

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019111902

海底麻坑表征及成因研究——以尼日尔三角洲为例

杨志鹏^{1,2}, 李磊^{1,2}, 张威^{1,2}, 龚广传^{1,2}, 党星宇³, 程琳燕^{1,2}, 高毅凡^{1,2}

1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 西安 710065

2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065

3. 中国矿业大学, 北京 100091

摘要: 基于西非几内亚湾尼日尔三角洲盆地研究区约 1300 km² 的高分辨率三维地震资料, 研究麻坑的剖面特征、平面展布形态、麻坑与水道的关系、麻坑的成因。通过对目的层位的精细解释及多种地震属性提取的方法, 在研究区西北部发现了 75 个麻坑, 在海底水道上方发现了 56 个麻坑, 以及在研究区其他区域分布的 62 个麻坑。研究区主要有条带状麻坑、复合麻坑和孤立麻坑三种麻坑样式。麻坑的成因和分布模式受埋藏水道段侵蚀和切割的影响, 麻坑下方地层中相应的浊积水道产生流体, 流体向上运移导致地层不连续, 进而对麻坑的形成和分布产生影响。根据麻坑下方地层特征和充填模式, 将麻坑的成因分为古水道成因和断裂成因。

关键词: 海底麻坑; 海底水道; 浅层流体; 地层不连续性

中图分类号:P737.2 文献标识码:A

Characteristics and genesis of submarine pockmarks -- A case from the Niger Delta

YANG Zhipeng^{1,2}, LI Lei^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, GONG Guangchuan^{1,2}, DANG Xingyu³, CHENG Linyan^{1,2}, GAO Yifan^{1,2}

1. 1. School of Earth Sciences and Engineering Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2. 2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China

3. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100091, China

Abstract: Based on the high-resolution three-dimensional seismic data of about 1300 km² acquired from the Niger Delta Basin of the Gulf of Guinea in West Africa, studied in this paper are the temporal and spatial distribution patterns of pockmarks, the relationship between pockmarks and sea bottom channels, and the genesis of various types of pockmarks. Through the fine interpretation of the target horizon and the extraction of various seismic attributes, there have found 75 pockmarks in the northwest of the study area, 56 pockmarks found above channels, and 62 pockmarks distributed in other parts of the study area. There are three types of pockmarks, such as pockmarks in belts, complex pockmarks and isolated pockmarks. The causes and distribution patterns of pockmarks are affected by the erosion and cutting of buried channel sections. The corresponding turbidity channels in the stratum below the pockmarks produce fluids. The upward migration of fluids causes the stratum to be discontinuous, which in turn affects the stratum and distribution of pockmarks. According to the stratigraphic characteristics and filling mode, the genesis of pockmarks is classified into ancient channel genesis and fault genesis.

Key words: submarine pockmarks; channels; shallow fluid; stratigraphic discontinuity

在 Nova Scotia 大陆架的沉积盆地内, King 和 MacLean 首次提出麻坑是海底垂直流体集中流动和排出的表现形式^[1-5]。虽然麻坑在碳酸盐岩环境中也有一些案例研究, 但是它们主要出现在细粒硅质碎屑沉积环境中^[6-7]。海底洼地的大小也各不相同, 这是由于液化沉淀物从海底深处排出以及随后的覆盖层坍塌而形成的^[8]。在短暂的地质时间间隔内,

麻坑往往很快形成, 并与地层流体(包括甲烷气体和碳氢化合物)的间歇性、偶尔的毁灭性排放有关^[3,9]。

在平面图中, 麻坑呈现为圆形到椭圆形的几何形状, 宽度从小于 1 m 到超过 300 m 不等^[3,9-12]。在横断面上, 从 U 型、V 型凹陷到锥型呈现出不同的形态^[2]。直径大于 250 m 的麻坑称为“大麻坑”^[13], 直径大于 1000 m 的称为“巨型麻坑”^[11]。

资助项目: 国家自然科学基金项目“深水重力流流态转化研究”(41302147); 西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划(YCS19112028)

作者简介: 杨志鹏(1996—), 男, 硕士, 主要从事地震解释及深水沉积方面的研究工作, E-mail: 1375152634@qq.com

通讯作者: 李磊(1979—), 男, 博士, 教授, 硕导, 主要从事地震地质综合解释及海洋沉积方面的研究工作, E-mail: lilei@xsysu.edu.cn

收稿日期: 2019-11-19; 改回日期: 2020-04-28。周立君编辑

麻坑的形成与地质构造和地质过程有关,如节理^[9]、断层和断层背斜^[14-15]、埋藏水道^[16-17]、泥底辟^[16-18]、孔隙水逃逸^[19-20]、滑坡^[21]、水流和潮汐影响^[22]、天然气水合物溶解和解离^[23-24]、地震、海啸,甚至人类活动等^[24-25]。巨型麻坑的形成是由于自封闭过程和上升流体的侧向迁移^[26]。

国内对海底麻坑的研究主要集中于南海北部与西部边缘的海底麻坑地貌,并取得了诸多重要进展,如沙志彬等^[27]基于浅地层剖面研究了南海北部陆坡的麻坑地貌;李列等^[28]、邸鹏飞等^[29]、拜阳等^[30]在琼东南莺歌海盆地中央坳陷区发现麻坑地貌,并根据对地震剖面的分析发现了古麻坑;张田升等^[31]首次对南海礼乐盆地南部坳陷海底麻坑进行了系统的识别研究。

深水水道是陆地沉积物进入深海区域的主要通道。由于一些大型水道能持续活跃数百万年,因此在大陆边缘的演化过程中扮演着重要的角色,现代海底的许多麻坑现象都与废弃和埋藏的水道系统的流体排出有关,而对于水道约束型的麻坑地貌的研究报道较少。本文基于尼日尔三角洲1300 km²的高质量三维地震资料,对尼日尔三角洲的海底麻坑地貌及成因进行了较为系统的研究报道。

1 区域概况

尼日尔三角洲盆地位于非洲西部边缘的几内亚湾,东以喀麦隆火山带为界,西以4000 m等深线

和达荷美盆地为界。盆地西部陆架宽度50~70 m,陆架坡折位于水深150~200 m处。尼日尔三角洲盆地深水陆坡区是本文主要的研究区域(图1),水域深度1000~2000 m,是世界上碳氢化合物最多产的区域之一,因该区域碳氢化合物含量丰富,故此地区较易形成麻坑地貌。始新世以来,海平面下降和快速沉积速率所形成的尼日尔三角洲盆地是世界上最大的海退型三角洲盆地之一^[32-33]。尼日尔三角洲地区发生的大规模沉积体系及地貌特征对于了解世界上大多数三角洲地层结构起着至关重要的作用^[34]。研究区位于尼日尔三角洲西部坡脚逆冲带,平均水深1500 m。区域内浅层气富集,海底表层有大量的麻坑出现。

