https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.097



琼东南盆地宝岛-长昌凹陷 陵水组储层差异演化特征

钟佳,杨希冰,朱沛苑,徐守立,邓孝亮,度 雷,李 兴,宋 鹏

摘 要: 宝岛-长昌凹陷陵水组砂岩储集体目前是琼东南盆地油气勘探的重点目标.本文综合铸体薄片、激光粒度、元素地球 化学、X衍射、扫描电镜、流体包裹体以及电子探针分析,探究宝岛凹陷北坡与长昌凹陷陵水组砂岩储层的成岩演化差异性.宝 岛凹陷北坡的砂岩储层具有"粒度粗、稳定组分高"的强水动力特征,是海南岛物源体系下的三角洲沉积;而长昌凹陷砂岩储层 具有"粒级偏细、泥质杂基重"的弱水动力特点,是神狐隆起、西沙隆起物源体系下的海底扇沉积.机械压实导致宝岛凹陷北坡 的陵水组砂岩储层颗粒普遍呈现线状或凹凸接触.高热流背景导致长昌凹陷陵水组砂岩在海底以下浅埋条件(海底以下约 1400 m)下即可进入化学压实阶段,颗粒呈点-线接触,并伴生重晶石、片钠铝石等热液矿物.宝岛凹陷北坡存在早、晚两期烃类 充注(14.5~10.0 Ma、2~0 Ma),期间被一期CO2充注分隔(7~3 Ma).长昌凹陷仅发育早期烃类充注(14.5~6.0 Ma),以及随后 的一期CO2充注(5~0 Ma).陵水组砂岩储层演化在宝岛凹陷北坡总体以"海底以下缓慢深埋、缓慢升温",天然气充注促进溶蚀 和抑制胶结为特点,而长昌凹陷则以"海底以下浅埋、快速升温",CO2持续充注促使碳酸盐或粘土或热液矿物胶结为特点. 关键词:成岩作用;沉积物源;稀土元素;机械压实;化学压实;黏土矿物;流体包裹体;陵水组;琼东南盆地. 中图分类号: P618 文章编号: 1000-2383(2019)08-2665-12 收稿日期:2019-01-23

Porosity Evolution Differences of the Lingshui Formation Reservoir between Baodao and Changchang Sag, Qiongdongnan Basin

Zhong Jia, Yang Xibing, Zhu Peiyuan, Xu Shouli, Deng Xiaoliang, Tuo Lei, Li Xing, Song Peng Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Zhanjiang 524057, China

Abstract: Sandstone reservoirs of Lingshui formation in Baodao-Changchang depression are currently the key targets for oil and gas exploration in Qiongdongnan Basin. In this paper, the differences of diagenesis evolution in sandstone reservoirs of Lingshui formation between the northern slope of Baodao sag and Changchang sag are studied by means of casting thin sections, laser particle size, element geochemistry, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, fluid inclusions and electron probe analysis. The results show that the sandstone reservoirs on the northern slope of Baodao sag are delta deposits under the provenance system of Hainan Island which have strong hydrodynamic characteristics of "coarse grain size and high stable component", while the sandstone reservoirs in Changchang sag have weak hydrodynamic characteristics of "fine grain size and heavy argillaceous", which are submarine fan deposits under the provenance system of Shenhu uplift and Xisha uplift. Mechanical compaction results in linear or convex contact of sandstone particles in Lingshui formation in the northern slope of Baodao sag. The high heat flow leads to the chemical compaction stage of sandstone in Lingshui formation of Changchang depression under the condition of shallow burial below sea floor (about an depth of 1 400 m below sea floor) and point-line contact of particles, accompanied by hydrothermal

作者简介:钟佳(1987--),男,工程师,硕士,主要从事沉积储层研究,ORCID:0000-0003-3856-0540. E-mail:zhongjiayi007@163.com

引用格式:钟佳,杨希冰,朱沛苑等,2019.琼东南盆地宝岛一长昌凹陷陵水组储层差异演化特征.地球科学,44(8):2665-2676.

基金项目:国家科技重大专项(No.2016ZX05026-002);中海石油(中国)有限公司自主立项项目(No.ZYKY-2018-ZJ-01).

minerals such as barite and dawsonite. There are two stages of hydrocarbon filling $(14.5 \sim 10.0 \text{ Ma}, 2 \sim 0 \text{ Ma})$ in the northern slope of Baodao sag, which were separated by one stage of CO₂ filling $(7 \sim 3 \text{ Ma})$. In Changchang sag, only early hydrocarbon filling $(14.5 \sim 6.0 \text{ Ma})$ and subsequent CO₂ filling $(5 \sim 0 \text{ Ma})$ were developed. The evolution of sandstone reservoirs in Lingshui Formation on the northern slope of Baodao Sag was generally characterized by "slowly deep-buried below sea floor and slow temperature rise". Natural gas filling promoted dissolution and inhibits cementation, while Changchang Sag was characterized by "shallow-buried below sea floor and rapid temperature rise" and continuous CO₂ filling promoted cementation of carbonate or clay or hydrothermal minerals.

Key words: sandstone diagenesis; sediment Source; rare earth elements; mechanical compaction; chemical compaction; clay minerals; fluid inclusions; Lingshui formation; Qiongdongnan Basin.

