https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.176



莺歌海盆地东方-乐东区中新统 盖层岩石学特征及封盖性分析

代 龙1,尤 丽1,招湛杰1,钟 佳1,徐守立1,娄 敏2

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057

2. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

摘 要: 莺歌海盆地东方一乐东区已获得商业气田发现,但针对气田盖层研究,尤其是泥岩盖层岩石学特征及孔喉结构特征 方面研究较少.利用岩石薄片、地球化学、XRD、元素分析等资料,深入分析研究区泥岩矿物组成、地球化学、成岩演化以及孔 隙结构特征.结果表明:莺歌海盆地东方一乐东区中新统黄一段和黄二段泥岩盖层分布最为稳定,泥岩盖层封盖性受陆源碎屑 供给与钙质化石碎片影响较大,研究区优质盖层中陆源碎屑颗粒与钙质化石碎片含量较低,次生溶蚀孔隙与微裂缝不发育;埋 藏成岩过程中的粘土矿物转化脱水与有机质热演化排烃是低速泥岩的主要成因;泥岩盖层以微孔喉和超微孔喉为主,此类喉 道不利于气体的渗流,对油气向上逸散起明显阻碍,盖层整体封盖性较好.

关键词:泥岩盖层;岩石学;中新统;东方区;乐东区;莺歌海盆地。

中图分类号: P618 **文章编号:** 1000-2383(2019)08-2677-09

Petrological Characteristics and Sealing Analysis of Mesozoic Caprock in Dongfang-Ledong Area, Yinggehai Basin

收稿日期:2019-01-29

Dai Long¹, You Li¹, Zhao Zhanjie¹, Zhong Jia¹, Xu Shouli¹, Lou Min²

1. Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Zhanjiang 524057, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Commercial gas fields have been discovered in Dongfang-Ledong area of Yinggehai Basin, but little research has been done on gas field caprock, especially on mudstone caprock type and pore throat structure. In this paper, the mineral composition, geochemistry, diagenetic evolution and pore structure characteristics of mudstone in the area are studied in depth by using the data of thin sections, geochemistry, XRD and element analysis. The results show that the distribution of mudstone caprocks in the first and second members of the Mesozoic Huangliu Formation in Dongfang-Ledong area of Yinggehai Basin is the most stable, and the caprocks are greatly influenced by terrigenousclastic supply and calcareous fossil fragments. The content of terrigenousclastic particles and calcareous fossil fragments in the high-quality caprocks in the study area is low, and secondary dissolution pore and micro-fracture are not developed. Dehydration of clay minerals during burial diagenesis and hydrocarbon expulsion by thermal evolution of organic matter are the main genesis of low-velocity mudstones. Mudstone caprock is dominated by microporous throat and ultraporousthroat, which is not conducive to gas seepage and obviously hinders the upward escape of oil and gas, and the overall sealing of caprock is good.

Key wods: mudstone caprock; petrological; Miocene; Dongfang area; Ledong area; Yinggehai Basin.

基金项目:"十三五"国家重大专项(No. 2016ZX05024-005);中海石油(中国)有限公司自主立项项目(No. ZYKY-2018-ZJ-01). 作者简介:代龙(1988—),男,工程师,主要从事储层地质综合研究工作.ORCID:0000-0001-7896-2785. E-mail:dailonggood@163.com

引用格式:代龙,尤丽,招湛杰,等,2019.莺歌海盆地东方一乐东区中新统盖层岩石学特征及封盖性分析.地球科学,44(8):2677-2685.