三角洲的后古新世剖面被划分为3个始新世到近代的历时岩相,代表了进积的沉积环境^[32,36-37]。基岩高田组(Akata)为海相成因,厚度达7000 m,是三角洲的主要烃源岩^[32],它由厚层的海洋页岩(烃源岩)和浊积砂组成,是深水油气勘探的目标。上覆阿格巴达组(Agbada)是三角洲的主要含油气单元,含硅层厚度超过3500 m^[38]。阿格巴达组在陆地和大部分海岸地区与贝宁组(Benin)的陆相砂层相重叠^[37]。

在研究区所在的三角洲深水环境中,高田组(Akata)被深水浊积河道复合体、泥石流和阿格巴达组页岩覆盖^[36]。在向陆地区,阿格巴达组又与贝宁组(Benin)的陆相砂层重叠。因此,三角洲的陆上和陆架地区富含砂岩,而深水环境则富含页岩,其中超过80%是页岩^[39]。气候驱动的海面升降作用

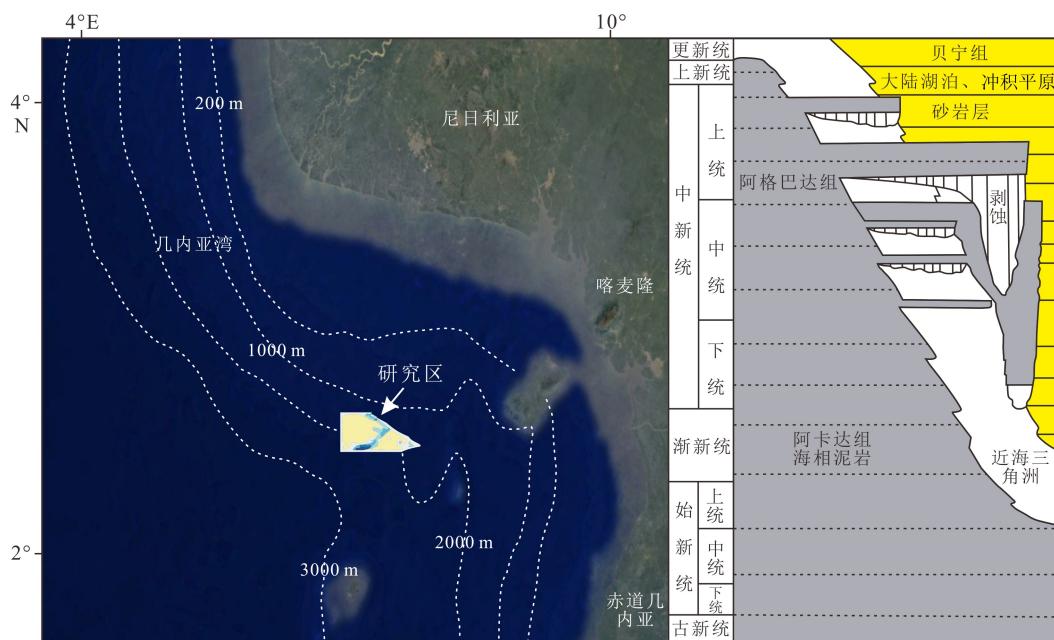


图1 尼日尔三角洲研究区位置图和地层年代示意图 (据文献[35]修订)

Fig.1 Location map and stratigraphic chronology of the Niger delta study area (revised from reference[35])

被认为是控制上新世至近代尼日尔三角洲层序地层结构的主要因素^[34,40]。

2 数据和方法

本研究使用了来自尼日尔西部深水三角洲 1300 km^2 的高质量三维地震数据。地震体为时间偏移体, 零相位由三维地震数据反极性(SEG 标准) 显示, 正反射系数对应波峰。由 2210 条主测线和 3987 条联络测线组成, 道间距 $12.5 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$, 采样率为 4 ms。解释层位为现代海底层, 地震体在浅层的主频率约为 50 Hz, 最大垂直分辨率约为 10 m。本研究采用地震地层学与地震地貌技术相结合的方法对地震数据集进行解释, 将地震剖面与平面属性图结合起来, 解释研究区的地质特征, 特别使用了均方根振幅切片(RMS)。RMS 振幅属性是根据背景特征的振幅响应对地质特征成像的一种有效方法, 用于对海底凹陷进行图像识别, 因为它能够对表面映射的细微痕迹地貌变化进行成像。

本文目的层为研究区现今海底层, 通过使用 1500 m/s 的地震速度生成的地表深度构造图显示了研究区域的海底水深。此外, 还绘制了一幅海底麻坑地形图, 用于成像海底麻坑, 生成等比例切片, 使用生成的等比例切片和海底表面的均方根振幅

图来显示水道系统和相关沉积元素的振幅随时间的变化。

利用三维地震地貌学方法对研究区水道的构型、形态和运动学特征进行研究, 浅层沉积物和海水速度分别以 2000 m/s 和 1500 m/s 将麻坑形态参数进行时深转换。尽管这种直接将地震剖面的测量数据转换为形态参数存在一些不确定性, 但目前这种方法在地震资料解释和浅层沉积体系研究中被广泛采用。利用 Surfer 软件对精细解释的地层数据进行网格化, 再将密集网格化的数据在软件中制作生成 3D 地形图。

对于麻坑形态参数, 主要测量麻坑的直径和深度, 直径测量主要是在地震剖面上, 读出测量对象的坐标, 因其 X、Y 坐标的单位为米(m), 故直径测量无需时深转换, 直接读取即可; 测量深度时由于剖面深度数据是以毫秒(ms)为单位, 故在使用时不仅需要在地震剖面上进行数据的读取, 还需要在 Landmark 上进行时深转换, 从而得到深度数据。

