

郭佳, 杨树春, 胡文博, 等. 南海西部大陆边缘南段油气形成差异性分析[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 1-7.

南海西部大陆边缘南段油气形成差异性分析

郭佳, 杨树春, 胡文博, 宋双, 王一博, 王龙

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要:南海西部大陆边缘南段发育万安盆地和涠公盆地,二者仅以昆仑隆起相隔,万安盆地以生气为主,涠公盆地以生油为主,造成二者油气差异性的原因有待探究。在已有的油气勘探资料和现有认识的基础上,通过对涠公盆地和万安盆地的热流背景、构造格局、沉积环境和生烃母质等特征进行剖析和类比,探讨2个盆地油气形成差异性的原因。研究认为,造成二者油气差异性的主要原因在于热流背景、构造格局、沉积环境以及生烃母质的不同。受断裂活动影响,万安盆地地温梯度和大地热流值均高于涠公盆地。万安盆地主力烃源岩时期是渐新世—早中新世,主要发育断拗型盆地湖沼—海湾相沉积,渐新世生烃母质主要为湖沼环境的藻类、水生植物以及高等植物的混源,早中新世生烃母质主要来自红树林等陆源高等植物,以II₂—III型干酪根为主,生气为主。涠公盆地主力烃源岩时期为渐新世,主要发育断陷型盆地湖相沉积,生烃母质主要来源于中深湖相的藻类和水生植物,以I—II型干酪根为主,生油为主。因此,断裂活动的差异控制了热流背景,构造格局的差异控制了沉积环境,沉积环境的差异控制了生烃母质,生烃母质的差异控制了油气类型。

关键词:万安盆地;涠公盆地;热流背景;构造格局;沉积环境;生烃母质

中图分类号:P744.4;P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.041

0 引言

万安盆地和涠公盆地位于南海西部大陆边缘南段,以昆仑隆起相隔。万安盆地位于昆仑隆起以南,西南部为纳土纳隆起区,东部以西雅隆起为界(图1)^[1]。盆地近SN走向展布,呈纺锤状,面积约78 253 km²,其中位于中国传统疆域内的面积为55 152 km²。盆地位于大陆架—上陆坡上,主体水深<500 m,是叠置在洋陆过渡壳和高热流值背景下的新生代走滑—伸展型盆地^[2]。涠公盆地位于昆仑隆起以北,北部紧邻越南大陆,西界为呵叻台地,向东北方向延伸进入南中国海。盆地近EW走向,面积约41 000 km²,全部位于越南海域。盆地位于越南大陆架之上,主体水深<100 m,是发育在陆壳和高热流背景下的一个新生代陆内伸展裂陷型盆地^[3-4]。

收稿日期:2021-02-22

资助项目:“十三五”国家科技重大专项“曾母-北康盆地群烃源岩生排烃潜力及资源量评价”(2016ZX05026004-005)

作者简介:郭佳(1984—),女,博士,工程师,主要从事含油气盆地沉积方面的研究工作.E-mail: guojia@cnooc.com.cn

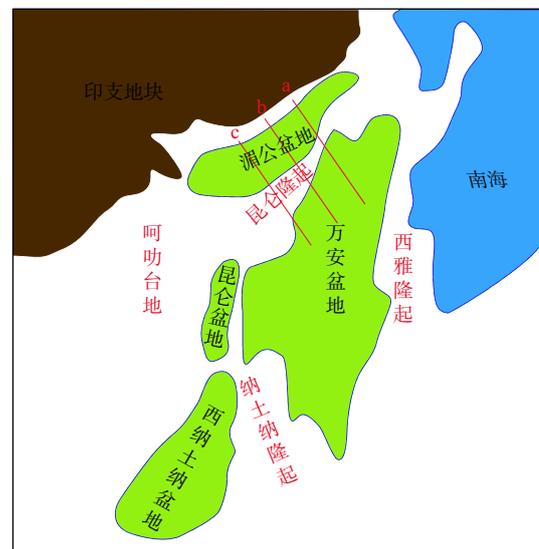


图1 南海西部大陆南缘盆地分布

Fig.1 Distribution of basins around the southern margin of the western South China Sea

万安盆地油气资源丰富,以生气为主。截至2012年,越南及其他外国石油公司在万安盆地累计钻井168口,其中探井136口,共发现油气田30个;累计探明石油可采储量超1亿m³、天然气可采储

