

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.119>



# 南海天然气水合物资源勘查战略 接替区初步分析与预测

何家雄<sup>1,2</sup>, 宁子杰<sup>3\*</sup>, 赵斌<sup>2,3</sup>, 万志峰<sup>4</sup>, 孟大江<sup>3</sup>

1. 中国科学院大学, 北京 100049
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州 511458
3. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东广州 510075
4. 中山大学海洋科学学院, 广东珠海 519000

**摘要:**二十多年来,南海天然气水合物勘查评价均主要集中在南海北部大陆边缘陆坡深水区,且先后在珠江口盆地神狐、珠江口盆地东部海域调查区和琼东南盆地陵水-松南调查区取得了天然气水合物勘查试采的重大突破及进展,陆续发现了两个大规模的天然气水合物藏,初步评价预测南海天然气水合物资源规模达800亿吨油当量左右,取得了南海天然气水合物勘探的阶段性重大成果.然而,南海天然气水合物资源进一步深化和拓展勘探的有利领域在哪里?尤其是可持续滚动勘探的战略接替区及选区在何处?其与目前陆坡深水油气及水合物勘探紧密相邻的外陆坡-洋陆过渡带(OCT)乃至洋盆区是否具有天然气水合物形成的地质条件?根据海洋地质调查及初步的地质综合分析研究,认为外陆坡-洋陆过渡带乃至洋盆区具备天然气水合物成藏的基本地质条件,可作为南海未来天然气水合物勘查的战略接替区和可持续滚动勘探的战略选区及资源远景区.针对这些影响和决定将来天然气水合物勘探决策部署及走向等关键问题进行初步分析与探讨,抛砖引玉希望能够对未来南海天然气水合物资源勘查评价及战略接替区之选择有所裨益!

**关键词:**南海;天然气水合物资源;可持续滚动勘探;勘查战略接替区分析;勘探远景区预测;油气地质.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2022)05-1549-20

收稿日期: 2021-08-10

## Preliminary Analysis and Prediction of Strategic Replacement Area for Gas Hydrate Exploration in South China Sea

He Jiaxiong<sup>1,2</sup>, Ning Zijie<sup>3\*</sup>, Zhao Bin<sup>2,3</sup>, Wan Zhifeng<sup>4</sup>, Meng Dajiang<sup>3</sup>

1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
2. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China*
3. *Guangzhou Marine Geological Survey of China Geological Survey, Guangzhou 510075, China*
4. *School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000, China*

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划项目(No.2009CB219501);中国地质调查局项目(Nos.GZH201100305,DD20190232);广东省区域联合基金项目(No.2020A1515110405).

**作者简介:**何家雄(1956-),男,岗位教授,博士,主要从事深水油气及水合物成藏综合研究. ORCID: 0000-0002-8144-7060. E-mail: hejx@gig.ac.cn

\* **通讯作者:**宁子杰, ORCID: 0000-0003-3064-8855. E-mail: ningzijie@outlook.com

**引用格式:**何家雄,宁子杰,赵斌,万志峰,孟大江,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.

**Citation:** He Jiaxiong, Ning Zijie, Zhao Bin, Wan Zhifeng, Meng Dajiang, 2022. Preliminary Analysis and Prediction of Strategic Replacement Area for Gas Hydrate Exploration in South China Sea. *Earth Science*, 47(5): 1549-1568.

**Abstract:** The natural gas hydrate exploration and evaluation of South China Sea are mainly concentrated in continental margin slope deep water area of the northern South China Sea in the last 20 years. Major breakthroughs in the exploration and production of natural gas hydrate have been made in Shenhu area, Dongsha area and Lingshui-Songnan area of Qiongdongnan basin, where three billions of cubic meters of reserves of natural gas hydrate reservoir were found. A preliminary evaluation prediction about the south China sea natural gas hydrate resources is scale of 80 billion tons of oil equivalent, which has made major achievements in the natural gas hydrate exploration stage of South China Sea. However, where are the gas hydrate resources beneficial areas to further deepen and expand exploration in the South China Sea? In particular, where are the strategic replacement areas for sustainable rolling exploration? Is there any geological condition for gas hydrate formation in the continental slope-ocean continent transition (OCT) zone or even ocean basin area which is closely adjacent to the exploration of oil, gas and hydrate in deep water of continental slope at present? In this paper it intends to make a preliminary analysis and discussion on the key issues affecting and determining the future deployment and trend of gas hydrate exploration. It is hoped that it can be of some benefit to the exploration and evaluation of gas hydrate resources in the South China Sea and the selection of strategic replacement areas.

**Key words:** South China Sea; gas hydrate resources; sustainable progressive exploration; analysis of exploration strategic replacement area; prediction of exploration prospect area; petroleum geology.

## 0 引言

天然气水合物是天然气分子和水分子在低温高压环境下形成的具有笼型结构的固体物质,因其所含天然气可燃且为白色冰状固体,故俗称“可燃冰”。天然气水合物具有清洁、能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅等特征,其产出的天然气主要成分为甲烷,总资源量约为  $21 \times 10^{15} \text{ m}^3$ ,是目前已知煤、石油和天然气储量总和的 2 倍(Milkov, 2003)。天然气水合物形成必须具备充足的烃源供给和低温高压环境,且主要赋存于海底以下 0~1 000 m 的松散沉积物中和大陆永久冻土带内(陆红锋等, 2011)。

天然气水合物形成及分布主要受气源供给、温压环境和相对稳定的构造地质条件等因素的控制和影响,但其主控因素及决定性条件,则在于其必须具有充足的气源供给和畅通的运聚通道与相对稳定的高压低温环境。天然气水合物勘探实践及研究表明,水合物气源即烃源供给主要为沉积物中的原地生物成因气和异地热解成因气,以及以某种气(生物气/热解气)为主的混合气。生物成因气即指处在生物化学作用带(成熟门槛以上)的深水海底浅层沉积物的有机质通过生物化学作用所形成的生物甲烷气,其是全球迄今为止勘探发现的大多数天然气水合物矿藏的主要气源成因类型;热解气则是深水海底深部沉积的烃源岩有机质热演化(热力作用)所形成的成熟-高熟烃类天然气,其亦可为深水海底浅表层天然气水合物矿藏提供烃源供给,但必须具有非常畅通的纵向运聚通道系统与高压低温稳定带的浅表层水合物矿藏互联互通密切结合

方可成藏。目前全球水合物勘探实践及研究中发现的这种深部热解气供烃成藏的水合物类型非常少,仅在墨西哥湾等少数地区有所发现(何家雄等, 2013, 2015, 2016)。综上所述,天然气水合物成因成藏类型比较复杂,根据不同气源供给和成藏赋存方式,可以将全球天然气水合物藏划分为“扩散型”和“渗漏型”两种主要赋存产出类型,亦有专家将南海北部天然气水合物成藏模式及类型分为两类三型,即“原地生物气扩散型”和“深部热解气运聚渗漏型”两类;三型则为生物气气源自生自储原地扩散型天然气水合物成藏模式、热解气气源断层裂隙输导下生上储渗漏型天然气水合物成藏模式和热解气气源底辟及气烟囱输导下生上储渗漏型天然气水合物成藏模式(何家雄等, 2015, 2016)。当然,还有专家将南海北部天然气水合物成藏模式划分为扩散型、渗漏型及复合混合型(Tréhu *et al.*, 2006; 梁金强等, 2016; Ye *et al.*, 2018; 张伟等, 2020)。总之,虽然天然气水合物成因成藏类型及赋存特征研究近年来已取得了一些重大进展和突破,但仍然存在很多难点和疑惑/疑点,这些问题均须进一步深化研究与不断的勘探实践及探索所佐证。

南海北部大陆边缘深水区,是中国天然气水合物开展海洋地质调查最早、勘查研究程度最高的地区,也是中国天然气水合物成藏地质条件及勘探前景最佳区域之一。南海外陆坡-洋陆过渡带乃至洋盆区天然气水合物气源供给及其成因成藏特征,其可能与全球水合物矿藏一样,亦主要来自深水海底浅部未成岩沉积物中形成的大量生物气,且生物甲

烷气源往往在近距离及原位(原地)供给充注,在邻近的高压低温稳定带中形成(扩散型或渗漏型)天然气水合物矿藏.尚须强调指出,在南海陆坡及洋陆过渡带,某些断层裂隙及气烟囱非常发育的局部地区亦存在深部热解气气源供给形成的(渗漏型)水合物成因成藏类型.但其必须具有非常畅通的不同层位层系断层裂隙及气烟囱互联互通等纵向运移通道系统输送,方可在深水海底浅表层(小于500 m)高压低温稳定带形成天然气水合物藏.迄今为止,我国在南海北部陆坡深水区已开展了大规模深水油气勘探和天然气水合物资源勘查评价及钻探工作,并在珠江口盆地神狐调查区成功实施了两次天然气水合物的试采工程项目.尚须强调指出,二十多年来,南海天然气水合物勘查评价均主要集中在南海北部陆坡深水区,且先后在珠江口盆地神狐、珠江口盆地东部海域调查区及琼东南盆地陵水-松南调查区,取得了天然气水合物勘查评价及钻探试采的重大突破及进展,陆续发现了两个大规模的天然气水合物矿藏.然而,南海天然气水合物勘查的进一步深化与拓展方向及勘探领域在哪里?天然气水合物可持续滚动勘探及可接替战略选区又在何处?与目前陆坡区深水油气及天然气水合物勘探紧密相邻的外陆坡-洋陆过渡带(OCT)乃至洋盆区是否具有天然气水合物形成的地质条件?很显然,这些均是影响和决定未来天然气水合物勘探决策部署及走向的关键核心问题.鉴于此,本文将以南海大陆边缘及洋陆过渡带和洋盆深水区为主要研究对象,系统分析总结南海天然气水合物资源勘探开发现状,重点对该区天然气水合物可持续滚动勘探的战略接替区(后备选区)进行初步分析探讨,以期对未来南海天然气水合物资源勘查评价及战略接替区优选等有所裨益!

## 1 南海水合物勘查评价及研究现状

天然气水合物形成必须具备充足的气源供给、有效运移通道和适宜赋存的高压低温环境,同时亦受储层微断裂构造和沉积物储集物性、孔隙水盐度等沉积构造多因素的影响(吴能友等,2008).全球天然气水合物主要分布于陆架-陆坡、边缘海盆等海洋深水环境和南北极或中低纬度(如青藏高原)永久冻土带.其中,97%的天然气水合物资源均赋存于海洋深水沉积环境(高爱国,2001).我国南海位于欧亚板块、澳大利亚板块和太平洋板块相互交

汇处,是西太平洋具有典型大洋地壳的最大边缘海,其展布面积约为 $350 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要由大陆架、大陆坡及各种岛礁和洋陆过渡带及中央洋盆所组成.其中,大陆架面积约为 $168.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (占南海的48.14%),大陆坡面积为 $126.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ (占南海的36.12%),中央洋盆面积为 $55.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ (占南海的15.74%)(张洪涛等,2007).南海不同区域陆缘(大陆边缘)性质各异且地貌类型复杂、崎岖海底发育,陆架及大陆坡宽广、新生代沉积充填物巨厚、沉积有机质丰富,具有较好的油气及天然气水合物成藏条件和勘探前景(Kvenvolden, 1988; 姚伯初, 2001; 张光学等, 2002; 张光学和黄永祥, 2003; 姚伯初等, 2004; 张功成等, 2007).南海经历了早白垩世末、始新世末和中中新世末3次构造运动,基底构造复杂,新构造作用活跃,中中新统之下沉积盖层断裂构造发育,有些断裂自基底断至海底,既控制着陡坡地形的形成,又有利于烃气向上远距离输送,此外南海洋底还大量发育底辟构造、海底滑塌体以及褶皱等有利于水合物形成聚集的地质构造环境.因此南海具备天然气水合物大规模成藏的沉积背景和构造条件.

我国天然气水合物海洋地质调查及勘查研究工作相对国外起步较晚,但通过二十多年天然气水合物勘查评价及研究,尤其是近十多年的勘查及钻探试采实践,中国天然气水合物勘查试采水平已经走在了世界前列.我国天然气水合物勘查研究始于1995年,1999年广州海洋地质调查局首次在南海北部西沙海槽,勘查发现了天然气水合物重要地球物理标志——似海底反射层(BSR)(姚永坚等,2007).通过区域海洋地质调查与天然气水合物进一步勘查评价与深入研究,在综合判识确定天然气水合物矿藏分布特征及其精细刻画的基础上,中国地质调查局广州海洋地质调查局于2007年及后续十多年,先后对南海北部珠江口盆地神狐、珠江口盆地东部海域调查区和琼东南盆地陵水-松南调查区开展了水合物钻探工作.同时,优选神狐调查区典型水合物矿藏,并分别在2017和2020年成功实施了天然气水合物试采,使我国成为了世界海域水合物试采成功的第一个国家.其中2020年第二轮试采更是创造了“产气总量86.14万立方米,日均产气量2.87万立方米”的世界纪录.