3 麻坑形态类型及成因

3.1 海底麻坑的平面展布

据测量, 研究区域内发现了 203 处洼地, 被解释

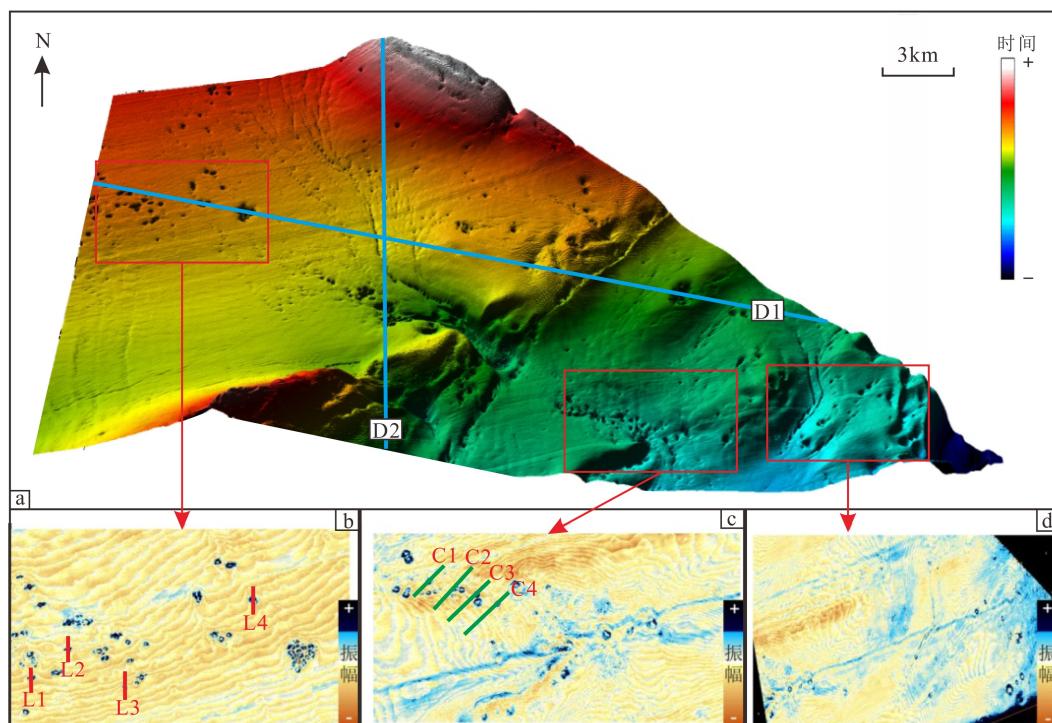


图 2 研究区麻坑平面分布图 (D1 和 D2 为过水道和麻坑的纵剖面)

Fig.2 Pockmark distribution map in the study area (D1 and D2 show the profiles of channels and pockmarks)

为麻坑(图 2),其中有 75 个麻坑在研究区西北部,56 个麻坑是在研究区的海底水道上方发现的,另外研究区内发现两个复合麻坑,规模较大,其形成是由多个麻坑复合而成,其下部地层在振幅上反映为弱振幅区。在平面视图中,特征主要表现为圆形和椭圆形,很少表现为新月形;在横截面上,麻坑主要呈 V 型,少数呈 U 型。麻坑的直径为 40~1000 m,深度范围从几米至几十米。

在该地区,麻坑密度与水深测量有关。除了水道边缘之外,密度随着水深测量的增加而降低。研究区内西南部麻坑密集,主要为独立分布(如图 2d)。在图 2b 中有一个复合麻坑,其直径为 774 m,深度为 47 m,由多个小麻坑聚集而成。图 2c 区域内有一个西北-东南走向的水道,在水道上方发育带状麻坑和孤立麻坑,本研究区内的水道上部麻坑主要呈条带状分布,包括 b、c 区域的水道上方的麻坑,在水道上方共识别出 56 个麻坑。研究区内麻坑大多呈现孤立的特征,也有随机分布和系统分布的特征,或呈带状分布。

3.2 麻坑的形态

依据麻坑的形态,本文将研究区内麻坑分为 3 类,分别为孤立麻坑、带状麻坑和复合麻坑(图 3)。

孤立麻坑是海底麻坑中常见的一种形态,它随机分布在陆架或陆坡海底之上。在孤立麻坑形成

过程中,流体渗漏起到至关重要的作用^[41]。海底的天然气水合物生成的气体顺着断层移动到较浅的层位聚集,导致地层的压力超出一般地层。由于这种浅层气上部覆盖的地层压力变小,下面层位的超压气体突破上覆地层,致使气体的泄露逸散。在这一过程中地层中的孔隙水顺着孔隙空间运移并且携带海底沉积物,相对来说比较薄弱的海底地层就会发生形变,海底地层孔隙水剥蚀了海底地层,沉积物减少,因此就会形成麻坑地貌。一般来说,孤立的麻坑基本上只有一次流体的泄露或者说只有一次流体喷发,也可以认为它是由流体迅速猛烈的向上喷出而造成的^[42]。

条带状麻坑在剖面上呈连续的 U 型或 V 型形态,流体逸散点是沿着古水道分布的,因而海底的麻坑会分布在与古水道对应的地区,形成与古水道的分布情况类似、形状类似的条带,称之为麻坑带。复合麻坑由多个麻坑成组出现,麻坑之间排列紧密。

尼日尔三角洲地区海底带状麻坑的分布与海底水道的分布关系密不可分,因此,推测带状麻坑的形成与古水道沉积关系甚密。研究区内古水道的主要成分为中—细砂岩组成的重力流沉积物,因为第四纪的古水道埋藏浅,受地层压力较小,导致其压实和固结程度不高,正因为如此重力流沉积物内存在孔隙,导致浅层气富集,形成压力超高的地层。

