

南海北部边缘盆地 CO₂ 成因及运聚规律与资源化利用思路

何家雄¹, 祝有海², 崔莎莎¹, 马文宏³

(1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 中海石油有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057)

摘要:南海北部边缘盆地 CO₂ 资源丰富, CO₂ 成因类型多, 依据 CO₂ 通常的成因判识与划分参数及标准($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值), 可将其划分为壳源型(有机和无机)、壳幔混合型及火山幔源型等 3 型 4 类。该区 CO₂ 运聚规律复杂, 壳源型岩石化学成因及壳幔混合型成因 CO₂ 资源丰富、储量规模大, 主要富集于西北部走滑伸展型边缘的莺歌海盆地泥底辟带浅层, 具有平面上分区分块、纵向上分层分带多期运聚成藏的规律, 且受控于泥底辟热流体上侵活动与巨厚海相含钙砂泥岩的物理化学综合作用; 火山幔源型成因 CO₂ 在该区资源规模相对较小, 多分布在北部边缘的东区, 即琼东南盆地东部Ⅱ断裂带周缘和珠江口盆地深大断裂发育区, 且主要受控于火山幔源岩浆脱排气活动的 CO₂ 气源供给与深大断裂导气输送作用的有效配置。根据迄今油气勘探程度, 南海北部 CO₂ 资源规模已逾万亿立方米, 居国内之首, 故颇具勘探潜力与综合开发利用前景。因此, 如何综合利用这种资源潜力巨大的 CO₂, 充分发挥其市场经济价值, 促进和加快其资源化利用的进程和步伐, 这是该区目前天然气勘探开发与综合利用所面临的重大科技攻关课题。

关键词:南海北部边缘盆地; 非生物 CO₂; 运聚成藏规律; 综合开发; 资源化利用

中图分类号: TE122

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2009)04-0488-09

0 引言

CO₂ 是天然气中常见的非烃气组分, 是整个自然界碳循环中较稳定的气体, 其在地球各圈层中分布普遍且不均匀。人类活动产生大量 CO₂, 不仅加大了这种不均衡现象, 而且还将造成人为的“温室效应”对地球表层系统和全球气候产生直接影响。已有研究表明^[1], 过去的 100 a, 大气中 CO₂ 浓度增加了约 60×10^{-6} , 而地球气温则升高了 0.6℃。2005 年 2 月 16 日“京都议定书”的签定, 标志着 CO₂ 等温室气体的排放将受到严格限制, 这对世界各国环境保护与资源综合利用均提出了巨大的挑战。虽然 CO₂ 对自然环境及生态平衡的破坏存在极为不利的一面, 但其同时也是国民经济及工农业生产中应用非常广泛的重要非烃气资源。由于 CO₂ 的多重

性, 人们在认识和改造自然的过程中, 必须充分利用 CO₂ 资源的有利方面, 并将其广泛应用于地球科学研究、工农业生产、化工化肥、石油开发开采及食品饮料等多种领域, 以促进人类社会与自然界的全面、协调、可持续发展。因此, 系统开展 CO₂ 成因及分布规律、勘探技术及方法、资源潜力与储量规模的精细评价, 以及综合开发与资源化利用等全方位多专业的 CO₂ 联合科技攻关非常必要且具有重大的科学和现实意义。

1 区域地质背景及油气地质概况

南海北部边缘盆地处于减薄的陆壳及洋陆过渡型地壳靠近洋壳一侧特殊的区域构造位置, 其区域地质背景复杂, 油气地质现象丰富多彩。由于不同类型及性质的盆地所处区域地质背景不同, 盆地结

构及发育演化特征差异颇大,其油气运聚成藏条件与油气及 CO₂ 分布富集规律差异非常明显:处在西北部边缘的莺歌海盆地属非常年轻的走滑伸展型盆地(图 1),虽然属于减薄型陆壳的区域构造位置,但岩石圈地壳非常薄,沉积基底以下的地壳厚度仅 5 km,比邻区处在洋陆过渡型地壳位置的琼东南盆地地壳厚度(8 km)和珠江口盆地的地壳厚度(7 km)薄。因此其上覆沉积盆地的沉积充填规模及发育演化特点与大地热流及地温场特征等,均与其他区域存在明显的差异。莺歌海盆地新近系及第四系海相拗陷沉积的沉降及沉积速率非常高(0.5~1.4 mm/a),沉积充填规模超过万米,这在南海北部边缘盆地及整个南海地区亦是罕见的;该区平均大地热流值高达 84.1 mW/m² 以上,最高地温梯度为 5.7℃/100m,在南海北部边缘盆地中亦是最高的,这就决定了该区盆地形成和发育演化,以及油气和 CO₂ 运聚成藏条件及分布富集规律等,均明显不同于相邻

的断陷裂谷盆地而具有其特殊性;莺歌海盆地具有以新近纪及第四纪巨厚海相拗陷沉积为主的断拗双层结构,亦存在较薄的早期古近纪陆相断陷沉积,但由于被晚期新近纪及第四纪巨厚海相拗陷沉积所覆盖叠置,故油气生、运、聚乃至成藏及分布规律,均主要取决于中新世晚期新构造运动(主要表现为泥底辟热流体活动)及其沉积充填体系和运聚输导系统与泥底辟伴生构造圈闭等成藏地质条件的有效配置。由于该区泥底辟及热流体上侵活动强烈,大地热流及地温场偏高,加之气源岩多属偏腐殖型的生源母质类型(海相环境输入的陆源母质),故该区主要以富集天然气为主,其中富集的烃类气主要为煤型烃类气,而形成的非烃气则主要为壳源型二氧化碳和氮等气体,且均主要展布于盆地中部的泥底辟带浅层。其他区域虽然亦有油气(包括非烃气)及油气苗显示(莺东斜坡带),但尚未形成大规模的商业性油气藏。