南海早期天然气水合物海洋地质调查及地质评价,主要根据海洋地质调查及大洋钻探计划项目

(ODP)所获酸解气/吸附气信息以及地球物理资料分析解释.祝有海等(2008)圈定了南海海域台湾西南-珠江口盆地东部海域、笔架南、琼东南-西沙海槽、中建南-中业北、万安-南薇西和南沙海槽等6大烃类显示异常区(图1);杨木壮等(2002,2010,2011)根据海洋地质调查与地球化学勘查结果及地球物理资料分析解释,亦判识确定了11个天然气水合物勘查远景区.其后随着进一步的海洋地质调查及地球物理勘查与地质综合评价研究的深入,最终将南海天然气水合物勘查评价及钻探重点区域,均

主要集中和聚焦在南海北部陆坡深水(水深小于2000 m范围).在上述天然气水合物海洋地质调查及勘查评价与地质综合研究的基础上,自2007年以来,广州海洋地质调查局先后在南海北部陆缘的陆坡中部珠江口盆地神狐调查区及陆坡东部珠江口盆地东部海域调查区和陆坡西部琼东南盆地西南部陵水-松南调查区,实施了6个航次多井位以天然气水合物勘查为目的的钻探工作,取得了天然气水合物勘查试采里程碑式的重大突破和长足进展.同时,通过天然气水合物成藏地质条件分析及综合评

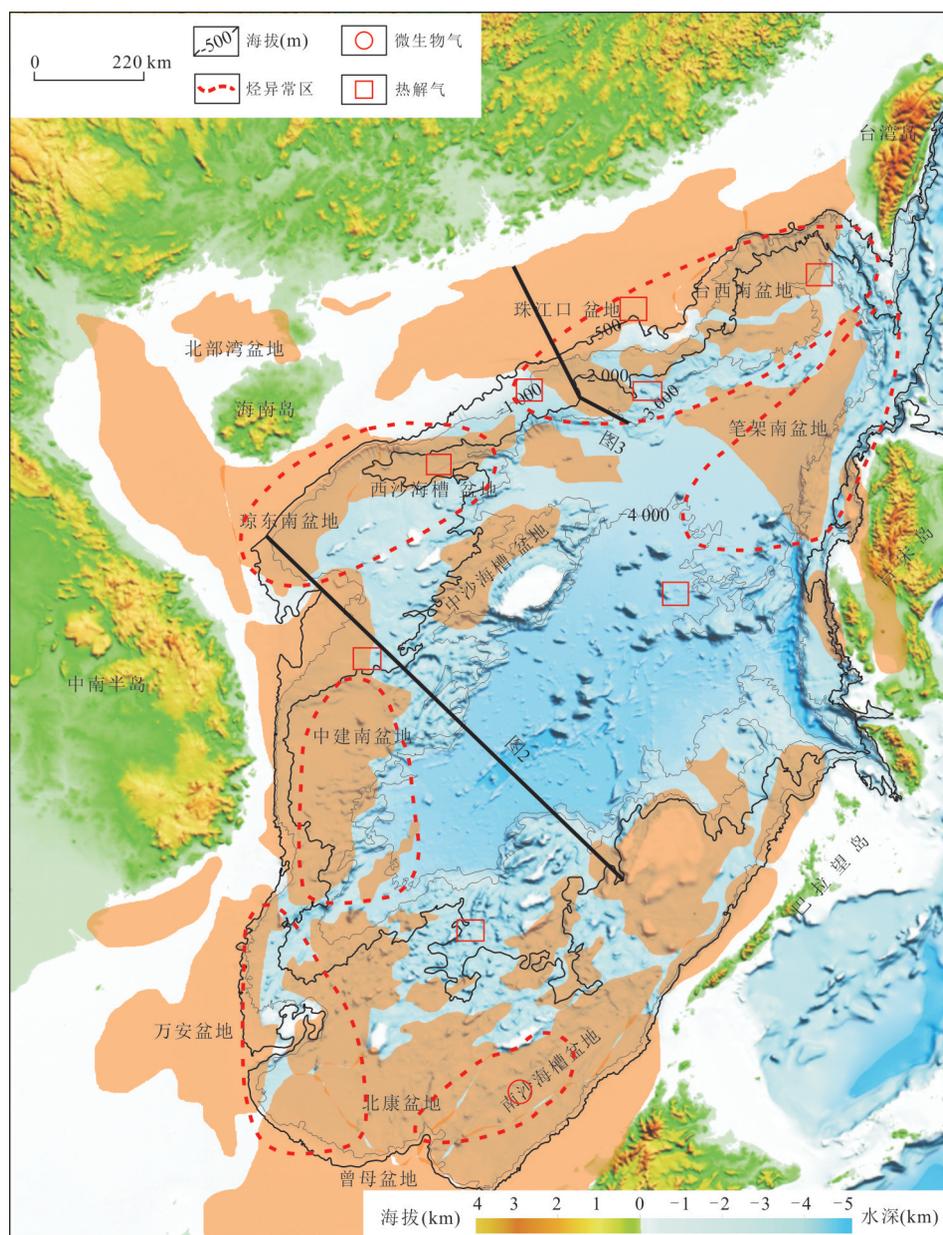


图1 南海沉积物中酸解烃样品采样位置、烃类异常显示区及成因类型分布(据祝有海等,2008)

Fig.1 Location of sediment sampling from the South China Sea and higher methane concentration areas with their origin types (modified by Zhu *et al.*, 2008)

价预测,在南海北部陆坡深水区判识确定了两大天然气水合物成藏富集带(以2 000 m水深为界)和三大水合物富集区(珠江口盆地东部海域复合/混合型水合物富集区、神狐扩散型水合物富集区和琼东南陵水-松南渗漏型水合物富集区)(梁金强等,2014,2018);通过进一步勘查评价及钻探落实进而圈定了两个大规模的天然气水合物矿藏;通过对南海天然气水合物资源分析评价,初步预测南海天然气水合物资源规模达800亿吨油当量左右,取得了该区天然气水合物勘探的阶段性重大成果。以下简要分析概述以上3个天然气水合物富集区块的基本情况。

南海北部陆坡东部珠江口盆地东部海域水合物富集区块,位于珠江口盆地东南部珠江口盆地东部海域深水区与台西南盆地西南部相邻。2004年中德联合考察在珠江口盆地东部海域调查区发现了长期释放甲烷气的九龙甲烷礁(Li *et al.*, 2013),之后陆续在该海域调查发现了增生楔、构造坡折带、滑塌构造、底辟构造和气烟囱等一系列与天然气水合物有关联、有利于天然气水合物赋存的特殊地质体及构造样式(张光学等,2006;赵汗青等,2006;宋海斌等,2007;毛云华等,2020)。海洋中的甲烷礁及冷泉碳酸盐岩是天然气水合物分解产物及遗迹,其分布及存在无疑表明该区曾经发生过水合物形成及分解等演变过程,故其是指示水合物存在的重要标志(陈忠等,2006)。在早期天然气水合物海洋地质调查及地球物理勘查和地质评价的基础上,2013年广州海洋地质调查局天然气水合物钻探航次对该区域开展了13个站位的钻探工作,其中5个站位获取了天然气水合物实物样品,其水合物层厚度为7~46 m(张光学等,2014),确证了该区天然气水合物藏的存在。对该区域的勘查评价与地质综合研究表明,该区天然气水合物赋存产出类型多、饱和度高、水合物分解气中甲烷平均含量大于99.9%,游离气甲烷/乙烷比值大于1 000,碳同位素 $\delta^{13}\text{C} < -65\text{‰}$ ,这些均指示了生物成因甲烷的特征(张光学等,2014)。尚须强调指出,该区浅层天然气水合物烃源供给,主要来自珠江口盆地东部海域隆起南部浅层沉积充填的上新统及第四系海相泥岩生成的大量生物气(何家雄等,2013)。此外该区域深部亦发现有生烃潜力的烃源岩,且地球物理探测发现存在向上的运移通道(Li *et al.*, 2013),但在已有的探测井内未发现深部气体成

分,因此不能完全排除热成因气的存在。借鉴常规油气储量评价预测方法,初步计算天然气水合物藏地质储量约为 $1\ 250 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,相当于大气田储量规模。该区最终通过地质地球物理分析与评价,结合水合物钻探成果分析,综合判识确定其为南海北部陆坡东部一个典型的天然气水合物富集区块(张光学等,2014)。

南海北部陆坡中部神狐水合物富集区块,位于珠江口盆地南部珠二坳陷白云凹陷中南部深水区,该区陆源沉积物供给充足,沉积速率高(于兴河等,2004),新生代沉积厚度大,最大可达12 km(梁劲等,2013)。该区主要烃源岩为古近系始新统文昌组湖相泥岩及下渐新统恩平组煤系,潜在烃源岩为上渐新统珠海组浅海相泥岩,这些烃源岩在纵向运聚通道系统发育且与浅表层连通的情况下,可为深水油气及深水海底浅表层水合物成藏提供热解气源供给。同时,在成熟生烃门槛以上(3 100 m),处在生物化学作用带的浅层上新统及上新统泥页岩亦可为其提供生物气气源供给。尽管该区域的水合物分解气均以甲烷为主( $>90\%$ ),指示出微生物成因气的特征,但在不同区域气源特征仍略有差异。如GMGS1航次的3个站位水合物分解气中仅有微量乙烷及以上重烃,指示热成因气贡献极小(Wang *et al.*, 2014)。而在邻近的GMGS3的4个站位和GMGS4的3个站位中发现明显高于GMGS1站位的乙烷、丙烷、丁烷等重烃成分,乙烷最高可达3%,且在其中一些井内发现II型水合物,显示出以微生物成因为主,存在热成因气的混合成因气源特征(Zhang *et al.*, 2017; 张伟等,2020)。总之,神狐调查区水合物成藏地质条件较好,而且深水海底浅表层沉积物处于高压低温环境下(海底温度小于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ ,压力大于150 atm)非常适宜天然气水合物富集成藏,故该区成为了南海北部首次天然气水合物勘查试采的重点靶区。2007年在该区首次钻获水合物实物样品后,通过进一步钻探及勘查评价与综合研究,最终将其确定为南海北部首个水合物勘查试采先导试验区,并分别于2017和2020年在该区成功实施了两次水合物试采,取得了南海北部深水海底浅表层未成岩粘土质粉砂型储层类型水合物勘查试采的重大突破和里程碑式的重大进展(吴能友等,2007a,2007b;王秀娟等,2011;苏丕波等,2014;于兴河等,2014;杨胜雄等,2017;Ye *et al.*, 2018)。

南海北部陆坡西部陵水-松南水合物富集区

块,位于南海西北部琼东南盆地南部深水区.该区新生代最大沉积厚度超过 15 km,最大生烃凹陷面积超过 9 000 km<sup>2</sup>,新生代发育多套烃源岩,主要包括古近系始新统湖相烃源岩、渐新统煤系及海相气源岩、新近系中新统海相潜在气源岩及上新统和第四系生物气气源岩(马文宏等, 2008; 何家雄等, 2013, 2015),亦可将其大体上划分为深部古近系热解气烃源岩和浅层新近系上新统及第四系深水海底生物气及亚生物气气源岩两大类(何家雄等, 2015).琼东南盆地南部深水区局部区域存在纵向断层及伴生裂隙、泥底辟和气烟囱等特殊地质体,其能够为深部热解气气源向上运移至深水海底浅表层未成岩沉积物中形成水合物藏提供流体运聚输导通道,进而形成下生上储的渗漏型水合物.此外,在气烟囱构造内部的裂隙中也存在裂隙充填型水合物,而深部流体运移至浅部粉砂质沉积物中也形成了孔隙充填型水合物.而对于深水海底浅表层水合物藏附近原地浅层生物气之气源供给,则非常广泛且往往能够在深水海底浅表层高压低温稳定带形成自生自储的扩散型水合物(何家雄等, 2013).因此,水合物形成富集必须保证其水合物藏所在区域的运聚通道系统非常畅通,该区域的气烟囱及伴生断裂、微裂隙及水道边界断层等共同构成了含气流体的运移通道,这些运移输导通道在空间上互相匹配,有利于古近纪烃源岩生成的热解成因气以及中新统烃源岩生成的浅层生物成因气运移输导至海底浅层水合物稳定域中聚集形成水合物藏(何家雄等, 2015; 张伟等, 2020).同时该区域发育的第四纪半深海泥质沉积和重力流沉积为天然气水合物成藏提供了储集空间(张伟等, 2020).总之,根据天然气水合物成藏地质条件,该区存在扩散型和渗漏型两种水合物藏.该区域水合物气体来源复杂,既有深部热解气烃源岩,又有深水海底浅层生物气及亚生物气烃源岩,生物气和热解气气源充足,可能存在生物气源自生自储型和热解气源下生上储型水合物(何家雄等, 2015).该区域较小的 C<sub>1</sub>/(C<sub>2</sub>+C<sub>3</sub>)比值(4.0~46.5)指示了其热解气的存在,而甲烷碳同位素 δ<sup>13</sup>C(-59.5‰~-48.8‰)较负又显示出生物气特征(Lai *et al.*, 2021).Lai *et al.* (2021)通过计算获得微生物成因甲烷贡献比例在 44%~67%,但是样品显示低 TOC 含量、低烃类指标和低原位温度,表明原位未压实沉积物的微生物产气潜力很低,因此该处甲烷气源还可能来自

