https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.123



琼东南盆地水合物富集区储层特征及勘探启示

樊 奇^{1,2},朱振宇¹,庞维新^{1,2},李清平^{1,2},周松望³,李元平⁴

1. 中海油研究总院有限责任公司,北京 100028

2. 海洋天然气水合物全国重点实验室,北京 102209

3. 中海油服股份有限公司物探事业部,天津 300450

4. 中海油深圳分公司研究院,广东深圳 518054

摘 要:天然气水合物是海洋新能源的重要开拓领域,南海琼东南盆地是水合物富集区和热点研究区.为进一步摸清琼东南 水合物富集区储层特征,选取国产自主技术装备收获的水合物岩心开展分析并获得第一手资料.通过粒度、岩矿分析(含扫描 电镜)、随钻测井、红外热成像、氯离子饱和度法等综合分析,测得储层主要是由石英(含量23%)、斜绿泥石(含量17%)、绢云 母(含量15%)、钠长石(含量14%)等组成的硅铝质粘土沉积,储层粒度中值15.1~34.1 µm,饱和度分布3%~54%,揭示了水 合物储层"细粒性、未成岩、易溃散、高电阻、高声速、强非均质性"等六大特征;结合气源、储层分析和勘探认识,建立了"异地热 成因气充注、本地微生物成因气补充、气烟囱顶部运移聚集、海底扇内横向成藏"的成藏模式,重点对123 mbsf和153 mbsf (mbsf全称为meter below seafloor,表示海底以下深度,以"m"为单位)两件原位保压岩心进行X射线和CT扫描,识别出泥质 粉砂孔隙型储层(海底扇横向为主)和南海新发现的水合物储层类型泥质粉砂微裂缝型储层(气烟囱垂向为主)两类主要储层; 提出了"以古气候一地质事件为节点关注珠江口一琼东南第四系大型砂体的赋存条件和资源潜力、加强传热传质在水合物成 藏机理和资源评价中的研究"勘探启示.研究可为中国南海天然气水合物勘查和试采提供重要科学参考. 关键词:储层特征;细粒;未成岩;勘探启示;天然气水合物;琼东南盆地;海洋地质学.

中图分类号: P67 **文章编号:** 1000-2383(2024)04-1421-10 **收稿日期:** 2022-12-27

Reservoir Characteristics and Exploration Implications of Gas Hydrate Enrichment Area, Qiongdongnan Basin

Fan Qi^{1,2}, Zhu Zhenyu¹, Pang Weixin^{1,2}, Li Qingping^{1,2}, Zhou Songwang³, Li Yuanping⁴

1. Research Institute, China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100028 China

2. State Key Laboratory of Gas Hydrates, Beijing 102209, China

- 3. Geophysical Exploration Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450, China
- 4. Research Institute of CNOOC Shenzhen Branch, Shenzhen 518054, China

Abstract: Gas hydrate is an important development of marine new energy, and the Qiongdongnan basin of the South China Sea is a hydrate enrichment and hot research area. In order to further understand hydrate reservoir characteristics of the Qiongdongnan area, thermal insulation and pressuring coring sampled by domestic technical equipment were selected for analysis and first-hand

作者简介:樊奇(1990-),男,高级工程师,博士,主要从事水合物和油气资源评价、烃源岩相关研究.ORCID:0000-0002-5490-4377. E-mail:fanqi@cnooc.com.cn

引用格式:樊奇,朱振宇,庞维新,李清平,周松望,李元平,2024.琼东南盆地水合物富集区储层特征及勘探启示.地球科学,49(4):1421-1430.

Citation: Fan Qi, Zhu Zhenyu, Pang Weixin, Li Qingping, Zhou Songwang, Li Yuanping, 2024. Reservoir Characteristics and Exploration Implications of Gas Hydrate Enrichment Area, Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 49(4):1421-1430.

