

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.021>



东海盆地丽水凹陷 CO₂ 分布特征及成藏主控因素

牛杏¹, 何云龙^{2*}, 庄新国³

1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2. 中国地质大学海洋学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 基于丽水凹陷钻井和地震资料, 综合天然气地球化学参数、基底断裂和岩浆底辟发育特征等, 研究丽水凹陷 CO₂ 的分布特征及其成藏主控因素。研究表明, 丽水凹陷 CO₂ 纵向上主要分布在灵峰组、明月峰组下段及元古界基底片麻岩中, 不同层位 CO₂ 的含量差别很大; 平面上, 温州 13-1、丽水 35-7 和南平 5-2 CO₂ 气藏均位于岩浆底辟体之上或者附近, 同时周围亦发育断层, 而丽水 36-1 高含 CO₂ 气藏和 LF-1 井含 CO₂ 气藏周围底辟不发育, 均紧邻灵峰凸起西侧的控注断裂。丽水凹陷幔源 CO₂ 成藏主要受早中新世和晚中新世两期火山岩浆活动的影响, 这两期火山活动将幔源 CO₂ 带到地壳浅层, 通过砂体侧向输导进入有利圈闭聚集成藏。

关键词: CO₂ 成因; 时空分布; 岩浆活动; 控制因素; 丽水凹陷; 油气。

中图分类号: P62

文章编号: 1000-2383(2021)10-3549-11

收稿日期: 2020-12-15

Distribution and Major Controlling Factors of CO₂ Reservoirs in Lishui Sag, East China Sea Basin

Niu Xing¹, He Yunlong^{2*}, Zhuang Xinguo³

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Based on the drilling data and seismic data of Lishui sag, the distribution and major controlling factors of CO₂ reservoirs are studied by combining geochemical parameters of natural gas and development characteristics of basement faults and magma diapirs. The results show that CO₂ is mainly concentrated in Lingfeng Formation, lower segment of Mingyuefeng Formation and Proterozoic basal gneiss in the vertical. Besides, the content of CO₂ varies greatly in different layers. Laterally, Wenzhou 13-1, Lishui 35-7 and Nanping 5-2 structural CO₂ gas reservoirs are located on or near the magma diapirs, and there are faults around these CO₂ gas reservoirs. Whereas, there is no diapir near Lishui 36-1 structural CO₂ gas reservoirs and LF-1 containing CO₂ gas reservoir, but they are adjacent to large depression-controlling faults which are located at west side of Lingfeng uplift. The distribution of CO₂ gas reservoirs in the Lishui sag is mainly controlled by two stages magmatic activities, which are respectively in Early Miocene and Late Miocene. Mantle-derived CO₂ gas is carried by the deep volcanic magma activities to shallow crust, then migrates along with sand body to favorable traps and forms CO₂ gas pools.

Key words: origin of carbon dioxide; spatiotemporal distribution; magmatic activity; controlling factor; Lishui sag; hydrocarbon.

基金项目: “十三五”国家重大科技专项(No. 2016ZX05027-001-006).

作者简介: 牛杏(1989-), 女, 讲师, 主要从事油气成藏、地球化学、沉积学方面的研究. ORCID: 0000-0001-7947-7984. E-mail: xingncug@163.com

* 通讯作者: 何云龙, Email: ylhe@cug.edu.cn

引用格式: 牛杏, 何云龙, 庄新国, 2021. 东海盆地丽水凹陷 CO₂ 分布特征及成藏主控因素. 地球科学, 46(10):3549-3559.

丽水凹陷位于东海盆地西南部,是重要的油气聚集凹陷之一.尽管丽水凹陷油气勘探已进行多年,但目前为止仅在丽水西次凹LS36-1-1井获得具有商业价值的高产气流和少量凝析油,进展较为缓慢(Chen *et al.*, 2008).前人的研究和钻井资料表明,丽水凹陷天然气成因类型复杂,烃类气以油型气、油型气和煤型气的混合气为主(苏奥等,2014),且常规烃类气与大量CO₂共存,16口探井中有8口井随钻气测见CO₂(图1,星号标注井).CO₂含量在平面和层位分布上变化较大,显示出极不均匀的分布特征.前人对凹陷中CO₂的成因多有研究(黄志龙等,2003;何家雄等,2005;葛和平等,2007;苏奥等,2014),但对其分布规律及成藏控制因素鲜有报道(何家雄等,2005;崔敏和赵

志刚,2015),这在很大程度上影响了丽水凹陷油气勘探的成功率.因此深入探讨丽水凹陷CO₂的分布规律及其成藏控制因素对于丽水凹陷天然气的勘探具有重要的理论和指导意义.

1 地质背景

丽水凹陷呈 NE-SW 展布,是在中生代残留盆地基础上拉张断裂形成的新生代半地堑盆地(葛和平等,2007),可划分为4个二级构造单元,由西至东依次是西次凹、灵峰凸起、东次凹,南部为南次凹(图1).丽水凹陷内发育一系列 NE-NNE 向正断层,断层倾向以 NW 向为主、SE 向为辅,这奠定了凹陷“东断西超、东陡西缓”的半地堑特征.

