

渤海湾某海洋平台场址浅层气分布与成因

周其坤^{1,2}, 孙永福³, 宋玉鹏¹, 李西双¹, 董立峰¹, 宋丙辉¹, 杜星¹, 王琮^{1,4},
修宗祥¹

ZHOU Qikun^{1,2}, SUN Yongfu³, SONG Yupeng¹, LI Xishuang¹, DONG Lifeng¹,
SONG Binghui¹, DU Xing¹, WANG Cong^{1,4}, XIU Zongxiang¹

1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;
2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;
3. 国家深海基地管理中心, 山东 青岛 266237;
4. 中国石油集团工程技术研究有限公司, 天津 300451

1. *The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong, China;*
2. *State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;*
3. *National Deep Sea Center, Qingdao 266237, Shandong, China;*
4. *CNPC Engineering Technology Research Company Limited, Tianjin 300451, China*

摘要:海底浅层气严重影响海底地层的结构稳定性,因此成为影响近海海洋平台安全的重要因素。基于高精度浅地层剖面及单道地震等物探调查资料,识别了渤海湾某海洋平台周边的浅层气分布状况及顶界埋深,并分析了研究区浅层气的成因。浅地层和单道地震资料解释的浅层气分布和顶界埋深具有非常好的一致性,平台周边1 km²范围内的浅层气主要分布在平台北侧及紧贴平台西南角,呈片状或条状分布,局部呈点状分布,顶界埋深在0.6~4.0 m之间。研究区内浅层气为浅层生物成气,但该区域断层发育,不排除热解成因浅层气的存在。指出浅层气体对海洋平台的影响主要表现在变形和失稳2个方面,对海洋平台采取针对性的防护措施具有现实意义。

关键词:渤海湾;海洋平台;浅层气;分布;成因

中图分类号:P722.4;P75 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)02/03-0298-07

Zhou Q K, Sun Y F, Song Y P, Li X S, Dong L F, Song B H, Du X, Wang C, Xiu Z X. Distribution of shallow gas at an offshore platform site in Bohai Bay and its genetic mechanism. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 298-304

Abstract: Submarine shallow gas has a serious impact on the structural stability of seafloor strata, so it has become an important factor affecting the safety of offshore platforms. Based on high-precision shallow stratigraphic profiles and single channel seismic data, the distribution and top buried depth of shallow gas around an offshore platform in Bohai Bay were identified, and the origin of shallow gas in the study area was analyzed. The distribution of shallow gas interpreted by shallow strata and single channel seismic data is very consistent with the top buried depth. The shallow gas in the area of 1 km² around the platform is mainly distributed in its north side and adjacent to its southwest corner in the form of patches or strips and locally in the form of points. The burial depth of top boundary is between 0.6 m and 4.0 m. The shallow gas in the study area is shallow biogenic gas, but the fault development in this area does not rule out the existence of pyrolytic shallow gas. The influence of shallow gas on offshore platform is mainly manifested in two aspects of

收稿日期:2020-05-10; **修订日期:**2020-11-09

资助项目:国家自然科学基金项目《南海北部外陆架海底沙波迁移特征及其动力机制研究》(批准号:41806079)、国家重点研发计划项目《水合物形成与分解过程微观结构与宏观力学特性》(编号:2017YFC0307305)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金《海底沙波形成机理及对管线影响研究》(编号:2017Q04)

作者简介:周其坤(1989-),男,硕士,工程师,从事海底地质灾害与工程安全方面研究。E-mail:zhouqikun@fio.org.cn

deformation and instability. This conclusion has practical significance for taking targeted protective measures for offshore platform.

Key words: Bohai Bay; offshore platform; shallow gas; distribution; genetic mechanism

浅层气通常指在海底以下 1000 m 以内的沉积物中聚集的气体^[1]。渤海海域的浅层气分布区域十分广泛^[2],包括辽东湾东北端、渤海湾西北部海区、渤海湾北部的曹妃甸南堡附近海域、渤中地区、黄河三角洲外海底、渤海海峡等。其中在渤中海域、辽东湾东北端等区域较密集^[3]。

海底浅层气的存在改变了地层的物理性质,同时在地震和声学探测剖面上有影像显示^[4]。浅层气有时伴生海底“麻坑”等海底地形地貌,有时浅层气会逸出海底进入水体,形成气泡,在海底面声学探测和水体层探测中有相应体现^[5]。实践证明,地震和声学探测手段是探测浅层气既经济又有效的手段^[6-7]。海底浅层气在地震剖面上常表现为杂乱反射、强振幅、空白反射、亮点反射、速度下拉和相位反转、气烟囱、频率和能量衰减等特征。研究表明,1%的游离气可引起杂乱反射^[8]。

