袁朱晔斐，田杨，熊小峰，等. 琼东南盆地宝岛凹陷南北断阶带古近系陵水组三段天然气差异富集机理.吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(6)：1998－2013. doi：10.13278/j.cnki.jjuese.20240239.
Yuan Zhuyefei，Tian Yang，Xiong Xiaofeng，et al. Comparative Analysis of Gas Enrichment Differences in the Third Member of the Paleogene Lingshui Formation in the South-North Step-Fault Zone of Baodao Sag，Qiongdongnan Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2024，54(6)：1998－2013. doi：10.13278/j.cnki.jjuese.20240239.

琼东南盆地宝岛凹陷南北断阶带古近系陵水组三段天然气差异富集机理

袁朱晔斐[1]，田 杨[1]，熊小峰[2]，叶 琳[1]，左高昆[2]，吴 楠[1]，朱晋杰[3]
1.长江大学地球科学学院，武汉 430100
2.中海石油(中国)有限公司海南分公司，海口 570312
3.中国地质大学(武汉)资源学院，武汉 430074

摘要：琼东南盆地宝岛凹陷沉积-构造演化复杂，存在多套生储盖组合。南北断阶带是宝岛凹陷现今主要油气富集区，古近系陵水组三段优质的三角洲砂体是其主要目的层。本文综合测井、地震、地球化学等资料，开展陵水组三段天然气富集静态要素对比研究，并结合盆地模拟技术，阐明天然气动态成藏的差异性，总结其主要控制因素。研究表明：北部断阶带甲烷体积分数偏低，非烃类气体体积分数高，以干气为主；南部断阶带天然气组分中烃类气体体积分数高，具有干气与湿气混合特征。北部断阶带为中孔、低渗储层，输导模式主要为T字型＋Z字型混合输导；南部断阶带为中孔、低渗—特低渗储层，输导模式以Z字型输导为主。北部断阶带BD21－1区块圈闭定型于三亚组末期，圈闭构造高点转为东西向，控凹断层活动，控圈断层持续变形，早期崖城组内生成的油气通过次级断层进入储层，后期控凹断层停止活动，通过控圈断层垂向运移至陵水组砂体。南部断阶带YL10－6区块北部圈闭定型于三亚组末期，后期受挤压应力影响，于F_{10-1}断裂处形成小背斜圈闭，其早期与晚期输导体系类型均为Z字型。南北断阶带陵水组三段均经历了3期油气充注，天然气差异富集机理为各生烃次洼生烃潜力、油气初次运移富集程度和二次运移保存条件的差异。

关键词：差异富集机理；成藏期次；天然气；储层；宝岛凹陷；南北断阶带；陵水组三段；琼东南盆地
doi：10.13278/j.cnki.jjuese.20240239 **中图分类号**：TE12；P618.13 **文献标志码**：A

Comparative Analysis of Gas Enrichment Differences in the Third Member of the Paleogene Lingshui Formation in the South-North Step-Fault Zone of Baodao Sag，Qiongdongnan Basin

Yuan Zhuyefei[1]，Tian Yang[1]，Xiong Xiaofeng[2]，Ye Lin[1]，Zuo Gaokun[2]，Wu Nan[1]，Zhu Jinjie[3]

收稿日期：2024－08－30

作者简介：袁朱晔斐(1999—)，男，硕士研究生，主要从事油气成藏方面的研究，E-mail：2022710399@yangtzeu.edu.cn

通信作者：田杨(1989—)，男，讲师，主要从事非常规油气地质资源评价、油气成藏动力学和油气成藏机理方面的研究，E-mail：ty@yangtzeu.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金项目(42172179)；湖北省教育厅科学研究计划资助项目(Q20221311)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (42172179) and the Scientific Research Project Funded by the Education Department of Hubei Province (Q20221311)

1. *School of Geosciences*, *Yangtze University*, *Wuhan* 430100, *China*
2. *CNOOC China Limited*, *Hainan Branch*, *Haikou* 570312, *China*
3. *School of Earth Resources*, *China University of Geosciences* (*Wuhan*), *Wuhan* 430074, *China*

Abstract: The sedimentary-tectonic evolution of Baodao sag in the Qiongdongnan basin is complex, with many sets of source-reservoir-seal assemblages in Baodao sag, Qiongdongnan basin. The south-north step-fault zone is the main oil and gas enrichment area in Baodao sag, the high-quality deltaic sand bodies in the Third Member of the Lingshui Formation of Paleogene are the main target beds. Based on the data of logging, seismic and geochemical data, this paper makes a comparative study on the static factors of gas enrichment in the Third Member of Lingshui Formation, and expounds the difference of gas dynamic accumulation by combining with basin simulation technology, the main control factors were summarized. The results show that the methane content is low and the non-hydrocarbon gas content is high in the northern step-fault zone, and the dry gas is the main gas in the southern step-fault zone. In the northern part of the step-fault zone, the medium porosity and low permeability reservoirs are mainly transported by T-type and Z-type mixed reservoirs, while in the southern part of the step-fault zone, the medium porosity, low permeability and ultra-low permeability reservoirs are mainly transported by Z-type reservoirs. The trap of block BD21-1 in the northern fault step zone was formed at the end of the Sanya Formation, and the structural high point of the trap turned to the east-west direction, in the early stage, the oil and gas generated in Yacheng Formation entered the reservoir through secondary faults. The trap in the northern part of block YL10-6 in the southern fault step was characterized as a small anticline trap at the F_{10-1} fault zone, which was formed at the end of the Sanya Formation and was influenced by compressive stress at the late stage. The Third Member of Lingshui Formation in the south-north step-fault zone experienced three stages of oil and gas charging. The gas differential enrichment depends on the differences in hydrocarbon potential of sub-depression, enrichment degree during primary migration, and preservation situation of secondary migration.

Key words: differential enrichment mechanism; accumulation period; natural gas; reservoir; Baodao sag; the south-north step-fault zone; the Third Member of Lingshui Formation; Qiongdongnan basin

0　引言

琼东南盆地位于我国南海西北部，属于新生代沉积盆地，具有丰富的油气储备以及巨大的勘探价值[1-3]。该盆地西部已发现多个大中型气田，如 Y13 大型气田，L17、L18 等大—中型气田[4]。伴随着勘探技术的发展以及地震数据资料的不断完善，2022 年在宝岛凹陷北部断阶带发现了深层、深水油气田——BD21-1 大型气田[5-6]，推动了该地区古近系油气勘探的新格局。

前人[7-8]关于琼东南盆地宝岛凹陷北部断阶带构造演化早有研究，并且也进行了以此为基础的构造控藏研究，但普遍以局部成藏条件差异研究为主，如构造控烃源、构造转换带控砂和输导体系格架控制天然气富集等，尚缺乏对琼东南盆地宝岛凹陷南北断阶带天然气差异富集机理的研究。随着地震资料全覆盖及钻井资料逐渐丰富，关于宝岛凹陷南北断阶带构造差异及其成藏差异也有了更深入的认识。实钻表明，南部断阶带 YL10-6 区块与北部断阶带 BD21-1 区块具备相似的条件：临近洼陷断裂发育、目的层储盖组合类似、输导体系配置良好以及构造脊发育并指向构造高点。沉积-构造演化的复杂性导致该地区油气成藏过程变得极为复杂，天然气富集规律难以掌握。

因此，在前人研究基础上，本文对研究区内钻井资料进行了详细剖析，并结合研究区 4 口新单井 YL10-6-A、YL10-6-B、YL10-6-C 和 YL10-6-D 分析化验资料，综合分析研究区南北断阶带天然气成藏的差异性，以期为后续同类型盆地的勘探提供最新研究信息。

1　区域地质背景

宝岛凹陷位于琼东南盆地北部，属被动大陆边缘伸展盆地，表现为南、北双断的地堑特征[7]（图 1a）。

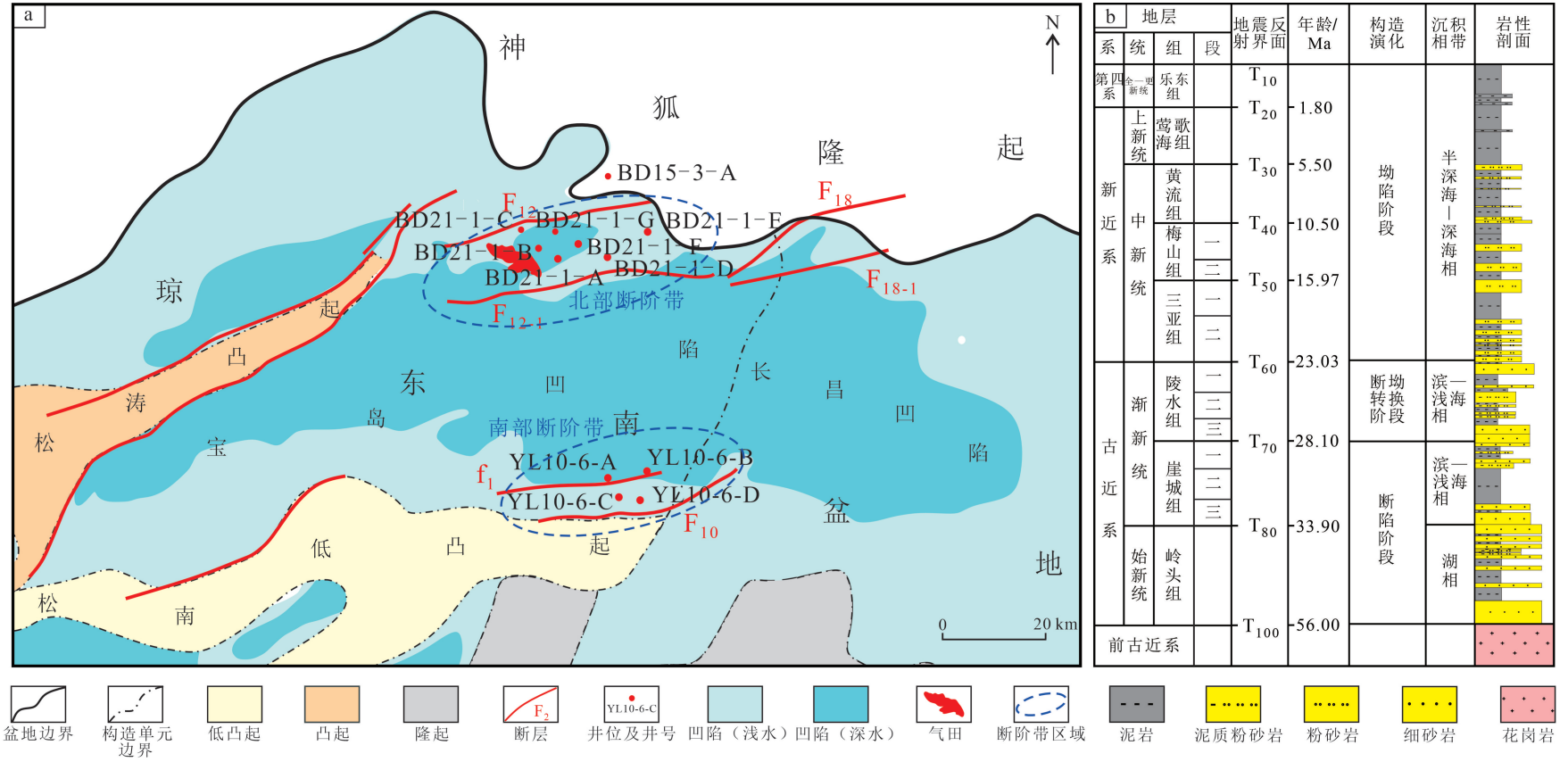


图 1　琼东南盆地构造单元(a)及宝岛凹陷地层综合柱状图(b)

