

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018103001

地震资料中柱状流体运移通道形态参数及其地质意义

张伯达^{1,2}, 雷振宇³, 郑文义¹, 李政坤¹, 蔡达仰¹, 张金锋¹, 苏明^{1,2}, 杨睿⁴

1. 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082
2. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 珠海 519082
3. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075
4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

摘要:深部流体在向上运移的过程中,能够形成垂直—近似垂直的柱状通道,如气烟囱构造、流体逸散管道等。利用高分辨率地震资料,能够直观地对这些柱状地球物理异常进行精细的描述与刻画,从而统计其形态参数。综合不同海域的研究成果,本次研究系统总结归纳了柱状流体运移通道的8个重要参数,分别是发育层位、终止层位、平面形状、直径、高度和宽高比、反射偏移、椭圆率、拟合椭圆方位角。形态参数分别与通道群在平面上的展布方位、特殊的海底异常地貌(如海底麻坑、丘状体等)、深部构造发育与分布(如底辟、断层等)等进行耦合关联,能够进一步揭示柱状流体运移通道的地质含义。可将形态参数分为:(1)从形态学上对柱状通道进行直接分类的参数;(2)指示柱状通道形成诱发因素或形成过程的参数;(3)划分柱状通道幕式流体活动及期次的参数;(4)定义柱状通道中流体活动时间区间的参数;(5)间接反映柱状通道中流体通量相对大小的参数。实际研究过程中,单一形态参数难以准确反映出复杂地质背景下柱状通道的真实地质含义,多参数组合、相互对比验证,能够更好地对柱状流体通道的地质含义做出综合分析。

关键词:柱状流体运移通道;流体活动;气烟囱;管道

中图分类号:P738, P631.4 **文献标识码:**A

Morphological parameters and geological significance of the columnar fluid migration pathways in seismic profiles

ZHANG Boda^{1,2}, LEI Zhenyu³, ZHENG Wenyi¹, LI Zhengkun¹, CAI Dayang¹, ZHANG Jinfeng¹, SU Ming^{1,2}, YANG Rui⁴

1. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, Zhuhai 519082, China
3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China
4. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract:Some columnar seismic anomalies with chimney structures and seepage pipes could be observed in seismic profiles. They are usually interpreted as the vertical migrating pathways of gas-bearing fluids. On the basis of comprehensive description from high-resolution seismic data, some morphological parameters of these columnar fluid migration pathways are calculated in this study. About eight important morphological parameters were systematically summarized, including the root zone level, termination level, plane shape, diameter, length/width ratio, vertical reflection offset, ellipticity, and fitting ellipse azimuth. Combined the spatial distribution pattern of morphological parameters with some special seafloor geomorphologies, such as pockmarks and mounds, and deeper structures, such as diapirs and faults, morphological parameters could be further used to reveal the geology of columnar migrating pathways for gas-bearing fluids. We divided all the parameters into five types, as (i) parameters for morphological classification of the columnar fluid flow structures; (ii) parameters for reveal the

资助项目:国家自然科学基金面上项目“珠江口盆地海底峡谷群侵蚀—沉积作用与天然气水合物动态成藏”(41576048);广东省促进经济发展专项资金(海洋经济发展用途)项目“天然气水合物先导区建设与资源区块优选”(GDME-2018D001);中国地质调查二级项目“南海XX油气资源调查”(DD20160155);广州市珠江科技新星项目“南海北部深水沉积体特征与天然气水合物钻探站位选择依据”(201710010198)

作者简介:张伯达(1991—),男,硕士研究生,目前主要从事流体运移与海域天然气水合物成藏关联性方面的学习和科研工作, E-mail: zhang-bd3@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:苏明(1983—),男,博士,副教授,目前主要从事深水沉积体系及资源效应、海域天然气水合物成藏地质条件分析等方面的科研工作, E-mail: suming3@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2018-10-30; **改回日期:**2019-01-12. 蔡秋蓉编辑

genetic factors and forming mechanisms; (iii) parameters for dating the episodic fluid activities; (iv) parameters for defining the initial and terminal times; and (v) parameters for indirectly reflecting the relative fluid fluxes. Therefore, integrated analysis based on multi-parameters and comparisons between parameters are important for interpreting these columnar fluid migration pathways formed upon different geological background.

Key words: columnar fluid migration pathways; fluid activities; gas chimneys; pipes

流体的垂向运移广泛分布于大陆边缘的沉积盆地中,常表现为特殊的地质构造和地貌特征,如气烟囱、流体逸散管道、泥底辟、泥火山、断层、麻坑等^[1]。以气烟囱和流体逸散管道为代表的流体运移通道类型,常在地震剖面中具有垂直—近似垂直的柱状轮廓、空白—杂乱和反射截断、下拉—上拱的异常地震反射结构等(图1)。这些异常地震反射可能是由于低声波传播速度的流体(例如气体)向上运移过程中引起了地震信号的失真^[2];也可能是由于流体的喷出带动地层的上拱或坍塌所形成^[3];或是由于喷出/渗漏的流体将顶部沉积物冲刷搬运,从而相对于背景减少沉积量所形成的^[4]。由于常与流体的活动(运移/逸散)相关,这些柱状地震反射异常体通常代表了柱状的流体运移通道(columnar fluid migration pathways,以下简称柱状通道)。

流体逸散管道是深部储层中汇聚型流体向上运移的垂直—近垂直通道,而气烟囱是气体赋存在裂

隙地层中所形成的低速含气带^[2,5]。从形态上来看,气烟囱在垂向上有着更小的宽高比,高度与直径的比值常小于1^[2,5]。气烟囱的垂向形状多不规则,如柱形、锥形、花冠形和梭形等^[6-9];而流体逸散管道通常为细长笔直的形状^[4]。流体逸散管道在平面上多为圆形或椭圆形^[2],在不同深度差别不大;而气烟囱的平面形态虽然也多为圆形和椭圆形,但不规则形或是线形的气烟囱也普遍存在^[6,10],截面形态随着深度的变化多具有不规则的变化^[7]。但是由于二者的地震反射特征很相似,并且都是以运移气体为主的通道,因此,本文将二者归为一类讨论。

随着地震资料分辨率的不断提高,尤其是高密度高分辨率2D地震数据和3D地震数据的使用,对于柱状通道的描述趋于精细化,如刻画内部结构^[3,4,11]、探讨形成和诱发机制^[3,4,6,7,10,12-16]、分析形成年龄与流体活动期次等^[8,14]。作为柱状通道最基本的参数之一,形态参数的刻画是较为直观和有效