0 引言

琼东南盆地近年在深水区获取了重大油气勘 探突破.西区乐东一陵水凹陷峡谷水道的探明天然 气超过千亿方(谢玉洪,2014),东区宝岛-长昌凹 陷也获得了领域性油气发现.在取得勘探突破的同 时,也充分显示了深水区的巨大勘探潜力.特别是, 宝岛一长昌凹陷作为深水区大型富生烃凹陷(张功 成等,2014),将成为建设万亿大气区的主战场.陵 水组作为崖城13-1大气田的主力储层,被誉为琼东 南盆地的"黄金组合",也一直是沉积、储层、成藏研 究的重点目标(龚再升等, 1997; 李绪宣, 2004; 张 亚雄等, 2013; 赵东娜等, 2014; Song et al., 2014; 李增学等, 2018). 宝岛凹陷北部构造带已有数口井 在陵水组获得油气发现,长昌凹陷也是有一口井在 陵水组获得突破.东区钻井所揭示的陵水组储层均 表现为中一低孔、中一低一特低渗、较强的非均质 性.这一结果严重制约着琼东南盆地深水区陵水组 的油气勘探.为了突破深水区勘探瓶颈,探究浅水 区与深水区陵水组储层成岩演化的差异性具有重 大意义.

已有不少学者从不同视角探究了储层差异演 化过程,包括从成岩产物及时序上研究水一岩反应 (Fischer et al., 2012),从岩石学组成及成岩演化来 分析砂岩致密化过程(罗静兰等, 2014),利用岩石 物理定量研究储层非均质性(Fitch et al., 2015),从 热动力条件来揭示储层演化规律(李驰等, 2018). 多重视角下的研究表明,砂岩母岩组分、水动力分 选以及成岩流体是决定砂岩储层演化和储集性能 的关键因素.本文以宝岛凹陷北坡和长昌凹陷已钻 井区陵水组砂岩储层为研究对象,利用岩石薄片、 粒度及稀土元素,分析两地区砂岩储层母岩性质、 岩石组构及水动力特征;通过薄片显微观察、X衍 射、包裹体测定及埋藏史分析,确定两地区砂岩储 层成岩演化、成岩作用类型及流体充注特征;最后 综合岩石学与成岩流体特征,确定宝岛凹陷北坡与 长昌凹陷陵水组砂岩储层差异演化过程,明确两地 区陵水组砂岩储层形成机理,为深水区寻找规模性 优质储层奠定基础,为下一步勘探部署提供重要 依据.

1 地质背景

琼东南盆地位于南海北部西缘,介于海南岛以 南与西沙群岛以北的区域,西以红河断裂与莺歌海 盆地相隔,东接珠江口盆地神狐隆起,是古近纪一 第四纪期间形成的被动大陆边缘盆地(龚再升等, 1997;李绪宣,2004).盆地整体构造格局呈"南北分 带、东西分块"特点,可分为海南隆起、北部坳陷带、 中部隆起带、中央坳陷带和南部隆起带5个二级构 造单元.其中,宝岛一长昌凹陷位于中央坳陷带东 部(图 1a),呈近东西向展布,西接松南凹陷,北邻神 狐隆起,南邻南部隆起,面积达19 000 km².

琼东南盆地经历了多个构造一沉积演化期(张 迎朝等,2017a,2017b).古新世一始新世为断陷期, 主要为湖相沉积,仅发育小规模的(扇)三角洲一湖 泊相体系.渐新世为拗一断期,主要为海陆过渡相 沉积,沉积了崖城组、陵水组.崖城组沉积期(早渐 新世),盆地发生海侵并接受海陆过渡相、滨浅海相 沉积,仅在近凹带和凸起周缘发育较大规模的(扇) 三角洲沉积体系.陵水组沉积期(晚渐新世),水体 进一步加深,凹陷中心转变为深海环境,(扇)三角 洲前端开始发育海底扇.早中新世为断一拗期,主 要为滨浅海相并发育浅水台地相,沉积了三亚组;



图 1 宝岛-长昌凹陷陵水组储集体分布与连井沉积相剖面 Fig.1 The distribution and wells section of sedimentary facies of Lingshui formation reservior in Baodao-Changchang sag

中中新世一第四纪为拗陷期,又称被动大陆边缘时 期,主要为浅海一深海沉积,自下而上依次沉积了 梅山组、黄流组、莺歌海组、乐东组.

宝岛-长昌凹陷在陵水组发育多个三角洲、海 底扇沉积体(图1a).宝岛凹陷北坡陵水组三角洲规 模较大,有利储层主要位于三角洲前缘水下分流河 道砂体(图1b).A-1、B-2/3、D-1等钻井显示,水下 分流河道砂以中-粗砂岩为主,伽玛曲线呈箱型或 齿化箱型,成像测井见块状层理与冲刷构造,孔隙 度为4.7%~16.0%(均值9.4%),渗透率(0.51~9.5 mD,均值3.2 mD),储层物性呈中一低孔、低渗特 征.陵水组时期,宝岛一长昌凹陷近凹带及凹陷中 心则发育多个海底扇(图1a),海底扇主力储集层为 中扇水道砂(图1b).水道砂岩性以粉一细砂岩为 主,伽玛曲线呈齿化箱型,地震剖面上呈明显下切 特征;其中,W-1井水道砂孔隙度为5.4%~19.6%, 平均孔隙度为14.8%,渗透率0.05~16.5 mD,平均 渗透率2.24 mD,物性整体为中一低孔、低一特低



图2 长昌凹陷陵水组与神狐隆起区稀土元素石标准化配分模式



渗,仅局部达到中渗.