沉积后期构造运动使海平面高度降低,上覆的

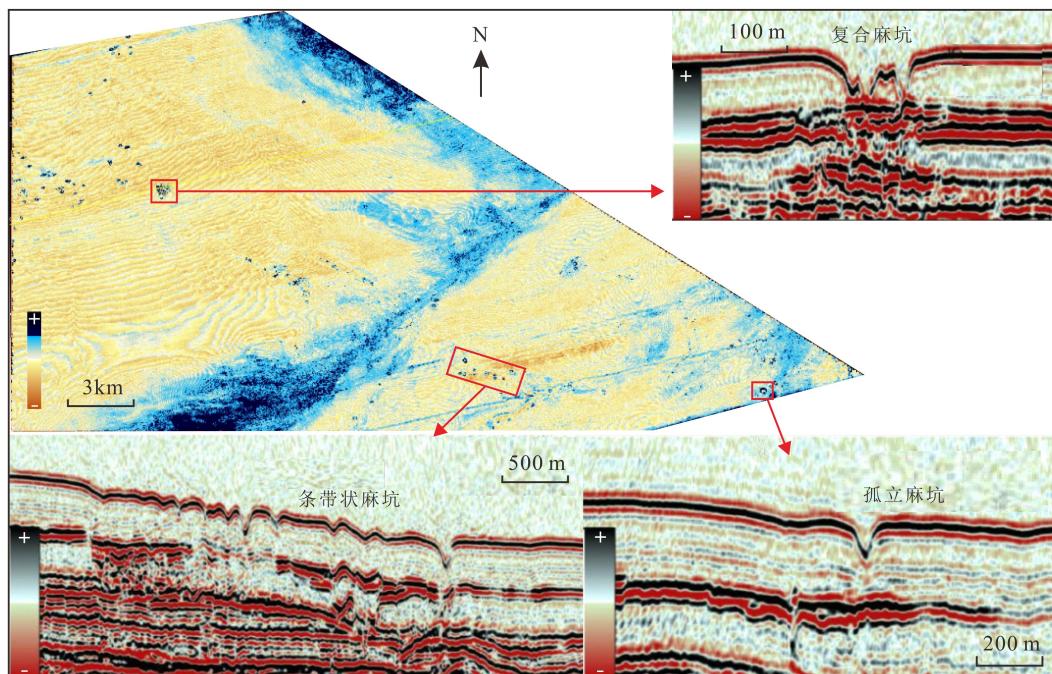


图 3 研究区海底麻坑剖面形态图

Fig.3 Profiles of seabed pockmark

地层压力随之降低时, 古水道内存在的超压气体很容易逸散到上覆的欠压实、还未固结完成的海底泥质盖层中, 并逸散到海底。在这个过程中, 浅层气体不断地向海底渗漏, 海底地层中孔隙变大且地层疏松并形成凹陷, 最终形成海底麻坑。因为流体逸散点是沿着古水道分布的, 因而海底的麻坑会分布在与古水道对应的地区, 形成与古水道的分布形状类似的条带状, 称之为麻坑带。在研究区中, 水道的边缘部位以及水道中有很多麻坑发育, 形态密集, 也可以认为是由很多个条带状麻坑进行组合排布从而形成了与麻坑下方水道展布类似的形态。

3.3 水道约束型海底麻坑

研究区有一条走向为西南至东北方向、长度约 14.1 km 的大型水道, 在其周围发育多条方向为东南至西北方向的水道, 水道与麻坑在地震剖面形态上主要差异为: 水道下无气烟囱发育, 麻坑下一般可见明显的气烟囱(图 4), 且麻坑内无内部填充物质, 表现为凹坑, 而水道内有丰富且杂乱的内部填充物(图 5a)。麻坑任意方向截取剖面其形态基本上均为下凹圆锥形, 而水道只有在特定方向才会有下 V 型或 U 型缺口。大多数海底水道是深切大陆架的侵蚀性通道, 沉积物通过这些通道从沿海高沉积物供应区输送到大型海底扇上。

晚白垩世西非赤道几内亚湾大陆边缘以典型的侵蚀型、砂质海底水道系统为主。该水道在古近

纪被废弃, 但在中新世构造抬升时重新活跃。随后沉积物供应的减少导致水道形态和活动发生剧烈变化。这种非典型的水道系统沉积类型为加积型, 无陆架边缘凹陷特征, 无陆坡沉积群。光滑的地震反射表明, 半深海沉积是沉积盆地的主要沉积类型, 水道内侧沉积物表明, 水道深度大于 150 m。当充填的沉积物失去流动通道时, 通常是由于侵蚀行为, 水道被截断并最终被填满。在水道废弃过程中, 流体逸出导致沿埋藏水道轴线成功形成“跨水道盐脊”^[41]。

研究区物源充足, 地形坡度较大, 当构造运动发生时, 有利于沉积物的滑坡、滑塌和浊流等现象的发生。沉积物滑坡和滑塌属于块体搬运, 对海底水道有强烈的侵蚀作用, 通常发生在水道上游坡度较大区域, 但沉积物的搬运距离较短。在块体搬运过程中, 沉积物在块体流头部剪切力作用下不断被冲刷, 并被抛至头部顶端湍流区域, 与周围水体相互混合形成浊流, 其所搬运的沉积物质则是海底水道两侧沉积的重要来源^[42]。海底水道在上游和下游端口区域, 侵蚀作用最强, 而水道侧壁的沉积物也因此失去稳定性, 导致周围地层中气体储层遭到破坏, 泄露的甲烷等气体沿水道边缘的缺口喷发, 在海底表面形成麻坑, 最终导致研究区内的麻坑多发育在海底水道周围, 在研究区水道壁上也发现有麻坑发育(图 5, 图 6b); 随着水道坡度变缓、两壁变宽等, 水道侵蚀作用逐渐减弱, 对两侧地层的破坏

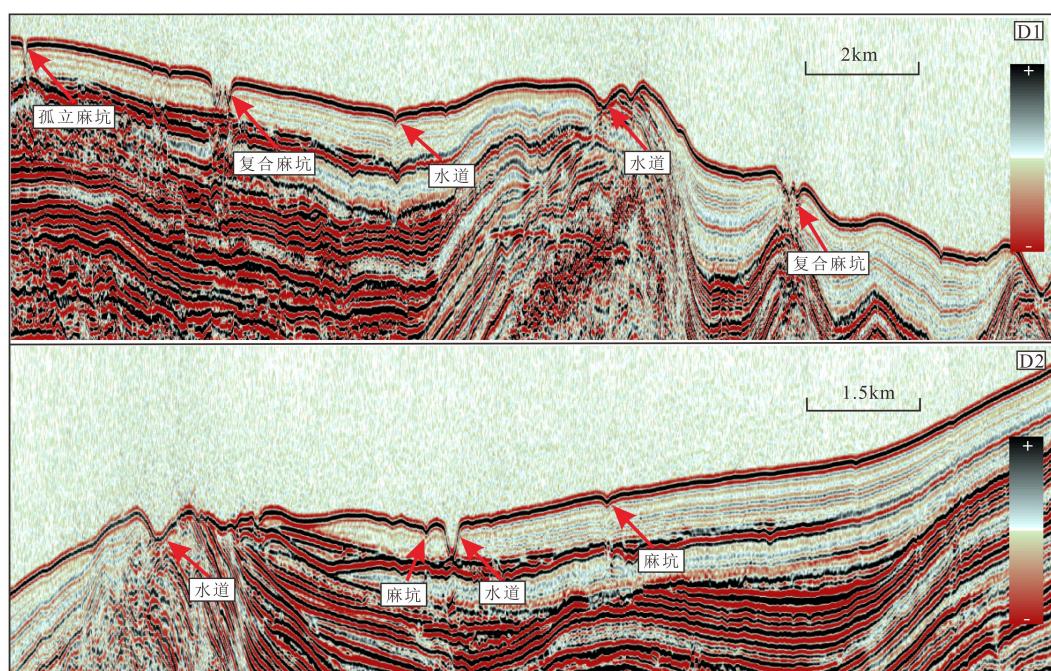


图 4 麻坑与水道分布关系图 (剖面位置见图 2a)

Fig.4 Distribution profile showing pockmark and channel (See Fig.2a for location)