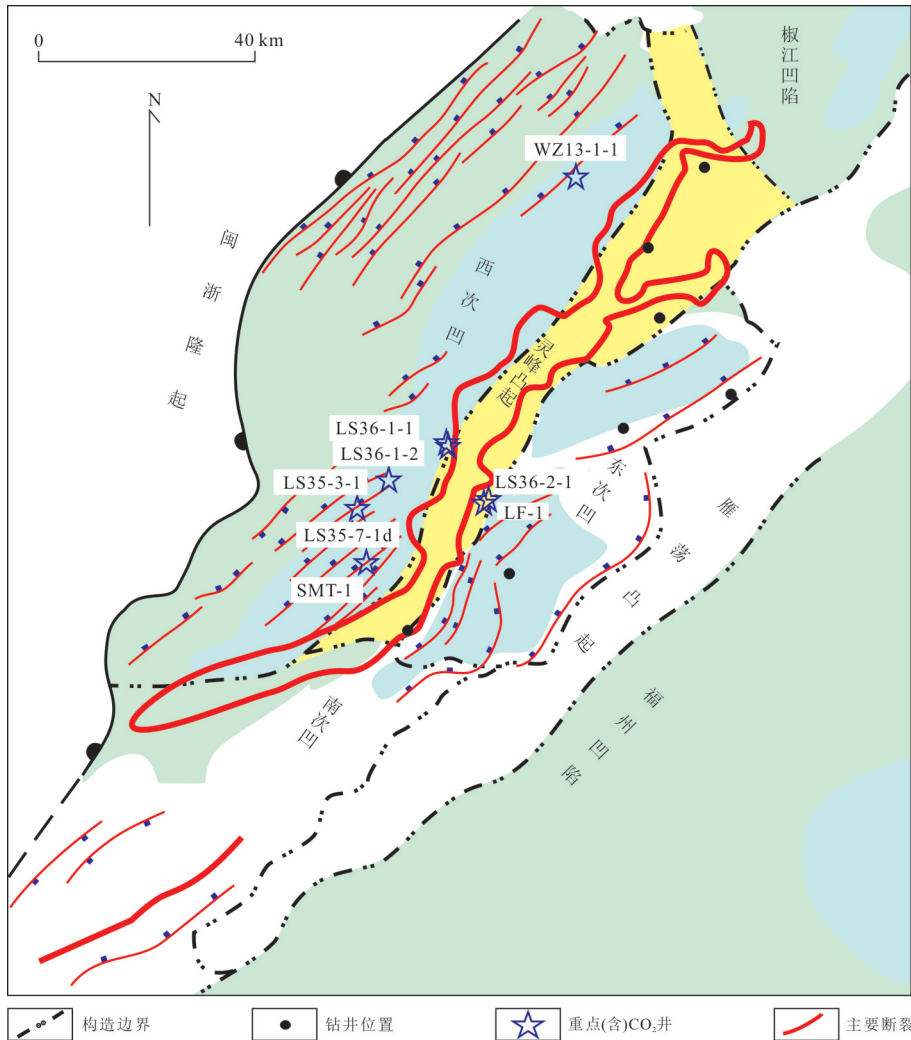


图1 丽水凹陷构造单元划分及基底断裂平面分布
Fig.1 Plane distribution of basement faults and tectonic units in Lishui sag

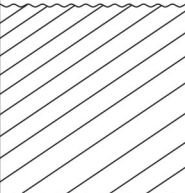
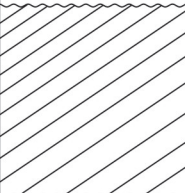
年代地层			地层	年龄(Ma)	区域构造运动	构造演化阶段	
新生代	第四系	更新统		东海群	2.6	冲绳海槽运动	区域沉降
	新近系	上新统	上	三潭组			
			下				
		中新统	上	柳浪组	11.6	龙井运动	
			中	玉泉组			
			下	龙井组			
		古近系	渐新统	上		23.3	花港运动
	下						
	始新统		上		32.0	玉泉运动	
			中		温州组		
			下		瓯江组		
	古新统		上	明月峰组	56.5	瓯江运动	裂陷
				灵峰组			
			下	月桂峰组			
					65.0	雁荡运动	
白垩系		上	石门潭组				

图 2 丽水凹陷地层及构造演化

Fig.2 Stratigraphic and tectonic evolution of Lishui sag

据全志刚等(2012)、张田等(2015)和蒋一鸣等(2020)修编

丽水凹陷经历了裂陷、裂后拗陷、区域沉降 3 个构造演化阶段和 6 期构造运动(图 2)。在所钻探井中,有多口井(如 SMT-1、WZ13-1-1 等)钻遇火成岩,如玄武岩、安山岩和凝灰岩等,表明该区岩浆活动频繁。凹陷内主要充填了中生界上白垩统石门潭组和新生界古近系、新近系和第四系地层,其中,古近系地层从下而上分别为古新统月桂峰组(E_{ly})、灵峰组(E_{ll})和明月峰组(E_{lm}),始新统瓯江组(E_{lo})和温州组(E_{lw}),缺失渐新统地层(葛和平等,2007)(图 2)。

2 丽水凹陷 CO₂ 成因类型

关于丽水凹陷 CO₂ 的成因,前人已做了大量研究。黄志龙等(2003)、何家雄等(2005)、葛和平等(2007)、苏奥等(2014)均认为除 LF-1 井天然气中的

CO₂ 为有机成因外,其余井天然气中的 CO₂ 均为无机幔源成因。有机成因 CO₂ 通常含量低于 15%,且 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 轻于 -10‰ ,相反,无机成因 CO₂ 通常含量高于 15% 且 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 重于 -8‰ (刘娜等,2019)。无机成因 CO₂ 中,变质成因的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值接近于碳酸盐岩的 $\delta^{13}C$ 值,为 $0\pm 3\text{‰}$;地幔—岩浆成因二氧化碳的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值大多为 $-6\text{‰}\pm 2\text{‰}$ (戴金星,1992)。基于这些指标,WZ13-1-1、SMT-1、LS35-7-1d 以及 LS36-1-1 和 LS36-1-2 井天然气中的 CO₂ 均为无机成因,LF-1 井天然气中的 CO₂ 为有机成因(图 3)。LF-1 井中的 CO₂ 很大程度上为天然气的伴生气,是有机质成烃过程的产物(黄志龙等,2003;葛和平等,2007)。天然气中氮的同位素可以进一步判别无机成因 CO₂ 来自壳源还是幔源。幔源氮的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值较高,一般为 1.1×10^{-5} ;壳源氮的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值较低,多为 2×10^{-8} ;大气来源的氮其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值则介于上述两者之

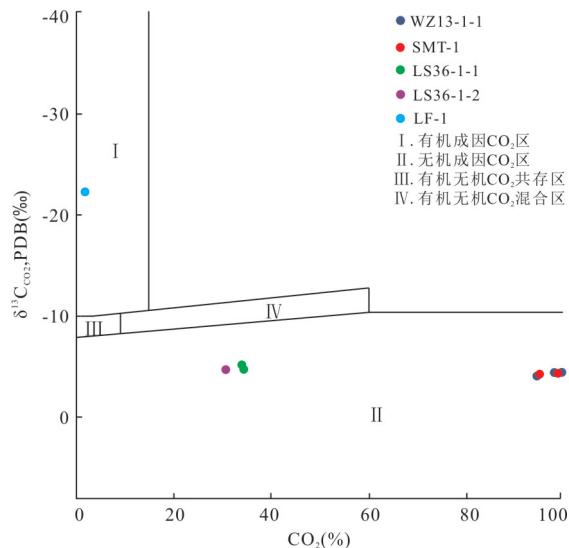


图3 丽水凹陷CO₂有机与无机成因判别

Fig.3 Identification of organic or inorganic origin of CO₂ in Lishui sag

图据戴金星等(1995)

间, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.4×10^{-6} (连承波等, 2007; Zhang *et al.*, 2008). 此外, 一般认为当 $R/R_a<1$ 时 (R 为样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的比值, R_a 为大气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的比值), 天然气主要为壳源成因; $R/R_a>1$ 时, 则表明有明显的幔源氦混入; 幔源成因 CO₂ 伴生氦同位素 R/R_a 值 >2 (何家雄等, 2005). WZ13-1-1 井和 LS36-1-2 井氦同位素的 R/R_a 比值均大于 2 (表 1), 表明温州 13-1 构造和丽水 36-1 构造天然气中的二氧化碳均为无机幔源成因.

