

南黄海盆地下古生界油气地质条件与勘探前景

张鹏辉^{1,2}, 付奕霖¹, 梁杰^{2,3}, 陈建文^{2,3}, 张银国^{2,3}, 鲍衍君¹, 薛路¹, 李慧君^{2,3}
ZHANG Penghui^{1,2}, FU Yilin¹, LIANG Jie^{2,3}, CHEN Jianwen^{2,3}, ZHANG Yinguo^{2,3},
BAO Yanjun¹, XUE Lu¹, LI Huijun^{2,3}

1. 河海大学海洋学院, 江苏 南京 210098;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071

1. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, Shandong, China;

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China

摘要: 钻探、包裹体分析及地球化学探测表明, 南黄海盆地深部海相中—古生界存在油气充注过程, 具备较好的油气资源潜力。基于南黄海盆地最新的地震资料解释成果和邻区下扬子陆域最新的钻井资料的充分认识, 通过对南黄海中—古生代海相盆地的构造区划、下古生界成藏要素及油气成藏组合的系统分析, 阐述了下古生界油气地质条件与勘探前景。研究结果表明: ①南黄海盆地是受多期构造运动叠加改造形成的残留盆地, 下古生界构造形变作用较弱, 地层保存较完整, 盆地中部崂山断隆带的高石稳定带构成了下古生界构造相对稳定带; ②下古生界油气地质条件较优越, 下寒武统烃源岩厚度较大且有机质含量较高, 以 I 型干酪根为主, 中寒武统—奥陶系多发育交代白云岩和颗粒灰岩, 可作为较好的储集层, 上奥陶统—下志留统厚层泥质岩广泛发育, 具备较好的封盖能力, 可作为一套区域性盖层; ③下古生界生储盖组合配置良好, 相对稳定的高石稳定带发育多个大型构造圈闭且存在油气充注, 构造圈闭与油气形成时空匹配较好, 后期构造破坏较弱, 油气保存条件较好, 可作为南黄海盆地深部海相油气勘探的有利区带。

关键词: 下古生界; 油气地质条件; 勘探潜力; 构造区划; 南黄海盆地

中图分类号: P534.4; P618.130.2⁺7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)02/03-0243-09

Zhang P H, Fu Y L, Liang J, Chen J W, Zhang Y G, Bao Y J, Xue L, Li H J. Hydrocarbon geological conditions and exploration prospects of Lower Paleozoic in the South Yellow Sea Basin. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 243-251

Abstract: Drilling, inclusion analysis and geochemical prospecting indicate that oil and gas charging process exists in the deep marine Mesozoic-Paleozoic strata in the South Yellow Sea Basin, which is endowed with a good potential of oil and gas resources. Based on the latest seismic data interpretation of the South Yellow Sea Basin and fully understanding of the latest drilling data in its adjacent Yangtze Platform, the geological conditions and exploration prospects of oil and gas in the Lower Paleozoic are described through systematic analysis on tectonic division of the Mesozoic-Paleozoic marine basins, hydrocarbon accumulation elements and assemblages of Lower Paleozoic. The results show that: a. The South Yellow Sea Basin is a residual basin formed by the superposition and reconstruction

收稿日期: 2020-05-06; **修订日期:** 2020-12-25

资助项目: 中国地质调查局项目《崂山隆起构造沉积条件地质调查》(编号: DD20190818)、《南黄海油气资源调查》(编号: DD20160152), 中央高校基本科研业务费项目《下扬子地块早寒武世古海洋环境演化》(编号: B200202144), 国家自然科学基金项目《南黄海崂山隆起二叠系储层油气成藏破坏与流体演化过程还原研究》(批准号: 42076220)、《下扬子地区下寒武统深水陆棚富含有机质泥页岩差异性成岩演化过程及其对孔隙发育的控制作用》(批准号: 41702162)、《南黄海崂山隆起中南部海底渗漏烃类源区示踪与运移路径重建》(批准号: 41776075)

作者简介: 张鹏辉(1986-), 男, 博士, 从事沉积学、储层地质学、石油地质学等的教学与研究。E-mail: zph010@163.com

通信作者: 梁杰(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 从事海洋油气调查与评价工作。E-mail: cgslijie@mail.cgs.gov.cn

resulting from multi-stage tectonic movements. As the Lower Paleozoic tectonic deformation is weak, the strata are relatively well preserved. The Gaoshi stabilized zone of the Laoshan fault uplift in the middle of the basin constitutes the Lower Paleozoic tectonic stable zone. b. Paleozoic strata possess relatively superior geological conditions for oil and gas resources, of which the Cambrian source rock is characterized by great thickness and high contents of organic substance dominated by type I kerogen. Metasomatic dolomite and granular limestone are mainly developed in Middle Cambrian to Ordovician, which can be used as better reservoirs. The thick argillaceous rocks of Upper Ordovician to Lower Silurian are widely developed and have good sealing ability, which can be used as a set of regional caprocks. The source-reservoir-caprock combination is well developed in Lower Paleozoic, and several large structural traps and hydrocarbon charging exist in the Gaoshi stable zone. As the structural traps match well with the formation of oil and gas in time and space, and the late structural destruction is relatively weak, the oil and gas preservation conditions are good. Therefore, it can be a favorable area for marine oil and gas exploration in South Yellow Sea Basin.

