



中国海域沉积盆地咸水层二氧化碳地质封存潜力

陈建文, 王嘹亮, 王平康, 袁勇, 曹珂, 付玉通, 陆东宇, 杨长清, 李慧君, 王建强, 张银国, 龚建明, 孙晶, 赵化淋

Carbon dioxide geological storage potential in saline aquifer of sedimentary basins in China Sea

CHEN Jianwen, WANG Liaoliang, WANG Pingkang, YUAN Yong, CAO Ke, FU Yutong, LU Dongyu, YANG Changqing, LI Huijun, WANG Jianqiang, ZHANG Yinguo, GONG Jianming, SUN Jing, and ZHAO Hualin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024042101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口盆地二氧化碳地质封存条件及源汇匹配性分析

Assessment on geological condition for carbon dioxide sequestration and source-sink matching in the Pearl River Mouth Basin
海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 55-65

东海陆架盆地咸水层CO₂封存地质条件适宜性评价

Evaluation on of geological suitability for CO₂ storage in salty aquifers in the East China Sea Shelf Basin
海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 129-139

陇中盆地中新世土壤呼吸历史及其对东亚夏季风的响应

Miocene soil respiration history in Longzhong Basin and its response to East Asian summer monsoon
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 185-192

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

Regional evaluation of oil and gas resources in offshore China and exploration of marine Paleo-Mesozoic oil and gas in the Yellow Sea and East China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 1-29

江苏盐城滨海地区浅层地下咸水的水盐来源及咸化成因

Water and salt sources and salinization of shallow saline groundwater in the coastal area of Yancheng, Jiangsu
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 48-59

大洋硅藻席沉积与冰期旋回中的碳-氮循环

Massive deposition of oceanic diatom mat and its impact on the carbon-nitrogen cycle over glacial-interglacial periods
海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 96-108



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈建文, 王嘹亮, 王平康, 等. 中国海域沉积盆地咸水层二氧化碳地质封存潜力[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 98-114.
CHEN Jianwen, WANG Liaoliang, WANG Pingkang, et al. Carbon dioxide geological storage potential in saline aquifer of sedimentary basins in China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 98-114.

中国海域沉积盆地咸水层二氧化碳地质封存潜力

陈建文^{1,2,3,4}, 王嘹亮⁵, 王平康⁶, 袁勇^{1,2,3,4}, 曹珂^{1,2,3,4}, 付玉通⁵, 陆东宇⁵, 杨长清^{1,2,3,4},
李慧君¹, 王建强^{1,2,3,4}, 张银国^{1,2,3,4}, 龚建明¹, 孙晶^{1,2,3,4}, 赵化淋^{1,2,3,4}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
2. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
3. 青岛市海洋地质碳封存工程研究中心, 青岛 266237
4. 青岛市海洋地质碳封存重点实验室, 青岛 266237
5. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 511458
6. 中国地质调查局基础调查部, 北京 100037

摘要: 二氧化碳地质封存是二氧化碳捕集利用封存 (CCUS) 技术的关键环节, 海域二氧化碳地质封存是将工业碳排放源或油气开发过程中捕集的二氧化碳, 以超临界态注入到海底咸水层、废弃或开发中油气藏等地质体中, 实现与大气长期隔离的过程。因远离人类居住地且有海水覆盖、具有“安全性高、环境风险小”特点, 海域二氧化碳地质封存受到欧美等国家和地区的高度重视。本文在分析我国海域沉积盆地基本地质条件基础上, 采用创新的模型体积法评价了我国海域沉积盆地咸水层二氧化碳地质封存潜力。研究表明, 我国海域沉积盆地新生界厚度大, 地壳稳定性较好, 具有中低地温场特征, 发育多套储碳-封盖组合, 构造地层圈闭多, 二氧化碳地质封存条件优越、咸水层封存潜力巨大。这将为我国海洋地质碳封存区带评价和目标区优选提供依据, 对我国沿海省市碳达峰碳中和路径规划和离岸碳封存示范工程预研究具有重要意义。

关键词: 二氧化碳地质封存; 中国海域沉积盆地; 模型体积法; 咸水层; 封存潜力

中图分类号: P744.4 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024042101

Carbon dioxide geological storage potential in saline aquifer of sedimentary basins in China Sea

CHEN Jianwen^{1,2,3,4}, WANG Liaoliang⁵, WANG Pingkang⁶, YUAN Yong^{1,2,3,4}, CAO Ke^{1,2,3,4}, FU Yutong⁵, LU Dongyu⁵,
YANG Changqing^{1,2,3,4}, LI Huijun¹, WANG Jianqiang^{1,2,3,4}, ZHANG Yinguo^{1,2,3,4}, GONG Jianming¹, SUN Jing^{1,2,3,4}, ZHAO Hualin^{1,2,3,4}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China
3. Qingdao Engineering Research Center of Offshore CO₂ Geological Storage, Qingdao 266237, China
4. Qingdao Key Laboratory of Offshore CO₂ Geological Storage, Qingdao 266237, China
5. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 511458, China
6. Basic Investigation Department of China Geological Survey, Beijing 100037, China

Abstract: Geological storage of carbon dioxide is the key link of carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) technology. Marine carbon dioxide geological storage is the process of injecting supercritical carbon dioxide captured by industrial carbon emission sources or oil and gas development into geological bodies, such as seabed salt water layers, abandoned or developing oil and gas reservoirs, to achieve long-term isolation from the atmosphere. Because it is far from human habitation and covered by sea water, it has the characteristics of "high safety and low environmental risk", the geological storage of Marine carbon dioxide has been highly valued by European and American countries and regions. Based on the analysis of the basic geological conditions of sedimentary basins in China Sea area, an innovative model volume method is used to evaluate the geological storage potential of carbon dioxide in brackish layers of sedimentary basins in China Sea area. The analysis

资助项目: 崂山实验室科技创新项目 (LSKJ202203404, LSKJ202203401); 国家自然科学基金 (42076220, 42102188); 山东省自然科学基金 (ZR2020MD037, ZR2020MD071, ZR2021QD095); 中国地质调查局海洋地质调查项目 (DD20230401, DD20221723, DD20190818, DD20160152)

作者简介: 陈建文 (1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海域油气资源调查评价与研究工作, E-mail: jwchen2012@126.com

通讯作者: 王平康 (1983—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋地质、沉积学研究与地质调查项目管理, E-mail: wangpingkang@qq.com

收稿日期: 2024-04-21; 改回日期: 2024-04-30. 张琰荣编辑

shows that the sedimentary basins in the sea area of China have large Cenozoic thickness, good crustal stability, characteristics of middle and low geothermal field, multiple sets of carbon storage and capping combinations, more structural and stratigraphic traps, superior geological conditions for carbon dioxide storage, and great potential for salt water reservoir storage. This will provide a basis for the evaluation of marine carbon dioxide geological storage zones and the optimization of target areas, and has great significance for the path planning of carbon peaking carbon neutrality and the pre-study of offshore carbon dioxide geological storage demonstration projects in China's coastal provinces and cities.

Key words: geological storage of carbon dioxide; sedimentary basins in China Sea; innovative model volume method; saline aquifer; storage potential

气候变化正在对全球产生持续而深远影响。2022 年举办的《联合国气候变化框架公约》第 27 次缔约方大会通过了“沙姆沙伊赫实施计划”，重申了《巴黎协定》“将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2℃ 以内”的长期目标，并且再次敦促各国逐步减少未采用捕集与封存措施的煤电。围绕国际国内新形势，针对二氧化碳捕集利用与封存（Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage, CCUS）发展面临的挑战，《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告（2023）》对碳达峰碳中和目标下 CCUS 技术进行了重新定位：CCUS 技术已经成为中国碳中和技术体系的重要组成部分，是化石能源近零排放的唯一技术选择、钢铁水泥等难减排行业深度脱碳的可行技术方案、未来支撑碳循环利用的主要技术手段^[1]。海域二氧化碳地质封存是将工业碳排放源或油气开发过程中捕集的二氧化碳，以超临界态注入到海底咸水层、废弃或开发中油气藏等地质体中，实现与大气长期隔离的过程（图 1）。二氧化碳地质封存介质主要为地下咸水层、枯竭油气

藏、不可开发煤层和基性-超基性岩等^[2-3]。目前，全球海域正在运行的二氧化碳地质封存项目的封存介质主要为咸水层和油气藏。煤层和基性-超基性岩是潜在的二氧化碳封存场所，我国海域煤层分布较少^[4]，基性-超基性岩二氧化碳封存的技术可行性和安全性仍有待进一步研究^[2-4]。

海域地质碳封存作为 CCUS 的应用场景之一，是沿海地区实现碳减排的有效途径^[5]。与陆域地质碳封存不同，海域二氧化碳地质封存远离人类居住区，远离人类赖以生存的地表水和地下水。此外，除岩石盖层外，表层更有海水的压力和阻隔，系统风险性大大降低^[5]，因而受到美国、英国、挪威、澳大利亚、欧盟等国家和地区的高度重视。1996 年，挪威在北海 Sleipner 气田实施了全球首个海域咸水层二氧化碳地质封存项目，每年将 100×10^4 t 伴生二氧化碳封存到咸水层中^[6]。2000 年以来，美国、挪威、英国、欧盟、澳大利亚等国家和地区陆续开展海域二氧化碳地质封存潜力评价，基本查明本国海域主要盆地咸水层二氧化碳地质封存潜力^[7-15]，其中

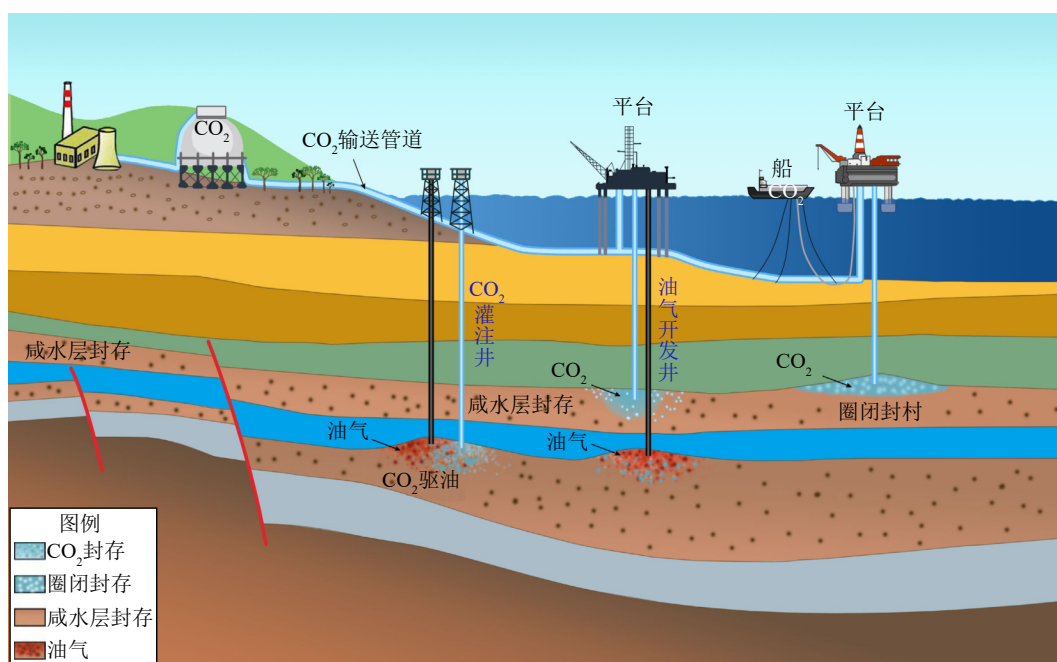


图 1 海域二氧化碳地质封存技术示意图

Fig.1 Schematic diagram of carbon dioxide geological storage technology in the sea area

