

万志峰, 张伟, 陈崇敏, 等. 琼东南盆地冷泉差异发育特征及其深部控制机理[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(7): 1-10.

琼东南盆地冷泉差异发育特征及其深部控制机理

万志峰^{1,2}, 张伟³, 陈崇敏¹, 苏丕波³, 王先庆³, 张金锋¹, 罗钧升¹

(1 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082; 2 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 湛江 524000;

3 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075)

摘要:海底冷泉与天然气水合物资源、全球气候变化和极端环境生态系统等重大问题密切相关, 具有重要的科学意义。冷泉系统形成演化影响因素众多, 其时空分布、活动特征及相关物理、化学和生物作用差异较大。冷泉活动的浅表层响应与深部控制要素的耦合关系、冷泉差异发育的流体动力学过程与控制机理等科学问题有待深入研究。以琼东南盆地为主要研究对象, 针对冷泉差异发育特征及其控制机理问题, 以流体动力学研究为主线, 深浅连通, 将浅表层冷泉观测数据与深部地质环境、地层压力等要素相结合, 精细刻画冷泉流体从物源层向浅表层运移的渗漏通道特征, 建立冷泉浅表层响应与深部要素之间的耦合关系, 揭示冷泉差异发育的流体动力学模式, 探讨冷泉差异发育的控制机理, 以为冷泉环境水合物勘查与试采、深海物质和能量迁移转化及极端环境的生态系统研究提供理论依据。

关键词:海底冷泉; 差异发育; 流体动力学特征; 控制机理; 琼东南盆地

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.113

0 引言

冷泉是指来自海底沉积界面之下与周围海水温度相近且富含甲烷等烃类物质的流体渗漏活动^[1-4]。自首次在墨西哥湾水深 3 200 m 的海底发现冷泉并命名以来^[5], 全球海底发现了 900 多个冷泉区^[6-7]。中国南海神狐、东沙、西沙海槽、琼东南等海域也发现了冷泉活动^[7-10]。国际上对海底冷泉系统的调查研究虽然只有不到 40 年的时间, 但由于其与天然气水合物资源、温室效应与全球环境变化、极端环境生态系统以及生命起源等重大问题密切相关, 而成为国内外学者关注的热点, 被誉为 20 世纪海洋地质学领域最重要的成就之一^[11-14]。

国内外学者对冷泉系统的空间结构、碳和元素循环、活动历史、驱动机制、化能自养生物以及渗漏型水合物成藏等方面的研究都获得了大量成果^[15-22],

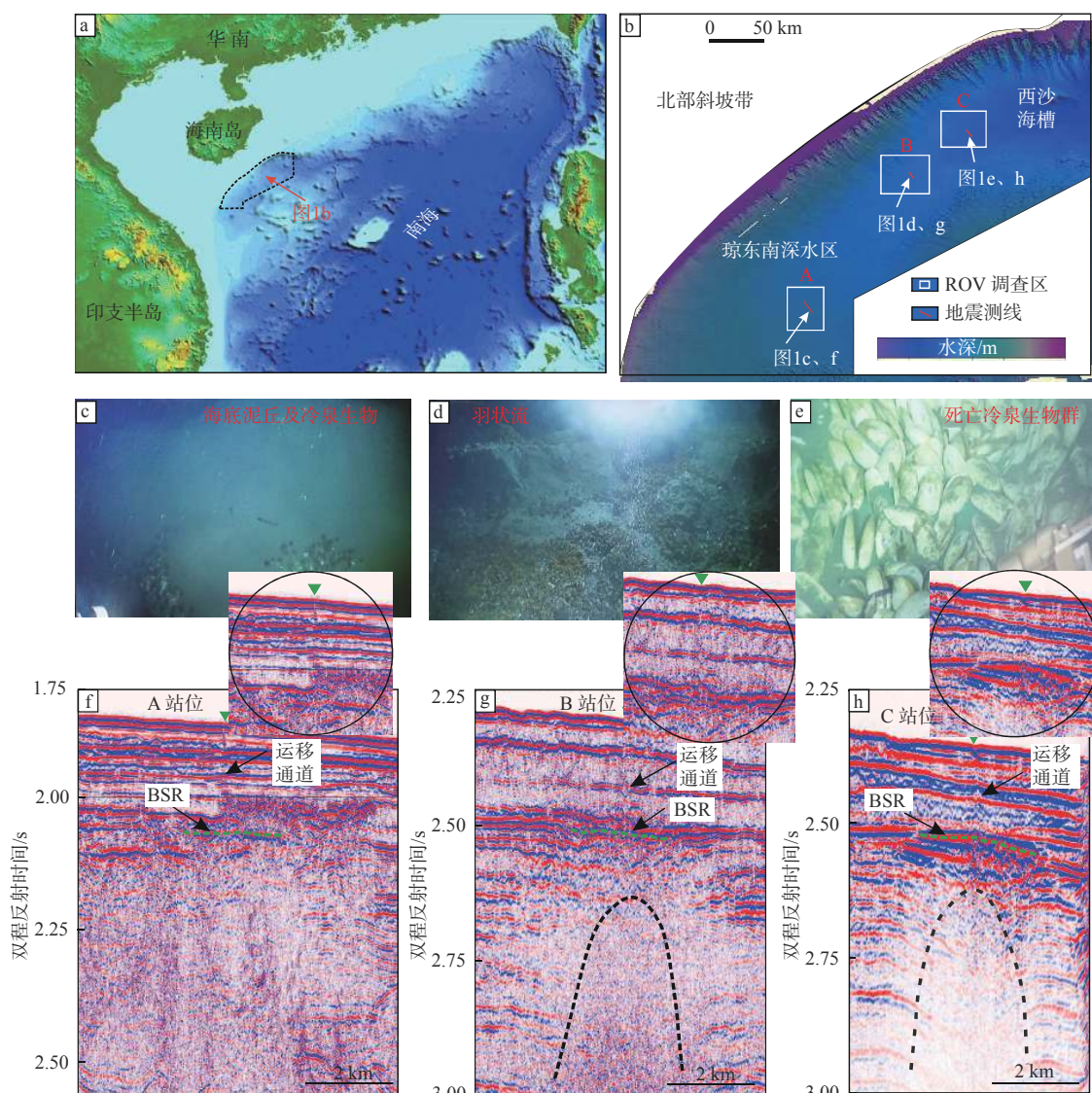
然而, 由于冷泉系统形成与演化的影响因素众多, 时空分布与活动特征差异大, 不同海域的冷泉系统具有不同的地质、地球化学特征, 并伴随着一系列物理、化学和生物作用的差异^[13-14, 23-24]。目前对冷泉时空演化过程与控制机理的认识较为薄弱, 冷泉活动的浅表层响应与深部控制要素的耦合关系、冷泉差异发育的流体动力学过程与控制机理等关键科学问题有待深入研究, 故迄今尚难以深入揭示冷泉系统演变与水合物成藏、深海环境与生命过程等相关科学问题^[25-30]。总之, 开展冷泉系统演变过程及其控制机理研究不仅具有重要的地质科学意义, 也具有重要的资源环境意义。