Fig.1　Structural unit of Qiongdongnan basin (a) and comprehensive histogram of strata in Baodao sag (b)

宝岛凹陷内沉积的新生代地层自下而上分别为始新统岭头组(T_{100}—T_{80})，渐新统崖城组(T_{80}—T_{70})、陵水组(T_{70}—T_{60})，中新统三亚组(T_{60}—T_{50})、梅山组(T_{50}—T_{40})、黄流组(T_{40}—T_{30})，上新统莺歌海组(T_{30}—T_{20})以及全新统—更新统乐东组(T_{20}—T_{10})(图 1b)[9]。崖城组半封闭海相泥岩、煤系烃源岩层为研究区主力烃源岩，始新统岭头组湖相泥岩为潜在烃源岩[10-15]。

琼东南盆地新生代以来共经历了 3 个构造演化阶段，分别为断陷阶段(T_{100}—T_{70})、断坳转换阶段(T_{70}—T_{60})和坳陷阶段(T_{60}至今)[16-17]，具有下断上坳的特征[18-20]。断陷阶段印度板块向北推进与欧亚板块发生碰撞，太平洋板块北北西向俯冲[21-22]。该时期沉积的始新统岭头组以湖相沉积为主；渐新统崖城组以滨—浅海相沉积为主，上部岩性为深灰色厚层泥岩夹薄层黄色泥质粉砂岩及细砂岩，下部为黄色细砂岩夹薄层深灰色泥岩。断坳转换阶段印度板块持续向北推进，印度-欧亚板块发生全面碰撞。该时期沉积的渐新统陵水组为滨—浅海相沉积，发育大规模三角洲砂体，岩性为黄色厚层泥质粉砂岩夹不等厚灰色泥岩，是宝岛凹陷的重要储集层。渐新世晚期由于南海扩张运动，海盆发生南北向扩张，南海南缘块体开始从华南大陆裂离并向南漂移，盆地东部水体迅速加深。坳陷阶段以来，区域构造运动强度减弱，板块碰撞激烈程度降低，太平洋板块向欧亚板块俯冲速度降低[19-26]，盆地以半深海—深海相沉积为主。

2　南北断阶带天然气富集差异性

本文综合利用测井、地震、地球化学等资料，结合盆地模拟技术，综合分析了宝岛凹陷南北断阶带天然气地球化学、储层、输导体系类型、圈闭演化、输导体系演化及天然气充注过程的差异性。

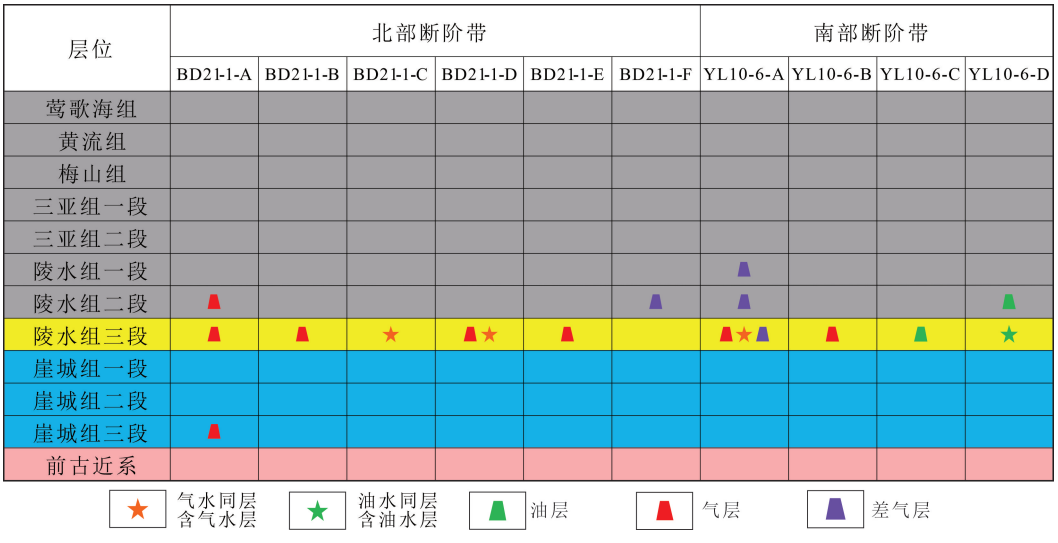
2.1　天然气分布

宝岛凹陷油气藏分布在南北断阶带处，主要为构造型圈闭油气藏，其中北部断阶带以断鼻型圈闭为主，南部断阶带则为断块型圈闭和断块＋岩性型圈闭，主要储层均为渐新统陵水组三段。根据研究区内典型完钻井油气分布分析(图 2)：北部断阶带钻井获得油气层，均为气层，未见油层，集中分布于陵水组三段。南部断阶带 YL10－6－A 和 YL10－6－B 井陵水组三段以气层为主；YL10－6－C 井在陵水组三段遇见良好油气显示，解释为油层；YL10－6－D 井分别在陵水组二段钻遇油层和陵水组三段钻遇油水同层和含油水层；南部断阶带天然气分布较分散，且多口井未见气层。整体上，北部断阶带天然气富集性优于南部断阶带。

2.2　天然气富集静态要素

2.2.1　天然气地球化学特征

本次研究从南北断阶带共搜集 87 个天然气组分样品和 13 个天然气碳同位素样品，测试分析皆在中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司中海油实验中心湛江实验中心完成，具体实验流程、仪器参数和标样情况参见文献[27]。



灰色为上覆地层及盖层；黄色为主要砂岩层；蓝色为烃源岩；粉色为基底。

图 2　宝岛凹陷南北断阶带油气分布图

Fig.2　Oil-gas distribution diagram of the south-north step-fault zone in Baodao sag

1)天然气组分特征

宝岛凹陷北部断阶带和南部断阶带古近系天然气平均密度分别为0.872 kg/m^{3}和0.762 kg/m^3,天然气相对密度由北向南呈现逐渐变小的特征。北部断阶带天然气组分中烃类气体体积分数普遍小于70%(图3a),天然气甲烷(CH_4)体积分数偏小,主要介于27.28%~72.54%之间(图3b),重烃(C_{2+})体积分数小,其值普遍低于10%(图3c),超过60%的样品干燥系数大于0.90(图3d),主要以成熟度较高的干气为主。北部断阶带CH_4体积分数小,但干燥系数大,其原因为非烃类气体体积分数大所致。南部断阶带烃类气体体积分数占绝对优势,体积分数主要集中在90.47%~99.17%之间(图3a),天然气CH_4体积分数大,主要介于72.89%~90.00%之间(图3b),C_{2+}组分体积分数明显大于北部断阶带(图3c),天然气干燥系数主要集中分布在小于0.80和0.90~0.95两个区间内,表明南部断阶带天然气类型为干气与湿气混合型(图3d)。

目的层深层天然气藏中非烃气均以CO_2和N_2为主(表1),CO_2体积分数介于0.71%~58.81%之间,集中分布于2.00%~30.00%之间。CO_2高值区出现在北部断阶带靠近控凹断层F_{12}处的部分井,如BD21-1-B井4 268.5 m(体积分数28.99%)、BD21-1-C井4 218.5 m(48.83%)。其CO_2体积分数偏大的原因为F_{12}断层长期活动且伸入基底,幔源产生的CO_2沿该断层向上运移,受该断层影响区域CO_2体积分数普遍偏大,位于研究区周缘的神狐隆起的BD15-3-A井揭示其CO_2体积分数高达

