

# 中国东部陆上和海域 CO<sub>2</sub> 成因及运聚规律 与控制因素分析

何家雄<sup>1,2</sup> 夏 斌<sup>1</sup> 刘宝明<sup>1</sup> 张树林<sup>1</sup>

(1. 中国科学院边缘海地质与矿产资源重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中海石油南海西部研究院, 广东 湛江 524057)

**摘要:**通过对中国东部陆上及海域大量地质地球化学资料的分析,重点对 CO<sub>2</sub> 成因及运聚成藏规律与主控因素进行了深入地探讨,并在此基础上对有利 CO<sub>2</sub> 分布区进行了初步预测。研究表明,中国东部陆上诸断陷盆地与东南沿海海域的东海盆地及南海北部大陆架琼东南盆地和珠江口盆地 CO<sub>2</sub> 气藏及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏中,CO<sub>2</sub> 均属典型的火山幔源型成因,其运聚富集主要受控于幔源型火山活动与沟通深部气源的基底深大断裂的导气配置作用,CO<sub>2</sub> 气源主要来自地壳深部幔源火山活动伴生的大量 CO<sub>2</sub>;南海北部大陆架西区莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 气藏及含 CO<sub>2</sub> 油气藏中的 CO<sub>2</sub>,属于壳源型及壳幔混合型成因,主要受控于泥底辟热流体晚期分层分块多期的局部上侵活动与沉积巨厚海相含钙砂泥岩的物理化学作用,其运聚分布具多期和分层分区的特点。因此,根据不同成因类型 CO<sub>2</sub> 运聚成藏规律,可以追踪气源,分析和预测天然气尤其是 CO<sub>2</sub> 的运聚分布,评价其资源潜力,为天然气勘探部署及决策提供依据,降低勘探风险。

**关键词:**中国东部盆地;东海及南海北部盆地;CO<sub>2</sub> 成因类型;运聚规律;主控因素

**中图分类号:**P618.130.2\*7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2005)04-0663-11

中国东部陆上诸断陷盆地与近海海域的东海及南海北部大陆架边缘盆地,历经半个多世纪的油气勘探,发现和探明了大量油气藏(田),同时亦陆续发现了大量 CO<sub>2</sub> 气藏(田)及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏,截至目前为止,已发现 33 个 CO<sub>2</sub> 气藏(田)。然而在中国由于对 CO<sub>2</sub> 资源重要性的认识尚浅,故对 CO<sub>2</sub> 的勘探与综合利用等研究,均未予以充分重视,尤其是在海上油气勘探中 CO<sub>2</sub> 常常被作为勘探风险来规避与排除。迄今为止,对于中国东部陆上及东南沿海海域诸盆地 CO<sub>2</sub> 资源规模、地质储量的详细评价、CO<sub>2</sub> 资源潜力的综合开发利用,以及基础研究等均非常薄弱,尚不能提供中国 CO<sub>2</sub> 总资源量的基本数据和准确的 CO<sub>2</sub> 总地质储量。但是,现在已有很多学者<sup>[1-36]</sup>对 CO<sub>2</sub> 气藏(田)及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏分布规律与勘探技术及评价方法与综合利用等,进行过研究。

根据以往研究及近期所获得的地质和地球化学资料,笔者将重点对中国东部陆上及海域诸断陷盆地迄今勘探发现的 CO<sub>2</sub> 气藏(田)、高含 CO<sub>2</sub> 油气藏中 CO<sub>2</sub> 成因及运聚成藏的主控因素,进行深入的研究与探讨,并根据壳源型岩石化

学成因及壳幔混合型成因与火山幔源型成因 CO<sub>2</sub> 不同成因机理、运聚成藏条件及其主控因素,分析和预测 CO<sub>2</sub> 运聚规律,以期达到大大降低天然气勘探风险的目的。

## 1 中国东部陆上与海域诸盆地 CO<sub>2</sub> 成因类型

本区 CO<sub>2</sub> 成因类型<sup>[4-11,15-31]</sup>,根据 CO<sub>2</sub> 的碳同位素及所伴生稀有气体氦同位素特征可划分为 4 种(表 1):壳源型岩石化学成因,该成因类型的 CO<sub>2</sub> 主要分布于南海北部边缘西区莺歌海盆地泥底辟带的浅层和中深层<sup>[17-26]</sup>,以及中国东部渤海湾陆相断陷盆地部分高含 CO<sub>2</sub> 油气藏区带。CO<sub>2</sub> 在天然气组成中含量较高,尤其是在莺歌海盆地泥底辟带浅层,其含量一般可达 28.5%~88.9%,最高达 93.0%,二氧化碳的碳同位素值( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ )和所伴生的烃类气甲烷的碳同位素值( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ )均偏重,伴生氦同位素值( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )偏低,R/Ra 值(样品  $^3\text{He}/^4\text{He}$  与标准空气  $^3\text{He}/^4\text{He}$  之比)均低于 0.6;壳源型有机成因,亦主要展布于南海北部西区莺歌海盆地泥底辟带浅层和中深层及中

收稿日期:2004-08-13;改回日期:2005-05-28

基金项目:国家“九五”重点科技攻关项目(96-110-07-01-02)资助。

作者简介:何家雄,男,1956 生,博士生,高级工程师,长期从事石油天然气勘探与地质综合研究;E-mail:hejx@cnooc.com.cn。

国东部陆上诸盆地(未列出),其主要的地球化学特征是:CO<sub>2</sub>含量低,在天然气组成中一般均低于8%,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 和所伴生烃类气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 偏轻, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值一般均小于-10‰,氦同位素值偏低,R/Ra值低于0.6;壳幔混合型成因,主要分布于南海北部西区莺歌海盆地泥底辟带乐东区LD8-1构造带浅层以及中国东部渤海湾陆相断盆地部分高含CO<sub>2</sub>油气藏区,主要特征是:氦同位素值(<sup>4</sup>He/<sup>3</sup>He)偏高,R/Ra值一般均大于1,多介于1~1.56。CO<sub>2</sub>在天然气组成中含量高,可达39%~79%, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 亦偏重,与壳源型岩石化学成因CO<sub>2</sub>类似;火山幔源型成因,该成因类型的CO<sub>2</sub>主要分布于中国东部中生代诸陆相断盆地以及东海盆地和南海北部边缘琼东南盆地东部2号断裂带周缘区和珠江口盆地,其主要特征是:氦同位素值(<sup>4</sup>He/<sup>3</sup>He)偏高,R/Ra值一般均大于2,最高达8.8,CO<sub>2</sub>在天然气组成中含量很高,多在80%以上(但由于运聚条件的差异,亦有含量较低的),最高达99.6%, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 亦偏重,其所伴生

烃类气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 可偏重或亦可偏轻(表1)。

上述四大成因类型的CO<sub>2</sub>在碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ )与氦同位素(<sup>4</sup>He/<sup>3</sup>He)的分类图(图1)中,分类界线明显,从图1可以看出,南海北部边缘琼东南盆地东部2号断裂带周缘区和珠江口盆地西部目前所发现的火山幔源型成因CO<sub>2</sub>点群与中国东部松辽盆地、渤海湾盆地黄骅拗陷和济阳拗陷、苏北盆地和三水盆地所产出的典型火山幔源型CO<sub>2</sub>相同,均分布于火山幔源型成因区域,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 均大于-8‰,R/Ra值大于2;南海北部西区莺歌海盆地泥底辟带浅层、中深层和琼东南盆地西部崖13-1区产出的CO<sub>2</sub>,点群大多分属于壳源型成因区(R/Ra值均小于1, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值在0~22‰),而壳源型成因区可依据 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}=-8‰$ 为界,将其进一步划分为壳源型岩石化学(无机)成因CO<sub>2</sub>和壳源型有机成因CO<sub>2</sub>两个类型<sup>[6-7]</sup>。少量点群分布于壳幔过渡(混合)成因区(R/Ra为1~2, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值大于-8‰)。

表1 中国东部及海域CO<sub>2</sub>气藏(田)、高含CO<sub>2</sub>油气藏中CO<sub>2</sub>成因类型与地球化学特征  
Table 1 Genetic types and geological-geochemical characteristics of CO<sub>2</sub> in CO<sub>2</sub> reservoirs and CO<sub>2</sub>-rich oil/gas reservoirs in eastern China and its sea areas