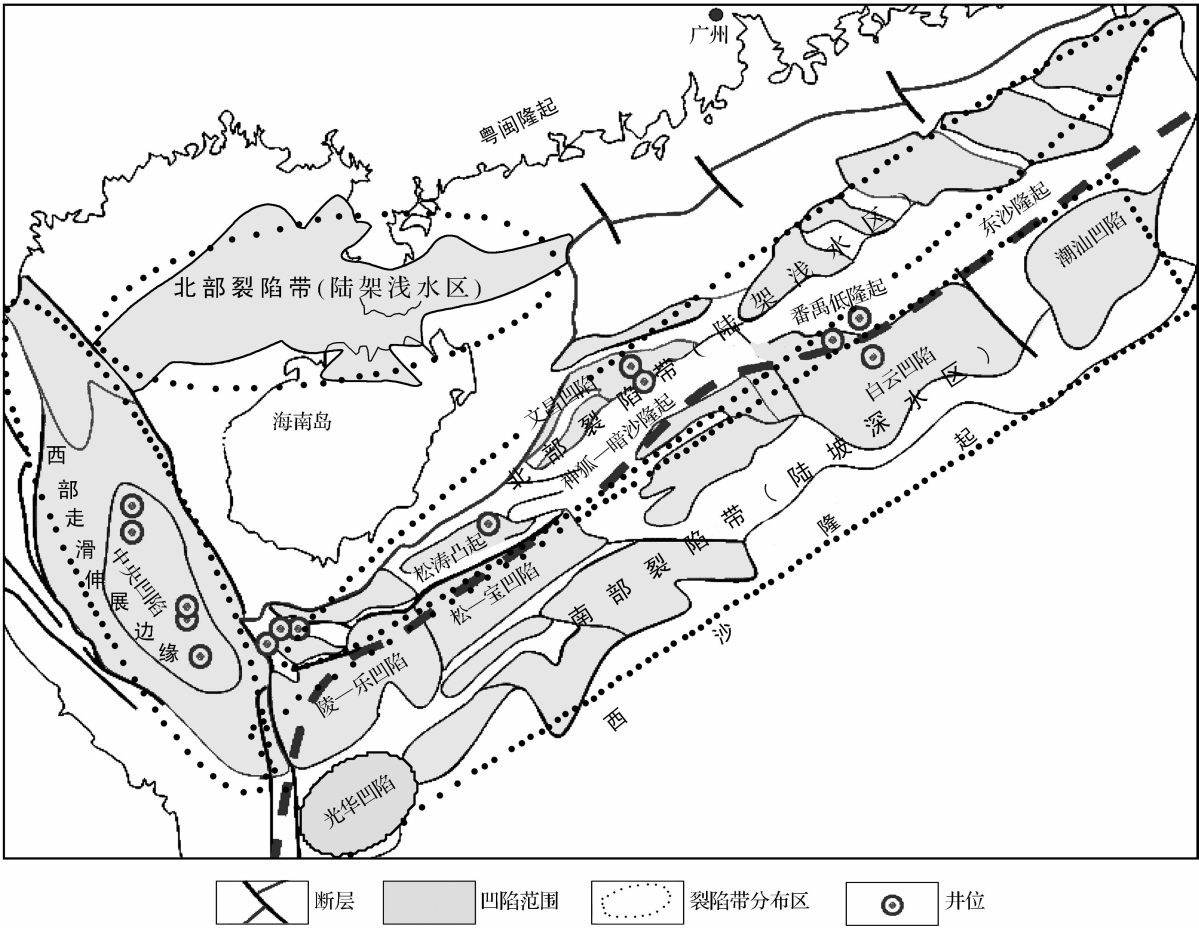


图 1 南海北部大陆边缘盆地新生代裂陷带与走滑伸展边缘区域展布特征

北部湾盆地、琼东南盆地及珠江口盆地则属典型拉张裂陷型(断陷裂谷型)盆地(图 1),具有与中国东部中生代陆相断陷盆地相似的典型断拗双层

盆地结构特征,普遍充填了古近系陆相断陷沉积和新近系海相拗陷沉积,且断陷裂谷期的陆相充填沉积规模尤其是厚度,一般大于海相拗陷沉积,故其油

气生、运聚成藏乃至分布富集规律,均与古近系陆相断陷沉积发育展布规模及运聚输导系统的沟通和新近系海相坳陷沉积的储层分布及圈闭等成藏地质条件密切相关。因此,断陷裂谷期形成的古近系中深湖相及河湖沼泽相、滨海沼泽相煤系烃源岩,如北部湾盆地始新统流沙港组中深湖相烃源岩、琼东南盆地渐新统崖城组及陵水组滨海沼泽相煤系烃源岩、珠江口盆地始新统文昌组中深湖相烃源岩和下渐新统恩平组河沼相煤系烃源岩和部分中深湖相烃源岩等,与新近纪海相坳陷期发育的浅水三角洲砂岩、河口砂坝及各种深水低位扇体等储集层以及新构造运动晚期形成的各种类型的局部构造和非构造圈闭等,共同对该区油气运聚成藏及分布规律起决定性的控制作用,并由此构成了颇具特色的陆生海储、古生新储及下生上储的成藏组合类型。多年的油气勘探及研究证实,这些地区属于南海北部边缘盆地的主要石油富集区,目前已发现的 30 多个油田及含油构造均主要分布于该区。如珠江口盆地北部裂陷带目前已投入开发的西江、惠州、陆丰、流花、文昌等 5 个油田群,连续稳产在每年 $1\,450\text{万 m}^3$ 以上;北部湾盆地涠洲油田群,原油生产也保持在每年 250万 m^3 以上。这些油田的基本成藏地质条件是,油田主要分布在中新世浅水三角洲相带和碳酸盐台地上,以中新统海侵体系域海相砂岩、礁滩灰岩为主要储层。这些油田的烃源岩均为古近纪裂陷期中深湖相泥岩及部分滨浅湖相泥岩、沼泽相煤系泥岩,且以海相坳陷期沉积的中新统上部海相泥岩为区域封盖层。油田圈闭类型主要为披覆背斜和滚动背斜、断背斜、断块及古潜山和生物礁滩等。

须强调指出的是,珠江口盆地及琼东南盆地东部地区,虽然主要以富集石油为主,但亦有天然气分布。如油田(石油)伴生气和以 CO_2 气藏及高含 CO_2 油气藏形式分布的天然气。该区火山幔源型 CO_2 气藏及高含 CO_2 油气藏,主要分布于能与深大断裂运聚系统沟通的隆起带及低凸起上或凹陷边缘深大断裂附近。如珠江口盆地东部的惠州 18-1 和惠州 22-1 火山幔源型 CO_2 气藏及高含 CO_2 油气藏,即分别分布于与深大断裂运聚系统沟通的惠陆低凸起和东沙隆起北侧深大断裂附近;而该盆地中南部的番禺 28-2 火山幔源型 CO_2 气藏则处于番禺低隆起南侧深大断裂带附近。再如琼东南盆地东部的宝岛 15-3 和宝岛 19-2 火山幔源型 CO_2 气藏及高含 CO_2 油气藏,则处于琼东南盆地东部与 II 深大断裂带连通的松涛低凸起上。很显然,这些火山幔源型 CO_2 运聚分布乃至富集成

