 2. 基底断裂; 3. CO<sub>2</sub> 气藏; 4. 中生代侵入岩; 5. 喷出岩; 6. 新生代碱性玄武岩; 7. 取样位置

Fig. 1 Regional geological map of gas pool in Gaoqing-Pingnan fault belt, Jiyang Depression

### 1 气藏的基本特征

研究所测的 14 口井主要分布于 4 个不同的气藏中。B4 井、B1 井位于平方王开发区内,该地区因沙四上块状灰岩因风化严重,岩性疏松,裂缝发育,渗透性好,属生物礁相沉积。气层主要为沙四上礁灰岩以及沙四中两套含油气层,其中 B4 井位于礁灰岩气顶区,B1 井位于礁灰岩油气边界附近,两井都位于沙四中含油范围内。气藏的圈闭类型为受断裂和岩性双重影响复合背斜圈闭,区域盖层为沙二

至沙三段地层。

G10 井及 G12 井位于高青-平南断裂西南段上升盘青城凸起西部。气藏圈闭类型属青城凸起中生界侵蚀面构造-岩性圈闭气藏,储气层为馆陶组薄层粉砂岩,盖层为馆陶组砂层之上的浅紫、棕黄色及少量灰绿色泥岩。G53、G3 气藏位于青城凸起主体西部馆陶组披覆背斜 G53 披覆背斜上,气藏储层由馆陶组中部地层靠近基岩不整合面的粉细砂岩组成,岩性疏松物性较好,碳酸盐含量低,属泛滥平原、河道间、河道边缘沉积。

H6 馆陶组气藏位于花沟断鼻带 H6 馆陶组滚

动背斜上,气藏背斜构造北接高青断层,东、西面分别受 G1 西、H6 西次级断层切割,为向东、西、南方向倾斜的不对称背斜,气藏储层由馆陶组上部地层内粉砂岩组成,岩性疏松物性好,碳酸盐含量较低,泥质含量相对高。属泛滥平原、河道间、河道边缘沉积。H17 气藏位于高青-平南断裂下降盘断鼻构造东翼的断块构造内,气层为沙三段下部水下扇形砂体内,盖层为沙三中段厚约 100 m 的泥岩段。

## 2 天然气地球化学特征

高青-平南断裂带气体组分及碳同位素分析数据(表 1)表明:断裂南侧,除 H17 井是以 CO<sub>2</sub> 气为主外,其他均以烃类气为主,CH<sub>4</sub> 的含量从 88.83%~99.26%。而断裂两侧 δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub> 变化范围从 -35.00‰~-55.17‰;除 H17 井为 -54.39‰外,其余井值均大于 -50‰。一般认为单纯的无机气 δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub> 大于 30‰<sup>[2]</sup>,如果从数值上直接判识,均为有

机成因特征。但是根据该地区断裂发育,岩浆喷发频繁以及流体包裹体的成分判别该地区有来自深部的无机成因气。之所以碳同位素偏轻,是由于生成的无机气从地球深部向浅部运移过程中发生分馏。加之混入有机气必然导致检测到的甲烷碳同位素偏轻<sup>[2]</sup>。因此初步认为该地区甲烷气是有机与无机混合形成。

在断裂的西部、北部主要以 CO<sub>2</sub> 气为主,含量在 60.72%~99.99%之间,除 B4 以 CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 为主的混合气藏外,其余 CO<sub>2</sub> 含量均大于 94%,本区高含 CO<sub>2</sub> 气藏中的 CO<sub>2</sub> 以相对富<sup>13</sup>C 为特征,δ<sup>13</sup>C 值变化较小,为 -7.7‰~-3.41‰,在 CO<sub>2</sub> 含量与其 δ<sup>13</sup>C<sub>CO<sub>2</sub></sub> 值图解上<sup>[4]</sup>,所有的数据点均投影于无机成因气区域内。以烃类气藏为主的 H6-2,6-4 井主要 δ<sup>13</sup>C<sub>CO<sub>2</sub></sub> -8.3‰~-8.6‰为有机与无机成因二氧化碳共存区;B4 井则为无机和有机成因二氧化碳混合气。

表 1 平方王、高青、花沟地区天然气组成及碳同位素组成

Table 1 Composition of natural gas and carbon isotope in the areas of Pingfanwang, Gaoqing and Huagou