地区/盆地	气田/构造	测井号	产层层位	储层岩性	深度/m	天然气组成/%				碳(PDB‰)、氦同位素			CO <sub>2</sub> 成因类型
						CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	R/Ra	
松辽盆地南部	万金塔	万5	K <sub>1</sub> q <sub>3</sub>	粉细砂岩	740.0	93.43	2.67	3.74		-4.95	-38.66	3.34	火山幔源型
	乾安	乾深10	K <sub>1</sub> q <sub>4</sub>	粉细砂岩	2176.2~2185.2	80.73	16.16	0.99	0.20	-3.73		3.16	
	孤店	孤9			1572.4~1580.2	97.05		2.65	0.20	-8.44	-43.97	3.22	
渤海湾盆地	翟庄子	港151	E <sub>s1</sub>	生物灰岩	1632~1639	98.61	0.19	1.17		-3.77	-28.60	3.62	火山幔源型
	平方王	滨4-6-6	E <sub>s4</sub>	礁滩灰岩及薄层细砂岩	1469.7~1481.0	72.50	0.33	23.52	3.51	-4.57	-51.67	2.76	
		平12-61			1452.4~487.6	79.17	0.38	17.13	3.19	-4.50	-51.80	2.58	
	平南	滨古14	O <sub>2</sub>	灰岩	2250.0~2370.0	96.99	0.46	1.16	1.39	-4.76	-47.50	2.00	
	花沟	花17	E <sub>s3</sub>	水下扇砂岩	1965.1~1980.2	93.78	1.60	3.89	0.73	-3.41	-54.39	3.18	
	阳25	阳25	E <sub>s4</sub>	薄层砂岩	2793.9~2805.0	96.50	3.06	0.44		-4.38	-42.51	2.94	
苏北盆地	黄桥	苏174	P <sub>1</sub> q/D <sub>3</sub> w	灰岩及砂岩	1859.4~2298.3	95.10		0.85	0.05	-2.65	-29.61	3.96	火山幔源型
	丁庄埭	苏东203	E <sub>2</sub> d	砂砾岩	2588.0~2592.0	92.06	5.09	2.05	0.11	-3.82		2.74	
	高邮	纪1	E <sub>1</sub> t	砂砾岩	2214.0~2245.0	92.32	5.31	0.81	0.18	-4.10		4.58	
三水盆地	宝月	南7	E <sub>1-2</sub> b	砂岩	1161.4~1184.0	83.99	1.79	12.29	1.93			3.80	火山幔源型
	沙头圩	水深9	E <sub>1-2</sub> b	灰岩	1429.2~1432.7	99.55	0.26	0.19	0.13	-4.60		4.29	
东海盆地 丽水凹陷	石门潭	石门潭1	E <sub>1</sub> lf		2571.0~2589.0	95.65	0.67	1.62	0.85	-4.51	-34.12		火山幔源型
					3335.0~3345.0	94.47		4.76	0.76	-4.00	-44.20	7.2	
	温州13-1	WZ13-1-1	E <sub>1</sub> lf	砂岩	3405.0~3412.0	98.59		1.19	0.22	-4.20	-46.60	8.8	
					3641.0~3666.0	99.87		0.13		-4.20		5.4	
	丽水36-1	LS36-1-1	E <sub>1</sub> myf		2251.0~2283.0	34.15		55.45	6.85	-5.03	-46.30		
莺歌海盆地	DF1-1Ⅲ	DF1-1/2,3	N <sub>y2</sub>	粉砂岩	1331~1362	64.70	5.82	27.97	1.52	-3.80	-31.90	0.07	壳源岩石化学型
	DF1-1中	DF1-1-11	N <sub>h1</sub>	粉砂岩	2785~2799	49.52	5.24	43.11	2.13	-0.65	-30.08	0.03	
	DF29-1Ⅳ	DF29-1-1	N <sub>y2</sub>		1832~1842	88.91	5.45	5.26	0.38	-2.00	-32.10	0.14	
	LD15-1	LD15-1-1			2200~2225	75.17	4.17	18.70	1.99	-4.15	-34.54	0.26	壳源有机型
	LD21-1	LD21-1-1	N <sub>y1</sub>	粉细砂岩	1553~1566	83.97	6.63	8.71	0.69	-4.18	-36.08	0.31	
	DF1-1Ⅱ	DF1-1/2,4			1322~1326	0.17	27.15	71.27	1.41	-16.90	-35.60	0.48	
	LD22-1	LD22-1-1	Q		851~858	0.16	19.60	77.68	1.04	-14.00	-54.30	0.07	
LD8-1	LD8-1-1	N <sub>y1</sub>		1723~1737	71.20	4.21	22.73	2.02	-3.65	-31.32	1.56	壳幔混合型	
琼东南盆地	BD19-2	BD19-2-2	E <sub>s</sub>	中细砂岩	5127.6	87.92	1.50	9.84	0.74	-7.5	-38.80	4.25	火山幔源型
	BD15-3	BD15-3-1			2267.5	97.64	0.48	1.80	0.00	-4.56	-42.70	4.58	
珠江口盆地西部	文昌15-1	WC15-1-1	N <sub>1</sub> z1	中细砂岩	1088~1096	76.98	4.81	12.46	5.76	-4.09	-40.00	4.11	火山幔源型
	文昌14-3	WC14-3-1	E <sub>3</sub> zh1	砂岩	2285~2308	38.87	1.31	43.62	16.20	-4.53	-41.88	3.06	
珠江口盆地东部	惠州18-1	HZ18-1-1	E <sub>3</sub> np	砂岩	3127.0~3135.5	93.56	5.25	0.61	0.16	-3.60	-43.19		火山幔源型
	番禺28-2	HZ28-2-1	E <sub>3</sub> zh	砂岩	3301.0	82.70	9.02	5.68	0.90	-3.92	-41.35		

## 2 不同成因 CO<sub>2</sub> 运聚规律与主控因素

### 2.1 火山幔源型 CO<sub>2</sub> 运聚规律与主控因素

#### 2.1.1 东部陆相断陷盆地火山幔源型 CO<sub>2</sub>

中国东部陆上火山幔源型 CO<sub>2</sub> 气藏主要分布在郯庐深大断裂带与大兴安岭—太行山—武陵山构造地球物理梯度带之间,以及和两侧的中新生代陆相断陷盆地中。迄今为止已发现 20 个 CO<sub>2</sub> 气藏(田),其中松辽盆地南部 3 个、渤海湾盆地 11 个、苏北盆地 3 个、三水盆地 3 个,除济阳拗陷的平方王和平南 CO<sub>2</sub> 气藏属下油上气的气顶气藏外,其余均为纯 CO<sub>2</sub> 气藏,且这些 CO<sub>2</sub> 气藏均富集于中国东部自北向南分布的 NWW 向新近纪—第四纪玄武岩带上<sup>[6-8]</sup>,其地球化学特征突出表现在 CO<sub>2</sub> 含量高(67.4%~99.6%)<sup>[8]</sup>, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值偏重(-3.25‰~-5.28‰),与 CO<sub>2</sub> 伴生的氮同位素值偏大(R/R<sub>a</sub> 均大于 2,一般为 2~4.96),且均与火山幔源型活动及深大断裂的发育展布密切相关。此类 CO<sub>2</sub> 气藏(田)的运聚分布均与地壳深部火山幔源活动及基底深大断裂的输气配置作用有极为密切的联系(图 2),深部火山幔源型 CO<sub>2</sub> 气源,主要通过深大断裂的沟通和输送疏导作用,源源不断地将其输送至浅部具圈闭条件良好的聚集场所,最终富集成藏。因此,气源断裂体系的展布与火山幔源活动脱气是控制这种火山幔源型成因 CO<sub>2</sub> 富集成藏及运聚规律的两大主控因素。

#### 2.1.2 东海及南海北部琼东南、珠江口盆地火山幔源型 CO<sub>2</sub>

东南沿海海域的东海盆地丽水凹陷、南海北部琼东南盆地东部 2 号断裂带周缘区和珠江口盆地,处在中国东部陆上 NWW 向新近纪—第四纪玄武岩带向大陆架延伸的区带上,亦处于郯庐深大断裂带与大兴安岭—太行山—武陵山构造地球物理梯度带与两侧向大陆架延伸的断裂发育区,故与中国东部陆相断陷盆地具有相同的大地构造背景断裂发育体系,新近纪以来断裂及火山活动较频繁。迄今勘探所发现的 10 个 CO<sub>2</sub> 气藏(田)与高含 CO<sub>2</sub> 油气藏(其中东海盆地丽水凹陷 3 个、珠江口盆地西部 2 个、珠江口盆地东部 3 个、琼东南盆地东部 2 个),均属火山幔源型成因,且 CO<sub>2</sub> 地球化学特征与中国东部陆相断陷盆地火山幔源型成因 CO<sub>2</sub> 一致<sup>[20-34,36]</sup>,CO<sub>2</sub> 含量高(34.2%~99.9%), $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值偏重(-3.6‰~-6.9‰),与 CO<sub>2</sub> 伴生的氮同位素值偏大(R/R<sub>a</sub> 均大于 2,一般为 2.2~8.8)。CO<sub>2</sub> 气藏(田)和高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的运聚富集亦与基底深大断裂的沟通导气配置作用相关(图 3-A,3-B)。CO<sub>2</sub> 气藏(田)及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏,主要分布于能与深大断裂沟通且受幔源型火山活动影响强烈的局部层段,CO<sub>2</sub> 气源比较单一,主要来自地壳深部的幔源型火山活动所产生的大量 CO<sub>2</sub>。因此,这种火山幔源型成因 CO<sub>2</sub> 的运聚分布特征,并没有壳源型岩石化学成因 CO<sub>2</sub> 及壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub> 那么复杂,而且主要运聚富集于基底深大断裂和晚期仍在继续活动的断裂带附近。