基金项目:国家自然科学基金企业联合基金(Nos. U19B2005, U20B6005);中国海油重点实验室主任基金(2024—2025);国家重点研发计划 (Nos. 2021YFC2800900);中国工程科技发展战略课题(No. 21-HN-ZD024).

data were obtained. By comprehensive analysis of grain size, rock and mineral analysis (including electron microscope scanning), LWD, thermal imaging, chloride ion saturation method, etc., it is measured that the reservoir is mainly composed of siliceous and aluminous clay deposits composed of quartz (23% content), plagioclase (17% content), sericite (15% content), albite (14% content), etc., and the median grain size of reservoir is 15.1 µm to 34.1µm and the saturation distribution is 3% to 54%. It reveals six characteristics of hydrate reservoir: "fine-grained, unconsolidated, easily disintegrate and disperse, high resistance, high acoustic velocity, and strong heterogeneity". Combined with gas source, reservoir analysis and exploration knowledge, a reservoir formation model of "off-site thermogenic gas injection, local microbial gas supplement, accumulation at top of gas chimney, and horizontal formation in the submarine fan reservoir" has been established. Focusing on the X-ray and CT scanning of 123 mbsf and 153 mbsf in-situ pressure-retaining cores, two main types of reservoirs are identified: argillaceous silt pore-type reservoir (submarine fan) and argillaceous silt micro-fractured reservoir (gas chimney fluid reconstruction), a new discovered type of hydrate reservoirs in the South China Sea. Exploration inspirations are put forward, "study the occurrence and resource potential of shallow scaled sand-bodies of geological events in the Zhujiangkou and Qiongdongnan sea, and strengthen research on heat and mass transfer of reservoir formation mechanism and resource evaluation". The research will provide important scientific reference for hydrate research and production test of the South China Sea.

Key words: reservoir characteristics; fine-grained; unconsolidated; exploration inspirations; gas hydrate; Qiongdongnan basin; marine geology.

0 引言

天然气水合物是一种自然存在的、由水和天然 气分子在低温高压环境下形成的似冰状笼型复合 物,多以分散状、结核状、脉状等赋存形式分布在被 动大陆边缘和陆上冻土带.目前,天然气水合物已 在全球240处发现,并在五地实施了10次试采作业 (Liang et al., 2019; Ye et al., 2019; 何家雄等, 2022).水合物因"储量规模大",被美国、日本和中国 视为海洋新能源开拓领域和战略能源并持续投入 研发.中海油自2007年开展水合物成藏规律研究, 依托"708勘察船""奋进号"完成了多轮关键技术海 试,建成了国产自主"勘探一钻井一测井一取心一 评价一海试"一体化技术和作业能力.目前我国水 合物研发和作业能力已跻身世界前列(Ye et al., 2019; 何家雄等, 2020).

作为我国第173个新矿种,天然气水合物的理 化性质、成藏机理与常规油气不同,需要科学的系 统认识.南海神狐、琼东南海域已发现的天然气水 合物,以泥质粉砂型储层为主,其资源丰度低、矿体 非均质性强,开发难度大(Liang et al., 2019; Ye et al., 2019; Wei et al., 2019; Ren et al., 2022).对 此,自然资源部 2018年牵头建立了琼东南水合物勘 查开发先导试验区(包括多个富集区),本文选取富 集区之一进行研究.

琼东南水合物富集区位于X17-2探区,这里深 部气源充足且成藏条件有利,已成为气烟囱型渗漏 型水合物研究的热点区.该类水合物具有"地震测 井响应多解、多气源动态运聚、传热传质过程影响" 等复杂特征,预测难度较大(Deng et al., 2021; He et al., 2022; Lai et al., 2022).本文利用第一手资料 开展了水合物储层评价工作,首次识别出南海泥质 粉砂微裂缝充填型等两类主要储层,揭示了水合物 储层"高电阻、高声波速度、未成岩、细粒性、强非均 质性、易溃散"六大基本特征,重建了"异地热成因 气充注、本地微生物成因气补充、气烟囱垂向运移、 海底扇内横向成藏"的地质过程,提出"寻找第四系 大型砂体"和"关注传热传质过程"等勘探启示,以 期为南海水合物勘查提供科学参考.