3 丽水凹陷(含)CO₂气藏分布特征

丽水凹陷天然气气藏中 CO₂ 的含量变化很大, 介于痕量~99.87% 之间 (表 1). 据戴金星等 (1994) 提出的按 CO₂ 在天然气中的含量进行分类的原则可将丽水凹陷气藏划分为 3 类: 二氧化碳气藏 (CO₂ 含量高于 60%)、高含二氧化碳气藏 (CO₂ 含量在 15%~60% 之间)、含二氧化碳气藏 (CO₂ 含量低于 15%). 因此温州 13-1 构造 (WZ13-1-1)、丽水 35-7 构造 (LS35-7-1d) 以及南平 5-2 构造 (SMT-1 井) 属于二氧化碳气藏; 丽水 36-1 构造 (LS36-1-1、LS36-1-2 井) 为高含二氧化碳气藏; 丽水 36-2 构造 (LF-1 井) 为含二氧化碳气藏.

3.1 纵向分布特征

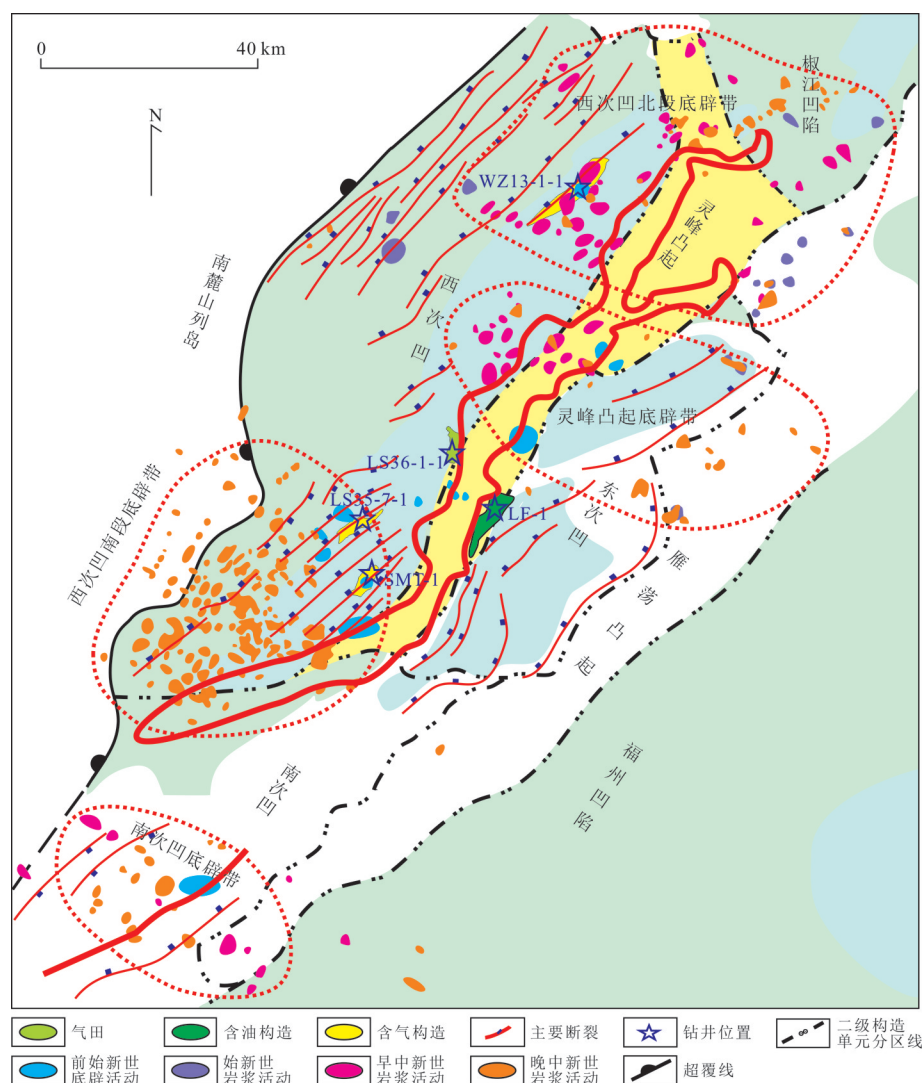
丽水凹陷 CO₂ 分布层位不均一, 目前已有钻井主要在灵峰组、明月峰组下段及元古界基底片麻岩中测试见 CO₂. 其中, 温州 13-1、南平 5-2 和丽水 35-7 的 CO₂ 气藏均储集于下古新统灵峰组砂岩中; 丽水 36-1 高含 CO₂ 气藏则主要储集于上古新统明月峰组下段; 含 CO₂ 气藏 (LF-1 井) 在元古界基底片麻岩中见到显示 (表 1). 从分布层位来看, 不同层位 CO₂ 的含量差别很大, 灵峰组 CO₂ 含量高达 90% 以上, 明月峰组下段 CO₂ 含量在 30%~40% 之间, 而元古界基底片麻岩中 CO₂ 含量很低, 小于 10% (表 1).

丽水凹陷油气的主要成藏期为中晚始新世, 幔源 CO₂ 充注则发生在渐新世以后 (孙玉梅和席小应, 2003). 导致灵峰组和明月峰组 CO₂ 含量差别较大的原因, 可能是丽水 36-1 构造与温州 13-1、南平 5-2 以及丽水 35-7 构造的圈闭性质不同, 且距离岩浆底辟

表 1 丽水凹陷天然气地球化学参数

Table 1 Geochemical parameters of natural gas in Lishui sag

井名	地层	深度(m)	气体主要组分				碳同位素	R/Ra	³ He/ ⁴ He (10 ⁻⁷)	数据来源
			(%)				(‰)			
			CH ₄	C ₂ ⁺	N ₂	CO ₂	δ ¹³ C _{CO2}			
SMT-1	E ₁ l	2 571~2 589	1.62	0.85	0.67	95.63	-4.15			
		2 638~2 657	0.42	—	0.29	99.42	-4.19			
WZ13-1-1	E ₁ l	3 335~3 345	4.76	0.76		94.47	-4.00	7.20	101.00	苏奥等, 2014
		3 405~3 412	1.19	0.22		98.59	-4.20	8.80	123.00	何家雄等, 2005
		3 641~3 666	0.13			99.87	-4.20	5.40	75.00	黄志龙等, 2003
LS36-1-1	E ₁ m	2 251~2 283	55.45	6.85	3.55	34.15	-5.03			
			55.10	6.75	3.44	34.50	-4.67			
LF-1	基底	2 511~2 530	59.48		6.16	痕量	-22.20			苏奥等, 2014
										黄志龙等, 2003
LS36-1-2	E ₁ m ₂	2 238~2 260	56.52	10.68	1.06	31.74	-4.60	8.80	59.70	葛和平等, 2007