美国地质调查局于2008年启动“碳封存-地质研究和评估”项目,已完成多轮联邦海域封存潜力评价^[7]。美国能源部发布5版美国碳封存图集,联邦海域咸水层二氧化碳地质封存预测潜力 2.29×10^{12} t。

碳达峰碳中和目标下中国2025、2030、2040、2050、2060年CCUS减排需求分别约为 0.24×10^8 、 1×10^8 、 10×10^8 、 20×10^8 、 23.5×10^8 t/a^[1]。我国沿海11省市总面积不足全国的14%,CO₂排放量却占全国总量的47%(数据来源CEADs,2020),碳中和目标下减碳压力巨大,因其陆域人口密集和特殊的地质条件导致缺乏碳封存场地,海域地质封存成为必然选择。但我国海域二氧化碳地质封存潜力评价和研究工作起步较晚,2010年,中国地质调查局设立“全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程”项目^[3],青岛海洋地质研究所采用机理法完成了我国海域二氧化碳地质封存潜力初步评价^[16],结果显示我国海域主要沉积盆地总封存潜力可达 1.5×10^{12} t^[17],具有巨大的碳封存潜力。霍传林^[18]收集了我国近海盆地的基本属性和主要地层的物性参数,采用体积法评价了我国近海11个主要盆地CO₂海底封存潜力为 2.50×10^{12} t。一些学者根据所掌握的资料初步评价了珠江口等海域主要盆地二氧化碳地质封存潜力^[19-22],探讨了东海陆架、珠江口、北部湾盆地等碳封存地质条件^[23-26]。总体来看,我国海域二氧化碳地质封存基础研究薄弱,整体处于潜力评价早期阶段,离摸清资源家底、服务碳达峰碳中和目标差距较大。为此,在中国地质调查局基础调查部的组织下,青岛海洋地质研究所牵头,联合广州海洋地质调查局和中国地质调查局发展研究中心,充分利用中国地质调查局海洋区域地质调查和油气资源调查获取的实测资料,在基础地质图件编制的基础上,分析基本的地质封存条件,创新评价方法于2022年开展中国海域沉积盆地咸水层二氧化碳地质封存潜力评价。

1 碳封存地质条件

1.1 地形地貌

中国海域海底地形是陆域向海洋的自然延伸,总体趋势是自西北向东南倾斜(图2)。以海南岛南端、台湾岛至日本九州以西五岛列岛一线为界,西侧海域为海岸带-内陆架体系,海底起伏和坡度较小,地势较平坦,水深一般小于200 m;东侧海域为外陆架-陆坡-海沟-岛弧-海盆体系,水深200~4 300 m,

坡陡,伴有海沟、海槽和海脊等复杂地形。渤海、北黄海、南黄海、东海陆架、台湾海峡海域均位于宽缓陆架区域,水体较浅,平均水深小于100 m;冲绳海槽位于陆坡—外陆架,水体较深,最大可达2 493 m。南海北部珠江口、北部湾、琼东南、莺歌海和台西南海域位于陆架—陆坡区域,其中莺歌海、北部湾、珠江口北部、琼东南西北部和台西南北部海域处于陆架区域,水深小于200 m,往东南陆坡水体逐渐加深,最大水深达3 385 m。中建南、南安海域位于南海西南部陆架—陆坡区域,水体西浅东深,中建南海域水深自西向东由16 m增加至4 343 m,南安西部海域水深100 m以内,东部最大达3 387 m。曾母、北康、礼乐、巴拉望和文莱沙巴海域位于南海南部陆架—陆坡区域,水体总体北深南浅,最大水深分别为1 796、2 746、3 553、3 826、2 200 m。

1.2 地壳稳定性

前人研究^[27-59]表明,中国海域主要发育NE-NNE、NW、SN和EW向4组断裂系统(优势走向为NE-NNE向)。断裂类型主要为伸展断裂、走滑断裂,也发育逆冲断裂、碰撞缝合带等。渤海盆地、北黄海盆地是发育在华北克拉通基础上的中—新生代叠合盆地,主要发育NEE-EW、NE-NNE和NW向3组断裂,其中近EW向、NE-NNE向断裂是控盆断裂,以正断裂为主,其次为走滑断裂和逆冲断裂。南黄海盆地是扬子地块在海域的延伸,主要发育NE向、NNE向、近EW向和NW向4组断裂体系,断裂延伸距离长且长期活动,古生代断裂多为逆冲断裂,中、新生代反转为“上正下逆”断裂。东海陆架盆地、冲绳海槽盆地和台湾海峡盆地是华南地块向陆域的延伸,发育NE-NNE向、NEE向和NW-NWW向3组断裂系统,其中NE-NNE向和NEE向断裂构成了盆地区域构造格架,NW-NWW向断裂一般形成时间较晚,以张扭断裂为主。南海断裂非常发育,包括碰撞缝合线、转换断裂和深大断裂等。断裂性质主要为正断裂和逆断裂,还伴生走滑断裂。断裂体系主要发育NE-NNE向、近EW向、NW向和近NS向4组,其中南海北部珠江口盆地、北部湾盆地、琼东南盆地和台西南盆地以NE-NNE向、近EW向断裂为主,莺歌海盆地以NW向、NNW向和近SN向断裂为主,中建南盆地和南安盆地则以近SN向、NNW和NNE向断裂为主,而曾母盆地和北康盆地主要为NW向、NNW向和近SN向断裂。地震活动以板块缝合带或板块边缘最



图 2 中国海域地貌水深及主要盆地分布

Fig.2 Geomorphology, water depth and distribution of major basins in China Sea

强,渤海、黄海、东海和南海地震活动性相对较弱,仅发生7次6~7级地震(数据来源:TPDC),其中渤海1次、南黄海2次、东海3次和南海北部1次;但东海东南部、冲绳海槽由于靠近琉球岛弧、南海东部由于靠近吕宋岛弧是强震的多发区,最大震级可达8级。

1.3 主要盆地特征

本次评价18个主要盆地(图2),包括渤海、北黄海、南黄海、台湾海峡、北部湾、莺歌海、东海陆架、冲绳海槽、台西南、珠江口、琼东南、中建南、南安、北康、曾母、礼乐、文莱-沙巴和巴拉望等盆地。盆地新生代地层广泛发育(表1),厚度一般为4 000~8 000 m^[53],其中,东海陆架、台西南、琼东南、莺歌海、曾母、北康、南安和文莱沙巴盆地新生代地层最大厚度超过10 000 m,莺歌海盆地和曾母盆地最厚可达18 000 m;渤海、冲绳海槽、台湾海峡、珠江口、北部湾、中建南、礼乐和巴拉望等盆地最大厚度为5 000~9 000 m;北黄海盆地新生代地

层厚度小于4 000 m。

盆地总体上分为裂陷期和裂后期两个地质演化阶段^[60-73]。裂陷阶段,盆地在区域性拉张背景下受同沉积边界断裂控制,表现为时间上多幕裂陷和空间上差异沉降特征;裂后阶段,盆地在热沉降背景下不受边界断裂控制,表现为时间上持续拗陷和空间上整体沉降特征(图3、4)。因此,裂陷期沉积具有“物源近、沉积速率快、地层厚度大、近岸扇三角洲相叠加发育”的特点;裂后期沉积具有“物源相对较远、地层分布广泛、河流-三角洲及滨岸相长期稳定发育、砂岩厚度大且物性好”的特点。盆地在新生代发育多个水侵到水退的沉积旋回,层序中发育分布稳定的凝缩段泥岩层。

中国海域地层地温梯度在稳定陆架区较低,盆地相对较冷;而在深水盆地、海槽等区域地温梯度较高,盆地相对较热;受深部高温地幔对陆壳边缘强烈作用的热效应影响,南海北部深水地区地温梯度较高,比东海、南黄海等边缘海盆地更“热”。我国海域沉积盆地总体具有中低地温场特点^[74-81](表1)。

表1 中国海域主要沉积盆地地质特征

Table 1 Geological characteristics of major sedimentary basins in China Sea

盆地名称	评价面积/km ²	新生代厚度/m	水深/m	地温梯度/(°C/km)	大地热流值/(mW/m ²)
			范围/平均值	范围/平均值	范围/平均值
渤海盆地	54 476	200~7 000	0~55/18	28~43/30	50~85/65.5
北黄海盆地	16 401	200~3 800	23~80/51	23~28/25	无数据
南黄海盆地	136 361	600~6 000	1~114/53	24~30/29.3	61~66/63.5
东海陆架盆地	239 580	2 250~17 500	4~894/97	24~50/30	50~88/68
冲绳海槽盆地	147 963	800~8 000	0~2 493/919	8~194/80.68	9~437/96.2
台湾海峡盆地	22 565	400~5 000	0~92/52	39~45/41	无数据
台西南盆地	42 185	400~10 700	0~3 385/1 288	33~47/39	3~170/65.6
珠江口盆地	200 136	400~9 000	0~2 919/439	29~113/42	59~81/69.95
北部湾盆地	52 222	400~5 000	0~91/31	35~39/37.5	62~68/64.67
琼东南盆地	96 289	500~14 000	4~2 970/1 054	25.2~60.8/40	83~112/95.7
莺歌海盆地	114 785	2 070~18 000	0~645/73	31~43/40	69~117/85
中建南盆地	134 497	1 400~8 000	16~4 343/1 815	/35	无数据
曾母盆地	217 268	2 000~18 000	0~1 796/224	25~50/46	60~120/90.9
北康盆地	78 499	1 000~12 000	0~2 746/1 539	30~40/34	43.9~45.1/44.5
南安盆地	191 703	2 000~12 000	0~3 387/959	21~38/29	46~80/55.7
文莱沙巴盆地	65 632	3 500~12 000	0~2 200/400	18.2~32.5/28	51~72/60.5
礼乐盆地	74 950	1 800~5 700	0~3 553/1 333	/29	23~26/24.5
巴拉望盆地	48 044	3 000~8 000	0~3 826/833	22~41/33	35~83/54.2