量超 2300 亿 m^3 ^[5]。涪盆地以生油为主。截至 2012 年,越南及其他外国石油公司在涪盆地累计钻井 232 口,共发现油气田 46 个;累计探明石油可采储量超 6 亿 m^3 、天然气可采储量超 1700 亿 m^3 ^[6]。仅一隆之隔的 2 个盆地,万安盆地以生气为主,油气比为 1:2;涪盆地则以生油为主,油气比为 4:1。为探明造成 2 个相邻盆地油气差异性巨大的控制因素,在已有的油气勘探资料和现有认识的基础上,对涪盆地和万安盆地的热流特征、构造格局、沉积环境和生烃母质等特征进行了剖析和类比,探讨了 2 个盆地油气形成差异性的原因,以期对南海中南部油气成藏主控因素分析及油气勘探起到一定的现实指导作用。

1 南海西部大陆边缘热流特征

众所周知,油气的形成受“源热”共控,潜在烃源岩是油气形成的内因,热是油气形成的外因,内因和外因缺一不可,二者的相互耦合作用控制了含油气区内油气的生成、相态类型与分布规律^[2]。沉积盆地的热状态与其构造活动密切相关。根据南海中南部热流值等值线图,整体上,南海热流值由陆架区向海盆区有逐渐增加的趋势(图 2)。南海西部大陆边缘因断裂扭张及深部热源异常补给为高热流背景区,平均值 71.9 mW/m^2 ^[7]。西部热流受南

海西部断裂带影响,热流值在断裂带附近异常增高,并由北向南逐渐增高,这与地壳和岩石圈厚度变化一致^[8]。

TRAN^[11] 基于越南近海 80 口钻井数据的地热研究结果揭示:越南近海附近的断裂及断层是重要的传热通道。受西部断裂带,特别是越东-万安断裂的影响,万安盆地地温梯度值向西减小较快,西北部地温梯度值为 $26 \text{ }^\circ\text{C/km}$,向东增加到约 $40 \text{ }^\circ\text{C/km}$,整个盆地平均值为 $35.9 \text{ }^\circ\text{C/km}$;相较万安盆地,涪盆地远离断裂带,其地热场主要受控于岩石圈厚度变化,地温梯度较小,计算值介于 $22.6\sim 33.5 \text{ }^\circ\text{C/km}$,平均值为 $27.8 \text{ }^\circ\text{C/km}$ 。同样,万安盆地的大地热流值亦明显高于涪盆地,万安盆地的热流值大部分介于 $50\sim 110 \text{ mW/m}^2$,平均值为 80 mW/m^2 ,而涪盆地的热流值介于 $45\sim 85 \text{ mW/m}^2$,平均值仅 64 mW/m^2 (表 1)。

2 构造格局控制沉积环境差异性

南海北部和西部靠近陆源一侧,由于构造位置的不同形成了 2 类盆地。靠近陆架的位置,基底通常是脆性的陆壳,在拉张应力下容易发生脆性伸展变形,形成断块多、分割性强的断陷盆地特征;而位于陆坡区的一测,其基底性质为韧性的洋陆过渡壳,在拉张应力下易形成中间深、两边浅的断拗型盆地^[12-14](图 3)。