井名	井段/m	层位	气体组分/%					δ <sup>13</sup> C <sub>PDB</sub> /‰			资料来源	
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>		C <sub>3</sub>
H6-4	790.0~830.0	Ng	1.93	96.50	0.43	0.00		-8.30	-44.70	-25.20	本文	
H6-2	743.8~783.4	Ng	1.92	96.70	0.43	0.00		-8.60	-44.70	-24.80		
H12	804.8~813.6	Ng	0.04	99.12	0.40	0.05	0.02				[3,44]	
H4	1 276.1~1 282.0	Es <sub>1</sub>	0.08	88.83	0.99	0.86	0.88		-55.17	-30.93	-22.36	
H6	818.0~819.6	Ng	0.02	99.26	0.44				-44.28	-25.24	-20.33	本文
H16	828.1~831.0	Ng		98.99	0.31				-46.60	-30.37	-22.64	
H17	1 965.1~1 980.0	Es <sub>3</sub>	89.70	7.47	0.20	0.31	0.27	-3.41	-54.39	-33.16	-31.25	
B4	1 510.0~1 568.0	Es <sub>4</sub>	60.72	32.62	2.30	2.03	0.58	-9.80	-49.40	-32.40	-28.90	本文
B1	1 890.0~1 898.0	Es <sub>4</sub>	94.13	3.53	0.85	0.86	0.38	-6.10	-45.80	-30.10	-27.40	
B11	1 980.2~2 250.0	Es <sub>4</sub>	97.32	1.31	0.34	0.37	0.35	-5.90	-47.55			[3,7]
G10	824.3~838.9	Ng	99.99	0.00				-5.20				本文
G12	820.0~850.0	Ng	99.91	0.08				-7.70				
G3	833.4~834.8	Ng	97.87	0.07				-4.41	-35.00			[3,44]
G53	811.4~818.0	Ng	99.96	0.04				-6.80				

## 3 天然气成因讨论

研究区内分布有不同类型的气藏,一是高纯度 CH<sub>4</sub> 气藏,CH<sub>4</sub> 含量 96.5%~99.12%;二是高纯度 CO<sub>2</sub> 气藏,CO<sub>2</sub> 含量从 94%~99.99%;三是高含 CH<sub>4</sub> 的 CO<sub>2</sub> 气藏,如 B4 井、H17 井,含 N<sub>2</sub> 的 CH<sub>4</sub> 气藏,如 H4 井。

### 3.1 CH<sub>4</sub> 成因分析

高青-平南断裂带生油气岩系十分发育。其中,沙四段上部和沙三段中下部为主要生气岩系,暗色泥岩及油页岩厚度 200 m~800 m,有机质含量丰富,残余有机碳含量 1%~4%。有机质演化程度较高,R<sub>o</sub> 值一般介于 0.4%~0.9%之间,有机质类型

以腐泥型为主,具有很好的生气条件。下第三系生成的天然气通过断层、不整合面等通道运移到浅层圈闭之中。花沟地区天然气组分,以甲烷占绝对优势,其含量一般大于 95%,属于干气。

高青-平南断裂带浅层天然气以沙三段湖相泥岩为主力烃源岩<sup>[5]</sup>,据戴金星<sup>[6]</sup>对天然气的成因判别该地区天然气以油型气为主。在地球化学研究中,通常认为甲烷碳同位素组成主要受源岩母质类型和热演化程度的影响。与相应烃源岩的演化程度有较好的对应关系,戴金星建立油型气 δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub>-R<sub>o</sub> 关系<sup>[7]</sup>对应的关系式是:δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub> ≈ 15.80 lgR<sub>o</sub> - 42.20 (R<sub>o</sub> 为镜质体反射率)。据此关系式及表 2 中 δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub> 数据得知该地区镜质体反射率主要范围在 0.16%~0.69%之间,烃源岩基本处于低成熟-成熟演化阶

段。一般而言,有机质与天然气的成熟度具有良好的对应性,该地区的  $R_o$  值与烃源岩相比显得偏低,这也进一步证明该地区不是由单一有机质热成因形成的天然气,而是具有多种来源。G3 井的  $R_o$  高达 2.86%,其原因应该是由高青地区发育了多期的岩浆喷发,溶解和扩散能力很强的深部热流体所携带的高热能使得沉积盆地的地温升高,加快烃源岩的热演化,使局部的有机质异常成熟。