烃类微生物降解生成的次生型微生物甲烷.琼东南盆地南部水合物富集区的勘查发现,亦经历了早期海洋地质调查取样及勘查评价和晚期钻探落实与确证的过程.在该区海洋地质调查中首先发现了一些海底麻坑、丘状体、大型海底圆丘、泥火山和自生碳酸盐结壳等特殊地貌类型及似海底地球物理反射层(BSR),这些特殊地质地球物理特征均指示了可能存在天然气水合物(尚久靖等, 2014).在前期海洋地质调查及浅表层钻探取样的基础上(2015年调查发现海马冷泉并进行了简易动力取样),综合评价优选出了最佳水合物矿藏目标,并分别于 2015、2016、2018 及 2019 年部署实施了水合物钻探,进而进一步确证了该区天然气水合物矿藏的存在(何家雄等, 2016; 张伟等, 2020; 赵静等, 2020; 王秀娟等, 2021),而且最终通过勘查评价与进一步落实,基本确证了陵水-松南区块水合物藏亦为相当于大气田储量规模的水合物矿藏,开创了琼东南盆地南部深水区新领域天然气水合物勘探的新局面.

综上所述,二十多年来,南海天然气水合物勘查评价及钻探试采,均主要集中在南海北部大陆边缘陆坡深水区(500~2 000 m 水深范围),自西向东依次为琼东南盆地南部深水区-珠江口盆地南部深水区-珠江口盆地东部深水区,而与之紧密相邻广阔的外陆坡-洋陆过渡带(OCT)及洋盆超深水区(>2 000 m),天然气水合物勘查评价及研究等均尚未涉及或涉足甚少.外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区,其地壳普遍比陆架陆坡区薄、地温场及热流值相对较高,新生代沉积充填物总体上相对陆坡区较薄,以往均认为这些区域一般不具备流体矿产资源潜力及勘探前景.本文通过对外陆坡-洋陆过渡带乃至洋盆区油气地质条件的初步分析研究,重点针对未来南海天然气水合物资源勘查可接替的勘探靶区及远景区,即可持续滚动勘探及可接替战略选区等开展初步的分析探讨,抛砖引玉以期对将来南海水合物勘查可持续发展尤其是战略接替区的优选与评价预测等有所裨益和帮助!

## 2 深地震探测所揭示新生代沉积特征

前已论及,南海天然气水合物海洋地质调查及勘查评价与研究,多年来均主要集中在南海北部陆缘的陆坡深水区,即水深小于 2 000 m 的水合物勘查调查区.迄今为止在南海北部深水区已勘查发现

了两大水合物成藏富集带及6个水合物成藏远景区、19个成藏区带和25个有利区块及24个钻探目标,综合评价圈定了两个大储量规模的水合物矿藏。总之,南海北部陆坡深水区天然气水合物勘查评价及研究程度总体上已相对较高,而与其紧密相邻的外陆坡-洋陆过渡带及中央洋盆等深水及超深水区,迄今为止天然气水合物勘查及研究均未能涉及,基本上属于水合物勘查评价及研究的空白区,天然气水合物勘查评价及研究工作尚未开展。但这些地区(外陆坡-洋陆过渡带及洋盆),根据其区域地质背景及水合物成藏地质条件,尤其是通过盆地深部结构与沉积充填特征及生烃潜力和高压低温稳定带时空耦合配置等要素的综合分析,结合海洋地质调查及IODP钻探成果等资料,可以初步判识确定该区具备了天然气水合物成藏的基本地质条件,亦具有水合物资源潜力及勘探前景,其应是将来南海水合物资源可持续滚动勘查开发的主战场和可接替的主要战略选区。

诚然,南海北部陆坡(外陆坡即陆坡外侧)-洋陆过渡带沉积盆地与浅水陆架-深水陆坡(内陆坡)区相比,由于其处在强烈薄化地壳的细颈化带及远端带位置,故地壳薄、地温场及大地热流相对较高。沉积充填规模具有在靠近外陆坡处较大而靠近洋盆一侧较小的特点,总体上的沉积充填规模比内陆坡区要小,但亦具备了热解成烃潜力和较强的生物甲烷生烃潜力(靠近中央洋盆区沉积充填薄,以生物气为主)。总之,该区基本上具备了水合物成藏的烃源供给条件,只要高压低温环境及其他地质条件与之匹配即可形成水合物矿藏。根据通过南海南北陆缘及西南次海盆大剖面的探测(图2),可明显看出,南海南北缘及西南次海盆的深部地壳结构,具有两侧陆壳厚而向中间的中央洋盆区过渡,其地壳显著减薄的特征,尤其是在陆坡外侧-洋陆过渡带处其地壳强烈减薄变化非常大,且具有地震莫霍面与成分莫霍面之双莫霍面结构特征以及蛇纹石化的橄榄石地幔之剥露现象(庞雄等,2018)。在上述强烈薄化的深部地壳结构之地质背景下,南海南北部大陆边缘外陆坡-洋陆过渡带,形成了规模巨大切穿地壳并向下变缓汇聚到深部莫霍滑脱面上的大型拆离断层系统,进而控制和决定了一系列与近陆缘浅水陆架断陷盆地构造属性完全不同的展布规模颇大的深水大型拆离盆地群(图3)。这些深水拆离盆地群展布规模大(含内陆坡盆地),其沉积充填厚度明显比近陆缘浅

水陆架盆地厚(米立军等,2019),基本与内陆坡盆地沉积充填厚度相当或略薄一些。如处在南海北部陆缘西段陆坡区(内陆坡)即琼东南盆地南部减薄型陆壳之上沉积充填有15 km左右巨厚层沉积物,相邻的西部中建南盆地等其他沉积盆地也发育有10 km左右厚层沉积物(Pichot *et al.*, 2014)。与其紧密相邻的外陆坡-洋陆过渡带(琼东南盆地南部),处在地壳强烈薄化大型拆离断层发育区,沉积充填物亦较厚,其沉积充填规模明显大于陆架浅水区盆地而与内陆坡深水区盆地基本相当或略小一些。这些深水拆离盆地沉积物有机质较丰富,不仅有一定量的陆源高等植物输入,尚有深水洋盆附近广泛发育的大量低等海洋生物繁殖(任建业等,2018)。在该区这种深部相对较高的热流场背景下,沉积有机质不仅可以形成一定量的热解气,而且在其深水海底浅表层未成岩沉积物中(地温小于70℃)亦可通过生物化学作用形成大量生物甲烷气,同时在中央洋盆区薄层沉积物中亦可形成生物气,进而为水合物形成提供多种烃源的供给。总之,根据以上初步分析,可以预测南海北部外陆坡-洋陆过渡带区乃至中央洋盆沉积充填较厚的新生代沉积物,基本上具备了生物气及热解气的成烃潜力,能够为水合物形成提供充足的烃源供给,在其他成藏地质条件时空耦合配置较好时即可形成水合物矿藏。

南海南部大陆边缘南沙海区,包括南海南部、西南部及东南部广大区域,跨越大陆坡和洋陆过渡带至洋盆,亦与南海北部具有类似的构造地质特点和深部地壳结构特征。南沙海区洋陆过渡带地壳相对较厚,通过该区莫霍面分析,南海南部陆缘南沙岛礁区莫霍面埋深一般在20 km以上,并且自南西靠近大陆边缘一侧向东北靠近中央洋盆方向逐渐加深,其在礼乐滩附近达到28 km左右(赵明辉等,2011)。另外,根据南海南部OBS探测资料判识南沙海区莫霍面深度亦在23~24 km范围,而且上地壳和下地壳厚度相似,属于减薄的陆壳结构(李家彪,2011),其平均地壳厚度在8.5~15 km(Pichot *et al.*, 2014)。根据深地震探测和钻井数据,还发现南沙海区上覆于地壳之上的沉积地层被多个不整合界面分隔,主要为下构造层中生界沉积物、中构造层古近系裂陷期沉积和上构造层新近系及第四系浅海-半深海披覆沉积(孙珍等,2011;雷振宇等,2020)。虽然在南沙海区不同盆地沉积特征及沉积厚度存在较大差异,但总体上均具有从陆缘区向洋陆

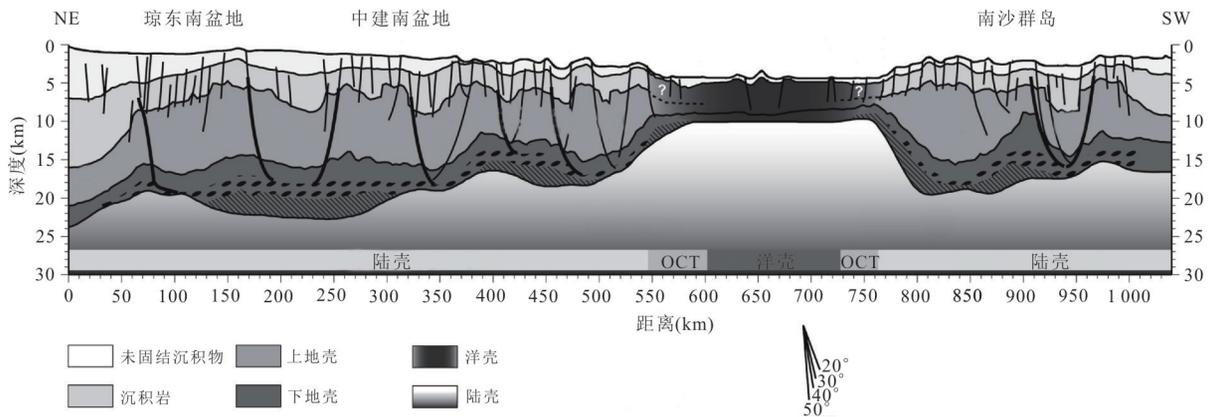


图2 南海南北陆缘及西南次海盆大剖面深部地壳结构构成及展布特征(引自 Pichot *et al.*, 2014 修改)

Fig. 2 Geological characteristics of the crustal structure in the SW conjugate margin of South China Sea (modified by Pichot *et al.*, 2014)

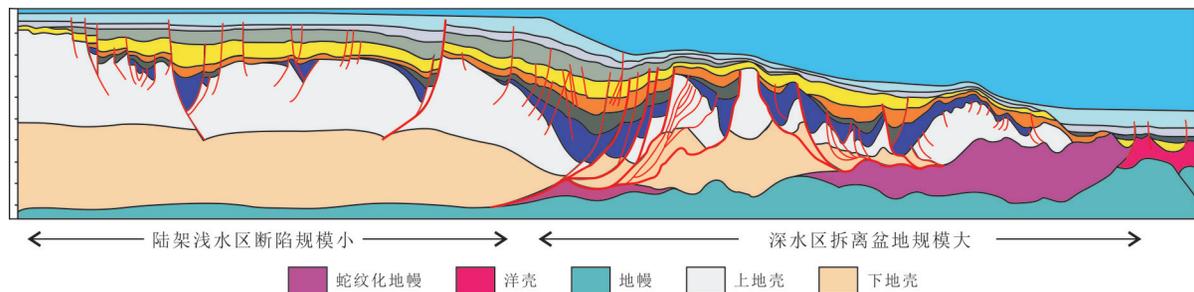


图3 南海北部大陆边缘陆架浅水断陷盆地与深水拆离盆地构造特征及展布规模对比(引自庞雄等, 2018 修改)

Fig. 3 Comparison of tectonic characteristics and distribution of shallow water rifted basins and deep water detachment basins in the northern continental margin of the South China Sea (modified by Pang *et al.*, 2018)

过渡带减薄的厚度趋势,根据深地震反射双程反射时和标准洋壳模型中海洋沉积物 P 波速度为 2 km/s,推测计算洋陆过渡带沉积厚度至少在 2 km 左右,陆坡外侧深水盆地沉积物最厚可达 10 km (Jerram and Petford, 2012; Pichot *et al.*, 2014),很显然,较大规模沉积物是油气形成的物质基础,尤其是在热力作用有效配置下,能够具有较大的生烃潜力.总之,以上深地震探测结果表明,南沙地区外陆坡-洋陆过渡带地壳相对洋盆区较厚,平均地壳厚度可达 10 km 左右,且热流场相对洋盆区较低,其盆地沉积充填物较厚,沉积物分布厚度多在 2~10 km 之间,具备了形成生物气和热解气基本地质条件,应具有较大生烃潜力.