自 2015 年“海马冷泉”这一海底“巨型”活动性冷泉被发现以来, 琼东南盆地成为当前冷泉研究的热点地区, 为该海域天然气水合物成藏及其环境效应、冷泉生物起源与演化等科学问题提供了重要依据和实验平台。调查表明, 琼东南盆地陆坡区海底冷泉广泛发育, 然而冷泉流体通量、时空演化、地形地貌、地球化学、生态系统、水合物赋存等方面有着较大差异(图 1)^[31-37]。那么, 是什么因素导致冷泉差异发育? 冷泉活动的主控因素是什么? 海底冷泉差异发育如何受控于深部地质环境与超压流体活动? 冷泉差异发育的控制机理是什么? 这

收稿日期: 2021-04-21

资助项目: 国家自然科学基金(42076054); 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目(ZJW-2019-03)

作者简介: 万志峰(1981—), 男, 博士, 副教授, 博士研究生导师, 主要从事海洋地质构造、油气及天然气水合物成藏方面的研究工作。E-mail: wanzhif@mail.sysu.edu.cn



水下机器人(ROV)观测显示, 3 个站位冷泉活动差异明显, A 站位于“海马冷泉”区, 冷泉活动强烈, 形成泥丘地貌, 贻贝发育; B 站可见冷泉羽状流, 发育大量冷泉生物; C 站冷泉已停止活动, 出现大量死亡白贝。过 3 个站位的地震剖面揭示了冷泉渗漏通道的差异性, 如图 f、g、h

图 1 琼东南盆地 3 个典型站位冷泉差异发育特征

Fig.1 Cold seeps differential development characteristics at three typical stations in the Qiongdongnan Basin

一系列的科学问题尚未有效解决。定量研究不同类型和特征冷泉系统发育的主控要素及控制机理是揭示冷泉系统形成与演化过程的关键, 亦是解析冷泉流体活动与天然气水合物成藏之关系、探索深海冷泉生物群的繁衍及演化机制的重要依据。