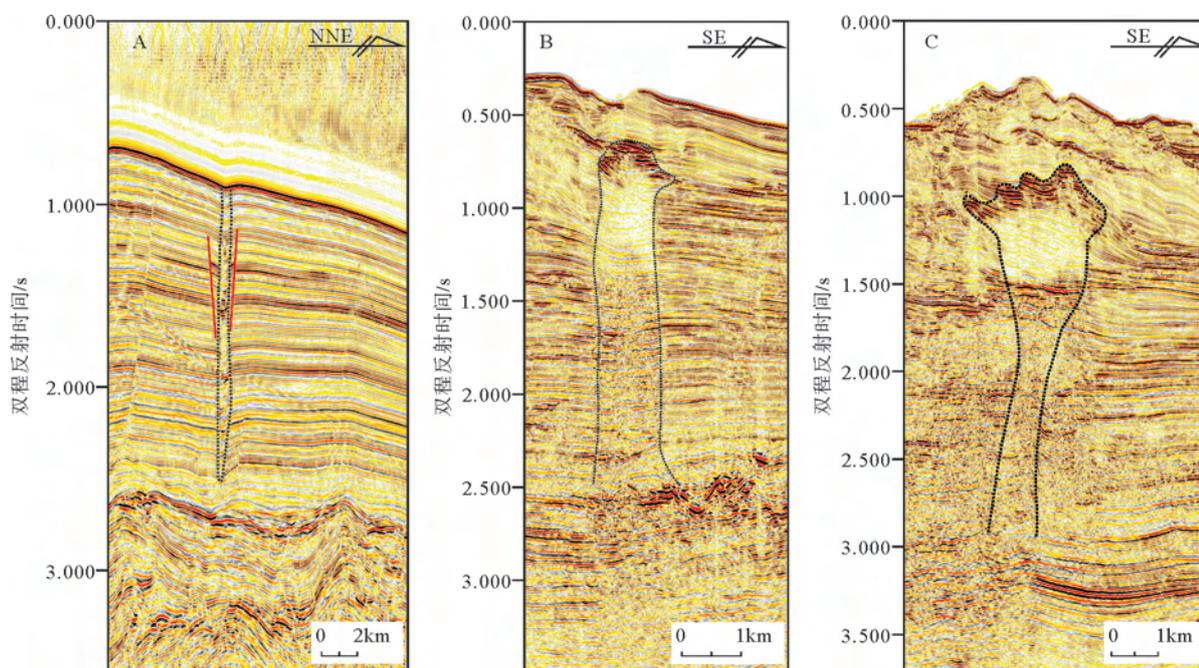


图1 典型柱状流体运移通道的地震反射结构(剖面由广州海洋地质调查局提供)

A为流体逸散管道,B和C为气烟囱;剖面A位于北康盆地,剖面B和C位于神狐海域

Fig.1 The typical columnar fluid migration pathways on the seismic profiles

A: a profile showing a pipe; B: a profile showing a gas chimney; C: a profile showing a gas chimney

Seismic section A was located at the Beikang basin; seismic sections B and C are located at the Shenhu area

的方法。针对剖面形态和平面分布,本次研究系统总结了柱状通道的 8 个基本形态参数(发育层位、终止层位、平面形状、直径、高度和宽高比、反射偏移、椭圆率、拟合椭圆方位角),对其含义和研究实例进行了归纳。将上述 8 个形态参数与平面上的展布方位、特殊的海底异常地貌(如海底麻坑、丘状体等)、深部构造发育与分布(如底辟、断层等)等方面结合,可以反映关于柱状通道形态学分类、形成因素、活动期次及持续时间、流体通量大小等方面的地质意义。研究表明,单一形态参数难以准确反映出复杂地质背景下柱状通道所代表的真实地质含义,多参数组合、相互对比验证的综合分析,有望系统而全面地揭示柱状通道内的流体运移和逸散的活动特征。

近 10 年来,国际上对柱状流体运移通道做了大量的研究,这对海洋天然气水合物与深水油气的勘探、海底地质灾害、全球环境变化都有着重要意义。并且许多对柱状流体运移通道的研究应用了形态学方面的方法,但是针对于柱状通道形态参数的综述性研究还比较少,对于其地质指示意义缺少系统性的归纳总结。因此,本文研究结果能够进一步加深对流体运移系统的理解,为深水资源勘探与评估提供帮助。

1 柱状流体运移通道形态参数

通过对地震剖面上柱状流体运移通道进行系统总结和解释(表 1),本次研究定义了 8 种柱状通道

的形态参数(部分参数可见图 2),分别为发育层位、终止层位、平面形状、直径、高度和宽高比、反射偏移、椭圆率、拟合椭圆方位角。8 个形态参数可分为 4 大类:①与层位相关的参数(如发育层位、终止层位);②直接统计的平面参数(如平面形状、直径(横截面轴长));③直接统计的垂向参数(如高度、反射偏移);④经过计算得到的参数(如宽高比、椭圆率、拟合椭圆方位角)。

1.1 参数 1:发育层位

发育层位即柱状通道的基底所处在地层。此处通常不再具有下拉—上拱的地震异常反射结构(图 2),因此,被认为是流体释放的初始部位^[17]。挪威海中部 Nyegga 麻坑区气烟囱的研究中,将内部反射不再具有向上弯曲特征的地层层位定义为气烟囱的发育层位,通过统计不同区域发育层位深度的频率,来反映气烟囱发育层位的空间分布情况^[7]。

1.2 参数 2:终止层位

终止层位是柱状通道停止向上发育的层位(图 2)。其识别特征可大致分为 4 类:①与通道相联系的海底麻坑或古麻坑;②与通道相联系的丘状构造;③代表游离气积聚或液化物质重新固化的强振幅异常;④反射起伏或扰动的突然终结等^[17]。北海维京地堑南部地区的气烟囱研究中,将最小终止地层层位和最大终止地层层位做了统计和对比^[6]。英国苏格兰北部 Loyal Field 对流体逸散管道进行了终止层

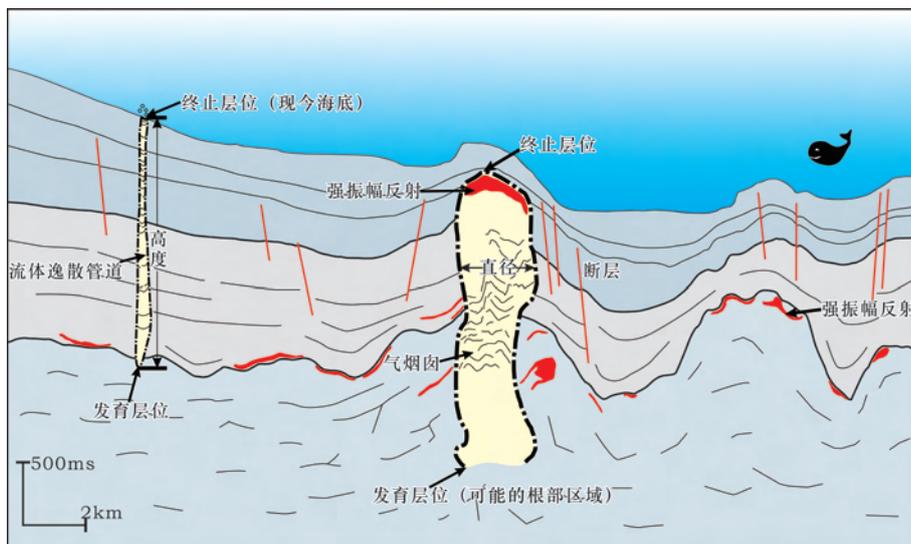


图 2 反映柱状流体运移通道发育层位、终止层位、直径、高度等参数的地质模式

Fig.2 The geological cartoon showing the root zone level, terminating level, diameter and the length of the columnar fluid migration pathways

