

海底麻坑研究现状及进展

罗 敏^{1,2}, 吴庐山³, 陈多福¹

(1 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 广州海洋地质调查局, 广州 510760)

摘 要:麻坑作为海底流体活动遗留下的痕迹,是一种常见的海底地貌。近半个世纪的研究表明,多数的海底麻坑是沉积地层中的流体向海底快速强烈喷发或者缓慢渗漏过程中形成的大小不等、形态各异的海底凹坑。在综合现有研究的基础上,系统介绍了海底麻坑的形态特征及分类、主要的研究方法、成因机制及研究意义,并指出海底流体运聚的动态平衡过程及对麻坑和冷泉系统的长期原位监测将是今后海底流体研究的热点。

关键词:海底麻坑;流体活动;成因机制;长期监测

中图分类号: P736.211 文献标识码: A

海底麻坑是于 1970 年在加拿大新斯科舍 (Nova Scotia) 大陆架进行海底油气勘探过程中首次被发现的^[1],当时这种火山口状的海底凹陷并未受到人们的重视,直到 1987 年 Hovland 等^[2]报道在北海海底麻坑沉积物中发现自生碳酸盐岩胶结物,并证实麻坑的形成与甲烷渗漏活动有关,人们才逐渐认识到麻坑可以很好地指示过去以及现今的海底流体活动。随着地震勘探技术及海洋声学探测技术的发展,在全球海域内发现了越来越多的海底麻坑,如挪威北部陆坡^[3]、赤道西非陆坡^[4]、白令海^[5]、北海^[6]、加拿大西部陆架^[7]、墨西哥湾^[8]、黑海^[9]以及中国南海^[10]等海域都发育大量海底麻坑。海底流体活动是海洋环境中极其普遍的现象,因此,在海湾、大陆架、大陆坡、深海平原中均发现有麻坑的分布^[11-13],水深变化范围可从 <10 m 深至 5 000 m 左右^[14]。

复杂多变的海洋环境及海底流体活动导致麻坑呈现出不同的大小和形态特征。最小的麻坑直径不到 5 m^[15],最大的麻坑直径可达数千米^[4, 10]。麻坑的形态可从圆形、椭圆形过渡为拉长形、新月形等^[16]。尽管对于麻坑的形成机制还存在一些争议,但随着研究的深入,各国学者普遍认为麻坑主要是由于海底流体(包括烃类气体、孔隙流体、地下水等)通过运移通道(如断层、不整合面或薄弱带等)向海底强烈快速喷逸或缓慢渗漏,剥蚀海底松散沉积物而形成大小不等的凹坑^[14, 16-18]。

海底流体活动对海底地质构造、生物群落以及海洋乃至大气环境都会产生重要影响,而麻坑作为海底流体活动最明显、最常见的指示之一^[16],近年来成为海洋地质学的研究热点之一。形成麻坑的流体可能来源于海底油气藏渗漏或天然气水合物分解^[14, 19-21],从麻坑中逸散的流体可能会改变局部海底生物多样性,甲烷作为一种温室气体从麻坑中渗漏到海洋水体乃至大气中可能对海洋生态系统及大气环境造成影响。同时深水麻坑区海底常发育有块状的天然气水合物^[22, 23]。此外,麻坑对于指示海底地质灾害(如海底滑坡、地震等)也具有重要意义^[4]。本文旨在综述国内外关于麻坑的研究现状及最新研究成果,以期推

收稿日期:2012-02-22

基金项目:国家重点基础研究计划项目(2009CB219508);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-GJ03)

作者简介:罗 敏(1987—),男,在读硕士,海洋地质专业。E-mail:luomin@gig.ac.cn

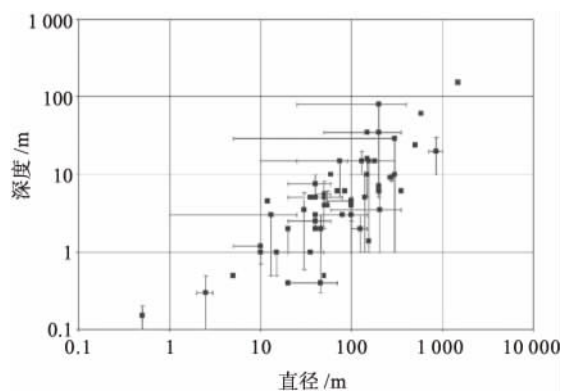
通讯作者:陈多福(1962—),男,博士,研究员,博导,主要从事冷泉和天然气水合物研究。E-mail:cdf@gig.ac.cn

动我国海底麻坑及流体活动相关研究。

1 海底麻坑的形态特征及分类

1.1 海底麻坑的形态和规模

由于海底麻坑可形成于多种不同的海洋环境,并且在形成之后还可能受到各种地质营力(如底流作用、滑塌等)的改造,因此,麻坑具有大小及形态迥异的特征。海底麻坑的大小变化范围很大,最小直径不到5 m,最大的直径可达数千米(图1)^[4, 10, 15],深度从<1 m至上百米^[16]。孙启良等^[10]在中国南海北部深水区发现了迄今为止海底现存的最大麻坑,直径达3 120 m; Cole等^[24]在北海 Firth 盆地的三维地震剖面上识别出古近纪地层中直径达4 000 m的古麻坑,这种超大型麻坑被认为是由于强烈大规模流体喷发所形成,而且通常是由多个较小(直径为100~200 m)的麻坑合并形成的复合麻坑。尽管麻坑的大小差异很大,但大多数典型麻坑的直径在10~250 m范围内,深度介于1~25 m^[4]。由于麻坑的直径和深度都具有较大的变化范围,必然导致麻坑内壁坡度也存在较大的差异,坡度最小的不到1°^[25],最大的可超过30°^[17],但大多数麻坑内壁的坡度一般为6°~18°,平均为9°^[7]。Dandapath



图中线段代表某一个麻坑区麻坑大小的变化范围,线上的点表示平均值。单个点表示单个麻坑的大小或某一麻坑区麻坑大小的平均值(麻坑大小变化范围未知)