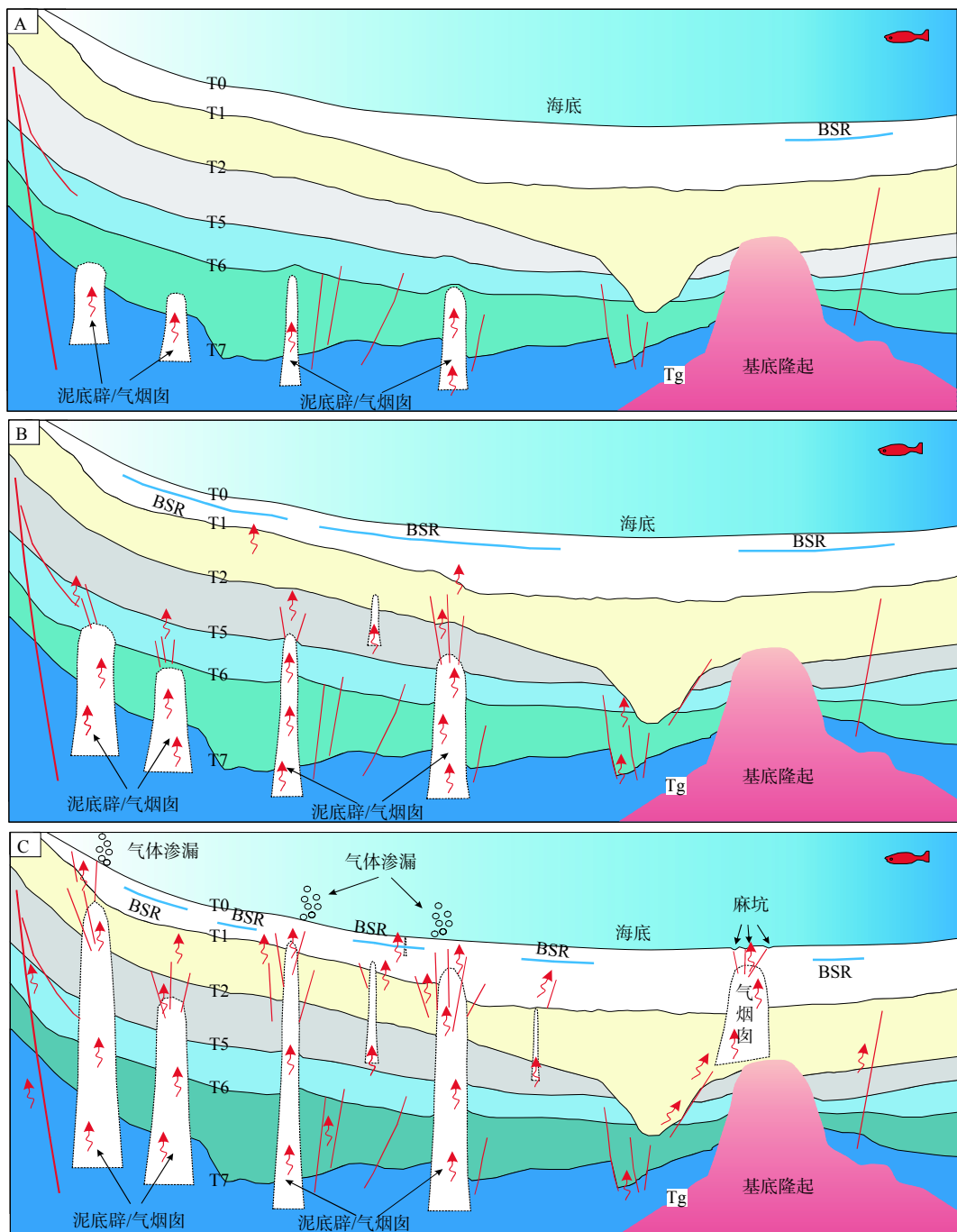
1 琼东南盆地冷泉发育特征

南海冷泉分布广泛, 神狐、东沙、琼东南、西沙海槽、南沙和越南沿岸等海域均有发现^[7-10]。2015 年, 中国首次在南海西北陆坡琼东南盆地发现仍在活动的“海马”冷泉, 规模巨大, 活动强烈, 并发现大量渗漏型天然气水合物、自生矿物、特征性冷泉生

态系统, 已然成为当前冷泉研究的热点地区^[7,19,32,36]。

琼东南盆地是一个大型新生代裂陷盆地, 其不仅富集常规油气, 亦蕴藏着丰富的水合物资源^[38-41]。该盆地属典型的“高温超压”盆地, 在超压作用下, 盆地南部深水区广泛发育泥底辟、气烟囱、微断裂等冷泉渗漏通道。泥底辟、气烟囱构造样式及其形态各异, 发育展布规模大小不一, 形成演化特点亦不同(图 2)^[31,34,42]。

“海马”冷泉是中国首次在南海北部陆坡西部海域发现的规模空前的活动性冷泉, 总体呈 EW 向条带状展布, 水深为 1 350~1 430 m, 面积约为 618 km²。“海马”冷泉具有 3 大特点: ①浅表层富含天然气水合物; ②自生碳酸盐岩大量出露; ③冷

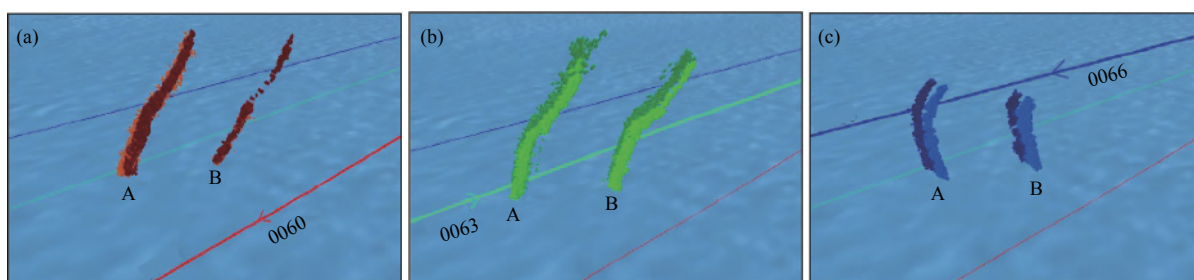
图 2 琼东南盆地泥底辟、气烟囱差异发育与水合物运聚模式^[34]Fig.2 Hydrate accumulation mode in forms of mud diapir and gas chimney in the Qiongdongnan Basin^[34]

泉生物群广泛发育^[7,19,32,37]。“海马”冷泉的发现为研究南海西部海域天然气水合物成藏及其环境效应、冷泉生物生命起源与演化等重要科学问题提供了重要依据和实验平台。

海底观测与实验分析表明,琼东南盆地冷泉差异发育特征明显,不同发育区冷泉流体通量、时空演化、地形地貌、流体地球化学、沉积物特征、生态系统、水合物赋存等方面有着较大差异。杨力等^[42]利用多波束、多道地震数据分析了琼东南盆地活动

冷泉羽状流、海底地貌与底质以及流体活动构造特征,观测到多个延伸高度超过 750 m 的气泡羽状流,并指出冷泉羽状流活动存在明显差异性,不同时刻羽状流形态也发生较大变化(图 3)。ROV 观测也揭示了冷泉活动强度、海底地貌及生物群落生态系统的差异(图 1)^[32,37]。

前人对琼东南盆地冷泉系统的发育特征、流体地球化学、冷泉碳酸盐岩、生态环境及其对水合物成藏的影响等方面开展了诸多研究。SUN 等^[31]、



3条测线采集的时间间隔约为3 h, 3次测量羽状流形态发生了较大的变化^[42]

图3 不同时刻在“海马”冷泉区测量的海底羽状流成像结果

Fig.3 Submarine gas plume imaging results at different times in the "Haima" cold seep

陈江欣等^[43]、ZHANG等^[34]利用地球物理数据分析了冷泉特殊的地形地貌特征和流体渗漏通道类型; LUO等^[18]、FENG和CHEN^[44]、LIANG等^[32]、WANG等^[45]通过对冷泉碳酸盐及相关沉积物分析, 揭示了冷泉系统的生物地球化学过程和地球化学特征; HU等^[35]、FANG等^[36]、WAN等^[37]通过冷泉发育区孔隙水的成分、地球化学与同位素分析, 阐明了冷泉流体来源与运移特征; ZHANG等^[34]分析了冷泉发育区水合物赋存特征, 探讨了冷泉活动对水合物成矿的影响。然而, 目前对琼东南盆地冷泉流体动力学过程的研究缺乏定量分析, 难以揭示冷泉的形成演变过程与控制机理^[18,33]。定量研究不同类型和特征冷泉系统发育的主控要素及控制机理, 是揭示冷泉系统形成与演化过程的关键, 亦是解析冷泉流体活动与天然气水合物成矿之关系、探索深海冷泉生物群的繁衍及演化机制的重要依据。