2 储层岩石学特征对比

2.1 岩石重矿物及稀土元素特征

宝岛凹陷北坡陵水组三角洲砂岩与海南隆起的亲缘关系显著.三角洲砂岩重矿物以锆石、电气石、白钛矿、磁铁矿为主.这一重矿物特征指示了以岩浆岩和沉积岩为主的母岩类型,且与海南隆起东南部花岗岩母岩的钛铁矿一锆石型重矿物组合较为一致(王策等,2014;李超等,2017).在稀土元素特征方面,宝岛凹陷北坡三角洲沉积物具有明显负销(Eu)异常.海南隆起的稀土元素分布模式也表现为负Eu异常特征.两者相似的稀土元素配分模式,也表明宝岛凹陷北坡三角洲物源来自于海南隆起(邵磊等,2010; Shao *et al.*, 2016; 李超和罗晓蓉, 2017).

长昌凹陷陵水组海底扇物源与宝岛凹陷北坡 三角洲存在明显差异.长昌凹陷C-1井中的陵水组 海底扇储集岩以极细砂岩为主,粒级明显偏细.C-1 井的稀土元素配分模式与神狐隆起区基岩相似,均 呈轻稀土富集、重稀土亏损的"右倾"型,为典型负 Eu异常(图2). 地震资料也显示神狐隆起往长昌凹 陷方向具有明显物源通道(蔡佳和王华, 2011;蔡 佳, 2017). 神狐隆起区沉积物样品重矿组合是代表 变质岩类母岩的"石榴石一帘石类一角闪石一榍 石"型(曹立成, 2014),基岩岩性为细粒浅变质流纹 岩(蔡佳, 2017),进一步说明长昌C区陵水组海底 扇物源来自神狐隆起区.长昌凹陷W-1井陵水组稀 土元素配分曲线也表现出"右倾"型,但呈总体正Eu 异常、局部负Eu异常特征(图2).可见,W-1井区在 一定程度上也受到神狐隆起物源影响.但是,地震 资料显示长昌凹陷W-1井区海底扇的源头在长昌 凹陷东南缘的西沙隆起区(图1),说明海底扇还是 存在东南物源.受到北部神狐隆起细粒物源注入的 影响,储集岩粒度也是以极细一细砂岩为主,显示 了细粒母岩的源区特征.综上认为:宝岛凹陷北坡 陵水组三角洲母岩来源于海南隆起区,而长昌凹陷 陵水组海底扇物源是受神狐隆起和西沙隆起的双 重影响.

2.2 岩石类型特征

宝岛凹陷北坡A-1、B-3、D-1井区与长昌凹陷 W-1井区陵水组储层岩石类型及组分存在明显差异 (表1,图3). 宝岛凹陷北坡陵水组三角洲储层以中、 粗砂为主,而长昌凹陷陵水组海底扇以粉、细砂储 集为主.两个凹陷的单晶石英含量均较高,基本都 达到50%. 宝岛凹陷北坡的长石和岩屑含量要略高 于长昌区.两个凹陷的岩屑均以多晶石英占主导, 其次是变质岩和喷出岩岩屑,少量花岗岩、云母.宝 岛凹陷北坡多晶石英含量 >12%,其他岩屑总 量 < 9%;长昌凹陷多晶石英含量仅为 8.2%,但变 质岩岩屑含量在岩屑中比重较高,达6.6%.基于砂 岩组分分类标准,宝岛凹陷北坡以岩屑石英砂岩、 长石岩屑砂岩为主,而长昌凹陷以岩屑石英砂岩为 主(图3).两个凹陷的填隙物中碳酸盐胶结物含量 均 <7%. 长昌凹陷砂岩储层泥质杂基含量高达 12.5%, 宝岛凹陷北坡最高仅 6.7%, 说明长昌凹陷 储层受泥质影响更重.两地区泥质填隙物中的黏土 矿物均以伊利石和伊蒙混层占主导,仅含少量高岭 石与绿泥石.长昌凹陷黏土矿物中伊利石所占比重 明显高于宝岛凹陷北坡,而其他类型黏土含量又低 于宝岛北坡.因此,宝岛凹陷北坡A-1、B-3、D-1井 区陵水组三角洲砂岩具有"粒级粗、稳定组分含量 高、泥质低"的特点,反映了北部海南岛物源优质母 岩品质;而长昌凹陷W-1井区陵水组海底扇储层 "粒度细、石英含量高、泥质重",说明海底扇较远源 沉积并一定程度上受神狐隆起细粒母岩的影响.