图 4 丽水凹陷(含)CO₂井与基底断裂、岩浆底辟Fig.4 The positions of wells containing CO₂ and plane distribution of basement faults and magmatic diaps

区的距离也不同. 丽水 36-1 构造处于丽水凹陷中央反转构造带上, 为反转背斜圈闭(葛和平等, 2003; Jiang *et al.*, 2015), 且明月峰组储层物性较灵峰组储层物性好(罗忠琴, 2013), 因此其成藏于明月峰组, CO₂ 含量较低的原因可能是丽水 36-1 构造周围底辟不发育, 离底辟发育区较远(距离西次凹南段底辟带中心 48.3 km, 距离灵峰凸起底辟带中心 23.8 km)(图 4), 致使供气量不足所致. 温州 13-1 构造位于丽水凹陷西斜坡, 南平 5-2 和丽水 35-7 构造则位于凹陷的南部, 三者均为断层圈闭, 明月峰组时期断层上下盘的断距已很小(几米到 80 余米), 地层呈东倾特征(图 5), 致使储集层上倾方向与渗透性地层相接, 故无法封闭(何生等, 2010), 因此明月峰组不具备圈闭条件, 而灵峰组

由于上下盘断距较大(200~400 多米), 具备封闭条件, 因此温州 13-1 构造、南平 5-2 构造和丽水 35-7 构造油气成藏于灵峰组, 又因为距离岩浆底辟区较近(温州 13-1 构造位于西次凹北段底辟带内, 南平 5-2 和丽水 35-7 构造位于西次凹南段底辟带)(图 4), 供气量充足, 因此 CO₂ 含量高.

3.2 平面分布特征

根据现有 CO₂ 发现井资料和地震资料, 将(含) CO₂ 井位置、基底断裂及岩浆底辟平面分布叠合, 如图 4 所示. 从中可以看出, 温州 13-1 CO₂ 气藏位于丽水凹陷西斜坡, 丽水 35-7 和南平 5-2 CO₂ 气藏位于丽水凹陷西次凹南部, 而高含 CO₂ 气藏(LS36-1-1)分布在丽水凹陷中央反转构造带上, 含 CO₂ 气藏(LF-1)则位于灵峰凸起上. 断裂带主要分布在丽水

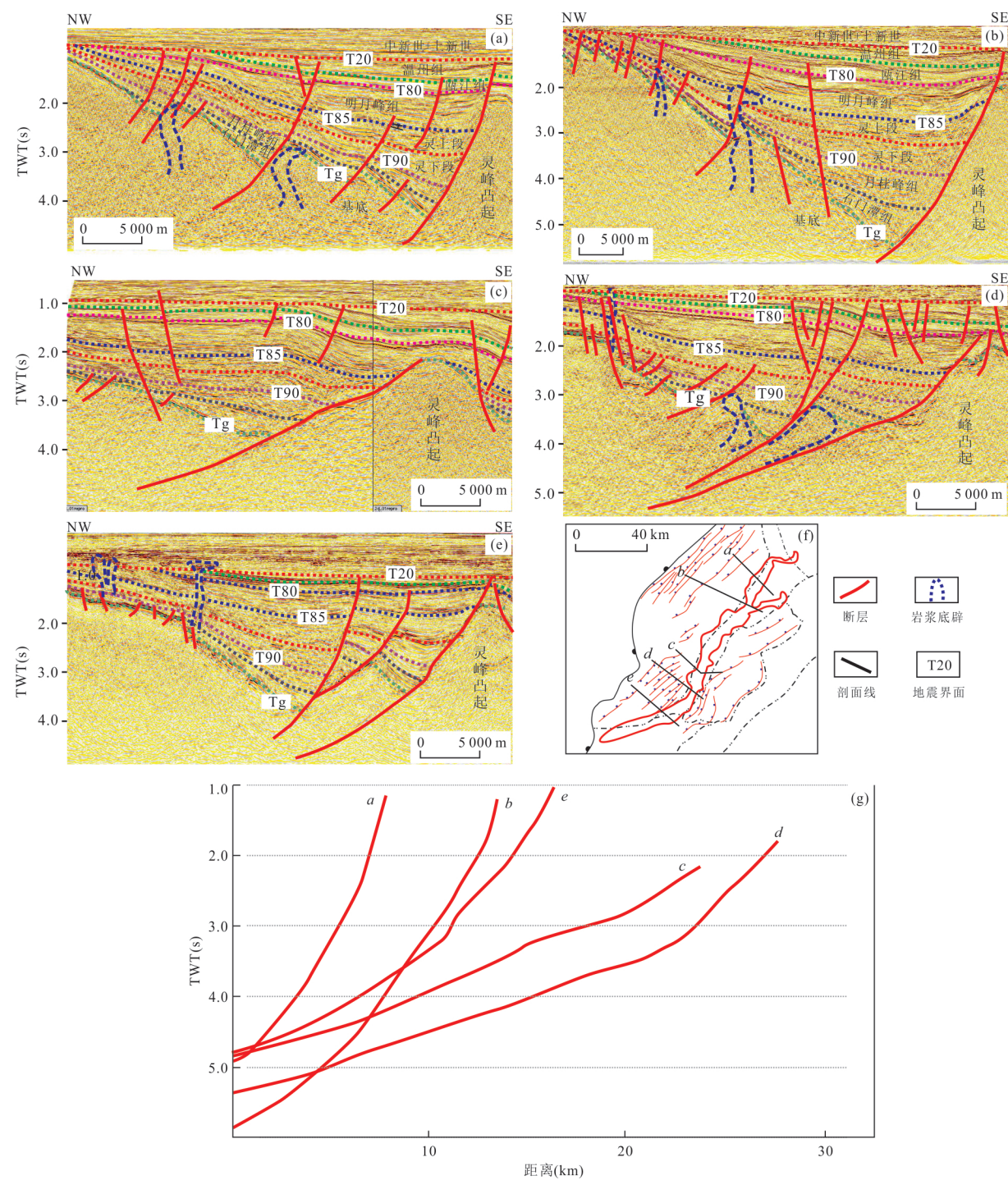


图5 灵峰凸起西侧深断裂详细解剖
Fig.5 Detailed analysis of deep faults on the west side of Lingfeng uplift