迄今为止,国内外公开报道了多起因海底浅层气引发的严重工程灾害事故。例如中国于 2002 年杭州湾大桥工程地质勘探过程中,钻井时出现强烈浅层气井喷和燃烧事故。渤海海域 1999 年浅层气藏井喷事故;蓬莱 19-3 区块、渤中 25-1 区块发生浅层气井喷事故造成了严重的经济损失^[9];谭振华探讨了大港油田(滩海)区 ZHH 8 井浅层气造成井喷事故的原因^[10];美国墨西哥湾、英国北海、印尼爪哇海、阿拉斯加海、波斯湾、加勒比海等水域进行海洋油气资源勘探开发时,由于对浅层气调查不足,都曾造成严重灾害^[11]等。富含浅层气的沉积层具有高压缩比、低抗剪强度的特点,在一定的地质条件下还会诱发海底地质灾害,浅层气的存在严重影响近海工程和构筑物的安全,所以研究海洋平台场址的浅层气分布及其成因具有重要意义。

1 地质概况

渤海是被山东半岛和辽东半岛包围的半封闭内海^[12]。研究区位于渤海湾内黄骅拗陷东侧(图 1)。黄骅拗陷是在华北地台基础上发展起来的中—新生代裂谷盆地,属于渤海湾盆地内部一个次级拗陷^[13],北临燕山褶皱带,西接沧县隆起,东靠埕宁隆起,东北部伸入渤海海域,西南端收敛变窄并与临

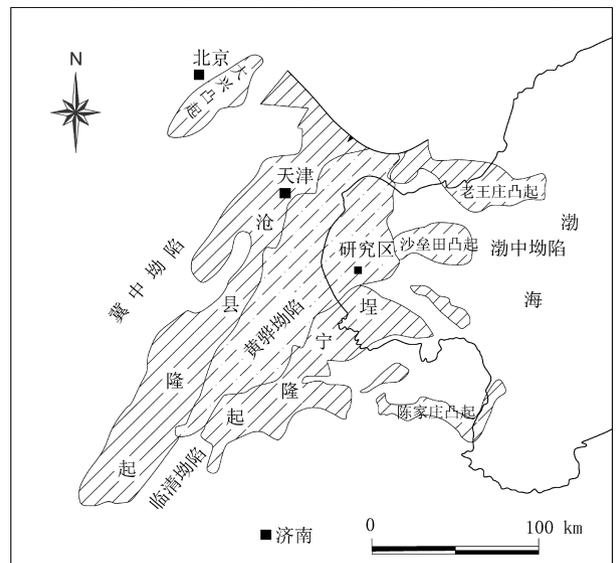


图 1 研究区大地构造区划位置

Fig. 1 Tectonic map of the study area showing its location

清拗陷相通。与渤海湾其他地区相同,黄骅拗陷新生代以古近系—新近系沉积为主,包括古近系孔店组、沙河街组、东营组和新近系馆陶组、明化镇组。

黄骅拗陷新构造运动普遍存在,与油气成藏关系密切。新构造运动控制大量晚期构造圈闭形成,新构造运动活动期的火山活动及持续深埋促使古近系烃源岩晚期快速生烃。形成的断层和不整合为油气运移提供良好的输导通道,调整和控制油气晚期动态成藏^[14]。

渤海地区在第四纪历经多次海侵海退,对应沉积地层具有海相地层与陆相地层交替出现的特征。海侵和海退引起海平面变化,导致陆源碎屑物、泥质沉积等丰富有机质进入海洋环境而处于还原条件,从而可能产生生物成因天然气。渤海构造运动活跃,构造断裂发育^[15],深部有机质进行热分解形成的油气向上运移至浅部地层的情况也可能发生。邢磊等^[3]研究认为本海域存在多处海底浅层气。该地区的浅层气在地球物理剖面上反射特征较明显且类型呈现多样化,主要包括声学反射混浊、声学幕、亮点、声学扰动,以及区域两侧地层相位下拉等特征。