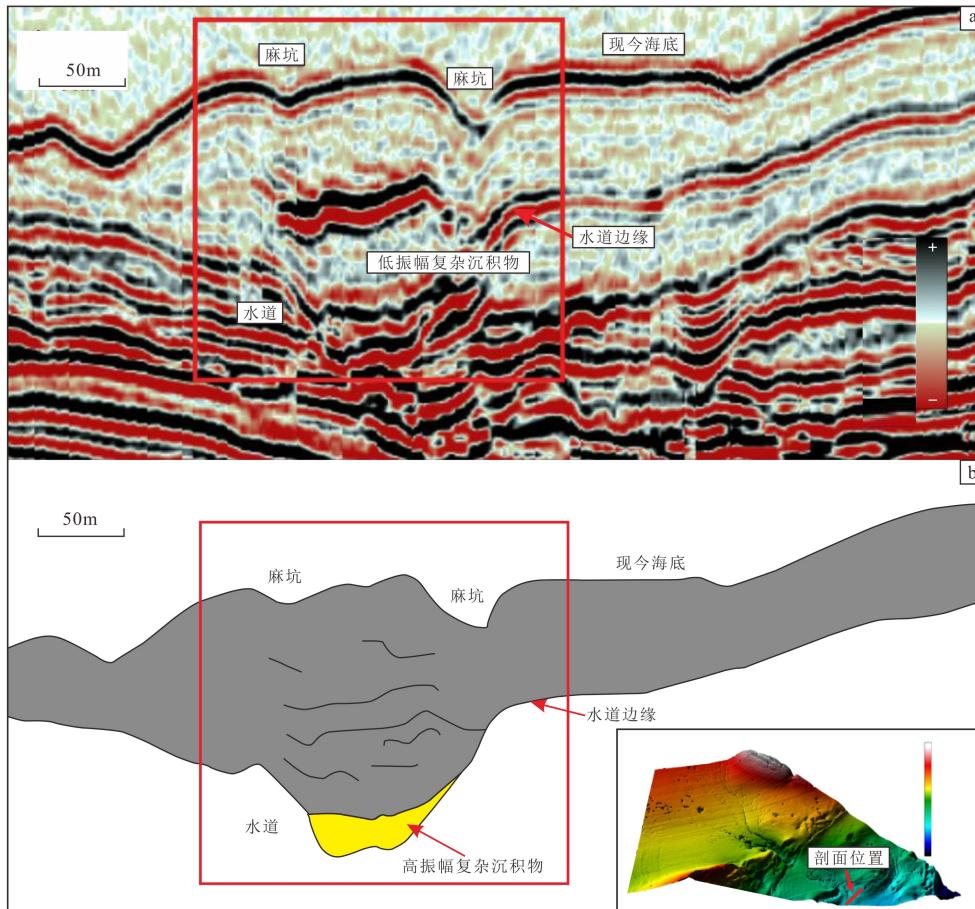


图5 麻坑下方水道沉积物填充示意图
Fig.5 Sediment fillings in channels below pockmarks

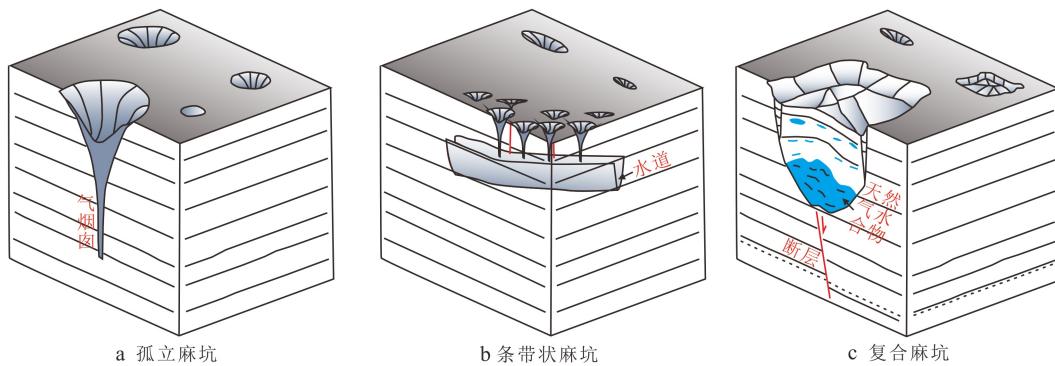


图6 麻坑的几何特征和海底结构示意图 (据文献[43]修订)
Fig.6 Geometrical characteristics and subseafloor structures for the five types of pockmarks (revised from reference[43])

性降低,导致水道下游中、下部两侧区域发育的麻坑数量较少。

以高振幅反射包裹体表示的载流层和伸展正断层促进了盆地深层流体进入水道系统的埋藏段(图5b)。在水道上普遍存在的“水道边缘”麻坑(图6b,图7),是由于地下的水道边缘与截断的储层相在水力作用下与较深的储层相直接联系的结果。“水道边缘”麻坑的形成被解释为受流体流动不连续性的控制,流体流动不连续性常由构成水道

充填物的富砂和富泥河道沉积物的地层交替所引起。泥质水道充填单元是流体流动的屏障,而连通的砂质充填单元则是流体运移的通道。在整个海底水道系统中出现的麻坑标志着埋藏储层相内的浅层流体流动^[16,44]。依据此结论本文认为,水道可以作为形成麻坑的一个重要的影响因素,而且这种麻坑的形成机理也是其重要的形成原因之一,将这种条带状麻坑的形成原因称为古水道成因。

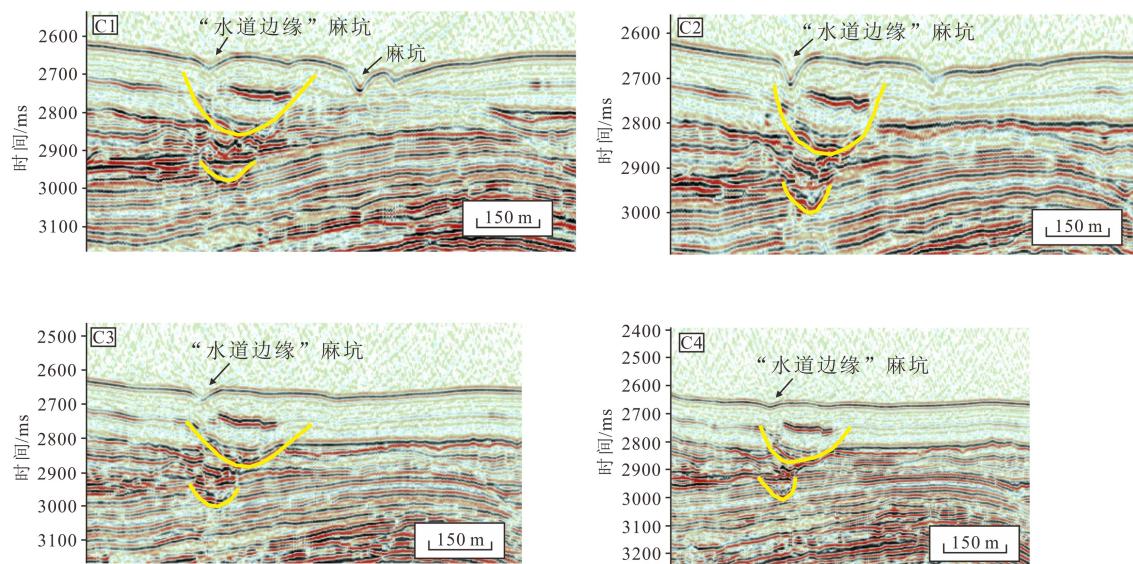


图 7 古水道埋藏段示意图 (剖面位置见图 2c)