凹陷西次凹的西南部和西北部;而岩浆底辟主要分布在西次凹的西南部和东北部;两者在平面分布并无良好的耦合关系。

丽水35-7和南平5-2的CO₂气藏周围基底断裂发育,且位于西次凹西南段底辟带内;温州13-1的CO₂气藏周围断裂也较发育,且位于西次凹北部岩

浆底辟带中,周围底辟十分发育(图4)。丽水36-1高含CO₂气藏紧邻灵峰凸起西侧的控凹断裂,距其南北部的底辟带(西次凹南段底辟带和灵峰凸起底辟带)均较远;含CO₂井LF-1井虽也紧邻灵峰凸起西侧的控凹断裂,但周围底辟不发育,且距离南部的西次凹南段底辟带和北部的灵峰凸起底辟带均较

远(分别距离 51.7 km 和 27.9 km)(图 4)。

综合来看,纵向上丽水凹陷 CO₂ 气藏主要分布于灵峰组,高含 CO₂ 气藏主要分布于明月峰组下段,含 CO₂ 气藏主要分布于元古界基底片麻岩中;平面上,不同构造中 CO₂ 含量的高低似乎与距离岩浆底辟带的远近密切相关,而与基底断裂关系不大。此外,基底断裂与岩浆底辟的平面分布并无良好的耦合关系。

4 CO₂ 气藏成藏主控因素

目前全球已发现的高含 CO₂ 的气田(藏)主要分布在岩浆和断裂活动十分频繁的环太平洋地区(廖凤蓉等,2012)。中国东部已发现的 35 个 CO₂ 气田(藏)主要分布在松辽、渤海湾、东海等盆地及部分现代构造岩浆活动区。前人的研究成果(戴春森,1995;何家雄等,2005;廖凤蓉等,2012)表明中国东部 CO₂ 气田(藏)的分布受控于深大断裂和岩浆活动,如松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地等 CO₂ 气田(藏)无一例外地与火山幔源活动及深大断裂的输气配置作用有极为密切的成因联系。而前人同样认为丽水凹陷幔源 CO₂ 运聚成藏也受控于幔源火山活动与沟通深部气源的基底深大断裂的发育展布与输导作用(何家雄等,2005;崔敏和赵志刚,2015)。那么丽水凹陷(含)CO₂ 气藏是否与中国东部其他 CO₂ 气田(藏)的控制因素一致呢?

4.1 基底深断裂发育特征

笔者利用地震资料详细解剖了丽水凹陷基底断裂的发育特征。通过对丽水凹陷多条地震剖面的解释与分析发现,丽水凹陷基底断裂向下最深可延伸至 4.5~6.0 s 之间(图 5),多相当于几千米至十几千米深,而东海陆架盆地莫霍面埋深为 28~30 km(徐德琼等,1983;郝天珧等,2006;高德章等,2006;韩波,2008)。所以,丽水凹陷基底断裂远

未达到输通幔源气源所需的深度。此外,从图 5 中还可以看出,由西北至西南基底断裂的倾角先减小后增大,c、d 剖面基底断裂的倾角明显小于 a、b 剖面,但 e 剖面基底断裂的倾角又有所增大;倾角越大,其侧向延伸距离越小,相反倾角越小,其侧向延伸距离越大,c、d 剖面中基底断裂侧向延伸距离远,分别为 23 km 和 28 km,而 a 剖面中基底断裂侧向延伸距离小于 8 km,b、e 剖面中的基底断裂侧向延伸距离比较接近,分别为 13 km 和 16 km。

笔者沿灵峰凸起从南到北选取了 52 条剖面,分层采取数据点对丽水凹陷基底断裂的活动速率进行了研究。研究表明基底断裂活动性在月桂峰组时期较低,在灵峰组上段时期达到最强,明月峰组时期明显减弱,始新世时期基底断裂活动性亦较弱,中新世停止活动(图 6)。这与陈春峰等(2013)、田杨等(2016)的观点一致。

4.2 岩浆活动特征

对大量的不同成分的火山—岩浆活动及岩浆岩体中包裹体分析表明,无论是基性还是酸性岩浆中的挥发组分均以水和二氧化碳为主(林松辉,2005),因此,岩浆活动可以为无机成因气的形成提供物质条件。通常认为,在火山喷发期岩浆会释放出大量火山气体(CO₂、CH₄等),然而,国外一些学者研究表明,在火山间歇期沿火山口和火山热泉同样会释放出大量火山气体,且由于火山间歇期持续时间较长,它们释放的气体总量往往比火山活动期还要大(郭正府等,2010)。

丽水凹陷存在多期岩浆活动,通过对丽水凹陷不同时期底辟的期次厘定,将岩浆底辟活动大致划分为 4 期(图 4):前始新世岩浆活动、始新世岩浆活动、早中新世岩浆活动和晚中新世岩浆活动。始新世之前,丽水凹陷主要发育隐伏型底辟,始新世之后,以火山型底辟为主。从图 4 可以看出,岩浆底辟体平面上呈团块状、圆状或次圆状;前始新世和始