南海中部洋盆区主要由中央(东部)次海盆及西北次海盆和西南次海盆所组成.中央(东部)洋盆是南海最大的次级海盆,通过海洋地质调查与深地震探测结果,其地壳厚度及沉积充填厚度均具有从南、北两侧大陆边缘向海盆中央逐渐减薄的特征(李家彪等, 2011).根据深地震反射双程反射时和

标准洋壳模型中海洋沉积物 P 波速度为 2 km/s (Jerram and Petford, 2012; Pichot *et al.*, 2014),推算中央洋盆/海盆沉积充填厚度一般在 600~900 m,但局部区域较厚,最厚可达 2 km(西南次海盆).根据 ODP1148 站位在中央洋盆北部(东部次海盆北部)钻遇新生代沉积物表明,古近系沉积有机质丰度较高(TOC 为 0.6% 左右),具备一定的生烃潜力.西南次海盆位于南沙地块西南部,以南北向的转换断层——中南断裂为界与中央洋盆相邻,依据反射地震剖面解释,西南次海盆洋壳部分在扩张脊上存在较厚沉积,其沉积厚度向两侧逐渐减薄,沉积时间具有中间老两侧新的特征(Gao *et al.*, 2009).通过反射地震剖面对比解释,西南次海盆边缘发育有强烈的伸展和沉降构造,该次海盆中可识别出下中新统之上的地层,局部最大沉积充填厚度超过 2 km(Liu, 2004).西南次海盆地壳厚度相对洋陆过渡带迅速减薄,莫霍面抬升到 8~12 km 处,属典型的洋壳结构(李家彪, 2011).在中央次海盆和西南次海盆的交界处,莫霍面等值线急剧变化,在

海盆中莫霍面埋深降至12 km以下,若除去新生代沉积层,西南次海盆地壳厚度相对洋陆过渡带地壳厚度要薄得多,其海盆洋壳平均厚度不到6 km(金庆焕和李唐根, 2000; 王建桥等, 2005a; 赵明辉等, 2011; Pichot *et al.*, 2014). 总之,西南次海盆地壳(洋壳)相对较薄,热流场相对较高. 深地震探测结果表明,西南次海盆洋壳之上,普遍沉积充填了800~2 000 m厚的沉积充填物,根据IODP大洋钻探结果,亦含有一定丰度的沉积有机质,具备形成生物气或热解气的基本地质条件,具有一定的生烃潜力. 该区海洋地质调查所获酸解气及吸附气分析亦证实,洋盆中沉积物的酸解气及吸附气显示强烈,因此推测其具有生物气或热解气的资源潜力.

综上所述,根据深地震探测及IODP钻探结果,南海广阔的外陆坡-洋陆过渡带区,地壳厚度相对较薄,平均地壳厚度可能在15 km左右,热流场相对较高,其上覆沉积充填地层厚度较大,至少在2 km以上,沉积有机质丰度相对洋盆区较高,具有形成生物气和热解气基本地质条件;中央洋盆/海盆区地壳最薄,洋壳平均厚度在8 km左右,但其上覆沉积物分布亦有一定的厚度,大致在600~2 000 m之间,加之该区深部热流场普遍偏高,故极大地促进了有机质成烃转化,虽然其沉积有机质丰度(TOC为0.6%左右)相对陆架陆坡区偏低,但仍然具有一定的生烃潜力. 而且,海洋地质调查所获酸解气及吸附气分析结果,亦表明和证实了南海洋盆区确实具有形成生物气资源潜力和一定量的热解气资源潜力.

### 3 ODP及深水油气勘探揭示的热流场特点

天然气水合物藏形成与常规油气藏一样均需要烃源供给运聚系统提供充足的烃源供给,而且还必须具备聚集成藏系统——天然气水合物高压低温稳定带(相当于常规油气藏圈闭),使之能得以富集保存而成藏,因此,天然气聚集成藏系统对于天然气水合物富集成藏仍然至关重要. 因此,天然气水合物高压低温稳定带即是天然气水合物富集成藏的场所,相当于常规油气藏的圈闭富集系统,其空间展布规模及分布特征直接决定和影响了天然气水合物资源潜力. 天然气水合物高压低温稳定带形成及其演变,主要受益地地温场特征及其地层压力系统所控制和约束. 南海大陆边缘盆地陆坡深水

区水深变化为300~3 500 m,南海中部的中央洋盆平均水深约为4 000 m. 总体上海底温度一般在2~10.0 °C之间变化,表明陆坡-洋陆过渡带及中央洋盆深水及超深水海底浅表层均处于低温高压的环境中,故其所构成的浅表层高压低温稳定带有利于天然气水合物藏形成. 尚须强调指出,热流场特征与天然气水合物高压低温稳定带展布特征密切相关. 在高压条件相同的情况下,若地温场及热流值较高,则天然气水合物稳定带规模及其厚度会明显减小;若地温场及热流值较低,则天然气水合物稳定带规模及厚度显著增加. 南海外陆坡-洋陆过渡带到中央洋盆深水区的流分布变化较大,从陆坡深水区热流值60.0 mW/m<sup>2</sup>向洋陆过渡带及中央洋盆中心热流值可升高到170.0 mW/m<sup>2</sup>,即这些区域深部热流场变化较大. 但这种高热流对于深水及超深水海底浅表层的影响并不是很大. 据相关研究及实际探测结果表明(王建桥等, 2005b),外陆坡-洋陆过渡带及中央洋盆深水海底浅表层沉积物(300 m以上)的热流场及地温场并不高,其地温一般不超过28 °C以上. 这就表明外陆坡-洋陆过渡带及中央洋盆区的深部高热流场,其对于深水海底浅表层沉积物之天然气水合物稳定带形成及其展布规模的影响并不大.

南海大陆边缘陆架陆坡-洋陆过渡带,均沉积充填有较大规模的新生代沉积,其沉积有机质丰富,迄今为止,在北部陆架陆坡区和南部陆架陆坡区均已勘探发现多个大中型油气田群,尤其是在内陆坡深水区还勘探发现了深水油气藏和天然气水合物藏. 与其紧密相邻的外陆坡-洋陆过渡带乃至中央洋盆区,根据上述第2节分析亦沉积充填了一定厚度及展布规模的沉积物,而且通过ODP和部分深水油气探井钻探证实,在外陆坡及洋陆过渡带乃至洋盆深水区(1148站位)也存在较好的烃源条件,至少具有生物气成烃潜力,能够为天然气水合物成藏提供烃源供给,这已为海洋地质调查及地球物理勘探所证实(中央洋盆北部存在BSR和具有烃类气显示的沉积物样品). 如在南海中央洋盆(中央次海盆)北部ODP184航次钻探所在区域,其地球物理探测表明(Chow *et al.*, 2000; 王建桥等, 2005b),在多站位附近均发现了典型的BSR分布(图4),表明该区深水海底浅表层地温场及热流值并不高,如果热流值偏高,则水合物的BSR标志不复存在. 而且,该航次的1146站位390~590 m深度段样品的顶空

气和酸解烃高含量异常显示明显,亦表明其具有生烃条件.同时,在该站位还发现了沉积物中 $Cl^-$ 含量降低标志和富 $^{18}O$ 的自生菱铁矿结核标志,也指示了其地球化学异常可能与天然气水合物存在有关(Zhu *et al.*, 2006).尚须强调指出,南海中央洋盆北部 ODP 多站位沉积物酸解气和顶空气(罐顶气)的甲烷碳同位素特征,均指示其沉积物中有有机质处于成熟-高熟阶段,即已进入油窗及气窗演化阶段,可以大量成烃生气(张光学等, 2006).根据该区顶空气和酸解烃样品的甲烷碳同位素与烃类气体分子比值 $C_1/(C_2 + C_3)$ 参数,可以综合判

识中央洋盆区北部沉积物形成的烃类气体以热解气为主,亦混入有少量微生物气.而且,这些热解气主要分布于水合物稳定带以下,能够为其提供烃源供给(王建桥等, 2005b; 祝有海等, 2008).总之,海洋地质地球物理调查及 ODP 样品的地球化学分析结果,均证实南海北部大陆边缘之洋陆过渡带和中央洋盆区沉积物存在热解气及生物气,且热解气成熟度尚处于成熟-高熟阶段.以上事实充分表明了南海北部洋陆过渡带及洋盆区深水海底浅表层地温场及热流值并不高,基本上能够适合于天然气水合物形成及其富集成藏.

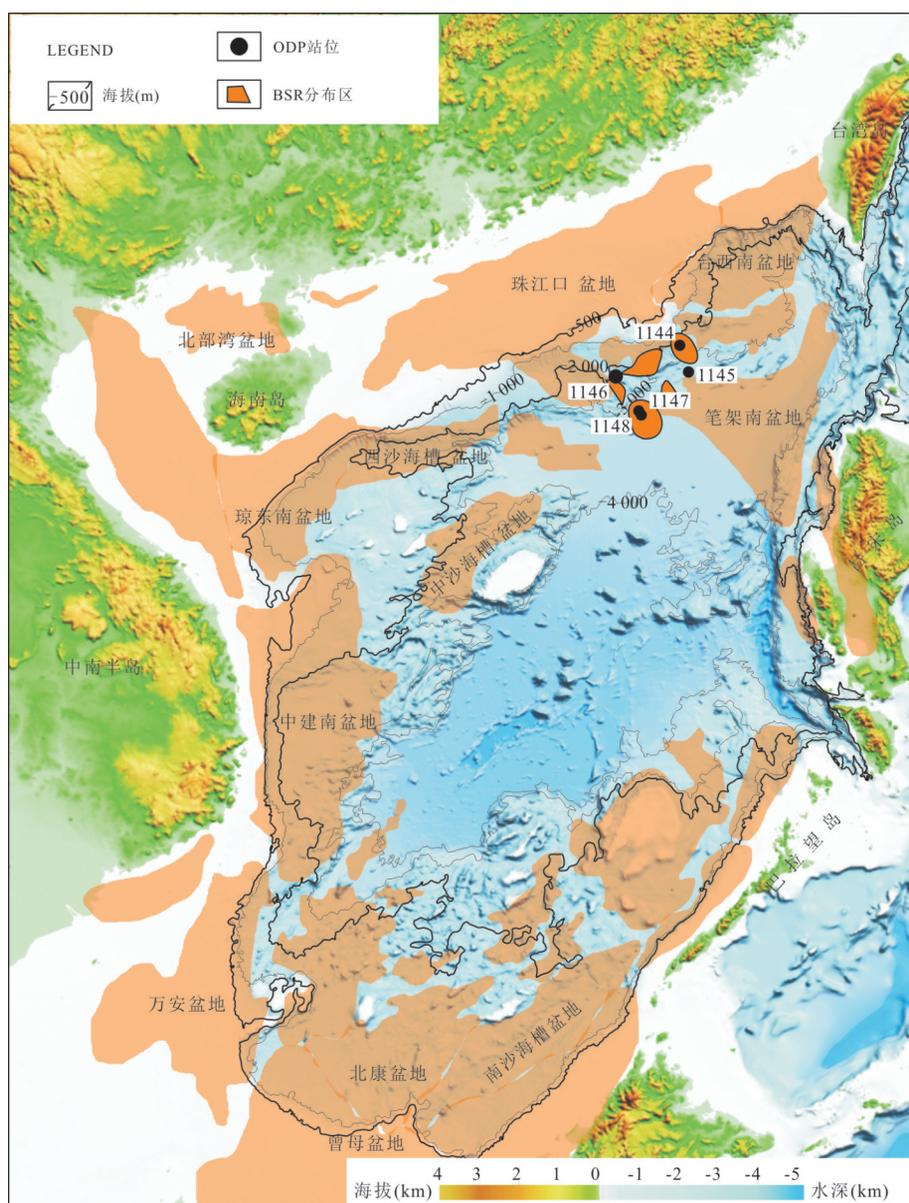


图4 南海中央次海盆北部 ODP184 航次多站位附近 BSR 分布特征(引自王建桥等, 2005b 修改)