图1 全球57个现代麻坑区麻坑大小分布
(据文献^[4]修改)

Fig. 1 Graph illustrating the size of 57 published occurrences of contemporary pockmarks from around the world(modified from reference ^[4])

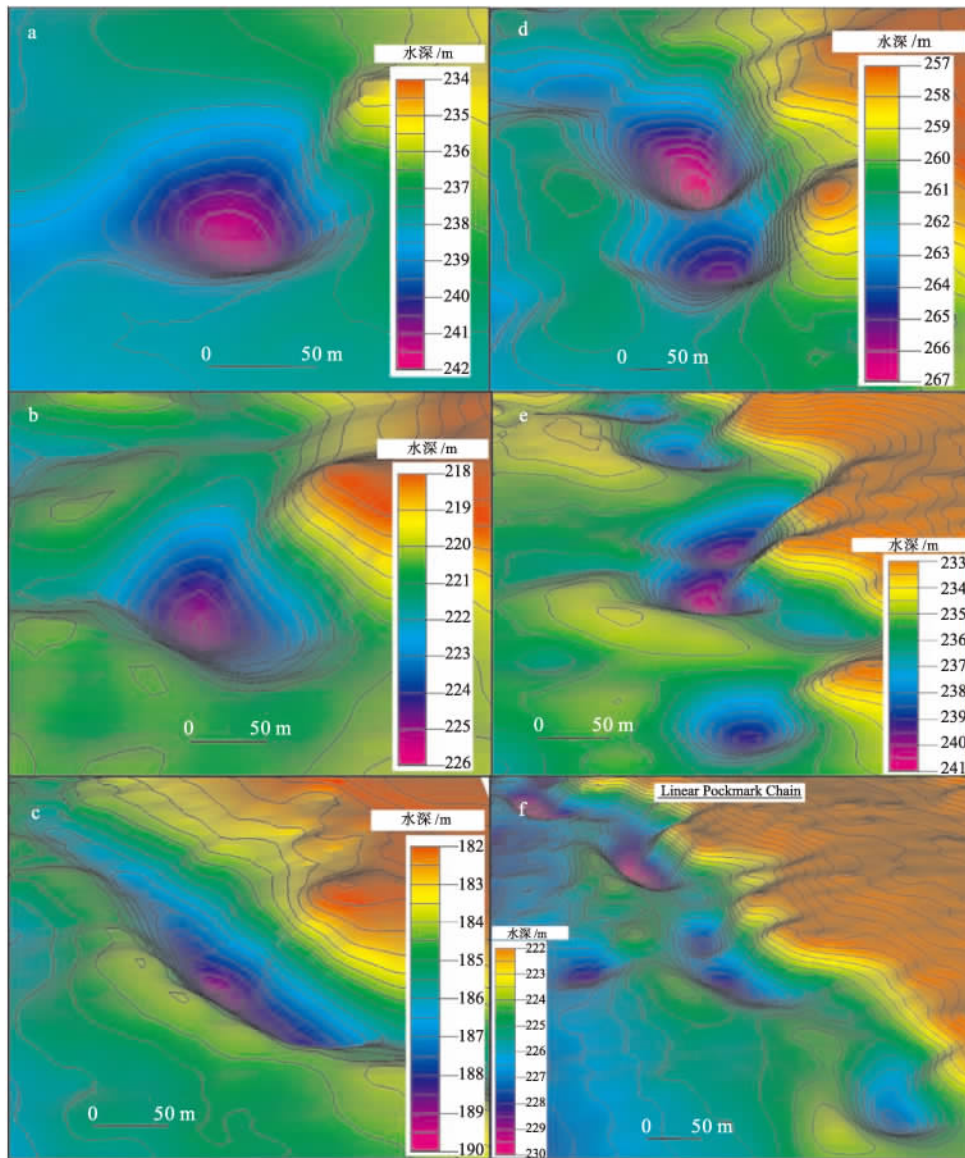
等^[25]统计了印度西部大陆边缘的麻坑发现其深度与长度、宽度、周长以及麻坑壁的坡度均存在一定的相关性; Leon等^[26]注意到卡的斯湾海底麻坑的直径与水深呈正相关。

不仅麻坑的规模差别很大,其平面形态也不尽相同,典型的麻坑呈圆形或椭圆形,也有的呈拉长形及新月形,还有的麻坑呈线性分布形成链状麻坑。此外,有些麻坑受海底各种地质因素(如滑塌及底流作用)的影响发生合并,形成复合麻坑^[10, 16, 25](图2)。在横剖面上,麻坑主要呈V形、U形以及W形3种形态,且多数呈不对称状。麻坑的原始大小以及形态主要取决于下伏流体储层的容积、超压大小和流体成分^[14],同时也受流体渗漏类型^[27]、海底沉积物的流变能力及颗粒大小、以及下伏地层的构造情况的控制^[28]。其最终的规模和形态还受底流改造以及麻坑中自生矿物沉淀等因素的影响^[4, 29]。

1.2 海底麻坑的分类

关于麻坑的分类,目前还没有统一的标准。Hovland等^[30]根据麻坑的形态和大小将麻坑分为6种类型:①单元麻坑:宽度为1~10 m,通常小于5 m,深度最多可达0.5 m,很可能代表流体仅发生了一次喷发或渗漏,且多数被认为是由于海底之下储层中的气体聚集推动上覆沉积物中孔隙水渗漏形成^[31];②正常麻坑:直径从10~700 m,深度从1~45 m的圆形凹坑,横剖面可以呈类似于盆地的形状(麻坑内壁平缓)或者为不对称、且内壁陡峭的形态,在正常麻坑周围常有单元麻坑的分布;③拉长形麻坑:麻坑长轴比短轴长很多,这种类型的麻坑常出现在斜坡或者受强烈底流影响的区域;④眼状麻坑:麻坑中心出现声学强反射区域,这是由于海底沉积物被剥蚀之后留下的粗粒物质或者是生物生命活动留下的遗迹(残留的骨骼或生物壳体等),也可能是自生碳酸盐岩沉淀导致;⑤链状麻坑:由单元麻坑或者小型正常麻坑排列成直线或曲线形,长度可延伸数千米,这种类型的麻坑通常是由于流体沿着近垂直的断层或者薄弱带集中渗漏形成;⑥复合麻坑:正常麻坑成群出现或者由几个麻坑合并而成。

