

doi: 10.12029/gc20200306

赵忠泉, 孙鸣, 万晓明, 陈胜红, 赵静, 宋立军, 李辉, 强昆生, 梁永兴. 2020. 微生物勘探技术在潮汕坳陷油气勘探中的应用初探[J]. 中国地质, 47(3): 645–654.

Zhao Zhongquan, Sun Ming, Wan Xiaoming, Chen Shenghong, Zhao Jing, Song Lijun, Li Hui, Qiang Kunsheng, Liang Yongxing. 2020. The application of microbial exploration technology to the oil and gas survey of Chaoshan depression[J]. Geology in China, 47(3):645–654 (in Chinese with English abstract).

微生物勘探技术在潮汕坳陷油气勘探中的应用初探

赵忠泉¹, 孙鸣¹, 万晓明¹, 陈胜红¹, 赵静¹, 宋立军², 李辉³, 强昆生¹, 梁永兴⁴

(1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 2. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司南海西部石油研究院, 广东 湛江 524057; 4. 盎亿泰地质微生物技术有限公司, 北京 102200)

摘要: 东沙海域潮汕坳陷中生界研究程度相对较低, 油气分布规律不明, 为了加强对该区油气分布和富集规律的研究, 针对潮汕坳陷西部地质目标首次应用微生物地球化学勘探技术(MGCE), 探讨其含油气性。MGCE技术以轻烃微渗漏理论为基础, 采用地质微生物学方法和地球化学方法检测研究区海底表层的微生物异常和吸附烃异常, 预测研究区下伏地层中油气的富集区及其油气性质。检测结果显示研究区西部凹陷的斜坡区微生物异常呈块状发育, 轻烃微渗漏强度变化大, 可能为潜在油气富集区, 酸解吸附烃成果显示可能的油气性质为干气和凝析油气。

关键词: 地质微生物学; 中生界; 微生物异常; 吸附烃异常; 油气资源调查工程; 潮汕坳陷; 东沙海域

中图分类号: P539.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2020)03-0645-10

The application of microbial exploration technology to the oil and gas survey of Chaoshan depression

ZHAO Zhongquan¹, SUN Ming¹, WAN Xiaoming¹, CHEN Shenghong¹,
ZHAO Jing¹, SONG Lijun², LI Hui³, QIANG Kunsheng¹, LIANG Yongxing⁴

(1. MNR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, Guangdong, China; 2. Geoscience and Engineering Faculty, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. Research Institute, Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, Guangdong, China; 4. AE&E Geomicrobial Technologies Inc., Beijing 102200, China)

Abstract: Oil and gas exploration of Mesozoic strata in Chaoshan depression of Dongsha sea area is believed to have good prospect. Because of its low exploration and study level caused by the limitation of seismic data, oil and gas distribution there is unknown. In order to strengthen the research on the distribution and enrichment of oil and gas in the west of Chaoshan depression, the authors first applied microbial hydrocarbon detection technology to study its oil-bearing property of geological targets. Based on the theory

收稿日期: 2018-08-16; **改回日期:** 2019-08-25

基金项目: 自然资源部中国地质调查局地质调查项目(DD20160154, DD20190212)资助。

作者简介: 赵忠泉, 男, 1983年生, 硕士, 工程师, 主要从事海洋油气资源调查研究工作; E-mail: zzqhello@163.com。

of light hydrocarbon microseepage, the authors used the method of geological microbiology and geochemistry directly detect the anomaly of microbes and adsorbed hydrocarbons on the surface of the study area, and predicted the enrichment area of oil and gas in the underlying strata of the study area as well as its oil or gas properties. The results of microbial hydrocarbon detection show that microbiological anomaly is massively developed in the slope area of the western depression, suggesting that the intensity of light hydrocarbon micro seepage is relatively large in the study area, and there may be oil and gas enrichment zone. Acidolysis hydrocarbon analysis shows possible existence of oil and gas properties for dry gas and condensate oil and gas. The results of microbial hydrocarbon detection indicate that the Mesozoic strata in the Dongsha sea area has a good potential for oil and gas resources.

Keywords: geological microbiology; Mesozoic strata; microbiological anomaly; anomaly of adsorbed hydrocarbon; oil and gas exploration engineering; Chaoshan depression; Dongsha sea area

About the first author: ZHAO Zhongquan, male, born in 1983, engineer, master, engages in research and survey on offshore hydrocarbon resources; E-mail: zzqhello@163.com.

Fund support: Supported by Geological Survey Project of China Geological Survey (No.DD20160154, No.DD20190212).

1 引言

南海北部是中国第四大油气产地(周蒂等, 2006), 综合研究表明南海北部中生界具有良好的油气勘探前景(姚伯初等, 1995; 郝沪军等, 2001; 杨少坤等, 2002; 陈冰等, 2005; 何家雄等, 2006; 胡卫剑等, 2011; 段九春, 2012)。通过多年来地质调查、勘探及研究, 南海北部广泛发育有中生代地层已成为共识。其中, 以位于东沙隆起的潮汕坳陷分布范围最广, 最大厚度超过 6000 m。

2003 年, 中国海洋石油公司在潮汕坳陷北部斜

坡上钻探的 LF35-1-1 井(位置见图 1b), 证实了南海北部海域中生界的存在, 并揭示出从早侏罗世至早白垩世该区沉积环境经历了盆地扩张下沉、深水沉积、火山喷发及陆相回返的一个完整的沉积和构造旋回(邵磊等, 2007; 郝沪军等, 2009; 段九春等, 2012), 钻井结果表明坳陷内充填有白垩纪陆相沉积及中—晚侏罗世海相沉积(吴国暄等, 2007; 张江阳等, 2016)。尽管 LF35-1-1 井未见油气显示, 但该井钻遇了富含放射虫的海相中生界和有机质丰度较高的侏罗系烃源岩, 不仅充分证实了中生代海相残留盆地的存在, 而且表明该区具备油气成藏的