位的描述,并进一步计算和统计终止处距海底的距离^[15]。南海碳酸盐溶蚀管道的研究,通过生物地力学的校正初步厘定了终止层位的年龄,并将终止地层年龄、管道数目及地质事件相结合分析其成因机制^[3]。

1.3 参数 3:平面形状

平面形状是柱状通道在海底或某一深度处横截面轮廓的形状或近似形状(图 3),是对轮廓呈不规则状的柱状通道的定性描述。西南巴伦支海和北海维京地堑南部地区,将气烟囱的平面形状描述为圆形、椭圆形和细长形,从而对柱状通道进行分类^[6,18]。

1.4 参数 4:直径(横截面轴长)

统计柱状通道的直径参数前,先要明确直径参数的统计标准。统计标准有层位和方位 2 个方面。层位指所有柱状通道的直径均利用同一标志层加以统计,方位指每条地震剖面只能描述通道的一部分(图 2),需要对高密度的 2D 地震或 3D 地震数据加以解释,通过将其平面轮廓勾勒出来才能统计出更真实的直径。除此之外,也可以选择统计每个柱状

通道的最大直径或平均直径。直径也可认为是柱状通道横截面的轴长(如图 3 中所示的长轴和短轴),属于定量或半定量的形态参数,既可以统计柱状通道在不同地层深度的轴长变化^[15],也可以统计整个通道的平均轴长及变化范围^[4,7]。

Cartwright 和 Santamarina 对流体逸散管道的直径大小及范围进行了统计,进而为成因分析提供依据^[19]。挪威海中部 Nyegga 麻坑区的实例中,根据轴长分别统计了气烟囱的直径范围及平均值^[7]。对应于管道终止层位和强振幅标志层的顶部, Daniele Maestrelli 等分别测量了流体逸散管道在标志界面处的轴长,用于刻画形态在不同层位处的变化规律^[15]。在纳米比亚海域地区流体逸散管道的研究实例中,作者统计了管道在 4 个标志性界面处的直径及平面形状^[4]。

1.5 参数 5:高度及宽高比(细长度)

柱状通道的高度是形态学方面重要的定量性限制参数^[15],因为该参数是最容易在地震剖面上统计的参数之一,是反映柱状通道规模大小的直观参数之一(图 2)。柱状通道高度的顶部可参见终止层位的描述,但其底部受地震资料品质、伪影区、地层破

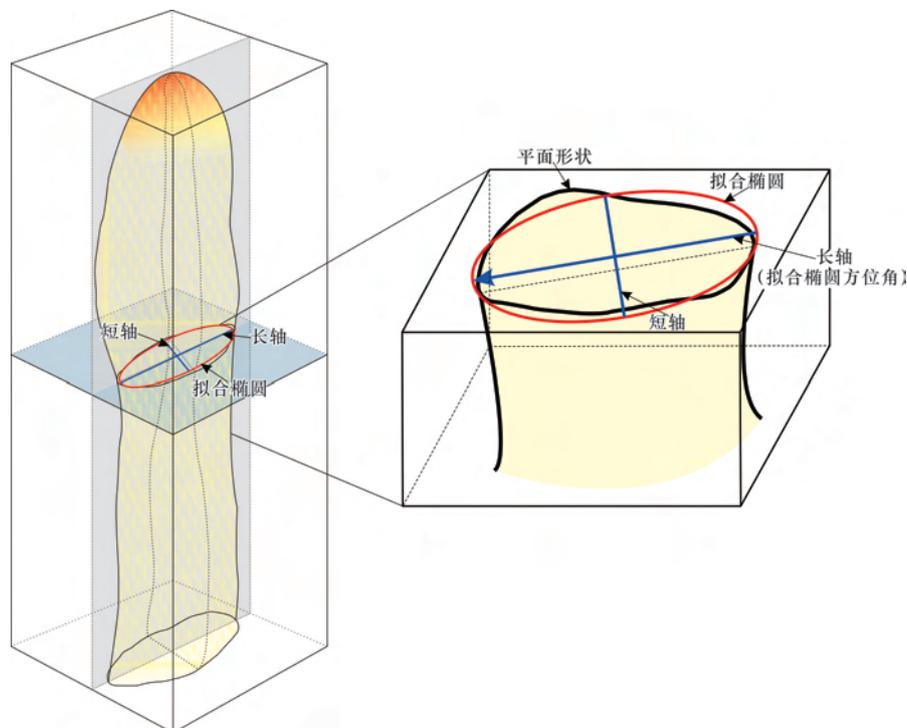


图 3 柱状流体运移通道平面形状、拟合椭圆方位角等形态参数的地质模式

Fig.3 The geological cartoon showing the plane shape of the columnar fluid migration pathways and the best fitting ellipse from the plane shape

坏和变形等因素的影响^[15],常常较难确定。在某种程度上,高度只能作为半定量参数。前人在英国苏格兰北部 Loyal Field 海域的研究过程中首先确定出柱状通道形态明显变化的部位,采用分段测量的方式来统计该标志层上下部分的高度^[15]。

宽高比是柱状通道直径与高度的比值,能够反映出柱状通道的细长化程度(因此也被称为细长度),是通道的重要分类指标。在挪威海中部 Nyegga 麻坑区、下刚果盆地地区、韩国郁龙盆地、纳米比亚海域地区,都分别统计了柱状通道的宽高比并依此进行类型的划分^[4,7,10,13]。

1.6 参数 6:反射偏移

柱状通道内部反射上拱或下拉起伏特征的最大起伏程度被称为反射偏移(图 4),也就是说,反射偏移是通道周缘正常反射界面与内部相对应反射界面之间的时间差^[7]。一般来说,反射偏移适用于通道内部代表地层真实变化的起伏情况^[3,4,7],若内部的起伏是由于低速物质造成的下拉伪影,其意义有待进一步研究。在挪威海中部 Nyegga 麻坑区,研究者统计了气烟囱反射偏移的范围及平均值,并建立