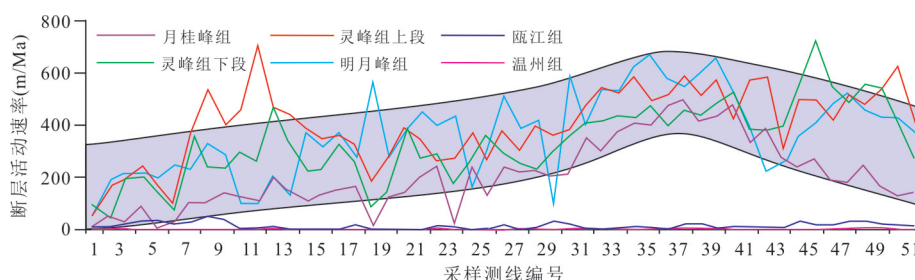


图 6 灵峰凸起西侧深断裂的活动性

Fig.6 The activity of deep faults on the west side of Lingfeng uplift

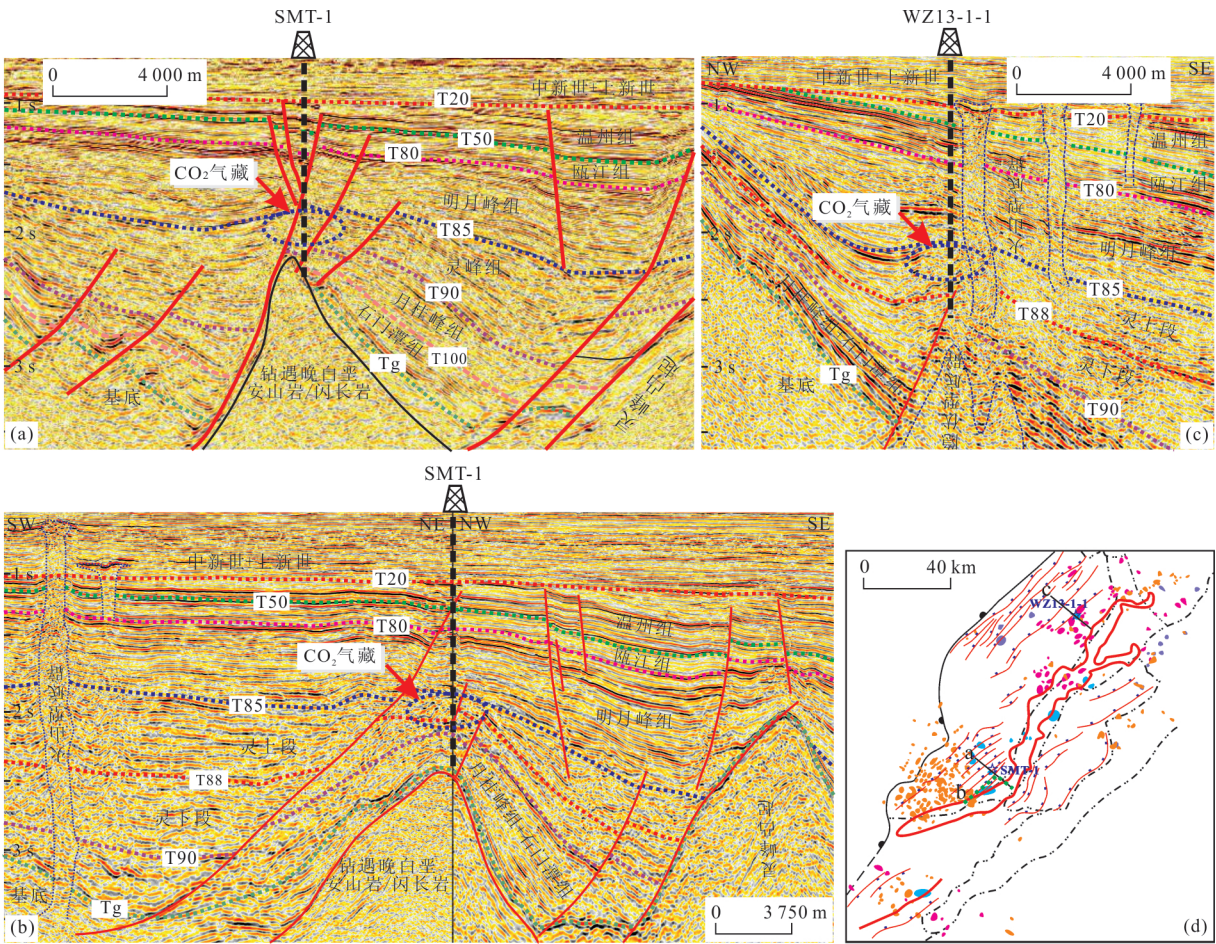


图 7 南平 5-2 构造及温州 13-1 构造 CO₂ 气藏地震剖面解析

Fig.7 Seismic section analysis of Nanping 5-2 and Wenzhou 13-1 structure CO₂ gas reservoirs

图例同图 5

新世底辟只零星分布;早中新世底辟发育规模增大,主要分布于丽水凹陷东北部,西次凹数量较多,灵峰凸起及椒江凹陷零星分布;晚中新世岩浆活动规模进一步增大,底辟体主要分布在丽水凹陷的西南部,大部分分布于西次凹南部,少部分分布于南次凹.由此可知,丽水凹陷的岩浆活动随时代由老到新有增大的趋势,这与中国东部岩浆活动特征相一致(廖凤蓉等,2012);此外,岩浆底辟的主要活动时期(早、晚中新世)与基底断裂的主要活动时期(古新世)并不匹配,而两者在平面分布上并无良好的耦合关系,因此认为丽水凹陷的岩浆底辟多为中心式喷发的火山机构,与基底断裂关系不大,这正好为基底断裂并未沟通幔源气源提供佐证.

温州 13-1 的 CO₂ 气藏周围发育早中新世和晚中新世两期岩浆活动,以早中新世岩浆活动为主;丽水 35-7 和南平 5-2 的 CO₂ 气藏附近均只发育前始新世一期岩浆底辟活动,但距西南部的晚中新世底

辟体较近;丽水 36-1 高含 CO₂ 构造周围底辟不发育,幔源 CO₂ 可能来自其北部的早中新世岩浆底辟群;含 CO₂ 构造 LF-1 周围底辟不发育,且远离底辟群.由此可以看出,岩浆底辟活动与 CO₂ 气藏的分布关系密切,为 CO₂ 气藏提供了气源.

4.3 控制因素分析

以南平 5-2 和温州 13-1 的 CO₂ 气藏为例进行详细的地震剖面解析,以确定基底断裂与岩浆活动对丽水凹陷 CO₂ 气藏的主控作用.利用地震资料层拉平技术对南平 5-2 和温州 13-1 构造形成时间进行定性判断,结果表明南平 5-2 构造圈闭于明月峰组下段时期才形成,温州 13-1 构造圈闭则于灵峰组上段至明月峰组下段时期才形成.

从图 7d 中选取 3 条地震剖面对南平 5-2 和温州 13-1 的 CO₂ 气藏进行详细解剖.由图 7a 所示剖面可知,SMT-1 井距灵峰凸起西侧深断裂较近,且其周围断裂较发育,其中一条断层深入基底之下;另外

在井深3 306~3 353.21 m由钻井揭示了厚达47 m的燕山期安山岩/闪长岩,表明SMT-1井底部发育的隐伏型底辟是燕山期岩浆活动的产物,而此时期南平5-2构造圈闭尚未形成,因此此气藏中的CO₂并非来自隐伏型底辟.图7b为NE-SW向剖面与NW-SE向剖面的交叉剖面,图中有一断层深入3.5 s以下且延伸至SMT-1井南部晚中新世火山型岩浆底辟下部,但其在晚中新世已停止活动,非活动期的断层渗透率很低,主要起封闭作用(刘志宏等,2004).因此南平5-2构造中的CO₂可能是由其南部广泛分布的晚中新世火山型岩浆底辟群(图7d)所带来的幔源CO₂通过砂体侧向运移而来.

在南平5-2构造由南向北选取12条剖面,分层采取数据点对此构造紧邻断层进行了活动速率研究(图8).研究表明南平5-2构造紧邻断层活动性由南向北有增强的趋势;时间序列上,月桂峰组时期断层活动速率较低,灵峰组下段时期断层活动速率达到最大,灵峰组上段时期断层活动速率基本与灵峰组下段时期保持一致,明月峰组下段时期断层活动速率有所下降,明月峰组上段显著下降(局部基本不活动),至瓯江组时期断层基本停止活动(图8).因此,南平5-2构造紧邻断层主要活动期为古新世,而其附近的岩浆底辟活动时间为晚中新世,因此南平5-2构造邻近断层对CO₂的输导运移不起作用,南平5-2构造中的CO₂可能是由其南部广泛分布的晚中新世火山型岩浆底辟群(图7d)所带来的幔源CO₂通过砂体侧向运移而来.