划分天然气成因类型的一个重要指标就是甲烷的碳同位素组成,一般来讲生物成因气  $\delta^{13}C_1$  低于 -55‰,而  $\delta^{13}C_1$  高于 -50‰ 的天然气为热成因天然气,介于两者之间的则是一种混合成因的天然气或者是生物-热催化成因的天然气<sup>[8]</sup>,尽管平方王、高青、花沟地区气体的组分变化较大,除 H17 井的  $\delta^{13}C_1$  值为 -54.39‰ 外,其余  $\delta^{13}C_1$  主要分布在 -35.00‰~-49.44‰,均大于 -50‰,G3 井  $\delta^{13}C_1$  值高达 -35.00‰。如果仅从数值上分析,该地区烃类气体应为热成因气。

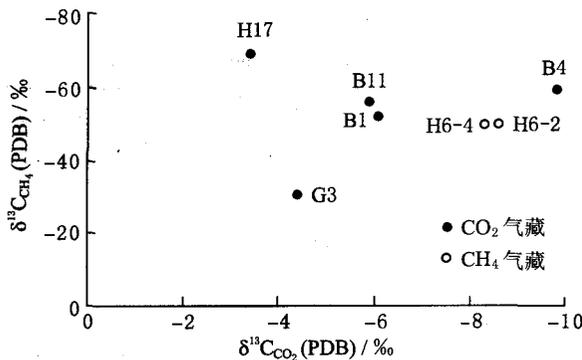


图 2 高青-平南断裂带  $\delta^{13}C_{CO_2}$ , PDB/‰ 与  $\delta^{13}C_{CH_4}$ , PDB/‰ 关系图

Fig. 2 The relation of  $\delta^{13}C_{CO_2}$  and  $\delta^{13}C_{CH_4}$  in the Gaoqing-Pingnan faults zone

张学华等<sup>[9]</sup>认为,  $\delta^{13}C_1$  值范围在 -30‰~-50‰ 的  $CH_4$  也可以是无机成因的,一般认为无机成因的天然气具有甲、乙、丙、丁烷  $\delta^{13}C$  反序排布的特征,李春园等采用数值模拟的方法对天然气中甲烷及其同系物的  $\delta^{13}C$  排序特征进行了研究,结果表明:当两种不同源的天然气混合时,两种具正序分布特征的生物成因天然气混合后可产生具反序分布特征的非生物成因天然气混合后也可产生具正序分布特征

的天然气,所以高青-平南断裂带甲烷及其同系物的  $\delta^{13}C$  虽为正序排序,也不能排除有无机成因的成分。结合该地区多期的岩浆喷发以及断裂构造发育的特征,认为该地区烃类天然气以有机和无机相结合混合天然气。

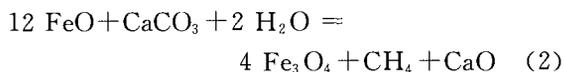
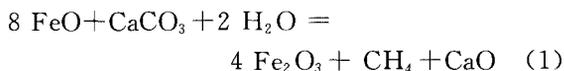
无机的天然气主要有两种来源,一种是岩浆中  $CH_4$  挥发份逸出。研究表明岩浆中溶解了相当数量的挥发份碳,以  $CO_2$  和  $CH_4$  为主<sup>[11]</sup>,当岩浆沿断裂等上升时,随着压力和温度的降低,  $CO_2$  和  $CH_4$  等挥发组分因在熔体中溶解度降低而逸出<sup>[12]</sup>。在高青-平南断裂带发现了具有幔源特征的方解石脉,其  $\delta^{13}C_{CaCO_3}$  为 -7.3‰~-7.9‰ (PDB),对这些方解石脉气液包裹体作 Raman 光谱分析,气相中  $CH_4$  为 9.0% mol~14.2% mol,液相中  $CH_4$  为 0.08% mol,这说明该地区含有幔源甲烷<sup>[13]</sup>,这种甲烷具有较高的碳同位素值,当与有机成因的天然气混合时其必然导致检测到的甲烷碳同位素偏轻。另一种来源则是高温幔源  $CO_2$  注入盆地之后,可能与被还原性强的物质还原为  $CH_4$ ,使天然气的  $\delta^{13}C_1$  值偏高。其中在喷发岩中发现未被氧化的铁具有特别的意义,对济阳坳陷  $CH_4$  气藏区以及  $CO_2$  气藏区的火成岩类主要元素  $Fe_2O_3$  及  $FeO$  含量进行分析<sup>[14]</sup>,从表 2 中可以看出除  $CO_2$  气藏区的 S10, S13, S15 外,  $CH_4$  气藏区的  $FeO$  含量明显高于  $CO_2$  气藏区,而  $CO_2$  气藏区的  $Fe_2O_3$  则高于  $CH_4$  气藏区,有无  $CO_2$  气藏对火山岩  $Fe_2O_3$ ,  $FeO$  含量影响较大,这说明了  $CO_2$  气藏区岩浆中的  $FeO$  有被氧化成为  $Fe_2O_3$ 。而相应的部分幔源  $CO_2$  则被还原成为  $CH_4$ 。而  $CO_2$  气藏区 3 个样之所以特别,是由于这 3 个样都属于 AO-碱性橄榄玄武岩,晚第三纪火山岩大多为喷溢相碱性橄榄玄武岩,多出现在盆地边缘部凹陷形成的晚期。 $CO_2$  被还原为  $CH_4$  的前提条件是较为还原的条件,即幔源  $CO_2$  的注入量小但能量高。晚期活动的岩浆中含有较丰富的  $CO_2$ ,但是此时的岩浆活动非常微弱,能量不足所以不能为氧化还原提供条件,所以该地区  $Fe_2O_3$ 、 $FeO$  含量没有氧化还原的迹象<sup>[13,14]</sup>。Henry 等<sup>[15]</sup>在高温高压的条件下,模拟上地幔的温压条件,将含  $CaCO_3$  方解石、 $FeO$  和  $H_2O$  按一定比例混合,在 5 GPa 条件下,当温度升高到 500 °C 时,利用激光拉曼观测到有