Fig.4 Location of ODP Leg 184 with respect to the regional bottom simulating reflector (BSR) on the north of the Central Subbasin in the South China Sea (modified by Wang *et al.*, 2005b)

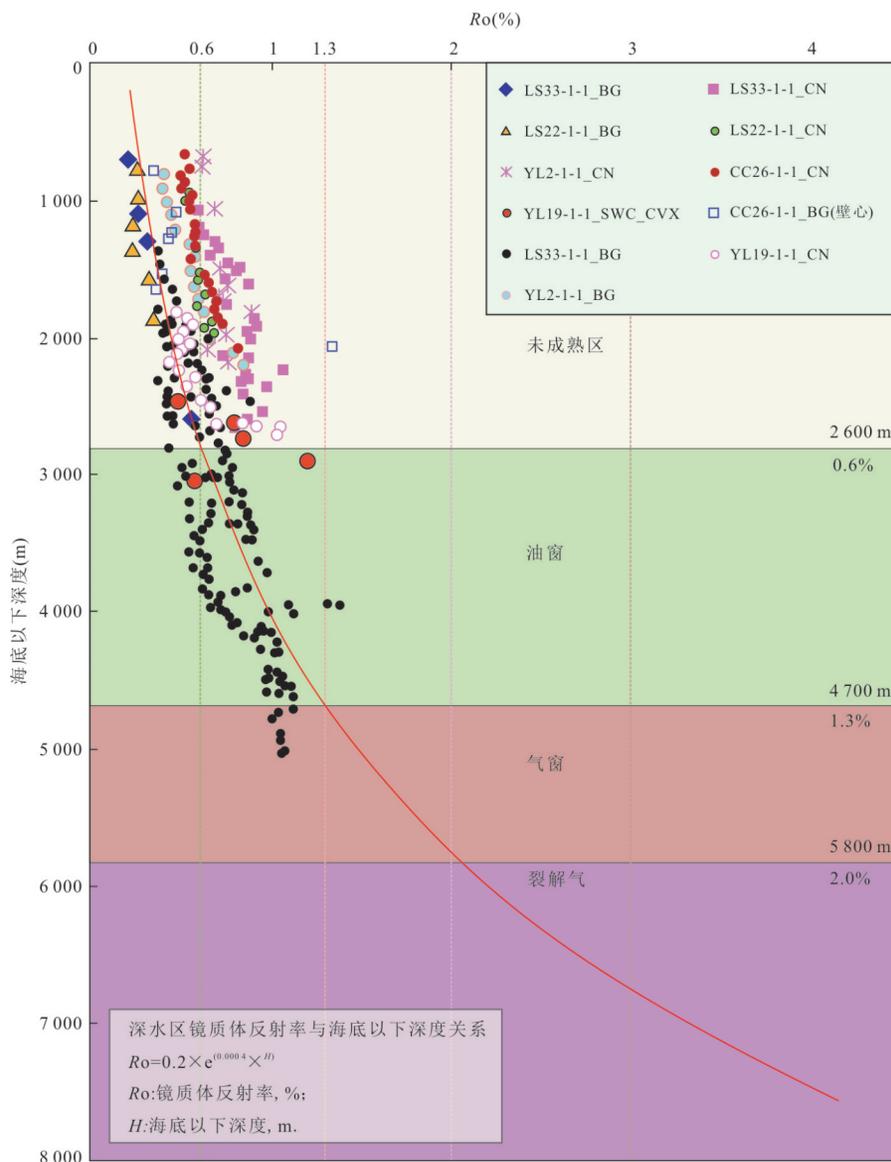


图 5 南海北部琼东南盆地南部陆坡深水探井有机质热演化( $R_o$ )特征及成烃门槛(修改引自中国海洋石油集团有限公司资料)  
 Fig.5 Organic matter thermal evolution ( $R_o$ ) characteristics and hydrocarbon generation threshold of deepwater exploration wells in southern continental slope of Qiongdongnan basin, northern South China Sea (modified by the data from China National Offshore Oil Corporation)

另外,通过深水油气勘探钻井揭示,亦证实南海北部陆坡-洋陆过渡带区域热流值及地温场并不太高,其热流值大致在  $47\sim 136\text{ mW/m}^2$  之间(王建桥等, 2005a),而且其对于深水海底浅表层沉积物影响亦不大.依据琼东南盆地陆坡深水油气探井揭示的沉积有机质热演化( $R_o$ )特征及成烃门槛特点(朱继田等, 2020),从图 5 所示可以明显看出,琼东南盆地南部陆坡深水处处在  $4\ 200\text{ m}$  (含水深,下同)以上烃源岩有机质尚未成熟,在  $6\ 200\text{ m}$  以上则达到成熟阶段,表明该区烃源岩有机质成熟度并不太高,其所处热流场较低.另外,

南海北部珠江口盆地南部陆坡深水处,由于处在减薄型及洋陆过渡型地壳的区域构造位置,盆地深部热流值大致为  $54\sim 85\text{ mW/m}^2$  (徐行等, 2011).其中陆坡-洋陆过渡带平均热流值约为  $77.5\text{ mW/m}^2$ ,局部较高的热流值可能与构造岩浆活动相关(张功成等, 2010),但总体上,该区第三系沉积有机质热演化特征亦与琼东南盆地类似,其有机质热演化成熟度尚处在成熟-高熟阶段.

南海中南部大陆边缘主要盆地,其探井揭示的主要烃源岩有机质成熟热演化特征与南海北部基本类似.西南部陆缘万安盆地存在渐新统、下中新

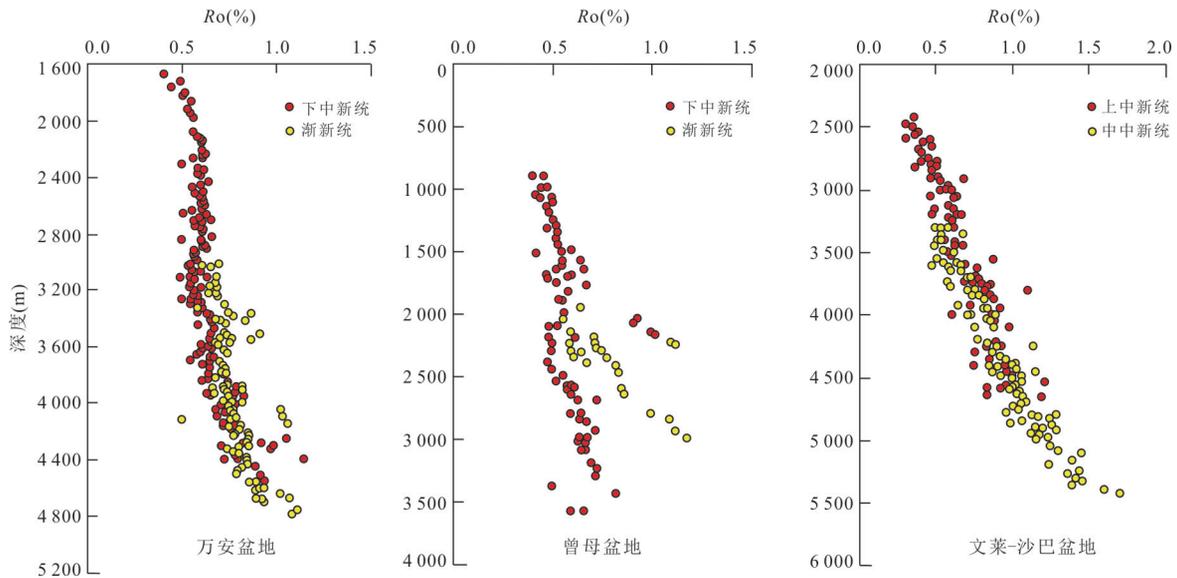


图6 南海中南部主要盆地钻探所揭示主要烃源岩有机质成熟热演化特征

Fig. 6 Maturation and thermal evolution characteristics of main source rocks revealed by drilling in the main basins in the central and southern South China Sea

统和中中新统 3 套烃源岩,其中以渐新统烃源岩为主,其沉积厚度较大,有机质丰富,成熟度高,该区平均热流值为  $71.9 \text{ mW/m}^2$  (张功成等, 2010)。根据钻探结果揭示,其下中新统和渐新统沉积有机质热演化程度并不太高,镜质体反射率  $R_o$  值小于  $1\%$  (图 6),表明亦处在成熟-高熟演化阶段。南部陆缘曾母盆地下中新统和渐新统沉积有机质热演化程度基本上亦与万安盆地类似,其镜质体反射率  $R_o$  值均小于  $1.2\%$ ,比万安盆地略高,但仍然处在成熟-高熟演化阶段。与曾母盆地东部相邻的文莱-沙巴盆地,沉积有机质热演化程度较高,其中,上中新统和中中新统烃源岩  $R_o$  值最高达到  $1.7\%$  左右 (图 6),但烃源岩有机质总体上仍处在成熟-高熟演化阶段,仅部分样品达到了过熟热演化阶段。总之,以上 3 个盆地沉积有机质热演化程度总体上并不太高,其有机质成熟度多处在成熟-高熟演化阶段,部分样品成熟度可达过熟阶段。据此推测南海南部广大区域地温场及热流值并不太高,热流值可能在  $80\sim 90 \text{ mW/m}^2$ ,并不是传统上认为均超过  $100 \text{ mW/m}^2$  以上。

综上所述,南海区域总体地温场及热流值,虽然与中国大陆区域相比明显偏高,但其对油气及天然气水合物形成及富集成藏,能够起到了重要的积极作用和促进作用。尚须强调指出,南海区域大地热流总体上并不是特别高,这与前人的一些热流探测及研究成果可能存在较大的差异,但根据油气勘

探井实际揭示的沉积有机质成熟度表明,南海区域整体热流值前人的探测评价结果可能明显偏大。依据油气勘探钻井所揭示新生代沉积有机质成熟度,结合地质条件分析,可以判识确定南海不同区域大地热流分布以中央洋盆最高,其中南海南部大陆边缘和西南部大陆边缘的平均大地热流值分别为  $80 \text{ mW/m}^2$  和  $78 \text{ mW/m}^2$ ; 北部大陆边缘平均大地热流值为  $75 \text{ mW/m}^2$ ,而中央洋盆平均大地热流值为  $88 \text{ mW/m}^2$  (徐行等, 2011)。很显然,总体上南海大地热流值比前人预测的要低。有鉴于此,进而可以判识确定南海陆坡-洋陆过渡带乃至洋盆深水区地温场及热流值并不太高,尤其是该区的深水海底浅表层 ( $300 \text{ m}$  左右) 地温场及热流值并不高,完全能够满足天然气水合物形成的高压低温条件。总之,ODP 及南海北部深水油气探井和南海中南部盆地油气探井均揭示,南海陆坡及洋陆过渡带乃至洋盆深水区,其新生代沉积充填物有机质热演化程度并不太高 (尤其是深水海底浅表层沉积物),根据有机质热演化程度指标  $R_o$  及气体甲烷碳同位素分析,新生代沉积有机质尚未达到过熟裂解热演化阶段,因此,完全有理由推测其所在区域地温场及热流值并不太高 (以前推测/探测结果偏高),南海陆坡-洋陆过渡带及中央洋盆的实际热流值可能在  $80\sim 90 \text{ mW/m}^2$ ,而其深水海底浅表层沉积物地温场及热流值则更低 (张功成等, 2010; 何家雄等, 2016),因此,外陆坡-洋陆过渡带及洋盆深水及

超深水海底浅表层,应具备天然气水合物形成之高压低温环境,只要气源供给充足且其他地质条件配置较好即可形成天然气水合物矿藏。

#### 4 外陆坡-OCT及洋盆具备水合物形成条件

前已论及,天然气水合物形成主要受气源供给与高压低温稳定带时空演化及其耦合配置之控制,即必须具有生烃潜力大的气源岩提供充足的气源供给,为天然气水合物形成提供雄厚的物质基础,同时还必须具备与之时空耦合配置较好的高压低温稳定带,即必须具有比较好的赋存条件和聚集场所,相当于常规油气藏的“圈闭聚集场所”。这就是天然气水合物形成的必要条件和重要控制因素(何家雄等, 2009)。总之,充足的气源供给及其运聚输导条件控制了天然气水合物丰度和饱和度,而高压低温稳定带时空展布则控制了天然气水合物藏展布规模及其资源潜力(何家雄等, 2016)。通过南海外陆坡-OCT(洋陆过渡带)及洋盆区域地质条件的深入分析研究,结合海洋地质地球物理调查及ODP钻探成果,可以初步判识确定该区具备了形成天然气水合物的烃源供给与运聚富集成藏的场所(高压低温稳定带)等主要条件,因此南海外陆坡-OCT及洋盆区应该具有天然气水合物资源潜力及勘探前景。