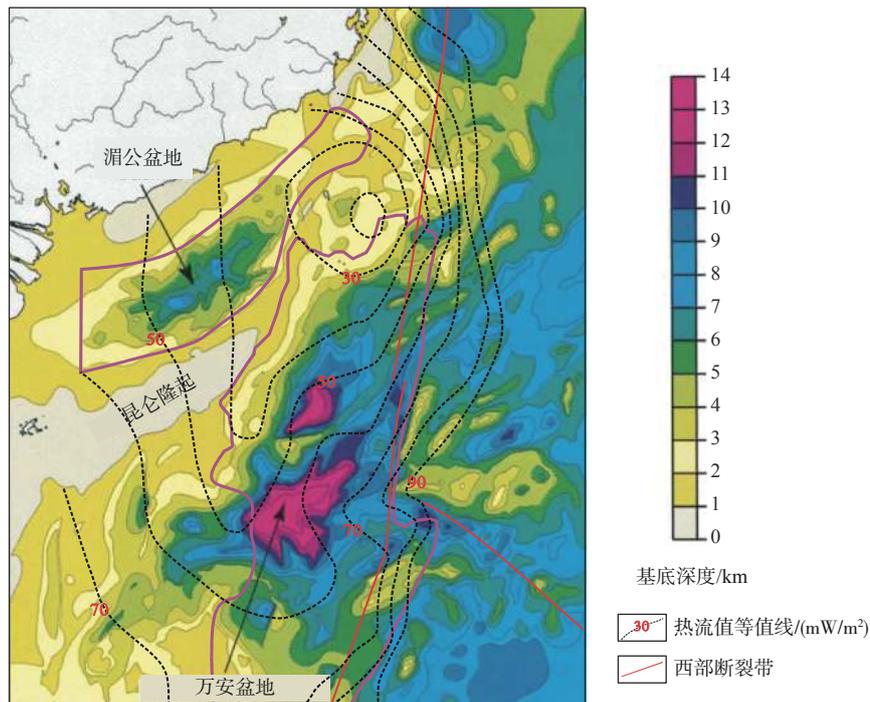


图 2 南海西部基底等深及大地热流值等值线图^[9-10]

Fig.2 Basement isobathic map with heat flow value of the west southern South China Sea^[9-10]

表 1 湄公盆地与万安盆地地温梯度和大地热流值^[11]Table 1 Geothermal gradient and heat flow in the Mekong Basin and the Wan'an Basin^[11]

盆地	地温梯度/(°C/km)			热流/(mW/m ²)		
	最小值	最大值	平均	最小值	最大值	平均
湄公盆地	22.6	33.5	27.8	45	85	64
万安盆地	26	41.5	35.9	50	110	80

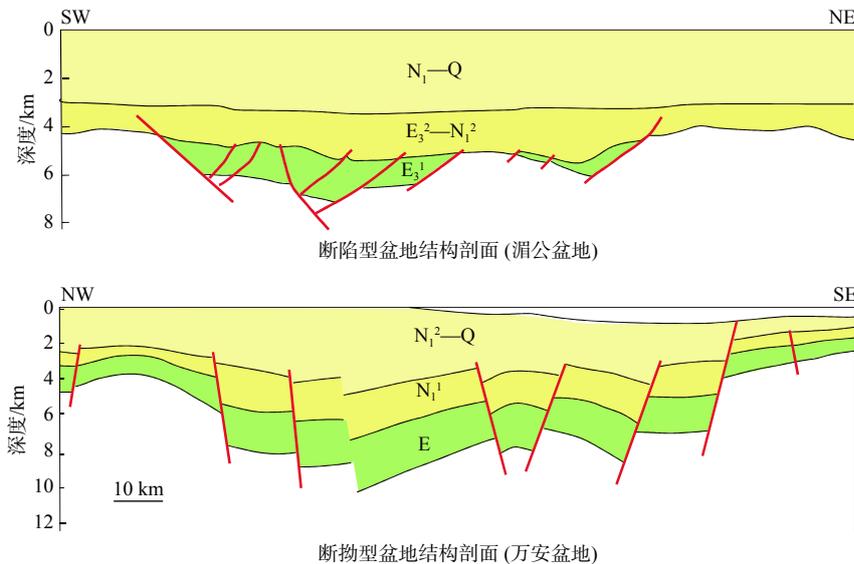


图 3 湄公盆地与万安盆地结构剖面

Fig.3 Structural profiles of Mekong Basin and Wan'an Basin

由于古构造格局的差异造成盆地基底性质的差异,从而形成不同的盆地类型。湄公盆地处在脆性陆壳之上,易形成断层控制作用较强的深大断陷型盆地^[15-17];万安盆地处在韧性的洋陆过渡壳之上,易形成断层控制作用相对较弱的宽缓断拗型盆地^[18]。

从过湄公盆地的剖面上看(图 4),其主力烃源岩发育时期为渐新世,盆地处在断陷期,主要发育西断东超的箕状断陷,盆地具有地层厚度变化大、断层控制作用强的断陷特征。万安盆地的主力烃源岩发育时期为渐新世—早中新世,此时盆地处在断拗期,断层主要位于盆地的中部,盆地具有中间深、两边浅的碟型特征,地层厚度整体变化不大,地形比较宽缓。

古构造格局不仅控制盆地结构,同时能够控制盆地中沉积水体的差异。昆仑隆起是位于万安盆地和湄公盆地的天然屏障,由于南海扩张形成的海侵,会因为昆仑隆起的阻隔而造成 2 个盆地沉积环境的差异。同时,由于昆仑隆起、阿勒台地和纳土纳弧的包围,万安盆地形成三面环陆的半封闭海湾环境^[19]。