藏,均与该区火山幔源岩浆脱排气活动之气源供给系统和深大断裂的导气输送作用等主控因素的相互配置存在极为密切的成因联系。

总之,由于南海北部边缘不同区域新生代盆地所处大地构造位置及地球动力学条件、区域地质背景的差异,导致盆地性质及深部结构类型、发育演化特点及沉积充填特征、展布规模等均明显不同,进而造成了不同类型盆地及区带油气和 CO_2 运聚分布规律及成藏主控因素差异巨大且各具特色。

2 非生物 CO_2 主要成因类型

近 10 多年来,南海北部边缘盆地油气勘探中,均陆续钻遇了大量 CO_2 等非烃气,在西北部边缘的莺歌海盆地泥底辟带浅层发现了东方 1-1、东方 29-1、乐东 8-1、乐东 15-1、乐东 21-1 及乐东 28-1 等一系列 CO_2 气藏及高含 CO_2 气藏;在北部边缘东区琼东南盆地东部及珠江口盆地,则发现了宝岛 15-3、宝岛 19-2、文昌 15-1、文昌 14-3、文昌 19-1、惠州 18-1、惠州 22-1、番禺 28-2 等一系列 CO_2 气藏及高含 CO_2 油气藏。根据 CO_2 碳同位素及所伴生的稀有气体氦同位素地球化学特征,采用通常的成因判识划分标准,笔者将其综合判识确定为多源非生物成因 CO_2 ^[2-3],并划分为 3 种主要成因类型即(表 1):①壳源型岩石化学成因 CO_2 ,该成因类型 CO_2 主要分布于莺歌海盆地泥底辟带浅层和中深层,其在天然气组成中含量高,尤其在泥底辟带浅层,其 CO_2 含量一般可达 $28.5\%\sim 88.9\%$,最高达 93.0% ,且 CO_2 碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$)和所伴生烃类气 CH_4 碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$)均偏重,氦同位素值($^3\text{He}/^4\text{He}$)偏低($0.39\times 10^{-7}\sim 6.9\times 10^{-7}$), R/Ra 值低于 0.6;②壳幔混合型成因 CO_2 ,主要分布于莺歌海盆地泥底辟带乐东区 LD8-1 构造区的浅层,其最重要的地球化学特征是,氦同位素值($^3\text{He}/^4\text{He}$)偏高($8.4\times 10^{-7}\sim 21.9\times 10^{-7}$), R/Ra 值一般均大于 1,多介于 $1\sim 1.56$ 之间。 CO_2 在天然气组成中含量高,可达 $39\%\sim 79\%$,且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值亦偏重;③火山幔源型成因 CO_2 ,该成因类型的 CO_2 主要分布于琼东南盆地东部 II 断裂带及周缘区,其最突出的特点是,氦同位素值($^3\text{He}/^4\text{He}$)偏高($41.4\times 10^{-7}\sim 87.5\times 10^{-7}$), R/Ra 值一般均大于 2,最高达 6.3, CO_2 含量在天然气组成中一般较高,多在 80% 以上(但由于运聚条件之差异,亦有含量较低的),最高达 97.6% ,且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值亦偏重,所伴生烃类气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 值可偏重或亦可偏轻。

表 1 南海北部边缘盆地 CO₂ 气藏及高含 CO₂ 油气藏中 CO₂ 成因类型判识与划分

地区/ 盆地	气田/ 构造	代表井	产层 层位	储层 岩性	深度 (m)	天然气组成(%)				碳、氢同位素(‰)			CO ₂ 成因类型
						CO ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ ⁺	CO ₂	CH ₄	R/Ra	
莺歌海 盆地	DF1-1/Ⅲ、Ⅳ	DF1-1/2,3	N _{y2}	粉砂岩	1 331~1 362	64.70	5.82	27.97	1.52	-3.80	-31.90	0.07	壳源岩石 化学型
	DF1-1S、Ⅱ、Ⅲ	DF1-1S/2,3			1 493~1 661	80.13	6.21	13.30	0.47	-3.59	-32.20	0.17	
	DF1-1 中	DF1-1-11	Nh ₁	粉砂岩	2 785~2 799	49.52	5.24	43.11	2.13	-0.65	-30.08	0.03	
	DF29-1/Ⅳ、Ⅴ	DF29-1-1	N _{y2}	粉细砂岩	1 832~1 842	88.91	5.45	5.26	0.38	-2.00	-32.10	0.14	
	LD15-1	LD15-1-1	N _{y1}	粉细砂岩	2 200~2 225	75.17	4.17	18.70	1.99	-4.15	-34.54	0.26	
	LD20-1	LD20-1-1			1 471~1 490	36.57	2.80	57356	3.09	-3.47	-32.04		
	LD21-1	LD21-1-1			1 553~1 566	83.97	6.63	8.71	0.69	-4.18	-36.08	0.31	
	LD22-1S	LD22-1-1			1 486~1 510	80.42	5.29	13.44	0.85	-0.56	-26.92	0.04	
	LD28-1	LD28-1-1	N _{y1}	粉细砂岩	1 655~1 690	88.10	3.50	7.10	1.30	7.90	-32.10	0.26	壳幔 混合型
	LD8-1	LD8-1-3 LD8-1-1			342~352 1 723~1 737	78.90 71.20	2.27 4.21	17.34 22.73	1349 2.02	-2.47 -3.65	-34.33 -31.32	0.99 1.56	
琼东南 盆地	BD19-2	BD19-2-2	E _{1s}	中细砂岩	5 100.0	81.56	1.52	16.06	0.00	-6.90	-39.30	6.25	火山 幔源型
	BD15-3	BD15-3-1			2 254.0	98.32	0.28	1.32	0.00	-4.49	-42.30	5.15	
珠江口 盆地 西部	WC15-1	WC15-1-1	N _{1zj1}	中细砂岩	1 088~1 096 1 250~1 257	76.98 85.76	4.81 2.13	12.46 14.24	5.76 5.10	-4.09 -3.66	-40.00 -39.93	4.11 3.67	
	WC14-3	WC14-3-1	E _{3zh1}	砂岩	2 285~2 308	38.87	1.31	43.62	19.20	-4.53	-41.88	3.06	火山 幔源型
	WC19-1	WC19-1-6	N _{1zj1}	砂岩	1 009~1 018	79.00	6.20	12.00	2.80	-4.30	-50.80	2.81	
珠江口 盆地 东部	HZ18-1	HZ18-1-1	E _{3np}	砂岩	3 127~3 135.5	93.56	5.25	0.61	0.16	-3.60	-43.19		火山 幔源型
	HZ22-1	HZ22-1-1	N _{2j}	砂岩	2 431~2 452.5	99.53	0.06	0.20	0.13	-4.00	-38.00		
	PY28-2	PY28-2-1	N _{2j}	砂岩	2 943.0	73.73	73.72	9.08	0.99	-3.84	-37.26		
			E _{3zh}	砂岩	3 301.0	82.70	9.02	5.68	0.90	-3.92	-41.35		