2018年, “海马号”水下机器人(ROV)与“深海勇士号”载人潜器在琼东南盆地开展联合深潜航次调查, 针对3个不同活动强度冷泉站位进行了观测取样分析(图1)。2019年, “海马号”ROV再次在该区域开展调查取样工作。笔者根据海底观测资料分析了不同站位冷泉流体活动、地形地貌、海底生物群落等方面的差异^[37], 并对获得的沉积物、流体、生物样品开展了元素与同位素、水化学、生物学相关测试分析。结合地震资料, 初步分析了冷泉渗漏通道与控制要素, 探讨了冷泉差异活动对该海域相关物理、化学、生物作用的影响。冷泉并非是固定的, 它在时空上都有着不一样的变化, 而其变化同时会决定着冷泉生态系统的演变。在中等流量冷泉渗漏中, 天然气水合物的形成可能会堵塞其气体运移通道, 使该冷泉流量渐渐减弱, 最后冷泉消失。流量大的冷泉可能会抑制天然气水合物的形成, 在较长的一段时间内在海底保持较大流量的

喷溢。冷泉并不能永久地保持大流量的状态, 后期随着其流量的减小, 该冷泉也可能会渐渐衰弱并最后消失。

2 海底冷泉系统形成演变过程

海底冷泉系统被称作“通往深部岩石圈的窗口”, 它的发现是20世纪海洋地质学领域最重要的成就之一^[11-12,14]。国际上对海底冷泉系统的调查研究虽然只有不到40年的时间, 但由于其与天然气水合物资源、温室气体环境效应与全球环境变化、极端环境生态系统以及生命起源等重大问题密切相关而成为国际科学前沿, 发展成地球科学领域新的学科增长点^[13,46-49]。

冷泉系统形成与演化的影响因素众多, 时空分布与发育特征差异大, 并伴随着一系列物理、化学和生物作用的异同^[14,23-24]。冷泉系统具有3个基本结构要素: 流体源、运移通道以及海底或近海底的渗漏系统^[14]。冷泉碳酸盐岩、黄铁矿等自生矿物以及孔隙水一直是冷泉研究的重要对象, 它可以很好地揭示冷泉系统的流体来源及活动演化特征^[32,44,50-51]。冷泉发育区是以化能自养菌为基础的特殊生态系统, 是探究地球深处生态系统的重要突破口, 亦是冷泉流体活动的重要指标^[5,7,19]。

冷泉渗漏通道主要包括断层、裂缝、泥底辟、泥火山、气烟囱、连通砂体等类型, 起着“桥梁”的作用, 是控制冷泉形成演化的关键环节^[13,16]。冷泉通道可为水合物形成提供充足的气源, 有利于渗漏型水合物的形成, 是寻找天然气水合物的重要标志^[15,20,46]。冷泉通道系统主要受控于地质构造过程, 直接引起流体运移路径、通量以及气/液比等关键参数的变化, 导致冷泉渗漏产物类型、地貌特征、水合物成藏、冷泉生物群落等的改变(图4)^[9,27,34]。

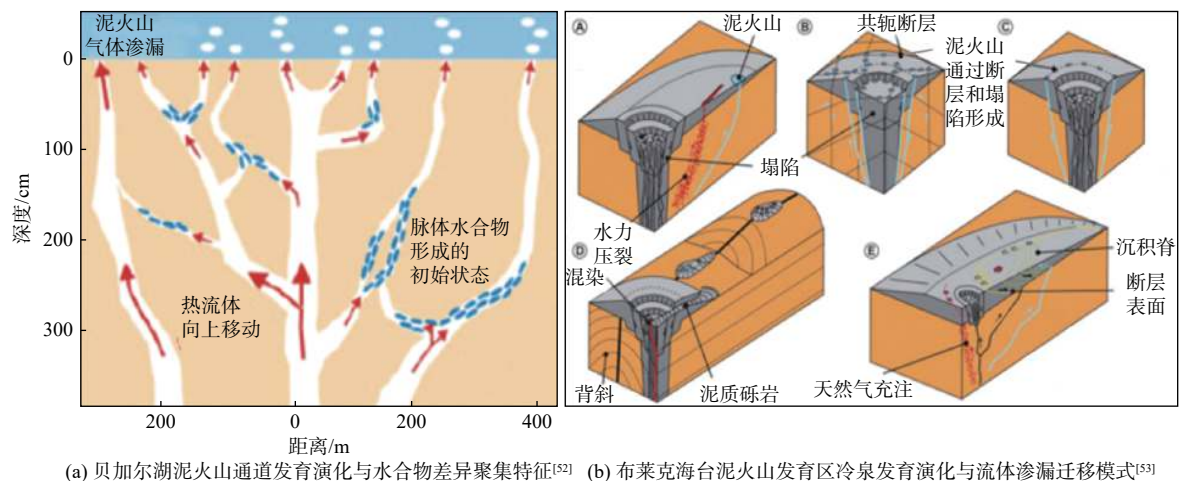


图 4 流体运移通道演化与冷泉差异发育模式

Fig.4 Fluid migration channel evolution and cold seep differential development model

海底冷泉系统甲烷释放是全球气候变化的重要影响因子, 据估计全球海洋环境 900 多处海底冷泉活动区每年释放到大气中的甲烷等烃类气体约为 $(0.4 \sim 12.2) \times 10^{12} \text{ g}$ [13,46]。国内外学者已经开展多项测量技术对海底冷泉渗漏系统进行观测, 包括原位观测 [54-55]、海底可视技术 [56]、声呐系统 [57-58] 以及地震方法 [43,59] 等。亦有部分学者根据海底观测影像资料以及声学数据开展冷泉渗漏的理论计算 [60]。

目前, 针对冷泉形成机制的研究主要是基于海底观测、地球物理探测、地球化学测试等手段, 探讨冷泉形成的地质环境、影响因素、成因机制, 认为构造抬升、海平面下降、全球气候冷暖变化、海底滑坡、沉积物块体流、地震、火山喷发、地温梯度改变、地层水变暖、温盐环流、季节变化等是冷泉形成的原因之一 [25-30]。前人关于冷泉形成机制的讨论多以定性分析为主, 观测与测试数据一般只能测得冷泉流体演化过程中极为有限的一段时间和一片区域, 而对冷泉流体动力学过程、时空演化规律与控制机理的理解较为薄弱, 缺乏对冷泉流体差异活动规律与控制机理的定量研究, 难以深入揭示冷泉系统演变与水合物成藏、深海环境与生命过程等相关科学问题。