1 研究区概况

琼东南盆地位于南海北部陆坡,北靠海南岛, 南为西沙永乐隆起,西接莺歌海盆地,北东以神狐 隆起与珠三坳陷、珠二坳陷相邻,是一个NE向伸展 的裂陷型沉积盆地,盆地面积8.3×10⁴ km².中生代 以来,琼东南盆地先后经历神狐运动、南海运动和 东沙运动,具有"晚白垩世—晚渐新世多幕裂陷期、 早中新世—中中新世热沉降期、晚中新世以来新构 造期"三期分异的构造和地层特征(吴克强等, 2022;徐长贵和尤丽,2022).

琼东南水合物富集区包括海马冷泉富集区、乐 东一陵水富集区、松南一宝岛富集区等(图1,陈鸣 等,2022;黄时卓等,2024).本文选取的乐东一陵水 富集区位于松南低凸南部,水深1650~1800 m左 右,海底地形平坦.该区水合物主要赋存于下伏气



图 1 研究区位置(红框)及琼东南盆地地层柱状图 Fig.1 Location map (red frame) of study area and stratigraphic column of the Qiongdongnan basin



图 2 琼东南盆地水合物岩心野外特征 Fig.2 Field characteristics of hydrate cores in the Qiongdongnan basin a. 浅表层孔隙型水合物储层样品;b. 富集层段点火试验;c. 释压储层剖切和块状水合物岩心;d. 岩心中的碳酸盐岩介壳及生物化石

烟囱和上覆海底扇组成的地质体中,其中乐东组三 段海底扇 BSR 较发育(深度 120~150 mbsf)(mbsf 全称为 meter below seafloor,表示海底以下深度,以 "m"为单位),气烟囱微裂缝是深部流体的输导通 道和储集体(Lai *et al.*,2022).

该区水合物成藏证据及重要条件包括:(1)该 区实施了多次针对水合物的测井作业,收获了保温 保压水合物岩心,证实水合物富集成带;(2)研究区 内 X17-2-1 探井在莺歌海组海底扇砂岩储层获得 高产气流(110×10⁴m³/d),深部气较充足;(3)第四 系海底扇粉砂沉积物源主要来自海南岛、越南红河 流域搬运,具有块体流搬运特征;(4)NE向气烟囱 构造成带发育,空白带反射和BSR集中连片;(5) 地温梯度高(6.5~11.3 ℃/hm),流体和冷泉活动较 多;(6)油气井作业和ROV调查发现局部海底有裸 漏的水合物和气体渗漏,可见双壳类和盲虾等生物 系统(Wu et al., 2018; 匡增桂等, 2018; Ye et al., 2019; Wei et al., 2019; 张迎朝等, 2019;张锟等, 2020;张旭东等, 2021).

2 水合物储层岩电特征

2.1 粒度特征

研究选取了水合物钻孔 H1 井 15个不同深度样品(覆盖深度 180 mbsf),用激光粒度仪进行现场粒度分析(图 2).依据国标 GB/T 19077.12008处理样品,先分别称重 0.5 g的沉积物样品放入 1 000 mL的去离子水中,再加入 0.5 mol/L的分散剂六偏磷酸钠,然后均匀搅拌至少 1 min使样品均匀分散,最后进行烘干和测试.Shepard标准粒度测试结果见表1.结果表明,样品的粒径中值范围为 15.1~

表1	琼东南盆地H1井水合物储层中位粒度

 Table 1
 Median particle size distribution of reservoir samples of Well H1 in the Qiongdongnan basin

深度(m)	粒度中值(µm)
0.10	24.856
0.50	27.641
0.80	34.112
0.95	24.600
11.20	24.760
12.30	21.312
27.20	15.055
87.20	16.710
100.70	17.946
123.00	30.642
127.20	27.784
129.70	28.944
137.20	21.804
153.00	15.962
172.00	25.555

34.1 μm,最集中分布在区间 21.3~28.9 μm,储层具 有细粒沉积特性.其中,在取样深度 0.8 mbsf 和 123 mbsf处,两处样品粒度中值偏大,进一步鉴定为 碳酸盐岩结壳和粉砂质沉积,指示古冷泉活动遗迹 (Ye *et al.*, 2019; Liang *et al.*, 2019; Wan *et al.*, 2020).