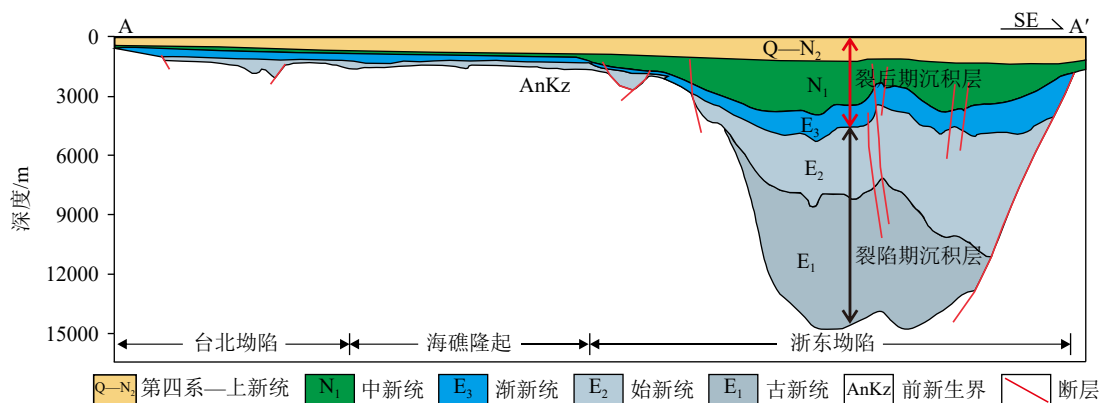


图 3 东海陆架盆地地质剖面图

Fig.3 Geological Profile of the East China Sea Shelf Basin

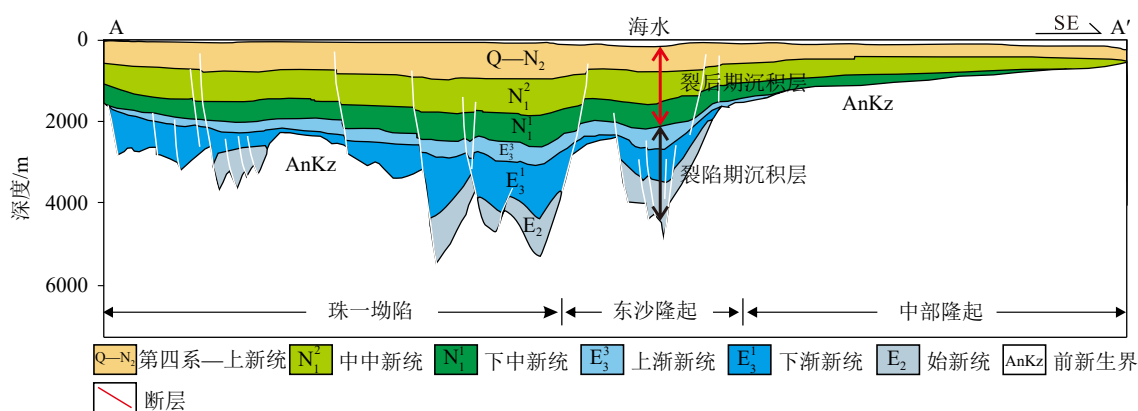


图 4 珠江口盆地地质剖面图

Fig.4 Geological Profile of the Pearl River Mouth Basin

本文评价将地温梯度低于 30 °C/km 的盆地划分为冷盆地, 地温梯度在 30~50 °C/km 范围的盆地划分为次冷—次热盆地, 地温梯度高于 50 °C/km 的盆地划分为热盆地。渤海、北黄海、南黄海、东海陆架、南安、文莱沙巴和礼乐等盆地的平均地温梯度 25~30 °C/km, 大地热流值平均小于 70 mW/m², 属于冷盆地; 台湾海峡、台西南、珠江口、北部湾、琼东南、莺歌海、中建南、曾母、北康、巴拉望等盆地的平均地温梯度为 33~46 °C/km, 属次冷—次热盆地; 冲绳海槽盆地平均地温梯度 80.68 °C/km, 大地热流值平均 96.2 mW/m², 属热盆地(表 1)。

1.4 储层沉积类型及储盖组合

中国海域新生界分布广、厚度大^[53]。钻井揭示, 我国海域盆地新生代地层中的砂岩储层主要发育 5 种沉积成因类型^[82-104], 分别为河流、扇三角洲、三角洲、滨浅湖和滨浅海沉积(图 5); 因压实和胶结作用, 砂岩孔隙度随着埋深的增大而变小, 此后在一定埋深范围内存在次生孔隙带^[105-129], 本文评价的地层深度范围内, 孔隙度为 10%~45%, 按孔隙度

大小将二氧化碳封存层(储碳层)分为优质储碳层(孔隙度大于 25%)、良好储碳层(孔隙度 15%~25%)和有效储碳层(孔隙度 10%~15%)3 类; 因海平面或湖平面的周期上升导致层序内最大海泛面或湖泛面附近的区域性泥岩(凝缩层)发育, 是储碳层的良好盖层(图 6)。钻井及地震资料解释表明, 海域新生界自下而上发育古新统、始新统、渐新统、中新统和上新统 5 套储盖组合^[91,95,97,109,129-131](图 7)。

2 封存潜力

2.1 评价的资料基础

本次评价的基础数据以中国地质调查局通过实施国家海洋地质调查、海域油气资源调查、海域油气资源选区评价和南海地质科考等专项项目获得的实测数据和成果资料为主体, 评价过程中涉及到盆地的油气勘探开发程度、矿权区块内储层物性参数等主要来源于商业油公司、科研院所发表的公

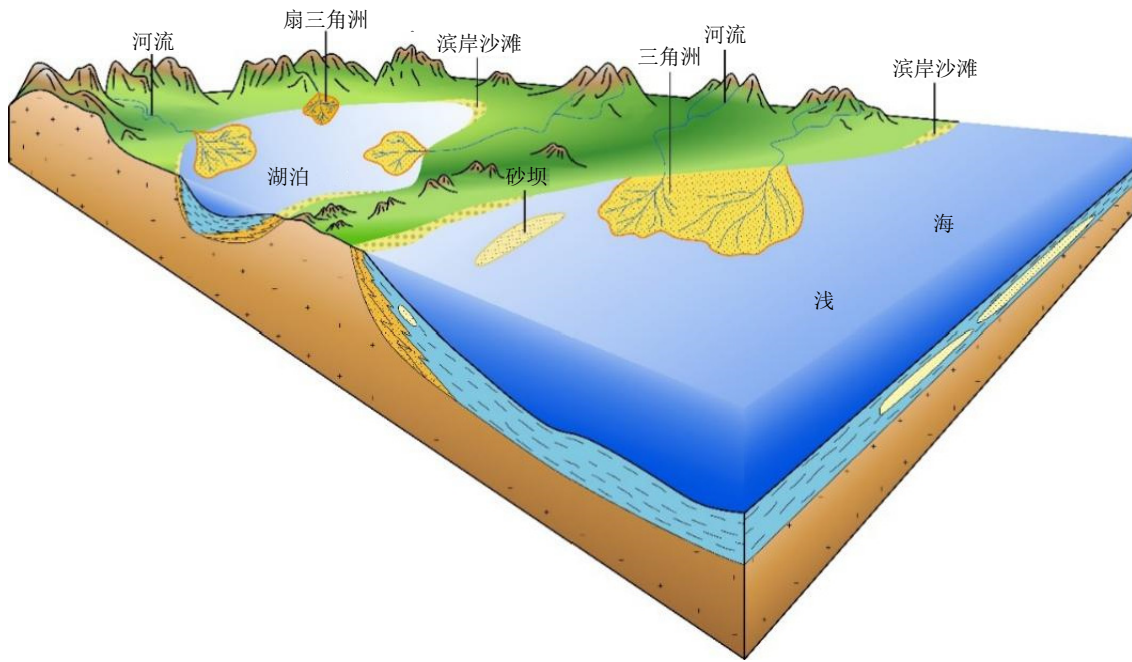


图5 中国海域砂岩储层沉积成因示意图

海域新生代盆地砂岩储层主要成因类型: 河流、扇三角洲、三角洲、滨浅湖和滨浅海。

Fig.5 Schematic diagram of sedimentary genesis of sandstone reservoirs in China Sea

The main genetic types of sandstone reservoirs in marine Cenozoic basins are rivers, fan deltas, deltas, coastal shallow lakes, and coastal shallow seas.

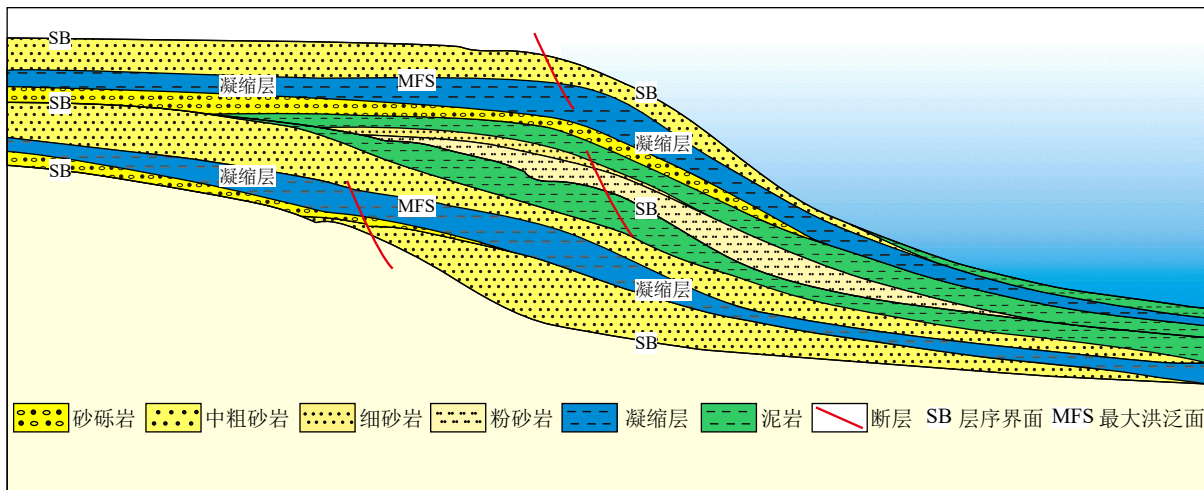


图6 海域新生界层序地层模式图

Fig.6 Sequence stratigraphic pattern of the Cenozoic in the sea area

开文献。地温场数据来源于国际热流委员会 (IHFC)官网;地震震级数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (TPDC)、美国地质调查局地震灾害官网等专业网站。从资料覆盖范围和详实程度来看,地质调查实测资料总体上实现了我国海域全覆盖。1:100万区域地质调查覆盖面积 $318 \times 10^4 \text{ km}^2$, 油气勘查完成概查区 $67.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 普查区 $70.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 详查区 $2.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。我国商业油公司勘探覆盖了海域油气矿权块 285 个, 面积 $159.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2.2 评价深度范围确定

本评价深度范围为海底以下 800~3 200 m。800 m 为满足二氧化碳超临界态温压条件的起始深度, 3 200 m 为中国海域沉积盆地新生代地层次生孔隙发育带的最大深度。地层储存空间大小是决定二氧化碳地质封存量的关键因素, 主要表征参数为孔隙度, 孔隙度主要受成岩作用控制。大量研究^[105-129]表明, 2 000 m 以浅新生代地层在压实作用