2 数据及处理方法

2.1 数据获取

研究区位于渤海湾浅水区域(图1),平均水深约3 m。为了精确研究海洋平台场址浅层气分布特征及其顶界埋深,2019年9月,在平台周边同时开展了浅地层剖面测量及单道地震测量。浅地层剖面调查研究在平台周边0.25 km²范围内开展,地层穿透深度10 m,测量比例尺为1:500,沿NE—SW向布设主测线101条,垂直主测线方向布设联络测线21条;单道地震测量在平台周边1 km²范围内开展,地层穿透深度300 m,测量比例尺为1:2500,沿NE—SW向布设主测线41条,垂直主测线方向布设联络测线11条(图2),图中A、B、C及D分别为该平台场址的4个分平台。

本次调查使用SF-3050星站差分接收机进行导航定位,采用Hypack导航软件。浅地层剖面测量使用德国Innomar Technologie GmbH研制开发的SES 2000极浅地层剖面系统(图3-a)。系统采用差频原理进行浅地层剖面探测和精确水深测量,适合浮泥、淤泥、浅层气、海底管线、沉积层等浅部地层的详细分层及目标的精确探测。深地层剖面测量使用SIG Pulse L5单道地震仪(图3-b),SIG Pulse L5单道数字地震仪配备负极放电火花声源和阳

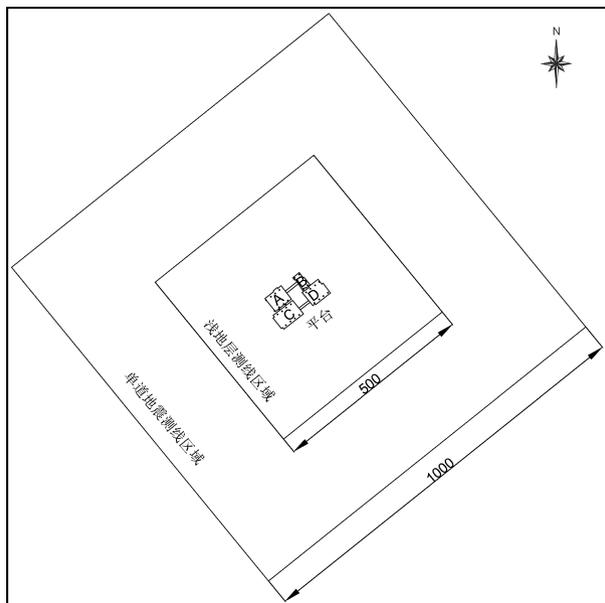


图2 研究区海洋平台及调查范围示意图(单位:m)

Fig. 2 Location of the offshore platform showing its investigation area

极放电火花震源,最大输出能量为6000 J。可用于水深20~2000 m,地层穿透深度200~500 m,能够满足导管架平台建造场地工程地质调查、浅层钻井工程地质灾害评估等需求。

本次研究累计获取浅地层剖面调查测线61 km,单道地震剖面调查测线56 km。

2.2 数据处理

所有导航数据均使用HypackMax软件进行处理,首先对导航数据资料对照设计测线进行全面的检查,把在卫星状态不好时,定位误差大的定位点剔除,以确保识别浅层气位置的准确性。

浅地层剖面数据采用ISE软件进行处理。通过对声学剖面反射波的振幅、频率、相位、连续性、反射结构、几何形态的组合关系(上超、下超、削截、顶超等)等特征,对相位特点进行区分,追踪稳定强相位,获得地层分界面,识别测区内的浅层气分布及顶界埋深。

单道地震剖面数据使用了DELPH WIN软件进行处理,主要包括以下步骤和方法(图4)。

(1)带通滤波:处理中采用的带通滤波器为100/120/1200/1500,可以有效地去除船舶、海浪、电缆摆动等十几到几十赫兹的噪音。

(2)自动增益:海水和松散沉积物对于高频地震信号有较强的吸收和衰减作用,当信号旅行数百毫秒时,其信号已经非常微弱,形成的地层剖面类似图4-a剖面,显然无法用于地震解译。为有效地突出深部地层信号,本次处理采用DELPH WIN软件提供的DEC自动增益方式,通过计算信号的包络,自动计算不同旅行时间的增益补偿参数,形成振幅相对均匀的地层剖面。

(3)相邻水平道叠加:对于带通滤波无法去除的随机噪声,DELPH WIN提供了相邻道水平叠加(1道~5道)的方法加以去除。考虑到本次炮间距约5 m,处理中采用相邻的2道叠加,得到较好的效果。

3 结果

3.1 浅地层剖面解释结果

3.1.1 水深地形

根据SES 2000获取的资料,该海洋平台周围水深在1.9~4.7 m之间,海底地形整体平坦,由西北向东南水深逐渐增加。平台周围海床水深1.9~2.6 m,平台西北侧、西南侧和东南侧存在航道和港池,