2.2 矿物组分和电镜特征

选取水合物富集层段153 mbsf处样品,通过船载X射线衍射仪进行岩石学矿物学分析,测得样品 主要矿物组分为石英(含量23%)、斜绿泥石(含量 17%)、绢云母(含量15%)、钠长石(含量14%)、碳酸钙(含量10%)、伊利石(含量10%)、钾微斜长石 (含量3%)、黄铁矿(含量1%)、闪石(含量1%)、样 品对应的主量元素包括二氧化硅(含量54%)、三氧 化二铝(含量15%)、氧化钙(含量5%)、三氧化二铁 (含量5%)、氧化钾(含量4%)、氧化镁(含量3%)、 氧化钠(含量2%),三氧化硫(含量2%)、二氧化钛 (含量1%)(图3).

同时,利用船载扫描电镜(Nova NanoSEM 450)对样品进行镜下观察鉴定(图4).首先,称重 10g样品烘干,然后将一小勺干燥样品抹在胶带上,进行场发射扫描电镜测量.观察见层片状伊利石为 主矿物,矿物颗粒边界特征弱,表明储层为富硅铝质、未成岩粘土沉积.

2.3 测井响应特征

随钻测井是水合物研究最广泛的方法(Liang et al., 2019; Wei et al., 2019).研究区水合物储层 在平面上表现为深海扇席状砂、远端漫溢沉积物等 细粒重力流沉积,在垂向上水合物富集层段发育有 连续厚层、砂-泥薄互层、单一薄层3种沉积序列, 沉积序列决定了测井曲线为连续跳跃、间断周期跳 跃、单层快速跳跃等响应.其中,富含水合物层段表



Fig.3 Mineral components and main oxide of hydrate samples of Well H1 in the Qiongdongnan basin



图 4 琼东南盆地水合物富集区H1井重点层段储层岩心扫描电镜 Fig.4 SEM images of representative samples of Well H1 in the Qiongdongnan basin



图 5 琼东南盆地H1井水合物测井响应特征及综合分析 Fig.5 Logging characteristics and comprehensive analysis of Well H1 in the Qiongdongnan basin

现出了中一高电阻率、中一高声波速度、低自然伽马、高中子孔隙度、低密度测井等响应(图5).

特别是高电阻率和高声波速度是最显著的岩 电特征.在单一薄层粉砂水合物层段,深一中一浅 探测电阻率常表现为同向依次叠置不交叉的倒钟 状、箱状特征(区别于下伏游离气的低电阻特征), 声波速度表现为倒钟状、或箱状(区别于下伏游离 气的低速特征).在含水合物层段粉砂质和泥质沉积 的薄互层层段(图5,1812~1876m),电阻率和声 波速度表现为倒圣诞树状、韵律特征,异常响应明 显.在数值上,研究区中一高饱和度水合物层段对 应 自然 伽 马 60~80 API,对应电阻率达 58~ 200 Ω•m,对应声波时差 160~170 us/ft,区别于正 常地层或含气层.

3 水合物储层类型及赋存特点

3.1 水合物储层类型

在对孔隙型储层(海底扇横向发育)和微裂缝 型储层(气烟囱纵向发育)的理论认识之上,重点对 123 mbsf和153 mbsf两件原位保压样品进行了X射 线和CT扫描(SMX-225CTX-SV,分辨率40μm), 观察分析了储层特征(图6).第1类为缺少裂缝的泥 质粉砂孔隙型储层,孔隙结构(灰黑色)相对均质, 水合物矿体呈核状、分散状分布于储层中,未见连 续脉状矿体;第2类为南海首次发现的泥质粉砂微裂缝储层,裂缝(灰黑色)走向不一致,核部裂缝可观察到少量脉状水合物,这类储层非均质性强、各向异性明显,相关工作较少,应加强研究.