3 多源非生物成因 CO₂ 运聚成藏规律

南海北部边缘盆地油气勘探中,迄今发现的壳源型、壳幔混合型 and 火山幔源型 3 类非生物(无机) CO₂ 气藏及高含 CO₂ 油气藏和含气构造,均主要集中分布于西北边缘莺歌海盆地泥底辟带浅层和琼东南盆地东部及珠江口盆地深大断裂带附近等区域。其中,壳源型岩石化学成因及壳幔混合型成因 CO₂ 主要富集于莺歌海盆地泥底辟带 1 100~2 380 m 浅层,一般具有分区分块与分层分带的运聚成藏特征(图 2),且受控于泥底辟热流体上侵活动与巨厚海相含钙砂泥岩的物理化学综合作用^[4-12];而火山幔源型成因 CO₂ 则多运聚富集于琼东南盆地东部和珠江口盆地,且主要展布在深大断裂附近,受控于火山幔源岩浆脱排气活动与深大断裂输气疏导系统的有效配置^[13-14]。

国内外罕见储量规模颇大的壳源型岩石化学成因及壳幔混合型成因 CO₂ 气藏,迄今仅在南海西北部边缘第三纪走滑—伸展型的莺歌海盆地中发现。这种非生物成因 CO₂ 气藏的区域分布,主要富集于莺歌海盆地中部坳陷泥底辟带浅层。虽然在该区泥底辟带中深层亦有钻遇壳源型岩石化学成因 CO₂,

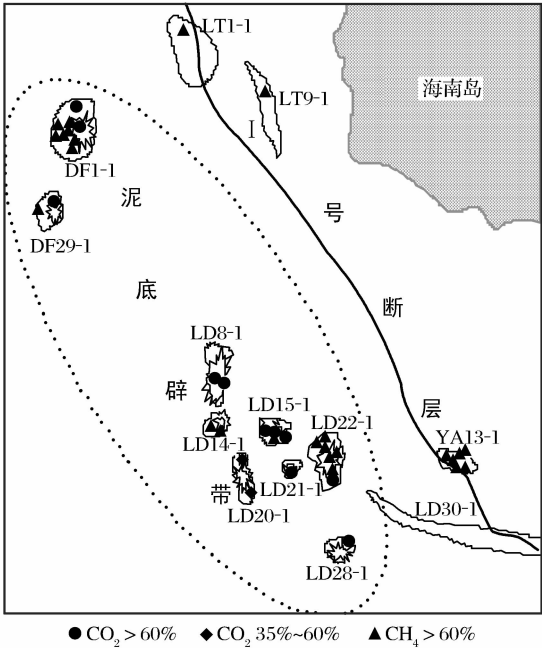


图 2 莺歌海盆地泥底辟带壳源型非生物 CO₂ 运聚特征
但在天然气中的含量甚低,均低于 7%^[15-16]。因此,该区高含量壳源型岩石化学成因及壳幔混合型成因的 CO₂ 气藏,主要集中分布于泥底辟带浅层(1 100~2 380 m),且具有平面上分区分块和纵向上分层分带多期运聚充注的成藏地质规律。其中,尤以泥

底辟带东方区和乐东区浅层气藏 CO₂ 分块及分层分带的运聚成藏特征最为典型^[17-19]。如 DF1-1 浅层气田,平面上西块 I、II 气组为低 CO₂ 富烃天然气(CO₂<1%),而其东块及北块则多为低烃富含壳源型 CO₂;纵向上分层分带亦非常明显(图 3),在 1 900 m 以上的浅层为富烃天然气与富壳源型 CO₂ 的富集带,1 900 m 以下的浅层下组合层段及中深层则以低含壳源型 CO₂ 的富烃天然气(CO₂<7%)为主,仅个别层段富含壳源型 CO₂,总体上仍属富烃

类低 CO₂ 天然气聚集带。同时,该区壳源型 CO₂ 与富烃低 CO₂ 天然气的分块分层及分带的运移充注,常具有多期次的运聚成藏特征,根据流体包裹体资料及天然气碳同位素资料判断,其运聚充注期次至少有 3~4 期,表明具有明显的多期充注与运聚成藏的特征^[15]。由于壳源型岩石化学成因及壳幔混合型成因 CO₂ 的气源物质广泛,运聚成藏规律复杂,且纵向上一般不具随深度增加壳源型 CO₂ 递增的变化规律。