深水油气勘探及ODP钻探表明,广阔的陆坡-OCT及洋盆区有机质热演化主要处于成熟-高熟阶段,其热流场可能与北部陆坡深水区基本相当,尤其是深水海底浅表层(<300 m,海底以下起算,以下均同)完全具备了天然气水合物形成的高压低温之地质环境条件。ODP及南海北部深水油气探井和南海中南部盆地部分探井钻探均揭示,其新生代沉积有机质热演化程度总体上并不太高,多处在成熟-高熟油气窗范围。其中,南海北部琼东南盆地深水油气钻井资料显示沉积有机质成熟度 $R_o$ 值,在500 m以上普遍低于0.6%,随着深度增加 $R_o$ 增大,在2 600 m达到成熟生烃门槛,随着深度增加至4 700 m, $R_o$ 接近或达到1.3%(图5),表明有机质处在成熟-高熟演化阶段。南海中南部油气勘探探井资料显示亦与南海北部类似,新生代沉积有机质热演化程度总体上亦处于成熟-高熟演化阶段。如处在南海西南部及南部的万安盆地和曾母盆地,其沉积有机质热演化成熟度 $R_o$ 值,800~1 600 m以上均小于0.6%,随着深度增加,直至3 500~4 800 m, $R_o$

值均小于1.2%(图6),表明其沉积有机质热演化成熟度仅达高熟演化阶段。该区沉积有机质热演化成熟度较高的为南海东南部文莱-沙巴盆地,其2 500 m以上的浅层沉积有机质热演化程度与相邻的曾母盆地类似,随着深度增加,在4 900 m处其 $R_o$ 达到1.7%,达到了高熟-过熟热演化阶段。总之,深水油气勘探及ODP钻探表明,沉积有机质热演化特征均证实了外陆坡-OCT及中央洋盆的地温场及热流值并不太高,故对其深水海底浅表层沉积物的影响亦不大。目前通过海洋地质调查及实际探测亦表明,外陆坡-OCT及洋盆区的海底温度一般多在4℃左右变化,海底以下600 m以上浅表层其地温均不超过12℃左右。这亦充分表明外陆坡及洋陆过渡带乃至洋盆深水区新生代沉积物有机质热演化程度并不太高,尤其是处于深水海底浅表层沉积物,其尚未达到成熟热演化阶段或仅处在未熟/低熟-生物化学作用带,因此,可以推测该区地温场及热流值并不太高,实际热流值可能为80~90 mW/m<sup>2</sup>,而其深水海底浅表层热流值则更低,地温场亦低,其地温不超过12℃以上(张功成等, 2010; 何家雄等, 2016),故可以确定外陆坡-OCT及洋盆区海底浅表层完全具备了天然气水合物形成的高压低温环境。

诚然,南海外陆坡-洋陆过渡带(OCT)及洋盆区,新生代沉积充填物与陆架-陆坡区相比,总体上相对较薄,但在某些局部区域新生代沉积充填厚度亦较厚,最厚可达4 km以上,且发育有多套煤系烃源岩和陆源海相烃源岩,其有机质主要来自于陆源高等植物及少量水生低等生物。南海北部外陆坡-洋陆过渡带高有机质丰度烃源岩主要分布于盆地或凹陷周缘,多为煤系烃源岩,少部分为海相陆源烃源岩,盆地或凹陷沉积中心主要为有机质丰度相对较低的陆源海相烃源岩,烃源条件及生烃潜力较差(李友川等, 2011)。如处于南海北部外陆坡-洋陆过渡带的深水油气探井所揭示的古近系烃源岩有机质丰度即比处在中央洋盆的要高得多。典型实例如琼东南盆地南部陆坡深水YL19-1-1井古近系钻遇了渐新统高有机质丰度烃源岩,有机碳含量大于1.2%以上,而其紧邻的中央洋盆区ODP184航次多站位钻遇的沉积有机质丰度偏低,渐新统泥岩有机碳含量均小于0.8%(吴国璋等, 2003)。总之,南海外陆坡-洋陆过渡带乃至中央洋盆新生代沉积具有一定的展布规模,且有机质丰度较高,具有一定的生烃潜力,能够为水合物矿藏形成提供气源供给。

另外,根据海洋地质调查取样及ODP钻探获取的浅层沉积物罐顶气(吸附气)及酸解气异常显示结果,均表明该区深部具有热解气供给及其资源潜力,尤其是在外陆坡-洋陆过渡带能够形成以热成因为主的天然气水合物矿藏.通过对南海外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区浅层沉积物中酸解气组成及甲烷碳同位素分析表明,在南海北部陆坡-洋陆过渡带、西部陆坡-洋陆过渡带、西沙海槽、南海东北部陆坡-洋陆过渡带、南海西南部及南部陆坡-洋陆过渡带和中央洋盆区,均可识别出典型热解气气源特征(祝有海等, 2008)(图1),如酸解气样品甲烷碳同位素值均在热解气范围.当然,在南沙海槽亦见到生物气及混合气气源特征(甲烷碳同位素偏轻,处在生物气-混合气范围).以上地球化学分析结果,均表明南海陆坡-洋陆过渡带乃至洋盆区均具有形成热解气气源的潜力.同时,南海北部陆坡深水区乐东-陵水凹陷深部大气田甲烷碳同位素分析亦证实,在该区剖面上深部为热解气而向上逐渐转为生物气,亦即存在热解气和生物气两种气源供给特点(祝有海等, 2008; 何家雄等, 2015).热解气主要来自构造活动伴生的多期次断层裂隙构成的运聚通道系统的源源不断地输导与充注之结果(杨胜雄等, 2017).这些断层裂隙构成的纵向运聚通道系统为深部热解气向上运聚到深水海底浅表层天然气水合物高压低温稳定带,起到了重要的桥梁和高速通道的作用,进而为形成下生上储渗漏型天然气水合物矿藏奠定了基础和前提条件.

## 5 水合物勘查战略接替区初步分析与评价预测

大量研究及勘探实践表明(张光学和黄永祥, 2003; 祝有海等, 2008; 何家雄等, 2013),南海陆坡深水区天然气水合物和深水油气资源丰富,而与其紧密相邻的广阔的外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区,同样具有天然气水合物成藏所必须具备的热解气/生物气气源供给和高压低温稳定带等重要地质条件.因此可以综合判识和初步预测南海外陆坡-洋陆过渡带乃至中央洋盆区,均可作为将来天然气水合物可持续滚动勘探的战略接替区,即天然气水合物资源勘探的战略选区和勘探前景区.根据南海外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区的区域地质背景及油气地质条件,结合近年来天然气水合物勘查评价成果,以及大量的地质地球物

理及地球化学资料分析,可以将南海未来天然气水合物勘查战略接替区/远景区,主要分为三大部分,即北部外陆坡-洋陆过渡带及洋盆天然气水合物勘查远景区、西部外陆坡-洋陆过渡带及洋盆天然气水合物勘查远景区和西南部外陆坡-洋陆过渡带及洋盆天然气水合物勘查远景区.这些远景区域均与深水油气勘探及天然气水合物勘查重点区紧密相邻/相连,亦具有相同或相似的油气地质条件,应该具有多种资源并存的勘探前景.

北部外陆坡-洋陆过渡带及洋盆天然气水合物勘查远景区,位于与南海北部内陆坡毗邻的外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区,主要包括台西南、珠江口和琼东南等盆地南部的陆坡外侧及洋陆过渡带和中央洋盆北部.该区域地壳厚度多大于14 km以上,新生代沉积物相对较厚,热流场相对较低,海底浅表层温度低于15℃以下,能够满足天然气水合物成藏所需的低温高压稳定带条件.新生代沉积充填的古近系/新近系及第四系沉积有机质,能够形成大量热解气和生物气,进而为水合物成藏提供气源供给.因此,该区是南海北部未来重要的天然气水合物勘查远景区.

西部外陆坡-洋陆过渡带天然气水合物勘查远景区,处于与南海西部陆坡毗邻的外陆坡-洋陆过渡带及西部洋盆,主要包括西沙盆地、中建南盆地东部和万安盆地东部外陆坡-洋陆过渡带及西南次海盆.该区域地壳厚度多在13 km左右,最薄为6 km左右,平均热流场与南海北部洋陆过渡带高一些,大部分区域深水海底浅表层温度低(小于12℃),在平均热流场较高的洋盆区海底温度也不超过16℃,亦满足了天然气水合物藏所需要的低温高压稳定带环境.该区新生代沉积较厚,最厚可达5 km(外陆坡-洋陆过渡带)~3 km(西南次海盆).新近系及第四系沉积有机质亦具备热解气和生物气的成烃潜力,能够为天然气水合物矿藏提供烃源供给,同时高压低温环境则构成了较好的水合物富集场所.因此,该区亦是未来南海西部天然气水合物勘查的主要远景区.

西南部外陆坡-洋陆过渡带及南部洋盆天然气水合物勘查远景区,处在与南海西南部陆坡毗邻的外陆坡-洋陆过渡带及南部洋盆,主要包括北康盆地、曾母盆地东北部和南沙海槽盆地等处于外陆坡及洋陆过渡带和南部洋盆区的一些盆地.该区域平均地壳厚度在9~15 km,除曾母盆地部分区域热流

场明显偏高外,平均热流场亦比南海北部洋陆过渡带略高,但深水海底浅表层温度较低,一般均不超过 $17^{\circ}\text{C}$ 以上,亦满足了天然气水合物成藏所必须具备的高压低温稳定带条件.该区新生代沉积充填局部区域可能较厚,但平均厚度可能在千米左右.新生代沉积有机质(新近系及第四系)具有生烃潜力,根据海洋地质调查获取的样品分析,可能存在热解气、生物气及混合气等多种气源供给.因此,该区亦具备了天然气水合物藏形成的基本地质条件,亦是未来南海南部天然气水合物勘查的重要远景区.

综上所述,根据海洋地质调查及ODP钻探所获样品地球化学分析,尤其是结合区域地质条件及水合物成藏要素剖析与深入研究,可以综合判识确定南海广阔的外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区,基本上具备了天然气水合物形成所必须具有的高压低温环境和气源供给两个主要条件,亦满足了水合物成藏之基本要求,因此这些区域均可作为南海将来天然气水合物资源勘查的战略接替区和天然气水合物可持续滚动勘探的远景区.可以坚信未来南海天然气水合物勘查必然要逐渐向外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区不断地拓展与开拓,进而为人类开发出更多的绿色环保资源,以满足人们物质文化生活与国家经济社会发展之重大需求.此外,尽管目前天然气水合物勘查评价研究及勘探实践在南海北部天然气水合物成藏地质条件及分布规律与控制因素等方面取得了重要成果与认识,但由于天然气水合物成因成藏机制及运聚成藏系统颇具特色,且外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区没有开展水合物勘查钻探,仅仅只有IODP资料及地震BSR解释成果和地震预测的沉积充填厚度及分布特征,缺少相关实际地质资料,因此,我们难以进行更深入系统的水合物成藏方面的分析研究工作,故欠缺对研究区浅层TOC分析及热模拟生烃实验、运聚输导系统及储集层类型及分布等水合物成藏要素方面研究工作,其气源供给、运聚类型、储集机理等基础地质问题尚未完全厘清,在未来水合物勘查及大洋钻探中有待进一步研究.

## 6 结论

(1)南海天然气水合物勘查评价,长期以来均主要集中在南海北部陆坡深水区,迄今为止,已勘查发现了两大水合物成藏富集带和3个水合物富集区块,并取得了天然气水合物勘查试采的重大

突破与进展,确证了南海北部陆坡区巨大的天然气水合物资源潜力及非常好的勘探前景.然而,与其紧密相邻的外陆坡-洋陆过渡带乃至洋盆区,迄今为止均尚未开展天然气水合物调查评价与勘探及研究,属于勘探及研究的空白区,但根据海洋地质调查及初步的地质综合分析研究,该区具备天然气水合物成藏的基本地质条件,可作为南海未来天然气水合物勘查的战略接替区和可持续滚动勘探的战略选区及资源远景区.

(2)南海深地震探测结果表明,外陆坡-洋陆过渡带地壳相对较厚,热流场相对较低,且沉积充填物较厚;中央洋盆区地壳相对较薄,热流场相对较高,上覆沉积物薄但亦有一定的厚度.虽然总体上外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区与陆架-陆坡区相比,其地壳薄,上覆新生代沉积充填物亦薄,且热流值及地温场偏高,但其上覆深水海底浅表层(小于 $300\text{ m}$ )热流值及地温场并不高,其地温一般均不超过 $26^{\circ}\text{C}$ ,加之新生代沉积有机质具备生物气或少量热解气的成烃潜力.因此,该区具备了天然气水合物藏形成所必须具有的气源供给和高压低温稳定带条件.