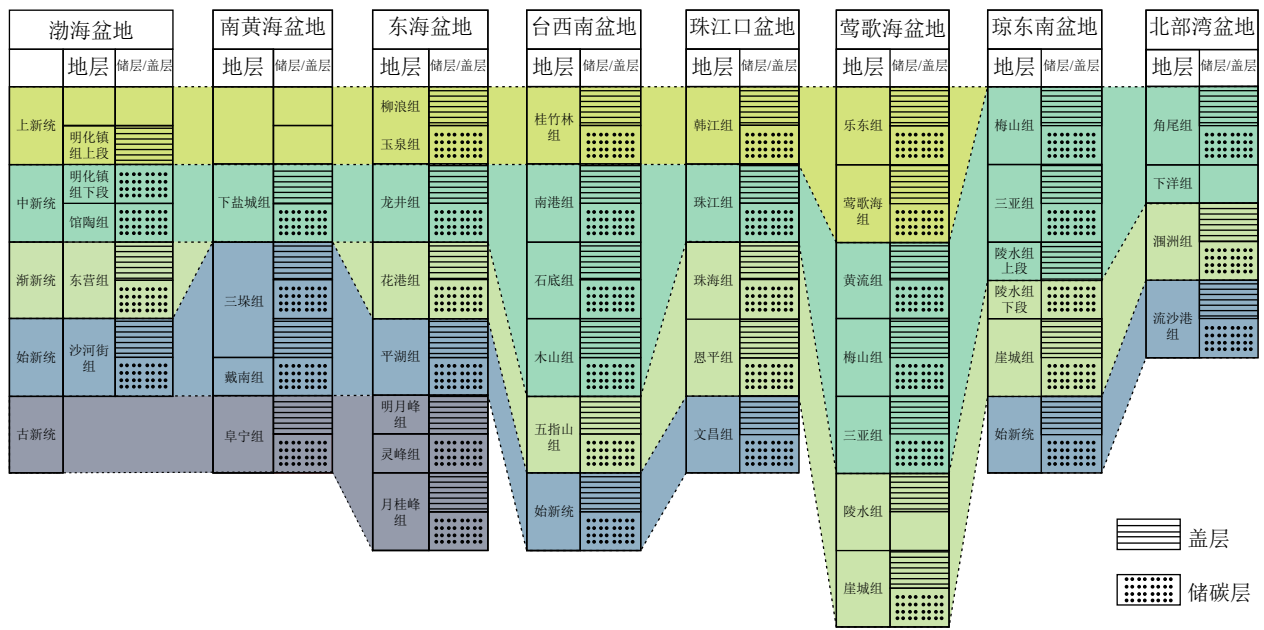


图 7 中国海域近海盆地二氧化碳地质封存储盖组合

Fig.7 Carbon dioxide geological storage and cap combination in offshore basins of China

和胶结作用下, 储层孔隙度随深度增加而降低; 地层埋深 2 000~3 200 m, 砂岩易溶组分被有机酸溶蚀, 形成大量的次生孔隙, 储层物性得到改善, 储层的孔隙度可达 15%~25%, 是良好的二氧化碳储层。因此, 本评价的地层深度范围定为海底以下 800~3 200 m。

2.3 封存潜力

2.3.1 潜力评价方法

目前, 全球二氧化碳地质封存潜力评价方法大致可分为机理法和体积法两大类。机理法基本原理为二氧化碳注入目标地质体后, 以构造地层封存、束缚封存、溶解封存、矿物封存和水动力封存方式封存, 分别计算不同封存方式的二氧化碳地质封存潜力, 进而得到总封存潜力。该方法虽然理论上考虑了各种机理的潜力, 但是溶解封存、束缚封存和矿物封存的潜力评价结果不仅受时间因素影响, 而且受数据取值精度影响, 大区域尺度下难以获得准确数据^[4, 132-133]。体积法基本原理为将可用于二氧化碳地质封存的地质体内所有的孔隙空间进行估算, 进而将该体积换算为对应封存条件下的二氧化碳地质封存潜力。该方法参数选取相对简单, 但因不同盆地有不同的地质条件, 因此针对不同盆地, 参数的选取需要有相应的约束条件。本次评价, 采用模型约束下的体积法(简称“模型体积法”), 解决了评价中关键参数的精度问题。

(1) 模型建立

针对我国海域沉积盆地特点和数据支撑程度, 构建了地层体积计算模型、相控砂地比模型、砂岩孔隙度函数模型和二氧化碳温压场空变模型等 4 大核心模型。

① 地层体积计算模型: 将 800~3 200 m 深度的沉积地层自上而下按一定间隔 h_i 划分成 n 个计算单元, 如图 8 所示。每个计算单元有不同的地层分布面积、地质体体积、砂岩孔隙度、二氧化碳密度。以此模型为约束, 在潜力评价时分别获取各计算单元的上述参数, 以描述各参数的空间非均质性, 提高潜力评价精度。

② 相控砂地比计算模型: 地层砂地比是潜力评价中的关键参数, 海域钻井资料表明, 不同沉积相带有不同的砂地比值, 以盆地沉积相平面图为约束, 建立各种类型的沉积相及砂地比占所在评价单元权重的计算模型, 如图 9 所示。模型中, 不同颜色代表不同沉积相类型, 其中: F_j 为各沉积相带钻井的砂岩厚度占地层厚度的百分比; A_j 为各相带面积。

③ 砂岩孔隙度函数模型: 在沉积盆地中, 地层浅部处于早期成岩阶段, 在压实作用和胶结作用下, 储层孔隙度随深度增加而降低; 当地层埋深加大进入中成岩早期阶段, 砂岩易溶组分被有机酸溶蚀, 形成大量的次生孔隙, 储层的孔隙度增大, 但不同盆地砂岩孔隙压实曲线不同(图 10), 根据压实曲线拟合可获得不同的孔隙度空变函数。

④ 二氧化碳温压场空变模型: 二氧化碳在不同的温度下密度不同, 在不同的水深条件下密度不

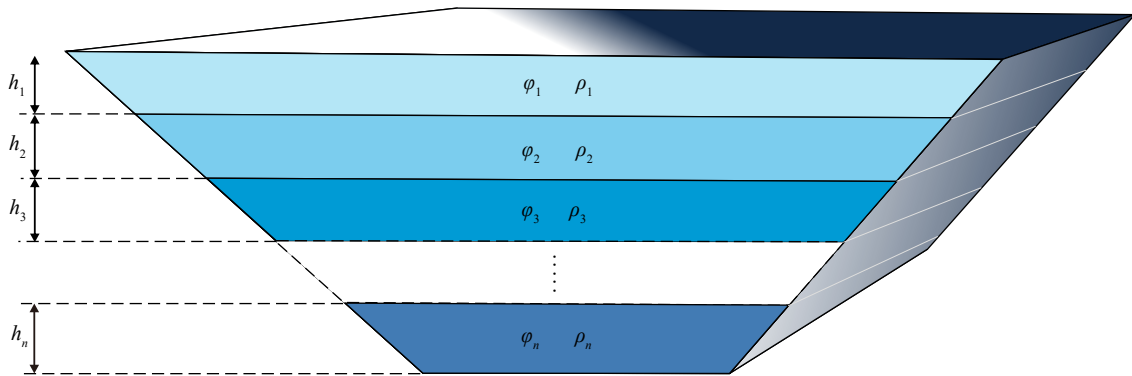


图8 地层体积计算模型
Fig.8 Calculation Model for Stratum Volume

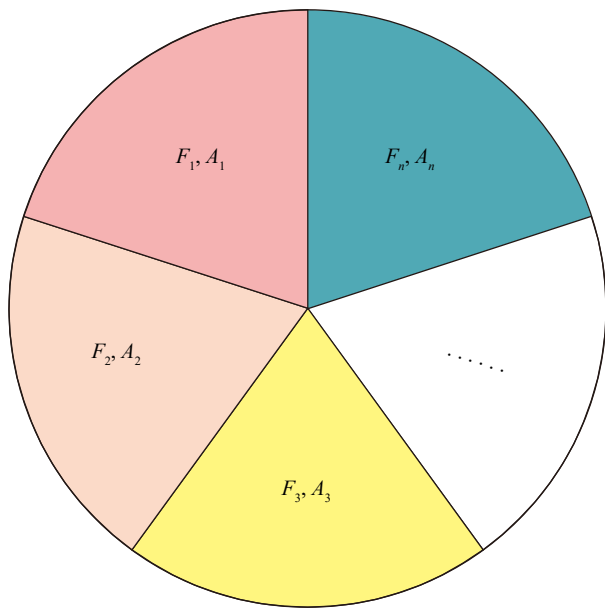


图9 相控砂地比计算模型

Fig.9 Calculation model for phase controlled sand to ground ratio

同,在不同的地层埋深条件下密度也不相同。其密度随着温压场的变化而变化,是温压场的空变函数。

(2)计算公式

盆地级二氧化碳地质封存潜力评价以盆地为评价对象,潜力计算参数采用收集到的盆地的实际数据获得。计算公式如下:

$$M_{CO_2} = \sum_{i=1}^n (V_i \times \varphi_i \times \rho_i) \times E \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

$$V_i = A_i \times H_i \times R$$

式中: M_{CO_2} -二氧化碳地质封存潜力,单位为t; V_i -第*i*计算单元砂岩体积,单位为m³; φ_i -第*i*计算单元砂岩孔隙度,单位为%; ρ_i -封存条件下的第*i*计算单元二氧化碳密度,单位为kg/m³; A_i -第*i*计算单元面积,单位为m²; H_i -第*i*计算单元地层厚度,单位为m; R -砂岩厚度与地层厚度的比值,单位为%; E -二

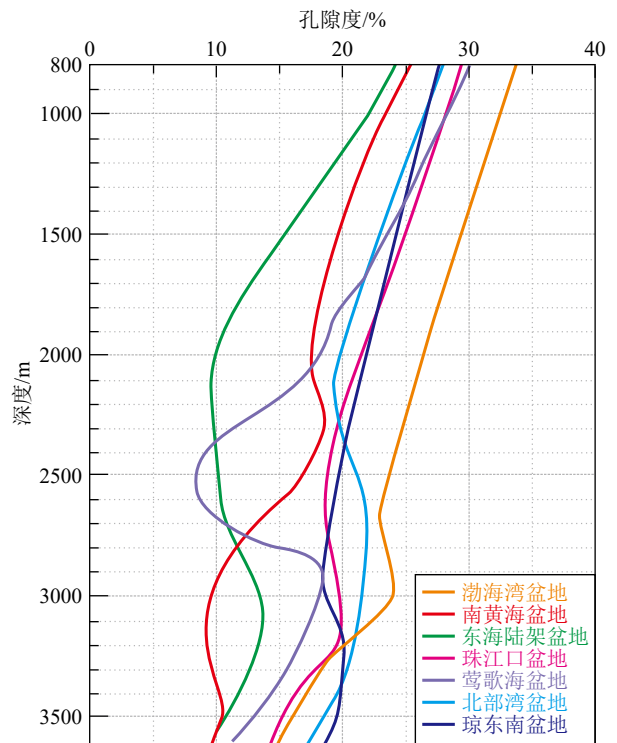


图10 海域典型区域孔隙度与深度变化关系

Fig.10 Relationship between porosity and depth variation in typical marine areas

氧化碳封存的有效系数,反映二氧化碳占据孔隙空间体积与总孔隙体积的比例。

(3)参数值确定

A-盆地面积:以新生界沉积厚度图为依据,利用 ArcGIS 软件直接计算获得(埋深 800~3 200 m 范围,每个计算单元分别计算)。**H-盆地地层厚度:**以新生界沉积厚度图为依据,计算埋深 800~3 200 m 内各计算单元厚度。**R-地层砂地比:**砂岩与地层厚度的比值,根据相控砂地比取值法获得(图9)。

首先统计盆地内各沉积相带钻井的砂岩厚度占地层厚度的百分比 F_i , 然后根据各相带面积确定

权重 A_j/A , 再通过加权平均计算盆地地层砂地比 R 。部分盆地无沉积相砂地比数据则参考地质条件相似盆地获得砂地比值(考虑到碳酸盐岩孔隙度和渗透率较低, 未计算该部分地质体封存潜力)。计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (F_j \times \frac{A_j}{A})}{n} (j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中: R -地层砂地比, %; F_j -盆地各沉积相带钻井的砂岩厚度占地层厚度的百分比, %; A_j -盆地内各沉积相带的面积, 单位为 m^2 ; A -盆地面积, 单位为 m^2 。

ϕ -砂岩孔隙度: 受压实、溶解等作用影响, 砂岩孔隙度随着地层埋深的加大而减少, 并在一定深度范围内发育次生孔隙带。本次评价利用各盆地内的压实曲线获得不同深度的孔隙度用于计算(每计算单元取一平均值计算)(图 10)。部分盆地和区带无压实曲线则参考地质条件相似盆地或区带获得。