南海北部琼东南盆地东部宝岛凹陷东北缘 BD15-3 构造 CO<sub>2</sub> 气藏即为受幔源型火山活动与沟通深部 CO<sub>2</sub> 气源的

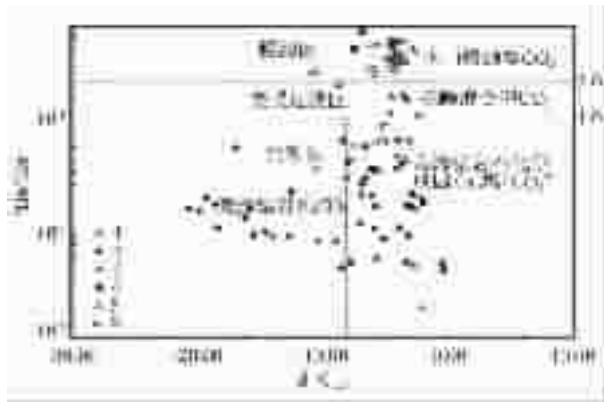


图 1 中国东部及海域诸盆地四大成因类型 CO<sub>2</sub> 划分的  $^3\text{He}/^4\text{He}-\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  图解

- 1—中国东部松辽、渤海湾、苏北及三水盆地;2—莺歌海盆地东方便区;
- 3—莺歌海盆地乐东区;4—琼东南盆地东部 2 号断裂带;
- 5—琼东南盆地西部崖 13—1 区;6—珠江口盆地西部

Fig.1  $^3\text{He}/^4\text{He}-\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  diagram of four genetic types of CO<sub>2</sub> in eastern China and various basins in the sea area

- 1—Songliao, Bohai Bay, Subei and Sanshui basins in eastern China;
- 2—East area of the Yinggehai basin;3—Ledong area of the Yinggehai basin;4—No. 2 fault zone of the eastern Qiongdongnan basin;
- 5—Ya13-1 district in the western Qiongdongnan basin;
- 6—Western Zhujiangkou basin

基底深大断裂控制而富集成藏的典型实例,该构造上 BD15-3-1 井所钻遇的陵水组 CO<sub>2</sub> 气藏与基底深大断裂的输气配置作用是密不可分的。由于基底深大断裂的沟通与输气作用,使地壳深部火山幔源型 CO<sub>2</sub> 得以输送到浅层,并在储层发育具备圈闭条件的有利场所富集成藏,由于随深度增加,其距离火山幔源型 CO<sub>2</sub> 气源中心就越近,则 CO<sub>2</sub> 含量就呈逐渐递增的变化趋势。

南海北部珠江口盆地东部火山幔源型成因 CO<sub>2</sub>,其形成及富集规律与上述琼东南盆地东部类似,主要受控于幔源型火山活动与沟通深部 CO<sub>2</sub> 气源的基底深大断裂的发育展布情况,以及现今仍在活动的次生断裂的发育情况<sup>[7]</sup>。CO<sub>2</sub> 气主要富集于基底深大断裂的附近,完全受控于深大断裂的发育展布情况与火山幔源活动(图 3-B),只要有运聚通道与其沟通配置,而具备良好的圈闭聚集及保存条件,均可将这种火山幔源型 CO<sub>2</sub> 输送至浅层形成 CO<sub>2</sub> 气藏或高含 CO<sub>2</sub> 的油气藏。

### 2.2 壳源和壳幔混合型 CO<sub>2</sub> 运聚规律与主控因素

壳源型岩石化学成因与壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub>,仅在南海北部边缘西区新近纪走滑—伸展型的莺歌海盆地及中国东部陆相断陷盆地部分油气藏中发现。这种成因类型的 CO<sub>2</sub> 主要分布于莺歌海盆地泥底辟带浅层,其中,壳源型岩石化学成因 CO<sub>2</sub> 目前在泥底辟带中深层虽已钻遇,但 CO<sub>2</sub> 在天



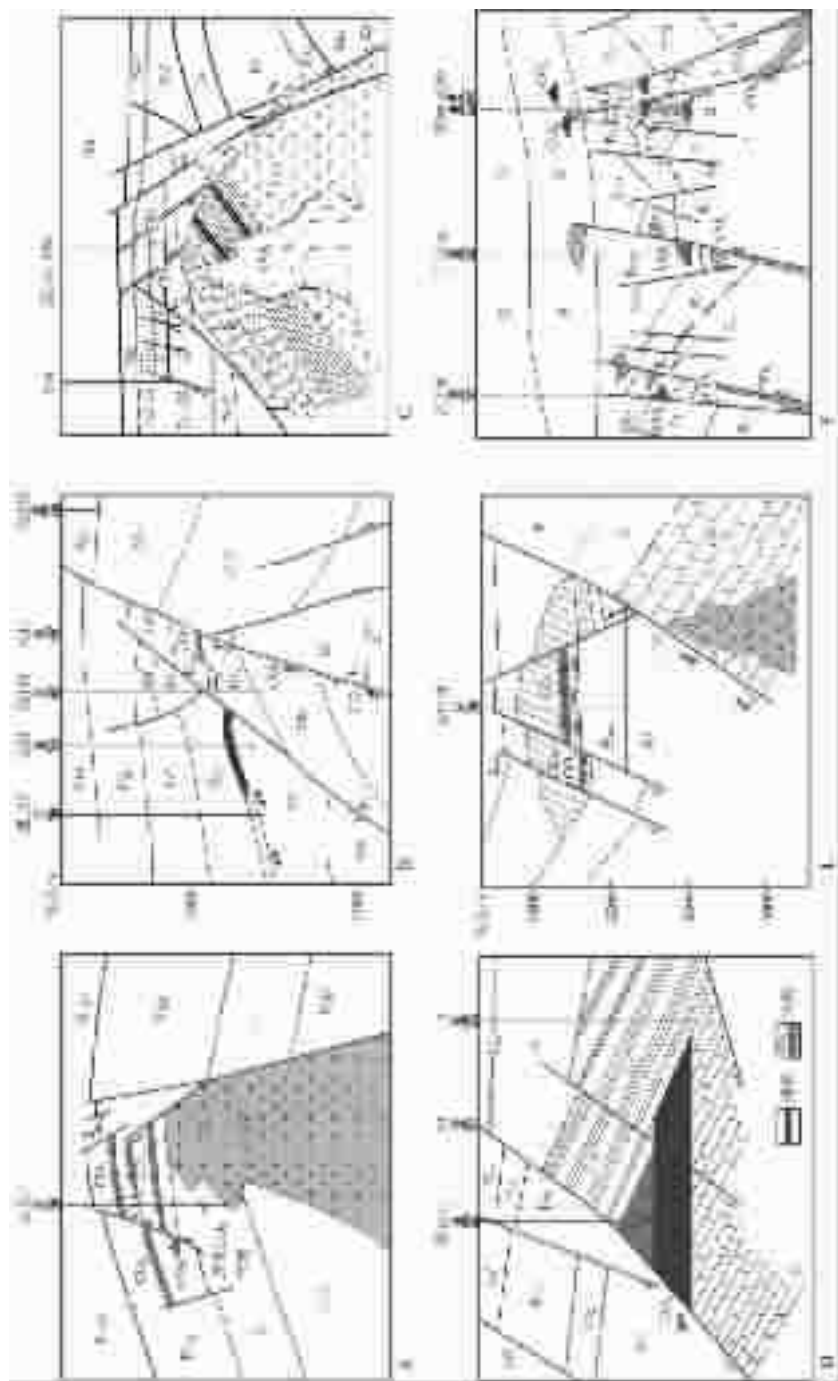


图2 中国东部陆相断陷盆地深大断裂带与火山幔源型CO<sub>2</sub>运聚成藏特征(据戴金星等,1995,1997修改)

A—松辽万金塔CO<sub>2</sub>气藏运聚模式;B—黄骅坳陷翟庄子CO<sub>2</sub>气藏运聚模式;C—济阳坳陷平方王CO<sub>2</sub>气藏运聚模式;D—济阳坳陷平南CO<sub>2</sub>气藏运聚模式;E—济阳坳陷花17CO<sub>2</sub>气藏运聚模式;F—苏北盆地CO<sub>2</sub>气藏运聚模式;箭头为运聚方向;J<sub>3</sub>—上侏罗统;K<sub>1</sub>q<sub>1</sub>—下白垩统青山口组;K<sub>1</sub>q<sub>2</sub>—下白垩统泉头组;Nm—上新统明化镇组;Ng—上新统馆陶组;Ed—渐新统东营组;Es<sub>1</sub>—渐新统沙河街组一段;Es<sub>2</sub>—渐新统沙河街组二段;Es<sub>3</sub>—渐新统沙河街组三段;Mz—中生界;C-P—石炭—二叠系;ε—寒武系;E<sub>1</sub>—古新统;E<sub>2,3</sub>—始新统—渐新统;E<sub>4</sub>—古新统—渐新统;T-D—三叠—泥盆系;S—志留系;Ek<sub>1</sub>—古新统孔店组;Q—第四系;N—新近系;E<sub>1</sub>—古新统;E<sub>2,3</sub>—始新统—渐新统;K<sub>2</sub>—上白垩统;T-D—三叠—泥盆系;S—志留系;