表 2 胜利油田火山岩类  $Fe_2O_3$  及  $FeO$  质量分数. w(B)/%<sup>[14]</sup>

Table 2 Major element of  $Fe_2O_3$  and  $FeO$  of the volcanic rocks from the Shengli oilfield (in percentage)

位置	非 $CO_2$ 气藏区					$CO_2$ 气藏区										
	辉绿岩			玄武岩		玄武安山岩			辉绿岩			碱玄岩		粗玄岩		辉绿岩
岩性	$E_{S3}$	$E_{S2}$	$E_{S3}$	Ng	$E_{S2}$	K <sub>1</sub>			K <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	$E_{S3}$	$E_{S2}$	$E_{S3}$	$E_{S3}$	$E_{S4}$
层位																
样号	S25	S26	S28	S29	S31	S1			S2	S3	S4	S6	S10	S13	S14	S15
$Fe_2O_3$	2.31	3.28	2.21	5.14	4.05	8.21	6.28	7.97	6.22	5.49	2.43	3.62	5.57	2.61		
$FeO$	9.29	7.4	8.91	6.49	7.8	2.6	5.3	3.57	4.44	4.87	2.87	6.16	4.6	5.5		

甲烷生成, 当温度到 600 °C 时, 有大量的甲烷生成, 具体反应见(1), (2)。



当岩浆喷发时温度远远高于 600 °C 大约在 1 000 °C ~ 1 250 °C 左右, 完全有可能发生该反应, 就进一步证明该地区的烃类气藏有无机成因烃类来源。

甲烷是火山活动区深部来源流体中重要的气体组分之一。最新值得重视的一点是我国境内最新火山喷发活动的五大连池火山区逸出气体中甲烷的  $\delta^{13}\text{C}$  值特别低, 平均只有 -45.8‰, 按照常规的分类方法, 该天然气为生物成因, 但这明显与地质环境不符<sup>[16]</sup>。同时一些学者认为在天然气从深部运移到浅部过程中碳同位素发生分馏及分离, 在这过程  $\delta^{13}\text{C}_1$  逐渐变轻<sup>[17,18]</sup>。 $\delta^{13}\text{C}_1$  为 -40‰ ~ -50‰ 的甲烷也可能是地幔脱气及部分  $\text{CO}_2$  还原生成的  $\text{CH}_4$ , 这种甲烷在碳同位素上与热成因甲烷难以区分。最近, Prinzhofer<sup>[19]</sup> 提出用稀有气体同位素来区分热成因气新方法。氦和氩主要来自深部扩散, 导致地幔脱气  $\text{CO}_2$  还原气气藏中  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  比值较高。相反, 热成因气的形成温度较高, 两个分子都容易气化, 这类气体中  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  比值偏低, 接近地壳平均值。笔者测定花 4 井中  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  比值, 高达 108, 远远高于地壳的平均值 4.92, 这也进一步说明该地区天然气不仅仅是由热成因。在沉积盆地中, 由于烃源岩存在, 岩浆上升带来的大量热能而形成大量有机成因烷烃气, 即使盆地深部有非生物烷烃气运移至盆地沉积层中, 往往难于认识而被认为是有机成因的烷烃气。根据天然气地质和地球化学条件, 我国东部裂谷型盆地中有来自深部的非生物成因烷烃气<sup>[20]</sup>。