Key words: Lower Paleozoic; geological conditions of oil and gas; exploration prospect; tectonic division; South Yellow Sea Basin

南黄海盆地为中—古生代海相沉积盆地和中—新生代陆相沉积盆地相叠加的大型沉积盆地^[1-3],是亚洲大陆东部边缘诸多基础地质构造问题和矿产资源的热点研究区域之一。布格重力异常、磁力异常场特征及海陆对比表明,南黄海盆地是扬子板块在海域的延伸部分,下扬子区古陆核主体位于南黄海海域^[2-6]。尽管南黄海盆地有近 60 年的油气勘探历史,共钻探钻井 30 口(中国 24 口、韩国 6 口),但至今未发现工业性油气流。

近年来越来越多的研究表明,包含南黄海盆地和下扬子陆域地区的下扬子区海相中—古生界保存较完整,具备较好的油气资源潜力^[2-3,7],其中,下扬子陆域下古生界油气显示(包括沥青在内)共 130 余处。大陆架科学钻探 CSDP-2 井是南黄海第 1 口全取心科学钻井,在下三叠统青龙组、上二叠统龙潭组、上石炭统船山组、中石炭统黄龙组,以及中志留统茅山组等古生代海相地层中见多处油气显示。结合包裹体分析,古生界多个层位、不同岩性存在油气充注,曾发生油气运移过程,具有多期成藏特征^[2-3,8-10]。南黄海盆地中南部高石 3 号构造圈闭的油气地球化学探测表明,该构造圈闭存在深部油气藏渗漏的地球化学异常,表现为双环状地球化学异常,其中内环异常指示深部残留油藏渗漏至海底表面,而外环异常指示深部原生气藏渗漏内环状异常,反映了原生气藏渗漏至海底表面^[11],进一步证实南黄海盆地深部海相地层具备形成较大规模油气藏的潜力。特别是在 2015 年起利用“高覆盖次数、富低频信号和强震源能量”的采集技术,获取了较高品质的南黄海盆地海相地层地震反射资料,解决了以往深部海相地层反射能量弱、成像质量差的问题^[3,12],为南黄海盆地深部油气资源勘查提供了有力

的支撑。开展南黄海盆地深部研究,向深部要资源、拓展勘查深度是未来资源领域发展的重要方向。

南黄海盆地现有 8 口井钻遇中—古生代海相地层,其中 CSDP-2 井钻遇厚层下志留统高家边组(但未揭示下部笔石页岩层段)及以浅地层^[2,9-10],且与下扬子陆域地层序列一致(图 1),是目前经钻探证实的南黄海盆地最老地层,但尚未揭示完整的下古生界。受目前钻探深度的限制,南黄海盆地海相古生界的研究工作难度很大。尽管近年来围绕南黄海盆地深部中—古生界已开展了沉积地层序列^[2-3]、构造演化特征^[2,13]、烃源岩分析^[3,10]、油气保存条件^[9,14]等研究,但相关研究主要集中在上古生界—中生界。研究认为,尽管南黄海盆地经历了与下扬子陆域类似的构造演化和沉积充填,但在中、新生代,南黄海盆地较下扬子陆域构造活动弱,特别是在盆地中部地区构造相对简单,推测海相中—古生界具有良好的烃源岩,油气保存条件相对较好。而与上古生界—中生界相比,海相下古生界构造稳定、变形较弱,具备更有利的油气保存条件^[3,9],但目前涉及南黄海盆地地下古生界油气地质的综合研究很少。本文利用南黄海盆地最新的地震资料解释成果和邻区下扬子陆域最新的钻井资料,基于盆地格局的差异性,系统分析评价了下古生界各成藏要素特征,并就勘探潜力进行了预测。

1 地质背景

作为扬子地块在现今海域的延伸,南黄海盆地位于面积达 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的南海海域,北起千里岩断裂,向南以江绍断裂为界(图 1)^[1-2,14]。南黄海盆地形成于太古宇—元古宇变质基底之上,先后经历了加里东期、海西期、印支期、燕山期、喜山期等多

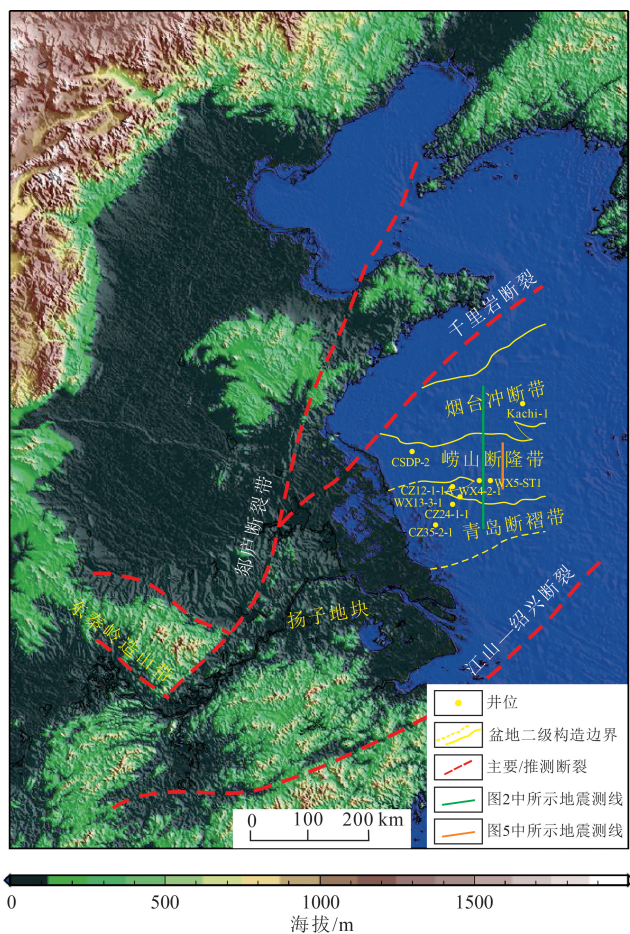


图1 南黄海盆地位置及中—古生代海相残留盆地构造区划(构造单元划分据参考文献[2-3])

Fig. 1 Location of the South Yellow Sea Basin and the tectonic division of the Paleozoic-Mesozoic marine residual basins

期构造运动^[2-3,9],构成了中—古生代海相盆地和中—新生代陆相盆地叠合的改造型残留盆地。

南黄海盆地钻井、连片地震剖面解释揭示,结合下扬子陆域钻井和露头资料分析对比,南黄海盆地海相中—古生界发育较齐全,整体厚度较大,多为4000~6000 m^[2-3,9,14]。