Eh<sub>1</sub>—古新—始新统华涌组;Eh<sub>2</sub>—古新—始新统西布组三段;Eh<sub>3</sub>—古新—始新统西布组二段;Eh<sub>4</sub>—古新—始新统西布组一段;Eh<sub>5</sub>—古新—始新统西布组二段;Eh<sub>6</sub>—古新—始新统布心组二段;Eh<sub>7</sub>—古新—始新统布心组一段;

Fig.2 Distribution of deep faults in continental downfaulted basins in eastern China and characteristics of migration and accumulation of volcanic mantle-derived CO<sub>2</sub> (modified from Dai Jin-xing et al., 1995 and 1997)

A—Migration and accumulation model of the Jinta CO<sub>2</sub> deposit, Songliao; B— Migration and accumulation model of the Zhaizhuangzi CO<sub>2</sub> deposit in the Huanghua depression; C—Migration and accumulation model of the Pingfangwang CO<sub>2</sub> deposit in the Jiyang depression; D— Migration and accumulation model of the Pingfang CO<sub>2</sub> deposit in the Jiyang depression;

E—Migration and accumulation model of the Hua17 CO<sub>2</sub> deposit in the Jiyang depression; F— Migration and accumulation model of the CO<sub>2</sub> deposit in the Subei basin; Arrow—Direction of migration and accumulation; J<sub>3</sub>—Upper Jurassic; K<sub>1</sub>q<sub>1</sub>—Lower Cretaceous Qinghankou Formation; K<sub>1</sub>q<sub>2</sub>—Lower Cretaceous Quantou Formation;

Nm—Pliocene Minghuizhen Formation; Ng—Pliocene Guantao Formation; Ed—Oligocene Dongying Formation; Es<sub>1</sub>—First Member of the Oligocene Shahejia Formation; Es<sub>2</sub>—Third Member of the Eocene Shahejia Formation. Mz—Mesozoic; C-P—Carbonaceous—Permian; ε—Cambrian; E<sub>1</sub>—Paleocene Kongdian Formation; E<sub>2,3</sub>—Eocene - Oligocene Shahejia Formation; E<sub>4</sub>—Permian; C—Carboniferous; O—Ordovician; Es<sub>2</sub>—Second Member of the Eocene Shahejia Formation; Ek<sub>1</sub>—Paleocene Kongdian Formation; Q—Quaternary; N—Neogene; E<sub>1</sub>—Paleocene; E<sub>2,3</sub>—Eocene - Oligocene; K<sub>2</sub>—Upper Cretaceous; T - D—Triassic - Devonian; S—Silurian; Eh<sub>1</sub>—Paleocene - Eocene Huayong Formation; Eh<sub>2</sub>—Third Member of the Paleocene - Eocene Xibu Formation; Eh<sub>3</sub>—Second Member of the Paleocene - Eocene Xibu Formation; Eh<sub>4</sub>—First Member of the Paleocene - Eocene Xibu Formation; Eh<sub>5</sub>—Third Member of the Paleocene - Eocene Xibu Formation; Eh<sub>6</sub>—Second Member of the Paleocene - Eocene Xibu Formation; Eh<sub>7</sub>—First Member of the Paleocene - Eocene Xibu Formation

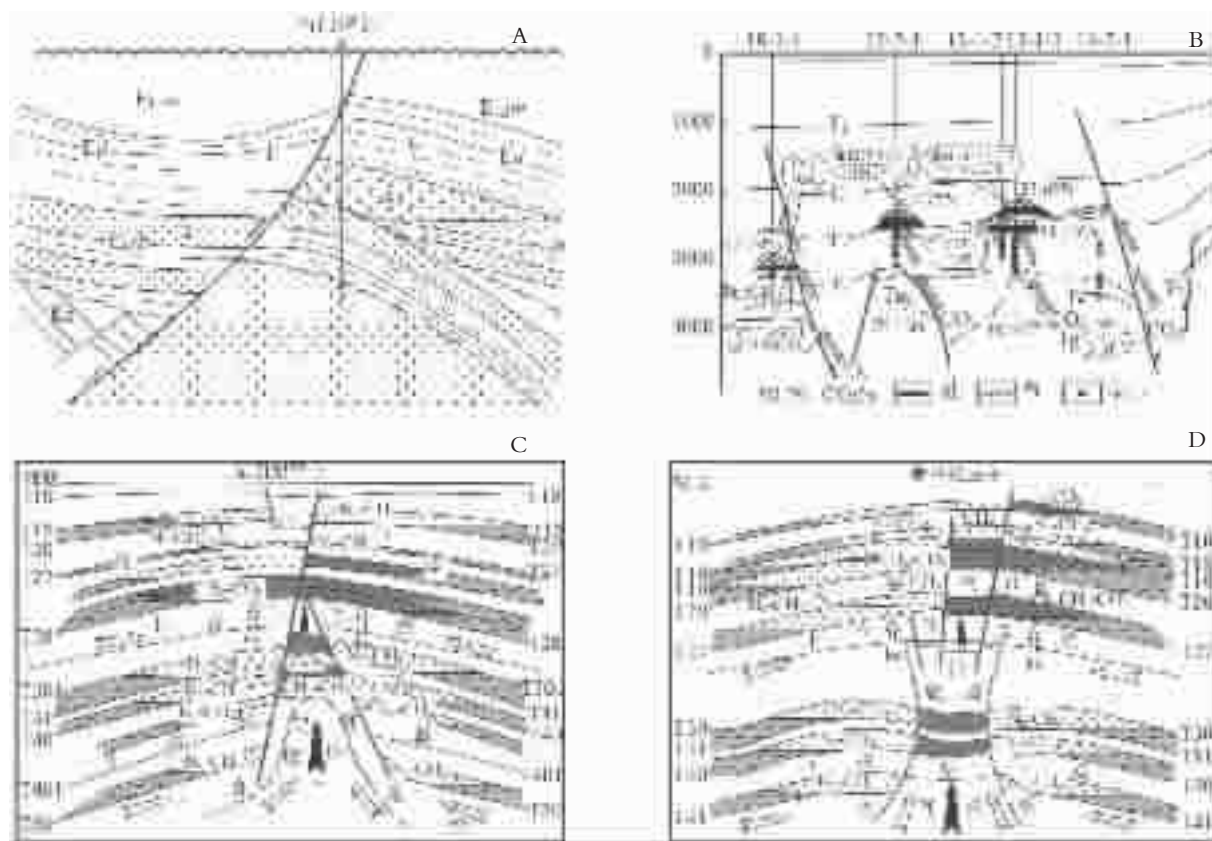


图 3 中国东南海域诸盆地不同成因 CO<sub>2</sub> 运聚与断裂及泥底辟活动的关系

1—泥岩;2—砂岩;3—花岗闪长岩;4—CO<sub>2</sub> 气藏;箭头为无机气运移方向

E<sub>1-2</sub>m—古新统明月峰组;E<sub>1</sub>l—古新统灵峰组;E<sub>1</sub>sh—古新统石门潭组;Cz—新生界

1—Mudstone;2—Sandstone;3—Granodiorce;4—CO<sub>2</sub> deposit.Arrow denotes the direction of inorganic gas

E<sub>1-2</sub>m—Paleocene Mingyuefeng Formation;E<sub>1</sub>l—Eocene Linfeng Formation;E<sub>1</sub>sh—Paleocene Shimentan Formation;Cz—Cenozoic

然气中的含量很低(均低于 7%)。高含量壳源型岩石化学成因 CO<sub>2</sub> 和壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub>, 不仅主要富集于泥底辟带浅层(1 100~2 380 m), 而且具有平面上分区分块, 纵向上分层分带分期运聚之规律<sup>[23-28]</sup>。其中, 泥底辟带东方区浅层气藏 CO<sub>2</sub> 为典型实例(图 3-C), 该区东方 1-1 气藏平面上的西块 I、II 气组为低 CO<sub>2</sub> 优质富烃天然气(CO<sub>2</sub><1%), 而其东块及北块则多为低含烃、高 CO<sub>2</sub> 的非烃气;纵向上分层分带亦明显, 1 900 m 以上的浅层为富烃天然气与富 CO<sub>2</sub> 非烃气的富集带, 1 900 m 以下的浅层下段及中深层则以低 CO<sub>2</sub> 富烃天然气(CO<sub>2</sub><7%)为主, 仅个别层段富含 CO<sub>2</sub>, 总体上仍属富烃低 CO<sub>2</sub> 优质天然气聚集带, 而该气藏 CO<sub>2</sub> 的运移充注具有多期次运聚特征<sup>[12]</sup>, 根据流体包裹体资料和天然气碳同位素资料, 其运移充注期次至少有 3~4 期, 表明其多期充注与运聚成藏的特征是非常明显的。