了气烟囱的长短轴长与反射偏移程度之间的对应关系^[7]。纳米比亚海域地区流体逸散管道内部有下拉反射特征,研究者统计了管道内部反射的宽度及起伏程度随深度的变化趋势^[4]。

1.7 参数 7:椭圆率(平面长短轴之比)

将柱状通道不规则的平面形状拟合成椭圆形,拟合椭圆的长短轴之比即为通道的椭圆率(图 4)。椭圆率可以定量的描述柱状通道的平面形状。挪威海中部 Nyegga 麻坑区的气烟囱可被划分为近圆形和近椭圆形^[7]。基于地形图及地震切片技术,流体逸散管道可根据椭圆率划分为圆形、近圆形、近椭圆形和椭圆形等类型^[19]。英国苏格兰北部 Loyal Field 海域将椭圆率称为“明显方位比”(apparent aspect ratio, AR_A),由于所测量的长轴和短轴不一定对应于实际的最大和最小轴线,因此, AR_A 同样是一种近似参数,不适合用于与区域应力相关的领域^[15]。纳米比亚海域地区流体逸散管道的研究实例中,管道在 4 个标志性层位的平面形状投影在同一平面上,以此直观反映通道的平面形状在垂向深度上的变化趋势^[4]。

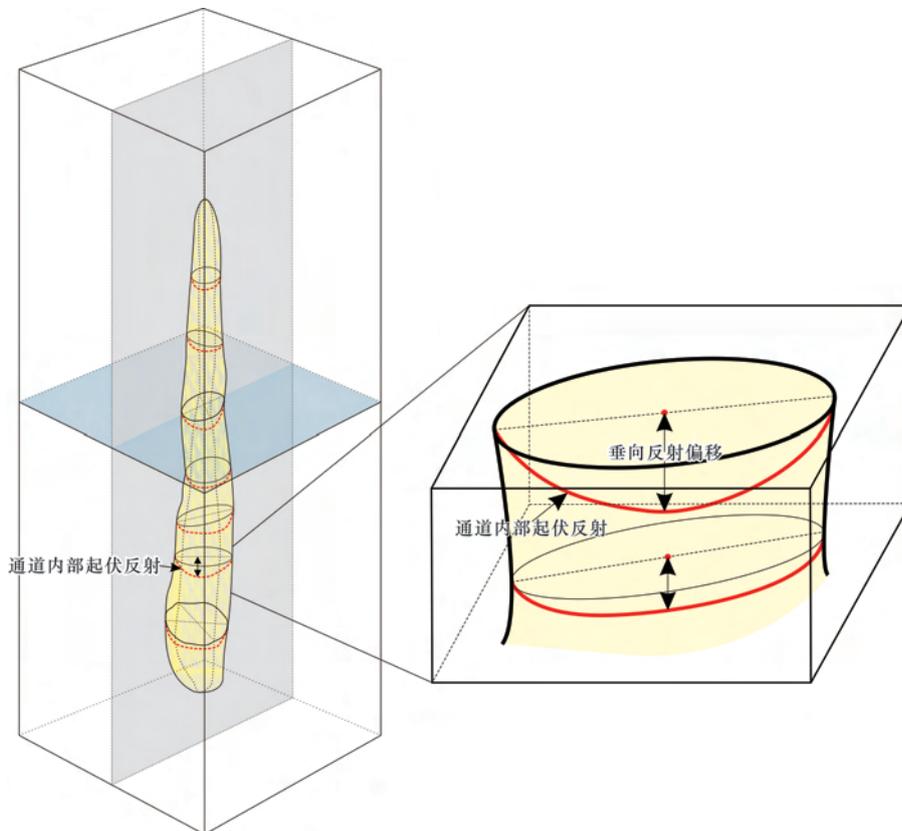


图 4 柱状流体运移通道的起伏特征及反射偏移参数的地质模式

Fig.4 The geological cartoon showing the pull-down reflection feature of the columnar fluid migration pathways

1.8 参数 8:拟合椭圆方位角

拟合椭圆的长轴延伸方向为拟合椭圆方位角,代表了柱状通道的发育或延展方向(图 3),属于描述柱状通道形态特征的半定量参数^[7]。挪威海中部 Nyegga 麻坑区,根据古海底时间切片中气烟囱的不均匀分布情况,将研究区划分为 4 个区域^[7]。通过统计气烟囱拟合椭圆方位角,构建玫瑰花图,从而刻画不同区域气烟囱的发育和分布情况,并尝试将拟合椭圆方位角与断层的分布方位相结合,进一步分析断层与气烟囱的成因关联^[7]。

2 柱状流体运移通道形态参数的地质意义

2.1 柱状通道形态参数的地质意义

上述对于不同形态参数的定义和描述说明,不同地质背景下发育的柱状通道各不相同,因此,形态参数与流体的活动特征并不存在一一对应的关系,一个参数可能具有指示流体活动多方面的意义(表 1),同样流体活动的某一种特征也需要多种参数共同加以验证。

2.1.1 发育层位:可能的流体来源与形成机制

发育层位对于理解柱状通道的流体来源深度、成分及成因是至关重要的^[7]。挪威海中部 Nyegga 麻坑区约 60%的气烟囱起源于一套区域性的强振幅反射地层,该套地层被解释为富含游离气的等深流地层^[7]。由于等深流地层的孔隙度和渗透率高于上下地层,有利于加强水和气体的流动和积聚,因此,是研究区麻坑群形成的重要流体来源层位^[7]。

2.1.2 终止层位:可能的活动时间与形成机制

终止层位有助于理解柱状通道的形成时期和形成机制^[19]。北海维京地堑南部 3 种类型气烟囱的终止层位不同,A、B 型烟囱可以到达全新世地层,其中部分 B 型烟囱可到达近海底的地层,而 C 型烟囱只能到达更新世地层,这可能表明了 3 种烟囱在形成时间上的差异^[6]。英国苏格兰北部 Loyal Field 海域,大部分流体逸散管道终止于古水道所形成的侵蚀不整合面,其他管道终止于该界面下方,这对于理解管道的形成年代和成因有重要的帮助^[15]。

2.1.3 平面形状:可能的形成机制与控制因素

平面形状这一参数是进行柱状通道类型划分的直观参数,当平面形状特征与其他地质要素进行匹

配关联时,可能指示了流体活动的形成机制与控制因素。如北海维京地堑南部地区中,略呈弯曲带状展布的气烟囱与上覆地层中发育的冲沟具有良好的空间匹配关系,可能具有成因关联^[6]。西南巴伦支海细长型柱状通道多位于深部大断层的上方,暗示深部大断裂可能控制了通道的形成^[18]。