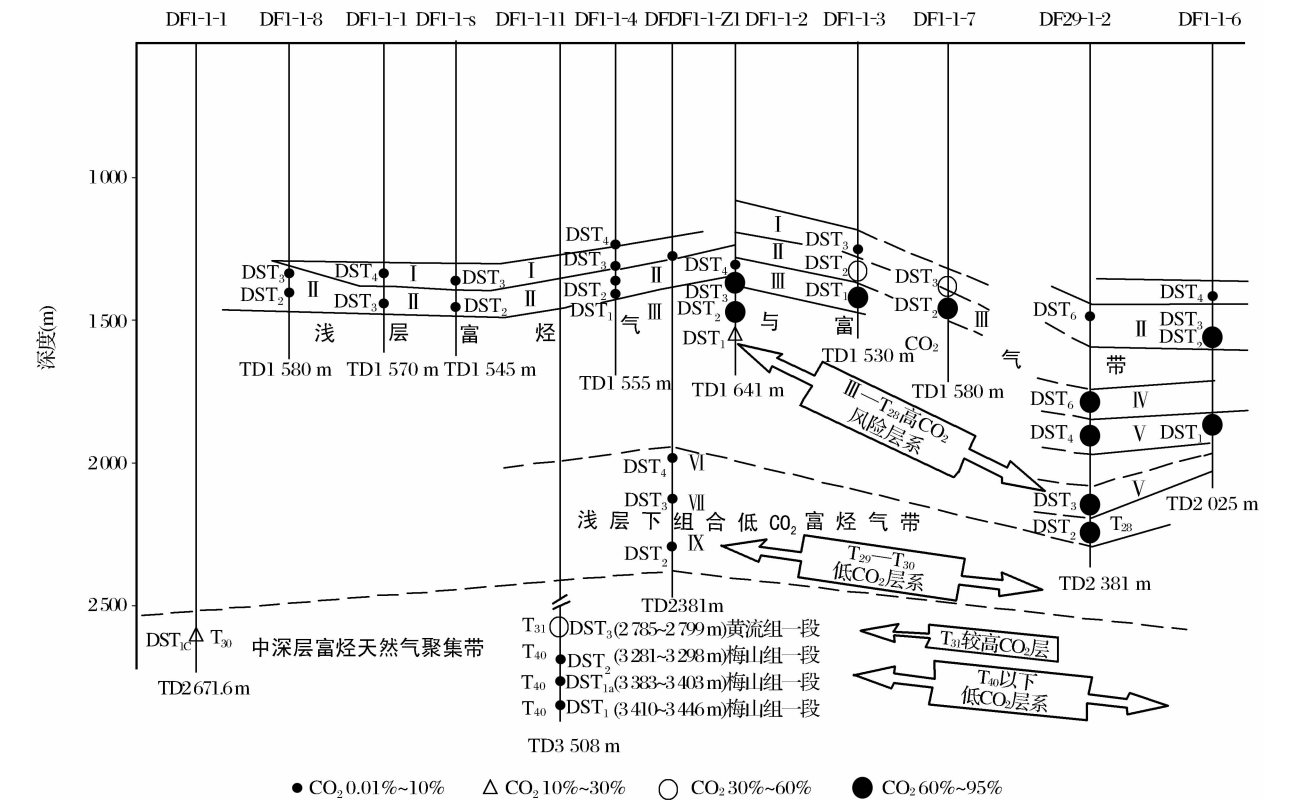


图 3 莺歌海盆地泥底辟带东方区浅—中深层壳源型 CO₂ 分块分层与分带运聚特征

火山幔源型成因 CO₂ 气藏及高含 CO₂ 油气藏,主要富集于琼东南盆地东部 II 断裂带及松东—宝岛凹陷周缘区和珠江口盆地坳陷(或凹陷)边缘与凸起附近的深大断裂处(图 4)。由于这些地区处在中国东部陆上 2 个 NWW 向新近纪—第四纪玄武岩带向大陆架延伸的区带上,亦为郯庐深大断裂带向南海北部大陆架延伸(海南岛东侧)的断裂发育区^[20],故其与中国东部陆相断陷盆地具有相同的大地构造背景及断裂发育体系,因此,该区断裂及火山岩浆脱排气活动亦较频繁,具备了形成火山幔源型 CO₂ 气藏的区域构造地质背景和基本的运聚成藏条件。该区迄今勘探所发现的 8 个 CO₂ 气藏(田)及高含 CO₂ 油气藏,其 CO₂ 均属火山幔源型成因,且 CO₂ 地质地球化学特征与中国东部中生代陆相断陷盆

地火山幔源型成因 CO₂ 完全一致,亦具 CO₂ 含量高(34.2%~97.6%), $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值偏重(-3.6‰~-6.9‰),与 CO₂ 伴生的氦同位素值偏大(R/Ra 值均大于 2,一般为 2.2~4.54)等特点。且这些 CO₂ 气藏(田)及高含 CO₂ 油气藏的运聚及富集成藏均主要与基底深大断裂的沟通及导气输送作用密切相关^[20]。这些特点充分表明其与中国东部陆相断陷盆地火山幔源型 CO₂ 气藏运聚规律完全一致。由于该区 CO₂ 气藏(田)及高含 CO₂ 油气藏的区域及剖面分布,均主要富集于能与深大断裂沟通且受火山幔源岩浆脱排气活动影响强烈的局部区块及层段,故其 CO₂ 气源比较单一,主要来自地壳深部幔源型火山活动所脱排出的原始 CO₂。因此,该区这种火山幔源型成因 CO₂ 区域及剖面上的运聚成藏

规律,相对莺歌海盆地壳源型岩石化学成因 CO₂ 而言比较简单,其运聚成藏特征并没有壳源型岩石化学成因及壳幔混合型成因 CO₂ 那么复杂,主要富集于能与基底深大断裂沟通(即与火山幔源型 CO₂ 气源中心沟通)和有效配置,且晚期仍在继续活动的断裂带及火山幔源岩浆频繁活动区附近。