Foland等^[32]在描述加利福尼亚大陆边缘的一个麻坑区时将直径大于250 m的麻坑命名为



a 圆形麻坑;b 椭圆形麻坑;c 拉长型麻坑;d 复合麻坑;e 和 f 链状麻坑

图 2 典型麻坑测深透视图(据文献[25])

Fig. 2 Perspective view of bathymetry of typical pockmarks(after reference [25])

大型麻坑(giant-pockmark);Corporation等^[4]将非洲西部大陆边缘直径大于1 000 m的海底麻坑称为超大型麻坑(mega-pockmark)。此外,根据麻坑的长宽比可将麻坑分为3类:圆形麻坑(长宽比为1~1.5)、椭圆形麻坑(长宽比为1.5~2.5)以及拉长形麻坑(长宽比大于2.5)^[25]。

2 海底麻坑的研究方法

目前,国内外对于麻坑的研究主要采用声学探测、地震探测、海底原位观测以及钻孔取心进行

地球化学分析等方法来对麻坑进行研究。主要有3个方面:①利用海底多波束测深、侧扫声纳、二维和三维高分辨率海底地震剖面、海底浅层剖面等声学 and 地震方法,研究麻坑的形态和流体渗流通道等;②利用水下机器人(ROV)直接对海底麻坑进行观测和采样,确定麻坑中气体渗漏通量及上覆水体甲烷浓度等;③通过麻坑中沉积物的取心,研究吸附气和孔隙水成分及含量等,明确形成麻坑的流体来源。

海底多波束测深图能够提供比较宏观的海底表面形态特征,麻坑在多波束测深图像上直观的

表现为下陷的地貌(图2)^[33]。海底流体渗漏会导致海底环境发生物理、化学和生物方面的变化,如渗漏流体形成的麻坑、与渗漏甲烷的缺氧氧化有关的自生碳酸盐岩以及生物席和化能自养生物群落等^[34],使得受流体渗漏影响海底及沉积物声阻抗及粗糙程度增加,在侧扫声呐图像上呈增强的逆向散射特征。海底地震剖面能够很好地识别出海底麻坑之下流体的运移,聚集及渗漏有关的地震反射特征,主要包括增强反射、柱状扰动、空白反射和气泡等^[35],可据此推断麻坑的形成机理。在浅层剖面上也能识别出与流体渗漏有关的麻坑,以及指示浅层气存在的各种声学特征,如声浑浊带、增强反射、亮点等^[36, 37]。

尽管存在大量指示麻坑及海底流体渗漏的声学及地球物理标志,但这些标志终究是间接的,要证明麻坑及流体渗漏的存在,还应该进行钻孔取样,开展地球化学分析。主要包括测定沉积柱样中沉积物吸附气体和孔隙水中的溶解气体的成分、 CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、孔隙水中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等离子的浓度随深度的变化等。近年来越来越多的使用ROV直接的观测和采样,也可为研究海底麻坑的流体渗漏成因提供直接证据。同时,开展麻坑的长期原位观测,包括从气体通量、温度、压力、盐度等方面进行监测,可明确麻坑的形成机制,流体渗漏特性及持续时间,并且对确定流体渗漏强度,流体对海底物理、化学和生物环境乃至大气环境的影响有重要意义。此外,Andrews等^[38]将地貌形态测量学的原理应用到麻坑研究中,提出了一种对麻坑形态进行定量描述的模型,从高分辨率测深图中识别和提取麻坑,能够很好对全球发育的麻坑进行定量对比。

3 成因机制

Kelley等^[39]提出麻坑形成的2种典型成因模式:①平衡模式:麻坑是由于流体经过成千上万年的缓慢渗漏形成的;②突变模式:地震、海啸、风暴等因素使气藏之上的盖层的封闭压力降低,流体突然发生强烈渗漏或喷发,伴随着大量泥质物质被搬运,形成麻坑。Cathles等^[31]建立了麻坑形成的概念模型和数学模型,认为首先在毛细管封闭的细粒沉积物之下聚集着游离气体,随着游