2.1.4 直径(横截面轴长):可能的规模大小与活动期次

直径可以作为反映柱状通道规模大小的直观参数,进而间接指示流体活动通量的大小。如流体逸散管道的直径大小,结合是否与麻坑或古麻坑相连,暗示了喷出过程的流体通量相对大小^[19]。此外,同一通道垂向上直径的变化可能指示了不同期次的流体活动。如英国苏格兰北部 Loyal Field 海域,对应于 2 个标志层,流体逸散管道的直径发生了明显的变化,说明这 2 个标志层处的地质事件明显影响了流体的活动,导致其存在“幕式”的活动阶段^[15]。挪威海域的气烟囱直径向海底有逐渐变小的趋势,直径在标志性地层界面处发生突变,指示该区域的流体活动可能存在 2 个大的期次,每一个新的流体逸散期次都会消耗一定量的超压来突破封闭,因此,气烟囱向上会变得更窄从而增加超压,为下一阶段的进一步突破封闭聚集能量^[14]。

2.1.5 高度和宽高比(细长度):可能的形成机制与控制因素

宽高比体现了柱状通道的整体形状,在分类意义上是一种半定量的标准,不同程度的细长度可能在一定程度上用于解释柱状通道的成因机制^[19]。下刚果盆地的线形烟囱宽高比 $>4:1$,与多边形断层对地层渗透率的影响相关^[10]。挪威海中部 Nyegga 麻坑区气烟囱的高度与直径成正比关系,研究认为气烟囱的这种形态特征与超压相关^[7]。纳米比亚海域地区柱状通道的高度和直径成正相关,高度每增加 100m,宽度大约增加 25m^[4]。

2.1.6 反射偏移:可能的形成机制与控制因素

反射偏移记录了柱状通道内部地层受到流体运移影响的程度(图 4),因此,对于内部反射不是伪影的通道而言,反射偏移对判断其形成机制有一定的意义。南海北部东沙区域识别了 2 种反射偏移垂向变化趋势不同的管道,结合构造背景与地层性质认为深层埋藏阶段的碳酸盐岩受到岩浆作用后溶解,发生连续崩塌进而引起了溶蚀管道的形成,与普遍发生的流体喷出机制不同^[3]。挪威海中部 Nyegga 麻坑区气烟囱的最大垂向反射偏移与最大直径在同一深度处出现,说明直径最大的区间或许是最容易

被流体穿透的地层,这可能与地层的岩性和裂隙等构造相关^[7]。纳米比亚海域地区流体逸散管道的反射偏移随深度变浅而呈现阶梯式的降低,这是因为管道形成后仍然进行的幕式或持续的流体渗漏导致上覆沉积物积累量相对周围较少,容易形成宽缓的凹陷^[4]。

2.1.7 椭圆率(平面长短轴之比):可能的形成机制与控制因素

柱状通道的形成发育一般和超压的大小、地层的岩性以及断层裂隙等构造的发育相关。椭圆率在一定程度上可以看作是通道在形成时向各向发育的均匀程度(图 3),相邻通道的椭圆率及相互平行程度可以反映受构造或地形控制的情况^[19]。椭圆率也反映了地层岩性、断层、裂隙等条件在柱状通道发育时作用的大小,是力学性质的体现。挪威海域地区较小的气烟囱平面呈近圆形,大型气烟囱平面形状呈椭圆形,整个气烟囱群体的平均长短轴之比是 2:1,气烟囱从下往上阶梯式变窄、变小的过程中,其椭圆率也越来越低,这是流体幕式喷发过程中超压减小的一个证据^[7,14]。英国苏格兰北部 Loyal Field 海域的研究统计了流体逸散管道终止层位处和一个强振幅地层处的椭圆率,这 2 个位置的椭圆率变化反映了管道形成中受断层、裂隙、多边形断层、侵蚀作用等因素的变化,与管道可能经历了两次或多次的活动期和渗漏这一结论相一致^[15]。在以上几个实例中,椭圆率这一参数上有着较为一致的规律,柱状通道在越深部的地层越倾向于有更大的直径和更大的椭圆率,在较浅部的地层中则有更小的直径和更接近于圆形的平面形状。

2.1.8 拟合椭圆方位角:可能的形成机制与控制因素

拟合椭圆方位角可以在椭圆率的基础上进一步

地对柱状通道受力或受构造控制的方向提供依据。挪威海中部 Nyegga 麻坑区的气烟囱拟合椭圆方位角有 4 个主要的延伸方向,可以划分为 4 个区域,对应于不同的构造背景^[7]。根据断层走向与椭圆方位角之间的相关性,研究认为气烟囱椭圆的长轴方位角可表示流体运移通道内的一级裂缝方位角,进而认为流体压裂和随后快速的沿裂隙运移可能是气烟囱发育及深部流体运移喷出的主要形成机制^[7]。

2.2 柱状通道的其他统计参数及其地质意义

除上述 8 种形态参数以外,一些在地震资料上可以观察到的统计参数也有重要的地质意义,例如:①柱状通道群在平面上的展布方位或延伸方向;②伴生的特殊海底异常地貌(如海底麻坑、丘状体等);③深部构造的发育与分布(如底辟、断层等)(图 5)。在许多研究中都会将这 3 种统计参数与各种不同的形态参数互相结合,综合判断柱状通道的地质意义。

英国苏格兰北部 Loyal Field 海域对柱状通道群的平面延伸方向做了细致的统计,并与断层、断裂的展布方位相结合^[15]。流体运移通道的平面延伸方向与区域内断层及断裂的延伸方向有较好的对应关系,二者空间上的匹配关系可用于分析柱状通道的形成诱发因素^[15]。德国北海地区也有受深部盐隆起和多边形断层共同控制所形成的气烟囱^[20]。

麻坑是流体活动最明显、最常见的海底地貌标志之一,流体运移体中的气体压力、局部的沉降以及底流被认为对麻坑的形成起到了控制作用^[8],虽然这些因素还不能完全解释麻坑的成因,但也足以证明麻坑对柱状通道的性质有重要的指示意义。麻坑记录了流体运移通道的形成时间、形成机制、流体或气体的相对排出量^[17,19,21-24]。管道的顶部终止处

表 1 柱状流体运移通道形态参数的定义及其地质意义

Table 1 Definitions and significances of the morphological parameters of the columnar fluid migration pathways