由图7c剖面可知,WZ13-1-1井不仅底部发育有前始新世的隐伏型底辟,而且在其东侧距井≤4 km的范围内,还发育有一个早中新世底辟体和两个晚中新世底辟体,且WZ13-1-1井与此早中新世火山型底辟体距离小于500 m.此外,由图7c可知,WZ13-1-1井位于局部构造高部位,其东侧地层

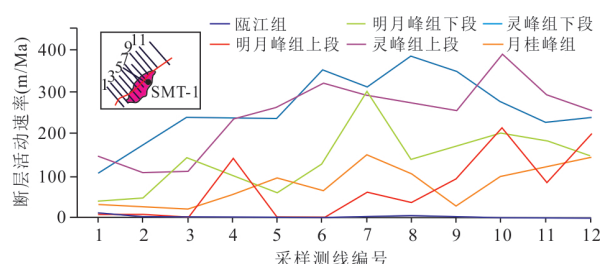


图8 南平5-2构造紧邻断层活动速率

Fig.8 Activity rate of faults adjacent to Nanping 5-2 structure

呈东倾特征,由其东侧火山底辟体带来的幔源CO₂就会顺着地层发生侧向运移,并在有利圈闭成藏.

综上所述,丽水凹陷CO₂气藏与幔源火山活动密切相关,尤其是早中新世和晚中新世两期火山岩浆活动.

5 结论

(1)已有勘探成果资料表明,丽水凹陷天然气气藏主要包括CO₂气藏、高含CO₂气藏和含CO₂气藏.地球化学指标判别表明除含CO₂气藏(LF-1井)中的CO₂为有机成因外,其余气藏中的CO₂均为无机幔源成因.纵向上,CO₂气藏主要分布在灵峰组,高含CO₂气藏主要分布在明月峰组下段,含CO₂气藏主要分布在元古界基底片麻岩中.平面上,CO₂气藏均位于岩浆底辟体之上或者附近,高含CO₂气藏距离其北部的岩浆底辟群较近,含CO₂气藏周围岩浆底辟不发育.

(2)岩浆底辟与基底断裂时空分布并无匹配关系,前者的主要活动时期为中新世,后者主要活动时期为古新世,因此丽水凹陷中的幔源CO₂并非由基底断裂输导而来.丽水凹陷幔源CO₂成藏主要受早中新世和晚中新世两期火山岩浆活动的影响,这两期火山活动将幔源CO₂带到地壳浅层,通过砂体侧向输导进入有利圈闭聚集成藏.

References

- Chen, C.F., Xu, C.M., Zhou, R.H., et al., 2013. Development Characteristics and Accumulation Conditions of Lithologic Reservoirs in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 25(2): 30–35 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. P., Ge, H.P., Chen, X.D., et al., 2008. Classification and Origin of Natural Gases from Lishui Sag, the East China Sea Basin. *Science in China (Series D)*, 51(1): 122–130. <https://doi.org/10.1007/s11430-008-5001-5>
- Cui, M., Zhao, Z.G., 2015. Constraint Analysis of Lishui Sag Hydrocarbon Accumulation in Donghai Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 22(2): 18–21, 151 (in Chinese with English abstract).
- Dai, C.S., Song, Y., Sun, Y., 1995. Genetic Characteristics and Distribution of Carbon Dioxide Gas Reservoirs in Eastern China. *Science in China (Ser. B)*, 25(7): 764–771 (in Chinese).
- Dai, J.X., 1992. Identification of Various Alkane Gases. *Science in China (Ser. B)*, 22(2): 185–193 (in Chinese).

- Dai, J.X., Song Y., Dai, C.S., et al., 1995. Inorganic Gas and Its Reservoir Forming Conditions in Eastern China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Dai, J.X., Song, Y., Hong, F., et al., 1994. Inorganic Genetic Carbon Dioxide Gas Accumulations and Their Characteristics in East Part of China. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 6(4): 215–222 (in Chinese with English abstract).
- Gao, D.Z., Zhao, J.H., Bo, Y.L., et al., 2006. A Study on Lithosphere 3D Structures in the East China Sea and Adjacent Regions. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 41(1): 10–26 (in Chinese with English abstract).
- Ge, H.P., Chen, J.P., Chen, X.D., et al., 2007. A Discussion on Origin and Type of Natural Gas in Lishui Sag, East China Sea Basin. *Science in China (Ser.D)*, 37(S2): 104–110 (in Chinese).
- Ge, H.P., Chen, Z.Y., Fang, L.F., et al., 2003. A Discussion on Hydrocarbon Accumulation Periods in Lishui Sag, East China Sea Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(1): 44–50 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z.F., Li, X.H., Zhang, M.L., 2010. Volcanic Activities and Deep Carbon Cycle. *Quaternary Sciences*, 30(3): 497–505 (in Chinese with English abstract).
- Han, B., 2008. Geophysical Field and Deep Tectonic Features of East China Sea (Dissertation). Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Hao, T.Y., Xu, Y., Xu, Y., et al., 2006. Some New Understandings on Deep Structure in Yellow Sea and East China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(2): 458–468 (in Chinese with English abstract).
- He, J.X., Xia, B., Liu, B.M., et al., 2005. Origin, Migration and Accumulation of CO₂ in East China and Offshore Shelf Basins. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4): 42–49 (in Chinese with English abstract).
- He, S., Ye, J.R., Xu, S.H., et al., 2010. Geology of Oil and Gas. China University of Geosciences Press, Wuhan, 114–120 (in Chinese).
- Huang, Z.L., Jiang, L., Hao, S.S., 2003. Classification of Gas Genesis in Lishui Sag of East Sea Basin. *Natural Gas Industry*, 23(3): 29–31 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.M., Zou, W., Liu, J.S., et al., 2020. Genetic Mechanism of Inversion Anticline Structure at the End of Miocene in Xihu Sag, East China Sea: A New Understanding of Basement Structure Difference. *Earth Science*, 45(3): 968–979 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z.L., Li, Y.J., Du, H.L., et al., 2015. The Cenozoic Structural Evolution and Its Influences on Gas Accumulation in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 22: 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.11.024>
- Lian, C.B., Zhong, J.H., Qu, F., et al., 2007. An Overview of Origin and Accumulation of CO₂. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 14(5): 7–12, 16 (in Chinese with English abstract).
- Liao, F.R., Wu, X.Q., Huang, S.P., 2012. Geochemical Characteristics of CO₂ Gases in Eastern China and the Distribution Patterns of Their Accumulations. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 939–948 (in Chinese with English abstract).
- Lin, S.H., 2005. Fault and Magmatic Activity as Control of Mantle Source CO₂ Gas Accumulation: A Case Study of Jiyang Depression. *Earth Science*, 30(4): 473–479 (in Chinese with English abstract).
- Liu, N., Wu, K.Q., Liu, L., et al., 2019. Dawsonite Characteristics and Its Implications on the CO₂ in Yinggehai-Huangliu Formation of Ledong Area, Yinggehai Basin. *Earth Science*, 44(8): 2695–2703 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.H., Chi, Y.L., Wang, K.W., et al., 2004. Activity and Sealing Property of Faults in the Western Part of Tarim Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(1): 61–66 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z.Q., 2013. Sandstone Characteristics and Assessment of the Palaeocene in Lishui Sag (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao, 31–49 (in Chinese with English abstract).
- Su, A., Chen, H.H., Cao, L.S., et al., 2014. Genesis, Source and Charging of Oil and Gas in Lishui Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(5): 523–532 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y.M., Xi, X.Y., 2003. Petroleum Reservoir Filling History and Oil-Source Correlation in the Lishui Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 30(6): 24–28 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Ye, J.R., Yang, B.L., et al., 2016. Hydrocarbon Accumulation Rule and Exploration Target Optimization in Lishui Sag, East China Sea Continental Shelf Basin. *Natural Gas Geoscience*, 27(4): 639–653 (in Chinese with English abstract).
- Tong, Z.G., Zhao, Z.G., Yang, S.C., et al., 2012. Research on Thermal Evolution and Hydrocarbon Expul-