从过万安盆地和湄公盆地的 3 条剖面可以看出(图 4),在湄公盆地和万安盆地的主生烃期,昆仑

隆起已经存在。从巽他陆架的区域沉积演化图上可以看出,由于昆仑隆起阻隔,渐新世—早中新世湄公盆地都是湖相沉积,直到中中新世以后海水才越过昆仑隆起,可以看出,昆仑隆起是造成沉积水体差异的主要因素。

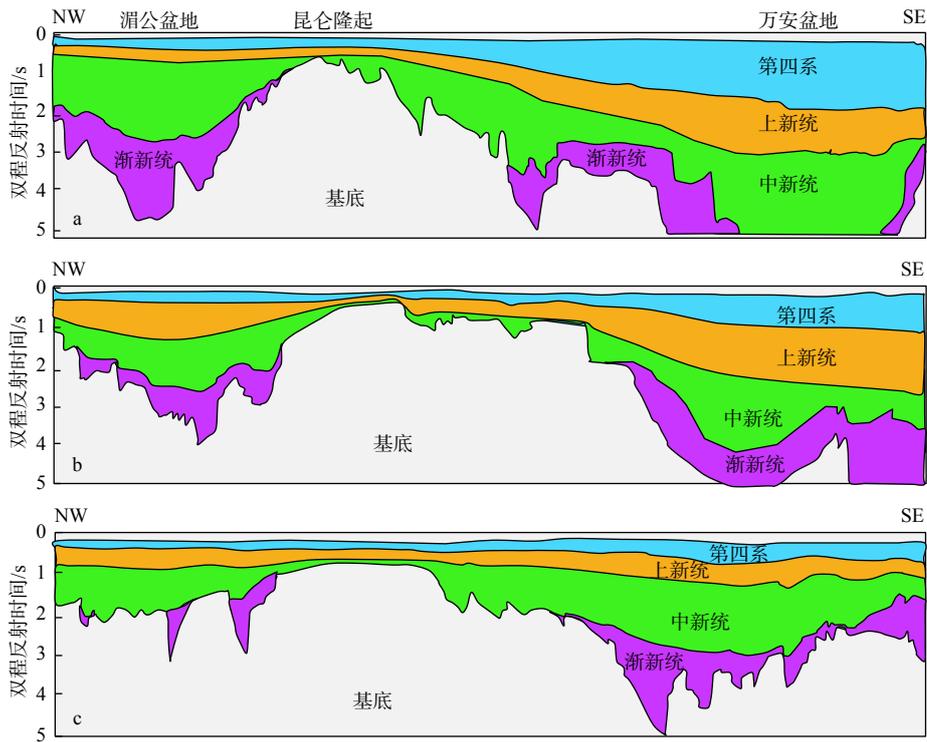
通过以上分析可以看出,古构造格局通过控制盆地结构和沉积水体差异,最终控制了 2 个盆地沉积环境的差异。湄公盆地主要发育断陷型盆地的湖相沉积,万安盆地则发育断拗型盆地的湖沼-海湾相的沉积(图 5)^[20]。

3 沉积环境控制生烃母质差异性

生烃母质主要来自富含有机质的动植物或微生物,而这些有机质生长又与沉积环境息息相关。根据生物标志化合物和孢粉化石组合显示,湄公盆地生烃母质主要来源于藻类和低等水生植物,万安盆地生烃母质主要来源于湖沼-海湾的藻类、低等水生植物和陆源高等植物^[21-24]。