ρ_{CO_2} -二氧化碳密度: 根据实际所处层位温度和压力条件下的二氧化碳密度, 每计算单元取一平均值。所处层位温度和压力利用海底温度、地层埋深和对应地温梯度、压力梯度计算获得, 或者根据油气田开发实际资料获得。

E -二氧化碳封存的有效系数: 该系数为二氧化碳占据孔隙空间体积与总孔隙体积的比例, 由国际能源署温室气体项目^[11]根据全球超过 20 000 个油气藏参数建立模型^[134], 以一定注入速率(最大 1Mt/a)进行数学模拟获得有效平面、有效封存的砂岩层厚度、有效孔隙度、有效体积和显微替换效率等参数, 再用蒙特卡洛采样模拟计算^[135]分别获得碎屑岩、白云岩、灰岩为主的咸水层在置信区间 10%~90% 内封存的有效系数分别为 1.2%~4.1%、2.0%~3.6% 和 1.3%~2.8%, 置信度为 50% 时, 分别为 2.4%、2.7% 和 2.0%(本次评价咸水层采用 2.4%)。其他计算参数根据钻井等资料获得。

2.3.2 评价结果

盆地级潜力评价分别计算了置信度 90%、50%、10% 的二氧化碳地质封存预测潜力(表 2), 文中采用置信度为 50% 时的二氧化碳地质封存预测潜力数据。结果表明, 中国海域二氧化碳地质封存潜力巨大, 18 个盆地预测潜力为 2.58×10^{13} t, 其中渤海、南黄海、东海陆架、冲绳海槽、珠江口、琼东南、中建南、南安、北康和曾母等 10 盆地预测潜力均超过 1×10^{12} t。近海的渤海、东海陆架和珠江口盆地的预测潜力分别为 $1 508 \times 10^8$ 、 $3 259 \times 10^8$ 和 $2 496 \times$

表 2 海域沉积盆地咸水层二氧化碳地质封存潜力
Table 2 Geologic storage potential of carbon dioxide in saline aquifers of maritime sedimentary basins

序号	盆地	预测潜力/ 10^8 t		
		$E_1=1.2\%$	$E_2=2.4\%$	$E_3=4.1\%$
1	渤海盆地	754	1 508	2 576
2	珠江口盆地	1 248	2 496	4 265
3	东海陆架盆地	1 629	3 259	5 567
4	北部湾盆地	228	456	779
5	莺歌海盆地	303	606	1 036
6	琼东南盆地	1 307	2 615	4 467
7	南黄海盆地	932	1 863	3 183
8	台西南盆地	424	847	1 448
9	台湾海峡盆地	90	181	309
10	北黄海盆地	43	86	147
11	中建南盆地	661	1 323	2 260
12	北康盆地	1 037	2 075	3 545
13	南安盆地	1 903	3 806	6 502
14	曾母盆地	1 050	2 101	3 589
15	冲绳海槽盆地	524	1 048	1 790
16	礼乐盆地	268	536	915
17	文莱沙巴盆地	342	685	1 170
18	巴拉望盆地	160	321	548
	总计	12 903	25 812	44 096

注: E_1 、 E_2 、 E_3 分别为置信度90%、50%、10%的二氧化碳封存有效系数

10^8 t, 为环渤海经济区、长江三角洲经济区和粤港澳大湾区实现碳中和目标提供了较大的二氧化碳地质封存空间。

3 结论与认识

(1) 我国海域二氧化碳地质封存潜力巨大

海域盆地级二氧化碳预测潜力 2.58×10^{12} t。其中渤海、北黄海、南黄海、东海陆架、台湾海峡、台西南、珠江口、北部湾、琼东南和莺歌海 10 个近海盆地预测潜力合计 1.39×10^{12} t, 东海陆架盆地封存潜力最大, 为 $3 259 \times 10^8$ t。

(2) 海域沉积盆地咸水层二氧化碳封存地质条件良好

我国海域地壳稳定性较好, 区域深大断裂较少, 渤海、黄海、东海中西部和南海诸盆地地震活

动性弱,仅在东海东部冲绳海槽盆地地震活动相对较强。海域沉积盆地分布广、新生代地层厚度大,总体具有中低地温场特征。盆地中砂岩储碳层具有5种成因类型,即河流相、三角洲相、扇三角洲相、滨浅海相和滨浅湖相砂岩。新生界发育5套储碳-封盖组合,分别为古新统、始新统、渐新统、中新统和上新统。总体来看,咸水层封存地质条件良好。

(3)封存潜力大的盆地具有“盆地裂后期控层、沉积相带控储、层序凝缩层封盖”地质规律

海域盆地经历了裂陷期和裂后期两个地质演化阶段,形成了“下断上坳”的双层结构,可分为下、上两个构造层。盆地裂后期,持续的整体沉降和沉积物快速充填形成的体积巨大、分布广泛的裂后期沉积地层,是主要的二氧化碳地质封存层;该时期,由于沉积地形较缓,物源区远离沉积区,河流携带大量沉积物进入水体形成三角洲分流河道、河口坝、前缘席状砂等砂体,这些砂体与盆地滨岸席状砂横向上连片、纵向上叠置,形成巨厚的砂岩地质体,其埋藏浅、物性好,是二氧化碳地质封存的主要储集体;同时,该时期经历了沉积基准面周期性的多次上升,发育多个三级层序,形成了多套由湖相或海相泥岩组成的水侵期凝缩段,这些凝缩段泥岩厚度大,区域性分布,是良好的封盖层。

参考文献 (References)

- [1] 张贤,杨晓亮,鲁玺,等.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)[R].北京:中国21世纪议程管理中心,全球碳捕集与封存研究院,清华大学,2023. [ZHANG Xian, YANG Xiaoliang, LU Xi, et al. China Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage (CCUS) Annual Report (2023)[R]. Beijing: The Administrative Center for China's Agenda 21, Global Institute, Tsinghua University, 2023.]
- [2] Bert M. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [3] 郭建强,文冬光,张森琦,等.中国二氧化碳地质储存适宜性评价与示范工程[M].北京:地质出版社,2014. [GUO Jianqiang, WEN Dongguang, ZHANG Senqi, et al. Suitability Evaluation and Demonstration Project of Carbon Dioxide Geological Storage in China[M]. Beijing: Geology Press, 2014.]
- [4] Bachu S. Phase III Final report-comparison between methodologies recommended for estimation of CO₂ storage capacity in geological media by the CSLF task force on CO₂ storage capacity estimation and the USDOE capacity and fairways subgroup of the regional Carbon Sequestration Partnerships Program[R]. Carbon Sequestration Leadership Forum, 2008: 1-16.
- [5] 米立军.全球海上CO₂封存现状及中国近海机遇与挑战[J].中国海上油气,2023,35(1): 123-135. [MI Lijun. Current status of global CO₂ ocean sequestration and opportunities and challenges in China offshore areas[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(1): 123-135.]
- [6] Furre A K, Eiken O, Alnes H, et al. 20 years of monitoring CO₂-injection at Sleipner[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 3916-3926.
- [7] U. S. Geological Survey Geologic Carbon Dioxide Storage Resources Assessment Team. National assessment of geologic carbon dioxide storage resources—results[R]. U. S. Geological Survey, 2013.
- [8] Szulczewski M L, MacMinn C W, Herzog H J, et al. Lifetime of carbon capture and storage as a climate-change mitigation technology[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(14): 5185-5189.
- [9] Van Der Meer B L G H, Arts R J, Geel C R, et al. K12-B: Carbon dioxide injection in a nearly depleted gas field offshore the Netherlands[M]//Grobe M, Pashin J C, Dodge R L. Carbon Dioxide Sequestration in Geological Media—State of the Science. Tulsa, USA: AAPG, 2009: 379-390.
- [10] Mathieson A, Midgely J, Wright I, et al. In Salah CO₂ Storage JIP: CO₂ sequestration monitoring and verification technologies applied at Krechba, Algeria[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 3596-3603.
- [11] Whittaker S, Rostron B, Hawkes C, et al. A decade of CO₂ injection into depleting oil fields: Monitoring and research activities of the IEA GHG Weyburn-Midale CO₂ Monitoring and Storage Project[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 6069-6076.
- [12] Sharma S, Cook P, Jenkins C, et al. The CO₂-CRC Otway Project: Leveraging experience and exploiting new opportunities at Australia's first CCS project site[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 5447-5454.
- [13] Sawada Y, Tanaka J, Suzuki C, et al. Tomakomai CCS demonstration project of Japan, CO₂ injection in progress[J]. *Energy Procedia*, 2018, 154: 3-8.
- [14] 焦念志.海底封存二氧化碳减排潜力巨大[J].中国战略新兴产业,2017(17): 95. [JIAO Nianzhi. Seabed storage has great potential for carbon dioxide emission reduction[J]. China Strategic Emerging Industry, 2017(17): 95.]
- [15] 周蒂,李鹏春,张翠梅.离岸二氧化碳驱油的国际进展及我国近海潜力初步分析[J].南方能源建设,2015,2(3): 1-9. [ZHOU Di, LI Pengchun, ZHANG Cuimei. Offshore CO₂-EOR: Worldwide progress and a preliminary analysis on its potential in offshore sedimentary basins off China[J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 1-9.]
- [16] 彭轩明,曹珂.中国近海二氧化碳地质潜力与适宜性评价[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2023. [PENG Xuanming, CAO Ke. Geological potential and suitability evaluation of carbon dioxide in offshore China[R]. Qingdao: Qingdao Institute of Marine Geology, 2023.]
- [17] 曹珂,吴林强,王建强,等.我国海洋地质碳封存研究进展与展望[J].中国地质调查,2023,10(2): 72-76. [CAO Ke, WU Linqiang, WANG Jianqiang, et al. Progress and perspective of marine geological carbon storage in China[J]. Geological Survey of China, 2023,