莺歌海盆地泥底辟带壳源型岩石化学成因 CO<sub>2</sub> 和壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub> 的形成及富集, 主要受控于泥底辟热流体和

分期分块分层的上侵活动与中新统一上新统巨厚含钙砂泥岩的物理化学综合作用<sup>[29-31]</sup>。由于该成因类型 CO<sub>2</sub> 气源物质(含钙砂泥岩)分布广泛, 因此, 泥底辟热流体分期分块分层的局部性侵入, 就直接控制和制约了 CO<sub>2</sub> 形成与富集特征(图 3-C, 3-D), 即 CO<sub>2</sub> 形成富集与泥底辟热流体局部侵入密切相关, 泥底辟热流体侵入或影响强烈的区块及层段 CO<sub>2</sub> 富集, 反之, 无泥底辟热流体侵入或影响很小的区块及层段, 一般无该成因类型 CO<sub>2</sub> 的输入和充注, 或者其 CO<sub>2</sub> 含量甚微。需强调的是, 由于泥底辟热流体侵入, 导致了浅部地层中部分层段粘土矿物演化发生了“热异常”变化, 伊蒙混层中的蒙脱石含量可剧烈下降(10%~25%), 即达到了晚期成岩作用阶段, CO<sub>2</sub> 则伴随热流体的侵入而运移富集于浅层中局部物性好的储层段, 在具备良好封盖条件下形成富 CO<sub>2</sub> 气藏;无热流体侵入或受热流体侵入影响很小的区块及层段, 粘土矿物演化则未见“热异常”变化, 属正常的成岩演化作用区, 这种区块及层段一般以富烃天然气的运聚充注为主, CO<sub>2</sub> 低于

1%,且多为有机成因,无壳源型岩石化学成因及壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub> 的充注。

### 3 不同成因 CO<sub>2</sub> 运聚成藏模式分析

根据中国东部中生代陆相断陷盆地、海域诸盆地不同成因 CO<sub>2</sub> 气藏所处大地构造背景及区域构造地质条件,结合不同成因类型的 CO<sub>2</sub> 地球化学特征与运聚成藏规律的分析,可将不同成因 CO<sub>2</sub> 划分为两类运聚成藏模式(表 2)。

火山幔源型成因 CO<sub>2</sub> 气藏及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏,其形成及运聚成藏,主要受沟通地壳深部的基底深大断裂的发育展布程度及晚期次生活动断裂的控制,即气源断裂体系是制约其运聚分布的主控因素,而 CO<sub>2</sub> 气源充足与否,则是其富集成藏的前提条件。由于 CO<sub>2</sub> 气源主要来自地壳深部幔源型火山活动所产生的原始 CO<sub>2</sub> 气,并通过基底深大断裂的输气配置作用,方可将其输送到具良好储集及圈闭条件的场所富集成藏,故 CO<sub>2</sub> 的纵向运聚与分布有深有浅,但一般均具有随深度增加 CO<sub>2</sub> 含量呈逐渐递增的规律,因此,对于这种火山幔源型成因 CO<sub>2</sub> 的预测相对比较简单,在确认了幔源型 CO<sub>2</sub> 气源的基础上,只要搞清了基底深大断裂的发育演化以及次生活动断裂的展布特征和火山活动情况,即可预测 CO<sub>2</sub> 的运聚分布特征,其成因类型划分与鉴别主要依据二氧化碳碳同位素和氦同位素特征来综合判断。

壳源型岩石化学成因与壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub> 的形成运聚成藏,则主要受控于泥底辟热流体的上侵活动与局部侵入的影响,因此,泥底辟热流体上侵活动的影响程度是形成该

类 CO<sub>2</sub> 的主控因素。由于该成因类型 CO<sub>2</sub> 气源广泛而复杂,主要来自中新统、上新统含钙砂泥岩与侵入热流体的物理化学综合作用所形成的 CO<sub>2</sub>,故其运聚成藏及分布特征与热流体侵入特点一致,多具有平面上分区分块、剖面上分层分带分期的规律,因而对于这种成因 CO<sub>2</sub> 的预测还相当困难,只能根据地质综合分析类比方法,来进行定性的预测与综合判断,其成因类型划分与鉴别也主要依据二氧化碳碳同位素和氦同位素特征来综合判断。

### 4 不同成因 CO<sub>2</sub> 有利成藏富集区分析与预测

#### 4.1 东部陆上盆地、东海盆地、琼东南、珠江口盆地 CO<sub>2</sub> 富集区分析与预测

中国东部中生代陆相断陷盆地火山幔源型 CO<sub>2</sub> 气藏的形成与富集,主要受控于深大断裂剧烈活动及幔源岩浆频繁对地壳的广泛侵入,戴金星等<sup>[8]</sup>认为中国东部伸展盆地火山幔源型 CO<sub>2</sub> 气藏的形成,主要与早、中侏罗世至第四纪的 5 个主要构造演化期和 3 期强烈的无机成因气的释放有关,并首次提出了预测火山幔源型 CO<sub>2</sub> 气藏的 7 个控制因素条件和标志,在此基础上,还明确指出了“高热-热构造区、伸展盆地、NW 向近期玄武岩浆活动带与壳幔混合型氦分布区,是无机成因气(CO<sub>2</sub>)的有利富集区带”,勘探实践充分证明了以上论断的正确性。迄今为止,中国东部陆相断陷盆地勘探所发现的 CO<sub>2</sub> 气藏及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏,都在 NE—NNE 向的伸展构造断裂带与 NW—NW 向火山断裂活动带的交汇复合部位。因此,对于中国东部陆相断陷盆地火山

表 2 中国东部陆上与海域诸盆地不同成因类型 CO<sub>2</sub> 形成的区域构造地质条件及运聚成藏模式与控制因素  
Table 2 Regional tectonic conditions for the formation of different types of CO<sub>2</sub> in various continental and sea basins in eastern China, model of migration and accumulation of CO<sub>2</sub> and controlling factors

成因类型		壳源型 CO <sub>2</sub> /壳幔混合型 CO <sub>2</sub>	火山幔源型 CO <sub>2</sub>
分布区域		南海北部边缘西区莺歌海盆地	中国东部陆相断陷盆地、东海盆地、南海北部边缘琼东南盆地东部与珠江口盆地
地球化学特征	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$	-0.56‰~-7.68‰	-2‰~-6.9‰
	$^3\text{He}/^4\text{He}$	壳源型( $<1.4 \times 10^{-6}$ )/壳幔混合型( $1.4 \times 10^{-6}$ ~ $2.8 \times 10^{-6}$ )	$\geq 2.8 \times 10^{-6}$
	R/Ra	壳源型( $<1.0$ )/壳幔混合型(1.0~2.0)	$\geq 2$
区域构造背景及运聚条件		新生代走滑伸展盆地,新近系、第四系沉积巨厚,构造断裂活动较弱,泥底辟发育,纵向底辟通道为主,侧向运聚通道不发育,泥底辟通道控制了油气运聚	中生代陆相断陷盆地,具典型双层结构及复杂的断裂体系,沉积及构造发育演化严格受深大断裂控制,断裂系统为主要运聚通道,直接制约了油气运聚过程
成因特点		泥底辟热流体分块分层局部侵入与中新统、上新统富含碳酸盐物质砂泥岩,发生岩石化学反应而形成大量 CO <sub>2</sub> , 气源物质广泛,CO <sub>2</sub> 分布复杂,在天然气组成中含量较高	地壳深部幔源型火山活动伴生的 CO <sub>2</sub> 通过基底深大断裂及次生活动断裂的沟通输送作用,而在不同深度富集成藏,气源单一、分布简单,在天然气组成中含量一般很高
运聚分布特征		CO <sub>2</sub> 运聚成藏与泥底辟热流体的局部侵入密切相关,且具分块分层富集的特点,剖面上总体多富集于泥底辟活动强烈的浅层,一般不具有离气源之远近而发生含量变化的规律	CO <sub>2</sub> 区域及剖面运聚分布与幔源型火山活动、基底深大断裂发育程度密切相关,CO <sub>2</sub> 多富集于能与幔源型火山活动沟通的深大断裂附近,其深度可深可浅,一般多具有随距 CO <sub>2</sub> 气源越近,CO <sub>2</sub> 有逐渐递增的规律
控制因素		主要受控于泥底辟热流体分期分块分层的上侵活动与中新统—上新统巨厚含钙砂泥岩的物理化学综合作用	火山幔源型成因 CO <sub>2</sub> 运聚分布主要受控于地壳深部的幔源型火山活动与沟通深部气源的基底深大断裂、次生活动断裂的输气配置作用