琼东南盆地冷泉系统异常发育, 冷泉发育区形成独特的海底生态系统, 浅表层水合物富集。多边形断裂、泥底辟、气烟囱是琼东南盆地冷泉系统的主要渗漏通道, 欠压实与超压环境是冷泉活动的主要动力, 控制冷泉系统形成演变。

3 冷泉活动的流体动力学特征

冷泉活动具有多期次、周期性发育的特点, 其形

成与演化的影响因素众多, 时空分布差异大 [4,7,13-14]。目前较多学者关注冷泉浅表层观测和地球化学测试分析, 缺乏对冷泉活动的浅表层响应与深部控制要素的耦合关系的研究, 难以揭示冷泉差异发育的流体动力学过程与控制机理等关键科学问题, 因此, 开展冷泉流体动力学过程定量分析与模拟研究十分必要。冷泉流体活动涉及构造应力场、压力场、温度场等三场耦合, 是一个极为复杂的地质过程 [26,28]。目前针对冷泉的模拟研究主要是从某一外界因素分析其形成机制、预测喷发量、探讨与水合物成藏的关系等, 缺乏对冷泉流体动力学过程的模拟研究。刘善琪等 [30] 基于水合物分解的动态有限元模型模拟冷泉流体的渗流达西速度; ZHONG 等 [29] 通过构造应力模拟探讨地震活动对泥火山形成的影响; ZOPOROWSKI 和 MILLER [61] 对 LUSI 泥火山的喷发周期、规模、寿命进行了模拟, 并开展了地质灾害评价; 曹运诚等 [20] 运用渗漏型甲烷水合物生成动力学模型模拟冷泉通量大小与天然气水合物分布的关系。

冷泉活动多为周期性(幕式)瞬态流, 常与超压系统相伴生。盆地演化的多期断裂作用引起的幕式沉降和充填, 使得超压封存系统经历破裂、泄压、愈合、增压等振荡性动力学演化旋回。超压的发育机制、超压流体的流动样式等是流体幕式瞬态流动的重要控制要素 [62-63]。早在 19 世纪中叶达西定律和流体势理论提出以后, 人们对多孔介质条件下的均质流体流动方面做了大量工作 [64]。进入 20 世纪以后, 国内外学者在流变介质、毛细管模型、不混溶多相流动和混溶多相流动、指进现象、渗流的统计力学理论等方面开展了大量的

数值模拟工作^[65-69]。

冷泉的差异发育是由流体运移动力学过程所决定的,总体上可以分为同源异常和异源异常2种类型。不同深部来源(异源)的冷泉差异活动可根据流体势计算分析其动力差异^[64];同一来源(同源)的冷泉流体后期多通道差异发育,与油气运移的优势通道问题类似^[70-72]。流体运移优势通道的形成主要受非均质性、产状、动力所控制,在这三要素联合影响下,盆地流体通过一系列具有特定几何特征的非均质输导层时优先选择运移路径,导致同一深部来源流体分叉后差异活动^[73-74]。

数值模拟是冷泉流体动力学过程分析的有效方法。在油气运移模拟研究中,主要有流体势分析方法、渗流力学数值模拟方法、逾渗数值模拟方法等^[65,67,70]。利用流体势的概念,建立油气势并由此确定油气运移的方向和运移量的思路和方法已逐渐为人们所接受^[64,69,73]。之后的一些学者在探讨油气运移动力的计算时采用了在动水条件下油柱高度的动力分析方法,还有些学者加入了两相驱替的渗流力学思想,利用有限元法、差分方法等求解流体宏观渗流方程,使油气二次运移路径和流场的研究得到进一步的发展^[64,66,71]。

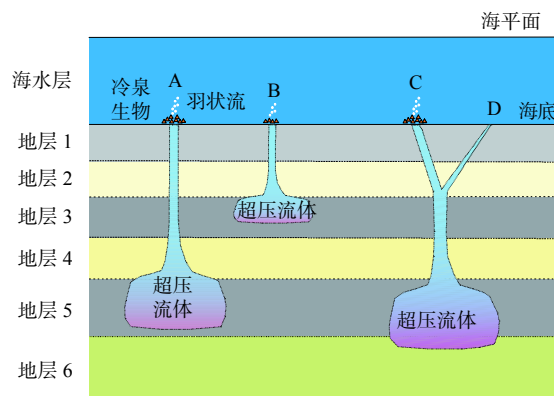
这些数值模拟方法可以很好地应用于冷泉流体动力学模拟与分析之上。我们可以由浅及深,深浅相连,将浅表层冷泉活动的观测数据与深层地质环境和异常流体压力相结合,以渗漏力学、流体动力学、流体运移过程与优势通道、能量守恒等为基础开展冷泉流体运移过程数值模拟,建立冷泉发育的动力学模式,揭示冷泉差异发育的控制机理。

琼东南盆地深水区油气勘探研究表明,该地区地层超压明显。超压流体活动形成丰富多样的冷泉渗漏系统。通过三维地震资料,揭示了流体渗漏通道,判别流体来源,进而计算流体势,确定流体运移动力与路径。

4 冷泉差异发育的控制机理

针对中国南海北部琼东南盆地冷泉差异发育特征及其控制机理研究过程中存在的实际问题,在前期初步研究的基础上,选取冷泉发育典型站位,以流体动力学研究为主线,深浅结合,将浅表层冷泉观测数据与深层地质环境、地层压力等要素相结合,进一步分析不同类型和特征冷泉系统发育的渗漏通道、地质条件及控制作用,细化流体通量、异

常压力、流体运移、优势通道、岩层物性等各项参数,建立了琼东南盆地冷泉流体发育的地质模型(图5)。



A、B、C、D 代表 4 种不同的冷泉类型: A 为深源强能量活动冷泉; B 为浅源弱能量活动冷泉; C、D 表示同源冷泉的差异发育

图 5 冷泉差异发育模式

Fig.5 Cold seep differential development model

根据琼东南盆地冷泉发育的地质背景与构造环境,模拟超压流体运移的动力学过程、能量转换与运移路径变化、优势通道选取与差异发育的过程和机理,定量分析冷泉流体动力学的时间与三维空间变化规律,查明冷泉浅表层响应与深部要素之间的耦合关系,建立冷泉差异发育的流体动力学模式,探讨冷泉差异发育的控制机理。