参数名称	定义	地质意义
发育层位	柱状通道的基底所处在的地层	反映可能的流体来源与形成机制
终止层位	柱状通道停止向上发育的层位	反映可能的活动时间与形成机制
平面形状	柱状通道横截面轮廓的形状	反映可能的形成机制与控制因素
直径	柱状通道横截面轴长	反映可能的规模大小与活动期次
高度及宽高比	高度:发育层位到终止层位的距离 宽高比:直径与高度的比值	反映可能的形成机制与控制因素
反射偏移	柱状通道内部反射上拱或下拉的最大起伏程度	反映可能的形成机制与控制因素
椭圆率	柱状通道平面形状拟合成椭圆,椭圆的长短轴之比	反映可能的形成机制与控制因素
拟合椭圆方位角	柱状通道平面形状拟合成椭圆,椭圆的长轴延伸方向	近似于柱状通道的发育或延展方向,反映其力学性质及形成机制

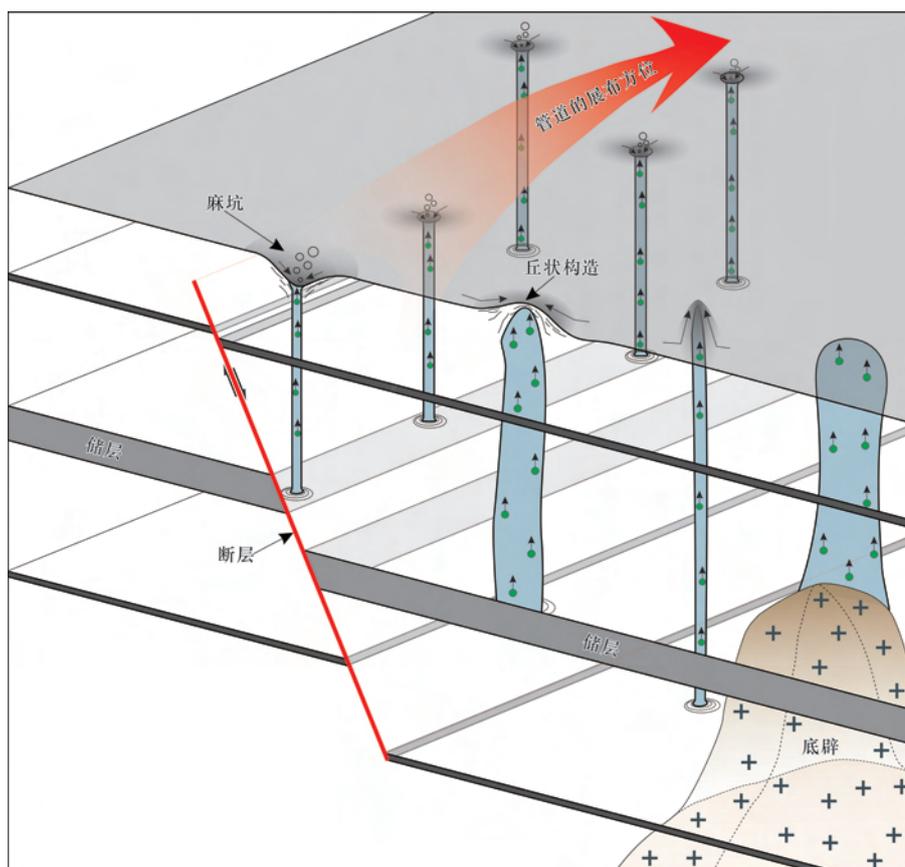


图5 柱状流体运移通道在平面上的延伸情况(a)、相伴生的麻坑与丘状构造(b)、深部构造或储层(c)等统计参数的地质模式

Fig.5 The geological cartoon showing the spatial distribution of the columnar fluid migration pathways (a), the special seafloor geomorphologies (as pockmarks and mounds) (b), and the development of deeper structures (as diapirs and faults) (c)

与麻坑或古麻坑的吻合,意味着管道的形成与高通量流体排出过程有重要联系^[19]。尼日利亚 Niger 三角洲地区的研究表明,气源、气体优先迁移的通道、气体的聚集和海平面变化是海底麻坑形成的关键因素,也是该区域海底麻坑之下柱状通道形成的关键因素^[8]。

除了海底麻坑之外,还有许多气烟囱或流体散溢管道的终止处为海底的凸起或丘状结构,这些丘状结构的性质可以提供关于流体运移构造形成机制、流体成分等重要线索。丘状构造可能是自生的也可能是由管道底部或内部上侵的物质形成。如果丘状构造是自生的,可能是甲烷衍生的自生碳酸盐岩^[19]。如果丘状构造是由挤压上侵沉积物形成的,那么形成丘状构造的管道很可能代表泥火山发育的初始阶段^[25,26]。丘状体的物质组成为流体运移晚期阶段提供了年代学的限制^[19]。麻坑与丘状体的存在也指示了该区域的流体活动非常活跃^[19]。

3 讨论

通过对柱状通道所有参数的描述以及地质意义的分析,可以发现,上述参数可归结为如下5类:①从形态学上对柱状通道进行直接分类的参数;②指示柱状通道形成诱发因素或形成过程的参数;③划分柱状通道幕式流体活动及期次的参数;④定义柱状通道中流体活动时间区间的参数;⑤间接反映柱状通道中流体通量相对大小的参数。需要注意的是,单一的参数难以在复杂的地质背景中得到准确的结论,想要在实际研究中较为准确地反映某种地质意义,则需要上述参数的多参数组合进行相互验证,从而更好地对研究区的柱状通道做出综合分析。

3.1 从形态学上对柱状通道进行直接分类的参数

平面形状、直径大小、高度及宽高比这几种参数在过去的一些实例中起到了形态学方面的分类作用。这几项形态参数都属于可以在地震资料中以图像的形式表现出来的参数。如果上述的某一个参数

在流体运移通道之间有着显著的差异,那么可以优先根据这种参数的差异做出分类,再结合其他参数做进一步的研究。例如北海维京地堑南部地区,首先通过平面形状的显著差异将气烟囱分为弯曲带形和近圆形 2 种,结合平面形状差异和构造背景,指出弯曲带状气烟囱与上覆的冲沟有成因上的关联^[6]。在西南巴伦支海的研究中,根据平面形状将大型流体运移构造分为圆形和细长型 2 种,细长形的流体运移通道多位于大型断层上方并且平面面积比圆形的通道更大^[18]。本次研究认为从形态学上对柱状通道进行直接分类的参数适合与指示柱状通道形成诱发因素或形成过程的参数相组合,因为柱状通道的形成机制及诱发因素很大程度地决定了其形态学上的特征。