幔源型 CO<sub>2</sub> 气藏有利富集区带,只要搞清了气源断裂体系的发育展布特征与幔源型火山活动的侵入情况,即可预测与分析评价其有利富集区。根据火山幔源型 CO<sub>2</sub> 气藏的 7 个控制因素和主要标志并结合前人研究成果<sup>[1-9]</sup>,预测中国东部伸展盆地带的有利 CO<sub>2</sub> 气藏富集区有:①松辽盆地南部万金塔—德惠区和孤店—乾安区 CO<sub>2</sub> 富集带;②渤海湾盆地辽河断陷东部凹陷东缘的浑河—三界炮 CO<sub>2</sub> 富集区带;③渤海湾盆地黄骅坳陷港西断裂潜山区、扣村区和北堡区 CO<sub>2</sub> 富集带;④渤海湾盆地冀中坳陷饶阳凹陷河间区留 58 与宁古 1 井 CO<sub>2</sub> 富集区带;⑤渤海湾盆地济阳坳陷南部高青—平南区、惠民凹陷西南部的玉皇庙区和东北边缘的阳信区 CO<sub>2</sub> 富集带;⑥苏北盆地东南斜坡黄桥区、溱潼凹陷东南部丁庄垛区和金湖凹陷东南部的王龙庄区 CO<sub>2</sub> 富集带;⑦三水盆地宝月—沙头圩背斜、小塘和西樵区 CO<sub>2</sub> 富集区带等。这些有利 CO<sub>2</sub> 气藏富集区带的共同特点是:气源断裂与储盖组合、圈闭保存条件好;处于莫霍面上隆、大地热流偏高(大于 1.3HFU)的构造及岩浆频繁活动区;多处 NE—NNE 向伸展断裂带与 NW—NWW 向断裂带及近期 NWW 向玄武岩活动带交汇复合部位;具有 CO<sub>2</sub> 含量高(>60%),伴生氮的 R/Ra 值偏大(2~4.96),δ<sup>13</sup>Cco<sub>2</sub> 值偏重(-3.25‰~-5.28‰)的地球化学特征等。

东海盆地、南海北部边缘琼东南盆地东部、珠江口盆地火山幔源型成因 CO<sub>2</sub> 的形成运聚成藏,也主要受控于沟通地

壳深部基底深大断裂的发育展布与晚期次生断裂的活动,CO<sub>2</sub> 气源主要来自地壳深部幔源型火山活动所产生的原始 CO<sub>2</sub>,并通过基底深大断裂将其输送到浅部圈闭富集成藏。基于 CO<sub>2</sub> 运聚成藏规律,根据近年油气勘探所获地质成果,对东海盆地、琼东南盆地东部和珠江口盆地有利 CO<sub>2</sub> 富集区带可作出以下预测:①东海盆地火山幔源型 CO<sub>2</sub> 主要发现于丽水凹陷中央隆起带上的石门潭、温州 13-1 潜山披覆构造、丽水 36-1 反转构造等断裂及火山活动频繁区,CO<sub>2</sub> 气源及运聚成藏均明显受控于基底深大断裂的导气配置作用与火山幔源活动,因此预测丽水凹陷西次凹南部邻近凹陷中心与深大断裂具有密切联系的构造带和中央反转构造带,以及邻近该带的灵峰潜山披覆构造带为幔源型 CO<sub>2</sub> 最有利富集区带,而丽水凹陷北部西斜坡构造带则为有利的幔源型 CO<sub>2</sub> 富集区带;②琼东南盆地目前发现的火山幔源型 CO<sub>2</sub> 主要富集于盆地东部 2 号断裂带周缘区,且严格受 2 号断裂和 2-1 号断裂晚期活动的控制和影响,因此,预测在 2 号断裂和 2-1 号断裂附近与其连通配置良好的渐新统陵水组构造、非构造圈闭均可形成 CO<sub>2</sub> 气藏及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏,远离该断裂系统则无 CO<sub>2</sub> 运聚富集,但由于纵向气源断裂通道尚未通至中新统梅山组,故其上覆地层无 CO<sub>2</sub> 运聚富集;③珠江口盆地西部火山幔源型 CO<sub>2</sub> 主要受控于珠三南深大断裂与文昌东断裂发育展布特点与活动程度,CO<sub>2</sub> 气藏与高含 CO<sub>2</sub> 油气藏均分布于该区域,因此,预测在珠三南深大断裂附近与其连通

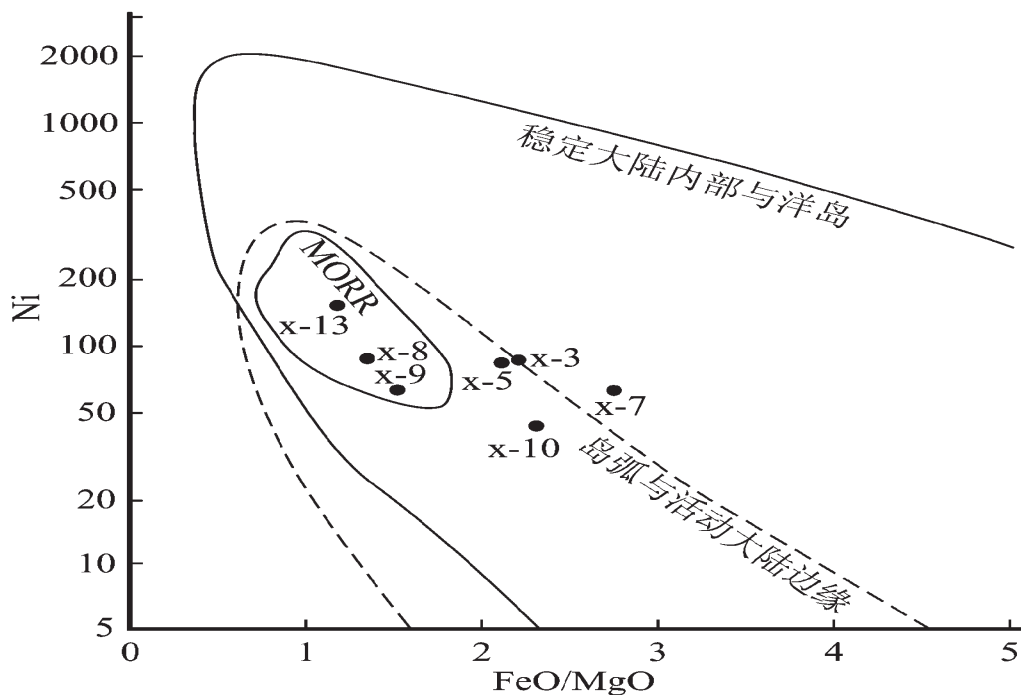


图 4 莺歌海泥底辟带东方区及邻区天然气运聚特征与有利 CO<sub>2</sub> 富集区预测

Fig. 4 Characteristics of gas migration and accumulation in the East area of the mud diapir zone of Yinggehai and prediction of the favorable CO<sub>2</sub> concentration area

良好的构造与非构造圈闭均可富集 CO<sub>2</sub>, 应是 CO<sub>2</sub> 气藏及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的有利富集区; ④珠江口盆地东部火山幔源型 CO<sub>2</sub> 亦严格受导气深大断裂发育展布与火山幔源型活动的控制和制约<sup>[9]</sup>, 如惠州 18-1、惠州 22-1 及番禺 28-2 等构造火山幔源型 CO<sub>2</sub> 气藏, 因此预测该区带为 CO<sub>2</sub> 气藏及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的有利富集区。

#### 4.2 南海北部边缘西区莺歌海盆地有利 CO<sub>2</sub> 富集区带分析与预测

南海北部大陆架西区莺歌海盆地壳源型和壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub> 运聚分布, 具有平面上分区分块, 剖面上分层分带分期充注与运聚的特点, 以及受控于泥底辟热流体上侵活动和影响之规律。因此对于有利 CO<sub>2</sub> 富集区带的分析与预测, 应根据探井地质资料及地震剖面所提供的地球物理信息, 重点分析泥底辟热流体上侵活动、影响范围与可能的运聚通道路径, 并结合地质综合类比分析法进行。基于以上认识并根据近几年该区浅层、中深层天然气勘探成果, 对莺歌海盆地泥底辟带浅层—中深层有利 CO<sub>2</sub> 富集区带可进行以下预测: 区域上, 壳源型岩石化学成因 CO<sub>2</sub> 主要富集于泥底辟带东方区东南部和乐东区(包括昌南)部分区块的局部层段, 主要受控于泥底辟热流体的上侵活动。但该区域内具体勘探目标及主要目的层段的 CO<sub>2</sub> 预测, 应结合具体的钻井地质资料和表征泥底辟热流体的地球物理及地球化学信息综合类比分析来确定。例如: 泥底辟带东方区 NW 方向浅层至临高区, 由于远离泥底辟热流体活动中心, 受其热流体活动的影响小, 根据东方 1-1 浅层气藏及 X 井的钻探成果, 以及该区带可能的天然气运聚成藏模式, 预测其无 CO<sub>2</sub> 富集区带存在, 该区浅层及中深层均应以富集烃类气藏为主(图 4)。再者, 根据近年 X 和 Q 两口深探井的钻探证实, 泥底辟带中深层无论是东方区还是乐东区均无 CO<sub>2</sub> 富集带分布, 存在早期成熟度相对较低的原生低 CO<sub>2</sub> 烃类气藏, 表明晚期形成的这种壳源型及壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub> 气源, 主要受泥底辟热流体上侵活动的控制和影响, 其高含 CO<sub>2</sub> 气通过泥底辟热流体上侵活动的通道运聚富集于浅层, 在其运聚过程中, 尚未破坏改造中深层早期已形成的原生低 CO<sub>2</sub> 烃类气藏, 这就是该区中深层无高 CO<sub>2</sub> 气藏分布的主要原因。因此, 基于该区浅层、中深层 CO<sub>2</sub> 运聚规律, 预测泥底辟带有利 CO<sub>2</sub> 富集区, 主要运聚于东方区和乐东区浅层泥底辟热流体上侵活动强烈的部分区块和层段是有事实根据的。