3.2 水合物饱和度分布特点

一般认为,南海水合物饱和度超过30%即属于 高饱和度.目前,琼东南海域已发现的水合物饱和 度分布3%~54%,平均30%,处于中一高水平 (Deng *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2022; He *et al.*, 2022).利用便携式电阻率仪,对孔隙水的电导率进



图6 琼东南盆地不同类型水合物储层X射线和CT扫描

Fig.6 $\,$ X-ray and CT scanning of coring of different reservoirs in the Qiongdongnan basin

a~c.孔隙型储层;d~f.微裂隙型储层

表 2	琼东南盆地水合物样品饱和度估算结果

Table 2 Saturation estimation results of hydrate reservoir in the Qiongdongnan basin

样品号	取样深度(m)	氯离子浓度(10 ⁴ mg/L)	电导率(ms/cm)	氯离子估算饱和度(%)
1	11.2	1.66	58.63	18.10
2	27.2	1.49	53.82	27.16
3	67.2	1.85	53.20	7.30
4	87.2	1.76	52.42	12.35
5	97.2	1.98	51.00	饱和度基准
6	100.7	3.43	68.19	饱和度基准
7	123	2.28	38.28	37.25
8	129.7	2.82	39.67	19.76
9	137.2	3.08	62.3	11.34
10	153	1.74	82.86	54.75

注:氯离子浓度计算公式为 $S = (1 - Cl_{pw}/Cl_{sw})/\rho_h,$ 其中 ρ_h 指天然气水合物密度, Cl_{pw} 指实测氯离子浓度, Cl_{sw} 指基线氯离子浓度.

行计算和检测,利用氯离子仪化验孔隙水的氯离子 浓度估算饱和度.孔隙水氯离子浓度分布范围在 1.40×10⁴~4.0×10⁴ mg/L; 电导 率 分 布 在 35~ 85 ms/cm.以 97.2 mbsf和 100.7 mbsf的样品为基准 计算得出富集区样品饱和度分布 3%~54% 区 间(表 2).

3.3 热成像测温特征

通过红外热成像仪对 123 mbsf 和 153 mbsf 获 取的水合物释压岩心在现场测试.结果表明:在室 温(27℃)条件下,岩心样品表面温度区间为-3.1~ 30℃.块状水合物样品具有低温异常特征(-3.1~ 0℃),并与同框点燃后的水合物高温异常(89℃)形 成对比,确认水合物的低温可燃的特性.储层整体 呈圆柱状(紫色部分,约25~26℃),低温成像的水 合物矿体(黑色,1.6℃)呈斑块状分布于周围,取心 收获较完整(图7).

同时观察到:(1)在岩心取出初始阶段,储层呈 现较好的圆柱状,但样品在测试过程中逐渐垮塌、 溃散成粥状特征,反映储层自持性差、未成岩固结, 水合物对储层骨架有重要支撑作用;(2)多段岩心 观察见到较多的零星分布的水合物矿体,反映储层 有效渗透率低、连通性差.

4 水合物储层成因及控制因素

基于水合物富集区"异地热成因气充注、本地 微生物成因气补充、气烟囱顶部运移聚集、海底扇 内横向成藏"地质过程和模式(图8),研究分析了储 层成因和控制因素.

实测和调研表明,松南低凸水合物气源主要来 自本地微生物气和陵水凹陷、东次洼的热成因气输 入(占比近40%),崖城组、陵水组和三亚组气源岩 在生气窗内(3150~5000 m, $Ro=0.5\%\sim1.3\%$), 可生成热成因气通过砂体和大型断裂运移到气烟 囱,气烟囱作为流体幕式运移的主要渗漏通道(匡 增桂等,2018;Liang et al., 2019; Wei et al., 2019; Ye et al., 2019),在上涌流体和静水压力的长期积 累和瞬间释放下形成了多期的微裂缝储层,这类微 裂缝型储层是南海琼东南海域新发现的储层类型 和渗漏型水合物主要储集体.同时,上覆海底扇与 气烟囱叠置连通,在流体势作用下,气体汇聚到气 烟囱顶部后会优先向渗漏率更好的富砂质海底扇 两翼横向扩展,并在扇体颗粒间孔隙充注聚集,研 究区乐东组三段的这套海底扇是盆地西南方向物 源形成的一套较为年轻的优质富粉砂质储集体,泥 质含量相对少,气体的扩散范围广难以对原始粒间



图 7 琼东南盆地水合物岩心热红外成像现场测试结果 Fig.7 Thermal infrared imaging features of hydrate cores in the Qiongdongnan basin



Fig.8 Distribution of different hydrate reservoirs and hydrate formation moderns of the Qiongdongnan basin

孔改造,因此发育了孔隙型储层和孔隙充填型水 合物.