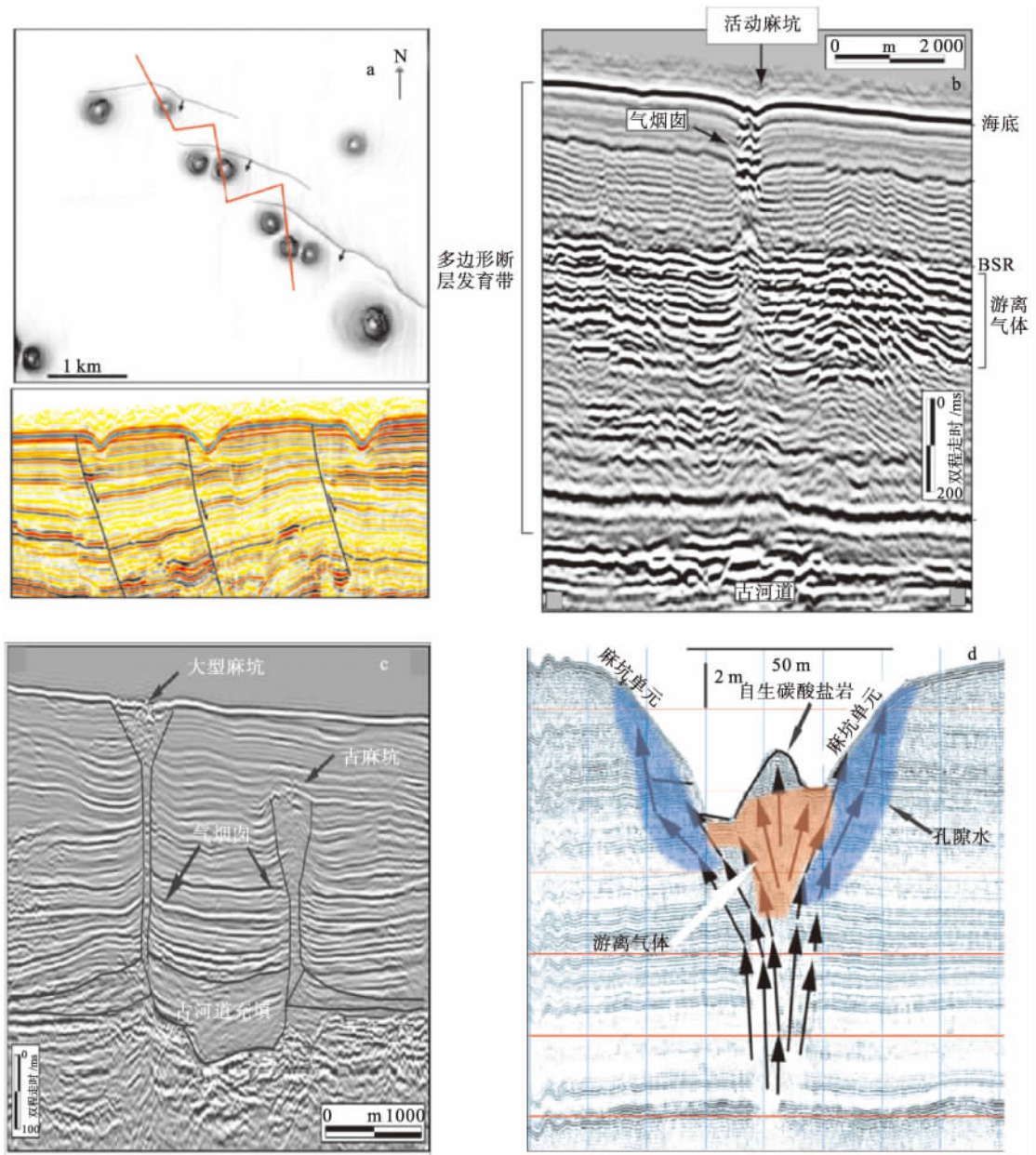
离气体的逐渐增加,当气体浮力超过毛细管压力后,游离气将刺穿毛细管封闭层,挤入上覆沉积层内,形成向上运移的气流,迫使孔隙水从沉积物中排出。由于气流推动孔隙水向上运移,使海底表面沉积物发生变形,最终液化的沉积物被底流搬运,形成麻坑。数值模拟结果表明当气流高度为气流底部到海底距离的一半时,就能够导致海底的沉积物变形及麻坑的形成。

流体对于麻坑的形成起到至关重要的作用,然而不同性质的流体可能会产生不同的渗漏特征,进而以不同的方式剥蚀海底沉积物而形成麻坑:①地下淡水渗漏:海底以下地层含水层中的地下水向海底渗漏能够携带并且搬运海底沉积物,形成海底凹陷^[1];②气体的释放:主要通过2种方式,一是海底(特别是深水区)之下聚集足量超压的游离气体,在海底发生间歇性喷发形成麻坑^[14, 40];二是气体持续渗漏剥蚀海底沉积物,使细粒沉积物悬浮在水体中,进而被底流搬运,而较粗粒沉积物残留在麻坑中^[41]。麻坑中渗漏的甲烷在近海底沉积层中与孔隙水中的 SO_4^{2-} 发生缺氧氧化,在麻坑中形成自生碳酸盐岩,同时为海底化能自养生物群的生长提供营养物质^[14]。③孔隙水渗漏:含水量高的粉砂及黏土沉积物的脱水作用,使孔隙水向上渗漏,在更粗的渗透性更好的海底沉积物中形成凹坑^[42];④甲烷水合物的形成引起的沉积物成筏作用(sediment rafting):海底附近的水合物在浮力的作用下可能脱离沉积物进入海水,同时水合物会携带一些沉积物进入水体,久而久之,形成海底麻坑^[43]。Paull等^[41]还提出一种高纬度麻坑特殊的形成机理:淡水冰筏(ice rafting)作用。当海底温度达 0°C 以下时,向上渗漏的淡水在沉积物与海水界面结冰,在浮力作用下携带海底沉积物脱离海底并被底流搬运,形成麻坑,这和第4种甲烷水合物成筏形成麻坑的方式类似。

麻坑形成的另一个不可或缺的条件是海底流体必须以一定的方式通过通道向海底喷逸或渗漏,这种流体向海底的运移和渗漏的动力主要是压力差。异常超压的形成可从沉积物沉积速率、沉积厚度以及沉积物岩性等方面考虑。海底流体异常超压形成之后,就能够使流体沿着有效的渗漏通道向海底运移。因此,麻坑的形成还与海底

之下的地层及地质构造密切相关。构造断层面(图 3a)、多边形断层(图 3b)、沉积边界、不整合面以及地层的薄弱带等均可以成为流体运移及渗漏的通道。在加拿大劳伦斯海湾^[44]、科林斯湾^[45]、非洲西部大陆边缘^[4]等海域的麻坑沿着断层走向

分布(图 3a)。Gay 等^[46, 47]发现非洲下刚果盆地的麻坑沿着古河道呈近线性分布,表明流体可能是从古河道的沉积物中渗漏到海底(图 3c)。此外,在泥底辟发育区也常见到海底麻坑的发育^[14, 48]。然而,海底流体运移通道随渗漏活动的



a 麻坑沿断层走向分布(上图)且多出现在断层上盘(下图); b 气体沿多边形断层带运移形成气烟囱,在海底形成麻坑;
c 古河道砂体中充填的流体在古河道两侧向上渗漏形成麻坑;
d 麻坑中自生碳酸盐岩的沉淀,使流体渗漏通道发生改变,在原麻坑的翼部形成单元麻坑