## 5 结 论

(1) 根据 CO<sub>2</sub> 碳同位素和所伴生稀有气体氦同位素特征可将中国东部及海域诸盆地 CO<sub>2</sub> 划分为四大成因类型, 即: 壳源型岩石化学成因、壳源型有机成因、壳幔混合型成因以及火山幔源型成因。前三类主要分布于南海北部边缘西区莺歌海盆地泥底辟带浅—中层以及中国东部陆相断陷盆地部分高含 CO<sub>2</sub> 油气藏中, 后者则主要富集于中国东部诸陆相断陷盆

地与东海盆地、南海北部边缘琼东南盆地东部和珠江口盆地。

(2) 不同成因类型 CO<sub>2</sub> 运聚分布特征差异性明显。壳源型岩石化学成因及有机成因 CO<sub>2</sub> 和壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub>, 主要富集于南海北部边缘西区莺歌海盆地泥底辟带浅层, 纵向上具分期分块分层分带特征; 而火山幔源型成因 CO<sub>2</sub> 则主要展布于中国东部中生代诸陆相断陷盆地与东海盆地、南海北部边缘琼东南盆地东部和珠江口盆地, 剖面上则主要富集于能与深大断裂沟通且受幔源型火山活动影响强烈和控制的局部层段。

(3) 南海北部边缘西区莺歌海盆地壳源型岩石化学成因 CO<sub>2</sub> 及壳幔混合型成因 CO<sub>2</sub> 的形成与富集, 主要受控于泥底辟热流体分期分块分层的强烈上侵活动与中新统一上新统巨厚含钙砂泥岩的物理化学综合作用; 中国东部中生代诸陆相断陷盆地、东海盆地、南海北部边缘琼东南盆地东部、珠江口盆地火山幔源型成因 CO<sub>2</sub> 形成与分布, 则主要受控于幔源型火山活动与沟通深部气源的基底深大断裂的发育展布与疏导作用。

(4) 根据不同成因类型 CO<sub>2</sub> 的成因机理、运聚分布规律及控制因素, 不但可以追踪气源, 分析和预测天然气, 尤其是 CO<sub>2</sub> 运聚分布规律, 为天然气勘探部署及决策提供依据; 而且可以评价其气源丰度与资源潜力, 为今后综合开发利用与制定远景规划奠定基础。

#### 参 考 文 献(References):

- [1] 戚厚发, 戴金星. 我国高含 CO<sub>2</sub> 气藏的分布及其成因探讨[J]. 石油勘探与开发, 1981, 3(2): 34~42.  
Qi Houfa, Dai Jinxing. Distribution and origin of high content CO<sub>2</sub> reservoir in our country[J]. Petroleum Exploration and Development, 1981, 3(2): 34~42 (in Chinese with English abstract).
- [2] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. 中国海上油气(地质), 1992, 6(1): 11~19.  
Dai Jinxing. Origin identification of various type gas[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1992, 6(1): 11~19 (in Chinese with English abstract).
- [3] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(2~3): 1~40.  
Dai Jinxing. Carbon/hydrogen isotope characteristics and identification of various type gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(2~3): 1~40 (in Chinese with English abstract).
- [4] 戴金星, 戴春森, 宋岩, 等. 中国东部无机成因的 CO<sub>2</sub> 气藏及其特征[J]. 中国海上油气(地质), 1994, 8(4): 215~222.  
Dai Jinxing, Dai Chunsen, Songyan, et al. CO<sub>2</sub> reservoir and characteristics from inorganic origin in eastern China[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, 8(4): 215~222 (in Chinese with English abstract).
- [5] 戴金星. 中国含油气盆地的无机成因气及其气藏[J]. 天然气工业, 1995, 8(4): 11~19.  
Dai Jinxing. Inorganic origin of hydrocarbon-bearing basin and gas



- reservoir in China[J]. Natural Gas Industry, 1995, 8(4): 11~19 (in Chinese with English abstract).
- [6] 戴金星. 中国东部和大陆架 CO<sub>2</sub> 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> reservoir and its type in eastern China and continental shelf[J]. Nature Exploration, 1996, 15(4): 18~20 (in Chinese with English abstract).
- [7] 戴金星, 傅成德, 关德范, 等. 天然气地质研究新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 183~203.
- Dai Jinxing, Fu Chengde, Guan Defan, et al. New Progress in Natural Gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 183~203 (in Chinese).
- [8] 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: 80~210.
- Dai Jinxing, Song Yan, Dai Chunseng, et al. Gas formation Condition from Inorganic Origin in Eastern China [M]. Beijing: Science Press, 1995: 80~210 (in Chinese).
- [9] 唐忠驭. 广东三水盆地 CO<sub>2</sub> 气藏地质特征及成因探讨[J]. 石油实验地质, 1980, 3(4): 10~18.
- Tang Zhongyu. Geologic characteristics and origin of CO<sub>2</sub> reservoir in Sanshui basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1980, 3(4): 10~18 (in Chinese).
- [10] 唐忠驭. 天然 CO<sub>2</sub> 气藏的地质特征及其利用[J]. 天然气工业, 1983, 3(3): 22~25.
- Tang Zhongyu. Geologic characteristics and utilization of natural CO<sub>2</sub> reservoir[J]. Natural Gas Industry, 1983, 3(3): 22~25 (in Chinese with English abstract).
- [11] 唐忠驭. 三水盆地火山活动与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 1984, 5(2): 89~99.
- Tang Zhongyu. Volcanic event and hydrocarbon in Sanshui basin [J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 1984, 5 (2): 89~99 (in Chinese).
- [12] 徐永昌, 王先彬, 吴仁铭, 等. 天然气中的稀有气体同位素[J]. 地球化学, 1979, 3(4): 271~281.
- Xuyongchang, Wangxianbin, Wu Renming, et al. Rare gas isotope in natural gas [J]. Geochemistry, 1979, 3 (4): 271~281 (in Chinese with English abstract).
- [13] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 慢源氦的工业聚集和郯庐大断裂[J]. 科学通报, 1990, 35(12): 932~935.
- Xu Yongchang, Shen Ping, Tao Mingxin, et al. Industrial accumulation and Tanlu big fault from mantle-derived helium [J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(12): 932~935 (in Chinese).
- [14] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 东部油气区天然气中慢源挥发份的地球化学[J]. 中国科学, 1996, 26(2): 1~8.
- Xu Yongchang, Shen Ping, Tao Mingxin, et al. Geochemistry from mantle-derived volatile of oil-gas field in eastern China[J]. Science in China, 1996, 26(2): 1~8 (in Chinese).
- [15] 杜建国. 中国天然气中高浓度 CO<sub>2</sub> 成因[J]. 天然气地球科学, 1991, 2(5): 199~202.
- Du Jianguo. Origin of high content CO<sub>2</sub> reservoir in China natural gas [J]. Natural Gas Geoscience, 1991, 2 (5): 199~202 (in Chinese with English abstract).
- [16] 杜建国, 刘文汇. 三水盆地天然气中氦和氩同位素地球化学研究[J]. 天然气地球科学, 1991, 2(6): 283~285.
- Du Jianguo, Liu Wenhui. Isotope geochemistry from helium and argon in Sanshui basin gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1991, 2(6): 283~285 (in Chinese with English abstract).
- [17] 何家雄. 莺歌海盆地东方 1-1 构造天然气地质地化特征及成因探讨[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(3): 1~8.
- He Jiexiong. Geologic-geochemical characteristics and origin of Dongfang 1-1 structure in Yinggehai basin [J]. Natural Gas Geoscience, 1994, 5(3): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- [18] 何家雄, 钟启祥, 陈伟煌, 等. 莺歌海盆地浅层天然气成因及烃源探讨[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(6): 15~27.
- He Jiexiong, Zhong Qixiang, Chen Weihuang, et al. Natural gas origin from shallow zone and source in Yinggehai basin [J]. Natural Gas Geoscience, 1994, 5 (6): 15~27 (in Chinese with English abstract).
- [19] 何家雄. 莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 天然气的初步研究[J]. 天然气地球科学, 1995, 6(3): 1~12.
- He Jiexiong. Preliminary study on CO<sub>2</sub> natural gas in Yinggehai basin [J]. Natural Gas Geoscience, 1995, 6 (3): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- [20] 何家雄, 陈刚. 莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 成因及运聚特征的初步研究[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(6): 8~15.
- He Jiexiong, Chen Gang. Preliminary study on origin and CO<sub>2</sub> migration in Yinggehai Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 6(3): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- [21] 何家雄, 陈刚. 莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 成因及与国内外典型 CO<sub>2</sub> 气藏的类比[J]. 天然气地球科学, 1996, 7(4): 1~12.
- He Jiexiong, Chen Gang. Contrast of CO<sub>2</sub> origin in Yinggehai Basin with internal-external typical CO<sub>2</sub> reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 1996, 7(4): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- [22] 何家雄. 莺歌海盆地莺-黄组浅层气藏烃源探讨及勘探方向[J]. 石油实验地质, 1996, 18(1): 78~87.
- He Jiexiong. Source rock and exploration of shallow zone gas reservoir in Yinggehai Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1996, 18(1): 78~87 (in Chinese with English abstract).
- [23] 何家雄, 陈刚. 莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 分布富集特征及初步预测[J]. 天然气地球科学, 1997, 8(3): 9~17.
- He Jiexiong, Chen Gang. The preliminary prediction conditions and occurrence of CO<sub>2</sub> migration in Yinggehai Basin. [J]. Natural Gas Geoscience, 1997, 8(3): 9~17 (in Chinese with English abstract).
- [24] 何家雄, 陈刚. 莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 分布及预测方法研究[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(2): 20~23.
- He Jiexiong, Chen Gang. The preliminary prediction conditions and occurrence of CO<sub>2</sub> migration in Yinggehai [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25 (2): 20~23 (in Chinese with English abstract).
- [25] 何家雄, 陈刚. 莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 成因及主气源[J]. 中国海上油气,