5 勘探启示

经过多年追赶,我国水合物勘查工作取得了巨大的进步,继美日之后建成了自主试采技术装备及 作业能力,但依旧面临较大困难和挑战(李林等, 2023):一是南海北部两大含油气盆地尚未发现大 规模砂质水合物,勘探压力大;二是成藏机理中矿 场尺度的水合物传热传质研究甚少(Wei *et al.*, 2019; Ye *et al.*, 2019;赵克斌, 2019;何家雄等, 2020;王秀娟等, 2021).笔者结合目前工作进展提出 如下启示:

(1)以古气候等地质事件为节点研究珠江口-琼东南第四系砂体的赋存条件和资源潜力.对比日 本、韩国的砂岩型水合物试采目标,浊积体砂岩型 水合物是优质的水合物资源.南海已发现的水合物 多为泥质粉砂型水合物,难以支撑生产性试采目标 (5万m³/d)和商业门限(30万m³/d),这指出了第四 系大型砂体的发育潜力问题.以珠江口盆地为例, 白云峡谷通常被认为是陆坡限制型峡谷,其砂体搬运能力弱.但新研究发现,在中更新世气候转型期(0.8 Ma),海平面旋回从41 ka增加到100 ka,这种大幅海平面下降为砂体输运提供了便利.因此,在高精度层序地层格架内,以地质气候事件为节点, 摸清5.5 Ma以来海底峡谷系统沉积演化过程、研究 第四系大型砂体的发育潜力对于优质水合物预测 很重要.

(2)加强传热传质过程在水合物成藏机理和资源评价中的研究.传质与传热作用普遍存在于地质流体活动,但很多地质工作者对水合物的温敏特性理解薄弱.近3年琼东南水合物钻后评价结果表明,需要加快矿场尺度下水合物成藏机理的传热传质定量化模拟.气烟囱等流体渗漏活动伴随着传热传质过程,这种温度压力异常直接影响地层中水合物赋存状态和规模.墨西哥湾、黑海等地区地热流调查工作发现,气烟囱核部温度场、地温梯度在短距离内显著变化,抑制了水合物的聚集(Fang et al., 2019;张旭东等,2021),这与琼东南水合物富集区W8-18 井作业情况类似(核部地温梯度11.3℃/hm).现有温压场主要是通过地温梯度和气源类型

估算的一维线性稳定温压场,难以体现和衡量非均 质地质作用.通过多手段多点数据建立变温压场模 型,开展矿场尺度的水合物传热传质研究,有助于 深入成藏机理和可采资源评价.

6 结论

(1)通过粒度、岩矿分析(扫描电镜)、随钻测井、热成像、氯离子饱和度法等综合分析,揭示了水合物储层"细粒性(粒度中值15.1~34.1 μm)、未成岩固结性(硅铝质粘土沉积)、高电阻、高声波速度、强非均质性(饱和度分布3%~54%)、易溃散"等六大特征;

(2)基于创建的"异地热成因气充注、本地微生物成因气补充、气烟囱顶部运移聚集、海底扇内横向成藏"的成藏模式,识别出泥质粉砂孔隙型储层 (海底扇横向发育)和南海新发现的泥质粉砂微裂 缝型储层(气烟囱纵向发育)两类主要储层,分析了 孔隙流体活动形成的压力差异是储层主控因素;

(3)根据现有工作,提出了"以地质一古气候事件为节点研究珠江口一琼东南第四系大型砂体的 赋存条件和资源潜力、加强水合物成藏机理中传热 传质研究"的勘探启示.

致谢:感谢两位审稿专家的宝贵意见,致谢中 海油南海水合物关键技术装备海试任务参加人员.