0 引言

莺歌海盆地是南海西部大陆边缘重要的含油 气盆地之一,经过多年的油气勘探,迄今已在盆地 东方区和乐东区发现多个含气构造,是当前南海西 部天然气勘探的主战场之一(谢玉洪等,2015年:张 迎朝等,2017年).油气保存条件一直是石油地质学 研究的薄弱环节,近年来,随着油气勘探理念的逐 渐转变和创新,盖层作为油气藏形成的重要因素受 到了广泛关注.尽管前人对莺歌海盆地做过大量研 究,但主要是关于盆地构造演化、沉积相与储层及 天然气成藏特征方面研究(谢玉洪和范彩伟,2010; 黄银涛等,2016;尤丽等,2018a,2018b),缺乏从微 观岩石学角度剖析泥岩盖层特征.近几年钻探揭 示,低速泥岩与正常泥岩盖层,其下含气饱和度存 在显著差异,且不同类型泥岩盖层在探区不同程度 发育且横向变化较大,封盖机制存在明显差异.为 此,笔者在前人研究基础上,结合最新的泥岩盖层 分析测试资料,重点从岩石学与孔喉结构方面探讨 低速和正常泥岩差异性,并初步探讨两种不同泥岩 类型封盖性,以期为莺歌海盆地东方一乐东区下步 有利目标搜寻和勘探布井提供指导.

1 区域地质背景

莺歌海盆地位于我国南海北部大陆架西北区, 是一个重要的新生代富含气盆地.该盆地处于南海 北部大陆架和印支半岛交界区,受岩石圈拉伸与红 河断裂走滑与双重机制影响,盆地整体为长条形, 形态呈NNW走向,属于典型的走滑一伸展盆地(徐 新德等,2015;田冬梅等,2017).该盆地由莺歌海凹 陷、河内凹陷、莺东斜坡、莺西斜坡以及临高凸起等 多个构造单元组成(图1). 莺歌海盆地作为南海西 部天然气勘探的重点区,当前主要勘探领域集中在 盆地内东方、乐东区,沉积地层主要由古近纪、新近 纪和第四纪地层组成,自下而上依次为始新统、渐 新统(崖城组和陵水组),中新统(三亚组、梅山组和 黄流组),上新统莺歌海组以及第四系乐东组,其中 中新统黄流组和梅山组是当前勘探主力层系.已有 勘探资料表明,研究区泥岩分布广,厚度大,钻探中 遇到的低速泥岩段其在地震相上与含气砂岩储层 反射特征相似:梅山组、黄流组及其以上地层发育 浅海或半深海背景下的陆架砂岩和海相泥岩,可形 成良好的储盖组合,勘探潜力巨大.



图 1 莺歌海盆地莺歌海凹陷构造区划分与地层特征 Fig.1 Sketch map and stratigraphic characteristics of Yinggehai sag, Yinggehai Basin

三亚组二段

;s2

三亚组一段

;s1

梅山组二段

;m2.

梅山组一段

;m1.

黄流组二段

;h2

黄流组一段

hl.



2 盖层泥岩分布特征

莺歌海盆地东方一乐东区18口探井综合录井 资料岩性统计表明,从研究区各层系泥岩、粉砂质 泥岩的厚度统计来看,泥岩在平面分布广泛,但在 不同层位厚度变化较大.泥岩累计厚度主要集中在 100~200 m,但在一些地区并不缺乏300 m以上的 厚层泥岩或粉砂质泥岩,如东方区和乐东区黄一段 盖层,凹陷斜坡区的三亚组盖层,其中有些盖层厚 度甚至超过500 m.此外,从储、盖层特征对比图上 也可看出,从凹陷区向斜坡区黄一段泥岩盖层厚度 和单层最大厚度逐渐增大(图2);梅山组有效盖层 分布在凹陷斜坡区,目前钻至三亚组层位的井较 少,大都位于盆地边缘,但泥地比和盖层总厚度较 大.从厚度分布上看,黄一段和黄二段泥岩盖层分 布最为稳定.

早期莺歌海盆地沉积中心位于东方区,由于快速沉积东方区开始出现低速泥岩(张明伟等,2018);晚期莺歌海盆地沉降中心逐渐向乐东区转移,处于凹陷中心泥岩速度开始反转,乐东区在埋深3900~4000m附近泥岩开始速度反转,即随深度增加,泥岩速度减小.通过对莺歌海盆地近年来钻遇井统计发现,从中深层黄流组至深层梅山组,低速泥岩在纵向上明显呈现出浅层发育机率小、多为薄层、分布范围有限的特征;深层因地层压力的增大,发育厚层低速泥岩层,尤其在梅山组层序界面下有"普遍发育低速泥岩"的特点.