上述中—古生代海相地层中存在3套地震反射标志层组,地震反射特征呈平行-亚平行结构,具有中—强振幅且连续性较好,分别对应中石炭统一下三叠统、下志留统及震旦系—下寒武统^[2-3],其中前2套标志层已为区内钻井所证实。

对于保存较完整的南黄海盆地地下古生界,结合钻井、地震资料解释和邻区下扬子陆域分析推测,自下而上依次发育寒武系泥质岩和碳酸盐岩、奥陶系碳酸盐岩和顶部薄层硅质泥岩、志留系泥质岩和

砂岩(图2)。

2 南黄海中—古生代海相残留盆地的构造区划

较高品质的南黄海盆地海相反射资料的获得,为中—古生代海相残留盆地地质结构的深入剖析提供了坚实的基础。依据地震资料解释,结合区域骨干剖面构造演化分析、残留盆地地层厚度与分布、断裂系统及构造样式,南黄海中—古生代海相残留盆地可划分为3个二级构造单元^[2-3,9],总体表现为南北分带的构造格局,自北向南依次为烟台冲断带、崂山断隆带和青岛断褶带(图1、图2)。

烟台冲断带:受来自北部的强烈挤压应力作用,呈高角度基底卷入式逆冲,断裂以北倾为主,逆冲力度较强^[3],海相地层上部剥蚀程度严重,下古生界相对稳定分布,地震剖面显示主控断裂深达基底,地层向南呈现高角度上抬。

崂山断隆带:属于印支期的对冲带,是该时期挤压构造运动形成的宽缓褶皱背斜的核部,但崂山断隆带南北构造变形具明显差异。具体表现为崂山断隆带北侧变形程度大,发育大型逆冲断裂,形成多个逆冲带或逆冲推覆带;南侧变形程度较小,断层发育少且规模较小,产状较平缓,构造相对稳定。根据地层展布及构造样式差异,可进一步细分为2个三级构造带:位于北部的青峰变形带和位于中、南部的高石稳定带^[3,9],反映出南黄海盆地北强南弱的不对称对冲格局(图2)。青峰变形带是一个大型逆掩推覆体系,总体表现为地层破碎、产状多变、构造变形强烈及断裂系统复杂的特点。高石稳定带地震剖面资料品质较高,标志层反射特征清楚且能连续追踪对比,地层总体较完整,构造变形作用较弱,早期断裂不发育,东部边缘地震资料品质相对变差,局部可能受火成岩影响。

青岛断褶带:南倾断裂较发育,常与北倾断裂构成地垒或地堑构造^[3],古生代海相地层发育较齐全、厚度大,但变形程度较崂山断隆带强,主要为隔挡式构造。

3 下古生界油气地质条件

3.1 烃源岩

南黄海盆地—下扬子陆域下寒武统底部以发育灰黑色—深灰色炭质页岩、硅质泥页岩及硅质岩为

地层					年龄 /Ma	岩性剖面	岩性描述	生储盖组合		
界	系	统	组	代号				生	储	盖
下 古 生 界	志留系	中统	茅山组*	S ₂ m			粉砂岩夹页岩			
			坟头组*	S ₁ f			粉砂岩为主，少量页岩			
		下统	高家边组*	S ₁ g			泥页岩夹粉砂岩			
	奥陶系	上统	五峰组	O ₃ w	500 505		硅质岩、硅质泥页岩			
			汤头组	O ₃ tt			灰岩、泥质灰岩			
			汤山组	O ₃ t			灰岩			
		中统	牯牛潭组	O ₂ g			灰岩			
			大湾组	O ₂ d			泥质灰岩夹页岩			
		下统	红花园组	O ₁ h			灰岩			
			仑山组	O ₁ l			白云质灰岩、灰质白云岩			
	寒武系	上统	观音台组	Є ₃ g	590		白云岩、白云质灰岩			
		中统	炮台山组	Є ₂ p			白云岩、白云质灰岩			
		下统	幕府山组	Є ₁ m			上部白云岩、泥质灰岩，下部页岩为主夹薄煤层			

注：*为南黄海盆地已钻遇地层

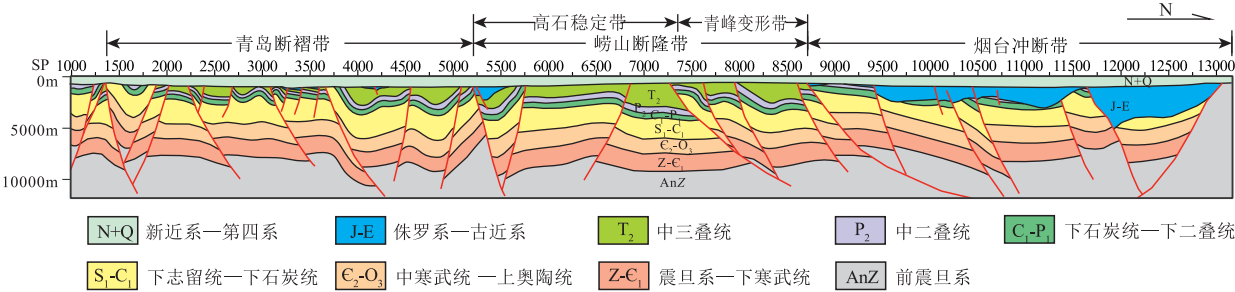


图2 南黄海盆地—下扬子陆域海相下古生界特征、主要生储盖组合及南黄海盆地地质剖面(盆地地质剖面据参考文献[9]修改)

Fig. 2 Lithology and source-reservoir-cap assemblage of Lower Paleozoic marine strata in the South Yellow Sea Basin and the Lower Yangtze Platform, and geological section of the South Yellow Sea Basin