Fig. 7 Schematic diagram of a buried ancient channel (See Fig. 2c for location)

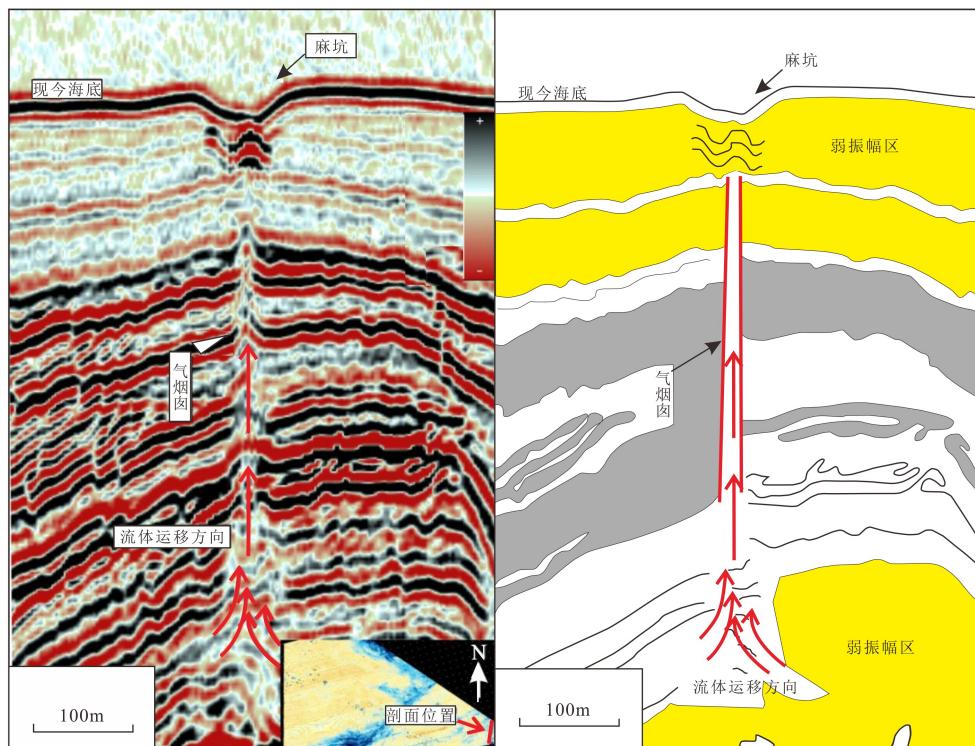


图 8 麻坑下部气烟囱示意图

Fig. 8 Schematic diagram of gas chimney below pockmark

3.4 控制因素

麻坑的形成通常是由于海底地层中的气体或者流体渗漏, 通过地层向海底进行排放所致。流体从气烟囱(图 8)、断层(图 9)和多孔隙的岩石向上方迁移, 被较为封闭的密封层堵塞, 有时直接从海底渗流而出。麻坑形成的过程中沉积地层流体猛烈地喷发, 有时缓慢持续逸散渗流, 麻坑是这一过

程的遗留痕迹和证据。因为低密度以及低黏稠度的泥岩、岩盐等受到挤压(上覆地层密度大形成重压力), 引起沉积物的局部凸起, 受到剥蚀而形成麻坑。当前大多数学者认为, 欠压实或非压实的沉积物、充足的渗漏流体、流体通道、气体超压体系以及良好的沉积物盖层^[42], 是形成海底麻坑的 5 个基本要素。

密封层的渗透性及其对应力累积的抵抗力控

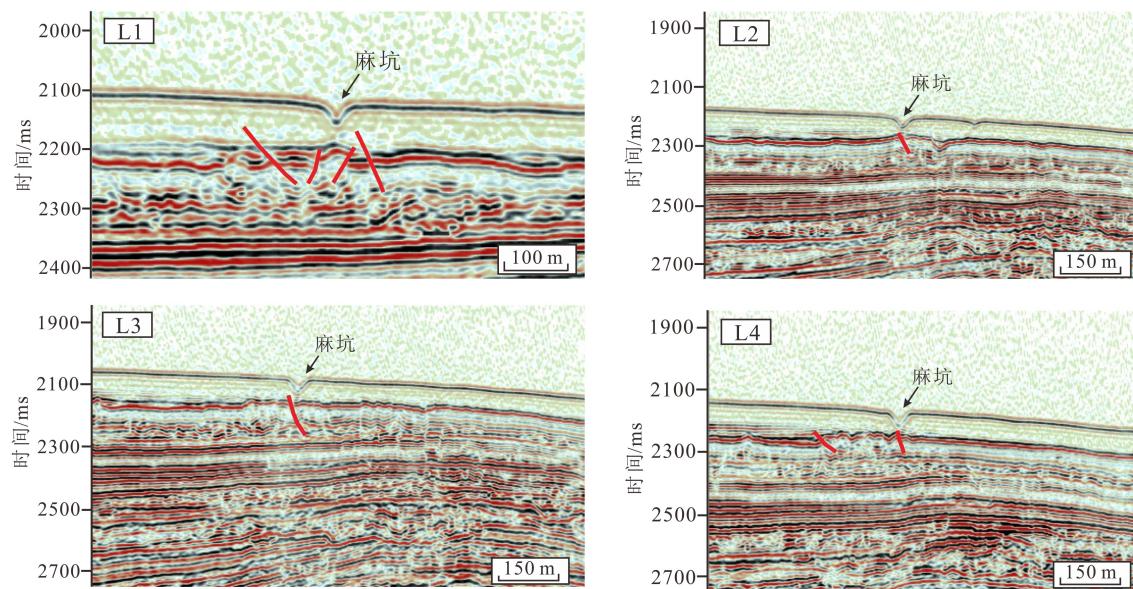


图 9 麻坑下部断裂分布图 (位置见图 2b, 红线代表断裂位置)