3 泥岩岩石学特征

泥岩的矿物组成、孔隙结构、沉积后期的成岩 作用是揭示研究区泥岩盖层岩石学特征多样性的 主要因素(周文等,1999;李士超等,2017;周雪峰 等,2018),同时也是影响泥岩盖层封盖能力的重要 影响因素.

3.1 矿物组分与岩石类型

莺歌海盆地东方区中新统泥岩矿物主要以石 英(含量分布在39%~59%,平均可达45%)、粘土 矿物(含量分布在23%~47%,平均可达34%)为 主,斜长石(含量分布在2%~19%,平均可达9%) 次之;乐东区中新统泥岩矿物中石英(含量为 35%~54%,平均为39%)、粘土矿物(含量为 12%~42%,平均为30.9%)含量相对高,斜长石(含 量为4%~19%,平均为11.3%)次之,另外含有少量 钾长石、方解石、白云石及菱铁矿.东方一乐东区泥 岩粘土矿物以伊利石为主,其次为伊/蒙混层及绿 泥石,碳酸盐岩矿物集中发育于有孔虫灰质泥岩 中,泥岩中的粉砂质纹层中包含细粒有孔虫化石碎 片与陆源碎屑.盖层封闭性能受脆性矿物长石、石 英与碳酸盐岩矿物含量的影响较大.总体上看,东 方区与乐东区泥岩中脆性矿物含量较低,粘土矿物 含量较高;局部受陆源碎屑供给与钙质化石碎片影 响,粘土矿物含量较低.东方区与乐东区受重力流 水道与三角洲沉积的影响较大的区域,泥岩中陆源 碎屑含量较高,粘土矿物含量较低,如东方区东南 部Y2-1井区与乐东区东北部C-1井区等.凹陷斜坡 区,局部泥岩中有孔虫化石与化石碎片含量较高 时,泥岩中碳酸盐岩含量较高,矿物含量较低.

依据全岩"粘土矿物一碳酸盐类一碎屑组分 (长英质/硅质)"含量,将粒度小于62µm的细粒岩 (包括粉砂岩、泥岩、灰岩)初步划分为10类(林森虎 等,2017;柳波等,2018).东方一乐东区中新统泥岩 可划分出6种主要的岩石类型(表1):①粘土岩;② 硅质粘土岩;③灰质粘土岩;④粘土质粉砂岩;⑤粘 土质灰岩;⑥混合细粒岩.其中,东方区主要为硅质 粘土岩,X2区部分样品为混合细粒岩;乐东区泥岩 岩石类型主要为硅质粘土岩、灰质粘土岩和混合细 粒岩(图3).受陆源碎屑供给影响较大的粘土质碎 屑岩与受钙质化石碎片影响较大的粘土质灰岩,由 于脆性矿物含量高,其对应的盖层封闭性能较差.

3.2 地球化学特征

对东方一乐东区正常泥岩和低速泥岩段样品 进行常量元素分析.研究区泥岩常量元素以SiO₂、 Al₂O₃和Fe₂O₃为主,其他组分含量较少.TiO₂、Al₂O₃ 与K₂O/Al₂O₃、K₂O/Na₂O比值常用来判断物源区物 质来源(明晓冉等,2017;尤丽等,2018a,2018b).一 般而言,K₂O/Al₂O₃比值小于0.4,显示钾长石匮乏; K₂O/Na₂O比值大于1,显示富石英的特点.研究区 正常泥岩与低速泥岩的Al₂O₃含量明显高于TiO₂, 二者比值在12.6~19.5,平均17.5,说明源区长英质 组分含量高;K₂O/Al₂O₃比值为0.19~0.28,显示钾 长石匮乏特点,同时K₂O/Na₂O比值为1.2~5.4,进 一步证实了物源区为富石英贫钾长石的特点(图4). 根据数据点在Roser和Korsch提出的物源区岩石类 型判别图解上的投图结果可知,正常泥岩落在石英 质沉积岩物源区,低速泥岩落在中性火成岩物源