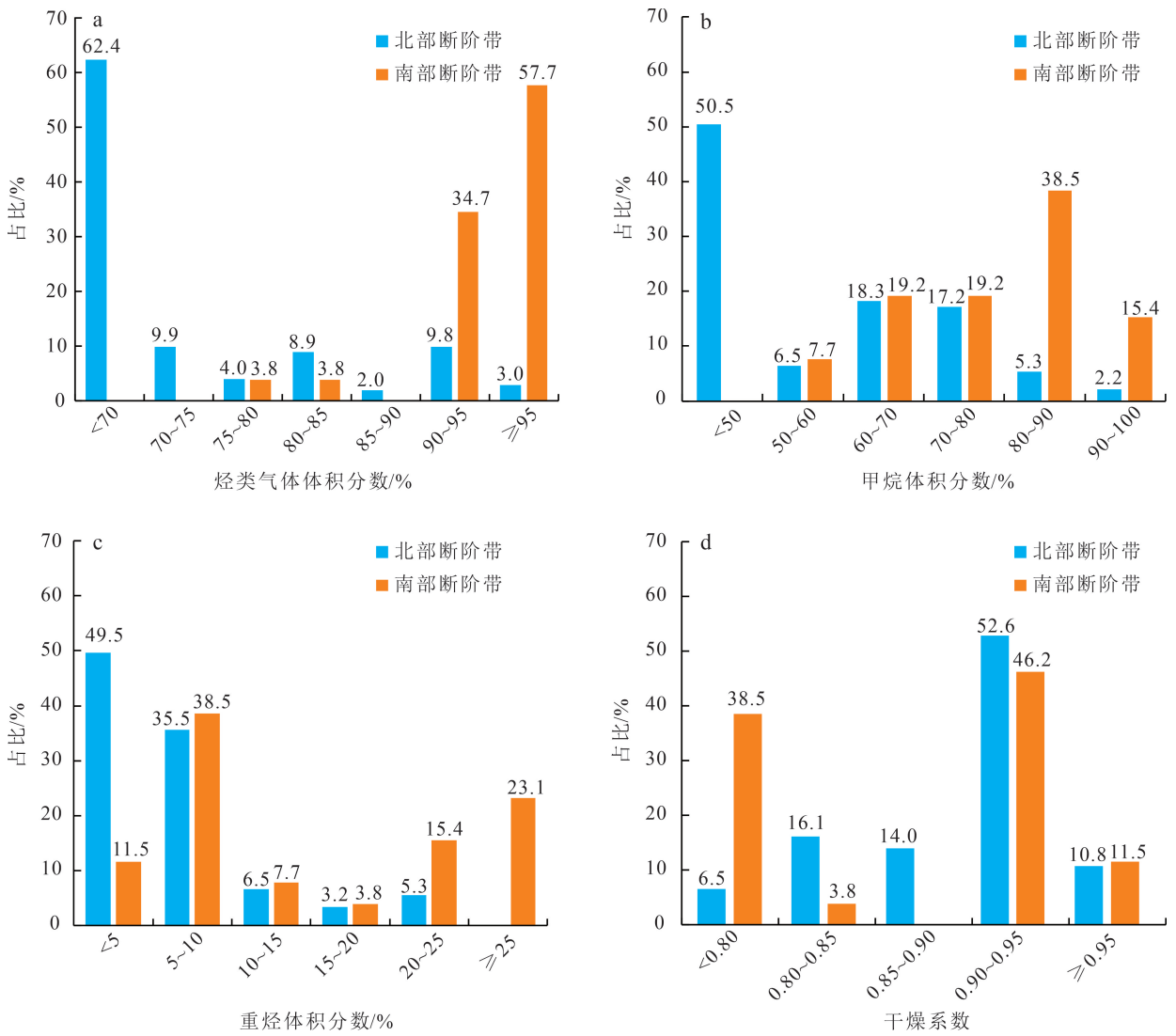


图3 宝岛凹陷南北断阶带天然气组分特征图

Fig.3 Characteristics of natural gas components in the south-north step-fault zone of Baodao sag

97.39%。南部断阶带 CO_2 体积分数介于 0.71%～7.26%之间，集中分布于 1.00%～3.00%之间。北部断阶带 N_2 体积分数介于 0.06%～20.50%之间。综上所述，北部断阶带非烃气体明显高于南部断阶带。

2)天然气碳同位素特征

研究区甲烷碳同位素($\delta^{13}C_1$)值介于－41.10‰～－37.45‰之间(表 1)，平均值为－39.97‰；北部断阶带 $\delta^{13}C_1$ 最小为 BD21－1－F 井，最大为 BD21－1－B 井；南部断阶带相较于北部断阶带天然气 $\delta^{13}C_1$ 值较大，平均值为－39.14‰。乙烷碳同位素($\delta^{13}C_2$)值介于－30.42‰～－28.18‰之间，平均值为－29.40‰，北部断阶带 BD21－1－B 井最小；北部断阶带与南部断阶带平均值分别为－29.48‰和－29.24‰。丙烷碳同位素($\delta^{13}C_3$)值变化幅度小，介于－27.62‰～－25.82‰之间，平均值为－26.92‰。丁烷碳同位素($\delta^{13}C_4$)值变化介于－26.39‰～－24.96‰之间，平均值为－25.71‰。宝岛凹陷南北断阶带深层天然气碳同位素值整体偏小，并且具有 $\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3<\delta^{13}C_4$ 的特征。南北断阶带碳同位素略有差异，南部断阶带天然气碳同位素相较于北部断阶带重，二者天然气碳同位素特征均指示有腐泥型有机质的贡献[28]。

3)天然气成因特征

通过对研究区天然气碳同位素组成分析可知，古近系深层天然气 $\delta^{13}C_1<-30.0‰$，证明研究区天然气为典型的有机成因气[29-30]。戴金星等[29]研究认为，煤成气的 $\delta^{13}C_2$ 值基本上重于－28.0‰，油型气的 $\delta^{13}C_2$ 值基本上轻于－28.5‰，当 $\delta^{13}C_2$ 介于－28.5‰～－28.0‰之间为两类气共存区，且以煤成气为主。将研究区古近系陵水组三段深层天然气 $\delta^{13}C_1$、$\delta^{13}C_2$ 及 $\delta^{13}C_3$ 值投入天然气成因模型[31](图 4)，研究区天然气碳同位素值主要落入煤成气和油型气区，表明研究区具有明显混源成藏特征。

2.2.2　储层特征

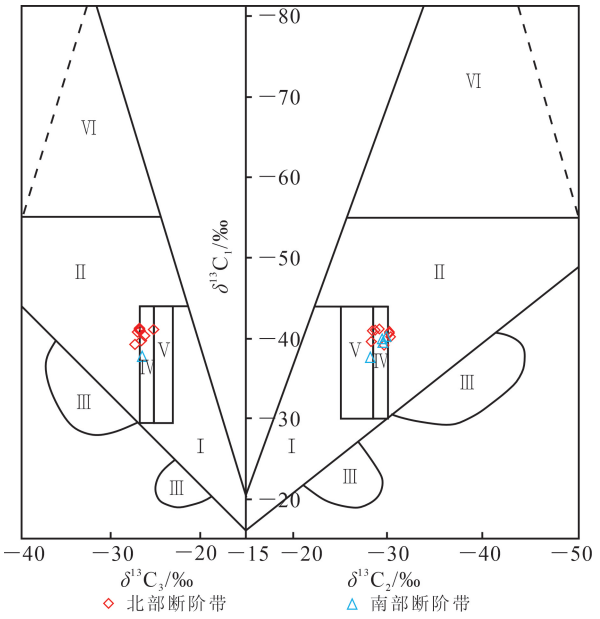
宝岛凹陷北部断阶带陵水组三段砂岩样品的储层孔隙度为 0.91%～20.04%，主要介于 10%～15%之间，平均值为 11.26%(图 5a)；渗透率介于 0.06×10^{-3}～$267.65\times10^{-3}\ \mu m^2$ 之间，集中分布于 0.1×10^{-3}～$10\times10^{-3}\ \mu m^2$ 之间，平均值为 $3.21\times10^{-3}\ \mu m^2$(图 5b)，为中孔、低渗储层。南部断阶带陵水组三段砂岩样品的储层孔隙度主要集中在 11.46%～20.78%之间，平均值为 14.85%(图 5c)；渗透率介于 0.03×10^{-3}～$547.97\times10^{-3}\ \mu m^2$ 之间，总体上小于 $1\times10^{-3}\ \mu m^2$，平均值为 $0.41\times10^{-3}\ \mu m^2$(图 5d)，为中孔、低渗—特低渗储层。

本次研究统计了 10 口单井砂地比、砂岩层均厚和砂岩层最大厚度(图 6)。结果表明：北部断阶带平均砂地比为52.28%，平均最大厚度为29.15 m，

表 1　宝岛凹陷南北断阶带古近系陵水组三段天然气组分和碳同位素数据

Table 1　Natural gas composition and carbon isotope data of the Third Member of the Paleogene Lingshui Formation in the south-north step-fault zone of Baodao sag

构造带	井名	深度/m	$\varphi(C_1)$/%	$\varphi(C_{2+})$/%	$\varphi(CO_2)$/%	$\varphi(N_2)$/%	$\delta^{13}C_1$/‰	$\delta^{13}C_2$/‰	$\delta^{13}C_3$/‰	$\delta^{13}C_4$/‰
北部断阶带	BD21－1－A	4 092.4～4 154.0	66.54	6.05	27.14	0.38	－39.53	－28.42	－27.01	－26.13
	BD21－1－B	4 268.5	60.65	9.47	28.99	2.32	－39.09	－29.76	－27.62	－26.39
		4 479.5	69.82	14.11	15.89	0.43	－40.16	－30.42	－26.67	－25.81
	BD21－1－C	4 218.5	41.38	8.54	48.83	0.06	－40.95	－28.81	－25.82	－24.96
	BD21－1－E	3 823.3	61.74	5.01	13.19	20.50	－40.59	－30.33	－27.41	
	BD21－1－F	4 358.5～4369.0	36.89	4.31	58.81		－40.79	－30.32	－27.13	－25.21
		4 372.5～4 386.0	37.14	3.49	29.37		－40.92	－28.54	－27.19	－25.73
		4 395.2～4 403.0	37.71	3.60	58.68		－41.10	－29.25	－27.19	－25.75
南部断阶带	YL10－6－A	5 066.0	72.89	24.75			－37.45	－28.18	－26.24	
		5 139.1	86.37	6.36	7.26		－39.33	－29.47		
	YL10－6－B	5 144.9	94.03	4.51	1.46		－40.05	－29.87		
		5 150.0	94.42	4.87	0.71		－39.73	－29.44		
	YL10－6－C	4 020.0	81.74	9.24	2.33	6.68				



Ⅰ.煤成气区;Ⅱ.油型气区;Ⅲ.碳同位素系列混合倒转区;Ⅳ.煤成气和油型气区;Ⅴ.煤成气、油型气和混合区;Ⅵ.生物气和亚生物气区。

图4 宝岛凹陷南北断阶带古近系深层天然气成因$\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$判别图

Fig.4 $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$ discriminant diagram of deep natural gas origin of Paleogene in the south-north step-fault zone of Baodao sag

砂岩层均厚为5.65 m;南部断阶带平均砂地比为37.53%,平均最大厚度为26.98 m,砂岩层均厚为5.50 m。北部断阶带储层孔隙度、渗透率、砂地比和储层均厚等均高于南部断阶带储层,整体上,北部断阶带储层优于南部断阶带储层。

2.2.3 输导体系类型

切穿多套地层的主控断裂、断块内次级控圈断裂以及不同沉积类型的规模砂体,组成了空间中的立体输导格架,形成了混合输导模式和Z字型复合输导模式(图7)。T字型输导类型指油气经断裂垂向运移后进入不整合面和砂体并向两侧运移。Z字型输导类型是由多条正断层组成断阶,相邻断裂之间由砂体相连接,油气沿着通源断裂以及呈阶梯状排列的砂体逐渐向凹陷边缘构造高部位运聚[32]。宝岛凹陷北部断阶带其输导模式主要为T字型+Z字型混合输导。T字型主要为天然气通过断块内部沟通烃源岩的次级断层短距离垂向输导后向南北两侧砂体中运移,其次为通过F_{12}断层垂向输导后再向北部隆起沿不整合面和砂体输导。Z字型输导主要为天然气通过F_{12-1}和F_2断层经过长距离垂向输导,再通过断块内部次级断层构成的断阶及砂体形