References

- Chen, M., Sun, D.Q., Wu, J.B., et al., 2022. Fine Characterization and Exploration Direction Prediction of Gas Hydrate Reservoirs in Songnan Low Uplift, Qiongdongnan Basin, South China Sea. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 49(1): 24-35(in Chinese with English abstract).
- Deng, W., Liang, J. Q., Zhang, W., et al., 2021. Typical Characteristics of Fracture-Filling Hydrate-Charged Reservoirs Caused by Heterogeneous Fluid Flow in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 124: 104810. https://doi. org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104810
- Fang, Y. X., Wei, J. G., Lu, H. L., et al., 2019. Chemical and Structural Characteristics of Gas Hydrates from the Haima Cold Seeps in the Qiongdongnan Basin of the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 182: 103924. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103924
- He, J.X., Ning, Z.J., Zhao, B., et al., 2022. Preliminary Analysis and Prediction of Strategic Replacement Area

for Gas Hydrate Exploration in South China Sea. *Earth Science*, 47(5): 1549-1568(in Chinese with English abstract).

- He, J.X., Zhong, C.M., Yao, Y.J., et al., 2020. The Exploration and Production Test of Gas Hydrate and Its Research Progress and Exploration Prospect in the Northern South China Sea. *Marine Geology Frontiers*, 36 (12): 1–14(in Chinese with English abstract).
- He, Y. L., Liang, J. Q., Kuang, Z. G., et al., 2022. Migration and Accumulation Characteristics of Natural Gas Hydrates in the Uplifts and Their Slope Zones in the Qiongdongnan Basin, China. *China Geology*, 5(2): 234-250. https://doi.org/10.31035/cg2022004
- Huang, S.Z., Li, F., Song, P., et al., 2024. Geophysical Identification Technology of Ultra Deep Water and Shallow Gas Reservoirs in Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 49(1): 313-323(in Chinese with English abstract).
- Kuang, Z. G., Fang, Y. X., Liang, J. Q., et al., 2018. Geomorphological–Geological–Geophysical Signatures of High–Flux Fluid Flows in the Eastern Pearl River Mouth Basin and Effects on Gas Hydrate Accumulation. *Scientia Sinica (Terrae)*, 48(8): 1033–1044(in Chinese).
- Lai, H. F., Qiu, H. J., Liang, J. Q., et al., 2022. Geochemical Characteristics and Gas-to-Gas Correlation of Two Leakage-Type Gas Hydrate Accumulations in the Western Qiongdongnan Basin, South China Sea. Acta Geologica Sinica, 96(2): 680-690. https://doi.org/ 10.1111/1755-6724.14931
- Li, L., Wang, B., Sun, L.Y., et al., 2023. Characteristics and Controlling Factors of Concentrated Gas Hydrate Occurrence in Zhongjian Basin, South China Sea. *Earth Science*, 48(12): 4628-4640(in Chinese with English abstract).
- Liang, J. Q., Zhang, W., Lu, J. A., et al., 2019. Geological Occurrence and Accumulation Mechanism of Natural Gas Hydrates in the Eastern Qiongdongnan Basin of the South China Sea: Insights from Site GMGS5-W9-2018. *Marine Geology*, 418: 106042. https://doi.org/ 10.1016/j.margeo.2019.106042
- Ren, J. F., Cheng, C., Xiong, P. F., et al., 2022. Sand-Rich Gas Hydrate and Shallow Gas Systems in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. Journal of Petroleum Science and Engineering, 215: 110630. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110630
- Wan, Z. F., Chen, C. M., Liang, J. Q., et al., 2020. Hydrochemical Characteristics and Evolution Mode of Cold Seeps in the Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Geofluids*, 2020: 4578967. https://doi.org/10.1155/