I able 1 I hemain rock types of Mesozoic Mudstone in Donglang-Ledong area					
序 号	岩石类 型	岩屑特征	微观特征	取样位置及特 征描述	矿物组成
1	粘土岩	L em .	лат	Y2-1井,3600 m,灰色,黄流 组一段,成分以 泥级粘土矿物和 泥级石英为主	粘土矿物>40 长石、石英<40 碳酸盐类<10
2	硅质 粘土岩	L cm .		X2-2井,3 083 m, 灰绿色, 黄 流组一段, 成分 主要 以泥级石英、长 石及粘土矿物为 主	粘土矿物为 30~45 长石、石英为 40~50 碳酸盐类<5
3	灰质 粘土岩			A2-1井,4082 m, 灰黑色, 黄 流组二段, 见方 解石多为泥粉晶 结构, 充填于粒	粘土矿物为 30~40 长石、石英为 35~45 碳酸盐类<15
4	粘土质 粉砂岩			C-1井,3660m, 浅灰色, 梅山组 一段,成分主要 为泥级石英和长 石	粘土矿物<30 长石、石英>50 碳酸盐类<15
5	粘土 质灰岩	Ltm.		A3-1井,3 950 m, 灰白色, 梅 山组一段, 介壳 结构明显	粘土矿物<30 长石、石英>50 碳酸盐类>10
6	混合 细粒岩			A3-1井,3 555 m, 灰白色, 黄 流组一段, 成分 主要为石英, 次 为长石及岩屑, 粘土和泥晶白云	粘土矿物<30 长石、石英为 40-60 碳酸盐类<10

表1 东方-乐东区中新统泥岩主要岩石类型特征

T.1.1. 1 T11 · D

区,表明正常泥岩研究区沉积物为古老的石英质沉 积物源区的强烈风化、搬运再沉积,低速泥岩以中 性火成岩物源供给为主.

在微量元素配分模式图中(图5),A3-1井泥岩 的微量元素含量明显低于Y2-1井,反映Y2-1沉积 时碎屑物源供给充足,受重力流沉积的影响较大. 在稀土元素配分模式图中,泥岩经球粒陨石标准化 后的配分曲线彼此平行,其轻稀土元素部分较陡而 重稀土元素部分较平缓,表明为轻稀土元素富集而 重稀土元素亏损的"右"倾型.Y2正常泥岩受石英质 沉积物源区影响,负铕异常,推测与西部昆嵩隆起 物源区有关;A3与东方Y2低速泥岩受长英质火成 岩或中性火成岩物源区影响,正铕异常,推测与东 部海南岛物源区影响有关.对比不同源区泥岩特 征,笔者发现在Y2区正常泥岩,粘土含量较高,碎 屑颗粒细且均匀分布,反映沉积时水动力较弱,沉 积物以悬浮供给为主;而可能受海南岛物源有关的 低速泥岩,碎屑颗粒细大小不一或定向排列,受重 力流或单向水流影响较大,常见有孔虫化石碎片.