(1) 生物标志化合物与碳同位素指示生烃母质不同

生物标志化合物具有特殊的指向性,在反映烃



剖面位置见图 1

图 4 过昆仑隆起地质剖面

Fig.4 Geologic profiles across Con Son Swell

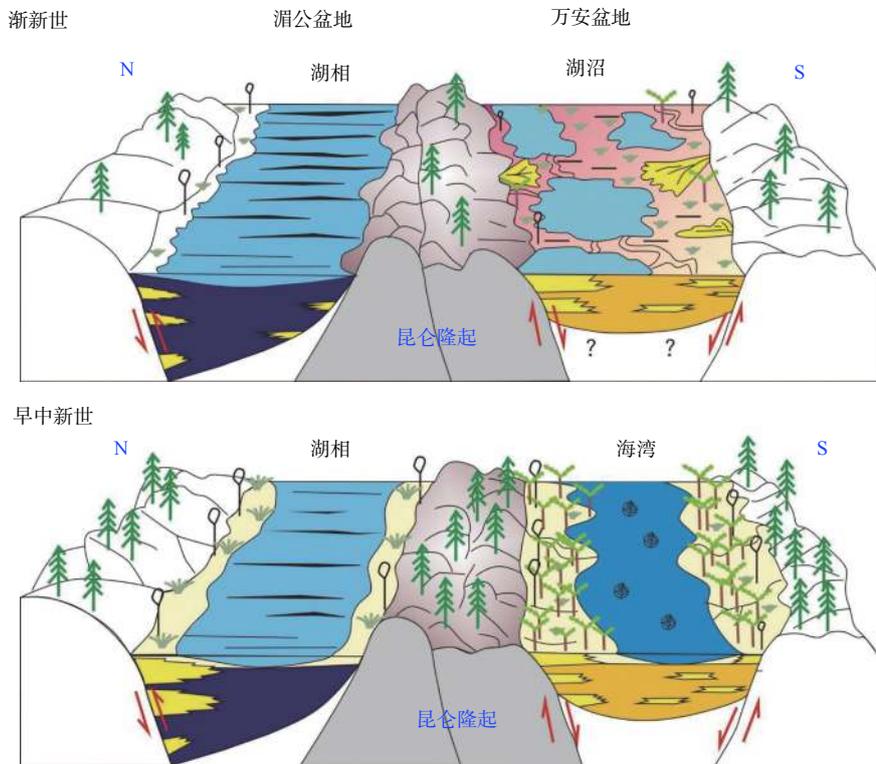


图 5 湄公盆地与万安盆地沉积模式图^[20]

Fig.5 Sedimentary patterns in Mekong and Wan'an basins^[20]

源岩有机质输入和沉积环境方面具有可靠性。姥植比(Pr/Ph)既是沉积环境参数,又是母源输入参数;

三环萜烷/藿烷能够反映有机质中藻类的贡献。图 6 显示湄公盆地有机质主要来自弱还原条件下的藻

类, 而万安盆地烃源岩主要形成于氧化环境, 既有藻类的贡献也有其他生物的贡献。

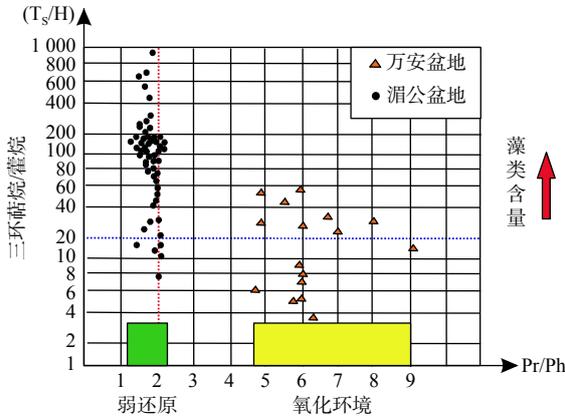


图 6 生物标志化合物指示生烃母质
Fig.6 Kerogens indicated by biomarkers

碳同位素组成同样能够指示母质来源和沉积环境, C_{27} 主要指示浮游生物来源, C_{28} 指示藻类来源, C_{29} 主要指示高等植物来源。图 7 显示涪公盆地有机质主要来源于湖泊环境的藻类, 万安盆地的有机质来源比较复杂, 既有湖泊藻类, 也有海湾植物, 更多的是来自陆源的高等植物, 表现出混源的特征^[20]。

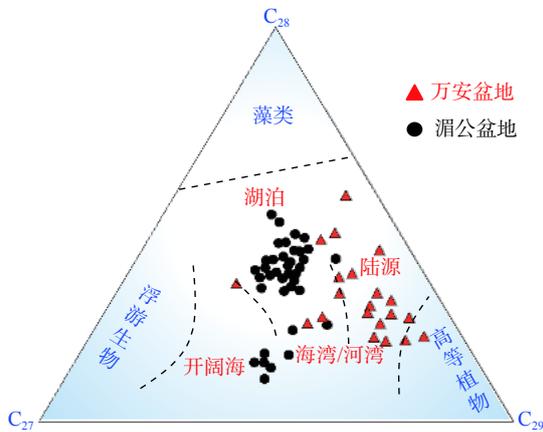


图 7 C_{27} — C_{29} 甾烷判断母质来源和沉积环境^[20]
Fig.7 Kerogen source and sedimentary environment identified with C_{27} — C_{29} sterane^[20]