(3)海洋地质调查样品及ODP钻探样品酸解气及罐顶气(吸附气)分析,均证实南海外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区存在热解气及生物气,且洋陆过渡带及洋盆区新生代沉积充填物有机质热演化程度尚处于成熟-高熟阶段,部分局部区域尚处在生物化学作用阶段.因此,可以推测其区域地温场及热流值亦与北部陆坡深水区基本相当,实际热流值可能为 $80\sim 90\text{ mW/m}^2$ (以往热流探测数据可能偏高),鉴于此,可以判识确定南海外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区深水海底浅表层,完全具备天然气水合物形成所需的高压低温环境及其条件.

(4)南海外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区新生代沉积展布具有一定的规模,其中洋陆过渡带沉积充填物相对较厚,一般在 $2\sim 5\text{ km}$ ,洋盆区沉积充填较薄,一般为 $0.6\sim 2\text{ km}$ 左右.该区沉积有机质基本上处在成熟-高熟阶段,局部地区处于未熟-低熟及生物化学作用阶段,因此可以综合判识外陆坡-洋陆过渡带及洋盆区新生代沉积物的生烃潜力,虽然与陆架陆坡区相比相差较大,但仍然具有一定的生烃潜力,能够为天然气水合物藏提供烃源供给.这已为海洋地质调查及ODP钻探所获浅层沉积物罐顶气及酸解气分析结果所证实.

## References

- Chen, Z., Yan, W., Chen, M.H., et al., 2006. Discovery of Cold Spring Carbonate Nodules on the Northern Continental Slope of the South China Sea: New Evidence of Undersea Natural Gas Seepage. *Chinese Science Bulletin*, 51(9):1065–1072 (in Chinese).
- Chow, J., Lee, J. S., Sun, R., et al., 2000. Characteristics of the Bottom Simulating Reflectors near Mud Diapirs: Offshore Southwestern Taiwan. *Geo-Marine Letters*, 20(1): 3–9. <https://doi.org/10.1007/s003670000034>
- Gao, A.G., 2001. Research on Natural Gas Hydrate and Its Countermeasures in China. *Marine Geology Development*, 17(3): 1–5 (in Chinese).
- Gao, H. F., Zhou, D., Qiu, Y., 2009. Relationship between Formation of Zhongyebei Basin and Spreading of Southwest Subbasin, South China Sea. *Journal of Earth Science*, 20(1): 66–76. <https://doi.org/10.1007/s12583-009-0007-2>
- He, J.X., Chen, S.H., Liu, H.L., et al., 2009. Natural Gas Genetic Types and Source Rocks in the Northern Slope of Baiyun Sag to Panyu Low Uplift in Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 30(1): 16–21 (in Chinese with English abstract).
- He, J.X., Lu, Z.Q., Su, P.B., et al., 2016. Source Supply System and Reservoir Forming Model Prediction of Natural Gas Hydrate in the Deep Water Area of the Northern South China Sea. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 38(6): 8–24 (in Chinese with English abstract).
- He, J.X., Su, P.B., Lu, Z.Q., et al., 2015. Prediction of Gas Sources of Natural Gas Hydrate in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea, and Its Migration, Accumulation and Reservoir Formation Pattern. *Natural Gas Industry*, 35(8): 19–29 (in Chinese with English abstract).
- He, J.X., Yan, W., Zhu, Y.H., et al., 2013. Bio-Genetic and Sub-Biogenetic Gas Resource Potential and Genetic Types of Natural Gas Hydrates in the Northern Marginal Basins of South China Sea. *Natural Gas Industry*, 33(6): 121–134 (in Chinese with English abstract).
- Jerram, D., Petford, N., 2012. The Field Description of Igneous Rocks, Second Edition. *Environmental and Engineering Geoscience*, 18(4): 399–400.
- Jin, Q.H., Li, T.G., 2000. Regional Geologic Tectonics of the Nansha Sea Area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Kvenvolden, K. A., 1988. Methane Hydrates and Global Climate. *Global Biogeochemical Cycles*, 2(3): 221–229. <https://doi.org/10.1029/GB002i003p00221>
- Lai, H., Fang, Y., Kuang, Z., et al., 2021. Geochemistry, Origin and Accumulation of Natural Gas Hydrates in the Qiongdongnan Basin, South China Sea: Implications from Site GMGS5-W08. *Marine and Petroleum Geology*, 123: 104774.
- Lei, Z.Y., Zhang, L., Wang, L.Z., et al., 2020. Provenance Migration in the Beikang Basin of the Southern South China Sea during the Oligocene to the Mid-Miocene. *Earth Science*, 45(5): 1855–1864 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. B., 2011. Dynamics of the Continental Margins of South China Sea: Scientific Experiments and Research Progresses. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 2993–3003 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.B., Ding, W.W., Gao, J.Y., et al., 2011. Cenozoic Evolution Model of the Sea-Floor Spreading in South China Sea: New Constraints from High Resolution Geophysical Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3004–3015 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., Lei, X. H., Zhang, X., et al., 2013. Gas Hydrate and Associated Free Gas in the Dongsha Area of Northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.09.007>
- Li, Y.C., Mi, L.J., Zhang, G.C., et al., 2011. The Formation and Distribution of Source Rocks for Deep Water Area in the Northern of South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(5): 970–979 (in Chinese with English abstract).
- Liang, J., Wang, M.J., Lu, J.A., et al., 2013. Characteristics of Sonic and Seismic Velocities of Gas Hydrate Bearing Sediments in the Shenhu Area, Northern South China Sea. *Natural Gas Industry*, 33(7): 29–35 (in Chinese with English abstract).
- Liang, J.Q., Wang, H.B., Su, P.B., et al., 2018. Study on Controlling Factors of Gas Hydrate Accumulation. Geological Publishing House, Beijing, 3–15 (in Chinese).
- Liang, J.Q., Wang, H.B., Su, X., et al., 2014. Natural Gas Hydrate Formation Conditions and the Associated Controlling Factors in the Northern Slope of the South China Sea. *Natural Gas Industry*, 34(7): 128–135 (in Chinese with English abstract).
- Liang, J.Q., Zhang, G.X., Lu, J.G., et al., 2016. Accumulation Characteristics and Genetic Models of Natural Gas Hydrate Reservoirs in the NE Slope of the South China Sea. *Natural Gas Industry*, 36(10): 157–162 (in Chinese with English abstract).

- Liu, Y.H., 2004. Tectonic-Stratigraphic Division and Blind Fold Structures in Nansha Waters, South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(3):337–348.
- Lu, H.F., Su, X.M., Zhang, M., 2011. Mineralogy and Geochemistry of Gas Hydrate Deposits in the South China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Ma, W.H., He, J.X., Yao, Y.J., et al., 2008. Characteristics of Tertiary Sediments and Main Source Rocks, Northern South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 19(1): 41–48 (in Chinese with English abstract).
- Mao, Y.H., Zhao, Z.X., Sun, Z., 2020. Extensional Thinning Mechanism of the Western Continental Margin of the Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 45(5): 1622–1635 (in Chinese with English abstract).
- Mi, L.J., Zhang, X.T., Pang, X., et al., 2019. Formation Mechanism and Petroleum Geology of Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, (A01):1–10 (in Chinese with English abstract).
- Milkov, A. V., 2003. Global Estimates of Hydrate-Bound Gas in Marine Sediments: How Much is Really out There?. *Earth Science Reviews*, 66(3): 183–197. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2003.11.002>
- Pang, X., Ren, J. Y., Zheng, J.Y., et al., 2018. Petroleum Geology Controlled by Extensive Detachment Thinning of Continental Margin Crust: A Case Study of Baiyun Sag in the Deep-Water Area of Northern South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 27–39 (in Chinese with English abstract).
- Pichot, T., Delescluse, M., Chamot-Rooke, N., et al., 2014. Deep Crustal Structure of the Conjugate Margins of the SW South China Sea from Wide-Angle Refraction Seismic Data. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 627–643. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.10.008>
- Ren, J.Y., Pang, X., Yu, P., et al., 2018. Characteristics and Formation Mechanism of Deepwater and Ultra-Deepwater Basins in the Northern Continental Margin of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(12): 4901–4920 (in Chinese with English abstract).
- Shang, J.J., Wu, L.S., Liang, J.Q., et al., 2014. The Microtopographic Features and Gas Seep Model on the Slope in the Northeastern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(1): 129–136 (in Chinese with English abstract).
- Song, H.B., Wu, S.G., Jiang, W.W., 2007. The Characteristics of BSRS and Their Derived Heat Flow on the Profile 973 in the Northeastern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(5): 1508–1517 (in Chinese with English abstract).
- Su, P.B., Liang, J.Q., Sha, Z.B., et al., 2014. Gas Sources Condition of Gas Hydrate Formation in Shenhu Deep Water Sea Zone. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 36(2): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Zhao, Z.X., Zhou, D., et al., 2011. The Stratigraphy and the Sequence Architecture of the Basins in Nansha Region. *Earth Science*, 36(5): 798–806 (in Chinese with English abstract).
- Tréhu, A. M., Ruppel, C., Holland, M., et al., 2006. Gas Hydrates in Marine Sediments: Lessons from Scientific Ocean Drilling. *Oceanography*, 19(4): 124–142.
- Wang, J.Q., Yao, B.C., Wan, L., et al., 2005a. Characteristics of Tectonic Dynamics of the Cenozoic Sedimentary Basins and the Petroleum Resources in the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(2): 91–100 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.Q., Zhu, Y.H., Wu, B.H., et al., 2005b. Geochemistry of Hydrocarbon Gases from Site 1146, ODP Leg 184, the South China Sea and the Implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(3): 53–60 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.J., Collett, T.S., Lee, M.W., et al., 2014. Geological Controls on the Occurrence of Gas Hydrate from Core, Downhole Log, and Seismic Data in the Shenhu Area, South China Sea. *Marine Geology*, 357: 272–292.
- 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).
- Wang, X.J., Wu, S.G., Dong, D.D., et al., 2011. Control of Mass Transport Deposits over the Occurrence of Gas Hydrate in Qiongdongnan Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(1): 109–118 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G.X., Qin, J.G., Mao, S.Z., 2003. Oligocene Palynological Records in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48(17): 1868–1871 (in Chinese).
- Wu, N.Y., Liang, J.Q., Wang, H.B., et al., 2008. Marine Gas Hydrate System: State of the Art. *Geoscience*, 22(3): 356–362 (in Chinese with English abstract).
- Wu, N.Y., Su, X., Song, H.B., et al., 2007a. Research on the Mechanism of Gas Hydrate Accumulation on the Northern Continental Slope of the South China Sea: Significance, Present Situation and Problems. *Marine Geology*, (3):1–11 (in Chinese).