3.3 成岩演化特征

成岩作用影响着烃类演化、粘土矿物的组合以及排列方式,也与泥岩封闭性密切相关(周文等, 1994;冯冲等,2011).随着埋深不断增加,在上覆沉 积物载荷和地温作用下,泥岩盖层会通过压实失水 导致结构、密度和矿物成分发生变化,封闭油气的 能力逐渐增强.按照碎屑岩成岩阶段划分方案,并 参考前人有关资料进行综合分析(谢玉洪等, 2015),东方X区分别在埋深2500m和3500m左 右进入中成岩A2和B期,I/S混层中S含量在 25%~10%, *R*。大于0.7;东方Y2区分别在埋深 2900m和3900m进入中成岩A2和B期;凹陷中心



图 3 莺歌海盆地东方一乐东区中新统泥岩矿物组成三角图 Fig. 3 Triangle map of mineral composition of miocene mud-

stone in Dongfang-Ledong area, Yinggehai Basin a. 粘土岩; b. 硅质粘土岩; c. 灰质粘土岩; d. 粉砂岩; e. 粘土质粉 砂岩; f. 钙质粉砂岩; g. 灰岩; h. 粘土质灰岩; i. 粉砂质灰岩; j. 混 合细粒岩; h1. 黄流组一段; h2. 黄流组二段; m1. 梅山组一段; m2. 梅山组二段; s1. 三亚组一段; s2. 三亚组二段 乐东B区和凹陷斜坡乐东A区分别在3500m和2900m左右进入中成岩A2期.反映乐东区成岩演 化较东方区慢,凹陷中心成岩演化较凹陷斜坡区慢. 从泥岩样品伊利石结晶度分析,东方区泥岩的伊利 石结晶度主要集中在0.4~0.6,乐东区伊利石结晶 度分布范围0.4~0.8,整体来看,研究区泥岩处于成 岩作用的中晚期阶段,塑性较好,对应封闭性能也 最好,表明其封盖能力较好.乐东区黄流组泥岩进 入中期成岩演化阶段,泥岩中的长石、钙质化石碎 片等受有机质热演化生成的有机酸溶蚀作用影响 较大形成次生溶孔(图6c);中期成岩阶段粘土矿物 转化脱水与有机质热演化排烃,有利于泥岩微裂缝 的生成(图6d).

4 泥岩孔喉结构特征及封盖性分析

本次通过铸体薄片及扫描电镜观察,结合高压 压汞实验(秦建中等,2013;田孝茹,2017),对东 方一乐东区中新统泥岩盖层孔喉结构展开研究.镜 下观察不同类型和不同矿物组成的泥岩发现泥岩 盖层的孔隙分布有如下特点:本区的孔隙主要以铸 模孔、有机质微孔及微裂缝为主,其次可见少量高 岭石和黄铁矿晶间孔.泥岩中长石、碳酸盐岩颗粒 受有机酸会发生溶蚀,溶蚀作用较强时可形成铸模 孔.泥岩中裂缝主要呈两种类型:一种为构造形成 裂缝,呈网格状、雁行状;另一种为成岩形成裂缝, 呈纺锤状、放射状分布,此类裂缝一般延伸不远,连 通性差.正常泥岩段一般较致密,微孔发育,大孔和 中孔基本不发育,裂缝多倍充填(图 6a,6b);低速泥



Fig.4 Discriminate map of parent rock properties of Huangliu Formation in Dongfang-Ledong area, Yinggehai Basin X2-2并采用覆压孔隙度和渗透率数据.



Fig.5 Distribution map of trace and rare earth elements in Dongfang-Ledong area, Yinggehai Basin



第8期

图 6 莺歌海盆地东方一乐东区泥岩盖层典型显微照片
Fig.6 Typical microphotographs of mudstone caprock in Dongfang-Ledong area, Yinggehai Basin
a. A3-1井, 3 766 m, m1, 正常泥岩段,发育少量微孔; b. Y2-1 井, 3 285 m, h1, 正常泥岩段,发育少量微孔; c. Y2-1井, 3 860 m, h2, 低速泥岩段,长石溶孔发育; d. A2-1井, 4 082 m, m1, 低 速泥岩, 微裂缝发育

岩段较正常泥岩孔隙和裂缝更发育,可见大量受有 机酸溶蚀产生的次生溶孔,同时还发育大量微裂缝 (图 6c,6d),裂缝发育可能与底辟作用形成有关.