3.2 指示柱状通道形成诱发因素或形成过程的参数

平面形状、直径大小、椭圆率、拟合椭圆方位角、平面排布方位角、与断层断裂构造分布的相关关系、伴生的麻坑或丘状构造、反射偏移、宽高比等参数在一些实例中起到了指示柱状通道形成诱发因素或形成过程的作用。水力压裂是柱状通道最常见的一种形成机制,当孔隙压力超过围岩的最小主应力和张应力时可以引起沉积物的破裂,水力压裂会使沉积物的薄弱点形成大量裂隙,裂隙形成后流体侵入进而形成流体运移通道^[17,27]。指示柱状通道形成诱发因素或形成过程的参数多为柱状通道在受到各种外力后的综合表现,可以在一定程度上反映柱状流体运移通道的力学性质。柱状通道形成的诱发因素及过程与其发育期次密切相关,因为一个海域的区域构造演化中可能会有多期次的褶皱、隆起、凹陷和断裂等构造活动,这些构造活动为柱状流体运移通道提供了裂隙、断层、薄弱带等流体阻力更小、更有利于通道发育的位置^[28]。并且这些区域构造活动多是幕式的,由此可以推断管道的幕式活动可能与构造薄弱带的形成相关^[28]。因此,将指示通道形成诱发因素或形成过程的参数与划分幕式流体活动的参数组合分析也是合理的方法。如英国苏格兰北部 Loyal Field 海域,将管道在平面上的排布方位角与大型背斜轴向、裂隙、断层等构造展布方位结合,认为管道的形成与裂隙、断层的发育相关^[15]。管道的直径、椭圆率的变化以及侧向的流体运移指示了管道多期次的活动及渗漏。挪威北部海域气烟囱的发育与幕式活动都与冰川作用的期次相关^[14]。本次研究认为将指示柱状通道形成诱发因素或形成过程

的参数与划分柱状通道幕式流体活动及期次的参数相结合,对研究幕式流体活动的机制有所帮助。

3.3 划分柱状通道幕式流体活动及期次的参数

直径大小、椭圆率、反射偏移、伴生的麻坑或丘状构造等参数在一些研究中起到反映柱状通道活动过程及期次的作用。这些参数在一些柱状通道垂向上不同位置会有较大的差异,这种差异可能代表了流体运移通道幕式活动的证据。除了上文提到的将这些参数与指示柱状通道形成诱发因素的参数相结合以外,明确柱状通道是否为幕式发育也需要将同样反映幕式活动及期次的不同参数组合判断。例如英国苏格兰北部 Loyal Field 海域,管道的直径在封闭层界面处以上突然变小,椭圆率在此界面以上同样变小,结合在此界面处的流体侧向运移的特征,综合判断管道发生了二次活动^[15]。挪威北部海域的气烟囱也有从下往上的幕式变窄特征,椭圆率也越来越低^[7,14],因此,这些参数的组合对多期次活动的研究是有效的。

3.4 定义柱状通道中流体活动时间区间的参数

反射偏移、终止层位、伴生的麻坑或丘状构造等参数在一些研究中起到定义柱状通道中流体活动时间的的作用。地层层位可以代表相对的年代,这一类参数在流体运移通道的终止处或顶部留下特殊的地震反射特征,如果这些特殊的地震反射特征可以代表古海底,则可以推断这些柱状通道的活动时间。这些定义流体活动时间的参数可以与指示柱状通道形成诱发因素的参数相结合,因为管道的诱发因素要与其发育的时间相对应才有意义。例如纳米比亚海域地区的流体逸散管道反射偏移的变化表明了管道在形成后仍然在进行幕式或持续的微渗漏,发生变化的层位指示了管道初始形成的时间^[29]。而头部更大的直径和更缓的反射偏移指示了随着沉积的发生,流体向上运移导致沉积物减少,管道与周围地层的沉积物压实量随着时间推移达到均衡,压实作用是管道形成的辅助机制^[29]。

3.5 间接反映柱状通道中流体通量相对大小的参数

伴生的麻坑、丘状体、渗漏构造等被认为可以间接地反映流体通量相对大小。通常情况下认为如果流体运移通道与上方形成的麻坑有着明显的联系,则麻坑是由甲烷渗漏所形成,并且麻坑被认为是高通量流体喷出所形成的构造^[19,21,30,31]。自生的丘状

体在一些研究中被认为是甲烷衍生的自生碳酸岩,自生丘状体和麻坑一样代表了通量较大的流体渗漏^[19]。直径、高度等参数反映了柱状通道的规模大小,但能否代表流体的通量大小还不确定,将这些反映柱状通道的规模的参数与麻坑的发育情况相结合可以间接地对比柱状通道中流体通量的相对大小。在通道的顶部如果是垂向堆叠的振幅减弱的地震异常,则代表了通道形成后持续低通量流态存在的证据^[19],在同一研究区可以将代表不同通量大小的证据与其他参数相结合,以此判断哪种参数具有通量大小方面的指示意义。这些间接反映柱状通道中流体通量相对大小的参数可以与断层的发育相结合,因为断层也是流体迁移的通道,并且有研究认为与断层相联系的气烟囱代表着有相对更高的流体通量^[9,16,28,32-34],而与断层无关的气烟囱由于内部的毛细管阻力阻止流体向上运移,导致流体通量更低^[16]。将断层发育的情况与伴生的麻坑、丘状体、渗漏特征等构造相结合,可以进一步地研究它们之间是否有相同的对流体通量的指示意义。另外将指示高流体通量的参数与流体运移通道的宽度或高度相结合,可以进一步分析通道规模与流体运移通量大小之间的关联。

4 结论

(1) 柱状流体运移通道的每一个形态特征可能指示了多个方面的地质意义,而每一种作用于柱状流体运移通道上的地质因素也可能造成了多个形态方面的变化。

(2) 单一的形态参数或其他方面的统计参数很难对应于某一个明确的地质意义。因此,总结每种参数可能指示的地质意义,并进行合理的组合,可以作为更准确分析柱状流体运移通道地质意义的方法。

(3) 8种形态参数及3种其他方面的统计参数根据其指示的地质意义归为5类。这5类参数相互组合可以更好地理解管道的形成机制、幕式流体活动的机制、流体通量的相对大小,从而为管道内部流体的运移和散溢过程分析提供依据。

参考文献 (References)