(2) 孢粉及化石组合指示生烃母质不同

涪公盆地渐新世—早中新世主要的孢粉组合为反映湖相腐泥质环境的葡萄藻, 反映低等水生环境的盘星藻、水蕨类, 以及反映沼泽环境的被子植物、蕨类植物和裸子植物。万安盆地渐新世—早中新世的孢粉组合则表现为藻类、低等水生植物和高等陆源植物混源的特征, 渐新世主要以湖相藻类和低等水生植物为主, 早中新世则以反映海湾环境的红树

林、海相沟鞭藻、有孔虫等高等植物为主。

生物标志化合物和孢粉组合两方面的证据都证明了不同的沉积环境控制不同的生烃母质。对于涪公盆地来说, 无论是渐新世还是早中新世, 都以中深湖相的藻类和水生植物为主要来源, 属于腐泥型有机质。万安盆地因为沉积环境不同, 生烃母质也有差异, 渐新世主要为湖沼环境的藻类和水生植物和高等植物的混源, 早中新世生烃母质主要来自红树林等陆源高等植物, 可见沉积环境对生烃母质有重要的控制作用。

4 生烃母质控制油气形成的差异性

涪公盆地主力烃源岩为渐新世的湖相泥岩夹少量的炭质泥岩, 以 I—II 型干酪根为主, 氢指数 (HI) 主体介于 200~600 mg/g (图 8a); 总有机碳 (TOC) 介于 1%~10%, 主体 >2%; 生烃潜量 (S_1+S_2) 主要介于 10~100 mg/g, 烃源岩类型属于中等—好。中新世烃源岩以 II—III 型干酪根为主, 岩性主要为湖相泥岩, 氢指数较低, 主体分布于 0~200 mg/g; TOC 介于 0.5%~2%, 主体 <1%; S_1+S_2 主要介于 0~10 mg/g, 属中等烃源岩。

万安盆地主力烃源岩为渐新世—早中新世的煤系烃源岩 (岩性主要为炭质泥岩和煤) 和陆源海相烃源岩 (岩性为暗色泥岩), 以 II₂—III 型干酪根为主^[25]。渐新世 HI 主体位于 200~300 mg/g, 局部在 400 mg/g 附近; 煤系烃源岩 TOC 位于 10% 附近, S_1+S_2 主要集中分布于 10 mg/g 和 80 mg/g 附近, 局部的高值说明万安盆地局部发育较好的煤系烃源岩; 陆源海相烃源岩 TOC 主体位于 1% 附近, S_1+S_2 零散分布于 0.2~7.0 mg/g, 缺乏规律。早中新世 HI 较低, 主体分布于 50~200 mg/g (图 8b)。煤系烃源岩 TOC 主要介于 50%~80%, S_1+S_2 零星分布于 10 mg/g 和 100 mg/g 附近; 陆源海相烃源岩 TOC 主体介于 0.5%~1.0%, S_1+S_2 主体分布于 0.2~5 mg/g, 整体为中等—好的烃源岩。

综上所述, 涪公盆地烃源岩主要为渐新世的湖相泥岩, 以 I—II 型干酪根为主, 生油为主; 万安盆地的烃源岩主要为渐新世—早中新世的煤系烃源岩 (岩性主要为炭质泥岩和煤) 和陆源海相烃源岩 (岩性为暗色泥岩), 以 II₂—III 型干酪根为主, 生气为主。另外, 从有机质成熟度上来看, 涪公盆地渐新世有机质成熟度 R_o 为 0.6%~2.2%; 万安盆地渐新世—早中新世 R_o 为 0.8%~2.2%, 局部 >2.2%。虽然成