图 3 麻坑及渗漏通道(据文献[4,45,46,15 修改])

Fig. 3 Pockmarks and seepage passage(modified from references [4,45,46,15])

进行可能会发生堵塞和改道。挪威海槽的一个正常麻坑底部中心由于自生碳酸盐岩的形成,阻止了流体继续向上运移,封闭在自生碳酸盐岩下的浅层气推动沉积物孔隙水沿着麻坑的翼部渗漏形成单元麻坑^[15](图3d)。

在麻坑形成之初,其形态多呈圆形或椭圆形,随后可能受到海底滑塌或者底流的影响^[27, 49, 50],形成形态各异的麻坑,如拉长形,新月形等。长期流体渗漏并不是维持麻坑形态的必要条件,其他机理同样也能够维持并改造麻坑形态^[51],如近海底微弱的底流在麻坑内形成上升流,能够阻止沉积物在麻坑中堆积^[49],从而维持麻坑的原有形态。

4 海底麻坑研究的意义

4.1 麻坑与油气及天然气水合物的关系

麻坑最初是在油气勘探过程中发现的,尽管仅用麻坑作为海底油气渗漏的指示有很大的局限性,但一些学者仍认为麻坑是海底油气藏发生渗漏在海底沉积物中留下的标志,如在北海 Troll 油田之上的海底就发现有密集分布的麻坑^[52]。同时,麻坑还可以作为海底油气藏完好程度的指示,在盖层封闭性较差或盖层受构造运动被刺穿的含油气区,大量麻坑的形成可能意味着油气圈闭遭到破坏,形成大型油气田的可能性较小^[53-55]。

Hovland 等^[23]在挪威海 Nyegga 海域的一个复杂麻坑中发现水合物丘状体,麻坑中的丘状水合物可能是由于烃类气体向海底运移过程中在水合物稳定带内形成的,水合物的形成导致体积膨胀而形成丘状体。卡的斯湾大陆边缘的麻坑区发育在水合物稳定带上,麻坑可能是由于水合物受地中海温暖海水的影响而发生分解,导致 CH₄ 等流体向上渗漏形成的^[56]。因此,麻坑在一定程度上能够指示海底油气藏及天然气水合物的存在。

4.2 麻坑内的生物地球化学过程

在非洲西部加蓬大陆边缘^[18]、下刚果盆地^[47]、挪威中部海域^[3]、卡的斯湾^[56]、大西洋中部大陆架^[57]等海域的麻坑中均发现自生碳酸盐岩或冷泉生物群的出现。从地层深部向上渗漏的

CH₄ 在硫酸盐—甲烷界面,通过甲烷氧化古菌和硫酸盐还原菌的作用发生缺氧氧化形成 HCO₃⁻,同时孔隙水中的硫酸盐被硫酸盐还原菌还原成 HS⁻(CH₄ + SO₄²⁻ → HCO₃⁻ + HS⁻ + H₂O),微生物活动形成的过量孔隙水溶解无机碳(DIC),使环境碱度增加,有利于自生碳酸盐岩的沉淀(Ca²⁺ + 2HCO₃⁻ → CaCO₃ + CO₂ + H₂O)^[58, 59]。在麻坑中发现的冷泉生物群落包括生物蛤、管状蠕虫、细菌席等^[18, 60],这些化能自养生物群落可以在不需要光和氧气的极端环境下利用 CH₄ 和 H₂S 为营养物质生存,有学者推测与冷泉渗漏有关的生物群落可能是地球上最原始的生物群落^[16],因此,研究冷泉渗漏系统中的化能自养生物群落对于了解地球生命起源有着重要意义。

Gay 等^[47]结合测深资料、高分辨率地震资料、水下视频以及重力取心资料提出一个大型麻坑内生物化学演化特征的模型并划分出 5 个沉积相带(图 4)。麻坑中心主要受甲烷渗漏过程控制,形成自生碳酸盐岩以及以 CH₄ 为生的细菌和动物群,外围主要受硫化物生成作用的控制,导致生存在黑色还原沉积物的 *Vesicomysidia* 型动物群以及白色细菌席的出现。以 CH₄ 为生的生物和以硫化物为生的生物在麻坑底部呈同心状分布。海底甲烷水合物只可能出现在麻坑中心区域或者出现在 CH₄ 通量足够大且能够穿过 SO₄²⁻—CH₄ 交接带的区域。

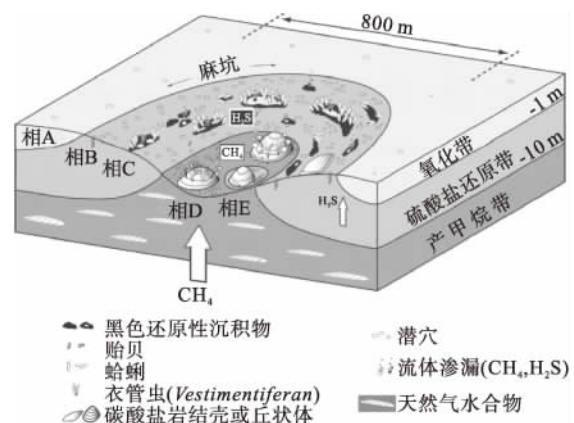


图 4 麻坑形态及生物化学演化模式(据文献[46]修改)

Fig. 4 Evolutionary model of morphological, chemical and biological features within a pockmark (modified from reference [46])