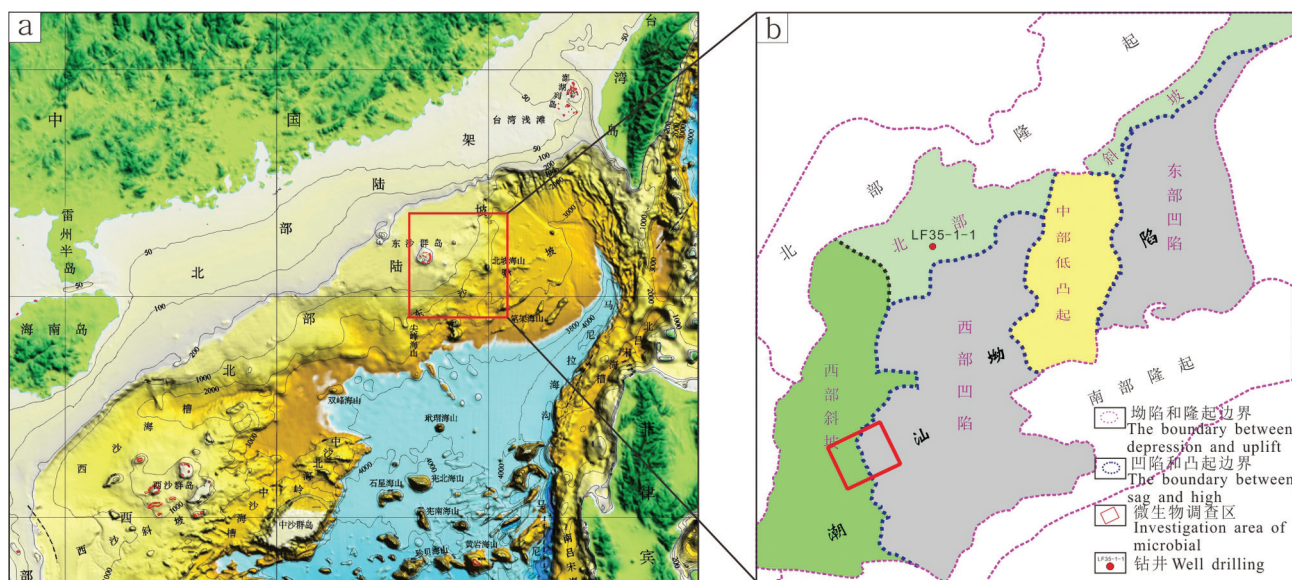


图1 研究区地理位置及中生代构造区划(a, 为研究区地理位置; b, 为研究区潮汕坳陷中生代构造区划)

Fig.1 Geographical location of the study area and Mesozoic structure division (a, the geographical location of the study area; b, the Mesozoic structure division of Chaoshan depression in the study area)

烃源岩条件。为了拓展勘探领域、打开海域中生界油气勘探局面,实现油气勘探突破,中国地质调查局广州海洋地质调查局2008年以来在南海北部东沙海域开展了大量地震调查,在坳陷内部划分了三级构造单元(图1b),圈定了一批重点构造。

由于东沙海域整体勘探程度较低,资料较少,利用地震资料圈定的重点构造的含油气性并不明确,对油气的平面分布特征需要进一步认识,因此,本研究利用微生物地球化学勘探技术(以下简称MGCE技术)对工区的重点构造进行微生物烃检测研究工作,搜索并圈定微生物异常区,判断构造目标含油气前景以及可能的油气性质。微生物地球化学勘探技术作为一种直接、快速、可靠且绿色环保的油气烃检测方法,在东沙海域尚属首次运用。

2 MGCE技术简介

2.1 微生物勘探技术的发展

利用微生物进行油气勘探最早起源于前苏联,早期技术对于烃氧化菌检测主要采用气体消耗法,该技术为伏尔加—乌拉尔油田的发现做出了重要贡献(Moqilewski et al., 1838)。气体消耗法操作较为繁琐,而且以烷烃作为碳源不具备选择性。因为烷烃是一类较为容易降解的碳源,一些非烃氧化菌受到烷烃气体单一碳源的驯化后也能代谢烷烃,造成检测结果偏差。此后,由于轻烃垂直运移理论遭到地质学家的质疑,这项技术逐渐被冷落。20世纪50年代后期,利用微生物油气勘探的相关技术逐步成熟,在勘探实践中充分论证了轻烃微渗漏理论的可靠性,建立了一系列的解释模型,并且在很多油气区块进行了应用(袁志华等,2010)。20世纪50年代以后,德国的Wagner和美国的Hitzman分别对烃氧化菌的检测技术方法进行了研究和探索(Hitzman, 1959a,b)。Wagner开发的微生物油气勘查技术(Microbial Prospection for Oil and Gas, MPOG),该技术在挪威北海海域勘探中得到验证,但该方法也存在与气体消耗法一样的问题。Hitzman开发了微生物石油调查技术(MOST),该技术使用选择性培养基作为烃氧化菌检测计数培养基,使得只有烃氧化菌才能在其中生长,对非烃氧化菌具有毒害和抑制作用,克服了微生物的驯化的干扰,其结果更为可靠,该技术在特立尼达岛东海岸、墨西哥湾、中国沿

海海域中成功实践(Hitzman, 1994)。20世纪90年代后,烃氧化菌检测技术出现了基于分子生物学的高通量测序法和基因芯片法等。

2000年,德国的微生物油气勘查技术引入中国,并进行了陆上区块的勘探研究(梅博文等, 2002)。2007年,盎亿泰地质微生物技术(北京)有限公司引进和发展美国的微生物石油调查技术,形成了微生物地球化学勘探技术(MGCE),开创了中国有规模的微生物地球化学勘探工业实践,取得了较好的应用效果(林壬子等,2009;张春林等,2010;郝纯等,2015;何丽娟等,2015;颜承志等,2015; Mirza et al., 2018;丁力等,2018)。微生物地球化学勘探技术的局限性在于其只能够在平面上获得油气藏微渗漏的信息,而无法获取油气深度、层位等信息。克服该局限性的发展方向应该是综合地质学、地球物理学、地球化学和地质微生物学等多学科的研究方法和信息,对勘探目标进行多学科综合研究,以达到对勘探目标全面准确研究评价,降低勘探风险,提升勘探成功率的目的(郝纯等,2015)。