- 10(2): 72-76.]
- [18] 霍传林. 我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域研究[D]. 大连海事大学博士学位论文, 2014. [HUO Chuanlin. Study on the potential evaluation and the storage areas of the carbon dioxide seabed storage in offshore China[D]. Doctor Dissertation of Dalian Maritime University, 2014.]
- [19] Zhou D, Zhao Z X, Liao J, et al. A preliminary assessment on CO₂ storage capacity in the Pearl River Mouth Basin offshore Guangdong, China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(2): 308-317.
- [20] Li P C, Zhou D, Zhang C M, et al. Potential of sub-seafloor CO₂ geological storage in northern South China Sea and its importance for CCS development in South China[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 5191-5200.
- [21] Li P C, Zhou D, Zhang C M, et al. Assessment of the effective CO₂ storage capacity in the Beibuwan Basin, offshore of southwestern P. R. China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 37: 325-339.
- [22] Yuan Y, Wang J Q, Chen J W, et al. Carbon dioxide storage potential of Cenozoic saline aquifers in the South Yellow Sea Basin[J]. *Energies*, 2023, 16(4): 1578.
- [23] 陈建文, 孙晶, 杨长清, 等. 东海陆架盆地新生界咸水层二氧化碳封存地质条件及封存前景[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(10): 14-21. [CHEN Jianwen, SUN Jing, YANG Changqing, et al. Geological conditions and prospects of carbon dioxide storage in the Cenozoic saline water layers of the East China Sea Shelf Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(10): 14-21.]
- [24] 可行, 陈建文, 龚建明, 等. 珠江口盆地二氧化碳地质封存条件及源汇匹配性分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(2): 55-65. [KE Xing, CHEN Jianwen, GONG Jianming, et al. Assessment on geological condition for carbon dioxide sequestration and source-sink matching in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(2): 55-65.]
- [25] 可行, 陈建文, 龚建明, 等. 东海陆架盆地 CO₂ 地质封存适宜性评价[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(7): 1-12. [KE Xing, CHEN Jianwen, GONG Jianming, et al. Suitability evaluation of CO₂ sequestration in the East China Sea Shelf Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(7): 1-12.]
- [26] Wang J Q, Yuan Y, Chen J W, et al. Geological conditions and suitability evaluation for CO₂ geological storage in deep saline aquifers of the Beibu Gulf Basin (South China)[J]. *Energies*, 2023, 16(5): 2360.
- [27] 张文佑, 张抗, 杨树康. 中国东部及相邻海域中、新生代地壳演化与盆地类型[J]. *海洋地质研究*, 1982, 2(1): 1-15. [ZHANG Wenyu, ZHANG Kang, YANG Shukang. On the evolution of crust and the classification of Mesozoic and Cenozoic basins in the eastern China and adjacent sea area[J]. *Marine Geology Quaternary Geology*, 1982, 2(1): 1-15.]
- [28] 丘中建, 龚再升. 中国油气勘探-第四卷-近海油气区[M]. 北京: 地质出版社与石油工业出版社, 1999. [QIU Zhongjian, GONG Zaisheng. Oil and Gas Exploration in China-Volume 4, Offshore Oil and Gas Areas[M]. Beijing: Geological Press and Petroleum Industry Press, 1999.]
- [29] 《中国油气田开发志》总编纂委员会. 中国油气田开发志(卷二十七): 南海东部油气区卷[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. [China Oil and Gas Field Development Journal, General Compilation Committee. China Oil and Gas Field Development Journal, Volume 27, East South China Sea Oil and Gas Region Volume[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.]
- [30] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质-地球物理系列图[M]. 北京: 地质出版社, 1992. [LIU Guangding. Geological and Geophysical Series Maps of China Sea and Adjacent Areas[M]. Beijing: Geology Press, 1992.]
- [31] 李祖辉, 郑彦鹏, 支鹏遥, 等. 渤海东南部深地震探测与地壳结构研究新进展: OBS2013 剖面数据处理分析[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(3): 1402-1409. [LI Zuhui, ZHENG Yanpeng, ZHI Pengyao, et al. The new progress of deep seismic survey and crustal structure in southeast of Bohai sea-based on the data processing and analysis of OBS2013 line[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(3): 1402-1409.]
- [32] 刘光夏, 赵文俊, 张先. 郯庐断裂带渤海段的深部构造特征: 地壳厚度和居里面的研究结果[J]. *长春地质学院学报*, 1996, 26(4): 387-391. [LIU Guangxia, ZHAO Wenjun, ZHANG Xian. The deep structure characteristics of the Tan-Lu Fault zone, Bohai segment: a case study on the crustal thickness and the curie depth[J]. *Journal of Jilin University of Earth Science*, 1996, 26(4): 387-391.]
- [33] Hao T Y, You Q Y, Liu L H, et al. Joint land-sea seismic survey and research on the deep structures of the Bohai Sea areas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(12): 13-24.
- [34] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 51-60. [WU Fuyuan, GE Wenchun, SUN Deyou, et al. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 51-60.]
- [35] 陈胜早. 下扬子—南黄海地区地壳结构与地震成因动力分析[J]. *地震学报*, 1992, 14(2): 164-171+257. [CHEN Shengzao. Crustal structure and seismogenic dynamic analysis in the Lower Yangzi-South Yellow Sea area[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1992, 14(2): 164-171.]
- [36] 陈胜早. 下扬子中新生代裂谷带的地球物理-地质特征[J]. *地质学报*, 1990(2): 107-120. [CHEN Shengzao. Geophysical and geological features of the Meso-Cenozoic Lower Yangtze rift zone[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1990(2): 107-120.]
- [37] 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. [CHEN Jianwen, LIANG Jie, ZHANG Yinguo, et al. Regional evaluation of oil and gas resources in offshore China and exploration of marine Paleo-Mesozoic oil and gas in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(6): 1-29.]
- [38] 陈建文, 施剑, 刘俊, 等. 南黄海海相中-古生界地震地质条件[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(10): 1-8. [CHEN Jianwen, SHI Jian, LIU Jun, et al. Seismic geological conditions of the marine Meso-Paleozoic in the South Yellow Sea Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(10): 1-8.]

- [39] 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. [CHEN Jianwen, LEI Baohua, LIANG Jie, et al. New progress of petroleum resources survey in South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(3): 1-23.]
- [40] 陈建文, 李刚, 陈国威. 东海陆架盆地西部坳陷带的中生界和古新统油气远景 [J]. 海洋地质动态, 2003, 19(8): 17-19. [CHEN Jianwen, LI Gang, CHEN Guowei. Petroleum prospects of Mesozoic and paleocene in the western depression of the East China Sea Shelf basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2003, 19(8): 17-19.]
- [41] 方银霞, 刘建华. 东海的地壳结构特征 [J]. 东海海洋, 2004, 22(3): 9-17. [FANG Yinxia, LIU Jianhua. The crustal structure character of East China Sea[J]. Donghai Marine Sciences, 2004, 22(3): 9-17.]
- [42] 金翔龙, 庄杰, 唐宝珏, 等. 冲绳海槽地震反射的结构特征 [J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(6): 481-487. [JIN Xianglong, ZHUANG Jie, TANG Baojue, et al. The structural features of Okinawa Trough by seismic reflection[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1985, 16(6): 481-487.]
- [43] 金翔龙, 喻普之. 冲绳海槽的构造特征与演化 [J]. 中国科学: B 辑, 1987(2): 196-203. [JIN Xianglong, YU Puzhi. Structural characteristics and evolution of the Okinawa Trough[J]. Scientia Sinica, 1987(2): 196-203.]
- [44] 阎贫, 刘海龄. 南海北部陆缘地壳结构探测结果分析 [J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 1-12. [YAN Pin, LIU Hailing. Analysis on deep crust sounding results in northern margin of South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2002, 21(2): 1-12.]
- [45] Ru K, Piggot J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(9): 1136-1155.
- [46] 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10Ma 以来的构造事件 [J]. 科学通报, 1998, 43(8): 797-810. [LI Sitian, LIN Changsong, ZHANG Qiming, et al. Dynamic process of episodic rifting and tectonic events since 10Ma in the northern continental margin basin of the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(8): 797-810.]
- [47] 邱宁, 王章稳, 王振峰, 等. 南海北部琼东南盆地地层结构与地壳伸展特征 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3189-3207. [QIU Ning, WANG Zhangwen, WANG Zhenfeng, et al. Tectonostratigraphic structure and crustal extension of the Qiongdongnan basin, northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10): 3189-3207.]
- [48] 张中杰, 刘一峰, 张素芳, 等. 琼东南盆地地壳伸展深度依赖性及其动力学意义 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 57-66. [ZHANG Zhongjie, LIU Yifeng, ZHANG Sufang, et al. The depth-dependence of crustal extension beneath Qiongdongnan basin area and its tectonic implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(1): 57-66.]
- [49] 赵兵, 张素芳, 李守林. 琼东南盆地区的地壳密度与岩石结构 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 98-107. [ZHAO Bing, ZHANG Sufang, LI Shoulin. Crustal density and composition models beneath Qiongdongnan basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(1): 98-107.]
- [50] 李振五. 南海中部和北部地壳性质的探讨 [J]. 地球物理学报, 1984, 27(2): 153-166. [LI Zhenwu. A discussion on the crustal nature of the central and northern parts of South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1984, 27(2): 153-166.]
- [51] 苏达权, 黄慈流, 夏戡原. 论南沙海槽的地壳性质 [J]. 地质科学, 1996, 31(4): 409-415. [SU Daquan, HUANG Ciliu, XIA Kanyuan. The crust in the Nansha Trough[J]. Chinese Journal of Geology, 1996, 31(4): 409-415.]
- [52] 刘海龄, 孙岩, 郭令智, 等. 南沙微板块边界的动力学演化 [J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 95-103. [LIU Hailing, SUN Yan, GUO Lingzhi, et al. On dynamic process and boundary faults' kinematic characteristics of Nansha microplate[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(5): 95-103.]
- [53] 朱伟林, 米立军. 中国海域含油气盆地图集 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010. [ZHU Weilin, MI Lijun. Atlas of Oil and Gas Basins, Chinese Waters[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.]
- [54] 胡见义, 牛嘉玉. 渤海湾盆地油气聚集理论和勘探实践的再深化: 为渤海湾含油气盆地发现 40 周年而作 [J]. 石油学报, 2001, 22(1): 1-5. [HU Jianyi, NIU Jiayu. The further deepening of oil-gas accumulation theory and exploratory practice of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1): 1-5.]
- [55] 庞小军, 李建平, 王冠民, 等. 渤中凹陷石南地区古近系断层活动特征及其对沉积相的控制 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(1): 11-16, 22. [PANG Xiaojun, LI Jianping, WANG Guanmin, et al. Characteristics and controlling effect of fault activity of Paleogene in Shinan area of Bozhong Depression on sedimentary facies[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27(1): 11-16, 22.]
- [56] 李文勇, 李东旭, 夏斌, 等. 北黄海盆地构造演化特征分析 [J]. 现代地质, 2006, 20(2): 268-276. [LI Wenyong, LI Dongxu, XIA Bin, et al. Characteristics of structural evolution in North Yellow Sea basin[J]. Geoscience, 2006, 20(2): 268-276.]
- [57] 蔡乾忠. 黄海含油气盆地区域地质与大地构造环境 [J]. 海洋地质动态, 2002, 18(11): 8-12. [CAI Qianzhong. Regional geology and geotectonic environment of petroliferous basins in the Yellow Sea[J]. Marine Geology Letters, 2002, 18(11): 8-12.]
- [58] 贾成业, 夏斌, 王核, 等. 东海陆架盆地丽水凹陷构造演化及油气地质分析 [J]. 天然气地球科学, 2006, 17(3): 397-401. [JIA Chengye, XIA Bin, WANG He, et al. Characteristic of tectonic evolution and petroleum geology in Lishui Sag, East China Sea basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(3): 397-401.]
- [59] 杨伟利, 王毅. 丽水、椒江凹陷伸展运动分析 [J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(3): 8-10. [YANG Weili, WANG Yi. The analysis of the Basin's extension in the Lishui-Jiajiang Sag[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(3): 8-10.]
- [60] Huang T C, Ting H H, Chen R C, et al. Basinal framework and tectonic evolution of offshore northern Taiwan[J]. Petroleum Geology of Taiwan, 1992, 27: 47-72.
- [61] Yu H S, Chow J. Cenozoic basins in northern Taiwan and tectonic implications for the development of the eastern Asian continental margin[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1997, 131(1-2): 133-144.
- [62] 张伟, 何家雄, 颜文, 等. 中国边缘海盆地构造演化与油气分布富集