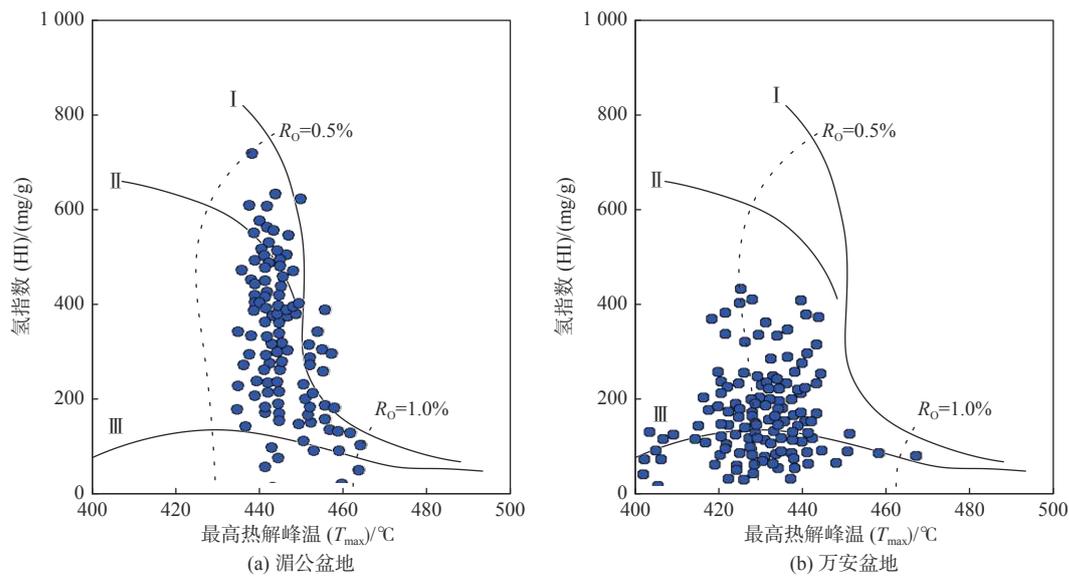


图8 湄公盆地与万安盆地烃源岩有机质类型

Fig.8 Types of organic matter in source rocks of Mekong Basin and Wan'an Basin

熟度略有不同,但是由于湄公盆地和万安盆地大致位于同一热体制之下,其主力烃源岩基本上达到了成熟—过成熟阶段。可见在相同的热体制条件下,生烃母质的不同造成了2个盆地油气形成的差异性。

5 结论

通过对万安盆地和湄公盆地的热流特征、构造格局、沉积环境以及生烃母质等特征可以看出,断裂活动的差异控制了热流背景,构造格局的差异控制了沉积环境,沉积环境的差异控制了生烃母质,生烃母质的差异控制了油气类型。

(1)受西部断裂活动影响,万安盆地地温梯度值和大地热流值均高于湄公盆地,前者的平均地温梯度值为 $35.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,后者为 $27.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;前者的大地热流平均值为 $80\text{ mW}/\text{m}^2$,而后者的热流平均值仅 $64\text{ mW}/\text{m}^2$ 。

(2)湄公盆地的主力烃源岩发育时期为渐新世,盆地处在断陷期,主要发育断陷型盆地的湖相沉积;万安盆地的主力烃源岩发育时期为渐新世—早中新世,盆地处在断拗期,发育断拗型盆地的湖沼—海湾相的沉积。

(3)湄公盆地渐新世生烃母质主要来源于中深湖相的藻类和水生植物,属于腐泥型有机质;万安盆地渐新世生烃母质主要为湖沼环境的藻类、水生植物以及高等植物的混源,早中新世生烃母质主要来自红树林等陆源高等植物。

(4)湄公盆地烃源岩主要为渐新世的湖相泥岩,

以I—II型干酪根为主,生油为主;万安盆地的烃源岩主要为渐新世—早中新世的煤系烃源岩(岩性主要为炭质泥岩和煤)和陆源海相烃源岩(岩性为暗色泥岩),以II₂—III型干酪根为主,生气为主。

参考文献:

- [1] 金庆焕,刘振湖,陈强. 万安盆地中部坳陷: 一个巨大的富生烃坳陷[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2004, 29(5): 525-530.
- [2] 孙桂华,高红芳,彭学超,等. 越南南部湄公盆地地质构造与沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(6): 25-33.
- [3] PUSH A. Structural evolution of the Nam Con Son Basin: quantitative fault analysis applied to a 3-D seismic dataset[D]. Durham: Durham University, 2007.
- [4] LE V K. The structural of the Mekong Trough[J]. International Geology Review, 1986, 28(2): 87-95.
- [5] 赵志刚,刘世翔,谢晓军,等. 万安盆地油气地质特征及成藏条件[J]. 中国海上油气, 2016, 28(4): 9-15.
- [6] CARSTENS H, BERSTAD S. Vietnam-attractive plays in a new geological province[J]. Oil and Gas Journal, 1994, 92(11): 78-83.
- [7] 张功成,李友川,刘世翔,等. “源热联控”中国海油气田“近岸油、远岸气”有序分布[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(5): 1-22.
- [8] 张功成,朱伟林,米立军,等. “源热联控论”: 来自南海海域油气田“外油内气”环带有序分布的新认识[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 987-1005.
- [9] 金春爽,汪集咏,王永新,等. 天然气水合物地热场分布特征[J]. 地质科学, 2004, 39(30): 416-423.
- [10] 陈强,金庆焕. 南海西部万安断裂活动特征及其对万安盆地的控制作用[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(10): 1-8.
- [11] TRAN H Y. Heat flow study results and geothermal energy distribution in the Vietnam offshore sedimentary basins[J]. Petroleum Exploration and Production, 2012, 10(1): 32-37.
- [12] 钱光华,樊开意. 万安盆地地质构造及演化特征[J]. 中国海上