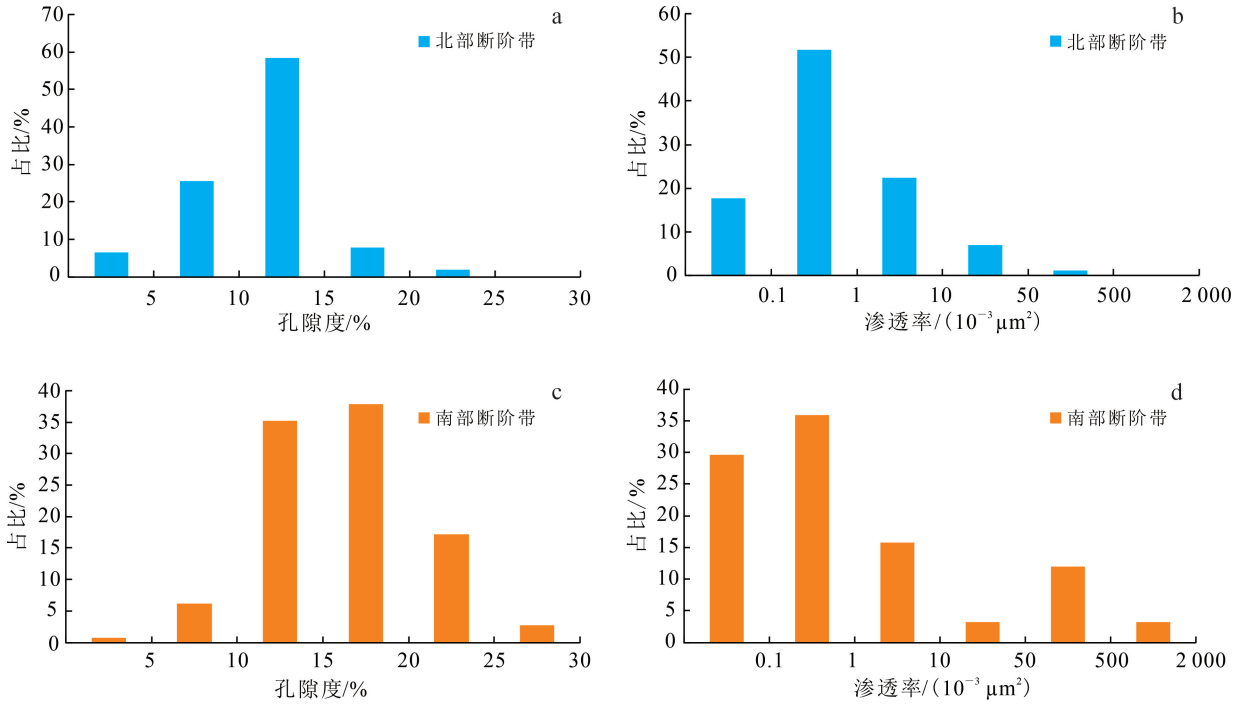
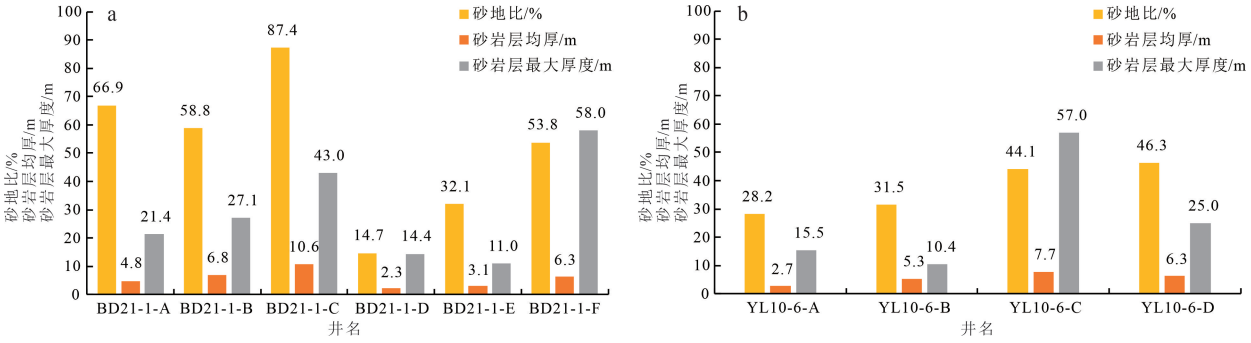


图5 宝岛凹陷南北断阶带陵水组三段孔渗分布直方图

Fig.5 Histogram of porosity and permeability distribution of the Third Member of Lingshui Formation in the south-north step-fault zone of Baodao sag



a. 北部断阶带；b. 南部断阶带。

图 6　宝岛凹陷南北断阶带储层参数柱状图

Fig.6　Reservoir parameter histogram of the south-north step-fault zone in Baodao sag

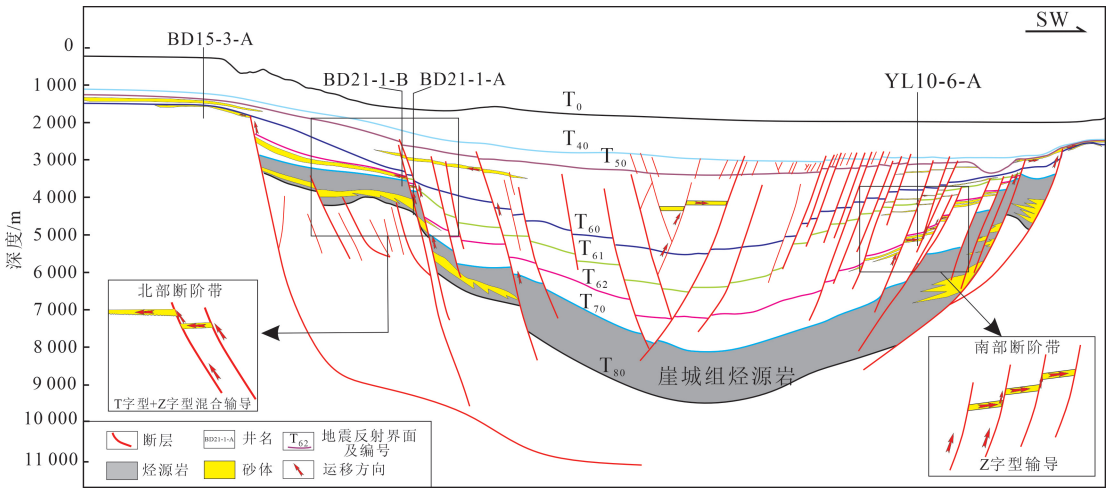


图 7　宝岛凹陷南北断阶带输导类型图

Fig.7　Transport type diagram of the south-north step-fault zone in Baodao sag

成的侧向输导。南部断阶带输导模式则为 Z 字型输导，油气主要通过南部断阶带的通源断层先垂向输导，再沿断阶带内砂体呈台阶状向高部位运移。宝岛凹陷北部隆起以 T 字型输导为主。与南部断阶带相比，北部断阶带沿主要控凹断裂垂向运移距离更远。

2.3　天然气富集动态演化

2.3.1　圈闭演化

宝岛凹陷北部断阶带 BD21－1 区块早期以控凹断层垂向输导为主，陵水组末期，圈闭内总体表现为西高东低的格局（图 8a），构造高点位于区块西部，BD21－1－A 井至 BD21－1－G 井发育北西向脊状构造高点。区块东部处于构造低部位，无明显圈闭发育。圈闭定型于三亚组末期（图 8b），该时期区块整体格局发生较大变化，西部构造高点走向从北西向转为近东西向，发育于 BD21－1－A 井至 BD21－1－D 井一线。区块东部 BD21－1－E 井区域由于东部边缘抬升形成构造岩性圈闭，后期东沙运动及新构造运动导致圈闭内部构造高点的持续变化，最终形成现今西低东高的形态，加之局部控圈断层的开启，造成了早期气藏在圈闭内部的重新分配（图 8c）。

宝岛凹陷南部断阶带 YL10－6 区块北部圈闭在陵水组末期形成（图 9a）。控凹断层短距离近源运聚，圈闭定型于三亚组末期（图 9b）。后期东沙运动及新构造运动导致内部控圈断层局部构造应力变化，由于局部走滑形成的挤压应力（图 9c），形成沿南部 F_{10-1} 断层的挤压小背斜圈闭（图 9d），油气沿垂向断裂与砂体构造脊快速运移成藏。