### 3.2 $\text{CO}_2$ 成因分析

天然  $\text{CO}_2$  有 3 种主要成因: (1) 岩浆脱气, (2) 地壳富碳岩石分解, (3) 有机质分解。高青-平南断裂带北侧主要以无机成因非烃气为主,  $\text{CO}_2$  的含量较高, 除 B4 井外,  $\text{CO}_2$  含量均在 94% 以上, 国外如此高纯度气藏, 通常是岩石化学成因和岩浆-幔源成因<sup>[21,22]</sup>。高青-平南地区中-新生代发生了大规模的火山活动, 高青地区沙二段有辉绿岩分布, 在中生界有安山岩、玄武岩分布<sup>[23]</sup>, G10 井在 757.24 m 到 839.84 m 深度至少检测到 5 期可能与  $\text{CO}_2$  气充注有关的盐水包裹体<sup>[24]</sup>, 说明高青地区经历多期的火山活动, 该地区  $\text{CO}_2$  气藏分布有一个明显特征: 与

火山岩的分布有直接或间接的空间关系, 特别是与最近的火山活动关系最为密切(图 1), 高青-平南断裂是地幔岩浆上涌以及脱气的通道。岩浆在缓慢的冷凝过程中逐渐把  $\text{CO}_2$  气释放出来, 释放出来的气体顺着沿断裂充填的玄武岩中发育的裂缝上升并进入馆陶组薄层粉砂岩中成藏。

根据各种地质环境生成的  $\text{CO}_2$  含量与稳定碳同位素比值关系, 能够帮助区分有机、无机成因类型 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} > -8\text{‰}$  为无机成因,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} < -10\text{‰}$  为有机成因), 但不能有效地区分幔源和壳源各种无机  $\text{CO}_2$ 。它们都表现出相似或部分重叠的  $\delta^{13}\text{C}$  值分布: 地壳碳酸岩盐热分解生成的  $\text{CO}_2$  有相似的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  (-3‰ ~ -8‰)<sup>[25]</sup>。该地区  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  为 -3.41‰ ~ -9.8‰, 一般认为  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值在 -4‰ ~ -7‰ 代表了地幔脱气生成的  $\text{CO}_2$ <sup>[26,27]</sup>。仅根据碳同位素并不能判别  $\text{CO}_2$  是否为地幔脱气成因, 结合前人对该地区的稀有气体地球化学特征研究进一步确定  $\text{CO}_2$  的来源。研究表明高青-平南断裂带  $\text{CO}_2$  气藏  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值主要在  $4.45 \times 10^{-6} \sim 6.35 \times 10^{-6}$  之间, H17 井 R/Ra 在 4.45 ~ 6.35 之间<sup>[28,29]</sup> (R 为样品的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值; Ra 为空气的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值, 为  $1.4 \times 10^{-6}$ )。一般认为岩浆-幔源成因  $\text{CO}_2$  中 He 同位素比值 R/Ra 大于 2.5<sup>[30,32]</sup>, 由此可知, 该地区  $\text{CO}_2$  主要是由岩浆-幔源成因, G3 井  $\text{CO}_2$  气的幔源成分最大, 认为该地区的  $\text{CO}_2$  应该是以幔源-岩石化学成因的混合气体。赫英<sup>[33]</sup> 对高青地区火山岩辉石中包裹体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  进行测定, 结果在 -7.2‰ ~ -8.5‰ 之间与气井的值相比偏低。最主要的原因可能是高青地区基底地层中有奥陶系碳酸盐岩潜山的分布<sup>[34]</sup>。岩浆在上涌过程中带出大量热量, 烘烤碳酸盐岩而产生大量  $\text{CO}_2$ , 这种烘烤作用产生的  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值主要分布在 -3.7 ~ 3.7 之间, 幔源-岩石化学成因混合气的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  就会比火山岩包裹体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值大。另外在以烃类气体为主的 B4 以及 H6-2, 6-4 井中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值相对较低, 这种现象表明无机成因的二氧化碳中混入了部分油型气二氧化碳, 使同位素偏轻。

### 3.3 断裂两侧气藏差别的原因探讨

沿高青-平南断裂带两侧的天然气藏存在明显的差别, 断裂南侧主要以  $\text{CO}_2$  气藏为主, 而断裂北侧则以烃类气藏为主, 形成这种差异的主要原因是由岩浆活动引起。