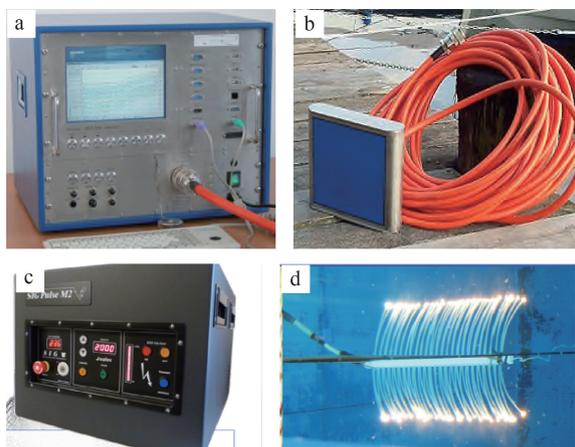


图 3 SES 2000 极浅地层剖面系统(a,b)及 SIG Pulse L5 单道数字地震仪(c,d)

Fig. 3 The SES 2000 extremely sub-bottom profile system (a,b) and the SIG Pulse L5 Single-channel digital seismograph (c,d)

港池水深约 3.3 m,航道水深约 4.1 m。

3.1.2 浅层气分布特征

叶银灿等^[16]根据多年的海上工作经验,总结了 4 种识别浅层气的重要标志:“麻坑”群、洼坑及气道、强反射与空白带、“亮点”。本次浅地层剖面识别浅层气的主要标志是空白带(图 5)。

浅地层剖面结果显示,平台 0.25 km² 范围内 10 m 以浅的浅层气主要分布在平台北侧及紧贴平台西南角,呈片状或条状分布,局部呈点状分布(图 6)。以往的钻孔资料显示,该平台表层 0~2.4 m 为流塑-软塑的灰色粘土,2.4~3.3 m 为松散-中密的粉土;3.3~14.5 m 为软塑-可塑的粉质粘土。由于表层粘土对浅层气的覆盖作用,导致浅层气在表层粘土下富集。依据浅地层探测的浅层气顶界埋深在 0.6~2.5 m 之间,与表层粘土的厚度一致。

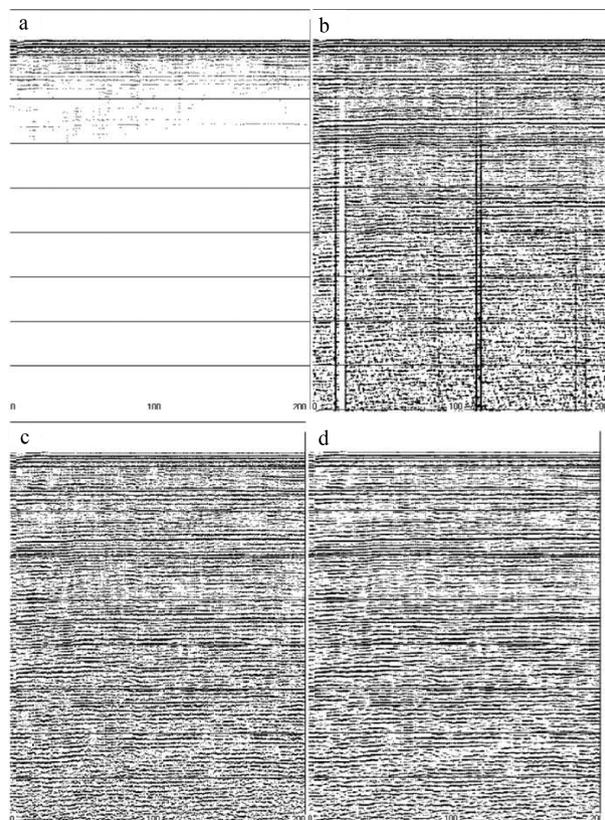


图 4 不同处理方法效果对比

Fig. 4 Comparison of effects of different processing methods

浅层气主要分布在平台 B 的西北侧、东北侧,平台 A 的西南侧,以及平台 C 的西南侧和东南侧。其中,平台 A 和 C 周围的浅层气距离平台约 5 m,在平台 B 北侧的浅层气区域约 0.03 km²,距离平台 B 最近约 14 m。