压汞曲线形态反映各孔喉段孔隙的发育情况、 孔隙之间的连通性(杨峰等,2013年).泥岩高压压 汞曲线分布表明(图7),毛细管压力曲线整体偏右 上方,中间主进汞段平缓且长,毛细管压力曲线显 示为高位平台,最大进汞饱和度可达100%.参照粒 级划分原则,把孔径0.01~5.00 μm为微孔隙,小于 0.01 μm为超微孔隙(苗建宇等,2003).从研究区压 汞一吸附法测得典型井孔喉半径集中范围上看,喉 道半径小于0.02 μm的喉道占总喉道的95%以上, 确定研究区以微孔喉和超微孔喉为主,这种喉道不 利于气体的渗流,能阻碍油气向上逸散.



Fig.7 Mercury injection curve and typical pore throat distribution map of mudstone in Dongfang-Ledong area

综合分析认为,莺歌海盆地东方一乐东区中新 统泥岩盖层厚度大,分布范围广,且该套区域性盖 层处于成岩作用的中晚期,喉道以微孔喉和超微孔 喉为主,封盖性能较强,具有良好的封盖条件.但需 要注意的是,该套泥岩中低速泥岩由于孔隙和裂缝 相对较发育,泥岩盖层的封盖性可能会受到一定 影响.

5 结论

(1)莺歌海盆地东方一乐东区黄流组一段和黄流组二段泥岩分布最稳定,在研究区分布广泛,且连续性强,是该区最重要和最可靠的盖层;低速泥 岩在纵向上呈浅层"发育几率小、多为薄层、分布范 围小",在深层"发育厚、分布范围广"的特征,成岩 过程中粘土矿物转化脱水与有机质热演化排烃形 成的微裂缝、次生溶孔等亦是研究区低速泥岩的典 型特征.

(2)东方-乐东区中新统泥岩盖层可划分出6 种主要的岩石类型,受陆源碎屑供给影响较大的粘 土质粉砂岩以及受钙质化石碎片影响较大的粘土 质灰岩的封盖条件较差;正常泥岩与低速泥岩表现 不同源区性质,受海南岛物源有关的低速泥岩,碎 屑颗粒细大小不一或定向排列,研究区泥岩整体处 于成岩作用的中晚期,封盖条件好,具备较好的封 盖条件.

(3)东方-乐东区中新统泥岩盖层主要以微孔 喉和超微孔喉为主,正常泥岩段一般较致密,微孔 发育,大孔和中孔基本不发育;低速泥岩段较正常 泥岩孔隙和裂缝更发育,可见大量受有机酸溶蚀产 生的次生溶孔,正常泥岩相较低速泥岩封盖性更好.

References

- Feng, C., Huang, Z.L., Tong, C.X., et al., 2011. Comprehensive Evaluation on the Sealing Ability of Mudstone Cap Rock in Member 2 of Yinggehai Formation of Yinggehai Basin. Journal of Earth Sciences & Environment, 33(4):373-377(in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. T., Yao, G. Q., Zhou, F. D., 2016. Provenance Analysis and Petroleum Geological Significance of Shallow-Marine Gravity Flow Sandstone for Huangliu Formation of Dongfang Area in Yinggehai Basin, the South China Sea. *Earth Science*, 41(9):1526-1538(in Chinese with English abstract).
- Lin, S.H., Yuan, X.J., Zhi, Y., 2017. Comparative Study on Lacustrine Shale and Mudstone and Its Significance: a Case from the 7th Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(3): 517-523(in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Shi, J.X., Fu, X.F., et al., 2018. Petrological Characteristics and Shale Oil Enrichment of Lacustrine Fine-Grained Sedimentary System: A Case Study of Organic-Rich Shale in First Member of Cretaceous Qingshankou

Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(5): 828-838(in Chinese with English abstract).