由于第三纪岩浆活动强烈, 范围较广, 火山岩面积近千余平方公里, 厚度可达千米, 主要分布在惠民凹陷和东营凹陷<sup>[35,36]</sup>, 早期岩浆活动中释放的  $\text{CO}_2$  气体受张性断层活动的影响难于形成有效的圈闭,

只有在新近纪以后的火山活动在地层中释放出的气体才能有效聚集并得以保存下来。从图 1 中可以看出 CO<sub>2</sub> 发育地区主要是与新生代碱性玄武岩系列火成岩有关。新近纪以后的火山活动范围减少, 主要分布在高青-平南断裂带的西部即高青地区, 而且主要以喷溢相碱性玄武岩为主, 但晚期活动的岩浆中含有较丰富的 CO<sub>2</sub><sup>[37]</sup>。

断裂两侧气藏烃类气体 δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub> 值并没有明显的界限(图 2), 推断断裂两侧的烃类气藏可能是同期岩浆喷发时形成。根据济阳拗陷岩浆活动分布图, 将各期的岩浆活动分别与气藏分布进行对比分析, 中生代及新生代早第三纪沙四期(E<sub>s4</sub>)和孔店期(E<sub>k</sub>)火山岩和侵入岩岩脉在济阳拗陷南北都有分布, 与非烃气藏的关系不大, 与烃类气藏关系比较密切。在早期的岩浆活动主要表现为喷发式的, 活动能量大, 此时 CO<sub>2</sub> 气体亦随岩浆向外喷发, 并向外散失, 只有少部分 CO<sub>2</sub> 的注入, 在高能量条件下发生氧化还原反应而生成 CH<sub>4</sub>, 断层自然成为岩浆运移的通道, 这时大量的岩浆充填到断裂两侧, 岩浆的喷发携带大量的热能, 促进了沉积有机质向烃类物质转化。所以该地区天然气主要以热成因为主, 同时也有部分岩浆中 CH<sub>4</sub> 挥发份逸出以及幔源 CO<sub>2</sub> 生还原反应生成的烷烃。同时由于火山岩本身的盖层作用, 阻挡了气体的进一步向上扩散而聚集成藏。而新生代中晚期(E<sub>s3</sub>以后)火山岩和侵入岩岩脉, 尤

其晚第三纪馆陶期(N<sub>g</sub>)和明化镇期(N<sub>m</sub>)的火山岩都分布在济阳拗陷南部的惠民凹陷和东营凹陷西部, 该区恰好是非烃气藏的富集区, 可见, 济阳拗陷的非烃气主要是与新生代中晚期火山活动, 尤其是晚第三纪的火山活动有密切的成生关系。

然而随着时间的推移, 地应力的释放, 断层的活动就会停止, 并逐渐封闭, 这时的断层不在起通道作用, 所以断裂北侧就没有气源通道, 因而形成的天然气藏也不会被后期的火成岩所破坏, 所以以烃类气体为主。而断裂南侧由于有仍有微弱岩浆活动, 伴随着侵入和喷发, 能量得以释放, 温度不断降低, 沿岩浆的上升路径会冷凝形成自深而浅的火成岩柱, 而岩浆结晶过程中会形成节理, 岩浆脱气后生成的二氧化碳沿这些形成的上升并进入馆陶组薄层粉砂岩中成藏<sup>[34]</sup>。

## 4 结 论

- 4.1 高青-平南断裂带烃类气藏以有机热成因为主的有机与无机混合气体。二氧化碳气藏主要是幔源-岩石化学成因为主的混合气。
- 4.2 火山岩中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO 含量对比研究表明, 气藏中有幔源二氧化碳发生还原反应生成的烷烃。
- 4.3 断裂带两侧气藏差别的最主要原因是由于岩浆活动影响造成。