2.2 MGCE技术原理

MGCE是一种基于油气藏轻烃微渗漏原理的烃检测技术,其核心功能是预测油气富集区及油气藏性质。油气藏中的轻烃气体在压力作用下以微泡上浮形式(Klusmarn et al., 1996; Saunders et al., 1999)或连续气相流形式(Brown, 2000)沿微裂隙垂直向上部表层沉积物中运移,在此过程中一部分轻烃成为表层沉积物中专性烃氧化菌的唯一碳源(食物)而使烃氧化菌异常发育,另一部分被黏土矿物吸附和次生碳酸盐胶结物包裹。因此,在油气藏上方表层沉积物中形成了与下伏油气藏正相关的微生物异常和吸附烃异常。轻烃微渗漏有3个基本特性:(1)普遍性。除超低压油气藏和特殊稠油油藏外,绝大多数油气藏存在轻烃微渗漏现象,都可用微生物方法来检测。(2)垂直性。油气藏轻烃微渗漏过程中,轻烃运移的方向总体上是垂直的。因此微生物异常的范围基本对应于地下油气藏的油/水或气/水边界,形成“顶部异常”。微生物异常强度的变化反映了油气圈闭内含油气的原始非均质性。但是,受区域不整合面与活动断裂带等地质条件的影响,也会发生轻烃侧向运移而呈现“线状”异常。(3)动态性。随着油气藏投入开发后,轻烃微渗漏

强度会发生动态性变化,在高产井区周围的微生物异常强度将不断降低(Tucker et al.,1994; Schumacher et al., 1997)。

MGCE技术的研究方法包括微生物石油调查技术(MOST, Microbial Oil Survey Technology)和酸解吸附烃技术(SSG, Sorbed Soil Gas),前者用来研究油气藏平面分布特征,后者预测下伏油气性质(成熟度)。经过近50年的发展和完善,轻烃微渗漏理论的可靠性得到充分论证,显著提高了微生物检测技术和解释模型的准确性,该技术正在成为提高油气勘探成功率、降低勘探风险的新型油气预测技术。

微生物异常的产生可以是垂直运移的微渗漏,也可以是沿断层或裂隙长距离的侧向运移的宏渗漏(Matthews, 1996)(图2)。宏渗漏一般代表可见的油气渗漏,只有肉眼不可见的微渗漏产生的微生物异常是和下伏油气藏呈现正相关关系(张春林等,2009)。MGCE技术检测的对象是以丁烷为唯一碳源的丁烷氧化菌,由于地表基本上不存在丁烷,只能来源于深部热成因油气藏,因此微生物和深部热成因油气构成了一对一的联系,降低了微生物结果解释的难度。

MOST技术适用于油气扫描调查,预测地下是否有油气藏,而SSG技术则是用于判别地下油气藏

的属性,即是油藏还是气藏。两种技术一主一辅,互相补充,合为一体。油气微生物评价成果所反映的是油气藏平面分布规律,油气微生物勘探的最终目的,是通过对研究工区内的微生物异常区进行分级排队,进而指明最有利的含油气前景区,为勘探提供决策依据。

3 样品采集与实验分析

根据微生物地球化学勘探技术要求的规定,在东沙海域潮汕坳陷西部采集微生物地球化学样品181站,采样站位的设计样式为平行测线和均匀网格形式,网格间距4 km×2 km和1.5 km×1.5 km(图3)。

3.1 样品采集

样品采集方式为重力取样器取样,当采样船只稳定在适宜的工作状态,将取样器下放,着底贯入后,将取样器缓慢提升,并注意尽量保持钢缆垂直。取样器提出海底后,快速提升,出水后慢速收回到甲板。利用卷尺量取20~25 cm的深度采集微生物样品,量取50~55 cm沉积物采集酸解吸附烃样品,两种样品均分为正、副2个样品,采样过程中防止污染和破坏,样品采集完成后,装入专用样品袋中,并密封分类存储于-10℃或以下的冰柜中,急速冷冻保存。全部样品采集完成之后,一起发往实验

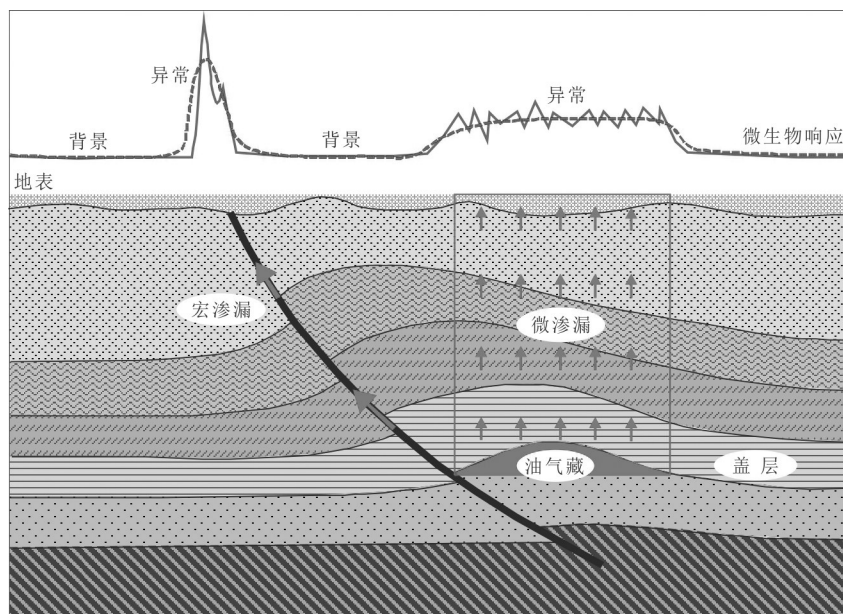


图2 烃类微渗漏与宏渗漏模式图(据郝纯等,2015修改)

Fig.2 Pattern of microseepage and macroseepage of hydrocarbon (modified from Hao Chun et al., 2015)