表1 宝岛-长昌凹陷陵水组储层岩石组分特征

Table 1 Parameters of sandstone components of Lingshui Formation Reservior in Baodao-Changchang Sag																	
井号	粒度	砂体类 型	岩石类型	单晶 石英 (%)	长石 (%)	岩屑(%)						碳酸 泥质 盐胶	泥质	黏土矿物含量(%)			
						多晶	花岗 变	变质	喷出	沉积	云母 (%)	结物	尔 坯	伊利	高岭	绿泥	伊蒙
						石英	岩	岩	岩	岩		(70)	石	石	石	混层	
A-1	rta.		岩屑石英砂岩、长石岩屑砂 岩	51.3	7.2	16.3	0.2	3.7	1.0	0	0.2	3.7	6.7				
D - 1	中、	三角洲		48.5	9.9	15.0	0.6	4.2	1.0	0	0.3	6.3	3.3				
В-3	怚			54.8	8.8	12.8	0.1	6.5	2.5	0	0.1	7.3	4.4	64.9	4.9	4.5	25.7
W-1	粉、 细	海底扇	岩屑石英砂岩	51.5	6.8	8.2	0	6.6	0.8	0	0.5	6.2	12.5	76.9	4.1	0.9	18.1



Fig.3 Sandstone composition classification of Lingshui formation reservoir in Baodao-Changchang sag

2.3 岩石结构特征

宝岛凹陷北坡A-1、B-3、D-1井区与长昌凹陷C-1、 W-1井区陵水组沉积环境及水动力差异引起两地区 砂岩粒度结构的不同.宝岛凹陷北坡陵水组三角洲 砂岩 C-M 图显示(图 4a), C 值集中在 500~2 500 µm 之间,M值在150~650 µm区间,曲线发育递变悬浮 QR段和均匀悬浮 SR段,为典型牵引流沉积特征; 并且B-3井典型粒度概率曲线可以看出(图4b),以 滚动组分、跳跃组分、悬浮组分"三段式"为特点,滚 动和跳跃组分含量占65%,砂岩粒度较粗以中一粗 砂占主导,分选以差一中等为主,反映较强的水动 力环境.长昌区陵水组海底扇砂岩粒度C-M曲线仅 发育平行于基线的递变悬浮 QR 段(图 4c), 呈典型 深水重力流沉积特征;而且W-1井壁心样粒度分布 曲线以悬浮组分为主(图4d),缺少跳跃、滚动组分, 砂岩粒级主要为粉一细砂,颗粒分选中等,总体水 动力条件较弱.结合前面源区母岩与砂岩岩石组分 特征,可以发现宝岛区在海南岛粗粒母岩供给下形 成的三角洲规模大,沉积水动力强,储层粒级粗、稳 定组分高;长昌区海底扇虽然沉积分异较强,岩石稳 定组分较高,但由于细粒母岩的影响,水动力条件 弱,砂岩粒级细、泥质杂基重.由此可见,两地区水动 力条件与储层岩石组构具有较好的对应关系.

3 储层成岩一流体对比

3.1 成岩演化阶段

温度场对琼东南盆地宝岛一长昌凹陷成岩演 化控制尤为明显. 琼东南盆地为典型"热盆", 深水 区长昌凹陷热流值要明显高于其他凹陷(米立军 等,2009;吴景富等,2013). 宝岛凹陷北坡已钻井 区水深<300 m、热流值<72 mW/m², 而长昌凹陷 深水一超深水区(水深>2000m),热流值升高并普 遍 >88 mW/m². 宝岛凹陷北坡 B 区地温梯度为 3.9 ℃/100 m, 而长昌凹陷W区地温梯度值为 5.4 ℃/100 m. 宝岛 B-2 井泥岩伊/蒙混层(I/S)中的 蒙皂石层含量为10%~55%、镜质体反射率(R。)值为 0.63%~0.84%,长昌C-1、W-1井泥岩I/S层中蒙皂 石层含量为15%~45%、R。值为0.52%~0.82%(图 5). 依据中国石油天然气行业标准(应凤祥等, 2003),宝岛-长昌区陵水组储层主体处于中成岩A 期,宝岛凹陷北坡的局部地区因海底以下埋深超过 5000m而少部分达到中成岩B期.考虑去除水深 后自海底以下的埋深,宝岛凹陷北坡B-2井在海底 以下埋深约3400m进入中成岩A2期(海水深约 200 m),而与长昌凹陷W-1、C-1井分别在海底以下 约1800m、1400m进入中成岩A2期(海水深约 2400m)(图5).可见,自宝岛凹陷北坡往长昌凹陷 方向进入相同成岩期的海底以下埋深变浅.即使在 同等沉积速率下,长昌凹陷相对于宝岛凹陷北坡进 入某一特定成岩期的时间更短、更快、更高效.宝岛 凹陷北坡与长昌凹陷的热背景差异主要是长昌凹



Fig.4 C-M patterns and typical probability cumulative curves of Lingshui Formation Reservoir in Baodao-Changchang Sag

陷莫霍面埋深变浅(图5),地壳厚度逐渐减薄、地幔 热流上涌导致地表热流值升高.这种高热流背景下 的迅速升温,有利于长昌凹陷陵水组砂岩通过化学 压实迅速进入中成岩A期.

3.2 成岩作用类型

宝岛-长昌凹陷陵水组储层成岩作用既有应 力加载相关的机械压实,也有溶蚀、胶结等化学反 应相关的化学压实(Schneider *et al.*, 1996;李超 等,2017).但机械压实强度和化学压实进程在不同 地区有所差异.

陵水组砂岩铸体薄片观察发现,宝岛凹陷北坡 储层颗粒之间多为线接触,甚至出现凹凸接触,为 典型的强机械压实特征(图5a);长昌凹陷储层呈现 颗粒间较紧密、多为点一线接触,主体处于近强机 械压实(图5b).这种机械压实的差异性与现今陵水 组在宝岛凹陷北坡和长昌凹陷的海底以下埋深(去 除水深)相一致.陵水组砂岩在宝岛凹陷北坡的海 底以下埋深达到3000~5000 m,而在长昌凹陷海 底以下埋深仅为1200~2600 m.显而易见,宝岛凹 陷北坡的陵水组砂岩储层遭受的机械压实更强烈.