2020/4578967

- Wang, X.J., Jin, J.P., Guo, Y.Q., et al., 2021. The Characteristics of Gas Hydrate Accumulation and Quantitative Estimation in the North Slope of South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 1038-1057(in Chinese with English abstract).
- Wei, J. G., Liang, J. Q., Lu, J. G., et al., 2019. Characteristics and Dynamics of Gas Hydrate Systems in the Northwestern South China Sea—Results of the Fifth Gas Hydrate Drilling Expedition. *Marine and Petroleum Geology*, 110: 287-298. https://doi. org/10.1016/j. marpetgeo.2019.07.028
- Wu, K.Q., Zeng, Q.B., Li, H.Y., et al., 2022. Accumulation Laws and Exploration Fields of Natural Gas in Northern South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 34(5): 23-35(in Chinese with English abstract).
- Wu, X. M., Liang, Q. Y., Ma, Y., et al., 2018. Submarine Landslides and Their Distribution in the Gas Hydrate Area on the North Slope of the South China Sea. *Energies*, 11(12): 3481. https://doi.org/10.3390/en11123481
- Xu, C.G., You, L., 2022. North Slope Transition Zone of Songnan - Baodao Sag in Qiongdongnan Basin and Its Control on Medium and Large Gas Fields, South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 49(6): 1061-1072(in Chinese with English abstract).
- Ye, J. L., Wei, J. G., Liang, J. Q., et al., 2019. Complex Gas Hydrate System in a Gas Chimney, South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 104: 29-39. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.03.023
- Zhang, K., Song, H.B., Wang, H.B., et al., 2020. A Preliminary Study on the Active Cold Seeps Flow Field in the Qiongdongnan Sea Area, the Northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 65(12): 1130-1140(in Chinese).
- Zhang, X.D., Yin, C., Zeng, F.X., et al., 2021. Collective Fluid Flow System and Its Implications for Gas Hydrate Accumulation in the North Slope of the South China Sea. *Geological Bulletin of China*, 40(S1): 280-286(in Chinese).
- Zhang, Y.Z., Gan, J., Xu, X.D., et al., 2019. The Source and Natural Gas Lateral Migration Accumulation Model of Y8-1 Gas Bearing Structure, East Deep Water in the

Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 44(8): 2609-2618 (in Chinese with English abstract).

Zhao, K.B., 2019. Occurrence and Accumulation Characteristics of Natural Gas Hydrate in the Eastern Nankai Trough, Japan. *Petroleum Geology & Experiment*, 41 (6): 831-837, 864(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈鸣,孙殿强,吴进波,等,2022.琼东南盆地松南低凸起天 然气水合物储层精细表征及勘探方向预测.成都理工 大学学报(自然科学版),49(1):24-35.
- 何家雄, 宁子杰, 赵斌, 等, 2022. 南海天然气水合物资源勘 查战略接替区初步分析与预测. 地球科学, 47(5): 1549-1568.
- 何家雄,钟灿鸣,姚永坚,等,2020.南海北部天然气水合物 勘查试采及研究进展与勘探前景.海洋地质前沿,36 (12):1-14.
- 黄时卓,李芳,宋鹏,等,2024.琼东南盆地超深水浅部气藏 地球物理识别技术.地球科学,49(1):313-323.
- 匡增桂,方允鑫,梁金强,等,2018.珠江口盆地东部海域高 通量流体运移的地貌一地质一地球物理标志及其对水 合物成藏的控制.中国科学:地球科学,48(8):1033-1044.
- 李林, 王彬, 孙鲁一, 等, 2023. 南海中建盆地天然气水合物 富集特征与控制因素. 地球科学, 48(12): 4628-4640.
- 王秀娟, 靳佳澎, 郭依群, 等, 2021. 南海北部天然气水合物 富集特征及定量评价. 地球科学, 46(3): 1038-1057.
- 吴克强,曾清波,李宏义,等,2022.南海北部天然气成藏规 律与勘探领域.中国海上油气,34(5):23-35.
- 徐长贵, 尤丽, 2022. 琼东南盆地松南一宝岛凹陷北坡转换 带特征及其对大中型气田的控制. 石油勘探与开发, 49(6): 1061-1072.
- 张锟, 宋海斌, 王宏斌, 等, 2020. 南海北部琼东南海域活动 冷泉流场特征初探. 科学通报, 65(12): 1130-1140.
- 张旭东, 尹成, 曾凡详, 等, 2021. 南海北部陆坡聚集流体活动系统及其对天然气水合物成藏的指示意义. 地质通报, 40(增刊1): 280-286.
- 张迎朝, 甘军, 徐新德, 等, 2019. 琼东南盆地深水东区 Y8-1含气构造天然气来源及侧向运聚模式. 地球科学, 44 (8): 2609-2618.
- 赵克斌, 2019. 日本南海海槽东部天然气水合物产出与富集 特征. 石油实验地质, 41(6): 831-837, 864.