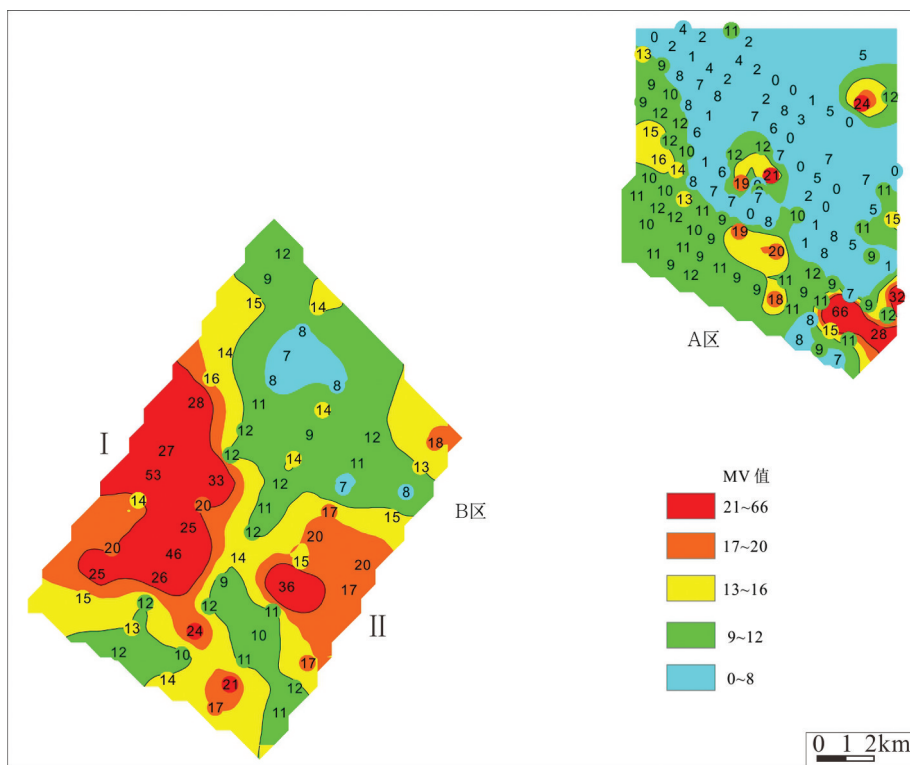


图3 研究区微生物异常平面分布图

Fig.3 Map of microbiological anomaly in the study area

室进行微生物和酸解吸附烃检测。

3.2 实验分析

微生物实验检测在盎亿泰地质微生物技术(北京)有限公司实验室完成,检测方法为最大可能数法,这种方法是微生物检测计数领域公认的标准方法。检测结果以微生物值(MV)指标评价体系表示,实验原理和MV的数值计算方法参考专利“一种微生物相对含量检测计数方法-CN106755287A”。MV值反映样品中专属微生物发育的相对浓度,而非绝对数值,为一无量纲量数据。微生物检测操作需无菌环境,主要步骤包括:称重、稀释、恒温培养和计数。(1)称重:使用电子天平(上海菁华YP202N,精度:0.01 g)称取25 g海洋沉积物样品。(2)稀释:将25 g样品置于100 mL稀释液中稀释,之后按稀释液:培养液=1:4的比例进行混合接种,并使用移液器(芬兰Biohit ePET)进行梯度稀释,每次梯度稀释,已接种培养液和无菌培养液比例均为1:4。培养液中加入生长指示剂,并根据预实验结果选择最终的梯度稀释浓度,设置3个平行样。(3)恒温培养:将所有接种好的培养基置于培养箱(上

海海向SPX-1000生化培养箱)中培养,并观察培养基的变化以判断专性微生物的生长情况。判别标准和依据为:无专性微生物存在的培养基指示剂不变(阴性),而有专性微生物存在的培养基指示剂有变化,液体变浑浊,表层出现菌膜(阳性)。(4)计数:根据同一样品系列及平行检测样品培养基显示阳性的数量,输入计算机程序MV Calculator计算出待测样品的MV值。本次检测设定了重复检测样品,重复检测样品所计算的测量不确定度为0.12。

酸解吸附烃检测利用气相色谱法,分析过程包括称重,酸化处理释放出 $C_1\sim C_5+$ 气体,以氮气为载体,进行精度在 10^{-6} 级的气相色谱(安捷伦7890A)分析得出。

4 实验数据与地质解释

4.1 微生物数据分析

利用微生物数据的数理统计、频率直方图以及分形方法(含量-总量法),综合确定微生物阈值(异常下限)。大于阈值值的微生物数据表示微生物异常,小于阈值值的微生物数据为微生物背景。

为了表示微生物异常强度的差别,将门槛值上下的微生物数据进行了五等分处理,并从高到低分别以红色、橙色、黄色、绿色和蓝色表示,分别对应为超高异常、高异常、中异常、低异常和背景值,其中黄色下限表示门槛值。在进行微生物异常区稳定性评价时,不仅要考虑红色点、橙色点的绝对数量,更要考虑是否有多个红色点、橙色点集中分布在一起形成簇群,且簇群周围是否有指示中、低值异常的黄色点和绿色点对其形成支撑。

微生物成果显示,工区MV异常背景区分显著,整体来看,B区块微生物异常强度高于A区块。B区块异常分布于工区的西南部,面积约280 km²;A区块微生物中一高异常零散分布于工区的西南部。对比A区块和B区块,认为B区块的微生物异常强度明显高于A区块。

根据微生物异常背景分布形态,可圈定2个微生物异常区,微生物异常区的圈定是建立微生物值可靠性的基础上,然后依据一定的圈定异常规则来划分该区微生物异常区。工区微生物异常区圈定

方法为:(1)以微生物中异常作为圈定下限。(2)按照克里金插值的方法圈定微生物异常范围。

微生物异常平面分布图上可以看出,工区微生物异常主要分布在B区块内。利用上述微生物值异常圈定原则,根据微生物MV异常及背景分布特征,把B区块内的微生物值划分为2个异常区,编号为I和II号异常区(图4)。

通过统计微生物异常带的评价要素,分别是测点数(连续性)、异常带内中高值异常点的分布(可靠性)、异常带内微生物值平均值(强度)等对各个异常带进行稳定性评价(表1)。

I号微生物异常区的测点数21个,全部测点MV平均值为23,中异常比例占测点总数的100%。测点异常比例高,微生物数值较大,数值稳定分布且呈块状集中分布,因此,评价认为I号异常区的异常强度较高(表1)。