4.3 麻坑与深水珊瑚礁

Hovland 等^[61]在对挪威中部近海的深水 *Lophelia* 珊瑚礁的研究过程中发现大量单元麻坑分布在深水珊瑚礁的上游(相对于底流运动方向),同时也发现一些珊瑚礁分布在正常麻坑内部。深水珊瑚礁通常出现在海底正地形上,洋流在遇到海底隆起产生涡流及内波将海水中营养物质聚集,促进珊瑚的生长^[62]。而 Hovland 等的发现可能会为深水珊瑚礁的形成提供另一种解释:从麻坑中渗漏的流体为珊瑚虫以及礁体的生长提供必要的营养物质。*Lophelia* 珊瑚礁的 $\delta^{13}\text{C}$ 测试结果表明, $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围相对较大($-2\text{‰} \sim -9\text{‰}$ PDB),过去认为主要是由于周围水体 pH 值变化导致的^[63],而 Hovland 等^[61]认为这可能与微生物消耗烃类物质有关,这些微生物又被栖息在珊瑚礁上的珊瑚虫或者其他冷泉生物消化吸收。

4.4 麻坑与地质灾害及其环境效应

麻坑常出现在与海底滑塌有关的斜坡区,尤其在滑塌体的上部未受扰动的沉积物中更为常见,如东北大西洋的 Storegga 滑坡麻坑区^[64]、卡的斯湾麻坑区^[26]等。麻坑作为海底流体(超压流体)渗漏的指示,可以为监测容易发生海底滑坡地区的稳定性提供重要信息,比如海底异常压力是如何形成及循环的^[30]。因此,海底麻坑的活动可能对海底工程建设造成安全隐患。

一些观察研究表明在地震之前或发生地震过程中,海底麻坑会变得异常活跃,气体从麻坑中快速向水体中渗漏^[65],因此,海底流体的异常活跃可能与地震活动有关。目前只在很少的地区发现正在活动的麻坑(水体中能观察到流体渗漏形成的气泡),所以,那些在大地震之前变得异常活跃并且可以作为地震前兆的麻坑常常被忽略^[30]。

由于 CH_4 作为一种温室效应极强的气体,其温室效应是 CO_2 的 20~30 倍^[66],所以,麻坑活动释放的天然气是全球 CH_4 循环的重要组成部分^[67]。因此,由富含 CH_4 的流体渗漏形成的麻坑作为一种重要的海底地貌受到各国学者的普遍关注。

5 海底麻坑研究展望

海底麻坑经历了近半个世纪的研究历史,取得了不少成果,特别是 20 世纪 90 年代以后,随着海洋探测技术及计算机技术的迅猛发展,在世界各大海域发现了大量海底麻坑,并对麻坑形态、成因机制以及麻坑内生物地球化学过程等方面有了一定的了解和认识。今后海底麻坑的研究重点有:

(1)过去海底麻坑研究主要集中在麻坑的形态特征、流体来源、渗漏通道、麻坑形态的维持与改造等方面,很少有研究涉及到形成麻坑的海底流体的动态运移过程,流体在海底的运移、聚集以及释放是一个复杂的动态平衡的过程。因此,模拟形成麻坑流体运聚和释放以及异常超压的形成过程可能成为今后麻坑研究的一个方向。

(2)研究表明,单元麻坑是由于海底以下沉积物中的气体因毛细管作用而被封堵,下伏聚集的游离气体像活塞一样推动沉积物孔隙水向上渗漏而形成的^[31],单元麻坑可以表征麻坑刚形成不久、且局部流体渗漏活动可能仍然比较活跃。因此,对单元麻坑中渗漏孔隙水溶解气的研究可以较准确获得下伏气源的成分及特征^[15],为判别气体成因及来源提供依据。

(3)目前在世界范围内发现的海底麻坑大多数已经不活动了(麻坑内未发现冒泡现象),表明形成麻坑的流体并不是源源不断的,而是间歇性或者周期性地喷发或渗漏。同时,海底麻坑与滑坡的关系从当前的研究进展来看,还不能确定到底是海底滑坡促进了流体渗漏进而形成麻坑,还是麻坑的活动引起海底滑坡。此外,对于麻坑对海底地震的指示作用也未进行系统的研究。因此,探明局部海底流体释放的规律,有助于了解区域构造特征以及合理预测海底地质灾害。

(4)若要获得麻坑区流体来源、运移通道和驱动机制以及生物地球化学等方面的详细信息,对海底麻坑进行系统全面的研究,有必要开展对麻坑及其冷泉系统的温度、压力、盐度、 CH_4 浓度等方面进行长期(几年甚至几十年)的原位监测,积累一些相关资料和数据,以期得到一些规律性的认识和结论。

参考文献:

- [1] King L H, Maclean B. Pockmarks on Scotian Shelf [J]. Geological Society of America Bulletin, 1970, 81(10): 3 141-3 148.
- [2] Hovland M, Talbot M R, Qvale H, et al. Methane-related carbonate cements in pockmarks of the North-Sea [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1987, 57(5): 881-892.
- [3] Hovland M, Svensen H, Forsberg C F, et al. Complex pockmarks with carbonate-ridges off mid-Norway: Products of sediment degassing [J]. Marine Geology, 2005, 218(1/4): 191-206.
- [4] Pilcher R, Argent J. Mega-pockmarks and linear pockmark trains on the West African continental margin [J]. Marine Geology, 2007, 244(1/4): 15-32.
- [5] Nelson H, Thor D R, Sandstrom M W, et al. Modern biogenic gas-generated craters (sea-floor pockmarks) on the Bering Shelf, Alaska [J]. Geological Society of America Bulletin, 1979, 90(12): 1 144-1 152.
- [6] Hovland M, Judd A G, King L H. Characteristic features of pockmarks on the North-Sea floor and Scotian Shelf [J]. Sedimentology, 1984, 31(4): 471-480.
- [7] Fader G B J. Gas-related sedimentary features from the eastern Canadian continental-shelf [J]. Continental Shelf Research, 1991, 11(8/10): 1 123-1 153.
- [8] Sieck H. Practical application of offshore site hazard surveys [J]. Ocean Eng (United States), 1975, 47(15): 6-9.
- [9] Cifici G, Dondurur D, Ergun M. Deep and shallow structures of large pockmarks in the Turkish shelf, Eastern Black Sea [J]. Geo-Marine Letters, 2003, 23(3/4): 311-322.
- [10] 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): 1 146-1 156.
- [11] Hovland M. On the shelf-sealing nature of marine seeps [J]. Marine Geology, 2002, 22(23): 87-94.
- [12] Plassen L, Vorren T O. Fluid flow features in fjord-fill deposits, Ullsfjorden, North Norway [J]. Norwegian Journal of Geology, 2003, 83(1): 37-42.
- [13] Naudts L, Greinert J, Artemov Y, et al. Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea [J]. Marine Geology, 2008, 251(3/4): 253-267.
- [14] Hovland M, Judd A G. Seabed pockmarks and seepages [M]. London:Graham & Trotman Ltd. , 1988.
- [15] Hovland M, Hegglund R, De Vries M H, et al. Unit-pockmarks and their potential significance for predicting fluid flow [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(6): 1 190-1 199.
- [16] Judd A G, Hovland M. Seabed fluid flow: the impact of geology, biology and the marine environment [M]. Cambridge:Cambridge Univ Press, 2007.
- [17] Webb K E, Hammer O, Lepland A, et al. Pockmarks in the inner Oslofjord, Norway [J]. Geo-Marine Letters, 2009, 29(2): 111-124.
- [18] Ondras H, Olu K, Fouquet Y, et al. ROV study of a giant pockmark on the Gabon continental margin [J]. Geo-Marine Letters, 2005, 25(5): 281-292.
- [19] Vaular E N, Barth T, Haflidason H. The geochemical characteristics of the hydrate-bound gases from the Nyegga pockmark field, Norwegian Sea [J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(5): 437-444.
- [20] Johnson J E, Goldfinger C, Suess E. Geophysical constraints on the surface distribution of authigenic carbonates across the Hydrate Ridge region, Cascadia margin [J]. Marine Geology, 2003, 202(1/2): 79-120.
- [21] Hood K C, Wenger L, Gross O, et al. Hydrocarbon systems analysis of the northern Gulf of Mexico: Delineation of hydrocarbon migration pathways using seeps and seismic imaging [C]// Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing: AAPG Studies in Geology, 2002, 48(2): 25-40.
- [22] Sahling H, Bohrmann G, Spiess V, et al. Pockmarks in the Northern Congo Fan area, SW Africa: Complex seafloor features shaped by fluid flow [J]. Marine Geology, 2008, 249(3/4): 206-225.
- [23] Hovland M, Svensen H. Submarine pingoes: Indicators of shallow gas hydrates in a pockmark at Nyegga, Norwegian Sea [J]. Marine Geology, 2006, 228(1/4): 15-23.
- [24] Cole D, Stewart S A, Cartwright J A. Giant irregular pockmark craters in the Palaeogene of the Outer Moray Firth Basin, UK North Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(5): 563-577.
- [25] Dandapath S, Chakraborty B, Karisiddaiah S M, et al. Morphology of pockmarks along the western continental margin of India: Employing multibeam bathymetry and backscatter data [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(10): 2 107-2 117.
- [26] Leon R, Somoza L, Medialdea T, et al. Pockmarks, collapses and blind valleys in the Gulf of Cadiz [J]. Geo-Marine Letters, 2010, 30(3/4): 231-247.
- [27] Boe R, Rise L, Ottesen D. Elongate depressions on the southern slope of the Norwegian Trench (Skagerrak): morphology and evolution [J]. Marine Geology, 1998, 146(1/4): 191-203.
- [28] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene-Miocene turbiditic palaeochannels in the Lower Congo Basin [J]. Marine Geology, 2006, 226