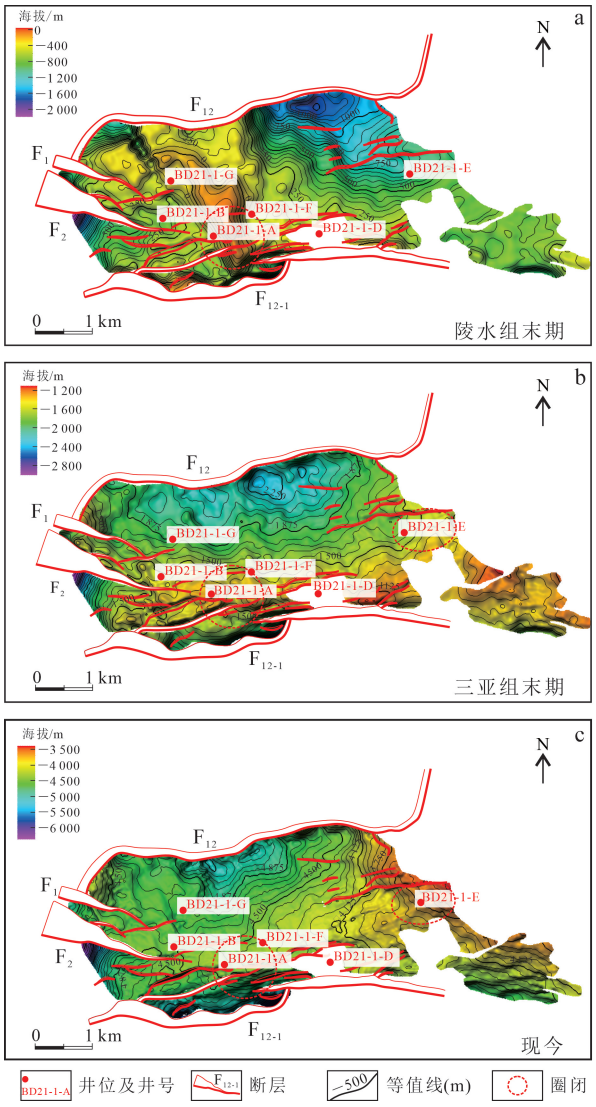


图8 宝岛凹陷北部断阶带圈闭演化图

Fig.8 Trap evolution diagram of northern step-fault zone in Baodao sag

2.3.2 输导体系演化

陵水组末期(23.03 Ma),崖城组烃源岩开始成熟,北部断阶带内部总体形成小型断阶,以Z字型输导和T字型输导为主(图10a)。早期生成的油气沿控凹断层短距离运聚到崖城组砂体内部成藏。三亚组末期(15.97 Ma),F_{12-1}断层持续活动,F_{33}、F_4断层持续变形。部分油气通过F_{12-1}进入陵水组三段砂体,早期崖城组内形成的油气藏也可能通过F_{33}、F_4等次级断层调整进入陵水组三段砂体。在断阶带以Z+T字型输导为主,近洼带以Z字型输导为主。梅山组—黄流组末期(10.50～5.50 Ma),F_{12-1}、F_{33}、F_4等断层基本停止活动,砂体内部形态调整。隆起带以T字型运移为主,断阶带内部以丘状运移为主,近洼带以Z字型运移为主。油气主要从B洼沿F_2、F_1等控圈断层垂向和陵水组砂体侧向运移至圈闭。南部断阶带早期以Z字型输导为主(图10b),东沙运动以后,在南部断阶带仍以Z字型输导为主,仅在控圈断层f_1东西段因活动强度的差异导致垂向输导能力的不同。天然气总体从深洼区沿控圈断层垂向+扇三角洲砂体侧向往高部位运聚。相较于北部断阶带,南部断阶带输导模式较为单一,且沿主控断层垂向运移距离短。

2.3.3 天然气充注过程

据前人研究表明,BD21-1气田发育有黄、绿、蓝白色包裹体,具有多期充注的特点[6,33]。北部断阶带BD21-1-A井陵水组三段储层识别出3类包裹体:均一温度为80～100 ℃的油包裹体、均一温度为130～150 ℃的烃类气盐水包裹体(主峰)、均一温度为140～160 ℃的CO_2伴生盐水包裹体(图11a)。崖城组储层识别出2类包裹体:80～90 ℃的油包裹体,以及均一温度集中在150～160 ℃的烃类气盐水包裹体(主峰)(图11b)。结合BD21-1-A单井埋藏史图(图11c)分析,认为陵水组三段储层经历了3期油气充注:中新世(16.0～8.0 Ma)油充注、中新世(5.0 Ma)高成熟烃类气充注,以及现今高成熟烃类伴幔源CO_2充注。崖城组储层经历了2期油气充注:中新世(20.0～19.0 Ma)油充注,以及中新世(10.0 Ma)至今的高成熟烃类气充注。

南部断阶带YL10-6气田YL10-6-D井陵水组三段储层内识别出石英颗粒内发蓝色荧光油包裹体、CH_4气包裹体和含CO_2盐水包裹体,未检测到发蓝色荧光油包裹体的同期盐水包裹体。根据本次实验所测得流体包裹体均一温度数据,YL10-6-D井陵水组三段流体包裹体均一温度分布直方图(图12a)分析表明,与CO_2包裹体同期盐水包裹体温度介于97.9～193.1 ℃之间,其主峰均一温度介于132.3～139.3 ℃之间。CH_4气包裹体伴生的同期盐水包裹体均一温度分布范围广,其均一温度介于92.3～195.4 ℃之间,其主峰均一温度介于140.2～149.6 ℃之间。YL10-6-D井陵水组三段至少存在2期充注,为一期天然气充注和一期CO_2充注,其主峰均一温度均明显高于地质历史时期地层温度,而CO_2为酸性气体是热液中的常见成分[34],推测为热液活动所致。结合YL10-6-D井埋藏史图(图

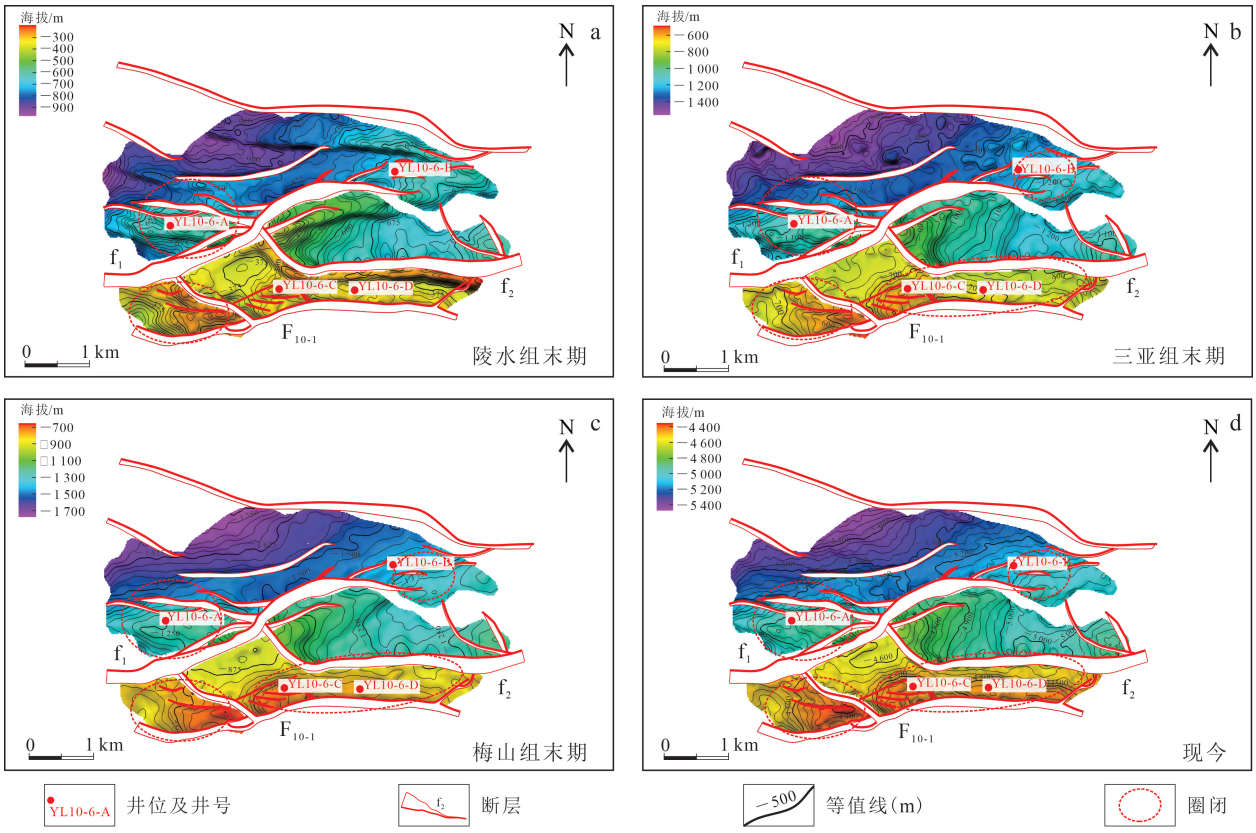


图 9　宝岛凹陷南部断阶带圈闭演化图

Fig.9　Trap evolution map of the southern step-fault zone in Baodao sag

12b)分析，YL10－6 区块存在 3 期油气充注：上新世(5.0 Ma)油充注，以及现今天然气充注与 CO_2 充注。

3　差异富集机理

3.1　生烃潜力的差异

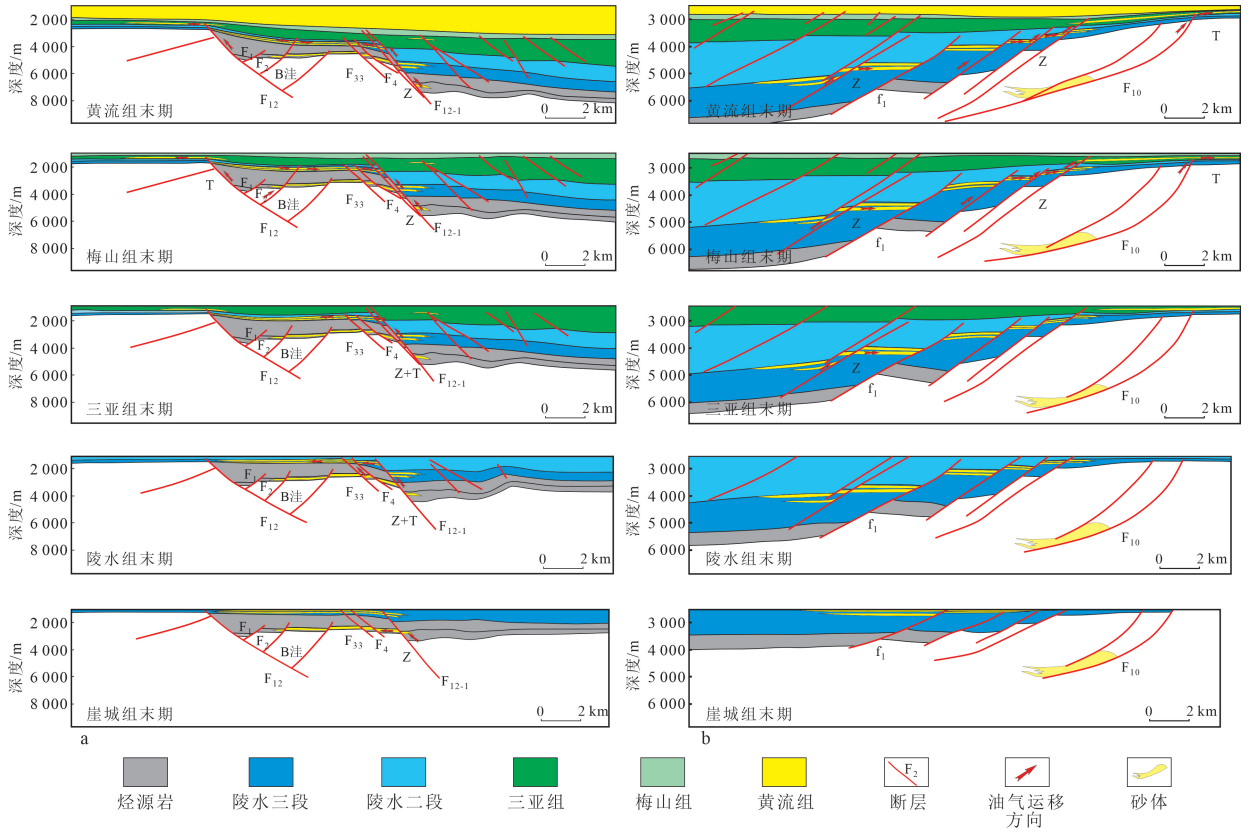
宝岛凹陷北部断阶带 BD21－1 区块周围环绕 A 洼、B 洼和 C 洼 3 个生烃洼陷(图 13)，具有较高的有机质丰度及较厚的烃源岩，为油气富集的关键。根据收集的中海石油(中国)有限公司海南分公司测得烃源岩热解数据[33]分析可知，渐新统崖城组发育的黑灰色泥岩的 w(TOC)值为 0.66%～1.11%，平均值为 0.82%，$w(S_1+S_2)$为 0.61～4.46 mg/g，平均值为 3.04 mg/g，为中等偏好的烃源岩。该段烃源岩厚度大，尤其是在 BD21－1 区块南部 C 洼内，其烃源岩厚度主要为 600～800 m，最厚可达 900 m，为 BD21－1 气田的形成提供了优质的物质基础。与北部断阶带相比，南部断阶带 YL10－6 区块仅在北部有一个生烃洼陷 D 洼，其烃源岩 w(TOC)值为 0.44%～1.13%，平均值为 0.71%，$w(S_1+S_2)$为 0.75～3.59 mg/g，平均值为 2.08 mg/g，为中等偏好的烃源岩。崖城组烃源岩厚度主要为 500～700 m。总体上，北部断阶带 BD21－1 区块具有更多的生烃洼陷，更有利于油气富集成藏。