冷泉流体渗流过程一般认为符合达西定律,流体渗流速度与水力梯度呈线性关系。

$$q = -\frac{kA}{\mu L} \Delta p \quad (1)$$

式中: q 是总体积流量, m^3/s ;

k 是渗透率, μm^2 ;

A 是渗流通道横截面面积, m^2 ;

μ 是流体黏度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

L 是渗流通道长度, m ;

p 为流体压力, Pa 。

由方程(1)可得出流体渗流的初始速度 $\vec{U}$,

$$\vec{U} = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (2)$$

对于冷泉喷发过程中向上运移的流体, z 轴方向的质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

动量守恒可用 Navier-Stokes 方程描述为:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g + \frac{8\pi\mu u}{A} = 0 \quad (4)$$

式中: A 是通道横截面面积, m^2 ;

μ 是恒定的动态黏度, Pa·s;

u 是流体上升速度, m/s。

冷泉流体能量变化和流体运移规律可用流体势来计算, 等式后 3 项分别表示重力势能、流体压能、毛细管势能。

$$\phi = \rho g z + \rho \int_0^p \frac{dp}{\rho(p)} + \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (5)$$

式中: σ 表示两相界面张力;

r 表示毛细管半径。

不同深部来源冷泉流体活动强度的差异体现在流体势大小之上。如图 5, 假设 A 和 B 两点, 距基准面的距离分别为 z_1 和 z_2 , 地层的压力分别为 p_1 和 p_2 , 岩石孔隙半径分别为 r_1 和 r_2 , 则两点的势差为:

$$\Delta \phi = \phi_A - \phi_B = (\rho_1 - \rho_2)g(z_1 - z_2) + (\Delta p_1 - \Delta p_2) + 2\sigma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \cos \theta \quad (6)$$

同一深部来源的冷泉流体, 向上运移过程中分叉为多通道的情况, 就涉及到流体运移优势通道选取问题。优势运移通道的取向为靠近运移动力合力的方向, 即运移动力和阻力之差。如图 5, C、D 两处冷泉, 流体从主通道分叉后, 两通道(输导层)流体运移动力(F_c 、 F_d)分别为:

$$\begin{cases} F_c = F_b \sin \theta_c + F_m - C_c \\ F_d = F_b \sin \theta_d + F_m - C_d \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_b 为浮力, N;

F_m 为主通道充注动力, N;

θ_c 、 θ_d 分别为两通道的倾角, (°);

C_c 、 C_d 分别为毛管力, N。

只有 F_c 或 F_d 大于零时, 流体才可能在分叉后的通道内运移。因此, 可通过分析 F_c 或 F_d 的相对大小来判断流体优势选择的运移路径, 分析同源冷泉差异活动的原因。

图 1 展示了琼东南盆地 3 个典型站位冷泉活动的差异。A 站位冷泉强烈活动, B 站位可见冷泉羽状流, C 站位冷泉停止活动。冷泉活动取决于流体动力的差异, 即流体势的大小。同时, ROV 观测显示, “海马”冷泉区流体渗漏通道特征明显, 呈线状分布, 和断裂通道吻合, 形成优势通道, 亦是冷泉差异活动的主要原因。

5 结论

采用“由浅及深, 深浅连通”, 将琼东南盆地浅

表层冷泉活动的观测数据与深部地质环境和异常流体压力相结合, 精细刻画了深层超压流体向浅层运移的动力学过程, 揭示了冷泉浅表层差异发育特征与深部控制要素的耦合关系, 探讨了冷泉差异发育的主控要素。以流体动力学过程研究为主线, 将浅表层冷泉差异发育与深部控制要素和渗漏通道相结合, 建立了冷泉系统流体动力学模型, 以渗流力学、流体动力学、流体运移优势通道、能量守恒等为基础开展冷泉流体流动与能量转化过程分析, 建立了冷泉差异发育的动力学模式, 揭示了冷泉差异发育的控制机理。认为琼东南盆地深水区超压环境是冷泉系统发育的主要动力, 断裂系统形成流体运移优势通道是冷泉差异发育的控制因素之一。

参考文献:

- [1] 陈多福, 陈先沛, 陈光谦. 冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 34-40.
- [2] ROBERTS H H, AHARON P. Hydrocarbon-derived carbonate buildups of the northern Gulf of Mexico continental slope: a review of submersible investigations[J]. Geo-Marine Letters, 1994, 14(2/3): 135-148.
- [3] BOETIUS A, WENZHÖFER F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(9): 725-734.
- [4] SUESS E. Marine cold seeps and their manifestations: geological control, biogeochemical criteria and environmental conditions[J]. International Journal of Earth Sciences, 2014, 103(7): 1889-1916.
- [5] PAULL C K, HECKER B, COMMEAU R, et al. Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa[J]. Science, 1984, 226(4677): 965-967.
- [6] SUESS E. Marine cold seeps: background and recent advances[M]//Wilkes H. Hydrocarbons, oils and lipids: diversity, origin, chemistry and fate. Springer International Publishing, 2018.
- [7] FENG D, QIU J W, HU Y, et al. Cold seep systems in the South China Sea: an overview[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 168: 3-16.
- [8] WAN Z F, XU X, WANG X Q, et al. Geothermal analysis of boreholes in the Shenhu gas hydrate drilling area, northern South China Sea: influence of mud diapirs on hydrate occurrence[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 158: 424-432.
- [9] WAN Z F, YAO Y J, CHEN K W, et al. Characterization of mud volcanoes in the northern Zhongjiannan Basin, western South China Sea[J]. Geological Journal, 2019, 54(1): 177-189.
- [10] 赵斌, 刘胜旋, 李丽青, 等. 南海冷泉分布特征及油气地质意义[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(10): 32-43.
- [11] 吴能友, 孙治雷, 卢建国, 等. 冲绳海槽海底冷泉-热液系统相