II号微生物异常区的测点数8个,全部测点MV平均值为20,异常比例占测点总数的100%。测点异常比例最高,微生物数值大,数值稳定分布,

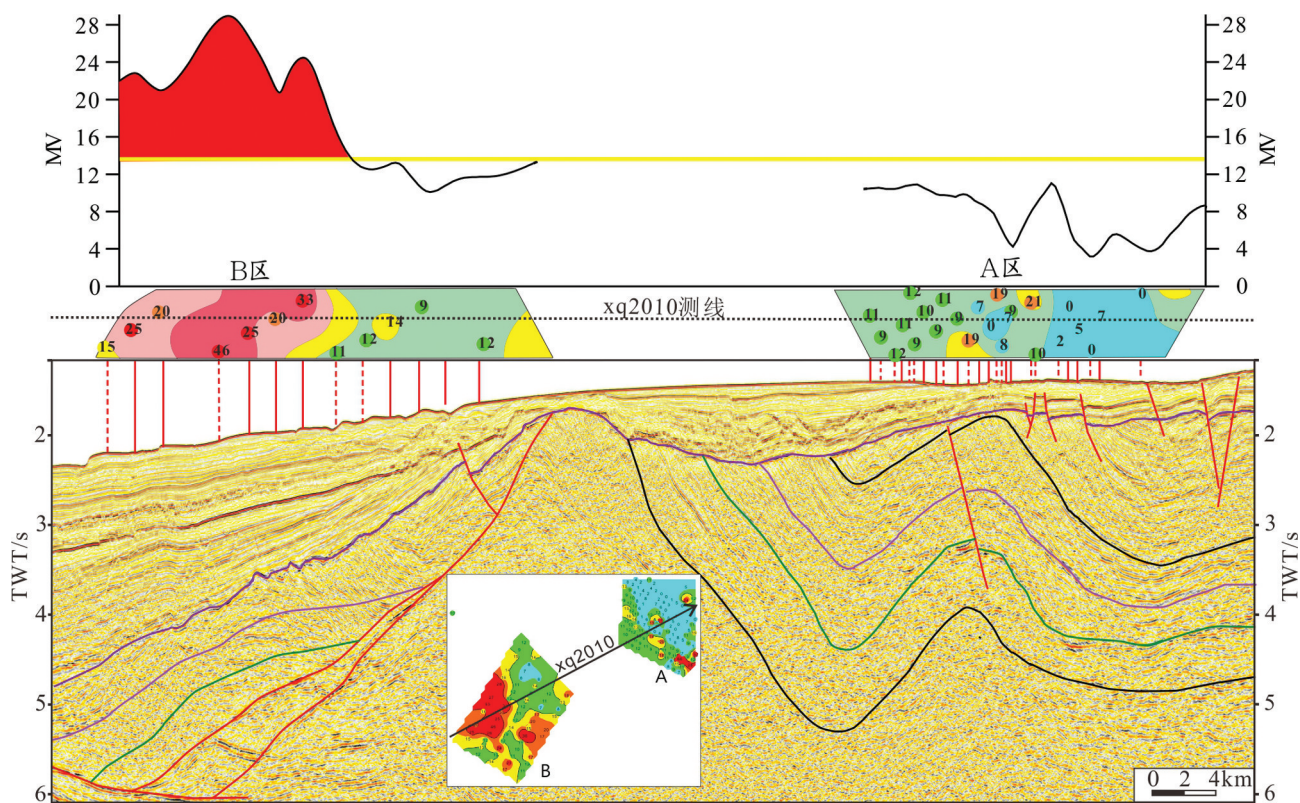


图4 xq2010地震剖面与微生物值叠合图

Fig.4 Overlap diagram of seismic profile(xq2010)and microbiological abnormal value

表1 研究区微生物异常区异常统计
Table 1 Statistical table of microbiological anomaly area

编号	测点数	全部测点MV平均值	最大值	最小值	中异常以上测点数比例/%	异常评价
I	21	23	53	13	100	+++++
II	8	20	36	15	100	+++++

因此,评价认为Ⅱ号异常区的异常强度较高。

因此,B区块微生物异常强度高,分布稳定,微生物异常区呈块状分布在该区的西南部,说明这些区域轻烃微渗漏强烈,具有较好的含油气前景。

4.2 综合研究和地质解释

研究区目标为潮汕坳陷西南部的一个局部构造(A区块)和一个斜坡区(B区块),属于两个不同的构造单元。从贯穿两个勘探目标的地震剖面上看,B区块位于潮汕坳陷的西部斜坡而A区块位于西部凹陷。结合微生物数据研究表明,B区块微生物值总体来看明显比A区块高,说明B区块的微渗漏强度相对更大,含油气前景好于A区块。

另外,从地震波形的连续性来看,B区块的同相轴连续性更好,而A区块同相轴连续性相对差,从地震解释成果可以看出,B区块所属的构造完整性更好,而A区块被断层复杂化,虽具有背斜的形态,但可能遭受后期破坏,保存条件相对可能更差。因此,位于斜坡区的B区块含油气的可能性更大(图4)。

从穿过B区块的地震剖面上看,该区中生界地层厚度从凹陷中心到凹陷边缘地层有减薄的趋势,靠近凹陷中心位置微生物异常发育,且向凹陷边缘微生物值逐渐由异常变为背景,说明在B区块内,靠近凹陷的区域距离生烃中心更近,含油气前景相对更好(图5)。

对于A区块,从侏罗系底面平面构造图来看,该区西南部微生物低异常发育区与工区侏罗纪地层局部构造具有较好的对应关系,表明其具有一定含油气的可能性,但是,从地震剖面上看该背斜被断层复杂化,可能保存条件存在不利因素,因此,其相对B区块含油气性较差(图6)。