3.2 单道地震剖面解释结果

当地震波穿过含气地层时,即使有少量气体存在,也会使反射系数和透射系数迅速变小,随着气

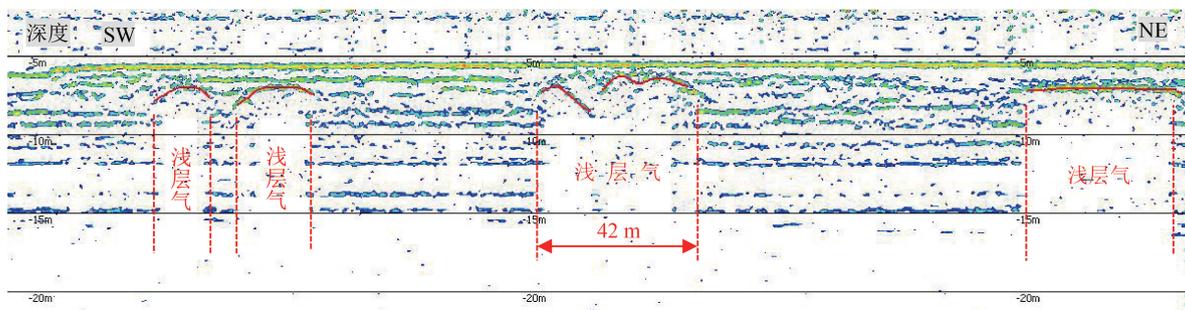


图 5 浅地层剖面揭示的浅层气

Fig. 5 Typical shallow gases revealed by sub-bottom profile

体饱和度增加,透射系数继续减小,但反射系数会负向逐渐增大^[17]。上述特征意味着,当地震波穿过含气体饱和度较低的地层时,反射振幅会变弱,但地震波具有足够的能量继续向下传播,气体下方正常地层的反射仍然可以识别;而当地震波穿过含气体饱和度较高的地层时,反射振幅仍然可能很强,但极性会发生反转,同时地震波只有少量能量(透射系数小)继续向下传播,气体下方正常地层的反射能量极弱。

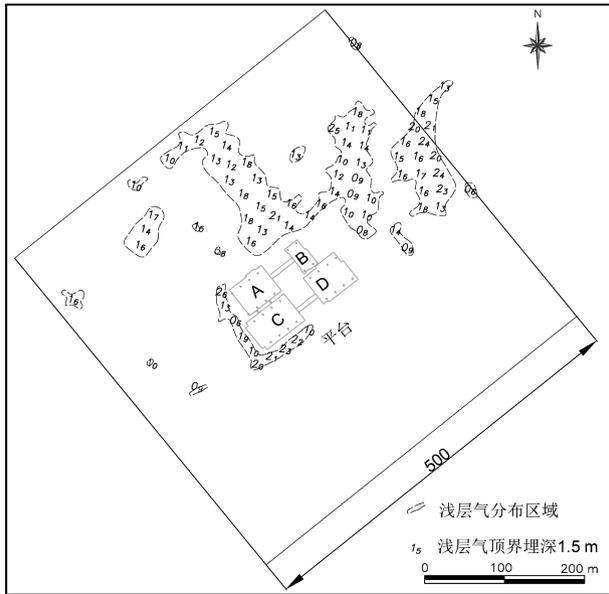


图6 平台周边 0.5 km×0.5 km 浅层气分布及顶界埋深(依据浅地层剖面探测)

Fig. 6 Distribution of shallow gases around the platform its top buried depth of the top boundary

在本次获得的单道地震剖面上,浅层气主要表现为“柱状扰动”/“气烟囱”/“气帘”(图7),极少部分为浊积状反射。柱状扰动的顶界面处具有较强的杂乱反射振幅,下方为弱振幅反射(在不加增益的剖面上)或振幅强的杂乱反射(加增益的剖面)。根据地震波穿过含气层时反射系数和透射系数随着气体饱和度的变化规律,推测上述反射特征是由于浅部沉积物中气体饱和度较高造成的。