Fig.9 Occurrence of faults under of pockmarks (see Fig.2b for location. Red lines represent faults)

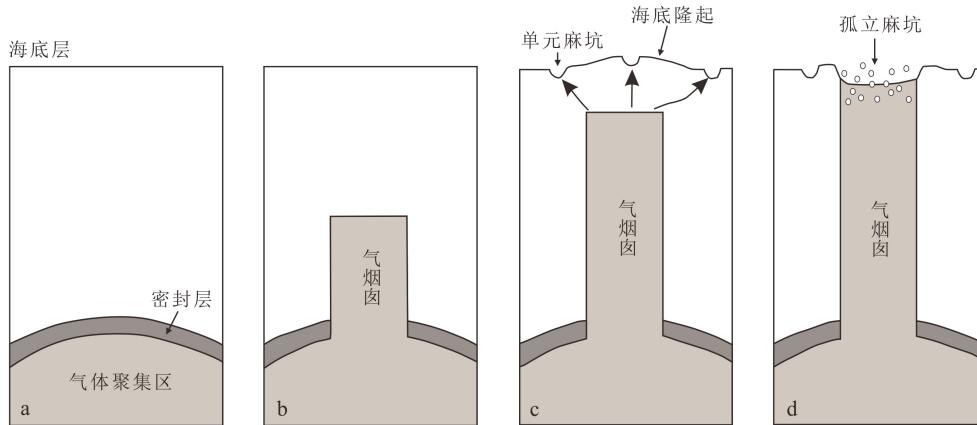


图 10 孤立麻坑形成机理 (据文献[43]修订)

Fig.10 The formation mechanisms of isolated pockmarks (revised from reference[43])

制了气体或流体从储集层泄漏到表面的速率。在海底,局部有效应力的减小可能导致流体剧烈的排出和麻坑的形成。一旦向上压力降低,就会形成圆形麻坑(图 10)^[43]。如果没有流体,则从成熟麻坑喷出的沉积物可以对称性地回落到其内部或周围的海底。然而,如果存在流动性的流体,它可能会输送沉积物并使它们分布不均匀,形成不对称特征。关于在原始麻坑形成之后的不均匀几何形状和海底之间的关联是有争议的。不均匀的麻坑几何形状通常呈现为海底表面的椭圆形(细长)形状,其不对称性由垂直剖面和这些参数中的方向来描述,从而得出沿三角洲边缘麻坑的不对称性,三角洲沉积物的下坡蠕变和地下气体排出之间的因果关系,以及沉积物的运输方向与底部的不对称性的关系^[45]。然而,海底海流和沉积物分布可能不是影响其不对

称性的唯一因素。麻坑通道与其稳定性之间相互作用的动力学也可能有助于麻坑几何形状的形成(图 10)。耗尽麻坑的气体储备可能需要较长时间,气体耗尽后,麻坑进入休眠状态,到目前为止发现的大多数麻坑是不活跃的。在休眠期间,海底水流偶尔会维持并逐渐修改圆形麻坑,但水流没有主动垂直流动。由于侧壁坍塌或被底流冲刷,休眠麻坑也可能收集沉积物^[46]。

麻坑的深度与麻坑的不对称性有直接联系,并且这种联系与海底流体有密切的关系。流体性质以及流体流量的大小直接决定海底麻坑的形状、深度等,也就是说对于海底麻坑的研究要着眼于其下层的海底流体的研究分析。海底麻坑单元还包括麻坑下的气烟囱,气烟囱是海底流体向海底表面运送流体的通道,一些研究指出麻坑直径和深度与海

底的水平面位置及气烟囱有着密不可分的关系^[47]。在本研究区海底陆坡上发育的一部分麻坑是由于其下伏地层中有小的断层所致(图 9), 可以将其归为断裂成因^[42]。总之, 海底麻坑可以有多种成因机制, 但基本上都是海底地层中的流体在压力差的作用下在某种或某些运移通道中发生渗漏或喷发所形成的。

4 结论

(1) 根据麻坑的剖面特征、平面展布形态的分析, 得出研究区主要有条带状麻坑、复合麻坑和孤立麻坑, 并将麻坑成因分为古水道成因和断裂成因。

(2) 麻坑的成因和分布模式受埋藏水道段侵蚀和切割的影响, 麻坑下方地层中相应的浊积水道产生流体, 流体向上运移导致地层不连续, 进而对麻坑的形成和分布产生影响。研究区麻坑的出现是浅层流体活动的标志, 海底水道内麻坑的系统排列显示了浅层埋藏储层相。

参考文献 (References)

- [1] King L H, Maclean B. Pockmarks on the scotian shelf [J]. *GSA Bulletin*, 1970, 81(10): 3141-3148.
- [2] Newman K R, Cormier M H, Weissel J K, et al. Active methane venting observed at giant pockmarks along the U.S. mid-Atlantic shelf break [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1-2): 341-352.
- [3] Cathles L M, Su Z, Chen D F. 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.
- [4] Hovland M, Heggland 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): 1190-1199.
- [5] 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.
- [6] Gemmer L, Huuse M, Clausen O R, et al. Mid-Palaeocene palaeogeography of the eastern North Sea Basin: integrating geological evidence and 3D geodynamic modelling [J]. *Basin Research*, 2002, 14(3): 329-346.
- [7] Betzler C, Lindhorst S, Hubscher C, et al. Giant pockmarks in a carbonate platform (Maldives, Indian Ocean) [J]. *Marine Geology*, 2011, 289(1-4): 1-16.
- [8] Davies R J. Kilometer-scale fluidization structures formed during early burial of a deep-water slope channel on the Niger Delta [J]. *Geology*, 2003, 31(11): 949-952.
- [9] Hovland M, Judd A G. Seabed Pockmarks and Seepages: Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment [M]. London, Boston: Graham & Trotman Limited, 1988: 293.
- [10] Haskell N, Nissen S, Hughes M, et al. Delineation of geologic drilling hazards using 3-D seismic attributes [J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(3): 373-382.
- [11] 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.
- [12] Sun Q L, Wu S G, Cartwright J, et al. Focused fluid flow systems of the Zhongjiajian Basin and Guangle Uplift, South China Sea [J]. *Basin Research*, 2013, 25(1): 97-111.
- [13] Foland S S, Maher N, Yun J W. Pockmarks along the Californian continental margin: implications for fluid flow [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83: 681-706.
- [14] Chand S, Rise L, Ottesen D, et al. Pockmark-like depressions near the Goliat hydrocarbon field, Barents Sea: morphology and genesis [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 26(7): 1035-1042.
- [15] Dimitrov L, Woodside J. Deep sea pockmark environments in the eastern Mediterranean [J]. *Marine Geology*, 2003, 195(1-4): 263-276.
- [16] 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*, 2005, 226(1-2): 25-40.
- [17] 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.
- [18] Hovland M. Pockmarks and gas-charged sediments in the eastern Skagerrak [J]. *Continental Shelf Research*, 1992, 12(10): 1111-1119.
- [19] Harrington P K. Formation of pockmarks by pore-water escape [J]. *Geo-Marine Letters*, 1985, 5(3): 193-197.
- [20] 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.
- [21] Sultan N, Cochonat P, Foucher J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability [J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1-4): 379-401.
- [22] Bøe 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.
- [23] Sultan N, Marsset B, Ker S, et al. Hydrate dissolution as a potential mechanism for pockmark formation in the Niger delta [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(B8).
- [24] Nakajima T, Kakuwa Y, Yasudomi Y, et al. Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 90: 228-242.
- [25] 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.