- 油气(地质), 1997, 11(2): 73-79.
- [13] 吴峻岐, 高红芳, 孙桂华. 南沙海域万安盆地地质构造与沉积体系特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(5): 1-11.
- [14] 张功成, 王璞珺, 吴景富, 等. 边缘海构造旋回: 南海演化的新模式[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 1-11.
- [15] LEE G H, LEE K, WATKINS J S. Geologic evolution of the Cuu Long and Nam Con Son Basin, offshore southern Vietnam South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(6): 1055-1082.
- [16] CANH T N. The stratigraphy of the Cuu Long Basin based on the results of new wells[M]. Hanoi: Petrovietnam Archives, 1988: 11.
- [17] Марков Ю Д. 齐云彩, 译. 越南东南陆架、陆坡的表层沉积物特征[J]. 海洋地质, 1992(2): 52-74.
- [18] 杨木壮, 王明君, 梁金强, 等. 南海万安盆地构造沉降及其油气成藏控制作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 85-88.
- [19] 贺清, 全志刚, 胡根成. 万安盆地沉积物充填演化及其对油气藏形成的作用[J]. 中国海上油气, 2005, 17(2): 80-83, 88.
- [20] COLE J. Biofacies and sequence stratigraphy, Oligocene to Pliocene, Cuu Long and Nam Con Son Basins, Vietnam[J]. Petrovietnam, 2011, 6(20): 3-14.
- [21] 刘振湖, 吴进民. 南海万安盆地油气地质特征[J]. 中国海上油气(地质), 1997, 11(3): 153-160.
- [22] 姚伯初, 刘振湖. 南沙海域沉积盆地及油气资源分布[J]. 中国海上油气, 2006, 18(3): 150-160.
- [23] 梁金强, 杨木壮, 张光学, 等. 南海万安盆地中部油气成藏特征[J]. 南海地质研究, 2003(0): 27-34.
- [24] 金庆焕, 刘宝明. 南沙万安盆地油气分布特征[J]. 石油实验地质, 1997, 19(3): 234-239, 260.
- [25] 张厚和, 刘鹏, 廖宗宝, 等. 南沙海域主要盆地地质特征与油气分布[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 62-70.

DIFFERENCE ANALYSIS OF HYDROCARBON GENERATION IN THE SOUTHERN PART OF THE WESTERN CONTINENTAL MARGIN OF THE SOUTH CHINA SEA

GUO Jia, YANG Shuchun, HU Wenbo, SONG Shuang, WANG Yibong, WANG Long
(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Two basins, the Wan'an and Mekong basins, occur in the southern part of the western continental margin of the South China Sea (SCS), separated by a swell called Con Son. The former contains natural gas, whereas the latter produces oil. In order to study the cause of the difference as such, heat flow background, structural pattern, sedimentary environment and hydrocarbon kerogen of the two basins are reexamined and compared in this work, based on existing geologic data and references. Research results indicate that in addition to the differences in contained hydrocarbon, there are differences in heat flow, structural pattern, sedimentary environment and hydrocarbon kerogen as well between the two basins. Affected by fault activities, the geothermal gradient and heat flow value of the Wan'an Basin are obviously higher than that of the Mekong Basin. In the Wan'an Basin, the major source rocks include the Oligocene to Early Miocene lacustrine-estuarine sediments deposited in a fault-depressed basin, and the kerogen of the Oligocene source rock mainly comes from lacustrine algae, aquatic plants and some higher plants, while the kerogen of Early Miocene mainly from terrestrial higher plants such as mangrove forest, dominated by type II₂-III of kerogen, which largely generates natural gas. In the Mekong Basin, however, the major source rock deposited in Oligocene is dominated by lacustrine sediment of rift type, with hydrocarbon generation material coming mostly from algae and aquatic plants, and the kerogen of type I-II that generates mainly oil. Therefore, it is concluded that the difference in structural pattern controls the sedimentary environment, the difference in sedimentary environment controls the hydrocarbon generation material, and the difference in hydrocarbon generation material controls the type of hydrocarbon generated.

Key words: Wan'an Basin; Mekong Basin; heat flow background; structural pattern; sedimentary environment; hydrocarbon generation material