两地区均常见长石、岩屑等不稳定组分的溶蚀 (图 6b, 6c). 扫描电镜下可见长石沿解理面发生内 部溶蚀,其中,长石颗粒的溶蚀残余结构形成粒内 溶孔(图 6d),长石颗粒完全溶蚀后则形成铸模孔 (图 6b).溶蚀化学反应生成的次生孔隙可以改善陵 水组储层物性.与此同时,胶结化学反应则对陵水 组砂岩储层物性产生负面影响.

两地区均可见硅质和黏土矿物胶结.硅质胶结 主要表现为石英次生加大(图 6a, 6b),主要形成于 有机酸大量溶蚀不稳定组分之后.粘土矿物胶结物 是以伊利石为主,少量伊/蒙混层,伊利石是以片状 或丝缕状分布在颗粒表面或粒间(图 6d, 6e);伊/蒙混 层为蒙脱石向伊利石转化的过渡产物,呈丝网状或棉 絮状分布于矿物表面;二者均产生于中成岩A2期.

但两地区碳酸盐胶结物有所差异.宝岛凹陷北 坡以铁方解石和铁白云石为主(图 6f),其中,铁方解 石呈连晶一嵌晶分布,铁白云以交代碎屑颗粒的形 式出现且自形程度好,铁白云石的形成时间晚于铁 方解石.长昌凹陷区以铁白云石为主,背散射下呈 粒状或斑块状充填粒间(图 6g,6h),部分也会交代 碎屑颗粒和先存碳酸盐胶结物,形成时间在石英加 大之后.

此外,探针测试发现长昌凹陷陵水组砂岩还发 育典型热液矿物胶结,如重晶石、片钠铝石等(图





6h,6i). 重晶石交代长石颗粒形成交代残余,背散射 下亮度明显强于铁白云石,说明其形成时间晚于铁 白云石(图6g);片钠铝石呈放射状集合体充填于粒 间孔隙(图6i),其形成于富Na⁺、Al³⁺和高含CO₂的 流体介质中,指示了CO₂充注(高玉巧等,2005). 热 液矿物赋存指示长昌凹陷受到了深部热流体活动 影响.

3.3 流体充注过程

与气态烃、CO₂共生的盐水包裹体均一温度显示,宝岛凹陷北坡与长昌凹陷陵水组砂岩的流体充 注时期存在差异.宝岛凹陷北坡存在3期流体充注 (图 7a),分别为120~140 ℃、150~170 ℃、180~ 190 ℃,其中,150~170 ℃对应于CO₂流体充注,另 外两期为烃气充注.长昌凹陷仅存在125~140℃的 烃气充注和150~165℃的CO₂充注(图7b).将烃气 或CO₂充注期的均一温度投影至埋藏史一热史图 后,可以确定宝岛凹陷北坡早期烃气充注的时间约 为14.5~10.0 Ma,CO₂充注约在7~3 Ma,晚期天然 气充注约在2 Ma至现今(图7c);而长昌凹陷早期烃 类气充注的时间约为14.5~6.0 Ma,CO₂充注发生 在约5 Ma至现今(图7d).

CO₂的充注时期对两地区储层的成岩过程具有 重要影响.宝岛凹陷北坡B区陵水组气样CO₂含量 高达89%,而长昌凹陷W-1井陵水组烃类气含量仅 51.4%,CO₂含量也较高.两地区CO₂充注时间较 长,阻碍了晚期烃类气体的充注和规模成藏(刘正



图6 宝岛-长昌区陵水组储层成岩作用类型显微照片

Fig.6 Microphotographs showing digenesis of Lingshui Formation Reservoir in Baodao-Changchang area a.B-3,4104.5 m,中-粗砂岩,颗粒呈线接触,石英次生加大,壁心(-);b.W-1,4855.5 m,细砂岩,颗粒呈点-线接触,石英次生加大,壁心 (-);c.B-3,4104.5 m,中-粗砂岩,长石与岩屑颗粒溶蚀,壁心(-);d.W-1,4855.5 m,细砂岩,长石颗粒溶蚀、片丝状伊利石充填粒间,扫描 电镜,壁心;e.B-3,3936.0 m,中-粗砂岩,片丝状伊利石充填颗粒之间,扫描电镜,壁心;f.B-3,4102.0 m,中-粗砂岩,连晶铁方解石胶结 与铁白云石交代,壁心(-);g.W-1,4920.0 m,极细砂岩,电子探针片,背散射成像,壁心;h.探针点1;重晶石,探针点2;铁白云石;i.C-1, 3360.8 m,极细砂岩,放射状片钠铝石,壁心(-)

华和陈红汉,2011;刘妍鷨等,2016),引起碳酸盐胶 结增强,进而导致储层物性明显变差.与此同时,在 长昌凹陷"浅莫霍面、高热流"背景下,高温热流体 伴随CO₂侵入陵水组储层,导致形成大量热液矿物 充填粒间孔隙从而使孔喉连通性变差、渗透率降低 (图 6g,6h).

4 储层孔隙演化

宝岛凹陷北坡与长昌凹陷陵水组砂岩储层分 别经历了两种不同的埋藏一成岩一孔隙演化路径 (图8).