3.2　初次运移条件差异

初次运移的有效性和发育与烃源岩接触面积较大的规模性砂体有关[35]。实钻结果及地震资料表明，YL10－6 区块与 BD21－1 区块具有相似的特征，却没有发现大规模油气藏。据图 14a 分析可知，该时期北部断阶带发育大规模扇三角洲，且伸入生烃主洼内部。从实际岩性(图 14b)分析，BD21－1－A 井崖城组三段沉积时沉积了厚约 60 m 的长石砂岩以及 150 m 厚的细砂岩与泥岩互层，单层厚度大都在 5 m 以上，最大可达 49 m。相较于宝岛凹陷北部断阶带，南部断阶带崖城组三段沉积时期扇三角洲砂体沉积规模小，未能伸入生烃洼陷内。因此，北部断阶带初次运移条件优于南部断阶带。

3.3　二次运移保存条件差异

北部断阶带BD21-1区块断层活动具有控凹



a. 北部断阶带；b. 南部断阶带。

图 10 宝岛凹陷南北断阶带输导体系演化图

Fig.10 Evolution diagram of transport system in the south-north step-fault zone of Baodao sag

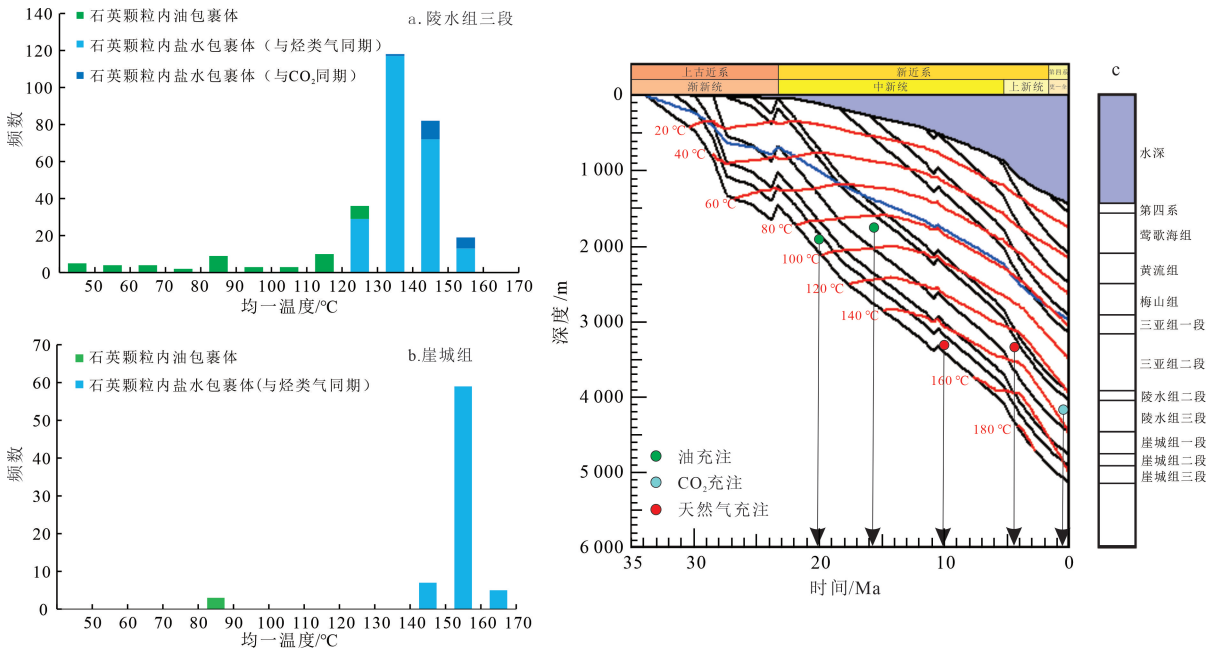


图 11 北部断阶带流体包裹体均一温度分布直方图(a、b)及 BD21－1－A 井埋藏史(c)

Fig.11 Histogram of homogenization temperature distribution of fluid inclusions in the northern fault step zone (a, b) and burial history of Well BD21－1－A (c)

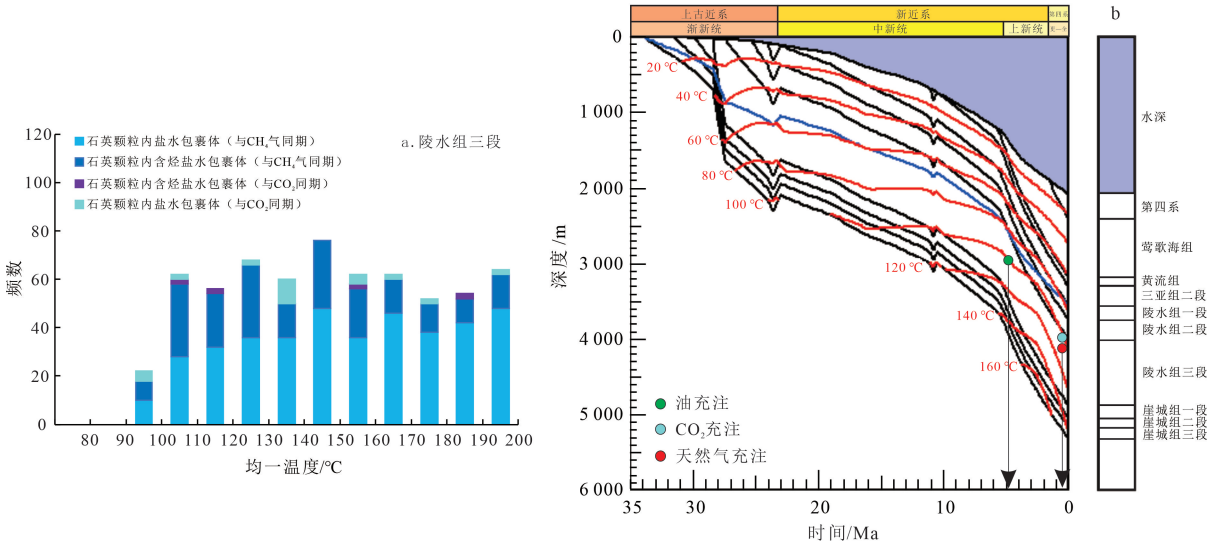


图 12　南部断阶带流体包裹体均一温度分布直方图(a)及 YL10－6－D 井埋藏史(b)

Fig.12　Histogram of homogenization temperature distribution of fluid inclusions in the southern fault step zone (a) and the burial history of Well YL10－6－D (b)

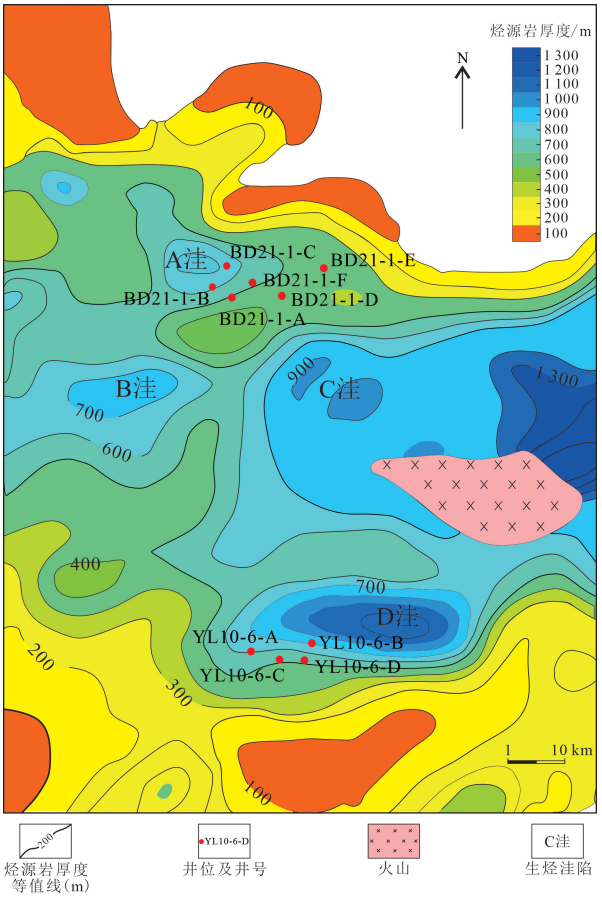
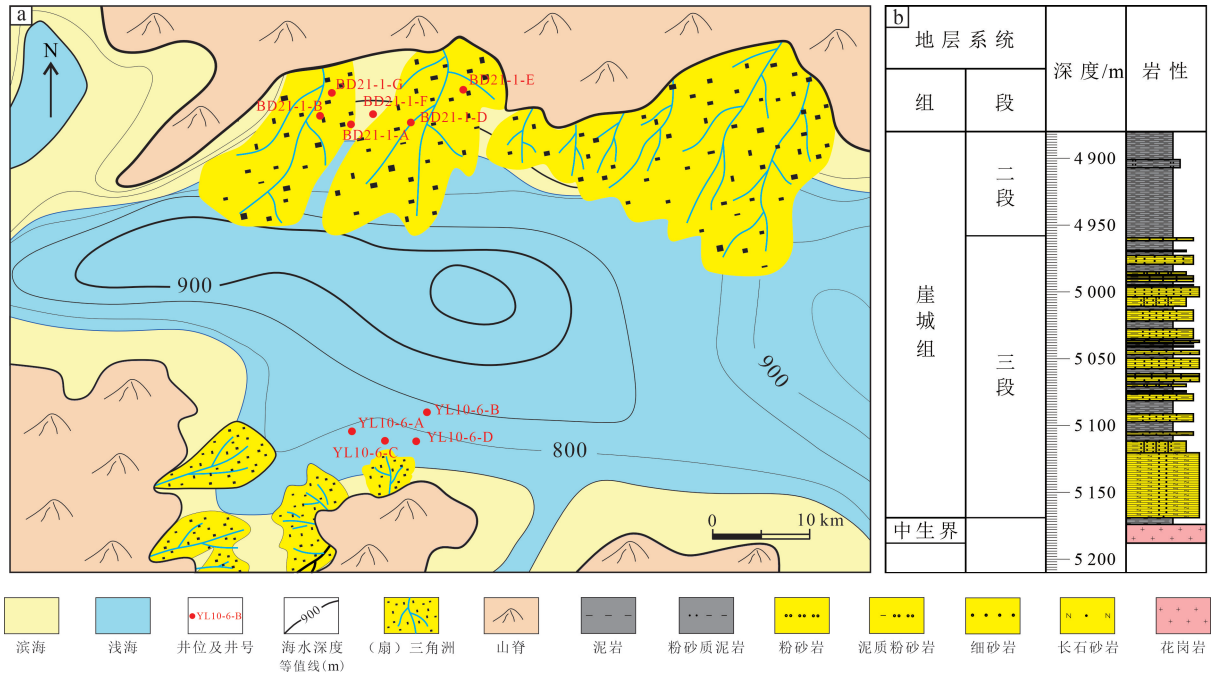