4.3 酸解吸附烃研究成果

由于从地质上来看,A区块和B区块分别位于

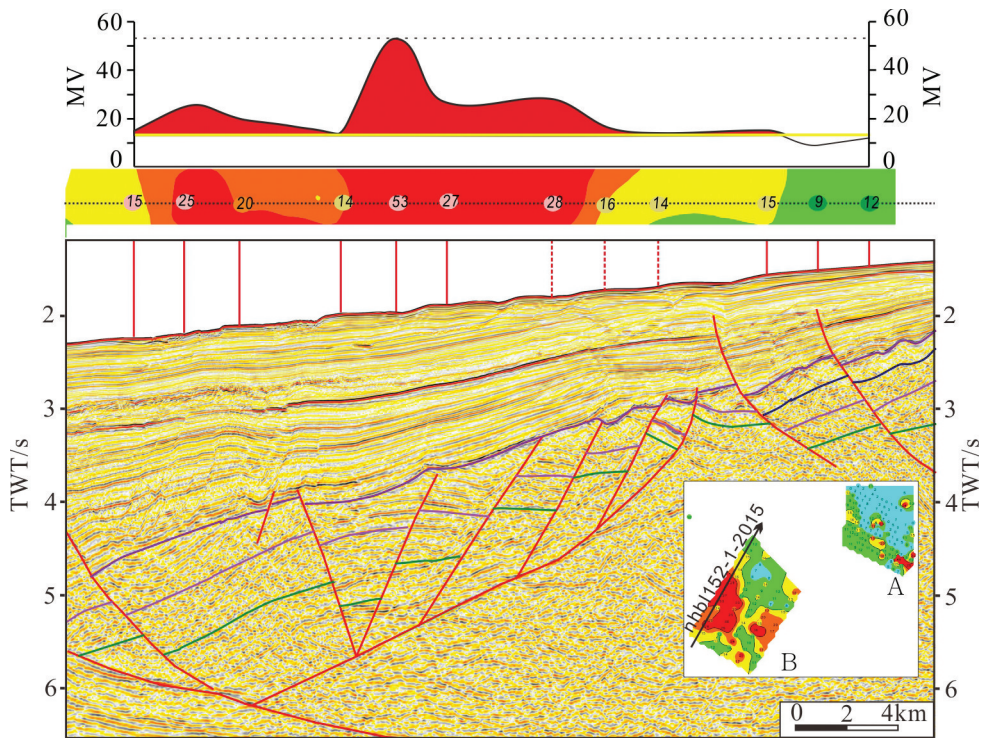
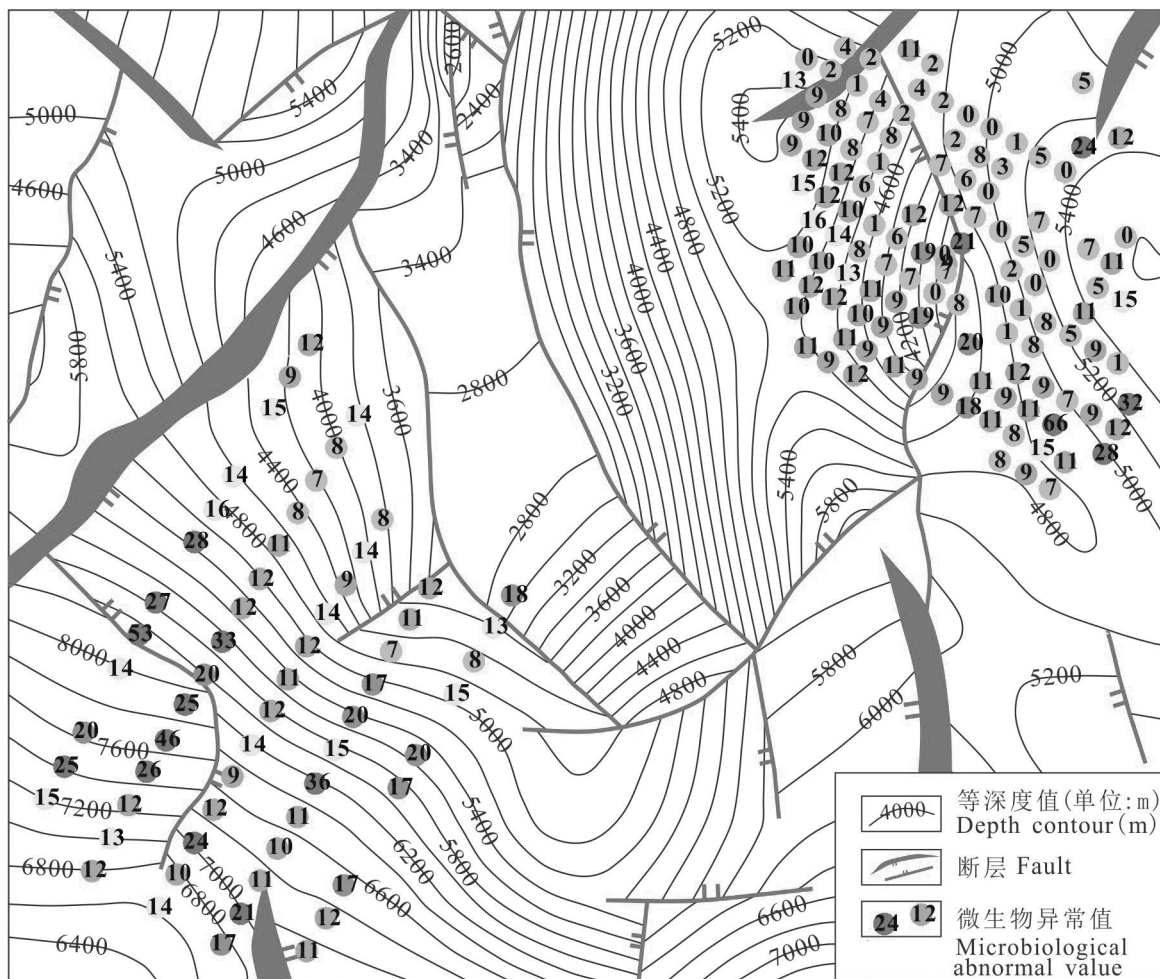


图5 nhbl152-1-2015地震剖面与微生物值叠合图
Fig.5 Overlap diagram of seismic profile (nhbl152-1-2015)and microbiological abnormal value

图6 微生物值和 T_0 构造图叠合图Fig.6 Superposition diagram of microbiological value and structural map of T_0

潮汕坳陷西部凹陷和西部斜坡区,属于两个不同的构造单元,因此,将两个A区块和B区块分开进行三组分模板和两组分模板投点。结果表明,A区块和B区块油气性质差异明显,可能指示了两个凹陷不同的油气来源。其中,A区块油气性质为凝析油气和油,B区块油气性质为干气和凝析油气,说明B区块油气成熟度比A区块高,可能指示潮汕坳陷西部斜坡区油气比西部凹陷区成熟度更高(图7)。

4.4 构造对油气分布的影响

大量研究和实践表明,地质构造控制了油气藏的形成与分布,因而构造条件的优劣是判断油气藏是否发育及发育规模的重要因素。研究构造对油气藏的制约性,主要是研究褶皱构造和断裂构造。首先,褶皱构造是油气形成聚集的主要场所,而褶皱构造中的背斜构造更有利于储藏油气,尤其是同沉积背斜古构造