- [26] Marcon Y, Ondréas H, Sahling H, et al. Fluid flow regimes and growth of a giant pockmark [J]. *Geology*, 2013, 42(1): 63-66.
- [27] 沙志彬, 杨木壮, 梁劲, 等. 南海北部陆坡海底异常地貌特征与天然气水合物的关系 [J]. *南海地质研究*, 2003(14): 29-34. [SHA Zhibin, YANG Muzhuang, LIANG Jin, et al. The characteristics of the abnormal physiognomys of seabed related to gas hydrate in North Slope, South China Sea [J]. *Gresearch of Eological South China Sea*, 2003(14): 29-34.]
- [28] 李列, 宋海斌, 杨计海. 莺歌海盆地中央坳陷带海底天然气渗漏系统初探 [J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(4): 1244-1247. [LI Lie, SONG Haibin, YANG Jihai. A preliminary study of seafloor gas seepage in central sag zone of Yinggehai Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(4): 1244-1247.]
- [29] 邱鹏飞, 黄华谷, 黄保家, 等. 莺歌海盆地海底麻坑的形成与泥底辟发育和流体活动的关系 [J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 26-36. [QIU Pengfei, HUANG Huagu, HUANG Baojia, et al. Seabed pockmark formation associated with mud diapir development and fluid activities in the Yinggehai Basin of the South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(5): 26-36.]
- [30] 拜阳, 宋海斌, 关永贤, 等. 利用反射地震和多波束资料研究南海西北部麻坑的结构特征与成因 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(7): 2208-2222. [BAI Yang, SONG Haibin, GUAN Yongxian, et al. Structural characteristics and genesis of pockmarks in the Northwest of the South China Sea derived from reflective seismic and multibeam data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2208-2222.]
- [31] 张田升, 吴自银, 赵荻能, 等. 南海礼乐盆地海底麻坑地貌及成因分析 [J]. *海洋学报*, 2019, 41(3): 106-120. [ZHANG Tiansheng, WU Ziyin, ZHAO Dineng, et al. The morphologies and genesis of pockmarks in the Reed Basin, South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(3): 106-120.]
- [32] Doust H, Omatsola E. "Niger delta", in J. D. Edwards and P. A. Santogrossi, Eds., *Divergent/Passive Margin Basins* [J]. AAPG Memoir, 1990, 48(1): 20-238.
- [33] Hooper R J, Fitzsimmons R J, Grant N, et al. The role of deformation in controlling depositional patterns in the south-central Niger Delta, West Africa [J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24(4): 847-859.
- [34] Jermannaud P, Rouby D, Robin C, et al. Plio-Pleistocene sequence stratigraphic architecture of the eastern Niger Delta: a record of eustasy and aridification of Africa [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(4): 810-821.
- [35] Nyantakyi E K, Li T, Hu W S, et al. Structural and stratigraphic characteristics on distal parts of the outer fold and thrust belt of southern Niger Delta, Nigeria [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(9): 6677-6695.
- [36] Short K C, Stäuble A J. Outline of geology of Niger Delta [J]. *AAPG Bulletin*, 1967, 51(5): 761-779.
- [37] Avbovbo A A. Tertiary lithostratigraphy of Niger delta [J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62(2): 295-306.
- [38] Corredor F, Shaw J H, Bilotti F. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(6): 753-780.
- [39] Graue K. Mud volcanoes in deepwater Nigeria [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(8): 959-974.
- [40] Riboulot V, Cattaneo A, Berné S, et al. Geometry and chronology of late Quaternary depositional sequences in the eastern Niger submarine delta [J]. *Marine Geology*, 2012, 319-322: 1-20.
- [41] 陈宇航, 姚根顺, 吕福亮, 等. 东非鲁伍马盆地渐新统深水道-朵体沉积特征及控制因素 [J]. *石油学报*, 2017, 38(9): 1047-1058. [CHEN Yuhang, YAO Genshun, LÜ Fuliang, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of Oligocene deep-water channel-lobe in Rovuma Basin of the East Africa [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(9): 1047-1058.]
- [42] 李磊, 裴都, 都鹏燕, 等. 海底麻坑的构型、特征、演化及成因——以西非木尼河盆地陆坡为例 [J]. *海相油气地质*, 2013, 18(4): 53-58. [LI Lei, PEI Du, DU Pengyan, et al. Architecture, character, evolution and genesis of seabed pockmarks: a case study to the continental slope in Rio Muni Basin, West Africa [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(4): 53-58.]
- [43] Xu C L, Xu G Q, Xing J H, et al. Research progress of seafloor pockmarks in spatio-temporal distribution and classification [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19(1): 69-80.
- [44] 苏明, 沙志彬, 匡增桂, 等. 海底峡谷侵蚀-沉积作用与天然气水合物成藏 [J]. *现代地质*, 2015, 29(1): 155-162. [SU Ming, SHA Zhibin, KUANG Zenggui, et al. Erosion and sedimentation of the submarine canyons and the relationship with gas hydrate accumulation [J]. *Geoscience*, 2015, 29(1): 155-162.]
- [45] Loncke L, Masclé J, Parties F S. Mud volcanoes, gas chimneys, pockmarks and mounds in the Nile deep-sea fan (eastern Mediterranean): geophysical evidences [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(6): 669-689.
- [46] Kelley J T, Dickson S M, Belknap D F, et al. Giant sea-bed pockmarks: evidence for gas escape from Belfast Bay, Maine [J]. *Geology*, 1994, 22(1): 59-62.
- [47] Gontharet S, Pierre C, Blanc-Valleron M M, et al. Nature and origin of diagenetic carbonate crusts and concretions from mud volcanoes and pockmarks of the Nile deep-sea fan (eastern Mediterranean Sea) [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(11-13): 1292-1311.