宝岛凹陷北坡处于较低地温场,地温梯度和大 地热流值分别小于4℃/100m、72mW/m².陵水组 缓慢沉降,上覆沉积地层加厚,地层温度逐渐升高, 机械压实作用逐渐增强,最后持续埋藏至现今,主 体处于中成岩A期,局部可达中成岩B期.然而,长 昌凹陷整体地温场较高,地温梯度与大地热流值分 别大于5℃/100m、88mW/m².长昌凹陷陵水组相 对快速沉降,地层温度快速升高,化学压实作用快 速增强,最后在上覆地层总体不厚的情况下埋藏至 今,主体处于中成岩A期,成岩期与宝岛北坡相当.

在成岩序列方面,宝岛凹陷北坡陵水组砂岩主 要经历了3个阶段:早成岩期机械压实强烈,高岭石 等粘土矿物析出,方解石沉淀,溶蚀较弱;中成岩A 期早期烃类充注,长石等颗粒溶蚀增强,石英发生 明显次生加大,蒙脱石向伊利石大量转化;中A期 晚期一中B期,CO2充注阻碍了晚期天然气充注,有 机酸溶蚀明显减弱,铁方解石胶结、白云石交代、伊 利石等黏土矿物充填孔隙.长昌凹陷则可归纳为: ①早成岩期上覆载荷与热效应导致化学压实强烈, 高岭石等自生矿物以及早期方解石胶结物形成,次



Fig.7 The homogenization temperature of aqueous inclusions in typical Lingshui Formation Reservoir in Baodao-Changchang Sag and burial history

生溶孔较少发育;②中成岩A期早期烃类充注,长 石等颗粒强烈溶蚀,石英次生加大或硅质胶结,蒙 脱石向伊利石转变;③中A期晚期,有机酸溶蚀减 弱,铁方解石胶结,伴随高温CO₂充注,重晶石等热 液矿物形成、铁白云石大量胶结交代、伊利石等黏 土矿物一并堵塞孔喉.二者区别在于长昌凹陷还发 育典型热液矿物.

第8期

宝岛凹陷北坡陵水组砂岩储层演化为"海底以 下深埋、缓慢升温"过程:机械压实明显降低了储层 孔隙度,早期胶结损失孔隙度较少,早期烃类充注 产生的溶蚀作用明显增孔,CO₂充注导致碳酸盐胶 结进一步减孔并降低孔喉连通性,最终深埋形成低 孔、低渗储层.而长昌凹陷陵水组砂岩储层经历了 "海底以下浅埋、快速升温"过程:化学压实明显降 低了储层孔隙度,早期胶结减孔较少,烃类充注引 起溶蚀增孔幅度较大,晚期高温CO₂充注导致大量 热液矿物、碳酸盐胶结物、黏土矿物形成并堵塞喉 道降低孔渗,进而埋藏成为低孔、低一特低渗为主 的储层.宝岛凹陷北坡陵水组砂岩,海底以下埋深 大,遭受机械压实损失孔隙度较多,后受晚期胶结 成为低孔、低渗储层;长昌凹陷陵水组砂岩,海底以 化学压实和胶结丧失的连通孔较多,形成有孔无渗 面貌.因此,较强机械压实与晚期碳酸盐胶结是宝 岛凹陷北坡陵水组砂岩储层物性变差的主要原因, 而高热背景下的化学压实与晚期多矿物胶结为长 昌凹陷陵水组砂岩储层低渗成因.

5 结论

(1)宝岛凹陷北坡陵水组三角洲砂岩受海南岛 粗粒花岗岩母岩供源,沉积水动力强,储层粒度粗、 泥质低、稳定组分含量高;长昌凹陷陵水组海底扇 砂岩受北部神狐隆起细粒母岩注入的影响,水动力 条件较弱,储层粒级偏细、泥质杂基重.

(2) 宝岛凹陷北坡地温梯度为 3.9 ℃/100 m,长 昌凹陷地温梯度高达 5.4 ℃/100 m. 宝岛凹陷北坡 陵水组砂岩储层碳酸盐胶结物兼有铁方解石和铁 白云石,存在两期烃类充注和一期 CO₂充注;而在长 昌凹陷陵水组砂岩储层碳酸盐胶结物主要为铁白 云石,仅发育早期烃类充注和晚期 CO₂充注.

(3) 宝岛凹陷北坡陵水组砂岩储层演化以"海底以下深埋、缓慢升温"的机械压实为主导,兼有 CO₂充注伴生的碳酸盐胶结,现今总体为低渗面貌; 而长昌凹陷陵水组砂岩储层则以"海底以下浅埋、



图 8 宝岛凹陷北坡与长昌凹陷陵水组储层成岩一孔隙差异演化模式

快速升温"的化学压实为主导,高温CO₂持续充注导 致大量热液矿物、碳酸盐胶结物、黏土矿物形成并 且堵塞喉道最后成为低一特低渗为主的储层.

致谢:感谢西南石油大学地球科学与技术学院 刘睿副教授的指导!感谢评审专家对文章提出的 宝贵意见与建议!