- [1] Andresen K J. Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems: What do they tell us about the basin evolution? [J]. *Marine Geology*, 2012, 332-334: 89-108.
- [2] 孙启良, 吴时国, 陈端新, 等. 南海北部深水盆地流体活动系统及其成藏意义 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(12): 4052-4062. [SUN Qiliang, WU Shiguo, CHEN Duanxin, et al. Focused fluid flow systems and their implications for hydrocarbon and gas hydrate accumulations in the deep-water basins of the northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(12): 4052-4062.]
- [3] Sun Q, Cartwright J, Wu S, et al. 3D seismic interpretation of dissolution pipes in the South China Sea: Genesis by subsurface, fluid induced collapse [J]. *Marine Geology*, 2013, 337(3): 171-181.
- [4] Moss J L, Cartwright J. 3D seismic expression of km-scale fluid escape pipes from offshore Namibia [J]. *Basin Research*, 2010, 22(4): 481-501.
- [5] Sun Q, Wu S, Cartwright J, et al. Shallow gas and focused fluid flow systems in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2012, 315-318(4): 1-14.
- [6] Karstens J, Berndt C. Seismic chimneys in the Southern Viking Graben-Implications for palaeo fluid migration and overpressure evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 412: 88-100.
- [7] Hustoft S, Bünz S, Mienert J. Three-dimensional seismic analysis of the morphology and spatial distribution of chimneys beneath the Nyegga pockmark field, offshore mid-Norway [J]. *Basin Research*, 2010, 22(4): 465-480.
- [8] Riboulot V, Cattaneo A, Sultan N, et al. Sea-level change and free gas occurrence influencing a submarine landslide and pockmark formation and distribution in deepwater Nigeria [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 375: 78-91.
- [9] Su M, Sha Z, Zhang C, et al. Types, characteristics and significances of migrating pathways of gas-bearing fluids in the Shenhu area, northern continental slope of the South China Sea [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(1): 219-231.
- [10] Ho S, Dan C, Imbert P. Insights into the permeability of polygonal faults from their intersection geometries with Linear Chimneys: A case study from the Lower Congo basin [J]. *Carnets De Geologie*, 2016, 16(2): 17-26.
- [11] Yang R, Su M, Qiao S, et al. Migration of methane associated with gas hydrates of the Shenhu area, northern slope of South China Sea [J]. *Marine Geophysical Research*, 2015, 36(2-3): 253-261.
- [12] Sun Y, Wu S, Dong D, et al. Gas hydrates associated with gas chimneys in fine-grained sediments of the northern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2012, 311-314: 32-40.
- [13] Kang N, Yoo D, Yi B, et al. Distribution and origin of seismic chimneys associated with gas hydrate using 2D multi-channel seismic reflection and well log data in the Ullung basin, East Sea [J]. *Quaternary International*, 2016, 392: 99-111.
- [14] Plaza-Faverola A, Bünz S, Mienert J. Repeated fluid expulsion through sub-seabed chimneys offshore Norway in re-

- response to glacial cycles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011,305(3-4):297-308.
- [15] Maestrelli D, Iacopini D, Jihad A A, et al. Seismic and structural characterization of fluid escape pipes using 3D and partial stack seismic from the Loyal Field (Scotland, UK): A multiphase and repeated intrusive mechanism[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017,88:489-510.
- [16] Heggland R. Using gas chimneys in seal integrity analysis: A discussion based on case histories[J]. *Evaluating Fault and Cap Rock Seals: AAPG Hedberg Series*, 2005(2): 237-245.
- [17] 骆迪, 蔡峰. 大陆边缘沉积盆地流体逸散管道地震特征及其成因机制[J]. *海洋地质前沿*, 2017,33(1):1-10. [LUO Di, CAI Feng. Seismic characteristic and genetic mechanism of fluid escape pipes in sedimentary basins of continental margin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017,33(1):1-10.]
- [18] Vadakkepuliambatta S, Bünz S, Mienert J, et al. Distribution of subsurface fluid-flow systems in the SW Barents Sea [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2013, 43:208-221.
- [19] Cartwright J, Santamarina C. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015,65:126-140.
- [20] Müller S, Reinhardt L, Franke D, et al. Shallow gas accumulations in the German North Sea[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2018, 91:139-151.
- [21] 罗敏, 吴庐山, 陈多福. 海底麻坑研究现状及进展[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(5): 33-42. [LUO Min, WU Lushan, CHEN Duofu. Research status and progress of seabed pockmarks[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012,28(5):33-42.]
- [22] Hustoft S, Dugan B, Mienert J. Effects of rapid sedimentation on developing the Nyegga pockmark field: Constraints from hydrological modeling and 3-D seismic data, offshore mid-Norway [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2009, 10: Q06012.
- [23] Tasianan A, Bünz S, Bellwald B, et al. High-resolution 3D seismic study of pockmarks and shallow fluid flow systems at the Snøhvit hydrocarbon field in the SW Barents Sea[J]. *Marine Geology*, 2018, 403:247-261.
- [24] Andresen K J, Huuse M. 'Bulls-eye' pockmarks and polygonal faulting in the Lower Congo basin: Relative timing and implications for fluid expulsion during shallow burial[J]. *Marine Geology*, 2011, 279(1-4):111-127.
- [25] Sanchez-Guillamón O, Vázquez J T, Palomino D, et al. Morphology and shallow structure of seafloor mounds in the Canary basin (eastern central Atlantic Ocean)[J]. *Geomorphology*, 2018,313:27-47.
- [26] Cartwright J. The impact of 3D seismic data on the understanding of compaction, fluid flow and diagenesis in sedimentary basins[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(5):881-893.
- [27] 张为民, 李继亮, 钟嘉猷, 等. 气烟囱的形成机理及其与油气的关系探讨[J]. *地质科学*, 2000,35(4):449-455. [ZHANG Weimin, LI Jiliang, ZHONG Jiayou, et al. A study on formation mechanism of gas-chimney and relationship with petroleum[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2000,35(4):449-455.]
- [28] 周立宏, 孙志华, 王振升, 等. 印缅俯冲增生楔气烟囱分带性及油气成藏规律[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 352-369. [ZHOU Lihong, SUN Zhihua, WANG Zhensheng, et al. Zonation and hydrocarbon accumulation rules of gas chimney in the Indo-Burmese Wedge[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4):352-369.]
- [29] Moss J L, Cartwright J. The spatial and temporal distribution of pipe formation, offshore Namibia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010,27(6):1216-1234.
- [30] Judd A G, Hovland M. *Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*[M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2007.
- [31] Sun Q, Wu S, 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] 龚建明, 廖晶, 何拥军, 等. 日本海天然气水合物气源成因及主控因素探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 106-112. [GONG Jianming, LIAO Jing, HE Yongjun, et al. Discussion on gas origins and main controlling factors for gas hydrates in the sea of Japan[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017,37(5):106-112.]
- [33] 侯读杰, 庞雄, 肖建新, 等. 白云凹陷断裂作为天然气运移通道的地质-地球化学证据[J]. *地学前缘*, 2008,15(4):81-87. [HOU Dujie, PANG Xiong, XIAO Jianxin, et al. The geological and geochemical evidence on the identification of natural gas migration through fault system, Baiyun Sag, Pearl River Mouth basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008,15(4): 81-87.]
- [34] 朱俊江, 李三忠. 高分辨率三维海洋反射地震 P-cable 系统应用进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(4):225-232. [ZHU Junjiang, LI Sanzhong. Progress of application of P-cable system of 3-D high-resolution seismic [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017,37(4):225-232.]