从柱状扰动反射相的顶面深度看(图6),区内的浅层气基本分布在海底之下数米之内,受单道地震剖面分辨率限制,其顶面深度误差较大,没有浅地层剖面得到的结果可靠。

单道地震剖面结果显示,浅层气主要分布于该

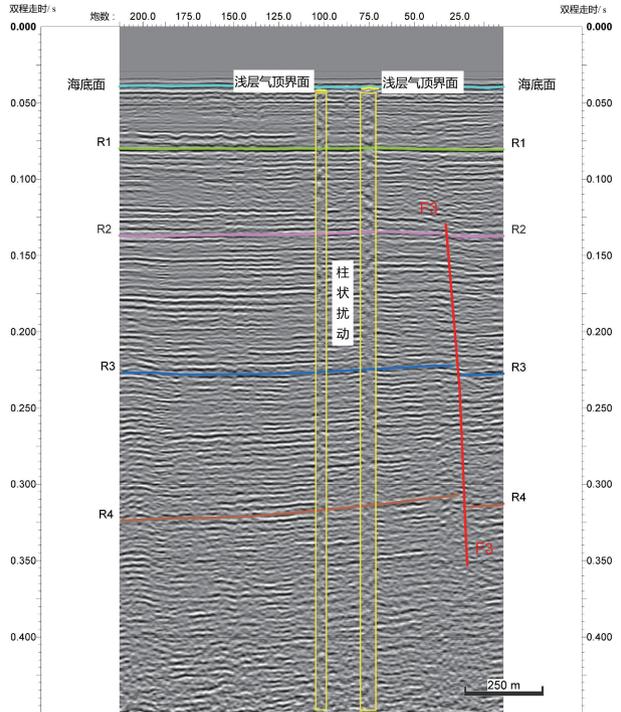


图7 典型单道地震剖面结果

(R1-R4 为识别的地层,F3 为识别的断层)

Fig. 7 Typical shallow gas profile detected by single-channel profile

平台场址的西北侧、东北侧和西南侧。其范围大致与浅地层剖面确定的浅层气的位置相同(图8)。其中,位于B平台西北侧的浅层气区域呈长条形,面积约 0.007 km²,距离平台最近约 24 m;位于B平台东北侧的浅层气区域呈不规则形状,面积约 0.02 km²,距离平台最近约 40 m;C平台西南侧的浅层气呈长条形,长约 60 m。依据单道地震资料分析得出的浅层气顶界埋深在 1~4 m 之间。

4 讨论

4.1 浅层气气源与成因

根据有机地球化学及实验地球化学分析,海底浅层气有 2 种类型^[16]:一种是生物成因浅层气,另一种是热解成因的浅层气。生物成因浅层气为淤泥层(通常位于全新统之下)中的有机质经厌氧菌的生物化学作用产生生物气(主要成分是甲烷),经过运移、富集,储集在附近的砂层透镜体或砂层顶部;热解成因的浅层气经过断层或裂隙等通道运移至浅部形成,这种类型中含气层的深度可能具有较