References

- Cai, J., 2017. Sedimentary Facies of Neogene Sanya Formation in Changchang Sag, Qiongdongnan Basin. *Lithologic Reservoirs*, 29(5):46–54(in Chinese with English abstract).
- Cai, J., Wang, H., 2011. The Temporal and Spatial Configure Relation of Sedimentary Systems and Sequence Stratigraphic Framework of Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin. *Offshore Oil*, 31(1):16-21(in Chinese with English abstract).
- Cao, L.C., 2014. Provenance Evolution since Neogene in the

Yinggehai and Qiongdongnan Basins: Evidence from REE, Heavy Mineral and Ziron U-Pb Ages(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

- Fischer, C., Dunkl, I., von Eynatten, H., et al., 2012. Products and Timing of Diagenetic Processes in Upper Rotliegend Sandstones from Bebertal (North German Basin, Parchim Formation, Flechtingen High, Germany). *Geological Magazine*, 149(5): 827-840. https://doi.org/ 10.1017/s0016756811001087
- Fitch, P. J. R., Lovell, M. A., Davies, S. J., et al., 2015. An Integrated and Quantitative Approach to Petrophysical Heterogeneity. *Marine and Petroleum Geology*, 63: 82– 96. https://doi.org/10.13039/501100000270
- Gao, Y.Q., Liu, L., Qu, X.Y., 2005. Gemesis of Dawsonite and Its Indication Significance of CO₂ Migration and Accumulation. Advances in Earth Science, 20(10): 1083– 1088(in Chinese with English abstract).

Fig.8 Variations in digenesis and pore evolution of Lingshui formation reservoir between Baodao sag's Northern slope and Changchang sag

- Gong, Z.S., Li, S.T., Xie, Q.J., 1997. Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Li, C., Chen, G.J., Zhang, G. C., et al., 2017. Developmental Characteristics and Provenances of the Submarine Fans Developed during the Middle Miocene in the Eastern Deepwater Area of the Qiongdongnan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(10):1555-1564(in Chinese with English abstract).
- Li, C., Luo, J.L., Hu, H.Y., et al., 2018. The Thermodynamic Impact on Deepwater Sandstone Diagenetic Evolution of the Zhuhai Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 44(2):572-583(in Chinese with English abstract).
- Li, C., Luo, X. R., 2017. Review on Mudstone Chemical Compaction. Journal of Earth Sciences & Environment, 39(6): 761-772(in Chinese with English abstract).
- Li, X.X., 2004. Study on Structural Dynamics and Hydrocarbon Accumulation in Qiongdongnan Basin(Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.X., Song, G.Z., Wang, D.D., et al., 2018. Characteristics of (Fan) Braided River Delta in Oligocene Coal Measures of Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 43(10) : 3471-3484(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. H., Chen, H.H., Su, A., et al., 2016. Eocene Source Rock Determination in Qiongdongnan Basin, the South China Sea: A Hydrocarbon Detection Perspective. *Earth Science*, 41(9): 1539-1547(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Chen, H.H., 2011.Hydrocarbon Charging Orders and Times in the Eastern Area of Qiongdongnan Basin. *Geoscience*, 25(2):279-288(in Chinese with English abstract).
- Luo, J.L., Li, X. S., Fu, X.Y., et al., 2014.Impact of Petrologic Components and Their Diagenetic Evolution on Tight Sandstone Reservoir Quality and Gas Yield: A Case Study from He 8 Gas-Bearing Reservoir of Upper Paleozoic in Northern Ordos Basin. *Earth Science*, 39 (5):537-545(in Chinese with English abstract).
- Mi, L. J., Yuan, Y.S., Zhang, G. C., et al., 2009. Characteristics and Genesis of Geothermal Field in Deep Water Area of the Northern South China Sea. Acta Petrolei Sinica, 30(1): 27-32(in Chinese with English abstract).
- Schneider, F., Potdevin, J. L., Wolf, S., et al., 1996. Mechanical and Chemical Compaction Model for Sedimentary

Basin Simulators. *Tectonophysics*, 263(1/2/3/4): 307-317.https://doi.org/10.1016/s0040-1951(96)00027-3

- Shao, L., Cao, L. C., Pang, X., et al., 2016. Detrital Zircon Provenance of the Paleogene Syn-Rift Sediments in the Northern South China Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2): 255-269. https://doi. org/ 10.13039/501100001809
- Shao, L., Li, A., Wu, G.X., et al., 2010. Evolution of Sedimentary Environment and Provenance in Qiongdongnan Basin in the Northern South China Sea. Acta Petrolei Sinica, 31(4): 548-552(in Chinese with English abstract).
- Song, G. Z., Wang, H., Gan, H. J., et al., 2014. Paleogene Tectonic Evolution Controls on Sequence Stratigraphic Patterns in the Central Part of Deepwater Area of Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. Journal of Earth Science, 25(2): 275-288. https://doi.org/ 10.1007/s12583-014-0433-7
- Wang, C., Liang, X.Q., Tong, C.X., et al., 2014. Characteristics and Geological Implications of Heavy Minerals from Seven Rivers in Adjacent Areas of Northeastern Yinggehai Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 32(2): 228-237 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.F., Yang, S.C., Zhang, G. C., et al., 2016. Geothermal History and Thermal Evolution of the Source Rocks in the Deep-Water Area of the Northern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(1): 170-180(in Chinese with English abstract).
- Xie, Y.H., 2014. A Major Breakthrough in Deepwater Natural Gas Exploration in Self-Run Oil/Gas Field in the Northern South China Sea and Its Enlightenment. *Natural Gas Industry*, 34(10):1-8 (in Chinese with English abstract).
- Ying, F. X., He, D. B., Long, Y. M., et al., 2003. SY/ T5477-2003 the Industry Standard of China and Division of Diagenetic Stage s in Clastic Rocks(Standard). Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, G. C., Zhang, Y. N., Shen, H. L., et al., 2014. An Analysis of Natural Gas Exploration Potential in the Qiongdongnan Basin by Use of the Theory of Joint Control of Source Rocks and Geothermal Heat. *Natural Gas Industry*, 34(1):18-27(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.X., Zhu, X.M., Zhang, G.C., et al., 2013. Sedimentary Characteristics of Oligocene Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 24(5):956-964(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Z., Gan, J., Yang, X.B., et al., 2017a. Tectonic Evolution and Its Constraints on the Formation of Deepwater Giant Gas Field in Lingshui Sag, Qiongdongnan