主^[9,14],厚度多为50~200 m,厚度较大且分布较广。下扬子陆域下寒武统暗色富有机质泥页岩多形成于盆地、陆棚相,在区域上主要分布在江苏盐城—安徽滁州、安徽石台—浙江安吉、江西德兴—浙江桐庐等地区^[7,15-19]。近年来,在下扬子陆域实施的多口钻井揭示了厚层的下寒武统暗色泥页岩,有机质含量较高(表1)。

位于江苏盱眙的官地1井完钻深度为601 m,揭示了较完整的下寒武统幕府山组,岩性以泥岩、灰岩与泥岩互层为主(图3-a),底部见石煤层(图3-b)。幕府山组厚度为441.45 m,泥页岩累积厚度达167.2 m,主要形成于陆棚—斜坡相,有机质丰度高,237块样品的总有机碳含量(TOC)平均值可达9.8%,有机显微组分表现为高腐泥组、低镜质组和惰质组的组成特征,干酪根类型以I—II₁型为主。官地1井幕府山

表1 下扬子陆域代表性钻井下寒武统烃源岩主要特征
Table 1 Characteristics of Cambrian source rocks of representative wells in the Lower Yangtze Platform

代表性钻井	泥岩累积厚度/m	TOC/%	等效 R _o /%	有机质类型
皖宁2井	465	0.5~10	3.5~4.1	I
官地1井	167.2	9.8	>3%	I—II ₁
N参1井	44	1.31	2.41	/
苏121井	124	4.61	2.14	/
N2井	71	2.97	2.22	/
皖页1井	401	4.07	3.7	/
宣页1井	269.8	3.26~14.2	3.05~3.67	I
昆2井	75.5	1.53	/	/
淳页1井	310	3.68	4.07	/

注:部分数据据参考文献[7,15,17-19]整理;“/”为无相关数据



图 3 南黄海盆地—下扬子陆域下古生界钻井岩心典型特征

Fig. 3 Typical characteristics of drilling cores from Lower Paleozoic strata in the South Yellow Sea Basin and the Lower Yangtze Platform

a—官地 1 井下寒武统泥页岩夹泥质灰岩,447.25~451.05 m;b—官地 1 井下寒武统底部石煤层,480.4~482.6 m;c—N2 井下奥陶统方解石脉中发育大量溶孔,1293.42 m;d—N2 井下奥陶统发育溶洞和垂直裂缝,1338.97 m;e—N2 井下奥陶统见晶间溶蚀孔,1338.97 m;f—鼓地 1 井下奥陶统仑山组细晶白云岩,局部夹硅质条带;g—N4 井高家边组厚层泥质岩;h—苏页 1 井高家边组厚层泥质岩,1074.5~1077.6 m;i—CSDP-2 井高家边组厚层泥质岩,2714.18~2718.18 m

组泥页岩等效镜质体反射率(R_o)值一般大于 3%,表明总体热演化程度较高,处于过成熟阶段。官地 1 井幕府山组不同深度段(55.4 m、256.15 m、296.75 m 和 440.75 m)样品的甾烷类化合物分布特征基本相似(图 4), $C_{27}\alpha\alpha\alpha R$ 、 $C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 甾烷相对组成分布呈反“L”形,且以 $C_{27}\alpha\alpha\alpha R$ 甾烷占优势,反映出以低等水生生物输入为主的有机质来源;而大部分烃源岩样品的孕甾烷和升孕甾烷的相对丰度均较高,表明官地 1 井烃源岩热演化程度较高。

位于安徽宁国的宣页 1 井完钻深度为 2848.8 m,钻遇下寒武统荷塘组和大陈岭组斜坡—盆地相以富有机质泥页岩为主的地层。其中,荷塘组下段多见硅质岩,上段多为硅质页岩、钙质泥岩和灰岩;大陈岭组多为硅质页岩、钙质泥岩和灰岩互层,泥页岩累积厚度达 269.8 m。宣页 1 井下寒武统硅质页岩中见大量海绵骨针、藻类化石及少量放射虫^[17-20]。

宣页 1 井下寒武统泥页岩有机质丰度较高,TOC 含量主要介于 3.26%~14.2% 之间,底部硅质岩 TOC 平均含量达 11.8%,以 I 型干酪根为主,热演化程度较高,其等效 R_o 值介于 3.05%~3.67% 之间^[18-19]。

南黄海盆地地震资料解释和邻区下扬子陆域对比分析显示,下寒武统幕府山组泥质岩在崂山断隆带分布较连续^[2],预测厚度较大。通过本次研究并结合前人工作分析(表 1),认为下扬子陆域下寒武统富有机质泥页岩 TOC 含量较高,普遍大于 2%,而热演化程度较高,等效 R_o 值则普遍大于 2%,且大部分在 3% 以上,干酪根类型以 I 型为主,有机质组分多为腐泥组。这套有机质含量较高、分布较稳定且厚度较大的下寒武统泥页岩,是南黄海盆地—下扬子陆域一套具有潜在生烃意义的区域烃源岩。