- sion History of Source Rocks in Low-Exploration Basins: A Case Study on Jiaojiang Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(3): 319—324, 329 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D.Q., Li, Q.X., Jiang, J.Z., 1983. The Mohorovicic Discontinuity in the East China Sea and Its Geologic Significance. *Marine Science Bulletin*, 2(5): 34—41 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T., Zhang, J.P., Zhang, S.L., et al., 2015. Tectonic Characteristics and Evolution of the West Depression Belt of the East China Sea Shelf Basin. *Marine Geology Frontiers*, 31(5): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T.W., Zhang, M.J., Bai, B.J., et al., 2008. Origin and Accumulation of Carbon Dioxide in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, China. *AAPG Bulletin*, 92(3): 341—358. <https://doi.org/10.1306/10230706141>
- ### 附中文参考文献
- 陈春峰, 徐春明, 周瑞华, 等, 2013. 东海陆架盆地丽水凹陷岩性油气藏发育特征与成藏条件. 中国海上油气, 25(2): 30—35.
- 崔敏, 赵志刚, 2015. 东海盆地丽水凹陷油气成藏制约因素分析. 特种油气藏, 22(2): 18—21, 151.
- 戴春森, 宋岩, 孙岩, 1995. 中国东部二氧化碳气藏成因特点及分布规律. 中国科学 (B 辑), 25(7): 764—771.
- 戴金星, 1992. 各类烷烃气的鉴别. 中国科学 (B 辑), 22(2): 185—193.
- 戴金星, 宋岩, 戴春森, 等, 1995. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件 (精装). 北京: 科学出版社.
- 戴金星, 宋岩, 洪峰, 等, 1994. 中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征. 中国海上油气 (地质), 6(4): 215—222.
- 高德章, 赵金海, 薄玉玲, 等, 2006. 东海及邻近地区岩石圈三维结构研究. 地质科学, 41(1): 10—26.
- 葛和平, 陈建平, 陈晓东, 等, 2007. 东海盆地丽水凹陷天然气类型及其成因探讨. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 37(S2): 104—110.
- 葛和平, 陈志勇, 方来富, 等, 2003. 丽水凹陷油气成藏期次探讨. 中国海上油气 (地质), 17(1): 44—50.
- 郭正府, 李晓惠, 张茂亮, 2010. 火山活动与深部碳循环的关系. 第四纪研究, 30(3): 497—505.
- 韩波, 2008. 东海地球物理场及深部地质构造研究 (博士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 郝天珧, 徐亚, 胥颐, 等, 2006. 对黄海—东海研究区深部结构的一些新认识. 地球物理学报, 49(2): 458—468.
- 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等, 2005. 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. 石油勘探与开发, 32(4): 42—49.
- 何生, 叶加仁, 徐思煌, 等, 2010. 石油及天然气地质学. 武汉: 中国地质大学出版社, 114—120.
- 黄志龙, 姜亮, 郝石生, 2003. 东海盆地丽水凹陷天然气成因类型. 天然气工业, 23(3): 29—31.
- 蒋一鸣, 邹玮, 刘金水, 等, 2020. 东海西湖凹陷中新世末反转背斜构造成因机制: 来自基底结构差异的新认识. 地球科学, 45(3): 968—979.
- 连承波, 钟建华, 渠芳, 等, 2007. CO₂ 成因与成藏研究综述. 特种油气藏, 14(5): 7—12, 16.
- 廖凤蓉, 吴小奇, 黄士鹏, 2012. 中国东部 CO₂ 气地球化学特征及其气藏分布. 岩石学报, 28(3): 939—948.
- 林松辉, 2005. 断裂及岩浆活动对幔源 CO₂ 气成藏的作用: 以济阳坳陷为例. 地球科学, 30(4): 473—479.
- 刘娜, 吴克强, 刘立, 等, 2019. 莺歌海盆地乐东东区片钠铝石特征及其对浅层 CO₂ 充注的指示. 地球科学, 44(8): 2695—2703.
- 刘志宏, 迟元林, 王孔伟, 等, 2004. 塔里木盆地西部断层的活动性与封闭性. 吉林大学学报 (地球科学版), 34(1): 61—66.
- 罗忠琴, 2013. 丽水凹陷古新统储层特征与储层评价 (硕士学位论文). 青岛: 中国海洋大学, 31—49.
- 苏奥, 陈红汉, 曹来圣, 等, 2014. 东海盆地丽水凹陷油气成因、来源及充注过程. 石油勘探与开发, 41(5): 523—532.
- 孙玉梅, 席小应, 2003. 东海盆地丽水凹陷油气源对比与成藏史. 石油勘探与开发, 30(6): 24—28.
- 田杨, 叶加仁, 杨宝林, 等, 2016. 东海陆架盆地丽水凹陷油气成藏规律及区带优选. 天然气地球科学, 27(4): 639—653.
- 仝志刚, 赵志刚, 杨树春, 等, 2012. 低勘探程度盆地烃源岩热演化及排烃史研究: 以东海椒江凹陷为例. 石油实验地质, 34(3): 319—324, 329.
- 徐德琼, 李全兴, 蒋家祯, 1983. 东海莫霍面及其地质意义. 海洋通报, 2(5): 34—41.
- 张田, 张建培, 张绍亮, 等, 2015. 东海陆架盆地西部坳陷带构造特征及演化. 海洋地质前沿, 31(5): 1—7.