- Li, S.C., Zhang, J.S., Gong, F.H., et al., 2017. The Characteristics of Mudstones of Upper Cretaceous Qingshankou Formation and Favorable Area Optimization of Shale Oil in the North of Songliao Basin. *Geological Bulletin of China*, 36(4): 654-663(in Chinese with English abstract).
- Miao, J. Y., Zhu, Z. Q., Liu, W., 2003. Characteristics of Pore Structures of Paleogene - Neogene Argillaceous Rocks in the Jiyang Depression. *Geological Review*, 49 (3):330-336(in Chinese).
- Ming, X.R., Li, L., Song, S.S., et al., 2017. Petrologic and Geochemical Records of Interaction Between Reducing Fluids and Mudstone Caprocks: A Case from the Mudstone in the Qingshankou Formation of Wangfu Depression in Southern Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 38 (5):952-962(in Chinese with English abstract).
- Qin, J.Z., Liu, W.X., Fan, M., et al., 2013.S hale Research Progress and Achievements in Seal Appraisal Technology. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(6): 689-688 (in Chinese with English abstract).
- Tian, D. M., Jiang, T., Zhang, D. J., et al., 2017. Genesis Mechanism and Characteristics of Submarine Channel: A Case Study of the First Member of Yinggehai Formation in Ledong Area of Yinggehai Basin. *Earth Science*, 42(2):130-141(in Chinese with English abstract).
- Tian, X.R., Zhuo, Q.G., Zhang, J., et al., 2017. Sealing Capacity of the Tugulu Group and Its Significance for Hydrocarbon Accumulation in the Lower Play in the Southern Junggar Basin, Northwest China. *Oil & Gas Geology*, 38(2):334-344(in Chinese with English abstract).
- Xie, Y.H., Fan, C.W., 2010. Some New Knowledge About the Origin of Huangliu Formation Reservoirs in Dongfang Area, Yinggehai Basin. China Offshore Oil & Gas, 22(6):355-359(in Chinese).
- Xie, Y.H., Li, X.S., Wang, H., 2015. High Temperature and Overpressure Natural Gas Reservoir Formation Theory and Exploration Practice in Ying - Qiong Basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, X.D., Zhang, Y.Z., Pei, J.X., et al., 2015. Control Effect of Tectonic Evolution on Gas Accumulation Difference in the Yinggehai Basin. *Natural Gas Industry*, 35 (2):12-20(in Chinese with English abstract).
- Yang, F., Ning, Z.F., Kong, D.T., et al., 2013. Pore Structure of Shales from High Pressure Mercury Injection and Nitrogen Adsorption Method. *Natural Gas Geoscience*, 24(3):450-455(in Chinese with English abstract).

- You, L., Zhang, Y.Z., Yang, X.B., et al., 2018a. Favorable Reservoir Evaluation and Prediction Technology in Complex Sedimentary-Diagenetic Field and its Application in Western South China Sea. *China Offshore Oil & Gas*.30 (2):45-53(in Chinese with English abstract).
- You, L., Zhong, J., Zhang, Y.Z., et al., 2018b. Petrography-Geochemistry and Source Significance of Western Canyon Channel of Northern South China Sea. *Earth Science*, 43(2):514-524(in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.W., Gao, L., Tan, J.C., et al., 2018. The Application of Low-Velocity Shale Identification Technology in the Yinggehai Basin Area Exploration. *China Mining Magazine*, 27(11):148-153(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Z, He, S.L., *Liu*, B., 2017. Sealing Mechanism and Sealing Capacity of Mudstone Caprock in The Overpressured Gas Field: A Case Study of X13 Gas Field, Yinggehai Basin, South China Sea. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(3):73-79(in Chinese).
- Zhou, W., Huang, H., Wang, S.Z., et al., 1999. Seal Evaluation of Caprock & Fault Belting. Sichuan Publishing House of Science & Technology, Chengdu (in Chinese).
- Zhou, W., Liu, W.B., Cheng, G.Y., 1994. Evolution and Seal Mechanism of Shale Caps in Hailaer Basin. *Journal* of Chengdu University of Technology, 21(1): 62-70(in Chinese).
- Zhou, X.F., Zhang, Y.S., Yan, D.T., et al., 2018. Quantitative Evaluation of Sealing Capacity of Tertiary Mudstone Caprock in Lenghu Area, Qaidam Basin. *Earth Science*, 43(S2):230-237(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯冲,黄志龙,童传新,等,2011.莺歌海盆地莺歌海组二段泥 岩盖层封闭性综合评价.地球科学与环境学报,33(4): 373-377.
- 黄银涛,姚光庆,周锋德,2016.莺歌海盆地黄流组浅海重力 流砂体物源分析及油气地质意义.地球科学,41(9), 1526-1538.
- 林森虎,袁选俊,杨智,2017.陆相页岩与泥岩特征对比及其 意义——以鄂尔多斯盆地延长组7段为例.石油与天然 气地质,38(3):517-523.
- 柳波,石佳欣,付晓飞,等,2018.陆相泥页岩层系岩相特征与 页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山 口组一段富有机质泥页岩为例.石油勘探与开发,45 (5):828-838.