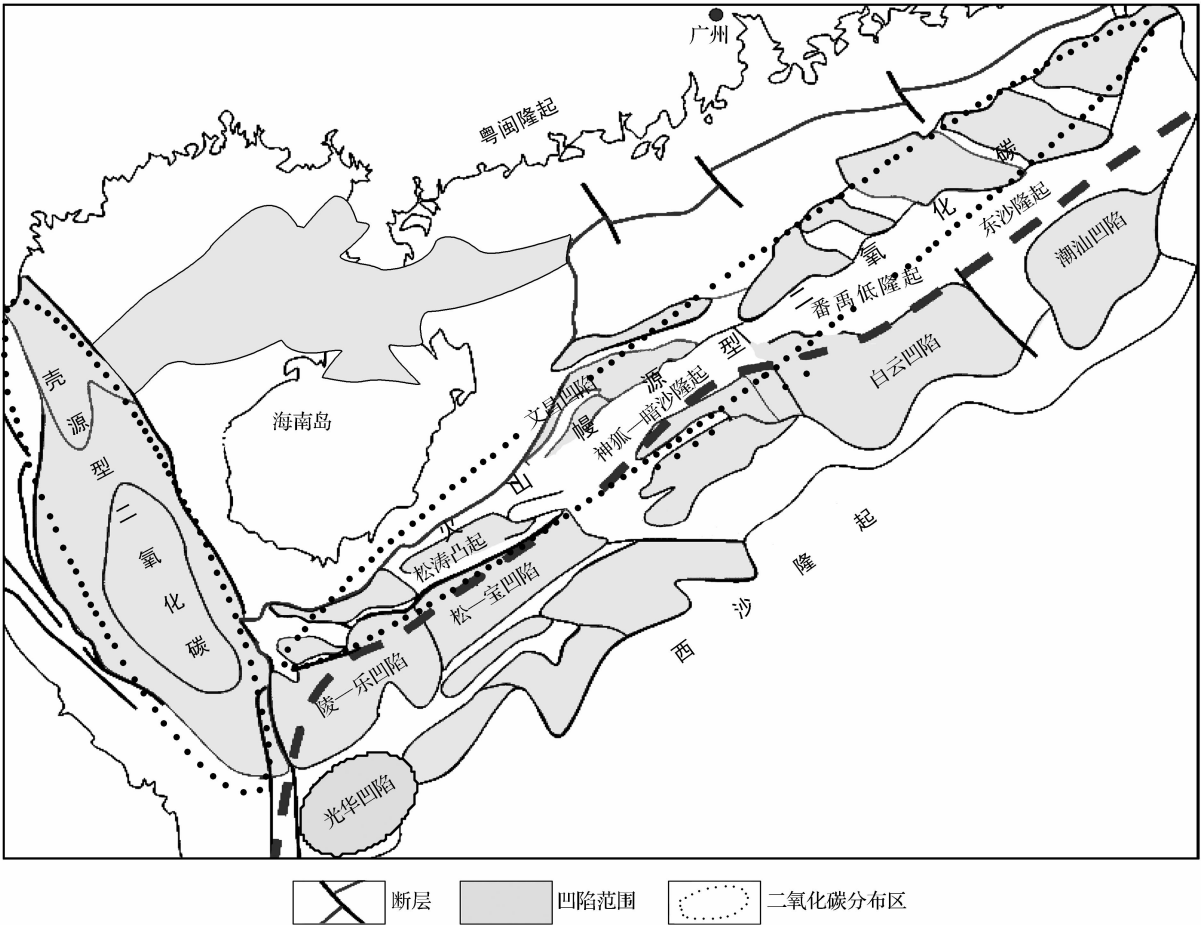


图 4 南海北部大陆边缘盆地壳源型与火山幔源型 CO₂ 区域分布规律

表 2 南海北部莺—琼盆地部分气田及含气构造非生物(无机)成因 CO₂ 气地质储量

序号	气田及含气构造	含气面积 (km ²)	地质储量(×10 ⁸ m ³)		CO ₂ 成因类型	备注
			混合气	CO ₂		
1	东方 1-1 浅层	278.7	996.8	225.0	壳源型岩石化 学及壳幔混合 型成因	分区块按不同 CO ₂ 含量计算
2	东方 1-1S	51.6	423.8	356.7		
3	东方 1-1N	18.7	18.8	6.3		
4	东方 29-1	120.0	965.0	828.2		
5	乐东 8-1	210.8	333.0	236.7		
6	乐东 15-1	36.5	178.8	60.8		CO ₂ 取 70% 分层按 CO ₂ 计算
7	乐东 20-1	51.0	51.6	23.8		
8	乐东 21-1	47.8	70.0	49.0		
9	乐东 22-1	165.8	431.0	26.2		
10	乐东 28-1	33.1	51.6	36.1		
11	东方 1-1 浅中层 DST ₃	199.0	426.0	213.0	火山幔源型 成因	CO ₂ 取 50%
12	宝岛 19-2S	85.9	501.5	401.2		CO ₂ 取 80%
13	宝岛 15-3A	10.1	302.5	272.3		CO ₂ 取 90%
合计			4 750.4	2 735.3		

4 多源非生物成因 CO₂ 资源规模及潜力

前已论及,南海北部边缘盆地 CO₂ 资源丰富,近 10 多年的油气勘探中,均陆续钻遇了大量多源非生物成因 CO₂,据不完全统计,迄今为止,仅莺—琼盆地天然气勘探中已先后发现了 9 个 CO₂ 气藏及高含 CO₂ 气藏。根据目前的天然气勘探及研究程度,依据 CO₂ 成因类型及生气潜力和气源丰度初步预测,该区非生物 CO₂ 资源量估计逾 2 万亿 m³ 以上,且经勘探及钻探评价证实的 CO₂ 地质储量规模亦颇大,初步计算该区 CO₂ 气(壳源型、壳幔混合型及火山幔源型)探明+控制+预测级地质储量已近 3 000 亿 m³(表 2),这些 CO₂ 气藏及高含 CO₂ 气藏主要分布于莺歌海盆地泥底辟带浅层和琼东南盆地东部 II 断裂带及其周缘区域。

总之,油气勘探实践及研究均充分表明,南海北部边缘盆地非生物成因 CO₂ 资源丰富,地质储量规模大。其中,尤以莺歌海盆地泥底辟带浅层壳源型 CO₂ 资源规模及地质储量最大,这种成因类型的非生物 CO₂ 在国内外亦是罕见的,因此,如何综合开发与利用这种非烃气资源,将海上(上游)天然气勘探中一直视为高勘探风险而规避的 CO₂ 转变为下游天然气综合利用产业发展的宝贵资源财富和有利机遇^[21-22],这是一个值得进一步深入研究与探讨的课题。

5 南海北部 CO₂ 综合开发及资源化利用

南海北部边缘盆地 CO₂ 资源丰富,地质储量及资源规模与潜力巨大,其在中国东部中生代陆相断陷盆地及近海盆地中均居首位。如何充分有效地利用这种多重性的 CO₂ 资源,是一个值得广大科技工作者和国家科技决策部门关注与重视的问题。鉴此,笔者在充分调研和系统研究的基础上,拟提出如下诸方面有关 CO₂ 资源化利用的思路及措施与建议。

5.1 落实与评价 CO₂ 资源规模及总资源量和地质储量

确定与落实评价南海北部边缘莺歌海盆地、琼东南盆地东部及珠江口盆地 CO₂ 资源规模及资源量和地质储量,是该区 CO₂ 资源综合开发及资源化利用的一项最基本和最基础的研究工作,亦是制定规划将来 CO₂ 资源综合利用方案的地质基础和基本的资源量依据。因此,进一步摸清南海北部边缘盆地 CO₂ 资源量之“家底”,搞清 CO₂ 的资源规模,精细落实最终的 CO₂ 地质储量,是综合开发利用 CO₂ 首当其冲的基础地质研究任务,亦是综合开发利用 CO₂ 资源,优选经济有效地综合开发利用 CO₂ 最佳项目的最基础研究工作。鉴此,笔者建议应该尽快开展逼