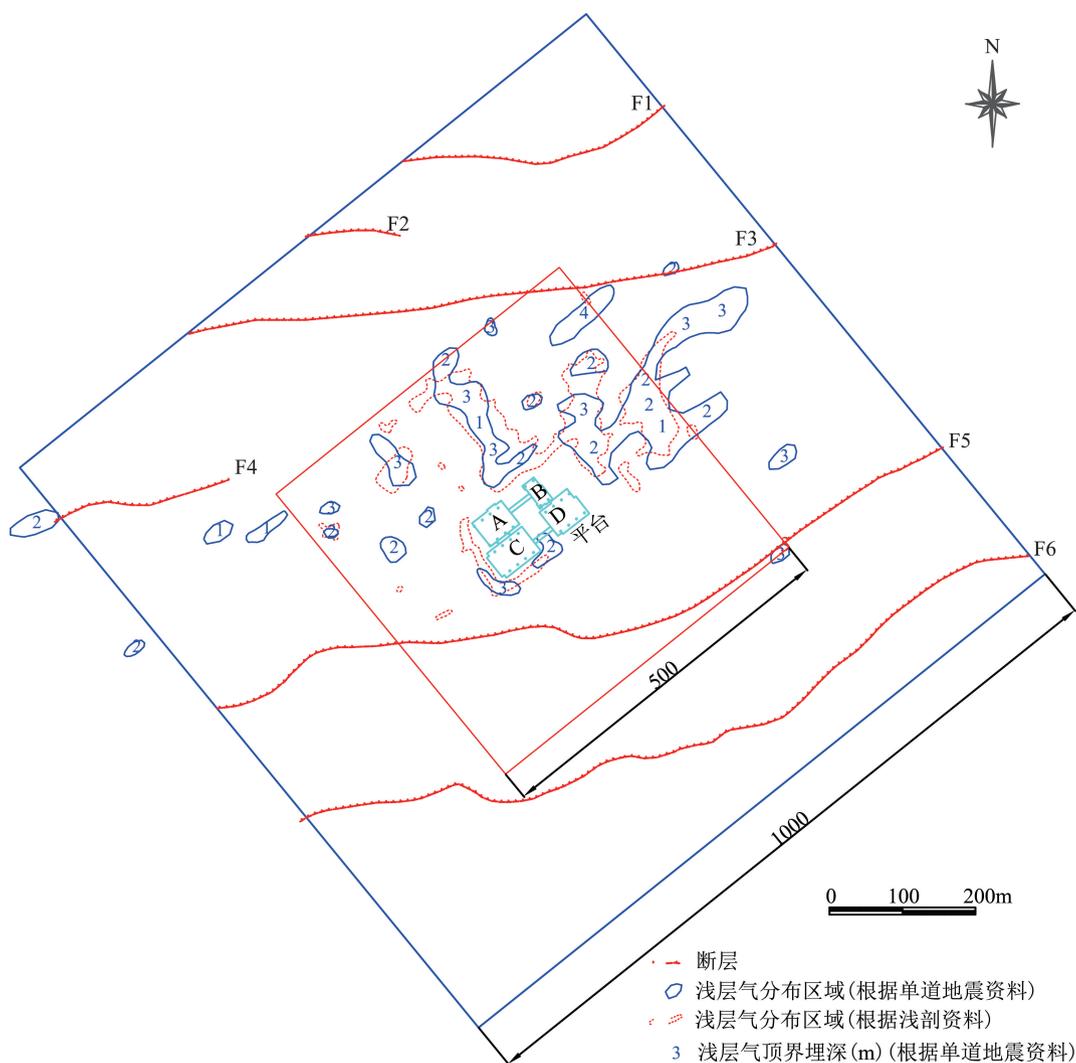


图8 平台周边1 km×1 km 浅层气及断层分布

Fig. 8 Distribution of shallow gas and the faults around the platform

大的差异(几米到数百米)。

渤海湾北部曹妃甸、南堡附近海域有浅层气分布现象。吉林大学在2005年10月至2006年8月在天津海域进行了地质地貌调查,调查结果显示,渤海湾西北部海域有浅层气分布^[18]。该海域由河流和海洋营力共同作用,滦河三角洲为浅层气的载体,并处于渤海湾西岸,曾被第四纪海侵事件影响,推测气体为生物成因^[3]。但该区域第四纪断层发育,部分断层甚至达到海底,且附近存在若干油田(BFD-1等),热解成因浅层气也可能存在^[19]。

如上所述,该平台表层10 m以浅分别为流塑-软塑的灰色粘土、松散-中密的粉土、软塑-可塑的粉质粘土。结合渤海湾西北部已有研究成果及本次识别的浅层气的分布深度看,研究区的浅层气为

浅层生物成气,但该区域断层发育(图8),且从其围绕平台分布的特征看,不排除热解成因浅层气的存在,需要结合前期资料和地球化学资料进一步判断。

4.2 浅层气对海洋平台的影响

实际调查资料表明,粘土与淤泥质粘土一般是海底浅层气的主要生气层与覆盖层,本身含气量不大,主要储气层为含砂沉积层。含气砂质沉积层具有气体连续、体积大、压力高等特征,使海底构筑物地基条件发生改变,导致地质灾害事件发生,对工程特性影响较大^[20]。浅层气体对海洋平台的影响主要表现在变形和失稳两个方面^[21]。

4.2.1 导致构筑物变形

当海底积聚的浅层气体突然释放时,含气层的压力骤然下降,快速的气流强烈冲击土层产状,在

较大范围内扰动上覆或下卧土层。随着强烈喷气过程的结束,土层产生快速沉降,土体随后会重新堆积下沉。由于浅层气压力大小不一、分布不均匀,气体的释放往往引起不均匀沉降,导致地层承载力均衡状态被打破,进而诱发海洋平台刚性结构的扭曲、坍塌,甚至倾覆。

4.2.2 破坏构筑物的稳定性

土体的抗剪强度、孔隙水压力等是建筑物稳定性分析计算的主要参数。含气沉积物会随着含气量的增加而膨胀,孔隙水压力也随之增加,导致有效应力降低,从而加大了土层的压缩性,破坏土体的骨架结构。地基土在自重作用下的固结作用,使海底松散沉积物的抗剪强度随深度增加,含气土层的这种增长率则明显减小,说明浅层气的存在使土的抗剪强度明显降低。含气土层这种高压缩、低强度的特征,严重影响了海洋平台的稳定性。特别是构筑物在外力作用下产生震动时,这种影响更会显著增强。