- 规律[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2014, 36(2): 9-23. [ZHANG Wei, HE Jiaxiong, YAN Wen, et al. Characteristics of tectonic evolution and distribution and enrichment patterns of oil and gas in the Chinese marginal basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(2): 9-23.]
- [63] 杨海长, 陈莹, 纪沫, 等. 珠江口盆地深水区构造演化差异性与油气勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 59-68. [YANG Haichang, CHEN Ying, JI Mo, et al. Structural evolution difference and the significance for oil and gas exploration in the deep water area of the Pearl River Mouth Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 59-68.]
- [64] 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2004, 29(5): 513-517. [GONG Zaisheng. Neotectonics and petroleum accumulation in offshore Chinese basins[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(5): 513-517.]
- [65] 龚再升, 李思田, 谢泰俊. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997. [GONG Zaisheng, LI Sitian, XIE Taijun. Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997.]
- [66] 张功成, 屈红军, 刘世翔, 等. 边缘海构造旋回控制南海深水油气成藏[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.]
- [67] 代一丁. 珠江口盆地西江南洼古近系构造演化与沉积特征[J]. 中国海上油气, 2013, 25(3): 1-7. [DAI Yiding. Paleogene tectonic evolution and sedimentation in South Xijiang sag, Pearl River Mouth basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(3): 1-7.]
- [68] 徐建永, 张功成, 梁建设, 等. 北部湾盆地古近纪幕式断陷活动规律及其与油气的关系[J]. 中国海上油气, 2011, 23(6): 362-368. [XU Jianyong, ZHANG Gongcheng, LIANG Jianshe, et al. Paleogene activities of episodic rifting and their relationships with hydrocarbon in Beibuwan basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(6): 362-368.]
- [69] 邓运华. 试论中国近海两个盆地带找油与找气地质理论及方法的差异性[J]. 中国海上油气, 2012, 24(6): 1-5, 11. [DENG Yunhua. A discussion on differences of hydrocarbon geology and applicable exploration theories and methods between two basin belts offshore China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(6): 1-5, 11.]
- [70] 雷宝华, 郑求根, 李俊良, 等. 珠三坳陷珠三南断裂形成演化及其对沉积中心迁移的控制[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 807-813. [LEI Baohua, ZHENG Qiugen, LI Junliang, et al. Formation and evolution of Zhu-3 south fault and its control on the depocenter shift in Zhu-3 depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 807-813.]
- [71] 张功成. 源热共控论[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 723-738. [ZHANG Gongcheng. Co-control of source and heat: the generation and distribution of hydrocarbons controlled by source rocks and heat[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 723-738.]
- [72] 米立军, 袁玉松, 张功成, 等. 南海北部深水油气地质特征及其成因[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 27-32. [MI Lijun, YUAN Yusong, ZHANG Gongcheng, et al. Characteristics and genesis of geothermal field in deep-water area of the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 27-32.]
- [73] 谢玉洪, 张迎朝, 李绪深, 等. 莺歌海盆地高温超压气藏控藏要素与成藏模式[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 601-609. [XIE Yuhong, ZHANG Yingzhao, LI Xushen, et al. Main controlling factors and formation models of natural gas reservoirs with high-temperature and overpressure in Yinggehai Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 601-609.]
- [74] 闫桂京, 许红, 杨艳秋. 苏北—南黄海盆地构造热演化特征及其油气地质意义[J]. 天然气工业, 2014, 34(05): 49-55. [YAN Guijing, XU Hong, YANG Yanqiu. Tectonic-thermal evolution characteristics of the Northern Jiangsu and South Yellow Sea basins and their petroleum geological significance[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(05): 49-55.]
- [75] 栾锡武, 张训华. 东海及琉球沟弧盆系的海底热流测量与热流分布[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 670-678. [LUAN Xiwu, ZHANG Xunhua. Heat flow measurement and distribution of East China Sea and Ryukyu Trench Arc Back-Arc system[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(4): 670-678.]
- [76] Yamano M, Uyeda S, Foucher J P, et al. Heat flow anomaly in the middle Okinawa Trough[J]. Tectonophysics, 1989, 159(3-4): 307-318.
- [77] Kinoshit M, Yamano M, Kasumi Y, et al. Report on DELP 1988 cruises in the Okinawa Trough: Part 8. Heat flow measurements[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1991, 66(1): 211-228.
- [78] 杜学斌, 姜涛, 王振峰, 等. 莺歌海盆地 CO₂ 气富集与热流体活动关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 109-114. [DU Xuebin, JIANG Tao, WANG Zhenfeng, et al. Relation between hot fluid and CO₂ enrichment in Yinggehai basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2): 109-114.]
- [79] 高波, 陶明信, 王万春. 深部热流体对油气成藏的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(1): 30-34. [GAO Bo, TAO Mingxin, WANG Wanchun. Influences of deeply sourced thermal fluid on the formation of hydrocarbon reservoirs[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 20(1): 30-34.]
- [80] 龚再升. 中国近海大油气田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 7-38. [GONG Zaisheng. The Major Oil and Gas Fields of China Offshore[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 7-38.]
- [81] 朱伟林. 中国近海油气勘探的回顾与思考[J]. 中国工程科学, 2011, 13(5): 4-9. [ZHU Weilin. China offshore oil and gas exploration: review and thinking[J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(5): 4-9.]
- [82] 李运振, 邓运华, 徐强, 等. 中国近海新生代盆地沉积环境演变分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1066-1075. [LI Yunzhen, DENG Yunhua, XU Qiang, et al. Sedimentary environmental evolution of the Cenozoic in China offshore basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1066-1075.]
- [83] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 575-582. [ZHU Weilin, LI Jianping, ZHOU Xinhui, et al. Neogene shallow water deltaic

- system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 575-582.]
- [84] 徐长贵. 渤海古近系坡折带成因类型及其对沉积体系的控制作用[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(6): 365-371. [XU Changgui. Genetic types of Paleogene slope-break zones and their controls on depositional system in Bohai offshore[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(6): 365-371.]
- [85] 何仕斌, 李丽霞, 李建红. 渤中坳陷及其邻区第三系沉积特征和油气勘探潜力分析[J]. *中国海上油气(地质)*, 2001, 15(1): 61-71. [HE Shibin, LI Lixia, LI Jianhong. Tertiary sedimentology and hydrocarbon potential in Bozhong depression and its adjacent area[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2001, 15(1): 61-71.]
- [86] 朱筱敏, 董艳蕾, 杨俊生, 等. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布[J]. *中国科学: D辑: 地球科学*, 2008, 38(S1): 1-10. [ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, YANG Junsheng, et al. Paleogene sequence stratigraphic framework and sedimentary system distribution in Liaodong Bay area[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2008, 38(S1): 1-10.]
- [87] 赵国连, 赵澄林. 渤中凹陷地震-沉积相研究[J]. *成都理工大学学报*, 2002, 29(1): 41-48. [ZHAO Guolian, ZHAO Chenglin. Study on the seismic-sedimentary facies of the Bozhong subsidence[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2002, 29(1): 41-48.]
- [88] 张银国, 肖国林, 吴志强, 等. 南黄海盆地北部坳陷古近系沉积特征及其沉积演化[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(10): 26-33. [ZHANG Yinguo, XIAO Guolin, WU Zhiqiang, et al. Sedimentary characteristics and evolution of the paleogene in the northern depression of the South Yellow Sea Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(10): 26-33.]
- [89] 王国纯, 朱伟林. 东海盆地新生代沉积环境[J]. *沉积学报*, 1992, 10(2): 100-108. [WANG Guochun, ZHU Weilin. Cenozoic sedimentary environment in East China Sea Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(2): 100-108.]
- [90] 陈建文. 东海陆架盆地第三纪主要砂体类型及沉积环境[J]. *青岛海洋大学学报*, 1994, 24(2): 271-280. [CHEN Jianwen. The main types of sandstone bodies and sedimentary environments in the Tertiary of the Donghai Shelf Basin[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1994, 24(2): 271-280.]
- [91] 张建培, 徐发, 钟韬, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组-花港组层序地层模式及沉积演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1): 35-41. [ZHANG Jianpei, XU Fa, ZHONG Tao, et al. Sequence stratigraphic models and sedimentary evolution of Pinghu and Huagang Formations in Xihu Trough[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(1): 35-41.]
- [92] 钟建强, 黄慈流, 詹文欢, 等. 台湾海峡新生代沉积盆地的演化[J]. *中国海上油气(地质)*, 1994, 8(3): 21-28. [ZHONG Jianqiang, HUANG Ciliu, ZHAN Wenhuan, et al. Evolution of cenozoic sedimentary basin in Taiwan Strait[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1994, 8(3): 21-28.]
- [93] 廖成基, 廖明光. 珠江口盆地珠三坳陷地层及沉积演化特征分析[J]. *化工设计通讯*, 2020, 46(2): 232, 242. [LIAO Chengji, LIAO Mingguang. Analysis on the strata and sedimentary evolution characteristics of Zhusan depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2020, 46(2): 232, 242.]
- [94] 唐勇, 黎明碧, 方银霞, 等. 南海北部大陆边缘深水区长陆坡盆地沉积特征[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 869-876. [TANG Yong, LI Mingbi, FANG Yinxia, et al. Characteristics of lower slope basin in northern continental margin of South China Sea[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 869-876.]
- [95] 杨少坤, 黄丽芬, 李希宗, 等. 珠江口盆地特殊层序地层模式及其对勘探的指导意义[J]. *中国海上油气(地质)*, 1996, 10(3): 137-142. [YANG Shaokun, HUANG Lifen, LI Xizong, et al. Special sequential stratigraphic pattern in the Pearl River Mouth Basin and its significance to exploration[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1996, 10(3): 137-142.]
- [96] 解习农, 陈志宏, 孙志鹏, 等. 南海西北陆缘深水沉积体系内部构成特征[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(4): 627-634. [XIE Xinong, CHEN Zhihong, SUN Zhipeng, et al. Depositional architecture characteristics of deepwater depositional systems on the continental margins of northwestern South China Sea[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(4): 627-634.]
- [97] 郭秀蓉, 武强, 邱燕, 等. 南海曾母盆地南部陆架边缘三角洲沉积特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 1-6. [GUO Xiurong, WU Qiang, QIU Yan, et al. Analysis of the shelf-margin delta in the south of Zengmu Basin, South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 1-6.]
- [98] 何云龙, 解习农, 陆永潮, 等. 琼东南盆地深水块体流构成及其沉积特征[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 905-913. [HE Yunlong, XIE Xinong, LU Yongchao, et al. Architecture and characteristics of Mass Transport Deposits(MTDs) in Qiongdongnan basin in northern South China Sea[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 905-913.]
- [99] 李莹, 张功成, 吕大炜, 等. 琼东南盆地崖城组沉积特征及成煤环境[J]. *煤田地质与勘探*, 2011, 39(1): 1-5. [LI Ying, ZHANG Gongcheng, LV Dawei, et al. Depositional characteristics and coal forming environment of Yacheng Formation, Qiongdongnan basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2011, 39(1): 1-5.]
- [100] 吴时国, 秦蕴珊. 南海北部陆缘深水沉积体系研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 922-930. [WU Shiguo, Qin Yunshan. The research of deepwater depositional system in the northern South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 922-930.]
- [101] 陈慧, 解习农, 毛凯楠, 等. 南海北部陆缘深水峡谷体系沉积特征及形成机制[J]. *地球科学*, 2020, 45(9): 3419. [CHEN Hui, XIE Xinong, MAO Gainan, et al. Depositional characteristics and formation mechanisms of deep-water canyon systems along the northern South China Sea Margin[J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 45(9): 3419.]
- [102] 李上卿, 牛华伟, 郑军, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷与海中凹陷古近纪沉积关系探讨[J]. *海洋石油*, 2012, 32(1): 1-6. [LI Shangqing, NIU Huawei, ZHENG Jun, et al. Discussion on sedimentary relationship between Weixinan Sag and Haizhong Sag during Paleogene period in Beibuwan Basin[J]. *Offshore Oil*, 2012, 32(1): 1-6.]