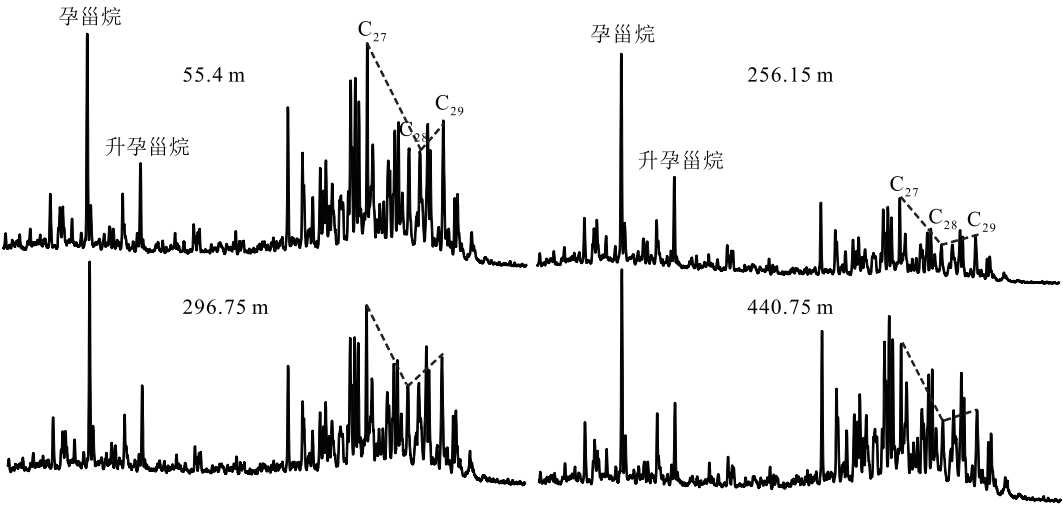


图4 下扬子陆域官地1井下寒武统泥页岩甾烷类化合物分布特征
Fig. 4 Distribution of steroids in Cambrian shale in Well Guandi 1, Lower Yangtze Platform

3.2 储层

下扬子陆域钻井及野外露头剖面揭示,下寒武统富有机质泥页岩层之上沉积了厚层的中寒武统一奥陶系碳酸盐岩,以灰岩和白云岩为主。

南黄海盆地目前虽尚未钻遇中寒武统一奥陶系碳酸盐岩地层,但典型的地震剖面波阻抗反射界面显示, $T_{12} \sim T_{13}$ 层序相当于该套碳酸盐岩地层,其双程反射时间厚度为 650~700 ms,内部反射能量较弱,内部结构为亚平行-空白-杂乱反射^[2]。

下扬子陆域中寒武统一奥陶系碳酸盐岩主要分布于台地相、台地边缘滩相和潮坪相,以及台地间斜坡相、陆棚相和盆地相。其中,台地间斜坡相、陆棚相和盆地相多发育泥晶灰岩,主要经历了埋藏环境压实作用、压溶作用和重结晶作用;而台地相、台地边缘滩相和潮坪相多发育颗粒灰岩及交代白云岩,主要经历了海水及淡水环境胶结作用、白云石化和溶解作用^[21]。下扬子陆域中寒武统一奥陶系露头剖面样品镜下观察表明,泥晶灰岩原生和次生孔隙较少,储集性差;颗粒灰岩在成岩作用早期原生孔隙被胶结物充填,而在中晚期受溶解作用会形成次生孔隙,但面孔率大多小于 3%;交代白云岩在成岩作用中晚期因溶解作用产生次生孔隙,多为晶间孔和溶孔,且连通性较好,面孔率多集中于 5%~12%^[21]。

下扬子陆域多口钻井揭示了一定厚度的中寒武统一奥陶系碳酸盐岩储层,普遍发育溶孔、缝洞、溶洞(表 2;图 3-c~f),并见一定的油气显示。其

中,兴参 1 井上寒武统观音台组 3018.5~3032.5 m 深度段白云岩岩心样品孔隙较高(表 2),距印支面小于 18 m,可作為一套优质的古风化岩溶储层^[22]。位于高邮凹陷的真 43 井在中寒武统炮台山组试获原油 1.7 t/d^[22],反映出较好的储集性能。此外,真 31 井在下奥陶统仑山组多个层段试油,虽未出油,但日产水 259 m³^[21],同样显示了良好的储集性能。

南黄海盆地-下扬子陆域中寒武统一奥陶系碳酸盐岩储层多集中于中寒武统炮台山组、上寒武统观音台组、下奥陶统仑山组及红花园组。其中,较优质的储层多集中于台地相、台地边缘滩相和潮坪相中的交代白云岩,其次为颗粒灰岩,以次生孔隙型储层为主。

表 2 下扬子陆域代表性钻井下古生界储层特征
Table 2 Lower Paleozoic Reservoir rocks of the representative wells in the Lower Yangtze Platform

代表性 钻井	层位	(潜在)储 层厚度/m	孔隙度 /%	渗透率 /mD	储集空 间类型
苏 121 井	炮台山组	68	0.2~8.51	/	溶孔、溶洞
许 24 井	炮台山组	83.2	0.6~5.7	/	溶孔、缝洞、溶洞
兴参 1 井	观音台组	4	9.2~34.4	29.7~ 1164.1	蜂窝状溶孔、裂缝
苏 103 井	观音台组	5.6	0.63~2.73	/	溶孔、溶洞、晶间孔
许 9 井	观音台组	81.2	0.5~3	/	溶孔、缝洞、溶洞
N2 井	红花园组	>54	/	/	溶孔、缝洞、溶洞
昆 3 井	仑山组	/	最高 5.54	0.42~21	晶间孔

注:部分数据据参考文献[21~22]整理;“/”为无相关数据

3.3 盖层

南黄海盆地-下扬子陆域下志留统高家边组 and 上奥陶统五峰组,以发育灰黑色-深灰色炭质页岩、硅质泥页岩及硅质岩为主^[10, 14, 23-24],多形成于陆棚相,厚度多为50~200 m,泥质岩厚度较大且分布较稳定(图3-g~i)。

南黄海盆地 CSDP-2 井位于崂山断隆带青峰变形带,该井钻遇厚层下志留统高家边组中上段,未揭示下部笔石页岩,岩性以灰色-深灰色泥岩为主(图3-h),夹少量泥质粉砂岩和粉砂质泥岩。CSDP-2 井高家边组泥质岩厚度较大且断层不甚发育,局部见构造滑脱面,单套泥质岩层厚度达115 m^[9]。该井高家边组泥质岩样品突破压力主要介于16.5~18.5 MPa之间,岩石扩散系数为 $6.82 \times 10^{-8} \sim 9.54 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$,表明高家边组泥质岩具有较好的封盖能力。