5 结 论

(1)浅地层剖面调查研究结果显示,平台 500 m×500 m 范围内 10 m 以浅的浅层气主要分布在平台北侧及紧贴平台西南角,呈片状或条状分布,局部呈点状分布。浅层气顶界埋深在 0.6~2.5 m 之间。

(2)单道地震剖面调查研究结果显示,浅层气主要分布于平台的西北侧和东北侧及平台的东南侧。其范围大致与浅地层剖面确定的浅层气位置相同,验证了 2 种方法探测的有效性与准确性。浅层气顶界埋深在 1~4 m 之间。

(3)依据本次识别的浅层气分布的深度分析推断,研究区浅层气为浅层生物成气。但该区域断层发育,且从其围绕平台分布的状况看,不排除热解成因浅层气的存在,需要结合前期资料和地球化学资料进一步判断。

(4)海底浅层气的存在会影响海上工程施工和构筑物安全。对赋存浅层气的工程设施特别是海洋平台,宜采取针对性的防护措施,确保工程安全。

致谢:野外调查作业期间得到自然资源部第一海洋研究所胡光海研究员的大力支持和指导,数据处理和成文过程得到了自然资源部第一海洋研究

所赵晓龙的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Floodgate G D, Judd A D. The origins of shallow gas [J]. *Continental Shelf Research*, 1992, 12(10): 1145-1156.
- [2] 李萍, 杜军, 刘乐军, 等. 我国近海海底浅层气分布特征 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(1): 69-74.
- [3] 邢磊, 焦静娟, 刘雪芹, 等. 渤海海域浅层气分布及地震特征分析 [J]. *中国海洋大学学报*, 2014, 47(11): 71-78.
- [4] Young-Jun K, Snons C, Jong-Hwa C, et al. Identification of shallow gas by seismic data and AVO processing: Example from the southwestern continental shelf of the Ulleung Basin, East Sea, Korea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 117, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104346.
- [5] 秦芹. 南海北部白云凹陷浅层气的地球物理识别、成因和运移模式的研究 [D]. 中国科学院深海科学与工程研究所硕士学位论文, 2017.
- [6] Hagen R A, Vogt P R. Seasonal variability of shallow biogenic gas in Chesapeake Bay [J]. *Marine Geology*, 1999, 158(1): 75-88.
- [7] Sauter E J, Muysakhin S I, Charlou J L, et al. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243(3): 354-365.
- [8] 吴时国, 孙运宝, 李清平, 等. 南海深水地质灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 154-163.
- [9] 杨鸿波, 齐恒之. 渤海油田浅层气井喷预防及控制技术 [J]. *中国海上油气*, 2004, 16(1): 43-46.
- [10] 谭振华, 陈红, 沙东, 等. 大港滩海(浅海)区浅层气井喷原因分析及预防技术探讨 [J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(3): 369-373.
- [11] 夏真, 马胜中, 石要红. 伶仃洋海底浅层气的基本特征 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 456-461.
- [12] 叶银灿. 中国海洋灾害地质学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [13] 汪泽成, 刘和甫, 段周芳, 等. 黄骅坳陷中新生代构造负反转分析 [J]. *地球科学*, 1998, 23(3): 289-293.
- [14] 李岳桐, 王文庆, 王刚, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷新构造运动特征及其控藏作用 [J]. *东北石油大学学报*, 2019, 43(6): 94-104.
- [15] 李延成. 渤海的地质演化与断裂活动 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1993, 13(2): 25-33.
- [16] 叶银灿, 陈俊仁, 潘国富, 等. 海底浅层气的成因、赋存特征及其对工程的危害 [J]. *东海海洋*, 2003, 21(1): 27-36.
- [17] 琼斯, 金翔龙. 海洋地球物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] 田立柱. 渤海湾西北部浅表地层结构特征 [D]. 吉林大学硕士学位论文, 2007.
- [19] 杨子庚, 张志询, 王学言. 渤海湾北部浅海海洋地质环境演变与灾害地质问题 [C]//寸丹集——庆贺刘光鼎院士工作 50 周年学术论文集. 1998.
- [20] 钟方杰, 朱建群. 应用持水特征曲线预测浅层气藏压力 [J]. *施工技术*, 2007, 36(S): 494-496.
- [21] 郁孟龙. 东海沿海浅层气体对水利工程的危害及防治措施 [J]. *中国水利*, 2011, 16: 37-40.