图 13　宝岛凹陷南北断阶带烃源岩厚度图

Fig.13　Thickness map of source rocks in the south-north step-fault zone of Baodao sag

大断层停止活动时间晚，控圈断层停止活动时间早的特点，控凹断层部分区段在 T_{40}（10.50 Ma）后仍具有活动性，而大部分次级断层于 T_{60}（23.03 Ma）前停止活动（图 15a）。控凹断层晚期的活动为烃源岩中的油气向上输导提供了主要通道，天然气从崖城组烃源岩经过垂向输导，再经砂体侧向输导进入由停止活动的次级断层构成的相对稳定的圈闭中。南部断阶带断层则普遍具有靠近凹陷中心断层停止活动时间晚，远离凹陷中心停止活动时间早的特点。以 YL10－6－A 井区为例，控圈断层 f_1 西侧于 T_{50} 前停止活动，其输导条件差，保存条件较好。该井控制的圈闭成藏得益于北部的断裂活动停止晚，且沟通烃源岩，通过垂向输导结合短距离侧向输导进入圈闭成藏。而 YL10－6－C 井圈闭（图 15b），主干断层于 T_{50}（15.97 Ma）前停止活动，其输导较差，保存能力较好。油气主要通过北部断阶带垂向输导，再经由砂体侧向输导进入圈闭中成藏。与北部断阶带相比，南部断阶带缺乏大规模的稳定区块，输导和保存能力具有分带性。南部断阶带北侧断层的输导能力强而保存能力弱，油气成藏主要通过垂向输导结合短距离侧向输导进入相对保存较好的圈闭中；靠近隆起区断层输导能力弱而保存能力增强，油气成藏主要通过北部断阶垂向输导再经过较长距离的侧向输导进入到圈闭中。



据文献[36]修编。

图14 宝岛凹陷南北断阶带崖城组三段沉积相平面图(a)及BD21-1-A井岩性柱状图(b)

Fig.14 Sedimentary facies plan of the Third Member of Yacheng Formation in the south-north step-fault zone of Baodao sag (a) and lithology histogram of Well BD21-1-A (b)

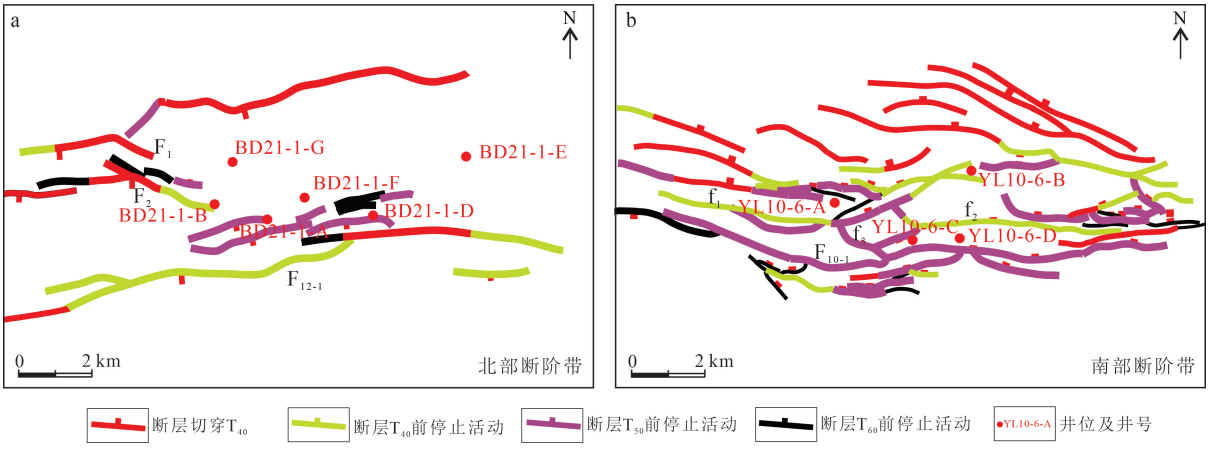


图15 宝岛凹陷南北断阶带断裂相对活动时期图

Fig.15 Relative activity period of faults in the south-north step-fault zone of Baodao sag

4 结论

1)北部断阶带 CH_4 体积分数偏低,非烃类气体体积分数高,干燥系数普遍大于0.90,以干气为主;南部断阶带天然气组分中烃类气体体积分数高,且具有干气与湿气混合特征。南北断阶带陵水组三段为中孔、低渗-特低渗储层,输导模式主要为T字型+Z字型混合输导。

2)北部断阶带自陵水组沉积末期持续变形,形成西高东低的形态,三亚组末期控凹断层持续活动,控圈断层持续变形,油气通过控凹断层进陵水组三段储层,早期形成的油气藏通过次级断层调整进入储层中,再通过控圈断层垂向和陵水组砂体侧向运移至圈闭。南部断阶带圈闭于陵水组末期形成,定型于三亚组末期,后期由于局部走滑形成的挤压应力,形成小背斜圈闭。南部断阶带油气充注时间晚

于北部断阶带。

3）YL10－6 区块相比 BD21－1 区块周围生烃洼陷少，且油气初次运移条件较差。北部断阶带 BD21－1 控凹断层停止活动时间晚，控圈断层停止活动时间早的特点利于油气成藏。南部断阶带凹陷中心断层停止活动时间晚，缺乏大规模的稳定区块。

参考文献（References）：

[1] 钟佳，王岩泉.琼东南盆地松南低凸起花岗岩年代学、地球化学特征及构造环境[J].吉林大学学报（地球科学版），2022，52(1)：134－148.
Zhong Jia, Wang Yanquan. Geochronology, Geochemistry Characteristics and Tectonic Setting of the Songnan Low Uplift Granite of Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1): 134－148.

[2] 张迎朝，徐新德，甘军，等.琼东南盆地深水大气田地质特征、成藏模式及勘探方向研究[J].地质学报，2017，91(7)：1620－1633.
Zhang Yingzhao, Xu Xinde, Gan Jun, et al. Study on the Geological Characteristics, Accumulation Model and Exploration Direction of the Giant Deepwater Gas Field in the Qiongdongnan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(7): 1620－1633.

[3] 施和生，杨计海，张迎朝，等.琼东南盆地地质认识创新与深水领域天然气勘探重大突破[J].中国石油勘探，2019，24(6)：691－698.
Shi Hesheng, Yang Jihai, Zhang Yingzhao, et al. Geological Understanding Innovation and Major Breakthrough to Natural Gas Exploration in Deep Water in Qiongdongnan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 691－698.

[4] 王振峰，孙志鹏，张迎朝，等.南海北部琼东南盆地深水中央峡谷大气田分布与成藏规律[J].中国石油勘探，2016，21(4)：54－64.
Wang Zhenfeng, Sun Zhipeng, Zhang Yingzhao, et al. Distribution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of the Giant Deepwater Central Canyon Gas Field in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(4): 54－64.

[5] 邓勇，裴健翔，胡林，等.南海西部海域宝岛 21－1 气田的发现与成藏模式[J].中国海上油气，2022，34(5)：13－22.
Deng Yong, Pei Jianxiang, Hu Lin, et al. Discovery and Hydrocarbon Accumulation Models of Baodao 21－1 Gas Field in the Western South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 13－22.

[6] 徐长贵，邓勇，吴克强，等.南海北部强活动型被动陆缘盆地宝岛 21－1 大气田的发现及地质意义[J].石油学报，2023，44(5)：713－729.
Xu Changgui, Deng Yong, Wu Keqiang, et al. Discovery and Geological Significance of the Large Gas Field Baodao 21－1 in a Passive Picontinental Basin with Strong Activity in the Northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(5): 713－729.

[7] 徐长贵，尤丽.琼东南盆地松南—宝岛凹陷北坡转换带特征及其对大中型气田的控制[J].石油勘探与开发，2022，49(6)：1061－1072.
Xu Changgui, You Li. North Slope Transition Zone of Songnan-Baodao Sag in Qiongdongnan Basin and Its Control on Medium and Large Gas Fields, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1061－1072.

[8] 甘军，张亚震，林璐，等.琼东南盆地宝岛凹陷天然气差异聚集主控因素与成藏模式[J].地球科学，2023，48(2)：439－450.
Gan Jun, Zhang Yazhen, Lin Lu, et al. Main Controlling Factors of Natural Gas Differential Accumulation Model, in Baodao Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(2): 439－450.