近实际地质条件下的高温高压热模生气实验与天然气及 CO₂ 地质地球化学、气源岩的层序地层学分析等综合研究,精细落实与评价南海北部边缘盆地 CO₂ 资源潜力,搞清该区的 CO₂ 资源规模与资源总量及地质储量,为 CO₂ 综合开发利用与经济评价等提供依据和基础数据。

5.2 根据市场需要及经济可行性优选 CO₂ 资源化利用的最佳项目

根据国家重大需求及社会经济发展之需要,深入开展 CO₂ 资源综合利用与市场开发应用项目的系统调研工作,优选经济可行适应国家社会经济发展及市场重大需求的最佳 CO₂ 综合开发利用项目。中国海洋石油总公司通过近年来的市场调研及可行性经济评价与综合研究,目前已在海南省东方市大型化工城建成了利用东方 1-1 气田开发生产提供的 CO₂ 天然气生产可降解环保型塑料的综合开发利用 CO₂ 项目,年生产 CO₂ 可降解环保型塑料达 3 000 t,目前正向规模化、产业化发展。显而易见,该项目成功投产和进一步的规模化发展,不仅可以大幅度节能减排、减少温室气体(CO₂)的大量排放,而且能够大规模、充分有效地利用南海北部边缘盆地的天然 CO₂ 资源,生产出多种颇具经济价值和工业价值的化工产品 & 化工原料。

5.3 开展海上油气田充注 CO₂,提高原油采收率的可行性研究与试验

国内外油气田开发实践及油气田开发地质研究均表明,CO₂ 作为油田开发晚期剩余原油的有效驱替剂和强化采油剂,在油田二次或三次采油开发过程中,尤其是在低渗透油气田及难开采的特殊油气田开发中,均可有效地增加油层渗透率,降低原油粘度和残余油饱和度,大大增强原油的流动性,极大地提高原油采收率。根据我国油田开发生产实践,充注 CO₂ 驱油平均可提高油田采收率 12.3% 以上。众所周知,我国油田平均采收率只有 32.2%,而低渗透油田采收率只有 20%^[23],因此尚有 60% 以上的油气储量需要实施三次采油进行开采,故提高油气采收率潜力巨大。因此,CO₂ 驱油是油田晚期开发开采工程中有效的增产措施和成熟开发技术。然而,在海上油田开发生产过程中,由于海上采油平台注采系统及处理设施装备比较复杂,而且尚须考虑 CO₂ 的防腐问题,故对海上油田充注 CO₂ 提高原油采收率项目,尚须进行更为全面系统的可行性研究,并在海上油田的采油平台上进行充注 CO₂ 提高原油采收率的可行性试验,方可最终实施。

5.4 开展海上油气田 CO₂ 综合开发利用配套系统设施总体规划研究

南海北部海域 CO₂ 资源主要分布在莺歌海盆地、琼东南盆地东部及珠江口盆地等地区,同时油气田亦主要分布于这些盆地,以及邻区的北部湾盆地,然而,欲将这些 CO₂ 资源进行综合开发利用,尤其是直接用于海上油气田开发(二次采油及三次采油)提高剩余油气采收率等采油工程项目上,则必须提前规划设计好最佳的海上油气田 CO₂ 综合开发利用配套系统设施及输注 CO₂ 气的工艺流程。只有这样未雨绸缪方可保证海上油气田大规模充注 CO₂ 提高油气采收率工程项目的顺利实施。因此,笔者建议通过中国科学院及高校与石油企业(中海油研究中心海洋工程生产部门)的密切合作与通力协作,尽快开展海上油气田充注 CO₂ 气提高油气田采收率项目的系统配套设施及总体开发利用规划方案设计的全面系统之综合研究与可行性经济评价,为海上油气田充注 CO₂ 提高油气采收率(二次、三次采油)开发项目的顺利实施,提供决策依据及基础数据。

5.5 开展 CO₂ 制备各类化工产品 & 化工原料的经济可行性研究

通过对 CO₂ 生产制备各种各类化工产品 & 化工原料(如干冰、液态 CO₂、碳酸二甲酯、碳酸丙烯酯、二甲醚、聚碳酸亚乙酯及可降解型聚氨酯泡沫等)的系统调研,对迄今所有利用 CO₂ 生产的各种类型的化工产品 & 化工原料,进行工业化、产业规模化生产的经济可行性研究与经济效益评价,以及市场需求调查和预测,优选和拓宽多种 CO₂ 综合利用的渠道与技术途径,最终选择既能产生规模经济效益又能大规模利用 CO₂ 的最佳 CO₂ 综合利用项目,进行系统的经济评价与工业化的试生产,以达到既能充分有效、大规模地利用 CO₂,又能获取最佳、最大的经济效益之目的。

5.6 建立适合我国油藏条件下 CO₂ 驱提高采收率的理论及技术体系

前已论及,国内外大量研究和油气田开发实践均表明,将 CO₂ 作为驱油剂注入油层可以大幅度地提高剩余原油的采收率。而且,油气藏本身就是封闭条件良好的地下储气库,亦可实现 CO₂ 的长期地下储存。因此,充注 CO₂ 到油气层不仅能大幅度提高石油采收率,而且能够大规模消耗 CO₂,实现和促进其资源化利用,同时亦能达到对 CO₂ 永久性封存之目的。必须强调指出的是,由于我国多数油气藏均属陆相油气藏,与国外油气藏尤其是美国目前实

施的 CO₂ 混相驱的海相油气藏相比,我国油气藏具有非均质性强、渗透率低、原油含蜡量高、沥青质及胶质含量高、粘度高明显不同于海相油气藏的地质地球化学特点,因此,我国采用 CO₂ 驱提高原油采收率尚存在许多特殊的理论问题与技术难点需要深入研究与解决。总之,我们应对 CO₂ 在提高石油采收率中的资源化利用给予高度的重视,并尽快开展相关研究,建立一套适合于我国陆相地质环境下油藏地质特点的利用 CO₂ 提高石油采收率的理论与技术开发体系。