## 参考文献

- [1] 郭 栋, 夏 斌, 王兴谋, 等. 济阳拗陷断裂活动与 CO<sub>2</sub> 气成藏的关系[J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 40-42.
- [2] 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, 131-150.
- [3] 夏新宇, 李春园, 赵 林. 天然气混源作用对同位素溯源的影响[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(3): 89-90.
- [4] 戴金星, 石 昕, 卫延召. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 5-11.
- [5] 程有义, 宋来亮, 郭 瑾, 等. 济阳拗陷浅层天然气富集的有利条件[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(6): 16-19.
- [6] 戴金星. 戴金星天然气地质和地球化学论文集(卷二)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001, 225-226.
- [7] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学(卷一)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992, 55-63.
- [8] Jenden P D, Hilton D R & Kaplan I R, et al. Abiogenic hydro-carbons and mantle helium in oil and gas fields[A]. In: Howell D G ed. *The Future of Energy Gases*[C]. Washington: United States Government Printing Office, 1993, 31-56.
- [9] 张学华, 郑永飞. 无机成因天然气碳同位素组成变化的理论模式[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(2): 81-85.
- [10] 李春园, 王先彬, 夏新宇. 甲烷及其同系物 δ<sup>13</sup>C 值反序排列特征的熟知模拟与非生物成因天然气藏探讨[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 306-311.
- [11] 赫 英, 王定一, 朱兴国. 幔源二氧化碳和甲烷成藏的现实性与可能性[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1997, 27(5): 422-426.
- [12] 朱永峰. 地幔流体与地球的放气作用[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 1997, 5(增刊): 71-75.
- [13] 金之钧, 张流平, 曾灏辉, 等. 东营凹陷与幔源富 CO<sub>2</sub> 流体有关的复合成因烷烃[J]. 科学通报, 2002, 47(16): 1 276-1 280.
- [14] 赫 英, 王定一, 廖永胜. 胜利油田火山岩类-盆地演化及其 CO<sub>2</sub>-Au 成藏成矿效应[J]. 地质科学, 2001, 36(4): 454-464.
- [15] Scott H P, Hemley R J, Mao H K, et al. Generation of methane in the Earth's mantle: In situ high pressure-temperature measurements of carbonate reduction[J]. PNAS, 2004, 101(39): 14 023-14 026.
- [16] 上官志冠, 赵慈平, 高 玲. 中国活动火山区甲烷的碳同位素研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(06): 1 458-1 464.
- [17] Pernaton E, Prinzhofer A, Schneider F. Reconsideration of methane signature as a criterion for the genesis of natural gas: influence of migration on isotopic signature [J]. *Revue de l'IFP*, 1996, 51(5): 635-651.
- [18] Prinzhofer A, Pernaton E. Isotopically light methane in natural gases: bacterial imprint or segregative migration? [J]. *Chemical Geology*, 1997, 142: 193-200.
- [19] Prinzhofer A, Mello M R, Da Silva Freitas L C, et al. A new geochemical characterization of natural gas and its use in oil and gas evaluation [C]. Hedberg Conference, Rio de Janeiro, November 1997. Special publication of the AAPG.
- [20] 戴金星. 非生物天然气资源的特征与前景[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 1-6.
- [21] Baker J C, Bai G P, Hamilton P J, et al. Continental-scale magmatic carbon dioxide seepage recorded by dawsonite in the Bowen-Gunndah-Sydney Basin system, eastern Australia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, A65 (3): 522-530.
- [22] Clayton J L, Spencer C W, Konz I & Szalay A. Origin and migration of hydrocarbon gases and carbon dioxide, BeÅ keÅ s Basin, southeastern Hungary[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 15(3): 233-247.
- [23] 郭 栋, 邱隆伟, 姜在兴. 济阳拗陷火成岩发育特征及其与二氧化碳成藏的关系[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(2): 21-24.