[9] 郭书生，廖高龙，梁豪，等.琼东南盆地 BD21 井深水区天然气勘探重大突破及意义[J].中国石油勘探，2021，26(5)：49－59.
Guo Shusheng, Liao Gaolong, Liang Hao, et al. Major Breakthrough and Significance of Deep-Water Gas Exploration in Well BD21 in Qiongdongnan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(5): 49－59.

[10] 雷超，任建业，李绪深，等.琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J].石油勘探与开发，2011，38(5)：560－569.
Lei Chao, Ren Jianye, Li Xushen, et al. Structural Characteristics and Petroleum Exploration Potential in the Deep-Water Area of the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 560－569.

[11] 戴娜，钟宁宁，邓运华，等.中生代—新生代大陆边缘盆地海相烃源岩成因类型[J].石油学报，2015，36(8)：940－953.
Dai Na, Zhong Ningning, Deng Yunhua, et al. Genetic Types of Marine Source Rock in Meso-Cenozoic Continental Margin Basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 940－953.

[12] 黄保家,李绪深,王振峰,等.琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力[J].中国海上油气,2012,24(4):1-7.
Huang Baojia, Li Xushen, Wang Zhenfeng, et al. Source Rock Geochemistry and Gas Potential in the Deep Water Area, Qiongdongnan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(4): 1-7.

[13] 张功成,屈红军,刘世翔,等.边缘海构造旋回控制南海深水区油气成藏[J].石油学报,2015,36(5):533-545.
Zhang Gongcheng, Qu Hongjun, Liu Shixiang, et al. Tectonic Cycle of Marginal Sea Controlled the Hydrocarbon Accumulation in Deep-Water Areas of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(5): 533-545.

[14] 吴飘,侯读杰,甘军,等.琼东南盆地深水东区渐新统烃源岩发育模式[J].沉积学报,2019,37(3):633-647.
Wu Piao, Hou Dujie, Gan Jun, et al. Developmental Model of Oligocene Source Rock in the Eastern Deep-Water Area of Qiongdongnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3): 633-647.

[15] 孙瑞,韩银学,曾清波,等.琼东南盆地深水区东段崖城组沉积特征及对海相烃源岩的控制[J].石油学报,2019,40(增刊2):57-66.
Sun Rui, Han Yinxue, Zeng Qingbo, et al. Sedimentary Characteristics of Yacheng Formation in the Eastern Deep Water Area in Qiongdongnan Basin and Their Control on Marine Source Rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(Sup.2): 57-66.

[16] 韩光明,李绪深,王立锋,等.琼东南盆地宝岛凹陷北坡断裂体系新认识及与天然气成藏关系[J].天然气地球科学,2013,24(2):352-355.
Han Guangming, Li Xushen, Wang Lifeng, et al. New Explanation of Fault System in Baodao Sag's Northern Slope of Qiongdongnan Basin and Its Affect for Natural Gas Accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 352-355.

[17] 贺婉慧,汪伟,尹宏伟,等.琼东南盆地深水区构造演化及东西段构造差异对比[J].高校地质学报,2022,28(5):644-654.
He Wanhui, Wang Wei, Yin Hongwei, et al. Structural Evolution in Deep Water Area of Qiongdongnan Basin and Comparison of Structural Differences Between Eastern and Western Segments[J]. Geological Journal of China Universities, 2022, 28(5): 644-654.

[18] 杨金海,杨希冰,周杰,等.琼东南盆地深水区松南—宝岛凹陷反转构造带发育特征及油气地质意义[J].海洋学报,2019,41(5):97-106.
Yang Jinhai, Yang Xibing, Zhou Jie, et al. Characteristics of Inversion Structure Belts and Their Hydrocarbon Geological in the Songnan-Baodao Sag in Deep Water Area of the Qiongdongnan Basin[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5): 97-106.

[19] 雷超,任建业,裴健翔,等.琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程[J].地球科学:中国地质大学学报,2011,36(1):151-162.
Lei Chao, Ren Jianye, Pei Jianxiang, et al. Tectonic Pattern and Curtain Evolution of the Deep-Water Zone in the Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1): 151-162.

[20] Taylor B, Hayes D E. The Tectonic Evolution of the South China Basin[M]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Washington: American Geophysical Union, 1980: 89-104.

[21] 姚伯初,万玲,吴能友.大南海地区新生代板块构造活动[J].中国地质,2004,31(2):113-122.
Yao Bochu, Wan Ling, Wu Nengyou. Cenozoic Plate Tectonic Activity in the Great South China Sea[J]. Geology in China, 2004, 31(2): 113-122.

[22] 林长松,初凤友,高金耀,等.论南海新生代的构造运动[J].海洋学报,2007,29(4):87-96.
Lin Changsong, Chu Fengyou, Gao Jinyao, et al. On the Tectonic Movement of the Cenozoic in the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2007, 29(4): 87-96.

[23] 庞雄,任建业,郑金云,等.陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征:以南海北部陆缘深水区白云凹陷为例[J].石油勘探与开发,2018,45(1):27-39.
Pang Xiong, Ren Jianye, Zheng Jinyun, et al. Petroleum Geology Controlled by Extensive Detachment Thinning of Continental Margin Crust: A Case Study of Baiyun Sag in the Deep-Water Area of Nnorthern South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 27-39.

[24] 刘晓锋,孙志鹏,刘新宇,等.南海北部深水区LS33a钻井微体古生物年代地层格架[J].沉积学报,2018,36(5):890-902.
Liu Xiaofeng, Sun Zhipeng, Liu Xinyu, et al. Chronostratigraphic Framework Based on Micro-Paleontological Data from Drilling LS33a in Deep Water Area of Northern South China Sea[J]. Acta

Sedimentologica Sinica，2018，36(5)：890－902.

[25] 任建业，庞雄，于鹏，等.南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析[J].地球物理学报，2018，61(12)：4901－4920.
Ren Jianye，Pang Xiong，Yu Peng，et al. Characteristics and Formation Mechanism of Deepwater and Ultra-Deepwater Basins in the Northern Continental Margin of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics，2018，61(12)：4901－4920.

[26] 任建业，罗盼，高圆圆，等.南海西南次海盆地壳岩石圈伸展破裂过程的构造、沉积和岩浆作用记录[J].地球科学，2022，47(7)：2287－2302.
Ren Jianye，Luo Pan，Gao Yuanyuan，et al. Structural，Sedimentary and Magmatic Records During Continental Breakup at Southwest Sub-Basin of South China Sea[J]. Earth Science，2022，47(7)：2287－2302.

[27] 周刚，胡德胜，游君君，等.北部湾盆地涠西南凹陷天然气地球化学特征及来源探讨[J].天然气地球科学，2024，35(11)：1923－1934.
Zhou Gang，Hu Desheng，You Junjun，et al. Geochemical Characteristics and Sources of Natural Gas in the Weixinan Sag，the Beibuwan Basin[J]. Natural Gas Geoscience，2024，35(11)：1923－1934.

[28] 戴金星. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义[J]. 天然气工业，2011，31(12)：1－6.
Dai Jinxing. Significance of the Study on Carbon Isotopes of Alkane Gases[J]. Natural Gas Industry，2011，31(12)：1－6.

[29] 戴金星，夏新宇，秦胜飞，等.中国有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因[J].石油与天然气地质，2003，24(1)：1－6.
Dai Jinxing，Xia Xinyu，Qin Shengfei，et al. Causation of Partly Reversed Orders of $\delta^{13}C$ in Biogenic Alkane Gas in China[J]. Oil & Gas Geology，2003，24(1)：1－6.

[30] 戴金星，邹才能，张水昌，等.无机成因和有机成因烷烃气的鉴别[J].中国科学：地球科学，2008，38(11)：1329－1341.
Dai Jinxing，Zou Caineng，Zhang Shuichang，et al. Identification of Organic Alkane Gases and Inorganic Alkane Gases[J]. Scientia Sinica Terrae，2008，38(11)：1329－1341.

[31] 戴金星，倪云燕，秦胜飞，等.四川盆地超深层天然气地球化学特征[J].石油勘探与开发，2018，45(4)：588－597.
Dai Jinxing，Ni Yunyan，Qin Shengfei，et al. Geochemical Characteristics of Ultra-Deep Natural Gas in the Sichuan Basin，SW China[J]. Petroleum Exploration and Development，2018，45(4)：588－597.

[32] 杨德彬，朱光有，苏劲，等.中国含油气盆地输导体系类型及其有效性评价[J].西南石油大学学报(自然科学版)，2011，33(3)：8－17，189－190.
Yang Debin，Zhu Guangyou，Su Jin，et al. Types and Effectiveness Evaluation of the Transporting Systems in China's Petroliferous Basins[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)，2011，33(3)：8－17，189－190.

[33] 尤丽，权永彬，庹雷，等.琼东南盆地深水区宝岛 21－1 气田天然气来源及输导体系[J].石油与天然气地质，2023，44(5)：1270－1278.
You Li，Quan Yongbin，Tuo Lei，et al. Natural Gas Sources and Migration Pathways of the Baodao 21－1 Gas Field in the Deep-Water Area of the Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology，2023，44(5)：1270－1278.

[34] 王玉萍，董春梅，陈洪德，等.鄂尔多斯盆地中西部奥陶纪热液活动的证据及其对储层发育的影响[J].海相油气地质，2014，19(2)：23－31.
Wang Yuping，Dong Chunmei，Chen Hongde，et al. Evidence of Ordovician Hydrothermal Activity in the West-Central Ordos Basin and Its Influence on Rreservoir Development[J]. Marine Origin Petroleum Geology，2014，19(2)：23－31.

[35] 刘道理，杜忠明，许新明，等.古近系油气初次运移有效性的主控因素：以珠江口盆地西江 A 和西江 B 构造圈闭油气勘探效果对比为例[J].海洋地质前沿，2017，33(10)：40－48.
Liu Daoli，Du Zhongming，Xu Xinming，et al. The Main Controlling Factors of the Effectiveness of Paleoproterozoic Oil and Gas Primary Transport：The Comparison of the Oil and Gas Exploration Effectiveness of Xijiang A and Xijiang B Tectonic Enclosures in the Pearl River Estuary Basin as an Example[J]. Marine Geology Frontiers，2017，33(10)：40－48.

[36] 张功成，纪沫，陈莹，等.琼东南盆地"气聚集带"的成藏特征与勘探潜力[J].石油学报，2024，45(1)：226－240.
Zhang Gongcheng，Ji Mo，Chen Ying，et al. Accumulation Characteristics and Exploration Potentials of Gas Accumulation Belt in Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica，2024，45(1)：226－240.