5.7 充分利用科研院校技术及信息优势与企业资源优势的结合互惠多赢

充分利用和发挥科研院校的研究力量及技术优势和情报信息优势,并与中海油等石油企业的资源优势(南海北部边缘盆地丰富的 CO₂ 资源)紧密结合和有效配置,实现合作多方技术及信息优势与企业资源优势的整合共享,促进合作多方的互惠多赢,齐心协力共同攻克“CO₂ 综合开发与资源化利用”的各种技术难题。为了加快实施南海北部 CO₂ 资源综合开发及资源化利用的步伐和进程,笔者建议,中海油企业本身应大力加强和重视 CO₂ 资源综合利用与市场开发应用研究,并联合中国科学院及有关高等院校组成 CO₂ 综合开发及资源化利用的科技攻关项目组,深入开展跨行业、全方位多兵种、多专业多领域相互渗透彼此结合的“CO₂ 综合利用项目”的联合科技攻关研究,并将其作为中海油发展上、下游产业链的重大科研项目予以立项与实施,亦可共同申请国家科技立项,尽快全面开展和实施 CO₂ 综合利用的科技攻关,努力使其上游海上天然气勘探中的高 CO₂ 风险转变为下游产业发展上可充分利用的资源财富和有利机遇。

6 结论与认识

(1)南海北部边缘盆地 CO₂ 资源丰富,CO₂ 成因类型多,根据 CO₂ 成因判识与划分参数,可将其多源非生物 CO₂ 划分为壳源型、壳幔混合型和火山幔源型等 3 大成因类型。

(2)壳源型、壳幔混合型 CO₂ 主要富集于莺歌海盆地泥底辟带浅层,具有平面上分区分块,剖面上分层分带多期运聚成藏的特征;火山幔源型 CO₂ 则主要展布于琼东南盆地东部 II 断裂带周缘区和珠江口盆地凹陷与凸起边缘的深大断裂带附近,且受控于火山幔源岩浆脱排气活动与深大断裂导气输送作用的相互配置。

(3)南海北部边缘盆地 CO₂ 资源潜力大,尤其是莺歌海盆地泥底辟带浅层非生物壳源型 CO₂ 资源规模巨大,其在国内外亦是罕见的。因此,如何综合利用南海北部这种如此丰富且具多重性的 CO₂ 非烃气资源,为国家经济建设及工农业生产服务,促进人与自然及社会经济全面、协调、可持续发展,这是国家及企业与科学家们所面临的重大综合性联合科技攻关课题,期望能够引起和得到国家科技部门及有关管理决策部门的高度重视,并尽快组织多学科、跨领域的联合科技攻关研究予以解决。

参考文献:

- [1] Gutzler D S. Evaluating global warming: A post-1990s perspective[J]. GSA Today, 2000, 10:345-351.
- [2] 何家雄,王振峰,裴秋波,等. 莺—琼盆地和珠江口盆地西部 CO₂ 成因及运聚分布特征[J]. 中国海上油气, 2003, 17(5): 293-297.
- [3] 何家雄,刘全稳. 南海北部大陆架边缘盆地 CO₂ 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 何家雄. 莺歌海盆地 CO₂ 天然气的初步研究[J]. 天然气地球科学, 1995, 6(3): 1-12.
- [7] 何家雄,陈刚. 莺歌海盆地 CO₂ 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.
- [8] 何家雄,陈刚. 莺歌海盆地 CO₂ 成因及与国内外典型 CO₂ 气藏的类比[J]. 天然气地球科学, 1996, 7(4): 1-12.
- [9] 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): 42-49.
- [10] 何家雄,陈刚. 莺歌海盆地 CO₂ 成因及主气源[J]. 中国海上油气, 1998, 12(3): 164-167.
- [11] 何家雄. 关于莺歌海盆地 CO₂ 成因问题的探讨[J]. 中国海上油气, 2003, 17(2): 149-150.
- [12] 何家雄. 再论莺歌海盆地 CO₂ 成因问题[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 412-415.
- [13] 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.
- [14] 何家雄,陈伟煌,李明兴,等. 莺—琼盆地天然气中 CO₂ 成因及气源综合判识[J]. 天然气工业, 2001, 21(3): 15-21.
- [15] 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.
- [16] 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 CO₂ 风险分析与预测[J]. 中国海上油气, 2000, 14(5): 332-338.
- [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.
- [18] 何家雄,陈刚. 莺歌海盆地 CO₂ 分布富集特征及初步预测[J]. 天然气地球科学, 1997, 8(3): 9-17.
- [19] 何家雄,陈刚. 莺歌海盆地 CO₂ 分布及预测方法研究[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(2): 20-23.
- [20] 腾吉文,王光杰,张中杰,等. 华南大陆 S 波三维速度与郯庐断裂带的南延[J]. 科学通报, 2000, 45(23): 2492-3497.
- [21] 何家雄,胡忠良,刘宝明,等. 综合开发利用南海莺—琼盆地 CO₂ 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.
- [22] 何家雄,夏斌,刘宝明,等. 创建中国 CO₂ 研究开发中心促进社会经济全面、协调、可持续发展[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 161-163.
- [23] 沈平平. 提高采收率技术进展[M]. 北京:石油工业出版社, 2006: 1-354.

Origin, Migration and Accumulation of CO₂ and Its Resource Utilization in Marginal Basin, Northern South China Sea

HE Jia-xiong¹, ZHU You-hai², CUI Sha-sha¹, MA Wen-hong³

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

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Zhanjiang Company, CNOOC, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: According to $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ and $^3\text{He}/^4\text{He}$, CO₂ could be classified into three types (or four sub-types) including crustal origin (organic and inorganic), crust-mantle origin and volcano-mantle origin. Crustal and crust-mantle CO₂ is mostly distributed in different horizontal blocks and different vertical layers in the shallow part of mud diapirs in the Yinggehai basin, and it is controlled by the diapirs up-invasion and thick marine calcic sand shales. Volcano-mantle CO₂ has smaller scale in the study area and is distributed in the faulted zone II east of the Qingdongnan basin and around the discordogenic fault zone in the Pear River Mouth basin, controlled by the effective system of mantle magma air discharge and migration. The CO₂ resources are over one trillion cubic meters in north of the South China Sea. It is important how to explore and use the enormous resources and to promote the utilization. It needs to be paid attention to by the relative departments and experts.

Key words: Northern South China Sea; Marginal basin; Abiogenetic CO₂; Migration and accumulation; Comprehensive development; Resource utilization.