造则比其他背斜构造等容易形成油气藏。

本次研究的A区块就位于潮汕坳陷西部凹陷的一个褶皱背斜构造上,但该构造为晚白垩世晚期隆升挤压而形成的地层褶皱变形(孙鸣等,2018),构造形成时间较晚,油气充注的时间可能较晚,且从地震剖面上看该背斜可能被同沉积的逆冲断层破坏,保存条件较为不利。相比较而言,位于潮汕坳陷西部斜坡区的B区块,可能一直处于中生代生烃凹陷的构造高部位,且后期构造变形较弱,有利于油气的聚集和保存。

有上述分析可知,潮汕坳陷西部斜坡区的构造较为稳定,形成油气藏的可能性较大,对应其微生物异常异常强度较高,分布稳定。这一结果指示,在东沙海域中生代油气预测评价中,应选择构造相对稳定,后期变形较弱的古构造发育区域来寻找有

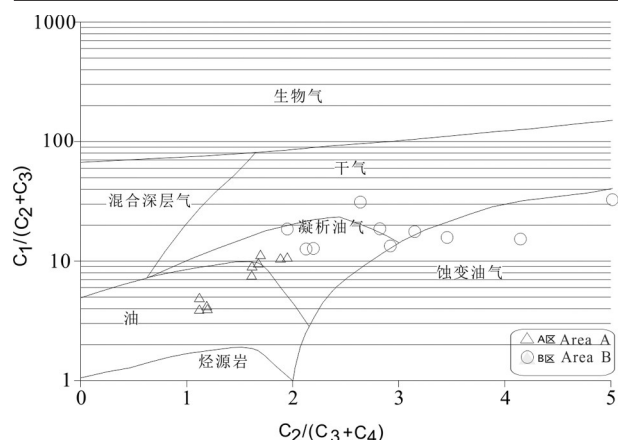


图7 研究区酸解吸附烃 $C_1/(C_2+C_3)-C_2/(C_3+C_4)$ 三组分交会图

Fig.7 Three-component cross-plot of acidolysis adsorbed hydrocarbon in the study area

利油气圈闭。

5 结 论

(1)在东沙海域潮汕坳陷首次开展了微生物地球化学勘探,结果显示研究区丁烷氧化菌广泛发育,表明研究区具有丁烷氧化菌发育的环境条件,可以利用该技术开展油气勘探研究,为后续研究工作奠定了基础。

(2)研究区微生物检测结果表明微渗漏强度存在显著变化,微生物异常区下伏地层中含油气可能性大。潮汕坳陷西部斜坡区较西部凹陷区微生物异常等级更高,指示前者具有相对更好含油气前景。

(3)研究区潜在的油气性质存在明显变化,西部斜坡区相对成熟度高,具有勘探干气和凝析油气的潜力。需要指出的是,利用钻井信息对MGCE技术进行标定是非常迫切而重要的工作,随着潮汕坳陷勘探进程的推进,进一步实施钻探将会是下一步工作的方向。

References

Brown A. 2000. Evaluation of possible gas microseepage mechanisms [J]. AAPG Bulletin, 84 (11):1775-1789.
Dietmar Schumacher. 2012. Hydrocarbon microseepage—A significant but underutilized geologic principle with broad applications for oil/gas exploration and production [C]// AAPG European Regional Conference.
Ding Li, Wu Yubing, Liu Fenfen. 2018. Microbiological and geochemical exploration for hydrocarbon reservoirs in volcanic

rocks of zhongguai uplift [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 25 (4):24-28.
Hao Chun, Sun Zhi Peng, Xue Jianhua. 2015. The application prospect of microbial geochemical exploration technology for hydrocarbon detection in deep water area of South China Sea[J]. China Petroleum Exploration, 20(5): 54-62.
He Jiaxiong, Chen Shenghong, Ma Wenhong, Gong Xiaofeng. 2012. The evolution, migration and accumulation regularity of oil and gas in Zhujiangkou basin, northeastern South China Sea[J]. Geology in China, 39(1): 106-118(in Chinese with English abstract).
He Lijuan, Zhang Yingchao, Mei Hai. 2015. Applying microbial geochemical exploration technology for hydrocarbon detection of Lingshui sag in deep water area of Qiongdongnan basin[J]. China offshore oil and gas, 27(4): 61-67.
Hitzman D O. 1959a. Prospecting for petroleum deposits [P].USA Patent: 2880142, 203231.
Hitzman D O. 1959b. Prospecting for petroleum deposits (detecting hydrocarbon consuming bacteria colonies by artificial hydrocarbon nutrient culturing) [P]. U.S. Patent, 3880142.
Hitzman D C, Tucker J D. 1994. Offshore trinidad survey identifies hydrocarbon microseepage [C]// Offshore Technology Conference, 65-72.
Jones V T, Burtell S G. 1996. Hydrocarbon flux variations in natural and anthropogenic seeps [J]. AAPG Memoir, (66): 203-221.
Klusman R W, Saaed M A. 1996. Comparison of light hydrocarbon microseepage mechanisms [J]. Hydrocarbon Migration and its Near-surface Expression, 157-168.
Lin Renzi, Mei Hai, Mei Bowen. 2009. The preliminary practice and application prospect of microbial oil-gas detection technologies[J]. Marine Geology Letters, 25(12):36-42.
Matthews M D. 1996. Importance of sampling design and density in target recognition [J]. AAPG Memoir, (66): 242-253
Mei Bowen, Yuan Zhihua, Wang Xiuheng. 2002. Microbiological prospecting of oil and gas[J].China petroleum exploration, 7(3):42-53.
Mei Hai, Lin Renzi, Mei Bowen. 2008. Microbial oil-gas detection technologies: Theory, practice and application prospect[J]. Natural Gas Geoscience, 19(6):888-893.
Mirza Omer Ahmed Baig, Kamran Aziz, Moin Raza Khan. 2017. Application of microbial geochemical exploration survey to help reducing the risk of hydrocarbon accumulation and charge—a case study from the kirthar foldbelt, south Pakistan [C]// Annual Technical Conference & Oil Show, 243-250.
Moquilewskii G A. 1938. Microbiological investigation in Connecting with gas Surveying[J]. RazvedkaNedr, 8(1):59-68.
Qiang Kunsheng, Zhang Guangxue, Zhang Li, Lü Baofeng, Zhong Guangjian, Feng Changmao, Yi Hai, Zhao Zhongquan, Yang Zhen, Yan Wei. 2018. A study of depositional characteristics of the Jurassic strata in Chaoshan Subbasin, northern South China Sea,