- (1/2): 25-40.
- [29] Andresen K J, Huuse M, Clausen O R. Morphology and distribution of Oligocene and Miocene pockmarks in the Danish North Sea - implications for bottom current activity and fluid migration [J]. *Basin Research*, 2008, 20(3): 445-466.
- [30] Hovland M, Gardner J V, Judd A G. The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards [J]. *Geofluids*, 2002, 2(2): 127-136.
- [31] Cathles L M, Su Z, Chen D. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 82-91.
- [32] Foland S, Maher N, Yun J. Pockmarks along the Californian Continental Margin: implications for fluid flow [J]. *AAPG Bull*, 1999, 83(2): 681-706.
- [33] 赵铁虎, 张训华, 冯 京. 海底油气渗漏浅表层声学探测技术 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(6): 149-156.
- [34] 李双林, 董贺平, 肖 菲. 海底烃类渗漏的地球物理识别 [J]. *海洋地质前沿*, 2007, 23(11): 14-21.
- [35] 赵铁虎, 张训华, 王修田, 等. 南黄海盆地北部拗陷海底油气渗漏的声学探测 [J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(2): 195-199.
- [36] Heggland R. Gas seepage as an indicator of deeper prospective reservoirs. A study based on exploration 3D seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15(1): 1-9.
- [37] Baraza J, Ercilla G. Gas-charged sediments and large pockmark-like features on the Gulf of Cadiz slope (SW Spain) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1996, 13(2): 253-261.
- [38] Andrews B D, Brothers L L, Barnhardt W A. Automated feature extraction and spatial organization of seafloor pockmarks, Belfast Bay, Maine, USA [J]. *Geomorphology*, 2010, 124(1/2): 55-64.
- [39] Kelley J T, Dickson S M, Belknap D F, et al. Giant seabed pockmarks: Evidence for gas escape from Belfast Bay, Maine [J]. *Geology*, 1994, 22(1): 59-62.
- [40] Prior D B, Doyle E H, Kaluza M J. Evidence for sediment eruption on deep-sea floor, Gulf of Mexico [J]. *Science*, 1989, 243(4890): 517-519.
- [41] Paull C K, Ussler W, Borowski W S. Freshwater ice rafting: an additional mechanism for the formation of some high-latitude submarine pockmarks [J]. *Geo-Marine Letters*, 1999, 19(1/2): 164-168.
- [42] Harrington P K. Formation of pockmarks by pore-water escape [J]. *Geo-Marine Letters*, 1985, 5(3): 193-197.
- [43] Paull C K, Ussler W, Borowski W S, et al. Methane-rich plumes on the Carolina continental rise - association with gas hydrates [J]. *Geology*, 1995, 23(1): 89-92.
- [44] Syvitski J P M, Praeg D B. Quaternary sedimentation in the St. Lawrence estuary and adjoining areas, Eastern Canada: an overview based on high-resolution seismostratigraphy [J]. *Gographie physique et Quaternaire*, 1989, 43(3): 291-310.
- [45] Soter S. Macroscopic seismic anomalies and submarine pockmarks in the Corinth-Patras rift, Greece [J]. *Tectonophysics*, 1999, 308(1/2): 275-290.
- [46] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Evidences of early to late fluid migration from an upper Miocene turbiditic channel revealed by 3D seismic coupled to geochemical sampling within seafloor pockmarks, Lower Congo Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(3): 387-399.
- [47] Gay A, Lopez M, Ondreas H, et al. Seafloor facies related to upward methane flux within a Giant Pockmark of the Lower Congo Basin [J]. *Marine Geology*, 2006, 226(1/2): 81-95.
- [48] Dimitrov L, Woodside J. Deep sea pockmark environments in the eastern Mediterranean [J]. *Marine Geology*, 2003, 195(1/4): 263-276.
- [49] Hammer, Webb K E, Depreiter D. Numerical simulation of upwelling currents in pockmarks, and data from the Inner Oslofjord, Norway [J]. *Geo-Marine Letters*, 2009, 29(4): 269-275.
- [50] Duarte J C, Terrinha P, Rosas F M, et al. Crescent-shaped morphotectonic features in the Gulf of Cadiz (offshore SW Iberia) [J]. *Marine Geology*, 2010, 271(3/4): 236-249.
- [51] Brothers L L, Kelley J T, Belknap D F, et al. More than a century of bathymetric observations and present-day shallow sediment characterization in Belfast Bay, Maine, USA: implications for pockmark field longevity [J]. *Geo-Marine Letters*, 2011, 31(4): 237-248.
- [52] Hovland M. Characteristic of pockmarks in the Norwegian Trench [J]. *Marine Geology*, 1981, 39(1/2): 103-117.
- [53] Thrasher J, Fleet A J, Hay S J, et al. Understanding geology as the key to using seepage in exploration: The spectrum of seepage styles [M]//Schumacher D, Abrams M A. *Hydrocarbon Migration and Its Near-surface Expression*, AAPG, 1996.
- [54] Van Rensbergen P, Rabaute A, Colpaert A, et al. Fluid migration and fluid seepage in the Connemara Field, Porcupine Basin interpreted from industrial 3D seismic and well data combined with high-resolution site survey data [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2007, 96(1): 185-197.
- [55] 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.
- [56] Leon R, Somoza L, Medialdea T, et al. Classification of sea-floor features associated with methane seeps along the

- Gulf of Cadiz continental margin [J]. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 2006, 53(11-13): 1 464-1 481.
- [57] Newman K R, Cormier M H, Weissel J K, et al. Active methane venting observed at giant pockmarks along the US mid-Atlantic shelf break [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1/2): 341-352.
- [58] Joye S B, Boetius A, Orcutt B N, et al. The anaerobic oxidation of methane and sulfate reduction in sediments from Gulf of Mexico cold seeps [J]. *Chemical Geology*, 2004, 205(3/4): 219-238.
- [59] Luff R, Wallmann K. Fluid flow, methane fluxes, carbonate precipitation and biogeochemical turnover in gas hydrate-bearing sediments at Hydrate Ridge, Cascadia Margin: numerical modeling and mass balances [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(18): 3 403-3 421.
- [60] Tryon M D, Brown K M. Complex flow patterns through Hydrate Ridge and their impact on seep biota [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(14): 2 863-2 866.
- [61] Hovland M, Indreiten T, Thomsen T. Unit-pockmarks and cold-water coral reefs—a possible link? [C]// *Proceedings of the 10th Conf on gas in marine sediments, Listveyanka, Russia*, 2010;37.
- [62] Freiwald A, Huhnerbach V, Lindberg B, et al. The Sula Reef Complex, Norwegian shelf [J]. *Facies*, 2002, 47:179-200.
- [63] Adkins J F, Boyle E A, Curry W B, et al. Stable isotopes in deep-sea corals and a new mechanism for " vital effects" [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67 (6): 1 129-1 143.
- [64] Paull C K, Ussler W I, Holbrook W S, et al. Origin of pockmarks and chimney structures on the flanks of the Storegga Slide, offshore Norway [J]. *Geo-Marine Letters*, 2008, 28(1): 43-51.
- [65] Dando P R, Hughes J A, Leahy Y, et al. Earthquakes increase hydrothermal venting and nutrient inputs into the Aegean [J]. *Continental Shelf Research*, 1995, 15(6): 655-662.
- [66] Schneider S H. The greenhouse effect: science and policy [J]. *Science*, 1989, 243(4 892): 771-781.
- [67] Judd A G, Hovland M, Dimitrov L I, et al. The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change [J]. *Geofluids*, 2002, 2(2): 109-126.

RESEARCH STATUS AND PROGRESS OF SEABED POCKMARKS

LUO Min^{1, 2}, WU Lushan³, CHEN Duofu¹

(1 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: Served as the indicator of seabed flow, the pockmark is one of the common submarine geomorphic features worldwide. Studies in nearly half a century suggest that pockmarks are seabed depressions of various size and different morphology caused either by sudden and catastrophic eruption or slow and continuous seepage of seabed fluid. Based on the research results of seabed pockmarks, major advances in the studies of pockmarks are reviewed. Meanwhile, we systematically summarize the morphology, categorization, the main research methods, and the formation mechanism of pockmarks as well as their significance of research. Moreover, we realize that the study on the dynamic balance of migration and accumulation of seabed fluid and long-term in-situ monitoring of the pockmarks and related seeps system will become the hotspot of seabed fluid in the future.

Key words: seabed pockmark; fluid flow; formation mechanism; long-term monitoring