- [24] 李丕龙, 王兴谋, 郭栋, 等. 胜利山东探区 CO<sub>2</sub> 气资源勘探综合研究[M]. 中国石化胜利油田有限公司, 2004, 70-72.
- [25] Koncz I. The stable carbon isotope composition of the hydrocarbon and carbon dioxide components of Hungarian natural gases[J]. *Acta Mineralogica-Petrographica, Szeged*, 1983, XXVI (1), 33-49.
- [26] Bredehoeft J D, Ingebritsen S E. Degassing of carbon dioxide as a possible source of high pore pressures in the crust. 1990, In J D Bredehoeft & D L Norton, *The role of fluids in crustal processes* (pp. 158-164). Washington, DC: National Academic Press.
- [27] Thrasher J, Fleet A J. Predicting the risk of carbon dioxide 'pollution' in petroleum reservoirs. In J O Grimalt, & C Dorronsoro, *Organic Geochemistry: Developments and Applications to Energy, Climate, Environment and Human History* [C], Proceedings 17th International Meeting on Organic Geochemistry, San Sebastian, Spain, 1995, 1 086-1 088.
- [28] 李趁义, 樊大亮, 郑和荣. 阳新-花沟地区二氧化碳成藏模式[J]. *石油学报*, 2004, 25(1): 35-39.
- [29] 车燕, 姜慧超, 穆星, 等. 花沟气田类型及成藏规律[J]. *油气地质与采收率*, 2001, 8(5): 32-34.
- [30] O'Nions R K, Ballentine C J. Rare gas studies of basin scale fluid movement[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1993, 344: 141-156.
- [31] Sherwood-Lollar B, Ballentine C J, O'Nions R K. The fate of mantle-derived carbon in a continental sedimentary basin: Integration of C/H<sub>2</sub> relationships and stable isotopic signatures [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(11): 2 295-2 307.
- [32] Alison M S, David R H, Colin G M & John M S. The CO<sub>2</sub>-He-Ar-H<sub>2</sub>O systematics of the Manus back-arc basin: Resolving source composition from degassing and contamination effects [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(8): 1 837-1 856.
- [33] 赫英, 王定一, 刘洪营, 等. 胜利油区二氧化碳气藏成因[J]. *石油与天然气地质*, 1997, 18(1): 82-82.
- [34] 王兴谋, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 济阳拗陷火山活动和 CO<sub>2</sub> 气藏的关系研究[J]. *天然气地球化学*, 2004.
- [35] 翟庆龙, 张允建. 东营凹陷沙三段烃源岩中火成岩岩石学特征分析[J]. *矿物岩石*, 2003, 23(1): 25-29.
- [36] 毛振强, 陈凤莲. 高青油田孔店组火山岩储集特征及成藏规律研究[J]. *矿物岩石*, 2005, 25(1): 104-108.
- [37] 王兴谋. 济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 气藏勘探有利区带分析[J]. *油气地质与采收率*, 2005, 12(1): 27-32.
- [38] 黄高健, 陈建渝, 张冬梅, 等. 济阳拗陷花沟-高青气田 CO<sub>2</sub> 气成因与成藏机制[J]. *中国海上油气(地质)*, 2002, 16(5): 295-301.

## GEOCHEMISTRY AND ORIGIN OF TWO TYPES OF GAS POOL IN GAOQING-PINGNAN FAULTS, JIYANG DEPRESSION

SHEN Bao-jian<sup>1,2</sup>, HUANG Zhi-long<sup>1</sup>, LIU Hong-wen<sup>1</sup>,  
XU Cheng<sup>1</sup>, LIN Zhi-jia<sup>2</sup>, YAN Zai-fei<sup>1,2</sup>, CHEN Mi<sup>1,2</sup>

- { 1. State Key Laboratory of Ore Deposits Geochemistry, Chinese Academy  
of Science, Guiyang 550002, China;  
2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China }

**Abstract:** Surrounding the Gaoqing-pingnan fault zone, there are multiple types of gas reservoir with the gas compositions of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>. The isotope geochemistry and compositions of the gas pools were studied in this paper. Hydrocarbon gas pool occurs in the Huagou area, characterized by the CH<sub>4</sub> contents ranging from 88.83% to 99.6%, and the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  values from -35.00‰ to -55.17‰, indicating that the hydrocarbon gas originated from high temperature decomposition of oil type gas. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and FeO contents of the volcanic rock from CO<sub>2</sub> gas pool area and CH<sub>4</sub> gas pool area showed evident difference. This showed that the hydrocarbon gas may be resulted from chemistry reaction. The CO<sub>2</sub> gas mainly appeared in the north area, with the CO<sub>2</sub> contents ranging from 60.72%~99.99%, the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  values from -3.41‰~-9.8‰, the <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios from  $4.35 \times 10^{-6}$ ~ $6.35 \times 10^{-6}$  (i. e. R/Ra= 4.45-4.35). Based on the data of composition and isotope, deep geological background, deep faults and volcanic rock, it revealed that CO<sub>2</sub> distribution in Gaoqing area was mostly originated from inorganic mantle source related with igneous rock. The favorable tectonic environment for the formation of CO<sub>2</sub> reservoir is rifting, which is related with great fault-magma activity, and the formation of CO<sub>2</sub> gas pools and its space-time correlation to the newest magmatic activities. The primary reason responsible for different distribution of gas pools in both sides of fault zone is magma activity.

**Key words:** carbon isotope; magma activity; mantle origin; Jiyang depression

ISSN 1001-6872(2007)03-0081-07; CODEN: KUYAE2

**Synopsis of the first author:** Shen Baojian, male, 29 years old, a doctoral student of geochemistry. Now he is engaged in the research of deepsteated fluid and gas pool.