- and its control on reservoir beds[J]. *Geology in China*, 45(1): 48–58(in Chinese with English abstract).
- Qiang Kunsheng, Zhang Guangxue, Zhang Li, Liu Baofeng, Zhong Guangjian, Feng Changmao, Yi Hai. 2018. Paleogeomorphic features and sedimentary facies model of Jurassic strata in Chaoshan sub-basin, northern South China Sea[J]. *Geology in China*, 45(6): 1251–1258(in Chinese with English abstract).
- Saunders D F, Buraon K R, Thompson C K. 1999. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations[J]. *AAPG Bulletin*, 83(1):170–185.
- Schumacher D, Hitzman D C, Tucker J. 1997. Applying High Resolution Surface Geochemistry to Assess Reservoir Compartmentalization and Monitor Hydrocarbon Drainage[C]// Institute for the Study of Earth and Man, Applications of Emerging Technologies: Unconventional Methods in Exploration of Petroleum and Natural Gas V. Dallas: Southern Methodist University Press, 309–322.
- Thrasher J, Fleet, A J, Hay S J, Hovland M, Dueppenbecker S. 1996. Understanding geology as the key to using seepage in exploration: The spectrum of seepage styles[J]. *Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression: AAPG Memoir*, (66):223–241.
- Tucker J, Hitzman D C. 1994. Detained microbial Survey help improve reservoir characterization [J]. *Oil & Gas Journal*, 92 (23): 65–69.
- Yan Chengzhi, Shi Hesheng, Pangxiong. 2014. Applying a technique microbiological geochemistry to hydrocarbon exploration in Baiyun sag deep water area[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 26(4): 15–19(in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhihua, Wang Ming. 2010. Study of fault block Qi-81 in the Western end of Gangxi structure of the Huanghua depression by using microbial anomalies[J]. *Geology and Exploration*, 46(6): 1106–1111(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunlin, Pang Xiongqi, Mei Hai. 2009. Identification of micro-seepage from macro-seepage and exploration practice in Changling Longwangou area of Zhenba block[J]. *Natural Gas Geoscience*, 20 (5):794–800(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunlin, Pang Xiongqi, Mei Hai. 2010. Application of microbial oil surveying to exploration of lithologic gas reservoirs: a case from Sanhu depression, Qaidam basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 37(3):310–315.
- Zhao Zhongquan, Zhong Guangjian, Feng Changmao. 2016. Cenozoic sequence stratigraphy and seismic facies analysis of Xisha Trough Basin in northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(1):15–26(in Chinese with English abstract).
- Zhu Weilin. 2009. Some key geological issue on oil and gas exploration in the northern deepwater area of the South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(8):1059–1064(in Chinese with English abstract).
- Zhuo Haiteng, Wang Yingmin, Xu Qiang, Li Dong, Wang Ying, Wang Yongfeng, Li Hua, Tang Wu. 2014. Classification and genesis of continental slopes on the northern South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(3):327–336.

附中文参考文献

- 丁力, 吴宇兵, 刘芬芬. 2018. 中拐凸起火山岩油气藏微生物地球化学勘探研究[J]. *特种油气藏*, 25(4):24–28.
- 郝纯, 孙志鹏, 薛健华. 2015. 微生物地球化学勘探技术及其在南海深水勘探中的应用前景[J]. *中国石油勘探*, 20(5): 54–62.
- 何家雄, 陈胜红, 马文宏, 龚晓峰. 2012. 南海东北部珠江口盆地成生演化与油气运聚成藏规律[J]. *中国地质*, 39(1): 106–118.
- 何丽娟, 张迎朝, 梅海. 2015. 微生物地球化学勘探技术在琼东南盆地深水陵区水凹陷烃类检测中的应用[J]. *中国海上油气*, 27(4): 61–67.
- 林壬子, 梅海, 梅博文. 2009. 油气微生物勘探技术的初步实践及其应用前景[J]. *海洋地质动态*, 25(12):36–42.
- 梅博文, 袁志华, 王修垣. 2002. 油气微生物勘探法 [J]. *中国石油勘探*, 7(3):42–53.
- 梅海, 林壬子, 梅博文. 2008. 油气微生物检测技术:理论、实践和应用前景[J]. *天然气地球科学*, 19(6):888–893.
- 强昆生, 张光学, 张莉, 吕宝凤, 钟广见, 冯常茂, 易海, 赵忠泉, 杨振, 鄢伟. 2018. 南海北部潮汕坳陷侏罗系沉积特征及对储层的控制作用研究[J]. *中国地质*, 45(1): 48–58.
- 强昆生, 张光学, 张莉, 吕宝凤, 钟广见, 冯常茂, 易海. 2018. 南海北部潮汕坳陷侏罗系古地貌特征及沉积相模式[J]. *中国地质*, 45(6): 1251–1258.
- 鄢全树, 石学法, 刘季花. 2015. 南海中—新生代火成岩岩石地球化学特征:约束南海构造演化[J]. *地质学报*, 89(z1):226–227.
- 颜承志, 施和生, 庞雄. 2014. 微生物地球化学勘探技术在白云凹陷深水油气勘探中的应用[J]. *中国海上油气*, 26(4):15–19.
- 袁志华, 王明. 黄骅. 2010. 坳陷港西构造西端歧81断块微生物异常研究[J]. *地质与勘探*, 46(6):1106–1111.
- 张春林, 庞雄奇, 梅海. 2009. 烃类微渗漏与宏渗漏的识别及镇巴长岭—龙王沟地区勘探实践[J]. *天然气地球科学*, 20(5):794–800.
- 张春林, 庞雄奇, 梅海. 2010. 微生物油气勘探技术在岩性油气藏勘探中的应用——以柴达木盆地三湖坳陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 37(3):310–315.
- 赵忠泉, 钟广见, 冯常茂. 2016. 南海北部西沙海槽盆地新生代层序地层及地震相[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 36(1):15–26.
- 朱伟林. 2009. 南海北部深水油气勘探关键地质问题[J]. *地质学报*, 83(8):1059–1064.
- 卓海腾, 王英民, 徐强, 李冬, 汪莹, 王永凤, 李华, 唐武. 2014. 南海北部陆坡分类及成因分析[J]. *地质学报*, 88(3):327–336.