- 互作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(5): 23-35.
- [12] 冯东, 宫尚桂. 海底冷泉系统硫的生物地球化学过程及其沉积记录研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(6): 1047-1056.
- [13] MAZURENKO L L, SOLOVIEV V A. Worldwide distribution of deep-water fluid venting and potential occurrences of gas hydrate accumulations[J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(3/4): 162-176.
- [14] TALUKDER A R. Review of submarine cold seep plumbing systems: leakage to seepage and venting[J]. *Terra Nova*, 2012, 24(4): 255-272.
- [15] GINSBURG G D, IVANOV V L, SOLOVIEV V A. Natural gas hydrates of the world's oceans[C]//Oil and gas content of the world's oceans. PGO Sevmorgeologia, 1984: 141-158.
- [16] MILKOV A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. *Marine Geology*, 2000, 167(1/2): 29-42.
- [17] PENG X, GUO Z, CHEN S, et al. Formation of carbonate pipes in the northern Okinawa Trough linked to strong sulfate exhaustion and iron supply[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 205(1): 1-13.
- [18] LUO M, DALE A W, WALLMANN K, et al. Estimating the time of pockmark formation in the SW Xisha Uplift (South China Sea) using reaction-transport modeling[J]. *Marine Geology*, 2015, 364: 21-31.
- [19] GUAN H X, BIRGEL D, PECKMANN J, et al. Lipid biomarker patterns of authigenic carbonates reveal fluid composition and seepage intensity at Haima cold seeps, South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 163-172.
- [20] 曹运诚, 苏正, 陈多福. 孔隙水渗流量对渗漏型天然气水合物影响的数值模拟研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(3): 379-390.
- [21] 韩喜球, 杨克红, 黄永祥. 南海东沙东北冷泉流体的来源和性质: 来自烟囱状冷泉碳酸盐岩的证据[J]. 科学通报, 2013, 58(19): 1865-1873.
- [22] 郭黛黛, 杨飞, 黄霞, 等. 南海东沙海域冷泉渗漏区沉积物稀土元素地球化学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 69-69.
- [23] 薛云松, 黄俊华. 冷泉沉积研究进展及环境意义[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 97-104.
- [24] 杨克红, 初凤友, 赵建如, 等. 南海北部烟囱状冷泉碳酸盐岩的沉积环境分析[J]. 海洋学报(中文版), 2013, 35(2): 82-89.
- [25] FISCHER D, MOGOLLÓN J, STRASSER M, et al. Subduction zone earthquake as potential trigger of submarine hydrocarbon seepage[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 647-651.
- [26] FESEKER T, BOETIUS A, FER F W, et al. Eruption of a deep-sea mud volcano triggers rapid sediment movement[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 544-559.
- [27] DAVIS P. Triggered mud eruption[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 592-593.
- [28] LUPI M, SAENGER E H, FUCHS F, et al. Lusi mud eruption triggered by geometric focusing of seismic waves[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 642-646.
- [29] ZHONG S L, WAN Z F, DUAN B C, et al. Do earthquakes trigger mud volcanoes? a case study from the southern margin of the Junggar Basin, NW China[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(3): 1223-1237.
- [30] 刘善琪, 尹凤玲, 朱伯靖, 等. 冷泉形成的数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1731-1741.
- [31] SUN Q L, WU S G, HOVLAND M, et al. The morphologies and genesis of mega-pockmarks near the Xisha Uplift, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(6): 1146-1156.
- [32] LIANG Q Y, HU Y, FENG D, et al. Authigenic carbonates from newly discovered active cold seeps on the northwestern slope of the South China Sea: constraints on fluid sources, formation environments, and seepage dynamics[J]. *Deep Sea Research Part I*, 2017, 124: 31-41.
- [33] WANG J L, WU S G, KONG X, et al. Subsurface fluid flow at an active cold seep area in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 17-26.
- [34] ZHANG W, LIANG J, YANG X, et al. The formation mechanism of mud diapirs and gas chimneys and their relationship with natural gas hydrates: insights from the deep-water area of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *International Geology Review*, 2020, 62(7/8): 789-810.
- [35] HU Y, LUO M, LIANG Q Y, et al. Pore fluid compositions and inferred fluid flow patterns at the Haima cold seeps from the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 103: 29-40.
- [36] FANG Y X, WEI J G, LU H L, et al. Chemical and Structural Characteristics of Gas Hydrates from the Haima Cold Seeps in the Qiongdongnan Basin of the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 182: 103924.
- [37] Wan Z F, Chen C M, Liang J Q, et al. Hydrochemical characteristics and evolution mode of cold seeps in the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Geofluids*, 2020, 2020(6): 1-16.
- [38] ZHU W L, HUANG B J, MI L J, et al. Geochemistry, origin and deep-water exploration potential of natural gases in the Pearl River Mouth and Qiongdongnan Basins, South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93: 741-761.
- [39] ZHAO Z X, SUN Z, WANG Z F, et al. The high resolution sedimentary filling in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2015, 361: 11-24.
- [40] HUANG B J, TIAN H, LI X S, et al. Geochemistry, origin and accumulation of natural gases in the deepwater area of the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 72: 254-267.
- [41] SHI X B, JIANG H Y, YANG J, et al. Models of the rapid post-rift subsidence in the eastern Qiongdongnan Basin, South China Sea: implications for the development of the deep thermal anomaly[J]. *Basin Research*, 2017, 29(3): 340-362.
- [42] 杨力, 刘斌, 徐梦婕, 等. 南海北部琼东南海域活动冷泉特征