- 李士超,张金友,公繁浩,等,2017.松辽盆地北部上白垩统青山口组泥岩特征及页岩油有利区优选.地质通报,36 (4):654-663.
- 苗建宇,祝总祺,刘文荣,等,2003.济阳坳陷古近系一新近系 泥岩孔隙结构特征.地质论评,49(3):330-336.
- 明晓冉,刘立,宋士顺,等,2017.还原性流体-泥岩盖层相互 作用的岩石学和地球化学记录---以松辽盆地南部王府 凹陷青山口组泥岩为例.石油与天然气地质,38(5), 952-962.
- 秦建中,刘伟新,范明,等,2013. 泥岩研究与盖层评价技术. 石油实验地质,35(6):689-706.
- 田冬梅,姜涛,张道军,等,2017.海底水道特征及其成因机制:以莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段为例.地球科学, 42(1):130-141.
- 田孝茹,卓勤功,张健,等,2017.准噶尔盆地南缘吐谷鲁群盖 层评价及对下组合油气成藏的意义.石油与天然气地 质,38(2):334-344.
- 谢玉洪,范彩伟,2010.莺歌海盆地东方区黄流组储层成因新 认识.中国海上油气,22(6),355-359.
- 谢玉洪,李绪深,王华,2015.莺一琼盆地高温超压天然气成 藏理论与勘探实践.北京:石油工业出版社.
- 徐新德,张迎朝,裴健翔,等,2015.构造演化对莺歌海盆地天 然气成藏差异性的控制作用.天然气工业,35(2): 12-20.
- 杨峰,宁正福,孔德涛,等,2013.高压压汞法和氮气吸附法分 析页岩孔隙结构.天然气地球科学,24(3):450-455.
- 尤丽,张迎朝,杨希冰,等,2018a.复杂沉积成岩场有利储层 评价预测技术及其在南海西部海域的应用.中国海上油 气,30(2):45-53.
- 尤丽,钟佳,张迎朝,等,2018b.南海北部中央峡谷水道的岩相-地球化学特征及其源区性质.地球科学,43(2): 514-524.
- 张明伟,高凌,谭建财,等,2018.低速泥岩识别技术在莺歌海 盆地区域勘探中的应用.中国矿业,27(11):148-153.
- 张迎朝,何胜林,刘兵,等,2017.南海高压气田泥岩盖层封闭 机制、封气能力及演化过程——以莺歌海盆地 x13高压 气田为例.海相油气地质,22(3):73-79.
- 周文,黄辉,王世泽,等,1999.盖层及断裂带的封堵作用评价.成都:四川科学技术出版社.
- 周文,刘文碧,程光瑛,1994.海拉尔盆地泥岩盖层演化过程 及封盖机理探讨.成都理工大学学报(自科版),21(1), 62-70.
- 周雪峰,张永庶,严德天,等,2018.柴达木盆地冷湖地区第三 系泥岩盖层封盖能力定量评价.地球科学,43(S2): 230-237.