下扬子陆域 N4 井钻遇高家边组大套泥质岩,高家边组厚度达1719.5 m。N4 井高家边组上覆坟头组地层压力系数为1.02,地层水矿化度介于7~15 g/L之间,地层水 Cl^- 含量为 7205×10^{-6} ,地温梯度为 $4.05^\circ\text{C}/100 \text{ m}$;而下伏奥陶系地层压力系数为0.99,地层水矿化度为20.15 g/L,地层水 Cl^- 含量为 9915×10^{-6} ,地温梯度为 $3.365^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,在高家边组上下2套地层中存在明显差异^[9, 14, 25],反映高家边组厚层泥岩具有很好的分隔性,可作为一套盖层。此外,下扬子陆域兴参1井、圣科1井和句参2井的高家边组岩心泥质岩样品的突破压力均较高,其中兴参1井大于12 MPa,圣科1井大于12 MPa,句参2井介于12~16 MPa之间^[9, 14],显示出较好的封盖能力。尽管 CSDP-2 井未钻遇高家边组下部笔石页岩,但在下扬子陆域多口钻穿下志留统高家边组和上奥陶统五峰组的钻井中均发现含笔石段的暗色泥页岩,有机质含量较高(TOC值普遍大于1%),热演化程度以高成熟—过成熟为主,进入生气阶段^[26-32],具有一定的生烃潜力,且在皖南地1井、皖含地1井、汤地1井等多口钻井的笔石页岩层段中见气测显示,有利于形成烃浓度封闭。

综上所述,南黄海盆地-下扬子陆域下志留统高家边组和上奥陶统五峰组泥质岩厚度大、分布较广,具备较好的封盖能力,是下古生界一套重要的区域性盖层。

3.4 油气保存条件

南黄海盆地海相下古生界分布广泛、厚度较

大,烃源岩和盖层品质较好且发育多套储层,尽管南黄海盆地整体变形程度较下扬子陆域弱,但因其海相地层经历了多期构造运动的叠加改造,下古生界早期油气聚集可能仍遭受不同程度的破坏。因此,保存条件是能否成藏或形成大规模油气的重要因素,也是决定下古生界能否取得勘探突破的关键。

受构造运动抬升剥蚀作用的影响,南黄海盆地局部高部位可能剥蚀至奥陶系,中生界及古近系也存在不同程度的剥蚀^[3, 9, 14],残余厚度变化较大。加里东运动对烟台冲断带和青岛断褶带改造作用较强,上志留统一中泥盆统大面积沉积缺失^[9, 14, 33-35]。印支—早燕山运动使包括下扬子陆域和南黄海盆地在内的整个下扬子区发生广泛的逆冲推覆和对冲,而崂山断隆带是该时期的对冲带,构成了南黄海海相残留盆地的相对构造稳定区(图2)。对于崂山断隆带,北部的青峰变形带形成多个逆冲带,整体断裂系统发育,圈闭形态一致性差,单个规模较小;而高石稳定带发育北东—南西向的褶皱构造带,变形较弱,圈闭形态较完整,单个面积较大^[3-4]。

下志留统高家边组泥质岩是下扬子区下古生界一套较优质的区域性盖层,同时是整个推覆构造活动中最重要的塑性滑脱层。滑脱层的存在,使滑脱层上、下2套地层呈现出不同的构造变形特点,滑脱层之下地层变形程度较上方地层弱^[25, 36-41],特别是崂山断隆带受这套滑脱层较好的卸力作用,使其南北两侧的挤压应力得以有效释放,因而该滑脱层之下的下古生界断裂较不发育,地层保存相对完整。

岩浆活动在南黄海盆地主要集中于晚侏罗世—早白垩世。航磁资料表明,岩浆活动主要局限分布于崂山断隆带东南边缘,对下古生界油气保存的影响不大^[9]。

综上所述,南黄海盆地崂山断隆带特别是高石稳定带为下古生界构造相对稳定区,其构造变形明显弱于烟台冲断带和青岛断褶带,褶皱较平缓,有利于地层完整保存和圈闭继承性发育,具备较理想的油气保存条件。

4 下古生界油气成藏组合及勘探潜力

根据南黄海盆地地下古生界烃源岩、储层及盖层的空间相互组合配置关系,其油气成藏组合为:下寒武统泥质岩为区域性烃源岩,中寒武统一奥陶系交代白云岩及颗粒灰岩为储层,上奥陶统五峰组—

下志留统高家边组为区域性盖层(图 2、图 3)。该组合在崂山断隆带保存较完整,预测烃源岩厚度较大且有机质含量较高,发育以次生孔隙型为主的具备潜在储集性能的碳酸盐岩储层,盖层封盖能力较好、厚度大且连片分布,生储盖配置较好。下古生界生储盖组合的圈闭主要形成于加里东期,在奥陶纪—志留纪油充注和二叠纪气充注后,经历了印支期—早燕山期定型^[3],尽管存在一定程度的油气破坏和改造作用,但崂山断隆带下古生界构造变形弱,圈闭继承性发育,有利于烃类富集和保存。此外,作为早期(寒武纪)形成的隆起区,崂山断隆带在相当长时期内处于构造高部位^[42],有利于成为下古生界烃源岩生成的油气运移和聚集区;而上奥陶统五峰组—下志留统高家边组区域性盖层的广泛发育,以及崂山断隆带相对稳定的构造背景为早期形成的油气保存提供了良好的条件(图 5)。

高石稳定带作为崂山断隆带构造变形最弱的区带(图 2),该区地震资料品质较好,标志层反射特征清楚,构造带内能连续追踪对比,海相地层保存基本完整、油源条件充分、储层分布稳定、盖层较优质、断裂发育少且规模较小、产状较平缓、岩浆活动较弱,整体油气保存条件较好,纵向上生储盖配置较好,大型构造圈闭发育,是南黄海盆地下古生界油气勘查的有利区带。其中发育多个大型圈闭的