- [103] 阎贫, 刘海龄, 邓辉. 南沙地区下第三系沉积特征及其与含油气性的关系[J]. *大地构造与成矿学*, 2005, 29(3): 391-402. [YAN Pin, LIU Hailing, DENG Hui. Characteristics of the Paleogene deposits in Nansha Waters and their relations to the petroleum Potential[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2005, 29(3): 391-402.]
- [104] Todd S P, Dunn M E, Barwise A J G. Characterizing petroleum charge systems in the Tertiary of SE Asia[J]. *Geological Society*, 1997, 126(1): 25-47.
- [105] 吴朝华, 赵美松, 刘海龄. 南沙中部海域沉积地层特征及其构造成因[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 853-860. [WU Chaohua, ZHAO Meisong, LIU Hailing. Characteristics of sedimentary strata in central Nansha Sea area and its tectonic origin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 853-860.]
- [106] 徐行, 姚永坚, 王立非. 南海南部海域南薇西盆地新生代沉积特征[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(3): 170-175. [XU Xing, YAO Yongjian, WANG Lifei. Cenozoic sedimentation of Nanweixi basin, the southern South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17(3): 170-175.]
- [107] 金庆焕, 吴进明, 谢秋元. 南沙西部海域沉积盆地分析与油气资源[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001. [JIN Qinghuan, WU Jinming, XIE Qiuyuan. Analysis of Sedimentary Basins and Oil and Gas Resources in Western Nansha[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001.]
- [108] 钟志洪, 王良书, 李绪宣, 等. 琼东南盆地古近纪沉积充填演化及其区域构造意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(1): 29-36. [ZHONG Zhihong, WANG Liangshu, LI Xuxuan, et al. The Paleogene basin-filling evolution of Qiongdongnan basin and its relation with seafloor spreading of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(1): 29-36.]
- [109] 何仕斌, 张功成, 米立军, 等. 南海北部大陆边缘盆地深水储层类型及沉积演化[J]. *石油学报*, 2007, 28(5): 51-56. [HE Shibin, ZHANG Gongcheng, MI Lijun, et al. Reservoir type and sedimentary evolution in the continental margin deepwater area of the northern South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 51-56.]
- [110] 穆曙光, 张以明. 成岩作用及阶段对碎屑岩储层孔隙演化的控制[J]. *西南石油学院学报*, 1994, 16(3): 22-27. [MU Shuguang, ZHANG Yiming. Reservoirs pores evolution under the control of diagenesis and stage[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1994, 16(3): 22-27.]
- [111] 李丽霞. 渤中地区第三系碎屑岩储层成岩作用研究[J]. *中国海上油气(地质)*, 2001, 15(2): 111-119. [LI Lixia. The diagenesis model of tertiary sandstone reservoir in Bozhong area[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2001, 15(2): 111-119.]
- [112] 谢武仁, 邓宏文, 王洪亮, 等. 渤中凹陷古近系储层特征及其控制因素[J]. *沉积与特提斯地质*, 2008, 28(3): 101-107. [XIE Wuren, DENG Hongwen, WANG Hongliang, et al. Palaeogene reservoir rocks in central Bohai Gulf depression and their controls[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2008, 28(3): 101-107.]
- [113] 代黎明, 徐长贵, 王清斌, 等. 石臼坨凸起西部陡坡带古物源差异演化模式及其对储层的控制作用[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(4): 51-59. [DAI Liming, XU Changgui, WANG Qingbin, et al. Difference of provenance evolution mode and its impact on reservoir in the western steep slope zone of Shijiutuo uplift, Bohai sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(4): 51-59.]
- [114] 施振飞, 张振城, 叶绍东, 等. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组储层次生孔隙成因机制探讨[J]. *沉积学报*, 2005, 23(3): 429-436. [SHI Zhenfei, ZHANG Zhencheng, YE Shaodong, et al. The mechanism of secondary pores in the reservoir of Funing Formation in Gaoyou Depression of Subei basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 429-436.]
- [115] 郝军, 苏雪波, 鲁改欣, 等. 苏北盆地白驹凹陷洋心次凹泰一段孔隙演化特征分析[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 1094-1101. [HAO Jun, SU Xuebo, LU Gaixin, et al. An analysis of porosity evolution in 1st Member of Taizhou Formation within Yangxin sub-depression, Baiju sag, Subei basin[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 1094-1101.]
- [116] 吕成福, 陈国俊, 张功成, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组碎屑岩储层特征及成因机制[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(9): 2763-2773. [LÜ Chengfu, CHEN Guojun, ZHANG Gongcheng, et al. Reservoir characteristics of detrital sandstones in Zhuhai Formation of Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(9): 2763-2773.]
- [117] 郝乐伟, 王琪, 廖朋, 等. 番禺低隆起—白云凹陷北坡第三系储层次生孔隙形成机理分析[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4): 734-743. [HAO Lewei, WANG Qi, LIAO Ming, et al. Forming mechanism of secondary porosity in Tertiary reservoirs in Panyu low uplift and north slope of Baiyun sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4): 734-743.]
- [118] 嵇喜准, 王琪, 陈国俊, 等. 珠江口盆地恩平凹陷碎屑岩储层孔隙度纵向演化特征[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(5): 643-666. [ZHUO Xizhun, WANG Qi, CHEN Guojun, et al. Vertical porosity variation of clastic reservoir rock in Enping sag, Zhujiangkou Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(5): 643-666.]
- [119] 于兴河, 姜辉, 施和生, 等. 珠江口盆地番禺气田沉积特征与成岩演化研究[J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 876-884. [YU Xinghe, JIANG Hui, SHI Hesheng, et al. Study on depositional characteristic and diagenetic evolution in Panyu Gas Field of Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 876-884.]
- [120] 陈国俊, 杜贵超, 张功成, 等. 珠江口盆地番禺低隆起第三系储层成岩作用及物性影响因素分析[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(6): 854-861. [CHEN Guojun, DU Guichao, ZHANG Gongcheng, et al. Diagenesis and main factors controlling the tertiary reservoir properties of the Panyu low-uplift reservoirs, Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(6): 854-861.]
- [121] 施和生, 雷永昌, 吴梦霜, 等. 珠一坳陷深层砂岩储层孔隙演化研究[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 169-175. [SHI Hesheng, LEI Yongchang, WU Mengshuang, et al. Research on the evolution of pores in deep sandstone reservoir in ZHU 1 Depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 169-175.]
- [122] 舒艳, 胡明毅, 蒋海军, 等. 西湖凹陷西部斜坡带储层成岩作用及孔隙演化[J]. *海洋石油*, 2011, 31(4): 63-67. [SHU Yan, HU Mingyi, JIANG Haijun, et al. Diagenesis and reservoir porosity evolution of Western Slope Zone of Xihu Sag[J]. *Offshore Oil*, 2011, 31(4): 63-

- 67.]
- [123] 陈国俊, 吕成福, 王琪, 等. 珠江口盆地深水区白云凹陷储层孔隙特征及影响因素 [J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 566-572. [CHEN Guojun, LÜ Chengfu, WANG Qi, et al. Characteristics of pore evolution and its controlling factors of Baiyun Sag in deepwater area of Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 566-572.]
- [124] 钟佳, 尤丽, 张迎朝, 等. 琼东南盆地乐东-陵水凹陷黄流组峡谷水道储层成岩作用与孔隙演化 [J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(5): 708-718. [ZHONG Jia, YOU Li, ZHANG Yingzhao, et al. Diagenesis and porosity evolution of the Huangliu Formation canyon-channel reservoir in Ledong-Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(5): 708-718.]
- [125] 马明, 陈国俊, 李超, 等. 珠江口盆地白云凹陷恩平组储层成岩作用与孔隙演化定量表征 [J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(10): 1515-1526. [MA Ming, CHEN Guojun, LI Chao, et al. Quantitative analysis of porosity evolution and formation mechanism of good reservoir in Enping Formation, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(10): 1515-1526.]
- [126] 操应长, 葱克来, 王艳忠, 等. 冀中坳陷麻固凹陷河西务构造带古近系沙河街组四段储集层孔隙度演化定量研究 [J]. *古地理学报*, 2013, 15(5): 593-604. [CAO Yingchang, XI Kelai, WANG Yanzhong, et al. Quantitative research on porosity evolution of reservoirs in the Member 4 of Paleogene Shahejie Formation in Hexiwu structural zone of Langgu sag, Jizhong Depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(5): 593-604.]
- [127] 徐燕红, 杨香华, 梅廉夫, 等. 文昌 A 凹陷珠海组低渗砂岩成岩特征与孔隙演化 [J]. *地球科学*, 2020, 45(6): 2172-2185. [XU Yanhong, YANG Xianghua, MEI Lianfu, et al. Diagenetic characteristics and porosity evolution of low permeability sandstone reservoir in Zhuhai Formation, Wenchang A sag[J]. *Earth Science*, 2020, 45(6): 2172-2185.]
- [128] 尤丽, 徐守立, 李才, 等. 低渗储集层成岩孔隙演化与“甜点”分布: 以南海北部珠江口盆地文昌 A 凹陷渐新统珠海组为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(2): 235-246. [YOU Li, XU Shouli, LI Cai, et al. Diagenesis-porosity evolution and "sweet spot" distribution of low permeability reservoirs: a case study from Oligocene Zhuhai Formation in Wenchang A sag, Pear River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 235-246.]
- [129] 谢玉洪, 伏美燕, 陈倩倩, 等. 张性盆地高温砂岩储层发育控制因素: 以珠江口盆地文昌 A 凹陷为例 [J]. *地质科技情报*, 2016, 35(1): 59-67. [XIE Yuhong, FU Meiyang, CHEN Qianqian, et al. Controlling factors of reservoir development under high temperature in an extensional basin: a case study from Wenchang A sag in Pearl River Estuary Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(1): 59-67.]
- [130] 何仕斌, 朱伟林, 李丽霞. 渤中坳陷沉积演化和上第三系储盖组合分析 [J]. *石油学报*, 2001, 22(2): 38-43. [HE Shibin, ZHU Weilin, LI Lixia. Sedimentary evolution and Neogene reservoir-seal assemblage analysis of Bozhong depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(2): 38-43.]
- [131] 刘志峰, 刘志鹏, 肖伶俐, 等. 珠三坳陷北部珠海组—韩江组沉积演化及储盖组合 [J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(9): 25-31. [LIU Zhifeng, LIU Zhipeng, XIAO Lingli, et al. Facies evolution and reservoir-seal assemblages in the Zhuhai and Hanjiang Formations, North of ZHU III Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(9): 25-31.]
- [132] CSLF. Phase I final report-task force for review and identification of standards for CO₂ storage capacity measurement[R]. Berlin, Germany: Carbon Sequestration Leadership Forum, 2005.
- [133] CSLF. Phase II final report-task force for review and identification of standards for CO₂ storage capacity measurement[R]. Berlin, Germany: Carbon Sequestration Leadership Forum, 2007.
- [134] Basava-Reddi L, Gorecki C, Wildgust N. Development of Storage Coefficients for Carbon Dioxide Storage in Deep Saline Formations[C]//Proceedings of the Second EAGE CO₂ Geological Storage Workshop. Berlin, Germany: European Association of Geoscientists & Engineers, 2009.
- [135] Goodman A, Hakala A, Bromhal G, et al. U. S. DOE methodology for the development of geologic storage potential for carbon dioxide at the national and regional scale[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(4): 952-965.