- 及形成模式[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(7): 2905-2914.
- [43] 陈江欣, 宋海斌, 关永贤, 等. 海底冷泉的地震海洋学初探[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(2): 604-616.
- [44] FENG D, CHEN D F. Authigenic carbonates from an active cold seep of the northern South China Sea: new insights into fluid sources and past seepage activity[J]. *Deep Sea Research Part II*, 2015, 122: 4-83.
- [45] WANG X D, LI N, FENG D, et al. Using chemical compositions of sediments to constrain methane seepage dynamics: a case study from Haima cold seeps of the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 137-144.
- [46] DIMITROV L I. Mud volcanoes-the most important pathway for degassing deeply buried sediments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 59(1/4): 49-76.
- [47] WANG X J, HUTCHINSON D R, WU S G, et al. Elevated gas hydrate saturation within silt and silty clay sediments in the Shenhu area, South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2011, 116(B05102).
- [48] 苏正, 刘丽华. 南海北部陆坡天然气水合物成藏特征研究进展分析[J]. *新能源进展*, 2020, 8(1): 35-41.
- [49] 吴时国, 龚跃华, 米立军, 等. 南海北部深水盆地油气渗漏系统及天然气水合物成藏机制研究[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 433-440.
- [50] WANG S H, YAN W, CHEN Z, et al. Rare earth elements in cold seep carbonates from the southwestern Dongsha area, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 482-493.
- [51] 范美彤, 葛璐, 朱碧, 等. 冷泉碳酸盐岩Sr同位素示踪研究进展[J]. *地质学报*, 2019, 93(8): 2081-2091.
- [52] POORT J, KHLYSTOV O M, NAUDTS L, et al. Thermal anomalies associated with shallow gas hydrates in the K-2 mud volcano, Lake Baikal[J]. *Geo-Marine Letters*, 2012, 32(5/6): 407-417.
- [53] HORNBAACH M J, RUPPEL C, VAN DOVER C L. Three-dimensional structure of fluid conduits sustaining an active deep marine cold seep[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(5): L05601.
- [54] JOHANSEN C, TODD A C, MACDONALD I R. Time series video analysis of bubble release processes at natural hydrocarbon seeps in the Northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 82: 21-34.
- [55] 邸鹏飞, 陈庆华, 陈多福. 海底冷泉渗漏气体流量原位在线测量技术研究[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 83-87.
- [56] LEIFER I. Seabed bubble flux estimation by calibrated video survey for a large blowout seep in the North Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 743-752.
- [57] 秦华伟, 范相会, 蔡真, 等. 海底冷泉区气泡流量流速的声学探测机理研究[J]. *热带海洋学报*, 2016, 35(4): 35-39.
- [58] 余翼, 栾锡武, 刘鸿, 等. 海底冷泉气泡羽流声学探测参数研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 188-199.
- [59] 刘伯然, 宋海斌, 关永贤, 等. 南海东北部陆坡冷泉系统的浅地层剖面特征与分析[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(1): 247-256.
- [60] 李灿苹, 刘学伟, 勾丽敏, 等. 冷泉活动区天然气水合物上覆水体中气泡羽状流的数值模拟[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(3): 391-399.
- [61] ZOPOROWSKI A, MILLER S A. Modelling eruption cycles and decay of mud volcanoes[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(9): 1879-1887.
- [62] XING J H, SPIESS V. Shallow gas transport and reservoirs in the vicinity of deeply rooted mud volcanoes in the central Black Sea[J]. *Marine Geology*, 2015, 369: 67-78.
- [63] VONA A, GIORDANO G, DE BENEDETTI A A, et al. Ascent velocity and dynamics of the Fiumicino mud eruption, Rome, Italy[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(15): 6244-6252.
- [64] HUBBERT M K, RUBEY W W. Mechanics of fluid filled porous solids and its application to over thrust faulting, role of fluid pressure in mechanics of over thrust faulting[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1959, 70: 115-166.
- [65] SCHOWALTER T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment[J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(5): 723-760.
- [66] WETTE D H, YUKLER M A. Petroleum origin and accumulation in basin evolution: a quantitative model[J]. *AAPG Bulletin*, 1981, 65(8): 1387-1396.
- [67] UNGERER P. Fluid flow, hydrocarbon generation, and migration[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(3): 309-335.
- [68] HINDLE A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(9): 1451-1481.
- [69] 金之钧, 张发强. 油气运移研究现状及主要进展[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 263-270.
- [70] 姜振学, 庞雄奇, 曾溅辉, 等. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 507-516.
- [71] 罗群, 庞雄奇, 姜振学. 一种有效追踪油气运移轨迹的新方法: 断面优势运移通道的提出及其应用[J]. *地质论评*, 2005, 51(2): 156-162.
- [72] 徐长贵, 彭靖淞, 吴庆勋, 等. 渤海湾凹陷区复杂断裂带垂向优势运移通道及油气运移模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 684-692.
- [73] 马中良, 曾溅辉, 郑伦举. 稳态充注下输导层交汇处油气运移路径的选择性[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(1): 89-94.
- [74] 李鹤永, 田坤, 邱旭明, 等. 油气优势运移通道形成“三要素”分析: 以苏北盆地高邮凹陷XJZ油田为例[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(5): 577-583.

HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF COLD SEEP DIFFERENTIAL DEVELOPMENT IN THE QIONGDONGNAN BASIN AND THEIR DEEP CONTROLLING MECHANISMS

WAN Zhifeng^{1,2}, ZHANG Wei³, CHEN Chongmin¹, SU Pibo³,
WANG Xianqing³, ZHANG Jinfeng¹, LUO Junsheng¹

(1 School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524000, China;

3 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

Abstract: The submarine cold seeps are closely related to some important scientific issues, such as the occurrence of natural gas hydrate, global climate change, and extreme environmental ecosystems. There are many factors affecting the formation and evolution of cold seep systems. Their spatial and temporal distribution, activity characteristics, and related physical, chemical, and biological effects are very different from place to place. The coupling relationship between shallow surface cold seeps activities and their deep controlling factors, the hydrodynamic process and control mechanism of differential development of cold seeps need to be further studied. This paper tries to take the Qiongdongnan Basin as the research object and select some typical cold seep active stations as cases to solve the problem of cold seep differential activity process and their control mechanisms. Based on previous researches, taken the hydrodynamic research as the key, and combined the observation data of shallow cold seeps together with the deep geological environment and formation pressure, some numerical models are set up in this paper for the cold seep fluid flow and energy conversion process. The dynamics process of fluid migration from deep to shallow are portrayed. And analyzed are also the geological conditions and control factors for different cold seep systems. Afterward, the coupling relationship between the shallow surface responses of cold seeps to the deep elements is identified. Then a dynamic model of cold seep differential development is established. In the end, the control mechanisms of cold seep differentiation are discussed. This work may provide a theoretical basis for hydrate exploration and trial mining, study of deep-sea material and energy migration and transformation, and research of the extreme environmental ecosystem of cold seep.

Key words: submarine cold seep; differential development; hydrodynamics; control mechanism; Qiongdongnan Basin