高石稳定带中部可作为重点目标区。

5 结 论

(1)南黄海盆地作为扬子板块向海域的延伸,尽管受多期构造运动的影响,但由于其处于下扬子古陆核主体区,南黄海盆地构造较下扬子陆域更简单,海相中—古生界保存较齐全,受控于构造格架的南北分异,表现为盆地中部的崂山断隆带受构造改造较两侧弱,且以崂山断隆带中、南部的高石稳定带残留海相下古生界的保存最完整,断隆较不发育,产状较平缓。

(2)南黄海盆地海相下古生界存在一套完整的生储盖组合,下寒武统泥质岩可作为一套有利的区域性烃源岩,有机质含量较高、厚度较大且分布较连续;中寒武统一奥陶系碳酸盐岩特别是次生孔隙发育的交代白云岩层可作为较好的储集层;上奥陶统一下志留统泥质岩可作为一套较优质的区域性盖层,其厚度较大,局部见滑脱层面,具备较好的封盖能力,这套盖层已为 CSDP-2 井钻遇并证实。

(3)南黄海盆地崂山断隆带中、南部的高石稳定带下古生界构造变形弱,断裂较不发育,发育多个大型构造圈闭,圈闭继承性发育,存在油气充注过程,油气保存条件较理想,预测高石稳定带是油气聚集成藏并最终保存的有利场所,具备较好的海

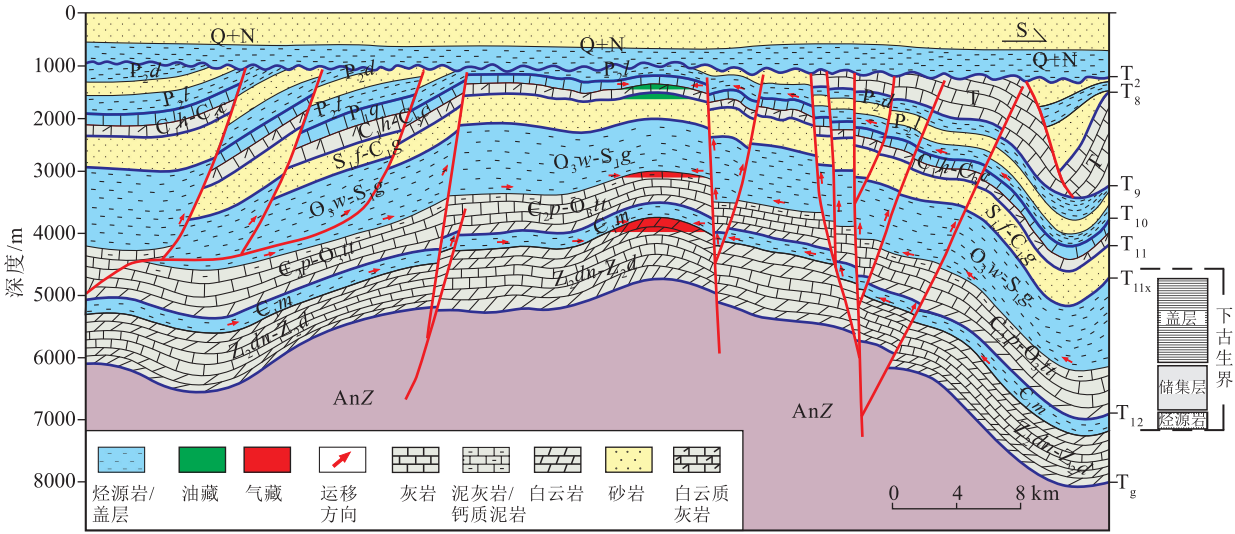


图 5 崂山断隆带高石稳定带油气运聚成藏模式(据参考文献[41]修改)

Fig. 5 Hydrocarbon migration and accumulation model of the Gaoshi Stabilization Zone of the Laoshan fault uplift.
Q—第四系;N—新近系;P₂d—二叠系大隆组;P₂l—二叠系龙潭组;P₁q—二叠系栖霞组;C₃c—石炭系船山组;C₁h—石炭系和州组;
C₁g—石炭系高骊山组;S₁f—志留系坟头组;S₁g—志留系高家边组;O₃w—奥陶系五峰组;O₃t—汤头组;C₂p—寒武系炮台山组;
C₁m—寒武系幕府山组;Z₂dn—震旦系灯影组;Z₂d—震旦系陡山沱组;AnZ—前震旦系