- Wu, N.Y., Zhang, H.Q., Yang, S.X., et al., 2007b. Preliminary Discussion on Natural Gas Hydrate (NGH) Reservoir System of Shenhu Area, North Slope of South China Sea. *Natural Gas Industry*, 27(9): 1–6, 125 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., He, J.X., He, L.J., et al., 2011. Distribution of Heat Flow in Cenozoic Basins of South China Sea and Its Connection with Oil and Gas Migration and Accumulation. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(6): 99–108 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M.Z., Pan, A.D., Sha, Z.B., 2010. Geological Models of Gas Hydrates Deposits along the Continental Margin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(6): 85–90 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M.Z., Sha, Z.B., Liang, J.Q., et al., 2011. Metallogenic Conditions of Gas Hydrate in the Northeastern Slope of the South China Sea. *Geoscience*, 25(2): 340–348 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M.Z., Wu, L., He, C.X., et al., 2002. New Development of International Marine Mineral Resource Researches. *Marine Geology Development*, 18(9): 17–21 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S.X., Liang, J.Q., Lu, J.A., et al., 2017. New Understandings on the Characteristics and Controlling Factors of Gas Hydrate Reservoirs in the Shenhu Area on the Northern Slope of the South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 24(4): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B.C., 2001. The Gas Hydrate in the South China Sea. *Tropic Oceanology*, 20(2): 20–28 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B.C., Wan, L., Liu, Z.H., 2004. Tectonic Dynamics of Cenozoic Sedimentary Basins and Hydrocarbon Resources in the South China Sea. *Earth Science*, 29(5): 543–549 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y.J., Huang, Y.Y., Wu, N.Y., et al., 2007. Conditions and Status for Forming and Exploring Gas Hydrate. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(6): 668–672 (in Chinese with English abstract).
- Ye, J.L., Qin, X.W., Qiu, H.J., et al., 2018. Data Report: Molecular and Isotopic Compositions of the Extracted Gas from China's First Offshore Natural Gas Hydrate Production Test in South China Sea. *Energies*, 11(10): 2793. <https://doi.org/10.3390/en11102793>
- Yu, X.H., Wang, J.Z., Liang, J.Q., et al., 2014. Depositional Accumulation Characteristics of Gas Hydrate in the Northern Continental Slope of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 35(2): 253–264 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X.H., Zhang, Z.J., Su, X., et al., 2004. Primary Discussion on Accumulation Conditions for Sedimentation of Gas Hydrate and Its Distribution in South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 311–315 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.C., Mi, L.J., Wu, S.G., et al., 2007. Deepwater Area—The New Prospecting Targets of Northern Continental Margin of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 28(2): 15–21 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.C., Zhu, W.L., Mi, L.J., et al., 2010. The Theory of Hydrocarbon Generation Controlled by Source Rock and Heat from Circle Distribution of Outside-Oil Fields and Inside-Gas Fields in South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 987–1005 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.X., Huang, Y.X., 2003. Marine Gas Hydrate Seismology. Ocean Press, Beijing, 116 (in Chinese).
- Zhang, G.X., Huang, Y.Y., Zhu, Y.H., et al., 2002. Prospect of Gas Hydrate Resources in the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(1): 75–81 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.X., Liang, J.Q., Lu, J.A., et al., 2014. Characteristics of Natural Gas Hydrate Reservoirs on the Northeastern Slope of the South China Sea. *Natural Gas Industry*, 34(11): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.X., Zhu, Y.H., Liang, J.Q., et al., 2006. Tectonic Controls on Gas Hydrate Deposits and Their Characteristics. *Geoscience*, 20(4): 605–612 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.T., Zhang, H.Q., Zhu, Y.H., 2007. Gas Hydrate Investigation and Research in China: Present Status and Progress. *Geology in China*, 34(6): 953–961 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Liang, J.Q., Lu, J.A., et al., 2017. Accumulation Features and Mechanisms of High Saturation Natural Gas Hydrate in Shenhu Area, Northern South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5): 670–680.
- Zhang, W., Liang, J.Q., Lu, J.A., et al., 2020. Characteristics and Controlling Mechanism of Typical Leakage Gas Hydrate Reservoir Forming System in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Natural Gas Industry*, 40(8): 90–99 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H.Q., Wu, S.G., Xu, N., et al., 2006. The Elementary Research of Gas Hydrate Associated with Mud Diapir Structure in the East China Sea. *Geoscience*, 20(1): 115–122 (in Chinese with English abstract).

- Zhao, J., Liang, Q.Y., Wei, J.G., et al., 2020. Seafloor Geology and Geochemistry Characteristic of Methane Seepage of the "Haima" Cold Seep, Northwestern Slope of the South China Sea. *Geochimica*, 49(1): 108–118 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M.H., Qiu, X.L., Xu, H.L., et al., 2011. Deep Seismic Surveys in the Southern South China Sea and Contrast on Its Conjugate Margins. *Earth Science*, 36(5): 823–830 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J.T., Deng, Y., Guo, M.G., et al., 2020. Mineralization Conditions and Accumulation Pattern of the Gas Hydrate in Qiongdongnan Basin Floor Plain. *China Offshore Oil and Gas*, 32(3): 10–19 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y.H., Huang, Y.Y., Matsumoto, R., et al., 2006. Geochemical and Stable Isotopic Compositions of Pore Fluids and Authigenic Siderite Concretions from Site 1146, ODP Leg 184: Implications for Gas Hydrate. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, (184):1–15.
- Zhu, Y.H., Wu, B.H., Luo, X.R., et al., 2008. Geochemical Characteristics of Hydrocarbon Gases and Their Origin from the Sediments of the South China Sea. *Geoscience*, 22(3):407–414 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈忠, 颜文, 陈木宏, 等, 2006. 南海北部大陆坡冷泉碳酸盐结核的发现: 海底天然气渗漏活动的新证据. *科学通报*, 51(9): 1065–1072.
- 高爱国, 2001. 天然气水合物研究及我国的对策. *海洋地质动态*, 17(3): 1–5.
- 何家雄, 陈胜红, 刘海龄, 等, 2009. 珠江口盆地白云凹陷北坡-番禺低隆起天然气成因类型及其烃源探讨. *石油学报*, 30(1): 16–21.
- 何家雄, 卢振权, 苏丕波, 等, 2016. 南海北部天然气水合物气源系统与成藏模式. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 38(6): 8–24.
- 何家雄, 苏丕波, 卢振权, 等, 2015. 南海北部琼东南盆地天然气水合物气源及运聚成藏模式预测. *天然气工业*, 35(8): 19–29.
- 何家雄, 颜文, 祝有海, 等, 2013. 南海北部边缘盆地生物气/亚生物气资源与天然气水合物成矿成藏. *天然气工业*, 33(6): 121–134.
- 金庆焕, 李唐根, 2000. 南沙海域区域地质构造. *海洋地质与第四纪地质*, 20(1): 1–8.
- 雷振宇, 张莉, 王龙樟, 等, 2020. 南海南部北康盆地晚渐新世-中中新世物源变化. *地球科学*, 45(5): 1855–1864.
- 李家彪, 2011. 南海大陆边缘动力学: 科学实验与研究进展. *地球物理学报*, 54(12): 2993–3003.
- 李家彪, 丁巍伟, 高金耀, 等, 2011. 南海新生代海底扩张的构造演化模式: 来自高分辨率地球物理数据的新认识. *地球物理学报*, 54(12): 3004–3015.
- 李友川, 米立军, 张功成, 等, 2011. 南海北部深水区烃源岩形成和分布研究. *沉积学报*, 29(5): 970–979.
- 梁劲, 王明君, 陆敬安, 等, 2013. 南海北部神狐海域含天然气水合物沉积层的速度特征. *天然气工业*, 33(7): 29–35.
- 梁金强, 王宏斌, 苏丕波, 等, 2018. 天然气水合物成藏的控制因素研究. 北京:地质出版社, 3–15.
- 梁金强, 王宏斌, 苏新, 等, 2014. 南海北部陆坡天然气水合物成藏条件及其控制因素. *天然气工业*, 34(7): 128–135.
- 梁金强, 张光学, 陆敬安, 等, 2016. 南海东北部陆坡天然气水合物富集特征及成因模式. *天然气工业*, 36(10): 157–162.
- 陆红锋, 孙晓明, 张美, 2011. 南海天然气水合物沉积物矿物学和地球化学. 北京:科学出版社.
- 马文宏, 何家雄, 姚永坚, 等, 2008. 南海北部边缘盆地第三系沉积及主要烃源岩发育特征. *天然气地球科学*, 19(1): 41–48.
- 毛云华, 赵中贤, 孙珍, 2020. 珠江口盆地西部陆缘伸展-减薄机制. *地球科学*, 45(5):1622–1635.
- 米立军, 张向涛, 庞雄, 等, 2019. 珠江口盆地形成机制与油气地质. *石油学报*, (A01):1–10.
- 庞雄, 任建业, 郑金云, 等, 2018. 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白云凹陷为例. *石油勘探与开发*, 45(1): 27–39.
- 任建业, 庞雄, 于鹏, 等, 2018. 南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析. *地球物理学报*, 61(12): 4901–4920.
- 尚久靖, 吴庐山, 梁金强, 等, 2014. 南海东北部陆坡海底微地貌特征及其天然气渗透模式. *海洋地质与第四纪地质*, 34(1): 129–136.
- 宋海斌, 吴时国, 江为为, 2007. 南海东北部 973 剖面 BSR 及其热流特征. *地球物理学报*, 50(5):1508–1517.
- 苏丕波, 梁金强, 沙志彬, 等, 2014. 神狐深水海域天然气水合物成藏的气源条件. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 36(2): 1–8.
- 孙珍, 赵中贤, 周蒂, 等, 2011. 南沙海域盆地的地层系统与沉积结构. *地球科学*, 36(5): 798–806.
- 王建桥, 姚伯初, 万玲, 等, 2005a. 南海海域新生代沉积盆地的油气资源. *海洋地质与第四纪地质*, 25(2): 91–100.
- 王建桥, 祝有海, 吴必豪, 等, 2005b. 南海 ODP1146 站位烃类气体地球化学特征及其意义. *海洋地质与第四纪地质*, 25(3): 53–60.

- 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.
- 王秀娟, 吴时国, 董冬冬, 等, 2011. 琼东南盆地块体搬运体系对天然气水合物形成的控制作用. 海洋地质与第四纪地质, 31(1): 109—118.
- 吴国璋, 覃军干, 茅绍智, 2003. 南海深海相渐新统孢粉记录. 科学通报, 48(17):1868—1871.
- 吴能友, 梁金强, 王宏斌, 等, 2008. 海洋天然气水合物成藏系统研究进展. 现代地质, 22(3): 356—362.
- 吴能友, 苏新, 宋海斌, 等, 2007a. 南海北部陆坡天然气水合物成藏机理研究: 意义、现状与问题. 海洋地质, (3): 1—11.
- 吴能友, 张海启, 杨胜雄, 等, 2007b. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探. 天然气工业, 27(9): 1—6, 125.
- 徐行, 何家雄, 何丽娟, 等, 2011. 南海北部与南部新生代沉积盆地热流分布与油气运聚富集关系. 海洋地质与第四纪地质, 31(6): 99—108.
- 杨木壮, 潘安定, 沙志彬, 2010. 陆缘地区天然气水合物成藏地质模式. 海洋地质与第四纪地质, 30(6):85—90.
- 杨木壮, 沙志彬, 梁金强, 等, 2011. 南海东北部陆坡区天然气水合物成矿作用. 现代地质, 25(2): 340—348.
- 杨木壮, 吴琳, 何朝雄, 等, 2002. 国际海洋矿产研究新进展. 海洋地质动态, 18(9):17—21.
- 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等, 2017. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识. 地学前缘, 24(4): 1—14.
- 姚伯初, 2001. 南海的天然气水合物矿藏. 热带海洋学报, 20(2): 20—28.
- 姚伯初, 万玲, 刘振湖, 2004. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源. 地球科学, 29(5): 543—549.
- 姚永坚, 黄永祥, 吴能友, 等, 2007. 天然气水合物的形成条件及勘探现状. 新疆石油地质, 28(6): 668—672.
- 于兴河, 王建忠, 梁金强, 等, 2014. 南海北部陆坡天然气水合物沉积成藏特征. 石油学报, 35(2): 253—264.
- 于兴河, 张志杰, 苏新, 等, 2004. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布. 地学前缘, 11(1): 311—315.
- 张功成, 米立军, 吴时国, 等, 2007. 深水区: 南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域. 石油学报, 28(2): 15—21.
- 张功成, 朱伟林, 米立军, 等, 2010. “源热共控论”: 来自南海海域油气田“外油内气”环带有序分布的新认识. 沉积学报, 28(5): 987—1005.
- 张光学, 黄永祥, 2003. 海域天然气水合物地震学. 北京: 海洋出版社, 116.
- 张光学, 黄永祥, 祝有海, 等, 2002. 南海天然气水合物的成矿远景. 海洋地质与第四纪地质, 22(1): 75—81.
- 张光学, 梁金强, 陆敬安, 等, 2014. 南海东北部陆坡天然气水合物藏特征. 天然气工业, 34(11): 1—10.
- 张光学, 祝有海, 梁金强, 等, 2006. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征. 现代地质, 20(4): 605—612.
- 张洪涛, 张海启, 祝有海, 2007. 中国天然气水合物调查研究现状及其进展. 中国地质, 34(6): 953—961.
- 张伟, 梁金强, 陆敬安, 等, 2020. 琼东南盆地典型渗漏型天然气水合物成藏系统的特征与控藏机制. 天然气工业, 40(8): 90—99.
- 赵汗青, 吴时国, 徐宁, 等, 2006. 东海与泥底辟构造有关的天然气水合物初探. 现代地质, 20(1): 115—122.
- 赵静, 梁前勇, 尉建功, 等, 2020. 南海北部陆坡西部海域“海马”冷泉甲烷渗漏及其海底表征. 地球化学, 49(1): 108—118.
- 赵明辉, 丘学林, 徐辉龙, 等, 2011. 南海南部深地震探测及南北共轭陆缘对比. 地球科学, 36(5):823—830.
- 朱继田, 邓勇, 郭明刚, 等, 2020. 琼东南盆地盆底平原区天然气水合物成矿条件及成藏模式. 中国海上油气, 32(3): 10—19.
- 祝有海, 吴必豪, 罗续荣, 等, 2008. 南海沉积物中烃类气体(酸解烃)特征及其成因与来源. 现代地质, 22(3): 407—414.