Basin. *Marine Geology Frontiers*, 33(10):22-31(in Chinese with English abstract).

- Zhang, Y.Z., Xu, X.D., Gan, J., et al., 2017b. Study on the Geological Characteristics, Accumulation Model and Exploration Direction of the Giant Deepwater Gas Field in the Qiongdongnan Basin. Acta Geologica Sinica, 91(7): 1620-1633(in Chinese with English abstract).
- Zhao, D.N., Zhu, X.M., Lin, J.C., et al., 2014. Sedimentary Characteristics and Evolution of Transitional Belt of the Paleogene Lingshui Formation in Ya13 - 1 Gasfield of Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Journal of Palaeogeography*, 16(3):385-400 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡佳,2017. 琼东南盆地长昌凹陷新近系三亚组沉积相. 岩 性油气藏,29(5):46-54.
- 蔡佳,王华,2011. 琼东南盆地陵水组层序地层格架及沉积体 系的时空配置关系.海洋石油,31(1):16-21.
- 曹立成,2014. 莺歌海一琼东南盆地区新近纪物源演化研究 (硕士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 高玉巧,刘立,曲希玉,2005.片钠铝石的成因及其对CO₂天然 气运聚的指示意义.地球科学进展,20(10):1083-1088.
- 龚再升,李思田,谢秦俊,1997.南海北部大陆边缘盆地分析 与油气聚集.北京:科学出版社.
- 李超,陈国俊,张功成,等,2017.琼东南盆地深水区东段中 中新世深水扇发育特征及物源分析.天然气地球科学, 28(10):1555-1564.
- 李超, 罗晓容, 2017. 泥岩化学压实作用研究进展. 地球科学 与环境学报, 39(6): 761-772.
- 李弛,罗静兰,胡海燕,等,2018.热动力条件对白云凹陷深水 区珠海组砂岩成岩演化过程的影响.地球科学,44(2): 572-583.
- 李绪宣,2004. 琼东南盆地构造动力学演化及油气成藏研究 (博士学位论文). 广州:中国科学院研究生院(广州地 球化学研究所).
- 李增学,宋广增,王东东,等,2018. 琼东南盆地渐新统煤系(扇) 辫状河三角洲特征. 地球科学,43(10):3471-3484.

- 刘妍鷨,陈红汉,苏奥,等,2016. 从含油气检测来洞悉琼东南 盆地东部发育始新统烃源岩的可能性. 地球科学,41 (9):1539-1547.
- 刘正华,陈红汉,2011. 琼东南盆地东部地区油气形成期次和 时期.现代地质,25(2):279-288.
- 罗静兰,刘新社,付晓燕,等,2014.岩石学组成及其成岩演 化过程对致密砂岩储集质量与产能的影响:以鄂尔多斯 盆地上古生界盒8天然气储层为例.地球科学,39(5): 537-545.
- 米立军,袁玉松,张功成,等,2009.南海北部深水区地热特征 及其成因.石油学报,30(1):27-32.
- 邵磊,李昂,吴国瑄,等,2010. 琼东南盆地沉积环境及物源演 变特征. 石油学报,31(4):548-552.
- 王策,梁新权,童传新,等,2014.莺歌海盆地东北部邻区7条 主要人海河流重砂矿物特征及其地质意义.沉积学报, 32(2):228-237.
- 吴景富,杨树春,张功成,等,2013.南海北部深水区盆地热历 史及气源岩热演化研究.地球物理学报,56(1): 170-180.
- 谢玉洪,2014. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其 启示.天然气工业,34(10):1-8.
- 应凤祥,何东博,龙玉梅,等,2003.SY/T5477-2003中华人 民共和国石油天然气行业标准:碎屑岩成岩阶段划分. 北京:石油工业出版社.
- 张功成,张义娜,沈怀磊,等,2014."源热共控"琼东南盆地的 天然气勘探潜力.天然气工业,34(1):18-27.
- 张亚雄,朱筱敏,张功成,等,2013.中国南海琼东南盆地渐新 统陵水组沉积特征.天然气地球科学,24(5): 956-964.
- 张迎朝, 甘军, 杨希冰, 等, 2017a. 琼东南盆地陵水凹陷构造 演化及其对深水大气田形成的控制作用. 海洋地质前 沿, 33(10):22-31.
- 张迎朝,徐新德,甘军,等,2017b.琼东南盆地深水大气田地 质特征、成藏模式及勘探方向.地质学报,91(7): 1620-1633.
- 赵东娜,朱筱敏,林金成,等,2014. 南海琼东南盆地崖13-1 气田古近系陵水组海陆过渡带沉积特征及演化.古地理 学报,16(3):385-400.