相油气资源前景。

参考文献

- [1] 戴春山,李刚,蔡峰,等. 黄海前第三系及油气勘探方向[J]. 中国海上油气(地质),2003,17(4): 225-231.
- [2] 陈建文,雷宝华,梁杰,等. 南黄海盆地油气资源调查新进展[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(3): 1-23.
- [3] 陈建文,梁杰,张银国,等. 中国海域油气资源潜力分析与黄东海海域油气资源调查进展[J]. 海洋地质与第四纪地质,2019,39(6): 1-29.
- [4] Li W, Liu Y, Xu J. Onshore-offshore structure and hydrocarbon potential of the South Yellow Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 90: 127-136.
- [5] 陈建文,龚建明,李刚,等. 南黄海盆地海相中—古生界油气资源潜力巨大[J]. 海洋地质前沿,2016,32(1): 1-7.
- [6] Zhang M, Xu D, Chen J. Geological structure of the Yellow Sea area from regional gravity and magnetic interpretation [J]. Applied Geophysics, 2007, 4(2): 75-83.
- [7] 夏在连,花彩霞,刘计勇,等. 下扬子区下古生界油气有利勘探区带探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(3): 66-74.
- [8] 郭兴伟,朱晓青,宋世杰. 大陆架科钻 CSDP-2 井在南黄海水相地层中首次钻遇油气显示[J]. 海洋地质与第四纪地质,2015,5: 124.
- [9] 许振强,梁杰,陈建文,等. 南黄海崂山隆起中、古生界油气保存条件分析[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(3): 125-133.
- [10] Cai L, Xiao G, Guo X, et al. Assessment of Mesozoic and Upper Paleozoic source rocks in the South Yellow Sea Basin based on the continuous borehole CSDP-2[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101: 30-42.
- [11] 李双林,董贺平,王建强,等. 南黄海盆地崂山隆起中南部海域油气目标地球化学探测: 海底油气渗漏与双环状地球化学异常[J]. 海洋地质与第四纪地质,2020,40(2): 847-858.
- [12] 陈建文,施剑,张异彪,等. 地震调查技术突破南黄海水相中—古生界成像技术瓶颈[J]. 地球学报,2017,38(6): 847-858.
- [13] Pang Y, Guo X, Shi B, et al. Hydrocarbon generation evaluation, burial history, and thermal maturity of the Lower Triassic Silurian organic-rich sedimentary rocks in the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin, East Asia[J]. Energy & Fuels, 2020, 34: 4565-4578.
- [14] 梁杰,张鹏辉,陈建文,等. 南黄海盆地海相中—古生界油气保存条件[J]. 天然气工业,2017,37(5): 10-19.
- [15] 刘计勇,张飞燕,印燕铃. 下扬子下寒武统岩相古地理及烃源岩条件研究[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(3): 85-95.
- [16] 梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等. 中国南海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质,2008,13(2): 1-16.
- [17] 黄正清,周道容,李建青,等. 下扬子地区寒武系页岩气成藏条件分析与资源潜力评价[J]. 石油实验地质,2019,41(1): 94-98.
- [18] 樊佳莉. 下扬子地区下寒武统富有机质页岩的岩相与沉积环境[J]. 地质科技情报,2017,36(5): 156-163.
- [19] 唐显春,曾辉,张培先,等. 宣城地区荷塘组页岩含气性浅析[J]. 油气藏评价与开发,2011,1(1/2): 78-84.
- [20] Xiao S, Hu J, Yuan X, et al. Articulated sponges from the Lower Cambrian Hetang Formation in southern Anhui, South China: Their age and implications for the early evolution of sponges [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 220(1): 89-117.
- [21] 王英华. 中、下扬子区海相碳酸盐岩成岩作用研究[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1991.
- [22] 梁兵,段宏亮,李华东. 下扬子地区海相层系成藏条件及勘探评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [23] 张敏强,高顺莉,谭思哲. 南黄海盆地中、古生界地质特征及勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(3): 24-34.
- [24] 梁杰,陈建文,张银国,等. 南黄海盆地中、古生界盖层条件[J]. 现代地质,2016,30(2): 353-360.
- [25] 张淮,周荔青,李建青. 下扬子地区海相下组合油气勘探潜力分析[J]. 石油实验地质,2006,28(1): 15-20.
- [26] 张训华,肖国林,吴志强,等. 南黄海油气勘探若干地质问题认识和探讨[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [27] 贾东,胡文瑄,姚素平,等. 江苏省下志留统黑色页岩浅井钻探及其页岩气潜力分析[J]. 高校地质学报,2016,22(1): 127-137.
- [28] 熊强青,王中鹏,张娣,等. 下扬子巢湖地区皖舍地 1 井五峰组—高家边组下段生物地层[J]. 地层学杂志,2020,44(1): 46-55.
- [29] Chen Q, Fan J, Zhang L, et al. Paleogeographic evolution of the Lower Yangtze region and the break of the “platform-slope-basin” pattern during the Late Ordovician[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(5): 625-636.
- [30] Yang S, Hu W, Wang X, et al. Duration, evolution, and implications of volcanic activity across the Ordovician-Silurian transition in the Lower Yangtze region, South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 518: 13-25.
- [31] 潘继平,乔德武,李世臻,等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J]. 地质通报,2011,30(2/3): 338-341.
- [32] 方朝刚,黄正清,滕龙,等. 下扬子地区晚奥陶世凯迪期—早志留世世丹期岩相古地理及其油气地质意义[J]. 中国地质,2020, 47(1): 144-160.
- [33] 张海敏,陈建文,李刚,等. 地震调查在南黄海崂山隆起的发现及其石油地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,2009,29(3): 107-113.
- [34] 金春爽,乔德武,沈怀磊,等. 海域油气资源战略调查与选区[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [35] Yao Y, Chen C, Feng Z, et al. Tectonic Evolution and Hydrocarbon Potential in Northern Area of the South Yellow Sea[J]. Journal of Earth Science, 2010, 21(1): 71-82.
- [36] 郭彤楼. 下扬子地区中古生界叠加构造特征与多源多期成藏[J]. 石油实验地质,2004,26(4): 319-323.
- [37] 徐旭辉,周小进,彭金宁. 从扬子地区海相盆地演化改造与成藏浅析南黄海勘探方向[J]. 石油实验地质,2014,36(5): 523-531.
- [38] 马永生,楼章华,郭彤楼,等. 中国南海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨[J]. 地质学报,2006,80(3): 406-417.
- [39] 张鹏辉,梁杰,陈建文,等. 中国叠合盆地深部海相地层油气保存条件剖析[J]. 海洋地质前沿,2019,35(1): 1-11.
- [40] Brun J, Sokoutis D, Driessche J V D. Analogue modeling of detachment fault systems and core complexes[J]. Geology, 1994, 22(4): 319-322.
- [41] Yan D P, Zhang B, Zhou M F, et al. Constraints on the depth, geometry and kinematics of blind detachment faults provided by fault-propagation folds: An example from the Mesozoic fold belt of South China[J]. Journal of Structural Geology, 2009, 31(2): 150-162.
- [42] 陈春峰,施剑,徐东浩,等. 南黄海崂山隆起形成演化及对油气成藏的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(3): 55-65.