- 1998,12(3):164~167.
- He Jiaxiong, Chen Gang. The preliminary prediction conditions and occurrence of CO<sub>2</sub> migration in Yinggehai Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25 (2): 20~23 (in Chinese with English abstract).
- [26] 何家雄, 李明兴, 陈胜红, 等. 莺歌海盆地泥底辟带中深层天然气勘探中的 CO<sub>2</sub> 风险分析与预测 [J]. 中国海上油气, 2000, 14(5): 332~338.
- He Jiaxiong, Li Mingxing, Chen Shenghong, et al. Risk and exploration targets of deep zone gas in Mud Diapir Belt, Yinggehai Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2000, 14 (5): 332~338 (in Chinese with English abstract).
- [27] 何家雄, 陈伟煌, 李明兴, 等. 莺-琼盆地天然气成因类型及气源剖析 [J]. 中国海上油气, 2000, 14(6): 398~405.
- He Jiaxiong, Chen Weihuang, Li Mingxing, et al. Origin type and source of natural gas in Ying-Qiong Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2000, 14(6): 398~405 (in Chinese with English abstract).
- [28] 何家雄, 陈伟煌, 李明兴, 等. 莺歌海盆地热流体上侵活动与天然气运聚富集关系探讨 [J]. 天然气地球科学, 2000, 11(6): 29~43.
- He Jiaxiong, Chen Weihuang, Li Mingxing, et al. Geotemperature field and upwelling action of hot flow body and its relationship with natural gas migration and accumulation in Yinggehai Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2000, 11 (6): 29~43 (in Chinese with English abstract).
- [29] 何家雄, 陈伟煌, 李明兴, 等. 莺-琼盆地天然气中 CO<sub>2</sub> 成因及气源综合判识 [J]. 天然气工业, 2001, 21(3): 15~21.
- He Jiaxiong, Chen Weihuang, Li Mingxing, et al. CO<sub>2</sub> origin and gas source in Ying-Qiong Basin. [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(3): 15~21 (in Chinese with English abstract).
- [30] 何家雄. 关于莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 成因问题的探讨 [J]. 中国海上油气, 2003, 17(2): 149~150.
- He Jiaxiong. Origin of CO<sub>2</sub> in Yinggehai Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 17 (2): 149~150 (in Chinese with English abstract).
- [31] 何家雄. 再论莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 成因问题 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 412~415.
- He Jiaxiong. Origin of CO<sub>2</sub> in Yinggehai Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2003, 14 (5): 412~415 (in Chinese with English abstract).
- [32] 何家雄, 杨计海, 陈志宏, 等. 莺歌海盆地中深层天然气运聚成藏特征 [J]. 天然气工业, 2003, 23(3): 15~19.
- He Jiaxiong, Yang Jihai, Chen Zhihong, et al. Migration-accumulation characteristics of deep zone gas in Yinggehai Basin [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(3): 15~19 (in Chinese with English abstract).
- [33] 何家雄, 王振峰, 裴秋波, 等. 莺-琼盆地和珠江口盆地西部 CO<sub>2</sub> 成因及运聚分布特征 [J]. 中国海上油气, 2003, 17(5): 293~297.
- He Jiaxiong, Wang Zhenfeng, Pei Qiubo, et al. CO<sub>2</sub> migration and origin in Ying-Qiong and western Pearl Mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2003, 17(5): 293~297 (in Chinese with English abstract).
- [34] 何家雄, 刘全稳. 南海北部大陆架边缘盆地 CO<sub>2</sub> 成因及运聚规律分析与预测 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1): 1~8.
- He Jiaxiong, Liu Quanwen. Analysis and discussion to the characters on generative cause, migration and distribution of CO<sub>2</sub> in Ying-Qiong Basin in the North of the South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15 (1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- [35] 何家雄, 胡忠良, 刘宝明, 等. 综合开发利用南海莺-琼盆地 CO<sub>2</sub> 资源促进国家及中海油跨越式发展 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(4): 401~405.
- He Jiaxiong, Hu Zhongliang, Liu Baoming, et al. To utilize CO<sub>2</sub> reservoir in Ying-Qiong Basin of south China sea and to promote the development of CNOOC by leaps and bounds [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15 (4): 401~405 (in Chinese with English abstract).
- [36] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 创建中国 CO<sub>2</sub> 研发中心促进社会经济可持续发展 [J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 161~163.
- He Jiaxiong, Xia Bin, Liu Baoming, et al. Suggestion to establish CO<sub>2</sub> research and development center in China [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 161~163 (in Chinese with English abstract).
- [37] 向凤典. 珠江口盆地东部 CO<sub>2</sub> 气藏及其对油气聚集的影响 [J]. 中国海上油气, 1994, 8(3): 155~162.
- Xiang Fengdian. CO<sub>2</sub> reservoir and effect to oil-gas migration in eastern Pearl Mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, 8(3): 155~162 (in Chinese with English abstract).

## Analysis of the genesis and migration and accumulation of CO<sub>2</sub> and controlling factors in the onland and offshore areas of eastern China

HE Jia-xiong<sup>1,2</sup>, XIA Bin<sup>1</sup>, LIU Bao-ming<sup>1</sup>, ZHANG Shu-lin<sup>1</sup>

(1. *Laboratory of Marginal Sea Geology and Resources, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, Guangdong, China;*

2. *Western South China Sea Research Institute, China Offshore Oil Ltd. Co., Zhanjiang 524057, Guangdong, China)*

**Abstract:** According to a wealth of geological and geochemical data, this paper focuses on the genesis and characteristics of migration and accumulation of CO<sub>2</sub> and their key controlling factors in eastern China and its sea areas and on that basis a preliminary evaluation of the favorable CO<sub>2</sub> distribution areas is made. The study shows that in various continental downfaulted basins in eastern China, the China East Sea basin of the southeast sea region and the continental shelf—Qiongdongnan basin and Zhujiangkou basin—of the northern South China Sea, CO<sub>2</sub> in CO<sub>2</sub> reservoirs and CO<sub>2</sub>-rich oil/gas reservoirs is of typical volcanic mantle-derived type and that its migration and concentration is mainly controlled by mantle-derived volcanism and gas-conducting distribution of deep basement faults connected with the gas source at depth. CO<sub>2</sub> is mainly sourced from substantial amount of CO<sub>2</sub> associated with mantle-derived volcanism at the deep level of the crust. CO<sub>2</sub> in the CO<sub>2</sub> reservoirs and CO<sub>2</sub>-rich oil/gas reservoirs in the Yinggehai basin on the continental shelf of the northern South China Sea is of crust origin and crust-mantle mixing origin and mainly controlled by local, layer-by-layer and zone-by-zone, multiple intrusion of late hydrothermal fluids in mud diapir areas and physico-chemical processes of very thick Pliocene-Miocene marine calcareous sandstone and mudstone. Therefore according to the characteristics of migration and accumulation of different genetic types of CO<sub>2</sub>, we can trace the CO<sub>2</sub> source, analyze and predict the migration, accumulation and distribution of gas and especially CO<sub>2</sub> so as to provide a basis for make the plan and decision of gas exploration and reduce the risk of exploration.

**Key words:** basin in eastern China; East China Sea basin and northern South China Sea basin; genetic type of CO<sub>2</sub>; characteristics of migration and accumulation; main controlling factor

**About the first author:** HE Jia-xiong, male, born in 1956, doctor candidate and senior engineer, has long engaged in petroleum exploration and integrated geological study; E-mail: hejx@cnooc.com.cn.